



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ
ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ
ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GIS ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟ
ΕΥΑΛΩΤΩΝ ΣΕ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ
«Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ»

ΜΟΥΣΑΔΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
Επιβλέπων: Ε. Μπαλάς, Καθηγητής

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ
ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Αθήνα, Ιούνιος 2018

Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διεπιστημονικού – Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Μετά την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν κατά τη διάρκεια εκπόνησής της.

Οφείλω αρχικά να ευχαριστήσω θερμά, τον Καθηγητή του Ε.Μ.Π, Διευθυντή του τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών και επιβλέποντα αυτής της εργασίας κ. Ευάγγελο Μπαλτά για την καθοδήγηση του από το αρχικό έως το τελικό της στάδιο. Επίσης ευχαριστώ τα άλλα δύο μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, κ. Νάνου Αικατερίνη, Επίκουρη Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και κ. Τσιχριντζή Βασίλειο, Καθηγητή της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την υποψήφια Διδάκτορα του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π, Φελώνη Ελισσάβετ, για τη βοήθειά της κατά την σύνταξη της εργασίας.

Ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω, στην Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, για την πολύτιμη βοήθειά τους στην έγκαιρη εύρεση των αναγκαίων χρονοσειρών βροχής και την άμεση ανταπόκρισή τους για τη διεκπεραίωση της παρούσας.

Επίσης ευχαριστώ τον Υποψήφιο Διδάκτορα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κ. Αλαμάνο Άγγελο για την πολύτιμη συνδρομή του στην αναζήτηση σχετικής βιβλιογραφίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Γιώργο και Ντία και τον αδερφό μου Μιχάλη για την υπομονή, τη στήριξή τους.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	iii
Περίληψη.....	vi
Extended abstract	vii
Introduction	vii
Study area	vii
Methodology.....	ix
Results and Discussion	xiii
Conclusions	xxi
Selected References.....	xxii
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Αντικείμενο και Σκοπός	2
1.3 Διάρθρωση τεύχους	3
2 Το ΥΔ Αττικής (EL 06) με έμφαση στο Λεκανοπέδιο Αττικής	4
2.1 Διοικητική διάρθρωση και Χωροταξία του Λεκανοπεδίου Αττικής	5
2.2 Γενικά Χαρακτηριστικά και Μορφολογία του Ανάγλυφου	5
2.3 Αστικοποίηση	6
2.4 Βροχομετρικά Δεδομένα ΥΔ Αττικής.....	7
2.5 Χρήσεις Γης.....	8
2.6 Καταγεγραμμένα πλημμυρικά επεισόδια.....	9
2.7 Ανάλυση Αιτίων - Μηχανισμών Πλημμύρας & Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου	14
3 Πλημμυρική επικινδυνότητα & ευάλωτες σε πλημμύρες περιοχές	17
3.1 Μεθοδολογίες Λήψης Απόφασης με τη χρήση Γλωσσικών Κλιμάκων, Αριθμοδεικτών και Ασαφούς Λογικής	19
3.1.1 Γλωσσικές Κλίμακες.....	19
3.1.2 Αριθμοδείκτες.....	20
3.1.3 Συστήματα Λήψης Απόφασης	21
3.1.4 Το πλαίσιο χρήσης Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic).....	22
3.2 Μεθοδολογία Πολυκριτηριακής Ανάλυσης σε περιβάλλον GIS.....	27
3.2.1 Η Μέθοδος Πολυκριτηριακής Ανάλυσης.....	29
3.2.2 Σταθμισμένος Γραμμικός Συνδυασμός (WLC)	30
3.2.3 Η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytical Hierarchy Process-AHP)	30
3.2.4 Η Ασαφής Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Fuzzy Analytical Hierarchy Process-FAHP)	32
3.2.5 Οι Τεχνικές ταξινόμησης.....	35
3.3 Ανάλυση Προβλήματος και Διαδικασία Επιλογής Κριτηρίων	36
3.3.1 Διαδικασία αξιολόγησης των αρχικά επιλεγμένων κριτηρίων	36
3.3.2 Το υψόμετρο (Digital Elevation Model – DEM).....	39
3.3.3 Η Κλίση (Slope - S).....	41
3.3.4 Η Κρίσιμη Πλευρά (critical Aspect – critical A.).....	42
3.3.5 Η Οριζόντια Απόσταση Χερσαίας Ροής (Horizontal Overland Flow Distance - HOFD)	45

3.3.6	Η Κάθετη Απόσταση από Δίκτυο Καναλιών (Vertical Distance of Channel Network-VDCN)	47
3.3.7	Ο δείκτης καμπυλότητας περιοχής (Curvature - C), Η ταξινόμηση με βάση την καμπυλότητα της περιοχής (Curvature Classification - CC) και Ο πολλαπλής κλίμακας δείκτης τοπογραφικής θέσης (multi-scale Topographic Position Index - mTPI).....	48
3.3.8	Ο saga δείκτης τοπογραφικής υγρασίας (saga Topographic Wetness Index - sTWI).....	52
3.3.9	Ο σύνθετος δείκτης υδρολογικών απωλειών βροχής της μεθόδου SCS (composite Curve Number – compCN)	54
3.3.10	Ο ημερήσια τροποποιημένος δείκτης Fournier (daily Modified Index – dMFI).	57
4	Αποτελέσματα και Συζήτηση	59
4.1	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Μεθόδων Στάθμισης	60
4.2	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων σχετικών με τα Κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν.....	62
4.3	Κατάρτιση Χαρτών ευάλωτων σε πλημμύρες περιοχών	65
4.4	Αξιολόγηση Μεθόδων με βάση Ιστορικά Στοιχεία Πλημμυρών	72
5	Συμπεράσματα & Μελλοντική Έρευνα.....	74
5.1	Σύνοψη	74
5.1	Συμπεράσματα	74
5.2	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	77
6	Βιβλιογραφικές Αναφορές	78
6.1	Ξενόγλωσσες	78
6.2	Ελληνικές	81
6.3	Διαδικτυακοί τόποι	81

Περίληψη

Η μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο «Ανάπτυξη και εφαρμογή ολοκληρωμένης μεθοδολογίας σε περιβάλλον GIS για τον καθορισμό ευάλωτων σε πλημμύρες περιοχών – Η περίπτωση της Αττικής» έχει ως στόχο αφενός να παρουσιάσει μία απλή τροποποιητική εφαρμογή της υπάρχουσας μεθοδολογίας για την ανάδειξη των ευάλωτων σε πλημμύρες περιοχών, και αφετέρου να εισάγει μία νέα βελτιωμένη και ολοκληρωμένη μεθοδολογική πρόταση για το συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής.

Ως μελέτη περίπτωσης επιλέχθηκε η περιοχή της Αττικής δεδομένου ότι το Υδατικό Διαμέρισμα της Αττικής παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στην οικονομική δραστηριότητα της Ελλάδας. Ακόμη, είναι το πιο πυκνοκατοικημένο και σε αυτό βρίσκεται η πρωτεύουσα της χώρας. Ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας για την επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής μελέτης είναι το γεγονός ότι η εν λόγω περιοχή κατά καιρούς καταπονείται από έντονες ξαφνικές βροχοπτώσεις, που δοκιμάζουν τη φέρουσα ικανότητα του υδρογραφικού δικτύου και αποτελούν αίτιο εμφάνισης πλημμυρικών φαινομένων σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η ανθρώπινη δραστηριότητα και η αστικοποίηση επιδρούν καταλυτικά στην εμφάνιση ολοένα και σφοδρότερων φαινομένων πλημμύρας διότι μειώνουν τις υδρολογικές απώλειες και το χρόνο συρροής των λεκανών απορροής.

Στο πλαίσιο υλοποίησης της εργασίας, αρχικά, εξετάζεται η ανάπτυξη και η εφαρμογή μίας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας πολυκριτηριακής ανάλυσης σε περιβάλλον GIS για τον καθορισμό περιοχών ευάλωτων σε πλημμύρες. Ακολούθως παρουσιάζεται και αναπτύσσεται όλο το γνωστό, αναγκαίο και ικανό θεωρητικό και πρακτικό υπόβαθρο. Εν συνεχεία το υπόψη πλαίσιο εφαρμόζεται, σε περιβάλλον SAGA 6.3.0 και ArcMap 10.2, στο ΥΔ Αττικής και δοκιμάζεται μία σειρά εναλλακτικών τροποποιήσεων. Τέλος, αναλύονται όλα τα προκύπτοντα αποτελέσματα των εφαρμοσθέντων τροποποιήσεων που δοκιμάστηκαν και καταληκτικά από τη σύνθεση των βελτιώσεων διαμορφώνεται το νέο – προτεινόμενο πλαίσιο.

Λέξεις κλειδιά: Αττική, πλημμύρες, πολυκριτηριακή ανάλυση, GIS, ασαφή σύνολα

Extended abstract

Introduction

Attica's region River Basin District plays a very important role in the economic activity of Greece, as more than 50% of country's population dwells, works and bestirs itself in it. The area is occasionally suffers from intense sudden rainfall, with west-southwest origin, which test the channel bearing capacity of the drainage network and are the cause of floods. Finally, human activity and urbanization have a catalytic effect on the occurrence of severe floods as they reduce the water loss and the concentration time of the basin.

The purpose of this MSc thesis is to develop and implement an integrated multicriteria analysis methodology in a GIS environment for the identification of flood-prone areas. The methodology used in the present study is based on the methodology suggested by Papaioannou et al. (2015), and it is an important issue as it is one of the main objectives of the EU Flood Directive (2007/60/EC). However, the whole process was under investigation and all the necessary theoretical and practical background was developed. Thus, initially the method was applied to the fully urbanized territory of the Attica Basin, and then modifications were proposed and tested both in the theoretical part of the method and in the tools for the construction of the criteria used practically. Finally, all the results of the modifications that have been tested are presented and a new methodological framework is outlined with some improvements. Consequently, this study does not only present a simple modified application of this methodology in the study area, but also a new improved and integrated methodological approach.

Study area

The Attica's region River Basin District corresponds to an area of 3186 km² and consists mainly of the part of the Attica Region, Aegina, Salamina and Makronisos, and a small part of the regions of Sterea Ellada and the Peloponnese. It is noted that in the study area, as shown in Figure 1, only the continental part of the Attica's region River Basin District will be examined.

The climate of the study area is characterized as Mediterranean with the exception of the mountainous parts, where the climate is mountainous. The average annual rainfall is 411mm and ranges from 350mm (in the Attica Basin) to 1000mm (in the mountainous areas and mainly in Parnitha). The average annual temperature varies from 16 ° C to 18 ° C, depending on altitude and distance from the sea.

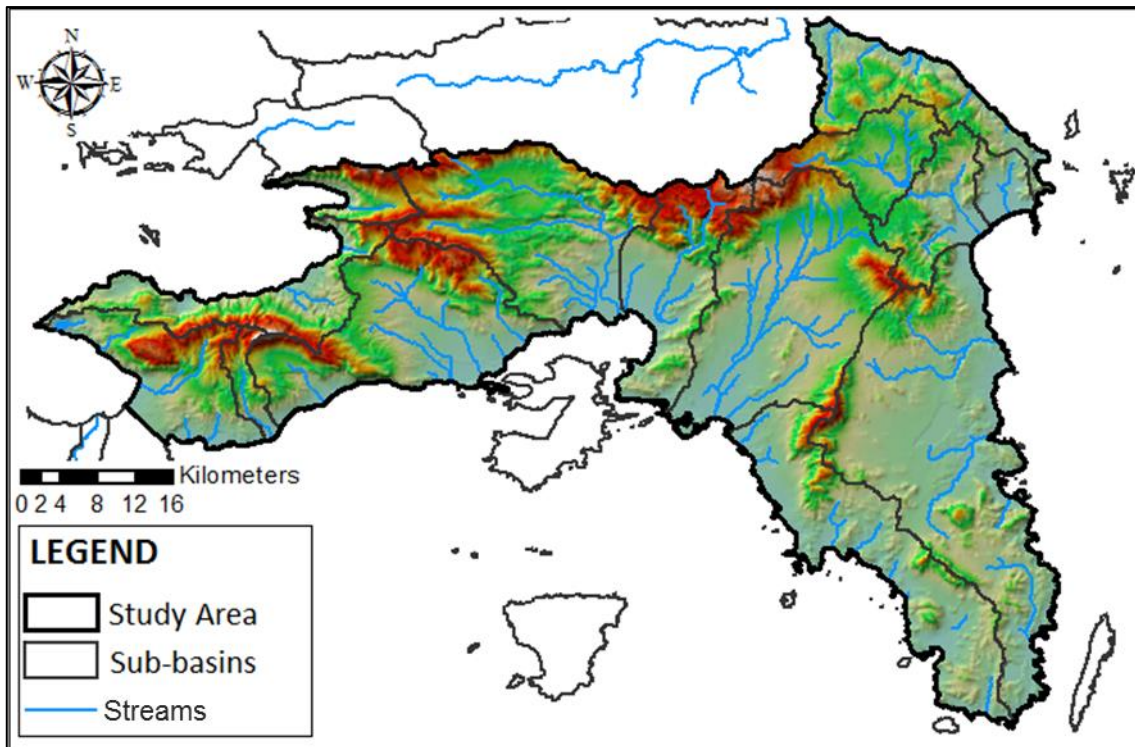


Figure 1 Study area

In the entire procedure, rainfall time series were used from the rainfall stations in the study area, provided by the Hellenic National Meteorological Service (HNMS). Table 1 shows the Maximum Monthly Precipitation for the month that gives the highest cumulative rainfall in the fewest days.

Table 1 Rainfall data timeseries

Station Name	Timeseries Length	Years	Maximum Monthly Rainfall (mm)	Record
MARATHONAS	1986-2003	17	103,8	Nov-86
NEA PHOLADELFA	1981-2010	29	163,6	Mar-98
TATOI (DEKELIA)	1981-2017	36	185,1	Jan-85
ELLINIKO	1981-2017	36	205,3	Mar-98
PIREAS	1981-2010	29	109,9	Nov-04
ELEFSINA	1981-2017	36	101,2	Oct-89
SPATA (AIRPORT)	1981-2017	36	127,6	Nov-82
The data is for the period 1981 to date or until the year of shutdown for those stations that have shut down.				
Data deficiencies at SPATA Station for the period 1998-2001 due to airport transfer operations.				
Lack of data at the ELLINIKO station from November 2013 to November 2014 due to its transfer to the Central Service Building, distance about 1000 meters.				

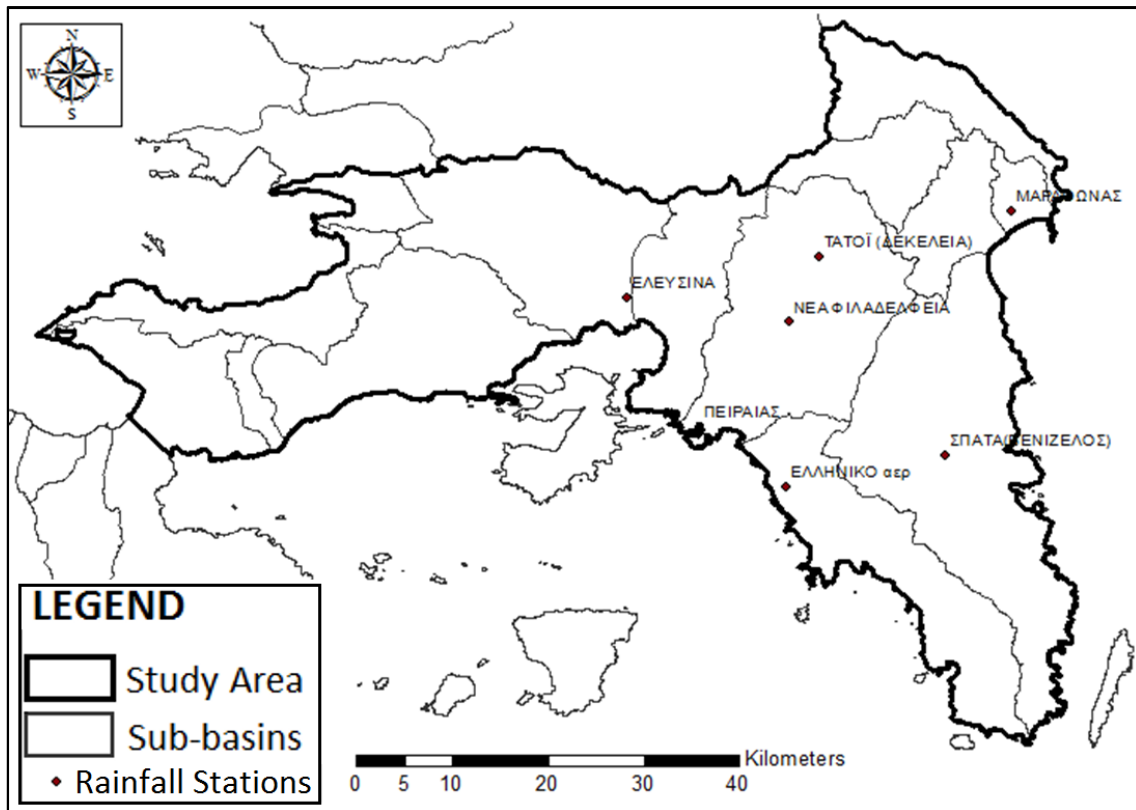


Figure 2 HNMS's Rainfall Station Network in the study area.

The Corine Land Cover Map (CLC) is mainly produced with a visual interpretation of satellite imagery of the European Space Agency's high resolution satellite imagery. Subsequently, following modifications by the competent authorities of each State participating in the program (For Greece, NATIONAL CADASTRE & MAPPING AGENCY S.A.) land cover maps are converted into land use maps. Figure 3 shows the land use categories of the study area.

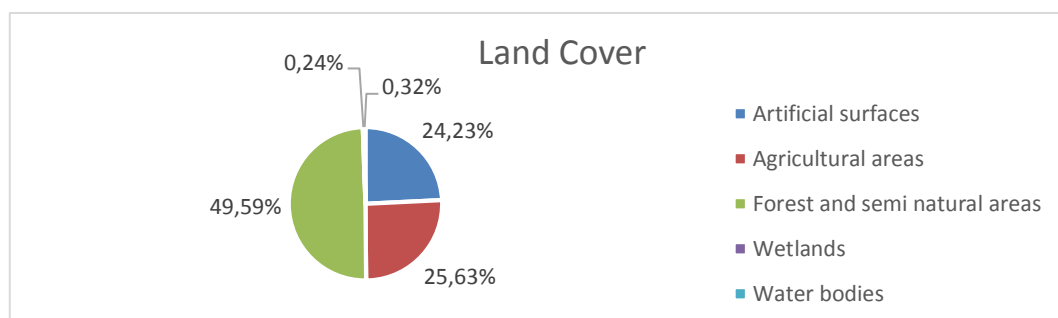


Figure 3 Land cover types distribution for Attiki

Methodology

Figure 4 shows the process of the multi-criteria analysis application. In general, two different approaches are proposed to convert all criteria into a common scale, the normalization (analysis α) and the classification (analysis β). To approximate the objective function of the multi-criteria analysis, the assumption of the weighted linear combination (WLC) is made. Finally, two weighting methods are applied and are referred to as (γ) "Analytical Hierarchy Process-AHP" and as (δ) "Fuzzy Analytical Hierarchy Process-FAHP".

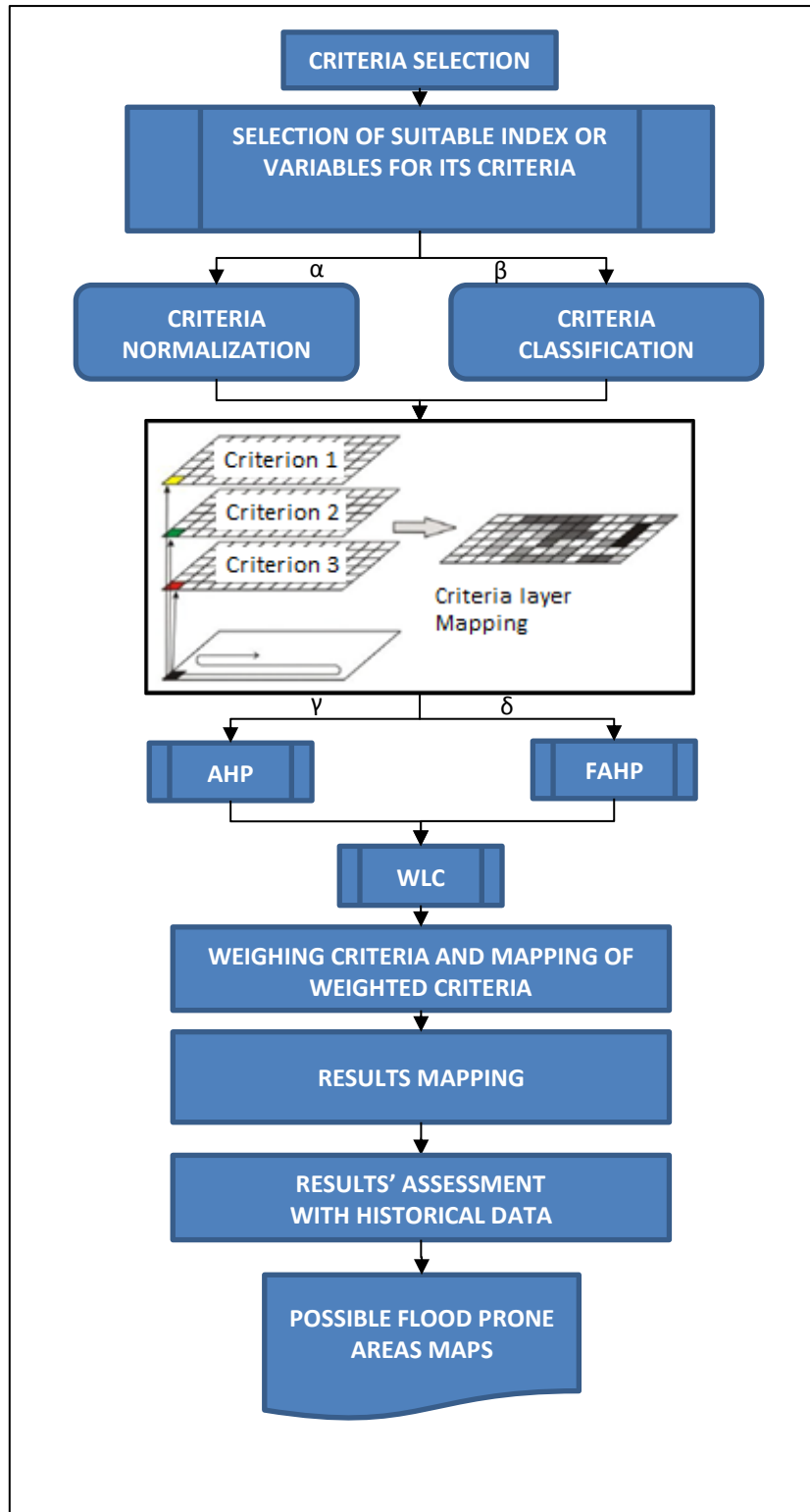


Figure 4 Process Flow Diagram

In the present study, the extended FAHP method (Chang, 1996) was applied. This method uses triangular fuzzy set of numbers, matching them to Saaty's crisp set of numbers and linguistic scale (Saaty, 1980). Here the transformed linguistic scale of significance is used in triangular fuzzy numbers (TFN), as shown in Tables 2 (α) and (β). The correspondence of Tables 2 (a) and

(b) is directly used, converting the crisp set of Pairwise Comparison Tables produced in the AHP process into TFN ones.

Table 2 Linguistic scale of significance convert

(α)	FAHP scale	
	Linguistic Scale	TFN scale
Equally Important	(1,1,1)	(1,1,1)
Intermediate 1	(1,2,3)	(1/3,1/2,1)
Moderately Important	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)
Intermediate 2	(3,4,5)	(1/5,1/4,1/3)
Important	(4,5,6)	(1/6,1/5,1/4)
Intermediate 3	(5,6,7)	(1/7,1/6,1/5)
Very Important	(6,7,8)	(1/8,1/7,1/6)
Intermediate 4	(7,8,9)	(1/9,1/8,1/7)
Absolutely Important	(9,9,9)	(1/9,1/9,1/9)

(Source: Zhou, 2012)

(β)	FAHP scale	
	Linguistic Scale	TFN scale
Equally Important	(1,1,1)	(1,1,1)
Intermediate 1	(1,1,3)	(1/3,1,1)
Moderately Important	(1,3,5)	(1/5,1/3,1)
Intermediate 2	(1,3,5)	(1/5,1/3,1/5)
Important	(3,5,7)	(1/7,1/5,1/3)
Intermediate 3	(3,5,7)	(1/7,1/5,1/3)
Very Important	(5,7,9)	(1/9,1/5,1/7)
Intermediate 4	(7,9,9)	(1/9,1/9,1/7)
Absolutely Important	(9,9,9)	(1/9,1/9,1/9)

(Source: Junior et al., 2014 with changes)

Table 3 summarizes the criteria that were produced and their value range of relevant importance by category as they emerged in their analysis.

After the creation of the criteria in GIS environment, two main scenarios were created and also their combination. The first main scenario focuses on rainfall intensity and general land morphology, while the second scenario mainly focuses on the drainage channel network. Finally, the combination of the two aforementioned scenarios is estimated to be closer to reality. The scenarios were recorded in AHP pairwise comparison tables in MS Excel. All processing of the weighting scenarios was done in the MS Excel environment.

Initially, 3 AHP weighting vectors were created, one for each scenario, called ahp1 ahp2 and GROUP_ahp. Then two FAHP vectors were created according to Table 2 (α), called fahp1(1) and fahp1(2), and two other vectors according to Table 2 (β) called fahp2(1) and fahp2(2), one for each master scenario. Finally, 1 FAHP vector was created to cover the gap between the 2 main scenarios, called GROUP_fahp. The above are also shown in the following flowchart (Figure 4). The weighted vectors produced are shown in Table 4. It is noted that the name type such as “xxx_K” are derived from the criteria classification by K-mean method (Figure 5).

Table 3 Criteria Summary

	CRITERION	TOOL	APPLICATION	VALUES BEFORE STANDIZATION OR CLASSIFICATION	STANDARDI ZE VALUES	CENTROIDS K-MEAN METHOD
1.	Digital Elevation Model – DEM		ARCMAP 10.2	[0 , 1408,31]	[0 , 1]	1 868,79
						2 576,27
						3 370,75
						4 202,88
						5 60,34
2.	Slope - S	Slope	ARCMAP 10.2	[0 , 15731,3]	[0 , 1]	1 11.911,30
						2 2.160,41
						3 65,86
						4 32,70
						5 7,81
3.	critical Aspect – critical A	Apect	ARCMAP 10.2	North (337,5 , 22,5)	0,4	1 27,34
				Northeast (22,5 , 67,5)	0,2	
				East (67,5 , 112,5)	0,2	2 105,32
				Southeast (112,5 , 157,5)	0,2	
				South (157,5 , 202,5)	0,4	3 174,37
				Southwest (202,5 , 247,5)	1	
				West (247,5 , 292,5)	0,8	4 321,49
				Northwest (292,5 , 337,5)	0,6	
				Plane -1	0,5	5 242,79
4.	Horizontal Overland Flow Distance - HOFD	Overland Flow Distance to Channel Network	SAGA 6.3.0	[0 , 2387,71]	[0 , 1]	1 721,42
						2 407,81
						3 247,79
						4 136,62
						5 43,07
5.	Vertical Distance of Channel Network-VDCN	Vertical Distance of Channel Network	SAGA 6.3.0	[0 , 323,55]	[0 , 1]	1 102,50
						2 59,11
						3 33,42
						4 15,32
						5 1,90
6.(α)	Curvature - C	Curvature	ARCMAP 10.2	[-2065 , 2060,15]	[0 , 1]	-
6.(β)	Curvature Classification - CC	Curvature Classification	SAGA 6.3.0	0 (convex/convex)	0	-
				1 (plane/convex)	0,125	
				2 (concave/convex)	0,25	
				3 (convex/plane)	0,375	
				4 (plane/plane)	0,5	
				5 (concave/plane)	0,625	
				6 (convex/concave)	0,75	
				7 (επιτεδη/concave)	0,875	
8 (concave/concave)	1					
6.(γ)	multi-scale Topographic Position Index - Mtpi	Multi-Scale Topographic Position Index	SAGA 6.3.0	[-90,21 , 90]	[0 , 1]	1 42,48
						2 0,61
						3 -0,01
						4 -0,88
						5 -16,79
7.	saga Topographic Wetness Index - sTWI	Saga Wetness Index	SAGA 6.3.0	[-6,5 , 14,37]	[0 , 1]	1 2,32
						2 3,64
						3 5,58
						4 7,95
						5 11,41
8.	composite Curve Number – compCN (SCS Method)		ARCMAP 10.2	[77 , 99]	[0 , 1]	1 77
						2 78,46
						3 80,29
						4 89,4
						5 97,75
9.	daily Modified Fournier Index – dMFI		ARCMAP 10.2	[66,19 , 106,81]	[0 , 1]	1 73,35
						2 79,17
						3 83,06
						4 89,12
						5 95,9

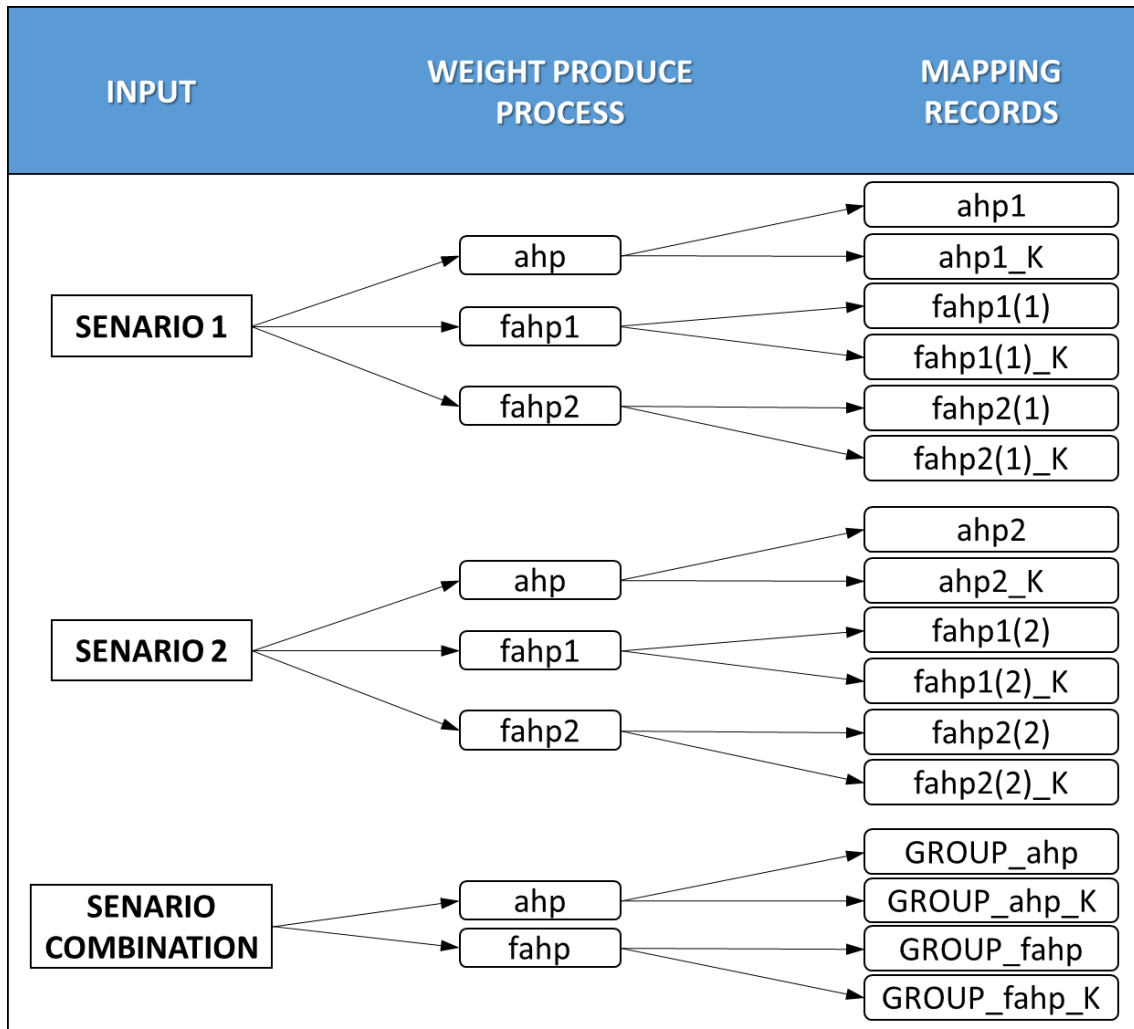


Figure 5 Result flowchart & Mapping records

Table 4 Vectors of criteria weights

	DEM	SLOPE	critical ASPECT	HOFD	VDCN	Land Morphology	sTWI	compCN	dMFI
ahp1	0,02	0,03	0,04	0,08	0,08	0,18	0,16	0,18	0,23
ahp2	0,03	0,08	0,02	0,05	0,17	0,14	0,36	0,11	0,04
GROUP_ahp	0,02	0,04	0,07	0,06	0,11	0,16	0,23	0,16	0,15
fahp1(1)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,18	0,25	0,33
fahp2(1)	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,25	0,18	0,25	0,30
GROUP_fahp	0,00	0,07	0,00	0,05	0,14	0,17	0,22	0,18	0,16
fahp1(2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,50	0,39	0,00
fahp2(2)	0,00	0,02	0,00	0,00	0,20	0,17	0,46	0,15	0,00

Results and Discussion

The Curvature and Curvature Classification criteria are a graphical representation of the same size, except that the first is of constant value, while the second one has distinct and is a special classification of the first. After these two criteria were normalized, the result appears to follow the same general pattern (maps of Figures 6 and 7). Curvature classification seems to give more precision as a criterion. But as to the result, it generates great “noise” in the final result. Indicative in support of the above are Figures 6 and 7 produced by the GROUP_fahp process

for the Curvature and Curvature Classification criteria, respectively. In particular, the results of Figure 6 appear to be better grouped, as the color combination of the areas of Figure 7 can give similar limits to the categories in Figure 6. For the breakdown by criterion classification, these criteria were not used as their impact would be negligible in the study area. Thus, the multi-scale Topographic Position Index was used, which was not used in the normalized analysis as it takes too long to calculate it.

By contrasting Figures 8 and 9, which are AHP method products for normalized criteria, it appears that "Scenario 1" lacks altitude information, and "Scenario 2" does not. Finally, both scenarios have equally low weights on the altitude criterion for the AHP method, while for the FAHP method the altitude criterion is assigned zero factor's weight. The VDCN, sTWI and HOFD criteria give clear indications of flood-prone areas. In particular, sTWI if properly classified can give a first estimate for a region. In addition, the investigation of the criteria revealed that the VDCN appears to hold altitude data in conjunction with flow direction and distance ratio data, the sTWI has slope and position data (upstream - downstream) while the HOFD gives information about the horizontal component of the flow.

As shown in Figure 8, the distribution of dMFI does not yield satisfactory results. This problem arises because, as shown in Figure 10, there is a shortage of primary data in locations west of Elefsina station.

The results generated for each scenario by the AHP and FAHP methods appear to be similar. For example, if the maps ahp1, fahp1 (1) and fahp2 (1) (Figures 8, 11 and 12 respectively) of scenario 1 compare, it seems that the siting of the hazard zones is similar. Moreover, the FAHP method adapts to the model the concept of uncertainty.

The proposed Fuzzification methodology (fahp2 process, Table 2 (β)) yields results closer to the outputs of the AHP process than those produced by the fahp1 process (Table 2 (α)). That is, the fahp2 maps (Figure 12 and 15) are more similar to ahp1 (Figure 8), ahp2 (Figure 9) than fahp1 (Figure 11 and 14) respectively.

For the combination of the two main scenarios, the GROUP_ahp process is an average approach, while the GROUP_fahp process uses the fuzzy logic tools.

The FAHP methodology seems to focus more on the criteria that are responsible for the end result (Table 4) as the final results are very close to the corresponding results produced by the AHP method. In addition, using the FAHP methodology, it seems that the multi-criterion is simplified, since the weightings of the criteria that are not responsible for the final result are also zero. Thus, the necessary waiting time for the overall processing of the criteria (CPU Time savings) is reduced, converging more rapidly into similar results to AHP.

Comparing, for example, the maps ahp2, fahp1 (2) and fahp2 (2) (Figures 9, 14 and 15 respectively) of scenario 2, one observes that with the FAHP method the map data has better grouping in the boundaries of color regions, better imaging.

It is emphasized that using classification methods directly to the criteria instead of normalization requires minimal memory to display, process and store the criteria of each cell

which leads to less complexity of calculations and consequently to minimization of the required processing time and requirements of the type of technical specifications of the machine computer used to compile flood-vulnerable maps. Characteristics for the compilation of maps with criteria that the implementation time was halved.

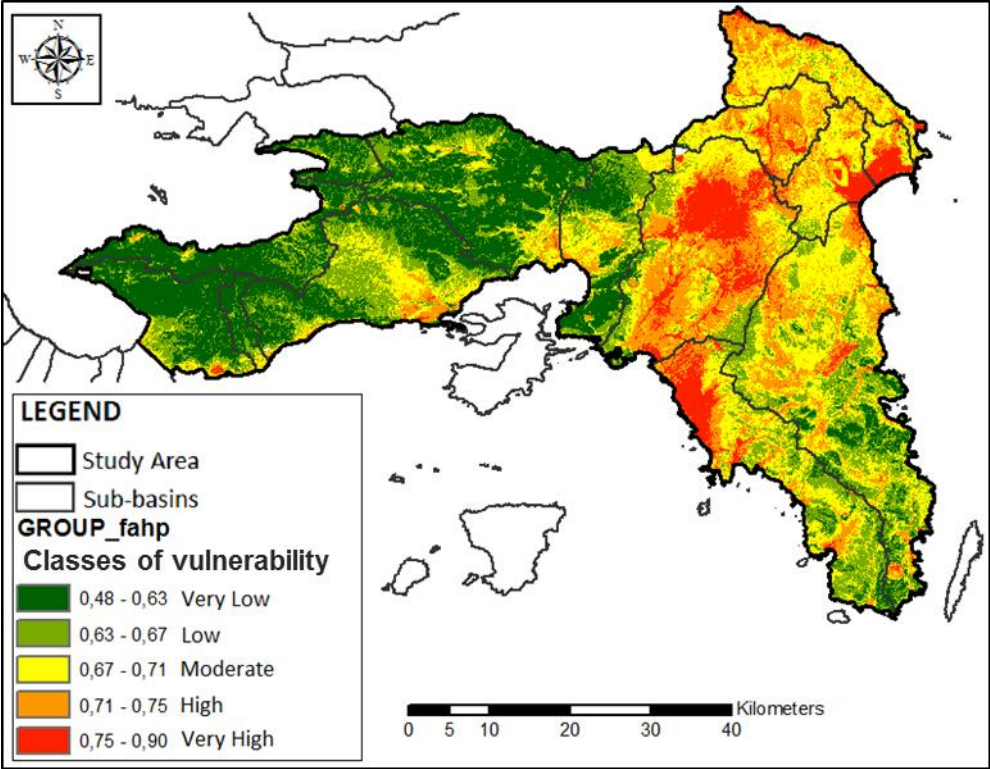


Figure 6 Flood Prone Areas Map, GROUP_fahp

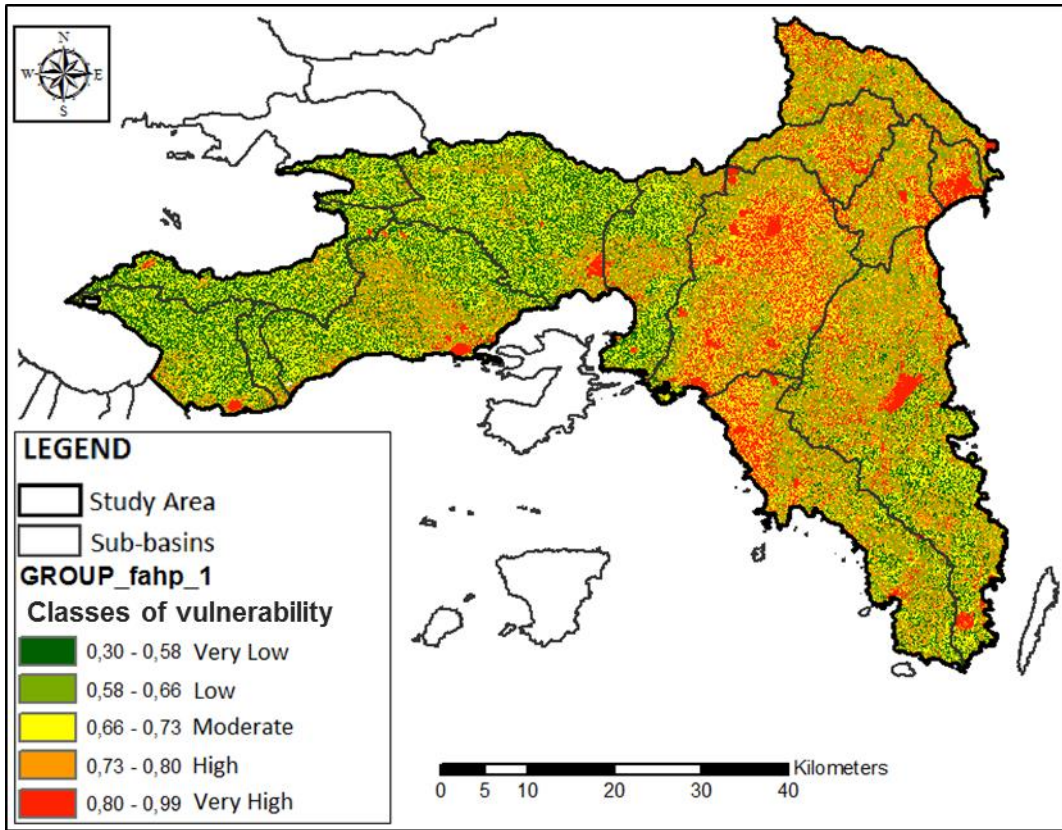


Figure 7 Flood Prone Areas Map, GROUP_fahp_1

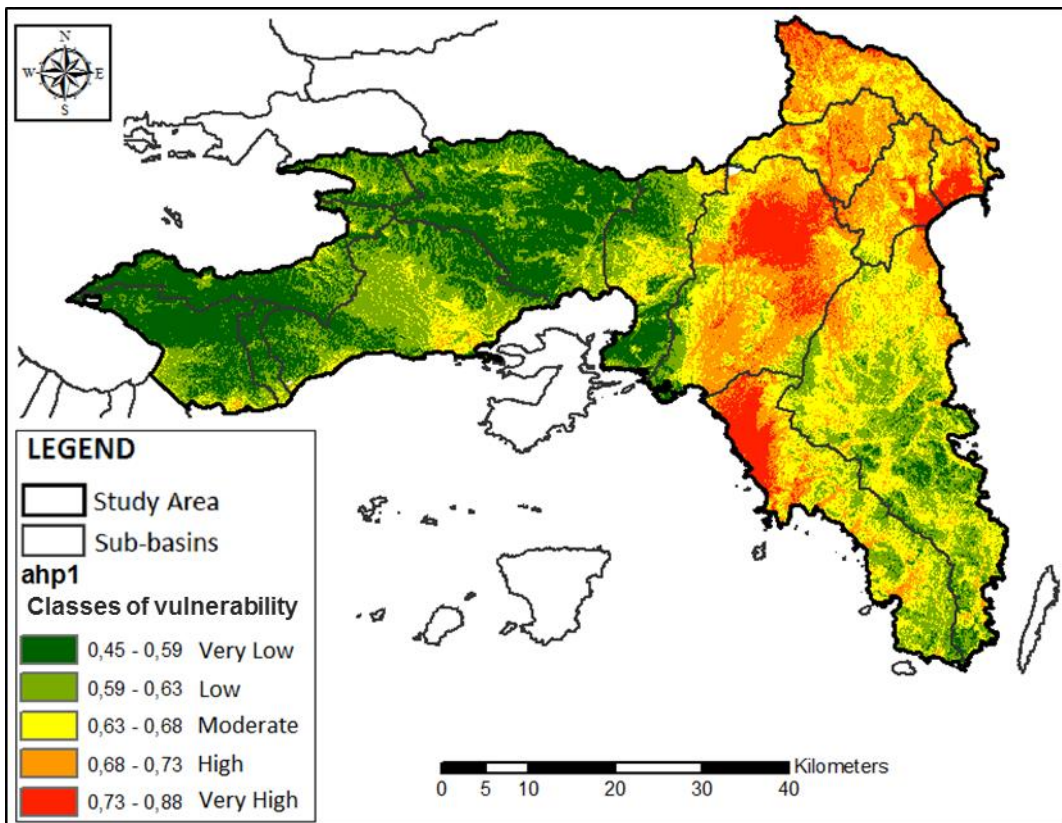


Figure 8 Flood Prone Areas Map, ahp1

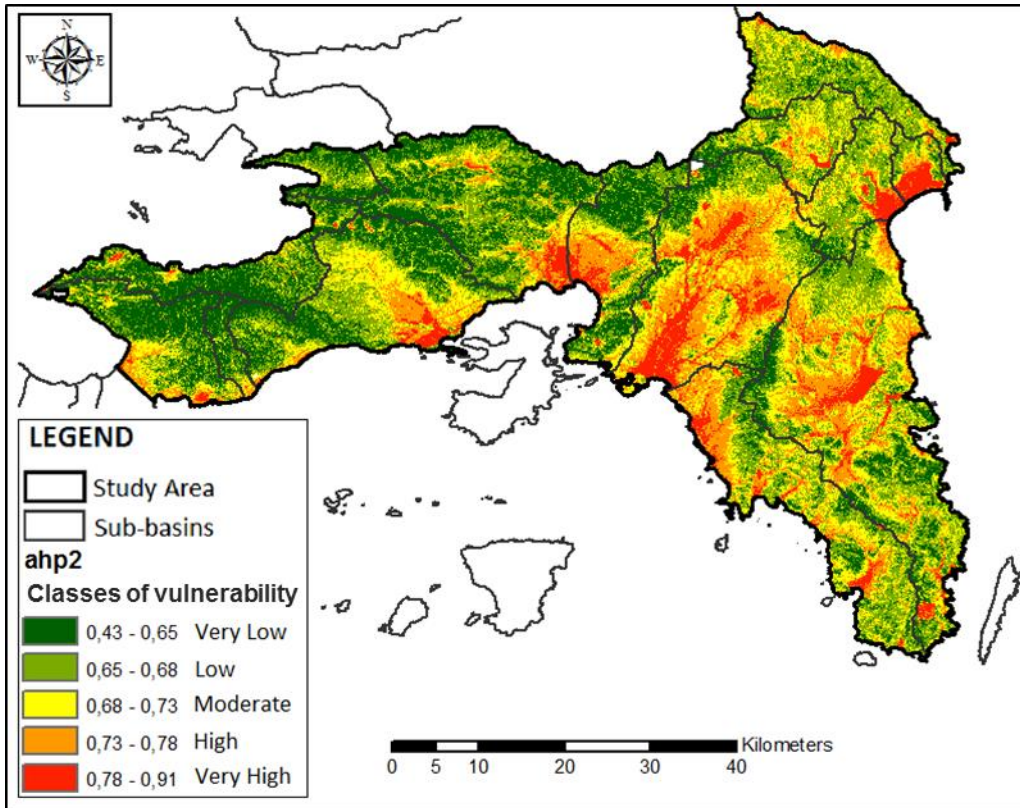


Figure 9 Flood Prone Areas Map, fahp2

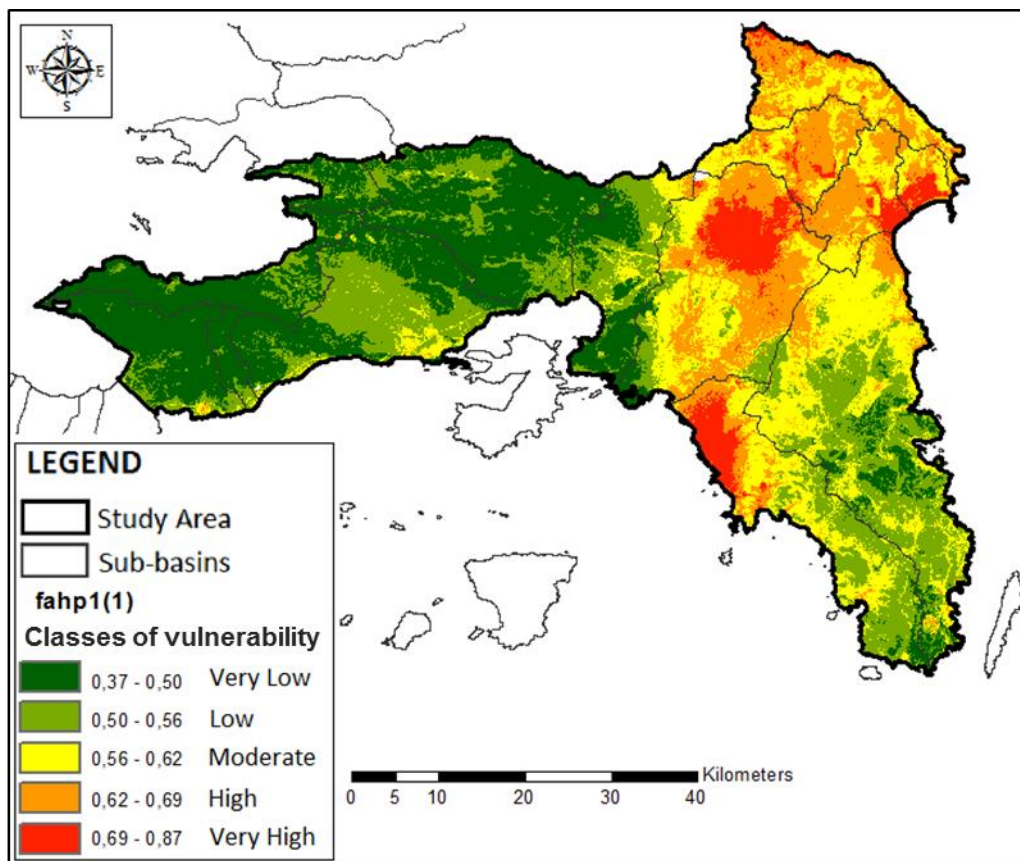


Figure 10 Flood Prone Areas Map, fahp1(1)

