



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Δημιουργία υδρολογικού μοντέλου προσομοίωσης της διακύμανσης της
στάθμης της λίμνης της Καστοριάς**

ΛΕΚΚΟΣ ΜΑΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΑΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΖΗΣΗΣ ΜΑΛΛΙΟΣ

Περίληψη

Η διπλωματική εργασία εξετάζει τις δυνατότητες προσομοίωσης της στάθμης της λίμνης Καστοριάς με χρήση συστημάτων διαχείρισης γεωγραφικών πληροφοριών (ΓΣΠ) και λογισμικού υδρολογικής προσομοίωσης Hec-HMS. Για την προσομοίωση χρησιμοποιούνται τοπογραφικά και μετεωρολογικά δεδομένα, χάρτες υδρογεωλογικών ιδιοτήτων και κάλυψης της γης. Κατασκευάζεται ένα υδρολογικό μοντέλο που προσομοιώνει τις μετεωρολογικές διεργασίες αλλά και τις διεργασίες της επιφάνειας του εδάφους που ευθύνονται για τις μεταβολές της στάθμης. Στο μετεωρολογικό μοντέλο εισάγεται το βροχομετρικό δίκτυο με τις χρονοσειρές της κατακρήμνισης και της θερμοκρασίας. Στο μοντέλο της λεκάνης απορροής προσομοιώνονται οι φυσικές διεργασίες που παρεμβάλλονται μεταξύ κατακρήμνισης και απορροής. Η αποτίμηση και η βαθμονόμηση του μοντέλου γίνεται μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων με μετρήσεις από το πεδίο και γίνονται βελτιώσεις έπειτα από δοκιμές. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν αφορούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και την σημασία ανάπτυξης υδρολογικών μοντέλων.

Abstract

This thesis examines the simulation possibilities of the water level of the lake of Kastoria with the use of geographic information systems (GIS) and the hydrological simulation software Hec-HMS. For the simulation, topographic data, meteorological data and maps of hydrogeological properties and coverage have been used. A hydrological model has been developed, which simulates the meteorological and ground processes responsible for water level volatility. The input for the meteorological model is the precipitation and temperature time series from the rain gauge network. The water catchment area model simulates the natural processes that take place between precipitation and discharge. The evaluation and calibration of the model is done through the comparison of its results with measurements from the site, which lead to implementation of improvements following their testing. The conclusions present the results of the simulation and discuss the importance of developing hydrological models.

Πρόλογος

Τα υδρολογικά μοντέλα έχουν τεράστια σημασία για την καλύτερη διαχείριση των υδατικών πόρων. Τα τελευταία χρόνια λόγω της αυξανόμενης ζήτηση νερού και της κλιματικής αλλαγής η διαχείριση των υδατικών πόρων γίνεται όλο και σημαντικότερη. Σε μία λίμνη είναι σημαντικό η γνώση των διακυμάνσεων της στάθμης ώστε να αντιμετωπιστούν ορθολογικά πιθανά μελλοντικά προβλήματα και να επιτευχθεί καλύτερη διαχείριση της. Για να πραγματοποιηθεί αυτό είναι απαραίτητη η μελέτη των φυσικών διεργασιών που συμβάλλουν στην απορροή του νερού στη λίμνη και της αλληλεπίδραση τους στο επίπεδο της υδρολογικής λεκάνης.

Η υδρολογική προσομοίωση βασίστηκε σε υπόβαθρο γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, μια πρακτική που ενδείκνυται στην μελέτη των φυσικών φαινομένων και συστημάτων καθώς και τις πολύπλευρες επιδράσεις τους στον άνθρωπο και το περιβάλλον γενικότερα.

Οφείλω να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή Ζήση Μάλλιο για την καθοδήγηση που μου παρείχε καθόλα την διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας και ιδιαίτερα στον τομέα της εξοικείωσης με τα απαραίτητα λογισμικά.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την Αντιπεριφέρεια της Καστοριάς για όλα τα δεδομένα που με μεγάλη προθυμία μου παρείχε.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Πρόλογος.....	4
1 Εισαγωγή.....	2
2 Υδρολογική ανάλυση.....	4
2.1 Ορισμοί σε επίπεδο λεκάνης απορροής.....	4
2.2 Ο υδρολογικός κύκλος του νερού	7
2.3 Υδρολογική προσομοίωση	11
3 Περιοχή μελέτης και δεδομένα : Η λεκάνη απορροής της λίμνης Καστοριάς	12
3.1 Περιοχή μελέτης.....	12
3.1.1 Γεωγραφική θέση-Τοπογραφικά χαρακτηριστικά.....	12
3.1.2 Γεωμορφολογία	13
3.1.3 Κλιματολογικές συνθήκες	15
3.1.4 Βλάστηση.....	19
3.2 Δεδομένα	19
3.2.1 Τοπογραφικά δεδομένα.....	19
3.2.2 Εδαφολογικά δεδομένα	20
3.2.3 Μετεωρολογικά δεδομένα.....	22
3.2.4 Δεδομένα χρήσεων Γης.....	25
4 Υλικά και μέθοδοι	27
4.1 Λογισμικά.....	27
4.1.1 Λογισμικό QGIS.....	27
4.1.2 Λογισμικό υδρολογικής προσομοίωσης HEC-HMS.....	28
4.2 Συνοπτική περιγραφή της μεθοδολογίας.....	29
5 Κατασκευή μοντέλου της λεκάνης απορροής	31
5.1 Προεπεξεργασία.....	31
5.2 Εξαγωγή-Επεξεργασία λεκάνης απορροής.....	36
5.3 Χαρακτηριστικά υδατορευμάτων και υπολεκανών	36
5.4 Δημιουργία μοντέλου λεκάνης απορροής.....	37
5.5 Δημιουργία μετεωρολογικού μοντέλου	38
6 Προσομοίωση της λειτουργίας της λεκάνης απορροής.....	41
6.1 Οργάνωση της προσομοίωσης στο υπολογιστικό περιβάλλον	41
6.2 Μοντέλο λεκάνης απορροής.....	42
6.2.1 Συστατικά του μοντέλου της λεκάνης απορροής.....	42
6.2.2 Μέθοδος αναχαίτισης λόγω φυτοκάλυψης.....	44

6.2.3	Μέθοδος απωλειών	47
6.2.4	Μέθοδος μετασχηματισμού της κατακρήμνισης σε σημειακή απορροή.....	56
6.2.5	Μέθοδος βασικής ροής.....	59
6.3	Μετεωρολογικό μοντέλο	61
7	Βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου	63
7.1	Εκτιμώμενα υδρολογικά μεγέθη.....	63
7.2	Επιλογή μεθόδων προσομοίωσης.....	63
7.3	Αρχική προσομοίωση.....	64
7.4	Τελική προσομοίωση	69
8	Συμπεράσματα	80
9	Βιβλιογραφία	81

1 Εισαγωγή

Η διαχείριση των υδατικών πόρων και η ανάλυση των συστημάτων τους, γίνεται όλο και σημαντικότερη λόγω της αβεβαιότητας που προκαλεί η αυξανόμενη ζήτηση σε ποσότητα και σε ποιότητα νερού αλλά και η κλιματική αλλαγή. Για το υδατικό περιβάλλον κρίνεται αναγκαία η εφαρμογή βιώσιμων πολιτικών ανάπτυξης και διαχείρισης των υδατικών πόρων μέσω σχεδιασμού, υλοποίησης και βέλτιστης λειτουργίας έργων υποδομής και παρεμβάσεων διαχείρισης. Μια ορθολογική πολιτική ανάπτυξης οφείλει επίσης να λαμβάνει υπόψη της και τη διαχείριση ακραίων φαινομένων και κρίσεων όπως τα προβλήματα λειψυδρίας και πλημμυρών αλλά και πιο μακροπρόθεσμους περιβαλλοντικούς στόχους, όπως η σε βάθος χρόνου προστασία των νερών και των σχετιζόμενων με αυτά οικοσυστημάτων, η βελτίωση της ποιότητας και της οικολογικής τους κατάστασης. Έτσι αναπτύσσονται διάφορα υδρολογικά μοντέλα με σκοπό την πρόβλεψη της ποσότητας του νερού στο υδατικό περιβάλλον. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό η κατασκευή υδρολογικών μοντέλων για μία λίμνη ώστε να αντιμετωπιστούν ορθολογικά πιθανά μελλοντικά προβλήματα και να επιτευχθεί καλύτερη διαχείριση της.

Ειδικότερα, στον ελλαδικό χώρο παρατηρούνται μεγάλα διαστήματα έλλειψης βροχοπτώσεων με αποτέλεσμα τις σημαντικές διακυμάνσεις στις στάθμες των λιμνών της χώρας που δημιουργούν αρκετές συνέπειες και απειλούν την βιωσιμότητα τους. Η λίμνη της Καστοριάς παίζει πολύ μεγάλο ρόλο για την τοπική κοινωνία και οικονομία συνεπώς για να σχεδιαστούν πολιτικές διαχείρισης για την βιωσιμότητα της λίμνης είναι ιδιαίτερα σημαντικό η πρόβλεψη της διακύμανσης της στάθμης της.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης της λεκάνης απορροής της λίμνης της Καστοριάς με στόχο τη μελέτη της διακύμανσης της στάθμης της με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα.

Για την κατασκευή του τελικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν δύο προγράμματα, αρχικά χρησιμοποιήθηκε το ευρέως διαδεδομένο με πολλές δυνατότητες χρήσης πρόγραμμα γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών QGIS που διαχειρίζεται γεωγραφικές πληροφορίες και το πρόγραμμα υδρολογικής προσομοίωσης Hec-HMS.

Αρχικά κατά το προπαρασκευαστικό στάδιο της μελέτης συγκεντρώθηκαν όλα τα απαραίτητα δεδομένα όπως κατάλληλοι ψηφιακοί χάρτες εδαφολογικών χαρακτηριστικών, χρήσεων γης, ανάγλυφου του εδάφους και μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής που θα αξιοποιηθούν σε επόμενα στάδια.

Έπειτα από την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων με τη χρήση του QGIS εξάχθηκαν τα όρια της λεκάνης απορροής της λίμνης και των υπολεκανών γύρω από αυτή, σχηματίστηκε το υδρογραφικό δίκτυο και κατασκευάστηκε το δίκτυο των βροχομετρικών σταθμών στο οποίο αργότερα έγινε η εισαγωγή της κατακρήμνισης. Οι γεωμετρικές ιδιότητες της επιφάνειας της λεκάνης απορροής και το δίκτυο των

βροχομετρικών σταθμών αποτελούν υπόβαθρο για την μετέπειτα υδρολογική προσομοίωση με την χρήση του Hec-HMS.

Το τελικό στάδιο επεξεργασίας και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων γίνεται με την χρήση του λογισμικού υδρολογικής προσομοίωσης. Στο Hec-HMS εισάγονται οι υπολεκάνες απορροής και το μετεωρολογικό μοντέλο. Εν συνεχεία γίνεται η επιλογή των μεθόδων για τις κυριότερες διεργασίες που θα χρησιμοποιήσει το λογισμικό για την μετατροπή της κατακρήμνισης σε απορρέοντα όγκο νερού και η εισαγωγή των απαραίτητων συντελεστών κατακράτησης του νερού από το έδαφος. Έπειτα το πρόγραμμα "τρέχει" και προσομοιώνει την στάθμη της λίμνης με το πέρασμα του χρόνου. Η επιλογή των μεθόδων έγινε με την σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις μετρήσεις που έχουν ληφθεί από το σημείο ώστε το μοντέλο να μας παρέχει τα βέλτιστα πραγματικά αποτελέσματα.

Το τελικό προϊόν του Hec-HMS αποτελεί το υδρολογικό μοντέλο που προσομοιώνει την στάθμη της λίμνης της Καστοριάς. Η αποτίμηση του μοντέλου έγινε με την σύγκριση των αποτελεσμάτων του, με τις μετρήσεις που είχαν ληφθεί από τη λίμνη, την περίοδο από τον Ιανουάριο του 2016 έως τον Νοέμβριο του 2020.

2 Υδρολογική ανάλυση

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν ορισμένες έννοιες που χρησιμοποιούνται για τις υδρολογικές διαδικασίες της λεκάνης απορροής, θα αναλυθεί ο υδρολογικός κύκλος του νερού και η διαδικασία μίας υδρολογικής προσομοίωσης.

2.1 Ορισμοί σε επίπεδο λεκάνης απορροής

Στην υδρολογία χρησιμοποιούνται ορισμένες έννοιες για τις υδρολογικές διαδικασίες της λεκάνης απορροής που πρέπει να εξηγηθούν για να είναι δυνατή η κατανόηση όσων ακολουθούν. Επιλέχθηκαν να αναλυθούν οι παρακάτω βασικοί όροι :

- Υδρολογική λεκάνη ή Λεκάνη απορροής
- Υδροκρίτης ή Υδροκριτική γραμμή
- Υδρογεωλογικές λεκάνες
- Υδατόρευμα
- Υδρογραφικό δίκτυο
- Υδρογράφημα απορροής
- Εξατμισοδιαπνοή

Υδρολογική λεκάνη ή Λεκάνη απορροής

Η λεκάνης απορροής είναι η πιο χαρακτηριστική χωρική κλίμακα της υδρολογίας. Έτσι λεκάνη απορροής ορίζεται μία καθορισμένη τοπογραφική και υδρολογική ενότητα η οποία αποτελεί τη στοιχειώδη χωρική μονάδα αποστράγγισης μίας επιφάνειας χέρσου. Τα όρια της λεκάνης απορροής ορίζονται από την γεωμορφολογία της περιοχής. Τα βασικά μορφολογικά στοιχεία της αποτελούν οι πλαγιές και οι κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου. Ουσιαστικά είναι η περιοχή που αποστραγγίζεται από ένα δίκτυο υδατορευμάτων. Μία λεκάνη απορροής μπορεί να χωριστεί σε επί μέρους τμήματα σε περίπτωση που το μέγεθος της είναι μεγάλο για μεγαλύτερη ακρίβεια και λεπτομέρεια αποτελεσμάτων. Τα τμήματα αυτά είναι οι υπολεκάνες. Το νερό που απορρέει από κάθε χωρική μονάδα της λεκάνης απορροής καταλήγει σε ένα κοινό μοναδικό σημείο το οποίο αποτελεί την έξοδο της λεκάνης απορροής.

Υπάρχει και η ανάγκη ορισμού διαφόρων εννοιών που χαρακτηρίζουν την ροή του νερού. Η ροή του νερού μπορεί να γίνεται επιφανειακά ή υπόγεια. Ο όρος επιφανειακή απορροή αναφέρεται στην ροή του νερού, λόγω της επίδρασης της βαρύτητας, κατά μήκος των φυσικών υδατορευμάτων. Συχνά ως απορροή αναφερόμαστε στην επιφανειακή απορροή. Η επιφανειακή απορροή εξαρτάται από την διαπερατότητα των σχηματισμών που αναπτύσσονται στην λεκάνη απορροής και από τον βαθμό κορεσμού τους. Όταν μία επιφανειακή έκταση μιας αποτελείται από υδροπερατά πετρώματα, η ποσότητα νερού που θα ρέει επιφανειακά θα είναι περιορισμένη λόγω αυξημένης κατείσδυσης. Όμως αν τα πετρώματα της περιοχής

είναι αδιαπέρατα τότε η κατείσδυση είναι περιορισμένη σε αντίθεση με την επιφανειακή απορροή. Η απορροή εκφράζεται ποσοτικά με όρους παροχής, όγκου και ισοδύναμου ύψους.

Υδροκρίτης ή Υδροκριτική γραμμή

Υδροκρίτης είναι το όριο της λεκάνης απορροής που ορίζεται από την γεωμορφολογία της περιοχής. Είναι μία νοητή γραμμή που συνδέει τα ψηλότερα σημεία των υψωμάτων του ανάγλυφου της Γης και διαχωρίζει τη ροή των όμβριων υδάτων. Κάθε τμήμα υδροκριτικής γραμμής ορίζει δύο αντίθετες κατευθύνσεις απορροής. Η υδροκριτική γραμμή μιας λεκάνης απορροής ταυτίζεται με τα εξωτερικά όρια της λεκάνης και διακόπτεται μόνο στο σημείο εξόδου του ύδατος.

Υδρογεωλογικές λεκάνες

Υδρογεωλογικές λεκάνες ονομάζονται οι λεκάνες που συγκεντρώνουν τα υπόγεια νερά και τα οδηγούν σε μια έξοδο.

Υδατόρευμα

Υδατόρευμα ή υδατόρεμα είναι μία φυσικά διαμορφωμένη επιφάνεια του εδάφους που είναι κύριος αποδέκτης των υδάτων της επιφανειακής απορροής και διασφαλίζει την διόδυσή του σε χαμηλότερες στάθμες προς άλλους αποδέκτες. Με κριτήριο την ποσότητα του νερού που ρέει, τα υδατορεύματα διακρίνονται σε:

- εφήμερα υδατορεύματα ή ρυάκια,
- ημιμόνιμα υδατορεύματα ή χειμαρρους η ροή των οποίων είναι εποχιακή και συνήθως ορμητική αλλά όχι μεγάλη σε όγκο,
- μόνιμα υδατορεύματα ή ποταμοί η ροή των οποίων παρόλο που παρουσιάζει εποχιακή διακύμανση δεν διακόπτεται καμία περίοδο του έτους.

Η φυσική διαμόρφωση του εδάφους στην οποία ρέει το νερό του υδατορεύματος ονομάζεται κοίτη. Έχει σχήμα αύλακος και διαμορφώνεται από τις δυνάμεις του νερού με τέτοιο τρόπο ώστε να μεταφέρει όσο γίνεται καλύτερα προς τα κατάντη την μάζα του νερού και των φερτών υλών τα οποία αποτελούν την ποτάμια διάβρωση. (Δόικος, 2015)

Στην κοίτη διακρίνονται δύο περιοχές :

- Το εδαφικό τμήμα της αλλούβιας πεδιάδας η οποία δημιουργείται από την συμπεριφορά του ποταμού με την πάροδο του χρόνου.
- Η μόνιμη κοίτη στην οποία διακρίνουμε τον πυθμένα και τις όχθες.

Υδρογραφικό δίκτυο

Υδρογραφικό δίκτυο μιας περιοχής ορίζεται ένα ενιαίο σύστημα του βασικού και των δευτερευόντων κλάδων ενός ποταμού, δηλαδή των ρυακιών, των χειμάρρων και των παραποτάμων που την αποστραγγίζουν. Το υδρογραφικό δίκτυο είναι το δίκτυο μεταφοράς του επιφανειακού νερού που απορρέει στα χαμηλότερα υψόμετρα.

Το υδρογραφικό δίκτυο διακρίνεται ανάλογα την μορφή και η πυκνότητα του. Ανάλογα με την μορφή του μπορεί να είναι δενδριτικής, παράλληλης, κλιμακωτής, ορθογώνιας, δακτυλιοειδούς, πολυλεκανώδους ή μορφής σύνθετης παραμόρφωσης. Η μορφή του δικτύου εξαρτάται τόσο από κλιματικούς και γεωλογικούς παράγοντες, όσο από ανθρωπογενείς επεμβάσεις. Η πυκνότητα του μεταβάλλεται με το ετήσιο ύψος βροχής που κατακρημνίζεται στο δίκτυο. Η ποσότητα του νερού που θα απορρεύσει μέσω του δικτύου καθορίζεται και από τους ανέμους και τις θερμοκρασίες που επικρατούν.

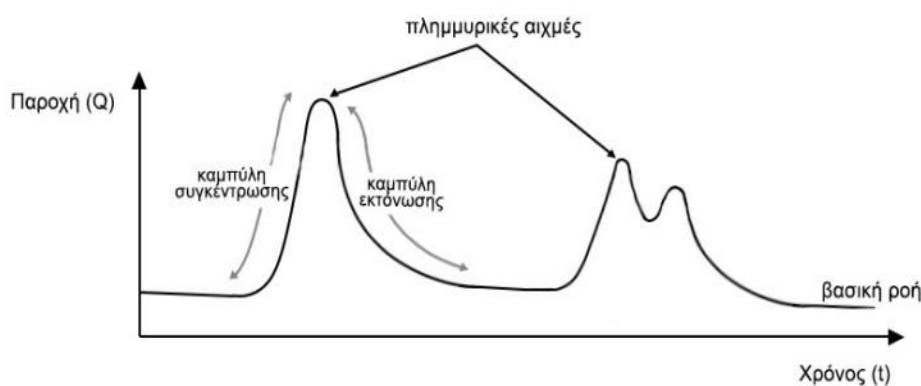
Η σχέση μεταξύ των κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου καθορίζεται από την ποσοτική του ανάλυση. Η παρατήρηση της ύπαρξης διαφορετικών κλάδων οδήγησε στη διατύπωση μιας ποσοτικής έκφρασης για την ανάπτυξη ενός υδρογραφικού δικτύου με την μορφή αρίθμησης των κλάδων του. Ο επιστημονικός κλάδος έχει προτείνει διάφορους τρόπους ταξινόμησης. Οι γνωστότεροι και συνήθως χρησιμοποιούμενοι είναι των Horton (1945), Strahler (1952). Η ανάλυση των δικτύων σκοπεύει στον προσδιορισμό των επιπτώσεων των περιβαλλοντικών παραγόντων. Η ανάλυση χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της εξέλιξης των δικτύων και για τον προσδιορισμό της υδρολογικής συμπεριφοράς των λεκανών απορροής.



Εικόνα 1 : Σκαρίφημα απλής υδρολογικής λεκάνης (πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 2016).

Υδρογράφημα απορροής

Υδρογράφημα απορροής είναι το διάγραμμα της παροχής σαν συνάρτηση του χρόνου σε ένα ορισμένο σημείο της κοίτης ενός υδατορρεύματος [$Q = Q(t)$]. Όταν η παροχή είναι χαμηλή και σχετικά σταθερή σε εκείνα τα χρονικά διαστήματα παρατηρούνται ασήμαντες ή καθόλου βροχοπτώσεις. Σε αυτά τα χρονικά διαστήματα η παροχή προέρχεται από πηγές που δίνουν παροχή σε όλη τη διάρκεια του χρόνου αυτή εκφράζεται ως η βασική ροή. Στη περίπτωση που παρατηρείται στο υδρογράφημα μεγάλη παροχή αυτό ισοδυναμεί με περίοδο έντονων βροχοπτώσεων όπου κατακρήμνιση μετατρέπεται σε επιφανειακή απορροή. (Βαφειάδης Μ., 2004)



Διάγραμμα 1: Υδρογράφημα απορροής (Πηγή : Βαφειάδης Μ., 2004).

Εξατμισοδιαπνοή

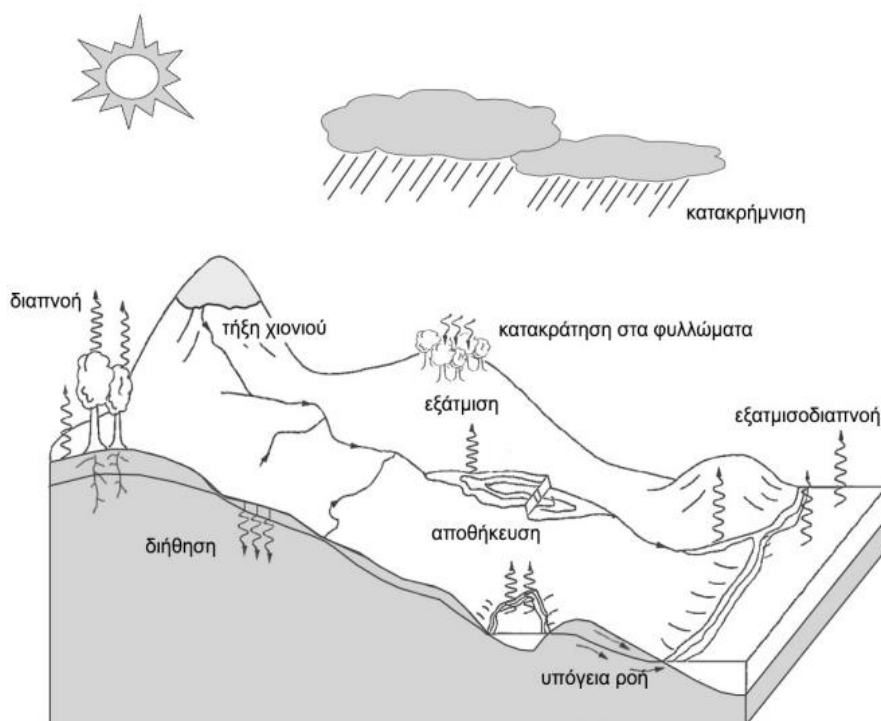
Εξατμισοδιαπνοή ορίζεται η απώλεια του νερού που επιτυγχάνεται με την εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους σε συνδυασμό με την απώλεια νερού από την φυτοκόμη (διαπνοή). Συχνά γίνεται αναφορά και την δυνητική εξατμισοδιαπνοή που πραγματοποιείται σε πλήρως ομοιόμορφα καλυμμένες με χλωρίδα επιφάνειες με απεριόριστη διάθεση νερού.

2.2 Ο υδρολογικός κύκλος του νερού

Υδρολογικός κύκλος είναι η διαρκής ανακύκλωση του νερού της Γης μέσα στην υδρόσφαιρα και στην ατμόσφαιρα. Αιτία για αυτή την κυκλική διαδικασία του νερού είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Η φυσική κατάσταση του νερού μεταβάλλεται διαρκώς. Οι μορφές που παίρνει είναι η στερεά, σε μορφή πάγων, η υγρή των ποταμών, των

λιμνών και της θάλασσας και η αέρια κατάσταση των υδρατμών. Λόγω της θέρμανσης του αέρα στην επιφάνεια της γης, τα νερά της εξατμίζονται και σχηματίζονται οι υδρατμοί δημιουργώντας τα σύννεφα. Έπειτα οι υδρατμοί συμπυκνώνονται, υγροποιούνται και μέσω της βροχής ή άλλης μορφής υετού, επιστρέφουν στις αποθήκες νερού της γης είτε στις επιφανειακές όπως οι θάλασσες και οι λίμνες, είτε στις υπόγειες.

Ο χρόνος πραγματοποίησης του κύκλου δεν είναι σταθερός, στη διάρκεια π.χ. μιας παρατεταμένης ξηρασίας ο κύκλος φαίνεται ότι έχει διακοπεί. Η ένταση και η συχνότητα του κύκλου εξαρτώνται από το κλίμα και τη γεωγραφική θέση της περιοχής. Όταν τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα πέφτουν απευθείας στη θάλασσα δεν υπάρχει επιφανειακή απορροή συνεπώς η διάρκεια του κύκλου είναι μικρότερη.



Εικόνα 2: Απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου του νερού (πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 2016).

Στην παρούσα διπλωματική εξετάζεται η βροχόπτωση, και όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιφανειακή ροή του νερού στη διαδρομή προς την λίμνη. Έτσι στην προσομοίωση της στάθμης της λίμνης για κάθε υπολεκάνη που απορρέει σε αυτή εξετάζονται οι εξής διαδικασίες:

- Κατακράτηση και αναχαίτιση ποσότητας νερού από τα φυλλώματα των δέντρων και φυτών

- Διήθηση του νερού στο έδαφος
- Εγκλωβισμός ποσότητας νερού στην επιφάνεια που συνοδεύεται από εξάτμιση
- Αποθήκευση ποσότητας νερού σε υπόγειους ταμιευτήρες και εκφόρτιση του στον ποταμό, συμβάλλοντας στην επιφανειακή απορροή
- Μετασχηματισμός του πλεονάσματος της κατακρήμνισης σε σημειακή απορροή στην έξοδο κάθε υπολεκάνης
- Συνεισφορά της βασικής ροής κάθε υπολεκάνης στην απορροή

Υδρολογικό ισοζύγιο

Το υδρολογικό ή υδατικό ισοζύγιο μιας λεκάνης απορροής είναι η μαθηματική έκφραση του υδρολογικού της κύκλου. Το υδρολογικό ισοζύγιο εκφράζεται με την εξίσωση της διαφοράς μεταξύ της εισροής και της εκροής σε μια λεκάνη απορροής, με το ρυθμό αλλαγής της αποθήκευσης νερού στη λεκάνη ΔS , σε καθορισμένο χρόνο Δt . Στη περίπτωση που η λεκάνη απορροής θεωρηθεί ως ένα σύστημα στο οποίο είναι γνωστές η εισροή και εκροή και άγνωστες οι εσωτερικές διεργασίες, το υδρολογικό της ισοζύγιο εκφράζεται ως εξής:

$$\frac{\Delta S}{\Delta T} = I - O$$

Όπου:

I = η μέση εισροή

O = η εκροή για το χρονικό διάστημα ΔT

Για μια λεκάνη απορροής, η εισροή μπορεί να συνίσταται σε βροχόπτωση, χιονόπτωση ή άλλες μορφές κατακρήμνισης. Η επιφανειακή απορροή, η ενδιάμεση απορροή, η υπόγεια απορροή, η εξάτμιση, η διαπνοή και η διήθηση, είναι οι συνηθέστερες συνιστώσες της εκροής. Η αποθήκευση της λεκάνης έχει και αυτή διάφορες συνιστώσες, όπως είναι η επιφανειακή αποθήκευση (πάνω στο έδαφος, συμπεριλαμβανομένης και της αποθήκευσης σε υδατορεύματα και ταμιευτήρες), η υπεδάφια αποθήκευση (μέσα στη ριζική ζώνη), η υπόγεια αποθήκευση (μέσα στους υδροφορείς) και η παρεμπόδιση (από βλάστηση, κτίρια, κλπ). Οι παραπάνω παράγοντες συνοψίζονται στην ακόλουθη βασική εξίσωση υδρολογικού ισοζυγίου.

$$\frac{\Delta S}{\Delta T} = P - E - T - R - G - N$$

όπου:

P= η κατακρήμνιση (βροχόπτωση και χιονόπτωση)

E= η εξάτμιση στην ατμόσφαιρα

T= η διαπνοή φυλλώματα της βλάστησης

R= η άμεση επιφανειακή απορροή

G= η υπόγεια απορροή

N= λοιπές απώλειες (διαφυγές, υδροληψίες)

Ειδικά για τους ταμιευτήρες ισχύει η παρακάτω εξίσωση ισοζυγίου:

$$V_{t+1} = V_t + Q_{obs,t} + P_t - EPT_t - a_i * W - N_t$$

όπου:

V_{t+1} = ο όγκος που είναι αποθηκευμένος στην αρχή του μήνα t

V_t = ο όγκος που είναι αποθηκευμένος στο τέλος του μήνα t

$Q_{obs,t}$ = η μηνιαία εισροή στον ταμιευτήρα

P_t = η μηνιαία κατακρήμνιση πάνω στην επιφάνεια του ταμιευτήρα

EPT_t = η μηνιαία εξάτμιση από την επιφάνεια του ταμιευτήρα

W = η ποσότητα ύδατος που εκρέει

a_i = ο μηνιαίος συντελεστής κατανομής του W

N_t = οι μη ελεγχόμενες μηνιαίες διαφυγές (απώλειες) από τον ταμιευτήρα

Εκτίμηση υδατικού δυναμικού λεκάνης απορροής

Η διαδικασία εκτίμησης του υδατικού δυναμικού της λεκάνης απορροής σε μία θέση ενδιαφέροντος, αφορά τον προσδιορισμό μιας αξιόπιστης χρονοσειράς εισροών στη θέση αυτή με σκοπό την αξιοποίησή της για τον αναλυτικό σχεδιασμό ενός μελετώμενου έργου ταμίευσης. Η χρονοσειρά αυτή προσδιορίζεται:

- «απευθείας» μέσω επεξεργασίας επαρκούς δείγματος παρατηρημένων παροχών στη θέση του έργου ταμίευσης,
- με τη «μεταφορά» υδρολογικής πληροφορίας από θέση άλλης λεκάνης με παρόμοια φυσιογραφικά χαρακτηριστικά,
- με την κατάστρωση συνεχούς υδρολογικού μοντέλου (μοντέλου βροχής-απορροής) αξιοποιώντας μετρήσεις βροχόπτωσης,
- με τη χρήση στοχαστικών συνθετικών χρονοσειρών εισροών.

Οι τρεις τελευταίες διαδικασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην περίπτωση απουσίας μετρήσεων, ανεπαρκών μετρήσεων ή ανάγκης για την επέκταση των μετρήσεων παροχής στην εξεταζόμενη θέση. Όσο μεγαλύτερο είναι το διαθέσιμο δείγμα εισροών, τόσο περισσότερο αξιόπιστα θεωρούνται τα αποτελέσματα των υδρολογικών αναλύσεων. Για παράδειγμα, σε εποχιακούς ταμιευτήρες θεωρείται ότι επαρκεί ένα μικρότερο δείγμα εισροών σε σχέση με ταμιευτήρες υπερετήσιας ρύθμισης.

