



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Σύγχρονες Τεχνολογίες Διαχείρισης Περιβαλλοντικών Κίνδυνων»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΙΧΘΥΟΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ ΣΕ ΦΥΣΙΚΟ ΥΔΑΤΟΡΡΕΥΜΑ ΜΕ
ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**



ΣΠΥΡΙΔΟΥΛΑ ΝΤΟΛΑ

00030

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: **Ευαγγελία Φαρσιρώτου,**

**Καθηγήτρια Τμήματος Γεωπονίας Ιχθυολογίας και
Υδάτινου Περιβάλλοντος Πανεπιστημίου Θεσσαλίας,
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ.**

ΒΟΛΟΣ, Σεπτέμβριος 2024



UNIVERSITY OF THESSALY

INTERDEPARTMENTAL POSTGRADUATE STUDIES

PROGRAMME

“Advanced Technologies for Environmental Risk Management”

POSTGRADUATE MASTER’S THESIS

INVESTIGATION OF FISH PASSAGE OPERATION IN A NATURAL RIVER WITH A NUMERICAL MODEL SIMULATION



SRYRIDOULA NTOLA

00030

Supervisor: Evangelia Farsirotou,

Professor of the Department of Agriculture, Ichthyology and Aquatic
Environment of the University of Thessaly, Dr. Civil Engineer A.P.Th.

Volos, September 2024

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Σύγχρονες Τεχνολογίες Διαχείρισης Περιβαλλοντικών Κινδύνων»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΙΧΘΥΟΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ ΣΕ
ΦΥΣΙΚΟ ΥΔΑΤΟΡΡΕΥΜΑ ΜΕ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

INVESTIGATION OF FISH PASSAGE OPERATION IN A NATURAL
RIVER WITH A NUMERICAL MODEL SIMULATION

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή το Σεπτέμβριο, 2024.

Επιβλέπων/-ουσα: Ευαγγελία Φαρσιρώτου,

Καθηγήτρια Τμήματος Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου
Περιβάλλοντος Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Δρ. Πολιτικός
Μηχανικός Α.Π.Θ.

Νικόλαος Αλαμανής

Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος
Γεωπονίας-Αγροτεχνολογίας του
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Σπυρίδων Κωτσόπουλος

Καθηγητής Τμήματος
Συστημάτων Ενέργειας

ΒΟΛΟΣ, Σεπτέμβριος 2024

[III]

.....
Σπυριδούλα Ντόλα

Γεωπόνος, Ιχθυολόγος

Copyright © Σπυριδούλα Ντόλα, (2024)

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στο συγγραφέα.

Το περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας εκφράζει τις απόψεις του/της συγγραφέα και ουδεμία ευθύνη για το περιεχόμενο φέρουν ο/η επιβλέπων/ουσα, και η εξεταστική επιτροπή για αυτό.

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή.

Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης.

Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στη Διπλωματική μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Μεταπτυχιακού Τίτλου των Μεταπτυχιακών Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων.

Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η Μ.Δ.Ε. προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.

Ονοματεπώνυμο Συγγραφέα: Σπυριδούλα Ντόλα

Υπογραφή:

Ημερομηνία: Σεπτέμβριος, 2024

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στο να φέρω σε πέρας την παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Επιβλέπουσα της εργασίας αυτής, κα Φαρσιώτου Ευαγγελία, για την πολύτιμη βοήθειά της και τη διαρκή υποστήριξή της. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση, βοήθεια και προ πάντων κατανόηση και ανοχή καθ' όλο το χρονικό διάστημα των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	17
1.1. Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (EL08).....	17
1.1.1. Λεκάνη Απορροής (ΛΑΠ) Αλμυρού – Πηλίου.....	18
1.2. Αλμυρός	19
1.3. Λίμνες Ζερέλια	21
1.3.1. Μαγούλα Ζερέλια	22
1.3.2. Γεωλογικά χαρακτηριστικά	23
1.3.3. Προτεινόμενα Σενάρια Δημιουργίας των λιμνών	24
1.3.4. Πανίδα	25
1.4. Επιλογή υδραυλικής κατασκευής ιχθυοπεράσματος	27
1.4.1. Κλίμακες διέλευσης ιχθύων.....	28
1.4.2. Κλίμακα ‘Pool Weir’	29
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	33
2.1. Arc-GIS και HEC-RAS.....	33
2.2. Μεθοδολογία	36
2.2.1. Επεξεργασία στο πρόγραμμα του Arc-GIS	36
2.2.2. Υπολογισμός παροχής νερού για 50, 100 και 1.000 έτη στο πρόγραμμα Microsoft Excel	53
2.2.3. Δημιουργία πλευρικών κατασκευών με θυροφράγματα στο πρόγραμμα HEC-RAS.....	60
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	67
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ	71
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	72
5.1. Ξένη βιβλιογραφία.....	72
5.2. Ελληνική βιβλιογραφία.....	73
5.3. Ιστοσελίδες.....	75

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας με τις επιμέρους λεκάνες απορροής (Υ.ΠΕ.ΘΕ)	19
Εικόνα 2: Γεωγραφική τοποθεσία Αλμυρού (Βικιπαίδεια).....	21
Εικόνα 3: Λίμνες Ζερέλια (Restart Tourism)	22
Εικόνα 4: Χαρακτηριστικά πετρώματα της μικρής λίμνης (Γαϊτανόπουλος Α., 2014)	23
Εικόνα 5: α) Εμφάνιση αλλούβιακού υλικού, β):Ανθρακικές κροκάλες, γ):Χαοτική διάσταση σε μικροτομή νότια της μεγάλης λίμνης (Lagios et.al, 2010)	24
Εικόνα 6: Α) Ένα νανοβουτηχτάρι στις ακροκαλαμιές, Β) Ένας βαλκανοβάτραχος στην όχθη (Natura Graeca)	26
Εικόνα 7: Κατασκευή κλίμακας Pool weir στην Βέρνη (Ελβετία) (FAO, 2002).....	32
Εικόνα 8: Κατασκευή κλίμακας Pool weir χωρίς παροχή ροής (Α) και με παροχή ροής (Β) (FAO, 2002).....	32
Εικόνα 9: Προσθήκη αρχείου υπολεκανών και ψηφιακού αρχείου Raster DEM στο χάρτη	38
Εικόνα 10: Διόρθωση αρχείου DEM και περικοπή στην υπολεκάνη.....	39
Εικόνα 11: Παρουσίαση κατεύθυνσης ροής νερού εντός της υπολεκάνης.....	40
Εικόνα 12: Παρουσίαση σημείων διαφορετικής συγκέντρωση ροής με 2 κλίμακες.	41
Εικόνα 13: Απεικόνιση ισουψών καμπυλών της υπολεκάνης των 20m (ανοιχτό πράσινο) και των 50m(σκούρο πράσινο).....	42
Εικόνα 14: Παρουσίαση σχεδιασμένης υπό μελέτη λεκάνης (σχήμα καλυμμένο με πράσινο χρώμα).....	43
Εικόνα 15: Εμφάνιση αποτελέσματος έπειτα από υπολογισμό εμβαδού της υπό μελέτη λεκάνης	44
Εικόνα 16: Περικοπή αρχείου DEM για την εμφάνιση ψηφιακού υψομέτρου στην υπό μελέτη λεκάνη	44
Εικόνα 17: Εμφάνιση ισουψών καμπυλών 10 m	45
Εικόνα 18: Παρουσίαση ποταμών 1 ^{ης} , 2 ^{ης} και 3 ^{ης} τάξης	46
Εικόνα 19: Σχεδίαση κύριου ποταμού της υπό μελέτη λεκάνης.....	46
Εικόνα 20: Εμφάνιση αποτελέσματος έπειτα από τον υπολογισμό μήκους του ποταμού που διασχίζει την υπό μελέτη λεκάνη	47
Εικόνα 21: Παρουσίαση χάρτη κλίσεων γης στην υπό μελέτη λεκάνη.....	48
Εικόνα 22: Εμφάνιση και περικοπή χάρτη χρήσεων γης στην υπό μελέτη λεκάνη ...	49
Εικόνα 23: Διαχωρισμός χρήσεων γης (2 κατηγορίες) στην υπό μελέτη λεκάνη	50
Εικόνα 24: Περικοπή όμβριων καμπυλών εντός ορίων στην υπό μελέτη λεκάνη	51
Εικόνα 25: Εμφάνιση αποτελέσματος μέσης τιμής για την παράμετρο ‘λ’	51
Εικόνα 26: Εμφάνιση αποτελέσματος μέσης τιμής για την παράμετρο ‘β’	52
Εικόνα 27: Εμφάνιση αποτελέσματος μέσης τιμής για την παράμετρο ‘η’	52

Εικόνα 28: Παρουσίαση γεωλογικού χάρτη υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας (ΥΠΕΚΑ).....	57
Εικόνα 29: Παρουσίαση υδρολιθικού χάρτη υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας (ΥΠΕΚΑ).....	58
Εικόνα 30: Παρουσίαση εδαφικού χάρτη υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας (ΥΠΕΚΑ).....	58
Εικόνα 31: Προσθήκη αρχείων υπολεκάνης και κύριου υδατορέματος της, σχεδιασμός κύριου υδατορέματος, οχθών, διατομών	61
Εικόνα 32: Παρουσίαση σχεδιασμού υδατορέματος και διατομών στο περιβάλλον της γεωμετρίας	62
Εικόνα 33: Παρουσίαση πρώτης διατομής με διορθωμένα δεδομένα.....	62
Εικόνα 34: Διαμόρφωση προφίλ για τα 50, 100 και 1.000 έτη με προσθήκη τιμών παροχής και ορισμός κρίσιμης ροής.....	63
Εικόνα 35: Συμπλήρωση δεδομένων για την δημιουργία θυροφραγμάτος μετά την δεύτερη διατομή (α' περίπτωση: ύψος ανοίγματος θυρών 0.4 m).....	64
Εικόνα 36: Συμπλήρωση δεδομένων για την δημιουργία θυροφραγμάτος μετά την δεύτερη διατομή (α' περίπτωση: ύψος ανοίγματος θυρών 0.3 m).....	64
Εικόνα 37: Ορισμός μέτρων ανοίγματος της θύρας για τα 50, 100 και 1.000 έτη στην πρώτη πλευρική κατασκευή.....	65
Εικόνα 38: Συμπλήρωση δεδομένων για την εκτέλεση του προγράμματος.....	65
Εικόνα 39: Εκτέλεση του προγράμματος	66
Εικόνα 40: Αποτελέσματα πλευρικών κατασκευών θυροφραγμάτων με παροχή νερού για 50, 100 και 1.000 έτη (α' περίπτωση με βάθος ανοίγματος των θυρών 0.3 m).....	68
Εικόνα 41: Αποτελέσματα πλευρικών κατασκευών θυροφραγμάτων με παροχή νερού για 50, 100 και 1.000 έτη (α' περίπτωση με βάθος ανοίγματος των θυρών 0.4 m).....	68

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3: Τιμές αποτελεσμάτων για το εμβαδόν υπολεκάνης, μήκος υδατορέματος, μέγιστο, μέσο και ελάχιστο υψόμετρο υπολεκάνης.....	54
Πίνακας 4: Σύνοψη δεδομένων για τον υπολογισμό σημειακής έντασης βροχόπτωσης	54
Πίνακας 5: Παρουσίαση τιμών σημειακής έντασης, συντελεστή και επιφανειακή ένταση βροχόπτωσης.....	55
Πίνακας 6: Τιμές του συντελεστή απορροής εκτός αναπτυγμένων χωρών (ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ, 2002).....	59
Πίνακας 7: Αποτελέσματα τιμών για τους επιμέρους συντελεστές και τον τελικό συντελεστή απορροής.....	59
Πίνακας 8: Αποτελέσματα υπολογισμού παροχής νερού στην υπό μελέτη λεκάνη για περιόδους επαναφοράς 50, 100 και 1.000 έτη	60
Πίνακας 9: Υδραυλικά αποτελέσματα για την α' περίπτωση κατασκευής (με βάθος ανοίγματος των θυρών 0.3 m).....	69
Πίνακας 10: Υδραυλικά αποτελέσματα για την β' περίπτωση κατασκευής (με βάθος ανοίγματος των θυρών 0.3 m).....	70

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Διαδοχικές θέσεις εγκατάστασης και βυθισμένων οπών κλίμακας ‘Pool Weir’ (τροποποιημένο από FAO, 2002)	30
Σχήμα 2: Κατά μήκος τομή κλίμακας ‘Pool Weir’ (τροποποιημένο από FAO, 2002)	31

ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΥΠΕΚΑ	Υπουργείο Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής
κ.λπ	και λοιπά
κ.α.	και άλλα

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΕΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

m	μέτρα
km	χιλιόμετρα
km ²	τετραγωνικά χιλιόμετρα
mm	χιλιοστά

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαχείριση και η προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων αποτελούν βασικό στοιχείο της περιβαλλοντικής διαχείρισης, με τη διευκόλυνση της διέλευσης των ιχθύων μέσω των ιχθυοπερασμάτων να διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση της βιοποικιλότητας. Στο πλαίσιο αυτό, οι υδραυλικές κατασκευές χρησιμοποιούνται ευρέως για να επιτρέψουν την ασφαλή μετακίνηση των ιχθύων, εξασφαλίζοντας τη διέλευση των ιχθυοπερασμάτων για να φτάσουν στους φυσικούς τόπους αναπαραγωγής τους ή να μεταναστεύσουν. Η επιλογή και ο σχεδιασμός των κατασκευών αυτών πρέπει να βασίζεται σε συγκεκριμένες υδραυλικές συνθήκες που καθορίζονται από την τοπογραφία και τη ροή του ποταμού, καθώς και στις ανάγκες των ειδών που διαβιούν σε αυτό το περιβάλλον.

Η παρούσα μελέτη εξετάζει την αποτελεσματικότητα λειτουργίας των πλευρικών κατασκευών τύπου Pool Weir στο ποταμό, στην περιοχή δίπλα στις λίμνες Ζερέλια, με σκοπό τη διευκόλυνση της διέλευσης των ιχθύων σε φυσικά υδατορρεύματα. Η έρευνα επικεντρώνεται στη χρήση τεχνολογιών αριθμητικής προσομοίωσης, όπως το HEC-RAS και το Arc-GIS, για την ανάλυση των υδραυλικών συνθηκών που απαιτούνται για τη σωστή λειτουργία των κατασκευών. Τα αποτελέσματα της μελέτης αποκαλύπτουν ότι η παροχή νερού της περιοχής είναι αρκετά μικρή για την απόδοση λειτουργίας των κατασκευών και έτσι καθιστά τη διέλευση των ιχθύων δύσκολη. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα μικρό βάθος ροής για τις περιόδους επαναφοράς 50, 100 και 1.000 έτη. Η έλλειψη επαρκούς βάθους ροής οδηγεί σε μη ιδανικές συνθήκες διέλευσης των ιχθύων, αυξάνοντας τον κίνδυνο παγίδευσης ή τραυματισμού. Η μελέτη καταλήγει στο ότι οι συγκεκριμένες υδραυλικές κατασκευές δεν λειτουργούν αποδοτικά με την παροχή ροής στην υπολεκάνη της περιοχής μελέτης. Επομένως, απαιτείται η βελτίωση των υδραυλικών συνθηκών και η αύξηση της παροχής στον ποταμό για την καλύτερη λειτουργία των κατασκευών με φυσικό τρόπο.

Λέξεις-Κλειδιά: Λεκάνη Αλμυρού, υπολεκάνη, κλίμακα Pool Weir, περίοδοι επαναφοράς, παροχή νερού, βάθος ροής

ABSTRACT

The management and protection of aquatic ecosystems is a key element of environmental management, with the facilitation of fish passage through natural watercourses playing a key role in maintaining biodiversity. In this context, hydraulic structures are widely used to allow the safe movement of fish, ensuring the passage of fish passages to reach their natural breeding grounds or to migrate. The selection and design of these structures must be based on specific hydraulic conditions determined by the topography and flow of the river, as well as the needs of the species that live in this environment.

The present study examines the operation efficiency of the Pool Weir type lateral constructions in the river in the area next to the Zerelia Lakes, with the aim of facilitating the passage of fish in natural watercourses. The research focuses on the use of numerical simulation technologies, such as HEC-RAS and Arc-GIS, to analyze the hydraulic conditions required for the proper operation of structures. The results of the study reveal that the water supply of the area is insufficient for the operationalefficiency of the structures and thus makes the passage of fish difficult. This fact resultsin shallow flow depth for the return periods of 50, 100 and 1.000 years. Lack of adequate flow depth results in sub-optimal fish passage conditions, increasing the risk of entrapment or injury. The study concludes that the specific hydraulic constructions do not work efficiently with the supply of water flow in the studied subbasin. Improvement of the hydraulic conditions and flow discharge increment is necessary foroptimum operation of the structures in a natural way.

Key words: Almyros Basin, Sub-basin, Pool Weir Scale, Return Periods, Flow Rate, Flow Depth

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο σκοπός της παρούσας μελέτης είναι ο σχεδιασμός και η αξιολόγηση ενός ιχθυοπεράσματος για τη λίμνη Ζερέλια τύπου pool-weir, αξιοποιώντας σύγχρονες τεχνικές γεωγραφικής ανάλυσης και υδραυλικής προσομοίωσης, όπως το Arc-GIS και το HEC-RAS. Οι επιμέρους στόχοι περιλαμβάνουν τη μελέτη της γεωμορφολογίας και των υδραυλικών συνθηκών της περιοχής λίμνης Ζερέλια. Τον προσδιορισμό της κατάλληλης τοποθεσίας για την εγκατάσταση του ιχθυοπεράσματος με χρήση εργαλείων GIS. Την προσομοίωση των υδραυλικών συνθηκών στις διόδους ιχθύων με το HEC-RAS, διασφαλίζοντας την αποδοτικότητα και βιωσιμότητά τους. Τέλος, την παροχή προτάσεων για την ενίσχυση απόδοσης λειτουργίας για την συγκεκριμένη κατασκευή.

Το πρόβλημα που διερευνά η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία αφορά τον προσδιορισμό της βέλτιστης και αποδοτικότερης λειτουργίας πλευρικής κατασκευής ιχθυοπεράσματος με μοντέλο προσομοίωσης, για την περιοχή μελέτης, λαμβάνοντας υπόψη τις υδρολογικές, υδραυλικές και περιβαλλοντικές συνθήκες.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (EL08)

Το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (EL08) αποτελείται από το σύνολο της Περιφέρειας Θεσσαλίας, με εξαίρεση τα νησιά των Σποράδων, ένα μικρό τμήμα δυτικά που ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, ένα μικρό τμήμα νότια που ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας και ένα μικρό τμήμα βόρεια που ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Μακεδονίας και το νότιο τμήμα της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας (περιοχή Πλαταμώνα).

Δομή Υδατικού Διαμερίσματος

Η συνολική έκταση του Υδατικού Διαμερίσματος ισούται με 13.140 km². Ο πληθυσμός του, με βάση τα στοιχεία της ΕΛ.ΣΤΑΤ 2011, είναι 703.459 κάτοικοι. Από διαχειριστική άποψη το Διαμέρισμα υπάγεται στην Αποκεντρωμένη Διοίκηση Θεσσαλίας – Στερεάς Ελλάδας και στην Διεύθυνση Υδάτων Θεσσαλίας. Το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας περιλαμβάνει δύο λεκάνες: την λεκάνη του Πηνειού (EL0816) και την λεκάνη του Αλμυρού – Πήλιου (EL0817) (Εικ. 1).