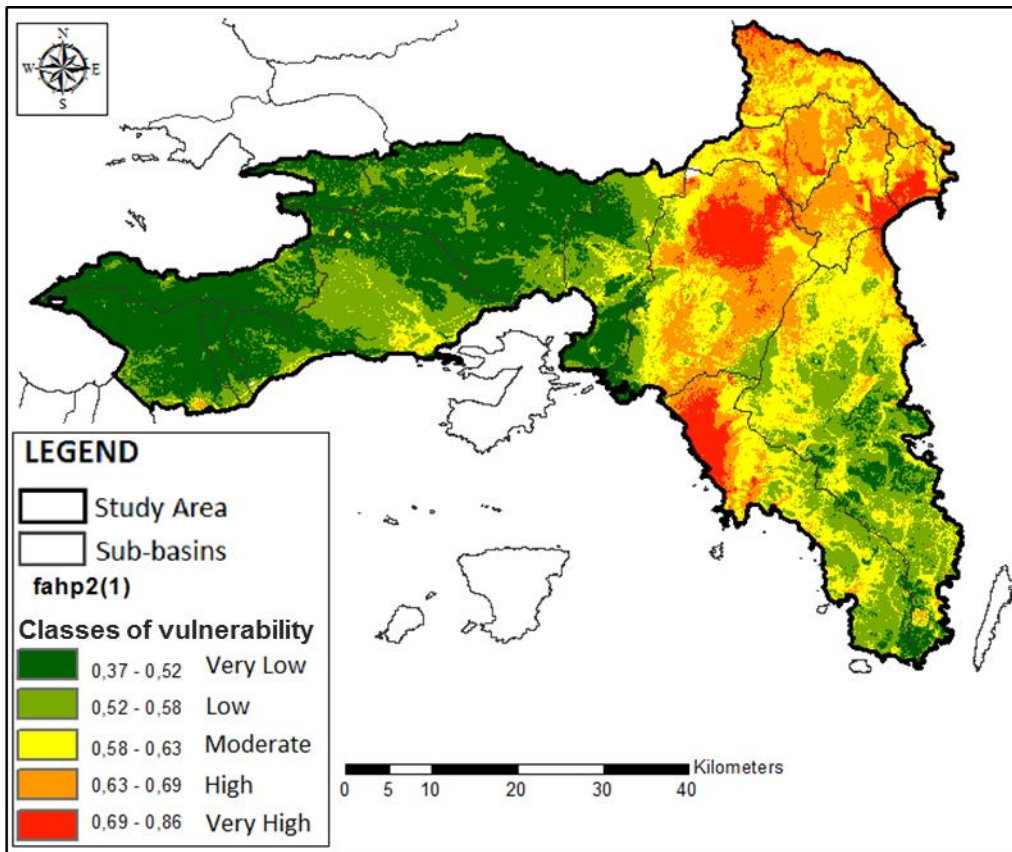


Figure 11 Flood Prone Areas Map, fahp2(1)

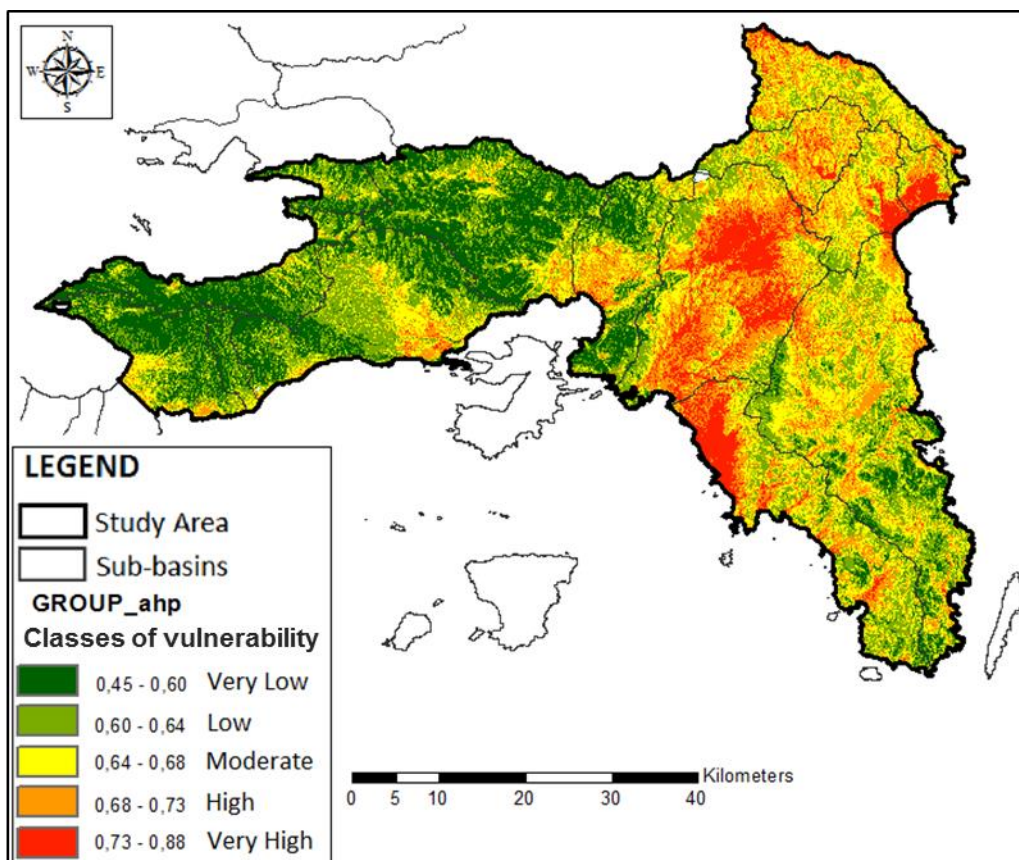


Figure 12 Flood Prone Areas Map, GROUP_ahp

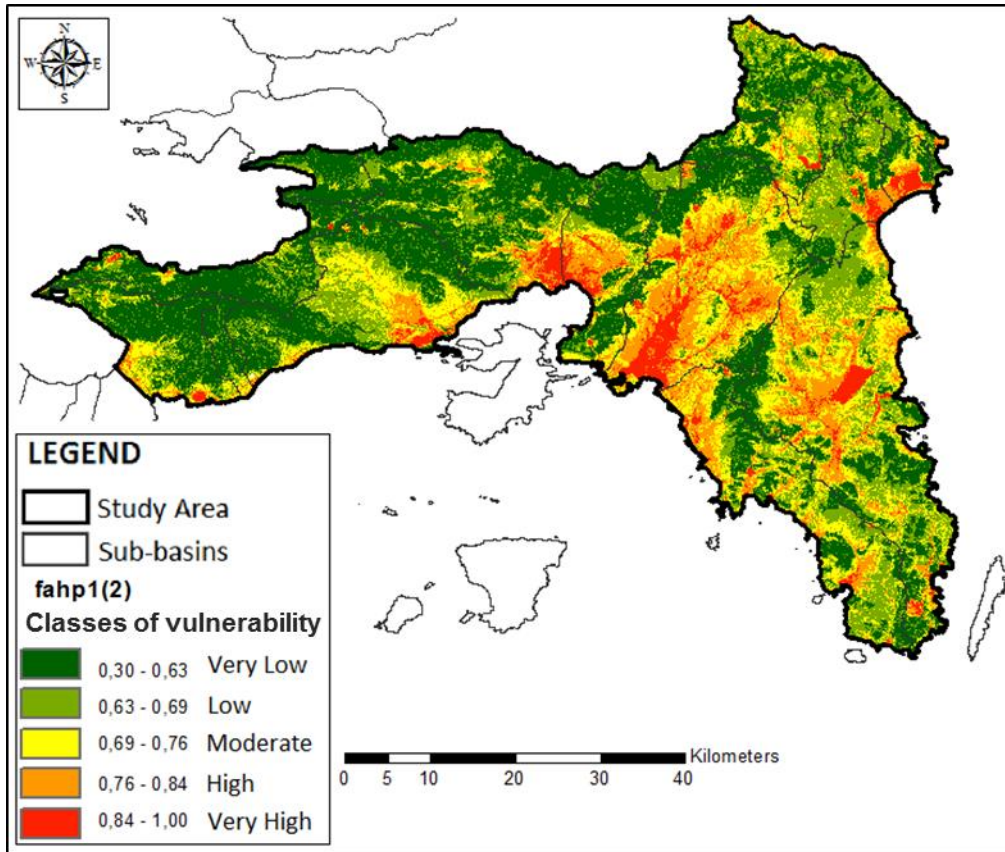


Figure 13 Flood Prone Areas Map, fahp1(2)

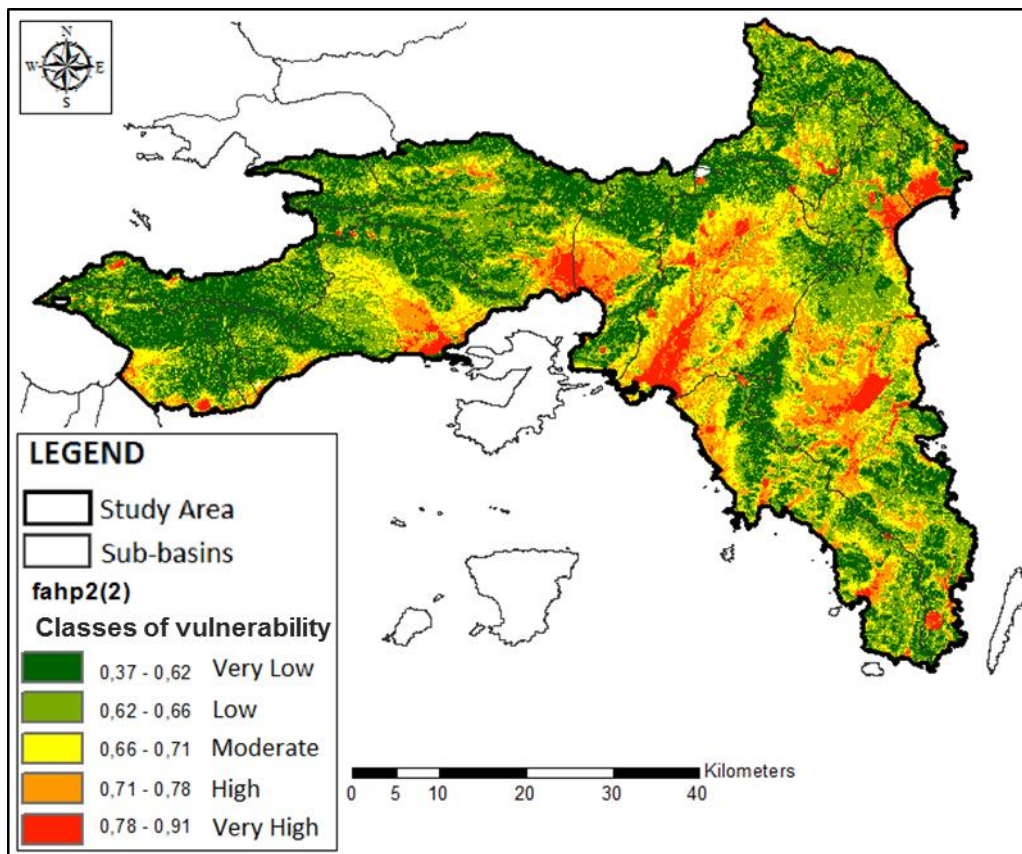


Figure 14 Flood Prone Areas Map, fahp2(2)

Summarizing the above mentioned, it seems that the map GROUP_fahp_K (Figure 15) is selected in order to be evaluated on the basis of the historical flood data provided by the MIE freely available on the Internet. This suggestion is based on the fact that the map is derived from the combination of two main scenarios and from an algorithmic process that bridges the two scenarios using the basic principles of fuzzy logic. In addition, it is a quick process relative to GROUP_fahp. From Figure 15 it appears that all High Flood Risk Areas have been described by the proposed procedure under the categories "Great" and "Very Large" and in addition, other equally vulnerable areas have been identified within which the recorded floods are outside the limits of the zones. Figure 16 shows the areas of potentially high flood risk and the Municipalities according to "Kallikratis administrative structure" to underline ehre these areas are located in.

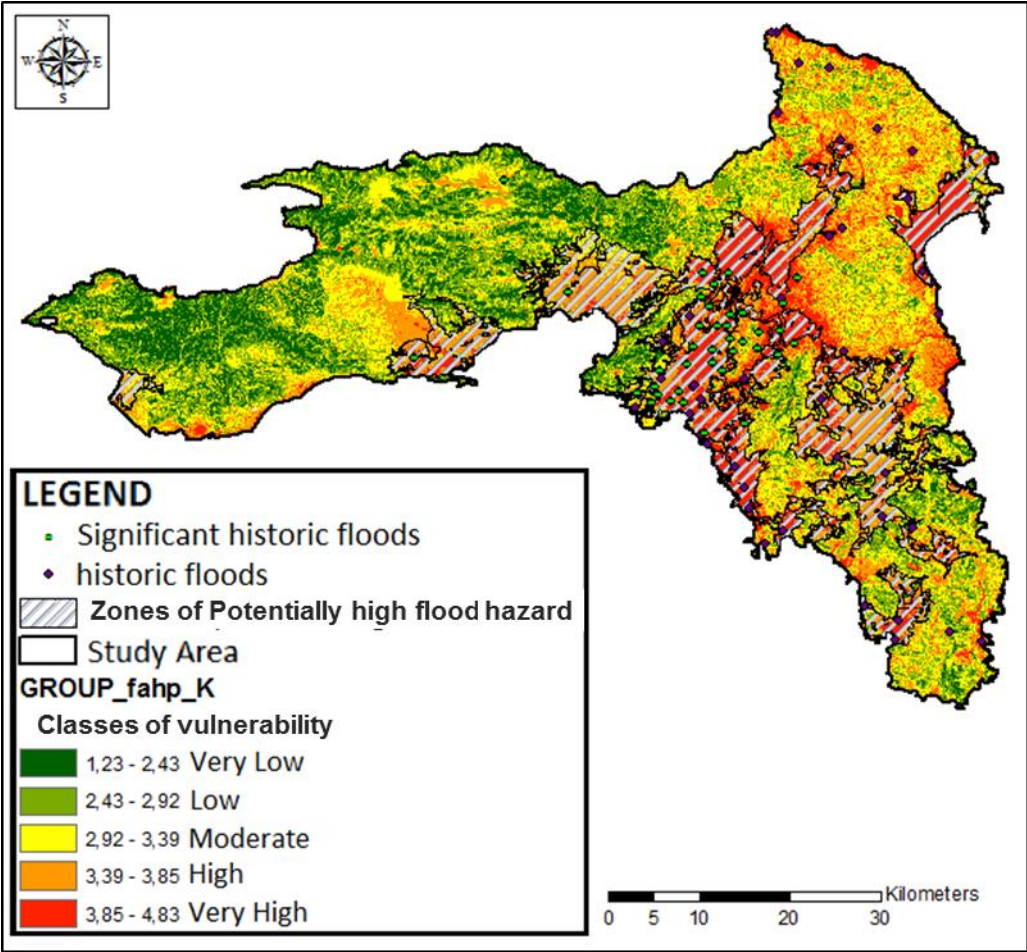


Figure 15 Announced and Calculated Flood prone areas Maps, GROUP_fahp_K areas

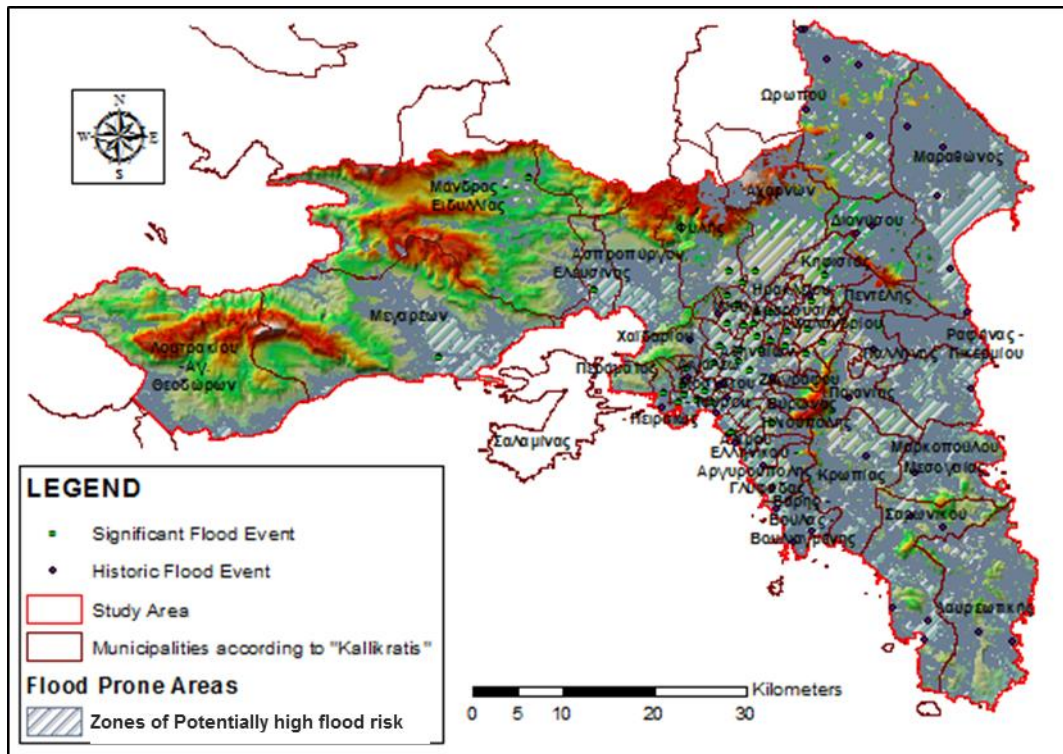


Figure 16 Map of potentially high flood hazard areas according to GROUP_fahp_K

Conclusions

In the present study, a GIS-based multi-criteria analysis was used. The purpose of applying multi-criteria analysis is, through a GIS-based approach, to identify potentially flood-prone areas. The assessment was made at a basin level, and with a view to minimizing, as far as possible, the subjectivity of the selected multicriteria analysis method.

Finally, it should be noted that:

- (α) To minimize subjectivity, which is a significant limitation in the application of multicriteria assessment methods, some of the procedural steps of the proposed process are modeled and some are a product of a combination of existing tools. This combination was done manually and the intervention was for the launch of automated tools in order to avoid oversight as in black-box models.
- (β) The proposed framework has been developed to identify potential areas that are prone to flooding in order to be able to apply on large spatial scales. In this work, this framework applies, evaluates and proposes improvements for a larger spatial scale than that already applied (Papaioannou et al., 2015).
- (γ) The proposed framework has been implemented by Papaioannou et al., 2015 in areas of small and medium human environmental intervention, ie in the river basin of Xeria in Thessaly. In the present work this framework of work is applied in a tight and highly modified artificial environment such as the urban area of Attica.

Selected References

- Chang, D.Y., 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European journal of operational research*, 95(3), pp.649-655.
- Junior, F.R.L., Osiro, L. and Carpinetti, L.C.R., 2014. A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection. *Applied Soft Computing*, 21, pp.194-209.
- Protection, C., 2007. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks.
- Papaoiannou, G., Vasiliades, L. and Loukas, A., 2015. Multi-criteria analysis framework for potential flood prone areas mapping. *Water resources management*, 29(2), pp.399-418.
- Saaty, T.L., 1980. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation*. New York: McGraw, 281.
- Zhou, X., 2012. Fuzzy analytical network process implementation with matlab. In *MATLAB-A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications-Volume 3*. InTech.
- Copernicus Programme, 2018.
<https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/corine-land-cover-general-description> και <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>
(πρόσβαση 15 Ιουνίου 2018)
- MEE, 2018.
<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=252> (πρόσβαση 28 Μαΐου 2018)

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Το υδατικό διαμέρισμα της Αττικής και ειδικότερα η υπολεκάνη του Λεκανοπεδίου παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στην οικονομική ζωή της χώρας μας, δεδομένου ότι πλέον του 50% του πληθυσμού της κατοικεί, εργάζεται, επιχειρεί και βρίσκεται σε αυτό. Η φύση της γεωγραφίας του Λεκανοπεδίου είναι τέτοια που, καθώς τα βροχοφόρα συστήματα έρχονται από τα Νότια – Νοτιοδυτικά, ανυψώνονται λόγω του αναγλύφου στις λοφοσειρές του λεκανοπεδίου και στους γύρω ορεινούς σχηματισμούς και υγροποιούνται. Έτσι, ο υετός δημιουργεί μια παροχή στο υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής (δυσο κυρίως ποταμοί Κηφισός, Ιλισός), που πρέπει να παροχετευθεί και να διοδευτεί στη θάλασσα.

Η περιοχή κατά καιρούς δοκιμάζεται από έντονες ξαφνικές βροχοπτώσεις που δοκιμάζουν τη φέρουσα ικανότητα του υδρογραφικού δικτύου και αποτελούν αίτιο εμφάνισης πλημμυρικών φαινομένων. Οι έντονες βροχοπτώσεις εκτός του ότι φορτίζουν ξαφνικά το υδρογραφικό δίκτυο με νερό βροχής το φορτίζουν και με αλουβιακές φερτές ύλες οι οποίες προέρχονται από τη διάβρωση των ορεινών περιοχών και εναποτίθενται στα πεδινά και οι οποίες γίνονται συχνά αίτιο αλλαγών στη μορφολογία του υδρογραφικού δικτύου, μείωσης της παροχευτικής του ικανότητας, υπερχειλίσεων και τελικά πλημμυρικών φαινομένων. Τέλος οι ανθρώπινη δραστηριότητα και η αστικοποίηση επιδρά καταλυτικά στην εμφάνιση ολόένα και σφοδρότερων φαινομένων πλημμύρας καθώς μειώνουν τις υδρολογικές απώλειες και το χρόνο συρροής της λεκάνης.

Διαβάζοντας κανείς τα σημαντικά ιστορικά στοιχεία των επιπτώσεων από πλημμυρικά φαινόμενα που παρατίθενται στην παρούσα εργασία, δύναται να αντιληφθεί τα ακόλουθα:

- (δ) Διαχρονικά και σταδιακά, τα επιμέρους υλοποιούμενα αντιπλημμυρικά έργα έχουν βελτιώσει την εικόνα που αναμένεται από μια μεγάλη νεροποντή, για τα σημεία που κάποτε εμφανίστηκε σημαντική καταστροφή.
- (ε) Καθώς πρακτικά διαπιστώνεται ότι αυξάνει συνεχώς ο πολεοδομικός ιστός του άστεως της Αθήνας χωρίς ιδιαίτερο σχέδιο, λόγω του άναρχου της επέκτασής του και επειδή αλλάζουν οι νομικά αποδεκτές χρήσεις γης απρόβλεπτα, τα υπάρχοντα έργα ανάσχεσης του πλημμυρικού φαινομένου αποδεικνύονται ανεπαρκή και αυτό είναι κάτι που πρέπει να τονιστεί στους πολίτες αλλά και να προβληματίσει τους ιθύνοντες, καθώς αναδεικνύεται η απαίτηση για συνεχή επαναπροσδιορισμό των περιοχών που είναι ευάλωτες σε πλημμύρα λόγω αυτών των συνεχών μεταβολών.

- (στ) Η πολιτεία αποδίδει ολοένα και μεγαλύτερη σημασία στις επιμέρους καταστροφές. Κάτι που ενδεχόμενα να φαινόταν κάποτε φυσιολογικό φαινόμενο, σήμερα αναδεικνύεται σε σημείο προβληματισμού. Έτσι, σήμερα θεωρείται από τους πολίτες των παρακείμενων περιοχών ως μη αποδεκτό φαινόμενο:
- (i) Το να υπερχειλίζει των πλευρικών τοιχωμάτων του το υδρογραφικό δίκτυο εντός αστικής ζώνης (π.χ., ο π. Κηφισός ή ο π. Ιλισός).
 - (ii) Το να πλημμυρίσουν τα αγροτεμάχια περιοχών σε μικρή απόσταση από το αστικό κέντρο που χρησιμοποιούνται κυρίως για τον καλοκαιρινό παραθερισμό των κατοίκων του άστεως και αναπτύσσονται οικονομικές αξίες γης. Στην πράξη δηλαδή αναφέρονται τα οικόπεδα καλλιεργούμενα και μη και ίσως εξοχικές κατοικίες χτισμένες εκτός Σχεδίου Πόλεως (π.χ., του Μαραθώνα).
 - (iii) Το να παρασυρθεί και να καταστραφεί κατά τη διάρκεια μιας νεροποντής οποιαδήποτε εμπράγματα ιδιοκτησία με οικονομική αξία καθώς και αντικείμενα πολιτισμικής κληρονομιάς (π.χ., αυτοκίνητα, αγάλματα).
 - (iv) Το να πλημμυρίσουν κτίρια ή χώροι τους με νερό.
 - (v) Το να μεταβληθεί από τη νεροποντή σε χείμαρρο ή να κλείσει πρόσκαιρα λόγω πλημμύρας κάποιος δρόμος.

1.2 Αντικείμενο και Σκοπός

Αντικείμενο της εν λόγω μεταπτυχιακής εργασίας είναι η εκτίμηση των πλημμυρικά ευάλωτων περιοχών στο ΥΔ της Αττικής με χρήση μεθόδων GIS και MCDM και η διερεύνηση των αποτελεσμάτων με χρήση διαφορετικών προσεγγίσεων σύμφωνα πάντα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία για τις Πλημμύρες (2007/60/EC). Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι, αφού παραθέσει όλα τα υπάρχοντα δεδομένα, περιγράψει όλα τα χαρακτηριστικά και ιδιαιτερότητες που αφορούν στην περιοχή μελέτης και εξετάσει τις διατιθέμενες σύγχρονες μεθόδους, να αναπτύξει και να εφαρμόσει και αξιολογήσει μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία πολυκριτηριακής ανάλυσης σε περιβάλλον GIS για τον καθορισμό ευάλωτων σε πλημμύρες περιοχών.

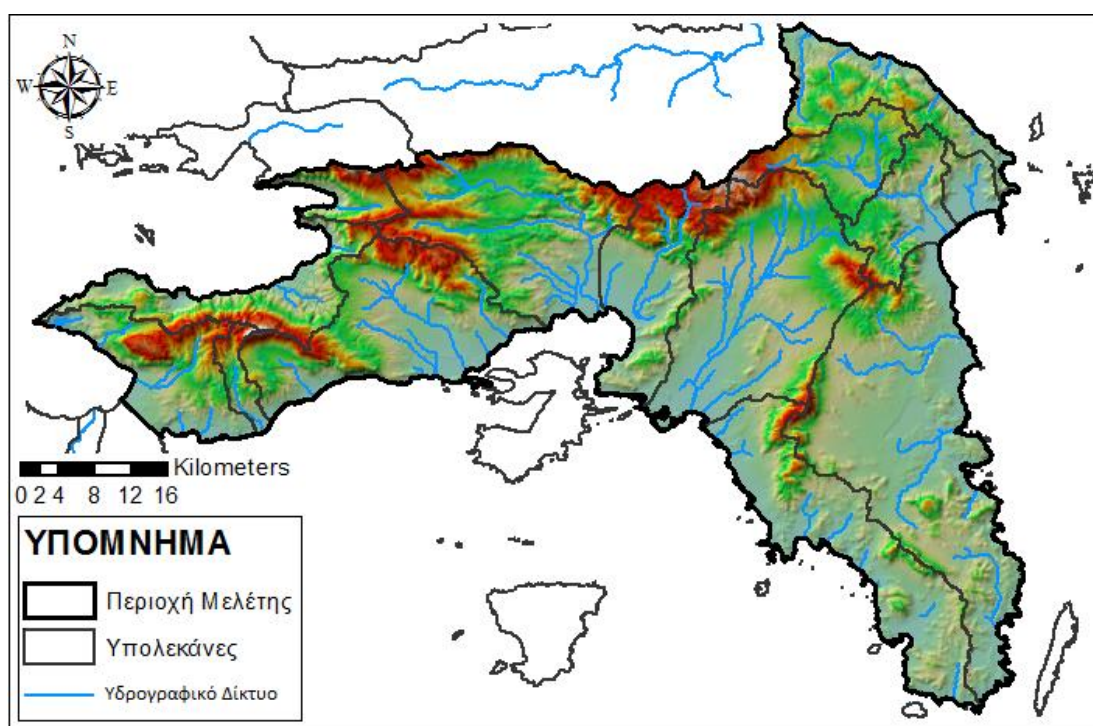
Για τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία κορμό αποτέλεσε η μεθοδολογία που εισηγήθηκαν οι Παραιοαννου et al., (2015). Ωστόσο η όλη διαδικασία τέθηκε υπό διερεύνηση και αναπτύχθηκε όλο απαιτητό υπόβαθρο (θεωρητικό και πρακτικό). Έτσι, αρχικά εφαρμόστηκε κατάλληλα στο πλήρως αστικοποιημένο έδαφος του Λεκανοπεδίου Αττικής. Έπειτα, προτάθηκαν και δοκιμάστηκαν τροποποιήσεις τόσο στο θεωρητικό κομμάτι της μεθόδου όσο και στα εργαλεία και κριτήρια που χρησιμοποιούνται πρακτικά για την ανάδειξη του κατά πόσο ευάλωτη είναι η περιοχή μελέτης σε πλημμύρες. Τέλος, παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα των τροποποιήσεων που δοκιμάστηκαν και καταληκτικά διαμορφώθηκε ένα νέο μεθοδολογικό πλαίσιο από τις βελτιώσεις. Συνεπώς, στην παρούσα εργασία δεν παρουσιάζεται μόνο μία απλή τροποποιητική εφαρμογή της υπόψη μεθοδολογίας στην περιοχή μελέτης αλλά και μία νέα βελτιωμένη και ολοκληρωμένη μεθοδολογική πρόταση.

1.3 Διάρθρωση τεύχους

Στο Κεφάλαιο 2 που ακολουθεί γίνεται περιγραφή της περιοχής μελέτης. Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα φυσικά και ανθρωπογενή χαρακτηριστικά του Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής, καθώς επίσης, και μια σειρά καταγεγραμμένων ιστορικών στοιχείων εμφάνισης του πλημμυρικού φαινομένου και των συνεπειών του, που προκλήθηκαν από βροχοπτώσεις. Στο Κεφάλαιο 3 καθορίζεται το πλαίσιο εργασίας του μελετώμενου προβλήματος, περιγράφεται σε γενικές γραμμές το μαθηματικό υπόβαθρο των εν χρήσει μεθόδων επίλυσης του προβλήματος, και παρατίθεται ο τρόπος ανάλυσης του προβλήματος και η εν γένει διαδικασία ανάδειξης των εν χρήσει κριτηρίων για την τελική διαμόρφωση Χαρτών Ευάλωτων σε Πλημμύρες Περιοχών. Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα και παρουσιάζονται τόσο οι Χάρτες τεκμηρίωσης του μεθοδολογικού πλαισίου που προτείνει η παρούσα εργασία, όσο και οι τελικοί Χάρτες ευάλωτων περιοχών σε πλημμύρες. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 παρατίθενται σε λίστα τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2 Το ΥΔ Αττικής (EL 06) με έμφαση στο Λεκανοπέδιο Αττικής

Το Υδατικό Διαμέρισμα Αττικής έχει έκταση 3186 km² και απαρτίζεται κυρίως από το τμήμα της Περιφέρειας Αττικής, τα νησιά Αίγινα, Σαλαμίνα και Μακρόνησος και μικρό τμήμα των Περιφερειών Στερεάς Ελλάδας και Πελοποννήσου. Ειδικότερα, ορίζεται ως σύστημα μίας λεκάνης απορροής αυτή του ΥΔ της Αττικής με κωδική ονομασία EL06. Πιο συγκεκριμένα αποτελεί ένα σύνολο ξεχωριστών συστημάτων και υπολεκανών. Αυτά είναι τα εξής: το Λεκανοπέδιο Αττικής (Λ.Α.Π. Κηφισού και Ιλισού), το σύστημα της λίμνη Κουμουνδούρου, το Θριάσιο Πεδίον (Λ.Α.Π. Σαρανταπόταμου), τις λεκάνες απορροής Μεγάρων – Αγίων Θεοδώρων, το τεχνητό σύστημα της διώρυγας της Κορίνθου και της λίμνης Βουλιαγμένης Λουτρακίου, τις λεκάνες απορροής Αλεποχωρίου – Ψάθας – Πόρτο Γερμενού, τη λεκάνη απορροής Ωρωπού, το τεχνητό σύστημα του φράγματος του Μαραθώνα έκτασης 2,98 km², το σύστημα του Σχινιά στο Μαραθώνα, τη λεκάνη απορροής του Μαραθώνα, τη λεκάνη απορροής Σπάτων – Κορωπίου, και τις λεκάνες απορροής της Λαυρεωτικής και το σύστημα της λίμνης βουλιαγμένης.



Σχήμα 2.1 Η περιοχή μελέτης

Σημειώνεται ότι στην περιοχή μελέτης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1, θα εξεταστεί μόνο το ηπειρωτικό μέρος του Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής καθώς εκτιμάται ότι για την εφαρμογή της παρούσας μεθόδου έκαστο νησιωτικό σύστημα πρέπει να εξεταστεί ξεχωριστά με διαφορετικές παραδοχές. Ακολουθώς γίνεται εκτενής αναφορά στο Λεκανοπέδιο της Αττικής καθώς αυτό αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα της υπό μελέτη περιοχής, εξαιτίας της ιδιαίτερης αστικής του ανάπτυξης.

Το κλίμα της υπό μελέτη περιοχής χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό με εξαίρεση τα ορεινά, όπου το κλίμα είναι ορεινό. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής είναι 411mm και κυμαίνεται από 350mm (στο Λεκανοπέδιο Αττικής) μέχρι 1.000mm (στα ορεινά τμήματα και κυρίως στην Πάρνηθα). Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 16°C μέχρι 18°C, ανάλογα με το υψόμετρο και την απόσταση από τη θάλασσα. (ΥΠΕΝ/ΕΓΥ, 2018)

2.1 Διοικητική διάρθρωση και Χωροταξία του Λεκανοπεδίου Αττικής

Το υδατικό διαμέρισμα της Αττικής περιλαμβάνει κυρίως την περιφέρεια Αττικής που χωροθετείται στο Ανατολικό τμήμα του γεωγραφικού διαμερίσματος της Στερεάς Ελλάδας. Γεωγραφικά, αποτελεί την πιο πυκνοκατοικημένη Περιφέρεια, καθώς σε αυτή ανήκουν η πρωτεύουσα, Αθήνα και η πόλη του Πειραιά, που είναι και το μεγαλύτερο λιμάνι της χώρας. Ειδικότερα, το Λεκανοπέδιο της Αττικής, με έκταση 427 km², αποτελείται από το πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας και του Πειραιά και οριοθετείται από το Σαρωνικό κόλπο και τα βουνά της Πάρνηθας, του Υμηττού και της Πεντέλης. Ωστόσο, τα όρια της περιοχής που αντιλαμβάνεται ο μέσος κάτοικος της περιοχής ως λεκανοπέδιο διαρκώς αυξάνονται, ακολουθώντας τα όρια της αστικής ζώνης που διαρκώς επεκτείνονται.

Σημειώνεται ότι στα προάστια του Αστικού κέντρου της Αθήνας παρατηρείται ηπιότερη δόμηση αλλά συγκεντρώνονται υψηλότερες οικονομικά αξίες γης, καθώς επίσης και ότι στα προάστια της πόλης του Πειραιά περιλαμβάνονται τα νησιά του Αργοσαρωνικού, τα οποία όμως δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας μελέτης.

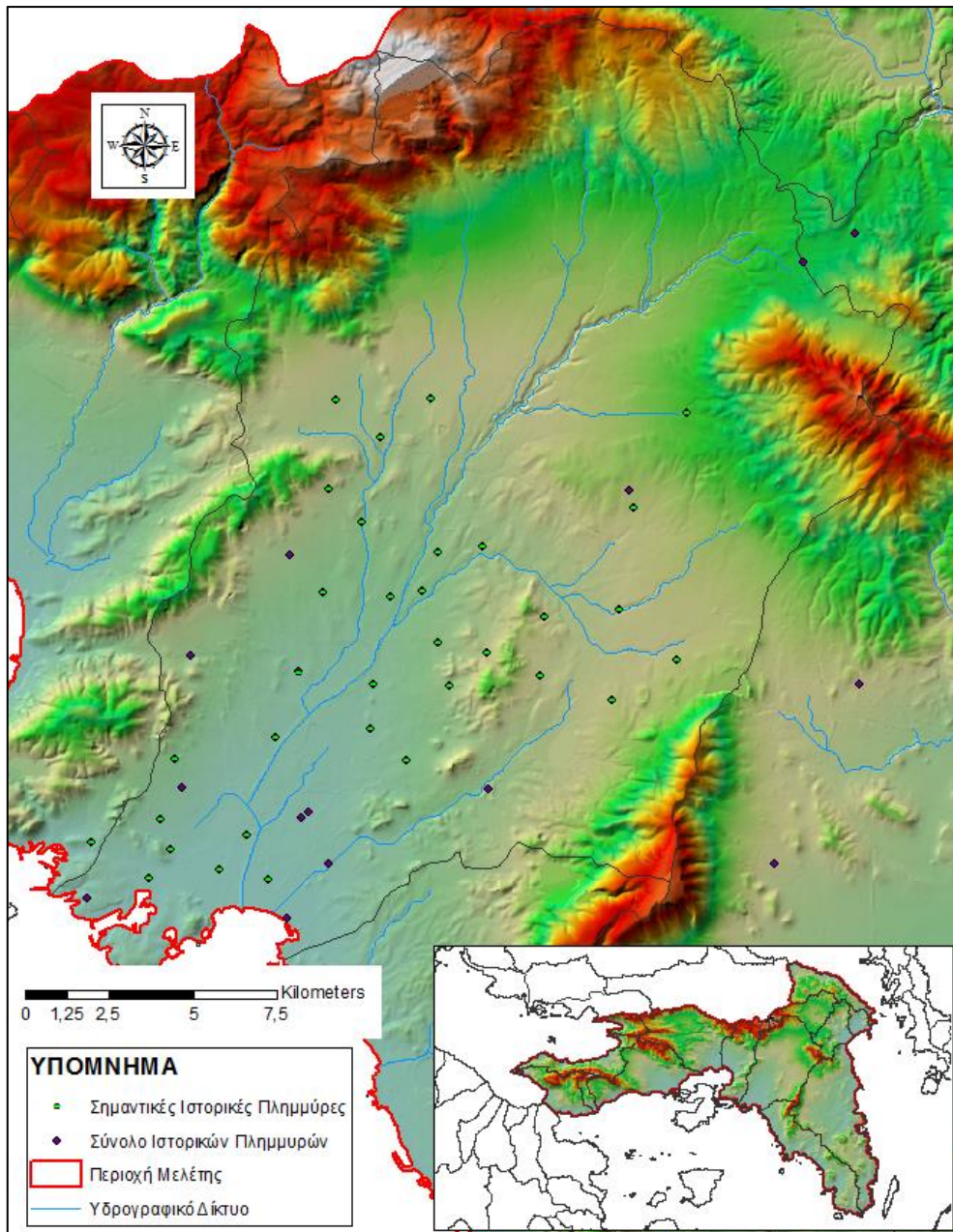
2.2 Γενικά Χαρακτηριστικά και Μορφολογία του Ανάγλυφου

Το μεγαλύτερο μέρος του ΥΔ Αττικής είναι πεδινό έως ημιορεινό. Ειδικότερα για το Λεκανοπέδιο Αττικής, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2, το ανάγλυφο του εδάφους στη μεγαλύτερη έκταση χαρακτηρίζεται ως πεδινό, που περιλαμβάνει μη συνεχείς μεταξύ τους εξάρσεις γης επιπέδου λόφου, όπως τα Τουρκοβούνια, του Φιλοπάππου, ο Λυκαβηττός και η Ακρόπολη. Αυτοί οι λόφοι αναπτύσσονται, με προσανατολισμό από τα βορειοανατολικά προς τα νοτιοδυτικά και το υψόμετρο μειώνεται καθώς προχωράμε προς τα νοτιοδυτικά.

Η περιοχή του Λεκανοπεδίου Αττικής περιβάλλεται από τέσσερις ορεινούς όγκους. Στα ανατολικά βρίσκεται ο Υμηττός, στα βόρεια ο ορεινός σχηματισμός της Πεντέλης και η Πάρνηθα, και στα δυτικά το Όρος Αιγάλεω και αρκετές λοφοσειρές ή μεμονωμένοι λόφοι. Τέλος, στα νότια η περιοχή βρέχεται από το Σαρωνικό Κόλπο.

Οι κύριοι ποταμοί στο Λεκανοπέδιο είναι ο Κηφισός και ο Ιλισός οι οποίοι διαρρέουν το Λεκανοπέδιο Αττικής. Ο Κηφισός εμφανίζει εκτεταμένο υδρογραφικό δίκτυο με πολλούς μικροχειμάρρους, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι τα ρέματα της Χελιδονούς, του

Κοκκιναρά, της Λαμπρινής και του Χαλανδρίου. Από τα 427 km² της συνολικής έκτασης του Λεκανοπεδίου Αττικής, τα 370 km² αποτελούν τη Λ.Α.Π. του Κηφισού και τα 45 km² τη Λ.Α.Π. του Ιλισού (Gournelos and Maroukian, 1990). Σημειώνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος του π. Ιλισού, ήδη από τις πηγές του, έχει υπογειοποιηθεί από πολύ παλιά για την εύρυθμη λειτουργία του άστεως.



Σχήμα 2.2 Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του Λεκανοπεδίου της Αττικής

2.3 Αστικοποίηση

Η Αττική κατοικείται από την εποχή της πρώτης νεολιθικής εγκατάστασης, δηλαδή περισσότερο από 5.000 χρόνια πριν. Ειδικότερα, η οικιστική ανάπτυξη του Λεκανοπεδίου της Αττικής ξεκίνησε γύρω από τους λόφους και κυρίως πέριξ της Ακροπόλεως.

Κύρια χαρακτηριστικά της σύγχρονης ανάπτυξης της πόλης είναι η ταχύτατη αντικατάσταση του παλαιού ιστού και οι νέες επεκτάσεις. Αυτά τα χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με τη γρήγορη αύξηση και εξάπλωση του πληθυσμού σε πυκνότητα και έκταση αντίστοιχα, κάνουν τα ίχνη της εξέλιξης των ορίων της αστικής ζώνης να χάνονται στο χρόνο. Η παρούσα περίοδος αποτελεί μια πολύ σημαντική καμπή για την ανάπλαση και την ανάπτυξη του Πολεοδομικού Συγκροτήματος του Λεκανοπεδίου λόγω της τρέχουσας οικονομικής κρίσης. Η καμπή αυτή έχει δύο βασικές πτυχές τα δημόσια έργα, που εκτελούνται πλέον με φειδώ για την κάλυψη των νέων αναγκών, καθώς και τις νέες επενδύσεις του ιδιωτικού τομέα που κινούνται προς την κατεύθυνση των νέων τεχνολογιών και της ανακαίνισης του παλαιού αστικού ιστού, προκειμένου να μεγιστοποιείται η παρούσα αξία και το κέρδος. Σημειώνεται ότι η περίοδος αυτή δεν μπορεί να παραλληλιστεί με την περίοδο των δεκαετιών 1960 και 1970 ή του 2000, περιόδους κατά τις οποίες το τοπίο του Λεκανοπεδίου δέχθηκε μια σωρεία αλλαγών σε εικόνα τόσο στον πυρήνα του, όσο και στην επέκταση των ορίων του λόγω των διαφόρων έργων. Σήμερα, οι σχεδιαστικές επιλογές των νέων υποδομών σε σχέση με τα αντίστοιχα έργα του πρόσφατου παρελθόντος λαμβάνονται στο πνεύμα της οικονομίας προϋπολογισμού και όγκου με τρόπο τέτοιο ώστε να μη μειώνεται η λειτουργικότητα και η αποτελεσματικότητά τους.

2.4 Βροχομετρικά Δεδομένα ΥΔ Αττικής

Για την ανάλυση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν χρονοσειρές βροχών ημερήσιας βάσης για τους βροχομετρικούς σταθμούς της περιοχής μελέτης της ΕΜΥ. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται ως Μέγιστη Μηνιαία Βροχόπτωση η αθροιστική μηνιαία βροχόπτωση για τον μήνα που έδωσε το μεγαλύτερο ύψος βροχής μέσα στις λιγότερες μέρες.

Πίνακας 2.1 Αντιστοίχιση κλίμακας κριτηρίων με την πλημμυρική επικινδυνότητα

Όνομα Σταθμού	Μήκος Χρονοσειράς	Έτη	Μέγιστη Μηνιαία Βροχόπτωση (mm)	Καταγραφής
ΜΑΡΑΘΩΝΑΣ	1986-2003	17	103,8	Νοε-86
ΝΕΑ ΦΙΛΑΔΕΛΦΕΙΑ	1981-2010	29	163,6	Μαρ-98
ΤΑΤΟΪ (ΔΕΚΕΛΕΙΑ)	1981-2017	36	185,1	Ιαν-85
ΕΛΛΗΝΙΚΟ αερ	1981-2017	36	205,3	Μαρ-98
ΠΕΙΡΑΙΑΣ	1981-2010	29	109,9	Νοε-04
ΕΛΕΥΣΙΝΑ	1981-2017	36	101,2	Οκτ-89
ΣΠΑΤΑ (ΒΕΝΙΖΕΛΟΣ)	1981-2017	36	127,6	Νοε-82
Τα δεδομένα είναι για το διάστημα 1981 έως σήμερα ή έως το έτος διακοπής της λειτουργίας τους για όσους σταθμούς έχουν κλείσει.				
Ελλείψεις τιμών στο σταθμό ΣΠΑΤΩΝ για το διάστημα 1998-2001 λόγω εργασιών για τη μεταφορά του αεροδρομίου				
Ελλείψεις τιμών στο σταθμό ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ για το διάστημα Νοέμβρ.2013 μέχρι Νοέμβρ.2014 λόγω μεταφοράς του στην Κεντρική Υπηρεσία, απόσταση περίπου ίση με 1000 μέτρα				

(Προέλευση: ΕΜΥ μετά από επεξεργασία)

2.5 Χρήσεις Γης

Το Corine Land Cover ξεκίνησε το 1985 (έτος αναφοράς 1990) και έχουν δημιουργηθεί χάρτες κάλυψης γης για τα έτη 2000 και 2006 και 2012. Αποτελεί μία ταξινόμηση της κάλυψης της γης σε 44 τάξεις. Το CLC χρησιμοποιεί τα μεγέθη των 25 ha και των 100 m ως Ελάχιστα Μεγέθη Αναφοράς Χαρτογράφησης και το μέγεθος των 5 ha για την ενημέρωση των χαρτών και την ένταξη των όποιων χρονικών αλλαγών. Το CLC παράγεται κυρίως με οπτική ερμηνεία δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας. Στη συνέχεια ύστερα από τροποποιήσεις από τις αρμόδιες αρχές κάθε κράτους που συμμετέχει στο πρόγραμμα οι χάρτες κάλυψης γης μετατρέπονται σε χάρτες χρήσεων γης. (Copernicus, 2018) Για την Ελλάδα η Ε.Κ.ΧΑ. Α.Ε. σε συνεργασία με τις υπόλοιπες Ευρωπαϊκές Υπηρεσίες ανέλαβε την κατάρτιση των χαρτών σε εθνικό επίπεδο αξιοποιώντας τα γεωχωρικά δεδομένα που έχει στην κατοχή της μέσω του συγχρηματοδοτούμενου προγράμματος από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος με τίτλο «GMES/Copernicus Initial Operations (GIO) Land monitoring 2011-2013» ή GIO LAND. (Ε.Κ.ΧΑ. Α.Ε., 2018)

Στο Σχήμα 2.3 φαίνονται οι κατηγορίες χρήσεων γης της περιοχής μελέτης, η οποία αποτελείται κυρίως από Δάση (49,59%), Γεωργικές περιοχές (25,63%) και Τεχνητές επιφάνειες (24,23%). Στα Σχήματα 2.4, 2.5 και 2.6 παρατίθεται η ανάλυση αυτών των κατηγοριών.