2.3 Υδρολογική προσομοίωση

Ως προσομοίωση ή υδρολογικό μοντέλο αναφέρεται ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών (Ευστρατιάδης 2006, Μαμάσης, 2009). Τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να υπολογίσουν περιστατικά ποικίλων χρονικών διαστημάτων όπως η στάθμη μίας λίμνης.

Τα υδρολογικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση ενός συνόλου μεταβλητών (απορροή, εξατμισοδιαπνοή) σε μία εξωτερική φόρτιση (βροχόπτωση). Για να παράξουν ένα αποτέλεσμα απαιτούν τον ορισμό των αρχικών και οριακών συνθηκών (βαθμός κορεσμού του εδάφους) και των χαρακτηριστικών μεγεθών του συστήματος (ρυθμός διήθησης, γεωμετρικά χαρακτηριστικά απορροής).

Η διαδικασία της υδρολογικής προσομοίωσης περιλαμβάνει, εκτός από την τελική κατασκευή ενός μοντέλου, τις διαδικασίες της υδρολογικής ανάλυσης και σύνθεσης, δηλαδή της εκτίμησης της ποσότητας και της ποιότητας των διαθέσιμων δεδομένων και έχει στόχο την εξαγωγή του μέγιστου δυνατού ποσοστού περιεχόμενης πληροφορίας από τα δεδομένα (Μ Βαφειάδης, 2004). Οι ελλείψεις δεδομένων πρέπει να καλυφθούν από την παραγωγή τεχνικών δεδομένων, αυτή η διαδικασία ονομάζεται υδρολογική σύνθεση.

Τα υδρολογικά μοντέλα αναπτύσσονται στα εξής στάδια (Ευστρατιάδης, Μαμάσης, 2009):

- Επιλογή διεργασιών για προσομοίωση
- Επιλογή μεθόδων προσομοίωσης
- Διατύπωση μαθηματικών εξισώσεων
- Κωδικοποίηση υπολογιστικής διαδικασίας
- Υπολογισμός παραμέτρων
- Αποτίμηση συνέπειας
- Επαλήθευση

3 Περιοχή μελέτης και δεδομένα : Η λεκάνη απορροής της λίμνης Καστοριάς

3.1 Περιοχή μελέτης

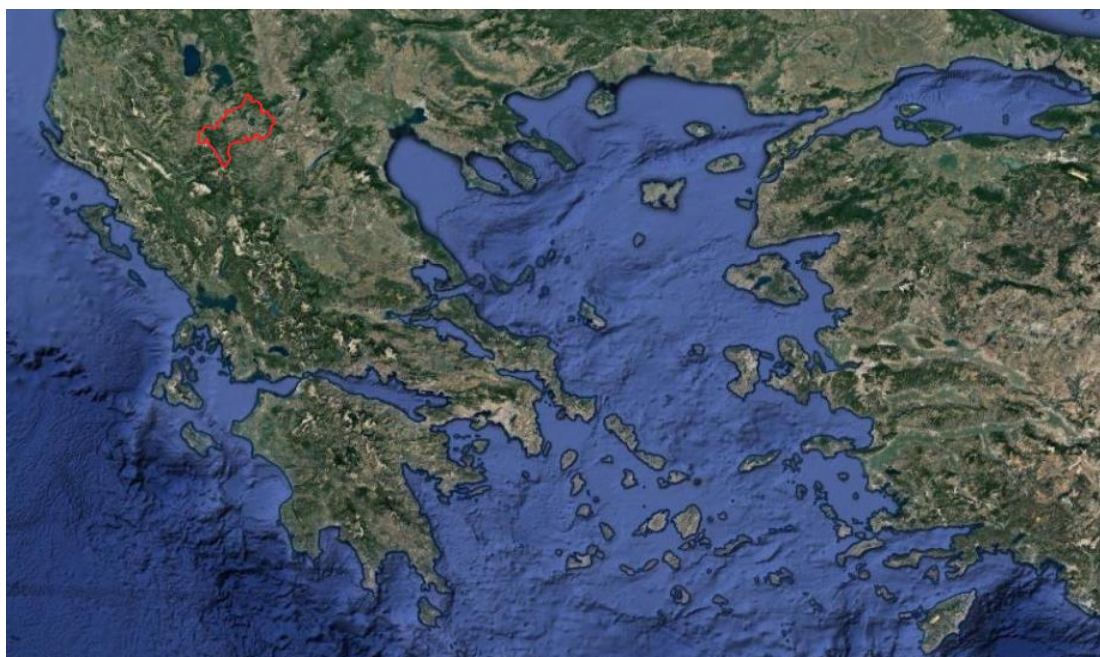
3.1.1 Γεωγραφική θέση-Τοπογραφικά χαρακτηριστικά

Η πόλη της Καστοριάς

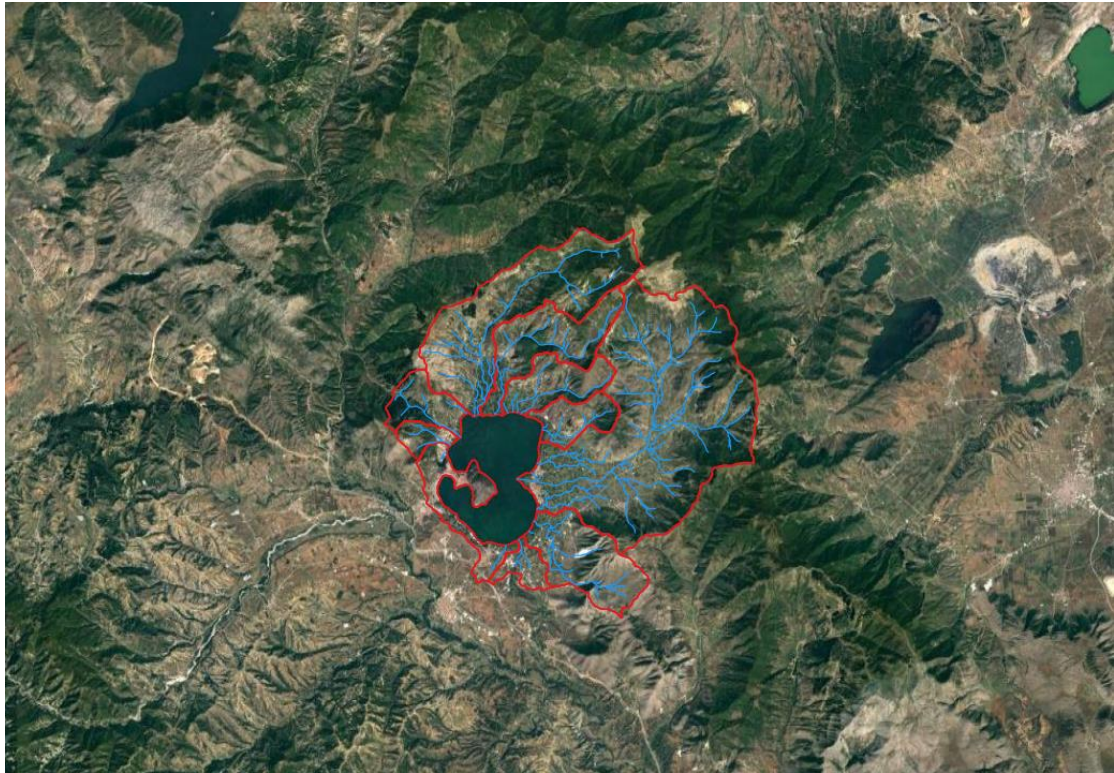
Η Καστοριά με πληθυσμό περίπου 17.000 κατοίκους είναι η πρωτεύουσα του ομώνυμου νομού και βρίσκεται στο κέντρο του. Επίσης ανήκει στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Μακεδονίας και πρόκειται για παραμεθόριο νομό, συνορεύει με την Αλβανία και με τους νομούς Φλώρινας, Κοζάνης και Γρεβενών. Το όνομα της λέγεται ότι το πήρε από τους κάστορες που ενδημούσαν για αιώνες σε αυτήν. Στη Καστοριά βρίσκεται η λίμνη Ορεστιάδα μία από τις ομορφότερες λίμνες της Ελλάδας που είναι άμεσα συνδεδεμένη με την φυσιογνωμία της πόλης. Η πόλη της Καστοριάς έχει χτιστεί στο μέσο της λίμνης.

Η ζωή των ανθρώπων της περιοχής είναι άμεσα συνδεδεμένη με την λίμνη τόσο σε κοινωνικό επίπεδο όσο και σε οικονομικό καθώς αποτελεί πόλο έλξης για πλήθος τουριστών ενώ θεωρείται η δεύτερη πιο παραγωγική σε αλιεύματα λίμνη της χώρας. Εκτός από τον τουριστικό τομέα ανεπτυγμένος στη περιοχή είναι ο αγροτικός, κτηνοτροφικός αλλά και ο τομέας του εμπορίου γούνας.

Η λίμνη με έκταση περίπου 30 τετραγωνικά χιλιόμετρα και έκταση λεκάνης απορροής 262 τετραγωνικά χιλιόμετρα και συνήθως παγώνει για λίγες μέρες τον χειμώνα. Η λίμνη της Καστοριάς έχει χαρακτηριστεί "Μνημείο Φυσικού Κάλλους" από το Υπουργείο Πολιτισμού και είναι επίσημα ενταγμένο στο ευρωπαϊκό δίκτυο περιβαλλοντικής προστασίας «Φύση 2000» .



Εικόνα 3 : Χάρτης Ελλάδας όπου σημειώνεται τα όρια του νομού Καστοριάς.



Εικόνα 4 : Η λίμνης της Καστοριάς με την τις υπολεκάνες απορροής της και το υδρογραφικό δίκτυο.

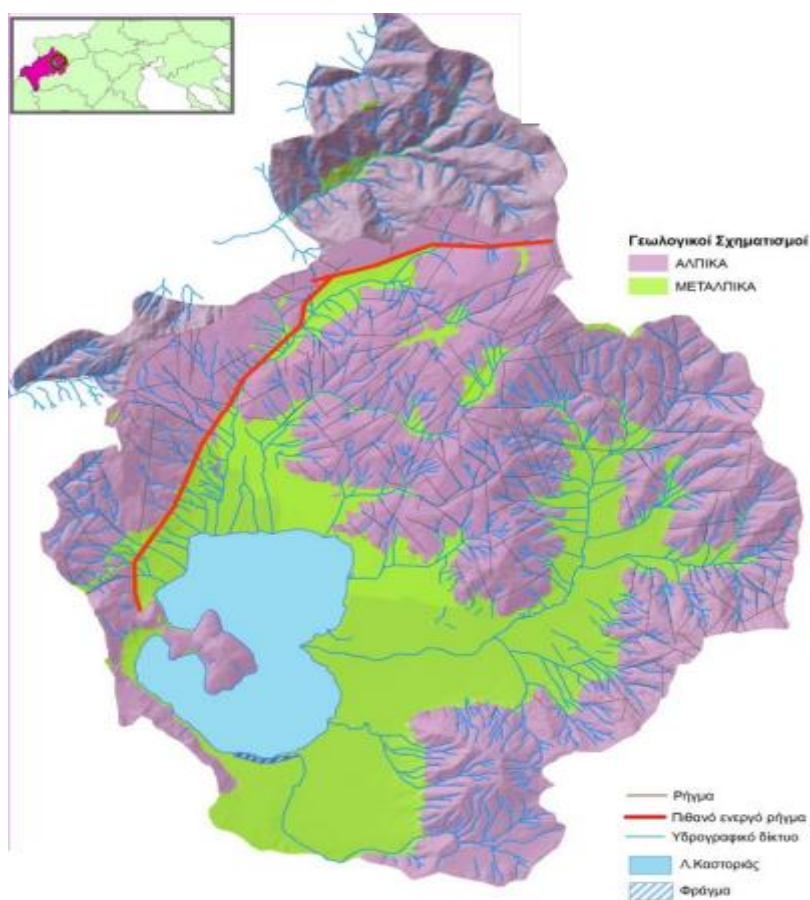
Η λίμνη έχει υψόμετρο κοντά στα 630 μ. πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας με ελάχιστο βάθος 1,4 μέτρα και μέγιστο 12 μέτρα, η μέση θερμοκρασία του νερού είναι 22 βαθμοί Κελσίου. Η Ορεστιάδα είναι η ενδεκάτη σε μέγεθος λίμνη στην Ελλάδα με επιφάνεια 30 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Η περιφέρεια της λίμνης είναι περίπου 30 χιλιόμετρα και ο όγκος των νερών 100.000.000 κυβικά μέτρα. Η λίμνη έχει αρκετές εισροές νερού κυρίως από τα δυτικά και τα ανατολικά που γεμίζουν την λεκάνη απορροής της τους χειμερινούς μήνες και εκρέει μέσω του ρέματος Γκιόλι με χρήση ηλεκτρικού θυροφράγματος στον ποταμό Αλιάκμονα. Παλαιότερα το βραχόβουνο σχημάτιζε μια νησίδα διότι η λίμνη το περιέβαλλε εξ ολοκλήρου.

3.1.2 Γεωμορφολογία

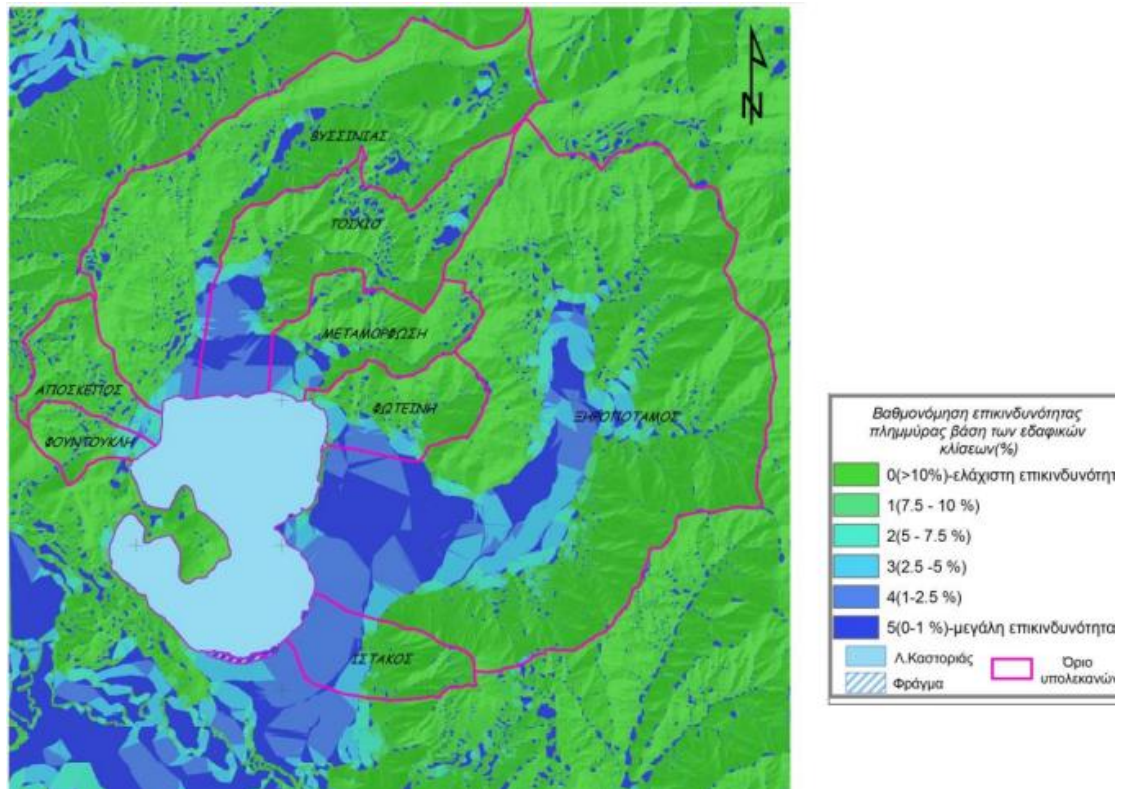
Η λίμνη της Καστοριάς θεωρείται μία τεκτονικής προέλευσης λίμνη (Σωτηριάδης, 1984 & Σακκάς, 1993) όπου αποτελεί μία υπολειμματική μορφή των μεγαλύτερων λιμνών Νεογενούς –Τεταρτογενούς, που βρίσκονταν στο χώρο της Μακεδονίας και δημιουργήθηκαν από τις τεκτονικές κοιλάδες στο χώρο της Δυτικής Μακεδονίας, κατά το νεοτεκτονικό στάδιο των αλπικών πτυχώσεων (Βαφειάδης, 1983). Η λίμνη θεωρείται καρστική λίμνη όπου αποτελεί τμήμα της Πελαγονίας λίμνης, που δέσποζε κατά την διλούβιο εποχή και είχε έκταση 164 τετραγωνικά χιλιόμετρα με βάθος 50 μέτρα (Stanković, 1931).

Η λεκάνη απορροής της λίμνης έχει ένα αυτοτελές υδρογραφικό δίκτυο. Ως υδροκρίτη ορίζεται από ανατολικά τις κορυφές Μηλιά και Πύργος, στα βόρεια το όρος Βερνού και διέρχεται από τις κορυφές Δούκας, Κρόνος, Βίτσι και Σπυρακάκης. Στα νοτιοανατολικά, στη ράχη του όρους Πετρώδες, και καταλήγει στο νότιο τμήμα της λίμνης Καστοριάς (Μάρης, 1997). Τα σημαντικότερα ρέματα του υδρογραφικού δικτύου λόγω του μεγέθους τους είναι οι χείμαρροι Ξηροπόταμος, Βουσσινιάς, Κωτούρη και Μεταμόρφωση.

Η περιοχή της Καστοριάς παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία σε σχηματισμούς. Στα πετρώματα της περιοχής περιλαμβάνονται προαλπικά μεταμορφωμένα και πλουτώνια, κρυσταλλοσχιτώδη, ημιμεταμορφωμένα, φυλλιτικά και πλουτωνικά, αλπικά τριαδοϊουρασικά ανθρακικά ιζήματα και μεταλικά μολασσικά ιζήματα της Μεσοελληνικής Αύλακας, πλειοκαινικά, πλειοπλειστοκαινικά και λιμνοποτάμια ιζήματα, και τέλος χαλαροί τεταρτογενείς σχηματισμοί (Βαφειάδης 1983). Κατά το μεγαλύτερο μέρος τους τα πετρώματα ανήκουν στην Πελαγονική ζώνη, ενώ στη δυτική περιοχή εμφανίζονται σχηματισμοί της Υποπελαγονικής και κυριαρχούν και ιζήματα της Μεσοελληνικής Αύλακας (Κουσουρής 1987). Στα ορεινά τμήματα ορίζεται ως κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα η ευπάθεια στις επιφανειακές και χαραδρωτικές διαβρώσεις και αποσαθρώσεις (Μάρης, 1997).



Εικόνα 5: Γεωλογικοί σχηματισμοί στη λεκάνη απορροής της λίμνης (Πηγή : Χατζημιχαήλ Π. 2011).

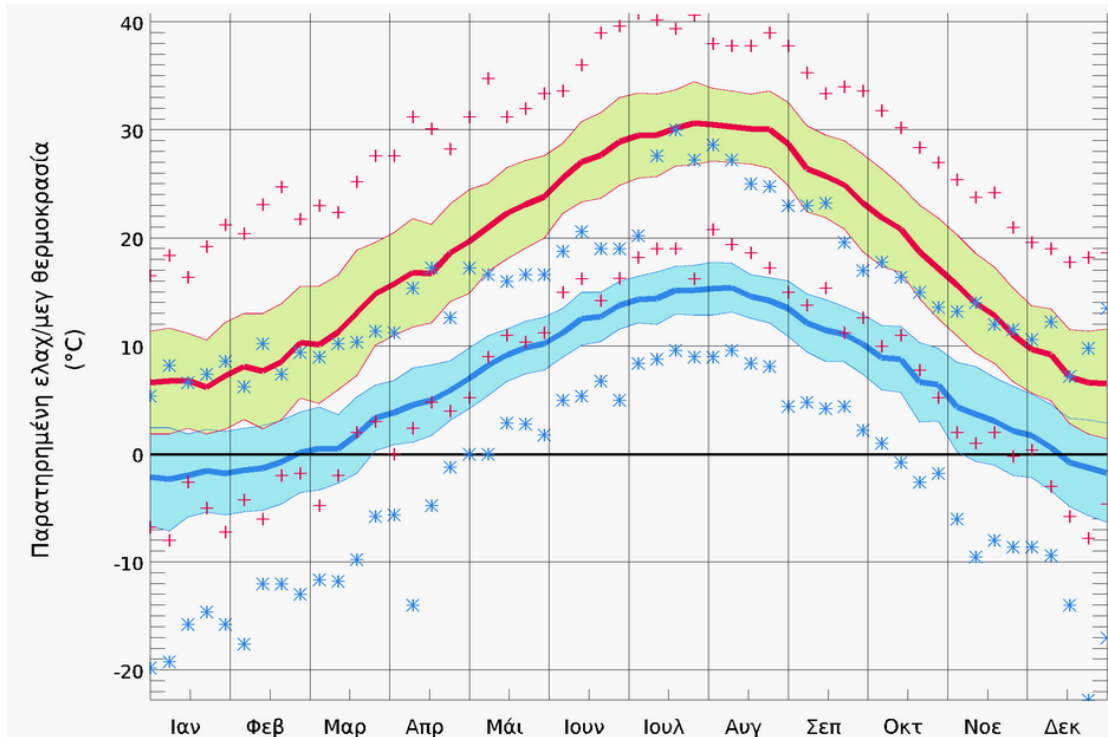


Εικόνα 6: κλίσεις εδάφους στη λεκάνη απορροής της λίμνης (Πηγή : Χατζημιχαήλ Π. 2011).

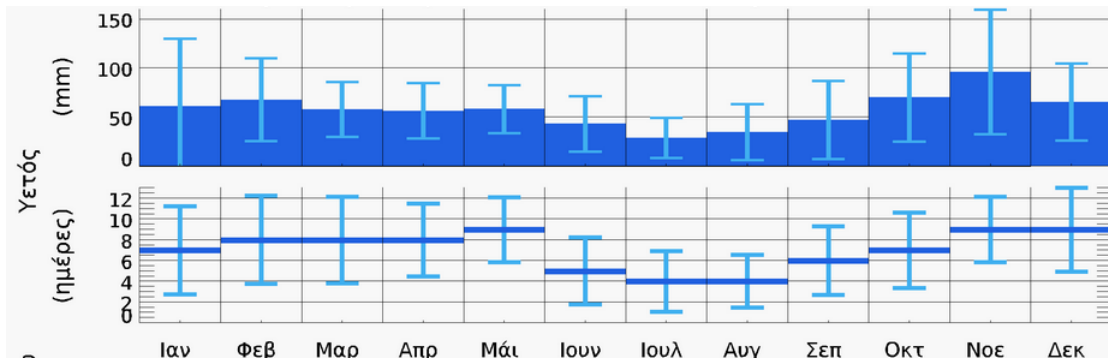
3.1.3 Κλιματολογικές συνθήκες

Το κλίμα στην ευρύτερη περιοχή της Καστοριάς θεωρείται ενδιάμεσο μεταξύ μεσογειακού και ηπειρωτικού κλίματος. Η λίμνη έχει καθοριστικό ρόλο στο μικροκλίμα της περιοχής. Κατά τους χειμερινούς μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο παρατηρούνται αυξημένες χιονοπτώσεις σπανιότερα κατά τους μήνες Δεκέμβριο και Μάρτιο. Η ατμοσφαιρική υγρασία είναι περισσότερο εμφανής την χειμερινή περίοδο που συνοδεύεται με βροχοπτώσεις μεγάλης διάρκειας και λιγότερο την άνοιξη και το καλοκαίρι. Κατά τους χειμερινούς μήνες συχνά εμφανίζεται το φαινόμενο του ολικού παγετού με παρατεταμένη διάρκεια των τιμών της θερμοκρασίας κάτω από τους μηδέν βαθμούς κελσίου.

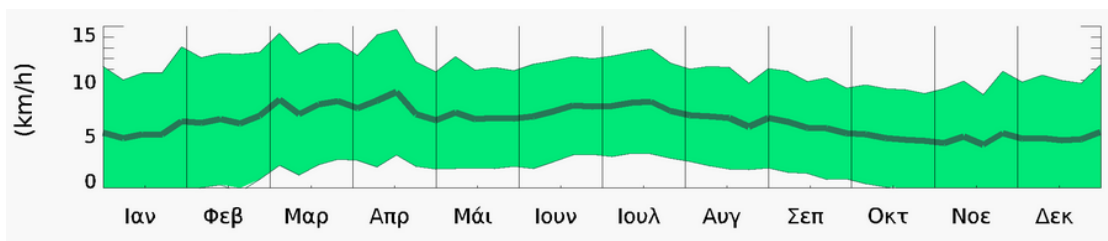
Παρακάτω παρουσιάζονται πίνακες με παρατηρημένα και προβλεπόμενα κλιματολογικά δεδομένα για την Καστοριά από το αρχείο και ένα μοντέλο προσομοίωσης του ισότοπου <https://www.meteoblue.com/el> :



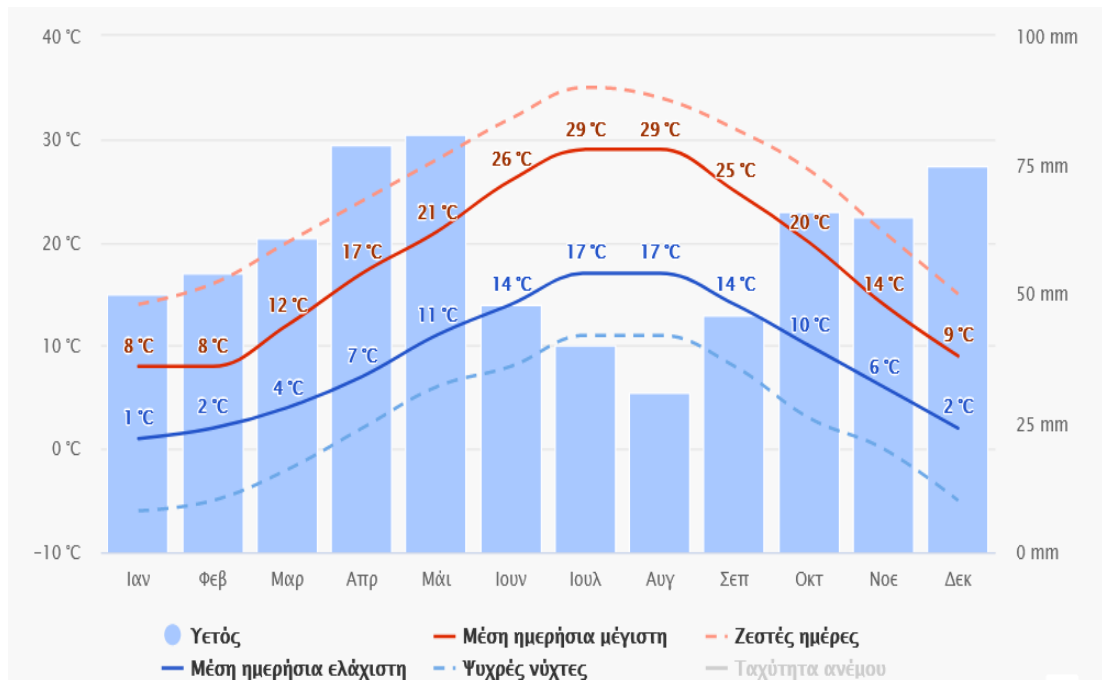
Διάγραμμα 2: παρατηρημένη ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία (Πηγή meteoblue).



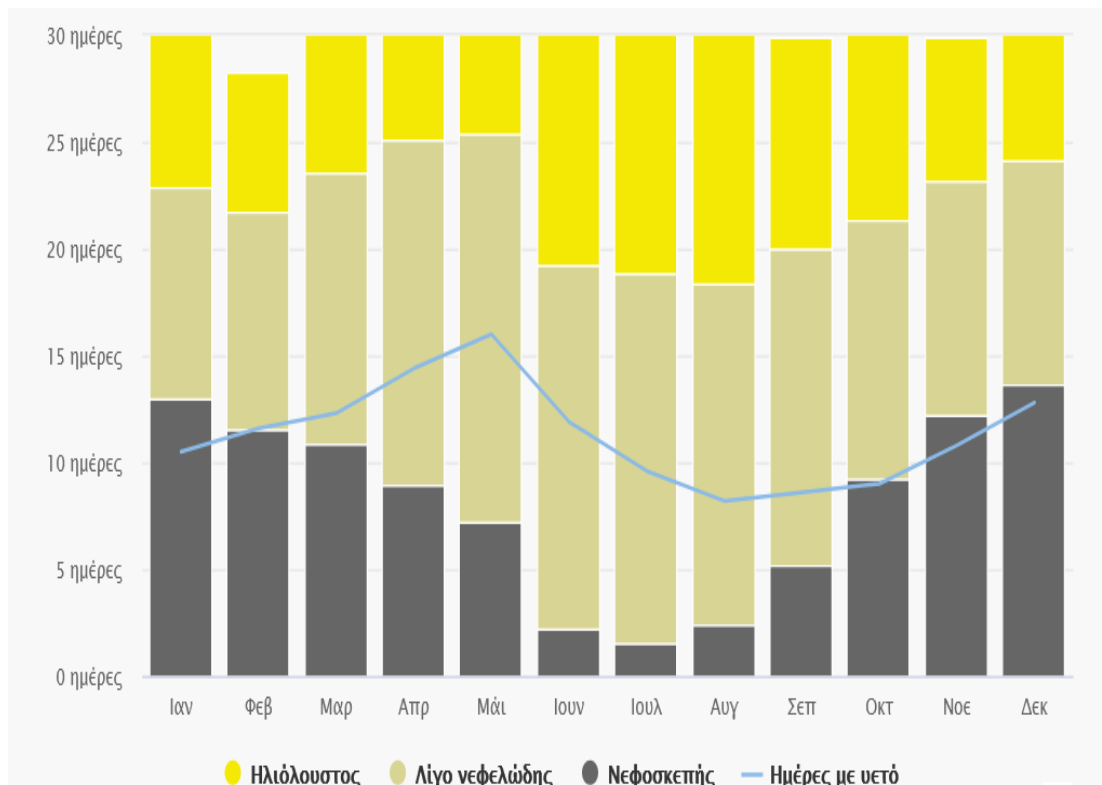
Διάγραμμα 3: παρατηρημένες τιμές υετού (Πηγή meteoblue).



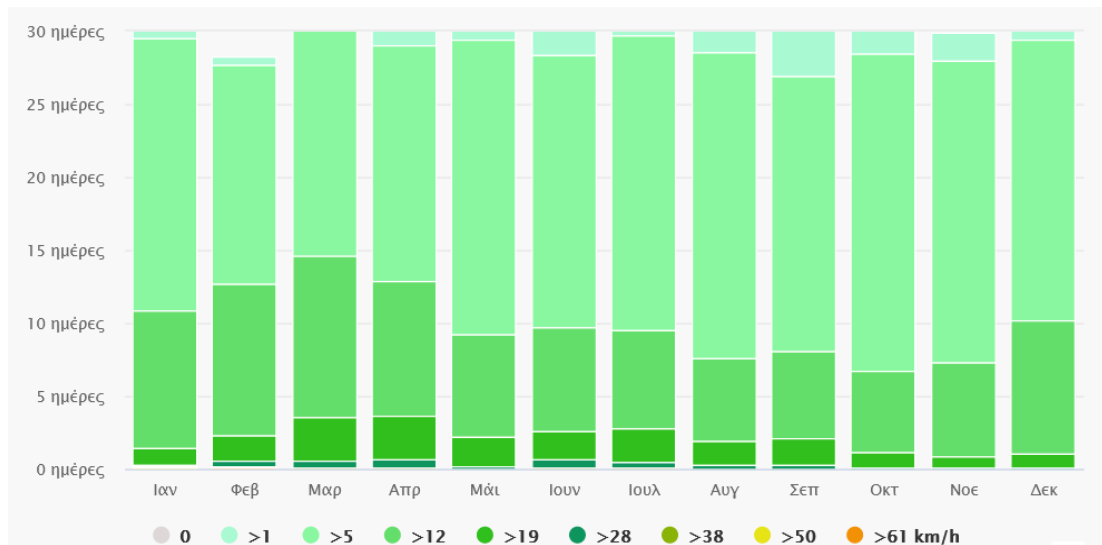
Διάγραμμα 4: παρατηρημένες τιμές ταχύτητας ανέμου (Πηγή meteoblue).