Κλίμα

Το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (EL08) χωρίζεται σε τρεις περιοχές: την ανατολική παράκτια ορεινή περιοχή, η οποία έχει μεσογειακό κλίμα, τα κεντρικά πεδινά, που έχουν κλίμα ηπειρωτικό και το δυτικό οροπέδιο, το οποίο έχει ορεινό κλίμα. Η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι από 16 έως 17°C. Η ετήσια διαφορά θερμοκρασίας ξεπερνά τους 22°C. Οι πιο ζεστοί μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος και οι πιο κρύοι μήνες ο Ιανουάριος, ο Φεβρουάριος και ο Δεκέμβριος. Οι παγετοί εμφανίζονται συχνά μεταξύ Νοεμβρίου και Απριλίου. Το ποσοστό βροχόπτωσης στο διαμέρισμα είναι υψηλότερο στα δυτικά, μειώνεται στα πεδινά τμήματα και αυξάνεται στις ορεινές περιοχές στα ανατολικά. Οι ετήσιες ενδείξεις βροχόπτωσης είναι 468 mm στο σταθμό Λαρίσης, 550 mm στο σταθμό Τυρνάβου και 1.142 mm στον ορεινό σταθμό Μουζακίου. Η μέση ετήσια επιφανειακή βροχόπτωση της επαρχίας εκτιμάται ότι είναι 678 mm. Οι μήνες με εντονότερη βροχόπτωση είναι από τον Οκτώβριο έως τον Ιανουάριο, ενώ οι μήνες με τις λιγότερες πιθανότητες βροχόπτωσης είναι ο Ιούλιος

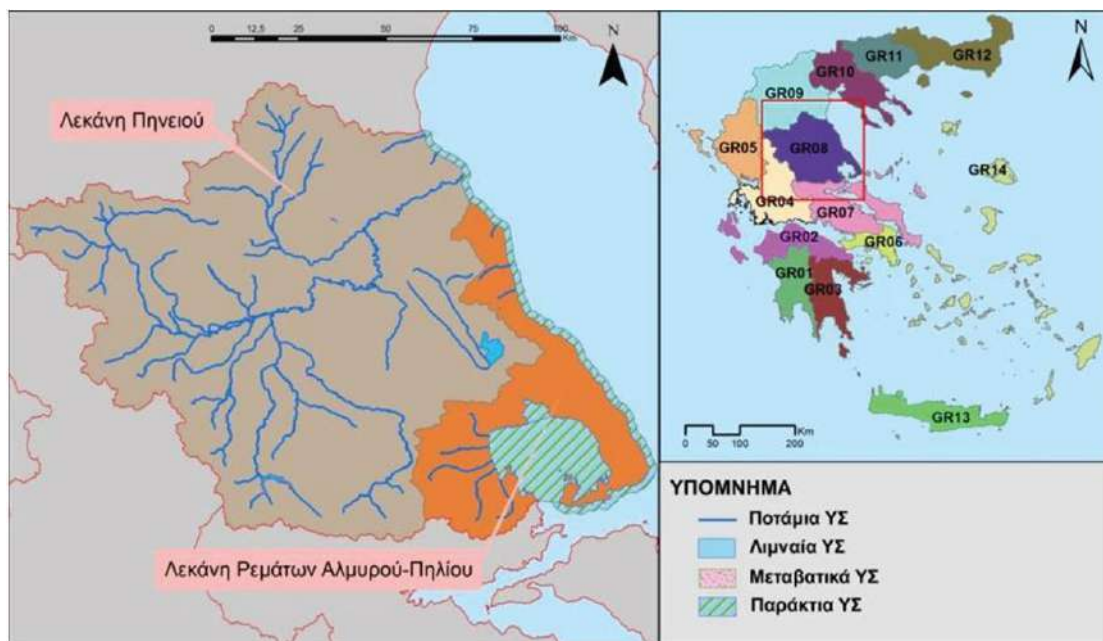
και Αύγουστος. Οι χιονοπτώσεις είναι συχνές, ειδικότερα στα ορεινά σημεία του διαμερίσματος, και γίνονται πιο έντονες από τα νότια προς τα βόρεια και από τα ανατολικά προς τα δυτικά (ΥΠΕΚΑ).

1.1.1. Λεκάνη Απορροής (ΛΑΠ) Αλμυρού – Πηλίου

Λεκάνη Απορροής Ποταμού / Υδρολογική Λεκάνη / Συλλεκτήρια Λεκάνη / Λεκάνη αποστράγγισης, σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60, ορίζεται ως η οριζόντια προβολή του εδάφους, μέσα στην οποία συγκεντρώνεται η συνολική απορροή μέσα από ρέματα, ποτάμια και πιθανές λίμνες ενώ καταλήγει στη θάλασσα σε ένα συγκεκριμένο σημείο του εδάφους γνωστό ως εκβολή ή δέλτα του ποταμού (FAΣ, 2016).

Αξίζει να σημειωθεί πως η Οδηγία 2000/60/ΕΕ αφορά ένα ολιστικό πλαίσιο κοινοτικής δράσης σχετικά με τα ύδατα της Ευρώπης. Έχει τεθεί σε εφαρμογή από τις 22/12/2000 και στοχεύει στη διαχείριση όλων των υδάτων (εσωτερικά, υπόγεια, μεταβατικά, παράκτια, θαλάσσια). Η διαχείρισή τους εξαρτάται από την εξέταση οικολογικών παραμέτρων (βιολογικές, υδρομορφολογικές και φυσικοχημικές παράμετροι). Επιπλέον, η διαχείριση των υδάτων πραγματοποιείται σε κάθε οικοπεριοχή ξεχωριστά, ανάλογα με τα κλιματικά και τα γεωγραφικά δεδομένα. Ως μονάδα διαχείρισης ορίζεται η Περιοχή Λεκάνης Απορροής Ποταμού. Τέλος, ο σκοπός της Οδηγίας είναι η καλή κατάσταση των υδάτων στην Ευρώπη μέχρι το 2015. Οι πέντε κλίμακες αξιολόγησης των υδάτων είναι άριστη, καλή, μέτρια, ελλιπής και κακή (Ψιλοβίκος, 2016).

Στη Λεκάνη Απορροής του Αλμυρού - Πηλίου του υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας, δεν εντοπίζονται μεγάλοι ποταμοί αλλά ένα σύνολο ρεμάτων που καταλήγουν κατά κύριο λόγο στον Παγασητικό κόλπο. Η συνολική έκταση της λεκάνης ισούται με 2.079 km² (ΥΠΕΚΑ).



Εικόνα 1: Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας με τις επιμέρους λεκάνες απορροής (Υ.Π.Ε.ΘΕ)

1.2. Αλμυρός

Ο Αλμυρός είναι μια πόλη του νομού Μαγνησίας, στη Θεσσαλία, Ελλάδα (Εικ. 2). Αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα διοικητικά, εμπορικά και πολιτιστικά κέντρα της περιοχής. Βρίσκεται περίπου 35 km νότια της πόλης του Βόλου και είναι χτισμένος σε υψόμετρο περίπου 80 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Η πόλη βρίσκεται σε μια εκτεταμένη και εύφορη πεδιάδα, γνωστή ως πεδιάδα του Αλμυρού, που εκτείνεται προς τα δυτικά και βόρεια. Στα δυτικά της πόλης υψώνεται το όρος Όθρυς, ένα από τα σημαντικότερα βουνά της Κεντρικής Ελλάδας, με μέγιστο υψόμετρο περίπου 1.726 m. Το Όθρυς είναι σημαντικό για το μικροκλίμα της περιοχής και την απορροή. Την πεδιάδα του Αλμυρού διασχίζει ο ποταμός Ξεριάς, ένας εποχιακός ποταμός, γνωστός για την έντονη ροή του κατά τη διάρκεια των βροχερών μηνών και την σχεδόν ξηρασία του κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, που ρέει κοντά στην πόλη. Βορειοανατολικά της πόλης βρίσκονται οι δύο λίμνες Ζερέλια, που είναι ηφαιστειακής προέλευσης και αποτελούν σημαντικούς υδροβιότοπους για την περιοχή και θα απασχολήσουν την παρούσα εργασία.

Η περιοχή του Αλμυρού κατοικείται από τη Νεολιθική Εποχή και την Πρώιμη περίοδο του Χαλκού, όπως αποδεικνύουν οι έρευνες που αποκάλυψαν ένα δίκτυο

μικρών οικισμών κοντά σε φυσικές πηγές και παράκτιες περιοχές, επάνω σε χαμηλούς λόφους ή σε πεδινές εκτάσεις (Βουζαζάκης Κ., 2008). Η ονομασία "Αλμυρός" πιστεύεται ότι προέρχεται από την αρχαία πόλη Άλος των τρωικών χρόνων, που ιδρύθηκε από τον βασιλιά Αθάμαντα. Η Άλος και η μετέπειτα πόλη Αλμυρός βρίσκονταν κοντά στις υφάλμυρες πηγές Κεφάλωση και Χαλάσματα, γεγονός που πιθανόν συνδέει την ονομασία με την ομηρική λέξη "αλς" (θάλασσα) ή "άλας" (αλάτι), λόγω της παρουσίας υφάλμυρου νερού (Δήμος Αλμυρού, 2019).

Η πεδιάδα του Αλμυρού διαθέτει έναν αρκετά πλούσιο υδροφόρο ορίζοντα, ο οποίος χρησιμοποιείται για την άρδευση των καλλιεργειών. Χαρακτηριστικό γνώρισμα είναι η λεκάνη απορροής του Αλμυρού που αποτελεί τμήμα του ενιαίου βυθίσματος Αλμυρού-Παγασητικού. Τα 2/3 του βυθίσματος αυτού καλύπτονται από τον Παγασητικό κόλπο στα ανατολικά, σε βάθη μέχρι στα 100 m, ενώ το 1/3 προς τα δυτικά αποτελεί την ημιορεινή ζώνη (υψόμετρο 200-300 m) και την χερσαία περιοχή χαμηλού ανάγλυφου, με υψόμετρα μέχρι 200 m. Το ανάγλυφο της λεκάνης του Αλμυρού διαμορφώθηκε κυρίως από τη τεκτονική δραστηριότητα ενεργών ρηγμάτων, τα οποία βρίσκονται σε δράση από το Πλειόκαινο μέχρι σήμερα, με αρκετά από αυτά να έχουν επαναδραστηριοποιηθεί κατά το Τεταρτογενές. Δευτερεύοντα ρόλο στη διαμόρφωση του ανάγλυφου έπαιξαν οι κλιματικές συνθήκες και η διαφορική διάβρωση των πετρωμάτων. Κύριο χαρακτηριστικό της λεκάνης του Αλμυρού είναι η σχετική βύθιση του ανατολικού τμήματος της λεκάνης σε σχέση με το δυτικό, που επέτρεψε τη διατήρηση του χερσαίου τμήματός της (Γαλανάκης, 1997).



1.3. Λίμνες Ζερέλια

Οι λίμνες Ζερέλια (Εικ. 3) είναι δύο από τις πιο μοναδικές φυσικές λίμνες στην Ελλάδα, τόσο λόγω της γεωλογικής τους προέλευσης όσο και της ιστορικής τους σημασίας. Οι λίμνες Ζερέλια είναι γνωστές από την αρχαιότητα και έχουν συνδεθεί με την αρχαία πόλη της Αλονίσσου, η οποία βρισκόταν κοντά στη σύγχρονη πόλη του Αλμυρού. Η περιοχή γύρω από τις λίμνες ήταν σημαντική για τους αρχαίους κατοίκους, κυρίως λόγω της γεωργικής εκμετάλλευσης της εύφορης γης. Χαρακτηρίζονται για το σχεδόν κυκλικό τους σχήμα, ενδεικτικό των κρατήρων, και περιβάλλονται από πεδινές εκτάσεις. Το έδαφος γύρω από τις λίμνες είναι κυρίως γεωργικό, με καλλιέργειες όπως βαμβάκι και δημητριακά (Δήμος Αλμυρού, 2021).

Οι λίμνες Ζερέλια ή Ζηρέλια βρίσκονται μέσα στη λεκάνη απορροής του ρέματος Ξεριά και απέχουν περίπου 5 km νοτιοδυτικά από την πόλη του Αλμυρού και 2,5 km από το Δημοτικό Διαμέρισμα Ευξεινούπολης, σε υψόμετρο 130 m από τη θάλασσα, στους βόρειους πρόποδες του Όθρυς. Η μεγαλύτερη λίμνη στα δυτικά έχει έκταση 44.000 m² και 754 m περίμετρο, μέγιστο βάθος έως 10 m και διάμετρο 240 m. Η ανατολική λίμνη καταλαμβάνει έκταση 26.000 m² με περίμετρο 600 m, το βάθος της φτάνει έως τα 8 m και έχει διάμετρο 160 m. Οι λίμνες δεν τροφοδοτούνται από μόνιμα ποτάμια ή ρυάκια, και η στάθμη του νερού τους εξαρτάται κυρίως από την εποχή και τις κλιματολογικές συνθήκες, την απορροή από την γύρω περιοχή, καθώς και τις διενεργούμενες αντλήσεις. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, η εξάτμιση μπορεί να μειώσει σημαντικά τη στάθμη του νερού, με αποτέλεσμα οι λίμνες, ειδικά η μικρότερη, να ξηραίνονται εν μέρει ή πλήρως. Μεταξύ τους υπάρχει επικεντρική απόσταση 470 m, η δε υψομετρική τους διαφορά είναι περίπου 4 m (η ανατολική λίμνη είναι η χαμηλότερη) (Γαϊτανόπουλος, 2014).



Εικόνα 3: Λίμνες Ζερέλια (*Restart Tourism*)

1.3.1. Μαγούλα Ζερέλια

Η Μαγούλα Ζερέλια συγκαταλέγεται ανάμεσα στις πιο γνωστές προϊστορικές περιοχές της Θεσσαλίας. Στην περιοχή έχουν βρεθεί αρχαιολογικά ευρήματα, συμπεριλαμβανομένων μυκηναϊκών τάφων και άλλων αρχαίων κατασκευών, που υποδηλώνουν την ανθρώπινη παρουσία και δραστηριότητα γύρω από τις λίμνες εδώ και χιλιάδες χρόνια. Από ανασκαφές που έγιναν στις αρχές του εικοστού αιώνα (1908) από τους Wace και Thompson προσδιορίζεται ότι η θέση κατοικήθηκε κυρίως από τη Μέση Νεολιθική Εποχή μέχρι και την Ύστερη Εποχή του Χαλκού, ενώ εντοπίστηκαν λείψανα που φανερώνουν ίχνη κατοίκησης έως τον 4ο αι. μ.Χ..

Γενικότερα τα στοιχεία των ανασκαφών συνηγορούν στο ότι, για την κατανόηση της προϊστορικής κατοίκησης στην περιοχή νότια και νοτιοδυτικά του Αλμυρού απαιτείται μια ευρύτερη συγκριτική μελέτη των νεολιθικών οικισμών μεταξύ τους. Σημαντικός παράγοντας στην εξέλιξη και στη κατανομή των νεολιθικών οικισμών αποτέλεσε η παρουσία των δίδυμων λιμνών Ζερέλια. Πολλοί ερευνητές συνδυάζουν την ύστερη κατοίκηση και ανάπτυξη του οικισμού στη θέση της μαγούλας με την παρουσία των λιμνών. Η δυνατότητα άντλησης των υδάτων τους καθώς και το φυσικό κάλος που πρόσδιδαν στη περιοχή αποτέλεσε πόλο έλξης για τους ανθρώπους εκείνης της περιόδου, που μέσω των λιμνών εντατικοποίησαν τη γεωργική και κτηνοτροφική τους δραστηριότητα (Γαϊτανόπουλος, 2014).

1.3.2. Γεωλογικά χαρακτηριστικά

Μικρή Ανατολική λίμνη

Η περιοχή γύρω από τη μικρή λίμνη χαρακτηρίζεται από την παρουσία ενός λευκού έως κιτρινωπού ανθρακικού υλικού, με κόκκους που κυμαίνονται σε μέγεθος μεγαλύτερο της άμμου έως αρκετά εκατοστά (Εικ. 4). Τα κομμάτια αυτού του υλικού έχουν κυρίως ακανόνιστα γωνιώδη ή υπογωνιώδη σχήματα, ενώ συχνά περιέχουν εγκλείσματα κερατολιθικού υλικού. Εκτός από τις τεταρτογενείς αποθέσεις, τα πετρώματα του αλπικού υποβάθρου, όπως Κρητιδικοί ασβεστόλιθοι, σχιστόλιθοι και κερατόλιθοι, εμφανίζονται σπάνια στην περιοχή (Γαϊτανόπουλος, 2014).

Μεγάλη Δυτική λίμνη

Στην περιοχή ανάμεσα στις λίμνες, μέσα στις προσχώσεις και τα στρώματα καστανέρυθρης αργίλου, εμφανίζονται κροκάλες διαφόρων μεγεθών με ακανόνιστα γωνιώδη-υπογωνιώδη σχήματα. Χαρακτηριστικό είναι ότι δεν υπάρχει σαφής διαστρωμάτωση, καθώς τα υλικά είναι ακανόνιστα κατανεμημένα. Στο ανατολικό άκρο της λίμνης, συσσωρεύονται κροκάλες και λατύπες ανθρακικής σύστασης με μικρό βαθμό στρογγυλότητας, ανάμεσα σε λεπτόκοκκα υλικά. Γύρω από τη λίμνη, βρίσκονται επίσης χαλαζιακά και κερατολιθικά (ραδιολαρίτες) θραύσματα, χωρίς εμφανή διαβάθμιση ή στρωμάτωση στα ιζήματα. Συχνά οι κροκάλες αποτελούνται από μικρότερα θραύσματα χαλαζία και κόκκινων κερατολίθων, τα οποία συνδέονται με ανθρακικό υλικό (Εικ. 5) (Γαϊτανόπουλος, 2014).



Εικόνα 4: Χαρακτηριστικά πετρώματα της μικρής λίμνης (Γαϊτανόπουλος Α., 2014)



Εικόνα 5: α) Εμφάνιση αλλοβιακού υλικού, β):Ανθρακικές κροκάλες, γ):Χαοτική διάσταση σε μικροτομή νότια της μεγάλης λίμνης (Lagios *et.al*, 2010)

1.3.3. Προτεινόμενα Σενάρια Δημιουργίας των λιμνών

Οι λίμνες Ζερέλια θεωρούνται καρστικές ή μετεωριτικές, αν και η ακριβής γεωλογική προέλευση συζητείται. Το γεγονός ότι δεν υπάρχουν σταθερές πηγές που να τροφοδοτούν τις λίμνες, και η μορφολογία τους, υποστηρίζουν την υπόθεση ότι σχηματίστηκαν από την πρόσκρουση μετεωρίτη. Παρακάτω θα αναφέρουμε μερικά από τα πιθανά σενάρια για την δημιουργία τους.

Ηφαιστειακή προέλευση

Οι πρώτοι που μελέτησαν την περιοχή στο πλαίσιο χαρτογράφησης ήταν οι Μαρίνος και Παπάκης (1965), οι οποίοι υποστήριξαν ότι οι δύο λίμνες αντιστοιχούν σε κρατήρες εμβρυωδών ηφαιστειών τύπου "maar", αποτέλεσμα ηφαιστειακής δραστηριότητας του Τεταρτογενούς και μέρος της ηφαιστειακής ομάδας του Παγασητικού κόλπου. Ωστόσο, η απουσία ηφαιστειακών υλικών και ενδείξεων βίαιων εκρήξεων στην περιοχή αποδυναμώνει αυτόν τον ισχυρισμό. Το πλησιέστερο ηφαιστειακό κέντρο εντοπίζεται κοντά στις Μικροθήβες, με πετρώματα από το ομώνυμο ηφαίστειο, και ανατολικά της Νέας Αγχιάλου υπάρχουν μικρές εμφανίσεις βασαλτικής λάβας ("Πορφυρίωνας"). Τα ηφαιστειακά αυτά πετρώματα ανήκουν στην ομάδα "Βόλου-Αταλάντης", τμήμα του νότιου ηφαιστειακού τόξου του Αιγαίου. Το πιο σημαντικό συμπέρασμα της συγκεκριμένης μελέτης είναι ότι οι λίμνες έχουν κοινή υδρολογική σύνδεση, καθώς άντληση νερού από τη μία επηρεάζει άμεσα τη στάθμη της άλλης, υποδεικνύοντας ότι μοιράζονται τον ίδιο υδροφόρο ορίζοντα.

Καρστική προέλευση

Ο Γαλανάκης, στη διδακτορική του διατριβή το 1997, μελέτησε τις λίμνες Ζερέλια και κατέληξε ότι ο σχηματισμός τους οφείλεται στη δράση του ρήγματος στο νότιο περιθώριο της λεκάνης του Αλμυρού, σε συνδυασμό με τα μεγάλα καρστικά έγκοιλα στους ασβεστόλιθους του Όθρυος. Η κατάρρευση των καρστικών εγκοίλων, που βρίσκονταν κάτω από τις πλειοκαινικές μάργες, προκάλεσε την κάμψη των νεογενών και τεταρτογενών ιζημάτων και δημιούργησε τοπικές συνθήκες υψηλής υδροφορίας. Επιπλέον, ανθρώπινες παρεμβάσεις απομάκρυναν τα χερσαία υλικά για τη συγκέντρωση νερού, ενώ τα εκσκαφικά υλικά χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του κοντινού γήλοφου. Τον συλλογισμό αυτό αποδέχτηκε ο αρχαιολόγος Βουζαξάκης Κ. (2008) στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής, σημειώνοντας ότι γεώτρηση στη μικρή λίμνη έδειξε πως τα παλαιότερα δείγματα γύρης χρονολογούνται περίπου το 500 μ.Χ., πολύ αργότερα από τη Νεολιθική περίοδο.

