

---

---

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ, ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΔΟΠΟΪΑΣ

---

---



# ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΗΡΑΚΛΗ ΣΤΑΜΟΥ

Επιβλέπων: Χρίστος Ταξιλάρης, Καθηγητής ΑΠΘ - ΤΑΤΜ



## **ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

### **ΗΡΑΚΛΗ ΣΤΑΜΟΥ**

#### **ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ**

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, Εργαστήριο Σχεδιασμού Μεταφορών, Συγκοινωνιακής Τεχνικής και Οδοποιίας.

Ημερομηνία προφορικής εξέτασης: -

Εξεταστική επιτροπή:

#### **Χρίστος Ταξιλάρης**

Καθηγητής Α.Π.Θ., Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών – Επιβλέπων

#### **Γιώργος Μίντσας**

Καθηγητής Α.Π.Θ., Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών – Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

#### **Σωκράτης Μπάσμπας**

Καθηγητής Α.Π.Θ., Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών – Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

#### **Γεωργία Αϋφαντοπούλου**

Διευθύντρια Ερευνών & Ερευνήτρια Α' Ινστιτούτο Μεταφορών, ΕΚΕΤΑ – Εξετάστρια

#### **Κωνσταντίνος Αντωνίου**

Καθηγητής Technical University of Munich (TUM), Dept. of Civil, Geo and Environmental Engineering – Εξεταστής

#### **Σεραφείμ Κάπρος**

Καθηγητής Πανεπιστημίου Αιγαίου, Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών - Εξεταστής

#### **Απόστολος Παπαγιαννάκης**

Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ., Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας και Ανάπτυξης - Εξεταστής

©Ηρακλής Στάμος

© Α.Π.Θ.

ISBN

*Η έγκριση της παρούσας διδακτορικής διατριβής από το Τμήμα Τοπογράφων και Τοπογράφων Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης δεν υποδηλώνει την αποδοχή των γνωμών του συγγραφέως (Ν.5343/1932, άρθρο 202, παράγραφος 2).*

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Δεν θα μπορούσα να ξεκινήσω τις ευχαριστίες μου από κάποιο άλλον πέραν του καθηγητή, συντρόφου και κυρίως δασκάλου μου, του κ. Ταξιλάρη. Η υπομονή του, η επιμονή του και πάνω από όλα η συμπαράσταση και κατανόησή του, ήταν για μένα οι βάσεις πάνω στις οποίες χτίστηκε όλη αυτή η δουλειά. Η καθοδήγηση του δασκάλου μου, τον οποίο εκτιμώ απεριόριστα και αγαπώ, ήταν θεμελιώδης και ευτυχώς για μένα, ξεπερνάει τα όρια της διατριβής αυτής.

Ευχαριστώ ακόμα ιδιαιτέρως θερμά τους κκ. Γιώργο Μίντση και Σωκράτη Μπάσμπα, που μου έμαθαν στα χρόνια του Πανεπιστημίου τις 'Μεταφορές', μου έμαθαν να τις αγαπώ και με μύησαν ως καθηγητές μου πρώτα, και ως μέλη της 3μελούς συμβουλευτικής επιτροπής έπειτα, σε κάποιες από τις πιο ενδιαφέρουσες περιοχές της επιστήμης.

Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της 7μελούς εξεταστικής επιτροπής της διατριβής – για διάφορους αλλά και παρόμοιους λόγους συνάμα: τον κ. Αντωνίου, την κα. Αϋφαντοπούλου, τον κ. Κάπρο και τον κ. Παπαγιαννάκη για την προσπάθεια και το χρόνο που επένδυσαν για να βελτιώσουν τη διατριβή αυτή.

Στη διάρκεια της συγγραφής της διατριβής υπήρξαν διάφοροι άνθρωποι, οι οποίοι για διάφορους λόγους και με διάφορους τρόπους, συνετέλεσαν στην ολοκλήρωση αυτής της δουλειάς, που σε διάφορα χρονικά σημεία της φαινόταν αδύνατο – σε μένα τουλάχιστον – να ολοκληρωθεί.

Πριν όμως τους ευχαριστήσω έναν προς έναν, θα ήθελα να αφιερώσω αυτή την εργασία στην σύντροφό μου Νικολέτα και στην κόρη μου Αφροδίτη. Η μια, συνειδητά και αδιαμαρτύρητα και η άλλη, ασυνείδητα και φωναχτά, έπαιξαν τον σημαντικότερο ρόλο στην ολοκλήρωσή της. Η διατριβή λοιπόν αφιερώνεται σε αυτές.

Από τα βάθη της καρδιάς μου ευχαριστώ τον φίλο μου και αδερφό μου Ζουζέπ Μαρία . Χωρίς αυτόν και χωρίς τον επίσης αγαπημένο μου φίλο Μάνο, θα ήταν αδύνατο να ολοκληρωθεί η διατριβή αυτή. Δεν μπορώ να πω αρκετά για την παρουσία τους σε όλη τη διάρκεια της συγγραφής της διατριβής αυτής. Τους ευχαριστώ λοιπόν, και τους αγαπώ.

Ευχαριστώ επίσης την μονάκριβή μου κα. Αϋφαντοπούλου – δυστυχώς δεν χωρούν εδώ όλοι οι λόγοι αλλά αυτή γνωρίζει. Πιο πολύ από όλα για την αγάπη της, την πίστη της και την υποστήριξή της σε μένα. Η συμβολή της στην εκπόνηση αυτής της διατριβής ήταν σημαντικότερη.

Ευχαριστώ τον επίσης πρώτα φίλο, συνάδελφο και συνεργάτη Βαγγέλη Μητσάκη – που κοντά του έμαθα πώς να δουλεύω, και που πάντα, με τον δικό του τρόπο, με έσπρωχνε στην ολοκλήρωση της δουλειάς αυτής και στην δική μου ερευνητική ολοκλήρωση.

Θα ήθελα τέλος να ευχαριστήσω για την ψυχική τους υποστήριξη καθόλη τη διάρκεια της συγγραφής της διατριβής, τους και τις αγαπημένες μου φίλους και φίλες Ζακ, Ρόζα, Ναταλία και Ελισάβετ.

Όπως άνοιξα τον κατάλογο των ευχαριστιών με την οικογένεια που έφτιαξα, θα ήθελα να κλείσω με την οικογένεια που με έφτιαξε και στην οποία οφείλω το ότι βρίσκομαι σήμερα εδώ, γράφοντας αυτές τις γραμμές. Στον Μπούκο μου, στη μανούλα μου και στο μανάρι μου για την παρότρυνση και την ηθική και υλική συμπαράσταση καθώς και για την γενικότερη παιδεία που μου παρείχαν και για τις αξίες που απέκτησα. Σας ευχαριστώ.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ακραία καιρικά φαινόμενα και οι φυσικές καταστροφές που προκαλούνται από την αλλαγή του κλίματος, αναμένεται να αυξηθούν σημαντικά κατά τα επόμενα χρόνια τις αρνητικές επιπτώσεις στα συστήματα (υπό την έννοια των δικτύων και των υποδομών) διαφόρων τομέων. Ο τομέας των Μεταφορών, ως βασική δραστηριότητα της κοινωνίας και της οικονομίας, δεν θα μείνει ανεπηρέαστος από τις αρνητικές επιπτώσεις, που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή, καθώς οι αναμενόμενες αλλαγές, όπως υποστηρίζεται από τη διεθνή ερευνητική κοινότητα, θα επηρεάσουν τόσο τις υποδομές Μεταφορών όσο και τη λειτουργία των δικτύων Μεταφορών που αυτές υποστηρίζουν, ανεξαρτήτως μέσου μετακίνησης. Δοθείσης της αυξημένης συχνότητας και έντασης των ακραίων καιρικών φαινομένων και αντίστοιχων φυσικών καταστροφών, που παρατηρούνται παγκοσμίως τα τελευταία χρόνια, η επεξεργασία σεναρίων εκδήλωσης τέτοιων φαινομένων, η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεών τους στα συστήματα Μεταφορών και η ανάπτυξη μέτρων αντιμετώπισής τους είναι πλέον απαραίτητη.

Κεντρικό στόχο της προς αξιολόγηση Διδακτορικής Διατριβής αποτελεί, η εύρεση και ανάπτυξη τρόπων αντιμετώπισης της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στα συστήματα Μεταφορών. Ανεξάρτητα από τις πολιτικές που θα υιοθετηθούν και θα εφαρμοστούν τελικά από τη διεθνή κοινότητα, αναφορικά με τα αποδεκτά επίπεδα εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, οι επιπτώσεις θα συνεχίσουν να γίνονται έντονα αισθητές για τις επόμενες λίγες δεκαετίες. Αναμένεται δε οι επιπτώσεις αυτές καθώς και η ανάγκη για προσαρμογή, να είναι μεγαλύτερες και πιο εμφανείς στο δομημένο περιβάλλον και ιδιαίτερα στα τεράστια παγκοσμίως δίκτυα αυτοκινητοδρόμων και σιδηροδρόμων, γέφυρες, σήραγγες, αεροδρόμια, λιμάνια και δίκτυα Μαζικών Μεταφορών. Για τους λόγους αυτούς, η διδακτορική έρευνα στοχεύει, αφενός στην ανάπτυξη μαθηματικών εργαλείων και τρόπων κατανόησης και ποσοτικοποίησης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα συστήματα Μεταφορών, και αφετέρου στην εύρεση βέλτιστων μέτρων προσαρμογής, που θα μπορέσουν να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα και να μειώσουν την τρωτότητα των συστημάτων Μεταφορών έναντι της επερχόμενης αλλαγής του κλίματος.

Η εξυπηρέτηση του κεντρικού στόχου επιχειρείται μέσω δύο επιμέρους στόχων:

1. Την εύρεση νέων μη δομικών μέτρων προσαρμογής του συστήματος των Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή υπό τη μορφή μαθηματικών εργαλείων, προτύπων και αλγορίθμων, για την καλύτερη κατανόηση, διαχείριση και ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα συστήματα

Μεταφορών. Τα μέτρα αυτά περιλαμβάνουν τόσο την χρήση ή/και προσαρμογή καθιερωμένων μεθόδων αξιολόγησης της λειτουργίας δικτύων, προερχόμενων από την περιοχή του Σχεδιασμού των Μεταφορών και της Θεωρίας της Κυκλοφοριακής ροής αλλά και από άλλες επιστημονικές περιοχές, όσο και την ανάπτυξη νέων μεθόδων για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας ή της τρωτότητας των δικτύων Μεταφορών.

2. Την αξιολόγηση και ιεράρχηση μέτρων προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή, μέσω της ανάπτυξης ενός μεθοδολογικού οδηγού αποτίμησης διαφόρων παραμέτρων σχετικών με την εφαρμογή μέτρων προσαρμογής (διάρκεια, κόστος, συνεισφορά στη μείωση της τρωτότητας) και των παράγωγων διαγραμμάτων ροής μέτρων προσαρμογής για όλα τα συστήματα Μεταφορών (χερσαίων – οδικών και σιδηροδρομικών-πλωτών και αεροπορικών).

Η διάρθρωση της διδακτορικής διατριβής σε 11 κεφάλαια ευνοεί την εισαγωγή του ενδιαφερόμενου ερευνητή ή μελετητή στις έννοιες, θεωρίες και υπολογιστικές μεθόδους που είναι απαραίτητες για την κατανόηση, διαχείριση, ποσοτικοποίηση και μείωση των αρνητικών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα συστήματα Μεταφορών, μέσω της εύρεσης, ανάπτυξης και ανάλυσης βέλτιστων μέτρων προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών σε αυτή.

Στο Κεφάλαιο 1, με τίτλο «Εισαγωγή», παρουσιάζεται μια συνοπτική περιγραφή του ερευνητικού περιβάλλοντος μέσα στο οποίο κινείται η διδακτορική διατριβή, του προβλήματος που εξετάζεται, της σημασίας του, καθώς και των βασικότερων παραμέτρων του. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι ερευνητικοί στόχοι, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν.

Στα Κεφάλαια 2 έως 6, γίνεται αναλυτική επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας στους επιστημονικούς τομείς που εμπίπτουν στην θεματική περιοχή της Διατριβής, και είναι απαραίτητοι για την εξυπηρέτηση των στόχων της. Η θεματική περιοχή και το αντικείμενο της Διατριβής ορίζεται, από τους εξής βασικούς επιστημονικούς άξονες:

- Κλιματική αλλαγή
- Κυκλοφοριακή Ροή
- Κυκλοφοριακή Ικανότητα
- Συγκοινωνιακός Σχεδιασμός και μαθηματική προτυποποίηση μετακινήσεων
- Ανάλυση και αξιολόγηση λειτουργίας δικτύων



Η επισκόπηση περιλαμβάνει, εντοπισμό και εξέταση των απαραίτητων επιστημονικών κειμένων, ευρισκόμενων σε διεθνείς βιβλιοθήκες, περιοδικών, προηγούμενων διδακτορικών διατριβών και συναφών συγγραμμάτων, κυρίως στον τομέα των Μεταφορών καθώς και στον τομέα της κλιματικής αλλαγής. Στόχος των κεφαλαίων αυτών είναι η καταγραφή και κριτική αξιολόγηση των πρόσφατων και των τρεχουσών ερευνητικών εξελίξεων, ώστε να εξασφαλιστεί η συμβολή του διδακτορικού έργου στην πρόοδο της συναφούς επιστημονικής περιοχής αλλά και η επιστημονική του επάρκεια.

Στο Κεφάλαιο 7, με τίτλο «Μεθοδολογική προσέγγιση προσαρμογής του τομέα των Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή», παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε κατά την εκπόνηση της διδακτορικής έρευνας και περιγράφεται αναλυτικά το σχετικό υπολογιστικό πλαίσιο. Στο κεφάλαιο αυτό, εξηγείται και αναλύεται η χρήση ή/και προσαρμογή γνωστών εργαλείων και μεθόδων και η ανάπτυξη νέων, βάσει αυτών που αναλύθηκαν στα Κεφάλαια 2 έως 6.

Στο Κεφάλαιο 8, με τίτλο «Εφαρμογή μεθοδολογικής προσέγγισης - επαναδιατύπωση μεγεθών και Υποδειγμάτων Κυκλοφορίας Οχημάτων και Σχεδιασμού των Μεταφορών», παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθοδολογικής προσέγγισης του προηγούμενου κεφαλαίου. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται συνολικά οι μέθοδοι και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της κυκλοφοριακής ροής και του σχεδιασμού των Μεταφορών, η ποιοτική αξιολόγησή τους (αν χρήζουν αλλαγών και η προτεραιοποίηση των αλλαγών αυτών), και η αναλυτική επαναδιατύπωση συγκεκριμένων μεγεθών και υποδειγμάτων, έτσι ώστε να παραμετροποιείται ή έννοια του καιρού, του κλίματος, και των αλλαγών τους. Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται επίσης εφαρμογή των μεγεθών και υποδειγμάτων αυτών σε πραγματικά δίκτυα Μεταφορών και σε μελέτες περιπτώσεων, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η συνεισφορά τους.

Στο Κεφάλαιο 9, με τίτλο «Εφαρμογή μεθοδολογικής προσέγγισης – αποτίμηση σημαντικότητας και ανθεκτικότητας δικτύων Μεταφορών ή στοιχείων τους», παρουσιάζεται η εφαρμογή των μεθόδων και εργαλείων για την επαλήθευση της δυνατότητας εφαρμογής μέτρων της Θεωρίας Δικτύων για τα δίκτυα Μεταφορών και η αλγοριθμική εύρεση των βέλτιστων κατανομών των τιμών των μέτρων αυτών. Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή των μέτρων που προτείνονται, των μεγεθών και των υποδειγμάτων αυτών σε θεωρητικά και πραγματικά δίκτυα Μεταφορών και σε μελέτες περιπτώσεων, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η συνεισφορά τους.

Στο Κεφάλαιο 10, με τίτλο «Εφαρμογή μεθοδολογικής προσέγγισης – ιεράρχηση εφαρμογής μέτρων προσαρμογής», παρουσιάζεται η εφαρμογή των μεθόδων και εργαλείων για την κατηγοριοποίηση σε ομάδες, ανάλογα με το περιεχόμενο τους, των ευρημάτων της βιβλιογραφικής επισκόπησης που αφορούν καθιερωμένα μέτρα προσαρμογής, η αξιολόγηση των επιμέρους χαρακτηριστικών τους (κόστος, χρόνος, συνεισφορά για τη μείωση της τρωτότητας), και η σύνταξη διαγραμμάτων ροής εφαρμογής τους ανά μεταφορικό μέσο.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 11, με τίτλο «Πορίσματα», παρουσιάζονται η σύνοψη των κυριότερων συμπερασμάτων της διατριβής, η βασική συνεισφορά της στα επιστημονικά πεδία που εξετάστηκαν, οι περαιτέρω ανάγκες για έρευνα, καθώς και οι προοπτικές που προκύπτουν βάσει των αποτελεσμάτων της διατριβής.

## SUMMARY

Extreme weather events and natural hazards that are attributed to the change of climate are admittedly expected to negatively impact in transportation systems – under a perspective of both networks and infrastructure – in the forecoming years. The transportation sector, as a key societal and economical area of today's world, will not remain uninfluenced by the negative impacts associated with climate change, as the latter will influence the sector as a whole, irrespective of transport mode, according to the scientific community. Given the increased frequency of occurrence and intensity of climate change induced events, as observed in the last decades, the elaboration of scenarios of occurrence of such phenomena, the quantification of their effects on the transportation systems and the development of measures to address is now deemed necessary.

The main objective of the doctoral dissertation is to find and develop ways to address the impact of climate change on transportation systems. Regardless of the policies that will be adopted and eventually implemented by the international community regarding acceptable levels of greenhouse gas emissions, the effects of climate change will continue to be strongly felt for the next few decades. These effects, as well as the need for adaptation, are expected to be greater and more pronounced in the built environment and especially in the vast global motorway and rail networks, bridges, tunnels, airports, ports and public transport networks. For these reasons, the herein conducted doctoral research aims, on the one hand, to develop analytical tools and ways of understanding and quantifying the effects of climate change on transportation systems, and, on the other hand, to find optimal adaptation measures that can enhance resilience and reduce vulnerability of the latter in view of the impending change of climate.

The main objective of the doctoral dissertation is addressed via two sub-objectives, namely:

1. The research on new, non-structural measures to adapt transportation system to climate change, in the form of mathematical tools, standards and algorithms, to better understand, manage and quantify the effects of climate change. These measures include the use and/or adaptation of established methods of evaluating the operation and functionality of networks, originating from the area of Transport Planning and Traffic Theory but also from other scientific areas, as well as the development of new methods for the assessment of resilience or the vulnerability of transportation networks.

2. The evaluation and prioritization of adaptation measures of transportation systems to climate change, through the development of a methodological guide for the assessment of various parameters related to the implementation of adaptation measures (duration, cost, contribution to reducing vulnerability) and of the derivative adaptation flowcharts for all transportation systems (land – road transport, rail transport, inland waterway and sea transport, and air transport).

The structure of the doctoral dissertation in 11 chapters favors the introduction of the interested researcher (or reader in general) to the concepts, theories and computational methods that are necessary to understand, manage, quantify and reduce the negative effects of climate change on transportation systems, through the development of and analysis of optimal measures for the adaptation of transportation systems to climate change.

Chapter 1, entitled "Introduction", presents a brief description of the research environment in which the doctoral dissertation places itself in, the problem under consideration, its importance, as well as its main parameters. The research objectives, methodology followed and tools used as well as the research contribution of the PhD candidate to the progress of the respective scientific field are being thoroughly described in this Chapter.

In Chapters 2 to 6, there is a detailed review of the international literature in the scientific areas that fall within the thematic area of the dissertation. The subject area and the very topic of the dissertation are defined by the following central scientific axes:

- Climate change
- Traffic Flow
- Traffic Capacity
- Transportation planning and mathematical modeling of transport
- Analysis and evaluation of networks operation and functionality

The review includes among others the identification and examination of scientific sources, as found in international libraries, journals, previous doctoral dissertations and related books, mainly in the field of transportation as well as in the field of climate change. The purpose of these chapters is to record and critically evaluate recent and current research developments, in order to ensure the contribution of the doctoral dissertation to the progress of the relevant scientific area as well as its scientific adequacy.

Chapter 7, entitled "A Methodological approach for the adaptation of the transportation sector to climate change", presents the methodological approach followed in doctoral dissertation and describes in detail the relevant computational framework. In this chapter, the use and/or adaptation of known tools and methods and the development of new ones, based on those analyzed in Chapters 2 to 6, are explained and analyzed.

Chapter 8, entitled "Application of the methodological approach - reformulation of figures and models of Traffic Flow Theory and Transportation Planning", presents the application of the methodological approach as developed in the previous chapter. In detail, the methods and tools used for describing traffic flow and transport planning are presented herein, they are qualitatively assessed (in terms of how imminent a change would be, and how each change is prioritized against all others), and the detailed reformulation of specific figures and models, so that the concept of weather, climate, and their changes, is taken into account. In the same chapter, these figures and models are also applied in real transport networks and in case studies, in order to evaluate their contribution.

Chapter 9, entitled "Application of the methodological approach - assessment of the significance and resilience of transportation networks and their components", presents the application of methods and tools to verify the feasibility of Graph Theory measures in transportation networks and the algorithmic investigation of optimal patterns of the values of these measures. In the same chapter, the proposed measures, their figures and models are applied in theoretical and real transportation networks and in case studies, in order to evaluate their contribution.

Chapter 10, entitled "Application of the methodological approach - prioritization of the implementation of adaptation measures", presents the application of methods and tools for the categorization the findings of the literature review concerning standard adaptation measures into groups, the evaluation of their individual characteristics (cost, time, contribution to the reduction of vulnerability), and the compilation of their implementation flowcharts per means of transport.

Finally, Chapter 11, entitled "Findings", presents the summary of the main conclusions of the dissertation, its main contribution to the scientific fields examined, the further needs for research, as well as the perspectives that arise based on the results of the dissertation.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	- 5 -
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	- 7 -
SUMMARY .....	- 11 -
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	- 14 -
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	- 22 -
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	- 26 -
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 32 -
1.1. Ερευνητικό περιβάλλον.....	- 34 -
1.2. Στόχοι και μεθοδολογία της διατριβής.....	- 35 -
1.3. Δομή της διδακτορικής διατριβής.....	- 38 -
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ.....	- 44 -
2.1. Εισαγωγή.....	- 44 -
2.2. Ορισμός.....	- 44 -
2.3. Αίτια πρόκλησης της κλιματικής αλλαγής .....	- 47 -
2.4. Έκφανση κλιματικής αλλαγής .....	- 49 -
2.5. Κλιματικά υποδείγματα και κλιματικά σενάρια .....	55
2.5.1. Κλιματικά υποδείγματα .....	55
2.5.2. Κλιματικά σενάρια.....	56
2.6. Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής στα συστήματα Μεταφορών .....	60
2.6.1. Εισαγωγή .....	60
2.6.2. Επισκόπηση διεθνούς βιβλιογραφίας .....	60
2.6.3. Επισκόπηση εθνικών προσπαθειών - Η μελέτη της Τράπεζας της Ελλάδος ..	73
2.7. Αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής .....	75
2.7.1. Μετριασμός.....	77
2.7.2. Προσαρμογή.....	88

2.8.	Αναφορές και βιβλιογραφία .....	98
2.8.1.	Παραπομπές σε αναφορές.....	98
2.8.2.	Παραπομπές σε γενική βιβλιογραφία .....	106
3.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗ ΡΟΗ: ΜΕΓΕΘΗ, ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΑ .....	107
3.1.	Εισαγωγή.....	107
3.2.	Μεγέθη κυκλοφοριακής ροής και μαθηματικοί ορισμοί τους .....	107
3.2.1.	Κυκλοφοριακός φόρτος .....	107
3.2.2.	Ταχύτητα .....	108
3.2.3.	Πυκνότητα και κατάληψη .....	111
3.2.4.	Χρονικός και χωρικός διαχωρισμός .....	112
3.3.	Θεμελιώδεις σχέσεις μεγεθών κυκλοφοριακής ροής.....	113
3.3.1.	Εισαγωγή .....	113
3.3.2.	Θεμελιώδης σχέση της κυκλοφοριακής ροής.....	114
3.3.3.	Θεμελιώδεις σχέσεις μεγεθών κυκλοφοριακής ροής.....	115
3.3.4.	Εμπειρικές σχέσεις κυκλοφοριακών μεγεθών .....	118
3.3.5.	Θεμελιώδεις σχέσεις σε επίπεδο δικτύου .....	126
3.4.	Μαθηματικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής .....	128
3.4.1.	Εισαγωγή .....	128
3.4.2.	Μικροσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής.....	129
3.4.3.	Μεσοσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής.....	137
3.4.4.	Μακροσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής .....	138
3.5.	Συμπεράσματα .....	141
3.6.	Αναφορές και βιβλιογραφία .....	141
3.6.1.	Παραπομπές σε αναφορές.....	141
3.6.2.	Παραπομπές σε γενική βιβλιογραφία .....	143
4.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ.....	145
4.1.	Εισαγωγή.....	145
4.2.	Στάθμη εξυπηρέτησης.....	146

4.3.	Διακοπτόμενη και μη διακοπτόμενη ροή .....	146
4.4.	Ρυθμός ροής εξυπηρέτησης.....	147
4.5.	Παράγοντες που επηρεάζουν την κυκλοφοριακή ικανότητα και τη στάθμη εξυπηρέτησης.....	148
4.5.1.	Οδικές συνθήκες .....	148
4.5.2.	Κυκλοφοριακές συνθήκες .....	149
4.5.3.	Συνθήκες ελέγχου.....	150
4.5.4.	Νέες τεχνολογίες .....	151
4.6.	Βασικές συνθήκες.....	151
4.7.	Υπολογισμός κυκλοφοριακής ικανότητας .....	152
4.8.	Ιεράρχηση δικτύων.....	153
4.9.	Συμπεράσματα .....	154
4.10.	Αναφορές και βιβλιογραφία .....	155
4.10.1.	Παραπομπές σε γενική βιβλιογραφία .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ .....	156
5.1.	Εισαγωγή.....	156
5.1.1.	Η ζήτηση .....	157
5.1.2.	Η προσφορά: Δίκτυα Μεταφορών .....	158
5.2.	Δομή και χαρακτήρας υποδειγμάτων.....	158
5.3.	Υποδείγματα 4 σταδίων .....	159
5.4.	Γένεση μετακινήσεων.....	161
5.4.1.	Παραγωγή μετακινήσεων .....	161
5.4.2.	Έλξη μετακινήσεων.....	163
5.4.3.	Αναγωγή σε μελλοντικό χρόνο.....	163
5.5.	Κατανομή μετακινήσεων στο χώρο .....	164
5.5.1.	Μέθοδοι συντελεστή ανάπτυξης .....	165
5.5.2.	Αναλυτικές μέθοδοι .....	167



5.6.	Επιλογή μέσου.....	169
5.6.1.	Συνάρτηση χρησιμότητας.....	174
5.6.2.	Πολυωνυμικό υπόδειγμα Logit .....	176
5.6.3.	Ιεραρχικό υπόδειγμα Logit.....	177
5.6.4.	Πολυωνυμικό υπόδειγμα probit .....	179
5.7.	Καταμερισμός μετακινήσεων στο δίκτυο .....	180
5.7.1.	Εύρεση διαδρομών .....	181
5.7.2.	Μέθοδοι καταμερισμού των μετακινήσεων.....	183
5.7.3.	Καταμερισμός όλα-ή-τίποτα .....	183
5.7.4.	Καταμερισμός όλα-ή-τίποτα με περιορισμό χωρητικότητας .....	184
5.7.5.	Στοχαστικές μέθοδοι.....	185
5.7.6.	Καταμερισμός μετακινήσεων σε συμφορημένα δίκτυα.....	188
5.7.7.	Εύρεση ισορροπίας .....	191
5.7.8.	Δυναμικός καταμερισμός.....	195
5.8.	Συμπεράσματα .....	198
5.9.	Αναφορές και βιβλιογραφία .....	199
6.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΩΝ .....	203
6.1.	Εισαγωγή .....	203
6.2.	Θεωρία δικτύων .....	203
6.3.	Η έννοια της κεντρικότητας .....	205
6.4.	Κεντρικότητα βαθμού (degree centrality) .....	206
6.5.	Δύναμη κόμβου (node force).....	208
6.6.	Συνδυασμός κεντρικότητας βαθμού και δύναμης κόμβου .....	209
6.7.	Κεντρικότητα εγγύτητας (closeness centrality).....	209
6.8.	Κεντρικότητα ενδιάμεσου (betweenness centrality).....	210
6.9.	Ροή κεντρικότητας ενδιάμεσου (flow betweenness centrality) .....	211
6.10.	Ισοδιανυσματική κεντρικότητα (eigenvector centrality) .....	212
6.11.	Κεντρικότητα Katz .....	213

6.12.	Βαθμική κεντρικότητα.....	214
6.13.	Alpha κεντρικότητα .....	215
6.14.	Τοπικός Συντελεστής σύμπλεξης (local clustering coefficient).....	215
6.15.	Κεντρικότητα ομφαλού και κυριαρχίας (hub and authority centrality) .....	216
6.16.	Κεντρικότητα πληροφορίας (information centrality) .....	218
6.17.	Δεικτης h (h-index) .....	219
6.18.	Ιεραρχικός βαθμός (hierarchical degree).....	220
6.19.	Κεντρικότητα εξάπλωσης (percolation centrality).....	220
6.20.	Συγκέντρωση Freeman (Freeman centralization) .....	222
6.21.	Κρισιμότητα συνδέσμων .....	223
6.22.	Συμπεράσματα .....	224
6.23.	Αναφορές και βιβλιογραφία .....	225
6.23.1.	Παραπομπές σε αναφορές.....	225
6.23.2.	Παραπομπές σε γενική βιβλιογραφία .....	226
7.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΤΟΜΕΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ.....	228
7.1.	Εισαγωγή.....	228
7.2.	Μεθοδολογική προσέγγιση .....	233
7.3.	Επίπεδο 1 – Επαναδιατύπωση μεγεθών και υποδειγμάτων Κυκλοφοριακής Ροής και Σχεδιασμού των Μεταφορών .....	235
7.3.1.	Επίπεδο 1 – Βήμα 1: Συστηματική αποτύπωση μεγεθών και υποδειγμάτων	239
7.3.2.	Επίπεδο 1 – Βήμα 2: Ποιοτική αξιολόγηση και προτεραιοποίηση αλλαγών	240
7.3.3.	Επίπεδο 1 – Βήμα 3: Αναλυτική επαναδιατύπωση.....	243
7.4.	Επίπεδο 2 – Αποτίμηση σημαντικότητας και ανθεκτικότητας δικτύων Μεταφορών ή στοιχείων τους .....	243
7.4.1.	Επίπεδο 2 – Βήμα 1: Επαλήθευση εφαρμοσιμότητας και χρησιμότητας μέτρων για τα δίκτυα Μεταφορών .....	246

7.4.2.	Επίπεδο 2 – Βήμα 2: Αλγοριθμική εύρεση βέλτιστων κατανομών των τιμών	
	248	
7.5.	Επίπεδο 3 – Ιεράρχηση εφαρμογής μέτρων προσαρμογής.....	250
8.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ - ΕΠΑΝΑΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ	
	255	
8.1.	Εισαγωγή.....	255
8.2.	Συστηματική αποτύπωση μεγεθών και υποδειγμάτων.....	255
8.3.	Ποιοτική αξιολόγηση και προτεραιοποίηση αλλαγών .....	257
8.3.1.	Αξιολόγηση επιπτώσεων καιρού και κλίματος, σε κυκλοφοριακά και συγκοινωνιακά μεγέθη και υποδείγματα.....	258
8.3.2.	Αξιολόγηση κρισιμότητας κυκλοφοριακών μεγεθών συγκοινωνιακών υποδειγμάτων για τον υπολογισμό άλλων στοιχείων.....	267
8.3.3.	Ανάλυση τεταρτημορίων και προτεραιοποίηση αλλαγών .....	273
8.4.	Αναλυτική επαναδιατύπωση στοιχείων υψηλής προτεραιότητας.....	274
8.4.1.	Μεγέθη κυκλοφοριακής ροής και θεμελιώδεις σχέσεις τους σε συνθήκες Ακραίων Καιρικών Φαινομένων.....	275
8.4.2.	Συνάρτηση χρησιμότητας.....	293
8.5.	Συμπεράσματα εφαρμογής 1 <sup>ου</sup> επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης.....	304
9.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ - ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥΣ ..	306
9.1.	Εισαγωγή.....	306
9.2.	Επαλήθευση εφαρμοσιμότητας και χρησιμότητας μέτρων για τα δίκτυα Μεταφορών.....	306
9.2.1.	Υπόθεση χρήσης και αναλυτική επαναδιατύπωση μέτρων Θεωρίας Δικτύων με κυκλοφοριακούς όρους.....	307
9.2.2.	Εφαρμογή σε δίκτυο Μεταφορών .....	311
9.2.3.	Ανάλυση δυνατότητας εφαρμοσιμότητας και χρησιμότητας .....	340
9.2.4.	Δέσμη μέτρων για αποτίμηση σημαντικότητας.....	343

9.3.	Αλγοριθμική εύρεση βέλτιστων κατανομών των τιμών .....	346
9.3.1.	Βασικές πτυχές αλγοριθμικής εφαρμογής.....	347
9.3.2.	Δημιουργία δικτύων.....	347
9.3.3.	Αφαίρεση στοιχείων.....	354
9.3.4.	Αλγοριθμική εφαρμογή και ανάλυση .....	359
9.3.5.	Απόδοση δικτύων – μέσος χρόνος μετακίνησης και συνολικός αριθμός μετακινήσεων.....	359
9.3.6.	Αναγνώριση ανθεκτικών δικτύων .....	365
9.3.7.	Ανάλυση τιμών μέτρων Θεωρίας Δικτύων – συνολική θεώρηση.....	368
9.3.8.	Συσχέτιση τιμών μέτρων Θεωρίας Δικτύων και απόδοσης ανθεκτικών δικτύων 377	
9.4.	Συμπεράσματα εφαρμογής 2 <sup>ου</sup> επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης .....	405
10.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ - ΙΕΡΑΡΧΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ .....	408
10.1.	Εισαγωγή .....	408
10.2.	Κατηγοριοποίηση μέτρων προσαρμογής.....	408
10.3.	Αξιολόγηση επιμέρους χαρακτηριστικών .....	416
10.3.1.	Έρευνα ερωτηματολογίου.....	417
10.3.2.	Στατιστική ανάλυση απαντήσεων .....	419
10.3.3.	Σύνοψη χαρακτηριστικών μέτρων προσαρμογής.....	421
10.4.	Σύνταξη διαγραμμάτων ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής.....	423
10.4.1.	Διαγράμματα ροής για τις οδικές μεταφορές.....	424
10.4.2.	Διαγράμματα ροής για τις σιδηροδρομικές μεταφορές.....	426
10.4.3.	Διαγράμματα ροής για τις αεροπορικές μεταφορές .....	428
10.4.4.	Διαγράμματα ροής για τις πλωτές μεταφορές .....	429
10.5.	Συμπεράσματα εφαρμογής 3 <sup>ου</sup> επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης...	431
11.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: ΠΟΡΙΣΜΑΤΑ .....	435
11.1.	Εισαγωγή .....	435

11.2.	Κύρια συμπεράσματα .....	435
11.2.1.	Η προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή ως πεδίο της επιστήμονικής τεχνικής των Μεταφορών.....	435
11.2.2.	Ανάγκη εξεύρεσης και ανάπτυξης εργαλείων για τον χαρακτηρισμό της σημαντικότητας και της ανθεκτικότητας στα δίκτυα των Μεταφορών .....	438
11.2.3.	Αξιολόγηση και συνεισφορά δομικών μέτρων προσαρμογής.....	440
11.2.4.	Δέσμη μη-δομικών και δομικών μέτρων προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή .....	441
11.3.	Ερευνητική συνεισφορά.....	442
11.4.	Άξονες για περαιτέρω έρευνα.....	446
Παράρτημα I.....		451
Παράρτημα II.....		459
Παράρτημα III.....		473
Παράρτημα IV.....		476

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Διαφορές κλίματος και καιρού (Πηγή: (United Nations, 2011).....	- 45 -
Πίνακας 2: Επισκόπηση καιρικών και κλιματικών φαινομένων και περίληψη παρατηρούμενων και προβλεπόμενων αλλαγών σε παγκόσμια κλίμακα, Πηγή: (IPCC, 2012) .....	54
Πίνακας 3: Πιθανότητα εκδήλωσης ΑΚΦ σε αριθμό ημερών [μέγιστος (Μ), ελάχιστος (Ε) και μέσος (Με)] ανά έτος για την περίοδο 2011-2040 για επιλεγμένες πόλεις της Ευρώπης. (Πηγή: Van der Linden & J.F.B., 2009).....	58
Πίνακας 4: Βιβλιογραφικά ευρήματα για την επίδραση βροχοπτώσεων στην κυκλοφοριακή ροή και στην ταχύτητα .....	67
Πίνακας 5: Διαφορές στρατηγικών αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής (Πηγή: (ΤοΙ, 2005) .....	77
Πίνακας 6: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας του τομέα των Μεταφορών (σε %) ανά μέσο μετακίνησης (Πηγή: (U.S. Energy Information Administration, 2016).....	78
Πίνακας 7: Μέτρα μετριασμού για τον τομέα των Μεταφορών.....	80
Πίνακας 8: Μέτρα προσαρμογής για τις οδικές μεταφορές (και υποδομές) .....	94
Πίνακας 9: Μέτρα προσαρμογής για τις σιδηροδρομικές μεταφορές (και υποδομές) .....	95
Πίνακας 10: Μέτρα προσαρμογής για τις αεροπορικές μεταφορές (και υποδομές).....	96
Πίνακας 11: Μέτρα προσαρμογής για τις πλωτές μεταφορές (και υποδομές).....	97
Πίνακας 12: Μεγέθη κυκλοφοριακής ροής (Πηγή: (May, 1990) .....	107
Πίνακας 13: Παραδείγματα βασικών συνθηκών κυκλοφοριακής ικανότητας για διακοπτόμενη και μη ροή κυκλοφορίας .....	152
Πίνακας 14: Κατηγορίες υποδειγμάτων βάσει κατανομής σφάλματος .....	174
Πίνακας 15: Συναρτήσεις καθυστέρησης .....	185
Πίνακας 16: Παραδείγματα δικτύων .....	204
Πίνακας 17: Συγκεντρωτική αποτύπωση των 'Μαθηματικών των Μεταφορών' .....	256
Πίνακας 18: Συγκεντρωτική άποψη ποιοτικής αξιολόγησης επίπτωσης καιρικών και κλιματικών συνθηκών .....	267
Πίνακας 19: Συγκεντρωτική άποψη ποιοτικής αξιολόγησης κρισιμότητας στοιχείων .....	269
Πίνακας 20: Ποσοστιαίες αλλαγές για τα μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής λόγω εμφάνισης ΑΚΦ στο δίκτυο που εξετάζεται.....	288
Πίνακας 21: Εκτίμηση επιπτώσεων ισχυρής χιονόπτωσης στην Πόλη 1 ανά μέσο.....	296

Πίνακας 22: Εκτίμηση επιπτώσεων των εξεταζόμενων ΑΚΦ στις Πόλεις και τις συνδέσεις τους .....	298
Πίνακας 23: Στοιχεία προσφοράς και ζήτησης μετακινήσεων για τις εξεταζόμενες πόλεις	301
Πίνακας 24: Γενικευμένο κόστος στο βασικό σενάριο για τις συνδέσεις των πόλεων που εξετάζονται.....	302
Πίνακας 25: Γενικευμένο κόστος στο σενάριο ΑΚΦ για τις συνδέσεις των πόλεων που εξετάζονται.....	303
Πίνακας 26: Ποσοστιαία διαφορά επιβατικών μετακινήσεων ανά μέσο – σύγκριση βασικού σεναρίου έναντι σεναρίου ΑΚΦ.....	303
Πίνακας 27: Μέτρα και εργαλεία της θεωρίας δικτύων και υποθέσεις χρήσης τους στα δίκτυα Μεταφορών.....	308
Πίνακας 28: Μήκη οδικών τμημάτων δικτύου Sioux Falls.....	313
Πίνακας 29: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Κεντρικότητας Βαθμού (ΚΒα) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls .....	321
Πίνακας 30: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Δύναμης Κόμβου (ΔΚο) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls .....	323
Πίνακας 31: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Κεντρικότητας Εγγύτητας (ΚΕγ) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls.....	326
Πίνακας 32: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Κεντρικότητας Ενδιαμέσου (ΚΕν) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls.....	328
Πίνακας 33: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Ροής Κεντρικότητας Ενδιαμέσου (ΡΚΕν) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls.....	330
Πίνακας 34: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Τοπικού Συντελεστή Σύμπλεξης (ΤΣΣυ) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls.....	332
Πίνακας 35: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Κεντρικότητας Πληροφορίας (ΚΠλ) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls.....	334
Πίνακας 36: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Δείκτη h (Δh) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls.....	337
Πίνακας 37: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Ιεραρχικού Βαθμού (ΙΒα) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls .....	339
Πίνακας 38: Στατιστική ανάλυση κατάταξης σημαντικότητας κόμβων δικτύου Sioux Falls	340
Πίνακας 39: Τελική δέσμη μέτρων αποτίμησης σημαντικότητας κόμβων δικτύων Μεταφορών .....	345
Πίνακας 40: Χαρακτηριστικά των τυχαίων δικτύων που εξετάζονται.....	352

Πίνακας 41: Απόδοση δικτύων και διαφορές τους για τα 3 σενάρια αφαίρεσης στοιχείων (10%, 20% και 30%) και επίπτωση αφαίρεσης στον αριθμό μετακινήσεων .....	362
Πίνακας 42: Τελικά δίκτυα ανάλυσης.....	364
Πίνακας 43: Αναμενόμενες τιμές των μέτρων σε επίπεδο δικτύου ανά εξεταζόμενο δίκτυο .....	378
Πίνακας 44: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής δύναμης κόμβου .....	380
Πίνακας 45: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής κεντρικότητας εγγύτητας.....	381
Πίνακας 46: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής κεντρικότητας ενδιαμέσου .....	383
Πίνακας 47: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής κεντρικότητας πληροφορίας .....	384
Πίνακας 48: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού δύναμης κόμβου και κεντρικότητας εγγύτητας .....	386
Πίνακας 49: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού δύναμης κόμβου και κεντρικότητας ενδιαμέσου .....	388
Πίνακας 50: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού δύναμης κόμβου και κεντρικότητας πληροφορίας.....	389
Πίνακας 51: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού κεντρικότητας ενδιαμέσου και κεντρικότητας εγγύτητας .....	391
Πίνακας 52: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού κεντρικότητας ενδιαμέσου και κεντρικότητας πληροφορίας.....	393
Πίνακας 53: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας πληροφορίας.....	395
Πίνακας 54: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού δύναμης κόμβου, κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας ενδιαμέσου .....	397
Πίνακας 55: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού δύναμης κόμβου, κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας πληροφορίας .....	399
Πίνακας 56: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού κεντρικότητας εγγύτητας, κεντρικότητας ενδιαμέσου και κεντρικότητας πληροφορίας .....	401
Πίνακας 57: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού όλων των μέτρων .....	403
Πίνακας 58: Πλήθος εκτιμηθέντων ανθεκτικών δικτύων και αντίστοιχο ποσοστό επί του συνόλου βάσει μεμονωμένων μέτρων ή συνδυασμών τους .....	405
Πίνακας 59: Μέτρα προσαρμογής με κατηγοριοποίηση περιεχομένου και ομαδοποίηση ανά μέσο μεταφοράς .....	411
Πίνακας 60: Στοιχεία έρευνας.....	417
Πίνακας 61: Ερωτήσεις έρευνας και προεπιλεγμένες απαντήσεις .....	419



Πίνακας 62: Ποσοστά πλήρωσης έρευνας ερωτηματολογίου ανά ερώτηση και ανά μέσο μεταφοράς .....	420
Πίνακας 63: Σύνοψη των χαρακτηριστικών των μέτρων προσαρμογής ανά μεταφορικό μέσο .....	421
Πίνακας 64: Μέτρα προσαρμογής οδικών Μεταφορών και κωδικοποίησή τους.....	424
Πίνακας 65: Μέτρα προσαρμογής σιδηροδρομικών Μεταφορών και κωδικοποίησή τους	427
Πίνακας 66: Μέτρα προσαρμογής αεροπορικών Μεταφορών και κωδικοποίησή τους .....	428
Πίνακας 67: Μέτρα προσαρμογής πλωτών Μεταφορών και κωδικοποίησή τους .....	430

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Κεντρικοί και επιμέρους στόχοι της διδακτορικής διατριβής .....	- 36 -
Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση της δομής της διδακτορικής διατριβής .....	- 41 -
Εικόνα 3: Μεταβολή στη στάθμη της θάλασσας από δορυφορικές παρατηρήσεις (1993-2014) .....	51
Εικόνα 4: Μεταβολή της στάθμης της θάλασσας από μετρήσεις παράκτιας παλίρροιας (1870- 2000).....	51
Εικόνα 5: Μεταβολή ετήσιας παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας συγκριτικά με τη μέση θερμοκρασία μεταξύ 1961-1990 .....	51
Εικόνα 6: Κατάταξη ετήσιων θερμοκρασιών (1850-2008).....	51
Εικόνα 7: Μεταβολή της θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης ανά γεωγραφική περιοχή συγκριτικά με τη μέση θερμοκρασία μεταξύ 1961-1990 .....	51
Εικόνα 8: Μεταβολή της μέσης βροχόπτωσης ανά γεωγραφική περιοχή συγκριτικά με τη μέση θερμοκρασία μεταξύ 1961-1990 .....	51
Εικόνα 9: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη αλλαγή σε αριθμό ημερών ανά έτος για τις περιόδους 1989-2010 έως 2011-2040 για τρία επίπεδα δριμύτητας ισχυρών ανέμων Α) 17 m/s Β) 25 m/s C) 32 m/s .....	57
Εικόνα 10: Περιοχές του τομέα των Μεταφορών, στις οποίες είναι αισθητές οι καιρικές και κλιματικές αλλαγές .....	62
Εικόνα 11: Επισκόπηση της βιβλιογραφίας για τη μείωση της ταχύτητας (%) λόγω διαφόρων εντάσεων βροχόπτωσης.....	71
Εικόνα 12: Ετήσιες συνολικές εκπομπές CO <sub>2</sub> ανά περιοχή στη Γη την περίοδο 1751-2017 ..	76
Εικόνα 13: Σχηματική απεικόνιση πρόκλησης και αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής..	77
Εικόνα 14: Γραμμική θεώρηση κυκλοφοριακών συνθηκών και εκπομπών αέριων ρύπων... 83	
Εικόνα 15: Θεώρηση κυκλοφοριακών συνθηκών ελεύθερης ροής και εκπομπών αέριων ρύπων .....	84
Εικόνα 16: Θεώρηση κυκλοφοριακών συνθηκών κορεσμένης ροής και εκπομπών αέριων ρύπων .....	85
Εικόνα 17: Θεμελιώδη διαγράμματα κυκλοφοριακής ροής κατά Greenshield .....	116
Εικόνα 18: Μορφές θεμελιωδών σχέσεων ταχύτητας - πυκνότητας .....	119
Εικόνα 19: Γενικευμένη μορφή σχέσης ταχύτητας – φόρτου σε ελεύθερες λεωφόρους....	120
Εικόνα 20: Μορφές θεμελιωδών σχέσεων φόρτου - πυκνότητας.....	121
Εικόνα 21: Η τυπική μορφή της σχέσης φόρτου – κατάληψης .....	122

Εικόνα 22: Διασπορά σε παρατηρούμενη γραφική παράσταση φόρτου – πυκνότητας .....	123
Εικόνα 23: Θεμελιώδεις ‘σχέσεις’ φόρτου – πυκνότητας βάσει εμπειρικών παρατηρήσεων διασποράς .....	124
Εικόνα 24: Γραφική αναπαράσταση ‘αξιόπιστης’ (sound) θεμελιώδους σχέσης φόρτου – πυκνότητας σύμφωνα με τον del Castillo .....	125
Εικόνα 25: Σχέση φόρτου – πυκνότητας, Περιοχές συμφορημένης και μη συμφορημένης ροής .....	128
Εικόνα 26: Παράμετροι ασφαλούς απόστασης του υποδείγματος Pipes .....	130
Εικόνα 27: Διάκριση στον χώρο για ένα απλό οδικό τμήμα .....	140
Εικόνα 28: Η διαδικασία του Σχεδιασμού των Μεταφορών σε 4 στάδια .....	160
Εικόνα 29: Δομές πολυτροπικών υποδειγμάτων .....	173
Εικόνα 30: Δομή ιεραρχικού υποδείγματος με πέντε “φωλιές” .....	178
Εικόνα 31: Ένας κόμβος (B) και οδικά τμήματα που τον τροφοδοτούν με μετακινήσεις ....	187
Εικόνα 32: Περιοχής συμφορημένης και μη συμφορημένης κυκλοφοριακής ροής .....	189
Εικόνα 33: Σχηματική απεικόνιση επιπέδων μεθοδολογικής προσέγγισης της διδακτορικής διατριβής .....	234
Εικόνα 34: Μεθοδολογική προσέγγιση Επιπέδου 1: Επαναδιατύπωση μεγεθών και υποδειγμάτων Κυκλοφοριακής Ροής και Σχεδιασμού των Μεταφορών .....	237
Εικόνα 35: Διαγραμματική απεικόνιση τυχαίων αποτελεσμάτων ανάλυσης τεταρτημορίων για την προτεραιοποίηση επαναδιατύπωσης κυκλοφοριακών και συγκοινωνιακών στοιχείων .....	243
Εικόνα 36: Μεθοδολογική προσέγγιση Επιπέδου 2: Αποτίμηση σημαντικότητας και ανθεκτικότητας δικτύων Μεταφορών ή στοιχείων τους .....	245
Εικόνα 37: Μεθοδολογικά στάδια πρώτου βήματος για την επαλήθευση εφαρμοσιμότητας και χρησιμότητας μέτρων για τα δίκτυα Μεταφορών .....	247
Εικόνα 38: Μεθοδολογική προσέγγιση Επιπέδου 3: Ιεράρχηση εφαρμογής μέτρων προσαρμογής .....	251
Εικόνα 39: Παράδειγμα σύνταξης διαγράμματος ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής	253
Εικόνα 40: Διάγραμμα απεικόνισης βαθμού επηρεασμού του υπολογισμού κυκλοφοριακών στοιχείων και στοιχείων Σχεδιασμού των Μεταφορών από άλλα στοιχεία .....	272
Εικόνα 41: Προτεραιοποίηση επαναδιατυπώσεων στοιχείων .....	273
Εικόνα 42: Πορείες (trajectories) των οχημάτων στον χώρο και στον χρόνο .....	277
Εικόνα 43: Απεικόνιση υπό εξέταση διαστήματος στο διάγραμμα χώρου-χρόνου .....	278

Εικόνα 44: Άποψη υπό εξέταση διαστήματος και πορείες οχημάτων στον χώρο και στον χρόνο .....	279
Εικόνα 45: Διαστήματα εξέτασης του διαγράμματος χώρου – χρόνου υπό ΚΣ (αριστερά) και υπό συνθήκες ΑΚΦ (δεξιά).....	280
Εικόνα 46: Θεμελιώδη διαγράμματα κυκλοφοριακής ροής υπό κανονικές συνθήκες (μαύρη διαγράμμιση) και συνθήκες ΑΚΦ (γκρι διαγράμμιση) .....	282
Εικόνα 47: (α) Περιοχή μελέτης και μετεωρολογικοί σταθμοί συλλογής καιρικών δεδομένων, (β) χωρική κατανομή συσσώρευσης βροχόπτωσης και (γ) ωριαία ένταση βροχόπτωσης..	283
Εικόνα 48: Ζώνες ανάλυσης και θέσεις μετρητών κυκλοφοριακών μεγεθών στο εξεταζόμενο δίκτυο .....	285
Εικόνα 49: Ωριαίοι κυκλοφοριακοί φόρτοι, ταχύτητες και πυκνότητες οχημάτων στα 5 διαστήματα ανάλυσης στο εξεταζόμενο δίκτυο Μεταφορών .....	288
Εικόνα 50: Γραμμική παλινδρόμηση των λόγων των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής με την ένταση της βροχόπτωσης.....	291
Εικόνα 51: Εύρη τιμών επικύρωσης της θεωρητικής ανάλυσης .....	293
Εικόνα 52: Τριωνυμική επιλογή μέσου στη μέθοδο που παρουσιάζεται .....	300
Εικόνα 53: Μητρώο Προέλευσης-Προορισμού δικτύου Sioux Falls κατά την πρωινή ώρα αιχμής (08:00-09:00) .....	312
Εικόνα 54: Το κυκλοφοριακό δίκτυο Sioux Falls: άποψη πραγματικού δικτύου (αριστερά) και κωδικοποιημένου δικτύου (δεξιά).....	313
Εικόνα 55: Απόψη περιβάλλοντος αυτοματοποιημένης διαδικασίας στην γλώσσα προγραμματισμού R.....	316
Εικόνα 56: Κυκλοφοριακοί φόρτοι (σε οχήματα/ώρα) ανά κατεύθυνση οδικού τμήματος	317
Εικόνα 57: Χρόνοι διάνυσης (σε λεπτά) ανά κατεύθυνση οδικού τμήματος .....	318
Εικόνα 58: Λόγος χρόνων διάνυσης προς χρόνους διάνυσης σε συνθήκες ελεύθερης ροής ανά κατεύθυνση οδικού τμήματος .....	319
Εικόνα 59: Κεντρικότητα Βαθμού στο δίκτυο Sioux Falls .....	320
Εικόνα 60: Δύναμη Κόμβου στο δίκτυο Sioux Falls.....	322
Εικόνα 61: Κεντρικότητα Εγγύτητας στο δίκτυο Sioux Falls.....	324
Εικόνα 62: Κεντρικότητα Ενδιαμέσου στο δίκτυο Sioux Falls .....	327
Εικόνα 63: Ροή Κεντρικότητας Ενδιαμέσου στο δίκτυο Sioux Falls .....	329
Εικόνα 64: Τοπικός Συντελεστής Σύμπλεξης στο δίκτυο Sioux Falls .....	331
Εικόνα 65: Κεντρικότητα Πληροφορίας στο δίκτυο Sioux Falls .....	333
Εικόνα 66: Δείκτης h στο δίκτυο Sioux Falls.....	336

Εικόνα 67: Ιεραρχικός βαθμός στο δίκτυο Sioux Falls .....	338
Εικόνα 68: Χαρτογράφηση σημαντικότητας των κόμβων του δικτύου Sioux Falls και δίκτυο Sioux Falls .....	341
Εικόνα 69: Χαρτογράφηση σημαντικότητας των κόμβων του δικτύου Sioux Falls βάσει θέσης κόμβων .....	342
Εικόνα 70: Πιθανότητα εμφάνισης σε θέση κατάταξης (μ.ο.) ανά κόμβο και περιοχή του δικτύου .....	343
Εικόνα 71: Δίκτυο μορφής πλέγματος στο λογισμικό SUMO .....	348
Εικόνα 72: Δίκτυο μορφής ιστού στο λογισμικό SUMO .....	349
Εικόνα 73: Δίκτυο τυχαίας μορφής στο λογισμικό SUMO .....	350
Εικόνα 74: Ποσοστό συνολικών μετακινήσεων που εξυπηρετείται για διάφορα ποσοστά αφαίρεσης στοιχείων όλων των δικτύων .....	355
Εικόνα 75: Ποσοστιαία διαφορά μέσου χρόνου μετακίνησης συγκριτικά με το αρχικό σενάριο (χωρίς αφαίρεση στοιχείων) για διάφορα ποσοστά αφαίρεσης στοιχείων όλων των δικτύων .....	356
Εικόνα 76: Ποσοστιαία διαφορά μέσου μήκους μετακίνησης συγκριτικά με το αρχικό σενάριο (χωρίς αφαίρεση στοιχείων) για διάφορα ποσοστά αφαίρεσης στοιχείων όλων των δικτύων .....	357
Εικόνα 77: Άποψη δικτύων έπειτα από αφαίρεση ποσοστού στοιχείων τους (από 10% έως 80%) – Δίκτυο 34 .....	358
Εικόνα 78: Αναγνώριση ανθεκτικότητας δικτύων (σύμφωνα με την κωδικοποίηση των τυχαίων δικτύων) .....	366
Εικόνα 79: Ανθεκτικά δίκτυα (2 <sup>ο</sup> τεταρτημόριο) (σύμφωνα με την κωδικοποίηση των τυχαίων δικτύων) .....	367
Εικόνα 80: Αναγνώριση ανθεκτικότητας δικτύων (σύμφωνα με την κωδικοποίηση των τυχαίων δικτύων) .....	368
Εικόνα 81: Κατανομές τιμών Δύναμης Κόμβου για όλα τα δίκτυα .....	369
Εικόνα 82: Περιοχές τιμών και κατανομών της Δύναμης Κόμβου για όλα τα δίκτυα.....	370
Εικόνα 83: Κατανομές τιμών Κεντρικότητας Εγγύτητας για όλα τα δίκτυα .....	371
Εικόνα 84: Περιοχές τιμών και κατανομών της Κεντρικότητας Εγγύτητας για όλα τα δίκτυα .....	372
Εικόνα 85: Κατανομές τιμών Κεντρικότητας Ενδιαμέσου για όλα τα δίκτυα.....	374
Εικόνα 86: Περιοχές τιμών και κατανομών της Κεντρικότητας Ενδιαμέσου για όλα τα δίκτυα .....	375

Εικόνα 87: Κατανομές τιμών Κεντρικότητας Πληροφορίας για όλα τα δίκτυα .....	376
Εικόνα 88: Περιοχές τιμών και κατανομών της Κεντρικότητας Ενδιαμέσου για όλα τα δίκτυα .....	377
Εικόνα 89: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησης τους βάσει τιμών Δύναμης Κόμβου .....	381
Εικόνα 90: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησης τους βάσει τιμών Κεντρικότητας Εγγύτητας.....	382
Εικόνα 91: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησης τους βάσει τιμών Κεντρικότητας Ενδιαμέσου .....	384
Εικόνα 92: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησης τους βάσει τιμών Κεντρικότητας Πληροφορίας .....	385
Εικόνα 93: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησης τους βάσει τιμών συνδυασμού δύναμης κόμβου και κεντρικότητας εγγύτητας.....	387
Εικόνα 94: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησης τους βάσει τιμών συνδυασμού δύναμης κόμβου και κεντρικότητας ενδιαμέσου.....	389
Εικόνα 95: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησης τους βάσει τιμών συνδυασμού δύναμης κόμβου και κεντρικότητας πληροφορίας .....	390
Εικόνα 96: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησης τους βάσει τιμών συνδυασμού κεντρικότητας ενδιαμέσου και κεντρικότητας εγγύτητας.....	392
Εικόνα 97: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησης τους βάσει τιμών συνδυασμού κεντρικότητας ενδιαμέσου και κεντρικότητας πληροφορίας .....	394
Εικόνα 98: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησης τους βάσει τιμών συνδυασμού κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας πληροφορίας .....	396
Εικόνα 99: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησης τους βάσει τιμών συνδυασμού δύναμης κόμβου, κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας ενδιαμέσου	398
Εικόνα 100: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησης τους βάσει τιμών συνδυασμού δύναμης κόμβου, κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας πληροφορίας .....	400
Εικόνα 101: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησης τους βάσει τιμών συνδυασμού κεντρικότητας εγγύτητας, κεντρικότητας ενδιαμέσου και κεντρικότητας πληροφορίας.....	402
Εικόνα 102: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησης τους βάσει τιμών συνδυασμού όλων των μέτρων .....	404
Εικόνα 103: Διάγραμμα ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής οδικών Μεταφορών .....	424

Εικόνα 104: Διάγραμμα ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής σιδηροδρομικών Μεταφορών.....	426
Εικόνα 105: Διάγραμμα ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής αεροπορικών Μεταφορών .....	428
Εικόνα 106: Διάγραμμα ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής πλωτών Μεταφορών .....	430

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

Ακραία Καιρικά Φαινόμενα	ΑΕΠ
Ακραία Καιρικά Φαινόμενα	ΑΚΦ
Δείκτη h	Δh
Δημόσιες Συγκοινωνίες	ΔΣ
Δύναμη Κόμβου	ΔΚο
Ευρωπαϊκή Ένωση	ΕΕ
Ηνωμένες Πολιτείες	ΗΠΑ
Ιδιωτικής Χρήσης	ΙΧ
Ιεραρχικός Βαθμός	ΙΒα
Κανονικές Συνθήκες	ΚΣ
Κεντρικότητα Βαθμού	ΚΒα
Κεντρικότητα Εγγύτητας	ΚΕγ
Κεντρικότητα Ενδιαμέσου	ΚΕν
Κεντρικότητα Πληροφορίας	ΚΠλ
Μακροσκοπικά Θεμελιώδη Διαγράμματα	ΜΘΔ
Μέσα Μαζικής Μετακίνησης	ΜΜΜ
Μέσος Χρόνος Μετακίνησης	ΜΧΜ
Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών	ΟΗΕ
Παραγόμενων – Ελκόμενων	ΜΠΕ
Προέλευσης - Προορισμού	ΠΠ
Ροή Κεντρικότητας Ενδιαμέσου	ΡΚΕν
Συντελεστής Ωρας Αιχμής	ΣΩΑ
Τεχνολογίες Πληροφοριών και Επικοινωνιών	ΤΠΕ
Τοπικός Συντελεστής Σύμπλεξης	ΤΤΣυ
Φυσικές Καταστροφές	ΦΚ
Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων	ΧΥΤΑ

Central Processing Unit	CPU
European Transport policy Information System	ETIS
German Development Cooperation	GDC
Hierarchical/Nested Logit Models	HL
hyperlink-induced topic search	HITS
Intergovernmental Panel on Climate Change	IPCC
Multinomial Logit Model	MNL
Nomenclature of Territorial Units for Statistics	NUTS3
Organisation for Economic Co-operation and Development	OECD
Simulation of Urban Mobility	SUMO
Single European Sky ATM Research	SESAR
Transportation Research Board	TRB
United Nations Framework Convention on Climate Change	UNFCC
Weather Research and Forecasting	WRF
World Meteorological Organization	WMO





# 1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1. Ερευνητικό περιβάλλον

Η αλλαγή του κλίματος της Γης είναι μια φυσική διαδικασία. Όταν όμως γίνεται αναφορά σήμερα στην κλιματική αλλαγή, δεν εννοείται η φυσική μεταβολή του κλίματος αλλά οι αλλαγές που παρατηρούνται στο κλίμα του πλανήτη, και σχετίζονται με την αλλαγή στη συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Αέρια του θερμοκηπίου εκπέμπονται τόσο από φυσικές διεργασίες όσο και από ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες απελευθερώνουν μεγάλες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) στην ατμόσφαιρα, πέραν των υδρατμών, αυξάνοντας τις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των αερίων αυτών, ενισχύοντας έτσι το φαινόμενο του θερμοκηπίου και θερμαίνοντας το κλίμα. Η αύξηση όμως της μέσης θερμοκρασίας της Γης<sup>1</sup> δεν συνεπάγεται απαραίτητα θερμότερο κλίμα για όλες τις περιοχές του κόσμου. Καθώς ο πλανήτης θερμαίνεται, μεταβάλλεται το κλιματικό σύστημα και επηρεάζονται τα επίπεδα υγρασίας, συμβάλλοντας στην συχνότερη και εντονότερη εκδήλωση ακραίων και απρόβλεπτων φαινομένων.

Τα ακραία καιρικά φαινόμενα και οι φυσικές καταστροφές που προκαλούνται από την αλλαγή του κλίματος, αναμένεται να αυξήσουν σημαντικά μέσα στα επόμενα χρόνια τις αρνητικές επιπτώσεις στα συστήματα (υπό την έννοια των δικτύων και των υποδομών) διαφόρων τομέων. Ο τομέας των Μεταφορών, ως βασική δραστηριότητα της κοινωνίας και της οικονομίας, δεν θα μείνει ανεπηρέαστος από τις αρνητικές επιπτώσεις, που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή, καθώς οι αναμενόμενες αλλαγές, όπως υποστηρίζεται από τη διεθνή ερευνητική κοινότητα, θα επηρεάσουν τόσο τις υποδομές Μεταφορών όσο και τη λειτουργία των δικτύων Μεταφορών που αυτές υποστηρίζουν, ανεξαρτήτως μέσου μετακίνησης. Επιπρόσθετα, η κλιματική αλλαγή αναμένεται να αυξήσει την αβεβαιότητα γύρω από το σχεδιασμό των συστημάτων Μεταφορών, ώστε αυτά να είναι λιγότερο τρωτά και ευπαθή στα ακραία καιρικά φαινόμενα και τις φυσικές καταστροφές, καθώς το παρελθόν δεν μπορεί να είναι πλέον μια αξιόπιστη πηγή πρόβλεψης για το μελλοντικό κλίμα

---

<sup>1</sup> Σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή, η μέση θερμοκρασία του αέρα στην επιφάνεια του πλανήτη ανέβηκε 0,74 βαθμούς Κελσίου (°C) ± 0,18 βαθμούς Κελσίου (°C) τον 20ό αιώνα, ενώ οι εκτιμήσεις προβλέπουν αύξηση από 1,1 βαθμούς Κελσίου (°C) έως 6,4 βαθμούς Κελσίου (°C) για τον 21ο αιώνα.

(δεδομένων των ακραίων φαινομένων που εκδηλώνονται σήμερα και δεν είχαν προβλεφθεί). Δοθείσης λοιπόν της αυξημένης συχνότητας και έντασης των ακραίων καιρικών φαινομένων και αντίστοιχων φυσικών καταστροφών, που παρατηρείται παγκοσμίως τα τελευταία χρόνια, η επεξεργασία σεναρίων εκδήλωσης τέτοιων φαινομένων, η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων τους στα συστήματα Μεταφορών και η ανάπτυξη μέτρων αντιμετώπισης τους, είναι πλέον απαραίτητη.

Εν όψει των δυσμενών επιδράσεων που σχετίζονται με την αλλαγή του κλίματος, ιδιαίτερη προσοχή δίνεται σε μέτρα και στρατηγικές προσαρμογής<sup>2</sup> των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή, με τη μορφή προληπτικών δράσεων, που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων της, όπως και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των διαφόρων τομέων ανθρώπινης δραστηριότητας και των μέσων/εργαλείων υλοποίησης τους. Ωστόσο, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αποτελεσματικότητα του σχεδιασμού για την αντιμετώπιση μελλοντικών επιπτώσεων, είναι ζωτικής σημασίας να κατανοηθούν και να εκτιμηθούν με ποσοτικούς όρους, οι επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος ιδιαίτερα στον τομέα των Μεταφορών.

Τα παραπάνω πεδία ορίζουν το πλαίσιο, μέσα στο οποίο κινείται η παρούσα διδακτορική διατριβή.

## **1.2. Στόχοι και μεθοδολογία της διδακτορικής διατριβής**

Βασικό στόχο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί, και συνεπώς το κεντρικό ερευνητικό ερώτημα της, είναι η εύρεση και ανάπτυξη τρόπων αντιμετώπισης της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στα συστήματα Μεταφορών. Ανεξάρτητα από τις πολιτικές που θα υιοθετηθούν και θα εφαρμοστούν τελικά από τη διεθνή κοινότητα αναφορικά με τα αποδεκτά επίπεδα εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου<sup>3</sup>, οι επιπτώσεις της ραγδαίας μέχρι

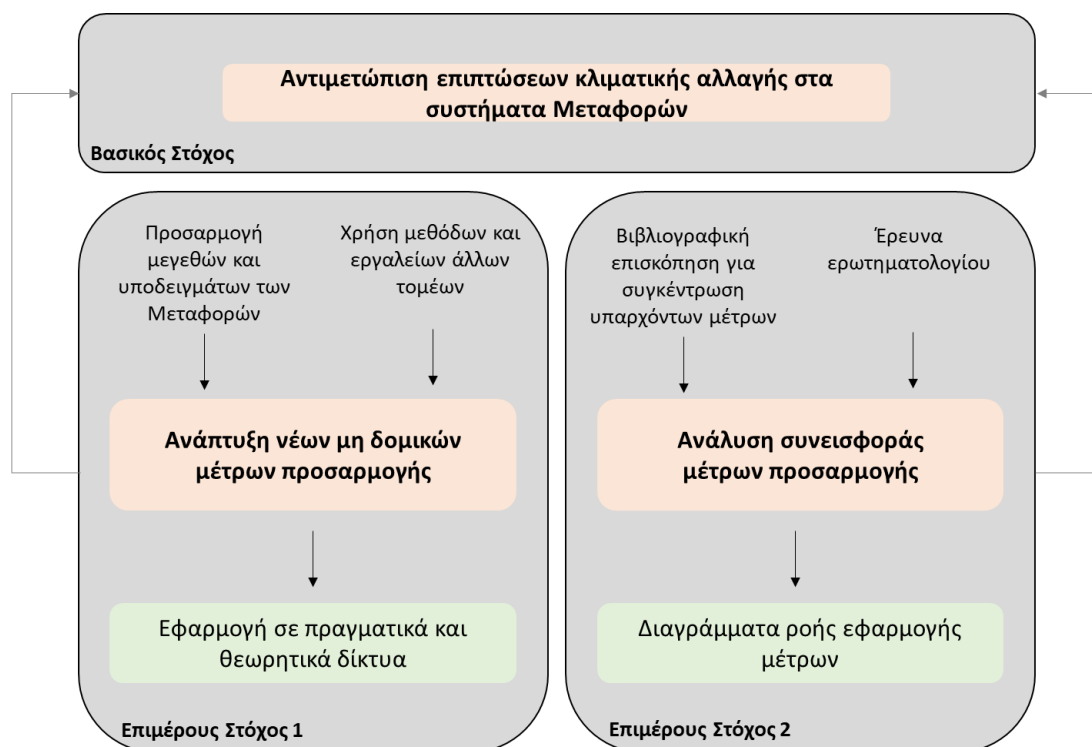
---

<sup>2</sup> Ως προσαρμογή νοείται ο ένας από τους δύο τρόπους αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής, που στοχεύει στην αντιμετώπιση των επιπτώσεών της, έναντι του 'μετριασμού που στοχεύει στην αντιμετώπιση των αιτιών της αλλαγής του κλίματος (δηλαδή τη συσσώρευση αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα).

<sup>3</sup> Κατά την 21<sup>η</sup> Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή στο Παρίσι (30/11/2015 – 11/12/2015) συμφωνήθηκε από αντιπροσώπους 196 χωρών η διατήρηση της αύξησης της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας κάτω από 2 βαθμούς Κελσίου (°C) συγκριτικά με την προβιομηχανική περίοδο (1750-1850). Η συμφωνία θα καταστεί νομικά δεσμευτική αν υπογραφεί από τουλάχιστον 55 χώρες που μαζί εκπέμπουν τουλάχιστον το 55% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Πρακτικά, η συμφωνία προβλέπει την σχεδόν μηδενική εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου μεταξύ 2030 και 2050. Η συμφωνία του Παρισιού θα αντικαταστήσει το Πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο υπεγράφη το 1992.

σήμερα αύξησής τους, θα συνεχίσουν να γίνονται αισθητές για τις επόμενες δεκαετίες. Αναμένεται δε οι επιπτώσεις αυτές, καθώς και η ανάγκη για προσαρμογή, να είναι μεγαλύτερες και πιο εμφανείς στο δομημένο περιβάλλον και ιδιαίτερα στα τεράστια ανά τον πλανήτη συστήματα αυτοκινητοδρόμων, γεφυρών, σηράγγων, σιδηροδρόμων, αεροδρομίων, λιμανιών και δικτύων μαζικών Μεταφορών. Για τους λόγους αυτούς, η διδακτορική αυτή έρευνα στοχεύει, αφενός στην ανάπτυξη μαθηματικών εργαλείων, μεθόδων και τρόπων κατανόησης και ποσοτικοποίησης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα συστήματα Μεταφορών, και αφετέρου στην εύρεση βέλτιστων μέτρων προσαρμογής που θα μπορέσουν να αυξήσουν την ανθεκτικότητα και να μειώσουν την τρωτότητα των συστημάτων Μεταφορών δεδομένης της επερχόμενης αλλαγής του κλίματος.

Η εξυπηρέτηση του κεντρικού στόχου επιχειρείται στη διατριβή μέσω δύο επιμέρους στόχων, όπως αυτοί παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.



**Εικόνα 1: Κεντρικοί και επιμέρους στόχοι της διδακτορικής διατριβής**

Ο πρώτος επιμέρους στόχος αφορά στην εύρεση νέων μη δομικών μέτρων προσαρμογής του συστήματος των Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή. Τα μέτρα αυτά που αναπτύσσονται και προτείνονται στην διατριβή, έχουν τη μορφή μαθηματικών εργαλείων, μεθόδων και αλγορίθμων, για την καλύτερη κατανόηση, διαχείριση και ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα συστήματα Μεταφορών. Τα μέτρα αυτά περιλαμβάνουν τόσο την χρήση ή/και προσαρμογή υπαρχουσών μεθόδων αξιολόγησης της λειτουργίας δικτύων,

προερχόμενων από την περιοχή του σχεδιασμού των Μεταφορών και της θεωρίας της κυκλοφοριακής ροής αλλά και από άλλες επιστημονικές περιοχές, όσο και την ανάπτυξη νέων μεθόδων για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας και της τρωτότητας των δικτύων Μεταφορών. Η εγκυρότητα και ευστοχία των μεθόδων αυτών για την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα συστήματα Μεταφορών, ελέγχεται στη διδακτορική διατριβή μέσω εφαρμογής τους σε:

- θεωρητικά δίκτυα με προσομοίωση
- πραγματικά δίκτυα (με υπόθεση εκδήλωσης ακραίων καιρικών φαινομένων ή φυσικών καταστροφών και εκτίμηση των επιπτώσεων τους), και συγκεκριμένα στα Ευρωπαϊκά δίκτυα επιβατικών μεταφορών
- μελέτες περιπτώσεων (case studies) με πραγματικά συμβάντα και εκ των υστέρων αποτίμηση των επιπτώσεων τους στα συστήματα Μεταφορών, και συγκεκριμένα στα οδικά δίκτυα της Αττικής (πλημμυρικά φαινόμενα 2013 και 2014), της Μητροπολιτικής Περιοχής της Θεσσαλονίκης (ακραίες βροχοπτώσεις 2014) και της Πελοποννήσου (δασικές πυρκαγιές 2007)

Τα εργαλεία και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εκπλήρωση του πρώτου επιμέρους στόχου συνοψίζονται επιγραμματικά σε:

- Αναλυτική έκφραση μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής
- Υποδείγματα ροής της κυκλοφορίας (traffic flow models)
- Θεμελιώδεις σχέσεις μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής σε επίπεδο δικτύου (fundamental diagrams)
- Υποδείγματα κατανομής της ζήτησης για μετακινήσεις σε μέσα μεταφορών (modal split models)
- Υποδείγματα μακροσκοπικού καταμερισμού της ζήτησης για μετακινήσεις σε δίκτυα μεταφορών (macroscopic traffic assignment models)
- Υποδείγματα μικροσκοπικής προσομοίωσης της κυκλοφορίας (microscopic traffic simulation models)
- Τεχνικές αξιολόγησης και ανάλυσης δικτύων (network assessment and analysis)
- Τοπολογία δικτύων και θεωρία γράφων (network topology and graph theory)

Ο δεύτερος επιμέρους στόχος αφορά αφενός στην αξιολόγηση και ιεράρχηση μέτρων προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή, μέσω της ανάπτυξης ενός μεθοδολογικού πλαισίου αποτίμησης διαφόρων παραμέτρων σχετικών με την

εφαρμογή μέτρων προσαρμογής (διάρκεια, κόστος, συνεισφορά στη μείωση της τρωτότητας), και αφετέρου στην ανάπτυξη διαγραμμάτων ροής μέτρων προσαρμογής ειδικών για όλα τα συστήματα Μεταφορών (χερσαίων – οδικών και σιδηροδρομικών, πλωτών και αεροπορικών μετακινήσεων). Τα εργαλεία και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εκπλήρωση του δεύτερου επιμέρους στόχου συνοψίζονται επιγραμματικά σε:

- Έρευνα ερωτηματολογίου
- Πολυκριτηριακή ανάλυση παραμέτρων

### **1.3. Δομή της διδακτορικής διατριβής**

Η διάρθρωση της διδακτορικής διατριβής σε 11 κεφάλαια ευνοεί την εισαγωγή του ενδιαφερόμενου ερευνητή ή μελετητή στις έννοιες, θεωρίες και υπολογιστικές μεθόδους που είναι απαραίτητες για την κατανόηση, ποσοτικοποίηση, διαχείριση και μείωση των αρνητικών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα συστήματα Μεταφορών, μέσω της εύρεσης, ανάπτυξης και ανάλυσης βέλτιστων μέτρων προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών σε αυτή καθώς και στην εξοικείωση με όλα τα σχετικά αντικείμενα που οδηγούν στις προτεινόμενες λύσεις και εφαρμογές τους.

Στο **Κεφάλαιο 1**, με τίτλο «**Εισαγωγή**», παρουσιάζεται μια συνοπτική περιγραφή του ερευνητικού περιβάλλοντος μέσα στο οποίο κινείται η διδακτορική διατριβή, του προβλήματος που εξετάζεται, της σημασίας του, καθώς και των βασικότερων παραμέτρων του. Περιγράφονται οι ερευνητικοί στόχοι, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξή τους, καθώς και η ερευνητική συνεισφορά του υποψήφιου διδάκτορα.

Στα **Κεφάλαια 2 έως 6**, εκτελείται αναλυτική επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας στους επιστημονικούς τομείς που εμπíπτουν στην θεματική περιοχή της διατριβής, και είναι απαραίτητοι για την εξυπηρέτηση των στόχων της. Η θεματική περιοχή και το αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής ορίζεται, από τους εξής βασικούς επιστημονικούς άξονες:

1. Κλιματική αλλαγή
2. Κυκλοφοριακή ροή και ικανότητα
3. Συγκοινωνιακός σχεδιασμός και μαθηματική προτυποποίηση μετακινήσεων
4. Ανάλυση και αξιολόγηση λειτουργίας δικτύων

Η επισκόπηση περιλαμβάνει, την εύρεση και εξέταση των απαραίτητων επιστημονικών κειμένων από διεθνείς βιβλιοθήκες επιστημονικών περιοδικών, προηγούμενων διδακτορικών διατριβών και συναφών συγγραμμάτων, κυρίως στον τομέα των Μεταφορών καθώς και στον τομέα της κλιματικής αλλαγής. Στόχο των κεφαλαίων αυτών αποτελεί η καταγραφή και κριτική αξιολόγηση τόσο των παρελθουσών όσο και των τρεχουσών επιστημονικών και ερευνητικών εξελίξεων ώστε να εξασφαλιστεί, τόσο η καινοτομική συμβολή του διδακτορικού ερευνητικού έργου όσο και η επιστημονική του επάρκεια.

Συγκεκριμένα, στο **Κεφάλαιο 2**, με τίτλο «**Κλιματική αλλαγή**», γίνεται επισκόπηση της έννοιας της κλιματικής αλλαγής και των αιτιών πρόκλησής της, των συνεπαγόμενων ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών, και των τρόπων εκτίμησης της εμφάνισής τους στο εγγύς και στο μακρινό μέλλον (έως το 2100). Γίνεται επίσης εκτενής ανάλυση των επιπτώσεων των φαινομένων αυτών στα συστήματα Μεταφορών, αλλά και στους διαφορετικούς τρόπους αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής, μέσω προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών ή και μετριασμού των αιτίων που προκαλούν την αλλαγή του κλίματος.

Στο **Κεφάλαιο 3**, με τίτλο «**Κυκλοφοριακή ροή: μεγέθη, σχέσεις και υποδείγματα**» γίνεται επισκόπηση των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής και των μεταξύ τους θεμελιωδών σχέσεων, διατύπωση των αναλυτικών εκφράσεων τους, καθώς και ανάλυση των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων υποδειγμάτων της κυκλοφοριακής ροής σε μακροσκοπικό, μικροσκοπικό και μεσοσκοπικό επίπεδο.

Στο **Κεφάλαιο 4**, με τίτλο «**Κυκλοφοριακή ικανότητα**», γίνεται επισκόπηση της έννοιας της κυκλοφοριακής ικανότητας των οδικών τμημάτων, συζητούνται οι παράγοντες που την επηρεάζουν βάσει της μέχρι σήμερα επιστημονικής θεώρησης, και παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της, που καταλήγει και στην ιεράρχηση των οδικών τμημάτων που χρησιμοποιείται στην κυκλοφοριακή τεχνική.

Στο **Κεφάλαιο 5**, με τίτλο «**Σχεδιασμός των Μεταφορών**», γίνεται επισκόπηση των βασικών υποδειγμάτων που χρησιμοποιούνται στα τέσσερα στάδια του σχεδιασμού των Μεταφορών.

Στο **Κεφάλαιο 6**, με τίτλο «**Μέθοδοι ανάλυσης και αξιολόγησης δικτύων**», γίνεται επισκόπηση των μεθόδων ανάλυσης και αξιολόγησης λειτουργίας δικτύων (θεωρία δικτύων και γράφων).

Στο **Κεφάλαιο 7**, με τίτλο «**Μεθοδολογική προσέγγιση προσαρμογής του τομέα των Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή**», παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε κατά την εκπόνηση της διδακτορικής έρευνας, και περιγράφεται αναλυτικά το υπολογιστικό πλαίσιο, σύμφωνα με το οποίο αυτή συντελέστηκε. Στο κεφάλαιο αυτό, εξηγείται και αναλύεται η χρήση ή/και προσαρμογή υπαρχόντων εργαλείων και μεθόδων, και η ανάπτυξη νέων, βάσει αυτών που αναλύθηκαν στα **Κεφάλαια 3** έως **6**, και τα οποία εφαρμόζονται στη συνέχεια, δηλαδή στα **Κεφάλαια 8** έως **10**, για την επίτευξη των στόχων της διδακτορικής έρευνας.

Στο **Κεφάλαιο 8**, με τίτλο «**Εφαρμογή μεθοδολογικής προσέγγισης - επαναδιατύπωση μεγεθών και υποδειγμάτων κυκλοφορίας και σχεδιασμού των Μεταφορών**», παρουσιάζεται η εφαρμογή των μεθόδων και εργαλείων για την συστηματική αποτύπωση μεγεθών και υποδειγμάτων που χρησιμοποιούνται στις Μεταφορές, η ποιοτική αξιολόγησή τους (αν χρήζουν αλλαγών και η προτεραιοποίηση των αλλαγών αυτών), και η αναλυτική επαναδιατύπωση συγκεκριμένων μεγεθών και υποδειγμάτων, έτσι ώστε να παραμετροποιείται ή έννοια του καιρού, του κλίματος, και των αλλαγών τους. Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται επίσης εφαρμογή αυτών των μεγεθών και υποδειγμάτων σε πραγματικά δίκτυα Μεταφορών και σε μελέτες περιπτώσεων (case studies), έτσι ώστε να αξιολογηθεί η συνεισφορά τους. Η εφαρμογή των προτεινόμενων μεθόδων γίνεται, αφενός για περιπτώσεις δικτύων που επλήγησαν από ακραία καιρικά φαινόμενα (εκ των υστέρων ανάλυση), και αφετέρου για πιθανές μελλοντικές εκδηλώσεις παρόμοιων φαινομένων (μελέτες περιπτώσεων).

Στο **Κεφάλαιο 9**, με τίτλο «**Εφαρμογή μεθοδολογικής προσέγγισης – αποτίμηση σημαντικότητας και ανθεκτικότητας δικτύων Μεταφορών ή στοιχείων τους**», παρουσιάζεται η εφαρμογή των μεθόδων και εργαλείων για την επαλήθευση της δυνατότητας εφαρμογής μέτρων της Θεωρίας Δικτύων για τα δίκτυα Μεταφορών και η αλγοριθμική εύρεση των βέλτιστων κατανομών των τιμών των μέτρων αυτών. Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή των μέτρων που προτείνονται, των μεγεθών και των υποδειγμάτων αυτών σε πειραματικά και τυχαία δίκτυα Μεταφορών, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η συνεισφορά τους.

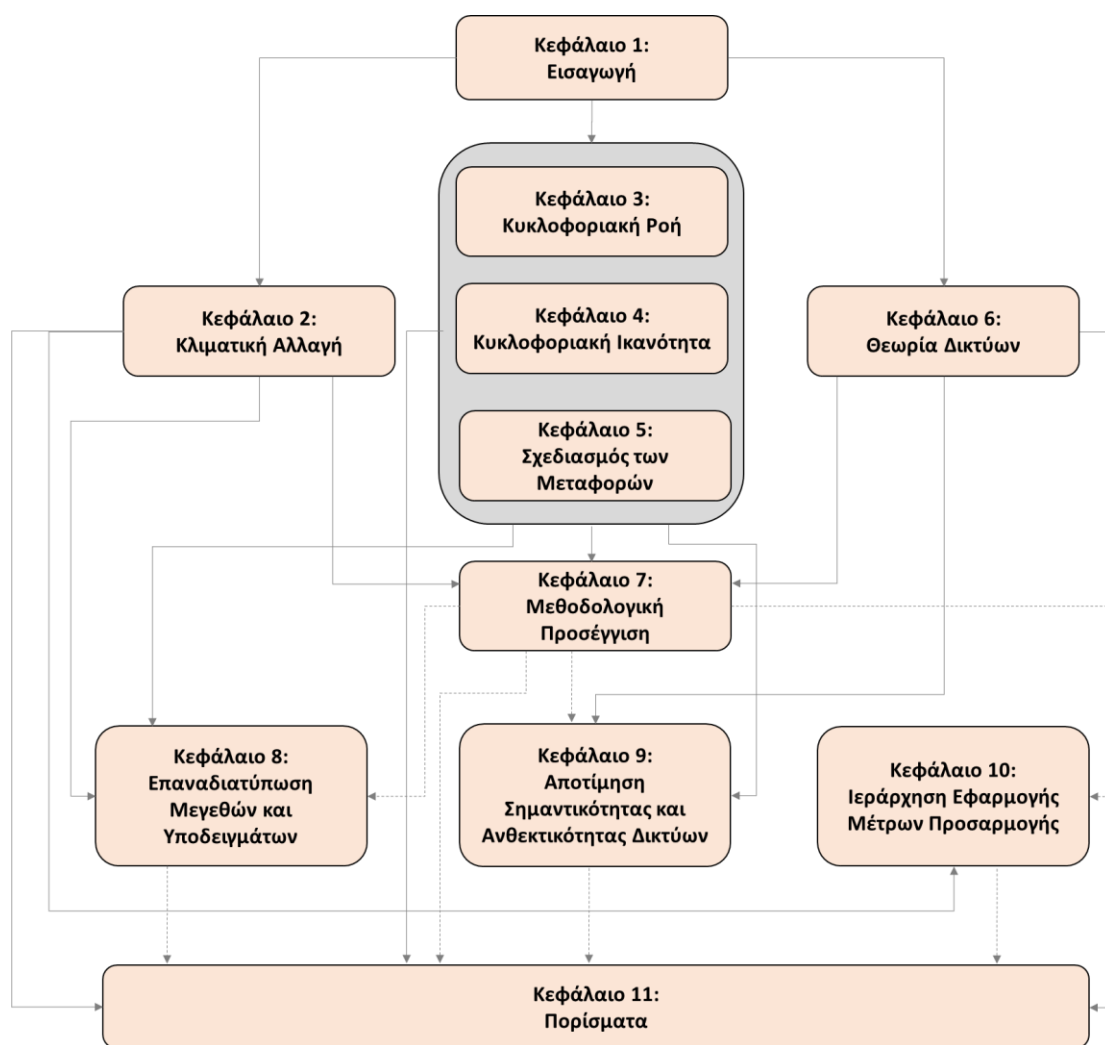
Στο **Κεφάλαιο 10**, με τίτλο «**Εφαρμογή μεθοδολογικής προσέγγισης – ιεράρχηση εφαρμογής μέτρων προσαρμογής**», παρουσιάζεται η εφαρμογή των μεθόδων και εργαλείων για την κατηγοριοποίηση των ευρημάτων της βιβλιογραφικής επισκόπησης, αναφορικά με υπάρχοντα μέτρα προσαρμογής, σε ομάδες ανάλογα με το περιεχόμενό τους,



η αξιολόγηση των επιμέρους χαρακτηριστικών τους (κόστος, χρόνος, συνεισφορά για τη μείωση της τρωτότητας), και η σύνταξη διαγραμμάτων ροής εφαρμογής τους ανά μεταφορικό μέσο.

Στο **Κεφάλαιο 11**, με τίτλο «**Πορίσματα**», παρουσιάζονται η σύνοψη των κυριότερων συμπερασμάτων της διδακτορικής διατριβής, η βασική συνεισφορά της στα επιστημονικά πεδία που εξετάστηκαν, οι περαιτέρω ανάγκες για έρευνα, καθώς και οι προοπτικές που προκύπτουν βάσει των αποτελεσμάτων της διατριβής.

Στην Εικόνα 2 απεικονίζεται σχηματικά η δομή της διδακτορικής διατριβής και οι σχέσεις μεταξύ των επιμέρους κεφαλαίων.



Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση της δομής της διδακτορικής διατριβής

Όπως φαίνεται:

- Τα ευρήματα της βιβλιογραφικής επισκόπησης αναφορικά με την κλιματική αλλαγή (**Κεφάλαιο 2**) χρησιμοποιούνται:

- για την ανάπτυξη της μεθοδολογικής προσέγγισης (Κεφάλαιο 7)
  - για την εφαρμογή του προσαρμοσμένου υποδείγματος κατανομής στα μέσα, στα Ευρωπαϊκά δίκτυα επιβατικών μεταφορών (Κεφάλαιο 8)
  - για τη σύνταξη διαγραμμάτων ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής ανά μεταφορικό μέσο (Κεφάλαιο 10)
- Τα ευρήματα της βιβλιογραφικής επισκόπησης αναφορικά με την κυκλοφοριακή ροή και ικανότητα, και τον σχεδιασμό των Μεταφορών (**Κεφάλαια 3, 4 και 5**) χρησιμοποιούνται:
    - για την ανάπτυξη της μεθοδολογικής προσέγγισης (Κεφάλαιο 7)
    - για την αξιολόγησή τους ως προς την έννοια του καιρού στην αναλυτική έκφρασή τους, στην προτεραιοποίηση πιθανών αλλαγών τους, και για την επαναδιατύπωση των αναλυτικών εκφράσεών τους (Κεφάλαιο 8)
    - για την εφαρμογή των σχετικών υποδειγμάτων σε θεωρητικά και πραγματικά δίκτυα Μεταφορών (καταμερισμός των μετακινήσεων) (Κεφάλαιο 8 και 9)
    - για την εισαγωγή κυκλοφοριακών όρων σε εργαλεία και μεθόδους από άλλες επιστημονικές περιοχές (Κεφάλαιο 9)
  - Τα ευρήματα της βιβλιογραφικής επισκόπησης αναφορικά με τις μεθόδους αξιολόγησης και ανάλυσης δικτύων (**Κεφάλαιο 6**) χρησιμοποιούνται:
    - για την ανάπτυξη της μεθοδολογικής προσέγγισης (Κεφάλαιο 7)
    - για την αξιολόγηση χρησιμότητας και δυνατότητας εφαρμογής εργαλείων άλλων επιστημονικών περιοχών στα δίκτυα Μεταφορών (Κεφάλαιο 9)
    - για την ανάπτυξη μέτρων αποτίμησης της ανθεκτικότητας και της τρωτότητας των δικτύων Μεταφορών και επιμέρους στοιχείων τους (Κεφάλαιο 9)
    - για τη σύνταξη διαγραμμάτων ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής ανά μεταφορικό μέσο (Κεφάλαιο 10)

Αξίζει να σημειωθεί πως κάθε επιμέρους κεφάλαιο επικεντρώνεται σε ορισμένα θεμελιώδη επιστημονικά άρθρα και κείμενα, τα οποία κρίθηκαν σημαντικά για τα υπό μελέτη αντικείμενα του εκάστοτε κεφαλαίου. Τα άρθρα και κείμενα αυτά ορίζουν τις **αναφορές** του κάθε κεφαλαίου και συγκροτούν τον βασικό άξονα, γύρω από τον οποίο οργανώνεται και παρουσιάζεται η σχετική ανάλυση των αντικειμένων. Επιπλέον, αναλύονται επιστημονικά άρθρα και κείμενα, τα οποία παρουσιάζουν σημαντικό βαθμό συνάφειας με τις αναφορές

και έχουν δημοσιευθεί είτε από τους ίδιους συγγραφείς είτε από άλλους. Τα κείμενα αυτά ορίζουν την **γενική βιβλιογραφία** που αξιοποιήθηκε στο πλαίσιο της διδακτορικής έρευνας.

## **2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ**

### **2.1. Εισαγωγή**

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται βιβλιογραφική επισκόπηση της έννοιας της κλιματικής αλλαγής και των αιτιών πρόκλησής της, των συνεπαγόμενων ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών και των επιπτώσεών τους στα συστήματα Μεταφορών, καθώς και των τρόπων αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής μέσω της προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών για τη μείωση των αρνητικών επιδράσεων που αυτή έχει. Στόχος της ενότητας αυτής είναι η αποσαφήνιση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής και η ανάδειξη της σημασίας του για τον τομέα των Μεταφορών.

### **2.2. Ορισμός**

Η κλιματική αλλαγή (climate change) μεταφράζεται σε αλλαγή της στατιστικής κατανομής των καιρικών συνθηκών, όταν η αλλαγή αυτή διαρκεί για εκτεταμένο χρονικό διάστημα (συνήθως πάνω από 30 χρόνια) σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Μπορεί να αναφέρεται ως μεταβολή στις μέσες καιρικές συνθήκες (π.χ. αύξηση της θερμοκρασίας) ή στη διάρκειά τους για μια περιοχή (π.χ. μικρότερη ή μεγαλύτερη διάρκεια εποχών). Η έννοια του καιρού όμως δεν πρέπει να συγχέεται με αυτή του κλίματος. Η μεν πρώτη χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κατάσταση της ατμόσφαιρας «στιγμιαία» ή ακριβέστερα, κατά μία βραχεία περίοδο (μερικών μηνών), ενώ η δεύτερη χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις ατμοσφαιρικές συνθήκες σε μια εκτεταμένη χρονική περίοδο και σε μια περιοχή. Η διαφορά τους δηλαδή έγκειται στην αναγωγή του χρόνου, καθώς το κλίμα είναι ο μέσος όρος των καιρικών συνθηκών στο χρόνο για ένα χώρο. Έτσι, ο καιρός μπορεί να αλλάζει από λεπτό σε λεπτό, από ώρα σε ώρα, από μέρα σε μέρα και από εποχή σε εποχή, ενώ το κλίμα όχι. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει επιγραμματικά τις διαφορές του κλίματος και του καιρού.

**Πίνακας 1: Διαφορές κλίματος και καιρού (Πηγή: (United Nations, 2011)**

	<b>Κλίμα</b>	<b>Καιρός</b>
<b>Ορισμός</b>	Περιγράφει τις μέσες καιρικές συνθήκες που επικρατούν ή αναμένονται σε μια συγκεκριμένη περιοχή και για μια εκτεταμένη χρονική περίοδο (>30 ετών). Το κλίμα μιας συγκεκριμένης περιοχής έχει τις εξής συνιστώσες: ατμόσφαιρα, υδρόσφαιρα, κρυσόσφαιρα, επιφάνεια της γης (λιθόσφαιρα) και βιόσφαιρα.	Περιγράφει τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν ή αναμένονται σε μια συγκεκριμένη περιοχή και χρονική περίοδο με τις βραχυπρόθεσμες (λεπτά έως εβδομάδες) παραλλαγές τους.
<b>Έκφραση</b>	Οι εκφάνσεις του κλίματος περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων τη μέση βροχόπτωση, τη μέση θερμοκρασία, την υγρασία, την ξηρασία, τη μέση ηλιοφάνεια, τη μέση ταχύτητα του ανέμου καθώς και το είδος και την προβλεπόμενη συχνότητα εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων (τυφώνας, παγετός, χαλάζι, πλημμύρες, καταιγίδες, κ.α.) σε ένα μεγάλο χρονικό διάστημα.	Οι εκφάνσεις του καιρού περιλαμβάνουν τον ήλιο, τη βροχή, τη νεφοκάλυψη, τους ανέμους, το χαλάζι, το χιόνι, το χιονόνερο, την παγωμένη βροχή, τις πλημμύρες, τις χιονοθύελλες, τις καταιγίδες, τις βροχές που προκαλούνται από ένα ψυχρό ή ένα θερμό μέτωπο, την υπερβολική θερμότητα, τα κύματα καύσωνα κ.α.
<b>Προβλέψη</b>	Με χρήση συγκεντρωτικών μεγεθών που αφορούν σε στατιστικά δεδομένα καιρού για περιόδους τουλάχιστον 30 ετών και χρήση παγκόσμιων κλιματικών μοντέλων. Η ταξινόμηση της Γης σε κλιματικές ζώνες γίνεται κατά κύριο λόγο βάσει των ετήσιων κύκλων θερμοκρασίας και βροχόπτωσης.	Με συλλογή μετεωρολογικών δεδομένων που περιγράφουν την υπάρχουσα κατάσταση της ατμόσφαιρας, όπως η θερμοκρασία του αέρα, πίεση, υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, κ.α. και χρήση μαθηματικών υποδειγμάτων για να καθοριστεί το πώς αναμένεται να αλλάξει η ατμόσφαιρα στο εγγύς μέλλον. Η χαοτική φύση της ατμόσφαιρας συνεπάγεται ότι ακριβείς και άρτιες προβλέψεις είναι σχετικά αδύνατες και ότι η ακρίβειά τους μικραίνει όσο μεγαλώνει το χρονικό βεληνεκές της πρόβλεψης.
<b>Σχετική Επιστήμη</b>	Κλιματολογία	Μετεωρολογία

Επιστημονικά, για την αλλαγή του κλίματος χρησιμοποιούνται ευρέως δύο ορισμοί: αυτός της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on

Climate Change -IPCC)<sup>4</sup>, και αυτός των Ηνωμένων Εθνών (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC). Σύμφωνα με το IPCC, η κλιματική αλλαγή ορίζεται ως το σύνολο εκείνων των αλλαγών στην κατάσταση του κλίματος, που μπορούν να ταυτοποιηθούν (π.χ. μέσω στατιστικών αναλύσεων) από τις αλλαγές στις μέσες τιμές ή στη μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του, και που παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα, συνήθως δεκαετίες ή περισσότερο (IPCC, 1995). Η κλιματική αλλαγή μπορεί να οφείλεται σε εσωτερικές φυσικές διαδικασίες, εξωτερικές επιδράσεις, ή σε ανθρωπογενείς αλλαγές στη σύνθεση της ατμόσφαιρας ή στις χρήσεις γης. Σύμφωνα με τα Ηνωμένα Έθνη, η κλιματική αλλαγή ορίζεται ως μια αλλαγή του κλίματος που αποδίδεται άμεσα ή έμμεσα σε ανθρώπινη δραστηριότητα, που μεταβάλλει τη σύνθεση της ατμόσφαιρας του πλανήτη σε συνδυασμό με τις φυσικές κλιματικές διακυμάνσεις που παρατηρούνται σε μεγάλες χρονικές περιόδους (UN, 1992).

Όπως φαίνεται, ο ορισμός των Ηνωμένων Εθνών αποκλείει το γεγονός ότι η κλιματική αλλαγή οφείλεται μόνο σε φυσικά αίτια. Η ειδοποιός αυτή διαφορά είχε προκαλέσει στις αρχές του 1970 μια σειρά από συζητήσεις αναφορικά με το αν πρέπει η επιστημονική κοινότητα να ασχοληθεί με την κλιματική αλλαγή και τους τρόπους αντιμετώπισης των επιπτώσεών της και κυρίως τον μετριασμό των αιτίων που την προκαλούν, καθώς υπήρχαν υπέρμαχοι της άποψης ότι η αλλαγή του κλίματος είναι μια καθόλα φυσική διαδικασία (εφόσον δεν υπάρχει πλέον π.χ. η εποχή των παγετώνων) (MIT, 1971). Η πρώτη αναφορά στη σύνδεση κλιματικής αλλαγής και υπερθέρμανσης του πλανήτη λόγω ανθρώπινης δραστηριότητας (global warming) έγινε το 1975 από τον Broecker (Broecker, 1975). Όμως μέχρι το 1979, που δημοσιεύτηκε η πρώτη μελέτη για την επίδραση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (NAS, 1979) (γνωστή και ως μελέτη Charney), οι απόψεις δίσταντο ως προς την πιθανή κατεύθυνση αλλαγής του κλίματος. Από τη μία πλευρά, οι βιομηχανικές εκπομπές μικροσκοπικών αερομεταφερόμενων σωματιδίων (αερολύματα – aerosols) ενδέχεται να προκαλέσουν ψύξη της ατμόσφαιρας, ενώ από την άλλη, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου θα μπορούσαν να προκαλέσουν αύξηση της θερμοκρασίας της. Έκτοτε όμως, έγινε παγκοσμίως αντιληπτό ότι *«εφόσον το διοξείδιο του άνθρακα συνεχίζει να αυξάνεται*

---

<sup>4</sup> **IPCC**: Οργανισμός που συστήθηκε το 1988 από τη Παγκόσμια Μετεωρολογική Οργάνωση (World Meteorological Organization – WMO) και το περιβαλλοντικό πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών (United Nations Environment Program) και έχει έκτοτε αναδειχθεί στο σημαντικότερο φορέα παγκοσμίως που μελετά τόσο τις αιτίες πρόκλησης της κλιματικής αλλαγής όσο και τους διάφορους τρόπους αντιμετώπισης της, ενώ παράλληλα εξετάζει μελλοντικά κλιματικά σενάρια, βάσει των οποίων αναπτύσσονται εν πολλοίς οι διεθνείς πολιτικές για το κλίμα.

*σε ποσότητα, δεν υπάρχει αμφιβολία ότι θα προκαλέσει αλλαγές στο κλίμα, και οι αλλαγές αυτές λόγω υπερθέρμανσης του πλανήτη, δεν θα είναι αμελητέες» (NAS, 1979).*

Μέχρι και σήμερα, η επιστημονική κοινότητα αναφέρεται σε *υπερθέρμανση του πλανήτη* για τις περιπτώσεις αύξησης της θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης και σε *κλιματική αλλαγή* για όλες τις υπόλοιπες επιδράσεις των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, αποδεχόμενη πλήρως την εμπλοκή της ανθρώπινης δραστηριότητας. Ενδεικτικά, το 2010, το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας των Η.Π.Α., έχοντας εξετάσει διεξοδικά διάφορες επιστημονικές θεωρίες για την αλλαγή του κλίματος σε παγκόσμιο επίπεδο, που υποστηρίζονται από ανεξάρτητες μεταξύ τους παρατηρήσεις και αναλύσεις, αποφάνθηκε, σχετικά με τα συγκλίνοντα πορίσματα των σχετικών θεωριών αναφορικά με την ανθρώπινη εμπλοκή στην αλλαγή του κλίματος, ότι η πιθανότητα, σε μεταγενέστερο στάδιο, να είναι λανθασμένα, είναι πολύ μικρή (NRC, 2010).

### **2.3. Αίτια πρόκλησης της κλιματικής αλλαγής**

Ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια που δέχεται η Γη από τον Ήλιο και ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια αυτή αποδίδεται από τη Γη στο διάστημα καθορίζουν την θερμοκρασία ισορροπίας και το κλίμα της Γης. Αυτή η ενέργεια διανέμεται σε όλη την επιφάνεια της Γης, κυρίως μέσω των ανέμων, των ωκεάνιων ρευμάτων καθώς και άλλων μηχανισμών, διαμορφώνοντας έτσι το διαφορετικό κλίμα μεταξύ διαφόρων περιοχών. Οι παράγοντες που διαμορφώνουν το κλίμα ονομάζονται κλιματικές επιδράσεις (climate forcings). Οι επιδράσεις αυτές περιλαμβάνουν διαδικασίες όπως, οι διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας, οι μεταβολές στην τροχιά της Γης, στην λευκαύγεια<sup>5</sup> και στην ανακλαστικότητα των ηπείρων και των ωκεανών, η ορογένεση<sup>6</sup>, η κίνηση των ηπείρων και οι αλλαγές στη συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου (EPA, 2014). Οι κλιματικές επιδράσεις μπορεί να είναι εσωτερικές ή εξωτερικές. Οι εσωτερικές επιδράσεις αφορούν στους φυσικούς μηχανισμούς και στις διαδικασίες που επηρεάζουν το κλίμα (π.χ. η κυκλοφορία της θερμότητας) ενώ οι εξωτερικές επιδράσεις μπορεί να είναι είτε φυσικές (π.χ. μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία) είτε

---

<sup>5</sup> Η Λευκαύγεια (από τη λατινική λέξη albedo λευκότητα) είναι το μέτρο αντανάκλαστικότητας μιας επιφάνειας ή ενός σώματος.

<sup>6</sup> Η Ορογένεση (orogeny) περιγράφει τον μηχανισμό δημιουργίας ορέων (βουνών) στις ηπείρους μέσω της δομικής παραμόρφωσης της λιθόσφαιρας λόγω της εμπλοκής των τεκτονικών πλακών.

ανθρωπογενείς (π.χ. αύξηση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου). Σε κάθε περίπτωση, η αντίδραση του κλιματικού συστήματος μπορεί να είναι γρήγορη (π.χ. ψύξη λόγω αερομεταφερόμενης ηφαιστειακής τέφρας που αντανακλά το φως του ήλιου), αργή (π.χ. θερμική διαστολή του νερού των ωκεανών), ή ένας συνδυασμός (π.χ. απώλεια αντανακλαστικότητας του Αρκτικού Ωκεανού). Πάντως, η συνολική αντίδραση στους μηχανισμούς επίδρασης δεν είναι ορατή παρά σε διάστημα αιώνων.

Στις κλιματικές αυτές επιδράσεις υπάρχει μια σειρά παραγόντων ανάδρασης (climate change feedbacks) που καθορίζουν το βαθμό αντίδρασης του κλιματικού συστήματος και που μπορούν να ενισχύσουν ή να μειώσουν την αρχική επίδραση (Jackson & Jenkins, 2012). Στους παράγοντες αυτούς συγκαταλέγονται οι υδρατμοί, η αντανάκλαση των πάγων, τα σύννεφα και οι αλλαγές στον κύκλο του άνθρακα της Γης (π.χ. απελευθέρωση του διοξειδίου του άνθρακα από το έδαφος) (Riebek, 2011).

Κατά μία απλουστευμένη διατύπωση, για να συμβεί η αλλαγή του κλίματος σε παγκόσμια κλίμακα πρέπει να συμβεί ένα από τα εξής φαινόμενα (NCAR, 2014):

- Αλλαγή στην ποσότητα της θερμότητας που εισέρχεται στο γήινο σύστημα
- Αλλαγή στην ποσότητα της θερμότητας που εξέρχεται από το γήινο σύστημα

Η θερμότητα που εισέρχεται στο σύστημα της Γης προέρχεται προφανώς από τον Ήλιο. Το φως του Ήλιου ταξιδεύει στο χώρο άρα και στην ατμόσφαιρα, θερμαίνοντας την επιφάνεια της Γης (συμπεριλαμβανομένων και των ωκεανών). Ωστόσο, η ποσότητα του ηλιακού φωτός που εισέρχεται στο σύστημα δεν είναι πάντα η ίδια. Οι αλλαγές στην τροχιά της Γης και στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (κλιματικές επιδράσεις) επηρεάζουν την ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στη Γη. Η θερμότητα εξέρχεται από το γήινο σύστημα, καθώς η επιφάνεια της Γης, έχοντας θερμανθεί με ηλιακή ενέργεια, ακτινοβολεί θερμότητα στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο, ορισμένα αέρια στην ατμόσφαιρα (αέρια του θερμοκηπίου – Greenhouse Gases) επιτρέπουν στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας να απορροφήσουν τη θερμότητα που εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης, παγιδεύοντάς την μέσα στο σύστημά της. Ενώ όμως τα αέρια του θερμοκηπίου, όπως οι υδρατμοί, το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο και το οξείδιο του αζώτου, είναι απαραίτητο μέρος της ατμόσφαιράς, καθώς προφυλάσσουν τη Γη από τη μετατροπή της σε μια παγωμένη σφαίρα με θερμοκρασία επιφάνειας  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , τον τελευταίο αιώνα η ποσότητα των αερίων του θερμοκηπίου εντός της ατμόσφαιρας έχει αυξηθεί ραγδαία, κυρίως λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων.



## 2.4. Έκφανση κλιματικής αλλαγής

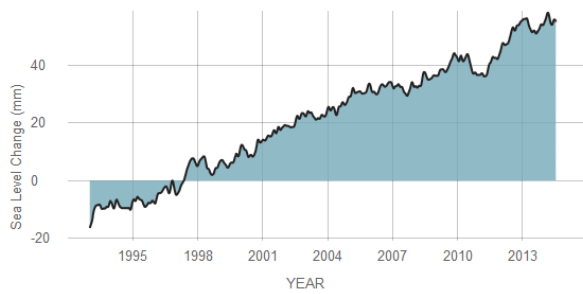
Η έκφανση της κλιματικής αλλαγής γίνεται αντιληπτή από τους ανθρώπους με δύο βασικούς τρόπους. Ο πρώτος αφορά σε αλλαγές που είναι μακροπρόθεσμες, χαρακτηρίζονται από διάρκεια και το αποτέλεσμά τους βιώνεται περισσότερο σαν γεγονός παρά σαν διαδικασία (π.χ. λιώσιμο των πάγων, που συνεπάγεται συνεχή αύξηση της στάθμης της θάλασσας). Ο δεύτερος αφορά σε αλλαγές μικρής διάρκειας (από μερικά λεπτά έως μερικές εβδομάδες) οι οποίες βιώνονται εντονότερα, λόγω των άμεσων επιπτώσεών τους στα ανθρώπινα συστήματα (π.χ. επιπτώσεις πλημμυρών). Αποδείξεις για την κλιματική αλλαγή προέρχονται από ποικιλία πηγών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανασύνθεση παρελθοντικών κλιμάτων. Σχετικά πλήρη παγκόσμια αρχεία για τη θερμοκρασία στην επιφάνεια της Γης χρονολογούνται από τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα. Για προγενέστερες περιόδους, τα περισσότερα στοιχεία ενδείξεων κλιματικής αλλαγής είναι έμμεσα (μέσω αλλαγών οικιστικών και γεωργικών τάσεων, αρχαιολογικών μαρτυριών, ιστορικών εγγράφων κ.λπ.,) π.χ. και οι επιπτώσεις της έχουν συνδεθεί με την κατάρρευση διαφόρων πολιτισμών. (Demenocal, 2001).

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι αλλαγές που αφορούν στους παγετώνες (glaciers) οι οποίοι θεωρούνται ως ένας από τους πιο ευαίσθητους δείκτες αλλαγής του κλίματος. Από το 1970, όταν και έγινε η πρώτη παγκόσμια απογραφή παγετώνων, παρακολουθούνται σταθερά πάνω από 100.000 παγετώνες, και από τα δεδομένα τα οποία έχουν συλλεχθεί, έχει βρεθεί ότι οι παγετώνες συρρικνώνονται σημαντικά (με σημαντικότερες υποχωρήσεις παγετώνων τη δεκαετία του 1940 και από το 1980 μέχρι και σήμερα)<sup>7</sup> (Zemp, et al., 2008). Στην ίδια κατηγορία ανήκει και η μείωση των πάγων της Αρκτικής θάλασσας (arctic sea ice loss) τις τελευταίες δεκαετίες, τόσο σε έκταση όσο και σε πάχος, που αποτελεί περαιτέρω απόδειξη για την ταχεία αλλαγή του κλίματος. Δορυφορικές παρατηρήσεις δείχνουν ότι οι πάγοι στην Αρκτική θάλασσα μειώνονται με επί πλέον ρυθμό 11.5% ανά δεκαετία, σε σχέση με την αντίστοιχη μείωση μεταξύ 1979 και 2000 (NASA, 2014). Αλλαγές στον τύπο, τη κατανομή και κάλυψη της βλάστησης αποδίδονται επίσης εν μέρει στην αλλαγή του κλίματος (αύξηση των βροχοπτώσεων συνεπάγεται γρηγορότερη ανάπτυξη φυτών και συνακόλουθη

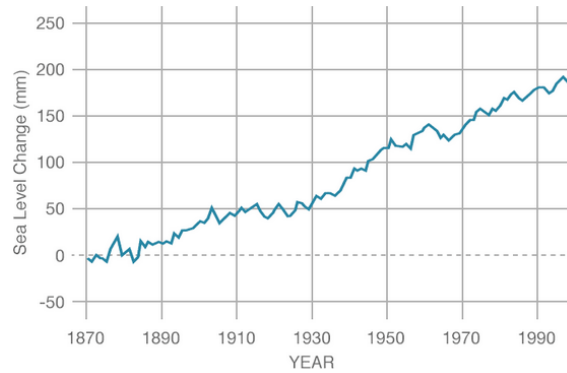
---

<sup>7</sup> Οι παγετώνες όταν λιώνουν αφήνουν πίσω λιθώνας που περιέχουν ποικιλία υλικού [συμπεριλαμβανομένων οργανικής ύλης, χαλαζία, και καλίου] που μπορεί να χρονολογηθεί και να γίνει έτσι καταγραφή των περιόδων κατά τις οποίες ένας παγετώνας προχώρησε και υποχώρησε σε μέγεθος.

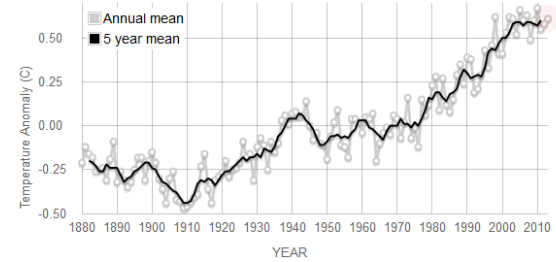
παγίδευση του διοξειδίου του άνθρακα – αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται ταχεία απώλεια φυτών, ερημοποίηση κ.α.) (Sahney, et al., 2010) (Bachelet, et al., 2001). Επίσης, αλλαγές στο είδος της γύρης που βρίσκεται σε διαφορετικά στρώματα ιζημάτων σε λίμνες, βάλτους και ποταμούς είναι ενδεικτικές των αλλαγών στις κοινότητες των φυτών και ένα ακόμα σημάδι αλλαγής του κλίματος (Langdon, et al., 2004) (Birks, 2003). Επιπρόσθετα, η μέση βροχόπτωση ξηράς, που αυξήθηκε κατά περίπου 2% κατά τη διάρκεια του 20<sup>ου</sup> αιώνα (με μέγιστο στις δεκαετίες του 1950 και 1970) είναι ένας από τους ευκολότερα αντιληπτούς δείκτες αλλαγής του κλίματος (Huntington, n.d.), όπως και η αύξηση της στάθμης της θάλασσας, η οποία έχει ανέβει 15 έως 25 μέτρα τα τελευταία 2,5 εκατομμύρια χρόνια (Hansen & Makiko, 2011), 17 εκατοστά τον τελευταίο αιώνα (και συνεχίζει να ανεβαίνει με ρυθμό αύξησης 3,3mm το χρόνο) (NASA, 2014). Τέλος, η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης, κυρίως ως αποτέλεσμα της απελευθέρωσης του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, είναι εν πολλοίς η γενεσιουργός αιτία των παραπάνω, και ταυτόχρονα η χαρακτηριστικότερη απόδειξη της αλλαγής του κλίματος. Η μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας έχει παρατηρηθεί μετά το 1970, με τα 20 θερμότερα έτη στην ιστορία να είναι όλα μετά το 1981 (και τα 10 εξ αυτών στα τελευταία 12 χρόνια μέχρι το 2009) (Menne & Kennedy, 2009). Παρόλο που στη διάρκεια της δεκαετίας 2000-2010 υπήρξε μείωση της εκπεμπόμενης από τον ήλιο ενέργειας, η θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους συνεχίζει να αυξάνεται σταθερά (UNSW-CCRC, 2009) (Εικόνα 5).



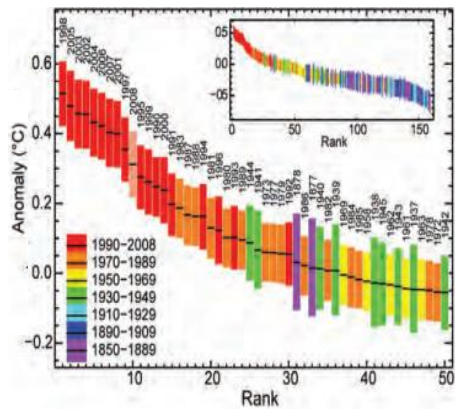
Εικόνα 3: Μεταβολή στη στάθμη της θάλασσας από δορυφορικές παρατηρήσεις (1993-2014)



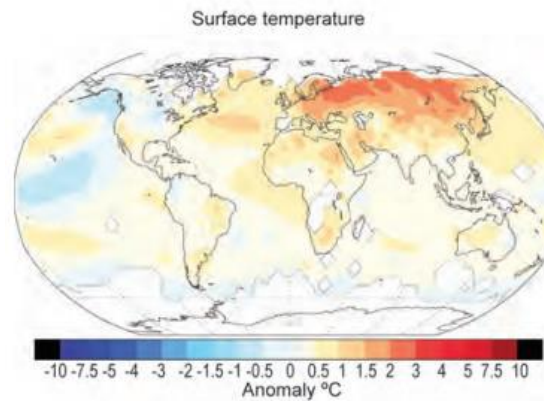
Εικόνα 4: Μεταβολή της στάθμης της θάλασσας από μετρήσεις παράκτιας παλίρροιας (1870-2000)



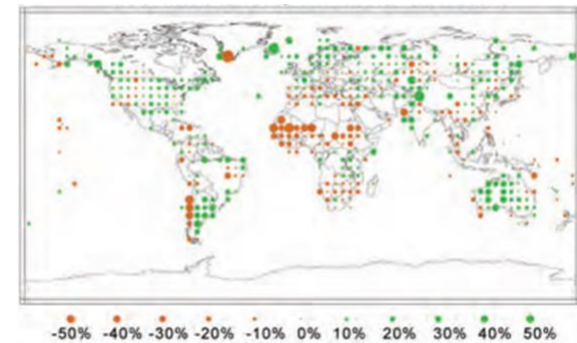
Εικόνα 5: Μεταβολή ετήσιας παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας συγκριτικά με τη μέση θερμοκρασία μεταξύ 1961-1990



Εικόνα 6: Κατάταξη ετήσιων θερμοκρασιών (1850-2008)



Εικόνα 7: Μεταβολή της θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης ανά γεωγραφική περιοχή συγκριτικά με τη μέση θερμοκρασία μεταξύ 1961-1990



Εικόνα 8: Μεταβολή της μέσης βροχόπτωσης ανά γεωγραφική περιοχή συγκριτικά με τη μέση θερμοκρασία μεταξύ 1961-1990

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι φυσικοί κίνδυνοι (natural hazards) και τα αντίστοιχα ακραία καιρικά ή κλιματικά φαινόμενα (climate extreme, extreme weather or climate event)<sup>8</sup>. Για την καλύτερη κατανόηση της ορολογίας που χρησιμοποιείται στον τομέα της κλιματικής αλλαγής, η παρούσα διδακτορική διατριβή υιοθετεί εν πολλοίς τη σημασιολογία που έχει οριστεί από τα Ηνωμένα Έθνη (UNISDR, 2009) για την περιγραφή εννοιών που σχετίζονται με τους κινδύνους (στις περιπτώσεις που δεν ισχύει το τελευταίο αναφέρεται η αντίστοιχη πηγή). Σύμφωνα με τα Ηνωμένα Έθνη ως κίνδυνος ορίζεται η ύπαρξη ενός επικίνδυνου φαινομένου, ουσίας, ανθρώπινης δραστηριότητας ή κατάστασης που μπορεί να προκαλέσει απώλεια ζωής, τραυματισμό ή άλλες επιπτώσεις στην υγεία, υλικές ζημιές, διακοπή λειτουργίας των υπηρεσιών, κοινωνική και οικονομική αναστάτωση ή περιβαλλοντική ζημία. Οι κίνδυνοι που συνδέονται με καταστροφές<sup>9</sup> είναι φυσικής ή τεχνολογικής προέλευσης και προκύπτουν από διαταράξεις της ομαλής λειτουργίας διαφόρων γεωλογικών, μετεωρολογικών, υδρολογικών, ωκεάνιων, βιολογικών και τεχνολογικών στοιχείων (ή συνδυασμό τους). Με τεχνικούς όρους, οι κίνδυνοι περιγράφονται ποσοτικά με την πιθανολογική (σε %) συχνότητα εμφάνισης διαφορετικών εντάσεων (υψηλή, μεσαία, χαμηλή, κ.λπ.) για διάφορους τομείς και περιοχές, όπως προκύπτει από ιστορικά δεδομένα ή επιστημονικές αναλύσεις και προβλέψεις (π.χ. πιθανότητα χ% κινδύνου πολύ υψηλής έντασης). Οι φυσικοί κίνδυνοι είναι υποσύνολο του συνόλου των κινδύνων. Χαρακτηρίζονται από το μέγεθος ή την ένταση τους, την ταχύτητα της εκδήλωσης, τη διάρκεια και το μέγεθος της έκτασής τους. Για παράδειγμα, οι σεισμοί έχουν μικρή διάρκεια και επηρεάζουν συνήθως

---

<sup>8</sup> Ισχύουν οι ίδιες διαφοροποιήσεις όπως και μεταξύ καιρού και κλίματος (ενότητα 2.2): ένα ακραίο καιρικό φαινόμενο συνδέεται με αλλαγές των καιρικών συνθηκών σε μια περίοδο μικρότερη της μιας ημέρας μέχρι και μερικών εβδομάδων ενώ ένα ακραίο κλιματικό φαινόμενο αφορά σε μεγαλύτερες χρονικές περιόδους και μπορεί να είναι αποτέλεσμα συσσώρευσης διαφόρων (ακραίων ή μη) καιρικών φαινομένων (π.χ. η συσσώρευση ημερών (αυξημένο χρονικό διάστημα) με σχετικά μικρότερη βροχόπτωση από την κανονική μπορεί να οδηγήσει σε ξηρασία).

<sup>9</sup> Ως καταστροφή (disaster) ορίζεται η διατάραξη της λειτουργίας ενός συστήματος (και άρα μια κοινωνίας), με εκτεταμένες ανθρώπινες, υλικές, οικονομικές ή περιβαλλοντικές απώλειες και επιπτώσεις, που υπερβαίνουν την ικανότητα του πληγέντος συστήματος να τις αντιμετωπίσει με ιδίους πόρους. Οι καταστροφές περιγράφονται επίσης ως αποτέλεσμα του εξής συνδυασμού: έκθεση σε κίνδυνο· παρούσες συνθήκες τρωτότητας και ευπάθειας· ανεπαρκής ικανότητα ή έλλειψη μέτρων για τη μείωση ή αντιμετώπιση των πιθανών αρνητικών συνεπειών και επιπτώσεων. Οι επιπτώσεις μιας καταστροφής μπορεί να περιλαμβάνουν απώλεια της ζωής, τραυματισμό, ασθένεια και άλλες αρνητικές επιδράσεις στην ανθρώπινη σωματική, ψυχική και κοινωνική ευημερία, μαζί με υλικές ζημιές, καταστροφή των περιουσιακών στοιχείων, απώλεια υπηρεσιών, κοινωνική και οικονομική διατάραξη και υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Κατά αντιστοιχία, σύμφωνα με το πρότυπο ISO, ως κίνδυνος (risk) ορίζεται η επίδραση της αβεβαιότητας σε προκαθορισμένους στόχους (ISO/IEC, 2009). Ως επίδραση νοείται η οποιαδήποτε (θετική ή αρνητική) απόκλιση από το αναμενόμενο. Ο κίνδυνος εκφράζεται ως ο συνδυασμός της πιθανότητας εμφάνισης ενός γεγονότος και των συνεπειών του. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η λέξη risk-κίνδυνος έχει δύο διακριτές έννοιες: ενώ από τη μία είθισται η έμφαση να τοποθετείται στην έννοια της πιθανότητας (και υπό αυτή την έννοια στην τύχη όπως π.χ. ο κίνδυνος ενός ατυχήματος), σε τεχνικούς όρους, η έμφαση τοποθετείται στις συνέπειες (υπό την έννοια των πιθανών απωλειών σε οποιοδήποτε επίπεδο) (UNISDR, 2009).

μια σχετικά μικρή περιοχή, ενώ οι ξηρασίες είναι αργές στην εξέλιξη και υποχώρησή τους και συχνά επηρεάζουν μεγάλες περιοχές. Οι φυσικοί κίνδυνοι μπορεί να είναι υδρομετεωρολογικής (hydrometeorological) και γεωφυσικής (geophysical) φύσης και ως τέτοιοι περιλαμβάνουν την πιθανή ύπαρξη τροπικών κυκλώνων (γνωστοί και ως θύελλες ή τυφώνες), καταιγίδων, χαλαζοπτώσεων, κατολισθήσεων, ανεμοστρόβιλων, χιονοθύελλας, έντονης χιονόπτωσης, χιονοστιβάδων, πλημμυρών, ξηρασίας, καύσωνα, ψύχους και σεισμών. Οι υδρομετεωρολογικές και γεωφυσικές συνθήκες μπορούν επίσης να είναι παράγοντες δημιουργίας άλλων κινδύνων, όπως οι δασικές πυρκαγιές. Στις περιπτώσεις κινδύνων, των οποίων η συχνότητα και σφοδρότητα εμφάνισης εκτείνεται πέραν των προβλεπόμενων πιθανοτήτων και ορίων λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας (υπερεκμετάλλευση και υποβάθμιση εδαφών και άλλων περιβαλλοντικών πόρων), τότε χρησιμοποιείται ο όρος κοινωνικοφυσικός κίνδυνος (socio-natural hazard). Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι κίνδυνοι συνδέονται μεταξύ τους, όπως π.χ. σε μια πλημμύρα που προκλήθηκε από έναν τυφώνα ή το τσουνάμι που δημιουργήθηκε από έναν σεισμό. Στα ακραία καιρικά ή κλιματικά φαινόμενα εντάσσονται οι εμφανίσεις μιας καιρικής ή κλιματικής μεταβλητής με τιμές που βρίσκονται πάνω (ή κάτω) από μια οριακή τιμή κοντά στο άνω (ή κάτω) άκρο του εύρους των παρατηρούμενων τιμών της μεταβλητής σε μια περίοδο. Η περίοδος αναφοράς που χρησιμοποιείται είναι κατά κανόνα αυτή μεταξύ 1961 και 1990. Είναι σημαντικό να σημειωθεί εδώ ότι η θεώρηση της ακρότητας ενός φαινομένου αφενός δεν συνεπάγεται νομοτελειακά ακραίες επιπτώσεις (καθώς η ακρότητα αφορά στη συχνότητα εμφάνισης και έντασής του) και αφετέρου μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή (π.χ. μια ακραία θερμή ημέρα στην τροπική ζώνη θα έχει διαφορετική θερμοκρασία από μια αντίστοιχη στην πολική). Μια συνολική εικόνα της έκφανσης της κλιματικής αλλαγής φαίνεται παρακάτω (Πίνακας 2) όπου παρουσιάζονται κάποια καιρικά και κλιματικά φαινόμενα, καθώς και οι παρατηρούμενες και προβλεπόμενες αλλαγές τους.

Πίνακας 2: Επισκόπηση καιρικών και κλιματικών φαινομένων και περιήληψη παρατηρούμενων και προβλεπόμενων αλλαγών σε παγκόσμια κλίμακα, Πηγή: (IPCC, 2012)<sup>10</sup>

		Παρατηρούμενες αλλαγές (από το 1950 έως σήμερα)	Προβλεπόμενες αλλαγές (από σήμερα έως το 2100)
Καιρικά και κλιματικά φαινόμενα	Θερμοκρασία	Σημαντική μείωση του αριθμού των ασυνήθιστα ψυχρών ημερών και νυχτών σε παγκόσμια κλίμακα και αντίστοιχη αύξηση των θερμών. Μεσαίο επίπεδο εμπιστοσύνης για αύξηση της διάρκειας και του αριθμού των κυμάτων ψύχους και καύσωνα λόγω περιορισμένων δεδομένων παρατήρησης	Σχεδόν βέβαιη μείωση της συχνότητας και της έντασης των ασυνήθιστα ψυχρών ημερών και νυχτών σε παγκόσμια κλίμακα και αντίστοιχη αύξηση των θερμών. Πολύ πιθανή αύξηση στη διάρκεια, συχνότητα και ένταση κυμάτων καύσωνα και ψύχους στις ηπειρωτικές περιοχές
	Βροχόπτωση	Σημαντική αύξηση στον αριθμό φαινομένων ισχυρών βροχοπτώσεων σε περισσότερες περιοχές στον κόσμο	Πιθανή αύξηση της συχνότητας των φαινομένων ισχυρών βροχοπτώσεων ή αύξηση του ποσοστού του ύψους βροχής που προέρχεται από τέτοια φαινόμενα σε πολλές περιοχές του πλανήτη, και ιδιαίτερα σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη και τροπικές περιοχές
	Άνεμοι	Χαμηλό επίπεδο εμπιστοσύνης για τις παρατηρούμενες τάσεις λόγω ελλιπών δεδομένων	Χαμηλό επίπεδο εμπιστοσύνης για προβλέψεις σφοδρών (ακραίων) ανέμων
	Κυκλώνες	Χαμηλό επίπεδο εμπιστοσύνης ότι οποιαδήποτε μακροχρόνια (>40 χρόνια) αύξηση στον αριθμό των κυκλώνων είναι ορθή (λόγω μεγάλων αλλαγών στους τρόπους παρατήρησης και συλλογής δεδομένων από το παρελθόν μέχρι σήμερα)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Πιθανή μείωση ή καμία αλλαγή στην συχνότητα εμφάνισης κυκλώνων</li> <li>Πιθανή αύξηση της μέσης μέγιστης ταχύτητας του ανέμου, αλλά ίσως όχι σε όλες τις λεκάνες</li> <li>Πιθανή αύξηση των ισχυρών βροχοπτώσεων που σχετίζονται με κυκλώνες</li> </ul>
	Ξηρασίες	Μεσαίο επίπεδο εμπιστοσύνης ότι ορισμένες περιοχές του πλανήτη έχουν βιώσει εντονότερες και μεγαλύτερες περιόδους ξηρασίας (ιδιαίτερα η νότια Ευρώπη και Δυτική Αφρική)	Μεσαίο επίπεδο εμπιστοσύνης για την προβλεπόμενη αύξηση της διάρκειας και έντασης της ξηρασίας σε ορισμένες περιοχές του πλανήτη. Συνολικά χαμηλό επίπεδο εμπιστοσύνης λόγω μη συμφωνίας των αξιολογητών αναφορικά με τις προβλέψεις τους
	Πλημμύρες	<ul style="list-style-type: none"> <li>Λίγες έως μέτριες ενδείξεις για αξιολόγηση των παρατηρούμενων αλλαγών στην ένταση και συχνότητα των πλημμυρών που αποδίδονται σε κλιματικούς λόγους σε περιφερειακό επίπεδο</li> <li>Μικρή συμφωνία για αυτές τις ενδείξεις από τους ειδικούς και χαμηλό επίπεδο εμπιστοσύνης σε παγκόσμια κλίμακα αναφορικά με τις αλλαγές αυτές</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Χαμηλό επίπεδο εμπιστοσύνης στις παγκόσμιες προβλέψεις για αλλαγές στη συχνότητα και ένταση των πλημμυρών λόγω ανεπαρκών στοιχείων</li> <li>Μεσαίο επίπεδο εμπιστοσύνης ότι οι προβλεπόμενες αυξήσεις στα φαινόμενα ισχυρών βροχοπτώσεων θα συμβάλλουν στη δημιουργία πλημμυρών σε ορισμένες περιοχές</li> </ul>

<sup>10</sup> Για την αξιολόγηση των παρατηρούμενων και προβλεπόμενων αλλαγών και λαμβάνοντας υπόψη την εγγενή αβεβαιότητα που αφορά στις εκτιμήσεις αυτές, το IPCC αξιολογεί το επίπεδο εμπιστοσύνης (πόσο σίγουροι είναι οι αξιολογητές) και πιθανότητας (πόσο πιθανό θεωρούν ότι μπορεί να συμβεί) κάθε αξιολόγησης. Έτσι, πριν από κάθε αλλαγή περιγράφεται το επίπεδο εμπιστοσύνης ως υψηλό, μεσαίο ή χαμηλό. Για κάθε αλλαγή με υψηλό επίπεδο εμπιστοσύνης, αξιολογείται και η πιθανότητα εμφάνισης της ως σχεδόν βέβαια (99-100%), πολύ πιθανή (90-100%), αρκετά πιθανή (66-100%), πιθανή (50-100%), λιγότερο πιθανή (33-66%), απίθανη (0-33%), πολύ απίθανη (0-10%) και εξαιρετικά απίθανη (0-1%). Για τις αλλαγές με μεσαίο ή χαμηλό επίπεδο εμπιστοσύνης δεν αξιολογείται η πιθανότητα εμφάνισης τους (Mastrandrea, et al., 2010).

## **2.5. Κλιματικά υποδείγματα και κλιματικά σενάρια**

Σε μια προσπάθεια καλύτερης κατανόησης των παραμέτρων που επηρεάζουν το κλίμα, αλλά και της εκτίμησης του πώς αυτό θα αλλάξει στα επόμενα χρόνια, και σε πλήρη αντιστοιχία με αντίστοιχες προσπάθειες σε λοιπούς επιστημονικούς χώρους, μεταξύ των οποίων και αυτός των Μεταφορών, αναπτύσσονται τα τελευταία χρόνια σύνθετοι μαθηματικοί τρόποι περιγραφής των σχέσεων των παραμέτρων αυτών, κι έπειτα από ανάλυσή τους, η δημιουργία σεναρίων (ανά γεωγραφική περιοχή) για το πώς η έκφανση του κλίματος (όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.4) προβλέπεται να αλλάξει. Οι δύο αυτές θεματικές ενότητες, αφενός των κλιματικών προτύπων και αφετέρου των κλιματικών σεναρίων, παρουσιάζονται επιγραμματικά παρακάτω, καθώς αποτελούν πεδίο εφαρμογής των μεθόδων αποτίμησης κλιματικών επιπτώσεων στις Μεταφορές που αναπτύσσει και χρησιμοποιεί η διατριβή.

### **2.5.1. Κλιματικά υποδείγματα**

Τα κλιματικά υποδείγματα αποτελούν μια προσπάθεια προσομοίωσης και πρόβλεψης των ποικίλων διαδικασιών που συνθέτουν το κλίμα. Ο αντικειμενικός σκοπός ανάπτυξής τους είναι να κατανοηθούν οι διεργασίες αυτές σε βάθος, ώστε να προβλεφθούν τα αποτελέσματα των αλλαγών και των αλληλεπιδράσεων με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Η προσομοίωση συμπληρώνεται περιγράφοντας το κλιματικό σύστημα με όρους βασικών φυσικών, χημικών και βιολογικών αρχών. Έτσι, ένα υπόδειγμα μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από ένα σύνολο εξισώσεων που εκφράζουν τους νόμους αυτούς.

Οι βασικοί τύποι κλιματικών υποδειγμάτων παρουσιάζονται παρακάτω με επιγραμματική περιγραφή του είδους και της χρήσης τους στις επόμενες ενότητες (DMOD, 2005):

#### **2.5.1.1. Πρότυπα Ενεργειακού Ισοζυγίου**

Πρόκειται για μηδενικής διάστασης ή μονοδιάστατα πρότυπα που προβλέπουν τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας με το γεωγραφικό πλάτος. Απλοποιημένες σχέσεις χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν τους όρους που συνεισφέρουν στο ενεργειακό ισοζύγιο κάθε γεωγραφικής ζώνης.

#### **2.5.1.2. Μονοδιάστατα πρότυπα ακτινοβολίας - ανοδικής μεταφοράς**

Τα πρότυπα αυτά υπολογίζουν την εικόνα της κατακόρυφης θερμοκρασίας, συνήθως λαμβάνοντας το συνολικό μέσο όρο, με σαφή προτυποποίηση των ακτινοβολουσών διεργασιών τόσο από την πλευρά του ήλιου όσο και της γης, και με προσαρμογή στην ανοδική μεταφορά, ώστε η θερμοβαθμίδα που υπολογίζεται κάθε φορά να μη ξεπερνά μια προκαθορισμένη κρίσιμη θερμοβαθμίδα.

#### **2.5.1.3. Δισδιάστατα στατιστικά - δυναμικά πρότυπα**

Τα πρότυπα αυτά ασχολούνται αποκλειστικά με διεργασίες της επιφάνειας της θάλασσας και τη δυναμική στο πλαίσιο των ζωνών και περιλαμβάνουν μια ατμόσφαιρα που αναλύεται κατακόρυφα. Αναπαριστούν είτε τις δύο οριζόντιες διαστάσεις είτε την κατακόρυφη σε συνδυασμό με μια οριζόντια διάσταση. Τα μοντέλα αυτά αποτέλεσαν το έναυσμα για την ενσωμάτωση της χημείας στα σφαιρικά μοντέλα.

#### **2.5.1.4. Τρισδιάστατα μοντέλα παγκόσμιας κυκλοφορίας (GCMs).**

Τα μοντέλα αυτά ενσωματώνουν την τρισδιάστατη φύση της ατμόσφαιρας και / ή του ωκεανού. Στα μοντέλα αυτά γίνεται προσπάθεια να αναπαρασταθούν οι περισσότερες κλιματικές διεργασίες που πιστεύεται ότι είναι σημαντικές καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους. Για παράδειγμα λαμβάνεται υπόψη η εισερχόμενη και εξερχόμενη ακτινοβολία, ο τρόπος με τον οποίο κινείται ο αέρας, ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η βλάστηση στην επιφάνεια της γης κ.λπ.

### **2.5.2. Κλιματικά σενάρια**

Με την εφαρμογή των κλιματικών υποδειγμάτων, που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.5.1 σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές με διαφορετικά κλιματικά χαρακτηριστικά, είναι δυνατός ο υπολογισμός της πιθανότητας εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων στις περιοχές αυτές. Μια τέτοια εφαρμογή κλιματικών υποδειγμάτων υψηλής ανάλυσης (25 x 25 χλμ<sup>2</sup>) στα πλαίσια του ευρωπαϊκού έργου EWENT, κατέληξε στην ποσοτική εκτίμηση εμφάνισης Ακραίων Καιρικών Φαινομένων (ΑΚΦ) στην Ευρώπη για την περίοδο 2011-2040 (Vajda, et al., 2011). Τα ΑΚΦ που εξετάστηκαν αφορούσαν σε:

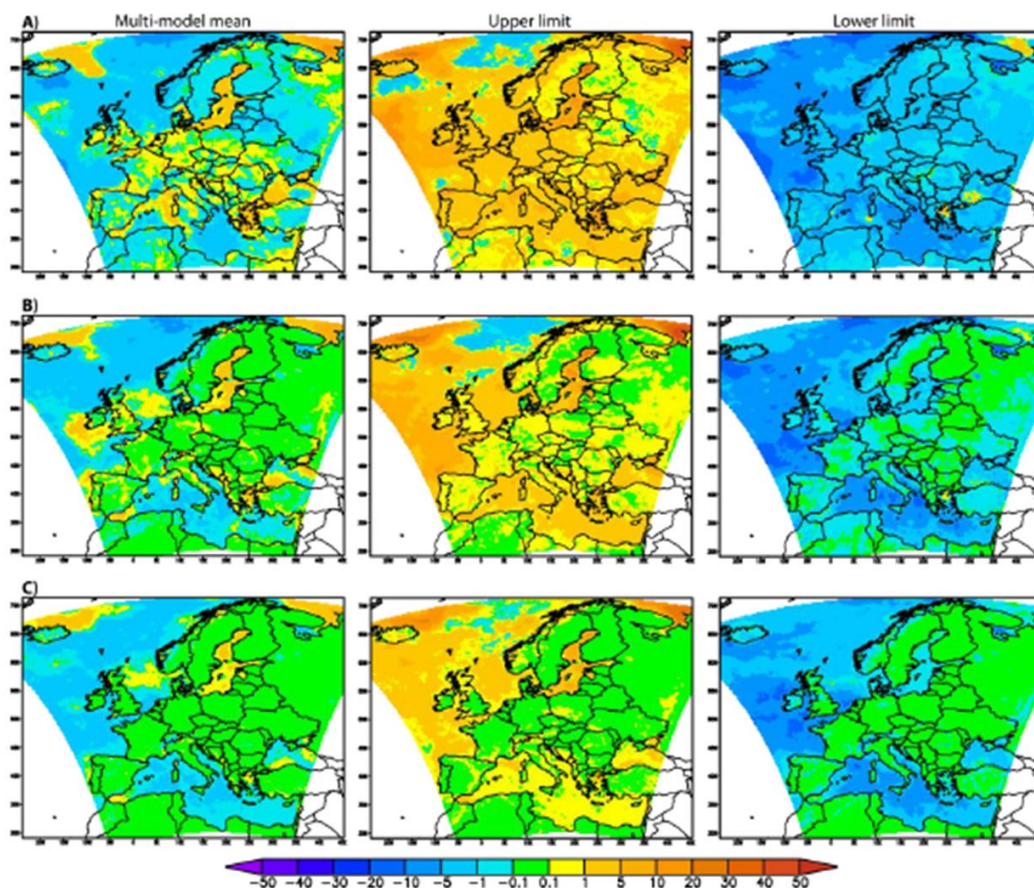
- ισχυρούς ανέμους
- χιονοπτώσεις
- χιονοθύελλες



- ισχυρές βροχοπτώσεις
- καύσωνες
- παγετούς

Όλα τα ακραία καιρικά φαινόμενα που εξετάστηκαν ταξινομήθηκαν σε τρία (3) επίπεδα δριμύτητας (εκτός από τις χιονοθύελλες) και υπολογίσθηκαν οι εκτιμήσεις εκδήλωσης, τους εκφρασμένες σε διαφορά αριθμού ημερών ανά έτος σε σχέση με την περίοδο 1989-2010. Καθώς οι εκτιμήσεις παρέχονται από κλιματικά μοντέλα, παρουσιάζεται ο μέγιστος (Μ), ο ελάχιστος (Ε) και ο μέσος (Με) αριθμός ημερών ανά ΑΚΦ.

Στην Εικόνα 9 απεικονίζεται η ανάλυση αυτή για το φαινόμενο των ισχυρών ανέμων, όπου και αποτυπώνεται χρωματικά η αλλαγή σε αριθμό ημερών.



Εικόνα 9: Μέση, μέγιστη και ελάχιστη αλλαγή σε αριθμό ημερών ανά έτος για τις περιόδους 1989-2010 έως 2011-2040 για τρία επίπεδα δριμύτητας ισχυρών ανέμων Α) 17 m/s Β) 25 m/s C) 32 m/s

Αντίστοιχα, ο Πίνακας 3 παρουσιάζει τις αντίστοιχες αναλύσεις εκδήλωσης όλων των εξεταζόμενων ΑΚΦ σε αριθμό ημερών ανά χρόνο για την περίοδο 2011-2014 (συγκριτικά με την περίοδο 1989-2010) για επιλεγμένες πόλεις της Ευρώπης.

Πίνακας 3: Πιθανότητα εκδήλωσης ΑΚΦ σε αριθμό ημερών [μέγιστος (Μ), ελάχιστος (Ε) και μέσος (Με)] ανά έτος για την περίοδο 2011-2040 για επιλεγμένες πόλεις της Ευρώπης.  
(Πηγή: Van der Linden & J.F.B., 2009)

Τοποθεσία	ΑΚΦ	Άνεμοι			Χιονοπτώσεις			Χιονοθύελλες	Ισχυρές Βροχοπτώσεις			Καύσωνες			Παγετοί		
		≥ 17 m/s	≥ 25 m/s	≥ 32 m/s	≥ 1 cm/d	≥ 10 cm/d	≥ 20 cm/d		≥ 30 mm/d	≥ 100 mm/d	≥ 150 mm/d	≥ 25°C	≥ 32°C	≥ 43°C	≤ 0°C	≤ -7°C	≤ -20°C
Αμστερνταμ	Με	45,5	2,6	0,1	1,6	0,3	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	23,3	1,2	0,0	14,6	1,1	0,0
	Μ	48,2	3,2	0,4	4,0	0,5	0,0	0,2	3,8	0,0	0,0	24,7	1,2	0,0	19,0	1,6	0,0
	Ε	42,2	2,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	3,5	0,0	0,0	22,2	1,2	0,0	6,3	0,	0,0
Βαρκελώνη	Με	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,7	0,3	0,0	114,2	6,5	0,0	0,2	0,0	0,0
	Μ	4,3	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,1	0,4	0,0	125,6	18,6	0,0	0,4	0,0	0,0
	Ε	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,3	0,2	0,0	99,8	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0
Κοπεγχάγη	Με	44,8	1,7	0,0	6,5	1,0	0,1	0,2	0,7	0,0	0,0	14,9	0,0	0,0	24,2	0,0	0,0
	Μ	48,9	2,2	0,1	9,9	1,2	0,1	0,3	0,9	0,0	0,0	15,1	0,0	0,0	30,9	1,9	0,0
	Ε	40,5	1,0	0,0	2,4	0,9	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	14,5	0,0	0,0	18,2	0,0	0,0
Φρανκφούρτη	Με	19,2	0,4	0,0	2,2	0,2	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0	61,1	6,8	0,0	19,8	1,0	0,0
	Μ	21,0	0,4	0,0	4,8	0,3	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	65,4	7,5	0,0	24,7	2,5	0,0
	Ε	16,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	55,2	6,1	0,0	14,7	0,0	0,0
Λονδίνο	Με	39,8	1,5	0,0	0,2	0,3	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	29,2	0,8	0,0	2,2	0,0	0,0
	Μ	43,2	1,8	0,0	1,6	0,4	0,0	0,1	2,4	0,0	0,0	35,9	0,9	0,0	6,9	0,1	0,0
	Ε	37,6	1,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	25,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Μαδρίτη	Με	7,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	138,7	62,9	0,4	0,0	0,0	0,0
	Μ	8,8	0,2	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	148,2	66,6	2,2	1,2	0,1	0,0
	Ε	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	132,8	55,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Μόσχα	Με	8,7	0,0	0,0	41,4	4,4	0,3	0,5	2,6	0,0	0,0	46,5	2,2	0,0	106,3	38,7	0,3
	Μ	10,0	0,2	0,0	44,7	5,0	0,5	1,1	3,0	0,1	0,0	52,3	2,8	0,0	110,9	42,9	4,0
	Ε	7,2	0,0	0,0	35,9	3,8	0,3	0,0	2,2	0,0	0,0	41,0	1,7	0,0	97,6	32,6	0,0
Μόναχο	Με	6,5	0,2	0,0	12,9	2,0	0,2	0,7	7,1	0,0	0,0	48,2	3,0	0,0	42,3	3,9	0,0
	Μ	8,1	0,4	0,0	16,4	2,4	0,4	0,8	7,7	0,0	0,0	52,2	5,3	0,0	46,0	6,6	0,0
	Ε	4,0	0,0	0,0	10,2	1,8	0,1	0,7	6,2	0,0	0,0	44,0	2,0	0,0	39,4	0,0	0,0

<b>Μαγιάρα</b>	Με	20,6	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	121,8	15,4	0,0	0,0	0,0	0,0
	Μ	21,7	1,1	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	0,1	0,0	129,1	26,2	0,0	0,0	0,0	0,0
	Ε	17,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	0,0	113,9	8,9	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Παρίσι</b>	Με	21,7	0,4	0,0	0,3	0,1	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	57,8	5,9	0,0	6,6	0,0	0,0
	Μ	25,0	0,7	0,0	1,5	0,2	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	63,5	7,0	0,0	9,6	0,6	0,0
	Ε	19,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	50,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Ρώμη</b>	Με	5,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0	149,5	34,8	0,0	0,0	0,0	0,0
	Μ	6,4	0,6	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	2,9	0,1	0,0	160,7	53,3	0,0	0,5	0,0	0,0
	Ε	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0	134,5	30,5	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Στοκχόλμη</b>	Με	36,0	1,3	0,0	19,2	2,2	0,1	0,6	1,4	0,0	0,0	17,4	0,3	0,0	65,4	9,1	0,0
	Μ	38,3	1,5	0,0	22,0	2,4	0,2	0,8	1,7	0,0	0,0	18,4	0,3	0,0	73,9	13,0	0,1
	Ε	34,0	1,1	0,0	14,5	1,9	0,1	0,3	1,0	0,0	0,0	16,7	0,3	0,0	54,0	0,0	0,0
<b>Ζυρίχη</b>	Με	10,2	0,1	0,0	13,7	2,7	0,7	0,0	6,1	0,0	0,0	35,3	1,0	0,0	42,7	1,9	0,0
	Μ	11,4	0,2	0,0	17,9	3,5	0,8	0,2	6,8	0,0	0,0	39,3	1,7	0,0	47,3	3,3	0,1
	Ε	7,7	0,0	0,0	8,1	2,0	0,6	0,0	5,6	0,0	0,0	32,2	0,7	0,0	36,3	0,0	0,0

Η σημασία ύπαρξης τέτοιων δεδομένων είναι καίριας σημασίας και απαραίτητη για την περαιτέρω ανάλυση πιθανών επιπτώσεων που θα έχουν τα ΑΚΦ σε διάφορους τομείς της οικονομίας και της κοινωνίας, μεταξύ των οποίων και οι Μεταφορές.

Συγκεκριμένα στη διδακτορική διατριβή, τα στοιχεία που παρατίθενται παραπάνω χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη υποθετικών σεναρίων Ακραίων Καιρικών Φαινομένων σε διάφορες πόλεις της Ευρώπης, και μέσω εφαρμογής μιας νέας μεθόδου κατανομής της ζήτησης για μετακινήσεις στα μέσα μεταφορών (που αναπτύσσει η διατριβή στην Ενότητα 8.4.2), επιχειρείται ποσοτικοποίηση των επιπτώσεών τους.

## **2.6. Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής στα συστήματα Μεταφορών**

### **2.6.1. Εισαγωγή**

Ο καιρός και το κλίμα όπως αυτά εκφράζονται από τα σχετικά φαινόμενα (π.χ. βροχοπτώσεις, άνεμοι, κ.λπ.) έχουν νομοτελειακά και ανεξαρτήτως οποιαδήποτε αλλαγής διάφορες επιπτώσεις στον τομέα των Μεταφορών (π.χ. το φαινόμενο της ομίχλης οδηγεί σε χαμηλή ορατότητα και συνεπώς σε μειωμένη ταχύτητα των οχημάτων). Επιπρόσθετα, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες φαίνεται να επηρεάζουν τη στατιστική κατανομή των φαινομένων αυτών και να επιτείνουν τη συχνότητα εμφάνισης και την έντασή τους. Για αυτούς τους λόγους είναι απαραίτητο να καταγραφούν και να κατηγοριοποιηθούν οι βασικές περιοχές των Μεταφορών που πλήττονται από τα καιρικά και κλιματικά φαινόμενα, με στόχο να αναδειχθεί το εύρος και η σημασία των επιπτώσεων της αλλαγής του κλίματος στον τομέα των Μεταφορών.

Η ενότητα αυτή επιχειρεί μια τέτοια ομαδοποίηση αυτών των επιπτώσεων μέσω της επισκόπησης της διεθνούς κι εθνικής βιβλιογραφίας που ασχολείται με αυτό το αντικείμενο.

### **2.6.2. Επισκόπηση διεθνούς βιβλιογραφίας**

Η έκθεση και η ευπάθεια των συστημάτων Μεταφορών σε ακραία καιρικά φαινόμενα (ΑΚΦ) και φυσικές καταστροφές (ΦΚ), είναι έκδηλες στη διάρκεια των τελευταίων ετών, με αυξανόμενη συχνότητα και δριμύτητα. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει προσδιορίσει τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής στους διάφορους οικονομικούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων των Μεταφορών, και έχει τονίσει τη σημασία της παρακολούθησης και εκτίμησης των επιδράσεων ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών, για ένα καθ' όλα ανθεκτικότερο

σύστημα Μεταφορών. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change) έχει τεκμηριώσει την αξιολόγηση των παρατηρηθεισών κλιματικών αλλαγών και των αποκρίσεων των φυσικών και ανθρωπογενών συστημάτων, των βασικών μελλοντικών επιπτώσεων καθώς επίσης και των βέλτιστων σχεδίων προσαρμογής (IPCC, 2007).

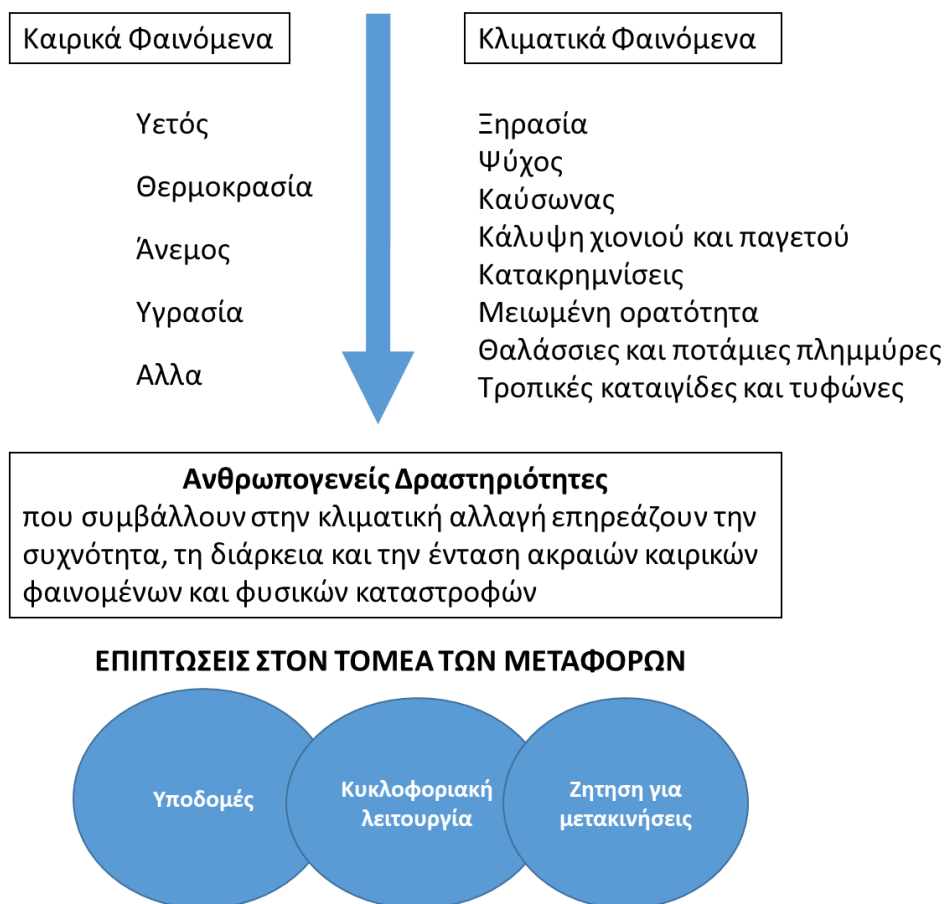
Οι μέχρι σήμερα ερευνητικές προσπάθειες σε αυτόν τον τομέα έχουν αποδείξει πως τα ΑΚΦ και οι ΦΚ ενέχουν σημαντικούς κινδύνους για την ασφάλεια των μετακινούμενων, επηρεάζουν τη γενικότερη λειτουργία της εφοδιαστικής αλυσίδας, ακινητοποιούν τις συγκοινωνιακές υποδομές, μειώνουν τη δυνατότητα πρόσβασης, καθυστερούν τις παραδόσεις φορτίων και διογκώνουν τις δαπάνες ανεφοδιασμού. Επιπλέον, μελέτες σε διάφορα κράτη-μέλη της ΕΕ σε εθνικό επίπεδο, καθώς επίσης και προγράμματα σε πανευρωπαϊκό επίπεδο, έχουν παραγάγει μέχρι σήμερα γενικές αξιολογήσεις των επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής στα συστήματα Μεταφορών σε τοπικό, εθνικό και διεθνές επίπεδο, συνήθως με την εξέταση συγκεκριμένων και ήδη εκδηλωμένων ΑΚΦ και ΦΚ και την προβολή των επιδράσεών τους στο μέλλον. Όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 2.4, η προβλεπόμενη αύξηση της συχνότητας των ακραίων καιρικών φαινομένων που οφείλονται στην αλλαγή του κλίματος, έχει μελετηθεί εκτενώς με χρήση τόσο στατιστικών αναλύσεων των κλιματικών τάσεων, βάσει πραγματικών παρατηρήσεων, όσο και εκτιμήσεων βάσει προβλέψεων παγκόσμιων και τοπικών κλιματικών μοντέλων.

Συνολικά, η επίδραση των δυσμενών καιρικών συνθηκών στη λειτουργία των μεταφορικών συστημάτων ήταν στο επίκεντρο σχετικών ερευνητικών δραστηριοτήτων από τις αρχές του 1950, όταν και αναφέρθηκαν οι πρώτες προσπάθειες για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης του υετού (Tanner, 1952) (Road Research Laboratory, 1965). Μεταγενέστερες μελέτες έδειξαν ότι η αλλαγή στην επιλογή μέσου μετακίνησης (από τα μέσα μαζικής μεταφοράς ή την πεζή μετακίνηση στην χρήση ιδιωτικού οχήματος), καθώς και οι συνολικές ακυρώσεις μετακινήσεων, σχετίζονται άμεσα με τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Στις αλλαγές που παρατηρούνται υπάρχει και μια σειρά άλλων παραμέτρων που σχετίζονται με τις μετακινήσεις όπως η ώρα αναχώρησης και ο προορισμός (Hassan & Barker, 1999). Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν τρεις βασικές περιοχές στις Μεταφορές όπου οι επικρατούσες καιρικές και κλιματικές συνθήκες έχουν άμεσο αντίκτυπο (Maze, et al., 2006):

- Οι υποδομές
- Η κυκλοφοριακή λειτουργία και ροή επιβατικών και εμπορευματικών οχημάτων
- Η ζήτηση για μετακινήσεις

Η Εικόνα 10 αποτυπώνει πως τα καιρικά φαινόμενα (βροχοπτώσεις, θερμοκρασία κ.λπ.) συμβάλλουν σε κλιματικά φαινόμενα (κατακρημνίσεις, μειωμένη ορατότητα κ.λπ.), τα οποία

με τη σειρά τους επηρεάζουν την υποδομή, τις κυκλοφοριακές λειτουργίες και τη ζήτηση για μετακινήσεις.



Εικόνα 10: Περιοχές του τομέα των Μεταφορών, στις οποίες είναι αισθητές οι καιρικές και κλιματικές αλλαγές. Στις παρακάτω ενότητες γίνεται επισκόπηση των επιπτώσεων ανά περιοχή του τομέα των Μεταφορών.

### 2.6.2.1. Επιπτώσεις στις υποδομές

Ο καιρός και το κλίμα επηρεάζουν το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη συντήρηση και την απόδοση των υποδομών και των εγκαταστάσεων που απαιτούνται για την παροχή των υπηρεσιών των Μεταφορών και που επιτρέπουν την κίνηση επιβατών και εμπορευμάτων, καθ'όλη τη διάρκεια ζωής τους. Τέτοιες υποδομές και εγκαταστάσεις είναι για παράδειγμα οι δρόμοι, οι σιδηρόδρομοι, οι διάδρομοι αεροδρομίων, οι θαλάσσιοι τερματικοί σταθμοί, τα κανάλια και οι γέφυρες. Οι υποδομές αυτές κατασκευάζονται για να αντέχουν τις επιπτώσεις ενός μεγάλου εύρους καιρικών και περιβαλλοντικών συνθηκών. Το γεγονός όμως ότι κάποιες ανθρωπογενείς δραστηριότητες μπορούν να συμβάλλουν στην αλλαγή των καιρικών και κλιματικών συνθηκών σε μια περιοχή, σημαίνει ότι ορισμένες υποθέσεις σχετικά με τις μελλοντικές συνθήκες (και το αν και πώς αυτές θα επηρεάσουν τις υποδομές) ενδεχομένως να μην επαληθευτούν, και πιθανώς να οδηγήσουν σε πρόωρη φθορά ή αποτυχία απόδοσης των

υποδομών. Τα τρέχοντα ερευνητικά κλιματικά υποδείγματα (βλ. Ενότητα 2.5) υποδηλώνουν ότι πολλές από τις προβλεπόμενες επιπτώσεις θα πραγματοποιηθούν μακροπρόθεσμα, σε ένα μεγάλο χρονικό διάστημα από σήμερα (>30-70 έτη). Αυτός ο χρονικός ορίζοντας κρίνεται ικανός για να επιτρέψει την ομαλή (και οικονομικότερη) αντικατάσταση των περισσότερων τύπων μεταφορικών υποδομών των οποίων η διάρκεια ζωής είναι συνήθως έως 25 χρόνια, χρησιμοποιώντας βελτιωμένες προβλέψεις και πληρέστερα υποδείγματα που μπορούν να λάβουν υπόψη τους τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Όμως, σε κάποιες άλλες περιπτώσεις υποδομών, όπως οι γέφυρες ή οι λιμενικές εγκαταστάσεις, οι προβλεπόμενες αλλαγές στο κλίμα ενδέχεται να εμφανιστούν αρκετά νωρίτερα μέσα στην αναμενόμενη διάρκεια ζωής των υποδομών, ενδεχομένως απαιτώντας δαπανηρές λύσεις ανασυγκρότησης, εκσυγχρονισμού ή μετεγκατάστασης τους.

#### *2.6.2.1.1. Επιπτώσεις σχετικές με τη θερμοκρασία*

Οι επιπτώσεις που σχετίζονται με τη θερμοκρασία αφορούν σε ακραίες θερμοκρασίες (καύσωνες και παγετούς), κύκλους ψύξης-τήξης (freeze-thaw cycles), συρρίκνωση παγετώνων (permafrost degradation) και σε μειωμένη κάλυψη πάγου.

#### **Ακραίες θερμοκρασίες - Κάυσωνες και παγετοί**

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η αλλαγή του κλίματος στον πλανήτη αναμένεται να αυξήσει τη συχνότητα και τη ένταση των θερμών (>25°C) και εξαιρετικά θερμών ημερών (>32°C), ενώ ο αριθμός των ψυχρών (<-7°C) και εξαιρετικά ψυχρών ημερών (<-20°C) θα μειωθεί<sup>11</sup>. Ως εκ τούτου, οι παρακάτω επιπτώσεις στο οδοστρώμα αναμένεται να παρατηρηθούν συχνότερα:

- Μείωση της αντοχής του οδοστρώματος και εμφάνιση ρωγμών (rutting) σχετιζόμενων με (υψηλή) επιβολή φορτίων/βαρών
- Υποχώρηση, κάμψη ή κατάρρευση του οδοστρώματος (buckling)
- Έκπλυση (flushing) ή ρευστοποίηση (bleeding) ασφάλτου σε παλαιά ή κακώς κατασκευασμένα οδοστρώματα

Αυτές οι επιπτώσεις αναμένεται να οδηγήσουν σε ιδιαίτερα αυξημένο κόστος συντήρησης στις περιοχές όπου θα υπερβαίνονται οι θερμικές ανοχές του οδοστρώματος εγείροντας θέματα

---

<sup>11</sup> Οι προβλέψεις αυτές βασίζονται σε κλιματικά σενάρια και υποδείγματα των οποίων η ακρίβεια βελτιώνεται διαρκώς καθώς συγκεντρώνουν αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον τις τελευταίες δεκαετίες. Ως εκ τούτου, μπορεί από τη μία πλευρά οι προβλέψεις που βασίζονται σε αυτά να αλλάζουν πχ. ως προς τον εκτιμώμενο αριθμό ημερών με καύσωνα στην Ινδία, στις ΗΠΑ ή στη Γαλλία, αλλά συνολικά συμφωνούν ως προς την παρατηρούμενη τάση που αναφέρεται εδώ.

οδικής ασφάλειας. Εξετάζοντας τις αλλαγές από μια θετικότερη σκοπιά, οι λιγότερες εξαιρετικά ψυχρές ημέρες και τα υψηλότερα κατώτατα όρια θερμοκρασίας μπορεί να μειώσουν την εμφάνιση θερμικών ρωγμών (thermal cracking) στο οδόστρωμα κατά τη διάρκεια του χειμώνα και να αντισταθμίσουν ορισμένες από τις αυξημένες δαπάνες συντήρησης του καλοκαιριού. Οι επιπτώσεις αυτές μπορεί να γίνουν περισσότερο ή λιγότερο αισθητές σε διαφορετικά μέρη του κόσμου ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες.

Επίσης, λόγω των ακραίων θερμοκρασιών, οι σιδηρόδρομοι υπόκεινται σε κάμψη των σιδηροτροχιών τους, σύμφωνα και με πλήθος ήδη καταγεγραμμένων ατυχημάτων (βλ. Maryland - USA, 07/2002). Και ενώ οι επιπτώσεις που σχετίζονται με τις εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες αναμένεται να είναι πιο συχνές, η βιβλιογραφία αναφέρει ότι και οι χαμηλές και εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες αναμένονται να είναι υπεύθυνες για ένα πολύ μεγαλύτερο ποσοστό ζημιών στις τροχιές (track), στους αρμούς μεταξύ τροχιών (switch) και στα βαγόνια (railcar) (Andrey and Mills 2003).

### **Κύκλοι ψύξης και τήξης (freeze-thaw cycles)**

Οι αυξημένες συχνότητες των κύκλων ψύξης-τήξης σχετίζονται άμεσα με την πρόωρη φθορά των οδοστρωμάτων, κυρίως όπου το υπόβαθρο των οδών (subgrades) αποτελείται από λεπτόκοκκα και κορεσμένα υλικά, δηλαδή συνθήκες που ευνοούν την διόγκωση- ανύψωση του εδάφους (soil uplift) και άλλων επιφανειακών αποθέσεων (surface deposits) λόγω της διαστολής των υπόγειων υδάτων κατά την ψύξη (frost heaving), και την αποδυνάμωση λόγω τήξης (thaw weakening) (Haas et al., 1999). Παρόλα αυτά, στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι οι κύκλοι ψύξης και τήξης, που καθορίζονται με ημερήσιο κατώτατο όριο θερμοκρασίας αέρα 0°C, μπορεί να γίνουν λιγότερο συχνοί λόγω της κλιματικής αλλαγής σε αρκετές περιοχές του Βόρειου Ημισφαιρίου (Andrey and Mills, 2003).

### **Μειωμένη κάλυψη πάγου**

Η μελλοντική βιωσιμότητα των χειμερινών παγωμένων δρόμων θα εξαρτηθεί από τη μειωμένη κάλυψη πάγου. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες θα μειώσουν τόσο την εποχιακή διάρκεια του πάγου όσο και το πάχος και την αντοχή του, παράγοντες που αναγκαστικά θα οδηγήσουν σε μείωση του βάρους των οχημάτων που μπορούν να κυκλοφορήσουν τους δρόμους αυτούς (Lonegan et al., 1993). Αυτές οι επιπτώσεις μπορεί να αντισταθμιστούν μερικώς από μια μεγαλύτερη περίοδο χωρίς πάγο που θα μπορούσε να επιτρέψει την εκτενέστερη χρήση πλωτών μέσων.

### **Μήκος κατασκευής / ποιότητα κατασκευής**



Παρόλο που οι αποφάσεις για νέα ανάπτυξη ή επέκταση των μεταφορικών υποδομών καθορίζονται κατά βάση από μη-κλιματικούς παράγοντες (οικονομικοί λόγοι, πληθυσμιακή ανάπτυξη, κ.α.), οι υψηλότερες θερμοκρασίες θα μπορούσαν δυνητικά να επιμηκύνουν τις περιόδους κατά τις οποίες μπορεί να πραγματοποιηθεί η κατασκευή τους, κι έτσι έμμεσα να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα του κόστους τους. Από την άλλη πλευρά, οι ακραίες θερμοκρασίες και οι δυσμενείς συνθήκες εργασίας για τους εργαζομένους και για ορισμένες μορφές κατασκευαστικών δραστηριοτήτων αναμένεται να αντισταθμίσουν αυτά τα κέρδη (π.χ. η υψηλή θερμοκρασία, η χαμηλή υγρασία και οι άνεμοι μεγάλης έντασης είναι παράγοντες που μειώνουν τους χρόνους πήξης (setting time) και τη δύναμη του σκυροδέματος (Almusallam 2001)).

#### *2.6.2.1.2. Επιπτώσεις σχετικές με την αύξηση της στάθμης της θάλασσας*

Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας από 9 έως 88 εκατοστά (παρατηρήσεις σε όλο τον πλανήτη) είναι πιθανό αποτέλεσμα της παγκόσμιας αλλαγής του κλίματος, και θα επιδεινωθεί στις περιοχές όπου το έδαφος υποχωρεί για φυσικούς λόγους (Houghton et al 2001). Σε συνδυασμό με μεγάλης έντασης καταιγίδες σε τροπικές ή μεσαίου γεωγραφικού πλάτους περιοχές, οι σταδιακές μεταβολές της στάθμης της θάλασσας αναμένεται να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές ή να καταστήσουν εντελώς απρόσιτες τις χαμηλού κόστους παράκτιες υποδομές, συμπεριλαμβανομένων των οδικών και σιδηροδρομικών (road and railbeds), των λιμενικών και αεροπορικών εγκαταστάσεων, των σηράγγων και των υπόγειων σιδηροδρόμων/μετρό/διαδρόμων διέλευσης. Η ευπάθεια των υποδομών των Μεταφορών αναμένεται να είναι σημαντικά υψηλότερη σε όλες τις παράκτιες περιοχές, στις οποίες παρατηρούνται μεγάλες συγκεντρώσεις πληθυσμού και άρα μεγάλες επενδύσεις σε αεροδρόμια, τερματικούς σταθμούς, κ.λπ. (π.χ. κατά μήκος των ακτών της ανατολικής πλευράς των ΗΠΑ).

#### *2.6.2.1.3. Επιπτώσεις σχετικές με τη βροχόπτωση*

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα μελλοντικά μοτίβα (patterns) βροχοπτώσεων είναι περισσότερο αβέβαιες από ότι στη θερμοκρασία, λόγω εν μέρει της εξαιρετικά μεταβλητής φύσης των βροχοπτώσεων και της αδυναμίας των παγκόσμιων κλιματικών υποδειγμάτων να παραμετροποιήσουν και να αποτυπώσουν με μαθηματικούς όρους ορισμένες διαδικασίες βροχόπτωσης. Οι αυξημένες βροχοπτώσεις όμως ενδέχεται να επηρεάσουν τη συχνότητα των κατακρημνίσεων και κατολισθήσεων, που με τη σειρά τους αναμένεται να προκαλέσουν ζημιές (μικρότερης ή μεγαλύτερης εμβέλειας) στις οδικές και σιδηροδρομικές υποδομές, και να επιβάλουν έτσι μεγαλύτερα επίπεδα συντήρησης. Αυτές οι επιπτώσεις είναι πιο πιθανό να πλήξουν ιδιαίτερα ορεινές περιοχές (Evans and Clague 1997).

Οι ποτάμιες πλημμύρες και οι πλημμύρες αστικών ομβρίων υδάτων (stormwater flooding), αναμένεται τόσο να επιδεινώσουν τις επιπτώσεις που σχετίζονται με την άνοδο της στάθμης της θάλασσας στις παράκτιες περιοχές, όσο και να επηρεάσουν τις ηπειρωτικές περιοχές, και συγκεκριμένα τις οδικές και σιδηροδρομικές υποδομές εντός των πλημμυρικών πεδιάδων (flood plains), συμπεριλαμβανομένων των γεφυρών, θεμελίων γέφυρας, οχετών, κ.λπ.. Οι βροχοπτώσεις και η υγρασία είναι επίσης σημαντικοί παράγοντες που συμβάλλουν στη διάβρωση υποδομών Μεταφορών. Η πρόωρη φθορά των γεφυρών, των στεγαζόμενων χώρων στάθμευσης και άλλων υποδομών των Μεταφορών κατασκευασμένων από σκυρόδεμα αναμένεται να ενταθεί στις περιοχές που η αλλαγή του κλίματος θα προκαλέσει συχνότερα και εντονότερα φαινόμενα βροχόπτωσης.

#### 2.6.2.2. Επιπτώσεις στη λειτουργία του συστήματος των Μεταφορών

##### **Ασφάλεια**

Οι καιρικές συνθήκες είναι αδιαμφισβήτητα από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ασφάλεια στον τομέα των Μεταφορών. Μόνο για τον Καναδά, οι καιρικές συνθήκες συμβάλλουν σε περίπου 10 εκτροχιασμούς αμαξοστοιχιών, 10-15 ατυχήματα αεροσκαφών, πάνω από 100 ναυτικά ατυχήματα και δεκάδες χιλιάδες οδικές συγκρούσεις το χρόνο (Andrey and Mills 2003). Οι ίδιοι αριθμοί είναι πολλαπλάσιοι για χώρες με μεγαλύτερο πληθυσμό – για παράδειγμα το 2000 έγιναν 300.000 οδικά ατυχήματα με τραυματισμό στις ΗΠΑ κατά τη διάρκεια βροχής, χιονιού, καταιγίδας ή άλλων δυσμενών καιρικών συνθηκών (U.S. Department of Transportation 2001). Σε απόλυτες τιμές, τα οδικά ατυχήματα αποτελούν το πιο σημαντικό ζήτημα ασφάλειας που εγείρεται λόγω καιρικών συνθηκών και αναμένεται να επηρεαστεί περισσότερο από την εμφάνιση συχνότερων και εντονότερων ακραίων καιρικών φαινομένων. Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι ο υετός αυξάνει την πιθανότητα σύγκρουσης μεταξύ οχημάτων από 50 έως και 100%, ενώ η πιθανότητα για τραυματισμό εμπλεκόμενων προσώπων στα οδικά ατυχήματα αυξάνεται περίπου κατά 45% (Andrey et al 2001a, 2003). Η πιθανότητα τραυματισμού είναι παρόμοια τόσο για περιπτώσεις χιονοπτώσεων όσο και βροχοπτώσεων συγκριτικά με τις κανονικές εποχιακές συνθήκες οδήγησης (Andrey et al., 2003). Αυτό σημαίνει ότι εάν οι σχέσεις ευαισθησίας (sensitivity relations) μεταξύ αυτών των φαινομένων και της πιθανότητας τραυματισμού σε οδικό ατύχημα παραμείνουν παρόμοιες τις επόμενες δεκαετίες, οι μετατοπίσεις από τις χιονοπτώσεις προς τις βροχοπτώσεις, όπως προκύπτει από πολλές μελέτες προσομοίωσης της κλιματικής αλλαγής (Houghton et al., 2001), αναμένεται να έχουν ελάχιστες θετικές επιπτώσεις στα ποσοστά ατυχημάτων, σε αντίθεση με τα οφέλη που αναμένονται σύμφωνα με μελέτες στο παρελθόν (IBI Group, 1990). Συνολικά βέβαια, αν και δεν έχει ολοκληρωθεί μια λεπτομερής ανάλυση και αν υποτεθεί ότι όλοι οι άλλοι παράγοντες παραμείνουν σταθεροί, αναμένεται ότι οι ηπιότερες χειμερινές συνθήκες θα

βελτιώσουν το επίπεδο ασφάλειας για τους σιδηροδρόμους, τις αεροπορικές και ναυτικές μεταφορές (Andrey and Mills 2003).

### Κινητικότητα

Όλα τα μέσα μεταφοράς αντιμετωπίζουν διαταραχές των υπηρεσιών τους λόγω του καιρού, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια του χειμώνα στις περισσότερες περιοχές του πλανήτη. Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι ακυρώσεις και οι εκτροπές των εμπορικών και επιβατικών αεροσκαφών εκτιμάται ότι κοστίζουν μεταξύ \$40.000 και \$150.000 ανά πτήση, αντίστοιχα (Environmental and Societal Impacts Group 1997). Οι προσωρινά μειωμένες ταχύτητες στις σιδηροδρομικές μεταφορές κατά τη διάρκεια εξαιρετικά ψυχρών ημερών όπως και παρατεταμένων κυμάτων καύσωνα, καθώς και το κλείσιμο των δρόμων και των σιδηροδρόμων λόγω καταιγίδων το χειμώνα, πλημμυρών, κατολισθήσεων και δασικών πυρκαγιών, αποτελούν άλλα χαρακτηριστικά παραδείγματα επιπτώσεων των καιρικών φαινομένων στην κινητικότητα (Andrey and Mills 2003). Οι σχετικές δαπάνες αυτών των επιπτώσεων, αν και μεταβλητά από έτος σε έτος, ανέρχονται σε εκατομμύρια δολάρια. Οποιαδήποτε αύξηση της έντασης ή της συχνότητας των ακραίων καιρικών φαινομένων λόγω της αλλαγής του κλίματος θα μεταφραζόταν άμεσα σε πολύ μεγαλύτερες δαπάνες και σε σημαντικά μεγαλύτερες επιπτώσεις στην κινητικότητα και επιβατών και στη διακίνηση εμπορευμάτων. Πιθανό όφελος από ένα θερμότερο κλίμα (και την συνεπαγόμενη συρρίκνωση των παγετώνων) θα ήταν η βελτιωμένη δυνατότητα ναυσιπλοΐας, για παράδειγμα στο δρόμο του μεταξιού ή στην Αρκτική.

Ειδικότερη έμφαση δίνεται σε αυτή την ενότητα στις εκτιμώμενες (ή και παρατηρηθείσες) επιπτώσεις των πλημμυρών λόγω ακραίων φαινομένων βροχόπτωσης, αφενός διότι σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, οι πλημμύρες είναι το αποτέλεσμα των ακραίων καιρικών φαινομένων που έχει μελετηθεί περισσότερο (καθώς είναι το συχνότερα παρατηρούμενο φαινόμενο με αρνητικές επιπτώσεις στον τομέα των Μεταφορών) και αφετέρου διότι στην παρούσα διατριβή προτείνεται ένα νέο μαθηματικό υπόδειγμα ποσοτικοποίησης των επιπτώσεων της ακραίας βροχόπτωσης στις οδικές μεταφορές (βλ. Ενότητα 8.4.1).

Ο Πίνακας 4 συνοψίζει βιβλιογραφικά ευρήματα σχετικά με την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων ακραίων βροχοπτώσεων στην απόδοση του συστήματος Μεταφορών σε διάφορα μέρη του κόσμου.

**Πίνακας 4: Βιβλιογραφικά ευρήματα για την επίδραση βροχοπτώσεων στην κυκλοφοριακή ροή και στην ταχύτητα**

Ερευνητής	Περιοχή μελέτης	Τύπος τμήματος οδικού	Κατάσταση οδοστρώματος ή ένταση βροχόπτωσης (σε mm/h)	Μείωση ροής κυκλοφορίας (οχήμ./ώρα)	Μείωση ταχύτητας κίνησης (χλμ./ώρα)
-----------	-----------------	-----------------------	---	-------------------------------------	-------------------------------------

(Maeki, 1972)	Φινλανδία	Χωματόδρομος	βρεγμένο οδόστρωμα*		2% – 4%
(Galín, 1981)	Αυστραλία	Αγροτική οδός	βρεγμένο οδόστρωμα*		7% - 8%
(Hawkins, 1988)	Nottinghamshire, Ην.Βασίλειο	Αυτοκινητόδρομος	σπρέι και σταθερή / ισχυρή βροχή *	8% – 16%	4 – 6 χλμ./ώρα
(Lamn, et al., 1990)	Νέα Υόρκη, ΗΠΑ	Αγροτική οδός	βροχή*		καμία διαφορά
(Ibrahim & Hall, 1994)	Τορόντο, Καναδάς	Αυτοκινητόδρομος	ασθενής βροχή* ισχυρή βροχή*	10% – 20%	1.7% 4,4% – 8,7%
(Hogema, 1996)	Ολλανδία	Αυτοκινητόδρομος	βροχή*		11 χλμ./ώρα
(Brilon & Ponzlet, 1996)	Γερμανία	Ταχείας κυκλοφορίας	βρεγμένο οδόστρωμα *	έως και 8%	~6 χλμ./ώρα
(Liang, et al., 1998)	Ίνταχο, ΗΠΑ	Ταχείας κυκλοφορίας	ασθενής βροχή* μέτριας έντασης (moderate) βροχή * ισχυρή βροχή *		19,9% 22,8% 25,7%
(Holdener, 1998)	ΗΠΑ	Ταχείας κυκλοφορίας	βρεγμένο οδόστρωμα*		0,2– 37,9 χλμ./ώρα
(Edwards, 1999)	Κάρντιφ, Ουαλία	Αυτοκινητόδρομος	βροχή*		4,4%
(Martin, et al., 2000)	Γιούτα, ΗΠΑ	Ταχείας κυκλοφορίας	μέτρια βροχή * ισχυρή βροχή*	έως και 26%	10% 25%
(Kyte, et al., 2001)	Αϊνταχο, ΗΠΑ	Ταχείας κυκλοφορίας	βροχή*		9.5 χλμ./ώρα
(Smith, et al., 2004)	Βιρτζίνια, ΗΠΑ	Ταχείας κυκλοφορίας	ασθενής βροχή* ισχυρή βροχή *		3% – 5%
(Chung, et al., 2006)	Τόκιο, Ιαπωνία	Περιφερειακή οδός	0 – 1 1 – 2 2 – 3 3 – 4 5 – 10		4,5% 4,6% 5,6% 6,4% 8,2%
(Maze, et al., 2006)	Μινεάπολις, ΗΠΑ	Ταχείας κυκλοφορίας	0 – 0,02 0,02 – 0,6 > 0,6	έως και 22%	2% 4% 6%
(Agarwal, et al., 2006)	Μινεσότα, ΗΠΑ	Ταχείας κυκλοφορίας	0 – 0,26 0,26 – 6,35 > 6,35		1% – 2% 2% – 4% 4% – 7%
(Unrau & Andrey, 2006)	Τορόντο, Καναδάς	Αστική οδός	0,1 – 2,4		10%
(Sabir, et al., 2008)	Ολλανδία	*	*		Μεταξύ 10-15%
(Rakha, et al., 2008)	Βαλτιμόρη, Μινεάπολις, Σηάτλ, ΗΠΑ	Ταχείας κυκλοφορίας	0 – 1 1 – 10,6	έως και 14%	2% - 3,6% 6% - 9%
(Billot, et al., 2009)	Παρίσι, Γαλλία	Ταχείας κυκλοφορίας	0 – 2 2 – 3		8% 12,6%
(Camacho & Garcia, 2010)	Βορειοδυτική Ισπανία	Ταχείας κυκλοφορίας	1 - 2 2 – 5		0,8 – 3 χλμ./ώρα 1,4 – 4,6 χλμ./ώρα
(Transportation Research Board, 2010)	ΗΠΑ	Ταχείας κυκλοφορίας	ασθενής βροχή* ισχυρή βροχή *		1.9% 4,8% - 6,4%
(Lam, et al., 2013)	Χονγκ Κονγκ	Αστική οδός	0 – 0.5 0,5 – 6,5 > 6,5		3,5% – 4,2% ~5,7% 6,8% – 10,1%

(Skabardoni s, et al., 2013)	ΗΠΑ	*		έως και 14%	
(Skabardoni s, et al., 2013)	Ελλάδα	*		έως και 16%	
(Mitsakis, et al., 2014)	Αθήνα, Ελλάδα	Αστική οδός	18 – 27		έως και 35,4%
(Hooper, et al., 2014)	Λονδίνο, Ην. Βασίλειο	Αυτοκινητόδρομος	βρεγμένο οδόστρωμα*		2,1%

\* Πληροφορίες σχετικά με τον τύπο οδικού τμήματος ή/και την ένταση της βροχοπτώσης δεν δίδονται στην εξεταζόμενη μελέτη

Όπως φαίνεται στην αριστερή στήλη του Πίνακα, όπου οι βιβλιογραφικές πηγές ακολουθούν χρονική σειρά (βάσει του πότε δημοσιεύτηκαν), μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 2000, το ενδιαφέρον για τις επιπτώσεις των βροχοπτώσεων, επικεντρώθηκε στην σύγκριση της κυκλοφοριακής λειτουργίας του υγρού έναντι του στεγνού οδοστρώματος, αντί για τη συσχέτιση των επιπτώσεων τους με την κατά τόπους ένταση του φαινομένου ή τον τύπο του οδικού τμήματος που πλήττονταν. Η πλειονότητα των ερευνητικών εργασιών, που ασχολούνται με την επίδραση των καιρικών συνθηκών στις κυκλοφοριακές παραμέτρους, προσεγγίζει το θέμα μέσω της ανάλυσης και συσχέτισης δεδομένων κυκλοφορίας και καιρικών συνθηκών, και κατά κανόνα οι περισσότερες από τις προσπάθειες αυτές, χρησιμοποιούν δεδομένα που προέρχονται από σταθερούς σταθμούς μέτρησης κυκλοφοριακών και καιρικών παραμέτρων. Το γεγονός αυτό μπορεί να εγείρει αμφιβολίες (και συνεπώς να μειώσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων) καθώς καθίσταται αναγκαία η συνεχής και απρόσκοπτη λειτουργία των σταθμών αυτών, προκειμένου το αναλυόμενο σύνολο δεδομένων να είναι επαρκές σε μέγεθος και χωρική έκταση. Αυτό είναι ιδιαίτερα σύνθετο, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι σταθμοί ενδέχεται να μην λειτουργούσαν για συνεχείς χρονικές περιόδους (για τεχνικούς λόγους, λόγους συντήρησης ή σύνδεσης των σταθμών με το κεντρικό σύστημα αποθήκευσης δεδομένων), ή ακόμα και αν λειτουργούσαν, τα δεδομένα μπορεί να παρουσίαζαν ανωμαλίες ή σφάλματα. Οι περισσότερες σχετικές ερευνητικές προσπάθειες έχουν μελετήσει κυρίως τις επιπτώσεις της έντασης της βροχοπτώσης στη διακύμανση των βασικών μεγεθών της κυκλοφορίας, μέσω των σχέσεων ταχύτητας – φόρτου - πυκνότητας, όπως αυτές ορίζονται βάσει των θεμελιωδών διαγραμμάτων. Οι ανωτέρω όμως ερευνητικές προσπάθειες αφορούσαν σε μεμονωμένους οδικούς άξονες, και χωρίς να εξετάζουν τις επιμέρους επιπτώσεις κατά τύπο οδικού τμήματος που πλήττεται από το εκάστοτε φαινόμενο, εστιάζοντας σε ορισμένα είδη οδών ανά μελέτη (π.χ. οδούς ταχείας κυκλοφορίας, αυτοκινητοδρόμους, κ.λπ.). Όπως παρατηρείται, οι βροχοπτώσεις μπορούν να προκαλέσουν μείωση της κυκλοφοριακής ροής της τάξης του 22% και μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της μέσης ταχύτητας ροής των οχημάτων της τάξης του 35%. Επίσης, όπως ήταν αναμενόμενο, οι επιπτώσεις εξαρτώνται τόσο από την ένταση των βροχοπτώσεων όσο και από τον τύπο των οδικών τμημάτων που πλήττονται (π.χ. οι αστικοί δρόμοι επηρεάζονται περισσότερο από τους

άλλους τύπους δρόμων πιθανόν λόγω των ήδη υπάρχουσών τριβών ροής, όπως η στάθμευση, οι στάσεις των μέσων μαζικής μεταφοράς, η συχνότητα των διασταυρώσεων και των διαβάσεων των πεζών, κ.λπ.).

Αναφορικά με την περιοχή που έχουν εκπονηθεί οι μελέτες που παρουσιάζονται στο πλαίσιο της βιβλιογραφικής επισκόπησης της παρούσας διατριβής, η πλειονότητα των αναφορών είναι από τις ΗΠΑ και τον Καναδά, ενώ είναι εμφανώς λιγότερες οι προερχόμενες από Δυτικοευρωπαϊκές χώρες. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι είναι εξαιρετικά περιορισμένη η έρευνα για τις επιπτώσεις των πολύ ισχυρών και ακραίων βροχοπτώσεων στα συστήματα Μεταφορών.

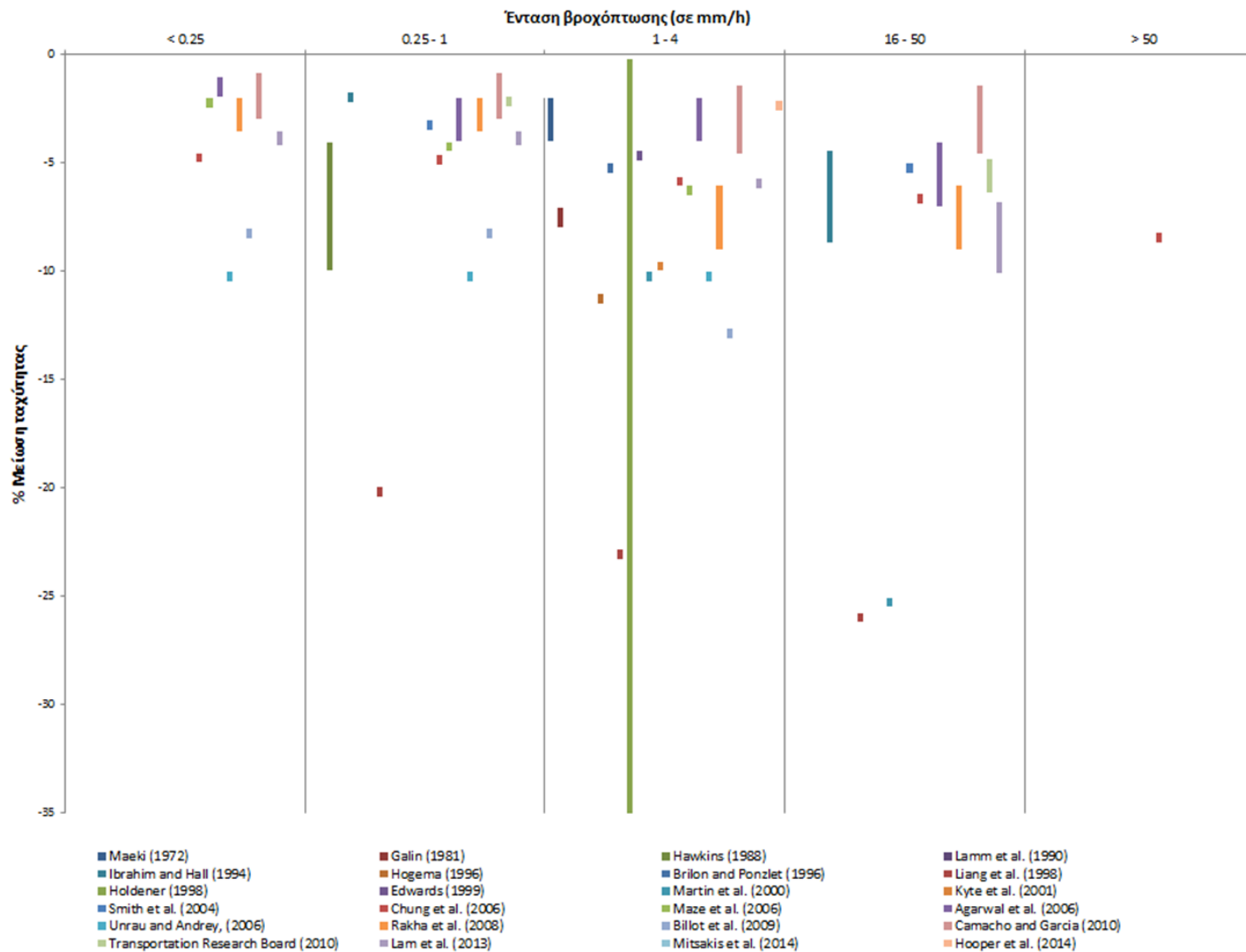
Καθώς δεν υπάρχει μια ευρέως χρησιμοποιούμενη κλίμακα που να περιγράφει ποιοτικά την ένταση της βροχόπτωσης και να τη συσχετίζει με την ωριαία τιμή ύψους βροχής σε mm, ορίζονται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής κατηγορίες για διευκόλυνση της περιγραφής των πραγματικών φαινομένων βροχόπτωσης, που παρουσιάζονται και αναλύονται στο Κεφάλαιο 8. Η ταξινόμηση αυτή γίνεται σε έξι (6) διακριτές κατηγορίες<sup>12</sup>:

1. πολύ ασθενής (< 0,25 mm/h)
2. ασθενής (0,25 mm/h – 1 mm/h)
3. μέτρια (1 mm/h – 4 mm/h)
4. ισχυρή (4 mm/h – 16 mm/h)
5. πολύ ισχυρή (16 mm/h – 50 mm/h)
6. ακραία (> 50 mm/h)

Με στόχο τη διευκόλυνση ανάγνωσης των ευρημάτων της βιβλιογραφικής επισκόπησης σχετικά με την επίδραση της βροχόπτωσης στην ταχύτητα κυκλοφορίας απεικονίζεται στην Εικόνα 11 η συσχέτιση της έντασης της βροχόπτωσης (βάσει των παραπάνω κατηγοριών) και η ποσοστιαία μείωση της ταχύτητας που αναφέρεται. Οι γραμμές στην Εικόνα 11 αναπαριστούν το εύρος της ποσοστιαίας μείωσης ενώ οι κουκίδες αναπαριστούν σημεία, για τα οποία η επίπτωση της βροχόπτωσης δεν ποσοτικοποιείται από τη βιβλιογραφία με εύρος τιμής αλλά με ακριβή τιμή.