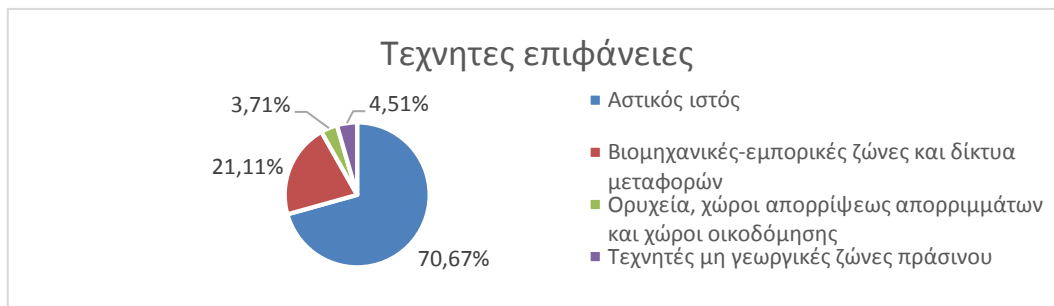
Σχήμα 2.3 Χρήσεις Γης του ΥΔ Αττικής



Σχήμα 2.4 Ανάλυση κατηγορίας Δασών και Ημι-φυσικών περιοχών



Σχήμα 2.5 Ανάλυση κατηγορίας Γεωργικών περιοχών



Σχήμα 2.6 Ανάλυση κατηγορίας Τεχνητών επιφανειών

2.6 Καταγεγραμμένα πλημμυρικά επεισόδια

Τα κυριότερα επεισόδια πλημμύρας που έπληξαν το Λεκανοπέδιο της Αττικής παρατίθενται παρακάτω (Κανδηλιώτη, 2009, Meteoclub, 2018):

- (ζ) Στις **22/10/1887**: Μετά από έντονη βροχόπτωση 2d προκλήθηκε πλημμύρα. Μια οικοδομή και μια μονοκατοικία κατέρρευσαν. Καταγράφηκε 1 θάνατος.
- (η) Στις **14/11/1895**: Μετά από καταιγίδα διάρκειας 12h πλημμύρισαν η περιοχή του Αγίου Παντελεήμονα, το Βαθρακονήσι στον Ιλισό, περιοχή Βάθης και ο Κηφισός ποταμός, που κατέστη επικίνδυνος σε όλο το μήκος του. Αρκετοί δρόμοι καταστράφηκαν και άλλοι έκλεισαν, πλημμύρισαν σπίτια, έπεσαν γέφυρες και η συγκοινωνία διεκόπη. Καταγράφηκαν 21 θάνατοι.
- (θ) Στις **14/11/1896**: Μετά από ισχυρή καταιγίδα 24h πλημμύρισαν οι περιοχές Καμίνια, Νέο Χωριό, Περιβόλια, Άγιος Ιωάννης, Ελαιώνας, Νέο Φάληρο. Στο Νέο Φάληρο το νερό ξεπέρασε το 1 μέτρο. Κατέπεσαν 450 σπίτια. Για 2d η πόλη φωτιζόταν με τα ηλεκτρικά των πλοίων. Διακόπηκε η συγκοινωνία Αθηνών-Πειραιώς. Καταγράφηκαν 35 θάνατοι. Η καταιγίδα έμεινε γνωστή ως καταιγίδα του Αγ. Φιλίππου.
- (ι) Στις **20/11/1925**: Μετά από ισχυρή βροχόπτωση με ξεσπάσματα καταιγίδας προκλήθηκε πλημμύρα. Μετά από 1h και 25' καταγράφηκαν ύψος βροχής 55mm και ένταση 44mm/h ενώ μετά από 5h και 23' το ύψος βροχής ανήλθε στα 95mm, με ένταση 17,65mm/h, ενώ το ημερήσιο ύψος βροχής έφθασε τα 150mm. Η παροχή του Ιλισού υπολογίστηκε κατόπιν μετρήσεως της ροής στη γέφυρα Χαροκόπου σε 168,50m³/s. Το επεισόδιο προκάλεσε αρκετές και σημαντικές πλημμύρες σε περιουσίες.

- (ια) Στις **23/11/1925**: Μετά από καταιγίδα διάρκειας 4h προκλήθηκε πλημμύρα. Στο κέντρο της Αθήνας κατέρρευσαν 127 σπίτια και καταγράφηκαν 8 θάνατοι. Στον Πειραιά το επεισόδιο καταγράφηκε ως θύελλα. Στις περιοχές Λάκκα, Βάβουλα, Καμίνια, Λεύκα, Κάτω Κοκκινιά, Άγιος Ελευθέριος και Εργοστάσια. Πλημμύρισαν σχεδόν όλα τα υπόγεια σπιτιών και καταστημάτων, και διακόπηκε η συγκοινωνία στις γραμμές του τραμ και του ηλεκτρικού.
- (ιβ) Στις **5/11/1928**: Μετά από πολύ ισχυρή καταιγίδα που συνοδευόταν από χαλάζι και κεραυνούς προκλήθηκε πανικός στους κατοίκους στις περιοχές Κρεμμυδαρού, Μπασμάδες, Δραπετσώνα, Ποντίων. Κατέρρευσαν 60 σπίτια ενώ έμειναν άστεγες 150 οικογένειες.
- (ιγ) Στις **26/10/1930**: Μετά από ισχυρή βροχόπτωση διάρκειας 15h πλημμύρισαν ο Ιλισός και ο Κηφισός ποταμός. Αρκετά σπίτια υπέστησαν ζημιές στις περιοχές της Νέας Ιωνίας, των Σεπολίων, του Κολωνό, της Φωκίωνος Νέγρη και των Σφαγείων. Καταγράφηκαν 2 θάνατοι.
- (ιδ) Στις **17/10/1933**: Μετά από ισχυρή βροχόπτωση στις περιοχές Δουργούτιο, Παλαιά Σφαγεία, Ζωγράφου, Κοπανά και την οδό Βουλιαγμένης, παρασύρθηκαν τα νεοαναγερμένα αντιπλημμυρικά έργα της κοίτης του Ιλισού με αποτέλεσμα τα νερά της κοίτης να ξεχυθούν στη γύρω περιοχή και να προκαλέσουν ζημιές σε πολλά σπίτια. Καταγράφηκε 1 θάνατος. Στον Πειραιά επλήγησαν οι περιοχές Καμίνια, Λεύκα, Βάβουρας, όπου πλημμύρισαν υπόγεια σπιτιών και έκλεισαν δρόμοι λόγω αποθέσεως όγκων λάσπης σε αυτούς.
- (ιε) Στις **2/12/1933**: Μετά από ισχυρότατη καταιγίδα στον Πειραιά προκλήθηκε πλημμύρα. Κατέρρευσαν πολλά σπίτια στις περιοχές Σούδα, Καμίνια, Παλαιά Κοκκινιά, Μεταμόρφωση, Ταμπούρια, Αντίσταση, Άγιος Διονύσιος, Δραπετσώνα, Καλλιόπη και Καστέλα. Καταγράφηκαν 2 θάνατοι.
- (ιστ) Στις **22/11/1934**: Μετά από συνεχή βροχόπτωση διάρκειας 5h προκλήθηκε πλημμύρα. Καταγράφηκαν υλικές ζημιές σε σπίτια στην Κυψέλη, τη Νέα Ιωνία και τη Νέα Φιλαδέλφεια, ενώ διακόπηκε η ηλεκτροδότηση και η συγκοινωνία. Στον Πειραιά η καταιγίδα είχε διάρκεια 6h και γενικά η εικόνα ήταν χειρότερη. Πλημμύρισαν οι περιοχές της Κοκκινιάς, Νέου Φαλήρου, Μοσχάτου, Αγίους Ιωάννη, Γλυκών Νερών ενώ ελαφρότερες πλημμύρες έγιναν στις περιοχές Κουτσικάρι και Δραπετσώνα. Ο Κηφισός υπερχείλισε. Επλήγησαν σχεδόν όλα τα σπίτια και τα καταστήματα, το ύψος του νερού στο Νέο Φάληρο έφτασε το 1m ενώ στο Μοσχάτο τα 2m. Ένεκα τούτου, διακόπηκαν τελείως οι μετακινήσεις μεταξύ Τζιτζιφίων – Νέου Φαλήρου και η λειτουργία του ηλεκτρικού. Το ηλεκτρικό εργοστάσιο στο Φάληρο υπέστη ζημιές και έπεσε η γέφυρα των εκβολών του Κηφισού λόγω της πίεσης των υδάτων. Καταγράφηκαν 6 θάνατοι.
- (ιζ) Στις **5/11/1936**: Μετά από ισχυρή βροχόπτωση προκλήθηκε πλημμύρα στις περιοχές Κερατσίνι, Τζιτζιφιές, Παλαιά Σφαγεία και Παλαιό Φάληρο. Διακόπηκε η οδική συγκοινωνία επειδή κατέρρευσε γέφυρα κοντά στην περιοχή Έντεν και επειδή πολλοί δρόμοι έφραξαν από τόνους λάσπης. Επιπλέον πλημμύρισαν πολλά σπίτια και

καταστήματα και η γέφυρα των Παλαιών Σφαγείων χαρακτηρίστηκε ως ετοιμόρροπη. Καταγράφηκαν 2 θύματα.

- (ιη) Στις **29/10/1938**: Μετά από ισχυρή βροχόπτωση διάρκειας 3h πλημμύρισαν πολλοί δρόμοι και άλλοι κατέστησαν αδιάβατοι. Υπήρξαν βλάβες σε υπονόμους και κυρίως στον Προφήτη Δανιήλ. Οι περιοχές που επλήγησαν ήταν τα Πατήσια, η Νέα Ιωνία, το Γαλάτσι και η Κυψέλη. Καταγράφηκε 1 θάνατος.
- (ιθ) Στις **6/11/1939**: Μετά από ισχυρή βροχόπτωση διάρκειας 1h πλημμύρισαν πολλά υπόγεια και δρόμοι στις οδούς Αχαρνών και Δουργούτη, και ορισμένες περιοχές κατά μήκος του Ιλισού.
- (κ) Στις **13/10/1955**: Έβρεχε στην Αθήνα επί εβδομάδες μέρα παρά μέρα και μετά από καταιγίδα εκείνης της μέρας ο Ιλισός ξεχείλισε και πλημμύρισε τις χαμηλές περιοχές Καλλιθέας, Μοσχάτου και Φαλήρου.
- (κα) Στις **6/11/1961**: Η καταιγίδα χαρακτηρίζεται ως η μητέρα όλων των καταιγίδων με χαλάζι μεγέθους καρυδιού επί 10 h συνεχόμενα. Η Καταιγίδα έπληξε κυρίως το Μπουρνάζι, τα Νέα Λιόσια, τα Νέα Σφαγεία Αθηνών, το Θησείο, τους Αγίους Αναργύρους, τη Νέα Φιλαδέλφεια, τη Νέα Ιωνία, το Παλαιό Ηράκλειο, το Γαλάτσι, το Αιγάλεω, τη Νέα Χαλκηδόνα και τον Ταύρο. Κατέρρευσαν πολλά οικήματα και καταγράφηκαν 46 θύματα. Στην οδό Πειραιώς το ύψος του νερού έφτασε τα 2 μέτρα. Κατέρρευσαν 400 σπίτια και έμειναν άστεγες πάνω από 500 οικογένειες ενώ πλημμύρισαν πάνω από 4.000 σπίτια. Σημειώνεται ότι ο μετεωρολογικός σταθμός της Νέας Φιλαδέλφειας, για τα πρώτα 25' κατέγραψε 31mm βροχής, και 74,50mm/h ένταση βροχόπτωσης.
- (κβ) Στις **30/10/1972**: Το μέσο ύψος βροχής κατά την διάρκεια της βροχόπτωσης ήταν 80 mm και η θύελλα ήταν σχεδόν ομοιόμορφη σε όλο το Λεκανοπέδιο της Αττικής. Κατά την πλημμύρα αυτή τα νερά του Κηφισού έφθασαν στο χείλος των αναχωμάτων, στο τμήμα μεταξύ των γεφυρών Πειραιώς και Ποσειδώνος και προκάλεσαν βαθιά διάβρωση, κατάντη της κοιτοστρώσεως προστασίας της γέφυρας της παραλιακής Λ. Ποσειδώνος. Η καταστροφή αποφεύχθηκε χάρη στα μέτρα που έλαβαν αμέσως οι κατασκευάστριες εταιρείες του έργου εκβολής του Κηφισού.
- (κγ) Στις **2/11/1977**: Η βροχή άρχισε από νωρίς το απόγευμα της Δευτέρας 2 Νοεμβρίου και διήρκησε μέχρι περίπου τα ξημερώματα της Τρίτης. Επλήγησαν κυρίως οι περιοχές Περιστερί, Αιγάλεω, Κορυδαλλός, Νίκαια, Ρέντη, Κερατσίνι και Αγ. Βαρβάρα. Καταγράφηκαν 21 θύματα και ανυπολόγιστες υλικές ζημιές. Είναι ίσως η μεγαλύτερη σε έκταση και καταστρεπτικότερη πλημμύρα που σημειώθηκε στο λεκανοπέδιο.
- (κδ) Στις **28/10/1978**: Καταγράφηκε ισχυρή βροχή διάρκειας 4h με αποτέλεσμα να τεθούν σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης οι περιοχές Μπραχάμι, Νέα Ιωνία, Θησείο, Καλαμάκι, Νέα Χαλκηδόνα, Αγ. Ανάργυροι, Παλαιό Φάληρο ενώ πλημμύρησαν τα περισσότερα υπόγεια.

- (κε) Στις **7/10/1980**: Καταγράφηκε ισχυρή βροχή 2h με αποτέλεσμα να πλημμυρίσουν οι περιοχές Νέα Λιόσια, Πετρούπολη, Άγιοι Ανάργυροι, Νέα Φιλαδέλφεια, και στο Περιστερί στην Ανθούπολη. Παρασύρθηκαν πολλά αυτοκίνητα ενώ πλημμύρισαν και 13 καταστήματα και 18 σπίτια.
- (κστ) Στις **27/10/1980**: Σημειώθηκε καταιγίδα διάρκειας 3h. Ζημιές προκλήθηκαν στις περιοχές Χολαργός, Αγία Παρασκευή, Χαλάνδρι, Φιλοθέη, Ψυχικό, Νέα Ιωνία, Ν. Λιόσια και Καματερό. Πλημμύρησαν πολλά υπόγεια. Καταγράφηκε 1 θάνατος.
- (κζ) Στις **27/10/1986**: Σημειώθηκε ισχυρή καταιγίδα διάρκειας 2d. Στις περιοχές Ιλίσια, Κηφισιά, Μαρούσι, Νέο Ηράκλειο, Νέα Λιόσια, Νέα Ιωνία, Περιστερί, Αιγάλεω, Ν. Φάληρο, Καλλίπολη, Πασαλιμάνι, Αγία Σοφία προκλήθηκαν ζημιές. Αποτέλεσμα αυτής της ισχυρής καταιγίδας ήταν η καθίζηση του εδάφους βάθους 2 μέτρων στη Νέα Κηφισιά. Παράλληλα, στο δρόμο άνοιξε ρωγμή μήκους 25 μέτρων και πλάτους 1 μέτρου. Πλημμύρισαν 150 σπίτια, καταστήματα και ο υποσταθμός της ΔΕΗ στον οποίο τα νερά είχαν ύψος 2-3 μέτρα. Διεκόπη το ηλεκτρικό ρεύμα καθώς και οι συκοινωνίες.
- (κη) Στις **4/11/1986**: Καταιγίδα διάρκειας 1d έπληξε τη Νέα Ιωνία, την Αγ. Παρασκευή και τα Ιλίσια με αποτέλεσμα να πλημμυρίσουν πολλά σπίτια και καταστήματα.
- (κθ) Στις **23/3/1987**: Σημειώθηκαν πολύ ισχυρές βροχές στον Πειραιά και συγκεκριμένα οι περιοχές Καλλιθέα, Μοσχάτο, Κορυδαλλό, Νίκαια και Αμφιθέα πλημμύρισαν. Συνολικά πλημμύρισαν πάνω από 150 σπίτια και καταστήματα.
- (λ) Στις **12/11/1987**: Μια ισχυρή βροχόπτωση έπληξε τις περιοχές Μαραθώνα, Γλυφάδα, Βούλα, Πετρούπολη, Περιστερί, Μεταξουργείο και Άνω Λιόσια. Πλημμύρισαν σπίτια, καταστήματα και 4.000 στρέμματα με φυτοκαλλιέργειες στην περιοχή Βρανά του Μαραθώνα.
- (λα) Στις **25/02/1988**: Σημειώθηκε ισχυρή καταιγίδα που έπληξε τις περιοχές Περιστερί, Ταύρος, Γαργητού, Λιόσια, Μπουρνάζι και λιγότερο τις περιοχές Ηλιούπολη, Αγ. Παρασκευή, Ψυχικό, Χολαργός, Παιανία και Μαραθώνας. Πλημμύρισαν πολλά σπίτια και καταστήματα, έγιναν καθιζήσεις σε δρόμους και στο 37 km Αθηνών- Μαραθώνα πλημμύρισαν 5.000 στρέμματα γης.
- (λβ) Στις **5/10/1989**: Μια ισχυρή θύελλα διάρκειας εικοσιτεσσάρων ωρών έπληξε όλα τα Βόρεια προάστια. Πλημμύρισαν σπίτια και καταστήματα. Πάνω από 50 δέντρα έσπασαν και ξεριζώθηκαν από τον αέρα πέφτοντας σε αμάξια, περίπτερα αλλά και καλώδια του ηλεκτρικού με αποτέλεσμα να διακοπεί η ηλεκτροδότηση σε πολλά προάστια. Καταγράφηκαν 7 θανάτοι.
- (λγ) Στις **9/12/1989**: Σημειώθηκε ισχυρή βροχή διάρκειας 5h. Στις περιοχές Άνω Πετράλωνα, Εξάρχεια, Άγιοι Ανάργυροι και Αμπελόκηποι πλημμύρισαν σπίτια και καταστήματα, ξεριζώθηκαν δένδρα, έπεσαν γέφυρες, έγιναν καθιζήσεις και υπέστησαν ζημιές τα δίκτυα του ΟΤΕ και της ΔΕΗ.

- (λδ) Στις **15/01/1991**: Καταγράφηκε ισχυρή νεροποντή. Στις περιοχές Κανάρια Ηλιουπόλεως πλημμύρισαν πολλά σπίτια και καταστήματα. Καταγράφηκε 1 θάνατος.
- (λε) Στις **8/11/1991**: Ισχυρή καταιγίδα έπληξε τις περιοχές Γλυφάδα, Καλαμάκι, Βούλα, Ελληνικό, Παιανία και Παλλήνη. Πλημμύρισαν 90 σπίτια και καταστήματα, ενώ υπέστη μεγάλη ζημιά το τελωνείο του Ανατολικού Αερολιμένα.
- (λστ) Στις **21/11/1993**: Μεγάλη βροχόπτωση διάρκειας 7h έπληξε τις περιοχές Γλυφάδα, Βούλα, Βάρη και Βουλιαγμένη. Πλημμύρισαν σπίτια και καταστήματα καθώς και η εθνική οδός η οποία έκλεισε για 2 ώρες αφού το νερό είχε φτάσει το 1 μέτρο. Επίσης πάρα πολλά αυτοκίνητα παρασύρθηκαν από το νερό και πολλοί δρόμοι καταστράφηκαν εξαιτίας ρηγματώσεων και καθιζήσεων.
- (λζ) Στις **31/5/1994**: Έντονα καιρικά φαινόμενα προκάλεσαν μεγάλες καταστροφές στα νότια προάστια. Καταγράφηκαν 10 θάνατοι.
- (λη) Στις **21-22/10/1994**: Προκλήθηκε πλημμύρα από ισχυρή σε ένταση βροχόπτωση, διπλάσια περίπου του επεισοδίου της 2/11/1977. Παρασύρθηκαν αυτοκίνητα και καταστράφηκαν τμήματα του οδικού δικτύου γύρω από Ποδονίφτη και Κηφισό.
- (λθ) Στις **21-22/11/1994**: Καταγράφηκε ισχυρή βροχόπτωση. Ο Κηφισός υπερχείλισε και στο σημείο της Κακιάς Σκάλας σημειώθηκαν κατολισθήσεις. Τοπικά σημειώθηκαν πλημμύρες στο κέντρο της Αθήνας, όπου η στάθμη του νερού σε μερικά σπίτια έφτασε τα 3,5m ενώ εκατοντάδες αυτοκίνητα καταστράφηκαν. Καταγράφηκαν 9 θάνατοι.
- (μ) Στις **8/7/2002**: Ισχυρή βροχόπτωση έπληξε την περιοχή του Νοσοκομείου ΣΩΤΗΡΙΑ και την περιοχή Σταθμού Λαρίσης ενώ υπήρξαν αρκετές ζημιές. Πλημμύρισαν πολλά ισόγεια και υπόγεια οικιών και επιχειρήσεων κυρίως εκατέρωθεν του Κηφισού. Μεγάλα τμήματα του υδρογραφικού δικτύου κατέστησαν απροσπέλαστα ή έπαθαν ζημιές.
- (μα) Στις **2-8/9/2002**: Εξαιτίας ισχυρής βροχόπτωσης και σε συνδυασμό με εκτελούμενα έργα αναδιευθέτησης του Κηφισού ξεχείλισε ο ποταμός στην περιοχή του Μοσχάτου και προκλήθηκαν σημαντικές υλικές ζημιές στη γύρω περιοχή.
- (μβ) Στις **6-9/11/2002**: Εξαιτίας ισχυρής βροχόπτωσης και σε συνδυασμό με τα εκτελούμενα έργα αναδιευθέτησης του Κηφισού και την ανεπάρκεια παροχέτευσης κάτω από της γέφυρες στην περιοχή του Μοσχάτου, ξεχείλισε ο ποταμός και προκλήθηκαν σημαντικές υλικές ζημιές στην περιοχή Ρέντη, Λαχαναγοράς και Μοσχάτου.
- (μγ) Στις **22-25/11/2005**: Στην Αττική σημειώθηκαν μεγάλα ύψη βροχής που ξεπέρασαν κατά πολύ τα μέσα βροχομετρικά ύψη του Νοεμβρίου (Ανατολική Αττική 50-80 mm). Επλήγησαν κυρίως περιοχές της Ανατολικής Αττικής (Πεντέλη, Διόνυσος και Μαραθώνας) αλλά και περιοχές της Νοτιοανατολικής Αττικής. Ζημιές δεν καταγράφηκαν.
- (μδ) Στις **20-21/10/2007**: Έντονες βροχοπτώσεις και θυελλώδεις ανέμοι έπληξαν όλη τη χώρα. Πλημμύρισαν 46 υπόγεια. Το οδόστρωμα της οδού Αλαμάνας στον Κολωνό

έκλεισε εξαιτίας καθίζησης. Επίσης διακόπηκε η κυκλοφορία στην Εθνική Οδό Αθηνών-Κορίνθου στο ύψος της Χαλυβουργικής και, στην υπόγεια διάβαση της οδού Καλλιρόης. Επίσης προβλήματα σημειώθηκαν στη λεωφόρο Πικερμίου, στην παραλιακή λεωφόρο Ποσειδώνος, στην περιφερειακή του Αιγάλεω και στη λεωφόρο NATO. Τα προβλήματα που προκλήθηκαν από τη συγκεκριμένη πλημμύρα αποκαταστάθηκαν γρήγορα.

- (με) Στις **22/2/2013**: Ύστερα από σφοδρή κακοκαιρία στην Αττική (75 τόνους νερού ανά στρέμμα) προκλήθηκαν πλημμύρες. Έκλεισαν πολλοί δρόμοι και διακόπηκε η ηλεκτροδότηση σε πολλές περιοχές. Η πυροσβεστική δέχτηκε πολλές κλήσεις για άντληση υδάτων και στήθηκε επιχείρηση απεγκλωβισμού στη Σταμάτα. Καταγράφηκε ένας θάνατος μίας γυναίκας, όπου ο χείμαρρος στην οδό Αμαρουσίου στο Χαλάνδρι την παρέσυρε με το αυτοκίνητό της.
- (μστ) Στις **22/10/2015**: Ύστερα από κακοκαιρία προκλήθηκαν πλημμύρες στην Αττική. Οι κλήσεις στην Πυροσβεστική ήταν κατά την εκδήλωση του πλημμυρικού φαινομένου ανήλθαν στις 835 στο λεκανοπέδιο και κυρίως από περιοχές της Δυτικής Αττικής. Εκείνη τη νύχτα η Πυροσβεστική ήταν σε επιφυλακή και για την εξομάλυνση της κατάστασης επιστρατεύτηκαν 140 συνεργεία με 560 άνδρες. Η Ειδική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας εξέδωσε ειδικές οδηγίες για την προστασία των πολιτών. Οι περιοχές που επλήγησαν περισσότερο ήταν το Μενίδι, τα Άνω Λιόσια, το Ίλιον και το Καματερό. Στο Καματερό κατέρρευσε ένα σπίτι επί της οδού Κωστή Παλαμά. Έκλεισαν δρόμοι λόγω του ύψους του νερού, η Λάμπρου Κατσώνη έκλεισε (από την οδό Αναξαγόρα μέχρι την οδό Τσουντα) και η Τσουντα έκλεισε προς Πειραιά και Περιστερί. Δεκάδες οι καταστροφές στο οδικό δίκτυο και τις υποδομές. Καταγράφηκε ένας θάνατος, ο 41χρονος εγκλωβίστηκε στο όχημά του εξαιτίας του χειμάρρου στη συμβολή των οδών Αριστοτέλους και Μαυροπηγής στο κέντρο του Μενιδίου.
- (μζ) Στις **15/2/2017**: Μετά από έντονη βροχόπτωση, πλημμύρα έπνιξε τη Δυτική Αττική και περισσότερο τις περιοχές Μάνδρα, Νέα Πέραμος, Μαγούλα και Ελευσίνα. Καταγράφηκαν 21 θάνατοι. Η πλημμύρα ονομάστηκε η τρίτη μεγαλύτερη στην Αττική βάσει νεκρών. Στη χώρα κηρύχτηκε εθνικό πένθος για τα θύματα. Από τις αυτοψίες στην περιοχή της Μάνδρας οι καταστροφές σε κτίρια ανήλθαν τις 1064, εκ των οποίων οι 794 ήταν σε κατοικίες, οι 126 σε επαγγελματικούς χώρους, οι 8 σε δημόσια κτίρια και οι υπόλοιπες 136 σε αποθήκες και υπόγεια. Στα Μέγαρα και στη Νέα Πέραμο καταγράφηκαν 448 καταστροφές, οι 228 σε κατοικίες, οι 38 σε επαγγελματικούς χώρους, οι 6 σε δημόσια κτίρια και οι 123 σε αποθήκες και υπόγεια.

2.7 Ανάλυση Αιτίων - Μηχανισμών Πλημμύρας & Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου

Σύμφωνα με το Σχήμα 2.7 και κυρίως με βάση τα παραπάνω ιστορικά συμβάντα οι ιστορικές πλημμύρες και τα επακόλουθά τους στην περιοχή της Αττικής οφείλονται στο συνδυασμό των παρακάτω αιτίων:



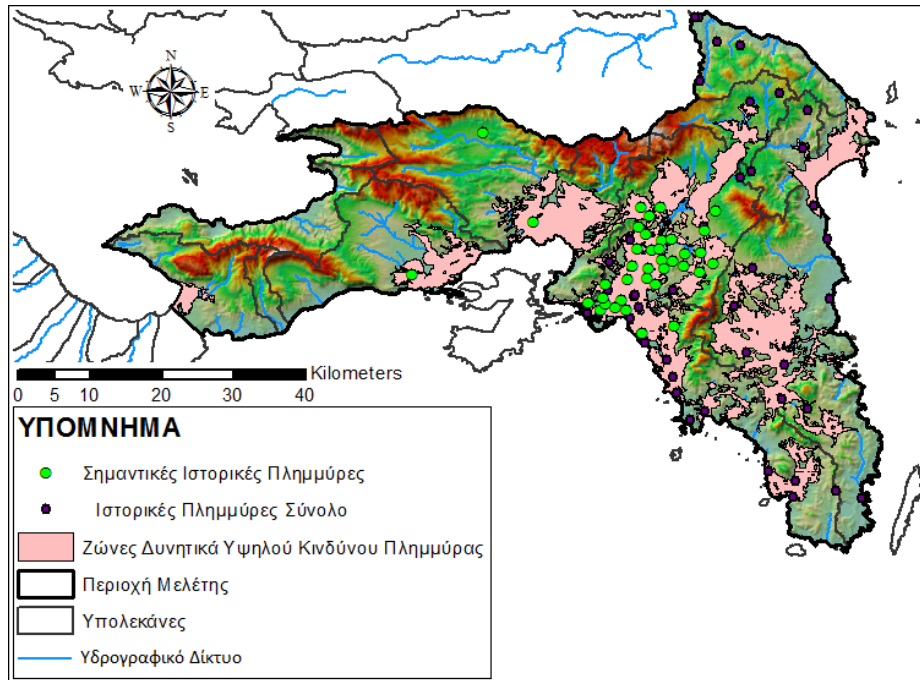
(Πηγή: ΥΠΕΝ/ΕΓΥ, 2017)

Σχήμα 2.7 Κύρια αίτια και Τύποι πλημμυρών

- (α) Βροχόπτωση με υψηλή ένταση
- (β) Ζημιές από ποταμοχειμάρειες αποθέσεις και από διάβρωση εδαφών
- (γ) Ποτάμια πλημμύρα
- (δ) Αστοχία τεχνικών έργων
- (ε) Έλλειψη βαλβίδων αντεπιστροφής στο δίκτυο αποστράγγισης ομβρίων
- (στ) Ελλιπής καθαρισμός αποστραγγιστικού δικτύου είτε αναφέρεται κανείς στις σχάρες των συλλεκτών κατά μήκος του οδικού δικτύου είτε αναφέρεται στα πρηνή των αγωγών
- (ζ) Κατάληψη πλημμυρικού πεδίου για αστικές, αγροτικές ή άλλες μη συναφείς χρήσεις

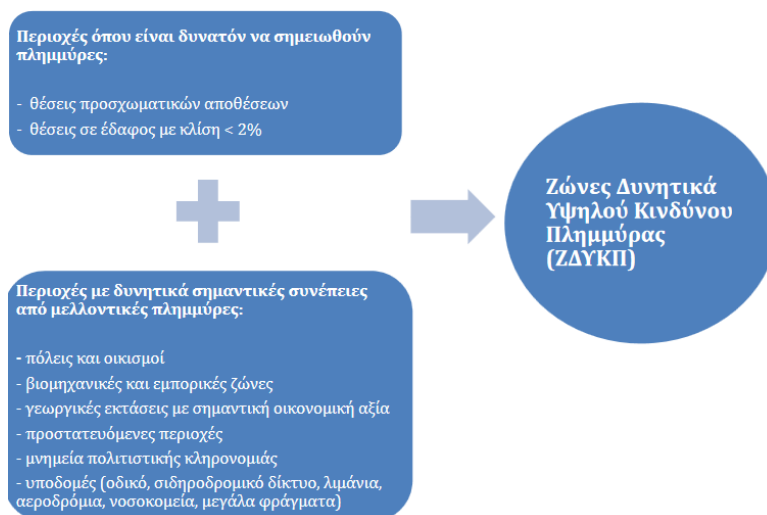
Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αρχικός πολεοδομικός ιστός της Αθήνας χαρακτήριζε εκμεταλλευόμενος πλήρως το φυσικό περιβάλλον για εξοικονόμηση πόρων. Αρχικά οι μικροί ξεροπόταμοι έγιναν δρόμοι και στη συνέχεια τα φερόμενα υπ' αυτών ύδατα διευθετήθηκαν μέσω ειδικά σχεδιασμένων οχετών ομβρίων που ακολουθούν σχεδόν την παλιά ροή με τη διαφορά ότι οι ανοιχτοί φυσικοί αποδέκτες μετατράπηκαν σε συνδυασμό κλειστών υπόγειων και ανοιχτών επίγειων τεχνητών αγωγών. Σήμερα η κοινή γνώμη που εκφράζεται από τα ΜΜΕ θεωρεί ότι η όποια υπερχειλίση δεν είναι αποδεκτή σε όλο το μήκος της αστικής ζώνης ή στις περιοχές που εμφανίζουν οικονομική δραστηριότητα. Επίσης η όποια υπερχειλίση εμφανίζεται στα ανάντι οφείλεται συνήθως στη συμφόρηση των κλειστών αγωγών στα κατάντι. Συνεπώς, μία παραδοχή υπέρ της ασφαλείας και στο πλαίσιο μιας προκαταρκτικής αξιολόγησης του πλημμυρικού κινδύνου στην περιοχή θα ήταν να θεωρηθεί ότι το αποστραγγιστικό δίκτυο του Λεκανοπεδίου είναι ήδη συμφορημένο και ως εκ τούτου να εξεταστεί μόνο η δυνατότητα επιφανειακής απορροής βάση του ανάγλυφου αντί της υφιστάμενης υπογειοποιημένης ή διοδομένης ροής.

Στο χάρτη του Σχήματος 2.8 που ακολουθεί φαίνονται οι ζώνες δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας στην περιοχή μελέτης όπως αυτές δίνονται από την ΥΠΕΝ/ΕΓΥ σύμφωνα με την προκαταρκτική αξιολόγηση κινδύνων πλημμύρας του 2012. Ο υπόψη χάρτης αποτελεί προϊόν πολυκριτηριακής ανάλυσης σύμφωνα με τα κριτήρια που αφορούν το ποιες περιοχές είναι δυνατόν να πλημμυρίσουν και σε ποιες περιοχές θα υπάρξουν δυνητικά σημαντικές συνέπειες από εν δυνάμει μελλοντικές πλημμύρες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9.



(Προέλευση ΥΠΕΝ, 2018 μετά από προσαρμογή)

Σχήμα 2.8 Χάρτης προκαταρκτικής αξιολόγησης κινδύνων πλημμύρας ΥΔ Αττικής

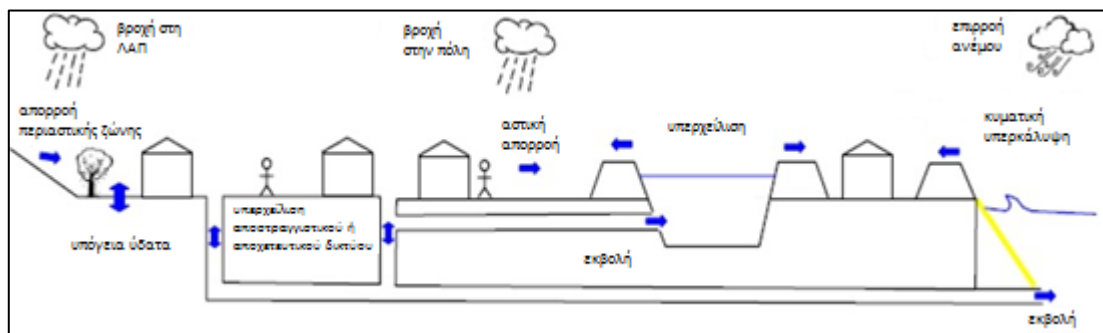


(Πηγή: ΥΠΕΝ/ΕΓΥ, 2017)

Σχήμα 2.9 Κριτήρια και υποκριτήρια προσδιορισμού των Ζωνών Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας

3 Πλημμυρική επικινδυνότητα & ευάλωτες σε πλημμύρες περιοχές

Η ποσοτικοποίηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας σε μια αστική περιοχή αποτελεί πρόκληση, καθώς αυτή είναι προϊόν συγκυριών και συνδυασμού παραγόντων τόσο φυσικών όσο και μηχανικών και δύναται να προσεγγιστεί μέσω της ανάλυσης Source – Pathway – Receptor (προτεινόμενη μετάφραση ως μοντέλο Πηγής – Διαύλου – Αποδέκτη), και που στην περίπτωση της παρούσας εργασίας δύναται να απεικονιστεί όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 (Hall and Dawson, 2005).



(Προέλευση: Hall and Dawson, 2005 μετά από μετάφραση)

Σχήμα 3.1 Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ πηγής – διαύλων – αποδεκτών στην Ολοκληρωμένη Διαχείριση Πλημμυρικής Επικινδυνότητας.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας ακολουθεί μία προσπάθεια καταγραφής, σε γενικές γραμμές, των παραγόντων που καθορίζουν μια εκτίμηση για το μέγεθος της πλημμυρικής επικινδυνότητας, έχοντας υπόψη το Σχήμα 2.7 (σελίδα 15 ανωτέρω) και το Σχήμα 3.1 καθώς και τις ιδιαιτερότητες της περιοχής μελέτης. Έτσι, δύναται να θεωρηθεί ότι σε μια αστική περιοχή οι παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος της πλημμυρικής επικινδυνότητας είναι οι εξής:

- (α) Οι αρχικές συνθήκες που επικρατούν στο σύστημα πριν την βροχή.
- (β) Οι συνθήκες κατά τη βροχοπτώση και τα χαρακτηριστικά της βροχοπτώσης.
- (γ) Η μορφολογία, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και οι τύποι εδαφικής κάλυψη της περιοχής είτε φυσική είτε ανθρωπογενής.

- (δ) Η κατάσταση των δικτύων παροχέτευσης και διόδευσης ομβρίων πριν την εκδήλωση της βροχόπτωσης και όποιου άλλου έργου που μπορεί να αλλάξει τη φυσική υδρολογική απόκριση του συστήματος.
- (ε) Το μέγεθος συνολικά των αρνητικών επιπτώσεων, που θα έχει η εκδήλωση πλημμύρας στην περιοχή μελέτης, στο φυσικό περιβάλλον και την ανθρώπινη δραστηριότητα.

Επιπρόσθετα πρέπει να συνυπολογιστεί ότι σε βροχοπτώσεις μικρής περιόδου επαναφοράς κύριο ρόλο παίζει το δίκτυο ομβρίων της αστικής περιοχής, ενώ σε ακραία φαινόμενα βροχόπτωσης κύριο ρόλο παίζουν οι επιφανειακές συνιστώσες (Bamford et al., 2008).

Για την κατάρτιση κατάλληλων χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας σε μία περιοχή υπάρχουν πολλές μέθοδοι για τη μελέτη τόσο του φαινομένου της πλημμυρογένεσης όσο και του τρόπου πλημμύρισης αυτής. Ωστόσο, η αξιολόγηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας σε μία περιοχή αποτελεί μια διαδικασία προσομοίωσης, αυξημένης πολυπλοκότητας και απαιτεί χρήματα, χρόνο και μεγάλο υπολογιστικό φόρτο. Τις τελευταίες δεκαετίες και στο πλαίσιο της προκαταρκτικής αξιολόγησης της πλημμυρικής επικινδυνότητας παρατηρείται ιδιαίτερο ενδιαφέρον από μέρους της επιστημονικής κοινότητας στη μελέτη του φαινομένου με μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης. Η προσαρμογή αυτών των μεθόδων στη διερεύνηση του φαινομένου και ο συνδυασμός τους με συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών μπορεί να δώσει, ως προϊόν της, χάρτες ζωνών δυνητικής πλημμυρικής επικινδυνότητας και να αποτυπώσει τα όρια των περιοχών δυνητικά υψηλής επικινδυνότητας ή αλλιώς των Ευάλωτων σε πλημμύρες περιοχών.

Στον Πίνακα 3.1 συγκεντρώνονται τα πιο συνήθη σε χρήση κριτήρια από τη βιβλιογραφία που δύναται να χρησιμοποιηθούν σε μία τέτοια πολυκριτηριακή ανάλυση ανάδειξης περιοχών που είναι ευάλωτες σε πλημμύρες, καθώς και ο τρόπος επίδρασής τους στις προς μελέτη περιοχές ως προς την αύξηση ή τη μείωση του ενδεχομένου πρόκλησης πλημμύρας στην εν λόγω περιοχή.

Πίνακας 3.1 Αντιστοίχιση κλίμακας κριτηρίων με την πλημμυρική επικινδυνότητα

Κριτήρια	Κατηγορίες	Πλημμυρική Επικινδυνότητα
Υψόμετρο (Kirby et al., 2002, Yalcin and Akyurek, 2004, Messner and Meyer, 2006, Kandilioti and Makropoulos, 2012, Siddayao et al., 2014, Ouma and Tateishi, 2014, Papaioannou et al., 2015)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Μεγάλο Υψόμετρο 2. Μέσο Υψόμετρο 3. Μικρό Υψόμετρο 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Χαμηλή 2. Μέση 3. Υψηλή
Κλίση (Kirby et al., 2002, Yalcin and Akyurek, 2004, Butler et al., 2006, Boroushaki and Malczewski, 2008, Yahaya, 2008, Kandilioti and Makropoulos, 2012, Ouma and Tateishi, 2014, Papaioannou et al., 2015)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Μεγάλη Κλίση 2. Μέση Κλίση 3. Μικρή Κλίση 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Χαμηλή 2. Μέση 3. Υψηλή

Κριτήρια	Κατηγορίες	Πλημμυρική Επικινδυνότητα
Πυκνότητα Παντοροϊκού Δικτύου (Schmitt et al.,2004, Kirby et al., 2002, Kandilioti and Makropoulos, 2012)	1. Μικρή Πυκνότητα 2. Μέση Πυκνότητα 3. Μεγάλη Πυκνότητα	1. Χαμηλή 2. Μέση 3. Υψηλή
Πυκνότητα Αγωγών (Schmitt et al.,2004, Kirby et al., 2002, Kandilioti and Makropoulos, 2012)	1. Μικρή Πυκνότητα 2. Μέση Πυκνότητα 3. Μεγάλη Πυκνότητα	1. Χαμηλή 2. Μέση 3. Υψηλή
Πυκνότητα Ρεμάτων (Schmitt et al.,2004, Kirby et al., 2002, Yahaya, 2008, Kandilioti and Makropoulos, 2012, Ouma and Tateishi, 2014)	1. Μικρή Πυκνότητα 2. Μέση Πυκνότητα 3. Μεγάλη Πυκνότητα	1. Χαμηλή 2. Μέση 3. Υψηλή
Κατηγορία Χρήσεων Γης (Yalcin and Akyurek, 2004, Schmitt et al., 2004, Correia et al., 1999, Butler et al., 2006, Yahaya, 2008, Kandilioti and Makropoulos, 2012, Ouma and Tateishi, 2014)	1. Φυσικό περιβάλλον 2. Φυσικό περιβάλλον με κάποιες αστικές χρήσεις 3. Διακεκομμένο ή Συνεχές αστικό περιβάλλον	1. Χαμηλή 2. Μέση 3. Υψηλή
Η εγγύτητα στα ρέματα (Ologunorisa and Abawua, 2005, Russel and McBride,2001, Butler et al., 2006, Messner and Meyer, 2006, Boroushaki and Malczewski, 2008, Siddayao et al., 2014.)	1. Μεγάλη απόσταση 2. Μέση απόσταση 3. Μικρή απόσταση	1. Χαμηλή 2. Μέση 3. Υψηλή

3.1 Μεθοδολογίες Λήψης Απόφασης με τη χρήση Γλωσσικών Κλιμάκων, Αριθμοδεικτών και Ασαφούς Λογικής

3.1.1 Γλωσσικές Κλίμακες

Η μεθοδολογία λήψης απόφασης με τη χρήση Γλωσσικών Κλιμάκων βασίζεται στη χρήση της γλώσσας για την καταγραφή χαρακτηριστικών (μιας κατάστασης υπαρκτής ή επιθυμητής) και μπορεί να οδηγήσει μέσα από λεκτικά σχήματα (επιχειρήματα και τεκμηρίωση) στη λήψη μίας απόφασης, η οποία αναδεικνύεται ως βέλτιστη μεταξύ άλλων εναλλακτικών από μια διαδικασία για την ταξινόμηση των χαρακτηριστικών σε κλάσεις της γλωσσικής κλίμακας.

Η εφαρμογή των γλωσσικών κλιμάκων είναι πολύ εύκολη και γρήγορη, και μπορεί να εφαρμοστεί κατά τη διαδικασία της ανάλυσης του προβλήματος για την καλύτερη περιγραφή ή / και για την καλύτερη τεκμηρίωση των ληφθεισομένων αποφάσεων. Εισάγει ένα πιο ευέλικτο πλαίσιο εργασίας το οποίο επιτρέπει την αναπαράσταση των πληροφοριών με έναν πιο άμεσο τρόπο και διευκολύνει όταν δεν μπορούν να καθοριστούν επακριβώς οι ποσοτικές πληροφορίες. Συνεπώς, οι έννοιες καταγράφονται και αξιολογούνται μέσα από λεκτικά σχήματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από αοριστία και υποκειμενικότητα (πχ «μέτριο»,

«καλό», «πολύ καλό» κα) καθώς δεν προσδιορίζεται το μέγεθος της μεταβλητής που χαρακτηρίζεται ώστε να ταξινομηθεί σε μία κατηγορία.

Επιπλέον, μέσα από την αμιγή χρήση γλωσσικών κλιμάκων χάνεται η όποια πληροφορία ποσότητας και δίνεται έμφαση μόνο στον ποιοτικό χαρακτηρισμό της έννοιας που καταγράφεται. Συνήθως προκειμένου να ληφθεί η απόφαση, ο υπεύθυνος ή η ομάδα των υπευθύνων που καλείται να αναλύσει το πρόβλημα, αποφασίζει σύμφωνα με κάποιες έννοιες που παίζουν το ρόλο των κριτηρίων, ταξινομούνται και λαμβάνονται υπόψη. Η καταγραφή των κριτηρίων λήψης απόφασης δεν έχει κανένα νόημα αν αυτά δεν μπορούν να ενταχθούν σε μία ενιαία κλίμακα και να συναξιολογηθούν.

Στον Πίνακα 3.2 που ακολουθεί, φαίνεται ένα παράδειγμα γλωσσικής κλίμακας, η κλίμακα σημαντικότητας του Saaty (Saaty, 1980), που χρησιμοποιείται για συγκρίσεις μεταξύ χαρακτηριστικών ώστε να μπορέσει ο εκάστοτε μελετητής να ιεραρχήσει τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιεί ως κριτήρια για να αποφασίσει. Σημειώνεται ότι η έννοια της σημαντικότητας στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ως συνώνυμο της έννοιας της σχετικής σπουδαιότητας για να περιγράψει τη σύγκριση δυο κριτηρίων μεταξύ τους.

Πίνακας 3.2 Η Γλωσσική κλίμακα σημαντικότητας του Saaty

Γλωσσική Κλίμακα σημαντικότητας
Εξίσου Σημαντικό
Ενδιάμεσο 1
Μέτρια Σημαντικότερο
Ενδιάμεσο 2
Σημαντικότερο
Ενδιάμεσο 3
Πολύ Σημαντικότερο
Ενδιάμεσο 4
Απόλυτα Σημαντικότερο

(Πηγή: Saaty, 1980)

3.1.2 Αριθμητικοί Δείκτες

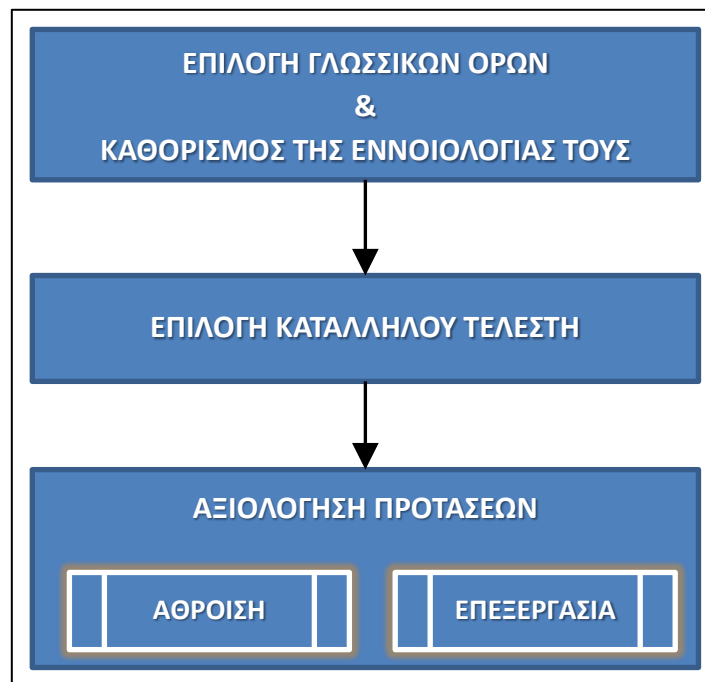
Εν γένει, δεν είναι πάντα εύκολο να επιχειρηματολογεί κανείς, να συγκρίνει ανόμοια πράγματα και να πείθει μόνο με τη χρήση λεκτικών σχημάτων, καθώς π.χ., τα όρια ενός λεκτικού χαρακτηρισμού μπορεί να τροποποιούνται κατά το δοκούν (δηλαδή, να διευρύνονται ή να υποβιβάζονται κατά τρόπο αυθαίρετο και υποκειμενικό) δημιουργώντας ασάφεια που ορισμένες φορές μπορεί να παραπλανήσει.

Έτσι, προκειμένου να υποστηρίζεται η αξιοπιστία της τελικής απόφασης, ταυτόχρονα με τα λεκτικά σχήματα στο χαρακτηρισμό των κριτηρίων, χρησιμοποιούνται και ποσοτικά στοιχεία. Βέβαια, κάποιες έννοιες δεν ποσοτικοποιούνται εύκολα. Αυτό οδηγεί τους μελετητές στην εισαγωγή κατά την ανάλυση των υπόψη εννοιών και κάποιων αριθμητικών δεικτών, οι οποίοι ανάλογα με το ακριβές αριθμητικό αποτέλεσμά τους μας δίνουν μία πληροφορία. Για παράδειγμα η επιρροή των χρήσεων γης στον τρόπο απόκρισης της λεκάνης απορροής κατά την διάρκεια μίας βροχής μπορεί να ποσοτικοποιηθεί μέσα από το δείκτη curve number (§3.3.9 κατωτέρω). Σημειώνεται ότι για κάθε τιμή των αριθμητικών δεικτών δύναται να αντιστοιχίζεται ποσοτικά μια φυσική ποιοτική έννοια γλωσσικής κλίμακας με ακρίβεια, αξιοπιστία και αντικειμενικότητα ανάλογη των δεδομένων από τα οποία προέρχεται.

Στη συνέχεια, αν όλα τα κριτήρια είναι εκφρασμένα μέσω αριθμητικών δεικτών αδιαστατοποιούνται και εκφράζονται σε μία ενιαία αριθμητική κλίμακα απόδοσης (πχ., ως ποσοστό %, ή με τιμές από το 0-10, κλπ.). Κατ' αυτό τον τρόπο τα παραγόμενα αριθμητικά αποτελέσματα μπορούν να συνδυαστούν και να επεξεργαστούν ταχύτερα από Η/Υ. Το πρόβλημα μπορεί να προγραμματιστεί ως διαδικασία βελτιστοποίησης και να αυτοματοποιηθεί μέσω της χρήσης βάσεων δεδομένων, έμπειρων συστημάτων, συστημάτων υποβοήθησης λήψης απόφασης και πολυκριτηριακής ανάλυσης.

3.1.3 Συστήματα Λήψης Απόφασης

Τα Συστήματα λήψης απόφασης ενός προβλήματος με τη χρήση γλωσσικών μεταβλητών περιλαμβάνει τρία βήματα, όπως αυτά φαίνονται και στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 Βασικά Βήματα Ανάδειξης Απόφασης

Βήμα 1^ο : Η κατάλληλη επιλογή του συνόλου των γλωσσικών όρων και η εννοιολογία τους. Αποτελείται από τον ορισμό της κύριας γλωσσικής κλίμακας που χρησιμοποιείται για την παροχή των γλωσσικών τιμών απόδοσης στα διάφορα κριτήρια και στις εναλλακτικές και διαμορφώνουν τη γλωσσική πληροφορία. Η κατασκευή της γλωσσικής κλίμακας περιλαμβάνει δύο επιμέρους βήματα:

- (α) καθορίζεται ο αριθμός των βαθμίδων του συνόλου των γλωσσικών όρων
- (β) καθορίζονται τα ονόματα των βαθμίδων και η σημασία που εκπροσωπούν.