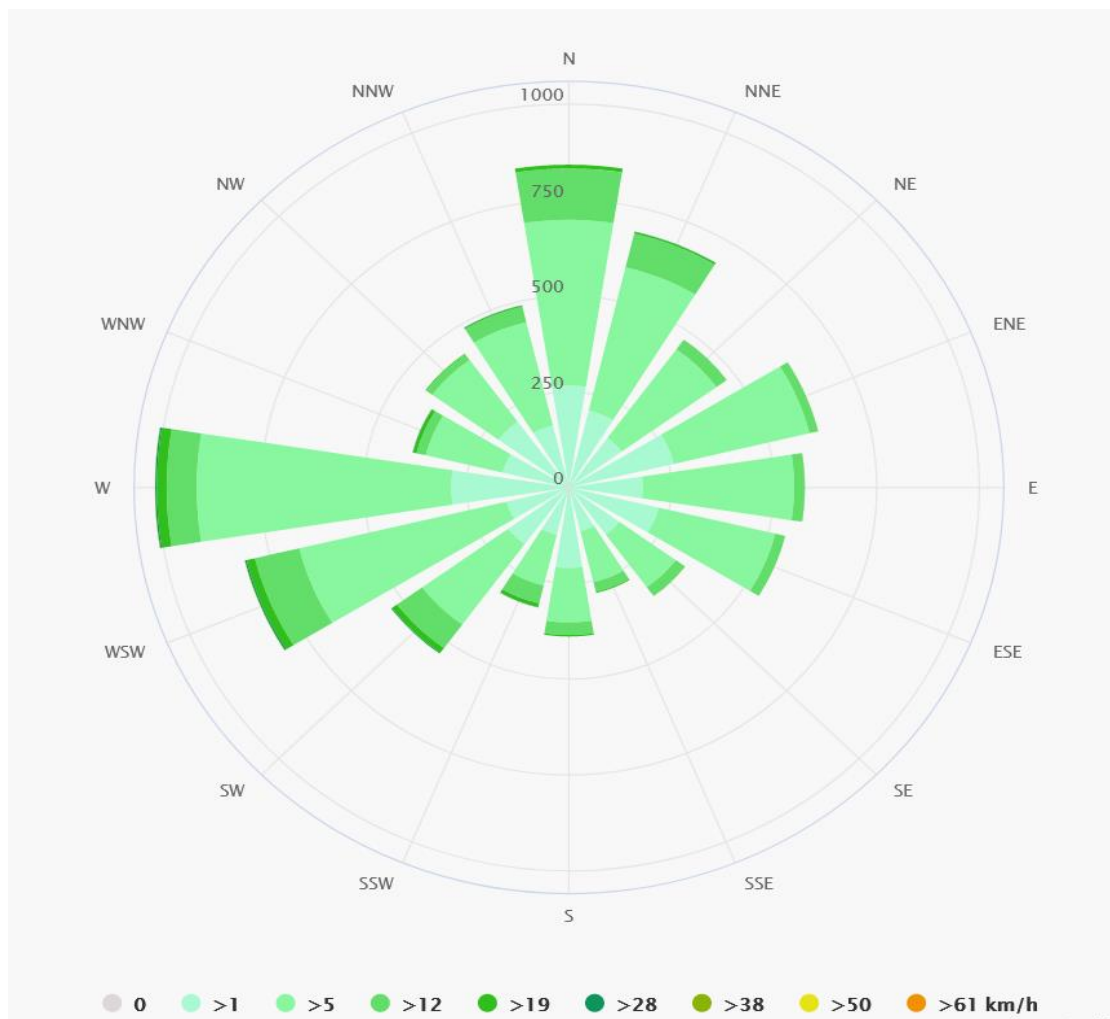
Διάγραμμα 5: προβλεπόμενος μέσος όρος θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων (Πηγή meteoblue).



Διάγραμμα 6: προβλεπόμενη νέφωση και ημέρες βροχόπτωσης (Πηγή meteoblue.).



Διάγραμμα 7: προβλεπόμενη ταχύτητα ανέμου (Πηγή meteoblue).



Διάγραμμα 8: προβλεπόμενη κατεύθυνση και ταχύτητα ανέμου (Πηγή meteoblue).

3.1.4 Βλάστηση

Η λεκάνη απορροής της λίμνης αποτελείται κυρίως από δασικές, θαμνώδεις εκτάσεις και φυσικούς βοσκότοπους με ποσοστό περίπου στο 10%. Το μεγαλύτερο ποσοστό της έκτασης είναι μη αρδευόμενο ενώ μικρό είναι το ποσοστό της αγροτικής δασικής έκτασης. Εκλείπουν οι γεωργικές εκτάσεις με φυσική βλάστηση από την περιοχή. Έντονη είναι η εμφάνιση της σκληροφυλλικής βλάστησης σε αντίθεση με το μικρό ποσοστό που καταλαμβάνουν τα οπωροφόρα δέντρα κυρίως στο Βόρειο τμήμα της λεκάνης. Η λίμνη περιμετρικά περιβάλλεται από παραλίμνιους βάλτους. Έντονη αστική δόμηση παρατηρείται μόνο στη περιοχή στην οποία είναι χτισμένη η πόλη και μικρή αραιοκατοικημένη δόμηση στην υπόλοιπη λεκάνη.

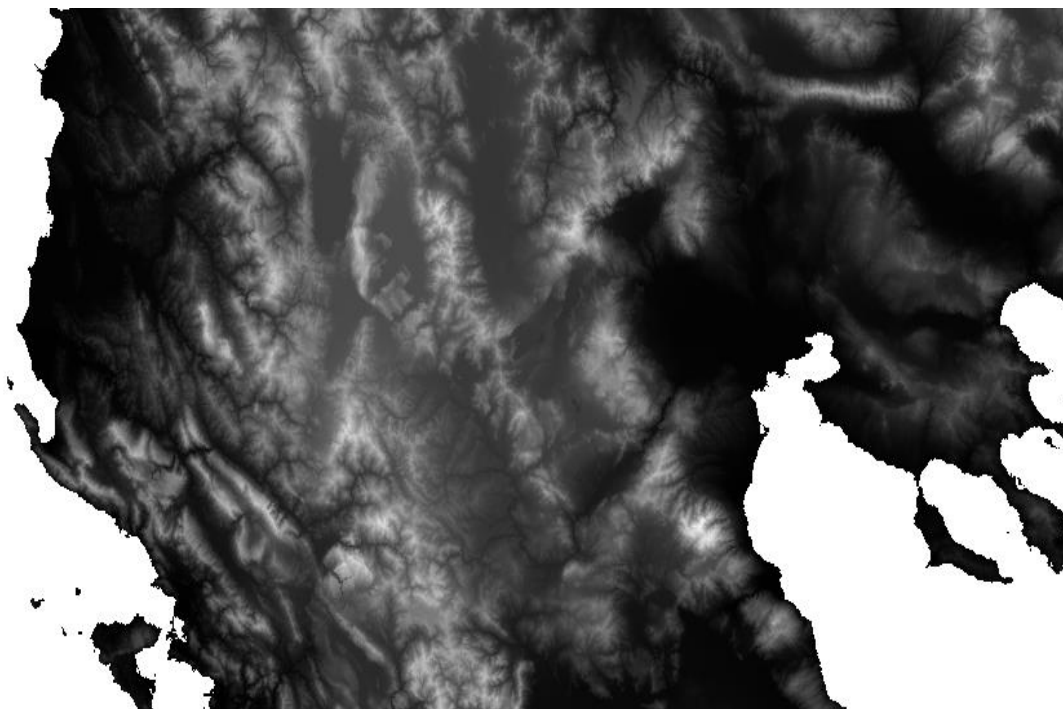
3.2 Δεδομένα

3.2.1 Τοπογραφικά δεδομένα

Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM)

Αρχικά κατά το πρώτο στάδιο της κατασκευής του ομοιώματος της λεκάνης απορροής της λίμνης γίνεται επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής στο πρόγραμμα QGIS. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους απεικονίζει σε ψηφιακή μορφή το ανάγλυφο της Γης. Η ψηφιακή μορφή αναφέρεται σε έναν κάρναβο όπου κάθε κελί του περιέχει μία τιμή υψομέτρου για όλο το εύρος του. Η ανάλυση του μοντέλου εξαρτάται από την διάσταση των κελιών όσο πιο μικρά σε μέγεθος είναι τα κελιά τόσο καλύτερη ανάλυση επιτυγχάνεται.

Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας ανακτήθηκε το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου από τον ιστότοπο της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Παρατήρησης Γης Copernicus (<https://www.copernicus.eu/en>). Τα αρχεία της υπηρεσίας βασίζονται σε παρατηρήσεις δορυφόρων και σε επί τόπου παρατηρήσεις. Από τον ιστότοπο αποκτήθηκαν δυο κομμάτια του ψηφιακού μοντέλου το E50N20 και το E50N10 τα οποία πρέπει να συγχωνευτούν με το λογισμικό του QGIS ώστε να περιλαμβάνουν τιμές υψομέτρου για όλη την ευρύτερη περιοχή. Το μοντέλο αποκτήθηκε σε μορφή Geotiff και είναι το μοναδικό δεδομένο για την δημιουργία, μέσω της κατάλληλης επεξεργασίας, του ομοιώματος της λεκάνης απορροής της λίμνης.



Εικόνα 7 : Ψηφιακό ανάγλυφο υψομέτρου (DEM) (Πηγή Copernicus).

3.2.2 Εδαφολογικά δεδομένα

Για την ορθή και αποτελεσματική προσομοίωση της λίμνης απαραίτητη ήταν η εύρεση και αξιοποίηση ενός συνόλου γεωγραφικών και γεωλογικών δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά έπειτα από την κατάλληλη επεξεργασία μέσα από το QGIS πρέπει να εισαχθούν στο λογισμικό Hec-HMS ώστε να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση. Τα γεωγραφικά και γεωλογικά δεδομένα χωρίζουν τον ευρωπαϊκό χάρτη σε χρωματισμένα πολύγωνα όπου κάθε χρώμα απεικονίζει μία τιμή ανάλογα με την ιδιότητα της συγκεκριμένης περιοχής. Τα αρχεία ανακτήθηκαν από τον ιστότοπο της ευρωπαϊκής βάσης δεδομένων του Ινστιτούτου Περιβάλλοντος και Βιωσιμότητας που υπάγεται στο Γενικό Κέντρο Ερευνών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής ([ESDAC - European Commission \(europa.eu\)](http://ESDAC-EuropeanCommission.europa.eu)).

Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκαν αρχεία των παρακάτω ιδιοτήτων :

- (AWC TOP) Ικανότητα αποθήκευσης νερού της ανώτερης εδαφικής στρώσης σε mm/m,
- (DIMP) Βάθος της αδιαπέρατης στρώσης σε cm,
- (TXSRFDO) Κυρίαρχη υφή επιφανειακής στρώσης σε κλάσεις, με βάση τα ποσοστά άμμου και αργίλου.

Τα παραπάνω αρχεία εισάγονται στο QGIS για την απαραίτητη επεξεργασία.



Εικόνα 8: χάρτης ικανότητας αποθήκευσης νερού της ανώτερης εδαφικής στρώσης. (Πηγή ESDAC).



Εικόνα 9: χάρτης βάθους της αδιαπέρατης στρώσης (Πηγή ESDAC).

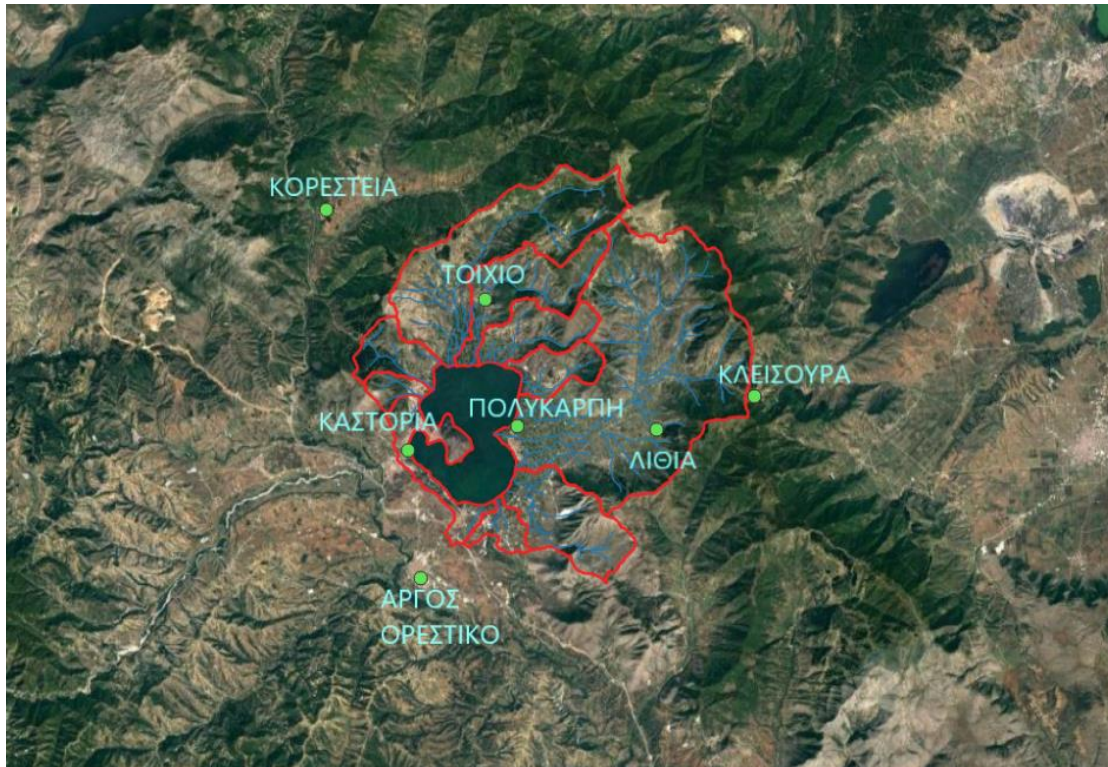


Εικόνα 10: χάρτης κυριαρχικής υφή επιφανειακής στρώσης (Πηγή ESDAC).

3.2.3 Μετεωρολογικά δεδομένα

Το μετεωρολογικό μοντέλο που αναπτύσσεται στο Hec-HMS, απαιτεί την εισαγωγή ενός δικτύου μετεωρολογικών σταθμών στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής. Στους μετεωρολογικούς σταθμούς πρέπει να εισάγουμε βροχομετρικά δεδομένα, σε αυτή την περίπτωση την συνολική ημερήσια κατακρήμνιση σε χιλιοστά. Οι χρονοσειρές μετρήσεων μετεωρολογικών μεγεθών των σταθμών αποκτήθηκαν από τα αρχεία της Αντιπεριφέρειας Καστοριάς.

Η Αντιπεριφέρεια Καστοριάς συλλέγει δεδομένα από έξι βροχομετρικούς σταθμούς τον σταθμό του Άργους Ορεστικού, του Καλοχωρίου, των Λακκωμάτων, της Λιθιάς, της Πολυκάρπης και του Τοιχιού. Οι σταθμοί αυτοί παρέχουν δεδομένα ανά 10 λεπτά για το ύψος της βροχής, την θερμοκρασία, την σχετική υγρασία, την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου τα οποία αποθηκεύονται στο "server" της Αντιπεριφέρειας. Επίσης συλλέγει δεδομένα για την λίμνη από πέντε σταθμούς. Οι σταθμοί αυτοί παρέχουν δεδομένα ανά 10 λεπτά για την στάθμη της λίμνης, για την συγκέντρωση του νερού, την θολότητα, για το pH και για την θερμοκρασία τα οποία επίσης αποθηκεύονται στο "server" της Αντιπεριφέρειας. Το σύνολο των παραπάνω δεδομένων επεξεργάστηκαν κατάλληλα ώστε να προσαρμοστούν στις μεθόδους του υδρολογικού μοντέλου που κατασκευάστηκε.



Εικόνα 11: Θέσεις μετεωρολογικών σταθμών.

οι μετεωρολογικοί σταθμοί που επιλέχθηκαν:

Πίνακας 1: Μετεωρολογικοί σταθμοί και τα υψόμετρα τους.

Σταθμοί	Υψόμετρο (m)
Κορέστεια	835
Τοιχίο	670
Καστοριά	632
Κλεισόυρα	1203
Λιθιά	1160
Πολυκάρπη	630
Άργος Ορεστικό	645

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές του συνολικού ύψους βροχόπτωσης (mm) και της μέσης θερμοκρασίας (°C) για το 2019 των σταθμών της Αντιπεριφέρειας:

Πίνακας 2: Ύψος βροχόπτωσης (mm) για το 2019.

Ύψος βροχόπτωσης (mm)							
Μήνας/σταθμος	Άργος	Καλοχώρι	Κορέστεια	Λακκώματα	Λιθιά	Πολυκάρπη	Τοιχίο
Ιαν	99	125,8	102,2	128,6	85	-	77
Φεβ	0	3	5,4	3,4	1	-	1
Μαρ	6	24,8	4,2	12,4	4	7	8

Απρ	38	49,8	45,2	49,6	35	40	35
Μαι	72	102,2	92,8	76,6	81	61	83
Ιουν	20	26,6	54,4	16	21	19	48
Ιουλ	54	44,6	86,8	61,8	54	30	36
Αυγ	1	5,4	16,4	5,4	3	1	0
Σεπτ	15	17,6	18	34,8	12	3	15
Οκτ	34	35,6	25,4	40	27	13	26
Νοε	162	196,4	197,6	195,8	170	84	170
Δεκ	68	79,8	69,6	78,6	66	39	67

Πίνακας 3: μέσες τιμές θερμοκρασίας (°C) για το 2019.

Μέση θερμοκρασία (°C)							
Μήνας/σταθμος	Άργος	Καλοχώρι	Κορέστεια	Λακκώματα	Λιθιά	Πολυκάρπη	Τοιχίο
Ιαν	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8	-0,6	-	-0,6
Φεβ	4	4,1	3,4	4,1	3,8	-	4,3
Μαρ	8,5	8,9	8,1	8,8	8,6	9,9	8,9
Απρ	10,8	10,8	10,2	11,2	10,6	11,3	11
Μαι	13,9	13,4	12,6	14,1	13,5	14,2	13,6
Ιουν	20,4	20,5	19,3	21,7	20,3	20,5	20,2
Ιουλ	21,3	21,7	20,6	21,9	21,4	21,6	20,9
Αυγ	21,9	22,8	22,2	21,8	22,4	22,5	21,8
Σεπτ	18	18,7	18	17,9	18,3	18,8	18,3
Οκτ	12,7	14,3	13,6	13,1	13,2	13,7	12,9
Νοε	9,6	9,6	9,6	9,7	10,1	10,3	9,8
Δεκ	4,3	4,4	4,3	4,1	4,4	4,7	4,3

Πίνακας 4: μηνιαία σχετική υγρασία.

Μέση θερμοκρασία (°C)							
Μήνας/σταθμος	Άργος	Καλοχώρι	Κορέστεια	Λακκώματα	Λιθιά	Πολυκάρπη	Τοιχίο
Ιαν	85,2	86,2	85,1	87,9	84,6	-	83,1
Φεβ	68,0	68,3	71,2	70,9	69,7	-	64,6
Μαρ	63,1	63,6	63,4	64,7	62,2	59,7	60,7
Απρ	73,5	74,9	74,3	74,1	74,4	73,9	73,3
Μαι	73,2	76,3	77,8	74,2	75,9	74,9	75,9
Ιουν	73,4	72,8	77,1	81,0	74,1	74,3	75,5
Ιουλ	70,1	66,4	71,4	73,1	68,7	69,0	72,7
Αυγ	67,5	60,8	64,2	71,7	63,6	63,6	69,1
Σεπτ	71,6	68,3	70,5	74,8	69,4	70,1	73,7
Οκτ	80,5	74,3	75,6	81,4	79,0	80,3	84,0
Νοε	92,6	92,8	92,6	94,3	92,1	92,2	93,4
Δεκ	85,4	86,0	84,9	88,6	86,0	85,7	84,6

Η διαμόρφωση του μετεωρολογικού μοντέλου στο Hec-HMS βασίζονται στη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen. Σύμφωνα με αυτήν, η περιοχή μελέτης χωρίζεται σε υποπεριοχές, τα όρια των οποίων προκύπτουν από τις μεσοκαθέτους στις ευθείες που ενώνουν δύο παρακείμενους σταθμούς. Οι υποπεριοχές που δημιουργούνται με τον τρόπο αυτό, έχουν το χαρακτηριστικό ότι περιλαμβάνουν όλα τα σημεία που βρίσκονται πιο κοντά στον σταθμό που περικλείει η υποπεριοχή αυτή, παρά σε οποιοδήποτε άλλο σταθμό (Βαφειάδης Μ. 2004)

Για την παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν σε υπολογιστικά φύλλα του EXCEL τα μεγέθη της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου και της συνολικής ημερήσιας κατακρήμνισης σε χιλιοστά (mm).

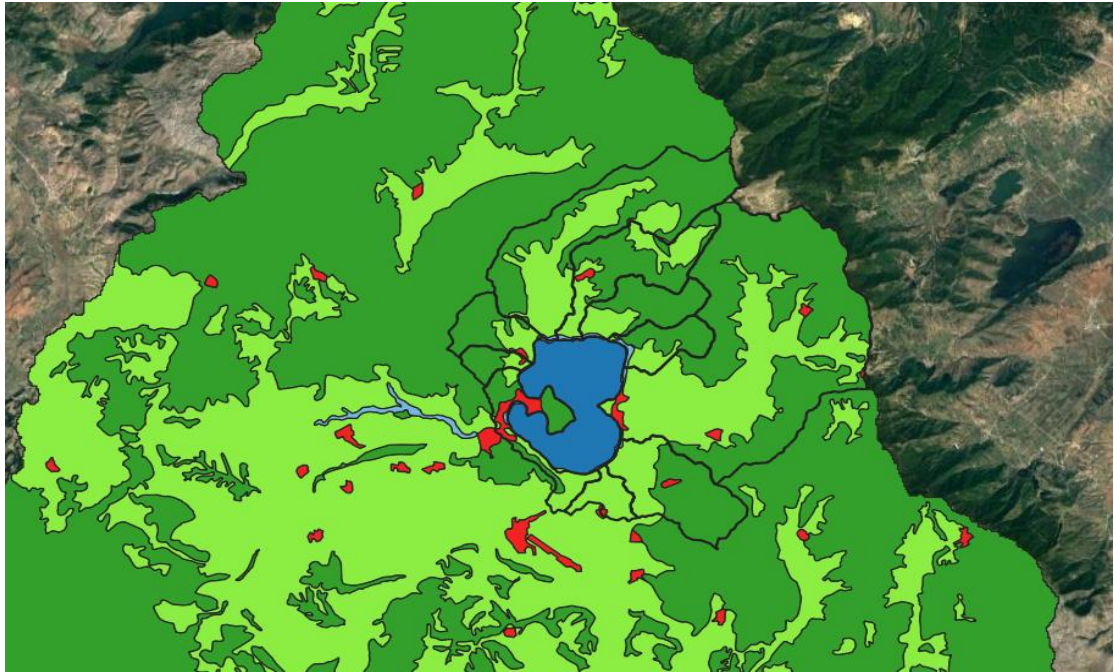
3.2.4 Δεδομένα χρήσεων Γης

Στην επιφάνεια του εδάφους επικρατούν διάφορες χρήσεις γης οι οποίες επηρεάζουν την υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης απορροής και είναι απαραίτητο να συνεκτιμηθούν στην προσομοίωση διεργασιών όπως η αναχαίτιση μέρους της κατακρήμνισης στα φυλλώματα των δένδρων, η εξατμισοδιαπνοή, η δυνατότητα κατακράτηση του εδάφους κ.α που είναι απαραίτητες για την τελική προσομοίωση της στάθμης της λίμνης. Τα αρχεία για τον καθορισμό των περιοχών με διαφορετικές χρήσεις γης, αποκτήθηκαν από τον ιστότοπο της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Παρατήρησης Γης Copernicus (<https://www.copernicus.eu/en>). Χρησιμοποιήθηκαν οι υψηλής ανάλυσης χάρτες για τις χρήσεις γης των τεχνικών επιφανειών, γεωργικών εκτάσεων, δασικών περιοχών, υγροτόπων και υδατικών επιφανειών τους οποίους προσφέρει ο ιστότοπος. Τα δεδομένα που αντλήθηκαν εισήχθησαν στο λογισμικό του QGIS και έπειτα από την κατάλληλη επεξεργασία προέκυψαν τα ποσοστά χρήσης γης κάθε υπολεκάνης που αργότερα θα προστεθούν στο πρόγραμμα του Hec HMS για την τελική προσομοίωση.

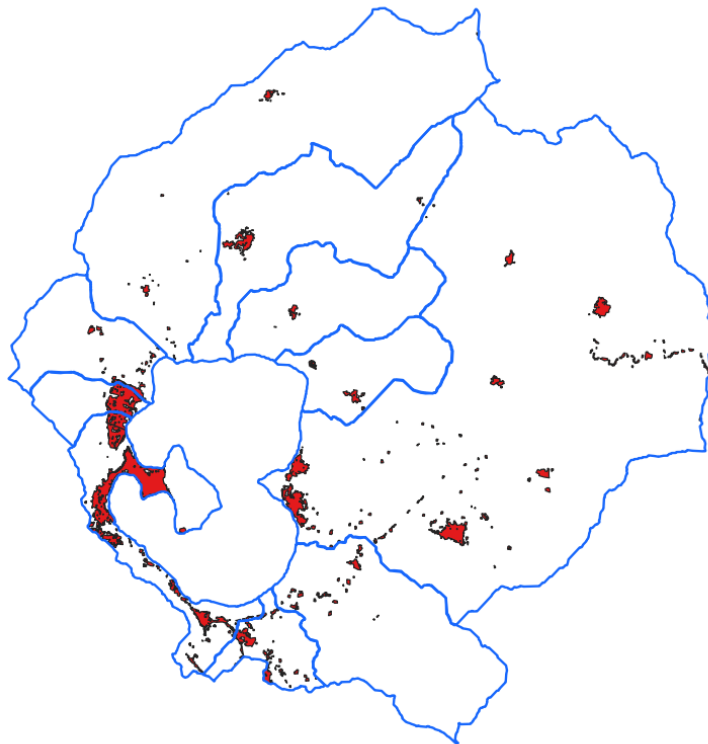
Συνεπώς οι χρήσεις γης χωρίζονται σε πέντε μεγάλες κατηγορίες των οποίων οι εκτάσεις παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα. Τα δεδομένα για την κάλυψη της γης αντλήθηκαν από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα corine copernicus. Τέλος στην εικόνα απεικονίζεται γενική εικόνα της κάλυψης του εδάφους ενοποιημένη στις 5 κατηγορίες.

Πίνακας 5: Ποσοστά χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής της λίμνης.

Χρήση γης	Ποσοστό
Τεχνικές εκτάσεις	2,43
Γεωργικές εκτάσεις	35,74
Δασικές εκτάσεις	61,55
Υγρότοποι	0,18
Υδάτινες επιφάνειες	0,10



Εικόνα 12: Απεικόνιση κατηγοριών χρήσεων γης στην λεκάνη απορροής της λίμνης από το Copernicus



Εικόνα 13: Απεικόνιση χρήσης γης τεχνικής επιφάνειας στην λεκάνη απορροής της λίμνης από το Copernicus

4 Υλικά και μέθοδοι

4.1 Λογισμικά

4.1.1 Λογισμικό QGIS

Το Quantum GIS ή QGIS είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών (GIS). Είναι ένα επίσημο πρόγραμμα του Open Source Geospatial Foundation (OSGeo) και διατίθεται δωρεάν προς όλους τους χρήστες. Δημιουργήθηκε τον Ιούνιο του 2002 κάτω από την άδεια General Public License (GPL). Η συγκεκριμένη άδεια παρέχει τη δυνατότητα επιθεώρησης και τροποποίησης του πηγαίου κώδικα, έτσι δίνει την εγγύηση στον χρήστη πως θα έχει πρόσβαση σε ένα δωρεάν λογισμικό GIS, που μπορεί να τροποποιηθεί. Το QGIS δίνει δυνατότητα ενσωμάτωσης λειτουργιών για ανάπτυξη με το pyQGIS, ένα σύστημα υποστήριξης που βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού Python η οποία χρησιμοποιείται για να βοηθήσει στην δημιουργία επιπροσθέτων εργαλείων. Μια σειρά ενσωματωμένων εργαλείων βοηθάει στην οπτικοποίηση σε μετασχηματισμούς δεδομένων και σε τοπολογικούς ελέγχους.

Το QGIS επιτρέπει την σύνθεση και εξαγωγή γεωγραφικών χαρτών αλλά και την ανάλυση και επεξεργασία μέσα από πολλαπλές λειτουργίες χωρικών και γεωγραφικών δεδομένων. Οι βασικές λειτουργίες του γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών είναι:

- **η προβολή γεωγραφικής βάσης δεδομένων (Geodatabase)** : Το GIS είναι μια χωρική βάση δεδομένων, που περιέχει ένα σύνολο δεδομένων, που αντιπροσωπεύουν γεωγραφικές πληροφορίες από άποψη γενικού μοντέλου δεδομένων GIS (χαρακτηριστικά, raster, τοπολογίες, δίκτυα).
- **Γεωγραφική προβολή (Geovisualization)**: Το GIS είναι ένα σύνολο από έξυπνους χάρτες και άλλες προβολές, που παρουσιάζουν διάφορα χαρακτηριστικά δεδομένων, καθώς και τις μεταξύ τους σχέσεις πάνω στην επιφάνεια της Γης. Διαφορετικές προβολές χαρτών των υποκείμενων γεωγραφικών πληροφοριών, μπορούν να σχηματιστούν και να χρησιμοποιηθούν για διάφορες αναλύσεις, ερωτήματα και επεξεργασία δεδομένων/πληροφοριών.
- **Προβολή γεωεπεξεργασίας (Geoprocessing view)**: Το GIS είναι ένα σύνολο από εργαλεία που διαμορφώνουν πληροφορίες, και δημιουργούν νέες γεωγραφικές βάσεις δεδομένων από τις ήδη υπάρχουσες. Οι λειτουργίες γεωεπεξεργασίας, παίρνουν ουσιαστικά, τις πληροφορίες από υπάρχουσες βάσεις δεδομένων, κάνουν αναλύσεις και με τα αποτελέσματα δημιουργούν νέες βάσεις δεδομένων.

Το QGIS χρησιμοποιεί μια χωρική βάση δεδομένων για την δημιουργία έξυπνων χαρτών, που περικλείουν διάφορα χαρακτηριστικά. Το λογισμικό επεξεργάζεται αυτά τα χαρακτηριστικά και τα συνδυάζει με άλλες χωρικές βάσεις ή και χάρτες, και συνθέτει νέα δεδομένα.

4.1.2 Λογισμικό υδρολογικής προσομοίωσης HEC-HMS

Το Hec-HMS είναι ένα λογισμικό υδρολογικής προσομοίωσης που αναπτύχθηκε το 1992 από το Κέντρο Υδρολογικής Μηχανικής στο Στρατό Μηχανικών των Στρατιωτικών Η.Π.Α. ως υποκατάστατο του HEC-1. Το νέο λογισμικό εκσυγχρονισμένο στην αριθμητική ανάλυση σε σχέση με το HEC-1 και έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει ολοκληρωτικά την κατακρήμνιση και την απορροή δενδρικών λεκανών αποστράγγισης. Το μοντέλο προσομοιώνει μεμονωμένες ροές υδρολογικού κύκλου μέσα από την εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων (μεθόδων), όπως η τήξη χιονιού, η διήθηση, η εξατμισοδιαπνοή, η ροή βάσης και η δρομολόγηση καναλιών. Το μοντέλο εφαρμόζεται σε διάφορες αναλύσεις όπως μελέτες υδατικού ισοζυγίου, πλημμυρών, σχεδιασμός υπερχειλίσης ταμιευτήρα, πρόβλεψη ροής, αποστράγγιση αστικών πόλεων, μελλοντικές επιπτώσεις αστικοποίησης, ποιότητα νερού, διάβρωση και μεταφορά ιζημάτων. Τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου περιλαμβάνουν πολλαπλές μεθόδους για τη μοντελοποίηση φυσικών διαδικασιών απορροής όπου ο χρήστης επιλέγει μια κατάλληλη μέθοδο βάσει της διαθεσιμότητας των δεδομένων, τους σκοπούς της προσομοίωσης και την εμπειρία πάνω στη χρήση κάθε μεθόδου. Το λογισμικό διαθέτει ολοκληρωμένο περιβάλλον εργασίας όπου περιλαμβάνει μια βάση δεδομένων, βοηθητικά προγράμματα εισαγωγής δεδομένων, μηχανισμό υπολογισμού και εργαλεία αναφοράς αποτελεσμάτων. Η χρήση των διαφορετικών μελών του λογισμικού επιτρέπεται από ένα γραφικό περιβάλλον (interface) και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποθηκεύονται στο HEC-DSS (Σύστημα Αποθήκευσης Δεδομένων).