---

<sup>12</sup> Οι περιγραφικές συνθήκες, που στη βιβλιογραφία συναντώνται ως “βροχή” ή “βρεγμένο οδόστρωμα” κατατάσσονται στην κατηγορία μέτριας έντασης (1-4mm/h)



Εικόνα 11: Επισκόπηση της βιβλιογραφίας για τη μείωση της ταχύτητας (%) λόγω διαφόρων εντάσεων βροχόπτωσης

## Αποτελεσματικότητα

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει γενική συναίνεση ότι η αλλαγή του κλίματος θα οδηγήσει σε μείωση της στάθμης των υδάτων των λιμνών, της ροής των καναλιών και των ποταμών (Mortsch et al., 2000, National Synthesis Team Synthesis 2001). Πολλές έρευνες σχετικά με τις συνέπειες της μείωσης της στάθμης των υδάτων στις ναυτιλιακές δραστηριότητες, καταλήγουν στο κοινό συμπέρασμα της πιθανής σημαντικής αύξησης του κόστους μεταφοράς των αγαθών που μεταφέρονται μέσω αυτών των οδών (συνήθως σιδηρομεταλλευμάτων, άνθρακα, και λοιπων ορυκτών), λόγω της ανάγκης να πραγματοποιηθούν περισσότερες κινήσεις για τη μεταφορά του ίδιου όγκου φορτίου, ακόμη και αν ληφθεί υπόψη η προοπτική μιας εκτεταμένης διάρκειας ναυσιπλοΐας λόγω τήξης των πάγων στις άλλοτε παγωμένες θάλασσες (Lindeberg et al., 2000, Millerd 1996, Bergeron 1995, Slivitzky 1993, Marchand et al., 1988). Αυτή η νέα πραγματικότητα θα αποτελούσε σοβαρή πρόκληση για τη βιομηχανία η οποία επηρεάζεται από διαρκώς μεταβαλλόμενα πρότυπα (patterns) της ζήτησης για μεταφορές, και από τον ανταγωνισμό των ποικίλων μέσων και δρόμων μεταφοράς εμπορευμάτων.

Οι μειωμένες δαπάνες που γίνονται για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων του χιονιού και του πάγου στον τομέα των Μεταφορών αποδίδονται διεθνώς στα οφέλη της υπερθέρμανσης του πλανήτη (IBI Group 1990) [ενδεικτικά οι ετήσιες δαπάνες συντήρησης των οδικών υποδομών λόγω χιονιού και πάγου ανέρχονται περίπου σε 2 δις. δολάρια \$ στις Η.Π.Α. (The Weather Team 1998, Jones 2003)]. Οι λιγότερο συχνές χιονοπτώσεις και οι λιγότερες συνολικά ημέρες με χιόνι είναι επίσης πιθανό να οδηγήσουν σε εξοικονομήσεις πόρων, λόγω της μείωσης των ζημιών που θα προκαλούνταν από τη διάβρωση από αλάτι στα οχήματα και στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα (π.χ. γέφυρες, χώρους στάθμευσης). Οι εμπειρικές σχέσεις μεταξύ θερμοκρασίας και ιστορικών ποσοστών χρήσης αλατιού (Andrey et al. 2001b, McCabe 1995, Cornford and Thornes 1996) υποδηλώνουν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 3-4°C μπορεί να μειώσει τη χρήση αλατιού και άμμου κατά 20% έως 70% ετησίως.

Οι επιδράσεις της θερμοκρασίας στην αποδοτικότητα των καυσίμων των μηχανοκίνητων μεταφορών, έχουν επίσης αποτελέσει αντικείμενο συζητήσεων και ερευνών σχετικών με τις εκτιμήσεις των επιπτώσεων του κλίματος (IBI Group 1990, Titus 1992). Η αύξηση της θερμοκρασίας αναμένεται να οδηγήσει σε ελαφρά αύξηση της κατανάλωσης καυσίμων, τόσο για τα αεροσκάφη λόγω της χαμηλότερης απόδοσης του κινητήρα, όσο και για τα αυτοκίνητα (Ι.Χ. και φορτηγά), λόγω της αυξημένης χρήσης του κλιματισμού και την αντισταθμιστική



επίδραση της μειωμένης χρήσης ελαστικών χιονιού και συστημάτων απόψυξης (defrosting systems) (Andrey and Mills 2003).

### **2.6.2.3. Επιπτώσεις στη ζήτηση για μετακινήσεις**

Τα διαθέσιμα ερευνητικά ή άλλα ευρήματα που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία και αφορούν στις πιθανές συνέπειες της κλιματικής αλλαγής στη ζήτηση για μετακινήσεις, είναι περιορισμένα. Σύμφωνα με διάφορες πηγές, ορισμένες προσαρμογές της ζήτησης ενδέχεται να προκύψουν άμεσα ως απάντηση στη μείωση των υδάτων των λιμνών και ποταμών, και είναι πιθανή η μετατόπιση της ζήτησης από τα πλωτά μέσα στις σιδηροδρομικές και οδικές μεταφορές. Πιο σημαντικές αλλαγές αναμένεται να προκύψουν έμμεσα, ως αποτέλεσμα της προσαρμογής στην αλλαγή του κλίματος σε άλλους τομείς. Για παράδειγμα, σε περίπτωση αλλαγής του χωροταξικού μοντέλου της γεωργικής παραγωγής, ως απάντηση στην ξηρασία ή σε παρατεταμένης διάρκειας καλλιεργητικές περιόδους, αναμένεται να προκύψουν νέες απαιτήσεις για μετακινήσεις ενώ άλλες μπορεί να υποχωρήσουν. Ομοίως για την ενέργεια, η αλλαγή του κλίματος μπορεί να επιτρέψει τη φθηνότερη ανάπτυξη νέων πόρων ορυκτών καυσίμων (π.χ. στην Αρκτική), αυξάνοντας έτσι τη ζήτηση για προμήθειες και μαζική μεταφορά πετρελαίου. Ωστόσο, η μεγαλύτερη πιθανή μεταστροφή θα είναι πιθανόν αποτέλεσμα και των διεθνών δεσμεύσεων για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και των συναφών επενδύσεων σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε ένα ακραίο (κι από ότι φαίνεται σήμερα, ακόμα μακρινό) σενάριο ευρείας υιοθέτησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των νέων καυσίμων (π.χ. υδρογόνο), ο τομέας των μεταφορών θα μεταβαλλόταν σημαντικά δημιουργώντας νέες ευκαιρίες και προκλήσεις.

### **2.6.3. Επισκόπηση εθνικών προσπαθειών - Η μελέτη της Τράπεζας της Ελλάδος**

Σε εθνικό επίπεδο, η μελέτη της Τράπεζας της Ελλάδος (2012) σχετικά με τις περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα, αφιέρωσε ένα κεφάλαιο για την εκτίμηση των επιπτώσεων στα δίκτυα Μεταφορών της χώρας. Η μελέτη επικεντρώθηκε κυρίως στον προσδιορισμό της ευπάθειας του συστήματος Μεταφορών, στην εκτίμηση της ζήτησης για μεταφορές, στην ποσοτικοποίηση των δαπανών προσαρμογής που σχετίζονται με διάφορα κλιματικά σενάρια και στη διαμόρφωση μέτρων και πολιτικής Μεταφορών για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα δίκτυα και στους τρόπους μεταφοράς.

Συνοπτικά, τα ευρήματα της μελέτης αφορούν στα εξής:

A. Για τις οδικές μεταφορές (και υποδομές):

- Το πρόσθετο κόστος συντήρησης της οδικής υποδομής της χώρας, λόγω αύξησης της μέσης θερμοκρασίας κατά 2°C, εκτιμάται σε περίπου 100 εκ. € το χρόνο για χρονικό ορίζοντα το 2100.
- Η επαναχάραξη σε υψηλότερα επίπεδα των οδικών τμημάτων που βρίσκονται σε υψόμετρο που μπορεί να επηρεαστούν από μια αύξηση της στάθμης της θάλασσας έως 50 εκατοστά, συνολικού εκτιμώμενου μήκους 172 χλμ., εκτιμάται ότι θα έχει κόστος της τάξης των 2.5-3 δις. €.
- Το κόστος αποκατάστασης ζημιών στο οδικό δίκτυο λόγω πλημμυρών εκτιμάται σε 200 εκ. € το χρόνο για το χρονικό ορίζοντα 2100.
- Κόστος 9.3 δις. € το χρόνο για τους μετακινούμενους λόγω καθυστερήσεων εξαιτίας φαινομένων κλιματικής αλλαγής
- Εξοικονόμηση 30 εκ. € το χρόνο λόγω μείωσης των κινητοποιήσεων για αποχιονισμούς και μείωση του κόστους συντήρησης των υποδομών λόγω αύξησης της μέσης θερμοκρασίας κατά 2°C.
- Μη ποσοτικοποιημένα οφέλη από τη μείωση των καθυστερήσεων των επιβατών των οχημάτων που αποκλείονται από το χιόνι, καθώς και μείωση του κόστους τροφοδοσίας αποκλεισμένων περιοχών.

Για τις σιδηροδρομικές μεταφορές (και υποδομές):

- Το πρόσθετο κόστος συντήρησης και επιδιόρθωσης της σιδηροδρομικής υποδομής, λόγω αύξησης της μέσης θερμοκρασίας κατά 2°C εκτιμάται σε περίπου 40 εκ. € το χρόνο για το χρονικό ορίζοντα 2100.
- Η επαναχάραξη σε υψηλότερο σημείο των σιδηροδρομικών γραμμών που μπορεί να επηρεαστούν από μια αύξηση της στάθμης της θάλασσας έως 50 εκατοστά, συνολικού εκτιμώμενου μήκους 60 χλμ., εκτιμάται ότι θα έχει κόστος της τάξης των 300 εκ. €.
- Κόστος 11 εκ. € το χρόνο για τους μετακινούμενους λόγω καθυστερήσεων εξαιτίας φαινομένων κλιματικής αλλαγής.
- Εξοικονόμηση 0,1 εκ. € το χρόνο λόγω μείωσης των κινητοποιήσεων για αποχιονισμούς και μείωση του κόστους συντήρησης των σιδηροδρομικών υποδομών, λόγω αύξησης της μέσης θερμοκρασίας κατά 2°C.

Για τις λιμενικές υποδομές:

- Το κόστος ανύψωσης κρηπιδωμάτων των λιμένων συνολικού μήκους 77 χλμ. κατά 50 εκατοστά, λόγω ύψωσης της στάθμης της θάλασσας έως 50 εκατοστά, εκτιμάται σε 550 εκ. €.

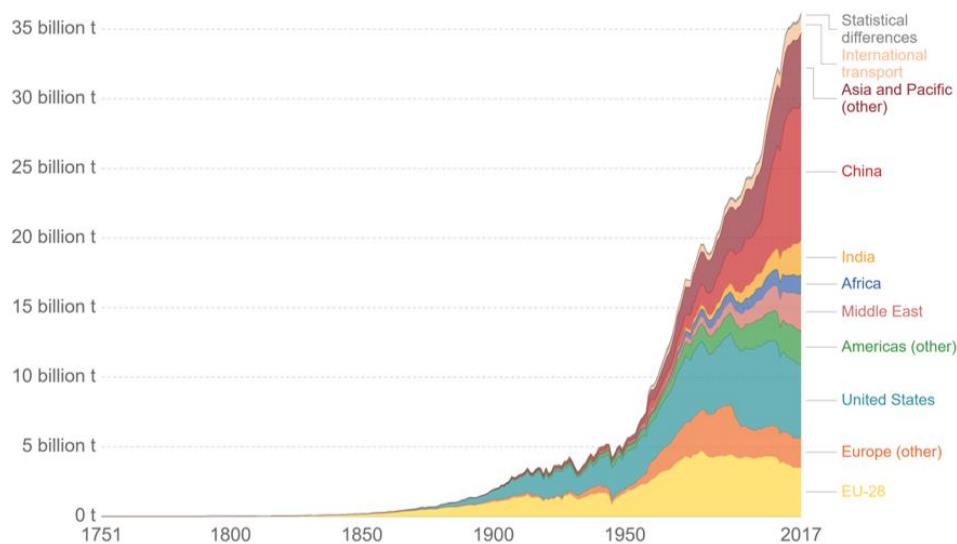
Η μελέτη της Τράπεζας της Ελλάδος εξετάζει διάφορα σενάρια προσαρμογής (ή μη) στην κλιματική αλλαγή, με τις παραπάνω εκτιμήσεις μειωμένες έως και 50% στις περιπτώσεις έντονης προσαρμογής.

## **2.7. Αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής**

Η αλλαγή του κλίματος είναι ένα από τα πιο περίπλοκα ζητήματα που αντιμετωπίζει σήμερα ο πλανήτης. Περιλαμβάνει πολλές διαστάσεις και είναι ένα παγκόσμιο πρόβλημα, αισθητό σε τοπικές κλίμακες, που θα συνεχίσει να υπάρχει. Ακόμη και αν όλες οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες σταματούσαν άμεσα να συντελούν στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου (βλ. Ενότητα 2.3), η υπερθέρμανση του πλανήτη και η κλιματική αλλαγή θα συνεχίζαν να επηρεάζουν τις μελλοντικές γενιές, καθώς η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα παραμένει για εκατοντάδες χρόνια και ο πλανήτης δεν αντιδρά άμεσα στην υπερθέρμανση που αυτό προκαλεί. Έτσι, η ανθρωπότητα και πλανήτης είναι 'δεσμευμένοι' σε κάποιο βαθμό αλλαγής του κλίματος.

Ο βαθμός αλλαγής του κλίματος θα καθοριστεί με βάση τον τρόπο με τον οποίο θα συνεχιστούν οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, μέσω των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, αλλά και με τον τρόπο με τον οποίο το κλιματικό σύστημα θα ανταποκρίνεται στις εκπομπές αυτές.

Παρά την αυξανόμενη συνειδητοποίηση της αλλαγής του κλίματος, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου συνεχίζουν να αυξάνονται αμείωτα. Η Εικόνα 12 παρουσιάζει την εξέλιξη των παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub> από το 1751 έως το 2017. Όπως φαίνεται, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> αυξήθηκαν από 2 δις. τόνους το 1900 σε πάνω από 36 δις. τόνους 115 χρόνια αργότερα. Και ενώ τα δεδομένα από το 2014 έως το 2017 υποδήλωναν ότι οι παγκόσμιες ετήσιες εκπομπές CO<sub>2</sub> είχαν σταθεροποιηθεί, τα στοιχεία του Global Carbon Project (Le Quéré, et al., 2018) έδειξαν μια περαιτέρω ετήσια αύξηση 2,7% και 0,6% για το 2018 και το 2019 αντίστοιχα.

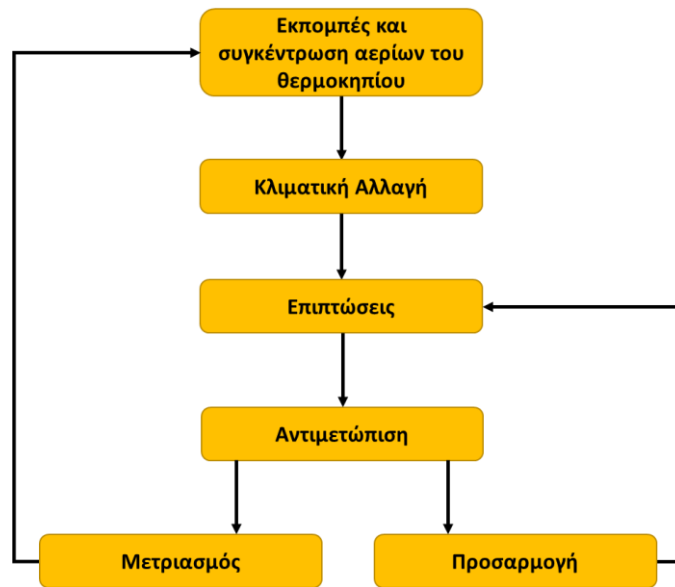


Εικόνα 12: Ετήσιες συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά περιοχή στη Γη την περίοδο 1751-2017

Η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής γίνεται μέσω δύο διακριτών προσεγγίσεων και στρατηγικών:

1. Μέσω μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και σταθεροποίηση των επιπέδων θερμικής παγίδευσης στην ατμόσφαιρα ("μετριασμός").
2. Μέσω προσαρμογής στην αλλαγή του κλίματος που ήδη βρίσκεται σε εξέλιξη ("προσαρμογή").

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 13, οι δύο αυτές στρατηγικές παρουσιάζουν ορισμένες διαφορές, ιδίως όσον αφορά τους στόχους τους. Ο μετριασμός προσπαθεί να αντιμετωπίσει τα αίτια της αλλαγής του κλίματος (δηλαδή τη συσσώρευση αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα), ενώ η προσαρμογή αντιμετωπίζει τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Και οι δύο προσεγγίσεις είναι απαραίτητες καθώς, ακόμη και με έντονες προσπάθειες μετριασμού, το κλίμα θα συνεχίσει να αλλάζει τις επόμενες δεκαετίες και άρα η προσαρμογή στις αλλαγές αυτές είναι απαραίτητη. Από την άλλη πλευρά, η προσαρμογή δεν θα είναι σε θέση να εξαλείψει όλες τις αρνητικές επιπτώσεις, και ο μετριασμός είναι ζωτικής σημασίας για τον περιορισμό των αλλαγών στο κλιματικό σύστημα στο μέλλον.



Εικόνα 13: Σχηματική απεικόνιση πρόκλησης και αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής

Η προσαρμογή και ο μετριασμός διαφέρουν επίσης όσον αφορά τις χωρικές κλίμακες: παρόλο που η κλιματική αλλαγή είναι ένα παγκόσμιο ζήτημα, τα οφέλη της προσαρμογής είναι τοπικά ενώ τα οφέλη από τον μετριασμό είναι παγκόσμια. Η προσαρμογή και ο μετριασμός διαφέρουν επίσης όσον αφορά τις χρονικές κλίμακες και τους σχετικούς τομείς προτεραιότητας (Πίνακας 5).

Πίνακας 5: Διαφορές στρατηγικών αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής (Πηγή: (Τοί, 2005)

	Μετριασμός	Προσαρμογή
<b>Χωρική κλίμακα</b>	Κυρίως ένα διεθνές ζήτημα, καθώς ο μετριασμός παρέχει παγκόσμια οφέλη.	Κυρίως ένα τοπικό ζήτημα, καθώς η προσαρμογή προσφέρει ως επί το πλείστον οφέλη σε τοπικό επίπεδο.
<b>Χρονική κλίμακα</b>	Ο μετριασμός έχει μακροπρόθεσμα αποτελέσματα λόγω της αδράνειας του κλιματικού συστήματος.	Η προσαρμογή μπορεί να έχει βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα αποτελέσματα στη μείωση της ευπάθειας.
<b>Τομείς</b>	Ο μετριασμός αποτελεί προτεραιότητα στους τομείς της ενέργειας, των μεταφορών, της βιομηχανίας και της διαχείρισης αποβλήτων.	Η προσαρμογή αποτελεί προτεραιότητα κυρίως στους τομείς των υδάτων και της υγείας και σε παράκτιες ή χαμηλές περιοχές.
<b>Στόχος</b>	Αντιμετώπιση αιτιών κλιματικής αλλαγής	Αντιμετώπιση επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής

### 2.7.1. Μετριασμός

Ο μετριασμός της κλιματικής αλλαγής συνεπάγεται τη μείωση της εκπομπής των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, είτε μειώνοντας τις πηγές αυτών των αερίων (π.χ. καύση ορυκτών καυσίμων για ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα ή μεταφορά), είτε ενισχύοντας τις λεκάνες απορρόφησης (sinks) που συσσωρεύουν και αποθηκεύουν αυτά τα αέρια (όπως οι

ωκεανοί, τα δάση και το έδαφος). Σύμφωνα με τα Ηνωμένα Έθνη, ο στόχος του μετριασμού είναι να αποφευχθεί στο μέγιστο δυνατό βαθμό η ανθρώπινη παρέμβαση στο κλιματικό σύστημα (μέσω των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων που συντελούν στην αλλαγή του κλίματος) και να σταθεροποιηθούν τα επίπεδα των αερίων του θερμοκηπίου σε ένα χρονοδιάγραμμα επαρκές ώστε να επιτρέψει στα οικοσυστήματα να προσαρμοστούν φυσικά στην κλιματική αλλαγή (IPCC, 2014).

#### 2.7.1.1. Μετριασμός της κλιματικής αλλαγής στον τομέα των Μεταφορών

Ο τομέας των μεταφορών αντιπροσωπεύει το 25% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Οι επιβατικές μεταφορές αντιπροσωπεύουν περίπου τα δύο τρίτα του ανωτέρου ποσοστού (63%), ενώ οι εμπορευματικές αντιπροσωπεύουν περίπου το ένα τρίτο ( Πίνακας 6).

**Πίνακας 6: Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας του τομέα των Μεταφορών (σε %) ανά μέσο μετακίνησης (Πηγή: (U.S. Energy Information Administration, 2016)**

	Μέσο Μετακίνησης	Ποσοστό (%)
Επιβατικές	Οδικές (Ι.Χ.)	43
	Οδικές (Λεωφορεία)	4
	Αεροπορικές	14
	Σιδηροδρομικές (Μετρό, Τραμ)	3
Εμπορευματικές	Οδικές (Βαρέα Οχήματα)	12
	Οδικές (Άλλα φορτηγά)	10
	Πλωτές	12
	Σιδηροδρομικές	2

Σύμφωνα με την Τέταρτη Έκθεση Αξιολόγησης της Διακυβερνητικής Επιτροπής του 2007, ο ρυθμός αύξησης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον τομέα των Μεταφορών είναι ο υψηλότερος από όλους τους τομείς που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας (IPCC, 2007). Αυτό εξηγείται μερικώς και από τη μεγάλη αύξηση της ιδιοκτησίας ιδιωτικών αυτοκινήτων που παρατηρείται, με τα 200 εκατομμύρια αυτοκίνητα που κυκλοφορούσαν το 1970 να φτάνουν τα 1.3 δις το 2016 (Davis, et al., 2018). Παρά τη σημαντική πρόοδο της ενεργειακής παραγωγικότητας, οι τρέχοντες ρυθμοί μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας για διάφορους τρόπους μεταφοράς, όπως τα αυτοκίνητα και τα αεροπλάνα, δεν συμβαδίζουν με την ταχεία ανάπτυξη αυτών των τρόπων μεταφοράς. Για παράδειγμα, το 2001, τα Ι.Χ. οχήματα και τα φορτηγά αντιπροσώπευαν το μεγαλύτερο μέρος των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα του τομέα των μεταφορών (περίπου 74%) (World Business Council for Sustainable Development, 2004). Ως εκ τούτου, τόσο σε τοπικό όσο και σε εθνικό επίπεδο, οι στρατηγικές για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που οφείλονται στον τομέα

των Μεταφορών θα πρέπει να στρέφονται πρωτίστως τόσο στα Ι.Χ. οχήματα όσο και στα φορτηγά.

#### **2.7.1.2. Μέτρα μετριασμού**

Η έρευνα στο χώρο του μετριασμού του τομέα των Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή δεν είναι νέα καθώς υπάρχει πλήθος βιβλιογραφικών πηγών με αναφορές σε πολιτικές, μέτρα και δράσεις που μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων που παράγονται από τις μετακινήσεις. Παρ'ότι έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες ομαδοποίησης και κατηγοριοποίησης των πρακτικών αυτών ανάλογα π.χ. με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, με το αν τα μέτρα μετριασμού αφορούν σε υπάρχοντα ή μελλοντικά οχήματα, κ.α., στην παρούσα διατριβή επιχειρείται μια απλούστερη ταξινόμηση σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Πολιτικές και μέτρα τα οποία αποσκοπούν στην μετατροπή ή αντικατάσταση υπαρχόντων μέσων μεταφοράς με μέσα χαμηλών εκπομπών αέριων ρύπων, των οποίων θα επιδιωχθεί η αύξηση μέσω της ανάπτυξης νέων τεχνολογιών και νέων οχημάτων
2. Πολιτικές και μέτρα, τα οποία αποσκοπούν στην μείωση των μετακινήσεων

Συγκεκριμένα για τη δεύτερη κατηγορία, πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ η μείωση της κινητικότητας υφίσταται ως στρατηγική μείωσης εκπομπών αέριων ρύπων, και άρα μείωσης της επίδρασης των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στο κλίμα, όμως η κοινωνική διάσταση αυτής της στρατηγικής μπορεί να επιφέρει εκτός των άλλων και κοινωνικό αποκλεισμό σε ομάδες μετακινούμενων που πιθανώς δεν θα έχουν τα οικονομικά μέσα να ανταπεξέλθουν στο κόστος της μετακίνησης (αν αυτό αυξηθεί υπέρμετρα σε μια προσπάθεια μείωσης της μετακίνησης), αφορμή αυξημένης επιτήρησης της κοινωνίας (για το εάν και κατά πόσο υπακούει σε μέτρα απαγόρευσης κυκλοφορίας για περιβαλλοντικούς λόγους), και έτσι σε ολοκληρωτισμό. Για το λόγο αυτό, η ανάπτυξη και εφαρμογή πολιτικών και μέτρων που αποσκοπούν στη μείωση των μετακινήσεων θα πρέπει να γίνεται με κοινωνικούς όρους, και με προσοχή από τους αρμοδίους φορείς για την αποφυγή κοινωνικών διακρίσεων.

Ο Πίνακας 7 παρουσιάζει συνοπτικά τα ευρήματα της βιβλιογραφικής επισκόπησης για τα μέτρα, τις πολιτικές και τις στρατηγικές μετριασμού με αναφορά τόσο σε συγκεκριμένα παραδείγματα όσο και στην εκτιμώμενη ή παρατηρηθείσα επίδραση των μέτρων αυτών στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, καυσίμων, εκπομπών αέριων ρύπων και ζήτησης για μετακινήσεις.

Πίνακας 7: Μέτρα μετριασμού για τον τομέα των Μεταφορών

Μέτρο – Πολιτική - Στρατηγική	Επεξήγηση - Παράδειγμα	Επίδραση	Πηγή	Κατηγορία
Πρώθηση πεζή μετακίνησης και μετακίνησης με ποδήλατο		Για μια μετακίνηση 2 χλμ., εκπομπές έως και 419 γραμμάρια λιγότερο CO <sub>2</sub> εφόσον αυτή η μετακίνηση αντικαθιστά μια μετακίνηση με ιδιωτικό όχημα.	(Salter, et al., 2011) (Vasconcellos, 2001) (Hook, 2003) (Gehl, 2010) (Bonham & Koth, 2010) (Garrard, et al., 2008) (Emond, et al., 2009)	1
Πρώθηση Μέσων Μαζικής Μεταφοράς – Λεωφορείο		Έως και 2.3 φορές λιγότερη κατανάλωση ενέργειας ανά επιβατοχιλιόμετρο (στοιχεία από 84 πόλεις στον κόσμο)	(Vuchic, 1981) (Newman & Kenworthy, 2006)	1
Πρώθηση Μέσων Μαζικής Μεταφοράς – Μετρό		Έως και 5.3 φορές λιγότερη κατανάλωση ενέργειας ανά επιβατοχιλιόμετρο (στοιχεία από 84 πόλεις στον κόσμο)	(Bailey, et al., 2008)	
Πρώθηση Μέσων Μαζικής Μεταφοράς – Τραμ		Έως και 4 φορές λιγότερη κατανάλωση ενέργειας ανά επιβατοχιλιόμετρο (στοιχεία από 84 πόλεις στον κόσμο)	(Vasconcellos, 2001) (Sierra, 2008)	
Πρώθηση εναλλακτικών επιλογών μετακίνησης	<ul style="list-style-type: none"> <li>Έκδοση ενιαίων εισιτηρίων για διαφορετικά μέσα μαζικής μεταφοράς, που διευκολύνουν τις πολυτροπικές μετακινήσεις</li> <li>Παροχή πληροφοριών, ιδίως σχετικά με τις διαδρομές, τα χρονοδιαγράμματα και το κόστος των υπηρεσιών μαζικής μεταφοράς</li> </ul>	Λιγότερες εκπομπές CO <sub>2</sub> μεταξύ 130-170 γραμμαρίων ανά χιλιόμετρο που δεν χρησιμοποιείται το Ι.Χ. αυτοκίνητο.	(Cervero & Kockelman, 1997)	1
Transit Oriented Development (Ανάπτυξη Προσαρμοσμένη στις Δημόσιες Μεταφορές)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Αστικός σχεδιασμός και ανάπτυξη χρήσεων γης που μεγιστοποιεί τα οφέλη διαδρόμων και κέντρων διαμεταφοράς (transit centers &amp; corridors)</li> </ul>	Απο 2.1 έως 3.3 φορές μικρότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου	(Trubka, et al., 2010) (Cervero, et al., 2002) (Dittmar & Ohland, 2004)	2
Μείωση της ανάγκης για μετακινήσεις	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ενθάρρυνση χρήσης μη-μηχανοκίνητων μέσων και MMM, επειδή οι μετακινούμενοι που χρησιμοποιούν αυτούς τους τρόπους μεταφοράς και όχι τα ιδιωτικά οχήματα ταξιδεύουν λιγότερο συνολικά</li> <li>Ανάπτυξη και δημιουργία πυκνότερων κοινοτήτων, έτσι ώστε οι άνθρωποι να είναι πιο κοντά στις δραστηριότητες και μεταξύ τους</li> <li>Πρώθηση μικτών χρήσεων γης, έτσι ώστε οι προορισμοί των μετακινούμενων (καταστήματα, σχολεία, χώροι εργασίας και τα σπίτια των φίλων, για παράδειγμα) να είναι επίσης πιο κοντά</li> <li>Μεγαλύτερη αυτονομία των κοινοτήτων, έτσι ώστε οι άνθρωποι να μπορούν να ικανοποιήσουν περισσότερες ανάγκες τους μέσα στις κοινότητές τους</li> <li>Ενθάρρυνση χρήσης τεχνολογίας πληροφοριών και επικοινωνιών για να μπορούν οι άνθρωποι να επικοινωνούν με άλλους, να λαμβάνουν πληροφορίες και να εκτελούν εργασίες</li> </ul>		(Salter, et al., 2011)	2



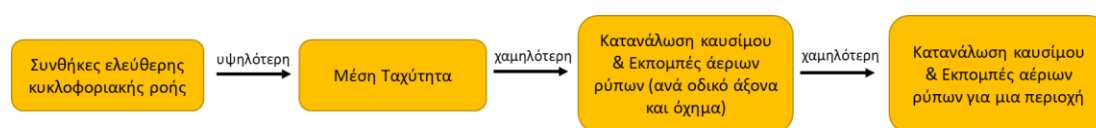
<p><b>Διαχείριση της ζήτησης για επιβατικές μετακινήσεις με ιδιωτικά μέσα</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Προγράμματα αλλαγής συμπεριφοράς</li> <li>• Πολιτική στάθμευσης (π.χ. με χρονικό περιορισμό κατάληψης θέσεων στάθμευσης, αύξηση κόστους στάθμευσης, κ.α.)</li> <li>• Κίνητρα και αντικίνητρα τιμών (καυσίμων, διοδίων, τελών κυκλοφορίας, φόρων συμφόρησης, κ.α.)</li> <li>• Περιορισμός περιοχών εντός των οποίων μπορούν να ταξιδεύουν ιδιωτικά οχήματα</li> <li>• Συνεπιβατισμός</li> <li>• Κοινή χρήση αυτοκινήτων (συνιδιοκτησία, οικονομία διαμοιρασμού)</li> </ul>	<p>Οι μειώσεις των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη διαχείριση της ζήτησης ιδιωτικών οχημάτων δεν είναι εύκολο να εκτιμηθούν συνολικά.</p> <p>Ένα από τα πιο επιτυχημένα προγράμματα αλλαγής συμπεριφοράς (TravelSmart) έχει καταφέρει μείωση των μετακινήσεων με Ι.Χ. οχήματα κατά 10% στην Αυστραλία. Μια ενδεχόμενη αύξηση του κόστους στάθμευσης ίση με το 50% του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας Ι.Χ. οχήματος, μπορεί να μειώσει τη ζήτηση για στάθμευση έως και 30% (Shenzen, Κίνα).</p> <p>Η ελαστικότητα της τιμής των καυσίμων υποδεικνύει ότι μια αύξηση της τάξης του 10% θα οδηγήσει σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 3% σε διάστημα ενός έτους ή και 5% σε 5 έως 10 χρόνια. Υπολογίζεται ότι περίπου το 50% της μείωσης στην κατανάλωση καυσίμου θα οφείλεται σε μειωμένη χρήση οχημάτων (Αυστραλία). Είναι πιθανόν η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου ως αποτέλεσμα αύξησης της τιμής του να είναι ανελαστική σε περιοχές, όπου οι εναλλακτικές λύσεις για μετακίνηση είναι περιορισμένες ή μη ελκυστικές. Άλλες πρακτικές όπως η επιβολή διοδίων, μπορούν να μειώσουν τη συμφόρηση έως και κατά 21% (Λονδίνο).</p>	<p>(Shoup, 1997) (Cambridge Systematics, 2009) (Litman, 2011) (Rye, 2010) (Cervero, 2009) (Barter, 2010) (Transport for London, 2007) (Hargroves &amp; Smith, 2005)</p>	<p>1</p>
<p><b>Βελτίωση των προτύπων λειτουργίας Ι.Χ. οχημάτων</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Πρότυπα για οικονομία και απόδοση καυσίμου Ι.Χ. οχημάτων</li> <li>• Πρότυπα εκπομπών ρύπων για Ι.Χ. οχήματα</li> <li>• Έλεγχοι Ι.Χ. οχημάτων</li> <li>• Υποχρεωτική υιοθέτηση συγκεκριμένων τεχνολογιών οχημάτων ή προτύπων σχεδιασμού</li> <li>• Φορολογία και μέτρα τιμολόγησης για την απόδοση του οχήματος</li> <li>• Συμπερίληψη των προτύπων εκπομπών στις εγγυήσεις</li> <li>• Αποκλεισμός παλαιότερων οχημάτων από τους δρόμους</li> <li>• Πρότυπα για την ποιότητα των καυσίμων</li> <li>• Εκπαίδευση οδηγών και ιδιοκτητών οχημάτων για τα καθαρά καύσιμα, για τη συντήρηση των οχημάτων, για περιβαλλοντικούς τρόπους οδήγησης, κ.α.</li> <li>• Οφέλη από βελτιωμένες λειτουργικές επιδόσεις</li> </ul>	<p>Ένα καλά συντηρημένο όχημα χρησιμοποιεί μεταξύ 3% και 7% λιγότερα καύσιμα και ως εκ τούτου οδηγεί σε ανάλογη μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub></p> <p>Τα πρότυπα εκπομπών ρύπων είναι χρήσιμα για τη μείωση των εκπομπών που προκαλούν τοπική ρύπανση, όπως αιωρούμενα σωματίδια (SPM), οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>), μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, επειδή αυτοί οι τοπικοί ατμοσφαιρικοί ρύποι μπορούν να περιοριστούν χωρίς να μειωθεί η κατανάλωση καυσίμων, με την τοποθέτηση συσκευών ελέγχου εκπομπών στα οχήματα. Η εφαρμογή τέτοιων προτύπων έχει μεγαλύτερα οφέλη σε χώρες όπως η Κίνα, το Μεξικό, κ.λπ. και λιγότερα σε χώρες της ΕΕ.</p> <p>Σε όλο τον κόσμο ένα μικρό ποσοστό των οχημάτων (περίπου 10%) είναι υπεύθυνο για ένα μεγάλο μέρος της ρύπανσης (περίπου 50%). Οι έλεγχοι και οι επιθεωρήσεις οχημάτων μπορούν να οδηγήσουν σε ταχύτερη υιοθέτηση διατάξεων ελέγχου των εκπομπών αερίων ρύπων.</p> <p>Η απαίτηση από τους κατασκευαστές και πωλητές νέων αυτοκινήτων να συμπεριλάβουν τα επίπεδα εκπομπών στις εγγυήσεις τους δημιουργεί ένα κίνητρο για να κάνουν ότι</p>	<p>(Salter, et al., 2011) (Tiffany &amp; Lewison, 2008) (Kolke, 2005) (Govinda &amp; Dulal, 2009) (Pandey, 2006)</p>	<p>1</p>

		μπορούν για να μειώσουν τις εκπομπές. Οι οδηγοί και οι ιδιοκτήτες θα έχουν επίσης περισσότερα κίνητρα να ελέγχουν το όχημά τους εάν γνωρίζουν ότι το κόστος οποιωνδήποτε επισκευών ή εργασιών συντήρησης καλύπτεται από την εγγύηση. Τα οχήματα που καλύπτονται από μια τέτοια εγγύηση θα μπορούσαν να απαλλαγούν από οποιοδήποτε τέλος εκπομπών.		
<b>Διαχείριση της κυκλοφορίας</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Επιβολή μέτρων κατευνασμού της κυκλοφορίας (traffic calming measures)</li> <li>• Εφαρμογή τεχνολογιών Ευφυών Μέσων Μεταφοράς</li> <li>• Έλεγχος της κυκλοφορίας σε διασταυρώσεις – προτεραιότητα MMM</li> </ul>			1
<b>Ηλεκτρικά οχήματα ηλεκτροκίνηση</b> -		<p>Η επίδραση των ηλεκτροκίνητων οχημάτων στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου εξαρτάται από:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• τη σχετική απόδοση του ηλεκτρικού συστήματος κίνησης, που είναι συνήθως 3 φορές αποδοτικότερη συγκριτικά με ένα όχημα μηχανής εσωτερικής καύσης</li> <li>• οι απώλειες στο δίκτυο ηλεκτρικής μετάδοσης και διανομής, οι οποίες είναι κατά κανόνα λιγότερο από 10% για ένα σύγχρονο κεντρικό ενεργειακό δίκτυο (αλλά σημαντικά περισσότερες για άλλα δίκτυα)</li> <li>• η ένταση άνθρακα (carbon intensity) της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας</li> </ul>	(Boston Consulting Group, 2010) (International Energy Agency, 2009)	1
<b>Τεχνολογίες κίνησης και καυσίμων</b>	<p>Αντικατάσταση της τεχνολογίας κίνησης των οχημάτων (συνήθως κινητήρων εσωτερικής καύσης με ανάφλεξη από σπινθήρα) με αποδοτικότερες τεχνολογίες, όπως:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Κινητήρες εσωτερικής καύσης με συμπίεση</li> <li>• Μικρο τουρμπίνες (micro turbines)</li> <li>• Κύτταρα καυσίμου (fuel cells)</li> <li>• Υβριδικοί κινητήρες</li> </ul> <p>Αντικατάσταση της τεχνολογίας καυσίμων των οχημάτων (συνήθως ορυκτών καυσίμων) με λιγότερο ρυπογόνες τεχνολογίες, όπως:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Φυσικό αέριο</li> <li>• LPG</li> <li>• Συνθετικό ντίζελ &amp; Βιοντίζελ</li> <li>• Αιθανόλη</li> <li>• Υδρογόνο</li> <li>• Μεθανόλη</li> </ul>	<p>Η απόδοση μετατροπής καυσίμου σε μηχανική ενέργεια (κινητήρες εσωτερικής καύσης με ανάφλεξη από σπινθήρα) είναι 15% με 20%, με μέγιστη απόδοση 32%. Η απόδοση αυτή για κινητήρες εσωτερικής καύσης με συμπίεση είναι 22% με 28%, με μέγιστη απόδοση 43%, για κινητήρες με μικρο τουρμπίνες 26% και με κύτταρα καυσίμου 36%. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόδοση μετατροπής, τόσο μικρότερες είναι οι εκπομπές αερίων ρύπων.</p>	(Von Helmlolt & Eberle, 2007) (Mueller-Langer, et al., 2007) (Bartels, et al., 2010) (Birch, 2010) (European Environmental Agency, 2010)	1

Πρέπει εδώ να σημειωθεί, ότι ένα μέρος των μέτρων που αναφέρονται παραπάνω, θα είναι αποτελεσματικό για τη μείωση της χρήσης ιδιωτικών οχημάτων μόνο εάν υπάρχουν και προσφέρονται εναλλακτικά μεταφορικά μέσα (δηλαδή Μ.Μ.Μ., υποδομές πεζή μετακίνησης και ποδηλάτων) όταν και όπου τα χρειάζονται οι μετακινούμενοι ή εάν οι Τεχνολογίες Πληροφοριών και Επικοινωνιών (ΤΠΕ) μπορούν να αντικαταστήσουν την ίδια τη μετακίνηση.

Κάποια από τα μέτρα μετριασμού των εκπομπών αέριων ρύπων στον τομέα των Μεταφορών αντιμετωπίζονται συχνά σαν πανάκεια και χρησιμοποιούνται ως τέτοια από τις αρχές, χωρίς επαρκή ανάλυση όλων των παραμέτρων τους. Έτσι, για παράδειγμα, το μέτρο επιβολής διοδίου κυκλοφοριακής συμφόρησης (congestion toll) στο Λονδίνο, τη Σιγκαπούρη και το Όσλο, που αφορά συγκεκριμένες κεντρικές περιοχές (ζώνες) για συγκεκριμένες ώρες της μέρας, ως ένα μέσο αποσυμφόρησης και άρα μείωσης των εκπομπών, εκθειάζεται συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία ως καλή πρακτική μείωσης της συμφόρησης έως και το 20%. Δεν γίνεται όμως επαρκής αναφορά στα σημαντικά θέματα προσβασιμότητας και αποκλεισμού που εγείρει ένα τέτοιο μέτρο στους μετακινούμενους που δεν έχουν τη δυνατότητα να πληρώσουν διόδιο, ούτε και στη χωρική και χρονική μετατόπιση της συμφόρησης και των αντίστοιχων επιπτώσεων.

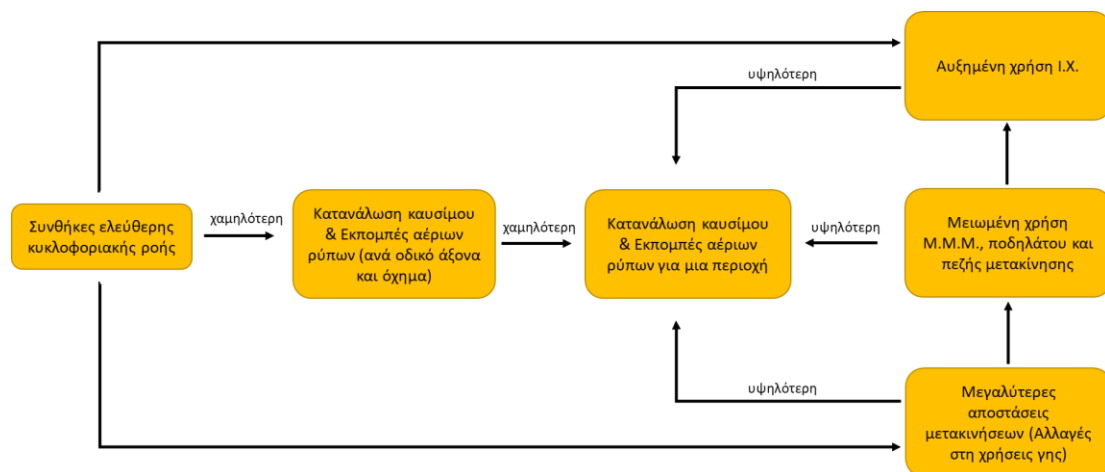
Συχνά οι αρχές εντοπίζουν το πρόβλημα των εκπομπών ρύπων από τον τομέα των Μεταφορών στην ύπαρξη υψηλού επιπέδου κυκλοφοριακής συμφόρησης. Θεωρούν ότι η λύση έγκειται στην βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών, στη μείωση δηλαδή της συμφόρησης. Προσφεύγουν λοιπόν σε διάφορα μέτρα που μερικώς (και βραχυπρόθεσμα) αντιμετωπίζουν το πρόβλημα. Η μερική αυτή θεώρηση βασίζεται στην υπόθεση ότι η λύση της βελτίωσης των κυκλοφοριακών συνθηκών θα οδηγήσει γραμμικά σε μικρότερη κατανάλωση καυσίμων και επομένως σε χαμηλότερες εκπομπές αέριων ρύπων (Εικόνα 14).



**Εικόνα 14: Γραμμική θεώρηση κυκλοφοριακών συνθηκών και εκπομπών αέριων ρύπων**

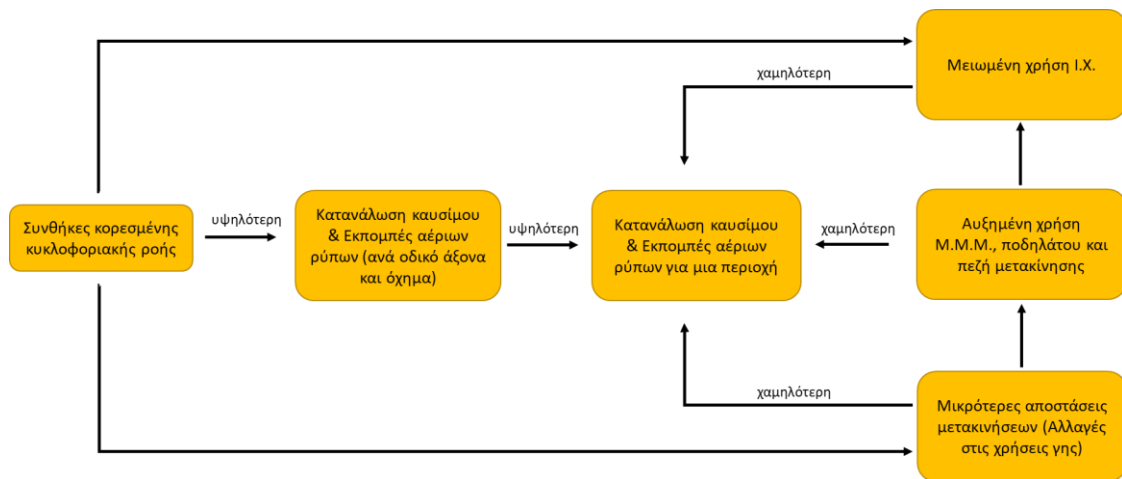
Η θεώρηση αυτή εν τέλει είναι λανθασμένη, διότι αυτό που παρατηρείται σε περιπτώσεις, όπου η μετακίνηση με ιδιωτικά μέσα διευκολύνεται με οποιοδήποτε τρόπο, είναι το φαινόμενο της παράγωγης κυκλοφορίας (induced travel): για ένα βραχύ χρονικό διάστημα φαίνεται ότι το όποιο μέτρο ρευστοποίησης της ροής φέρει αποτελέσματα, όμως οι βελτιωμένες κυκλοφοριακές συνθήκες ελκύουν πρόσθετη ζήτηση για μετακινήσεις με ιδιωτικά μέσα (και άρα ακυρώνουν τα μέτρα που λήφθηκαν για την βελτίωση των συνθηκών

(Εικόνα 15). Είναι απαραίτητο να ειπωθεί εδώ ότι η αυτοκίνηση σε πεπερασμένο χώρο προσομοιάζει αυτήν ενός αέριου σε κλειστό χώρο, με την τάση κατάληψης όλου του όγκου του. Έτσι, νέες οδικές υποδομές νομοτελειακά θα υπόκεινται σε εξάντληση της κυκλοφοριακής τους ικανότητας. Αυτό που επίσης παρατηρείται συχνά είναι το παράδοξο του γερμανού μαθηματικού Braess (1968): η προσθήκη ενός ή περισσότερων οδικών αξόνων σε ένα δίκτυο κυκλοφορίας με σκοπό την αποσυμφόρηση τους και μείωση της διάρκειας μετακίνησης, μπορεί να επιβραδύνει τη συνολική ροή της κυκλοφορίας, αυξάνοντας τον συνολικό χρόνο διαδρομών (Frank, 1981).



Εικόνα 15: Θεώρηση κυκλοφοριακών συνθηκών ελεύθερης ροής και εκπομπών αέριων ρύπων

Τα μέτρα που τελικά έχουν τη δυνατότητα να μετριάσουν σημαντικά τις εκπομπές αέριων ρύπων στον τομέα των Μεταφορών (για τις οδικές μεταφορές), είναι εκείνα τα μέτρα τα οποία δεν προσβλέπουν σε βελτίωση των κυκλοφοριακών συνθηκών (Εικόνα 16). Ενώ αυτό μπορεί να φαίνεται αντιφατικό, και πιθανώς πολιτικά ασύμφορο για τις εθνικές και τοπικές αρχές διακυβέρνησης, είναι ο μόνος τρόπος μετριασμού, που στρατηγικά ευσταθεί.



Εικόνα 16: Θεώρηση κυκλοφοριακών συνθηκών κορεσμένης ροής και εκπομπών αέριων ρύπων

Ένα άλλο παράδειγμα μέτρου μετριασμού που μπορεί να έχει αντίθετα από τα επιθυμητά αποτελέσματα, αφορά στις συνολικές βελτιώσεις του οχήματος, ώστε να μειωθεί η κατανάλωση καυσίμου (οικονομία κατανάλωσης καυσίμου, πρότυπα απόδοσης οχημάτων), και περιγράφεται από το παράδοξο του Jevons. Το 1865 ο Άγγλος οικονομολόγος Jevons παρατήρησε ότι οι τεχνολογικές βελτιώσεις που αύξαναν την αποδοτικότητα χρήσης άνθρακα οδήγησαν στην αύξηση της χρήσης και κατανάλωσης του άνθρακα σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών. Σήμερα, το ευρέως γνωστό παράδοξο στην περιβαλλοντική οικονομία χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις περιπτώσεις, όπου η τεχνολογική πρόοδος ή οι κυβερνητικές πολιτικές αυξάνουν μεν την αποτελεσματικότητα με την οποία χρησιμοποιείται ένας πόρος (μειώνοντας την αναγκαία ποσότητα για οποιαδήποτε χρήση), αλλά το ποσοστό κατανάλωσης αυτού του πόρου αυξάνεται λόγω της αυξανόμενης ζήτησης. Για το λόγο αυτό συνιστάται να εφαρμόζεται το μέτρο φορολόγησης εκπομπών αέριων ρύπων αντί της επιβολής προτύπων οικονομίας και απόδοσης καυσίμων, το οποίο κάνει τη μετακίνηση ακριβότερη, χωρίς την εμφάνιση του παραδόξου του Jevons.

Είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον συνολικά το πώς ενώ τόσο το παράδοξο του Braess όσο και αυτό του Jevons είναι γνωστά εδώ και πολλές δεκαετίες, και όχι μόνο στην επιστημονική κοινότητα, οι αρχές συνεχίζουν να επενδύουν σε μέτρα των οποίων τελικά η δυναμική συνεισφορά είναι αν όχι αντίθετη του αναμενομένου, σημαντικά περιορισμένη.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η εφαρμογή μέτρων μετριασμού δεν μπορεί να γίνει μονοδιάστατα – έχοντας υπόψη μόνο τη δυναμική συνεισφορά κάποιων μέτρων στην μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων στον τομέα των Μεταφορών. Μια σειρά μέτρων και πολιτικών που παρατίθενται στην ενότητα αυτή έχουν έντονη κοινωνική διάσταση καθώς πιθανή εφαρμογή τους θα επηρέαζε σημαντικά τα οικονομικά ασθενέστερα τμήματα της κοινωνίας,

π.χ. τους ανθρώπους που δεν έχουν τη δυνατότητα αγοράς οχημάτων με χαμηλές εκπομπές αέριων ρύπων, αυτούς που αν απογορευόταν η χρήση του οχήματος τους, δεν θα είχαν εναλλακτικούς τρόπους πρόσβασης στον προορισμό τους, κ.λπ. Για το λόγο αυτό συνιστάται μια συνολική θεώρηση κινήτρων και αντικινήτρων, μέτρων και αντιμέτρων, για τους μετακινούμενους.

Από τη φύση των μέτρων, πρακτικών και πολιτικών μετριασμού που παρουσιάζονται στην Ενότητα αυτή γίνεται σαφές ότι η μεγάλη πλειονότητά τους κατευθύνεται προς τη λιγότερη δυνατή χρήση και παρουσία των ιδιωτικών μέσων μεταφοράς στο δομημένο περιβάλλον. Ενώ αυτό το γεγονός είναι γενικά εύκολα κατανοητό στην θεωρία – εφόσον όπως παρουσιάστηκε τα  $\frac{3}{4}$  των παγκόσμιων εκπομπών αέριων ρύπων προέρχονται από τις οδικές μεταφορές, και δη από τη χρήση Ι.Χ. οχημάτων και φορτηγών – η πράξη απέχει παρασάγγας. Στην προκειμένη περίπτωση, οι λόγοι που αυτό συμβαίνει δεν είναι τεχνικοί, αλλά οικονομικοπολιτικοί, καθώς ο βασικός πολέμιος της εφαρμογής των μέτρων αυτών, και άρα του μετριασμού των επιπτώσεων του τομέα των Μεταφορών στην αλλαγή του κλίματος, είναι ο τομέας της αυτοκινητοβιομηχανίας, ο οποίος ασκεί ηγεμονικό ρόλο στο lobby που συμπεριλαμβάνει τα δίκτυα εμπορίας και χρηματοδότησης (δανεισμού) απόκτησης ιδιωτικών οχημάτων καθώς και τους κατασκευαστές και διαχειριστές μεγάλων οδικών υποδομών (βλέπε και σκάνδαλο Dieseltgate). Ο τομέας αυτός μέσω των μεγάλων εταιριών και επιχειρήσεων του χώρου, είναι συνεργάσιμος και ανοιχτός στην εφαρμογή εκείνων μόνο των μέτρων, τα οποία με το ελάχιστο δυνατό κόστος θα του επιτρέψουν να διατηρήσει ή και να επεκτείνει την κυριαρχία του στο μερίδιο των μετακινήσεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ηλεκτροκίνηση, όπου ενώ τα τεχνολογικής και τεχνικής φύσης ζητήματα είναι εν πολλοίς λυμένα, η ευρεία υιοθέτηση τέτοιων οχημάτων θα γίνει μόνο όταν ο τομέας της αυτοκινητοβιομηχανίας θα μπορεί να αποκομίσει τα μέγιστα οικονομικά οφέλη, όταν δηλαδή μεταξύ άλλων το κόστος παραγωγής συσσωρευτών ενέργειας θα μειωθεί σημαντικά και όταν το κόστος ανάπτυξης της απαραίτητης υποδομής επαναφόρτισης των ηλεκτροκίνητων οχημάτων θα μετακυλιστεί στους φορολογούμενους (ανεξαρτήτως απλής χρήσης ή και ιδιοκτησίας). Το παράδειγμα της ηλεκτροκίνησης είναι επίσης ενδιαφέρον, διότι ενώ παρουσιάζεται ως το 'μέλλον' για τις μεταφορές, και τη μετάβαση τους σε "καθαρότερα" επίπεδα, αποκρύπτεται σε μεγάλο βαθμό από τη δημόσια συζήτηση η απαιτούμενη κατανάλωση ενέργειας (και άρα εκπομπής ρύπων) για την παραγωγή της. Είναι αναντίστοιχο να γίνεται ανάλυση των πλεονεκτημάτων της ηλεκτροκίνησης ως λύσης φιλικής στο περιβάλλον για τις μεταφορές, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη, ότι, για παράδειγμα, η παραγωγή αυτής της ενέργειας στην Γαλλία γίνεται από πυρηνικά εργοστάσια, με όποιες

απειλές αυτά αντιπροσωπεύουν (και άρα μηδενικές εκπομπές ρύπων) ενώ στην Γερμανία κυρίως από κάυση λιγνίτη.

Ένα πρόσθετο ζήτημα που εγείρεται αναφορικά με την εφαρμογή μέτρων μετριασμού είναι αυτό της χωρικής κλίμακας. Για παράδειγμα, το μέτρο επιβολής προτύπων οικονομίας καυσίμου αφορά αφενός μόνο καινούργια οχήματα, και αφετέρου, με εξαίρεση χώρες όπως η Κίνα, η Ινδία ή η Βραζιλία που κατασκευάζουν δικά τους οχήματα, άλλες 'αναπτυσσόμενες' χώρες μπορούν να επιβάλουν πρότυπα μόνο με απαγόρευση εισαγωγών οχημάτων που δεν πληρούν τα πρότυπα αυτά. Πολλές από αυτές τις χώρες καταλήγουν τελικά να χρησιμοποιούν φθηνότερα και μεταχειρισμένα οχήματα, των οποίων η χρήση σε πλουσιότερες χώρες έχει απαγορευτεί ή καταργηθεί, και τα οποία έχουν σημαντικά χαμηλότερη οικονομία καυσίμου. Για το λόγο αυτό, μια πιο συνεπής παγκόσμια προσέγγιση αναφορικά με τα πρότυπα απόδοσης και οικονομίας των καυσίμων θα συνέβαλλε αποφασιστικά στη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά κάποια μέτρα και πολιτικές (όπως π.χ. τα μέτρα για τη βελτίωση της ποιότητας των καυσίμων) που δεν μειώνουν πάντοτε τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Παρόλα αυτά, η οικοδόμηση ενός πνεύματος ευθύνης για τις εκπομπές των οχημάτων πρέπει να περιλαμβάνει και την ευθύνη για τη μείωση ή την εξάλειψη τόσο των τοξικών ρύπων (οξειδία N, S, C, όσο και των αερίων θερμοκηπίου. Η ανάπτυξη αισθήματος ευθύνης για κάθε ένα από αυτά τα θέματα θα διευκόλυε την ανάπτυξη αισθήματος ευθύνης και για τα άλλα. Άλλωστε αυτό είναι και το κριτικό βάθρο της κοινωνικής και πολιτικής Οικολογίας (βλ. μεταξύ άλλων Ivan Illich).

Το καθένα από τα μέτρα που περιγράφονται σε αυτή την ενότητα αποτελεί μέρος μιας ευρύτερης θεώρησης μετριασμού. Οι μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου θα προκύψουν συνεργατικά από τη μετάβαση σε άλλους τρόπους μεταφοράς, από τα μειωμένα επίπεδα μετακινήσεων (τα μέτρα αυτά πρέπει να υιοθετούνται μόνο έπειτα από κριτική αξιολόγηση των πιθανών αρνητικών κοινωνικών τους επιπτώσεων, σε ευπαθείς οικονομικά και μεταφορικά ομάδες πληθυσμού), και από την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών οχημάτων και καυσίμων. Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι τουλάχιστον στο βραχυπρόθεσμο έως μεσοπρόθεσμο μέλλον, τα τεχνικά και τεχνολογικά μέτρα που παρουσιάζονται δεν μπορούν, ούτε μεμονωμένα, ούτε καν μαζί, να μειώσουν πλήρως τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στο βαθμό που είναι απαραίτητο, και άρα η προσπάθεια ανάδειξής τους ως μοναδικής λύσης στο πρόβλημα είναι λανθασμένη. Τέλος, είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι η μέχρι σήμερα εν μέρει αποτυχία του συστήματος να πείσει τους μετακινούμενους (για

διάφορους λόγους) να επιλέξουν μέσα μετακίνησης φιλικότερα προς το περιβάλλον, ή με άλλα λόγια, η ανάδειξη της ιδιωτικής μετακίνησης ως κοινωνικό και οικονομικό status-quo, δεν πρέπει να σταματήσει την κοινωνική πίεση στις εμπλεκόμενες αρχές για εξεύρεση λύσεων προς την κατεύθυνση αποθάρρυνσης χρήσης Ι.Χ. οχημάτων και ενθάρρυνσης χρήσης εναλλακτικών μέσων μετακίνησης. Η προσέγγιση *push and pull*, δηλαδή η ενθάρρυνση (ή και επιβολή σε ένα βαθμό) με διάφορα μέσα των μετακινούμενων να αφήσουν τα ιδιωτικά μέσα μεταφοράς (=push) και να επιλέξουν τα μαζικά μέσα μετακίνησης (π.χ. Δημόσιες Συγκοινωνίες) ή μη μηχανοκίνητα μέσα (=pull) εξακολουθεί να είναι πιο επίκαιρη από ποτέ όσο η κλιματική αλλαγή γίνεται πιο αισθητή.

### **2.7.2. Προσαρμογή**

Η προσαρμογή περιλαμβάνει την προσαρμογή στο πραγματικό ή στο αναμενόμενο μελλοντικό κλίμα. Βασικός στόχος της προσαρμογής είναι η μείωση της ευπάθειας και της ευαισθησίας του φυσικού και του δομημένου περιβάλλοντος στις επιβλαβείς συνέπειες της αλλαγής του κλίματος. Τα μέτρα προσαρμογής στοχεύουν επίσης στην αξιοποίηση των πιθανών ωφέλιμων ευκαιριών που συνδέονται με την αλλαγή του κλίματος (για παράδειγμα, μεγαλύτερες εποχές καλλιέργειας ή αυξημένες αποδόσεις σε ορισμένες περιοχές).

#### **2.7.2.1. Προσαρμογή του τομέα των Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή**

Η παρούσα διδακτορική διατριβή υιοθετεί τον ορισμό της *προσαρμογής* στην κλιματική αλλαγή ως “εκείνες τις πρωτοβουλίες και τα μέτρα που μπορούν να μειώσουν την τρωτότητα των οικοσυστημάτων απέναντι τόσο στα πραγματικά όσο και στα αναμενόμενα αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής” (Parry, et al., 2007). Διάφορες επιστημονικές δημοσιεύσεις, αναφορικά με την προσαρμογή των Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή κατά τη δεκαετία του 1980, περιορίστηκαν σε προσπάθειες να ορίσουν την έννοια αυτή. Ήταν ουσιαστικά το 1988, οπότε και δημιουργήθηκε η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), που έγιναν στοχευμένες προσπάθειες για να προσδιοριστούν πιθανές λύσεις (με τη μορφή μέτρων) για το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής (Houghton, et al., 1990). Παρά την εκτεταμένη έρευνα που διεξήχθη στο πεδίο αυτό, η IPCC δεν ανέφερε την έννοια της προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή παρά μόνο στη δεύτερη Έκθεση Αξιολόγησής της το 1995 (Houghton, et al., 1996). Η αναγκαιότητα των στρατηγικών προσαρμογής ενάντια στις επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος, αναγνωρίστηκε στην 3η Έκθεση Αξιολόγησής της IPCC το 2001, στην οποία δηλώθηκε ότι επειδή τα μέτρα μετριασμού δεν θα αρκούν για να



αποτραπεί η κλιματική αλλαγή, “τα μέτρα και οι πολιτικές προσαρμογής θα είναι απαραίτητες” (McCarthy, et al., 2001).

Στο μεταξύ διάστημα, διάφοροι ερευνητές στη δεκαετία του 1990 υποστήριξαν ότι τα συστήματα θα προσαρμοστούν “από μόνα τους στις συνεχώς μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες”, πράγμα που μέχρι σήμερα τουλάχιστον διαψεύδεται (Rosenzweig & Parry, 1994). Οι Smithers και Smit το 1997 ήταν οι πρώτοι που πρότειναν την ταξινόμηση των στρατηγικών προσαρμογής βάσει των χαρακτηριστικών των κλιματικών φαινομένων και των ιδιοτήτων τους σε αντίθεση με το παρελθόν όπου οι προσπάθειες προσαρμογής των συστημάτων και δικτύων των Μεταφορών ήταν γενικού χαρακτήρα (Smithers & Smit, 1997).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, η έρευνα για την προσαρμογή επιταχύνθηκε ριζικά. Πρώτα, οι Smit, Burton, Klein και Street αναρωτήθηκαν “ποιος ή τι προσαρμόζεται” (Smit, et al., 1999). Αυτή η ερώτηση άνοιξε μια νέα προοπτική στην έρευνα μέτρων προσαρμογής, καθώς υπαινίχθηκε ότι τα μέτρα προσαρμογής θα μπορούσαν να διαφέρουν, ανάλογα με τον τομέα της ανθρώπινης δραστηριότητας (Μεταφορές, Ενέργεια, Νερό, κ.λπ.). Ιδιαίτερα μάλιστα για τις Μεταφορές, τα μέτρα προσαρμογής είναι πολύ διαφορετικά, ανάλογα και με το μέσο μεταφοράς που εξετάζεται.

Το 2002, το νεοουσταθέν Πρόγραμμα για τις Κλιματικές Επιπτώσεις στο Ηνωμένο Βασίλειο (UKCIP), δημοσίευσε ένα κατάλογο σεναρίων που συνόψιζαν τις επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής και πρότειναν μια σειρά επιλογών για την αντιμετώπισή τους, συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στην έρευνα των επιπτώσεων και στις στρατηγικές προσαρμογής (UKCIP, 2002). Την ίδια περίοδο, διάφοροι ερευνητές έκαναν μια ακόμη πιο εμπειριστατωμένη προσέγγιση στο θέμα των επιπτώσεων, και στις επιλογές προσαρμογής στο δομημένο περιβάλλον. Αντίστοιχες εθνικές προσπάθειες έχουν καταγραφεί από τότε και σε άλλες χώρες μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα.

Στα επόμενα χρόνια, διάφοροι ερευνητές κατήθυναν τις έρευνές τους σε συγκεκριμένους τομείς δραστηριοτήτων όπως οι Μεταφορές. Τον Οκτώβριο του 2001, το Κέντρο Tyndall για την Έρευνα της Κλιματικής Αλλαγής οργάνωσε ένα εργαστήριο, όπου ειδικοί από όλο τον κόσμο συζήτησαν τα αποτελέσματα της τελευταίας αξιολόγησης για την κλιματική αλλαγή, και έθεσαν το πλαίσιο για τις πολιτικές και τις στρατηγικές που πρέπει να ακολουθηθούν για τον επιτυχή περιορισμό των επιπτώσεων της (Adger, et al., 2003). Η ημερίδα, που οργανώθηκε μόλις μερικούς μήνες μετά την 3η Έκθεση Αξιολόγησης του IPCC, ανέδειξε τον αντίκτυπο και την επίδραση της έκθεσης, καθώς και το αυξανόμενο ενδιαφέρον της

ερευνητικής κοινότητας στο θέμα της κλιματικής αλλαγής. Το 2003, οι Eddowes Waller, Taylor, Briggs, Meade και Ferguson επιχείρησαν να προσεγγίσουν τις στρατηγικές προσαρμογής ανά μεταφορικό μέσο, αφού ανέλυσαν τις επιπτώσεις σε θέματα ασφαλείας, λόγω της επιδείνωσης των καιρικών συνθηκών (Eddowes, et al., 2003). Αυτή ήταν μία από τις πρώτες ερευνητικές προσπάθειες για την κλιματική αλλαγή που επικεντρώθηκε άμεσα στις Μεταφορές, και στα επιμέρους μέσα μεταφοράς, ανοίγοντας το δρόμο για περαιτέρω σχετική έρευνα.

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (European Environmental Agency), προσέγγισε το θέμα της τρωτότητας διαφόρων τομέων στην κλιματική αλλαγή, το 2005, τονίζοντας επίσης την ανάγκη για προσαρμογή στις αναδυόμενες αλλαγές, δίνοντας έμφαση όχι μόνο στη συζήτηση των επιπτώσεων και των μέτρων προσαρμογής, αλλά και στην πορεία των ενεργειών που πρέπει να ακολουθούνται, εντός των ορίων της ΕΕ (European Environment Agency, 2005). Το έργο του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος ήταν η μία από τις δυο προσεγγίσεις για την προσαρμογή, που έγιναν από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Το 2009, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε την Πράσινη Βίβλο για την ενσωμάτωση της προσαρμογής στην ΕΕ, καθώς και τη συμμετοχή της Ευρωπαϊκής κοινωνίας στις στρατηγικές προσαρμογής (European Commission, 2009).

Στα μέσα της δεκαετίας του 2000, τα Ηνωμένα Έθνη (Ο.Η.Ε.), δημοσίευσαν μια έκθεση με τη μορφή οδηγού, για το σχεδιασμό και την υλοποίηση των έργων που μπορούν να μειώσουν την ευπάθεια στην κλιματική αλλαγή, και να ενισχύσουν τις τυχόν ευεργετικές επιπτώσεις (όπως το λιώσιμο των πάγων που ανοίγει νέες οδούς μεταφορών (United Nations Development Programme, 2005). Ωστόσο, ήταν η 4η Έκθεση Αξιολόγησης του IPCC το 2007, που σηματοδότησε την αρχή μιας νέας εποχής για την έρευνα στο χώρο της προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή.

Στα χρόνια που ακολούθησαν, οι εκθέσεις και οι αναφορές σχετικά με την κλιματική αλλαγή εστιάστηκαν περισσότερο στην ανάλυση των επιπτώσεών της στις υποδομές και στα δίκτυα Μεταφορών, παρά στο θεωρητικό υπόβαθρο της έννοιας της προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή και στα μέτρα αντιμετώπισής της. Έκτοτε, και δεδομένης της συνεχούς επιδείνωσης του κλίματος, οι τομεακές εκθέσεις και λοιπές δημοσιεύσεις πολλαπλασιάζονται, αναφερόμενες σε διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες (γεωργία, υγεία, κ.λπ.). Το 2008, το Transportation Research Board (TRB) εξέδωσε την Ειδική Έκθεση αρ.290 σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις Μεταφορές των Η.Π.Α., και τις σχετικές επιλογές προσαρμογής.

Ένα χρόνο αργότερα, οι Koetse και Rietveld δημοσίευσαν ένα άρθρο, στο οποίο επικεντρώθηκαν στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις υποδομές των Μεταφορών, και στη λειτουργικότητα των δικτύων υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες. Αυτή η επιστημονική δημοσίευση αποτελεί μέχρι σήμερα την πληρέστερη αναφορά για τις επιπτώσεις αυτές. Το άρθρο έδωσε ιδιαίτερη προσοχή στις οικονομικές προοπτικές των επιπτώσεων, ακολουθώντας τα βήματα της έκθεσης Stern<sup>13</sup> σχετικά με τα οικονομικά της κλιματικής αλλαγής (Koetse & Rietveld, 2009) (Stern, 2008) για να καταλήξει στην αναγκαία εξεύρεση μέτρων προσαρμογής άμεσης εφαρμογής.

Το 2009, το Ινστιτούτο Wuppertal δημοσίευσε μια έκθεση για λογαριασμό της Γερμανικής Αναπτυξιακής Συνεργασίας (German Development Cooperation), σχετικά με διάφορες εναλλακτικές λύσεις για την προσαρμογή, ανάλογα με τους ιδιαίτερους κλιματικούς παράγοντες. Με βάση το έργο που επιτέλεσε η βρετανική UKCIP, η GDC ανέπτυξε μια προσέγγιση σε 7 στάδια για τη στρατηγική προσαρμογής, που εφαρμόζεται σε οποιαδήποτε επίπτωση της κλιματικής αλλαγής, ανεξάρτητα από το κλιματικό φαινόμενο που την προκάλεσε. Η ομάδα τόνισε την ανάγκη να περάσει η έρευνα από τη στατική στη δυναμική αντίληψη: αν και το κλίμα θεωρήθηκε στατική παράμετρος στην πλειονότητα των προηγούμενων αναλύσεων για τις Μεταφορές, υπάρχει «η ανάγκη για στροφή σε δυναμικές προσεγγίσεις σχεδιασμού για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό των μελλοντικών δικτύων και συστημάτων» Μεταφορών (German Development Cooperation, 2009).

Το 2010, οι Taylor και Philp του Εθνικού Εργαστηρίου Έρευνας Προσαρμογής στην Κλιματική Αλλαγή στην Αυστραλία συνόψισαν μια σειρά από επιλογές για την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, και όρισαν τις κύριες απαιτήσεις της κάθε στρατηγικής για τη μείωση της ευαισθησίας του συστήματος. Παράλληλα, περαιτέρω έρευνα σχετικά με τις επιλογές προσαρμογής διεξήχθη από το TRB, για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στις Μεταφορές, καθώς και τα μέτρα προσαρμογής για τον περιορισμό των επιπτώσεών της.

---

<sup>13</sup> Το κύριο συμπέρασμα της έκθεσης Stern είναι ότι τα οφέλη από την έγκαιρη δράση για την αλλαγή του κλίματος υπερβαίνουν κατά πολύ το κόστος της μη δράσης. Η έκθεση υποδεικνύει τις πιθανές επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος στους υδάτινους πόρους, στην παραγωγή τροφίμων, στην υγεία, στο περιβάλλον και στις μεταφορές. Σύμφωνα με αυτήν, το συνολικό κόστος της κλιματικής αλλαγής χωρίς καμία δράση ισοδυναμεί με απώλεια τουλάχιστον 5% του παγκόσμιου ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος (ΑΕΠ) κάθε χρόνο. Ένα ευρύτερο φάσμα κινδύνων και επιπτώσεων θα μπορούσε να αυξήσει το ποσοστό αυτό στο 20% του ΑΕΠ επ' αόριστον. Ο Stern αναφέρει επίσης ότι 5-6 βαθμοί αύξησης της θερμοκρασίας είναι "μια πραγματική πιθανότητα."

Στην αρχή της περασμένης δεκαετίας (2010), ο ΟΗΕ εξέδωσε έκθεση σχετικά με τις επιλογές προσαρμογής αναφορικά με την αποκλειστική αντιμετώπιση προβλημάτων σε λιμένες και κανάλια, αναπληρώνοντας σε κάποιο βαθμό, ένα κενό στην έρευνα.

#### **2.7.2.2. Μέτρα προσαρμογής**

Καθώς η έρευνα για την προσαρμογή των Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή είναι σχετικά νέα, δεν υπάρχει στη γνώση του γράφοντος συντεταγμένη προσπάθεια συγκέντρωσης και ομαδοποίησης των διαφόρων μέτρων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Για το λόγο αυτό, στην ενότητα αυτή επιχειρείται μια τέτοια συγκέντρωση των διαφόρων μέτρων προσαρμογής των υποδομών και δικτύων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή που συναντώνται στη βιβλιογραφία σε μια προσπάθεια ομαδοποίησής τους σε μορφή πινάκων και περαιτέρω ταξινόμησης και ιεράρχησής τους στο Κεφάλαιο 10.

Οι πίνακες των μέτρων προσαρμογής που παρουσιάζονται στο τέλος αυτής της ενότητας (Πίνακας 8-Πίνακας 11) χρησιμοποιούνται περαιτέρω στην Ενότητα 10.4, όπου έπειτα από πολυκριτηριακή ανάλυση διαφόρων παραμέτρων που τα χαρακτηρίζουν (βέλτιστος χρόνος εφαρμογής τους, κόστος και διάρκεια εφαρμογής τους, συνεισφορά τους στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, κ.α.) τα μέτρα ιεραρχούνται και συντάσσονται σε διαγράμματα ροής για την εφαρμογή τους για τα επόμενα χρόνια.

Τα μέτρα που παρουσιάζονται, εντοπίστηκαν κατά την επισκόπηση της βιβλιογραφίας (άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά, πρακτικά συνεδρίων και τεχνικές αναφορές) από τα τέλη της δεκαετίας του 1980 και μετά και στα οποία περιέχονται μέτρα, δράσεις και στρατηγικές σχετικά με την αντιμετώπιση των δυσμενών συνεπειών της κλιματικής αλλαγής στα δίκτυα και στις υποδομές των Μεταφορών. Επιπλέον, εξετάστηκαν αναφορές διεθνών οργανισμών, επιτροπών και δημοσίων φορέων που ασχολούνται με την κλιματική αλλαγή, όπως η Διεθνής Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (ΟΗΕ), η Ευρωπαϊκή Αντιπροσωπεία Περιβάλλοντος, το Ευρωπαϊκό Θεματικό Κέντρο για τις Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής, Τρωτότητας και Προσαρμογής, η Επιτροπή Έρευνας Μεταφορών των Εθνικών Ακαδημιών, η Επιτροπή Κλιματικής Αλλαγής (Ηνωμένες Πολιτείες) και η Παγκόσμια Τράπεζα. Συγκεντρώθηκαν επίσης ευρήματα και αποτελέσματα ερευνητικών έργων στο πλαίσιο Ευρωπαϊκών χρηματοδοτικών μηχανισμών έρευνας (2000-2017). Για την παρουσίαση των μέτρων προσαρμογής σε πίνακες, έγινε ομαδοποίησή τους από τον γράφοντα ανά μέσο μεταφοράς. Σημειώνεται εδώ ότι πολλά από τα μέτρα προσαρμογής που αναφέρονται θα μπορούσαν να

εφαρμοστούν οριζόντια (για όλα τα μέσα μεταφοράς). Παρόλα αυτά η ομαδοποίησή τους γίνεται με βάση την κατηγοριοποίησή τους στην πηγή αναφοράς.

**Πίνακας 8: Μέτρα προσαρμογής για τις οδικές μεταφορές (και υποδομές)**

<b>Μέτρο</b>	<b>Πηγή</b>
Έκδοση εκπαιδευτικού και ενημερωτικού υλικού για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης για τις Μεταφορές με όλα τα μέσα	(IPCC, 2007)
Ανάπτυξη σχεδίων έγκαιρης επικοινωνίας και συντονισμού με συμμετοχή των ενδιαφερόμενων φορέων	(Bipartisan Policy Center, 2009)
Ανάπτυξη βιώσιμων επιχειρηματικών μοντέλων για την παροχή συστημάτων πληροφοριών έκτακτης ανάγκης	(Khreis et al., 2019)
Οργάνωση ανεφοδιασμού σε παγιδευμένους οδηγούς/επιβάτες με τη βοήθεια εθελοντών και οργανώσεων βοήθειας	(Parry, et al., 2007)
Παροχή αξιόπιστης, άμεσης και - εάν είναι εφικτό- εξατομικευμένης πληροφόρησης σχετικά με τη διάρκεια ενός ακραίου περιστατικού	(German Development Cooperation, 2009)
Φύτευση παρόδιας βλάστησης που απορροφά την παραγόμενη θερμότητα και προστατεύει τις οδούς	(Wang et. al, 2019)
Σχεδιασμός νέων ασφαλικών μιγμάτων ανθεκτικών στη θερμότητα	(Transportation Research Board, 2008)
Ανάπτυξη ανθεκτικών στη θερμότητα αρθρώσεων γεφυρών	(Transportation Research Board, 2011)
Ανάπτυξη καινοτόμων υλικών οδοστρώματος ανθεκτικών στη διάβρωση	(German Development Cooperation, 2009)
Προσαρμογή των ωραρίων εργασίας (και συνεπαγόμενων μετακινήσεων) κάτω από αντίξοες καιρικές συνθήκες για τις οδικές μεταφορές	(IPCC, 2007)
Βελτίωση των συστημάτων αποχέτευσης για τις οδικές και σιδηροδρομικές υποδομές	(Transportation Research Board, 2008)
Νέα ασφατικά μείγματα που βοηθούν στην ταχύτερη αποστράγγιση των λιμναζόντων υδάτων	(Matthews, 2011)
Ενίσχυση της οδικής διαστρωμάτωσης για την πρόληψη φαινομένων ξεπλύματος (washing off)	(German Development Cooperation, 2009)
Εγκατάσταση πινακίδων που προειδοποιούν τον οδηγό/πεζό σχετικά με επικείμενο πλημμυρισμένο οδικό δίκτυο	(Wang et. al, 2016)
Αυστηρή επιβολή ορίου ταχύτητας κατά τη διάρκεια ΑΚΦ (π.χ. καταγίδων)	(German Development Cooperation, 2009)
Μέτρα προστασίας κατά της καθίζησης των πρανών γύρω από το οδικό/σιδηροδρομικό δίκτυο	(Transportation Research Board, 2008)
Εγκατάσταση ανεμοθραυστών	(Espinet, Schweikert and Chinowsky, 2015)
Βελτίωση αποχετεύσεων στις οδικές διασταυρώσεις	(Stead, 2016)
Νέα σχεδιαστικά πρότυπα που αφορούν στα συστατικά του οδικού δικτύου (πινακίδες, φωτισμός) για την ενίσχυση της προστασίας των χρηστών	(Stenek, et al., 2011)
Τακτικός καθαρισμός ποδηλατοδρόμων και πεζοδρομίων κατά τη διάρκεια του χειμώνα	(German Development Cooperation, 2009)
Ανάπτυξη ευφύων συστημάτων ανάδρασης στα οχήματα για να επικοινωνούν σύμφωνα με τις ανάγκες των μετακινούμενων	(Rosenzweig & Parry, 1994)
Σχέδια προτεραιότητας που διατηρούν την πρόσβαση στα νοσοκομεία, στους σταθμούς έκτακτης ανάγκης και στους χώρους καταφυγής	(German Development Cooperation, 2009)
Ορισμός των αξόνων προτεραιότητας για τον καθαρισμό οδών σε περιπτώσεις μεγάλης κλίμακας επιπτώσεων	(Kaufman, et al., 2012)
Επανεξέταση συμβάσεων διαδικασιών συντήρησης, ώστε να καταστούν ευέλικτες και αποτελεσματικές κάτω από ταχέως μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες	(McCarthy, et al., 2001)
Ανύψωση των παράκτιων οδικών δικτύων	(Karl, et al., 2009)
Συντονισμός των σχεδίων έκτακτης ανάγκης μεταξύ των μέσων και δικτύων μεταφοράς	(Kaufman, et al., 2012)
Εφαρμογή των κατάλληλων διαδικασιών διαχείρισης κινδύνου με σκοπό την προετοιμασία για αντίξοες συνθήκες	(German Development Cooperation, 2009)
Τυποποίηση των πληροφοριών καιρού και των προειδοποιήσεων κινδύνου	(Lykou, et al. 2016)
Εκτίμηση έκθεσης κινδύνου εταιρειών εφοδιαστικής αλυσίδας και δημιουργία των κατάλληλων σχεδίων προσαρμογής	(Parry, et al., 2007)
Σχεδιασμός και επενδύσεις σε νέα οδικά υλικά με δυνατότητα "γρήγορης αποκατάστασης"	(Stocker, 2013)
Ρύθμιση και εφαρμογή διεθνών προτύπων για πληροφορίες δελτίων καιρού και έκτακτης ανάγκης	(IPCC, 2007)
Διαβούλευση και συντονισμός των αρχών αυτοκινητοδρόμων και βασικών ενδιαφερόμενων φορέων για να επενδύσουν σε στρατηγικές προσαρμογής	(De Bruin, et al., 2009)
Παροχή καταφυγίων για μη μηχανοκίνητα μέσα μεταφοράς	(Stenek, et al., 2011)
Προετοιμασία για επαρκή αποθέματα αλατιού και διαθεσιμότητα εξοπλισμού καθαρισμού οδικού δικτύου πριν και κατά τη διάρκεια του χειμώνα	(McCarthy, et al., 2001)

Πίνακας 9: Μέτρα προσαρμογής για τις σιδηροδρομικές μεταφορές (και υποδομές)

Μέτρο	Πηγή
Κατασκευή αναχωμάτων για την προστασία της υποδομής από την υψηλή στάθμη του νερού	(Transportation Research Board, 2008) (Schwartz, 2010)
Χρήση συνεχώς συγκολλημένων σιδηροτροχιών	(Transportation Research Board, 2008)
Επαναπρογραμματισμός σιδηροδρομικών δρομολογίων λόγω αυξημένης συχνότητας υψηλών θερμοκρασιών	(Giannopoulos, et al., 2012) & (Parry, et al., 2007)
Τακτική αντικατάσταση των υλικών βάσης του σιδηροδρόμου λόγω τήξης	(Walker, et al., 2010)
Εγκατάσταση λωρίδων/γραμμών έκτακτης ανάγκης για τις οδικές μεταφορές	(Buzási & Csete, 2016)
Δημιουργία περισσότερων και μεγαλύτερων αποχετευτικών λάκκων και σωλήνες απορροής μεγαλύτερης χωρητικότητας	(Espinete, Schweikert and Chinowsky, 2015)
Προστασία των υπόγειων σιδηροδρομικών σταθμών και των χώρων καταφυγής και σχεδιασμός για τη διαδικασία εκκένωσης	(German Development Cooperation, 2009)
Εγκατάσταση συστημάτων πρόγνωσης τοπικών καιρικών συνθηκών	(Kaufman, et al., 2012)
Προετοιμασία σχεδιασμού εξυπηρέτησης εφοδιαστικής αλυσίδας για την αλλαγή εξοπλισμού σε περιπτώσεις κινδύνων	(German Development Cooperation, 2009)
Εφαρμογή μέτρων προστασίας για τις σιδηροδρομικές υποδομές, π.χ. εμπόδια	(Transportation Research Board, 2008)
Μέτρα προστασίας κατά της καθίζησης των πρανών γύρω από τα σιδηροδρομικά δίκτυα για την αποφυγή αποκοπής σιδηροδρομικών τμημάτων	(Stead, 2016), (Stocker, 2013), (Pasimieni et al., 2016)
Ανύψωση της σιδηροδρομικής υποδομής καθώς και των γεφυρών	(Camacho et al., 2016)
Πρόσθετη άντληση σε σιδηροδρομικές σήραγγες	(Vajjarapu, et al., 2016)
Προστασία των υπαίθριων σιδηροδρομικών υποδομών από τους ανέμους	(German Development Cooperation, 2009)
Ανάπτυξη συστήματος διακοπής λειτουργίας για γραμμές που κινούνται μέσα σε αστικό περιβάλλον	(German Development Cooperation, 2009)
Ενσωμάτωση των προβλέψεων για την κλιματική αλλαγή στο σχεδιασμό της αποχέτευσης για την αντιμετώπιση της προβλεπόμενης συχνότητας και του μεγέθους μελλοντικών πλημμυρών	(Pasimieni et al., 2016)
Εγκατάσταση κοινών κέντρων ελέγχου και δρομολόγησης τρένων, συμπεριλαμβανομένων των σιδηροδρομικών υπηρεσιών και των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης	(Khreis et al., 2016)
Ενίσχυση ανθεκτικότητας των σιδηροδρομικών υποδομών έναντι των πλημμυρών	(Wang et al., 2016)
Ενίσχυση των υφιστάμενων εμποδίων/αναχωμάτων για τις οδικές μεταφορές	(Lykou, et al. 2016)
Σχεδιασμός για την παροχή υπηρεσιών αντικατάστασης με άλλα μεταφορικά μέσα (π.χ. λεωφορεία)	(German Development Cooperation, 2009)
Ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης πλημμυρών, ανέμων και καταιγίδας που ενσωματώνουν καλύτερη πρόγνωση του καιρού	(Kaufman, et al., 2012)
Χαρτογράφηση κινδύνου τρωτότητας σε συνεργασία με τις μετεωρολογικές υπηρεσίες για όλες τις υποδομές μεταφορών	(IPCC, 2007) & (Khreis et al., 2019)
Προσδιορισμός κρίσιμων θέσεων για κάθε ακραίο καιρικό φαινόμενο για όλες τις υποδομές Μεταφορών	(McCarthy, et al., 2001)
Σχεδιασμός διαδρομών έκτακτης ανάγκης ή εκτροπές, λόγω αποκοπής δικτύων	(German Development Cooperation, 2009) & (Walker, et al., 2010)
Ενσωμάτωση διαφόρων τύπων παρακολούθησης δεδομένων σχετικών με την κίνηση των τρένων	(Kaufman, et al., 2012)
Βελτίωση, συντήρηση και παρακολούθηση όλων των μεταφορικών υποδομών	(Bipartisan Policy Center, 2009)
Βελτιωμένα συστήματα που προειδοποιούν τους οδηγούς και τις ομάδες επισκευής για πιθανά προβλήματα των σιδηροδρομικών εγκαταστάσεων	(German Development Cooperation, 2009)
Βελτιωμένος αερισμός σε υπόγειους σιδηροδρομικούς σταθμούς	(Vajjarapu, et al., 2016)
Συστήματα παρακολούθησης-προειδοποίησης θερμοκρασίας σε υπόγειες σιδηροδρομικές υποδομές	(German Development Cooperation, 2009)
Επιβολή μείωσης ορίων ταχύτητας σε περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών	(Kaufman, et al., 2012)

**Πίνακας 10: Μέτρα προσαρμογής για τις αεροπορικές μεταφορές (και υποδομές)**

<b>Μέτρο</b>	<b>Πηγή</b>
Κατασκευή φραγμάτων-αναχωμάτων για την προστασία της υποδομής στα παράκτια αεροδρόμια από τις πλημμύρες	(Stead, 2016)
Κατασκευή διαδρόμων με ασφαλτόμιγμα που επιταχύνει την αποστράγγιση του στάσιμου νερού (π.χ. πορώδεις τάπητες)	(Khreis et al., 2016)
Εγκατάσταση ανεμοφρακτών	(Buzási & Csete, 2016)
Ενίσχυση των αερολιμενικών υποδομών από τις πλημμύρες	(Vajjarapu, et al., 2016)
Επανακατεύθυνση διαδρόμων προσγείωσης και απογείωσης αεροσκαφών λόγω μεταβαλλόμενων πλευρικών ανέμων	(Koetse & Rietveld, 2009) & (Walker, et al., 2010)
Εφαρμογή τεχνολογιών και διαδικασιών που αναπτύχθηκαν από το SESAR (Single European Sky ATM Research) (το οποίο είναι έργο επιδοτούμενο από την ΕΕ) με στόχο τη βελτιστοποίηση της χωρητικότητας σε ακραίες καιρικές συνθήκες	(Camacho et al., 2016)
Ανάπτυξη συστήματος μέτρησης για την αξιολόγηση και σύγκριση της ευπάθειας (τρωτότητας) των αερολιμένων και του εναέριου χώρου	(Transportation Research Board, 2008)
Ενίσχυση της διαφάνειας κατά τη σύγκριση των επιπτώσεων των γεγονότων που προκαλούν διαταραχές (σταθερές διαδικασίες στατιστικής αξιολόγησης)	(Wang et. al, 2019)
Βελτίωση πρόβλεψης τοπικών καιρικών συνθηκών και διαταραχών	(McCarthy, et al., 2001)
Προσδιορισμός των περιοχών με πιθανή τήξη του μόνιμου στρώματος πάγου	(Transportation Research Board, 2011)
Ανύψωση των διαδρόμων προσγείωσης και απογείωσης αεροσκαφών	(Espinet, Schweikert and Chinowsky, 2015)
Αναθεώρηση κωδικών δόμησης γύρω από αεροδρόμια	Lykou, et al. 2016)
Αποκλεισμός των περιοχών υψηλού κινδύνου πλημμυρών από οποιαδήποτε αναπτυξιακή δραστηριότητα ή κατασκευή υποδομών Μεταφορών	(Vajjarapu, et al., 2016)
Επανασχεδιασμός συστημάτων αποχέτευσης	(Transportation Research Board, 2008)
Ένταξη των πτυχών της κλιματικής αλλαγής στο ρυθμιστικό σχέδιο αεροδρομίων	(Karl , et al., 2009)
Βελτίωση της χωρητικότητας του εξοπλισμού περιστολής (π.χ. εκχιονιστικά, κλιματιστικά)	(Schwartz, 2010)
Κατασκευή μακρύτερων διαδρόμων για να διευκολύνουν τα αεροσκάφη που προσγειώνονται σε υψηλής πυκνότητας αέρα	(Pasimeni et. al., 2016)
Χρήση ανθεκτικού στη θερμότητα ασφαλτομίγματος στους διαδρόμους απογείωσης και προσγείωσης αεροσκαφών	(Transportation Research Board, 2008)
Μετεγκατάσταση αεροπορικών διαδρόμων που κατασκευάστηκαν πάνω σε επιφάνειες που επηρεάζονται από την τήξη του οδοστρώματος	(Karl , et al., 2009)
Αυξημένες επισκευές σε διαδρόμους προσγείωσης και απογείωσης αεροσκαφών που βρίσκονται σε εδάφη που επηρεάζονται από την τήξη του οδοστρώματος	(Transportation Research Board, 2008)
Ανάπτυξη σχεδίων εκκένωσης από υποδομές αεροδρομίων και χάραξη εναλλακτικών σχεδίων εκτέλεσης αεροπορικών μεταφορών	(Khreis et al., 2016)



**Πίνακας 11: Μέτρα προσαρμογής για τις πλωτές μεταφορές (και υποδομές)**

<b>Μέτρο</b>	<b>Πηγή</b>
Μετεγκατάσταση λιμενικών υποδομών, όπου αυτές βρίσκονται σε περιοχές υψηλού κινδύνου λόγω κλιματικής αλλαγής	(McCarthy, et al., 2001) & (Transportation Research Board, 2008)
Βελτίωση της ποιότητας και αξιοπιστίας των προβλέψεων αιολικής ενέργειας (ανέμων) με τη χρήση WRF (Weather Research and Forecasting) με ανάλυση μέχρι και 2 χιλιομέτρων	(United Nations, 2011)
Βελτίωση των υποδομών μεταφόρτωσης εμπορευμάτων στους λιμένες, καθιστώντας αυτές αποτελεσματικές κάτω από διαφορετικές στάθμες νερού	(German Development Cooperation, 2009)
Παραγωγή ακριβέστερων προβλέψεων καιρού μέσω της σύγκρισης των αποδόσεων των μοντέλων πρόγνωσης καιρού έναντι αξιόπιστων δεδομένων παρατήρησης για τον τόπο πρόγνωσης	(Buzási & Csete, 2016)
Εισαγωγή ανθεκτικών στη θερμότητα υλικών στη διαδικασία κατασκευής των λιμένων	(United Nations, 2011)
Συνεχής παρακολούθηση των θερμοκρασιών περιβάλλοντος των έργων υποδομής	(Vajjarapu, et al., 2016)
Ενισχυμένη μόνωση και ψύξη των αποθηκών στους λιμένες	(United Nations, 2011)
Κατασκευή υποδομών προστασίας από τσουνάμι για τους λιμένες	(McCarthy, et al., 2001)
Βελτίωση πρόσβασης στα λιμάνια και χάραξη νέων διαδρομών για τις θαλάσσιες Μεταφορές	(Stead, 2017)
Σχεδιασμός εναλλακτικών διαδρομών για εμπορευματικές Μεταφορές στις αρκτικές περιοχές	(Walker, et al., 2010)
Δημιουργία Ευρωπαϊκής επιτροπής για τα ποτάμια για την κοινή αντιμετώπιση επιδράσεων ΑΚΦ	(McCarthy, et al., 2001)
Δημιουργία ενός ευρωπαϊκού χώρου ποτάμιας ναυσιπλοΐας με ελάχιστα διοικητικά εμπόδια και με ένα μέγιστο εναρμονισμένο νομοθετικό και κανονιστικό πλαίσιο	(United Nations, 2011), (Vajjarapu, et al., 2016)
Ανύψωση των λιμενικών υποδομών πάνω από το μέγιστο κύμα	(Transportation Research Board, 2011)
Κατασκευή φραγμάτων και τειχών προστασίας για την αποφυγή πλημμυρών νερού στους λιμένες	(Pasimeni, et. al., 2016)
Δημιουργία ισχυρότερων μηχανισμών σύνδεσης πλοίου και φόρτωσης/εκφόρτωσης φορτίου	(Eisenack, et al., 2011)
Νέα πρότυπα σχεδιασμού πλοίων για προστασία από μεγαλύτερα κύματα ή ρηχά κανάλια /λιμάνια	(Buzási & Csete, 2016)
Ενίσχυση αποβαθρών και γερανών για αυξημένη αντοχή σε σφοδρούς ανέμους και μεγαλύτερα κύματα	(Transportation Research Board, 2008)
Σχεδιασμός λεκανών κατακράτησης και αποχέτευσης νερού σε περίπτωση σοβαρών πλημμυρών	(United Nations, 2011)
Λειτουργία ενός ολοκληρωμένου ευφυούς δικτύου πλωτών οδών σε όλη την Ευρώπη	(Transportation Research Board, 2011)
Συλλογή, καταγραφή, απεικόνιση και ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με το βάθος νερού για τις ποτάμιες και θαλάσσιες μεταφορές	(McCarthy, et al., 2001)
Μετεγκατάσταση, επανασχεδιασμός και ενίσχυση των κυματοθραυστών για την προστασία των λιμανιών και της γενικής υποδομής θαλάσσιων Μεταφορών από μεγαλύτερα κύματα	(United Nations, 2011)
Έκδοση κατευθυντήριων γραμμών σχετικά με την εφαρμογή της περιβαλλοντικής νομοθεσίας που αφορά στους λιμένες και στις πλωτές οδούς	(United Nations, 2011)
Ανάπτυξη καινοτόμου τεχνολογίας για τον εκσυγχρονισμό και τη λειτουργία του στόλου, του λιμανιού και των τερματικών σταθμών	(Karl, et al., 2009)
Ενίσχυση της αποτελεσματικότητας και αποδοτικότητας νέων τεχνολογιών (π.χ. αισθητήρες για την πρόβλεψη του καιρού)	(United Nations, 2011)
Εφαρμογή της Κοινής Δήλωσης Ανάπτυξης του Περιβάλλοντος & της Εσωτερικής Ναυσιπλοΐας με την παροχή τεχνικής βοήθειας	(German Development Cooperation, 2009)
Παροχή επαρκών θέσεων ελλιμενισμού, αγκυροβολίων και εξοπλισμού ακτής για το χειρισμό (εξυπηρέτηση) μεγαλύτερου αριθμού σκαφών	(United Nations, 2011)
Συνεχής και διαφοροποιημένη παρακολούθηση και ανάλυση της εξέλιξης του συστήματος εκκένωσης (εκφόρτισης) των υδάτων των ποταμών	(IPCC, 2007)
Διαρθρωτικές αλλαγές των τεχνικών έργων των ποταμών	(United Nations, 2011)
Τακτική αφαίρεση των ιζημάτων από το βυθό	(Karl, et al., 2009)
Ανάπτυξη καινοτόμων, προσαρμοσμένων, αποτελεσματικών και πιο φιλικών προς το περιβάλλον σκαφών	(Wang et. al, 2019)
Επέκταση λειτουργιών και ολοκλήρωση συστημάτων RIS (River Information Services)	(Transportation Research Board, 2011)
Ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων για τη βελτίωση της παρακολούθησης των ποταμών (διατμητική τάση, μεταφορά ιζημάτων, μορφο-δυναμική κ.λπ.)	(Camacho et al., 2016)
Πρόβλεψη κάθετων αποβαθρών για να διευκολύνουν τη μεταφόρτωση σε συνθήκες εξαιρετικά χαμηλής στάθμης νερού	(Transportation Research Board, 2008)

Από την παραπάνω επισκόπηση στα μέτρα προσαρμογής μπορούν να εξαχθούν δύο βασικά συμπεράσματα αναφορικά με τις ανάγκες περαιτέρω έρευνας. Αφενός, τα ευρήματα της βιβλιογραφίας δεν εμφανίζουν άλλη διάσταση πέραν της αναφοράς τους σε προτεινόμενα μέτρα προσαρμογής, δηλαδή δεν υπάρχουν στοιχεία για την οικονομική τους διάσταση (κόστος), την διάρκεια εφαρμογής τους, τη πιθανή συνεισφορά τους στη μείωση της τρωτότητας του τομέα Μεταφορών, και κυρίως, δεν γίνεται ιεράρχηση της σημαντικότητας τους. Ενώ η χρησιμότητα ύπαρξης τέτοιων πινάκων ως πηγή πληροφοριών για τις αρχές είναι αδιαμφισβήτητη, αναδεικνύεται η ανάγκη ιεράρχησής τους μέσω διαγραμμάτων ροής (βάσει π.χ. των χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν παραπάνω) που θα βοηθήσουν τις αρχές να προτεραιοποιήσουν τις δράσεις τους.

Αφετέρου, η ενδελεχής εξέταση ανέδειξε την απουσία μέτρων, που αφορούν στον χαρακτηρισμό των επιμέρους στοιχείων των δικτύων με τρόπο που θα μπορούσε να συνεισφέρει στην περαιτέρω ανάπτυξη μέτρων προσαρμογής, καταδεικνύοντας π.χ. τα κρίσιμα τμήματα ενός δικτύου, τα οποία πρέπει να παραμείνουν λειτουργικά και στην προστασία των οποίων θα πρέπει να δοθεί προτεραιότητα κατά την εκδήλωση ακραίων καιρικών φαινομένων, ή τα τμήματα εκείνα στα οποία πρέπει να γίνει χωροθέτηση φορέων και μηχανισμών αντιμετώπισης έκτακτων αναγκών, π.χ. πυροσβεστικών οχημάτων.

## **2.8. Αναφορές και βιβλιογραφία**

### **2.8.1. Παραπομπές σε αναφορές**

Adger, W. N. et al., 2003. Adaptation to climate change in the developing world. *Progress in development studies*, 3(3), pp. 179-195.

Agarwal, M., Maze, T. & Souleyetette, R., 2006. The weather and its impact on urban freeway traffic operations. Washington, D.C., Transportation Research Board.

Bachelet, D., Neilson, R., Lenihan, J. & Drapek, R., 2001. Climate Change Effects on Vegetation Distribution and Carbon Budget in the United States. *Ecosystems*, 4(3), pp. 164-185.

Bailey, L., Molchitarian, P. & Little, A., 2008. The Broader Connection between Public Transportation, Energy, Conservation and GHG Reduction, s.l.: ICF International.

Bartels, J., Pate, M. & Olson, N., 2010. An Economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 1-14.

Barter, P., 2010. Parking Policy in Asian Cities, s.l.: Asian Development Bank.

Billot, R., El Faouzi, N. & De Vuyst, F., 2009. Multi-level assessment of the rain impact on drivers' behaviors: standardized methodology and empirical analysis. *Transportation Research Record*, Volume 2107, pp. 134-142.

Bipartisan Policy Center, 2009. *Transportation Adaptation to Global Climate Change*, Washington D.C.: s.n.

Birch, S., 2010. Optimising the Replacement for Engine Displacement. *Automotive Engineering International*, p. 24.

Birks, H., 2003. The Importance of Plant Macrofossils in the Reconstruction of Lateglacial Vegetation and Climate: Examples from Scotland, western Norway, and Minnesota, USA. *Quaternary Science Reviews*, 22(5-7), pp. 453-473.

Bonham, J. & Koth, B., 2010. Universities and the Cycling Culture. *Transportation Research Part D*, 15(2), pp. 94-102.

Boston Consulting Group, 2010. *Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities and the Outlook to 2020*, Boston: BCG.

Brilon, W. & Ponzlet, M., 1996. Variability of speed-flow relationships on German autobahns. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 1555, pp. 91-96.

Broecker, W., 1975. Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming?. *Science*, 8 August, Volume 189, pp. 460-463.

Camacho, F. & Garcia, A., 2010. Analysis of impact of adverse weather on freeway free-flow speed in Spain. *Transportation Research Record*, Volume 2169, pp. 150-159.

Cambridge Systematics, 2009. *Moving Cooler: Transportation Strategies to Reduce GHG emissions*, s.l.: Urban Land Institute.

Cervero, R., 2009. Influences of Built Environment on Walking and Cycling: Lessons from Bogota. *International Journal of Sustainable Transportation*, 3(4), pp. 203-226.

Cervero, R., Farrel, C. & Murphy, S., 2002. Transit Oriented Development and Joint Development in the US: A Literature Review. *Research Results Digest*, Volume 52.

Cervero, R. & Kockelman, K., 1997. Travel Demand and the 3Ds: Density, Diversity and Design. *Transportation Research Part D*, 2(3), pp. 199-219.

Chung, E., Ohtani, O., Warita, H. & Kuwahara, M., 2006. Does weather affect highway capacity?. *Yakoma, Japan*, s.n.

Davis, S., Williams, S. & Boundy, R., 2018. *Transport Energy Data Book*. 36.2 ed. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory.

De Bruin, K. et al., 2009. Adapting to Climate Change in The Netherlands: An Inventory of Climate Adaptation Options and Ranking of Alternatives. *Climate Change*, 95(1-2), pp. 23-45.

Demenocal, P., 2001. Cultural Responses to Climate Change During the Late Holocene. *Science*, 292(5517), pp. 667-673.

Dittmar, H. & Ohland, G., 2004. *The New Transit Town: Best Practices in Transit-oriented Development*. Washington D.C.: Island Press.

DMOD, 2005. [http://dmod.physics.auth.gr/klima\\_03.htm](http://dmod.physics.auth.gr/klima_03.htm). [Online]

Available at: [http://dmod.physics.auth.gr/klima\\_03.htm](http://dmod.physics.auth.gr/klima_03.htm)

[Accessed 03 February 2019].

Eddowes, M. J. et al., 2003. Railway safety implications of weather, climate and climate change., United Kingdom: Rail Safety and Standards Board.

Edwards, J., 1999. Speed adjustment to motorway commuter traffic to inclement weather. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, Volume 2, pp. 1-14.

Eisenack, K., Stecker, R., Reckien, D. & Hoffman, E., 2011. Adaptation to Climate Change in the Transport Sector: A Review, Potsdam: Potsdam Institute for Climate Impact Research.

Emond, C., Tang, W. & Handy, S., 2009. Explaining Gender Difference in Bicycling Behaviour. Transportation Research Record, Volume 2125, pp. 16-25.

EPA, 2014. United States Environmental Protection Agency. [Online]

Available at: <http://www.epa.gov/climatechange/glossary.html#F>

[Accessed 10 November 2014].

European Commission, 2009. Adapting to climate change: towards a European framework for action - COM 147, Brussels, Belgium: European Commission.

European Environment Agency, 2005. Vulnerability and adaptation to climate change in Europe, s.l.: EEA.

European Environmental Agency, 2010. Biofuel production in EU Member States, Brussels: EEA.

Frank, M., 1981. The braess paradox. Mathematical Programming, 20(1), pp. 283-302.

Galini, D., 1981. Speeds on two-lane rural roads - a multiple regression analysis. Traffic Engineering and Control, Volume 22, pp. 353-360.

Garrard, G., Rose, G. & Lo, S., 2008. Promoting transport cycling for women: the role of bicycle infrastructure. Preventive Medicine, 46(1), pp. 55-59.

Gehl, J., 2010. Cities for People. Washington D.C.: Island Press.

German Development Cooperation, 2009. Adapting urban transport to climate change: contribution of the Wuppertal institute in GTZ's Sustainable Transport Sourcebook, Germany: GTZ.

Giannopoulos, G., Gagatsi, E., Mitsakis, E. & Salanova, J. M., 2012. Environmental, financial and social impacts of climate change in Greece, Athens: Bank of Greece.

Govinda, T. & Dulal, H., 2009. Regulatory instruments to control environmental externalities from the transport sector. European Transport, Volume 41, pp. 80-112.

Hansen, J. E. & Makiko, S., 2011. Earth's Climate History: Implications for Tomorrow. [Online]

Available at: [http://www.giss.nasa.gov/research/briefs/hansen\\_15/](http://www.giss.nasa.gov/research/briefs/hansen_15/)

[Accessed 10 November 2014].

Hargroves, K. & Smith, M., 2005. *The Natural Advantage of Nations*. London: The Natural Edge Project, Earthscan.

Hassan, Y. A. & Barker, D., 1999. The impact of unreasonable or extreme weather on traffic activity within Lothian region, Scotland. *Journal of Transport Geography*, Volume 7, pp. 209-213.

Hawkins, R., 1988. *Motorway traffic behavior in reduced visibility conditions*. Amsterdam, the Netherlands, Elsevier.

Hogema, J., 1996. *Effects of rain on daily traffic volume and on driving behavior (TM-96-B019)*, Soesterberg, the Netherlands: TNO Human Factors Research Institute.

Holdener, D., 1998. The effects of rainfall on freeway speeds. *Journal - Institute of Transportation Engineers*, Volume 68, p. 16.

Hook, W., 2003. *Preserving and Expanding the Role of Non-Motorized Transport*, s.l.: GIZ.

Hooper, E., Chapman, L. & Quinn, A., 2014. The impact of precipitation on speed-flow relationships along a UK motorway corridor. *Theoretical and applied climatology*, 117(1-2), pp. 303-316.

Houghton, J., Jenkins, G. & Ephraim, J. eds., 1990. *Climate change: scientific assessment of climate change*. New York: Cambridge University Press.

Houghton, J. et al. eds., 1996. *Climate change 1995: the science of climate change. Contribution of Working Group I to the 2nd assessment report to the IPCC*. New York: Cambridge University Press.

Huntington, T., n.d. Evidence for Intensification of the Global Water Cycle: Review and Synthesis. *Journal of Hydrology*, 319(1-4), pp. 83-95.

Ibrahim, A. T. & Hall, F., 1994. Effect of adverse weather conditions on speed-flow occupancy relationships. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 1457, pp. 184-191.

International Energy Agency, 2009. *Technology Roadmap: Electric and Plug-in-Hybrid Electric Vehicles*, s.l.: IEA.

IPCC, 2007. *Contribution of WG II to the 4th Assessment Report of the IPCC*, Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

IPCC, 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

IPCC, 2014. *Summary for Policymakers*, in: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge UK and New York USA: Cambridge University Press.

Jackson, R. & Jenkins, A., 2012. *Vital signs of the planet: global climate change and global warming: uncertainties*. [Online]

Available at: [http://climate.nasa.gov/nasa\\_role/science/](http://climate.nasa.gov/nasa_role/science/)

[Accessed 07 November 2014].

Karl, T., Melillo, J. & Peterson, T. eds., 2009. *Global Climate Change Impacts in the United States*. Cambridge: Cambridge University Press.

Kaufman, S., Qing, C., Levenson, N. & Hanson, M., 2012. *Transportation During and After Hurricane Sandy*, New York: Rudin Center for Transportation, Wagner Graduate School of Public Service.

Koetse, M. J. & Rietveld, P., 2009. The impact of climate change and weather on transport: an overview of empirical findings. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 14, pp. 205-221.

Kolke, R., 2005. *Inspection & Maintenance and Roadworthiness*, s.l.: GIZ.

Kyte, M., Khatib, Z., Shannon, P. & Kitchener, F., 2001. Effect of weather on free-flow speed. *Transportation Research Record*, Volume 1776, pp. 60-68.

Lamn, R., Choueiri, E. & Mailaender, T., 1990. Comparison of operating speeds on dry and wet pavements of two-lane rural highways. *Transportation Research Record*, Volume 1280, pp. 199-207.

Lam, W., Tam, M., Cao, X. & Li, X., 2013. Modeling the effects of rainfall intensity on traffic speed, flow and density relationships for urban roads. *Journal of Transportation Engineering*, 139(7), pp. 758-770.

Langdon, P., Barber, K. & Lomas-Clarke, S., 2004. Reconstructing climate and environmental change in northern England through chironomid and pollen analyses: evidence from Talkin Tarn, Cumbria. *Journal of Paleolimnology*, 32(2), pp. 197-213.

Le Quéré, C. et al., 2018. Global Carbon Budget 2018. *Earth System Science Data*, Volume 10, pp. 2141-2194.

Liang, W., Kyte, M., Kitchener, F. & Shannon, P., 1998. Effect of environmental factors on driver speed: a case study. *Transportation Research Record*, Volume 1635, pp. 155-161.

Litman, T., 2011. *Transportation Elasticities: How Prices and Other Factors Affect Travel Behaviour*, s.l.: Victoria Transport Policy Institute.

Maeki, S., 1972. The effect of weather and road conditions on driving speeds. *Tielehti*, Volume 8, pp. 353-360.

Martin, P., Perrin, J., Hansen, B. & Quintana, I., 2000. *Inclement weather signal timings (UTL MPC01-120)*, Salt Lake City, Utah, US: Utah Traffic Lab, University of Utah, Salt Lake City.

Matthews, T., 2011. *Climate Change Adaptation in Urban Systems: Strategies for Planning Regimes*, Brisbane: Urban Research Program.

Maze, T., Agarwal, M. & Burchett, G., 2006. Whether weather matters to traffic demand, traffic safety and traffic operations and flow. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Volume 1948, pp. 170-176.

McCarthy, J. et al. eds., 2001. Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the 3rd assessment report of the IPCC. New York: Cambridge University Press.

Menne, M. J. & Kennedy, J. J., 2009. Global Surface Temperatures in 2008 [in "State of the Climate in 2008"]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 90(8), pp. S1-S196.

Mills, B. & Andrey, J., 2002. Climate change and transportation: potential interactions and impacts. The potential impacts of climate change on transportation, Volume 77.

MIT, 1971. Inadvertent Climate Modification: Report of the Study of Man's Impact on Climate, Cambridge: MIT Press.

Mitsakis, E., Stamos, I., Diakakis, M. & Salanova Grau, J. M., 2014. Impacts of high-intensity storms on urban transportation: applying traffic flow control methodologies for quantifying the effects. International Journal of Environmental Science and Technology.

Mueller-Langer, F., Tzimas, E., Kaltschmitt, M. & Peteves, S., 2007. Techno-economic assessment of hydrogen production processes for the hydrogen economy for the short and medium term. International Journal of Hydrogen Energy, Volume 32, pp. 3797-3810.

NAS, 1979. Carbon Dioxide and Climate, Washington, D.C.: s.n.

NASA, 2014. Global Climate Change - Vital Signs of the Planet. [Online]

Available at: <http://climate.nasa.gov/evidence/>

[Accessed 07 November 2014].

Newman, P. & Kenworthy, J., 2006. Urban Design to Reduce Automobile Dependence in Centers. *Opolis*, 2(1), pp. 35-52.

NRC, 2010. Advancing the Science of Climate Change, Washington, D.C.: The National Academies Press.

Pandey, R., 2006. Looking beyond inspection and maintenance in reducing pollution from in-use vehicles. *Environmental Economics and Policy Studies*, Volume 7, pp. 435-457.

Parry, M. et al. eds., 2007. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the 4th assessment report of the IPCC. New York: Cambridge University Press.

Rakha, H., Farnazeh, M., Arafeh, M. & Sterzin, E., 2008. Inclement weather impacts on freeway traffic stream behavior. *Transportation Research Record*, Volume 2071, pp. 8-18.

Riebek, H., 2011. The Carbon Cycle: Feature Articles: Effects of Changing the Carbon Cycle. [Online]

Available at: <http://www.earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/page5.php>

[Accessed 09 November 2014].

Road Research Laboratory, 1965. Research on road traffic, London, UK: H.M.S.O..

Rosenzweig, C. & Parry, M., 1994. Potential impact of climate change on world food supply. *Nature*, Volume 367, pp. 133-138.

- Rye, T., 2010. *Parking Management: A Contribution Towards Liveable Cities*, s.l.: GIZ.
- Sabir, M., Van Ommeren, J., Koetse, M. J. & Rietveld, P., 2008. *Welfare effects of adverse weather through speed changes in car commuting trips*. Amsterdam, The Netherlands: s.n.
- Sahney, S., Benton, M. & Falcon-Lang, H., 2010. Rainforest collapse triggered Pennsylvanian tetrapod diversification in Euramerica. *Geology*, 38(12), pp. 1079-1082.
- Salter, R., Subash, D. & Newman, P., 2011. *Technologies for Climate Change Mitigation - Transport Sector*, Copenhagen: Roskilde: Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi..
- Schwartz, H., 2010. *America's Climate Choices: Adaptation - A Challenge to the Transportation Industry*. [Sound Recording] (Transportation Research Board of the National Academies).
- Shoup, D., 1997. The High Cost of Free Parking. *Journal of Planning Education and Research*, Volume 17, pp. 3-20.
- Sierra, K., 2008. *Safe, Clean and Affordable..Transport for Development*, Washington D.C.: The World Bank Group's Transport Business Strategy for 2008-2012.
- Skabardonis, A., Kopelias, P. & Papadimitriou, F., 2013. *Weather impacts on traffic flow*. Thessaloniki, Greece, s.n.
- Smit, B., Burton, I., Klein, R. & Street, R., 1999. The science of adaptation: a framework for assessment. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 4(3-4), pp. 199-213.
- Smith, B. et al., 2004. *Investigation of rainfall on freeway traffic flow*. Washington, D.C., Transportation Research Board.
- Smithers, J. & Smit, B., 1997. Human adaptation to climatic variability and change. *Global Environmental Change*, 7(2), pp. 129-146.
- Stenek, V. et al., 2011. *Climate Risk and Business: Ports*, Cartagena: International Finance Corporation.
- Stern, N., 2008. The economics of climate change. *The American Economic Review*, pp. 1-37.
- Stocker, T. F. ed., 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Workign Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5)*. New York: Cambridge University Press.
- Tanner, J., 1952. Effect of weather on traffic flow. *Nature*, Volume 4290, p. 107.
- Tiffany, B. & Lewison, L., 2008. *Transportation Strategies to Mitigate Climate Change. Leadership and Management in Engineering*, 8(3), pp. 124-131.
- Tol, 2005. Adaptation and mitigation: trade-offs in substance and methods. *Environmental Science and Policy*, 8(6), pp. 572-578.
- Transportation Research Board, 2008. *Potential impacts of climate change on U.S. transportation*, Washington, USA: TRB.
- Transport for London, 2007. *London Congestion Charging: Impacts Monitoring 5th Annual Report*, London: TFL.



Transportation Research Board, 2010. Highway Capacity Manual, Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Transportation Research Board, 2011. Adapting transportation to the impacts of climate change, Washington, USA: TRB.

Trubka, R., Newman, P. & Bilsborough, D., 2010. The Costs of Urban Sprawl. Environmental Design Guide, 1(3), pp. 83-85.

U.S. Energy Information Administration, 2016. Transportation sector energy consumption - International Energy Outlook 2016, Washington D.C.: US Energy Information Administration.

UKCIP, 2002. Climate Change Scenarios for the United Kingdom, s.l.: s.n.

UN, 1992. The United Nations Framework Convention on Climate Change, New York, USA: United Nations.

UNISDR, 2009. Terminology on Disaster Risk Reduction, Geneva: United Nations International Strategy for Disaster Reduction.

United Nations Development Programme, 2005. Adaptation policy frameworks for climate change, s.l.: United Nations.

United Nations, 2011. Climate change impacts and adaptations: a challenge for global ports. Geneva: UN.

Unrau, D. & Andrey, J., 2006. Driver response to rainfall on urban expressways. Transportation Research Record, Volume 1980, pp. 24-30.

UNSW-CCRC, 2009. Updating the World on the Latest Climate Science, Sydney, Australia: The University of New South Wales Climate Change Research Centre.

Vajda, A. et al., 2011. Probabilities of adverse weather affecting transport in Europe: climatology and scenarios up to the 2050s. [Online]

[Accessed 04 March 2019].

Van der Linden, P. & J.F.B., M., 2009. ENSEMBLES: Climate change and its impacts: summary of research and results from the ENSEMBLES project, s.l.: Met Office Hadley Centre.

Vasconcellos, E., 2001. Urban Transport, Environment and Equity: The Case for Developing Countries. s.l.:Earthscan Publications.

Von Helmolt, R. & Eberle, U., 2007. Fuel Cell Vehicles: Status 2007. Journal of Power Sources , Volume 165, pp. 933-943.

Vuchic, V., 1981. Urban Public Transportation Systems and Technology. New Jersey: Prentice Hall.

Walker, L., Figliozzi, A., Haire, A. & MacArthur, J., 2010. Climate Action Plans and Long-Range Transportation Plans in the Pacific Northwest: A review of the State of Practice, Washington D.C.: Transportation Research Forum.

World Business Council for Sustainable Development, 2004. Mobility 2030 Report: Meeting the Challenges, Geneva : World Business Council for Sustainable Development.

Zemp, M. et al., 2008. Global Glacier Changes: Facts and Figures, s.l.: United Nations.

### **2.8.2. Παραπομπές σε γενική βιβλιογραφία**

Bailey, L., Molchitarian, P. & Little, A., 2008. The Broader Connection between Public Transportation, Energy, Conservation and GHG Reduction, s.l.: ICF International.

Broecker, W., 1975. Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming?. Science, 8 August, Τόμος 189, pp. 460-463.

Dittmar, H. & Ohland, G., 2004. The New Transit Town: Best Practices in Transit-oriented Development. Washington D.C.: Island Press.

Eddowes, M. J. και συν., 2003. Railway safety implications of weather, climate and climate change., United Kingdom: Rail Safety and Standards Board.

Eisenack, K., Stecker, R., Reckien, D. & Hoffman, E., 2011. Adaptation to Climate Change in the Transport Sector: A Review, Potsdam: Potsdam Institute for Climate Impact Research.

Gehl, J., 2010. Cities for People. Washington D.C.: Island Press.

Hook, W., 2003. Preserving and Expanding the Role of Non-Motorized Transport, s.l.: GIZ.

Karl, T., Melillo, J. & Peterson, T. επιμ., 2009. Global Climate Change Impacts in the United States. Cambridge: Cambridge University Press.

Litman, T., 2011. Transportation Elasticities: How Prices and Other Factors Affect Travel Behaviour, s.l.: Victoria Transport Policy Institute.

Road Research Laboratory, 1965. Research on road traffic, London, UK: H.M.S.O..

Stern, N., 2008. The economics of climate change. The American Economic Review, pp. 1-37.

Transportation Research Board, 2008. Potential impacts of climate change on U.S. transportation, Washington, USA: TRB.

Transport for London, 2007. London Congestion Charging: Impacts Monitoring 5th Annual Report, London: TFL.

United Nations, 2011. Climate change impacts and adaptations: a challenge for global ports. Geneva: UN.

Vasconcellos, E., 2001. Urban Transport, Environment and Equity: The Case for Developing Countries. s.l.: Earthscan Publications.

### 3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗ ΡΟΗ: ΜΕΓΕΘΗ, ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΑ

#### 3.1. Εισαγωγή

Η κυκλοφοριακή ροή (traffic flow) προσδιορίζεται από μεγέθη, τα οποία μπορούν να μετρηθούν. Τα βασικά κυκλοφοριακά μεγέθη είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος (traffic volume), η ταχύτητα (speed) των οχημάτων και η πυκνότητα (density).

Ανάλογα με το αν εξετάζεται η κίνηση κάθε οχήματος ξεχωριστά ή αν εξετάζεται συνολικά η κίνηση των οχημάτων σε ένα οδικό τμήμα ορίζονται κυκλοφοριακά μεγέθη που εξετάζονται σε μικροσκοπικό και μακροσκοπικό επίπεδο. Ο Πίνακας 12 παρουσιάζει τα βασικά μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής σε μικροσκοπικό και μακροσκοπικό επίπεδο.

Πίνακας 12: Μεγέθη κυκλοφοριακής ροής (Πηγή: (May, 1990))

Μικροσκοπικά μεγέθη κυκλοφοριακής ροής	Μακροσκοπικά μεγέθη κυκλοφοριακής ροής
Χρονικός διαχωρισμός	Φόρτος
Ταχύτητα σημείου	Μέση ταχύτητα
Χωρικός διαχωρισμός	Πυκνότητα

Η βιβλιογραφική επισκόπηση που ακολουθεί παρουσιάζεται χωρίς ιδιαίτερες βιβλιογραφικές αναφορές, καθότι αποτελεί κλασσική επιστημονική κατάκτηση. Ωστόσο βασικές πηγές αναφοράς αποτέλεσαν τα έργα των May A.D. (1990), Golias & Tsamboulas (1995), Greenshields B.D. (1935), Gazis, D.C. (1974), Daganzo (1994) και Smulders (1990), Φραντζεσκάκη, Γκόλια και Πιτσιάβα-Λατινοπούλου (2009) και Φραντζεσκάκη και Γιαννόπουλου (1986).

#### 3.2. Μεγέθη κυκλοφοριακής ροής και μαθηματικοί ορισμοί τους

##### 3.2.1. Κυκλοφοριακός φόρτος

Ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι ο συνολικός αριθμός οχημάτων που περνούν από ένα σημείο ή μία διατομή οδού στη μονάδα του χρόνου. Εκφράζεται σε “οχήματα ανά μονάδα χρόνου”, για παράδειγμα, οχήματα ανά ώρα, μέρα, κ.ά. Ο ρυθμός ροής είναι ο συνολικός αριθμός οχημάτων που περνούν από ένα σημείο ή μία διατομή οδού κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου μικρότερης της ώρας, ανηγμένος στην χρονική περίοδο μίας ώρας (ισοδύναμος

ωριαίος κυκλοφοριακός φόρτος). Εκφράζεται πάντοτε σε οχήματα ανά ώρα και η περίοδος μετρήσης στην οποία αναφέρεται συνήθως ο ρυθμός ροής είναι 15 λεπτά.

Μαθηματική διατύπωση: Αν  $n(x)$  είναι ο αριθμός οχημάτων που περνούν από μια διατομή στη θέση  $x$  κατά το χρονικό διάστημα  $T$ , τότε ο κυκλοφοριακός φόρτος ( $q$ ) στη θέση  $x$  δίνεται από τη σχέση:

$$q(x) = \frac{n(x)}{T} \quad \text{Εξίσωση 3.1}$$

Όταν το αποτέλεσμα της ανωτέρω εξίσωσης αναχθεί στον αντίστοιχο αριθμό οχημάτων ανά ώρα, τότε προκύπτει ο ρυθμός ροής.

Ο κυκλοφοριακός φόρτος, ανάλογα με το χρονικό διάστημα κατά το οποίο μελετάται καθώς και την περιοχή μελέτης, παρουσιάζει διακυμάνσεις στον τρόπο που κατανέμεται στο χρόνο (μηνιαία ή εποχιακή, ημερήσια, ωριαία) και στο χώρο (ανά κατεύθυνση και λωρίδα κυκλοφορίας). Οι διακυμάνσεις αυτές επηρεάζουν σημαντικά τη μελέτη και το σχεδιασμό των συγκοινωνιακών υποδομών για τις οποίες είναι απαραίτητο πλέον να λαμβάνεται πλέον υπόψη και η κλιματική αλλαγή.

### 3.2.2. Ταχύτητα

Η ταχύτητα με την οποία κινούνται τα οχήματα είναι ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας. Στην κυκλοφοριακή ροή χρησιμοποιούνται διάφορα είδη ταχυτήτων ανάλογα με τη συγκοινωνιακή εφαρμογή.

Για την κίνηση μεμονωμένων οχημάτων ορίζονται τα εξής:

Ταχύτητα σημείου (spot speed), είναι η ταχύτητα που έχει ένα όχημα όταν περνά από δεδομένο σημείο.

Ταχύτητα διαδρομής (travel speed), είναι η μέση ταχύτητα με την οποία κινήθηκε ένα όχημα από το σημείο προέλευσης στο σημείο προορισμού, υπολογιζόμενων και των καθυστερήσεων λόγω στάσεων. Για τον υπολογισμό της διαιρείται η συνολική διανυθείσα απόσταση μεταξύ των δύο άκρων της διαδρομής με το συνολικό χρόνο που απαιτήθηκε για τη διαδρομή, συμπεριλαμβανομένου του χρόνου των στάσεων.

Ταχύτητα λειτουργίας (operating speed), είναι η μέγιστη ταχύτητα διαδρομής, με την οποία μπορεί να κινηθεί ένα όχημα σε δεδομένο τμήμα του οδικού δικτύου κάτω από καλές καιρικές συνθήκες, με την υπάρχουσα κάθε φορά κυκλοφορία και χωρίς να ξεπεράσει τη μέγιστη ταχύτητα ασφαλείας που εκφράζεται από την ταχύτητα μελέτης, η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οδού.

Για το σύνολο των οχημάτων που κυκλοφορούν σε ένα τμήμα οδού ή περνούν από μία διατομή της οδού ορίζονται δύο θεμελιώδη μεγέθη ταχύτητας η μέση ταχύτητα χρόνου και η μέση ταχύτητα χώρου.

Μέση ταχύτητα χρόνου (time mean speed), είναι ο αριθμητικός μέσος όρος των ταχυτήτων σημείου των οχημάτων που περνούν μπροστά από μία διατομή οδού σε μία δεδομένη χρονική περίοδο.

Μαθηματική διατύπωση: Αν  $u_i(x)$  είναι η ταχύτητα του οχήματος  $i$  που περνά από μια διατομή  $x$ , στο χρονικό διάστημα  $T$ , τότε η μέση ταχύτητα χρόνου  $u_t$  δίνεται από την εξίσωση:

$$u_t = \frac{1}{n(x)} \sum_{i=1}^{n(x)} u_i(x) \quad \text{Εξίσωση 3.2}$$

Μέση ταχύτητα χώρου (space mean speed), είναι ο αριθμητικός μέσος όρος των ταχυτήτων σημείου που έχουν σε μία ορισμένη χρονική στιγμή όλα τα οχήματα που βρίσκονται σε ένα δεδομένο τμήμα της οδού. Ένας άλλος ορισμός της μέσης ταχύτητας χώρου είναι η ταχύτητα που θα έπρεπε να αναπτυχθεί για να διανυθεί ένα δεδομένο τμήμα οδού σε χρόνο ίσο με το μέσο χρόνο διάνυσης όλων των οχημάτων που διέρχονται από το δεδομένο τμήμα της οδού σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Μαθηματική διατύπωση: Αν  $t_j$  είναι ο χρόνος που χρειάζεται το όχημα  $j$ , από τα  $N(T)$  οχήματα που διήνυσαν ένα δεδομένο οδικό τμήμα μήκους  $L$  σε χρονικό διάστημα  $T$ , για να διανύσει το εν λόγω οδικό τμήμα, τότε η μέση ταχύτητα χώρου  $u_s$  δίνεται από την εξίσωση:

$$u_s = \frac{L}{\sum_{j=1}^{N(T)} \frac{t_j}{N(T)}} = \frac{N(T)L}{\sum_{j=1}^{N(T)} t_j} \quad \text{Εξίσωση 3.3}$$

Σε αντίθεση με τη μέση ταχύτητα χρόνου που αναφέρεται σε σημείο, η μέση ταχύτητα χώρου χαρακτηρίζει μήκος οδού ή λωρίδας. Ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας χώρου στηρίζεται στο χρόνο που απαιτείται για να διανυθεί ένα οδικό τμήμα. Κατά συνέπεια τα οχήματα που κινούνται με χαμηλή ταχύτητα επηρεάζουν περισσότερο τη μέση ταχύτητα χώρου από ότι τα οχήματα που κινούνται με μεγάλη ταχύτητα. Για το λόγο αυτό, και παρ'ότι τα δύο μεγέθη είναι ετεροειδή, μπορούμε να πούμε ότι η μέση ταχύτητα χώρου είναι γενικά μικρότερη από τη μέση ταχύτητα χρόνου. Στην περίπτωση που τα οχήματα στο θεωρούμενο οδικό τμήμα κινούνται με την ίδια ταχύτητα και τη διατηρούν σταθερή όσο κινούνται εντός του τμήματος αυτού, η μέση ταχύτητα χώρου είναι ίση με τη μέση ταχύτητα χρόνου.

Είναι σημαντικό επίσης να αναφερθούν οι παρακάτω ορισμοί ταχυτήτων:

Μέση ταχύτητα οδού (average highway speed), είναι ο σταθμισμένος μέσος όρος των ταχυτήτων μελέτης των επιμέρους τμημάτων μιας οδού.

Ταχύτητα περιοχής (area speed), σε μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο, είναι ο αριθμητικός μέσος όρος των ταχυτήτων σημείου των οχημάτων που περνούν από έναν αριθμό χαρακτηριστικών σημείων που έχουν επιλεγεί σε μία ορισμένη περιοχή.

Ταχύτητα ελεύθερης ροής (free flow speed), είναι η ταχύτητα λειτουργίας σε τμήμα μιας αρτηρίας, όταν ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι πολύ χαμηλός (συνθήκες ελεύθερης ροής).

Ταχύτητα πορείας (running speed) είναι η μέση ταχύτητα κίνησης ενός οχήματος σε μία συγκεκριμένη διαδρομή. Είναι δηλαδή, η απόσταση που διανύθηκε, διαιρεμένη με το χρόνο διαδρομής, χωρίς να υπολογίζονται σε αυτόν οι καθυστερήσεις από τις στάσεις.

Γραμμική ταχύτητα κίνησης (linear speed), είναι ο λόγος της κατ' ευθεία γραμμής απόστασης μεταξύ των δύο άκρων της διαδρομής ενός οχήματος, προς το χρόνο που χρειάζεται το όχημα για τη διαδρομή αυτή στο υπάρχον δίκτυο με τις υπάρχουσες κυκλοφοριακές συνθήκες.

Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί εδώ ότι ήδη από τον ορισμό των διαφόρων ταχυτήτων, είτε μεμονωμένων είτε ομάδας οχημάτων, απουσιάζει η έννοια του καιρού και του κλίματος ως παράμετρος ορισμού τους. Αυτό είναι σημαντικό διότι η ταχύτητα, ίσως το βασικότερο

Σελίδα 110 από 481

κυκλοφοριακό μέγεθος για ένα μεγάλο εύρος εργασιών στον τομέα των Μεταφορών, θεωρείται ανεπηρέαστη καιρικών και κλιματικών μεταβολών, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται οι διάφοροι ορισμοί της για την ανάπτυξη υποδειγμάτων κυκλοφοριακής ροής, τον καθορισμό της στάθμης εξυπηρέτησης, την χρησιμότητα μέσων μεταφορών για την κατανομή της ζήτησης για μετακινήσεις στα μέσα, κ.λπ. χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ότι π.χ. η ταχύτητα ελεύθερης ροής αφορά σε ιδανικές καιρικές συνθήκες με άριστη ορατότητα, ηλιοφάνεια και είναι μόνο συνάρτηση του κυκλοφοριακού φόρτου.

### 3.2.3. Πυκνότητα και κατάληψη

Η πυκνότητα κυκλοφορίας (traffic density), ορίζεται ως ο αριθμός των οχημάτων που κινούνται σε μία δεδομένη στιγμή στη μονάδα μήκους της οδού (συνήθως οχήματα ανά χιλιόμετρο). Μπορεί να αναφέρεται και στις δύο ή σε κάθε μία από τις κατευθύνσεις κίνησης της κυκλοφορίας, καθώς επίσης και σε μία ή περισσότερες λωρίδες κυκλοφορίας. Η πυκνότητα της κυκλοφορίας είναι σημαντικό μακροσκοπικό μέγεθος γιατί χαρακτηρίζει την ένταση της κυκλοφορίας στη μη διακοπτόμενη ροή. Η πυκνότητα μπορεί να θεωρηθεί ως έκφραση της έντασης της ροής στο χώρο, δηλαδή σε τμήμα οδού συγκεκριμένου μήκους.

Μαθηματική διατύπωση: Αν είναι  $n(t)$  ο αριθμός των οχημάτων που βρίσκονται σε τμήμα συνολικού μήκους  $L$  τη χρονική στιγμή  $t$ , τότε η πυκνότητα  $k(t)$  τη χρονική στιγμή  $t$  δίνεται από την εξίσωση:

$$k(t) = \frac{n(t)}{L} \quad \text{Εξίσωση 3.4}$$

Το μέγεθος το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ότι εκφράζει την ένταση της κυκλοφορίας στο χρόνο, δηλαδή σε μία διατομή της οδού σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, είναι η κατάληψη (occupancy). Η κατάληψη ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου που μία διατομή καταλαμβάνεται από όχημα.

Μαθηματική διατύπωση: Η κατάληψη για το χρονικό διάστημα  $T$ , ισούται με το άθροισμα των χρονικών στιγμών που τα οχήματα καλύπτουν μια διατομή, προς το χρονικό διάστημα αναφοράς  $T$ . Για κάθε όχημα  $i$ , ο χρόνος που καταλαμβάνει μια διατομή στη θέση  $x$  εξαρτάται από την ταχύτητα του οχήματος  $u_i(x)$  στη θέση  $x$  και το μήκος του οχήματος  $L_i$ . Η κατάληψη  $O(x)$  στη θέση  $x$  δίνεται από την εξίσωση:

$$O(x) = \frac{\sum_i^{n(x)} \frac{L_i}{u(i)x}}{T} \quad \text{Εξίσωση 3.5}$$

Αν ληφθεί υπόψη το πλάτος  $d$  του φωρατή, που χρησιμοποιείται συνήθως για τη μέτρηση της κατάληψης, τότε η εξίσωση 2.5 γίνεται:

$$O(x) = \frac{\sum_i^{n(x)} \frac{L_i + d}{u(i)x}}{T} \quad \text{Εξίσωση 3.6}$$

### 3.2.4. Χρονικός και χωρικός διαχωρισμός

Ο διαχωρισμός (headway) σε μια λωρίδα κυκλοφορίας, είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών οχημάτων ως προς ένα σταθερό σημείο αναφοράς τους. Η απόσταση αυτή μετρείται σε μήκος για το χωρικό διαχωρισμό (space headway) ή σε χρόνο για το χρονικό διαχωρισμό (time headway).

Μαθηματική διατύπωση μέσου χρονικού διαχωρισμού  $\bar{h}$ : Αν  $h_i(x)$  είναι ο χρονικός διαχωρισμός του οχήματος  $i$  από το επόμενο όχημα στη θέση  $x$ , ο μέσος χρονικός διαχωρισμός  $\bar{h}(x)$  στη θέση  $x$  για το χρονικό διάστημα  $T$  δίνεται από την εξίσωση:

$$\bar{h}(x) = \frac{\sum_{i=1}^{n(x)} h_i(x)}{n(x)} \quad \text{Εξίσωση 3.7}$$

Στην περίπτωση μεγάλων τιμών  $T$  ισχύει:  $T \approx \sum_{i=1}^{n(x)} h_i(x)$ . Επομένως, από τις εξισώσεις 2.1 και 2.7:



$$q(x) \approx \frac{1}{\bar{h}(x)} \quad \text{Εξίσωση 3.8}$$

Δηλαδή, ο κυκλοφοριακός φόρτος στη θέση  $x$ , είναι ίσος με το αντίστροφο του μέσου χρονικού διαχωρισμού στη θέση αυτή.

Μαθηματική διατύπωση μέσου χωρικού διαχωρισμού  $\bar{d}$ : Αν  $d_j(t)$  είναι ο χωρικός διαχωρισμός του οχήματος  $j$  από το προπορευόμενο κατά τη χρονική στιγμή  $t$ , στο τμήμα μήκους  $L$ , ο μέσος χωρικός διαχωρισμός  $\bar{d}(t)$  στο τμήμα αυτό κατά τη χρονική στιγμή  $t$  δίνεται από την εξίσωση:

$$\bar{d}(t) = \frac{\sum_{j=1}^{n(t)} d_j(t)}{T} \quad \text{Εξίσωση 3.9}$$

Στην περίπτωση μεγάλων τιμών  $T$  ισχύει:  $T \approx \sum_{j=1}^{n(t)} d_j(t)$ . Επομένως, από τις εξισώσεις 2.4 και 2.9:

$$k(t) \approx \frac{1}{\bar{d}(t)} \quad \text{Εξίσωση 3.10}$$

Δηλαδή, η πυκνότητα τη χρονική στιγμή  $t$  ισούται με το αντίστροφο του μέσου χωρικού διαχωρισμού κατά τη στιγμή αυτή.

### 3.3. Θεμελιώδεις σχέσεις μεγεθών κυκλοφοριακής ροής

#### 3.3.1. Εισαγωγή

Η θεωρία της κυκλοφοριακής ροής περιγράφει μαθηματικά τις σχέσεις μεταξύ κυκλοφοριακών μεγεθών. Υπάρχουν δύο βασικές θεωρήσεις: η ντετερμινιστική και η στοχαστική. Στη ντετερμινιστική θεώρηση είναι δυνατός ο ακριβής υπολογισμός ενός κυκλοφοριακού μεγέθους, αν δοθεί η τιμή ενός άλλου. Τα ντετερμινιστικά πρότυπα χωρίζονται σε μακροσκοπικά, μικροσκοπικά και μεσοσκοπικά, ανάλογα με το αν εξετάζεται

η κυκλοφοριακή ροή συνολικά ή μεμονωμένα για κάθε όχημα. Στη στοχαστική θεώρηση γίνεται η παραδοχή ότι η τιμή ενός μεγέθους κυμαίνεται γύρω από μια μέση τιμή με τρόπο που μπορεί να περιγραφεί από μια στατιστική κατανομή.

### 3.3.2. Θεμελιώδης σχέση της κυκλοφοριακής ροής

Η θεμελιώδης σχέση που συνδέει τα τρία μακροσκοπικά μεγέθη της κυκλοφορίας είναι:

$$q = ku_s \quad \text{Εξίσωση 3.11}$$

#### Απόδειξη:

Έστω ένα μικρό οδικό τμήμα μήκους  $L$ , το οποίο διασχίζουν  $N(T)$  οχήματα (της ίδιας κατεύθυνσης) κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος  $T$ . Η μέση πυκνότητα  $k$  κατά το χρονικό διάστημα  $T$  δίνεται από τη σχέση:

$$k = \frac{\text{μέσος αριθμός οχημάτων στο εξεταζόμενο οδικό τμήμα}}{L} \quad \text{Εξίσωση 3.12}$$

Αν το όχημα  $i$  διασχίζει το οδικό τμήμα μήκους  $L$  σε χρόνο  $t_i$ , η πιθανότητα  $P_i$  το όχημα  $i$  να βρίσκεται μέσα στο εξεταζόμενο οδικό τμήμα σε κάποια χρονική στιγμή εντός του διαστήματος  $T$  δίνεται από τη σχέση:

$$P_i = \frac{t_i}{T} \quad \text{Εξίσωση 3.13}$$

Επομένως, ο μέσος αριθμός οχημάτων στο εξεταζόμενο οδικό τμήμα μήκους  $L$  προκύπτει ότι είναι ίσος με:

$$\frac{\sum_{i=1}^n t_i}{T} \quad \text{Εξίσωση 3.14}$$

Με βάση τα παραπάνω η σχέση 3.12 γίνεται:

$$k = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n t_i}{T}}{L} = \frac{\frac{N(T)}{T}}{\frac{N(T)L}{\sum_{i=1}^n t_i}} \quad \text{Εξίσωση 3.15}$$

Επειδή το μήκος του εξεταζόμενου οδικού τμήματος  $L$  είναι "μικρό" δηλαδή ομοιογενές, είναι δυνατό να θεωρηθεί ότι ο αριθμός των οχημάτων  $N(T)$  που διασχίζουν το οδικό τμήμα στη χρονική περίοδο  $T$ , είναι ίδιος με τον αριθμό των οχημάτων  $n(x)$  που περνούν από μια διατομή στη θέση  $x$  του οδικού τμήματος  $L$ . Επομένως, η σχέση 3.15 γίνεται με τη χρήση των εξισώσεων 3.1 (κυκλοφοριακός φόρτος) και 3.3 (μέση ταχύτητα χώρου):

$$k \approx \frac{\frac{n(x)}{T}}{\frac{N(T)L}{\sum_{i=1}^n t_i}} = \frac{q}{u_s} \quad \text{Εξίσωση 3.16}$$

Από τη θεμελιώδη σχέση που συνδέει τα τρία βασικά μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής προκύπτει ότι, όταν είναι γνωστά τα δύο από τα τρία μεγέθη, προκύπτει το τρίτο.

### 3.3.3. Θεμελιώδεις σχέσεις μεγεθών κυκλοφοριακής ροής

Τα θεμελιώδη διαγράμματα της κυκλοφοριακής ροής περιγράφουν τις σχέσεις μεταξύ των μακροσκοπικών μεγεθών της: του κυκλοφοριακού φόρτου, της ταχύτητας και της πυκνότητας. Η εξαγωγή των θεμελιωδών διαγραμμάτων βασίζεται στην υπόθεση ότι η ταχύτητα χώρου  $u_s$  και η πυκνότητα  $k$  συνδέονται με γραμμική σχέση της μορφής:

$$u_s = a + \beta k \quad \text{Εξίσωση 3.17}$$

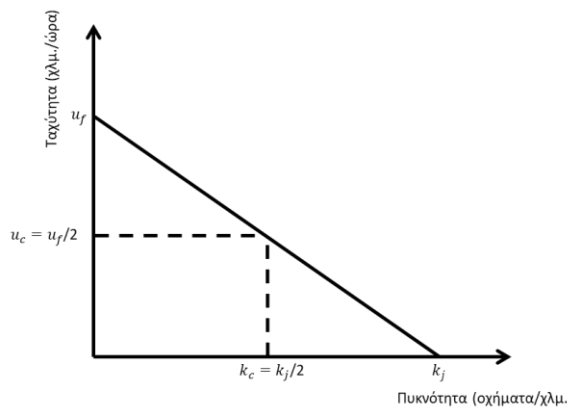
Όταν η πυκνότητα  $k$ , συνεπώς και ο φόρτος, τείνει προς το μηδέν, η ταχύτητα προσεγγίζει την ταχύτητα ελεύθερης ροής ( $u_s = u_f$ ). Όσο η πυκνότητα αυξάνεται, η ταχύτητα μειώνεται έως ότου η πυκνότητα πάρει τη μέγιστη τιμή της  $k_j$  που αντιστοιχεί σε συνθήκες ακινητοποίησης οχημάτων, οπότε η ταχύτητα μηδενίζεται ( $u_s = 0$ ). Χρησιμοποιώντας τα δύο παραπάνω ζεύγη ακραίων τιμών στην εξίσωση 3.17, προκύπτει:

$$u_s = u_f - \left(\frac{u_f}{k_j}\right)k \quad \text{Εξίσωση 3.18}$$

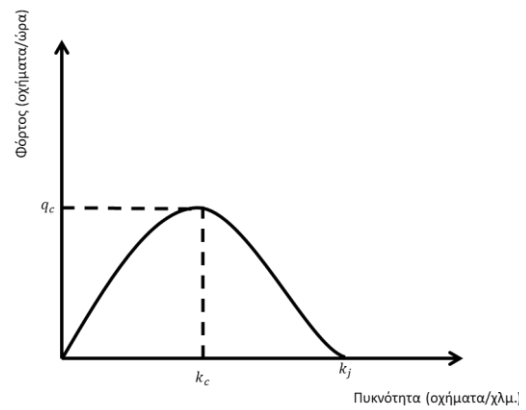
Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της σχέσης 3.18 με  $k$  προκύπτει:

$$q = u_s k = u_f k - \left(\frac{u_f}{k_j}\right)k^2 \quad \text{Εξίσωση 3.19}$$

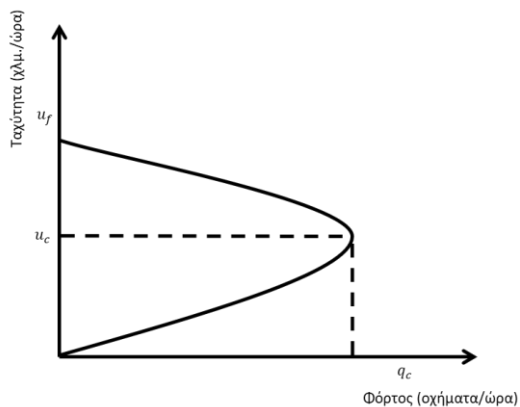
Η γραφική παράσταση της γραμμικής σχέσης ταχύτητας – πυκνότητας φαίνεται στην (Εικόνα 17 – Σχέδιο α).



(α) Σχέση Ταχύτητας - Πυκνότητας



(β) Σχέση Φόρτου - Πυκνότητας



(γ) Σχέση Ταχύτητας - Φόρτου

**Εικόνα 17: Θεμελιώδη διαγράμματα κυκλοφοριακής ροής κατά Greenshield**

Από την αντίστοιχη σχέση φόρτου – πυκνότητας (Εικόνα 17 - Σχέδιο β), φαίνεται ότι όταν η πυκνότητα τείνει στο μηδέν ( $k \rightarrow 0$ ) και ο φόρτος τείνει στο μηδέν ( $q \rightarrow 0$ ). Ο φόρτος όμως τείνει στο μηδέν και στην περίπτωση που η πυκνότητα τείνει στην πυκνότητα κορεσμού ( $k \rightarrow k_j$ ) (περίπτωση όπου τα οχήματα βρίσκονται ακινητοποιημένα επί της οδού).

Επομένως, ενώ παρατηρείται η μέγιστη δυνατή πυκνότητα, ο φόρτος είναι μηδενικός. Η μέγιστη τιμή του φόρτου  $q_c$  εμφανίζεται για την τιμή πυκνότητας  $k_c$  που ικανοποιεί τη σχέση

$\frac{dq}{dk} = 0$ , δηλαδή:

$$\frac{dq}{dk}=0 \Rightarrow u_f - 2\left(\frac{u_f}{k_j}\right)k_j = 0 \Rightarrow k_c = \frac{k_j}{2} \quad \text{Εξίσωση 3.20}$$

Επομένως, ο μέγιστος φόρτος  $q_c$ , δηλαδή η κυκλοφοριακή ικανότητα, εμφανίζεται στην τιμή πυκνότητας που είναι ίση με το μισό της πυκνότητας κορεσμού  $k_j$  και ισούται με:

$$q_c = \frac{u_f k_j}{2} - \frac{u_f k_j^2}{k_j 4} = \frac{u_f k_j}{4} \quad \text{Εξίσωση 3.21}$$

Αν η εξίσωση 3.18 λυθεί ως προς  $k$ , και πολλαπλασιαστούν τα δύο μέλη της σχέσης με  $u_s$  προκύπτει:

$$q = k u_s = k_j u_s - \left(\frac{k_j}{u_f}\right) u_s^2 \quad \text{Εξίσωση 3.22}$$

Η γραφική παράσταση της σχέσης φόρτου – ταχύτητας φαίνεται στην Εικόνα 17 – Σχέδιο γ. Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας (ταχύτητα ελεύθερης ροής  $u_f$ ) προκύπτει όταν ο φόρτος είναι μηδενικός. Όσο ο φόρτος αυξάνεται, η ταχύτητα μειώνεται. Το πάνω τμήμα της γραφικής παράστασης αντιστοιχεί σε συνθήκες ελεύθερης ροής και οριοθετείται στο σημείο όπου μεγιστοποιείται ο φόρτος ( $q_c$ ). Από το σημείο αυτό και μετά η πυκνότητα υπερβαίνει την τιμή  $k_c$ , οπότε ο φόρτος και η ταχύτητα μειώνονται. Οριοθετείται έτσι το κάτω τμήμα της γραφικής παράστασης που αντιστοιχεί σε συνθήκες κορεσμού. Η μέγιστη τιμή φόρτου  $q_c$  εμφανίζεται για την τιμή της ταχύτητας  $u_c$  που ικανοποιεί τη σχέση  $\frac{dq}{du_s} = 0$ , δηλαδή

$$\frac{dq}{du_s} = 0 \Rightarrow k_j - \frac{2k_j}{u_f} u_c = 0 \Rightarrow u_c = u_f/2 \quad \text{Εξίσωση 3.23}$$

Από τις εξισώσεις 3.20 και 3.23 προκύπτει ότι ο μέγιστος φόρτος  $q_c$ , δηλαδή η κυκλοφοριακή ικανότητα, εμφανίζεται για τιμή πυκνότητας ίση με το μισό της πυκνότητας κορεσμού και για τιμή ταχύτητας ίση με το μισό της ταχύτητας ελεύθερης ροής.

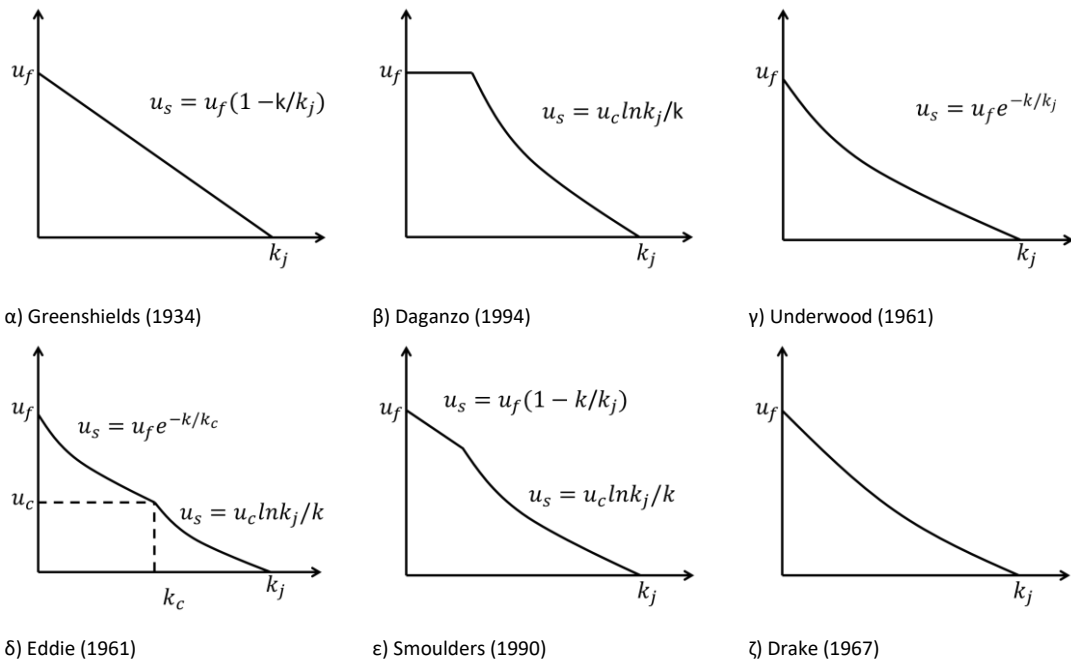
### 3.3.4. Εμπειρικές σχέσεις κυκλοφοριακών μεγεθών

Οι θεμελιώδεις σχέσεις μεταξύ των μακροσκοπικών κυκλοφοριακών μεγεθών αναφέρονται σε ομοιογενή και σταθερή κυκλοφοριακή ροή. Όμως η στατιστική επεξεργασία μετρήσεων κυκλοφοριακών μεγεθών έχει δείξει ότι η κυκλοφοριακή ροή δεν είναι ούτε ομοιογενής ούτε σταθερή. Αυτό εξηγεί το γεγονός ότι οι μετρήσεις σε υπεραστικές οδούς, λεωφόρους και αστικές αρτηρίες δείχνουν ότι υπάρχουν κάποιες διαφοροποιήσεις της πραγματικής συμπεριφοράς της κυκλοφορίας, σε σχέση με τη μαθηματική μορφή των θεμελιωδών διαγραμμάτων κυκλοφοριακής ροής.

Οι σχέσεις που παρουσιάζονται δεν περιγράφουν επαρκώς όλο το εύρος των κυκλοφοριακών καταστάσεων. Αυτό οφείλεται στην έντονη μεταβλητότητα της κυκλοφοριακής ροής, κυρίως στην περιοχή κοντά στη μέγιστη τιμή φόρτου. Η μεταβλητότητα αυτή, που μπορεί να είναι μια ταλάντωση γύρω από τις υψηλές τιμές φόρτου ή μια απότομη μετάβαση σε κορεσμό, πριν ο φόρτος πάρει τη μέγιστη τιμή του, είναι αποτέλεσμα της εξαναγκασμένης ροής των οχημάτων (η κίνηση των οχημάτων επηρεάζεται και από την περιοχή μέτρησης. Σε αυτό συμβάλλουν παράγοντες όπως η διαφορετικότητα στη γεωμετρία της οδού, το είδος ροής (διακοπτόμενη ή μη), η κυκλοφοριακή ικανότητα, κ.α. Σημαντικό ρόλο στη δυσκολία περιγραφής της κυκλοφοριακής ροής με προσαρμογή μαθηματικών σχέσεων παίζει και η θέση μέτρησης, που καθορίζει και την πληρότητα των δεδομένων σε ποικίλες κυκλοφοριακές καταστάσεις.

#### 3.3.4.1. Σχέση Ταχύτητας - Πυκνότητας

Οι σχέσεις που περιγράφηκαν στην Ενότητα 3.3.3 μελετήθηκαν πρώτα από τον Greenshields το 1934, ο οποίος αρχικά επικεντρώθηκε στη μελέτη της σχέσης της απόστασης  $s$  μεταξύ δύο οχημάτων και της ταχύτητας  $u_s$ , αλλά το όνομα του συνδέθηκε με τη θεμελιώδη σχέση που πρότεινε μεταξύ ταχύτητας και πυκνότητας ένα χρόνο αργότερα (Greenshields, 1935). Η μορφή της σχέσης αυτής θεωρήθηκε, όπως φάνηκε παραπάνω, γραμμική (Εικόνα 18 α).

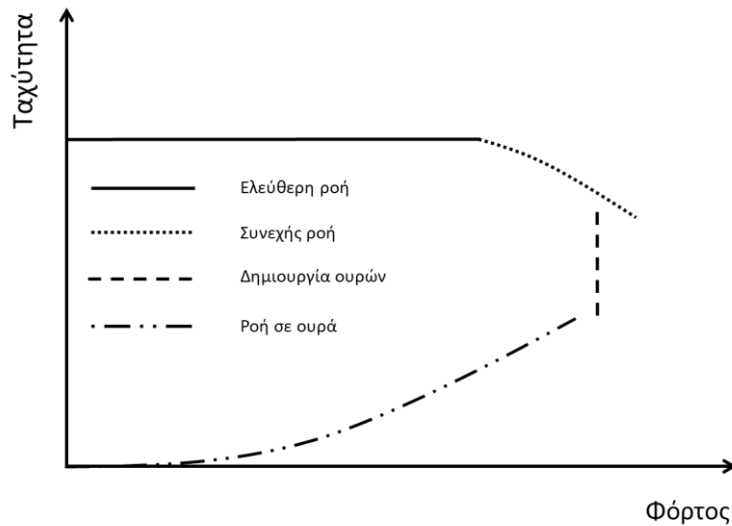


**Εικόνα 18: Μορφές θεμελιωδών σχέσεων ταχύτητας - πυκνότητας**

Από τότε πολλές διαφορετικές μορφές έχουν προταθεί με αυτή του Daganzo να είναι η πιο διαδεδομένη (Εικόνα 18 β) (Daganzo, 1994).

### 3.3.4.2. Σχέση Ταχύτητας - Φόρτου

Η μελέτη της μορφής της σχέσης της ταχύτητας – φόρτου ξεκινά από την εργασία του Greenshields και την υπόθεση της γραμμικής σχέσης που συνδέει την ταχύτητα και την πυκνότητα. Η θεμελιώδης μορφή της σχέσης ταχύτητας – φόρτου είναι παραβολική όπως φάνηκε στην Εικόνα 17. Μια από τις επικρατέστερες σήμερα μορφές της εμπειρικής καμπύλης που αντιστοιχεί στη σχέση φόρτου – ταχύτητας παρουσιάζεται στην Εικόνα 19, όπου φαίνονται τρία τμήματα που αντανακλούν τις συνθήκες ελεύθερης ροής, τη φάση δημιουργίας ουρών και τις κορεσμένες συνθήκες (ροή σε ουρά) αντίστοιχα.



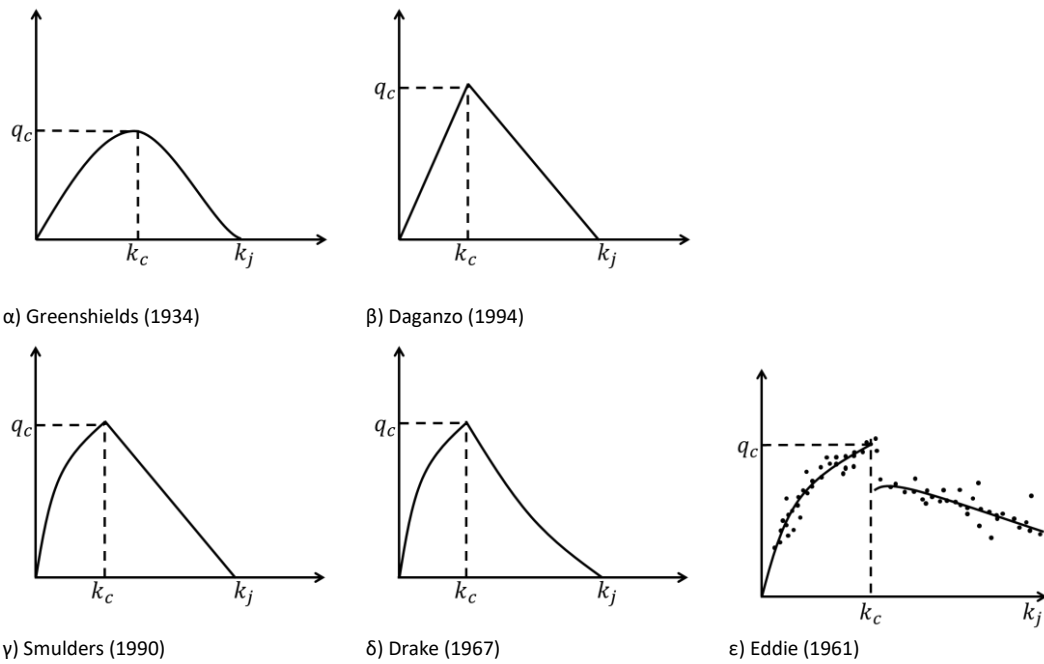
**Εικόνα 19: Γενικευμένη μορφή σχέσης ταχύτητας – φόρτου σε ελεύθερες λεωφόρους**

Η μορφή του σχήματος στην Εικόνα 19, αναφέρεται σε ελεύθερες λεωφόρους. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή του σχήματος στην Εικόνα 19, όπου ο φόρτος πλησιάζει σε τιμές κοντά στην κυκλοφοριακή ικανότητα. Παρατηρείται ότι οι ταχύτητες παραμένουν σχεδόν σταθερές σε υψηλές τιμές φόρτου. Αναφορικά με τη μείωση του φόρτου στην αρχή της δημιουργίας κορεσμού ανάντη, μελέτες έχουν δείξει μείωση κατά 3% έως 5%. Η μείωση αυτή δεν γίνεται αισθητή, εξαιτίας του μικρού χρονικού διαστήματος που διαρκούν οι υψηλοί φόρτοι πριν από τον κορεσμό.

### 3.3.4.3. Σχέση Φόρτου - Πυκνότητας

Ο Greenshields ήταν ο πρώτος που μελέτησε τη σχέση φόρτου – πυκνότητας και κατέληξε σε μια παραβολικής μορφής καμπύλη για να περιγράψει τη σχέση των δύο μεγεθών το 1935 (Εικόνα 20 α) (Greenshields, 1935). Από τότε πολλές διαφορετικές μορφές έχουν προταθεί, με αυτή του Daganzo (1994) να είναι η πιο διαδεδομένη (Εικόνα 20 β) με μια τριγωνικής μορφής καμπύλη που περιγράφει τη σχέση φόρτου – πυκνότητας. Στην Εικόνα 20 (γ) παρουσιάζεται το θεμελιώδες διάγραμμα που προτάθηκε το 1990 από τον Smulders, που είναι ένας συνδυασμός αυτών του Greenshields και του Daganzo: παραβολικής μορφής για χαμηλές πυκνότητες και γραμμικής μορφής για μεγάλες πυκνότητες (Smulders, 1990).



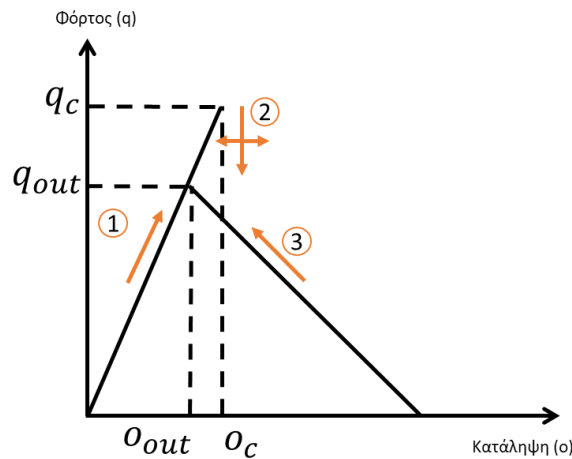


**Εικόνα 20: Μορφές θεμελιωδών σχέσεων φόρτου - πυκνότητας**

Ο Eddie ήταν από τους πρώτους που μελέτησαν την εμπειρική σχέση φόρτου – πυκνότητας και επισήμανε την ασυνεχή συμπεριφορά κοντά σε υψηλές τιμές φόρτου (Eddie, 1961). Στην Εικόνα 20 (ε) φαίνεται η σχέση φόρτου – πυκνότητας ως αποτέλεσμα ασυνεχών εκθετικών συναρτήσεων, η οποία είναι γνωστή και ως υπόθεση του Eddie.

Η σύγχρονη πρακτική στη μελέτη της σχέσης φόρτου – πυκνότητας της κυκλοφορίας εστιάζεται στη μελέτη της σχέσης φόρτου – κατάληψης, εξαιτίας της ευκολίας που παρουσιάζεται στην πραγματοποίηση μετρήσεων κατάληψης σε σχέση με την πυκνότητα. Η στροφή προς τη μελέτη της σχέσης φόρτου – κατάληψης στη δεκαετία του 1980 σηματοδοτεί την αρχή μιας προσπάθειας προσδιορισμού του τρόπου με τον οποίο η κυκλοφοριακή ροή μεταβαίνει από τη συνεχή ροή σε συνθήκες κορεσμού.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η παρακολούθηση της τροπής της κυκλοφοριακής ροής από συνθήκες συνεχούς ροής σε κορεσμό. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 21 σε συνθήκες συνεχούς ροής, όσο αυξάνεται ο φόρτος αυξάνεται και η κατάληψη (κίνηση 1) έως τη μέγιστη τιμή φόρτου  $q_c$  όπου περαιτέρω αύξηση της κατάληψης οδηγεί σε απότομη πτώση της κυκλοφοριακής ικανότητας (κίνηση 2).



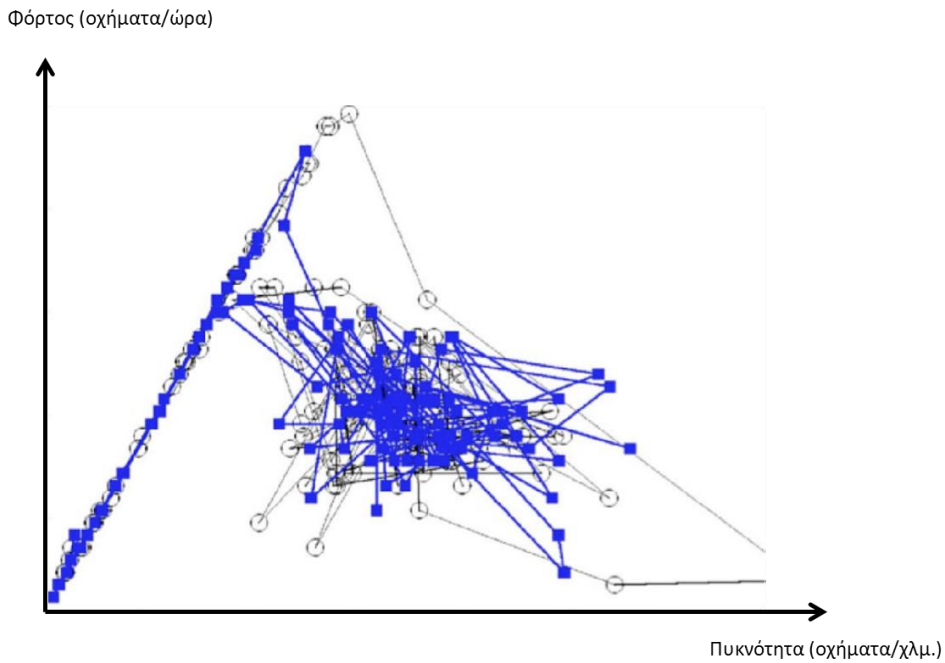
Εικόνα 21: Η τυπική μορφή της σχέσης φόρτου – κατάληψης

Οι εμπειρικές παρατηρήσεις έχουν δείξει ότι, ενώ η κυκλοφοριακή ροή μεταβαίνει σε κορεσμό αφού πάρει ο κυκλοφοριακός φόρτος τιμή  $q_c$ , η επαναφορά από κορεσμό σε ελεύθερη ροή γίνεται με μειωμένη τιμή φόρτου σε σχέση με τη μέγιστη του τιμή (κίνηση 3):  $q_{out} < q_c$ . Η συμπεριφορά αυτή είναι γνωστή και ως κυκλοφοριακή υστέρηση.

#### 3.3.4.4. Διασπορά (scatter) στις θεμελιώδεις σχέσεις

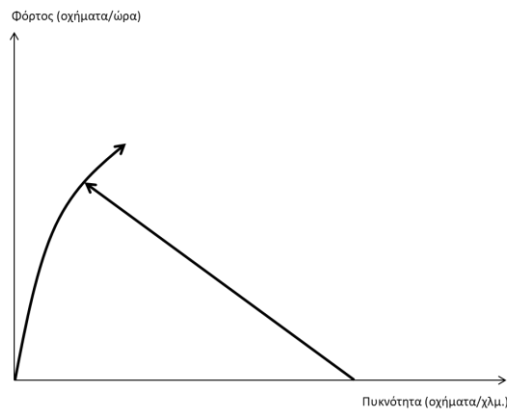
Τα θεμελιώδη διαγράμματα φόρτου - πυκνότητας που βασίζονται σε πραγματικές μετρήσεις φόρτου και πυκνότητας παρουσιάζουν συνήθως διασπορά μεγάλου εύρους (Εικόνα 22).

Ένα μεγάλο μέρος της παρατηρούμενης αυτής διασποράς μπορεί να αποδοθεί σύμφωνα με τους Zhang (1999) και Laval (2011), στις συνθήκες κυκλοφορίας χωρίς ισορροπία. Συγκεκριμένα, ο Zhang ορίζει ότι η κυκλοφορία είναι σε ισορροπία αν σε ένα διάστημα  $t$  και οδικό τμήμα μήκους  $L$ , η ταχύτητα  $u$  και η πυκνότητα  $k$  δεν αλλάζουν, δηλαδή:  $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$ ,  $\frac{\partial k}{\partial t} = 0$ ,  $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$  (Zhang, 1999), (Laval, 2011). Σύμφωνα με τους ίδιους, μόνο εκείνα τα σημεία του διαγράμματος διασποράς που ικανοποιούν αυτά τα κριτήρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την 'προσαρμογή' (fit) της θεμελιώδους σχέσης. Τότε, ο Zhang ονομάζει τη σχέση φόρτου και πυκνότητας ως θεμελιώδη σχέση ισορροπίας.

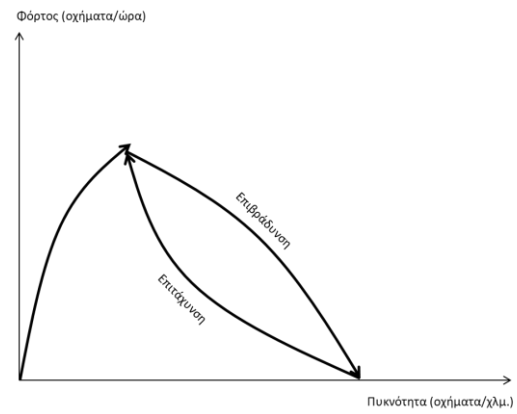


**Εικόνα 22: Διασπορά σε παρατηρούμενη γραφική παράσταση φόρτου – πυκνότητας**

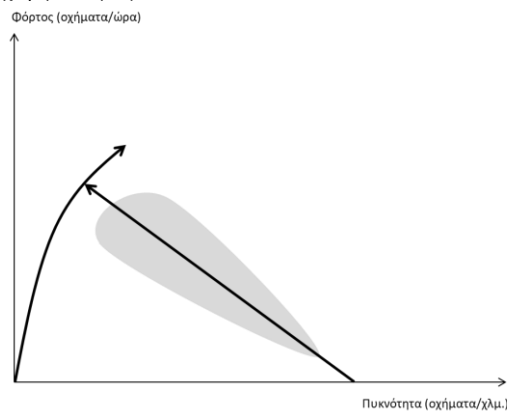
Άλλοι ερευνητές εξηγούν την παρατηρούμενη διασπορά με διαφορετικούς τρόπους. Για παράδειγμα, ο Edie, και οι Cassidy και Bertini αποδίδουν ένα μέρος της διασποράς στην πτώση της κυκλοφοριακής ικανότητας (Eddie, 1961), (Cassidy & Bertini, 1999): λίγο πριν την έναρξη της συμφόρησης, η εκροή (outflow) από ένα σημείο συμφόρησης (bottleneck) είναι υψηλότερη από ότι σε κατάσταση συμφόρησης (Εικόνα 23 α).



(α) Θεμελιώδης σχέση φόρτου – πυκνότητας με πτώση χωρητικότητας



(β) Θεμελιώδης σχέση φόρτου – πυκνότητας με υστέρηση



(γ) Τριφασική θεμελιώδης 'σχέση': οι γραμμές και η σκιασμένη περιοχή είναι αποδεκτές κατάστασεις κυκλοφορίας  
**Εικόνα 23: Θεμελιώδεις 'σχέσεις' φόρτου – πυκνότητας βάσει εμπειρικών παρατηρήσεων διασποράς**

Η πτώση της κυκλοφοριακής ικανότητας εξηγείται από το χαμηλό ρυθμό επιτάχυνσης των οχημάτων κατά την έξοδο από την περιοχή κυκλοφοριακής συμφόρησης, και την επιβράδυνση τους με υψηλό ρυθμό κατά την είσοδό τους στην περιοχή κυκλοφοριακής συμφόρησης. Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 3.3.4.3, η θεωρία αυτή οδηγεί σε θεμελιώδεις σχέσεις μεταξύ φόρτου και πυκνότητας με υστέρηση (Εικόνα 23 β) (Newell, 1965), (Treiterer & Myers, 1974).

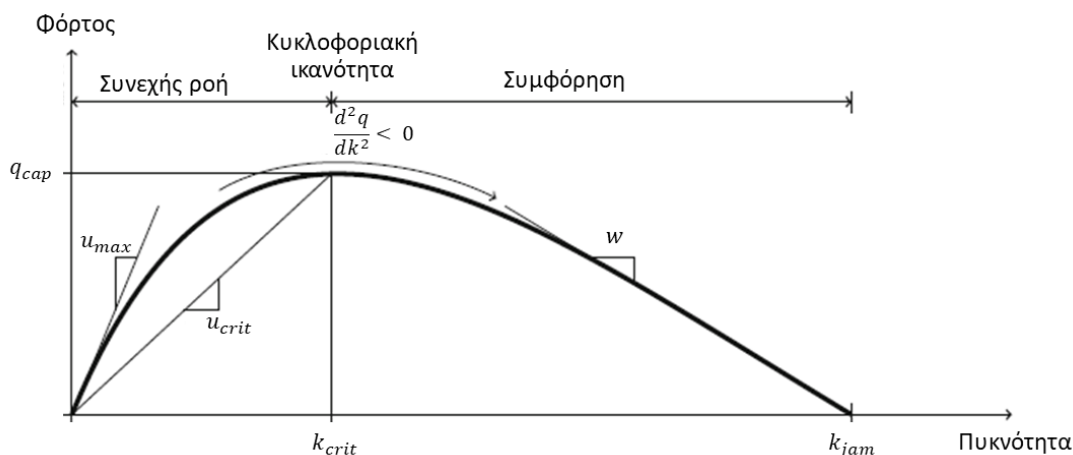
Από μια εντελώς διαφορετική σκοπιά, ο Kerner υποστηρίζει ότι οι παρατηρήσεις δείχνουν υπερβολική διασπορά για να περιγράψουν μια μοναδική θεμελιώδη σχέση και προτείνει για το λόγο αυτό τη χρήση μιας τριφασικής προσέγγισης (Εικόνα 23 γ), που χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη τριών καταστάσεων συμφόρησης, μία από τις οποίες παρουσιάζει μια μεγάλη διασπορά στο διάγραμμα φόρτου – πυκνότητας (Kerner, 2009). Ως αποτέλεσμα, η μέγιστη ροή, δηλαδή η κυκλοφοριακή ικανότητα, ενός οδικού τμήματος ενδέχεται να ποικίλλει με την πάροδο του χρόνου.

### 3.3.4.5. Ιδιότητες και προϋποθέσεις θεμελιωδών σχέσεων

Το 2012 ο del Castillo πρότεινε τις εξής συγκεκριμένες ιδιότητες μιας 'αξιόπιστης' θεμελιώδους σχέσης (del Castillo, 2012):

1. Η ταχύτητα κυμαίνεται από μηδέν έως τη μέγιστη τιμή  $u_{max}$ .
2. Η πυκνότητα κυμαίνεται από μηδέν έως τη μέγιστη τιμή  $k_{jam}$ .
3. Οι ταχύτητες στις τιμές ακραίας πυκνότητας είναι  $u(0) = u_{max}$  και  $u(k_{jam}) = 0$ .
4. Ο κυκλοφοριακός φόρτος  $q$  στις τιμές ακραίας πυκνότητας είναι  $q(0) = q(k_{jam}) = 0$ .
5. Η μέγιστη ταχύτητα  $u_{max}$  και η ταχύτητα κύματος συμφόρησης  $w$  απορρέουν από τις κλίσεις του θεμελιώδους διαγράμματος στις τιμές ακραίας πυκνότητας:  $u_{max} = dq/dk(0)$  και  $w = dq/dk(k_{jam})$ .
6. Η βασική σχέση είναι αυστηρά κοίλη:  $\frac{d^2q}{dk^2} < 0$  για σχεδόν όλες τις τιμές πυκνότητας  $k \in [0, k_{jam}]$ .

Οι ιδιότητες αυτές απεικονίζονται στην Εικόνα 24.



Εικόνα 24: Γραφική αναπαράσταση 'αξιόπιστης' (sound) θεμελιώδους σχέσης φόρτου – πυκνότητας σύμφωνα με τον del Castillo

Σύμφωνα με τον del Castillo, η 6<sup>η</sup> ιδιότητα είναι απαραίτητη για να οριστεί ένα υπόδειγμα κυκλοφοριακής ροής με μια μοναδική λύση, αλλά βάσιμα μπορεί να θεωρηθεί ότι η πραγματική κυκλοφορία μπορεί να συμπεριφερθεί με τρόπο που να περιγράφεται από μια θεμελιώδη σχέση που δεν είναι αυστηρά κοίλη. Επιπλέον, η ταχύτητα δεν αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας ( $\frac{du}{dk} \leq 0$ ). Ο del Castillo θεωρεί ότι αυτή είναι μια αναγκαία αλλά όχι και ικανή συνθήκη για την τελευταία ιδιότητα που προτείνει αναφορικά με την αυστηρή κοιλότητα της θεμελιώδους σχέσης.

Μια άλλη σημαντική ιδιότητα των θεμελιωδών σχέσεων είναι η ύπαρξη μέγιστου κυκλοφοριακού φόρτου (δηλαδή κυκλοφοριακής ικανότητας):  $q_{cap} = \max_{0 < k < k_{jam}} q(k)$ . Υποθέτοντας ότι οι παραπάνω προϋποθέσεις ικανοποιούνται, η κυκλοφοριακή ικανότητα σχετίζεται με μοναδική τιμή πυκνότητας που ονομάζεται κρίσιμη πυκνότητα  $k_{crit}$ , και μια μοναδική τιμή ταχύτητας που ονομάζεται κρίσιμη ταχύτητα  $u_{crit}$  με  $q_{cap} = k_{crit} u_{crit}$ . Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 24, η κρίσιμη πυκνότητα διαχωρίζει τη θεμελιώδη σχέση σε δύο περιοχές: (1) μια περιοχή συνεχούς ροής με τιμές πυκνότητας μικρότερες της κρίσιμης, τιμές ταχύτητας μεγαλύτερες της βέλτιστης, και αυξανόμενες τιμές κυκλοφοριακού φόρτου όσο αυξάνονται οι τιμές της πυκνότητας, και (2) μια περιοχή συμφόρησης με τιμές πυκνότητας μεγαλύτερες της κρίσιμης, τιμές ταχύτητας μικρότερες της βέλτιστης, και φθίνουσες τιμές κυκλοφοριακού φόρτου όσο αυξάνονται οι τιμές της πυκνότητας.

Στην Ενότητα 3.3.4.3 περιγράφηκαν πέντε θεμελιώδεις σχέσεις φόρτου - πυκνότητας με διαφορετικά σχήματα. Η βασική σχέση του Greenshields (βλέπε Εικόνα 20 α) είναι η μόνη που ικανοποιεί όλα τα κριτήρια του del Castillo. Οι άλλες θεμελιώδεις σχέσεις (Daganzo, Smulders, Drake και Eddie) δεν είναι αυστηρά κοίλες, αν και οι δύο πρώτες είναι ασθενώς κοίλες και όλες έχουν μη-αυξανόμενη ταχύτητα ( $\frac{du}{dk} \leq 0$ ).

Στην Ενότητα 3.3.4.4 εξετάστηκε το φαινόμενο της διασποράς στις θεμελιώδεις σχέσεις. Καμία από τις θεμελιώδεις σχέσεις που εξηγούν το φαινόμενο αυτό και απεικονίζονται στην Εικόνα 23 δεν ικανοποιούν την 6<sup>η</sup> ιδιότητα του del Castillo. Επιπλέον, οι θεμελιώδεις σχέσεις με πτώση ικανότητας ή υστέρηση, συνεπάγονται μη μοναδική θεμελιώδη σχέση: σε μια ορισμένη πυκνότητα (όπου αντιστοιχεί συνήθως σε φόρτο πάνω από την κυκλοφοριακή ικανότητα), ο κυκλοφοριακός φόρτος δεν καθορίζεται με μοναδικό τρόπο από την πυκνότητα, αλλά εξαρτάται επίσης από προηγούμενες καταστάσεις κυκλοφορίας.

### 3.3.5. Θεμελιώδεις σχέσεις σε επίπεδο δικτύου

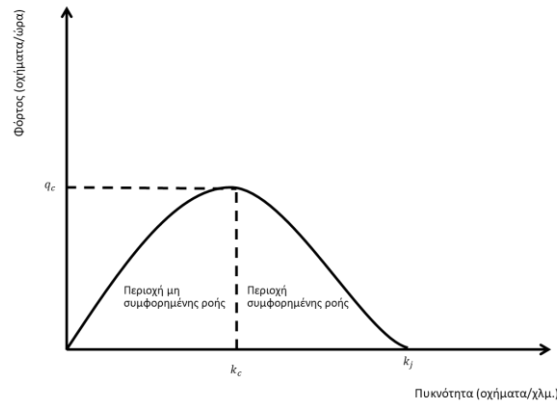
Οι σχέσεις μεταξύ των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, προσδιορίστηκαν αρχικά μέσω εμπειρικών παρατηρήσεων σε ρεύματα μη διακοπτόμενης ροής της κυκλοφορίας και σε συγκεκριμένα οδικά τμήματα.

Μεταγενέστερες προσομοιώσεις δικτύων και εμπειρικές παρατηρήσεις έδειξαν ότι παρόμοιες σχέσεις μεταξύ των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής υπάρχουν και σε επίπεδο δικτύου (και όχι μόνο οδικού τμήματος), όπου οι κυκλοφοριακές ροές διακόπτονται τακτικά από π.χ. σηματοδοτούμενες διασταυρώσεις. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, όταν τα μεγέθη  
Σελίδα 126 από 481

κυκλοφοριακού φόρτου, ταχύτητας και πυκνότητας εξετάζονται και εκτιμώνται ως μέσες τιμές σε επίπεδο οδικού δικτύου (και όχι οδικού τμήματος), οι σχέσεις που προκύπτουν περιγράφονται από τα αντίστοιχα Μακροσκοπικά Θεμελιώδη Διαγράμματα (ΜΘΔ), σε αντίθεση με τα θεμελιώδη διαγράμματα που αναφέρονται σε συγκεκριμένα οδικά τμήματα.

Η εμπειρική επαλήθευση της ύπαρξης ΜΘΔ έγινε πρόσφατα, μέσω συνδυασμού μετρήσεων από 500 μετρητές στην πόλη της Yokohama της Ιαπωνίας και ενός μεγάλου δείγματος δεδομένων προερχόμενων από συσκευές GPS σε ταξί (Geroliminis & Daganzo, 2007 και Daganzo & Geroliminis, 2008. Οι αναλύσεις και οι προσομοιώσεις σε αυτές τις βιβλιογραφικές αναφορές δείχνουν, ότι τα ΜΘΔ είναι διαγράμματα που μπορούν να αναπαραχθούν κάτω από ομοιογενείς συνθήκες κυκλοφορίας σε αστικά δίκτυα, ακόμα και αν τα θεμελιώδη διαγράμματα ροής - πυκνότητας για μεμονωμένα οδικά τμήματα παρουσιάζουν σημαντική διασπορά. Οι αναφορές αυτές έδειξαν επίσης ότι τα ΜΘΔ περιγράφουν δίκτυα ανεξαρτήτως του παραγόμενου κυκλοφοριακού έργου. Δηλαδή ο κυκλοφοριακός φόρτος σε ένα δίκτυο είναι μέγιστος για την ίδια τιμή της πυκνότητας, ανεξάρτητα από τους χρονικά μεταβαλλόμενους πίνακες προέλευσης-προορισμού.

Η σημασία της παρατήρησης και απόδειξης ύπαρξης των θεμελιωδών σχέσεων των κυκλοφοριακών μεγεθών σε επίπεδο δικτύου είναι εξαιρετικά σημαντική. Μέσω παρατηρήσεων με μετρητές στο οδικό δίκτυο, οι υπεύθυνοι φορείς για την κυκλοφορία σε μια πόλη έχουν στα χέρια τους ένα σημαντικό εργαλείο διαχείρισης. Το εργαλείο αυτό συνίσταται στην παρακολούθηση της εξέλιξης της σχέσης π.χ. κυκλοφοριακού φόρτου και πυκνότητας σε πραγματικό χρόνο, και στην προσπάθεια διατήρησής της σε επίπεδο μη συμφόρησης (βλ. Εικόνα 25 – περιοχή μη συμφορημένης ροής) με διάφορα μέσα, π.χ. με έλεγχο της εισόδου οχημάτων σε μια κεντρική αστική περιοχή που τείνει στη συμφόρηση μέσω τροποποίησης κύκλων σηματοδότησης (μείωση κύκλων πρασίνου) στην περίμετρό της.



Εικόνα 25: Σχέση φόρτου – πυκνότητας, Περιοχές συμφορημένης και μη συμφορημένης ροής

### 3.4. Μαθηματικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής

#### 3.4.1. Εισαγωγή

Τα υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής βασίζονται σε θεμελιώδεις νόμους της Φυσικής για την περιγραφή της κίνησης των οχημάτων σε χώρο και χρόνο. Παρέχουν γνώση για τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η κυκλοφοριακή ροή κάτω από συγκεκριμένες κυκλοφοριακές και δομικές συνθήκες ενός οδικού συστήματος και αποτελούν απαραίτητο τμήμα των υποδειγμάτων προσομοίωσης. Τα πρότυπα αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την περιοχή εφαρμογής (δίκτυο, κόμβοι, αρτηρίες, κ.α.), τη μεθοδολογία ανάπτυξης (αναλυτική, προσομοίωση), το είδος των μεταβλητών (συνεχή, διακριτά ή μεικτά πρότυπα), την αναπαράσταση της κυκλοφορίας (ντετερμινιστικά, στοχαστικά), κ.α. Ο βασικότερος διαχωρισμός γίνεται με βάση το επίπεδο λεπτομέρειας που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση της κίνησης των οχημάτων κατά μήκος μιάς οδού, σε κόμβο ή σε δίκτυο.

Με βάση το επίπεδο λεπτομέρειας, τα μαθηματικά υποδείγματα χωρίζονται σε μακροσκοπικά, μικροσκοπικά και μεσοσκοπικά. Στα μακροσκοπικά υποδείγματα, η κυκλοφορία των οχημάτων εξετάζεται συνολικά, και στόχος είναι η διερεύνηση του συνολικού συστήματος της κυκλοφορίας με βάση τις σχέσεις των βασικών κυκλοφοριακών μεγεθών (φόρτος, ταχύτητα και πυκνότητα). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας υποδειγμάτων είναι τα μακροσκοπικά υδροδυναμικά υποδείγματα.

Αντίθετα, τα μικροσκοπικά μαθηματικά υποδείγματα βασίζονται στην περιγραφή της κίνησης κάθε οχήματος κατά μήκος μιάς οδού ξεχωριστά, από ένα διάνυσμα με συνιστώσες τη θέση στο χώρο, την ταχύτητα και την επιτάχυνση. Τα πρότυπα αυτά αποτελούνται από



κανόνες ανανέωσης των τριών αυτών μεγεθών, με βάση την κατάσταση των γειτονικών οχημάτων. Ανάλογα με τη θεώρηση για την εξέλιξη των κυκλοφοριακών μεγεθών με το χρόνο, τα μικροσκοπικά υποδείγματα μπορεί να είναι συνεχή στο χρόνο και το χώρο (Υποδείγματα ακολουθίας οχημάτων), διακριτά στο χρόνο αλλά συνεχή στο χώρο (υποδείγματα προσομοίωσης) ή διακριτά στο χώρο και το χρόνο (cellular automata).

Τέλος, τα μεσοσκοπικά μαθηματικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής, αναπτύχθηκαν για να καλύψουν το κενό μεταξύ των μικροσκοπικών υποδειγμάτων, που περιγράφουν τη συμπεριφορά μεμονωμένων οχημάτων και των μακροσκοπικών υποδειγμάτων που περιγράφουν την κυκλοφορία ως συνεχή ροή. Τα μεσοσκοπικά υποδείγματα περιλαμβάνουν υποδείγματα διανομής και συμπλέγματος (distribution and cluster models). Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα μεσοσκοπικά υποδείγματα είναι τα αεριοκινητικά (gas-kinetic).

### **3.4.2. Μικροσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής**

Η προτυποποίηση της κυκλοφοριακής ροής σε μικροσκοπικό επίπεδο βασίζεται στην περιγραφή της κίνησης κάθε μεμονωμένου οχήματος μέσα στο κυκλοφοριακό ρεύμα. Αυτό συνεπάγεται την ανάγκη προτυποποίησης διαφόρων ενεργειών, όπως για παράδειγμα η επιτάχυνση, η επιβράδυνση και οι αλλαγές λωρίδας, τις οποίες εκτελεί ο κάθε οδηγός αντιδρώντας στην υπόλοιπη κυκλοφορία που τον περιβάλλει. Τα μικροσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής βασίζονται στην υπόθεση ότι οι οδηγοί προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους σε εκείνη του προπορευόμενου οχήματος, και περιγράφουν τη διαμήκη (longitudinal) και πλευρική (lateral) συμπεριφορά των επιμέρους οχημάτων. Στα μικροσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής, τα οχήματα αριθμούνται για να υποδεικνύουν την σειρά τους:  $n$  είναι το υπό εξέταση όχημα,  $n - 1$  το προπορευόμενο όχημα,  $n + 1$  το όχημα που ακολουθεί, κ.λπ. Η συμπεριφορά κάθε μεμονωμένου οχήματος αναπαριστάται ως προς τη μπροστινή θέση  $x$ , την ταχύτητα  $u = dx/dt$ , την επιτάχυνση  $a = du/dt$  ή με ένα συνδυασμό των τριών παραμέτρων. Τα περισσότερα μικροσκοπικά υποδείγματα είναι υποδείγματα ακολουθίας οχημάτων, βασική προϋπόθεση των οποίων είναι η συνέχεια της κυκλοφοριακής ροής στο χώρο και το χρόνο.

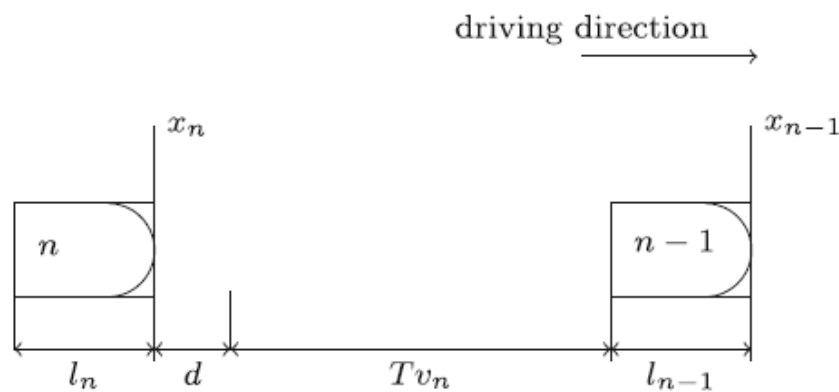
#### **3.4.2.1. Υποδείγματα ασφαλούς απόστασης**

Το πρώτο μικροσκοπικό υπόδειγμα ακολουθίας οχημάτων ήταν αυτό του Pipes και βασίζεται σε μια έννοια ασφαλούς απόστασης κίνησης από το προπορευόμενο όχημα (Pipes, 1953). Ο

Pipes πρότεινε την έκφραση της θέσης του προπορευόμενου οχήματος ως μια συνάρτηση της θέσης του ακολουθούντος οχήματος, της μορφής:

$$x_{n-1} = x_n + d + Tv_n + l_{n-1}^{veh} \quad \text{Εξίσωση 3.24}$$

Όπου  $d$  είναι η απόσταση μεταξύ των δύο οχημάτων,  $l_{n-1}^{veh}$  είναι το μήκος του προπορευόμενου οχήματος, και  $Tv_n$  είναι σύμφωνα με τον Pipes η 'απόσταση ασφαλείας' (legal distance) μεταξύ του οχήματος  $n - 1$  και  $n$  (Εικόνα 26).



Εικόνα 26: Παράμετροι ασφαλούς απόστασης του υποδείγματος Pipes

Η θεωρία ακολουθίας οχημάτων του Pipes οδηγεί σε μια ελάχιστη απόσταση ασφαλείας, η οποία αυξάνεται γραμμικά με την ταχύτητα. Τα αποτελέσματα του υποδείγματος αυτού, παρόλη την απλουστευμένη γενικότερη θεώρηση που ακολουθεί, επαληθεύτηκαν πλήρως βάσει μετρήσεων στο πεδίο.

Το 1961, οι Komatani και ο Sasaki εξήγαγαν ένα πρότυπο ακολουθούντος οχήματος από τους νόμους κίνησης του Νεύτωνα (Komatani & Sasaki, 1961). Στο πρότυπο αυτό, θεωρείται ότι ένας οδηγός ενεργεί έτσι ώστε να αποφύγει μια σύγκρουση, ακόμη και αν το προπορευόμενο όχημα ενεργήσει «απρόβλεπτα». Στην πραγματικότητα, οι Komatani και ο Sasaki, αντικαθιστούν την απόσταση  $d$  μεταξύ των δύο οχημάτων του υποδείγματος Pipes με έναν όρο που εξαρτάται από την ταχύτητα. Επιπλέον, η διατύπωσή τους περιλαμβάνει και μια χρονική καθυστέρηση  $s$ . Μια θετική τιμή  $s$  σημαίνει ότι χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα μεταξύ μιας αλλαγής στη συμπεριφορά ενός οχήματος και της πραγματικής αντίδρασης του ακολουθούντος οχήματος σε αυτή την αλλαγή. Την ίδια χρονική περίοδο, ο Newell (1961) πρότεινε ένα απλό υπόδειγμα ασφαλούς απόστασης με καθυστέρηση, της μορφής (Newell, 1961):

$$u_n = u_n(u_{n-1}(t - \tau) - x_n(t - \tau)) \quad \text{Εξίσωση 3.25}$$

όπου  $\tau$  ο χρόνος καθυστέρησης. Σαράντα χρόνια αργότερα (2002), ο ίδιος απλούστευσε το υπόδειγμά του, υποθέτοντας ότι ένα όχημα ακολουθεί την τροχιά του προπορευόμενου οχήματος, που εκφράζεται από τα  $\tau_n$  και  $s_{jam,n}$  στην εξίσωση 3.26 (Newell, 2002):

$$x_n(t + \tau_n) = x_{n-1}(t) - s_{jam,n} \quad \text{Εξίσωση 3.26}$$

Το μοντέλο του Newell μπορεί να ερμηνευτεί υποθέτοντας πως ο οδηγός που ακολουθεί επιλέγει μια ταχύτητα βάσει της χρονικής απόστασης  $T_{n+1}$ , και μια επιτάχυνση βάσει της διαφοράς στην ταχύτητα την χρονική στιγμή  $t$ , η οποία είναι ανάλογη με την απόκλισή του από την καμπύλη ισορροπίας με χρόνο «χαλάρωσης» (relaxation time)  $T_{n+1}$ .