Προέλευση από πρόσκρουση μετεωρίτη

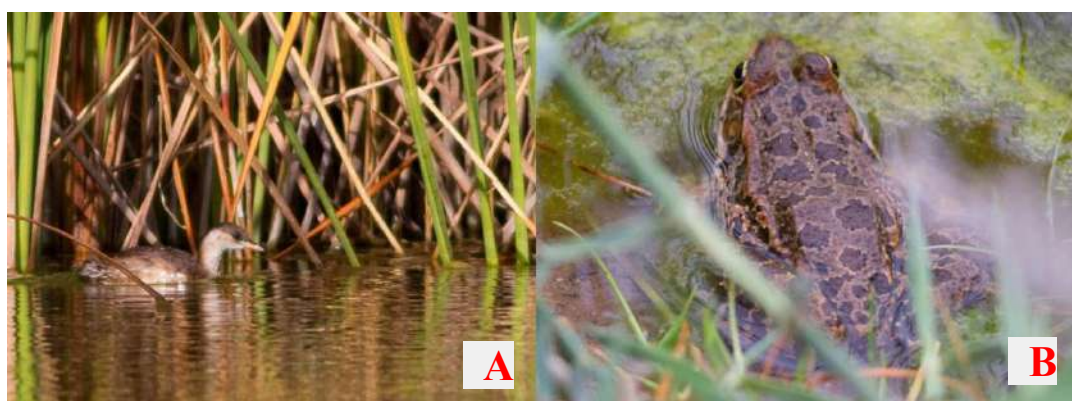
Πιο πρόσφατες έρευνες που βασίστηκαν σε ορυκτολογικές, γεωχημικές αναλύσεις, βαρυτικές και μαγνητικές μετρήσεις, καθώς και πυρηνοληψίες, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι λίμνες σχηματίστηκαν από πρόσκρουση μετεωρίτη. Στο ασβεστιτικό υλικό γύρω από τις λίμνες εντοπίστηκαν ακανθώδη υφή και υαλώδη θραύσματα, σημάδια γρήγορης τήξης και κρυστάλλωσης από την πρόσκρουση. Επίσης, βρέθηκε επίπεδη θραύση σε χαλαζία και ασβεστίτη, αποτέλεσμα χαμηλής πίεσης κρουστικών κυμάτων. Το πιο σημαντικό εύρημα ήταν η ανίχνευση μερικώς τετηγμένου ζirkονίου, που απαιτεί θερμοκρασίες άνω των 1400°C, επιβεβαιώνοντας την πρόσκρουση του μετεωρίτη. Το σενάριο αυτό έγινε ευρέως αποδεχτό και πλέον οι λίμνες χαρακτηρίζονται ως λίμνες από μετεωρίτες (Γαϊτανόπουλος, 2014).

1.3.4. Πανίδα

Οι λίμνες Ζερέλια αποτελούν σημαντικούς υδροβιότοπους, φιλοξενώντας πολλά είδη πτηνών, ερπετών και ιχθύων. Περιβάλλονται από καλαμιώνες, ενώ γύρω τους εκτείνονται καλλιέργειες και ρυάκια με πυκνή βλάστηση. Λόγω της τοποθεσίας τους στον κάμπο, προσελκύουν πλήθος πουλιών. Την άνοιξη και το καλοκαίρι, λευκοί πελαργοί τρέφονται στα χόρτα γύρω από τις λίμνες. Εδώ ζουν υδρόβια και παρυδάτια είδη όπως φαλαρίδες, νερόκοτες, νανοβουτηχτάρια (Εικ. 6, Α), διάφορα είδη πάπιας,

τσικνιάδες και νανοπουλάδες. Αρπακτικά όπως γερακίνες, καλαμόκιρκοι και ξεφτέρια είναι επίσης παρόντα. Στους γύρω αγρούς βρίσκονται μικροπούλια όπως λιβαδοκελάδες, τσιφτάδες, ψαρόνια και ορτύκια, ενώ στις καλαμιές φωλιάζουν είδη όπως κιστικόλες και καλαμοποταμίδες.

Τα ερπετά της περιοχής είναι είδη, όπως πρασινόσαυρες, πρασινόφρυνους, βαλκανοβάτραχους (Εικ. 6, Β), δεντροβάτραχους, νερόφιδα, λιμνόφιδα, δεντρογαλίες και οχιές. Τα είδη που κατεβαίνουν από τις γύρω δασωμένες πλαγιές, όπως αλεπούδες, ασβούς, νυφίτσες, κουνάβια, λαγούς και σκαντζόχοιρους είναι τα θηλαστικά συναντά κανείς στην περιοχή (Natura Graeca).



Εικόνα 6: Α) Ένα νανοβουτηχτάρι στις ακροκαλαμιές, Β) Ένας βαλκανοβάτραχος στην όχθη (Natura Graeca)

Οι λίμνες Ζερέλια εμφανίζουν υψηλές συγκεντρώσεις άλγης, κυρίως στη μεγαλύτερη λίμνη, όπου τα φύκη κυριαρχούν και καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις, συχνά φτάνοντας μέχρι την επιφάνεια του νερού. Αυτή η κατάσταση αποδίδεται στην εντατική καλλιέργεια των γύρω εδαφών για πολλές δεκαετίες, με εκτεταμένη χρήση λιπασμάτων. Η βορειοδυτική λίμνη, λόγω της μεγαλύτερης έκτασής της και της εκτεταμένης λεκάνης απορροής, συλλέγει μεγάλες ποσότητες νιτρικών και άλλων λιπασμάτων μέσω των υδάτων που τη διαρρέουν. Παρόμοια φαινόμενα παρατηρούνται και στη μικρότερη λίμνη, αλλά σε μικρότερη κλίμακα.

Το φαινόμενο που παρατηρείται στις λίμνες είναι ο ευτροφισμός, δηλαδή η υπερβολική συγκέντρωση θρεπτικών συστατικών λόγω του εμπλουτισμού των υδάτων με νιτρικά και φωσφορικά ιόντα από τα λιπάσματα. Αυτό οδηγεί σε αυξημένη φυτική βιομάζα, όπως φυτοπλαγκτόν και υδρόβια βλάστηση, στις "κλειστές" αυτές υδάτινες μάζες (Γαϊτανόπουλος, 2014).

Η παρουσία ιχθυοπανίδας στις λίμνες αυτές είναι περιορισμένη λόγω του μικρού μεγέθους τους, των ειδικών συνθηκών του νερού και της έλλειψης άμεσης επικοινωνίας με άλλες υδάτινες οδούς. Σύμφωνα με μελέτες και παρατηρήσεις λόγω της μορφολογίας και της απομόνωσης των λιμνών, δεν φιλοξενούν μεγάλο αριθμό ιχθύων ή ευρεία ποικιλία ειδών. Τα είδη ψαριών που υπάρχουν μπορεί να είναι περιορισμένα σε κοινά είδη γλυκών υδάτων, όπως η λιπαριά (*Alburnus alburnus*) ή κάποια είδη της οικογένειας των κυπρινιδών (*Cyprinidae*), αλλά η παρουσία αυτών των ειδών δεν έχει τεκμηριωθεί από εξειδικευμένες βιολογικές μελέτες. Παρελθόντα προγράμματα εμπλουτισμού υδάτων: Πιθανόν στο παρελθόν να έχουν γίνει προσπάθειες εμπλουτισμού των λιμνών με ψάρια από τον άνθρωπο, ωστόσο δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα για τα αποτελέσματα ή τη σταθερότητα των πληθυσμών. Οι λίμνες Ζερέλια είναι περισσότερο γνωστές για την οικολογική και γεωλογική τους σημασία, παρά για τη βιοποικιλότητα των ψαριών. Η χλωρίδα και η πανίδα των λιμνών είναι μάλλον περιορισμένες, λόγω των μικρών διαστάσεων και της απομόνωσης του υδάτινου συστήματος.

1.4. Επιλογή υδραυλικής κατασκευής ιχθυοπεράσματος

Ο κύριος στόχος των υδραυλικών κατασκευών είναι να προσελκύσουν οι ιχθύες σε ένα συγκεκριμένο σημείο και να τα βοηθήσουν να κινηθούν προς τα ανάντη μέσω ενός περάσματος ή να τα παγιδεύσουν σε μια δεξαμενή και να τα μεταφέρουν προς τα πάνω μέσω κλιμάκων ή ανελκυστήρων.

Ο σχεδιασμός ενός περάσματος ιχθύων πρέπει να λάβει υπόψη τη συμπεριφορά των μεταναστευτικών ειδών. Η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται από την ταχύτητα ροής του νερού, που πρέπει να είναι συμβατή με την ικανότητα κολύμβησης των ιχθύων, αλλά και από τη διεύθυνση και τη φορά της ροής. Επίσης, παράγοντες όπως ο αερισμός, η έντονη τυρβώδης ροή ή η πολύ χαμηλή ταχύτητα ροής μπορούν να αποτελέσουν εμπόδιο για τη μετανάστευση. Η ευαισθησία των ιχθύων σε παράγοντες όπως το διαλυμένο οξυγόνο, η θερμοκρασία, ο θόρυβος, το φως και οι οσμές, καθώς και οι διαφορές στις φυσικοχημικές ιδιότητες του νερού μεταξύ των θέσεων ανάντη και κατάντη του φράγματος, μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την κίνησή τους.

Η κατασκευή ενός φράγματος μπορεί να διακόψει ή να καθυστερήσει τη μετανάστευση των ιχθύων, ιδιαίτερα των ανάδρομων ειδών, οδηγώντας σε μείωση ή

ακόμη και εξαφάνιση των ειδών που βασίζονται στη μετακίνηση κατά μήκος του ποταμού για αναπαραγωγή και τροφή σε ορισμένες φάσεις της ζωής τους. Επιπλέον, η παρουσία του φράγματος μπορεί να προκαλέσει τραυματισμούς και αυξημένη θνησιμότητα των ιχθύων, λόγω παραγόντων όπως οι υδροστρόβιλοι, οι υπερχειλιστές, οι αλλαγές στη ροή του ποταμού, οι διακυμάνσεις στη θερμοκρασία και την ποιότητα του νερού, καθώς και η αυξημένη έκθεση σε θηρευτές.

Κατά τη σχεδίαση υδραυλικών έργων, είναι σημαντικό να διεξάγεται περιβαλλοντική μελέτη από ειδικούς επιστήμονες, όπως υδραυλικούς μηχανικούς, ιχθυολόγους και περιβαλλοντολόγους. Αυτοί πρέπει να αξιολογούν τις ανάγκες του κάθε οικοσυστήματος και να προτείνουν τη δημιουργία διαδρόμων διέλευσης για οι ιχθύες. Επειδή οι υδάτινες συνθήκες είναι διαφορετικές σε κάθε οικοσύστημα, απαιτείται λεπτομερής ανάλυση των αναγκών του, των ειδών που ζουν σε αυτό και των υδρολογικών χαρακτηριστικών, όπως η διαστασιολόγηση των υπερχειλιστών και των παροχών αιχμής, ο τύπος της ροής και το βάθος του νερού, ώστε οι υδραυλικές κατασκευές να σχεδιάζονται σωστά (Ψιλοβίκος, 2016).

1.4.1. Κλίμακες διέλευσης ιχθύων

Η κλίμακα για τη διέλευση ιχθύων είναι μια κατασκευή που διευκολύνει την κίνηση των μεταναστευτικών ιχθύων, ειδικά αυτών που κινούνται ανάδρομα, προς τα ανάντη, βοηθώντας το ποτάμιο ή λιμναίο οικοσύστημα να διατηρήσει τη φυσική του λειτουργία. Τέτοιες κλίμακες είναι ιδανικές για περιοχές όπου υπάρχουν υδραυλικές κατασκευές κάθετες στη ροή του ποταμού, με ύψος από 300 έως 600 mm, όπως εκχειλιστές και καταβαθμοί, ή ακόμα και χαμηλά φράγματα με ύψος αρκετών μέτρων.

Κατά το σχεδιασμό μιας κλίμακας διέλευσης ιχθύων, λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες. Αρχικά είναι σημαντικά η παροχή, η ταχύτητα, η φορά, το βάθος του νερού και τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της κίνησης καθώς και οι ταχύτητες έλξης. Η απόσβεση-καταστροφή της ενέργειας, οι περιοχές ηρεμίας, η μεταφορά του νερού από τις επιμέρους περιοχές είναι εξίσου απαραίτητα. Τέλος, οι δίνες εισόδου, η απόσταση μεταξύ των επιμέρους δεξαμενών και τα είδη που πρόκειται να διέλθουν έχουν καθοριστικό ρόλο για την ομαλή διεξαγωγή ενός τέτοιου έργου.

Υπάρχουν σχέδια διαφορετικής κλίμακας ιχθύων που κατασκευάζονται ανά τον κόσμο. Κάποιες από αυτές είναι η κλίμακα ‘Pool Weir’, ‘Denil’, ‘Steep Pass’, ‘Vertical Slot’ κ.α.. Αν και καμία κλίμακα διέλευσης δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες όλων των ειδών, οι σχεδιαστές επιδιώκουν να εξυπηρετήσουν όσο το δυνατόν περισσότερα είδη. Το σχέδιο που θα εξεταστεί στη συγκεκριμένη μελέτη είναι η κλίμακα ‘Pool Weir’ (Ψιλοβίκος, 2016).

1.4.2. Κλίμακα ‘Pool Weir’

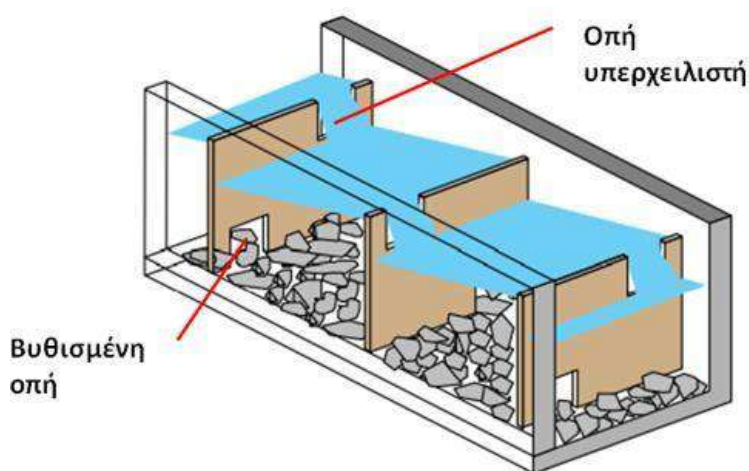
Η κλίμακα τύπου Pool weir είναι μια από τις παλαιότερες μεθόδους κατασκευής περασμάτων για ψάρια, που χρησιμοποιείται σε υδραυλικές κατασκευές. Από τα τέλη του 19ου αιώνα, αναφέρεται ότι έχει εφαρμοστεί περίπου στο 1% των φραγμάτων στη Γαλλία (Philippe, 1897). Οι δεξαμενές σε αυτή την κατασκευή τοποθετούνται κλιμακωτά και χωρίζονται από μικρά φραγμάτια, τα οποία επιτρέπουν το νερό να ρέει μέσω εγκοπών υπερχειλίσης, επιτυγχάνοντας την κίνηση του νερού από το ένα επίπεδο στο άλλο (Rajaratnam. et al., 1988).

Οι βασικές παράμετροι μιας κλίμακας τύπου Pool weir περιλαμβάνουν το μέγεθος των δεξαμενών, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εγκοπών και τα βάθη του νερού σε κάθε δεξαμενή. Αυτοί οι παράγοντες καθορίζουν την ταχύτητα της ροής, την ποσότητα του νερού και τη γενική υδραυλική λειτουργία του συστήματος. Οι δεξαμενές, εκτός από το να παρέχουν ήρεμες ζώνες για οι ιχθύες, λειτουργούν και ως μηχανισμοί μείωσης της ενέργειας, περιορίζοντας τη μετάδοση ενέργειας μεταξύ των δεξαμενών και προστατεύοντας έτσι οι ιχθύες από πιθανούς τραυματισμούς λόγω έντονης ροής (Ψιλοβίκος, 2016).

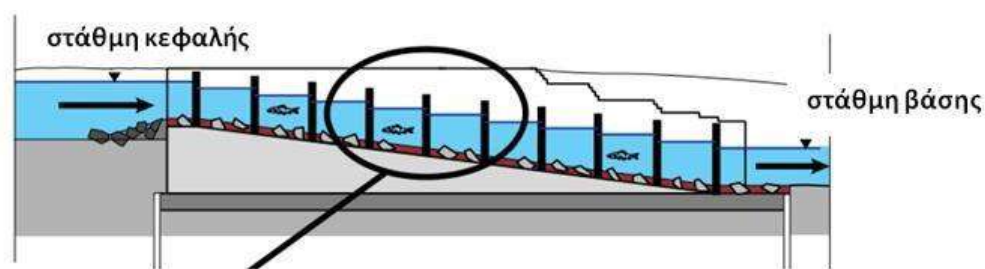
Η ποικιλία στις κατασκευές τύπου Pool weir (Σχ.1, Σχ. 2) παγκοσμίως είναι μεγάλη, με διαφορές στο μέγεθος των δεξαμενών, στη σύνδεσή τους και στον τρόπο που διαχειρίζονται τη ροή του νερού. Οι δεξαμενές μπορεί να έχουν μήκος από 0,50 m έως πάνω από 10 m, ενώ το βάθος του νερού μπορεί να κυμαίνεται από 0,50 m έως πάνω από 2 m. Οι σχεδιαστικές προδιαγραφές βασίζονται στην ικανότητα κολύμβησης των ιχθύων και στα υδραυλικά μοντέλα. Η πτώση του νερού μεταξύ των δεξαμενών εξαρτάται από το είδος των ιχθύων, με πέστροφες και σολομούς, που μπορούν να πηδούν από δεξαμενή σε δεξαμενή, να απαιτούν πτώση περίπου 0,20 m. Ο όγκος των δεξαμενών καθορίζεται για να επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόσβεση ενέργειας,

αποτρέποντας την υπερβολική αερόβια δραστηριότητα, η οποία θα μπορούσε να αυξήσει τα επίπεδα οξυγόνου σε επίπεδα επιβλαβή για οι ιχθύες. Ο όγκος των δεξαμενών καθορίζεται με βάση την ποσότητα ενέργειας που πρέπει να απορροφηθεί. Η απορρόφηση ενέργειας μειώνει την ένταση της τυρβώδους ροής και περιορίζει τον υπερβολικό αερισμό των δεξαμενών. Η υπερβολική αερόβια δραστηριότητα θα μπορούσε να προκαλέσει επίπεδα οξυγόνου πάνω από το φυσιολογικό, γεγονός που προκαλεί άγχος στους ιχθύες και ενδέχεται να οδηγήσει σε θανάτους. Οι ανώτατες επιτρεπόμενες τιμές απόσβεσης ενέργειας κυμαίνονται συνήθως από $E = 100 \text{ W/m}^3$ για μικρά ψάρια και νεαρά άτομα έως $E = 200 \text{ W/m}^3$ για τις σαλμονίδες (Beitz, 1997, Larinier, 1992,).

Η εμπειρία έχει δείξει ότι ένας ορθολογικός σχεδιασμός κλιμάκων τύπου Pool weir, λαμβάνοντας υπόψη τα υδραυλικά κριτήρια, μπορεί να εξυπηρετήσει μια ποικιλία ιχθύων. Η διαφορά στο βάθος του νερού μεταξύ των δεξαμενών καθορίζει τις ταχύτητες ροής και μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο για τη διέλευση των ιχθύων. Για να διευκολυνθεί η κίνηση τους, η διαφορά στο βάθος μεταξύ των δεξαμενών δεν πρέπει να ξεπερνά τα 0,15-0,20 m. Η ιδανική κλίση μεταξύ των δεξαμενών υπολογίζεται από τη διαφορά στο βάθος του νερού και το μήκος των δεξαμενών, με τις κλίσεις να κυμαίνονται μεταξύ 1/7 και 1/15, και τη διαφορά στο βάθος να είναι περίπου 0,15 m. Ο αριθμός των απαιτούμενων δεξαμενών καθορίζεται από την ολική διαφορά στο ύψος του νερού, δηλαδή τη διαφορά στη στάθμη του νερού μεταξύ της κεφαλής και της βάσης του ταμιευτήρα (Ψιλοβίκος, 2016).



Σχήμα 1: Διαδοχικές θέσεις εγκοπής και βυθισμένων οπών κλίμακας ‘Pool Weir’ (τροποποιημένο από FAO, 2002)



Σχήμα 2: Κατά μήκος τομή κλίμακας 'Pool Weir' (τροποποιημένο από FAO, 2002)

Σύμφωνα με το FAO, για συγκεκριμένα είδη ιχθύων δίνονται προτεινόμενες διαστάσεις δεξαμενών, βυθισμένων οπών, εγκοπών, απαιτούμενη παροχή και μέγιστη διαφορά φορτίου για την κλίμακα Pool Weir (Πιν. 1).