Βήμα 2^ο : Η επιλογή κατάλληλου τελεστή της γλωσσικής πληροφορίας. Βάση της κατάταξης των κριτηρίων λήψης απόφασης στις βαθμίδες της γλωσσικής κλίμακας ο τελεστής θα παίρνει κάποιες τιμές. Η διαδικασία αυτή γίνεται πιο εύκολη αν η γλωσσική πληροφορία έχει εκφραστεί με κατάλληλους αριθμοδείκτες.

Βήμα 3^ο : Η αξιολόγηση των προτάσεων.

Αποτελείται από την επιλογή της βέλτιστης διαθέσιμης εναλλακτικής πρότασης βάσει των παρεχόμενων γλωσσικών τιμών απόδοσης και περιλαμβάνει τις εξής επιμέρους φάσεις (Kacprzyk et al., 2012, Roubens, 1997):

(α) Η Φάση Άθροισης της Γλωσσικής Πληροφορίας:

Αθροίζοντας τις παρεχόμενες γλωσσικές τιμές απόδοσης βάσει όλων των κριτηρίων μέσω του επιλεγμένου αθροιστικού τελεστή της γλωσσικής πληροφορίας υπολογίζεται η συνολική απόδοση κάθε εναλλακτικής αλλά και η σημαντικότητα των κριτηρίων απόφασης για κάθε ένα ξεχωριστά.

(β) Η Φάση Επεξεργασίας:

Αποτελείται από την ιεράρχηση των εναλλακτικών ανάλογα με τη συνολική τιμή απόδοσης ώστε να ληφθεί η βέλτιστη απόφαση.

3.1.4 Το πλαίσιο χρήσης Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic)

Η Ασαφής Λογική αποτελεί τη γενίκευση της κλασσικής λογικής, κατά την οποία μία έννοια μπορεί να κατέχει ένα βαθμό αλήθειας. Η κλασσική λογική εφαρμόζεται μόνο σε έννοιες που είναι ολοκληρωτικά αληθείς ή είναι ολοκληρωτικά λανθασμένες.

Στην καθημερινή ζωή χρησιμοποιούνται επιθετικοί προσδιορισμοί οι οποίοι είναι ανακριβείς, όπως για παράδειγμα «ψηλός», «γερασμένος» κ.α. Στα μαθηματικά πρέπει η περιγραφή να είναι ακριβής, δηλαδή θα πρέπει τα όρια να είναι δοσμένα με σαφήνεια, όπως για παράδειγμα το ύψος και η ηλικία. Στην πραγματικότητα όμως κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα εφικτό, καθώς λίγα πράγματα είναι απλά και ακριβή ή έχουν αντιστοιχία με ένα μετρήσιμο αριθμητικό μέγεθος. Σε αυτό το σημείο μπαίνει η Ασαφής Λογική, η οποία μέσω της αναπαράστασης των λεκτικών όρων από τα ασαφή σύνολα, αποτελεί την γέφυρα επικοινωνίας ανάμεσα στον άνθρωπο και την μηχανή. Δηλαδή για παράδειγμα η έννοια ψηλός μπορεί να παρασταθεί ως αυτός που έχει, με κάποια πιθανότητα, ύψος από 1,70m έως 1,90m¹, και αυτό γιατί μπορεί κάποιος να έχει το ύψος αλλά να μη φαίνεται (περπατάει σκυφτός), επιπλέον, η έννοια γερασμένος μπορεί να εκφράζει με κάποια πιθανότητα τη μέση ηλικιακή ομάδα, κι αυτό γιατί κάποιος μπορεί να φαίνεται πιο γερασμένος από κάποιο με μεγαλύτερη ηλικία, το οποίο αποτελεί ένα ασαφές αριθμητικό σύνολο.

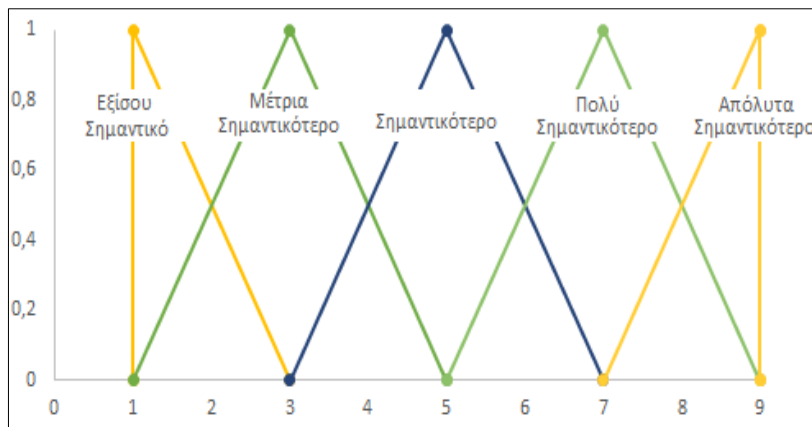
Για την εκτίμηση του κατά πόσο ευάλωτη είναι μία περιοχή του λεκανοπεδίου Αττικής σε πλημμύρες, δύναται να ληφθούν υπόψη αρκετά κριτήρια, διαφορετικής φύσης. Η διαφορετικότητα των κριτηρίων απόφασης ως προς τις πληροφορίες που μεταφέρουν αλλά και η δυσκολία ώστε μερικά από αυτά να εκφραστούν ποσοτικά ή να ταξινομηθούν σε μία ενιαία κλίμακα της οποίας τα όρια είναι σαφώς προσδιορισμένα, κατέστησε απαραίτητη την προσέγγιση του προβλήματος με τη χρήση ασαφούς λογικής (fuzzy logic). Με τον τρόπο αυτό τα κριτήρια, μέσα από μια σειρά μετασχηματισμών, δύναται να εκφράζονται σε μια ενιαία ασαφή κλίμακα. Τέλος στο πλαίσιο της ασαφούς λογικής γίνεται μία προσπάθεια να γεφυρωθούν οι προσεγγίσεις δύο διαφορετικών σεναρίων που αναπτύχθηκαν.

¹ Οι τιμές είναι ενδεικτικές

3.1.4.1 Τα Ασαφή Σύνολα

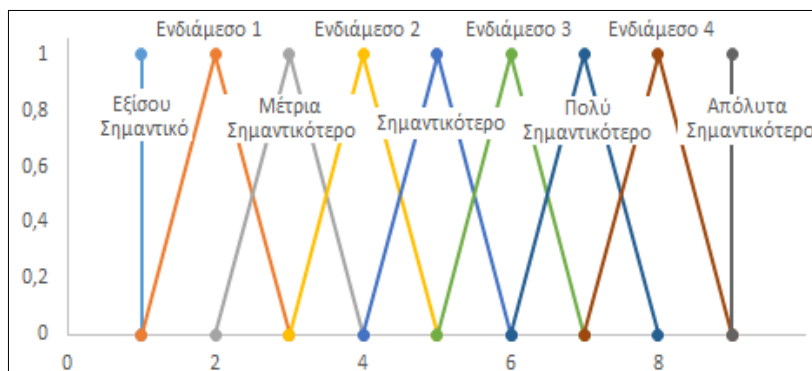
Μια τιμή ορίζεται ως ασαφής (Fuzzy) όταν δύναται να ανήκει ταυτόχρονα σε πολλά υποσύνολα, στο κάθε ένα με μία πιθανότητα ή αλλιώς βαθμό συμμετοχής. Το ασαφές σύνολο περιλαμβάνει τέτοια στοιχεία, που το κάθε ένα έχει ένα βαθμό συμμετοχής σε κάθε υποσύνολο.

Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.3 και 3.4 αναπαριστούν γραφικά τα ασαφή σύνολα τιμών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι αριθμητικές τιμές που μπορεί να πάρει η μεταβλητή και στον κατακόρυφο άξονα το ποσό συμμετοχής από το 0 έως το 1 του κάθε αριθμού στις βαθμίδες της γλωσσικής κλίμακας. Στο διάγραμμα η κάθε γραφική παράσταση που ορίζει την αντιστοιχία υποσυνόλου γλωσσικής κλίμακας ονομάζεται συνάρτηση συμμετοχής (Membership functions ή MF). Για παράδειγμα στο Σχήμα 3.4, ο αριθμός 3 αντιστοιχεί με ποσό 1 στη βαθμίδα «Μέτρια Σημαντικότερο» ενώ το 2,5 αντιστοιχεί κατά 0,5 στη βαθμίδα «Ενδιάμεσο 1» και κατά 0,5 στη βαθμίδα «Μέτρια Σημαντικότερο».



(Πηγή: Junior et al, 2014)

Σχήμα 3.3 Γραφική απεικόνιση της αντιστοιχίας των συναρτήσεων μετασχηματισμού της Γλωσσικής Κλίμακας σε ένα σύνολο ασαφών αριθμών



(Πηγή: Zhou, 2012)

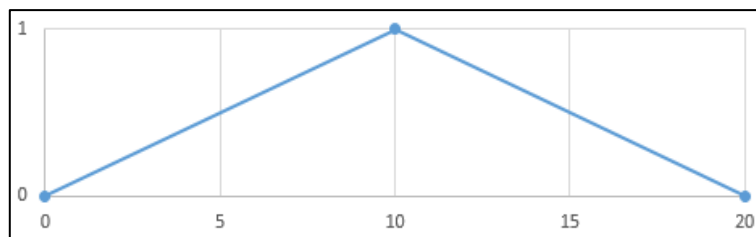
Σχήμα 3.4 Γραφική απεικόνιση της αντιστοιχίας των συναρτήσεων μετασχηματισμού της Γλωσσικής Κλίμακας σε ένα σύνολο ασαφών αριθμών

3.1.4.2 Οι Συναρτήσεις Συμμετοχής

Υπάρχουν διάφοροι τύποι συναρτήσεων συμμετοχής που αναπαριστούν τα ασαφή σύνολα όπως είναι η τριγωνική μορφή (triangular), η τραπεζοειδής (trapezoidal), η καμπανοειδής (generalize bell ή gbell), η γκαουσιανή (gaussian), η μορφή s (s), η μορφή pi (pi), η μορφή z (z), η σιγμοειδής (sigmoidal) ή ακόμα και μια συγκεκριμένη μαθηματική τιμή.

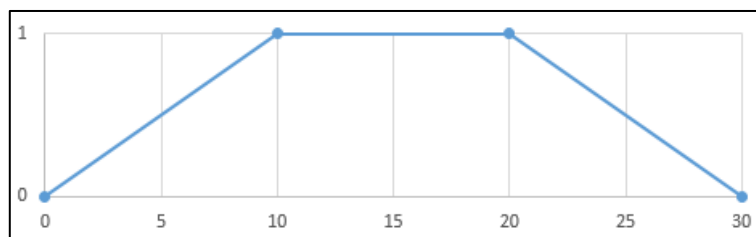
Πιο συχνά, σε εφαρμογές ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης για τη λήψη απόφασης και σε μεθόδους όπως αυτή που ακολουθήθηκε, χρησιμοποιούνται η τριγωνική συνάρτηση ή η τραπεζοειδής (Ziaei and Hajizade, 2011). Σημειώνεται ότι:

- (α) Η τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής χαρακτηρίζεται από τις τρεις παραμέτρους (a, b, c) με $a < b < c$, ως εξής:



Σχήμα 3.5 Παράδειγμα τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής (0,10,20)

- (β) Η τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής χαρακτηρίζεται από τις τέσσερις παραμέτρους (a, b, c, d) με $a < b < c < d$, ως εξής:



Σχήμα 3.6 Παράδειγμα τραπεζοειδούς συνάρτησης συμμετοχής (0,10,20,30)

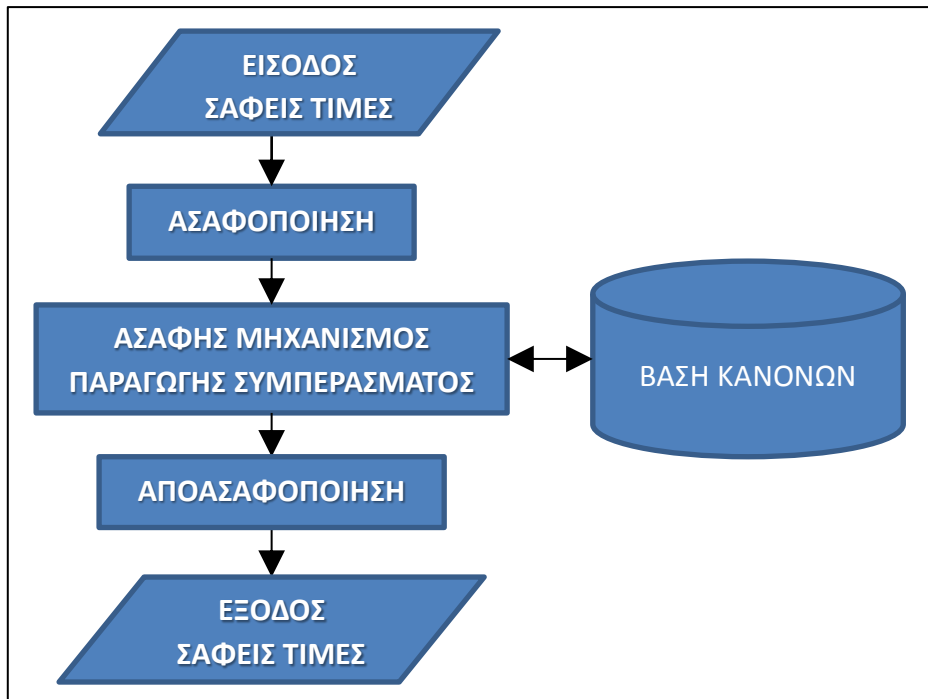
Στην παρούσα εργασία όπως αναφέρθηκε και παραπάνω έγινε χρήση ασαφών συνόλων τριγωνικής μορφής (Σχήματα 3.3, 3.4).

3.1.4.3 Λεκτικοί Τροποποιητές ή Φράκτες

Τα ασαφή σύνολα εκφράζουν ασαφείς έννοιες που χρησιμοποιούνται καθημερινά στη φυσική ανθρώπινη γλώσσα. Οι ασαφείς αυτές έννοιες έχουν τη δυνατότητα να παράγουν άλλες ασαφείς έννοιες με την χρήση λεκτικών τροποποιητών ή φρακτών (linguistic modifiers or linguistic hedges), δηλαδή συγκριτικούς προσδιορισμούς, όπως για παράδειγμα «πολύ», «ελαφρά», «σχεδόν», «περισσότερο», «λιγότερο» κα. Για παράδειγμα ο λεκτικός όρος «ψηλός» με τους παραπάνω λεκτικούς τροποποιητές παράγει ασαφείς έννοιες όπως «πολύ ψηλός» κτλ. Αυτοί οι λεκτικοί τροποποιητές μπορούν να μοντελοποιηθούν αριθμητικά και με ακρίβεια καθώς αναφέρονται σε συγκρίσεις μεγεθών.

3.1.4.4 Ασαφείς Ελεγκτές

Τα βασικά δομικά στοιχεία ενός ασαφούς ελεγκτή φαίνονται στο Σχήμα 3.7 και περιγράφονται στη συνέχεια:



Σχήμα 3.7 Χαρακτηριστικό διάγραμμα ροής ασαφούς ελεγκτή

- (α) Η ασαφής βάση κανόνων στην οποία είναι αποθηκευμένοι οι κανόνες, της μορφής εάν τότε και όλοι οι περιορισμοί, για τον έλεγχο της διαδικασίας.
- (β) Τα σαφή σύνολα που χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν τις μεταβλητές εισόδου και εξόδου λεκτικών όρων ή πραγματικών αριθμών και αντιστοιχούνται σε ασαφείς αριθμούς.
- (γ) Ο ασαφοποιητής που μετατρέπει τις πραγματικές τιμές της εισόδου σε ασαφή σύνολα.
- (δ) Ο μηχανισμός παραγωγής συμπεράσματος ο οποίος ελέγχει τις εξόδους του ασαφοποιητή και με χρήση της βάσης κανόνων και εξάγει τα ασαφή σύνολα των συμπερασμάτων.
- (ε) Ο αποασαφοποιητής ο οποίος μετατρέπει τα ασαφή σύνολα που εξάγει ο μηχανισμός παραγωγής συμπεράσματος σε σαφή σύνολα.

Συνεπώς, ο σχεδιαστής ενός ασαφούς ελεγκτή αναλογιζόμενος τα παραπάνω πρέπει να ακολουθήσει τα εξής βήματα:

Βήμα 1^ο : Πρέπει να ταιριάζει τα αριθμητικά ασαφή σύνολα με τους λεκτικούς όρους του προβλήματος που αναλύεται, πχ., η αντιστοίχιση ασαφών τριγωνικών αριθμών με τη γλωσσική κλίμακα του Saaty (Πίνακας 3.3).

Πίνακας 3.3 Αντιστοίχιση Γλωσσικής Κλίμακας Σημαντικότητας Saaty σε Τριγωνικές Ασαφείς Κλίμακες

Γλωσσική Κλίμακα Σημαντικότητας του Saaty	Τριγωνική Ασαφής Κλίμακα (a)	Τριγωνική Ασαφής Κλίμακα (b)
Εξίσου Σημαντικό	(1,1,1)	(1,1,1)
Ενδιάμεσο 1	(1,2,3)	(1,1,3)
Μέτρια Σημαντικότερο	(2,3,4)	(1,3,5)
Ενδιάμεσο 2	(3,4,5)	(1,3,5)
Σημαντικότερο	(4,5,6)	(3,5,7)
Ενδιάμεσο 3	(5,6,7)	(3,5,7)
Πολύ Σημαντικότερο	(6,7,8)	(7,5,9)
Ενδιάμεσο 4	(7,8,9)	(7,9,9)
Απόλυτα Σημαντικότερο	(9,9,9)	(9,9,9)

(Πηγή (a): Zhou, 2012, Προέλευση (b): Junior et al, 2014 μετά από τροποποιήσεις)

Βήμα 2^ο : Γίνεται η διατύπωση των κανόνων με τη δημιουργία ασαφούς βάσης κανόνων. Οι κανόνες αποθηκεύονται με τη μορφή πιθανού αίτιου – πιθανού αποτελέσματος (εάν τότε).

Βήμα 3^ο : Καθορίζεται ο τύπος της ασαφούς συνεπαγωγής. Οι πιο γνωστοί τύποι ασαφούς συνεπαγωγής είναι (Κανδηλιώτη, 2009):

- (α) του Mamdani, ο οποίος λαμβάνει το μικρότερο από τους βαθμούς συμμετοχής των ασαφών συνόλων και παράγει το βαθμό εκπλήρωσης του κάθε κανόνα.
- (β) του Larsen, ο οποίος πολλαπλασιάζοντας τους βαθμούς συμμετοχής των ασαφών συνόλων υπολογίζει το βαθμό εκπλήρωσης του κανόνα.

Βήμα 4^ο : Καθορίζεται ο τύπος αποασαφοποίησης. Η αποασαφοποίηση παράγει μία πραγματική τιμή από ένα ασαφές σύνολο. Είναι με λίγα λόγια, η αντίστροφη διαδικασία από την ασαφοποίηση. Άρα, μέσα από τη διαδικασία αποασαφοποίησης εκλέγεται ένας πραγματικός αριθμός ως αντιπροσωπευτικός του ασαφούς συνόλου. Η τιμή του υπόψη αριθμού μπορεί να είναι:

- (α) Η Κεντρική τιμή (Centroid defuzzycation ή center of area, COA), όπου υπολογίζεται το κέντρο βάρους της κατανομής του ασαφούς συνόλου της εξόδου.
- (β) Ο μέσος όρος των μεγίστων (Mean of Maxima, MOM), όπου υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών εξόδου που έχουν τον μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής.
- (γ) Ο μικρότερος από τους μέγιστους (Smallest of maxima, SOM), όπου υπολογίζεται από τις μέγιστες τιμές εξόδου εκείνη που έχει το μικρότερο βαθμό συμμετοχής.
- (δ) Ο μεγαλύτερος από τους μέγιστους (Largest of maxima, LOM), όπου υπολογίζεται από τις μέγιστες τιμές εξόδου εκείνη που έχει το μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής.

Σημείωση: Πιο συχνά χρησιμοποιείται η μέθοδος της κεντρικής τιμής ή κεντροειδούς (Centroid ή COA), γιατί παρουσιάζει το μικρότερο σφάλμα σε σχέση με τις υπόλοιπες. Επιπρόσθετα, στην παρούσα μελέτη γίνεται χρήση μίας πιθανοτικής μεθόδου που θα αναλυθεί εκτεταμένα παρακάτω (§3.2.4, Βήμα 2^ο).

3.2 Μεθοδολογία Πολυκριτηριακής Ανάλυσης σε περιβάλλον GIS

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η πολυκριτηριακή ανάλυση, πυρήνας της οποίας είναι μια «αντικειμενική συνάρτηση», βασισμένη σε δεδομένα από γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών της περιοχής του ΥΔ Αττικής.

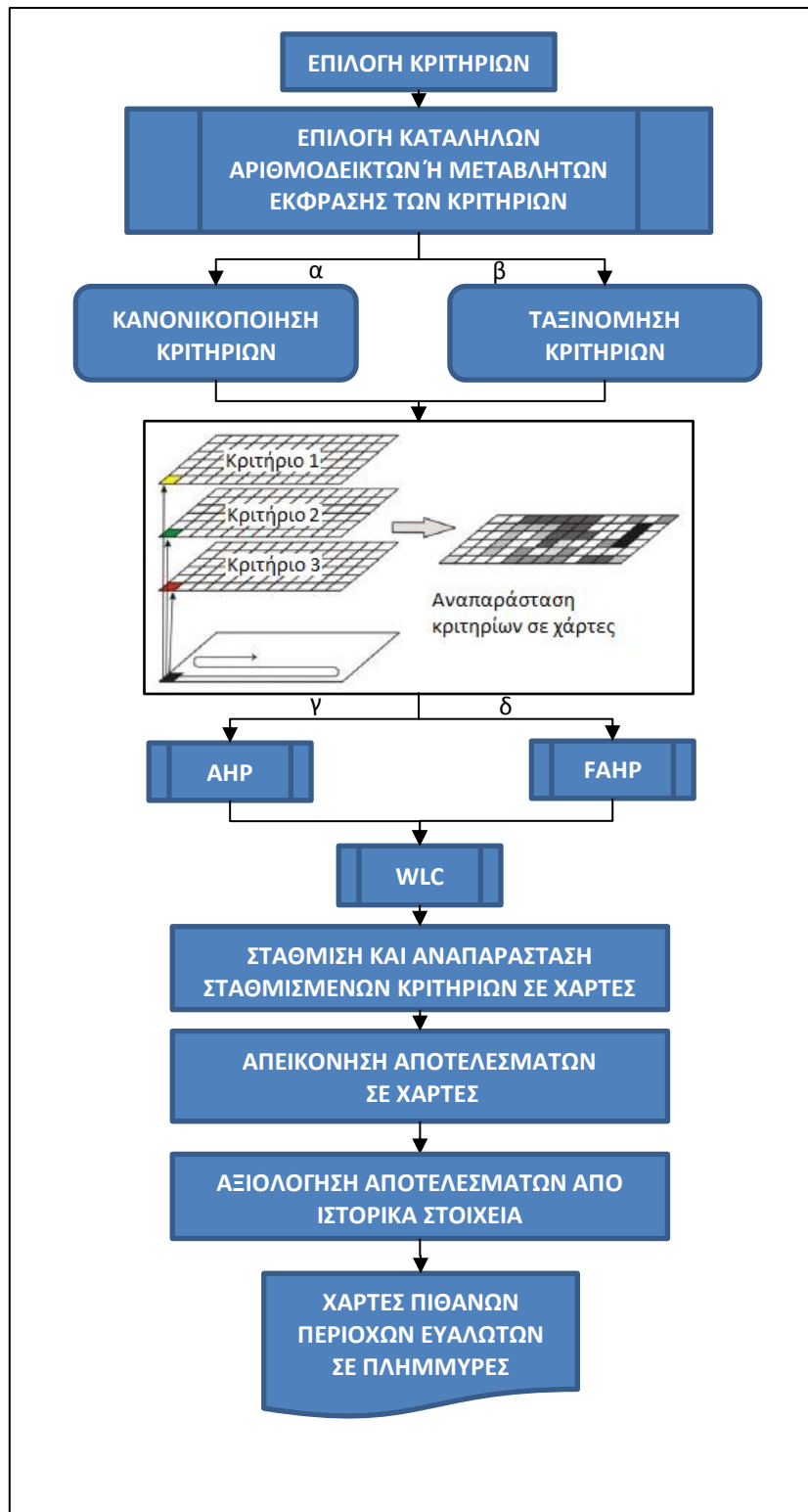
Σκοπός της εφαρμογής της πολυκριτηριακής ανάλυσης είναι, μέσω της διαδικασίας, να αναδειχθούν οι πιθανώς πιο ευάλωτες σε πλημμύρες περιοχές. Η αξιολόγηση έγινε σε επίπεδο λεκάνης απορροής, και με γνώμονα την ελαχιστοποίηση, κατά το μέτρο του δυνατού, της υποκειμενικότητας της μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Σημειώνεται ότι:

- (α) Για την ελαχιστοποίηση της υποκειμενικότητας, η οποία αποτελεί σημαντικό περιορισμό στην εφαρμογή μεθόδων πολυκριτηριακής αξιολόγησης κάποια από τα επιμέρους διαδικαστικά βήματα της διαδικασίας που προτείνεται μοντελοποιήθηκαν και κάποια αποτελούν προϊόν συνδυασμού έτοιμων υφισταμένων εφαρμογών. Αυτός ο συνδυασμός έγινε χειροκίνητα και η παρέμβαση ήταν για την εκκίνηση των αυτοματοποιημένων εργαλείων ώστε να μη χάνεται η εποπτεία όπως σε μοντέλα τύπου μαύρου κουτιού.
- (β) Το προτεινόμενο πλαίσιο αναπτύχθηκε για τον εντοπισμό πιθανών περιοχών που είναι ευάλωτες στις πλημμύρες προκειμένου να μπορεί να εφαρμόζεται σε μεγάλες χωρικές κλίμακες. Στην παρούσα εργασία αυτό το πλαίσιο εφαρμόζεται, αξιολογείται και προτείνονται βελτιώσεις για μεγαλύτερη χωρική κλίμακα από αυτή που έχει ήδη εφαρμοστεί (Papaioannou et al., 2015).
- (γ) Το προτεινόμενο πλαίσιο έχει εφαρμοστεί από Papaioannou et al., 2015 σε περιοχές μικρής και μέτριας ανθρώπινης περιβαλλοντικής παρέμβασης, δηλαδή στη ΛΑΠ του Ξεριά ποταμού στη Θεσσαλία. Στην παρούσα εργασία το υπόψη πλαίσιο εργασίας εφαρμόζεται σε ένα σφιχτό και ιδιαίτερα τροποποιημένο τεχνητό περιβάλλον όπως η αστική ζώνη του ΥΔ Αττικής.

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζονται σε Διάγραμμα Ροής οι διεργασίες εφαρμογής της πολυκριτηριακής ανάλυσης, καθώς και ο τρόπος συνδυασμού της με τη χρήση εφαρμογής γεωγραφικών πληροφοριών και των μεθόδων AHP και FAHP (§3.2.3 και §3.2.4 κατωτέρω). Γενικά προτείνονται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις ανάλυσης:

Ανάλυση α : Αρχικά, όλα τα κριτήρια αφού εκφραστούν και κατανεμηθούν στην περιοχή μελέτης σε χάρτες, κανονικοποιούνται, στη συνέχεια εκφράζονται σε χάρτες και μετά από επεξεργασία τους από τις μεθόδους AHP και FAHP (γ και δ αντίστοιχα στο Σχήμα 3.8) τα αποτελέσματα ταξινομούνται για να δημιουργήσουν τελικά τους χάρτες έκφρασης πιθανών ευάλωτων περιοχών σε πλημμύρες. Άρα, τα X_i κριτήρια απόφασης κανονικοποιούνται μέσω της σχέσης:



Σχήμα 3.8 Το Διάγραμμα ροής διαδικασίας που ακολουθήθηκε

$$X_i = \frac{(R_i - R_{min})}{(R_{max} - R_{min})} \cdot SR, \text{ εάν το κριτήριο θέλουμε να μεγιστοποιηθεί}$$

$$X_i = \frac{(R_{max} - R_i)}{(R_{max} - R_{min})} \cdot SR, \text{ εάν το κριτήριο θέλουμε να ελαχιστοποιηθεί}$$

Όπου:

R_i : είναι οι μη κανονικοποιημένες τιμές

SR : είναι το εύρος των κανονικοποιημένων τιμών, εδώ $SR=1$

max / min : είναι η μέγιστη / ελάχιστη τιμή του κριτηρίου i

Ανάλυση β : Αρχικά, όλα τα κριτήρια αφού εκφραστούν και κατανεμηθούν στην περιοχή μελέτης σε χάρτες, ταξινομούνται, στη συνέχεια εκφράζονται σε χάρτες και μετά από επεξεργασία τους από τις μεθόδους AHP και FAHP (γ και δ αντίστοιχα στην Σχήμα 3.8) τα αποτελέσματα ταξινομούνται για να δημιουργήσουν τελικά τους χάρτες έκφρασης πιθανών ευάλωτων περιοχών σε πλημμύρες. Ειδικότερα, τα κριτήρια απόφασης δύναται να ταξινομούνται μέσω των μεθόδων: Natural Breaks, K-means, FCM, GMMC και CLARA. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται κατά την ανάλυση β η ταξινόμηση μέσω της μεθόδου K-means. Τονίζεται ότι κατά τη χρήση της υπόψη προσέγγισης απαιτείται ελάχιστη μνήμη για την αποθήκευση των κριτηρίων εκάστου κελιού (εν σχέσει προς την Ανάλυση α) πράγμα που οδηγεί και σε μικρότερη πολυπλοκότητα υπολογισμών και κατά συνέπεια σε ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου CPU time.

Στη συνέχεια προτού προχωρήσουμε στην παρουσίαση της πολυκριτηριακής ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία θα παρουσιάσουμε, σε γενικές γραμμές, το συναφές θεωρητικό υπόβαθρο.

3.2.1 Η Μέθοδος Πολυκριτηριακής Ανάλυσης

Εν γένει, οι Μέθοδοι Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (MCA) χρησιμοποιούνται για την ανάλυση μιας σειράς παραγόντων, δηλαδή των κριτηρίων απόφασης, με σκοπό την αξιολόγηση ενός θέματος (πχ κατά πόσον είναι μια περιοχή ευάλωτη σε πλημμύρες) ή τη δημιουργία μιας ενδεδειγμένης από τη μέθοδο επιλογής προερχόμενης από μία ομάδα εργασίας. Τα κριτήρια αφού εκφραστούν κατάλληλα (συνήθως μετά από μια διαδικασία αδιαστατοποίησης) και εκφρασμένα όλα σε μία ενιαία κλίμακα (πχ ποσοστού), χρησιμοποιούνται ως μεταβλητές εισόδου προκειμένου να αποδοθεί ένα «σκορ» ως αποτέλεσμα της αντικειμενικής συνάρτησης που εκπροσωπεί το θέμα που αξιολογείται.

Τα κριτήρια γεωαναφέρονται στα αντίστοιχα εικονοστοιχεία της περιοχής μελέτης των οποίων την πληροφορία μεταφέρουν μέσω εφαρμογής επεξεργασίας γεωγραφικών πληροφοριών και στη συνέχεια εφαρμόζεται η διαδικασία της πολυκριτηριακής ανάλυσης για κάθε εικονοστοιχείο ξεχωριστά. Μία τέτοια ανάλυση είναι εφικτό να υλοποιηθεί για μέγεθος εικονοστοιχείου pixel έως και 20m x 20m (Papaioannou et al., 2015).

Στην παρούσα μελέτη η ανάλυση υλοποιείται σε επίπεδο εικονοστοιχείου pixel 5m x 5m. Σε κάθε εικονοστοιχείο αποδίδεται ως επίδοση («σκορ») η πιθανότητα του κατά πόσον ευάλωτη είναι η υπόψη θέση (περιοχή) σε πλημμύρες, μέσω των τιμών «από 0 έως 1» και «μεγαλύτερες του 1 και μικρότερες του 5», σύμφωνα με την «Ανάλυση α» και την «Ανάλυση β» αντίστοιχα, της §3.2 ανωτέρω. Τελικά τα αποτελέσματα απεικονίζεται σε Χάρτες Ευάλωτων σε Πλημμύρες Περιοχών μέσω του προγράμματος ArcMap 10.2 .

3.2.2 Σταθμισμένος Γραμμικός Συνδυασμός (WLC)

Για την προσέγγιση της αντικειμενικής συνάρτησης της πολυκριτηριακής γίνεται η παραδοχή του σταθμισμένου γραμμικού συνδυασμού (WLC), δηλαδή ότι η αντικειμενική συνάρτηση είναι άθροισμα των σταθμισμένων επιλεγμένων κριτηρίων απόφασης και είναι της μορφής:

$$S = \sum w_i x_i,$$

όπου: S : είναι η αντικειμενική συνάρτηση, δηλαδή αποδίδει το κατά πόσον ευάλωτο είναι ένα εικονοστοιχείο στην πλημμύρα.

w_i : είναι τα βάρη που δείχνουν τη σημαντικότητα του κάθε κριτηρίου απόφασης i

x_i : είναι τα κριτήρια απόφασης i .

Στην παρούσα εφαρμόζονται οι δύο μέθοδοι στάθμισης για την πολυκριτηριακή ανάλυση και αναφέρονται ως (γ) «Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία» (Analytical Hierarchy Process-AHP) και (δ) «Ασαφής Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία» (Fuzzy Analytical Hierarchy Process-FAHP) στην Σχήμα 3.8 και θα αναλυθούν στη συνέχεια.

3.2.3 Η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytical Hierarchy Process-AHP)

Η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP) είναι μια μέθοδος στάθμισης των κριτηρίων απόφασης της πολυκριτηριακής ανάλυσης μέσω της σύγκρισης των κριτηρίων απόφασης σε ζεύγη.

Η AHP χρησιμοποιεί ιεραρχικές δομές για να αναπαραστήσει ένα πρόβλημα και, στη συνέχεια, αναπτύσσει προτεραιότητες μεταξύ των κριτηρίων απόφασης βάσει της κρίσης του μελετητή (Saaty 1980). Αυτό γίνεται κάνοντας χρήση της γλωσσικής κλίμακας του Saaty και την αντιστοίχιση των γλωσσικών πληροφοριών με ακέραιους αριθμούς από το 1 έως το 9 όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.4 και θα αναλυθεί παρακάτω. Η AHP περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

Πίνακας 3.4 Μετατροπή της Γλωσσικής Κλίμακας Σημαντικότητας σε σαφείς τιμές AHP.

Γλωσσική Κλίμακα σημαντικότητας	Τιμές σημαντικότητας	Τιμές μη σημαντικότητας
Εξίσου Σημαντικό	1	1
Ενδιάμεσο 1	2	1/2
Μέτρια Σημαντικότερο	3	1/3
Ενδιάμεσο 2	4	1/4
Σημαντικότερο	5	1/5
Ενδιάμεσο 3	6	1/6
Πολύ Σημαντικότερο	7	1/7
Ενδιάμεσο 4	8	1/8
Απόλυτα Σημαντικότερο	9	1/9

(Πηγή: Saaty and Vargas, 1991)

Βήμα 1^ο: Καθορίζεται μια ιεραρχία σημαντικότητας μεταξύ των κριτηρίων απόφασης που έχουν επιλεγεί για την πολυκριτηριακή ανάλυση και καταγράφονται οι απόψεις του μελετητή. Η καταγραφή γίνεται με μορφή ερωτηματολογίου σύγκρισης των κριτηρίων ανά

δύο, δηλαδή μέσα από συγκρίσεις ζευγών και με βάση τη γλωσσική κλίμακα και τη μετατροπή της σε σαφείς αριθμούς από το 1 έως το 9, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.4. Για παράδειγμα, αν επιλέχτηκαν ως κριτήρια τα A_1 και A_2 τότε ο μελετητής θα πρέπει να τα συγκρίνει, έστω ότι A_1 σημαντικότερο A_2 σύμφωνα με τις απόψεις του μελετητή, τότε λοιπόν καταγράφεται σύμφωνα με τον Πίνακα 3.4 για το ζεύγος $A_1 - A_2$: 5 και για το $A_2 - A_1$: 1/5. Τόσο οι τιμές σημαντικότητας όσο και η αμοιβαία κλίμακα μη σημαντικότητας θα αναφέρονται ως τιμές σημαντικότητας.

Βήμα 2^ο: Δημιουργείται ο Πίνακας A Σύγκρισης Ζευγών των διατεταγμένων κριτηρίων.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Ο εν λόγω πίνακας έχει την ιδιότητα τα στοιχεία $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$, όπου i είναι οι γραμμές, j οι στήλες και a_{ij} οι τιμές σημαντικότητας. Επίσης, $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$, όπου w τα αντίστοιχα βάρη των κριτηρίων απόφασης και A_1 έως A_n , τα κριτήρια απόφασης.

$$Aw = \begin{matrix} & \begin{matrix} A_1 & \dots & A_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} w_1/w_1 & \dots & w_1/w_n \\ \vdots & \dots & \vdots \\ w_n/w_1 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = nw$$

Δηλαδή για τα ζεύγη του παραδείγματος παραπάνω («Βήμα 1») $a_{12}=5$ και $a_{21}=1/5$.

Βήμα 3^ο: Εκτιμώνται οι επιμέρους βαρύτητες δηλαδή, τα βάρη σημαντικότητας w των κριτηρίων σύμφωνα με τον πίνακα σύγκρισης ζευγών. Η διαδικασία αναλύεται στα εξής επιμέρους βήματα:

- (α) Προστίθενται οι τιμές κάθε στήλης του πίνακα σύγκρισης ζευγών.
- (β) Διαιρούνται τα στοιχεία του πίνακα με το αντίστοιχο άθροισμα της στήλης που ανήκουν δημιουργώντας έτσι τον κανονικοποιημένο πίνακα σύγκρισης ζευγών.
- (γ) Υπολογίζονται οι μέσοι όροι των στοιχείων κάθε γραμμής του κανονικοποιημένου πίνακα ξεχωριστά, διαιρώντας το αλγεβρικό τους άθροισμα με το πλήθος τους, το αποτέλεσμα αυτής της πράξης είναι και οι ζητούμενες βαρύτητες.

Βήμα 4^ο: Αξιολογείται η συνέπεια (ή συνοχή) μέσω του εύρους συνοχής CR , για $CR=CI/RI$, όπου Ci ο δείκτης συνοχής και RI ο τυχαίος δείκτης. Το επιθυμητό εύρος πρέπει να είναι σύμφωνα με τον Saaty $CR < 0.1$. Αν δεν είναι, τότε θα πρέπει να αναθεωρηθούν οι κρίσεις σε ένα ή περισσότερα ζεύγη, κάνοντας αλλαγές κατευθείαν στον Πίνακα Σύγκρισης Ζευγών (που παρήχθη στο Βήμα 2) στα a_{ij} . Το Ci υπολογίζεται από την παρακάτω διαδικασία:

- (α) Το κάθε στοιχείο της στήλης του πίνακα A πολλαπλασιάζεται με το αντίστοιχο βάρος του κριτηρίου που εκπροσωπεί η στήλη δημιουργώντας έναν πίνακα $C = a_{ij} \cdot w_j$
- (β) Τα στοιχεία των γραμμών του πίνακα C αθροίζονται, δημιουργώντας ένα διάνυσμα λ , όπου $\lambda_i = \sum_j c_{ij}$
- (γ) Τα στοιχεία του πίνακα C διαιρούνται με τα βάρη των κριτηρίων των αντίστοιχων γραμμών και προστίθενται για να δώσουν το λ_{max} , όπου: $\lambda_{max} = \sum_i \lambda_i / w_i$.
- (δ) Υπολογίζεται το CI από τη σχέση $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$, όπου n είναι το πλήθος των κριτηρίων.
- (ε) Τέλος, υπολογίζεται το RI από τον Πίνακα 3.5

Πίνακας 3.5 Η αντιστοίχιση των τιμών RI , ανάλογα με το πλήθος των κριτηρίων n .

Random index															
Order	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R.I.	0.00	0.00	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	1.59
First order differences		0.00	0.52	0.37	0.22	0.14	0.10	0.05	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01

(Πηγή: Saaty and Tran, 2007)

Βήμα 5^ο: Από τα παραπάνω παράγονται Πίνακες A που απεικονίζουν τις επιμέρους απόψεις του κάθε μελετητή. Στο παρόν βήμα διαμορφώνεται ένας πίνακας που περιλαμβάνει όλες τις απόψεις των μελετητών ταυτόχρονα με τη χρήση της λογικής του Μέσου Όρου. Δηλαδή, παράγεται ένας Πίνακας A' με επιμέρους στοιχεία το ΜΟ των αντίστοιχων στοιχείων των πινάκων A που συλλέχτηκαν. Τα στοιχεία του νέου Πίνακα αξιολογούνται σύμφωνα με τη διαδικασία του 4^{ου} Βήματος και στη συνέχεια αποδίδονται οι βαρύτητες w_i που θα χρησιμοποιηθούν στην πολυκριτηριακή.

3.2.4 Η Ασαφής Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Fuzzy Analytical Hierarchy Process-FAHP)

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί πολλές μεθοδολογίες ασαφούς λογικής, οι βασικές αρχές της οποίας παρουσιάζονται ανωτέρω. Στην παρούσα εργασία, εφαρμόστηκε η εκτεταμένη μέθοδος ασαφούς αναλυτικής ιεραρχικής διαδικασίας (Fuzzy Analytical Hierarchy Process – FAHP) (Chang, 1996).

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τριγωνικούς ασαφείς αριθμούς, αντιστοιχίζοντάς τους στους πραγματικούς αριθμούς και την αντίστοιχη γλωσσική κλίμακα του Saaty, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα των Σχημάτων 3.3 και 3.4. Έχουν δοκιμαστεί διάφορες συναρτήσεις μετασχηματισμού της γλωσσικής κλίμακας σε ασαφείς αριθμούς (Bulut et al., 2012, Lee 2010). Εδώ χρησιμοποιούνται οι μετασχηματισμένες γλωσσικές κλίμακες σημαντικότητας σε ασαφείς τριγωνικές κλίμακες, όπως φαίνεται και στους Πίνακες 3.6 (α) και (β).

Η αντιστοιχία των Πινάκων 3.6 (α) και (β) χρησιμοποιείται απευθείας, μετατρέποντας τους σαφείς πίνακες Σύγκρισης Ζευγών που παρήχθησαν κατά τη διαδικασία της AHP σε μετασχηματισμένους ασαφείς τριγωνικής κλίμακας.

Μελετώντας τα παραπάνω παρατηρείται ότι ο Saaty στην κλίμακά του για να εξαλείψει την αβεβαιότητα του μελετητή και τη δυσκολία του να κατατάξει κάποιο κριτήριο σε μία καθαρή κατηγορία, δηλαδή σε έναν από τους αριθμούς 1,3,5,7 ή 9, εισάγει τις ενδιάμεσες κατηγορίες που ουσιαστικά δεν έχουν κάποια άλλη φυσική ερμηνεία πέραν του ότι βρίσκονται στην ενδιάμεση περιοχή δυο καθαρών κατηγοριών. Τα σύνολα ασαφών αριθμών προσδίδουν την έννοια της περιοχής στις κατηγορίες της γλωσσικής κλίμακας και εκφράζουν και αλληλοεπικαλύψεις, δηλαδή αν ένας μελετητής δεν μπορεί να ξεχωρίσει αν κάτι είναι «Σημαντικότερο» ή «Πολύ Σημαντικότερο», αυτό μπορεί να το εκφράσει μέσα από τις συναρτήσεις μετασχηματισμού που θα επιλέξει για να τον εκφράζουν και να αποτυπώνουν την όποια αβεβαιότητά του. Μπορεί αν θέλει να εισάγει και κάποιο υβριδικό σύστημα όπου κάποια κριτήρια συγκρίνονται με αντιστοιχία σε πραγματικούς αριθμούς, ενώ κάποια άλλα σε ασαφείς (Ishizaka, 2014).

Πίνακας 3.6 Αντιστοιχίζοντας τη Γλωσσική Κλίμακα Σημαντικότητας σε Κλίμακες Τριγωνικών Ασαφών Αριθμών

(α) Γλωσσική Κλίμακα σημαντικότητας	Τιμές κλίμακας FAHP	
	Τιμές σημαντικότητας	Τιμές μη σημαντικότητας
Εξίσου Σημαντικό	(1,1,1)	(1,1,1)
Ενδιάμεσο 1	(1,2,3)	(1/3,1/2,1)
Μέτρια Σημαντικότερο	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)
Ενδιάμεσο 2	(3,4,5)	(1/5,1/4,1/3)
Σημαντικότερο	(4,5,6)	(1/6,1/5,1/4)
Ενδιάμεσο 3	(5,6,7)	(1/7,1/6,1/5)
Πολύ Σημαντικότερο	(6,7,8)	(1/8,1/7,1/6)
Ενδιάμεσο 4	(7,8,9)	(1/9,1/8,1/7)
Απόλυτα Σημαντικότερο	(9,9,9)	(1/9,1/9,1/9)

(Πηγή: Zhou, 2012)

(β)	Τιμές κλίμακας FAHP	
	Τιμές σημαντικότητας	Τιμές μη σημαντικότητας
Εξίσου Σημαντικό	(1,1,1)	(1,1,1)
Ενδιάμεσο 1	(1,1,3)	(1/3,1,1)
Μέτρια Σημαντικότερο	(1,3,5)	(1/5,1/3,1)
Ενδιάμεσο 2	(1,3,5)	(1/5,1/3,1/5)
Σημαντικότερο	(3,5,7)	(1/7,1/5,1/3)
Ενδιάμεσο 3	(3,5,7)	(1/7,1/5,1/3)
Πολύ Σημαντικότερο	(5,7,9)	(1/9,1/5,1/7)
Ενδιάμεσο 4	(7,9,9)	(1/9,1/9,1/7)
Απόλυτα Σημαντικότερο	(9,9,9)	(1/9,1/9,1/9)

(Προέλευση: Junior et al., 2014 μετά από τροποποιήσεις)

Από τα παραπάνω καταλαβαίνει κανείς ότι η αντιστοιχία των ασαφών κατηγοριών σε ασαφείς αριθμούς δημιουργεί μεγαλύτερη ασάφεια και μπερδεύει αντί να συγκεκριμενοποιήσει την αβεβαιότητα του μελετητή (Saaty and Tran, 2007).

Για παράδειγμα, εάν κάποιος θέλει να ερμηνεύσει την έννοια της ασαφούς τριπλέτας 1,2,3 της αντιστοιχίας του Zhou (2012), με μια πρόχειρη ματιά βλέπει από το Σχήμα 3.4 ότι περιλαμβάνει την περιοχή ανάμεσα στο «Εξίσου Σημαντικό» και «Μέτρια Σημαντικότερο». Ειδικότερα, παρατηρεί ότι είναι ένα κενό σύνολο το οποίο δεν έχει καμία απολύτως φυσική

ερμηνεία. Οι τιμές από το 1 έως το 2 δεν ορίζεται σε ποιο σύνολο ανήκουν, εκτός του «Ενδιάμεσου 1» κατά υπόλοιπο ποσοστό τους, το οποίο εξηγείται βέβαια από την ύπαρξη του κάτω ορίου στην κλίμακα και επειδή οι αριθμοί που μετατρέπουμε είναι ακέραιοι (δεν παίζει κάποιο ρόλο καθώς τελικά ερμηνεύεται ως κάτι ανάμεσα στο «Εξίσου Σημαντικό» και το «Ενδιάμεσο 1»). Οι τιμές από την άλλη μεταξύ του 2 και του 3 ανήκουν στο σύνολο «Ενδιάμεσο 1» και ταυτόχρονα στο Σύνολο «Μέτρια Σημαντικότερο». Δηλαδή, εδώ εκφράζονται και οι καθαρές κατηγορίες και οι ενδιάμεσες ως περιοχές ενώ ουσιαστικά θα έπρεπε να εκφράζονται μόνο οι καθαρές κατηγορίες. Έτερο παράδειγμα, η τριπλέτα 1,3,5 του Σχήματος 3.3 αποτελεί την έκφραση της καθαρής κατηγορίας «Μέτριας Σημαντικότητας» όπου οι τιμές από το 1 έως 3 ανήκουν στις καθαρές κατηγορίες «Εξίσου Σημαντικό» και «Μέτρια Σημαντικότερο» ενώ οι τιμές από 3 έως 5 ανήκουν στις καθαρές κατηγορίες «Μέτρια Σημαντικότερο» και «Σημαντικότερο». Βέβαια, ενώ πλέον η γλωσσική κλίμακα εκφράζεται απόλυτα μέσα από ασαφείς αριθμούς δεν υπάρχει άμεση αντιστοιχία στις τιμές 2, 4, 6 και 8, καθώς οι ενδιάμεσες κατηγορίες έχουν ενσωματωθεί στις καθαρές κατηγορίες, διευρύνοντάς τους τα όρια και δημιουργώντας αλληλεπικαλυπτόμενες ζώνες. Οι παραδοχές που έγιναν για να υπάρξει αντιστοιχία είναι ότι το «Ενδιάμεσο 1» μπορεί να εκφραστεί από το χώρο 1,1,3 και εκφράζει την έννοια του «περίπου ίσου» στα μαθηματικά (πχ μεταξύ διαφορετικών κριτηρίων) καθώς το 1,1,1 εκφράζει την έννοια της απόλυτης ισότητας (πχ όταν συγκρίνουμε ίδια πράγματα δηλαδή η διαγώνιος του πίνακα σύγκρισης ζευγών) και κατά παρόμοιο τρόπο το «Ενδιάμεσο 4» αντιστοιχίζεται στο χώρο 7,9,9 και εκφράζει τη μαθηματική έννοια του να τείνει στο απόλυτο καθώς το 9,9,9 είναι η έννοια του απόλυτου. Πραγματικό πρόβλημα υπάρχει στις Ενδιάμεσες κατηγορίες 2 και 3 όπου στην παρούσα εργασία ταξινομήθηκαν στην προηγούμενη κοντινότερη κατηγορία ασαφούς συνόλου. Βέβαια, προκειμένου να αποδειχθεί ότι η υπόψη προσέγγιση είναι η ενδεδειγμένη θα πρέπει να διενεργηθεί ειδική προς τούτο μελέτη.