Παρακάτω αναφέρονται τα στοιχεία που περιέχει το πρόγραμμα για την προσομοίωση των διαδικασιών κατακρήμνισης-απορροής-διόδευσης

- Επιλογές κατακρημνίσεων
- Μοντέλα απωλειών τα οποία μπορούν να υπολογίσουν τον όγκο της απορροής, δεδομένης της κατακρήμνισης και των ιδιοτήτων της λεκάνης απορροής.
- Μοντέλα άμεσης απορροής για τον υπολογισμό της επιφανειακής ροής, την αποθήκευση και την απώλεια ενέργειας καθώς το νερό διαρρέει από την λεκάνη στο ρέμα.
- Μοντέλα υδρολογικών διοδεύσεων για τον υπολογισμό της υδαταποθήκευσης και της ενεργειακής ροής καθώς το νερό ρέει στο ρέμα.
- Μοντέλα των φυσικών συμβολών και διακλαδώσεων.

- Μοντέλα για τα έργα ελέγχου του νερού, όπως εκτροπές και εγκαταστάσεις αποθήκευσης.
- Μοντέλο απορροής για χρήση με κατανεμημένα δεδομένα κατακρημνίσεων, όπως πχ δεδομένα από μετεωρολογικά ραντάρ.
- Μοντέλο εδαφικής υγρασίας για την προσομοίωση της μακροχρόνιας απόκρισης της λεκάνης στην υγρασία και στην ξηρασία.
- Ένα πακέτο αυτόματης βαθμονόμησης το οποίο μπορεί να εκτιμήσει συγκεκριμένες παραμέτρους του μοντέλου και αρχικές συνθήκες, βάσει σειρών παρατηρήσεων και υδρομετεωρολογικές συνθήκες.
- Συνδέσεις με ένα σύστημα διαχείρισης δεδομένων (HEC-DSS) το οποίο επιτρέπει την αποθήκευση δεδομένων την επανάκτηση και την συνδεσιμότητα με άλλα εργαλεία ανάλυσης.

4.2 Συνοπτική περιγραφή της μεθοδολογίας

Στην παρούσα παράγραφο θα γίνει μία συνοπτική αναφορά στη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την δημιουργία της προσομοίωσης της στάθμης της λίμνης της Καστοριάς.

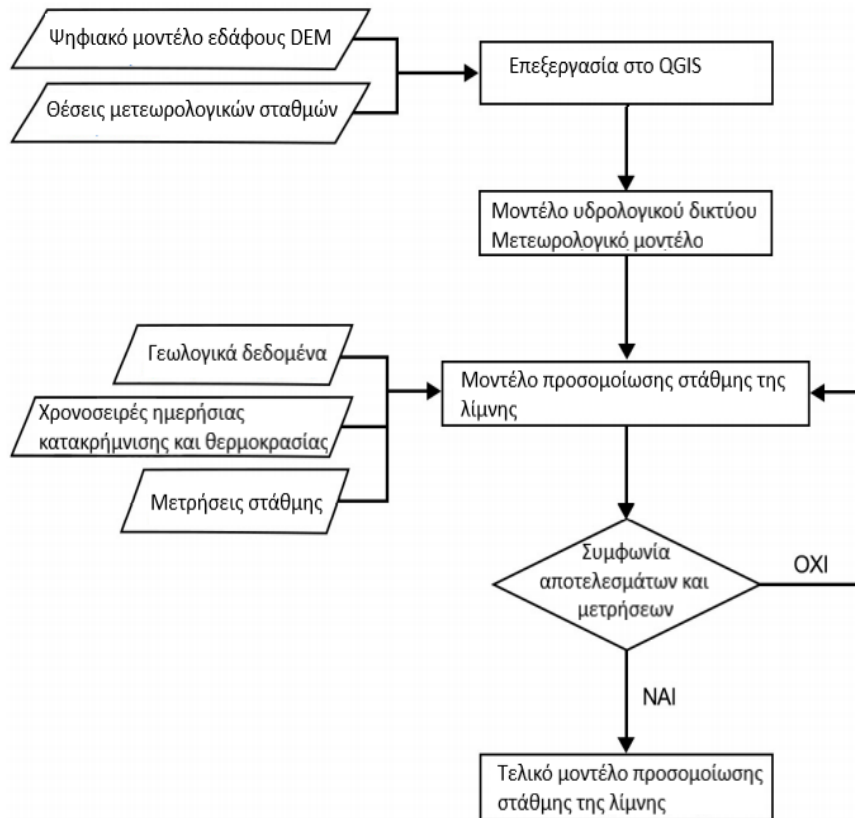
Κατά το πρώτο βήμα χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό QGIS στο οποίο εισήχθησαν το ψηφιακό ανάγλυφο εδάφους (DEM) , σε δυο κομμάτια τα οποία μέσω της κατάλληλης εντολής ενοποιήθηκαν, και οι θέσεις των επιλεγμένων μετεωρολογικών σταθμών για την δημιουργία του μετεωρολογικού μοντέλου. Το ψηφιακό μοντέλο του εδάφους υπέστη την κατάλληλη επεξεργασία ώστε να δημιουργηθεί η λεκάνη απορροής της λίμνης.

Στη προσομοίωση της λεκάνης απορροής απεικονίζονται το σύνολο των στοιχείων καθιστούν οι υπολεκάνες, τα υδατορεύματα, οι κόμβοι τα σημεία εξόδου καθώς και ένα σύνολο χαρακτηριστικών δεδομένων που κρίνονται απαραίτητα για την δημιουργία της τελικής προσομοίωσης όπως η έκταση και η μέση κλίση κάθε υπολεκάνης, τα μήκη, οι θέσεις, οι μέσες κλίσεις των υδατορευμάτων και η μέγιστη διαδρομή απορροής εντός της κάθε υπολεκάνης.

Για την δημιουργία του μετεωρολογικού μοντέλου επιλέχθηκε η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen με την βοήθεια των οποίων υπολογίσθηκαν τα ποσοστά επιρροής κάθε σταθμού στις υπολεκάνες. Έπειτα τα ποσοστά επιρροής χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της μέσης κατακρήμνισης κάθε υπολεκάνης.

Στο επόμενο βήμα υπολογίσθηκαν οι απαραίτητοι υδρολογικοί συντελεστές με την βοήθεια των γεωμετρικών και τοπογραφικών δεδομένων ώστε να προσομοιωθούν οι διαδικασίες των κατακρημνίσεων, των απωλειών και της απορροής μέσα στην λεκάνη.

Τέλος το μετεωρολογικό μοντέλο, το μοντέλο της λεκάνης απορροής, οι υδρολογικοί συντελεστές και τα βροχομετρικά δεδομένα σε μορφή χρονοσειρών εισήχθησαν στο πρόγραμμα υδρολογικής προσομοίωσης Hec-HMS. Έπειτα το λογισμικό μπορεί να παράγει τελικά αποτελέσματα τα οποία θα αξιολογηθούν και θα συγκριθούν με τις πραγματικές μετρήσεις.



Διάγραμμα 9: Διαγραμματική περιγραφή της μεθοδολογίας.

5 Κατασκευή μοντέλου της λεκάνης απορροής

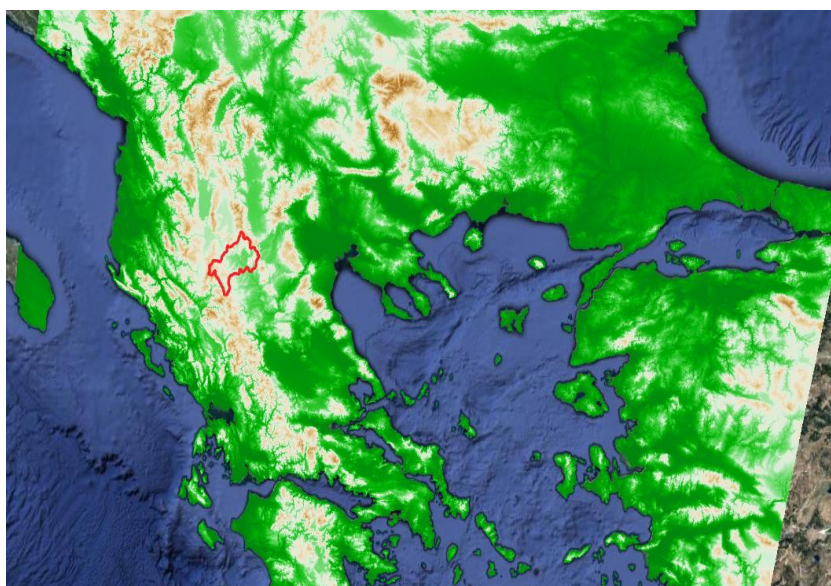
5.1 Προεπεξεργασία

Στο στάδιο της προεπεξεργασίας του εδάφους με την χρήση του προγράμματος QGIS θα απομονωθεί η λεκάνη απορροής της λίμνης, θα διαχωριστούν οι υπολεκάνες της, θα χαραχθεί το υδρογραφικό δίκτυο και θα δημιουργηθεί το μετεωρολογικό μοντέλο. Για την παραπάνω επεξεργασία απαιτείται ένα σύνολο εντολών που θα αναλυθούν παρακάτω, οι οποίες είναι οι εξής:

- Συγχώνευση ψηφιακού εδάφους (merge)
- Clip Raster by Extent
- Rasterize
- Χάραξη του δικτύου των ποταμών στο ψηφιακό έδαφος (Burn stream network into DEM)
- Ανύψωση κοιλοτήτων (Fill Sinks)

Συγχώνευση Merge

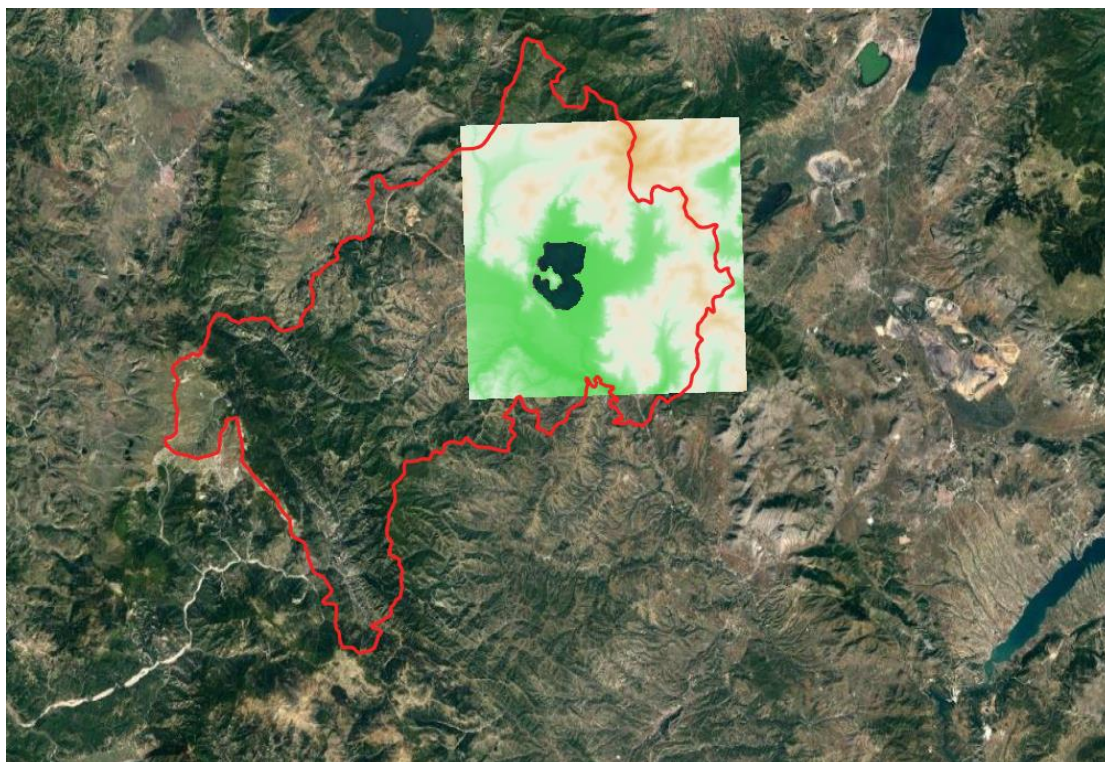
Η εντολή αυτή συγχωνεύει τα τμήματα του ψηφιακού μοντέλου ανάγλυφου (DEM) σε ένα ώστε να επιτυγχάνεται η επεξεργασία του μοντέλου σε όλη την περιοχή μελέτης. Το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Copernicus παρέχει στους χρήστες το ψηφιακό μοντέλο ανάγλυφου (DEM) σε τμήματα. Εδώ επιλέχθηκαν τα τμήματα EU_DEM_v11_E50N20 όπου περιλαμβάνει τα Βαλκάνια και ένα μέρος της βόρειας Ελλάδας και το EU_DEM_v11_E50N10 που περιλαμβάνει την υπόλοιπη Ελλάδα και την δυτική Τουρκία.



Εικόνα 14: Βήμα προεπεξεργασίας εδαφικού ανάγλυφου *Merge*.

Clip Raster by Extent

Όπως φαίνεται στον παραπάνω χάρτη το ψηφιακό μοντέλο του εδάφους υπερκαλύπτει την περιοχή μελέτης και για αυτό είναι απαραίτητο, αυτό να περικοπεί γύρω από τα όρια αυτής. Στη φόρμα του εργαλείου Clip raster by extent στο πεδίο Input layer επιλέγεται το επίπεδο raster που περιέχει το ψηφιακό μοντέλο του εδάφους και στο πεδίο Clipping extent σχεδιάζονται τα όρια της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 15: Βήμα προεπεξεργασίας εδαφικού ανάγλυφου *Clip Raster by Extent*.

Rasterize

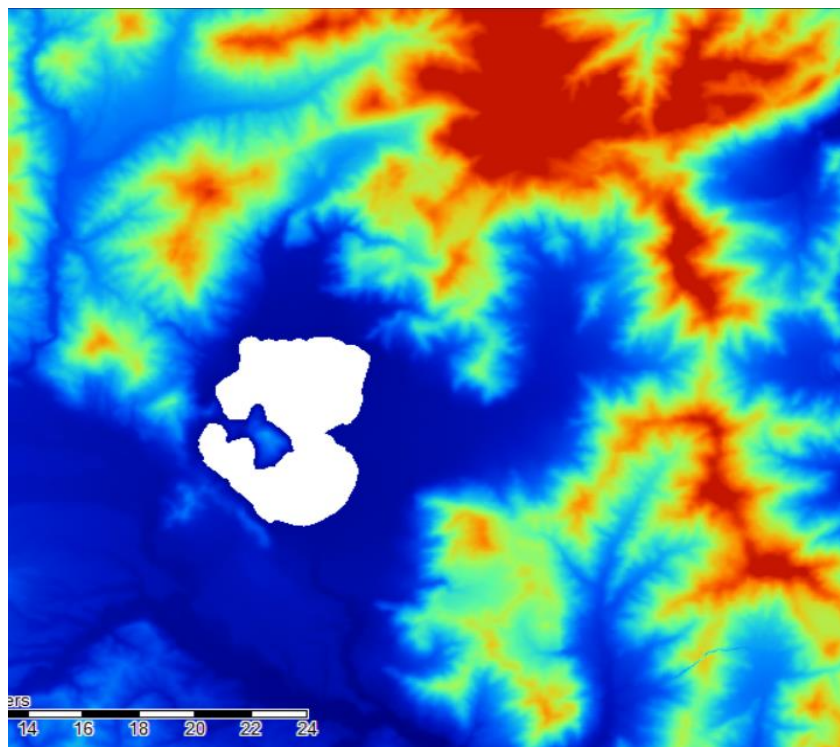
Η εντολή αυτή μετατρέπει επιλεγμένα χαρακτηριστικά σε αρχείο τύπου raster. Για την παρούσα μελέτη μετατρέπει το διανυσματικό επίπεδο των ποταμών σε αρχείο τύπου raster.

Το υδρογραφικό δίκτυο των ποταμών που υπάρχουν εντός των ορίων του ψηφιακού μοντέλου του εδάφους θα πρέπει να «χαραχθεί» πάνω στο ψηφιακό μοντέλο του εδάφους έτσι ώστε στη συνέχεια το QGIS να μπορέσει να ολοκληρώσει επιτυχώς την οριοθέτηση της λεκάνης απορροής. Η διαδικασία «χάραξης» του υδρογραφικού δικτύου των ποταμών στο ψηφιακό μοντέλο του εδάφους ξεκινά με την επιλογή των ποταμών οι οποίοι με την εντολή rasterize μετατρέπονται σε αρχείο τύπου raster.

Σε αυτό το σημείο αν και όλοι οι αλγόριθμοι του Saga GIS είναι διαθέσιμοι μέσα από το περιβάλλον του QGIS είναι προτιμότερο η διαδικασία να συνεχιστεί εντός του περιβάλλοντος του Saga GIS, καθώς για κάποιους λόγους που οφείλονται σε προγραμματιστικά σφάλματα (Bugs) αρκετές φορές το QGIS δεν είναι σε θέση να ολοκληρώσει σωστά τις διαδικασίες.

Burn stream network into DEM

Στη φόρμα του εργαλείου Burn Stream Network into DEM ορίζεται το ψηφιακό μοντέλο του εδάφους στο πεδίο DEM, το επίπεδο raster του δικτύου των ποταμών στο πεδίο Streams, ενώ στο πεδίο Processed DEM ορίζεται η επιλογή Create για να δημιουργηθεί ένα νέο επίπεδο που θα βασίζεται στο ψηφιακό μοντέλο του εδάφους και θα έχει χαραχθεί σε αυτό το δίκτυο των ποταμών. Τέλος στις επιλογές του εργαλείου ορίζεται η μέθοδος lower cell's value to neighbors minimum value minus epsilon με βάση την οποία θα δημιουργηθεί το νέο αρχείο και τιμή του συντελεστή epsilon. Έτσι δημιουργείται ένα νέο επίπεδο [Burned Streams].

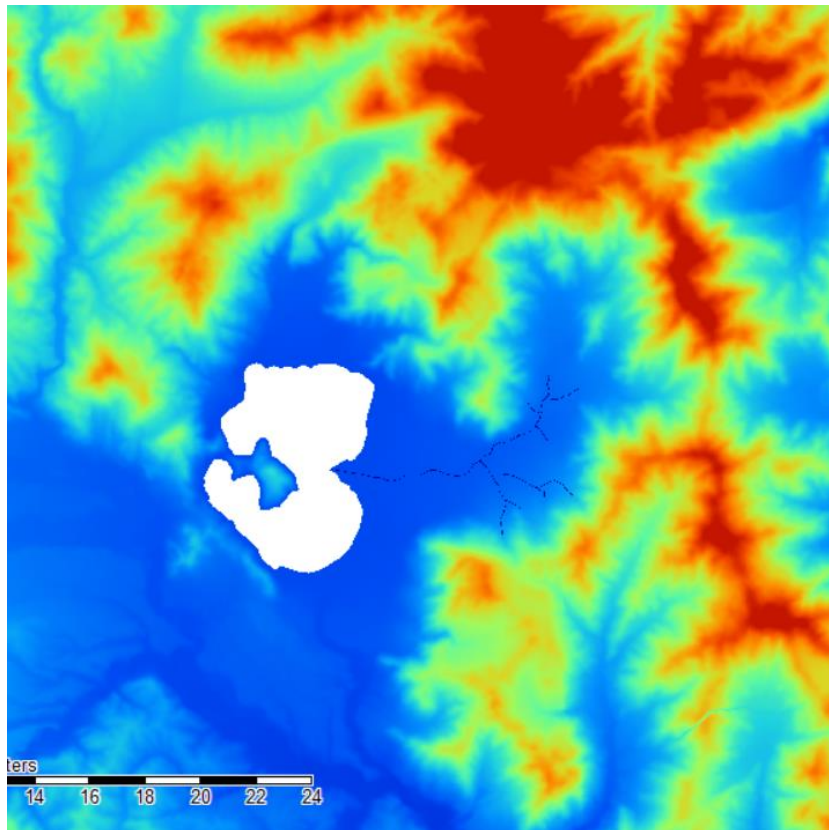


Εικόνα 16: Βήμα προεπεξεργασίας εδαφικού ανάγλυφου **Burn stream network into DEM**.

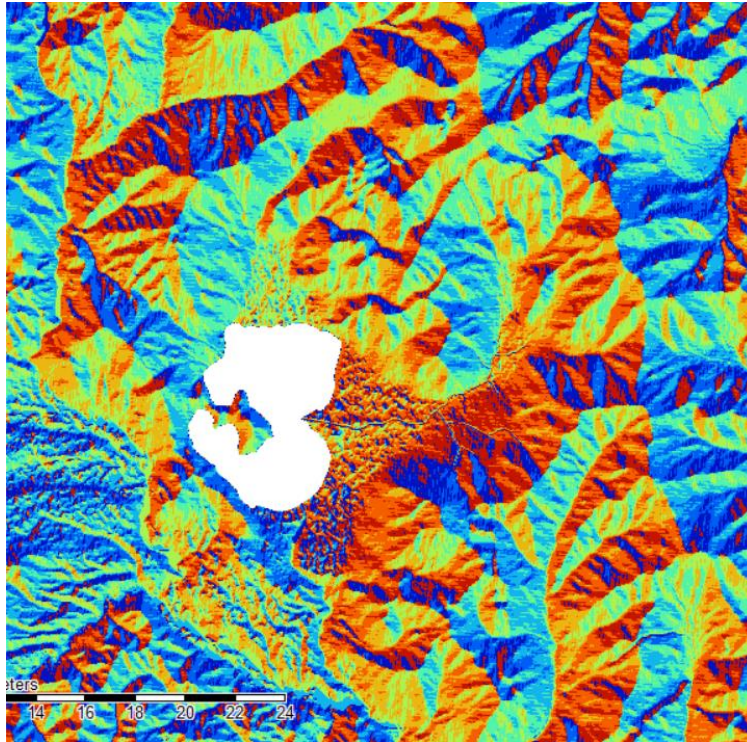
Ανύψωση κοιλοτήτων (Fill Sinks)

Το ψηφιακό μοντέλο ανάγλυφου (DEM) λειτουργεί με την χρήση κελιών, έτσι χωρίζεται σε έναν συγκεκριμένο αριθμό κελιών ίδιου μεγέθους. Το μοντέλο εδάφους είναι πιθανό σε διάφορα σημεία να παρουσιάζει κοιλοότητες (sinks) περιοχές όπου η τιμή υψομέτρου του κεντρικού κελιού να είναι μικρότερη από τα

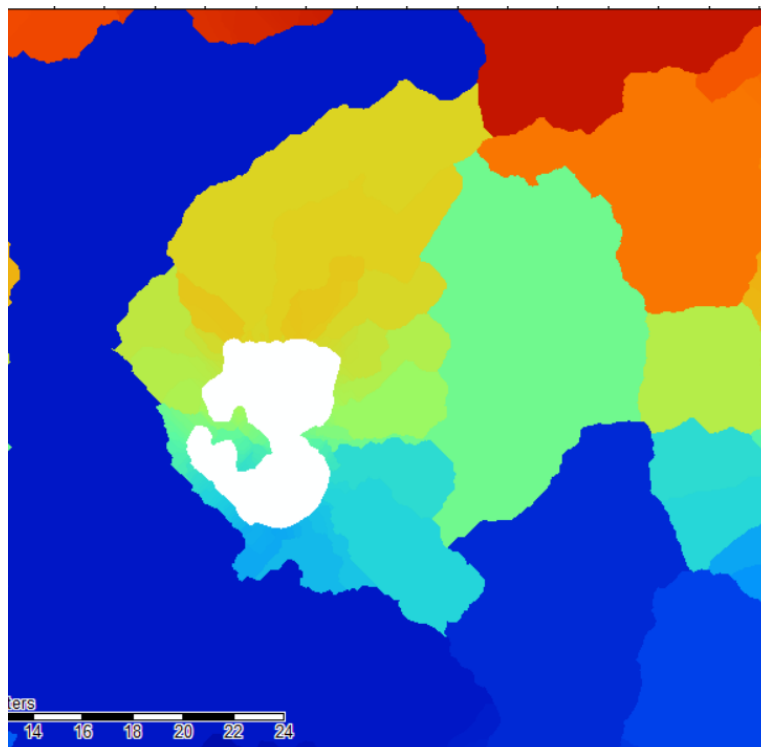
υψόμετρα των γειτονικών κελιών. Σε αυτή την περίπτωση το νερό εγκλωβίζεται διακόπτεται η ροή με αποτέλεσμα να δημιουργείται σφάλμα στην προσομοίωση. Την λύση στο πρόβλημα την δίνει η εντολή fill sinks όπου ανυψώνει την στάθμη των κεντρικών κελιών των κοιλοτήτων ώστε να αποκτήσει την ίδια τιμή υψομέτρου με τα γειτονικά του κελιά. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να συμπληρωθεί το κενό για να επιτραπεί στο νερό να ρεύσει κατά μήκος του εδαφικού ανάγλυφου. Από την εφαρμογή του εργαλείου Fill Sinks (Wang & Liu) δημιουργήθηκαν τρία νέα επίπεδα. Το ψηφιακό μοντέλο του εδάφους [Burned Streams] [no sinks], το επίπεδο της διεύθυνσης της επιφανειακής απορροής Flow Directions και το επίπεδο των λεκανών απορροής Watershed Basins.



Εικόνα 17: Βήμα προεπεξεργασίας εδαφικού ανάγλυφου *Fill Sinks*.



Εικόνα 18: Βήμα προεπεξεργασίας εδαφικού ανάγλυφου **Flow Directions**.

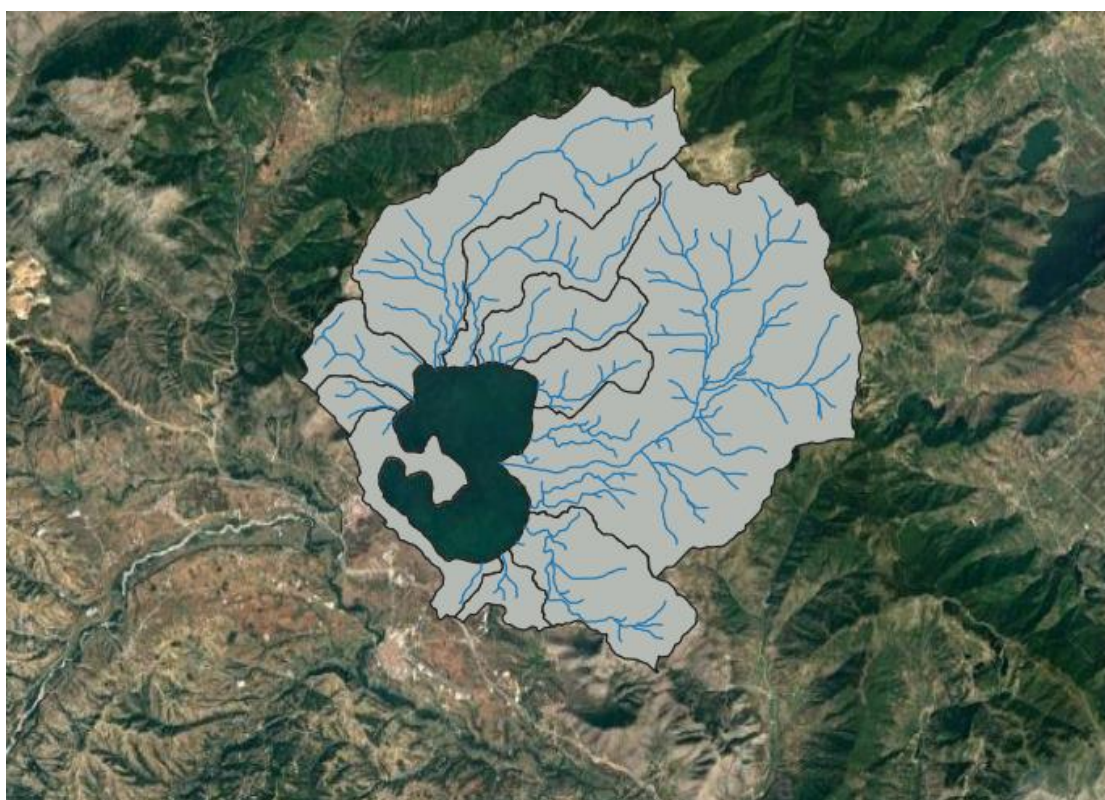


Εικόνα 19: Βήμα προεπεξεργασίας εδαφικού ανάγλυφου **Watershed Basins**.

5.2 Εξαγωγή-Επεξεργασία λεκάνης απορροής

Σε αυτό το στάδιο δημιουργούνται τα απαραίτητα αρχεία που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο της λεκάνης απορροής, που αργότερα θα εισαχθεί στο λογισμικό Hec-HMS.

Χρησιμοποιώντας την εντολή Channel Network and Drainage Basins δημιουργούνται δύο διανυσματικά επίπεδα, ένα που περιλαμβάνει τα πολύγωνα των υπολεκανών και ένα που περιέχει το υδρογραφικό δίκτυο. Στη φόρμα του εργαλείου στο πεδίο Elevation επιλέγεται το ψηφιακό μοντέλο του εδάφους και ορίζεται το όριο της κλάσης των υδατορευμάτων που θα δημιουργηθούν στο πεδίο Threshold. Κατασκευάζονται οι πίνακες ιδιοτήτων των δύο αρχείων ώστε να περιέχουν δεδομένα που αντιστοιχούν στα φυσικά χαρακτηριστικά των υπολεκανών και των υδατορευμάτων, όπως η έκταση, το μήκος και άλλες παράμετροι που θα υπολογιστούν σε επόμενο στάδιο.



Εικόνα 20: Εξαγωγή λεκάνης απορροής λίμνης Καστοριάς

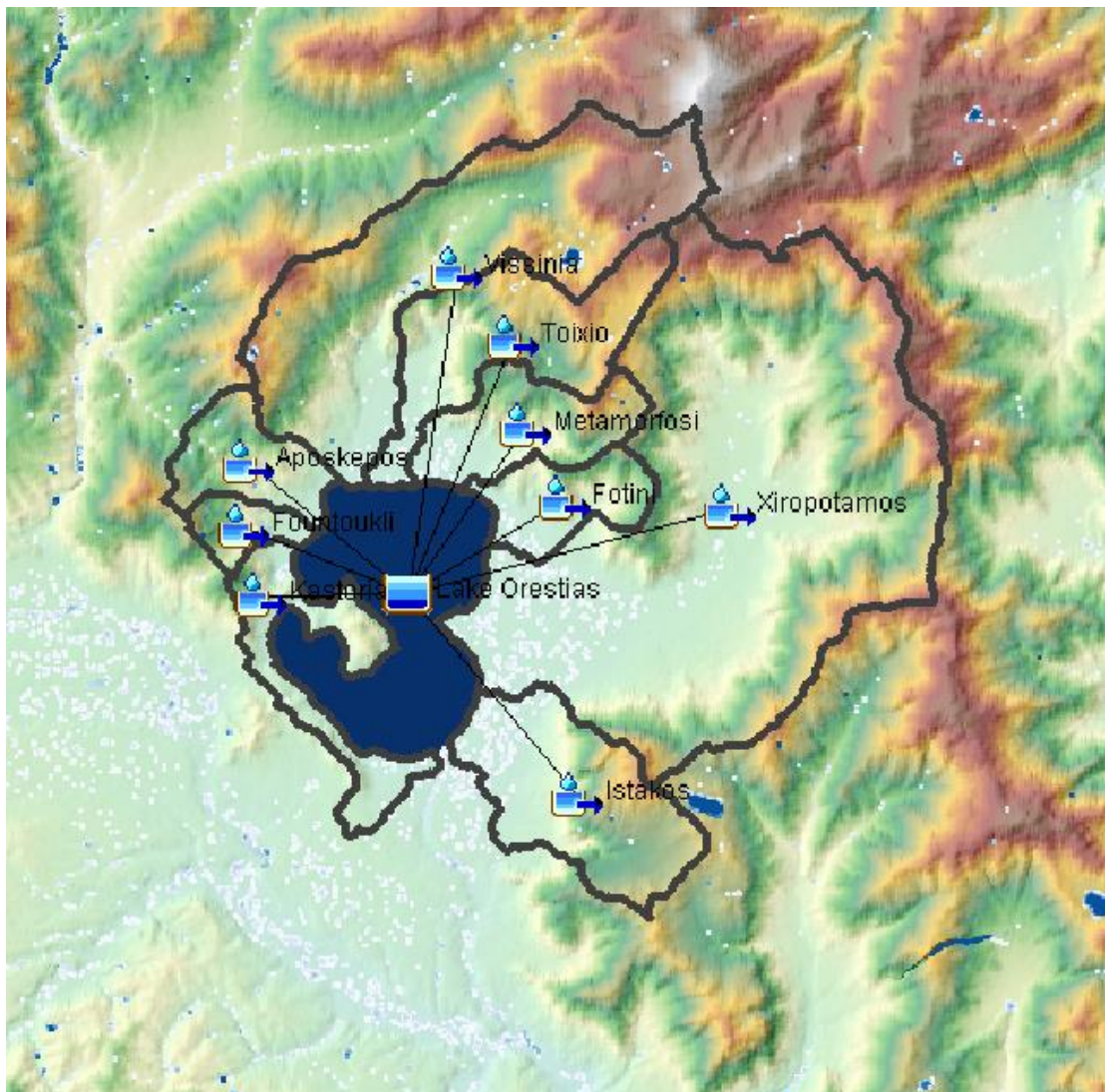
5.3 Χαρακτηριστικά υδατορευμάτων και υπολεκανών

Το saga QGIS υπολογίζει διάφορα φυσικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά των υδατορευμάτων και των υπολεκανών, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των υδρογραφικών παραμέτρων. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι:

- Μήκος υδατορεύματος (m)
- Κλίση υδατορεύματος
- Μέση κλίση υπολεκάνης
- Μέγιστη διαδρομή απορροής (m)

5.4 Δημιουργία μοντέλου λεκάνης απορροής

Σε αυτό το στάδιο δημιουργείται η σχηματική απεικόνιση όλων των στοιχείων του υδρολογικού δικτύου και οι μεταξύ τους συνδέσεις. Δημιουργείται ένα επίπεδο που συμβολίζει την συνδεσιμότητα των υπολεκανών με την λίμνη χρησιμοποιώντας το εργαλείο subbasin για τις υπολεκάνες και το εργαλείο reservoir για την λίμνη του προγράμματος hec-HMS.