Πίνακας 1: Προτεινόμενες διαστάσεις για τις κλίμακες Pool Weir (FAO, 2002)

Είδη για τα οποία προορίζονται	Διαστάσεις δεξαμενών (m)			Διαστάσεις βυθισμένων οπών (m)		Διαστάσεις εγκοπών (m)		Παροχή Q (m ³ /s)	Μέγιστη διαφορά φορτίου (m)
	μήκος l _b	πλάτος b	βάθος νερού h	πλάτος b _s	μήκος h _s ²	πλάτος b _s	μήκος h _a		
Οξύρρυγχος	5-6	2,5-3	1,5-2	1,5	1	---	---	2,5	0,2
Σολωμός, Πέστροφα	2,5-3	1,6-2	0,8-1,0	0,4-0,5	0,3-0,4	0,3	0,3	2,5-0,5	0,2
Τυλινάρι, Μπριάνα	1,4-2	1,0-1,5	0,6-0,8	0,25-0,35	0,25-0,35	0,25	0,25	0,08-0,2	0,2
Άνω ζώνη πέστροφας	>1,0	>0,8	>0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,05-0,1	0,2



Εικόνα 7: Κατασκευή κλίμακας Pool weir στην Βέρνη (Ελβετία) (FAO, 2002)



Εικόνα 8: Κατασκευή κλίμακας Pool weir χωρίς παροχή ροής (Α) και με παροχή ροής (Β) (FAO, 2002)

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Arc-GIS και HEC-RAS

Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ)-Geographic Information Systems (GIS)

Η έλλειψη υδρομετρήσεων και ο σύγχρονος σχεδιασμός αντιπλημμυρικών έργων απαιτούν τη χρήση και το συνδυασμό ειδικών τεχνολογιών. Το νερό είναι ουσιώδες για τη ζωή και τη λειτουργία του φυσικού περιβάλλοντος. Λόγω της σημασίας και της κλίμακας των προβλημάτων που σχετίζονται με τους υδατικούς πόρους, τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) αποτελούν ισχυρό εργαλείο για την ανάπτυξη λύσεων. Η εμφάνιση του ArcGIS της ESRI έφερε νέες δυνατότητες στην απεικόνιση των δεδομένων που αφορούν τους υδατικούς πόρους μέσω των GIS. Το αποτέλεσμα αυτής της ανάπτυξης είναι το ArcHydro, ένα μοντέλο δεδομένων του ArcGIS ειδικά για τους υδατικούς πόρους. Το ArcHydro διευκολύνει τη δημιουργία υδρολογικών πληροφοριακών συστημάτων που συνδυάζουν χωρικά και χρονικά δεδομένα, υποστηρίζοντας την υδραυλική ανάλυση και μοντελοποίηση (Maidment, 2002).

Πιο συγκεκριμένα, τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ), ή αλλιώς Geographic Information Systems (GIS), είναι ένα ισχυρό σύνολο εργαλείων, που έχει την δυνατότητα να αποθηκεύει μεγάλο όγκο χωρικών στοιχείων (Burrough P.A., 1983). Επιπλέον αποτελεί το καταλληλότερο εργαλείο για τη χωρική ανάλυση των δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική διάσταση των στοιχείων και αποτελεί ένα πολύ αποτελεσματικό μηχανισμό για την επίλυση χωρικών προβλημάτων καθώς η κατανομή, η οπτικοποίηση των πληροφοριών στο χώρο και η παραγωγή χαρτών μέσω των διατιθέμενων λογισμικών βοηθά στη δημιουργία και την εξέταση εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης των προβλημάτων αυτών. Ο χώρος και η κάθε είδους πληροφορία που τον περιγράφει είναι συνδεδεμένοι με ένα μεγάλο κομμάτι ανθρωπίνων δραστηριοτήτων. Παράλληλα, έχει εφαρμογή σε όλο και περισσότερους τομείς (Κουτσόπουλος, 2005). Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών χρησιμοποιούνται σε πολλούς τομείς όπως είναι η γεωλογία, οι περιβαλλοντικές επιστήμες, η υδρολογία, η γεωργία, η πολεοδομία και η χωροταξία, αφού το

αντικείμενο τους είναι ο χώρος. Καθώς απεικονίζουν γεωγραφικά στοιχεία, η χρήση τους βοηθάει στη διαχείριση περιβάλλοντος με τον προσδιορισμό φυσικών πόρων, στο οδικό δίκτυο με τον σχεδιασμό του χώρου της πόλης. Το γεγονός αυτό εξυπηρετεί και στην διαχείριση των μεταφορικών συστημάτων. Η χρήση τους γίνεται απαραίτητη στην κοινωνία αφού δίνει την δυνατότητα παρακολούθησης και αντιμετώπισης δημοσίων υγειονομικών προβλημάτων, πρόβλεψης και αντιμετώπισης φυσικών καταστροφών αλλά και γεωπολιτικών απειλών. Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών χρησιμοποιούν ειδικό λογισμικό και εργαλεία που επιτρέπουν την επεξεργασία, την ανάλυση και την οπτικοποίηση των γεωγραφικών δεδομένων. Ο τρόπος λειτουργίας των συστημάτων αποτελείται από τη συλλογή δεδομένων, η οποία μπορεί να γίνει μέσω δορυφορικών εικόνων, αεροφωτογραφιών και από άλλες πηγές όπως αισθητήρες και ειδικά όργανα μέτρησης. Τα δεδομένα που συλλέγονται αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων, συνήθως χωρική. Στην συνέχεια, η ανάλυση των δεδομένων περιλαμβάνει την εφαρμογή διάφορων αλγορίθμων και εργαλείων για την εξαγωγή πληροφοριών, τη διαχείριση της χωρικής ανάλυσης και τη δημιουργία χαρτών. Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) παίζουν σημαντικό ρόλο στην αντιμετώπιση και τη διαχείριση περιβαλλοντικών κινδύνων με την ανάλυση φυσικών δεδομένων, στοιχεία που αποδεικνύουν τις περιβαλλοντικές αλλαγές που μπορεί να προκαλέσουν καταστροφικά φαινόμενα. Έτσι οι αναλύσεις παρουσιάζουν περιοχές ευαίσθητες στα φαινόμενα αυτά και μέσα από αυτό δίνεται η ευκαιρία για το σχεδιασμό και τη λήψη αποφάσεων που αφορούν μέτρα πρόληψης και προστασίας.

Hydrologic Engineering Center, HEC

Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί η χρήση θεωρητικών μοντέλων που προσομοιώνουν φυσικά φαινόμενα, όπως οι πλημμύρες, και βοηθούν στην πρόβλεψη του κινδύνου και στη λήψη αποφάσεων για τον καλύτερο τρόπο διαχείρισης των χειμαρρικών ρευμάτων, με σκοπό την αποτροπή ζημιολογικών επιπτώσεων. Ένα από τα πιο διαδεδομένα μοντέλα για την ανάλυση της ροής των καναλιών και την οριοθέτηση πλημμυρών είναι το HEC-RAS (Khattak et. al., 2016). Το HEC-RAS είναι ένα ολοκληρωμένο υδραυλικό λογισμικό που διατίθεται δωρεάν στο διαδίκτυο, προσομοιώνει διάφορα σενάρια με σύνθετους υπολογισμούς και παρέχει ακριβή αποτελέσματα. Χρησιμοποιείται ευρέως για τη μελέτη της ροής ποταμών και

χειμάρρων, τον έλεγχο της παροχευευστικότητάς τους και την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου (Εφραιμίδης κ.ά., 2006). Η επικοινωνία του ArcGIS με το HEC-RAS γίνεται μέσω του HEC-GeoRAS, ένα λογισμικό που επιτρέπει τη δημιουργία αρχείων για τη μεταφορά τους από το ArcGIS στο HEC-RAS και την περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων στο ArcGIS (Μπούρη, 2008).

Το λογισμικό HEC-RAS αναπτύχθηκε στο Κέντρο Υδρολογικής Μηχανικής (Hydrologic Engineering Center, HEC), το οποίο είναι τμήμα του Ινστιτούτου Υδατικών Πόρων (IWR), του Σώματος των Μηχανικών του Στρατού των Η.Π.Α. Αυτό το λογισμικό προσομοιώνει φυσικά ή τεχνητά υδατορέματα, ως μεμονωμένα συστήματα. Έχει χρησιμοποιηθεί συστηματικά για την μοντελοποίηση υδραυλικών προσομοιώσεων (Knebl et al., 2005; Pappenberger et al., 2005; Saleh et al., 2011), ενώ το γεγονός ότι είναι ελεύθερο λογισμικό-δωρεάν το κάνει περισσότερο ελκυστικό. Πραγματοποιεί υπολογισμούς: α)σε μόνιμη ροή, β)σε μη μόνιμη ροή, γ)για τη μεταφορά ιζημάτων, δ)για την ποιότητα του νερού. Επιλύει υδραυλικά φυσικούς ή τεχνητούς φυσικούς αγωγούς που μπορεί να συμπεριλαμβάνονται σε τοπική κλίμακα. Επίσης έχει την δυνατότητα να αποθηκεύει και να διαχειρίζεται δεδομένα χαρτών. Χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό μονοδιάστατης σταθερής ροής του νερού και δύο διαστάσεων ασταθή υδραυλική ροή του νερού μέσα από ποτάμια, μεταξύ άλλων καναλιών (Solvusoft Corporation). Η ευκολία ενσωμάτωσης του με άλλα μοντέλα και τεχνολογίες είναι ένα άλλο αξιοσημείωτο πλεονέκτημα (Fan et al., 2009, Knebl et al., 2005, Rodriguez et al., 2008). Σύμφωνα με τον Ghanbarpour et al. (2013) η σύνδεση του HEC-RAS με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών για σταθερή ροή, σταδιακά μεταβαλλόμενη ροή και η χαρτογράφηση τελικά των πλημμυρισμένων εκτάσεων, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των κατασκευών, που ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις ενός πλημμυρικού γεγονότος. Κάποια από τα βασικά του εργαλεία του μπορούν να επεξεργαστούν αρχεία project, αρχεία γεωμετρίας, αρχεία ροής και συνδιαστικά αρχεία. Το λογισμικό του HEC-RAS παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι ο ακριβής υπολογισμός πλημμυρικής παροχής, γεγονός που κρίνεται απαραίτητο για την λήψη αποφάσεων μιας περιοχής (όπως αντιπλημμυρικά έργα, οριοθετήσεις). Επίσης, ο υπολογισμός βάθος ροής νερού, ταχύτητας ροής νερού και άλλων υδραυλικών παραμέτρων μπορούν να υπολογιστούν με το συγκεκριμένο λογισμικό. Η γνώση των στοιχείων αυτών είναι

σημαντική για τον προσδιορισμό ακριβής θέσης και έκτασης πλημμύρας, επιπτώσεων πλημμυρών, κατασκευή έργων με ακριβής υπολογισμούς στις περιπτώσεις που χρειάζεται. Το λογισμικό του HEC-RAS παρουσιάζει και άλλα πλεονεκτήματα όπως η ευκρινής απεικόνιση χαρτών και τρισδιάστατων χαρτών, σύνδεση με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS).

Το GeoRAS αξιοποιεί το ArcGIS Desktop για τη δημιουργία χωρικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται ως είσοδοι στα μοντέλα HEC-RAS, βασισμένα σε ψηφιακά μοντέλα εδάφους και άλλα σύνολα δεδομένων GIS. Αφού τα αποτελέσματα υπολογιστούν στο HEC-RAS, μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία στο GeoRAS, επιτρέποντας τη χαρτογράφηση των βάθους και της έκτασης των πλημμυρών, μαζί με άλλα συναφή χωρικά δεδομένα, όπως η ταχύτητα της ροής, τα πάχη πάγου και η μεταφορά ιζημάτων. Το GeoRAS εφαρμόζει τη μέθοδο "διαίρεση και κατάκτηση" για την ανάλυση πολύ μεγάλων συνόλων εδαφικών δεδομένων, διασπώντας τα σε μικρότερα τμήματα και αναλύοντας το καθένα ξεχωριστά, συνδυάζοντας στη συνέχεια τα αποτελέσματα για τη δημιουργία χαρτών. Αυτό το γεωγραφικό πλαίσιο ανάλυσης, όταν συνδυάζεται με δημόσια περιουσιακά στοιχεία, όπως δρόμοι, καταφύγια και διαδρομές εκκένωσης, βοηθά στην προστασία ανθρώπων και περιουσιών από πλημμύρες (ESRI).

2.2. Μεθοδολογία

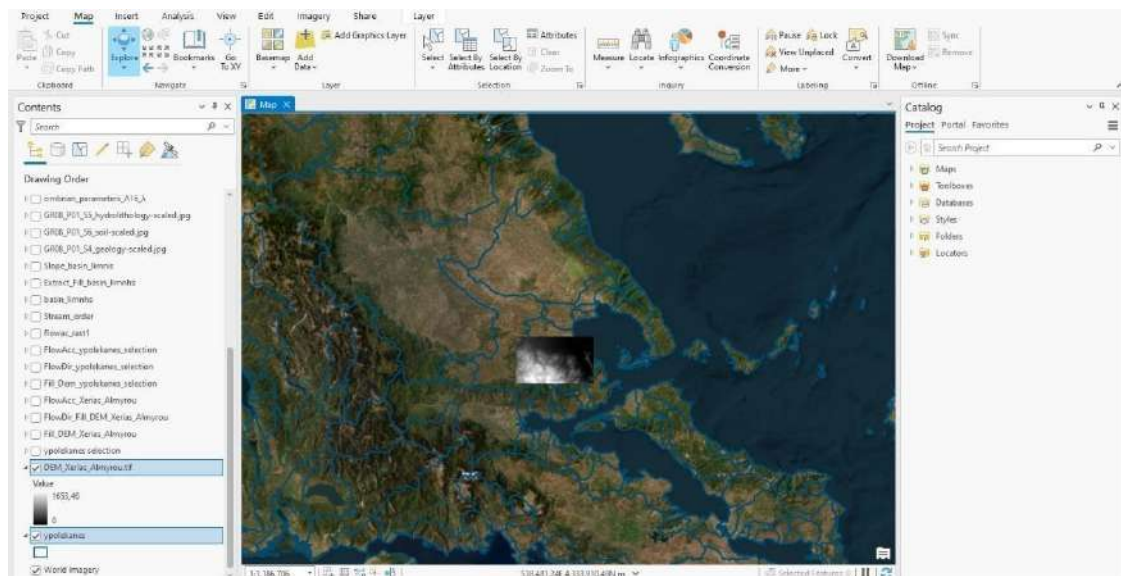
2.2.1. Επεξεργασία στο πρόγραμμα του Arc-GIS

2.2.1.1. Ανάλυση χωρικών δεδομένων

Έχοντας ως στόχο τον υπολογισμό παροχής για 50, 100 και 1.000 έτη, απαραίτητος κρίνεται ο υπολογισμός τιμών για συγκεκριμένες παραμέτρους. Για το λόγο αυτό η επεξεργασία χωρικών δεδομένων μέσα από το περιβάλλον του Arc-GIS συμβάλλει στην επίτευξη του στόχου αυτού. Η επεξεργασία αποτελείται από τα εξής βήματα:

1. Εισαγωγή δεδομένων: Προσθήκη αρχείου με τις υπολεκάνες και ψηφιακού αρχείου του υψομέτρου

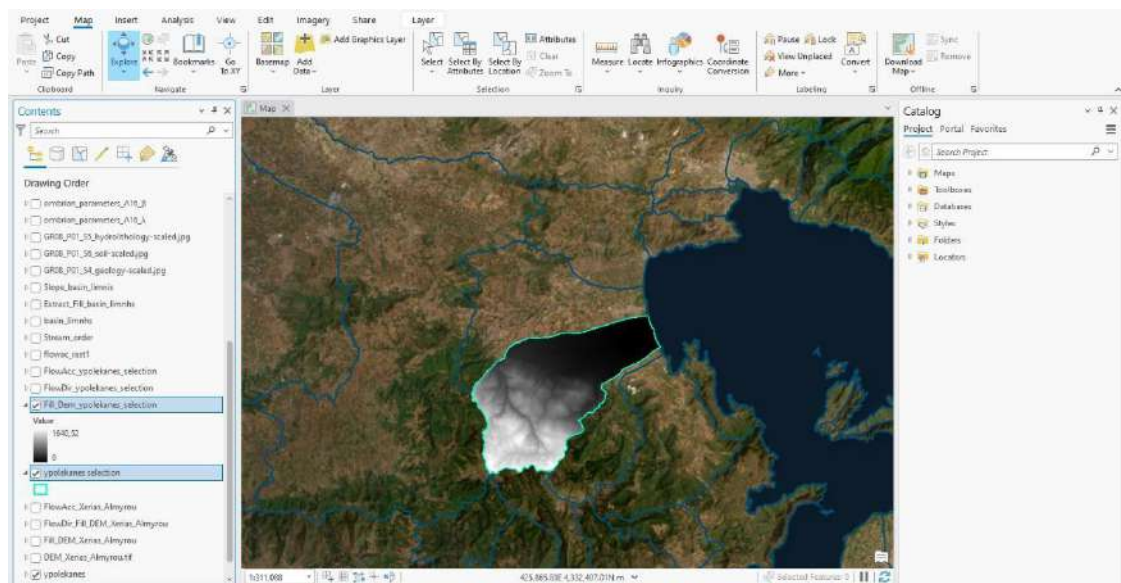
Ανοίγοντας το περιβάλλον του Arc-GIS, πραγματοποιείται η δημιουργία ενός νέου project και η εμφάνιση του γεωγραφικού χάρτη με την μορφή Imagery Hybrid Basemap. Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στον ποταμό Ξεριά της περιοχής Αλμυρού Μαγνησίας. Έτσι η χωρική ανάλυση θα πραγματοποιηθεί στην συγκεκριμένη περιοχή. Για την ευκολότερη διαχείριση του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής, το υδατικού διαμέρισμα της Θεσσαλίας διαχωρίζεται, όπως προαναφέρθηκε, σε 2 λεκάνες, από όπου η μελέτη θα εστιάσει στην λεκάνη Αλμυρού-Πηλίου, που περιλαμβάνει τον ποταμό Ξεριά. Η προσθήκη αρχείου υπολεκανών “ypolekanes” με την εντολή ‘Add Data’, κρίνεται απαραίτητη, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 10). Η επιλογή της υπό εξέταση λεκάνης γίνεται με την εντολή Selection, επιλέγοντας το αρχείο ‘ypolekanes’ και την συγκεκριμένη υπολεκάνη, δημιουργώντας έτσι ένα καινούριο αρχείο “ypolekanes_selection”. Η καλύτερη κατανόηση συγκέντρωσης και κατεύθυνσης ροής του νερού γίνεται με βάση το υψόμετρο του εδάφους. Για την ψηφιακή απεικόνιση του υψομέτρου, πραγματοποιείται προσθήκη μοντέλου εδάφους Raster DEM “DEM_Xerias_Almyrou” (Εικ. 9), που παρουσιάζει τις διαφορετικές τιμές του υψομέτρου ανά σημείο του εδάφους με ψηφιακά κελιά (pixels), έχοντας αποχρώσεις ασπρόμαυρης κλίμακας. Επιπλέον, το ίδιο αρχείο αποτελεί βάση για τα επόμενα βήματα σχετικά με την ανάλυση κατεύθυνσης ροής ρέματος (‘Flow Direction’) και συγκέντρωση ροής του νερού (‘Flow Accumulation’).



Εικόνα 9: Προσθήκη αρχείου υπολεκάνων και ψηφιακού αρχείου Raster DEM στο χάρτη

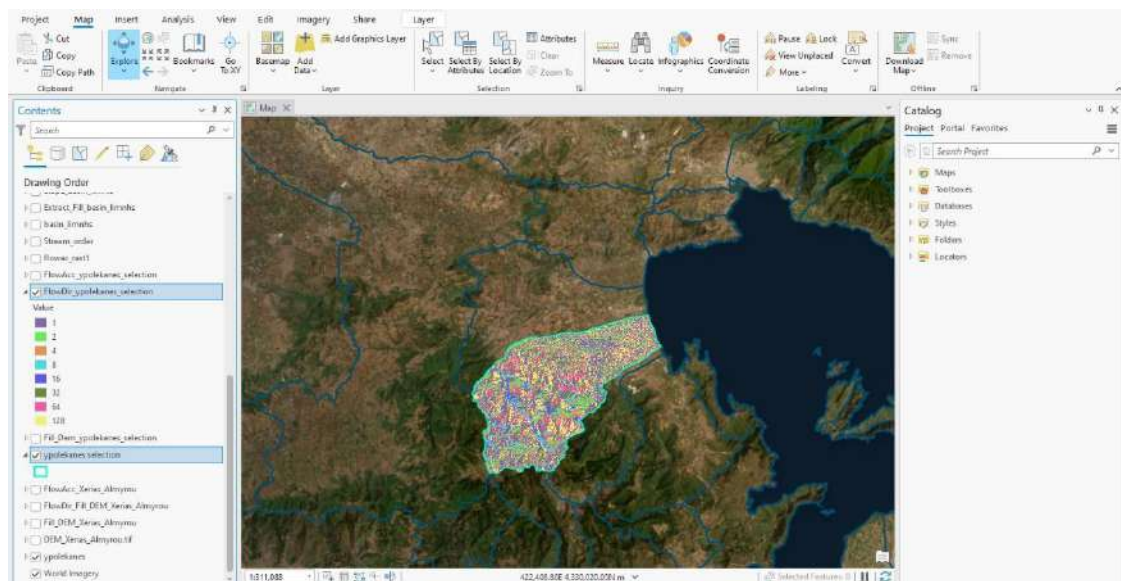
2. Διόρθωση αρχείου DEM, απεικόνιση κατεύθυνσης και συγκέντρωσης ροής

Το αρχείο DEM παρουσιάζει ψηφιακά σφάλματα σε ορισμένα σημεία της περιοχής, με αποτέλεσμα στα σημεία αυτά να μην είναι γνωστές οι τιμές του υψομέτρου. Η διόρθωσή του εκτελείται με την χρήση εργαλείων από το πακέτο Analysis Tools, και πιο συγκεκριμένα το εργαλείο 'Fill'. Έπειτα από την συμπλήρωση των στοιχείων και την εκτέλεση της εντολής, προκύπτει ένα διορθωμένο ψηφιακό αρχείο "Fill_DEM_Xerias_Almyrou", στο οποίο γίνεται περικοπή του ψηφιακού αρχείου μέσα στα όρια της υπολεκάνης με την εντολή Clip από το ίδιο πακέτο χρησιμοποιώντας το διορθωμένο αρχείο DEM της υπολεκάνης, με όνομα 'Fill_Dem-ypolekanes_selection', όπως παρουσιάζεται και στην Εικ. 10.