Τέλος, από τη διαδικασία της FAHP υπολογίζονται τα βάρη για την πολυκριτηριακή ανάλυση με τρόπο παρόμοιο με αυτό της AHP. Στην FAHP ο πίνακας σύγκρισης ζευγών A αποτελείται από ασαφείς αριθμούς και έχει τη μορφή:

$$A = \begin{bmatrix} (1,1,1) & (l_{12}, m_{12}, u_{12}) & \cdots & (l_{1n}, m_{1n}, u_{1n}) \\ (l_{21}, m_{21}, u_{21}) & (1,1,1) & \cdots & (l_{2n}, m_{2n}, u_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (l_{n1}, m_{n1}, u_{n1}) & (l_{n2}, m_{n2}, u_{n2}) & \cdots & (1,1,1) \end{bmatrix}$$

που έχει αντίστοιχες ιδιότητες με τον πίνακα της AHP, δηλαδή:

$$a_{ji} = a_{ij}^{-1} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})^{-1} = \left(\frac{1}{u_{ij}}, \frac{1}{m_{ij}}, \frac{1}{l_{ij}} \right)$$

Σύμφωνα με τον Chang (1996), όπως περιγράφεται και από τον Χαρίλα (2012) η διαδικασία υπολογισμού των βαρών είναι η ακόλουθη:

Βήμα 1^ο: Υπολογίζονται για κάθε κριτήριο απόφασης i , τα στοιχεία S_i που ονομάζονται fuzzy synthetic extent, και αποτελούν τα διανύσματα των ασαφών βαρών και δίνονται από τις σχέσεις ως ακολούθως:

$$S_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{kj} \right]^{-1}, \sum_{j=1}^n a_{ij} = \left(\sum_{j=1}^n l_{ij}, \sum_{j=1}^n m_{ij}, \sum_{j=1}^n u_{ij} \right) \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij}} \right)$$

Βήμα 2^ο: Μετατρέπεται το διάνυσμα ασαφών αριθμών των βαρών S στο αντίστοιχο διάνυσμα πραγματικών αριθμών (V). Σημειώνεται ότι αρχικά υπολογίζονται οι πιθανότητες το στοιχείο S_i να είναι μεγαλύτερο από το στοιχείο S_k και δημιουργείται το διάνυσμα $V_i = \min(V(S_i \geq S_k))$, όπου:

$$V(S_i \geq S_k) = \begin{cases} 1, & \text{όταν } m_i \geq m_k \\ 0, & \text{όταν } l_k \geq u_i \\ \frac{l_k - u_i}{(m_i - u_i) - (m_k - l_k)}, & \text{σε άλλη περίπτωση} \end{cases},$$

Γράφοντας $V(S_i \geq S_k)$ εννοείται ότι γίνεται σύγκριση του S του κριτηρίου i διαδοχικά με όλα τα υπόλοιπα S , δηλαδή για k από ένα έως n όπου n το πλήθος των κριτηρίων. Οι έλεγχοι της παραπάνω εξίσωσης γίνονται με τη σειρά που αναγράφονται.

Βήμα 3^ο: Κανονικοποιώντας το διάνυσμα V ώστε οι όροι του να έχουν άθροισμα 1, τελικά, υπολογίζεται το διάνυσμα των πραγματικών βαρών W .

3.2.5 Οι Τεχνικές ταξινόμησης

Όλες οι υπόψη μέθοδοι χαρακτηρίζονται ως μέθοδοι ταξινόμησης επειδή δημιουργούν κλάσεις δεδομένων. Όπως αναφέρθηκε ήδη και παραπάνω §3.2, οι μέθοδοι ταξινόμησης εφαρμόστηκαν σε δύο περιπτώσεις κατά τη διαδικασία:

1^η: Η ταξινόμηση με τη μέθοδο Natural Breaks εφαρμόστηκε στο τέλος της διαδικασίας προκειμένου οι περιοχές να ταξινομηθούν σε χρωματικές κατηγορίες επικινδυνότητας και να παρουσιαστούν με ευκρίνεια («Ανάλυση α» και «Ανάλυση β» Σχήματος 3.8, §3.2 ανωτέρω). Αυτή η διαδικασία γίνεται μόνο για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε 5/βάθμια χρωματική κλίμακα από το πράσινο στο κόκκινο αντί της συνεχούς γραμμικής αναπαράστασης από το μικρότερο στο μεγαλύτερο με τη χρωματική κλίμακα από πράσινο σε κόκκινο.

2^η: Η ταξινόμηση με τη μέθοδο K-means εφαρμόστηκε απευθείας στα κριτήρια, προκειμένου αυτά να αδιαστατοποιηθούν κατά την «Ανάλυση β» σε αντιστάθμισμα της κανονικοποίησης που γίνεται κατά την «Ανάλυση α» (Σχήμα 3.8).

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε ταξινόμηση για 5 κλάσεις σημαντικότητας για την ταξινόμηση των κριτηρίων σε αντιστοιχία με τις 5 κλάσεις επικινδυνότητας περιοχών σε πλημμύρες και για την τελική παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε έναν ενιαίο χάρτη χρησιμοποιήθηκαν οι 5 κλάσεις επικινδυνότητας. Αυτή η επιβολή, 5 τάξεων κινδύνου στα αποτελέσματα, ακολουθείται και σε παρόμοιες μελέτες για τον εντοπισμό των ευάλωτων σε πλημμύρες περιοχών (Kourgialas and Karatzas, 2011; Stefanidis and Stathis, 2013; Zou et al. 2013, Papaioannou et al 2015).

Οι αλγόριθμοι ταξινόμησης κατηγοριοποιούνται βάσει του μοντέλου ταξινόμησης. Για εφαρμογές παρόμοιες με αυτή της παρούσας εργασία έχουν προταθεί οι ακόλουθες μέθοδοι:

- (α) Natural Breaks του Jenks (Stefanidis and Stathis, 2013, Papaioannou et al., 2015, Yalcin and Akyurek, 2004)
- (β) K-mean (Papaioannou et al., 2015, Kar et al, 2015)
- (γ) Fuzzy c-mean (Papaioannou et al, 2015, Kar et al, 2015, Gautam et al, 2016)
- (δ) Gaussian Mixture Model (Papaioannou et al, 2015)
- (ε) Clustering Large Applications CLARA (Kaufman and Rousseeuw, 2009, Papaioannou et al, 2015, Makki, 2017).

3.3 Ανάλυση Προβλήματος και Διαδικασία Επιλογής Κριτηρίων

Οι επιλεγμένες μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή σχέσεων μεταξύ των επιλεγμένων κριτηρίων. Στην παρούσα ανάλυση, τα χρησιμοποιούμενα κριτήρια είναι ποσοτικές πληροφορίες του ανάγλυφου με γεωαναφορά στο χώρο υπό τη μορφή χαρτών ειδικού σκοπού. Για την ταυτοποίηση των ευάλωτων σε πλημμύρες περιοχών και την εκτίμηση πιθανότητας εμφάνισης σε αυτές, είναι σημαντική η κατάλληλη επιλογή δεικτών που θα αντιπροσωπεύουν τα χαρακτηριστικά της περιοχής και τους μηχανισμούς που επηρεάζουν την εμφάνιση πλημμυρών ως κριτήρια απόφασης κατά την εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Επιπλέον, αυτά τα χαρακτηριστικά ή οι ιδιότητες πρέπει να έχουν μετρηθεί ή να υπολογίζονται γρήγορα, για ολόκληρη την περιοχή μελέτης και να έχουν απλή ερμηνεία. Άρα σημαντικός παράγοντας για την επιλογή ενός κριτηρίου για την πολυκριτηριακή ανάλυση είναι η διαθεσιμότητα των δεδομένων που υπάρχουν, καθώς και ο χρόνος που χρειάζονται για να επεξεργαστούν και να μετατραπούν σε αξιοποιήσιμα κριτήρια με τη μορφή χαρτών ειδικών πληροφοριών.

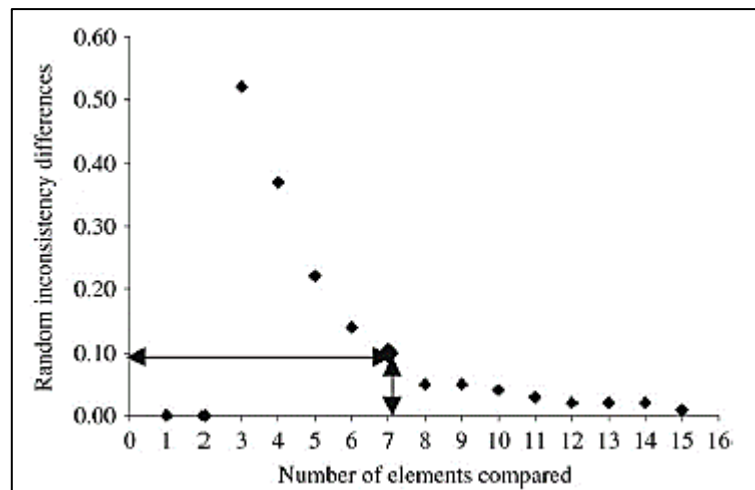
3.3.1 Διαδικασία αξιολόγησης των αρχικά επιλεγμένων κριτηρίων

Οι μέθοδοι AHP και FAHP δεν λειτουργούν καλά για άπειρο πλήθος κριτηρίων. Ειδικότερα, παρατηρώντας τον τυχαίο δείκτη συσχέτισης (Πίνακας 3.5) και τη μεταβολή του ανάλογα με το πλήθος n των κριτηρίων παρατηρείται ότι για αύξηση του πλήθους κριτηρίων από 6 σε 7 η διαφορά στον τυχαίο δείκτη είναι 0,10 (Σχήμα 3.9) πράγμα το οποίο συνεπάγεται ότι οι μελετητές κατά τη διαμόρφωση του πίνακα συγκρίσεων ζευγών δεν είναι σε θέση να κάνουν αλλαγές σε διάφορα στοιχεία ταυτόχρονα και με ακρίβεια. (Saaty and Tran, 2007)

Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζονται ως γραφική παράσταση οι διαφορές της τρίτης σειράς του Πίνακα 3.5 και δείχνει τη σημασία του αριθμού «7» ως σημείο αποκοπής, πέρα από το οποίο οι διαφορές είναι μικρότερες από 0,10 όπου οι μελετητές δεν είναι αρκετά ευαίσθητοι για να κάνουν ακριβείς αναθεωρήσεις στην κρίση τους σε διάφορα κριτήρια ταυτόχρονα. Επιπλέον το υπόψη Σχήμα 3.9 δείχνει ότι ένα πρόβλημα πολυκριτηριακής ανάλυσης μπορεί

να περιγράφεται από το πολύ 15 κριτήρια, πλην όμως, τα τελευταία 8 θα έχουν αμελητέα επίδραση σε σχέση με τα πρώτα 7.

Επιπλέον, για χαρακτηριστικά υπό μορφή δεικτών παρουσιάζεται ένας σχετικός προβληματισμός για το εάν κάποιος δείκτης περιλαμβάνει πληροφορίες περισσότερων του ενός χαρακτηριστικού, ενώ γενικότερα υπάρχει ο προβληματισμός μήπως κάποια χαρακτηριστικά δεν είναι γραμμικώς ανεξάρτητα μεταξύ τους. Έτσι, σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, μετά από μία αρχική καταγραφή των σχετικών με το υπό μελέτη φαινόμενο χαρακτηριστικών, δηλαδή των πιθανών κριτηρίων και των σχετικών δεικτών που τα ποσοτικοποιούν, κρίνεται αναγκαίο το βήμα της αξιολόγησης του ποια χαρακτηριστικά πρέπει να συμπεριληφθούν τελικά στην πολυκριτηριακή ανάλυση ως κριτήρια.



(Πηγή: Saaty and Tran, 2007)

Σχήμα 3.9 Η μεταβολή του τυχαίου δείκτη συσχέτισης με το πλήθος των κριτηρίων

Η αξιολόγηση της γραμμικής ανεξαρτησίας των πιθανών κριτηρίων μεταξύ τους γίνεται μέσα από μία προκαταρκτική διαδικασία γραμμικού τεστ συσχέτισης, υπολογίζοντας το συντελεστή συσχέτισης ως ακολούθως.

Αν έχω ένα διάνυσμα δεδομένων X και ένα Y τότε ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίζεται από την εξίσωση: $C(X, Y) = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2(y-\bar{y})^2}}$.

Στην προκαταρκτική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν 32 πιθανά κριτήρια, που σχετίζονται με τη γεωμορφολογία της λεκάνης απορροής και τις πλημμύρες, και από αυτά διακρίθηκαν τα 10 ως κριτήρια (Papaioannou et al., 2015). Τα κριτήρια, ονομαστικά αναφέρονται ως ακολούθως:

1. Το υψόμετρο (Digital Elevation Model - DEM)
2. Η Κλίση (Slope - S)
3. Η Συσσώρευση ροής (Flow Accumulation - Flow Ac.)
4. Η Πλευρά (Aspect - A)

5. Η Οριζόντια Απόσταση Χερσαίας Ροής (Horizontal Overland Flow Distance HOFD)
6. Η Κάθετη Απόσταση Χερσαίας Ροής (Vertical Overland Flow Distance VOFD)
7. Ο Δείκτης Τοπογραφικής Θέσης (Topographic Position Index TPI)
8. Ο Δείκτης Υγρασίας (Wetness Index WI)
9. Ο Δείκτης υδρολογικών απωλειών βροχής της μεθόδου SCS (Curve Number CN)
10. Ο Τροποποιημένος Δείκτης Fournier (Modified Fournier Index MFI).

Σημειώνεται ότι στην παρούσα δεν χρησιμοποιήθηκε τελικά το κριτήριο της συσσώρευσης της ροής (3. Flow Ac), διότι κρίθηκε περιττό καθώς τα κριτήρια είναι ήδη πάνω από 7 και θα επηρεάσει το τελικό αποτέλεσμα πολύ λίγο, εισάγοντας περιττή πολυπλοκότητα στους υπολογισμούς. Ενισχυτικά στα προηγούμενα, θεωρήθηκε ότι η πληροφορία της συσσώρευσης της ροής είναι ενσωματωμένη στους δείκτες αποστάσεων ροής που είναι γραμμικώς εξαρτημένοι (άμεσα παράγωγα) της κατεύθυνσης της ροής και τα μεγέθη τους είναι ανάλογα. Βέβαια, πρέπει να τονιστεί επίσης ότι αυτή η φιλοσοφική προσέγγιση δεν αναδεικνύεται και από το γραμμικό τεστ συσχέτισης μεταξύ των δυο αυτών κριτηρίων.

Επιπλέον, αντί του κριτηρίου της κάθετης απόστασης χερσαίας ροής (VOFD) χρησιμοποιείται το κριτήριο της κάθετης απόστασης από το δίκτυο καναλιών (Vertical Distance to Channel Network - VDCN). Αντί του τοπογραφικού δείκτη θέσης (TPI) ελέγχθηκαν σε αντικατάσταση αυτού ο δείκτης καμπυλότητας περιοχής (Curvature - C), η ταξινόμηση με βάση την καμπυλότητα της περιοχής (Curvature Classification - CC) και ο πολλαπλής κλίμακας δείκτης τοπογραφικής θέσης (multi-scale Topographic Position Index - mTPI). Αντί του δείκτη υγρασίας χρησιμοποιήθηκε ο saga δείκτης τοπογραφικής υγρασίας (saga Topographic Wetness Index - sTWI). Στη διαδικασία υπολογισμού των υδρολογικών απωλειών αντί του Curve Number χρησιμοποιήθηκε το composite Curve Number (compCN). Αντί του κριτηρίου της πλευράς (Aspect - A) χρησιμοποιήθηκε η κρίσιμη πλευρά (critical Aspect – critical A). Τέλος αντί του κριτηρίου του τροποποιημένου δείκτη Fournier (MFI) χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο του ημερήσια τροποποιημένου δείκτη Fournier (daily Modified Index – dMFI). Οι λόγοι των επιμέρους τροποποιήσεων των κριτηρίων αναπτύσσεται παρακάτω στην ανάλυση των κριτηρίων.

Έτσι, κατόπιν των ανωτέρω η λίστα των κριτηρίων διαμορφώνεται ως εξής:

1. Το υψόμετρο (Digital Elevation Model – DEM)
2. Η Κλίση (Slope - S)
3. Η Κρίσιμη Πλευρά (critical Aspect – critical A.)
4. Η Οριζόντια Απόσταση Χερσαίας Ροής (Horizontal Overland Flow Distance - HOFD)

5. Η Κάθετη Απόσταση από το Δίκτυο Καναλιών (Vertical Distance of Channel Network-VDCN)

6. (α) Ο πολλαπλής κλίμακας δείκτης τοπογραφικής θέσης (multi-scale Topographic Position Index - mTPI)

(β) Η ταξινόμηση με βάση την καμπυλότητα της περιοχής (Curvature Classification - CC)

(γ) Ο δείκτης καμπυλότητας περιοχής (Curvature - C)

7. Ο saga δείκτης τοπογραφικής υγρασίας (saga Topographic Wetness Index - sTWI)

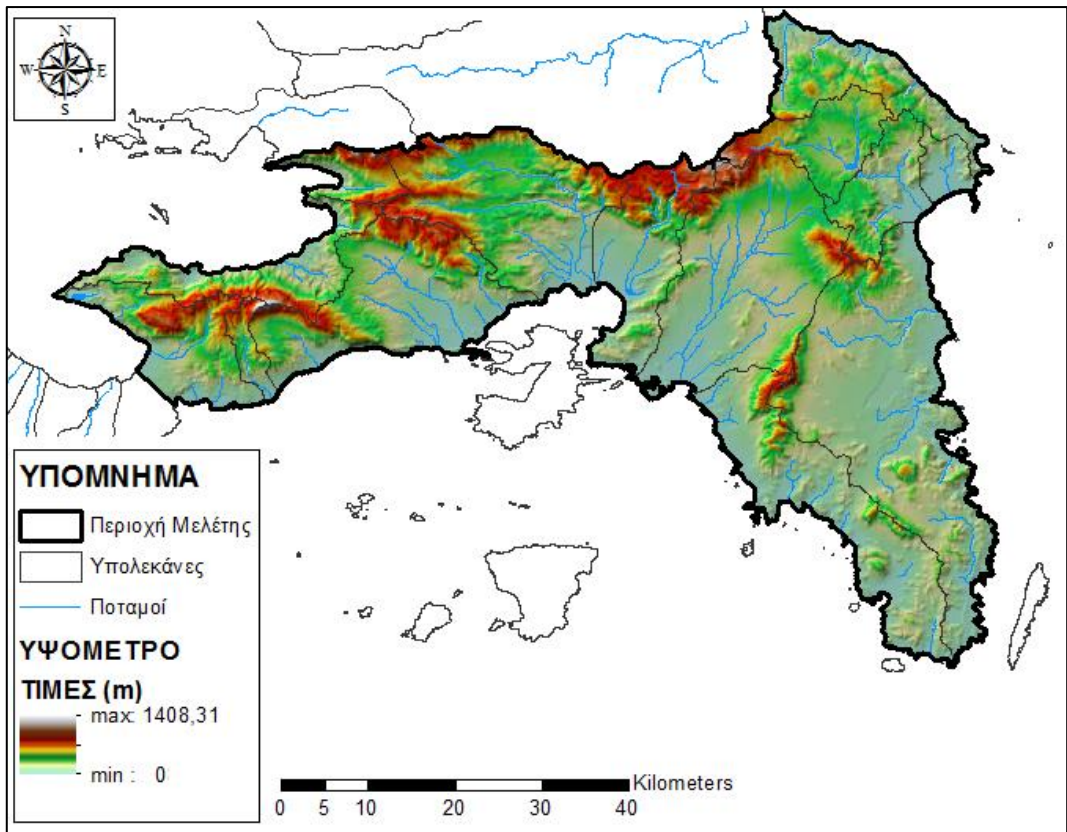
8. Ο σύνθετος δείκτης υδρολογικών απωλειών βροχής της μεθόδου SCS (composite Curve Number – compCN)

9. Ο ημερήσια τροποποιημένος δείκτης Fournier (daily Modified Index – dMFI).

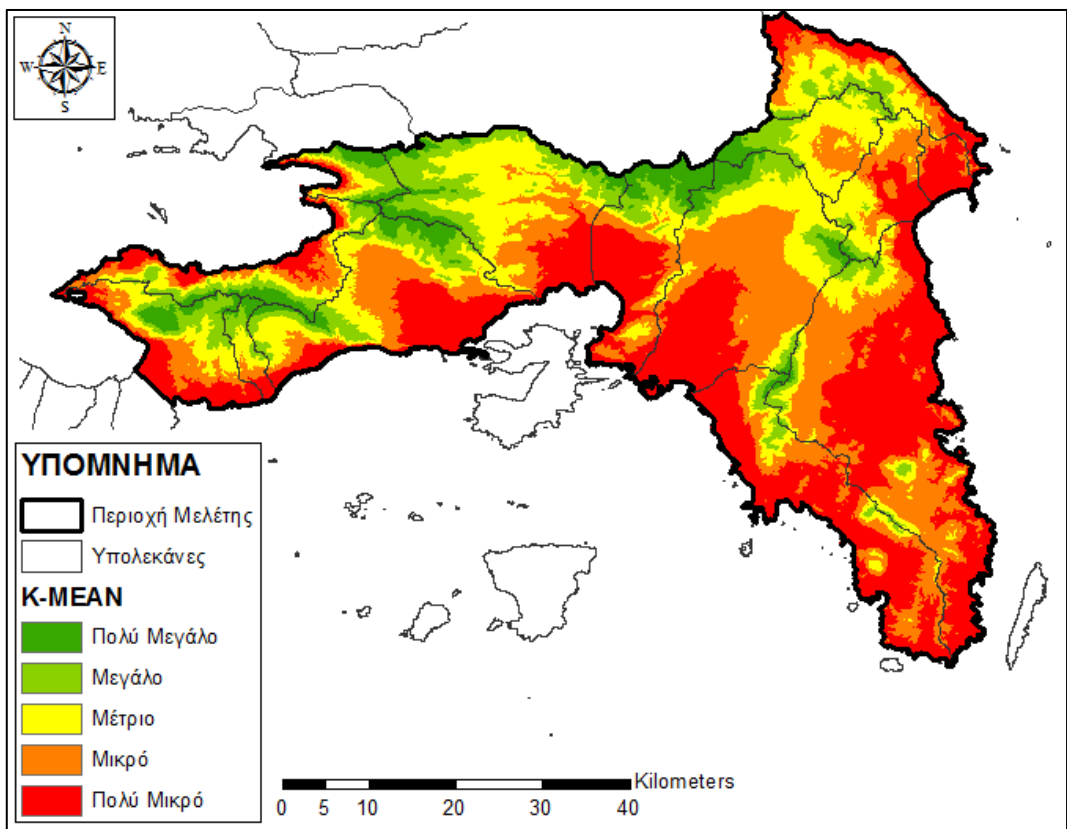
3.3.2 Το υψόμετρο (Digital Elevation Model – DEM)

Έχει αποδειχθεί ότι οι περιοχές με μικρότερο υψόμετρο είναι πιο ευάλωτες σε πλημμύρες, δηλαδή το κριτήριο ελαχιστοποιείται (Πίνακας 3.1). Σε κάποιες μελέτες χρησιμοποιείται κάποιου είδους αντίστροφης κλίμακας μέτρηση δηλαδή, από το πιο ψηλό σημείο προς το επίπεδο της θάλασσας ώστε να μεγιστοποιείται το κριτήριο κατά την επεξεργασία του (Burrough et al., 2015).

Στην παρούσα εργασία το υπόψη κριτήριο δημιουργήθηκε από τις ψηφιακές απεικονίσεις τύπου ERDAS Imagine μεγέθους 5m x 5m του «Εθνικού Κτηματολογίου» (Copyright © 2012, NATIONAL CADASTRE & MAPPING AGENCY S.A.) ως εξής. Αρχικά συντέθηκε το ψηφιδωτό για την περιοχή μελέτης με βάση τη διανομή φύλλων χάρτου, στη συνέχεια γεμίστηκαν τα τοπικά βυθίσματα και τα κενά του χάρτη και κόπηκαν τα τοπικά μέγιστα. Η επεξεργασία και η απεικόνιση έγινε σε περιβάλλον ArcMap 10.2 εκτός από τη διαδικασία ταξινόμησης με K-mean, που έγινε σε περιβάλλον Saga 6.3.0. Στο χάρτη του Σχήματος 3.10 απεικονίζεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και στο Σχήμα 3.11 η ταξινόμηση των υψομέτρων σε 5 κλάσεις.



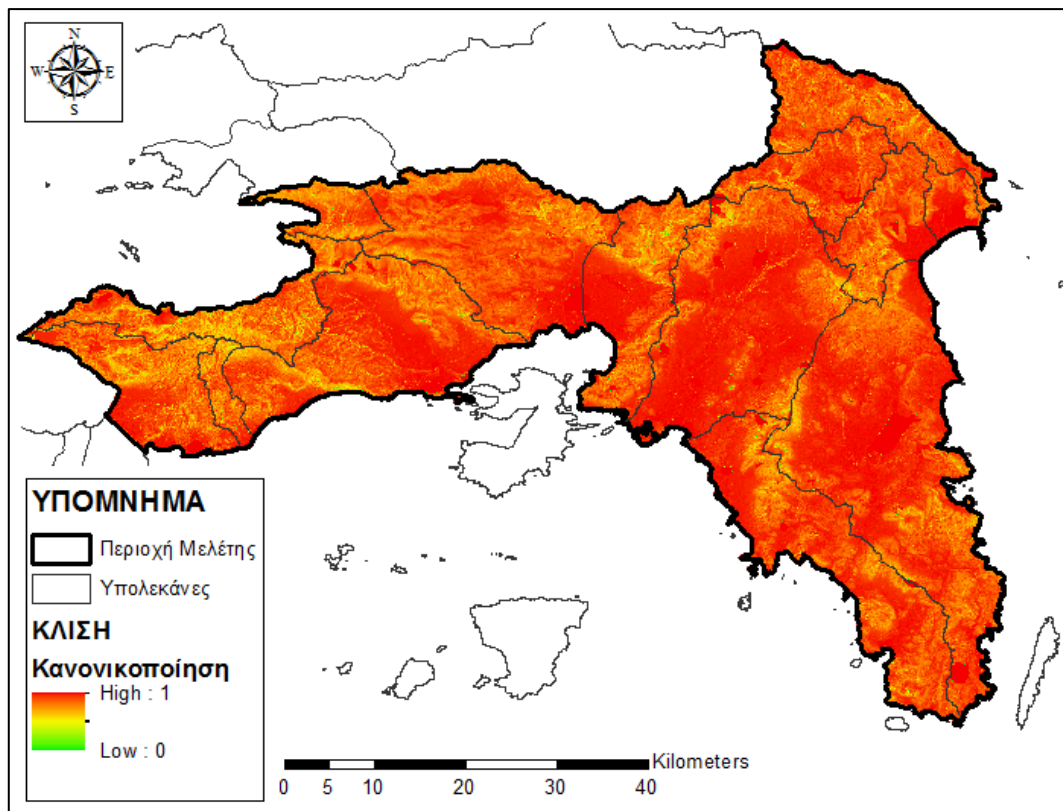
Σχήμα 3.10 Υψομετρικός Χάρτης Εδάφους ΥΔ Αττικής



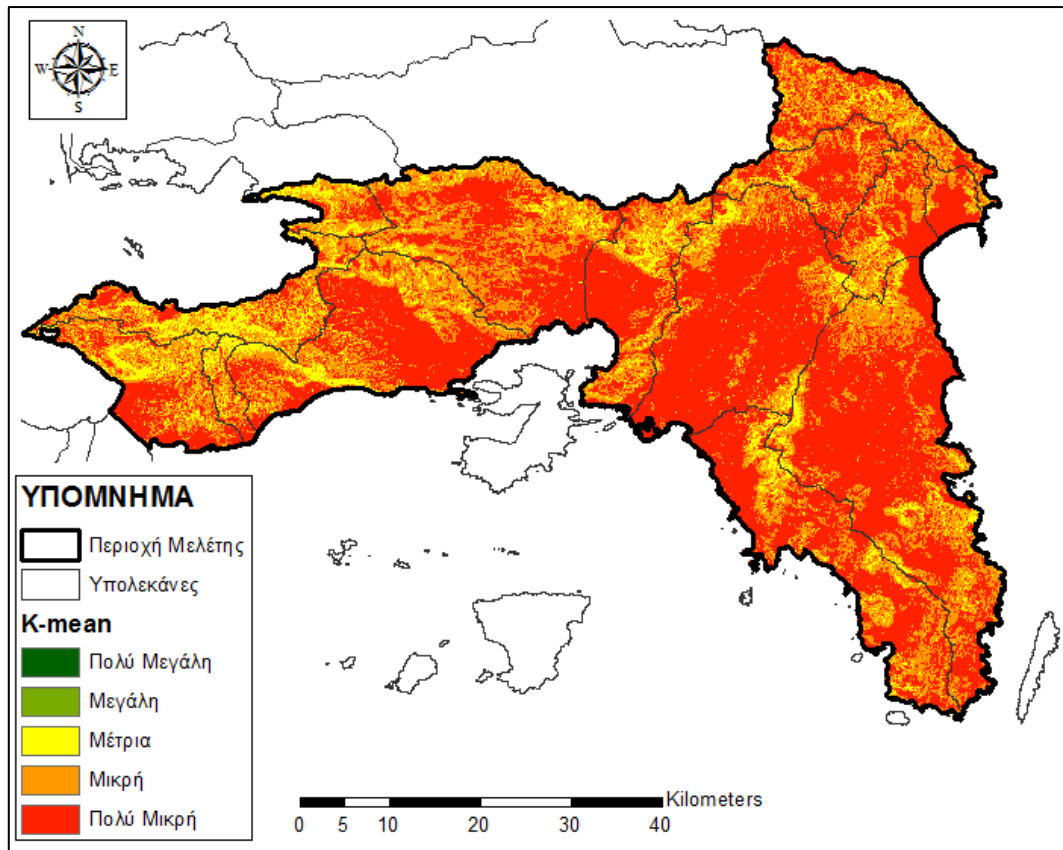
Σχήμα 3.11 Χάρτης Ταξινομημένων Υψομέτρων ΥΔ Αττικής σε 5 κλάσεις

3.3.3 Η Κλίση (Slope - S)

Για το κριτήριο κλίση δημιουργήθηκαν οι σχετικοί χάρτες κανονικοποιημένων κλίσεων και ταξινομημένων κλίσεων (Σχήμα 3.12 και Σχήμα 3.13 αντίστοιχα). Αυτοί οι χάρτες είναι προϊόν της μέσης κλίσης σε κάθε εικονοστοιχείο και μετριέται ως ποσοστό (%) της ανύψωσης προς την οριζόντια μετατόπιση. Η κλίση είναι κύριο προϊόν του υψομέτρου και δίνει πληροφορίες σχετικά με την κινητικότητα του απορρέοντος ρευστού στη λεκάνη απορροής. Γενικά, όσο μικρότερη είναι η κλίση τόσο πιο ευάλωτη είναι η περιοχή σε πλημμύρα, δηλαδή ελαχιστοποίηση κριτηρίου (Πίνακας 3.1). Όλη η επεξεργασία και η απεικόνιση έγινε σε περιβάλλον ArcMap 10.2 εκτός από τη διαδικασία ταξινόμησης με K-mean που έγινε σε περιβάλλον Saga 6.3.0.



Σχήμα 3.12 Χάρτης Κανονικοποιημένων Κλίσεων ΥΔ Αττικής

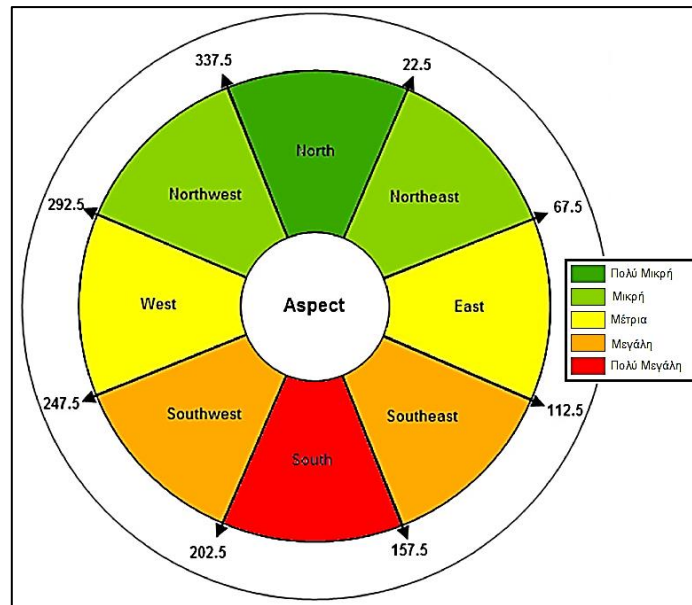


Σχήμα 3.13 Χάρτης Ταξινομημένων Κλίσεων ΥΔ Αττικής

3.3.4 Η Κρίσιμη Πλευρά (critical Aspect – critical A.)

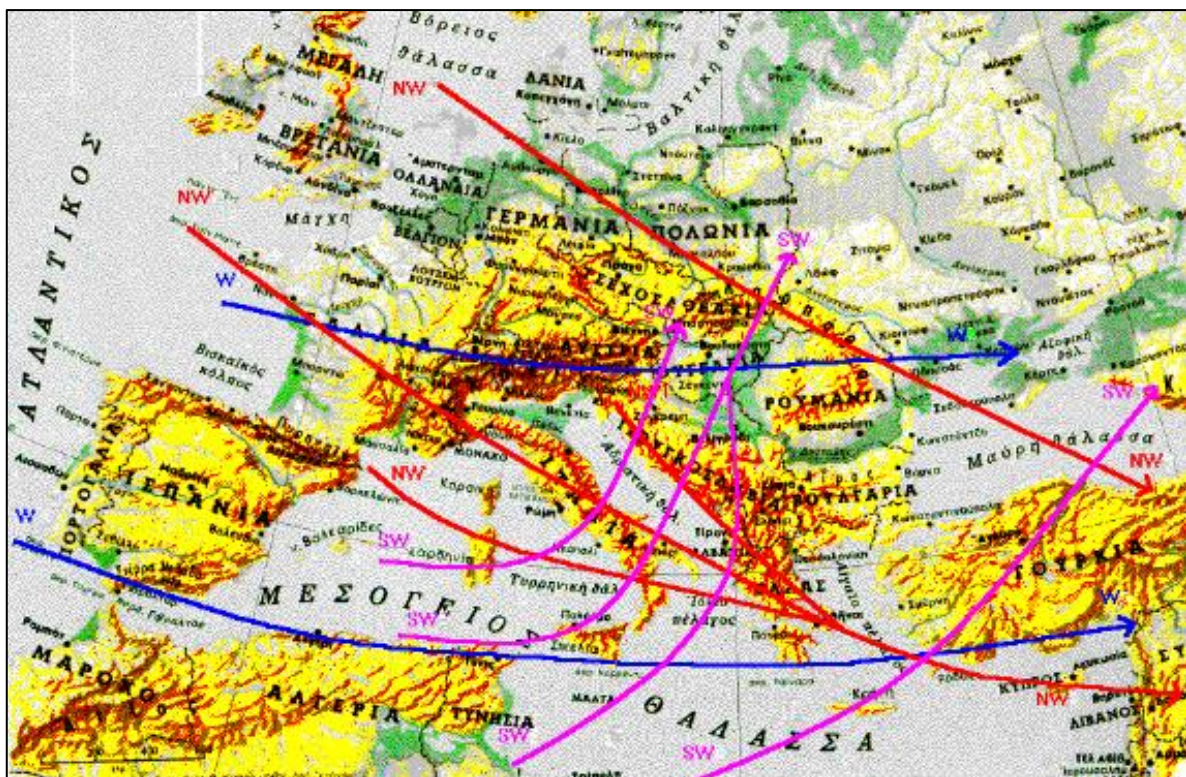
Η πλευρά εισόδου των καταιγίδων στη λεκάνη απορροής συμπεριλαμβάνεται στο κριτήριο που ονομάζεται Aspect. Γενικά τα πρανή που αναπτύσσονται κάθετα στη διεύθυνση της καταιγίδας με την καταιγίδα προς το πρανές τότε αυτά τα πρανή είναι πιο ευάλωτα σε πλημμύρες και αποτελούν την κρίσιμη πλευρά της λεκάνης. Έτσι, αφού πρώτα όλα τα πρανή ταξινομηθούν με βάση τα σημεία του ορίζοντα προς τα οποία δημιουργούν απορροή, τους αποδίδεται μία πιθανότητα επικινδυνότητας. Στην πιο επικίνδυνη κατεύθυνση δίνεται η πιθανότητα 1 και ανάλογα με την απόκλιση από αυτήν του πρανού, η πιθανότητα μειώνεται. Αν για παράδειγμα οι καταιγίδες έρχονται κυρίως από τα Νότια τότε οι πιθανότητες διαμορφώνονται όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.14. (Παραϊοαννου et al., 2011). Σημειώνεται ότι στην παρούσα εργασία στις περιοχές με μηδενική κλίση αποδίδεται η πιθανότητα μέτριας επικινδυνότητας.

Επιπλέον, αξιοποιώντας όλη την πληροφορία του Σχήματος 3.15 και όχι μόνο την επικρατούσα διεύθυνση, που είναι η δυτική - νοτιοδυτική, τότε το κριτήριο της Πλευράς μετατρέπεται σε αυτό της Κρίσιμης Πλευράς (Critical Aspect) και το Σχήμα 3.14 παίρνει τη μορφή του Σχήματος 3.16. Οι χάρτες του κριτηρίου της κρίσιμης πλευράς περιλαμβάνονται στους χάρτες Σχήματος 3.17 και 3.18. Όλη η επεξεργασία και η απεικόνιση έγινε σε περιβάλλον ArcMap 10.2, εκτός από τη διαδικασία ταξινόμησης με K-mean που έγινε σε περιβάλλον Saga 6.3.0.



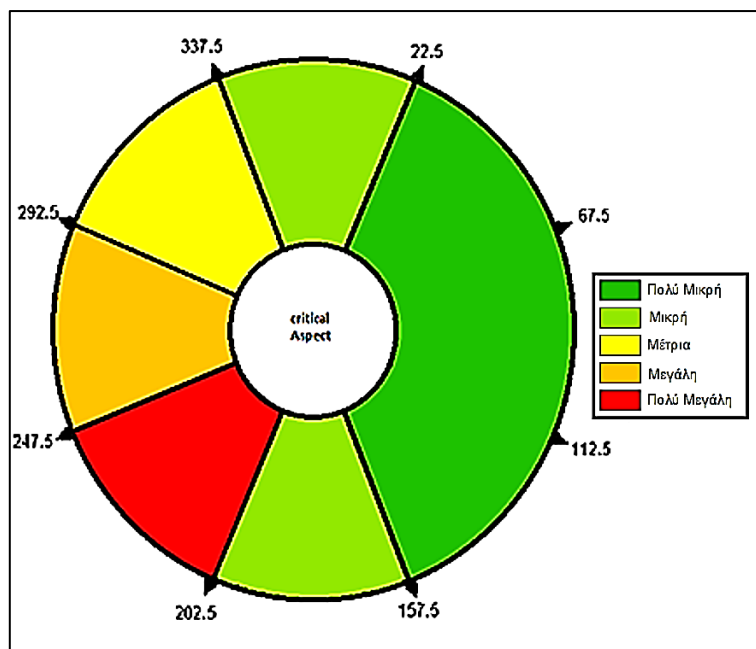
(Πηγή: Παραιοαννου et al., 2015)

Σχήμα 3.14 Επικινδυνότητα Προσανατολισμού Πρανούς της ΛΑΠ του Ξεριά ποταμού

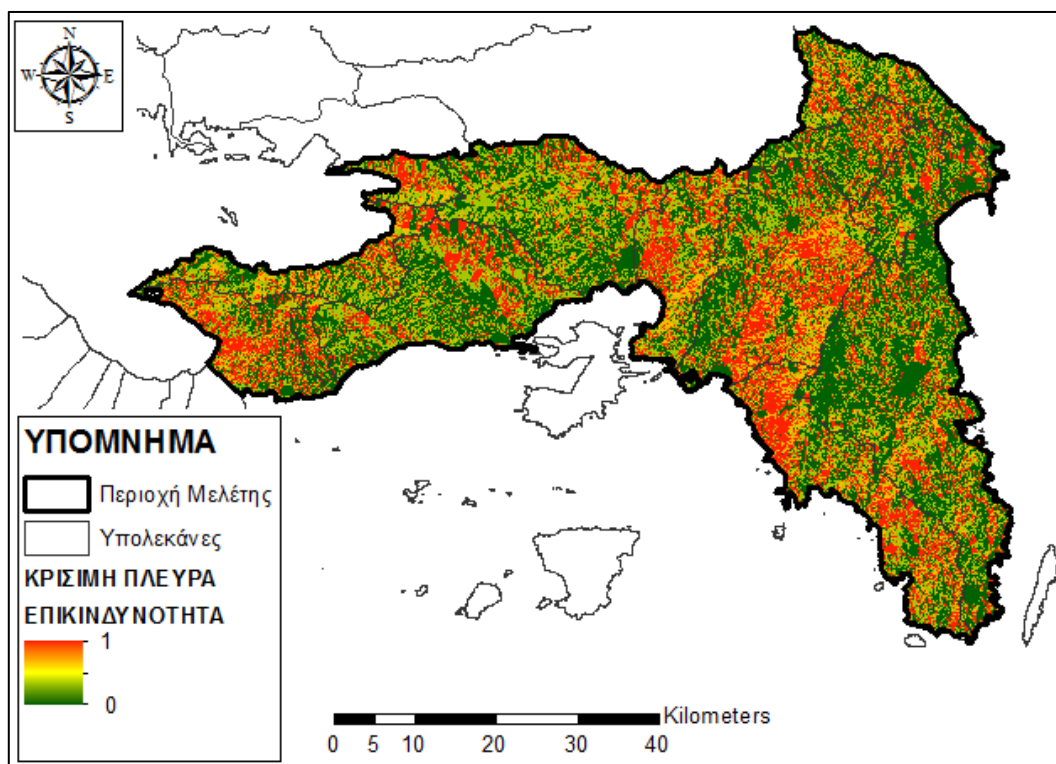


(Πηγή: Σημειώσεις μαθήματος Διαχείρισης Υδατικών Πόρων Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ)

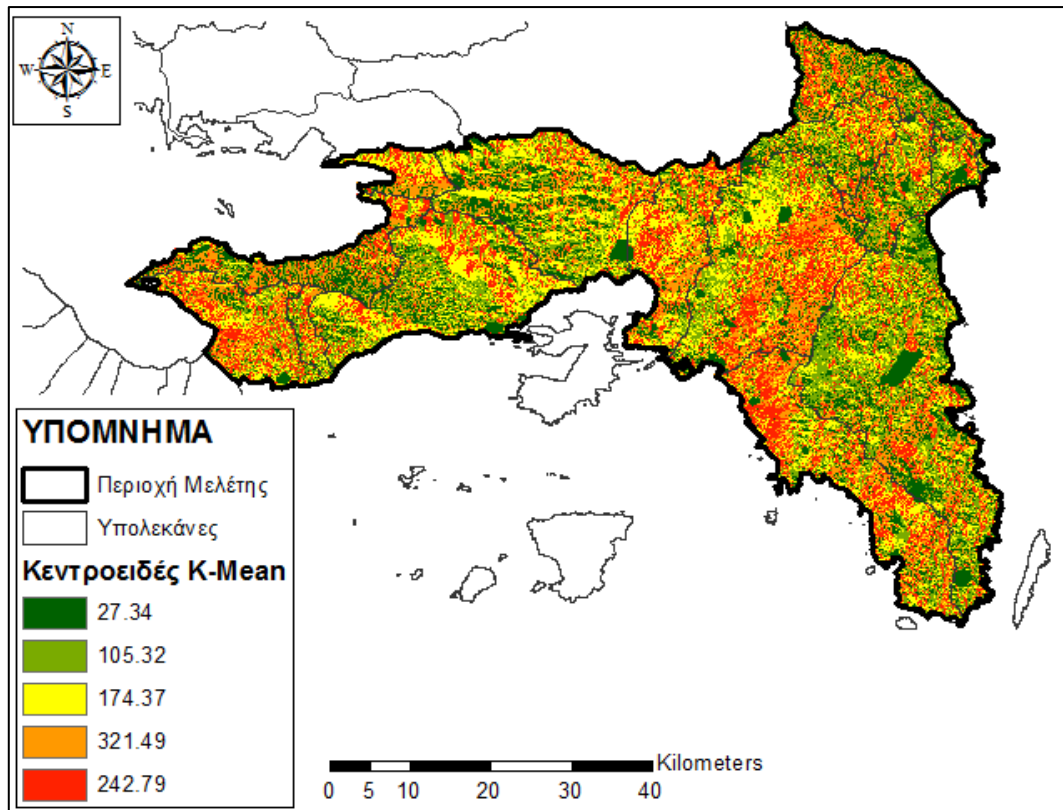
Σχήμα 3.15 Κύριες Διευθύνσεις Βροχοφόρων Συστημάτων



Σχήμα 3.16 Επικινδυνότητα Κρίσιμων Προσανατολισμών Πρανούς για την περιοχή του ΥΔ Αττικής



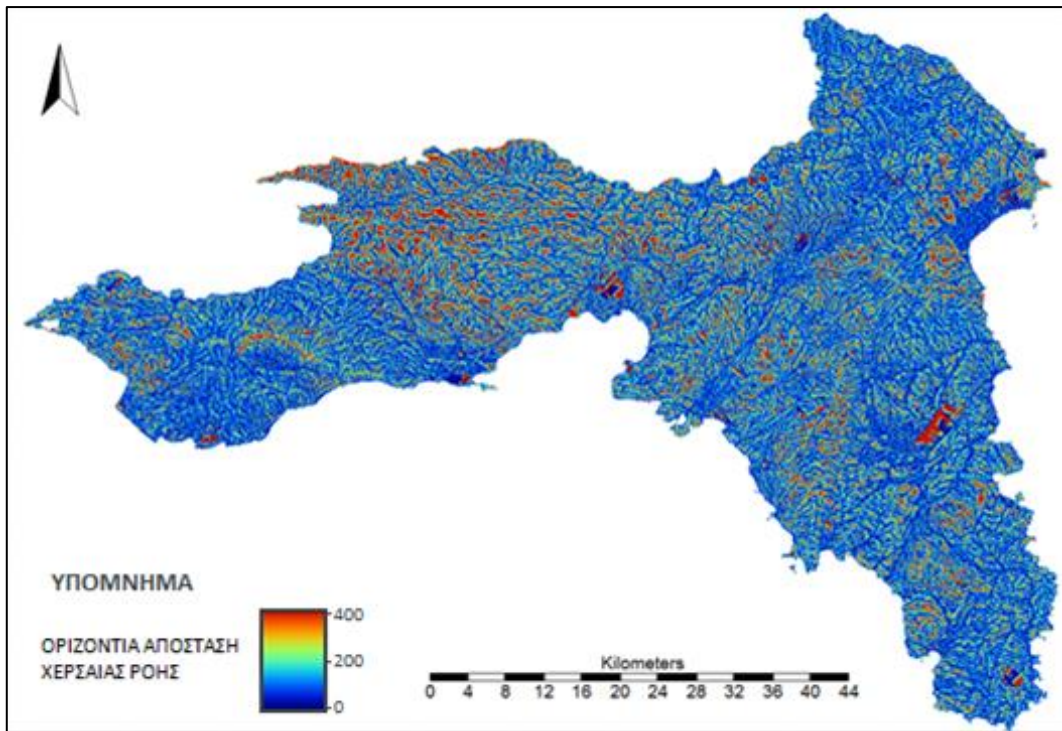
Σχήμα 3.17 Χάρτης Κανονικοποιημένης Κρίσιμης Πλευράς ΥΔ Αττικής



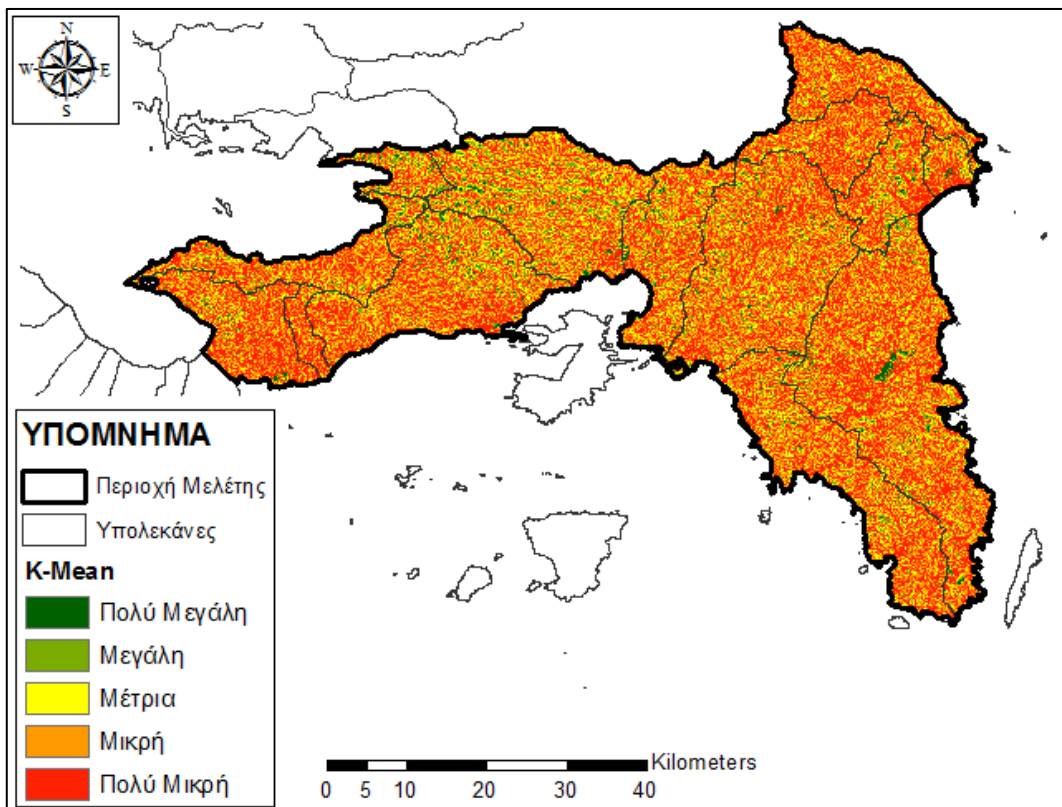
Σχήμα 3.18 Χάρτης Ταξινομημένης Κρίσιμης Πλευράς ΥΔ Αττικής

3.3.5 Η Οριζόντια Απόσταση Χερσαίας Ροής (Horizontal Overland Flow Distance - HOFD)

Η οριζόντια απόσταση χερσαίας ροής λαμβάνει υπόψη της την πραγματική κίνηση του νερού από κελί σε κελί και όχι την ευκλείδεια απόσταση. Αυτό το κριτήριο είναι προϊόν του δικτύου υδατορεμάτων που αποστραγγίζει την περιοχή και γενικότερα του ψηφιακού μοντέλου του εδάφους (Olagu 2004). Αρχικά, πριν την κανονικοποίηση, η απόσταση εκφράζεται στις ίδιες μονάδες έκφρασης του υψομέτρου (Σχήμα 3.19). Όσο πιο μικρή είναι η διαδρομή της ροής από το κελί μέχρι την κοίτη του υδατορέματος τόσο πιο ευάλωτο σε πλημμύρες είναι το κελί και συνεπώς το κριτήριο ελαχιστοποιείται (Πίνακας 3.1). Στον χάρτη του Σχήματος 3.20 φαίνεται το υπόψη κριτήριο ταξινομημένο. Όλη η επεξεργασία και η απεικόνιση έγινε σε περιβάλλον Saga 6.3.0 εκτός από την απεικόνιση του χάρτη με ταξινομημένα μεγέθη με τη μέθοδο του K-mean που έγινε σε περιβάλλον ArcMap 10.2.