Η βασική υπόθεση ότι οι οδηγοί ακολουθούν ένα προπορευόμενο όχημα τηρώντας μια απόσταση ασφαλείας δεν ισχύει πάντα. Για το λόγο αυτό, ο Hidas πρότεινε ένα υπόδειγμα, η βασική υπόθεση του οποίου στηρίζεται στο γεγονός ότι ο οδηγός ενός οχήματος που ακολουθεί  $n + 1$ , τείνει να ακολουθεί τηρώντας μια μικρότερη απόσταση ασφαλείας. Όταν πλησιάζει, και ακολουθεί ένα προπορευόμενο όχημα  $n$ , οποιαδήποτε χρονική στιγμή προσπαθεί να προσαρμόσει την επιτάχυνσή του, έτσι ώστε να φτάσει σε μια επιθυμητή απόσταση με μια χρονική υστέρηση, η οποία διαρκεί  $\tau$  δευτερόλεπτα (Hidas, 1998). Το υπόδειγμα είναι της μορφής:

$$x_n(t + \tau) - x_{n+1}(t + \tau) = D_{n+1}(t + \tau) \quad \text{Εξίσωση 3.27}$$

Η βασική υπόθεση είναι πως η επιθυμητή απόσταση είναι γραμμικά συσχετιζόμενη με την επιθυμητή ταχύτητα:

$$D_{n+1}(t + \tau) = \alpha \dot{x}_{n+1}(t + \tau) + \beta \quad \text{Εξίσωση 3.28}$$

όπου  $\alpha$  και  $\beta$  είναι σταθερές και  $\dot{x}_{n+1}(t + \tau)$  είναι, όπως και προηγουμένως, η ταχύτητα του οχήματος  $n + 1$  που ακολουθεί την χρονική στιγμή  $t + \tau$ . Ένα πλεονέκτημα του υποδείγματος αυτού είναι ότι δεν βασίζεται σε θέματα συμπεριφοράς σχετικά με τους χρόνους αντίδρασης. Υποθέτοντας σταθερές επιταχύνσεις  $a_n$  για το όχημα που προπορεύεται και  $a_{n+1}$  για το όχημα που ακολουθεί κατά την χρονική υστέρηση  $\tau$ , ο Hidas απέδειξε πως η επιτάχυνση  $a_{n+1}$  του οχήματος που ακολουθεί, δίνεται από την σχέση:

$$\alpha_{n+1} = \frac{t [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)]}{\alpha\tau + \frac{1}{2}\tau^2} + \frac{[x_n(t) - x_{n+1}(t) - \alpha\dot{x}_{n+1}(t) - \beta]}{\alpha\tau + \frac{1}{2}\tau^2} + \frac{\frac{1}{2}\tau^2\alpha_n}{\alpha\tau + \frac{1}{2}\tau^2}$$

Εξίσωση 3.29

Η σχέση αυτή υποθέτει επίσης πως όταν ο οδηγός που ακολουθεί προσεγγίζει ένα πιο αργό προπορευόμενο όχημα, τότε προσπαθεί να ορίσει την επιτάχυνσή του με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτύχει την ίδια ταχύτητα με αυτήν του προπορευόμενου στο τέλος της διαδικασίας επιβράδυνσης του προπορευόμενου. Δηλαδή:

$$\dot{x}_{n+1}(t) + \alpha_{n+1}\tau = \dot{x}_n(t) + \alpha_n\tau \quad \text{Εξίσωση 3.30}$$

όπου η χρονική υστέρηση  $\tau$  υπολογίζεται από την σχέση:

$$\tau = \frac{x_n(t) - x_{n+1}(t) - \alpha\dot{x}_n(t) - \beta}{\alpha\alpha_n - 0,5[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)]} \quad \text{Εξίσωση 3.31}$$

#### 3.4.2.2. Υποδείγματα ερεθίσματος - απόκρισης

Μια άλλη κατηγορία υποδειγμάτων ακολουθώντας οχήματος είναι αυτή των υποδειγμάτων ερεθίσματος-απόκρισης. Σε αυτά τα υποδείγματα θεωρείται ότι οι οδηγοί επιταχύνουν ή επιβραδύνουν ως αντίδραση σε τρία ερεθίσματα:

1. Ταχύτητα του δικού τους οχήματος  $u_n = \frac{dx_n}{dt}$
2. Απόσταση από το προπορευόμενο όχημα  $s_n = x_{n-1} - x_n$
3. Σχετική ταχύτητα ως προς το προπορευόμενο όχημα (ρυθμός υποχώρησης (receding rate)  $\dot{s}_n = \frac{ds_n}{dt} = u_{n-1} - u_n$

Η αντίδραση περιλαμβάνει την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση, ανάλογα με το μέγεθος της εκάστοτε διέγερσης την εκάστοτε χρονική στιγμή με μια χρονική υστέρηση  $T$ , η οποία είναι ίση με τον χρόνο αντίδρασης του οδηγού που ακολουθεί. Οι Gerlough και Huber ανέπτυξαν μια σειρά υποδειγμάτων, των οποίων η βασική εξίσωση έχει την μορφή (Gerlough & Huber, 1975):

$$\text{Αντίδραση } (t + T) = \text{Εναισθησία} \times \text{Ερέθισμα } (t)$$

Το πρώτο και πιο απλό υπόδειγμα αφορά στην περίπτωση εκείνη, κατά την οποία η αντίδραση αναπαριστάται βάσει της επιτάχυνσης ή της επιβράδυνσης του οδηγού που ακολουθεί και το ερέθισμα αναπαριστάται βάσει της διακύμανσης της σχετικής ταχύτητας. Το απλό αυτό υπόδειγμα θεωρεί πως η ευαισθησία είναι σταθερή. Αν  $x_n(t)$  είναι η θέση του προπορευόμενου και  $x_{n+1}(t)$  η θέση του οχήματος που ακολουθεί την χρονική στιγμή  $t$ , τότε το βασικό υπόδειγμα έχει την μορφή:

$$\ddot{x}_{n+1}(t + T) = \lambda[\dot{x}_n(t) + \dot{x}_{n+1}(t)] \quad \text{Εξίσωση 3.32}$$

όπου η αντίδραση είναι η επιτάχυνση ή η επιβράδυνση, ανάλογα με το πρόσημο του ερεθίσματος. Το πρόσημο είναι θετικό όταν η σχετική ταχύτητα είναι θετική, δηλαδή όταν  $\dot{x}_n(t) > \dot{x}_{n+1}(t)$  και αρνητικό όταν η σχετική ταχύτητα είναι αρνητική, δηλαδή όταν  $\dot{x}_n(t) < \dot{x}_{n+1}(t)$  ή και όταν οι σχετικές ταχύτητες είναι ίσες, δηλαδή όταν  $\dot{x}_n(t) = \dot{x}_{n+1}(t)$ . Το υπόδειγμα αυτό είναι γνωστό ως γραμμικό μοντέλο ακολουθίας οχημάτων, εξαιτίας της άμεσης συσχέτισης μεταξύ της αντίδρασης και του ερεθίσματος (Gerlough & Huber, 1975) & (Rothery, 1992).

Το πιο χαρακτηριστικό όμως υπόδειγμα της κατηγορίας ερεθίσματος – απόκρισης, είναι το επονομαζόμενο υπόδειγμα GHR (από τους εμπνευστές του Gazis, Herman και Rothery το 1961), το οποίο είναι της μορφής (Gazis, et al., 1961):

$$a_n(t) = \gamma \frac{(u_{n-1}(t))^{c_1}}{(s_n(t-\tau))^{c_2}} \dot{s}_n(t - \tau) \quad \text{Εξίσωση 3.33}$$

όπου  $\gamma \frac{(u_{n-1}(t))^{c_1}}{(s_n(t-\tau))^{c_2}}$  θεωρείται η ευαισθησία του οδηγού/οχήματος  $n$ ,  $\gamma$  είναι η παράμετρος ευαισθησίας,  $c_1$  και  $c_2$  είναι οι παράμετροι προσαρμογής του υποδείγματος σε εμπειρικά δεδομένα, ο ρυθμός υποχώρησης (receding rate)  $\dot{s}_n(t - \tau)$  που θεωρείται το ερέθισμα, και η επιτάχυνση  $a_n(t)$  που θεωρείται η απόκριση. Στην έρευνά τους, οι Gazis, Herman και Rothery έκαναν ανάλυση των σχέσεων μεταξύ του γραμμικού μοντέλου ακολουθίας οχημάτων και των μακροσκοπικών μοντέλων για ροές σταθερής κατάστασης. Η ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης δίνει την ταχύτητα του οχήματος  $n + 1$ , η οποία μπορεί να ερμηνευτεί βάσει της ταχύτητας του κυκλοφοριακού ρεύματος. Για την επίλυση της εξίσωσης και για τον υπολογισμό του περιορισμού ολοκλήρωσης (λαμβάνοντας υπόψη ότι η πυκνότητα  $k$  είναι αντίστροφη του  $s$  και η μέση απόσταση  $s$  μεταξύ των οχημάτων δίνεται από την σχέση  $s_n = x_n - x_{n+1}$ ), η σχέση ταχύτητας-πυκνότητας υπολογίζεται βάσει της προηγούμενης εξίσωσης και δίνεται από την σχέση

$$u = \lambda \left[ \frac{1}{k} - \frac{1}{k_{jam}} \right] \quad \text{Εξίσωση 3.34}$$

όπου  $k_{jam}$  είναι η πυκνότητα συμφόρησης. Λαμβάνοντας υπόψη την θεμελιώδη σχέση  $q = ku$ , τότε η σχέση σταθερής κατάστασης δίνεται από την σχέση:

$$q = ku = \lambda \left[ 1 - \frac{k}{k_{jam}} \right] \quad \text{Εξίσωση 3.35}$$

#### 3.4.2.3. Υποδείγματα σημείων δράσης (action point)

Μια άλλη κατηγορία μικροσκοπικών υποδειγμάτων κυκλοφοριακής ροής αφορούν στα υποδείγματα σημείων δράσης (action point), τα οποία βασίζονται στην υπόθεση ότι οι οδηγοί των οχημάτων αντιδρούν μόνο όταν αντιλαμβάνονται ότι προσεγγίζουν ένα προπορευόμενο όχημα. Σύμφωνα με αυτή την υπόθεση, ο ρυθμός προσέγγισης ή η απόσταση μεταξύ δύο οχημάτων πρέπει να φτάσουν σε κάποιο όριο αντίληψης πριν αντιδράσει ο οδηγός. Το κύριο πλεονέκτημα των υποδειγμάτων σημείων δράσης σε αντίθεση με άλλα υποδείγματα ακολουθίας οχημάτων είναι ότι:

- σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ οχημάτων η συμπεριφορά οδήγησης δεν επηρεάζεται από αυτή άλλων οχημάτων
- σε μικρές αποστάσεις μεταξύ οχημάτων η συμπεριφορά οδήγησης επηρεάζεται από αυτή άλλων οχημάτων, μόνο όταν οι μεταβολές σε παραμέτρους, π.χ. της σχετικής ταχύτητας και της απόστασης, είναι αρκετά μεγάλες ώστε να γίνουν αντιληπτές.

Εάν η συμπεριφορά οδήγησης επηρεάζεται από αυτή των άλλων οχημάτων, οποιοδήποτε από τα υποδείγματα ασφαλούς απόστασης ή ερεθίσματος – απόκρισης που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει ποσοτικά την επίδραση στη συμπεριφορά οδήγησης.

Το πρώτο υπόδειγμα σημείου δράσης ανέπτυξαν ο Wiedeman το 1974, και έπειτα ο Fellendorf (1994). Τέτοια υποδείγματα βασίζονται στον Leutzbach (1988) σχετικά με τον προσδιορισμό των επονομαζόμενων ψυχο-φυσικών υποδειγμάτων απόστασης μεταξύ των οχημάτων (Wiedemann, 1974), (Fellendorf, 1994) & (Leutzbach, 1988). Τα υποδείγματα αυτά στηρίζονται σε δυο βασικές παραδοχές:

1. Στις περιπτώσεις μεγάλης απόστασης μεταξύ των οχημάτων, ο οδηγός του οχήματος που ακολουθεί δεν επηρεάζεται από την διαφορά της ταχύτητας.

2. Στις περιπτώσεις μικρής απόστασης μεταξύ των οχημάτων υπάρχουν συνδυασμοί σχετικών ταχυτήτων και αποστάσεων, για τους οποίους, όπως και στην πρώτη παραδοχή, δεν υπάρχει καμία αντίδραση από τον οδηγό του οχήματος που ακολουθεί, επειδή η σχετική κίνηση είναι πολύ μικρή

Αυτές οι παραδοχές υπονοούν την ύπαρξη νοητών ορίων, τα οποία μόνο όταν προσεγγιστούν θα προκαλέσουν κάποια αλλαγή και αντίδραση του οδηγού του οχήματος που ακολουθεί. Τα όρια αυτά αποτυπώνονται γραφικά στο διάστημα  $(\Delta x, \Delta \dot{x})$  μέσω παραβολικών μορφών, δια των οποίων μπορεί να εξηγηθεί ο τρόπος με τον οποίο κινείται το όχημα που ακολουθεί. Ένα όχημα που κινείται με ταχύτητα  $\dot{x}_{n+1}$ , η οποία είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα  $\dot{x}_n$  του προπορευόμενου οχήματος, θα το «προφτάσει» με σταθερή σχετική ταχύτητα  $\Delta \dot{x}$ . Όταν προσεγγιστεί το όριο, τότε ο οδηγός αντιδρά μειώνοντας την ταχύτητά του. Η σχετική κίνηση με σταθερή επιβράδυνση εμφανίζεται με την μορφή παραβολικών σχημάτων, στα οποία η ελάχιστη ταχύτητα βρίσκεται στον άξονα  $\Delta x$ . Ο οδηγός προσπαθεί να επιβραδύνει, έτσι ώστε να φτάσει σε ένα σημείο, στο οποίο ισχύει  $\Delta \dot{x} = 0$ . Δεν μπορεί να επιτύχει όμως κάτι τέτοιο, γιατί δεν είναι σε θέση να αντιληφθεί μικρές διαφορές καθώς και να ελέγξει την δική του ταχύτητα σε ικανοποιητικό βαθμό. Το αποτέλεσμα είναι πως η απόσταση θα αυξηθεί και πάλι. Όταν ο οδηγός προσεγγίσει το αντίθετο όριο, επιταχύνει και προσπαθεί να πετύχει την επιθυμητή απόσταση. Αν υποθεθεί πως η σχέση μεταξύ των νοητών ορίων για την απόσταση είναι ίδια τόσο για θετικές όσο και για αρνητικές μεταβολές της σχετικής ταχύτητας, τότε η συμπεριφορά που προκύπτει σχετικά με την απόσταση που τηρείται έχει παρόμοια μορφή με ένα συμμετρικό εκκρεμές κινούμενο περί του σημείου ισορροπίας του.

Έχει επίσης αποδειχθεί πως η συμπεριφορά αντιστοιχεί σε μια ειδική περίπτωση του γενικού μοντέλου ακολουθίας οχημάτων:

$$\ddot{x}_{n+1}(t + T) = c \frac{\dot{x}_{n+1}^m(t)}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad \text{Εξίσωση 3.36}$$

όπου  $m=0$  και  $l=2$ .

#### 3.4.2.4. Υποδείγματα ακολουθίας οχημάτων πολλαπλών κλάσεων

Όλα τα υποδείγματα ακολουθίας οχημάτων που αναφέρονται παραπάνω βασίζονται σε διάφορες παραμέτρους, στοχεύοντας στην όσο το δυνατόν ακριβέστερη αναπαράσταση του

τρόπου με τον οποίο οι οδηγοί των οχημάτων που ακολουθούν προσαρμόζουν τον τρόπο οδήγησής τους σε αυτόν του προπορευόμενου οχήματος.

Τα περισσότερα υποδείγματα ακολουθίας οχημάτων που περιγράφονται και αναλύονται στη βιβλιογραφία προϋποθέτουν ομοιογενείς μονάδες οδηγού και οχήματος, δηλαδή θεωρούν ότι όλα τα οχήματα και όλοι οι οδηγοί συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο. Ωστόσο, δεδομένου ότι κάθε όχημα προτυποποιείται και προσομοιώνεται μεμονωμένα, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η ετερογένεια. Στην περίπτωση αυτή, οι παράμετροι των υποδειγμάτων, όπως η επιθυμητή (μέγιστη) ταχύτητα, η ευαισθησία και ο χρόνος αντίδρασης, μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τα οχήματα και τους οδηγούς. Τα περισσότερα εμπορικά εργαλεία προσομοίωσης βασισμένα σε υποδείγματα ακολουθίας οχημάτων είναι πολλαπλών κλάσεων, λαμβάνουν δηλαδή υπόψη την ετερογένεια.

Αφετέρου, ο συνεχώς αυξανόμενος αριθμός των παραμέτρων των υποδειγμάτων μπορεί θεωρητικά να οδηγήσει στην αναπαράσταση της πραγματικότητας με μεγαλύτερη αξιοπιστία, ο υπολογισμός τους όμως γίνεται συνθετότερος και περισσότερο χρονοβόρος.

#### 3.4.2.5. Υποδείγματα Cellular Automata

Η βασική διαφορά των υποδειγμάτων Cellular Automata σε σχέση με τα υποδείγματα ακολουθίας οχημάτων, είναι ότι είναι διακριτά σε χώρο και χρόνο. Στα υποδείγματα αυτά ένα οδικό τμήμα περιγράφεται από μια αλληλουχία μοναδιαίων οδικών τμημάτων μήκους 7.5 μέτρων που λέγονται κελιά. Τα κελιά μπορούν να είναι είτε άδεια είτε να καταλαμβάνονται από ένα ακριβώς όμοιο όχημα. Τα υποδείγματα Cellular Automata συνίστανται επί της ουσίας σε μια σειρά κανόνων, σύμφωνα με τους οποίους αποφασίζεται η κίνηση του οχήματος στο επόμενο κελί. Κάθε κελί συνοδεύεται από ένα αριθμό που περιγράφει την ταχύτητα του οχήματος και μπορεί να πάρει διακριτές τιμές από 0 έως μια μέγιστη τιμή ταχύτητας  $u_{max}$ .

Το πρώτο υπόδειγμα τέτοιας μορφής αναπτύχθηκε από τους Cremer και Ludwig (Cremer & Ludwig, 1986). Το πιο χαρακτηριστικό υπόδειγμα Cellular Automata είναι το υπόδειγμα NaSch, που έχει πάρει το όνομα του από τους εμπνευστές του Nagel και Schreckenberg (Nagel & Schreckenberg, 1992). Σύμφωνα με το υπόδειγμα αυτό, η θέση των οχημάτων που βρίσκονται σε ένα οδικό τμήμα ανανεώνεται παράλληλα σε κάθε χρονική περίοδο  $t$  με βάση τέσσερις κανόνες που περιγράφουν: 1) την τάση των οχημάτων να κινούνται με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα, 2) την αλληλεπίδραση οχημάτων για την αποφυγή συγκρούσεων, 3) την



τυχαιότητα στη συμπεριφορά των οχημάτων σε συνθήκες επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης και 4) την ανανέωση των θέσεων των οχημάτων στο εξεταζόμενο οδικό τμήμα (A., 2000).

### **3.4.3. Μεσοσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής**

Τα μεσοσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής συνδυάζουν σε κάποιον βαθμό τα μικροσκοπικά χαρακτηριστικά (υπό την έννοια ότι μπορούν να αφορούν μεμονωμένα οχήματα) και τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα αυτά που σχετίζονται με τα δυναμικά χαρακτηριστικά των οχημάτων. Υπάρχουν δυο βασικές προσεγγίσεις για τα μοντέλα μεσοσκοπικής προσομοίωσης της κυκλοφορίας.

- Στην πρώτη δεν λαμβάνονται υπόψη τα μεμονωμένα οχήματα, τα οποία ομαδοποιούνται σε συστοιχίες, οι οποίες όμως μπορούν να αποτελούνται οριακά και από ένα μόνο όχημα, και κινούνται κατά μήκος των οδικών τμημάτων (Leonard, et al., 1989).
- Στην δεύτερη τα δυναμικά χαρακτηριστικά της ροής ορίζονται από απλουστευμένα δυναμικά χαρακτηριστικά των μεμονωμένων οχημάτων (Jauakrishnan & Mahmassani, 1994).

Μια επίσης βασική διαφορά μεταξύ των μεσοσκοπικών προσεγγίσεων, έγκειται στον τρόπο με τον οποίο διαχειρίζεται ο χρόνος. Οι πιο συνηθισμένες προσεγγίσεις βασίζονται σε προσομοιώσεις, στις οποίες ο χρόνος κυλάει κατά προεπιλεγμένες χρονικές μονάδες Δt. Άλλες προσεγγίσεις έχουν ασύγχρονη μορφή, ή βασίζονται σε συμβάντα, δηλαδή, η κατάσταση του υποδείγματος αλλάζει όταν λαμβάνει χώρα κάποιο συμβάν. Ο χρόνος εξελίσσεται με μεταβαλλόμενα μεγέθη, βάσει της στιγμής του συμβάντος.

#### **3.4.3.1. Αεριοκινητικά υποδείγματα (gas –kinetic)**

Τα αεριοκινητικά υποδείγματα αναπτύχθηκαν κατ'αναλογία των υποδειγμάτων που περιγράφουν την κίνηση μεγάλου αριθμού μικροσωματιδίων (ατόμων ή μορίων) σε ένα αέριο. Όταν εφαρμόζονται στην κυκλοφοριακή ροή, αυτά τα υποδείγματα περιγράφουν τη δυναμική των συναρτήσεων διανομής ταχύτητας των οχημάτων. Οι Prigogine και Andrews ήταν οι πρώτοι που ανέπτυξαν αεριοκινητικά υποδείγματα για την περιγραφή της κυκλοφοριακής ροής, σύμφωνα με την μερικώς διαφορική εξίσωση της μορφής (Prigogine & Andrews, 1960) & (Prigogine, 1961):

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + u \left( \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial x} \right) = \left( \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} \right)_{\text{επιτάχυνση}} + \left( \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} \right)_{\text{αλληλεπίδραση}} \quad \text{Εξίσωση 3.37}$$

όπου  $\tilde{\rho}$  είναι η μειωμένη πυκνότητα φάσης-χώρου (reduced phase-space density). Το αριστερό μέρος της εξίσωσης αποτελείται από την παράγωγο του χρόνου και έναν όρο μεταγωγής (advection) που περιγράφει τη διάδοση της πυκνότητας φάσης-χώρου με την ταχύτητα του οχήματος. Στη δεξιά πλευρά, υπάρχει ένας όρος επιτάχυνσης που περιγράφει την επιτάχυνση προς την ταχύτητα ισορροπίας και ένας όρος αλληλεπίδρασης, ο οποίος περιγράφει την αλληλεπίδραση μεταξύ κοντινών οχημάτων.

### 3.4.4. Μακροσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής

Τα μακροσκοπικά υποδείγματα προσομοιώνουν την κίνηση των οχημάτων με τη ροή των ρευστών και βασίζονται στην υπόθεση του συνεχούς μέσου. Στα μακροσκοπικά υποδείγματα τα μεμονωμένα οχήματα δεν αναπαριστώνται ως τέτοια, αλλά χρησιμοποιούνται αθροιστικές μεταβλητές για την κυκλοφοριακή ροή: (μέσος) φόρτος  $q(x, t)$ , (μέση) ταχύτητα  $u(x, t)$  και (μέση) πυκνότητα  $k(x, t)$ . Τα μεγέθη αυτά θεωρούνται πως είναι ορισμένα για κάθε χρονική περίοδο  $t$  και για κάθε σημείο  $x$  στον χώρο και συνδέονται μεταξύ τους με μία εξίσωση διατήρησης (Gerlough & Huber, 1975) & (Kuehne, et al., 1992):

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial t} = 0 \quad \text{Εξίσωση 3.38}$$

Όμοια με την εξίσωση συνέχειας της υδροδυναμικής, η εξίσωση αυτή ισχύει για ένα οδικό τμήμα χωρίς εισόδους και εξόδους (και άρα ο αριθμός των οχημάτων διατηρείται). Η εξίσωση αυτή συμπληρώνεται από την θεμελιώδη σχέση της κυκλοφοριακής ροής:

$$q(x, t) = k(x, t)u(x, t) \quad \text{Εξίσωση 3.39}$$

Η επίλυση της εξίσωσης διατήρησης απαιτεί μια επιπλέον εξίσωση, η οποία συνήθως βασίζεται στην υπόθεση πως ο φόρτος  $q$  είναι συνάρτηση της πυκνότητας  $q = q(k)$  ή ότι αντίστοιχα και η ταχύτητα είναι συνάρτηση της πυκνότητας  $u = u(k)$ . Η υπόθεση αυτή ικανοποιείται μόνο σε συνθήκες ισορροπίας. Η εξίσωση συνέχειας μπορεί να βελτιωθεί προσθέτοντας έναν ακόμα όρο  $g(x, t)$ , ο οποίος αναπαριστά τα οχήματα που εισέρχονται ή εξέρχονται ενός αυτοκινητοδρόμου που έχει εισόδους και εξόδους:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial t} = g(x, t) \quad \text{Εξίσωση 3.40}$$

Η σχέση ταχύτητας-πυκνότητας  $u = u(k)$  είναι απαραίτητο να προέρχεται είτε από ένα θεωρητικό είτε από ένα εμπειρικό υπόδειγμα κατάστασης  $u - k$ , το οποίο μπορεί να έχει την γενική μορφή (May & Keller, 1967):

$$u = u_f \left[ 1 - \left( \frac{k}{k_{jam}} \right)^{\alpha\beta} \right] \quad \text{Εξίσωση 3.41}$$

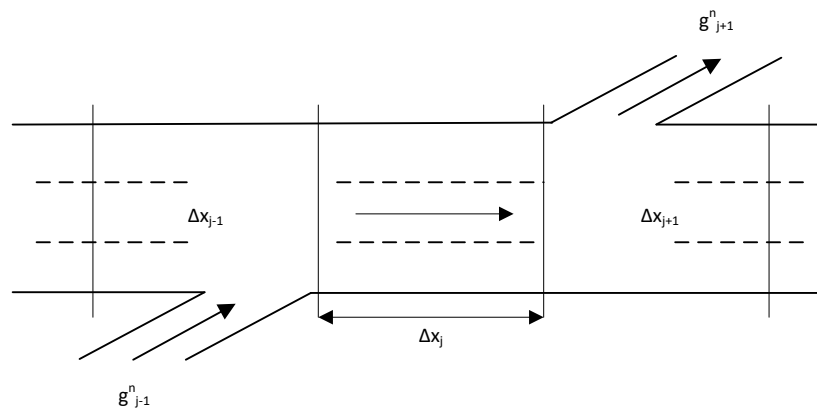
όπου  $u_f$  είναι η ταχύτητα ελεύθερης ροής και  $k_{jam}$  είναι η πυκνότητα συμφόρησης. Στη μορφή αυτή, η εξίσωση 3.42 περιγράφει το κινηματικό – κυματικό υπόδειγμα (kinematic wave model) το οποίο αργότερα ονομάστηκε υπόδειγμα LWR από τους εμπνευστές του Lighthill, Whitham και Richards (Lighthill & Whitham, 1955), (Richards, 1956). Το βασικό στοιχείο του υποδείγματος αυτού είναι ότι τα οχήματα θεωρείται ότι επιτυγχάνουν τη νέα ταχύτητα ισορροπίας αμέσως μετά την αλλαγή της κατάστασης κυκλοφορίας, πράγμα που συνεπάγεται απεριόριστη επιτάχυνση για τα οχήματα. Ένα άλλο μειονέκτημα του υποδείγματος LWR, είναι ότι η μετάβαση από την περιοχή συνεχούς κυκλοφοριακής ροής στην περιοχή συμφόρησης συμβαίνει πάντοτε στην ίδια τιμή πυκνότητας και χωρίς πτώση της κυκλοφοριακής ικανότητας ή υστέρηση. Δεδομένου λοιπόν ότι το υπόδειγμα LWR δεν λαμβάνει υπόψη την επιτάχυνση καθώς και τις επιδράσεις αδράνειας, δεν μπορεί να αναπαραστήσει με ακρίβεια τα δυναμικά χαρακτηριστικά της κυκλοφοριακής ροής σε καταστάσεις εκτός ισορροπίας.

Για τον λόγο αυτό προτάθηκε από τον Payne ένα βελτιωμένο υπόδειγμα, το οποίο προέρχεται από ένα απλό υπόδειγμα ανταπόκρισης – ερεθίσματος (stimulus – response) βασισμένο σε ένα υπόδειγμα ακολουθούντος οχήματος (Payne, 1971). Στο υπόδειγμά του, ο Payne αντικατέστησε την εξίσωση 3.41 με μια δευτεροβάθμια μερική διαφορική εξίσωση (εξού και η ονομασία του ως υπόδειγμα υψηλότερης τάξης (high-order), η οποία αντιστοιχεί στην εξίσωση ορμής της δυναμικής ρευστών.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{1}{T} [u_e(k) - u] - \frac{c^2}{k} \frac{\partial k}{\partial x} \quad \text{Εξίσωση 3.43}$$

όπου  $T$  είναι ο χρόνος χαλάρωσης,  $c^2 = \mu/T$  είναι η βέλτιστη (sound) ταχύτητα και  $\mu$  είναι η παράμετρος προσδοκίας. Ο αριθμητικός υπολογισμός των  $k$ ,  $u$  και  $q$  γίνεται μέσω της διάκρισης του υπό μελέτη οδικού τμήματος σε μικρά τμήματα  $\Delta x$ , και μέσω της επικαιροποίησης των τιμών των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής σε κάθε κόμβο του δικτύου ανά συνεχώς αυξανόμενα χρονικά διαστήματα  $\Delta t$  (Papageorgiou & Schmidt, 1991),

(Michalopoulos, 1988). Ένα παράδειγμα διάκρισης στον χώρο σε ένα απλό οδικό τμήμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 27.



Εικόνα 27: Διάκριση στον χώρο για ένα απλό οδικό τμήμα

Η πυκνότητα σε κάθε κόμβο  $j$ , εκτός αυτών που βρίσκονται στα όρια (άκρα), για την επόμενη χρονική στιγμή  $n + 1$  υπολογίζεται βάσει της πυκνότητας στα γειτονικά οδικά τμήματα (τόσο ανάντη όσο και κατόντη,  $j - 1$  και  $j + 1$  αντίστοιχα) για την τρέχουσα χρονική στιγμή  $n$  σύμφωνα με την εξίσωση

$$k_j^{n+1} = \frac{1}{2}(k_{j+1}^n + k_{j-1}^n) - \frac{\Delta t}{2\Delta x}(q_{j+1}^n + q_{j-1}^n) + \frac{\Delta t}{2\Delta x}(g_{j+1}^n + g_{j-1}^n) \quad \text{Εξίσωση 3.44}$$

όπου  $k_j^n$  είναι η πυκνότητα και  $q_j^n$  ο φόρτος στον κόμβο  $j$  την χρονική στιγμή  $t = t_0 + n\Delta t$ , όπου  $t_0$  είναι η αρχική χρονική στιγμή,  $\Delta t$  και  $\Delta x$  είναι οι αντίστοιχες αυξήσεις στον χρόνο και στον χώρο, έτσι ώστε το πηλίκο  $\Delta x/\Delta t$  να είναι μεγαλύτερο της ταχύτητας ελεύθερης ροής και  $g_j^n$  είναι ο ρυθμός γένεσης (ή διάλυσης) στον κόμβο  $j$  την χρονική στιγμή  $t = t_0 + n\Delta t$ . Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν εισερχόμενοι ή εξερχόμενοι φόρτοι, τότε ο ρυθμός  $g_j^n$  είναι ίσος με μηδέν.

Αφού υπολογιστεί η πυκνότητα, η ταχύτητα κατά την χρονική στιγμή  $t + \Delta t$  στο σημείο  $n + 1$  προκύπτει από την εξίσωση της ταχύτητας ισορροπίας  $u_e k$ , όπου  $u_j^{n+1} = u_e(k_j^{n+1})$ . Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το γραμμικό υπόδειγμα του Greenshields, σύμφωνα με τον οποίο ((Greenshields, 1934a και Greenshields, 1935):

$$u_j^{n+1} = u_f \left(1 - \frac{k_j^{n+1}}{k_{jam}}\right) \quad \text{Εξίσωση 3.45}$$

Ο κυκλοφοριακός φόρτος κατά την χρονική στιγμή  $t + \Delta t$  μπορεί να υπολογιστεί από τη θεμελιώδη εξίσωση:

$$q_j^{n+1} = k_j^{n+1} + u_j^{n+1} \quad \text{Εξίσωση 3.46}$$

Στην εξίσωση αυτή οι τιμές των  $k$  και  $u$  μπορούν να υπολογιστούν βάσει των προηγούμενων εξισώσεων. Διάφορα μέτρα αποδοτικότητας, όπως για παράδειγμα οι καθυστερήσεις, οι στάσεις, ο συνολικός χρόνος ταξιδιού κ.α. μπορούν να υπολογιστούν βάσει των τιμών  $k$ ,  $u$  και  $q$ .

### 3.5. Συμπεράσματα

Από την επισκόπηση των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής και των μεταξύ τους σχέσεων, καθώς και των υποδειγμάτων κυκλοφοριακής ροής σε μακρο-, μέσο- και μικροσκοπικό επίπεδο, προκύπτει η απουσία παραμέτρων και συσχετίσεων, τόσο των μεγεθών όσο και των παραγόμενων υποδειγμάτων, με τις καιρικές και κλιματικές συνθήκες. Στη μαθηματική διατύπωση των κυκλοφοριακών μεγεθών και των αντίστοιχων υποδειγμάτων, θεωρείται ότι οι καιρικές και κλιματικές συνθήκες είναι ιδανικές και δεν επηρεάζουν τα μεγέθη και τις σχέσεις τους, και άρα δεν χρήζουν παραμετροποίησης. Δεδομένων των ευρημάτων σχετικά με την έκφραση της κλιματικής αλλαγής που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2, αναδεικνύεται η ανάγκη επαναπροσδιορισμού τόσο του τρόπου που αντιλαμβανόμαστε τα μεγέθη της κυκλοφορίας (είναι π.χ. αφύσικο να θεωρούμε ότι η ταχύτητα κίνησης οχημάτων παραμένει ανεπηρέαστη από το ύψος βροχόπτωσης) όσο και του μαθηματικού τρόπου που αποδίδουμε τα μεγέθη αυτά και αναπτύσσουμε τα αντίστοιχα υποδείγματα.

### 3.6. Αναφορές και βιβλιογραφία

#### 3.6.1. Παραπομπές σε αναφορές

A., S., 2000. Statistical physics of traffic flow. *Physica A*, Volume 285, pp. 101-120.

Cassidy, M. & Bertini, R., 1999. Some traffic features at freeway bottlenecks.. *Transportation Research Part B Methodological*, 33(1), pp. 25-45.

Cremer, M. & Ludwig, J., 1986. A fast simulation model for traffic flow on the basis of boolean operations. *Mathematical Computational Simulations*, 28(4), pp. 297-303.

Daganzo, C., 1994. The cell transmission model: a dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B Methodological*, 28(4), pp. 269-287.

Daganzo, C. F. & Geroliminis, N., 2008. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. *Transportation Research Part B*, 42(9), pp. 771-781.

- del Castillo, J., 2012. Three new models for the flow–density relationship: derivation and testing for freeway and urban data. *Transportmetrica*, 8(6), pp. 443-465.
- Eddie, L., 1961. Car following and steady-state theory. *Operations Research*, Volume 9, pp. 66-76.
- Fellendorf, M., 1994. VISSIM: a microscopic simulation tool to evaluate actuated signal control including bus priority. Dallas, TX, ITE annual meeting.
- Gazis, D., Herman, R. & Rothery, R., 1961. Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow. *Operational Research*, 9(4), pp. 545-567.
- Gerlough, D. & Huber, M., 1975. Traffic flow theory: a monograph. TRB Special report 165, Washington D.C.: Transportation Research Board.
- Geroliminis, N. & Daganzo, C. F., 2007. Macroscopic modeling of traffic in cities. Washington, D.C., s.n.
- Greenshields, B., 1934a. The photographic method of studying traffic behaviour. s.l., s.n., pp. 382-399.
- Greenshields, B. D., 1935. A study of traffic capacity. s.l., s.n., pp. 448-47.
- Hidas, P., 1998. A car following model for urban traffic simulation. *Traffic Engineering and Control*, 39(5), pp. 300-305.
- Jauakrishnan, R. & Mahmassani, H., 1994. An evaluation tool for advanced traffic information and management systems in urban networks. *Transportation Research Part C*, 2(3), pp. 129-147.
- Kerner, B., 2009. Introduction to modern traffic flow theory and control: the long road to three-phase traffic theory. New York: Springer.
- Kometani, E. & Sasaki, T., 1961. Dynamic Behaviour of traffic with a non-linear spacing-speed relationship. In: R. Herman, ed. *Theory of Traffic Flow*. Amsterdam: Elsevier, pp. 105-119.
- Kuehne, R., Michalopoulos, R. & Zhang, H., 1992. Continuum flow models. In: *Traffic flow theory*. s.l.:s.n., p. Chapter 5.
- Laval, J., 2011. Hysteresis in traffic flow revisited: an improved measurement method. *Transportation Research Part B Methodological*, 45(2), pp. 385-391.
- Leonard, D., Gower, P. & Taylor, N., 1989. CONTRAM: Structure of the model, Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.
- Leutzbach, W., 1988. Introduction to the theory of traffic flow. Berlin: Springer-Verlag.
- Lighthill, M. & Whitham, G., 1955. On kinematic waves II: a theory of traffic flow on long crowded roads. *Proc R Soc Lond ser A Math Phys Sci*, 229(1178), pp. 317-345.
- May, A., 1990. *Traffic Flow Fundamentals*. New Jersey: Prentice Hall Englewood Cliffs.
- May, A. & Keller, H., 1967. Non-integer car-following Models. *Highway Research Record*, Volume 199, pp. 19-32.

- Michalopoulos, P., 1988. Analysis of traffic flows at complex congested arterials. *Transportation Research Record*, Volume 1194, pp. 77-86.
- Nagel, K. & Schreckenberg, M., 1992. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal of Physics*, 2(12), pp. 2221-2229.
- Newell, G., 1961. Nonlinear effects in the dynamics of car following. *Operational Research*, 9(2), pp. 209-229.
- Newell, G., 1965. Instability in dense highway traffic, a review. *Proceedings of the 2nd international symposium on the theory of traffic flow*, pp. 73-83.
- Newell, G., 2002. A simplified car-following theory: a lower order model. *Transportation Research Part B Methodological*, 36(3), pp. 195-205.
- Payne, H., 1971. Models of freeway traffic and control. *Mathematical models of public systems, Simulation council proceedings*, pp. 51-61.
- Pipes, L., 1953. An operational analysis of traffic dynamics. *Journal of Applied Physics*, 24(3), pp. 274-281.
- Prigogine, I., 1961. A boltzmann-like approach to the statistical theory of traffic flow. In: R. Herman, ed. *Theory of Traffic Flow*. Amsterdam: Elsevier, pp. 158-164.
- Prigogine, I. & Andrews, F., 1960. A boltzmann-like approach for traffic flow. *Operational Research*, 8(6), pp. 789-797.
- Richards, P., 1956. Shock waves on the highway. *Operational Research*, 4(1), pp. 42-51.
- Rothery, R., 1992. Car following models. In: *Traffic Flow Theory*. Washington: Federal Highway Administration, p. Chapter 4.
- Smulders, S., 1990. Control of freeway traffic flow by variable speed signs. *Transportation Research Part B Methodological*, 24(2), pp. 111-132.
- Transportation Research Board, 2010. *Highway Capacity Manual*, Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Treiterer, J. & Myers, J., 1974. The hysteresis phenomenon in traffic flow. In: D. Buckley, ed. *Proceedings of the 6th international symposium on transportation and traffic theory*. Amsterdam: Elsevier, pp. 13-38.
- van Wageningen-Kesels, F., van Lint, H., Vuik, K. & Hoogendoorn, S., 2015. Genealogy of traffic flow models. *Euro Journal on Transportation and Logistics*, Volume 4, pp. 445-473.
- Wiedemann, R., 1974. *Simulation des Strassenverkehrsflusses*, Karlsruhe: Institute for Traffic Engineering, University of Karlsruhe.
- Zhang, H., 1999. A mathematical theory of traffic hysteresis. *Transportation Research Part B Methodological*, 33(1), pp. 1-23.

### **3.6.2. Παραπομπές σε γενική βιβλιογραφία**

May A.D. 1990 *Traffic Flow Fundamentals*. Prentice-Hall Englewood Cliffs, New Jersey

Transportation Research Board, 2010, Highway Capacity Manual, National Research Council, Washington D.C.

Golias, J. and Tsamboulas, D. 1995 Macrolevel estimation of highway lane usage. Journal of Transportation Engineering of ASCE, Vol. 121, Issues 1, pp 40-49

FHWA, 2001, Traffic monitoring guide, FHWA-PL-01-021

Transportation Research Board, 1992 Revised Monograph on Traffic Flow Theory State of the Art Report. Washington D.C.

Φραντζεσκάκης Ι., Γκόλιας, Ι., Πιτσιάβα-Λατινοπούλου Μ. 2009 Κυκλοφοριακή Τεχνική, εκδ. Παπασωτηρίου

Φραντζεσκάκης Ι., Γιαννόπουλος Γ. 1986 Βασικές έννοιες-κόμβοι-κυκλοφοριακή ικανότητα-σήμανση-σηματοδότηση-κυκλοφοριακές μετρήσεις τόμος 1, Εκδόσεις Παρατηρητής

Greenshields B.D. (1935) A Study of Traffic Capacity. Highway Research Board Proceedings 14, 448-477.

Gazis, D.C. (1974) "Traffic Science" John Wiley & Sons, New York

Μητσάκης, Ε. (2011) Βέλτιστος Σχεδιασμός Δικτύων Μεταφορών, Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ



## 4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

### 4.1. Εισαγωγή

Κατά το σχεδιασμό και τη διερεύνηση της λειτουργίας ενός οδικού συστήματος, είναι απαραίτητη η γνώση της κυκλοφοριακής ικανότητας των διαφόρων στοιχείων του συστήματος (π.χ. σηματοδοτούμενοι κόμβοι, τμήματα οδών διαφόρων κατηγοριών, κ.λπ.) με αναφορά στην οποία, το εν λόγω οδικό σύστημα θα είναι ικανό να εξυπηρετήσει, τον μέγιστο κυκλοφοριακό φόρτο.

Η κυκλοφοριακή ικανότητα εκφράζει το μέγιστο ωριαίο ρυθμό ροής οχημάτων ή προσώπων, δηλαδή τα οχήματα ή τα πρόσωπα που μπορεί να περάσουν από ένα δεδομένο σημείο ή ένα μικρό τμήμα λωρίδας κυκλοφορίας ή οδού, κατά τη μία ή και κατά τις δύο κατευθύνσεις, κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής περιόδου, σε σχέση με τις οδικές και κυκλοφοριακές συνθήκες, καθώς και τις συνθήκες ελέγχου της κυκλοφορίας που επικρατούν.

Οι διάφοροι ορισμοί που σχετίζονται με την κυκλοφοριακή ικανότητα, και ακόμα περισσότερο ο τρόπος υπολογισμού της για τα διάφορα στοιχεία ενός οδικού δικτύου, διαφέρουν σημαντικά από χώρα σε χώρα. Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμοί και μέθοδοι που αναπτύχθηκαν στις ΗΠΑ, στη Μεγάλη Βρετανία, και στη Γαλλία. Σε κάθε περίπτωση όμως, παρατηρείται απουσία αναφοράς σε καιρικές και κλιματικές συνθήκες, και στις αλλαγές τους, που όμως θα έπρεπε να υπεισέρχονται στον υπολογισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας ενός οδικού στοιχείου. Είναι προφανές, ότι η κυκλοφοριακή ικανότητα επηρεάζεται από τις συνθήκες αυτές, και άρα θα πρέπει να αντιμετωπίζεται περισσότερο ως ένα μέγεθος δυναμικό, υπό την έννοια ότι η τιμή του αλλάζει σύμφωνα με τις συνθήκες αυτές, πάρα ως μια τιμή που συνοδεύει ένα οδικό τμήμα ανεξαρτήτως συνθηκών.

Η βιβλιογραφική επισκόπηση που ακολουθεί παρουσιάζεται χωρίς ιδιαίτερες βιβλιογραφικές αναφορές, καθότι αποτελεί κλασσική επιστημονική κατάκτηση. Ωστόσο βασικές πηγές αναφοράς αποτέλεσαν τα έργα των Kimber, McDonald & Hounsel (1986), OECD (1983), Transportation Research Board (2010), Webster & Cobbe (1966) και Φραντζεσκάκη, Γκόλια, Πιτσιάβα-Λατινοπούλου (2009).

## 4.2. Στάθμη εξυπηρέτησης

Βασική έννοια κατά τον υπολογισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας, αποτελεί η στάθμη εξυπηρέτησης, ένα ποιοτικό μέγεθος που εκφράζει τις συνθήκες λειτουργίας μέσα σε ένα ρεύμα κυκλοφορίας όπως τις αντιλαμβάνονται οι οδηγοί, οι επιβάτες ή οι πεζοί. Καθορίζονται διάφορες στάθμες εξυπηρέτησης με βάση ορισμένες οριακές τιμές παραμέτρων, όπως η ταχύτητα και ο χρόνος μετακίνησης, η πυκνότητα και οι καθυστερήσεις. Από το 1965 έχουν καθιερωθεί 6 στάθμες εξυπηρέτησης οι οποίες χαρακτηρίζονται με τα στοιχεία A έως F και καλύπτουν όλες τις πιθανές συνθήκες λειτουργίας, από την καλύτερη: A, ελεύθερη ροή (free flow), μέχρι τη δυσμενέστερη: F, κορεσμός (saturation).

Η ανάλυση της κυκλοφοριακής ικανότητας περιλαμβάνει και την εκτίμησή του μέγιστου κυκλοφοριακού φόρτου που μπορεί να εξυπηρετηθεί, όταν διατηρείται μία δεδομένη στάθμη εξυπηρέτησης, εκτός από τη στάθμη F που τείνει στον κορεσμό.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι για τον καθορισμό της στάθμης εξυπηρέτησης μιας αστικής οδού, χρησιμοποιείται ο λόγος της μέσης ταχύτητας διαδρομής προς την ταχύτητα ελεύθερης ροής, διότι η ταχύτητα ελεύθερης ροής:

- εξαρτάται από το περιβάλλον της οδού (γεωμετρικά χαρακτηριστικά, χαρακτήρας παρόδιων δραστηριοτήτων και γειτονικές χρήσεις γης)
- θεωρεί μηδενική ή ελάχιστη την αλληλεπίδραση μεταξύ οχημάτων, δηλαδή η πυκνότητα της κυκλοφορίας και οι κυκλοφοριακοί φόρτοι είναι αρκετά χαμηλοί, και η αναλογία της σύνθεσης της κυκλοφορίας όπως και ο αριθμός στρεφουσών κινήσεων δεν επηρεάζουν σημαντικά την κίνηση των οχημάτων
- θεωρεί ότι δεν υπάρχει φωτεινή σηματοδότηση ή σήμανση που να επηρεάζει την επιλογή της ταχύτητας.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι καιρικές και κλιματικές συνθήκες δεν αναφέρονται ως παράγοντες επηρεασμού της ταχύτητας ελεύθερης ροής, και έτσι υπεισέρχεται ένα πιθανό συστηματικό σφάλμα στον υπολογισμό της στάθμης εξυπηρέτησης.

## 4.3. Διακοπτόμενη και μη διακοπτόμενη ροή

Τα κύρια στοιχεία ενός οδικού συστήματος μεταφορών μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το είδος ροής που μπορούν να προσφέρουν:

- Μη διακοπτόμενη ροή, όταν δεν υπάρχουν μόνιμες εγκαταστάσεις όπως π.χ. σηματοδότηση, που μπορεί να προκαλέσουν διακοπές της κυκλοφοριακής ροής. Οι συνθήκες κυκλοφοριακής ροής προκύπτουν από την αλληλεπίδραση μεταξύ οχημάτων στο ρεύμα κυκλοφορίας, και μεταξύ οχημάτων και γεωμετρικών και περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών της οδού. Οι ελεύθερες λεωφόροι αποτελούν τυπικό παράδειγμα μη διακοπτόμενης ροής
- Διακοπτόμενη ροή, όταν υπάρχουν ελεγχόμενα ή μη σημεία πρόσβασης που προκαλούν την περιοδική διακοπή ή την ουσιαστική επιβράδυνση της κυκλοφοριακής ροής, ανεξάρτητα από το μέγεθος της. Παρατηρείται συνήθως στις οδούς, όπου η ροή διακόπτεται ή επιβραδύνεται από σηματοδότηση ή σήμανση.

Οι παραπάνω όροι περιγράφουν τον τύπο του οδικού στοιχείου και όχι την ποιότητα της κυκλοφοριακής ροής. Έτσι, η ροή σε μια ελεύθερη λεωφόρο ονομάζεται μη διακοπτόμενη, ακόμα και όταν υπάρχει κορεσμός ο οποίος οδηγεί μέχρι και στη διακοπή της ροής, γιατί η τελευταία προκαλείται από λόγους που οφείλονται στην ίδια την κυκλοφορία και όχι στον τύπο της οδού.

#### **4.4. Ρυθμός ροής εξυπηρέτησης**

Ο ρυθμός ροής εξυπηρέτησης για μία στάθμη εξυπηρέτησης, αποτελεί το μέγιστο ωριαίο ρυθμό ροής οχημάτων ή πεζών που μπορούν να περάσουν από ένα οδικό στοιχείο σε μία ορισμένη χρονική περίοδο, ώστε οι συνθήκες λειτουργίας του να διατηρούνται σε αυτή τη στάθμη εξυπηρέτησης. Σε κάθε στάθμη εξυπηρέτησης αντιστοιχεί ένας ρυθμός ροής (εξυπηρέτησης) που αν ξεπεραστεί οδηγεί στην επόμενη (χειρότερη) στάθμη (εξυπηρέτησης). Για τη διευκρίνιση της έννοιας της κυκλοφοριακής ικανότητας είναι απαραίτητη η χρονική περίοδος. Όταν π.χ. εξετάζονται μεγάλες χρονικές περίοδοι, π.χ. μια ημέρα ή ένα έτος, η κυκλοφοριακή ικανότητα εξαρτάται από τις ωριαίες, ημερήσιες και εποχιακές διακυμάνσεις της κυκλοφορίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η πλήρης χρησιμοποίηση της οδού περιορίζεται μόνο σε ένα ποσοστό της συνολικής εξεταζόμενης περιόδου, όταν δηλαδή παρουσιάζεται η μέγιστη ζήτηση. Όταν δεν ορίζεται η χρονική περίοδος, η κυκλοφοριακή ικανότητα αναφέρεται συνήθως σε περίοδο μιας ώρας, οπότε αυτή αντιστοιχεί στο μέγιστο αριθμό οχημάτων που μπορούν να περάσουν σε μια ώρα. Στις περισσότερες όμως αναλύσεις κυκλοφοριακής ικανότητας, εξετάζεται ο ρυθμός ροής βασισμένος σε μια περίοδο 15 λεπτών, ώστε να ληφθούν υπόψη και η ανομοιομορφία της ροής μέσα σε μια ώρα, και οι αιχμές ροών που δημιουργεί. Στις περιπτώσεις αυτές, με τη

βοήθεια του Συντελεστή Ώρας Αιχμής (ΣΩΑ), ο ωριαίος ρυθμός ροής καθορίζεται ως ίσος με το τετραπλάσιο του μέγιστου κυκλοφοριακού φόρτου για ένα δεκαπεντάλεπτο.

Στις αναλύσεις της κυκλοφοριακής ικανότητας, λαμβάνεται συνήθως υπόψη ο ρυθμός ροής  $v$  (βασισμένος στο 15λεπτο της μεγαλύτερης κίνησης) κατά την ώρα αιχμής, και όχι ο ωριαίος κυκλοφοριακός φόρτος  $V$  κατά την ίδια ώρα. Ο πρώτος προκύπτει από τη διαίρεση του δεύτερου με τον ΣΩΑ και εφράζει τις δυσμενέστερες συνθήκες, από άποψη μεγέθους κυκλοφοριακής ροής, που μπορούν να απαντηθούν μέσα στο διάστημα της εξεταζόμενης ώρας αιχμής, εξαιτίας ανομοιομορφίας της ροής:

$$v = V/\Sigma\Omega A \quad \text{Εξίσωση 4.1}$$

Αντίστοιχα, για τον καθορισμό της στάθμης εξυπηρέτησης, εξετάζεται συνήθως ο μέγιστος ρυθμός ροής εξυπηρέτησης και όχι ο μέγιστος κυκλοφοριακός φόρτος.

#### **4.5. Παράγοντες που επηρεάζουν την κυκλοφοριακή ικανότητα και τη στάθμη εξυπηρέτησης**

Η ποσοτική έκφραση της κυκλοφοριακής ικανότητας για διάφορες στάθμες εξυπηρέτησης, έχει νόημα μόνο όταν είναι γνωστές οι επικρατούσες οδικές και κυκλοφοριακές συνθήκες και οι συνθήκες ελέγχου.

##### **4.5.1. Οδικές συνθήκες**

Οι οδικές συνθήκες περιλαμβάνουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού, και δεν αλλάζουν χρονικά παρά μόνο όταν πραγματοποιηθούν νέες κατασκευές ή βελτιώσεις στην εξεταζόμενη οδό. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν:

1. Ο αριθμός και το πλάτος των λωρίδων
2. Ο τύπος της οδού και το περιβάλλον της
3. Τα πλάτη των ερεισμάτων και η απόσταση των κατά πλάτος εμποδίων
4. Η ταχύτητα μελέτης
5. Η οριζόντια και κατακόρυφη χάραξη
6. Η ύπαρξη αποκλειστικών λωρίδων στροφής στις διασταυρώσεις

Η οριζόντια και κατακόρυφη χάραξη μιας οδού εξαρτώνται από την ταχύτητα μελέτης και από την τοπογραφία των περιοχών που αυτή διασχίζει. Επίσης, η γενική κατάσταση του οδοστρώματος επηρεάζει την κυκλοφοριακή ικανότητα και τους φόρτους εξυπηρέτησης.

#### 4.5.2. Κυκλοφοριακές συνθήκες

Οι κυκλοφοριακές συνθήκες εξαρτώνται από τη φύση της κυκλοφορίας στο εξεταζόμενο οδικό στοιχείο, και αλλάζουν κατά τις διάφορες περιόδους της ημέρας ή κατά τις διάφορες ημέρες του έτους. Οι κυκλοφοριακές συνθήκες που επηρεάζουν την κυκλοφοριακή ικανότητα δρόμων και οδών, είναι η σύνθεση και η κατανομή της κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση και λωρίδα.

Αναφορικά με τη σύνθεση της κυκλοφορίας, η ύπαρξη βαρέων οχημάτων, οχημάτων δηλαδή με περισσότερα από τέσσερα ελαστικά που ακουμπούν στο έδαφος, μειώνει ουσιαστικά την κυκλοφοριακή ικανότητα. Τα φορτηγά, τα λεωφορεία και τα οχήματα αναψυχής (τροχόσπιτα, αυτοκινούμενα) είναι οι τρεις κατηγορίες βαρέων οχημάτων που επηρεάζουν την κυκλοφοριακή ικανότητα κατά δύο τρόπους:

1. Είναι μεγαλύτερα από τα επιβατικά αυτοκίνητα και καταλαμβάνουν μεγαλύτερη επιφάνεια στο κατάστρωμα της οδού.
2. Έχουν χαμηλότερες επιδόσεις, ιδιαίτερα όσο αφορά την επιτάχυνση/επιβράδυνση και την ικανότητα να διατηρούν την ταχύτητα τους σε ανωφέρειες (maintain speed on upgrades).

Η δεύτερη επίπτωση είναι σοβαρότερη, καθώς η αδυναμία των βαρέων οχημάτων να διατηρήσουν τον ίδιο ρυθμό κίνησης με τα επιβατικά οχήματα, δημιουργεί σε πολλές περιπτώσεις κενά στο ρεύμα κυκλοφορίας, τα οποία είναι δύσκολο να καλυφτούν με ελιγμούς των επιβατικών οχημάτων. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται ιδιαίτερα σε υπεραστικές οδούς μιας λωρίδας ανά κατεύθυνση, με μεγάλες κατά μήκος κλίσεις και μεγάλη ανισότητα στην κατανομή της κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση.

Η κατανομή της κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση έχει επίσης σημαντική επίδραση στον υπολογισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας. Είναι επίσης σημαντική διότι ο υπολογισμός της κυκλοφοριακής ικανότητας για αυτοκινητόδρομους πολλαπλών λωρίδων γίνεται με βάση την κυκλοφορία μόνο μιας κατεύθυνσης. Παρόλα αυτά, κάθε κατεύθυνση της οδικής υποδομής συνήθως σχεδιάζεται για να εξυπηρετεί το μέγιστο ρυθμό κυκλοφοριακής ροής κατά την

κατεύθυνση αιχμής. Συνήθως, η κατεύθυνση της κυκλοφορίας αιχμής είναι αντίθετη το πρωί από το απόγευμα.

Τέλος, η κατανομή κυκλοφορίας ανά λωρίδα αποτελεί επίσης παράγοντα επηρεασμού της κυκλοφοριακής ικανότητας, καθώς π.χ. η λωρίδα έκτακτης ανάγκης έχει λιγότερη κίνηση από άλλες λωρίδες.

#### **4.5.3. Συνθήκες ελέγχου**

Οι συνθήκες ελέγχου αναφέρονται αφενός στη ρύθμιση της κυκλοφορίας με κατάλληλες συσκευές και σημάσεις, και αφετέρου στους κανόνες κυκλοφορίας που εφαρμόζονται, π.χ. ο τύπος και η χρονική ρύθμιση των σηματοδοτών καθώς και τα διάφορα σήματα στάσης, προτεραιότητας, απαγόρευσης στροφών, ο χρόνος πρασίνου, ο κύκλος σηματοδότησης, κ.λπ. Ο πιο κρίσιμος τύπος ελέγχου της κυκλοφορίας είναι η σηματοδότηση.

Τα σήματα υποχρεωτικής διακοπής πορείας και τα σήματα παραχώρησης προτεραιότητας επηρεάζουν επίσης την κυκλοφοριακή ικανότητα, αλλά με λιγότερο καθοριστικό τρόπο. Ένας φωτεινός σηματοδότης ορίζει όλους τους χρόνους που επιτρέπεται κάθε κίνηση, ενώ το σήμα υποχρεωτικής διακοπής πορείας π.χ. σε μια διασταύρωση κύριας αρτηρίας με δευτερεύουσα οδό, ορίζει μόνο την προτεραιότητα για την κίνηση της κυκλοφορίας επί της κύριας αρτηρίας. Σε αυτή την περίπτωση, οι μετακινούμενοι επί της δευτερεύουσας οδού θα πρέπει να περιμένουν υποχρεωτικά, έως ότου βρουν κενό στην κυκλοφορία της κύριας αρτηρίας για να εισέρθουν σε αυτή. Επομένως, η κυκλοφοριακή ικανότητα οδών χαμηλότερης ιεράρχησης εξαρτάται από τις κυκλοφοριακές συνθήκες των οδών υψηλότερης ιεράρχησης.

Άλλοι τύποι ελέγχου και κανονισμών μπορούν επίσης να επηρεάσουν σημαντικά την κυκλοφοριακή ικανότητα, τους φόρτους και το επίπεδο εξυπηρέτησης. Για παράδειγμα, η απαγόρευση στάθμευσης επί της οδού μπορεί να αυξήσει τον αριθμό λωρίδων που είναι διαθέσιμες για την κυκλοφορία των οχημάτων. Οι απαγορεύσεις στρεφουσών κινήσεων μπορούν επίσης να αυξήσουν την κυκλοφοριακή ικανότητα. Ο καθορισμός ειδικών λωρίδων για λεωφορεία ή λωρίδων εναλλασσόμενης φοράς καθώς και οι μονοδρομήσεις, οι οποίες περιορίζουν τον αριθμό των σημείων συνάντησης των κυκλοφοριακών ρευμάτων, αποτελούν άλλους τρόπους ελέγχου που επηρεάζουν επίσης την κυκλοφοριακή ικανότητα.

#### 4.5.4. Νέες τεχνολογίες

Οι συνεχώς αναπτυσσόμενες νέες τεχνολογίες μεταφορών (Ευφυή Συστήματα Μεταφορών) που στοχεύουν στην αύξηση της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας των οδικών μεταφορών, μπορούν επίσης να αυξήσουν σημαντικά την κυκλοφοριακή ικανότητα. Ως Ευφυή Συστήματα Μεταφορών νοούνται εδώ όλες εκείνες οι τεχνολογίες που επιτρέπουν στους οδηγούς οχημάτων, αλλά και στους χειριστές των Κέντρων Διαχείρισης της Κυκλοφορίας, να συλλέγουν και να χρησιμοποιούν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για να βελτιώσουν τον έλεγχο των οδικών συνθηκών και την πλοήγηση των οχημάτων.

Τα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών επηρεάζουν την κυκλοφοριακή ικανότητα με τους παρακάτω τρόπους:

- Σε ελεύθερες λεωφόρους ή σε οδούς μη διακοπτόμενης ροής, τα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών μπορούν να επιτύχουν μείωση των αποστάσεων (χωρικών ή χρονικών) μεταξύ των οχημάτων και άρα να αυξήσουν την κυκλοφοριακή ικανότητα αυτών των οδικών στοιχείων.
- Σε σηματοδοτούμενες οδούς και αρτηρίες, το βασικό πλεονέκτημα των Ευφυών Συστημάτων Μεταφορών αφορά στη βέλτιστη κατανομή χρόνου πρασίνου και μέσω αυτής, στην αύξηση της κυκλοφοριακής ικανότητας
- Σε μη σηματοδοτούμενες οδούς και αρτηρίες, μπορεί να παρατηρηθεί αύξηση της κυκλοφοριακής ικανότητας όταν τα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών βοηθούν τους οδηγούς να εκτιμήσουν τα κενά στην κυκλοφορία (και άρα μέσω αυτών να πληροφορούνται τότε μπορούν να εισέρθουν σε ρεύμα κίνησης οδού υψηλότερης ιεράρχησης).

#### 4.6. Βασικές συνθήκες

Ο καθορισμός της κυκλοφοριακής ικανότητας κάτω από ορισμένες βασικές συνθήκες είναι προφανέστατα χρήσιμος, διότι δίνει μια εικόνα των κυκλοφοριακών φόρτων που μπορεί να εξυπηρετηθούν από μια οδό. Αποτελεί δε τη βάση από όπου μπορεί να ξεκινήσει ο υπολογισμός της πραγματικής κυκλοφοριακής ικανότητας ενός οδικού στοιχείου, με χρησιμοποίηση στη συνέχεια κατάλληλων συντελεστών προσαρμογής στις πραγματικές συνθήκες, ανάλογα με το πόσο οι επικρατούσες οδικές και κυκλοφοριακές συνθήκες και οι συνθήκες ελέγχου διαφέρουν από τις ιδεώδεις.

Η έκταση της επίδρασης κάθε παράγοντα εξαρτάται όχι μόνο από το μέγεθος του, αλλά και από τον τύπο του εξεταζόμενου οδικού στοιχείου (ελεύθερη λεωφόρος, αστική και υπεραστική οδός, κ.λπ.) όσο και από το συνδυασμό του με άλλους παράγοντες. Έτσι, π.χ. η επίδραση ενός δεδομένου ποσοστού φορτηγών αυτοκινήτου είναι μεγαλύτερη σε μια οδό δύο λωρίδων από ότι σε μια οδό τεσσάρων λωρίδων κυκλοφορίας, όπου το προσπέρασμα είναι ευχερέστερο. Άλλο παράδειγμα είναι ο συνδυασμός της επίδρασης του ποσοστού των φορτηγών αυτοκινήτων (κυκλοφοριακός παράγοντας) με την κατά μήκος κλίση της οδού και το μήκος ορατότητας για προσπέρασμα (οδικοί παράγοντες) που δίνει δυσμενέστερα αποτελέσματα.

Κατά την ανάλυση της κυκλοφοριακής ικανότητας για κάθε οδικό στοιχείο λαμβάνονται υπόψη οι βασικές συνθήκες, όπως περιγράφονται π.χ. για τις Ηνωμένες Πολιτείες, στο Highway Capacity Manual. Παραδείγματα βασικών συνθηκών για μη διακοπτόμενη και διακοπτόμενη ροή παρουσιάζονται στον Πίνακα 13.

**Πίνακας 13: Παραδείγματα βασικών συνθηκών κυκλοφοριακής ικανότητας για διακοπτόμενη και μη ροή κυκλοφορίας**

	<b>Μη διακοπτόμενη ροή</b>	<b>Διακοπτόμενη ροή</b>
<b>1</b>	Λωρίδες κυκλοφορίας πλάτους 3.60 μέτρων	Λωρίδες κυκλοφορίας πλάτους 3.60 μέτρων
<b>2</b>	Εμπόδια πλευρικά ή στη μεσαία νησίδα σε απόσταση 1.80 μέτρα από τις άκρες των λωρίδων κυκλοφορίας	Μη κεντρική εμπορική περιοχή
<b>3</b>	Ταχύτητα μελέτης 100 χλμ./ώρα, για οδούς τεσσάρων ή περισσότερων λωρίδων κυκλοφορίας	Χωρίς στάσεις λεωφορείων στις προσβάσεις
<b>4</b>	Μόνο επιβατικά οχήματα	Μόνο επιβατικά οχήματα
<b>5</b>	Μηδενική κατά μήκος κλίση	Μηδενική κατά μήκος κλίση
<b>6</b>	Χωρίς τμήματα με περιορισμό προσπέρασματος σε οδούς δύο λωρίδων κυκλοφορίας	Χωρίς στάθμευση οχημάτων στις προσβάσεις
<b>7</b>	Χωρίς παρεμπόδιση της κυκλοφορίας λόγω ελέγχου κυκλοφορίας ή οχημάτων που στρέφουν	Χωρίς πεζούς

Μεταξύ άλλων παραδοχών, όπως καλές συνθήκες οδοστρώματος, εξοικείωση των οδηγών με το οδικό στοιχείο που εξετάζεται, και ροή κυκλοφορίας χωρίς εμπόδια, οι βασικές συνθήκες υποθέτουν 'καλές' καιρικές συνθήκες.

#### **4.7. Υπολογισμός κυκλοφοριακής ικανότητας**

Ο αναλυτικός υπολογισμός της κυκλοφοριακής ικανότητας και της μέγιστης ροής εξυπηρέτησης για μια δεδομένη στάθμη, ή αντίθετα, ο καθορισμός της στάθμης εξυπηρέτησης στην οποία λειτουργεί ένα οδικό στοιχείο κάτω από ένα δεδομένο κυκλοφοριακό φόρτο, γίνεται με διαφορετική μεθοδολογία ανάλογα με το οδικό στοιχείο



που εξετάζεται, με τη βοήθεια τύπων, διαγραμμάτων και πινάκων που διατίθενται σε εγχειρίδια κυκλοφοριακής ικανότητας.

Για τον υπολογισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας, χρησιμοποιούνται διάφορα κριτήρια όπως η ιεράρχηση των οδών, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οδών (αριθμός και πλάτος λωρίδων, χρήση τους), οι στάθμες εξυπηρέτησης, οι φόρτοι εξυπηρέτησης, η σύνθεση της κυκλοφορίας, ο αριθμός στρεφουσών κινήσεων, ο έλεγχος πρόσβασης (ή μη) σε κόμβους και η ύπαρξη (ή μη) σηματοδότησης. Βάσει αυτών υπολογίζονται παράμετροι όπως το κρίσιμο κυκλοφοριακό κενό, ο χρονικός διαχωρισμός ακολουθίας, ο ρυθμός ροής, το μήκος ουράς και η καθυστέρηση, οι οποίες με τη σειρά τους συνδυάζονται σε διαφορετικές μεταξύ τους εξισώσεις βάσει της ιεράρχησης της υπό εξέταση οδού, για τον καθορισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας.

Η σημαντικότερη παρατήρηση που προκύπτει και εδώ είναι, ότι στις μαθηματικές διατυπώσεις υπολογισμού τόσο της κυκλοφοριακής ικανότητας των οδών, όσο και των επιμέρους μεταβλητών που την καθορίζουν, δεν λαμβάνονται υπόψη καιρικές και κλιματικές συνθήκες, οι οποίες θεωρούνται εκ προοιμίου ιδανικές. Αυτό είναι κρίσιμο γιατί ο υπολογισμός των βασικών κυκλοφοριακών μεγεθών όπως η ικανότητα, ή η ταχύτητα, χρησιμοποιούνται και αυτούσια για τη δικαιολόγηση ή απόρριψη παρεμβάσεων, αλλά και ως μεταβλητές εισόδου σε υποδείγματα που υπολογίζουν την κατανομή των μετακινήσεων στα μεταφορικά μέσα ή τον καταμερισμό τους στο δίκτυο.

#### **4.8. Ιεράρχηση δικτύων**

Σύμφωνα με την προτεινόμενη λειτουργική ιεράρχηση των οδών από τις ελληνικές Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων, οι οδοί διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με τις λειτουργίες που εξυπηρετούν:

- Σύνδεση
- Πρόσβαση (στις παρόδιες χρήσεις γης)
- Παραμονή (επί της οδού)

Ανάλογη κατανομή χρησιμοποιείται και στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, με τις αντίστοιχες υποδιαίρεσεις:

- Αρτηρίες (Ελεύθερες Λεωφόροι, Ταχείες Λεωφόροι, Λοιπές Κύριες Αρτηρίες και Δευτερεύουσες Αρτηρίες)

- Συλλεκτήριες Οδοί (Κύριες και Δευτερεύουσες)
- Τοπικές Οδοί

Από την παραπάνω κατηγοριοποίηση, η οποία εν πολλοίς είναι παρόμοια και (για) σε εγχειρίδια και οδηγίες οδικών έργων άλλων χωρών, γίνεται σαφές ότι απουσιάζει μια ανάλυση κι ένας περαιτέρω χαρακτηρισμός των οδών υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής, με τρόπο τέτοιο που μπορεί να βοηθήσει τις αρχές να πάρουν ορθότερες αποφάσεις κατά τη διάρκεια εκδήλωσης ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών. Με την υπάρχουσα ιεράρχηση είναι, για παράδειγμα, αδύνατο να αναγνωριστούν εκείνα τα οδικά τμήματα τα οποία θα πρέπει να παραμείνουν λειτουργικά σε περίπτωση εκκένωσης, ακόμα και αν υποθεθεί ότι όσο υψηλότερη η ιεράρχηση τόσο 'σημαντικότερο' το οδικό τμήμα για την καλή κυκλοφοριακή λειτουργία του δικτύου μεταφορών. Γιατί, ακόμα και σε εκείνη την περίπτωση που θα υποθεθεί ότι οι λεωφόροι πρέπει να παραμείνουν ανοιχτές, δεν υπάρχει κανένας περαιτέρω χαρακτηρισμός των λεωφόρων πέραν της κυκλοφοριακής τους ικανότητας, και πιθανόν των κυκλοφοριακών φόρτων που εξυπηρετούν, που να καταδεικνύει ποια ή ποιες από όλες τις λεωφόρους, δεδομένης της θέσης και της λειτουργίας τους στο δίκτυο, πρέπει να παραμείνουν ανοιχτές.

#### **4.9. Συμπεράσματα**

Όπως αναφέρθηκε και στις επιμέρους ενότητες του κεφαλαίου αυτού, το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει για την έννοια και τον υπολογισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας των οδών, είναι η απουσία παραμετροποίησης του καιρού και του κλίματος. Ενώ για παράδειγμα στη βιβλιογραφία η χρονική διακύμανση θεωρείται κρίσιμος παράγοντας καθορισμού της κυκλοφοριακής ικανότητας, αναγνωρίζοντας π.χ. τη διαφορά μεταξύ κυκλοφορίας κατά τις ώρες αιχμής έναντι αυτών εκτός αιχμής, ή κατά την περίοδο των διακοπών του καλοκαιριού σε μια πόλη έναντι μιας εργάσιμης καθημερινής, δεν γίνεται αναφορά σε εκείνες τις καιρικές και κλιματικές συνθήκες που επηρεάζουν ή μπορούν να επηρεάσουν την κυκλοφοριακή ικανότητα.

Επίσης, γίνεται σαφές ότι για κυκλοφοριακούς και μόνο σκοπούς, η ιεράρχηση των τμημάτων ενός δικτύου με τις παρούσες προσεγγίσεις είναι επαρκής, αλλά δεν ισχύει το ίδιο όταν το δίκτυο Μεταφορών εξετάζεται υπό το πρίσμα ακραίων καιρικών φαινομένων ή φυσικών καταστροφών. Ενώ ο χαρακτηρισμός μιας οδού ως π.χ. κύριας αρτηρίας, μπορεί να περιέχει όλες τις απαραίτητες κυκλοφοριακές πληροφορίες (για τους φόρτους εξυπηρέτησης, την

ταχύτητα ελεύθερης ροής, την κυκλοφοριακή ικανότητα για κάθε επίπεδο εξυπηρέτησης, κ.λπ.), δεν περιέχει καμία πληροφορία ως προς το ρόλο και τη σημασία αυτής της οδού για την καλή κυκλοφοριακή λειτουργία του δικτύου. Δεδομένης της κλιματικής αλλαγής, με την ολοένα και συχνότερη και δριμύτερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων, κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός πρόσθετων πληροφοριών, και ο επακόλουθος χαρακτηρισμός των τμημάτων ενός δικτύου ως προς τη σημασία τους, δεδομένης της θέσης τους στο δίκτυο και του έργου που προσφέρουν.

#### **4.10. Αναφορές και βιβλιογραφία**

Φραντζεσκάκης Ι., Γκόλιας, Ι., Πιτσιάβα-Λατινοπούλου Μ. 2009 Κυκλοφοριακή Τεχνική, εκδ. Παπασωτηρίου

Kimber, R., McDonald, M. & Hounsel, N., 1986. The prediction of saturation flows for road junctions controlled by traffic signals, s.l.: Transport and Research Laboratory.

OECD, 1983. Traffic Capacity of Major Routes, Paris: OECD.

Transportation Research Board, 2010. Highway Capacity Manual, Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Webster, F. & Cobbe, B., 1966. Traffic Signals, s.l.: Road Research Laboratory.

## 5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ

### 5.1. Εισαγωγή

Ο βασικός σκοπός του Σχεδιασμού των Μεταφορών είναι η ορθότερη δυνατή αποτύπωση και προβολή στο μέλλον των πραγματικών συσχετίσεων μεταξύ χρήσεων γης και μεταφορών, και η βαθμονόμηση τους. Η αποτύπωση αυτή γίνεται μέσω αναλυτικών προσεγγίσεων, δηλαδή μαθηματικών υποδειγμάτων. Τα δεδομένα που πρωτίστως χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία σχέσεων αφορούν μεταξύ άλλων στα παρακάτω:

- διαθέσιμες μεταφορικές υποδομές μιας εξεταζόμενης περιοχής, και τα χαρακτηριστικά τους
- χαρακτηριστικά μετακινήσεων κατόπιν ερευνών και μετρήσεων κυκλοφορίας για την δημιουργία μητρώων προέλευσης-προορισμού
- στοιχεία σχετικά με τις χρήσεις γης, την κατανομή εισοδήματος και την εργασία
- μέτρα ελκυστικότητας και προσπελασιμότητας γεωγραφικών ζωνών και δραστηριοτήτων
- ιστορικά δεδομένα για την αύξηση του πληθυσμού και την ιδιοκτησία οχημάτων

Οι σχέσεις συνήθως προσδιορίζονται με την χρήση μαθηματικών υποδειγμάτων σε βήματα, τα οποία εξετάζονται διαδοχικά και το αποτέλεσμα του καθενός αποτελεί δεδομένο εισόδου για το επόμενο.

Η βιβλιογραφική επισκόπηση που ακολουθεί παρουσιάζεται χωρίς ιδιαίτερες βιβλιογραφικές αναφορές, καθότι αποτελεί κλασσική επιστημονική κατάκτηση. Ωστόσο βασικές πηγές αναφοράς αποτέλεσαν τα έργα των Hensher & Button (2000), Sussman (2000), Cascetta (1999), Γιαννόπουλου (2002), Domencich & McFadden (1975), Ortuzar & Willumsen (2009), Ταξιλτάρη (1996), Moore (1957), Dijkstra (1959), Papageorgiou (1991) και Daganzo (1997).

### **5.1.1. Η ζήτηση**

#### **5.1.1.1. Μετακίνηση**

Η Μετακίνηση είναι η φυσική ενέργεια-κίνηση ενός προσώπου για την εξυπηρέτηση ανάγκης οικονομικού, κοινωνικού, μορφωτικού ή ψυχαγωγικού χαρακτήρα, που προσφέρεται στο σημείο (ή ζώνη) κατάληξης της μετακίνησης. Η μετακίνηση ορίζεται επομένως από τα άκρα της, δηλαδή την προέλευση και τον προορισμό της, που ορίζονται με γεωγραφικούς όρους. Άρα χαρακτηρίζεται από μήκος και διάρκεια, εν τέλει δε και από χρηματικό ή και μη χρηματικό κόστος για την πραγματοποίησή της. Πραγματοποιείται με χρήση ενός ή περισσότερων μέσων μεταφοράς και μπορεί να έχει περιοδικό (επαναλαμβανόμενο) χαρακτήρα. Νοηματοδοτείται από τα φυσικά, κοινωνικοοικονομικά και πολιτισμικά χαρακτηριστικά του μετακινούμενου προσώπου που οι ανάγκες του αντιστοιχίζονται σε υποχρεωτικούς και μη υποχρεωτικούς σκοπούς μετακίνησης. Κατά σύμβαση υποχρεωτικού (και περιοδικού) χαρακτήρα μετακινήσεις είναι αυτές από το σπίτι προς την εργασία ή την εκπαίδευση. Όλες οι άλλες μετακινήσεις, όσο επιτακτικού τύπου και αν είναι (π.χ. μετακίνηση για λόγους υγείας ή άλλους ζωτικής σημασίας λόγους) θεωρούνται μη υποχρεωτικές μετακινήσεις. Εννοείται πως οι υποχρεωτικού χαρακτήρα μετακινήσεις ευθύνονται για τις κυκλοφοριακές αιχμές και γενικότερα σχετίζονται με τη ζήτηση αιχμής.

#### **5.1.1.2. Χρόνος και μετακινήσεις**

Οι μετακινήσεις δεν γνωρίζουν χρονικό περιορισμό καθώς μπορούν να τελούνται οποιοδήποτε χρονικό διάστημα και περίοδο. Ωστόσο τα χαρακτηριστικά τους μεταβάλλονται σύμφωνα με την ώρα της ημέρας, ή την ημέρα (καθημερινές, σαββατοκύριακα, αργίες, κ.λπ.), την περίοδο και τις εποχές, με αποτέλεσμα η διαδικασία αναπαράστασης του φαινομένου της μετακίνησης να διαφοροποιείται, π.χ. ως προς την «τυπική» μέρα, τις ώρες αιχμής κ.λπ.

#### **5.1.1.3. Φυσικός χώρος των μετακινήσεων**

Η έννοια του γεωγραφικού χώρου αφορά στον τρόπο που διαιρείται μια εξεταζόμενη περιοχή σε μη επικαλυπτόμενες υπό-περιοχές (τα όρια των οποίων συμπίπτουν συχνά με μεγάλους οδικούς άξονες, και λοιπές βασικές αρτηρίες ενός δικτύου), καθώς και σε μικρότερα τμήματά τους, τις ζώνες, τα όρια των οποίων συμπίπτουν με οδούς χαμηλότερης ιεράρχησης. Για κάθε ζώνη, ορίζεται στο εσωτερικό της το κεντροειδές (το οποίο δεν έχει γεωμετρική υπόσταση), αλλά είναι κεντρικής σημασίας σημείο και ως τέτοιο επιλέγεται (π.χ.

ένα διοικητικό κέντρο, μια κεντρική πλατεία ή και ένας κεντρικός κυκλοφοριακός κόμβος). Κεντροειδές λοιπόν είναι το σημείο από το οποίο θεωρείται ότι εκκινούν ή στο οποίο θεωρείται ότι κατευθύνονται όλες οι μετακινήσεις από και προς τη ζώνη.

### **5.1.2. Η προσφορά: Δίκτυα Μεταφορών**

Η απεικόνιση των μεταφορικών δικτύων, δηλαδή της προσφοράς για την ικανοποίηση της ζήτησης, παίρνει δικτυακή μορφή και κωδικοποιείται κατάλληλα αποδίδοντας κατά μονοσήμαντο τρόπο τη θέση των κόμβων, καθώς και την κατεύθυνση και το μέτρο έντασης (μήκος, ταχύτητα, διάρκεια, κόστος) των τόξων μεταξύ δύο κόμβων.

## **5.2. Δομή και χαρακτήρας υποδειγμάτων**

Τα υποδείγματα πρόβλεψης μετακινήσεων και κυκλοφορίας (ΥΠΜΚ) σύμφωνα με τη θεωρία της λειτουργικότητας, στοχεύουν στην πρόβλεψη συνθηκών ελευθερίας μετακίνησης σε τμήματα του δικτύου με υψηλές προδιαγραφές, επιχειρούν μια σχηματοποίηση της διαδικασίας παραγωγής και διεξαγωγής της κυκλοφορίας, και συνιστούν βοήθημα στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Το βασικό χαρακτηριστικό των υποδειγμάτων αυτών, που συνιστά και τον λόγο ευρείας αποδοχής και χρήσης τους για μια σειρά αναλύσεων και ασκήσεων, είναι η δυνατότητα που δίνουν στον μελετητή/ερευνητή, να επεξεργαστεί και να απεικονίσει γραφικά ένα μεγάλο όγκο χαρακτηριστικών, πληροφοριών και σχέσεων που διέπουν τα δίκτυα των Μεταφορών και τα επιμέρους στοιχεία τους (κόμβοι, οδικά τμήματα, κυκλοφοριακές ζώνες). Λόγω αυτού του χαρακτηριστικού, συνεχίζει να αναπτύσσεται με ταχείς ρυθμούς ένας ερευνητικός, τεχνολογικός και, τελευταία, όλο και αυξανόμενος εμπορικός κλάδος, υποστήριξης της διαδικασίας λήψης αποφάσεων σχετικών με τον σχεδιασμό των δικτύων Μεταφορών, με τη βοήθεια τέτοιων υποδειγμάτων (Ταξιλάρης, 1996).

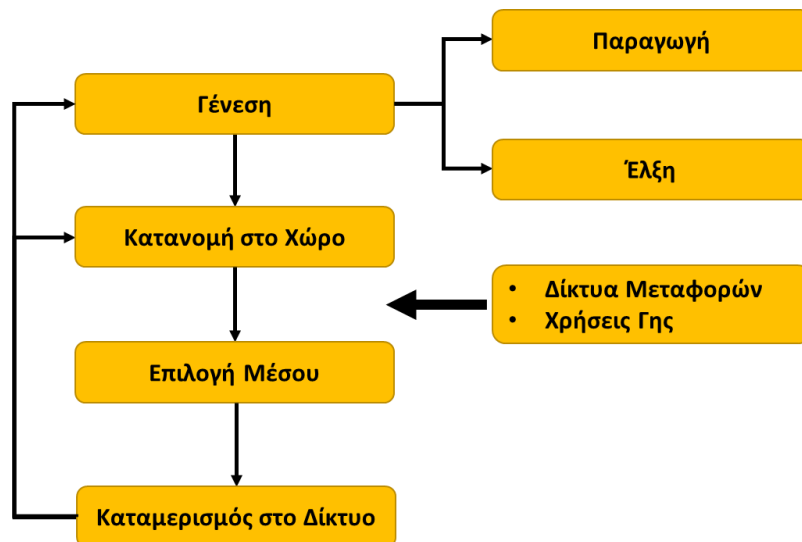
Η ανάγκη όμως αιτιολόγησης, και δικαιολόγησης, πολιτικών αποφάσεων, αναφορικά με επεμβάσεις στο δομημένο περιβάλλον των Μεταφορών, στα δίκτυα, τα μέσα και τις υποδομές τους, με χρήση ΥΠΜΚ και παρόμοιων μεθόδων και εργαλείων, οδήγησε αναπόφευκτα στην απλούστευση της αναπαράστασης της πραγματικότητας με μαθηματικούς όρους, σε υπερβολή της εκτίμησης των δυνατοτήτων αυτών των εργαλείων και, συχνά, σε άκριτη πίστη στα αποτελέσματά που αυτά παράγουν. Έτσι, παρατηρούνται

φαινόμενα που θα πρέπει οπωσδήποτε να προβληματίσουν την επιστημονική και μελετητική κοινότητα, αναφορικά με την εφαρμογή τέτοιων εργαλείων ανεξαρτήτως γεωγραφικών συνθηκών, την πολλές φορές μη δικαιολογημένη έκταση χρήσης τους για την επίλυση στοιχειωδών ή απλών προβλημάτων, και τέλος, την επίκληση του αλάθητου τέτοιων εργαλείων από διοικητικούς και αυτοδιοικητικούς φορείς. Οι φορείς αυτοί προφανώς δεν γνωρίζουν, τους εγγενείς περιορισμούς των υποδειγμάτων και τις υποθέσεις που υποκρύπτονται με κατάληξη συχνά την παρερμηνεία της πραγματικής ισχύος των αποτελεσμάτων τους (Ταξιλιτάρης, 1996).

Χωρίς καμία πρόθεση από τον γράφοντα να μειωθεί η μεγάλη συνεισφορά τέτοιων εργαλείων για το σχεδιασμό των Μεταφορών, είναι απαραίτητο να επισημανθούν οι πραγματικές δυνατότητές τους, ώστε να κατανοηθούν πλήρως οι λόγοι που τα εργαλεία αυτά καταλήγουν σε συγκεκριμένα αποτελέσματα, να οριοθετηθούν οι προσδοκίες των χρηστών (κυρίως των αρχών και υπευθύνων σχεδιασμού και διαχείρισης δικτύων Μεταφορών), και να αποφεύγεται η κατάχρησή τους για την δικαιολόγηση προειλημμένων αποφάσεων στον τομέα των Μεταφορών.

### **5.3. Υποδείγματα 4 σταδίων**

Κατά την κλασική διαδικασία, το πρόβλημα της προσομοίωσης των μετακινήσεων αντιμετωπίζεται σε 4 διαδοχικά βήματα ή στάδια, σε κάθε ένα από τα οποία αναλύεται μια βασική διάσταση της κινητικότητας (δηλαδή των μετακινήσεων) και αντιπαραβολή της ζήτησης (ανάγκης) και της προσφοράς (μέσα) Μεταφορών. Τα στάδια αυτά που εξετάζονται ενδελεχώς στις επόμενες ενότητες απεικονίζονται συνθετικά στην Εικόνα 28:



Εικόνα 28: Η διαδικασία του Σχεδιασμού των Μεταφορών σε 4 στάδια

### Γένεση μετακινήσεων

Στο στάδιο αυτό μελετάται η δημιουργία (γένεση) των μετακινήσεων που παράγονται και προσελκύονται στις διάφορες ζώνες της περιοχής μελέτης. Οι αντίστοιχοι αριθμοί, που συνήθως ονομάζονται παραγωγές και έλξεις, ορίζονται ως συνάρτηση κοινωνικο-οικονομικών χαρακτηριστικών, χαρακτηριστικών τοποθεσίας και χρήσεων γης της κάθε ζώνης και χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες σκοπού, όπως εργασία, αναψυχή, εκπαίδευση, αγορά κ.λπ.. Στο στάδιο αυτό απαντάται η ερώτηση 'πόσες μετακινήσεις έχουν ως προέλευση και προορισμό τις επιμέρους ζώνες της περιοχής μελέτης'.

### Κατανομή μετακινήσεων στο χώρο

Στο στάδιο αυτό δημιουργούνται εξισώσεις που περιγράφουν την κατανομή των μετακινήσεων στις ζώνες και οδηγούν στη σύνταξη πινάκων, των λεγόμενων μητρώων Προέλευσης Προορισμού  $i-j$ . Οι εξισώσεις αυτές ορίζονται ως συναρτήσεις των παραγωγών και των έλξεων των διαφόρων ζωνών (από το στάδιο της γένεσης) και ενός παράγοντα δυσκολίας της μετακίνησης μεταξύ αυτών. Κάποια υποδείγματα, χρησιμοποιούν κυκλοφοριακές μετρήσεις για τον προσδιορισμό του μητρώου μηχανοκίνητων μετακινήσεων. Στο στάδιο αυτό απαντάται η ερώτηση 'πόσες μετακινήσεις γίνονται με αφετηρία τη ζώνη  $i$  και κατάληξη τη ζώνη  $j$  μιας περιοχής, για όλες τις ζώνες της περιοχής μελέτης'.

### Επιλογή μέσου

Στο στάδιο αυτό προσδιορίζονται τα ποσοστά των μετακινήσεων μεταξύ σημείων προέλευσης και προορισμού που κατανέμονται σε διαφορετικά μέσα μεταφοράς. Τα



ποσοστά αυτά εξάγονται συνήθως βάσει των χρόνων διαδρομής και του κόστους ανά μέσο, ενώ εξαρτώνται και από παράγοντες κοινωνικο-οικονομικούς και χαρακτηριστικά χρήσεων στα σημεία προέλευσης και προορισμού. Στο στάδιο αυτό απαντάται η ερώτηση 'πώς ή με ποιο μέσο γίνεται η μετακίνηση;'

#### Καταμερισμός ροών μετακινήσεων σε δίκτυα

Στο στάδιο αυτό, οι κατανεμημένες μετακινήσεις ανά προέλευση, προορισμό και μέσο μεταφοράς, καταμερίζονται σε διαδρομές δια μέσου του δικτύου, έτσι ώστε να εκτιμηθούν οι κυκλοφοριακοί φόρτοι και η διάρκεια /κόστος διαδρομών ως συνάρτηση των χαρακτηριστικών του δικτύου. Η πιο συνήθης υπόθεση που διέπει τις διαδικασίες αυτού του σταδίου είναι πως οι μετακινούμενοι προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν το συνολικό κόστος της μετακίνησής τους.

### **5.4. Γένεση μετακινήσεων**

Η γένεση των μετακινήσεων περιγράφει και αναλύει δύο επιμέρους διαδικασίες: την παραγωγή και την έλξη των μετακινήσεων στις ζώνες της περιοχής μελέτης. Στόχος του σταδίου αυτού είναι να προσδιορίσει τον αριθμό των μετακινήσεων που έχουν σημεία προέλευσης ή προορισμού ευρισκόμενα σε καθεμιά από τις ζώνες, ως συνάρτηση παραγόντων θέσης και χρήσεων γης (π.χ. πυκνότητα δόμησης, απόσταση από άλλες ζώνες, εμβαδόν κτισμένης επιφάνειας, κ.α.), κοινωνικο-οικονομικών χαρακτηριστικών (π.χ. εισόδημα ανά νοικοκυριό, μέγεθος νοικοκυριού, αριθμός εργαζόμενων μελών, ιδιοκτησία αυτοκινήτου, κ.α.) και χαρακτηριστικών ποιότητας εξυπηρέτησης των ζωνών, π.χ. προσιτότητα της ζώνης από το σύστημα ΜΜΜ. Πρέπει εδώ να επισημανθεί, ότι τα οικονομετρικής φύσης υποδείγματα που κατά βάση χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη γένεση των μετακινήσεων, ενέχουν κλασικές αδυναμίες που σχετίζονται με τη στιγμιαία παρατήρηση του μελετώμενου συστήματος, βάσει της οποίας προσδιορίζονται οι μεταβλητές, οι παράμετροι και οι μεταξύ τους σχέσεις.

#### **5.4.1. Παραγωγή μετακινήσεων**

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της παραγωγής των μετακινήσεων (ανάλυση κατά κατηγορίες και γραμμική παλινδρόμηση) και παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες. Η θεωρία διακριτών επιλογών που μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί

ως μέθοδος για την εκτίμηση παραγωγής των μετακινήσεων παρουσιάζεται σε παρακάτω Ενότητα (βλ. Κατανομή μετακινήσεων στα μέσα).

#### 5.4.1.1. Ανάλυση κατά κατηγορίες

Σύμφωνα με τη μέθοδο της ανάλυσης κατά κατηγορίες, ο πληθυσμός της περιοχής που μελετάται χωρίζεται σε ομοιογενείς κατηγορίες νοικοκυριών, με βάση τα επιλεγμένα κοινωνικό-οικονομικά χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια, εκτιμώνται τυπικοί συντελεστές παραγωγής μετακινήσεων, οι οποίοι εφαρμόζονται στο σύνολο των νοικοκυριών της ομάδας με τα ίδια χαρακτηριστικά κάθε περιοχής. Βασική υπόθεση της μεθόδου είναι ότι ο ρυθμός γένεσης των μετακινήσεων για κάθε κατηγορία νοικοκυριού παραμένει σταθερός για όλο το χρονικό διάστημα που αναφέρονται οι προβλέψεις. Με βάση τους σταθερούς αυτούς ρυθμούς γένεσης μετακινήσεων και υπολογίζοντας το μελλοντικό αριθμό νοικοκυριών σε κάθε μία από τις κατηγορίες, υπολογίζονται οι μελλοντικές μετακινήσεις. Τα μαθηματικά υποδείγματα της μεθόδου αυτής εκφράζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$T_{ik} = NOIK_i R_{il} f_{ik} \quad \text{Εξίσωση 5.1}$$

$$T_{ik} = NOIK_i R_{ic} f_{ik} \quad \text{Εξίσωση 5.2}$$

$$T_{ik} = \sum NOIK_i P_{iz} R_{izl} f_{ik} \quad \text{Εξίσωση 5.3}$$

Όπου  $T_{ik}$  είναι ο αριθμός των παραγόμενων μετακινήσεων στη ζώνη  $i$  με σκοπό  $k$ ,  $NOIK_i$  είναι ο αριθμός των νοικοκυριών στη ζώνη  $i$ ,  $R_{il}$  είναι ο συντελεστής (ρυθμός) παραγωγής μετακινήσεων νοικοκυριών με μέσο εισόδημα  $l$ ,  $R_{ic}$  είναι ο συντελεστής (ρυθμός) παραγωγής μετακινήσεων νοικοκυριών με δείκτη ιδιοκτησίας Ι.Χ αυτοκινήτων ίσο με  $C$ ,  $R_{izl}$  είναι ο συντελεστής (ρυθμός) παραγωγής μετακινήσεων νοικοκυριών με  $z$  αριθμό Ι.Χ αυτοκινήτων και μέσο εισόδημα  $l$ ,  $P_{iz}$  είναι το ποσοστό των νοικοκυριών με  $z$  αριθμό Ι.Χ αυτοκινήτων και  $f_{ik}$  είναι το ποσοστό των μετακινήσεων με σκοπό μετακίνησης  $k$ .

#### 5.4.1.2. Γραμμική παλινδρόμηση

Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί στον προσδιορισμό μιας αιτιώδους σχέσης μεταξύ του αριθμού των παραγόμενων μετακινήσεων και των χαρακτηριστικών των χρηστών, της περιοχής μελέτης και του μεταφορικού συστήματος. Η γραμμική παλινδρόμηση διακρίνεται σε δυο κατηγορίες: αφενός σε εκείνη που χρησιμοποιεί μέσους δείκτες για κάθε ζώνη ανάλυσης και αφετέρου σε εκείνη που εξειδικεύει σε μικρότερες μονάδες ανάλυσης, στο επίπεδο του νοικοκυριού ή και του κάθε τυπικού χρήστη του συστήματος. Η γενική διατύπωση του γραμμικού υποδείγματος είναι η ακόλουθη:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i \quad \text{Εξίσωση 5.4}$$

όπου  $y$  είναι η εξαρτημένη μεταβλητή (π.χ αριθμός παραγόμενων μετακινήσεων),  $x_i$  είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές (χαρακτηριστικά χρηστών και του συστήματος) και  $\beta_i$  είναι οι συντελεστές που εκτιμώνται κατά τη διαδικασία προσαρμογής του υποδείγματος.

#### 5.4.2. Έλξη μετακινήσεων

Για την εκτίμηση των ελκόμενων μετακινήσεων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα νοικοκυριά σαν βασικές μονάδες θεώρησης για τους σχετικούς υπολογισμούς, γιατί μικρός αριθμός μετακινήσεων έλκεται από τα νοικοκυριά. Αντιθέτως, έλξη μετακινήσεων προκαλούν άλλες χρήσεις γης (εργασία, ψυχαγωγία, κ.λπ.). Οι μέθοδοι εκτίμησης των ελκόμενων μετακινήσεων στις ζώνες μια περιοχής μελέτης είναι ίδιες με εκείνες της παραγωγής μετακινήσεων, με πιο διαδεδομένη εκείνη της μεθόδου παλινδρόμησης (όπως περιγράφηκε παραπάνω), με βασική διαφορά τις ανεξάρτητες μεταβλητές που επηρεάζουν την έλξη των μετακινήσεων σε μια ζώνη (π.χ. σύνολο θέσεων εργασίας, επιφάνεια ζώνης, οικονομική δραστηριότητα καταστημάτων, κ.α.).

#### 5.4.3. Αναγωγή σε μελλοντικό χρόνο

Αν υποτεθεί ότι τα χαρακτηριστικά της γένεσης των μετακινήσεων παραμένουν σταθερά στο χρόνο, τότε οι μελλοντικές εκτιμήσεις των μέτρων παραγωγής και έλξης των μετακινήσεων, μπορούν να γίνουν με τις εξισώσεις παλινδρόμησης, κάνοντας τις απαραίτητες προσαρμογές για τις εκτιμώμενες μελλοντικές καταστάσεις. Εξαιτίας των δυσκολιών εφαρμογής της

μεθόδου παλινδρόμησης όμως, αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν αποσυνθετικά υποδείγματα, βασισμένα στα νοικοκυριά, με βασική υπόθεση ότι το νοικοκυριό είναι η θεμελιώδης μονάδα στην διαδικασία γένεσης των μετακινήσεων και πως οι μετακινήσεις που δημιουργούνται εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά και την τοποθεσία κατοικίας του νοικοκυριού. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου ανάλυσης είναι πως οι κατηγορίες νοικοκυριών μπορούν να εκτιμηθούν από δεδομένα απογραφής με χρήση γνωστών σχέσεων, όπως για παράδειγμα η κατανομή του εισοδήματος, η ιδιοκτησία οχημάτων και η οικογενειακή δομή. Επιπρόσθετα, η ανάλυση είναι υπολογιστικά απλούστερη ενώ και η αποσυνθετική πληροφορία μπορεί να αποδείξει πιο ικανοποιητικά την συμπεριφορά μεμονωμένων προσώπων σε σύγκριση με την αθροιστική πληροφορία σε επίπεδο ζώνης. Το κύριο πάντως μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι πως η κατανομή αναφοράς των νοικοκυριών μπορεί να μην ισχύει για την μελλοντική χρονική περίοδο στόχου της μελέτης.

### **5.5. Κατανομή μετακινήσεων στο χώρο**

Στόχος των υπολογισμών αυτού του σταδίου είναι η αποκατάσταση συνδέσεων μεταξύ σημείων προέλευσης και προορισμού, δηλαδή η κατανομή μετακινήσεων μεταξύ των διαφόρων κυκλοφοριακών ζωνών της περιοχής μελέτης. Με άλλα λόγια, στο βήμα αυτό συνδέονται τα άκρα των μετακινήσεων που προσδιορισθήκαν στο στάδιο της γένεσης και καταρτίζονται τα μητρώα Προέλευσης-Προορισμού. Οι επιθυμίες μετακινήσεων συναρτώνται με την προσφερόμενη συγκοινωνιακή υποδομή και τα χαρακτηριστικά της (ταχύτητες ή και λοιπά στοιχεία επιπέδου συγκοινωνιακής εξυπηρέτησης), και τα αποτελέσματα αποτυπώνονται αριθμητικά στα μητρώα Προέλευσης- Προορισμού (Π-Π). Αντικείμενο των υποδειγμάτων κατανομής των μετακινήσεων στο χώρο είναι έτσι η εκτίμηση του αριθμού των μετακινήσεων που εκτελούνται από μια ζώνη προέλευσης σε μια ζώνη προορισμού, δεδομένων των αποτελεσμάτων του προηγούμενου βήματος. Οι κύριες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των μελλοντικών ροών προέλευσης-προορισμού μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες: μέθοδοι συντελεστή ανάπτυξης και αναλυτικές μέθοδοι, όπως τα υποδείγματα βαρύτητας και οι επί το στοχαστικότερο παραλλαγές τους, δηλαδή τα υποδείγματα ευκαιριών. Ανεξάρτητα από το είδος της μεθόδου που ακολουθείται, η βασική θεωρία κάθε μεθοδολογίας κατανομής των μετακινήσεων είναι ότι ο αριθμός των μετακινήσεων μεταξύ δύο κυκλοφοριακών ζωνών είναι ανάλογος με τα κίνητρα για μετακινήσεις που υπάρχουν σε κάθε ζώνη και αντιστρόφως ανάλογος με την τριβή (με το κόστος δηλαδή σε γενικευμένη έννοια).

### 5.5.1. Μέθοδοι συντελεστή ανάπτυξης

Οι μέθοδοι συντελεστή ανάπτυξης βασίζονται στην υπόθεση ότι η σημερινή μορφή της κατανομής των μετακινήσεων σε μια περιοχή μελέτης θα παραμείνει ίδια στο μέλλον, και ότι ο αριθμός των μετακινήσεων θα μεταβληθεί κατά ένα σταθερό συντελεστή. Οι μέθοδοι αυτοί επιχειρούν έτσι την προβολή στο μέλλον των σημερινών μετακινήσεων μεταξύ κυκλοφοριακών ζωνών με τη βοήθεια κατάλληλων συντελεστών. Σύμφωνα με τις μεθόδους αυτές, μία υπάρχουσα κατανομή μετακινήσεων (όπως απεικονίζεται σε ένα μητρώο Π-Ε<sup>14</sup>), προσαρμόζεται μέσω συντελεστών αύξησης στο μελλοντικό χρονικό ορίζοντα του έτους στόχου της μελέτης. Η προσαρμογή γίνεται με βάση προβλέψεις των παραγόμενων-ελκόμενων μετακινήσεων σε κάθε ζώνη. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται όταν δεν αναμένονται δομικές αλλαγές του συγκοινωνιακού δικτύου και προσφέρουν εκτιμήσεις χαμηλού κόστους αλλά και περιορισμένης ερμηνευτικότητας. Παραδείγματα συντελεστών ανάπτυξης είναι οι ομοιόμορφοι συντελεστές, και οι απλά και διπλά περιορισμένοι συντελεστές (αλλιώς και συντελεστές Fratar) .

#### 5.5.1.1. Υποδείγματα ομοιόμορφου συντελεστή ανάπτυξης

Στα υποδείγματα ομοιόμορφου συντελεστή ανάπτυξης, γίνεται η υπόθεση ότι η μόνη διαθέσιμη πληροφορία είναι εκείνη της ύπαρξης ενός και μόνο συντελεστή αύξησης για ολόκληρη την περιοχή μελέτης. Για παράδειγμα, αν υποτεθεί ότι οι μετακινήσεις στην περιοχή αναμένεται να αυξηθούν κατά  $x$  % από τη χρονική στιγμή αποτύπωσής τους σε ένα μητρώο Π-Ε έως και το έτος στόχο της μελέτης, τότε κάθε στοιχείο του αρχικού μητρώου πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή  $1 + x/100$  για να παραχθεί το νέο μητρώο.

Το υπόδειγμα περιγράφεται από τη σχέση:

---

<sup>14</sup> Τα μητρώα Παραγόμενων – Ελκόμενων (Π-Ε) μετακινήσεων αποτελούν τη βάση των μητρώων προέλευσης-προορισμού (Π-Π), τα οποία, σε αντιδιαστολή με τα πρώτα, θεωρούνται προσανατολισμένα μητρώα, με την έννοια ότι προσδιορίζουν την κατεύθυνση των μετακινήσεων, πολλές από τις οποίες έχουν (αρχικά) παραχθεί στο άκρο που καταλήγουν.

#### 5.5.1.2. Υποδείγματα απλά περιορισμένου συντελεστή ανάπτυξης

Στα υποδείγματα απλά περιορισμένου συντελεστή ανάπτυξης χρησιμοποιούνται (όταν υπάρχουν) εκτιμήσεις των μελλοντικών παραγόμενων ή ελκόμενων μετακινήσεων. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζονται διαφορετικοί συντελεστές σε κάθε ζώνη, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$T_{ij} = [P_i / \sum t_{iz}] * t_{ij}, \text{ για όλα τα } i, j$$

Εξίσωση 5.5

όπου:  $T_{ij}$  είναι οι εκτιμώμενες μετακινήσεις από τη ζώνη  $i$  στη  $j$ ,  $P_i$  είναι οι εκτιμώμενες παραγόμενες μετακινήσεις στη ζώνη  $i$ , και  $t_{ij}$  είναι οι εκτιμώμενες του έτους βάσης από  $i$  σε  $j$ .

Τόσο για τις μεθόδους ομοιόμορφου συντελεστή ανάπτυξης, όσο και για αυτές του απλά περιορισμένου συντελεστή, ισχύει ότι ενώ είναι εύχρηστες, γίνεται η χονδροειδής υπόθεση ότι οι υπάρχουσες τριβές στις μετακινήσεις (γενικευμένο κόστος, δηλαδή χρόνοι διαδρομής, καθυστερήσεις, κόστος μετακίνησης, κ.λπ.) θα παραμείνουν ίδιες και στο μέλλον, και ότι θα επηρεάζουν τους μετακινούμενους με τον ίδιο τρόπο.

#### 5.5.1.3. Υποδείγματα Fratar

Η μέθοδος Fratar (που έχει πάρει το όνομα της από τον ομώνυμο μελετητή που την ανέπτυξε και τη χρησιμοποίησε στις Η.Π.Α. το 1950) υπολογίζει μελλοντικά μητρώα (κατανομής) μετακινήσεων με εφαρμογή συντελεστών ανάπτυξης, με στόχο την προσαρμογή παραγόμενων και ελκόμενων μετακινήσεων (Fratar, 1954):

$$T_{ij} = t_{ij} a_i b_j$$

Εξίσωση 5.6

με τους περιορισμούς:  $\sum_j T_{ij} = P_i$  και  $\sum_i T_{ij} = A_j$ , όπου  $T_{ij}$  είναι οι εκτιμώμενες μετακινήσεις από την ζώνη  $i$  στη  $j$ ,  $P_i$  είναι οι εκτιμώμενες παραγόμενες μετακινήσεις στη ζώνη  $i$ ,  $A_j$  είναι οι εκτιμώμενες ελκόμενες μετακινήσεις στη ζώνη  $j$ ,  $t_{ij}$  είναι οι μετακινήσεις

του έτους βάσης από  $i$  σε  $j$ ,  $a$  συντελεστής εξισορρόπησης της γραμμής  $i$  και  $b$  ο συντελεστής εξισορρόπησης της στήλης  $j$ .

Το παραπάνω πρόβλημα λύνεται με σύγκλιση μέσω διαδοχικών επαναλήψεων. Κάθε επανάληψη συνίσταται στην προσαρμογή των γραμμών του μητρώου ώστε να εξισώνονται με τις συνολικά (ανά ζώνη) παραγόμενες  $P_i$  και κατόπιν στην προσαρμογή των στηλών στις συνολικά (ανά στήλη ή ζώνη) ελκόμενες  $A_j$ . Η προσαρμογή αυτή συνεχίζεται για έναν δεδομένο (μικρό) αριθμό επαναλήψεων, ή μέχρις να ικανοποιηθεί το κριτήριο της σύγκλισης, το οποίο συνήθως ορίζεται ως ένα ποσοστό απόκλισης των παραγόμενων και ελκόμενων μετακινήσεων μιας προσέγγισης ( $n$ ) από την αμέσως προηγούμενη ( $n-1$ ). Μια συνήθης τιμή αυτού του κριτηρίου είναι 10%, δηλαδή:

$$0,9 \leq \frac{P_i^n}{P_i^{n-1}} \leq 1,1 \text{ και } 0,9 \leq \frac{A_j^n}{A_j^{n-1}} \leq 1,1 \text{ για όλα τα } i, j \quad \text{Εξίσωση 5.7}$$

Προς αποφυγή των πολύπλοκων υπολογισμών της μεθόδου Fratar, χρησιμοποιείται και η μέθοδος Detroit (από την εφαρμογή της μεθόδου στην ομώνυμη πόλη των Η.Π.Α. το 1956).

### 5.5.2. Αναλυτικές μέθοδοι

Οι αναλυτικές μέθοδοι βασίζονται στις παραδοχές πως πρέπει πρώτα να κατανοηθούν οι αιτίες των μετακινήσεων πριν γίνει η πρόβλεψη για αυτές, και πως η αιτιώδης σχέση των μετακινήσεων είναι δυνατόν να κατανοηθεί αν κάποιος την εξηγήσει με κανόνες της Μηχανικής. Παραδείγματα τέτοιων μεθόδων είναι τα υποδείγματα βαρύτητας, τα υποδείγματα ευκαιρίας και τα ηλεκτροστατικά υποδείγματα.

#### 5.5.2.1. Υπόδειγμα βαρύτητας

Το υπόδειγμα βαρύτητας (εμπνεόμενο από το νόμο βαρύτητας του Νεύτωνα) είναι το πιο γνωστό και ευρέως χρησιμοποιούμενο υπόδειγμα κατανομής των μετακινήσεων στο χώρο. Ο τύπος βαρύτητας του Νεύτωνα ( $F = m_1 m_2 d^{-2}$ ) γίνεται εδώ  $T_{ij} = P_i A_j f(d_{ij})$  και βασίζεται στην υπόθεση ότι ο αριθμός των μετακινήσεων που παράγεται σε μια ζώνη  $i$  και έλκεται στη ζώνη  $j$  είναι ανάλογος προς:

- Τον αριθμό των μετακινήσεων που παράγονται στη ζώνη  $i$ ,  $P_i$
- Τον αριθμό των μετακινήσεων που έλκονται στη ζώνη  $j$ ,  $A_j$

- Μια συνάρτηση τριβής (ή αντίστασης μετακίνησης)  $f(d_{ij})$ , που χαρακτηρίζει το χωρικό (ή χρονικό) διαχωρισμό  $d_{ij}$  των ζωνών.

Έχουν δοκιμαστεί διάφοροι τύποι συναρτήσεων αντίστασης των διαφόρων μέτρων αντίστασης, δηλαδή της απόστασης, του χρόνου και του κόστους. Οι διαφορετικές διατυπώσεις των συναρτήσεων αυτών αποσκοπούν στην αντιπροσωπευτικότερη περιγραφή του τρόπου που ο διαχωρισμός των ζωνών συντελεί στη μείωση της ελκυστικότητας τους για τους διάφορους σκοπούς μετακίνησης. Συνήθεις μαθηματικές εκφράσεις που χρησιμοποιούνται είναι η εκθετική, η αντίστροφη γεωμετρική, καθώς και η συνάρτηση τύπου "γ". Όπως και στην περίπτωση των υποδειγμάτων συντελεστή ανάπτυξης, η διατύπωση του υποδείγματος βαρύτητας μπορεί να γίνει με απλό περιορισμό ως προς τις παραγωγές ( $P_i$ ) ή έλξεις μετακινήσεων ( $A_j$ ), ή με διπλό περιορισμό και για τις δύο.

Στην περίπτωση του υποδείγματος απλού περιορισμού, οι μετακινήσεις κατανέμονται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση, με περιορισμό ως προς τις παραγόμενες μετακινήσεις:

$$T_{ij} = P_i(A_i f(d_{ij}) / \sum_z (A_z f(d_{iz}))) \quad \text{Εξίσωση 5.8}$$

Αντίστοιχα, οι μετακινήσεις κατανέμονται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση με περιορισμό ως προς τις ελκόμενες μετακινήσεις.

$$T_{ij} = A_j(P_i f(d_{ij}) / \sum_z (P_z f(d_{iz}))) \quad \text{Εξίσωση 5.9}$$

Η διατύπωση του διπλά περιορισμένου υποδείγματος βαρύτητας είναι η παρακάτω:

$$T_{ij} = a_i P_i b_j A_j f(d_{ij}) \quad \text{Εξίσωση 5.10}$$

με τους περιορισμούς:  $\sum_j T_{ij} = P_i$  και  $\sum_i T_{ij} = A_j$ , όπου  $T_{ij}$  είναι οι εκτιμώμενες μετακινήσεις από την ζώνη  $i$  στη  $j$ ,  $P_i$  είναι οι εκτιμώμενες παραγόμενες μετακινήσεις στη ζώνη  $i$ ,  $A_j$  είναι οι εκτιμώμενες ελκόμενες μετακινήσεις στη ζώνη  $j$ ,  $t_{ij}$  είναι οι μετακινήσεις



του έτους βάσης από  $i$  σε  $j$ ,  $a$  συντελεστής εξισορρόπησης της γραμμής  $i$  και  $b$  ο συντελεστής εξισορρόπησης της στήλης  $j$ .

#### 5.5.2.2. Υπόδειγμα ευκαιρίας

Το υπόδειγμα ευκαιρίας (βασισμένο στην εργασία του Schneider έχει τη μορφή  $T_{ij} = P_i U_j$ , όπου  $T_{ij}$  είναι ο αριθμός μετακινήσεων μεταξύ ζώνης  $i$  και ζώνης  $j$ ,  $T_i$  είναι το σύνολο των μετακινήσεων που παράγεται στη ζώνη  $i$  και  $U_j$  είναι η πιθανότητα που υπάρχει για μια μετακίνηση να σταματήσει στη ζώνη  $j$  (Schneider, 1960). Όπως φαίνεται, ο αριθμός των μετακινήσεων από μια ζώνη  $i$  σε μια άλλη ζώνη  $j$  θα ισούται με την πιθανότητα που υπάρχει για μια μετακίνηση από την ζώνη  $i$  να σταματήσει στη ζώνη  $j$ , πολλαπλασιασμένη επί τον συνολικό αριθμό μετακινήσεων που παράγονται στη ζώνη  $i$ .

Τα υποδείγματα ευκαιριών διακρίνονται σε δύο μορφές (ενδιάμεσων ευκαιριών και ανταγωνιζόμενων ευκαιριών) και θεωρούνται, και στις δύο αυτές μορφές τους, εξίσου ακριβή και αναλυτικά όσο και τα υποδείγματα βαρύτητας, και ακριβέστερα από τα υποδείγματα συντελεστή ανάπτυξης.

### 5.6. Επιλογή μέσου

Η επιλογή του μέσου μεταφοράς είναι ίσως ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα στο Σχεδιασμό των Μεταφορών. Αυτό συμβαίνει λόγω του ρόλου που διαδραματίζουν οι μαζικές μεταφορές. Σχεδόν χωρίς εξαίρεση, τα μέσα μαζικής μεταφοράς χρησιμοποιούν την μεταφορική υποδομή αποτελεσματικότερα από τα ιδιωτικά μέσα και κατά συνέπεια δεν συμβάλλουν στην συμφόρηση. Είναι σχετικά απίθανο, ανεξαρτήτως περιοχής, όλοι οι ιδιοκτήτες αυτοκινήτων που επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν τα αυτοκίνητά τους να μπορούν να βρίσκονται ταυτόχρονα σε αστικές περιοχές, χωρίς μεγάλα τμήματα του αστικού ιστού να θυσιαστούν για να μετατραπούν σε δρόμους και χώρους στάθμευσης.

Επομένως, το ζήτημα της επιλογής του μέσου μεταφοράς είναι ίσως το πιο σημαντικό στοιχείο του Σχεδιασμού των Μεταφορών και της χάραξης πολιτικής Μεταφορών. Επηρεάζει τη γενική αποτελεσματικότητα με την οποία οι μετακινούμενοι μπορούν να μετακινηθούν σε αστικές περιοχές και το μερίδιο του αστικού χώρου που αφιερώνεται στις υπηρεσίες Μεταφορών. Για τους λόγους αυτούς, είναι εξαιρετικά σημαντικό το ζήτημα ανάπτυξης υποδειγμάτων ευαίσθητων στα χαρακτηριστικά των μετακινήσεων και στο προφίλ των μετακινουμένων.

Σε συνέχεια των προηγούμενων σταδίων, εξετάζεται εδώ η κατανομή των μετακινήσεων στα μηχανοκίνητα μεταφορικά μέσα (και όχι στην πεζή μετακίνηση και τη μετακίνηση με μη μηχανοκίνητα μέσα, ιδίως για μετακινήσεις μικρής απόστασης, καθώς ο μηχανισμός ατομικής επιλογής για τέτοιες περιπτώσεις δεν είναι ακόμα γνωστός με ακρίβεια) που έχουν σαν στόχο την κατανομή των μετακινήσεων προσώπων στα διάφορα μεταφορικά μέσα, ώστε να προκύψουν οι ροές οχημάτων μεταξύ των ζωνών. Η κατανομή των μετακινήσεων στα μεταφορικά μέσα γίνεται με βάση ορισμένους βασικούς παράγοντες επηρεασμού της συμπεριφοράς του μετακινούμενου.

Οι παράγοντες επηρεασμού της συμπεριφοράς του μετακινούμενου κατηγοριοποιούνται στις παρακάτω ομάδες:

- *Χαρακτηριστικά μετακίνησης:* οι βασικότεροι παράγοντες είναι ο σκοπός, το μήκος, το κόστος και το διάστημα της μέρας της μετακίνησης (καθώς π.χ. μετακινήσεις τις βραδινές ώρες είναι δυσκολότερο να γίνουν με ΜΜΜ).
- *Χαρακτηριστικά μετακινούμενου:* Οι βασικότεροι παράγοντες είναι τα κοινωνικο-οικονομικά χαρακτηριστικά των νοικοκυριών, όπως π.χ. το εισόδημα, η ιδιοκτησία και διαθεσιμότητα οχημάτων, το μέγεθος και η δομή του νοικοκυριού.
- *Χαρακτηριστικά συστήματος μεταφορών:* οι παράγοντες χωρίζονται σε ποσοτικούς, π.χ. χρόνος διαδρομής, κόστος των μετακινήσεων, διαθεσιμότητα και κόστος στάθμευσης, και σε ποιοτικούς π.χ. αξιοπιστία, ασφάλεια, άνεση, κ.λπ.
- *Άλλα χαρακτηριστικά:* πυκνότητα της οικιστικής ανάπτυξης, τύπος εργασίας και η χωροθέτηση της εργασίας.

Υπάρχουν δύο διακριτές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στο στάδιο του καταμερισμού στα μέσα, με βάση τη θέση του σταδίου αυτού σε σχέση με τα άλλα στάδια του Σχεδιασμού των Μεταφορών. Η πρώτη αφορά στην περίπτωση που η διαδικασία καταμερισμού κατά μέσο είναι το δεύτερο βήμα, αμέσως μετά από αυτό της γένεσης των μετακινήσεων και πριν από την κατανομή των μετακινήσεων σε μητρώα Π-Π. Τα υποδείγματα αυτά ονομάζονται υποδείγματα καταμερισμού κατά μέσο των άκρων των μετακινήσεων (trip-end modal split models) και έχουν σαν στόχο την εκτίμηση της κατανομής σε κάθε μεταφορικό μέσο όλων των μετακινήσεων που ξεκινούν από κάθε κυκλοφοριακή ζώνη. Το πρόβλημα αυτών των υποδειγμάτων εντοπίζεται στο ότι αν ο καταμερισμός στα μέσα γίνει πριν την κατανομή στο δίκτυο, δεν υπάρχει καμία ένδειξη του προορισμού των μετακινήσεων, και άρα τα χαρακτηριστικά της διαδρομής και των μέσων δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη. Η βασική θεώρηση των υποδειγμάτων αυτών είναι ότι οι καθοριστικοί παράγοντες επιλογής μέσου

Σελίδα 170 από 481

είναι τα προσωπικά χαρακτηριστικά των μετακινούμενων. Η θεώρηση αυτή ήταν αντιπροσωπευτική και της εποχής και της περιοχής στην οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρον (Η.Π.Α), όπου και υπήρχε η γενική προσέγγιση ότι όσο ανέβαινε το εισόδημα, τόσο οι μετακινούμενοι θα αγόραζαν και θα χρησιμοποιούσαν τα ιδιωτικά τους οχήματα. Τα υποδείγματα αυτά συσχέτιζαν την επιλογή μέσου κατά βάση με το εισόδημα, την οικιστική πυκνότητα και την ιδιοκτησία Ι.Χ. οχήματος. Έτσι, είχαν μηδενική απόκριση σε αλλαγές πολιτικής, όπως π.χ. βελτίωση των ΜΜΜ, απαγόρευση ή περιορισμό στάθμευσης, επιβολή διοδίων, κ.λπ. και άρα περιορισμένη αντοχή στο χρόνο.

Ο δεύτερος τύπος υποδειγμάτων είναι αυτός που χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα και αφορά στην περίπτωση που ο καταμερισμός κατά μέσο έπεται της κατανομής των μετακινήσεων σε Π-Π. Τα υποδείγματα αυτά ονομάζονται υποδείγματα καταμερισμού κατά μέσο των κατανεμημένων μετακινήσεων (trip-interchange modal split models). Τα υποδείγματα αυτά έχουν το προτέρημα ότι λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά της μετακίνησης και της διαθεσιμότητας διαφορετικών μέσων για τη μετακίνηση. Κατά αντιστοιχία όμως, υπάρχει μεγαλύτερη δυσκολία ενσωμάτωσης των χαρακτηριστικών των μετακινούμενων, γιατί αυτά έχουν ήδη συντεθεί στους Π-Π.

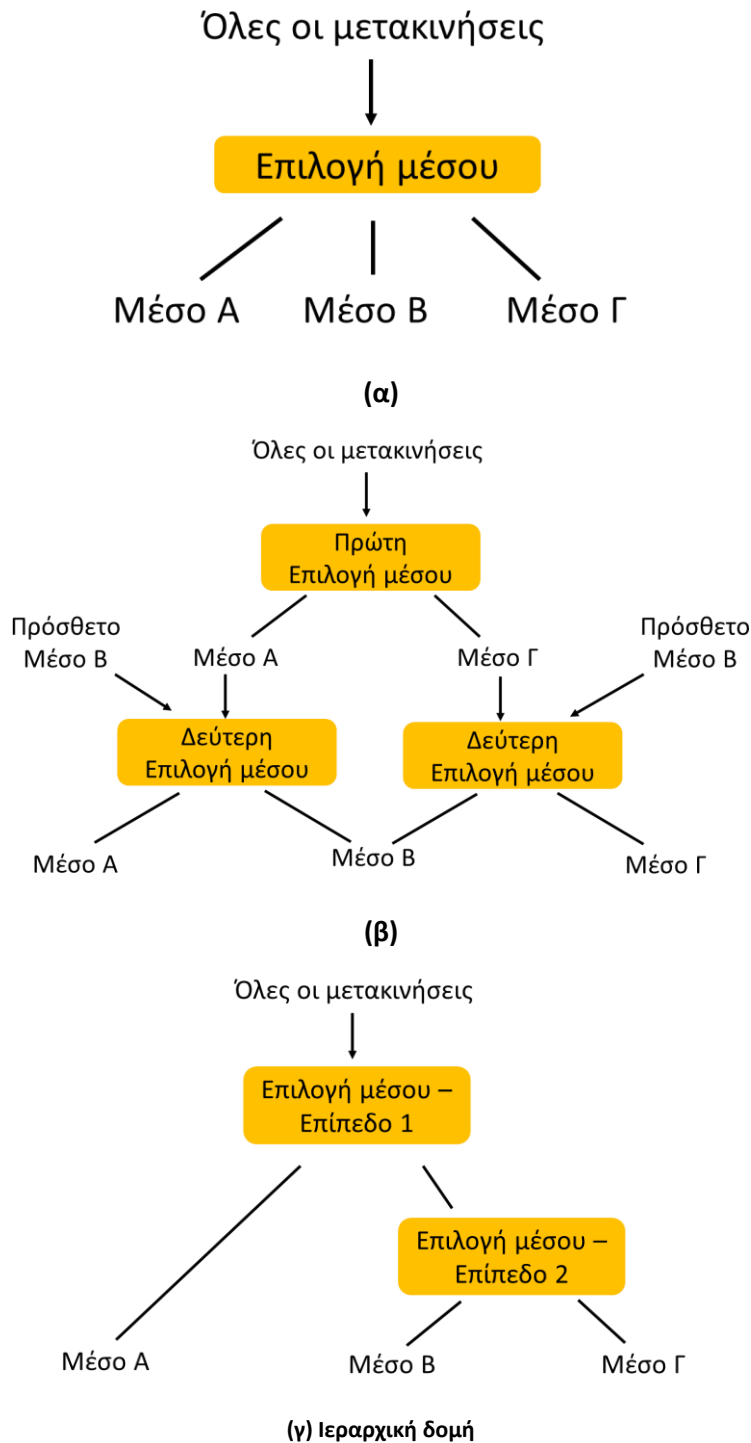
Για την κατανομή στα μέσα χρησιμοποιούνται σήμερα κατά βάση υποδείγματα αποσυνθετικά ή εξατομικευμένα, τύπου απλού ή πολλαπλού Logit, και στηρίζονται σε παρατηρούμενες επιλογές που γίνονται για κάθε μετακινούμενο ατομικά ή για κάθε νοικοκυριό. Πρέπει να υπογραμμισθεί εδώ, ότι η χρήση των αποσυνθετικών υποδειγμάτων είναι συχνά μια ευαίσθητη εργασία, διότι προϋποθέτει την ακριβή γνώση των παραγόντων που καθορίζουν την επιλογή αλυσίδας μεταφοράς (trip chain), την οποία θα μπορούσε να επιλέξει κάθε μετακινούμενος – μέλος του δείγματος που χρησιμοποιείται στην προσαρμογή του υποδείγματος. Ανθétως τα συνθετικά υποδείγματα στηρίζονται σε παρατηρήσεις ομάδων χρηστών των διαφόρων ανταγωνιζόμενων συγκοινωνιακών μέσων σε κάθε σύνδεση και σε σχέσεις που διέπουν μεγάλες ομάδες μετακινούμενων με κοινά χαρακτηριστικά, επί τη βάση μέσων τιμών παραμέτρων σε επίπεδο ζώνης η και ολόκληρης γεωγραφικής περιοχής. Το μαθηματικό εργαλείο των συνήθων συνθετικών μεθόδων είναι η γραμμική παλινδρόμηση (βλ. Ενότητα 5.4.1.2).

Η διαδικασία επιλογής μέσου από τους μετακινούμενους μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά με διάφορους τρόπους. Η μαθηματική περιγραφή που θα αναφερθεί στις παρακάτω ενότητες, μπορεί να βρίσκει συνηθέστερη εφαρμογή στην επιλογή μέσου μεταφοράς, αλλά με την ίδια ακριβώς μαθηματική προσέγγιση με την οποία προσεγγίζεται η επιλογή μέσου,

Σελίδα 171 από 481

μπορούν να μελετηθούν οι επιλογές διαδρομής ή χρόνου αναχώρησης, αλλά και γενικότερα όλα τα προβλήματα που σχετίζονται με προτιμήσεις των μετακινουμένων. Στα μαθηματικά υποδείγματα που αναπαριστούν επιλογές (ή γενικότερα συμπεριφορά) γίνεται η υπόθεση ότι οι μετακινούμενοι κάνουν τις επιλογές τους σχετικά με το μέσο μετακίνησης, ή το χρόνο αναχώρησης, με βάση τη σύγκριση των εναλλακτικών επιπέδων των υπηρεσιών που παρέχονται από το σύστημα μεταφορών, επιλογές οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά (άρα τις προσδοκίες ή και απαιτήσεις) των μετακινουμένων. Συνεπώς, ένας μετακινούμενος θα πάρει αποφάσεις σχετικά με το μέσο που θα χρησιμοποιήσει, ή τη διαδρομή που θα ακολουθήσει, που προκύπτουν από τη δική του προσωπική εκτίμηση σχετικά με τις επιπτώσεις των εναλλακτικών επιλογών στη μετακίνηση του.

Η Εικόνα 29 παρουσιάζει πιθανές δομές υποδειγμάτων για την επιλογή μέσου, με παραπάνω από δύο διαθέσιμα μέσα. Η πιο απλή μορφή και ευρέως διαδεδομένη στην αποσυνθετική προτυποποίηση, παρουσιάζεται στην Εικόνα 29 (α). Το βασικό της μειονέκτημα είναι η υπόθεση ότι όλες οι εναλλακτικές έχουν το ίδιο βάρος, κι αυτή η υπόθεση μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες εκτιμήσεις όταν κάποιες από τις εναλλακτικές συσχετίζονται.



Εικόνα 29: Δομές πολυτροπικών υποδειγμάτων

Η δομή στην Εικόνα 29 (β), χρησιμοποιήθηκε στα τέλη της δεκαετίας 1960 και στις αρχές της δεκαετίας 1970, και εγκαταλείφθηκε έκτοτε καθώς έδινε διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με το ποια εναλλακτική θεωρούταν ως πρόσθετη. Η τρίτη δομή στην Εικόνα 29 (γ) είναι η ονομαζόμενη ιεραρχική δομή, όπου οι επιλογές που έχουν κοινά χαρακτηριστικά συσχετίζονται μεταξύ τους (π.χ. τα ΜΜΜ), και διαχωρίζονται έπειτα σε δεύτερο επίπεδο,

όπου και γίνεται και ο πρώτος διαχωρισμός μεταξύ μηχανοκίνητων και μη μηχανοκίνητων μετακινήσεων.

Ανάλογα με τις παραδοχές που γίνονται για την μορφή της κατανομής του σφάλματος έχουμε δύο κατηγορίες υποδειγμάτων (Πίνακας 14).

Πίνακας 14: Κατηγορίες υποδειγμάτων βάσει κατανομής σφάλματος

Κατανομή Σφάλματος	Gumbel	Normal
Υπόδειγμα	Logit	Probit

Τα υποδείγματα Logit, και παρά την κατά Gumbel κατανομή σφαλμάτων που είναι λιγότερο συνήθης υπόθεση, χρησιμοποιούνται ευρέως στις Μεταφορές και είναι τα πιο διαδεδομένα υποδείγματα, δεδομένου ότι αξιοποιούν μια αναλυτική σχέση και επιλύονται σχετικά εύκολα. Το όνομα logit προέρχεται από το Logistic Probability Unit. Τα υποδείγματα Probit, παρόλη την υπόθεση περί κανονικής κατανομής των σφαλμάτων, δεν εδράζονται σε καθιερωμένη αναλυτική σχέση και είναι πολύ δυσκολότερο να επιλυθούν, ιδίως όταν ο αριθμός των εναλλακτικών επιλογών είναι μεγάλος.

Είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι τα παραπάνω υποδείγματα, αποτελούν κατά βάση συνέχεια του υποδείματος καταναλωτικής συμπεριφοράς, που αναπτύχθηκε από τον Luce, τη δεκαετία του 1950. Σύμφωνα με το υπόδειγμα αυτό, η πιθανότητα  $P_o$  για έναν καταναλωτή να επιλέξει ένα αγαθό  $B_o$  μεταξύ πλήθους  $k$  αγαθών  $B_k$ , καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από την αντίστοιχη σχετική χρησιμότητα  $u_k$ , εκφράζεται ως εξής:

$$P_o = \frac{e^{u_o}}{\sum_k e^{u_k}} \quad \text{Εξίσωση 5.11}$$

Η σχετική χρησιμότητα, που μπορεί να προσδιορίζεται θετικά ως όφελος και αρνητικά ως κόστος, εξετάζεται ενδελεχώς στην επόμενη Ενότητα, καθώς οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για να την περιγράψουν, βρίσκουν εφαρμογή για την έκφραση του γενικευμένου κόστους κάθε μετακίνησης.

### 5.6.1. Συνάρτηση χρησιμότητας

Η ελκυστικότητα μιας λύσης για τη μετακίνηση ενός επιβάτη εξαρτάται από την χρησιμότητα ή ωφελιμότητα της λύσης αυτής. Η έννοια της χρησιμότητας είναι μια θεωρητική έννοια, η

οποία ορίζεται ως ο παράγοντας εκείνος που ο μετακινούμενος επιθυμεί να μεγιστοποιήσει. Τα μαθηματικά λοιπόν υποδείγματα που περιγράφουν τη συμπεριφορά χρηστών βασίζονται στην αρχή της βελτιστοποίησης της χρησιμότητας, σε σχέση με διάφορους περιορισμούς χρόνου, κόστους, κ.λπ. Γίνεται δηλαδή η βασική υπόθεση ότι οι χρήστες του μεταφορικού συστήματος και των υποδομών αποσκοπούν στη μεγιστοποίηση της προσωπικής ωφέλειας που μπορούν να αποκτήσουν από την μετακίνησή τους (π.χ. μείωση χρόνου μετακίνησης, μείωση κόστους, αύξηση άνεσης και ασφάλειας, κ.λπ.).

Η χρησιμότητα μιας εναλλακτικής  $i$  για ένα μετακινούμενο  $q$  ( $U_{iq}$ ) αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι η συνάρτηση συστηματικής ή αντιπροσωπευτικής ή μετρούμενης χρησιμότητας  $V_{iq}$ . Η συστηματική χρησιμότητα είναι άμεσα υπολογίσιμη και εξαρτάται από διάφορες ανεξάρτητες (ερμηνευτικές) μεταβλητές  $X_i$ , όπου  $i$  η επιλογή, και μπορεί να εκφραστεί από την εξίσωση:

$$V_{iq} = \sum_k \theta_{ki} X_{ikq} \quad \text{Εξίσωση 5.12}$$

όπου οι τιμές των παραμέτρων  $\theta$  θεωρούνται σταθερές για όλους τους μετακινούμενους, αλλά μπορεί να είναι διαφορετικές για τις διαφορετικές εναλλακτικές επιλογές που έχουν αυτοί.

Το δεύτερο μέρος είναι η τυχαία συνιστώσα  $\varepsilon_{iq}$  και αναπαριστά την ιδιοσυγκρασία και τις ιδιαίτερες προτιμήσεις του μετακινούμενου, και τα πιθανά σφάλματα μέτρησης και παρατήρησης (δηλ. προτυποποίησης του προβλήματος). Η τυχαία συνιστώσα  $\varepsilon_i$ , που ονομάζεται και τυχαίος όρος της χρησιμότητας ή τυχαίο σφάλμα, αντικατοπτρίζει την πλευρά εκείνη της συμπεριφοράς ενός μετακινούμενου που δεν εμπίπτει στον αντιπροσωπευτικό ή συστηματικό όρο  $V_i X_i$ . Η τυχαία συνιστώσα  $\varepsilon_{iq}$  μπορεί να θεωρηθεί ότι ακολουθεί μια κατανομή πιθανότητας με μέση τιμή 0.

Έτσι, η χρησιμότητα  $U_{iq}$  αναπαριστά την αντιληπτή ωφέλεια της επιλογής  $i$ , δηλαδή την ωφέλεια όπως την αντιλαμβάνεται ο μετακινούμενος (λόγω των ιδιαίτερων προτιμήσεων που έχει ή και λόγω σφαλμάτων που υπεισέρχονται από την έλλειψη ακριβούς γνώσης των χαρακτηριστικών των διαθέσιμων εναλλακτικών επιλογών που έχει) και δίνεται από τον τύπο:

$$U_{iq} = V_{iq} + \varepsilon_{iq} \quad \text{Εξίσωση 5.13}$$

Σημειώνεται ότι για να ισχύει η παραπάνω σχέση απαιτείται ομοιογένεια των μετακινούμενων, δηλαδή θα πρέπει να έχουν όλοι το ίδιο σύνολο επιλογών A και να αντιμετωπίζουν τους ίδιους περιορισμούς.

Για την πρόβλεψη της επιλογής μια λύσης ή μέσου μεταφοράς  $i$  η τιμή της συνάρτησης χρησιμότητας του  $U_i$  πρέπει να συγκριθεί με την τιμή της χρησιμότητας των άλλων εναλλακτικών λύσεων  $U_j$ . Ο λόγος  $U_i/U_j$  μπορεί να μετατραπεί σε τιμή πιθανότητας  $P_{ij}$  μεταξύ 0 και 1 με τη χρήση μαθηματικών μετασχηματισμών (με καμπύλη κατανομής S), όπως:

$$P_1 = \frac{\exp(V_1)}{\exp(V_1) + \exp(V_2)} \quad \text{Εξίσωση 5.14}$$

### 5.6.2. Πολυωνυμικό υπόδειγμα Logit

Το πολυωνυμικό υπόδειγμα Logit (Multinomial Logit Model – MNL) είναι το πιο απλό και ευρέως χρησιμοποιούμενο υπόδειγμα διακριτών επιλογών και αναπτύχθηκε με βάση την παραδοχή ότι τα τυχαία σφάλματα ακολουθούν ίδιες και ανεξάρτητες κατανομές τύπου Gumbel. Η μαθηματική του διατύπωση είναι η ακόλουθη:

$$P_{iq} = \frac{\exp(\beta V_i)}{\sum_{A_j \in A(q)} \exp(\beta V_{jq})} \quad \text{Εξίσωση 5.15}$$

Όπου  $\beta$  σχετίζεται με την τυπική απόκλιση  $\sigma$  της κατανομής Gumbel ως εξής:

$$\beta^2 = \pi^2 / 6\sigma^2 \quad \text{Εξίσωση 5.16}$$

Στην πράξη η παράμετρος  $\beta$  θεωρείται σαν ίση προς την μονάδα, αφού δεν μπορεί να υπολογισθεί ξεχωριστά από τις παραμέτρους  $\theta$  της συστηματικής συνάρτησης χρησιμότητας.

Η εξίσωση είναι ταυτόσημη με το δίτιμο (binary) υπόδειγμα logit, με εξαίρεση την ύπαρξη περισσότερων όρων στον παρονομαστή, που αντανακλά το μεγαλύτερο αριθμό διαθέσιμων εναλλακτικών.



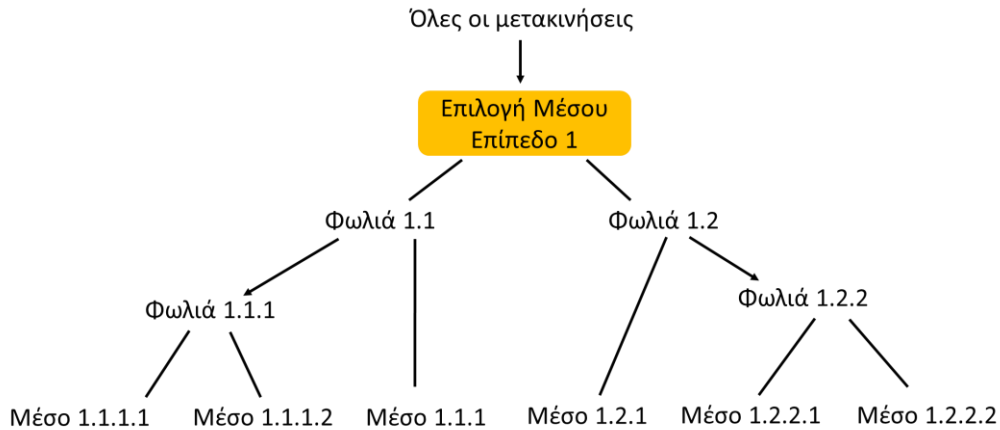
Το πολυωνυμικό υπόδειγμα Logit δομείται βάσει της σχετικής χρησιμότητας  $V_i$  κάθε μέσου, ως γραμμικής συνάρτησης των χαρακτηριστικών του. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν το χρόνο και το κόστος μετακίνησης με κάθε μέσο, καθώς και χαρακτηριστικά των επιβατών που μπορεί να επηρεάζουν την επιλογή του μέσου (εισόδημα, ηλικία, φύλο, κ.λπ.).

Το υπόδειγμα MNL πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη της «Ανεξαρτησίας από εναλλακτικές επιλογές» (Independence from Irrelevant Alternatives-IIA), η οποία δηλώνει ότι όπου δύο εναλλακτικές έχουν μη-μηδενική πιθανότητα να επιλεγθούν, ο λόγος της μιας πιθανότητας έναντι της άλλης δεν επηρεάζεται από την παρουσία ή απουσία μια άλλης εναλλακτικής από το σύνολο των επιλογών. Όπως φαίνεται, στο υπόδειγμα MNL ο λόγος  $\frac{P_j}{P_i} = \exp(V_j - V_i)$  είναι μια σταθερά ανεξάρτητη από τις υπόλοιπες εναλλακτικές. Πρακτικά, η συνθήκη αυτή υπονοεί, για παράδειγμα, ότι ο λόγος των πιθανοτήτων επιλογής ανάμεσα στο λεωφορείο και Ι.Χ. αυτοκίνητο είναι ανεξάρτητος από την ύπαρξη ή όχι μετρό. Ενώ αυτό αρχικά θεωρήθηκε ως πλεονέκτημα του υποδείγματος, σήμερα πλέον θεωρείται ότι σε πολλές περιπτώσεις, η συνθήκη IIA αποτελεί ένα σοβαρό καθώς και μη-ρεαλιστικό περιορισμό στην ανάπτυξη των υποδειγμάτων επιλογής μέσου.

### 5.6.3. Ιεραρχικό υπόδειγμα Logit

Όταν οι εναλλακτικές επιλογές που εξετάζει ο μετακινούμενος δεν είναι ανεξάρτητες, αλλά υπάρχουν ομάδες που περιέχουν επιλογές που μεταξύ τους μοιάζουν, όπως π.χ. όλα τα δημόσια μέσα μεταφοράς έναντι της ιδιωτικής μετακίνησης, τότε ενδεχόμενη εφαρμογή του πολυωνυμικού μοντέλου Logit οδηγεί σε μη αξιόπιστες εκτιμήσεις του καταμερισμού στα μέσα. Ο λόγος είναι ότι τα υποδείγματα MNL εκφράζουν τη διαδικασία επιλογής μέσου ως μια απευθείας και ταυτόχρονη επιλογή ανάμεσα σε «ανταγωνιστικά μέσα». Προκειμένου να γίνει εφικτή η πιο ρεαλιστική προτυποποίηση της επιλογής μέσου, αλλά και να «ξεπεραστούν» οι περιορισμοί IIA του μοντέλου MNL, αναπτύχθηκε μια κατηγορία προτύπων των ιεραρχικών λογιστικών υποδειγμάτων (Hierarchical ή Nested Logit Models - HL). Τα πρότυπα αυτά δίνουν τη δυνατότητα της απεικόνισης της διαδικασίας επιλογής μέσου ως σύνθετης (πολυεπίπεδης) διαδικασίας. Το ιεραρχικό μοντέλο logit θεωρεί μεν ότι κάθε μετακινούμενος αξιολογεί τις εναλλακτικές επιλογές που έχει με βάση την ωφέλεια που συνδέεται με κάθε επιλογή, αλλά βασίζεται στην υπόθεση ότι ο μετακινούμενος χωρίζει την μετακίνηση του σε διάφορα στάδια και στη συνέχεια ακολουθεί μια διαδοχική διαδικασία λήψης αποφάσεων, όπως φάνηκε και στην Εικόνα 29 (γ). Έτσι, οι διαφορετικές εναλλακτικές

επιλογές που συσχετίζονται μεταξύ τους, ομαδοποιούνται σε ομάδες, "φωλιές" (nests) ή επίπεδα (levels) και αναπαριστώνται με μια σύνθετη μεταβλητή που συνδέεται με μια σύνθετη συνάρτηση χρησιμότητας, και στη συνέχεια διαχωρίζονται τα μέλη κάθε ομάδας ή "φωλιάς" μεταξύ τους. Ο διαχωρισμός αυτός, μπορεί να γίνει σε δύο ή και περισσότερα επίπεδα (Εικόνα 30). Σε κάθε επίπεδο λαμβάνεται και μια απόφαση.



Εικόνα 30: Δομή ιεραρχικού υποδείγματος με πέντε "φωλιές"

Το ιεραρχικό υπόδειγμα διατυπώνεται μαθηματικά ως διαδοχικά υποδείγματα της μορφής:

$$P_{im} = \frac{\exp(U_m)}{\sum_{q=1}^n U_m} \quad \text{Εξίσωση 5.17}$$

όπου  $P_{im}$  είναι η πιθανότητα επιλογής του μέσου  $m$ ,  $V_m$  είναι η μετρημένη χρησιμότητα του  $m$  μέλους της ίδιας "φωλιάς", και  $n$  είναι ο αριθμός των διαθέσιμων επιλογών στη "φωλιά".

Η αναμενόμενη μέγιστη τιμή της χρησιμότητας (EMU) της φωλιάς προσδιορίζεται από την σχέση:

$$EMU = \log \sum_{M=1}^n \exp U_m \quad \text{Εξίσωση 5.18}$$

όπου  $U_m$  είναι η συνάρτηση χρησιμότητας της "φωλιάς".

Έτσι, η σύνθετη χρησιμότητα της "φωλιάς"  $I$  (composite utility of the nest) είναι:

$$V_I = \varphi * EMU + \sum_k (\alpha_j Z_{jk}) \quad \text{Εξίσωση 5.19}$$

όπου  $\varphi$  και  $\alpha$  παράμετροι που υπολογίζονται σε υψηλότερα επίπεδα,  $Z_{jk}$  είναι όλα τα  $j$  κοινά χαρακτηριστικά σε όλα τα  $k$  μέλη της ανώτερης "φωλιάς" και τα οποία εξαιρέθηκαν κατά την ανάλυση της "φωλιάς"  $I$ . Για να καθοριστούν σωστά τα ιεραρχικά υποδείγματα πρέπει να

ικανοποιούνται οι εξής συνθήκες: 1. Πρέπει η σταθερά  $\varphi$  να ικανοποιεί για μία "φωλιά" τη σχέση  $0 \leq \varphi \leq 1$  και 2. Σε περίπτωση που υπάρχουν πολλές "φωλιές" η προηγούμενη σχέση για το  $\varphi$  θα πρέπει να ισχύει για κάθε "φωλιά", δηλαδή  $0 \leq \varphi_1 \leq \varphi_2 \leq \dots \leq \varphi_n \leq 1$ , όπου  $\varphi_1$  αντιστοιχεί στο μικρότερο και  $\varphi_n$  αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο επίπεδο.

Η χρήση των ιεραρχικών υποδειγμάτων είναι ευρέως διαδεδομένη στην πράξη, καθώς οι περισσότερες έρευνες επιλογής μέσου γίνονται με δεδομένα δεδηλωμένης προτίμησης (Stated Preference Data), και συνδυάζουν υπαρκτές και μη υπαρκτές εναλλακτικές. Για τον τύπο των ερευνών αυτών, με υποθετικές επιλογές, τα ιεραρχικά πρότυπα προσφέρουν μια εξαιρετική επιλογή διερεύνησης υποθέσεων.

#### 5.6.4. Πολυωνυμικό υπόδειγμα probit

Στα υποδείγματα probit, τα στοχαστικά σφάλματα  $\varepsilon$  της εξίσωσης 5.12 έχουν κανονική κατανομή γύρω από το μηδέν, κι έναν αυθαίρετο πίνακα συμμεταβλητότητας (arbitrary covariance matrix), δηλαδή οι διακυμάνσεις (variances) μπορεί να είναι διαφορετικές και τα σφάλματα μπορούν να συσχετίζονται με οποιοδήποτε τρόπο. Αυτή η γενικότητα δεν επιτρέπει την διατύπωση του υποδείγματος με τρόπο εξίσου απλό με τα υποδείγματα MNL (εκτός της δυαδικής του περίπτωσης), και η επίλυση του απαιτεί πολλές προσεγγίσεις.

Στην περίπτωση του δυαδικού υποδείγματος, οι συναρτήσεις χρησιμότητας (σύμφωνα με τη συνάρτηση 5.12) μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$U_1(\theta, Z) = V_1(\theta, Z) + \varepsilon_1(\theta, Z)$$

$$U_2(\theta, Z) = V_2(\theta, Z) + \varepsilon_2(\theta, Z)$$

όπου  $\varepsilon(\theta, Z)$  κατανέμεται δισδιάστατα με  $N(0, \Sigma)$  με:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \rho\sigma_1\sigma_2 \\ \rho\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 \end{pmatrix}$$

όπου  $\rho$  είναι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ  $U_1$  και  $U_2$ .

Η πιθανότητα επιλογής της εναλλακτικής 1 δίνεται από τη σχέση:

$$P_1(\theta, Z) = \Phi[(V_1 - V_2)\sigma_\varepsilon] \quad \text{Εξίσωση 5.20}$$

όπου  $\Phi[x]$  είναι η αθροιστική κανονική κατανομή που έχει πινακοποιημένες τιμές.

## 5.7. Καταμερισμός μετακινήσεων στο δίκτυο

Ο καταμερισμός της κυκλοφορίας στο δίκτυο είναι η διαδικασία εκείνη, κατά την οποία ανατίθενται οι μετακινήσεις σε διαδρομές εντός του δικτύου. Τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου αφορούν στην περιγραφή του συστήματος Μεταφορών και στα μητρώα μετακινήσεων, ενώ τα αποτελέσματα – δεδομένα εξόδου – της διαδικασίας του καταμερισμού της κυκλοφορίας, διαφέρουν ανάλογα με τον βαθμό εξειδίκευσης της διαδικασίας που χρησιμοποιείται, και περιλαμβάνουν την εκτίμηση των κυκλοφοριακών φόρτων, το κόστος πάνω σε κάθε τμήμα του δικτύου, τις στρέφουσες κινήσεις και πρωτίστως τα “δέντρα” διαδρομών.

Η διαδικασία του καταμερισμού ακολουθεί μια βραχυπρόθεσμη εξισορρόπηση της ζήτησης με τη διατιθέμενη υποδομή. Κατά τη διαδικασία αυτή, που είναι γνωστή και ως φόρτιση του δικτύου, γίνεται η εκτίμηση του μεγέθους της κυκλοφορίας οχημάτων (γενικότερα των μέσων μεταφοράς) που αναλαμβάνεται από κάθε στοιχείο του δικτύου, δηλ. τα τόξα ή συνδέσμους (οδικά τμήματα) και τους κόμβους (διασταυρώσεις).

Η έννοια της εξισορρόπησης της ζήτησης για μετακινήσεις με τη διατιθέμενη υποδομή, είναι κεντρικής σημασίας για τον καταμερισμό των μετακινήσεων, και αποτελεί δάνειο από την Οικονομική Επιστήμη. Σύμφωνα με τη συμβατική οικονομική θεώρηση, οι ανταλλαγές αγαθών και υπηρεσιών πραγματοποιούνται ως αποτέλεσμα αντιπαραβολής της ζήτησης για αυτές με την προσφορά τους. Το σημείο ισορροπίας που προκύπτει καθορίζει την τιμή στην οποία ανταλλάσσονται τα αγαθά, και τις αντίστοιχες ροές τους (ποσότητες που ανταλλάσσονται) στην αγορά. Το σημείο ισορροπίας εντοπίζεται όταν το οριακό κόστος παραγωγής και πώλησης των αγαθών ισούται με τα οριακά έσοδα που εξασφαλίζονται από την πώλησή τους. Αυτή η ισορροπία όμως δεν μπορεί ποτέ να τεθεί σε ισχύ στην πράξη, καθώς το σύστημα των τιμών και των επιπέδων παραγωγής είναι υπό μόνιμη προσαρμογή, ως απάντηση στις αλλαγές της αγοραστικής δύναμης, τις καταναλωτικές επιθυμίες, την τεχνολογία, τις τεχνικές παραγωγής, κ.λπ. Ωστόσο, η έννοια της ισορροπίας είναι πολύτιμη στην κατανόηση της κίνησης της οικονομίας και στην πρόβλεψη των μελλοντικών της καταστάσεων.

Στον τομέα των Μεταφορών, η προσφορά αποτελείται από το (οδικό) δίκτυο, που αντιπροσωπεύεται από τους συνδέσμους (και τους συνδεδεμένους κόμβους τους) με το αντίστοιχο κόστος τους. Το κόστος είναι συνάρτηση ενός των χαρακτηριστικών των συνδέσμων, π.χ. απόσταση, ταχύτητα ελεύθερης ροής, χωρητικότητα και σχέση ταχύτητας-

ροής. Η ζήτηση, όπως περιγράφεται σε προηγούμενες ενότητες, αποτελείται από μια ένδειξη του αριθμού των μετακινήσεων ανά ζεύγος Π-Π και του μέσου που χρησιμοποιείται. Πρέπει όμως να σημειωθεί, ότι οι Μεταφορές είναι ένα «αγαθό» τελείως ιδιότυπο και η λογική της αντιπαράθεσης της προσφοράς και της ζήτησης για τη διαμόρφωση μιας τελικής τιμής, όπως συμβαίνει με άλλα αγαθά στην μικροοικονομική θεώρηση, δεν βρίσκει εφαρμογή στον τομέα αυτό. Ο λόγος είναι ότι οι μεταφορές είναι ένα ενδιάμεσο αγαθό κατανάλωσης, υπό την έννοια ότι αποτελούν μέσο για την επίτευξη κάποιου στόχου, και όχι ένα τελικό προϊόν (εκτός ίσως των περιπτώσεων όπου πρωταγωνιστές σε ταινίες αμερικάνικης κυρίως προέλευσης μετακινούνται με μόνο σκοπό να γευτούν την – υποτιθέμενη, και εν πολλοίς κατασκευασμένη, – απόλαυση της οδήγησης). Επιπρόσθετα, στις περισσότερες των περιπτώσεων πραγματικών δικτύων Μεταφορών, η προσφορά είναι ανελαστική λόγω μη δυνατότητας χωρικής επέκτασης των μεταφορικών υποδομών - και άρα δεν μπορεί να αυξηθεί αισθητά. Τέλος, διότι η τιμή της μετακίνησης, δεν είναι ο αποκλειστικός παράγοντας που προσδιορίζει την ισορροπία ζήτησης και προσφοράς, π.χ. αυξήσεις της τιμής καυσίμου δεν συνεπάγονται αυτόματα μείωση της χρήσης μηχανοκίνητων μέσων (Ταξιλάρης, 1996). Για τους λόγους αυτούς, η εξισορρόπηση προσφοράς και ζήτησης για τον τομέα των Μεταφορών που επιχειρείται μέσω της αύξησης της προσφοράς (δηλαδή των μεταφορικών υποδομών), μπορεί να έχει μόνο βραχυπρόθεσμη ισχύ και, νομοτελειακά, η ζήτηση θα ακολουθήσει την αύξηση αυτή, μετατοπίζοντας απλώς το σημείο ισορροπίας των δύο, χωρίς ουσιαστικά να πετύχει επίλυση του προβλήματος της κυκλοφορίας. Παρ'όλα αυτά, είναι χρήσιμο να εξεταστεί το σύστημα Μεταφορών στο πλαίσιο αυτό, λαμβάνοντας όμως υπόψη την διαμόρφωση μιας δυναμικής ισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, με όρους κυκλοφορίας, διότι μεταφράζεται σε επιπτώσεις μέσομακροπρόθεσμα τόσο για την προσφορά, όσο και για την ζήτηση.

Εν τέλει, η διαδικασία του καταμερισμού των μετακινήσεων στο δίκτυο περιλαμβάνει αφενός την εύρεση διαδρομών που συνδέουν την προέλευση και τον προορισμό κάθε μετακίνησης (λαμβάνοντας υπόψη τη λογική με την οποία οι μετακινούμενοι κάνουν την επιλογή της διαδρομής τους) και αφετέρου τις μεθόδους καταμερισμού των ροών (από τα μητρώα Π-Π) στις διαδρομές.

### **5.7.1. Εύρεση διαδρομών**

Βασική προϋπόθεση στον καταμερισμό των μετακινήσεων είναι η θεώρηση ενός 'ορθολογικού' μετακινούμενου, που θα επέλεγε τη διαδρομή που προσφέρει το μικρότερο

αντιληπτό (και αναμενόμενο) ατομικό κόστος. Υπάρχουν όμως διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της διαδρομής κατά την οδήγηση μεταξύ δύο σημείων. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν το χρόνο διαδρομής, την απόσταση, το χρηματικό κόστος (καύσιμα και άλλα), την κυκλοφοριακή συμφόρηση και τις ουρές, τον τύπο των ελιγμών που απαιτούνται, τον τύπο της οδού (αυτοκινητόδρομος, λεωφόρος, αστική οδός, δευτερεύουσα αρτηρία, κ.λπ.), κ.α. Η έκφραση ενός γενικευμένου κόστους, που περιλαμβάνει όλα αυτά τα στοιχεία, είναι μια σύνθετη εργασία και για τον καταμερισμό των μετακινήσεων δεν συνιστάται η προσπάθεια παραμετροποίησης όλων των παραπάνω παραγόντων. Επομένως, οι προσεγγίσεις είναι αναπόφευκτες και η πιο συνηθισμένη εξ αυτών είναι να ληφθούν υπόψη μόνο δύο παράγοντες στην επιλογή της διαδρομής: ο χρόνος και το χρηματικό κόστος.

Το γεγονός ότι διαφορετικοί οδηγοί συχνά επιλέγουν διαφορετικές διαδρομές όταν ταξιδεύουν μεταξύ δύο ίδιων σημείων μπορεί να αποδοθεί σε δύο διαφορετικές κατηγορίες λόγων:

1. Διαφορές στις ατομικές αντιλήψεις για το τι συνιστά την «καλύτερη διαδρομή». Διαφορετικοί μετακινούμενοι μπορούν όχι μόνο να ενσωματώνουν διαφορετικά χαρακτηριστικά στη συνάρτηση γενικευμένου κόστους τους, αλλά να τα αντιλαμβάνονται και με διαφορετικούς τρόπους.
2. Τα αποτελέσματα συμφόρησης που επηρεάζουν πρώτα τις μικρότερες διαδρομές και καθιστούν το γενικευμένο τους κόστος συγκρίσιμο με τις αρχικά λιγότερο ελκυστικές διαδρομές.

Υπάρχουν δύο βασικοί αλγόριθμοι γενικής χρήσης για την εξεύρεση των συντομότερων (ή με το μικρότερο γενικευμένο κόστος) διαδρομών στα οδικά δίκτυα. Ο πρώτος είναι του Moore (1957) και ο δεύτερος του Dijkstra (1959). Και για τους δύο αλγόριθμους, ισχύει ότι τα κεντροειδή των ζωνών (από όπου ξεκινάει ή καταλήγει μια διαδρομή) δεν υπολογίζονται στο κόστος. Είναι γνωστό ότι ο αλγόριθμος του Dijkstra είναι καλύτερος από αυτόν του Moore, ιδίως για μεγαλύτερα δίκτυα, υπό την έννοια ότι οι συντομότερες διαδρομές υπολογίζονται γρηγορότερα, ωστόσο, είναι πιο δύσκολο να προγραμματιστεί. Ο Van Vliet (1977) αναγνώρισε επίσης έναν λιγότερο γνωστό αλγόριθμο ο οποίος αποδίδει πολύ καλά ακόμη και σε μεγάλα δίκτυα: τον αλγόριθμο του D'Esoro, όπως περιγράφηκε και δοκιμάστηκε από τον Pape (1974). Σύμφωνα με τον Van Vliet, ο αλγόριθμος του D'Esoro μπορεί να μειώσει τους χρόνους CPU κατά 50% σε σχέση με αυτόν του Moore, και είναι απλούστερος από αυτόν του Dijkstra (Van Vliet, 1977).

### 5.7.2. Μέθοδοι καταμερισμού των μετακινήσεων

Κάθε μέθοδος καταμερισμού των μετακινήσεων στο δίκτυο έχει συνήθως αρκετά βήματα. Οι βασικές όμως λειτουργίες όλων των μεθόδων είναι οι εξής:

1. Να προσδιορίσουν ένα σύνολο διαδρομών που θα μπορούσαν να θεωρηθούν ελκυστικές για τους οδηγούς. Αυτές οι διαδρομές αποθηκεύονται σε συγκεκριμένη δομή δεδομένων, που ονομάζεται δέντρο και επομένως αυτή η λειτουργία ονομάζεται στάδιο προσδιορισμού δέντρων.
2. Να καταμερίσουν κατάλληλες αναλογίες των μητρώων Π-Π σε αυτές τις διαδρομές ή δέντρα. Με το πέρας αυτής της λειτουργίας, οι σύνδεσμοι (οδικά τμήματα) ενός δικτύου αποκτούν κυκλοφοριακό φόρτο.
3. Να επιτύχουν σύγκλιση ως προς μια προκαθορισμένη λύση: πολλές μέθοδοι ακολουθούν ένα επαναληπτικό πρότυπο διαδοχικών προσεγγίσεων προς μια ιδανική λύση, π.χ. την ισορροπία του Wardrop. Η σύγκλιση με αυτή τη λύση παρακολουθείται για να αποφασιστεί πότε θα σταματήσει η επαναληπτική διαδικασία.

Πρακτικά, όλες οι μέθοδοι με τις οποίες οι μετακινήσεις που υπάρχουν στα μητρώα Π-Π καταμερίζονται στο δίκτυο, μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Εκείνες που επιτρέπουν την επιλογή μιας μόνο διαδρομής (ελάχιστου κόστους, π.χ. χρόνου) για κάθε ζεύγος Π-Π, και στις οποίες υπάρχει η υπόθεση ότι κάθε οδηγός επιλέγει τη διαδρομή με το μικρότερο κόστος, σύμφωνα με κάποιο μονοσήμαντο ορισμό αυτού του κόστους, και ακολουθούν την 1<sup>η</sup> συνθήκη του Wardrop.
2. Εκείνες που επιτρέπουν την επιλογή της ακολουθητέας διαδρομής από περισσότερες της μίας εναλλακτικές διαδρομές τη φορά, και που λαμβάνουν υπόψη το γεγονός ότι οι μετακινούμενοι, αν και πάντα προσπαθούν να ακολουθήσουν τη διαδρομή με το μικρότερο κόστος, δεν είναι δυνατόν να έχουν ένα μονοσήμαντο ορισμό του κόστους αυτού ή ότι μπορεί να αλλάζουν επιλογή κατά τη διάρκεια της διαδρομής τους ακολουθώντας τη 2<sup>η</sup> συνθήκη του Wardrop (και έτσι γίνονται επιλογές από αρκετές διαδρομές κάθε φορά).

### 5.7.3. Καταμερισμός όλα-ή-τίποτα

Η απλούστερη μέθοδος καταμερισμού των μετακινήσεων στο δίκτυο ονομάζεται όλα-ή-τίποτα (all-or-nothing), και υποθέτει ότι όλοι οι οδηγοί θεωρούν τα ίδια χαρακτηριστικά για

την επιλογή της διαδρομής, και ότι τα αντιλαμβάνονται και τα ζυγίζουν με τον ίδιο τρόπο. Η απουσία επιπτώσεων συμφόρησης σημαίνει ότι το κόστος των οδικών τμημάτων είναι σταθερό. Η υπόθεση ότι όλοι οι οδηγοί αντιλαμβάνονται το ίδιο κόστος σημαίνει ότι κάθε οδηγός από το σημείο προέλευσης  $i$  έως το σημείο προορισμού  $j$  πρέπει να επιλέξει την ίδια διαδρομή. Επομένως, όλοι οι οδηγοί αντιστοιχίζονται σε μία διαδρομή μεταξύ  $i$  και  $j$  και κανένας οδηγός δεν καταμερίζεται σε άλλες, λιγότερο ελκυστικές διαδρομές. Αυτές οι υποθέσεις είναι ίσως λογικές σε δίκτυα χωρίς κυκλοφοριακή συμφόρηση, όπου υπάρχουν λίγες εναλλακτικές διαδρομές και με πολύ διαφορετικό κόστος.

Η μέθοδος καταμερισμού όλα-ή-τίποτα θεωρείται γενικά περιορισμένου ενδιαφέροντος για τον Σχεδιασμό των Μεταφορών, κυρίως διότι καταλήγει σε αντιπαράβολή των επιπέδων ζήτησης και προσφοράς – καθώς καταμερίζει φόρτους σε τόξα (οδικά τμήματα) του δικτύου Μεταφορών ανεξαρτήτως της κυκλοφοριακής ικανότητας των τελευταίων να την εξυπηρετήσουν, και μη συνυπολογίζοντας τις τάσεις εξισορρόπησης που αναμένεται να εκδηλωθούν σε περίπτωση κορεσμού. Παρόλα αυτά, ακριβώς για τον λόγο αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υποδείξει ένα είδος «επιθυμητής/ιδεατής γραμμής», και εν τέλει την υπερφόρτιση των οδικών τμημάτων που οδηγούν σε κυκλοφοριακό κορεσμό τους. Το πιο σημαντικό και πρακτικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο για άλλες συνθετότερες (και ακριβέστερες) μεθόδους καταμερισμού, π.χ. της “ισορροπίας χρηστών” και των στοχαστικών μεθόδων.

#### **5.7.4. Καταμερισμός όλα-ή-τίποτα με περιορισμό χωρητικότητας**

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι όσο αυξάνει ο κυκλοφοριακός φόρτος σε ένα οδικό τμήμα, μειώνεται η ταχύτητα κίνησης. Η ταχύτητα τείνει να μειώνεται στην αρχή με αργό ρυθμό, ενώ όσο αυξάνονται οι ουρές στο δίκτυο, η μέση ταχύτητα στα οδικά τμήματα μειώνεται περισσότερο, ως το σημείο που οι ουρές δημιουργούν καταστάσεις εμπλοκής, όπου δηλαδή παρατηρούνται πολύ μικρές ροές σε κάποια οδικά τμήματα.

Η βάση για τον υπολογισμό των νέων χρόνων διαδρομής, είναι τις περισσότερες φορές, κάποια καθορισμένη συνάρτηση των χρόνων διαδρομής, που συνήθως προτυποποιούνται στις σχετικές κυκλοφοριακές μελέτες ως θετικές, μη-γραμμικές και συνεχώς αύξουσες συναρτήσεις της κυκλοφοριακής ροής. Οι βασικές παράμετροι, που συσχετίζουν τον χρόνο διαδρομής  $t_a$  σε ένα οδικό τμήμα  $a$  με την ροή  $f_a$  στο οδικό τμήμα αυτό, είναι ο χρόνος ελεύθερης ροής  $t_a^0$ , που αποτελεί μέτρο του χρόνου διαδρομής σε συνθήκες ελάχιστης (ελεύθερης) ροής, και η πραγματική κυκλοφοριακή ικανότητα  $c_a$ , που αποτελεί μέτρο της



ροής πέραν της οποίας ο χρόνος διαδρομής θα αυξηθεί έντονα, αν η ροή αυξηθεί περαιτέρω. Παρόλο που οι συναρτήσεις αυτές αναπτύχθηκαν για χρήση σε ελεύθερες λεωφόρους, χρησιμοποιούνται ευρέως σε αστικά οδικά δίκτυα. Ο Πίνακας 15 παρουσιάζει τις συναρτήσεις απόδοσης οδικών τμημάτων, που αναπτύχθηκαν κατά την δεκαετία του 1960 και 1970.

Πίνακας 15: Συναρτήσεις καθυστέρησης

Συνάρτηση χρόνου διαδρομής	Συγγραφέας/Ερευνητής
$t_a^0 e^{(f_a/c_a-1)}$	(Smock, 1963)
$t_a^0 2^{(f_a/c_a-1)}$	(Schneider, 1963)
$t_a^0 (1 + 0,15((f_a/c_a)^{m_a}))$	(U.S. Bureau of Public Roads, 1964)
$t_a^0 + \log(c_a) - \log(c_a - f_a)$	(Mosher, 1963)
$\beta_a - c_a(t_a^0 - \beta_a)/(f_a - c_a)$	(Mosher, 1963)
$t_a^0 \log(r_v - 1)$	(Murchland, 1969)
$t_a^0 (2)^{v/c}$	(Rathnau, 1974)

Η διαδικασία καταμερισμού με τη μέθοδο αυτή είναι μια διαδικασία διαδοχικών φορτίσεων. Γίνεται αρχικά ένας πρώτος καταμερισμός με τμήμα του μητρώου Π-Π και αρχικούς χρόνους διαδρομής. Με βάση τους κυκλοφοριακούς φόρτους που προκύπτουν, υπολογίζονται νέοι χρόνοι διαδρομής και νέες αλληλουχίες/δέντρα διαδρομών ελάχιστου κόστους. Έπειτα επαναλαμβάνεται ο καταμερισμός με ένα νέο τμήμα του μητρώου Π-Π, και προκύπτουν νέοι κυκλοφοριακοί φόρτοι, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου καταμεριστούν όλες οι μετακινήσεις του μητρώου Π-Π, χωρίς υπέρβαση της κυκλοφοριακής ικανότητας πουθενά.

Στην πράξη έχει αποδειχθεί ότι η ακρίβεια της μεθόδου και τα αποτελέσματά της, εξαρτώνται από το πώς επιλέγεται το τμήμα εκείνο του μητρώου Π-Π το οποίο καταμερίζεται κάθε φορά.

### 5.7.5. Στοχαστικές μέθοδοι

Οι στοχαστικές μέθοδοι καταμερισμού των μετακινήσεων δίνουν έμφαση στη μεταβλητότητα των αντιλήψεων των μετακινούμενων, σχετικά με το κόστος που επιδιώκουν να ελαχιστοποιήσουν (απόσταση, χρόνος ταξιδιού, γενικευμένο κόστος). Γίνεται δηλαδή η βασική υπόθεση ότι οι μετακινούμενοι, προτιμούν μεν τις διαδρομές με το ελάχιστο κόστος, αλλά δεν έχουν σαφή γνώση ή δεν κάνουν την ίδια εκτίμηση του κόστους αυτού και έτσι θα μπορούσαν να ακολουθήσουν πολλές διαδρομές για το ίδιο ζεύγος Π-Π. Για το λόγο αυτό, οι στοχαστικές μέθοδοι εξετάζουν και τις 'δεύτερες' καλύτερες διαδρομές (από άποψη κόστους) και αυτό αυξάνει τη συνθετότητα τους, καθώς ο αριθμός των εναλλακτικών

δεύτερων καλύτερων διαδρομών μεταξύ κάθε ζεύγους Π-Π μπορεί να είναι εξαιρετικά μεγάλος. Διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί για την ενσωμάτωση των παραπάνω πτυχών, αλλά μόνο δύο έχουν σχετικά ευρεία αποδοχή: οι μέθοδοι που βασίζονται στην προσομοίωση (simulation-based) και αυτές που βασίζονται στην αναλογία (proportion-based). Οι μεν πρώτες χρησιμοποιούν ιδέες από τη στοχαστική προσομοίωση (Monte Carlo<sup>15</sup>) για να εισάγουν την έννοια της μεταβλητότητας του αντιληπτού κόστους, ενώ οι δεύτερες, κατανέμουν κυκλοφοριακούς φόρτους σε εναλλακτικές διαδρομές, σύμφωνα με αναλογίες που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας συναρτήσεις τύπου logit.

#### **5.7.5.1. Μέθοδοι προσομοίωσης (simulation-based)**

Πέραν της υπόθεσης των μεθόδων προσομοίωσης, όπως όλων των στοχαστικών μεθόδων, ότι οι μετακινούμενοι επιλέγουν τις διαδρομές με το ελάχιστο κόστος, γίνεται επίσης η υπόθεση ότι το κόστος κάθε οδικού τμήματος, όπως το αντιλαμβάνεται κάθε μετακινούμενος, ακολουθεί μια κανονική στατιστική κατανομή, της οποίας η μέση τιμή είναι το κόστος του οδικού τμήματος που μετρείται κάτω από τυπικές κυκλοφοριακές συνθήκες, και ότι για κάθε οδικό τμήμα η κατανομή αυτή είναι ανεξάρτητη από εκείνες των άλλων τμημάτων. Διάφορες μέθοδοι χρησιμοποιούν προσομοίωση Monte Carlo για να αναπαραστήσουν τη μεταβλητότητα του αντιληπτού κόστους, αλλά αυτή του Burrel είναι η ευρύτερα γνωστή (Burrel, 1968). Οι αδυναμίες των μεθόδων αυτών όμως, αφορούν ακριβώς την υπόθεση ανεξαρτησίας του αντιληπτού κόστους των οδικών τμημάτων από τους μετακινούμενους. Στην πράξη, οι μετακινούμενοι έχουν προτιμήσεις. Για παράδειγμα να μετακινούνται στον αυτοκινητόδρομο, να αποφεύγουν τους σηματοδοτούμενους κόμβους ή τις χαμηλής ιεράρχησης οδούς. Η υπόθεση ανεξαρτησίας οδηγεί συχνά σε μη-ρεαλιστικές λύσεις όπου ο μετακινούμενος χρησιμοποιεί μικρούς δρόμους που συνδέουν παράλληλες διαδρομές, ενώ και οι επιπτώσεις της συμφόρησης δεν λαμβάνονται υπόψη.

#### **5.7.5.2. Μέθοδοι αναλογίας (proportion-based)**

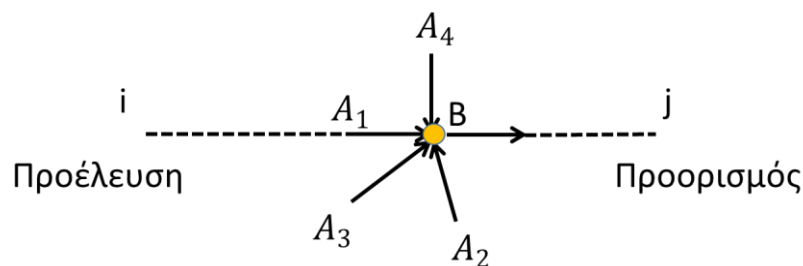
Οι μέθοδοι αναλογίας βασίζονται πρακτικά σε έναν αλγόριθμο καταμερισμού, ο οποίος διαμοιράζει τις μετακινήσεις που φτάνουν σε ένα κόμβο σε όλους τους πιθανούς κόμβους

---

<sup>15</sup> Η μέθοδος Μόντε Κάρλο (αγγλικά: Monte Carlo method), ή πείραμα/προσομοίωση Μόντε Κάρλο, είναι μια στοχαστική διαδικασία όπου με χρήση τυχαίων αριθμών και τη στατιστική προσπαθούμε να λύσουμε ένα πρόβλημα. Σε ένα πείραμα Μόντε Κάρλο χρησιμοποιείται προσομοίωση με μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών.

εξόδου που συνδέονται με αυτόν, σε πλήρη αντιδιαστολή με τη μέθοδο όλα-ή-τίποτα, που κατανέμει όλες τις μετακινήσεις σε μια έξοδο. Επίσης, πολύ συχνά, οι μέθοδοι αυτές αντιστρέφουν το πρόβλημα, έτσι ώστε ο καταμερισμός των μετακινήσεων σε ένα κόμβο να βασίζεται στην προέλευση των μετακινήσεων (από πού έρχονται) παρά στον προορισμό τους (πού κατευθύνονται).

Στην Εικόνα 31 υπάρχουν διάφορα πιθανά σημεία εισόδου  $A_1, A_2, A_3, A_4$  για μετακινήσεις από το  $i$  στο  $j$ .



Εικόνα 31: Ένας κόμβος (B) και οδικά τμήματα που τον τροφοδοτούν με μετακινήσεις

Οι παράγοντες διαίρεσης  $f_i$  ορίζονται από:

$$f_i = 0 \quad \text{αν } d_{A_i} \geq d_B$$

$$0 < f_i \leq 1 \quad \text{αν } d_{A_i} < d_B$$

όπου  $d_{A_i}$  είναι το ελάχιστο κόστος μετακίνησης από το σημείο προέλευσης  $i$  στον κόμβο  $A_i$ . Η πρώτη συνθήκη απαιτεί ο παράγοντας διαίρεσης  $f_i$  να είναι ίσος με 0 αν ένας κόμβος εισόδου  $A_i$  είναι μακρύτερα ή απαιτεί μεγαλύτερο κόστος προσέγγισης από τον κόμβο προέλευσης από ότι από τον κόμβο B, εξασφαλίζοντας ότι οι μετακινήσεις καταμερίζονται σε λογικές διαδρομές, δηλαδή σε διαδρομές που τις απομακρύνουν από τον κόμβο προέλευσης. Οι μετακινήσεις  $T_B$  που περνούν από τον κόμβο B, κατανέμονται σύμφωνα με:

$$F(A_i, B) = T_B f_i / \sum_i f_i \quad \text{Εξίσωση 5.21}$$

Ο καταμερισμός των μετακινήσεων σύμφωνα με τις μεθόδους αναλογίας γίνεται με εφαρμογή της μεθόδου όλα-ή-τίποτα. Οι διάφορες μέθοδοι αναλογίας διαφέρουν μεταξύ τους στον τρόπο που ορίζουν τη συνάρτηση διαίρεσης  $f_i$ . Η γνωστότερη μέθοδος είναι αυτή του Dial, σύμφωνα με τον οποίο (Dial, 1971):

$$f_i = \exp(-\Omega \delta d_i) \quad \text{Εξίσωση 5.22}$$

όπου  $\delta d_i$  είναι το επιπρόσθετο κόστος, λόγω μετακίνησης από τον κόμβο προέλευσης στον κόμβο B μέσω του κόμβου  $A_i$ , αντί μέσω της διαδρομής ελάχιστου κόστους.

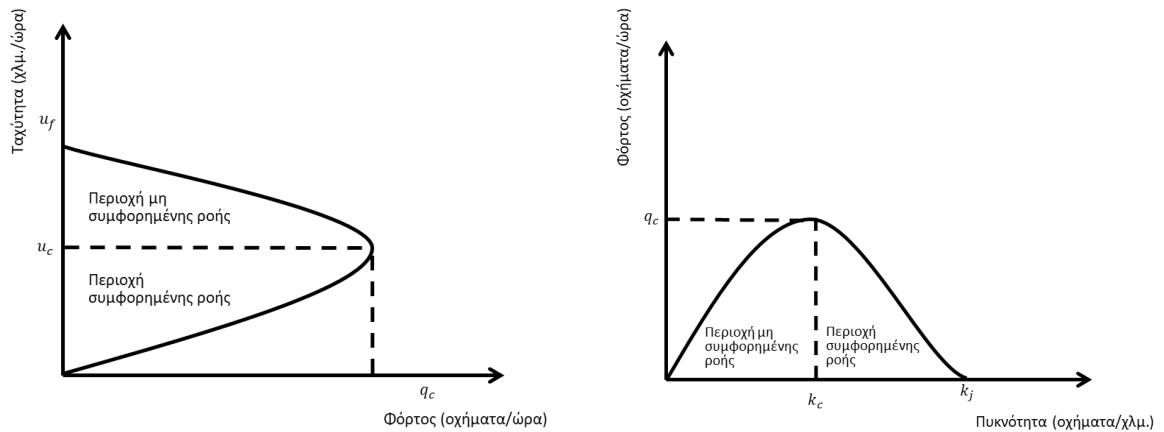
Ενώ οι μέθοδοι αυτές μέσω της έννοιας των λογικών διαδρομών απομακρύνουν τον κίνδυνο επιλογής εναλλακτικών διαδρομών που θα ήταν παράλογες για το πραγματικό δίκτυο, όπως επίσης και κυκλικών διαδρομών (loops), είναι ιδιαίτερα σύνθετες σε ό,τι αφορά τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων προς μια τελική λύση εξισορρόπησης των κυκλοφοριακών φόρτων.

### 5.7.6. Καταμερισμός μετακινήσεων σε συμφορημένα δίκτυα

Πριν αναλυθεί ο καταμερισμός των μετακινήσεων σε δίκτυα που βρίσκονται υπό συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης, οριοθετείται εδώ η έννοια της συμφόρησης σύμφωνα με τις θεμελιώδεις σχέσεις των μεγεθών της κυκλοφορίας που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 0. Λαμβάνοντας υπόψη τους ορισμούς των μεγεθών του κυκλοφοριακού φόρτου, της μέσης χωρικής ταχύτητας και της πυκνότητας, που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 3.3, μπορούν να παρατηρηθούν τα εξής:

- Όταν δεν διέρχονται οχήματα από ένα οδικό τμήμα μέσα σε ένα εξεταζόμενο χρονικό διάστημα, δεν υπάρχει κυκλοφορία. Κατά συνέπεια, όταν ισχύει  $q=0$  και  $k=0$ , η μέση χωρική ταχύτητα ισούται με την ταχύτητα ελεύθερης ροής  $u_f$ , δηλαδή  $\bar{u}_s = u_f$ . Όσο αυξάνεται ο κυκλοφοριακός φόρτος  $q$ , μειώνεται η χωρική ταχύτητα  $\bar{u}_s$ , και αντίστοιχα, όσο αυξάνεται η πυκνότητα  $k$ , τόσο αυξάνεται και ο κυκλοφοριακός φόρτος  $q$ , έως την οριακή συνθήκη  $k=k_c$  και  $q=q_c$ .
- Με την αύξηση του αριθμού των οχημάτων, που διέρχονται από το οδικό τμήμα, και κατ' επέκταση του κυκλοφοριακού φόρτου, οι συνθήκες κυκλοφορίας χειροτερεύουν και σε κάποιο χρονικό σημείο επέρχεται κυκλοφοριακή συμφόρηση. Σε συνθήκες συμφόρησης, όσο ο αριθμός των οχημάτων που μπορεί να διέλθει από τη διατομή μειώνεται, τόσο μειώνεται και η ελευθερία κίνησης των οχημάτων. Κατά συνέπεια, παρατηρείται μείωση του φόρτου  $q$  και της χωρικής ταχύτητας  $\bar{u}_s$ . Όταν το υπό εξέταση οδικό τμήμα έχει κορεστεί, όταν δηλαδή  $k=k_j$ , τα οχήματα δεν μπορούν να κινηθούν. Σε αυτή την περίπτωση, ισχύει  $q=0$  και  $\bar{u}_s=0$ .

Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν στα διαγράμματα μέσης χωρικής ταχύτητας και κυκλοφοριακού φόρτου (Εικόνα 32 – αριστερά), και κυκλοφοριακού φόρτου και πυκνότητας (Εικόνα 32 – δεξιά), δύο περιοχές: αυτή της συμφορημένης κυκλοφοριακής ροής και αυτή της μη συμφορημένης κυκλοφοριακής ροής.



**Εικόνα 32: Περιοχές συμφορημένης και μη συμφορημένης κυκλοφοριακής ροής**

Η χρήση της έννοιας της κυκλοφοριακής συμφόρησης στις επόμενες Ενότητες, οριοθετείται από τις παραπάνω παρατηρήσεις, και αφορά στις περιοχές που καταδεικνύονται ως περιοχές συμφορημένης κυκλοφοριακής ροής στην Εικόνα 32, σε επίπεδο δικτύου.

#### 5.7.6.1. Η ισορροπία Wardrop

Αν αγνοηθούν οι στοχαστικές επιδράσεις που περιγράφηκαν στις προηγούμενες Ενότητες και ληφθεί υπόψη μόνο η κυκλοφοριακή ικανότητα των οδικών τμημάτων (και ο περιορισμός της όσο αυξάνονται οι κυκλοφοριακοί φόρτοι που καταμερίζονται εκεί) ως η καθοριστική παράμετρος εξάπλωσης των μετακινήσεων σε ένα δίκτυο, τότε θα πρέπει να εξεταστεί ένα διαφορετικό σύνολο μεθόδων για τον καταμερισμό των μετακινήσεων. Οι μέθοδοι αυτές προσπαθούν επί της ουσίας να προσεγγίσουν τις συνθήκες ισορροπίας με διαφορετικούς βαθμούς επιτυχίας. Όπως διατυπώθηκε επίσημα από τον Wardrop (Wardrop, 1952):

*Υπό συνθήκες ισορροπίας σε συμφορημένα δίκτυα, η κυκλοφορία οργανώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε κανένας μετακινούμενος να μην μπορεί να μειώσει το κόστος της διαδρομής του αν αλλάξει διαδρομή.*

Εάν όλοι οι μετακινούμενοι αντιλαμβάνονται το κόστος με τον ίδιο τρόπο (χωρίς στοχαστικές επιδράσεις, τότε:

Υπό συνθήκες ισορροπίας σε συμφορημένα δίκτυα, η κυκλοφορία οργανώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε όλες οι χρησιμοποιούμενες διαδρομές μεταξύ ενός ζεύγους Π-Π να έχουν ίσο και ελάχιστο κόστος, ενώ όλες οι αχρησιμοποίητες διαδρομές να έχουν ίσο ή μεγαλύτερο κόστος.

Οι παραπάνω διατυπώσεις αναφέρονται ως η πρώτη συνθήκη του Wardrop, ή η ισορροπία του Wardrop, ή ισορροπία χρηστών.

Ο δείκτης  $\delta$  όπως διατυπώνεται παρακάτω, χρησιμοποιείται για να μετρήσει πόσο εγγύτερα βρίσκεται μια λύση (υπό την έννοια του αποτελέσματος της διαδικασίας του καταμερισμού) στην ισορροπία του Wardrop:

$$\delta = \frac{\sum_{ijr} T_{ijr} (C_{ijr} - C_{ij}^*)}{\sum_{ij} T_{ij} C_{ij}^*} \quad \text{Εξίσωση 5.23}$$

όπου  $C_{ijr} - C_{ij}^*$  είναι η υπέρβαση κόστους μιας μετακίνησης σε μια διαδρομή, σχετικά με το ελάχιστο κόστος της μετακίνησης για το ζεύγος  $(i, j)$ . Το κόστος υπολογίζεται μετά την τελευταία επανάληψη κάθε αλγορίθμου καταμερισμού και αφού έχουν αποδοθεί οι ολικοί κυκλοφοριακοί φόρτοι στα οδικά τμήματα.

Ο Wardrop πρότεινε επίσης έναν εναλλακτικό τρόπο καταμερισμού της κυκλοφορίας σε δίκτυο, και αυτός συνήθως αναφέρεται ως η δεύτερη συνθήκη του, η οποία ονομάζεται και βέλτιστη ισορροπία συστήματος (system optimum) ή και κοινωνική ισορροπία (social equilibrium):

Υπό συνθήκες κοινωνικής ισορροπίας σε συμφορημένα δίκτυα, η κυκλοφορία θα πρέπει να οργανώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται το μέσο (ή ολικό) κόστος μετακίνησης.

Ως συνθήκες κοινωνικής ισορροπίας, ο Wardrop εννοεί ότι όλοι οι χρήστες ενός δικτύου Μεταφορών, συμπεριφέρονται συνεργατικά αναφορικά με την επιλογή των διαδρομών τους, έτσι ώστε να διασφαλίσουν την πιο αποτελεσματική (βέλτιστη) χρήση ολόκληρου του συστήματος. Πρόκειται προφανώς περισσότερο για μια συνθήκη που θα μπορούσε να επηρεάσει τον τρόπο σχεδιασμού και διαχείρισης των κυκλοφοριακών δικτύων, σε σχέση με την πρώτη συνθήκη του, που προσπαθεί να περιγράψει τη συμπεριφορά μεμονωμένων μετακινούμενων, που προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν το κόστος μετακίνησης τους.

#### 5.7.6.2. Μέθοδος σταδιακού καταμερισμού (incremental assignment)

Στην περίπτωση της μεθόδου του σταδιακού καταμερισμού, ο πίνακας των συνολικών μετακινήσεων  $T$  διαρείται σε επιμέρους πίνακες με την επιβολή κάποιων παραγόντων αναλογίας  $p_n$ , ώστε  $\sum_n p_n = 1$ . Οι επιμέρους πίνακες στη συνέχεια φορτίζονται στο δίκτυο σταδιακά, σε συνεχείς διαδρομές το κόστος των οποίων διαμορφώνεται βάσει των προηγούμενων φορτίσεων. Τυπικές τιμές των παραγόντων αναλογίας είναι 0.4, 0.3, 0.2 και 0.1.

Η μέθοδος αυτή δεν συγκλίνει ικανοποιητικά στην ισορροπία του Wardrop και ο βασικότερος λόγος είναι ότι αφού ένα οδικό τμήμα έχει φορτιστεί (με κάποιο κυκλοφοριακό φόρτο), δεν μπορεί να αποφορτιστεί και να αποδοθεί ο κυκλοφοριακός φόρτος του σε άλλο οδικό τμήμα. Έτσι, αν κατά τη διάρκεια μιας από τις πρώτες επαναλήψεις της μεθόδου, ένας μεγάλος όγκος φόρτου καταμεριστεί σε οδικά τμήματα σύμφωνα με την πρώτη συνθήκη του Wardrop (επειδή π.χ. τα οδικά αυτά τμήματα έχουν μικρό χρόνο διέλευσης, αλλά έχουν και μικρή κυκλοφοριακή ικανότητα), τότε η μέθοδος δεν συγκλίνει στη σωστή λύση. Παρόλα αυτά, είναι μια μέθοδος εύχρηστη με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

#### 5.7.6.3. Μέθοδος καταμερισμού συνεχόμενων μέσων (successive averages)

Οι επαναληπτικοί αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν, τουλάχιστον εν μέρει, για να ξεπεραστεί το πρόβλημα του καταμερισμού της υπερβολικής κυκλοφορίας σε οδικά τμήματα χαμηλής κυκλοφοριακής ικανότητας. Σε έναν επαναληπτικό αλγόριθμο, η 'τρέχουσα' κυκλοφοριακή ροή σε ένα οδικό τμήμα υπολογίζεται, ως ένας γραμμικός συνδυασμός της τρέχουσας κυκλοφοριακής ροής στην προηγούμενη επανάληψη και μιας 'βοηθητικής' ροής που προκύπτει από έναν καταμερισμό όλα-ή-τίποτα στην παρούσα επανάληψη.

#### 5.7.7. Εύρεση ισορροπίας

Το στατικό πρόβλημα καταμερισμού των ροών μετακινήσεων σε δίκτυο μπορεί να αποδοθεί ως ένα πρόβλημα εύρεσης της κατάστασης ισορροπίας δεδομένου δικτύου, με γνωστό μητρώο ζήτησης και δεδομένων των νόμων που διέπουν το φαινόμενο της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Σύμφωνα με την πρώτη συνθήκη του Wardrop, η ισορροπία αυτή επιτυγχάνεται, όταν κανένας χρήστης του δικτύου δεν μπορεί μονομερώς να μειώσει το κόστος μετακίνησής του, επιλέγοντας κάποια άλλη διαδρομή. Για την εύρεση της ισορροπίας αυτής χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι και αλγόριθμοι καταμερισμού των μετακινήσεων.

### 5.7.7.1. Μαθηματικός προγραμματισμός

Παρόλο που ο Wardrop δημοσίευσε τις συνθήκες του το 1952, δεν ήταν παρά 4 χρόνια αργότερα (1956) όταν οι Beckmann, McGuire και Winsten, χρησιμοποιώντας αρχές της μη-γραμμικής θεωρίας βελτιστοποίησης, απέδειξαν πως οι δυο συνθήκες του Wardrop αντιστοιχούν σε κυρτά, μη-γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης με γραμμικούς περιορισμούς. Σύμφωνα με αυτούς, το πρόβλημα της ισορροπίας διατυπώνεται ως εξής (Beckmann, et al., 1956):

$$\text{Min} \sum_a \int_0^{q_a} c(w) dw \quad \text{Εξίσωση 5.24}$$

με τους περιορισμούς:

$$\sum_k f_k^{rs} = q^{rs} \quad \text{Εξίσωση 5.25}$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \text{Εξίσωση 5.26}$$

όπου  $f_k^{rs}$  είναι ο φόρτος στη διαδρομή  $k$  μεταξύ προέλευσης  $r$  και προορισμού  $s$ ,  $q_a$  ο φόρτος του συνδέσμου  $a$  και  $c_a$  το αντίστοιχο κόστος του.

Η επίλυση του παραπάνω προβλήματος δίνει τους φόρτους ισορροπίας:

$$f_k^{rs} (g_k^{rs} - g^*) = 0, \quad g_k^{rs} - g^* \geq 0 \quad \text{Εξίσωση 5.27}$$

όπου  $g_k^{rs}$  είναι το κόστος διαδρομής  $k$  μεταξύ προέλευσης  $r$  και προορισμού  $s$ , και  $g^*$  το κόστος ισορροπίας του χρήστη στη διαδρομή μεταξύ προέλευσης  $r$  και προορισμού  $s$ .

Ο υπολογισμός ακολουθεί τα εξής βήματα: η κυκλοφορία καταμερίζεται στο δίκτυο με βάση τις διαδρομές ελαχίστου κόστους, οι χρόνοι διαδρομών υπολογίζονται εκ νέου λαμβάνοντας υπόψη τις μειώσεις ταχύτητας λόγω της αύξησης των φόρτων (φόρτισης του δικτύου) και εν συνεχεία η κυκλοφορία επανα-καταμερίζεται με βάση τον ίδιο κανόνα. Με τον τρόπο αυτό όμως, η διαδικασία ανακυκλώνεται και συνήθως δε συγκλίνει. Για το λόγο αυτό, αντί αυτής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η λύση της σταδιακής φόρτισης (βλέπε ενότητα 5.6.6.2), που και αυτή είναι πιθανό να δώσει αρχικές φορτίσεις που υπερβαίνουν τις βέλτιστες.