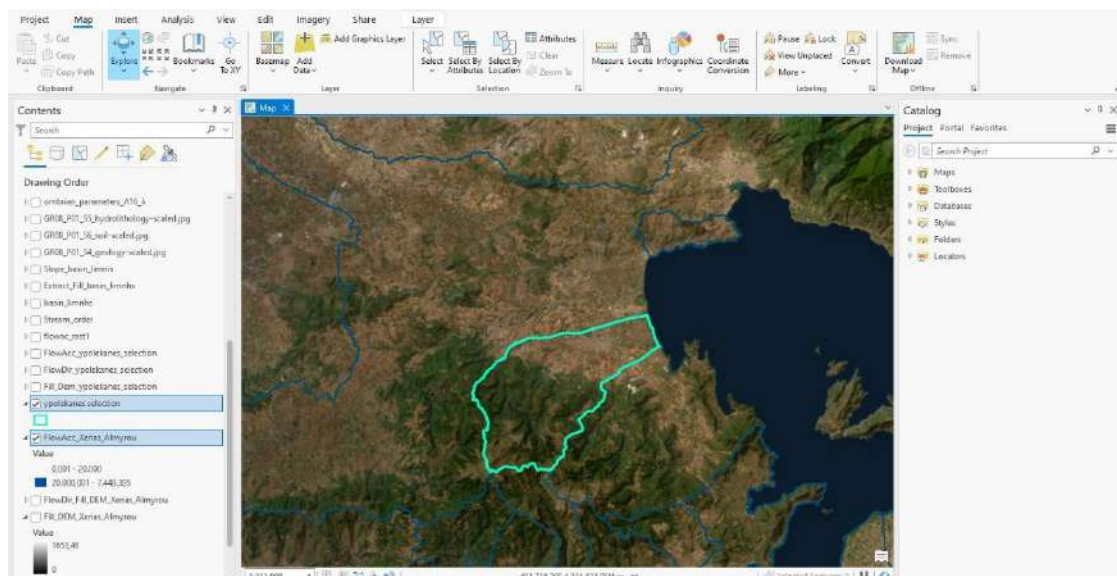
Εικόνα 10: Διόρθωση αρχείου DEM και περικοπή στην υπολεκάνη

Καθώς οι τιμές του υψομέτρου είναι γνωστές σε όλα τα σημεία πλέον, η εύρεση κατεύθυνσης ροής των ρεμάτων καθίσταται ως μια εύκολη διαδικασία. Η διαδικασία αυτή εκτελείται μέσω του εργαλείου ‘Flow Direction’ από το πακέτο Analysis Tools. Μετά την συμπλήρωση των στοιχείων με τα καινούρια δεδομένα, από την εκτέλεση της εντολής παρουσιάζεται ένα νέο πολύχρωμο ψηφιακό αρχείο “FlowDir_Fill_DEM_Xerias_Almyrou”. Κάθε ψηφιακό κελί αντιπροσωπεύει μια διαφορετική κατεύθυνση με τα οχτώ διαφορετικά χρώματα να είναι οι οχτώ κύριες κατευθύνσεις του ορίζοντα όπως Βόρεια, Βορειοανατολικά, Ανατολικά κ.λπ. Για τον περιορισμό του αρχείου που δημιουργήθηκε μέσα στην υπολεκάνη, γίνεται χρήση της ίδιας εντολής (‘Clip’) όπως και στην προηγούμενο βήμα. Το αρχείο που δημιουργείται, αναγνωρίζεται με το όνομα “FlowDir_ypolekanes_selection” (Εικ. 11).



Εικόνα 11: Παρουσίαση κατεύθυνσης ροής νερού εντός της υπολεκάνης

Έχοντας ως στόχο την καλύτερη κατανόηση του υδρογραφικού δικτύου της υπολεκάνης, αναγκαία κρίνεται και η παρουσίαση της συγκέντρωσης ροής του νερού, δηλαδή σε ποια σημεία της περιοχής ρέει ή και συγκεντρώνεται το νερό. Το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει από την εντολή ‘Flow Accumulation’ από το πακέτο όπως στα αρχικά βήματα. Έτσι, δημιουργείται ένα νέο ψηφιακό αρχείο ‘‘FlowAcc_Xerias_Almyrou’’, στο οποίο επίσης εφαρμόζεται περικοπή στην υπολεκάνη όπως είναι γνωστό από τα παραπάνω βήματα με όνομα ‘‘FlowAcc_ypolekanes_selection’’ (Εικ. 12). Στο συγκεκριμένο ψηφιακό αρχείο απεικονίζονται pixels με κλίμακα δύο χρωμάτων αλλά και δύο εύρη τιμών. Το μικρότερο εύρος τιμών (από το μηδέν έως μια τιμή) αντιπροσωπεύει σημεία όπου διέρχονται τα δευτερεύοντα ρέματα, ποτάμια, ρυάκια μικρής ροής που εισέρχονται και ρέουν σε κορυφογραμμές και πλαγιές βουνών. Το μεγαλύτερο εύρος τιμών (από την επόμενη τιμή μέχρι την μεγαλύτερη τιμή) αντιπροσωπεύει σημεία όπου ρέουν τα κύρια ρέματα με μεγαλύτερη ροή. Παράλληλα, με την διαδικασία αυτή δίνεται η δυνατότητα πρόβλεψης κινδύνου πλημμύρας σε μια περιοχής με τα σημεία υψηλής συγκέντρωσης ροής να εμφανίζουν μεγαλύτερο κίνδυνο. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και στην περίπτωση σχεδιασμού κατασκευαστικών έργων ώστε να αποφευχθεί η καταστροφή τους λόγω διαβρώσεων από πλημμύρες, γεγονός που εξετάζεται στην παρούσα μελέτη.

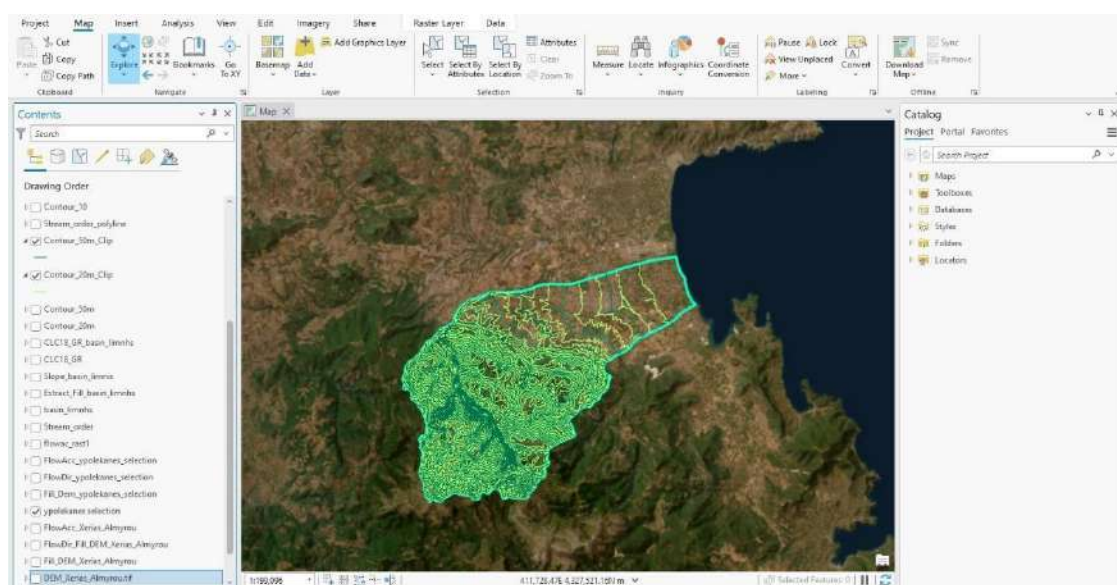


Εικόνα 12: Παρουσίαση σημείων διαφορετικής συγκέντρωση ροής με 2 κλίμακες.

3. Προσθήκη ισουψών καμπυλών και περικοπή στην υπολεκάνη

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην περιοχή των λιμνών Ζερέλια και έχει ως σκοπό, όπως προαναφέρθηκε, η κατασκευή πλευρικών κατασκευών θυροφράγματος ως ιχθυοπέρασμα για τους ιχθύες που φιλοξενεί το συγκεκριμένο οικοσύστημα. Η ανάλυση των υδραυλικών συνθήκων της περιοχής αυτής είναι απαραίτητη, ώστε να εξαχθούν σωστά αποτελέσματα. Ο στόχος αυτός μπορεί να επιτευχθεί με την εστίαση και την ανάλυση της περιοχής σε μικρότερη κλίμακα για μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό παροχής του νερού. Για να σχεδιαστεί, όμως, μια υπολεκάνη μικρότερης κλίμακας, αναγκαία είναι η χρήση ισουψών καμπυλών. Ισουψής καμπύλη ορίζεται η ορθογώνια προβολή όλων των σημείων του εδάφους που έχουν το ίδιο υψόμετρο σε σχέση με το επίπεδο της θάλασσας σε έναν διδιάστατο χάρτη. Η απόσταση μεταξύ δύο καμπυλών είναι σταθερή και ονομάζεται ισοδιάσταση. Όλες οι καμπύλες είναι κλειστές και παράλληλα μεταξύ τους (Ψιλοβίκος, 2016). Αποτελεί ένα βασικό εργαλείο για τον υπολογισμό κλίσεων του εδάφους, την ανάλυση απορροής του νερού αλλά και την εκτίμηση κόστους που αφορά κατασκευαστικά έργα λόγω διαφορά υψομέτρου. Ταυτόχρονα, η συμβολή τους στην χάραξη λεκανών είναι σημαντική, γεγονός που λαμβάνει χώρα και στον παρών βήμα. Η εμφάνιση ισουψών καμπυλών στο περιβάλλον του GIS γίνεται με την εντολή 'Contour' από το πακέτο Analysis Tools. Η διαφορά υψομέτρου, δηλαδή η απόσταση μεταξύ μιας ισουψής καμπύλης από την επόμενη της,

που δίνεται στην παρούσα εργασία είναι 50 m και 20 m (με ονόματα αρχείων: “Contour_50m” και “Contour_20m” αντίστοιχα), τιμές που εξυπηρετούν στη συνέχεια στην χάραξη λεκάνης μικρότερης κλίμακας από την λεκάνη που έχει επιλεχθεί. Παρ’ όλα αυτά, η περικοπή τους στην αρχική επιλεγμένη λεκάνη δίνει μια καλύτερη εικόνα παρατήρησης σχετικά με την συχνότητα εμφάνισης καμπυλών στην ευρύτερη, υπό μελέτη, περιοχή (Εικ. 13) (με ονόματα αρχείων: ‘Contour_50m_Clip’ και ‘Contour_20m_Clip’ αντίστοιχα).

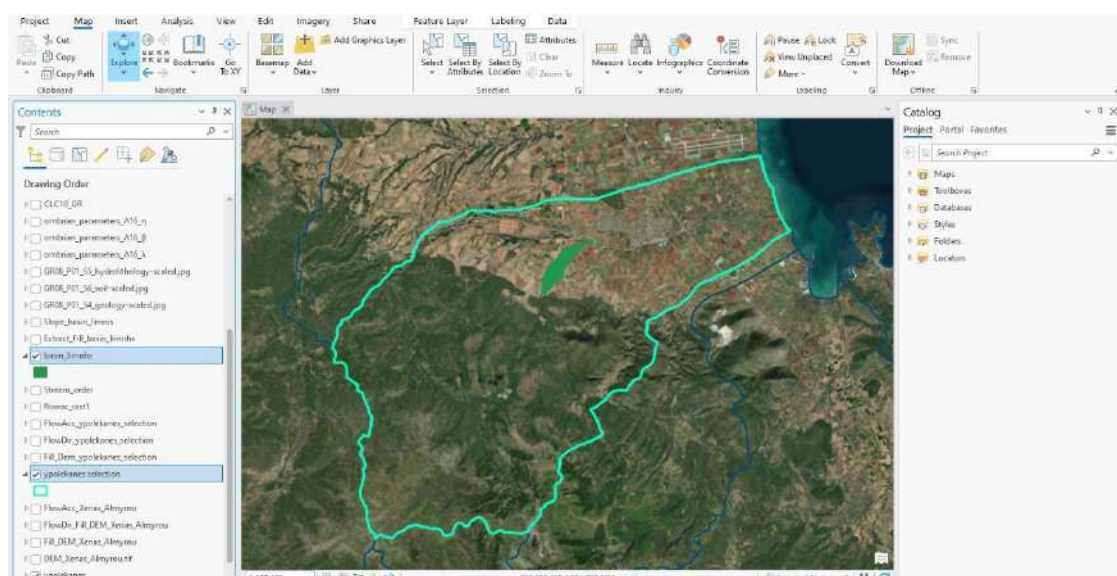


Εικόνα 13: Απεικόνιση ισουψών καμπυλών της υπολεκάνης των 20m (ανοιχτό πράσινο) και των 50m(σκούρο πράσινο)

4. Σχεδιασμός υπό εξέταση λεκάνης, υπολογισμός του εμβαδού της και περικοπή αρχείου Dem

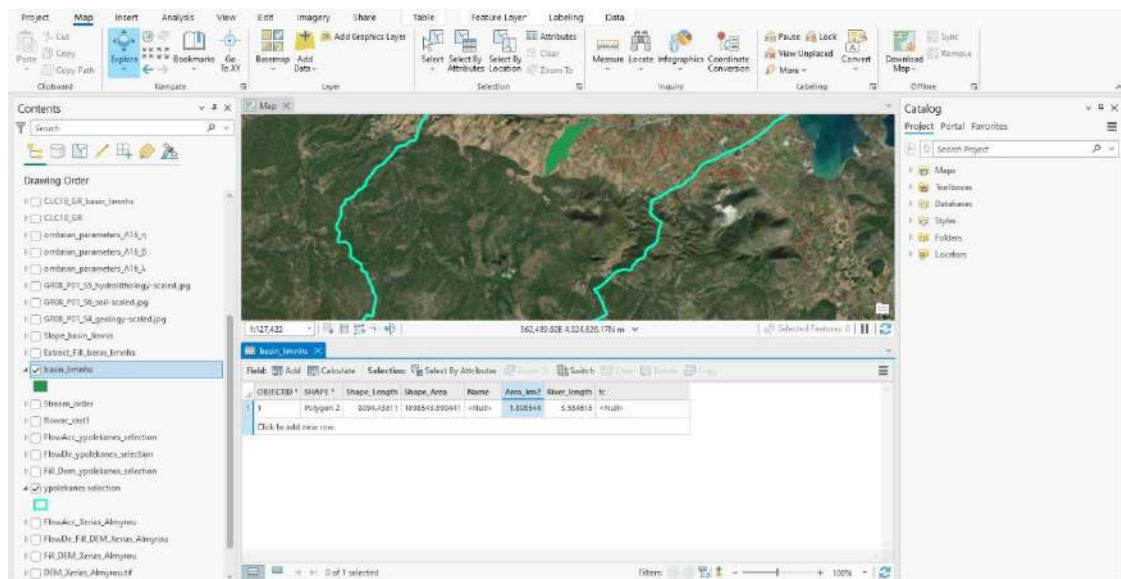
Με βάση τις ισουψείς καμπύλες που παρουσιάζονται στην λεκάνη, η σχεδίαση μιας μικρότερης κλίμακας λεκάνης, που εξετάζεται αποτελεί μια εύκολη αλλά ταυτόχρονα προσεκτική διαδικασία, στην οποία η ένωση των κορυφών απαρτίζει το μεγαλύτερο μέρος της διαδικασίας. Για την ένωση των κορυφών, καθώς έτσι σχηματίζεται ένας υδροκρίτης, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η καλή “ανάγνωση” του χάρτη με τις ισουψείς καμπύλες. Υδροκρίτης ή υδροκριτική γραμμή ορίζεται η νοητή γραμμή, η οποία ενώνει τα υψηλότερα σημεία του υψομέτρου από την επιφάνεια της γης, ενώ παράλληλα διαχωρίζει την επιφανειακή απορροή σε διάφορες κατευθύνσεις. Με άλλα λόγια είναι τα εξωτερικά όρια μιας λεκάνης απορροής (Ψιλοβίκος, 2016). Η

“ανάγνωση” χάρτη ισουψών καμπυλών γίνεται με τον εντοπισμό των υψηλών σημείων, όπου εμφανίζονται με την μορφή καμπυλόγραμμης γωνίας με κατεύθυνση προς τις καμπύλες με τις υψηλότερες τιμές, και τον εντοπισμό των χαμηλών σημείων, όπου εμφανίζονται με την ίδια μορφή αλλά προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η εντολή στο περιβάλλον σχεδίασης, που εκτελέστηκε για την συγκεκριμένη μελέτη, είναι η εντολή ‘Create’, με την οποία σχεδιάστηκε η νέα υπολεκάνη περικλείοντας την Μεγάλη Δυτική Λίμνη Ζερέλια και το ποτάμι που συνδέεται με αυτή (όνομα αρχείου υπό μελέτη λεκάνης: “basin_limnhs”). Ως κατώτατο σημείο της υπολεκάνης ορίστηκε το σημείο ένωσης του ποταμού με τον κύριο ποταμό Ξεριά (Εικ. 14).



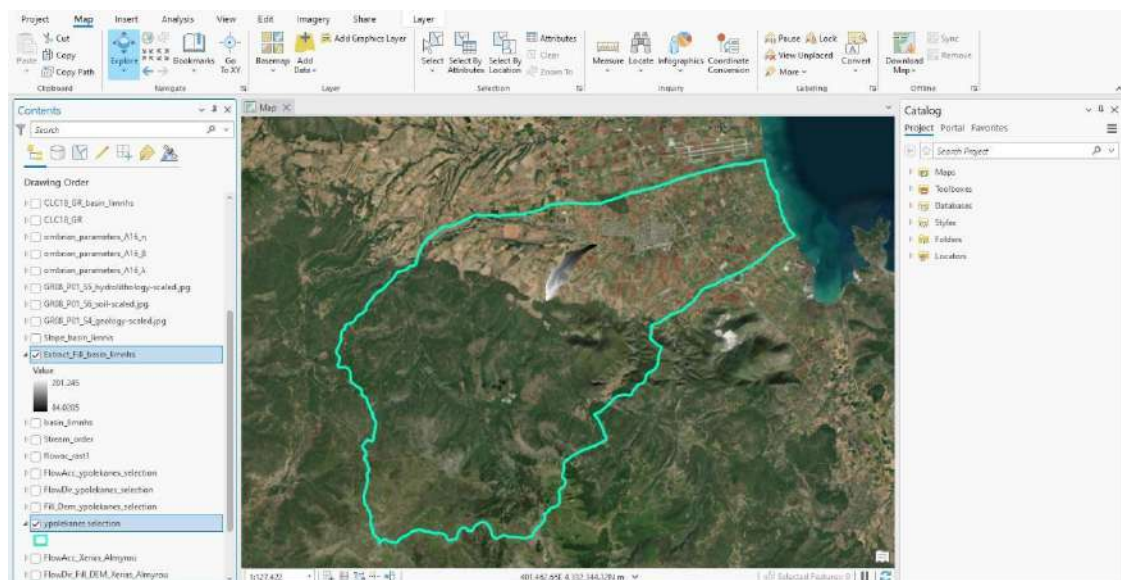
Εικόνα 14: Παρουσίαση σχεδιασμένης υπό μελέτη λεκάνης (σχήμα καλυμμένο με πράσινο χρώμα)

Το περιβάλλον του GIS, δίνει την δυνατότητα παράλληλα να υπολογιστεί, στον Attribute Table, το εμβαδόν της νέας σχεδιασμένης υπό εξέτασης υπολεκάνης με την εντολή ‘Calculate Geometry’ και τον καθορισμό μονάδας μέτρησης τα τετραγωνικά μέτρα (km²). Το αποτέλεσμα του εμβαδού, όπως φαίνεται και από την Εικ. 15, ισούται με 1.898.544 km².