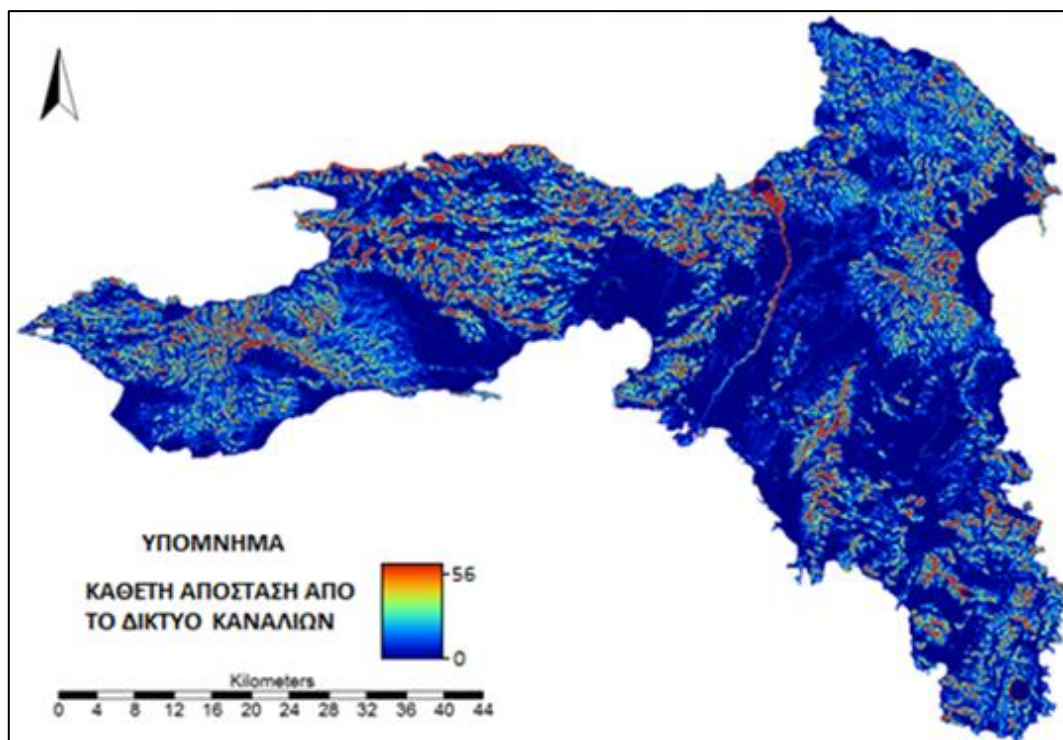
Σχήμα 3.19 Χάρτης Οριζόντιας Απόστασης Χερσαίας Ροής ΥΔ Αττικής



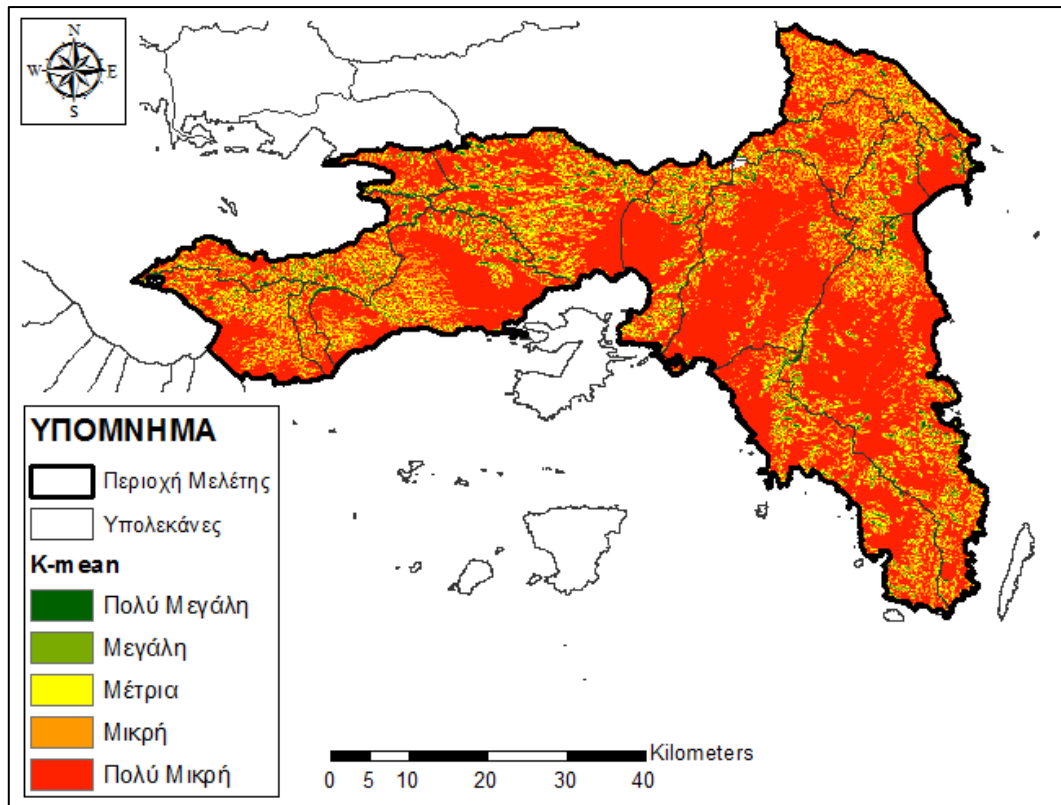
Σχήμα 3.20 Χάρτης Ταξινομημένης Οριζόντιας Απόστασης Χερσαίας Ροής ΥΔ Αττικής

3.3.6 Η Κάθετη Απόσταση από Δίκτυο Καναλιών (Vertical Distance of Channel Network-VDCN)

Η κατακόρυφη απόσταση από τη χερσαία ροή βασίζεται στην κάθετη απόσταση μεταξύ των υψομέτρων των κελιών και των υψομέτρων που υπολογίζονται για το δίκτυο υδατορευμάτων των εν λόγω κελιών. Για έκαστο κελί υπολογίζεται το υψόμετρο με βάση τη θέση του, σαν να βρισκόταν εντός κοίτης ποταμού (Ολαγα, 2004). Η απόσταση εκφράζεται στις ίδιες μονάδες με την τιμή των υψομέτρων και το μέγεθος των κελιών είναι το ίδιο με αυτό των κελιών του ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων. Όσο πιο μικρή είναι η απόσταση τόσο πιο ευάλωτη είναι η περιοχή σε πλημμύρες, δηλαδή το κριτήριο ελαχιστοποιείται. Η συνολική επεξεργασία επεξεργασία και η απεικόνιση σε χάρτη, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.21 και έγινε σε περιβάλλον Saga 6.3.0, εκτός από την απεικόνιση του χάρτη με ταξινομημένα μεγέθη με τη μέθοδο του K-mean που έγινε σε περιβάλλον ArcMap 10.2 και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.22.



Σχήμα 3.21 Χάρτης Κάθετης Απόστασης από το Δίκτυο Καναλιών ΥΔ Αττικής



Σχήμα 3.22 Χάρτης Ταξινομημένων Κάθετων Αποστάσεων από το Δίκτυο Καναλιών ΥΔ Αττικής

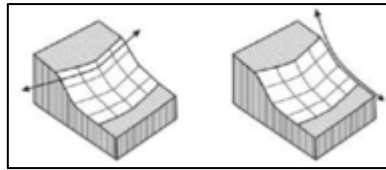
3.3.7 Ο δείκτης καμπυλότητας περιοχής (Curvature - C), Η ταξινόμηση με βάση την καμπυλότητα της περιοχής (Curvature Classification - CC) και Ο πολλαπλής κλίμακας δείκτης τοπογραφικής θέσης (multi-scale Topographic Position Index - mTPI)

Αντί του δείκτη τοπογραφικής θέσης (TPI) ελέγχθηκαν, σε αντικατάσταση αυτού, ο δείκτης καμπυλότητας περιοχής (Curvature - C), η ταξινόμηση με βάση την καμπυλότητα της περιοχής (Curvature Classification - CC) και ο πολλαπλής κλίμακας δείκτης τοπογραφικής θέσης (multi-scale Topographic Position Index - mTPI). Η αντικατάσταση αυτή ήταν αναγκαία καθώς για τον υπολογισμό του δείκτη τοπογραφικής θέσης πρέπει να εισαχθεί μία ακτίνα ελέγχου η οποία δεν μπορεί να είναι ίδια για όλη την περιοχή μελέτης. Έτσι προτείνονται για εφαρμογή και εν συνεχεία ελέγχονται σε αντικατάστασή αυτού ο δείκτης καμπυλότητας περιοχής (Curvature - C) προϊόν του ArcMap 10.2, μία ταξινόμηση με βάση την καμπυλότητα της περιοχής (Curvature Classification - CC) προϊόν του Saga 6.3.0 και ο δείκτης πολλαπλής τοπογραφικής θέσης (multi Topographic Position Index - mTPI) προϊόν του Saga 6.3.0.

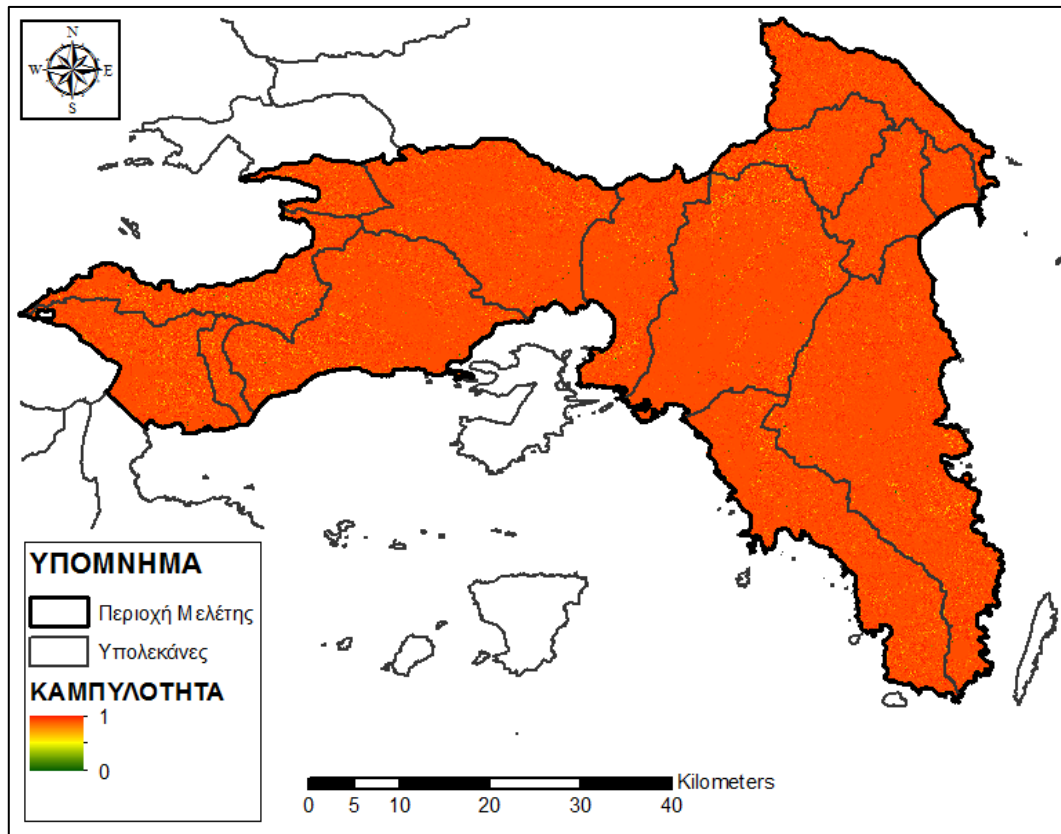
Ο Δείκτης Καμπυλότητας Περιοχής (Curvature - C)

Ο Δείκτης Καμπυλότητας περιοχής αξιοποιεί την καμπυλότητα του επιπέδου και του προφίλ (Σχήμα 3.23) των πρανών της περιοχής και τους αποδίδει μία τιμή. Η συνολική επεξεργασία και απεικόνιση του κανονικοποιημένου κριτηρίου έγινε σε περιβάλλον ArcMap 10.2 (Σχήμα 3.24). Το υπόψη κριτήριο ταξινομήθηκε και στην ταξινομημένη του μορφή σε περιβάλλον Saga 6.3.0 με τη μέθοδο K-mean, αλλά στην παρούσα δεν χρησιμοποιήθηκε κατά την πολυκριτηριακή ανάλυση (και συνεπώς παραλείπεται η παρουσίαση αντίστοιχου Σχήματος

για αυτό) καθώς η απεικόνισή του δεν παρουσιάζει κανένα ενδιαφέρον και σχεδόν όλα τα στοιχεία του συσσωρεύονται σε μία κλάση.



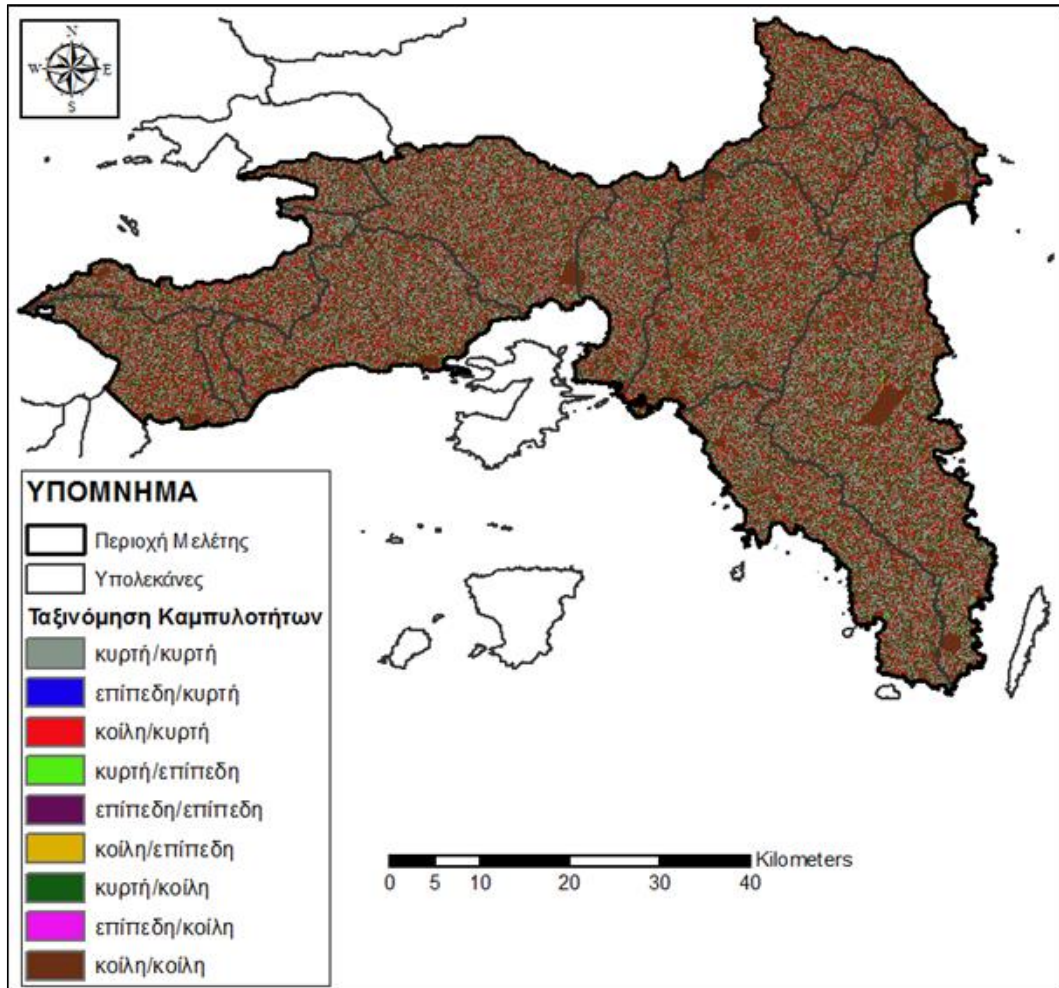
Σχήμα 3.23 Καμπυλότητα Επιπέδου και Καμπυλότητα Προφίλ



Σχήμα 3.24 Χάρτης Κανονικοποιημένης Καμπυλότητας ΥΔ Αττικής

Η Ταξινόμηση Καμπυλότητας Περιοχής (Curvature Classification - CC)

Η Ταξινόμηση της Καμπυλότητας γίνεται με το χαρακτηρισμό των δύο καμπυλοτήτων σε κοίλη ή κυρτή. Έτσι, δημιουργούνται 9 πιθανοί συνδυασμοί και συνεπώς 9 κλάσεις όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.25. Ωστόσο, η χρήση του παρόντος κριτηρίου δίνει αποτελέσματα με παρόμοια μοτίβα στην κανονικοποιημένη του μορφή με αυτά του κριτηρίου του Δείκτη Καμπυλότητας. Η δημιουργία του κριτηρίου και η ταξινόμησή του με τη μέθοδο K-mean έγινε σε περιβάλλον Saga 6.3.0 ενώ η κανονικοποίηση και η απεικόνισή του έγινε σε περιβάλλον ArcMap 10.2. Το κριτήριο ταξινομήθηκε σε περιβάλλον Saga 6.3.0 με τη μέθοδο K-mean αλλά δεν παρουσιάζεται και δεν χρησιμοποιήθηκε στην ταξινομημένη του μορφή από την πολυκριτηριακή ανάλυση, καθώς η απεικόνισή του δεν παρουσιάζει κανένα ενδιαφέρον και σχεδόν όλα τα στοιχεία του συσσωρεύονται σε μία κλάση.



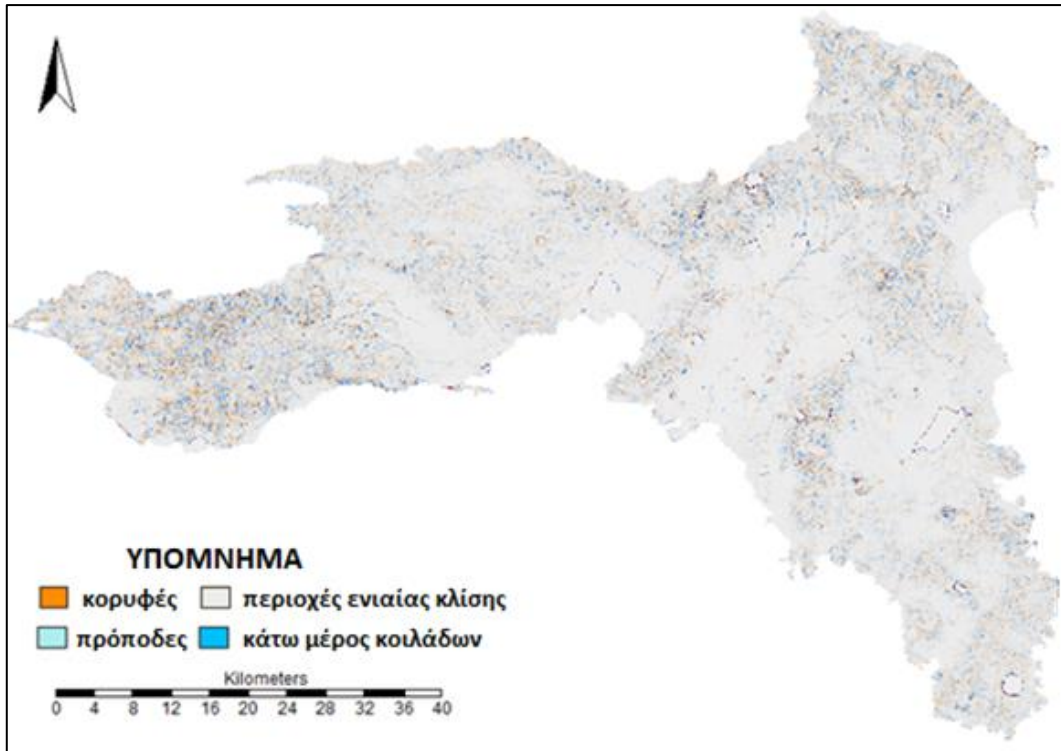
Σχήμα 3.25 Χάρτης Ταξινόμησης Καμπυλοτήτων

Ο πολλαπλής - κλίμακας Δείκτης Τοπογραφικής Θέσης (multi-scale Topographic Position Index - mTPI)

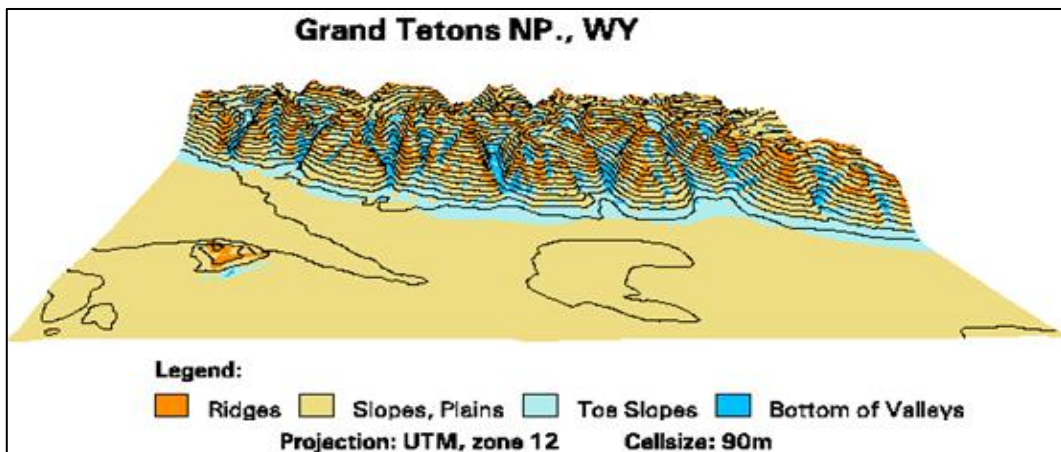
Γενικά η μορφολογία του εδάφους μιας τοποθεσίας μπορεί να είναι λόφος, κοιλάδα, περιοχή με ενιαία κλίση, εκτεθειμένη κορυφογραμμή, επίπεδη πεδιάδα ή κάποια άλλη μορφολογία εδάφους (Tagil and Jenness, 2008). Ο Δείκτης Τοπογραφικής Θέσης (Topographic Position Index - TPI) είναι ένας δείκτης που αναπαριστά την τοποθεσία στην περιοχή ενδιαφέροντος και υπολογίζεται με δεδομένο εισόδου την ακτίνα ελέγχου περιοχής. Ο δείκτης υπολογίζεται βάσει της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ του κελιού και του μέσου υψομέτρου των γειτονικών του κελιών εντός της ακτίνας ελέγχου περιοχής. Όταν ο δείκτης έχει αρνητικές τιμές τότε η περιοχή είναι ευάλωτη σε πλημμύρες. Όσο πιο μικρή είναι η τιμή τόσο πιο ευάλωτη είναι η περιοχή σε πλημμύρες, δηλαδή το κριτήριο ελαχιστοποιείται.

Στην παρούσα εργασία ελέγχθηκε το κριτήριο του δείκτη τοπογραφικής θέσης πολλαπλής κλίμακας το οποίο σαν εργαλείο έχει την ίδια φιλοσοφία με το παραπάνω, με τη διαφορά ότι δεν χρειάζεται να εισαχθεί ακτίνα ελέγχου και αυτό εξυπηρετεί την παρούσα ανάλυση, διότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ενιαία ακτίνα για ολόκληρη την περιοχή μελέτης. Αυτό το κριτήριο δημιουργήθηκε, απεικονίστηκε (Σχήμα 3.26) και ταξινομήθηκε με βάση τη μέθοδο K-mean σε περιβάλλον Saga 6.3.0. Η ερμηνεία της χρωματικής κλίμακας που χρησιμοποιείται

στο χάρτη του Σχήματος 3.26 φαίνεται στο Σχήμα 3.27, γεγονός το οποίο πρέπει να τονιστεί διότι τα δεδομένα του εν λόγω χάρτη (Σχήματος 3.26) δεν είναι ταξινομημένα αλλά σε συνεχή αριθμητική κλίμακα. Η απεικόνιση του ταξινομημένου χάρτη (Σχήμα 3.28) έγινε σε περιβάλλον ArcMap 10.2.

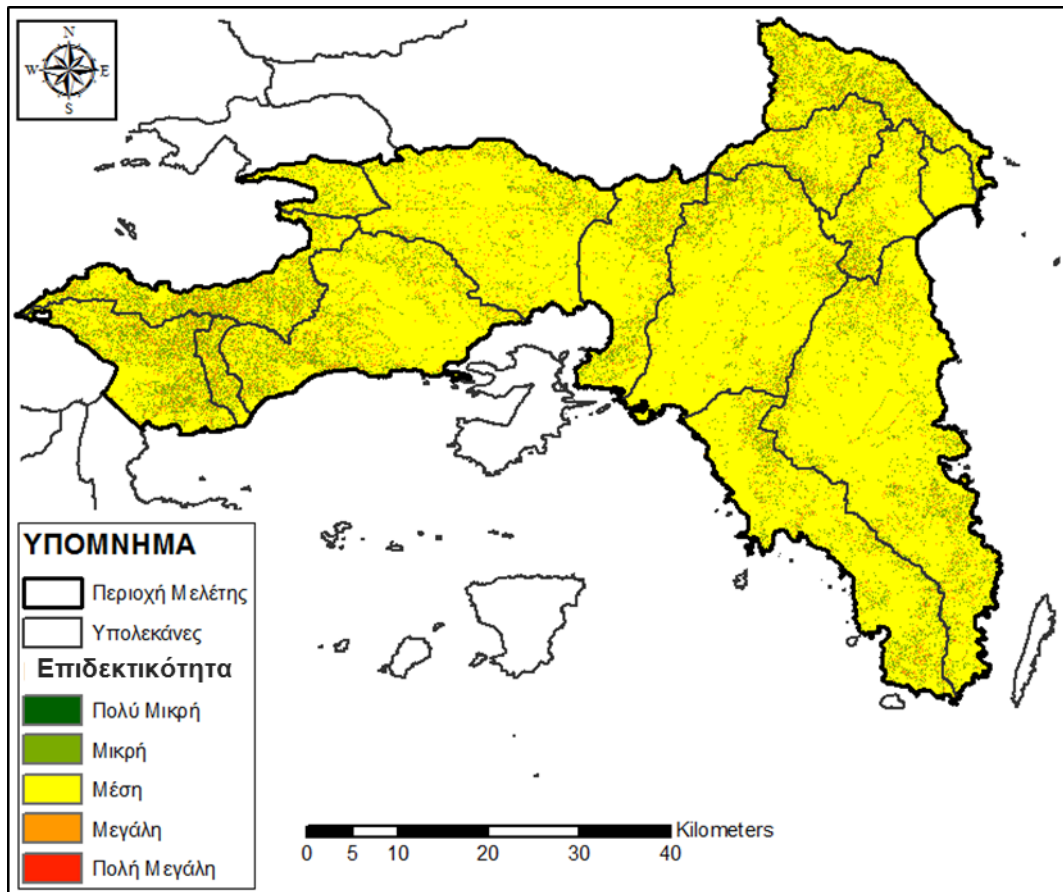


Σχήμα 3.26 Χάρτης Δείκτη Τοπογραφικής Θέσης πολλαπλής κλίμακας



(Πηγή: Niklaus Zimmermann, 2000)

Σχήμα 3.27 Εξήγηση χρωματοκώδικα του Δείκτη Τοπογραφικής Θέσης πολλαπλής κλίμακας



Σχήμα 3.28 Χάρτης Ταξινομημένου Δείκτη Τοπογραφικής Θέσης πολλαπλής κλίμακας

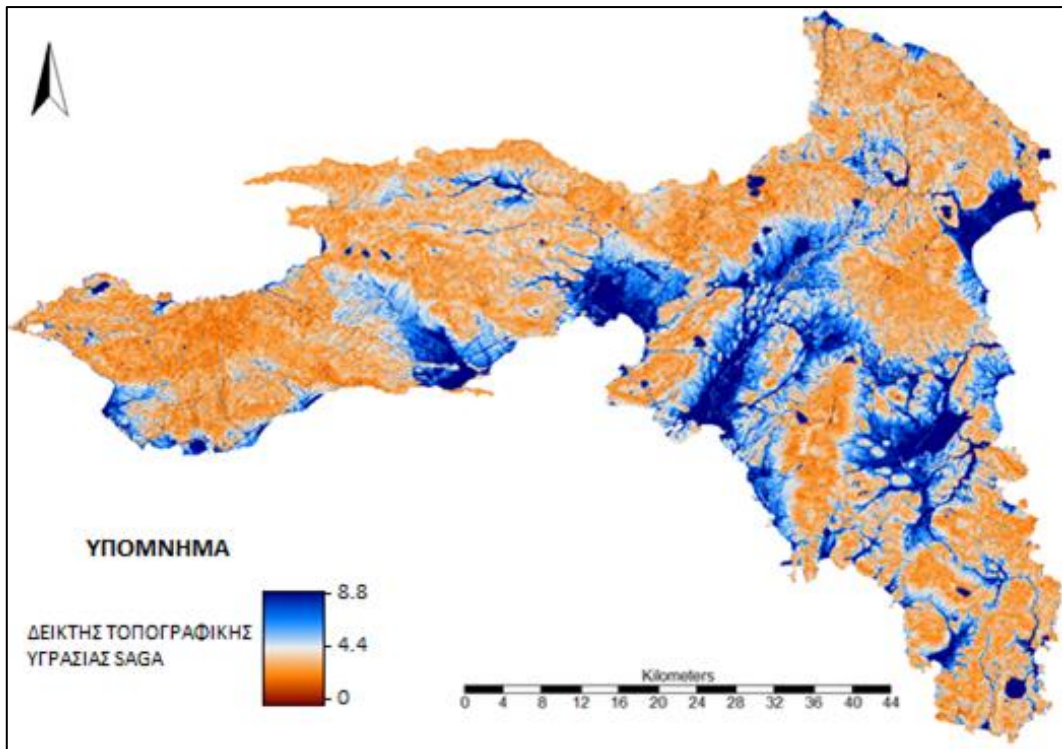
3.3.8 Ο saga δείκτης τοπογραφικής υγρασίας (saga Topographic Wetness Index - sTWI)

Η τοπογραφική υγρασία δείχνει το κατά πόσο μία περιοχή δύναται να δημιουργήσει απορροή.

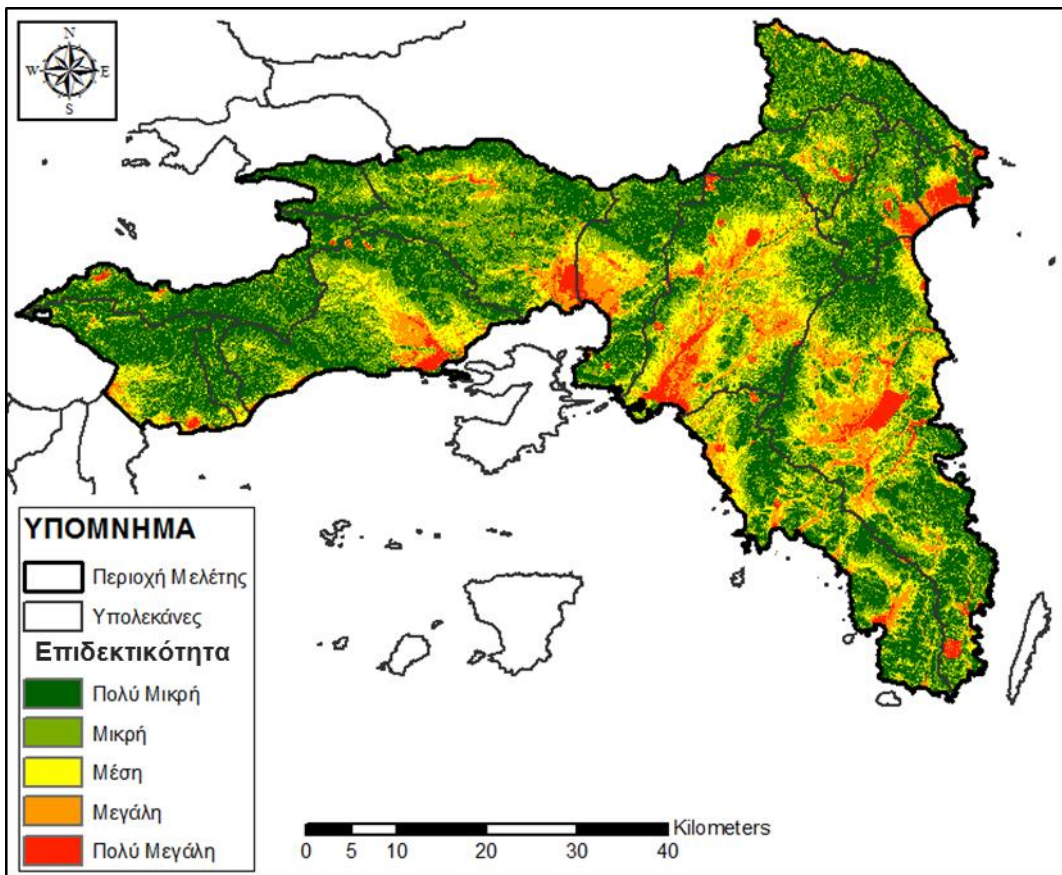
Ο υπόψη δείκτης είναι ένα φυσικό χαρακτηριστικό του εδάφους και εκφράζει την εδαφική υγρασία και την κορεσμένη επιφανειακή ζώνη του εδάφους (Papaioannou et al., 2015). Επιπλέον είναι ένα φυσικό χαρακτηριστικό των περιοχών που πλημμυρίζουν (Kirkby, 1975).

Ο saga δείκτης τοπογραφικής θέσης βασίζεται σε δύο επιμέρους υπολογισμούς που αφορούν την κλίση και την τροποποίηση της ανάντι έκτασης για το κάθε κελί μέσα από μία επαναληπτική διαδικασία, η οποία δεν μελετά τη ροή ως ένα πολύ λεπτό στρώμα (φιλμ). Αποτέλεσμα αυτής της επαναληπτικής διαδικασίας είναι για τα κελιά που βρίσκονται στον πάτο των κοιλάδων με μικρή κάθετη απόσταση από την κοίτη να εκτιμάται πιο ρεαλιστικά, η δυνητική εδαφική υγρασία. (Böhner et al., 2003)

Μεγαλύτερη εδαφική υγρασία σημαίνει ότι μεγαλύτερη ποσότητα νερού μετατρέπεται σε άμεση απορροή. Εδάφη με μεγάλη εδαφική υγρασία συνήθως ταυτίζεται με περιοχές που είναι ευάλωτες σε πλημμύρες, δηλαδή το κριτήριο μεγιστοποιείται. Το κριτήριο δημιουργήθηκε, απεικονίστηκε (Σχήμα 3.29) και ταξινομήθηκε με τη μέθοδο K-mean σε περιβάλλον Saga 6.3.0. Η απεικόνιση του ταξινομημένου κριτηρίου έγινε σε περιβάλλον ArcMap 10.2 (Σχήμα 3.30).



Σχήμα 3.29 Χάρτης του saga Δείκτη Τοπογραφικής Υγρασίας



Σχήμα 3.30 Χάρτης Ταξινομημένου saga Δείκτη Τοπογραφικής Υγρασίας

3.3.9 Ο σύνθετος δείκτης υδρολογικών απωλειών βροχής της μεθόδου SCS (composite Curve Number – compCN)

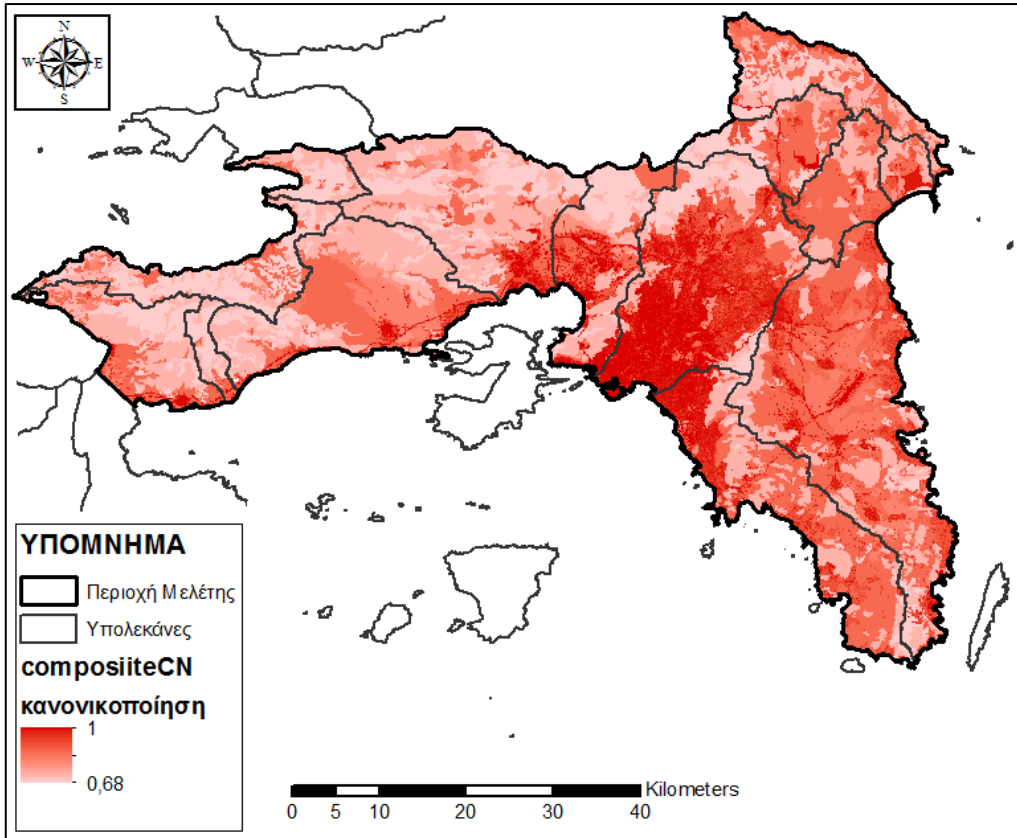
Ο δείκτης Curve Number (CN) είναι μια εμπειρική παράμετρος που χρησιμοποιείται στην υδρολογία για την εκτίμηση της άμεσης απορροής ή της διήθησης από την υπερβολική βροχόπτωση. Ο CN της απορροής βασίζεται στην υδρολογική ομάδα του εδάφους της περιοχής, στις χρήσεις γης και στις συνθήκες υγρασίας του εδάφους. Η εκτίμηση του CN απαιτεί τη χαρτογράφηση του τύπου του εδάφους και των χρήσεων γης. Τα δεδομένα για την εκτίμηση του δείκτη βασίστηκαν στην ταξινόμηση των εδαφών σε υδρολογικές κατηγορίες και σε χρήσεις γης από το CORINE Land Cover (Miliiani, 2011).

Στην παρούσα εργασία επειδή η κύρια χρήση της περιοχής μελέτης είναι η αστική ο τύπος του εδάφους λαμβάνεται, υπέρ της ασφαλείας, κατηγορίας Δ. Επιπλέον, τροποποιείται ο δείκτης και λαμβάνεται ο σύνθετος δείκτης CN (Σχήμα 3.31) αναλογικά με το ποσοστό αδιαπερατότητας του εδάφους, από την εξίσωση $CN + (99 - CN) \cdot \frac{\text{αδιαπερατότητα}}{100}$, όπου η αδιαπερατότητα είναι εκφρασμένη σε ποσοστό (%) (TR-55, 1986). Όσο περισσότερη βροχή γίνεται απορροή τόσο πιο ευάλωτη είναι η περιοχή σε πλημμύρες, δηλαδή το κριτήριο μεγιστοποιείται. Όλη η επεξεργασία και η απεικόνιση έγινε σε περιβάλλον ArcMap 10.2 εκτός από τη διαδικασία ταξινόμησης με K-mean που έγινε σε περιβάλλον Saga 6.3.0 (χάρτης Σχήματος 3.32).

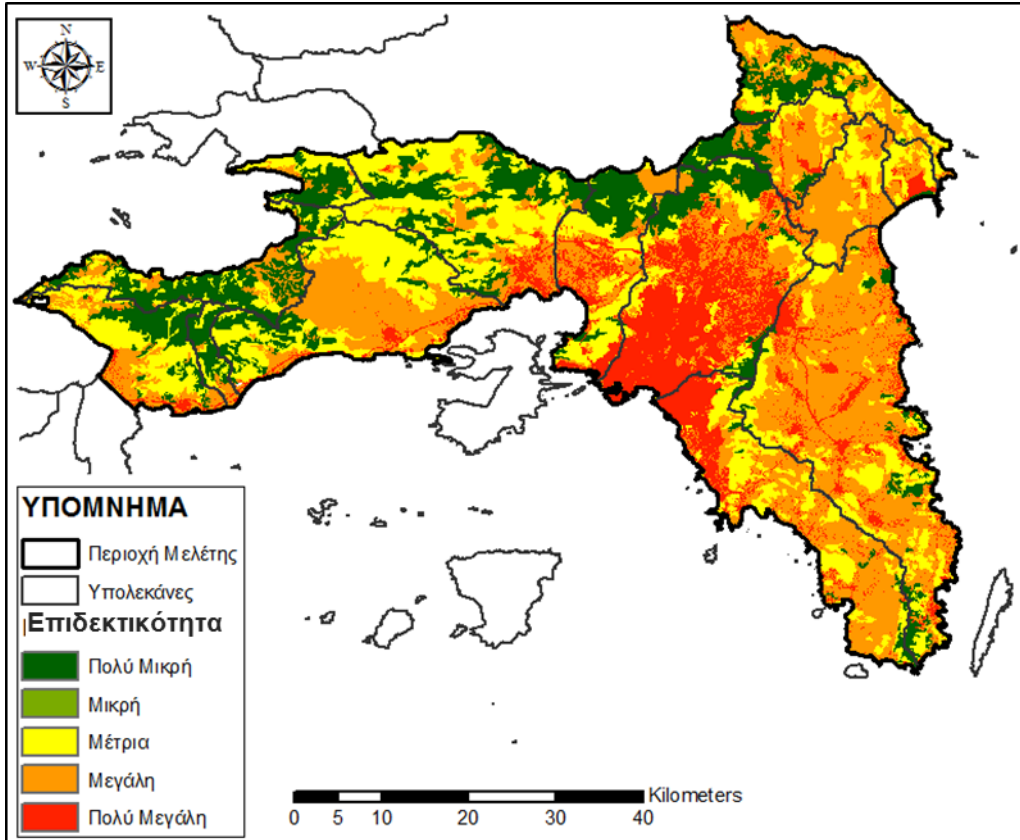
Πίνακας 3.5 Η αντιστοίχιση των τιμών RI, ανάλογα με το πλήθος των κριτηρίων n.

CORINE land cover class	Hydrologic soil group			
	A	B	C	D
1.1.1 Continuous urban fabric	89	92	94	95
1.1.2 Discontinuous urban fabric	77	85	90	92
1.2.1 Industrial or commercial units	81	88	91	93
1.2.2 Road and rail networks and associated land	98	98	98	98
1.2.3 Port areas	81	88	91	93
1.2.4 Airports	72	82	87	89
1.3.1 Mineral extraction sites	72	82	87	89
1.3.2 Dump sites	72	82	87	89
1.3.3 Construction sites	72	82	87	89
1.4.1 Green urban areas	68	79	86	89
1.4.2 Sport and leisure facilities	49	69	79	84
2.1.1 Non-irrigated arable land	49	69	79	84
2.1.2 Permanently irrigated land	49	69	79	84
2.1.3 Rice fields	59	70	78	81
2.2.1 Vineyards	67	77	83	87
2.2.2 Fruit trees and berry plantations	65	75	82	86
2.2.3 Olive groves	65	75	82	86
2.3.1 Pastures	49	69	79	84
2.4.1 Annual crops associated with permanent crops	62	71	78	81
2.4.2 Complex cultivation patterns	67	78	85	89
2.4.3 Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation.	67	78	85	89
2.4.4 Agroforestry areas	45	66	77	83
3.1.1 Broad-leaved forest	60	65	70	77
3.1.2 Coniferous forest	60	65	70	77
3.1.3 Mixed forest	60	65	70	77
3.2.1 Natural grassland	60	65	74	80
3.2.2 Moors and heathland	60	65	74	80
3.2.3 Sclerophyllous vegetation	60	65	74	80
3.2.4 Transitional woodland-scrub	60	65	74	80
3.3.1 Beaches, dunes, sands	25	55	70	77
3.3.2 Bare rocks	68	79	86	89
3.3.3 Sparsely vegetated areas	68	79	86	89
3.3.4 Burnt areas	68	79	86	89
3.3.5 Glaciers and perpetual snow	79	79	79	79
4.1.1 Inland marshes	98	98	98	98
5.1.1 Water courses	99	99	99	99
5.1.2 Water bodies	99	99	99	99
5.2.1 Coastal lagoons	99	99	99	99

(Πηγή: Miliani, 2011)



Σχήμα 3.31 Χάρτης Κανονικοποιημένου σύνθετου δείκτη CN



Σχήμα 3.32 Χάρτης Ταξινομημένου σύνθετου δείκτη CN

3.3.10 Ο ημερήσια τροποποιημένος δείκτης Fournier (daily Modified Index – dMFI).

Η βροχόπτωση είναι μια σημαντική παράμετρος για τη μελέτη του φαινομένου της πλημμύρας και ως εκ τούτου συμπεριλήφθηκε στην ανάλυση με βάση το κριτήριο dMFI. Έτσι δημιουργήθηκε ένας χάρτης «δυναμικού» βροχόπτωσης χρησιμοποιώντας, καταντιστοιχεία τη μεθοδολογία υπολογισμού του Modified Fournier Index (Morgan 2005).

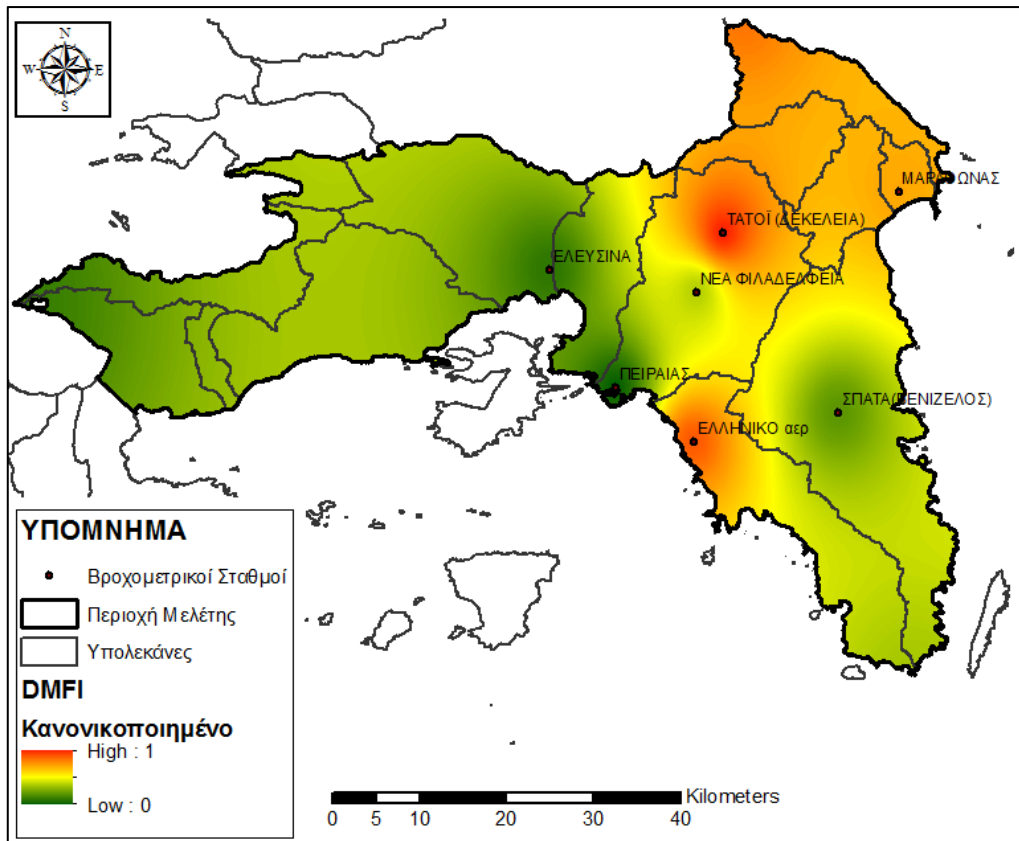
Στην παρούσα εργασία ο δείκτης υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$dMFI = \sum_{i=1}^{30} \frac{p^2}{P}$$

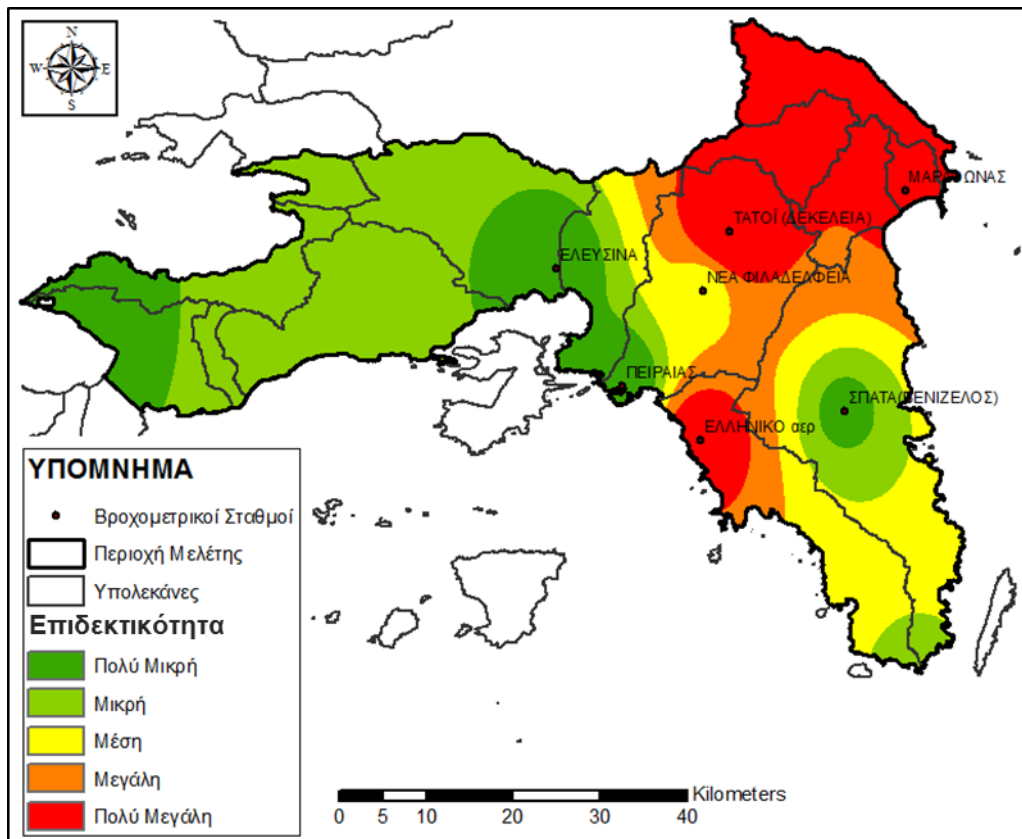
Όπου Σ η αθροιστική περίοδος των ημερών του μήνα
 p η αθροιστική ημερήσια βροχόπτωση
 P η αθροιστική μηνιαία βροχόπτωση.