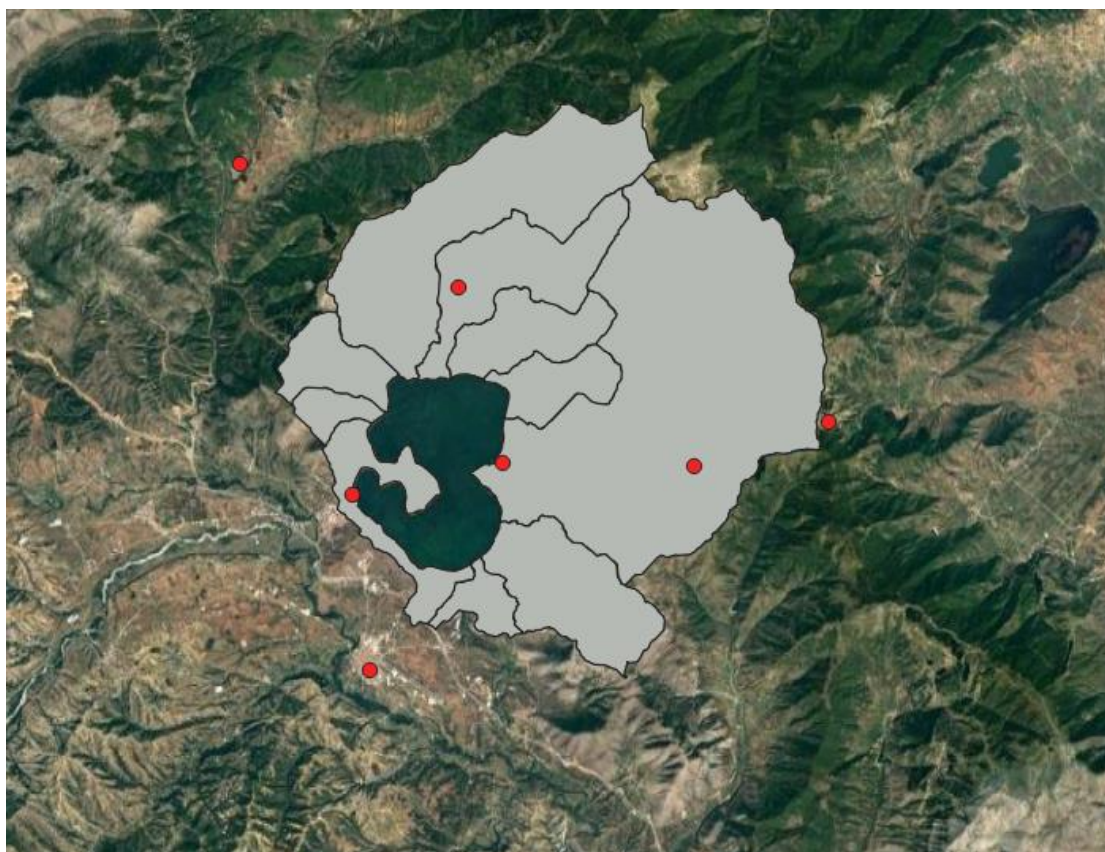


Εικόνα 21: σχηματική απεικόνιση του υδρολογικού μοντέλου.

5.5 Δημιουργία μετεωρολογικού μοντέλου

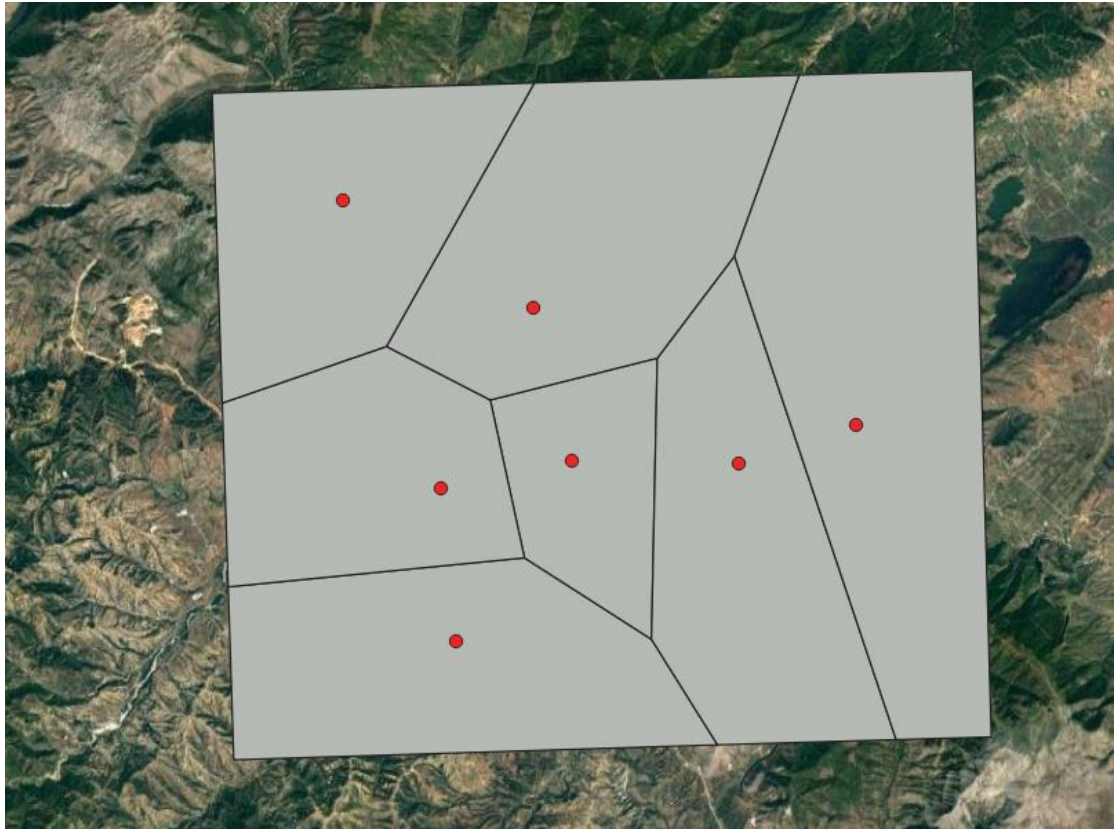
Το μετεωρολογικό μοντέλο κατασκευάζεται με την μέθοδο των βαρών βροχομετρικών σταθμών (Gage Weights) που απαιτεί την δημιουργία των πολυγώνων Thiessen βάσει του βροχομετρικού δικτύου. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιλέχθηκε λόγω της απλότητας στην χρήση της και της σχετικής αποτελεσματικότητας της στην αναγωγή των διαθέσιμων βροχομετρικών δεδομένων σε μια περιοχή.

Για την δημιουργία των πολυγώνων Thiessen αρχικά εισάγονται οι θέσεις των βροχομετρικών σταθμών μέσω υπολογιστικών φύλλων excel που περιέχουν τις συντεταγμένες του κάθε βροχομετρικού σταθμού μέσω της εντολής Add Delimited Text Layer.



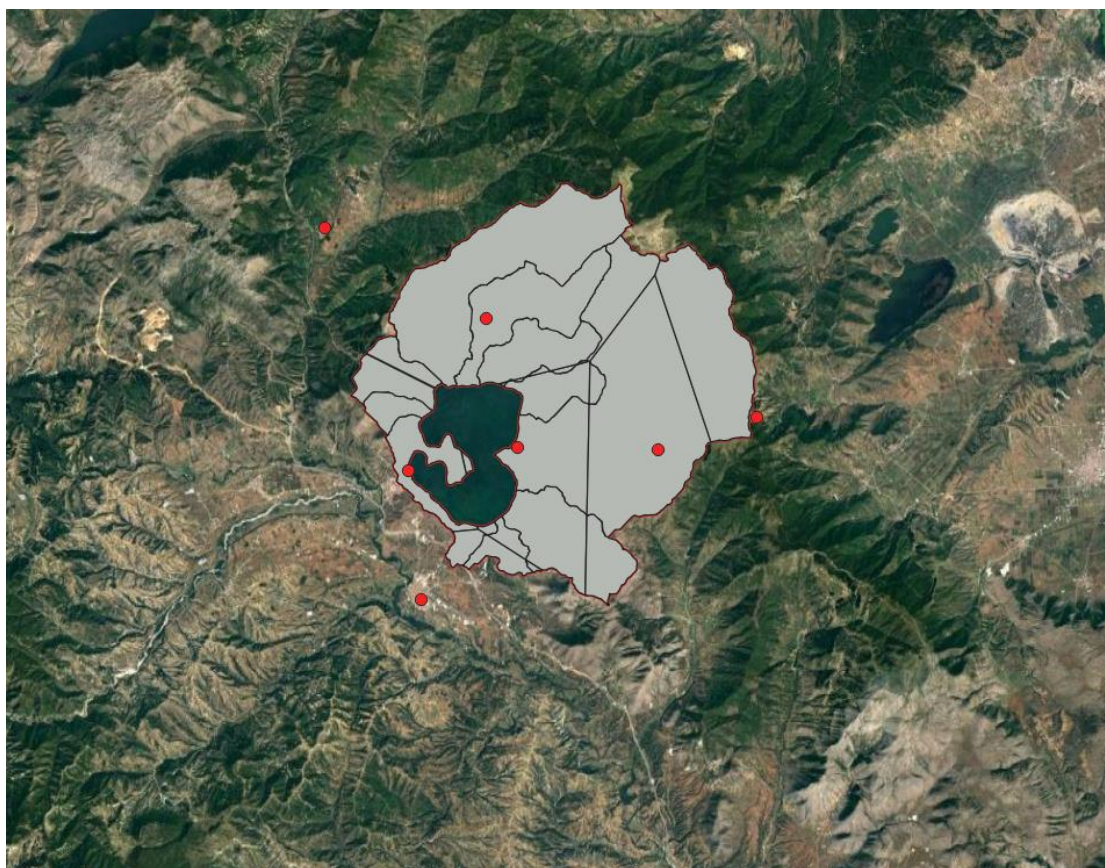
Εικόνα 22: Βήματα δημιουργίας του μετεωρολογικού μοντέλου. Θέσεις βροχομετρικών σταθμών.

Έπειτα με την εντολή Voronoi polygons δημιουργούνται τα πολύγωνα Thiessen γύρω από τις θέσεις των βροχομετρικών σταθμών. Έτσι καταλήγουμε σε ένα αρχείο πολυγώνων shapefiles.



Εικόνα 23: Βήματα δημιουργίας του μετεωρολογικού μοντέλου. Πολύγωνα Thiessen.

Στη συνέχεια πραγματοποιούμε μία τομή στα πολύγωνα στο επίπεδο των υπολεκανών απορροής και υπολογίζουμε το ποσοστό που καλύπτει κάθε πολύγωνο σε κάθε υπολεκάνη το οποίο ισοδυναμεί με το βάρος επιρροής του κάθε σταθμού στη υπολεκάνη. Τα βάρη επιρροής των σταθμών εισάγονται και χρησιμοποιούνται από το λογισμικό Hec-HMS, για τον υπολογισμό της μέσης κατακρήμνισης κάθε υπολεκάνης.



Εικόνα 24: Βήματα δημιουργίας του μετεωρολογικού μοντέλου. Τομή επιπέδου υπολεκανών και πολυγώνων Thiessen.

6 Προσομοίωση της λειτουργίας της λεκάνης απορροής

6.1 Οργάνωση της προσομοίωσης στο υπολογιστικό περιβάλλον

Όλα τα απαραίτητα δεδομένα και οι ρυθμίσεις που απαιτούνται για να διενεργηθεί η προσομοίωση της απορροής στο Hec-HMS, είναι οργανωμένα σε βασικές ενότητες όπως παρουσιάζονται παρακάτω.

Μοντέλο λεκάνης απορροής

Όλα τα υδρολογικά στοιχεία απεικονίζονται με διακριτά σύμβολα, διατεταγμένα σε ένα δίκτυο δενδρικής μορφής που χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την διαδικασία της απορροής. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από τις υπολεκάνες, τα υδατορεύματα, τους ταμιευτήρες, τις εκτροπές και τις πηγές, όπου υπάρχουν. Οι υπολογισμοί ξεκινούν από τα ανάντη και εξελίσσονται προς τα κατόντη και το σημείο εξόδου.

Η σχηματική αναπαράσταση της λεκάνης, αποτελεί το υπόβαθρο πάνω στο οποίο θα προσομοιωθεί η φυσική της λειτουργία. Αυτό, γίνεται με την επιλογή των μεθόδων προσομοίωσης, καθεμιά από τις οποίες αναπαριστά και μια φυσική διεργασία. Οι μέθοδοι του μοντέλου της λεκάνης απορροής παρουσιάζονται αναλυτικότερα παρακάτω.

Μετεωρολογικό μοντέλο

Το μετεωρολογικό μοντέλο είναι υπεύθυνο για την οργάνωση των κλιματικών δεδομένων που δρουν κατά την εκτέλεση μιας προσομοίωσης. Η επιλογή της μεθόδου με την οποία θα αξιοποιηθούν κατά την προσομοίωση, περιλαμβάνεται στο μετεωρολογικό μοντέλο.

Τρία μετεωρολογικά φαινόμενα μπορούν να συμπεριληφθούν στην προσομοίωση:

- Η βροχόπτωση
- Το λιώσιμο του χιονιού
- Η εξατμισοδιαπνοή που επηρεάζεται από την θερμοκρασία.

Χρονοσειρές δεδομένων

Οι τιμές των μετεωρολογικών δεδομένων εισάγονται σε μορφή χρονοσειρών για κάθε σταθμό. Για τις χρονοσειρές της κατακρήμνισης απαιτείται ο ορισμός της μορφής της χρονοσειράς, δηλαδή η διάρκεια, το βήμα και το σύστημα μονάδων μέτρησης.

Αντίστοιχα, οι μετρήσεις των υδρομετρικών μεγεθών για τα οποία υπάρχουν καταγεγραμμένες τιμές εισάγονται επίσης σε μορφή χρονοσειράς. Η χρονοσειρά επικολλάται στο στοιχείο του υδρολογικού δικτύου το οποίο αναπαριστά καλύτερα τη θέση των μετρήσεων.

Προδιαγραφές ελέγχου

Για να εκτελεστεί μια προσομοίωση είναι απαραίτητο να συνδυαστούν το μοντέλο της λεκάνης απορροής και το μετεωρολογικό μοντέλο. Ως προδιαγραφές ελέγχου ορίζονται η χρονική διάρκεια και το βήμα της προσομοίωσης.

Αποτελέσματα

Τα παραγόμενα αποτελέσματα μπορούν να εμφανιστούν είτε σε μορφή πινάκων είτε διαγραμμάτων για όλα τα υδρολογικά στοιχεία, σύμφωνα με το βήμα που έχει ορισθεί. Αφορούν υδρολογικά μεγέθη τα σημαντικότερα εκ των οποίων είναι :

Για τις υπολεκάνες :

- Η ποσότητα κατακρήμνισης που αναχαιτίσθηκε και διηθήθηκε (mm)
- Το πλεόνασμα της κατακρήμνισης που απορρέει κάθε στιγμή (mm)
- Η παροχή στο σημείο εξόδου (m^3/s)
- Η ημερομηνία που παρατηρήθηκε η μέγιστη παροχή,

Για τους ταμιευτήρες :

- Υψόμετρο στάθμης (m)
- Χωρητικότητα (m^3)
- Παροχή εξόδου (m^3/s)
- Η ημερομηνία που παρατηρήθηκαν οι μέγιστες τιμές για τα παραπάνω μεγέθη.

6.2 Μοντέλο λεκάνης απορροής

6.2.1 Συστατικά του μοντέλου της λεκάνης απορροής

Στοιχεία υδρολογικού δικτύου

Στο στάδιο της προεπεξεργασίας του εδαφικού ανάγλυφου η λεκάνη απορροής χωρίστηκε σε υπολεκάνες και χαράχθηκε το υδρογραφικό δίκτυο που περιλαμβάνει την συνδεσιμότητα μεταξύ υπολεκανών.

Κάθε στοιχείο υπολεκάνης, εννοιολογικά αναπαριστά των σύνολο των επιφανειακών και υπόγειων διαδικασιών που αλληλεπιδρούν κατά την διάρκεια της βροχόπτωσης και της απορροής. Η μοναδική εισροή που δέχεται η υπολεκάνη είναι η κατακρήμνιση και περιλαμβάνουν μια μοναδική εκροή.

Τα στοιχεία του ταμιευτήρα αναπαριστά την λειτουργία της λίμνης. Τα στοιχεία του ταμιευτήρα δέχονται εισροές που προέρχονται από τις ανάντη υπολεκάνες και υδατορεύματα και περιλαμβάνουν μία μοναδική εκροή.

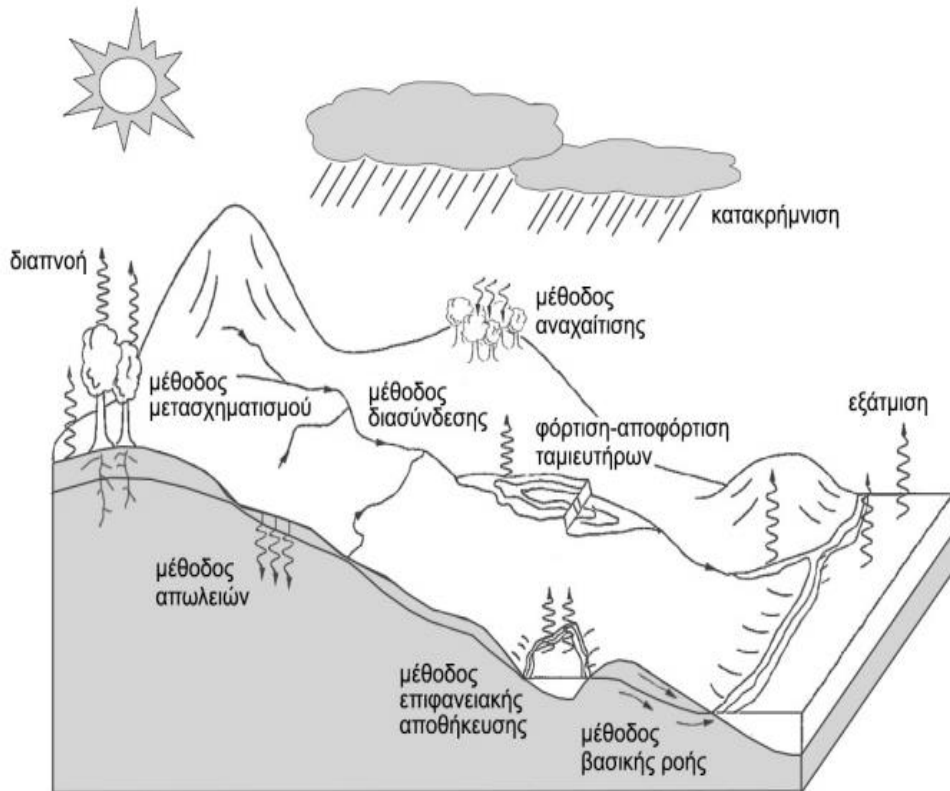
Με την εισαγωγή του μοντέλου της λεκάνης απορροής (basin model) στο Hec-HMS αποθηκεύονται για κάθε υδρολογικό στοιχείο, τα στοιχεία που βρίσκονται ακριβώς ανάντη και ακριβώς κατόντη αυτού, ενώ για τις υπολεκάνες μεταφέρεται στην καρτέλα ιδιοτήτων τους η έκταση σε τετραγωνικά χιλιόμετρα, όπως υπολογίστηκε στο QGIS.

Μέθοδοι προσομοίωσης

Το Hec-HMS χρησιμοποιεί ένα σύνολο γνωστών υδρολογικών μεθόδων για να διενεργήσει την υδρολογική προσομοίωση. Ο χρήστης πρέπει να εκτιμήσει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις παραμέτρους που στο σύνολό τους προσομοιώνουν το περιβάλλον μέσα στο οποίο συμβαίνει μια απορροή. Στο σχήμα παρουσιάζονται οι φυσικές διεργασίες που περιλαμβάνονται στο Hec-HMS σε μορφή μαθηματικών μοντέλων (μεθόδων).

Αυτές είναι:

- Αναχαίτιση της κατακρήμνισης λόγω φυτοκάλυψης εντός κάθε υπολεκάνης,
- Κατακράτηση σε κοιλάτητες στην επιφάνεια του εδάφους,
- Απώλειες λόγω διήθησης εντός κάθε υπολεκάνης,
- Μετασχηματισμός του πλεονάσματος της κατακρήμνισης σε σημειακή απορροή στην έξοδο κάθε υπολεκάνης,
- Συνεισφορά της βασικής ροής κάθε υπολεκάνης στην απορροή,
- Διόδευση της απορροής μέσω των υδατορευμάτων,
- Κατακράτηση και υπερχείλιση του νερού από ταμιευτήρες.



Εικόνα 25: Μέθοδοι προσομοίωσης φυσικών διεργασιών στο Hec-HMS.

Η τελική ποσότητα που απορρέει στο σημείο εξόδου μιας υπολεκάνης προκύπτει ως εξής :

$$\text{Κατακρήμιση} \left[\begin{array}{l} = \{ - \text{Ποσότητα που κατακρατείται στα φυτά} \\ - \text{Ποσότητα που διηθείται στο έδαφος} \\ - \text{Ποσότητα που εγκλωβίζεται στην επιφάνεια} \\ + \text{Βασική ροή} \\ - \text{Ποσότητα που αποθηκεύεται σε ταμιευτήρες} \} \end{array} \right] = \text{Τελική απορροή}$$

6.2.2 Μέθοδος αναχαίτισης λόγω φυτοκάλυψης

Η μέθοδος αναχαίτισης (canopy method) αναπαριστά τον τρόπο που επηρεάζουν τα φυλλώματα των δένδρων και των φυτών που καλύπτουν την λεκάνη απορροής τη προσομοίωση της στάθμης της λίμνης. Τα φυλλώματα των φυτών κατακρατούν ένα μέρος της κατακρήμισης εμποδίζοντας την να καταλήξει στο έδαφος. Η ποσότητα που αναχαίτζεται από τα φυλλώματα εξατμίζεται κατά την διάρκεια της ξηράς περιόδου. Η επιλογή μίας μεθόδου κατακράτησης θα βοηθήσει στην επίτευξη των βέλτιστων αποτελεσμάτων της μελέτης. Οι τρεις μέθοδοι κατακράτησης που είναι διαθέσιμες απαιτούν την εκτίμηση τριών κοινών παραμέτρων, που είναι οι εξής:

- Η αρχική ποσότητα (Initial Storage) νερού που κατακρατείται από το φύλλωμα των φυτών κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης ως προς το ποσοστό της μέγιστης κατακράτησης.
- Η ικανότητα κατακράτησης ή μέγιστη κατακράτηση (Max Storage) που εισάγεται ως ένα σταθερό βάθος και αναπαριστά την μέγιστη ποσότητα που μπορεί να συγκρατήσουν τα φυλλώματα των φυτών. Στη περίπτωση που αυτό το βάθος καλυφθεί τότε το νερό θα αρχίσει να ρέει στο έδαφος. Σε περιόδους έλλειψης βροχοπτώσεων, η ικανότητα αναχαίτισης του φυλλώματος αναπληρώνεται μέχρι την έλευση νέου επεισοδίου βροχόπτωσης.
- Ο αδιάστατος συντελεστής καλλιεργειών (Crop Coefficient) που εκφράζει την ποσότητα του νερού που θα προσροφηθεί από το έδαφος και κατά το φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής θα αποβληθεί μέσω του φυλλώματος. Η τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, πολλαπλασιάζεται με την τιμή του συντελεστή καλλιεργειών, και η επαυξημένη τιμή της, περιλαμβάνει πλέον και την απορρόφηση νερού από το υπέδαφος.

Οι διαθέσιμες μέθοδοι παρά της ομοιότητας στα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις στη μορφή των βασικών παραμέτρων που εισάγονται στους υπολογισμούς. Αναλυτικότερα, κατά την απλή μέθοδο (simple canopy) χρησιμοποιούνται σταθερές τιμές για τις παραμέτρους χωρίς την απαίτηση για εισαγωγή επιπρόσθετων δεδομένων. Η διακριτοποιημένη απλή μέθοδος (gridded simple canopy) είναι μία μορφή της απλής μεθόδου η οποία εφαρμόζεται σε ένα διακριτοποιημένο υπόβαθρο. Οι τιμές των παραμέτρων της μεθόδου είναι διαφορετικές για κάθε κελί και για την χρησιμοποίησή τους απαιτείται επιπλέον μελέτη.

Η δυναμική μέθοδο (dynamic canopy) τείνει περισσότερο στην πραγματικότητα διότι ο συντελεστής των καλλιεργειών μεταβάλλεται χρονικά αναπαριστώντας την μεταβλητότητα των φυτών ανάλογα με την εποχή. Για την ορθή χρήση της μεθόδου απαιτούνται ένα σύνολο αναλυτικών δεδομένων που περιγράφουν αυτή την μεταβολή, είτε σε μορφή καννάβου (GridSet), είτε με την χρήση χρονοσειρών καταγεγραμμένων τιμών σε συγκεκριμένα σημεία της υπολεκάνης (Time-Series Gage).

Στη παρούσα μελέτη η επιλογή της απλής μεθόδου αναχαίτισης κρίθηκε ως η πλέον κατάλληλη λόγω της ευκολίας που παρουσιάζει στην χρήση και στην προσαρμογή των τιμών των παραμέτρων αλλά και της έλλειψης διαθέσιμων δεδομένων για την εφαρμογή διαφορετικής μεθόδου.

Εκτίμηση παραμέτρων

Για την εκτίμηση της μέγιστης ικανότητας κατακράτησης αξιοποιήθηκαν οι χάρτες χρήσεων γης που παρέχει το πρόγραμμα Corine. Οι συγκεκριμένοι χάρτες χωρίζουν

την επιφάνεια της γης σε έξι κατηγορίες χρήσεων γης ανάλογα με το ποσοστό και το είδος της φυτοκάλυψης.

Πίνακας 6: Ποσοστά χρήσεων γης στις υπολεκάνες με βάση την φυτοκάλυψη.

Υπολεκάνη	Ποσοστά ανά κατηγορία γης(%)				
	Τεχνητές επιφάνειες	Καλλιέργειες	Μεικτά Δάση	Χαμηλή βλάστηση	Υδάτινα στοιχεία
ΙΣΤΑΚΟΣ	0,99	65,62	16,12	2,70	3,45
ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΣ	1,62	32,20	45,12	3,68	1,45
ΦΩΤΕΙΝΗ	1,39	45,18	33,40	3,42	5,72
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	0,42	52,62	34,31	1,75	1,01
ΤΟΙΧΙΟ	1,20	40,21	52,16	1,89	1,42
ΒΥΣΣΙΝΙΑ	0,25	37,22	52,53	3,15	0,42
ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	2,41	22,25	56,88	3,66	0,11
ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗ	14,69	20,41	44,71	1,66	1,12
ΚΑΣΤΟΡΙΑ	21,03	34,56	28,27	7,73	1,53

Έπειτα για τον υπολογισμό της μέγιστης ικανότητας κατακράτησης της κατακρήμνισης για κάθε κατηγορία χρήσεων γης αποδόθηκε μία ενιαία τιμή της ικανότητας κατακράτησης.

Πίνακας 7: Ικανότητα κατακράτησης των χρήσεων γης.

Χρήση γης	Ικανότητα κατακράτησης
Τεχνητές επιφάνειες	0,0
Καλλιέργειες	3,0
Κωνοφόρα Δάση	6,0
Μεικτά Δάση	4,0
Χαμηλή βλάστηση	2,0
Υδάτινα στοιχεία	0,0

Στη συνέχεια για κάθε υπολεκάνη υπολογίστηκαν τα ποσοστά των έξι κατηγοριών χρήσεων γης. Η ικανότητα κατακράτησης κάθε υπολεκάνης, προέκυψε ως η σταθμισμένη μέση τιμή των ικανοτήτων κατακράτησης κάθε χρήσης με την εφαρμογή της σχέσης 6.1 :

$$S_{maxi} = \sum_{n=1}^6 S_{maxn} * Wn, i \quad (6.1)$$

όπου :

S_{maxi} = Η μέση ικανότητα κατακράτησης της i υπολεκάνης (mm)

S_{maxn} = Η ικανότητα κατακράτησης που αντιστοιχεί στην n χρήση γης (mm)

Wn_i = Το ποσοστό της n χρήσης γης στην i υπολεκάνη (%)

Από την σχέση 6.1 προέκυψε η μέγιστη ικανότητα κατακράτησης για κάθε υπολεκάνη:

Πίνακας 8: Ικανότητας κατακράτησης (mm).

Υπολεκάνη	Ικανότητα κατακράτησης (mm)
ΙΣΤΑΚΟΣ	2.67
ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΣ	2.84
ΦΩΤΕΙΝΗ	2.75
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	2,99
ΤΟΙΧΙΟ	3.33
ΒΥΣΣΙΝΙΑ	3.28
ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	3.02
ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗ	2.43
ΚΑΣΤΟΡΙΑ	2.32

Όσον αναφορά την παράμετρο της ποσότητας που έχει ήδη αποθηκευτεί κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης, επιλέχθηκε ένα κοινό ποσοστό για όλη την λεκάνη απορροής. Επειδή η προσομοίωση ξεκινά τον μήνα Ιανουάριο το ποσοστό εκτιμήθηκε στο 50%.

Για τον συντελεστή καλλιεργειών σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής δόθηκε επίσης κοινή τιμή 1. Ως μέθοδος απορρόφησης, επιλέχθηκε η απλή μέθοδος λόγω απλότητας και συμβατότητας με την μέθοδο απωλειών που θα χρησιμοποιηθεί και θα αναλυθεί σε επόμενο στάδιο.

6.2.3 Μέθοδος απωλειών

Κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης ένα μέρος του όγκου του νερού εγκλωβίζεται σε τεχνητές ή φυσικές αδιαπέρατες κοιλότητες, ένα άλλο αναχαιτίζεται από το φύλλωμα των δένδρων και το εναπομένοντα νερό της βροχής που καταλήγει στο έδαφος είτε απορρέει επιφανειακά είτε διηθείται στο υπέδαφος.