Εικόνα 15: Εμφάνιση αποτελέσματος έπειτα από υπολογισμό εμβαδού της υπό μελέτη λεκάνης

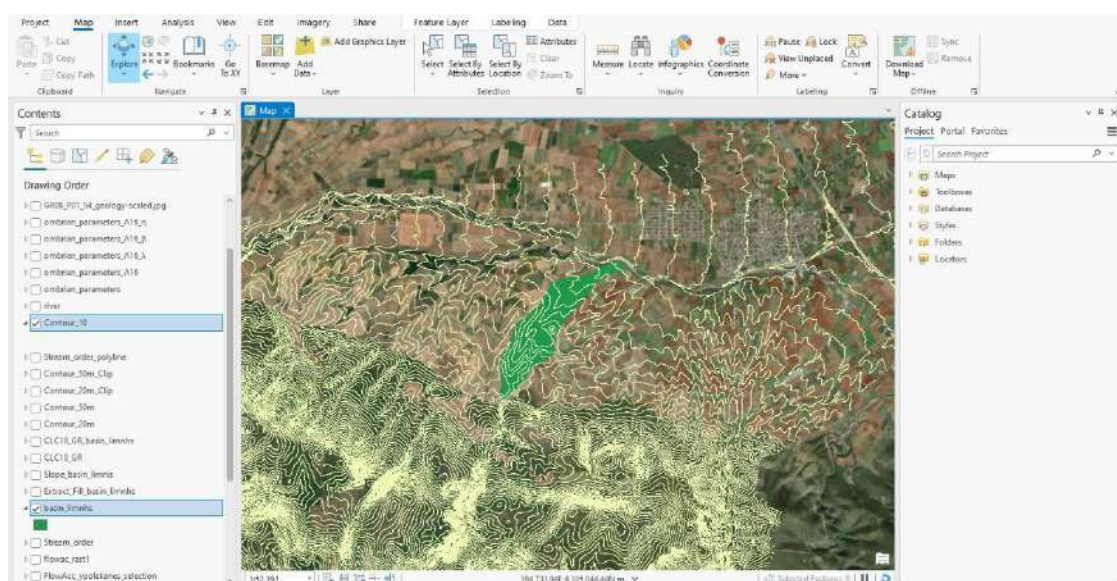
Για την εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων, κρίνεται επίσης σημαντική η περικοπή του διορθωμένου ψηφιακού αρχείου Raster DEM, έτσι ώστε να έχει τα ίδια όρια με την υπό μελέτη λεκάνη και αυτό εκτελείται με την εντολή ‘Extract by Mask’ από το πακέτο Analysis Tools, με όνομα νέου αρχείου “‘Extract_Fill_basin_limnhs” (Εικ. 16).



Εικόνα 16: Περικοπή αρχείου DEM για την εμφάνιση ψηφιακού υψομέτρου στην υπό μελέτη λεκάνη

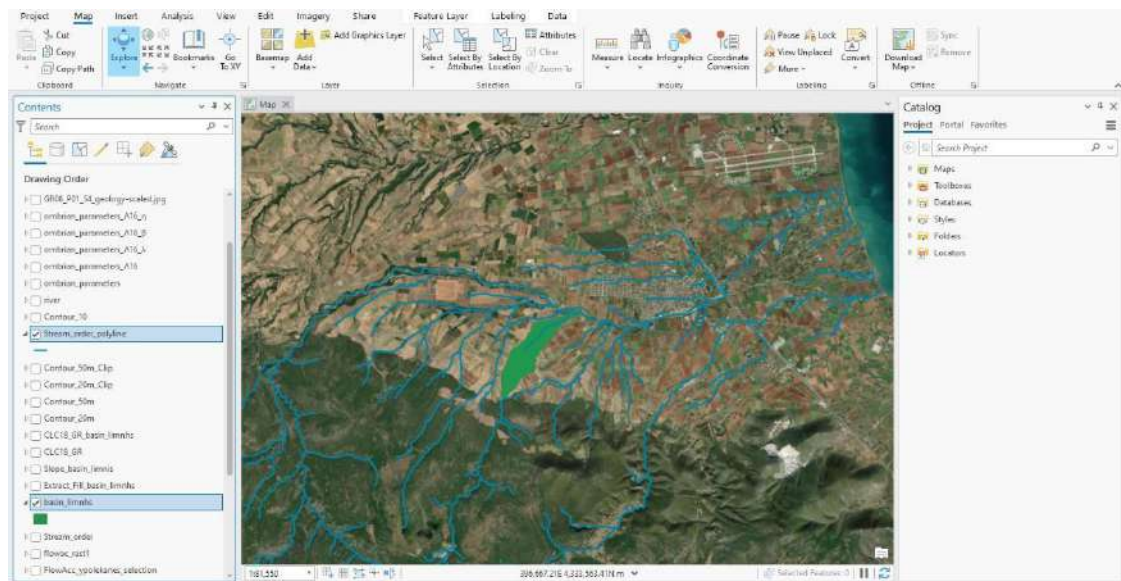
5. Σχεδίαση ρέματος με την βοήθεια εργαλείων και ισουψών καμπυλών 10m, υπολογισμός μήκους του

Ένα ακόμη στοιχείο που είναι απαραίτητο για τον υπολογισμό παροχής νερού που συγκεντρώνεται στην υπολεκάνη είναι ο σχεδιασμός του κύριου ποταμού της. Ο σχεδιασμός του ποταμού γίνεται με την ίδια διαδικασία σχεδιασμού της υπό μελέτη λεκάνης με την διαφορά ότι η ένωση γίνεται στα χαμηλότερα σημεία από τις ισουψείς καμπύλες. Για πιο λεπτομερές σχεδιασμό χρησιμοποιήθηκαν ισουψείς καμπύλες ανά 10 m (“Contour_10”) που προστίθενται με την ίδια διαδικασία που έχει ήδη προαναφερθεί.



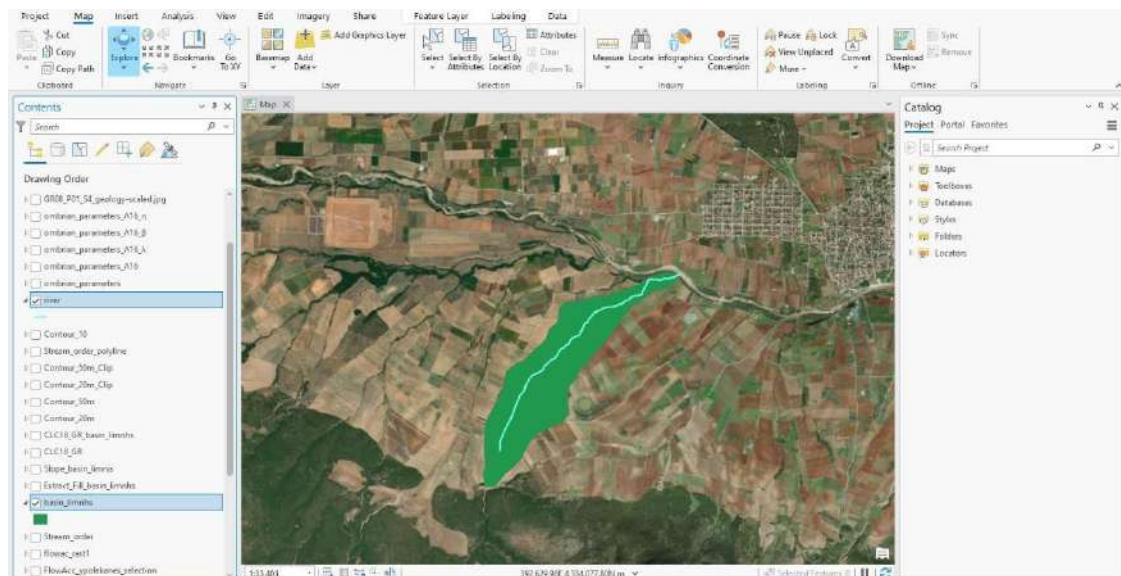
Εικόνα 17: Εμφάνιση ισουψών καμπυλών 10 m

Ακόμα, ως βάση για τη χάραξη του ποταμού έγινε χρήση της εντολής ‘Stream Order’, από όπου εμφανίζονται τα ποτάμια πρώτης, δεύτερης και τρίτης τάξης. Τα ποτάμια του δημιουργούμενου αρχείου ‘Stream_order_polyline’, ταξινομούνται με βάση το μεγάλο κύριο ποτάμι, το οποίο καταλήγει στη θάλασσα και στο οποίο ταυτόχρονα συγκεντρώνεται το νερό από όλους τους παραπόταμους (ποτάμι πρώτης τάξης). Τα ποτάμια δεύτερης τάξης ονομάζονται οι παραπόταμοι που συνδέονται με τον κύριο ποταμό και αποτελούν ένα δεύτερο κύριο παραπόταμο. Αντίστοιχα οι παραπόταμοι που συνδέονται με τον τελευταίο απαρτίζουν τα ποτάμια τρίτης τάξης. Έπειτα από την εκτέλεση της εντολής η παρουσίαση των ποταμών, και των τριών τάξεων, είναι σαφή. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 18), το ποτάμι της υπό μελέτη λεκάνης αναγνωρίζεται ως ποταμός δεύτερης τάξης.



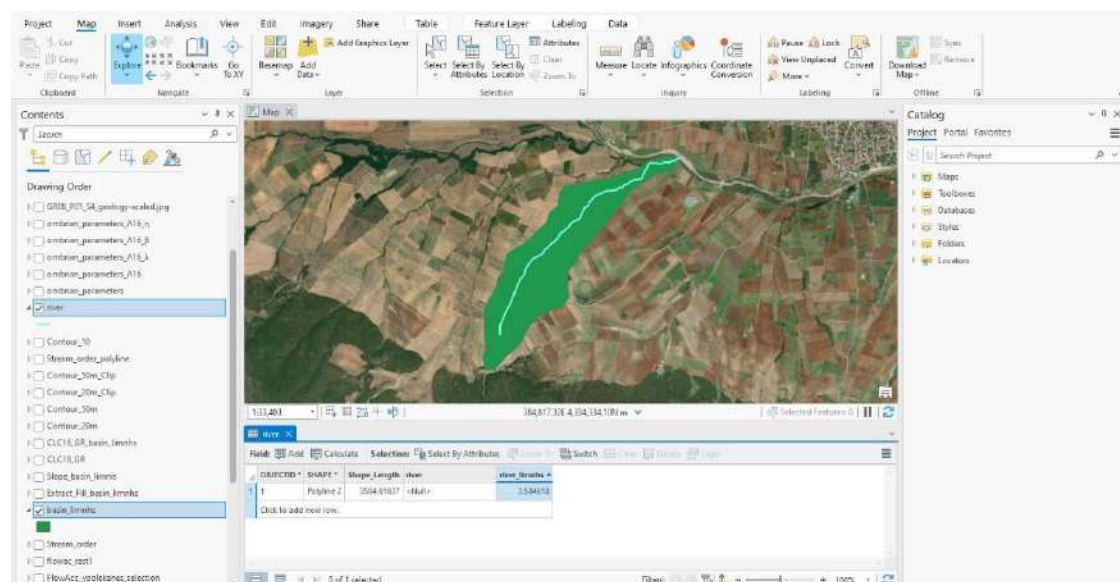
Εικόνα 18: Παρουσίαση ποταμών 1^{ης}, 2^{ης} και 3^{ης} τάξης

Η χάραξη του κύριου ποταμού της υπολεκάνης έχοντας ξεκινάει από το χαμηλότερο σημείο μιας ισουψής καμπύλης με μεγάλη τιμή υψομέτρου. Συνεχίζοντας τα χαμηλότερα σημεία από τις επόμενες καμπύλες ενώνονται προς την έξοδο της υπολεκάνης, δηλαδή με κατεύθυνση προς τις καμπύλες με το χαμηλότερο υψόμετρο και ως τελικό σημείο, το σημείο που ενώνεται ο παραπόταμος (όνομα ποταμού: 'river') με το κύριο ποταμό Ξεριά (Εικ. 19).



Εικόνα 19: Σχεδίαση κύριου ποταμού της υπό μελέτη λεκάνης

Ο υπολογισμός μήκους του ποταμού είναι βασικός καθώς η τιμή του αποτελέσματος θα χρησιμοποιηθεί μετέπειτα. Ο υπολογισμός του μήκους βασίζεται επίσης στον Attribute Table του ποταμού σε συνδυασμό με την εντολή ‘Calculate Geometry’ και τον καθορισμό, ως μονάδα μέτρησης, τα χιλιόμετρα (km). Το αποτέλεσμα του μήκους, όπως φαίνεται και από την Εικ. 20, ισούται με 3.584.618 km.

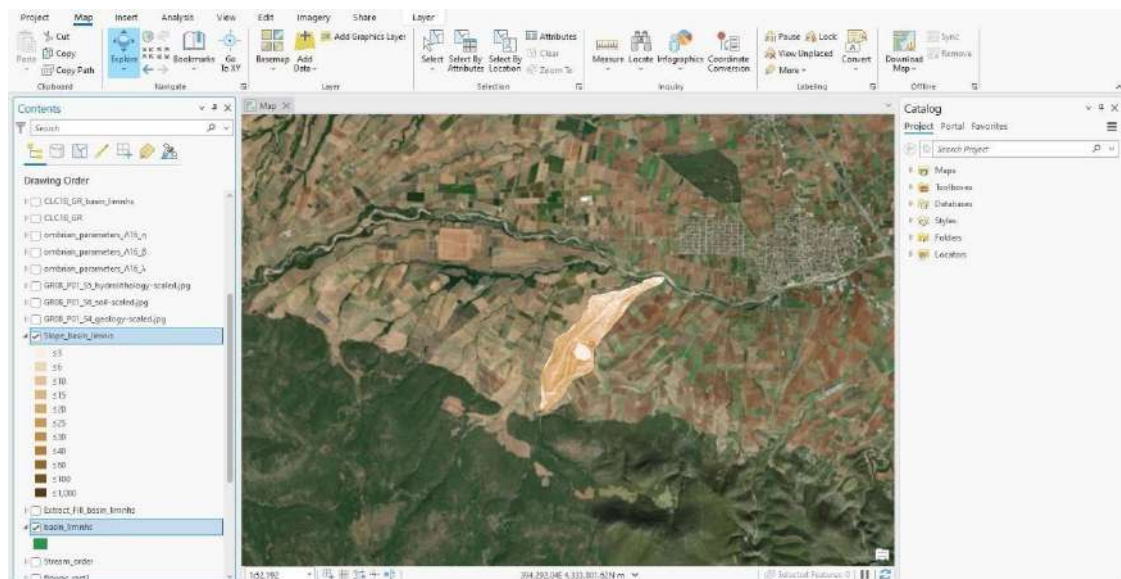


Εικόνα 20: Εμφάνιση αποτελέσματος έπειτα από τον υπολογισμό μήκους του ποταμού που διασχίζει την υπό μελέτη λεκάνη

2.2.1.2. Εξαγωγή απαραίτητων τιμών

1. Προσθήκη αρχείου κλίσεων και περικοπή στην υπό εξέταση λεκάνη

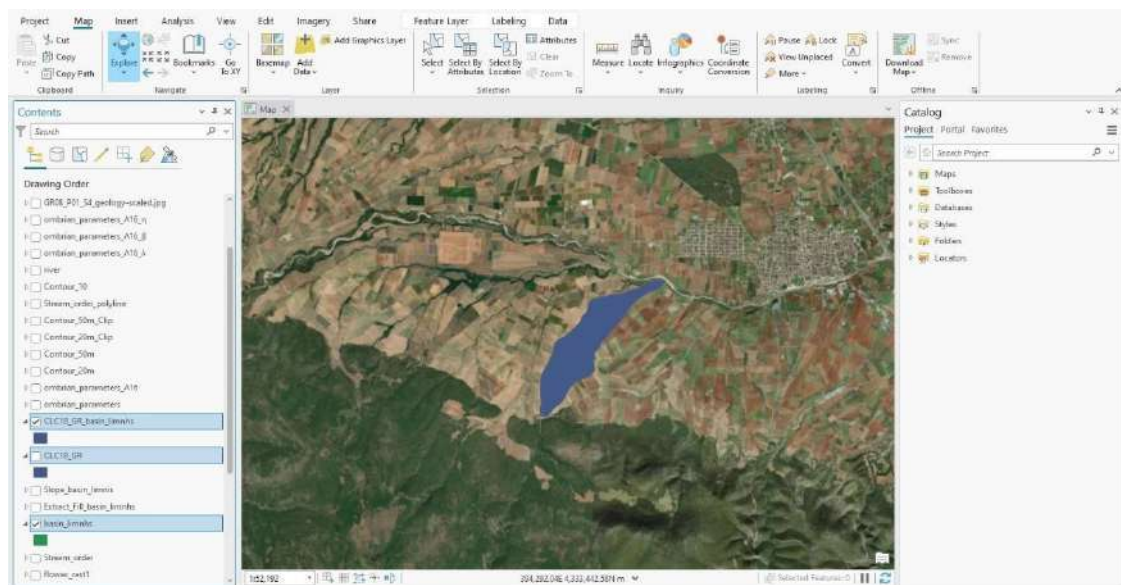
Για την ασφαλέστερη κατασκευή ενός ιχθυοπεράσματος απαραίτητη είναι η εμφάνιση χάρτη κλίσεων γης. Οι κλίσεις γης φανερώνουν πόσο απότομη ή επίπεδη είναι η μορφολογία της γης σε ένα σημείο, ενώ ταυτόχρονα αποδεικνύουν ότι οι περιοχές με την ταχύτερη ροή του νερού είναι περιοχές με μεγαλύτερη κλίση ενώ οι περιοχές με μικρότερη ροή νερού είναι περιοχές με μικρότερη κλίση. Η εμφάνιση του χάρτη πραγματοποιείται με την εντολή ‘Slope’. Η Εικ. 21, παρουσιάζει τον περικομμένο χάρτη εντός της υπολεκάνης (“Slope_basin_limnhs”) με μικρές κλίσεις γης, καθώς η απόχρωση των χρωμάτων είναι με απαλά χρώματα, τα οποία, όπως εξηγούνται και στην κλίμακα του χάρτη εμφανίζουν τις μικρότερες τιμές κλίσης.



Εικόνα 21: Παρουσίαση χάρτη κλίσεων γης στην υπό μελέτη λεκάνη

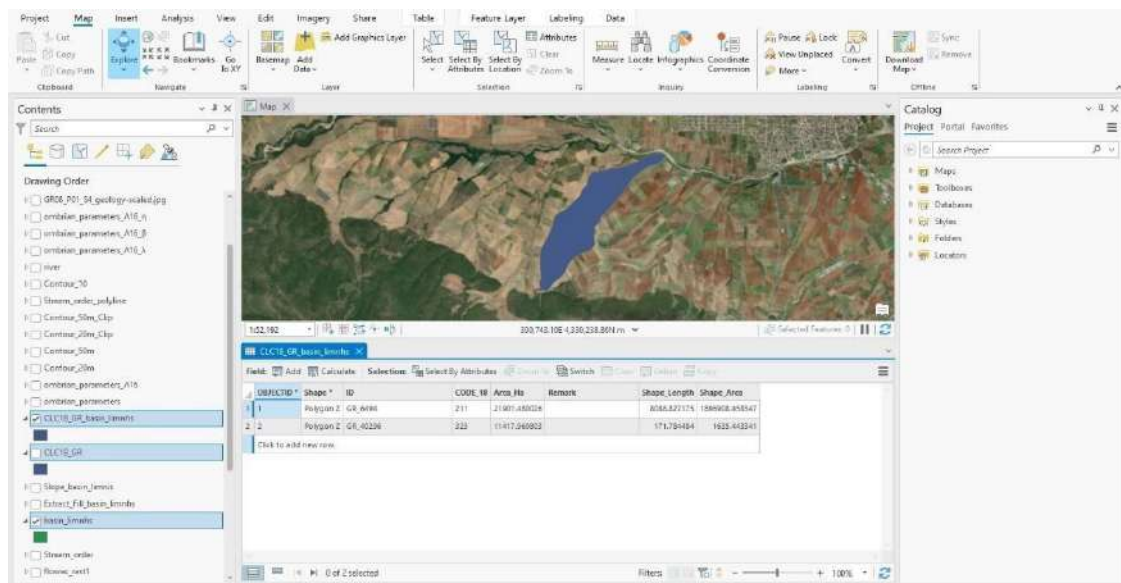
2. Προσθήκη χάρτη χρήσεων γης και περικοπή στην υπό εξέταση λεκάνη

Μια παράμετρος, που πρέπει να ληφθεί υπόψιν για την σχεδιασμό της κατασκευής του ιχθυοπεράσματος, είναι η διευκρίνιση χρήσεων γης για την περιοχή. Οι χρήσεις γης, δηλαδή με ποιον τρόπο αξιοποιείται το έδαφος σε μια περιοχή, εξαρτάται από την βλάστησή του και τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή αυτή. Στην περίπτωση της παρούσα μελέτης η γνωστοποίηση των χρήσεων γης εξυπηρετεί στην λήψη απόφασης σχετικά με την λειτουργία του έργου. Η κατασκευή του θα εξασφαλίσει την αποφυγή αρνητικής επίδρασής του στο περιβάλλον και την κοινωνία αποφεύγοντας δυσμενείς συνέπειες, όπως συμβαίνει στην περίπτωση, για παράδειγμα, καταστροφής του οικοσυστήματος και των αγροτικών καλλιεργειών έπειτα από ένα ακραίο φαινόμενο πλημμύρας. Επιπλέον, με τις χρήσεις γης δίνεται η δυνατότητα πρόβλεψης σχετικά με τις αλλαγές που θα συμβούν μελλοντικά στη ροή του νερού και πως η αλλαγή αυτή επιδρά στην κοινωνία, για παράδειγμα αν εμποδίζει την κάλυψη ανάγκης παροχής νερού στους γύρω οικισμούς αλλά και στην υποβάθμιση του οικοσυστήματος επηρεάζοντας την βιοποικιλότητα αλλά και την υγεία των υδάτων. Για την εμφάνιση του χάρτη χρήσεων γης, εκτελείται η εντολή προσθήκης αρχείου χρήσεων γης ‘CLC18_GR’, αρχείο που εύρεση του γίνεται στο διαδίκτυο. Με την περικοπή του αρχείου εντός των ορίων της υπολεκάνης, δημιουργείται ένα νέο αρχείο με την ονομασία ‘CLC18_GR_basin_limnhs’ (Εικ. 22).