Περιοχές που εμφανίζονται ξαφνικά μεγάλες βροχοπτώσεις είναι πιο ευάλωτες σε πλημμύρες σε σχέση με εκείνες που βρέχει εξίσου καθ' όλη τη διάρκεια του υδρολογικού έτους, δηλαδή το κριτήριο μεγιστοποιείται. Για την εκτίμηση των χαρτών του dMFI χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των αντιστρόφων αποστάσεων και χρονοσειρές των βροχομετρικών σταθμών της ΕΜΥ στην Αττική που φαίνεται και στα Σχήματα 3.33 και 3.34. Η επεξεργασία των χρονοσειρών έγινε σε περιβάλλον excel και για κάθε σταθμό επιλέχτηκε ο μήνας με το μεγαλύτερο δείκτη. Η διαδικασία της χωρικής κατανομής του δείκτη έγινε σε περιβάλλον ArcMap 10.2 καθώς και η απεικόνισή του σε χάρτες. Η διαδικασία ταξινόμησής του με K mean έγινε σε περιβάλλον Saga 6.3.0.

Τέλος σημειώνεται ότι δεν επιλέχτηκε μία χωρική κατανομή του δείκτη με τη χρήση του υψομέτρου και της βροχοβαθμίδας καθώς τότε ο δείκτης δεν θα πέρναγε το τεστ συσχέτισης (Papaioannou et al., 2015).



Σχήμα 3.33 Χάρτης Κανονικοποιημένου dMFI



Σχήμα 3.34 Χάρτης Ταξινομημένου dMFI

4 Αποτελέσματα και Συζήτηση

Μετά από την επεξεργασία των δεδομένων και τη δημιουργία τελικά των κριτηρίων σε περιβάλλον ArcMap 10.2 και Saga 6.3.0 δημιουργήθηκαν δύο κύρια σενάρια και το ενδιάμεσό τους, με σκοπό τη στάθμιση των κριτηρίων για την τελική κατάρτιση των χαρτών ευάλωτων σε πλημμύρες περιοχών. Το πρώτο κύριο σενάριο εστιάζει περισσότερο στο δυναμικό της βροχής και τη γενικότερη μορφολογία του εδάφους, ενώ το δεύτερο κύριο σενάριο εστιάζει περισσότερο στο υδρογραφικό δίκτυο και την υγρασία του εδάφους. Τέλος, ο συνδυασμός των δυο προηγούμενων σεναρίων εκτιμάται ότι προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα. Τα υπόψη σενάρια καταγράφηκαν σε πίνακες σύγκρισης ζευγών της μεθόδου AHP σε περιβάλλον excel, όπου και έγινε όλη η επεξεργασία αυτών για την παραγωγή των βαρών στάθμισης τόσο για τη μέθοδο AHP όσο και για την FAHP.

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα κριτήρια που παρήχθησαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο 3, καθώς επίσης και τα σύνολα τιμών τους ανά κατηγορία όπως προέκυψαν κατά την ανάλυσή τους.

Πίνακας 4.1 Συγκεντρωτικός πίνακας των κριτηρίων που παράχθηκαν

	ΚΡΙΤΗΡΙΟ	ΚΥΡΙΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ	ΑΡΧΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ή ΚΛΑΣΕΙΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ	ΚΑΝΟΝΙΚΟ-ΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ	ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΗ ΚΛΑΣΕΩΝ Κ-MEAN
1.	Το υψόμετρο (Digital Elevation Model – DEM)		ARCMAP 10.2	[0 , 1408,31]	[0 , 1]	1 868,79
						2 576,27
						3 370,75
						4 202,88
						5 60,34
2.	Η κλίση (Slope - S)	Slope	ARCMAP 10.2	[0 , 15731,3]	[0 , 1]	1 11.911,30
						2 2.160,41
						3 65,86
						4 32,70
						5 7,81
3.	Η Κρίσιμη Πλευρά (critical Aspect – critical A.)	Aspect	ARCMAP 10.2	Βόρεια (337,5 , 22,5)	0,4	1 27,34
				Βορειοανατολικά (22,5 , 67,5)	0,2	
				Ανατολικά (67,5 , 112,5)	0,2	2 105,32
				Νοτιοανατολικά (112,5 , 157,5)	0,2	
				Νότια (157,5 , 202,5)	0,4	3 174,37
				Νοτιοδυτικά (202,5 , 247,5)	1	
				Δυτικά (247,5 , 292,5)	0,8	4 321,49
				Βορειοδυτικά (292,5 , 337,5)	0,6	
	ΕΠΙΠΕΔΟ -1	0,5	5 242,79			
4.	Η Οριζόντια Απόσταση Χερσαίας Ροής (Horizontal Overland Flow Distance - HOFD)	Overland Flow Distance to Channel Network	SAGA 6.3.0	[0 , 2387,71]	[0 , 1]	1 721,42
						2 407,81
						3 247,79
						4 136,62
						5 43,07

	ΚΡΙΤΗΡΙΟ	ΚΥΡΙΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ	ΑΡΧΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ή ΚΛΑΣΕΙΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ	ΚΑΝΟΝΙΚΟ-ΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ	ΚΕΝΤΡΟΕΙΔΗ ΚΛΑΣΕΩΝ Κ-ΜΕΑΝ
5.	Η Κάθετη Απόσταση από από το Δίκτυο Καναλιών (Vertical Distance of Channel Network-VDCN)	Vertical Distance of Channel Network	SAGA 6.3.0	[0 , 323,55]	[0 , 1]	1 102,50
						2 59,11
						3 33,42
						4 15,32
						5 1,90
6.(α)	Ο δείκτης καμπυλότητας περιοχής (Curvature - C)	Curvature	ARCMAP 10.2	[-2065 , 2060,15]	[0 , 1]	-
6.(β)	Η ταξινόμηση με βάση την καμπυλότητα της περιοχής (Curvature Classification - CC)	Curvature Classification	SAGA 6.3.0	0 (κυρτή/κυρτή)	0	-
				1 (επίπεδη/κυρτή)	0,125	
				2 (κοίλη/κυρτή)	0,25	
				3 (κυρτή/επίπεδη)	0,375	
				4 (επίπεδη/επίπεδη)	0,5	
				5 (κοίλη/επίπεδη)	0,625	
				6 (κυρτή/κοίλη)	0,75	
				7 (επίπεδη/κοίλη)	0,875	
8 (κοίλη/κοίλη)	1					
6.(γ)	Ο πολλαπλής κλίμακας δείκτης τοπογραφικής θέσης (multi-scale Topographic Position Index - mTPI)	Multi-Scale Topographic Position Index	SAGA 6.3.0	[-90,21 , 90]	[0 , 1]	1 42,48
						2 0,61
						3 -0,01
						4 -0,88
						5 -16,79
7.	Ο saga δείκτης τοπογραφικής υγρασίας (saga Topographic Wetness Index - sTWI)	Saga Wetness Index	SAGA 6.3.0	[-6,5 , 14,37]	[0 , 1]	1 2,32
						2 3,64
						3 5,58
						4 7,95
						5 11,41
8.	Ο σύνθετος δείκτης υδρολογικών απωλειών βροχής της μεθόδου SCS (composite Curve Number – compCN)		ARCMAP 10.2	[77 , 99]	[0 , 1]	1 77
						2 78,46
						3 80,29
						4 89,4
						5 97,75
9.	Ο ημερήσια τροποποιημένος δείκτης Fournier (daily Modified Fournier Index – dMFI).		ARCMAP 10.2	[66,19 , 106,81]	[0 , 1]	1 73,35
						2 79,17
						3 83,06
						4 89,12
						5 95,9

4.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Μεθόδων Στάθμισης

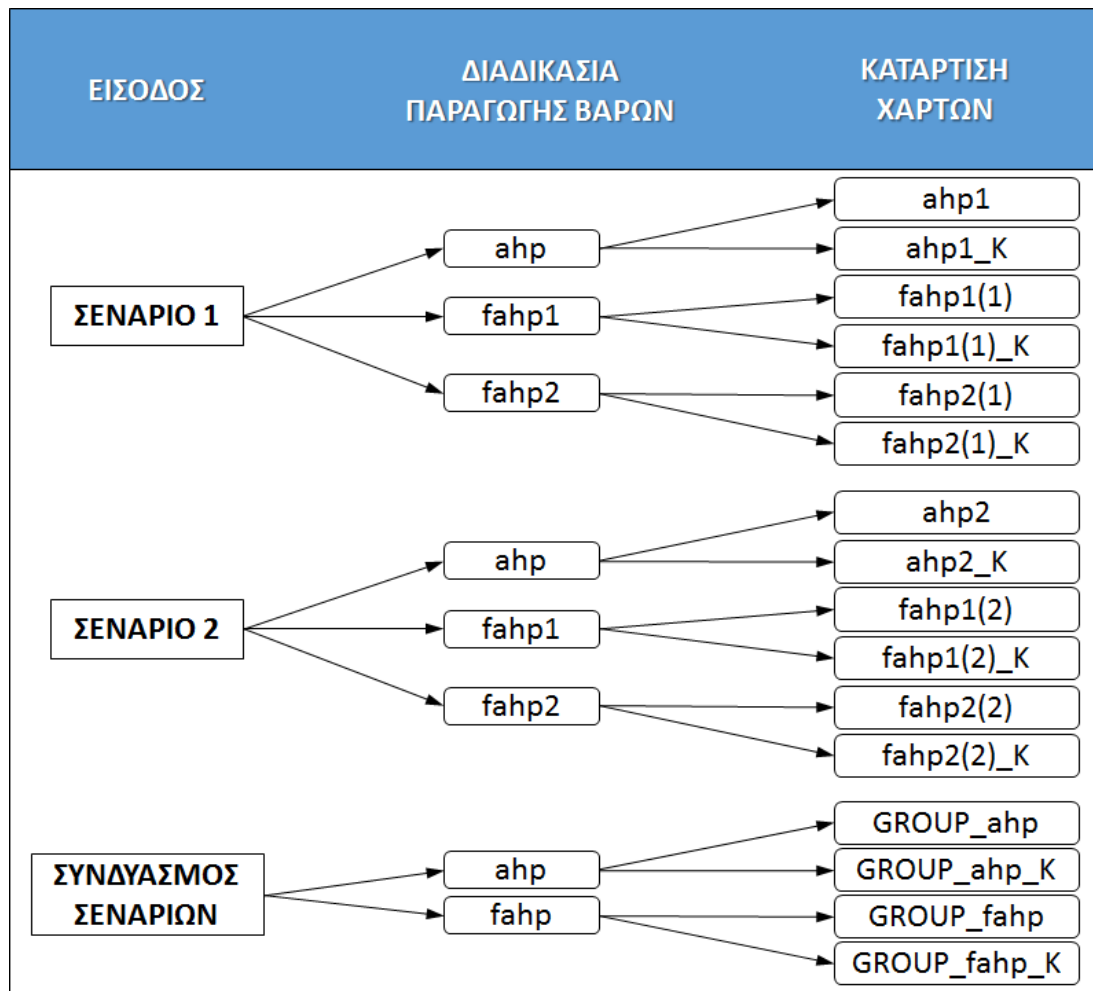
Τα κριτήρια που περιεγράφηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο 3 και αναλυτικά περιλαμβάνονται στον Πίνακα 4.1 ελήφθησαν υπόψη στην πολυκριτηριακή ανάλυση που διενεργήθηκε στο πλαίσιο διαδικασίας εφαρμογής του Σχήματος 3.8 της παρούσας εργασίας και περιγράφεται ως ακολούθως:

Βήμα 1^ο Αρχικά δημιουργήθηκαν 3 διανύσματα βαρών στάθμισης AHP, ένα για κάθε σενάριο, όπου καλούνται ahp1 ahp2 και GROUP_ahp. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν 2 διανύσματα FAHP σύμφωνα με τον Πίνακα 3.6 (σελ. 33 ανωτέρω) περίπτωση (α), που καλούνται fahr1(1) και fahr1(2) και έτερα 2 διανύσματα σύμφωνα με την περίπτωση (β) του ίδιου Πίνακα, που καλούνται fahr2(1) και fahr2(2), ένα για κάθε κύριο σενάριο. Τέλος δημιουργήθηκε 1 διάνυσμα FAHP για τη γεφύρωση των 2 κύριων σεναρίων όπου καλείται GROUP_fahr. Τα παραπάνω φαίνονται και στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί (Σχήμα 4.1). Τα διανύσματα στάθμισης που παράχθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.

Βήμα 2^ο Μοντελοποιήθηκε, σε περιβάλλον ArcMap 10.2 και με τη βοήθεια του model builder, η διαδικασία του σταθμισμένου γραμμικού συνδυασμού και καταρτίστηκαν οι τελικοί χάρτες. Επιπλέον, παράχθηκαν και κάποιοι χάρτες προκειμένου να ελεγχθεί ποιο

κριτήριο θα αντικαταστήσει το κριτήριο του δείκτη τοπογραφικής θέσης (όπως ήδη αναλύθηκε ανωτέρω στο Κεφάλαιο 3).

Η διαδικασία της παραγωγής χαρτών έγινε μια φορά με τα κανονικοποιημένα κριτήρια και μια με τα ταξινομημένα. Σημειώνεται ότι τα ονόματα της μορφής xxxx_K αποτελούν τους χάρτες που είναι προϊόντα της πολυκριτηριακής ανάλυσης με ταξινομημένα κριτήρια με τη χρήση της μεθόδου K-mean (Σχήμα 4.1).



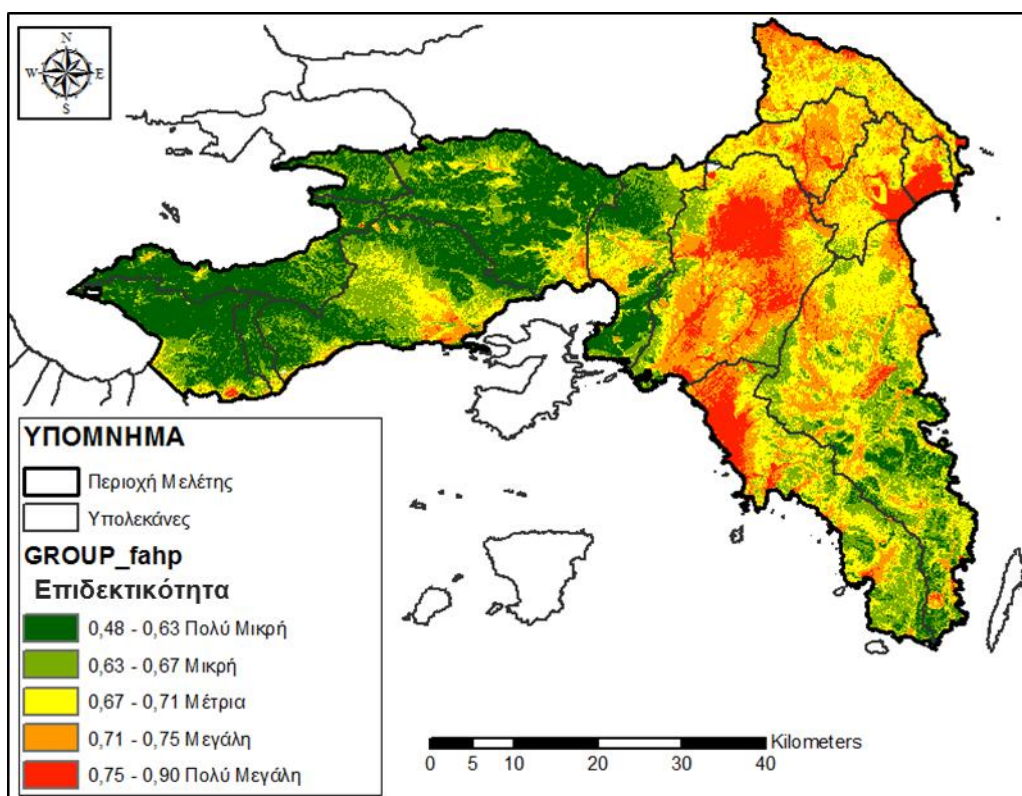
Σχήμα 4.1 Διάγραμμα Ροής παραγωγής αποτελεσμάτων & κατάρτισης χαρτών

Πίνακας 4.2 Διανύσματα Βαρών Στάθμισης Κριτηρίων.

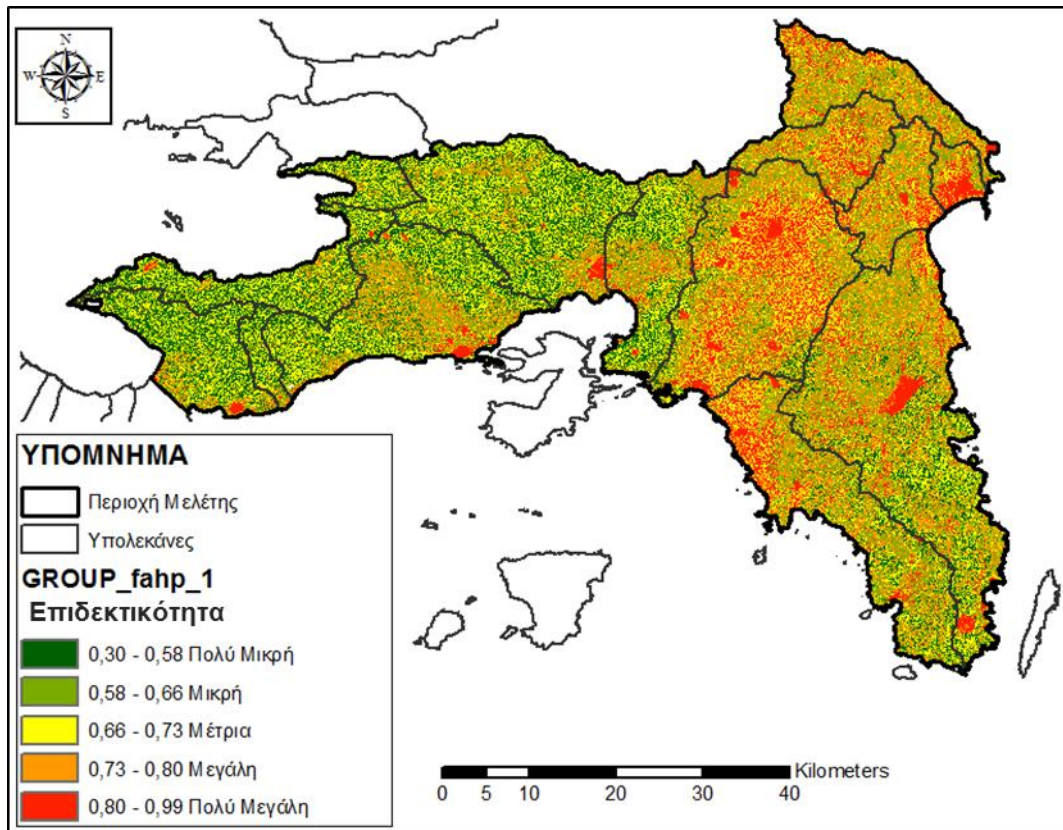
	DEM	SLOPE	critical ASPECT	HOFD	VDCN	Μορφολογία Εδάφους	sTWI	compCN	dMFI
ahp1	0,02	0,03	0,04	0,08	0,08	0,18	0,16	0,18	0,23
ahp2	0,03	0,08	0,02	0,05	0,17	0,14	0,36	0,11	0,04
GROUP_ahp	0,02	0,04	0,07	0,06	0,11	0,16	0,23	0,16	0,15
fahp1(1)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,18	0,25	0,33
fahp2(1)	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,25	0,18	0,25	0,30
GROUP_fahp	0,00	0,07	0,00	0,05	0,14	0,17	0,22	0,18	0,16
fahp1(2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,50	0,39	0,00
fahp2(2)	0,00	0,02	0,00	0,00	0,20	0,17	0,46	0,15	0,00

4.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων σχετικών με τα Κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν

Ανακεφαλαιωτικά τα κριτήρια Curvature και το Curvature Classification παράχθηκαν σε περιβάλλον ArcMap 10.2 και Saga GIS 6.3.0 αντίστοιχα. Τα κριτήρια αυτά είναι μία γραφική απεικόνιση του ίδιου ακριβώς μεγέθους με τη διαφορά ότι το πρώτο έχει συνεχείς τιμές ενώ το δεύτερο έχει διακριτές, αποτελεί δηλαδή μία ταξινόμηση του πρώτου. Αφού τα δύο αυτά κριτήρια κανονικοποιήθηκαν, παράχθηκαν για όλα τα σενάρια οι τελικοί χάρτες, μία φορά για το πρώτο κριτήριο και μία για το δεύτερο και εκ του αποτελέσματος φαίνεται ότι ακολουθούν το ίδιο γενικό μοτίβο (χάρτες Σχήματος 4.2 και 4.3). Το curvature classification εξαιτίας του τρόπου που ορίζεται κατασκευάζεται και απεικονίζεται ως χάρτης κριτηρίου, μοιάζει να δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια ως επιμέρους δείκτης. Πλην όμως, ως προς το αποτέλεσμα δημιουργεί μεγάλο «θόρυβο» στο τελικό προϊόν. Αυτό φαίνεται με απλή αντιπαραβολή των τελικών χαρτών, που παράγονται με χρήση του κριτηρίου Curvature Classification με τους αντίστοιχους χάρτες που παράγονται με τη χρήση του κριτηρίου Curvature για οποιοδήποτε κριτήριο. Ενδεικτικά προς υποστήριξη των ανωτέρω παρατίθενται τα Σχήματα 4.2 και 4.3 που παράγονται από τη διαδικασία GROUP_fahr για τα κριτήρια Curvature και Curvature Classification αντίστοιχα. Ειδικότερα, τα αποτελέσματα του Σχήματος 4.2 φαίνεται να έχουν καλύτερη ομαδοποίηση, καθώς ο χρωματικός συνδυασμός των περιοχών του Σχήματος 4.3 μπορεί να δώσει παρόμοια όρια με τις κατηγορίες του Σχήματος 4.2. Για την ανάλυση με ταξινομημένα τα κριτήρια με K-mean όπως αναφέρθηκε δεν χρησιμοποιήθηκαν τα παραπάνω κριτήρια καθώς η επίδρασή τους θα ήταν σαν να προσέθετε κανείς μία σχεδόν σταθερή ποσότητα συνολικά στην περιοχή, δηλαδή το κριτήριο δεν έχει επίδραση λόγω ταξινόμησης στην περιοχή μελέτης. Έτσι χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο multi-scale Topographic Position Index



Σχήμα 4.2 Χάρτης Ευάλωτων σε Πλημμύρες Περιοχών ΥΔ Αττικής, GROUP_fahr

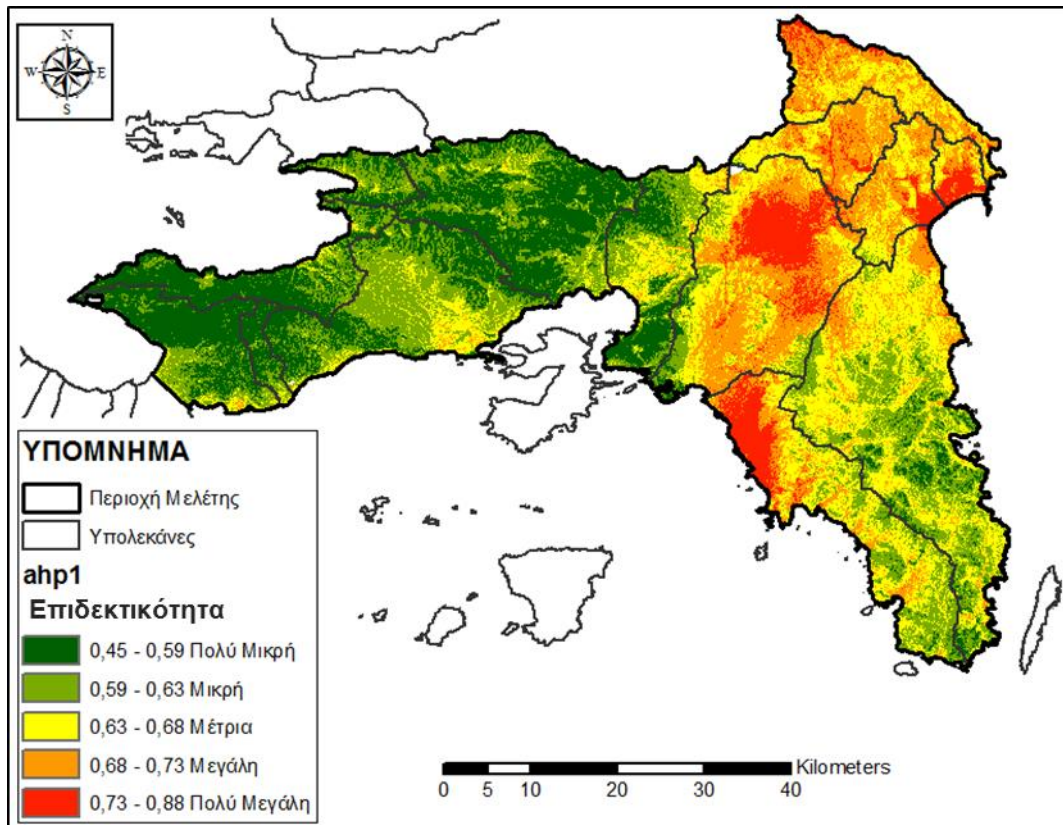


Σχήμα 4.3 Χάρτης Ευάλωτων σε Πλημμύρες Περιοχών ΥΔ Αττικής, GROUP_fahr_1

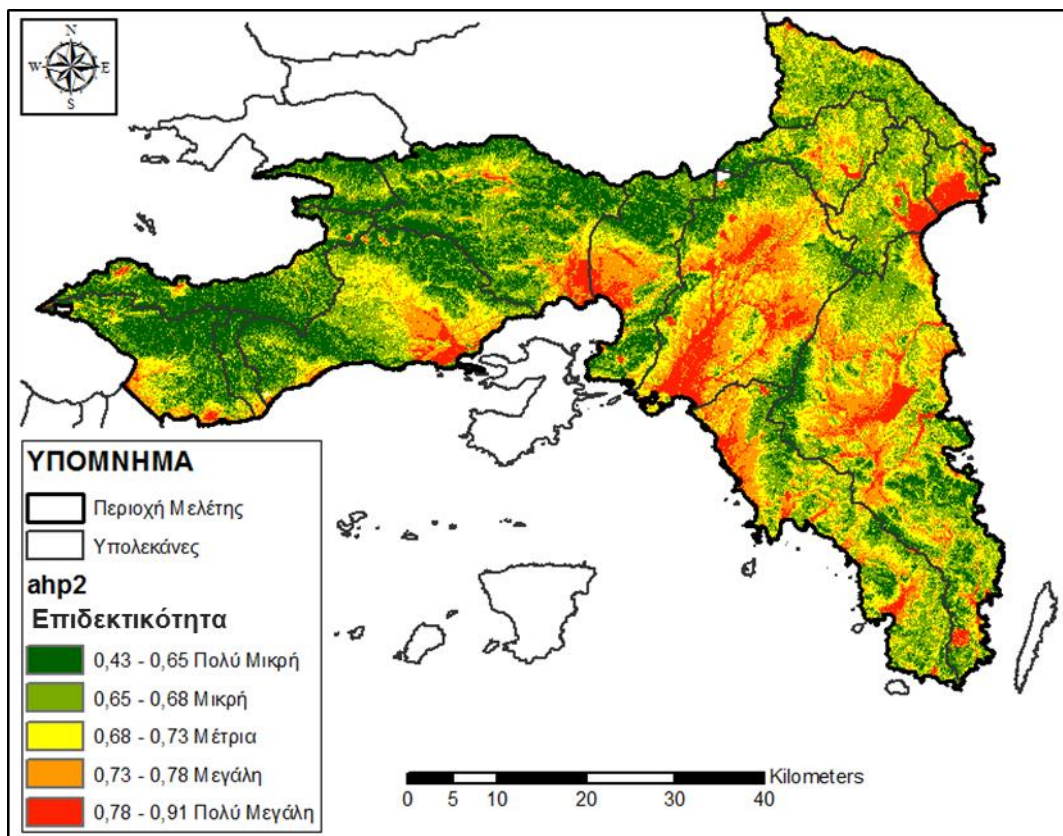
Ένας προβληματισμός προέκυψε από τα πρώτα κιόλας αποτελέσματα των 2 σεναρίων. Για παράδειγμα αντιπαραβάλλοντας τα Σχήματα 4.4 και 4.5 που είναι προϊόντα της μεθόδου ΑΗΡ για κανονικοποιημένα κριτήρια, δηλαδή οι χάρτες ahr1 και ahr2 όπως ορίστηκαν στο Σχήμα 4.1, φαίνεται ότι το «σενάριο 1» στερείται της πληροφορίας του υψομέτρου, ενώ το «σενάριο 2» όχι. Τέλος, και τα δύο σενάρια έχουν εξίσου χαμηλά βάρη στο κριτήριο του υψομέτρου για τη μέθοδο ΑΗΡ. Ο προβληματισμός για τα αποτελέσματα των δύο σεναρίων εξακολουθεί και για τα αποτελέσματα της μεθόδου FAHP μόνο που σε αυτή την προσέγγιση, στο κριτήριο του υψομέτρου αποδίδεται μηδενική βαρύτητα.

Η απάντηση του ως άνω προβληματισμού δίνεται από τα κριτήρια VDCN, sTWI και HOFD κατά σειρά προτεραιότητας. Ειδικότερα, αυτά τα κριτήρια δίνουν σαφείς ενδείξεις για τις ευάλωτες σε πλημμύρες περιοχές. Συγκεκριμένα, το sTWI αν ταξινομηθεί κατάλληλα μπορεί να δώσει μία πρώτη εκτίμηση για μία περιοχή. Επιπλέον, από τη διερεύνηση των κριτηρίων προέκυψε ότι το VDCN φαίνεται να κρατάει δεδομένα υψομέτρου σε συνδυασμό με δεδομένα κατευθύνσεων ροής και αναλογίας αποστάσεων, το sTWI έχει δεδομένα κλίσεων και αλληλουχίας θέσεων (ανάντι - κατάντι) ενώ το HOFD δίνει την πληροφορία σχετικά με την οριζόντια συνιστώσα της ροής.

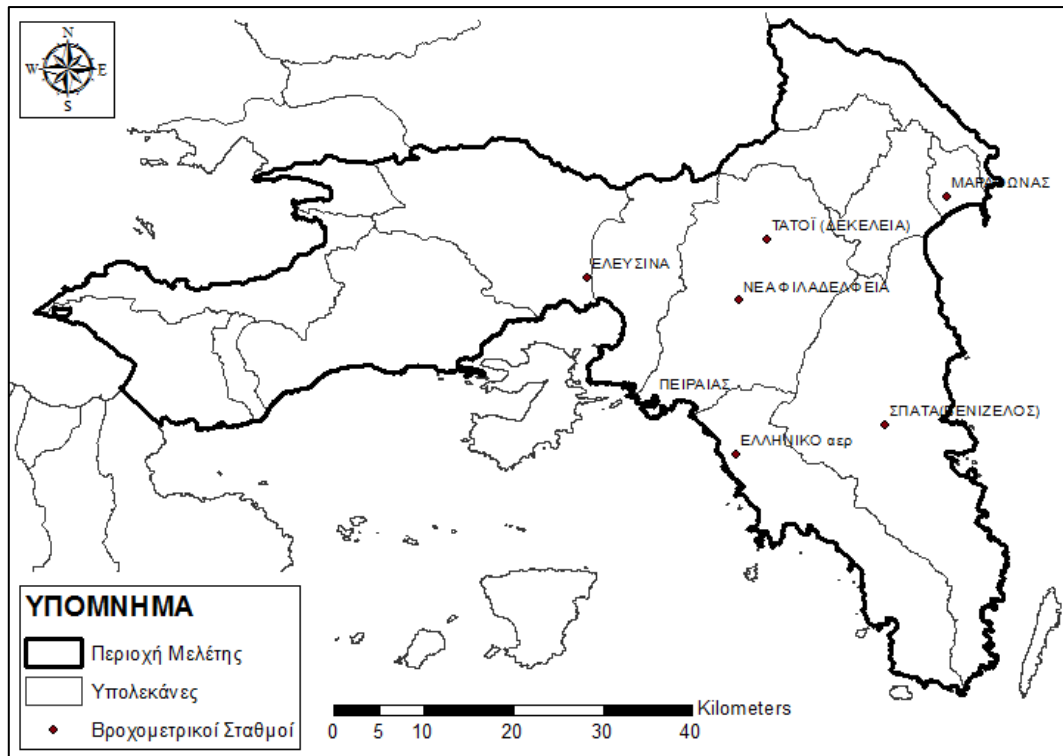
Όπως φαίνεται στον τελικό χάρτη του σεναρίου 1 (Σχήμα 4.4, που αποδίδει το σενάριο με έμφαση στο κριτήριο dMFI), η κατανομή του dMFI με χρήση της μεθόδου αντίστροφων αποστάσεων (Inverse Distance) δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αυτό το πρόβλημα δημιουργείται διότι όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.6 υπάρχει έλλειψη σε πρωτογενή δεδομένα βροχοπτώσεων σε θέσεις δυτικότερα του σταθμού της Ελευσίας.



Σχήμα 4.4 Χάρτης Ευάλωτων σε Πλημμύρες Περιχών ΥΔ Αττικής, ahp1



Σχήμα 4.5 Χάρτης Ευάλωτων σε Πλημμύρες Περιχών ΥΔ Αττικής, ahp2



Σχήμα 4.6 Το Δίκτυο Βροχομετρικών Σταθμών της ΕΜΥ ΥΔ Αττικής.

4.3 Κατάρτιση Χαρτών ευάλωτων σε πλημμύρες περιοχών

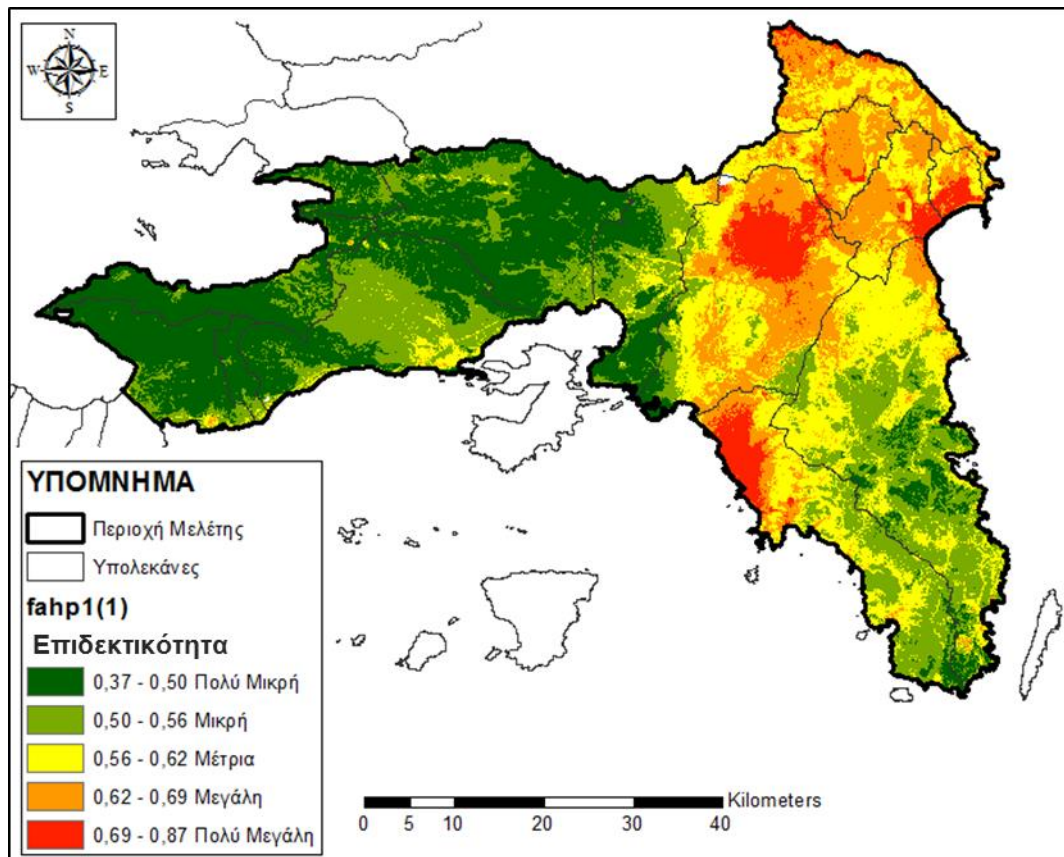
Τα αποτελέσματα που παράγονται για κάθε σενάριο από τις μεθόδους ΑΗΡ και FAHP φαίνεται να είναι παρόμοια. Για παράδειγμα αν αντιπαραβληθούν οι χάρτες ahr1, fahr1(1) και fahr2(1) (Σχήματα 4.4, 4.7 και 4.8 αντίστοιχα) του σεναρίου 1 φαίνεται πως η χωροθέτηση των ζωνών κινδύνου είναι παρόμοια. Επιπλέον, με τη διαδικασία FAHP προσαρμόζεται και ποσοτικοποιείται στην κλίμακα σύγκρισης των κριτηρίων η έννοια της αβεβαιότητας μέσω της ασάφειας του ασαφούς συνόλου αριθμών που χρησιμοποιείται.

Στην παρούσα εργασία, η προτεινόμενη μεθοδολογία ασαφοποίησης της σαφούς κλίμακας σημαντικότητας του Saaty (διαδικασία fahr2, Πίνακας 3.6(β)) δίνει αποτελέσματα πιο κοντά στα εξαγόμενα αποτελέσματα της διαδικασίας ΑΗΡ, έναντι αυτών που παράγονται με τη διαδικασία fahr1 (Πίνακας 3.6(α)). Δηλαδή οι χάρτες fahr2(1) (Σχήμα 4.8) και fahr2(2) (Σχήμα 4.11) μοιάζουν περισσότερο στους ahr1 (Σχήμα 4.4), ahr2 (Σχήμα 4.5) απ' ό τι οι fahr1(1) (Σχήμα 4.7) και fahr1(2) (Σχήμα 4.10) αντίστοιχα.

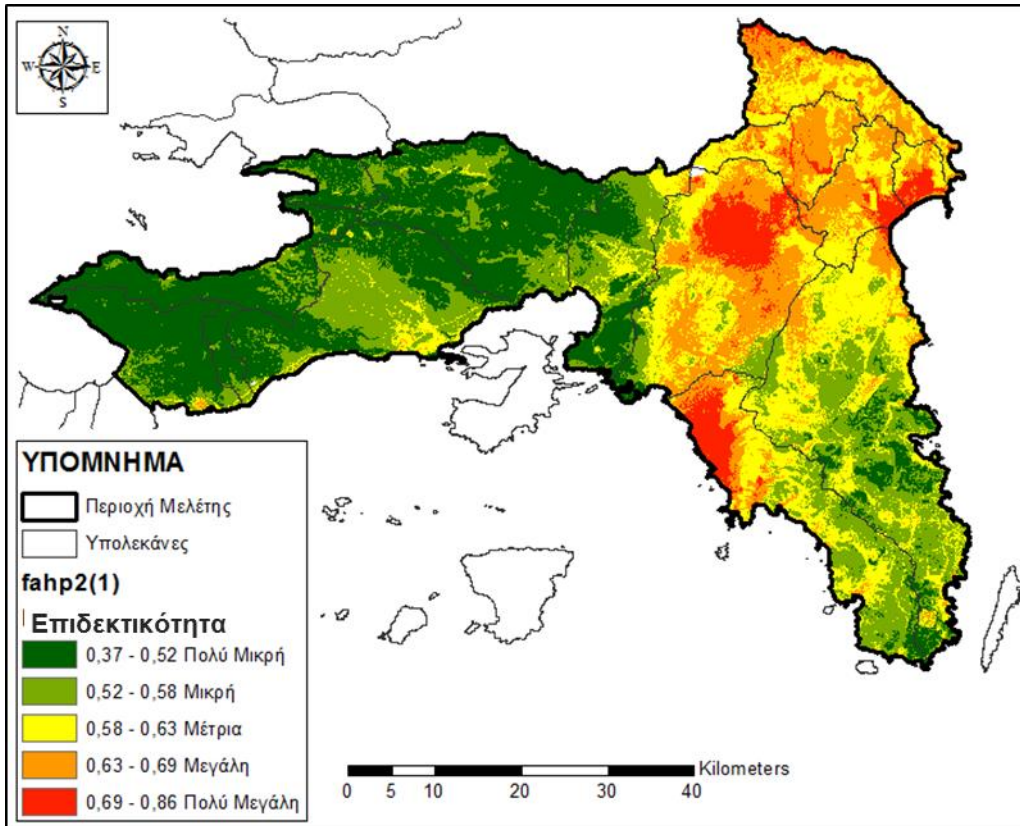
Μία άλλη πηγή αβεβαιότητας είναι και η γεφύρωση διαφορετικών απόψεων. Στην παρούσα εργασία ο Συνδυασμός των Σεναρίων 1 και 2 φαίνεται τόσο στο Σχήμα 4.9 (GROUP_ahr), όσο και στο Σχήμα 4.2 (GROUP_fahr). Σημειώνεται ότι η διαδικασία GROUP_ahr είναι μια προσέγγιση Μέσου Όρου, ενώ η διαδικασία GROUP_fahr χρησιμοποιεί τα εργαλεία της ασαφούς λογικής, όπως ήδη έχει αναλυθεί ανωτέρω (Κεφάλαιο 3).

Η μεθοδολογία FAHP φαίνεται ότι εστιάζει περισσότερο στα κριτήρια που δίνουν ή ευθύνονται για το τελικό αποτέλεσμα (Πίνακας 4.2) καθώς τα τελικά αποτελέσματα όπου δεν ταυτίζονται, είναι πάρα πολύ κοντά στα αντίστοιχα παραγόμενα μέσω της μεθόδου ΑΗΡ.

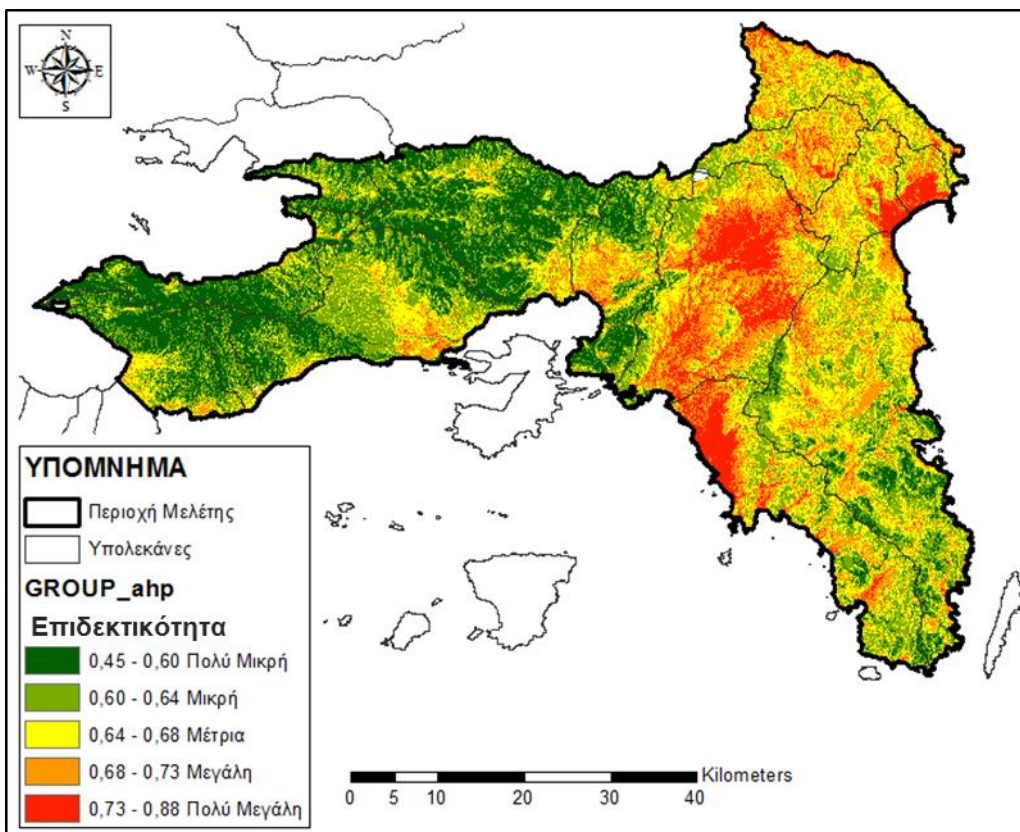
Επιπλέον, παρατηρώντας τον Πίνακα 4.2 φαίνεται ότι, με τη χρήση της μεθοδολογίας FAHP απλοποιείται η πολυκριτηριακή, καθώς μηδενίζονται οι βαρύτητες των κριτηρίων που δεν ευθύνονται και τόσο για τη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος, κι έτσι τελικά μειώνεται ο αναγκαίος χρόνος αναμονής για τη συνολική επεξεργασία των κριτηρίων (εξοικονόμηση CPU Time) συγκλίνοντας ταχύτερα σε παρόμοια αποτελέσματα με την ΑHP.