Μια ιδανική λύση στο παραπάνω πρόβλημα είναι να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος Frank-Wolfe. Όταν ο αλγόριθμος αυτός εφαρμόζεται στα μοντέλα καταμερισμού της κυκλοφορίας των Beckmann et al., προσπαθεί να βρει λύσεις μεταξύ καταμερισμού «όλα ή τίποτα», βάσει χρόνων διαδρομής της παρούσας ροής, και βάσει της ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης μεταξύ του διανύσματος της παρούσας ροής και της λύσης «όλα ή τίποτα» (Frank & Wolfe, 1956). Ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί τον πιο συνηθισμένο αλγόριθμο επίλυσης στα σημερινά πακέτα λογισμικού για τον συγκοινωνιακό σχεδιασμό.

### 5.7.7.2. Στοχαστική ισορροπία χρηστών

Η έννοια της «ισορροπίας χρηστών» σχετίζεται με την πλήρη πληροφόρηση των χρηστών σχετικά με το κόστος όλων των διαδρομών καθώς επίσης και με την ομοιόμορφη και ορθολογική συμπεριφορά τους κατά την διαδικασία λήψης αποφάσεων. Για τον λόγο αυτό, το μοντέλο “ισορροπίας χρηστών” είναι γνωστό ως ντετερμινιστικό μοντέλο καταμερισμού της κυκλοφορίας.

Στην πραγματικότητα όμως, ο αντιληπτός χρόνος διαδρομής από τους μετακινούμενους μεταβάλλεται, και οι επιλογές των διαδρομών γίνονται βάσει του αντιληπτού χρόνου διαδρομής και όχι του πραγματικού. Για τον λόγο αυτό, οι διαδρομές που τελικά επιλέγονται δεν είναι ούτε οι συντομότερες ούτε και έχουν τον ίδιο πραγματικό χρόνο. Για να συμπεριληφθούν αυτές οι μεταβολές στην αντίληψη των μετακινούμενων, σχετικά με το κόστος των διαδρομών σε ένα μη-ντετερμινιστικό, δηλαδή στοχαστικό μοντέλο, είναι απαραίτητο να εισαχθεί ένας τυχαίος συντελεστής στην συνάρτηση κόστους διαδρομής.

Έστω  $T_a(f)$  ο αντιληπτός χρόνος διαδρομής σε ένα οδικό τμήμα  $a \in A$  για έναν τυχαίο χρήστη και  $C_{pqr}$  ο αντιληπτός χρόνος διαδρομής που σχετίζεται με κάθε διαδρομή  $r \in R_{pq}$  και έστω ότι αυτός μοιράζεται σε όλους τους οδηγούς. Θεωρώντας πως ισχύει η αρχή της αθροιστικότητας για τους χρόνους διαδρομής, ισχύει

$$C_{pqr}(h) = \sum_{a \in A} \delta_{pqra} T_a(f) \quad \text{Εξίσωση 5.28}$$

Η συνάρτηση  $C_{pqr}$  αντιστοιχεί στην πιθανότητα ένας τυχαία επιλεγμένος μετακινούμενος να εκτελέσει την μετακίνησή του μέσω της διαδρομής αυτής.

Έστω  $P_{pqr} = P_{pqr}(c)$  η πιθανότητα να γίνει η διαδρομή  $r \in R_{pq}$  αντιληπτή ως η συντομότερη, δεδομένων των πραγματικών χρόνων διαδρομής  $c$ , δηλαδή

$$P_{pqr}(c) \stackrel{\text{def}}{=} \Pr(C_{pqr} \leq C_{pql}, \forall l \neq r, l \in R_{pq} | c) \quad \text{Εξίσωση 5.29}$$

Η τυχαία μεταβλητή  $C_{pqr}$  υποτίθεται πως προκύπτει ως το άθροισμα του πραγματικού χρόνου διαδρομής  $c_{pqr}$  και ενός τυχαίου σφάλματος  $\xi_{pqr}$ , που μπορεί να μεταβάλλεται από μετακινούμενο σε μετακινούμενο, με μέση τιμή  $E(\xi_{pqr}) = 0$ . Ισχύει:

$$E(C_{pqr}) = E(c_{pqr} + \xi_{pqr}) = c_{pqr} \quad \text{Εξίσωση 5.30}$$

έτσι ώστε κατά μέσον όρο οι αντιληπτοί χρόνοι διαδρομής να είναι ίσοι με τους πραγματικούς.

Οι κατανομές των ροών σε ένα μοντέλο στοχαστικού καταμερισμού της κυκλοφορίας εξαρτώνται από τις στοχαστικές μεταβλητές  $\xi$ . Οι κατανομές ροών που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι τα μοντέλα logit και probit, που αντιστοιχούν στην επιλογή κατανομών Weibull-Gumbel και κατανομών Gauss-Laplace αντίστοιχα.

Η φυσική επέκταση της συνθήκης του Wardrop, για την "ισορροπία χρηστών" για την μη-ντετερμινιστική περίπτωση περιλαμβάνει τον ορισμό μιας κατάστασης στοχαστικής ισορροπίας μετακινούμενων, στην οποία κανένας μετακινούμενος δεν πιστεύει πως μπορεί να βελτιώσει τη διάρκεια της μετακίνησής του αλλάζοντας διαδρομή (Daganzo & Sheffi, 1977). Δηλαδή, οι αντιληπτοί χρόνοι διαδρομών είναι ίσοι σε όλες τις διαδρομές που χρησιμοποιούνται για κάθε ζεύγος προέλευσης-προορισμού.

Οι συνθήκες στοχαστικής ισορροπίας χρηστών χαρακτηρίζονται από τις εξισώσεις:

$$d_{pq} P_{pqr}(c) = h_{pqr}, \forall r \in R_{pq}, \forall (p, q) \in C \quad \text{Εξίσωση 5.31}$$

Επίσης, πρέπει να ισχύουν οι περιορισμοί ροής στο δίκτυο

$$\sum_{r \in R_{pq}} h_{pqr} = d_{pq}, \forall (p, q) \in C \quad \text{Εξίσωση 5.32}$$

$$h_{pqr} \geq 0, \forall r \in R_{pq}, \forall (p, q) \in C \quad \text{Εξίσωση 5.33}$$

Οι ροές στα οδικά τμήματα και στις διαδρομές είναι τυχαίες μεταβλητές, βάσει της κατανομής του αντιληπτού χρόνου διαδρομής (Daganzo, 1979). Για τον λόγο αυτό οι μεταβλητές  $f$  και  $h$  πρέπει να θεωρούνται ως μέσες τιμές των μεταβλητών αυτών.

*Αλγόριθμοι για το βασικό υπόδειγμα και τις επεκτάσεις*

Το πρόγραμμα για τον καταμερισμό της κυκλοφορίας έχει την μορφή:

$$\min T(f) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{a \in A} \int_0^{f_a} t_a(s) ds \quad \text{Εξίσωση 5.34}$$

βάσει των περιορισμών:

$$\sum_{r \in R_{pq}} h_{pqr} = d_{pq}, \forall (p, q) \in C \quad \text{Εξίσωση 5.35}$$

$$h_{pqr} \geq 0, \forall r \in R_{pq}, \forall (p, q) \in C \quad \text{Εξίσωση 5.36}$$

$$\sum_{(p,q) \in C} \sum_{r \in R_{pq}} \delta_{pqra} h_{pqr} = f_a, \forall a \in A \quad \text{Εξίσωση 5.37}$$

ενώ ισχύουν οι παραδοχές:

Παραδοχή α) το δίκτυο είναι ισχυρά συνδεδεμένο

Παραδοχή β) η ζήτηση  $d_{pq}$  είναι θετική για κάθε  $(p, q) \in C$  (περίπτωση σταθερής ζήτησης)

Παραδοχή γ) η συνάρτηση ζήτησης  $g_{pq}: R_+ \rightarrow R_+$  είναι θετική, συνεχής, έχει άνω φράγμα και είναι φθίνουσα για κάθε  $(p, q) \in C$  (περίπτωση ελαστικής ζήτησης)

Παραδοχή δ) η συνάρτηση χρόνου διαδρομής  $t_a: R_+ \rightarrow R_{++}$  είναι θετική, συνεχής και αύξουσα για κάθε  $a \in A$

Η πρώτη αναφορά σε έναν αλγόριθμο που συγκλίνει σχετικά με την επίλυση του μοντέλου καταμερισμού της κυκλοφορίας με σταθερή ζήτηση, είναι αυτή του Smock (Smock, 1963). Ο αλγόριθμος αυτός, που είναι αντίστοιχος με τις σημερινές μεθόδους των συνεχόμενων μέσων, μπορεί να θεωρηθεί ως μια απλουστευμένη έκδοση της μεθόδου Frank-Wolfe.

### 5.7.8. Δυναμικός καταμερισμός

Ο δυναμικός καταμερισμός της κυκλοφορίας αναφέρεται σε ένα πλήθος προβλημάτων, τα οποία αντιστοιχούν σε διάφορες μεταβλητές απόφασης και σε υποκείμενες υποθέσεις, σχετικά με την συμπεριφορά των μετακινούμενων και του συστήματος Μεταφορών γενικότερα. Ο δυναμικός καταμερισμός της κυκλοφορίας αναφέρεται επίσης σε διάφορες απαιτήσεις σε δεδομένα και στην αναπαράσταση, τόσο του συστήματος μεταφορών, όσο και των συστημάτων ελέγχου της κυκλοφορίας. Το κοινό χαρακτηριστικό των προτύπων του δυναμικού καταμερισμού είναι πως σε αντίθεση με τις υποθέσεις του στατικού

καταμερισμού, εισάγουν την έννοια των χρονικά μεταβαλλόμενων κυκλοφοριακών ροών. Η μεγάλη δυσκολία και περιπλοκότητα των υποδειγμάτων δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας, έχει οδηγήσει στην υιοθέτηση είτε αναλυτικών μοντέλων (analytical models) (δηλαδή μαθηματικών υποδειγμάτων που έχουν λύσεις κλειστού τύπου, λύσεις δηλαδή σε εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις αλλαγές σε ένα σύστημα, και οι οποίες εκφράζονται σαν μαθηματικές αναλυτικές συναρτήσεις), είτε λύσεων βάσει υποδειγμάτων προσομοίωσης, τα οποία χρησιμοποιούνται όταν μια αναλυτική διατύπωση δεν είναι δυνατή – π.χ. όταν το μέγεθος του μοντέλου είναι πολύ μεγάλο ή όταν δεν μπορεί να εξαχθεί ακριβής λύση. Τα υποδείγματα προσομοίωσης παρέχουν αποτελέσματα για μια συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης και πρέπει να εκτελούνται πολλές φορές για να αντισταθμίσουν το αποτέλεσμα των αριθμητικών υπολογισμών.

Τα υποδείγματα μαθηματικού προγραμματισμού για τον δυναμικό καταμερισμό της κυκλοφορίας, διατυπώνουν το πρόβλημα σε διακριτό χρόνο. Οι Merchant και Nemhauser ήταν οι πρώτοι που διατύπωσαν το πρόβλημα του δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας ως ένα μαθηματικό πρόγραμμα. Η διατύπωσή τους περιοριζόταν στην ντετερμινιστική, σταθερής ζήτησης, μονού προορισμού περίπτωση του βέλτιστου συστήματος (Merchant & Nemhauser, 1978).

Ο Carey επαναδιατύπωσε το πρόβλημα των Merchant και Nemhauser ως ένα κυρτό, μη-γραμμικό πρόγραμμα, το οποίο παρείχε βασικά μαθηματικά και αλγοριθμικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την αρχική διατύπωση (Carey, 1987). Οι συγγραφείς πρότειναν επίσης και επεκτάσεις του βασικού μοντέλου, ώστε να υποστηρίζονται πολλαπλοί προορισμοί, οι οποίες όμως παραμένουν προβληματικές, εξαιτίας ζητημάτων μη-κυρτότητας που σχετίζονται με την αρχή FIFO (first-in, first-out). Οι δυσκολίες αυτές φαίνεται πως υπάρχουν σε όλες τις διατυπώσεις μαθηματικού προγραμματισμού για το χρονικά μεταβαλλόμενο πρόβλημα του καταμερισμού της κυκλοφορίας, τόσο για τις περιπτώσεις "ισορροπίας χρηστών" όσο και για τις περιπτώσεις βέλτιστου συστήματος.

Ένα άλλο φαινόμενο που σχετίζεται με την διατύπωση των μοντέλων μαθηματικού προγραμματισμού για βέλτιστο σύστημα, και δημιουργεί προβλήματα σχετικά με τα επίπεδα ρεαλισμού της κυκλοφοριακής ροής, είναι το κράτημα της κυκλοφορίας σε κάποια οδικά τμήματα. Σε ένα οδικό δίκτυο είναι δυνατόν κάποιες κυκλοφοριακές ροές να ευνοηθούν σε σχέση με κάποιες άλλες, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι καθυστερήσεις συνολικά στο δίκτυο. Αν δεν οριστεί κάτι συγκεκριμένο περί του αντιθέτου, η διατύπωση της λύσης για το βέλτιστο σύστημα είναι δυνατόν να περιλαμβάνει περιπτώσεις συγκράτησης της

κυκλοφορίας σε κάποια διαδρομή, ευνοώντας την κυκλοφορία για κάποιες άλλες διαδρομές. Δηλαδή, τα οχήματα είναι δυνατόν να υπόκεινται σε τεχνητές καθυστερήσεις σε κάποια οδικά τμήματα, οι οποίες μπορεί να μην είναι ούτε ρεαλιστικές ούτε καν λογικές. Το φαινόμενο αυτό απαιτεί την εισαγωγή επιπλέον περιορισμών, έτσι ώστε να μην επιτρέπεται η τεχνητή συγκράτηση της κυκλοφορίας (Carey & Subrahmanian, 2000).

Οι Birge και Ho επέκτειναν το πρόβλημα των Merchant και Nemhauser με στοχαστική λογική, χαλαρώνοντας την υπόθεση πως οι μετακινήσεις μεταξύ των προελεύσεων και των προορισμών είναι γνωστές για όλη την χρονική περίοδο που εξετάζεται (Birge & I., 1993). Ανέπτυξαν μια πολυσταδιακή στοχαστική διατύπωση μαθηματικού προγραμματισμού, η οποία είναι μη-γραμμική και μη-κυρτή, όπως και στην ντετερμινιστική περίπτωση (όπου οι μετακινήσεις μεταξύ των προελεύσεων και των προορισμών θεωρούνται γνωστές). Το υπόδειγμα υποθέτει έναν πεπερασμένο αριθμό σεναρίων τυχαίων μεταβλητών, όπου το κάθε σενάριο ορίζεται ως ο πιθανός συνδυασμός προηγούμενων μετακινήσεων μεταξύ προελεύσεων και προορισμών σε κάθε χρονική περίοδο. Η διατύπωσή τους όμως υποθέτει και πως οι αποφάσεις στον τρέχοντα καταμερισμό είναι ανεξάρτητες από τις μελλοντικές μετακινήσεις.

Ο Ziliaskorouλος εισήγαγε μια διατύπωση γραμμικού προγραμματισμού, για το πρόβλημα του δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας στο βέλτιστο σύστημα με έναν προορισμό, η οποία βασίζεται στο μοντέλο μετάδοσης κελιών του Daganzo (βλ. Ενότητα 3.4.2.5) για την διάδοση της κυκλοφορίας (Ziliaskorouλος, 2000) (Daganzo, 1994). Η διατύπωση αυτή δεν στηρίζεται σε συναρτήσεις κόστους, καθώς χρησιμοποιεί το μοντέλο μετάδοσης κελιών που είναι περισσότερο ευαίσθητο σε θέματα ρεαλισμού της κυκλοφοριακής ροής. Αν και δεν αποτελεί ένα επιχειρησιακό μοντέλο για εφαρμογές σε πραγματικά δίκτυα, παρέχει αρκετές χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες των μοντέλων δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας.

Οι εκτενείς ερευνητικές προσπάθειες επίλυσης του προβλήματος δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας βάσει προσεγγίσεων μαθηματικού προγραμματισμού, καταδεικνύουν τις δυσκολίες για πρακτικές εφαρμογές σε μεγάλα δίκτυα. Το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι ο συμβιβασμός που απαιτείται μεταξύ της μαθηματικής ορθότητας και του βαθμού ρεαλισμού της κυκλοφοριακής ροής, συναρτήσει των διαφόρων περιορισμών. Παρόλο το εύρος της υφιστάμενης ερευνητικής δραστηριότητας στους τομείς του μη-κυρτού προγραμματισμού, η εμφάνιση της μη-κυρτότητας στα μοντέλα δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας έχει ως αποτέλεσμα, την απώλεια της αναλυτικής και υπολογιστικής ορθότητας προκειμένου

αυτά να εφαρμοστούν σε πραγματικά δίκτυα μεγάλου μεγέθους. Επιπλέον, οι διατυπώσεις του προβλήματος δυναμικού καταμερισμού της κυκλοφορίας βάσει μαθηματικού προγραμματισμού συναντούν δυσκολίες, οι οποίες σχετίζονται με την χρήση συναρτήσεων κόστους οδικών τμημάτων, με την χρήση συναρτήσεων εξόδου οδικών τμημάτων, με το κράτημα της κυκλοφορίας, με την ύπαρξη εν τέλει αποτελεσματικών επιλύσεων που θα επιτρέψουν εφαρμογές πραγματικού χρόνου σε μεγάλα δίκτυα και με την πλήρη κατανόηση των ιδιοτήτων των λύσεων (Μητσάκης, 2011).

## 5.8. Συμπεράσματα

Η βάση της προτυποποίησης των συγκοινωνιακών προβλημάτων είναι ένα σύνολο υποθέσεων, όπως για παράδειγμα το γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά των μετακινήσεων είναι σταθερά και προβλέψιμα, και ότι η ζήτηση για μετακινήσεις σχετίζεται άμεσα με την κατανομή και την ένταση των χρήσεων γης. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ένα συγκοινωνιακό υπόδειγμα πρέπει να πληροί κάποια κριτήρια για να είναι χρήσιμο: να είναι ευαίσθητο στις πολιτικές των Μεταφορών, έτσι ώστε τα αποτελέσματα των διαφόρων εναλλακτικών πολιτικών να είναι δυνατόν να εκτιμηθούν ενώ πρέπει και να μπορεί να διασυνδέει τα χαρακτηριστικά του συγκοινωνιακού συστήματος με τις επιλογές των μετακινουμένων. Επίσης, να είναι ευέλικτο, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση διαφορετικών προβλημάτων χωρίς να απαιτείται ευρεία συλλογή νέων δεδομένων και βαθμονόμηση. Πρέπει να είναι εφαρμόσιμο σε διαφορετικές περιοχές χωρίς να απαιτείται ευρεία επανεκτίμηση όλων των παραμέτρων του για κάθε νέα περιοχή ενώ τέλος να είναι αποτελεσματικό, υπό την έννοια της παροχής μέγιστης δυνατής ακρίβειας στην πρόβλεψη για κάθε μονάδα κόστους που καταναλώθηκε για την συλλογή δεδομένων.

Για τα δύο πρώτα στάδια από τα τέσσερα στάδια του Σχεδιασμού των Μεταφορών, αυτά της γένεσης των μετακινήσεων και της κατανομής στο χώρο, μπορεί να υποθέσει κανείς ότι οι καιρικές και κλιματικές συνθήκες έχουν και θα έχουν περιορισμένη επίδραση στις υποχρεωτικού χαρακτήρα μετακινήσεις, καθώς ο καιρός, πλην ακραίων φαινομένων, και το κλίμα δεν μπορεί να αλλάξει (βραχυπρόθεσμα ή μεσοπρόθεσμα) τον τόπο κατοικίας ή εργασίας. Έτσι, είτε υπάρχει έντονη χιονόπτωση ή πολύ χαμηλή ορατότητα, μια ζώνη (θεωρητικά) θα συνεχίσει να παράγει και να έλκει τον ίδιο περίπου αριθμό μετακινήσεων. Ωστόσο, παρά τη υποτιθέμενη περιορισμένη επίδραση, πρέπει να σημειωθεί ότι μια μετακίνηση μπορεί να ακυρωθεί ή να μετατοπιστεί χρονικά λόγω καιρικών και κλιματικών συνθηκών, και άρα η παραγωγή και έλξη των αντίστοιχων ζωνών να επηρεαστεί, έστω για

πεπερασμένη χρονική περίοδο. Για τον καθορισμό αυτής της επίδρασης, η οποία εκτιμάται από τον γράφοντα ως περιορισμένη, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη συμπεριφορικών υποδειγμάτων βάσει μεγάλης κλίμακας έρευνας ερωτηματολογίων σε μετακινούμενους. Όπως φάνηκε στην βιβλιογραφική επισκόπηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο Κεφάλαιο 2, η επίδραση αυτή δεν έχει προσεγγιστεί επαρκώς.

Για τα τελευταία δύο στάδια του Σχεδιασμού των Μεταφορών όμως, αυτά της επιλογής μέσου και του καταμερισμού της κυκλοφορίας στα δίκτυα, είναι εξίσου λογικό να υποθεθεί ότι οι καιρικές και κλιματικές συνθήκες επηρεάζουν το αν ο μετακινούμενος θα επιλέξει το ιδιωτικό του αυτοκίνητο ή τα ΜΜΜ για να μετακινηθεί προς την εργασία του μια καθημερινή με έντονη βροχόπτωση, ή και ποια διαδρομή θα επιλέξει ως οδηγός. Η υπόθεση της επίδρασης αυτής αποκτά προφανώς μεγαλύτερη σημασία όσο αυξάνεται η δριμύτητα ενός φαινομένου. Μπορεί λοιπόν να εξαχθεί με σχετική ασφάλεια το συμπέρασμα, ότι, τα υποδείγματα που χρησιμοποιούνται και για τα δύο αυτά στάδια, πρέπει να επαναπροσδιοριστούν και να παραμετροποιηθεί η επίδραση καιρικών και κλιματικών συνθηκών. Παρόμοιο συμπέρασμα είχε ήδη προκύψει και από την βιβλιογραφική επισκόπηση των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής και των υποδειγμάτων των μεταξύ τους σχέσεων.

## **5.9. Αναφορές και βιβλιογραφία**

### **5.9.1.1. Παραπομπές σε αναφορές**

Beckmann, M., McGuire, C. & Winstein, C., 1956. Studies on the economics of transportation. New Haven, CT: Yale University Press.

Birge, J. & I., H., 1993. Optimal flows in stochastic dynamic networks with congestion. Operations Research, 41(1), pp. 203-216.

Burrel, J., 1968. Multiple route assignment and its application to capacity restraint. In: Beitrage zur Theorie des Verkehrsflusses. Karlsruhe: Strassenbau und Strassenverhkerhrstechnik Heft.

Carey, M., 1987. Optimal Time Varying Flows on Congested Networks. Operations Research , 35(1), pp. 58-69.

Carey, M. & Subrahmanian, E., 2000. An approach to modeling time-varying flows on congested networks. Transportation Research Part B, 34(3), pp. 157-183.

Daganzo, C., 1979. Multinomial probit: the theory and its applications to demand forecasting. New York, NY: Academic Press.

Daganzo, C., 1994. Cell Transmission Model: A Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent with the Hydrodynamic Theory. *Transportation Research Part B*, 28B(4), pp. 269-287.

Daganzo, C. & Sheffi, Y., 1977. On stochastic models of traffic assignment. *Transportation Science*, Volume 11, pp. 253-274.

Dial, R., 1971. A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration. *Transportation Research*, Volume 5, pp. 83-111.

Frank, P. & Wolfe, P., 1956. An algorithm for quadratic programming. *Naval Research Logistics Quarterly*, Volume 3, pp. 95-110.

Fratrar, T., 1954. Vehicular trip distribution by successive approximations. *Traffic Quarterly*, Volume 8, pp. 53-65.

Janson, B., 1991. Dynamic assignment for urban road networks. *Transportation Research Part B*, 25(2-3), pp. 143-161.

Merchant, D. & Nemhauser, G., 1978. A model and an algorithm for the dynamic traffic assignment problems. *Transportation Science*, 12(3), pp. 183-199.

Mosher, W., 1963. A capacity-restraint algorithm for assigning flow to a transport network. *Highway Research Record*, Volume 6, pp. 41-70.

Murchland, R., 1969. Road Network Traffic Distribution in Equilibrium. Oberwolfach, *Proceedings of Mathematical Methods in economic sciences*, Mathematisches Forschungsinstitut.

Rathnau, A., 1974. Capacity Restraint method-assignment programs, s.l.: Script and McGraw-Hill.

Schneider, M., 1963. A direct approach to traffic assignment. *Highway Research Record*, Volume 6, pp. 71-75.

Smock, R., 1963. A comparative description of a capacity-restraint traffic assignment. *Highway Research Record*, Volume 6, pp. 12-40.

U.S. Bureau of Public Roads, 1964. Traffic assignment manual, Washington, D.C.: U.S. Bureau of Public Roads, U.S. Government Printing Office.

Vliet, V., 1977. D'Esopo: a forgotten tree-building algorithm. *Traffic Engineering and Control*, Volume 18, pp. 372-375.

Wardrop, J. G., 1952. Some theoretical aspects of road traffic research. s.l., s.n., pp. 325-378.

Ziliaskopoulos, A., 2000. A linear programming model for the single destination system optimum dynamic traffic assignment problem. *Transportation Science*, 34(1), pp. 37-49.

#### **5.9.1.2. Παραπομπές σε γενική βιβλιογραφία**

Hensher, D. & Button, K. (2000). *Handbook of Transport Modeling*, Pergamon

Sussman, J. (2000). *Introduction to Transportation Systems*, Artech House



Cascetta, E. (1999). Transportation systems engineering: theory and methods. Kluwer Academic Publishers.

Γιαννόπουλος Γ. (2002). Σχεδιασμός των μεταφορών, εκδ. Παρατηρητής

Martin B.V., Memmot F.W., Bone A.J. (1961) Principles and techniques of predicting future demand for urban area transportation, MIT Press, Cambridge, MA.

Shuldiner P.W. (1962) Trip generation at the home, Highway Research Board Bulletin, 347: 40-59

Μητσάκης Ε. (2011) Βέλτιστος Σχεδιασμός Δικτύων Μεταφορών, Διδακτορική Διατριβή ΑΠΘ Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Salter R.J. (1976) Highway traffic analysis and design, 2<sup>nd</sup> ed, Macmillan, London

Domencich T.A., McFadden D. (1975) Urban travel demand: A behavioral analysis, vol. 93 of Contributions to Economic Analysis, North Holland, Amsterdam

Ortuzar, J., Willumsen, L. (2009) Modelling Transport, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England

Willumsen, L.G. (1991) Origin-destination matrix: static estimation. In M. Papageorgiou (ed), Concise Encyclopedia of Traffic & Transportation Systems, Pergamon Press, Oxford

Willumsen, L.G. (2000) Travel networks, In D. Hensher and K.J. Button (eds), Handbook of Transport Modeling, Pergamon, Oxford

Supernak, J. (1979) A behavioural approach to trip generation modelling. Proceedings 7<sup>th</sup> PTRC Summer Annual Meeting, University of Warwick, July 1979, England.

Tardiff, T.J. (1976) A note on goodness-of-fit statistics for probit and logit models. Transportation 5, pp. 377-388

Ταξιλτάρης, Χ. (1996). Σημειώσεις Σχεδιασμού των Μεταφορών. Εισαγωγή στη μεθοδολογία και τη διαδικασία του σχεδιασμού των μεταφορών. Θεσσαλονίκη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Ταξιλτάρης, Χ. (1996). Σημειώσεις Σχεδιασμού των Μεταφορών. Υποδείγματα πρόβλεψης μετακινήσεων και κυκλοφορίας. Θεσσαλονίκη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών.

Moore, E. (1957) The shortest path through a maze. Proceedings International Symposium on the Theory of Switching. Harvard University Press, Cambridge, Mass.

Dijkstra, E.W. (1959) Note on two problems in connection with graphs (spanning tree, shortest path). Numerical Mathematics 1, 269-271

Van Vliet, D. (1977) D'Esopo: a forgotten tree-building algorithm, Traffic Engineering and Control 18 pp 372-375

Pape, U. (1974) Implementation and efficiency of Moore algorithms for the shortest route problem, Mathematical Programming 7, 212-222

Tardiff, T.J. (1979) Specification analysis for quantal choice models. Transportation Science 13, pp. 179-390

- Sobel, K.L. (1980) Travel demand forecasting by using the nested multinomial logit model, *Transportation Research Record* 775, pp. 48-55
- Papageorgiou, M. (ed) (1991) *Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems*, Pergamon Press, Oxford
- Ortuzar, J., Garrido, R. (2001) Methodological developments: workshop report. In H. Mahmassani (ed.), *Changes and Opportunities in Travel Behaviour: Research and Applications*, Pergamon, Oxford
- McFadden, D., Train, K. (2000) Mixed MNL models for discrete response. *Journal of Applied Econometrics* 15, 447-470
- Wootton H.J., Pick G.W. (1967) Travel estimates from census data, *Traffic Engineering and Control*, 9: 142-145, 152
- Pick G.W., Gill J. (1970) New developments in category analysis, in PRTC Symposium, London
- Mayberry, J.P. (1973) Structural requirements for abstract-mode models of passenger transportation. In R.E. Quandt (ed.), *The Demand for Travel: Theory and Measurement*. D.C. Heath and Co., Lexington, Mass.
- Langdon, M. (1984) Methods of determining choice probability in utility maximising multiple alternative models. *Transportation Research* 18B, 209-234
- Daganzo, C. (ed.) (1997) *Fundamentals of Transportation and Traffic*, Elsevier
- Daganzo, C., Bouthelier F., Sheffi, Y. (1977) Multinomial Probit and Qualitative Choice: a computationally efficient algorithm, *Transportation Science* 11, 4, pp. 338-358
- Garling, T., Laitila, K., Westin K. (1998) *Theoretical foundations of travel choice modelling*, Elsevier
- Oppenheim, N. (ed.) (1995) *Urban Travel Demand Modelling*, J. Wiley and Sons

## **6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΩΝ**

### **6.1. Εισαγωγή**

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται μέθοδοι ανάλυσης και αξιολόγησης δικτύων από διάφορους τομείς (ενέργεια, τηλεπικοινωνίες, υγεία κ.α.), σε μια προσπάθεια αναγνώρισης και εύρεσης εκείνων των τεχνικών, που θα μπορούσαν να έχουν εφαρμογή στα δίκτυα των Μεταφορών. Η βιβλιογραφική επισκόπηση που επιχειρείται εδώ θεωρείται απαραίτητη, δεδομένης της ανάγκης διεύρυνσης των τρόπων που αναλύονται σήμερα τα δίκτυα των Μεταφορών υπό ένα αμιγώς κυκλοφοριακό και συγκοινωνιακό πρίσμα, που δεν λαμβάνει υπόψη του τις καιρικές συνθήκες και την αλλαγή του κλίματος. Αναζητούνται δηλαδή εκείνες οι μέθοδοι ανάλυσης δικτύων που, αν εφαρμοστούν σε δίκτυα Μεταφορών, μπορούν να βοηθήσουν τις αρμόδιες αρχές να πάρουν ορθότερες αποφάσεις για την προστασία και μείωση της τρωτότητάς τους έναντι ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών.

Οι επόμενες ενότητες καλύπτουν τις βασικές έννοιες για τα δίκτυα συνολικά, ενώ πραγματοποιείται εισαγωγή σε έννοιες, μεγέθη και μαθηματικές μεθόδους ανάλυσης τους. Οι έννοιες και θεωρίες που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό, χρησιμοποιούνται σε επόμενες ενότητες της διδακτορικής διατριβής σε αναλυτικές και εφαρμοσμένες διατυπώσεις για την:

1. Ανάπτυξη μεθοδολογικής προσέγγισης μείωσης της τρωτότητας των δικτύων Μεταφορών στο Κεφάλαιο 7
2. Εξέυρεση μη δομικών μέτρων προσαρμογής των δικτύων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή στο Κεφαλαίο 8

### **6.2. Θεωρία δικτύων**

Ο πιο απλουστευμένος ορισμός είναι ότι ένα δίκτυο αποτελεί μια μορφή αναπαράστασης ενός συστήματος, με στόχο την απλούστευσή του, και την κατανόηση της λειτουργίας του μέσω της διερεύνησης σχέσεων μεταξύ των συνδεδεμένων στοιχείων του. Ένα δίκτυο από δομικής απόψεως είναι ένα σύνολο σημείων και κόμβων που συνδέονται μεταξύ τους με συνδέσμους (ονομάζονται διαφορετικά ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής), διαμέσου των

οποίων γίνεται μεταφορά διαφόρων υλικών και μη υλικών οντοτήτων από και προς τους κόμβους. Στον Πίνακα 16 συνοψίζονται μερικά παραδείγματα δικτύων.

Πίνακας 16: Παραδείγματα δικτύων

Σύστημα	Κόμβοι	Σύνδεσμοι	Ροή	Συντελεστής τριβής ή παράγοντας δυσκολίας
Μεταφορές	Πόλεις, διασταυρώσεις, σταθμοί, στάσεις	Οδικά τμήματα, αεροδιάδρομοι, γραμμές τραίνων, υδάτινοι οδοί	Οχήματα, σκάφη, επιβάτες, φορτία	Απόσταση, χρόνος, χρήμα
Διαδίκτυο	Server, βάσεις δεδομένων, ηλεκτρονικοί υπολογιστές	Καλώδια, ασύρματες συνδέσεις	Δεδομένα, πληροφορίες	Απόσταση, σύνδεση, χωρητικότητα, χρήμα
Υδραυλική	Αντλιοστάσια, ταμιευτήρες, λίμνες	Αγωγοί (φυσικές και τεχνητές ροές)	Νερό, υγρά και αέρια καύσιμα, υγρά απόβλητα	Χρήμα, όγκος
Ηλεκτρικά κυκλώματα	Πύλες, καταχωρητές, επεξεργαστές	Καλώδια	Ηλεκτρικό φορτίο	Ταχύτητα, δυναμικότητα
Γραμμές παραγωγής	Σταθμοί εργασίας	Ιμάντες, μεταφορές	Πρώτες ύλες, ημικατεργασμένα προϊόντα	Χρόνος, κόστος, χωρητικότητα, δυναμικότητα
Στερεά απόβλητα	Σημεία συλλογής, μονάδες επεξεργασίας, ΧΥΤΑ	Δίκτυα μεταφορών, αγωγοί	Στερεά απόβλητα	Χρήμα, όγκος
Τηλεπικοινωνίες	Άνθρωποι, συσκευές τηλεφώνων, πυλώνες τηλεπικοινωνίας	Καλώδια, ασύρματες συνδέσεις	Ομιλία, εικόνα, δεδομένα	Χρήμα, σύνδεση
Κοινωνικά δίκτυα	Πρόσωπα, οργανώσεις, κοινωνικές συλλογικότητες	Σχέσεις (φιλίας, επιχειρηματικές, πολιτικές)	Πληροφορίες, δεδομένα, αποφάσεις	Χρήμα, σύνδεση, κόστος
Βιολογία	Νευρώνες εγκεφάλου	Δενδρίτες, άξονες	Ηλεκτρικά σήματα, ηλεκτρικοί παλμοί	Ταχύτητα, συχνότητα, νεύρωση

Η επιστημονική κοινότητα, στην προσπάθειά της να μελετήσει τα δίκτυα που υφίστανται στην πραγματική ζωή, ανέπτυξε πλήθος μαθηματικών (υπολογιστικών και στατιστικών) εργαλείων, αποσκοπώντας στην καλύτερη ερμηνεία της συμπεριφοράς των δικτύων, και των ιδιοτήτων των κόμβων τους. Για παράδειγμα, η εύρεση του κόμβου με τις περισσότερες κορυφές (δηλαδή συνδέσεις) έχει ιδιαίτερη σημασία, π.χ. σε ένα σύστημα βιβλιογραφικών αναφορών, γιατί αναδεικνύει τη σημαντικότερη επιστημονική εργασία, ή εκείνη που

Σελίδα 204 από 481

μνημονεύεται περισσότερο από τις άλλες. Αντίστοιχα η εύρεση του μονοπατιού με το μικρότερο κόστος διαδρομής μεταξύ δύο κόμβων, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα εργαλείου με εφαρμογή στον τομέα των Μεταφορών και ειδικότερα, στον καταμερισμό των μετακινήσεων στο δίκτυο (βλ. Ενότητα 5.5). Τα εργαλεία αυτά υπάγονται στη Θεωρία των Δικτύων, που είναι μία επιστημονική περιοχή συνισταμένη διαφόρων επιστημονικών αντικειμένων, όπως τα εφαρμοσμένα μαθηματικά, η επιχειρησιακή έρευνα, η επιστήμη των υπολογιστών, τα κοινωνικά, οικονομικά, πολιτικά υποσυστήματα, οι επιστήμες του μηχανικού, της διοίκησης κ.λπ. Η καταγωγή της θεωρίας αυτής μπορεί να αναζητηθεί στην προσπάθεια του Kirchhoff (1845), καθώς και άλλων ερευνητών οι οποίοι πρώτοι μελέτησαν συστηματικά τα ηλεκτρικά κυκλώματα. Αυτή η εργασία έθεσε τις βάσεις για τη μετέπειτα πορεία και εξέλιξη της θεωρίας των δικτύων, και κατέστησε τα δίκτυα χρήσιμα μαθηματικά αντικείμενα για την απεικόνιση πολλών φυσικών ή και επινοημένων συστημάτων (π.χ. του διαδικτύου, των τηλεπικοινωνιών). Πριν τον Kirchhoff, με θέματα δικτύων είχε αρχικά ασχοληθεί ο Euler με τη μελέτη του για τις «Επτά Γέφυρες του Κένιγκσμπεργκ» το 1736, και την προσπάθειά του να βρει λύση στον γνωστό γρίφο της εποχής που αφορούσε στην ανακάλυψη μιας διαδρομής, που θα επέτρεπε σε έναν περιπατητή να διέλθει από όλες τις γέφυρες της πόλης, χωρίς όμως να περάσει δυο φορές από κάποια ή κάποιες από αυτές.

### 6.3. Η έννοια της κεντρικότητας

Στη θεωρία των Δικτύων εξέχουσα θέση κατέχει η έννοια της κεντρικότητας, η οποία ορίζει τη 'σημαντικότητα' των κορυφών ενός γράφου ή των κόμβων ενός δικτύου. Ο ορισμός της σημαντικότητας των κόμβων, και κατά συνέπεια και της κεντρικότητάς τους, εξαρτάται από το είδος του κάθε φορά εξεταζόμενου δικτύου, και από το προς μελέτη αντικείμενο του ερευνητή. Για παράδειγμα, σε ένα κοινωνικό δίκτυο θεωρούνται σημαντικοί οι κόμβοι που έρχονται σε επικοινωνία με μεγάλο αριθμό άλλων, δηλαδή οι κόμβοι με μεγάλο αριθμό συνδέσεων με άλλους κόμβους (που μπορεί να αντιστοιχεί σε μεγάλο πλήθος σχέσεων φιλίας). Αντίθετα, σε ένα δίκτυο ροής πληροφοριών, ο μεγάλος αριθμός συνδέσεων ενός κόμβου δεν τον καθιστά απαραίτητα σημαντικό, καθώς προέχει για παράδειγμα ο έλεγχος της πληροφορίας που διακινείται μεταξύ των κόμβων. Σε αυτή την περίπτωση, η κεντρικότητα ενός σημαντικού κόμβου, δεν θα καθοριστεί από τον αριθμό συνδέσεων με άλλους κόμβους αλλά, για παράδειγμα, από την συχνή θέση του ως ενδιάμεσου μεταξύ μονοπατιών των ζευγών κόμβων, που ανταλλάσσουν πληροφορίες μέσα στο δίκτυο (Borgatti & Martin, 2006).

Σημειώνεται εδώ, ότι η βιβλιογραφική επισκόπηση που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες αναφορικά με τα κυκλοφοριακά μεγέθη και τις μεταξύ τους σχέσεις, και τον Σχεδιασμό των Μεταφορών, δεν ανέδειξε την ύπαρξη μεθόδων ή εργαλείων που χαρακτηρίζουν τους κόμβους σε ένα δίκτυο Μεταφορών (πέραν των στοιχείων που αφορούν στον έλεγχο ενός κόμβου ή διασταύρωσης, ή των στρεφουσών κινήσεων που ξεκινούν ή καταλήγουν εκεί). Παράλληλα, ο χαρακτηρισμός των συνδέσμων (οδικών τμημάτων) μεταξύ των κόμβων είναι αμιγώς συγκοινωνιακού ενδιαφέροντος, με παροχή πληροφοριών για τα χαρακτηριστικά κυκλοφοριακής ικανότητας, ταχύτητας ελεύθερης ροής, στάθμης εξυπηρέτησης ή για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός τμήματος. Για το λόγο αυτό, στις επόμενες ενότητες επιχειρείται μια συνοπτική επισκόπηση και ανάλυση διαφόρων μέτρων κεντρικότητας δικτύων, και δίνεται η θεωρητική διατύπωσή τους, ενώ παρατίθενται και άλλοι δείκτες χαρακτηρισμού συνδέσμων και κόμβων ενός δικτύου που συναντήθηκαν στη βιβλιογραφία, σε μια προσπάθεια αναγνώρισης εκείνων που θα μπορούσαν να έχουν εφαρμογή στα δίκτυα των Μεταφορών, υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής.

Η επισκόπηση επικεντρώνεται σε αυτό τον τομέα της θεωρίας δικτύων λόγω της 'σημαντικότητας' των κόμβων που συνοδεύει την έννοια της κεντρικότητας και ορίζεται μέσω αυτής. Ακριβώς επειδή, όπως ειπώθηκε παραπάνω, η λέξη 'σημαντικότητα' έχει διάφορες σημασίες, οδηγώντας και σε διαφορετικούς ορισμούς της έννοιας της κεντρικότητας, οι δύο βασικές κατηγορίες ορισμών της σημαντικότητας αφορούν στα εξής (Borgatti, 2005):

- Αφενός, στη σημαντικότητα ενός κόμβου ως δείκτη που περιγράφει το είδος ροής ή τη μεταφορά που γίνεται μέσω του κόμβου. Στην κατηγορία αυτή γίνεται διάκριση των μέτρων κεντρικότητας, ανάλογα με τον τύπο ροής που θεωρούν σημαντικό (π.χ. όγκος κυκλοφοριακού φόρτου που εξυπηρετείται από έναν κόμβο).
- Αφετέρου, στη σημαντικότητα ενός κόμβου ως δείκτη συμμετοχής στη συνεκτικότητα ενός δικτύου. Στην κατηγορία αυτή γίνεται διάκριση των μέτρων κεντρικότητας βάσει του τρόπου μέτρησης της συνοχής του δικτύου (π.χ. αριθμός συντομότερων διαδρομών που περνά από έναν κόμβο).

#### **6.4. Κεντρικότητα βαθμού (degree centrality)**

Για τον προσδιορισμό της κεντρικότητας βαθμού, ο βαθμός ενός κόμβου σε ένα δίκτυο, ισούται με τον αριθμό των γειτονικών του κόμβων, δηλαδή τον αριθμό των κόμβων με τους οποίους συνδέεται. Για την περίπτωση προσανατολισμένων δικτύων (δικτύων δηλαδή που

οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων έχουν κατεύθυνση χωρίς να είναι απαραίτητα αμφίδρομες, όπως είναι τα τόξα σε δίκτυο οδικών Μεταφορών), διαχωρίζεται επίσης ο εσωτερικός και ο εξωτερικός βαθμό κάθε κόμβου. Ως *εσωτερικός βαθμός* (in-degree) ορίζεται το συνολικό πλήθος των τόξων, που καταλήγουν στον κόμβο, σε αντίθεση με τον *εξωτερικό βαθμό* (out-degree) που μετράει τα τόξα που εκκινούν από τον κόμβο, με κατεύθυνση τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου. Σε κάθε περίπτωση μπορεί να εξαχθεί ο *συνολικός βαθμός* ενός κόμβου σε περίπτωση προσανατολισμένου δικτύου, με την πρόσθεση του εσωτερικού και εξωτερικού βαθμού (Freeman, 1979). Η κεντρικότητα βαθμού ενός κόμβου  $i$  σε ένα μη προσανατολισμένο δίκτυο αλλά και οι κεντρικότητες εσωτερικού και εξωτερικού βαθμού σε προσανατολισμένα δίκτυα, δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$k_i = \sum_j^N A_{ij} \quad \text{Εξίσωση 6.1}$$

$$k_i^{in} = \sum_j^N A_{ij} \quad \text{Εξίσωση 6.2}$$

$$k_i^{out} = \sum_j^N A_{ij} \quad \text{Εξίσωση 6.3}$$

όπου  $N$  είναι το πλήθος των κόμβων και  $A_{ij}$  το στοιχείο του πίνακα γειτνίασης στη θέση  $i, j$ .

Σε επίπεδο δικτύου, χρησιμοποιείται η *κανονικοποιημένη κεντρικότητα βαθμού*, που υπολογίζεται με διαίρεση της κεντρικότητας βαθμού με το μέγιστο πιθανό αριθμό συνδέσεων ενός κόμβου.

#### Δυνατότητα χρήσης και σημασία στα δίκτυα Μεταφορών:

Η χρήση του μέτρου αυτού στα δίκτυα Μεταφορών κρίνεται περιορισμένη, καθώς είναι εντελώς ανεξάρτητη από την έννοια της κυκλοφορίας – την βασική δηλαδή παράμετρο σε ένα τέτοιο δίκτυο. Η εφαρμογή του μέτρου σε ένα δίκτυο Μεταφορών, θα μπορούσε να καταδείξει εκείνους τους κόμβους, οι οποίοι, επειδή έχουν πολλές συνδέσεις, αποκτούν

υψηλότερη σημαντικότητα έναντι άλλων. Όμως, αυτή η σημαντικότητα θα ήταν πιθανόν περιορισμένη, γιατί θα ήταν ανεξάρτητη των κυκλοφοριακών φόρτων που θα εξυπηρετούνταν από αυτούς τους κόμβους. Υπό αυτή την έννοια, δεν θα μπορούσε να είναι ένα μέτρο χρήσιμο για λήψη αποφάσεων χωροθέτησης κόμβων ειδικού ρόλου, όπως χώροι βραχείας στάθμευσης οχημάτων έκτακτων αναγκών (πυροσβεστικών, κ.λπ.).

### 6.5. Δύναμη κόμβου (node force)

Για την αντιμετώπιση του περιορισμού της κεντρικότητας βαθμού, που επικεντρώνεται αποκλειστικά στον αριθμό συνδέσεων ενός κόμβου με τους υπόλοιπους κόμβους σε ένα δίκτυο, και για να προκύψει ένα σταθμισμένο δίκτυο (όπου οι σύνδεσμοι μεταξύ κόμβων συνοδεύονται από κάποιο 'βάρος'), προτάθηκε από τους Barrat, Barthelemy, Pastor-Satorras και Vespignani το 2004, η *δύναμη κόμβου*. Σύμφωνα με αυτήν, η κεντρικότητα ενός κόμβου ισούται, με το άθροισμα των βαρών όλων των τόξεων που συνδέονται με τον εξεταζόμενο κόμβο. Το μέτρο αυτό διατυπώνεται ως εξής (Barrat, et al., 2004):

$$s_i = \sum_j^N w_{ij} \quad \text{Εξίσωση 6.4}$$

όπου  $w_{ij}$  το 'βάρος' του συνδέσμου που συνδέει τους κόμβους  $i, j$ .

#### Δυνατότητα χρήσης και σημασία στα δίκτυα Μεταφορών:

Η χρήση του μέτρου αυτού στα δίκτυα Μεταφορών κρίνεται μεν περιορισμένη, αλλά άξια περαιτέρω ανάλυσης. Ο λόγος είναι ότι στη δύναμη κόμβου μπορεί να ληφθεί υπόψη ως 'βάρος' ενός συνδέσμου, ο συνολικός κυκλοφοριακός φόρτος που εξυπηρετείται από αυτόν (ή ο λόγος του κυκλοφοριακού φόρτου προς την κυκλοφοριακή ικανότητα). Η σημαντικότητα λοιπόν ενός κόμβου μπορεί να προκύψει, από το σύνολο των κυκλοφοριακών φόρτων που ξεκινούν, καταλήγουν ή διέρχονται μέσω αυτού. Επομένως, όσο μεγαλύτερος ο συνολικός φόρτος, τόσο μεγαλύτερη η δύναμη βαθμού και άρα η σημαντικότητα του κόμβου. Παρόλα αυτά, το μέτρο αυτό λαμβάνει υπόψη του μόνο τα βάρη, αδιαφορώντας για το πλήθος των γειτόνων του (τον αριθμό δηλαδή των κόμβων με τους οποίους συνδέεται). Επομένως, μπορεί ένας κόμβος στην άκρη ενός δικτύου μεταφορών, στον οποίο καταλήγει κυκλοφοριακός φόρτος  $q$  από ένα μοναδικό οδικό τμήμα, να υπολογίζεται ως εξίσου σημαντικός με ένα κεντρικό κόμβο που εξυπηρετεί μεν κυκλοφοριακό φόρτο  $q$ , ο οποίος όμως προκύπτει από ένα άθροισμα συνδέσεων  $x$ .



## 6.6. Συνδυασμός κεντρικότητας βαθμού και δύναμης κόμβου

Σε μια προσπάθεια αντιμετώπισης των επιμέρους περιορισμών των μέτρων κεντρικότητας βαθμού και δύναμης κόμβου, οι Orsahl, Agneessens και Skvoretz συνδύασαν τα δύο μέτρα το 2010, εισάγοντας μια παράμετρο συντονισμού, που καθορίζει το βαθμό επίδρασης της κεντρικότητας ενός κόμβου από το πλήθος και από τα βάρη των συνδέσεών του. Το μέτρο αυτό ( $C_D^{wa}$ ) διατυπώνεται ως εξής (Orsahl, et al., 2010):

$$C_D^{wa} = k_i * \left(\frac{s_i}{k_i}\right)^a = k_i^{(1-a)} * s_i^a \quad \text{Εξίσωση 6.5}$$

όπου  $k_i$  η κεντρικότητα βαθμού,  $s_i$  η δύναμη βαθμού και  $a$  η θετική παράμετρος συντονισμού. Όταν  $a = 1$  τότε ο συνδυασμός ταυτίζεται με τη δύναμη κόμβου, όταν  $a = 0$  τότε ο συνδυασμός ταυτίζεται με την κεντρικότητα βαθμού, όταν  $a > 1$  τότε ο συνδυασμός αυτός αποκτά αρνητική σχέση με την κεντρικότητα βαθμού και όταν  $a \in (0,1)$  τότε ο συνδυασμός αυτός γίνεται ανάλογος της κεντρικότητας βαθμού.

### Δυνατότητα χρήσης και σημασία στα δίκτυα Μεταφορών:

Παρά το γεγονός ότι ο συνδυασμός της κεντρικότητας βαθμού και της δύναμης κόμβου ξεπερνάει τους επιμέρους περιορισμούς της μεμονωμένης χρήσης του ενός ή του άλλου, δεν παύει να είναι ελλιπής, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη τη συνολική δομή ενός δικτύου. Για παράδειγμα, αν ένας κόμβος μπορεί να συνδεθεί με πολλούς άλλους και να εξυπηρετεί μεγάλο όγκο κυκλοφοριακών φόρτων, ενδέχεται να μην είναι σε τέτοια θέση στο δίκτυο, ώστε να μπορούν π.χ. να προσεγγιστούν με σχετική ευκολία (ή μικρό κόστος) άλλοι κόμβοι, και άρα η σημαντικότητά του στο δίκτυο να περιορίζεται.

## 6.7. Κεντρικότητα εγγύτητας (closeness centrality)

Για να αντιμετωπιστεί ο γενικός περιορισμός της τοπικότητας στην σημαντικότητα που δίνει η κεντρικότητα βαθμού και οι παραλλαγές της, ο Freeman διατύπωσε την *κεντρικότητα εγγύτητας* ως το αντίστροφο άθροισμα των κοντινότερων αποστάσεων από τον υπό εξέταση κόμβο, όλων των κόμβων ενός δικτύου. Το μέτρο διατυπώνεται ως εξής (Freeman, 1979):

$$Cl_i = \frac{1}{\sum_j d(i,j)} \quad \text{Εξίσωση 6.6}$$

όπου  $d(i, j)$  είναι η κοντινότερη απόσταση μεταξύ των κόμβων  $i, j$ .

Σύμφωνα με την κεντρικότητα εγγύτητας, οι σημαντικότεροι κόμβοι ενός δικτύου είναι αυτοί οι οποίοι βρίσκονται σε κοντινότερες αποστάσεις σε σχέση με τους υπόλοιπους του δικτύου. Έτσι, η ύπαρξη μικρής ή μέσης απόστασης ενός κόμβου από τους υπόλοιπους, συνεπάγεται αυτόματα και καλύτερη ικανότητα π.χ. στη διάδοση πληροφορίας σε ένα κοινωνικό δίκτυο.

#### Δυνατότητα χρήσης και σημασία στα δίκτυα Μεταφορών:

Η χρήση του μέτρου αυτού κρίνεται άξια περαιτέρω διερεύνησης στα δίκτυα Μεταφορών. Αντί για τη χρήση της απόστασης για την εύρεση και τον υπολογισμό των κοντινότερων αποστάσεων από κόμβο σε κόμβο, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο χρόνος διέλευσης και η συνολική χρονική καθυστέρηση ενός οδικού τμήματος, όπως προκύπτει έπειτα από τον καταμερισμό των μετακινήσεων στο δίκτυο. Σε μια τέτοια περίπτωση, σημαντικοί κόμβοι θα ήταν αυτοί για τους οποίους οι χρόνοι σύνδεσής τους με όλους τους υπόλοιπους κόμβους ενός δικτύου θα ήταν οι μικρότεροι, και θα μπορούσαν π.χ. να σηματοδοτήσουν μια ιεράρχηση επέμβασης προστασίας και διατήρησης λειτουργίας, σε περίπτωση εκδήλωσης ακραίου καιρικού φαινομένου ή φυσικής καταστροφής. Ο κύριος περιορισμός της κεντρικότητας εγγύτητας που αφορά στην αδυναμία εφαρμογής της σε δίκτυα με αποσυνδεδεμένους κόμβους, δεν έχει επίπτωση στα δίκτυα Μεταφορών, όπου όλοι οι κόμβοι συνδέονται τουλάχιστον με έναν άλλο κόμβο μέσω ενός συνδέσμου.

### **6.8. Κεντρικότητα ενδιαμέσου (betweenness centrality)**

Η *κεντρικότητα ενδιαμέσου* αξιολογεί το βαθμό στον οποίο ένας κόμβος βρίσκεται στο μονοπάτι της κοντινότερης διαδρομής μεταξύ δύο άλλων κόμβων στο δίκτυο. Εξαιτίας όμως της συχνής ύπαρξης πέραν της μιας συντομότερης διαδρομής μεταξύ δύο κόμβων σε ένα δίκτυο, το μέτρο διατυπώνεται διαιρώντας τις συντομότερες διαδρομές που περνούν από τον υπό εξέταση κόμβο με το συνολικό πλήθος των συντομότερων διαδρομών που υπάρχουν μεταξύ όλων των κόμβων. Έτσι, η κεντρικότητα ενδιαμέσου διατυπώνεται ως εξής (Freeman, 1979):

$$g(U) = \sum_{s \neq u \neq t} \frac{\sigma_{st}(u)}{\sigma_{st}} \quad \text{Εξίσωση 6.7}$$

όπου  $\sigma_{st}(u)$  ο συνολικός αριθμός συντομότερων διαδρομών από τον κόμβο  $s$  προς τον κόμβο  $t$  μέσω του κόμβου  $u$ , και  $\sigma_{st}$  ο συνολικός αριθμός συντομότερων διαδρομών από τον κόμβο  $s$  προς τον κόμβο  $t$ .

Αν και το μέτρο αυτό παίρνει υπόψη τη συνολική δομή ενός δικτύου (ξεπερνώντας όπως και η κεντρικότητα εγγύτητας τους περιορισμούς τοπικότητας της κεντρικότητας βαθμού), ένα μεγάλο ποσοστό κόμβων σε ένα δίκτυο δεν βρίσκεται μέσα στην αλληλουχία κόμβων συντομότερων διαδρομών μεταξύ οποιωνδήποτε δύο άλλων κόμβων, και συνεπώς παίρνει την τιμή 0.

Ένα μειονέκτημα αυτού του μέτρου, είναι η αποκλειστική επιλογή των συντομότερων μονοπατιών. Το γεγονός αυτό, καθιστά το μέτρο ακατάλληλο για πολλά είδη δικτύων, όπως για παράδειγμα δίκτυα που περιγράφουν τη μετάδοση τοξικών παραγόντων ή την κίνηση πληροφοριών. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η μη εφαρμογή του σε σταθμισμένα δίκτυα (όπου οι σύνδεσμοι μεταξύ κόμβων σταθμίζονται με κάποιο βάρος).

#### Δυνατότητα χρήσης και σημασία στα δίκτυα Μεταφορών:

Παρά τους παραπάνω περιορισμούς, η εφαρμογή του μέτρου αυτού στα δίκτυα Μεταφορών, κρίνεται άξια περαιτέρω διερεύνησης. Αντί της απόστασης, μπορεί και πάλι να χρησιμοποιηθεί ο χρόνος διέλευσης και η καθυστέρηση επί ενός οδικού τμήματος, για τον υπολογισμό και την εύρεση κοντινότερων διαδρομών μεταξύ δύο κόμβων. Η κεντρικότητα ενδιάμεσου σε ένα δίκτυο Μεταφορών θα μπορούσε να αντιστοιχεί, στη μέση αναμενόμενη συχνότητα εμφάνισης ενός κόμβου στη συντομότερη διαδρομή ροής δύο διαφορετικών κόμβων του δικτύου. Έτσι, θα μπορούσε να καταδείξει τους κόμβους εκείνους σε ένα δίκτυο που, ακριβώς επειδή εξυπηρετούν το μεγαλύτερο αριθμό κοντινότερων διαδρομών, είναι σημαντικοί για τη λειτουργία του δικτύου, και άρα πιθανά μέτρα προσαρμογής σε ακραία καιρικά φαινόμενα καθώς και μέτρα μείωσης της τρωτότητας θα μπορούσαν να κατευθυνθούν σε αυτούς.

### **6.9. Ροή κεντρικότητας ενδιάμεσου (flow betweenness centrality)**

Ένας άλλος τρόπος να ξεπεραστεί ο περιορισμός της κεντρικότητας ενδιάμεσου αναφορικά με τη μη εφαρμογή της σε σταθμισμένα δίκτυα, αλλά και για να μετρησεί ο πιθανός περιορισμός εφαρμογής σε διάφορα δίκτυα μέσω της αποκλειστικής χρήσης συντομότερων διαδρομών, είναι μια παραλλαγή του παραπάνω μέτρου, που ονομάζεται *ροή κεντρικότητας*

ενδιαμέσου. Το μέτρο αυτό μετράει την ροή που περνάει από έναν κόμβο, ο οποίος βρίσκεται σε ένα μονοπάτι μεταξύ δύο άλλων, και διατυπώνεται ως εξής (Freeman, et al., 1991):

$$g'(u) = \frac{q_{st}(u)}{q_{st}} \quad \text{Εξίσωση 6.8}$$

όπου  $q_{st}(u)$  η μέγιστη ροή που μεταδίδεται από τον κόμβο  $s$  προς τον κόμβο  $t$  μέσω του κόμβου  $u$  και  $q_{st}$  η μέγιστη ροή που μεταδίδεται από τον κόμβο  $s$  προς τον κόμβο  $t$ .

#### Δυνατότητα χρήσης και σημασία στα δίκτυα Μεταφορών:

Η εφαρμογή του μέτρου αυτού στα δίκτυα Μεταφορών κρίνεται άξια περαιτέρω διερεύνησης. Η ροή μεταξύ δύο κόμβων μπορεί να πάρει τη μορφή κυκλοφοριακών φόρτων, και έτσι οι σημαντικοί κόμβοι σε ένα δίκτυο θα ήταν εκείνοι, δια μέσου των οποίων εξυπηρετείται ο μεγαλύτερος όγκος της κυκλοφορίας του δικτύου.

### **6.10. Ισοδιανυσματική κεντρικότητα (eigenvector centrality)**

Το μέτρο της *ισοδιανυσματικής κεντρικότητας* που προτάθηκε από τον Bonasich, απαντάει στον περιορισμό της κεντρικότητας βαθμού, όπου η σημαντικότητα ενός κόμβου ορίζεται μόνο από τον αριθμό συνδέσεων του με άλλους κόμβους. Ενώ λοιπόν η κεντρικότητα βαθμού δεν παίρνει υπόψη τη σημαντικότητα των κόμβων με τους οποίους συνδέεται ένας υπό εξέταση κόμβος, και θεωρεί εξίσου σημαντικούς δύο κόμβους με π.χ. 4 συνδέσεις με άλλους κόμβους, η ισοδιανυσματική κεντρικότητα λαμβάνει υπόψη τη σημαντικότητα των 4 αυτών κόμβων, εξετάζοντας τη κεντρικότητα βαθμού των κόμβων αυτών. Έτσι, ένας κόμβος θεωρείται πλέον σημαντικός όχι μόνο αν συνδέεται με πολλούς άλλους κόμβους, αλλά και αν οι κόμβοι με τους οποίους αυτός συνδέεται είναι και αυτοί με τη σειρά τους σημαντικοί και σε ποιο μέγεθος (υπό την έννοια του αριθμού των κόμβων που συνδέονται και αυτοί με τη σειρά τους). Το μέτρο αυτό διατυπώνεται σε μορφή πινάκων ως εξής (Bonasich, 1987):

$$x_i = \lambda_i^{-1} \sum_j A_{ji} x_j \quad \text{Εξίσωση 6.9}$$

όπου  $x_i$  η ισοδιανυσματική κεντρικότητα,  $A_{ji}$  είναι το στοιχείο  $i, j$  του πίνακα γειτνίασης και  $\lambda_i$  είναι οι ιδιοτιμές<sup>16</sup> του πίνακα  $A$ .

#### Δυνατότητα χρήσης και σημασία στα δίκτυα Μεταφορών:

Η εφαρμογή του μέτρου αυτού στα δίκτυα Μεταφορών κρίνεται περιορισμένης σημασίας. Οι λόγοι είναι παρόμοιοι με αυτούς που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 6.4 και αφορούν στην τοπικότητα του μέτρου (παρόλο που συγκριτικά με την κεντρικότητα βαθμού, ο αμιγώς τοπικός χαρακτήρας επεκτείνεται ελαφρώς) και κυρίως στην έλλειψη στοιχείων και παραμέτρων κυκλοφοριακού και γενικότερα συγκοινωνιακού χαρακτήρα. Ένα γενικό βασικό μειονέκτημα της ισοδιανυσματικής κεντρικότητας παρατηρείται σε προσανατολισμένα δίκτυα, όπου κόμβοι που έχουν υψηλό εσωτερικό βαθμό, είναι πιθανό εν τέλει να έχουν μηδενική κεντρικότητα. Επειδή το μέτρο αυτό δεν ενδείκνυται προς περαιτέρω διερεύνηση ως προς την εφαρμογή σε δίκτυα Μεταφορών, δεν εξετάζεται ο περιορισμός αυτός σε βάθος.

### 6.11. Κεντρικότητα Katz

Προς αντιμετώπιση ενός από τους περιορισμούς της ισοδιανυσματικής κεντρικότητας αναπτύχθηκε ένα άλλο μέτρο, το βασικό χαρακτηριστικό του οποίου είναι η εισαγωγή μιας σταθεράς, η οποία αποδίδει σε κάθε κόμβο κάποια μη μηδενική κεντρικότητα, ανεξάρτητα από τη θέση του κόμβου στο δίκτυο και την κεντρικότητα των γειτόνων του. Το μέτρο αυτό ονομάζεται *κεντρικότητα Katz* και διατυπώνεται ως εξής (Katz, 1953):

$$x_i = \alpha \sum_j A_{ji} x_j + \beta \quad \text{Εξίσωση 6.10}$$

όπου  $x_i$  η κεντρικότητα Katz,  $A_{ji}$  είναι το στοιχείο  $i, j$  του πίνακα γειτνίασης και  $\alpha, \beta$  είναι οι θετικές σταθερές.

---

<sup>16</sup> Ένα ιδιοδιάνυσμα ενός τετραγωνικού πίνακα  $A$ , είναι ένα μη μηδενικό διάνυσμα  $v$ , που όταν πολλαπλασιαστεί με τον πίνακα  $A$ , ισούται με το αρχικό διάνυσμα, πολλαπλασιασμένο με έναν αριθμό  $\lambda$ , έτσι ώστε  $Av = \lambda v$ . Ο αριθμός  $\lambda$  ονομάζεται ιδιοτιμή του πίνακα  $A$  που αντιστοιχεί στο μη μηδενικό διάνυσμα  $v$

Σελίδα 213 από 481

Σύμφωνα με την κεντρικότητα Katz, κόμβοι που έχουν συνδυασμό υψηλού εσωτερικού βαθμού και ύπαρξη γειτονικών με υψηλή κεντρικότητα, θα παρουσιάζουν υψηλότερη κεντρικότητα σε σχέση με άλλους κόμβους με εξίσου υψηλό εσωτερικό βαθμό, όπου οι γειτονικοί τους κόμβοι όμως έχουν χαμηλή κεντρικότητα.

#### Δυνατότητα χρήσης και σημασία στα δίκτυα Μεταφορών:

Η εφαρμογή του μέτρου αυτού στα δίκτυα Μεταφορών κρίνεται περιορισμένη, για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 6.10. Παρόλη την επίλυση του περιορισμού της ισοδιανυσματικής κεντρικότητας, με την απόδοση μηδενικής κεντρικότητας (και άρα μηδενικής σημαντικότητας), δεν παύει να είναι ένα μέτρο στο οποίο ένα δίκτυο Μεταφορών θα θεωρούταν σαν ένα οποιοδήποτε άλλο δίκτυο (με κορυφές και συνδέσμους, χωρίς κυκλοφοριακά και συγκοινωνιακά χαρακτηριστικά παρά μόνο γεωμετρικά).

### **6.12. Βαθμική κεντρικότητα**

Η *βαθμική κεντρικότητα* είναι μια παραλλαγή της κεντρικότητας Katz, που αναπτύχθηκε από τους Page, Brin, Motwani και Winograd, για να αντιμετωπίσει τον περιορισμό της κεντρικότητας Katz που αποδίδει την ίδια σημαντικότητα σε όλους τους κόμβους που συνδέονται με έναν σημαντικό κόμβο. Στην βαθμική κεντρικότητα, η κεντρικότητα που μεταφέρεται από ένα κόμβο σε γειτονικούς κόμβους είναι διαιρεμένη με τον εξερχόμενο βαθμό τους. Η βαθμική κεντρικότητα διατυπώνεται ως εξής (Page, et al., 1999):

$$x_i = \alpha \sum_j A_{ji} \left( \frac{x_j}{k_j^{out}} \right) + \beta$$

Εξίσωση 6.11

όπου  $k_j^{out}$  είναι η κεντρικότητα εξερχόμενου βαθμού του κόμβου  $j$ .

Η βαθμική κεντρικότητα ονομάστηκε ως *κεντρικότητα PageRank* από την μηχανή διαδικτυακής αναζήτησης Google, και τη χρησιμοποιεί ως μέσο κατάταξης ιστοσελίδων. Η βαθμική κεντρικότητα ή κεντρικότητα PageRank λειτουργεί στο σύστημα του διαδικτύου με ακρίβεια, επειδή όταν μια σελίδα (=κόμβος) έχει πληθώρα ηλεκτρονικών υπερσυνδέσμων (hyperlinks) από άλλες σημαντικές σελίδες (=άλλοι κόμβοι), είναι μεν μια ένδειξη ότι η σελίδα αυτή είναι σημαντική, αλλά το πρόσθετο στοιχείο της διαίρεσης με τον εξερχόμενο βαθμό των σελίδων (=άλλοι κόμβοι) που αναφέρονται στην υπό εξέταση σελίδα (=κόμβος), εξασφαλίζει ότι δεν υπάρχει δυσανάλογη επιρροή.

### Δυνατότητα χρήσης και σημασία στα δίκτυα Μεταφορών:

Η εφαρμογή του μέτρου αυτού στα δίκτυα Μεταφορών κρίνεται περιορισμένη, για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 6.11. Παρόλη την επίλυση του περιορισμού της κεντρικότητας Katz, με την απόδοση ισόποσης κεντρικότητας (και άρα της ίδιας σημαντικότητας) σε όλους τους κόμβους που συνδέονται με ένα σημαντικό κόμβο, αυτή δεν παύει να είναι ένα μέτρο στο οποίο ένα δίκτυο Μεταφορών θα θεωρούταν σαν ένα οποιοδήποτε άλλο δίκτυο (με κορυφές και συνδέσμους, και χωρίς κυκλοφοριακά και συγκοινωνιακά χαρακτηριστικά παρά μόνο γεωμετρικά).

### **6.13. Alpha κεντρικότητα**

Ο Bonasich πρότεινε το 1987 ένα μέτρο κεντρικότητας, που αποτελεί μια γενικευμένη μορφή της κεντρικότητας Katz και υπολογίζει την κεντρικότητα ενός κόμβου συνυπολογίζοντας τη διαφορετική συνεισφορά κάθε άλλου με τον οποίο έρχεται σε επικοινωνία αλλά και τις επιρροές που δέχεται από το περιβάλλον εκτός δικτύου. Το μέτρο ονομάζεται *κεντρικότητα alpha* και μετράει το συνολικό πλήθος μονοπατιών από έναν κόμβο, σταθμίζοντάς τα ανάλογα με το μήκος τους, και παίρνοντας υπόψη και εξωγενείς παράγοντες. Ως εξωγενείς παράγοντες νοούνται εδώ παράγοντες όπως το εισόδημα ή ηλικία, καθώς το μέτρο βρίσκει κυρίως εφαρμογή στο πεδίο των κοινωνικών δικτύων. Το μέτρο διατυπώνεται σε μορφή πινάκων ως εξής (Bonasich, 1987):

$$c = aA^T c + e$$

Εξίσωση 6.12

όπου  $a$  είναι η παράμετρος απόσβεσης,  $A$  είναι ο πίνακας γειτνίασης του δικτύου και  $e$  είναι το διάνυσμα των εξωτερικών επιρροών.

### Δυνατότητα χρήσης και σημασία στα δίκτυα Μεταφορών:

Η εφαρμογή του μέτρου αυτού στα δίκτυα Μεταφορών κρίνεται περιορισμένη για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 6.11.

### **6.14. Τοπικός Συντελεστής σύμπλεξης (local clustering coefficient)**

Ο *τοπικός συντελεστής σύμπλεξης* είναι ένα μέτρο κεντρικότητας, και δείχνει την απόσταση που απέχουν οι γειτονικοί κόμβοι ενός υπό εξέταση κόμβου από τη δημιουργία «κλειστής ομάδας». Η κλειστή ομάδα νοείται ως ένα υπογράφημα του οποίου όλοι οι κόμβοι

συνδέονται μεταξύ τους. Το μέτρο αυτό ποσοτικοποιεί δηλαδή το κατά πόσο οι άμεσα συνδεδεμένοι κόμβοι με έναν υπό εξέταση κόμβο, συνδέονται και αυτοί μεταξύ τους. Ο τοπικός συντελεστής σύμπλεξης ενός κόμβου, είναι ο λόγος του πλήθους των ζευγών των γειτονικών του κόμβων, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους, προς το συνολικό αριθμό ζευγών των γειτονικών του κόμβων και διατυπώνεται ως εξής (Watts & Strogatz, 1998):

$$CIC(i) = \frac{\kappa_i(\kappa_i - 1) |e_{jk}: j, k \in N_i, e_{jk} \in E|}{2} \quad \text{Εξίσωση 6.13}$$

όπου  $\kappa_i$  είναι ο βαθμός του κόμβου  $i$ ,  $e_{jk}$  είναι το πλήθος των συνδέσμων που βρίσκονται μεταξύ των γειτονικών κόμβων του κόμβου  $i$ ,  $N_i: \{j: e_{jk} \in E\}$  είναι η "γειτονιά" του κόμβου  $i$  και  $E$  το σύνολο όλων των συνδέσμων του δικτύου.

#### Δυνατότητα χρήσης και σημασία στα δίκτυα Μεταφορών:

Η εφαρμογή του μέτρου αυτού στα δίκτυα Μεταφορών κρίνεται άξια περαιτέρω διερεύνησης. Ο λόγος είναι ότι το μέτρο αυτό μπορεί να είναι ένα μέτρο ελέγχου ύπαρξης κενών στο δίκτυο, υπό την έννοια της αναγνώρισης γειτονικών κόμβων σε έναν υπό εξέταση κόμβο που δεν συνδέονται μεταξύ τους. Επομένως, σε περίπτωση που κριθεί αναγκαία η εκκένωση ενός δικτύου Μεταφορών, τα κενά συνιστούν εμπόδιο στην αποτελεσματική ροή της κυκλοφορίας καθώς θα μειώνουν τον αριθμό των διαθέσιμων διαδρομών. Εξ άλλου, ο τοπικός συντελεστής σύμπλεξης θα μπορούσε να καταδείξει κόμβους που είναι απαραίτητοι για την καλή λειτουργία του δικτύου κάτω από όλες τις συνθήκες. Μια πιθανόν χαμηλή τιμή του μέτρου αυτού για ένα κόμβο, θα σήμαινε ότι αυτός ο κόμβος περιβάλλεται από κόμβους που χαρακτηρίζονται από έλλειψη μεταξύ τους συνδέσεων, και άρα η κυκλοφορία θα πρέπει να εξυπηρετηθεί μέσω αυτού του κόμβου. Συνεπώς, ένας τέτοιος κόμβος θα ήταν ψηλά στην ιεράρχηση προστασίας και προσαρμογής, για την περίπτωση εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων.

#### **6.15. Κεντρικότητα ομφαλού και κυριαρχίας (hub and authority centrality)**

Ο Kleinberg ανέπτυξε έναν αλγόριθμο με στόχο την ποσοτικοποίηση της σημαντικότητας κάθε κόμβου, με βάση τα δύο παραπάνω είδη σημαντικών κόμβων, που ονομάζεται HITS (hyperlink-induced topic search) και δίνει σε κάθε κόμβο, μια *κεντρικότητα κυριαρχίας* (authority centrality) και μια *κεντρικότητα ομφαλού* (hub centrality). Κύριο χαρακτηριστικό των κόμβων με υψηλή κεντρικότητα κυριαρχίας είναι ότι έχουν πολλούς εισερχόμενους



συνδέσμους από κόμβους-ομφαλούς, ενώ οι κόμβοι με υψηλή κεντρικότητα ομφαλού διακρίνονται από την ύπαρξη πολλών εξερχόμενων συνδέσμων προς κόμβους κυριαρχίας. Ένας κόμβος μπορεί ταυτόχρονα να είναι και ομφαλός και κόμβος κυριαρχίας, όταν πληροί συγχρόνως και τις δύο ιδιότητες.

Σύμφωνα με τον Kleinberg, η κεντρικότητα κυριαρχίας ενός κόμβου, είναι ανάλογη με το άθροισμα των τιμών κεντρικότητας ομφαλού των κόμβων από τους οποίους προέρχονται τα εισερχόμενα τόξα του. Η μαθηματική σχέση που δίνει την κεντρικότητα ομφαλού είναι η εξής (Kleinberg, 1999):

$$x_i = \alpha \sum_j A_{ij} y_j \quad \text{Εξίσωση 6.14}$$

ή σε μορφή πινάκων  $x = \alpha Ay$ .

Ομοίως, η κεντρικότητα ομφαλού ενός κόμβου, είναι ανάλογη με το άθροισμα των τιμών κεντρικότητας κυριαρχίας των κόμβων, στους οποίους καταλήγουν τα εξερχόμενα τόξα του. Η μαθηματική σχέση που δίνει την κεντρικότητα ομφαλού είναι η εξής :

$$y_i = \beta \sum_j A_{ji} x_j \quad \text{Εξίσωση 6.15}$$

ή σε μορφή πινάκων  $y = \beta A^T x$

Ο αλγόριθμος HITS (hyperlink-induced topic search), που δίνει σε κάθε κόμβο, μια κεντρικότητα κυριαρχίας και μια κεντρικότητα ομφαλού αποτελεί επέκταση της ισοδιανυσματικής κεντρικότητας (βλ. Ενότητα 6.10) και παράλληλα πρόδρομο για τη βαθμική κεντρικότητα (βλ. Ενότητα 6.12). Έτσι ενώ η κεντρικότητα ομφαλού μπορεί να είναι ίση με μηδέν σε κάποιες περιπτώσεις, είναι πιθανό να έχουμε μη μηδενική κεντρικότητα κυριαρχίας, και το αντίστροφο.

#### Δυνατότητα χρήσης και σημασία στα δίκτυα Μεταφορών:

Η εφαρμογή του μέτρου αυτού στα δίκτυα Μεταφορών κρίνεται άξια περαιτέρω διερεύνησης. Επειδή όμως ο ορισμός των σταθερών  $\alpha$  και  $\beta$  σε ένα δίκτυο Μεταφορών για κάθε κόμβο θα ήταν μια ιδιαίτερος σύνθετη διαδικασία, και καθώς το βασικό πεδίο εφαρμογής του αλγορίθμου αυτού είναι το διαδίκτυο, με σκοπό να αποφασιστεί η σημαντικότητα μιας ιστοσελίδας με γνώμονα τη δομή των συνδέσεων, τόσο η κεντρικότητα ομφαλού όσο και η κεντρικότητα κυριαρχίας μπορούν να υπολογιστούν επιμέρους με μέτρα

που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή αυτά της βαθμικής και της ισοδιανυσματικής κεντρικότητας.

### 6.16. Κεντρικότητα πληροφορίας (information centrality)

Η κεντρικότητα πληροφορίας μετράει τη συμβολή κάθε κόμβου, στη διάδοση των οντοτήτων (πληροφοριών, κυκλοφορίας, νερού, κ.ο.κ.) σε όλο το δίκτυο. Ο τρόπος με τον οποίο ποσοτικοποιείται αυτή η συμβολή, είναι η εξέταση της συμπεριφοράς ενός δικτύου έπειτα από την απομάκρυνση του εκάστοτε εξεταζόμενου κόμβου. Αρχικά εξετάζεται η ικανότητα μετάδοσης οντοτήτων του δικτύου, αποτελούμενου από όλους τους κόμβους, και στη συνέχεια επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία απενεργοποιώντας κάθε φορά έναν κόμβο, με στόχο τον δι'απαγωγής υπολογισμό της συνεισφοράς του στο δίκτυο (Latora & Marchiori, 2001).

Για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των κόμβων του δικτύου χρησιμοποιείται η αποτελεσματικότητα δικτύου, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης μεταξύ δύο κόμβων, και διατυπώνεται ως εξής (Latora & Marchiori, 2003):

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}}$$

Εξίσωση 6.16

όπου  $N$  είναι το πλήθος κόμβων του δικτύου, και  $d_{ij}$  η απόσταση της συντομότερης διαδρομής μεταξύ δύο κόμβων  $i, j$ .

Έτσι, η κεντρικότητα πληροφορίας διατυπώνεται ως εξής (Lattora & Marchiori, 2004):

$$C_i = \frac{\Delta E}{E} = \frac{E(G) - E(G')}{E(G)}$$

Εξίσωση 6.17

όπου  $E$  είναι η αποτελεσματικότητα του δικτύου  $G$ , και  $G'$  το δίκτυο μετά την απομάκρυνση όλων των συνδέσμων που συνδέουν τον κόμβο  $i$  με τους γειτονικούς του κόμβους.

#### Δυνατότητα χρήσης και σημασία στα δίκτυα Μεταφορών:

Η εφαρμογή του μέτρου αυτού στα δίκτυα Μεταφορών κρίνεται άξια περαιτέρω διερεύνησης. Αντί της απόστασης των συντομότερων διαδρομών ως μέτρο υπολογισμού της

Σελίδα 218 από 481

αποτελεσματικότητας του δικτύου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο συνολικός χρόνος διέλευσης (ή η χρονική καθυστέρηση) της αλληλουχίας των οδικών τμημάτων που συνιστούν τη συντομότερη διαδρομή (δηλαδή το άθροισμα των επιμέρους χρόνων διέλευσης των οδικών τμημάτων). Για τον επανυπολογισμό των χρόνων διέλευσης και των καθυστερήσεων στα οδικά τμήματα, έπειτα από αφαίρεση των τμημάτων που συνδέουν τον υπό εξέταση κόμβο με τους γειτονικούς του, μπορεί να γίνει εκ νέου καταμερισμός των μετακινήσεων στο δίκτυο. Η εφαρμογή της κεντρικότητας πληροφορίας σε ένα δίκτυο Μεταφορών μπορεί να καταδείξει εκείνους τους κόμβους, των οποίων η μη λειτουργία λόγω εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών, θα είχε τη μεγαλύτερη επίπτωση στην αποτελεσματικότητα του δικτύου, και άρα εκείνους τους κόμβους των οποίων η διατήρηση λειτουργίας θα ήταν κρίσιμη.

### 6.17. Δείκτης $h$ ( $h$ -index)

Ο δείκτης  $h$  προτάθηκε από τον Hirsch, με σκοπό την ποσοτικοποίηση της σημαντικότητας των δημοσιεύσεων ενός επιστήμονα, με βάση τις ετεροαναφορές που δέχονται οι εργασίες του. Ένας επιστήμονας έχει δείκτη  $h$  όταν υπάρχουν  $h$  δημοσιεύσεις του, από τις οποίες η κάθε μία ετεροαναφέρεται από τουλάχιστον  $h$  δημοσιεύσεις. Ο δείκτης  $h$  διατυπώνεται ως εξής (Hirsch, 2005):

$$h - index (f) = \max_i \min(f(i), i)$$

Εξίσωση 6.18

όπου  $f$  είναι η συνάρτηση που ανταποκρίνεται στις ετεροαναφορές κάθε δημοσίευσης

#### Δυνατότητα χρήσης και σημασία στα δίκτυα Μεταφορών:

Ενώ φαινομενικά τα πεδία εφαρμογής είναι πολύ διαφορετικά, μία πιθανή εφαρμογή του δείκτη αυτού στα δίκτυα Μεταφορών κρίνεται ενδιαφέρουσα για περαιτέρω διερεύνηση. Ο λόγος είναι ότι θα μπορούσε, μέσω του δείκτη  $h$ , να περιγραφεί η σημαντικότητα ενός κόμβου (=επιστήμονας) βάσει των κόμβων με τους οποίους συνδέεται (=δημοσιεύσεις), και από τους οποίους περνάει  $h$  αριθμός συντομότερων διαδρομών για όλα τα ζεύγη Π-Π ενός δικτύου. Ένας αριθμός  $h < N_i$ , όπου  $N$  είναι ο αριθμός γειτονικών κόμβων του υπό εξέταση κόμβου  $i$ , θα σήμαινε ότι ο κόμβος περιβάλλεται από κόμβους, οι οποίοι δεν είναι απαραίτητα σημαντικοί (όπου η σημαντικότητα εδώ ορίζεται από τον αριθμό των κοντινότερων διαδρομών που διέρχονται από ένα κόμβο).

## 6.18. Ιεραρχικός βαθμός (hierarchical degree)

Ο *ιεραρχικός βαθμός* είναι ένα μέτρο που υπολογίζει τον αριθμό των προσβάσιμων κόμβων από έναν κόμβο εκκίνησης μέσω διαδρομών μήκους  $h$ , με τον περιορισμό ότι κάθε κόμβος μπορεί να είναι επισκέψιμος μόνο μία φορά (avoiding walks). Για ένα σταθερό μήκος  $h$  κάθε ένας από τους γειτονικούς κόμβους θα είναι προσπελάσιμος με πιθανότητα  $p_j^h$ . Δεδομένου ενός διανύσματος τέτοιων πιθανοτήτων, ο ιεραρχικός βαθμός ενός κόμβου διατυπώνεται ως εξής (Viana & Batista, 2012):

$$κ_i^{(h)} = \exp\left(-\sum_j p_j^{(h)} \log p_j^{(h)}\right) \quad \text{Εξίσωση 6.19}$$

### Δυνατότητα χρήσης και σημασία στα δίκτυα Μεταφορών:

Μία πιθανή εφαρμογή του μέτρου αυτού στα δίκτυα Μεταφορών κρίνεται άξια περαιτέρω διερεύνησης. Ο λόγος είναι ότι αντικαθιστώντας το μήκος  $h$  με τον χρόνο  $t$ , μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός των κόμβων σε ένα δίκτυο που θα είναι προσβάσιμος από ένα σημείο εκκίνησης μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα  $t$ . Ένα τέτοιο μέτρο κρίνεται ότι θα είχε ιδιαίτερη σημασία για τη διαχείριση ακραίων καιρικών φαινομένων (αλλά και άλλων συμβάντων) σε επίπεδο σχεδιασμού, π.χ. για την χωροθέτηση οχημάτων έκτακτης ανάγκης, καθώς οι αρχές θα μπορούσαν να γνωρίζουν το ποσοστό του δικτύου που θα μπορούσαν να καλύψουν εντός κάποιου αποδεκτού χρόνου  $t$ .

## 6.19. Κεντρικότητα εξάπλωσης (percolation centrality)

Πολλά από τα μέτρα κεντρικότητας που αναλύθηκαν παραπάνω ποσοτικοποιούν τη σημαντικότητα ενός κόμβου με καθαρά τοπολογικούς όρους, και η σημαντικότητα αυτή δεν εξαρτάται με κανέναν τρόπο από την «κατάσταση» του κόμβου. Εντούτοις, ένας κόμβος μπορεί να είναι σημαντικός σύμφωνα π.χ. με τη κεντρικότητα εγγύτητας, ή με κάποιο άλλο μέτρο κεντρικότητας, αλλά δεν θα μπορούσε να είναι σημαντικός σε ένα δίκτυο στο οποίο υπάρχει 'εξάπλωση' (percolation). Η έννοια της εξάπλωσης χρησιμοποιείται για να περιγράψει, τον τρόπο εξάπλωσης μιας οντότητας που εξετάζεται σε ένα δίκτυο, για παράδειγμα, μιας ιογενούς λοίμωξης που μπορεί να εξαπλωθεί μέσω ανθρώπινων δικτύων, ή των ιών των ηλεκτρονικών υπολογιστών που μπορούν να εξαπλωθούν σε δίκτυα υπολογιστών, ή των ειδήσεων σχετικά με τις προσφορές των καταστημάτων που μπορούν να εξαπλωθούν επίσης μέσω κοινωνικών δικτύων. Σε όλα αυτά τα σενάρια, η εξάπλωση της

οντότητας γίνεται μέσω των συνδέσμων ενός δικτύου, μεταβάλλοντας την κατάσταση των κόμβων από τους οποίους περνάει καθώς εξαπλώνεται, είτε με τρόπο αναστρέψιμο είτε όχι (π.χ. σε ένα επιδημιολογικό σενάριο, τα άτομα μεταβαίνουν από την ευπαθή κατάσταση στην νοσηρή και μολυσματική κατάσταση καθώς η λοίμωξη εξαπλώνεται). Οι καταστάσεις που μπορούν να έχουν οι μεμονωμένοι κόμβοι στα παραπάνω παραδείγματα, θα μπορούσαν να είναι δυαδικού χαρακτήρα (π.χ. έλαβαν ή δεν έλαβαν τις ειδήσεις), διακριτού χαρακτήρα (π.χ. ευπαθείς/νοσηρές/υγιείς μετά την ανάρρωση) ή συνεχούς χαρακτήρα (όπως το ποσοστό των μολυσμένων ανθρώπων σε μια πόλη), καθώς εξαπλώνεται η οντότητα που εξετάζεται. Το κοινό χαρακτηριστικό σε όλα αυτά τα σενάρια είναι, ότι η εξάπλωση της οντότητας έχει ως αποτέλεσμα, την αλλαγή της κατάστασης κόμβων.

Προσπαθώντας να περιγράψουν αυτό το φαινόμενο, οι Piraveenan, Prokorenko και Hossain πρότειναν ένα μέτρο κεντρικότητας το οποίο ονόμασαν *κεντρικότητα εξάπλωσης*. Η κεντρικότητα εξάπλωσης μετράει τη σημαντικότητα των κόμβων υπό την έννοια της υποβοήθησης της εξάπλωσης μιας οντότητας σε ένα δίκτυο. Η κεντρικότητα εξάπλωσης ορίζεται για έναν κόμβο, σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, ως το ποσοστό των 'εξαπλωμένων διαδρομών' που διέρχονται από αυτόν τον κόμβο. Μια εξαπλωμένη διαδρομή είναι η συντομότερη διαδρομή μεταξύ ενός ζεύγους κόμβων, όπου τον κόμβο προέλευσης έχει επισκεφτεί και πιθανώς επηρεάσει η οντότητα που εξετάζεται (π.χ. μόλυνση) και διατυπώνεται ως εξής (Piraveenan, et al., 2013):

$$PC^t(v) = \frac{1}{N-2} * \sum_j \frac{\sigma_{sr}(v)}{\sigma_{sr}} x_s^t / (\sum [x_i^t] - x_v^t) \quad \text{Εξίσωση 6.20}$$

όπου  $\sigma_{sr}$  είναι ο συνολικός αριθμός κοντινότερων διαδρομών από τον κόμβο  $s$  στον κόμβο  $r$ ,  $\sigma_{sr}(v)$  είναι ο αριθμός εκείνων των κοντινότερων διαδρομών που περνούν μέσω του κόμβου  $v$  και  $x_i^t$  είναι η εξάπλωση του κόμβου  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$  ( με  $x_i^t = 0$  να σημαίνει ότι ο κόμβος δεν έχει επηρεαστεί από την οντότητα και  $x_i^t = 1$  να σημαίνει ότι ο κόμβος έχει πλήρως επηρεαστεί).

#### Δυνατότητα χρήσης και σημασία στα δίκτυα Μεταφορών:

Ενώ είναι απολύτως σαφές ότι το μέτρο αυτό αναπτύχθηκε με γνώμονα δίκτυα συνθετότερα αυτού των Μεταφορών, εφαρμογή του μέτρου αυτού κρίνεται ενδιαφέρουσα προς περαιτέρω διερεύνηση, αν θεωρηθεί ο κυκλοφοριακός φόρτος ως η οντότητα του δικτύου που εξαπλώνεται από κόμβο σε κόμβο.

Ο λόγος είναι ότι αφενός αυτό το μέτρο κεντρικότητας μπορεί να λάβει υπόψη του χρονικές παραμέτρους, και αφετέρου ότι η εφαρμογή της κεντρικότητας εξάπλωσης θα μπορούσε να καταδείξει ως σημαντικούς εκείνους τους κόμβους, που υποβοηθούν περισσότερο από άλλους την εξάπλωση της κυκλοφορίας. Αυτοί θα πρέπει να παραμείνουν λειτουργικοί κατά τη διάρκεια ακραίου καιρικού φαινομένου καθώς μέσω αυτών θα πρέπει να γίνει η πιθανή εκκένωση ενός δικτύου. Προϋπόθεση των ανωτέρω βεβαίως, είναι η διαθεσιμότητα τόσο των απαραίτητων δεδομένων εισόδου όσο και υπολογιστικών εργαλείων για τον δυναμικό καταμερισμό των μετακινήσεων στο δίκτυο (βλέπε Ενότητα 5.7.8).

## 6.20. Συγκέντρωση Freeman (Freeman centralization)

Η *συγκέντρωση Freeman* είναι ένα μέτρο που υπολογίζει την ισχύ του σημαντικότερου κόμβου ενός δικτύου σε σχέση με όλους τους άλλους κόμβους. Ορίζεται ως το άθροισμα των διαφορών οποιουδήποτε μέτρου κεντρικότητας μεταξύ του πιο σημαντικού κόμβου σε ένα δίκτυο και όλων των άλλων κόμβων, διαιρεμένο με το θεωρητικά μεγαλύτερο τέτοιο άθροισμα διαφορών, σε οποιοδήποτε δίκτυο ίδιου μεγέθους. Έτσι, κάθε μέτρο κεντρικότητας μπορεί να έχει τη δική του συγκέντρωση Freeman, που διατυπώνεται ως εξής (Freeman, 1979):

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^N C_x(p_*) - C_x(p_i)}{\max \sum_{i=1}^N C_x(p_*) - C_x(p_i)} \quad \text{Εξίσωση 6.21}$$

όπου  $C_x$  είναι η συγκέντρωση Freeman για ένα δίκτυο,  $C_x(p_i)$  είναι η τιμή κάποιου μέτρου κεντρικότητας στον κόμβο  $i$ ,  $C_x(p_*)$  είναι η μέγιστη τιμή του μέτρου κεντρικότητας, και  $\max \sum_{i=1}^N C_x(p_*) - C_x(p_i)$  είναι το άθροισμα των διαφορών του μέτρου κεντρικότητας. Ο δείκτης  $x$  υποδηλώνει τον αριθμό των κόμβων σε ένα δίκτυο, έτσι ώστε η συγκέντρωση Freeman να χρησιμοποιείται ως μέτρο σύγκρισης δικτύων με τον ίδιο αριθμό κόμβων.

### Δυνατότητα χρήσης και σημασία στα δίκτυα Μεταφορών:

Μία πιθανή εφαρμογή του μέτρου αυτού κρίνεται άξια περαιτέρω διερεύνησης ενώ ισχύουν τα κατά περίπτωση συμπεράσματα που αναφέρθηκαν για τα επιμέρους μέτρα κεντρικότητας (καθώς στη συγκέντρωση Freeman χρησιμοποιείται κάποιο από τα μέτρα κεντρικότητας των προηγούμενων ενότητων). Η δυνατότητα που δίνει η συγκέντρωση Freeman να συγκρίνονται δίκτυα ίδιου μεγέθους μεταξύ τους είναι ιδιαίτερως ενδιαφέρουσα, τόσο για τη σύγκριση δύο εντελώς διαφορετικών δικτύων Μεταφορών (π.χ. δύο διαφορετικών πόλεων) όσο και συγκρίσιμων, από άποψη μεγέθους περιοχών του ίδιου δικτύου.

## 6.21. Κρισιμότητα συνδέσμων

Η *κρισιμότητα συνδέσμων* είναι ένα μέτρο παρόμοιας λογικής με την κεντρικότητα πληροφορίας που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 6.16, και αφορά στον προσδιορισμό των σημαντικότερων συνδέσμων ενός δικτύου. Είναι ένα μέτρο που προτάθηκε το 2008 έπειτα από τον τυφώνα Κατρίνα στις Η.Π.Α. και είναι το μόνο από τα μέτρα που βρέθηκαν στην βιβλιογραφική επισκόπηση, το οποίο αναπτύχθηκε με βάση τα δίκτυα Μεταφορών. Αυτό είναι εμφανές στον τρόπο που υπολογίζεται η κρισιμότητα ενός τμήματος: Αρχικά υπολογίζεται ο συνολικός δείκτης αποτελεσματικότητας του δικτύου με τρόπο παρόμοιο αυτού που πρότειναν οι Latora και Marchiori και χρησιμοποιείται στην κεντρικότητα πληροφορίας, αλλά προσαρμοσμένος από τους Nagurney και Qiang έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη και η ζήτηση για μετακινήσεις του μητρώου Π-Π, και η 'αντίσταση' από το δίκτυο για την πραγματοποίηση της μετακίνησης (π.χ. διάρκεια) (Nagurney & Qiang, 2008).

Τα βήματα υπολογισμού της κρισιμότητας συνδέσμων είναι τα εξής:

**Βήμα 1:** Καταμερισμός των μετακινήσεων στο δίκτυο, όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 5.7.

**Βήμα 2:** Υπολογισμός του δείκτη αποτελεσματικότητας του δικτύου (Network efficiency):

$$\varepsilon = \varepsilon(G, d) = \frac{\sum_{w \in W} \frac{d_w}{\lambda_w}}{n_w} \quad \text{Εξίσωση 6.22}$$

όπου  $\varepsilon$  είναι ο δείκτης απόδοσης ενιαίων δικτύων,  $G$  είναι η τοπολογία του δικτύου (κόμβοι και οδικά τμήματα),  $d$  είναι το διάνυσμα της ζήτησης για μετακινήσεις (μητρώα Προέλευσης-Προορισμού),  $W$  είναι το ζεύγος του μητρώου Π-Π,  $d_w$  είναι η ζήτηση για μετακινήσεις του ζευγαριού  $w$  του μητρώου Π-Π,  $\lambda_w$  είναι η αντίσταση (disutility) του ζευγαριού  $w$  του μητρώου Π-Π (π.χ. χρόνος ταξιδιού), και  $n_w$  είναι ο συνολικός αριθμός των ζευγαριών Π-Π για το δίκτυο  $G$ .

**Βήμα 3:** Ένα τυχαίο οδικό τμήμα του δικτύου αφαιρείται από το δίκτυο και ο δείκτης  $\varepsilon$  υπολογίζεται ξανά. Επαναληπτικά, αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε οδικό τμήμα του δικτύου, προκειμένου να υπολογιστεί ο δείκτης  $\varepsilon$  για κάθε οδικό τμήμα που έχει αφαιρεθεί.

**Βήμα 4:** Υπολογισμός του δείκτη κρισιμότητας κάθε οδικού τμήματος ο οποίος διατυπώνεται ως εξής:

$$I(g) = \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon(G, d) - \varepsilon(G - g, d)}{\varepsilon(G, d)} \quad \text{Εξίσωση 6.23}$$

όπου  $G - g$  είναι το δίκτυο που προκύπτει αφού το οδικό τμήμα  $g$  αφαιρεθεί από το δίκτυο  $G$ . Ο δείκτης κρισιμότητας  $I$  για κάθε οδικό τμήμα, αντιπροσωπεύει τη διαφορά της αποτελεσματικότητας του δικτύου μετά την απομάκρυνση κάθε οδικού τμήματος, σε σχέση με την αρχική (κανονική) κατάσταση του δικτύου.

Είναι σαφές από τα παραπάνω ότι το μέτρο αυτό μπορεί να αναγνωρίσει τα οδικά τμήματα ενός δικτύου, που αν καταστούν μη λειτουργικά, σε περίπτωση ακραίου καιρικού φαινομένου (ή άλλων ακραίων συμβάντων), οι επιπτώσεις στο δίκτυο θα είναι ιδιαίτερας δυσμενείς.

## 6.22. Συμπεράσματα

Η βιβλιογραφική επισκόπηση που έγινε στη Θεωρία Δικτύων και στη Θεωρία Γράφων με σκοπό την αναγνώριση μέτρων που χρησιμοποιούνται σε άλλες επιστημονικές περιοχές και συστήματα για τον χαρακτηρισμό των κόμβων και συνδέσμων ενός δικτύου, κρίνεται από τον γράφοντα ιδιαίτερα χρήσιμη. Ο λόγος είναι ότι αναδείχθηκαν και διατυπώθηκαν μαθηματικά εργαλεία που μπορούν να εφαρμοστούν στα δίκτυα Μεταφορών, έτσι ώστε να γίνει καλύτερη κατανόηση των κυκλοφοριακών κόμβων και συνδέσμων, αναφορικά με τη σημαντικότητα και το ρόλο τους στη λειτουργία ενός δικτύου. Το συμπέρασμα αυτό είναι δυνητικά σημαντικό, διότι αυτού του είδους η πληροφορία για τους κόμβους και τους συνδέσμους του δικτύου Μεταφορών δεν παρέχεται από τα αμιγώς κυκλοφοριακά και συγκοινωνιακά εργαλεία και υποδείγματα. Ενώ δηλαδή η επιστήμη του Συγκοινωνιολόγου μπορεί με σχετική ασφάλεια να υπολογίσει την κυκλοφοριακή ικανότητα, την ταχύτητα ελεύθερης ροής, την στάθμη εξυπηρέτησης, τον αριθμό λωρίδων, κ.α. σε ένα οδικό τμήμα, δεν μπορεί να παράσχει πληροφορίες σχετικά με το πόσο σημαντικά είναι αυτά τα οδικά τμήματα, ή τι επίπτωση θα είχαν στη λειτουργία του δικτύου αν αυτά για οποιαδήποτε λόγο καθίσταντο μη λειτουργικά. Τα παραπάνω έχουν ιδιαίτερη σημασία, συνδυαστικά με τα συμπεράσματα που εξήχθησαν σχετικά με την αλλαγή του κλίματος και την αύξηση της συχνότητας εμφάνισης και δριμύτητας ακραίων καιρικών φαινομένων.

Όπως επίσης φάνηκε από την βιβλιογραφική επισκόπηση αυτού του κεφαλαίου και από τα διάφορα μέτρα που παρουσιάστηκαν, η σημαντικότητα ενός κόμβου εξαρτάται κάθε φορά από το δίκτυο στο οποίο αντιστοιχεί. Πιο συγκεκριμένα, σε προσανατολισμένα δίκτυα, όπως



τα δίκτυα Μεταφορών, η κεντρικότητα που προσδίδεται σε κάθε κόμβο είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την κατεύθυνση των συνδέσμων, και η σημαντικότητα των κόμβων επηρεάζεται είτε από τους εισερχόμενους είτε από τους εξερχόμενους συνδέσμους τους. Ανάλογα με το είδος του δικτύου, προκύπτει κάθε φορά η κατάλληλη επιλογή του μέτρου κεντρικότητας, με σκοπό την επιθυμητή κατανομή κεντρικότητας. Ο ρόλος, δηλαδή, που παίζει ο κόμβος σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο, είναι αυτός που θα καθορίσει και την σημαντικότητά του. Φαίνεται επίσης να υπάρχουν δύο πιθανοί λόγοι που οι κόμβοι σε ένα δίκτυο καταλαμβάνουν υψηλές τιμές: αφενός ως αποτέλεσμα μεγάλου πλήθους εισερχόμενων συνδέσμων, οι οποίοι καθιστούν, με άμεσο τρόπο, σημαντικό έναν κόμβο, και αφετέρου ως αποτέλεσμα μεγάλου πλήθους εξερχόμενων συνδέσμων σε άλλους σημαντικούς κόμβους, οι οποίοι καθιστούν, με έμμεσο τρόπο, σημαντικό τον κόμβο.

Από την επισκόπηση μπορεί επίσης να εξαχθεί μια βασική παρατήρηση που είναι εμφανής και στον τρόπο διάρθρωσης του κεφαλαίου αυτού και των ενότητων του, ότι δηλαδή περιορισμοί ενός μέτρου κεντρικότητας, απαντώνται με την ανάπτυξη άλλων μέτρων κεντρικότητας, χωρίς όμως να χάνεται η αξία κανενός από τα μέτρα αυτά. Το σημαντικότερο συμπέρασμα όμως που αφορά στα δίκτυα Μεταφορών, και για το οποίο έγινε προσπάθεια σχολιασμού σε κάθε ενότητα, είναι ότι δεν ενδείκνυνται όλα τα μέτρα ως σχετικά ή αξία περαιτέρω διερεύνησης και εφαρμογής στα δίκτυα Μεταφορών, είτε γιατί ο στόχος τους είναι περιορισμένος είτε γιατί πιθανή εφαρμογή τους δεν θα προσέδιδε πρόσθετη αξία. Τέλος, ακόμα και για τα μέτρα εκείνα που δυνητικά θα είχαν ενδιαφέρον ανάλυσης για τα δίκτυα Μεταφορών, είναι απαραίτητη η εξεύρεση ισοδύναμων εκφράσεων και μαθηματικών διατυπώσεων τους με κυκλοφοριακούς και συγκοινωνιακούς όρους.

## **6.23. Αναφορές και βιβλιογραφία**

### **6.23.1. Παραπομπές σε αναφορές**

Barrat, A., Barthelemy, M., Pastor-Satorras, R. & Vespignani, A., 2004. The architecture of complex weighted networks. *s.l.*, National Academy of Sciences of the USA, pp. 3747-3752.

Bonasich, P., 1987. Power and centrality: a family of measures. *American Journal of Sociology*, 92(5), pp. 1170-1182.

Borgatti, S., 2005. Centrality and Network Flow. *Social Networks*, Volume 27, pp. 55-71.

Borgatti, S. & Martin, E., 2006. A graph-theoretic perspective on centrality. *Social Networks*, 28(4), pp. 466-484.

Freeman, L., 1979. Centrality in social networks; conceptual clarification. *Social Networks*, 1(3), pp. 215-239.

Freeman, L., Borgatti, S. & White, D., 1991. Centrality in valued graphs: a measure of betweenness based on network flow. *Social Networks*, Volume 13, pp. 141-154.

Hirsch, J., 2005. An index to quantify an individual's scientific research output. *s.l.*, National Academy of Science of the USA, pp. 16569-16572.

Katz, L., 1953. A new status index derived from sociometric analysis. *Psychometrika*, pp. 39-43.

Kleinberg, J., 1999. Authoritative sources in a hyperlinked environment. *Journal of the ACM*, 46(5), pp. 604-632.

Latora, V. & Marchiori, M., 2001. Efficient behaviour of small-world networks. *Physical Review Letters*, Volume 87.

Latora, V. & Marchiori, M., 2003. Economic small-world behaviour in weighted networks. *The European Physical Journal*, Volume B 32, pp. 249-263.

Lattora, V. & Marchiori, M., 2004. How the science of complex networks can help developing strategies against terrorism. *Chaos, Solutions and Fractals*, Volume 20, pp. 69-75.

Nagurney, A. & Qiang, Q., 2008. A network efficiency measure with application to critical infrastructure networks. *Journal of Global Optimization*, Volume 40, pp. 261-275.

Opsahl, T., Agneessens, F. & Skvoretz, J., 2010. Node centrality in weighted networks: generalizing degree and shortest paths. *Social Networks*, 32(3), pp. 245-251.

Page, L., Brin, S., Motwani, R. & Winograd, T., 1999. The pageRank citation ranking: bringing order to the web. *Brisbane, Australia*, s.n., pp. 161-172.

Piraveenan, M., Prokopenko, M. & Hossain, L., 2013. Percolation centrality: quantifying graph-theoretic impact of nodes during percolation in networks. *PLOS ONE*, 8(1).

Viana, M. & Batista, J. d. C. L., 2012. Effective number of accessed nodes in complex networks. *Physical Review E*, 85(3).

Watts, D. & Strogatz, S., 1998. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, Volume 393, pp. 440-442.

### **6.23.2. Παραπομπές σε γενική βιβλιογραφία**

Barabási, A. L., & Albert, R. (1999). Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286 (5439), 509-512.

Barabási, A. L., Albert, R., & Jeong, H. (1999). Mean-field theory for scale-free random networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 272 (1), 173-187.

Newman, M. (2001) Scientific collaboration networks. II. Shortest paths, weighted networks, and centrality. *Physical Review E* 64, 016132.

Newman, M. (2005). A measure of betweenness centrality based on random walks. *Social Networks*. 27(1), 39-54.

Wasserman S., Faust K. (1994) *Social networks analysis: methods and applications* Cambridge University Press

Zafarani R., Ali Abbasi M., Liu H. (2014) *Social Media Mining*, Cambridge University Press

Κάτανος Λ. (2018), Μέθοδοι Συσταδοποίησης για τον Εντοπισμό Κοινοτήτων σε Πολύπλοκα Δίκτυα, Μεταπτυχιακή εργασία, Διατμηματικό Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στα Πολυπλοκά Συστήματα και Δίκτυα, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Δήμας Χ. (2017) Τεχνικές παραγοντοποίησης σε κοινωνικά συστήματα υποδείξεων, Διπλωματική εργασία στο Τμήμα Μηχανικών και Οικονομίας Διοίκησης, της Σχολής Επιστημών της Διοίκησης του Πανεπιστημίου Αιγαίου.

Γρηγοριάδης Ι. (2015) Μέτρα σε δίκτυα-ιδιότητες και εφαρμογές, Μεταπτυχιακή Εργασία, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Στατιστική και Μοντελοποίηση, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

## 7. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΤΟΜΕΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΣΤΗΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

### 7.1. Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, η έκφανση της κλιματικής αλλαγής μέσω των ακραίων καιρικών φαινομένων και των φυσικών καταστροφών γίνεται ήδη αντιληπτή στο δομημένο περιβάλλον. Η συχνότητα και η δριμύτητά τους αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια. Όσες προσπάθειες και να γίνουν (σήμερα αλλά και στο μέλλον) για τον περιορισμό των αιτιών που προκάλεσαν και προκαλούν την αλλαγή του κλίματος, είναι αναπόφευκτο για τον πλανήτη να βιώσει τις επιπτώσεις των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, που συμβάλλουν στην αλλαγή αυτή. Με λίγα λόγια, αυτό που βιώνουμε σήμερα, ως ανθρωπότητα αναφορικά με την αλλαγή του κλίματος, οφείλεται σε πράξεις του χθες, και ομοίως αυτό που θα βιώσουμε αύριο, οφείλεται σε πράξεις του σήμερα και του χθες. Δεδομένου λοιπόν αυτού του νομοτελειακού αξιώματος, αναδεικνύεται η αναγκαιότητα να προσαρμοστούμε (ως είδη, ως συστήματα, ως δίκτυα, κ.ο.κ.) σε αυτό που συμβαίνει σήμερα και επέρχεται πέραν πάσης αμφιβολίας. Η υπέρμετρη προσπάθεια εξεύρεσης τρόπων περιορισμού των μελλοντικών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής με παράλληλη υποτίμηση της προσαρμογής σε αυτήν σήμερα, αφήνει έκθετα τα συστήματα και τα δίκτυα διαφόρων τομέων.

Για τον τομέα των Μεταφορών, η προσαρμογή αυτή μπορεί να πάρει διάφορες μορφές και σχήματα. Παρόλα αυτά, όπως φάνηκε στην Ενότητα 2.7.2, η αντίληψη της επιστημονικής κοινότητας για τους τρόπους προσαρμογής μπορεί μεν να μην εξαντλείται ολοκληρωτικά σε δομικά μέτρα, αλλά οπωσδήποτε επικεντρώνεται σε τέτοια. Έτσι π.χ. προτείνεται, η επαναχωροθέτηση υποδομών που βρίσκονται σε περιοχές υψηλού πλημμυρικού κινδύνου σε άλλες ασφαλέστερες περιοχές, ή η προσαρμογή παράκτιων οδών στην επικείμενη άνοδο της στάθμης της θάλασσας με την ανύψωση προστατευτικών τοιχωμάτων. Ενώ σε ένα μεγάλο βαθμό αυτή η λογική και αντιμετώπιση είναι αναγκαία και αναπόφευκτη, παρατηρείται ένα κενό στην ανάπτυξη τρόπων και μέτρων προσαρμογής που δεν είναι δομικού χαρακτήρα, και που δυνητικά θα μπορούσαν να προστατεύσουν τη λειτουργία των δικτύων Μεταφορών. Μια τέτοια προσέγγιση για την εξεύρεση μέτρων προσαρμογής είναι εξίσου αναγκαία, γιατί αφενός αίρει τους περιορισμούς μιας δομικής αποκλειστικά προσέγγισης αναφορικά με τη μη δυνατότητα επέμβασης σε όλων των ειδών τα δίκτυα (π.χ. δεν μπορεί να υπάρξει επαναχωροθέτηση αστικού οδικού δικτύου), και αφετέρου, ανάγει

την έννοια της προσαρμογής σε μια ευρύτερη έννοια *προστασίας* των Μεταφορών. Ως τέτοια μπορεί να νοείται μια σειρά πράξεων και δράσεων, που μπορεί να απαντήσει σε ερωτήματα όπως:

- Πως μπορεί να προστατευτεί ένα υπάρχον δίκτυο Μεταφορών με τον καλύτερο δυνατό τρόπο;
- Πως μπορεί να διασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή λειτουργία ενός δικτύου Μεταφορών, στο οποίο εκδηλώνονται ακραία καιρικά φαινόμενα και φυσικές καταστροφές;
- Πως μπορεί να σχεδιαστεί η λειτουργία ενός συστήματος Μεταφορών λαμβάνοντας υπόψη τις εκφάνσεις της κλιματικής αλλαγής;
- Ποιοι κόμβοι, και ποια τμήματα ενός δικτύου Μεταφορών, πρέπει να προστατευτούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, για να διασφαλιστεί η όσο το δυνατόν καλύτερη λειτουργία τους κάτω από έκτακτες συνθήκες;
- Με ποια προτεραιότητα και πότε πρέπει να γίνει η προσαρμογή των συστημάτων Μεταφορών;

Από τη βιβλιογραφική επισκόπηση που πραγματοποιήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, προκύπτουν τρία βασικά συμπεράσματα που καταδεικνύουν και τις θεματικές περιοχές στις οποίες, σύμφωνα με τον γράφοντα, είναι αναγκαία η διεξαγωγή περαιτέρω έρευνας, όπου και φιλοδοξεί να συνεισφέρει η παρούσα διατριβή. Βάσει της παραπάνω θεώρησης, και οι τρεις αυτές θεματικές περιοχές αναλύονται από τη σκοπιά της ανάγκης για εξεύρεση περαιτέρω λύσεων προσαρμογής, μη δομικού και δομικού χαρακτήρα, που να μπορούν να απαντήσουν στα παραπάνω ερωτήματα.

Η πρώτη θεματική περιοχή αφορά αυτήν της Κυκλοφοριακής Τεχνικής και του Σχεδιασμού των Μεταφορών. Όπως φάνηκε στα κεφάλαια 3, 4 και 5, η ενσωμάτωση της έννοιας του καιρού και του κλίματος (και συνεπώς και της αλλαγής του) στην ανάπτυξη υποδειγμάτων που περιγράφουν και προσομοιώνουν τη λειτουργία των δικτύων Μεταφορών, και που χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την ανάπτυξη στρατηγικών σχεδίων, μελετών εφαρμογής, μελετών διαχείρισης της κυκλοφορίας, κ.λπ., γίνεται σε σημαντικά περιορισμένο βαθμό. Για παράδειγμα, ενώ υπάρχει πλειάδα μαθηματικών διατυπώσεων της συνάρτησης της μέσης ταχύτητας χώρου  $u_s$  με τον κυκλοφοριακό φόρτο  $q$  και την πυκνότητα  $k$ , που διαφέρουν βάσει συνθηκών κυκλοφορίας, (διακοπτόμενη ή συνεχής ροή), εξεταζόμενου οδικού τμήματος, με διάφορες υποθέσεις βαθμού κορεσμού και διάφορες αποκρίσεις της κυκλοφορίας σε αυτές, εντούτοις δεν παραμετροποιούν σε καμία διατύπωσή τους τον

Σελίδα 229 από 481

ακριβή τρόπο με τον οποίο η ταχύτητα επηρεάζεται π.χ. από το ύψος βροχόπτωσης. Αντίστοιχα, για τον υπολογισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας π.χ. σε κόμβους με έλεγχο των προσβάσεων της δευτερεύουσας οδού με σήμα STOP, ο υπολογισμός του χρονικού διαχωρισμού ακολουθίας  $t_f$ , του χρόνου δηλαδή που μεσολαβεί μεταξύ της εκκίνησης δύο διαδοχικών οχημάτων σε συνθήκες ουράς, αγνοεί την πιθανή ύπαρξη καιρικών φαινομένων. Η παρατήρηση αυτή είναι κρίσιμη καθώς, βάσει των διαφόρων τιμών που προβλέπονται στα εγχειρίδια χωρών ή περιοχών για τον υπολογισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας, καθορίζεται τελικά μια τιμή κυκλοφοριακής ικανότητας που δεν ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα. Στην ίδια κατεύθυνση, τα αποσυνθετικά ή εξατομικευμένα υποδείγματα επιλογής μέσου, στα οποία κατά κόρον βασίζεται η κατανομή των μετακινήσεων στα μέσα (3<sup>ο</sup> στάδιο του Σχεδιασμού των Μεταφορών), δεν λαμβάνουν υπόψη τους στην ελκυστικότητα μιας λύσης μεταφοράς ενός μετακινούμενου την πιθανότητα εμφάνισης ενός ακραίου καιρικού φαινομένου και την πιθανή επίπτωσή του στο γενικευμένο κόστος μετακίνησης και τη συνάρτηση σχετικής χρησιμότητας.

Είναι μια συνολική παρατήρηση του γράφοντος ότι οι μαθηματικές διατυπώσεις των κυκλοφοριακών μεγεθών και των υποδειγμάτων που αναπτύσσονται βάσει αυτών, θεωρούν ως βάση ιδανικές καιρικές και κλιματικές συνθήκες, συνθήκες δηλαδή που δεν επηρεάζουν με κανένα τρόπο τα κυκλοφοριακά μεγέθη και υποδείγματα. Η διαπίστωση αυτή δεν είναι καινοφανής καθώς είναι ευρέως γνωστό στην επιστημονική κοινότητα, ότι για λόγους κυρίως απλοποίησης των τρόπων με τους οποίους τα υποδείγματα αναπαριστούν την πραγματικότητα, αλλά και εξοικονόμησης υπολογιστικών πόρων, η μεγάλη πλειονότητα υποδειγμάτων, μαθηματικών διατυπώσεων μεγεθών, και αναλυτικών τους σχέσεων, βρίθκει υποθέσεων και απλουστεύσεων. Ως ένα βαθμό, αυτό είναι απαραίτητο· όσο όμως εξελίσσεται η υπολογιστική ισχύς, και οι δυνατότητες που δίνονται στους ερευνητές να αποτυπώσουν μαθηματικά την πραγματικότητα με σύνθετα εργαλεία, κρίνεται απαραίτητος ο επανασχεδιασμός των τρόπων με τους οποίους αναπαριστώνται μαθηματικά τα κυκλοφοριακά και συγκοινωνιακά φαινόμενα, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη σε κάθε βήμα, η έννοια του καιρού και του κλίματος.

Η διαπίστωση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι όπως περιγράφηκε, η αλλαγή του κλίματος, ήδη έχει αυξήσει την ένταση και την πιθανότητα εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων και ως εκ τούτου, έχει δημιουργήσει συνθήκες που δεν μπορούν πλέον να προσπεραστούν, να αγνοηθούν, ή να θεωρηθούν ιδανικές στα υποδείγματα πάνω στα οποία βασίζεται ο στρατηγικός Σχεδιασμός των Μεταφορών. Είναι, για παράδειγμα, σχεδόν βέβαιο,

δύο πανομοιότυπα δίκτυα Μεταφορών, με τις ίδιες υποδομές, την ίδια (θεωρητικά ιδανική) κυκλοφοριακή ικανότητα, την ίδια ακριβώς ζήτηση για μετακινήσεις, κ.λπ., αλλά με διαφορετικές καιρικές και κλιματικές συνθήκες να παρουσιάζουν διαφορετικές κατανομές στα μέσα, διαφορετικούς καταμερισμούς σε διαδρομές και συνολικά διαφορετικές κυκλοφοριακές λειτουργίες. Οι διαφορές αυτές είναι αδύνατο να αναγνωριστούν, να περιγραφούν και να ποσοτικοποιηθούν με τη χρήση των μέχρι σήμερα υποδειγμάτων της Κυκλοφοριακής Τεχνικής, και του Σχεδιασμού των Μεταφορών. Και στα δύο δίκτυα της παραπάνω υπόθεσης εργασίας είναι έτσι πιθανό να προταθούν παρόμοιες 'θεραπείες' η λύσεις στα ζητήματα που αντιμετωπίζουν, η πιθανή εφαρμογή των οποίων θα οδηγήσει σε εντελώς διαφορετικά αποτελέσματα. Και ακόμα πιο σημαντικό, τα δύο αυτά δίκτυα θα σχεδιαστούν για το μέλλον, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη αποφασιστικές καιρικές και κλιματικές παράμετροι που θα καθορίσουν τη λειτουργία τους. Αναδεικνύεται έτσι η ανάγκη επαναπροσδιορισμού του τρόπου με τον οποίο η επιστημονική κοινότητα αντιλαμβάνεται και χρησιμοποιεί, τόσο τα κυκλοφοριακά μεγέθη όσο και τα προκύπτοντα μαθηματικά υποδείγματα προσομοίωσης της κυκλοφορίας. Ο επαναπροσδιορισμός αυτός συνιστά ένα έμμεσο μέτρο προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή· ο τομέας των Μεταφορών προσαρμόζεται στην αλλαγή του κλίματος, παραμετροποιώντας την στα μεγέθη και υποδείγματα που τον περιγράφουν και τον αναπαριστούν.

Το δεύτερο κεντρικό συμπέρασμα που προκύπτει από τη βιβλιογραφική επισκόπηση, και αναδεικνύει τη δεύτερη θεματική περιοχή, στην οποία κρίνεται αναγκαία περαιτέρω έρευνα, αφορά στην έλλειψη μεθόδων και εργαλείων που μπορούν να περιγράψουν τη σημαντικότητα των στοιχείων (κόμβων και τμημάτων) ενός δικτύου Μεταφορών. Με τα υπάρχοντα κυκλοφοριακά και συγκοινωνιακά εργαλεία, η πληροφορία που δίνεται για τα στοιχεία ενός δικτύου Μεταφορών, είναι απολύτως σχετική με τον τομέα των Μεταφορών: ενώ μπορούν να είναι γνωστές διάφορες πληροφορίες για τα στοιχεία του δικτύου, όπως η στάθμη εξυπηρέτησης ενός οδικού τμήματος, ο κυκλοφοριακός φόρτος που εξυπηρετείται από κάθε κόμβο, η ύπαρξη ή μη σηματοδότησης, και οι χρόνοι πρασίνου, η κυκλοφοριακή ικανότητα και η ταχύτητα ελεύθερης ροής σε ένα οδικό τμήμα, ο τρόπος που επηρεάζεται ο χρόνος μετακίνησης από τη ροή κυκλοφορίας, κ.ο.κ., δεν παρέχεται καμία πληροφορία για την 'αξία' του κάθε στοιχείου μέσα σε ένα δίκτυο Μεταφορών. Η έννοια της αξίας δεν είναι χρηματική, αλλά λειτουργική, και απαντάει στο ερώτημα πόσο και πώς αλλάζει η λειτουργία ενός δικτύου Μεταφορών, αν ένα ή περισσότερα στοιχεία του καταστούν μη λειτουργικά. Απαντάει έτσι έμμεσα και στο ερώτημα, ποια στοιχεία ενός δικτύου πρέπει να παραμείνουν λειτουργικά για να διασφαλιστεί το πλησιέστερο δυνατόν στο κανονικό επίπεδο λειτουργίας

Σελίδα 231 από 481

του, σε περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών. Ένας τέτοιος χαρακτηρισμός των στοιχείων ενός δικτύου, θα επέκτεινε τον ορίζοντα ιεράρχησης των οδικών τμημάτων από πρωτεύουσες ή δευτερεύουσες αστικές αρτηρίες, κ.λπ., σε περισσότερο ή λιγότερο τρωτά οδικά τμήματα, περισσότερο ή λιγότερο κρίσιμα για την βέλτιστη λειτουργία της κυκλοφορίας. Θα καταδείκνυε έτσι εκείνα τα οδικά τμήματα ενός δικτύου, στα οποία πρέπει να διασφαλιστεί ένα υψηλό επίπεδο λειτουργίας ή μια κατά το δυνατόν υψηλή στάθμη εξυπηρέτησης σε περίπτωση ακραίου φαινομένου, προκειμένου να μη διακυβευτεί η ασφάλεια των μετακινούμενων κατά την εκκένωσή του. Ή θα υποδείκνυε εκείνα τα τμήματα του δικτύου, στα οποία θα πρέπει να χωροθετηθούν πυροσβεστικοί σταθμοί, για την αποτελεσματικότερη επέμβαση των πυροσβεστικών οχημάτων σε όλο το δίκτυο.

Η εξεύρεση τρόπων, που μπορούν να αναδείξουν τα στοιχεία ενός δικτύου που είναι σημαντικά ή απαραίτητα για τη λειτουργία του, είναι αναγκαία στο πλαίσιο της προσαρμογής στην αλλαγή του κλίματος. Έχοντας αυτή την πληροφορία, οι μελετητές και οι αρχές, μπορούν να δράσουν αναλόγως για να εξασφαλίσουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, τη κανονική λειτουργία ενός δικτύου Μεταφορών στην αλλαγή του κλίματος.

Στην ίδια θεματική περιοχή, παρατηρήθηκε επίσης και η έλλειψη ενός μέτρου ή εργαλείου, που να μπορεί να ποσοτικοποιεί την ανθεκτικότητα και την αντοχή ενός δικτύου Μεταφορών, στις εκδηλώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων. Ενός ή μερικών δεικτών δηλαδή, που να μπορούν να αποτιμήσουν την ικανότητα ενός δικτύου Μεταφορών, θεωρουμένου ως συστήματος (με την συστημική έννοια του όρου) να ανταπεξέλθει σε φαινόμενα που διαταράσσουν την ομαλή λειτουργία του. Αυτοί οι δείκτες, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ex ante για καθένα από τα δίκτυα Μεταφορών σε μια περιοχή ή μια χώρα, για να καταδείξουν εκείνα των οποίων η τρωτότητα σε διάφορα φαινόμενα θα ήταν αυξημένη, ώστε να υποδειχθούν θέσεις, όπου θα έπρεπε να γίνουν επεμβάσεις για την αύξηση της ανθεκτικότητάς τους.

Τέλος, ένα άλλο σημαντικό κενό που αναγνωρίστηκε κατά την επισκόπηση των μέτρων, στρατηγικών και πολιτικών προσαρμογής του τομέα των Μεταφορών στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, και προσδιορίζει την τρίτη θεματική περιοχή περαιτέρω έρευνας, είναι αυτό της έλλειψης χαρακτηρισμού των μέτρων προσαρμογής ως προς την εφαρμοσιμότητά τους. Παρατηρήθηκε δηλαδή η απουσία συνοδείας κάθε προτεινόμενου μέτρου από μια διάσταση κόστους, ή συνιστώμενου χρονικού ορίζοντα εφαρμογής, ή δυνητικής συνεισφοράς του στη μείωση της τρωτότητας του τομέα Μεταφορών. Η απουσία των



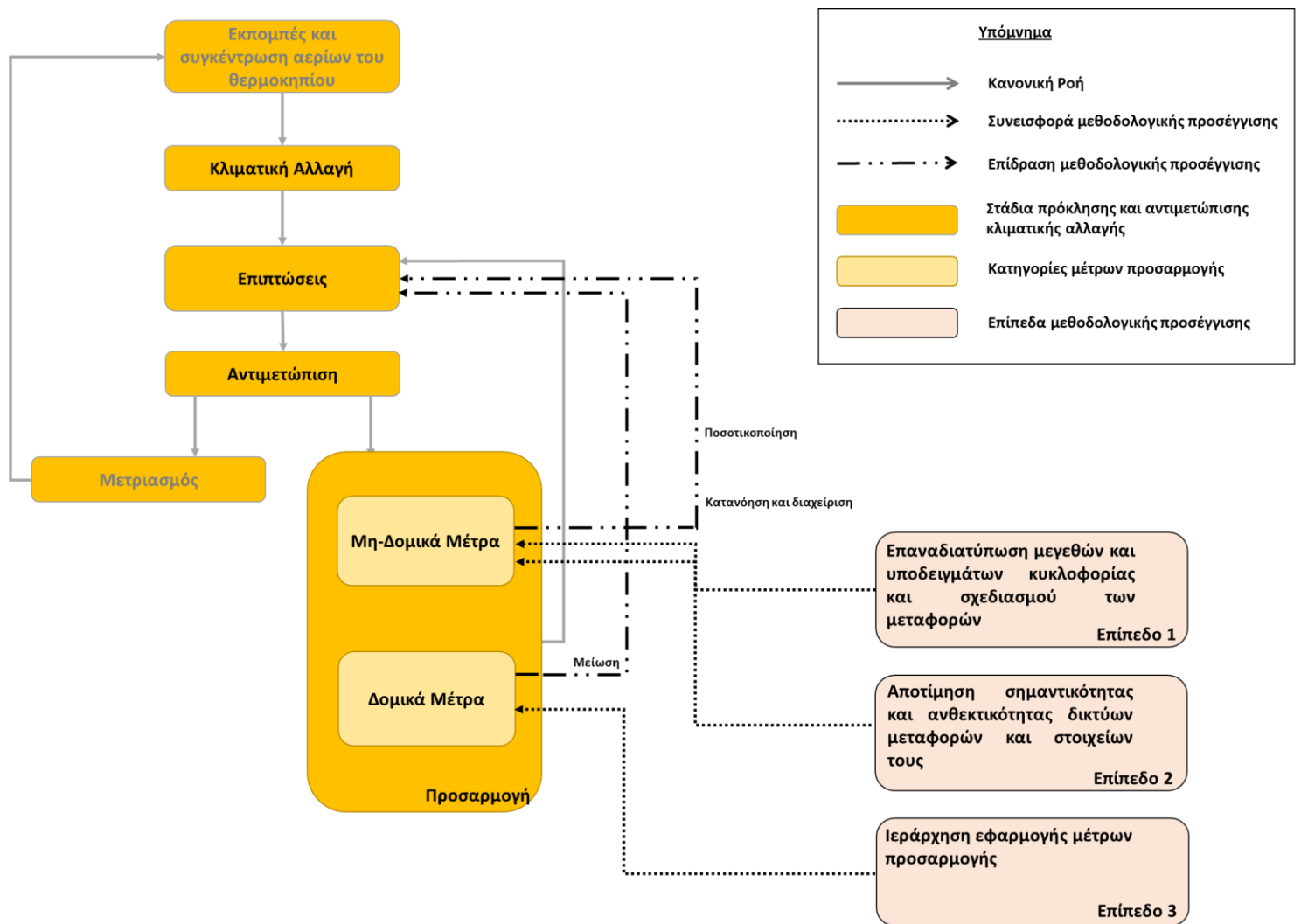
χαρακτηριστικών αυτών για κάθε μέτρο, καθιστά την εφαρμογή τους αφενός δυσκολότερη, και αφετέρου υποκείμενη σε στοιχεία τυχειότητας, καθώς οι αρχές δεν είναι πάντα σε θέση να γνωρίζουν τι πρέπει να εφαρμόσουν σήμερα, τι αύριο, και γιατί.

## 7.2. Μεθοδολογική προσέγγιση

Έχοντας εντοπίσει και κατ'αρχήν αξιολογήσει, χάρη στη κριτική μελέτη της βιβλιογραφίας, τις ανάγκες για έρευνα εξεύρεσης τρόπων προσαρμογής του τομέα των Μεταφορών, παρουσιάζεται στα παρακάτω η σχεδίαση μιας μεθοδολογικής κάλυψης αυτών των αναγκών σε τρία επίπεδα, σύμφωνα και με τις θεματικές περιοχές που αναγνωρίστηκαν και περιγράφηκαν παραπάνω:

1. Το πρώτο επίπεδο, αφορά στην επανεξέταση και επαναπροσδιορισμό των αναλυτικών διατυπώσεων των κυκλοφοριακών μεγεθών και των συγκοινωνιακών υποδειγμάτων που χρησιμοποιούνται, έτσι ώστε να είναι εφικτή η παραμετροποίηση της έκφρασης της κλιματικής αλλαγής (με απώτερο σκοπό την καλύτερη προσαρμογή των δικτύων και συστημάτων που σχεδιάζονται).
2. Το δεύτερο επίπεδο, αφορά στην εξεύρεση μαθηματικών μεθόδων και εργαλείων για την ανάλυση των επιμέρους στοιχείων του δικτύου Μεταφορών, προκειμένου να αναδειχθεί η σημαντικότητα και η αξία τους, και για την ποσοτική αξιολόγηση της ανθεκτικότητάς τους.
3. Το τρίτο επίπεδο, αφορά στην ιεράρχηση των ευρημάτων της βιβλιογραφικής επισκόπησης, αναφορικά με τα μέτρα, τις στρατηγικές και τις πολιτικές προσαρμογής του τομέα των Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή, μέσω της ανάπτυξης διαγραμμάτων ροής για την εφαρμογή μέτρων προσαρμογής για κάθε μέσο και υποδομή Μεταφορών.

Στην Εικόνα 33 που ακολουθεί απεικονίζεται σχηματικά αυτή η μεθοδολογική προσέγγιση.



Εικόνα 33: Σχηματική απεικόνιση επιπέδων μεθοδολογικής προσέγγισης της διδακτορικής διατριβής

Αναφορικά με την Εικόνα 33 επισημαίνεται ότι στο αριστερό μέρος απεικονίζεται σχηματικά η πρόκληση και αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, και ότι ενώ ο μετριασμός προσπαθεί να αντιμετωπίσει τα αίτια της αλλαγής του κλίματος (δηλαδή τη συσσώρευση αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα), η προσαρμογή αντιμετωπίζει έμπρακτα τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, υπό την έννοια της ενσωμάτωσης μέτρων προσαρμογής στο Συγκοινωνιακό Σχεδιασμό και υλοποίησή τους βραχυ-μεσοπρόθεσμα.

Όπως φαίνεται, και τα τρία επίπεδα έχουν ως απώτερο στόχο τον εμπλουτισμό των εργαλείων, τρόπων και μεθόδων προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή, προκειμένου έτσι να συμβάλλουν στο μέτρο που τους αντιστοιχεί, στην καλύτερη κατανόηση και διαχείριση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, στην ποσοτικοποίησή τους και εν τέλει στην μείωσή τους.

Το μεν Επίπεδο 1, μέσω της μαθηματικής επαναδιατύπωσης των κυκλοφοριακών μεγεθών και των υποδειγμάτων του Σχεδιασμού των Μεταφορών, απαντά στο βιβλιογραφικό κενό που αναφέρθηκε παραπάνω, και αφορά στην απουσία καιρικών και κλιματικών παραμέτρων στην Κυκλοφοριακή Τεχνική και τον Σχεδιασμό των Μεταφορών. Μέσω αυτής της αναδιατύπωσης μεγεθών και υποδειγμάτων, το Επίπεδο 1 συνεισφέρει συνολικά στην ανάπτυξη μέτρων προσαρμογής μη δομικού χαρακτήρα. Προτείνει δηλαδή εργαλεία ανάλυσης και σχεδιασμού δικτύων Μεταφορών, που ενδείκνυνται για την ποσοτικοποίηση και άρα την καλύτερη κατανόηση και διαχείριση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.

Το Επίπεδο 2, μέσω της αποτίμησης της σημαντικότητας και της ανθεκτικότητας των δικτύων Μεταφορών και των επιμέρους στοιχείων τους, απαντάει στο βιβλιογραφικό κενό που αφορά στην απουσία δεικτών που μπορούν να καταδείξουν την λειτουργική αξία κόμβων και τμημάτων ενός δικτύου, και την ανθεκτικότητά του συνολικά σε αλλαγές που διαταράσσουν τη λειτουργία του. Το 2<sup>ο</sup> επίπεδο συνεισφέρει επίσης στην ανάπτυξη μέτρων προσαρμογής μη δομικού τύπου.

Τέλος, το Επίπεδο 3, μέσω της ιεράρχησης της εφαρμογής μέτρων προσαρμογής, απαντά στο βιβλιογραφικό κενό που αφορά στην απουσία απαραίτητων πληροφοριών και στοιχείων για τον ενδεδειγμένο χρόνο εφαρμογής, το κόστος και τη συνεισφορά των μέτρων, στην μείωση της τρωτότητας των συστημάτων Μεταφορών. Μέσω της ιεράρχησης αυτής, το Επίπεδο 3 συνεισφέρει συνολικά στην ανάλυση μέτρων προσαρμογής δομικού (κυρίως) χαρακτήρα.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται διεξοδικά οι μεθοδολογικές προσεγγίσεις για κάθε επίπεδο και θεματική περιοχή.

### **7.3. Επίπεδο 1 – Επαναδιατύπωση μεγεθών και υποδειγμάτων Κυκλοφοριακής Ροής και Σχεδιασμού των Μεταφορών**

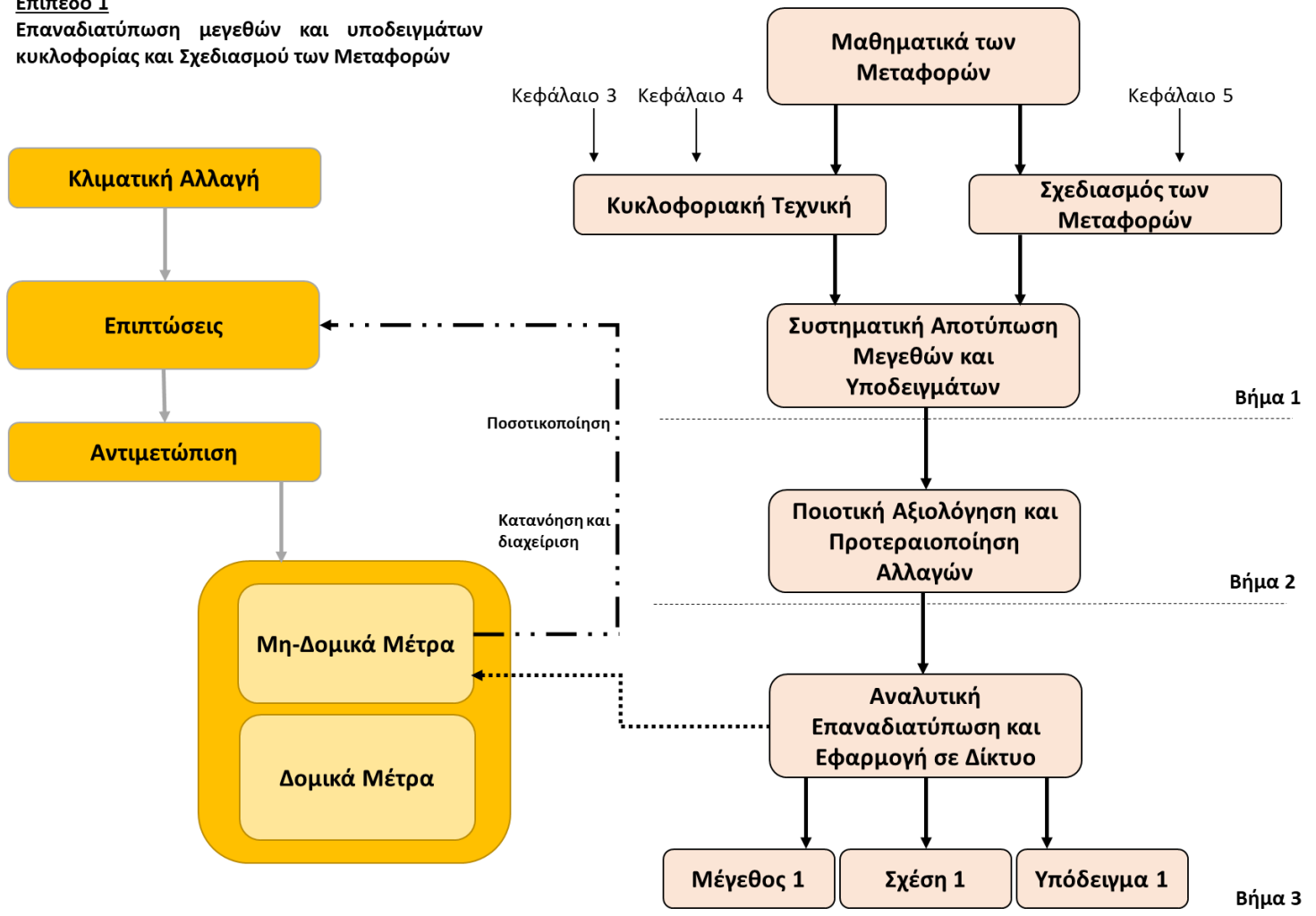
Η επαναδιατύπωση όλων των μαθηματικών εκφράσεων και αναλυτικών σχέσεων, των μεγεθών της κυκλοφορίας και των υποδειγμάτων που χρησιμοποιούνται στον Σχεδιασμό των Μεταφορών – που συνολικά θα αναφέρονται ως Μαθηματικά των Μεταφορών παρακάτω – είναι έργο που ξεπερνάει το πλαίσιο και τις αντικειμενικές δυνατότητες μιας διδακτορικής έρευνας. Δεν θα μπορούσε να είναι διαφορετικά, καθώς ο όγκος της έρευνας που έχει προηγηθεί στον τομέα αυτόν, και που μόνο συνοπτικά αποδόθηκε στα Κεφάλαια 3, 4 και 5 καλύπτοντας τις θεμελιώδεις έννοιες, είναι τεράστιος.

Παρόλα αυτά, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, γίνεται μια πρώτη προσπάθεια αναγνώρισης και προτεραιοποίησης των μεγεθών και των υποδειγμάτων εκείνων που χρήζουν επαναδιατύπωσης, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη ο καιρός, το κλίμα, και οι αλλαγές τους. Βάσει αυτής της προτεραιοποίησης, γίνεται μια πρόταση αναλυτικής έκφρασης ορισμένων εξ αυτών, ως ένα πρώτο βήμα 'προσαρμογής' των Μαθηματικών των Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή. Η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθείται εδώ, δεν είναι ούτε εξαντλητική ούτε μοναδική. Μπορούν να υπάρξουν οπωσδήποτε και άλλοι τρόποι, τόσο συστηματοποίησης και αξιολόγησης των Μαθηματικών των Μεταφορών, όσο και αναλυτικής διατύπωσης κάποιων εκφράσεών τους. Καθώς όμως συνολικά το θέμα αυτό – της παραμετροποίησης του κλίματος, του καιρού, και των αλλαγών τους – δεν συζητείται επαρκώς από την επιστημονική κοινότητα, όπως φάνηκε από την βιβλιογραφική επισκόπηση, η συμβολή της προσέγγισης που προτείνεται και ακολουθείται στη διατριβή, είναι αφενός η ανάδειξη της σημασίας αυτής της πρακτικής, και αφετέρου μια πρώτη προσπάθεια του γράφοντος προς θεμελίωση ενός ερευνητικού άξονα.

Η μεθοδολογική προσέγγιση για την υλοποίηση αυτού του σκοπού απεικονίζεται σχηματικά στην Εικόνα 34.

### Επίπεδο 1

Επαναδιατύπωση μεγεθών και υποδειγμάτων κυκλοφορίας και Σχεδιασμού των Μεταφορών



Εικόνα 34: Μεθοδολογική προσέγγιση Επίπεδο 1: Επαναδιατύπωση μεγεθών και υποδειγμάτων Κυκλοφοριακής Ροής και Σχεδιασμού των Μεταφορών

Επισημαίνεται, ότι στην Εικόνα 34, με κίτρινη απόχρωση, απεικονίζεται σχηματικά η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής μέσω προσαρμογής, και είναι απόσπασμα της συνολικής μεθοδολογικής προσέγγισης της διδακτορικής διατριβής όπως παρουσιάστηκε στην Εικόνα 33. Όπως φαίνεται λοιπόν στην Εικόνα 34, και ξεκινώντας από το επάνω δεξιά μέρος, τα Μαθηματικά των Μεταφορών χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες – σε αυτή της Κυκλοφοριακής Ροής, από όπου αντλούνται οι υπάρχουσες αναλυτικές διατυπώσεις των μεγεθών που περιγράφουν την κυκλοφορία και των μεταξύ τους σχέσεων, όπως παρουσιάστηκαν στα Κεφάλαια 3 και 4, και σε αυτή του Σχεδιασμού των Μεταφορών, από όπου αντλούνται οι μέθοδοι, τα υποδείγματα και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στα 4 στάδια, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5. Πρέπει να τονιστεί εδώ ότι ο διαχωρισμός αυτός των Μαθηματικών των Μεταφορών δεν είναι εξαντλητικός, διότι αφενός δεν εξετάζονται όλοι οι υποτομείς της επιστήμης των Μεταφορών, όπως π.χ. τα μαθηματικά

Σελίδα 237 από 481

της Οικονομικής των Μεταφορών, και διότι αφετέρου η διδακτορική έρευνα επικεντρώνεται στις οδικές μεταφορές.

Το πρώτο βήμα της μεθοδολογικής προσέγγισης του Επιπέδου 1, αφορά στην συστηματική αποτύπωση όλων των μεγεθών και των υποδειγμάτων που χρησιμοποιούνται στα Μαθηματικά των Μεταφορών. Ο επιμέρους στόχος αυτού του βήματος είναι να συγκεντρωθούν τα παραπάνω, να ομαδοποιηθούν κατά το δυνατόν σε κατηγορίες, δηλαδή κατά μέγεθος, σχέση μεταξύ μεγεθών, και υπόδειγμα, και να παρουσιαστούν με τρόπο συστηματικό και συνοπτικό, ώστε να προετοιμαστεί το έδαφος για το δεύτερο βήμα της μεθοδολογικής προσέγγισης.

Στο δεύτερο βήμα της μεθοδολογικής προσέγγισης του Επιπέδου 1, θα γίνει ποιοτική αξιολόγηση του αν και κατά πόσο το περιγραφόμενο μέγεθος, σχέση ή υπόδειγμα που παρουσιάστηκε στο βήμα 1, χρήζει επαναδιατύπωσης ή νέου ορισμού της έννοιάς του, και σε ποιο βαθμό προτεραιότητας μετά την αξιολόγησή του. Για παράδειγμα, ένα κεντρικό συμπέρασμα του Κεφαλαίου 5 (Σχεδιασμός των Μεταφορών) ήταν ότι τα Βήματα 3 (Επιλογή Μέσου) και 4 (Καταμερισμός Μετακινήσεων στο Δίκτυο) του Σχεδιασμού των Μεταφορών, είναι περισσότερο 'ευαίσθητα' στις επιπτώσεις του καιρού, του κλίματος και των αλλαγών τους, από ό,τι τα Βήματα 1 (Γένεση Μετακινήσεων) και 2 (Κατανομή Μετακινήσεων στο Χώρο).

Στο τρίτο βήμα της μεθοδολογικής προσέγγισης του Επιπέδου 1, θα επιχειρηθεί η αναλυτική διατύπωση εκείνων των μεγεθών, των σχέσεων τους, και των υποδειγμάτων που αναδείχθηκαν ως προτεραιότητες κατά το βήμα 2. Θα προταθεί δηλαδή η εισαγωγή παραμέτρων ή μεταβλητών, που περιγράφουν την επίδραση των καιρικών συνθηκών ή την έκφανση της αλλαγής του κλίματος, στις υπάρχουσες μαθηματικές διατυπώσεις. Η αναλυτική αυτή επαναδιατύπωση τους, θα είναι και το τελικό αποτέλεσμα του Επιπέδου 1 υπό την μορφή μαθηματικών σχέσεων, που θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί των κλασικών ως μη δομικά μέτρα προσαρμογής, για την πιστότερη ποσοτικοποίηση, κατανόηση και διαχείριση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.

Στις επόμενες ενότητες αυτού του κεφαλαίου, γίνεται εφαρμογή των βημάτων της μεθοδολογικής προσέγγισης του Επιπέδου 1.

### 7.3.1. Επίπεδο 1 – Βήμα 1: Συστηματική αποτύπωση μεγεθών και υποδειγμάτων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σκοπός αυτού του βήματος είναι η συγκέντρωση όλων των μεγεθών, των μεταξύ τους σχέσεων και των υποδειγμάτων που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση της Κυκλοφοριακής Ροής και τον Σχεδιασμό των Μεταφορών, όπως και μια κατά το δυνατόν ομαδοποίηση και απόδοσή τους με τρόπο συστηματικό μεν, συνοπτικό δε, για να γίνει η αξιολόγησή τους (ως προς το αν χρήζουν επαναδιατύπωσης και με ποια σειρά) στο βήμα 2.

Για την επίτευξη του παραπάνω σκοπού, προτείνεται η χρήση Πίνακα, οι γραμμές του οποίου θα αφορούν στο κάθε στοιχείο που θα εξεταστεί (όπου ως στοιχεία νοούνται όλα τα παραπάνω μεγέθη, σχέσεις τους, υποδείγματα, κ.λπ.), και οι στήλες θα επιχειρούν την ομαδοποίηση και κατηγοριοποίησή τους, έτσι ώστε να μπορεί να εξαχθεί, βάσει κάποιας λογικής που θα αναλυθεί στο επόμενο βήμα, η προτεραιότητα επαναδιατύπωσης.

Προτείνεται έτσι ένας πίνακας της παρακάτω μορφής:

Στοιχείο	Ομαδοποίηση	Κατηγοριοποίηση
----------	-------------	-----------------

Στη στήλη 'Ομαδοποίηση', χρησιμοποιείται η λογική που ακολουθήθηκε κατά τη δόμηση των υπο-ενοτήτων των κεφαλαίων της βιβλιογραφικής επισκόπησης, όπως η μέση ταχύτητα χώρου, η μέση ταχύτητα χρόνου, η ταχύτητα ελεύθερης ροής κ.ο.κ. θα εισαχθούν στην ομάδα 'Ταχύτητα'. Αντίστοιχα όλα τα υποδείγματα που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την κυκλοφοριακή ροή, θα ενσωματωθούν στην ομάδα 'Κυκλοφοριακή Ροή', κ.ο.κ. Συνολικά προτείνονται οι εξής επιμέρους ομάδες: 'Διαχωρισμός', 'Κυκλοφοριακός φόρτος', 'Κυκλοφοριακή ικανότητα', 'Πυκνότητα – Κατάληψη', 'Ταχύτητα', 'Κυκλοφοριακή ροή', 'Ταχύτητα – Πυκνότητα', 'Κυκλοφοριακός Φόρτος – Πυκνότητα', 'Ταχύτητα - Κυκλοφοριακός Φόρτος', 'Κυκλοφοριακή ροή', 'Γένεση μετακινήσεων', 'Κατανομή στο χώρο', 'Κατανομή στα μέσα' και 'Καταμερισμός στο δίκτυο'.

Στη στήλη 'Κατηγοριοποίηση', επίσης χρησιμοποιείται η λογική που ακολουθήθηκε κατά τη δόμηση των ενοτήτων των κεφαλαίων της βιβλιογραφικής επισκόπησης: για παράδειγμα, όλα τα υποδείγματα που περιγράφουν την κυκλοφοριακή ροή σε όλα τα επίπεδα θα ενσωματωθούν στην ομάδα 'Υποδείγματα'. Αντίστοιχα, όλες οι εκφράσεις της ταχύτητα, της πυκνότητας, της κατάληψης, κ.λπ. θα ενταχθούν στην ομάδα 'Μεγέθη'. Συνολικά προτείνονται οι εξής επιμέρους κατηγορίες: 'Μέγεθος', 'Σχέση', 'Υπόδειγμα' και 'Μέθοδος ή Αλγόριθμος'.

### 7.3.2. Επίπεδο 1 – Βήμα 2: Ποιοτική αξιολόγηση και προτεραιοποίηση αλλαγών

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στόχος αυτού του βήματος είναι η ποιοτική αξιολόγηση όλων των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της κυκλοφορίας και τον Σχεδιασμό των Μεταφορών, σχετικά με το αν αυτά χρήζουν επαναδιατύπωσης, και με ποια προτεραιότητα. Η προτεραιοποίηση που προτείνεται είναι απαραίτητη, για να αντιμετωπιστεί το θέμα του όγκου κυρίως, που θα συνεπαγόταν μια αναλυτική επαναδιατύπωση όλων των μεγεθών, των μεταξύ τους σχέσεων, των υποδειγμάτων και των μεθόδων. Στόχος είναι η ανάδειξη εκείνων των στοιχείων στα οποία οι καιρικές και κλιματικές συνθήκες, και οι αλλαγές τους, θα έχουν τις μεγαλύτερες επιπτώσεις, αλλά και εκείνων των στοιχείων που είναι 'κρισιμότερα', υπό την έννοια του επηρεασμού περισσότερων άλλων στοιχείων, όπως η ταχύτητα, που ως έννοια και μέγεθος υπεισέρχεται στον υπολογισμό της πλειονότητας των υποδειγμάτων και μεθόδων, που χρησιμοποιούνται στον Σχεδιασμό των Μεταφορών.

Για την επίτευξη των παραπάνω, προτείνεται η χρήση ενός αξιολογικού εργαλείου με τη μορφή ανάλυσης τεταρτημορίων (quadrant analysis). Στην ανάλυση αυτή, κάθε ένα από τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν στο προηγούμενο βήμα, θα αξιολογηθεί ως προς δύο βασικές παραμέτρους:

- το μέγεθος της επίπτωσης του καιρού και του κλίματος, και των αλλαγών τους σε αυτό
- την κρισιμότητά του για τον υπολογισμό άλλων στοιχείων

Για την αξιολόγηση της επίπτωσης του καιρού, του κλίματος, και των αλλαγών τους σε κάθε στοιχείο, προτείνεται μια ποιοτική αξιολόγηση, με τις παρακάτω τιμές: 1. Χαμηλή, 2. Μέτρια και 3. Υψηλή. Η ποιοτική αξιολόγηση της επίπτωσης του καιρού, του κλίματος, και των αλλαγών τους, στα ίδια τα κυκλοφοριακά μεγέθη, και τα υποδείγματα που χρησιμοποιούνται στον τομέα των Μεταφορών, είναι μια ερευνητική διαδικασία, που για να διεξαχθεί με τρόπο όσο το δυνατόν αντικειμενικότερο, θα πρέπει να τεθούν κάποιες αρχές, και να γίνουν κάποιες θεωρήσεις, που θα εφαρμοστούν σε όλες τις περιπτώσεις. Είναι σαφές ότι η διαδικασία αυτή θα μπορούσε να γίνει απλούστερη, αν με τρόπο δυαδικό (Ναι και Όχι), αξιολογούνταν το αν οι καιρικές και κλιματικές συνθήκες, επηρεάζουν το υπό εξέταση στοιχείο. Επειδή όμως, το ζητούμενο είναι η αξιολόγηση του μεγέθους της επίπτωσης σε τρία επίπεδα, είναι απαραίτητο να σημειωθούν τα εξής:



- Για τα μεγέθη, τα οποία προκύπτουν έπειτα από παρατηρήσεις, και δεν έχουν δυναμική (με την έννοια της Μηχανικής) υπόσταση, δεν παίρνουν δηλαδή διανυσματική έκφραση, όπως ο κυκλοφοριακός φόρτος, ή η πυκνότητα της κυκλοφορίας, θεωρείται ότι το μέγεθος της επίπτωσης του καιρού και του κλίματος, θα είναι 'μέτριο'. Ο λόγος είναι, ότι η αναλυτική έκφρασή τους, ως μαθηματική εξίσωση παρατήρησης, μπορεί να επαναδιατυπωθεί, με σχετικά απλό τρόπο.
- Για τα μεγέθη που έχουν δυναμική (με την έννοια της Μηχανικής) υπόσταση, όπως ο χρόνος ή η ταχύτητα, θεωρείται ότι το μέγεθος της επίπτωσης είναι 'υψηλό'.
- Για τα μεγέθη, που μέχρι σήμερα υπολογίζονται ή εκτιμώνται από μια σειρά παραμέτρων, από τις οποίες βέβαια απουσιάζει ο καιρός και το κλίμα (π.χ. κυκλοφοριακή ικανότητα), θα θεωρείται ότι το μέγεθος της επίπτωσης θα είναι 'χαμηλό' (με την υπόθεση ότι οι βασικές παράμετροι λαμβάνονται ήδη υπόψη, άρα ο καιρός και το κλίμα μπορούν μερικώς να βελτιώσουν τον υπολογισμό ή την εκτίμηση του μεγέθους αυτού).
- Για τα σύνθετα μεγέθη, που μέχρι σήμερα υπολογίζονται και εξαρτώνται από ένα ή περισσότερα άλλα μεγέθη που επίσης εξετάζονται, το μέγεθος της επίπτωσης του καιρού και του κλίματος, θα ισούται με το μεγαλύτερο μέγεθος επίπτωσης, μεταξύ των μεγεθών που αποτελούν συνιστώσες των σύνθετων μεγεθών.
- Για τις σχέσεις μεταξύ των μεγεθών που εξετάζονται, θα θεωρείται ότι υπερισχύει το μεγαλύτερο μέγεθος επίπτωσης, σύμφωνα με την αξιολόγηση των επιμέρους μεγεθών (π.χ. στην σχέση κυκλοφοριακού φόρτου και ταχύτητας, το μέγεθος της επίπτωσης θα ισούται με το μεγαλύτερο μέγεθος επίπτωσης μεταξύ του κυκλοφοριακού φόρτου και της ταχύτητας).
- Για όλες τις μεθόδους και τους αλγορίθμους, που εμπεριέχουν τη χρήση μεγεθών και σχέσεών τους ή άλλα υποδείγματα που εξετάζονται, θα θεωρείται ότι το μέγεθος της επίπτωσης είναι 'χαμηλό' (καθώς θα αφορά σε ένα μέρος της μεθόδου και του αλγορίθμου, που πιθανόν έχει ευρύτερη έννοια και χρήση από αυτή που γίνεται στις Μεταφορές).
- Για όλα τα υποδείγματα, που εμπεριέχουν τη χρήση μεγεθών και σχέσεών τους ή άλλα υποδείγματα που εξετάζονται, θα γίνεται αξιολόγηση κατά περίπτωση, και βάσει του σκοπού χρήσης του υποδείγματος.

Για την αξιολόγηση της κρισιμότητας του στοιχείου που εξετάζεται, και για τον μετέπειτα υπολογισμό άλλων στοιχείων, προτείνεται η ανάπτυξη ενός πίνακα συσχέτισης. Οι τιμές του πίνακα αυτού θα μπορούν να πάρουν τις τιμές 0 και 1, όπου 0 συνεπάγεται ότι το στοιχείο

Σελίδα 241 από 481

δεν υπεισέρχεται στον υπολογισμό άλλου στοιχείου, και 1 συνεπάγεται ότι το στοιχείο χρησιμοποιείται στον υπολογισμό άλλου στοιχείου. Προκύπτει έτσι ένας Πίνακας της παρακάτω μορφής:

	Στοιχείο 1	Στοιχείο 2	Στοιχείο 3	Στοιχείο n	Άθροισμα
Στοιχείο 1	1	0 ή 1	0 ή 1	0 ή 1	Max = n
Στοιχείο 2	0 ή 1	1	0 ή 1	0 ή 1	Max = n
Στοιχείο 3	0 ή 1	0 ή 1	1	0 ή 1	Max = n
Στοιχείο n	0 ή 1	0 ή 1	0 ή 1	1	Max = n

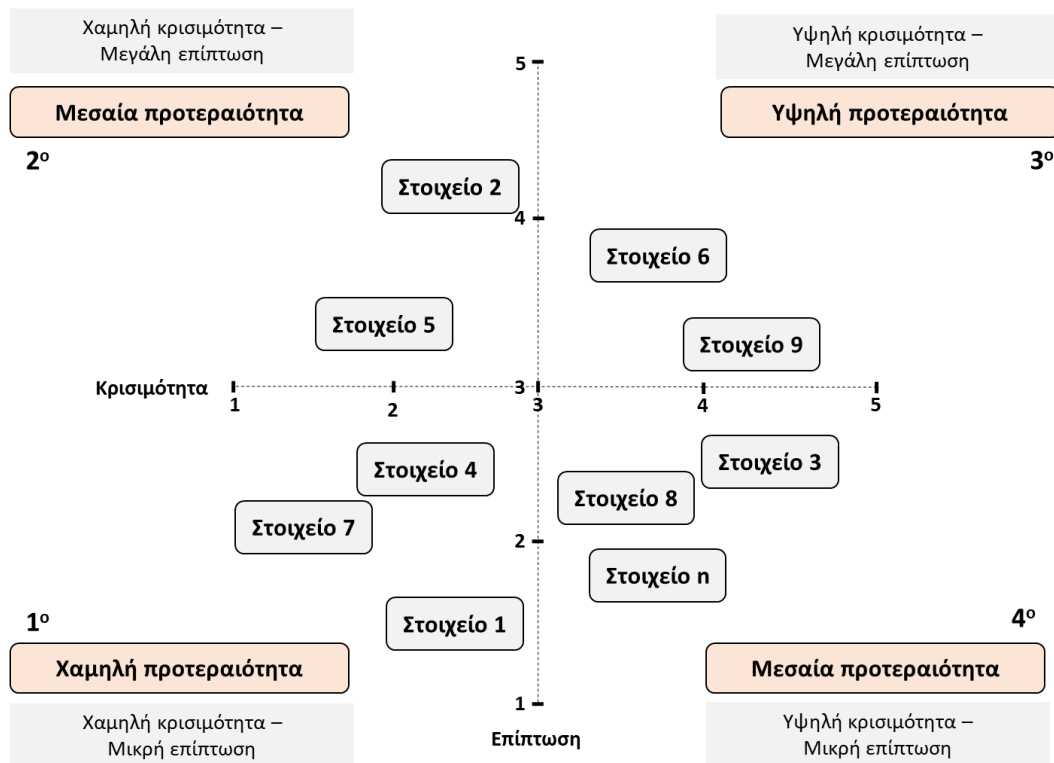
Πρέπει να σημειωθεί, ότι ο Πίνακας αυτός δεν μπορεί να είναι συμμετρικός, διότι οι σχέσεις μεταξύ των στοιχείων δεν είναι αμφίδρομες. Στην στήλη Άθροισμα προστίθενται όλες οι μονάδες της γραμμής του Πίνακα που αντιστοιχεί σε κάθε στοιχείο. Όπως προκύπτει, όσο μεγαλύτερο το άθροισμα, τόσο κρισιμότερο το υπό εξέταση στοιχείο για τον υπολογισμό των υπολοίπων στοιχείων του Πίνακα.

Τελικά, θα προκύψει ένας πίνακας της παρακάτω μορφής:

	Επίπτωση	Κρισιμότητα
Στοιχείο 1	1, 2 ή 3	1 έως n
Στοιχείο 2	1, 2 ή 3	1 έως n
Στοιχείο 3	1, 2 ή 3	1 έως n
Στοιχείο n	1, 2 ή 3	1 έως n

Στη συνέχεια, θα συσχετιστούν οι δύο αξιολογήσεις κάθε στοιχείου και θα απεικονιστούν σε ένα κοινό διάγραμμα επίπτωσης – κρισιμότητας, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 35. Για τη συσχέτιση των δύο αξιολογήσεων, θα γίνει κανονικοποίηση (normalization) των επιμέρους τιμών των αξιολογήσεων επίπτωσης και κρισιμότητας, σε μια κλίμακα από το 1 έως το 5. Με τη συσχέτιση αυτή παρέχεται μια καθαρή εικόνα για την προτεραιοποίηση επαναδιατύπωσης των στοιχείων:

- Χαμηλή κρισιμότητα - Μικρή επίπτωση: Χαμηλή προτεραιότητα (1<sup>ο</sup> τεταρτημόριο)
- Χαμηλή κρισιμότητα – Μεγάλη επίπτωση: Μεσαία προτεραιότητα (2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο)
- Υψηλή κρισιμότητα – Μεγάλη επίπτωση: Υψηλή προτεραιότητα (3<sup>ο</sup> τεταρτημόριο)
- Υψηλή κρισιμότητα – Μικρή επίπτωση: Μεσαία προτεραιότητα (4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο)



Εικόνα 35: Διαγραμματική απεικόνιση τυχαίων αποτελεσμάτων ανάλυσης τεταρτημορίων για την προτεραιοποίηση επαναδιατύπωσης κυκλοφοριακών και συγκοινωνιακών στοιχείων

### 7.3.3. Επίπεδο 1 – Βήμα 3: Αναλυτική επαναδιατύπωση

Στο βήμα αυτό θα γίνει η επαναδιατύπωση των μεγεθών, σχέσεων τους, υποδειγμάτων και μεθόδων ή αλγορίθμων που κατά το προηγούμενο βήμα θα έχουν λάβει τιμές υψηλής προτεραιοποίησης. Σε όλες τις περιπτώσεις επαναδιατύπωσης, θα γίνει εφαρμογή τους σε δίκτυο Μεταφορών, είτε για τη βαθμονόμηση των προτεινόμενων αναλυτικών εκφράσεων είτε για επαλήθευση της εφαρμοσιμότητάς τους.

### 7.4. Επίπεδο 2 – Αποτίμηση σημαντικότητας και ανθεκτικότητας δικτύων Μεταφορών ή στοιχείων τους

Στο επίπεδο αυτό της μεθοδολογικής προσέγγισης, σκοπός είναι η εύρεση και η ανάπτυξη μεθόδων που μπορούν να αποτιμήσουν ποσοτικά τη σημαντικότητα των επιμέρους στοιχείων (κόμβοι και οδικά τμήματα) ενός δικτύου Μεταφορών, και την ανθεκτικότητα του δικτύου (ως συστήματος) έναντι πιθανών συνθηκών που απορρυθμίζουν την κανονική του λειτουργία. Όπως αναφέρθηκε, η γνώση της σημαντικότητας και της ανθεκτικότητας των δικτύων Μεταφορών και των στοιχείων τους, μπορεί να αποτελέσει ένα μη δομικό μέτρο

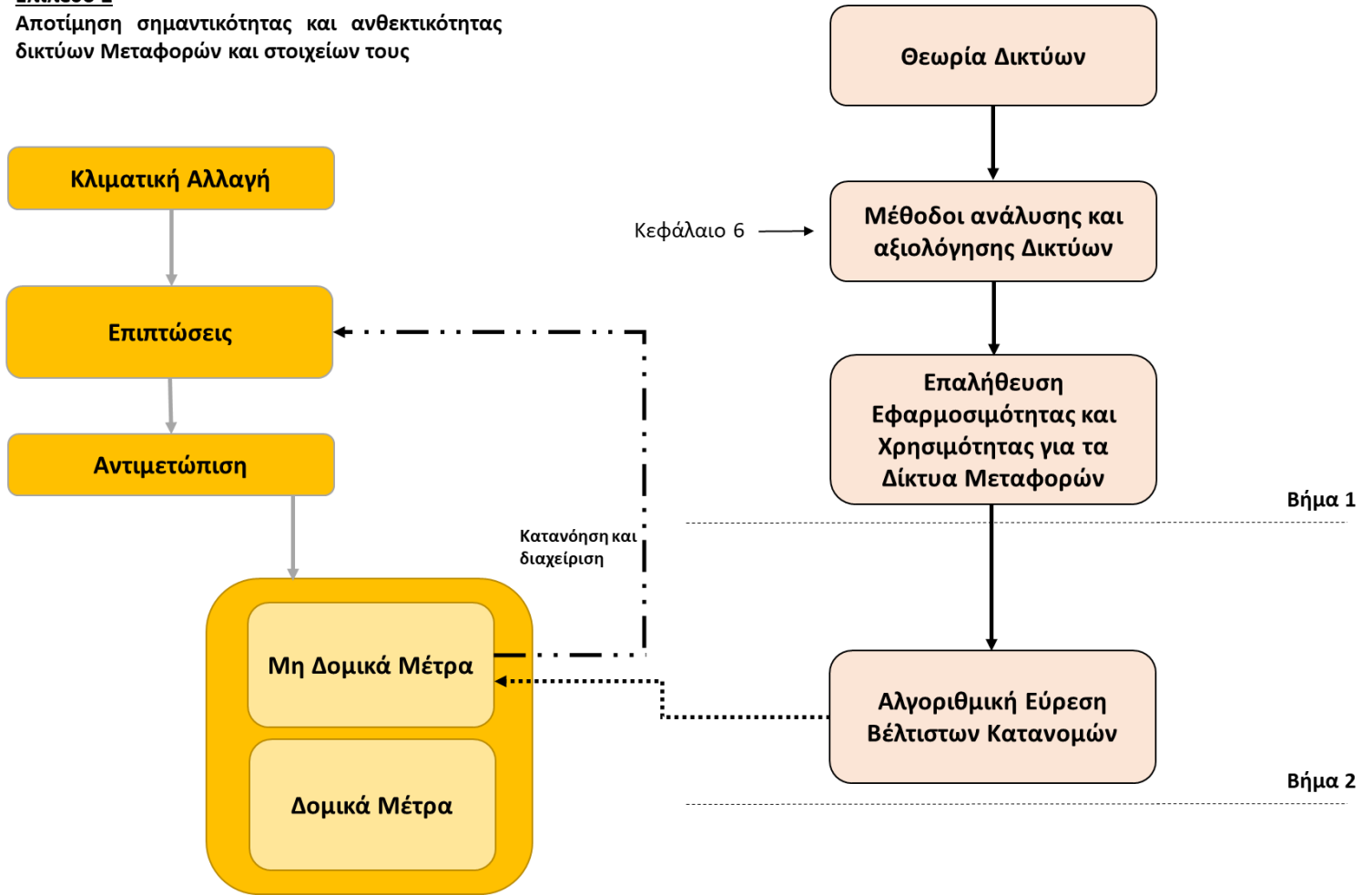
προσαρμογής στην έκφραση της αλλαγής του κλίματος. Η εφαρμογή αυτού του μέτρου σε ένα δίκτυο Μεταφορών μπορεί να καταδείξει:

1. Αφενός, εκείνα τα στοιχεία δικτύου, των οποίων η παρουσία είναι κρίσιμη για την εύρυθμη λειτουργία του (και άρα τα στοιχεία εκείνα τα οποία πρέπει να προστατευτούν ή να παραμείνουν οπωσδήποτε λειτουργικά κατά την εκδήλωση ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών).
2. Αφετέρου, εκείνα τα δίκτυα, στα οποία η χωροθέτηση, η διάταξη και η 'σχέση' των στοιχείων τους μεταξύ τους, τα καθιστά εξ ορισμού λιγότερα ανθεκτικά σε αλλαγές (δηλαδή σε επιπτώσεις) κατά τη λειτουργία τους. Αυτά είναι και τα δίκτυα, τα οποία θα επιβαρυνθούν περισσότερο από τις επιπτώσεις της εκδήλωσης ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών.

Η μεθοδολογική προσέγγιση για την υλοποίηση αυτού του στόχου απεικονίζεται σχηματικά στην Εικόνα 36.

## Επίπεδο 2

Αποτίμηση σημαντικότητας και ανθεκτικότητας δικτύων Μεταφορών και στοιχείων τους



Εικόνα 36: Μεθοδολογική προσέγγιση Επίπεδου 2: Αποτίμηση σημαντικότητας και ανθεκτικότητας δικτύων Μεταφορών ή στοιχείων τους

Επισημαίνεται εδώ, ότι στην Εικόνα 36, με κίτρινη απόχρωση, απεικονίζεται σχηματικά η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής μέσω προσαρμογής, και είναι απόσπασμα της συνολικής μεθοδολογικής προσέγγισης της διδακτορικής διατριβής, όπως παρουσιάστηκε στην Εικόνα 33. Στη βιβλιογραφική επισκόπηση που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 6, συγκεντρώθηκαν και παρουσιάστηκαν διάφορα μέτρα, μέθοδοι και δείκτες (από εδώ και στο εξής 'μέτρα') από την επιστημονική περιοχή της Θεωρίας Δικτύων, που μπορούν να αποδώσουν μια αριθμητική τιμή στην 'αξία' κάθε στοιχείου ενός δικτύου, δεδομένων κάποιων παραμέτρων. Παρόλα αυτά, όπως φάνηκε, μόλις ένα από τα 18 αυτά μέτρα έχει αναπτυχθεί για τα δίκτυα Μεταφορών (ο δείκτης κρισιμότητας συνδέσμων – βλ. Ενότητα 6.21), ενώ τα υπόλοιπα βρίσκουν κατά βάση εφαρμογή σε δίκτυα ηλεκτρονικών υπολογιστών, ενέργειας, κοινωνικά, τηλεπικοινωνιών και του Διαδικτύου. Έτσι, το πρώτο βήμα της μεθοδολογικής προσέγγισης του επιπέδου αυτού, είναι η επαλήθευση των

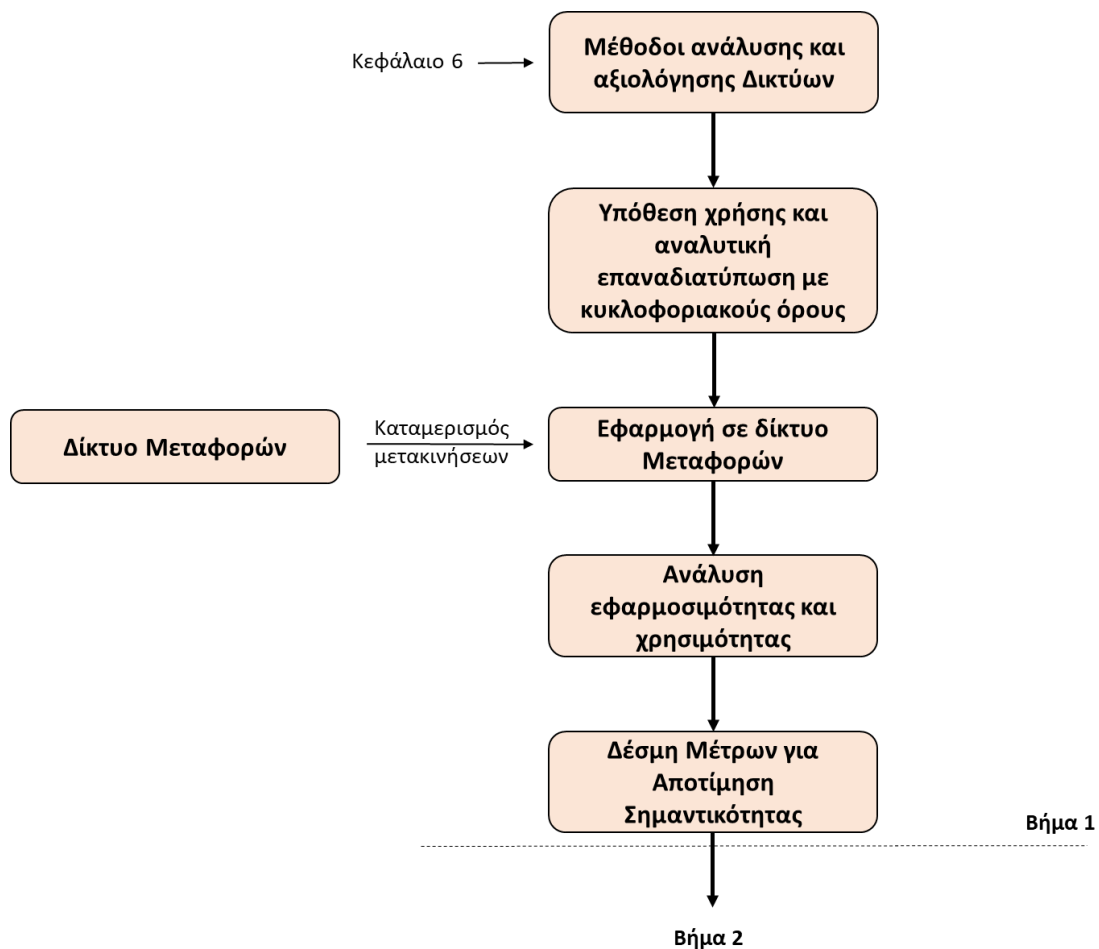
υποθέσεων εφαρμογής που έγιναν για κάθε ένα από αυτά τα μέτρα στο Κεφάλαιο 6, η ανάλυση της χρησιμότητάς τους και η κατανόηση των αποτελεσμάτων τους για τα δίκτυα Μεταφορών. Το βήμα αυτό ολοκληρώνεται με την πρόταση δέσμης μέτρων από τη Θεωρία Δικτύων, της οποίας μπορεί να γίνει χρήση και εφαρμογή σε δίκτυα Μεταφορών υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής. Τέτοια μέτρα θα χρησιμοποιηθούν για την ποσοτικοποίηση της ανθεκτικότητας ενός δικτύου και των στοιχείων του στο Βήμα 2.

Το δεύτερο βήμα αφορά στην προσπάθεια εύρεσης μοτίβων στην κατανομή των τιμών των μέτρων που προέκυψαν από το βήμα 1, για τα επιμέρους στοιχεία ενός δικτύου Μεταφορών, έτσι ώστε με σχετική ασφάλεια να μπορούν να αναγνωριστούν δίκτυα, των οποίων η λειτουργία είναι περισσότερο ή λιγότερο ευπαθής σε επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Γνωρίζοντας τις κατανομές των βέλτιστων τιμών των μέτρων ανθεκτικότητας και με *ex ante* εφαρμογή σε ένα δίκτυο Μεταφορών οποιασδήποτε εκδήλωσης ακραίου καιρικού φαινομένου, μπορεί να απαντηθεί ένα κρίσιμο ερώτημα των αρχών (από τους διαχειριστές δικτύων Μεταφορών έως τις υπηρεσίες Πολιτικής Προστασίας): Πόσο ανθεκτικό λειτουργικά είναι το αντίστοιχο δίκτυο σε αλλαγές, που προκαλούνται από εξωσυστημικούς παράγοντες?

Στις επόμενες ενότητες γίνεται εφαρμογή των βημάτων της μεθοδολογικής προσέγγισης του Επιπέδου 2.

#### **7.4.1. Επίπεδο 2 – Βήμα 1: Επαλήθευση εφαρμοσιμότητας και χρησιμότητας μέτρων για τα δίκτυα Μεταφορών**

Στο πρώτο βήμα του επιπέδου 2 της μεθοδολογικής προσέγγισης, στόχος είναι η επαλήθευση των υποθέσεων που έγιναν στο Κεφάλαιο 6, αναφορικά με το κατά πόσο η επαναδιατύπωση των αναλυτικών εκφράσεων των μέτρων με κυκλοφοριακούς όρους και η εφαρμογή τους σε δίκτυα Μεταφορών είναι δυνατή και αφετέρου η διερεύνηση της δυνατότητας χρησιμοποίησης αυτών, ως απάντηση στις ανάγκες αποτίμησης της σημαντικότητας κυκλοφοριακών κόμβων και τμημάτων. Η εφαρμογή του πρώτου βήματος θα καταλήξει στα μέτρα εκείνα, των οποίων η χρήση έχει νόημα για τα δίκτυα των Μεταφορών υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής και θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα βήματα. Η Εικόνα 37 παρουσιάζει τα επιμέρους στάδια του πρώτου βήματος αυτού του επιπέδου.



**Εικόνα 37: Μεθοδολογικά στάδια πρώτου βήματος για την επαλήθευση εφαρμοσιμότητας και χρησιμότητας μέτρων για τα δίκτυα Μεταφορών**

Όπως φαίνεται, η πρώτη ενέργεια της μεθόδου θα αφορά στη συγκέντρωση των μέτρων που συναντήθηκαν στη βιβλιογραφική επισκόπηση και στην διατύπωση υποθέσεων χρήσης τους για τα δίκτυα Μεταφορών. Όπου αυτό κριθεί απαραίτητο, θα γίνει επαναδιατύπωση της αναλυτικής έκφρασης του μέτρου που εξετάζεται, έτσι ώστε να παραμετροποιείται η έννοια της κυκλοφορίας και των Μεταφορών συνολικά.

Η δεύτερη ενέργεια θα αφορά στην εφαρμογή αυτών των μέτρων σε κάποιο δίκτυο Μεταφορών. Αυτής της ενέργειας θα προηγηθεί μια διαδικασία καταμερισμού των μετακινήσεων στο δίκτυο Μεταφορών, που θα έχει επιλεγεί για την εφαρμογή των μέτρων αυτών. Για την ποσοτικοποίηση ορισμένων εξ αυτών, προτείνεται η χρήση μεγεθών, όπως ο κυκλοφοριακός φόρτος ή ο χρόνος διάνυσης των οδικών τμημάτων.

Η τρίτη ενέργεια θα αφορά στην ποιοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής των επιμέρους μέτρων, πριν την τελική διαλογή της δέσμης των μέτρων που κρίνονται ως εφαρμόσιμα και χρήσιμα για τα δίκτυα Μεταφορών.

#### 7.4.2. Επίπεδο 2 – Βήμα 2: Αλγοριθμική εύρεση βέλτιστων κατανομών των τιμών

Στο δεύτερο βήμα του επιπέδου 2 της μεθοδολογικής προσέγγισης, στόχος είναι η εύρεση μοτίβων στις κατανομές των τιμών των μέτρων που συγκεντρώθηκαν στο προηγούμενο βήμα, τα οποία θα μπορούσαν να καταδείξουν την ανθεκτικότητα ή όχι ενός δικτύου. Πρακτικά, το ερώτημα που θα απαντηθεί μέσω αυτού του βήματος είναι, αν μπορούν τα μέτρα αυτά να μας δώσουν πληροφορίες για το πόσο απρόσκοπτα, σε σχέση με τις κανονικές συνθήκες, θα μπορούσε να λειτουργήσει ένα δίκτυο Μεταφορών όταν υφίσταται αλλαγές (υπό την έννοια ότι κάποια από τα στοιχεία του είναι δυνατόν να καταστούν μη λειτουργικά, όπως στην περίπτωση εκδήλωσης ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών). Μέσω αυτού του βήματος γίνεται, δηλαδή, μια προσπάθεια να κατανοηθεί σε βάθος αν, μέσω των κατανομών των τιμών των μέτρων αυτών για τα επιμέρους στοιχεία ενός δικτύου Μεταφορών, μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την ανθεκτικότητά του (π.χ. ένα δίκτυο, του οποίου οι κόμβοι παίρνουν τιμές κεντρικότητας εγγύτητας με κατανομή Poisson είναι λιγότερο ανθεκτικό από ένα δίκτυο που οι αντίστοιχες τιμές έχουν εκθετική κατανομή).

Για να μπορέσουμε να φτάσουμε σε ένα τέτοιο συμπέρασμα, πρέπει να αναπτυχθεί μια συστηματική διαδικασία υπολογισμού υπό μορφή ενός αλγορίθμου. Πριν την ανάπτυξη του αλγορίθμου, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα εξής:

- Για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας του δικτύου, σε περιπτώσεις αλλαγών της δομής του έναντι κανονικών συνθηκών, ακολουθείται η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε κατά την βιβλιογραφική επισκόπηση και αφορά στην 'αφαίρεση' στοιχείων από το δίκτυο (βλέπε Ενότητες 6.16 και 6.21) και κατόπιν σύγκριση κάποιων δεικτών που υπολογίζονται για τα δύο δίκτυα: το κανονικό, και αυτό που προκύπτει έπειτα από την αφαίρεση κάποιων στοιχείων.
- Για την εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος, αναφορικά με τις κατανομές των τιμών των μέτρων, κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή του αλγορίθμου σε μεγάλο αριθμό δικτύων.

Οι επιμέρους ενέργειες του προτεινόμενου αλγορίθμου παρουσιάζονται παρακάτω:

Ενέργεια 1: Δημιουργία τυχαίου δικτύου  $G$  με  $i$  αριθμό κόμβων και  $j$  αριθμό οδικών τμημάτων και τυχαίων κεντροειδών κυκλοφοριακών ζωνών

Ενέργεια 2: Δημιουργία τυχαίου διανύσματος ζήτησης για μετακινήσεις



Ενέργεια 3: Καταμερισμός των μετακινήσεων στο δίκτυο και υπολογισμός συνολικής καθυστέρησης διάνυσης οδικών τμημάτων  $\Sigma t$

Ενέργεια 4: Υπολογισμός τιμών του υπό εξέταση μέτρου για τα στοιχεία του δικτύου και της κατανομής των τιμών του

Ενέργεια 5.1: Αφαίρεση τυχαίων  $x = 10\%$  κόμβων του δικτύου και δημιουργία νέου δικτύου  $G'$

Ενέργεια 5.2: Καταμερισμός των μετακινήσεων στο νέο δίκτυο  $G'$  και υπολογισμός συνολικής καθυστέρησης διάνυσης οδικών τμημάτων  $\Sigma t'$

Ενέργεια 5.3: Υπολογισμός δείκτη  $s = \frac{\Sigma t}{\Sigma t'}$

Ενέργεια 6: Επανάληψη Ενεργειών 5.1 έως 5.3 για αριθμό επαναλήψεων  $m=100$

Ενέργεια 7: Υπολογισμός δείκτη  $S_x = \frac{\Sigma s}{100}$

Ενέργεια 8: Επανάληψη Ενεργειών 5.1 και 7 για  $x = 20\%$  και  $30\%$  του πλήθους των κόμβων του δικτύου

Ενέργεια 9: Επανάληψη Ενεργειών 2 έως 8 για αριθμό επαναλήψεων  $l=100$

Ενέργεια 10: Επανάληψη Ενεργειών 1 έως 9 για μεγάλο αριθμό δικτύων

Όπως φαίνεται, ακολουθείται μια επαναληπτική διαδικασία δημιουργίας πολλών τυχαίων δικτύων. Σε κάθε δίκτυο που δημιουργείται, καταμερίζεται ένας τυχαίος αριθμός μετακινήσεων, και υπολογίζεται σωρευτικά ο αθροιστικός χρόνος διάνυσης όλων των οδικών τμημάτων του. Ο χρόνος αυτός αποτελεί τον δείκτη κανονικής λειτουργίας του δικτύου και ως προς αυτόν θα συγκρίνονται όλοι οι αντίστοιχοι δείκτες των δικτύων που προκύπτουν, έπειτα από τυχαία αφαίρεση κάποιων στοιχείων τους. Πριν την αφαίρεση οποιωνδήποτε στοιχείων από ένα δίκτυο, υπολογίζονται οι τιμές του μέτρου που εξετάζεται για κάθε στοιχείο του δικτύου, και υπολογίζεται η κατανομή των τιμών αυτών. Η αφαίρεση στοιχείων από ένα δίκτυο γίνεται, για να προσομοιωθεί η εμφάνιση και η επίπτωση ενός ακραίου καιρικού φαινομένου στη λειτουργία του δικτύου. Προτείνονται 3 βήματα αφαίρεσης στοιχείων του δικτύου της τάξης του 10% των υφιστάμενων στοιχείων. Η επιλογή του βήματος είναι τυχαία αλλά αντιπροσωπευτική τριών τάξεων επιπτώσεων ενός ακραίου φαινομένου, που θεωρείται ότι μπορεί να καταλύσει τη λειτουργία κατά σειρά του 10%, του 20% και του 30% του συνόλου των στοιχείων ενός δικτύου. Το όριο τίθεται περίπου στο 30%

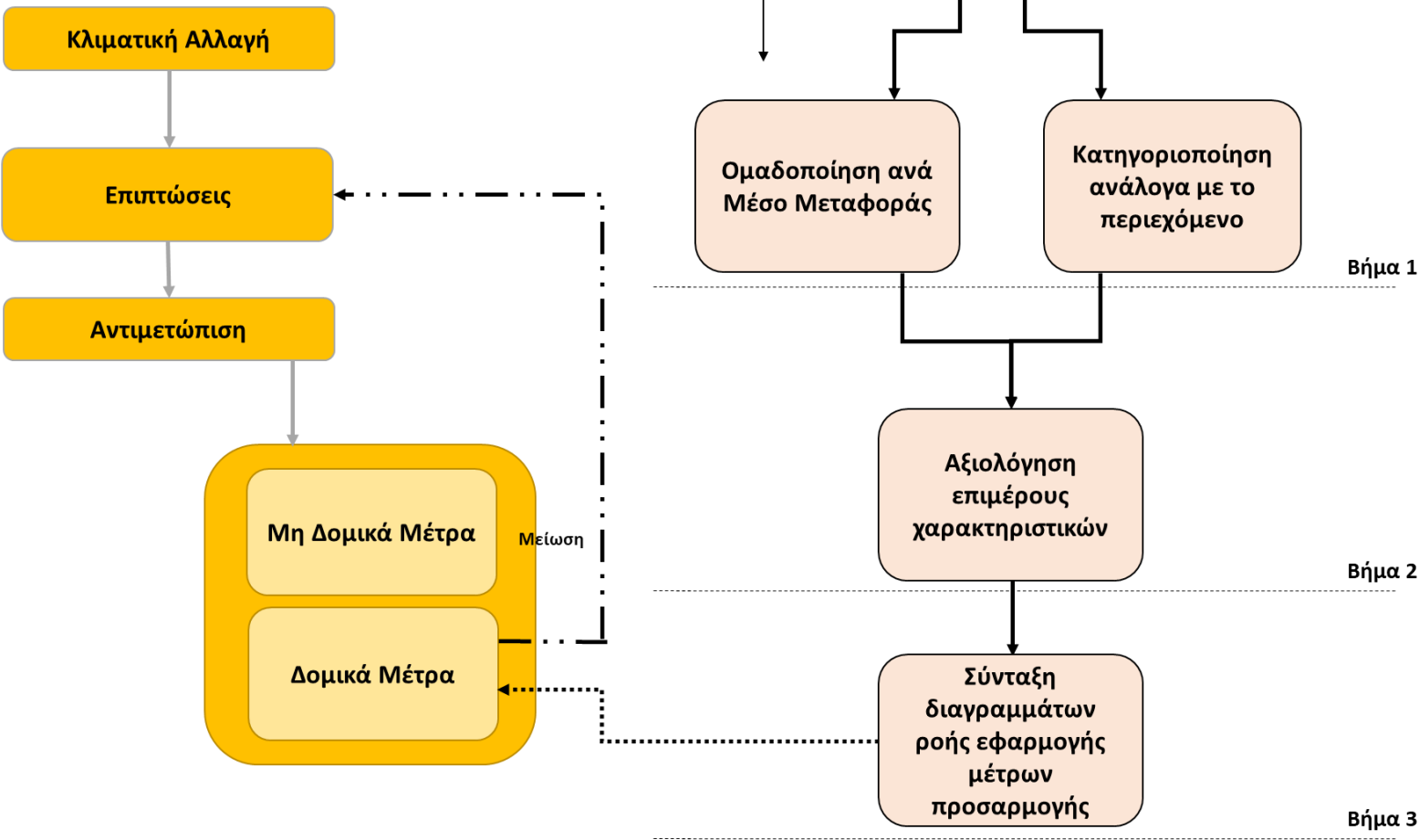
των στοιχείων ενός δικτύου, καθώς πάνω από αυτό το όριο είναι πολύ πιθανό, να μην μπορεί να γίνει ο καταμερισμός των μετακινήσεων ή τα αποτελέσματα να μην είναι αντιπροσωπευτικά της πραγματικότητας. Ο υπολογισμός του δείκτη  $s_x$  γίνεται για να υπολογιστεί, πόσο κοντά στην κανονική λειτουργία του παρέμεινε το δίκτυο, έπειτα από την αφαίρεση κάποιων στοιχείων του. Τιμές του  $s_x$  κοντά στη μονάδα, σημαίνουν ότι οι επιπτώσεις αφαίρεσης των στοιχείων του είχαν μικρή επίδραση, άρα το δίκτυο θεωρείται ανθεκτικό. Για αυτές τις τιμές του  $s_x$  διερευνώνται οι κατανομές των τιμών του μέτρου που εξετάζεται κάθε φορά, με σκοπό την πιθανή εύρεση κάποιου μοτίβου που να αποδεικνύει την ανθεκτικότητα του δικτύου.

### **7.5. Επίπεδο 3 – Ιεράρχηση εφαρμογής μέτρων προσαρμογής**

Στόχος του τρίτου και τελευταίου επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης, είναι η απόδοση επιπρόσθετων χαρακτηριστικών στα μέτρα προσαρμογής, που βρέθηκαν στη βιβλιογραφική επισκόπηση και παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 2.7.2.2 καθώς και η ιεράρχηση μιας πιθανής εφαρμογής τους. Υπενθυμίζεται εδώ, ότι για τα μέτρα αυτά παρατηρήθηκε απουσία απαραίτητων συνοδευτικών πληροφοριών και στοιχείων, που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως παράμετροι ιεράρχησής τους. Όμως, μέσω της ιεράρχησης αυτής, το τρίτο επίπεδο της μεθοδολογικής προσέγγισης μπορεί να παραγάγει ένα εργαλείο ανάλυσης διαφόρων μέτρων προσαρμογής (εφόσον αποδίδει επιπλέον χαρακτηριστικά σε κάθε μέτρο), και σύνθεσής τους, υπό τη μορφή διαγραμμάτων ροής.

Στην προσπάθεια να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος, προτείνεται μια μεθοδολογική προσέγγιση για τη διαμόρφωση και σύνθεση διαγραμμάτων ροής μέτρων προσαρμογής, που καλύπτουν τις Μεταφορές τόσο προσώπων όσο και εμπορευμάτων και η οποία απεικονίζεται σχηματικά στην Εικόνα 38.

**Επίπεδο 3**  
Ιεράρχηση εφαρμογής μέτρων προσαρμογής



**Εικόνα 38: Μεθοδολογική προσέγγιση Επιπέδου 3: Ιεράρχηση εφαρμογής μέτρων προσαρμογής**

Επισημαίνεται, ότι στην Εικόνα 38, με κίτρινη απόχρωση, απεικονίζεται σχηματικά η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής μέσω προσαρμογής, και είναι απόσπασμα της συνολικής μεθοδολογικής προσέγγισης της διδακτορικής έρευνας όπως παρουσιάστηκε στην Εικόνα 33. Κατά τη βιβλιογραφική επισκόπηση που πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 2, συγκεντρώθηκαν μέτρα, πολιτικές και στρατηγικές προσαρμογής (από εδώ και στο εξής 'μέτρα') και ήδη ομαδοποιήθηκαν ανά μέσο μεταφοράς (βλέπε Πίνακας 8 έως και Πίνακας 11). Αναλύοντας το περιεχόμενο και τη φύση των μέτρων που συγκεντρώθηκαν, φαίνεται να υπάρχουν κάποιες γενικές κατηγορίες, στις οποίες αυτά υπάγονται. Έτσι, το πρώτο βήμα της μεθοδολογικής προσέγγισης του επιπέδου αυτού, είναι η κατηγοριοποίηση των μέτρων προσαρμογής ανάλογα με το περιεχόμενό τους. Ενδεικτικά αναφέρονται μέτρα τεχνικού χαρακτήρα, νομοθετικού περιεχομένου, ή μέτρα που βασίζονται στις τεχνολογίες

πληροφορικής και επικοινωνιών (ΤΠΕ), ενώ η ενδεδειγμένη κατηγοριοποίηση παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 10.