Εικόνα 22: Εμφάνιση και περικοπή χάρτη χρήσεων γης στην υπό μελέτη λεκάνη

Ανοίγοντας τον πίνακα Attribute Table, εμφανίζονται δύο χρήσεις γης για την συγκεκριμένη υπολεκάνη. Ειδικότερα, η πρώτη χρήση γης με κωδικό 211, σύμφωνα με την «Ελληνική ονοματολογία CORINE LAND COVER» (Ελληνικό Κτηματολόγιο), αντιπροσωπεύει την μη αρδευόμενη αρόσιμη γη. Ως μη αρδευόμενη γη ορίζεται η έκταση που δεν υπάρχει κάποια φυσική παροχή νερού από την περιοχή και ως αρόσιμη γη ορίζεται η έκταση που μπορεί να καλλιεργηθεί με εναλλαγές προϊόντων καλλιέργειας (αμειψισπορά), ενώ περιλαμβάνει και αγροναπαύσεις (ΕΛ.ΣΤΑΤ). Η δεύτερη χρήση γης με κωδικό 323, αντιστοιχεί στην σκληροφυλλική βλάστηση. Σκληροφυλλική βλάστηση αποτελείται από θαμνώδης βλάστηση, με κυρίαρχα είδη φυτών α) η μακκία, γνωστή μεσογειακή πυκνή βλάστηση που εντοπίζεται σε χαμηλά και μέσα υψόμετρα αβεστολιθικού υποστρώματος, και β) τα φρύγανα, ασυνεχής και χαμηλή βλάστηση σε ασβεστούχα οροπέδια (Ελληνική Ορνιθολογική Εταιρία, 2000).

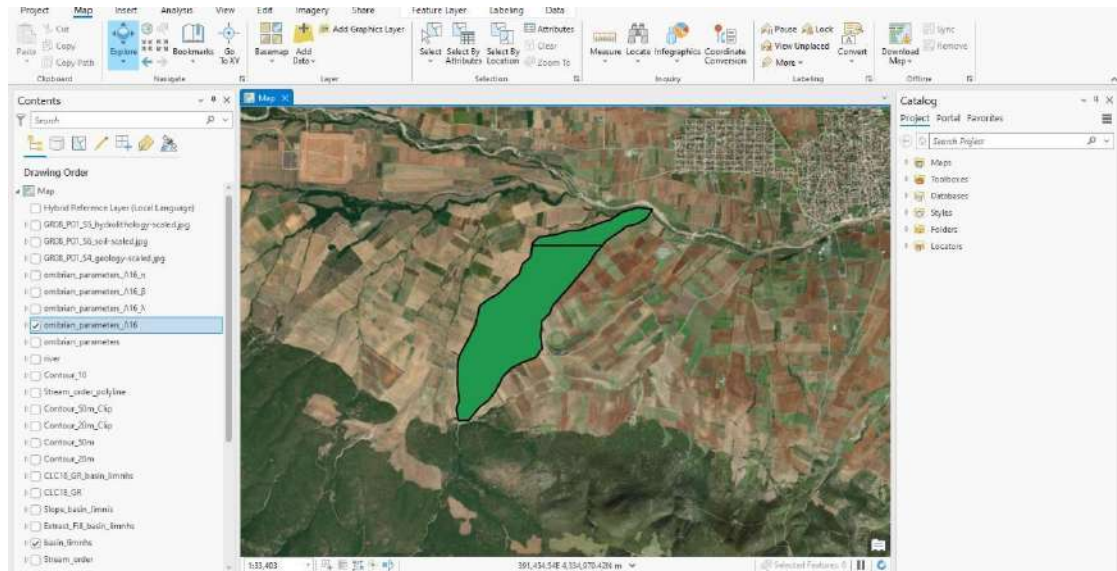


Εικόνα 23: Διαχωρισμός χρήσεων γης (2 κατηγορίες) στην υπό μελέτη λεκάνη

3. Χρήση όμβριων καμπυλών για των υπολογισμό τιμών για τις παραμέτρους 'λ', 'β', 'η'

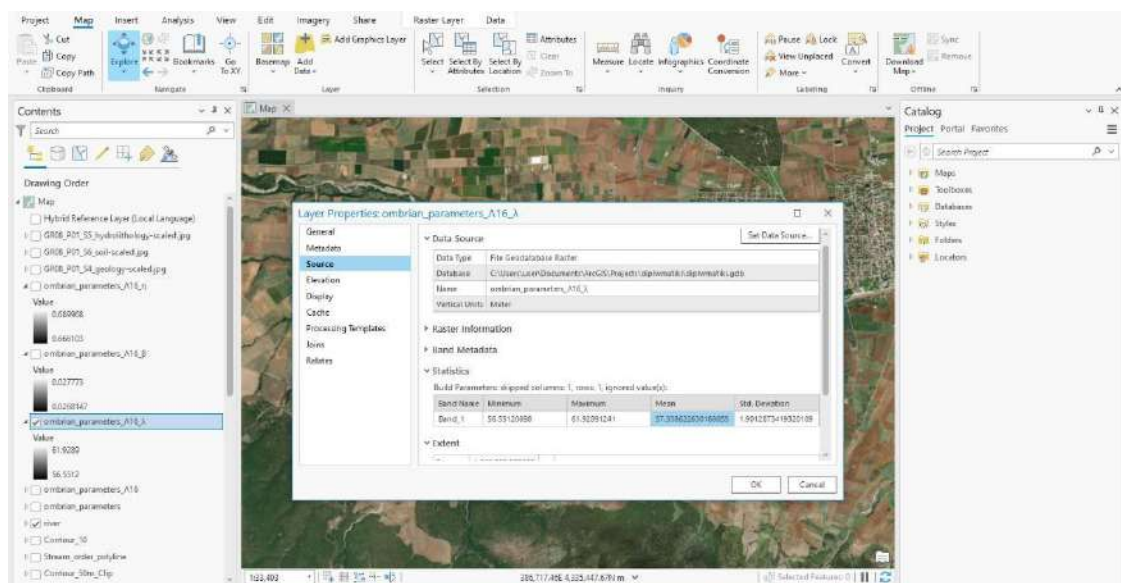
Ένα από τα απαραίτητα ζητούμενα είναι η εύρεση τιμών παροχής νερού. Για τον υπολογισμό των τιμών, που θα ακολουθήσει παρακάτω, υπάρχουν παράμετροι 'λ', 'β', 'η' για τις οποίες οι τιμές γίνονται γνωστές από το περιβάλλον του GIS με την βοήθεια των όμβριων καμπυλών. Οι όμβριες καμπύλες, σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60/EK στον Ελλαδικό χώρο, δίνουν τη δυνατότητα πρόβλεψης κινδύνου πλημμύρας. Στο πλαίσιο εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60/EK, το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας ανέθεσε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο την εκπόνηση του έργου: «Παραγωγή χαρτών με τις επικαιροποιημένες παραμέτρους των όμβριων καμπυλών σε επίπεδο χώρας (εφαρμογή της Οδηγίας ΕΕ 2007/60/EK στην Ελλάδα)». Το έργο είχε ως αντικείμενο την ενοποίηση, στο σύνολο της ελληνικής επικράτειας, των παραμέτρων των όμβριων καμπυλών, όπως αυτές προέκυψαν, σε επίπεδο Υδατικού Διαμερίσματος, στο πλαίσιο της 1ης Αναθεώρησης των Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας (Οδηγία 2007/60/EK) (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2007). Ο χάρτης τους απεικονίζει περιοχές με τετραγωνισμένη οριοθέτηση για συγκεκριμένες περιόδους επαναφοράς αναπαριστώντας τη σχέση μεταξύ έντασης και διάρκειας βροχοπτώσης. Η εμφάνιση του χάρτη με τις όμβριες καμπύλες πραγματοποιείται με την προσθήκη 'Add Data' του ψηφιακού αρχείου shapefile

όμβριων καμπυλών (ΥΠΕΚΑ). Για την εξαγωγή τιμών για τις συγκεκριμένες παραμέτρους στην υπό μελέτη λεκάνη, εκτελείται η περικοπή των όμβριων καμπυλών εντός της υπολεκάνης με την εντολή ‘Clip’, όπως εμφανίζεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικ. 24).



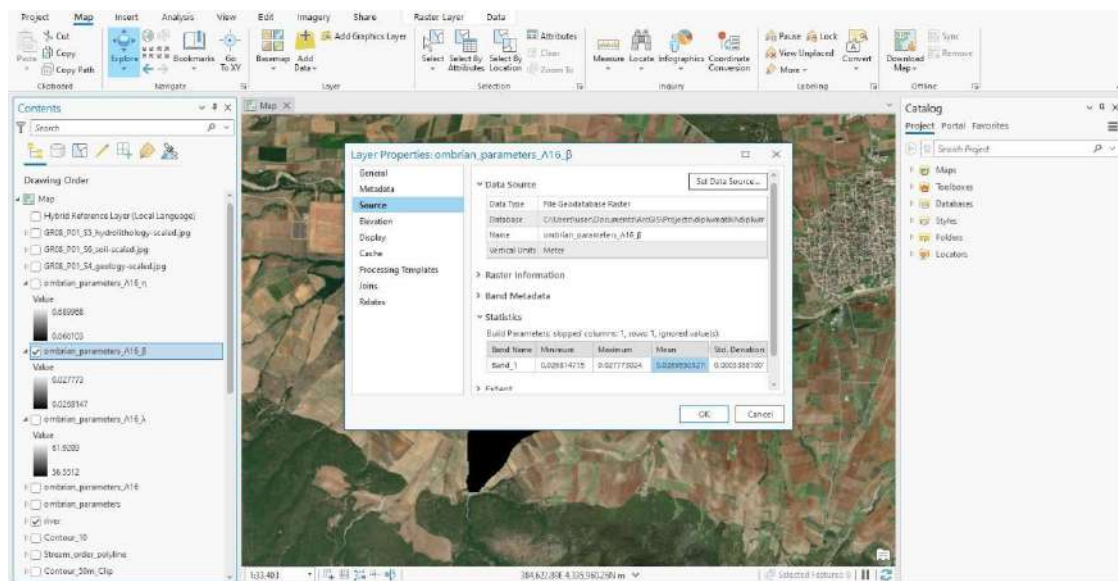
Εικόνα 24: Περικοπή όμβριων καμπυλών εντός ορίων στην υπό μελέτη λεκάνη

Η τιμή για την παράμετρο ‘λ’ εξάγεται μέσω της εντολής ‘Polygon to raster’ χρησιμοποιώντας ως βάση τις όμβριες καμπύλες και θέτοντας την αναζητούμενη παράμετρο ‘λ’. Η μέση τιμή της παραμέτρου δίνεται από το στατιστικό πίνακα του αποτελέσματος.

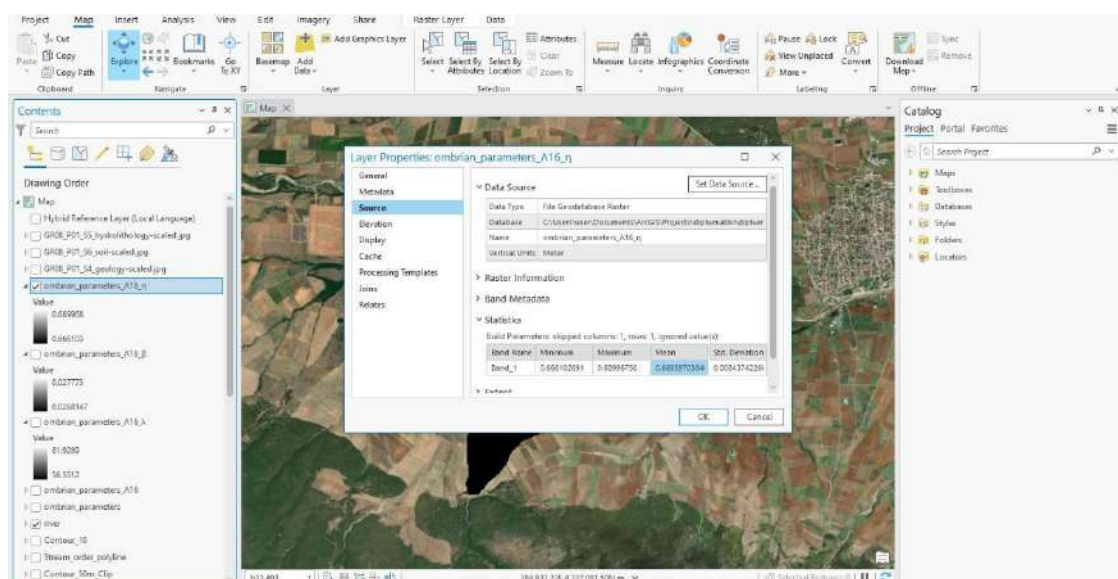


Εικόνα 25: Εμφάνιση αποτελέσματος μέσης τιμής για την παράμετρο ‘λ’

Παρομοίως, εκτελείται η ίδια διαδικασία για τις παραμέτρους ‘β’ και ‘η’.



Εικόνα 26: Εμφάνιση αποτελέσματος μέσης τιμής για την παράμετρο ‘β’



Εικόνα 27: Εμφάνιση αποτελέσματος μέσης τιμής για την παράμετρο ‘η’

2.2.2. Υπολογισμός παροχής νερού για 50, 100 και 1.000 έτη στο πρόγραμμα Microsoft Excel

1) Υπολογισμός επιφανειακής έντασης βροχόπτωσης

Για τον υπολογισμό παροχής νερού, αρχικά πρέπει να εκτιμηθεί η ένταση της βροχόπτωσης. Όμως οι όμβριες καμπύλες δίνουν σημειακά δεδομένα. Οπότε ο υπολογισμός έντασης βροχόπτωσης θα υπολογιστεί αρχικά σημειακά και έπειτα θα γίνει αναγωγή επιφανειακά. Η σημειακή ένταση βροχόπτωσης υπολογίζεται από τον τύπο (1) (Κουτσογιάννης και συν. 2023):

$$x = \lambda \cdot \frac{(T / \beta)^{\xi} - 1}{(1 + k / \alpha)^{\eta}} \quad (1)$$

Όπου: x (mm/hr) = η σημειακή ένταση βροχόπτωσης

λ, β, η = παράμετροι της υπολεκάνης

α, ξ = σταθερές τιμές

T (years) = περίοδος επαναφοράς

k (hr) = t_c = χρόνος συγκέντρωσης

Καθώς για τις περισσότερες μεταβλητές έχουν υπολογιστεί οι τιμές τους, για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης t_c (hr), χρησιμοποιήθηκε ο τύπος (2) κατά Giandotti (Giandotti, 1934), ο οποίος και είναι:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8 \sqrt{H_{\text{mean}} - H_{\text{min}}}} \quad (2)$$

Όπου: t_c (hr) = χρόνος συγκέντρωσης

A (km²) = το εμβαδόν της υπό μελέτη λεκάνης

L (km) = το μήκος του κύριου υδατορέματος της υπολεκάνης

H_{mean} (m) = το μέσο υψόμετρο της υπολεκάνης

H_{min} (m) = το ελάχιστο υψόμετρο της υπολεκάνης

Για το εμβαδόν, το μέσο και το ελάχιστο υψόμετρο της υπολεκάνης, αλλά και το μήκος του υδατορέματος γίνονται γνωστά από του στατιστικούς πίνακες της

υπολεκάνης και του ρέματος αντίστοιχα μέσα από το περιβάλλον του GIS. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πιν. 3).

Πίνακας 1: Τιμές αποτελεσμάτων για το εμβαδόν υπολεκάνης, μήκος υδατορέματος, μέγιστο, μέσο και ελάχιστο υψόμετρο υπολεκάνης

Εμβαδόν λεκάνης (km²)	Μήκος υδατορέματος (km)	Μέγιστο υψόμετρο (m)	Μέσο υψόμετρο (m)	Ελάχιστο υψόμετρο (m)
1,90	3,58	201,25	142,21	84,02

Με τα δεδομένα του Πιν. 1 και τον Τύπο 2, υπολογίζεται ο χρόνος συγκέντρωσης και είναι ίσος με **$t_c = 1,78$ (hr).**

Για τον υπολογισμό της σημειακής έντασης βροχόπτωσης μέσω του τύπου (1), τα δεδομένα συνοψίζονται στον Πιν. 4. Οι τιμές για τις παραμέτρους λ , β , η υπολογίστηκαν στο περιβάλλον του GIS μέσα από εντολές του προγράμματος, οι σταθερές α , ξ ισούται με 0,18, οι τιμές παρουσιάζονται και στον πίνακα Attribute Table των όμβριων καμπυλών. Η τιμή για την μεταβλητή k ισούται με το αποτέλεσμα του χρόνου συγκέντρωσης και οι περίοδοι επαναφοράς, όπου υπολογίζεται η ένταση βροχόπτωσης, είναι 50, 100 και 1.000 έτη.

Πίνακας 2: Σύνοψη δεδομένων για τον υπολογισμό σημειακής έντασης βροχόπτωσης

λ	T	β	ξ	k	α	η	Σημειακή ένταση βροχόπτωσης ($\chi=i$) (mm/hr)
57,34	50	0,03	0,18	1,78	0,18	0,67	33,28
57,34	100	0,03	0,18	1,78	0,18	0,67	39,24
57,34	1.000	0,03	0,18	1,78	0,18	0,67	65,33

2) Μετατροπή σημειακής έντασης βροχόπτωσης σε επιφανειακή

Για το υπολογισμό της παροχής νερού, απαραίτητη κρίνεται η ένταση της βροχόπτωσης να είναι επιφανειακή (σε όλη την έκταση της υπολεκάνης). Η αναγωγή της σημειακής βροχόπτωσης σε επιφανειακή γίνεται μέσα από τον τύπο (3) (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

$$\text{Επιφανειακή ένταση (x=i)} = \text{σημειακή ένταση (i)} * \varphi \quad (3)$$

Ο συντελεστής φ υπολογίζεται από τον τύπο (4) (Κουτσογιάννης, 1997β):

$$\varphi = 1 - \frac{0,048A^{0,36-0,01\ln A}}{D^{0,35}} \geq 0,25 \quad (4)$$

Όπου: $A(\text{km}^2)$ = η έκταση της λεκάνης

$D(h) = t_c$ = η διάρκεια της βροχής

Ο συντελεστής αυτός έχει τις ακόλουθες, εμπειρικά διαπιστωμένες ιδιότητες:

- 1) είναι πάντα μικρότερος από 1
- 2) είναι φθίνουσα συνάρτηση της έκτασης
- 3) είναι αύξουσα συνάρτηση της διάρκειας βροχής
- 4) εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από την περίοδο επαναφοράς (αύξηση της περιόδου επαναφοράς οδηγεί σε ασθενή μείωση του συντελεστή φ) (Bacchi B. and Ranzi R., 1996 και Smith, 1993).