Σχήμα 4.7 Χάρτης Ευάλωτων σε Πλημμύρες Περιοχών ΥΔ Αττικής, fahp1(1)



Σχήμα 4.8 Χάρτης Ευάλωτων σε Πλημμύρες Περιχών ΥΔ Αττικής, fahp2(1)

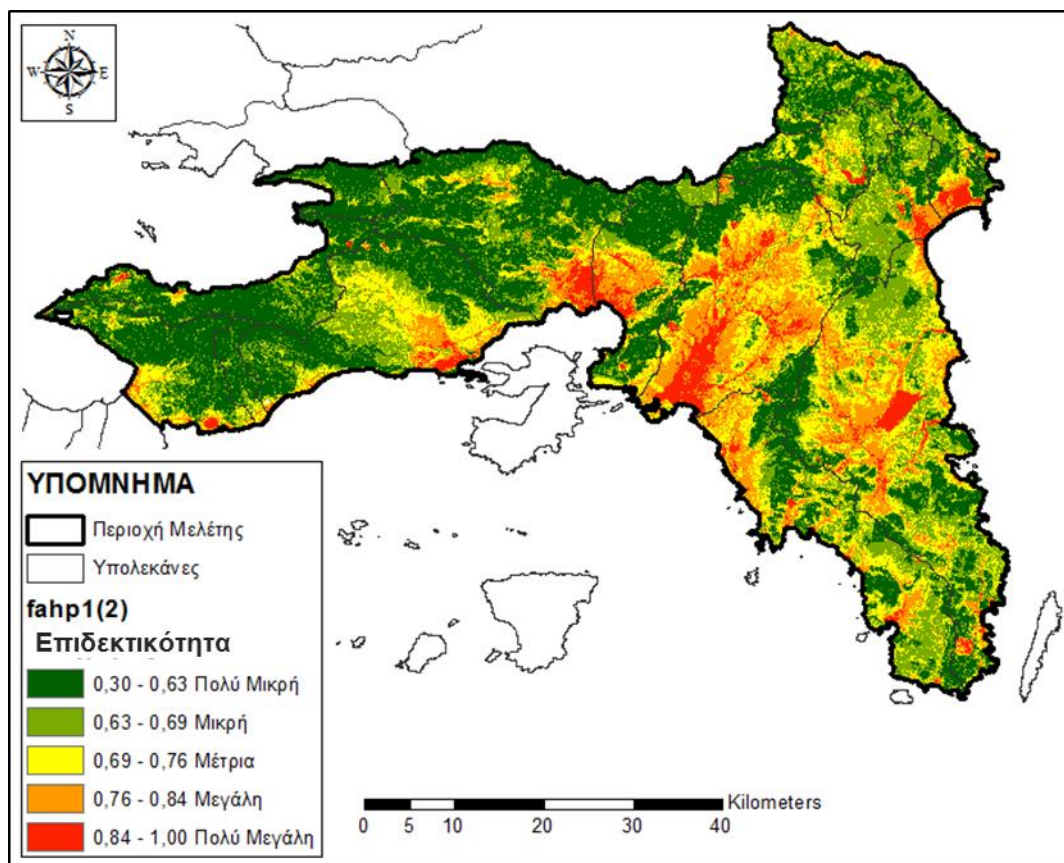


Σχήμα 4.9 Χάρτης Ευάλωτων σε Πλημμύρες Περιχών ΥΔ Αττικής, GROUP_ahp

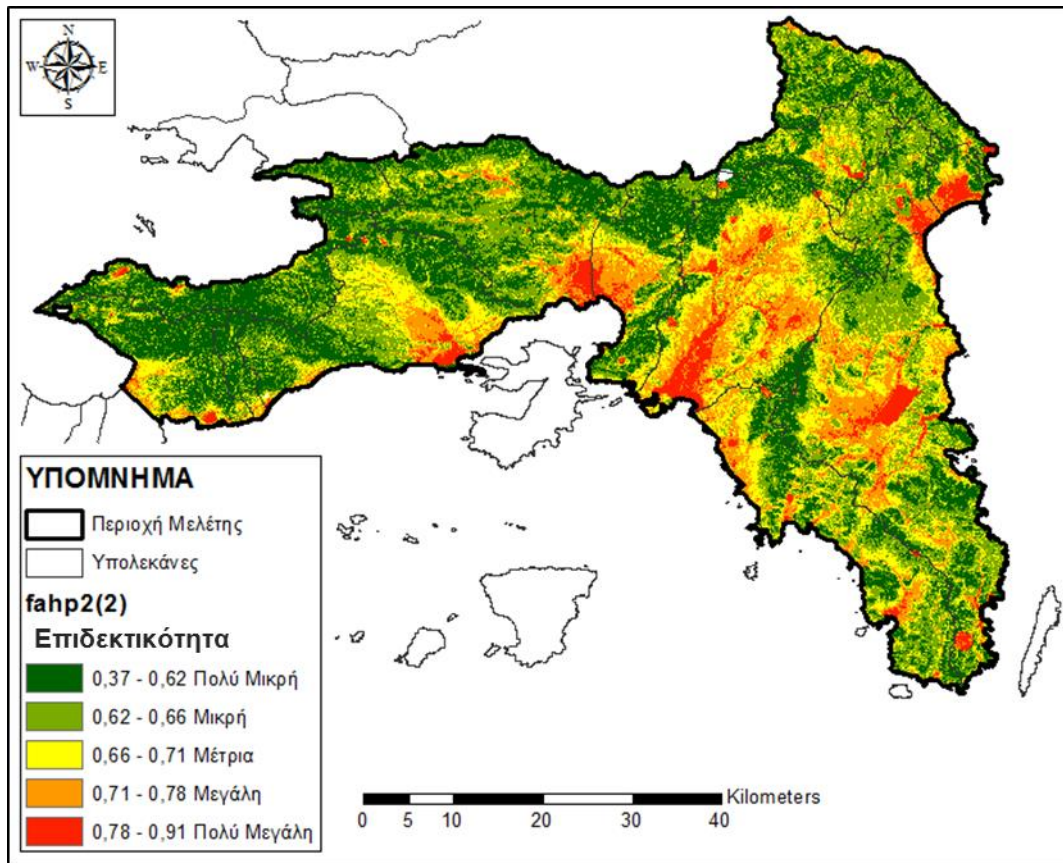
Αντιπαραβάλλοντας για παράδειγμα του χάρτες ahp2, fahr1(2) και fahr2(2) (Σχήματα 4.5, 4.10 και 4.11 αντίστοιχα) του σεναρίου 2, παρατηρεί κανείς ότι με τη μέθοδο FAHP τα δεδομένα των χαρτών έχουν καλύτερη ομαδοποίηση στην οριοθέτηση χρωματικών περιοχών και συνεπώς, καλύτερη απεικόνιση.

Τονίζεται ότι με χρήση μεθόδων ταξινόμησης απευθείας στα κριτήρια αντί της κανονικοποίησης απαιτείται ελάχιστη μνήμη για την απεικόνιση, επεξεργασία και αποθήκευση των κριτηρίων εκάστου κελιού πράγμα που οδηγεί και σε μικρότερη πολυπλοκότητα υπολογισμών και κατά συνέπεια σε ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου χρόνου επεξεργασίας και απαιτήσεων τύπου τεχνικών προδιαγραφών του μηχανήματος ηλεκτρονικού υπολογιστή που χρησιμοποιείται για να καταρτιστούν οι χάρτες ευάλωτων σε πλημμύρες περιοχών. Χαρακτηριστικά για την κατάρτιση των χαρτών με ταξινομημένα τα κριτήρια ο χρόνος υλοποίησης μειώθηκε στο μισό.

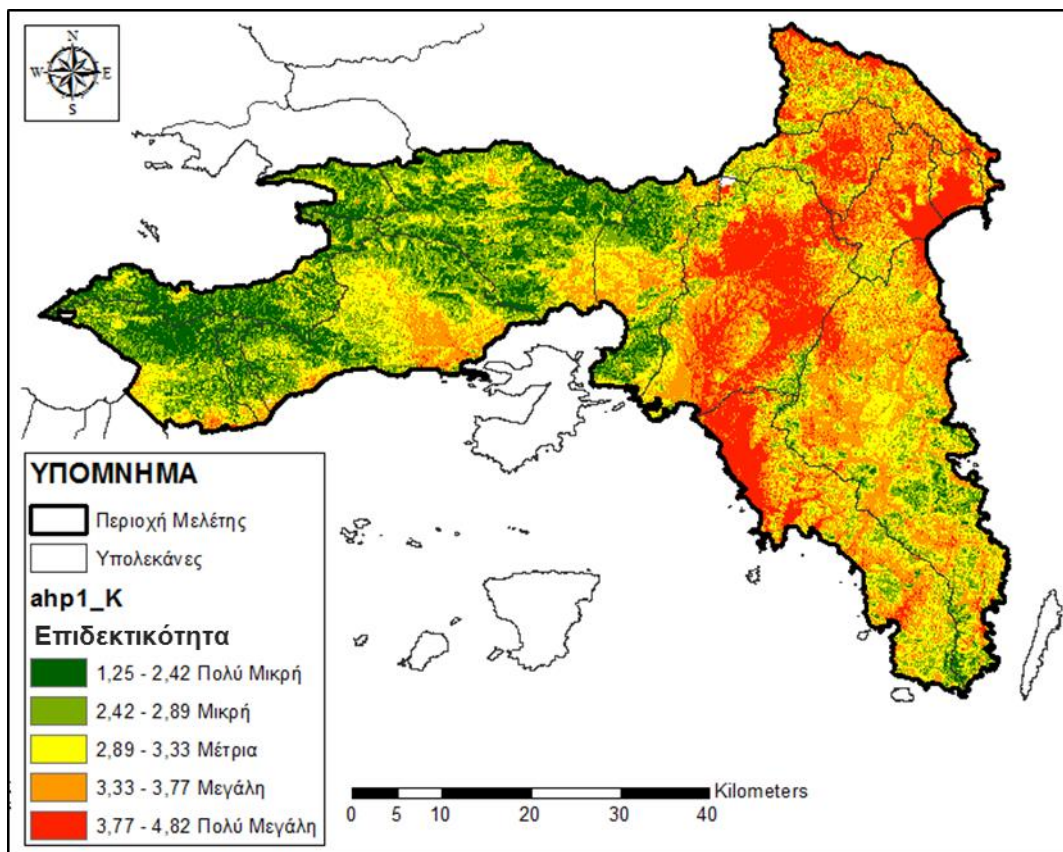
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χάρτες ahp1_K (Σχήμα 4.12), ahp2_K (Σχήμα 4.13), fahr2(1)_K (Σχήμα 4.14), fahr2(2)_K (Σχήμα 4.15), GROUP_ahp_K (Σχήμα 4.16), και GROUP_fahr_K (Σχήμα 4.17) των ταξινομημένων κριτηρίων. Κατόπιν των ανωτέρω δεν παρουσιάζονται οι χάρτες της διαδικασίας fahr1, γιατί θεωρούνται χειρότεροι από αυτούς της διαδικασίας fahr2 (και ως εκ τούτου δεν παρατίθενται στην παρούσα εργασία).



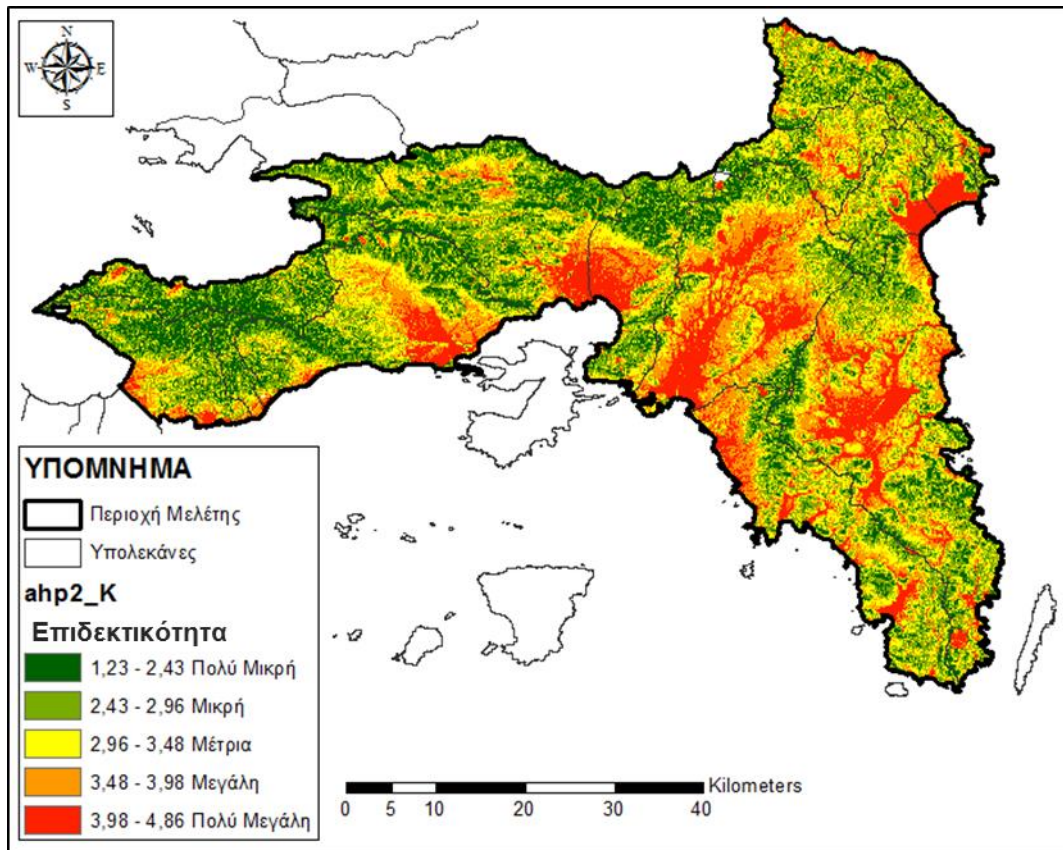
Σχήμα 4.10 Χάρτης Ευάλωτων σε Πλημμύρες Περιοχών ΥΔ Αττικής, fahr1(2)



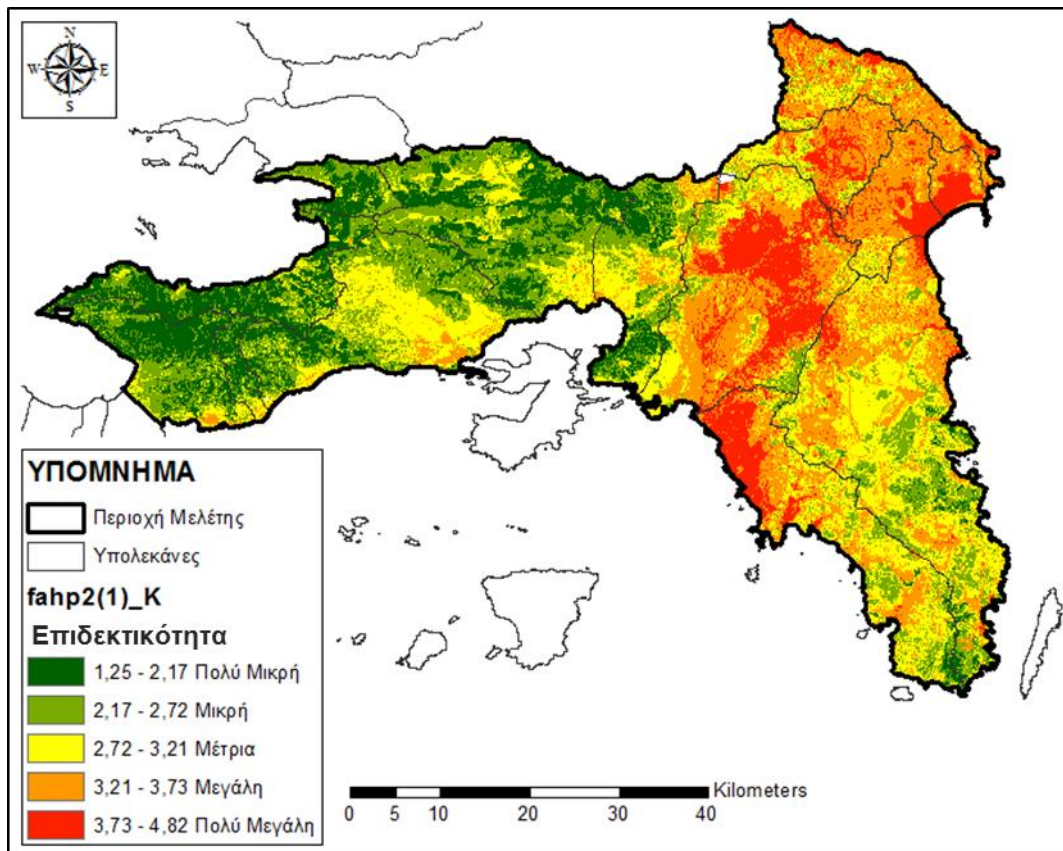
Σχήμα 4.11 Χάρτης Ευάλωτων σε Πλημμύρες Περιοχών ΥΔ Αττικής, fahp2(2)



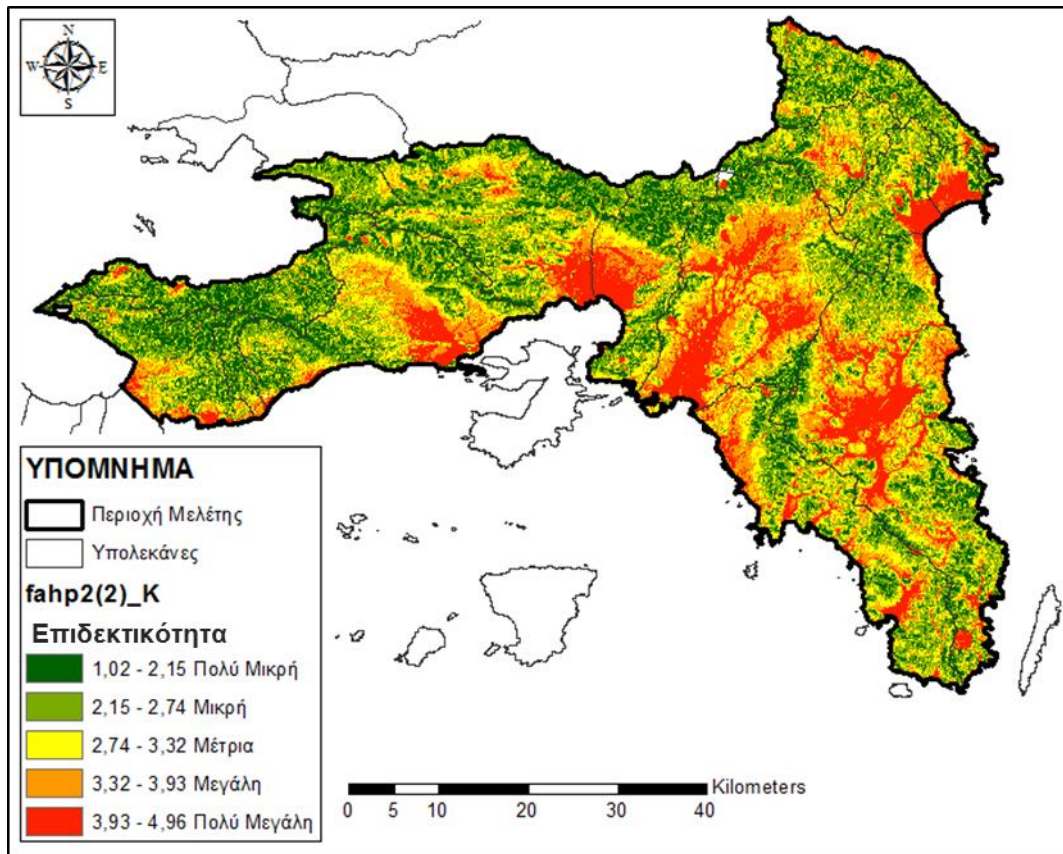
Σχήμα 4.12 Χάρτης Ευάλωτων σε Πλημμύρες Περιοχών ΥΔ Αττικής, ahp1_K



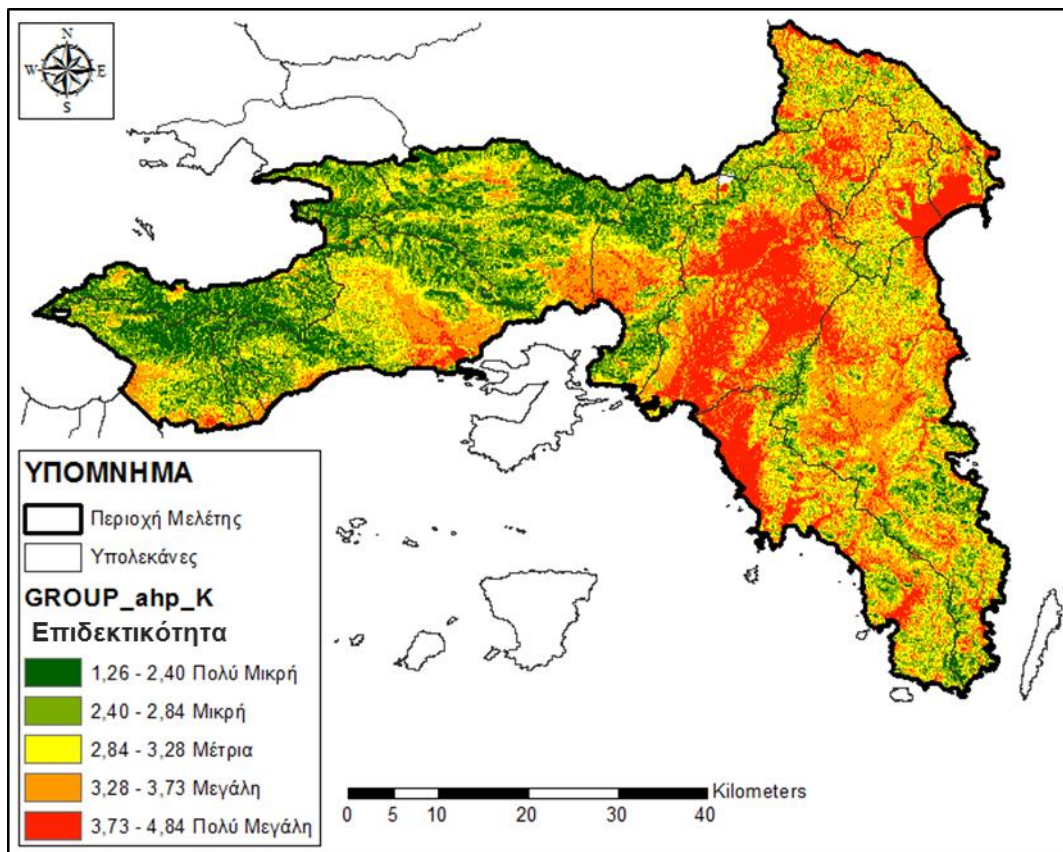
Σχήμα 4.13 Χάρτης Ευάλωτων σε Πλημμύρες Περιοχών ΥΔ Αττικής, a_hr2_K



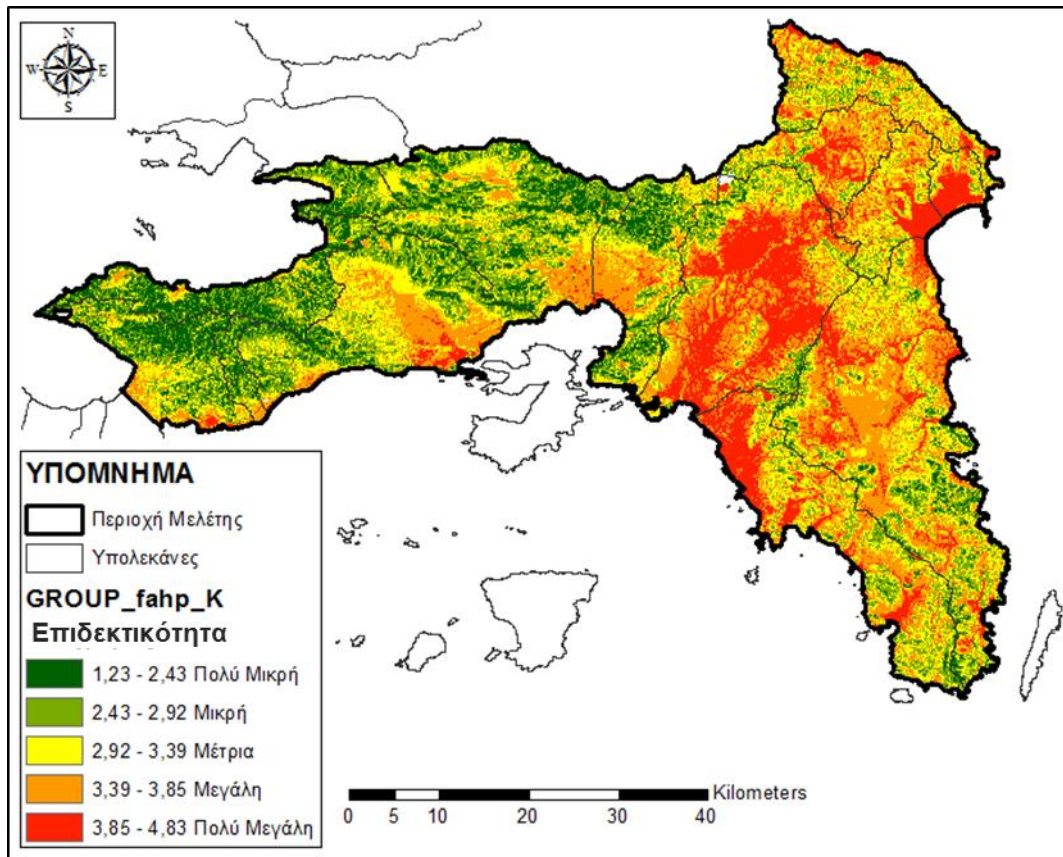
Σχήμα 4.14 Χάρτης Ευάλωτων σε Πλημμύρες Περιοχών ΥΔ Αττικής, f_a_hr2(1)_K



Σχήμα 4.15 Χάρτης Ευάλωτων σε Πλημμύρες Περιχών ΥΔ Αττικής, fahp2(2)_K



Σχήμα 4.16 Χάρτης Ευάλωτων σε Πλημμύρες Περιχών ΥΔ Αττικής, GROUP_ahp_K



Σχήμα 4.17 Χάρτης Ευάλωτων σε Πλημμύρες Περιχών ΥΔ Αττικής, GROUP_fahr_K

4.4 Αξιολόγηση Μεθόδων με βάση Ιστορικά Στοιχεία Πλημμυρών

Συνοψίζοντας τα παραπάνω φαίνεται ότι πρέπει να επιλεγεί ο χάρτης GROUP_fahr_K (Σχήμα 4.18) προκειμένου να αξιολογηθεί με βάση τα ιστορικά στοιχεία πλημμυρών που παρέχονται από το ΥΠΕΝ/ΕΓΥ ελεύθερα στο διαδίκτυο (Κεφάλαιο 2 §2.4 ανωτέρω).

Η επιλογή αυτή βασίζεται στο ότι ο υπόψη χάρτης προέρχεται από το συνδυασμό δύο κύριων σεναρίων και από μία αλγοριθμική διαδικασία που γεφυρώνει τα δύο σενάρια με τη χρήση των βασικών αρχών ασαφούς λογικής. Από το Σχήμα 4.18 φαίνεται πως όλες οι Ζώνες Υψηλού πλημμυρικού Κινδύνου έχουν περιγραφεί από την προτεινόμενη διαδικασία στις κατηγορίες «Μεγάλη» και «Πολύ Μεγάλη» και επιπλέον έχουν οριστεί και άλλες εξίσου ευάλωτες περιοχές εντός των οποίων βρίσκονται και όσες καταγεγραμμένες πλημμύρες είναι εκτός των ορίων των ζωνών. Στο Σχήμα 4.19 φαίνονται οι ζώνες δυνητικά υψηλού κινδύνου και οι Καλλικρατικοί Δήμοι στους οποίους ανοίκουν αυτές οι περιοχές.

5 Συμπεράσματα & Μελλοντική Έρευνα

5.1 Σύνοψη

Στην παρούσα εργασία, αφού παρουσιάστηκαν όλα τα διαθέσιμα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, περιγράφηκαν όλα τα χαρακτηριστικά και οι ιδιαιτερότητες που αφορούν στην περιοχή μελέτης και εξετάστηκαν οι διατιθέμενες σύγχρονες μέθοδοι, αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία πολυκριτηριακής ανάλυσης σε περιβάλλον GIS για τον καθορισμό ευάλωτων σε πλημμύρες περιοχών.

Όλη η διαδικασία τέθηκε υπό διερεύνηση και αναπτύχθηκε όλο απαιτητό υπόβαθρο (θεωρητικό και πρακτικό). Αρχικά λοιπόν, έγινε μία προσπάθεια καταγραφής των κύριων παραγόντων που καθορίζουν μια εκτίμηση για το μέγεθος της πλημμυρικής επικινδυνότητας. Έπειτα, δοκιμάστηκαν τροποποιήσεις και διαφορετικές αναλύσεις τόσο στο θεωρητικό κομμάτι της μεθόδου όσο και στα εργαλεία και κριτήρια που χρησιμοποιούνται πρακτικά για την ανάδειξη του κατά πόσο ευάλωτη είναι η περιοχή μελέτης σε πλημμύρες. Στην παρούσα εφαρμόζονται οι δύο μέθοδοι στάθμισης για την πολυκριτηριακή ανάλυση η «Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία» (Analytical Hierarchy Process-AHP) και η «Ασαφής Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία» (Fuzzy Analytical Hierarchy Process-FAHP). Για τη δεύτερη προτάθηκαν μάλιστα και αλλαγές στον τρόπο διαχείρισης των πινάκων σύγκρισης ζευγών και τη διαδικασία ασαφοποίησής τους για την εφαρμογή της μεθόδου FAHP (διαδικασία fahp2). Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι ανάλυσης δεδομένων. Σύμφωνα με την πρώτη, τα κριτήρια κανονικοποιήθηκαν, ενώ, σύμφωνα με τη δεύτερη, τα κριτήρια ταξινομήθηκαν. Στην παρούσα μελέτη, η ανάλυση υλοποιήθηκε σε επίπεδο εικονοστοιχείου pixel 5m x 5m, που είναι το μικρότερο δυνατό βάσει διαθέσιμων δεδομένων, επειδή η περιοχή μελέτης είναι ένα σφιχτό και ιδιαίτερα τροποποιημένο τεχνητό περιβάλλον μεγάλης σημασίας. Η αστική ζώνη του ΥΔ Αττικής περιλαμβάνει σχεδόν το 50% των δραστηριοτήτων και του πληθυσμού της χώρας. Τέλος, μέσα από τις συνεχείς δοκιμές προτεινόμενων τροποποιήσεων και την κατάρτιση τελικών χαρτών αποτελεσμάτων, βελτιώθηκε και καταληκτικά διαμορφώθηκε ένα νέο μεθοδολογικό πλαίσιο.

5.1 Συμπεράσματα

Συγκεντρωτικά, όπως αναλύθηκαν εκτενέστερα στα προηγούμενα κεφάλαια, τα επιμέρους συμπεράσματα της παρούσας εργασίας είναι τα ακόλουθα:

- (α) Αναφορικά με την ανάλυση β, που ως μέθοδος αδιαστατοποίησης των κριτηρίων χρησιμοποιήθηκε η ταξινόμηση μέσω της μεθόδου K-means, απαιτήθηκε ελάχιστη

μνήμη για την αποθήκευση των κριτηρίων εκάστου κελιού πράγμα που οδηγεί και σε μικρότερη πολυπλοκότητα υπολογισμών και κατά συνέπεια σε ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου CPU time σε σύγκριση με την ανάλυση α που χρησιμοποιήθηκε η κανονικοποίηση. Σημειώνεται ότι η διαδικασία στάθμισης των κριτηρίων μέσω της ταξινόμησης ολοκληρώθηκε στο μισό χρόνο έναντι της κανονικοποίησης των κριτηρίων.

- (β) Η διαδικασία ασαφοποίησης που προτάθηκε για την εφαρμογή της μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης FAHP φαίνεται να συγκλίνει περισσότερο στα αποτελέσματα της AHP. Ταυτόχρονα το κέρδος είναι ότι διατηρεί τα πλεονεκτήματα της χρήσης ασαφούς λογικής, δηλαδή μετριασμό της αβεβαιότητας, καθώς μέσω μαθηματικών εκφράσεων αποτυπώνονται όλες οι απόψεις και οι αμφιβολίες των μελετητών.
- (γ) Αξιοποιήθηκε όλη η διαθέσιμη πληροφορία για την περιοχή μελέτης και προέκυψε η βελτίωση του γνωστού χαρακτηριστικού αναγλύφου, της Πλευράς (Aspect), στο κριτήριο της Κρίσιμης Πλευράς (Critical Aspect).
- (δ) Επειδή η κύρια χρήση της περιοχής μελέτης είναι η αστική, ο υδρολιθολογικός τύπος του εδάφους λαμβάνεται κατηγορίας Δ, υπέρ της ασφαλείας. Αυτή η επιλογή φαίνεται να είναι μικρότερης σημασίας στη διαμόρφωση του κριτηρίου του δείκτη CN καθώς λήφθηκαν υπόψη και τα δεδομένα αδιαπερατότητας του εδάφους στη διαμόρφωσή του.
- (ε) Προτάθηκε η χρήση του δείκτη dMFI, ο οποίος ουσιαστικά εκπροσωπεί το δυναμικό της περιοχής να δώσει πλημμύρες από πλευράς κατακρημνισμάτων, δηλαδή το πόσο ξαφνικά βρέχει σε επίπεδο μήνα. Η τροποποίηση αυτή φαίνεται να ανταποκρίνεται θετικά στη διαμόρφωση του τελικού χάρτη ευάλωτων περιοχών σε πλημμύρες.
- (στ) Η προσέγγιση ασαφούς λογικής των ευάλωτων περιοχών μέσω του συνδυασμού των δύο κύριων σεναρίων έχει το πλεονέκτημα του ότι πλέον η μέθοδος υποδεικνύει τον κατάλληλο συνδυασμό. Πρακτικά, οι μελετητές απλώς περιγράφουν τα δύο σενάρια και η μέθοδος FAHP καλείται να τα γεφυρώσει. Έτσι, η όποια υποκειμενικότητα επιλογής για το κατά πόσο πρέπει να δοθεί βάση στο υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής ή στο δυναμικό βροχής της περιοχής μειώνεται στο ελάχιστο.
- (ζ) Σημαντικό κριτήριο αποτέλεσε και η έννοια της καμπυλότητας του εδάφους. Για την κατάρτιση αυτού του κριτηρίου προτάθηκαν και ελέγχθηκαν τα κριτήρια του δείκτη καμπυλότητας (Curvature), του δείκτη ταξινομημένης καμπυλότητας (Curvature Classification) και του δείκτη τοπογραφικής θέσης πολλαπλής κλίμακας (multi-scale Topographic Position Index). Αντίθετα ο δείκτης τοπογραφικής θέσης κρίθηκε ανεπαρκής καθώς ο καθορισμός μίας ενιαίας ακτίνας ελέγχου για τον υπολογισμό του στην περιοχή μελέτης δεν ήταν εφικτός. Από την διερεύνηση αυτών των τριών κριτηρίων προκύπτουν τα εξής:
 - (i) Τα κριτήρια Curvature και το Curvature Classification είναι μία γραφική απεικόνιση του ίδιου ακριβώς μεγέθους με τη διαφορά ότι το πρώτο έχει πεδίο τιμών του συνεχείς τιμές, ενώ το δεύτερο έχει διακριτές τιμές και αποτελεί

ταξινόμηση του πρώτου. Αυτά τα δύο κριτήρια εκ του αποτελέσματος φαίνεται ότι ακολουθούν το ίδιο γενικό μοτίβο.

- (ii) Το Curvature Classification μοιάζει να δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια ως επιμέρους δείκτης, αλλά ως προς το αποτέλεσμα δημιουργεί μεγάλο «θόρυβο» στον τελικό χάρτη ευάλωτων περιοχών σε πλημμύρες.
 - (iii) Το Curvature δίνει αποτελέσματα που φαίνεται να έχουν καλύτερη ομαδοποίηση σε σχέση με το Curvature Classification. Επιπλέον το εργαλείο που παράγει τον χάρτη ειδικού σκοπού που απεικονίζει το multi-scale Topographic Position Index απαιτεί πάρα πολύ μεγάλο υπολογιστικό χρόνο επεξεργασίας (CPU time). Έτσι για την ανάλυση με κανονικοποιημένα τα κριτήρια προκρίθηκε το Curvature.
 - (iv) Κατά την ανάλυση με ταξινομημένα τα κριτήρια κρίνεται αμελητέα η επίδραση των κριτηρίων Curvature και Curvature Classification στην αντικειμενική εξίσωση της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Δεδομένου ότι, σχεδόν όλη η περιοχή ταξινομήθηκε σε μία κλάση και ελάχιστα εικονοστοιχεία ταξινομήθηκαν στις υπόλοιπες 4 κλάσεις, για την ανάλυση με ταξινομημένα τα κριτήρια προκρίθηκε ως κριτήριο ο δείκτης τοπογραφικής θέσης πολλαπλής κλίμακας.
- (η) Από τη διερεύνηση των κριτηρίων προέκυψε ότι το VDCN φαίνεται να κρατάει δεδομένα υψομέτρου σε συνδυασμό με δεδομένα κατευθύνσεων ροής και αναλογίας αποστάσεων, το sTWI έχει δεδομένα κλίσεων και αλληλουχίας θέσεων (ανάντη - κατάντη) ενώ το HOFD δίνει την πληροφορία σχετικά με την οριζόντια συνιστώσα της ροής. Έτσι τελικά φαίνεται ότι το κριτήριο του υψομέτρου μπορεί να παραληφθεί.
- (θ) Καθένα από τα κριτήρια VDCN, sTWI και HOFD δίνουν σαφείς ενδείξεις για τις ευάλωτες σε πλημμύρες περιοχές. Ειδικότερα, το sTWI αν ταξινομηθεί κατάλληλα φαίνεται να μπορεί να δώσει μία πρώτη εκτίμηση για μία περιοχή από μόνο του.
- (ι) Τα τρία σημαντικότερα κριτήρια που φαίνεται να συμμετέχουν περισσότερο στο να αναδείξουν μία περιοχή σε ευάλωτη είναι το sTWI, το compCN και αυτό της καμπυλότητας του εδάφους. Ωστόσο αν έπρεπε να επιλεγούν μόνο τρία κριτήρια για την πολυκριτηριακή τότε ενδεχομένως το ένα να πρέπει να είναι το VDCN ή αλλιώς το υψόμετρο για να μην χαθεί η πληροφορία του ύψους από το τελικό αποτέλεσμα.
- (ια) Τα αποτελέσματα που παράγονται για κάθε σενάριο ξεχωριστά, από τις μεθόδους AHP και FAHP φαίνεται να είναι παρόμοια.
- (ιβ) Με τη διαδικασία FAHP προσαρμόζεται και ποσοτικοποιείται στην κλίμακα σύγκρισης των κριτηρίων η έννοια της αβεβαιότητας μέσω της ασάφειας του ασαφούς συνόλου αριθμών που χρησιμοποιείται.
- (ιγ) Η εδώ προτεινόμενη μεθοδολογία ασαφοποίησης της σαφούς κλίμακας σημαντικότητας του Saaty δίνει αποτελέσματα πιο κοντά στα εξαγόμενα αποτελέσματα της διαδικασίας AHP.

- (ιδ) Η μεθοδολογία FAHP φαίνεται ότι εστιάζει περισσότερο στα κριτήρια που δίνουν ή ευθύνονται για το τελικό αποτέλεσμα καθώς τα τελικά αποτελέσματα, όπου δεν ταυτίζονται, είναι πάρα πολύ κοντά στα αντίστοιχα παραγόμενα μέσω της μεθόδου AHP. Επιπλέον, φαίνεται ότι, με τη χρήση της μεθοδολογίας FAHP απλοποιείται η πολυκριτηριακή, καθώς μηδενίζονται οι βαρύτητες των κριτηρίων που δεν ευθύνονται και τόσο για τη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος, κι έτσι τελικά μειώνεται ο αναγκαίος χρόνος αναμονής για τη συνολική επεξεργασία των κριτηρίων (εξοικονόμηση CPU Time) συγκλίνοντας ταχύτερα σε παρόμοια αποτελέσματα με την AHP.

5.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Λαμβάνοντας υπόψη όλη την προηγηθείσα ανάλυση και το μεθοδολογικό πλαίσιο που προτείνεται αφήνονται για μελλοντική έρευνα τα εξής:

- (α) Από την ανάλυση φαίνεται ότι το κριτήριο του υψομέτρου δύναται να παραληφθεί εξαιτίας της ύπαρξης του VDCN σε συνδυασμό με άλλα κριτήρια. Ωστόσο, αυτό αποτελεί μια υπόθεση που απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να αποδειχθεί.
- (β) Ενώ η χρήση του dMFI φαίνεται να ανταποκρίνεται θετικά στη διαμόρφωση του τελικού χάρτη ευάλωτων περιοχών σε πλημμύρες, απαιτείται μελλοντική έρευνα στο κομμάτι της χωρικής κατανομής των σημειακών δεδομένων καθώς και συλλογή και χρήση βροχομετρικών δεδομένων δυτικότερα της Ελευσίνας για την περιοχή μελέτης. Επιπλέον υπολογίστηκε ο μέγιστος σε επίπεδο ημερολογιακού μήνα, οπότε μια πρόταση για μελλοντική έρευνα είναι ο υπολογισμός του δείκτη για το δυσμενέστερο διάστημα 30 ημερών.
- (γ) Επειδή η κύρια χρήση της περιοχής μελέτης είναι η αστική ο υδρολιθολογικός τύπος του εδάφους λαμβάνεται, υπέρ της ασφαλείας, κατηγορίας Δ. Ωστόσο αντικείμενο μελλοντικής έρευνας θα μπορούσε να είναι και η εισαγωγή και αξιοποίηση και μίας τέτοιας πληροφορίας.
- (δ) Επειδή η κύρια χρήση της περιοχής μελέτης είναι η αστική, γενικά πιο σημαντικό ρόλο εκτιμάται να παίζει η αδιαπερατότητα του εδάφους, για αυτό το λόγο και στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο σύνθετος δείκτης CN. Ωστόσο, εκτιμάται ότι μία προσέγγιση αυτού του κριτηρίου από ένα γενικότερο διαχωρισμό φυσικού - τεχνητού περιβάλλοντος θα έκανε το μοντέλο «ελαφρύτερο», χωρίς να χάνεται μεγάλο μέρος της χρήσιμης για το αποτέλεσμα πληροφορίας.
- (ε) Η διερεύνηση των συνθηκών κάτω από τις οποίες είναι δυνατόν να μην συνυπολογίζονται κάποια από τα κριτήρια που συμμετείχαν, καθώς και η ταυτόχρονη ένταξη άλλων, όπως για παράδειγμα, η οικονομική αξία της γης ή ακόμα και ο συνδυασμός των σεναρίων που περιγράφηκαν με άλλα.

6 Βιβλιογραφικές Αναφορές

6.1 Ξενόγλωσσες

- Bamford, T., Balmforth, D., Digman, C., Waller, S. and Hunter, N., 2008. Modelling Flood Risk Assessment, an Evaluation of Different Methods. In WaPUG Autumn Conference.
- Böhner, J., Köthe, R., Conrad, O., Gross, J., Ringeler, A. and Selige, T., 2001. Soil regionalisation by means of terrain analysis and process parameterisation. Soil classification, 2003.
- Borouhaki, S. and Malczewski, J., 2008. Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS. Computers & Geosciences, 34(4), pp.399-410.
- Bulut, E., Duru, O., Keçeci, T. and Yoshida, S., 2012. Use of consistency index, expert prioritization and direct numerical inputs for generic fuzzy-AHP modeling: A process model for shipping asset management. Expert Systems with Applications, 39(2), pp.1911-1923.
- Burrough, P.A., McDonnell, R.A. and Lloyd, C.D., 2015. Principles of geographical information systems. Oxford University Press.
- Butler, D., Kokkalidou, A. and Makropoulos, C.K., 2006. Supporting the siting of new urban developments for integrated urban water resource management. In Integrated Urban Water Resources Management (pp. 19-34). Springer, Dordrecht.
- Chang, D.Y., 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. European journal of operational research, 95(3), pp.649-655.
- Correia, F.N., Da Silva, F.N. and Ramos, I., 1999. Floodplain management in urban developing areas. Part I. Urban growth scenarios and land-use controls. Water resources management, 13(1), pp.1-21.
- Gautam, S., Moudgil, S. and Bhatia, T., 2016. Fuzzy Logic Based Intrusion Detection Scheme against DoS Attack in MANET, International Journal of Research in IT, Management and Engineering, ISSN 2249 - 1619, Volume 06 Issue 07 , July 2016, Page 21-27

- Gournelos, T., Maroukian, H., 1990, Geomorphological observations concerning the evolution of the basin of Athens, *Geologica Balcanica*, 20. 6.
- Hall, J., Dawson, R., 2005. Systems-based risk analysis to support integrated flood risk management, Discussion Document, 3rd meeting of the urban flood risk assessment working group, Exeter, 9th June 2005.
- Junior, F.R.L., Osiro, L. and Carpinetti, L.C.R., 2014. A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection. *Applied Soft Computing*, 21, pp.194-209.
- Kandilioti, G. and Makropoulos, C., 2012. Preliminary flood risk assessment: the case of Athens. *Natural hazards*, 61(2), pp.441-468.
- Kacprzyk, J. and Fedrizzi, M. eds., 2012. Multiperson decision making models using fuzzy sets and possibility theory (Vol. 18). Springer Science & Business Media.
- Kourgialas, N.N. and Karatzas, G.P., 2011. Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas—a case study. *Hydrological Sciences Journal—Journal des Sciences Hydrologiques*, 56(2), pp.212-225.
- Kar, A.K., Lohani, A.K., Goel, N.K. and Roy, G.P., 2015. Rain gauge network design for flood forecasting using multi-criteria decision analysis and clustering techniques in lower Mahanadi river basin, India. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, pp.313-332.
- Kaufman, L. and Rousseeuw, P.J., 2009. Finding groups in data: an introduction to cluster analysis (Vol. 344). John Wiley & Sons.
- Kirkby, M.J., 1975. Hydrograph modeling strategies. *Process in physical and human geography*, pp.69-90.
- Kirby, W., Riggs, H., Sauer, V. and Thomas Jr, W., 2002. The national flood frequency program, version 3: a computer program for estimating magnitude and frequency of floods for ungaged sites. US Geological Survey, VA.
- Lee, M.C., 2010. The analytic hierarchy and the network process in multicriteria decision making: performance evaluation and selecting key performance indicators based on ANP model. In *Convergence and Hybrid Information Technologies*. InTech.
- Makki, I., 2017. Hyperspectral Imaging for Landmine Detection (Doctoral dissertation, POLITECNICO DI TORINO).
- Morgan, R.P.C., 2005. Soil erosion and conservation. Blackwell Publ., Oxford, UK. Soil erosion and conservation. 3rd ed. Blackwell Publ., Oxford, UK.
- Messner, F. and Meyer, V., 2006. Flood damage, vulnerability and risk perception—challenges for flood damage research. In *Flood risk management: hazards, vulnerability and mitigation measures* (pp. 149-167). Springer, Dordrecht.

- Miliani, F., Ravazzani, G. and Mancini, M., 2011. Adaptation of precipitation index for the estimation of antecedent moisture condition in large mountainous basins. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(3), pp.218-227.
- Olaya, V.I.C.T.O.R., 2004. A gentle introduction to SAGA GIS. The SAGA User Group eV, Gottingen, Germany, 208.
- Ouma, Y.O. and Tateishi, R., 2014. Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment. *Water*, 6(6), pp.1515-1545.
- Ologunorisa, T.E. and Abawua, M.J., 2005. Flood risk assessment: a review. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 9(1), pp.57-63.
- Papaoiannou, G., Vasiliades, L. and Loukas, A., 2015. Multi-criteria analysis framework for potential flood prone areas mapping. *Water resources management*, 29(2), pp.399-418.
- Protection, C., 2007. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks.
- Roubens, M., 1997. Fuzzy sets and decision analysis. *Fuzzy sets and systems*, 90(2), pp.199-206.
- Russell, W.H. and McBride, J.R., 2001. The relative importance of fire and watercourse proximity in determining stand composition in mixed conifer riparian forests. *Forest Ecology and Management*, 150(3), pp.259-265.
- Siddayao, G.P., Valdez, S.E. and Fernandez, P.L., 2014. Analytic hierarchy process (AHP) in spatial modeling for floodplain risk assessment. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 4(5), p.450.
- Schmitt, T.G., Thomas, M. and Ettrich, N., 2004. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. *Journal of Hydrology*, 299(3-4), pp.300-311.
- Siddayao, G.P., Valdez, S.E. and Fernandez, P.L., 2014. Analytic hierarchy process (AHP) in spatial modeling for floodplain risk assessment. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 4(5), p.450.
- Saaty, T.L., 1980. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation*. New York: McGraw, 281.
- Saaty, T.L. and Vargas, L.G., 1991. *Prediction, projection, and forecasting: applications of the analytic hierarchy process in economics, finance, politics, games, and sports*. Kluwer Academic Pub.

- Saaty, T.L. and Tran, L.T., 2007. On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the Analytic Hierarchy Process. *Mathematical and Computer Modelling*, 46(7-8), pp.962-975.
- Stefanidis, S. and Stathis, D., 2013. Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP). *Natural hazards*, 68(2), pp.569-585.
- SCS, U., 1986. *Urban Hydrology for Small Watersheds*, Technical Release No. 55 (TR-55). US Department of Agriculture, US Government Printing Office, Washington, DC.
- Tagil, S. and Jenness, J., 2008. GIS-based automated landform classification and topographic, landcover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey. *Journal of Applied Sciences*, 8(6), pp.910-921.
- Yalcin, G. and Akyurek, Z., 2004, July. Analysing flood vulnerable areas with multicriteria evaluation. In 20th ISPRS congress (pp. 1-6)
- Yahaya, S., Ahmad, N. and Abdalla, R.F., 2010. Multicriteria analysis for flood vulnerable areas in Hadejia-Jama'are River basin, Nigeria. *European Journal of Scientific Research*, 42(1), pp.71-83.
- Zhou, X., 2012. Fuzzy analytical network process implementation with matlab. In *MATLAB-A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications-Volume 3*. InTech.
- Ziaei, M. and Hajizade, F., 2011, June. Fuzzy analytical hierarchy process (FAHP): A GIS-based multicriteria evaluation/selection analysis. In *Geoinformatics, 2011 19th International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- Zou, Q., Zhou, J., Zhou, C., Song, L. and Guo, J., 2013. Comprehensive flood risk assessment based on set pair analysis-variable fuzzy sets model and fuzzy AHP. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(2), pp.525-546.

6.2 Ελληνικές

- Κανδηλιώτη, Γ. Ι., 2009. Εκτίμηση Πλημμυρικής Επικινδυνότητας στο Υδατικό Διαμέρισμα της Αττικής. Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΕΜΠ.
- Χαρίλας, Δ.Ε., 2012. Τεχνικές Βέλτιστης Διαχείρισης Πόρων σε Ασύρματα Δίκτυα Επόμενης Γενιάς για Διασφάλιση Ποιότητας Υπηρεσίας. Διατριβή επί Διδακτορία, ΕΜΠ.

6.3 Διαδικτυακοί τόποι

- Copernicus Programme, 2018.
<https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/corine-land-cover-general->

description και <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012> (πρόσβαση 15 Ιουνίου 2018)

E.K.X.A. A.E., 2018.

<http://www.ktimatologio.gr/forestmaps/Pages/xrasis-gis.aspx> (πρόσβαση 15 Ιουνίου 2018)

Meteoclub, 2018.

<http://www.meteoclub.gr/themata/egkyklopaideia/920-1887> (πρόσβαση 27 Απριλίου 2018)

Niklaus Zimmermann, 2000.

https://www.wsl.ch/staff/niklaus.zimmermann/programs/aml4_1.html (πρόσβαση 1 Μαΐου 2018)

ΥΠΕΝ/ΕΓΥ, 2018.

<http://floods.ypeka.gr/index.php/23-ydatika-diagrammata/gr06/240-gr06> (πρόσβαση 20 Μαΐου 2018)

ΥΠΕΝ, 2018.

<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=252> (πρόσβαση 28 Μαΐου 2018)

ΥΠΕΝ/ΕΓΥ, 2017.

<http://floods.ypeka.gr/index.php/sxedia-diaxeirisis/attiki-gr06> (πρόσβαση 5 Απριλίου 2018)