Το δεύτερο βήμα του επίπεδου αυτού, αφορά στην αξιολόγηση των επιμέρους χαρακτηριστικών των μέτρων. Δεδομένων τόσο του βασικού κενού που αναγνωρίστηκε κατά την βιβλιογραφική επισκόπηση, και αφορά στην έλλειψη χαρακτηρισμού των μέτρων προσαρμογής ως προς την εφαρμοσιμότητά τους, όσο και του κεντρικού στόχου του 3<sup>ου</sup> επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης, αναφορικά με την ιεράρχηση μιας πιθανής εφαρμογής των μέτρων προσαρμογής, είναι απαραίτητο να απαντηθούν κάποια ερωτήματα για τα μέτρα αυτά, όπως:

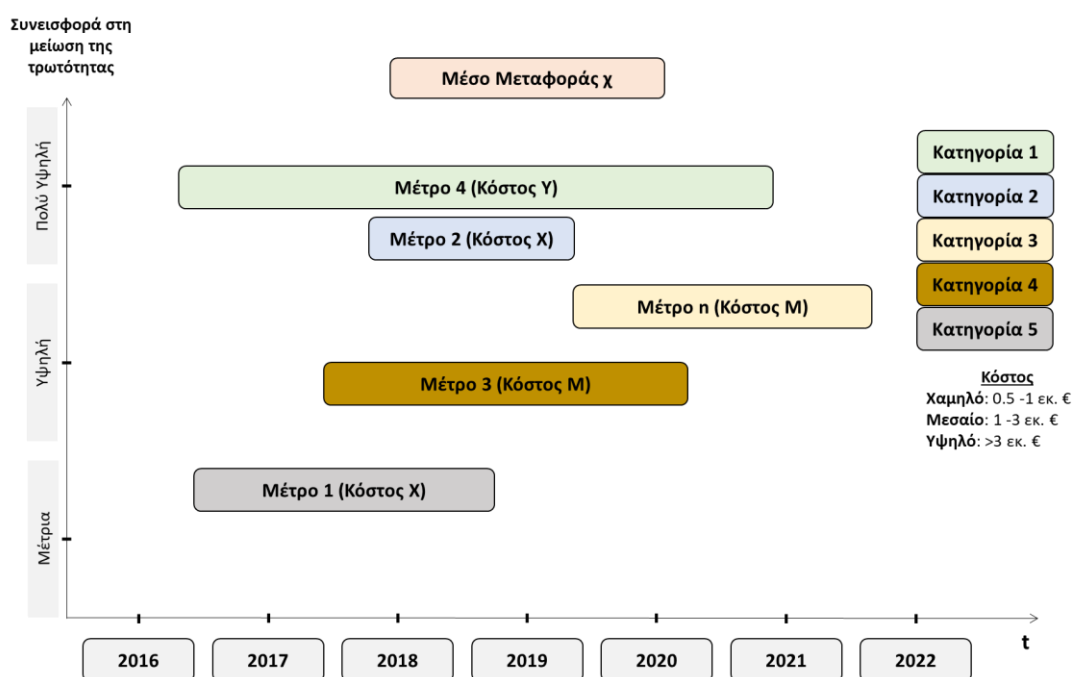
- Πότε πρέπει να εφαρμοστεί ένα μέτρο;
- Πόσο εκτιμάται να διαρκέσει η εφαρμογή του;
- Ποιο εκτιμάται να είναι το κόστος του;
- Ποια είναι η εκτιμώμενη συνεισφορά του στην μείωση της τρωτότητας των συστημάτων Μεταφορών από την κλιματική αλλαγή;

Καθώς οι απαντήσεις σε αυτές τις ερωτήσεις δεν είναι μονοσήμαντες, προτείνεται ο σχεδιασμός μιας έρευνας ερωτηματολογίου, που θα απευθύνεται σε εμπειρογνώμονες του τομέα των Μεταφορών. Η έρευνα ερωτηματολογίου οφείλει να επικεντρωθεί στις εξής τρεις θεματικές ενότητες, δεδομένων των ερωτημάτων που τέθηκαν παραπάνω:

1. Χρονική διάσταση των μέτρων προσαρμογής: Πότε πρέπει ένα συγκεκριμένο μέτρο να εφαρμοστεί και ποιο το χρονοδιάγραμμα της εφαρμογής του; Δεδομένης της αναγκαιότητας για προσαρμογή, οι πιθανές απαντήσεις στο πρώτο ερώτημα έχουν μέγιστο εύρος μερικών ετών από το χρόνο διεξαγωγής της έρευνας.
2. Οικονομική διάσταση των μέτρων προσαρμογής: Ποιο είναι το κόστος της πιθανής εφαρμογής κάθε μέτρου; Δεδομένης της δυσκολίας ακριβούς εκτίμησης του κόστους κάθε μέτρου, προτείνεται η χρήση ενός ποιοτικού δείκτη για το κόστος. Οι πιθανές απαντήσεις μπορούν να έχουν τιμές 'Χαμηλό', 'Μέσο' και 'Υψηλό' και να αντιστοιχούν σε φάσματα τιμών. Για τους εμπειρογνώμονες που μπορεί να έχουν ποσοτική γνώση του κόστους, δίνεται η ελεύθερη επιλογή συμπλήρωσης της έρευνας και με μια ακριβή αριθμητική τιμή (σε ευρώ).
3. Συμβολή εκάστου μέτρου προσαρμογής στη βελτίωση της ανθεκτικότητας καθενός από τα υπό εξέταση συστήματα Μεταφορών: Ποια είναι η πιθανή συνεισφορά του κάθε μέτρου στην προστασία της υποδομής των Μεταφορών, και στην

ανθεκτικότητα των λειτουργιών των δικτύων Μεταφορών απέναντι στην κλιματική αλλαγή; Οι πιθανές απαντήσεις είναι και σε αυτή την περίπτωση ποιοτικού χαρακτήρα, καθώς αφενός η έρευνα στην προσαρμογή των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή είναι ακόμα πρώιμη, και αφετέρου διότι η ακριβής αξιολόγηση της συμβολής είναι ένα πολύ σύνθετο ζήτημα ακόμα και για μια έρευνα που απευθύνεται σε εμπειρογνώμονες. Δεδομένου ότι κάθε μέτρο προσαρμογής, μπορεί να συμβάλει κατ'ελάχιστο 'μέτρια' στη βελτίωση της ανθεκτικότητας, οι πιθανές απαντήσεις στο ερώτημα αυτό είναι: 'Μέτρια', 'Υψηλή', 'Πολύ υψηλή'.

Στο τρίτο βήμα, τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των επιμέρους χαρακτηριστικών των μέτρων προσαρμογής παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων ροής (Εικόνα 39).



Εικόνα 39: Παράδειγμα σύνταξης διαγράμματος ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής

Όπως φαίνεται, συντάσσονται διαγράμματα στα οποία τοποθέτηση κάθε μέτρου γίνεται βάσει της αξιολόγησης του προηγούμενου βήματος:

- Έναρξη της περιόδου εφαρμογής του μέτρου (αριστερό άκρο οριοθέτησης του κάθε μέτρου στο διάγραμμα ροής).
- Εκτιμώμενος χρόνος για την εφαρμογή του μέτρου (κατά μήκος οριοθέτηση κάθε μέτρου στον άξονα Χ).
- Οικονομικοί πόροι που απαιτούνται για την εφαρμογή του μέτρου (ένδειξη σε μια υψηλή-μέση-χαμηλή κλίμακα).

- Συμβολή του μέτρου στη μείωση της τρωτότητας, και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας του συστήματος μεταφοράς (τοποθέτηση της οριοθέτησης κάθε μέτρου στον άξονα Υ).

## 8. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ - ΕΠΑΝΑΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

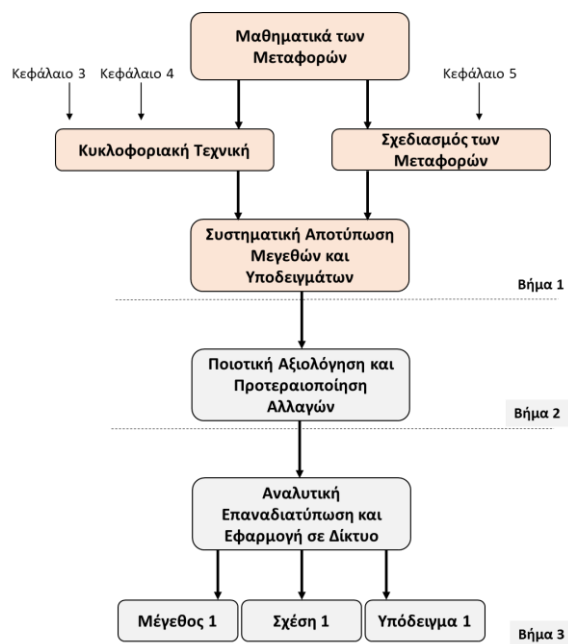
### 8.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται εφαρμογή του πρώτου επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης της διδακτορικής διατριβής, που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 7. Υπενθυμίζεται, ότι βασικός στόχος του επιπέδου αυτού είναι η επαναδιατύπωση των μεγεθών και υποδειγμάτων που χρησιμοποιούνται στην Κυκλοφοριακή Τεχνική και στον Σχεδιασμό των Μεταφορών, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη μέσω σχετικής παραμετροποίησης, η έννοια του καιρού και του κλίματος, και των αλλαγών τους. Επειδή όμως ο όγκος ενός τέτοιου εγχειρήματος υπερβαίνει το πλαίσιο μιας διδακτορικής έρευνας, γίνεται προτεραιοποίηση εκείνων των μεγεθών, των σχέσεών τους και των υποδειγμάτων που χρήζουν επαναδιατύπωσης. Η διάρθρωση του κεφαλαίου ακολουθεί ένα προς ένα τα βήματα της μεθοδολογίας, όπως αυτά αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 7.3.

### 8.2. Συστηματική αποτύπωση μεγεθών και υποδειγμάτων

Η συστηματική αποτύπωση των μεγεθών και των υποδειγμάτων που χρησιμοποιούνται στις Μεταφορές (και συγκεκριμένα στην Κυκλοφοριακή Τεχνική και στον Σχεδιασμό των Μεταφορών) αποτελεί το πρώτο βήμα του πρώτου επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης της διδακτορικής διατριβής.

Υπενθυμίζεται ότι στο βήμα αυτό, σκοπός είναι να γίνει μια συστηματική συγκέντρωση των «Μαθηματικών των Μεταφορών», τα οποία στην συνέχεια θα αξιολογηθούν και θα προτεραιοποιηθούν (στο Βήμα 2) και ορισμένα εξ αυτών θα επαναδιατυπωθούν (στο Βήμα 3). Σύμφωνα με την μεθοδολογική προσέγγιση του πρώτου



βήματος, που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 7.3.1, ο Πίνακας 17 παρουσιάζει μια συγκεντρωτική αποτύπωση των 'Μαθηματικών των Μεταφορών'. Όλα τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον Πίνακα αυτό, προέρχονται από την βιβλιογραφική επισκόπηση των Κεφαλαίων 3, 4 και 5 της διδακτορικής διατριβής.

**Πίνακας 17: Συγκεντρωτική αποτύπωση των 'Μαθηματικών των Μεταφορών'**

Στοιχείο	Ομαδοποίηση	Κατηγοριοποίηση
Χρονικός διαχωρισμός	Διαχωρισμός	Μέγεθος
Χωρικός διαχωρισμός		
Κυκλοφοριακός φόρτος	Κυκλοφοριακός φόρτος	
Στάθμη εξυπηρέτησης	Κυκλοφοριακή ικανότητα	
Κυκλοφοριακή ικανότητα		
Πυκνότητα	Πυκνότητα - Κατάληψη	
Κατάληψη		
Ταχύτητα σημείου	Ταχύτητα	
Ταχύτητα διαδρομής		
Ταχύτητα λειτουργίας		
Μέση ταχύτητα χρόνου		
Μέση ταχύτητα χώρου		
Μέση ταχύτητα οδού		
Ταχύτητα περιοχής		
Ταχύτητα ελεύθερης ροής		
Ταχύτητα πορείας		
Γραμμική ταχύτητα κίνησης		
Θεμελιώδης σχέση κυκλοφοριακής ροής	Κυκλοφοριακή Ροή	Σχέση
Σχέση Ταχύτητας - Πυκνότητας		
Σχέση Φόρτου - Πυκνότητας		
Σχέση Ταχύτητας - Φόρτου		
Μικροσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής		Υπόδειγμα
Μεσοσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής		
Μακροσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής	Γένεση μετακινήσεων	Μέθοδος ή Αλγόριθμος
Ανάλυση κατά κατηγορίες		
Γραμμική παλινδρόμηση		
Υποδείγματα αναγωγής σε μελλοντικό χρόνο	Κατανομή στο χώρο	Υπόδειγμα
Υποδείγματα ομοιόμορφου συντελεστή ανάπτυξης		
Υποδείγματα απλά περιορισμένου συντελεστή ανάπτυξης		
Υποδείγματα διπλά περιορισμένου συντελεστή ανάπτυξης		
Υποδείγματα προσαρμογής Fratar		
Υπόδειγμα βαρύτητας		
Συνθετικά υποδείγματα απλά και διπλά περιορισμένα		
Υπόδειγμα ευκαιρίας		
Συνάρτηση χρησιμότητας	Σχέση	
Υποδείγματα καταμερισμού κατά μέσο των άκρων των μετακινήσεων		
Υποδείγματα καταμερισμού κατά μέσο των κατανεμημένων μετακινήσεων	Κατανομή στα μέσα	Υπόδειγμα
Συνθετικά υποδείγματα		
Πολυωνυμικό υπόδειγμα Logit		
Ιεραρχικό υπόδειγμα Logit		



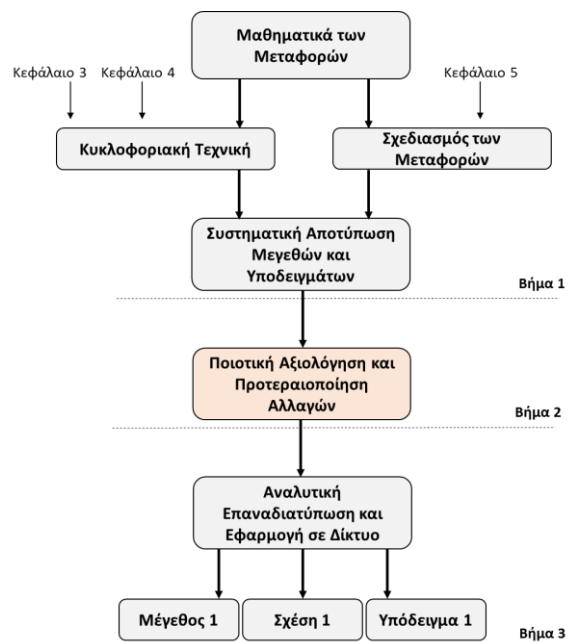
Πολυωνυμικό υπόδειγμα Probit		
Υποδείγματα απευθείας υπολογισμού ζήτησης		
Εύρεση διαδρομών	Καταμερισμός στο δίκτυο	Μέθοδος ή Αλγόριθμος
Συναρτήσεις καθυστέρησης		Σχέση
Καταμερισμός όλα-ή-τίποτα		Μέθοδος ή Αλγόριθμος
Καταμερισμός όλα-ή-τίποτα με περιορισμό χωρητικότητας		
Μέθοδοι προσομοίωσης		
Μέθοδοι αναλογίας		
Μέθοδος απότομης και ήπιας αλλαγής ταχύτητας		
Μέθοδος σταδιακού καταμερισμού		
Μέθοδος καταμερισμού συνεχόμενων μέσων		
Μαθηματικός προγραμματισμός		
Στοχαστική ισορροπία χρηστών		
Δυναμικός καταμερισμός		

### 8.3. Ποιοτική αξιολόγηση και προτεραιοποίηση αλλαγών

Η ποιοτική αξιολόγηση και η προτεραιοποίηση των πιθανών αλλαγών των μεγεθών που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο βήμα, αποτελεί το δεύτερο βήμα του πρώτου επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης της διδακτορικής διατριβής.

Υπενθυμίζεται ότι στο βήμα αυτό γίνεται η αξιολόγηση της επίπτωσης του καιρού, του κλίματος, και των αλλαγών τους, στο στοιχείο που εξετάζεται, και η αξιολόγηση της κρισιμότητας του στοιχείου, αν δηλαδή

υπεισέρχεται στον υπολογισμό ή στην αναλυτική έκφραση άλλων στοιχείων. Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 7.3.2, για την προτεραιοποίηση ακολουθείται μια ανάλυση τεταρτημορίων, με 2 βασικούς άξονες αξιολόγησης: την επίπτωση και την κρισιμότητα. Για την αξιολόγηση της επίπτωσης χρησιμοποιείται μια ποιοτική κλίμακα (χαμηλή, μέτρια, υψηλή) που λαμβάνει και τις αντίστοιχες αριθμητικές τιμές (1, 2, και 3), ενώ για την αξιολόγηση της κρισιμότητας, αναπτύσσεται ένας Πίνακας συσχέτισης των στοιχείων μεταξύ τους, όπου με χρήση δύο τιμών (μηδέν και ένα) αξιολογείται αν ένα στοιχείο υπεισέρχεται στον υπολογισμό του άλλου.



Παρακάτω εξετάζονται ένα προς ένα τα στοιχεία που συγκεντρώνει ο Πίνακας 17 του προηγούμενου βήματος, και αξιολογούνται ποιοτικά ως προς την επίπτωση σε αυτά του καιρού, του κλίματος και των αλλαγών τους.

### **8.3.1. Αξιολόγηση επιπτώσεων καιρού και κλίματος, σε κυκλοφοριακά και συγκοινωνιακά μεγέθη και υποδείγματα**

Η αξιολόγηση του μεγέθους της επίπτωσης του καιρού και του κλίματος στα στοιχεία των “Μαθηματικών των Μεταφορών”, που συγκεντρώθηκαν στο προηγούμενο βήμα, είναι ποιοτικής φύσης, και γίνεται σε μια κλίμακα 3 βαθμίδων: Χαμηλή, Μέτρια και Υψηλή (επίπτωση). Σημειώνονται εδώ επιγραμματικά, οι αρχές και υποθέσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την αξιολόγηση αυτή και που περιγράφηκαν αναλυτικά στην Ενότητα 7.3.2:

- Για τα μεγέθη τα οποία προκύπτουν έπειτα από παρατηρήσεις, και δεν έχουν «δυναμική» (με την έννοια της Μηχανικής) υπόσταση, δεν παίρνουν δηλαδή διανυσματική έκφραση, όπως ο κυκλοφοριακός φόρτος ή η πυκνότητα της κυκλοφορίας, θεωρείται ότι το μέγεθος της επίπτωσης του καιρού και του κλίματος σ’αυτά, θα είναι ‘μέτριο’.
- Για τα μεγέθη που έχουν «δυναμική» (με την έννοια της Μηχανικής) υπόσταση, όπως ο χρόνος ή η ταχύτητα, θεωρείται ότι το μέγεθος της επίπτωσης πάνω τους είναι ‘υψηλό’.
- Για τα κλασικά μεγέθη Κυκλοφοριακής Τεχνικής και Σχεδιασμού των Μεταφορών που ούτως ή άλλως υπολογίζονται ή εκτιμώνται αλλά από τα οποία απουσιάζει οποιαδήποτε παράμετρος σχετική με τον καιρό και το κλίμα, θεωρείται ότι το μέγεθος της επίπτωσης που υφίστανται θα είναι ‘χαμηλό’.
- Για τα σύνθετα μεγέθη, που μέχρι σήμερα υπολογίζονται και εξαρτώνται από ένα ή περισσότερα άλλα μεγέθη που επίσης εξετάζονται, το μέγεθος της επίπτωσης του καιρού και του κλίματος, θα ισούται με το μεγαλύτερο μέγεθος επίπτωσης, μεταξύ των μεγεθών που αποτελούν συνιστώσες των σύνθετων μεγεθών.
- Για τις σχέσεις μεταξύ των μεγεθών που εξετάζονται, θεωρείται ότι υπερισχύει το μεγαλύτερο μέγεθος της επίπτωσης, σύμφωνα με την αξιολόγηση των επιμέρους μεγεθών.

- Για όλες τις μεθόδους και τους αλγορίθμους που εμπεριέχουν τη χρήση μεγεθών και σχέσεων τους ή για άλλα υποδείγματα που εξετάζονται, θα θεωρείται ότι το μέγεθος της επίπτωσης είναι 'χαμηλό'.
- Για όλα τα υποδείγματα, που εμπεριέχουν τη χρήση μεγεθών και σχέσεων τους ή άλλα υποδείγματα που εξετάζονται, θα γίνεται αξιολόγηση κατά περίπτωση και βάσει του σκοπού χρήσης του υποδείγματος.

Παρακάτω, εξετάζονται ένα προς ένα τα στοιχεία που παρουσιάζει ο Πίνακας 17, όπου παρατίθεται μια περιγραφική αξιολόγηση για κάθε στοιχείο και η αποτίμηση του μεγέθους της επίπτωσης, σύμφωνα με την παραπάνω κλίμακα.

#### **8.3.1.1. Χωρικός και χρονικός διαχωρισμός**

Τα πρώτα δύο στοιχεία που εξετάζονται, αφορούν στον *χωρικό και στον χρονικό διαχωρισμό*, που περιγράφουν την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών οχημάτων ως προς ένα σταθερό σημείο αναφοράς τους σε μήκος και σε χρόνο αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται ότι ο ελάχιστος διαχωρισμός είναι το μικρότερο μήκος ή ο μικρότερος χρόνος, που μπορεί να επιτευχθεί από ένα σύστημα, χωρίς μείωση της ταχύτητας των οχημάτων. Στις οδικές μεταφορές που εξετάζονται εδώ, τόσο ο χωρικός, όσο και ο χρονικός διαχωρισμός επηρεάζονται από την παρουσία ακραίων καιρικών συνθηκών. Επειδή ο μέσος χωρικός όσο και ο μέσος χρονικός διαχωρισμός μπορούν να διατυπωθούν αντιστοίχως ως αντιστρόφως ανάλογοι της πυκνότητας τη χρονική στιγμή  $t$  και του κυκλοφοριακού φόρτου στη θέση  $x$  (βλ. Ενότητα 3.2.4), και άρα είναι παρατηρούμενα μεγέθη (υπό διαφορετικές καιρικές συνθήκες), το μέγεθος της επίπτωσης αξιολογείται ως μέτριας έντασης. Δεν ισχύει το ίδιο για τον διαχωρισμό σε μέσα σταθερής τροχιάς που είναι περισσότερο προστατευμένα ή επηρεάζονται λιγότερο από ακραίες καιρικές συνθήκες. Για τις πλωτές και τις αεροπορικές μεταφορές η έννοια του χρονικού διαχωρισμού δεν έχει την ίδια αξία (λόγω μεγέθους δικτύων), και η τάξη μεγέθους του είναι συνήθως ώρες ή μέρες, οπότε αυτός είναι λιγότερο ευαίσθητος στην παρουσία ακραίων καιρικών φαινομένων.

#### **8.3.1.2. Κυκλοφοριακός φόρτος**

Ο *κυκλοφοριακός φόρτος*, που εκφράζει τον αριθμό οχημάτων που περνούν από ένα σημείο ή μία διατομή οδού στη μονάδα του χρόνου, επηρεάζεται όπως αναμένεται, από την ύπαρξη ακραίων καιρικών συνθηκών. Ο αριθμός των οχημάτων που περνούν από ένα σημείο είναι μέγιστος, όταν επικρατούν ιδανικές καιρικές συνθήκες (ηλιοφάνεια, ορατότητα, υγρασία κ.λπ.). Η παρουσία καιρικών φαινομένων (ακραίων και μη) προφανώς επηρεάζει τον φόρτο.

Οι κυκλοφοριακοί φόρτοι, ανάλογα με το χρονικό διάστημα κατά το οποίο μελετώνται καθώς και με την περιοχή μελέτης, παρουσιάζουν διακυμάνσεις της κατανομής τους στο χρόνο (μηνιαία ή εποχιακή, ημερήσια, ωριαία) και στο χώρο (ανά κατεύθυνση και λωρίδα κυκλοφορίας). Οι διακυμάνσεις αυτές επηρεάζουν σημαντικά τη μελέτη και το σχεδιασμό των συγκοινωνιακών υποδομών, και συνεπώς είναι απαραίτητο να λαμβάνεται πλέον υπόψη και η κλιματική αλλαγή. Καθώς ο κυκλοφοριακός φόρτος είναι ένα μέγεθος που προκύπτει έπειτα από μετρήσεις, ή είναι αποτέλεσμα του 4<sup>ου</sup> σταδίου του Σχεδιασμού των Μεταφορών, και άρα δεν υπεισέρχεται ως μεταβλητή εισόδου (όπως π.χ. η ταχύτητα), το μέγεθος της επίπτωσης αξιολογείται ως μέτριας έντασης.

#### **8.3.1.3. Στάθμη εξυπηρέτησης**

Η *στάθμη εξυπηρέτησης* εκφράζει τις συνθήκες λειτουργίας μέσα σε ένα ρεύμα κυκλοφορίας, και καθορίζεται με βάση ορισμένες οριακές τιμές παραμέτρων, όπως η ταχύτητα και ο χρόνος διάνυσης, η πυκνότητα και οι καθυστερήσεις. Το μέγεθος αυτό καθορίζεται από μια σειρά μεταβλητών ή άλλων μεγεθών (βλέπε Ενότητα 4.2), και έτσι, το μέγεθος της επίπτωσης αξιολογείται ως χαμηλό.

#### **8.3.1.4. Κυκλοφοριακή ικανότητα**

Για τον υπολογισμό της *κυκλοφοριακής ικανότητας* χρησιμοποιούνται διάφορα κριτήρια, όπως η ιεράρχηση των οδών, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους (αριθμός και πλάτος λωρίδων, χρήση τους), οι στάθμες εξυπηρέτησης, οι φόρτοι εξυπηρέτησης, η σύνθεση της κυκλοφορίας, ο αριθμός στρεφουσών κινήσεων, ο έλεγχος πρόσβασης (ή μη) σε κόμβους και η ύπαρξη (ή μη) σηματοδότησης (βλ. Ενότητα 4.7). Βάσει αυτών, υπολογίζονται παράμετροι όπως ο μέσος χρονικός διαχωρισμός (ακολουθίας), ο ρυθμός ροής, το μήκος ουράς και η καθυστέρηση, που με τη σειρά τους συνδυάζονται σε διαφορετικές μεταξύ τους εξισώσεις, βάσει της ιεράρχησης της υπό εξέταση οδού για τον καθορισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας. Η σημαντικότερη παρατήρηση που προκύπτει εδώ είναι, ότι για τον καθορισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας των οδών, δεν λαμβάνονται υπόψη καιρικές και κλιματικές συνθήκες, οι οποίες θεωρούνται a priori ιδανικές. Ωστόσο πρέπει να αναφερθεί, ότι όπως π.χ. η χρονική διακύμανση θεωρείται κρίσιμος παράγοντας καθορισμού της κυκλοφοριακής ικανότητας (αναγνωρίζοντας τη διαφορά μεταξύ κυκλοφορίας κατά τις ώρες αιχμής έναντι αυτών εκτός αιχμής, ή κατά την περίοδο των διακοπών του καλοκαιριού σε μια πόλη έναντι μιας εργάσιμης καθημερινής), πρέπει και οι καιρικές συνθήκες να συμπεριληφθούν ως παράγοντες που επηρεάζουν ή μπορούν να επηρεάσουν την κυκλοφοριακή ικανότητα.

Καθώς το εξεταζόμενο μέγεθος εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων ή άλλων μεγεθών, από τα οποία απουσιάζει ο καιρός και το κλίμα, το ύψος της επίπτωσης αξιολογείται ως χαμηλό.

#### **8.3.1.5. Πυκνότητα και κατάληψη**

Η *πυκνότητα της κυκλοφορίας*, που ορίζεται ως ο αριθμός των οχημάτων που κινούνται σε μία δεδομένη στιγμή στη μονάδα μήκους της οδού, επηρεάζεται όπως αναμένεται από την ύπαρξη ακραίων καιρικών συνθηκών. Καθώς, η πυκνότητα είναι ένα μέγεθος μετρήσιμο που προκύπτει από παρατηρήσεις, το μέγεθος της επίπτωσης αξιολογείται ως μέτριο. Για την *κατάληψη*, που ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου που μία διατομή καταλαμβάνεται από ένα όχημα, ισχύει η ίδια αξιολόγηση όπως και για την πυκνότητα.

#### **8.3.1.6. Ταχύτητα**

Η *ταχύτητα* είναι ίσως το σημαντικότερο μέγεθος συγκοινωνιακής προσφοράς, τόσο για την Κυκλοφορική τεχνική όσο και για τον Σχεδιασμό των Μεταφορών. Όπως προκύπτει όμως από την βιβλιογραφική επισκόπηση (βλ. Ενότητα 3.2.2), οι διάφοροι ορισμοί της ταχύτητας (είτε μεμονωμένων οχημάτων είτε συνόλου), δεν παραμετροποιούν τον καιρό και το κλίμα, ούτε και τις αλλαγές τους. Έτσι, το σημαντικότερο μέγεθος για ένα μεγάλο εύρος εργασιών στον τομέα των Μεταφορών, καθώς αφορά σε ιδανικές καιρικές συνθήκες, είναι μόνο συνάρτηση του κυκλοφοριακού φόρτου ή της πυκνότητας. Ως αποτέλεσμα, χρησιμοποιούνται οι διάφοροι ορισμοί της ταχύτητας, και κατά βάση η ταχύτητα ελεύθερης ροής και η βέλτιστη ταχύτητα, για την ανάπτυξη υποδειγμάτων Κυκλοφοριακής Ροής, τον καθορισμό της στάθμης εξυπηρέτησης, την κατανομή της ζήτησης στα διάφορα μέσα Μεταφορών, την εύρεση συντομότερων διαδρομών και τον καταμερισμό των μετακινήσεων στο δίκτυο, κ.λπ., χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το πώς αυτή επηρεάζεται από την κλιματική μεταβολή. Για τον λόγο αυτό, το μέγεθος της επίπτωσης στην ταχύτητα συνολικά θεωρείται υψηλό.

#### **8.3.1.7. Θεμελιώδεις και παράγωγες σχέσεις Κυκλοφοριακής Ροής**

Η *θεμελιώδης σχέση της κυκλοφοριακής ροής*  $q = kv_s$  και οι άλλες σχέσεις μεταξύ βασικών ή παράγωγων μεγεθών (διαχωρισμός, κατάληψη κ.λπ.), είναι κεντρικής σημασίας για την περιγραφή και την προτυποποίηση της κυκλοφορίας. Η επαναδιατύπωσή τους, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη ο καιρός και το κλίμα, είναι απαραίτητη για την πιστότερη αποτύπωση της πραγματικότητας. Οι σχέσεις μεταξύ των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής έχουν προσδιοριστεί μέσω εμπειρικών παρατηρήσεων σε συνθήκες μη διακοπτόμενης ροής της κυκλοφορίας συγκεκριμένων οδικών τμημάτων (βλ. Ενότητα 3.3). Περιγράφουν έτσι, επί της

ουσίας, τη σχέση των μεγεθών για τα τμήματα αυτά, στα οποία έγιναν οι παρατηρήσεις, και γίνεται γενίκευση και αναγωγή της ισχύος τους για τα υπόλοιπα οδικά τμήματα. Κρίνεται λοιπόν συνολικά για τους λόγους αυτούς, απαραίτητος ο επαναπροσδιορισμός των σχέσεων βάσει εμπειρικών παρατηρήσεων υπό διάφορες καιρικές συνθήκες και για διαφόρων ειδών οδικά τμήματα. Δεδομένων των βασικών αρχών και υποθέσεων που παρατέθηκαν στην Ενότητα 8.3.1, ότι δηλαδή για τις σχέσεις μεταξύ των μεγεθών που εξετάζονται, θεωρείται ότι υπερισχύει το μεγαλύτερο μέγεθος της επίπτωσης, σύμφωνα με την αξιολόγηση των επιμέρους μεγεθών, το μέγεθος της επίπτωσης για την αξιολόγηση της θεμελιώδους σχέσης θεωρείται υψηλό (δεδομένης της παρουσίας της ταχύτητας (βλ. Ενότητα 8.3.1.6). Το ίδιο ισχύει και για τις επιμέρους σχέσεις ταχύτητας-πυκνότητας και ταχύτητας-φόρτου. Για τη σχέση φόρτου-πυκνότητας, το μέγεθος της επίπτωσης αξιολογείται ως μέτριο (δεδομένης της επιμέρους αξιολόγησης για τον κυκλοφοριακό φόρτο και την πυκνότητα στις προηγούμενες ενότητες).

### **8.3.1.8. Υποδείγματα Κυκλοφοριακής Ροής**

#### *8.3.1.8.1. Μικροσκοπικά υποδείγματα Κυκλοφοριακής Ροής*

Τα μικροσκοπικά υποδείγματα Κυκλοφοριακής Ροής, περιγράφουν την κίνηση μεμονωμένου οχήματος μέσα σε ένα κυκλοφοριακό ρεύμα. Αυτό συνεπάγεται την ανάγκη δημιουργίας αναπαράστασης διαφόρων ενεργειών, όπως για παράδειγμα η επιτάχυνση, η επιβράδυνση και οι αλλαγές λωρίδας, τις οποίες εκτελεί ο οδηγός αντιδρώντας στην υπόλοιπη κυκλοφορία που τον περιβάλλει. Η συμπεριφορά μεμονωμένου οχήματος προτυποποιείται ως προς τη θέση  $x$  του προπορευόμενου οχήματος, την ταχύτητα  $u = dx/dt$ , την επιτάχυνση  $a = du/dt$  ή με ένα συνδυασμό των τριών παραμέτρων. Είναι προφανές ότι ο τρόπος με τον οποίο εκτελούνται οι παραπάνω ενέργειες, επηρεάζεται άμεσα από τις καιρικές και κλιματικές συνθήκες. Είναι επίσης σαφές, ότι οποιαδήποτε επαναδιατύπωση των υποδειγμάτων που χρησιμοποιούνται σε μικροσκοπικό επίπεδο, μπορεί να προκύψει από την επαναδιατύπωση των επιμέρους μεγεθών που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξή τους. Δεδομένων των βασικών αρχών και υποθέσεων που παρατέθηκαν στην Ενότητα 8.3.1, ότι δηλαδή για όλα τα υποδείγματα, που εμπεριέχουν τη χρήση μεγεθών και σχέσεών τους ή άλλα υποδείγματα που επίσης εξετάζονται, θα γίνεται αξιολόγηση κατά περίπτωση, και δεδομένης της εκτεταμένης χρήσης των μικροσκοπικών υποδειγμάτων σήμερα για ένα μεγάλο εύρος σκοπών, το μέγεθος της επίπτωσης αξιολογείται ως υψηλό.

#### 8.3.1.8.2. Μακροσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής

Στα μακροσκοπικά υποδείγματα, η κυκλοφορία των οχημάτων εξετάζεται συνολικά, και στόχος είναι η διερεύνηση του συνολικού συστήματος της κυκλοφορίας με βάση τις σχέσεις των βασικών κυκλοφοριακών μεγεθών (φόρτος, ταχύτητα και πυκνότητα). Τα μακροσκοπικά υποδείγματα, προσομοιώνουν την κίνηση των οχημάτων με τη ροή των ασυμπιεστων ρευστών. Στα μακροσκοπικά υποδείγματα τα μεμονωμένα οχήματα δεν λαμβάνονται υπόψη, αλλά αντιθέτως, χρησιμοποιούνται ομαδοποιημένες τιμές μεταβλητών για την κυκλοφοριακή ροή: (μέσος) φόρτος  $q(x, t)$ , (μέση) ταχύτητα  $u(x, t)$  και (μέση) πυκνότητα  $k(x, t)$ . Για τα μακροσκοπικά υποδείγματα, ισχύει έτσι η ίδια αξιολόγηση που περιγράφηκε στην Ενότητα 8.3.1.7 αναφορικά με τις *θεμελιώδεις σχέσεις της κυκλοφοριακής ροής σε επίπεδο δικτύου*, και το μέγεθος επίπτωσης αξιολογείται ως υψηλό. Πρέπει επίσης να σημειωθεί, ότι συνολικά η μελέτη των θεμελιωδών σχέσεων των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής σε επίπεδο δικτύου, έχει μεγαλύτερο επιστημονικό ενδιαφέρον, διότι αυτές μπορούν να έχουν καθολικότερη εφαρμογή (από τις σχέσεις που αναφέρονται σε μεμονωμένα οδικά τμήματα). Για τις διάφορες εφαρμογές των θεμελιωδών σχέσεων της κυκλοφορίας σε επίπεδο δικτύου, και την χρήση τους ως ελεγκτικού μηχανισμού αποφυγής της συμφόρησης (ως άμεσης επίπτωσης ενός ακραίου καιρικού φαινομένου) σε πραγματικό χρόνο, βλέπε Ενότητα 3.3.5.

#### 8.3.1.8.3. Μεσοσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής

Τα μεσοσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής συνδυάζουν σε κάποιον βαθμό τα μικροσκοπικά χαρακτηριστικά (καθώς μπορούν να αφορούν και να περιγράφουν τη συμπεριφορά μεμονωμένων οχημάτων), και τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά (που αφορούν και περιγράφουν τη συμπεριφορά συστάδων οχημάτων). Ισχύουν έτσι, οι αντίστοιχες αξιολογήσεις για τα μικροσκοπικά και μακροσκοπικά υποδείγματα, αλλά μόνο μερικώς, καθώς η συνολική χρήση των μεσοσκοπικών υποδειγμάτων κυκλοφοριακής ροής είναι σαφώς περιορισμένη σε σχέση με τα μάκρο- και μικροσκοπικά υποδείγματα. Δεδομένων των βασικών αρχών και υποθέσεων που παρατέθηκαν στην Ενότητα 8.3.1, ότι δηλαδή για όλα τα υποδείγματα, που εμπεριέχουν τη χρήση μεγεθών και σχέσεων τους ή άλλα υποδείγματα που εξετάζονται, θα γίνεται αξιολόγηση κατά περίπτωση, και δεδομένης της σχετικά περιορισμένης χρήσης των μεσοσκοπικών υποδειγμάτων σήμερα (έναντι των μικροσκοπικών και μακροσκοπικών υποδειγμάτων), το μέγεθος της επίπτωσης αξιολογείται ως χαμηλό.

### 8.3.1.9. Υποδείγματα 4 σταδίων Σχεδιασμού των Μεταφορών

#### 8.3.1.9.1. Υποδείγματα και μέθοδοι 1<sup>ου</sup> σταδίου Σχεδιασμού των Μεταφορών

Στα υποδείγματα και στις μεθόδους, που χρησιμοποιούνται στο πρώτο βήμα του Σχεδιασμού των Μεταφορών (*Γένεση των μετακινήσεων*), στο οποίο περιγράφονται και αναλύονται η παραγωγή και η έλξη των μετακινήσεων στις ζώνες της περιοχής μελέτης, προτείνεται η παραμετροποίηση καιρικών και κλιματικών συνθηκών. Αυτό ισχύει, παρά το γεγονός, ότι για τον προσδιορισμό του αριθμού των μετακινήσεων (συνήθως ανά ημέρα), που έχουν σημεία προέλευσης ή προορισμού σημεία που βρίσκονται σε καθεμιά από τις κυκλοφοριακές ζώνες μελέτης, ο παράγοντας των καιρικών και των κλιματικών συνθηκών σε μακροσκοπικό επίπεδο δεν φαίνεται να διαδραματίζει αποφασιστικό ρόλο, δηλαδή δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό το αν θα πραγματοποιηθεί μια μετακίνηση (εκτός π.χ. από περιπτώσεις κατάρρευσης του συστήματος Μεταφορών και άρα αδυναμίας πραγματοποίησης της μετακίνησης). Η διάσταση που όμως αξιολογείται ως ευαίσθητη, είναι ο χρόνος που θα επιλεγεί για να πραγματοποιηθεί μια μετακίνηση, ειδικά μέσα σε μια ημέρα ή μια εβδομάδα. Είναι δηλαδή πιθανόν, κάποιος μετακινούμενος να επιλέξει να κάνει μια μη-υποχρεωτική μετακίνηση (π.χ. αναψυχής ή για ψώνια), βάσει της πρόβλεψης του καιρού μέσα σε μια ημέρα (π.χ. αν υπάρχει έντονη βροχόπτωση το πρωί, να επιλεγεί ως χρόνος μετακίνησης το απόγευμα). Με άλλα λόγια μπορεί να συμβεί χρονική εκτροπή μέρους της κινητικότητας. Πάντως ο συσχετισμός της γένεσης των μετακινήσεων και καιρικών συνθηκών δεν έχει ερευνηθεί σε βάθος και οποιαδήποτε προσπάθεια σε αυτή την κατεύθυνση θεωρείται χρήσιμη. Για τα υποδείγματα και τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στο στάδιο αυτό, το μέγεθος της επίπτωσης από την κλιματική αλλαγή και τις καιρικές διακυμάνσεις αξιολογείται στη γενικότητά του ως χαμηλό.

#### 8.3.1.9.2. Υποδείγματα 2<sup>ου</sup> σταδίου Σχεδιασμού των Μεταφορών

Στα υποδείγματα που χρησιμοποιούνται στο δεύτερο βήμα του Σχεδιασμού των Μεταφορών (*Κατανομή των μετακινήσεων στο δίκτυο*), στο οποίο υπολογίζονται οι προελεύσεις, οι προορισμοί των μετακινήσεων, και η κατανομή τους μεταξύ των διαφόρων κυκλοφοριακών ζωνών της περιοχής μελέτης, προτείνεται η παραμετροποίηση καιρικών και κλιματικών συνθηκών. Αυτό ισχύει, παρά το γεγονός ότι ο καιρός και το κλίμα δεν φαίνεται να διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στον τρόπο που συνδέονται τα άκρα των μετακινήσεων υποχρεωτικού πρωτίστως χαρακτήρα, που προσδιορίστηκαν στο στάδιο της γένεσης. Αυτό δεν συνεπάγεται όμως ότι οι καιρικές και κλιματικές συνθήκες δεν επηρεάζουν τις επιμέρους



παραμέτρους, βάσει των οποίων καθορίζονται τα άκρα των μετακινήσεων. Έτσι λοιπόν, τα χαρακτηριστικά της διατιθέμενης συγκοινωνιακής υποδομής (μεταφορική ικανότητα, επίπεδο συγκοινωνιακής εξυπηρέτησης) για συγκεκριμένες συνδέσεις μεταξύ ζωνών, ειδικά σε περιπτώσεις απουσίας εναλλακτικών λύσεων, επηρεάζονται άμεσα από τις καιρικές και κλιματικές συνθήκες, και άρα με τη σειρά τους επηρεάζουν τα άκρα κάποιων, έστω λίγων μετακινήσεων. Συνολικά λοιπόν, το μέγεθος της επίπτωσης κλίματος και καιρού σ' αυτό το 2<sup>ο</sup> στάδιο αξιολογείται ως χαμηλό.

#### *8.3.1.9.3. Υποδείγματα 3<sup>ου</sup> σταδίου Σχεδιασμού των Μεταφορών*

Στα υποδείγματα που χρησιμοποιούνται στο τρίτο βήμα του Σχεδιασμού των Μεταφορών (*Επιλογή μέσου μετακίνησης*), στο οποίο υπολογίζεται η κατανομή των μετακινήσεων προσώπων στα διάφορα μεταφορικά μέσα μεταξύ ζωνών, προτείνεται η παραμετροποίηση καιρικών και κλιματικών συνθηκών. Στους μέχρι σήμερα χρησιμοποιούμενους παράγοντες της συμπεριφοράς των μετακινούμενων, βάσει των οποίων γίνεται η επιλογή μέσου (χαρακτηριστικά μετακίνησης, χαρακτηριστικά μετακινούμενων και χαρακτηριστικά συστήματος Μεταφορών), μόνο μερικώς και εμμέσως υπεισέρχονται οι καιρικές και κλιματικές συνθήκες, μέσω κυρίως των χρόνων διαδρομής ανά μέσο (άρα και της ταχύτητας). Όμως το ζήτημα της επιλογής μέσου μεταφοράς είναι ίσως το πιο σημαντικό στοιχείο του σχεδιασμού των Μεταφορών και της χάραξης πολιτικής Μεταφορών. Για τον λόγο αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό το ζήτημα ανάπτυξης υποδειγμάτων, ευαίσθητων σε όλα τα χαρακτηριστικά των μετακινήσεων που επηρεάζουν τις προσωπικές επιλογές μέσου. Εδώ παρ'ότι παίζουν σημαντικό ρόλο οι καιρικές και κλιματικές συνθήκες, αυτές εξ' ορισμού θεωρούνται ιδανικές ή άνευ επίδρασης κατά την ανάπτυξη των σχετικών υποδειγμάτων. Πέραν της ταχύτητας και του πώς αυτή επηρεάζει τους χρόνους διαδρομής των διαφόρων μέσων, δεδομένων διαφορετικών καιρικών συνθηκών, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η πιθανότητα εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών. Στο πλαίσιο της αλλαγής του κλίματος, είναι απαραίτητη η γνώση της 'πίεσης' που μπορεί να ασκηθεί στην ικανότητα ενός μέσου να εξυπηρετήσει τους μετακινούμενους, δεδομένης της επίπτωσης της κλιματικής αλλαγής και της εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών σε ένα άλλο μέσο. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι είναι σημαντικό να αναπτυχθούν υποδείγματα, που να μπορούν να υπολογίσουν το πώς η κατανομή των μετακινούμενων στα μέσα θα επηρεαστεί από την πιθανότητα εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων. Δεδομένου ότι μπορούμε να γνωρίζουμε αυτές τις πιθανότητες ανά φαινόμενο, βάσει των κλιματικών υποδειγμάτων και σεναρίων που αναπτύσσονται με βαθμό

λεπτομέρειας της τάξης των 25 χλμ<sup>2</sup> (βλέπε Ενότητες 2.5.1 και 2.5.2), τα υποδείγματα αυτά θα μπορούσαν να απαντήσουν στο ποια μέσα θα πρέπει να ενισχυθούν και σε ποιό βαθμό, έτσι ώστε να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες των μετακινούμενων, σε περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων. Τέτοια υποδείγματα θα είχαν εφαρμογή σε μεγάλα δίκτυα, επιπέδου νομών, περιφερειών ή ολόκληρων χωρών. Το μέγεθος της επίπτωσης στο σύνολο των διαφορετικών υποδειγμάτων αξιολογείται ως μέτριο, λόγω του γεγονότος ότι όλα τα σχετικά υποδείγματα χρησιμοποιούν κάποια μορφή συνάρτησης χρησιμότητας (βλέπε Ενότητα 5.6), για την οποία, το μέγεθος επίπτωσης αξιολογείται ως υψηλό.

#### *8.3.1.9.4. Υποδείγματα 4<sup>ου</sup> σταδίου Σχεδιασμού των Μεταφορών*

Για τις μεθόδους (κυρίως αλγορίθμους) που χρησιμοποιούνται στο τέταρτο βήμα του Σχεδιασμού των Μεταφορών (*Καταμερισμός των μετακινήσεων στο δίκτυο*), κατά το οποίο κατανέμονται οι μετακινήσεις διά των διαφόρων μέσων σε διαδρομές κάθε δικτύου, προτείνεται η έμμεση παραμετροποίηση καιρικών και κλιματικών συνθηκών. Ο λόγος είναι ότι για την διαδικασία φόρτισης ενός δικτύου, της βραχυπρόθεσμης δηλαδή εξισορρόπησης της ζήτησης με τη διατιθέμενη υποδομή (προσφορά), χρησιμοποιούνται κατά βάση η ταχύτητα, η σχέση της με τον κυκλοφοριακό φόρτο, και η κυκλοφοριακή ικανότητα, συναρτήσει των οποίων γίνεται μια σειρά υπολογισμών, όπως π.χ. η εύρεση των συντομότερων διαδρομών, ο καθορισμός του συνολικού 'κόστους' μετακίνησης από διάφορα μονοπάτια (paths) ενός δικτύου, κ.λπ. Έτσι, η επαναδιατύπωση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται στο στάδιο αυτό, μπορεί να προκύψει μέσω της επαναδιατύπωσης των επιμέρους μεγεθών που επηρεάζουν τον καταμερισμό των μετακινήσεων. Το μέγεθος της επίπτωσης για όλες τις επιμέρους μεθόδους, αξιολογείται έτσι ως χαμηλό. Για τον υπολογισμό των συναρτήσεων καθυστέρησης όμως, το μέγεθος επίπτωσης αξιολογείται ως μέτριο, καθώς οι σχέσεις αυτές, συσχετίζουν την αύξηση του χρόνου διαδρομής σε ένα οδικό τμήμα, δεδομένης της κυκλοφοριακής ικανότητάς του, και του φόρτου που εξυπηρετεί.

#### **8.3.1.10. Συγκεντρωτική ανάλυση αξιολόγησης μεγέθους επίπτωσης στα στοιχεία των 'Μαθηματικών των Μεταφορών'**

Έπειτα από την ανάλυση όλων των επιμέρους στοιχείων, προκύπτει ο Πίνακας 18 που παρουσιάζει συγκεντρωτικά την αξιολόγηση του μεγέθους της επίπτωσης των καιρικών και κλιματικών συνθηκών, και των αλλαγών τους στα στοιχεία αυτά. Στον πίνακα αυτόν, επισημαίνονται με σκίαση εκείνα τα στοιχεία για τα οποία η αξιολόγηση έχει υψηλές τιμές επίπτωσης.

**Πίνακας 18: Συγκεντρωτική άποψη ποιοτικής αξιολόγησης επίπτωσης καιρικών και κλιματικών συνθηκών**

Στοιχείο	Αξιολόγηση μεγέθους επίπτωσης	
Χρονικός διαχωρισμός	Μέτριο	
Χωρικός διαχωρισμός		
Κυκλοφοριακός φόρτος	Μέτριο	
Στάθμη εξυπηρέτησης	Χαμηλό	
Κυκλοφοριακή ικανότητα		
Πυκνότητα	Μέτριο	
Κατάληψη		
Ταχύτητα	Υψηλό	
Θεμελιώδης σχέση κυκλοφοριακής ροής	Υψηλό	
Σχέση Ταχύτητας - Πυκνότητας	Υψηλό	
Σχέση Φόρτου - Πυκνότητας	Μέτριο	
Σχέση Ταχύτητας - Φόρτου	Υψηλό	
Μικροσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής	Υψηλό	
Μεσοσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής	Χαμηλό	
Μακροσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής	Υψηλό	
Ανάλυση κατά κατηγορίες	Χαμηλό	
Γραμμική παλινδρόμηση	Μέτριο	
Υποδείγματα αναγωγής σε μελλοντικό χρόνο		
Υποδείγματα ομοιόμορφου συντελεστή ανάπτυξης	Χαμηλό	
Υποδείγματα απλά περιορισμένου συντελεστή ανάπτυξης		
Υποδείγματα διπλά περιορισμένου συντελεστή ανάπτυξης		
Υποδείγματα Fratar		
Υπόδειγμα βαρύτητας		
Συνθετικά υποδείγματα απλά και διπλά περιορισμένα		
Υπόδειγμα ευκαιρίας		
Συνάρτηση χρησιμότητας		Υψηλό
Υποδείγματα καταμερισμού κατά μέσο των άκρων των μετακινήσεων		Μέτριο
Υποδείγματα καταμερισμού κατά μέσο των κατανεμημένων μετακινήσεων		
Συνθετικά υποδείγματα		
Πολυωνυμικό υπόδειγμα Logit		
Ιεραρχικό υπόδειγμα Logit		
Πολυωνυμικό υπόδειγμα Probit		
Μεικτό υπόδειγμα Logit		
Υποδείγματα απευθείας υπολογισμού ζήτησης	Χαμηλό	
Εύρεση διαδρομών		
Συναρτήσεις καθυστέρησης	Μέτριο	
Καταμερισμός όλα-ή-τίποτα	Χαμηλό	
Καταμερισμός όλα-ή-τίποτα με περιορισμό χωρητικότητας		
Μέθοδοι προσομοίωσης		
Μέθοδοι αναλογίας		
Μέθοδος απότομης και ήπιας αλλαγής ταχύτητας		
Μέθοδος σταδιακού καταμερισμού		
Μέθοδος καταμερισμού συνεχόμενων μέσων		
Μαθηματικός προγραμματισμός		
Στοχαστική ισορροπία χρηστών		
Δυναμικός καταμερισμός		

### 8.3.2. Αξιολόγηση κρισιμότητας κυκλοφοριακών μεγεθών συγκοινωνιακών υποδειγμάτων για τον υπολογισμό άλλων στοιχείων

Η έννοια της κρισιμότητας χρησιμοποιείται εδώ για να περιγράψει πόσο σημαντικό είναι ένα στοιχείο (από αυτά που συγκεντρώθηκαν στο πρώτο βήμα και αξιολογήθηκαν παραπάνω)

για τον υπολογισμό ενός άλλου στοιχείου. Η άσκηση αυτή γίνεται για να συνδυαστεί, η πληροφορία της κρισιμότητας ενός στοιχείου και της επίπτωσης σε αυτό των καιρικών και κλιματικών συνθηκών, και να εξαχθεί η προτεραιότητα, με την οποία θα πρέπει να γίνει οποιοσδήποτε επαναπροσδιορισμός και επαναδιατύπωσή του.

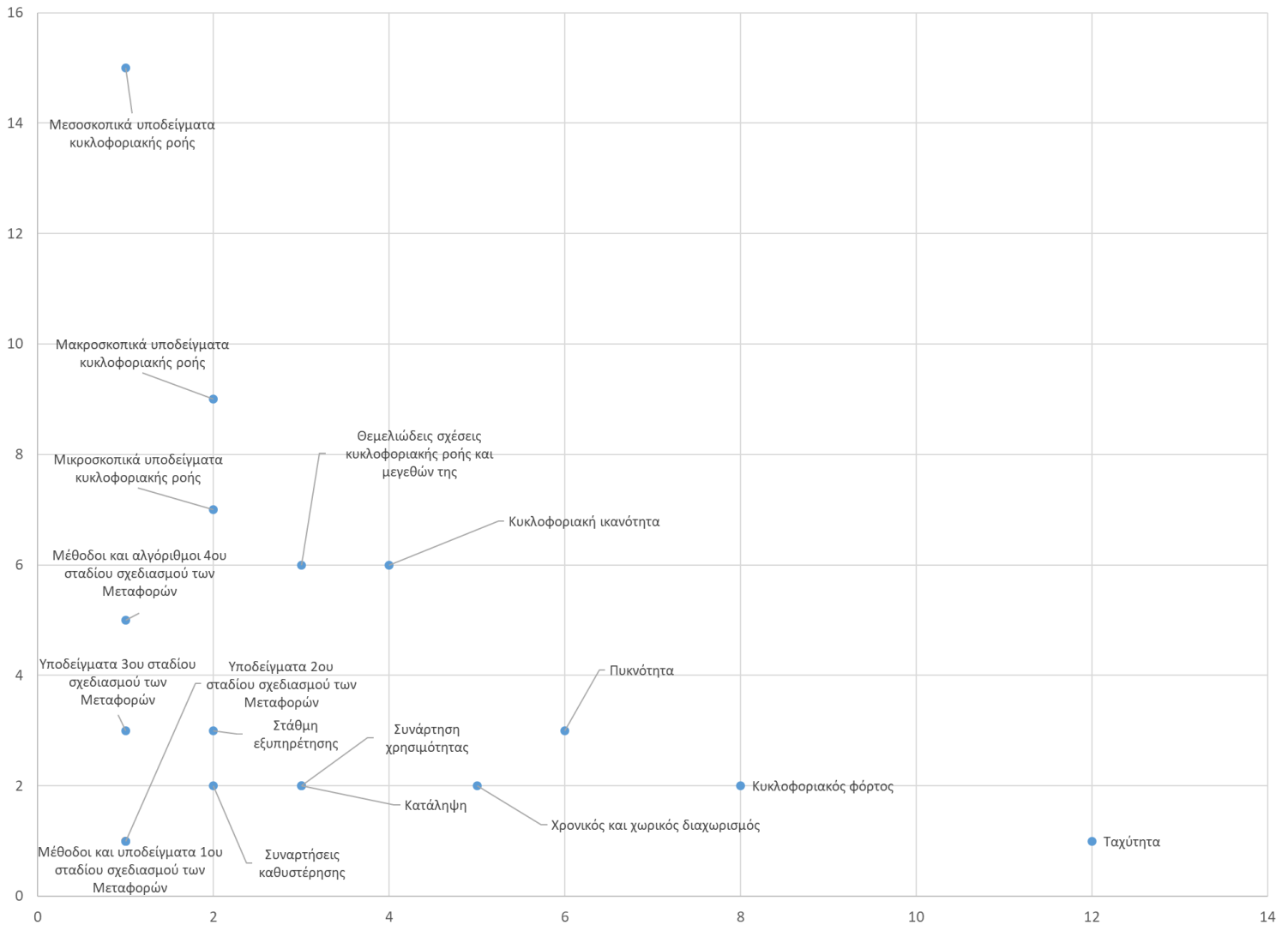
Σύμφωνα με τη μεθοδολογική προσέγγιση, για την αξιολόγηση της κρισιμότητας του στοιχείου που εξετάζεται κάθε φορά, συμπληρώνεται με δυαδικό τρόπο ένας πίνακας συσχέτισης. Οι τιμές των κελιών του πίνακα αυτού θα μπορούν να πάρουν τις τιμές 0 και 1, όπου 0 συνεπάγεται ότι το στοιχείο δεν υπεισέρχεται στον υπολογισμό άλλου στοιχείου, και 1 συνεπάγεται ότι το στοιχείο χρησιμοποιείται στον υπολογισμό άλλου στοιχείου. Ο πίνακας αυτός, συμπληρώνεται ανά γραμμή: ξεκινώντας από το πρώτο στοιχείο (γραμμή 1, στήλη 1), εξετάζονται όλα τα στοιχεία (γραμμή 1, στήλη 2 έως στήλη n), κ.ο.κ. Για την συμπλήρωση του Πίνακα, γίνεται ομαδοποίηση των υποδειγμάτων και μεθόδων που χρησιμοποιούνται σε κάθε στάδιο του Σχεδιασμού των Μεταφορών. Ο Πίνακας 19 παρουσιάζει την αξιολόγηση της κρισιμότητας βάσει αυτής της μεθοδολογικής προσέγγισης.

Πίνακας 19: Συγκεντρωτική άποψη ποιοτικής αξιολόγησης κρισιμότητας στοιχείων

Στοιχεία	Χρονικός και χωρικός διαχωρισμός	Κυκλοφοριακός φόρτος	Στάθμη εξυπηρέτησης	Κυκλοφοριακή ικανότητα	Πυκνότητα	Κατάληψη	Ταχύτητα	Θεμελιώδεις σχέσεις κυκλοφοριακής ροής και μεγεθών της	Μικροσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής	Μεσοσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής	Μακροσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής	Υποδείγματα 1ου σταδίου σχεδιασμού των Μεταφορών	Υποδείγματα 2ου σταδίου σχεδιασμού των Μεταφορών	Συνάρτηση χρησιμότητας	Υποδείγματα 3ου σταδίου σχεδιασμού των Μεταφορών	Συναρτήσεις καθυστέρησης	Μέθοδοι 4ου σταδίου σχεδιασμού των Μεταφορών	Άθροισμα
Χρονικός και χωρικός διαχωρισμός	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	5
Κυκλοφοριακός φόρτος	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	8
Στάθμη εξυπηρέτησης	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Κυκλοφοριακή ικανότητα	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	4
Πυκνότητα	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	6
Κατάληψη	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	3
Ταχύτητα	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	11
Θεμελιώδεις σχέσεις κυκλοφοριακής ροής και μεγεθών της	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	3
Μικροσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
Μεσοσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Μακροσκοπικά υποδείγματα κυκλοφοριακής ροής	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
Υποδείγματα 1ου σταδίου σχεδιασμού των Μεταφορών	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Υποδείγματα 2ου σταδίου σχεδιασμού των Μεταφορών	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Συνάρτηση χρησιμότητας	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	3
Υποδείγματα 3ου σταδίου σχεδιασμού	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1

των Μεταφορών																		
Μέθοδοι 4ου σταδίου σχεδιασμού των Μεταφορών	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
Συναρτήσεις καθυστέρησης	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
Άθροισμα	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω Πίνακα για τη δημιουργία του έγιναν κάποιες απαραίτητες ομαδοποιήσεις μεγεθών για λόγους σύμπτυξης (π.χ. ο χωρικός και ο χρονικός διαχωρισμός μοιράζονται το ίδιο κελί, όλες οι θεμελιώδεις σχέσεις των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής εξετάζονται μαζί, όλοι οι ορισμοί της ταχύτητας θεωρούνται υποσύνολο ενός μεγαλύτερου συνόλου με κωδικοποίηση 'ταχύτητα', τα διαφορετικά υποδείγματα και μέθοδοι των διαφόρων σταδίων του Σχεδιασμού των Μεταφορών είναι επίσης σε ένα κελί, κ.ο.κ.). Πρέπει να σημειωθεί ότι ο τελικός πίνακας που προκύπτει δεν είναι συμμετρικός, διότι οι σχέσεις μεταξύ των στοιχείων δεν είναι αμφίδρομες. Στην στήλη 'Άθροισμα', προστίθενται όλες οι μονάδες της γραμμής του Πίνακα που αντιστοιχεί σε κάθε στοιχείο. Επομένως όσο μεγαλύτερο το άθροισμα των γραμμών, τόσο κρισιμότερο το υπό εξέταση στοιχείο για τον υπολογισμό των υπολοίπων στοιχείων του Πίνακα. Στην γραμμή 'Άθροισμα', προστίθενται όλες οι μονάδες της στήλης του Πίνακα που αντιστοιχεί σε κάθε στοιχείο. Όπως προκύπτει, όσο μεγαλύτερο το άθροισμα των στηλών, τόσο περισσότερα μεγέθη, σχέσεις ή άλλα υποδείγματα και μέθοδοι υπεισέρχονται στον υπολογισμό του κάθε στοιχείου. Οι συνολικές αλληλοεξαρτήσεις των στοιχείων, και το πώς κάθε στοιχείο επηρεάζεται και επηρεάζει τον υπολογισμό άλλων στοιχείων, απεικονίζεται στο διάγραμμα στην Εικόνα 40.



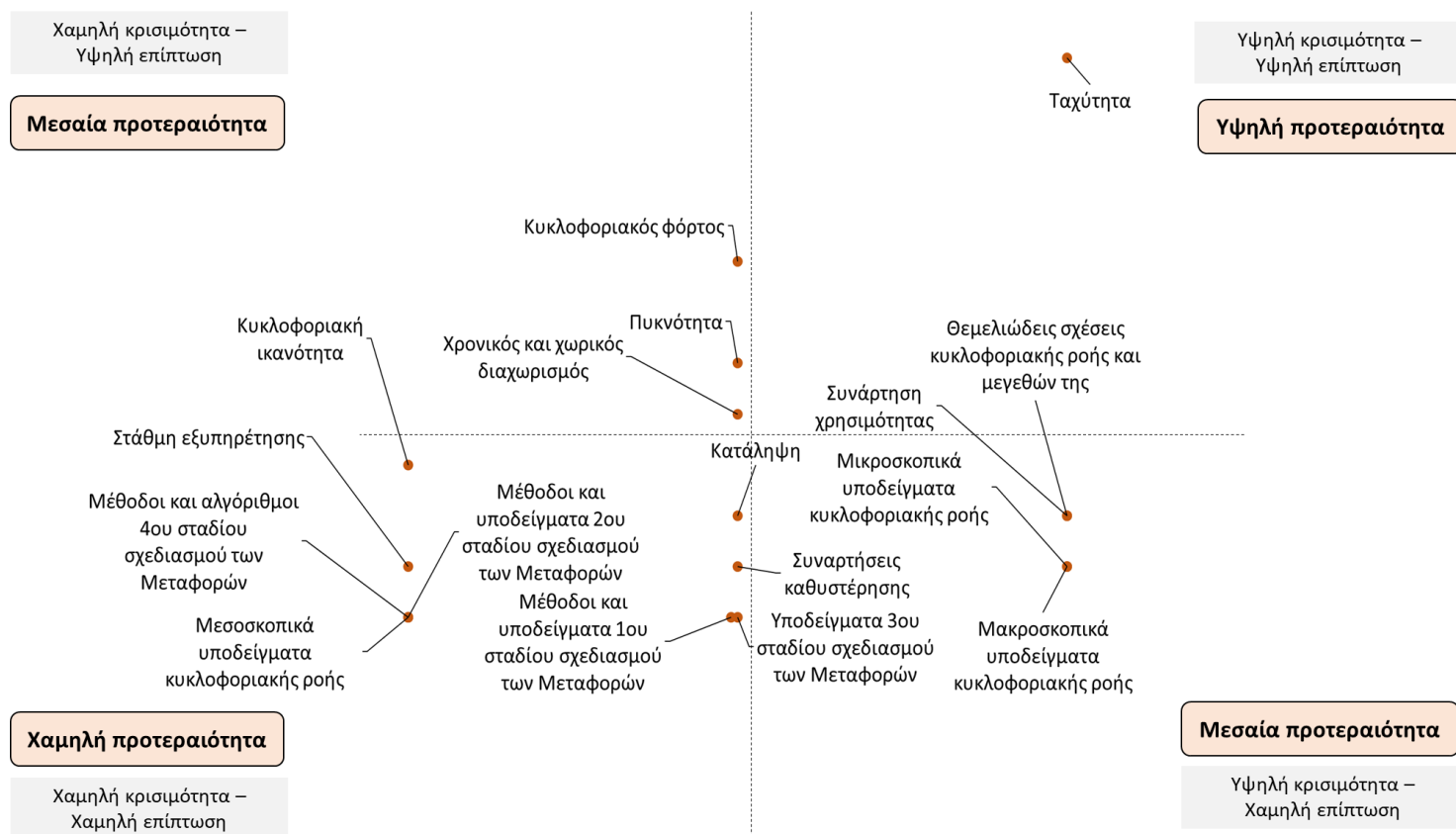
**Εικόνα 40: Διάγραμμα απεικόνισης βαθμού επηρεασμού του υπολογισμού κυκλοφοριακών στοιχείων και στοιχείων Σχεδιασμού των Μεταφορών από άλλα στοιχεία**

Στο διάγραμμα αυτό, ο άξονας x αφορά στον αριθμό των στοιχείων που υπεισέρχονται στον υπολογισμό του υπό εξέταση στοιχείου, και ο άξονας y, αφορά στον αριθμό των στοιχείων που επηρεάζει το υπό εξέταση στοιχείο. Όπως φαίνεται, υπάρχουν στοιχεία, στον υπολογισμό των οποίων υπεισέρχεται μεγάλος αριθμός άλλων στοιχείων (υψηλές τιμές στον άξονα y), και στοιχεία, που υπεισέρχονται στον υπολογισμό άλλων στοιχείων (υψηλές τιμές στο άξονα x). Σύμφωνα με τον ορισμό της κρισιμότητας που χρησιμοποιείται εδώ, μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα στοιχεία που επηρεάζουν τον υπολογισμό άλλων στοιχείων (υψηλές τιμές στον άξονα x) και άρα πιθανή επαναδιατύπωσή τους, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη κλιματικές και καιρικές συνθήκες, θα οδηγούσε αυτόματα και στον επηρεασμό άλλων μεγεθών.



### 8.3.3. Ανάλυση τεταρτημορίων και προτεραιοποίηση αλλαγών

Για την ιεράρχηση της προτεραιοποίησης των αλλαγών στις αναλυτικές εκφράσεις των 'Μαθηματικών των Μεταφορών', συνδυάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθοδολογικής προσέγγισης του επιπέδου 1, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες Ενότητες, και αφορούν στην αξιολόγηση του μεγέθους της επίπτωσης των καιρικών και κλιματικών συνθηκών στο εξεταζόμενο στοιχείο, και στην κρισιμότητα του στοιχείου αυτού για τον υπολογισμό άλλων στοιχείων. Ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης επιπτώσεων και κρισιμότητας για κάθε υπό εξέταση στοιχείο, γίνεται με ανάλυση τεταρτημορίων, όπως παρουσιάστηκε στην μεθοδολογική προσέγγιση (βλέπε Ενότητα 7.3.2). Το αποτέλεσμα απεικονίζεται στο διάγραμμα της Εικόνα 41.



Εικόνα 41: Προτεραιοποίηση επαναδιατυπώσεων στοιχείων

Όπως φαίνεται, το στοιχείο του οποίου η προτεραιοποίηση επαναδιατύπωσης είναι υψηλή, είναι μόνο η ταχύτητα (ως σύνολο των ορισμών της). Ακολουθούν οι θεμελιώδεις σχέσεις της κυκλοφοριακής ροής και των μεγεθών της, η συνάρτηση χρησιμότητας, με υψηλή κρισιμότητα και μικρή επίπτωση, και ο κυκλοφοριακός φόρτος και η πυκνότητα, με χαμηλή κρισιμότητα και υψηλή επίπτωση.

Καθώς τα δύο τελευταία στοιχεία, θα εξεταστούν μέσω της παρουσίας τους στις θεμελιώδεις σχέσεις της κυκλοφοριακής ροής και των μεγεθών της, τα τελικά στοιχεία που προτείνονται προς επαναδιατύπωση είναι:

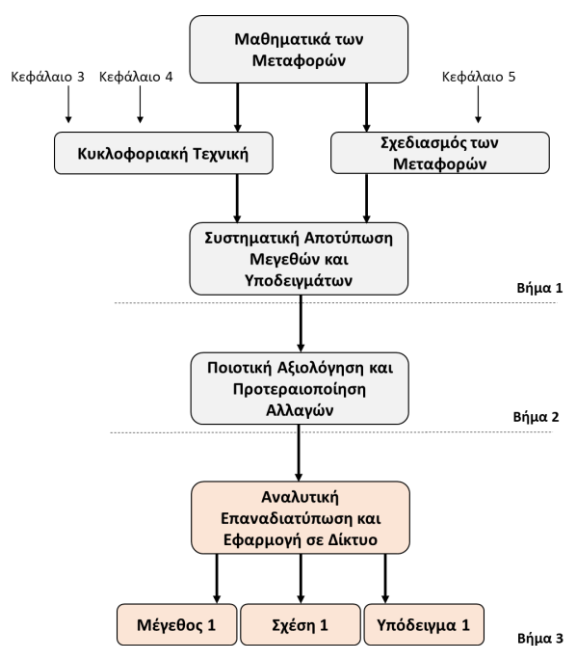
- Τα μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής (ταχύτητα, φόρτος, πυκνότητα) και οι μεταξύ τους σχέσεις
- Η συνάρτηση χρησιμότητας για τα υποδείγματα επιλογής μέσου

#### 8.4. Αναλυτική επαναδιατύπωση στοιχείων υψηλής προτεραιότητας

Η αναλυτική επαναδιατύπωση των μεγεθών και των υποδειγμάτων που αξιολογήθηκαν ως υψηλής προτεραιότητας, σύμφωνα με την ανάλυση του προηγούμενου βήματος, αποτελεί το τρίτο και τελευταίο βήμα του πρώτου επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης.

Την επαναδιατύπωση των μεγεθών και υποδειγμάτων που καταδείχθηκαν, ακολουθεί εφαρμογή σε πραγματικό ή θεωρητικό δίκτυο Μεταφορών, είτε για τη βαθμονόμησή τους, είτε για την αξιολόγηση

της χρήσης τους. Έτσι, γίνεται επαναδιατύπωση των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής και των θεμελιωδών σχέσεών τους υπό συνθήκες εμφάνισης Ακραίων Καιρικών Φαινομένων (ΑΚΦ), με χρήση εμπειρικών δεδομένων από ένα πραγματικό δίκτυο που επλήγη από ΑΚΦ (Αθήνα, 2014), ενώ επαναδιατυπώνεται η συνάρτηση χρησιμότητας για ένα ιεραρχικό υπόδειγμα επιλογής μέσου Logit, και γίνεται εφαρμογή του σε θεωρητικό δίκτυο μικρής κλίμακας.



### 8.4.1. Μεγέθη κυκλοφοριακής ροής και θεμελιώδεις σχέσεις τους σε συνθήκες Ακραίων Καιρικών Φαινομένων

#### 8.4.1.1. Πλαίσιο και υποθέσεις επαναδιατύπωσης μεγεθών

Όπως παρουσιάστηκε στην βιβλιογραφική επισκόπηση (Ενότητα 3.3), οι θεμελιώδεις σχέσεις των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής προκύπτουν από εμπειρικές παρατηρήσεις των μεγεθών αυτών σε πραγματικά δίκτυα Μεταφορών. Βάσει αυτών των παρατηρήσεων, δημιουργούνται τα διαγράμματα χώρου-χρόνου (space-time diagram) των επιμέρους πορειών (trajectories) όλων των οχημάτων που διανύουν ένα υπό εξέταση δίκτυο Μεταφορών. Βάσει αυτής της προσέγγισης, της χρήσης δηλαδή των διαγραμμάτων χώρου-χρόνου των οχημάτων για ένα δίκτυο Μεταφορών, θα επιχειρηθεί παρακάτω η επαναδιατύπωση των μεγεθών της Κυκλοφοριακής Ροής και των μεταξύ τους σχέσεων.

Για να πραγματοποιηθεί η επαναδιατύπωση αυτή, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του κλίματος και του καιρού (στα μεγέθη και τις σχέσεις τους), θα μελετηθεί ένα θεωρητικό δίκτυο Μεταφορών, στο οποίο θα υποτεθεί η εμφάνιση ενός ακραίου καιρικού φαινομένου, και θα αναλυθεί η επίπτωση του στα κυκλοφοριακά μεγέθη.

Τόσο για το δίκτυο Μεταφορών που θα χρησιμοποιηθεί, όσο και για το καιρικό φαινόμενο που θεωρείται ότι πλήττει το δίκτυο αυτό, γίνονται μια σειρά υποθέσεων (υπό τη μορφή συνθηκών που διέπουν τη λειτουργία του δικτύου και περιγράφουν την εμφάνιση του καιρικού φαινομένου), οι οποίες θα διευκολύνουν την ανάλυση και τη μαθηματική διατύπωση της επίδρασης του φαινομένου στο δίκτυο Μεταφορών. Οι υποθέσεις αυτές περιγράφουν ιδανικές συνθήκες, που δεν παρατηρούνται σύμφωνα με τις εμπειρικές μετρήσεις. Οι υποθέσεις όμως αυτές είναι απαραίτητες για μια πρώτη προσέγγιση αναλυτικής περιγραφής της επίπτωσης του καιρού και του κλίματος στις θεμελιώδεις σχέσεις των κυκλοφοριακών μεγεθών, ώστε στο μέλλον, ερευνητικές και μελετητικές προσπάθειες σε αυτό το αντικείμενο, να ξεκινήσουν από μια πιο προωθημένη βάση.

Γίνονται λοιπόν οι εξής υποθέσεις:

1. Αναφορά σ' ένα οδικό τμήμα μήκους  $L$
2. Τα οχήματα εισέρχονται στο οδικό τμήμα με σταθερό χρονικό διαχωρισμό  $h_i(x)$  του οχήματος  $i$  στη θέση  $x$ .
3. Η ταχύτητα χώρου  $u_s$  των οχημάτων θεωρείται ίδια και σταθερή κατά μήκος διάνυσης του οδικού τμήματος.

4. Ο χωρικός διαχωρισμός  $s_j(t)$  είναι σταθερός και ίδιος για όλα τα οχήματα (ως απόρροια των προηγούμενων δύο συνθηκών).

Για το καιρικό φαινόμενο που θεωρείται, γίνονται οι εξής υποθέσεις:

1. Η ένταση του καιρικού φαινομένου που πλήττει το οδικό τμήμα, είναι ομοιογενώς κατανεμημένη σε όλο το μήκος του οδικού τμήματος, και συνεπώς η επίδραση του φαινομένου είναι ομοιόμορφη (uniform) για όλη την περιοχή.
2. Το καιρικό φαινόμενο πλήττει το οδικό τμήμα με ένταση μεγέθους  $i$ , σύμφωνα με το οποίο διατυπώνεται η ένταση του καιρικού φαινομένου (δηλαδή σε mm/h για την βροχόπτωση, σε m/s για τον άνεμο, κ.ο.κ.).
3. Δεν θεωρείται ότι παρατηρείται συσσώρευση του μεγέθους με το οποίο διατυπώνεται η ένταση του καιρικού φαινομένου. Θεωρείται δηλαδή ότι αν στο χρονικό σημείο  $t$  βρέχει με ένταση  $i$ , στο χρονικό σημείο  $t + 1$ , όπου επίσης βρέχει με ένταση  $i$ , δεν έχει συσσωρευτεί νερό στο κατάστρωμα. Άρα η συσσώρευση της έντασης προηγούμενων χρονικών περιόδων θεωρείται ότι δεν έχει επίπτωση στο τρέχον χρονικό διάστημα. Η υπόθεση αυτή πρακτικά σημαίνει ότι το σύστημα που εξετάζεται δεν έχει μνήμη.

Σημειώνεται εδώ, ότι η επίδραση του φαινομένου στη λειτουργία της κυκλοφορίας θα εκφραστεί ως αλλαγή (μείωση ή αύξηση) των μεγεθών: φόρτος, ταχύτητα και πυκνότητα. Η αλλαγή αυτή θεωρείται ότι εξαρτάται από το μέγεθος σύμφωνα με το οποίο διατυπώνεται η ένταση του καιρικού φαινομένου (δηλαδή σε mm/h για την βροχόπτωση, σε m/s για τον άνεμο, κοκ) και συσχετίζεται με το μέγεθος αυτό με κάποιο τρόπο (π.χ. γραμμικό, μη-γραμμικό (exponential, logarithmic)).

#### **8.4.1.2. Γραφική αναπαράσταση και μαθηματική διατύπωση μεγεθών Κυκλοφοριακής Ροής**

Για να μπορέσει να γίνει επαναδιατύπωση των κυκλοφοριακών μεγεθών υπό συνθήκες ΑΚΦ, πρέπει πρώτα να γίνει η μαθηματική διατύπωση των μεγεθών υπό ιδανικές συνθήκες (εφεξής 'κανονικές συνθήκες') με εργαλεία που θα επιτρέψουν παρόμοια ανάλυση υπό συνθήκες ΑΚΦ. Για το σκοπό αυτό, προτείνεται εδώ η χρήση των διαγραμμάτων χώρου – χρόνου των οχημάτων που κινούνται στο οδικό τμήμα που εξετάζεται.

Σε αυτό το οδικό τμήμα, θεωρείται ότι εισέρχεται ένα σύνολο  $n$  οχημάτων, συστηματικά ανά χρονικά διαστήματα  $s_j \forall j \in n$ , που κυκλοφορεί με σταθερή ταχύτητα  $u_s$  and παραμένει στο οδικό τμήμα μέχρι το τέλος μιας περιόδου  $T$  ( $t_j = T - s_j \forall j \in n$ ).

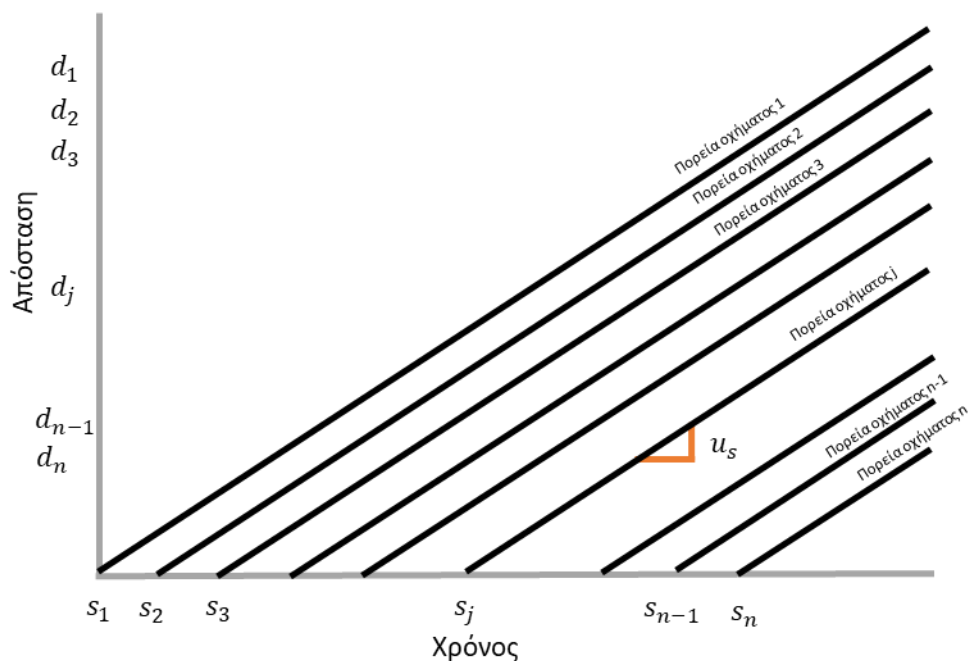
Σύμφωνα με τις υποθέσεις που έγιναν στην προηγούμενη ενότητα, ο χρονικός διαχωρισμός  $H = s_{j+1} - s_j \forall j \in n$  και ο χωρικός διαχωρισμός  $S = d_{j+1} - d_j \forall j \in n$  των οχημάτων θεωρούνται σταθεροί (χρονικά και χωρικά κατά μήκος του οδικού τμήματος). Επειδή η διανυθείσα απόσταση κάθε οχήματος δίνεται από την εξίσωση:

$$d_j = u_s \cdot t_j \forall j \in n \quad \text{Εξίσωση 8.1}$$

Οι σχέσεις του χωρικού και χρονικού διαχωρισμού  $S$  και  $H$  μπορούν να συσχετιστούν μεταξύ τους ως εξής:

$$S = H \cdot u_s \forall j \in n \quad \text{Εξίσωση 8.2}$$

Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω, μπορεί να δημιουργηθεί το διάγραμμα χώρου-χρόνου των οχημάτων που κινούνται στο οδικό τμήμα που εξετάζεται, και το οποίο απεικονίζεται στην Εικόνα 42, όπου και παρουσιάζονται οι πορείες των οχημάτων στο χώρο και στο χρόνο.



Εικόνα 42: Πορείες (trajectories) των οχημάτων στο χώρο και στο χρόνο

Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό, και δεδομένων των μαθηματικών διατυπώσεων των κυκλοφοριακών μεγεθών, όπως παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 0, ισχύει ότι:

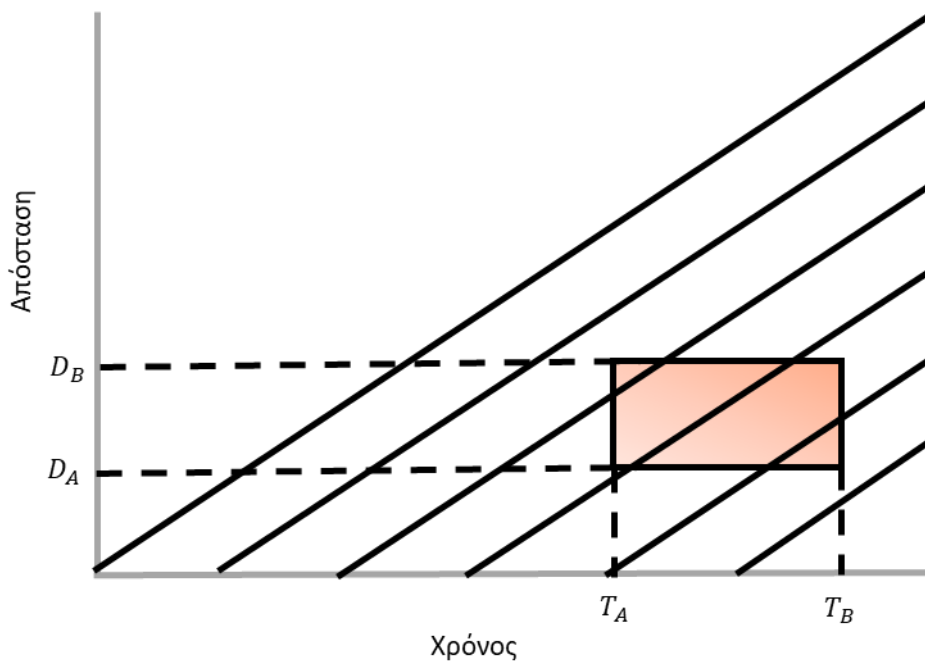
$$k = \frac{\sum_{j=1}^n t_j}{L \cdot T} \quad \text{Εξίσωση 8.3}$$

$$q = \frac{\sum_{j=1}^n d_j}{L \cdot T} \quad \text{Εξίσωση 8.4}$$

$$u_s = \frac{q}{k} = \frac{\sum_{j=1}^n d_j}{\sum_{j=1}^n t_j} \quad \text{Εξίσωση 8.5}$$

όπου  $L$  είναι το μήκος του οδικού τμήματος και  $T$  η διάρκεια της περιόδου που εξετάζεται.

Βάσει των υποθέσεων σταθερού χρονικού διαχωρισμού, σταθερής ταχύτητας και σταθερού χωρικού διαχωρισμού, το διάγραμμα χώρου – χρόνου στην Εικόνα 42 είναι ίδιο, ανεξαρτήτως των χρονικών και χωρικών διαστημάτων που επιλέγονται για την εξέτασή του. Έτσι, προτείνεται η επιλογή ενός τυχαίου διαστήματος  $l$  και χρονικής περιόδου  $t$  όπου  $l = D_B - D_A$  και  $t = T_B - T_A$ . Η επιλογή ενός τυχαίου διαστήματος  $l$  και χρονικής περιόδου  $t$  δημιουργεί ένα ορθογώνιο όπως αυτό στην Εικόνα 43.



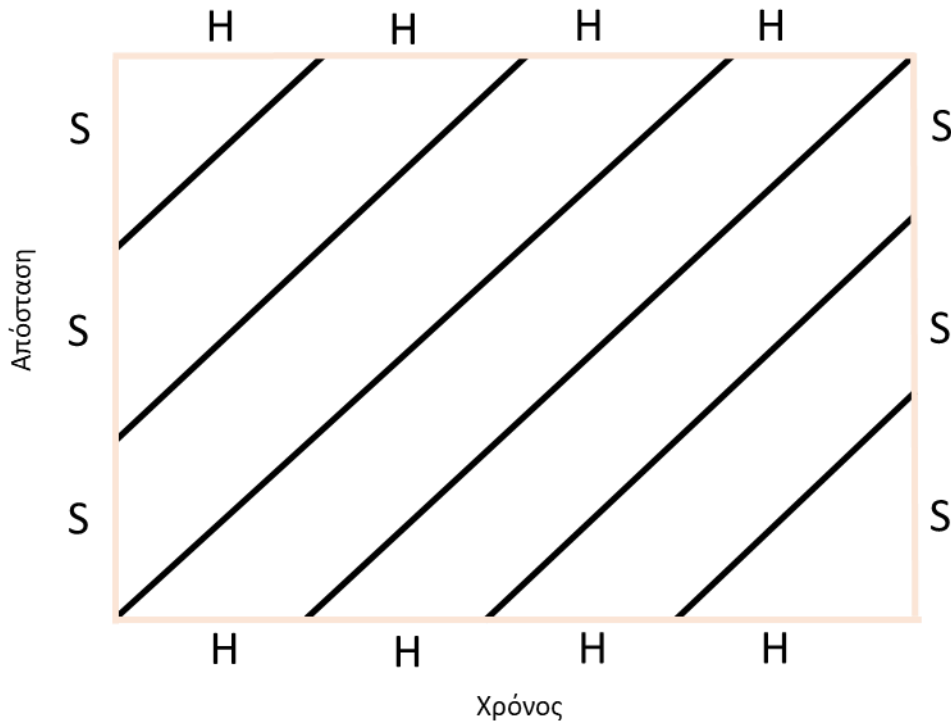
**Εικόνα 43:** Απεικόνιση υπό εξέταση διαστήματος στο διάγραμμα χώρου-χρόνου

Το ορθογώνιο αυτό αναπαριστά τις πορείες (trajectories) των οχημάτων σε ένα οδικό τμήμα μήκους  $l$  μεταξύ των σημείων  $D_B$  και  $D_A$ , στο χρονικό διάστημα διάρκειας  $t$  μεταξύ των στιγμών  $T_B$  και  $T_A$ . Έτσι, για λόγους απλούστευσης επιλέγουμε οι διαστάσεις του ορθογώνιου να είναι ίσες με 4 φορές τον χρονικό διαχωρισμό για τον οριζόντιο άξονα ( $t = 4 * H$ ), και ίσες με 3 φορές τον χωρικό διαχωρισμό για τον κατακόρυφο άξονα ( $l = 3 * S$ ).

Έτσι, θα ισχύει ότι:

$$l \cdot t = 3 \cdot S \cdot 4 \cdot H = 3 \cdot H \cdot u_s \cdot 4 \cdot H = 12 \cdot u_s \cdot H^2 \quad \text{Εξίσωση 8.6}$$

Για την διατύπωση της πυκνότητας και του κυκλοφοριακού φόρτου βάσει του διαστήματος που επιλέχθηκε και ορίζεται από το ορθογώνιο στην Εικόνα 43, πρέπει να υπολογιστούν οι προβολές της πορείας κάθε οχήματος σε κάθε άξονα (πόσο μήκος διήνυσε και σε ποιο χρονικό διάστημα). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 44, οι προβολές αυτές συσχετίζονται άμεσα με τις τιμές του χωρικού διαχωρισμού  $S$  και του χρονικού διαχωρισμού  $H$ .



Εικόνα 44: Άποψη υπό εξέταση διαστήματος και πορείες οχημάτων στο χώρο και στο χρόνο

Σύμφωνα με την Εξίσωση 8.6 και τη μαθηματική διατύπωση της πυκνότητας (Εξίσωση 8.3), αυτή μπορεί να υπολογιστεί, ως εξής:

$$k = \frac{\sum_{j=1}^n t_j}{l \cdot t} = \frac{H+2H+3H+3H+2H+H}{12u_s H^2} = \frac{12H}{12u_s H^2} = \frac{1}{u_s H} = \frac{1}{S} \quad \text{Εξίσωση 8.7}$$

Όπως φαίνεται, στην Εξίσωση 8.7, η πυκνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του χωρικού διαχωρισμού  $S$ . Αντίστοιχα, μπορεί να υπολογιστεί ο κυκλοφοριακός φόρτος, ως εξής:

$$q = \frac{\sum_{j=1}^n d_j}{l \cdot t} = \frac{S+2S+3S+3S+2S+S}{12u_s H^2} = \frac{12S}{12u_s H^2} = \frac{1}{H} \quad \text{Εξίσωση 8.8}$$

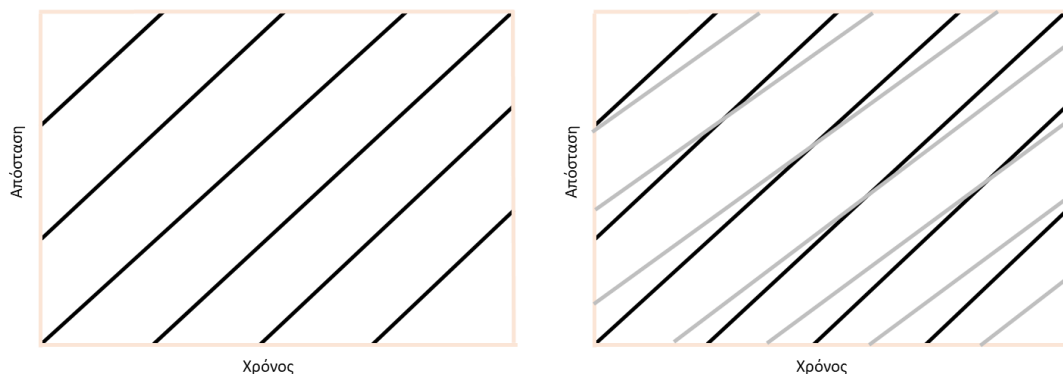
Όπως φαίνεται, στην Εξίσωση 8.8, ο φόρτος είναι αντιστρόφως ανάλογος του χρονικού διαχωρισμού  $H$ . Με αντίστοιχο τρόπο μπορεί να υπολογιστεί και η ταχύτητα  $u_s$  ως εξής:

$$u_s = \frac{q}{k} = \frac{\sum_{j=1}^n d_j}{\sum_{j=1}^n t_j} = \frac{1/H}{1/u_s H} = u_s \quad \text{Εξίσωση 8.9}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις, και το γεγονός ότι αποτελούν έμμεση απόδειξη των ορισμών του χωρικού και χρονικού διαχωρισμού (βλέπε Ενότητα 3.2.4), είναι επαλήθευση της προσέγγισης που ακολουθείται για την επαναδιατύπωση των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής. Μπορεί δηλαδή η παραπάνω προσέγγιση, με τη χρήση του διαγράμματος χώρου-χρόνου των πορειών των οχημάτων, να εφαρμοστεί για να περιγράψει την επίδραση των ΑΚΦ στα μεγέθη που εξετάζονται. Η εφαρμογή αυτή περιγράφεται στις επόμενες ενότητες.

#### 8.4.1.3. Γραφική αναπαράσταση και μαθηματική διατύπωση κυκλοφοριακών μεγεθών υπό συνθήκες ΑΚΦ

Το αντίστοιχο διάγραμμα χώρου-χρόνου (space-time diagram) υπό συνθήκες εκδήλωσης Ακραίου Καιρικού Φαινομένου (ΑΚΦ) θα είναι παρόμοιας μορφής, όμως με διαφορετική κλίση στις γραμμές που αναπαριστούν τις πορείες των οχημάτων, λόγω της διαφορετικής ταχύτητάς τους, δεδομένης της εκδήλωσης ΑΚΦ. Ακολουθώντας την ίδια προσέγγιση με πριν, η επιλογή του διαστήματος εξέτασης (σε σχήμα ορθογωνίου) θα επιτρέψει την διατύπωση των μεγεθών υπό συνθήκες ΑΚΦ. Η Εικόνα 45 απεικονίζει το διάστημα εξέτασης (σε μορφή ορθογωνίου σχήματος) στις δύο περιπτώσεις.



Εικόνα 45: Διαστήματα εξέτασης του διαγράμματος χώρου – χρόνου υπό ΚΣ (αριστερά) και υπό συνθήκες ΑΚΦ (δεξιά)

Ως αποτέλεσμα της παρουσίας ενός ΑΚΦ, ο κυκλοφοριακός φόρτος και η πυκνότητα θα επηρεαστούν μέσα στο διάστημα που εξετάζεται. Έτσι, αν θεωρηθεί ότι η επίπτωση ενός ΑΚΦ στον χρονικό και χωρικό διαχωρισμό είναι της μορφής  $H' = a * H$  και  $S' = \beta * S$  αντίστοιχα, τότε τα κυκλοφοριακά μεγέθη θα επηρεαστούν σύμφωνα με τις σχέσεις:



$$k' = \frac{1}{S'} = \frac{1}{\beta S} = \frac{k}{\beta} \quad \text{Εξίσωση 8.10}$$

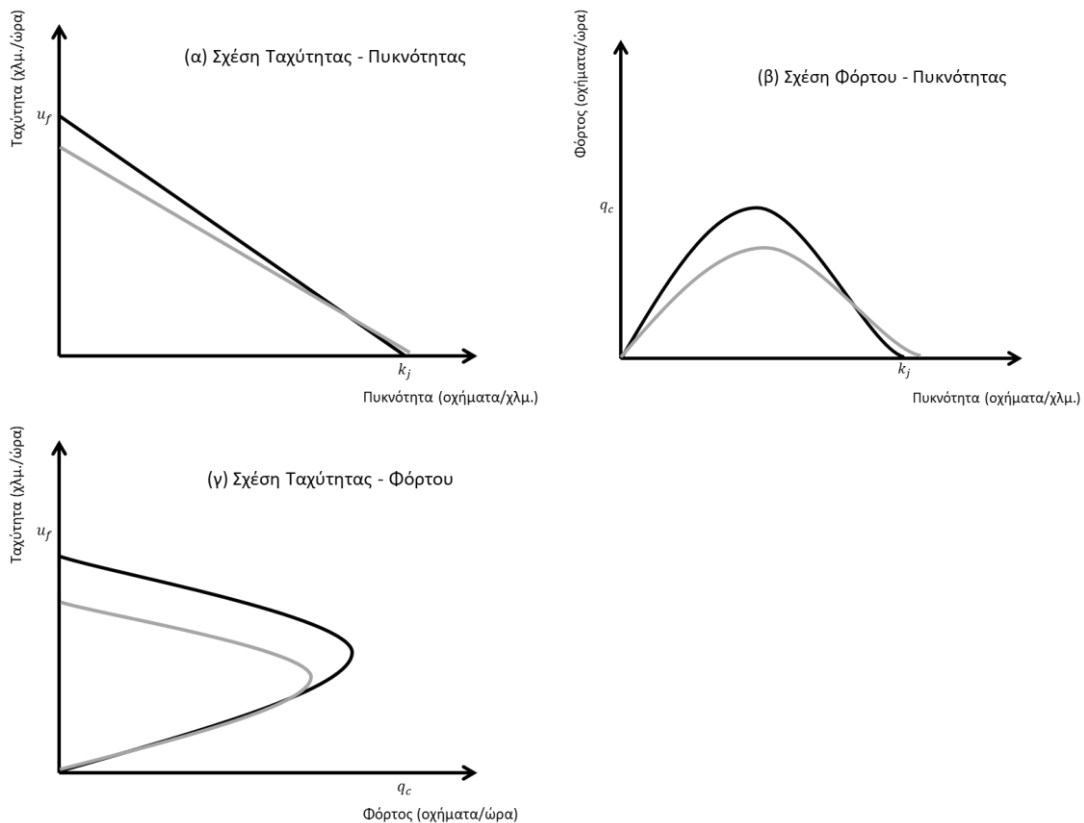
$$q' = \frac{1}{H'} = \frac{1}{\alpha H} = \frac{q}{\alpha} \quad \text{Εξίσωση 8.11}$$

$$u_s' = \frac{q'}{k'} = \frac{q/\alpha}{k/\beta} = u_s \frac{\beta}{\alpha} \quad \text{Εξίσωση 8.12}$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, αν ο χρονικός και ο χωρικός διαχωρισμός σε συνθήκες ΑΚΦ επηρεάζονται από τους παράγοντες  $\alpha$  και  $\beta$  αντίστοιχα, η ταχύτητα θα επηρεαστεί κατά έναν παράγοντα  $\frac{\beta}{\alpha}$ . Έτσι, η επίπτωση ενός ΑΚΦ στην ταχύτητα μπορεί να υπολογιστεί, αν είναι γνωστή η επίπτωση στο χρονικό και χωρικό διαχωρισμό, και άρα και στον κυκλοφοριακό φόρτο και στην πυκνότητα αντίστοιχα.

#### 8.4.1.4. Εκτίμηση επίπτωσης ΑΚΦ στις θεμελιώδεις σχέσεις των κυκλοφοριακών μεγεθών

Η απεικόνιση της επίπτωσης ΑΚΦ στις θεμελιώδεις σχέσεις των κυκλοφοριακών μεγεθών (Εξίσωση 8.10, Εξίσωση 8.11 και Εξίσωση 8.12) φαίνεται στην Εικόνα 46, όπου οι σχέσεις υπό ΚΣ απεικονίζονται με μαύρο χρώμα, και οι σχέσεις υπό συνθήκες ΑΚΦ απεικονίζονται με γκρι χρώμα:



Εικόνα 46: Θεμελιώδη διαγράμματα κυκλοφοριακής ροής υπό κανονικές συνθήκες (μαύρη διαγράμμιση) και συνθήκες ΑΚΦ (γκρι διαγράμμιση)

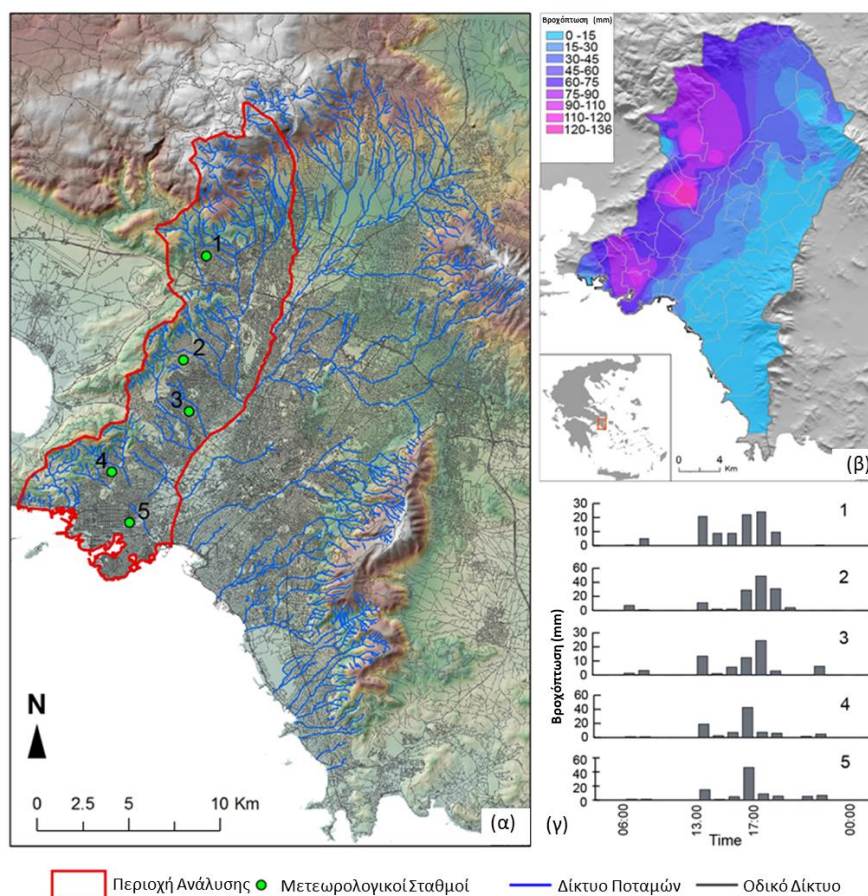
Για την επικύρωση των παραπάνω συμπερασμάτων, και του ακριβούς τρόπου επίδρασης ενός ΑΚΦ στα μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής, δηλαδή αν, σε τι βαθμό και με ποιο τρόπο οι καμπύλες στην Εικόνα 46 αλλάζουν, είναι απαραίτητη η χρήση εμπειρικών δεδομένων. Για το λόγο αυτό, γίνεται στις επόμενες ενότητες χρήση τέτοιων δεδομένων που προέρχονται από ένα πραγματικό δίκτυο Μεταφορών υπό συνθήκες εμφάνισης ΑΚΦ. Επί της ουσίας, αυτό που επιχειρείται είναι η εξάρτηση των παραμέτρων  $\alpha$  και  $\beta$  των εξισώσεων της Ενότητας 8.4.1.3 από την ένταση  $i$  ενός ΑΚΦ.

#### 8.4.1.5. Εξαγωγή εμπειρικών δεδομένων

Στις επόμενες ενότητες γίνεται συνοπτική περιγραφή του ΑΚΦ και του δικτύου Μεταφορών που εξετάζεται, και αναλύεται η επίδραση του ΑΚΦ στα κυκλοφοριακά μεγέθη. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται η ανάλυση της επίδρασης με αριθμητικούς όρους, για να εξαχθούν τα απαραίτητα εμπειρικά δεδομένα για την επικύρωση της θεωρητικής επαναδιατύπωσης των μεγεθών της Κυκλοφοριακής Ροής.

#### 8.4.1.5.1. Περιγραφή Ακραίου Καιρικού Φαινομένου και δεδομένα καιρού

Το φαινόμενο που εξετάζεται παρατηρήθηκε την Παρασκευή 24 Οκτωβρίου 2014 στην περιοχή της Αττικής, όταν ένα βαρομετρικό χαμηλό που σχηματίστηκε πάνω από την Αδριατική Θάλασσα κινήθηκε μέσω του Ιονίου Πελάγους προς την Πελοπόννησο και στη συνέχεια την Αττική. Ταυτόχρονα με τη διέλευσή του πάνω από την Αττική, το 'σύστημα' ωρίμασε αναπτύσσοντας μια σειρά καταιγίδων οδηγώντας σε συσσώρευση βροχής έως 130 mm σε 5 ώρες. Η καταιγίδα οδήγησε σε έντονες πλημμύρες στα δυτικά τμήματα της λεκάνης της Αττικής, συμπεριλαμβανομένων των περιοχών Αχαρνών, Ιλίου, Περιστερίου, Κορυδαλλού και Πειραιά. Οι πληγείσες περιοχές αποτελούν και τη βασική περιοχή μελέτης της εφαρμογής (Εικόνα 47 – α).



**Εικόνα 47: (α) Περιοχή μελέτης και μετεωρολογικοί σταθμοί συλλογής καιρικών δεδομένων, (β) χωρική κατανομή συσσώρευσης βροχόπτωσης και (γ) ωριαία ένταση βροχόπτωσης (Χαρτογραφικό Υπόβαθρο: Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών)**

Οι καταιγίδες καταγράφηκαν από το δίκτυο παρακολούθησης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και συγκεκριμένα από 5 μετεωρολογικούς σταθμούς στις περιοχές που επλήγησαν από το φαινόμενο (Εικόνα 47 – α και β). Η ποιότητα των δεδομένων που συλλέχθηκαν από αυτούς τους σταθμούς ελέγχθηκε για ελλείψεις τιμών ή ασυνέπειες μέσω ποιοτικών ελέγχων. Οι μετεωρολογικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν επιλέχθηκαν έτσι ώστε να

Σελίδα 283 από 481

επιτευχθεί η μέγιστη χωρική κάλυψη της περιοχής μελέτης και να εξασφαλιστεί ικανοποιητική τεκμηρίωση της χωρικής μεταβλητότητας των βροχοπτώσεων (Εικόνα 47 – β). Τα δεδομένα ήταν διαθέσιμα σε χρονικά βήματα των 10 λεπτών, παρέχοντας τόσο την ένταση όσο και τα συνολικά ποσά βροχόπτωσης που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της καταιγίδας.

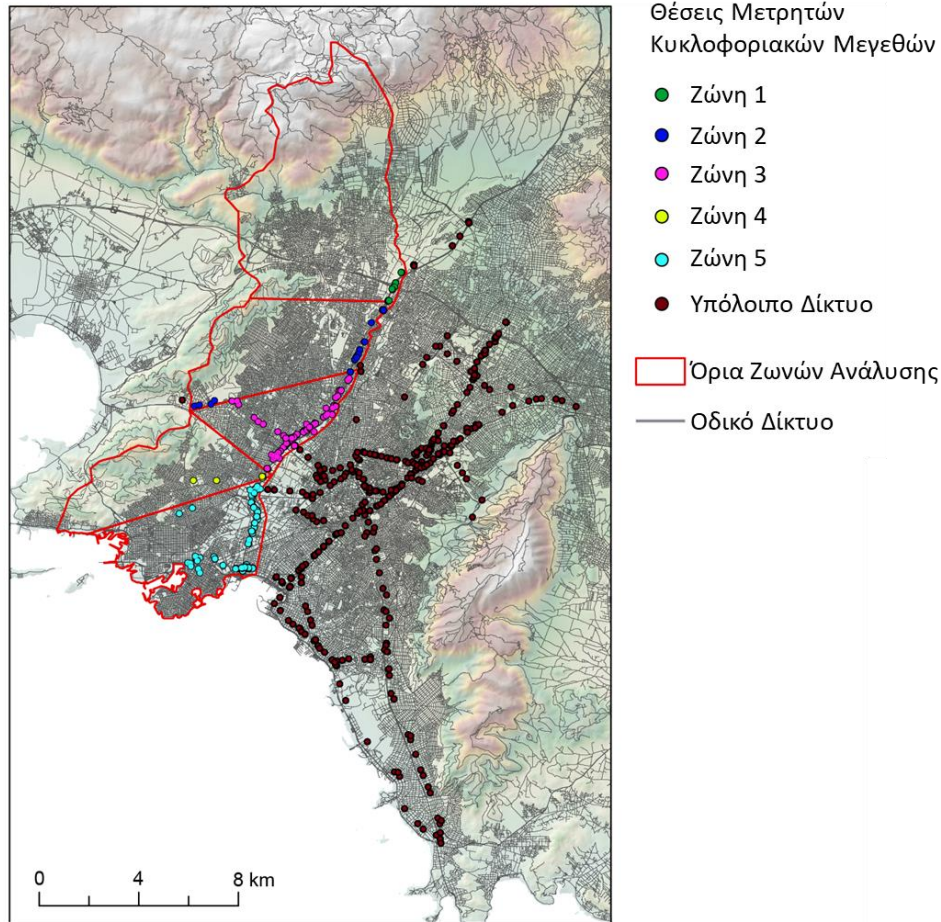
#### *8.4.1.5.2. Δίκτυο Μεταφορών και δεδομένα κυκλοφορίας*

Το δίκτυο Μεταφορών που επιλέχθηκε για την επικύρωση των θεωρητικών εκτιμήσεων της επίπτωσης ΑΚΦ στα μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής, είναι το οδικό δίκτυο της Αττικής. Ο λόγος επιλογής αυτού του δικτύου ήταν η πρόσβαση του υποψήφιου διδάκτορα και γράφοντα στα καιρικά και κυκλοφοριακά δεδομένα του Οκτωβρίου 2014, όταν και το δίκτυο αυτό επλήγη από ισχυρές βροχοπτώσεις.

Το δίκτυο Μεταφορών της Αττικής που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση αποτελείται από 36.725 κόμβους και 81.880 οδικά τμήματα. Η ζήτηση σε μια τυπική ημέρα είναι της τάξης των 4 εκ. μετακινήσεων. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι περιγραφικά και ενδεικτικά της τάξης μεγέθους του δικτύου που αναλύθηκε, αλλά δεν χρησιμοποιήθηκαν σε κανένα σημείο της ανάλυσης, καθώς τα μόνα δεδομένα που ήταν απαραίτητα για την ανάλυση ήταν δεδομένα πυκνότητας, κυκλοφοριακού φόρτου και ταχύτητας σε επιλεγμένα οδικά τμήματα του δικτύου.

Τα κυκλοφοριακά αυτά δεδομένα συλλέχθηκαν από επαγωγικούς βρόχους που είναι εγκατεστημένοι κατά μήκος του δικτύου που εξετάστηκε, και στα οποία είχε πρόσβαση ο γράφων κατά τη διάρκεια της ερευνητικής του απασχόλησης στο Ινστιτούτο Μεταφορών του Εθνικού Κέντρου Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης. Τα δεδομένα αυτά συλλέγονται και συντηρούνται από το Κέντρο Διαχείρισης Κυκλοφορίας της Περιφέρειας Αττικής.

Οι μετρητές των κυκλοφοριακών μεγεθών καταγράφουν δεδομένα πυκνότητας, κυκλοφοριακού φόρτου και ταχύτητας με συχνότητα 2 λεπτών (δηλαδή κάθε 2 λεπτά μια καινούργια εγγραφή εισέρχεται στη βάση δεδομένων για τα 3 μεγέθη). Στην Εικόνα 48 απεικονίζονται οι 229 θέσεις των μετρητών των κυκλοφοριακών μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση, καθώς και οι 5 ζώνες ανάλυσης που προέκυψαν βάσει της θέσης των μετεωρολογικών σταθμών μέτρησης της έντασης της βροχόπτωσης στην Δυτική Αττική.



**Εικόνα 48: Ζώνες ανάλυσης και θέσεις μετρητών κυκλοφοριακών μεγεθών στο εξεταζόμενο δίκτυο**

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη διδακτορική έρευνα αφορούν πέντε (5) ημερήσια διαστήματα, που αντιστοιχούν στις:

- τρεις προηγούμενες Παρασκευές πριν την εμφάνιση του ΑΚΦ (03, 10 και 17 Οκτωβρίου 2014)
- την Παρασκευή που παρατηρήθηκε το ΑΚΦ (24 Οκτωβρίου 2014)
- την Παρασκευή μετά το ΑΚΦ (31 Οκτωβρίου 2014)

Για αντιπροσωπευτικότερη αποτύπωση των κανονικών συνθηκών, χρησιμοποιείται η ίδια ημέρα για την οποία υπάρχει το φαινόμενο της βροχόπτωσης, δηλαδή η Παρασκευή, για να αποφευχθεί η σύγκριση μιας οποιασδήποτε καθημερινής ημέρας με το Σαββατοκύριακο, ή μιας ημέρας που τα εμπορικά καταστήματα είναι ανοιχτά, έναντι μιας ημέρας που δεν είναι). Έτσι, τα παραπάνω διαστήματα επιλέχθηκαν έτσι ώστε να αντικατοπτρίζουν τις συνήθεις συνθήκες κυκλοφορίας μιας τυπικής Παρασκευής, καθώς σε κανένα από τα υπόλοιπα διαστήματα πέραν της 24<sup>ης</sup> Οκτωβρίου δεν παρατηρήθηκε φαινόμενο βροχόπτωσης.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν υποβλήθηκαν σε περιορισμούς (φιλτραρίστηκαν) προκειμένου να αποκλειστούν μη έγκυρες εγγραφές, για τις παρακάτω περιπτώσεις:

- ταχύτητα οχήματος > 150χλμ/ώρα
- ταχύτητα οχήματος = 0
- κυκλοφοριακός φόρτος = 0 οχήματα/ώρα και ταχύτητα οχήματος > 0χλμ/ώρα

#### *8.4.1.5.3. Επίπτωση βροχόπτωσης στα κυκλοφοριακά μεγέθη*

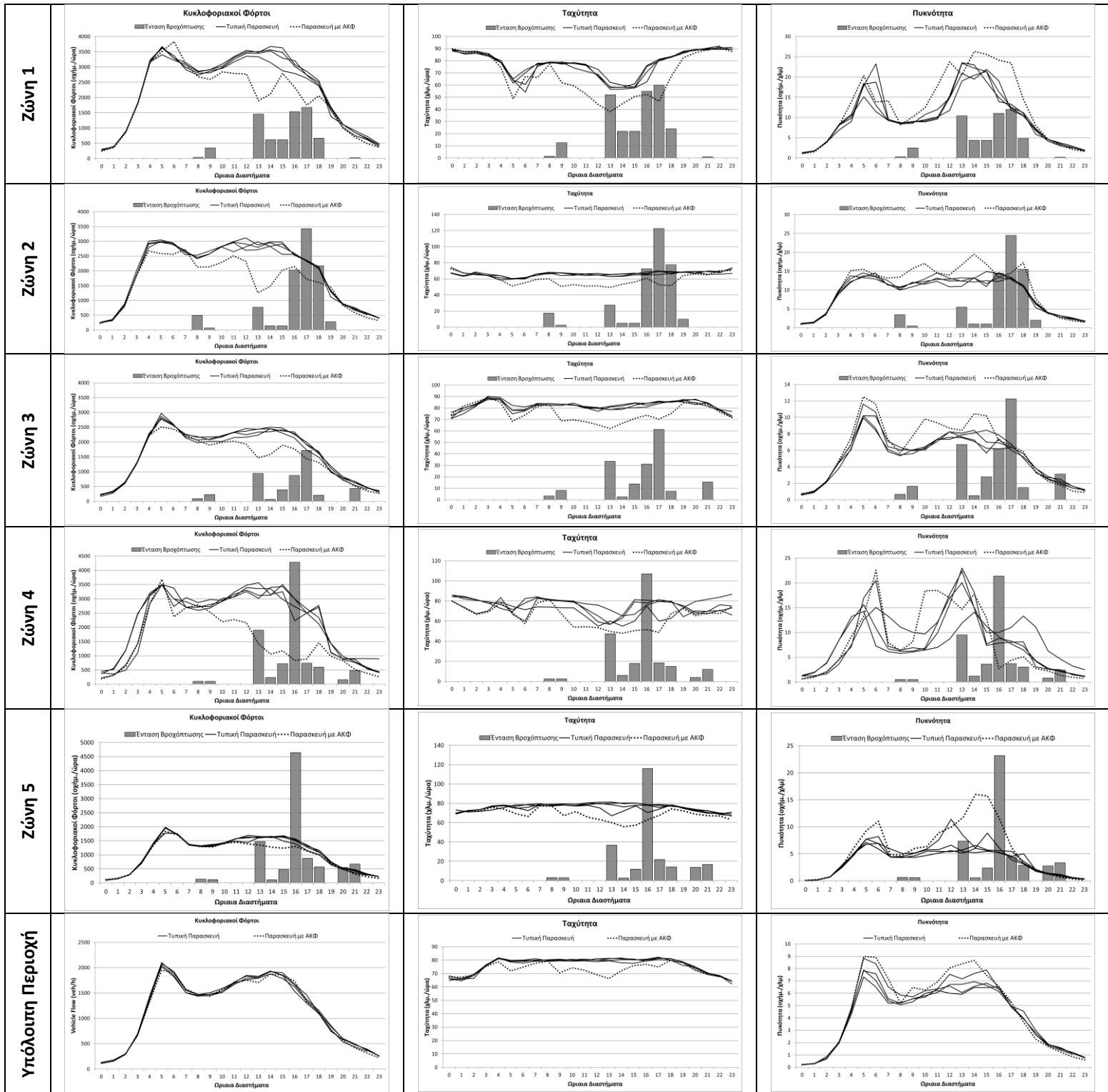
Οι επιπτώσεις της βροχόπτωσης στα κυκλοφοριακά μεγέθη ποσοτικοποιήθηκαν συγκρίνοντας τις μετρήσεις των μεγεθών στα πέντε διαστήματα ανάλυσης, όπου επί της ουσίας συγκρίνονται οι μετρήσεις των μεγεθών της κυκλοφορίας υπό κανονικές συνθήκες (ΚΣ) και συνθήκες ΑΚΦ (Ακραίου Καιρικού Φαινομένου) – εν προκειμένω βροχόπτωσης. Για το σκοπό αυτό, τα δεδομένα ομαδοποιήθηκαν και αναλύθηκαν σε σχέση με τη ζώνη από την οποία προήλθε η εκάστοτε μέτρηση. Τέλος, τα δεδομένα συγκεντρώθηκαν σε διαστήματα 15 λεπτών προκειμένου να μειωθεί ο βαθμός διασποράς.

Συνολικά, η κυκλοφορία των οχημάτων παρεμποδίστηκε σημαντικά σε όλη την περιοχή της Αττικής. Όπως προέκυψε από την ανάλυση των δεδομένων, όλα τα μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής επηρεάστηκαν από την παρουσία των βροχοπτώσεων, σε διαφορετικό όμως βαθμό. Η Εικόνα 49 απεικονίζει την επίδραση της βροχόπτωσης στις 5 ζώνες ανάλυσης και στο υπόλοιπο δίκτυο της Αττικής.

Όπως φαίνεται, ο τρόπος, ο χρόνος και ο βαθμός στον οποίο επηρεάστηκε κάθε μέγεθος της κυκλοφοριακής ροής διαφέρει, ανάλογα με την ένταση της βροχόπτωσης και τη διάρκεια του ίδιου του συμβάντος. Επιπλέον φαίνεται να υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ της έντασης της βροχόπτωσης και της μείωσης του κυκλοφοριακού φόρτου, της ταχύτητας των οχημάτων και της αύξησης της πυκνότητας τους. Για παράδειγμα, στη Ζώνη 1, παρατηρείται αντιστρόφως ανάλογη επίδραση στη μείωση των κυκλοφοριακών φόρτων, σύμφωνα με την αυξομείωση της έντασης της βροχόπτωσης μεταξύ του χρονικού διαστήματος 13:00 και 17:00. Μια αντίστοιχη συσχέτιση παρατηρείται στη μείωση των κυκλοφοριακών φόρτων στη Ζώνη 4, όπου βροχόπτωση έντασης 42,8mm/ώρα στο ωριαίο διάστημα από τις 16:00 ως τις 17:00, επέφερε μείωση κυκλοφοριακών φόρτων κατά 150%.

Ωστόσο, το συμπέρασμα αυτό (του βαθμού δηλαδή στον οποίο επηρεάζονται τα μεγέθη από την παρουσία βροχόπτωσης) δεν ισχύει για όλες τις ζώνες και όλα τα μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής. Για παράδειγμα, η Ζώνη 5 επηρεάζεται λιγότερο συγκριτικά με τις

άλλες ζώνες ανάλυσης ως προς τη μείωση των κυκλοφοριακών φόρτων και της ταχύτητας, καθώς η βροχοπτώση φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά μόνο το μέγεθος της πυκνότητας σε όλη τη Ζώνη 5. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το οδικό δίκτυο στη Ζώνη 5 πιθανώς υποχρησιμοποιείται, εξυπηρετώντας λιγότερα οχήματα σε σχέση με τη χωρητικότητά του και άρα η επίδραση είναι μικρότερη.



**Εικόνα 49: Ωριαίοι κυκλοφοριακοί φόρτοι, ταχύτητες και πυκνότητες οχημάτων στα 5 διαστήματα ανάλυσης στο εξεταζόμενο δίκτυο Μεταφορών**

Σε κάθε περίπτωση δεν μπορούν όλες οι παρατηρηθείσες επιδράσεις να συσχετιστούν άμεσα με την ένταση της βροχόπτωσης. Για παράδειγμα, η πυκνότητα στη Ζώνη 4 συμπεριφέρεται αυθαίρετα κατά την αρχική παρουσία βροχόπτωσης και μειώνεται σημαντικά μόνο όταν η καταγεγραμμένη βροχόπτωση φτάνει την υψηλότερή της ένταση. Ομοίως, η πυκνότητα στη Ζώνη 3 επηρεάζεται μόνον όταν η ένταση βροχόπτωσης κυμαίνεται μεταξύ 5mm/ώρα και 14mm/ώρα, ενώ παραμένει σχετικά ανεπηρέαστη από τις υψηλές εντάσεις βροχόπτωσης. Επιπλέον, η διάρκεια του ίδιου του ΑΚΦ δεν σχετίζεται με τη διάρκεια των επιπτώσεών του, καθώς οι συσσωρευμένες βροχοπτώσεις εξακολουθούν να εμποδίζουν τη λειτουργία της κυκλοφορίας σε ορισμένες ζώνες, ακόμη και όταν δεν υπάρχει πλέον βροχόπτωση.

Τέλος, η υπόλοιπη περιοχή της Αττικής, στην οποία παρατηρήθηκαν πολύ χαμηλές εντάσεις βροχόπτωσης, επηρεάστηκε επίσης αλλά με έμμεσο τρόπο. Οι μετρούμενοι κυκλοφοριακοί φόρτοι στην υπόλοιπη Αττική είχαν μείωση της τάξης του 5% συνολικά μεταξύ 13:00 και 17:00, ενώ η ταχύτητα των οχημάτων παρουσίασε μείωση της τάξης του 10% σε σύγκριση με τις κανονικές συνθήκες κατά την ίδια περίοδο. Ο Πίνακας 20 συνοψίζει τις ποσοστιαίες αλλαγές για τα μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής που αναλύθηκαν σε όλες τις ζώνες.

**Πίνακας 20: Ποσοστιαίες αλλαγές για τα μεγέθη της κυκλοφοριακής ροής λόγω εμφάνισης ΑΚΦ στο δίκτυο που εξετάζεται**

Κυκλοφοριακοί Φόρτοι	Μέσος ημερήσιος κυκλοφοριακός φόρτος (οχήμ./ώρα)		Μέση Ημερήσια Διαφορά (σε %)	Μέση Ωριαία Διαφορά στις ώρες εκδήλωσης του ΑΚΦ (13:00-19:00) (σε %)	Μέγιστη Διαφορά στις ώρες εκδήλωσης του ΑΚΦ (13:00-19:00) (σε %)
	Τυπική Παρασκευή	Παρασκευή με ΑΚΦ			
Ζώνη 1	2.293	1.989	-13	-27	-23
Ζώνη 2	1.991	1.623	-18	-31	-56
Ζώνη 3	1.644	1.423	-13	-25	-38
Ζώνη 4	2.196	1.496	-32	-59	-68
Ζώνη 5	1076	981	-9	-16	-23
Υπόλοιπη περιοχή	1.178	1.162	-1	-1	-3
Ταχύτητα	Μέση ημερήσια ταχύτητα (χλμ./ώρα)		Μέση Ημερήσια Διαφορά (σε %)	Μέση Ωριαία Διαφορά τις ώρες εκδήλωσης του ΑΚΦ (σε %) (13:00-19:00) (σε %)	Μέγιστη Διαφορά τις ώρες εκδήλωσης του ΑΚΦ (13:00-19:00) (σε %)
	Τυπική Παρασκευή	Παρασκευή με ΑΚΦ			
Ζώνη 1	78	68	-13	-23	-27
Ζώνη 2	66	59	-11	-18	-23
Ζώνη 3	82	76	-7	-13	-23
Ζώνη 4	74	64	-14	-21	-33
Ζώνη 5	76	68	-11	-17	-27
Υπόλοιπη περιοχή	76	73	-4	-6	-6



Πυκνότητα	Μέση ημερήσια πυκνότητα (οχήμ./χλμ.)		Μέση Ημερήσια Διαφορά (σε %)	Μέση Ωριαία Διαφορά στις ώρες εκδήλωσης του ΑΚΦ (σε %) (13:00-19:00) (σε %)	Μέγιστη Διαφορά στις ώρες εκδήλωσης του ΑΚΦ (13:00-19:00) (σε %)
	Τυπική Παρασκευή	Παρασκευή με ΑΚΦ			
Ζώνη 1	10	13	30	25	77
Ζώνη 2	9	11	22	33	54
Ζώνη 3	5	6	20	17	43
Ζώνη 4	8	8	0	-18	-67
Ζώνη 5	4	6	50	80	167
Υπόλοιπη περιοχή	4	5	25	0	0

#### 8.4.1.6. Εύρεση παραμέτρων $\alpha$ και $\beta$ μέσω εμπειρικών δεδομένων

Στην ενότητα αυτή χρησιμοποιούνται τα δεδομένα που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα (μετρήσεις των μεγεθών της κυκλοφορίας υπό κανονικές συνθήκες και υπό συνθήκες εκδήλωσης ΑΚΦ, και οι μετρήσεις της έντασης της βροχόπτωσης) σε μια προσπάθεια να διαπιστωθεί η επίδραση του ΑΚΦ στα μεγέθη αυτά, δηλαδή να βρεθούν οι παράμετροι  $\alpha$  και  $\beta$ , σύμφωνα με τις οποίες επηρεάζονται τα κυκλοφοριακά μεγέθη. Υπενθυμίζεται εδώ, ότι όπως αποδείχτηκε στην Ενότητα 8.4.1.3, αν ο χρονικός και χωρικός διαχωρισμός σε συνθήκες ΑΚΦ επηρεάζονται από τους παράγοντες  $\alpha$  και  $\beta$  αντίστοιχα, τότε η ταχύτητα θα επηρεαστεί κατά έναν παράγοντα  $\frac{\beta}{\alpha}$ .

Για να μπορέσουν να εκτιμηθούν αυτές οι παράμετροι, συσχετίστηκαν οι λόγοι (ratio) των μετρήσεων υπό ιδανικές συνθήκες και υπό συνθήκες ΑΚΦ για τα κυκλοφοριακά μεγέθη, σε ωριαίο επίπεδο, με την ένταση της βροχόπτωσης για καθεμία από τις πέντε ζώνες ανάλυσης. Οι μετρήσεις υπό ιδανικές συνθήκες (χωρίς βροχόπτωση) συγκεντρώθηκαν μαζί και χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος τους.

Η συσχέτιση αυτή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση γραμμικής παλινδρόμησης, εξετάστηκε δηλαδή αν η σχέση των λόγων των μεγεθών υπό κανονικές συνθήκες και υπό συνθήκες ΑΚΦ με την ένταση της βροχόπτωσης είναι της μορφής:

$$y = \gamma + \delta * i \quad \text{Εξίσωση 8.13}$$

όπου  $y$  είναι ο λόγος του μεγέθους που εξετάζεται,  $i$  είναι η ένταση της βροχόπτωσης, και  $\gamma$  και  $\delta$  οι παράμετροι της γραμμικής παλινδρόμησης. Επειδή όμως:

- οι λόγοι της πυκνότητας είναι σύμφωνα με την Εξίσωση 8.10 ( $k' = \frac{1}{s'} = \frac{1}{\beta s} = \frac{k}{\beta}$ ) ίσοι με  $\beta$ ,

- οι λόγοι του κυκλοφοριακού φόρτου είναι σύμφωνα με την Εξίσωση 8.11 ( $q' = \frac{1}{H'} = \frac{1}{\alpha H} = \frac{q}{\alpha}$ ) ίσοι με  $\alpha$ ,
- και οι λόγοι της ταχύτητας είναι σύμφωνα με την Εξίσωση 8.12 ( $u_s' = \frac{q'}{k'} = \frac{q/\alpha}{k'/\beta} = u_s \frac{\beta}{\alpha}$ ) ίσοι με  $\frac{\beta}{\alpha}$ ,

έτσι και το  $\gamma$  στην Εξίσωση 8.13, αναλόγως με το ποιο μέγεθος εξετάζεται, θα είναι ίσο με το  $\beta$  (για τους λόγους των πυκνότητων), ίσο με  $\alpha$  (για τους λόγους των κυκλοφοριακών φόρτων) και ίσο με  $\frac{\beta}{\alpha}$  (για τους λόγους των ταχυτήτων). Καθώς όμως ισχύει, ότι αν η ένταση της βροχόπτωσης είναι ίση με 0 (δεν υπάρχει δηλαδή βροχόπτωση), ο λόγος του μεγέθους που εξετάζεται θα πρέπει να είναι ίσος με 1, δηλαδή το μέγεθος υπό ΚΣ θα ισούται με το μέγεθος υπό ΑΚΦ, τότε το  $\gamma$  στην Εξίσωση 8.13 θα ισούται με 1. Συνεπώς, η Εξίσωση 8.13 μπορεί τώρα να γραφεί ως εξής:

$$y = 1 + \delta * i \quad \text{Εξίσωση 8.14}$$

και συγκεκριμένα για τα μεγέθη:

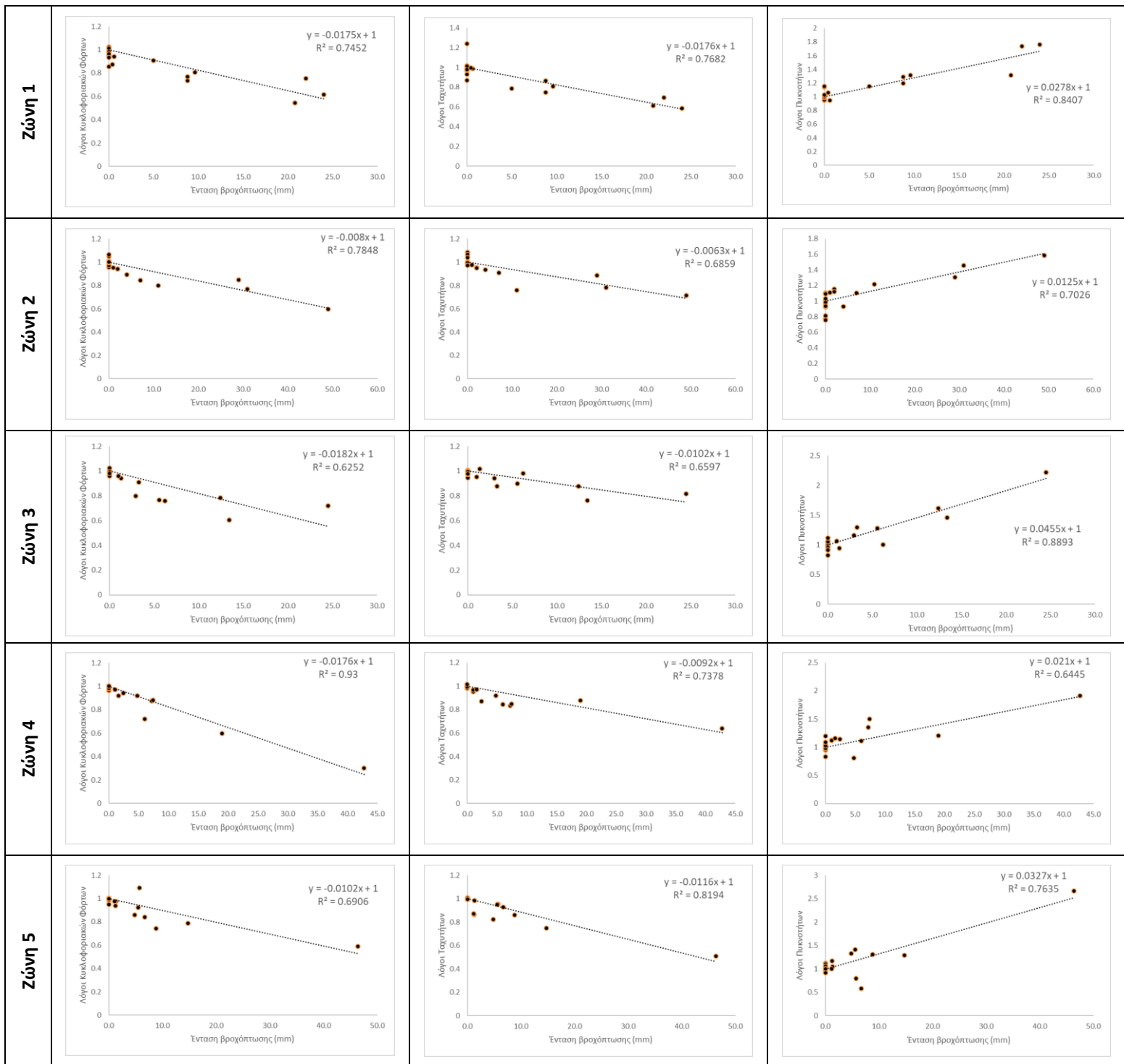
$$y_q = \frac{q'}{q} = \frac{1}{\alpha} = 1 + \delta_q * i \quad \text{Εξίσωση 8.15}$$

$$y_k = \frac{k'}{k} = \frac{1}{\beta} = 1 + \delta_k * i \quad \text{Εξίσωση 8.16}$$

$$y_u = \frac{u'}{u} = \frac{\frac{q'}{k'}}{\frac{q}{k}} = \frac{\beta}{\alpha} = 1 + \delta_u * i \quad \text{Εξίσωση 8.17}$$

Συνεπώς, εκτιμώντας τις τιμές του  $\delta$ , και καθώς η ένταση  $i$  της βροχόπτωσης είναι γνωστή από τα εμπειρικά δεδομένα, μπορεί να γίνει αντίστοιχα εκτίμηση του  $\alpha$ , του  $\beta$  και του  $\frac{\beta}{\alpha}$  (και άρα της επίπτωσης της βροχόπτωσης στα μεγέθη).

Στην Εικόνα 50 απεικονίζονται οι διαφορετικές τιμές του  $\delta$ , σύμφωνα με την συσχέτιση των λόγων των μεγεθών που εξετάζονται, με την ένταση της βροχόπτωσης.



**Εικόνα 50: Γραμμική παλινδρόμηση των λόγων των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής με την ένταση της βροχόπτωσης**

Όπως παρατηρείται, υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ του λόγου όλων των μεγεθών και της έντασης της βροχόπτωσης, με μια πτωτική τάση για τους λόγους ταχυτήτων και κυκλοφοριακών φόρτων, και αναμενόμενα, μια ανοδική τάση για τους λόγους των πυκνοτήτων.

Σύμφωνα λοιπόν με τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης:

- Για τον κυκλοφοριακό φόρτο, οι τιμές του  $\delta$  κυμαίνονται απο  $-0,0182$  έως  $-0,008$
- Για την πυκνότητα, οι τιμές του  $\delta$  κυμαίνονται απο  $0,0125$  έως  $0,0455$
- Για την ταχύτητα, οι τιμές του  $\delta$  κυμαίνονται απο  $-0,063$  έως  $-0,0092$

Για την επικύρωση των παραπάνω ευρημάτων, θα πρέπει σύμφωνα με την προσέγγιση που αναπτύχθηκε, και σύμφωνα με την Εξίσωση 8.17, να ισχύει ότι ο λόγος  $\frac{\beta}{\alpha}$  ισούται με  $\frac{\frac{1}{1+\delta_k * i}}{\frac{1}{1+\delta_q * i}}$  (εκφράζοντας τα  $\beta$  και  $\alpha$  σύμφωνα με την Εξίσωση 8.15 και Εξίσωση 8.16 αντίστοιχα). Πρακτικά, η εξίσωση αυτή σημαίνει ότι μπορεί από την επίδραση του ΑΚΦ στον κυκλοφοριακό φόρτο και στην πυκνότητα αντίστοιχα, να εκτιμηθεί η επίπτωση στην ταχύτητα (λόγω της θεμελιώδους σχέσης των τριών θεμελιωδών μεγεθών της Κυκλοφοριακής Ροής).

Έτσι, ισχύει ότι:

$$\frac{\beta}{\alpha} = 1 + \delta_u * i \rightarrow$$

$$\frac{\frac{1}{1 + \delta_k * i}}{\frac{1}{1 + \delta_q * i}} = 1 + \delta_u * i \rightarrow$$

**Εξίσωση 8.18**

$$\frac{1 + \delta_q * i}{1 + \delta_k * i} = 1 + \delta_u * i \rightarrow$$

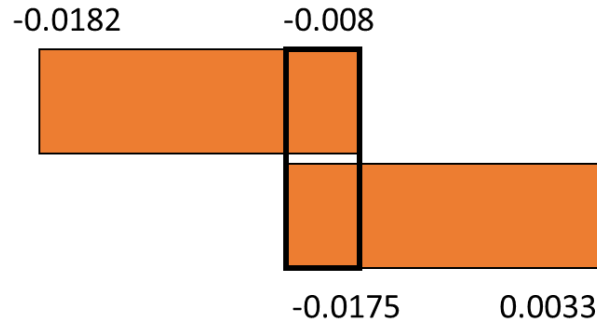
$$1 + \delta_q * i = 1 + \delta_u * i + \delta_k * i + \delta_u * \delta_k * i^2 \rightarrow$$

$$\delta_q = \delta_u + \delta_k + \delta_u * \delta_k * i$$

Αν ληφθούν υπόψη τα εύρη τιμών των  $\delta_u$  και  $\delta_k$  σύμφωνα με τα ευρήματα της ανάλυσης των εμπειρικών δεδομένων, μπορεί να υποτεθεί ότι ο τελευταίος όρος στην Εξίσωση 8.18 είναι αμελητέος καθώς πρόκειται για πολλαπλασιασμό πολύ μικρών τιμών (από  $10^{-4}$  έως  $10^{-6}$ ). Έτσι, προκύπτει ότι:

$$\delta_q = \delta_u + \delta_k \quad \text{Εξίσωση 8.19}$$

Σύμφωνα και πάλι με τα εύρη των τιμών του  $\delta$  για κάθε μέγεθος που εξετάζεται, φαίνεται να υπάρχει ένα εύρος τιμών το οποίο επαληθεύει την Εξίσωση 8.19, και συγκεκριμένα:



Εικόνα 51: Εύρη τιμών επικύρωσης της θεωρητικής ανάλυσης

Για τις τιμές που βρίσκονται μέσα στο οριοθετημένο πλαίσιο στην Εικόνα 51, η θεωρητική ανάλυση επικυρώνεται από τα εμπειρικά δεδομένα.

Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί ότι σύμφωνα με τα αριθμητικά ευρήματα, για βροχόπτωση έντασης έως και 60mm/h και συσσώρευσης στο δίκτυο έως 130mm/h, σε επίπεδο δικτύου:

- ο κυκλοφοριακός φόρτος μειώνεται κατά ένα παράγοντα 0,8 έως 1,8 επί την ένταση της βροχόπτωσης
- η πυκνότητα αυξάνεται κατά ένα παράγοντα 1,2 έως 4 επί την ένταση της βροχόπτωσης
- η ταχύτητα μειώνεται κατά ένα παράγοντα 0,9 έως 6 επί την ένταση της βροχόπτωσης

#### 8.4.2. Συνάρτηση χρησιμότητας

Σύμφωνα με τα ευρήματα της βιβλιογραφικής επισκόπησης (βλέπε Ενότητα 5.6), η επιλογή μέσου μεταφοράς θεωρείται ότι επηρεάζεται από μια σειρά παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων των χαρακτηριστικών των μετακινούμενων (διαθεσιμότητα και ιδιοκτησία αυτοκινήτων, εισόδημα, ηλικία, κ.λπ.), από την ίδια τη μετακίνηση (σκοπός, απόσταση, ώρα της ημέρας, κ.λπ.) και από το σύστημα μεταφοράς (διάρκεια μετακίνησης, χρόνος αναμονής, χρόνος μεταφοράς επί του οχήματος, χρηματικό κόστος, άνεση, ασφάλεια, κ.λπ.). Οι συναρτήσεις χρησιμότητας των μέσων μεταφοράς περιέχουν το σύνολο του χρηματικού και μη χρηματικού κόστους χρήσης κάθε μέσου και η μορφή τους δίνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$U_m = \alpha_m + \sum_{i=1}^I (\beta_{im} * x_{im}) \quad \forall m \in M \quad \text{Εξίσωση 8.20}$$

όπου  $U_m$  η συνάρτηση χρησιμότητας κάθε μέσου  $m$ ,  $\alpha_m$  ένας σταθερός ποιοτικός όρος του μέσου  $m$  (ποιοτικές παράμετροι όπως ασφάλεια, άνεση, αξιοπιστία, κ.α.),  $x_{im}$  ο παράγοντας  $i$  του μέσου  $m$ ,  $\beta_{im}$  ο συντελεστής του παράγοντα  $i$  του μέσου  $m$ ,  $I$  ο συνολικός αριθμός των χαρακτηριστικών του προτύπου,  $M$  το σύνολο των εξεταζόμενων μεταφορικών μέσων.

Όπως φάνηκε όμως από την επισκόπηση της βιβλιογραφίας, από τη μορφή της συνάρτησης χρησιμότητας, απουσιάζουν παράγοντες σχετικοί με τον καιρό και το κλίμα, που θα μπορούσαν να παραμετροποιήσουν την επίδρασή τους στις επιλογές μέσου μεταφοράς των μετακινούμενων. Για το λόγο αυτό, προτείνεται η επαναδιατύπωση των συναρτήσεων χρησιμότητας των μέσων μεταφοράς, και η δόμησή τους με τέτοιο τρόπο ώστε να εμπεριέχουν ποιοτικές παραμέτρους που σχετίζονται με την εκδήλωση Ακραίων Καιρικών Φαινομένων (ΑΚΦ).

Συγκεκριμένα, προτείνεται η επαναδιατύπωση των συναρτήσεων χρησιμότητας έτσι ώστε αυτές να περιλαμβάνουν:

- 1) την πιθανότητα εκδήλωσης Ακραίων Καιρικών Φαινομένων (ΑΚΦ)
- 2) την εκτιμώμενη επίπτωση των ΑΚΦ στα δίκτυα των μέσων Μεταφορών και στη λειτουργία τους,
- 3) τη διάρκεια της επίπτωσης αυτής.

Οι παραπάνω παράμετροι προτείνεται να μετατρέπονται σε γενικευμένο κόστος με τη χρήση των τιμών της «αξίας» του χρόνου.

Έτσι, σε περιπτώσεις παρουσίας ΑΚΦ, οι συναρτήσεις χρησιμότητας προτείνεται να δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$U_{lm} = \alpha_m + [\beta_m * C_{lm}] + [\gamma_m * VoT * (TT_{lm} + \sum_{k=1}^j \sum_{c=1}^c (OP_{kc} * D_{ck} * I_{mkcc'}) )]] \quad \text{Εξίσωση 8.21}$$

όπου  $\alpha_m$  είναι και πάλι ένας σταθερός ποιοτικός όρος του μέσου  $m$  (ποιοτικές παράμετροι όπως ασφάλεια, άνεση, αξιοπιστία, κ.α.),  $\beta_m$  ο συντελεστής του κόστους μετακίνησης με το μέσο  $m$ ,  $C_{lm}$  το χρηματικό κόστος μετακίνησης με το μέσο  $m$  για τη σύνδεση  $l$ ,  $\gamma_m$  ο συντελεστής του χρόνου διαδρομής της μετακίνησης με το μέσο  $m$ ,  $VoT$  η αξία του χρόνου,

$TT_{im}$  ο χρόνος μετακίνησης με το μέσο  $m$  για τη σύνδεση  $l$ ,  $OP_{kc}$  η πιθανότητα εκδήλωσης ΑΚΦ  $k$  στην πόλη  $c$ ,  $D_{ck}$  η διάρκεια επίπτωσης του ΑΚΦ  $k$  στην πόλη  $c$ ,  $I_{mkcc'}$  ο βαθμός επίπτωσης του ΑΚΦ  $k$ , στο μέσο  $m$ , στη σύνδεση μεταξύ του διαδοχικού ζεύγος πόλεων  $c$  και  $c'$  στην σύνδεση  $l$ ,  $j$  το σύνολο των ΑΚΦ και  $C$  το σετ των πόλεων μεταξύ της προέλευσης και του προορισμού της σύνδεσης  $l$ .

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζεται εφαρμογή της επαναδιατυπωμένης αυτής συνάρτησης χρησιμότητας σε ένα θεωρητικό δίκτυο με υποθέσεις εμφάνισης ΑΚΦ.

#### 8.4.2.1. Εφαρμογή σε θεωρητικό δίκτυο

Η επαναδιατυπωμένη συνάρτηση χρησιμότητας, που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, εφαρμόζεται εδώ σε ένα θεωρητικό δίκτυο Μεταφορών μικρής κλίμακας (τριών κόμβων - σε αυτή την περίπτωση πόλεων - όπου θεωρείται ότι εκδηλώνονται Ακραία Καιρικά Φαινόμενα, που επηρεάζουν τη λειτουργία των μέσων Μεταφορών που συνδέουν αυτές τις πόλεις, και συνεπώς επηρεάζουν και την επιλογή μέσου των μετακινουμένων). Τα μεταφορικά μέσα που θεωρούνται ότι χρησιμοποιούνται για τις μετακινήσεις μεταξύ των τριών αυτών πόλεων είναι το αεροπλάνο, το τρένο και το Ι.Χ. αυτοκίνητο. Το δίκτυο που εξετάζεται θεωρείται ότι είναι ένα δίκτυο τριών ευρωπαϊκών πόλεων και συγκεκριμένα της Βαρκελώνης, της Ρώμης και της Ζυρίχης. Η επιλογή των συγκεκριμένων πόλεων έγινε τυχαία, με μόνο κριτήριο επιλογής τη ρεαλιστική συνδεσιμότητα των τριών αυτών πόλεων με τα παραπάνω μέσα μεταφοράς.

Ο σκοπός της ανάπτυξης του παραπάνω σεναρίου είναι να διερευνηθεί κατά πόσο η επαναδιατύπωση της συνάρτησης χρησιμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ποσοτικοποιήσει τις επιδράσεις Ακραίων Καιρικών Φαινομένων στην επιλογή του μέσου μεταφοράς. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής εκφράζονται σε διαφοροποιημένες ροές επιβατών μεταξύ των διαφόρων μέσων που εξετάζονται.

Η εφαρμογή που παρουσιάζεται γίνεται σε τρία διαδοχικά βήματα, που αφορούν:

1. στην εκτίμηση πιθανότητας εκδήλωσης ΑΚΦ
2. στην αξιολόγηση των επιπτώσεών τους και
3. στην ποσοτικοποίηση των μεταβαλλόμενων επιβατικών ροών μεταξύ μεταφορικών μέσων.

Η χρήση της επαναδιατυπωμένης συνάρτησης χρησιμότητας γίνεται στο Βήμα 3.

#### 8.4.2.2. Βήμα 1 – Πιθανότητα εκδήλωσης συμβάντος στις πόλεις ή στις συνδέσεις τους

Σε αυτό το βήμα ποσοτικοποιείται η πιθανότητα να εκδηλωθούν ΑΚΦ στις πόλεις και στις συνδέσεις τους. Η πιθανότητα εκδήλωσης ΑΚΦ σε οποιοδήποτε σημείο των συνδέσεων μεταξύ των πόλεων θεωρείται ίση με την πιθανότητα εκδήλωσης ΑΚΦ στην πόλη που βρίσκεται πλησιέστερα στο σημείο που εξετάζεται. Είναι προφανές ότι όσο πυκνότερο είναι το δίκτυο που αναλύεται, τόσο ακριβέστερα μπορεί να προσδιοριστεί η πιθανότητα ΑΚΦ.

Στο πλαίσιο της εφαρμογής, υποτίθεται ότι ακραία κύματα θερμότητας (πάνω από 43 βαθμούς Κελσίου) πλήττουν την Βαρκελώνη κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου και παράλληλα ισχυροί άνεμοι (άνω των 32m/s) πλήττουν τη Ρώμη. Επίσης υποτίθεται ότι η επίδραση του πρώτου ΑΚΦ διαρκεί 8 ώρες, ενώ η επίδραση του δεύτερου ΑΚΦ διαρκεί 4 ώρες.

#### 8.4.2.3. Βήμα 2 – Εκτίμηση επιπτώσεων στις πόλεις ή στις συνδέσεις τους

Η εκτίμηση των επιπτώσεων των ΑΚΦ είναι ένα εξαιρετικά σύνθετο ζήτημα και υπήρξε αντικείμενο της βιβλιογραφικής επισκόπησης της διδακτορικής διατριβής (βλέπε Ενότητα 2.6). Στην προκειμένη εφαρμογή, γίνονται υποθέσεις για τον βαθμό στον οποίο τα δίκτυα των μέσων Μεταφορών επηρεάζονται από ένα ΑΚΦ. Σημειώνεται όμως εδώ, ότι τέτοια στοιχεία για πραγματικά δίκτυα Μεταφορών μπορούν να προέλθουν από ιστορικές παρατηρήσεις. Για παράδειγμα, η εκδήλωση ενός ΑΚΦ σε μια Πόλη 1 θεωρείται ότι σύμφωνα με ιστορικά στοιχεία εμπόδισε τις αεροπορικές, σιδηροδρομικές και οδικές μεταφορές κατά  $x_{i,j}\%$ ,  $y_{i,j}\%$ , και  $z_{i,j}\%$ , αντίστοιχα, όπου  $i, j$  το ζεύγος προέλευσης – προορισμού των πόλεων που εξετάζεται σε κάθε δίκτυο όπου η Πόλη 1 είναι είτε προέλευση είτε προορισμός. Στην παρούσα εφαρμογή, γίνεται υιοθέτηση μιας πινακοποιημένης προσέγγισης για την απεικόνιση των επιδράσεων των ΑΚΦ στις συνδέσεις όλων των κόμβων του δικτύου που εξετάζεται (Πίνακας 21).

Πίνακας 21: Εκτίμηση επιπτώσεων ισχυρής χιονόπτωσης στην Πόλη 1 ανά μέσο

ΑΚΦ: Χ Πληγείσα Πόλη: 1 Μεταφορικό Μέσο: Αεροπορικές μεταφορές			
	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3
Πόλη 1	-	$x_{12}\%$	$x_{13}\%$
Πόλη 2	$x_{21}\%$	-	$x_{23}\%$
Πόλη 3	$x_{31}\%$	-	-
ΑΚΦ: Χ Πληγείσα Πόλη: 1			



Μεταφορικό Μέσο: Σιδηροδρομικές μεταφορές			
	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3
Πόλη 1	-	$\gamma_{12}\%$	$\gamma_{13}\%$
Πόλη 2	$\gamma_{21}\%$	-	-
Πόλη 3	$\gamma_{31}\%$	-	-
ΑΚΦ: Χ Πληγείσα Πόλη: 1 Μεταφορικό Μέσο: Οδικές μεταφορές			
	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3
Πόλη 1	-	$z_{12}\%$	$z_{13}\%$
Πόλη 2	$z_{21}\%$	-	-
Πόλη 3	$z_{31}\%$	$z_{32}\%$	-

Όπως φαίνεται, ο αντίκτυπος του ΑΚΦ στην Πόλη 1 (η πιθανότητα εκδήλωσης του οποίου είναι το αποτέλεσμα του Βήματος 1), επηρεάζει τις αεροπορικές συνδέσεις που προέρχονται από, ή κατευθύνονται προς την Πόλη 1 κατά  $x_{ij}\%$ , τις σιδηροδρομικές συνδέσεις κατά  $\gamma_{ij}\%$  και τις οδικές συνδέσεις κατά και  $z_{ij}\%$ . Τα βασικά πλεονεκτήματα της πινακοποιημένης προσέγγισης περιγράφονται παρακάτω:

- Είναι δυνατό να υπολογιστεί η περίπτωση ταυτόχρονων ΑΚΦ που έχουν επιπτώσεις στις πόλεις και τις συνδέσεις τους, καθώς οι πίνακες αναφέρονται σε κάθε ΑΚΦ και σε κάθε πόλη χωριστά.
- Είναι δυνατό να εκτιμηθεί η επίδραση ενός ΑΚΦ που εμφανίζεται στην Πόλη 1, αλλά που έχει επιπτώσεις στις Πόλεις 2 και 3 και στις συνδέσεις τους, χάρη στη χρησιμοποίηση των συμμετρικών πινάκων. Το γεγονός αυτό καταδεικνύεται στον πίνακα αξιολόγησης της επίδρασης του υπό εξέταση ΑΚΦ π.χ. στις αεροπορικές μεταφορές (Πίνακας 21), όπου επηρεάζεται επίσης η σύνδεση της Πόλης 2 με την Πόλη 3, υποθέτοντας ότι η σύνδεση αυτή διεξάγεται μέσω του αερολιμένα της Πόλης 1. Το ίδιο γεγονός καταδεικνύεται και στον αντίστοιχο πίνακα των οδικών Μεταφορών, όπου η οδική σύνδεση μεταξύ Πόλης 3 και Πόλης 2 επηρεάζεται επίσης, υποθέτοντας ότι εξυπηρετείται μέσω της Πόλης 1.

Απαραίτητα στοιχεία για την αξιολόγηση αυτή είναι η διάρκεια της επίδρασης των ΑΚΦ που εξετάζονται και η ίδια η επίπτωσή τους στη λειτουργία των μεταφορικών μέσων που πλήττουν, εκφρασμένη ως ποσοστό επί τοις 100, με το 0 να σημαίνει καμία επίπτωση και το 100 την πλήρη αναστολή της λειτουργίας τους.

Στην παρούσα εφαρμογή θεωρείται ότι τα ακραία κύματα θερμότητας (ΚΘ) οδήγησαν σε δασικές πυρκαγιές στην περιοχή της Βαρκελώνης (Πόλη 1), που επηρεάζουν τη σύνδεση της πόλης με το εθνικό οδικό δίκτυο. Θεωρείται έτσι, ότι επηρεάζουν τις οδικές μεταφορές σε βαθμό 50% και τις σιδηροδρομικές μεταφορές σε ένα βαθμό 20%. Οι ισχυροί άνεμοι (ΙΑ) κοντά στον αερολιμένα της Ρώμης (Πόλης 2) θεωρείται ότι παρεμποδίζουν τις αεροπορικές μεταφορές κατά 70%. Όλα τα παραπάνω ποσοστά ορίσθηκαν χάριν παραδείγματος χωρίς δεδομένα.

Πίνακας 22: Εκτίμηση επιπτώσεων των εξεταζόμενων ΑΚΦ στις Πόλεις και τις συνδέσεις τους

Πίνακας επιπτώσεων ακραίων κυμάτων Θερμότητας (ΚΘ) για κάθε πόλη					Μέσο	Πίνακας επιπτώσεων ισχυρών ανέμων (ΙΑ) για κάθε πόλη			
Πόλη 1	ΚΘ – Πόλη 1	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3	Οδικές μεταφορές (Ι.Χ.)	ΙΑ – Πόλη 1	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3
	Πόλη 1	0	0.5	0.5		Πόλη 1	0	0	0
	Πόλη 2	0.5	0	0		Πόλη 2	0	0	0
	Πόλη 3	0.5	0	0		Πόλη 3	0	0	0
Πόλη 2	ΚΘ – Πόλη 2	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3		ΙΑ – Πόλη 2	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3
	Πόλη 1	0	0	0		Πόλη 1	0	0	0
	Πόλη 2	0	0	0		Πόλη 2	0	0	0
	Πόλη 3	0	0	0		Πόλη 3	0	0	0
Πόλη 3	ΚΘ – Πόλη 3	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3		ΙΑ – Πόλη 3	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3
	Πόλη 1	0	0	0		Πόλη 1	0	0	0
	Πόλη 2	0	0	0		Πόλη 2	0	0	0
	Πόλη 3	0	0	0		Πόλη 3	0	0	0
Πόλη 1	ΚΘ – Πόλη 1	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3	Σιδηροδρομικές μεταφορές (Γραίνο)	ΙΑ – Πόλη 1	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3
	Πόλη 1	0	0.2	0.2		Πόλη 1	0	0	0
	Πόλη 2	0.2	0	0		Πόλη 2	0	0	0
	Πόλη 3	0.2	0	0		Πόλη 3	0	0	0
Πόλη 2	ΚΘ – Πόλη 2	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3		ΙΑ – Πόλη 2	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3
	Πόλη 1	0	0	0		Πόλη 1	0	0	0

	Πόλη 2	0	0	0		Πόλη 2	0	0	0
	Πόλη 3	0	0	0		Πόλη 3	0	0	0
Πόλη 3	ΚΘ – Πόλη 3	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3	Αεροπορικές μεταφορές (Αεροπλάνο)	ΙΑ – Πόλη 3	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3
	Πόλη 1	0	0	0		Πόλη 1	0	0	0
	Πόλη 2	0	0	0		Πόλη 2	0	0	0
	Πόλη 3	0	0	0		Πόλη 3	0	0	0
Πόλη 1	ΚΘ – Πόλη 1	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3		ΙΑ – Πόλη 1	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3
	Πόλη 1	0	0	0		Πόλη 1	0	0	0
	Πόλη 2	0	0	0		Πόλη 2	0	0	0
	Πόλη 3	0	0	0		Πόλη 3	0	0	0
Πόλη 2	ΚΘ – Πόλη 2	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3		ΙΑ – Πόλη 2	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3
	Πόλη 1	0	0	0		Πόλη 1	0	0.7	0
	Πόλη 2	0	0	0		Πόλη 2	0.7	0.7	0.7
	Πόλη 3	0	0	0		Πόλη 3	0	0.7	0
Πόλη 3	ΚΘ – Πόλη 3	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3	ΙΑ – Πόλη 3	Πόλη 1	Πόλη 2	Πόλη 3	
	Πόλη 1	0	0	0	Πόλη 1	0	0	0	
	Πόλη 2	0	0	0	Πόλη 2	0	0	0	
	Πόλη 3	0	0	0	Πόλη 3	0	0	0	

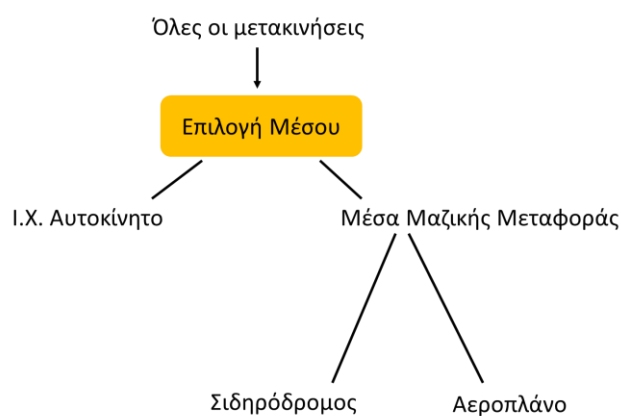
#### 8.4.2.4. Βήμα 3 – Μεταβολή επιβατικών ροών λόγω εκδήλωσης ΑΚΦ

Στο Βήμα 3 υπολογίζεται η μεταβολή των επιβατικών ροών λόγω της εκδήλωσης ΑΚΦ και της επίδρασής του στο εξεταζόμενο δίκτυο Μεταφορών. Προκειμένου να εκτιμηθεί η μεταβολή αυτή, είναι απαραίτητη η χρήση της επαναδιατυπωμένης συνάρτησης χρησιμότητας που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 8.4.2.

Στην εφαρμογή που παρουσιάζεται εδώ, υιοθετείται μια προσέγγιση προτυποποίησης επιλογής μέσου. Τα αποτελέσματα του Βήματος 3 αναφέρονται στη σύγκριση μιας περίπτωσης ενός «βασικού» σεναρίου (χωρίς την εμφάνιση ή εκδήλωση ενός ΑΚΦ) έναντι ενός σεναρίου όπου εκδηλώνονται ένα ή περισσότερα ΑΚΦ και εκφράζουν την αλλαγή του

Σελίδα 299 από 481

ποσοστού των επιβατικών μετακινήσεων που γίνονται με τα μεταφορικά μέσα. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η πολυπλοκότητα των περιπτώσεων των μετακινούμενων που έχουν ή που μπορούν να ταξιδέψουν με Ι.Χ. αυτοκίνητο, έναντι των μετακινούμενων που θα μπορούσαν να ταξιδέψουν μόνο με τα μέσα μαζικής μεταφοράς (αεροπλάνο, τραίνο), εφαρμόζεται ένα ιεραρχικό υπόδειγμα Logit, το οποίο ομαδοποιεί τις εναλλακτικές λύσεις μεταφοράς σε ιδιωτικές και μαζικές μεταφορές. Κατ'αυτόν τον τρόπο τα υποσύνολα των μαζικών μέσων μεταφοράς συσχετίζονται λόγω κοινών χαρακτηριστικών (δεδομένου ότι κανένας μετακινούμενος δεν χρειάζεται να έχει Ι.Χ. ή δίπλωμα οδήγησης προκειμένου να μπορεί να ταξιδέψει). Στην Εικόνα 52 απεικονίζεται σχηματικά η παραπάνω ομαδοποίηση με εφαρμογή τριών (3) διαφορετικών μέσων μετακίνησης (Ι.Χ., τραίνο, αεροπλάνο).



**Εικόνα 52: Τριωνυμική επιλογή μέσου στη μέθοδο που παρουσιάζεται**

#### 8.4.2.4.1. Στοιχεία προσφοράς και ζήτησης

Για την περιγραφή του βασικού σεναρίου χρησιμοποιούνται τα στοιχεία ζήτησης και προσφοράς μεταξύ των εξεταζόμενων πόλεων από τη βάση δεδομένων ETISPlus (2009) (Πίνακας 23). Η ETISPlus είναι μια βάση δεδομένων για τις μετακινήσεις χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ταξινομημένη σε περιοχές NUTS3 και εμπεριέχει τις επιβατικές ροές για όλα τα μέσα μεταφοράς που χρησιμοποιούνται με έτος αναφοράς το 2010. Ο υπολογισμός των επιβατικών ροών είναι βασισμένος στις παρατηρηθείσες τιμές που παρέχονται από τις επίσημες εθνικές αρχές κάθε χώρας.

Πίνακας 23: Στοιχεία προσφοράς και ζήτησης μετακινήσεων για τις εξεταζόμενες πόλεις

	Ετήσιες επιβατικές μετακινήσεις (σε χιλ.)	Κόστος (C) σε €			Χρόνος μετακίνησης (TT) σε h			
		BCN	ROM	ZUR	BCN	ROM	ZUR	
Αεροπλάνο	BCN	0	213.7	79.3	BCN	0	1,75	2
	ROM	194.4	0	43.7	ROM	1,75	0	1,66
	ZUR	95.8	39.7	0	ZUR	4,46	1,58	0
Τραίνο	BCN	0	1.9	0.9	BCN	0	23,65	16,26
	ROM	0.9	0	2.9	ROM	22,68	0	6,85
	ZUR	0.2	3.1	0	ZUR	16,26	7,35	0
Ι.Χ. Αυτοκίνητο	BCN	0	9.1	8	BCN	0	14,16	10,85
	ROM	5.1	0	2.9	ROM	14,06	0	9,2
	ZUR	2	2.5	0	ZUR	10,78	9,21	0

#### 8.4.2.4.2. Αξία του χρόνου

Η αξία του χρόνου (VoT) χρησιμοποιείται στην παρούσα εφαρμογή για το συσχετισμό του χρόνου μετακίνησης και του αντίστοιχου κόστους, και την έκφρασή τους σε γενικευμένο κόστος.

#### 8.4.2.4.3. Βασικό Σενάριο - Συναρτήσεις χρησιμότητας

Οι συναρτήσεις χρησιμότητας κάθε μέσου είναι της μορφής που παρουσιάζεται παρακάτω. Οι παράμετροι των μεταβλητών μπορούν να προσδιοριστούν και να αλλάξουν έπειτα από βαθμονόμηση του υποδείγματος.

$$U_{im} = \alpha_m + \beta_m * C_{im} + \gamma_m * TT_{im} * VoT, \forall m \in M$$

Εξίσωση  
8.22

όπου  $U_{im}$  η συνάρτηση χρησιμότητας του μέσου  $m$  και της σύνδεσης  $i$ ,  $\alpha_m$  ένας σταθερός ποιοτικός όρος του μέσου  $m$  (ποιοτικές παράμετροι όπως ασφάλεια, άνεση, αξιοπιστία, κ.α.),  $C_{im}$  το κόστος μετακίνησης με το μέσο  $m$  για τη σύνδεση  $i$ ,  $\beta_m$  το βάρος της μεταβλητής του κόστους,  $TT_{im}$  ο χρόνος μετακίνησης με το μέσο  $m$  για τη σύνδεση  $i$ ,  $\gamma_m$  το βάρος της μεταβλητής του χρόνου μετακίνησης,  $VoT$  η αξία του χρόνου και  $M$  το σύνολο των εξεταζόμενων μεταφορικών μέσων

Σύμφωνα με τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν παραπάνω και τη συνάρτηση χρησιμότητας κάθε μέσου, ο Πίνακας 24 παρουσιάζει το γενικευμένο κόστος όλων των μέσων για όλες τις

συνδέσεις, θεωρώντας ότι οι ποιοτικές παράμετροι ισούνται με 0 και τα βάρη των μεταβλητών είναι ίσα με 1 για όλα τα μέσα (για λόγους απλούστευσης).

Πίνακας 24: Γενικευμένο κόστος στο βασικό σενάριο για τις συνδέσεις των πόλεων που εξετάζονται

Γενικευμένα κόστη			
Αεροπλάνο	BCN	ROM	ZUR
BCN	0	575	659
ROM	603	0	708
ZUR	1078	698	0
Τραίνο	BCN	ROM	ZUR
BCN	0	1357	1194
ROM	1322	0	809
ZUR	1194	830	0
I.X.	BCN	ROM	ZUR
BCN	0	904	770
ROM	899	0	665
ZUR	768	666	0

#### 8.4.2.4.4. Σενάριο ΑΚΦ - Συναρτήσεις χρησιμότητας

Οι συναρτήσεις χρησιμότητας κάθε μέσου σε περίπτωση ΑΚΦ περιλαμβάνουν την πιθανότητα εκδήλωσης κάθε ΑΚΦ (Βήμα 1), την εκτιμώμενη επίπτωση των ΑΚΦ στα δίκτυα των μέσων Μεταφορών (Βήμα 2) και τη διάρκεια της επίπτωσης. Τα παραπάνω δεδομένα μετατρέπονται σε γενικευμένο κόστος με τη χρήση των τιμών της «αξίας» του χρόνου. Για τα σενάρια με παρουσία ΑΚΦ οι συναρτήσεις χρησιμότητας δίνονται, όπως παρουσιάστηκε στην Ενότητα 8.4.2, από την παρακάτω σχέση:

$$U_{lm} = \alpha_m + [\beta_m * C_{lm}] + [\gamma_m * VoT * (TT_{lm} + \sum_{k=1}^j \sum_{c=1}^C (OP_{kc} * D_{ck} * I_{mkcc'}) )]$$

Εξίσωση  
8.23

όπου  $\alpha_m$  είναι, όπως και πιο πάνω, ένας σταθερός ποιοτικός όρος του μέσου  $m$  (ποιοτικές παράμετροι όπως ασφάλεια, άνεση, αξιοπιστία, κ.α.),  $\beta_m$  ο συντελεστής του κόστους μετακίνησης με το μέσο  $m$ ,  $C_{lm}$  το χρηματικό κόστος μετακίνησης με το μέσο  $m$  για τη σύνδεση  $l$ ,  $\gamma_m$  ο συντελεστής του χρόνου διαδρομής της μετακίνησης με το μέσο  $m$ ,  $VoT$  η αξία του χρόνου,  $TT_{lm}$  ο χρόνος μετακίνησης με το μέσο  $m$  για τη σύνδεση  $l$ ,  $OP_{kc}$  η πιθανότητα εκδήλωσης ΑΚΦ  $k$  στην πόλη  $c$ ,  $D_{ck}$  η διάρκεια επίπτωσης του ΑΚΦ  $k$  στην πόλη  $c$ ,  $I_{mkcc'}$  ο βαθμός επίπτωσης του ΑΚΦ  $k$ , στο μέσο  $m$ , στη σύνδεση μεταξύ του ζεύγος πόλεων  $c$  και  $c'$  στην σύνδεση  $l$ ,  $j$  το σύνολο των ΑΚΦ και  $C$  το ζεύγος των πόλεων μεταξύ της προέλευσης και του προορισμού της σύνδεσης  $l$ .

Σύμφωνα με τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν παραπάνω και τη συνάρτηση χρησιμότητας κάθε μέσου, το γενικευμένο κόστος για όλα τα μεταφορικά μέσα και τις συνδέσεις τους, παρουσιάζεται στον Πίνακα 25.

Πίνακας 25: Γενικευμένο κόστος στο σενάριο ΑΚΦ για τις συνδέσεις των πόλεων που εξετάζονται

Γενικευμένα κόστη			
Αεροπλάνο	BCN	ROM	ZUR
BCN	0	1074	659
ROM	603	0	1305
ZUR	1078	1294	0
Τραίνο	BCN	ROM	ZUR
BCN	0	1472	1323
ROM	1437	0	809
ZUR	1323	830	0
I.X.	BCN	ROM	ZUR
BCN	0	1119	1012
ROM	1115	0	665
ZUR	1010	666	0

#### 8.4.2.4.5. Αποτελέσματα (ποσοστιαία αλλαγή επιβατικών μετακινήσεων)

Η εφαρμογή των σχέσεων 5.17, 5.18 και 5.19 που περιγράφηκαν στην Ενότητα 5.6.3 για το ιεραρχικό υπόδειγμα Logit και της σχέσης 8.13 στην περίπτωση που εξετάζεται, δίνει ως αποτέλεσμα την ποσοστιαία αλλαγή των επιβατικών μετακινήσεων μεταξύ των πόλεων της εφαρμογής. Ο Πίνακας 26 παρουσιάζει τα αριθμητικά αποτελέσματα της θεωρητικής εφαρμογής, τα οποία όμως δεν σχολιάζονται περαιτέρω καθώς βασίστηκαν σε μια σειρά υποθέσεων, χαριν της εφαρμογής και επομένως έχουν ενδεικτική αξία.

Πίνακας 26: Ποσοστιαία διαφορά επιβατικών μετακινήσεων ανά μέσο – σύγκριση βασικού σεναρίου έναντι σεναρίου ΑΚΦ

% Διαφορά - Αεροπορικές Μετακινήσεις	BCN	ROM	ZUR
BCN	0%	3%	8%
ROM	2%	0%	-4%
ZUR	0%	-4%	0%
% Διαφορά – Σιδηροδρομικές Μετακινήσεις	BCN	ROM	ZUR
BCN	0%	0%	0%
ROM	-1%	0%	-6%
ZUR	-1%	-3%	0%
% Διαφορά – Οδικές Μετακινήσεις	BCN	ROM	ZUR

<b>BCN</b>	0%	-3%	-8%
<b>ROM</b>	-1%	0%	10%
<b>ZUR</b>	1%	7%	0%

### **8.5. Συμπεράσματα εφαρμογής 1<sup>ου</sup> επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης**

Στο Κεφάλαιο αυτό επιχειρήθηκε η κάλυψη ενός βασικού, κατά τον γράφοντα κενού της βιβλιογραφίας, αυτού της επαναδιατύπωσης ορισμένων στοιχείων και μεγεθών της κυκλοφορίας και των συγκοινωνιακών μέσων, έτσι ώστε να μπορέσει να παραμετροποιηθεί η έννοια του καιρού, του κλίματος και των αλλαγών τους. Αυτό το κενό, μέσω της εφαρμογής του Κεφαλαίου αυτού, καλύφθηκε μερικώς. Οι λόγοι της μερικής αυτής κάλυψης έχουν να κάνουν αφενός με τον πολύ μεγάλο όγκο του όλου εγχειρήματος, που δεν μπορεί εκ των πραγμάτων να καλυφθεί εξ ολοκλήρου από μια διδακτορική διατριβή, και αφετέρου με την ανάγκη πρόσβασης σε εμπειρικά δεδομένα, όχι μόνο κυκλοφοριακού χαρακτήρα αλλά και καιρικού/κλιματικού χαρακτήρα. Έτσι, ήδη μπορεί να ειπωθεί ότι διακρίνονται ευκρινώς κάποιες μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις, προς μια συνολική επαναδιατύπωση των 'Μαθηματικών των Μεταφορών' βασισμένη σε εμπειρικά δεδομένα καιρού και κυκλοφορίας.

Για την αντιμετώπιση των κενών αυτών, ακολουθήθηκε μια διαδικασία ιεράρχησης της ανάγκης επαναδιατύπωσης, βάσει της επίπτωσης του καιρού και του κλίματος στο εκάστοτε στοιχείο των 'Μαθηματικών των Μεταφορών' και της κρισιμότητας του στοιχείου αυτού για τον υπολογισμό ή τη διατύπωση άλλων στοιχείων. Η διαδικασία αυτή κατέληξε στην ανάγκη επαναδιατύπωσης των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής (και εν μέρει και των μεταξύ τους σχέσεων) και της συνάρτησης χρησιμότητας (ως μέσου επηρεασμού των υποδειγμάτων επιλογής μέσου). Η διαδικασία αυτή καθ' αυτή επιδέχεται περαιτέρω ανάλυση (και κριτική), καθώς σε κάποιο αναπόφευκτο βαθμό, η αξιολόγηση της επίπτωσης περισσότερο (και λιγότερο της κρισιμότητας) έγινε μέσω υποθέσεων και παραδοχών (βλέπε και Ενότητα 8.3.1). Σε κάθε περίπτωση όμως, η ίδια διαδικασία και η συσχέτιση επίπτωσης και κρισιμότητας για κάθε στοιχείο, ως αποφασιστική παράμετρος προτεραιοποίησης της επαναδιατύπωσης, είναι εφαρμόσιμη και γενικεύσιμη (δηλαδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια από άλλους ερευνητές).



Αναφορικά με την επαναδιατύπωση των μεγεθών της κυκλοφορίας, είναι εν γνώσει του γράφοντα ότι οι τιμές των παραμέτρων επίδρασης της βροχόπτωσης, στις οποίες κατέληξε η εφαρμογή της μεθοδολογικής προσέγγισης βάσει θεωρητικής και εμπειρικής ανάλυσης, δεν μπορούν ούτε να γενικευτούν σε άλλα ΑΚΦ αλλά και ούτε σε άλλα δίκτυα Μεταφορών, καθώς πιθανόν να συνδέονται αποκλειστικά με το δίκτυο από το οποίο προέκυψαν. Αποτελούν ωστόσο μια πρώτη εκτίμηση του πώς ένα ακραίο φαινόμενο μπορεί να επιδράσει στα κυκλοφοριακά μεγέθη, και με ποιόν τρόπο μπορεί αυτή η επίδραση να διατυπωθεί μαθηματικά. Όπως ειπώθηκε οι τιμές των παραμέτρων αυτών δεν μπορούν να μεταφερθούν σε άλλα ΑΚΦ και δίκτυα Μεταφορών, χωρίς προσαρμογή (calibration) στις συγκεκριμένες συνθήκες. Είναι ωστόσο σημαντικό να επισημανθεί ότι η προσέγγιση που αναπτύχθηκε, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα εύχρηστο εργαλείο μαθηματικής διατύπωσης, και εν τέλει ποσοτικοποίησης της επίδρασης ενός ΑΚΦ σε ένα δίκτυο Μεταφορών.

Αναφορικά με την επαναδιατύπωση της συνάρτησης χρησιμότητας, είναι προφανές ότι όσο ακριβέστερα είναι τα στοιχεία που εισέρχονται στο υπόδειγμα και όσο καλύτερη η βαθμονόμησή του, τόσο πιο αξιόπιστα τα αποτελέσματα της εφαρμογής του. Πρέπει εδώ να σημειωθεί, ότι ο καθορισμός μιας σειράς παραμέτρων της συνάρτησης χρησιμότητας, αρχής γενομένης από την αξία του χρόνου, βάσει της οποίας η επαναδιατύπωση που προτάθηκε και εφαρμόστηκε μπορεί να μεταφραστεί σε γενικευμένο κόστος του μετακινούμενου, είναι από μόνος του αντικείμενο ειδικής έρευνας. Αυτό που συμπερασματικά φαίνεται να είναι άξιο λόγου, είναι η δυνατότητα της επαναδιατυπωμένης συνάρτησης χρησιμότητας να λαμβάνει υπόψη καιρικούς και κλιματικούς παράγοντες και την επίπτωσή τους στη λειτουργία μέσω μεταφοράς, και έτσι να περιγράφει τις διαφορετικές επιλογές μέσου. Σε κάθε περίπτωση όμως, περαιτέρω έρευνα είναι απαραίτητη προς την κατεύθυνση της βαθμονόμησης και του καθορισμού των αντίστοιχων βαρών των παραμέτρων της συνάρτησης χρησιμότητας που προτείνεται εδώ, και η εφαρμογή της σε δίκτυα Μεταφορών, με πραγματικά δεδομένα για την πλήρη αξιολόγησή της.

## 9. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ - ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥΣ

### 9.1. Εισαγωγή

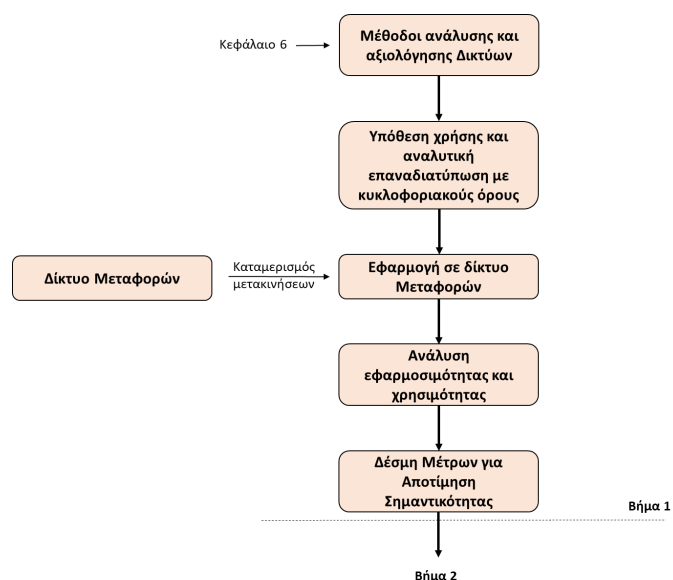
Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται εφαρμογή του δεύτερου επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης της διδακτορικής έρευνας, που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 7. Υπενθυμίζεται, ότι απώτερος σκοπός του επιπέδου αυτού είναι να αναλυθεί το αν και κατά πόσο τα εργαλεία αξιολόγησης και ανάλυσης δικτύων από άλλες επιστημονικές περιοχές, μπορούν να έχουν εφαρμογή στα δίκτυα Μεταφορών, για να αποτιμήσουν αφενός τη σημαντικότητα των επιμέρους στοιχείων του (κόμβων και τμημάτων), και αφετέρου την ανθεκτικότητα ή την τρωτότητα ενός δικτύου ως συστήματος, έναντι των επιπτώσεων ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών. Η διάρθρωση του κεφαλαίου ακολουθεί πιστά τα βήματα της μεθοδολογίας, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 7.4.

### 9.2. Επαλήθευση εφαρμοσιμότητας και χρησιμότητας μέτρων για τα δίκτυα Μεταφορών

Η επαλήθευση εφαρμοσιμότητας και χρησιμότητας μέτρων για τα δίκτυα Μεταφορών αποτελεί το πρώτο βήμα του δεύτερου επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης της διδακτορικής έρευνας.

Υπενθυμίζεται, ότι στο βήμα αυτό σκοπός είναι η επαλήθευση των υποθέσεων που έγιναν στο Κεφάλαιο 6, αναφορικά με το κατά

πόσον η επαναδιατύπωση των αναλυτικών εκφράσεων των μέτρων που βρέθηκαν κατά τη βιβλιογραφική επισκόπηση και παρουσιάστηκαν με κυκλοφοριακούς όρους και η εφαρμογή τους σε δίκτυα Μεταφορών είναι δυνατή, και αφετέρου η διερεύνηση της δυνατότητας



χρησιμοποίησης αυτών ως απάντηση στις ανάγκες αποτίμησης της σημαντικότητας κυκλοφοριακών κόμβων και τμημάτων. Η εφαρμογή του πρώτου βήματος θα καταλήξει στα μέτρα εκείνα, των οποίων η χρήση έχει νόημα για τα δίκτυα των Μεταφορών υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής, και τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα βήματα.

### **9.2.1. Υπόθεση χρήσης και αναλυτική επαναδιατύπωση μέτρων Θεωρίας Δικτύων με κυκλοφοριακούς όρους**

Ξεκινώντας από τα ευρήματα της βιβλιογραφικής επισκόπησης, ο Πίνακας 27 συνοψίζει τα μέτρα που παρουσιάστηκαν καθώς και την υπόθεση χρήσης τους στα δίκτυα Μεταφορών, όπως αυτή αναφέρθηκε στις επιμέρους ενότητες του Κεφαλαίου 6. Για κάθε μέτρο, για το οποίο γίνεται θετική εισήγηση διερεύνησης, παρατίθενται (όπου αυτό είναι σχετικό) οι κυκλοφοριακοί ή συγκοινωνιακοί όροι επαναδιατύπωσής του. Ο Πίνακας 27 δεν εμπεριέχει τους ορισμούς των επιμέρους μέτρων και εργαλείων της Θεωρίας Δικτύων, καθώς αυτοί αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 6, και για το λόγο αυτό, ο αναγνώστης παραπέμπεται στις υποενότητες του Κεφαλαίου αυτού για περαιτέρω λεπτομέρειες. Σημειώνεται επίσης, ότι στον Πίνακα αυτόν, θα προστεθεί μια ακόμα στήλη, που θα συμπληρωθεί μετά την εφαρμογή των μέτρων σε δίκτυα Μεταφορών ( που παρουσιάζεται στις επόμενες Ενότητες της διδακτορικής διατριβής), και θα αφορά στην ποιοτική αξιολόγηση της ανάλυσης, καταδεικνύοντας τα μέτρα εκείνα που προτείνονται προς περαιτέρω ανάλυση στα Βήματα 2 και 3.

Όπως φαίνεται παρακάτω, από τα συνολικά 18 μέτρα και εργαλεία που εξετάστηκαν κατά τη βιβλιογραφική επισκόπηση, προτείνονται προς περαιτέρω διερεύνηση τα 11 . Οι βασικοί λόγοι απόρριψης για περαιτέρω διερεύνηση κάποιων μέτρων αφορούν είτε στην συνθετότητα του αριθμητικού υπολογισμού τους (βλέπε π.χ. 'Κεντρικότητα ομφαλού και κυριαρχίας' και Ενότητα 6.15), είτε στη μη δυνατότητα παραμετροποίησης κυκλοφοριακών ή συγκοινωνιακών στοιχείων (βλέπε π.χ. 'Κεντρικότητα Katz' και Ενότητα 6.11). Σημειώνεται επίσης ότι το μέτρο της κρισιμότητας των συνδέσμων δεν εξετάζεται περαιτέρω, καθώς είναι το μόνο από τα μέτρα που συναντήθηκαν στην βιβλιογραφία, το οποίο έχει αναπτυχθεί για τα δίκτυα Μεταφορών και η εφαρμογή του έχει ήδη αναλυθεί και συζητηθεί εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία. Σημειώνεται τέλος, ότι η συγκέντρωση Freeman είναι ένα μέτρο σύγκρισης δικτύων παρομοίου μεγέθους και δεν εξετάζεται στη διατριβή.

Πίνακας 27: Μέτρα και εργαλεία της θεωρίας δικτύων και υποθέσεις χρήσης τους στα δίκτυα Μεταφορών

Μέτρο ή εργαλείο ανάλυσης από τη Θεωρία Δικτύων	Εισήγηση διερεύνησης	Υπόθεση χρήσης	Επαναδιατύπωση	Αναλυτική έκφραση
Κεντρικότητα βαθμού	Θετική	Για να καταδείξει εκείνους τους κόμβους οι οποίοι, επειδή έχουν πολλές συνδέσεις, αποκτούν κάποια σημαντικότητα έναντι άλλων	Χωρίς επαναδιατύπωση	$k_i = \sum_j^N A_{ij}$
Δύναμη κόμβου	Θετική	Για να καταδείξει εκείνους τους κόμβους για τους οποίους το σύνολο των κυκλοφοριακών φόρτων που ξεκινούν, καταλήγουν ή μετακινούνται μέσω αυτού είναι οι μεγαλύτεροι συγκριτικά με άλλους, και άρα οι σημαντικότεροι.	Με θεώρηση του 'βάρους' ενός τόξου τμήματος, τον όγκο του κυκλοφοριακού φόρτου που εξυπηρετείται από αυτό.	$s_i = \sum_j^N w_{ij}$
Συνδυασμός κεντρικότητας βαθμού και δύναμης κόμβου	Αρνητική: Διότι δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός της παραμέτρου συντονισμού, που καθορίζει το βαθμό επίδρασης της κεντρικότητας ενός κόμβου από το πλήθος των συνδέσεων του και από τα βάρη των συνδέσεων του.	-	-	$C_D^{wa} = k_i * \left(\frac{s_i}{k_i}\right)^a = k_i^{(1-a)} * s_i^a$
Κεντρικότητα εγγύτητας	Θετική	Για να καταδείξει εκείνους τους κόμβους για τους οποίους οι χρόνοι σύνδεσης τους με όλους τους υπόλοιπους κόμβους ενός δικτύου, είναι οι μικρότεροι, και άρα οι σημαντικότεροι.	Αντί για τη χρήση της απόστασης για την εύρεση και τον υπολογισμό των κοντινότερων αποστάσεων από κόμβο σε κόμβο, χρήση του χρόνου διέλευσης t ενός οδικού τμήματος, όπως προκύπτει έπειτα από τον καταμερισμό των μετακινήσεων στο δίκτυο	$Cl_i = \frac{1}{\sum_j d(i,j)}$
Κεντρικότητα ενδιαμέσου	Θετική	Για να καταδείξει τους κόμβους εκείνους σε ένα δίκτυο που, επειδή εξυπηρετούν το μεγαλύτερο αριθμό κοντινότερων διαδρομών, είναι σημαντικοί για τη λειτουργία του δικτύου, και άρα πιθανά μέτρα προσαρμογής σε ακραία καιρικά φαινόμενα καθώς και μέτρα μείωσης της τρωτότητας θα μπορούσαν να κατευθυνθούν σε αυτούς,	Αντί για τη χρήση της απόστασης, μπορεί να γίνει και πάλι χρήση του χρόνου διέλευσης t ενός οδικού τμήματος, όπως προκύπτει έπειτα από τον καταμερισμό των μετακινήσεων στο δίκτυο, για τον υπολογισμό και την εύρεση κοντινότερων διαδρομών μεταξύ δύο κόμβων	$g(U) = \sum_{s \neq u \neq t} \frac{\sigma_{st}(u)}{\sigma_{st}}$
Ροή κεντρικότητας ενδιαμέσου	Θετική	Για να καταδείξει τους κόμβους εκείνους σε ένα δίκτυο δια μέσου των οποίων εξυπηρετείται ο μεγαλύτερος όγκος της κυκλοφορίας σε επίπεδο δικτύου. Εδώ θα πρέπει να ελεγχθεί η πιθανή διαφορά με τη δύναμη κόμβου.	Με θεώρηση της 'ροής' μεταξύ δύο κόμβων τον όγκο του κυκλοφοριακού φόρτου που εξυπηρετεί το οδικό τμήμα που τους συνδέει.	$g'(u) = \frac{q_{st}(u)}{q_{st}}$

<b>Ισοδιανυσματική κεντρικότητα</b>	Αρνητική: Διότι το μέτρο είναι εξαιρετικά τοπικό και δεν μπορούν να παραμετροποιηθούν κυκλοφοριακά και συγκοινωνιακά στοιχεία.		-	$x_i = \lambda_i^{-1} \sum_j A_{ji} x_j$
<b>Κεντρικότητα Katz</b>	Αρνητική: Διότι δεν μπορούν να παραμετροποιηθούν κυκλοφοριακά και συγκοινωνιακά στοιχεία.			$x_i = \alpha \sum_j A_{ji} x_j + \beta$
<b>Βαθμική κεντρικότητα</b>	Αρνητική: Διότι δεν μπορούν να παραμετροποιηθούν κυκλοφοριακά και συγκοινωνιακά στοιχεία.			$x_i = \alpha \sum_j A_{ji} \left( \frac{x_j}{k_j^{out}} \right) + \beta$
<b>Αλφα κεντρικότητα</b>	Αρνητική: Διότι δεν μπορούν να παραμετροποιηθούν κυκλοφοριακά και συγκοινωνιακά στοιχεία.			$c = aA^T c + e$
<b>Τοπικός Συντελεστής σύμπλεξης</b>	Θετική	Για να καταδείξει τα σημεία ύπαρξης 'κενών' ή εμποδίων στο δίκτυο, υπό την έννοια της αναγνώρισης γειτόνων κόμβων σε έναν υπό εξέταση κόμβο που δεν συνδέονται μεταξύ τους, και συνεπώς οποιοσδήποτε κυκλοφοριακός φόρτος θα πρέπει να εξυπηρετείται μέσω αυτού του κόμβου.	Χωρίς επαναδιατύπωση	$CLC(i) = \frac{\kappa_i(\kappa_i - 1)  e_{jk}: j, k \in N_i, e_{jk} \in E }{2}$
<b>Κεντρικότητα ομφαλού και κυριαρχίας</b>	Αρνητική: Επειδή ο ορισμός των σταθερών $\alpha$ και $\beta$ σε ένα δίκτυο μεταφορών για κάθε κόμβο θα συνθέτετε μια ιδιαίτερως σύνθετη διαδικασία			$x_i = \alpha \sum_j A_{ij} y_j$ $y_i = \beta \sum_j A_{ji} x_j$
<b>Κεντρικότητα πληροφορίας</b>	Θετική	Για να καταδείξει εκείνους τους κόμβους των οποίων η μη λειτουργία θα είχε τη μεγαλύτερη επίπτωση στην αποτελεσματικότητα του δικτύου, και άρα εκείνους τους κόμβους των οποίων η διατήρηση λειτουργίας θα ήταν κρίσιμη.	Αντί της απόστασης των συντομότερων διαδρομών ως μέτρο υπολογισμού της αποτελεσματικότητας του δικτύου, χρήση του αθροιστικού χρόνου διέλευσης και της συνολικής χρονικής καθυστέρησης της αλληλουχίας των οδικών τμημάτων που συνιστούν τη συντομότερη διαδρομή. Για τον επανυπολογισμό των χρόνων διέλευσης και των καθυστερήσεων στα οδικά τμήματα, έπειτα από την αφαίρεση από το δίκτυο των τμημάτων που συνδέουν τον υπό εξέταση κόμβο με τους γειτονικούς του κόμβους, γίνεται εκ νέου καταμερισμός των μετακινήσεων στο δίκτυο	$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}}$ $C_i = \frac{\Delta E}{E} = \frac{E(G) - E(G')}{E(G)}$

<b>Δεικτης h</b>	Θετική	Για να καταδείξει ως σημαντικούς εκείνους τους κόμβους των οποίων οι γειτονικοί εξυπηρετούν έναν ελάχιστο αριθμό κοντινότερων διαδρομών (ίσο με τον αριθμό των γειτονικών κόμβων κατά ελάχιστο).	Χωρίς επαναδιατύπωση	$h - index(f) = \max_i \min(f(i), i)$
<b>Ιεραρχικός βαθμός</b>	Θετική	Για να καταδείξει τον αριθμό των προσβάσιμων κόμβων από έναν κόμβο εκκίνησης μέσω διαδρομών μήκους h, και συνεπώς το ποσοστό του δικτύου που μπορεί να καλυφθεί εντός κάποιου αποδεκτού χρόνου t.	Αντί για το μήκος h, χρήση του χρόνου t, και υπολογισμό του αριθμού των κόμβων σε ένα δίκτυο που θα είναι προσβάσιμος από ένα σημείο εκκίνησης μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα t.	$\kappa_i^{(h)} = \exp\left(-\sum_j p_j^{(h)} \log p_j^{(h)}\right)$
<b>Κεντρικότητα εξάπλωσης</b>	Αρνητική: Διότι η διαθεσιμότητα τόσο των απαραίτητων δεδομένων εισόδου όσο και των υπολογιστικών εργαλείων για τον δυναμικό καταμερισμό των μετακινήσεων σε ένα δίκτυο είναι περιορισμένη.			$PC^t(v) = \frac{1}{N-2} * \sum_j \frac{\sigma_{sr}(v)}{\sigma_{sr}} x_s^t / \left(\sum [x_i^t] - x_v^t\right)$
<b>Συγκέντρωση Freeman</b>	Θετική	Για να δώσει τη δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ δικτύων ίδιου μεγέθους βάσει κάποιου άλλου μέτρου ή δείκτη	Χωρίς επαναδιατύπωση	$C_x = \frac{\sum_{i=1}^N C_x(p_*) - C_x(p_i)}{\max \sum_{i=1}^N C_x(p_*) - C_x(p_i)}$
<b>Κρισιμότητα συνδέσμων</b>	Θετική – καθώς το μέτρο έχει αναπτυχθεί ειδικά για δίκτυα Μεταφορών, δεν εξετάζεται περαιτέρω στα πλαίσια της διατριβής	Ήδη σε εφαρμογή	Χωρίς επαναδιατύπωση	$\varepsilon = \varepsilon(G, d) = \frac{\sum_{w \in W} \frac{d_w}{\lambda_w}}{n_w}$ $I(g) = \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}$ $= \frac{\varepsilon(G, d) - \varepsilon(G - g, d)}{\varepsilon(G, d)}$

### 9.2.2. Εφαρμογή σε δίκτυο Μεταφορών

Για την εφαρμογή των μέτρων που προτείνονται προς περαιτέρω διερεύνηση σε δίκτυα Μεταφορών (Πίνακας 27), επιλέχθηκε ένα πειραματικό δίκτυο (test network) το οποίο χρησιμοποιείται κατά βάση για την μελέτη του προβλήματος του καταμερισμού των μετακινήσεων (και των διαφόρων αλγοριθμικών λύσεων που αναπτύσσονται για την επίλυσή του) και είναι ευρέως γνωστό στην επιστημονική κοινότητα. Η επιλογή ενός πειραματικού δικτύου, και όχι ενός πραγματικού οδικού δικτύου, έγινε δεδομένης της εκτεταμένης χρήσης τέτοιων δικτύων για ερευνητικούς και μελετητικούς σκοπούς, αποφεύγοντας έτσι τη συνθετότητα της κωδικοποίησης, και την ανάγκη εύρεσης δεδομένων εισόδου για την προσομοίωση της κυκλοφορίας και των μετακινήσεων. Όλα τα χαρακτηριστικά του πειραματικού δικτύου και τα δεδομένα που το συνοδεύουν και χρησιμοποιήθηκαν εδώ, είναι ανοιχτού τύπου και ελεύθερα διαθέσιμα στο διαδίκτυο<sup>17</sup>. Σημειώνεται, ότι δίκτυα όπως αυτό που χρησιμοποιείται εδώ ονομάζονται πειραματικά, παρ'ότι αποτελούν γεωγραφική απεικόνιση πραγματικών δικτύων Μεταφορών, διότι είναι απλουστευμένα ως προς τα πραγματικά.