Η μέθοδος των απωλειών υπολογίζει την ποσότητα του νερού που θα διηθηθεί στο υπέδαφος. Η πλεονάζουσα ποσότητα θα αποτελέσει τον όγκο που θα ρέει επιφανειακά προς τα κατόντη. Το σύνολο των διαθέσιμων μεθόδων απωλειών στηρίζεται στην βασική αρχή διατήρησης της μάζας, δηλαδή στο αξίωμα ότι κάθε στιγμή το άθροισμα της ποσότητας νερού που διηθήθηκε και της ποσότητας που απόρρευσε ισούται με το σύνολο του όγκου του νερού που κατέληξε στο έδαφος. Για τον υπολογισμό των απωλειών είναι διαθέσιμες έντεκα διαφορετικές μέθοδοι, οι οποίες είναι οι εξής:

- Μέθοδος ελλείμματος και σταθερού ρυθμού απωλειών (Deficit and Constant Loss)
- Μέθοδος εκθετικής μείωσης του ρυθμού απωλειών (Exponential Loss)
- Μέθοδος απωλειών Green και Ampt (Green And Ampt Loss)
- Διακριτοποιημένη μέθοδος ελλείμματος και σταθερού ρυθμού απωλειών (Gridded Deficit and Constant Loss)
- Διακριτοποιημένη μέθοδος απωλειών Green και Ampt (Gridded Green And Ampt Loss)
- Διακριτοποιημένη μέθοδος αριθμού καμπύλης SCS (Gridded SCS Curve Number Loss)
- Διακριτοποιημένη μέθοδος συνεχούς υπολογισμού της υγρασίας (Gridded Soil Moisture Accounting)
- Μέθοδος αρχικών και σταθερού ρυθμού απωλειών (Initial and Constant Loss)
- Μέθοδος αριθμού καμπύλης SCS (SCS Curve Number Loss)
- Μέθοδος Smith Parlange (Smith Parlange Loss)
- Μέθοδος συνεχούς υπολογισμού της υγρασίας (Soil Moisture Accounting)

Στην μέθοδο των αρχικών και σταθερού ρυθμού απωλειών καθορίζεται η ποσότητα του νερού που υπολείπεται για γεμίσει η ακόρεστη εδαφική στρώση και έπειτα να ξεκινήσει να ρέει το νερό επιφανειακά. Αρχικά μέχρι να καλυφθεί η μέγιστη χωρητικότητα η επιφανειακή απορροή είναι μηδαμινή και όλος ο όγκος του νερού διηθείται στο υπέδαφος. Στη συνέχεια το νερό εξολοκλήρου απορρέει επιφανειακά με σταθερό ρυθμό. Σε περιόδους που δεν εμφανίζεται βροχόπτωση η ικανότητα αποθήκευσης του εδάφους δεν αναπληρώνεται με αρνητική συνέπεια η συγκεκριμένη μέθοδος να μην κρίνεται αποτελεσματική για μακροχρόνια προσομοίωση.

Στην μέθοδο εκθετικής μείωσης του ρυθμού απωλειών ο ρυθμός κορεσμού του εδάφους εκφράζεται από το άθροισμα της ποσότητας που κατεισδύει και αναπαριστάται από μία λογαριθμική συνάρτηση. Αρχικά η διήθηση εξελίσσεται με αυξανόμενο ρυθμό μέχρι την στιγμή που το άθροισμα των απωλειών εξισωθεί με μια οριακή τιμή η οποία εξαρτάται από την εδαφική υγρασία και την ένταση της βροχόπτωσης. Έπειτα ο συντελεστής απωλειών μειώνεται εκθετικά. Για την ορθή χρήση της μεθόδου απαιτείται η εισαγωγή των κατάλληλων συντελεστών που περιγράφουν την καμπύλη και των τιμών της διηθημένης ποσότητας νερού για τις οποίες αυτή αλλάζει κλίση.

Η μέθοδος αριθμού καμπύλης SCS είναι μία απλή μέθοδος που κύριο χαρακτηριστικό της είναι ο αριθμός CN. Ο αριθμός CN εκφράζει το ποσοστό της κατακρήμνισης που θα απορρεύσει, συναρτήσει του τύπου του εδάφους και της χρήσης γης και είναι μοναδικός για κάθε υπολεκάνη. Όπως και σε άλλες μεθόδους ορίζεται το ποσό του νερού που θα διηθηθεί μέχρι να ξεκινήσει η επιφανειακή απορροή. Με το πέρας της

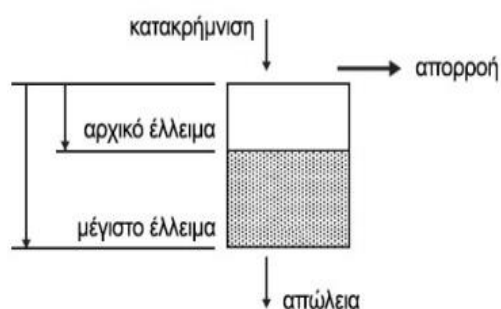
βροχόπτωσης το έδαφος συντηρεί τον βαθμό κορεσμού του γεγονός που καταστεί τη μέθοδο αριθμού καμπύλης SCS μη αποτελεσματική για μακροχρόνιες προσομοιώσεις.

Η μέθοδος συνεχούς υπολογισμού της υγρασίας χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την μέθοδο αναχαίτισης, και την μέθοδο επιφανείας. Η συγκεκριμένη μέθοδος προσομοιώνει την διήθηση του νερού στο έδαφος χρησιμοποιώντας ένα σύστημα τριών επίπεδων, την χωρητικότητα του στρώματος του εδάφους σε νερό, τα ανώτερα στρώματα υπόγειων υδάτων και τα κατώτερα στρώματα. Τα στρώματα του εδάφους χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν τη ροή του νερού από τα ανώτερα στα ρηχά στρώματα. Για την χρήση της απαιτείται η εισαγωγή παραμέτρων που περιγράφουν την αποθηκευτικότητα και την αρχική υγρασία. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για μεγάλες χρονικές περιόδους προσομοίωσης.

Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η μέθοδος ελλείμματος και σταθερού ρυθμού απωλειών (Deficit and Constant Loss) διότι είναι κατάλληλη για μακράς διάρκειας προσομοιώσεις καθώς λαμβάνει υπόψη τις συνεχείς μεταβολές της υγρασίας και την αφυδάτωσή του εδάφους κατά τις ξηρές περιόδους.

Η μέθοδος απωλειών ελλείμματος και σταθερού ρυθμού, υπολογίζει τις αλλαγές στην υγρασία της ακόρεστης εδαφικής στρώσης με αρχική συνθήκη την ποσότητα νερού που υπολείπεται για να φθάσει σε σημείο κορεσμού και οριακή συνθήκη την ικανότητα αποθήκευσης της σε νερό.

Η ικανότητα αποθήκευσης ή μέγιστο έλλειμμα (Maximum Deficit) εκφράζεται σαν βάθος αποθήκευσης (mm). Το αρχικό έλλειμμα (Initial Deficit) εκφράζεται σαν το βάθος αποθήκευσης (mm) το οποίο είναι κενό κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης. Ο ρυθμός απωλειών έχει σταθερή τιμή (Constant Rate) και εκφράζει το βάθος νερού (mm) που διηθείται ανά ώρα (mm/hr) σε συνθήκες κορεσμένου εδάφους.



Εικόνα 26: Απεικόνιση παραμέτρων της μεθόδου ελλείμματος και σταθερού ρυθμού απωλειών.

Για κάθε υπολεκάνη απαιτείται η εκτίμηση των παρακάτω παραμέτρων:

- Constant Rate (mm/hr) : Σταθερός ρυθμός απωλειών

- Initial Deficit (mm) : Υπολειπόμενη αποθήκευση (αρχικό έλλειμμα)
- Maximum Deficit (mm) : Ικανότητα αποθήκευσης (μέγιστο έλλειμμα)
- Impervious (%) : Ποσοστό της έκτασης της υπολεκάνης που θεωρείται αδιαπέρατη.

Εκτίμηση του ρυθμού απωλειών

Ο υπολογισμός του ρυθμού απωλειών βασίστηκε σε ηλεκτρονικό χάρτη που διαχωρίζει την περιοχή σε πέντε κατηγορίες εδαφών με βάση την κυρίαρχη υφή της επιφάνειας (Dominant Surface Texture Class). Ο διαχωρισμός στις πέντε κατηγορίες πραγματοποιείται βάσει των ποσοστών άμμου και αργίλου που περιέχονται σε κάθε τύπο εδάφους.

Έπειτα από κατάλληλες δοκιμές για κάθε κατηγορία εδάφους αποδόθηκε μία τιμή του σταθερού ρυθμού απωλειών. Οι πραγματικές συνθήκες που επηρεάζουν τον ρυθμό απωλειών είναι:

- Ο βαθμός κορεσμού του εδάφους
- Οι έντονες κατά τόπους εδαφικές κλίσεις
- Οι ύπαρξη αρδευόμενων εκτάσεων
- Η μεγάλη διάρκεια της προσομοίωσης

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές του ρυθμού απωλειών που προέκυψαν για τις πέντε εδαφικές κατηγορίες.

Πίνακας 9: Τιμές ρυθμού απωλειών ανά κατηγορία εδάφους

Κατηγορίες εδαφών βάσει των ποσοστών άμμου και αργίλου	Ρυθμός απωλειών mm/hr
Άργιλος < 18% , Άμμος > 65%	10
18% < Άργιλος < 35% , 15% < Άμμος < 65%	7,5
Άργιλος < 35% , Άμμος < 15%	5,5
35% < Άργιλος < 65%	2,0
Άργιλος > 60%	0,5

Στη συνέχεια για κάθε υπολεκάνη εκτιμήθηκαν τα ποσοστά κάθε κατηγορίας εδάφους του πίνακα και υπολογίστηκε ο μέσος ρυθμός απωλειών κάθε υπολεκάνης ως η σταθμισμένη μέση τιμή των ρυθμών απωλειών κάθε κατηγορίας εδάφους εφαρμόζοντας την σχέση 6.2:

$$R_i = \sum_{n=1}^5 R_n * W_{n,i} \quad (6.2)$$

όπου :

$R_i = O$ μέσος ρυθμός απωλειών της i υπολεκάνης (mm/hr)

$R_n = O$ μέσος ρυθμός απωλειών για την n κατηγορία εδάφους (mm/hr)

$W_{n,i}$ = Το ποσοστό της n κατηγορίας εδάφους στην i υπολεκάνη (%)

Από την σχέση 6.2 προέκυψε ο ρυθμός απωλειών για κάθε υπολεκάνη:

Πίνακας 10: ο ρυθμός απωλειών των υπολεκανών

Υπολεκάνη	Ρυθμός απωλειών (mm/hr)
ΙΣΤΑΚΟΣ	0,366
ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΣ	0,825
ΦΩΤΕΙΝΗ	0,633
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	0,711
ΤΟΙΧΙΟ	0,894
ΒΥΣΣΙΝΙΑ	0,964
ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	0,890
ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗ	0,796
ΚΑΣΤΟΡΙΑ	0,301

Εκτίμηση ικανότητας αποθήκευσης

Η εκτίμηση της ικανότητας αποθήκευσης έγινε με τον συνδυασμό δεδομένων δύο γεωλογικών χαρτών. Χάρτης που υποδεικνύει την αποθηκευτικότητα (C) σε νερό της ανώτερης εδαφικής στρώσης σε χιλιοστά ανά μέτρο βάθους και ο χάρτης βάθους (D) της διαπερατής στρώσης σε εκατοστά. Πρόκειται για επικαλύψεις της εφαρμογής google earth που αποκτήθηκαν από τον ιστότοπο <http://eussoils.jrc.ec.europa.eu/>. Οι τιμές των ιδιοτήτων αποδίδονται σε κλάσεις κάθε μια από τις οποίες αντιστοιχεί σε διαφορετικό χρώμα. Για να είναι δυνατοί οι υπολογισμοί για κάθε κλάση υιοθετήθηκε μια αντιπροσωπευτική τιμή.

Ο χάρτης αποθηκευτικότητας (C) σε νερό της ανώτερης εδαφικής στρώσης σε χιλιοστά ανά μέτρο βάθους είναι χωρισμένος σε τρεις κλάσεις:

Μέση (100-140 mm/m) → 120 mm/m

Υψηλή (140-190 mm/m) → 165 mm/m

Πολύ υψηλή (>190 mm/m) → 200 mm/m

Ο χάρτης βάθους (D) της διαπερατής στρώσης σε εκατοστά είναι χωρισμένος σε δύο κλάσεις:

Ρηχό (< 80 cm) → 40 cm

Βαθύ (> 80 cm) → 100 cm

Τα ποσοστά της κάθε κλάσης σε κάθε υπολεκάνη παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 11: ποσοστά τιμών αποθηκευτικότητας στις υπολεκάνες.

Υπολεκάνη	Μέση (%)	Υψηλή (%)	Πολύ υψηλή (%)
ΙΣΤΑΚΟΣ	0	100	0
ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΣ	56,03	41,88	1,82
ΦΩΤΕΙΝΗ	0	85,50	14,50
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	27,39	52,70	19,91
ΤΟΙΧΙΟ	73,55	21,00	5,45
ΒΥΣΣΙΝΙΑ	96,62	2,78	0,60
ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	87,62	12,38	0
ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗ	64,58	35,42	0
ΚΑΣΤΟΡΙΑ	22,82	66,25	10,93

Με βάσει τον χάρτη αποθηκευτικότητας ανά μέτρο βάθους υπολογίστηκε το ποσοστό κάθε τύπου εδάφους (μέσης, υψηλής ή πολύ υψηλής αποθηκευτικότητας) ανά υπολεκάνη. Η μέση αποθηκευτικότητα κάθε υπολεκάνης, προέκυψε ως η σταθμισμένη μέση τιμή της αποθηκευτικότητας κάθε τύπου εδάφους και υπολογίστηκε με την σχέση 6.3 :

$$C_i = \sum_{n=1}^3 C_n * W_{n,i} \quad (6.3)$$

όπου :

C_i = Η μέση αποθηκευτικότητα ανά μέτρο βάθος της i υπολεκάνης (mm/m)

C_n = Η αποθηκευτικότητα ανά μέτρο βάθους για τον n τύπο εδάφους (mm/m)

$W_{n,i}$ = Το ποσοστό του n τύπου εδάφους στην i υπολεκάνη (%)

Από την σχέση 6.3 προέκυψε η αποθηκευτικότητα mm/m για κάθε υπολεκάνη:

Πίνακας 12: αποθηκευτικότητα υπολεκανών.

Υπολεκάνη	Αποθηκευτικότητα (mm/m)
ΙΣΤΑΚΟΣ	165,00
ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΣ	140,00
ΦΩΤΕΙΝΗ	170,07
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	159,64
ΤΟΙΧΙΟ	133,81
ΒΥΣΣΙΝΙΑ	121,52
ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	125,56
ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗ	135,94
ΚΑΣΤΟΡΙΑ	158,55

Με βάσει τον χάρτη βάθους της διαπερατής στρώσης υπολογίστηκε το ποσοστό κάθε τύπου εδάφους (μικρού ή μεγάλου βάθους διαπερατής στρώσης) ανά υπολεκάνη.

Τα ποσοστά του κάθε βάθους σε κάθε υπολεκάνη παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 13: ποσοστα τιμών βάθους διαπερατής στρώσεις στις υπολεκάνες.

Υπολεκάνη	Ρηχό (%)	Βαθύ (%)
ΙΣΤΑΚΟΣ	31,12	68,88
ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΣ	32,44	67,56
ΦΩΤΕΙΝΗ	85,50	14,50
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	52,70	47,30
ΤΟΙΧΙΟ	21,00	79,00
ΒΥΣΣΙΝΙΑ	2,77	97,23
ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	12,37	87,63
ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗ	35,42	64,58
ΚΑΣΤΟΡΙΑ	66,25	33,75

Το μέσο βάθος της διαπερατής στρώσης κάθε υπολεκάνης, προέκυψε ως η σταθμισμένη μέση τιμή του βάθους διαπερατής στρώσης κάθε τύπου εδάφους και υπολογίστηκε με την σχέση 6.4 :

$$D_i = \sum_{n=1}^2 D_n * W_{n,i} \quad (6.4)$$

όπου :

D_i = Το μέσο βάθος της διαπερατής στρώσης της i υπολεκάνης (cm)

D_n = Το βάθος της διαπερατής στρώσης για τον n τύπο εδάφους (cm)

$W_{n,i}$ = Το ποσοστό του n τύπου εδάφους στην i υπολεκάνη (%)

Από την σχέση 6.4 προέκυψαν τα μέσα βάθη (cm) της διαπερατής στρώσης για κάθε υπολεκάνη:

Πίνακας 14: βάθη διαπερατής στρώσης υπολεκανών.

Υπολεκάνη	Βάθη (cm)
ΙΣΤΑΚΟΣ	81,32
ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΣ	80,27
ΦΩΤΕΙΝΗ	48,69
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	68,38
ΤΟΙΧΙΟ	87,40
ΒΥΣΣΙΝΙΑ	98,28
ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	92,57
ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗ	78,74
ΚΑΣΤΟΡΙΑ	60,24

Η μέση ικανότητα αποθήκευσης (μέγιστο έλλειμμα) για κάθε υπολεκάνη υπολογίστηκε ως το γινόμενο της μέσης αποθηκευτικότητας και του μέσου βάθους της διαπερατής στρώσης κάθε υπολεκάνης με την εφαρμογή της σχέσης 6.5 :

$$S_{max\ i} = C_i * D_i \quad (6.5)$$

όπου :

$S_{max\ i}$ = Η μέση ικανότητα αποθήκευσης της i υπολεκάνης (mm)

C_i = Η μέση αποθηκευτικότητα ανά μέτρο βάθους της i υπολεκάνης (mm/m)

D_i = Το μέσο βάθος της διαπερατής στρώσης της i υπολεκάνης (m)

Από την σχέση 6.5 προέκυψε η μέση ικανότητα αποθήκευσης (mm) για κάθε υπολεκάνη:

Πίνακας 15: μέση ικανότητα αποθήκευσης υπολεκανών

Υπολεκάνη	Μέση ικανότητα αποθήκευσης (mm)
ΙΣΤΑΚΟΣ	134,192
ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΣ	112,388
ΦΩΤΕΙΝΗ	82,812
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	109,166
ΤΟΙΧΙΟ	116,953
ΒΥΣΣΙΝΙΑ	119,431

ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	116,242
ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗ	107,045
ΚΑΣΤΟΡΙΑ	95,527

Το αρχικό έλλειμμα μέχρι το σημείο κορεσμού υπολογίστηκε ως ποσοστό της ικανότητας αποθήκευσης κάθε υπολεκάνης. Έτσι με δεδομένο ότι η προσομοίωση ξεκινά τον Ιανουάριο θεωρήθηκε για όλες τις υπολεκάνες ότι το 10% του μέγιστου βάθους αποθήκευσης είναι κενό και διαθέσιμο να παραλάβει νερό.

Εκτίμηση αδιαπέρατου ποσοστού

Το ποσοστό κάθε υπολεκάνης που θεωρείται αδιαπέρατο εκτιμήθηκε από τον υψηλής ανάλυσης χάρτη αδιαπέρατου του ευρωπαϊκού προγράμματος Copernicus. Το Copernicus διαχωρίζει την επιφάνεια της γης σε πέντε χρήσεις γης παρέχοντας υψηλής ανάλυσης χάρτες για αυτές. Έτσι για κάθε υπολεκάνη υπολογίστηκε το ποσοστό της αδιαπέρατης επιφάνειας που περιέχει.



Εικόνα 27: αδιαπέρατο εδάφος στις υπολεκάνες..

Πίνακας 16: ποσοστά τεχνικών επιφανειών στις υπολεκάνες.

Υπολεκάνη	Τεχνητές επιφάνειες Ποσοστά (%)
ΙΣΤΑΚΟΣ	0,995
ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΣ	1,622
ΦΩΤΕΙΝΗ	1,39
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	0,428
ΤΟΙΧΙΟ	1,204
ΒΥΣΣΙΝΙΑ	0,259
ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	2,411
ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗ	14,691
ΚΑΣΤΟΡΙΑ	21,034

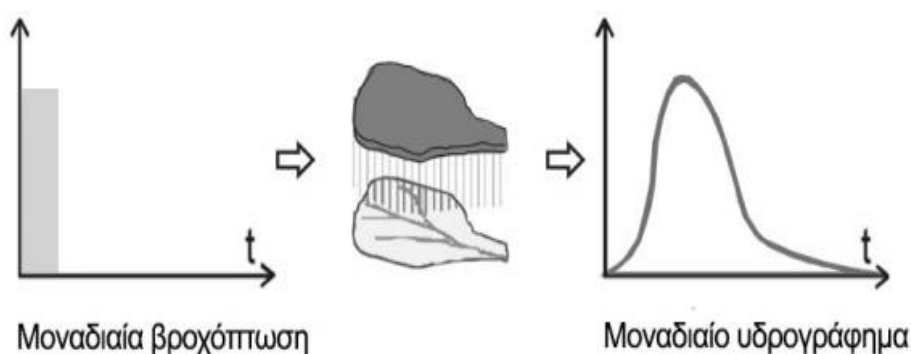
6.2.4 Μέθοδος μετασχηματισμού της κατακρήμνισης σε σημειακή απορροή

Για την ολοκληρωμένη προσομοίωση της λίμνης είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της επιφανειακής απορροής των υπολεκανών που απορρέουν στη λίμνη με την μέθοδο μετασχηματισμού της κατακρήμνισης σε σημειακή απορροή. Υπάρχουν επτά διαφορετικές μέθοδοι μετασχηματισμού, που διαφέρουν ως προς τις τιμές, την κινηματική εκτέλεση και την κατανομή τους:

- Μέθοδος μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά Clark (Clark Unit Hydrograph Transform)
- Κινηματική μέθοδος κυμάτων (Kinematic Wave Transform)
- Τροποποιημένη μέθοδος Clark (ModClark Transform)
- Μέθοδος μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά SCS (SCS Unit Hydrograph Transform)
- Μέθοδος μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά Snyder (Snyder Unit Hydrograph Transform)
- Μέθοδος καθορισμένου μοναδιαίου υδρογραφήματος (User-Specified Unit Hydrograph Transform)

Η κινηματική μέθοδος κυμάτων αναπτύχθηκε αρχικά για την αναπαράσταση της απορροή σε αστικές περιοχές. Η συνολική έκταση της υπολεκάνης χωρίζεται σε δυο επίπεδα (planes), το αδιαπέρατο και το διαπερατό και υπολογίζεται η σημειακή απορροή που αντιστοιχεί στα επιμέρους επίπεδα. Το νερό καταλήγει στο σημείο εξόδου της υπολεκάνης μέσω τεχνητών ή φυσικών αγωγών (subcollectors) και καναλιών (channels). Για τους υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως το μήκος και η μέση κλίση της μέσης διαδρομής απορροής, η τραχύτητα κ.α. Η τελική απορροή προκύπτει από το άθροισμα των γινομένων της απορροής και του ποσοστού συνεισφοράς του κάθε επιπέδου στην υπολεκάνη.

Όλες οι υπόλοιπες μέθοδοι στηρίζονται στη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος που παρουσιάστηκε από τον Sherman στα 1942. Σύμφωνα με αυτήν, γίνεται αποδεκτό ότι μια βροχή με σταθερή μοναδιαία ένταση επάνω σε μία λεκάνη απορροής και με μοναδιαία διάρκεια, γεννά ένα μοναδιαίο υδρογράφημα που είναι χαρακτηριστικό για την λεκάνη απορροής. Τα υδρογραφήματα που προέρχονται από βροχές πολλαπλάσιας έντασης ή διάρκειας, καθώς και αυτά που προέρχονται από σύνθετες μορφές βροχής μπορούν να υπολογιστούν από το μοναδιαίο υδρογράφημα, εφαρμόζοντας τις αρχές α) της γραμμικότητας και β) της σταθερότητας στο χρόνο (Βαφειάδης Μ., 2004).



Διάγραμμα 10: Θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος (Πηγή : Βαφειάδης Μ., 2004)

Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η μέθοδος μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά SCS. Η μέθοδος μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά προσεγγίζει την συγκέντρωση της απορροής μέσα από δύο τύπους αδιάστατου μοναδιαίου υδρογραφήματος που προορίζονται για γενική εφαρμογή. Αφού επιλεγθεί ο καταλληλότερος τύπος υδρογραφήματος, η μέθοδος υπολογίζει την καθυστέρηση (Lag Time) ως το χρονικό διάστημα μεταξύ της πτώσης του κέντρου μάζας της συνολικής βροχόπτωσης και της αιχμής του τελικού υδρογραφήματος.

Εκτίμηση παραμέτρων

Για την εφαρμογή της μεθόδου μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά SCS απαιτείται ο υπολογισμός του χρόνου συγκεντρώσεως T_c σε ώρες (Time of Concentration) εφαρμόζοντας τον παρακάτω τύπο:

$$T_c = \frac{l^{0.8} * (S + 1)^{0.7}}{1140 * Y^{0.5}}$$

όπου :

T_c : ο χρόνος συγκέντρωσης (h)

L : το μήκος του μέγιστου υδραυλικού δρόμου (ft)

S : δυνητικά μέγιστη κατακράτηση (in), ισούται με $(1000/CN)-10$

Y : η μέση κλίση της υπολεκάνης (%).

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά δηλαδή το μήκος του μέγιστου υδραυλικού δρόμου και η μέση κλίση κάθε υπολεκάνης, έχουν υπολογιστεί από το QGIS κατά το στάδιο της κατασκευής του ομοιώματος της λεκάνης απορροής. Ο αριθμός καμπύλης CN εκφράζει το ποσοστό (%) της κατακρήμνισης που θα απορρεύσει εντός μιας λεκάνης με βάση τις χρήσεις γης που επικρατούν σε κάθε υπολεκάνη. Η τιμές για τις πέντε βασικές κατηγορίες χρήσεων γης (Copernicus) βασίστηκε πάνω στην αντίστοιχη οδηγία του υπουργείου αγροτικής ανάπτυξης των Η.Π.Α. (Part 630 Hydrology / National Engineering handbook / Chapter 9: Hydrologic Soil-Cover Complexes).

Πίνακας 17: Αριθμοί καμπύλης CN για τις πέντε βασικές χρήσεις γης.

Χρήση γης	Αριθμός Καμπύλης CN
Τεχνητές επιφάνειες	80,0
Γεωργικές εκτάσεις	60,0
Δασικές εκτάσεις	30,0
Έκτασης χαμηλής βλάστησης	45,0
Υδάτινες επιφάνειες	100,0

Ο υπολογισμός του αριθμού CN για κάθε υπολεκάνη προέκυψε ως η σταθμισμένη μέση τιμή των αριθμών CN κάθε κατηγορίας χρήσεων γης με την εφαρμογή της σχέσης 6.6. Χρησιμοποιήθηκαν τα ποσοστά των πέντε βασικών χρήσεων γης ανά υπολεκάνη όπως υπολογίστηκαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου απωλειών.

$$CN_i = \sum_{n=1}^5 CN_n * W_{n,i} \quad (6.6)$$

όπου :

CN_i = Ο αριθμός CN της i υπολεκάνης (%)

CN_n = Ο αριθμός CN για την n κατηγορία χρήσεων γης (%)

$W_{n,i}$ = Το ποσοστό της n κατηγορίας χρήσεων γης στην i υπολεκάνη (%)

Οι χρόνοι συγκεντρώσεως για κάθε υπολεκάνη παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 18: χρόνοι συγκεντρώσεως των υπολεκανών.

Υπολεκάνη	Χρόνος συγκέντρωσης(min)
ΙΣΤΑΚΟΣ	133,02
ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΣ	324,18
ΦΩΤΕΙΝΗ	90,24
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	114,29
ΤΟΙΧΙΟ	208,70
ΒΥΣΣΙΝΙΑ	233,28
ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	141,49
ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗ	68,18
ΚΑΣΤΟΡΙΑ	136,99

6.2.5 Μέθοδος βασικής ροής

Το νερό που έχει διεισδύσει στο έδαφος, περνά μέσω της ακόρεστης ζώνης και εισάγεται στα υπόγεια νερά. Τα υπόγεια νερά είναι η πηγή των ρευμάτων κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων. Ένα μέρος της κατακρήμνισης που έχει κατεισδύσει επιστρέφει άμεσα από κάτω ή στην επιφάνεια του εδάφους κοντά στο ρεύμα, κατά τη διάρκεια των γεγονότων βροχόπτωσης (Καρακατσάνης Δ.). Η υπόγεια ροή που συμβάλει κατά αυτόν τον τρόπο στην επιφανειακή απορροή καλείται βασική ροή. Πέντε μέθοδοι διατίθενται για την εισαγωγή της βασικής ροής στο πρόγραμμα:

- Μέθοδος σταθερής μηνιαίας βασικής ροής (Constant monthly)
- Μέθοδος γραμμικής δεξαμενής (Linear Reservoir)
- Μέθοδος υποχώρησης (Recession)
- Μέθοδος συνδεδεμένης υποχώρησης (Bounded Recession)
- Μη γραμμική μέθοδος Boussinesq (Nonlinear Boussinesq)

Στη παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος γραμμικής δεξαμενής (Linear Reservoir).

Μέθοδος γραμμικής δεξαμενής

Κεντρική ιδέα της μεθόδου είναι η θεώρηση μιας υπόγειας δεξαμενής η οποία φορτίζεται κατά την φάση της κατείσδυσης του νερού των βροχοπτώσεων και στη συνέχεια αποφορτίζεται, συνεισφέροντας στην επιφανειακή ροή και μετά το πέρας της βροχόπτωσης. Ανάλογα με την ένταση του φαινομένου, η βασική ροή αυξάνεται στιγμιαία και στη συνέχεια ακολουθεί ομαλή πτωτική τάση. Έτσι κατά τη διάρκεια συνεχόμενων γεγονότων έντονης βροχόπτωσης, η βασική ροή διατηρείται σε υψηλά επίπεδα.

Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται ο καθορισμός της αρχικής συνθήκης και ο χρόνος απόκρισης (GW Coefficient) για τουλάχιστον δύο εδαφικές στρώσεις.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές που επιλέχθηκαν ως αρχική συνθήκη βασικής ροής στις δύο εδαφικές στρώσεις για κάθε υπολεκάνη. Οι τιμές επιλέχθηκαν έπειτα από δοκιμές.

Πίνακας 19: αρχική ροή στις δύο εδαφικές στρώσεις των υπολεκανών.

	1 ^η εδαφική στρώση	2 ^η εδαφική στρώση
Υπολεκάνη	Αρχική συνθήκη Βασικής ροής (m ³ /s)	Αρχική συνθήκη Βασικής ροής (m ³ /s)
ΙΣΤΑΚΟΣ	0,005	0,005
ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΣ	0,005	0,005
ΦΩΤΕΙΝΗ	0,005	0,005
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	0,005	0,005
ΤΟΙΧΙΟ	0,005	0,005
ΒΥΣΣΙΝΙΑ	0,005	0,005
ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	0,005	0,005
ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗ	0,005	0,005
ΚΑΣΤΟΡΙΑ	0,005	0,005

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές που επιλέχθηκαν για τον χρόνο απόκρισης για τις δύο εδαφικές στρώσεις. Οι τιμές για τον χρόνο απόκρισης επιλέχθηκαν έπειτα από δοκιμές.

Πίνακας 20: χρόνοι απόκρισης στις δύο εδαφικές στρώσεις των υπολεκανών

	1 ^η εδαφική στρώση	2 ^η εδαφική στρώση
Υπολεκάνη	χρόνος απόκρισης (hr)	χρόνος απόκρισης (hr)
ΙΣΤΑΚΟΣ	50	900
ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΣ	50	900
ΦΩΤΕΙΝΗ	50	900
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	50	900
ΤΟΙΧΙΟ	50	900
ΒΥΣΣΙΝΙΑ	50	900
ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	50	900
ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗ	50	900
ΚΑΣΤΟΡΙΑ	50	900

6.3 Μετεωρολογικό μοντέλο

Το μετεωρολογικό μοντέλο περιλαμβάνει τον καθορισμό των μετεωρολογικών διεργασιών, που θα δράσουν σε κάθε υπολεκάνη κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Τα φαινόμενα που μπορούν να εισαχθούν στο πρόγραμμα, είναι η κατακρήμνιση, η εξατμισοδιαπνοή και η τήξη του χιονιού. Η τελευταία δεν θα ληφθεί υπόψη στην παρούσα μελέτη καθώς η επίδραση της θεωρείται επουσιώδης για την περιοχή.

Για το φαινόμενο της βροχόπτωσης επιλέγεται η μέθοδος των βροχομετρικών σταθμών (precipitation gages). Η αναγωγή των μετρήσεων κάθε σταθμού στις γειτονικές υπολεκάνες, γίνεται με την εφαρμογή της θεωρίας των πολυγώνων Thiessen, τα οποία υπολογίστηκαν με την χρήση του QGIS. Η συμβολή κάθε πολυγώνου (σταθμού) στις υπολεκάνες, περιγράφεται από τις τιμές των βαρών επιρροής (gage weights) που είναι μοναδικές, για κάθε υπολεκάνη και σταθμό.