Το πειραματικό δίκτυο που επιλέχθηκε είναι αυτό της πόλης Sioux Falls των Η.Π.Α. Ο λόγος επιλογής του εν λόγω δικτύου υπαγορεύθηκε από το μικρό αριθμό κυκλοφοριακών κόμβων που αυτό περιλαμβάνει (=24). Καθώς οι κόμβοι είναι το κυκλοφοριακό στοιχείο που εξετάζεται και αναλύεται για όλα τα μέτρα που διερευνώνται παρακάτω, το μέγεθος του δικτύου το καθιστά κατάλληλο για την πρώτη αναγνωριστική εφαρμογή των μέτρων. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του δικτύου αυτού.

Σημειώνεται, ότι η διαδικασία της εφαρμογής των μέτρων που βρέθηκαν στη βιβλιογραφική επισκόπηση (βλέπε Κεφάλαιο 6), και αποτιμήθηκαν θετικά ως προς τη διερευνήσή τους (βλέπε Ενότητα 9.2.1), αφορά :

1. Αρχικά, στην προσομοίωση της κυκλοφορίας, έτσι ώστε να εξαχθούν τα απαραίτητα αποτελέσματα αναφορικά με τους χρόνους διάνυσης, τους κυκλοφοριακούς

---

<sup>17</sup> Ο αναγνώστης μπορεί να βρεί όλα τα δεδομένα για 23 πειραματικά δίκτυα Μεταφορών στον ιστότοπο: Transportation Networks for Research Core Team. Transportation Networks for Research. <https://github.com/bstabler/TransportationNetworks>.

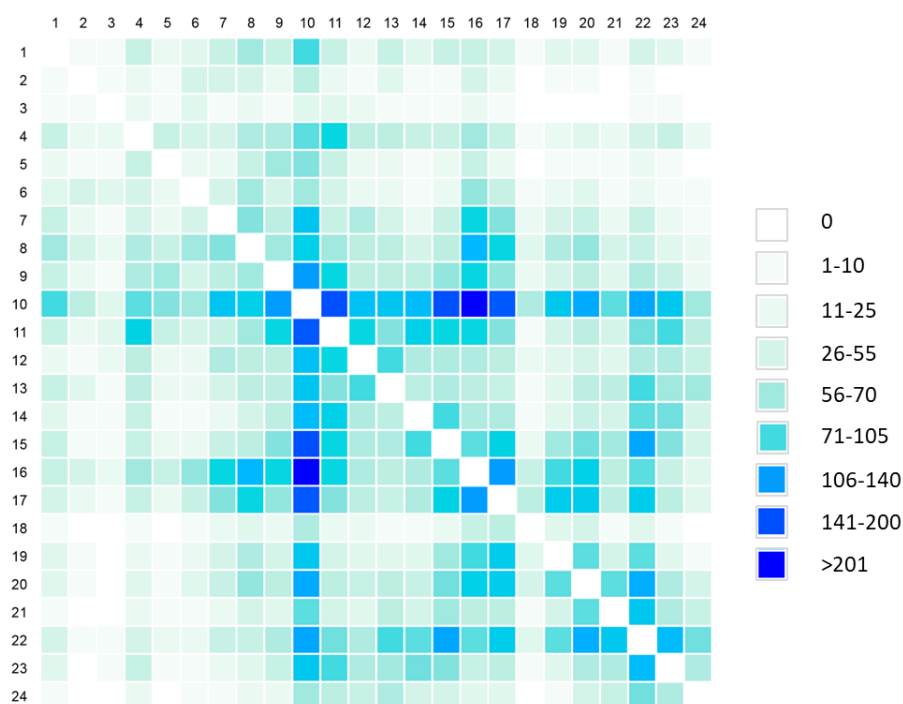
φόρτους, τις συντομότερες διαδρομές, κ.λπ. (όπου αυτό προτείνεται σύμφωνα με τον Πίνακα 27),

2. Εν συνεχεία, στον υπολογισμό των τιμών των μέτρων και στην γραφική τους απεικόνιση.

#### 9.2.2.1. Χαρακτηριστικά υπεραστικού δικτύου Μεταφορών Sioux Falls

Το πρώτο δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή του πρώτου επιπέδου του δεύτερου βήματος της μεθοδολογικής προσέγγισης είναι το δίκτυο Μεταφορών της πόλης Sioux Falls των Η.Π.Α..

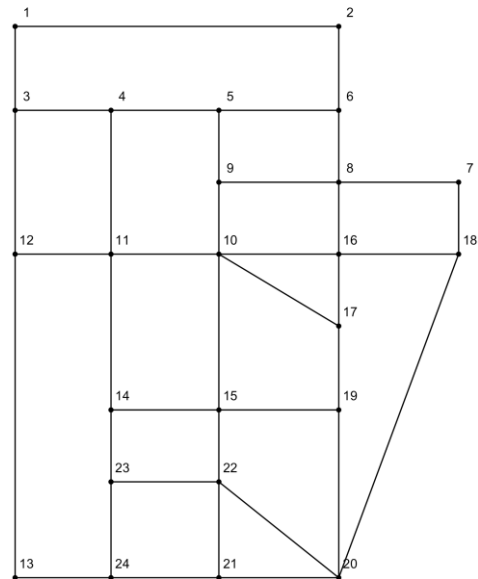
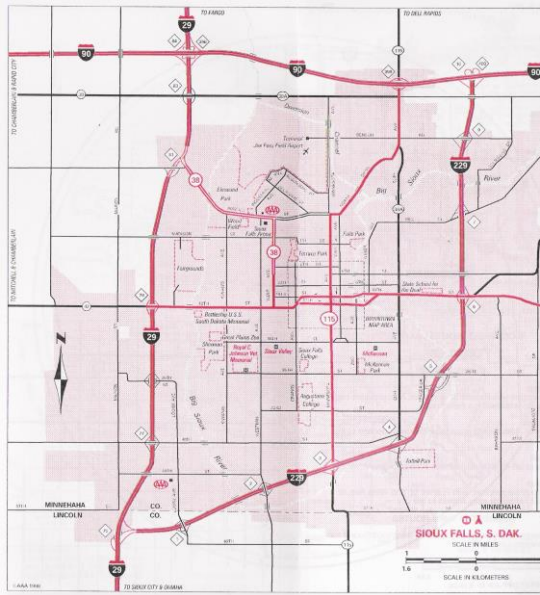
Το πειραματικό δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή έχει 24 κυκλοφοριακές ζώνες, από τις οποίες απορρέει η ζήτηση για μετακινήσεις, που σε ημερήσιο (24ώρο) επίπεδο αντιστοιχεί σε 360.600 μετακινήσεις. Για την εφαρμογή όμως που περιγράφεται εδώ χρησιμοποιήθηκε η ζήτηση για μετακινήσεις της πρωινής ώρας αιχμής (08:00-09:00) που αντιστοιχεί σε 17.645 μετακινήσεις. Η κατανομή των μετακινήσεων στο χώρο με το αντίστοιχο μητρώο Προέλευσης-Προορισμού για την πρωινή ώρα αιχμής παρουσιάζεται γραφικά στην Εικόνα 53.



Εικόνα 53: Μητρώο Προέλευσης-Προορισμού δικτύου Sioux Falls κατά την πρωινή ώρα αιχμής (08:00-09:00)

Τα κεντροειδή των κυκλοφοριακών ζωνών στο συγκεκριμένο δίκτυο συμπίπτουν γεωγραφικά με τους 24 οδικούς κόμβους που περιλαμβάνονται στο δίκτυο Sioux Falls, και οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω 76 οδικών τμημάτων (Εικόνα 54).





**Εικόνα 54: Το κυκλοφοριακό δίκτυο Sioux Falls: άποψη πραγματικού δικτύου (αριστερά) και κωδικοποιημένου δικτύου (δεξιά)**

Ο Πίνακας 28 παρουσιάζει το μήκος των οδικών τμημάτων μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Τέλος, η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα κίνησης σε όλο το δίκτυο και για όλα τα οδικά τμήματα είναι ίση με 95χλμ/ώρα.

**Πίνακας 28: Μήκη οδικών τμημάτων δικτύου Sioux Falls**

Από	Σε	Μήκος (km)	Από	Σε	Μήκος (km)
1	2	3	11	12	3
1	3	2	11	14	2
2	6	2.5	12	13	1.5
3	4	2	13	24	2
3	12	2	14	15	2.5
4	5	1	14	23	2
4	11	3	15	19	1.5
5	6	2	15	22	1.5
5	9	2.5	16	17	1
6	8	1	16	18	1.5
7	8	1.5	17	19	1
7	18	1	18	20	2
8	9	5	19	20	2
8	16	2.5	20	21	3

9	10	1.5	20	22	2.5
10	11	2.5	21	22	1
10	15	3	21	24	1.5
10	16	2	22	23	2
10	17	4	23	24	1

#### 9.2.2.2. Λογισμικό προσομοίωσης της κυκλοφορίας

Για την προσομοίωση της κυκλοφορίας στα δίκτυα Μεταφορών που περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό μικροσκοπικής προσομοίωσης της κυκλοφοριακής ροής<sup>18</sup> SUMO (Simulation of Urban Mobility). Το λογισμικό αυτό, δίνει τη δυνατότητα μικροσκοπικής (και πολυτροπικής) προσομοίωσης της κυκλοφορίας σε οδικά δίκτυα. Το λογισμικό SUMO περιλαμβάνει όλες τις εφαρμογές και λειτουργικές δυνατότητες που απαιτούνται για την προετοιμασία και εκτέλεση μίας κυκλοφοριακής προσομοίωσης. Επιπρόσθετα, το συγκεκριμένο λογισμικό έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά και δυνατότητες προσομοίωσης της κυκλοφορίας:

- χωρικά συνεχή και χρονικά διακριτή κίνηση των οχημάτων
- δρόμους πολλαπλών λωρίδων με δυνατότητα αλλαγής λωρίδων
- προγράμματα σηματοδότησης και διαφορετικούς κανόνες κίνησης των οχημάτων (ιδιότητα που δεν χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εφαρμογή)
- γρήγορο γραφικό περιβάλλον χρήστη (user interface)
- διαχείριση δικτύου με περισσότερα από 10.000 οδικά τμήματα
- ταχεία εκτέλεση προσομοίωσης (ιδιότητα απαραίτητη για την προσομοίωση της κυκλοφορίας σε μεγάλο αριθμό δικτύων Μεταφορών στα Βήματα 2 και 3 του δεύτερου επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης)
- διαλειτουργικότητα με άλλες εφαρμογές και γλώσσες προγραμματισμού κατά την εκτέλεση (ιδιότητα απαραίτητη λόγω της κωδικοποίησης των μέτρων σε γλώσσα προγραμματισμού σε διαφορετικό περιβάλλον από το SUMO).
- εξαγωγή αποτελεσμάτων ανά οδικό τμήμα, ανά κυκλοφοριακό κόμβο ή και ανά όχημα

---

<sup>18</sup> Υπενθυμίζεται, ότι η μικροσκοπική προσομοίωση της κυκλοφορίας εξετάστηκε βιβλιογραφικά στην Ενότητα 3.4.2

- δυνατότητα εισαγωγής οδικών δικτύων και χαρακτηριστικών τους από άλλα λογισμικά (ιδιότητα που χρησιμοποιήθηκε για την κωδικοποίηση των πειραματικών δικτύων)
- δυνατότητα δημιουργίας τυχαίων δικτύων Μεταφορών (ιδιότητα που χρησιμοποιήθηκε στο Βήμα 2)

Ο λόγος επιλογής αυτού του λογισμικού έναντι άλλων με παρόμοιες λειτουργίες και ιδιότητες είναι ότι αφενός το SUMO διατίθεται με δωρεάν άδεια χρήσης και αφετέρου ότι αποτελεί λογισμικό ανοικτού κώδικα (open source). Χάρη σ' αυτό, δόθηκε η δυνατότητα στον υποψήφιο διδάκτορα να συνδυάσει την κωδικοποίηση των μέτρων που έγιναν με γλώσσα προγραμματισμού R (βλέπε ενότητα 9.2.2.3), με την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της κυκλοφορίας ώστε να αυτοματοποιηθεί και να απλοποιηθεί ο αριθμητικός υπολογισμός των μέτρων.

#### **9.2.2.3. Κωδικοποίηση μέτρων από τη Θεωρία Δικτύων και αυτοματοποίηση διαδικασίας**

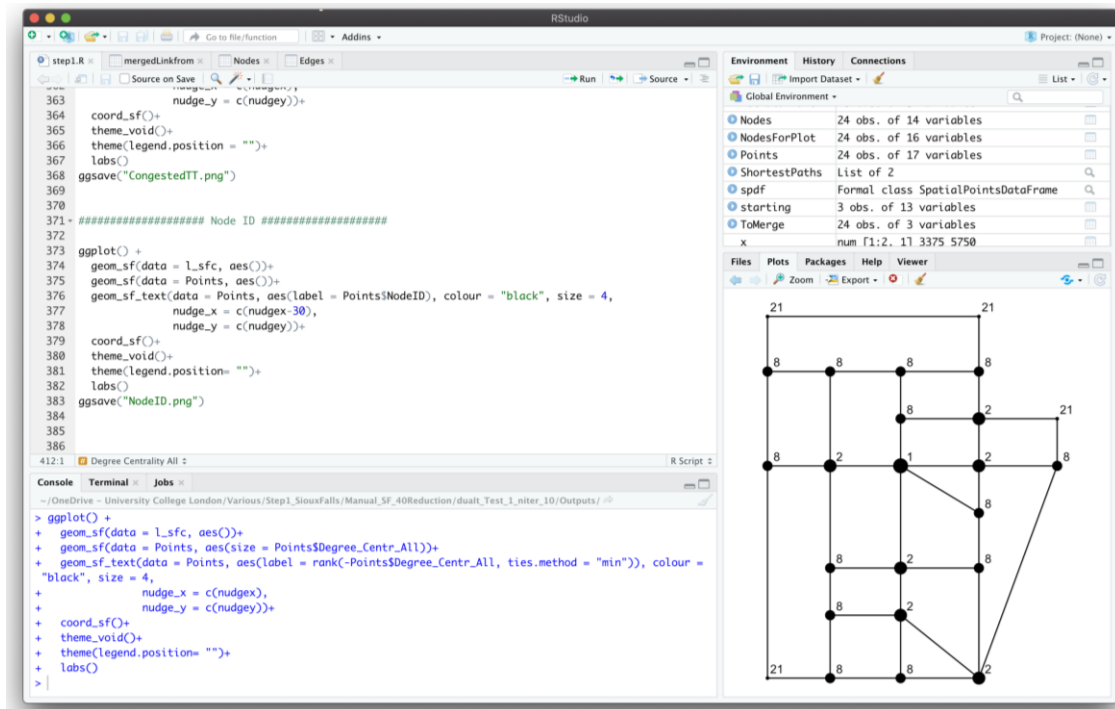
Η κωδικοποίηση των μέτρων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 6 έγινε με τη γλώσσα προγραμματισμού R. Η R είναι γλώσσα προγραμματισμού ανοικτού κώδικα σε περιβάλλον που παρέχει στον χρήστη τη δυνατότητα να κάνει υπολογιστική στατιστική και γραφήματα. Παρέχει όλα τα απαραίτητα εργαλεία, προκειμένου να υλοποιηθούν οι στατιστικές αναλύσεις των Βημάτων 2 και 3. Τα εργαλεία αυτά είναι:

- δημιουργία τυχαίων δειγμάτων
- διακριτές και συνεχείς μεταβλητές (Poisson, Gamma, Exponential κτλ)
- έλεγχοι υποθέσεων
- στατιστικά τεστ (Kolmogorov-Smirnoff)
- δημιουργία γραφημάτων (ιστόγραμμα, qq plot, pie chart, bar chart κτλ)

Είναι λογισμικό GNU (GNU's Not Unix), δηλαδή ο καθένας μπορεί να κάνει βελτιώσεις στον πηγαίο κώδικα της R και να τις δημοσιεύει. Λόγω του ότι όλοι έχουν πρόσβαση στον πηγαίο κώδικά της, έχουν γίνει πολλές βελτιώσεις από τότε που δημιουργήθηκε.

Στο περιβάλλον της R αυτοματοποιήθηκε η συνολική διαδικασία του πρώτου βήματος του δευτέρου επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης. Έτσι, αντί να εξαχθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της κυκλοφορίας από το SUMO, να εισαχθούν στην R, και να γίνει ο αριθμητικός υπολογισμός των τιμών των μέτρων που διερευνώνται, η διαδικασία

κωδικοποιήθηκε εξ ολοκλήρου στην R, και όταν ήταν απαραίτητα τα αποτελέσματα της κυκλοφοριακής προσομοίωσης, τότε η R αυτόματα ‘καλούσε’ το SUMO όπου και γινόταν η προσομοίωση, με απευθείας εισαγωγή στην R. Η Εικόνα 55 παρουσιάζει άποψη του περιβάλλοντος της γλώσσας προγραμματισμού R, ενώ ο συνολικός κώδικας που γράφτηκε και χρησιμοποιήθηκε, παρατίθεται στο Παράρτημα της διδακτορικής διατριβής.

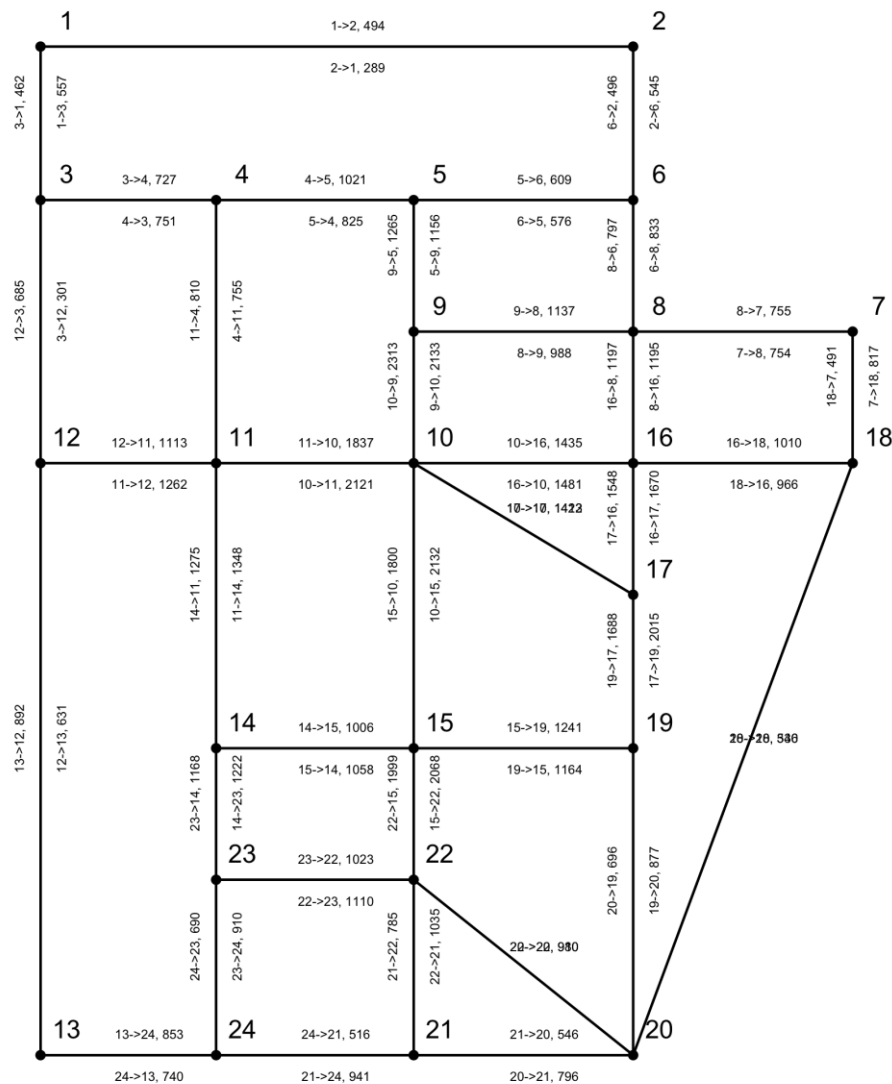


Εικόνα 55: Απόψη περιβάλλοντος αυτοματοποιημένης διαδικασίας στην γλώσσα προγραμματισμού R

#### 9.2.2.4. Εφαρμογή στο δίκτυο Sioux Falls

Για λόγους διευκόλυνσης της κατανόησης της εφαρμογής, και των αποτελεσμάτων των επιμέρους μέτρων, παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της κυκλοφορίας στο δίκτυο εφαρμογής. Στην Εικόνα 56 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του καταμερισμού των μετακινήσεων στο δίκτυο Sioux Falls σε κυκλοφοριακούς φόρτους ανά κατεύθυνση οδικού τμήματος, εκφρασμένα σε οχήματα ανά ώρα. Η κατεύθυνση των οδικών τμημάτων παρέχεται στην Εικόνα 56 από τους δύο πρώτους αριθμούς που διαχωρίζονται από ένα βέλος: ο πρώτος αριθμός σηματοδοτεί τον κόμβο από τον οποίο έρχεται ο κυκλοφοριακός φόρτος, το βέλος σηματοδοτεί την κατεύθυνση στην οποία κινείται ο κυκλοφοριακός φόρτος, και ο δεύτερος αριθμός σηματοδοτεί το κόμβο στον οποίο καταλήγει ο κυκλοφοριακός φόρτος. Η αριθμητική τιμή των κυκλοφοριακών φόρτων ανά κατεύθυνση οδικού τμήματος παρέχεται έπειτα από τη διευκρίνιση της κατεύθυνσης του οδικού τμήματος και διαχωρίζεται με κόμμα. Έτσι, η πληροφορία 4→5, 1021, αφορά σε 1021

οχήματα που καταμερίστηκαν στο οδικό τμήμα με κατεύθυνση από τον κόμβο 4 προς τον κόμβο 5.

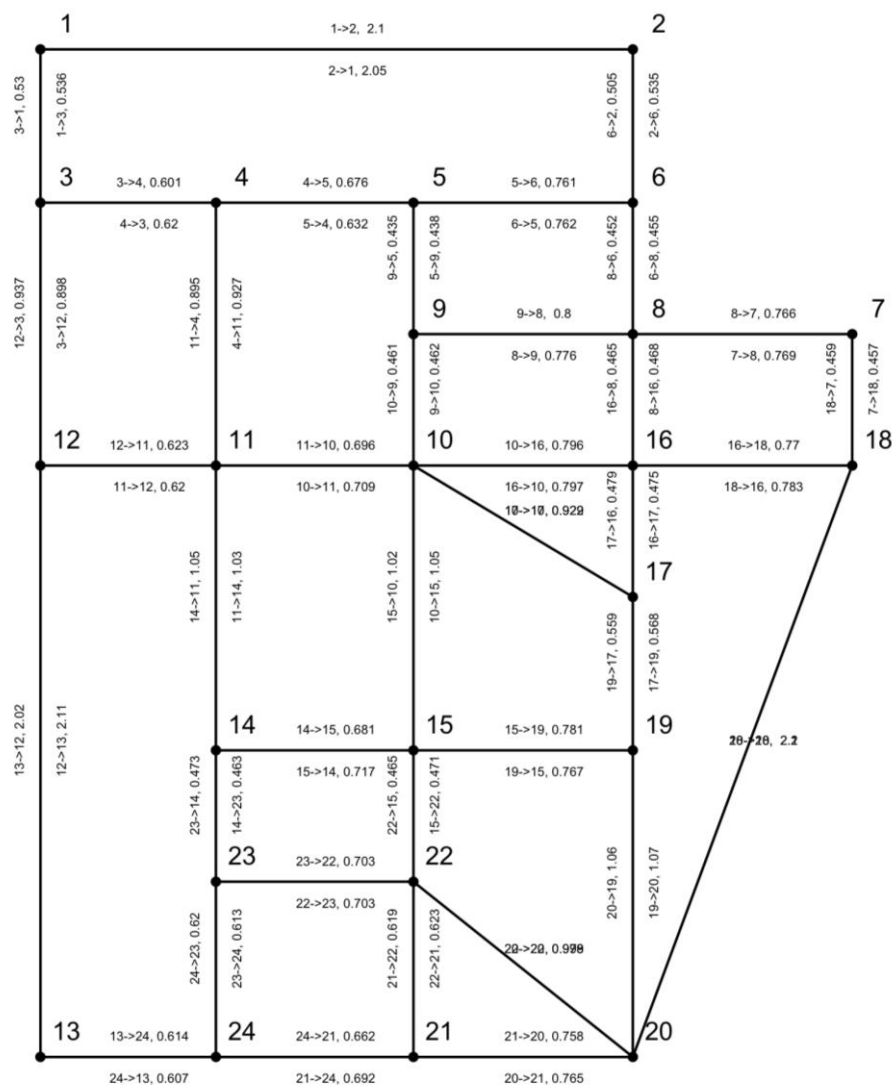


Εικόνα 56: Κυκλοφοριακοί φόρτοι (σε οχήματα/ώρα) ανά κατεύθυνση οδικού τμήματος

Όπως φαίνεται, η μεγαλύτερη συγκέντρωση κυκλοφοριακών φόρτων παρατηρείται στο γεωγραφικό κέντρο του δικτύου που εξετάζεται, στην ευρύτερη περιοχή που οριοθετείται μεταξύ των κόμβων 9-16-17-19-22-15-11-10, και όπου οι τιμές των φόρτων είναι >1500 οχημάτων την ώρα. Παρατηρείται επίσης μια ακόμα κατηγορία κυκλοφοριακών φόρτων, μικρότερη αριθμητικά αυτής που αναφέρθηκε παραπάνω (μεταξύ 800-1200 οχημάτων ανά ώρα), που δεν έχει μονοσήμαντο γεωγραφικό προσδιορισμό, αλλά φαίνεται να τροφοδοτεί την κεντρική περιοχή (ιδιαίτερα μεταξύ των κόμβων 4-5-9, 8-16-18, 20-21-22, 12-11-14). Τέλος, παρατηρείται μια κατηγορία κυκλοφοριακών φόρτων αρκετά χαμηλότερη αριθμητικά

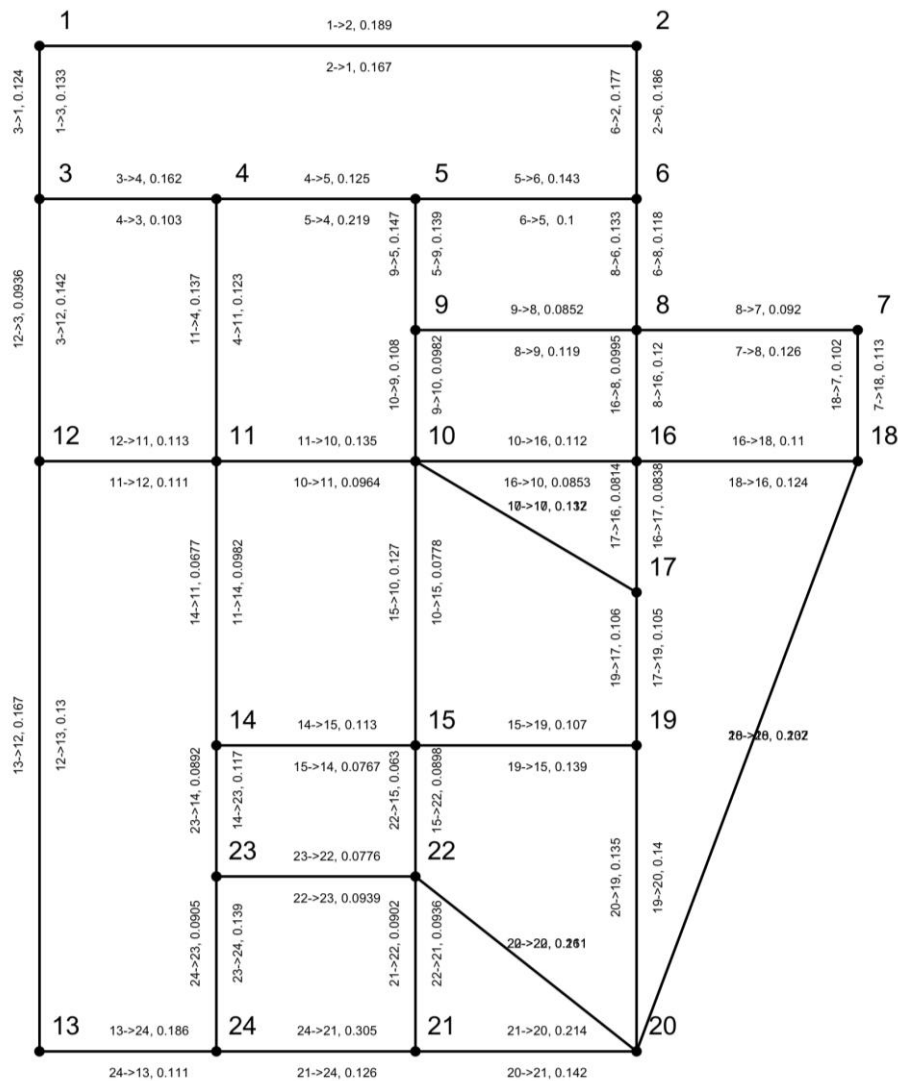
των δύο προηγούμενων (μεταξύ 500-800 οχημάτων την ώρα), κατά βάση μεταξύ κόμβων που έχουν περιφερειακή θέση στο δίκτυο (ενδεικτικά μεταξύ των κόμβων 1-2, 20-21, 12-3).

Αντίστοιχα, στην Εικόνα 57 παρουσιάζεται ο χρόνος διάνυσης των οδικών τμημάτων (σε λεπτά) ανά κατεύθυνση οδικού τμήματος (ισχύει ό,τι και προηγουμένως για την ανάγνωση των αριθμών στην Εικόνα 57). Σημειώνεται εδώ ότι οι αριθμητικές τιμές του χρόνου διάνυσης είναι ιδιαίτερος χαμηλές διότι το συγκεκριμένο δίκτυο έχει μικρή γεωγραφική έκταση, και τα μήκη των οδικών τμημάτων δεδομένης της μέγιστης επιτρεπόμενης ταχύτητας (=95χλμ/ώρα) διανύονται σε μικρό χρονικό διάστημα.



Εικόνα 57: Χρόνοι διάνυσης (σε λεπτά) ανά κατεύθυνση οδικού τμήματος

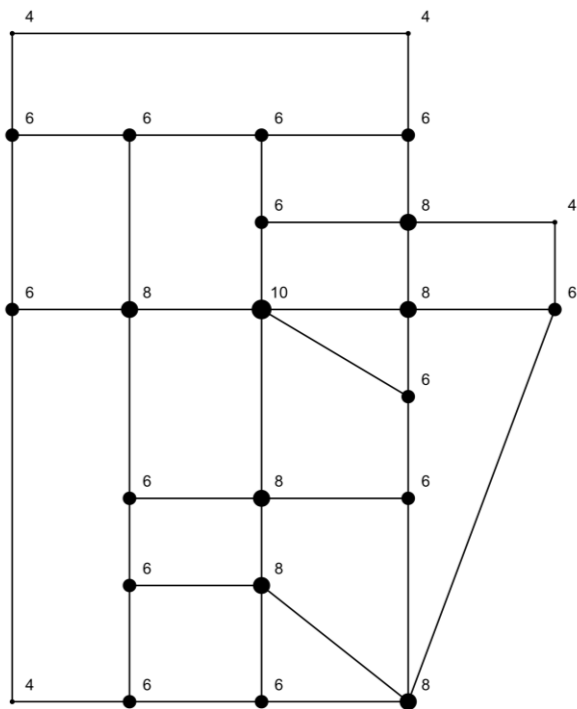
Για καλύτερη κατανόηση των χρόνων διάνυσης και της καθυστέρησης στο δίκτυο λόγω συμφόρησης, η Εικόνα 58 παρουσιάζει τους λόγους των χρόνων διάνυσης ως προς τους χρόνους διάνυσης σε συνθήκες ελεύθερης ροής ανά κατεύθυνση οδικού τμήματος.



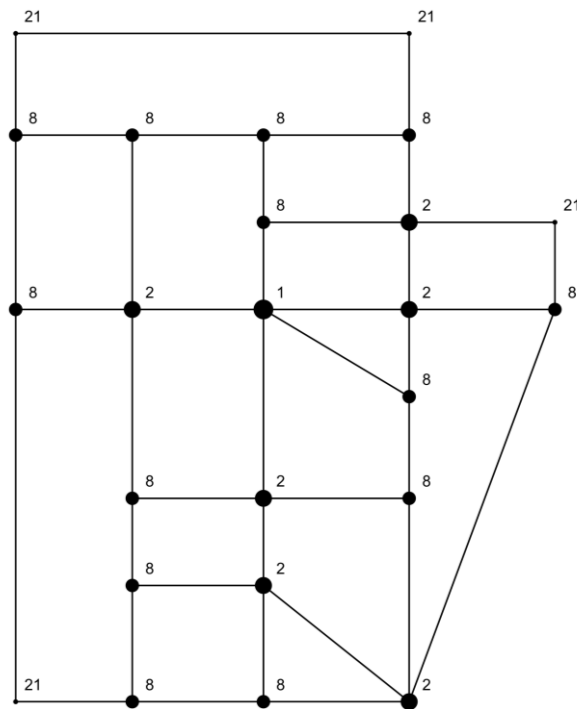
Εικόνα 58: Λόγος χρόνων διάνυσης προς χρόνους διάνυσης σε συνθήκες ελεύθερης ροής ανά κατεύθυνση οδικού τμήματος

### 9.2.2.1. Κεντρικότητα βαθμού

Υπενθυμίζεται ότι η τιμή της κεντρικότητας βαθμού ενός κόμβου σε ένα δίκτυο, ισούται με τον αριθμό των γειτονικών του κόμβων, δηλαδή τον αριθμό των κόμβων με τους οποίους συνδέεται. Η Εικόνα 59 παρουσιάζει τις τιμές της Κεντρικότητας Βαθμού στο δίκτυο Sioux Falls (Εικόνα 59 - αριστερά) καθώς και την κατάταξη των κόμβων του δικτύου σύμφωνα με αυτό το μέτρο (Εικόνα 59 - δεξιά). Όσο μικρότερη η τιμή κατάταξης, τόσο σημαντικότερος είναι ο κόμβος σύμφωνα με το μέτρο που εξετάζεται. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 59 - δεξιά, υπάρχουν διάφορες περιπτώσεις κόμβων που λαμβάνουν την ίδια σειρά κατάταξης ακριβώς επειδή η αριθμητική τιμή του μέτρου που εξετάζεται είναι ίδια.



(α) Τιμές Κεντρικότητας Βαθμού



(β) Κατάταξη κόμβων βάσει της σημαντικότητας που τους προσδίδεται από την Κεντρικότητα Βαθμού

**Εικόνα 59: Κεντρικότητα Βαθμού στο δίκτυο Sioux Falls**

Σημειώνεται επίσης, ότι στην περίπτωση προσανατολισμένων δικτύων, όπως το δίκτυο Sioux Falls, διαχωρίζεται ο εσωτερικός και ο εξωτερικός βαθμό κάθε κόμβου<sup>19</sup>. Στην Εικόνα 59 - αριστερά απεικονίζεται ο συνολικός βαθμός κάθε κόμβου, με την πρόσθεση του εσωτερικού και εξωτερικού βαθμού. Αυτός είναι και ο λόγος που η μεγαλύτερη τιμή κεντρικότητας βαθμού ισούται με 10 ενώ ο κόμβος που λαμβάνει αυτή την τιμή συνδέεται με 5 γειτονικούς κόμβους στο δίκτυο (αντίστοιχα κόμβοι με 4 συνδέσεις με άλλους κόμβους λαμβάνουν την τιμή 8).

Όπως φαίνεται, υψηλές τιμές κεντρικότητας βαθμού λαμβάνουν εκείνοι οι κόμβοι που είναι συνδεδεμένοι με τον μεγαλύτερο αριθμό γειτονικών κόμβων. Επειδή όμως για τον υπολογισμό του μέτρου αυτού απουσιάζει οποιαδήποτε παράμετρος θα μπορούσε να διαφοροποιήσει ένα δίκτυο Μεταφορών από ένα οποιοδήποτε άλλο δίκτυο, η χρήση του μέτρου αυτού για τα δίκτυα Μεταφορών φαίνεται να είναι περιορισμένη. Επειδή αυτή είναι

<sup>19</sup> Ως *εσωτερικός βαθμός* (in-degree) ορίζεται το συνολικό πλήθος των τόξων, που καταλήγουν στον κόμβο, σε αντίθεση με τον *εξωτερικό βαθμό* (out-degree) που μετράει τα τόξα που εκκινούν από τον κόμβο, με κατεύθυνση τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου.



εντελώς ανεξάρτητη από την έννοια της κυκλοφορίας – την βασική δηλαδή παράμετρο σε ένα τέτοιο δίκτυο, η κεντρικότητα βαθμού μπορεί μεν να καταδείξει εκείνους τους κόμβους οι οποίοι, επειδή έχουν πολλές συνδέσεις, αποκτούν υψηλότερη σημαντικότητα έναντι άλλων, αλλά αυτή η πληροφορία από μόνη της δεν επαρκεί, ακριβώς γιατί η σημαντικότητα που προσδίδεται στους κόμβους είναι ανεξάρτητη των κυκλοφοριακών φόρτων που εξυπηρετούνται από τους κόμβους αυτούς. Υπό αυτή την έννοια δεν θα μπορούσε να είναι ένα μέτρο χρήσιμο για λήψη αποφάσεων χωροθέτησης κόμβων ειδικού ρόλου, όπως χώροι βραχείας στάθμευσης οχημάτων έκτακτων αναγκών (πυροσβεστικών, κ.λπ.).

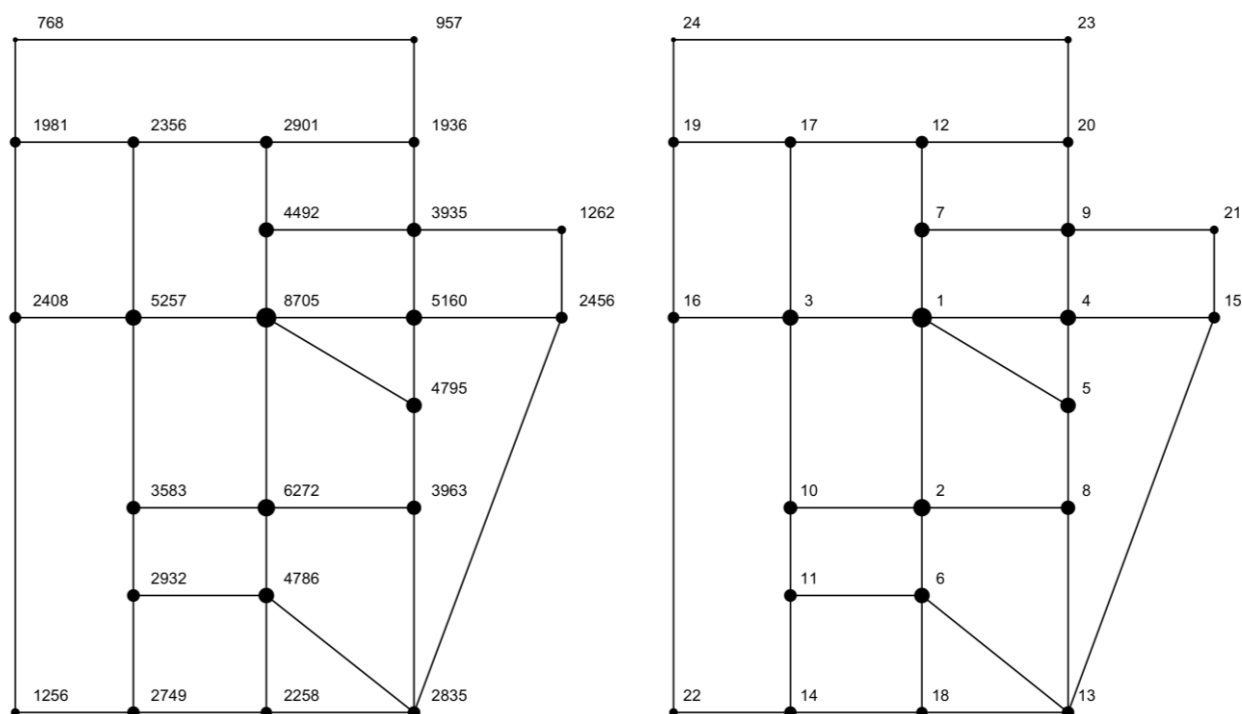
Ο Πίνακας 29 περιγράφει τη σειρά κατάταξης (στήλη 2) των κόμβων του δικτύου Sioux Falls (στήλη 1 και διάγραμμα), και θα συμπληρώνεται με πρόσθετες στήλες βάσει των μέτρων που εξετάζονται στις επόμενες ενότητες, έτσι ώστε να παρέχει μια σαφή εικόνα σύγκρισης μεταξύ της σημαντικότητας που αποδίδεται από αυτά στους κόμβους του δικτύου που εξετάζεται.

**Πίνακας 29: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Κεντρικότητας Βαθμού (ΚΒα) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls**

Κόμβος	ΚΒα
1	21
2	21
3	8
4	8
5	8
6	8
7	21
8	2
9	8
10	1
11	2
12	8
13	21
14	8
15	2
16	2
17	8
18	8
19	8
20	2
21	8
22	2
23	8
24	8

### 9.2.2.2. Δύναμη κόμβου

Σε απάντηση της αδυναμίας της Κεντρικότητας Βαθμού να καταδείξει τους σημαντικούς κόμβους ενός δικτύου Μεταφορών, λόγω του ότι δεν λαμβάνονται υπόψη παράμετροι σχετικές με την κυκλοφορία, η Δύναμη Κόμβου μπορεί να παραμετροποιηθεί προς αυτή την κατεύθυνση, καθώς ισούται με το άθροισμα των βαρών όλων των τόξων που συνδέονται με τον εξεταζόμενο κόμβο. Με θεώρηση του 'βάρους' ενός τόξου, τον όγκο του κυκλοφοριακού φόρτου που εξυπηρετείται από αυτό, προκύπτουν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 60 – αριστερά. Υπενθυμίζεται ότι οι κυκλοφοριακοί φόρτοι των τόξων προέκυψαν ως αποτέλεσμα του καταμερισμού των μετακινήσεων με τη χρήση του λογισμικού SUMO (βλέπε Εικόνα 56 και Ενότητα 9.2.2.4).



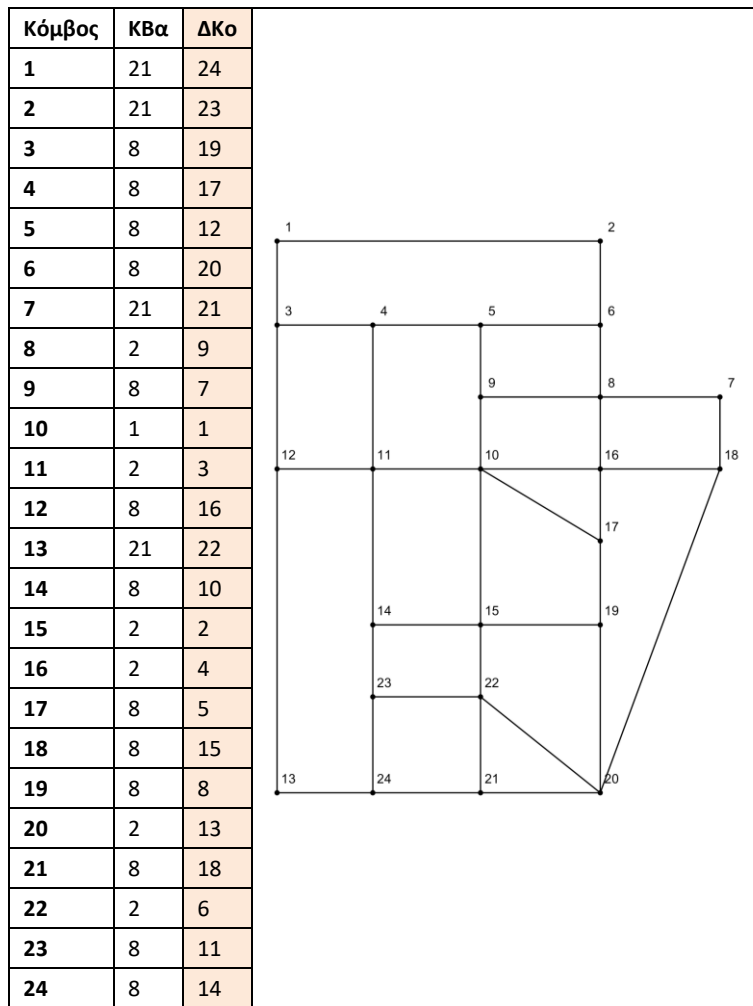
(α) Τιμές Δύναμης Κόμβου

(β) Κατάταξη κόμβων βάσει της σημαντικότητας που τους προσδίδεται από την Δύναμη Κόμβου

Εικόνα 60: Δύναμη Κόμβου στο δίκτυο Sioux Falls

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 60 – δεξιά, οι σημαντικότεροι κόμβοι βρίσκονται στην 'κεντρική' περιοχή του δικτύου. Όπως ήταν αναμενόμενο, η σειρά κατάταξης των σημαντικότερων κόμβων σύμφωνα με τη Δύναμη Κόμβου είναι στην πλειονότητα των περιπτώσεων διαφορετική από αυτήν της Κεντρικότητας Βαθμού (Πίνακας 30), καθώς η τελευταία δεν λαμβάνει υπόψη τα μεγέθη της κυκλοφορίας.

Πίνακας 30: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Δύναμης Κόμβου (ΔΚο) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls

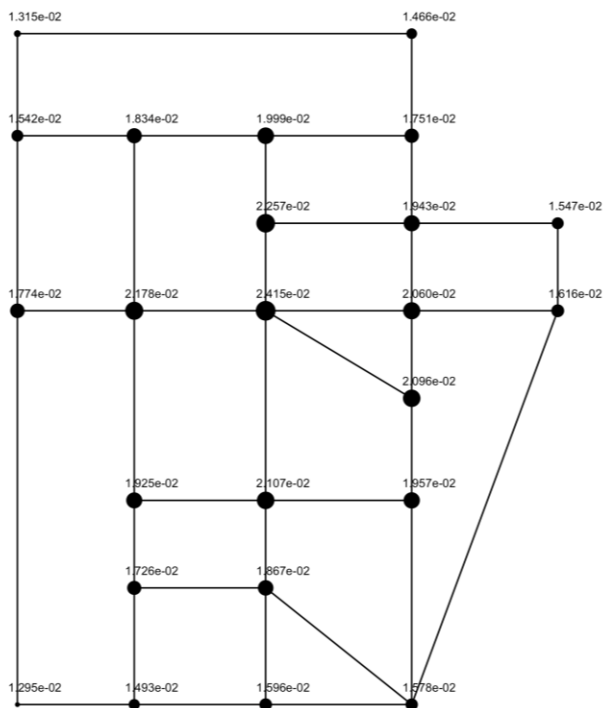


Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι περιπτώσεις των κόμβων 8, 20 και 22, που λόγω σύνδεσης με πολλούς γειτονικούς κόμβους καταλαμβάνουν υψηλή σημαντικότητα βάσει Κεντρικότητας Βαθμού (στη 2<sup>η</sup> θέση κατάταξης και οι 3 κόμβοι), αλλά λόγω εξυπηρέτησης περιορισμένων κυκλοφοριακών φόρτων, είναι λιγότερο σημαντικοί βάσει Δύναμης Κόμβου (9<sup>η</sup>, 13<sup>η</sup> και 6<sup>η</sup> θέση κατάταξης αντίστοιχα). Φαίνεται έτσι, ότι η Δύναμη Κόμβου είναι ένα μέτρο ικανό να καταδείξει εκείνους τους κόμβους ενός δικτύου Μεταφορών για τους οποίους το σύνολο των κυκλοφοριακών φόρτων που ξεκινούν, καταλήγουν ή διεκπεραιώνονται μέσω αυτών είναι οι μεγαλύτεροι συγκριτικά με άλλους, και άρα οι σημαντικότεροι.

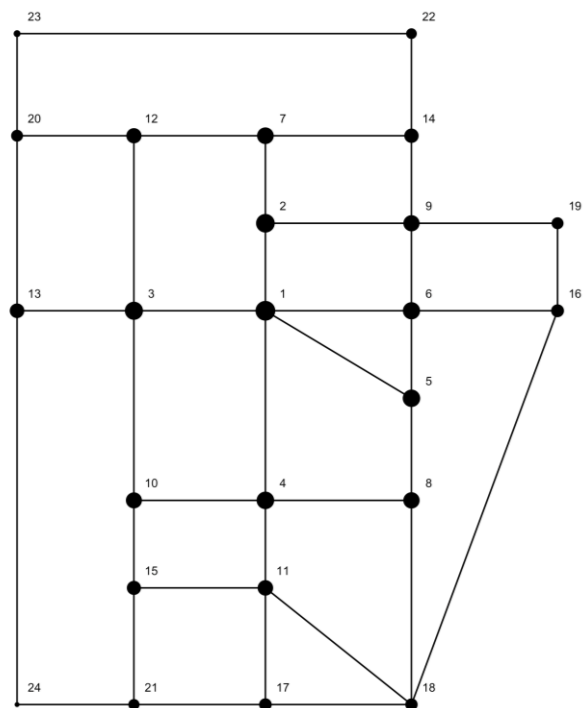
### 9.2.2.3. Κεντρικότητα εγγύτητας

Σύμφωνα με την κεντρικότητα εγγύτητας, οι σημαντικότεροι κόμβοι ενός δικτύου είναι αυτοί οι οποίοι βρίσκονται σε κοντινότερες αποστάσεις σε σχέση με όλους τους υπόλοιπους

κόμβους του δικτύου. Έτσι, η ύπαρξη μικρής ή μέσης απόστασης ενός κόμβου από τους υπόλοιπους συνεπάγεται πιθανόν και καλύτερη ικανότητα π.χ. στη διάδοση (propagation) της κυκλοφορίας. Αντί για τη χρήση όμως της γεωμετρικής απόστασης για την εύρεση και τον υπολογισμό των κοντινότερων αποστάσεων από κόμβο σε κόμβο, εξετάζεται εδώ η χρήση του χρόνου διέλευσης  $t$  ενός οδικού τμήματος, όπως προκύπτει έπειτα από τον καταμερισμό των μετακινήσεων στο δίκτυο (για τους χρόνους διέλευσης στο δίκτυο Sioux Falls που εξετάζεται εδώ, βλέπε Εικόνα 57 και Ενότητα 9.2.2.4). Η Εικόνα 61 – αριστερά παρουσιάζει τις τιμές της Κεντρικότητας Εγγύτητας για τους κόμβους του δικτύου Sioux Falls και η Εικόνα 61 – δεξιά παρουσιάζει την κατάταξή τους βάσει της σημαντικότητας που τους προσδίδεται από τις τιμές του μέτρου αυτού.



(α) Τιμές Κεντρικότητας Εγγύτητας



(β) Κατάταξη κόμβων βάσει της σημαντικότητας που τους προσδίδεται από την Κεντρικότητα Εγγύτητας

**Εικόνα 61: Κεντρικότητα Εγγύτητας στο δίκτυο Sioux Falls**

Όπως φαίνεται, οι τιμές στην Εικόνα 61 – αριστερά είναι μικρότερες της μονάδας καθώς για τον καθορισμό τους, υπολογίζεται το αντίστροφο άθροισμα των χρόνων διέλευσης όλων των κόμβων του δικτύου, από τον υπό εξέταση κόμβο, είναι δηλαδή της μορφής  $1/x$ , όπου  $x > 1$ .

Σύμφωνα με την κατάταξη των κόμβων, σημαντικοί είναι εκείνοι οι κόμβοι για τους οποίους οι χρόνοι σύνδεσής τους με όλους τους υπόλοιπους κόμβους ενός δικτύου είναι οι μικρότεροι. Στην περίπτωση του δικτύου Sioux Falls, οι σημαντικοί κόμβοι βρίσκονται στην Σελίδα 324 από 481

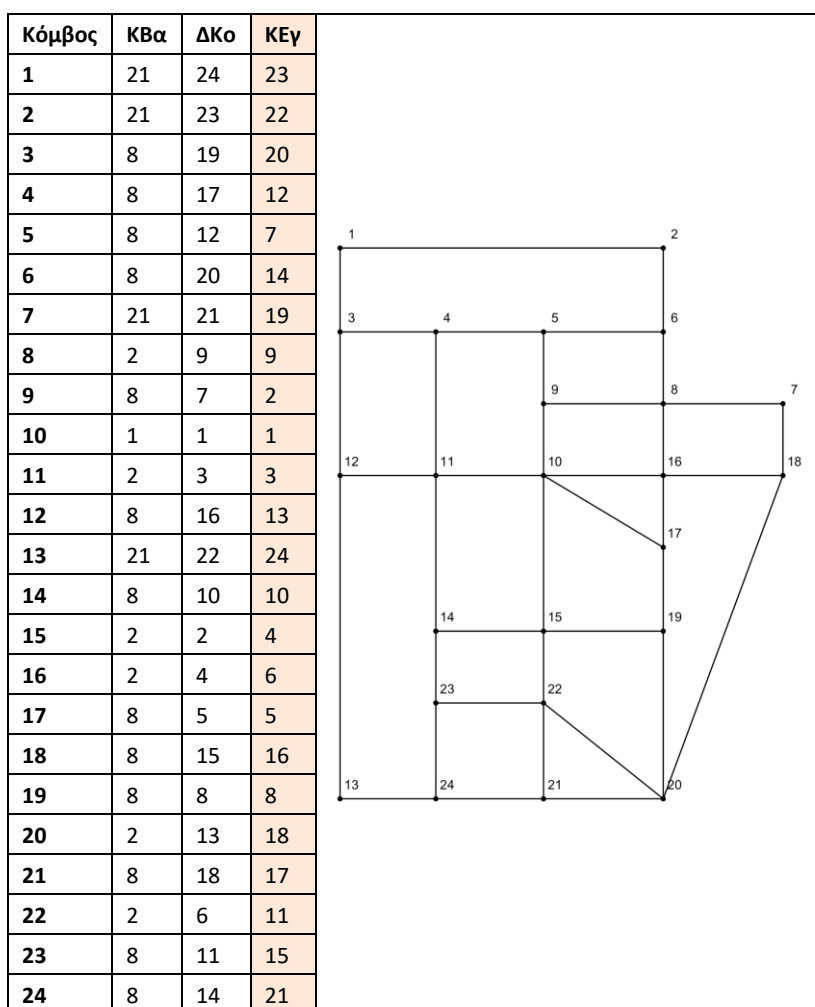
κεντρική περιοχή και γύρω από αυτή και θα μπορούσαν να σηματοδοτήσουν μια ιεράρχηση επέμβασης προστασίας και διατήρησης λειτουργίας τους. Οι λιγότερο σημαντικοί κόμβοι είναι, σύμφωνα με το μέτρο αυτό, οι κόμβοι που βρίσκονται στα άκρα του δικτύου και από τους οποίους οι χρόνοι πρόσβασης σε όλους τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου μεγιστοποιούνται.

Ο Πίνακας 31 συγκρίνει την κατάταξη σημαντικότητας βάσει της Κεντρικότητας Εγγύτητας έναντι των προηγούμενων μέτρων που εξετάστηκαν. Όπως φαίνεται, υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση τόσο από την Κεντρικότητα Βαθμού, όσο και από τη Δύναμη Κόμβου. Η χρήση των χρόνων διέλευσης ως κυκλοφοριακή παράμετρος ορισμού της σημαντικότητας των κόμβων έναντι των κυκλοφοριακών φόρτων, αλλάζει την κατάταξη σε σημαντικό βαθμό. Ενδεικτικά, ο κόμβος 9, που προηγουμένως ήταν ο 7<sup>ος</sup> σημαντικότερος κόμβος του δικτύου, είναι τώρα στη 2<sup>η</sup> θέση, καθώς εκκινώντας από αυτόν, όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι του δικτύου είναι προσβάσιμοι στο δεύτερο χαμηλότερο χρόνο συγκριτικά με τους υπολοίπους. Διακρίνεται έτσι και μια διαφοροποίηση της σημαντικότητας του μελετωμένου αντικειμένου: στην περίπτωση της Δύναμης Κόμβου η σημαντικότητα καταδεικνύει τους κόμβους που πρέπει να προστατευτούν έναντι ενδεχομένης διακοπής της λειτουργίας τους (διότι είναι σημαντικοί ακριβώς επειδή εξυπηρετούν μεγάλους κυκλοφοριακούς φόρτους του δικτύου), ενώ στην περίπτωση της Κεντρικότητας Εγγύτητας, η σημαντικότητα καταδεικνύει τους κόμβους στους οποίους πρέπει πιθανόν να σταθμεύσει ένα όχημα έκτακτης ανάγκης (πυροσβεστικό, ασθενοφόρο, εκχιονιστικό, κ.ο.κ.) έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσει τον χρόνο πρόσβασης σε άλλους κόμβους του δικτύου, σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας τους λόγω εμφάνισης ΑΚΦ. Παρόμοια συμπεράσματα μπορούν αντίστοιχα να εξαχθούν και για τον κόμβο 5.

Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί, ότι και στις τρεις περιπτώσεις μέτρων που εξετάστηκαν ως τώρα, ο κόμβος 1 κατατάσσεται 1<sup>ος</sup> στη σημαντικότητα, ανεξαρτήτως χρήσης κυκλοφοριακών παραμέτρων (ΚΒα), χρήσης κυκλοφοριακών φόρτων (ΔΚο) ή χρήσης χρόνων διέλευσης ως παραμέτρου ορισμού της σημαντικότητας.

Σε κάθε περίπτωση, και η Κεντρικότητα Εγγύτητας φαίνεται να αποτελεί ένα μέτρο ικανό να καταδείξει τους σημαντικούς κόμβους ενός δικτύου Μεταφορών.

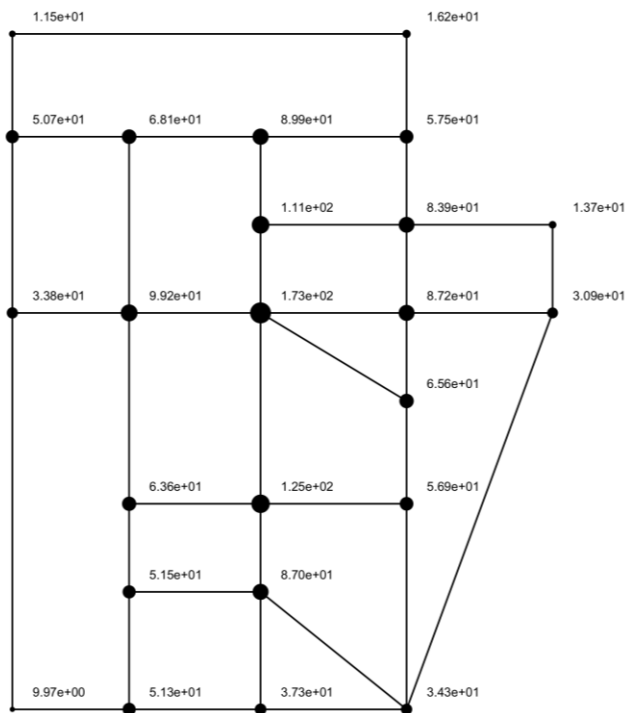
Πίνακας 31: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Κεντρικότητας Εγγύτητας (ΚΕγ) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls



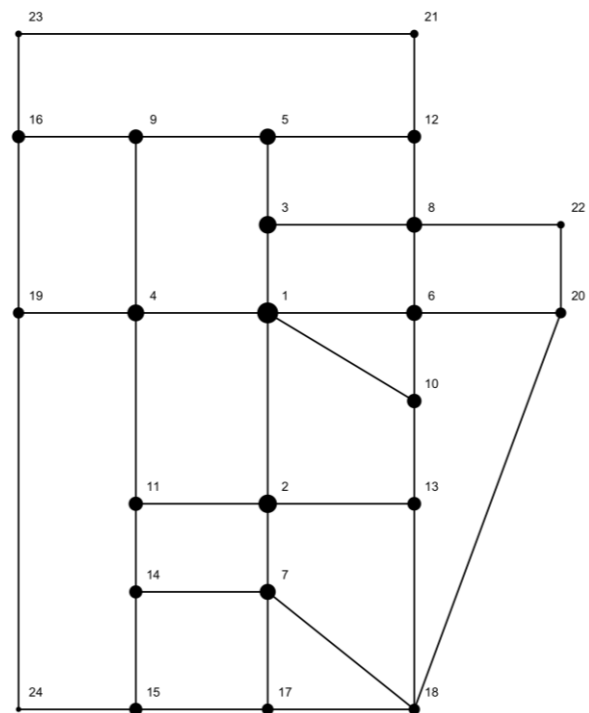
#### 9.2.2.4. Κεντρικότητα ενδιάμεσου

Η κεντρικότητα ενδιάμεσου αξιολογεί το βαθμό στον οποίο ένας κόμβος βρίσκεται στο μονοπάτι της κοντινότερης διαδρομής μεταξύ δύο άλλων κόμβων στο δίκτυο. Για τον υπολογισμό και την εύρεση κοντινότερων διαδρομών μεταξύ δύο κόμβων χρησιμοποιείται εδώ, αντί της απόστασης, ο χρόνος διάνυσης των οδικών τμημάτων (για τους χρόνους διέλευσης στο δίκτυο Sioux Falls που εξετάζεται εδώ, βλέπε Εικόνα 57 και Ενότητα 9.2.2.4). Για τον λόγο αυτό, οι κοντινότερες διαδρομές αναφέρονται παρακάτω ως συντομότερες διαδρομές. Οι διαδρομές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τιμών της κεντρικότητας ενδιάμεσου προέκυψαν από τον καταμερισμό των μετακινήσεων στο δίκτυο, και έπειτα από την εύρεση ισορροπίας σε αυτό, οπότε όλες οι διαδρομές είναι ίσης και ελάχιστης χρονικής διάρκειας για την εύρεση ισορροπίας (βλέπε και Ενότητα 5.7.7).

Η Εικόνα 62 – αριστερά παρουσιάζει τις τιμές της Κεντρικότητας Ενδιαμέσου για τους κόμβους του δικτύου Sioux Falls. Εξαιτίας της συχνής ύπαρξης πέραν της μιας συντομότερης διαδρομής μεταξύ δύο κόμβων σε ένα δίκτυο, το μέτρο διατυπώνεται διαιρώντας τις συντομότερες διαδρομές που περνούν από τον υπό εξέταση κόμβο με το συνολικό πλήθος των συντομότερων διαδρομών που υπάρχουν μεταξύ όλων των κόμβων. Έτσι, οι τιμές που φαίνονται στην Εικόνα 62 – αριστερά δεν αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των συντομότερων διαδρομών που περνούν από κάθε κόμβο, αλλά τη διαίρεση αυτού με τον συνολικό αριθμό συντομότερων διαδρομών.



(α) Τιμές Κεντρικότητας Ενδιαμέσου



(β) Κατάταξη κόμβων βάσει της σημαντικότητας που τους προσδίδεται από την Κεντρικότητα Ενδιαμέσου

**Εικόνα 62: Κεντρικότητα Ενδιαμέσου στο δίκτυο Sioux Falls**

Αντίστοιχα με τα μέτρα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες Ενότητες, η Εικόνα 62 – δεξιά παρουσιάζει την κατάταξη των κόμβων βάσει της σημαντικότητας που τους προσδίδεται από την Κεντρικότητα Ενδιαμέσου. Όπως φαίνεται, οι σημαντικοί κόμβοι του δικτύου συγκεντρώνονται στην κεντρική περιοχή του (όπως αναμενόταν λόγω του μεγάλου αριθμού συντομότερων διαδρομών που περνούν από αυτούς), και ο σημαντικότερος κόμβος του δικτύου είναι ο ίδιος με αυτόν που ήταν σύμφωνα με τα μέτρα που εξετάστηκαν έως τώρα (Πίνακας 32). Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι σύμφωνα με την Κεντρικότητα Ενδιαμέσου, η σημαντικότητα είναι σε αρκετές περιπτώσεις παρόμοια αυτής βάσει Δύναμης Κόμβου (π.χ. οι κόμβοι 15, 22 και 24), ενώ σε άλλες περιπτώσεις η σημαντικότητα είναι

παρόμοια βάσει Κεντρικότητας Εγγύτητας (π.χ. οι κόμβοι 9, 16 και 20). Φαίνεται δηλαδή από το γεγονός αυτό ότι η Κεντρικότητα Εγγύτητας να μπορεί να 'συνδυάσει' τη σημαντικότητα των δύο προηγούμενων μέτρων.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί, ότι σύμφωνα και με όλα τα προηγούμενα μέτρα που εξετάστηκαν (συμπεριλαμβανομένης της Κεντρικότητας Βαθμού), οι λιγότερο σημαντικοί κόμβοι, φαίνεται να βρίσκονται στα άκρα του δικτύου.

**Πίνακας 32: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Κεντρικότητας Ενδιαμέσου (ΚΕν) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls**

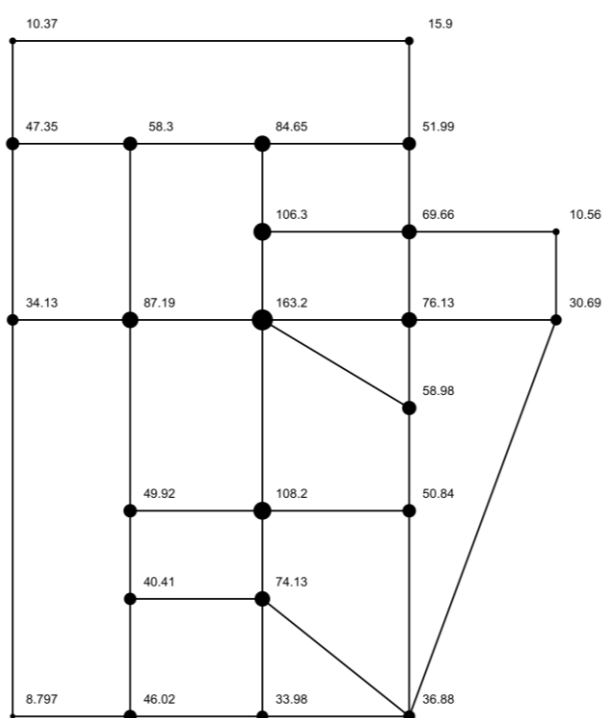
Κόμβος	ΚΒα	ΔΚο	ΚΕγ	ΚΕν
1	21	24	23	23
2	21	23	22	21
3	8	19	20	16
4	8	17	12	9
5	8	12	7	5
6	8	20	14	12
7	21	21	19	22
8	2	9	9	8
9	8	7	2	3
10	1	1	1	1
11	2	3	3	4
12	8	16	13	19
13	21	22	24	24
14	8	10	10	11
15	2	2	4	2
16	2	4	6	6
17	8	5	5	10
18	8	15	16	20
19	8	8	8	13
20	2	13	18	18
21	8	18	17	17
22	2	6	11	7
23	8	11	15	14
24	8	14	21	15

Σε κάθε περίπτωση, η εφαρμογή του μέτρου δείχνει ότι μπορεί να καταδείξει τους κόμβους σε ένα δίκτυο Μεταφορών που, ακριβώς επειδή εξυπηρετούν το μεγαλύτερο αριθμό συντομότερων διαδρομών, είναι σημαντικοί για τη λειτουργία του δικτύου, και άρα πιθανά μέτρα προσαρμογής σε ακραία καιρικά φαινόμενα καθώς και μέτρα μείωσης της τρωτότητας θα μπορούσαν να κατευθυνθούν σε αυτούς.

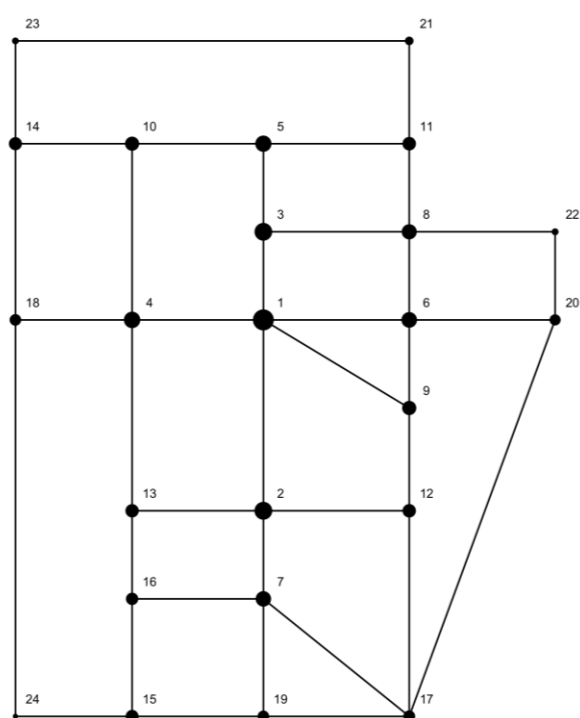


### 9.2.2.5. Ροή κεντρικότητας ενδιαμέσου

Η Ροή Κεντρικότητας Ενδιαμέσου είναι μια παραλλαγή της Κεντρικότητας Ενδιαμέσου που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη Ενότητα. Για τον καθορισμό των τιμών του μέτρου αυτού, υπολογίζεται ο λόγος των κυκλοφοριακών φόρτων που διέρχονται από έναν κόμβο, ο οποίος βρίσκεται στη συντομότερη διαδρομή μεταξύ δύο άλλων κόμβων του δικτύου, ως προς τους συνολικούς κυκλοφοριακούς φόρτους που έχουν αρχή και τέλος αντίστοιχα, στους δύο αυτούς κόμβους. Η Εικόνα 63 – αριστερά παρουσιάζει τις τιμές της Ροής Κεντρικότητας Ενδιαμέσου για το δίκτυο Sioux Falls, και η Εικόνα 63 – δεξιά παρουσιάζει την κατάταξη σημαντικότητας των κόμβων σύμφωνα με το μέτρο αυτό.



(α) Τιμές Ροής Κεντρικότητας Ενδιαμέσου



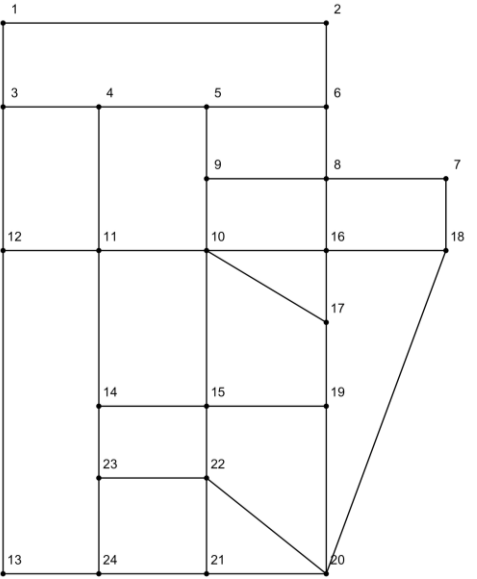
(β) Κατάταξη κόμβων βάσει της σημαντικότητας που τους προσδίδεται από την Ροή Κεντρικότητας Ενδιαμέσου

**Εικόνα 63: Ροή Κεντρικότητας Ενδιαμέσου στο δίκτυο Sioux Falls**

Σύμφωνα με τη Ροή Κεντρικότητας Ενδιαμέσου, οι σημαντικοί κόμβοι σε ένα δίκτυο είναι εκείνοι, δια μέσου των οποίων εξυπηρετείται ο μεγαλύτερος όγκος της κυκλοφορίας του δικτύου. Όπως φαίνεται και στη σύγκριση της κατάταξης σημαντικότητας μεταξύ των διαφόρων μέτρων (Πίνακας 33), η διαφορά της αποτίμησης σημαντικότητας σύμφωνα με αυτό το μέτρο και με τη Κεντρικότητα Ενδιαμέσου είναι αμελητέα. Ενδεικτικά, υπάρχουν 4 περιπτώσεις κόμβων (οι κόμβοι 3, 14, 21 και 23) για τους οποίους η σειρά κατάταξης αλλάζει μόλις κατά δύο θέσεις (είτε προς το περισσότερο είτε προς το λιγότερο σημαντικό).

Πίνακας 33: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Ροής Κεντρικότητας Ενδιαμέσου (ΡΚΕν) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls

Κόμβος	ΚΒα	ΔΚο	ΚΕγ	ΚΕν	ΡΚΕν
1	21	24	23	23	23
2	21	23	22	21	21
3	8	19	20	16	14
4	8	17	12	9	10
5	8	12	7	5	5
6	8	20	14	12	11
7	21	21	19	22	22
8	2	9	9	8	8
9	8	7	2	3	3
10	1	1	1	1	1
11	2	3	3	4	4
12	8	16	13	19	18
13	21	22	24	24	24
14	8	10	10	11	13
15	2	2	4	2	2
16	2	4	6	6	6
17	8	5	5	10	9
18	8	15	16	20	20
19	8	8	8	13	12
20	2	13	18	18	17
21	8	18	17	17	19
22	2	6	11	7	7
23	8	11	15	14	16
24	8	14	21	15	15



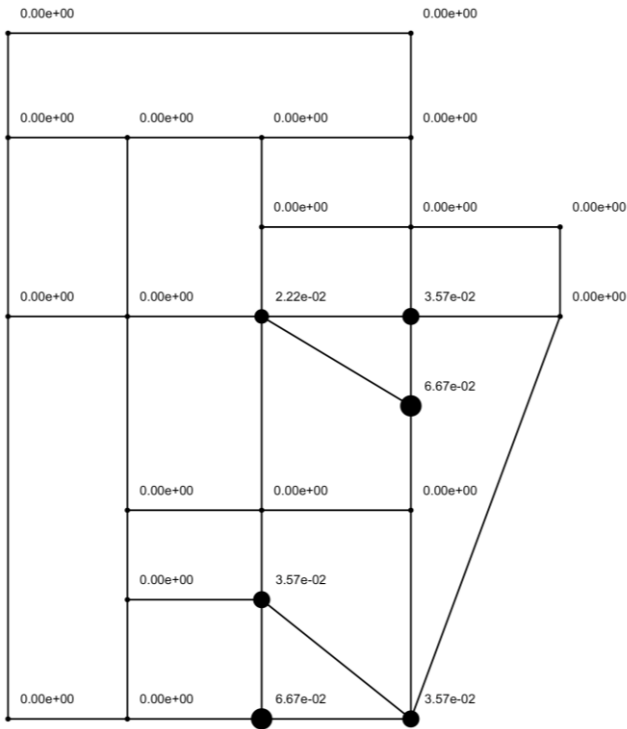
The diagram shows a network of 24 nodes (numbered 1 to 24) connected by edges. The nodes are arranged in a grid-like structure with some additional connections. Node 1 is at the top left, and node 2 is at the top right. Nodes 3-6 form a second row, 7-10 a third, 11-14 a fourth, 15-18 a fifth, 19-22 a sixth, and 23-24 a seventh. There are also diagonal connections between nodes 10-17, 17-20, and 22-20.

Για τον λόγο αυτό, παρόλο που η Ροή Κεντρικότητας Ενδιαμέσου μπορεί να καταδείξει τη σημαντικότητα των κόμβων ενός δικτύου Μεταφορών με κυκλοφοριακούς όρους, αποτελεί εν πολλοίς επανάληψη της Κεντρικότητας Ενδιαμέσου.

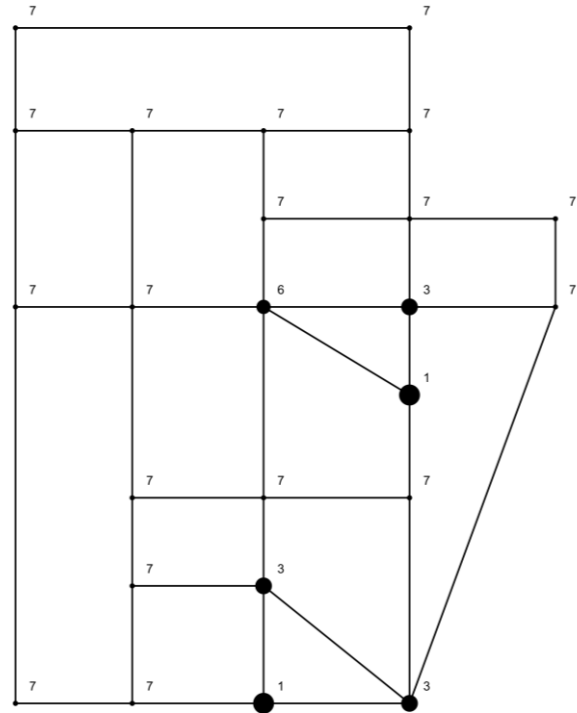
#### 9.2.2.6. Τοπικός συντελεστής σύμπλεξης

Ο τοπικός συντελεστής σύμπλεξης ποσοτικοποιεί το κατά πόσο οι άμεσα συνδεδεμένοι κόμβοι με έναν υπό εξέταση κόμβο, συνδέονται και αυτοί μεταξύ τους. Ο τοπικός συντελεστής σύμπλεξης ενός κόμβου είναι ο λόγος του πλήθους των ζευγών των γειτονικών του κόμβων, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους, προς τον συνολικό αριθμό ζευγών των γειτονικών του κόμβων. Έτσι, είναι ένα μέτρο που δεν μπορεί να παραμετροποιηθεί κυκλοφοριακά, και συνεπώς η αξία του για τα δίκτυα Μεταφορών είναι περιορισμένη.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 67 – αριστερά, οι τιμές του τοπικού συντελεστή σύμπλεξης είναι μηδενικές στις περιπτώσεις όπου οι γειτονικοί κόμβοι του κόμβου που εξετάζεται δεν συνδέονται μεταξύ τους, δεν σχηματίζουν δηλαδή τρίγωνο. Αντιθέτως, οι λίγοι κόμβοι που παίρνουν τιμές >0, είναι αυτοί των οποίων οι γειτονικοί κόμβοι σχηματίζουν ένα ή παραπάνω τρίγωνα μεταξύ τους.



(α) Τιμές Τοπικού Συντελεστή Σύμπλεξης



(β) Κατάταξη κόμβων βάσει της σημαντικότητας που τους προσδίδεται από τον Τοπικό Συντελεστή Σύμπλεξης

**Εικόνα 64: Τοπικός Συντελεστής Σύμπλεξης στο δίκτυο Sioux Falls**

Οι χαμηλές ή μηδενικές τιμές του μέτρου αυτού για ένα κόμβο, σημαίνουν ότι αυτός ο κόμβος περιβάλλεται από κόμβους που χαρακτηρίζονται από έλλειψη συνδέσεων μεταξύ τους, και άρα η κυκλοφορία θα πρέπει υποχρεωτικά να εξυπηρετηθεί μέσω αυτού του κόμβου. Συνεπώς, ένας τέτοιος κόμβος θα ήταν ψηλά στην ιεράρχηση προστασίας και προσαρμογής, σε περιπτώσεις που κριθεί αναγκαία η εκκένωση ενός δικτύου Μεταφορών, τα κενά συνιστούν εμπόδιο στην αποτελεσματική ροή της κυκλοφορίας καθώς θα μειώνουν τον αριθμό των διαθέσιμων διαδρομών.

Σε κάθε περίπτωση, η εφαρμογή του μέτρου αυτού σε ένα δίκτυο του μεγέθους που εξετάζεται εδώ, δεν ενδείκνυται για ασφαλή συμπεράσματα αναφορικά με τη χρησιμότητα του. Ο μικρός αριθμός κόμβων, και άρα οι περιορισμένες περιπτώσεις συνδέσεων μεταξύ τους και δημιουργίας τριγώνων, οδηγεί σε κατάταξη όπως αυτή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 67 – δεξιά, όπου πέραν των λιγοστών κόμβων που παίρνουν τιμές διάφορες του

μηδενός (και βρίσκονται ψηλά στη σημαντικότητα), οι υπόλοιποι κόμβοι παίρνουν μηδενικές τιμές και καταλαμβάνουν μαζικά τις τελευταίες θέσεις κατάταξης. Ο Πίνακας 34 παρουσιάζει τις τιμές κατάταξης σημαντικότητας βάσει του Τοπικού Συντελεστή Σύμπλεξης(ΤΣΣυ) έναντι των προηγούμενων μέτρων που εξετάστηκαν. Λόγω του γεγονότος ότι ο ΤΣΣυ είναι ένα μέτρο αυστηρά γεωμετρικό, οποιαδήποτε περαιτέρω ανάλυση ή σύγκριση των αποτελεσμάτων εφαρμογής του στο δίκτυο Μεταφορών που εξετάζεται δεν είναι δυνατή.

**Πίνακας 34: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Τοπικού Συντελεστή Σύμπλεξης (ΤΣΣυ) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls**

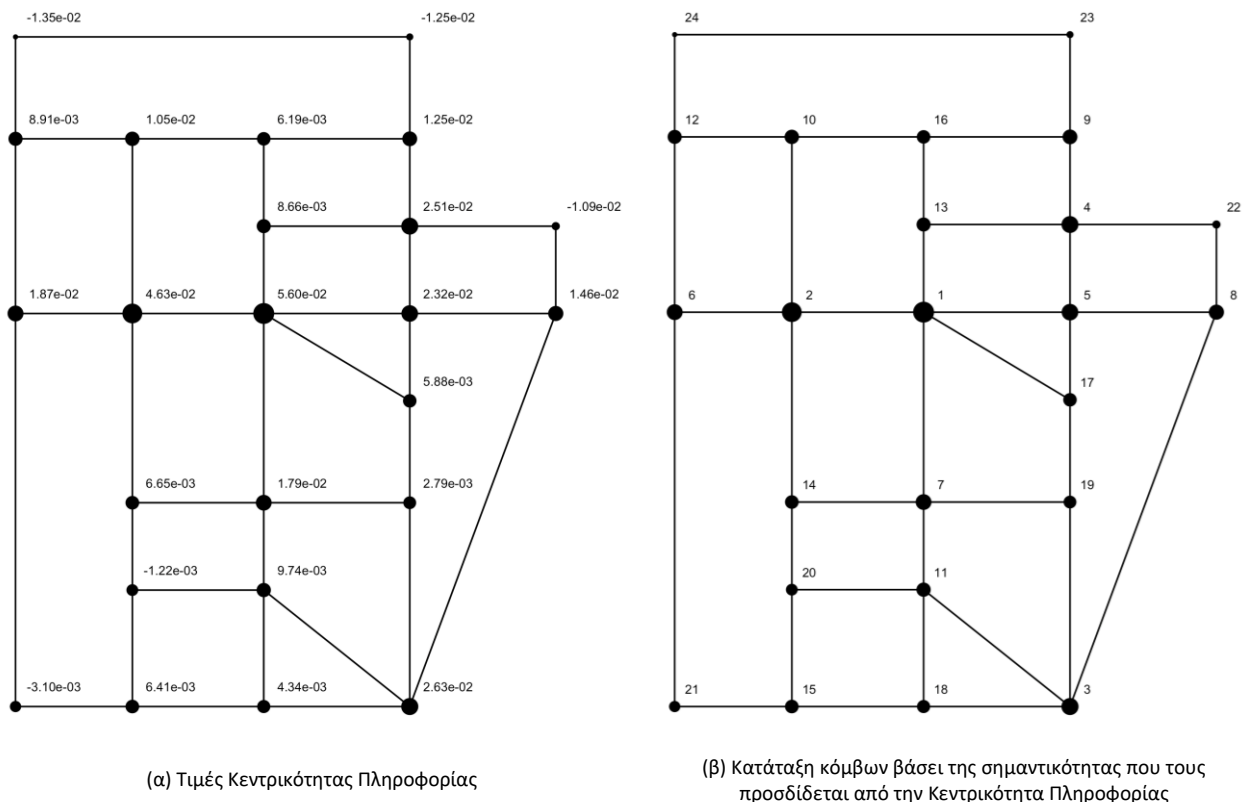
Κόμβος	ΚΒα	ΔΚο	ΚΕγ	ΚΕν	ΡΚΕν	ΤΣΣυ
1	21	24	23	23	23	7
2	21	23	22	21	21	7
3	8	19	20	16	14	7
4	8	17	12	9	10	7
5	8	12	7	5	5	7
6	8	20	14	12	11	7
7	21	21	19	22	22	7
8	2	9	9	8	8	7
9	8	7	2	3	3	7
10	1	1	1	1	1	6
11	2	3	3	4	4	7
12	8	16	13	19	18	7
13	21	22	24	24	24	7
14	8	10	10	11	13	7
15	2	2	4	2	2	7
16	2	4	6	6	6	3
17	8	5	5	10	9	1
18	8	15	16	20	20	7
19	8	8	8	13	12	7
20	2	13	18	18	17	3
21	8	18	17	17	19	1
22	2	6	11	7	7	3
23	8	11	15	14	16	7
24	8	14	21	15	15	7

#### 9.2.2.7. Κεντρικότητα πληροφορίας

Η κεντρικότητα πληροφορίας μετράει τη συμβολή κάθε κόμβου, στη διάδοση της κυκλοφορίας σε όλο το δίκτυο Μεταφορών. Ο τρόπος με τον οποίο ποσοτικοποιείται αυτή η συμβολή, είναι η εξέταση της συμπεριφοράς ενός δικτύου έπειτα από την απομάκρυνση του εκάστοτε εξεταζόμενου κόμβου. Αρχικά εξετάζεται η ικανότητα μετάδοσης οντοτήτων του δικτύου, αποτελούμενου από όλους τους κόμβους, και στη συνέχεια επαναλαμβάνεται η ίδια

διαδικασία απενεργοποιώντας κάθε φορά έναν κόμβο, με στόχο τον διάπαυσης υπολογισμό της συνεισφοράς του στο δίκτυο. Αντί της απόστασης των συντομότερων διαδρομών ως μέτρο υπολογισμού της αποτελεσματικότητας του δικτύου, προτείνεται και χρησιμοποιείται εδώ ο συνολικός χρόνος διέλευσης της αλληλουχίας των οδικών τμημάτων που συνιστούν τη συντομότερη διαδρομή (δηλαδή το άθροισμα των επιμέρους χρόνων διέλευσης των οδικών τμημάτων). Για τον επανυπολογισμό των χρόνων διέλευσης και των καθυστερήσεων στα οδικά τμήματα, έπειτα από αφαίρεση των τμημάτων που συνδέουν τον υπό εξέταση κόμβο με τους γειτονικούς του, έγινε εκ νέου καταμερισμός των μετακινήσεων στο δίκτυο.

Οι τιμές της Κεντρικότητας Πληροφορίας για τους κόμβους του δικτύου Sioux Falls απεικονίζονται στην Εικόνα 65 – αριστερά, και η κατάταξη της σημαντικότητας των κόμβων του δικτύου, βάσει αυτών των τιμών, απεικονίζεται στην Εικόνα 65 – δεξιά. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι σημαντικότεροι κόμβοι δεν είναι απαραίτητα συγκεντρωμένοι γύρω από το κέντρο του δικτύου, καθώς αρκετοί από τους σημαντικότερους κόμβους αποκλίνουν από αυτό.



**Εικόνα 65: Κεντρικότητα Πληροφορίας στο δίκτυο Sioux Falls**

Το γεγονός αυτό είναι εμφανές και στη συγκριτική ανάλυση με τα προηγούμενα μέτρα (Πίνακας 35), όπου κόμβοι γύρω από το κέντρο (ως Κέντρο νοείται ο κόμβος 10 και η γύρω Σελίδα 333 από 481

περιοχή), π.χ. οι κόμβοι 5, 9 και 15 δεν είναι στις υψηλές θέσεις σημαντικότητας. Επίσης ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι καταδεικνύονται ως σημαντικοί, και απαραίτητοι για την καλή (εδώ κανονική) λειτουργία του δικτύου, κόμβοι που σύμφωνα με προηγούμενα μέτρα καταλάμβαναν τις χαμηλότερες θέσεις σημαντικότητας, π.χ. ο κόμβος 20, στα άκρα του δικτύου.

**Πίνακας 35: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Κεντρικότητας Πληροφορίας (ΚΠΛ) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls**

Κόμβος	ΚΒα	ΔΚο	ΚΕγ	ΚΕν	ΡΚΕν	ΤΣΣυ	ΚΠΛ
1	21	24	23	23	23	7	24
2	21	23	22	21	21	7	23
3	8	19	20	16	14	7	12
4	8	17	12	9	10	7	10
5	8	12	7	5	5	7	16
6	8	20	14	12	11	7	9
7	21	21	19	22	22	7	22
8	2	9	9	8	8	7	4
9	8	7	2	3	3	7	13
10	1	1	1	1	1	6	1
11	2	3	3	4	4	7	2
12	8	16	13	19	18	7	6
13	21	22	24	24	24	7	21
14	8	10	10	11	13	7	14
15	2	2	4	2	2	7	7
16	2	4	6	6	6	3	5
17	8	5	5	10	9	1	17
18	8	15	16	20	20	7	8
19	8	8	8	13	12	7	19
20	2	13	18	18	17	3	3
21	8	18	17	17	19	1	18
22	2	6	11	7	7	3	11
23	8	11	15	14	16	7	20
24	8	14	21	15	15	7	15

Σε κάθε περίπτωση, η εφαρμογή της κεντρικότητας πληροφορίας στο δίκτυο, καταδεικνύει εκείνους τους κόμβους, των οποίων η μη λειτουργία, λόγω εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών, θα έχει τη μεγαλύτερη επίπτωση στην αποτελεσματικότητα του δικτύου, και άρα εκείνους τους κόμβους, των οποίων η διατήρηση λειτουργίας θα ήταν κρίσιμη. Το συγκεκριμένο μέτρο έχει (νοηματικά) μεγάλη αξία, καθώς με αυτή την αφαίρεση ενός κόμβου, προσομοιάζεται η ολική διακοπή λειτουργίας ενός κόμβου (λόγω π.χ. εμφάνισης ενός ΑΚΦ). Ωστόσο, η προσομοίωση αυτή είναι παράλληλα και

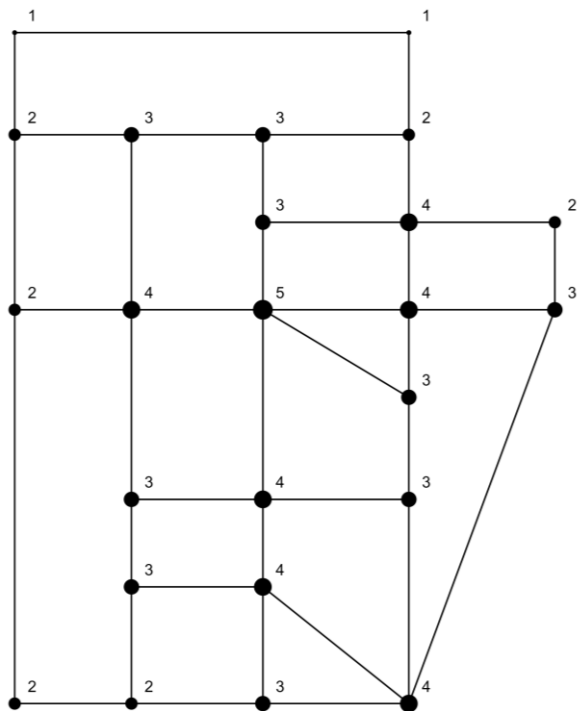
μη ρεαλιστική, καθώς η εμφάνιση ενός ΑΚΦ έχει πάντοτε χωρική διάσταση μεγαλύτερη ενός μοναδικού κόμβου, υπό την έννοια ότι αυτό επιδρά σε κάποιο πλήθος και όχι μόνο σε ένα κόμβο. Το Βήμα 2 της μεθοδολογικής προσέγγισης που περιγράφηκε στην Ενότητα 7.4.2 και εφαρμόζεται στην Ενότητα 9.3 στοχεύει ακριβώς στο να προσομοιώσει την Κεντρικότητα Πληροφορίας αναφορικά με την παράλληλη διακοπή λειτουργίας ενός πλήθους κόμβων σε δίκτυο Μεταφορών.

#### 9.2.2.8. Δείκτης $h$

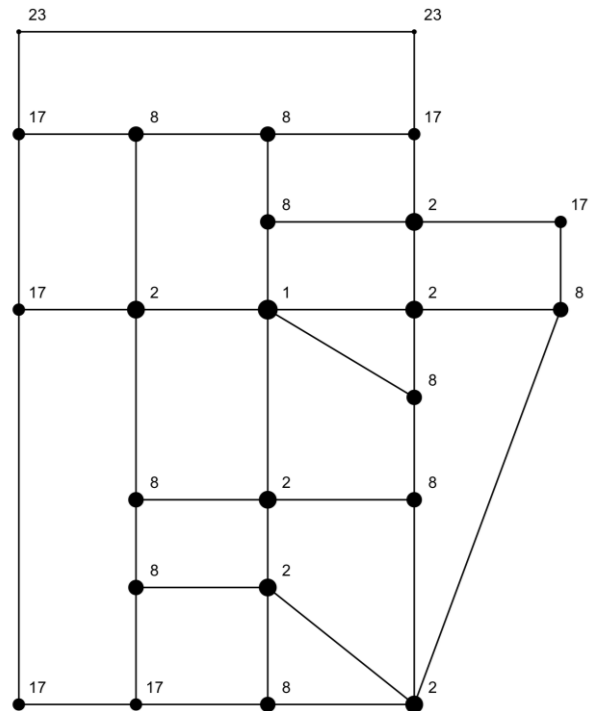
Ο Δείκτης  $h$  αναλύεται εδώ για να διερευνηθεί η δυνατότητα του να περιγράψει τη σημαντικότητα ενός κόμβου (=επιστήμονας) βάσει των κόμβων με τους οποίους συνδέεται (=δημοσιεύσεις), και από τους οποίους περνάει  $h$  αριθμός συντομότερων διαδρομών για όλα τα ζεύγη Π-Π ενός δικτύου. Υπενθυμίζεται εδώ, ότι ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται κανονικά για να ποσοτικοποιήσει τη σημαντικότητα των δημοσιεύσεων ενός επιστήμονα, με βάση τις ετεροαναφορές που δέχονται οι εργασίες του. Ένας επιστήμονας έχει δείκτη  $h$  όταν υπάρχουν  $h$  δημοσιεύσεις του, από τις οποίες η κάθε μία ετεροαναφέρεται από τουλάχιστον  $h$  δημοσιεύσεις. Σε παραλληλισμό με την παραπάνω περίπτωση χρήσης του δείκτη  $h$ , για την περίπτωση ενός δικτύου Μεταφορών, ο κόμβος θα παίζει τον ρόλο του επιστήμονα, οι γειτονικοί κόμβοι με τους οποίους συνδέεται θα είναι οι αντίστοιχες δημοσιεύσεις του, και οι συντομότερες διαδρομές που περνάν από αυτούς θα είναι οι αντίστοιχες ετεροαναφορές.

Έτσι, ένας αριθμός  $h < N_i$ , όπου  $N$  είναι ο αριθμός γειτονικών κόμβων του υπό εξέταση κόμβου  $i$ , θα σήμαινε ότι ο κόμβος περιβάλλεται από κόμβους, οι οποίοι δεν είναι απαραίτητα σημαντικοί (όπου η σημαντικότητα εδώ ορίζεται από τον αριθμό των συντομότερων διαδρομών που διέρχονται από ένα κόμβο). Για τον υπολογισμό των συντομότερων διαδρομών γίνεται και σε αυτό το μέτρο χρήση των χρόνων διέλευσης των οδικών τμημάτων.

Η Εικόνα 66 – αριστερά αποτυπώνει τις τιμές του Δείκτη  $h$  για τους κόμβους του δικτύου Sioux Falls και η Εικόνα 66 – δεξιά περιλαμβάνει την κατάταξη σημαντικότητας των κόμβων βάσει αυτών των τιμών.



(α) Τιμές Δείκτη  $h$



(β) Κατάταξη κόμβων βάσει της σημαντικότητας που τους προσδίδεται από τον Δείκτη  $h$

**Εικόνα 66: Δείκτης  $h$  στο δίκτυο Sioux Falls**

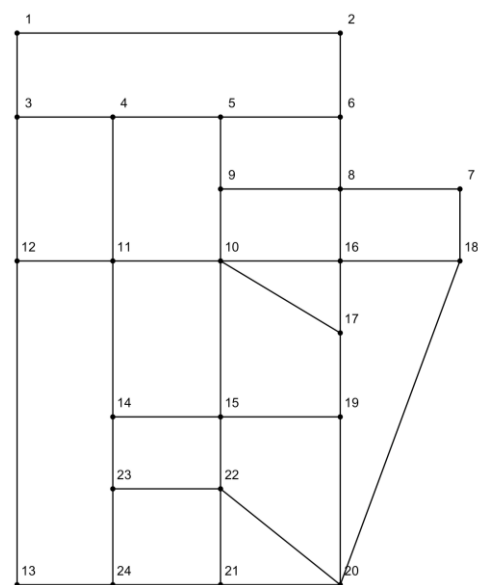
Η εφαρμογή του Δείκτη  $h$  σε ένα δίκτυο Μεταφορών δεν φαίνεται να είναι άξια λόγου, καθώς λόγω της εύρεσης ισορροπίας κατά τη διαδικασία του καταμερισμού των μετακινήσεων, δημιουργείται μεγάλος αριθμός διαδρομών ίσου και ελάχιστου κόστους, και συνεπώς, ο Δείκτης  $h$  θα παίρνει ίσες και παρόμοιες τιμές σε πολλές περιπτώσεις (όπως και φαίνεται στην Εικόνα 66 – αριστερά). Έτσι, η σημαντικότητα, και η διαφοροποίηση αυτής ανά κόμβο δικτύου Μεταφορών δεν θα είναι εφικτή.

Πρακτικά, ο Δείκτης  $h$ , έτσι όπως προτείνεται να εφαρμοστεί, καταλήγει σε παρόμοια αποτελέσματα αποτίμησης της σημαντικότητας με την Κεντρικότητα Βαθμού (Πίνακας 36), όπου πρακτικά ο δείκτης  $h$  ισούται με τον αριθμό των γειτονικών κόμβων (καθώς λόγω πλήθους διαδρομών, θα είναι ελάχιστες οι περιπτώσεις όπου  $h < N_i$ ).



Πίνακας 36: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Δείκτη  $h$  ( $\Delta h$ ) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls

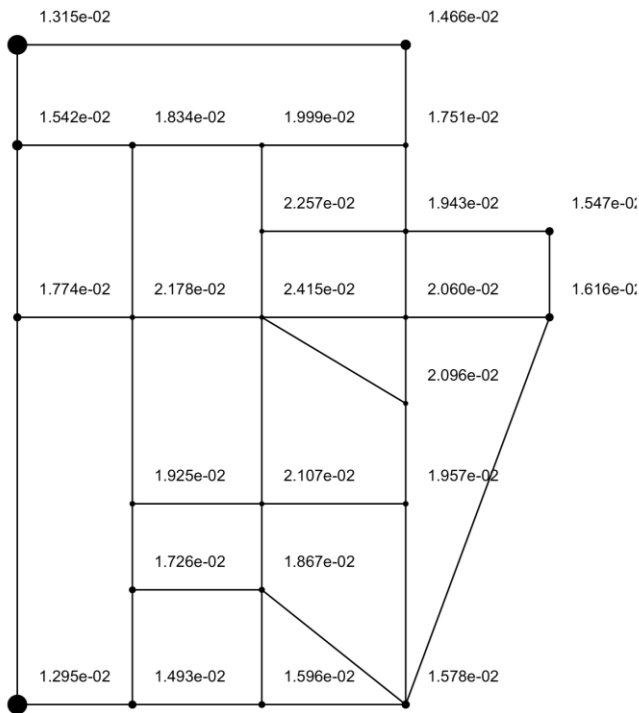
Κόμβος	ΚΒα	ΔΚο	ΚΕγ	ΚΕν	ΡΚΕν	ΤΣΣυ	ΚΠΛ	$\Delta h$
1	21	24	23	23	23	7	24	23
2	21	23	22	21	21	7	23	23
3	8	19	20	16	14	7	12	17
4	8	17	12	9	10	7	10	8
5	8	12	7	5	5	7	16	8
6	8	20	14	12	11	7	9	17
7	21	21	19	22	22	7	22	17
8	2	9	9	8	8	7	4	2
9	8	7	2	3	3	7	13	8
10	1	1	1	1	1	6	1	1
11	2	3	3	4	4	7	2	2
12	8	16	13	19	18	7	6	17
13	21	22	24	24	24	7	21	17
14	8	10	10	11	13	7	14	8
15	2	2	4	2	2	7	7	2
16	2	4	6	6	6	3	5	2
17	8	5	5	10	9	1	17	8
18	8	15	16	20	20	7	8	8
19	8	8	8	13	12	7	19	8
20	2	13	18	18	17	3	3	2
21	8	18	17	17	19	1	18	8
22	2	6	11	7	7	3	11	2
23	8	11	15	14	16	7	20	8
24	8	14	21	15	15	7	15	17



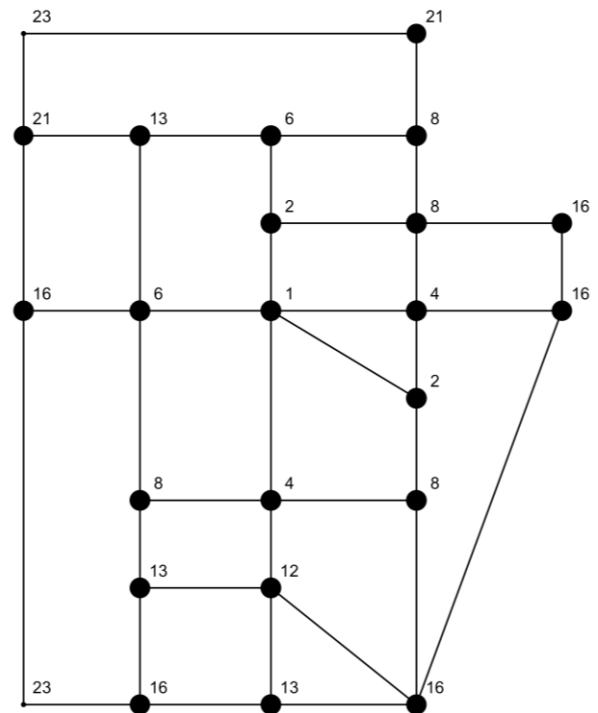
### 9.2.2.9. Ιεραρχικός βαθμός

Ο Ιεραρχικός Βαθμός υπολογίζει τον αριθμό των προσβάσιμων κόμβων από έναν κόμβο εκκίνησης μέσω διαδρομών μήκους  $h$ . Αντί για το μήκος  $h$ , γίνεται εδώ χρήση του χρόνου  $t$ , και αντίστοιχος υπολογισμός του αριθμού των κόμβων σε ένα δίκτυο που θα είναι προσβάσιμος από ένα σημείο εκκίνησης μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα  $t$ . Για την περίπτωση του δικτύου Sioux Falls, ο χρόνος  $t$  ορίστηκε στα 2 λεπτά, και οι τιμές του ιεραρχικού βαθμού για τους κόμβους του δικτύου απεικονίζονται στην Εικόνα 67 – αριστερά. Οι τιμές που φαίνονται σχετίζονται με τη μαθηματική διατύπωση του μέτρου (για αυτό και δεν είναι ακέραιοι αριθμοί).

Όπως φαίνεται από την κατάταξη των κόμβων βάσει της σημαντικότητας που τους προσδίδεται από το μέτρο αυτό (Εικόνα 67 – δεξιά), οι καλύτερα προσβάσιμοι κόμβοι (λόγω γεωγραφίας του δικτύου) από άλλους κόμβους, βρίσκονται στο γεωγραφικό κέντρο του δικτύου.



(α) Τιμές Ιεραρχικού βαθμού



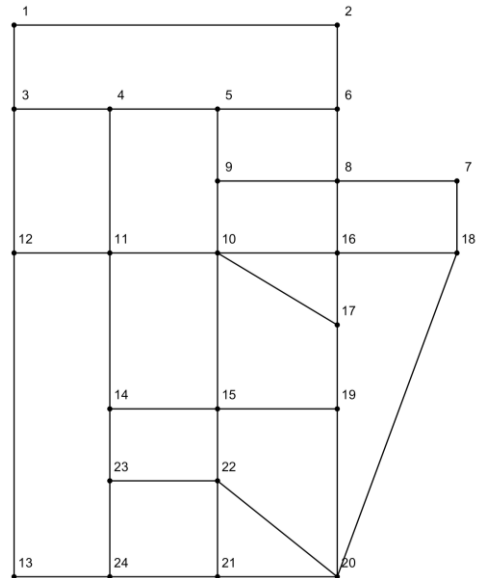
(β) Κατάταξη κόμβων βάσει της σημαντικότητας που τους προσδίδεται από τον Ιεραρχικό Βαθμό

**Εικόνα 67: Ιεραρχικός βαθμός στο δίκτυο Sioux Falls**

Συνολικά, η αποτίμηση σημαντικότητας βάσει Ιεραρχικού Βαθμού φαίνεται να είναι σύμφωνη σε πολλές περιπτώσεις (με μικρές διαφοροποιήσεις) με την Κεντρικότητα Εγγύτητας (υπενθυμίζεται εδώ ότι οι σημαντικότεροι κόμβοι είναι αυτοί από τους οποίους οι συνολικοί χρόνοι πρόσβασης για όλους τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου είναι οι μικρότεροι). Πράγματι, πλην μικρών εξαιρέσεων (Πίνακας 37), ο ιεραρχικός βαθμός δίνει παρόμοια αποτελέσματα με αυτά της Κεντρικότητας Εγγύτητας. Η διαφορά εδώ έγκειται στο πλήθος των κόμβων που είναι προσβάσιμοι εκκινώντας από έναν κόμβο, και που ορίζεται από την εκάστοτε εφαρμογή (εδώ με τυχαία επιλογή στα 2 λεπτά).

Πίνακας 37: Σειρά κατάταξης σημαντικότητας βάσει Ιεραρχικού Βαθμού (ΙΒα) και κόμβοι Δικτύου Sioux Falls

Κόμβος	ΚΒα	ΔΚο	ΚΕγ	ΚΕν	ΡΚΕν	ΤΣΣυ	ΚΠΛ	ΔΗ	ΙΒα
1	21	24	23	23	23	7	24	23	23
2	21	23	22	21	21	7	23	23	21
3	8	19	20	16	14	7	12	17	21
4	8	17	12	9	10	7	10	8	13
5	8	12	7	5	5	7	16	8	6
6	8	20	14	12	11	7	9	17	8
7	21	21	19	22	22	7	22	17	16
8	2	9	9	8	8	7	4	2	8
9	8	7	2	3	3	7	13	8	2
10	1	1	1	1	1	6	1	1	1
11	2	3	3	4	4	7	2	2	6
12	8	16	13	19	18	7	6	17	16
13	21	22	24	24	24	7	21	17	23
14	8	10	10	11	13	7	14	8	8
15	2	2	4	2	2	7	7	2	4
16	2	4	6	6	6	3	5	2	4
17	8	5	5	10	9	1	17	8	2
18	8	15	16	20	20	7	8	8	16
19	8	8	8	13	12	7	19	8	8
20	2	13	18	18	17	3	3	2	16
21	8	18	17	17	19	1	18	8	13
22	2	6	11	7	7	3	11	2	12
23	8	11	15	14	16	7	20	8	13
24	8	14	21	15	15	7	15	17	16



Σημειώνεται επίσης, ότι το μέτρο αυτό έχει μια πρόσθετη χρησιμότητα, καθώς μέσω αυτού, μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός των κόμβων σε ένα δίκτυο που θα είναι προσβάσιμος από ένα σημείο εκκίνησης μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα  $t$ , και συνεπώς το ποσοστό του δικτύου που μπορεί να καλυφθεί εντός κάποιου αποδεκτού χρόνου  $t$ . Έτσι, ένα τέτοιο μέτρο κρίνεται ότι θα είχε ιδιαίτερη σημασία για τη διαχείριση ακραίων καιρικών φαινομένων (αλλά και άλλων συμβάντων) σε επίπεδο σχεδιασμού, π.χ. για την χωροθέτηση οχημάτων έκτακτης ανάγκης, καθώς οι αρχές θα μπορούσαν να γνωρίζουν το ποσοστό του δικτύου που θα μπορούσαν να καλύψουν εντός κάποιου αποδεκτού χρόνου  $t$ .

### 9.2.3. Ανάλυση δυνατότητας εφαρμοσιμότητας και χρησιμότητας

Στην Ενότητα αυτή επιχειρείται μία συνολικότερη αποτίμηση της εφαρμογής των επιμέρους μέτρων στο πειραματικό δίκτυο που επιλέχθηκε, και μια ανάλυση της σημαντικότητας που προσδίδουν στο δίκτυο.

Αρχικά ο Πίνακας 38 παρουσιάζει μια στατιστική ανάλυση της σημαντικότητας των κόμβων του δικτύου Sioux Falls, επιμέρους για κάθε κόμβο ως προς κάθε μέτρο, αλλά και συνολικά τη θέση σημαντικότητας του κόμβου ως προς όλα τα μέτρα. Παρουσιάζεται έτσι η χαμηλότερη και υψηλότερη θέση κατάταξης του κόμβου στο Δίκτυο, η διάμεση τιμή κατάταξης, και ο μέσος όρος κατάταξης (όλες οι τιμές είναι σύμφωνα με την κλίμακα 1 έως 24 – με το 1 να είναι το σημαντικότερο και το 24 το λιγότερο σημαντικό).

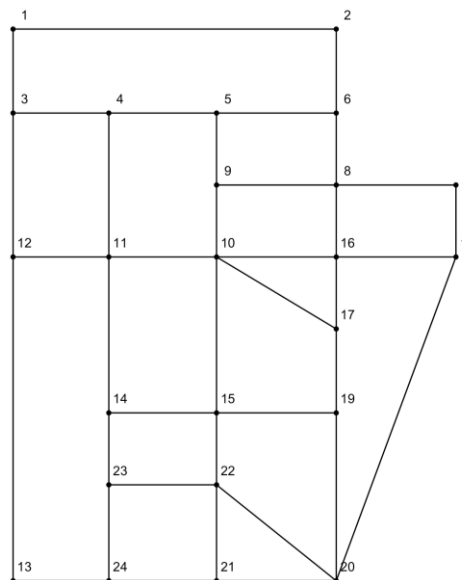
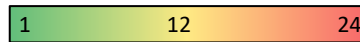
Πίνακας 38: Στατιστική ανάλυση κατάταξης σημαντικότητας κόμβων δικτύου Sioux Falls

Κόμβος	ΚΒα	ΔΚο	ΚΕγ	ΚΕν	ΡΚΕν	ΤΣΣυ	ΚΠΛ	ΔΗ	ΙΒα	Υψηλότερη	Χαμηλότερη	Διάμεσος	Μ.Ο.
1	21	24	23	23	23	7	24	23	23	7	24	23	21.22
2	21	23	22	21	21	7	23	23	21	7	23	21	20.22
3	8	19	20	16	14	7	12	17	21	7	21	16	14.89
4	8	17	12	9	10	7	10	8	13	7	17	10	10.44
5	8	12	7	5	5	7	16	8	6	5	16	7	8.22
6	8	20	14	12	11	7	9	17	8	7	20	11	11.78
7	21	21	19	22	22	7	22	17	16	7	22	21	18.56
8	2	9	9	8	8	7	4	2	8	2	9	8	6.33
9	8	7	2	3	3	7	13	8	2	2	13	7	5.89
10	1	1	1	1	1	6	1	1	1	1	6	1	1.56
11	2	3	3	4	4	7	2	2	6	2	7	3	3.67
12	8	16	13	19	18	7	6	17	16	6	19	16	13.33
13	21	22	24	24	24	7	21	17	23	7	24	22	20.33
14	8	10	10	11	13	7	14	8	8	7	14	10	9.89
15	2	2	4	2	2	7	7	2	4	2	7	2	3.56
16	2	4	6	6	6	3	5	2	4	2	6	4	4.22
17	8	5	5	10	9	1	17	8	2	1	17	8	7.22
18	8	15	16	20	20	7	8	8	16	7	20	15	13.11
19	8	8	8	13	12	7	19	8	8	7	19	8	10.11
20	2	13	18	18	17	3	3	2	16	2	18	13	10.22
21	8	18	17	17	19	1	18	8	13	1	19	17	13.22
22	2	6	11	7	7	3	11	2	12	2	12	7	6.78
23	8	11	15	14	16	7	20	8	13	7	20	13	12.44
24	8	14	21	15	15	7	15	17	16	7	21	15	14.22

Αν χαρτογραφηθεί ο παραπάνω Πίνακας σε μορφή χάρτη 'θερμότητας' (heat map) προκύπτει η Εικόνα 68, όπου με χρωματική διαβάθμιση από το πράσινο προς το κόκκινο χρώμα

απεικονίζονται οι σημαντικότεροι κόμβοι στο δίκτυο. Φαίνεται έτσι ότι με σχετικά απλό τρόπο το εύρος της σημαντικότητας των κόμβων του δικτύου σύμφωνα με όλα τα μέτρα (ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι κόμβοι 9, 10, 11, 15 και 16 συγκεντρώνουν τις υψηλότερες θέσεις σημαντικότητας σύμφωνα με την πλειονότητα των μέτρων).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ΚΒα	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
ΔΚο	Red	Red	Orange	Orange	Yellow	Orange	Orange	Green	Green	Green	Green	Orange	Red	Green	Green	Green	Green	Orange	Green	Yellow	Orange	Green	Yellow	Green
Κεγ	Red	Red	Orange	Yellow	Green	Yellow	Orange	Green	Green	Green	Green	Yellow	Red	Green	Green	Green	Green	Orange	Green	Orange	Yellow	Yellow	Orange	Red
Κεν	Red	Red	Orange	Green	Green	Yellow	Red	Green	Green	Green	Green	Orange	Red	Yellow	Green	Green	Green	Orange	Yellow	Orange	Orange	Green	Yellow	Orange
ΡΚΕν	Red	Red	Yellow	Green	Green	Yellow	Red	Green	Green	Green	Green	Orange	Red	Yellow	Green	Green	Green	Orange	Yellow	Orange	Orange	Green	Orange	Orange
ΤΣΣυ	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Green	Red	Red
ΚΠΛ	Red	Red	Yellow	Green	Green	Orange	Red	Green	Yellow	Green	Green	Green	Orange	Yellow	Green	Green	Orange	Green	Orange	Green	Orange	Yellow	Orange	Orange
Δh	Red	Red	Orange	Green	Green	Orange	Orange	Green	Green	Green	Green	Orange	Orange	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Orange
ΙΒα	Red	Red	Red	Yellow	Green	Green	Orange	Green	Green	Green	Green	Orange	Red	Green	Green	Green	Green	Orange	Green	Orange	Yellow	Yellow	Yellow	Orange



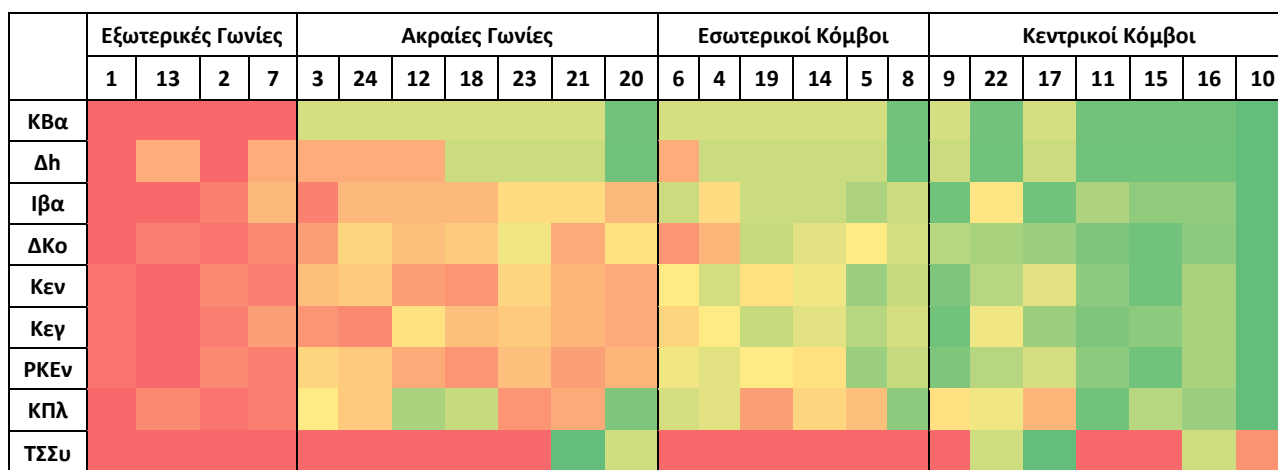
Εικόνα 68: Χαρτογράφηση σημαντικότητας των κόμβων του δικτύου Sioux Falls και δίκτυο Sioux Falls

Σύμφωνα με την Εικόνα 68 και το διάγραμμα του δικτύου, προκύπτει επίσης ότι *εξωτερικές γωνίες* (κόμβοι 1, 2, 7 και 13) έχουν ιδιαίτερως χαμηλή κατάταξη σημαντικότητας σε όλους τους δείκτες. Το γεγονός αυτό εξηγείται από τη θέση τους στο δίκτυο: είναι οι άκρες του δικτύου με μόνο 2 συνδέσεις. Για τις *επονομαζόμενες εδώ ακραίες γωνίες* (τους κόμβους δηλαδή 3, 12, 18, 20, 21, 23 και 24) προκύπτει ότι έχουν χαμηλή κατάταξη σημαντικότητας σε πολλούς δείκτες, αλλά καλύτερη αυτής των εξωτερικών γωνιών, καθώς παρόλο που είναι και αυτές άκρες του δικτύου, έχουν 3 συνδέσεις με γειτονικούς κόμβους. Προκύπτει επίσης ότι οι *εσωτερικές γωνίες* (οι κόμβοι δηλαδή 4, 5, 6, 8, 14, και 19) έχουν μέτρια κατάταξη σημαντικότητας βάσει της πλειονότητας των μέτρων, καθώς παρόλο που συνδέονται με 3

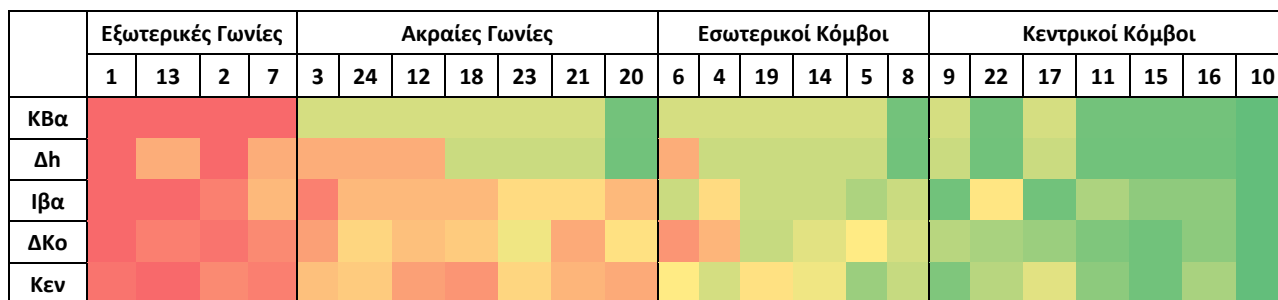
συνδέσεις με γειτονικούς κόμβους, δεν είναι χωροθετημένοι στη μέση. Σε ό,τι αφορά τους *κεντρικούς κόμβους* (τους κόμβους δηλαδή 9, 10, 11, 15, 16, 17 και 22), αυτοί έχουν υψηλή κατάταξη σημαντικότητας βάσει της πλειονότητας των μέτρων, καθώς είναι τα κεντρικά σημεία του δικτύου με 3 ή και παραπάνω συνδέσεις.

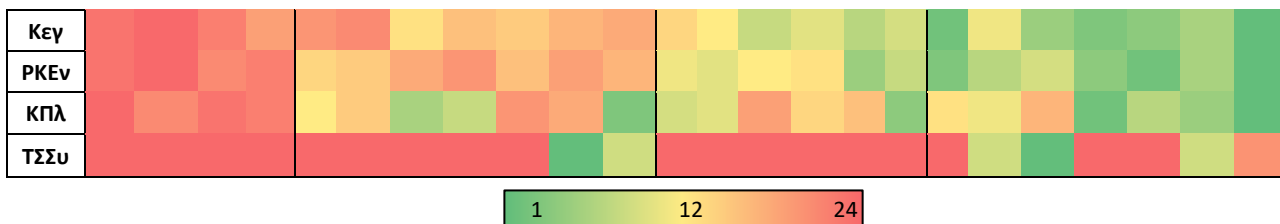
Σύμφωνα επίσης με τη χαρτογράφηση αυτή στην Εικόνα 68, αλλά σε επίπεδο εξεταζόμενων μέτρων, προκύπτει ότι η Κεντρικότητα Βαθμού (ΚΒα), που ορίζει το πλήθος των γειτονικών κόμβων με τον υπό εξέταση κόμβο, προσδίδει τη χαμηλότερη σημαντικότητα στις *εξωτερικές γωνίες* σε σχέση με το υπόλοιπο δίκτυο. Αντίστοιχα, ο Τοπικός Συντελεστής Σύμπλεξης (ΤΣΣ) ορίζει τις δύο τριγωνικές γεωμετρίες του δικτύου (κόμβοι 10-16-17 και 20-21-22), ένδειξη καλά συνδεδεμένων περιοχών. Φαίνεται όμως και η χαμηλής αξίας χρησιμότητα του ΤΣΣ, γεγονός που αναδείχθηκε και στην Ενότητα 9.2.2.6, καθώς η αποτίμηση σημαντικότητας δεν ακολουθεί τα μοτίβα των υπολοίπων μέτρων.

Εάν ο Πίνακας 38 οργανωθεί τώρα σύμφωνα με τις παραπάνω παρατηρήσεις και στην ίδια κατεύθυνση με την Εικόνα 68, προκύπτει η



Εικόνα 69. Όπως φαίνεται, η χαμηλότερη σημαντικότητα αποδίδεται κατά σειρά στις εξωτερικές και στις ακραίες γωνίες, και στη συνέχεια η υψηλότερη σημαντικότητα κατά σειρά στους εσωτερικούς και τους κεντρικούς κόμβους αντίστοιχα.



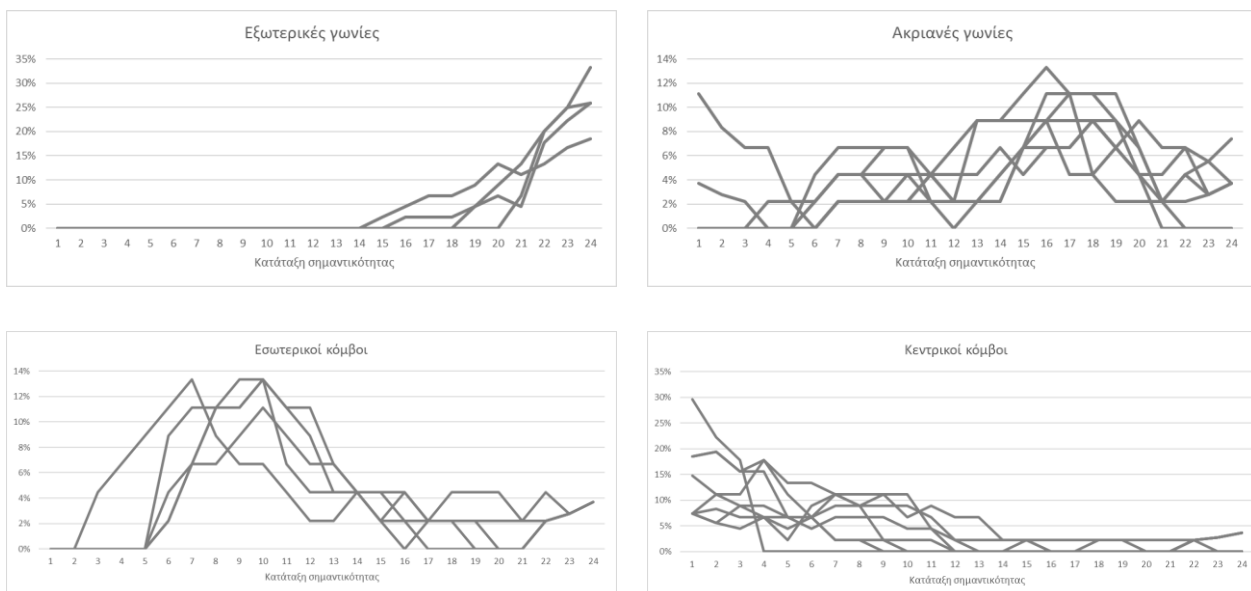


**Εικόνα 69: Χαρτογράφηση σημαντικότητας των κόμβων του δικτύου Sioux Falls βάσει θέσης κόμβων**

Εξετάζοντας τώρα τις 4 αυτές επιμέρους περιοχές του δικτύου, προκύπτουν τα διαγράμματα στην Εικόνα 70. Για κάθε περιοχή, απεικονίζεται η πιθανότητα εμφάνισης (σε % - Άξονας Υ) στην αντίστοιχη κατάταξη σημαντικότητας (από 1 έως 24 – Άξονας Χ), για κάθε έναν από τους κόμβους που εμπεριέχονται στην περιοχή αυτή (γραμμές του διαγράμματος). Έτσι το διάγραμμα που αφορά στις εξωτερικές γωνίες θα έχει 4 γραμμές, το αντίστοιχο για τις ακριανές γωνίες θα έχει 7 γραμμές, κ.ο.κ.

Όπως φαίνεται, οι εξωτερικές γωνίες έχουν υψηλή πιθανότητα εμφάνισης στις χαμηλές θέσεις κατάταξης της σημαντικότητας, παρατήρηση εκ διαμέτρου αντίθετη με αυτή για τους κεντρικούς κόμβους, που καταλαμβάνουν τις υψηλές θέσεις κατάταξης.

Η πιθανότητα εμφάνισης σε διάφορες θέσεις σημαντικότητας έχει μεγαλύτερη διασπορά για τις ακριανές γωνίες που μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο σημαντικές, ενώ για τους εσωτερικούς κόμβους φαίνεται μια τάση υψηλότερης πιθανότητας εμφάνισης στις υψηλές προς μέτριες θέσεις σημαντικότητας.



**Εικόνα 70: Πιθανότητα εμφάνισης σε θέση κατάταξης (μ.ο.) ανά κόμβο και περιοχή του δικτύου**

Η παραπάνω κατηγοριοποίηση του δικτύου σε περιοχές, και η ανάλυση σύμφωνα με αυτή, είναι δυνητικά ένα σημαντικό εργαλείο ταχείας αποτίμησης της σημαντικότητας περιοχών

ενός δικτύου, και όχι μεμονωμένων κόμβων. Επειδή όμως τα μέτρα που χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση αυτής της σημαντικότητας είναι παραμετροποιημένα με κυκλοφοριακά στοιχεία, η εφαρμογή του εργαλείου αυτού σε άλλα δίκτυα χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

#### **9.2.4. Δέσμη μέτρων για αποτίμηση σημαντικότητας**

Σύμφωνα με την ανάλυση της σημαντικότητας που προσδίδεται στους κόμβους του δικτύου που εξετάζεται, και η οποία παρουσιάστηκε σε επίπεδο μέτρων στην Ενότητα 9.2.2 και σε επίπεδο περιοχών δικτύου και επιμέρους κόμβων στην Ενότητα 9.2.3, προκύπτει ο επικαιροποιημένος Πίνακας 39.

Έναντι των μέτρων που περιλαμβάνει ο Πίνακας 27 στην Ενότητα 9.2.1, και τα οποία διερευνήθηκαν, ο Πίνακας 39 περιγράφει την τελική δέσμη μέτρων που προτείνονται προς χρήση για την αποτίμηση σημαντικότητας των δικτύων Μεταφορών, με την αντίστοιχη παραμετροποίηση τους.

Έτσι, ο Πίνακας 39 δεν περιλαμβάνει:

- μέτρα αυστηρά γεωμετρικού χαρακτήρα, στη μαθηματική διατύπωση των οποίων δεν μπορούν να υπεισέλθουν κυκλοφοριακές παράμετροι. Δηλαδή παραλείπει την Κεντρικότητα Βαθμού και τον Τοπικό Συντελεστή Σύμπλεξης,
- μέτρα των οποίων η αποτίμηση σημαντικότητας είναι παρόμοια με άλλα, δηλαδή η Ροή Κεντρικότητας Ενδιαμέσου που φέρνει αντίστοιχα αποτελέσματα με την Κεντρικότητα Ενδιαμέσου, και ο Ιεραρχικός Βαθμός με την Κεντρικότητα Εγγύτητας, και
- μέτρα των οποίων η επαναδιατύπωση με κυκλοφοριακούς όρους και εφαρμογή δεν απέφερε αξιόλογο αποτελέσματα αποτίμησης της σημαντικότητας, δηλαδή ο Δείκτης h.



Πίνακας 39: Τελική δέσμη μέτρων αποτίμησης σημαντικότητας κόμβων δικτύων Μεταφορών

Μέτρο ή εργαλείο ανάλυσης από τη Θεωρία Δικτύων	Εισήγηση διερεύνησης	Υπόθεση χρήσης	Επαναδιατύπωση	Αναλυτική έκφραση
<b>Δύναμη κόμβου</b>	Θετική	Για να καταδείξει τους κόμβους για τους οποίους το σύνολο των κυκλοφοριακών φόρτων που ξεκινούν, καταλήγουν ή διέρχονται μέσω αυτών είναι οι μεγαλύτεροι συγκριτικά με άλλους, και άρα οι σημαντικότεροι.	Με θεώρηση του 'βάρους' ενός τόξου τμήματος, τον όγκο του κυκλοφοριακού φόρτου που εξυπηρετείται από αυτό.	$S_i = \sum_j^N w_{ij}$
<b>Κεντρικότητα εγγύτητας</b>	Θετική	Για να καταδείξει τους κόμβους για τους οποίους οι χρόνοι σύνδεσης τους με όλους τους υπόλοιπους κόμβους ενός δικτύου, είναι οι μικρότεροι, και άρα οι σημαντικότεροι.	Αντί για τη χρήση της απόστασης για την εύρεση και τον υπολογισμό των κοντινότερων αποστάσεων από κόμβο σε κόμβο, χρήση του χρόνου διάνυσης $t$ ενός οδικού τμήματος, όπως προκύπτει έπειτα από τον καταμερισμό των μετακινήσεων στο δίκτυο	$Cl_i = \frac{1}{\sum_j d(i, j)}$
<b>Κεντρικότητα ενδιαμέσου</b>	Θετική	Για να καταδείξει τους κόμβους εκείνους σε ένα δίκτυο που, επειδή εξυπηρετούν το μεγαλύτερο αριθμό κοντινότερων διαδρομών, είναι σημαντικοί για τη λειτουργία του δικτύου, και άρα πιθανά μέτρα προσαρμογής σε ακραία καιρικά φαινόμενα καθώς και μέτρα μείωσης της τρωτότητας θα μπορούσαν να κατευθυνθούν σε αυτούς.	Αντί για τη χρήση της απόστασης, μπορεί και πάλι να γίνει χρήση του χρόνου διάνυσης $t$ ενός οδικού τμήματος, όπως προκύπτει έπειτα από τον καταμερισμό των μετακινήσεων στο δίκτυο, για τον υπολογισμό και την εύρεση κοντινότερων διαδρομών μεταξύ δύο κόμβων	$g(U) = \sum_{s \neq u \neq t} \frac{\sigma_{st}(u)}{\sigma_{st}}$
<b>Κεντρικότητα πληροφορίας</b>	Θετική	Για να καταδείξει τους κόμβους, των οποίων η μη λειτουργία θα είχε τη μεγαλύτερη επίπτωση στην αποτελεσματικότητα του δικτύου. Δηλαδή τους κόμβους των οποίων η διατήρηση λειτουργίας θα ήταν απαραίτητη.	Αντί της απόστασης των συντομότερων διαδρομών ως μέτρο υπολογισμού της αποτελεσματικότητας του δικτύου, χρήση του χρόνου διάνυσης συνολικά και της συνολικής χρονικής καθυστέρησης της αλληλουχίας των οδικών τμημάτων που συνιστούν τη συντομότερη διαδρομή. Για τον επανυπολογισμό των χρόνων διέλευσης και των καθυστερήσεων στα οδικά τμήματα, έπειτα από την αφαίρεση από το δίκτυο των τμημάτων που συνδέουν τον υπό εξέταση κόμβο με τους γειτονικούς του κόμβους, γίνεται εκ νέου καταμερισμός των μετακινήσεων στο δίκτυο	$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}}$ $C_i = \frac{\Delta E}{E} = \frac{E(G) - E(G')}{E(G)}$

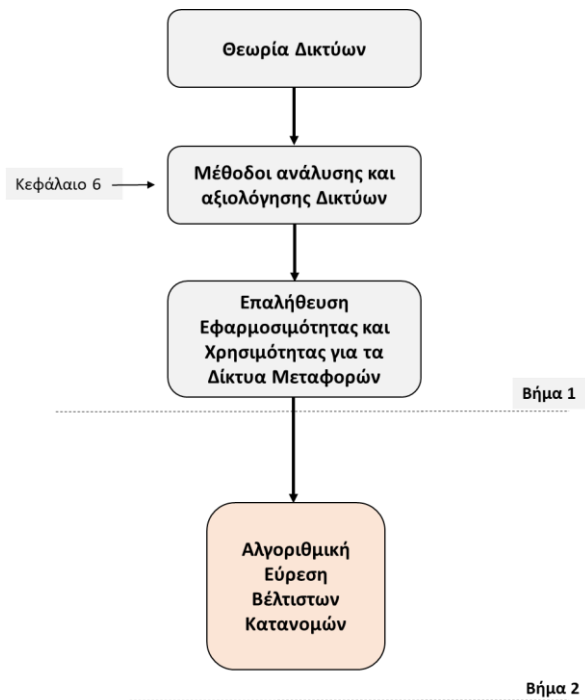
Η δέσμη των μέτρων αυτών θα εξεταστεί στο επόμενο Βήμα (Βήμα 2 του 2<sup>ου</sup> επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης) αναφορικά με τη διερεύνηση των τιμών των επιμέρους μέτρων και της κατανομής τους, ως ένδειξη της ανθεκτικότητας ενός δικτύου στην εμφάνιση ΑΚΦ.

### 9.3. Αλγοριθμική εύρεση βέλτιστων κατανομών των τιμών

Η αλγοριθμική εύρεση βέλτιστων κατανομών των τιμών των μέτρων στα οποία κατέληξε το προηγούμενο βήμα της μεθοδολογίας αποτελεί το δεύτερο βήμα του δευτέρου επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης της διδακτορικής διατριβής.

Υπενθυμίζεται ότι στο βήμα αυτό, σκοπός είναι η εύρεση μοτίβων στις κατανομές των τιμών των μέτρων που συγκεντρώθηκαν στο προηγούμενο βήμα, τα οποία θα μπορούσαν να καταδείξουν την ανθεκτικότητα ή όχι

ενός δικτύου. Πρακτικά, το ερώτημα που θα απαντηθεί μέσω αυτού του βήματος είναι, αν μπορούν τα μέτρα αυτά να παράσχουν μέσω των αριθμητικών τιμών τους, πληροφορίες για το πόσο απρόσκοπτα, σε σχέση με τις κανονικές συνθήκες, θα μπορούσε να λειτουργήσει ένα δίκτυο Μεταφορών όταν υφίσταται αλλαγές (υπό την έννοια ότι κάποια από τα στοιχεία του είναι δυνατόν να χάσουν την λειτουργικότητά τους κατά την περίπτωση εκδήλωσης ΑΚΦ). Δηλαδή μέσω αυτού του βήματος, γίνεται μια προσπάθεια να κατανοηθεί σε βάθος αν μέσω των κατανομών των τιμών των μέτρων αυτών για τα επιμέρους στοιχεία ενός δικτύου Μεταφορών μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την ανθεκτικότητά του (π.χ. ένα δίκτυο, του οποίου οι κόμβοι παίρνουν τιμές κεντρικότητας εγγύτητας με κατανομή Poisson είναι λιγότερο ανθεκτικό από ένα δίκτυο που οι αντίστοιχες τιμές έχουν εκθετική κατανομή).



### **9.3.1. Βασικές πτυχές αλγοριθμικής εφαρμογής**

Για να μπορέσει να εξαχθεί ένα ασφαλές συμπέρασμα του αν και κατά πόσο οι κατανομές των τιμών των μέτρων που προέρχονται από τη Θεωρία Δικτύων, προσαρμοσμένων σε κυκλοφοριακούς όρους, μπορούν να αποτιμήσουν την ανθεκτικότητα ενός δικτύου Μεταφορών, αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε στην Ενότητα 7.4.2 μια συστηματική διαδικασία υπολογισμού υπό τη μορφή αλγορίθμου. Στην ενότητα αυτή γίνεται εφαρμογή αυτού του αλγορίθμου.

Πριν την εφαρμογή αυτή, υπενθυμίζονται παρακάτω οι δύο βασικότερες πτυχές της όλης προσέγγισης:

1. Αφενός για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας του δικτύου, σε περιπτώσεις αλλαγών της δομής του έναντι κανονικών συνθηκών, ακολουθείται η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε κατά την βιβλιογραφική επισκόπηση και αφορά στην 'αφαίρεση' στοιχείων από το δίκτυο (βλέπε και Ενότητες 6.16 και 6.21) και κατόπιν σύγκριση κάποιων δεικτών που υπολογίζονται για τα δύο δίκτυα: το κανονικό, και αυτό που προκύπτει έπειτα από την αφαίρεση κάποιων στοιχείων. Η αφαίρεση των στοιχείων του δικτύου εξετάζεται στην Ενότητα 9.3.3.
2. Αφετέρου για τις κατανομές των τιμών των μέτρων, κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή του αλγορίθμου σε μεγάλο αριθμό δικτύων, έτσι ώστε να δημιουργηθούν όσο το δυνατό περισσότερα δεδομένα για την ανάλυση και να αποφευχθεί η περιπτώσιολογία. Μ'αυτά τα δεδομένα, ο ακριβής αριθμός των δικτύων που τελικά δημιουργήθηκε και εξετάστηκε, καθορίστηκε και από τις υπολογιστικές δυνατότητες και τον χρόνο που χρειάζεται για κάθε τυχαίο δίκτυο. Έτσι, δημιουργήθηκαν 69 τυχαία δίκτυα.

### **9.3.2. Δημιουργία δικτύων**

#### **9.3.2.1. Περιβάλλον δημιουργίας δικτύων**

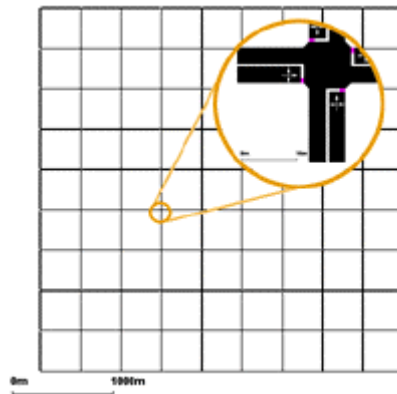
Για τη δημιουργία τυχαίων δικτύων χρησιμοποιήθηκε όπως και στο προηγούμενο βήμα το λογισμικό μικροσκοπικής προσομοίωσης της κυκλοφοριακής ροής SUMO (Simulation of Urban Mobility). Το λογισμικό αυτό, πέραν της δυνατότητας μικροσκοπικής προσομοίωσης

της κυκλοφορίας σε οδικά δίκτυα που αξιοποιήθηκε στο προηγούμενο βήμα, περιλαμβάνει μια λειτουργική δυνατότητα αυτόματης δημιουργίας δικτύων βάσει παραμέτρων που αποφασίζει ο χρήστης.

#### 9.3.2.2. Επιλογή μορφής και χαρακτηριστικών των δικτύων

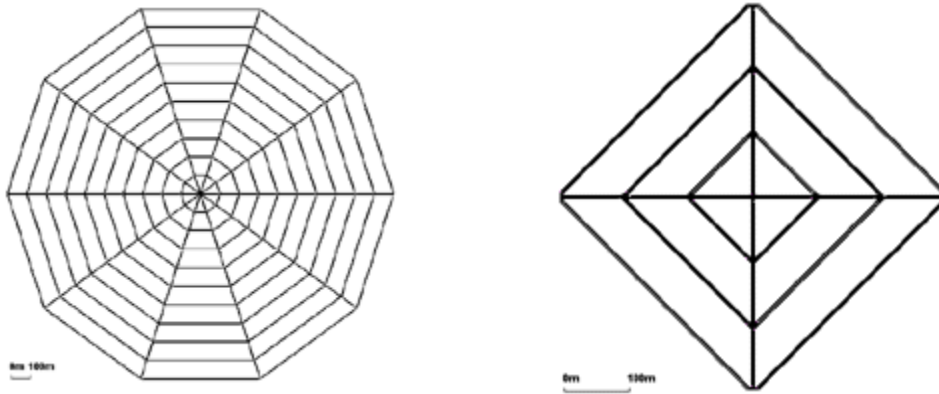
Η πρώτη επιλογή που έχει να κάνει ο χρήστης σχετικά με τη δημιουργία δικτύων αφορά στη μορφή τους και συγκεκριμένα μπορεί να αποφασίσει αν ένα δίκτυο θα είναι σε μορφή πλέγματος (grid), σε μορφή ιστού (spider) ή σε εντελώς τυχαία μορφή.

Για τα δίκτυα πλέγματος, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει πόσους κόμβους με κατεύθυνση  $x$  και πόσους κόμβους με κατεύθυνση  $y$  θα έχει το δίκτυό του, και σε τι απόσταση θα βρίσκονται αυτοί μεταξύ τους. Τα δίκτυα που προκύπτουν είναι όπως της μορφής αυτού στην Εικόνα 71.



Εικόνα 71: Δίκτυο μορφής πλέγματος στο λογισμικό SUMO

Για τα δίκτυα μορφής ιστού, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον αριθμό των αξόνων που διαιρούν τον χώρο, τον αριθμό των 'κύκλων' που δημιουργούνται μεταξύ των αξόνων, και την απόσταση μεταξύ τους. Τα δίκτυα που προκύπτουν είναι της μορφής αυτού στην Εικόνα 72.



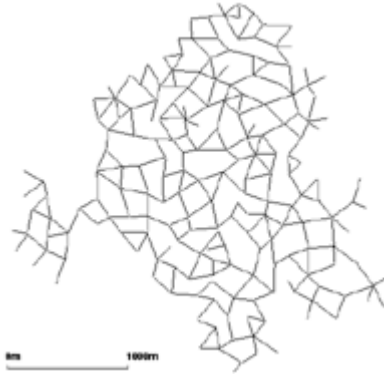
Εικόνα 72: Δίκτυο μορφής ιστού στο λογισμικό SUMO

Καθώς όμως τα πραγματικά δίκτυα Μεταφορών μπορεί να πάρουν και πολλές άλλες μορφές, επιλέχθηκε η τρίτη επιλογή, αυτή της δημιουργίας τυχαίων δικτύων όπου ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μια σειρά παραμέτρων που θα καθορίσουν τα χαρακτηριστικά τους, και συγκεκριμένα:

- τον αριθμό των τόξων του δικτύου (και άρα εμμέσως των κόμβων του)
- την κατεύθυνση των τόξων του δικτύου (μονής ή διπλής κατεύθυνσης)
- το μέγιστο και ελάχιστο μήκος των τόξων του δικτύου (και άρα εμμέσως της απόστασης μεταξύ των κόμβων του)
- την μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα διάνυσης των τόξων
- τη γεωμετρία του τόξου (αριθμός και πλάτος λωρίδων)
- τη γωνία μεταξύ δύο συνδεόμενων τόξων
- τη συνδεσιμότητα των τόξων (το αν δηλαδή συνδέονται μεταξύ τους)

Είναι σημαντικό εδώ να σημειωθεί ότι ο τρόπος που δημιουργούνται τα τυχαία δίκτυα είναι ο εξής: αρχικά δημιουργείται ένα τόξο στον χώρο μεταξύ δύο κόμβων, και έπειτα η δημιουργία ενός άλλου τόξου, κ.ο.κ. Τα τυχαία δίκτυα δεν δημιουργούνται δηλαδή με δημιουργία κυκλοφοριακών κόμβων σε τυχαία  $x$  και  $y$  του δικτύου και σύνδεσή τους με τόξα, αλλά με απ'ευθείας δημιουργία τόξων. Για το λόγο αυτό, η τελευταία παράμετρος της λίστας των παραμέτρων που αναφέρθηκε παραπάνω, είναι ιδιαιτέρως κρίσιμη, καθώς σύμφωνα με αυτή αποφασίζεται αν ένα τόξο που δημιουργείται έπειτα από άλλα, θα συνδεθεί με αυτά, ή θα δημιουργηθεί μόνο του (χωρίς εξάρτηση ή σύνδεση από άλλα) στο χώρο.

Σύμφωνα με αυτή την επιλογή, τα δίκτυα που προκύπτουν είναι της μορφής αυτού στην Εικόνα 73.



**Εικόνα 73: Δίκτυο τυχαίας μορφής στο λογισμικό SUMO**

Επιπρόσθετα, ανεξαρτήτως μορφής δικτύου, ο χρήστης μπορεί να ορίσει τα εξής:

- τον αριθμό των μετακινήσεων που γίνονται στο δίκτυο
- τον αριθμό των ζευγών Προέλευσης – Προορισμού που περιλαμβάνουν αυτές τις μετακινήσεις

Σε ότι αφορά τη ζήτηση δηλαδή, αυτό που επιτρέπει το λογισμικό είναι αφενός να οριστεί ο συνολικός αριθμός των μετακινήσεων που θα γίνουν στο δίκτυο, και αφετέρου να οριστεί σε πόσα από όλα τα δυνατά ζεύγη Π-Π θα μοιραστεί αυτή η ζήτηση. Το τελευταίο είναι κεντρικής σημασίας, καθώς οι κυκλοφοριακές ζώνες που παράγουν και έλκουν τις μετακινήσεις, ταυτίζονται εν προκειμένω με τους κόμβους του δικτύου, δηλαδή κάθε κυκλοφοριακός κόμβος αντιπροσωπεύει πρακτικά μια κυκλοφοριακή ζώνη.

### **9.3.2.3. Παράμετροι εισόδου για τα χαρακτηριστικά των δικτύων**

Για όλες τις παραπάνω δυνατές επιλογές, δηλαδή το πόσα τόξα θα έχει το δίκτυο, ποιος θα είναι ο συνολικός αριθμός των μετακινήσεων κ.λπ., στο πλαίσιο της εφαρμογής αυτής έγιναν κάποιες παραδοχές παραμετροποίησης και περιγράφηκαν βάσει του εύρους πιθανολογικής εμφάνισης. Έτσι:

Για τον καθορισμό του εύρους μεγέθους των τυχαίων δικτύων, λήφθηκαν υπόψη τόσο η πολυπλοκότητα μετά-ανάλυσης όσο και ο υπολογιστικός χρόνος δημιουργίας και κυκλοφοριακής προσομοίωσής τους. Έτσι το μέγεθος των δικτύων που δημιουργήθηκαν, εκφρασμένο σε εύρος αριθμού κυκλοφοριακών κόμβων, ήταν μεταξύ 50 και 600. Δημιουργήθηκαν δηλαδή από πολύ μικρά δίκτυα (ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα δίκτυα 50 κόμβων είναι διπλάσιου μεγέθους του πειραματικού δικτύου Sioux Falls που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή των μέτρων της Θεωρίας Δικτύων στην Ενότητα 9.2), έως μεσαίου μεγέθους δίκτυα. Ο τελικός αριθμός των δικτύων σε σχέση με τον αριθμό

Σελίδα 350 από 481

κυκλοφοριακών κόμβων ήταν: 10 δίκτυα των 50 κόμβων, 10 δίκτυα των 100 κόμβων, 10 δίκτυα των 200 κόμβων, 10 δίκτυα των 300 κόμβων, 10 δίκτυα των 400 κόμβων, 10 δίκτυα των 500 κόμβων και 9 δίκτυα των 600 κόμβων.

Για την κατεύθυνση των τόξων του δικτύου, και για να εξασφαλιστεί ότι τα μέτρα της Θεωρίας Δικτύων που θα εξεταστούν, θα επιστρέψουν αριθμητικά αποτελέσματα για όλους τους κόμβους (άρα δε θα συναντηθεί πρόβλημα αδυναμίας υπολογισμού της τιμής ενός μέτρου κατά την εφαρμογή του κώδικα), αποφασίστηκε η δημιουργία διπλών κατευθύνσεων με πιθανότητα 95%.

Για τα μήκη των τόξων, θεωρήθηκαν 'λογικές' αποστάσεις διάνυσης μεταξύ δύο κυκλοφοριακών κόμβων, τιμές μεταξύ 100 και 1.500 μέτρων. Εκτός του γενικού εύρους μήκους των τόξων, εφαρμόστηκε και μια ακόμα συνθήκη για την ρεαλιστικότερη απεικόνιση του μεγέθους των δικτύων. Για τα 35 πρώτα δίκτυα που δημιουργήθηκαν (όλα τα δίκτυα των 50, 100 και 200 κυκλοφοριακών κόμβων, και 5 δίκτυα των 300 κυκλοφοριακών κόμβων), χρησιμοποιήθηκε ως μέγιστο μήκος το μισό χιλιόμετρο (500μ) ενώ για τα υπόλοιπα δίκτυα μεγαλύτερου μεγέθους, χρησιμοποιήθηκε ως μέγιστο μήκος το 1,5 χιλιόμετρο (1500μ).

Για τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα διάνυσης των τόξων, αυτή θεωρήθηκε ίση για όλα τα τόξα (δεν έγινε δηλαδή διάκριση τυπολογίας τόξων ούτε ιεράρχησή τους στο οδικό δίκτυο). Η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα για όλα τα τόξα θεωρήθηκε ίση με 50χλμ./ώρα, που είναι μια κανονική τιμή

Για τη γεωμετρία των τόξων, και συγκεκριμένα για τον αριθμό και το πλάτος των λωρίδων κυκλοφορίας, καθώς όπως αναφέρθηκε δεν έγινε ιεράρχηση των τόξων σε κατηγορίες οδού, καθορίστηκε μία λωρίδα κίνησης ανά κατεύθυνση κίνησης, πλάτους 3,65 μέτρων.

Για τη γωνία μεταξύ συνδεόμενων τόξων, και για αποφυγή δημιουργίας παράλληλων τόξων, αποφασίστηκε ένα εύρος μεταξύ 20° και 330°. Η κατανομή της πιθανότητας των τιμών εντός αυτού του εύρους είναι κανονική.

Για τη συνδεσιμότητα των τόξων, δηλαδή αν ένα νέο τόξο στο δίκτυο θα συνδεθεί με κάποιο υπάρχον, ή θα τοποθετηθεί στο χώρο ανεξαρτήτως της ύπαρξης άλλων τόξων, αποφασίστηκε πιθανότητα σύνδεσης 95%, αφενός για να διασφαλιστεί ότι δεν υπάρχουν απομονωμένα τόξα και κόμβοι στο δίκτυο, καθώς αυτό δεν μπορεί να συμβεί σε δίκτυα Μεταφορών, αλλά και για να επιτραπεί ένα μικρό περιθώριο δημιουργίας τυχαίων τόξων που δεν συνδέονται εξ αρχής με τα υπάρχοντα στο δίκτυο.

Για τον συνολικό αριθμό μετακινήσεων, και στην ίδια κατεύθυνση που αναφέρθηκε προηγουμένως αναφορικά με τη συνθετότητα μετά-ανάλυσης και υπολογιστικού χρόνου προσομοίωσης της κυκλοφορίας, θεωρήθηκε ένα εύρος τιμών μεταξύ 6600 και 7200 μετακινήσεων. Η κατανομή της πιθανότητας των τιμών εντός αυτού του εύρους είναι κανονική.

Για τον αριθμό των ζευγών Προέλευσης – Προορισμού που περιλαμβάνουν αυτές τις μετακινήσεις, και δεδομένου του μεγέθους του δικτύου (το μέγεθος σχετίζεται διότι πρακτικά όλοι οι κόμβοι είναι και κυκλοφοριακές ζώνες), θεωρήθηκε ένα εύρος μεταξύ 10 και 150 ζευγών. Πρακτικά αυτό συνεπάγεται ότι ο συνολικός αριθμός της ζήτησης για μετακινήσεις θα αφορά από 10 έως 150 ζεύγη κόμβων.

#### 9.3.2.4. Χαρακτηριστικά των τυχαίων δικτύων που εξετάζονται

Σύμφωνα με τις παραμέτρους των χαρακτηριστικών των τυχαίων δικτύων που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, προέκυψαν 69 δίκτυα Μεταφορών, μέσω της αυτόματης δημιουργίας τους στο λογισμικό SUMO. Ο Πίνακας 40 περιγράφει τα χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών, ως αποτέλεσμα της πιθανολογικής εμφάνισης των τιμών των παραμέτρων εισόδου.

Πίνακας 40: Χαρακτηριστικά των τυχαίων δικτύων που εξετάζονται

Κωδικός Δικτύου	Αριθμός Κόμβων	Μέση ταχύτητα κίνησης (σε χλμ./ώρα)	Μέσο Μήκος Μετακίνησης (σε χλμ.)	Συνολικός Αριθμός Μετακινήσεων
1	50	41	5,913	7,200
2	50	32	7,358	7,044
3	50	40	5,399	7,200
4	50	36	5,263	7,200
5	50	36	5,791	7,200
6	100	41	6,597	7,200
7	100	41	7,320	7,200
8	100	33	8,905	6,925
9	100	42	6,538	7,200
10	100	40	6,517	7,200
11	200	42	9,263	7,116
12	200	41	11,522	7,116
13	200	39	9,456	7,116
14	200	42	8,586	7,133
15	200	39	10,468	7,112
16	300	43	9,322	7,077
17	300	44	8,743	7,085
18	300	44	9,894	7,093
19	300	43	10,933	7,075
20	300	43	9,848	7,082
21	400	43	11,363	7,142



22	400	43	10,714	7,125
23	400	43	11,054	7,138
24	400	44	11,728	7,138
25	400	43	9,920	7,122
26	500	45	10,262	7,200
27	500	45	10,684	7,200
28	500	45	10,322	7,200
29	500	45	10,874	7,200
30	500	45	10,931	7,200
31	600	45	10,736	7,015
32	600	45	11,074	7,000
33	600	45	10,927	7,013
34	600	45	11,411	7,017
41	50	28	2,096	7,200
42	50	44	1,901	7,200
43	50	21	2,823	6,860
44	50	30	2,232	6,604
45	50	44	1,582	7,200
46	100	38	2,606	7,200
47	100	43	2,553	7,200
48	100	42	2,173	7,200
49	100	43	2,316	7,200
50	100	42	2,802	7,200
51	200	44	3,447	7,162
52	200	44	2,775	7,168
53	200	43	4,305	7,168
54	200	44	2,980	7,163
55	200	43	2,977	7,167
56	300	44	3,819	7,169
57	300	45	3,554	7,166
58	300	45	3,440	7,170
59	300	45	4,335	7,171
60	300	45	3,350	7,168
61	400	45	4,381	7,191
62	400	45	4,942	7,196
63	400	45	3,959	7,195
64	400	45	3,871	7,194
65	400	46	3,799	7,191
66	500	46	4,271	7,152
67	500	46	4,704	7,150
68	500	46	4,655	7,164
69	500	47	4,081	7,150
70	500	46	5,183	7,164
71	600	46	5,234	7,194
72	600	47	4,673	7,195
73	600	47	4,781	7,199
74	600	47	4,790	7,195
75	600	46	5,576	7,198

Για μια συνοπτική άποψη του 'μέσου' δικτύου που τελικά προέκυψε, χωρίς απαραίτητα να υπάρχει ένα τέτοιο δίκτυο μεταξύ των εξεταζομένων, αναφέρεται ότι:

- Ο μέσος αριθμός κόμβων είναι 302
- Η μέση ταχύτητα κίνησης είναι 43 χλμ./ώρα
- Το μέσο μήκος μετακίνησης είναι 6,415 χιλιόμετρα
- Ο μέσος αριθμός μετακινήσεων στα δίκτυα είναι 7.141 μετακινήσεις

Η μορφολογία όλων των δικτύων που εξετάζονται παρατίθεται στο παράρτημα.

Εφιστάται εδώ η προσοχή στην αριστερή στήλη του Πίνακα 40, όπου η κωδικοποίηση των δικτύων δεν είναι συνεχής (από το 1 έως το 69) παρόλο που ο συνολικός αριθμός των δικτύων είναι 69. Οι λόγοι αυτής της μη συνεχούς κωδικοποίησης είναι οι αποτυχημένες προσπάθειες του λογισμικού α) να δημιουργήσει δίκτυα, ή β) να καταμερίσει την κυκλοφορία, ή γ) να υπολογίσει τις τιμές των μέτρων (για διάφορους λόγους σχετικούς με τη στοχαστικότητα του εύρους των τιμών), και στην επιτυχή επαναπροσπάθειά του σε επόμενο βήμα (π.χ. μετά την προσπάθεια 34 ακολουθούν 6 αποτυχημένες προσπάθειες πριν την επόμενη επιτυχή προσπάθεια δημιουργίας του δικτύου 41). Η επισήμανση αυτή γίνεται εδώ, έτσι ώστε ο αναγνώστης να μπορεί να ανατρέξει σε αυτή την κωδικοποίηση στις επόμενες ενότητες που παρουσιάζεται η ανάλυση των επιμέρους δικτύων αλλά και για λόγους αποφυγής παρανόησης (υπάρχουν κωδικοί δικτύων που δεν εμφανίζονται ή κωδικοί δικτύων μεγαλύτεροι του συνολικού αριθμού δικτύων).

### 9.3.3. Αφαίρεση στοιχείων

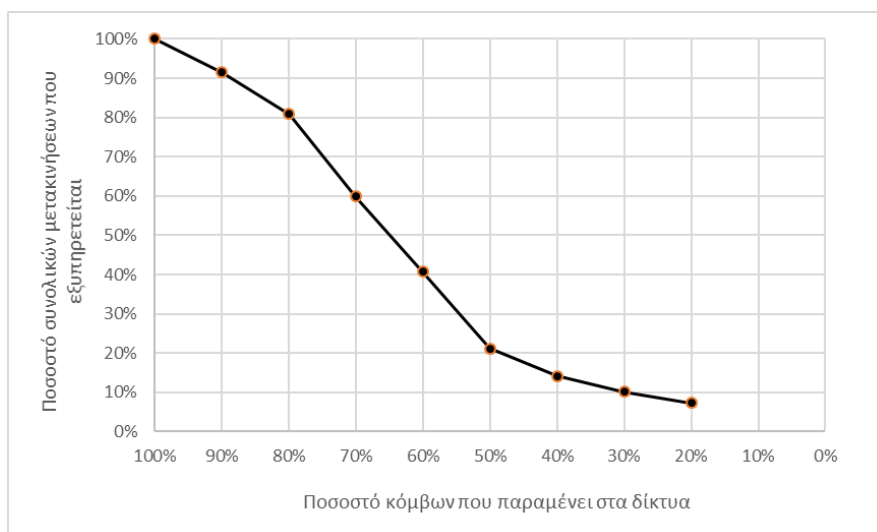
Όπως αναφέρθηκε, οι συνθήκες εμφάνισης ΑΚΦ στα δίκτυα Μεταφορών που εξετάζονται, προσομοιώνονται στην εφαρμογή μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας αφαίρεσης στοιχείων του δικτύου. Θεωρείται δηλαδή, ότι η εμφάνιση ΑΚΦ θα καταστήσει κάποια στοιχεία του δικτύου Μεταφορών μη λειτουργικά (για αυτό και αφαιρούνται από το δίκτυο). Για να ληφθεί υπόψη η διαφοροποίηση έντασης των ΑΚΦ που μπορούν να εμφανιστούν, η αφαίρεση των στοιχείων είναι αυξητικής τάσης σε κάθε επανάληψη – δηλαδή κάθε φορά που εξετάζεται το δίκτυο έχουν αφαιρεθεί περισσότερα στοιχεία από την προηγούμενη φορά.

Το πρώτο ερώτημα που δημιουργείται εδώ αφορά στο βήμα αφαίρεσης στοιχείων σε κάθε επαναληπτική διαδικασία – δηλαδή τι ποσοστό του δικτύου αφαιρείται κάθε φορά. Ενώ θα μπορούσε να εξεταστεί ένα πολύ μικρό βήμα αφαίρεσης, ως ποσοστό του συνόλου του δικτύου (π.χ. 1% για κάθε επανάληψη), επιλέχθηκε ένα υψηλότερο βήμα, αυτό του 10%, για να μπορέσει να αποτυπώσει πραγματικά ακραίες συνθήκες, αλλά και για να έχει

εννοιολογικό νόημα η 'ανθεκτικότητα' του δικτύου που εξετάζεται (μικρά ποσοστά αφαίρεσης στοιχείων ενός δικτύου πιθανόν δεν θα ήταν ενδεικτικά της επίπτωσης και άρα η ανθεκτικότητα του δικτύου στην αφαίρεση αυτή θα μπορούσε να υποτιμηθεί). Υπενθυμίζεται εδώ, ότι η ανθεκτικότητα μετριέται ως η 'απόσταση' ή η διαφορά της απόδοσης ενός δικτύου που έχει υποστεί αφαίρεση στοιχείων ως προς την απόδοση του δικτύου χωρίς καμία αφαίρεση στοιχείου.

Ενά δεύτερο ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί αφορά στον μέγιστο βαθμό αφαίρεσης στοιχείων από το δίκτυο. Για την απάντηση αυτού του ερωτήματος, δημιουργήθηκαν αρχικά σενάρια αφαίρεσης έως και 80% του αρχικού δικτύου (με βήμα 10%). Επειδή όμως σε κάθε βήμα αφαίρεσης στοιχείων, χάνεται από το δίκτυο και ένα μέρος του συνολικού αριθμού της ζήτησης (καθώς, όπως αναφέρθηκε οι κυκλοφοριακοί κόμβοι είναι κατ'ουσίαν και κυκλοφοριακές ζώνες, ανάλογα με το αν βρίσκονται στα άκρα μετακίνησης, και άρα αν αφαιρεθούν, χάνεται μαζί τους και η μετακίνηση που ξεκινούσε ή κατέληγε σε αυτούς), τίθεται ένα ζήτημα ρεαλιστικής αναπαράστασης της πραγματικότητας. Πρακτικά δηλαδή, αν αφαιρεθεί ένα πολύ υψηλό ποσοστό του δικτύου, μειώνονται σε τέτοιο βαθμό οι συνολικές μετακινήσεις, που το δίκτυο θα έχει αλλοιωθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό σε σχέση με το αρχικό.

Για να καθοριστεί έτσι το μέγιστο ποσοστό δικτύου που θα αφαιρεθεί, έγινε συσχέτιση της επίδρασης της αφαίρεσης, σε βήματα του 10%, στον συνολικό αριθμό των μετακινήσεων, για όλα τα δίκτυα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 74.



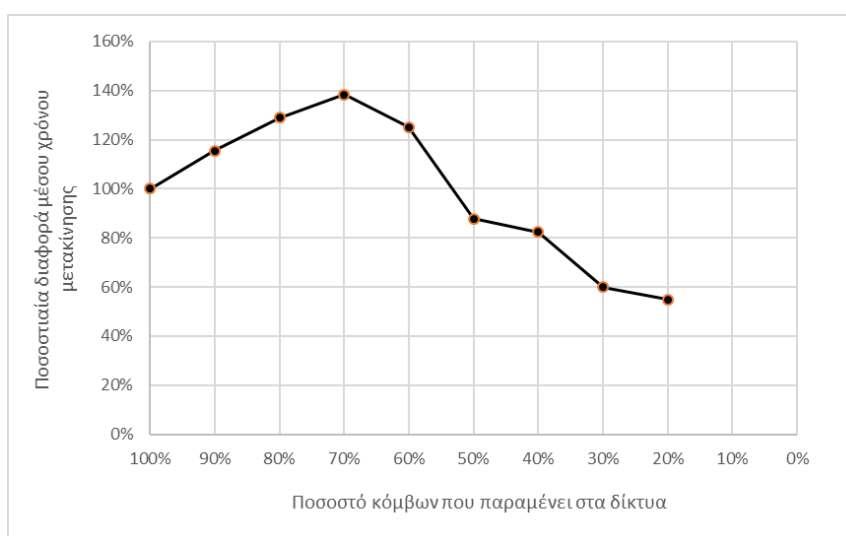
**Εικόνα 74: Ποσοστό συνολικών μετακινήσεων που εξυπηρετείται για διάφορα ποσοστά αφαίρεσης στοιχείων όλων των δικτύων**

Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν ότι μετά την αφαίρεση του 30% των στοιχείων ενός δικτύου, η σχέση αφαίρεσης στοιχείων με τη μείωση της ζήτησης παραμένει γραμμική, αλλά η κλίση

Σελίδα 355 από 481

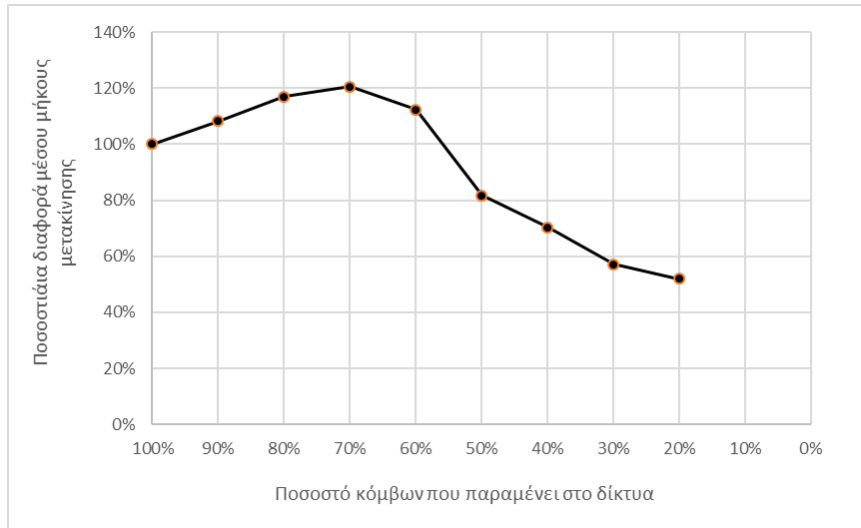
της είναι πολύ μεγάλη, σε βαθμό που θεωρήθηκε ότι αλλάζει σε μεγάλο (και μη επιθυμητό) βαθμό το δίκτυο. Συγκεκριμένα, για αφαίρεση στοιχείων σε ποσοστά 10% έως 20% παρατηρείται αντίστοιχη (γραμμική) μείωση του ποσοστού των συνολικών μετακινήσεων. Μετάξύ 30% και 50%, η αναλογία είναι διπλάσια (δηλαδή για αφαίρεση 10% των στοιχείων των δικτύων, παρατηρείται μείωση 20% των συνολικών μετακινήσεων) λόγω του ότι η μη συνδεσιμότητα δεν επιτρέπει να γίνουν μετακινήσεις που δεν σχετίζονται άμεσα με την αφαίρεση των στοιχείων από τα οποία ξεκινούν ή καταλήγουν οι μετακινήσεις, αλλά τα ενδιάμεσα αυτών.

Για επιβεβαίωση του παραπάνω συμπεράσματος έγινε επίσης συσχέτιση της μείωσης των στοιχείων των δικτύων με τον μέσο χρόνο διαδρομών του δικτύου (Εικόνα 75), διαπιστώθηκε μια ακόμα μη επιθυμητή 'συμπεριφορά' του δικτύου, έπειτα από αφαίρεση του 30%: ο μέσος χρόνος διαδρομών του δικτύου μειώνεται (αντί να αυξάνεται) διότι πέραν αυτού του ποσοστού, η μη συνδεσιμότητα του δικτύου, και ο μικρότερος αριθμός των μετακινήσεων, εξυπηρετούν κοντινές μετακινήσεις, που ολοκληρώνονται σε μικρό χρονικό διάστημα.



**Εικόνα 75: Ποσοστιαία διαφορά μέσου χρόνου μετακίνησης συγκριτικά με το αρχικό σενάριο (χωρίς αφαίρεση στοιχείων) για διάφορα ποσοστά αφαίρεσης στοιχείων όλων των δικτύων**

Σε αντίστοιχη συσχέτιση που έγινε μεταξύ της αφαίρεσης ποσοστών στοιχείων των δικτύων και της ποσοστιαίας διαφοράς του μέσου μήκους μετακίνησης (Εικόνα 76), παρατηρήθηκε παρόμοια 'συμπεριφορά' των δικτύων σε αφαιρέσεις στοιχείων σε ποσοστά άνω του 30%. Συγκεκριμένα, έως την κατά 30% αφαίρεση, τα μέση μήκη των μετακινήσεων αυξάνονται (παρατήρηση λογική βάσει της θεώρησης ότι κάποιοι κόμβοι έχουν καταστεί μη λειτουργικοί και άρα τα οχήματα θα διανύσουν μεγαλύτερες αποστάσεις για να φτάσουν στον προορισμό τους).

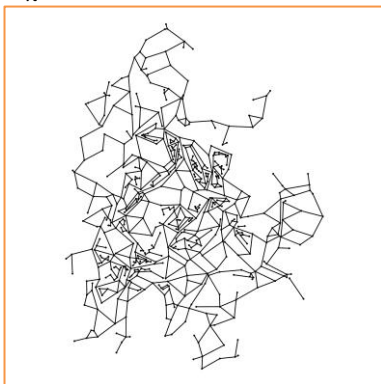


**Εικόνα 76: Ποσοστιαία διαφορά μέσου μήκους μετακίνησης συγκριτικά με το αρχικό σενάριο (χωρίς αφαίρεση στοιχείων) για διάφορα ποσοστά αφαίρεσης στοιχείων όλων των δικτύων**

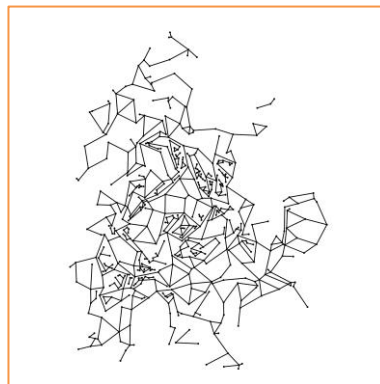
Τέλος, στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξε και η παρατήρηση της μορφολογίας των ίδιων των δικτύων έπειτα από μείωση τους: μετά το 30%, τα δίκτυα που εξετάζονται δεν ήταν πια 'δίκτυα' αλλά χωρικές συγκεντρώσεις κόμβων και τόξων, ασύνδετων μεταξύ τους. Ενδεικτικά, στην Εικόνα 77 απεικονίζεται ένα από τα τυχαία δίκτυα που δημιουργήθηκαν, και η μορφολογία του σε διάφορα ποσοστά αφαίρεσης στοιχείων του.



Τυχαίο Δίκτυο 34



Αφαίρεση 10%



Αφαίρεση 20%



Αφαίρεση 30%



Αφαίρεση 40%



Αφαίρεση 50%



Αφαίρεση 60%



Αφαίρεση 70%



Αφαίρεση 80%

Εικόνα 77: Άποψη δικτύων έπειτα από αφαίρεση ποσοστού στοιχείων τους (από 10% έως 80%) – Δίκτυο 34

#### **9.3.4. Αλγοριθμική εφαρμογή και ανάλυση**

Όπως αναφέρθηκε, για να ελεγχθεί η απόδοση ενός δικτύου σε συνθήκες ΑΚΦ σε σχέση με τις κανονικές συνθήκες, είναι απαραίτητη η χρήση ενός δείκτη που να περιγράφει με κυκλοφοριακούς όρους αυτή την 'απόδοση'. Για την εφαρμογή που παρουσιάζεται εδώ επιλέχθηκε ως δείκτης ο μέσος χρόνος μετακίνησης για κάθε δίκτυο που εξετάζεται.

Έτσι, αυτό που συμβαίνει σύμφωνα με τον αλγόριθμο που παρουσιάστηκε στη μεθοδολογική προσέγγιση (βλέπε Ενότητα 7.4.2), για κάθε τυχαίο δίκτυο που δημιουργείται, είναι να καταμερίζεται ένας τυχαίος αριθμός μετακινήσεων (εντός του εύρους που καθορίστηκε), και να υπολογίζεται ο μέσος χρόνος διάνυσης όλων των οδικών τμημάτων του. Ο χρόνος αυτός αποτελεί τον *δείκτη κανονικής λειτουργίας* του δικτύου και ως προς αυτόν συγκρίνονται όλοι οι αντίστοιχοι δείκτες των δικτύων που προκύπτουν, έπειτα από τυχαία αφαίρεση ποσοστών των στοιχείων τους. Ο υπολογισμός του λόγου του δείκτη κανονικής λειτουργίας ως προς τους δείκτες λειτουργίας για διάφορα ποσοστά αφαίρεσης στοιχείων γίνεται για να υπολογιστεί, πόσο κοντά στην κανονική λειτουργία του παρέμεινε το δίκτυο, έπειτα από την αφαίρεση στοιχείων του. Όταν οι τιμές του λόγου αυτού βρίσκονται κοντά στη μονάδα, τότε οι επιπτώσεις αφαίρεσης των στοιχείων του είχαν μικρή επίδραση, και συνεπώς το δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ανθεκτικό. Για εκείνα τα δίκτυα που παρουσιάζουν ενδείξεις ανθεκτικότητας, διερευνώνται οι κατανομές των τιμών των μέτρων που εξετάζονται, με σκοπό την πιθανή εύρεση κάποιου μοτίβου που να αποδεικνύει την ανθεκτικότητα του δικτύου.

Σημειώνεται, ότι ο υπολογισμός των τιμών της δέσμης των μέτρων στην οποία κατέληξε το Βήμα 1 του 2<sup>ου</sup> επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης γίνεται πριν την αφαίρεση οποιωνδήποτε στοιχείων από ένα δίκτυο. Υπολογίζονται δηλαδή οι τιμές των μέτρων που εξετάζονται ( για κάθε στοιχείο του δικτύου), και υπολογίζεται η κατανομή των τιμών αυτών σε κανονικές συνθήκες (δηλαδή συνθήκες μη εμφάνισης ΑΚΦ και συνεπώς μη αφαίρεσης στοιχείων).

#### **9.3.5. Απόδοση δικτύων – μέσος χρόνος μετακίνησης και συνολικός αριθμός μετακινήσεων**

Της δημιουργίας τυχαίων δικτύων, μέσω της διαδικασίας που περιγράφηκε σε προηγούμενες ενότητες, έπεται η ανάλυση της απόδοσής τους για τα διάφορα σενάρια αφαίρεσης

ποσοστών των στοιχείων τους. Όπως αναφέρθηκε, αυτό που πρακτικά εξετάζεται και παρουσιάζεται στην ενότητα αυτή, είναι τα αποτελέσματα του καταμερισμού των μετακινήσεων στα τυχαία δίκτυα, όχι όμως υπό μια αυστηρά κυκλοφοριακή σκοπιά (π.χ. δεν αναλύονται οι κυκλοφοριακοί φόρτοι στα επιμέρους τόξα των δικτύων, οι ταχύτητες μετακίνησης, οι δημιουργούμενες ουρές, κ.λπ.), καθώς αυτό είναι εκτός του πλαισίου της διδακτορικής διατριβής. Αντίθετα, χρησιμοποιούνται εκείνα μόνο τα αποτελέσματα, τα οποία είναι χρήσιμα για την εκπλήρωση του σκοπού του βήματος αυτού, της αποτίμησης δηλαδή της ανθεκτικότητας των τυχαίων δικτύων.

Έτσι, ο Πίνακας 41 παρουσιάζει για κάθε ένα από τα τυχαία δίκτυα που εξετάζονται, τον μέσο χρόνο μετακίνησης υπό κανονικές συνθήκες αλλά και για όλα τα σενάρια αφαίρεσης στοιχείων, καθώς και τη μείωση του συνολικού αριθμού των μετακινήσεων για κάθε ένα από αυτά τα σενάρια. Ο συνολικός αριθμός των μετακινήσεων και οι μεταβολές του συμπεριλαμβάνονται εδώ για καλύτερη κατανόηση της επίδρασης της αφαίρεσης των στοιχείων σε σχέση με την απόδοση των δικτύων (εν προκειμένω τον μέσο χρόνο μετακίνησης). Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 9.3.3 εξετάζονται σενάρια αφαίρεσης στοιχείων έως 30%. Όλα τα στοιχεία που παρουσιάζονται εκτιμώνται σε σχέση με το βασικό σενάριο (κανονικές συνθήκες – χωρίς αφαίρεση στοιχείων) για λόγους απλούστευσης και διευκόλυνσης της ανάλυσης. Έτσι, ο μέσος χρόνος διέλευσης θεωρείται ίσος με 100 για όλα τα δίκτυα (αντίστοιχα και για τον συνολικό αριθμό μετακινήσεων ισχύει το ίδιο) και οι χρόνοι καθώς και οι μετακινήσεις για τα υπόλοιπα σενάρια εκφράζονται ως προς αυτό. Με σκίαση επισημαίνονται τα σενάρια για τα οποία μεγιστοποιείται ο μέσος χρόνος μετακίνησης και μειώνεται ο συνολικός αριθμός μετακινήσεων, καθώς αυτό δε συμβαίνει απαραίτητα σε όλες τις περιπτώσεις για τα σενάρια αφαίρεσης 30%.

Ειδικά για τους χρόνους μετακίνησης, η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται για τα σενάρια αφαίρεσης 30% των στοιχείων των δικτύων σε ποσοστό 64% ενώ για τα σενάρια αφαίρεσης 20% των στοιχείων αντιστοιχούν 30% των περιπτώσεων. Η παρατήρηση αυτή είναι αναμενόμενη, διότι θα περίμενε κανείς ότι όσο μεγαλύτερο το ποσοστό αφαίρεσης στοιχείων ενός δικτύου, τόσο μεγαλύτερη και η επίπτωση στην αύξηση του μέσου χρόνου μετακίνησης. Ωστόσο, περιπτώσεις όπου η μέγιστη επίδραση στο μέσο χρόνο μετακίνησης παρατηρείται σε σενάρια μείωσης 10% ή 20% των στοιχείων, εξηγούνται για δύο λόγους: α) η τυχαία αφαίρεση στοιχείων από ένα βήμα σε ένα άλλο δεν διατηρείται, δηλαδή τα στοιχεία που αφαιρέθηκαν στο πρώτο βήμα (-10%), δεν είναι απαραίτητο ότι αφαιρέθηκαν και στο δεύτερο βήμα (-20%) και αντίστοιχα για το τρίτο βήμα (-30%) β) ακριβώς λόγω της



τυχαιότητας της αφαίρεσης στοιχείων, μπορεί να αφαιρεθούν στο πρώτο ή δεύτερο βήμα (έναντι του τρίτου) στοιχεία τα οποία είναι άκρα (προέλευση ή προορισμός) μεγάλου αριθμού μετακινήσεων και για αυτό το λόγο η επίπτωση να είναι μεγαλύτερη. Αυτοί είναι επίσης και οι λόγοι για τους οποίους παρατηρούνται περιπτώσεις όπου παρόλο που αφαιρείται ένα ποσοστό του δικτύου, αυτό δεν έχει επίπτωση στον αριθμό των μετακινήσεων (βλέπε π.χ. δίκτυο με κωδικό 4). Συνολικά πάντως και για τον συνολικό αριθμό μετακινήσεων, η μεγαλύτερη μείωση του αριθμού αυτού παρατηρείται κατά μεγάλη πλειονότητα στα σενάρια αφαίρεσης 30% των στοιχείων.

Θεωρείται πάντως ότι οι παραπάνω παρατηρήσεις επιλύονται σε επίπεδο συνολικής θεώρησης λόγω του μεγάλου αριθμού δικτύων που εξετάζονται.

Πίνακας 41: Απόδοση δικτύων και διαφορές τους για τα 3 σενάρια αφαίρεσης στοιχείων (10%, 20% και 30%) και επίπτωση αφαίρεσης στον αριθμό μετακινήσεων

Κωδικός Δικτύου	Μέσος Χρόνος Μετακίνησης - Σ0	Μέσος Χρόνος Μετακίνησης - Σ10%	Μέσος Χρόνος Μετακίνησης - Σ20%	Μέσος Χρόνος Μετακίνησης - Σ30%	Μέγιστη Διαφορά	Συνολικός Αριθμός Μετακινήσεων	Συνολικός Αριθμός Μετακινήσεων - Σ10%	Συνολικός Αριθμός Μετακινήσεων - Σ20%	Συνολικός Αριθμός Μετακινήσεων - Σ30%	Μέγιστη Διαφορά
1	100%	128%	164%	130%	164%	100%	100%	100%	80%	80%
2	100%	147%	119%	154%	154%	100%	71%	94%	89%	71%
3	100%	135%	133%	138%	138%	100%	80%	90%	100%	80%
4	100%	116%	129%	99%	129%	100%	100%	100%	70%	70%
5	100%	157%	213%	115%	213%	100%	88%	91%	70%	70%
6	100%	102%	127%	130%	130%	100%	70%	70%	50%	50%
7	100%	108%	116%	104%	116%	100%	90%	70%	40%	40%
8	100%	118%	144%	82%	144%	100%	94%	93%	73%	73%
9	100%	106%	131%	214%	214%	100%	100%	80%	70%	70%
10	100%	101%	104%	51%	104%	100%	90%	50%	40%	40%
11	100%	107%	99%	181%	181%	100%	100%	50%	10%	10%
12	100%	118%	124%	149%	149%	100%	70%	50%	50%	50%
13	100%	161%	67%	179%	179%	100%	68%	20%	43%	20%
14	100%	109%	142%	221%	221%	100%	100%	90%	36%	36%
15	100%	163%	168%	114%	168%	100%	84%	48%	10%	10%
16	100%	126%	135%	112%	135%	100%	100%	85%	50%	50%
17	100%	112%	142%	143%	143%	100%	90%	80%	60%	60%
18	100%	116%	120%	90%	120%	100%	80%	90%	30%	30%
19	100%	114%	138%	109%	138%	100%	95%	75%	40%	40%
20	100%	124%	132%	133%	133%	100%	85%	65%	60%	60%
21	100%	109%	109%	142%	142%	100%	90%	70%	65%	65%
22	100%	111%	115%	206%	206%	100%	85%	85%	40%	40%
23	100%	114%	160%	147%	160%	100%	100%	87%	80%	80%
24	100%	112%	177%	116%	177%	100%	90%	60%	55%	55%
25	100%	118%	107%	128%	128%	100%	85%	75%	35%	35%
26	100%	112%	114%	122%	122%	100%	98%	86%	52%	52%
27	100%	103%	124%	130%	130%	100%	84%	82%	70%	70%
28	100%	105%	124%	153%	153%	100%	72%	82%	54%	54%
29	100%	125%	120%	145%	145%	100%	83%	82%	48%	48%
30	100%	109%	114%	142%	142%	100%	82%	86%	62%	62%
31	100%	113%	141%	156%	156%	100%	98%	66%	53%	53%
32	100%	116%	120%	122%	122%	100%	88%	92%	48%	48%
33	100%	109%	121%	164%	164%	100%	90%	86%	46%	46%
34	100%	112%	128%	140%	140%	100%	88%	81%	60%	60%
41	100%	95%	125%	116%	125%	100%	100%	80%	60%	60%

42	100%	104%	247%	133%	247%	100%	80%	100%	70%	70%
43	100%	207%	157%	212%	212%	100%	24%	42%	59%	24%
44	100%	134%	139%	282%	282%	100%	109%	98%	60%	60%
45	100%	294%	114%	81%	294%	100%	100%	80%	40%	40%
46	100%	119%	218%	200%	218%	100%	100%	79%	70%	70%
47	100%	117%	121%	89%	121%	100%	90%	90%	50%	50%
48	100%	115%	258%	115%	258%	100%	100%	100%	80%	80%
49	100%	122%	92%	251%	251%	100%	90%	70%	80%	70%
50	100%	91%	109%	134%	134%	100%	90%	90%	60%	60%
51	100%	126%	138%	153%	153%	100%	100%	80%	80%	80%
52	100%	113%	110%	97%	113%	100%	100%	70%	60%	60%
53	100%	148%	234%	317%	317%	100%	100%	89%	74%	74%
54	100%	176%	218%	191%	218%	100%	100%	100%	70%	70%
55	100%	150%	122%	83%	150%	100%	100%	90%	30%	30%
56	100%	107%	150%	212%	212%	100%	100%	100%	80%	80%
57	100%	148%	127%	103%	148%	100%	100%	85%	70%	70%
58	100%	109%	172%	144%	172%	100%	100%	95%	90%	90%
59	100%	108%	210%	183%	210%	100%	95%	37%	80%	37%
60	100%	114%	112%	258%	258%	100%	95%	85%	60%	60%
61	100%	109%	128%	238%	238%	100%	100%	90%	65%	65%
62	100%	106%	112%	114%	114%	100%	100%	84%	60%	60%
63	100%	111%	137%	161%	161%	100%	100%	95%	77%	77%
64	100%	119%	126%	138%	138%	100%	100%	90%	55%	55%
65	100%	110%	119%	120%	120%	100%	95%	90%	45%	45%
66	100%	102%	111%	148%	148%	100%	96%	92%	77%	77%
67	100%	106%	115%	155%	155%	100%	98%	96%	78%	78%
68	100%	111%	121%	140%	140%	100%	94%	92%	76%	76%
69	100%	106%	117%	145%	145%	100%	98%	90%	80%	80%
70	100%	108%	107%	119%	119%	100%	98%	76%	54%	54%
71	100%	109%	127%	205%	205%	100%	96%	91%	67%	67%
72	100%	111%	131%	139%	139%	100%	98%	80%	50%	50%
73	100%	108%	120%	110%	120%	100%	98%	92%	50%	50%
74	100%	103%	113%	146%	146%	100%	90%	82%	68%	68%
75	100%	104%	113%	129%	129%	100%	88%	68%	63%	63%

Από τον παραπάνω Πίνακα προκύπτει και το υποσύνολο των δικτύων που θα εξεταστεί ενδελεχώς για την εύρεση 'ανθεκτικών' δικτύων. Το υποσύνολο αυτό θα αφορά μόνο το Σενάριο αφαίρεσης 30% των στοιχείων ενός δικτύου (ως συνολικά το χειρότερο/δυσμενέστερο σενάριο για τις περισσότερες περιπτώσεις), και από αυτό το υποσύνολο, δεν θα εξεταστούν οι περιπτώσεις των δικτύων για τα οποία η επίδραση στον μέσο χρόνο μετακίνησης είναι μεγαλύτερη σε κάποιο άλλο σενάριο εκτός του 30% (δηλαδή τα δίκτυα 1, 4, 5, 7, κ.ο.κ.). Ο Πίνακας 42 παρουσιάζει τα δίκτυα τα οποία τελικά θα εξεταστούν περαιτέρω καθώς και τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους.

**Πίνακας 42: Τελικά δίκτυα ανάλυσης**

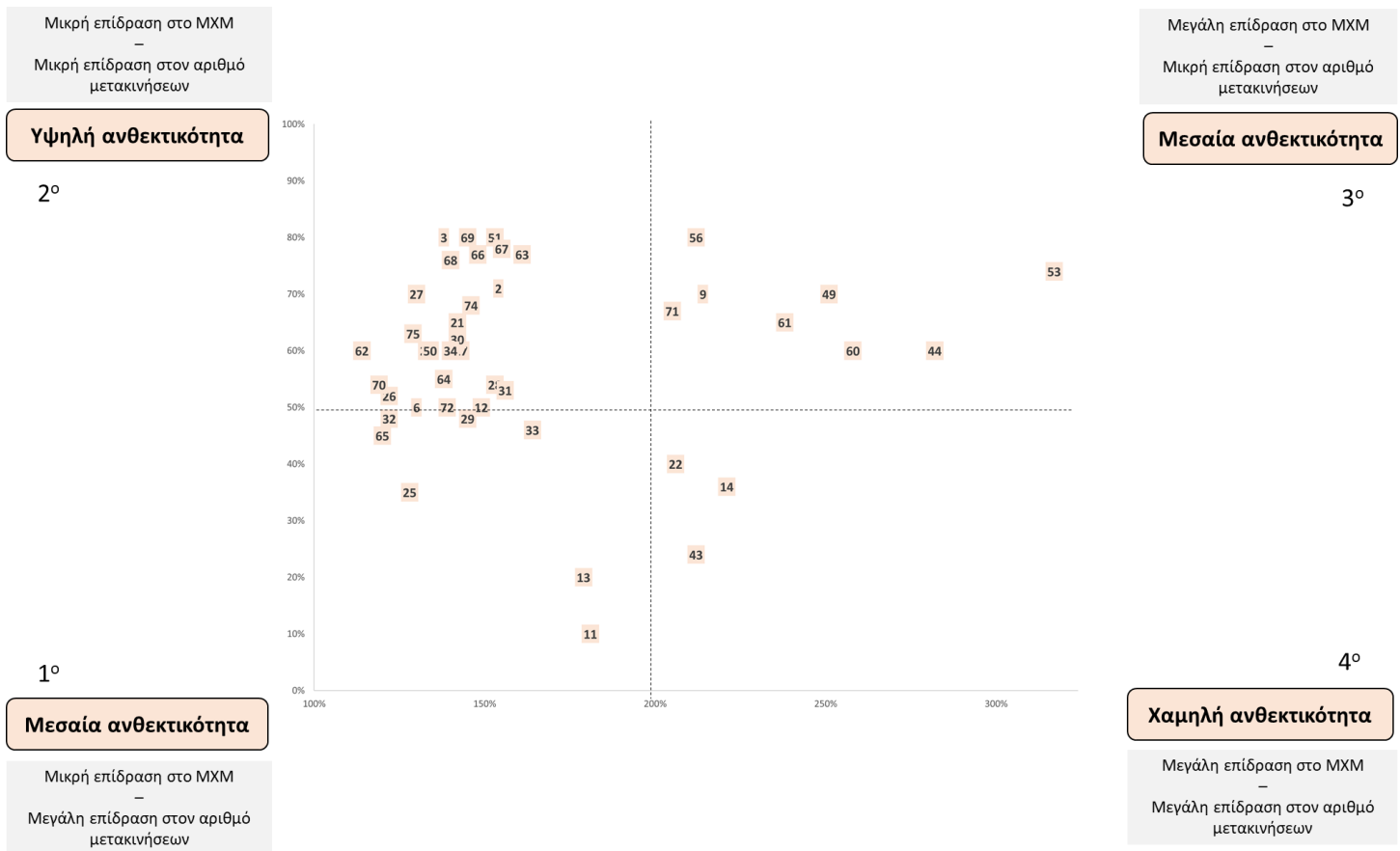
Κωδικός Δικτύου	Μέσος Χρόνος Μετακίνησης - Σ0	Μέσος Χρόνος Μετακίνησης - Σ30%	Μέγιστη Διαφορά	Συνολικός Αριθμός Μετακινήσεων	Συνολικός Αριθμός Μετακινήσεων - Σ30%	Μέγιστη Διαφορά	Αριθμός Κόμβων
2	100%	154%	154%	100%	89%	71%	50
3	100%	138%	138%	100%	100%	80%	50
6	100%	130%	130%	100%	50%	50%	100
9	100%	214%	214%	100%	70%	70%	100
11	100%	181%	181%	100%	10%	10%	200
12	100%	149%	149%	100%	50%	50%	200
13	100%	179%	179%	100%	43%	20%	200
14	100%	221%	221%	100%	36%	36%	200
17	100%	143%	143%	100%	60%	60%	300
20	100%	133%	133%	100%	60%	60%	300
21	100%	142%	142%	100%	65%	65%	400
22	100%	206%	206%	100%	40%	40%	400
25	100%	128%	128%	100%	35%	35%	400
26	100%	122%	122%	100%	52%	52%	500
27	100%	130%	130%	100%	70%	70%	500
28	100%	153%	153%	100%	54%	54%	500
29	100%	145%	145%	100%	48%	48%	500
30	100%	142%	142%	100%	62%	62%	500
31	100%	156%	156%	100%	53%	53%	600
32	100%	122%	122%	100%	48%	48%	600
33	100%	164%	164%	100%	46%	46%	600
34	100%	140%	140%	100%	60%	60%	600
43	100%	212%	212%	100%	59%	24%	50
44	100%	282%	282%	100%	60%	60%	50
49	100%	251%	251%	100%	80%	70%	100
50	100%	134%	134%	100%	60%	60%	100
51	100%	153%	153%	100%	80%	80%	200
53	100%	317%	317%	100%	74%	74%	200
56	100%	212%	212%	100%	80%	80%	300
60	100%	258%	258%	100%	60%	60%	300
61	100%	238%	238%	100%	65%	65%	400
62	100%	114%	114%	100%	60%	60%	400
63	100%	161%	161%	100%	77%	77%	400
64	100%	138%	138%	100%	55%	55%	400
65	100%	120%	120%	100%	45%	45%	400
66	100%	148%	148%	100%	77%	77%	500
67	100%	155%	155%	100%	78%	78%	500
68	100%	140%	140%	100%	76%	76%	500
69	100%	145%	145%	100%	80%	80%	500
70	100%	119%	119%	100%	54%	54%	500

71	100%	205%	205%	100%	67%	67%	600
72	100%	139%	139%	100%	50%	50%	600
74	100%	146%	146%	100%	68%	68%	600
75	100%	129%	129%	100%	63%	63%	600

### 9.3.6. Αναγνώριση ανθεκτικών δικτύων

Για την αναγνώριση των ‘ανθεκτικών’ δικτύων, θα συσχετιστούν οι αυξήσεις των μέσων χρόνων μετακίνησης με τις μειώσεις του συνολικού αριθμού μετακινήσεων (όπως αυτές περιγράφονται στην προηγούμενη ενότητα), για να ταυτοποιηθούν εκείνα τα δίκτυα τα οποία, παρόλη την αφαίρεση στοιχείων, παρουσιάζουν τις κοντινότερες στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Με τη συσχέτιση αυτή που απεικονίζεται στην Εικόνα 78 παρέχεται μια καθαρή εικόνα για τα ανθεκτικά αυτά δίκτυα.

- Μικρή επίδραση στο Μέσο Χρόνο Μετακίνησης (ΜΧΜ) – Μεγάλη επίδραση στον αριθμό μετακινήσεων: Μεσαία ανθεκτικότητα (1<sup>ο</sup> τεταρτημόριο)
- Μικρή επίδραση στο Μέσο Χρόνο Μετακίνησης (ΜΧΜ) – Μικρή επίδραση στον αριθμό μετακινήσεων: Υψηλή ανθεκτικότητα (2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο)
- Μεγάλη επίδραση στο Μέσο Χρόνο Μετακίνησης (ΜΧΜ) – Μικρή επίδραση στον αριθμό μετακινήσεων: Μεσαία ανθεκτικότητα (3<sup>ο</sup> τεταρτημόριο)
- Μεγάλη επίδραση στο Μέσο Χρόνο Μετακίνησης (ΜΧΜ) – Μεγάλη επίδραση στον αριθμό μετακινήσεων: Χαμηλή ανθεκτικότητα (4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο)



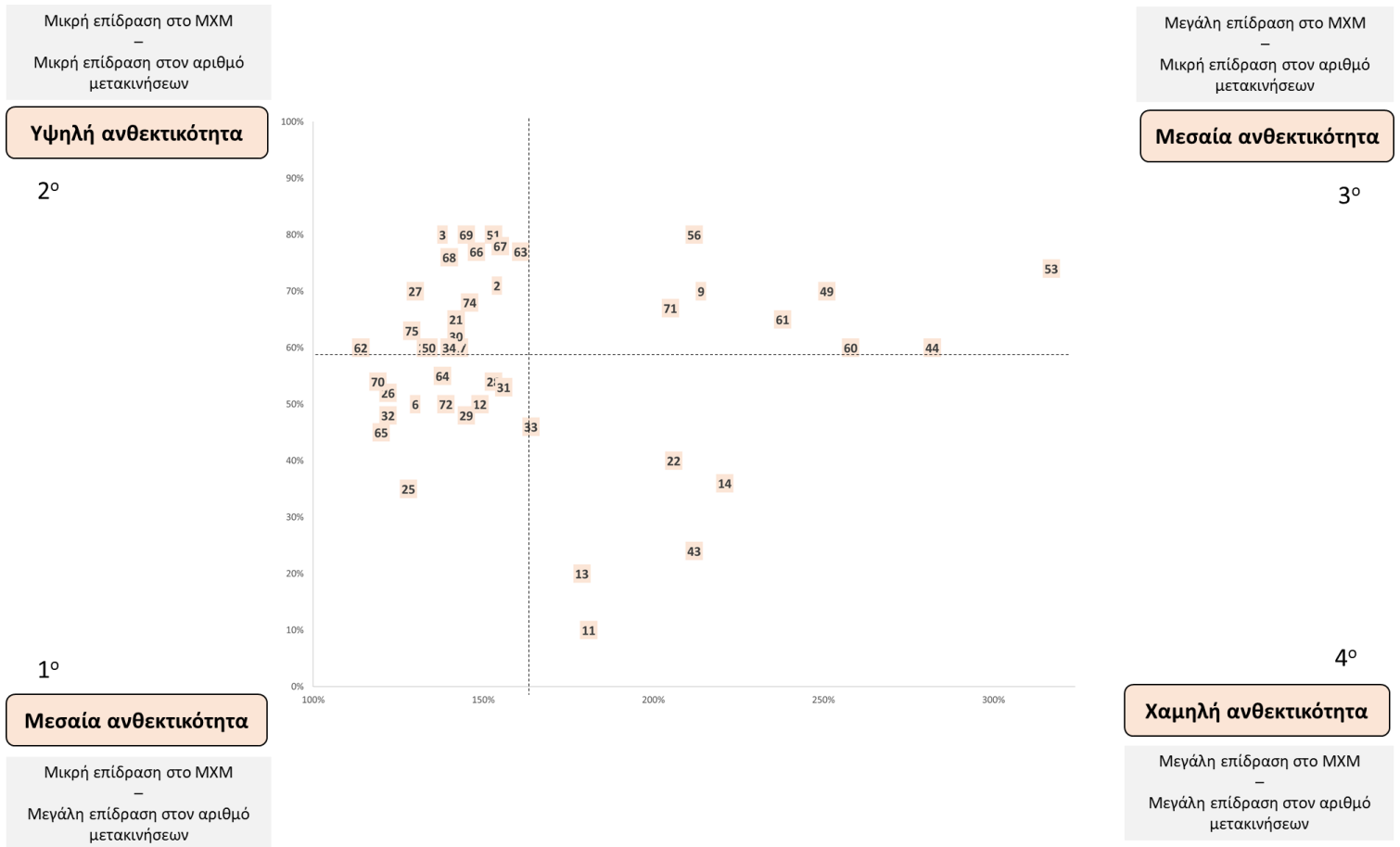
**Εικόνα 78: Αναγνώριση ανθεκτικότητας δικτύων (σύμφωνα με την κωδικοποίηση των τυχαίων δικτύων)**

Όπως φαίνεται στο 2° τεταρτημόριο (Εικόνα 78 – πάνω αριστερά), τα δίκτυα που θεωρούνται υψηλής ανθεκτικότητας, είναι αυτά στα οποία η αφαίρεση του 30% των στοιχείων τους είχε τη μικρότερη σχετική επίδραση στον μέσο χρόνο μετακίνησης, διατηρώντας και σε μεγάλο ποσοστό τον συνολικό αριθμό μετακινήσεων (άρα η επίδραση είναι μικρή). Προκύπτει έτσι το σύνολο των δικτύων τα οποία θεωρούνται ‘ανθεκτικά’. Αυτά τα δίκτυα είναι τα εξής (με αναφορά στον κωδικό τους):

2, 3, 6, 12, 17, 20, 21, 26, 27, 28, 30, 31, 34, 50, 51, 62, 63, 64, 66, 67, 68, 69, 70, 72, 74 και 75

Επειδή όμως η παραπάνω κατηγοριοποίηση είναι αυθαίρετη καθώς το εύρος επίδρασης θεωρείται πολύ μεγάλο για να χαρακτηρίζει την ανθεκτικότητα (όπως φαίνεται στην Εικόνα 78, τα όρια ανθεκτικότητας τέθηκαν στο 200% του αρχικού μέσου χρόνου μετακίνησης, και στο 50% του αρχικού συνολικού αριθμού μετακινήσεων – ως αρχικό θεωρείται σε κάθε περίπτωση το σενάριο χωρίς αφαίρεση στοιχείων). Για το λόγο αυτό, θεωρήθηκαν ως όρια ανθεκτικότητας οι μέσοι όροι των διαφορών επίδρασης των δικτύων. Οι τιμές αυτών είναι στο 160% του αρχικού μέσου χρόνου μετακίνησης και στο 58% του αρχικού συνολικού

αριθμού μετακινήσεων. Σύμφωνα με αυτά τα όρια ανθεκτικότητας, προέκυψαν τα τελικά ανθεκτικά δίκτυα όπως απεικονίζονται στο 2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο στην Εικόνα 79.



**Εικόνα 79: Ανθεκτικά δίκτυα (2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο) (σύμφωνα με την κωδικοποίηση των τυχαίων δικτύων)**

Προκύπτει έτσι το τελικό σύνολο των δικτύων, για τα οποία θα εξεταστούν οι κατανομές των τιμών των μέτρων της Θεωρίας Δικτύων στα οποία κατέληξε το Βήμα 1 του 2<sup>ου</sup> επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης. Αυτά τα δίκτυα είναι τα εξής (με αναφορά στον κωδικό τους):

2, 3, 17, 20, 21, 27, 30, 34, 50, 51, 62, 63, 66, 67, 68, 69, 74 και 75

Για τα ‘ανθεκτικά’ αυτά δίκτυα, δεν φαίνεται να υπάρχει μοτίβο (pattern) μεταξύ του μεγέθους ενός δικτύου και της τρωτότητάς του όπως φαίνεται στην Εικόνα 80. Όπως παρατηρείται, στο δεύτερο τεταρτημόριο υψηλής ανθεκτικότητας υπάρχουν δίκτυα όλων των μεγεθών (από 50 έως και 600 κόμβους).

Μικρή επίδραση στο MXM  
 –  
 Μικρή επίδραση στον αριθμό μετακινήσεων

**Υψηλή ανθεκτικότητα**

2°

1°

**Μεσαία ανθεκτικότητα**

Μικρή επίδραση στο MXM  
 –  
 Μεγάλη επίδραση στον αριθμό μετακινήσεων

Μεγάλη επίδραση στο MXM  
 –  
 Μικρή επίδραση στον αριθμό μετακινήσεων

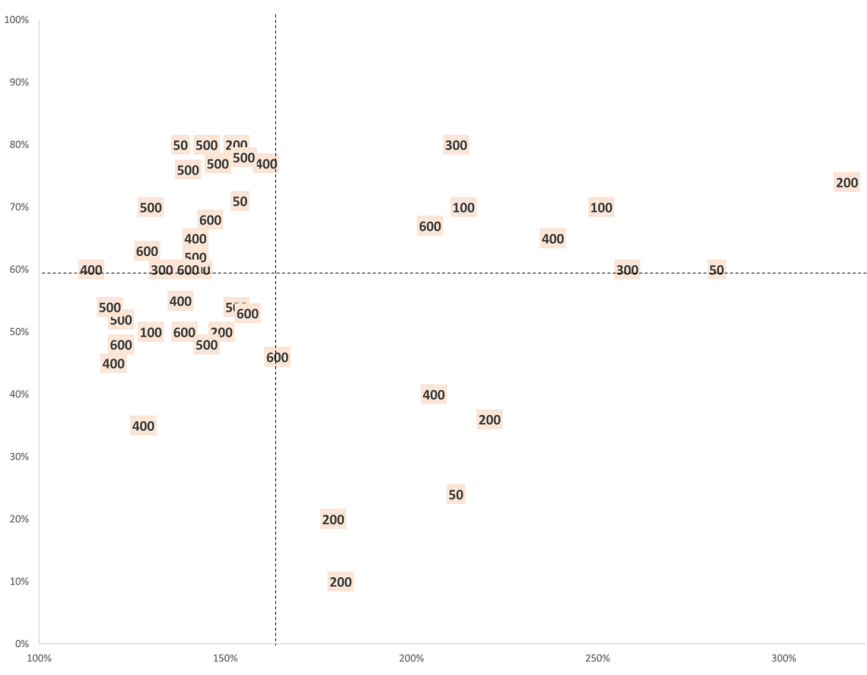
**Μεσαία ανθεκτικότητα**

3°

4°

**Χαμηλή ανθεκτικότητα**

Μεγάλη επίδραση στο MXM  
 –  
 Μεγάλη επίδραση στον αριθμό μετακινήσεων



Εικόνα 80: Αναγνώριση ανθεκτικότητας δικτύων (σύμφωνα με την κωδικοποίηση των τυχαίων δικτύων)

**9.3.7. Ανάλυση τιμών μέτρων Θεωρίας Δικτύων – συνολική θεώρηση**

Στην Ενότητα αυτή, πριν μελετηθούν οι τιμές των μέτρων της Θεωρίας Δικτύων για τα ανθεκτικά δίκτυα, στα οποία κατέληξε η προηγούμενη ενότητα, επιχειρείται μια συνολικότερη θεώρηση της κατανομής των τιμών των μέτρων, για όλα τα δίκτυα για το “σενάριο 0” (χωρίς αφαίρεση στοιχείων). Σκοπός είναι να αναγνωριστούν περιοχές τιμών ή κατανομές τους για τα διάφορα μέτρα

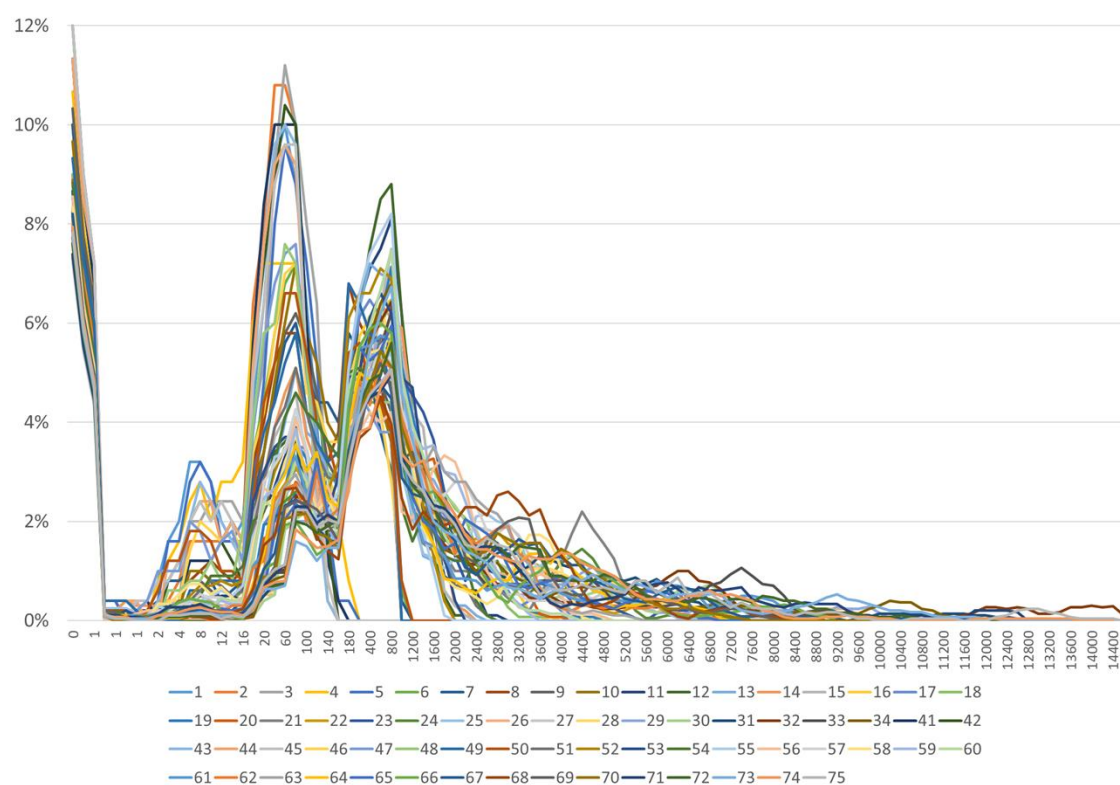
**9.3.7.1. Δύναμη Κόμβου**

Η Δύναμη Κόμβου είναι το πρώτο μέτρο της δέσμης (μέτρων) στην οποία κατέληξε η ενότητα 9.2.4. Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με τη δύναμη κόμβου, οι σημαντικότεροι κόμβοι ενός δικτύου είναι αυτοί με το μεγαλύτερο άθροισμα των βαρών (όλων) των τόξων που συνδέονται με έναν εξεταζόμενο κόμβο.



Εν προκειμένω, η δύναμη κόμβου κρίθηκε θετικά ως προς την εφαρμογή της σε ένα δίκτυο Μεταφορών, ως ένα μέτρο που μπορεί να καταδείξει εκείνους τους κόμβους για τους οποίους το σύνολο των κυκλοφοριακών φόρτων που ξεκινούν, καταλήγουν ή διέρχονται μέσω αυτών, είναι οι μεγαλύτεροι συγκριτικά με άλλους και άρα οι σημαντικότεροι. Για τη δύναμη κόμβου γίνεται θεώρηση του 'βάρους' ενός τόξου τμήματος, (δηλαδή) ο όγκος του κυκλοφοριακού φόρτου που εξυπηρετείται από αυτό.

Στην Εικόνα 81 απεικονίζονται οι κατανομές των τιμών της Δύναμης Κόμβου για όλα τα τυχαία δίκτυα που δημιουργήθηκαν.



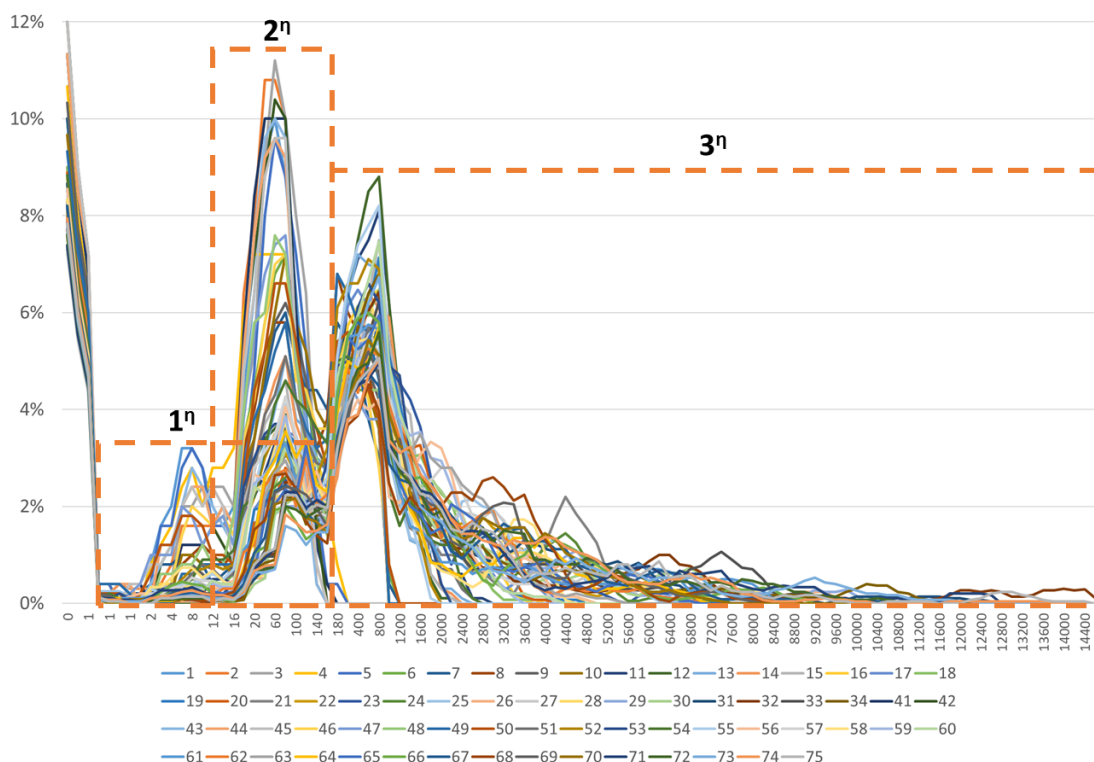
**Εικόνα 81: Κατανομές τιμών Δύναμης Κόμβου για όλα τα δίκτυα**

Σύμφωνα με την Εικόνα 81 φαίνεται να υπάρχουν 3 διακριτές περιοχές τόσο τιμών όσο και κατανομών τους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 82:

- Στην πρώτη περιοχή, φαίνονται κοίλες κατανομές με εμφάνιση ουράς προς το τέλος του εύρους τιμών της περιοχής. Το εύρος τιμών είναι περίπου μεταξύ 1 και 140, με σημείο καμψής των καμπυλών μεταξύ των τιμών 8 και 12. Η συγκέντρωση των τιμών είναι σχετικά μεγάλη και η κατανομή τους φαίνεται να είναι κανονική.
- Στη δεύτερη περιοχή, οι κοίλες κατανομές έχουν οριακά μικρότερο εύρος τιμών (περίπου μεταξύ 12 και 170). Ενώ το εύρος τιμών είναι παρόμοιο με της 1<sup>ης</sup> περιοχής, η συγκέντρωση των τιμών εμφανίζει πολύ μικρή διασπορά συγκριτικά με την 1<sup>η</sup>

περιοχή, και η κατανομή τους φαίνεται να είναι κανονική και ομαλή (χωρίς κορυφές και χωρίς ουρές).

- Στην τρίτη περιοχή, οι κατανομές είναι κανονικές με έντονη εμφάνιση ουράς για τις μεγάλες τιμές (και ακραίες τιμές του εύρους τιμών της περιοχής). Παρατηρείται μεγάλη διασπορά στο εύρος των τιμών (από 140 έως 14.000) ενώ για κάποιες τιμές υπάρχει επικάλυψη με τις τιμές της 2<sup>ης</sup> περιοχής.



Εικόνα 82: Περιοχές τιμών και κατανομών της Δύναμης Κόμβου για όλα τα δίκτυα

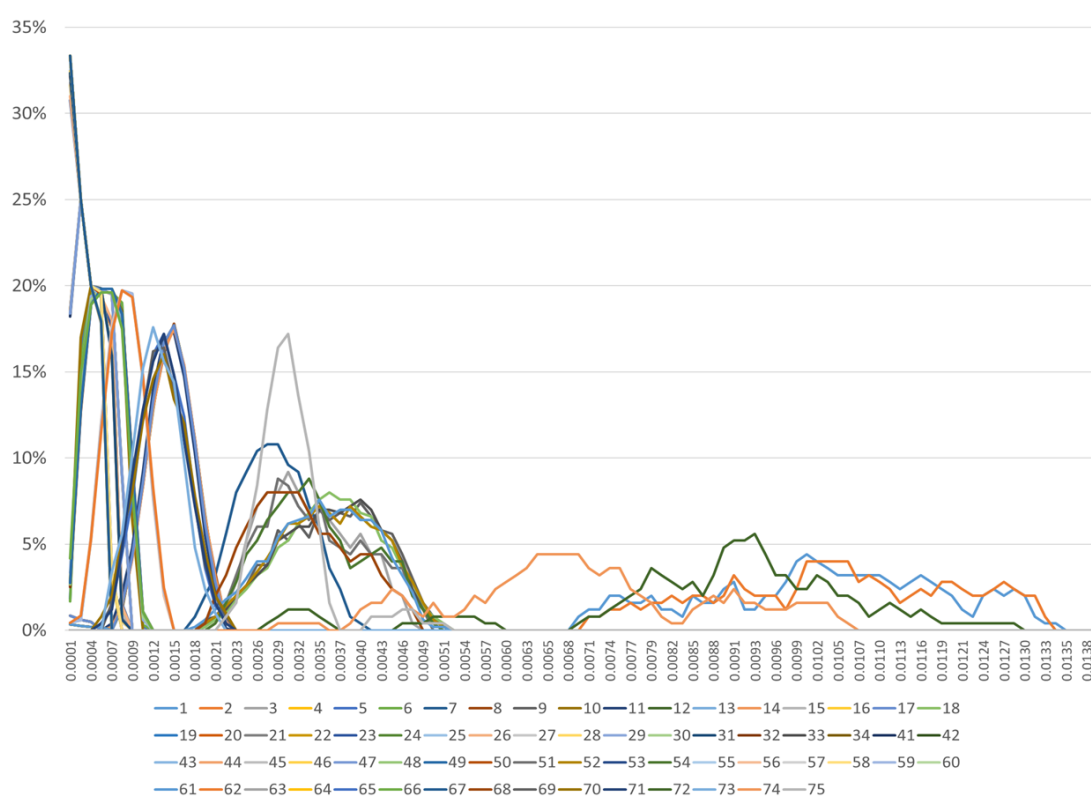
Η απεικόνιση των τιμών και των κατανομών τους σε μορφή διαγραμμάτων δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια για εξαγωγή συμπερασμάτων, δίνει όμως μια εικόνα της συμπεριφοράς των τιμών και των κατανομών τους για την δύναμη κόμβου.

### 9.3.7.2. Κεντρικότητα Εγγύτητας

Η Κεντρικότητα Εγγύτητας είναι το δεύτερο μέτρο της δέσμης (μέτρων) στην οποία κατέληξε η Ενότητα 9.2.4. Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με την κεντρικότητα εγγύτητας, οι σημαντικότεροι κόμβοι ενός δικτύου είναι αυτοί, οι οποίοι βρίσκονται σε κοντινότερες αποστάσεις σε σχέση με τους υπόλοιπους. Έτσι, η ύπαρξη μικρής ή μέσης απόστασης ενός κόμβου από τους υπόλοιπους συνεπάγεται αυτόματα και καλύτερη ικανότητα διάδοσης της ροής (είτε κυκλοφοριακής είτε άλλης).

Εν προκειμένω, η κεντρικότητα εγγύτητας κρίθηκε θετικά ως προς την εφαρμογή της σε ένα δίκτυο Μεταφορών, ως ένα μέτρο που μπορεί να καταδείξει εκείνους τους κόμβους, για τους οποίους οι χρόνοι σύνδεσής τους με όλους τους υπόλοιπους κόμβους ενός δικτύου, είναι οι μικρότεροι και άρα οι σημαντικότεροι. Αντί για χρήση της απόστασης στην εύρεση και τον υπολογισμό των κοντινότερων αποστάσεων από κόμβο σε κόμβο, γίνεται χρήση του χρόνου διάνυσης  $t$  ενός οδικού τμήματος, όπως προκύπτει έπειτα από τον καταμερισμό των μετακινήσεων στο δίκτυο.

Στην Εικόνα 83 απεικονίζονται οι κατανομές των τιμών της κεντρικότητας εγγύτητας για όλα τα τυχαία δίκτυα που δημιουργήθηκαν.

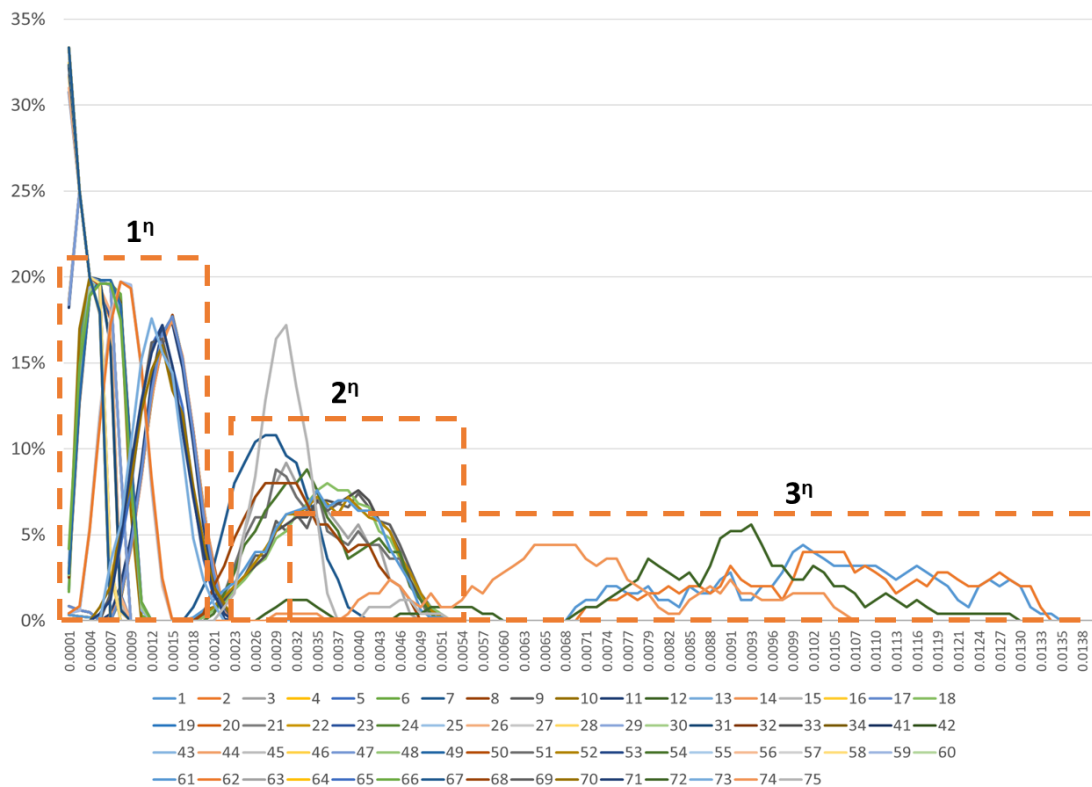


**Εικόνα 83: Κατανομές τιμών Κεντρικότητας Εγγύτητας για όλα τα δίκτυα**

Σύμφωνα με την Εικόνα 83 φαίνεται να υπάρχουν 3 διακριτές περιοχές τόσο τιμών όσο και κατανομών τους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 84:

- Στην πρώτη περιοχή, οι κοίλες κατανομές έχουν εύρος τιμών περίπου μεταξύ 0.0010 και 0.0015 (από 0.0001 έως 0.0011 και από 0.0004 έως 0.0019), με σημείο καμψής των καμπυλών στις τιμές 0.0005 και 0.0011. Η συγκέντρωση των τιμών είναι μεγάλη και η κατανομή τους φαίνεται να είναι κανονική. Παρατηρούνται δύο περιπτώσεις δικτύων, των οποίων οι τιμές δεν ακολουθούν το μοτίβο των υπόλοιπων δικτύων αυτής της περιοχής.

- Στη δεύτερη περιοχή, οι κοίλες κατανομές έχουν σημαντικά μεγαλύτερο εύρος τιμών, περίπου μεταξύ 0.002 και 0.0025 (από τιμές 0.0013-0.0016 έως 0.0033-0.0038), με σημείο καμπής των καμπυλών στις τιμές 0.0023 και 0.0024. Η συγκέντρωση των τιμών εμφανίζει διασπορά συγκριτικά με την 1<sup>η</sup> περιοχή, και η κατανομή τους φαίνεται να είναι κανονική, με πολλές όμως κορυφές (έναντι πιο ομαλών καμπυλών στην 1<sup>η</sup> περιοχή). Παρατηρείται μία περίπτωση δικτύου, του οποίου οι τιμές δεν ακολουθούν το μοτίβο των υπόλοιπων δικτύων αυτής της περιοχής.
- Στην τρίτη περιοχή, οι κατανομές είναι τόσο κοίλες όσο και κυρτές. Παρατηρείται μεγάλη διασπορά στο εύρος των τιμών (από 0.0029 έως 0.0135) ενώ για συγκεκριμένες τιμές υπάρχει επικάλυψη με τις τιμές της 2<sup>ης</sup> περιοχής. Η μορφή της κατανομής των τιμών της περιοχής αυτής δεν είναι απαραίτητα κανονική, αντιθέτως είναι έως και ομοιόμορφη για κάποιες περιπτώσεις δικτύων.



**Εικόνα 84:** Περιοχές τιμών και κατανομών της Κεντρικότητας Εγγύτητας για όλα τα δίκτυα

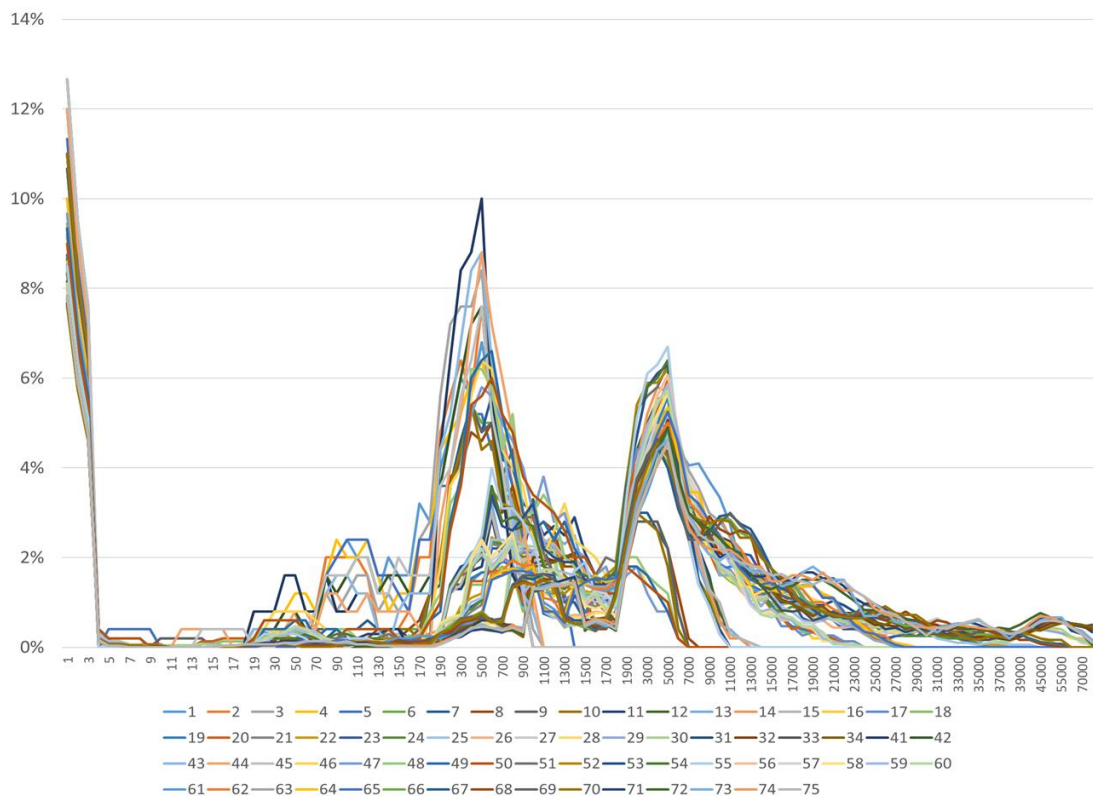
Η απεικόνιση των τιμών και των κατανομών τους σε μορφή διαγραμμάτων δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια για εξαγωγή συμπερασμάτων, δίνει όμως μια εικόνα της συμπεριφοράς των τιμών και των κατανομών τους για την κεντρικότητα εγγύτητας.

### 9.3.7.3. Κεντρικότητα Ενδιαμέσου

Η Κεντρικότητα Ενδιαμέσου είναι το τρίτο μέτρο της δέσμης μέτρων στην οποία κατέληξε η Ενότητα 9.2.4. Υπενθυμίζεται, ότι σύμφωνα με την κεντρικότητα ενδιαμέσου, οι σημαντικότεροι κόμβοι ενός δικτύου είναι αυτοί οι οποίοι βρίσκονται σε μεγάλο πλήθος συντομότερων διαδρομών μεταξύ δύο άλλων κόμβων στο δίκτυο.

Εν προκειμένω, η κεντρικότητα ενδιαμέσου κρίθηκε θετικά ως προς την σκοπιμότητα εφαρμογής της σε ένα δίκτυο Μεταφορών, ως μέτρο που μπορεί να καταδείξει τους κόμβους εκείνους σε ένα δίκτυο που, επειδή εξυπηρετούν το μεγαλύτερο αριθμό κοντινότερων διαδρομών, είναι σημαντικοί για τη λειτουργία του δικτύου και άρα πιθανά μέτρα προσαρμογής σε ακραία καιρικά φαινόμενα καθώς και μέτρα μείωσης της τρωτότητας θα μπορούσαν να κατευθυνθούν σε αυτούς. Αντί για τη χρήση της απόστασης, έγινε χρήση του χρόνου διάνυσης  $t$  ενός οδικού τμήματος, όπως προκύπτει έπειτα από τον καταμερισμό των μετακινήσεων στο δίκτυο, για τον υπολογισμό και την εύρεση συντομότερων διαδρομών μεταξύ δύο κόμβων.

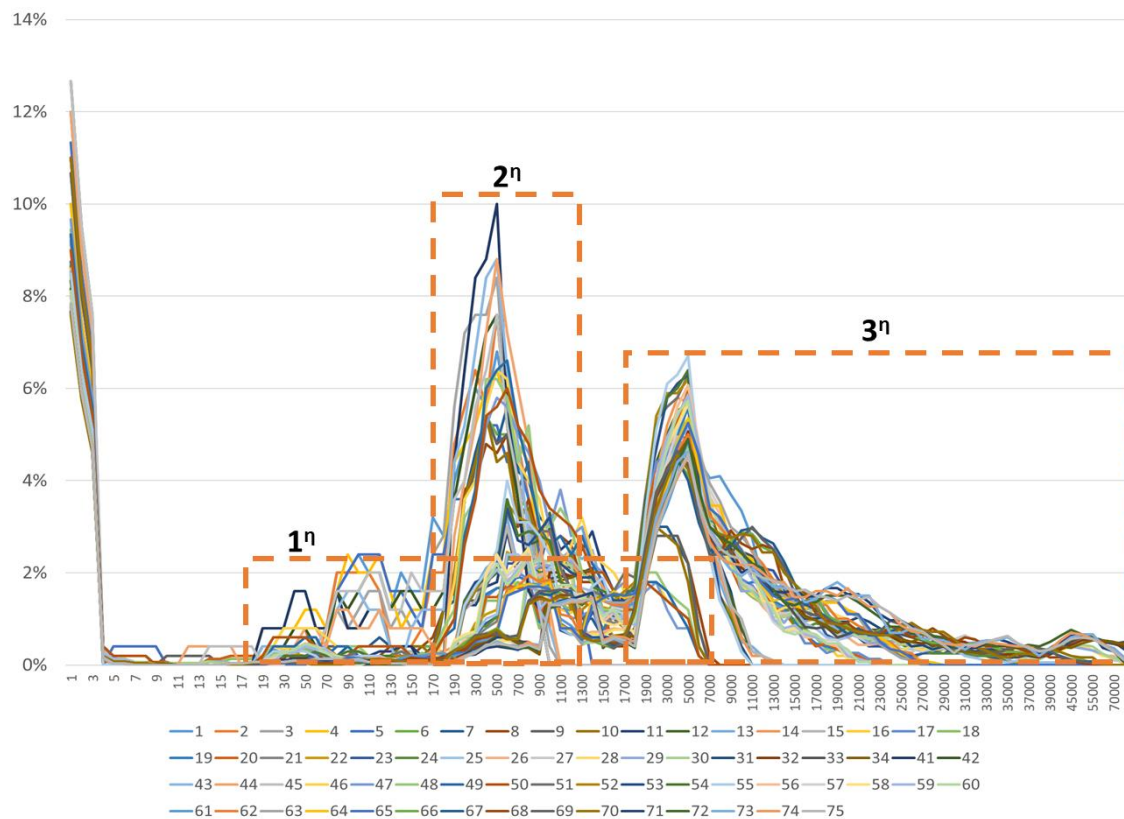
Στην Εικόνα 85 απεικονίζονται οι κατανομές των τιμών της κεντρικότητας ενδιαμέσου για όλα τα τυχαία δίκτυα που δημιουργήθηκαν.



**Εικόνα 85: Κατανομές τιμών Κεντρικότητας Ενδιαμέσου για όλα τα δίκτυα**

Σύμφωνα με την Εικόνα 85 φαίνεται να υπάρχουν 3 διακριτές περιοχές τόσο τιμών όσο και κατανομών τους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 86:

- Στην πρώτη περιοχή, οι κατανομές δεν έχουν συγκεκριμένη μορφολογία, φαίνεται να υπάρχουν πολλά άκρα στις καμπύλες που δημιουργούνται από τις κατανομές και οι κατανομές διαφόρων δικτύων παρουσιάζουν κοίλα και κυρτά διαστήματα. Η συγκέντρωση των τιμών εμφανίζει μεγάλη διασπορά (μεταξύ 17 και 7000)
- Στη δεύτερη περιοχή, οι κοίλες κατανομές έχουν σημαντικά μικρότερο εύρος τιμών περίπου μεταξύ 170 και 1300. Η συγκέντρωση των τιμών είναι μεγάλη συγκριτικά με την 1<sup>η</sup> περιοχή, και η κατανομή τους είναι κανονική, με διαφοροποίηση όμως στο εύρος τιμών.
- Στην τρίτη περιοχή, οι κατανομές είναι κανονικές με ουρά προς τις μεγάλες τιμές του μέτρου. Παρατηρείται επίσης μεγάλη διασπορά στο εύρος των τιμών (από 1700 έως 70000) ενώ για συγκεκριμένες τιμές υπάρχει επικάλυψη με τις τιμές της 1<sup>ης</sup> περιοχής.



**Εικόνα 86: Περιοχές τιμών και κατανομών της Κεντρικότητας Ενδιαμέσου για όλα τα δίκτυα**

Η απεικόνιση των τιμών και των κατανομών τους σε μορφή διαγραμμάτων δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια για εξαγωγή οριστικών συμπερασμάτων, δίνει όμως μια εικόνα της συμπεριφοράς των τιμών και των κατανομών τους για την κεντρικότητα ενδιαμέσου.

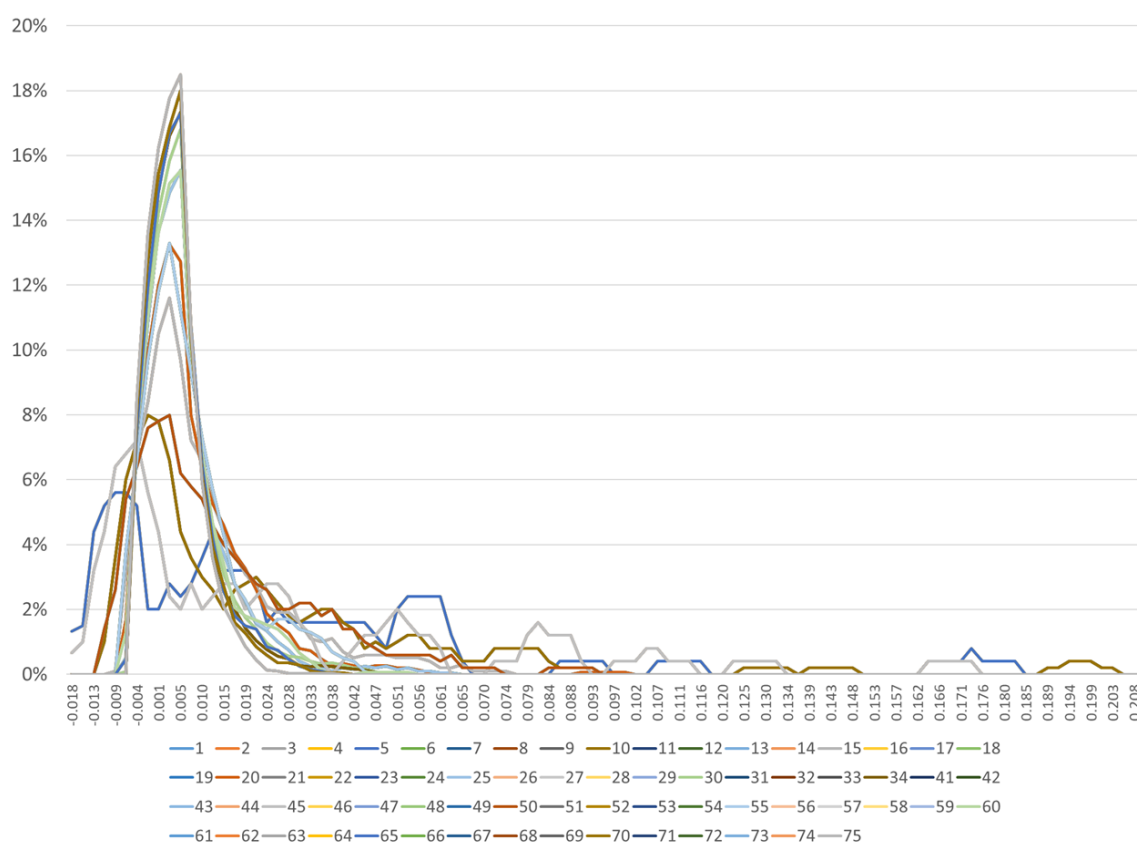
#### 9.3.7.4. Κεντρικότητα Πληροφορίας

Η Κεντρικότητα Πληροφορίας είναι το τελευταίο μέτρο της δέσμης στην οποία κατέληξε η Ενότητα 9.2.4. Υπενθυμίζεται, ότι σύμφωνα με την κεντρικότητα πληροφορίας οι σημαντικότεροι κόμβοι ενός δικτύου είναι αυτοί οι οποίοι έχουν τη μεγαλύτερη συμβολή των οντοτήτων (πληροφοριών, κυκλοφορίας, νερού, κ.ο.κ.) σε όλο το δίκτυο. Ο τρόπος με τον οποίο ποσοτικοποιείται αυτή η συμβολή, είναι η εξέταση της συμπεριφοράς ενός δικτύου έπειτα από την απομάκρυνση του εκάστοτε εξεταζόμενου κόμβου. Αρχικά εξετάζεται η ικανότητα μετάδοσης οντοτήτων του δικτύου αποτελούμενου από όλους τους κόμβους, και στη συνέχεια επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία απενεργοποιώντας κάθε φορά έναν κόμβο, με στόχο τον δι'απαγωγής υπολογισμό της συνεισφοράς του στο δίκτυο.

Εν προκειμένω, η κεντρικότητα πληροφορίας κρίθηκε θετικά ως προς την εφαρμογή της σε ένα δίκτυο Μεταφορών, ως ένα μέτρο που μπορεί να καταδείξει εκείνους τους κόμβους, των οποίων η μη λειτουργία θα είχε τη μεγαλύτερη επίπτωση στην αποτελεσματικότητα του

δικτύου, ή με άλλα εκείνους τους κόμβους των οποίων η διατήρηση λειτουργίας θα ήταν κρίσιμη. Αντί της απόστασης των συντομότερων διαδρομών, ως μέτρο υπολογισμού της αποτελεσματικότητας του δικτύου, γίνεται χρήση του χρόνου διάνυσης σωρευτικά και της συνολικής χρονικής καθυστέρησης της αλληλουχίας των οδικών τμημάτων που συνιστούν τη συντομότερη διαδρομή.

Στην Εικόνα 87 απεικονίζονται οι κατανομές των τιμών της κεντρικότητας ενδιαμέσου για όλα τα τυχαία δίκτυα που δημιουργήθηκαν.



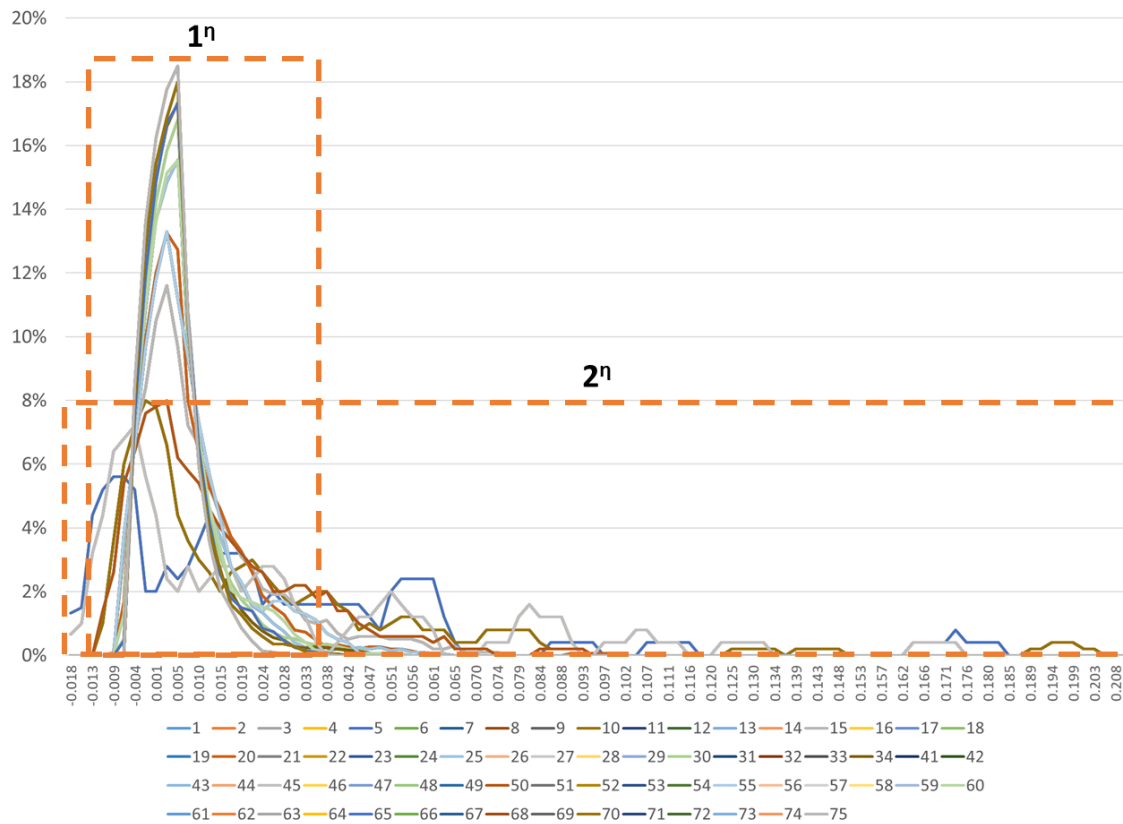
**Εικόνα 87: Κατανομές τιμών Κεντρικότητας Πληροφορίας για όλα τα δίκτυα**

Σύμφωνα με την Εικόνα 87 φαίνεται να υπάρχουν 2 διακριτές περιοχές, τόσο τιμών όσο και κατανομών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 88:

- Στην πρώτη περιοχή, οι κοίλες κατανομές έχουν εύρος τιμών περίπου μεταξύ -0.013 και 0.033, με μικρή διασπορά τιμών και σημείο καμπής των καμπυλών την τιμή 0.01. Η συγκέντρωση των τιμών είναι μεγάλη και η κατανομή τους είναι κανονική.
- Στη δεύτερη περιοχή, οι κοίλες κατανομές έχουν σημαντικά μεγαλύτερο εύρος τιμών περίπου μεταξύ -0.018 και 0.208 και εμφανίζουν μεγάλες ουρές προς το δεξιό άκρο του εύρους τους. Η συγκέντρωση των τιμών εμφανίζει διασπορά συγκριτικά με την



1<sup>η</sup> περιοχή, και η κατανομή τους είναι κανονική, με πολλές όμως κορυφές (έναντι πιο ομαλών καμπυλών στην 1<sup>η</sup> περιοχή).



**Εικόνα 88: Περιοχές τιμών και κατανομών της Κεντρικότητας Ενδιαμέσου για όλα τα δίκτυα**

Η απεικόνιση των τιμών και των κατανομών τους σε μορφή διαγραμμάτων δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μόνη της για εξαγωγή συμπερασμάτων, δίνει όμως μια εικόνα της συμπεριφοράς των τιμών και των κατανομών τους για την κεντρικότητα πληροφορίας.

### 9.3.8. Συσχέτιση τιμών μέτρων Θεωρίας Δικτύων και απόδοσης ανθεκτικών δικτύων

Στην ενότητα αυτή γίνεται ανάλυση των τιμών των μέτρων της Θεωρίας Δικτύων, μόνο για τα δίκτυα τα οποία κρίθηκαν ως ανθεκτικά, για τα οποία δηλαδή η αφαίρεση των στοιχείων τους είχε τη μικρότερη επίδραση στον μέσο χρόνο μετακίνησης και στον συνολικό αριθμό μετακινήσεων. Υπενθυμίζεται ότι η διαδικασία αναγνώρισης των ανθεκτικών δικτύων περιγράφηκε στην Ενότητα 9.3.6 και τα δίκτυα, τα οποία αναλύονται, είναι αυτά με τους εξής κωδικούς:

2, 3, 17, 20, 21, 27, 30, 34, 50, 51, 62, 63, 66, 67, 68, 69, 74 και 75

Σε αντίθεση όμως με την προηγούμενη ενότητα, δεν γίνεται απεικόνιση των τιμών των μέτρων των ανθεκτικών δικτύων σε διαγράμματα (καθώς αυτό καλύπτεται από τα διαγράμματα της προηγούμενης ενότητας, στα οποία υπάρχουν και τα ανθεκτικά δίκτυα, αλλά μια προσπάθεια συσχέτισης της απόδοσης των ανθεκτικών δικτύων (βλέπε Ενότητες 9.3.5 και 9.3.6) με τις τιμές των μέτρων (βλέπε Ενότητα 9.3.7). Σκοπός είναι, δηλαδή, η εύρεση κάποιων τιμών ή μοτίβων (patterns) τιμών ή κατανομών τους που να συνοδεύουν (και άρα να χαρακτηρίζουν) τα ανθεκτικά δίκτυα.

Για να γίνει αυτό, υπολογίστηκαν αρχικά από όλες τις τιμές των επιμέρους κόμβων για κάθε μέτρο, οι 'αναμενόμενες' τιμές σε επίπεδο δικτύου, βάσει αυτών των κατανομών. Υπολογίστηκε δηλαδή μία τιμή ανά μέτρο και ανά δίκτυο που περιγράφει αυτό το δίκτυο, βάσει όλων των επιμέρους τιμών κάθε κόμβου και της πιθανότητας (βάσει κατανομής) εμφάνισης αυτής της τιμής. Για παράδειγμα, αν σε ένα δίκτυο 50 κόμβων, η κατανομή των τιμών κεντρικότητας εγγύτητας είναι 10% για την τιμή 1, 50% για την τιμή 10, 30% για την τιμή 100 και 10% για την τιμή 1000, τότε η αναμενόμενη τιμή κεντρικότητας εγγύτητας του εν λόγω δικτύου θα ισούται με:

$$10\% * 1 + 50\% * 10 + 30\% * 100 + 10\% * 1000$$

Ο Πίνακας 43 περιλαμβάνει τις αναμενόμενες τιμές για όλα τα δίκτυα ανά μέτρο που εξετάζεται (με σκίαση επισημαίνονται τα ανθεκτικότερα δίκτυα).

**Πίνακας 43: Αναμενόμενες τιμές των μέτρων σε επίπεδο δικτύου ανά εξεταζόμενο δίκτυο**

Κωδικός Δικτύου	Δύναμη Κόμβου	Κεντρικότητα Εγγύτητας	Κεντρικότητα Ενδιαμέσου	Κεντρικότητα Πληροφορίας
<b>2</b>	162	0.010418	251	0.025859
<b>3</b>	201	0.003320	249	0.025859
<b>6</b>	652	0.000572	784	0.023608
<b>9</b>	705	0.003588	795	0.023608
<b>11</b>	1987	0.001406	2020	0.010843
<b>12</b>	1876	0.001439	2017	0.010843
<b>13</b>	1504	0.000270	1973	0.010843
<b>14</b>	1752	0.001440	2001	0.010843
<b>17</b>	2700	0.001432	3327	0.008137
<b>20</b>	3296	0.000390	3336	0.008137
<b>21</b>	5496	0.000383	5037	0.006559
<b>22</b>	4845	0.000585	5024	0.006559
<b>25</b>	5101	0.000291	5058	0.006559
<b>26</b>	5780	0.000398	6752	0.005815
<b>27</b>	5346	0.000381	6731	0.005815
<b>28</b>	5936	0.000382	6752	0.005815
<b>29</b>	6425	0.000572	6763	0.005815
<b>30</b>	6041	0.000587	6776	0.005815

31	7689	0.000381	8134	0.005181
32	8548	0.000591	8053	0.005181
33	7485	0.003568	8155	0.005181
34	7416	0.000292	8110	0.005181
43	150	0.000270	246	0.026106
44	152	0.000457	275	0.026106
49	742	0.000589	693	0.013580
50	691	0.000271	702	0.013580
51	1768	0.003387	1899	0.007600
53	1817	0.000295	1921	0.007600
56	3565	0.000821	3511	0.005944
60	2850	0.000263	3520	0.005944
61	5619	0.003484	5186	0.004926
62	4333	0.000829	5170	0.004926
63	4379	0.000262	5195	0.004926
64	4656	0.000262	5175	0.004926
65	4774	0.001356	5163	0.004926
66	6167	0.000571	7351	0.004513
67	6653	0.000263	7302	0.004513
68	6493	0.003228	7315	0.004513
69	6172	0.001350	7293	0.004513
70	6136	0.001353	7421	0.004513
71	8412	0.001345	9430	0.003832
72	8005	0.008741	9459	0.003832
74	7734	0.006999	9510	0.003832
75	7939	0.003074	9492	0.003832

Για να συσχετιστούν τώρα αυτές οι τιμές των ανθεκτικών δικτύων με την απόδοσή τους και για να φανεί, αν τα μέτρα αυτά ή κάποιος συνδυασμός τους μπορεί να περιγράψει αυτά τα δίκτυα, έγινε ταξινόμηση των τιμών των μέτρων από το μεγαλύτερο στο μικρότερο, καθώς όπως φάνηκε και από την εφαρμογή των μέτρων στο πειραματικό δίκτυο Sioux Falls (Βήμα 1<sup>ο</sup> – βλέπε Ενότητα 9.2.2), όσο μεγαλύτερη η τιμή ενός μέτρου, τόσο σημαντικότερος ο κόμβος που εξετάζεται. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη η τιμή για ένα δίκτυο, τόσο δεξιότερα στην κατανομή των διαγραμμάτων της προηγούμενης ενότητας (ανά μέτρο), και τόσο καλύτερα για ένα δίκτυο. Για να αποδειχθεί αν ισχύει αυτή η υπόθεση και σε ποιο βαθμό, έγινε συσχέτιση κάθε φορά των τιμών ανά μέτρο, και για όλους τους συνδυασμούς τους, και απεικόνιση με τα ανθεκτικότερα δίκτυα (βλέπε Ενότητα 9.3.6).

Πρακτικά δηλαδή, ταξινομούνται τα δίκτυα από τη μεγαλύτερη προς τη μικρότερη τιμή αναλόγως με το μέτρο που εξετάζεται, και αποδίδεται σε κάθε δίκτυο μια σειρά σημαντικότητας (από το 1 έως το 44, όπου 44 είναι όλα τα δίκτυα που εξετάζονται). Σκοπός είναι να απεικονιστεί, αν στο αντίστοιχο 2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο που προκύπτει από την εκάστοτε συσχέτιση, τα ανθεκτικά δίκτυα παίρνουν αντίστοιχα τις υψηλότερες τιμές ταξινόμησης. Σε τέτοια περίπτωση, θα σημαίνει ότι το εκάστοτε μέτρο (και οι τιμές του) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αντιπροσωπευτικό της ανθεκτικότητας.

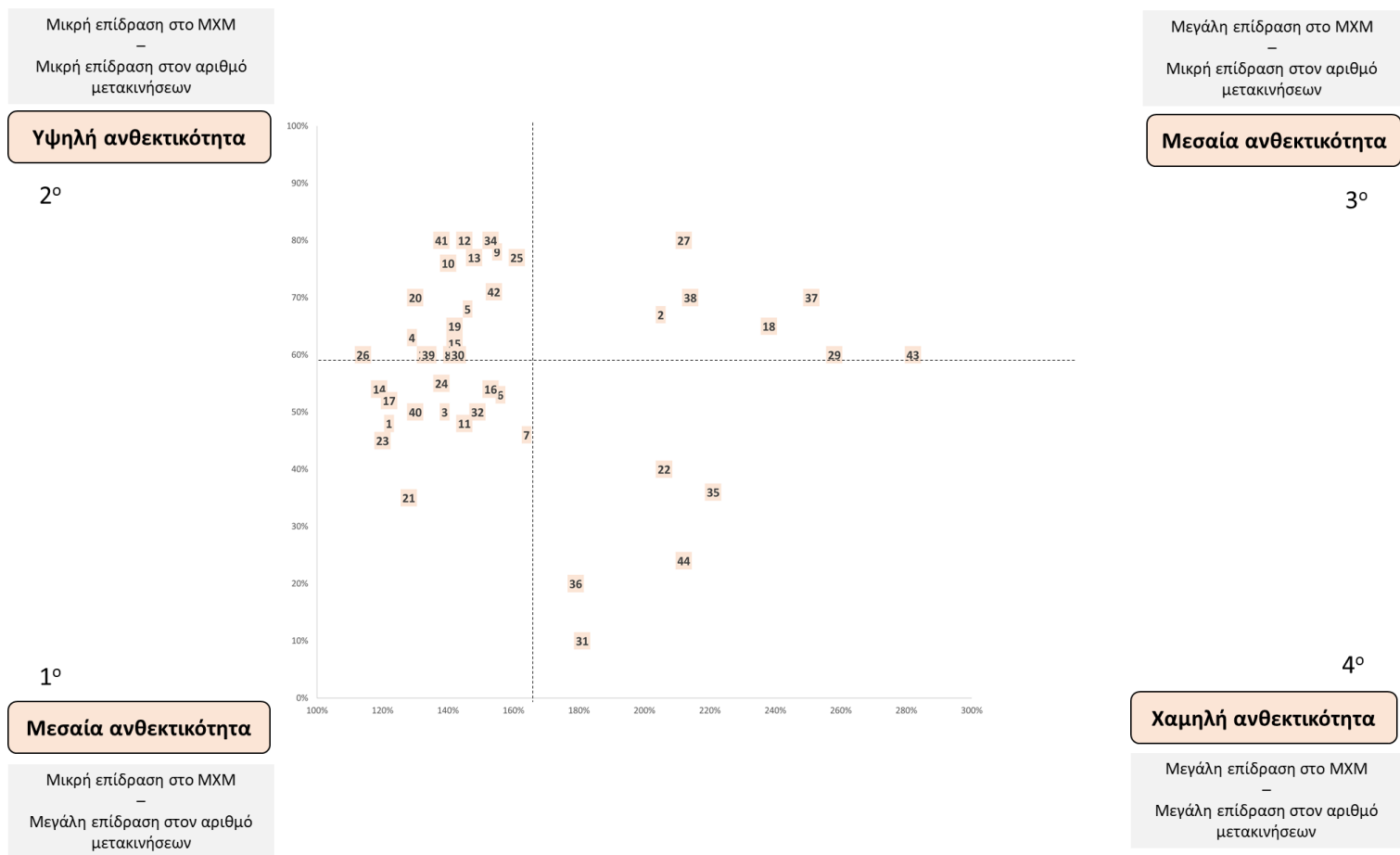
### 9.3.8.1. Δύναμη Κόμβου

Για τη δύναμη κόμβου, ισχύει η εξής ταξινόμηση – σε μορφή Πίνακα για τα 44 δίκτυα που εξετάζονται συνολικά (Πίνακας 44):

Πίνακας 44: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής δύναμης κόμβου

Κωδικός Δικτύου	Δύναμη Κόμβου	Ταξινόμηση	Κωδικός Δικτύου	Δύναμη Κόμβου	Ταξινόμηση
32	8548	1	65	4774	23
71	8412	2	64	4656	24
72	8005	3	63	4379	25
75	7939	4	62	4333	26
74	7734	5	56	3565	27
31	7689	6	20	3296	28
33	7485	7	60	2850	29
34	7416	8	17	2700	30
67	6653	9	11	1987	31
68	6493	10	12	1876	32
29	6425	11	53	1817	33
69	6172	12	51	1768	34
66	6167	13	14	1752	35
70	6136	14	13	1504	36
30	6041	15	49	742	37
28	5936	16	9	705	38
26	5780	17	50	691	39
61	5619	18	6	652	40
21	5496	19	3	201	41
27	5346	20	2	162	42
25	5101	21	44	152	43
22	4845	22	43	150	44

Αν τώρα γίνει η συσχέτιση αυτής της ταξινόμησης με την ανθεκτικότητα των δικτύων, προκύπτει και η αντίστοιχη απεικόνισή της στην Εικόνα 89.



Εικόνα 89: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησης τους βάσει τιμών Δύναμης Κόμβου

Όπως φαίνεται από τα 17 δίκτυα που χαρακτηρίστηκαν ως ανθεκτικά, και βρίσκονται στο 2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο (υψηλή ανθεκτικότητα), τα 8 εξ αυτών μπορούν να εκτιμηθούν μέσω της Δύναμης Κόμβου. Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων ακολουθεί μετά την ανάλυση όλων των μέτρων και των συνδυασμών τους στην Ενότητα 9.3.8.14.

### 9.3.8.1. Κεντρικότητα Εγγύτητας

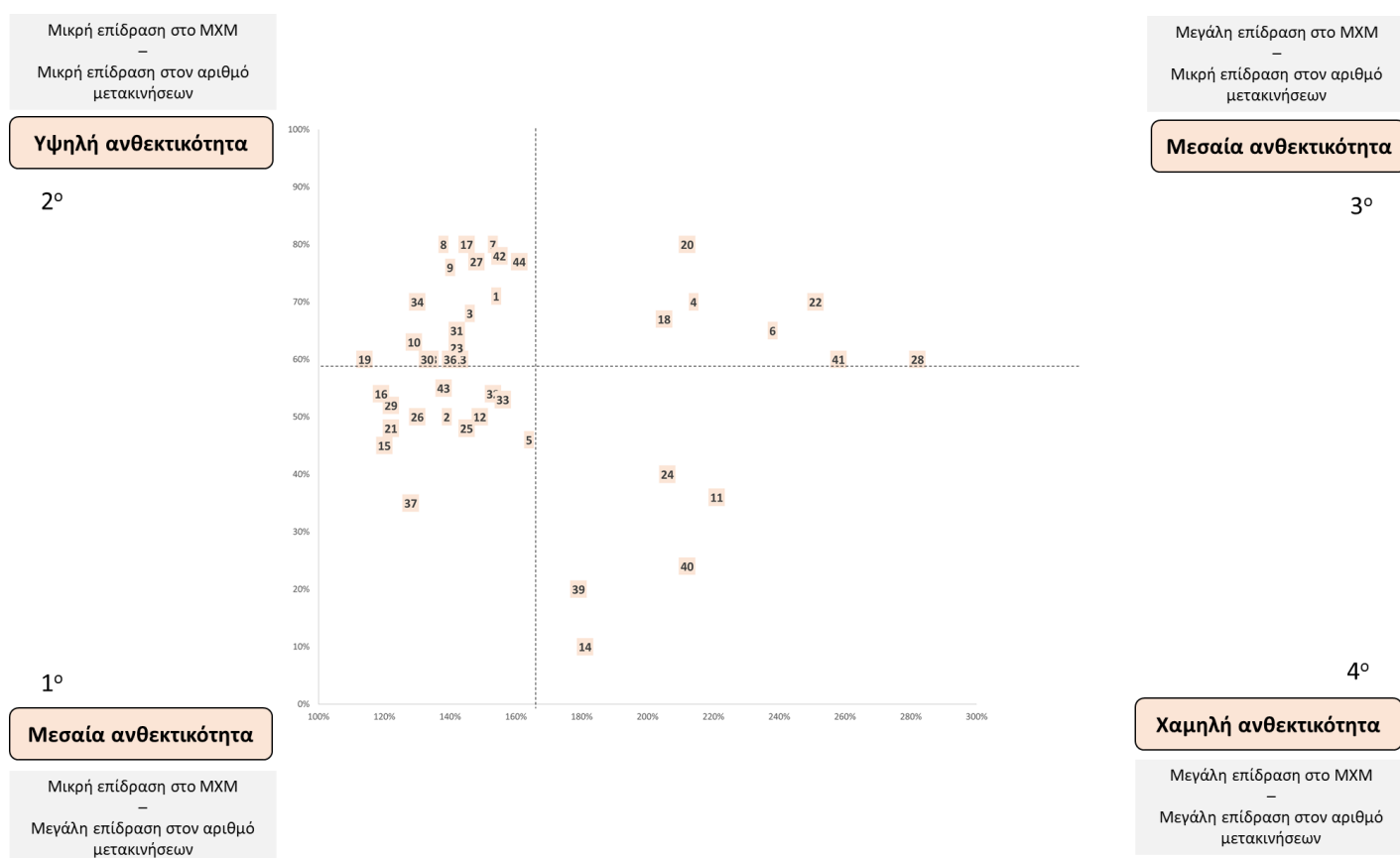
Για την κεντρικότητα εγγύτητας, ισχύει η εξής ταξινόμηση – σε μορφή Πίνακα για τα 44 δίκτυα που εξετάζονται συνολικά (Πίνακας 45):

Πίνακας 45: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής κεντρικότητας εγγύτητας

Κωδικός Δικτύου	Κεντρικότητα Εγγύτητας	Ταξινόμηση	Κωδικός Δικτύου	Κεντρικότητα Εγγύτητας	Ταξινόμηση
2	0.010418	1	30	0.000587	23
72	0.008741	2	22	0.000585	24
74	0.006999	3	29	0.000572	25
9	0.003588	4	6	0.000572	26
33	0.003568	5	66	0.000571	27
61	0.003484	6	44	0.000457	28

51	0.003387	7	26	0.000398	29
3	0.003320	8	20	0.000390	30
68	0.003228	9	21	0.000383	31
75	0.003074	10	28	0.000382	32
14	0.001440	11	31	0.000381	33
12	0.001439	12	27	0.000381	34
17	0.001432	13	53	0.000295	35
11	0.001406	14	34	0.000292	36
65	0.001356	15	25	0.000291	37
70	0.001353	16	50	0.000271	38
69	0.001350	17	13	0.000270	39
71	0.001345	18	43	0.000270	40
62	0.000829	19	60	0.000263	41
56	0.000821	20	67	0.000263	42
32	0.000591	21	64	0.000262	43
49	0.000589	22	63	0.000262	44

Αν τώρα γίνει η συσχέτιση αυτής της ταξινόμησης με την ανθεκτικότητα των δικτύων, προκύπτει και η αντίστοιχη απεικόνισή της στην Εικόνα 90.



Εικόνα 90: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησής τους βάσει τιμών Κεντρικότητας Εγγύτητας

Όπως φαίνεται από τα 17 δίκτυα που χαρακτηρίστηκαν ως ανθεκτικά, και βρίσκονται στο 2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο (υψηλή ανθεκτικότητα), τα 8 εξ αυτών μπορούν να εκτιμηθούν μέσω της Κεντρικότητας Εγγύτητας.

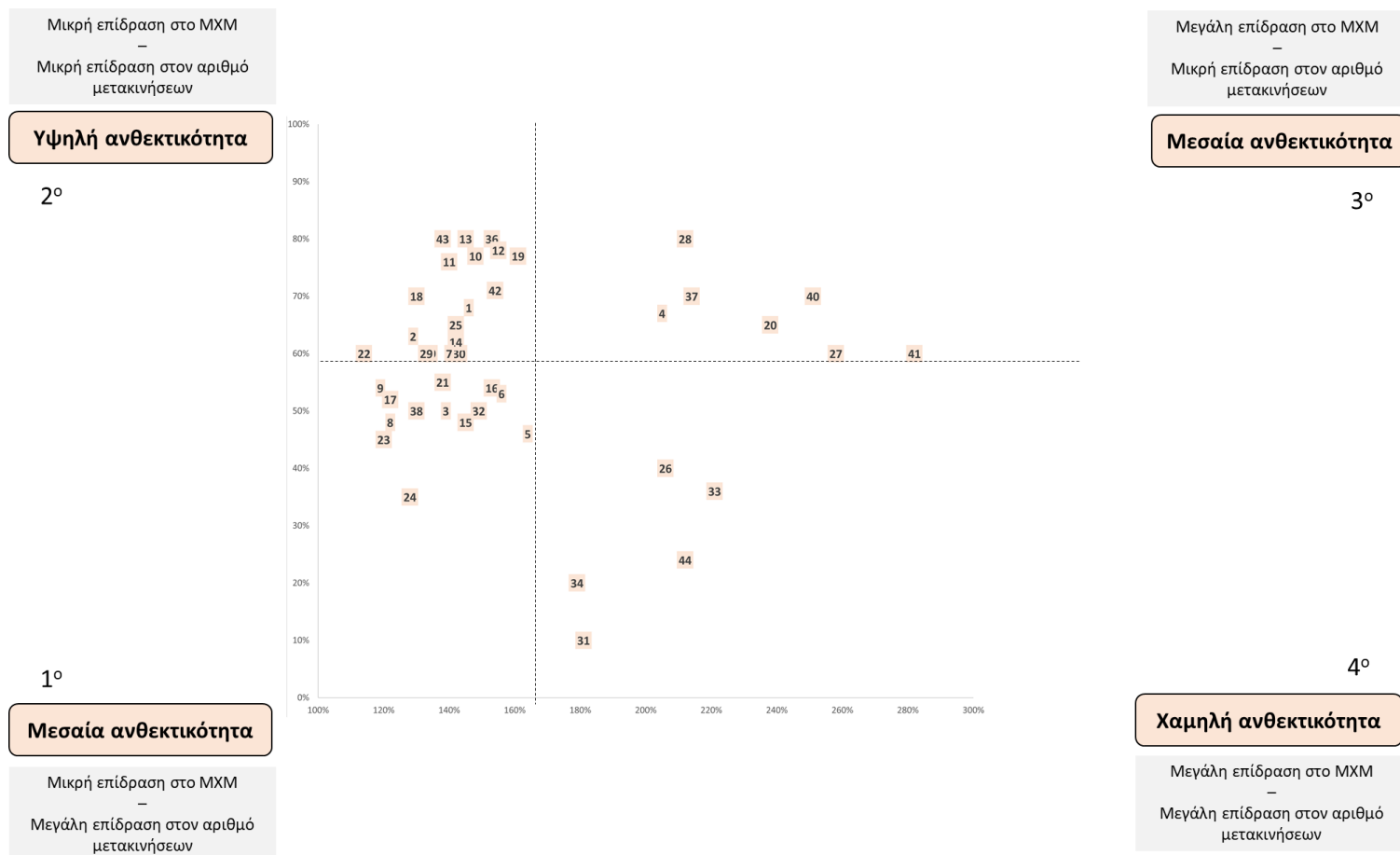
### 9.3.8.2. Κεντρικότητα Ενδιαμέσου

Για την κεντρικότητα ενδιαμέσου, ισχύει η εξής ταξινόμηση – σε μορφή Πίνακα για τα 44 δίκτυα που εξετάζονται συνολικά (Πίνακας 46):

Πίνακας 46: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής κεντρικότητας ενδιαμέσου

Κωδικός Δικτύου	Κεντρικότητα Ενδιαμέσου	Ταξινόμηση	Κωδικός Δικτύου	Κεντρικότητα Ενδιαμέσου	Ταξινόμηση
74	9510	1	65	5163	23
75	9492	2	25	5058	24
72	9459	3	21	5037	25
71	9430	4	22	5024	26
33	8155	5	60	3520	27
31	8134	6	56	3511	28
34	8110	7	20	3336	29
32	8053	8	17	3327	30
70	7421	9	11	2020	31
66	7351	10	12	2017	32
68	7315	11	14	2001	33
67	7302	12	13	1973	34
69	7293	13	53	1921	35
30	6776	14	51	1899	36
29	6763	15	9	795	37
28	6752	16	6	784	38
26	6752	17	50	702	39
27	6731	18	49	693	40
63	5195	19	44	275	41
61	5186	20	2	251	42
64	5175	21	3	249	43
62	5170	22	43	246	44

Αν γίνει η συσχέτιση αυτής της ταξινόμησης με την ανθεκτικότητα των δικτύων, προκύπτει και η αντίστοιχη απεικόνισή της στην Εικόνα 91.



Εικόνα 91: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησής τους βάσει τιμών Κεντρικότητας Ενδιαμέσου

Όπως φαίνεται από τα 17 δίκτυα που χαρακτηρίστηκαν ως ανθεκτικά, και βρίσκονται στο 2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο (υψηλή ανθεκτικότητα), τα 8 εξ αυτών μπορούν να εκτιμηθούν μέσω της Κεντρικότητας Ενδιαμέσου.

### 9.3.8.3. Κεντρικότητα Πληροφορίας

Για την κεντρικότητα πληροφορίας, ισχύει η εξής ταξινόμηση – σε μορφή Πίνακα για τα 44 δίκτυα που εξετάζονται συνολικά (Πίνακας 47):

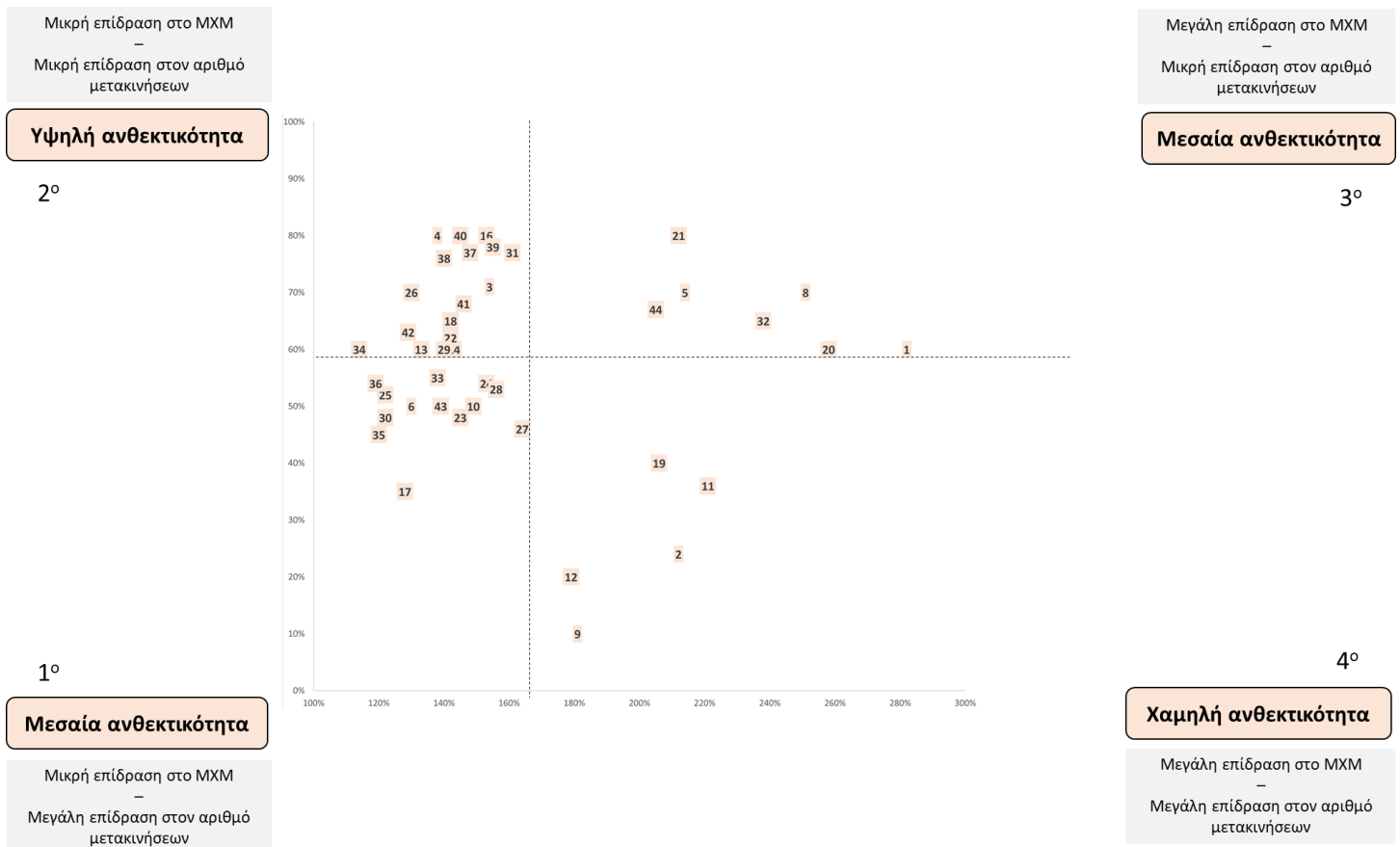
Πίνακας 47: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής κεντρικότητας πληροφορίας

Κωδικός Δικτύου	Κεντρικότητα Πληροφορίας	Ταξινόμηση	Κωδικός Δικτύου	Κεντρικότητα Πληροφορίας	Ταξινόμηση
44	0.026106	1	29	0.005815	23
43	0.026106	2	28	0.005815	24
2	0.025859	3	26	0.005815	25
3	0.025859	4	27	0.005815	26
9	0.023608	5	33	0.005181	27
6	0.023608	6	31	0.005181	28
50	0.013580	7	34	0.005181	29
49	0.013580	8	32	0.005181	30



11	0.010843	9	63	0.004926	31
12	0.010843	10	61	0.004926	32
14	0.010843	11	64	0.004926	33
13	0.010843	12	62	0.004926	34
20	0.008137	13	65	0.004926	35
17	0.008137	14	70	0.004513	36
53	0.007600	15	66	0.004513	37
51	0.007600	16	68	0.004513	38
25	0.006559	17	67	0.004513	39
21	0.006559	18	69	0.004513	40
22	0.006559	19	74	0.003832	41
60	0.005944	20	75	0.003832	42
56	0.005944	21	72	0.003832	43
30	0.005815	22	71	0.003832	44

Αν γίνει η συσχέτιση αυτής της ταξινόμησης με την ανθεκτικότητα των δικτύων, προκύπτει και η αντίστοιχη απεικόνισή της στην Εικόνα 92.



**Εικόνα 92:** Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησής τους βάσει τιμών Κεντρικότητας Πληροφορίας  
 Όπως φαίνεται από τα 17 δίκτυα που χαρακτηρίστηκαν ως ανθεκτικά, και βρίσκονται στο 2° τεταρτημόριο (υψηλή ανθεκτικότητα), τα 6 εξ αυτών μπορούν να εκτιμηθούν μέσω της Κεντρικότητας Πληροφορίας.

Στις επόμενες ενότητες εξετάζονται όλοι οι συνδυασμοί των μέτρων μεταξύ τους, με σκοπό την εύρεση του αντιπροσωπευτικότερου συνδυασμού.

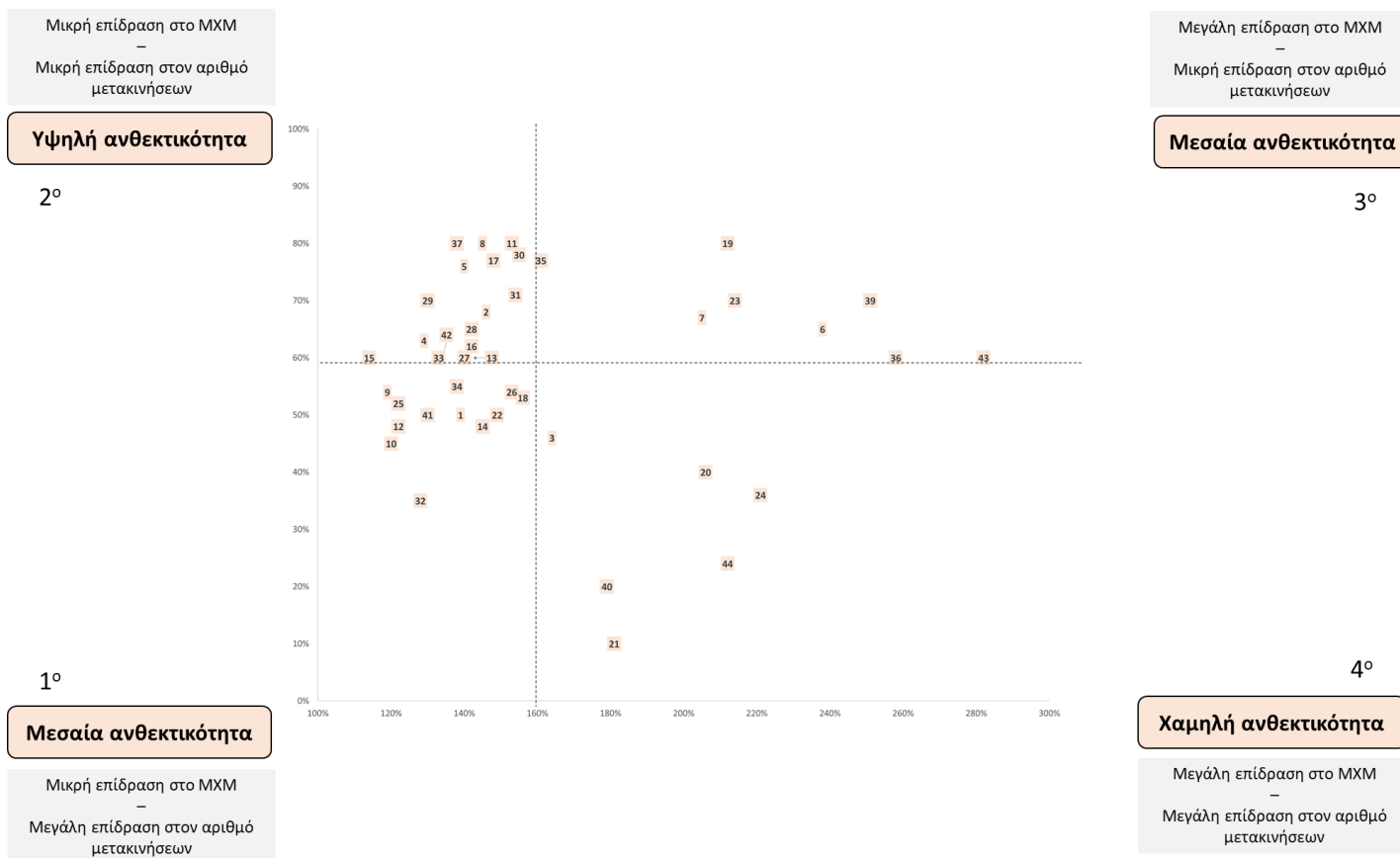
#### 9.3.8.4. Συνδυασμός Δύναμης Κόμβου και Κεντρικότητας Εγγύτητας

Για τον συνδυασμό δύναμης κόμβου και κεντρικότητας εγγύτητας, ισχύει η εξής ταξινόμηση – σε μορφή Πίνακα για τα 44 δίκτυα που εξετάζονται συνολικά (Πίνακας 48):

**Πίνακας 48: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού δύναμης κόμβου και κεντρικότητας εγγύτητας**

Κωδικός Δικτύου	ΔΚο*Κεγ	Ταξινόμηση	Κωδικός Δικτύου	ΔΚο*Κεγ	Ταξινόμηση
72	69.971894	1	9	2.529540	23
74	54.132249	2	14	2.522705	24
33	26.707543	3	26	2.299679	25
75	24.402184	4	28	2.266819	26
68	20.957669	5	34	2.165176	27
61	19.578657	6	21	2.103312	28
71	11.311177	7	27	2.034575	29
69	8.333762	8	67	1.746945	30
70	8.301574	9	2	1.685625	31
65	6.472029	10	25	1.486018	32
51	5.987595	11	20	1.285968	33
32	5.050891	12	64	1.221786	34
17	3.866937	13	63	1.146907	35
29	3.674874	14	60	0.750461	36
62	3.592380	15	3	0.667552	37
30	3.545373	16	53	0.535245	38
66	3.521452	17	49	0.437200	39
31	2.932964	18	13	0.406677	40
56	2.925391	19	6	0.372561	41
22	2.833575	20	50	0.187188	42
11	2.793120	21	44	0.069422	43
12	2.699324	22	43	0.040433	44

Αν γίνει η συσχέτιση αυτής της ταξινόμησης με την ανθεκτικότητα των δικτύων, προκύπτει και η αντίστοιχη απεικόνισή της στην Εικόνα 93.



**Εικόνα 93: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησής τους βάσει τιμών συνδυασμού δύναμης κόμβου και κεντρικότητας εγγύτητας**

Όπως φαίνεται από τα 17 δίκτυα που χαρακτηρίστηκαν ως ανθεκτικά, και βρίσκονται στο 2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο (υψηλή ανθεκτικότητα), τα 9 εξ αυτών μπορούν να εκτιμηθούν μέσω του συνδυασμού δύναμης κόμβου και κεντρικότητας εγγύτητας.

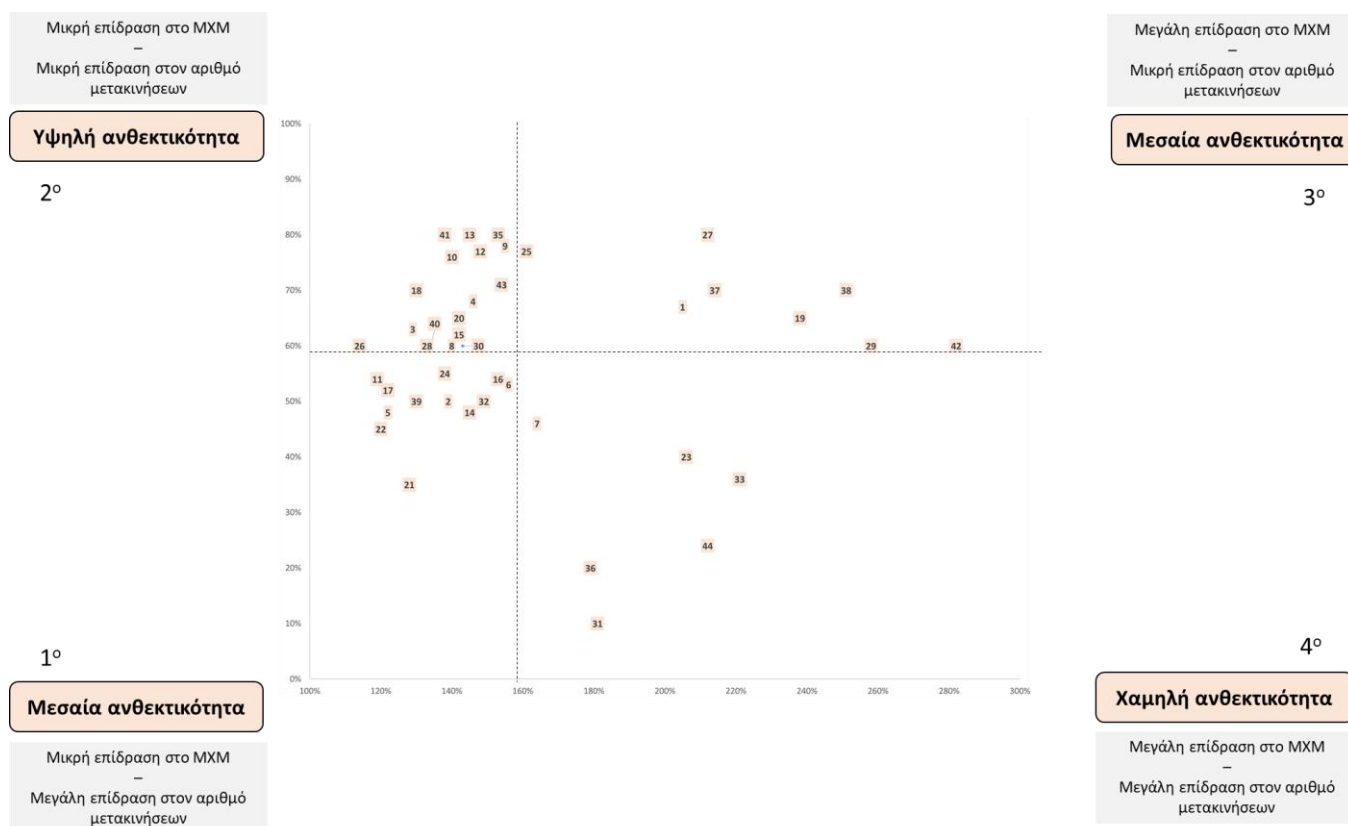
### 9.3.8.5. Συνδυασμός Δύναμης Κόμβου και Κεντρικότητας Ενδιαμέσου

Για τον συνδυασμό δύναμης κόμβου και κεντρικότητας ενδιαμέσου ισχύει η εξής ταξινόμηση – σε μορφή Πίνακα για τα 44 δίκτυα που εξετάζονται συνολικά (Πίνακας 49):

Πίνακας 49: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού δύναμης κόμβου και κεντρικότητας ενδιαμέσου

Κωδικός Δικτύου	ΔΚο*Κεν	Ταξινόμηση	Κωδικός Δικτύου	ΔΚο*Κεν	Ταξινόμηση
71	79328150	1	22	24338981	23
72	75723173	2	64	24093203	24
75	75359054	3	63	22752261	25
74	73548382	4	62	22400264	26
32	68841750	5	56	12514701	27
31	62545724	6	20	10996252	28
33	61039482	7	60	10034559	29
34	60143351	8	17	8980537	30
67	48577659	9	11	4014056	31
68	47495043	10	12	3784938	32
70	45530904	11	14	3504923	33
66	45335588	12	53	3489628	34
69	45016280	13	51	3356616	35
29	43452977	14	13	2966378	36
30	40934997	15	9	560798	37
28	40077338	16	49	514474	38
26	39022939	17	6	511193	39
27	35983401	18	50	484945	40
61	29143509	19	3	49999	41
21	27680024	20	44	41856	42
25	25801083	21	2	40594	43
65	24647451	22	43	36904	44

Αν γίνει η συσχέτιση αυτής της ταξινόμησης με την ανθεκτικότητα των δικτύων, προκύπτει και η αντίστοιχη απεικόνισή της στην Εικόνα 94.



**Εικόνα 94: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησής τους βάσει τιμών συνδυασμού δύναμης κόμβου και κεντρικότητας ενδιαμέσου**

Όπως φαίνεται από τα 17 δίκτυα που χαρακτηρίστηκαν ως ανθεκτικά, και βρίσκονται στο 2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο (υψηλή ανθεκτικότητα), τα 8 εξ αυτών μπορούν να εκτιμηθούν μέσω της δύναμης κόμβου και κεντρικότητας ενδιαμέσου.

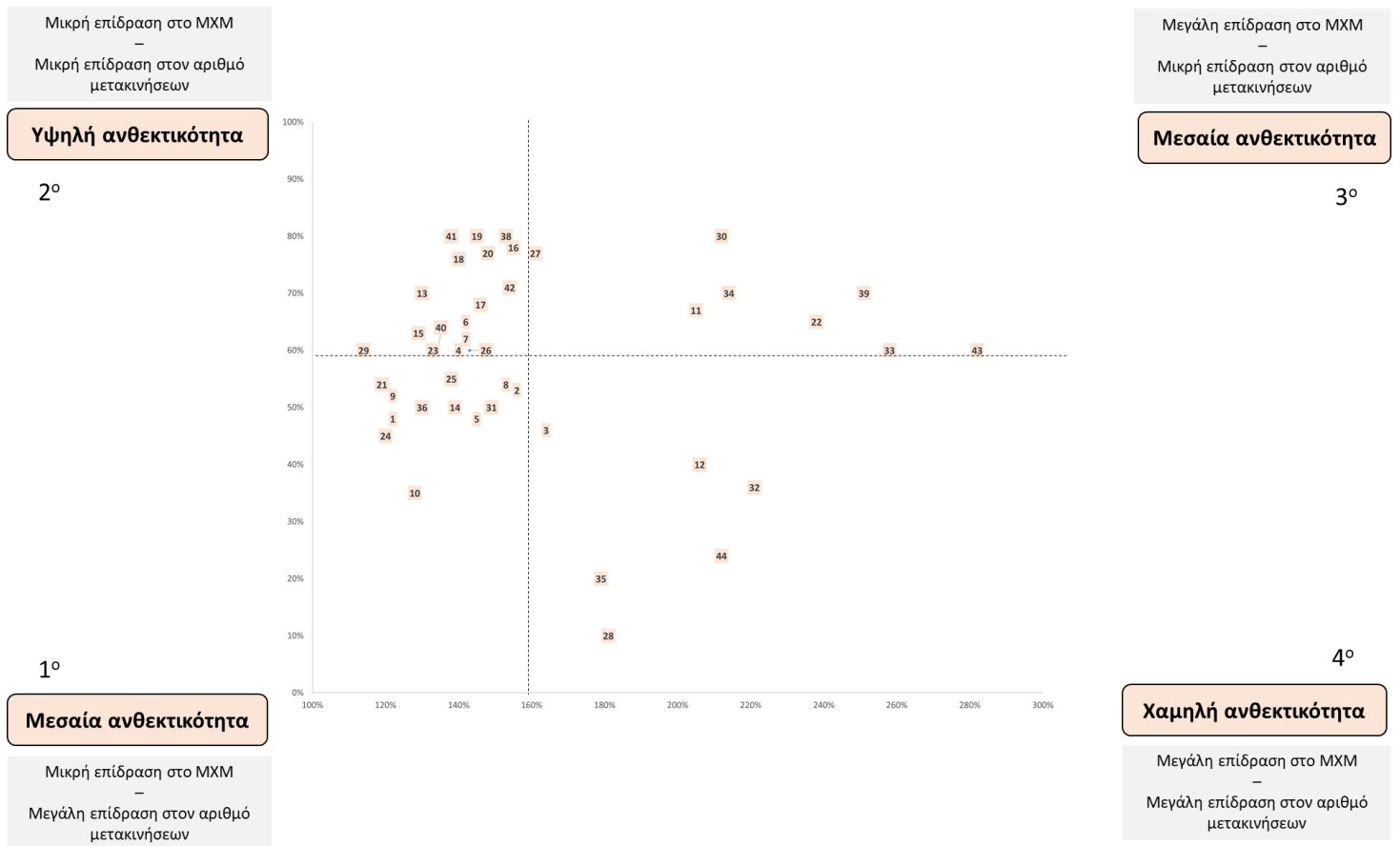
### 9.3.8.6. Συνδυασμός Δύναμης Κόμβου και Κεντρικότητας Πληροφορίας

Για τον συνδυασμό δύναμης κόμβου και κεντρικότητας πληροφορίας, ισχύει η εξής ταξινόμηση – σε μορφή Πίνακα για τα 44 δίκτυα που εξετάζονται συνολικά (Πίνακας 50):

**Πίνακας 50: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού δύναμης κόμβου και κεντρικότητας πληροφορίας**

Κωδικός Δικτύου	ΔΚο*ΚΠΛ	Ταξινόμηση	Κωδικός Δικτύου	ΔΚο*ΚΠΛ	Ταξινόμηση
32	44.28904	1	20	26.81878	23
31	39.84036	2	65	23.51588	24
33	38.78113	3	64	22.93642	25
34	38.42179	4	17	21.96540	26
29	37.36472	5	63	21.57347	27
21	36.04680	6	11	21.54296	28
30	35.13053	7	62	21.34313	29
28	34.51830	8	56	21.18887	30
26	33.61088	9	12	20.34343	31
25	33.45937	10	14	18.99386	32
71	32.23453	11	60	16.94296	33
22	31.77732	12	9	16.64488	34
27	31.08851	13	13	16.30640	35
72	30.67461	14	6	15.38505	36
75	30.42201	15	53	13.80747	37
67	30.02689	16	51	13.43461	38
74	29.63564	17	49	10.08060	39
68	29.30671	18	50	9.38577	40
69	27.85780	19	3	5.19955	41
66	27.83554	20	2	4.18403	42
70	27.69278	21	44	3.96883	43
61	27.68245	22	43	3.91233	44

Αν τώρα γίνει η συσχέτιση αυτής της ταξινόμησης με την ανθεκτικότητα των δικτύων, προκύπτει και η αντίστοιχη απεικόνισή της στην Εικόνα 95.



**Εικόνα 95: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησής τους βάσει τιμών συνδυασμού δύναμης κόμβου και κεντρικότητας πληροφορίας**

Όπως φαίνεται από τα 17 δίκτυα που χαρακτηρίστηκαν ως ανθεκτικά, και βρίσκονται στο 2° τεταρτημόριο (υψηλή ανθεκτικότητα), τα 7 εξ αυτών μπορούν να εκτιμηθούν μέσω του συνδυασμού δύναμης κόμβου και κεντρικότητας πληροφορίας.

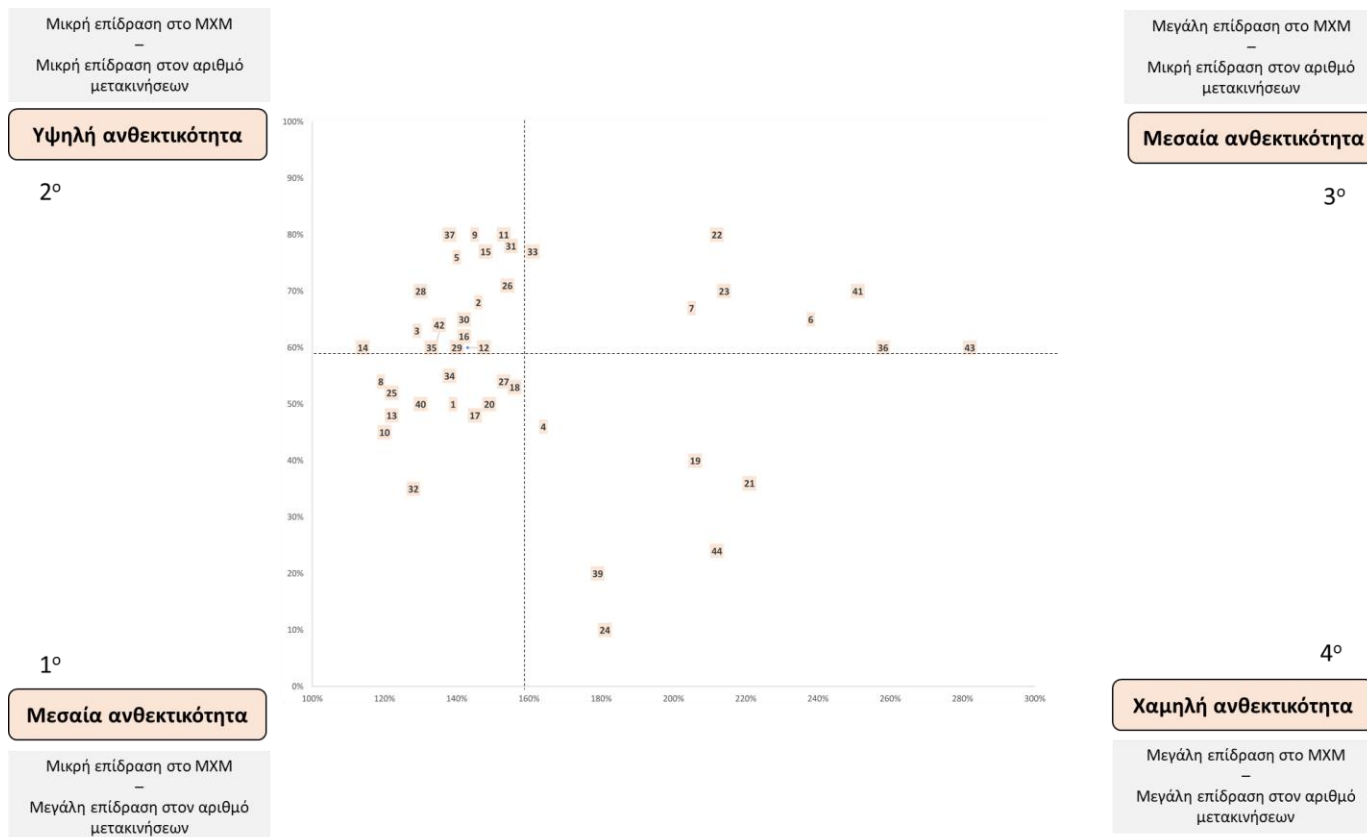
### 9.3.8.7. Συνδυασμός Κεντρικότητας Εγγύτητας και Κεντρικότητας Ενδιαμέσου

Για τον συνδυασμό κεντρικότητας ενδιαμέσου και κεντρικότητας εγγύτητας, ισχύει η εξής ταξινόμηση – σε μορφή Πίνακα για τα 44 δίκτυα που εξετάζονται συνολικά (Πίνακας 51):

Πίνακας 51: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού κεντρικότητας ενδιάμεσου και κεντρικότητας εγγύτητας

Κωδικός Δικτύου	ΚΕγ*ΚΕν	Ταξινόμηση	Κωδικός Δικτύου	ΚΕγ*ΚΕν	Ταξινόμηση
72	82.6813464	1	9	2.8536783	23
74	66.5600838	2	11	2.8402819	24
75	29.1743660	3	26	2.6863148	25
33	29.0977259	4	2	2.6137790	26
68	23.6083004	5	28	2.5783748	27
61	18.0695972	6	27	2.5615643	28
71	12.6796052	7	34	2.3679953	29
70	10.0401776	8	21	1.9277257	30
69	9.8474707	9	67	1.9173559	31
65	7.0003995	10	25	1.4734477	32
51	6.4317757	11	63	1.3606467	33
17	4.7652324	12	64	1.3579111	34
32	4.7586362	13	20	1.3016374	35
62	4.2869871	14	60	0.9268422	36
66	4.1972946	15	3	0.8255711	37
30	3.9766431	16	53	0.5658887	38
29	3.8678343	17	13	0.5334073	39
31	3.1025084	18	6	0.4484385	40
22	2.9384011	19	49	0.4081970	41
12	2.9024469	20	50	0.1900338	42
14	2.8814920	21	44	0.1257203	43
56	2.8810223	22	43	0.0664371	44

Αν επιχειρηθεί η συσχέτιση αυτής της ταξινόμησης με την ανθεκτικότητα των δικτύων, προκύπτει και η αντίστοιχη απεικόνισή της στην Εικόνα 96.



**Εικόνα 96: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησής τους βάσει τιμών συνδυασμού κεντρικότητας ενδιάμεσου και κεντρικότητας εγγύτητας**

Όπως φαίνεται από τα 17 δίκτυα που χαρακτηρίστηκαν ως ανθεκτικά, και βρίσκονται στο 2° τεταρτημόριο (υψηλή ανθεκτικότητα), τα 9 εξ αυτών μπορούν να εκτιμηθούν μέσω συνδυασμού κεντρικότητας ενδιάμεσου και κεντρικότητας εγγύτητας.

### 9.3.8.8. Συνδυασμός Κεντρικότητας Εγγύτητας και Κεντρικότητας Πληροφορίας

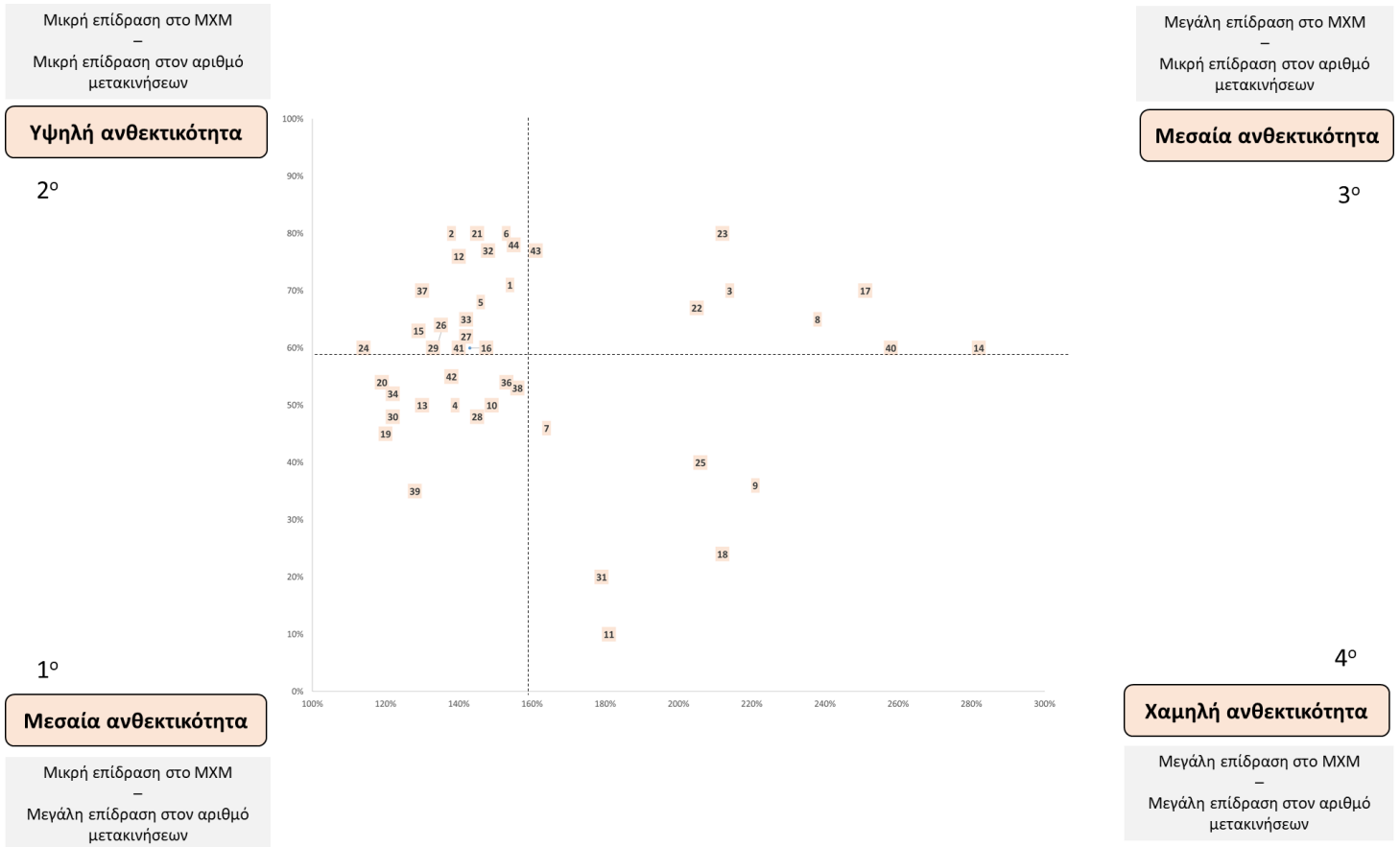
Για τον συνδυασμό κεντρικότητας ενδιάμεσου και κεντρικότητας πληροφορίας, ισχύει η εξής ταξινόμηση – σε μορφή Πίνακα για τα 44 δίκτυα που εξετάζονται συνολικά (Πίνακας 52):



Πίνακας 52: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού κεντρικότητας ενδιάμεσου και κεντρικότητας πληροφορίας

Κωδικός Δικτύου	ΚΕγ*ΚΠΛ	Ταξινόμηση	Κωδικός Δικτύου	ΚΕγ*ΚΠΛ	Ταξινόμηση
2	0.000269403	1	56	0.000004878	23
3	0.000085853	2	62	0.000004085	24
9	0.000084699	3	22	0.000003836	25
72	0.000033493	4	50	0.000003678	26
74	0.000026820	5	30	0.000003413	27
51	0.000025743	6	29	0.000003326	28
33	0.000018487	7	20	0.000003175	29
61	0.000017164	8	32	0.000003061	30
14	0.000015615	9	13	0.000002932	31
12	0.000015600	10	66	0.000002577	32
11	0.000015243	11	21	0.000002510	33
68	0.000014567	12	26	0.000002314	34
6	0.000013496	13	53	0.000002239	35
44	0.000011921	14	28	0.000002221	36
75	0.000011778	15	27	0.000002213	37
17	0.000011655	16	31	0.000001976	38
49	0.000007998	17	25	0.000001911	39
43	0.000007043	18	60	0.000001565	40
65	0.000006679	19	34	0.000001513	41
70	0.000006107	20	64	0.000001293	42
69	0.000006094	21	63	0.000001290	43
71	0.000005152	22	67	0.000001185	44

Αν εξεταστεί η συσχέτιση αυτής της ταξινόμησης με την ανθεκτικότητα των δικτύων, προκύπτει και η αντίστοιχη απεικόνισή της στην Εικόνα 97.



**Εικόνα 97: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησής τους βάσει τιμών συνδυασμού κεντρικότητας ενδιάμεσου και κεντρικότητας πληροφορίας**

Όπως φαίνεται από τα 17 δίκτυα που χαρακτηρίστηκαν ως ανθεκτικά, και βρίσκονται στο 2° τεταρτημόριο (υψηλή ανθεκτικότητα), τα 7 εξ αυτών μπορούν να εκτιμηθούν μέσω συνδυασμού κεντρικότητας ενδιάμεσου και κεντρικότητας πληροφορίας.

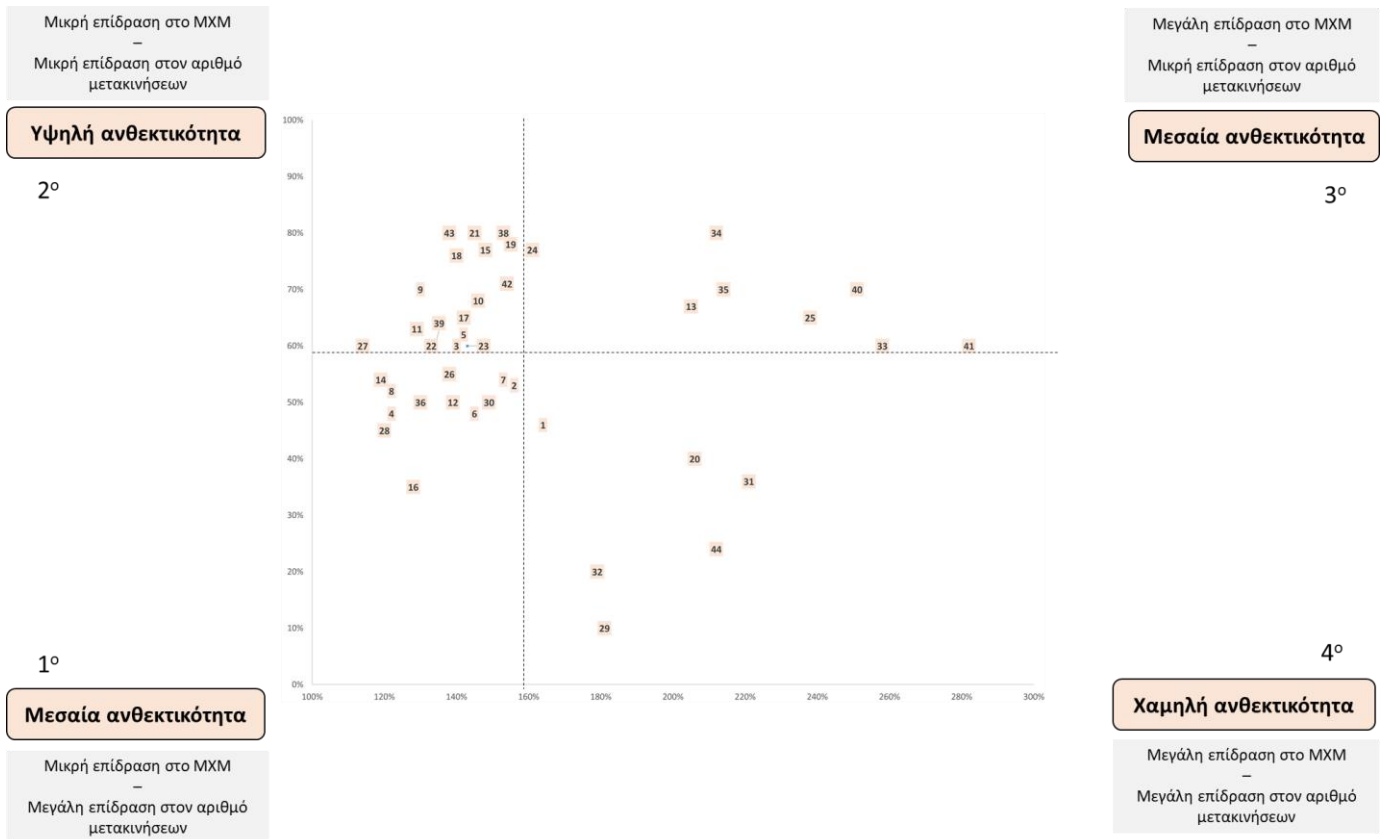
### 9.3.8.9. Συνδυασμός Κεντρικότητας Ενδιάμεσου και Κεντρικότητας Πληροφορίας

Για τον συνδυασμό κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας πληροφορίας, ισχύει η εξής ταξινόμηση – σε μορφή Πίνακα για τα 44 δίκτυα που εξετάζονται συνολικά (Πίνακας 53):

Πίνακας 53: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας πληροφορίας

Κωδικός Δικτύου	ΚΕν*ΚΠΛ	Ταξινόμηση	Κωδικός Δικτύου	ΚΕν*ΚΠΛ	Ταξινόμηση
33	42.2518	1	17	27.0680	23
31	42.1434	2	63	25.5940	24
34	42.0209	3	61	25.5488	25
32	41.7264	4	64	25.4919	26
30	39.4039	5	62	25.4699	27
29	39.3267	6	65	25.4357	28
28	39.2626	7	11	21.9067	29
26	39.2617	8	12	21.8743	30
27	39.1410	9	14	21.6952	31
74	36.4395	10	13	21.3879	32
75	36.3715	11	60	20.9251	33
72	36.2462	12	56	20.8675	34
71	36.1343	13	9	18.7778	35
70	33.4925	14	6	18.5184	36
66	33.1778	15	53	14.5980	37
25	33.1763	16	51	14.4312	38
21	33.0376	17	50	9.5284	39
68	33.0133	18	49	9.4119	40
67	32.9560	19	44	7.1874	41
22	32.9529	20	2	6.4879	42
69	32.9178	21	3	6.4304	43
20	27.1456	22	43	6.4286	44

Αν τώρα γίνει η συσχέτιση αυτής της ταξινόμησης με την ανθεκτικότητα των δικτύων, προκύπτει και η αντίστοιχη απεικόνισή της στην Εικόνα 98.



**Εικόνα 98: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησής τους βάσει τιμών συνδυασμού κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας πληροφορίας**

Όπως φαίνεται από τα 17 δίκτυα που χαρακτηρίστηκαν ως ανθεκτικά, και βρίσκονται στο 2° τεταρτημόριο (υψηλή ανθεκτικότητα), τα 7 εξ αυτών μπορούν να εκτιμηθούν μέσω συνδυασμού κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας πληροφορίας.

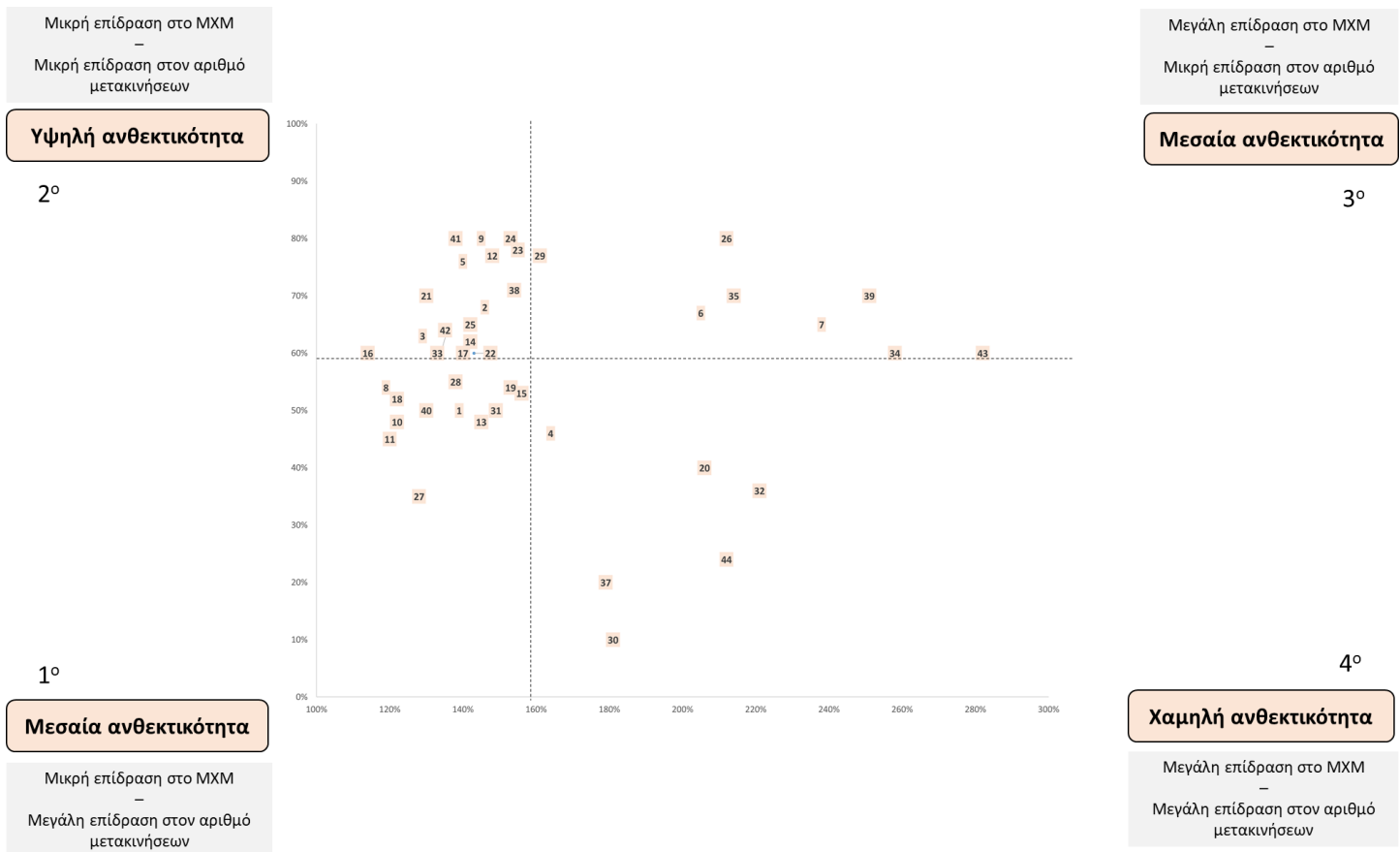
### 9.3.8.10. Συνδυασμός Δύναμης Κόμβου, Κεντρικότητας Εγγύτητας και Κεντρικότητας Ενδιαμέσου

Για τον συνδυασμό δύναμης κόμβου, κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας ενδιαμέσου, ισχύει η εξής ταξινόμηση – σε μορφή Πίνακα για τα 44 δίκτυα που εξετάζονται συνολικά (Πίνακας 54):

Πίνακας 54: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού δύναμης κόμβου, κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας ενδιαμέσου

Κωδικός Δικτύου	ΔΚο*ΚΕγ*ΚΕν	Ταξινόμηση	Κωδικός Δικτύου	ΔΚο*ΚΕγ*ΚΕν	Ταξινόμηση
72	661881	1	67	12756	23
74	514780	2	51	11370	24
75	231624	3	21	10594	25
33	217797	4	56	10270	26
68	153295	5	25	7516	27
71	106665	6	64	6322	28
61	101540	7	63	5959	29
70	61603	8	11	5643	30
69	60781	9	12	5446	31
32	40677	10	14	5048	32
65	33417	11	20	4290	33
66	25886	12	60	2642	34
29	24852	13	9	2012	35
30	24024	14	53	1028	36
31	23857	15	13	802	37
62	18574	16	2	423	38
34	17560	17	49	303	39
26	15526	18	6	292	40
28	15305	19	3	166	41
22	14236	20	50	131	42
27	13694	21	44	19	43
17	12864	22	43	10	44

Αν μελετηθεί η συσχέτιση αυτής της ταξινόμησης με την ανθεκτικότητα των δικτύων, προκύπτει και η αντίστοιχη απεικόνισή της στην Εικόνα 99.



**Εικόνα 99: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησής τους βάσει τιμών συνδυασμού δύναμης κόμβου, κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας ενδιαμέσου**

Όπως φαίνεται από τα 17 δίκτυα που χαρακτηρίστηκαν ως ανθεκτικά, και βρίσκονται στο 2° τεταρτημόριο (υψηλή ανθεκτικότητα), τα 8 εξ αυτών μπορούν να εκτιμηθούν μέσω του συνδυασμού δύναμης κόμβου, κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας ενδιαμέσου.

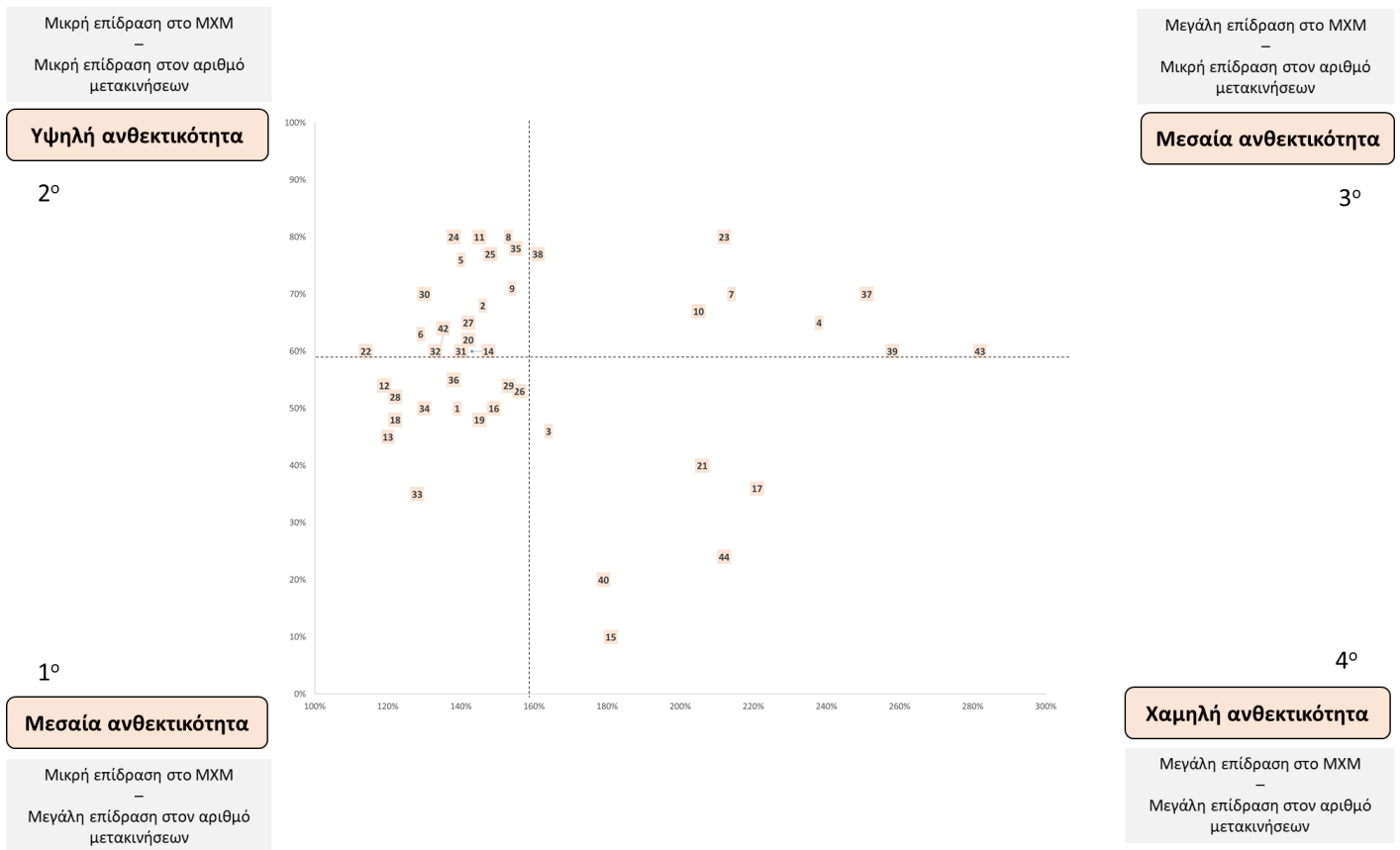
### 9.3.8.11. Συνδυασμός Δύναμης Κόμβου, Κεντρικότητας Εγγύτητας και Κεντρικότητας Πληροφορίας

Για τον συνδυασμό δύναμης κόμβου, κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας πληροφορίας, ισχύει η εξής ταξινόμηση – σε μορφή Πίνακα για τα 44 δίκτυα που εξετάζονται συνολικά (Πίνακας 55):

Πίνακας 55: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού δύναμης κόμβου, κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας πληροφορίας

Κωδικός Δικτύου	ΔΚο*ΚΕγ*ΚΠΛ	Ταξινόμηση	Κωδικός Δικτύου	ΔΚο*ΚΕγ*ΚΠΛ	Ταξινόμηση
72	0.2681	1	56	0.0174	23
74	0.2074	2	3	0.0173	24
33	0.1384	3	66	0.0159	25
61	0.0964	4	31	0.0152	26
68	0.0946	5	21	0.0138	27
75	0.0935	6	26	0.0134	28
9	0.0597	7	28	0.0132	29
51	0.0455	8	27	0.0118	30
2	0.0436	9	34	0.0112	31
71	0.0433	10	20	0.0105	32
69	0.0376	11	25	0.0097	33
70	0.0375	12	6	0.0088	34
65	0.0319	13	67	0.0079	35
17	0.0315	14	64	0.0060	36
11	0.0303	15	49	0.0059	37
12	0.0293	16	63	0.0056	38
14	0.0274	17	60	0.0045	39
32	0.0262	18	13	0.0044	40
29	0.0214	19	53	0.0041	41
30	0.0206	20	50	0.0025	42
22	0.0186	21	44	0.0018	43
62	0.0177	22	43	0.0011	44

Αν επιχειρηθεί η συσχέτιση αυτής της ταξινόμησης με την ανθεκτικότητα των δικτύων, προκύπτει και η αντίστοιχη απεικόνισή της στην Εικόνα 100.



**Εικόνα 100: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησής τους βάσει τιμών συνδυασμού δύναμης κόμβου, κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας πληροφορίας**

Όπως φαίνεται από τα 17 δίκτυα που χαρακτηρίστηκαν ως ανθεκτικά, και βρίσκονται στο 2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο (υψηλή ανθεκτικότητα), τα 7 εξ αυτών μπορούν να εκτιμηθούν μέσω του συνδυασμού δύναμης κόμβου, κεντρικότητας εγγύτητας και κεντρικότητας πληροφορίας

### 9.3.8.12. Συνδυασμός Κεντρικότητας Εγγύτητας, Κεντρικότητας Ενδιαμέσου και Κεντρικότητας Πληροφορίας

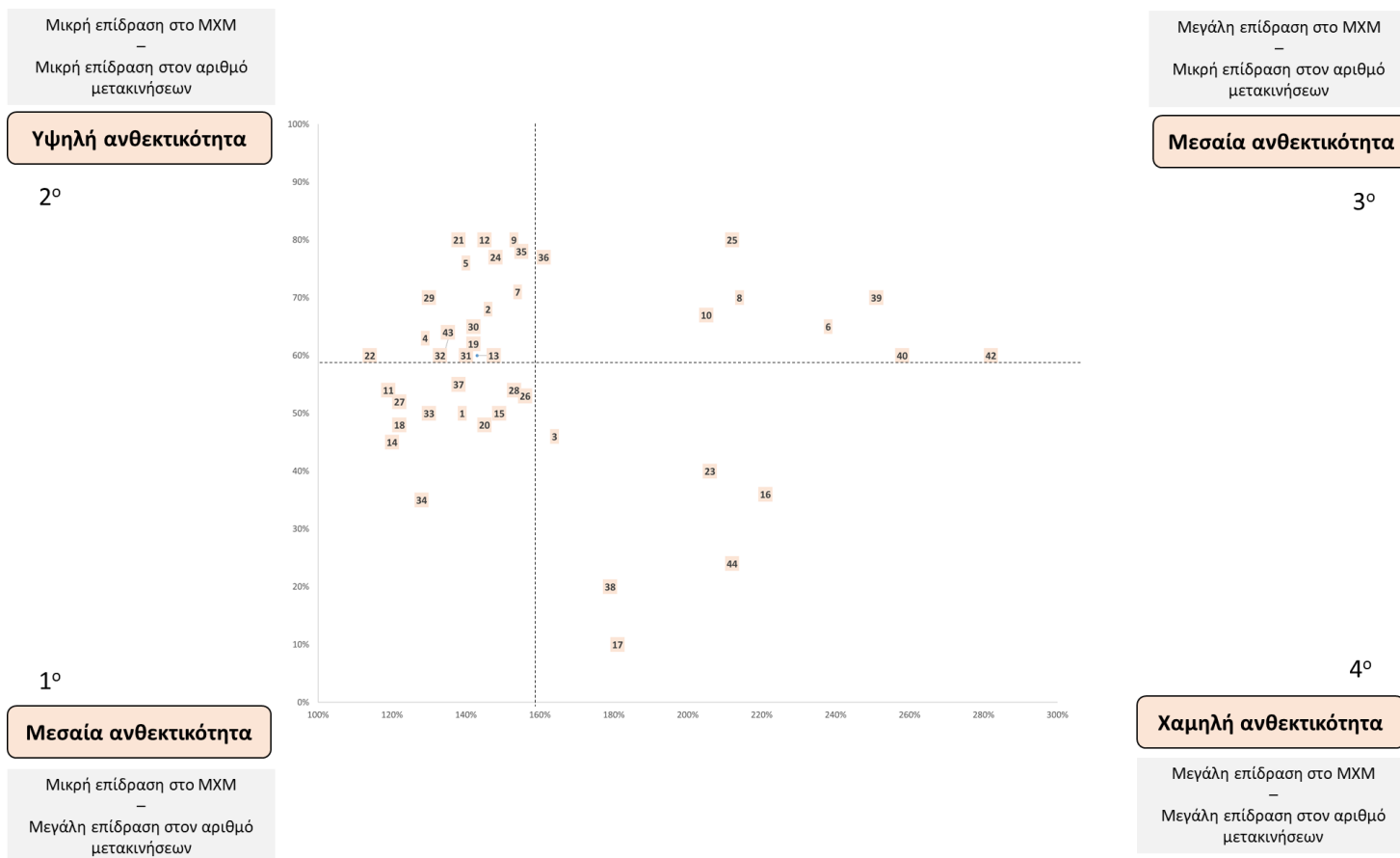
Για τον συνδυασμό κεντρικότητας εγγύτητας, κεντρικότητας ενδιαμέσου και κεντρικότητας πληροφορίας, ισχύει η εξής ταξινόμηση – σε μορφή Πίνακα για τα 44 δίκτυα που εξετάζονται συνολικά (Πίνακας 56):



Πίνακας 56: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού κεντρικότητας εγγύτητας, κεντρικότητας ενδιαμέσου και κεντρικότητας πληροφορίας

Κωδικός Δικτύου	ΚΕγ*ΚΕν*ΚΠλ	Ταξινόμηση	Κωδικός Δικτύου	ΚΕγ*ΚΕν*ΚΠλ	Ταξινόμηση
72	0.31682	1	22	0.01927	23
74	0.25505	2	66	0.01894	24
33	0.15076	3	56	0.01712	25
75	0.11179	4	31	0.01607	26
68	0.10655	5	26	0.01562	27
61	0.08902	6	28	0.01499	28
2	0.06759	7	27	0.01490	29
9	0.06737	8	21	0.01264	30
51	0.04888	9	34	0.01227	31
71	0.04859	10	20	0.01059	32
70	0.04532	11	6	0.01059	33
69	0.04445	12	25	0.00966	34
17	0.03877	13	67	0.00865	35
65	0.03449	14	63	0.00670	36
12	0.03147	15	64	0.00669	37
14	0.03124	16	13	0.00578	38
11	0.03080	17	49	0.00554	39
32	0.02466	18	60	0.00551	40
30	0.02312	19	53	0.00430	41
29	0.02249	20	44	0.00328	42
3	0.02135	21	50	0.00258	43
62	0.02112	22	43	0.00173	44

Αν επιχειρηθεί η συσχέτιση αυτής της ταξινόμησης με την ανθεκτικότητα των δικτύων, προκύπτει και η αντίστοιχη απεικόνισή της στην Εικόνα 101.



**Εικόνα 101: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησής τους βάσει τιμών συνδυασμού κεντρικότητας εγγύτητας, κεντρικότητας ενδιάμεσου και κεντρικότητας πληροφορίας**

Όπως φαίνεται, από τα 17 δίκτυα που χαρακτηρίστηκαν ως ανθεκτικά, και βρίσκονται στο 2° τεταρτημόριο (υψηλή ανθεκτικότητα), τα 7 εξ αυτών μπορούν να εκτιμηθούν μέσω του συνδυασμού κεντρικότητας εγγύτητας, κεντρικότητας ενδιάμεσου και κεντρικότητας πληροφορίας.

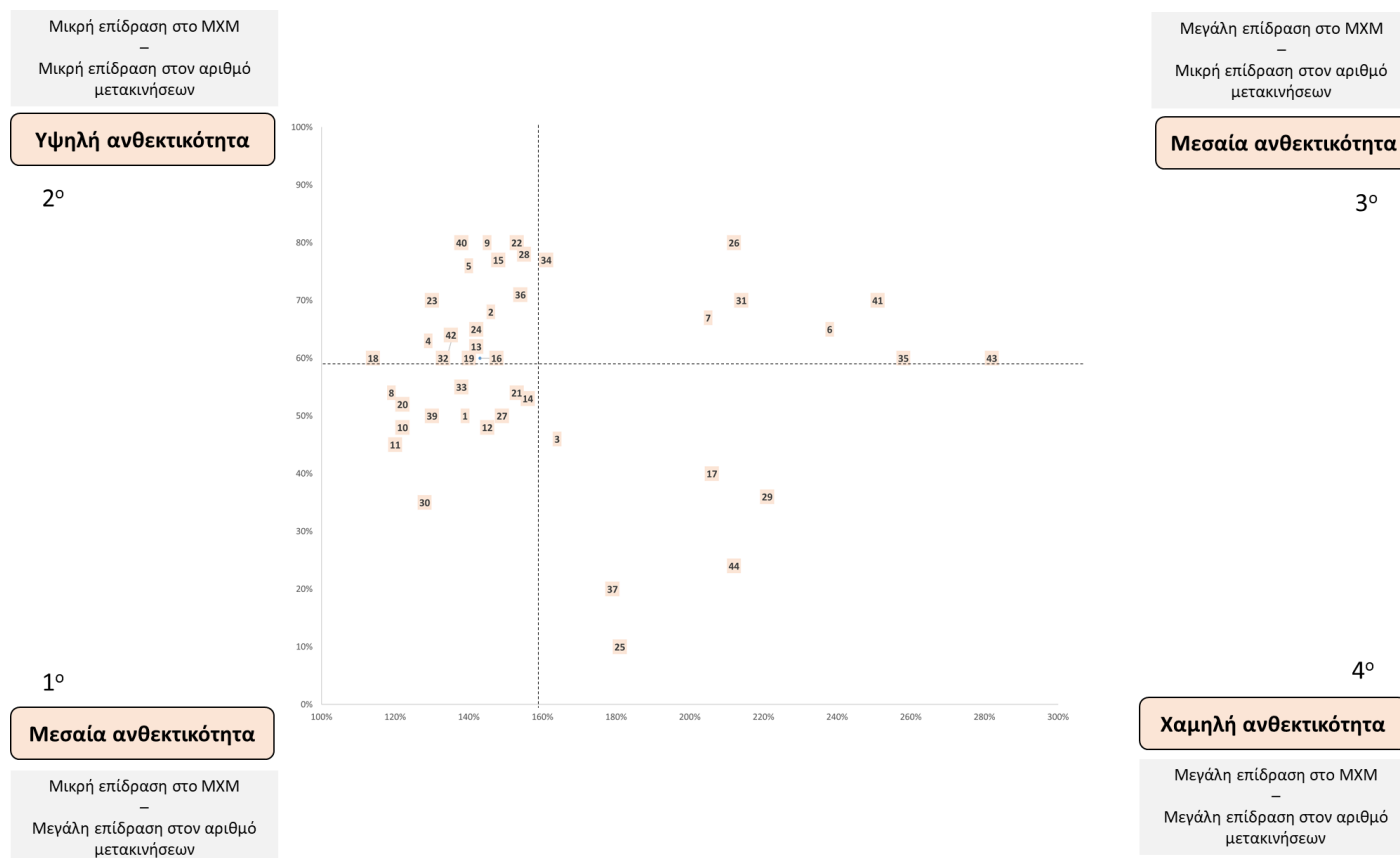
### 9.3.8.13. Συνδυασμός όλων των μέτρων

Για τον συνδυασμό όλων των μέτρων ισχύει η εξής ταξινόμηση – σε μορφή Πίνακα για τα 44 δίκτυα που εξετάζονται συνολικά (Πίνακας 57):

Πίνακας 57: Ταξινόμηση δικτύων βάσει τιμής συνδυασμού όλων των μέτρων

Κωδικός Δικτύου	Όλα τα μέτρα	Ταξινόμηση	Κωδικός Δικτύου	Όλα τα μέτρα	Ταξινόμηση
72	2536.2	1	27	79.6	23
74	1972.6	2	21	69.5	24
33	1128.4	3	11	61.2	25
75	887.5	4	56	61.0	26
68	691.9	5	12	59.0	27
61	500.2	6	67	57.6	28
71	408.7	7	14	54.7	29
70	278.0	8	25	49.3	30
69	274.3	9	9	47.5	31
32	210.8	10	20	34.9	32
65	164.6	11	64	31.1	33
29	144.5	12	63	29.4	34
30	139.7	13	60	15.7	35
31	123.6	14	2	10.9	36
66	116.8	15	13	8.7	37
17	104.7	16	53	7.8	38
22	93.4	17	6	6.9	39
62	91.5	18	3	4.3	40
34	91.0	19	49	4.1	41
26	90.3	20	50	1.8	42
28	89.0	21	44	0.5	43
51	86.4	22	43	0.3	44

Αν τώρα γίνει η συσχέτιση αυτής της ταξινόμησης με την ανθεκτικότητα των δικτύων, προκύπτει και η αντίστοιχη απεικόνισή της στην Εικόνα 102.



Εικόνα 102: Συσχέτιση ανθεκτικότητας δικτύων και ταξινόμησής τους βάσει τιμών συνδυασμού όλων των μέτρων

Όπως φαίνεται από τα 17 δίκτυα που χαρακτηρίστηκαν ως ανθεκτικά, και βρίσκονται στο 2° τεταρτημόριο (υψηλή ανθεκτικότητα), τα 7 εξ αυτών μπορούν να εκτιμηθούν μέσω του συνδυασμού όλων των μέτρων.

#### 9.3.8.14. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Ο Πίνακας 58 παρουσιάζει συνολικά τον αριθμό και το ποσοστό των δικτύων που κάθε μέτρο ή και συνδυασμός τους μπορεί να εκτιμήσει ως τα ανθεκτικότερα, βάσει των τιμών του (ή τον πολλαπλασιασμό των τιμών αυτών).

Πίνακας 58: Πλήθος εκτιμηθέντων ανθεκτικών δικτύων και αντίστοιχο ποσοστό επί του συνόλου βάσει μεμονωμένων μέτρων ή συνδυασμών τους

	Αριθμός εκτίμησης ανθεκτικών δικτύων	Ποσοστό εκτίμησης επί του συνόλου
Δύναμη Κόμβου	8	47%
Κεντρικότητα Εγγύτητας	8	47%
Κεντρικότητας Ενδιαμέσου	8	47%
Κεντρικότητα Πληροφορίας	6	35%
Δύναμη Κόμβου & Κεντρικότητα Εγγύτητας	9	53%
Δύναμη Κόμβου & Κεντρικότητα Ενδιαμέσου	9	47%
Δύναμη Κόμβου & Κεντρικότητα Πληροφορίας	7	41%
Κεντρικότητα Εγγύτητας & Κεντρικότητα Ενδιαμέσου	9	53%
Κεντρικότητας Εγγύτητας & Κεντρικότητα Πληροφορίας	7	41%
Κεντρικότητα Ενδιαμέσου & Κεντρικότητα Πληροφορίας	7	41%
Δύναμη Κόμβου & Κεντρικότητα Εγγύτητας & Κεντρικότητας Ενδιαμέσου	8	47%
Δύναμη Κόμβου & Κεντρικότητα Εγγύτητας & Κεντρικότητας Πληροφορίας	7	41%
Κεντρικότητα Εγγύτητας & Κεντρικότητας Ενδιαμέσου & Κεντρικότητα Πληροφορίας	7	41%
Όλα τα μέτρα	7	41%

Όπως προκύπτει, δεν φαίνεται υπάρχει απόλυτη συσχέτιση για κανένα μέτρο και κανένα συνδυασμό τους. Παρόλα αυτά, μπορούν επαρκώς να περιγράψουν τα ανθεκτικότερα δίκτυα. Εκτός της κεντρικότητας πληροφορίας, (ένα μέτρο το οποίο κάθε φορά που εξετάζεται, χαμηλώνει αισθητά το ποσοστό σωστής εκτίμησης είτε μόνο του είτε σε οποιοδήποτε συνδυασμό), τα υπόλοιπα μέτρα που εξετάστηκαν και οι συνδυασμοί τους, συμπεριφέρονται σχεδόν παρόμοια.

Αυτό που πρακτικά παρατηρείται είναι ότι η εφαρμογή της κεντρικότητας εγγύτητας σε συνδυασμό είτε με τη δύναμη κόμβου είτε με την κεντρικότητα ενδιαμέσου, για λίγο παραπάνω από 1 στις 2 φορές, θα αναγνωρίσει εάν ένα δίκτυο είναι ανθεκτικό, αν δηλαδή η λειτουργία του έπειτα από αφαίρεση μεγάλου μέρους των στοιχείων του (εν προκειμένω 30%) θα παραμείνει κοντά στη λειτουργία του υπό κανονικές συνθήκες. Το συμπέρασμα αυτό, αποτελεί μια πρώτη εκτίμηση της ανθεκτικότητας ενός δικτύου Μεταφορών, μέσω της χρήσης μέτρων της Θεωρίας Δικτύων.

#### 9.4. Συμπεράσματα εφαρμογής 2<sup>ου</sup> επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης

Στο Κεφάλαιο αυτό ερευνήθηκε η δυνατότητα (υπό το πρίσμα της εφαρμοσιμότητας και χρησιμότητας) μεταφοράς γνώσης από το γνωστικό πεδίο της Θεωρίας Δικτύων σε αυτό των Μεταφορών, με τη μορφή ανάλυσης μέτρων που δόκιμα μπορούν να περιγράψουν δίκτυα

Σελίδα 405 από 481

ενέργειας, πληροφορικής ή τηλεπικοινωνιών, ώστε να κριθεί αν αυτά τα μέτρα μπορούν να αποτελέσουν κριτήρια ανθεκτικότητας στα δίκτυα Μεταφορών.

Αρχικά επαναδιατυπώθηκαν μαθηματικά οι ορισμοί των μέτρων αυτών με κυκλοφοριακούς όρους, εισήχθησαν δηλαδή κυκλοφοριακές παράμετροι για τον υπολογισμό τους. Ενδεικτικά, χρησιμοποιήθηκαν οι κυκλοφοριακοί φόρτοι, οι χρόνοι διάνυσης και η καθυστέρηση στα τόξα ενός δικτύου Μεταφορών, το πλήθος των συντομότερων διαδρομών έπειτα από καταμερισμό των μετακινήσεων, έναντι αυστηρά γεωμετρικών και γεωγραφικών σχέσεων των στοιχείων ενός δικτύου (απόσταση, αριθμός συνδέσεων μεταξύ στοιχείων, κ.λπ.). Επιπρόσθετα, έγιναν υποθέσεις χρήσης των μέτρων αυτών για τα δίκτυα Μεταφορών και της ερμηνείας των αποτελεσμάτων τους σε ενδεχόμενη εφαρμογή τους. Κατά την άποψη του υποψήφιου διδάκτορα, τόσο η αναλυτική επαναδιατύπωση των μέτρων όσο και οι υποθέσεις χρήσης τους που έγιναν με γνώμονα την ανάδειξη 'σημαντικών' στοιχείων σε ένα δίκτυο Μεταφορών (υπό το πρίσμα της επίδρασης των ακραίων καιρικών φαινομένων στα στοιχεία αυτά), είναι άξιες αναφοράς και αποτελούν εφαλτήριο για περαιτέρω έρευνα.

Η εφαρμογή των μέτρων αυτών σε πειραματικά και τυχαία δίκτυα που είτε πάρθηκαν από τη βιβλιογραφία είτε δημιουργήθηκαν από τον υποψήφιο διδάκτορα, πρέπει να αντιμετωπιστούν ως αυτό που πραγματικά είναι, δηλαδή ως θεωρητικά δίκτυα. Ως τέτοια, διέπονται από σειρά υποθέσεων για τα χαρακτηριστικά και τη λειτουργία τους και συνεπώς τα αποτελέσματα της εφαρμογής των μέτρων (και η ερμηνεία τους) θα πρέπει να αντιμετωπίζεται με την απαραίτητη σύνεση. Από την εφαρμογή στο Κεφάλαιο αυτό, φαίνεται ότι υπάρχει μια σειρά μέτρων, που έπειτα από την επαναδιατύπωσή τους, έχουν δυνητικά μεγάλη χρησιμότητα για τα δίκτυα Μεταφορών, διότι μπορούν, λαμβάνοντας υπόψη την κυκλοφορία σε ένα δίκτυο, να καταδείξουν κόμβους στους οποίους είτε θα πρέπει να χωροθετηθούν υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης ή αντιμετώπισης ακραίων φαινομένων, είτε θα πρέπει να προστατευτούν με σειρά προτεραιότητας (έναντι των υπολοίπων κόμβων ενός δικτύου) για να διασφαλιστεί, η όσο το δυνατόν πλησιέστερη προς την κανονική λειτουργία του όλου δικτύου. Αυτό που είναι από επιχειρησιακή άποψη ενδιαφέρον είναι ότι η εφαρμογή των μέτρων αυτών για την ανάδειξη της σημαντικότητας των κόμβων ενός δικτύου Μεταφορών, υπερβαίνει τα όρια της κλιματικής αλλαγής, των ακραίων καιρικών φαινομένων ή των φυσικών καταστροφών, και μπορεί να έχει και άλλες (πιο καθημερινές) εφαρμογές, π.χ. την εκκένωση ενός δικτύου σε περίπτωση φωτιάς ή την χωροθέτηση ασθενοφόρων, πυροσβεστικών ή άλλων οχημάτων για την ταχύτερη κάλυψη του δικτύου.

Αναφορικά με την εύρεση βέλτιστων κατανομών, πρέπει να ειπωθεί ότι δεν βρέθηκαν 'βέλτιστες' κατανομές τιμών αλλά ούτε και μοτίβα (patterns) που θα μπορούσαν να περιγράψουν την ανθεκτικότητα ενός δικτύου Μεταφορών, καθώς τα ανθεκτικά δίκτυα που αναγνωρίστηκαν εμφάνισαν ποικίλη διασπορά και συγκέντρωση τιμών. Παρατηρήθηκε όμως, ότι μεταξύ των μέτρων που επιλέχθηκαν προς περαιτέρω διερεύνηση, οι υψηλές τιμές της κεντρικότητας εγγύτητας σε συνδυασμό είτε με τη δύναμη κόμβου είτε με την κεντρικότητα ενδιαμέσου (οι κατανομές δηλαδή κάποιου από τους παραπάνω δύο συνδυασμούς που παρουσιάζουν μεγαλύτερη διασπορά από ότι συγκέντρωση προς τα δεξιά της γραφικής παράστασης) μπορούν να περιγράψουν 1 στα 2 ανθεκτικά δίκτυα (53% των περιπτώσεων).

Σε κάθε περίπτωση όμως, η εφαρμογή των μέτρων της Θεωρίας Δικτύων σε τυχαία δίκτυα Μεταφορών επιβεβαίωσε τα επιχειρήματα υπέρ της χρησιμότητας και εφαρμοσιμότητας του 1<sup>ου</sup> βήματος, καθώς από το πειραματικό δίκτυο 24 κυκλοφοριακών κόμβων, έγινε εφαρμογή σε δίκτυα από 2 έως και 25 φορές μεγαλύτερου μεγέθους. Παρόλο που μένει να τεκμηριωθεί η εφαρμογή των μέτρων σε πραγματικά δίκτυα Μεταφορών μεγάλου μεγέθους (και αυτό αποτελεί ήδη πρόταση μελλοντικής ερευνητικής κατεύθυνσης του γράφοντα), όλα τα παραπάνω συνιστούν σοβαρές ενδείξεις δυνατότητας εφαρμογής σε μεγάλα δίκτυα Μεταφορών.

Συνολικά, από την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθοδολογικής προσέγγισης, αναδείχθηκαν μέτρα που μελετώνται από τη Θεωρία Δικτύων και μπορούν να θεωρηθούν ως μη δομικά μέτρα προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή για τα δίκτυα Μεταφορών, με σκοπό την καλύτερη διαχείριση των επιπτώσεων της.

## 10.ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ - ΙΕΡΑΡΧΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ

### 10.1. Εισαγωγή

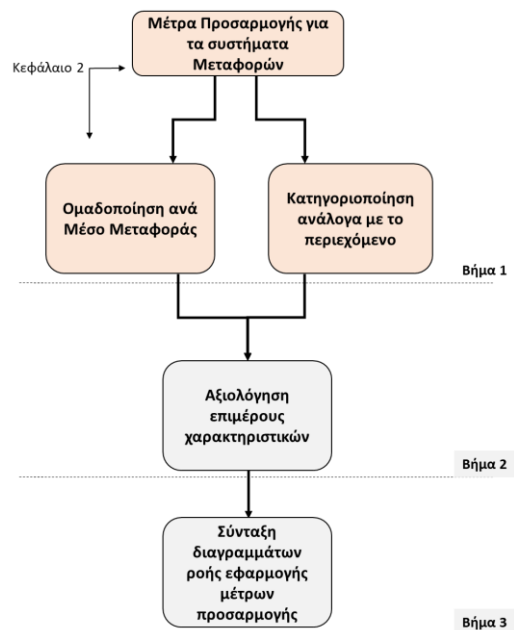
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εφαρμογή του τρίτου επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης της διδακτορικής έρευνας, που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 7. Υπενθυμίζεται, ότι απώτερος στόχος του επιπέδου αυτού είναι η απόδοση πρόσθετων χαρακτηριστικών στα μέτρα προσαρμογής, που βρέθηκαν στη βιβλιογραφική επισκόπηση και παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 2.7.2.2, καθώς και η ιεράρχηση μιας πιθανής εφαρμογής τους. Για τα μέτρα αυτά, παρατηρήθηκε απουσία απαραίτητων συνοδευτικών πληροφοριών και στοιχείων, που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως παράμετροι ιεράρχησής τους. Όμως, μέσω της απόδοσης πρόσθετων χαρακτηριστικών και της ιεράρχησης των μέτρων προσαρμογής, μπορεί να παραχθεί ένα εργαλείο ανάλυσης και σύνθεσής τους υπό τη μορφή διαγραμμάτων ροής. Η διάρθρωση του κεφαλαίου ακολουθεί ένα προς ένα τα βήματα της μεθοδολογίας, όπως αυτά αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 7.5.

### 10.2. Κατηγοριοποίηση μέτρων προσαρμογής

Η κατηγοριοποίηση των μέτρων προσαρμογής ανάλογα με το περιεχόμενό τους αποτελεί το πρώτο βήμα του τρίτου επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης .

Υπενθυμίζεται ότι, μετά την κατηγοριοποίησή τους (στο Βήμα 1), τα μέτρα προσαρμογής που βρέθηκαν στη βιβλιογραφική επισκόπηση, θα αξιολογηθούν ως προς κάποια επιμέρους χαρακτηριστικά τους (στο Βήμα 2) και θα ιεραρχηθούν ως προς την εφαρμογή τους (στο Βήμα 3). Κατά τη βιβλιογραφική επισκόπηση που πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 2, τα μέτρα προσαρμογής που συγκεντρώθηκαν, ομαδοποιήθηκαν ήδη ανά μέσο μεταφοράς

(βλέπε Πίνακας 8 έως και Πίνακας 11). Αναλύοντας το περιεχόμενο και τη φύση των μέτρων που συγκεντρώθηκαν, αναδεικνύονται κάποιες γενικές κατηγορίες στις οποίες αυτά





υπάγονται. Υπενθυμίζεται, ότι με τον όρο 'μέτρα' προσαρμογής, εννοούνται όλα τα μέτρα, οι πολιτικές, οι στρατηγικές, οι διαδικασίες και οι υπηρεσίες προσαρμογής του τομέα των Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή.

Οι κατηγορίες που προέκυψαν έπειτα από ανάλυση των μέτρων είναι οι εξής:

1. Μέτρα πολιτικού και νομοθετικού χαρακτήρα
2. Μέτρα τεχνικού και δομικού χαρακτήρα
3. Μέτρα επιχειρησιακού και διαδικαστικού (procedural) χαρακτήρα
4. Μέτρα πληροφοριακού χαρακτήρα
5. Μέτρα πρόβλεψης και αποτίμησης κινδύνων και υποστήριξης λήψης αποφάσεων

Στην πρώτη κατηγορία – **Μέτρα πολιτικού και νομοθετικού χαρακτήρα** – ανήκουν μέτρα μακροπρόθεσμου και στρατηγικού κυρίως χαρακτήρα σε επίπεδο διαμόρφωσης πολιτικής (policy) για την προσαρμογή του τομέα των Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή, και μέτρα σχετικά με τη χάραξη νομοθεσιών, κανονισμών και τυποποίησης της έννοιας της προσαρμογής.

Στην δεύτερη κατηγορία – **Μέτρα τεχνικού και δομικού χαρακτήρα** – ανήκουν μέτρα επέμβασης (πριν, κατά, και έπειτα από την εμφάνιση ενός ακραίου καιρικού φαινομένου ή μιας φυσικής καταστροφής) στις υποδομές των Μεταφορών σχετικά με την επισκευή, συντήρηση και εγκατάσταση τεχνικών διατάξεων για την καλύτερη και ομαλότερη λειτουργία των υποδομών (και των δικτύων) Μεταφορών.

Στην τρίτη κατηγορία – **Μέτρα επιχειρησιακού και διαδικαστικού (procedural) χαρακτήρα** – ανήκουν μέτρα που αφορούν σε διαχειριστικές διαδικασίες, σχέδια δράσης και ευθυνών για την διαχείριση κινδύνων. Επίσης, μέτρα προσαρμογής των τρόπων διαχείρισης των δικτύων Μεταφορών, και μέτρα συνεργατικού χαρακτήρα μεταξύ των υπευθύνων αρχών για τη διαχείριση και τον μετριασμό του κινδύνου (πριν, κατά, και έπειτα από την εμφάνιση ενός ακραίου καιρικού φαινομένου ή μιας φυσικής καταστροφής).

Στην τέταρτη κατηγορία – **Μέτρα πληροφοριακού χαρακτήρα** – ανήκουν μέτρα σχετικά με τη ροή πληροφοριών (ως προς την ύπαρξη ή εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων ή φυσικών καταστροφών), και την υποστήριξη των επιβατικών και εμπορευματικών μεταφορών με τη χρήση Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών (ΤΠΕ) (π.χ. παρακολούθηση από δορυφόρους) και μέσω ανάπτυξης και εφαρμογής σχετικών υπηρεσιών.

Στην πέμπτη κατηγορία – **Μέτρα πρόβλεψης και αποτίμησης κινδύνων και υποστήριξης λήψης αποφάσεων** – ανήκουν μέτρα σχετικά με την ανάπτυξη υποδειγμάτων πρόβλεψης κινδύνων (risk models) και αξιολόγησης των επιπτώσεών τους στον τομέα των Μεταφορών λόγω της εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών, και μέτρα υποστήριξης λήψης αποφάσεων για τη διαχείρισή τους.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, παρατίθεται ο Πίνακας 59 που περιλαμβάνει όλα τα μέτρα προσαρμογής που βρέθηκαν στην βιβλιογραφική επισκόπηση, την ομαδοποίησή τους ανά μέσο μεταφοράς, την κατηγοριοποίησή τους στις 5 προαναφερθείσες κατηγορίες περιεχομένου (με αναφορά στον αριθμό κατηγορίας από 1 έως 5, και με χρωματική διαφοροποίηση), και την κωδικοποίησή τους (που θα χρησιμοποιηθεί στο Βήμα 3 για την σύνταξη των διαγραμμάτων ροής). Σημειώνεται ότι πολλά από τα μέτρα προσαρμογής που αναφέρονται θα μπορούσαν να εφαρμοστούν οριζόντια (για όλα τα μέσα μεταφοράς). Παρόλα αυτά η ομαδοποίησή τους γίνεται με βάση την κατηγοριοποίησή τους στην πηγή αναφοράς (βλ. Ενότητα 2.7.2.2). Σημειώνεται επίσης, ότι για λόγους ευκρίνειας, αλλά και επειδή η βασική εργασία του βήματος αυτού είναι η κατηγοριοποίηση των μέτρων προσαρμογής, ο Πίνακας 59 είναι οργανωμένος βάσει των πέντε κατηγοριών περιεχομένου που προτάθηκαν παραπάνω. Τέλος, σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχει μερική επικάλυψη των μέτρων – παρατίθενται όμως εδώ πιστά σύμφωνα με την εύρεση τους στη βιβλιογραφική επισκόπηση (βλ. Κεφάλαιο 2).

Πίνακας 59: Μέτρα προσαρμογής με κατηγοριοποίηση περιεχομένου και ομαδοποίηση ανά μέσο μεταφοράς

Μέτρο	Κατηγοριοποίηση	Ομαδοποίηση	Κωδικοποίηση
Έκδοση εκπαιδευτικού και ενημερωτικού υλικού για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης για τις Μεταφορές με όλα τα μέσα	1	Οδικές	O1
Αυστηρή επιβολή ορίου ταχύτητας κατά τη διάρκεια ΑΚΦ (π.χ. καταιγίδων)	1	Οδικές	O15
Επανεξέταση συμβάσεων διαδικασιών συντήρησης, ώστε να καταστούν ευέλικτες και αποτελεσματικές κάτω από ταχέως μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες	1	Οδικές	O24
Ρύθμιση και εφαρμογή διεθνών προτύπων για πληροφορίες δελτίων καιρού και έκτακτης ανάγκης	1	Οδικές	O31
Διαβούλευση και συντονισμός των αρχών αυτοκινητοδρόμων και βασικών ενδιαφερόμενων φορέων για να επενδύσουν σε στρατηγικές προσαρμογής	1	Οδικές	O32
Σχεδιασμός διαδρομών έκτακτης ανάγκης ή εκτροπές, λόγω αποκοπής δικτύων	1	Σιδηροδρομικές	Σ24
Αναθεώρηση όρων δόμησης γύρω από αεροδρόμια	1	Αεροπορικές	A12
Αποκλεισμός των περιοχών υψηλού κινδύνου πλημμυρών από οποιαδήποτε εγκατάσταση υποδομών Μεταφορών	1	Αεροπορικές	A13
Ένταξη των πτυχών της κλιματικής αλλαγής στο ρυθμιστικό σχέδιο αεροδρομίων	1	Αεροπορικές	A15
Βελτίωση της χωρητικότητας του εξοπλισμού περιστολής (π.χ. εκχιονιστικά, κλιματιστικά)	1	Αεροπορικές	A16
Βελτίωση πρόσβασης στα λιμάνια και χάραξη νέων διαδρομών για τις θαλάσσιες Μεταφορές	1	Πλωτές	P9
Σχεδιασμός εναλλακτικών διαδρομών για εμπορευματικές Μεταφορές στις αρκτικές περιοχές	1	Πλωτές	P10
Δημιουργία Ευρωπαϊκής επιτροπής για τις ποτάμιες μεταφορές για την κοινή αντιμετώπιση επιδράσεων ΑΚΦ	1	Πλωτές	P11
Δημιουργία ευρωπαϊκού χώρου ποτάμιας ναυσιπλοΐας με ελάχιστα διοικητικά εμπόδια και με εναρμονισμένο νομοθετικό και κανονιστικό πλαίσιο	1	Πλωτές	P12
Λειτουργία ολοκληρωμένου ευφυούς δικτύου πλωτών οδών σε όλη την Ευρώπη	1	Πλωτές	P19
Έκδοση κατευθυντήριων γραμμών σχετικά με την εφαρμογή της περιβαλλοντικής νομοθεσίας που αφορά στους λιμένες και στις πλωτές οδούς	1	Πλωτές	P22
Ανάπτυξη καινοτόμου τεχνολογίας για τον εκσυγχρονισμό και τη λειτουργία του στόλου, του λιμανιού και των τερματικών σταθμών	1	Πλωτές	P23
Εφαρμογή της Κοινής Δήλωσης Ανάπτυξης του Περιβάλλοντος & της Εσωτερικής Ναυσιπλοΐας με την παροχή τεχνικής βοήθειας	1	Πλωτές	P25
Ανάπτυξη καινοτόμων, προσαρμοσμένων, αποτελεσματικών και πιο φιλικών προς το περιβάλλον σκαφών	1	Πλωτές	P30
Επιβολή μείωσης ορίων ταχύτητας σε περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών	1	Σιδηροδρομικές	Σ30
Ανάπτυξη σχεδίων έγκαιρης επικοινωνίας και συντονισμού με συμμετοχή των ενδιαφερόμενων φορέων	2	Οδικές	O2
Φύτευση παρόδιας βλάστησης που απορροφά την παραγόμενη θερμότητα και προστατεύει τις οδούς	2	Οδικές	O6
Σχεδιασμός νέων ασφαλικών μιγμάτων ανθεκτικών στην υπερθέρμανση	2	Οδικές	O7
Ανάπτυξη ανθεκτικών στη θερμότητα αρθρώσεων γεφυρών	2	Οδικές	O8
Ανάπτυξη καινοτόμων υλικών οδοστρωμάτων ανθεκτικών στη διάβρωση	2	Οδικές	O9
Βελτίωση των συστημάτων αποχέτευσης για τις οδικές και σιδηροδρομικές υποδομές	2	Οδικές	O11
Νέα ασφαλικά μείγματα που βοηθούν στην ταχύτερη αποστράγγιση των λιμναζόντων υδάτων	2	Οδικές	O12

Ενίσχυση της οδικής διαστρωμάτωσης για την πρόληψη φαινομένων έκπλυσης (washing off)	2	Οδικές	O13
Μέτρα προστασίας κατά της καθίζησης των πρανών γύρω από το οδικό/σιδηροδρομικό δίκτυο	2	Οδικές	O16
Εγκατάσταση ανεμοθραυστών	2	Οδικές	O17
Βελτίωση αποχετεύσεων στις οδικές διασταυρώσεις	2	Οδικές	O18
Νέα σχεδιαστικά πρότυπα που αφορούν στα συστατικά του οδικού δικτύου (πινακίδες, φωτισμός) για την ενίσχυση της προστασίας των χρηστών	2	Οδικές	O19
Τακτικός καθαρισμός ποδηλατοδρόμων και πεζοδρομίων κατά τη διάρκεια του χειμώνα	2	Οδικές	O20
Ανύψωση των παράκτιων οδικών δικτύων	2	Οδικές	O25
Παροχή καταφυγίων για μη μηχανοκίνητα μέσα μεταφοράς	2	Οδικές	O33
Προετοιμασία για επαρκή αποθέματα αλατιού και διαθεσιμότητα εξοπλισμού καθαρισμού οδικού δικτύου πριν και κατά τη διάρκεια του χειμώνα	2	Οδικές	O34
Κατασκευή αναχωμάτων για την προστασία της υποδομής από την υψηλή στάθμη του νερού	2	Σιδηροδρομικές	Σ1
Χρήση συνεχούς σιδηροδρομικής υποδομής	2	Σιδηροδρομικές	Σ2
Τακτική αντικατάσταση των υλικών βάσης του σιδηροδρόμου λόγω τήξης	2	Σιδηροδρομικές	Σ4
Εγκατάσταση λωρίδων/γραμμών έκτακτης ανάγκης για τις οδικές μεταφορές	2	Σιδηροδρομικές	Σ5
Δημιουργία περισσότερων και μεγαλύτερων αποχετευτικών λάκκων και σωλήνες απορροής μεγαλύτερης χωρητικότητας	2	Σιδηροδρομικές	Σ6
Εγκατάσταση συστημάτων πρόγνωσης τοπικών καιρικών συνθηκών	2	Σιδηροδρομικές	Σ8
Προετοιμασία σχεδιασμού εξυπηρέτησης εφοδιαστικής αλυσίδας για την αλλαγή εξοπλισμού σε περιπτώσεις κινδύνων	2	Σιδηροδρομικές	Σ9
Εφαρμογή μέτρων προστασίας για τις σιδηροδρομικές υποδομές, π.χ. εμπόδια	2	Σιδηροδρομικές	Σ10
Μέτρα προστασίας κατά της καθίζησης των πρανών γύρω από τα σιδηροδρομικές υποδομές	2	Σιδηροδρομικές	Σ11
Ανύψωση της σιδηροδρομικής υποδομής καθώς και των γεφυρών	2	Σιδηροδρομικές	Σ12
Πρόσθετη άντληση σε σιδηροδρομικές σήραγγες	2	Σιδηροδρομικές	Σ13
Προστασία των σιδηροδρομικών υποδομών από τους ανέμους	2	Σιδηροδρομικές	Σ14
Ανάπτυξη συστήματος διακοπής λειτουργίας για γραμμές που κινούνται μέσα σε αστικό περιβάλλον	2	Σιδηροδρομικές	Σ15
Προσδιορισμός κρίσιμων θέσεων για κάθε ακραίο καιρικό φαινόμενο για όλες τις υποδομές Μεταφορών	2	Σιδηροδρομικές	Σ23
Βελτίωση, συντήρηση και παρακολούθηση όλων των μεταφορικών υποδομών	2	Σιδηροδρομικές	Σ26
Βελτιωμένος αερισμός σε υπόγειους σιδηροδρομικούς σταθμούς	2	Σιδηροδρομικές	Σ28
Κατασκευή φραγμάτων-αναχωμάτων για την προστασία της υποδομής στα παράκτια αεροδρόμια από τις πλημμύρες	2	Αεροπορικές	A1
Κατασκευή διαδρόμων με ασφαλτόμιγμα που επιταχύνει την αποστράγγιση του στάσιμου νερού (π.χ. πορώδεις τάπητες)	2	Αεροπορικές	A2
Εγκατάσταση ανεμοφρακτών	2	Αεροπορικές	A3
Ενίσχυση των αερολιμενικών υποδομών από τις πλημμύρες	2	Αεροπορικές	A4
Επανακατεύθυνση διαδρόμων προσγείωσης και απογείωσης αεροσκαφών λόγω μεταβαλλόμενων πλευρικών ανέμων	2	Αεροπορικές	A5

Εφαρμογή τεχνολογιών και διαδικασιών που αναπτύχθηκαν από το SESAR (Single European Sky ATM Research) με στόχο τη βελτιστοποίηση της χωρητικότητας σε ακραίες καιρικές συνθήκες	2	Αεροπορικές	A6
Ανύψωση των διαδρόμων προσγείωσης και απογείωσης αεροσκαφών	2	Αεροπορικές	A11
Επανασχεδιασμός συστημάτων αποχέτευσης	2	Αεροπορικές	A14
Κατασκευή μακρύτερων διαδρόμων για να διευκολύνουν τα αεροσκάφη που προσγειώνονται σε υψηλής πυκνότητας αέρα	2	Αεροπορικές	A17
Χρήση ανθεκτικού στη θερμότητα ασφαλτομίγματος στους διαδρόμους απογείωσης και προσγείωσης αεροσκαφών	2	Αεροπορικές	A18
Μετεγκατάσταση αεροπορικών διαδρόμων που κατασκευάστηκαν πάνω σε επιφάνειες που επηρεάζονται από την τήξη του οδοστρώματος	2	Αεροπορικές	A19
Αυξημένες επισκευές σε διαδρόμους προσγείωσης και απογείωσης αεροσκαφών που βρίσκονται σε εδάφη που επηρεάζονται από την τήξη του οδοστρώματος	2	Αεροπορικές	A20
Μετεγκατάσταση λιμενικών υποδομών, όπου αυτές βρίσκονται σε περιοχές υψηλού κινδύνου λόγω κλιματικής αλλαγής	2	Πλωτές	P1
Βελτίωση των υποδομών μεταφόρτωσης εμπορευμάτων στους λιμένες, καθιστώντας αυτές αποτελεσματικές κάτω από διαφορετικές στάθμες νερού	2	Πλωτές	P3
Εισαγωγή ανθεκτικών στη θερμότητα υλικών στη διαδικασία κατασκευής των λιμένων	2	Πλωτές	P5
Ενισχυμένη μόνωση και ψύξη των αποθηκών στους λιμένες	2	Πλωτές	P7
Κατασκευή υποδομών προστασίας από τσουνάμι για τους λιμένες	2	Πλωτές	P8
Ανύψωση των λιμενικών υποδομών πάνω από το μέγιστο κύμα	2	Πλωτές	P13
Κατασκευή φραγμάτων και τειχών προστασίας για την αποφυγή πλημμυρών νερού στους λιμένες	2	Πλωτές	P14
Δημιουργία ισχυρότερων μηχανισμών σύνδεσης πλοίου και φόρτωσης/εκφόρτωσης φορτίου	2	Πλωτές	P15
Νέα πρότυπα σχεδιασμού πλοίων για προστασία από μεγαλύτερα κύματα ή ρηχά κανάλια /λιμάνια	2	Πλωτές	P16
Ενίσχυση αποβαθρών και γερανών για αυξημένη αντοχή σε σφοδρούς ανέμους και μεγαλύτερα κύματα	2	Πλωτές	P17
Σχεδιασμός λεκανών κατακράτησης και αποχέτευσης νερού σε περίπτωση σοβαρών πλημμυρών	2	Πλωτές	P18
Μετεγκατάσταση, επανασχεδιασμός και ενίσχυση των κυματοθραυστών για την προστασία των λιμανιών και της γενικής υποδομής από μεγαλύτερα κύματα	2	Πλωτές	P21
Παροχή επαρκών θέσεων ελλιμενισμού, αγκυροβολίων και εξοπλισμού ακτής για το χειρισμό (εξυπηρέτηση) μεγαλύτερου αριθμού σκαφών	2	Πλωτές	P26
Τακτική αφαίρεση των ιζημάτων από το βυθό	2	Πλωτές	P29
Πρόβλεψη κάθετων αποβαθρών για να διευκολύνουν τη μεταφόρτωση σε συνθήκες εξαιρετικά χαμηλής στάθμης νερού	2	Πλωτές	P33
Οργάνωση ανεφοδιασμού σε παγιδευμένους οδηγούς/επιβάτες με τη βοήθεια εθελοντών και οργανώσεων βοήθειας	3	Οδικές	O4
Προσαρμογή των ωραρίων εργασίας (και συνεπαγόμενων μετακινήσεων) κάτω από αντίξοες καιρικές συνθήκες για τις οδικές μεταφορές	3	Οδικές	O10
Σχέδια προτεραιότητας που διατηρούν την πρόσβαση στα νοσοκομεία, στους σταθμούς έκτακτης ανάγκης και στους χώρους καταφυγής	3	Οδικές	O22
Ορισμός των αξόνων προτεραιότητας για τον καθαρισμό οδών σε περιπτώσεις μεγάλης κλίμακας επιπτώσεων	3	Οδικές	O23
Συντονισμός των σχεδίων έκτακτης ανάγκης μεταξύ των μέσων και δικτύων μεταφοράς	3	Οδικές	O26

Εφαρμογή των κατάλληλων διαδικασιών διαχείρισης κινδύνου με σκοπό την προετοιμασία για αντίξοες συνθήκες	3	Οδικές	O27
Επαναπρογραμματισμός σιδηροδρομικών δρομολογίων λόγω αυξημένης συχνότητας υψηλών θερμοκρασιών	3	Σιδηροδρομικές	Σ3
Εγκατάσταση κοινών κέντρων ελέγχου και δρομολόγησης τρενών, συμπεριλαμβανομένων των σιδηροδρομικών υπηρεσιών και των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης	3	Σιδηροδρομικές	Σ17
Σχεδιασμός για την παροχή υπηρεσιών αντικατάστασης με άλλα μεταφορικά μέσα (π.χ. λεωφορεία)	3	Σιδηροδρομικές	Σ20
Ανάπτυξη σχεδίων εκκένωσης από υποδομές αεροδρομίων και χάραξη εναλλακτικών σχεδίων εκτέλεσης αεροπορικών μεταφορών	3	Αεροπορικές	A21
Συνεχής και διαφοροποιημένη παρακολούθηση και ανάλυση της εξέλιξης του συστήματος εκκένωσης (εκφόρτισης) των υδάτων των ποταμών	3	Πλωτές	Π27
Διαρθρωτικές αλλαγές των τεχνικών έργων των ποταμών	3	Πλωτές	Π28
Ανάπτυξη βιώσιμων επιχειρηματικών μοντέλων για την παροχή συστημάτων πληροφοριών έκτακτης ανάγκης	4	Οδικές	O3
Παροχή αξιόπιστης, άμεσης και - εάν είναι εφικτό- εξατομικευμένης πληροφόρησης σχετικά με τη διάρκεια ενός ακραίου περιστατικού	4	Οδικές	O5
Εγκατάσταση πινακίδων που προειδοποιούν τον οδηγό/πεζό σχετικά με επικείμενο πλημμυρισμένο οδικό δίκτυο	4	Οδικές	O14
Ανάπτυξη ευφύων συστημάτων ανάδρασης στα οχήματα για να επικοινωνούν σύμφωνα με τις ανάγκες των μετακινούμενων	4	Οδικές	O21
Τυποποίηση των πληροφοριών καιρού και των προειδοποιήσεων κινδύνου	4	Οδικές	O28
Ενσωμάτωση διαφόρων τύπων παρακολούθησης δεδομένων σχετικών με την κίνηση των τρενών	4	Σιδηροδρομικές	Σ25
Βελτιωμένα συστήματα που προειδοποιούν τους οδηγούς και τις ομάδες επισκευής για πιθανά προβλήματα των σιδηροδρομικών εγκαταστάσεων	4	Σιδηροδρομικές	Σ27
Συστήματα παρακολούθησης-προειδοποίησης θερμοκρασίας σε υπόγειες σιδηροδρομικές υποδομές	4	Σιδηροδρομικές	Σ29
Ανάπτυξη συστήματος μέτρησης για την αξιολόγηση και σύγκριση της ευπάθειας (τρωτότητας) των αερολιμένων και του εναέριου χώρου	4	Αεροπορικές	A7
Ενίσχυση της διαφάνειας κατά τη σύγκριση των επιπτώσεων των γεγονότων που προκαλούν διαταραχές (σταθερές διαδικασίες στατιστικής αξιολόγησης)	4	Αεροπορικές	A8
Βελτίωση πρόβλεψης τοπικών καιρικών συνθηκών και διαταραχών	4	Αεροπορικές	A9
Συνεχής παρακολούθηση των θερμοκρασιών περιβάλλοντος των έργων υποδομής	4	Πλωτές	Π6
Συλλογή, καταγραφή, απεικόνιση και ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με το βάθος νερού για τις ποτάμιες και θαλάσσιες μεταφορές	4	Πλωτές	Π20
Ενίσχυση της αποτελεσματικότητας και αποδοτικότητας νέων τεχνολογιών (π.χ. αισθητήρες για την πρόβλεψη του καιρού)	4	Πλωτές	Π24
Επέκταση λειτουργιών και ολοκλήρωση συστημάτων RIS (River Information Services)	4	Πλωτές	Π31
Εκτίμηση έκθεσης κινδύνου εταιρειών εφοδιαστικής αλυσίδας και δημιουργία των κατάλληλων σχεδίων προσαρμογής	5	Οδικές	O29
Προστασία των υπόγειων σιδηροδρομικών σταθμών και των χώρων καταφυγής και σχεδιασμός για τη διαδικασία εκκένωσης	5	Σιδηροδρομικές	Σ7

Ενσωμάτωση των προβλέψεων για την κλιματική αλλαγή στο σχεδιασμό της αποχέτευσης για την αντιμετώπιση της προβλεπόμενης συχνότητας και του μεγέθους μελλοντικών πλημμυρών	5	Σιδηροδρομικές	Σ16
Ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης πλημμυρών, ανέμων και καταιγίδων που ενσωματώνουν καλύτερη πρόγνωση του καιρού	5	Σιδηροδρομικές	Σ21
Χαρτογράφηση κινδύνου τρωτότητας σε συνεργασία με τις μετεωρολογικές υπηρεσίες για όλες τις υποδομές μεταφορών	5	Σιδηροδρομικές	Σ22
Προσδιορισμός των περιοχών με πιθανή τήξη του μόνιμου στρώματος πάγου	5	Αεροπορικές	A10
Βελτίωση της ποιότητας και αξιοπιστίας των προβλέψεων αιολικής ενέργειας (ανέμων) με τη χρήση WRF (Weather Research and Forecasting) με ανάλυση μέχρι και 2 χλμ	5	Πλωτές	Π2
Παραγωγή ακριβέστερων προβλέψεων καιρού μέσω της σύγκρισης των αποδόσεων των υποδειγμάτων πρόγνωσης καιρού έναντι αξιόπιστων δεδομένων παρατήρησης για τον τόπο πρόγνωσης	5	Πλωτές	Π4
Ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων για τη βελτίωση της παρακολούθησης των ποταμών (διατμητική τάση, μεταφορά ιζημάτων, μορφο-δυναμική κ.λπ.)	5	Πλωτές	Π32

Όπως φαίνεται, υπάρχει πληθώρα μέτρων τεχνικού και δομικού χαρακτήρα (52% σε σύνολο 119 μέτρων). Η πληθωρική παρουσία τέτοιας φύσης μέτρων στη βιβλιογραφία είναι αναμενόμενη, καθώς σχετίζεται με την αμεσότητα εφαρμογής τους (έναντι π.χ. μέτρων νομοθετικού χαρακτήρα που ενέχουν πλήθος διαδικασιών και εμπλεκόμενων μερών), την αμεσότητα της συνεισφοράς τους (έναντι π.χ. μέτρων που βασίζονται σε τεχνολογικές λύσεις και υπηρεσίες υποστήριξης) και το γεγονός ότι αποτελούν άμεσα εφαρμόσιμες λύσεις – καθώς έχουν απτό χαρακτήρα (έναντι π.χ. μέτρων πρόβλεψης και αποτίμησης κινδύνων ή μέτρων πολιτικού χαρακτήρα). Οι υπόλοιπες τέσσερις κατηγορίες μέτρων έχουν παρόμοια παρουσία σε πλήθος μέτρων (σε ένα εύρος από 9 περιπτώσεις (Κατηγορία 5) έως και 20 (Κατηγορία 1)).

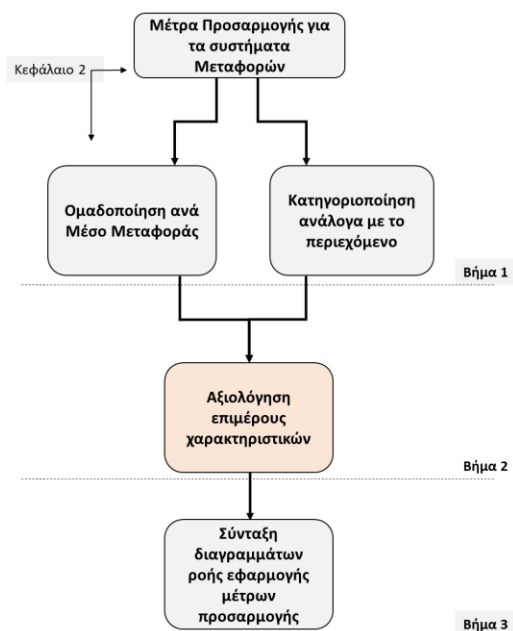


### 10.3. Αξιολόγηση επιμέρους χαρακτηριστικών

Η αξιολόγηση των επιμέρους χαρακτηριστικών των μέτρων προσαρμογής που βρέθηκαν στη βιβλιογραφική επισκόπηση (βλ. Ενότητα 2.7.2.2), αποτελεί το δεύτερο βήμα του τρίτου επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης της διδακτορικής διατριβής.

Υπενθυμίζεται, ότι στο βήμα αυτό γίνεται η αξιολόγηση των μέτρων προσαρμογής, με απώτερο στόχο τη σύνταξη διαγραμμάτων ροής εφαρμογής τους. Για να γίνει αυτό, πρέπει να προηγηθεί η απάντηση επιμέρους ερωτημάτων για κάθε μέτρο, αναφορικά με το

πότε πρέπει να εφαρμοστεί, πόσο εκτιμάται να διαρκέσει η εφαρμογή του, ποιο εκτιμάται να είναι το κόστος του και ποια εκτιμάται να είναι η συνεισφορά του στην μείωση της τρωτότητας των συστημάτων Μεταφορών από την κλιματική αλλαγή.





Καθώς οι απαντήσεις σε αυτές τις ερωτήσεις δεν είναι μονοσήμαντες, και άρα δεν μπορούν να απαντηθούν αποκλειστικά από την παρούσα διδακτορική έρευνα, ακολουθήθηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογική προσέγγιση, ο σχεδιασμός και η εφαρμογή μιας έρευνας ερωτηματολογίου, για την αξιοποίηση της οπτικής της επιστημονικής κοινότητας στα θέματα αυτά.

### 10.3.1. Έρευνα ερωτηματολογίου

Η έρευνα ερωτηματολογίου απευθύνθηκε σε εμπειρογνώμονες του τομέα των Μεταφορών και της κλιματικής αλλαγής, που είχαν συμμετάσχει στα ερευνητικά έργα MOWE-IT (Management of Weather Events in the Transport System 2012-2014), WEATHER (Weather Extremes: Impacts on Transport Systems and Hazards for European Regions 2009-2012), και EWENT (Extreme Weather impacts on European Networks of Transport 2009-2012), που είχαν επιδοτηθεί από το 7<sup>ο</sup> Πρόγραμμα Πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (7<sup>th</sup> Framework Programme, European Commission). Τα στοιχεία επικοινωνίας των συμμετεχόντων στα τρία αυτά ερευνητικά έργα έχουν διατηρηθεί με τη συγκατάθεσή τους στις βάσεις δεδομένων του Ινστιτούτου Μεταφορών (I.MET.), στις οποίες είχε πρόσβαση ο υποψήφιος διδάκτορας κατά τη διάρκεια της επαγγελματικής-ερευνητικής του εγασίας σε αυτό.

Η έρευνα σχεδιάστηκε σε ηλεκτρονική μορφή (Excel) και στην Αγγλική γλώσσα, και η συλλογή των απαντήσεων έγινε μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, κατά την περίοδο Ιανουάριου – Μαρτίου 2020. Συνολικά, 62 εμπειρογνώμονες απάντησαν στις επιμέρους ερωτήσεις. Ο Πίνακας 60 παρουσιάζει κάποια βασικά στοιχεία της έρευνας:

Πίνακας 60: Στοιχεία έρευνας

Τύπος έρευνας	Ερωτηματολόγιο
Τύπος ερωτήσεων	Κείμενο
Αριθμός Ερωτήσεων	5
Τύπος απαντήσεων	Προαιρετικού χαρακτήρα – με προεπιλογές
Περίοδος	Ιανουάριος – Μάρτιος 2020
Συμμετέχοντες	Από βάσεις δεδομένων των ερευνητικών έργων MOWE-IT, WEATHER, και EWENT
Αριθμός συμμετεχόντων	62
Γεωγραφική κάλυψη	Ευρωπαϊκή Ένωση, Η.Π.Α., Αυστραλία
Γλώσσα έρευνας	Αγγλικά

Το ερωτηματολόγιο επικεντρώθηκε στις εξής τρεις θεματικές ενότητες:

1. **Χρονική διάσταση των μέτρων προσαρμογής:** Πότε πρέπει ένα συγκεκριμένο μέτρο να εφαρμοστεί και ποιο το χρονοδιάγραμμα της εφαρμογής του; Δεδομένης της αναγκαιότητας για προσαρμογή, οι πιθανές απαντήσεις στο πρώτο ερώτημα έχουν μέγιστο εύρος μερικών ετών από το χρόνο διεξαγωγής της έρευνας.
2. **Οικονομική διάσταση των μέτρων προσαρμογής:** Ποιο είναι το κόστος της πιθανής εφαρμογής κάθε μέτρου; Δεδομένης της δυσκολίας ακριβούς εκτίμησης του κόστους κάθε μέτρου, προτείνεται η χρήση ενός ποιοτικού δείκτη για το κόστος. Οι πιθανές απαντήσεις μπορούν να έχουν τιμές 'Πολύ Χαμηλό', 'Χαμηλό', 'Μέτριο', 'Υψηλό' και 'Πολύ Υψηλό' και να αντιστοιχούν σε φάσματα τιμών. Για τους εμπειρογνώμονες που μπορεί να έχουν ποσοτική γνώση του κόστους, δίνεται η ελεύθερη επιλογή συμπλήρωσης των απαντήσεων και με αριθμητική τιμή (σε ευρώ).
3. **Συμβολή εκάστου μέτρου προσαρμογής στη βελτίωση της ανθεκτικότητας καθενός από τα υπό εξέταση συστήματα Μεταφορών:** Ποια είναι η πιθανή συνεισφορά του κάθε μέτρου στην προστασία της υποδομής των Μεταφορών και στην ανθεκτικότητα των λειτουργιών των δικτύων Μεταφορών απέναντι στην κλιματική αλλαγή; Οι πιθανές απαντήσεις είναι και σε αυτή την περίπτωση ποιοτικού χαρακτήρα, καθώς αφενός η έρευνα στην προσαρμογή των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή είναι ακόμα στα πρώτα της στάδια, και αφετέρου διότι η ακριβής αξιολόγηση της συμβολής είναι σύνθετο ζήτημα ακόμα και για εμπειρογνώμονες. Δεδομένου ότι κάθε μέτρο προσαρμογής, μπορεί να συμβάλει κατ'ελάχιστο 'μέτρια' στη βελτίωση της ανθεκτικότητας, οι πιθανές απαντήσεις στο ερώτημα αυτό είναι: 'Πολύ Χαμηλή', 'Χαμηλή', 'Μέτρια', 'Υψηλή' και 'Πολύ υψηλή'.

Από τις θεματικές αυτές ενότητες, προέκυψαν οι τελικές ερωτήσεις που συμπεριλήφθηκαν στην έρευνα, και οι οποίες παρατίθενται εδώ σε μορφή Πίνακα (Πίνακας 61), στα Ελληνικά. Δείγμα του ερωτηματολογίου που στάλθηκε στους εμπειρογνώμονες συμπεριλαμβάνεται στο Παράρτημα της διδακτορικής διατριβής.

Πίνακας 61: Ερωτήσεις έρευνας και προεπιλεγμένες απαντήσεις

Ερώτηση 1	Εκτιμώμενος χρόνος για την υλοποίηση του μέτρου				
	<1 χρόνο	>1-2 χρόνια	>2-3 χρόνια	>3-4 χρόνια	>5 χρόνια
Για όλα τα Μέτρα [1-119]					
Ερώτηση 2	Εκτιμώμενη χρονική περίοδος έναρξης εφαρμογής του μέτρου				
	Εντός 1 χρόνου	Εντός 2 χρόνων	Εντός 3 χρόνων	Εντός 4 χρόνων	Μετά από 5 χρόνια
Για όλα τα Μέτρα [1-119]					
Ερώτηση 3	Εκτιμώμενο χρηματικό κόστος πιθανής εφαρμογής του μέτρου				
	Πολύ χαμηλό	Χαμηλό	Μέσο	Υψηλό	Πολύ υψηλό
Για όλα τα Μέτρα [1-119]					
<i>Σε περίπτωση που γνωρίζετε, αναφέρετε τιμή κόστους εφαρμογής σε €</i>					
Ερώτηση 4	Εκτιμώμενη συνεισφορά του μέτρου στην προστασία της υποδομής των Μεταφορών				
	Πολύ χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή	Πολύ υψηλή
Για όλα τα Μέτρα [1-119]					
Ερώτηση 5	Εκτιμώμενη συνεισφορά του μέτρου στην ανθεκτικότητα των λειτουργιών των δικτύων Μεταφορών απέναντι στην κλιματική αλλαγή				
	Πολύ χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια	Υψηλή	Πολύ υψηλή
Για όλα τα Μέτρα [1-119]					

### 10.3.2. Στατιστική ανάλυση απαντήσεων

Η έρευνα ερωτηματολογίου απαντήθηκε συνολικά από 62 εμπειρογνώμονες. Τα αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν σε ηλεκτρονική μορφή και αναλύθηκαν στατιστικά, έτσι ώστε να προκύψει μια τιμή (από 1 έως 5 – όσες και οι κατηγορίες προεπιλεγμένων απαντήσεων για κάθε μία από τις ερωτήσεις) για κάθε χαρακτηριστικό, κάθε μέτρου που εξετάστηκε. Η στατιστική ανάλυση έγινε για να ληφθούν υπόψη όλες οι απαντήσεις που δόθηκαν από τους εμπειρογνώμονες, και με την παραδοχή ότι η εξειδίκευση και εμπειρία του καθενός στο αντικείμενο των Μεταφορών και της Κλιματικής αλλαγής ήταν ίση με όλων των άλλων. Ο προαιρετικός χαρακτήρας των απαντήσεων άλλωστε, διασφάλισε τις περιπτώσεις όπου οι συμμετέχοντες δεν είχαν γνώση ή δεν μπορούσαν να κάνουν εκτίμηση της απάντησης και συνεπώς απέφυγαν να απαντήσουν την ερώτηση, είτε συνολικά είτε για κάποια επιμέρους μέτρα ανά μέσο μεταφοράς.

Καθώς όμως οι εμπειρογνώμονες, στους οποίους απευθύνθηκε η έρευνα ερωτηματολογίου, είχαν ήδη κατ' ελάχιστο επαγγελματική εμπειρία εκπόνησης έρευνας στις θεματικές περιοχές ενδιαφέροντος (λόγω της συμμετοχής τους στα προαναφερθέντα ερευνητικά έργα), αλλά και

επειδή η πλειονότητα τους είχαν συναφές επαγγελματικό αντικείμενο (δηλαδή προέρχονταν ή απασχολούνταν στις θεματικές περιοχές ενδιαφέροντος της έρευνας), ο μέσος όρος απόκρισης στην έρευνα (ανά ερώτηση) ήταν 81%, με χαμηλότερη απόκριση στην Ερώτηση 3, αναφορικά με το κόστος πιθανής εφαρμογής (55%). Για τις απαντήσεις σε επίπεδο μέσων μεταφοράς, παρατηρήθηκαν εξίσου υψηλά ποσοστά πλήρωσης, με μέσο όρο απόκρισης 79%, και με τη χαμηλότερη απόκριση να παρατηρείται για τις πλωτές μεταφορές (63%). Ο Πίνακας 62 παρουσιάζει συνοπτικά τα ποσοστά συμπλήρωσης του ερωτηματολογίου ανά ερώτηση και ανά μεταφορικό μέσο.

**Πίνακας 62: Ποσοστά πλήρωσης έρευνας ερωτηματολογίου ανά ερώτηση και ανά μέσο μεταφοράς**

<b>Ερώτηση</b>	<b>Απαντήσεις</b>	<b>Ποσοστό</b>
Εκτιμώμενος χρόνος υλοποίησης (Ερώτηση 1)	58	94%
Εκτιμώμενη χρονική περίοδος έναρξης εφαρμογής (Ερώτηση 2)	56	90%
Εκτιμώμενο χρηματικό κόστος εφαρμογής (Ερώτηση 3)	34	55%
Συνεισφορά για τις υποδομές Μεταφορών (Ερώτηση 4)	48	77%
Συνεισφορά για τα δίκτυα Μεταφορών (Ερώτηση 5)	54	87%
<b>Μεταφορικό Μέσο</b>	<b>Απαντήσεις</b>	<b>Ποσοστό</b>
Οδικές Μεταφορές	57	92%
Σιδηροδρομικές Μεταφορές	52	84%
Αεροπορικές Μεταφορές	49	79%
Πλωτές Μεταφορές	39	63%

Διευκρινίζεται εδώ, ότι για τον υπολογισμό των ποσοστών απόκρισης στην έρευνα που παρουσιάστηκαν, υπολογίζεται ως απόκριση, η περίπτωση απάντησης για πάνω από 50% των επιμέρους μέτρων – είτε ανά ερώτηση, είτε ανά μέσο μεταφοράς. Αν δηλαδή κάποιος εμπειρογνώμονας απάντησε για 10 από τα 30 επιμέρους μέτρα των οδικών μεταφορών, δεν λαμβάνεται υπόψη στο ποσοστό απόκρισης σε αυτό το επίπεδο (αλλά λαμβάνεται υπόψη για τη συνολική διαμόρφωση των αποτελεσμάτων).