Πίνακας 21: βάρη επιρροής των μετεωρολογικών σταθμών στις υπολεκάνες

Υπολεκάνη/σταθμός	ΑΡΓΟΣ	ΚΛΕΙΣΟΥΡΑ	ΚΟΡΕΣΤΕΙΑ	ΤΟΙΧΙΟ	ΛΙΘΙΑ	ΠΟΛΥΚΑΡΠΗ	ΚΑΣΤΟΡΙΑ
ΙΣΤΑΚΟΣ	0,009	-	-	-	0,334	0,656	-
ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΣ	-	0,271	-	0,093	0,481	0,155	-
ΦΩΤΕΙΝΗ	-	-	-	0,031	0,14	0,829	-
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	-	-	-	0,968	-	0,032	-
ΤΟΙΧΙΟ	-	-	-	1	-	-	-
ΒΥΣΣΙΝΙΑ	-	-	-	1	-	-	-
ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	-	-	-	0,356	-	-	0,644
ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗ	-	--	-	-	-	-	1
ΚΑΣΤΟΡΙΑ	0,188	-	-	-	-	0,06	0,752

Τα δεδομένα της βροχόπτωσης, εισάγονται σε μορφή χρονοσειρών (Time-Series Data) για κάθε σταθμό.

Για το φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής επιλέγεται η μέθοδος hamon, λόγω των διαθέσιμων δεδομένων είναι η μόνη μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Η μέθοδος αυτή εκφράζεται με έναν συντελεστή εξατμισοδιαπνοής μετρημένο σε mm/g/m³, στη παρούσα μελέτη λαμβάνεται η προεπιλεγμένη τιμή του hcs-HMS 0,1651 για όλες τις υπολεκάνες της λίμνης.

Πίνακας 22: εξατμισοδιαπνοής των υπολεκάνων.

Υπολεκάνη	Εξατμισοδιαπνοή (mm/g/m ³)
ΙΣΤΑΚΟΣ	0,1651
ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΣ	0,1651

ΦΩΤΕΙΝΗ	0,1651
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	0,1651
ΤΟΙΧΙΟ	0,1651
ΒΥΣΣΙΝΙΑ	0,1651
ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	0,1651
ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗ	0,1651
ΚΑΣΤΟΡΙΑ	0,1651

7 Βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου για πέντε ημερολογιακά έτη. Οι τιμές των μεγεθών υπολογίζονται σε ημερήσια βάση, καλύπτουν την περίοδο από 1/1/2016 έως 5/11/2020 και αναφέρονται σε όλα τα στοιχεία της λεκάνης απορροής. Την εκτέλεση της αρχικής προσομοίωσης ακολουθεί η αποτίμηση του μοντέλου μέσω της διασταύρωσης των αποτελεσμάτων με τις πραγματικές μετρήσεις.

7.1 Εκτιμώμενα υδρολογικά μεγέθη

Για κάθε υδρολογικό στοιχείο υπολογίζονται οι τιμές μιας σειράς μεγεθών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε πίνακες και σε διαγράμματα συναρτήσεως του χρόνου, ανάλογα με το βήμα προσομοίωσης που έχει ορισθεί.

Για τις υπολεκάνες υπολογίζονται:

- Η ποσότητα νερού που αναχαιτίστηκε από τα φυτά (mm)
- Η ποσότητα νερού που κατέληξε στο έδαφος (mm)
- Η ποσότητα νερού που διηθήθηκε (mm)
- Η ποσότητα νερού που απέρρευσε (mm)
- Η παροχή λόγω επιφανειακής απορροής στο σημείο εξόδου (m^3/s)
- Η παροχή λόγω βασικής ροής στο σημείο εξόδου (m^3/s)
- Η συνολική παροχή στο σημείο εξόδου (m^3/s)
- Η αθροιστική ποσότητα κατακρήμνισης (mm)
- Η αθροιστική ποσότητα που διηθήθηκε (mm)
- Η αθροιστική ποσότητα που απέρρευσε (mm)
- Η εξατμισοδιαπνοή (mm)
- Η μέγιστη παροχή εξόδου (m^3/s)
- Η ημερομηνία που παρατηρήθηκε η μέγιστη παροχή εξόδου

Για το σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής υπολογίζονται:

- Η παροχή εξόδου (m^3/s)
- Η μέγιστη παροχή εξόδου (m^3/s)
- Η ημερομηνία που παρατηρήθηκε η μέγιστη παροχή εξόδου.

7.2 Επιλογή μεθόδων προσομοίωσης

Από το σύνολο των μεθόδων προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών που παρουσιάστηκαν στο πέμπτο κεφάλαιο, στην πρώτη προσομοίωση που εκτελέστηκε επιλέχθηκαν οι μέθοδοι που φαίνονται στον πίνακα.

Πίνακας 23: επιλογή μεθόδων προσομοίωσης.

Αρχική προσομοίωση Επιλογή Μεθόδων	Χρονική Διάρκεια: 01/01/2016-05/11/2020
Μέθοδος αναχαίτισης Canopy Method	Απλής αναχαίτισης Simple Canopy
Μέθοδος απωλειών Loss Method	Υπολείμματος και σταθερού ρυθμού απωλειών Deficit and Constant
Μέθοδος μετασχηματισμού Transform Method	SCS Unit Hydrograph
Μέθοδος Βασικής ροής Baseflow Method	Linear Reservoir
Surface Method	Simple Surface

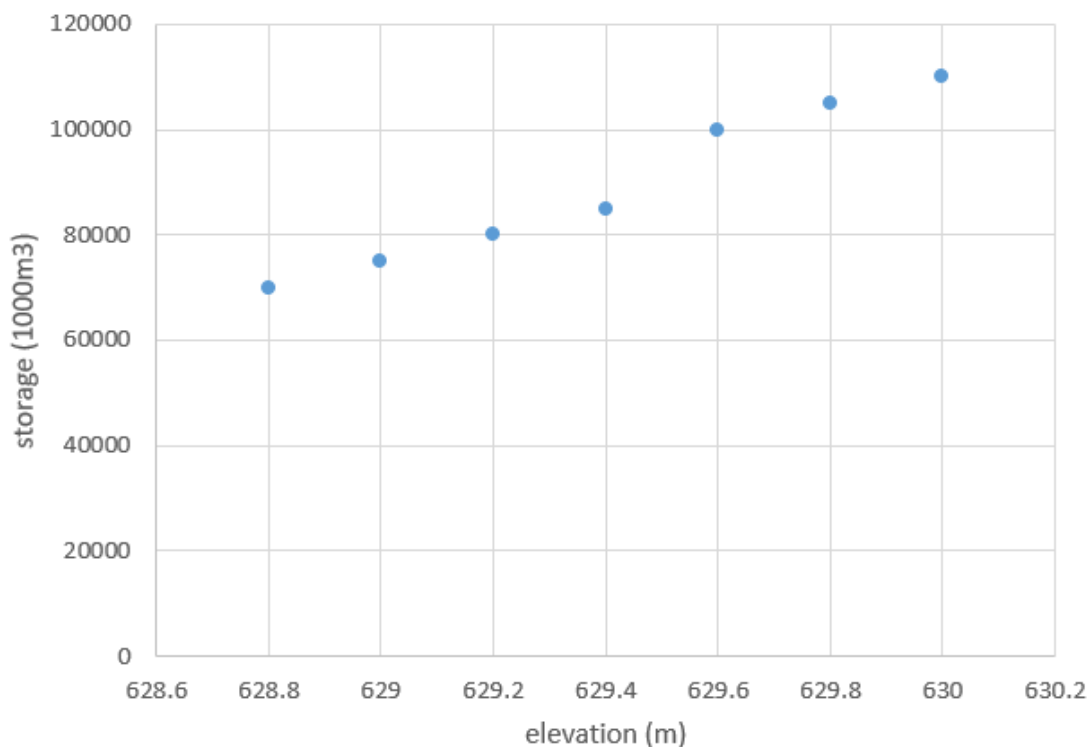
7.3 Αρχική προσομοίωση

Αρχικά για την βασική ροή επιλέχθηκαν οι παρακάτω τιμές για τον χρόνο απόκρισης και την ροή στις δύο εδαφικές στρώσεις:

Πίνακας 24: επιλογή τιμών βασικής ροής και χρόνου απόκρισης στις δύο εδαφικές στρώσεις ανά έτος για την αρχική προσομοίωση.

Εδαφική στρώση		Έτος				
		2016	2017	2018	2019	2020
1η	Χρόνος απόκρισης	100	100	100	100	100
	Αρχική τιμή βασικής ροής (m ³ /s)	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
	Fraction 1	0,005	0,25	0,25	0,25	0,75
2η	Χρόνος απόκρισης	500	500	500	500	500
	Αρχική τιμή βασικής ροής (m ³ /s)	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
	Fraction 2	0,005	0,05	0,05	0,05	0,25

Για την προσομοίωση της διαδικασίας φόρτισης και αποφόρτισης της λίμνης επιλέχθηκε η μέθοδος Outflow Structures. Η μέθοδος γνωστών διατάξεων εκροής (outflow structures) επιλέχθηκε λόγω της γνώσης των λειτουργικών χαρακτηριστικών της διάταξης της εκροής του ύδατος. Το χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η κατασκευή της καμπύλης στάθμης-χωρητικότητας. Στη παρούσα μελέτη η καμπύλη εκτιμήθηκε λόγω έλλειψης διαθέσιμων δεδομένων.



Διάγραμμα 11: Όγκου-στάθμης της λίμνης

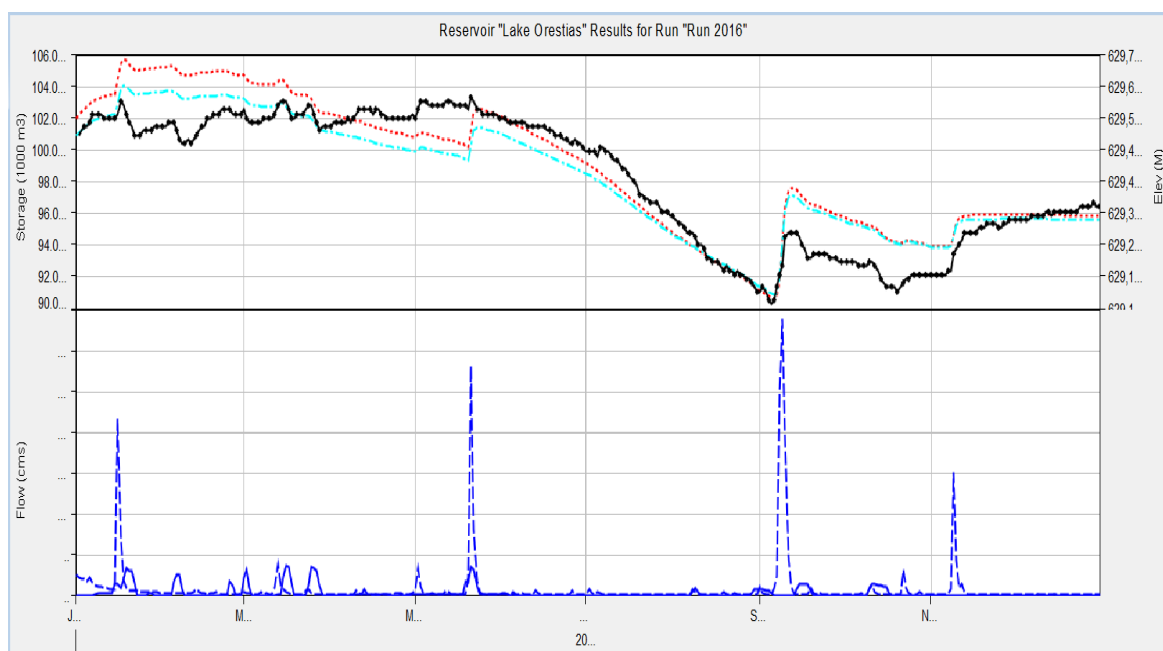
Επιπλέον έγινε εισαγωγή μέσων τιμών για το μέγεθος της εξάτμισης της λίμνης σύμφωνα με την βιβλιογραφία, πάρθηκαν ίδιες τιμές για όλα τα έτη :

Πίνακας 25: Μηνιαίας εξάτμισης της λίμνης

Μήνας	Εξάτμιση(mm)
Ιανουάριος	3
Φεβρουάριος	5
Μάρτιος	30
Απρίλιος	50
Μάιος	60
Ιούνιος	100
Ιούλιος	150
Αύγουστος	120
Σεπτέμβριος	80

Οκτώβριος	60
Νοέμβριος	5
Δεκέμβριος	3

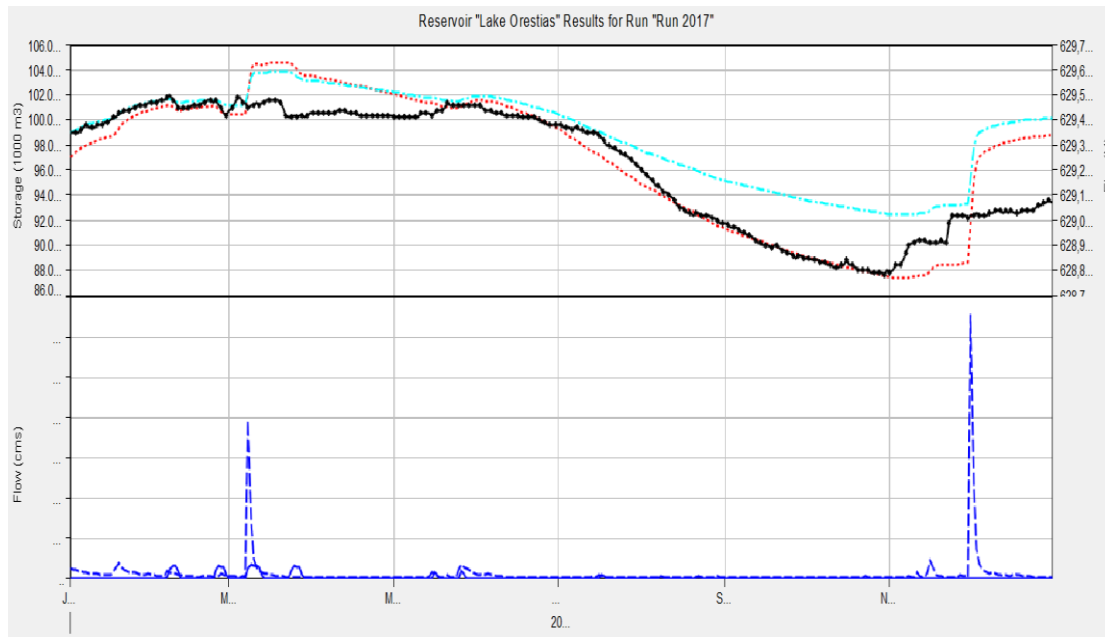
Στο διάγραμμα 11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της αρχικής προσομοίωσης για το μέγεθος της στάθμης της λίμνης με θαλασσί χρώμα. Στον ίδιο διάγραμμα, περιλαμβάνεται με μαύρο χρώμα και η χρονοσειρά της καταγεγραμμένης στάθμης ώστε να είναι εφικτή η διασταύρωση αποτελεσμάτων και μετρήσεων. Στο κάτω τμήμα του διαγράμματος φαίνονται οι συνολικές εισροές νερού στη λίμνη από όλα τα ρέματα που καταλήγουν σε αυτή καθώς και οι εκκροές από το ρέμα Γκιόλι.



Διάγραμμα 12: Διασταύρωση αποτελεσμάτων αρχικής προσομοίωσης για το 2016.

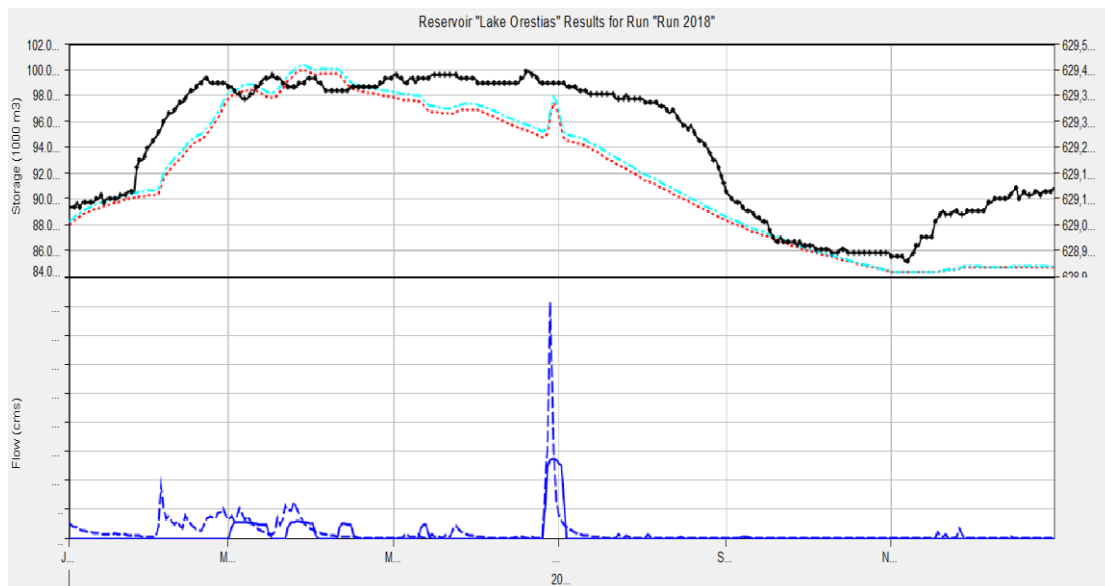
Από την μορφή των καμπυλών στο κάτω τμήμα του διαγράμματος γίνεται αντιληπτό ότι οι κορυφές αντιστοιχούν σε ήπια ή εντονότερα περιστατικά βροχόπτωσης, ενώ τα τμήματα μεταξύ των κορυφών αντιστοιχούν σε σύντομες ή μακρές περιόδους ξηρασίας. Στα διαγράμματα με έντονο μπλε χρώμα στο κάτω μέρος αναπαριστάται το μέγεθος της βροχόπτωσης. Τα τμήματα των καμπυλών κατά τα οποία η παροχή αυξάνεται αντιστοιχούν στο διάστημα έντονης βροχόπτωσης. Τα τμήματα των καμπυλών κατά τα οποία η παροχή φθίνει αντιστοιχούν στις ξηρές περιόδους.

Η προσομοίωση της στάθμης της λίμνης για το 2017:



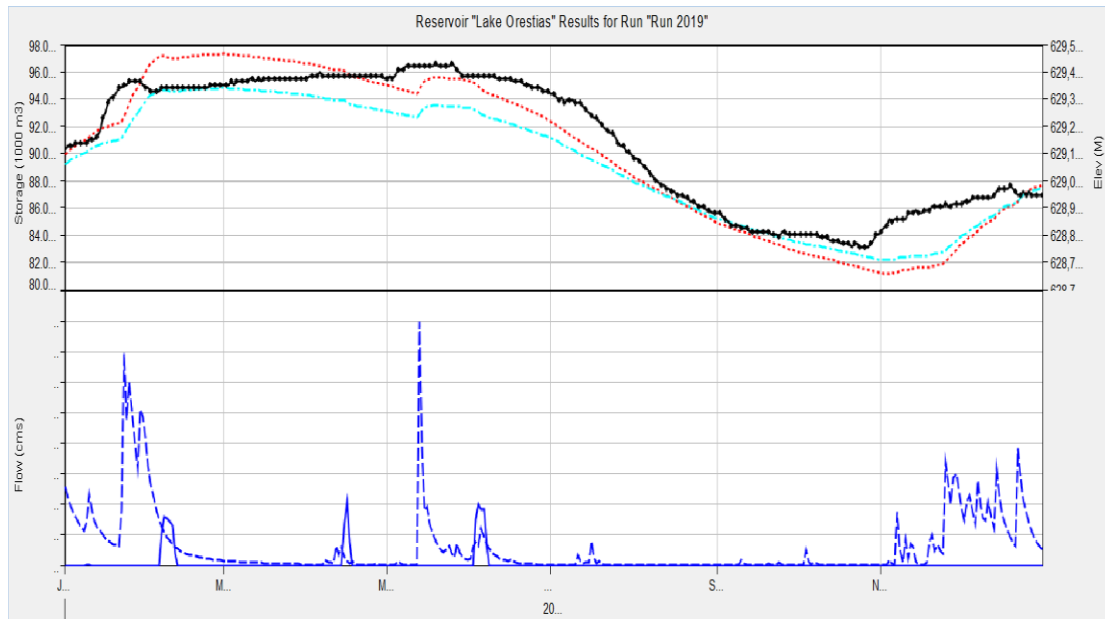
Διάγραμμα 13: Διασταύρωση αποτελεσμάτων αρχικής προσομοίωσης για το 2017.

Η προσομοίωση της στάθμης της λίμνης για το 2018:



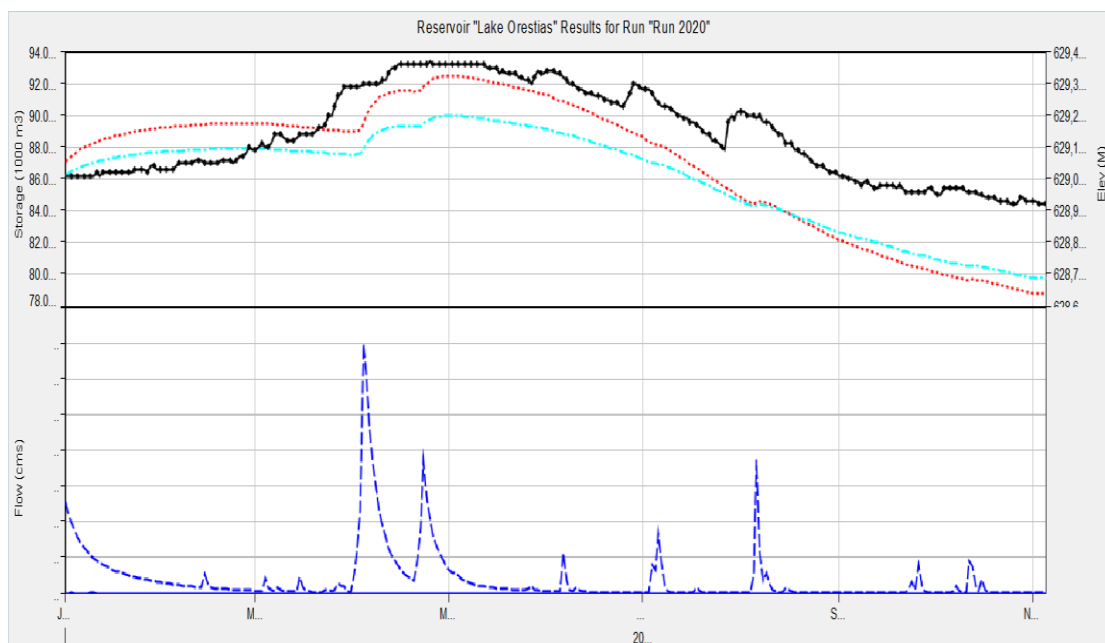
Διάγραμμα 14: Διασταύρωση αποτελεσμάτων αρχικής προσομοίωσης για το 2018.

Η προσομοίωση της στάθμης της λίμνης για το 2019:



Διάγραμμα 15: Διασταύρωση αποτελεσμάτων αρχικής προσομοίωσης για το 2019.

Η προσομοίωση της στάθμης της λίμνης για το 2020 :



Διάγραμμα 16: Διασταύρωση αποτελεσμάτων αρχικής προσομοίωσης για το 2020.

7.4 Τελική προσομοίωση

Όπως φάνηκε από τα διαγράμματα της προηγούμενης ενότητας τα αποτελέσματα της αρχικής προσομοίωσης παρουσίασαν σημαντικές αποκλίσεις σε σχέση με τις καταγεγραμμένες μετρήσεις της στάθμης. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μία νέα προσομοίωση όπου έπειτα από δοκιμές επιλέχθηκε ως χρόνος απόκρισης 50 ώρες και 900 ώρες για την 1^η και την 2^η εδαφική στρώση αντίστοιχα για τα έτη 2016 έως 2019. Για το έτος 2020 επιλέχθηκαν ως χρόνος απόκρισης 50 ώρες και 300 ώρες για την 1^η και την 2^η εδαφική στρώση αντίστοιχα. Επίσης επιλέχθηκαν νέες τιμές για την εξάτμιση της λίμνης ώστε να προσεγγίζουν καλύτερα τις πραγματικές τιμές. Οι τιμές της εξάτμισης πάρθηκαν επίσης έπειτα από τις κατάλληλες δοκιμές και παρουσιάζονται παρακάτω :

Πίνακας 26: επιλογή τιμών βασικής ροής και χρόνου απόκρισης στις δύο εδαφικές στρώσεις ανά έτος για την αρχική προσομοίωση.

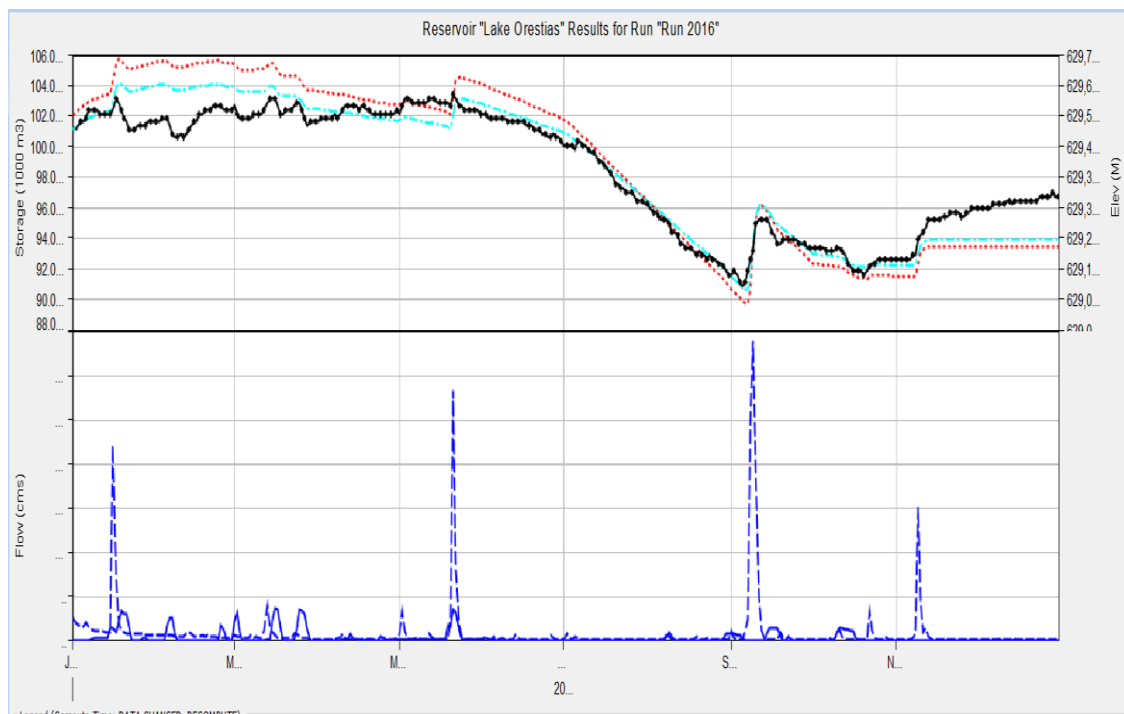
Εδαφική στρώση		Έτος				
		2016	2017	2018	2019	2020
1η	Χρόνος απόκρισης	50	50	50	50	50
	Αρχική τιμή βασικής ροής (m ³ /s)	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
	Fraction 1	0,005	0,25	0,25	0,25	0,75
2η	Χρόνος απόκρισης	900	900	900	900	300
	Αρχική τιμή βασικής ροής (m ³ /s)	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
	Fraction 1	0,005	0,25	0,25	0,25	0,25

Για το 2016 η εξάτμιση της λίμνης :

Πίνακας 27: Μηνιαίας εξάτμισης της λίμνης για το 2016.

Μήνας	Εξάτμιση(mm)
Ιανουάριος	3
Φεβρουάριος	10
Μάρτιος	20
Απρίλιος	40

Μάιος	60
Ιούνιος	80
Ιούλιος	180
Αύγουστος	190
Σεπτέμβριος	180
Οκτώβριος	30
Νοέμβριος	3
Δεκέμβριος	3



Διάγραμμα 17: Διασταύρωση αποτελεσμάτων αρχικής προσομοίωσης για το 2016.

Από την μορφή των καμπυλών στο κάτω τμήμα του διαγράμματος γίνεται αντιληπτό ότι οι κορυφές αντιστοιχούν σε ήπια ή εντονότερα περιστατικά βροχόπτωσης, ενώ τα τμήματα μεταξύ των κορυφών αντιστοιχούν σε σύντομες ή μακρές περιόδους ξηρασίας. Επίσης στο κάτω τμήμα του διαγράμματος φαίνονται οι συνολικές εισροές νερού στη λίμνη από όλα τα ρέματα που καταλήγουν σε αυτή καθώς και οι εκκροές από το ρέμα Γκίολι. Τα τμήματα των καμπυλών κατά τα οποία η παροχή αυξάνεται αντιστοιχούν στο διάστημα έντονης βροχόπτωσης. Τα τμήματα των καμπυλών κατά τα οποία η παροχή φθίνει αντιστοιχούν στις ξηρές περιόδους.

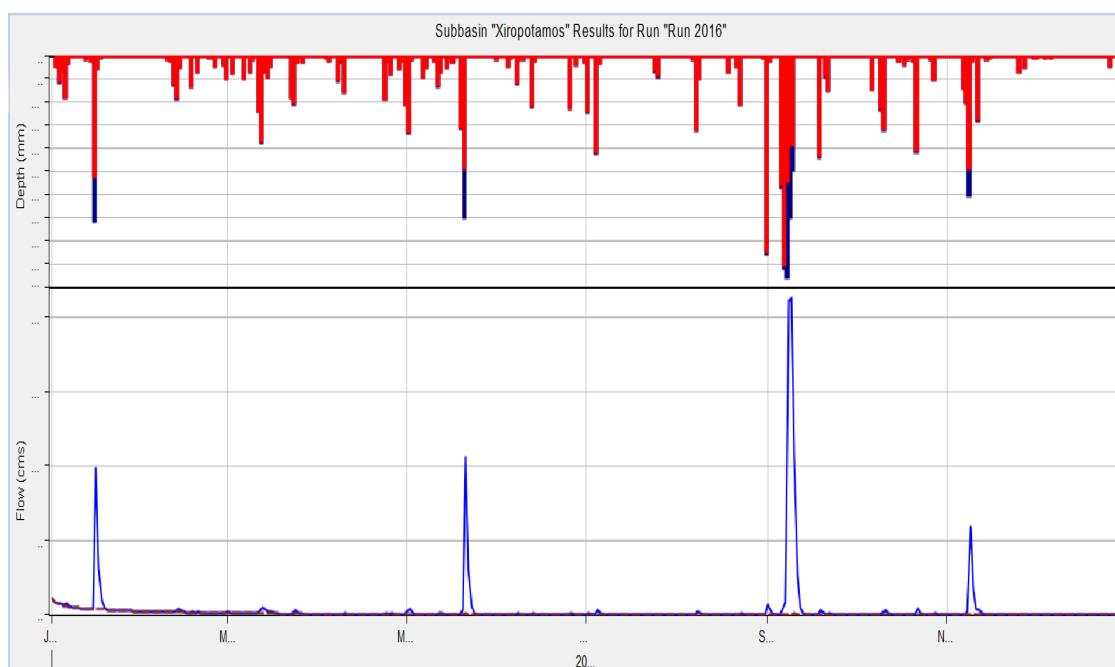
Για το 2016 από την σύγκριση των υδρογραφημάτων του σχήματος προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Οι δύο καμπύλες εμφανίζουν κορυφές στις ίδιες ημερομηνίες.

- Οι «βάσεις» των δυο καμπυλών ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό κατά τη διάρκεια της περιόδου που εξετάζεται. Με εξαίρεση τους πρώτους και τελευταίους μήνες του έτους που παρατηρείται μικρή απόκλιση.
- Το υδρογράφημα της καταγεγραμμένης στάθμης παρουσιάζει διακυμάνσεις στις αρχές του έτους σε σχέση με το υδρογράφημα της εκτιμώμενης στάθμης που ακολουθεί πιο ομαλές μεταβολές της στάθμης.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ροής του νερού στην υπολεκάνη του Ξηροπόταμου.

Για το 2016 παρατηρήθηκαν έντονες βροχοπτώσεις στα τέλη του μήνα Ιανουάριο, στις αρχές του Μαρτίου, στις αρχές του Σεπτεμβρίου και στις αρχές του Νοεμβρίου που αύξησαν την παροχή του νερού στην υπολεκάνη κατά τις περιόδους αυτές.



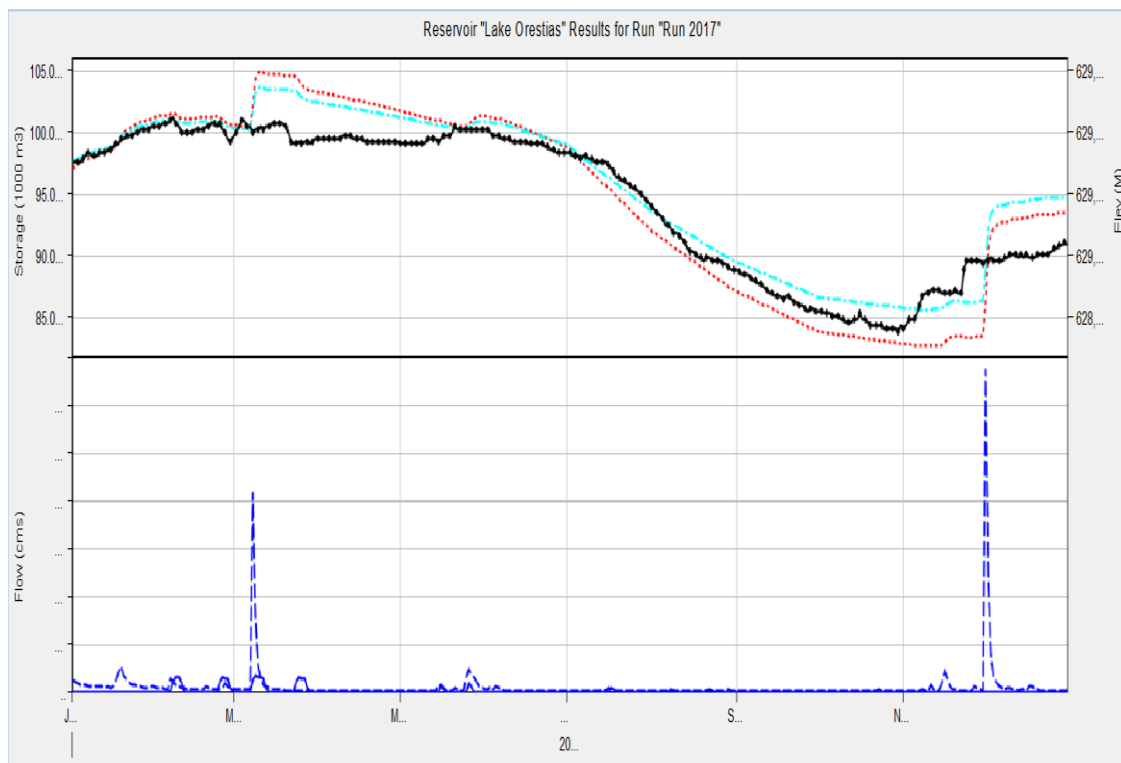
Διάγραμμα 18: ροή στην υπολεκάνη του Ξηροπόταμου το 2016.

Για το 2017 η εξάτμιση της λίμνης :

Πίνακας 28: Μηνιαίας εξάτμισης της λίμνης για το 2017.

Μήνας	Εξάτμιση(mm)
Ιανουάριος	3
Φεβρουάριος	30
Μάρτιος	50
Απρίλιος	60
Μάιος	70
Ιούνιος	100
Ιούλιος	230

Αύγουστος	170
Σεπτέμβριος	120
Οκτώβριος	40
Νοέμβριος	30
Δεκέμβριος	3



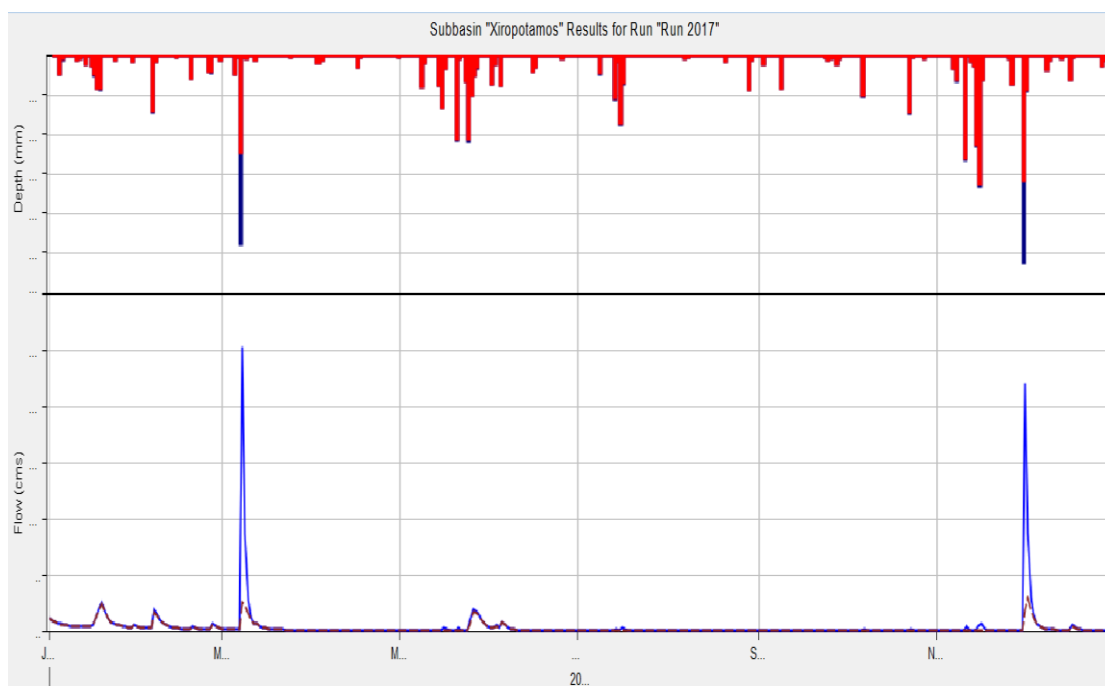
Διάγραμμα 19: Διασταύρωση αποτελεσμάτων αρχικής προσομοίωσης για το 2017.

Για το 2017 από την σύγκριση των υδρογραφημάτων του σχήματος προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Οι δύο καμπύλες εμφανίζουν κορυφές στις ίδιες ημερομηνίες με εξαίρεση την κορυφή της εκτιμώμενης στάθμης τον μήνα Μάρτιο όπου παρατηρείται αύξηση της στάθμης λογικά λόγω της έντονης βροχόπτωσης εκείνης της περιόδου
- Οι «βάσεις» των δυο καμπυλών ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό κατά τη διάρκεια της περιόδου που εξετάζεται. Με εξαίρεση τον μήνα Μάρτιο και τον Δεκέμβριο πιθανώς λόγω της έντονης βροχόπτωσης
- Το υδρογράφημα της καταγεγραμμένης στάθμης και το υδρογράφημα της εκτιμώμενης στάθμης στη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους ταυτίζονται.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ροής του νερού στην υπολεκάνη του Ξηροπόταμου.

Για το 2017 παρατηρήθηκαν έντονες βροχοπτώσεις στις αρχές του Μαρτίου και στις αρχές του Νοεμβρίου που αύξησαν την παροχή του νερού στην υπολεκάνη κατά τις περιόδους αυτές.

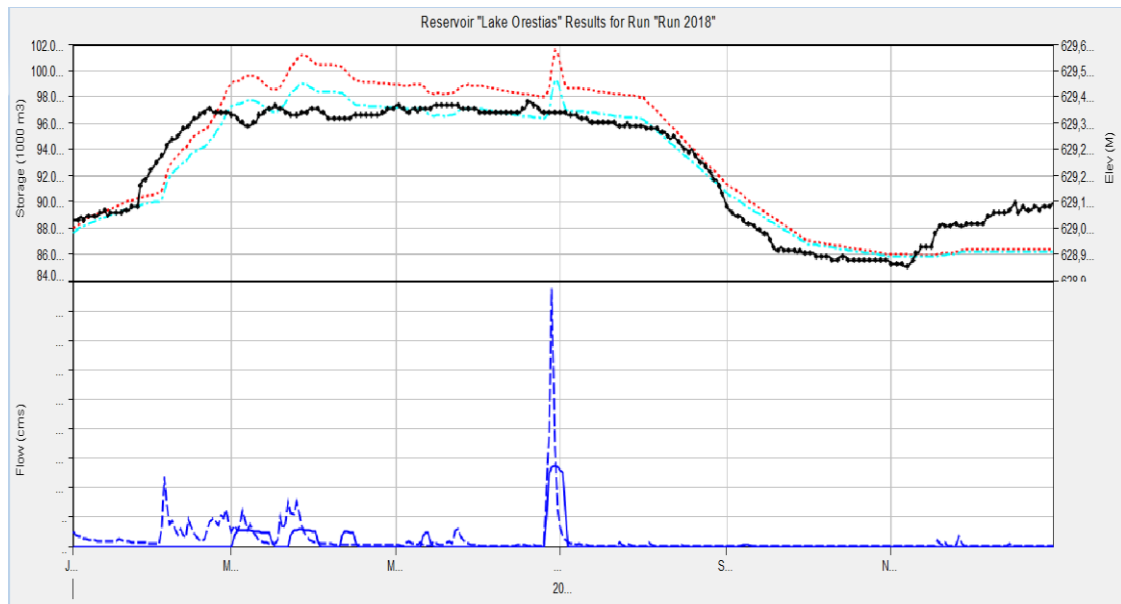


Διάγραμμα 20 : ροή στην υπολεκάνη του Ξηροπόταμου το 2017.

Για το 2018 η εξάτμιση της λίμνης :

Πίνακας 29: Μηνιαίας εξάτμισης της λίμνης για το 2018.

Μήνας	Εξάτμιση(mm)
Ιανουάριος	3
Φεβρουάριος	5
Μάρτιος	40
Απρίλιος	40
Μάιος	40
Ιούνιος	50
Ιούλιος	50
Αύγουστος	230
Σεπτέμβριος	150
Οκτώβριος	40
Νοέμβριος	5
Δεκέμβριος	3

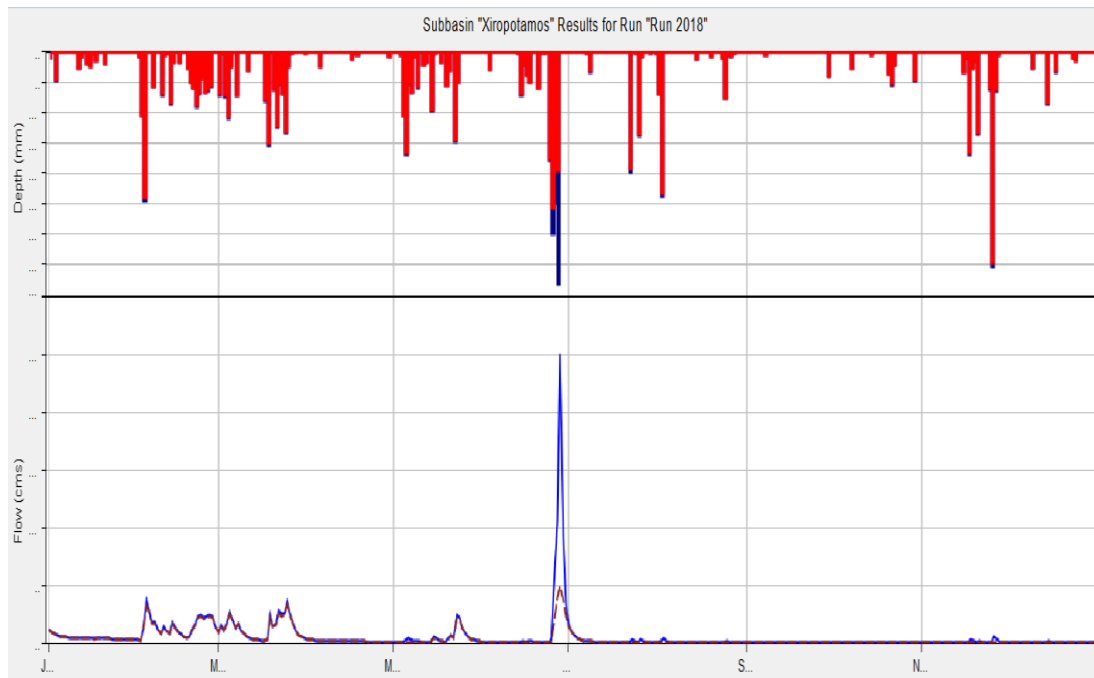


Διάγραμμα 21: Διασταύρωση αποτελεσμάτων αρχικής προσομοίωσης για το 2018.

Για το 2018 από την σύγκριση των υδρογραφημάτων του σχήματος προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Οι κορυφές του υδρογραφήματος εκτιμώμενης στάθμης παρουσιάζει μία καθυστέρηση σε σύγκριση με το υδρογράφημα της μετρημένης στάθμης.
- Οι «βάσεις» των δυο καμπυλών ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό κατά τη διάρκεια της περιόδου που εξετάζεται. Με εξαίρεση τους τελευταίους μήνες του έτους.
- Το υδρογράφημα της καταγεγραμμένης στάθμης και το υδρογράφημα της εκτιμώμενης στάθμης στη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους συγκλίνουν.
- Για το 2018 παρατηρήθηκαν έντονες βροχοπτώσεις τον μήνα Ιούλιο που αύξησαν την παροχή του νερού στην υπολεκάνη.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ροής του νερού στην υπολεκάνη του Ξηροπόταμου.

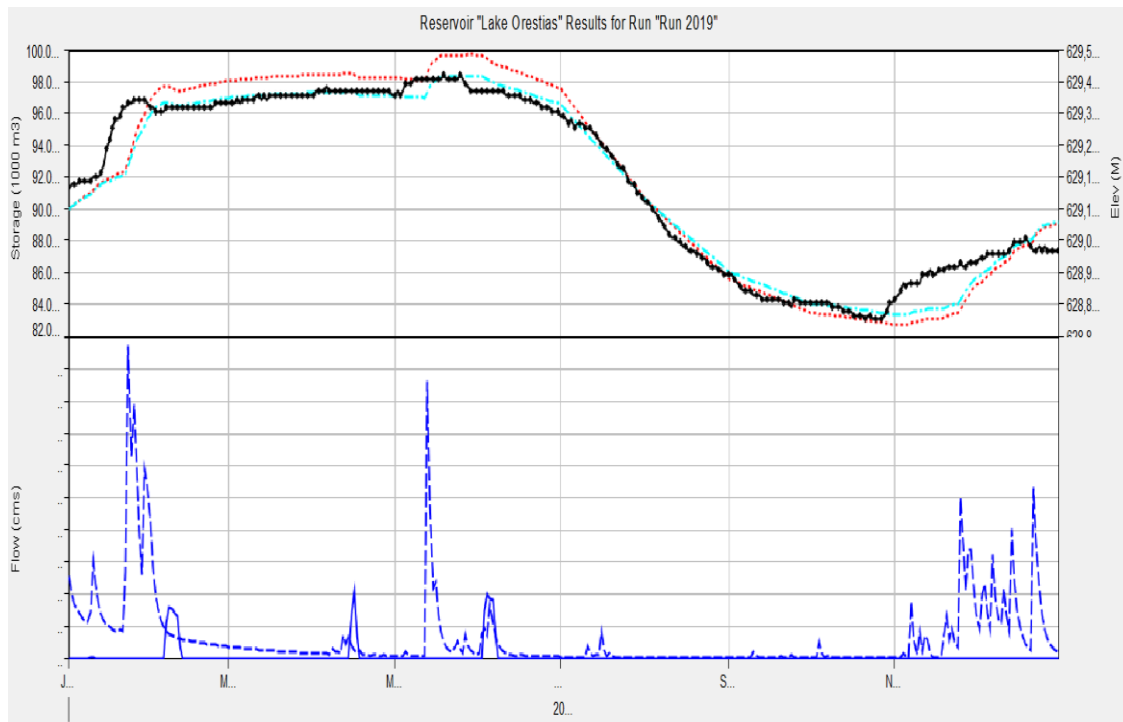


Διάγραμμα 22 : ροή στην υπολεκάνη του Ξηροπόταμου το 2018.

Για το 2019 η εξάτμιση της λίμνης :

Πίνακας 30: Μηνιαίας εξάτμισης της λίμνης για το 2019.

Μήνας	Εξάτμιση(mm)
Ιανουάριος	3
Φεβρουάριος	5
Μάρτιος	10
Απρίλιος	10
Μάιος	25
Ιούνιος	70
Ιούλιος	240
Αύγουστος	180
Σεπτέμβριος	80
Οκτώβριος	30
Νοέμβριος	5
Δεκέμβριος	5



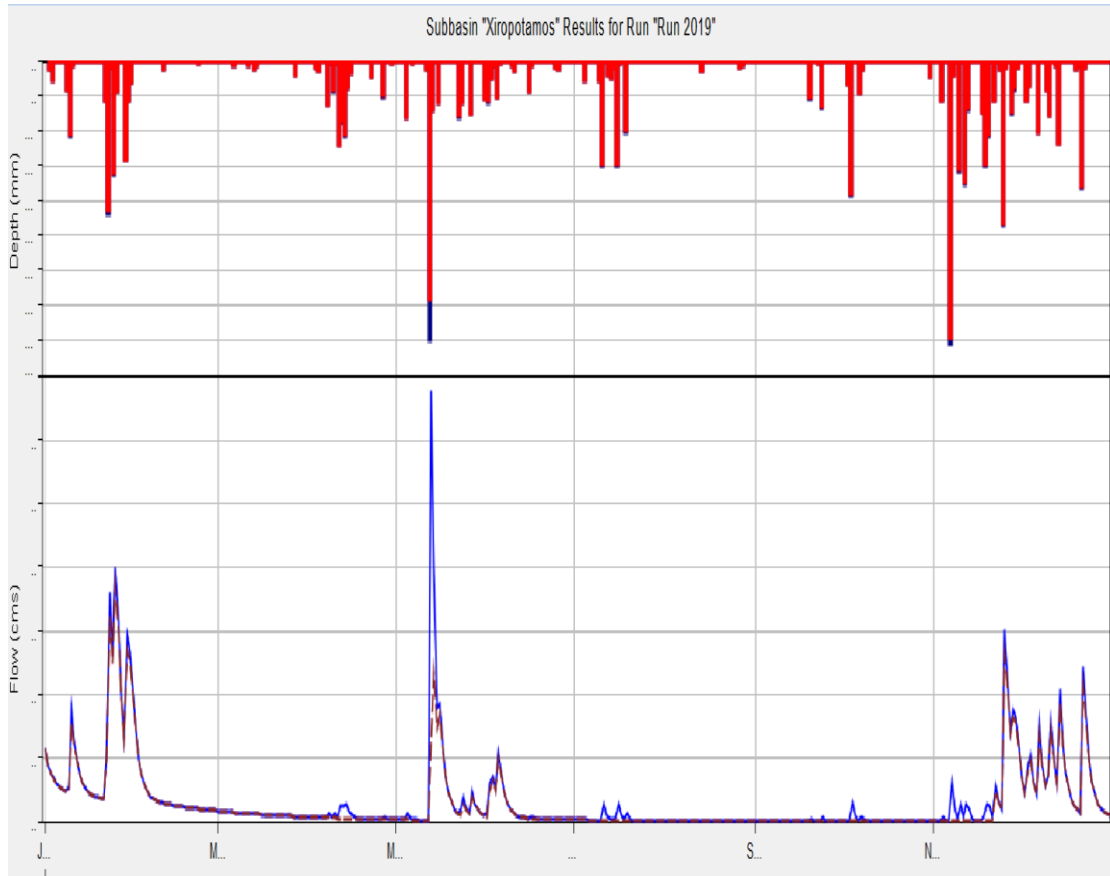
Διάγραμμα 23: Διασταύρωση αποτελεσμάτων αρχικής προσομοίωσης για το 2019.

Για το 2019 από την σύγκριση των υδρογραφημάτων του σχήματος προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Οι κορυφές του υδρογραφήματος εκτιμώμενης στάθμης παρουσιάζουν στη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους σύγκλιση με το υδρογράφημα της μετρημένης στάθμης με εξαίρεση μία χρονική καθυστέρηση που παρατηρείται στην αρχή του έτους
- Οι «βάσεις» των δυο καμπυλών ταυτίζονται σε υψηλό βαθμό κατά τη διάρκεια της περιόδου που εξετάζεται. Με εξαίρεση τους τελευταίους μήνες του έτους.
- Το υδρογράφημα της καταγεγραμμένης στάθμης και το υδρογράφημα της εκτιμώμενης στάθμης στη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους ταυτίζονται.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ροής του νερού στην υπολεκάνη του Ξηροπόταμου.

Για το 2019 παρατηρήθηκε αύξηση της ροής τον μήνα Φεβρουάριο, στις αρχές του Μαΐου και από τις αρχές του Νοεμβρίου.

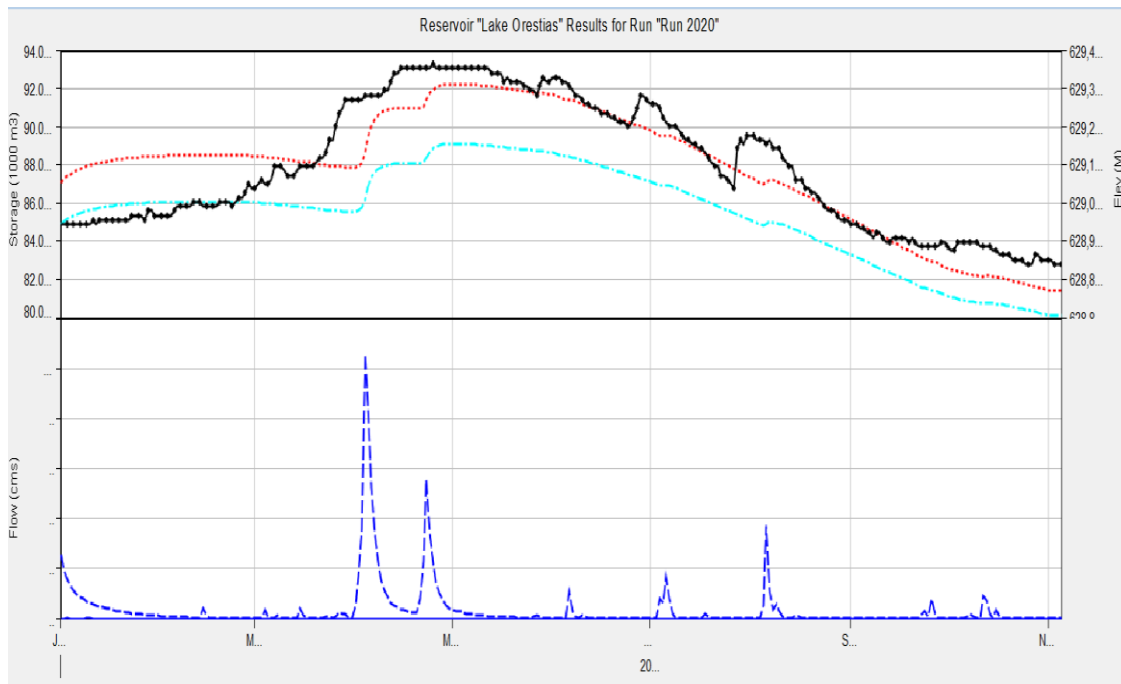


Διάγραμμα 24 : ροή στην υπολεκάνη του Ξηροπόταμου το 2019..

Για το 2020 η εξάτμιση της λίμνης :

Πίνακας 31: Μηνιαίας εξάτμισης της λίμνης για το 2020.

Μήνας	Εξάτμιση(mm)
Ιανουάριος	3
Φεβρουάριος	5
Μάρτιος	30
Απρίλιος	30
Μάιος	30
Ιούνιος	70
Ιούλιος	100
Αύγουστος	100
Σεπτέμβριος	100
Οκτώβριος	50
Νοέμβριος	5
Δεκέμβριος	5

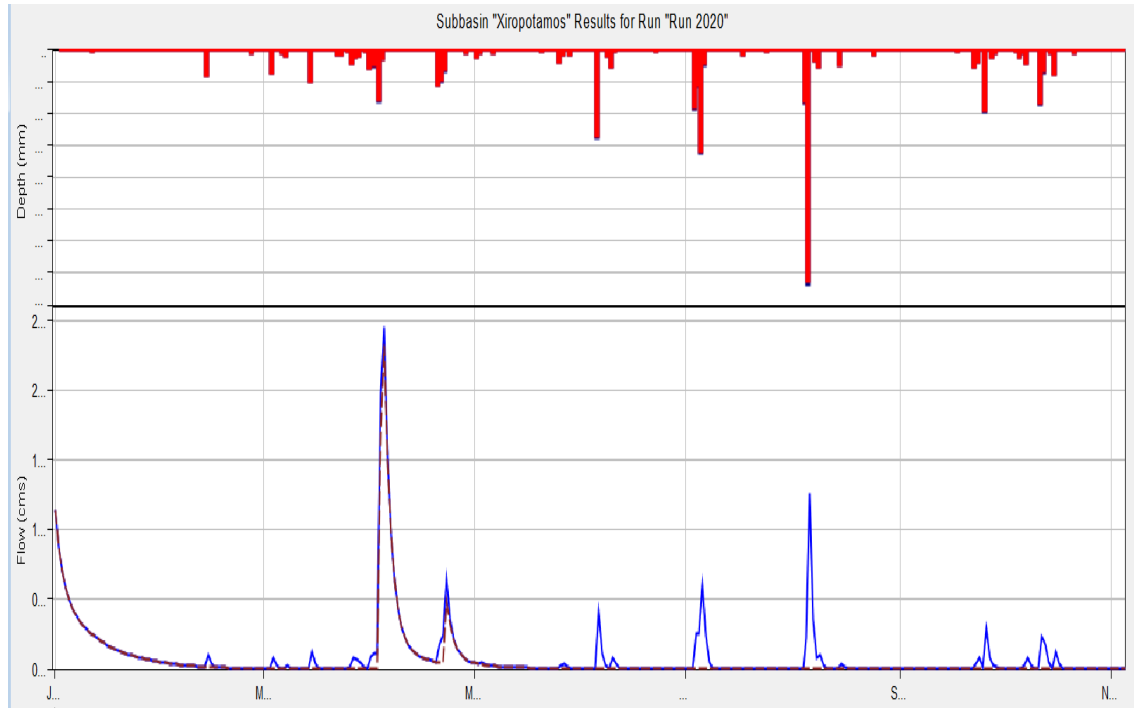


Διάγραμμα 25: Διασταύρωση αποτελεσμάτων αρχικής προσομοίωσης για το 2020..

Για το 2020 από την σύγκριση των υδρογραφημάτων του σχήματος προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Οι κορυφές του υδρογραφήματος μετρημένης στάθμης παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις στη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους ενώ το υδρογράφημα της εκτιμώμενης στάθμης παρουσιάζει μία πιο ομαλή διακύμανση καθόλη την διάρκεια του έτους.
- Οι «βάσεις» των δυο καμπυλών παρουσιάζουν απόκλιση. Με εξαίρεση τους τελευταίους μήνες του έτους.
- Το υδρογράφημα της καταγεγραμμένης στάθμης και το υδρογράφημα της εκτιμώμενης στάθμης στη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους παρουσιάζουν αναλογία ως προς την απόκλιση τους
- Για το 2020 παρατηρήθηκε έντονη αύξηση της ροής τον μήνα Ιανουάριο, τον Απρίλιο και τον Αύγουστο.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ροής του νερού στην υπολεκάνη του Ξηροπόταμου.



Διάγραμμα 26 : ροή στην υπολεκάνη του Ξηροπόταμου το 2020.

8 Συμπεράσματα

Μέσα από τη διαδικασία της βαθμονόμησης, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα σχετικά με τις ιδιαιτερότητες του υδρολογικού μοντέλου και την ικανότητά του να αναπαριστά τις διακυμάνσεις της στάθμης της λίμνης.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων και των καταγεγραμμένων μετρήσεων ανέδειξε ότι το μεγάλο πλήθος διαθέσιμων μετεωρολογικών δεδομένων οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα προσομοίωσης. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι πραγματοποιήθηκε ορθή κατάρτιση του μοντέλου.

Κατά τις περιόδους έντονων βροχοπτώσεων παρατηρήθηκε αρχικά αδυναμία του μοντέλου να αποδώσει την επιρροή του κορεσμού του εδάφους, αυτό οφείλεται στις παραμέτρους της βασικής ροής. Οι μέσες τιμές που επιλέχθηκαν αρχικά στη μέθοδο της βασικής ροής παρουσίασαν αδυναμία περιγραφής του φαινομένου. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκαν τιμές για την βασική ροή που προσέγγιζαν σε μεγαλύτερο βαθμό το φυσικό φαινόμενο. Όπως για την βασική ροή έτσι και για την παράμετρο της εξάτμισης της λίμνης οι μέσες τιμές που επιλέχθηκαν αδυνατούσαν να περιγράψουν αποτελεσματικά το φαινόμενο. Για αυτό επιλέχθηκαν νέες τιμές για την μέγεθος της εξάτμισης που προσεγγίζουν καλύτερα τις πραγματικές τιμές της. Η έλλειψη δεδομένων για τις παραμέτρους της βασικής ροής και της εξάτμισης οδήγησε στην προσαρμογή των παραμέτρων αυτών και στην επιλογή συγκεκριμένων μεθόδων. Σε περίπτωση ύπαρξης δεδομένων για την βασική ροή και την εξάτμιση θα χρησιμοποιούνταν άλλες μέθοδοι που προσομοίωναν καλύτερα τα φαινόμενα αυτά.

Όσον αφορά την σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις καταγεγραμμένες μετρήσεις, η τελική εκδοχή του μοντέλου θεωρείται ιδιαίτερα επιτυχημένη, με βάση τους στόχους και την εφικτή ακρίβεια ανάλυσης της συγκεκριμένης μελέτης. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι προβλέφθηκε επιτυχώς η τάξη μεγέθους της στάθμης για όλα τα ημερολογιακά έτη που μελετήθηκαν.

Εξετάζοντας την γενική εικόνα της προσομοίωσης της στάθμης της λίμνης της Καστοριάς με τη χρήση λογισμικού, γίνεται εμφανές ότι η πρόβλεψη της σε μεγάλη χωρική και χρονική κλίμακα είναι δυνατή και χρήσιμη. Το υδρολογικό μοντέλο που κατασκευάστηκε μπορεί να γίνει ένα πολύτιμο εργαλείο για την πρόβλεψη της στάθμης της λίμνης για μελλοντικά έτη ώστε να πραγματοποιείται η βέλτιστη διαχείριση της. Τέλος η ύπαρξη περισσότερων δεδομένων θα βοηθούσε το μοντέλο να εξάγει αποτελέσματα για την στάθμη της λίμνης με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια.

9 Βιβλιογραφία

1. Βαφειάδης Μ. (2004). Σημειώσεις «Υδρογραφήματα», Εκδόσεις ΤΥΤΠ-ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη
2. Ευστρατιάδης Α. (2006). Στρατηγικές και αλγόριθμοι πολυκριτηριακής βαθμονόμησης σύνθετων υδρολογικών μοντέλων, Κύκλος παρουσιάσεων ερευνητικών δραστηριοτήτων ΤΥΠΥΘΕ, ΕΜΠ, Αθήνα.
3. Δόικος Κ (2015). Προσομοίωση της ροής του Ποταμού Στρυμόνα και διερεύνηση των πλημμυρών της άνοιξης του 2015.
4. Μαμάσης Ν. (2009). Υδρολογικά μοντέλα και εφαρμογές, Κύκλος παρουσιάσεων Προχωρημένη Υδρολογία, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα
5. Καρακατσάνης Δ. (2011). Το πρόγραμμα HEC-HMS 3.0.0: μικρός οδηγός για το Hec-HMS στηριζόμενος στη λεκάνη της Μεσόχωρα, Θεσσαλονίκη.
6. Κουτσογιάννης Δ & Ξανθόπουλος Θ (2016). Τεχνική υδρολογία
7. Meteo blue meteoblue.com
8. Δημόσια Ανοιχτά Δεδομένα, geodata.gov.gr/geodata/
9. European Soil Data Centre, Joint Research Centre, European Commission. eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/country_maps/metadata.cfm?mycountry=GR
10. Νικολακόπουλος/repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2529/1/Nikolakopoulos_Chapter_01.pdf
11. U.S. Army Corps of Engineers (2013). Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual, USA
12. U.S. Army Corps of Engineers (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual, USA
13. Dingman, S. L., (1994). Physical Hydrology, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
14. U.S. Geological Survey's (USGS) usgs.gov
15. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας opengov.gr
16. Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ geo.auth.gr
17. National Oceanic and Atmospheric Administration. gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=daily&layers=111
18. Miguel Ponce V. Engineering Hydrology, Principles and Practices.
19. Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Παρατήρησης Γης Copernicus.eu
20. Αντιπεριφέρεια Καστοριάς kastoria.pdm.gov.gr