Σε επίπεδο επιμέρους μέτρων, το μέσο ποσοστό απόκρισης κυμάνθηκε στο 72%, με το χαμηλότερο ποσοστό να παρατηρείται για τα μέτρα με κωδικοποίηση Π19 (Πλωτές Μεταφορές - *Λειτουργία ενός ολοκληρωμένου ευφυούς δικτύου πλωτών οδών σε όλη την Ευρώπη*) και Ο29 (Οδικές Μεταφορές - *Εκτίμηση έκθεσης κινδύνου εταιρειών εφοδιαστικής αλυσίδας και δημιουργία των κατάλληλων σχεδίων προσαρμογής*). Σημειώνεται εδώ, ότι η κωδικοποίηση που αναφέρεται είναι σύμφωνα με τον Πίνακα 59.

### 10.3.3. Σύνοψη χαρακτηριστικών μέτρων προσαρμογής

Ο Πίνακας 63 συνοψίζει τις βασικές πτυχές των χαρακτηριστικών των μέτρων για όλα τα μέσα μεταφοράς, σε μια προσπάθεια μετά-ανάλυσης των διαγραμμάτων ροής. Ανάλογα με τα εξεταζόμενα χαρακτηριστικά:

- το **‘Χ’** χρησιμοποιείται για να περιγράψει:
  - το βραχύ χρόνο υλοποίησης (έως 2 χρόνια)
  - τη βραχεία έναρξη εφαρμογής (μέχρι και το 2021)
  - το χαμηλό χρηματικό κόστος εφαρμογής (έως 1 εκ. €)
- το **‘Μ’** χρησιμοποιείται για να περιγράψει:
  - τη μεσοπρόθεσμη υλοποίηση (από 2 έως 3 χρόνια)
  - τον μεσοπρόθεσμο χρόνο έναρξης εφαρμογής (από το 2021 έως το 2022)
  - το μέτριο χρηματικό κόστος εφαρμογής (από 1 έως 3 εκ. €)
  - τη μέτρια συνεισφορά στη μείωση της τρωτότητας
- το **‘Υ’** χρησιμοποιείται για να περιγράψει:
  - τον μεγάλο χρόνο υλοποίησης (από 3 έως 4 χρόνια)
  - τον μεσομακροπρόθεσμο χρόνο έναρξης εφαρμογής (από το 2022 έως το 2024)
  - το υψηλό χρηματικό κόστος εφαρμογής (από 3 έως 10 εκ. €)
  - την υψηλή συνεισφορά στη μείωση της τρωτότητας
- το **‘ΠΥ’** χρησιμοποιείται για να περιγράψει:
  - τον πολύ μεγάλο χρόνο υλοποίησης (πάνω από 4 χρόνια)
  - τον μακροπρόθεσμο χρόνο έναρξης εφαρμογής (μετά το 2024)
  - το πολύ υψηλό χρηματικό κόστος εφαρμογής (άνω των 10 εκ. €)
  - την πολύ υψηλή συνεισφορά στη μείωση της τρωτότητας

Πίνακας 63: Σύνοψη των χαρακτηριστικών των μέτρων προσαρμογής ανά μεταφορικό μέσο

Μέτρα πολιτικού και νομοθετικού χαρακτήρα				
	Οδικές μεταφορές	Σιδηροδρομικές μεταφορές	Αεροπορικές μεταφορές	Πλωτές μεταφορές
Εκτιμώμενος χρόνος υλοποίησης	X	X	X – Μ	X – Μ – Υ
Εκτιμώμενη χρονική περίοδος έναρξης εφαρμογής	X	X	X	X – Υ
Εκτιμώμενο χρηματικό κόστος εφαρμογής	X – Μ	X	X	X – Μ
Συνεισφορά για τις υποδομές και τη	X – Μ – Υ	ΠΥ	Μ – Υ – ΠΥ	Μ – Υ – ΠΥ

Λειτουργία των δικτύων Μεταφορών				
<b>Μέτρα τεχνικού και δομικού χαρακτήρα</b>				
	<b>Οδικές μεταφορές</b>	<b>Σιδηροδρομικές μεταφορές</b>	<b>Αεροπορικές μεταφορές</b>	<b>Πλωτές μεταφορές</b>
Εκτιμώμενος χρόνος υλοποίησης	X – Y – ΠΥ	X – M – Y	X – M – ΠΥ	M – Y
Εκτιμώμενη χρονική περίοδος έναρξης εφαρμογής	X – Y	X – M – Y	X – M	X – M – Y
Εκτιμώμενο χρηματικό κόστος εφαρμογής	X – M – Y	M – Y	M – Y	X – M – Y
Συνεισφορά για τις υποδομές και τη λειτουργία των δικτύων Μεταφορών	M – Y – ΠΥ	M – Y – ΠΥ	Y – ΠΥ	M – ΠΥ
<b>Μέτρα επιχειρηματικού και διαδικαστικού χαρακτήρα</b>				
	<b>Οδικές μεταφορές</b>	<b>Σιδηροδρομικές μεταφορές</b>	<b>Αεροπορικές μεταφορές</b>	<b>Πλωτές μεταφορές</b>
Εκτιμώμενος χρόνος υλοποίησης	X – M	X – M	X	M
Εκτιμώμενη χρονική περίοδος έναρξης εφαρμογής	X – M	X	X	M
Εκτιμώμενο χρηματικό κόστος εφαρμογής	X – Y	X – M	M	M – Y
Συνεισφορά για τις υποδομές και τη λειτουργία των δικτύων Μεταφορών	M – Y – ΠΥ	M – Y – ΠΥ	ΠΥ	M – Y – ΠΥ
<b>Μέτρα πληροφοριακού χαρακτήρα</b>				
	<b>Οδικές μεταφορές</b>	<b>Σιδηροδρομικές μεταφορές</b>	<b>Αεροπορικές μεταφορές</b>	<b>Πλωτές μεταφορές</b>
Εκτιμώμενος χρόνος υλοποίησης	X – M	X – M	M	X – M – Y
Εκτιμώμενη χρονική περίοδος έναρξης εφαρμογής	X – M	X – M	X	X – M – Y
Εκτιμώμενο χρηματικό κόστος εφαρμογής	X – M – Y	X – M – Y	X	X – M – Y
Συνεισφορά για τις υποδομές και τη λειτουργία των δικτύων Μεταφορών	X – ΠΥ	M – ΠΥ	M – Y – ΠΥ	M – Y
<b>Μέτρα πρόβλεψης και αποτίμησης κινδύνων και υποστήριξης λήψης αποφάσεων</b>				
	<b>Οδικές μεταφορές</b>	<b>Σιδηροδρομικές μεταφορές</b>	<b>Αεροπορικές μεταφορές</b>	<b>Πλωτές μεταφορές</b>
Εκτιμώμενος χρόνος υλοποίησης	X	X – M	X	M
Εκτιμώμενη χρονική περίοδος έναρξης εφαρμογής	M	X – M	X	X – Y
Εκτιμώμενο χρηματικό κόστος εφαρμογής	M	X – M	X	M – Y
Συνεισφορά για τις υποδομές και τη λειτουργία των δικτύων Μεταφορών	M	M – Y – ΠΥ	M	M – Y

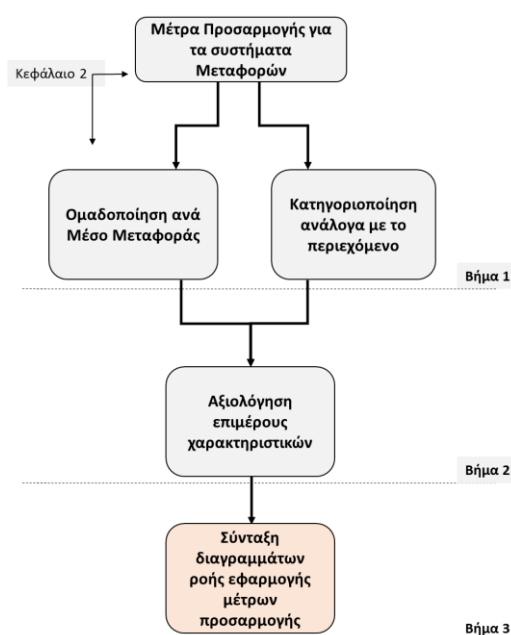
Η ανάλυση των απαντήσεων στα ερωτήματα της έρευνας για κάθε επιμέρους μέτρο στον Πίνακα 59, χρησιμοποιείται στο επόμενο βήμα για τη σύνταξη των διαγραμμάτων ροής εφαρμογής των μέτρων προσαρμογής ανά μέσο μεταφοράς, και παρουσιάζεται έτσι στην επόμενη Ενότητα (μέσω της τοποθέτησής τους στα διαγράμματα ροής). Εκτός από τις περιπτώσεις όπου ο μικρός αριθμός μέτρων ανά κατηγορία (π.χ. μέτρα πρόβλεψης και αποτίμησης κινδύνων και υποστηρίξης λήψης αποφάσεων για τις οδικές και τις αεροπορικές μεταφορές), βοηθάει στον μονοσήμαντο χαρακτηρισμό των μέτρων ανά μέσο, συνολικά, μπορεί να ειπωθεί ότι υπάρχει σημαντική διακύμανση μεταξύ της αξιολόγησης των μέτρων και των κατηγοριών τους.

#### 10.4. Σύνταξη διαγραμμάτων ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής

Η σύνταξη διαγραμμάτων ροής εφαρμογής των μέτρων προσαρμογής αποτελεί το τρίτο βήμα του τρίτου επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης της διδακτορικής έρευνας.

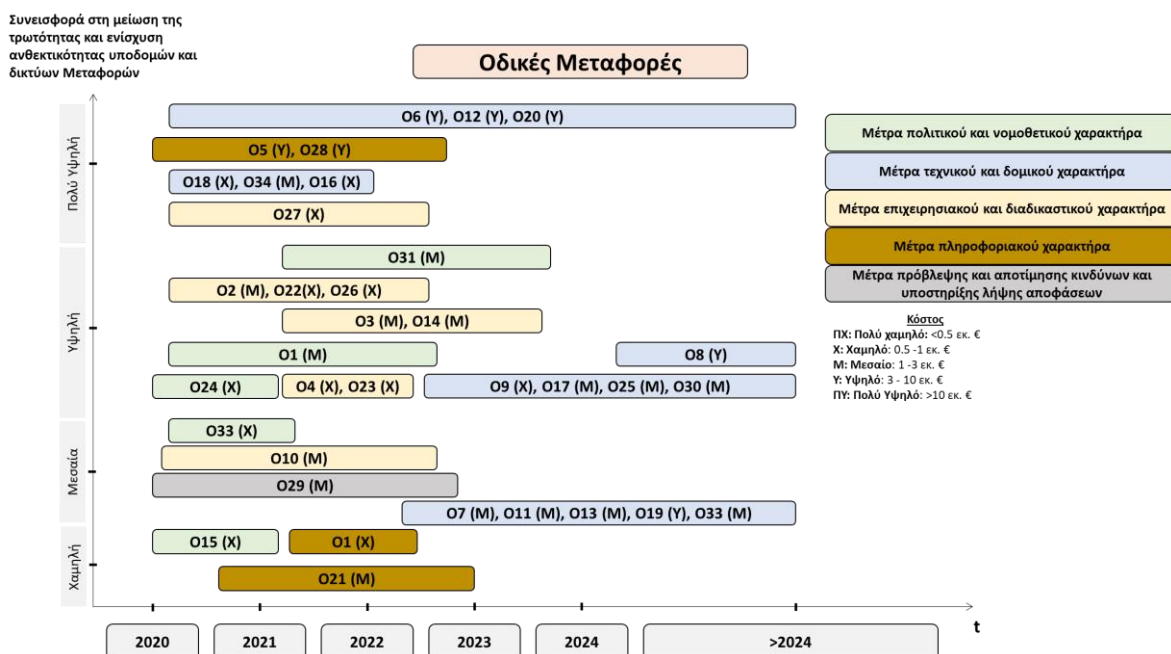
Για τη σύνταξη των διαγραμμάτων ροής, χρησιμοποιείται τόσο η κατηγοριοποίηση του πρώτου βήματος, όσο και η αξιολόγηση των επιμέρους χαρακτηριστικών των μέτρων προσαρμογής του δεύτερου βήματος.

Συγκεκριμένα, στα διαγράμματα ροής που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες, η 'τοποθέτηση' κάθε μέτρου γίνεται βάσει της αξιολόγησης του προηγούμενου βήματος. Έτσι, η έναρξη της χρονικής περιόδου εφαρμογής του μέτρου (απάντηση στην Ερώτηση 2 της έρευνας), οριοθετεί το αριστερό άκρο του μέτρου στο διάγραμμα ροής. Αντίστοιχα, ο εκτιμώμενος χρόνος για την υλοποίηση του μέτρου (απάντηση στην Ερώτηση 1 της έρευνας), το οριοθετεί κατά μήκος του άξονα Χ του διαγράμματος ροής, ενώ η συμβολή του μέτρου στη μείωση της τρωτότητας, και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας του συστήματος Μεταφορών (μέσος όρος απαντήσεων στις Ερωτήσεις 4 και 5), το οριοθετεί κατά πλάτος του άξονα Υ του διαγράμματος ροής. Τέλος, για κάθε μέτρο παρέχεται σχετική ένδειξη για τους εκτιμώμενους οικονομικούς πόρους πιθανής εφαρμογής του.



### 10.4.1. Διαγράμματα ροής για τις οδικές μεταφορές

Η Εικόνα 103 παρουσιάζει το διάγραμμα ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής για τις οδικές μεταφορές. Όπως απεικονίζεται, η μειονότητα των μέτρων που συμπεριλαμβάνονται στο διάγραμμα ροής είναι μη-τεχνικής φύσης και η υλοποίησή τους, που προτείνεται από τους εμπειρογνώμονες να ξεκινήσει στο εγγύς μέλλον, αναμένεται να έχει ολοκληρωθεί μέχρι την έναρξη του 2023, ενώ απαιτεί χαμηλή έως μέτρια οικονομική χρηματοδότηση. Από το 2023 και έπειτα θα πρέπει να εφαρμοστούν, με την εξαίρεση ορισμένων, τα μέτρα τεχνικού και δομικού χαρακτήρα, με σημαντικά υψηλότερη συμβολή στη μείωση της τρωτότητας των μεταφορικών συστημάτων από ότι οι άλλες κατηγορίες. Άμεσα θα πρέπει να εφαρμοστούν τα περιορισμένα σε αριθμό μέτρα πολιτικού και νομοθετικού χαρακτήρα για τις οδικές μεταφορές, ανοίγοντας το δρόμο και για άλλα μέτρα που πρέπει να υλοποιηθούν.



Εικόνα 103: Διάγραμμα ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής οδικών Μεταφορών

Για λόγους διευκόλυνσης του αναγνώστη, παρατίθεται ο Πίνακας 64 με τα μέτρα προσαρμογής των οδικών μεταφορών και την αντίστοιχη κωδικοποίησή τους ως απόσπασμα του Πίνακα 59.

Πίνακας 64: Μέτρα προσαρμογής οδικών Μεταφορών και κωδικοποίησή τους

Μέτρα προσαρμογής οδικών Μεταφορών	Κωδικοποίηση
Έκδοση εκπαιδευτικού και ενημερωτικού υλικού για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης για τις Μεταφορές	Ο1
Ανάπτυξη σχεδίων έγκαιρης επικοινωνίας και συντονισμού με συμμετοχή των ενδιαφερόμενων φορέων	Ο2

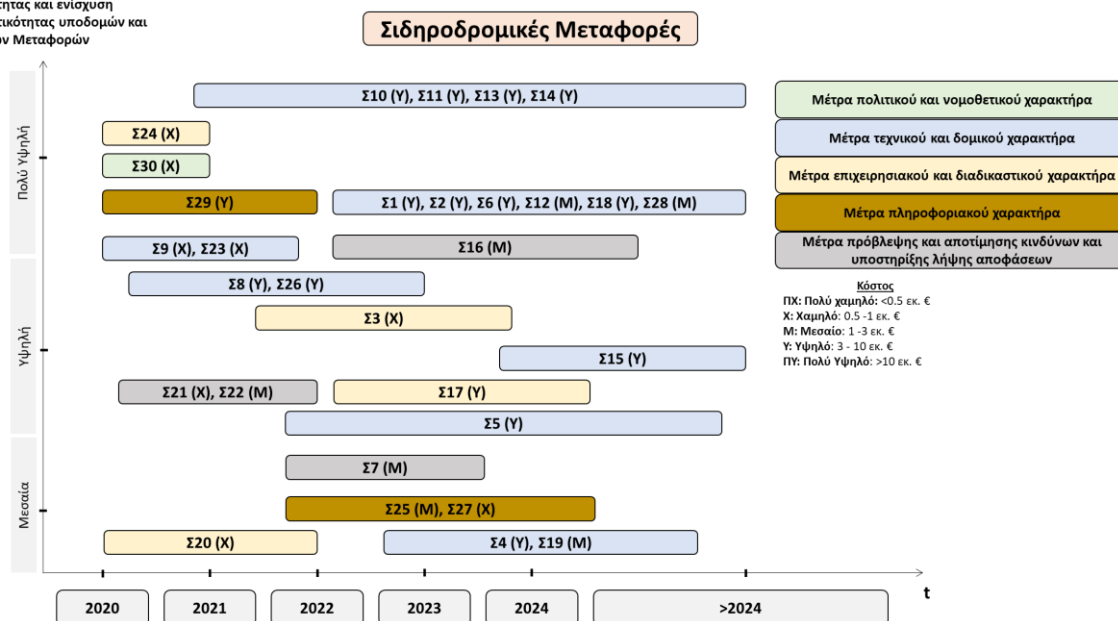


Ανάπτυξη βιώσιμων επιχειρηματικών μοντέλων για την παροχή συστημάτων πληροφοριών έκτακτης ανάγκης	O3
Οργάνωση ανεφοδιασμού σε παγιδευμένους οδηγούς/επιβάτες με τη βοήθεια εθελοντών και οργανώσεων βοήθειας	O4
Παροχή αξιόπιστης, άμεσης και - εάν είναι εφικτό- εξατομικευμένης πληροφόρησης σχετικά με τη διάρκεια ενός ακραίου περιστατικού	O5
Φύτευση παρόδιας βλάστησης που απορροφά την παραγόμενη θερμότητα και προστατεύει τις οδούς	O6
Σχεδιασμός νέων ασφαλικών μιγμάτων ανθεκτικών στη θερμότητα	O7
Ανάπτυξη ανθεκτικών στη θερμότητα αρθρώσεων γεφυρών	O8
Ανάπτυξη καινοτόμων υλικών οδοστρώματος ανθεκτικών στη διάβρωση	O9
Προσαρμογή των ωραρίων εργασίας (και συνεπαγόμενων μετακινήσεων) κάτω από αντίξοες καιρικές συνθήκες για τις οδικές μεταφορές	O10
Βελτίωση των συστημάτων αποχέτευσης για τις οδικές και σιδηροδρομικές υποδομές	O11
Νέα ασφαλικά μείγματα που βοηθούν στην ταχύτερη αποστράγγιση των λιμναζόντων υδάτων	O12
Ενίσχυση της οδικής διαστρωμάτωσης για την πρόληψη φαινομένων έκπλυσης (washing off)	O13
Εγκατάσταση πινακίδων που προειδοποιούν τον οδηγό/πεζό σχετικά με επικείμενο πλημμυρισμένο οδικό δίκτυο	O14
Αυστηρή επιβολή ορίου ταχύτητας κατά τη διάρκεια ΑΚΦ (π.χ. καταιγίδων)	O15
Μέτρα προστασίας κατά της καθίζησης των πρανών γύρω από το οδικό/σιδηροδρομικό δίκτυο	O16
Εγκατάσταση ανεμοθραυστών	O17
Βελτίωση αποχετεύσεων στις οδικές διασταυρώσεις	O18
Νέα σχεδιαστικά πρότυπα που αφορούν στα συστατικά του οδικού δικτύου (πινακίδες, φωτισμός) για την ενίσχυση της προστασίας των χρηστών	O19
Τακτικός καθαρισμός ποδηλατοδρόμων και πεζοδρομίων κατά τη διάρκεια του χειμώνα	O20
Ανάπτυξη ευφύων συστημάτων ανάδρασης στα οχήματα για να επικοινωνούν σύμφωνα με τις ανάγκες των μετακινούμενων	O21
Σχέδια προτεραιότητας που διατηρούν την πρόσβαση στα νοσοκομεία, στους σταθμούς έκτακτης ανάγκης και στους χώρους καταφυγής	O22
Ορισμός των αξόνων προτεραιότητας για τον καθαρισμό οδών σε περιπτώσεις μεγάλης κλίμακας επιπτώσεων	O23
Επανεξέταση συμβάσεων διαδικασιών συντήρησης, ώστε να καταστούν ευέλικτες και αποτελεσματικές κάτω από ταχέως μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες	O24
Ανύψωση των παράκτιων οδικών δικτύων	O25
Συντονισμός των σχεδίων έκτακτης ανάγκης μεταξύ των μέσων και δικτύων μεταφοράς	O26
Εφαρμογή των κατάλληλων διαδικασιών διαχείρισης κινδύνου με σκοπό την προετοιμασία για αντίξοες συνθήκες	O27
Τυποποίηση των πληροφοριών καιρού και των προειδοποιήσεων κινδύνου	O28
Εκτίμηση έκθεσης κινδύνου εταιρειών εφοδιαστικής αλυσίδας και δημιουργία των κατάλληλων σχεδίων προσαρμογής	O29
Σχεδιασμός και επενδύσεις σε νέα οδικά υλικά με δυνατότητα "γρήγορης αποκατάστασης"	O30
Ρύθμιση και εφαρμογή διεθνών προτύπων για πληροφορίες δελτίων καιρού και έκτακτης ανάγκης	O31
Διαβούλευση και συντονισμός των αρχών αυτοκινητοδρόμων και βασικών ενδιαφερόμενων φορέων για να επενδύσουν σε στρατηγικές προσαρμογής	O32
Παροχή καταφυγίων για μη μηχανοκίνητα μέσα μεταφοράς	O33
Προετοιμασία για επαρκή αποθέματα αλατιού και διαθεσιμότητα εξοπλισμού καθαρισμού οδικού δικτύου πριν και κατά τη διάρκεια του χειμώνα	O34

### 10.4.2. Διαγράμματα ροής για τις σιδηροδρομικές μεταφορές

Η Εικόνα 104 παρουσιάζει το διάγραμμα ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής για τις σιδηροδρομικές μεταφορές. Όπως φαίνεται, τα μέτρα τεχνικού και δομικού χαρακτήρα, που συνδέονται με σημαντικές οικονομικές απαιτήσεις, υπερτερούν αριθμητικά όλων των άλλων μέτρων, και όπως είναι αναμενόμενο, θεωρούνται απαραίτητα για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των σιδηροδρομικών συστημάτων Μεταφορών. Τα υπόλοιπα μέτρα που περιλαμβάνονται στο διάγραμμα ροής είναι κατά μέσο όρο μικρής διάρκειας υλοποίησης (έως 2 χρόνια) και χαμηλού έως μεσαίου κόστους εφαρμογής. Είναι αξιοσημείωτο ότι τα μέτρα πρόβλεψης και αποτίμησης κινδύνων και υποστήριξης λήψης αποφάσεων, που ανήκουν στις κατηγορίες χαμηλού και μεσαίου κόστους, αναμένεται να έχουν υψηλή συμβολή στη μείωση της ευπάθειας. Το μόνο μέτρο νομοθετικού χαρακτήρα για τον τομέα των σιδηροδρομικών Μεταφορών είναι χαμηλού κόστους και μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα με σύντομη διάρκεια εφαρμογής και με πολύ υψηλή αναμενόμενη συνεισφορά στη μείωση της τρωτότητας.

Συνεισφορά στη μείωση της τρωτότητας και ενίσχυση ανθεκτικότητας υποδομών και δικτύων Μεταφορών



Εικόνα 104: Διάγραμμα ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής σιδηροδρομικών Μεταφορών

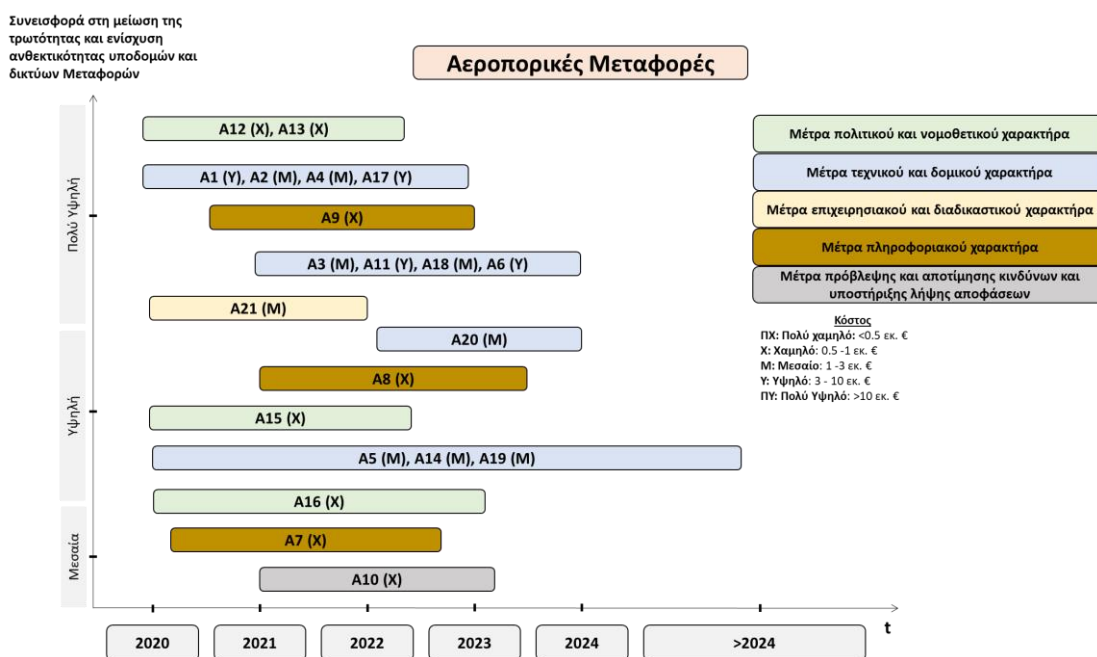
Για λόγους διευκόλυνσης του αναγνώστη, παρατίθεται ο Πίνακας 65 με τα μέτρα προσαρμογής των σιδηροδρομικών μεταφορών και την αντίστοιχη κωδικοποίησή τους ως απόσπασμα του Πίνακα 21.

**Πίνακας 65: Μέτρα προσαρμογής σιδηροδρομικών Μεταφορών και κωδικοποίησή τους**

<b>Μέτρα προσαρμογής σιδηροδρομικών Μεταφορών</b>	<b>Κωδικοποίηση</b>
Κατασκευή αναχωμάτων για την προστασία της υποδομής από την υψηλή στάθμη του νερού	Σ1
Χρήση συνεχώς συγκολλημένων σιδηροτροχιών	Σ2
Επαναπρογραμματισμός σιδηροδρομικών δρομολογίων λόγω αυξημένης συχνότητας υψηλών θερμοκρασιών	Σ3
Τακτική αντικατάσταση των υλικών βάσης του σιδηροδρόμου λόγω τήξης	Σ4
Εγκατάσταση λωρίδων/γραμμών έκτακτης ανάγκης για τις οδικές μεταφορές	Σ5
Δημιουργία περισσότερων και μεγαλύτερων αποχετευτικών λάκκων και σωλήνες απορροής μεγαλύτερης χωρητικότητας	Σ6
Προστασία των υπόγειων σιδηροδρομικών σταθμών και των χώρων καταφυγής και σχεδιασμός για τη διαδικασία εκκένωσης	Σ7
Εγκατάσταση συστημάτων πρόγνωσης τοπικών καιρικών συνθηκών	Σ8
Προετοιμασία σχεδιασμού εξυπηρέτησης εφοδιαστικής αλυσίδας για την αλλαγή εξοπλισμού σε περιπτώσεις κινδύνων	Σ9
Εφαρμογή μέτρων προστασίας για τις σιδηροδρομικές υποδομές, π.χ. εμπόδια	Σ10
Μέτρα προστασίας κατά της καθίζησης των πρανών γύρω από τα σιδηροδρομικά δίκτυα για την αποφυγή αποκοπής σιδηροδρομικών τμημάτων	Σ11
Ανύψωση της σιδηροδρομικής υποδομής καθώς και των γεφυρών	Σ12
Πρόσθετη άντληση σε σιδηροδρομικές σήραγγες	Σ13
Προστασία των υπαίθριων σιδηροδρομικών υποδομών από τους ανέμους	Σ14
Ανάπτυξη συστήματος διακοπής λειτουργίας για γραμμές που κινούνται μέσα σε αστικό περιβάλλον	Σ15
Ενσωμάτωση των προβλέψεων για την κλιματική αλλαγή στο σχεδιασμό της αποχέτευσης για την αντιμετώπιση της προβλεπόμενης συχνότητας και του μεγέθους μελλοντικών πλημμυρών	Σ16
Εγκατάσταση κοινών κέντρων ελέγχου και δρομολόγησης τρενών, συμπεριλαμβανομένων των σιδηροδρομικών υπηρεσιών και των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης	Σ17
Ενίσχυση ανθεκτικότητας των σιδηροδρομικών υποδομών έναντι των πλημμυρών	Σ18
Ενίσχυση των υφιστάμενων εμποδίων/αναχωμάτων για τις οδικές μεταφορές	Σ19
Σχεδιασμός για την παροχή υπηρεσιών αντικατάστασης με άλλα μεταφορικά μέσα (π.χ. λεωφορεία)	Σ20
Ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης πλημμυρών, ανέμων και καταγίδας που ενσωματώνουν καλύτερη πρόγνωση του καιρού	Σ21
Χαρτογράφηση κινδύνου τρωτότητας σε συνεργασία με τις μετεωρολογικές υπηρεσίες για όλες τις υποδομές μεταφορών	Σ22
Προσδιορισμός κρίσιμων θέσεων για κάθε ακραίο καιρικό φαινόμενο για όλες τις υποδομές Μεταφορών	Σ23
Σχεδιασμός διαδρομών έκτακτης ανάγκης ή εκτροπές, λόγω αποκοπής δικτύων	Σ24
Ενσωμάτωση διαφόρων τύπων παρακολούθησης δεδομένων σχετικών με την κίνηση των τρενών	Σ25
Βελτίωση, συντήρηση και παρακολούθηση όλων των μεταφορικών υποδομών	Σ26
Βελτιωμένα συστήματα που προειδοποιούν τους οδηγούς και τις ομάδες επισκευής για πιθανά προβλήματα των σιδηροδρομικών εγκαταστάσεων	Σ27
Βελτιωμένος αερισμός σε υπόγειους σιδηροδρομικούς σταθμούς	Σ28
Συστήματα παρακολούθησης-προειδοποίησης θερμοκρασίας σε υπόγειες σιδηροδρομικές υποδομές	Σ29

### 10.4.3. Διαγράμματα ροής για τις αεροπορικές μεταφορές

Η Εικόνα 105 παρουσιάζει το διάγραμμα ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής για τις αεροπορικές Μεταφορές. Όπως φαίνεται, τα μέτρα των αεροπορικών Μεταφορών προτείνεται να εφαρμοστούν στο εγγύς μέλλον (το τελευταίο εξ αυτών πρέπει να εφαρμοστεί το 2022), ανεξάρτητα από το κόστος και τη συμβολή τους στη μείωση της ευπάθειας. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την ανάγκη του τομέα των αεροπορικών Μεταφορών να εφαρμόσει νωρίτερα τις επιλογές αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής από ότι άλλα μέσα μεταφοράς, λόγω του ότι η εφαρμογή τους διαρκεί κατά μέσο όρο 4 χρόνια. Όπως επίσης παρατηρήθηκε στα διαγράμματα ροής των οδικών και σιδηροδρομικών επιλογών, τα μέτρα προσαρμογής νομοθετικού χαρακτήρα (ως υποκατηγορίας της 1<sup>ης</sup> κατηγορίας – Μέτρα πολιτικού και νομοθετικού χαρακτήρα, με πράσινη σκίαση στην Εικόνα), αξιολογούνται ως υψηλής συνεισφοράς στο στόχο της ενισχυμένης ανθεκτικότητας, ενώ η εφαρμογή τους είναι μεσαίας διάρκειας και μπορούν να εκκινήσουν όλες βραχυπρόθεσμα.



Εικόνα 105: Διάγραμμα ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής αεροπορικών Μεταφορών

Για λόγους διευκόλυνσης του αναγνώστη, παρατίθεται ο Πίνακας 66 με τα μέτρα προσαρμογής των αεροπορικών μεταφορών και την αντίστοιχη κωδικοποίησή τους ως απόσπασμα του Πίνακα 21.

Πίνακας 66: Μέτρα προσαρμογής αεροπορικών Μεταφορών και κωδικοποίησή τους

Μέτρα προσαρμογής αεροπορικών Μεταφορών	Κωδικοποίηση
Κατασκευή φραγμάτων-αναχωμάτων για την προστασία της υποδομής στα παράκτια αεροδρόμια από τις πλημμύρες	A1

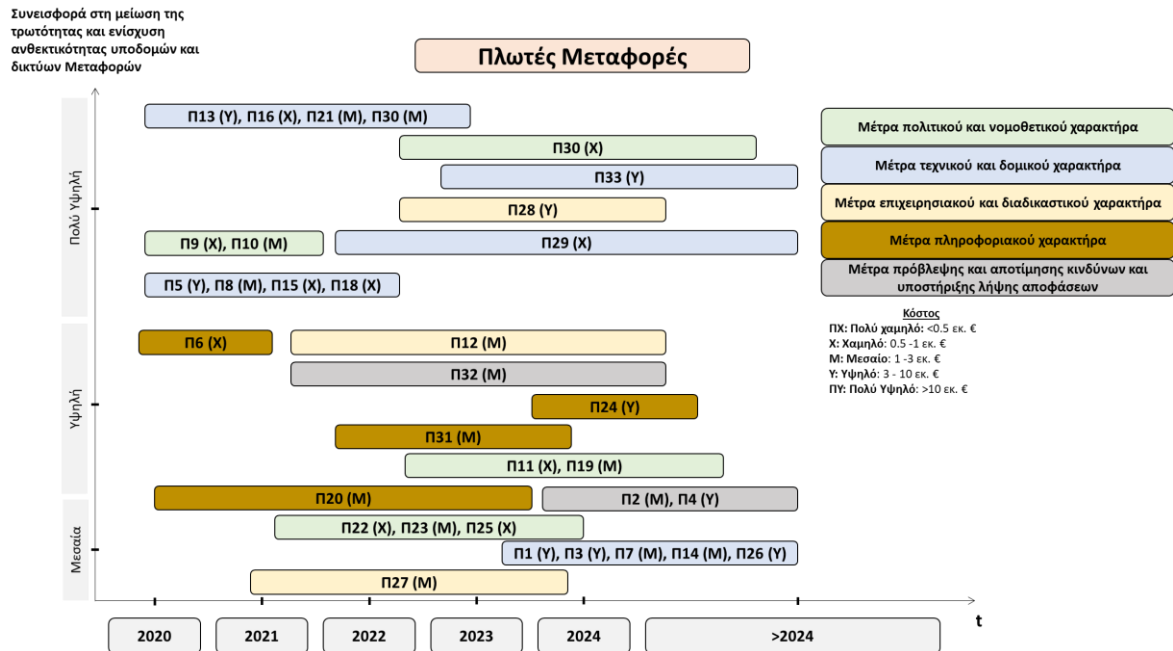
Κατασκευή διαδρόμων με ασφαλτόμιγμα που επιταχύνει την αποστράγγιση του στάσιμου νερού (π.χ. πορώδεις τάπητες)	A2
Εγκατάσταση ανεμοφρακτών	A3
Ενίσχυση των αερολιμενικών υποδομών από τις πλημμύρες	A4
Επανακατεύθυνση διαδρόμων προσγείωσης και απογείωσης αεροσκαφών λόγω μεταβαλλόμενων πλευρικών ανέμων	A5
Εφαρμογή τεχνολογιών και διαδικασιών που αναπτύχθηκαν από το SESAR (Single European Sky ATM Research) με στόχο τη βελτιστοποίηση της χωρητικότητας σε ακραίες καιρικές συνθήκες	A6
Ανάπτυξη συστήματος μέτρησης για την αξιολόγηση και σύγκριση της ευπάθειας (τρωτότητας) των αερολιμένων και του εναέριου χώρου	A7
Ενίσχυση της διαφάνειας κατά τη σύγκριση των επιπτώσεων των γεγονότων που προκαλούν διαταραχές (σταθερές διαδικασίες στατιστικής αξιολόγησης)	A8
Βελτίωση πρόβλεψης τοπικών καιρικών συνθηκών και διαταραχών	A9
Προσδιορισμός των περιοχών με πιθανή τήξη του μόνιμου στρώματος πάγου	A10
Ανύψωση των διαδρόμων προσγείωσης και απογείωσης αεροσκαφών	A11
Αναθεώρηση κωδικών δόμησης γύρω από αεροδρόμια	A12
Αποκλεισμός των περιοχών υψηλού κινδύνου πλημμυρών από οποιαδήποτε αναπτυξιακή δραστηριότητα ή κατασκευή υποδομών Μεταφορών	A13
Επανασχεδιασμός συστημάτων αποχέτευσης	A14
Ένταξη των πτυχών της κλιματικής αλλαγής στο ρυθμιστικό σχέδιο αεροδρομίων	A15
Βελτίωση της χωρητικότητας του εξοπλισμού περιστολής (π.χ. εκχιονιστικά, κλιματιστικά)	A16
Κατασκευή μακρύτερων διαδρόμων για να διευκολύνουν τα αεροσκάφη που προσγειώνονται σε υψηλής πυκνότητας αέρα	A17
Χρήση ανθεκτικού στη θερμότητα ασφαλτομίγματος στους διαδρόμους απογείωσης και προσγείωσης αεροσκαφών	A18
Μετεγκατάσταση αεροπορικών διαδρόμων που κατασκευάστηκαν πάνω σε επιφάνειες που επηρεάζονται από την τήξη του οδοστρώματος	A19
Αυξημένες επισκευές σε διαδρόμους προσγείωσης και απογείωσης αεροσκαφών που βρίσκονται σε εδάφη που επηρεάζονται από την τήξη του οδοστρώματος	A20
Ανάπτυξη σχεδίων εκκένωσης από υποδομές αεροδρομίων και χάραξη εναλλακτικών σχεδίων εκτέλεσης αεροπορικών μεταφορών	A21

#### 10.4.4. Διαγράμματα ροής για τις πλωτές μεταφορές

Η Εικόνα 106 παρουσιάζει το διάγραμμα ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής για τις πλωτές μεταφορές. Εδώ παρατηρείται ετερογενής κατανομή των μέτρων στις προκαθορισμένες κατηγορίες και σημαντική διακύμανση της περιόδου εφαρμογής, της διάρκειας υλοποίησης και των οικονομικών πόρων που εκτιμώνται ότι θα χρειαστούν, περιορίζοντας έτσι τα γενικά συμπεράσματα. Ενδεικτικά, η πλειονότητα των μέτρων τεχνικού και δομικού χαρακτήρα, αναμένεται να έχει υψηλή συμβολή στη μείωση της ευπάθειας, ενώ τα μέτρα επιχειρησιακού και διαδικαστικού χαρακτήρα που εκτιμώνται κυρίως ως χαμηλού ή μεσαίου χρηματικού κόστους, έχουν διάφορους βαθμούς συμβολής στη μείωση της ευπάθειας. Τα σχετικά λίγα σε αριθμό μέτρα πρόβλεψης και αποτίμησης κινδύνων και υποστήριξης λήψης αποφάσεων απαιτούν μέτριες δαπάνες, αναμένεται να έχουν υψηλή συμβολή στη μείωση της ευπάθειας και η υλοποίησή τους, η οποία εκκινεί μέσοπροθεσμα

Σελίδα 429 από 481

ή μακροπρόθεσμα, είναι μέσης ή μακράς διάρκειας. Τέλος, τα μέτρα πολιτικού και νομοθετικού χαρακτήρα είναι χαμηλού ή μεσαίου κόστους, έχουν ποικίλους βαθμούς υλοποίησης χρονοδιαγραμμάτων και διάρκεια εφαρμογής και πολύ υψηλή αναμενόμενη συνεισφορά στη μείωση της ευπάθειας.



Εικόνα 106: Διάγραμμα ροής εφαρμογής μέτρων προσαρμογής πλωτών Μεταφορών

Για λόγους διευκόλυνσης του αναγνώστη, παρατίθεται ο Πίνακας 67 με τα μέτρα προσαρμογής των πλωτών μεταφορών και την αντίστοιχη κωδικοποίησή τους ως απόσπασμα του Πίνακα 21.

Πίνακας 67: Μέτρα προσαρμογής πλωτών Μεταφορών και κωδικοποίησή τους

Μέτρα προσαρμογής πλωτών Μεταφορών	Κωδικοποίηση
Μετεγκατάσταση λιμενικών υποδομών, όπου αυτές βρίσκονται σε περιοχές υψηλού κινδύνου, λόγω κλιματικής αλλαγής	Π1
Βελτίωση της ποιότητας και αξιοπιστίας των προβλέψεων αιολικής ενέργειας (ανέμων) με τη χρήση WRF (Weather Research and Forecasting) με ανάλυση μέχρι και 2 χιλιομέτρων	Π2
Βελτίωση των υποδομών μεταφόρτωσης εμπορευμάτων στους λιμένες, καθιστώντας αυτές αποτελεσματικές κάτω από διαφορετικές στάθμες νερού	Π3
Παραγωγή ακριβέστερων προβλέψεων καιρού μέσω της σύγκρισης των αποδόσεων των μοντέλων πρόγνωσης καιρού έναντι αξιόπιστων δεδομένων παρατήρησης για τον τόπο πρόγνωσης	Π4
Εισαγωγή ανθεκτικών στη θερμότητα υλικών στη διαδικασία κατασκευής των λιμένων	Π5
Συνεχής παρακολούθηση των θερμοκρασιών περιβάλλοντος των έργων υποδομής	Π6
Ενισχυμένη μόνωση και ψύξη των αποθηκών στους λιμένες	Π7
Κατασκευή υποδομών προστασίας από τσουνάμι για τους λιμένες	Π8
Βελτίωση πρόσβασης στα λιμάνια και χάραξη νέων διαδρομών για τις θαλάσσιες Μεταφορές	Π9

Σχεδιασμός εναλλακτικών διαδρομών για εμπορευματικές Μεταφορές στις αρκτικές περιοχές	P110
Δημιουργία Ευρωπαϊκής επιτροπής για τις ποτάμιες μεταφορές για την κοινή αντιμετώπιση επιδράσεων ΑΚΦ	P111
Δημιουργία ενός ευρωπαϊκού χώρου ποτάμιας ναυσιπλοΐας με ελάχιστα διοικητικά εμπόδια και με ένα μέγιστο εναρμονισμένο νομοθετικό και κανονιστικό πλαίσιο	P112
Ανύψωση των λιμενικών υποδομών πάνω από το μέγιστο κύμα	P113
Κατασκευή φραγμάτων και τειχών προστασίας για την αποφυγή πλημμυρών νερού στους λιμένες	P114
Δημιουργία ισχυρότερων μηχανισμών σύνδεσης πλοίου και φόρτωσης/εκφόρτωσης φορτίου	P115
Νέα πρότυπα σχεδιασμού πλοίων για προστασία από μεγαλύτερα κύματα ή ρηγά κανάλια /λιμάνια	P116
Ενίσχυση αποβαθρών και γερανών για αυξημένη αντοχή σε σφοδρούς ανέμους και μεγαλύτερα κύματα	P117
Σχεδιασμός λεκανών κατακράτησης και αποχέτευσης νερού σε περίπτωση σοβαρών πλημμυρών	P118
Λειτουργία ενός ολοκληρωμένου ευφυούς δικτύου πλωτών οδών σε όλη την Ευρώπη	P119
Συλλογή, καταγραφή, απεικόνιση και ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με το βάθος νερού για τις ποτάμιες και θαλάσσιες μεταφορές	P120
Μετεγκατάσταση, επανασχεδιασμός και ενίσχυση των κυματοθραυστών για την προστασία των λιμανιών και της γενικής υποδομής θαλάσσιων Μεταφορών από μεγαλύτερα κύματα	P21
Έκδοση κατευθυντήριων γραμμών σχετικά με την εφαρμογή της περιβαλλοντικής νομοθεσίας που αφορά στους λιμένες και στις πλωτές οδούς	P22
Ανάπτυξη καινοτόμου τεχνολογίας για τον εκσυγχρονισμό και τη λειτουργία του στόλου, του λιμανιού και των τερματικών σταθμών	P23
Ενίσχυση της αποτελεσματικότητας και αποδοτικότητας νέων τεχνολογιών (π.χ. αισθητήρες για την πρόβλεψη του καιρού)	P24
Εφαρμογή της Κοινής Δήλωσης Ανάπτυξης του Περιβάλλοντος & της Εσωτερικής Ναυσιπλοΐας με την παροχή τεχνικής βοήθειας	P25
Παροχή επαρκών θέσεων ελλιμενισμού, αγκυροβολίων και εξοπλισμού ακτής για το χειρισμό (εξυπηρέτηση) μεγαλύτερου αριθμού σκαφών	P26
Συνεχής και διαφοροποιημένη παρακολούθηση και ανάλυση της εξέλιξης του συστήματος εκκένωσης (εκφόρτισης) των υδάτων των ποταμών	P27
Διαρθρωτικές αλλαγές των τεχνικών έργων των ποταμών	P28
Τακτική αφαίρεση των ιζημάτων από το βυθό	P29
Ανάπτυξη καινοτόμων, προσαρμοσμένων, αποτελεσματικών και πιο φιλικών προς το περιβάλλον σκαφών	P30
Επέκταση λειτουργιών και ολοκλήρωση συστημάτων RIS (River Information Services)	P31
Ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων για τη βελτίωση της παρακολούθησης των ποταμών (διατμητική τάση, μεταφορά ιζημάτων, μορφο-δυναμική κ.λπ.)	P32
Πρόβλεψη κάθετων αποβαθρών για να διευκολύνουν τη μεταφόρτωση σε συνθήκες εξαιρετικά χαμηλής στάθμης νερού	P33

### 10.5. Συμπεράσματα εφαρμογής 3<sup>ου</sup> επιπέδου της μεθοδολογικής προσέγγισης

Τα βασικά συμπεράσματα της εφαρμογής που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο αυτό είναι δύο ειδών. Αφενός αφορούν τα εργαλεία αυτά καθ'αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνταξη των διαγραμμάτων ροής, αλλά και τα ίδια τα διαγράμματα ροής ως μέσο υποβοήθησης

λήψης αποφάσεων από τις υπεύθυνες αρχές σχετικά με την προσαρμογή των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή. Αφετέρου, αφορούν στο περιεχόμενο των διαγράμματος ροής, στο είδος των μέτρων που είναι απαραίτητα να ληφθούν για την προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, αλλά και στο εκτιμώμενο κόστος αυτής της προσαρμογής.

Τα μεν επιστημονικά και μελετητικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν (στοχευμένη επισκόπηση βιβλιογραφίας για συλλογή διαφόρων τρόπων προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή, κατηγοριοποίηση βάσει περιεχομένου και μέσου μεταφοράς, έρευνα ερωτηματολογίου και στατιστική ανάλυση) κρίνονται επαρκή για τη σύνταξη των τελικών διαγραμμάτων ροής, με την υποσημείωση, ότι καθώς ο ευρύτερος τομέας (Μεταφορές και προσαρμογή στη κλιματική αλλαγή) συγκεντρώνει αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον, η βιβλιογραφική συλλογή μέτρων, πολιτικών και εργαλείων προσαρμογής πρέπει να επικαιροποιείται τακτικά (έτσι ώστε και τα αντίστοιχα διαγράμματα ροής να είναι ενημερωμένα). Αναφορικά με τη κατηγοριοποίηση των μέτρων που απαντώνται κατά τη βιβλιογραφική επισκόπηση, υπογραμμίζεται για το μέλλον η ανάγκη μιας συνολικότερης θεώρησης των Μεταφορών ως συστήματα, και όχι ανά μέσο Μεταφοράς, ειδικά σε επίπεδο πόλεων, όπου πιθανόν η προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή θα πρέπει να προσληφθεί υπό το πρίσμα της πολυτροπικότητας. Συμπεραίνεται δηλαδή ανάγκη δημιουργίας μια γενικής κατηγορίας μέτρων, η εφαρμογή των οποίων θα αντιμετώπιζε τις Μεταφορές ως σύνολο (ειδικά σε ότι αφορά μέτρα πολιτικού και νομοθετικού χαρακτήρα).

Σημειώνεται επίσης, ότι η έρευνα ερωτηματολογίου, ως προσέγγιση αποτίμησης διαφόρων παραμέτρων των επιμέρους μέτρων μπορεί μόνο τότε να είναι αξιόπιστη, όταν μπορεί να διασφαλιστεί η επιστημονική επάρκεια των συμμετεχόντων στο γνωστικό αντικείμενο που πραγματεύεται η έρευνα. Επειδή ακριβώς δεν είναι μια έρευνα π.χ. δηλωμένων προτιμήσεων ή πρόθεσης πληρωμής κάποιου κομίστρου για ένα μέσο μεταφοράς, δεν είναι δηλαδή μια γενική έρευνα που απευθύνεται σε μια μεγάλη ομάδα (π.χ. τους μετακινούμενους ως σύνολο), η αξία των αποτελεσμάτων της είναι άρρηκτα συνυφασμένη με τους συμμετέχοντές της. Για το λόγο αυτό, το πλήθος των συμμετεχόντων στην έρευνα (=62) κρίθηκε επαρκές για μια αρχική αποτίμηση μέτρων προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών.

Τα διαγράμματα ροής τα οποία προτάθηκαν στη μεθοδολογική προσέγγιση της Ενότητας 7.5, και συντάχθηκαν στο Κεφάλαιο αυτό, αποτιμώνται θετικά, ως μέσο πληροφόρησης επί Σελίδα 432 από 481



διαφόρων χαρακτηριστικών των μέτρων προσαρμογής, καθώς μπορούν με σχετικά απλό και άμεσο τρόπο (οπτικά δηλαδή) να παρέχουν πληροφορίες για το πότε πρέπει να εφαρμοστεί ένα μέτρο, τι διάρκεια θα έχει η εφαρμογή του και ποιο το εκτιμώμενο κόστος. Φαίνεται δε να είναι ένα εργαλείο που μπορεί να υποστηρίξει τις αρχές στη λήψη αποφάσεων αναφορικά με την προσαρμογή των συστημάτων Μεταφορών καθώς παρέχει την απαραίτητη πληροφορία της προτεραιοποίησης και αλληλουχίας εφαρμογής μέτρων. Πρακτικά δηλαδή, μια ενδεχόμενη υιοθέτηση των διαγραμμάτων ροής από τις αρχές, καταδεικνύει το σύνολο των ενεργειών που πρέπει να γίνουν για την προσαρμογή (ανά μέσο), και τη σειρά που πρέπει να γίνουν αυτές οι ενέργειες. Παρατηρήθηκαν όμως και δυο κενά αναφορικά με τις πληροφορίες που παρέχονται από τα διαγράμματα ροής: αφενός, δεν έχει συμπεριληφθεί η χρονική ισχύς της εφαρμογής κάθε μεμονωμένου μέτρου, δηλαδή δεν γίνεται γνωστό μέσω των διαγραμμάτων ροής, ποιά είναι η χρονική περίοδος κατά την οποία ένα μέτρο αποφέρει αποτελέσματα, (ή μέχρι πότε), και τι πρέπει να γίνει όταν παρέλθει αυτή η περίοδος. Άμεσα συνυφασμένη με αυτή την παρατήρηση, είναι και το κενό που φαίνεται να υπάρχει στην καθ'αυτή σύνταξη των διαγραμμάτων ροής αναφορικά με τη συνολική χρονική περίοδο που εξετάζουν. Τα διαγράμματα ροής που συντάχθηκαν και αναλύθηκαν είναι σαφώς βραχυπρόθεσμα – διάρκειας δηλαδή έως και 5 χρόνια. Καθώς όμως η αλλαγή του κλίματος εννοιολογικά είναι μια μακρά, και αργή διαδικασία, κρίνεται απαραίτητη η σύνταξη διαγραμμάτων ροής προσαρμογής σε αυτή, σε μεσο- και μακρο-πρόθεσμο μέλλον. Εξυπακούεται δε, ότι σε τέτοια περίπτωση, τα μέτρα που θα εμπεριέχονται σε αυτά τα διαγράμματα ροής, θα είναι πιθανόν διαφορετικά μεταξύ τους (άλλα μέτρα δηλαδή έως το 2025 και άλλα μέτρα έως το 2050), και άρα θα πρέπει να γίνει και η αντίστοιχη κατηγοριοποίησή τους (που είναι και το πρώτο βήμα της μεθοδολογικής προσέγγισης και εφαρμογής της διδακτορικής διατριβής).

Πρέπει επίσης να επισημανθεί, ότι ενώ μέσω της έρευνας που προτάθηκε και εφαρμόστηκε, η συνεισφορά των επιμέρους μέτρων στη μείωση της τρωτότητας και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των συστημάτων Μεταφορών έγινε με ποιοτικούς όρους και διαβαθμίσεις (από χαμηλή έως πολύ υψηλή), κρίνεται ουσιώδης η ποσοτικοποίηση της συνεισφοράς αυτής στο μέλλον. Η ποσοτικοποίηση αυτή μπορεί να γίνει τότε μόνο όταν κάποια από τα μέτρα αυτά εφαρμοστούν, αξιολογηθούν και αποτιμηθούν συνολικά, δηλαδή σε μέσο-πρόθεσμο ορίζοντα, και της ποσοτικοποίησης αυτής θα έπεται η επανασύνταξη των διαγραμμάτων ροής. Έτσι, πιθανόν αυτή η αριθμητική αποτίμηση, θα αποτελέσει σε κάποιο επίπεδο βαθμονόμηση μελλοντικών διαγραμμάτων ροής προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή.

Τέλος, παρόλο που η κλιματική αλλαγή δεν οριοθετείται γεωγραφικά, δεν περιορίζεται στα εθνικά σύνορα των κρατών και έχει 'οριζόντια' επίδραση σε ευρείες περιοχές, κρίνεται απαραίτητη η σύνταξη διαγραμμάτων ροής και σε εθνικό επίπεδο (πέραν του Ευρωπαϊκού ή του παγκόσμιου). Ο λόγος είναι η ευκολία ή δυσκολία λήψης πολιτικών αποφάσεων και οι διαφοροποιήσεις της κείμενης νομοθεσίας ανά κράτος (που αποτελούν και μια από τις κατηγορίες μέτρων που εξετάζει η διατριβή). Προτείνεται επίσης και αντίστοιχη σύνταξη διαγραμμάτων ροής σε διακρατικό επίπεδο γειτονικών κρατών (στην περίπτωση δηλαδή της Ελλάδας, μέτρα προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή Ελλάδας – Βόρειας Μακεδονίας, Αλβανίας, Βουλγαρίας, Τουρκίας, Ιταλίας, Κύπρου και Βορειοαφρικανικών χωρών).

## **11.ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11: ΠΟΡΙΣΜΑΤΑ**

### **11.1. Εισαγωγή**

Το τελευταίο αυτό κεφάλαιο αποτελεί τον επίλογο της διδακτορικής έρευνας, που οδήγησε στη συγγραφή της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Ως εκ τούτου γίνεται επιγραμματική αναφορά στα συμπεράσματα, τα οποία έχουν ήδη παρουσιαστεί στα αντίστοιχα τμήματα της διατριβής. Γίνεται επίσης αναφορά στα κυριότερα αποτελέσματα και στις δυνατότητες εκμετάλλευσης των αποτελεσμάτων, ενώ δίνονται και κάποιες κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με ερευνητικά θέματα που μπορούν να εξεταστούν μελλοντικά, στηριζόμενα στα αποτελέσματα της έρευνας που διεξήχθη. Αυτά συνιστούν, μαζί και με μεθοδολογικού χαρακτήρα επιλογές, την, με την απαιτούμενη μετριοπάθεια, εκτιμώμενη συνεισφορά του υποψηφίου διδάκτορα και της διδακτορικής του έρευνας στα συνδυασμένα επιστημονικά πεδία του Σχεδιασμού των Μεταφορών και των δικτύων τους, της θεωρίας της Κυκλοφοριακής Ροής και της Κλιματικής Αλλαγής.

### **11.2. Κύρια συμπεράσματα**

#### **11.2.1. Η προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή ως πεδίο της επιστήμονικής τεχνικής των Μεταφορών**

Η έκφανση της κλιματικής αλλαγής μέσω των ακραίων καιρικών φαινομένων και των φυσικών καταστροφών γίνεται ήδη αντιληπτή στο δομημένο περιβάλλον. Η συχνότητα και η δριμύτητά τους αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια. Όσες προσπάθειες και να γίνουν (σήμερα αλλά και στο μέλλον) για τον περιορισμό των αιτιών που προκάλεσαν και προκαλούν την αλλαγή του κλίματος, είναι αναπόφευκτο να βιώσει ο πλανήτης τις επιπτώσεις των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, που συμβάλλουν στην αλλαγή αυτή. Με λίγα λόγια, αυτό που βιώνουμε σήμερα, ως ανθρωπότητα αναφορικά με την αλλαγή του κλίματος, οφείλεται σε πράξεις του χθες, και ομοίως αυτό που θα βιώσουμε αύριο, οφείλεται σε πράξεις του σήμερα και του χθες. Δεδομένης λοιπόν αυτής της νομοτελειακής εξέλιξης, αναδεικνύεται η αναγκαιότητα να προσαρμοστούμε (ως είδη, ως συστήματα, ως δίκτυα) σε αυτό που συμβαίνει σήμερα και επέρχεται πέραν πάσης αμφιβολίας. Η υπέρμετρη προσπάθεια εξεύρεσης τρόπων περιορισμού των μελλοντικών επιπτώσεων της κλιματικής

αλλαγής με παράλληλη υποτίμηση της προσαρμογής σε αυτήν σήμερα, αφήνει έκθετα τα συστήματα και τα δίκτυα διαφόρων τομέων.

Έτσι, το σημαντικότερο και κεντρικότερο συμπέρασμα της διδακτορικής διατριβής αφορά στην ανάδειξη της κρίσιμότητας της κλιματικής αλλαγής για τον τρόπο, με τον οποίο η επιστημονική κοινότητα συλλαμβάνει, σχεδιάζει και υλοποιεί λύσεις, μέτρα και έργα στον τομέα των Μεταφορών. Ίσως της απαραίτητης προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών στην αλλαγή του κλίματος, που είναι και το βασικό αντικείμενο της έρευνας που έγινε, προηγείται η ανάγκη να προσαρμοστεί η ίδια η επιστήμη των Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή. Η κριτική βιβλιογραφική επισκόπηση (Κεφάλαια 2 έως 6 της διδακτορικής διατριβής) κατέληξε στην εν πολλοίς απουσία των παραγόντων του κλίματος και του καιρού, τόσο στην σύλληψη όσο και στην μαθηματική διατύπωση των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής και ικανότητας, και των μεταξύ τους σχέσεων. Αντίστοιχο κενό παρατηρήθηκε στον συγκοινωνιακό σχεδιασμό και την προτυποποίηση των συστημάτων και δικτύων Μεταφορών. Τα κενά αυτά οδηγούν εκ των πραγμάτων στο σχεδιασμό μη επαρκών λύσεων για το μέλλον, και ως εκ τούτου, προτείνεται να προσαρμοστούν κατάλληλα.

Συγκεκριμένα, από την επισκόπηση των *μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής και των μεταξύ τους σχέσεων*, καθώς και των υποδειγμάτων κυκλοφοριακής ροής σε μάκρο-, μέσο- και μικροσκοπικό επίπεδο, προέκυψε η απουσία παραμέτρων και συσχετίσεων, τόσο των μεγεθών όσο και των παραγόμενων υποδειγμάτων, με τις καιρικές και κλιματικές συνθήκες. Στη μαθηματική διατύπωση των κυκλοφοριακών μεγεθών και των αντίστοιχων υποδειγμάτων, θεωρείται από την βιβλιογραφία, ότι οι καιρικές και κλιματικές συνθήκες είναι ιδανικές, δηλαδή δεν επηρεάζουν τα μεγέθη και τις σχέσεις τους και άρα δεν χρήζουν παραμετροποίησης, πράγμα που όμως δεν περιγράφει επαρκώς την πραγματικότητα. Αναδείχθηκε έτσι η ανάγκη επαναπροσδιορισμού τόσο του τρόπου που αντιλαμβανόμαστε τα μεγέθη της κυκλοφορίας (είναι παράλογο να θεωρούμε ότι η ταχύτητα κίνησης οχημάτων παραμένει ανεπηρέαστη από το ύψος βροχόπτωσης) όσο και του μαθηματικού τρόπου που αποδίδουμε τα μεγέθη αυτά και αναπτύσσουμε τα αντίστοιχα υποδείγματα.

Το βασικό συμπέρασμα που προέκυψε σχετικά με την έννοια και τον υπολογισμό της *κυκλοφοριακής ικανότητας* των οδών, είναι η απουσία παραμετροποίησης του καιρού και του κλίματος. Ενώ άλλες παράμετροι ορθά θεωρούνται κρίσιμες για τον καθορισμό της κυκλοφοριακής ικανότητας, αναγνωρίζοντας π.χ. τη διαφορά μεταξύ κυκλοφορίας κατά τις ώρες αιχμής έναντι αυτών εκτός αιχμής, δεν παραμετροποιούνται αντίστοιχα καιρικές και κλιματικές συνθήκες που επηρεάζουν ή μπορούν να επηρεάσουν την κυκλοφοριακή

Σελίδα 436 από 481

ικανότητα. Το γεγονός αυτό οδηγεί και πάλι στην ανάπτυξη λύσεων που μόνο μερικώς μπορούν να περιγράψουν την πραγματικότητα.

Αντίστοιχα συμπεράσματα προέκυψαν και για τον *Σχεδιασμό των Μεταφορών*. Ενώ για τα δύο πρώτα στάδια από τα τέσσερα του Σχεδιασμού των Μεταφορών, αυτά της γένεσης των μετακινήσεων και της κατανομής στο χώρο, μπορεί ορθά να υποτεθεί ότι οι καιρικές και κλιματικές συνθήκες έχουν και θα έχουν περιορισμένη επίδραση στις υποχρεωτικού χαρακτήρα μετακινήσεις, καθώς ο καιρός, πλην ακραίων φαινομένων, και το κλίμα δεν μπορούν να αλλάξουν ( βραχυπρόθεσμα ή μεσοπρόθεσμα) τον τόπο κατοικίας ή εργασίας, δεν ισχύει το ίδιο για τα τελευταία δύο στάδια, αυτά της επιλογής μέσου και του καταμερισμού της κυκλοφορίας στα δίκτυα. Για αυτά, είναι λογικό να υποτεθεί ότι οι καιρικές και κλιματικές συνθήκες επηρεάζουν το αν ο μετακινούμενος θα επιλέξει το ιδιωτικό του αυτοκίνητο ή τα ΜΜΜ για να μετακινηθεί προς την εργασία του μια καθημερινή με έντονη βροχόπτωση, ή και ποια διαδρομή θα επιλέξει ως οδηγός. Η υπόθεση της επίδρασης αυτής αποκτά προφανώς μεγαλύτερη σημασία όσο αυξάνεται η δριμύτητα ενός φαινομένου. Μπορεί λοιπόν να εξαχθεί με σχετική ασφάλεια το συμπέρασμα, ότι τα υποδείγματα που χρησιμοποιούνται για τα δύο αυτά στάδια, πρέπει να επαναπροσδιοριστούν και να παραμετροποιηθεί η επίδραση καιρικών και κλιματικών συνθηκών.

Για τους λόγους αυτούς, η διδακτορική διατριβή προχώρησε σε μια προσπάθεια επαναπροσδιορισμού κάποιων από αυτών των μεγεθών και υποδειγμάτων. Αναφορικά λοιπόν, με την ίδια την προσαρμογή των επιμέρους μεγεθών, σχέσεων τους και συνεπαγόμενων υποδειγμάτων που χρησιμοποιούνται στην θεωρία της Κυκλοφοριακής Ροής και του Σχεδιασμού των Μεταφορών, το βασικό συμπέρασμα που προέκυψε αφορά στην ανάγκη προτεραιοποίησης οποιωνδήποτε αλλαγών, λόγω του τεράστιου όγκου του εγχειρήματος. Εδώ, η ανάγκη αυτή αντιμετωπίστηκε με μια διαδικασία ιεράρχησης, βάσει της επίπτωσης του καιρού και του κλίματος στο εκάστοτε στοιχείο των 'Μαθηματικών των Μεταφορών' και της κρισιμότητας του στοιχείου αυτού για τον υπολογισμό ή τη διατύπωση άλλων στοιχείων. Η διαδικασία αυτή κατέληξε στην ανάγκη επαναδιατύπωσης των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής (και εν μέρει και των μεταξύ τους σχέσεων) και της συνάρτησης χρησιμότητας (ως μέσου επηρεασμού των υποδειγμάτων επιλογής μέσου). Παρόλο που η διαδικασία αυτή καθ'αυτή επιδέχεται περαιτέρω ανάλυση, καθώς η αξιολόγηση της ιεράρχησης για την επαναδιατύπωση των στοιχείων έγινε μέσω υποθέσεων και παραδοχών, σε κάθε περίπτωση η συσχέτιση επίπτωσης και κρισιμότητας για κάθε στοιχείο, ως

αποφασιστική παράμετρος προτεραιοποίησης της επαναδιατύπωσης, είναι εφαρμόσιμη και γενικεύσιμη (δηλαδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια από άλλους ερευνητές).

Αναφορικά με την εφαρμογή των επανδιατυπωμένων μεγεθών της κυκλοφορίας σε πραγματικά δίκτυα Μεταφορών και υπό συνθήκες ενός εξεταζόμενου Ακραίου Καιρικού Φαινομένου, συνάγεται ότι τα αποτελέσματα οποιασδήποτε εφαρμογής δεν μπορούν ούτε να γενικευτούν σε άλλα ΑΚΦ αλλά και ούτε σε άλλα δίκτυα Μεταφορών. Αποτελούν ωστόσο μια πρώτη εκτίμηση του πώς ένα ακραίο φαινόμενο μπορεί να επιδράσει στα κυκλοφοριακά μεγέθη, και με ποιόν τρόπο μπορεί αυτή η επίδραση να διατυπωθεί μαθηματικά. Αναφορικά με την επαναδιατύπωση της συνάρτησης χρησιμότητας και την εφαρμογή της σε θεωρητικό δίκτυο, προκύπτει η δυνατότητα της επανδιατυπωμένης συνάρτησης χρησιμότητας να λαμβάνει υπόψη καιρικούς και κλιματικούς παράγοντες και την επίπτωσή τους στη λειτουργία μέσω μεταφοράς, και έτσι να περιγράφει τις διαφορετικές επιλογές μέσου.

#### **11.2.2. Ανάγκη εξεύρεσης και ανάπτυξης εργαλείων για τον χαρακτηρισμό της σημαντικότητας και της ανθεκτικότητας στα δίκτυα των Μεταφορών**

Το δεύτερο ουσιώδες συμπέρασμα της διδακτορικής διατριβής είναι η μέχρι σήμερα απουσία εργαλείων, που μπορούν να χαρακτηρίσουν την σημασία των επιμέρους στοιχείων ενός δικτύου Μεταφορών (κόμβων και τόξων) και η σημασία εξεύρεσης και ανάπτυξής τους. Γίνεται έτσι σαφές, ότι, ενώ για κυκλοφοριακούς και μόνο σκοπούς, η ιεράρχηση των τμημάτων ενός δικτύου με τις παρούσες προσεγγίσεις είναι επαρκής, δεν ισχύει το ίδιο όταν το δίκτυο Μεταφορών εξετάζεται υπό το πρίσμα ακραίων καιρικών φαινομένων ή φυσικών καταστροφών. Έτσι, ενώ ο χαρακτηρισμός μιας οδού ως κύριας αρτηρίας, μπορεί να περιέχει όλες τις απαραίτητες κυκλοφοριακές πληροφορίες (για τους φόρτους εξυπηρέτησης, την ταχύτητα ελεύθερης ροής, την κυκλοφοριακή ικανότητα και τη βέλτιστη ταχύτητα, κ.λπ.), δεν περιέχει καμία πληροφορία ως προς τον ρόλο και τη σημασία αυτής της οδού για την καλή κυκλοφοριακή λειτουργία του δικτύου. Δεδομένης της κλιματικής αλλαγής, με την ολοένα συχνότερη και δριμύτερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων, κρίνεται αναγκαίος ο προσδιορισμός πρόσθετων παραμέτρων και ο επακόλουθος χαρακτηρισμός των στοιχείων ενός δικτύου ως προς τη σημασία τους, δεδομένης της θέσης τους στο δίκτυο και του έργου που προσφέρουν.

Από την βιβλιογραφική επισκόπηση για την εξεύρεση τρόπων χαρακτηρισμού των στοιχείων ενός δικτύου ως προς τη σημασία τους σε άλλους επιστημονικούς τομείς, συνάγεται η χρησιμότητα της διεπαφής και επικοινωνίας διαφόρων επιστημονικών χώρων, και της  
Σελίδα 438 από 481

προσαρμοσμένης εφαρμογής εργαλείων που αρχικά αναπτύχθηκαν για να απαντήσουν σε άσχετα με τις Μεταφορές ερωτήματα. Και τούτο διότι αναδείχθηκαν και διατυπώθηκαν μαθηματικά εργαλεία που μπορούν να εφαρμοστούν στα δίκτυα Μεταφορών, έτσι ώστε να γίνει καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας των κυκλοφοριακών κόμβων και τόξων ενός δικτύου. Το συμπέρασμα αυτό είναι σημαντικό, διότι αυτού του είδους η πληροφορία για τους κόμβους και τους συνδέσμους του δικτύου Μεταφορών δεν παρέχεται από τα αμιγώς κυκλοφοριακά και συγκοινωνιακά εργαλεία και υποδείγματα. Ενώ δηλαδή η επιστήμη του Συγκοινωνιολόγου μπορεί με σχετική ασφάλεια να υπολογίσει την κυκλοφοριακή ικανότητα, την ταχύτητα ελεύθερης ροής, την στάθμη εξυπηρέτησης, τον αριθμό λωρίδων κ.α. σε ένα οδικό τμήμα, δεν μπορεί να παράσχει πληροφορίες σχετικά με το πόσο σημαντικά είναι αυτά τα οδικά τμήματα, ή τι επίπτωση θα είχαν στη λειτουργία του δικτύου αν αυτά για οποιαδήποτε λόγο καθίσταντο μη λειτουργικά. Τα παραπάνω έχουν ιδιαίτερη σημασία, συνδυαστικά με τα ευρήματα περί της αλλαγής του κλίματος και την αύξηση της συχνότητας εμφάνισης και δριμύτητας ακραίων καιρικών φαινομένων. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι προϋποτίθεται η προσαρμογή εν όψει εφαρμογής εργαλείων άλλων επιστημονικών χώρων. Αλλά και για τα εργαλεία εκείνα, που δυνητικά θα είχαν ενδιαφέρον για την ανάλυση των δικτύων Μεταφορών, είναι απαραίτητη η εύρεση ισοδύναμων εκφράσεων και μαθηματικών διατυπώσεών τους με κυκλοφοριακούς και συγκοινωνιακούς όρους.

Από την προσαρμογή και εφαρμογή κάποιων εξ αυτών των εργαλείων σε τυχαία δίκτυα Μεταφορών, και συγκεκριμένα από το γνωστικό πεδίο της Θεωρίας Δικτύων σε αυτό των Μεταφορών, με τη μορφή ανάλυσης μέτρων που δόκιμα μπορούν να περιγράψουν δίκτυα ενέργειας, πληροφορικής ή τηλεπικοινωνιών, προκύπτει ότι μια τέτοια μεταφορά γνώσης είναι δυνατή. Τα εργαλεία που εφαρμόστηκαν, βρέθηκαν ικανά να περιγράψουν την ανθεκτικότητα τυχαίων δικτύων Μεταφορών. Στην παρούσα διδακτορική έρευνα αποδείχθηκε ότι όντως υπάρχει μια σειρά εργαλείων που, έπειτα από την επαναδιατύπωσή τους, μπορούν, λαμβάνοντας υπόψη την κυκλοφορία σε ένα δίκτυο, να καταδείξουν κόμβους στους οποίους είτε θα πρέπει να χωροθετηθούν υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης ή αντιμετώπισης ακραίων φαινομένων, είτε θα πρέπει να προστατευτούν κατα προτεραιότητα (έναντι των υπολοίπων κόμβων ενός δικτύου) για να διασφαλιστεί η, όσο το δυνατόν πλησιέστερη προς την κανονική, λειτουργία του όλου δικτύου.

Σχετικά με τη σημαντικότητα που αυτά τα εργαλεία αποδίδουν στα στοιχεία των δικτύων των Μεταφορών, φαίνεται ότι η σημαντικότητα ενός κόμβου εξαρτάται κάθε φορά από το δίκτυο στο οποίο αντιστοιχεί. Σε προσανατολισμένα δίκτυα, όπως τα δίκτυα Μεταφορών, η

κεντρικότητα που προσδίδεται σε κάθε κόμβο είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την κατεύθυνση των τόξων, και η σημαντικότητα των κόμβων επηρεάζεται είτε από τα εισερχόμενα είτε από τους εξερχόμενα τόξα τους. Φάνηκε επίσης να υπάρχουν δύο πιθανοί λόγοι που οι κόμβοι σε ένα δίκτυο χαρακτηρίζονται σημαντικοί: αφενός λόγω του μεγάλου πλήθους εισερχόμενων τόξων, τα οποία καθιστούν, με άμεσο τρόπο, σημαντικό έναν κόμβο, και αφετέρου λόγω μεγάλου πλήθους εξερχόμενων τόξων προς άλλους σημαντικούς κόμβους, οι οποίοι καθιστούν, με έμμεσο τρόπο, σημαντικό τον κόμβο.

### **11.2.3. Αξιολόγηση και συνεισφορά δομικών μέτρων προσαρμογής**

Το τρίτο βασικό συμπέρασμα της διδακτορικής διατριβής είναι η ανάγκη αξιολόγησης και αποτίμησης της συνεισφοράς των μέτρων προσαρμογής, που προτείνονται στη βιβλιογραφία, ως απάντηση στην κλιματική αλλαγή. Δηλαδή η απλή παράθεση διαφόρων πρακτικών προσαρμογής στη βιβλιογραφία, χρήζει περαιτέρω ανάλυσης, έτσι ώστε η εφαρμογή των μέτρων αυτών να μπορεί να μεταφερθεί και σε άλλα πλαίσια ή μέρη του πλανήτη. Άρα, δεν είναι επαρκής η απλή συγκέντρωση μέτρων για μια συγκεκριμένη περιοχή, αλλά κρίνεται απαραίτητη η συνοδεία τους από πληροφορίες που θα διευκολύνουν πιθανή εφαρμογή τους και σε άλλα μέρη.

Από το εγχείρημα της κατηγοριοποίησης και αξιολόγησης των μέτρων προσαρμογής που συλλέχθηκαν στην βιβλιογραφική επισκόπηση, συνάγεται ότι τα επιστημονικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν (στοχευμένη επισκόπηση βιβλιογραφίας για συλλογή διαφόρων τρόπων προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή, κατηγοριοποίηση βάσει περιεχομένου και μέσου μεταφοράς, έρευνα ερωτηματολογίου, και στατιστική ανάλυση) κρίνονται επαρκή για τη σύνταξη διαγραμμάτων ροής μέτρων προσαρμογής. Προκύπτει επίσης, ότι η έρευνα ερωτηματολογίου, ως προσέγγιση αποτίμησης διαφόρων παραμέτρων των επιμέρους μέτρων, είναι αξιόπιστη, μόνον όταν μπορεί να διασφαλιστεί η επιστημονική επάρκεια των συμμετεχόντων στο γνωστικό αντικείμενο που πραγματεύεται η έρευνα.

Τα διαγράμματα ροής, τα οποία προτείνονται στην διδακτορική διατριβή αποτιμώνται θετικά, ως μέσο πληροφόρησης διαφόρων χαρακτηριστικών των μέτρων προσαρμογής, καθώς μπορούν με σχετικά απλό και άμεσο τρόπο να παρέχουν πληροφορίες για το πότε πρέπει να εφαρμοστεί ένα μέτρο, τι διάρκεια θα έχει η εφαρμογή του και ποιο το εκτιμώμενο κόστος. Μάλιστα τα εν λόγω διαγράμματα, μπορούν να αποτελέσουν ένα εργαλείο υποστήριξης των αρχών στη λήψη αποφάσεων αναφορικά με την προσαρμογή των



συστημάτων Μεταφορών, καθώς παρέχουν την απαραίτητη πληροφορία της προτεραιοποίησης και της αλληλουχίας εφαρμογής μέτρων.

#### **11.2.4. Δέσμη μη-δομικών και δομικών μέτρων προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή**

Για τον τομέα των Μεταφορών, η προσαρμογή μπορεί να πάρει διάφορες μορφές και σχήματα. Η αντίληψη της επιστημονικής κοινότητας για τους τρόπους προσαρμογής μπορεί μεν να μην εξαντλείται ολοκληρωτικά σε δομικά μέτρα, αλλά οπωσδήποτε επικεντρώνεται σε τέτοια. Ενώ σε ένα μεγάλο βαθμό αυτή η λογική και αντιμετώπιση είναι αναγκαία και αναπόφευκτη, παρατηρείται ένα κενό στην ανάπτυξη τρόπων και μέτρων προσαρμογής, που δεν είναι δομικού χαρακτήρα και που δυνητικά θα μπορούσαν να προστατεύσουν τη λειτουργία των δικτύων Μεταφορών. Μια τέτοια προσέγγιση για την εξεύρεση μέτρων προσαρμογής είναι εξίσου αναγκαία, διότι αφενός αίρει τους περιορισμούς μιας δομικής αποκλειστικά προσέγγισης αναφορικά με τη μη δυνατότητα επέμβασης σε όλων των ειδών τα δίκτυα, και αφετέρου ανάγει την έννοια της προσαρμογής σε μια ευρύτερη έννοια *προστασίας των συστημάτων Μεταφορών*.

Βάσει των παραπάνω, προτάθηκε, εξετάστηκε και εφαρμόστηκε στην διδακτορική έρευνα, μια μεθοδολογική προσέγγιση εξεύρεσης περαιτέρω λύσεων προσαρμογής, και μη δομικού και δομικού χαρακτήρα, που μπορεί να απαντήσει στα καίρια ερωτήματα προστασίας και διασφάλισης λειτουργίας των δικτύων Μεταφορών:

- Πως μπορεί να προστατευτεί ένα υπάρχον δίκτυο Μεταφορών με τον καλύτερο δυνατό τρόπο;
- Πως μπορεί να διασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή λειτουργία ενός δικτύου Μεταφορών, στο οποίο εκδηλώνονται ακραία καιρικά φαινόμενα και φυσικές καταστροφές;
- Πως μπορεί να σχεδιαστεί η λειτουργία ενός συστήματος Μεταφορών λαμβάνοντας υπόψη τις εκφάνσεις της κλιματικής αλλαγής;
- Ποιοι κόμβοι, και ποια τμήματα ενός δικτύου Μεταφορών, πρέπει να προστατευτούν κατα προτεραιότητα και με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, για να διασφαλιστεί η όσο το δυνατόν καλύτερη λειτουργία τους κάτω από έκτακτες συνθήκες;
- Με ποια προτεραιότητα και πότε πρέπει να γίνει η προσαρμογή των συστημάτων Μεταφορών;

Από την εφαρμογή της μεθοδολογικής προσέγγισης αναδείχθηκε η ανάγκη μιας συνολικής θεώρησης της προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή. Η συνολική αυτή θεώρηση μπορεί να αρθρώνεται σε διάφορα επίπεδα (δομικού ή μη-δομικού χαρακτήρα), με κοινό όμως στόχο τον εμπλουτισμό των εργαλείων, τρόπων και μεθόδων προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή, προκειμένου έτσι να συμβάλουν, στο μέτρο που τους αναλογεί, στην καλύτερη κατανόηση και διαχείριση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, στην ποσοτικοποίησή τους και εν τέλει στην μείωσή τους.

### **11.3. Ερευνητική συνεισφορά**

Η βασική συνεισφορά της παρούσας διατριβής είναι η προτεινόμενη μεθοδολογική προσέγγιση προσαρμογής του τομέα των Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή, σε τρία επίπεδα:

1. Το πρώτο επίπεδο, αφορά στην επανεξέταση και επαναπροσδιορισμό των αναλυτικών διατυπώσεων των κυκλοφοριακών μεγεθών και των συγκοινωνιακών υποδειγμάτων που χρησιμοποιούνται, έτσι ώστε να είναι εφικτή η παραμετροποίηση της έκφρασης της κλιματικής αλλαγής (με απώτερο σκοπό την καλύτερη προσαρμογή των δικτύων και συστημάτων που σχεδιάζονται).
2. Το δεύτερο επίπεδο, αφορά στην εξεύρεση μαθηματικών μεθόδων και εργαλείων για την ανάλυση των επιμέρους στοιχείων ενός δικτύου Μεταφορών, προκειμένου να αναδειχθεί η σημαντικότητα και η αξία τους, για την ποσοτική αξιολόγηση της ανθεκτικότητάς τους.
3. Το τρίτο επίπεδο, αφορά στην ιεράρχηση των ευρημάτων της βιβλιογραφικής επισκόπησης, αναφορικά με τα μέτρα, τις στρατηγικές και τις πολιτικές προσαρμογής του τομέα των Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή, μέσω της ανάπτυξης διαγραμμάτων ροής για την εφαρμογή μέτρων προσαρμογής για κάθε μέσο και υποδομή Μεταφορών.

Η ερευνητική συμβολή της παρούσας διδακτορικής διατριβής μπορεί επιγραμματικά να εντοπιστεί στα ακόλουθα επιστημονικά θέματα, συνεισφέροντας, στο μέτρο που της αναλογεί, στην προώθηση της μελέτης και της αναζήτησης λύσεων σε σχετικά προβλήματα.

1. Αξιολόγηση της επίπτωσης του καιρού, του κλίματος και των αλλαγών τους στον τρόπο έκφρασης και υπολογισμού κυκλοφοριακών μεγεθών και υποδειγμάτων του σχεδιασμού των Μεταφορών, και προτεραιοποίηση αναλυτικής επαναδιατύπωσής τους.

Η διατριβή αναπτύσσει ένα ποιοτικό αξιολογικό εργαλείο αποτίμησης της επίπτωσης του καιρού, του κλίματος και των αλλαγών τους, στα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την κυκλοφοριακή ροή και τις μεταξύ τους σχέσεις, καθώς και στα αντίστοιχα υποδείγματα σε μακρο-, μεσο, και μικρο-σκοπικό επίπεδο. Επιπλέον το μέγεθος της επίπτωσης αυτής αξιολογείται και για τα υποδείγματα, τις μεθόδους και τους αλγόριθμους (με όρους επάρκειάς τους) που χρησιμοποιούνται στα 4 στάδια του σχεδιασμού των Μεταφορών. Βάσει της αξιολόγησης αυτής, καθώς και της αποτίμησης της κρισιμότητας καθενός από τα παραπάνω μεγέθη και υποδείγματα, για τον υπολογισμό άλλων μεγεθών και υποδειγμάτων (υπό την έννοια του ποιο από αυτά υπεισέρχεται στον υπολογισμό ενός άλλου), προτείνεται μια συνολική προτεραιοποίηση της αναλυτικής έκφρασης για όλα τα στοιχεία (μεγέθη, σχέσεις, υποδείγματα, μέθοδοι, αλγόριθμοι) που χρησιμοποιούνται στην περιγραφή/ανάλυση της κυκλοφοριακής ροής, και στον σχεδιασμό των Μεταφορών.

2. Επαναδιατύπωση αναλυτικών εκφράσεων κυκλοφοριακών μεγεθών βάσει του ύψους βροχόπτωσης.

Στο πλαίσιο της διδακτορικής έρευνας, επαναδιατυπώνονται οι αναλυτικές εκφράσεις των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής (πυκνότητα, ταχύτητα, κυκλοφοριακός φόρτος) συναρτήσει των καιρικών συνθηκών, και συγκεκριμένα του ύψους πιθανής βροχόπτωσης σε μια περιοχή. Η επαναδιατύπωση αυτή μπορεί να εμπλουτίσει τα υπάρχοντα υποδείγματα μικροσκοπικής προσομοίωσης της κυκλοφορίας και μακροσκοπικής κατανομής των μετακινήσεων στα μεταφορικά μέσα και εν τέλει του καταμερισμού των μετακινήσεων στο δίκτυο, που λανθασμένα, κατά τον γράφοντα, υποθέτουν μηδενική επίδραση των καιρικών συνθηκών στις μετακινήσεις συνολικά. Για τον λόγο αυτό γίνεται παραμετροποίηση του ύψους βροχόπτωσης στη διατύπωση των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής και προτείνεται η χρήση της για ακριβέστερη απόδοση και ορθότερη εφαρμογή μικροσκοπικών και μακροσκοπικών υποδειγμάτων προσομοίωσης, της επιλογής μέσου και του καταμερισμού της κυκλοφορίας (π.χ. ακριβέστερος υπολογισμός διαδρομών (paths) σε ένα οδικό δίκτυο ).

3. Προσαρμογή υπαρχόντων υποδειγμάτων κατανομής της ζήτησης σε μεταφορικά μέσα , ώστε να λαμβάνουν υπόψη την πιθανότητα εμφάνισης ακραίων καιρικών

φαινομένων, φυσικών καταστροφών και των επιπτώσεων τους, μέσω επαναδιατύπωσης της συνάρτησης χρησιμότητας

Μέχρι σήμερα, τα υποδείγματα κατανομής της ζήτησης μετακινήσεων στα μεταφορικά μέσα, δεν λαμβάνουν υπόψη τους την πιθανότητα εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων. Συνεπώς, δεν εκτιμούν και τη συνεπαγόμενη εκτροπή της ζήτησης από μεταφορικό μέσο σε μεταφορικό μέσο. Το νέο υπόδειγμα που αναπτύχθηκε και παρουσιάζεται στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής έρευνας, βασίζεται σε επαναδιατύπωση της συνάρτησης χρησιμότητας των μέσων μεταφορών, και μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικό χρόνο σε περίπτωση εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων ή φυσικών καταστροφών, για να εκτιμηθεί το ποσοστό των μετακινήσεων που θα μετατοπιστούν, εντός ενός συστήματος, από τα πληττόμενα μέσα σε άλλα μέσα μεταφοράς. Επίσης μπορεί να εφαρμοστεί και στον σχεδιασμό της λειτουργίας των συστημάτων Μεταφορών, λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα εμφάνισης συγκεκριμένων ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών σε συγκεκριμένες περιοχές (βάσει κλιματικών σεναρίων), για την καλύτερη προετοιμασία του συστήματος των Μεταφορών, προκειμένου αυτό να απορροφήσει εκτρεπόμενες ροές. Αυτό θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε περιοχές, όπου οδικές υποδομές διασχίζουν ζώνες υψηλού κινδύνου πλημμύρας, και όπου θα μπορούσαν να προβλεφθούν μέτρα ενίσχυσης της προσφοράς σιδηροδρομικών μεταφορών, των οποίων οι οδεύσεις θα ήταν εξασφαλισμένες.

4. Χρήση μεθόδων ανάλυσης πολύπλοκων δικτύων, βασιζόμενων στις θεωρίες τοπολογίας δικτύων (network topology) και γράφων (graph theory), για την αποτίμηση της σημαντικότητας των επιμέρους στοιχείων (κόμβων και τμημάτων) των δικτύων Μεταφορών.

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής έρευνας χρησιμοποιούνται μέθοδοι ανάλυσης και αξιολόγησης πολύπλοκων δικτύων, για την αναγνώριση της κρισιμότητας και σημαντικότητας των επιμέρους στοιχείων πραγματικών δικτύων Μεταφορών και την ποσοτικοποίηση των κυκλοφοριακών επιπτώσεων σε περίπτωση που τα τμήματα αυτά καθίστανται μη λειτουργικά, λόγω εκδήλωσης ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών. Ανάλογες μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση βέλτιστων θέσεων εγκαταστάσεων και προσωπικού προστασίας (π.χ. χωροθέτηση Μονάδων Αντιμετώπισης Καταστάσεων Έκτακτης Ανάγκης).

5. Ανάπτυξη νέων τρόπων αξιολόγησης της ανθεκτικότητας και της τρωτότητας των δικτύων Μεταφορών.

Στην διατριβή διατυπώνονται μαθηματικοί τρόποι εκτίμησης της ανθεκτικότητας και της τρωτότητας και εν τέλει της λειτουργικότητας των δικτύων Μεταφορών, σε συνθήκες εκδήλωσης ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών. Οι τρόποι αποτίμησης της ανθεκτικότητας και της τρωτότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ex ante σε πραγματικά δίκτυα Μεταφορών και να καταδείξουν εκείνα τα δίκτυα και τα επιμέρους στοιχεία τους, που είναι περισσότερα ευάλωτα από άλλα και στα οποία συνεπώς θα πρέπει να επικεντρωθούν προσπάθειες προστασίας και προσαρμογής τους στην κλιματική αλλαγή.

6. Πολυδιάστατη αξιολόγηση και ιεράρχηση μέτρων προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή.

Τα συστήματα των Μεταφορών θα υφίστανται σημαντικές επιπτώσεις στη λειτουργία τους, λόγω της συνεχιζόμενης αλλαγής του κλίματος, όπως αυτή εκφράζεται από τη συχνότερη και εντονότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να γίνουν στοχευμένες ενέργειες, ώστε τα συστήματα Μεταφορών να μπορέσουν να «προσαρμοστούν» στις ενδεχόμενες αλλαγές, να ελεγχθεί η ενδεχόμενη ευπάθειά τους και να αυξηθεί η ανθεκτικότητά τους. Η διδακτορική διατριβή συμβάλλει σε αυτή την κατεύθυνση, μέσω της ανάπτυξης και εφαρμογής μιας μεθοδολογικής προσέγγισης για τη σύνταξη διαγραμμάτων ροής ενεργειών προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή (υπό τη μορφή τεχνικών μέτρων, στρατηγικών σχεδιασμού των συστημάτων Μεταφορών και πολιτικών χρήσης και λειτουργίας τους) κατά κατηγορίες ανάλογα με το περιεχόμενό τους. Με τον τρόπο αυτόν δημιουργείται μια εκτενής βάση ενδεικνυομένων ενεργειών προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή, η οποία οργανώνεται και ιεραρχείται βάσει διαφόρων παραμέτρων (χρονική διάρκεια, κόστος, σημαντικότητα και συνεισφορά στη μείωση της τρωτότητας και στην αύξηση της ανθεκτικότητας των συστημάτων Μεταφορών). Η προτεινόμενη μεθοδολογία σύνθεσης διαγραμμάτων ροής ενεργειών σχετικών με την προσαρμογή των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή, μπορεί να αποτελέσει οδηγό εφαρμογής από αρμόδιους φορείς, υπεύθυνους για τον μελλοντικό σχεδιασμό ανθεκτικότερων συστημάτων Μεταφορών στις εκφάνσεις της κλιματικής αλλαγής.

Εν κατακλείδι, η γενική συνεισφορά της διδακτορικής διατριβής εγγράφεται στην προσπάθεια κατανόησης της κλιματικής αλλαγής και των επιδράσεών της στις Μεταφορές,

καθώς και στην προσπάθεια εξεύρεσης τρόπων ώστε αυτές οι επιδράσεις να μετριαστούν στο μέλλον. Επομένως η διατριβή απευθύνεται πρωτίστως στην επιστημονική κοινότητα που εμπλέκεται στον σχεδιασμό και τη διαχείριση των συστημάτων Μεταφορών και αναζητεί λύσεις σε σχετικά προβλήματα που προκαλούνται από την εκδήλωση ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών. Απευθύνεται ωστόσο και στους υπεύθυνους φορείς και επαγγελματίες που εμπλέκονται σε αυτά τα αντικείμενα, καθώς παρέχει πληροφορίες και τρόπους για την ενσωμάτωση της κλιματικής αλλαγής στο σχεδιασμό και τη διαχείριση των συστημάτων Μεταφορών. Η ενσωμάτωση των ζητημάτων της κλιματικής αλλαγής στα μέσα, με τα οποία οι αρμόδιοι φορείς και οργανισμοί σχεδιάζουν και υλοποιούν τη λειτουργία, διαχείριση και συντήρηση των συστημάτων Μεταφορών, μπορεί να βοηθήσει σημαντικά, έτσι ώστε αυτοί οι οργανισμοί να γίνουν «ανθεκτικότεροι» σε απροσδόκητες ή δύσκολα προβλέψιμες διαταραχές των συστημάτων Μεταφορών λόγω της κλιματικής αλλαγής.

#### **11.4. Άξονες για περαιτέρω έρευνα**

Διάφορα θέματα, που σχετίζονται με τον σχεδιασμό και την εφαρμογή της μεθοδολογικής προσέγγισης που αναπτύχθηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή για την προσαρμογή του τομέα των μεταφορών στην κλιματική αλλαγή στην διδακτορική διατριβή, παραμένουν ανοικτά και προσδιορίζονται παρακάτω.

##### **1. Επαναδιατύπωση των 'Μαθηματικών των Μεταφορών'**

Στην διδακτορική διατριβή επιχειρήθηκε η κάλυψη ενός βασικού, κατά τον γράφοντα, κενού της βιβλιογραφίας, αυτού της επαναδιατύπωσης ορισμένων στοιχείων και μεγεθών της κυκλοφορίας και των συγκοινωνιακών μέσων, έτσι ώστε να μπορέσει να παραμετροποιηθεί η έννοια του καιρού, του κλίματος και των αλλαγών τους. Αυτό το κενό καλύφθηκε μερικώς. Οι λόγοι της μερικής αυτής κάλυψης σχετίζονται αφενός με τον πολύ μεγάλο όγκο του όλου εγχειρήματος, που δεν μπορεί εκ των πραγμάτων να καλυφθεί εξ ολοκλήρου από μια διδακτορική διατριβή και αφετέρου με την ανάγκη πρόσβασης σε εμπειρικά δεδομένα, όχι μόνο κυκλοφοριακού χαρακτήρα αλλά και καιρικού/κλιματικού χαρακτήρα. Έτσι ήδη μπορεί να ειπωθεί ότι διακρίνονται ευκρινώς κάποιες μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις, προς μια συστηματική επαναδιατύπωση των 'Μαθηματικών των Μεταφορών' βασισμένη σε συνδιαστικά εμπειρικά δεδομένα καιρού και κυκλοφορίας.

2. Υποκειμενική αποτίμηση επίπτωσης και κρισιμότητας κλιματικών παραγόντων για την προτεραιοποίηση επαναδιατύπωσης μεγεθών, μεταξύ τους σχέσεων, και υποδειγμάτων που χρησιμοποιούνται στις Μεταφορές

Δεδομένου του τεράστιου όγκου εργασίας που θα συνεπαγόταν η επαναδιατύπωση των 'Μαθηματικών των Μεταφορών' και καθώς μια τέτοια έρευνα και άσκηση δεν θα μπορούσε να οριοθετηθεί στο πλαίσιο μιας διδακτορικής διατριβής, ακολουθήθηκε μια διαδικασία ιεράρχησης, βάσει της επίπτωσης του καιρού και του κλίματος στο εκάστοτε στοιχείο των 'Μαθηματικών των Μεταφορών' και της κρισιμότητας του στοιχείου αυτού για τον υπολογισμό ή τη διατύπωση άλλων στοιχείων. Η διαδικασία αυτή κατέληξε στην ανάγκη επαναδιατύπωσης των μεγεθών της κυκλοφοριακής ροής (και εν μέρει και των μεταξύ τους σχέσεων) και της συνάρτησης χρησιμότητας (ως μέσου επηρεασμού των υποδειγμάτων επιλογής μέσου). Η διαδικασία αυτή καθ'αυτή επιδέχεται περαιτέρω κριτική ανάλυση, καθώς σε κάποιο αναπόφευκτο βαθμό, η αξιολόγηση της επίπτωσης περισσότερο και λιγότερο της κρισιμότητας, έγινε μέσω υποθέσεων και παραδοχών. Είναι έτσι απαραίτητη μελλοντικά η εύρεση αντικειμενικών τρόπων προτεραιοποίησης για την επαναδιατύπωση των αλλαγών.

3. Βαθμονόμηση βαρών κλιματικών και καιρικών παραμέτρων στις συναρτήσεις χρησιμότητας

Στο Κεφάλαιο 8 αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε σε τυχαίο δίκτυο μια νέα μορφή συνάρτησης χρησιμότητας για την επιλογή μέσου μετακίνησης, που περιλαμβάνει παραμέτρους σχετικά με τον καιρό και το κλίμα (πιθανότητα εμφάνισης Ακραίου Καιρικού Φαινομένου). Σε κάθε περίπτωση όμως, περαιτέρω έρευνα είναι απαραίτητη προς την κατεύθυνση της βαθμονόμησης και του καθορισμού των αντίστοιχων βαρών των μεταβλητών της συνάρτησης χρησιμότητας που προτείνεται εδώ, και η εφαρμογή της σε δίκτυα Μεταφορών, με πραγματικά δεδομένα για την πλήρη αξιολόγησή της.

4. Διευκρίνιση και άλλων επιστημονικών περιοχών για την εύρεση εργαλείων αποτίμησης της σημαντικότητας και κρισιμότητας των δικτύων Μεταφορών

Στη διδακτορική διατριβή έγινε βιβλιογραφική επισκόπηση εργαλείων ανάλυσης δικτύων (από την επιστημονική περιοχή της Θεωρίας Δικτύων) με εφαρμογές κατά βάση στα δίκτυα πληροφορικής, τηλεπικοινωνιών και ενέργειας. Δεδομένης όμως της εξέλιξης της τεχνολογίας, είναι απαραίτητο τα ευρήματα της διδακτορικής διατριβής να εμπλουτιστούν

μελλοντικά με εργαλεία και άλλων επιστημονικών περιοχών (π.χ. εργαλεία ανάλυσης σύνθετων κοινωνικών δικτύων).

#### 5. Σταδιακή αφαίρεση στοιχείων σε τυχαία δίκτυα και έλεγχος διατήρησης προηγούμενης κατάστασης

Στη διδακτορική διατριβή ακολουθήθηκε μια διαδικασία σταδιακής αφαίρεσης τυχαίων στοιχείων ενός δικτύου και μελέτης της κυκλοφοριακής λειτουργίας τους σε κάθε βήμα αφαίρεσης. Τα βήματα αυτά επιλέχθηκαν ως ποσοστά 10%, 20% και 30%. Μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες θα μπορούσαν να επικεντρωθούν αφενός με μεγαλύτερη ανάλυση μικρότερων και ενδιάμεσων βημάτων, π.χ. 15% ή 25%, αλλά και διατήρησης των στοιχείων που αφαιρούνται από το ένα βήμα στο άλλο (δηλαδή το 10% που αφαιρείται στο πρώτο βήμα, να παραμένει ως αφαιρούμενο στο δεύτερο βήμα, κοκ). Η μελέτη της κυκλοφοριακής λειτουργίας των δικτύων Μεταφορών σύμφωνα με την παραπάνω πρόταση θα μπορούσε να συγκριθεί με τα ευρήματα της διδακτορικής διατριβής, με τελικό στόχο την αναγνώριση της δέσμης εκείνων των εργαλείων που μπορούν να καταδείξουν τα ανθεκτικά δίκτυα.

#### 6. Επικύρωση ευρημάτων σε πραγματικά δίκτυα Μεταφορών

Η εφαρμογή των μέτρων που πηγάζουν από τη Θεωρία Δικτύων έγινε σε πειραματικά και τυχαία δίκτυα, που είτε πάρθηκαν από τη βιβλιογραφία είτε δημιουργήθηκαν από τον υποψήφιο διδάκτορα. Πρέπει, ως εκ τούτου, να αντιμετωπιστούν ως αυτό που πραγματικά είναι, δηλαδή ως θεωρητικά δίκτυα. Ως τέτοια, διέπονται από σειρά υποθέσεων για τα χαρακτηριστικά και τη λειτουργία τους και συνεπώς τα αποτελέσματα της εφαρμογής των μέτρων (και η ερμηνεία τους) θα πρέπει αφενός να αντιμετωπίζονται με την απαραίτητη σύνεση και αφετέρου η εφαρμογή να επεκταθεί σε πραγματικά δίκτυα Μεταφορών (όπου και το μέγεθος τους θα επιτρέψει συνθετότερες αναλύσεις με πιθανόν πλουσιότερα αποτελέσματα).

#### 7. Ενημέρωση και επικαιροποίηση πηγών μέτρων προσαρμογής

Για τη σύνταξη των διαγραμμάτων ροής για την προσαρμογή των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή, χρησιμοποιήθηκαν τα ευρήματα της βιβλιογραφικής επισκόπησης, και αφορά σε μέτρα που αναφέρονται σε επιστημονικές πηγές έως και το έτος 2019. Καθώς όμως ο ευρύτερος τομέας (Μεταφορές και προσαρμογή στη κλιματική αλλαγή) συγκεντρώνει αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον, η βιβλιογραφική συλλογή μέτρων, πολιτικών και



εργαλείων προσαρμογής πρέπει να επικαιροποιείται τακτικά (έτσι ώστε και τα αντίστοιχα διαγράμματα ροής να είναι ενημερωμένα).

#### 8. Συστημική θεώρηση προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή

Αναφορικά με την κατηγοριοποίηση των μέτρων προσαρμογής, που απαντώνται στη βιβλιογραφική επισκόπηση, υπογραμμίζεται για το μέλλον η ανάγκη μιας συνολικότερης θεώρησης των Μεταφορών ως συστημάτων και όχι ανά μεμονωμένο μέσο Μεταφοράς, ειδικά στις πόλεις, όπου πιθανόν η προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή θα πρέπει να προσληφθεί υπό το πρίσμα της πολυτροπικότητας. Συνάγεται δηλαδή η ανάγκη δημιουργίας μια γενικής κατηγορίας μέτρων, η εφαρμογή των οποίων θα αντιμετώπιζε τις Μεταφορές ως σύστημα και όχι ως απλό σύνολο-άθροισμα επιμέρους στοιχείων.

#### 9. Ποσοτική αξιολόγηση της συμβολής των διαφόρων μέτρων προσαρμογής

Ενώ μέσω της έρευνας που προτάθηκε και εφαρμόστηκε, η συνεισφορά των επιμέρους μέτρων στη μείωση της τρωτότητας και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των συστημάτων Μεταφορών έγινε με ποιοτικούς όρους και διαβαθμίσεις (από χαμηλή έως πολύ υψηλή), κρίνεται ουσιώδης η ποσοτικοποίηση της συνεισφοράς αυτής. Η ποσοτικοποίηση αυτή μπορεί να γίνει τότε μόνο, όταν κάποια από τα μέτρα αυτά εφαρμοστούν, αξιολογηθούν και αποτιμηθούν συνολικά, δηλαδή σε μεσο-πρόθεσμο ορίζοντα, ενώ της ποσοτικοποίησης αυτής θα έπεται η επανασύνταξη των διαγραμμάτων ροής. Έτσι, αυτή η αριθμητική αποτίμηση, θα μπορούσε να αποτελέσει κλίμακα βαθμονόμησης μελλοντικών διαγραμμάτων ροής προσαρμογής των συστημάτων Μεταφορών στην κλιματική αλλαγή.

#### 10. Περαιτέρω χαρακτηρισμός μέτρων προσαρμογής

Αναφορικά με την απόδοση επιμέρους χαρακτηριστικών στα μέτρα προσαρμογής (ως μέσο για τη σύνταξη των διαγραμμάτων ροής), παρατηρήθηκαν δυο κενά σχετικά με τις πληροφορίες που παρέχονται από τα διαγράμματα ροής: αφενός, δεν έχει συμπεριληφθεί η χρονική ισχύς της εφαρμογής κάθε μεμονωμένου μέτρου, δηλαδή δεν γίνεται γνωστό μέσω των διαγραμμάτων ροής ποιά είναι η χρονική περίοδος κατά την οποία ένα μέτρο αποφέρει αποτελέσματα (ή μέχρι πότε) και τι πρέπει να γίνει όταν παρέλθει αυτή η περίοδος. Άμεσα συνυφασμένο με αυτή την παρατήρηση, είναι και το κενό που φαίνεται να υπάρχει στην καθ'αυτήν σύνταξη των διαγραμμάτων ροής, αναφορικά με τη συνολική χρονική περίοδο που εξετάζουν. Τα διαγράμματα ροής που συντάχθηκαν και αναλύθηκαν είναι σαφώς βραχυπρόθεσμα. Καθώς όμως η αλλαγή του κλίματος εννοιολογικά είναι μια μακρά και αργή

διαδικασία, κρίνεται απαραίτητη η σύνταξη διαγραμμάτων ροής προσαρμογής σε αυτή, σε μεσο- και μακρο-πρόθεσμο μέλλον. Εξυπακούεται δε, ότι σε τέτοια περίπτωση, τα μέτρα που θα εμπεριέχονται σ' αυτά τα διαγράμματα ροής, θα είναι πιθανόν διαφορετικά μεταξύ τους (άλλα μέτρα δηλαδή έως το 2025 και άλλα μέτρα έως το 2050) και άρα θα πρέπει να γίνει και η αντίστοιχη κατηγοριοποίησή τους (που αποτελεί και το πρώτο βήμα της μεθοδολογικής προσέγγισης και εφαρμογής της παρούσας διατριβής).

#### 11. Σύνταξη διαγραμμάτων ροής μέτρων προσαρμογής εκτενούς γεωγραφικού ενδιαφέροντος

Παρόλο που η κλιματική αλλαγή δεν οριοθετείται γεωγραφικά, δεν περιορίζεται στα εθνικά σύνορα των κρατών και έχει 'οριζόντια' επίδραση σε ευρείες περιοχές, κρίνεται απαραίτητη η σύνταξη διαγραμμάτων ροής και σε εθνικό επίπεδο (πέραν του Ευρωπαϊκού ή του παγκόσμιου). Ο λόγος είναι η μικρότερη δυσκολία λήψης πολιτικών αποφάσεων και οι διαφοροποιήσεις της κείμενης νομοθεσίας ανά κράτος, που αποτελούν και μια από τις κατηγορίες μέτρων που εξετάστηκα (Κεφάλαια 2 και 10). Προτείνεται επίσης και αντίστοιχη σύνταξη διαγραμμάτων ροής σε διακρατικό επίπεδο γειτονικών κρατών της χώρας αναφοράς.

## Παράρτημα Ι – Κώδικας στην γλώσσα R για το δίκτυο Sioux Falls

Κώδικας στην γλώσσα R για την εφαρμογή μέτρων από τη Θεωρία Γράφων στο δίκτυο Sioux Falls – Κεφάλαιο 9

```
library(igraph)
library(tidyverse)
library(GGally)
library(ggplot2)
library(sf)
library(remotes)
library(rgdal)
library(info.centrality)
nycounties <- rgdal::readOGR("SiouxFallsCoordinates.geojson")
nycounties$x[2]
nycounties$y[2]
nycounties$id[2]

library(geosphere)
distm(c(nycounties$x[1], nycounties$y[1]), c(nycounties$x[2], nycounties$y[2]), fun =
distHaversine)

globalwd <- "/Users/iraklis/OneDrive\ -\ University\ College\
London/Various/Step1_SiouxFalls/"
pathToSUMO <- "/usr/local/opt/sumo/share/sumo/"
pathToAllNetFiles <- "/Users/iraklis/OneDrive\ -\ University\ College\
London/Various/Step1_SiouxFalls/"

NetworkName <- "upd_MESO_SiouxFalls.net.xml"
NetworkNameForOD2TRIPS <- "upd_SiouxFalls.net.xml"
ODName <- "myODUpdated.txt"
AdditionalFileName <- "SiouxFalls.additional.xml"
TazFileName <- "myTaZes.taz.xml"
startTime <-
Sys.setenv(SUMO_HOME = "/usr/local/opt/sumo/share/sumo/")

pathToNet2 <- paste("", pathToAllNetFiles, NetworkName, "", sep = "")
NetConv2PlainCommand <- paste("", pathToSUMO, "bin",
.Platform$file.sep, "netconvert", "",
' --sumo-net-file ',
pathToNet2,
' --plain-output-prefix plainnet --proj.plain-geo',
sep = "")

system(NetConv2PlainCommand)

NetConv2CSV <- paste("python ", "", pathToSUMO, "tools", ".Platform$file.sep, "xml",
.Platform$file.sep, "xml2csv.py", "' ' ", "",
pathToAllNetFiles,
```

```

"plainnet.edg.xml", "", " --xsd ", "",
pathtoSUMO, "data",
.Platform$file.sep, "xsd",
.Platform$file.sep,
"edges_file.xsd", "",
sep = "")
system(NetConv2CSV)

NetConv2CSV <- paste("python ", "", pathtoSUMO, "tools", .Platform$file.sep, "xml",
.Platform$file.sep, "xml2csv.py", " ", " ", "",
pathToAllNetFiles,
"plainnet.nod.xml", "", " --xsd ", "", pathtoSUMO,
"data", "/xsd",
.Platform$file.sep, "nodes_file.xsd", "",
sep = "")
system(NetConv2CSV)

myNETcsv <- read.csv("plainnet.edg.csv", sep = ";", stringsAsFactors = FALSE)
myNodes <- read.csv("plainnet.nod.csv", sep = ";", stringsAsFactors = FALSE)
myNodes <- myNodes[, c("node_id", "node_x", "node_y")]
myNodes <- myNodes[-1, ]
names(myNodes) <- c("id", "startNode_x", "startNode_y")
WithStartNodes <- merge(myNETcsv, myNodes, by.x = "edge_from", by.y = "id")
names(myNodes) <- c("id", "endNode_x", "endNode_y")
WithEndNodes <- merge(WithStartNodes, myNodes, by.x = "edge_to", by.y = "id")
All_Net <- WithEndNodes
rm(WithStartNodes, WithEndNodes)

setwd(globalwd)

iter <- 2
pathforScenario <- paste(pathToAllNetFiles, "dualt", iter, sep = "")
dir.create(pathforScenario)
pathforScenarioInput <- paste(pathToAllNetFiles, "dualt", iter, "/0_ScenarioInput", sep = "")
dir.create(pathforScenarioInput)
pathToAllNetFiles

file.copy(paste(pathToAllNetFiles, NetworkName, sep = ""),
paste(pathforScenarioInput, .Platform$file.sep, NetworkName, sep = ""), overwrite = TRUE)
file.copy(paste(pathToAllNetFiles, NetworkNameForOD2TRIPS, sep = ""),
paste(pathforScenarioInput, .Platform$file.sep, NetworkNameForOD2TRIPS, sep = ""),
overwrite = TRUE)
file.copy(paste(pathToAllNetFiles, ODName, sep = ""),
paste(pathforScenarioInput, .Platform$file.sep, ODName, sep = ""), overwrite = TRUE)
file.copy(paste(pathToAllNetFiles, AdditionalFileName, sep = ""),
paste(pathforScenarioInput, .Platform$file.sep, AdditionalFileName, sep = ""), overwrite =
TRUE)
file.copy(paste(pathToAllNetFiles, TazFileName, sep = ""),
paste(pathforScenarioInput, .Platform$file.sep, TazFileName, sep = ""), overwrite = TRUE)

```

```

oD2TRIPS = paste(pathtoSUMO,"bin/od2trips --no-step-log",
  "--spread.uniform ",
  "-n ", "", pathforScenarioInput,.Platform$file.sep,TazFileName, "", "-d ",
  "", pathforScenarioInput,.Platform$file.sep, ODName, "", "-o ",
  "", pathforScenarioInput,.Platform$file.sep, "StartTrips.trips.xml", "", sep="");
system(oD2TRIPS)

NetworkPath <- paste(pathforScenarioInput,.Platform$file.sep,NetworkName,sep="")
TripsPath <- paste(pathforScenarioInput,.Platform$file.sep, "StartTrips.trips.xml",sep="")
AddlPath <- paste(pathforScenarioInput,.Platform$file.sep,
"SiouxFalls.additional.xml",sep="")
setwd(pathforScenario)
duaiterate <- paste("python ", "", pathtoSUMO, "tools",.Platform$file.sep,"assign",
  .Platform$file.sep, "dualterate.py" , "",
  "--mesosim",
  "-n ", "", NetworkPath, "",
  "-t ", "", TripsPath, "",
  "-l ", "10",
  "-b ", "28800",
  "-e ", "37000",
  "-+ ", "", AddlPath, "",
  sep = "")
system(duaiterate)

EdgeOutputCov <- paste("python ", "", pathtoSUMO, "tools",.Platform$file.sep,"xml",
  .Platform$file.sep, "xml2csv.py" , "" , "",
  pathforScenarioInput,.Platform$file.sep,
  "edge.output.xml", "",
  sep = "")
system(EdgeOutputCov)
edgeOutput<- read.csv(paste(pathforScenarioInput,.Platform$file.sep,
  "edge.output.csv",sep=""),sep=";")
EdgeStatistics<- edgeOutput%>%
  group_by(edge_id)%>%
  summarise(n = n(),
    meanTT= mean(edge_traveltime)/60,
    minTT = min(edge_traveltime)/60,
    maxTT = max(edge_traveltime)/60,
    entered = sum(edge_entered),
    exited = sum(edge_departed))

NetDataFrame <-All_Net[, c("edge_from", "edge_to", "edge_id",
"edge_name","edge_length") ]
MergedNetDataFrame2 <- merge(NetDataFrame,EdgeStatistics,by.x = "edge_id", by.y =
"edge_id", all.x = TRUE)
MergedNetDataFrame <- MergedNetDataFrame2[, -1]
MergedNetDataFrame$edge_id <- MergedNetDataFrame2$edge_id

Graph <- graph_from_data_frame(MergedNetDataFrame, directed = TRUE)

```

```

Nodes <- as.data.frame(vertex_attr(Graph))
names(Nodes)<-"NodeID"
Degree_Centr_All <- centr_degree(Graph, mode = c("all"),
                                loops = TRUE, normalized = TRUE)
Nodes$Degree_Centr_All<-Degree_Centr_All$res

Degree_Centr_In <- centr_degree(Graph, mode = c("in"),
                                loops = TRUE, normalized = TRUE)
Nodes$Degree_Centr_In<- Degree_Centr_In$res

Degree_Centr_Out <- centr_degree(Graph, mode = c("out"),
                                loops = TRUE, normalized = TRUE)
Nodes$Degree_Centr_Out<- Degree_Centr_Out$res

Degree_Centr_Total <- centr_degree(Graph, mode = c("total"),
                                loops = TRUE, normalized = TRUE)
Nodes$Degree_Centr_Total<- Degree_Centr_Total$res

for(i in 1:nrow(Nodes)){
  summ<-0
  examinedNode <- Nodes$NodeID[i]
  starting<-MergedNetDataFrame[MergedNetDataFrame$edge_from==examinedNode, ]
  summ <- summ+ sum(starting$entered)
  ending<-MergedNetDataFrame[MergedNetDataFrame$edge_to==examinedNode, ]
  summ <- summ+ sum(starting$entered)
}

Closeness<- closeness(Graph, vids = V(Graph), mode = c("in"), weights = E(Graph)$meanTT,
normalized = FALSE)
Nodes$ClosenessMEANTT<- Closeness

Betweenness<-betweenness(Graph, v = V(Graph), directed = TRUE, weights =
E(Graph)$meanTT,
  nobigint = TRUE, normalized = FALSE)
Nodes$BetweennessMEANTT<- Betweenness

LocalTraversity <- transitivity(Graph, type = c("local"))
Nodes$LocalTraversity<- LocalTraversity

InfoCentrality <- info.centrality.vertex(Graph)
Nodes$InfoCentrality<- InfoCentrality

NodesForPlot<- merge(Nodes,myNodes,by.x="NodeID", by.y = "id", all.x = TRUE)
ToMerge <- NodesForPlot[,c("NodeID", "endNode_x", "endNode_y") ]
colnames(ToMerge)<- c("NodeID", "from_x", "from_y")
mergedLinkfrom <- merge(MergedNetDataFrame, ToMerge, by.x="edge_from", by.y =
"NodeID", all.x = TRUE)

```

```
colnames(ToMerge)<- c("NodeID", "to_x", "to_y")
mergedLinkfrom <- merge(mergedLinkfrom, ToMerge, by.x="edge_to", by.y = "NodeID", all.x
= TRUE)
```

```
spdf <- SpatialPointsDataFrame(coords = NodesForPlot[, c("endNode_x", "endNode_y")], data
= NodesForPlot)
Points<- st_as_sf(spdf)
```

```
begin.coord <- data.frame(x=mergedLinkfrom$from_x, y=mergedLinkfrom$from_y)
end.coord <- data.frame(x=mergedLinkfrom$to_x, y=mergedLinkfrom$to_y)
l_sf <- vector("list", nrow(begin.coord))
for (i in seq_along(l_sf)){
  l_sf[[i]] <- st_linestring(as.matrix(rbind(begin.coord[i, ], end.coord[i,])))
}
l_sfc <- st_sfc(l_sf)
l_sfc
lines_sp <- as(l_sfc, "Spatial")
```

```
ggplot() +
  geom_sf(data = l_sfc, aes())+
  geom_sf(data = Points, aes(size = Points$Degree_Centr_All))+
  geom_sf_text(data = Points, aes(label = Points$Degree_Centr_All), colour = "black", size = 4,
    nudge_x = c(1500),
    nudge_y = c(1500))+
  coord_sf()+
  theme_void()+
  theme(legend.position= "")+
  labs()
ggsave("DegreeCentralityAll.png")
```

```
# Degree Centrality All - RANK
ggplot() +
  geom_sf(data = l_sfc, aes())+
  geom_sf(data = Points, aes(size = Points$Degree_Centr_All))+
  geom_sf_text(data = Points, aes(label = rank(-Points$Degree_Centr_All, ties.method =
"min")), colour = "black", size = 4,
    nudge_x = c(1500),
    nudge_y = c(1500))+
  coord_sf()+
  theme_void()+
  theme(legend.position= "")+
  labs()
ggsave("DegreeCentralityAll_RANK.png")
```

```
ggplot() +
  geom_sf(data = l_sfc, aes())+
  geom_sf(data = Points, aes(size = Points$Degree_Centr_In))+
  geom_sf_text(data = Points, aes(label = Points$Degree_Centr_In), colour = "black", size = 4,
```

```

      nudge_x = c(1500),
      nudge_y = c(1500))+
  coord_sf()+
  theme_void()+
  theme(legend.position= "")+
  labs()
ggsave("DegreeCentralityIn.png")

```

```

ggplot() +
  geom_sf(data = l_sfc, aes())+
  geom_sf(data = Points, aes(size = Points$Degree_Centr_In))+
  geom_sf_text(data = Points, aes(label = rank(-Points$Degree_Centr_In, ties.method =
"min")), colour = "black", size = 4,
      nudge_x = c(1500),
      nudge_y = c(1500))+
  coord_sf()+
  theme_void()+
  theme(legend.position= "")+
  labs()
ggsave("DegreeCentralityIn_RANK.png")

```

```

ggplot() +
  geom_sf(data = l_sfc, aes())+
  geom_sf(data = Points, aes(size = Points$Degree_Centr_Out))+
  geom_sf_text(data = Points, aes(label = Points$Degree_Centr_Out), colour = "black", size =
4,
      nudge_x = c(1500),
      nudge_y = c(1500))+
  coord_sf()+
  theme_void()+
  theme(legend.position= "")+
  labs()
ggsave("DegreeCentralityOUT.png")

```

```

ggplot() +
  geom_sf(data = l_sfc, aes())+
  geom_sf(data = Points, aes(size = Points$Degree_Centr_Out))+
  geom_sf_text(data = Points, aes(label = rank(-Points$Degree_Centr_Out, ties.method =
"min")), colour = "black", size = 4,
      nudge_x = c(1500),
      nudge_y = c(1500))+
  coord_sf()+
  theme_void()+
  theme(legend.position= "")+
  labs()
ggsave("DegreeCentralityOUT_RANK.png")

```

```

ggplot() +
  geom_sf(data = l_sfc, aes())+
  geom_sf(data = Points, aes(size = Points$Degree_Centr_Total))+

```



```

geom_sf_text(data = Points, aes(label = Points$Degree_Centr_Total), colour = "black", size =
4,
      nudge_x = c(1500),
      nudge_y = c(1500))+
coord_sf()+
theme_void()+
theme(legend.position= "")+
labs()
ggsave("DegreeCentralityTotal.png")

```

```

ggplot() +
  geom_sf(data = l_sfc, aes())+
  geom_sf(data = Points, aes(size = Points$Degree_Centr_Total))+
  geom_sf_text(data = Points, aes(label = rank(-Points$Degree_Centr_Total, ties.method =
"min")), colour = "black", size = 4,
      nudge_x = c(1500),
      nudge_y = c(1500))+
coord_sf()+
theme_void()+
theme(legend.position= "")+
labs()
ggsave("DegreeCentralityTotal_RANK.png")

```

```

ggplot() +
  geom_sf(data = l_sfc, aes())+
  geom_sf(data = Points, aes(size = Points$ClosenessMEANTT))+
  geom_sf_text(data = Points, aes(label = formatC(Points$ClosenessMEANTT, format = "e",
digits = 3)),
      colour = "black",
      size = 3,
      nudge_x = c(3000),
      nudge_y = c(1500))+
coord_sf()+
theme_void()+
theme(legend.position= "")+
labs()
ggsave("Degree_ClosenessMEANTT.png")

```

```

ggplot() +
  geom_sf(data = l_sfc, aes())+
  geom_sf(data = Points, aes(size = Points$ClosenessMEANTT))+
  geom_sf_text(data = Points, aes(label = rank(-Points$ClosenessMEANTT, ties.method =
"min")),
      colour = "black",
      size = 3,
      nudge_x = c(1500),
      nudge_y = c(1500))+
coord_sf()+
theme_void()+
theme(legend.position= "")+
labs()

```

```

ggsave("Degree_ClosenessMEANTT_RANK.png")

ggplot() +
  geom_sf(data = l_sfc, aes())+
  geom_sf(data = Points, aes(size = Points$BetweennessMEANTT))+
  geom_sf_text(data = Points, aes(label = Points$BetweennessMEANTT),
    colour = "black", size = 3,
    nudge_x = c(1500),
    nudge_y = c(1500))+
  coord_sf()+
  theme_void()+
  theme(legend.position= "")+
  labs()
ggsave("Degree_BetweennessMEANTT.png")

ggplot() +
  geom_sf(data = l_sfc, aes())+
  geom_sf(data = Points, aes(size = Points$BetweennessMEANTT))+
  geom_sf_text(data = Points, aes(label = rank(-Points$BetweennessMEANTT, ties.method =
"min")),
    colour = "black", size = 3,
    nudge_x = c(1500),
    nudge_y = c(1500))+
  coord_sf()+
  theme_void()+
  theme(legend.position= "")+
  labs()
ggsave("Degree_BetweennessMEANTT_RANK.png")

```

## Παράρτημα II – Κώδικας στην γλώσσα R για τυχαία δίκτυα

Κώδικας στην γλώσσα R για την εφαρμογή μέτρων από τη Θεωρία Γράφων σε τυχαία δίκτυα

– Κεφάλαιο 9

```
library(tidyverse)
library(igraph)
library(info.centrality)
library(ggplot2)
library(sf)
library(rgdal)
createSemiRandomDemand<-function(NetworkName,RateOfDemand_p,EndOfSimulation,
fringe,
                                ndistinctODs,
                                pathforScenarioInput, pathtoSUMO){
  setwd(pathforScenarioInput)
  createRandomDemand <- paste("python ", pathtoSUMO, "tools",plsep, "randomTrips.py",
                              "-n ", NetworkName, ".net.xml",
                              "-p ", RateOfDemand_p,
                              "-e ", EndOfSimulation,
                              "--fringe-factor ", fringe,
                              "--validate",
                              sep = "")
  system(createRandomDemand, ignore.stderr = TRUE)
  tripsName<-"trips.trips.xml"
  NetConv2CSV <- paste("python ", "", pathtoSUMO, "tools",plsep,"xml",plsep, "xml2csv.py" , ""
, "",
                    pathforScenarioInput, plsep,tripsName,"",
                    "--output ", "", pathforScenarioInput, plsep, "trips.csv" , "",
                    "--xsd ", "",pathtoSUMO, "data", plsep, "xsd", plsep,"routes_file.xsd" , "",
                    sep = "")
  system(NetConv2CSV, ignore.stderr = TRUE)
  Trips<-read.table(file = paste(pathforScenarioInput, plsep,
"trips.csv",sep=""),sep=";",header = TRUE)
  Trips <- Trips[,colSums(is.na(Trips))<nrow(Trips)]
  ndistinctODs
  SampledODs<-Trips[sample(nrow(Trips),ndistinctODs), ]
  Multipl<-ceiling(nrow(Trips)/ndistinctODs)
  Expanded <- SampledODs[rep(seq_len(nrow(SampledODs)), each = Multipl), ]
  rows <- sample(nrow(Expanded),nrow(Trips))
  updatedTrips <- Expanded[rows, ]
  updatedTrips$trip_id<-Trips$trip_id
  updatedTrips$trip_depart<-Trips$trip_depart
  row.names(updatedTrips)<-NULL

  write.table(updatedTrips, file = "tripsToxml.csv",
              row.names = FALSE, dec = ".", sep = ";", quote = FALSE)

  NetConv2CSV <- paste("python ", "", pathtoSUMO, "tools",plsep,"xml",plsep, "csv2xml.py" , ""
, "",
                    pathforScenarioInput, plsep,"tripsToxml.csv" , "",
```

```

    " --output ", "", pathforScenarioInput, plsep, "trips.trips.xml", "",
    " --xsd ", "", pathtoSUMO, "data", plsep, "xsd", plsep, "routes_file.xsd", "",
    sep = "")
system(NetConv2CSV, ignore.stderr = TRUE)
file.remove("trips.trips.csv", "tripsToxml.csv", "trips.csv", "routes.rou.xml",
"routes.rou.alt.xml")
return(updatedTrips)
}

```

ReduceNetwork<-

```

function(NetworkName,reduction,tripsName,pathforScenarioInput,pathtoSUMO){

  plsep <- .Platform$file.sep
  setwd(pathforScenarioInput)
  TempFolder <- paste(pathforScenarioInput,"/temp/", sep="")
  dir.create(TempFolder)
  setwd(TempFolder)
  NetConv2CSV <- paste("python ", "", pathtoSUMO, "tools", plsep, "xml", plsep, "xml2csv.py", "
", "",
    pathforScenarioInput, plsep, tripsName, "",
    " --output ", "", TempFolder, "trips.csv", "",
    " --xsd ", "", pathtoSUMO, "data", plsep, "xsd", plsep, "routes_file.xsd", "",
    sep = "")
  system(NetConv2CSV, ignore.stderr = TRUE)
  Trips<-read.table(file = paste(TempFolder, "trips.csv", sep=""), sep=";", header = TRUE)
  Trips <- Trips[,colSums(is.na(Trips))<nrow(Trips)]

  AllOriginOrDestination <- unique(c(Trips$trip_from, Trips$trip_to))

  NetConv2PlainCommand <- paste("", pathtoSUMO, "bin", plsep, "netconvert", "",
    ' --sumo-net-file ', "\", pathforScenarioInput,
plsep, NetworkName, ".net.xml", "\",
    ' --plain-output-prefix plainnet --proj.plain-geo',
    sep = "")
  system(NetConv2PlainCommand, ignore.stderr = TRUE)
  NetConv2CSV <- paste("python ", "", pathtoSUMO, "tools", plsep, "xml", plsep, "xml2csv.py", "
", "",
    TempFolder, plsep, "plainnet.edg.xml", "",
    " --xsd ", "", pathtoSUMO, "data", plsep, "xsd", plsep, "edges_file.xsd", "",
    sep = "")
  system(NetConv2CSV, ignore.stderr = TRUE)

  myNETcsv<-read.csv("plainnet.edg.csv", sep = ";", stringsAsFactors =FALSE)
  NonODLinks<-myNETcsv[!(myNETcsv$edge_id %in% AllOriginOrDestination), ]
  ODLinks<-myNETcsv[(myNETcsv$edge_id %in% AllOriginOrDestination), ]
  remove <- sample(nrow(NonODLinks), round(reduction*(nrow(NonODLinks)/2)))
  if(length(remove)!=0){
    IDstoRemove <- NonODLinks$edge_id[remove]
    IDstoRemove <- c(IDstoRemove, -IDstoRemove)
    ReducedNet <- NonODLinks[!(NonODLinks$edge_id %in% IDstoRemove), ]
  }else{ReducedNet <- NonODLinks}
}

```

```

ReducedNet <- rbind(ReducedNet,ODLinks)
ReducedNet <- ReducedNet[,colSums(is.na(ReducedNet))<nrow(ReducedNet)]

nameForReduced<-paste("plainnet.edg_",reduction,".csv", sep="")
write.table(ReducedNet, file = nameForReduced,
            row.names = FALSE, dec = ".", sep = ";", quote = FALSE)

EdgeConv2XML <- paste("python ", "", pathtoSUMO, "tools", plsep, "xml", plsep, "csv2xml.py"
, "", #1
                    "-x ", "", pathtoSUMO, "data", plsep, "xsd", plsep, "edges_file.xsd", " ", #2
                    "", TempFolder, nameForReduced, "", #3
                    "-o ", "whwr.edge.xml",
                    sep = "")

system(EdgeConv2XML, ignore.stderr = TRUE)
NetCreateEdgesNodes <- paste("", pathtoSUMO, "bin", plsep, "netconvert", "",
                             '--node-files ', "", TempFolder, plsep, "plainnet.nod.xml", "",
                             '--edge-files ', "", TempFolder, plsep, "whwr.edge.xml", "",
                             '--output-file ', "", TempFolder, nameForReduced, ".net.xml", "",
                             "--ramps.guess", "--junctions.join",
                             # "--proj.utm",
                             sep = "")

system(NetCreateEdgesNodes, ignore.stderr = TRUE)
file.copy(paste(TempFolder,
                nameForReduced,
                ".net.xml", sep=""),
paste(pathforScenariInput, plsep, NetworkName, reduction, ".net.xml", sep=""), overwrite =
TRUE)
unlink(TempFolder, recursive = TRUE)
}

CreateAllNet<-function(NetName, pathforScenariInput){
  plsep <- .Platform$file.sep
  .
  setwd(pathforScenariInput)
  pathToNet2 <- paste("", pathforScenariInput, plsep, NetName, "", sep = "")
  NetConv2PlainCommand <- paste("", pathtoSUMO, "bin", plsep, "netconvert", "",
                                '--sumo-net-file ', pathToNet2,
                                '--plain-output-prefix plainnet --proj.plain-geo',
                                sep = "")
  system(NetConv2PlainCommand)
  # EDGES
  NetConv2CSV <- paste("python ", "", pathtoSUMO, "tools", plsep, "xml", plsep, "xml2csv.py", " ",
,
                    "", pathforScenariInput, plsep, "plainnet.edg.xml", "",
                    "--xsd ", "", pathtoSUMO, "data", plsep, "xsd", plsep, "edges_file.xsd", "",
                    sep = "")
  system(NetConv2CSV, ignore.stderr = TRUE)
  NetConv2CSV <- paste("python ", "", pathtoSUMO, "tools", .Platform$file.sep, "xml", plsep,
"xml2csv.py", " ",
                    "", pathforScenariInput, plsep, "plainnet.nod.xml", "",

```

```

    "--xsd ", "", pathtoSUMO, "data", "/xsd", plsep, "nodes_file.xsd", "",
    sep = "")
system(NetConv2CSV, ignore.stderr = TRUE)

myNETcsv<-read.csv("plainnet.edg.csv", sep = ";", stringsAsFactors =FALSE)
myNodes <-read.csv("plainnet.nod.csv", sep = ";", stringsAsFactors =FALSE)
myNodes <-myNodes[, c("node_id", "node_x", "node_y")]
myNodes<- myNodes[-1, ]

names(myNodes) <- c("id", "startNode_x", "startNode_y")
WithStartNodes <- merge(myNETcsv, myNodes, by.x = "edge_from", by.y = "id", all.x = TRUE)
names(myNodes) <- c("id", "endNode_x", "endNode_y")
WithEndNodes <- merge(WithStartNodes, myNodes, by.x = "edge_to", by.y = "id", all.x =
TRUE)
All_Net <- WithEndNodes
All_Net <- All_Net[,colSums(is.na(All_Net))<nrow(All_Net)]

file.remove("plainnet.edg.csv",
            "plainnet.con.xml",
            "plainnet.nod.csv",
            "plainnet.nod.xml",
            "plainnet.edg.xml",
            "edge.output.csv")
return(All_Net)
}

getEdgeStatistics<-function(pathforScenariInput, pathtoSUMO){
  plsep<-Platform$file.sep
  EdgeOutputCov <- paste("python ", "", pathtoSUMO, "tools", plsep, "xml", plsep, "xml2csv.py"
, "", "",
                        pathforScenariInput, plsep, "edge.output.xml", "",
                        "--xsd ", "", pathtoSUMO, "data", plsep, "xsd", plsep, "meandata_file.xsd", "",
                        sep = "")
  system(EdgeOutputCov)
  edgeOutput<- read.csv(paste(pathforScenariInput,.Platform$file.sep,
                             "edge.output.csv", sep=""), sep=";")
  edgeOutput<- edgeOutput[edgeOutput$edge_sampledSeconds!=0, ]
  EdgeStatistics<- edgeOutput%>%
  group_by(edge_id)%>%
  summarise(n = n(),
            meanTT= mean(edge_traveltime,na.rm = TRUE)/60,
            minTT = min(edge_traveltime,na.rm = TRUE)/60,
            maxTT = max(edge_traveltime,na.rm = TRUE)/60,
            meanWT = mean(edge_waitingTime,na.rm = TRUE)/60,
            maxWT = max(edge_waitingTime,na.rm = TRUE)/60,
            minWT = min(edge_waitingTime,na.rm = TRUE)/60,
            entered = sum(edge_entered),
            exited = sum(edge_departed))
  EdgeStatistics$Diff<- EdgeStatistics$minTT-EdgeStatistics$maxTT
  write.csv(EdgeStatistics, "edgestatistics.csv")
  return(EdgeStatistics)
}

```

```

}

GetVehOutPut<-function(AllNet, Nodes,lIter,pathforScenario,pathtoSUMO){
  message("Working On Vehicle Outputs")
  setwd(pathforScenario)
  plsep<-.Platform$file.sep
  NameForFinalVehInfo <- paste("vehroute_00", lIter-1, ".xml", sep = "")
  VehOutputCov <- paste("python ", "", pathtoSUMO, "tools", plsep, "xml", plsep, "xml2csv.py"
, "",
                        "", pathforScenario,.Platform$file.sep,NameForFinalVehInfo,"",
                        sep = "")
  system(VehOutputCov, ignore.stderr = TRUE)
  OutputName <- paste("vehroute_00", lIter-1, ".csv", sep = "")
  VehRouteInfo <- read.csv(OutputName, sep = ";")
  VehRouteInfo$route_edges <- as.character(VehRouteInfo$route_edges)
  VehRouteInfo$TripID <- seq(1,nrow(VehRouteInfo),1)
  Un<-as.data.frame(unique(VehRouteInfo$route_edges))
  rIDs <- paste("R_", seq(1,nrow(Un),1), sep = "")
  Un$ID <-rIDs
  names(Un) <- c("route_edges", "route_id")
  Un$fromTaz <- NA
  Un$toTaz <- NA
  Un$route_edges<-as.character(Un$route_edges)
  m <- as.data.frame(matrix(0, ncol = nrow(Nodes), nrow = nrow(Un) ))
  upTo<- nrow(Un)
  for(i in 1:upTo){
    if(i %% 100 == 0){
      message(paste(i," from ", upTo, sep = ""))
    }
    TheedgesVisited <- strsplit(Un$route_edges[i], split = " ")
    TheedgesVisited
    Un$fromTaz[i] <- TheedgesVisited[[1]][1]
    Un$toTaz[i] <- TheedgesVisited[[1]][length(TheedgesVisited[[1]])]
    for(k in 1:(length(TheedgesVisited[[1]])){
      examinedEdge <- TheedgesVisited[[1]][k]
      NodeTo <- AllNet$edge_to[AllNet$edge_id==examinedEdge]
      findthecolumn <- which(NodeTo==Nodes$NodeID)
      m[i,findthecolumn]<-1
    }
  }
  AllVehOut<- cbind(Un, m)

  VehRouteInfo <- merge(x = VehRouteInfo, y= AllVehOut, all.x = TRUE)
  VehRouteInfo<- VehRouteInfo[order(VehRouteInfo$TripID), ]
  return(VehRouteInfo)
}

```

```

EstimateTransportBetweennessTT<-function(VehRouteInfo, Nodes){
  message("Estimating Transport Betweenness (Travel Time)")
  m<- VehRouteInfo[, grep("V", colnames(VehRouteInfo))]
  GMerD<-VehRouteInfo[, c("fromTaz", "toTaz")]

```

```

AllTogeth <- cbind(GMerD, m)
uniqueODsPaths <- unique(AllTogeth)
uniqueODs <- unique(GMerD)
uniqueODs$nPaths <- 0
uniqueODs<- cbind(uniqueODs, as.data.frame(matrix(0, ncol = nrow(Nodes), nrow =
nrow(uniqueODs) )))
for(i in 1:nrow(uniqueODs)){
  ExaminedPaths <- uniqueODsPaths[uniqueODsPaths$fromTaz==uniqueODs$fromTaz[i] &
uniqueODsPaths$toTaz==uniqueODs$toTaz[i], ]
  uniqueODs$nPaths[i] <- nrow(ExaminedPaths)
  Cs <- colSums(ExaminedPaths[, 3:ncol(ExaminedPaths)])/nrow(ExaminedPaths)
  uniqueODs[i, 4:ncol(uniqueODs)]<- Cs
}
Transport_Betweeness <- colSums(uniqueODs[, 4:ncol(uniqueODs)])
return(Transport_Betweeness)
}

```

```

EstimateTransportBetweenessFlow<-function(VehRouteInfo, Nodes){
  message("Estimating Transport Betweeness (Flow)")
  m<- VehRouteInfo[, grep("V", colnames(VehRouteInfo))]
  GMerD<-VehRouteInfo[, c("fromTaz", "toTaz")]
  AllTogeth <- cbind(GMerD, m)
  FlowBet <- matrix(0, nrow = 1, ncol = ncol(AllTogeth))
  colnames(FlowBet)<- names(AllTogeth)
  FlowBet<-FlowBet[, 3:ncol(FlowBet)]
  uniqueODsPaths <- unique(AllTogeth)
  uniqueODs <- unique(GMerD)
  uniqueODs$nPaths <- 0
  uniqueODs<- cbind(uniqueODs, as.data.frame(matrix(0, ncol = nrow(Nodes), nrow =
nrow(uniqueODs) )))
  for(i in 1:nrow(uniqueODs)){
    ExaminedPaths <- AllTogeth[AllTogeth$fromTaz==uniqueODs$fromTaz[i] &
AllTogeth$toTaz==uniqueODs$toTaz[i], ]
    Cs <- colSums(ExaminedPaths[, 3:ncol(ExaminedPaths)])/nrow(ExaminedPaths)
    FlowBet <- FlowBet+ Cs
  }

  Transport_Betweeness <- FlowBet
  return(Transport_Betweeness)
}

```

```

EstimateCentralityMeasures <- function(Graph, VehRouteInfo, Nodes, LinkWithStats){
  message("Working On Centrality Measures")
  Nodes$TransportBetweeness <- EstimateTransportBetweenessTT(VehRouteInfo, Nodes)
  Nodes$TransportFLOWBetweeness <- EstimateTransportBetweenessFlow(VehRouteInfo,
Nodes)
  E(Graph)$Count[E(Graph)$Count==0]<-0.0001
  Nodes$Degree_Centr_All <- centr_degree(Graph, mode = c("all"),loops = TRUE,
normalized = TRUE)$res
  Nodes$Degree_Centr_In <- centr_degree(Graph, mode = c("in"),loops = TRUE,
normalized = TRUE)$res

```



```

Nodes$Degree_Centr_Out      <- centr_degree(Graph, mode = c("out"),loops = TRUE,
normalized = TRUE)$res
Nodes$Degree_Centr_Total    <- centr_degree(Graph, mode = c("total"),loops = TRUE,
normalized = TRUE)$res
Nodes$ClosenessMEANTT      <- closeness(Graph, vids = V(Graph), mode = c("in"), weights
= E(Graph)$meanTT, normalized = FALSE)
Nodes$BetweennessMEANTT    <- betweenness(Graph, v = V(Graph), directed = TRUE,
weights = E(Graph)$meanTT,nobigint = TRUE, normalized = FALSE)
Nodes$BetweennessFlow      <- betweenness(Graph, v = V(Graph), directed = TRUE, weights
= E(Graph)$Count ,nobigint = TRUE, normalized = FALSE)
Nodes$LocalTraversity      <- transitivity(Graph, type = c("local"))
message("Starting with Information Centrality - This takes time!")
Nodes$InfoCentrality        <- info.centrality.vertex(Graph) # cent$infocent <-
sna::infocent(get.adjacency(g3,sparse=F))
Nodes$NodeForce <- NA
message("Starting with Node Force!")
for(i in 1:nrow(Nodes)){
  summ<-0
  examinedNode <- Nodes$NodeID[i]
  starting<-LinkWithStats[LinkWithStats$edge_from==examinedNode, ]
  summ <- summ+ sum(starting$entered)
  ending<-LinkWithStats[LinkWithStats$edge_to==examinedNode, ]
  summ <- summ+ sum(ending$exited)
  Nodes$NodeForce[Nodes$NodeID==examinedNode]<-summ
}

```

```

Nodes$hIndex <- NA
message("Hierarchical Degree (we are almost done)!")
Threshold_h <- 2
DistanceMatrix <- distances(Graph, v = V(Graph), to = V(Graph), weights = E(Graph)$meanTT
)
DistanceMatrix[DistanceMatrix<Threshold_h]<-1
DistanceMatrix[DistanceMatrix>=Threshold_h]<-0
Nodes$HierarchicalDegree<-exp(-rowSums (DistanceMatrix, na.rm = FALSE, dims = 1))
message("Done!")
return(Nodes)
}

```

```

SeqNumber <- seq(1,5000,1)
myCounter<-40

```

```

pathToMainFolder<- "/Users/iraklis/OneDrive\ -\ /Various/Step2_FirstScenario/"

```

```

pathtoSUMO      <- "/usr/local/opt/sumo/share/sumo/"
path2SumoTools  <- "/usr/local/opt/sumo/share/sumo/tools/"
path2SumoBin    <- "/usr/local/opt/sumo/share/sumo/bin/"
Sys.setenv(SUMO_HOME = "/usr/local/opt/sumo/share/sumo/")
tripsName<-"trips.trips.xml"
AdditionalFileName<-"Edge_D.additional.xml"

```

```

plsep<-Platform$file.sep

RateOfDemand_p <- 0.6 # https://sumo.dlr.de/docs/Tools/Trip.html
EndOfSimulation <- 3600
fringe <- 1.4
ndistinctODs <- 100

for(ttt in 1:35){
  nlt <- c(50,50,50,50,50,
    100,100,100,100,100,
    200,200,200,200,200,
    300,300,300,300,300,
    400,400,400,400,400,
    500,500,500,500,500,
    600,600,600,600,600,
    1000,1000,1000,1000,1000,
    1500,1500,1500,1500,1500)
  nd <- c( 10,10,10,10,10,
    10,10,10,10,10,
    10,10,10,10,10,
    20,20,20,20,20,
    20,20,20,20,20,
    50,50,50,50,50,
    50,50,50,50,50,
    80,80,80,100,100,
    100,100,150,150,150)

  myCounter<-myCounter+1
  NetworkName <- "MySUMOFileHigh"
  NetworkType <- "--rand" # This can be also grid or spiral
  NIterations <- nlt[ttt] # Number of iterations (edges)
  NetBidirecProb <- 0.98 # prob of bi-directional links
  NetMaxDistance <- 500 # meters
  NetConnectProb <- 0.95 # Probability for roads to continue at each node
  Reduction <- seq(0.1, 0.8, 0.1)

  RateOfDemand_p <- 0.5 # https://sumo.dlr.de/docs/Tools/Trip.html
  EndOfSimulation <- 3600
  fringe <- 1.4
  ndistinctODs <- nd[ttt]

  pathforScenario <- paste(pathToMainFolder,
    "NT_", gsub("--", "", NetworkType),
    "_nlt_", NIterations,
    "_BDP_", NetBidirecProb,
    "_mDi_", NetMaxDistance,
    "_CoP_", NetConnectProb,
    "_OD_", ndistinctODs,
    "_Test_", myCounter, sep="")
  dir.create(pathforScenario)
}

```

```

pathforScenarioInput <- paste(pathforScenario,"/0_ScenarioInput", sep="")
dir.create(pathforScenarioInput)

setwd(pathforScenarioInput)

createRandomNetwork <- paste("netgenerate ",
    NetworkType,
    "--rand.iterations ", NIterations,
    "--rand.bidi-probability ", NetBidirecProb,
    "--rand.max-distance ", NetMaxDistance,
    "--rand.connectivity ", NetConnectProb,
    "--output-file=",NetworkName,".net.xml",
    sep = "")
system(createRandomNetwork, ignore.stderr = TRUE)

SemiRDemand<-
createSemiRandomDemand(NetworkName,RateOfDemand_p,EndOfSimulation, fringe,
    ndistinctODs,
    pathforScenarioInput, pathtoSUMO)
file.copy(paste(pathToMainFolder,AdditionalFileName,sep=""),
paste(pathforScenarioInput,plsep,AdditionalFileName,sep=""), overwrite = TRUE)
pathforOutputs <- paste(pathforScenario,"/Outputs/", sep="")

NetworkPath <- paste(pathforScenarioInput,plsep,NetworkName, ".net.xml",sep="")
TripsPath <- paste(pathforScenarioInput,plsep, "trips.trips.xml",sep="")
AddlPath <- paste(pathforScenarioInput,plsep, AdditionalFileName,sep="")

pathforOutputs <- paste(pathforScenario,"/Outputs/", sep="")
dir.create(pathforOutputs)
pathforOriginalRun <- paste(pathforScenario,"/OriginalRun", sep="")
dir.create(pathforOriginalRun)

setwd(pathforOriginalRun)
lIter <- 5
duaiterate <- paste("python ", "", pathtoSUMO, "tools",plsep,"assign",
    plsep, "dualterate.py" , "",
    "--mesosim",
    "-n ", "",NetworkPath,"",
    "-t ", "",TripsPath,"",
    "-l ", lIter,
    "-b ", "0",
    "-e ", EndOfSimulation+2000,
    "-+ ", "",AddlPath,"",
    "--vehroute detailed",
    sep = "")
system(duaiterate, ignore.stderr = TRUE)
NetName<-paste(NetworkName, ".net.xml",sep="")

EdgeStatistics<- getEdgeStatistics(pathforScenarioInput, pathtoSUMO) # Get edge statistics
(function)

```

```

AllNet<-CreateAllNet(NetName, pathforScenarioInput) # create the graph from SUMO
(function)
AllNet$length <- sqrt((AllNet$endNode_x-AllNet$startNode_x)^2 + (AllNet$endNode_y-
AllNet$startNode_y)^2) # estimate length
MergedNetDataFrame <- merge(AllNet,EdgeStatistics,by.x = "edge_id", by.y = "edge_id",
all.x = TRUE) # estimate length
SL <- MergedNetDataFrame$edge_id
MergedNetDataFrame$edge_id <- NULL
MergedNetDataFrame$edge_id<-SL
MergedNetDataFrame$meanTT[is.na(MergedNetDataFrame$meanTT)]<-
MergedNetDataFrame$length[is.na(MergedNetDataFrame$meanTT)]/
MergedNetDataFrame$edge_speed[is.na(MergedNetDataFrame$meanTT)]/60
MergedNetDataFrame$Count <-
MergedNetDataFrame$entered+MergedNetDataFrame$exited
MergedNetDataFrame$Count[is.na(MergedNetDataFrame$Count)]<-0
Graph <- graph_from_data_frame(MergedNetDataFrame, directed = TRUE)
Nodes <- as.data.frame(vertex_attr(Graph))
names(Nodes)<-"NodeID"

AllNet1 <-AllNet[, c("edge_from", "startNode_x", "startNode_y")]
AllNet2 <-AllNet[, c("edge_to", "endNode_x", "endNode_y")]
names(AllNet2) <- c("edge_from", "startNode_x", "startNode_y")
AllNet3 <- rbind(AllNet1,AllNet2)
UniqueNodes <- unique(AllNet3)
NodesForPlot <- merge(Nodes, UniqueNodes, by.x = "NodeID", by.y= "edge_from", all.x =
TRUE)
LinkWithStats <- MergedNetDataFrame
rm(MergedNetDataFrame)
VehRouteInfo<-GetVehOutPut(AllNet, Nodes,lter,pathforOriginaRun,pathtoSUMO)
OUTPUTVRI<- VehRouteInfo[, -grep("V", colnames(VehRouteInfo))]
Nodes <- EstimateCentralityMeasures(Graph, VehRouteInfo, Nodes, LinkWithStats)

NodesOut <- Nodes
NodesOut$Reduction <- 0

AllScenariosOut <- OUTPUTVRI
AllScenariosOut$route_exitTimes <- NULL
AllScenariosOut$Reduction <- 0

spdf <- SpatialPointsDataFrame(coords = NodesForPlot[, c("startNode_x", "startNode_y")],
data = NodesForPlot)
Points<- st_as_sf(spdf)

begin.coord <- data.frame(x=LinkWithStats$startNode_x, y=LinkWithStats$startNode_y)
end.coord <- data.frame(x=LinkWithStats$endNode_x, y=LinkWithStats$endNode_y)
l_sf <- vector("list", nrow(begin.coord))
for (i in seq_along(l_sf)){
  l_sf[[i]] <- st_linestring(as.matrix(rbind(begin.coord[i, ], end.coord[i,])))
}
l_sfc <- st_sfc(l_sf)
lines_sp <- as(l_sfc, "Spatial")

```

```

Lines <- st_as_sf(l_sfc)
xUpper <- max(Points$startNode_x)
xLower <- min(Points$startNode_x)
yUpper <- max(Points$startNode_y)
yLower <- min(Points$startNode_y)
Writename<-paste(pathforOutputs,"Original_Network",".png",sep="")
ggplot() +
  geom_sf(data = l_sfc, aes())+
  geom_sf(data = Points, aes(), size = 0.5)+
  xlim(xLower, xUpper)+
  ylim(yLower,yUpper)+
  coord_sf()+
  theme_void()+
  theme(legend.position= "")+
  labs()
ggsave(Writename)

Writename<-paste(pathforOutputs,"Original_VehRouteInfo",".csv",sep="")
write.table(OUTPUTVRI,file=Writename,
  row.names = FALSE, dec = ".", sep = ";", quote = FALSE)
Writename<-paste(pathforOutputs,"Original_Nodes",".csv",sep="")
write.table(Nodes,file=Writename,
  row.names = FALSE, dec = ".", sep = ";", quote = FALSE)
Writename<-paste(pathforOutputs,"Original_LinkWithStats",".csv",sep="")
write.table(LinkWithStats,file=Writename,
  row.names = FALSE, dec = ".", sep = ";", quote = FALSE)
unlink(pathforOriginaRun, recursive = TRUE)

for(reductionInter in 1:length(Reduction)){
  reduction <- Reduction[reductionInter]
  ReduceNetwork(NetworkName,reduction,tripsName,pathforScenarioInput,pathtoSUMO)
  NetName <- paste(NetworkName,reduction,".net.xml",sep="")
  NetworkPath <- paste(pathforScenarioInput,plsep,NetName,sep="")
  TripsPath <- paste(pathforScenarioInput,plsep, "trips.trips.xml",sep="")

  duarouter<-paste(pathtoSUMO, "bin",plsep,"duarouter" ,
    " -n ", "",NetworkPath,"",
    " --route-files ", "",TripsPath,"",
    " --ignore-errors",
    " --write-trips",
    " -o ", "",pathforScenarioInput,plsep,"trips_", reduction, ".trips.xml","",
    sep = "")
  system(duarouter, ignore.stderr = TRUE)
  TripsPath <- paste(pathforScenarioInput,plsep,"trips_", reduction, ".trips.xml",sep="")

  EdgeOutputCov <- paste("python ", "", pathtoSUMO, "tools",plsep,"xml",plsep,
"xml2csv.py" , "", "",
  TripsPath,"",
  " --xsd ", "",pathtoSUMO, "data", plsep, "xsd",plsep,"routes_file.xsd","",
  sep = "")
  system(EdgeOutputCov)
}

```

```

csvTripsFile <- paste(pathforScenarioInput,plsep,"trips_", reduction, ".trips.csv",sep="")
Test <- try(read.table(csvTripsFile, sep = ";",header = TRUE))
file.remove(csvTripsFile)
if(class(Test)=="data.frame" & nrow(Test)>0 & ncol(Test)>2){
  AddPath <- paste(pathforScenarioInput,plsep, AdditionalFileName,sep="")
  ReductionScenarioPath <- paste(pathforScenario,plsep,NetworkName,reduction,sep="")
  dir.create(ReductionScenarioPath)
  setwd(ReductionScenarioPath)
  lIter <- 5
  duaiterate <- paste("python ", "", pathtoSUMO, "tools",plsep,"assign",plsep,
"dualterate.py", "",
  "--mesosim",
  "-n ", "",NetworkPath,"",
  "-t ", "",TripsPath,"",
  "-l ", lIter,
  "-b ", "0",
  "-e ", EndOfSimulation+2000,
  "+ ", "",AddIPath,"",
  "--vehroute detailed",
  sep = "")
  system(duaiterate, ignore.stderr = TRUE)

  EdgeStatistics<- getEdgeStatistics(pathforScenarioInput, pathtoSUMO) #####
  AllNet<-CreateAllNet(NETName, pathforScenarioInput)
  AllNet$length <- sqrt((AllNet$endNode_x-AllNet$startNode_x)^2 + (AllNet$endNode_y-
AllNet$startNode_y)^2)
  MergedNetDataFrame <- merge(AllNet,EdgeStatistics,by.x = "edge_id", by.y = "edge_id",
all.x = TRUE) # estimate length
  SL <- MergedNetDataFrame$edge_id
  MergedNetDataFrame$edge_id <- NULL
  MergedNetDataFrame$edge_id<-SL
  MergedNetDataFrame$meanTT[is.na(MergedNetDataFrame$meanTT)]<-
MergedNetDataFrame$length[is.na(MergedNetDataFrame$meanTT)]/
  MergedNetDataFrame$edge_speed[is.na(MergedNetDataFrame$meanTT)]/60
  MergedNetDataFrame$Count <-
MergedNetDataFrame$entered+MergedNetDataFrame$exited
  MergedNetDataFrame$Count[is.na(MergedNetDataFrame$Count)]<-0
  Graph <- graph_from_data_frame(MergedNetDataFrame, directed = TRUE)
  Nodes <- as.data.frame(vertex_attr(Graph))
  names(Nodes)<-"NodeID"
  LinkWithStats <- MergedNetDataFrame
  rm(MergedNetDataFrame)
  VehRouteInfo<-GetVehOutPut(AllNet, Nodes,lIter,ReductionScenarioPath,pathtoSUMO)
  OUTPUTVRInfo<- VehRouteInfo[, -grep("V", colnames(VehRouteInfo))]
  Nodes <-EstimateCentralityMeasures(Graph, VehRouteInfo, Nodes, LinkWithStats)

file.copy(paste(pathforScenarioInput,plsep,"edge.output.xml",sep=""),paste(pathforOutputs
,"Red_",reduction,"_edge.output.xml",sep=""))

  AllNet1 <-AllNet[, c("edge_from", "startNode_x", "startNode_y")]
  AllNet2 <-AllNet[, c("edge_to", "endNode_x", "endNode_y")]

```

```

names(AllNet2) <- c("edge_from", "startNode_x", "startNode_y")
AllNet3 <- rbind(AllNet1,AllNet2)
UniqueNodes <- unique(AllNet3)
NodesForPlot <- merge(Nodes, UniqueNodes, by.x = "NodeID", by.y= "edge_from", all.x =
TRUE)
spdf <- SpatialPointsDataFrame(coords = NodesForPlot[, c("startNode_x",
"startNode_y")], data = NodesForPlot)
Points<- st_as_sf(spdf)

AllScenariosOut1 <- OUTPUTVRI
AllScenariosOut1$route_exitTimes <- NULL
AllScenariosOut1$Reduction <- reduction

AllScenariosOut<-rbind(AllScenariosOut,AllScenariosOut1)
Nodes$Reduction <- reduction
NodesOut<-rbind(NodesOut,Nodes)

Writename<-paste(pathforOutputs,"Red_",reduction,"_VehRouteInfo",".csv",sep="")
write.table(OUTPUTVRI,file=Writename, row.names = FALSE, dec = ".", sep = ";", quote =
FALSE)
Writename<-paste(pathforOutputs,"Red_",reduction,"_Nodes",".csv",sep="")
write.table(Nodes,file=Writename,row.names = FALSE, dec = ".", sep = ";", quote = FALSE)
Writename<-paste(pathforOutputs,"Red_",reduction,"_LinkWithStats",".csv",sep="")
write.table(LinkWithStats,file=Writename,
row.names = FALSE, dec = ".", sep = ";", quote = FALSE)
begin.coord <- data.frame(x=LinkWithStats$startNode_x, y=LinkWithStats$startNode_y)
end.coord <- data.frame(x=LinkWithStats$endNode_x, y=LinkWithStats$endNode_y)
l_sf <- vector("list", nrow(begin.coord))
for (i in seq_along(l_sf)){
l_sf[[i]] <- st_linestring(as.matrix(rbind(begin.coord[i, ], end.coord[i,])))
}
# Create simple feature geometry list column
l_sfc <- st_sfc(l_sf)
lines_sp <- as(l_sfc, "Spatial")
Lines <- st_as_sf(l_sfc)
Writename<-paste(pathforOutputs,"Red_",reduction,"_Network",".png",sep="")
ggplot() +
geom_sf(data = l_sfc, aes())+
geom_sf(data = Points, aes(), size = 0.5)+
xlim(xLower, xUpper)+
ylim(yLower,yUpper)+
coord_sf()+
theme_void()+
theme(legend.position= "")+
labs()
ggsave(Writename)
file.remove(paste(pathforScenarioInput,plsep,"edge.output.xml",sep=""))
unlink(ReductionScenarioPath, recursive = TRUE)
}
}
Writename<-paste(pathforScenario,.Platform$file.sep,"VEHICLES_ALLSCEN",".csv",sep="")

```

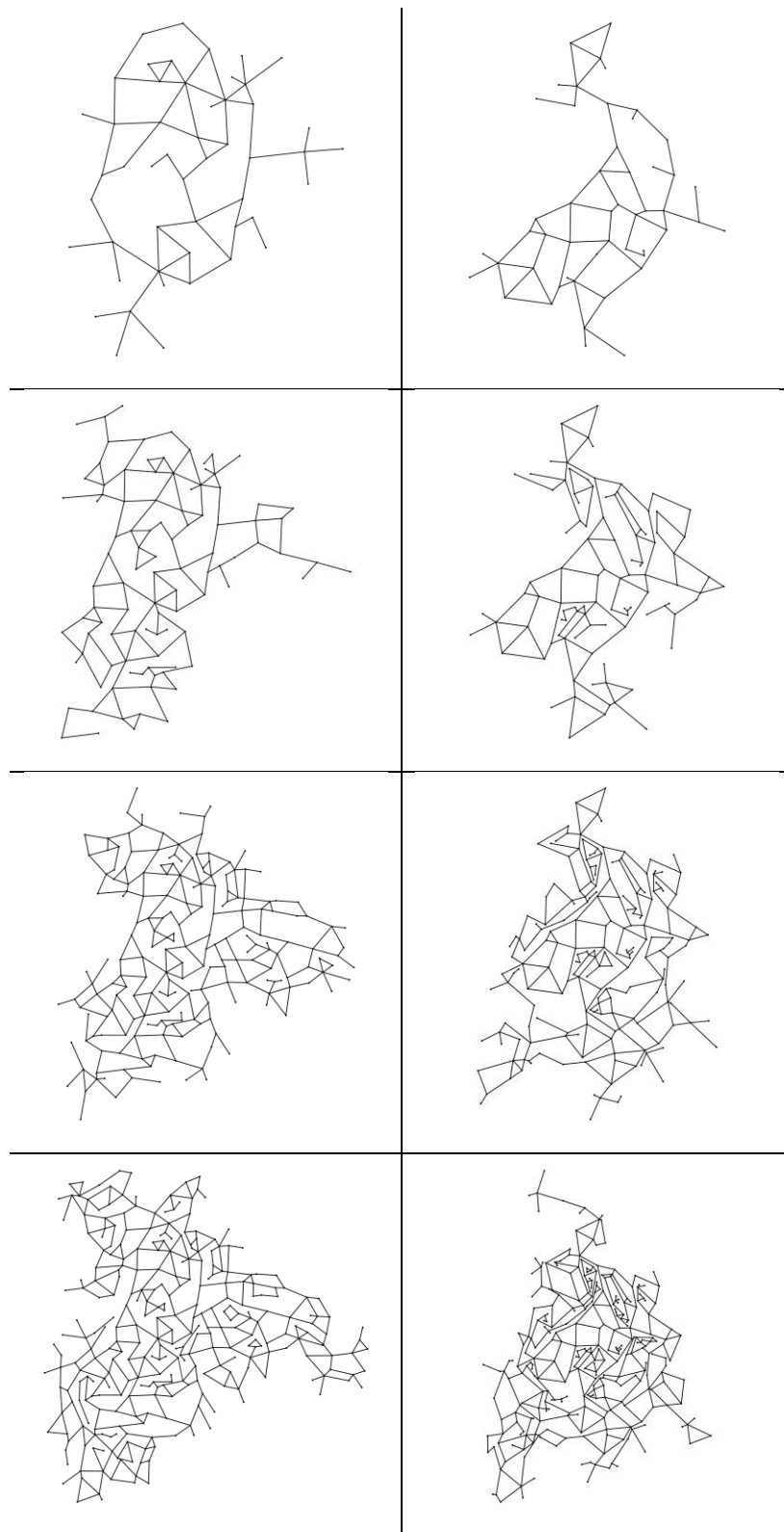
```
write.table(AllScenariosOut,file=Writename, row.names = FALSE, dec = ".", sep = ";", quote
= FALSE)
Writename<-paste(pathforScenario,.Platform$file.sep,"NODES_ALLSCEN", ".csv",sep="")
write.table(NodesOut,file=Writename, row.names = FALSE, dec = ".", sep = ";", quote =
FALSE)

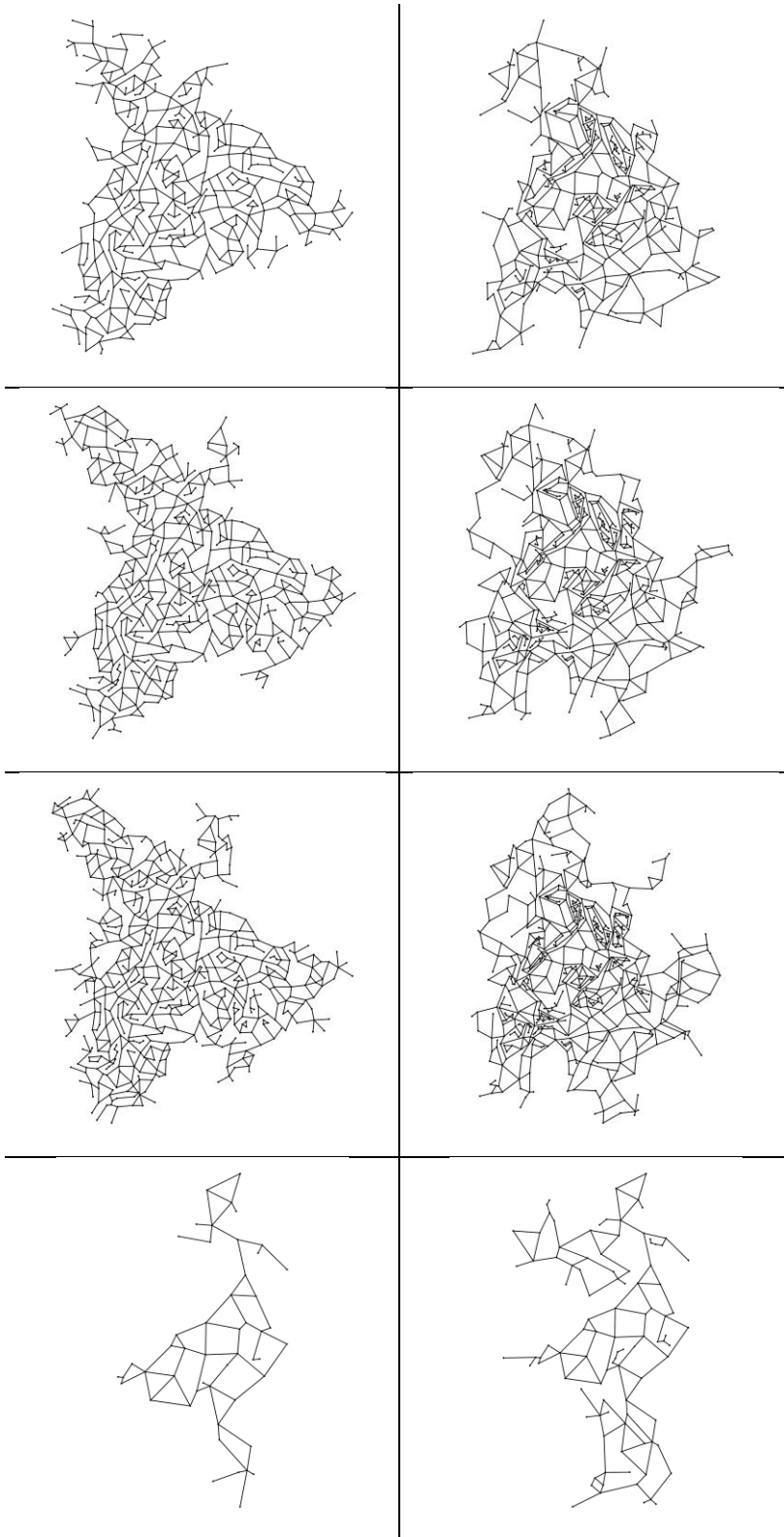
}
```

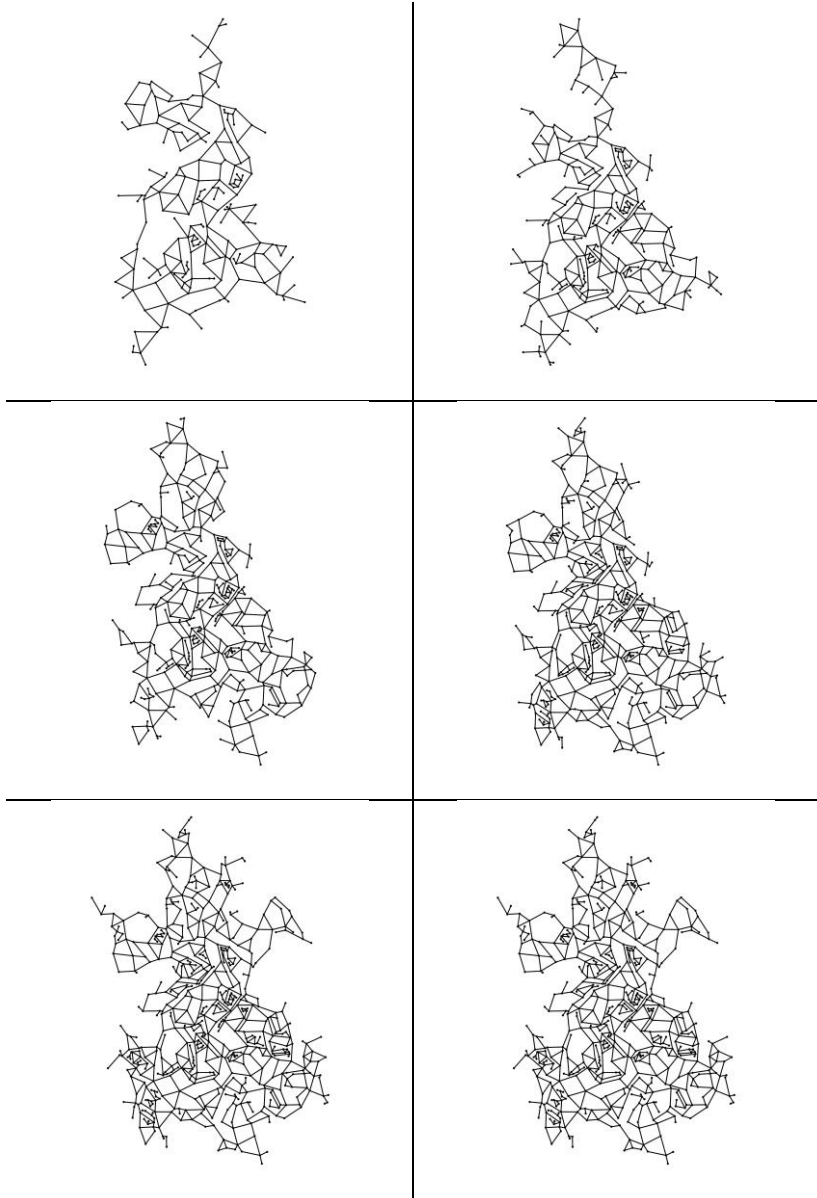


### Παράρτημα III – Απόψεις τυχαίων δικτύων

Απόψεις τυχαίων δικτύων – Κεφάλαιο 9







## **Παράρτημα IV – Έρευνα ερωτηματολογίου**

Έρευνα ερωτηματολογίου για την αξιολόγηση μέτρων προσαρμογής και απαντήσεις ερωτούμενων ανά μεταφορικό μέσο (στην πρωτότυπη μορφή) – Κεφάλαιο 10

Questions	Indicators	Measures										Information flow, ICT support	Decision of the models					Capitals			
		Operational and decision-making structures		Technical options and feasibility to reduce risk			Procedural and organizational options to reduce the risk						M13	M14	M15	M16	M17		M18		
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18		
Q1: How should the measure be implemented?	How are assets of buildings at risk of damage by flooding?	7	6	5	5	3	4	4	5	7	9	7	5	2	4	4	3	9	3	2	
	How are assets of people at risk of damage by flooding?	2	4	2	2	2	1	1	5	4	1	4	5	3	1	3	3	1	5	1	
	How are assets of economic activities at risk of damage by flooding?	2	2	4	4	2	5	1	1	1	2	1	4	4	4	3	3	2	2	7	1
	How are assets of infrastructure at risk of damage by flooding?	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2	1	1
	How are assets of environment at risk of damage by flooding?	1	1	3	3	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	How are assets of cultural heritage at risk of damage by flooding?	1	1	3	3	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	How are assets of tourism at risk of damage by flooding?	1	1	3	3	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	How are assets of agriculture at risk of damage by flooding?	1	1	3	3	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	How are assets of industry at risk of damage by flooding?	1	1	3	3	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	How are assets of services at risk of damage by flooding?	1	1	3	3	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Q2: How should the measure be implemented?	How are assets of buildings at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of people at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of economic activities at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of infrastructure at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of environment at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of cultural heritage at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of tourism at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of agriculture at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of industry at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of services at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Q3: How should the measure be implemented?	How are assets of buildings at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of people at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of economic activities at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of infrastructure at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of environment at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of cultural heritage at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of tourism at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of agriculture at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of industry at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	How are assets of services at risk of damage by flooding?	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	



Questions	Indicators	Measures										Legislative	
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10		
		Original and decision making structure	Technical options and possibilities to reduce risk	Procedural and organisational options to reduce risk	Information flow, ICT support	Decision and risk matrix							
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10		
		Inclusion of climate change impact in the airport master plan	Capacity improvement of existing infrastructure, low removal equipment, air conditioning	Implementation of SESAR developed technologies and procedures to optimise capacity in disruptive conditions	Development of travel re-arrangements and procedures to cope with multiple medical emergencies	Provision of information and travel advice	Development of passenger services offering passengers a more active role by enabling transport mode shifting	Tests to compare the vulnerability of airports and airspace	Transparency board in the comparison of the impacts of disruptive events (consistent statistical evaluation procedures)	Transparency board in the comparison of the impacts of disruptive events	Improvements of local weather and disruption forecasts (forecasts with improved geographical and timely information on about the disruption impact)		
		Within 1 year	3	4	7	5	2	1	2	2	5		1
		In 2 years	5	1	2	3	5	4	6	6	3		3
		In 3 years	5	2	4	2	4	8	4	4	3		
		In 4 years	1	6	2	3	3	2	3	3	4		2
		In > 5 years	1	2	2	1	1	1	1	1	2		2
		Q1: When should the measure be implemented?											
		Q2: Time needed for the implementation of the measure											
		Q3: Duration of the measure's impact											
		Q4: Extent of financial resources needed for the implementation of the measure (value relative to selected box)											
		Q5: Extent/size of population benefited from a potential application of the measure											
		Q6: How well does the measure contribute to the reduction of transport infrastructure											
		Q7: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q8: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q9: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q10: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q11: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q12: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q13: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q14: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q15: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q16: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q17: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q18: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q19: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q20: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q21: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q22: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q23: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q24: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q25: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q26: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q27: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q28: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q29: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q30: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q31: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q32: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q33: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q34: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q35: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q36: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q37: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q38: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q39: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q40: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q41: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q42: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q43: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q44: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q45: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q46: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q47: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q48: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q49: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q50: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q51: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q52: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q53: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q54: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q55: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q56: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q57: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q58: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q59: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q60: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q61: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q62: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q63: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q64: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q65: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q66: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q67: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q68: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q69: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q70: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q71: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q72: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q73: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q74: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q75: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q76: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q77: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q78: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q79: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q80: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q81: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q82: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q83: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q84: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q85: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q86: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q87: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q88: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q89: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q90: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q91: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q92: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q93: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q94: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q95: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q96: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q97: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q98: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q99: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											
		Q100: How well does the measure contribute to the prevention of transport network operation											

Ομάδα	Μάθημα	Μαθηματικά												Φυσική												Χημεία												Βιολογία												Γεωγραφία												Ψηφιακή Γραμματεία																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		Μ1	Μ2	Μ3	Μ4	Μ5	Μ6	Μ7	Μ8	Μ9	Μ10	Μ11	Μ12	Μ13	Μ14	Μ15	Μ16	Μ17	Μ18	Μ19	Μ20	Μ21	Μ22	Μ23	Μ24	Μ25	Μ26	Μ27	Μ28	Μ29	Μ30	Μ31	Μ32	Μ33	Μ34	Μ35	Μ36	Μ37	Μ38	Μ39	Μ40	Μ41	Μ42	Μ43	Μ44	Μ45	Μ46	Μ47	Μ48	Μ49	Μ50	Μ51	Μ52	Μ53	Μ54	Μ55	Μ56	Μ57	Μ58	Μ59	Μ60	Μ61	Μ62	Μ63	Μ64	Μ65	Μ66	Μ67	Μ68	Μ69	Μ70	Μ71	Μ72	Μ73	Μ74	Μ75	Μ76	Μ77	Μ78	Μ79	Μ80	Μ81	Μ82	Μ83	Μ84	Μ85	Μ86	Μ87	Μ88	Μ89	Μ90	Μ91	Μ92	Μ93	Μ94	Μ95	Μ96	Μ97	Μ98	Μ99	Μ100	Μ101	Μ102	Μ103	Μ104	Μ105	Μ106	Μ107	Μ108	Μ109	Μ110	Μ111	Μ112	Μ113	Μ114	Μ115	Μ116	Μ117	Μ118	Μ119	Μ120	Μ121	Μ122	Μ123	Μ124	Μ125	Μ126	Μ127	Μ128	Μ129	Μ130	Μ131	Μ132	Μ133	Μ134	Μ135	Μ136	Μ137	Μ138	Μ139	Μ140	Μ141	Μ142	Μ143	Μ144	Μ145	Μ146	Μ147	Μ148	Μ149	Μ150	Μ151	Μ152	Μ153	Μ154	Μ155	Μ156	Μ157	Μ158	Μ159	Μ160	Μ161	Μ162	Μ163	Μ164	Μ165	Μ166	Μ167	Μ168	Μ169	Μ170	Μ171	Μ172	Μ173	Μ174	Μ175	Μ176	Μ177	Μ178	Μ179	Μ180	Μ181	Μ182	Μ183	Μ184	Μ185	Μ186	Μ187	Μ188	Μ189	Μ190	Μ191	Μ192	Μ193	Μ194	Μ195	Μ196	Μ197	Μ198	Μ199	Μ200	Μ201	Μ202	Μ203	Μ204	Μ205	Μ206	Μ207	Μ208	Μ209	Μ210	Μ211	Μ212	Μ213	Μ214	Μ215	Μ216	Μ217	Μ218	Μ219	Μ220	Μ221	Μ222	Μ223	Μ224	Μ225	Μ226	Μ227	Μ228	Μ229	Μ230	Μ231	Μ232	Μ233	Μ234	Μ235	Μ236	Μ237	Μ238	Μ239	Μ240	Μ241	Μ242	Μ243	Μ244	Μ245	Μ246	Μ247	Μ248	Μ249	Μ250	Μ251	Μ252	Μ253	Μ254	Μ255	Μ256	Μ257	Μ258	Μ259	Μ260	Μ261	Μ262	Μ263	Μ264	Μ265	Μ266	Μ267	Μ268	Μ269	Μ270	Μ271	Μ272	Μ273	Μ274	Μ275	Μ276	Μ277	Μ278	Μ279	Μ280	Μ281	Μ282	Μ283	Μ284	Μ285	Μ286	Μ287	Μ288	Μ289	Μ290	Μ291	Μ292	Μ293	Μ294	Μ295	Μ296	Μ297	Μ298	Μ299	Μ300	Μ301	Μ302	Μ303	Μ304	Μ305	Μ306	Μ307	Μ308	Μ309	Μ310	Μ311	Μ312	Μ313	Μ314	Μ315	Μ316	Μ317	Μ318	Μ319	Μ320	Μ321	Μ322	Μ323	Μ324	Μ325	Μ326	Μ327	Μ328	Μ329	Μ330	Μ331	Μ332	Μ333	Μ334	Μ335	Μ336	Μ337	Μ338	Μ339	Μ340	Μ341	Μ342	Μ343	Μ344	Μ345	Μ346	Μ347	Μ348	Μ349	Μ350	Μ351	Μ352	Μ353	Μ354	Μ355	Μ356	Μ357	Μ358	Μ359	Μ360	Μ361	Μ362	Μ363	Μ364	Μ365	Μ366	Μ367	Μ368	Μ369	Μ370	Μ371	Μ372	Μ373	Μ374	Μ375	Μ376	Μ377	Μ378	Μ379	Μ380	Μ381	Μ382	Μ383	Μ384	Μ385	Μ386	Μ387	Μ388	Μ389	Μ390	Μ391	Μ392	Μ393	Μ394	Μ395	Μ396	Μ397	Μ398	Μ399	Μ400	Μ401	Μ402	Μ403	Μ404	Μ405	Μ406	Μ407	Μ408	Μ409	Μ410	Μ411	Μ412	Μ413	Μ414	Μ415	Μ416	Μ417	Μ418	Μ419	Μ420	Μ421	Μ422	Μ423	Μ424	Μ425	Μ426	Μ427	Μ428	Μ429	Μ430	Μ431	Μ432	Μ433	Μ434	Μ435	Μ436	Μ437	Μ438	Μ439	Μ440	Μ441	Μ442	Μ443	Μ444	Μ445	Μ446	Μ447	Μ448	Μ449	Μ450	Μ451	Μ452	Μ453	Μ454	Μ455	Μ456	Μ457	Μ458	Μ459	Μ460	Μ461	Μ462	Μ463	Μ464	Μ465	Μ466	Μ467	Μ468	Μ469	Μ470	Μ471	Μ472	Μ473	Μ474	Μ475	Μ476	Μ477	Μ478	Μ479	Μ480	Μ481	Μ482	Μ483	Μ484	Μ485	Μ486	Μ487	Μ488	Μ489	Μ490	Μ491	Μ492	Μ493	Μ494	Μ495	Μ496	Μ497	Μ498	Μ499	Μ500	Μ501	Μ502	Μ503	Μ504	Μ505	Μ506	Μ507	Μ508	Μ509	Μ510	Μ511	Μ512	Μ513	Μ514	Μ515	Μ516	Μ517	Μ518	Μ519	Μ520	Μ521	Μ522	Μ523	Μ524	Μ525	Μ526	Μ527	Μ528	Μ529	Μ530	Μ531	Μ532	Μ533	Μ534	Μ535	Μ536	Μ537	Μ538	Μ539	Μ540	Μ541	Μ542	Μ543	Μ544	Μ545	Μ546	Μ547	Μ548	Μ549	Μ550	Μ551	Μ552	Μ553	Μ554	Μ555	Μ556	Μ557	Μ558	Μ559	Μ560	Μ561	Μ562	Μ563	Μ564	Μ565	Μ566	Μ567	Μ568	Μ569	Μ570	Μ571	Μ572	Μ573	Μ574	Μ575	Μ576	Μ577	Μ578	Μ579	Μ580	Μ581	Μ582	Μ583	Μ584	Μ585	Μ586	Μ587	Μ588	Μ589	Μ590	Μ591	Μ592	Μ593	Μ594	Μ595	Μ596	Μ597	Μ598	Μ599	Μ600	Μ601	Μ602	Μ603	Μ604	Μ605	Μ606	Μ607	Μ608	Μ609	Μ610	Μ611	Μ612	Μ613	Μ614	Μ615	Μ616	Μ617	Μ618	Μ619	Μ620	Μ621	Μ622	Μ623	Μ624	Μ625	Μ626	Μ627	Μ628	Μ629	Μ630	Μ631	Μ632	Μ633	Μ634	Μ635	Μ636	Μ637	Μ638	Μ639	Μ640	Μ641	Μ642	Μ643	Μ644	Μ645	Μ646	Μ647	Μ648	Μ649	Μ650	Μ651	Μ652	Μ653	Μ654	Μ655	Μ656	Μ657	Μ658	Μ659	Μ660	Μ661	Μ662	Μ663	Μ664	Μ665	Μ666	Μ667	Μ668	Μ669	Μ670	Μ671	Μ672	Μ673	Μ674	Μ675	Μ676	Μ677	Μ678	Μ679	Μ680	Μ681	Μ682	Μ683	Μ684	Μ685	Μ686	Μ687	Μ688	Μ689	Μ690	Μ691	Μ692	Μ693	Μ694	Μ695	Μ696	Μ697	Μ698	Μ699	Μ700	Μ701	Μ702	Μ703	Μ704	Μ705	Μ706	Μ707	Μ708	Μ709	Μ710	Μ711	Μ712	Μ713	Μ714	Μ715	Μ716	Μ717	Μ718	Μ719	Μ720	Μ721	Μ722	Μ723	Μ724	Μ725	Μ726	Μ727	Μ728	Μ729	Μ730	Μ731	Μ732	Μ733	Μ734	Μ735	Μ736	Μ737	Μ738	Μ739	Μ740	Μ741	Μ742	Μ743	Μ744	Μ745	Μ746	Μ747	Μ748	Μ749	Μ750	Μ751	Μ752	Μ753	Μ754	Μ755	Μ756	Μ757	Μ758	Μ759	Μ760	Μ761	Μ762	Μ763	Μ764	Μ765	Μ766	Μ767	Μ768	Μ769	Μ770	Μ771	Μ772	Μ773	Μ774	Μ775	Μ776	Μ777	Μ778	Μ779	Μ780	Μ781	Μ782	Μ783	Μ784	Μ785	Μ786	Μ787	Μ788	Μ789	Μ790	Μ791	Μ792	Μ793	Μ794	Μ795	Μ796	Μ797	Μ798	Μ799	Μ800	Μ801	Μ802	Μ803	Μ804	Μ805	Μ806	Μ807	Μ808	Μ809	Μ810	Μ811	Μ812	Μ813	Μ814	Μ815	Μ816	Μ817	Μ818	Μ819	Μ820	Μ821	Μ822	Μ823	Μ824	Μ825	Μ826	Μ827	Μ828	Μ829	Μ830	Μ831	Μ832	Μ833	Μ834	Μ835	Μ836	Μ837	Μ838	Μ839	Μ840	Μ841	Μ842	Μ843	Μ844	Μ845	Μ846	Μ847	Μ848	Μ849	Μ850	Μ851	Μ852	Μ853	Μ854	Μ855	Μ856	Μ857	Μ858	Μ859	Μ860	Μ861	Μ862	Μ863	Μ864	Μ865	Μ866	Μ867	Μ868	Μ869	Μ870	Μ871	Μ872	Μ873	Μ874	Μ875	Μ876	Μ877	Μ878	Μ879	Μ880	Μ881	Μ882	Μ883	Μ884	Μ885	Μ886	Μ887	Μ888	Μ889	Μ890	Μ891	Μ892	Μ893	Μ894	Μ895	Μ896	Μ897	Μ898	Μ899	Μ900	Μ901	Μ902	Μ903	Μ904	Μ905	Μ906	Μ907	Μ908	Μ909	Μ910	Μ911	Μ912	Μ913	Μ914	Μ915	Μ916	Μ917	Μ918	Μ919	Μ920	Μ921	Μ922	Μ923	Μ924	Μ925	Μ926	Μ927	Μ928	Μ929	Μ930	Μ931	Μ932	Μ933	Μ934	Μ935	Μ936	Μ937	Μ938	Μ939	Μ940	Μ941	Μ942	Μ943	Μ944	Μ945	Μ946	Μ947	Μ948	Μ949	Μ950	Μ951	Μ952	Μ953	Μ954	Μ955	Μ956	Μ957	Μ958	Μ959	Μ960	Μ961	Μ962	Μ963	Μ964	Μ965	Μ966	Μ967	Μ968	Μ969	Μ970	Μ971	Μ972	Μ973	Μ974	Μ975	Μ976	Μ977	Μ978	Μ979	Μ980	Μ981	Μ982	Μ983	Μ984	Μ985	Μ986	Μ987	Μ988	Μ989	Μ990	Μ991	Μ992	Μ993	Μ994	Μ995	Μ996	Μ997	Μ998	Μ999	Μ1000	Μ1001	Μ1002	Μ1003	Μ1004	Μ1005	Μ1006	Μ1007	Μ1008	Μ1009	Μ1010	Μ1011	Μ1012	Μ1013	Μ1014	Μ1015	Μ1016	Μ1017	Μ1018	Μ1019	Μ1020	Μ1021	Μ1022	Μ1023	Μ1024	Μ1025	Μ1026	Μ1027	Μ1028	Μ1029	Μ1030	Μ1031	Μ1032	Μ1033	Μ1034	Μ1035	Μ1036	Μ1037	Μ1038	Μ1039	Μ1040	Μ1041	Μ1042	Μ1043	Μ1044	Μ1045	Μ1046	Μ1047	Μ1048	Μ1049	Μ1050	Μ1051	Μ1052	Μ1053	Μ1054	Μ1055	Μ1056	Μ1057	Μ1058	Μ1059	Μ1060	Μ1061	Μ1062	Μ1063	Μ1064	Μ1065	Μ1066	Μ1067	Μ1068	Μ1069	Μ1070	Μ1071	Μ1072	Μ1073	Μ1074	Μ1075	Μ1076	Μ1077	Μ1078	Μ1079	Μ1080	Μ1081	Μ1082	Μ1083	Μ1084	Μ1085	Μ1086	Μ1087	Μ1088	Μ1089	Μ1090	Μ1091	Μ1092	Μ1093	Μ1094	Μ1095	Μ1096	Μ1097	Μ1098	Μ1099	Μ1100	Μ1101	Μ1102	Μ1103	Μ1104	Μ1105	Μ1106	Μ1107	Μ1108	Μ1109	Μ1110	Μ1111	Μ1112	Μ1113	Μ1114	Μ1115	Μ1116	Μ1117	Μ1118	Μ1119	Μ1120	Μ1121	Μ1122	Μ1123	Μ1124	Μ1125	Μ1126	Μ1127	Μ1128	Μ1129	Μ1130	Μ1131	Μ1132	Μ1133	Μ1134	Μ1135	Μ1136	Μ1137	Μ1138	Μ1139	Μ1140	Μ1141	Μ1142	Μ1143	Μ1144	Μ1145	Μ1146	Μ1147	Μ1148	Μ1149	Μ1150	Μ1151	Μ1152	Μ1153	Μ1154	Μ1155	Μ1156	Μ1157	Μ1158	Μ1159	Μ1160	Μ1161	Μ1162	Μ1163	Μ1164	Μ1165	Μ1166	Μ1167	Μ1168	Μ1169	Μ1170	Μ1171	Μ1172	Μ1173	Μ1174	Μ1175	Μ1176	Μ1177	Μ1178	Μ1179	Μ1180	Μ1181	Μ1182	Μ1183	Μ1184	Μ1185	Μ1186	Μ1187	Μ1188	Μ1189	Μ1190	Μ1191	Μ1192	Μ1193	Μ1194	Μ1195	Μ1196	Μ1197	Μ1198	Μ1199	Μ1200	Μ1201	Μ1202	Μ1203	Μ1204	Μ1205	Μ1206	Μ1207	Μ1208	Μ1209	Μ1210	Μ1211	Μ1212	Μ1213	Μ1214	Μ1215	Μ1216	Μ1217	Μ1218	Μ1219	Μ1220	Μ1221	Μ1222	Μ1223	Μ1224	Μ1225	Μ1226	Μ1227	Μ1228	Μ1229	Μ1230	Μ1231	Μ1232	Μ1233	Μ1234	Μ1235	Μ1236	Μ1237	Μ1238	Μ1239	Μ1240	Μ1241	Μ1242	Μ1243	Μ1244	Μ1245	Μ1246	Μ1247	Μ1248	Μ1249	Μ1250	Μ1251	Μ1252	Μ1253	Μ1254	Μ1255	Μ1256	Μ1257	Μ1258	Μ1259	Μ1260	Μ1261	Μ1262	Μ1263	Μ1264	Μ1265	Μ1266	Μ1267	Μ1268	Μ1269	Μ1270	Μ1271	Μ1272	Μ1273	Μ1274	Μ1275	Μ1276	Μ1277	Μ1278	Μ1279	Μ1280	Μ1281	Μ1282	Μ1283	Μ1284	Μ1285	Μ1286	Μ1287	Μ1288	Μ1289	Μ1290	Μ1291	Μ1292	Μ1293	Μ1294	Μ1295	Μ1296	Μ1297	Μ1298	Μ1299	Μ1300	Μ1301	Μ1302	Μ1303	Μ1304	Μ1305	Μ1306	Μ1307	Μ1308	Μ1309	Μ1310	Μ1311	Μ1312	Μ1313	Μ1314	Μ1315	Μ1316	Μ1317	Μ1318	Μ1319	Μ1320	Μ1321	Μ1322	Μ1323	Μ1324	Μ1325	Μ1326	Μ1327	Μ1328	Μ1329	Μ1330	Μ1331



Questions		Indications		Measures				Legislative		
		Air Transport		Information flow, ICT support		Decision and risk models				
				M3		M4		M5		
				M6		M7				
Q1: When should the measure be implemented	Within 1 year	7	2							
	In 2 years	1	6							
Q2: Time needed for the implementation	In 3 years	5	4							
	In 4 years	1								
Q3: Duration of the measure's impact	In > 5 years									
	<1 year	3	2							
	1-2 years	3	5							
	2-3 years	4								
Q4: Extent of the measure's potential	3-4 years	3	3							
	>5 years	3								
Q5: How well does the measure contribute to the protection of infrastructure	<1 year	1	2							
	1-2 years	1								
Q6: Confidence level	2-3 years	2	4							
	3-4 years	10	9							
Q7: Flow well does the measure contribute in the network	>5 years									
	Very High	1 (500k)	2 (1m)							
Q8: Extent of the measure's potential	High	1	4							
	Moderate	7	3							
Q9: Extent of the measure's potential	Low	1 (<1m)								
	Very Low	1	2							
Q10: Confidence level	Very High	1	2							
	High	4	4							
Q11: Confidence level	Moderate	1	3							
	Low	5	2							
Q12: Confidence level	Very Low	1	1							
	Very well	2	2							
Q13: Confidence level	Well	4	5							
	Moderate	5	5							
Q14: Confidence level	Badly	2	1							
	Very Badly	1	2							
Q15: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q16: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q17: How well does the measure contribute in the network	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q18: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q19: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q20: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q21: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q22: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q23: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q24: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q25: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q26: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q27: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q28: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q29: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q30: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q31: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q32: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q33: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q34: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q35: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q36: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q37: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q38: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q39: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q40: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q41: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q42: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q43: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q44: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q45: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q46: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q47: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q48: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q49: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q50: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q51: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q52: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q53: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q54: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q55: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q56: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q57: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q58: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q59: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q60: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q61: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q62: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q63: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q64: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q65: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q66: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q67: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q68: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q69: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q70: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q71: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q72: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q73: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q74: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q75: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q76: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q77: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q78: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q79: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q80: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q81: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q82: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q83: Confidence level	Very well	1	2							
	Well	6	6							
Q84: Confidence level	Moderate	4	5							
	Badly	2								
Q85: Confidence level	Very									