Με αντικατάσταση των τιμών στον Τύπο (3), έχουμε τα εξής αποτελέσματα (Πιν. 5):

Πίνακας 3: Παρουσίαση τιμών σημειακής έντασης, συντελεστή και επιφανειακή ένταση βροχόπτωσης

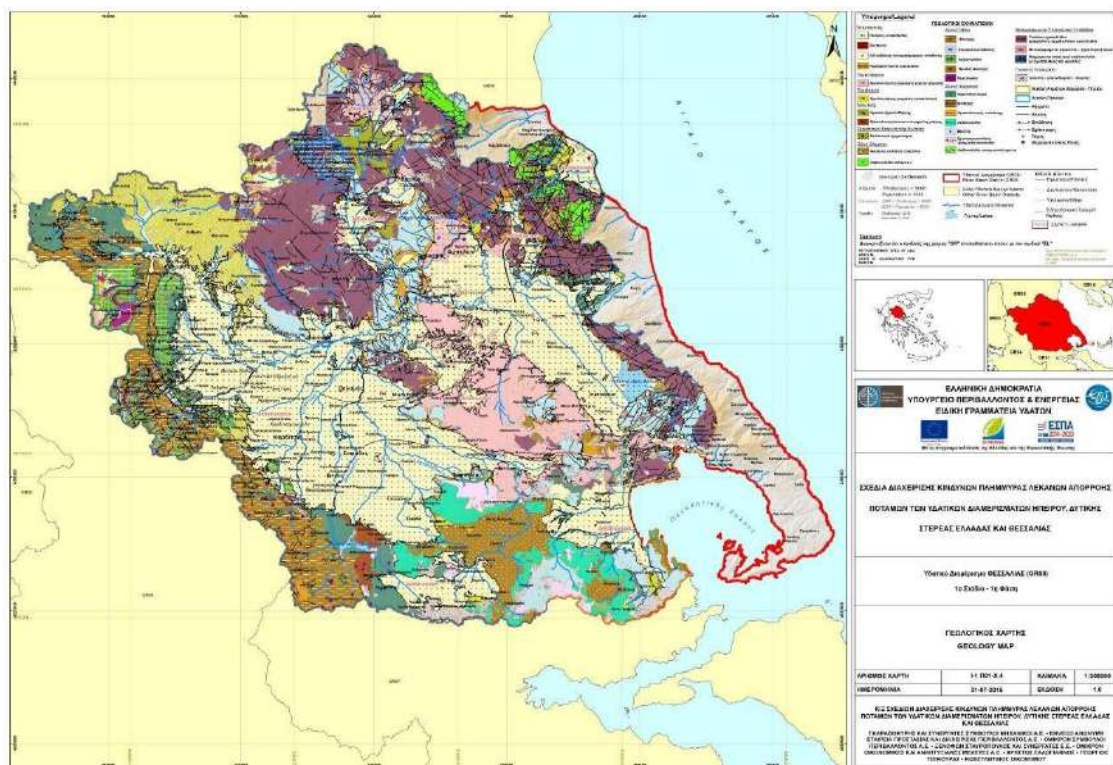
Σημειακή ένταση βροχόπτωσης ($x=i$) (mm/hr)	Συντελεστής φ	Επιφανειακή ένταση βροχόπτωσης ($i=i*\varphi$) (mm/hr)
33,28	0,903579	30,06788
39,24		35,45305
65,33		59,03093

3) Υπολογισμός συντελεστή απορροής, σύμφωνα με την ορθολογική μέθοδο:

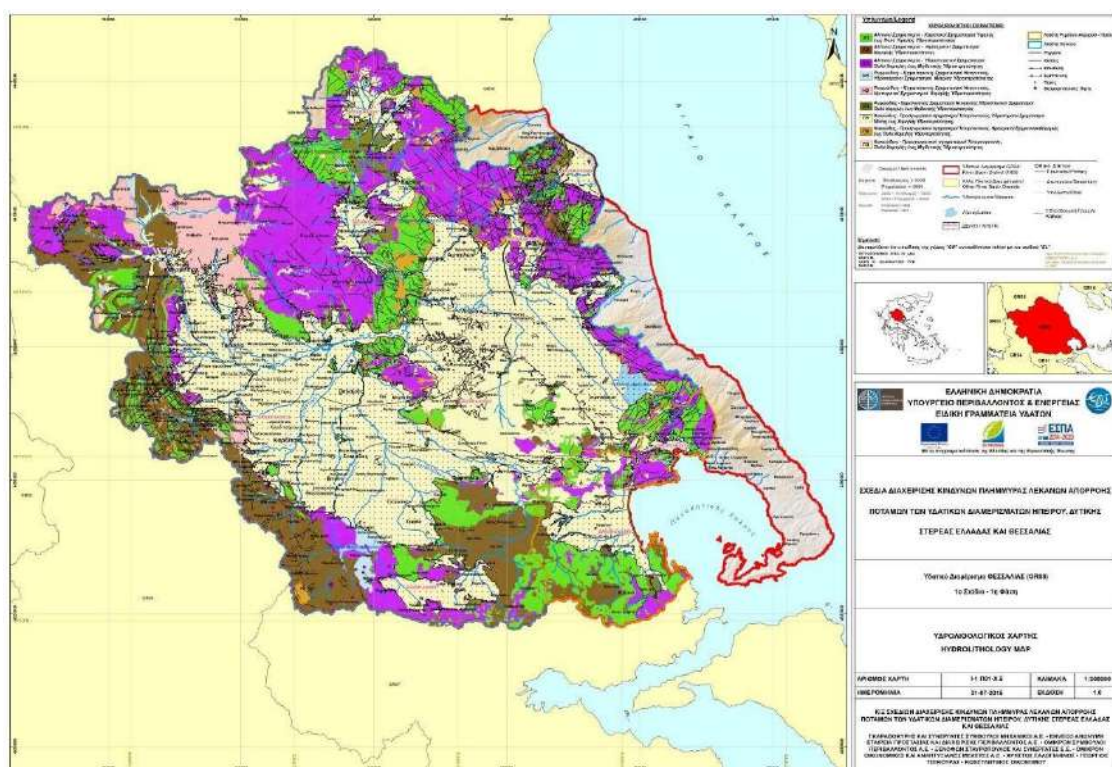
Είναι γνωστό ότι χρησιμοποιούνται ορθολογικές μέθοδοι για την εκτίμηση της αιχμής απορροής για σχετικά μικρές υδρολογικές λεκάνες απορροής (περιοχή λεκάνης απορροής, $A < 25 \text{ (km}^2\text{)}$) (Παπαμιχαήλ, 2001). Βασίζεται στην υπόθεση ότι για βροχοπτώσεις ομοιόμορφης έντασης και κατανομής σε μια λεκάνη απορροής, μια μέγιστη απορροή θα προκύψει όταν το νερό από όλα τα σημεία της λεκάνης απορροής φτάσει στην έξοδο του, αντιπροσωπεύοντας ένα ορισμένο ποσοστό της έντασης βροχόπτωσης που προκαλεί τη λεκάνη απορροής, η οποία έχει έχει αποδειχθεί εύλογη. Η μέθοδος είναι χρήσιμη για την εκτίμηση της μέγιστης απορροής σε μικρές λεκάνες απορροής (Τσακίρης, 1995). Η μέθοδος προϋποθέτει ότι η ένταση της βροχόπτωσης κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την υδρολογική λεκάνη και αυτή η υπόθεση είναι στην πραγματικότητα κατά προσέγγιση όταν η υδρολογική λεκάνη είναι μικρή. Ένα άλλο σημείο που πρέπει να σημειωθεί είναι η εκτίμηση της έντασης της βροχόπτωσης. Για να φτάσει στη μέγιστη κορυφή, όπως προαναφέρθηκε, το νερό πρέπει να φτάσει στην έξοδο της λεκάνης από όλα τα σημεία, δηλαδή η διάρκεια βροχόπτωσης ομοιόμορφης έντασης να είναι ίση με το χρόνο συγκέντρωσης t_c της λεκάνης. Αυτό δείχνει ότι η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις όπου η διάρκεια βροχόπτωσης είναι μικρότερη από t_c (Ψιλοβίκος, 2016).

Ο συντελεστής απορροής εκτιμάται από το άθροισμα των επιμέρους συντελεστών C_1, C_2, C_3, C_4 . Οι συντελεστές αυτοί εξαρτώνται από 1) το ανάγλυφο επιφάνειας της υπολεκάνης, 2) την διηθητικότητα του εδάφους, 3) την έκταση και την πυκνότητα της φυτοκάλυψης και 4) την κλίση των πρανών καθώς και την αποθηκευτική ικανότητα σε χαμηλά σημεία της επιφάνειας της υπολεκάνης (ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ, 2002). Έτσι, η τιμή του συντελεστή C_1 υπολογίζεται από την κλίση του εδάφους (αρχείο 'Slope' της υπολεκάνης στο περιβάλλον του GIS). Για τους συντελεστές C_2, C_3, C_4 , η εύρεση των τιμών τους πραγματοποιείται από το συνδυασμό εικόνων γεωολογικού, εδαφικού και υδρολιθικού χάρτη αντίστοιχα με τον Πιν 4. Προκειμένου να εξαχθούν σωστά αποτελέσματα, γίνεται προσθήκη των 3 χαρτών στο περιβάλλον του GIS ταυτίζοντας τις συντεταγμένες της κάθε εικόνας και από τις τέσσερις πλευρές, με τις συντεταγμένες του χάρτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να συμπίπτει η περιοχή της υπολεκάνης του γεωγραφικού χάρτη με την περιοχή της υπολεκάνης από την κάθε εικόνα. Έπειτα από λεπτομερή παρατήρηση της περιοχής και άντληση στοιχείων από το υπόμνημα, εξαγονται πληροφορίες για την διηθητικότητα τους εδάφους από τον γεωολογικό χάρτη

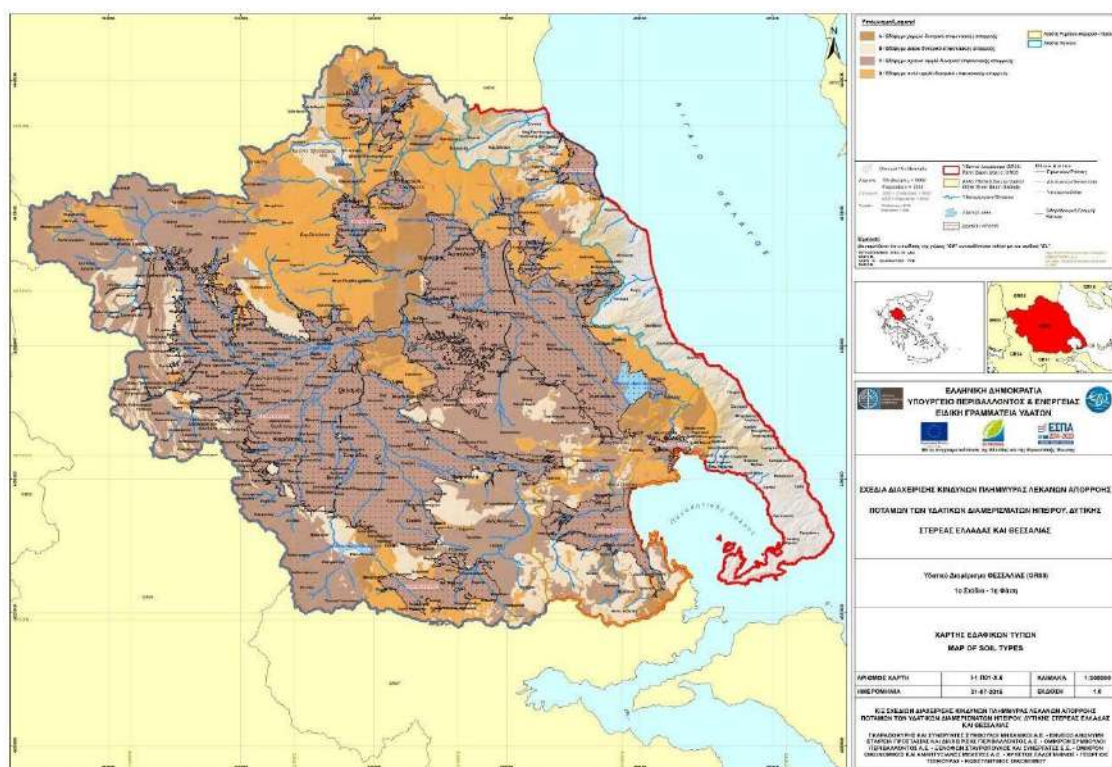
(αναλόγως τα είδη των πετρωμάτων, πόση είναι η διηθητικότητα του εδάφους) , τη φυτική κάλυψη από τον εδαφικό χάρτη (ποια είναι η χρήση του εδάφους, γεγονός που επαληθεύεται και από το χάρτη χρήσεων γης) και την αποθηκευτικότά του εδάφους από τον υδρολιθικό χάρτη (ποια είναι η αποστράγγιση της υπολεκάνης).



Εικόνα 28: Παρουσίαση γεωλογικού χάρτη υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας (ΥΠΕΚΑ)



Εικόνα 29: Παρουσίαση υδρολιθικού χάρτη υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας (ΥΠΕΚΑ)



Εικόνα 30: Παρουσίαση εδαφικού χάρτη υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας (ΥΠΕΚΑ)

Πίνακας 4: Τιμές του συντελεστή απορροής εκτός αναπτυγμένων χωρών (ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ, 2002)

	Ακραιές	Υψηλές	Συνήθειες	Χαμηλές
C1	0,28 – 0,35 επικλινές, ανώμαλες επιφάνειες με μέσες κλίσεις >30%	0,14 – 0,20 λοφώδες με μέσες κλίσεις 10 – 30 %	0,14 – 0,20 κυματώδες με μέσες κλίσεις 5 – 10 %	0,08 – 0,14 σχετικά επίπεδο με μέσες κλίσεις 0 – 5 %
C2	0,12 – 0,16 με επηρεαζόμενο κάλυμμα εδάφους, είτε βραχώδες είτε μανδύας λεπτόκκοκου εδάφους αμελητέας διηθητικότητας	0,08 – 0,12 βραδείας διηθητικότητας, άργιλοι ή αβαθή παχιά εδάφη χαμηλής διηθητικότητας, ατελώς ή πολύ μικρής αποστραγγιστικότητας	0,06 – 0,08 κανονικής διηθητικότητας καλά αποστραγγιζόμενο μικρής ή μεσοσίας μακροϋφής εδάφη, αμμώδη παχιά εδάφη, ίλυες και ιλυώδη εδάφη	0,04 – 0,06 υψηλής διηθητικότητας βαθιά άμμος ή άλλο έδαφος που απορροφά το νερό, πολύ ελαφριά καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη
C3	0,12 – 0,16 βλάστηση που δεν επηρεάζει, γυμνό ή πολύ αραιά κάλυψη	0,08 – 0,12 πτωχή έως μέτρια, καθαρές καλλιέργειες ή πτωχής φυσικής κάλυψης, λιγότερο από 20% της αποχετευόμενης επιφάνειας με καλή κάλυψη	0,06 – 0,08 μέτρια ως καλή περίπου 50% της επιφάνειας είναι καλή φυτική γη ή δασώδες, λιγότερο από 50% της επιφάνειας είναι καλλιέργειες	0,04 – 0,06 καλή έως άριστη περίπου 90% της αποχετευόμενης επιφάνειας είναι καλή φυτική γη, δασώδες ή ισοδύναμης κάλυψης
C4	0,10 – 0,12 αμελητέες ταπεινώσεις εδάφους και αβαθείς, μικροί διάδρομοι αποστράγγισης, καθόλου τέλματα	0,08 – 0,10 χαμηλή, καλά οριζόμενο σύστημα διαδρόμων αποστράγγισης, όχι λιμνάζοντα νερά ή τέλματα	0,06 – 0,08 κανονική, σημαντικές επιφανειακές ταπεινώσεις, λιμνάζοντα νερά και τέλματα	0,04 – 0,06 υψηλή, αποθηκευτικότητα, σύστημα αποστράγγισης όχι καλά οριζόμενο, μεγάλος αριθμός πλημμυριζόμενων επιφανειών ή τελμάτων

Οι πληροφορίες κατηγοριοποιούνται στον Πιν. 7, με αποτέλεσμα την εύρεση τιμών για κάθε επιμέρους συντελεστή:

Πίνακας 5: Αποτελέσματα τιμών για τους επιμέρους συντελεστές και τον τελικό συντελεστή απορροής

C1 =	0,21
C2=	0,16
C3 =	0,16
C4 =	0,12
Cολ =	0,65

Δεδομένου ότι οι τιμές στον Πιν. 6 ισχύουν για περίοδο αποκατάστασης 5-10 ετών, ο συντελεστής τελικής απορροής θα πρέπει να αυξηθεί κατά 10% για T=25 έτη, κατά 20% για T=50 έτη και κατά 25% για T=25 χρόνια για 100 χρόνια, αλλά εξακολουθεί να είναι χαμηλότερη από την ενότητα (ΟΜΟΕ-ΑΣΥΕΟ, 2002). Ο συντελεστής απορροής εξαρτάται (επιπλέον των προηγούμενων παραγόντων) από την υγρασία του εδάφους κατά την έναρξη των βροχοπτώσεων και η ένταση βροχόπτωσης, και έτσι συμπεραίνεται στην ίδια λεκάνη απορροής δεν θα παραμείνει σταθερός

(Λουκάς, διαφάνειες από Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων).

Η παροχή νερού, σύμφωνα με την ορθολογική μέθοδο, υπολογίζεται από τον τύπο (5) (Hwang and Houghtalen, 1966):

$$Q_{\max} = 0,278 \cdot C \cdot i \cdot A \quad (5)$$

Όπου: $Q(\text{m}^3/\text{sec})$ = η αιχμή της απορροής

$i(\text{mm/h})$ = η ένταση της βροχόπτωσης

$A(\text{km}^2)$ = το εμβαδόν υπό μελέτη λεκάνης

$Q(\text{m}^3/\text{s})$ = η παροχή αιχμής

C = ο συντελεστής απορροής

Στον παρακάτω πίνακα (Πιν. 8) συνοψίζονται τα δεδομένα και τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό της παροχής νερού στην υπό μελέτη λεκάνη για τις τρεις περιόδους επαναφοράς.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα υπολογισμού παροχής νερού στην υπό μελέτη λεκάνη για περιόδους επαναφοράς 50, 100 και 1.000 έτη

	0,278	A (km²)	i (mm/hr)	C	Q (m³/sec)
50 years	0,278	1,90	30,07	0,78	12,38
100 years	0,278	1,90	35,45	0,81	15,20
1.000 years	0,278	1,90	59,03	0,81	25,31

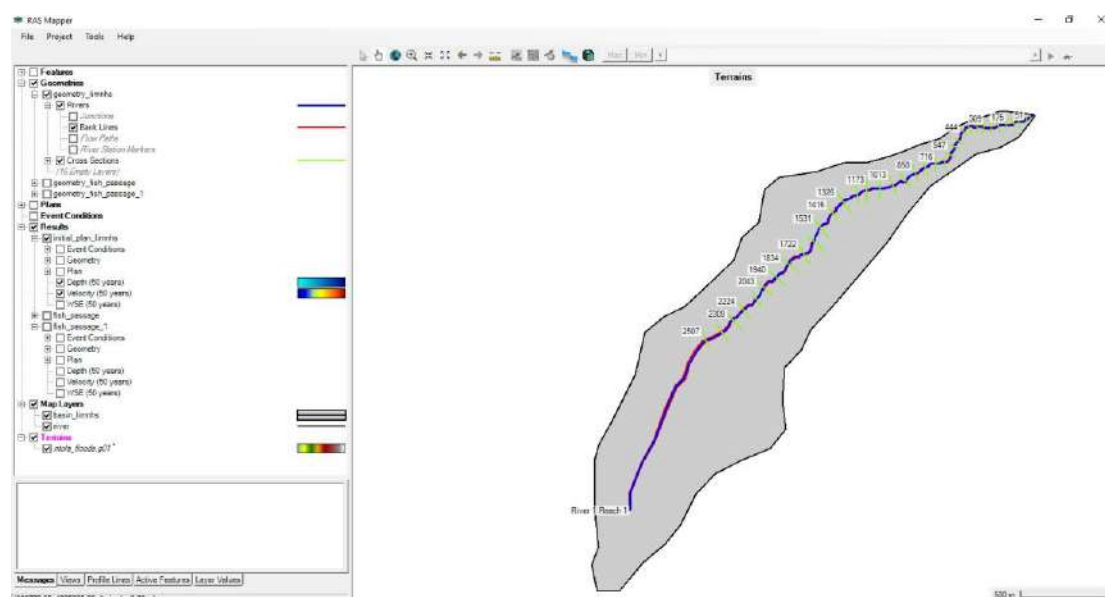
2.2.3. Δημιουργία πλευρικών κατασκευών με θυροφράγματα στο πρόγραμμα HEC-RAS

- 1) Εξαγωγή αρχείων (.tif) της υπολεκάνης και του κύριου υδατορρέυματος αλλά και αρχείου Raster DEM περικυκλωμένο στην υπολεκάνη από Arc-GIS

Η κατασκευή κλίμακας 'Pool Weir' στο πρόγραμμα του HEC-RAS, χρησιμοποιεί ως βάση τα αρχεία της υπολεκάνης, του κύριου υδατορέματος της και του ψηφιακού υψομέτρου της από το περιβάλλον του GIS. Για την εξαγωγή των αρχείων εκτελείται εντολή 'Export Feature' για την υπό λεκάνη και η εντολή 'Export Raster' για τον ψηφιακό αρχείο Raster DEM.

2) Δημιουργία Terrain, προσθήκη αρχείων υπολεκάνης, ρέματος, Raster DEM και σχεδιασμός της γεωμετρίας

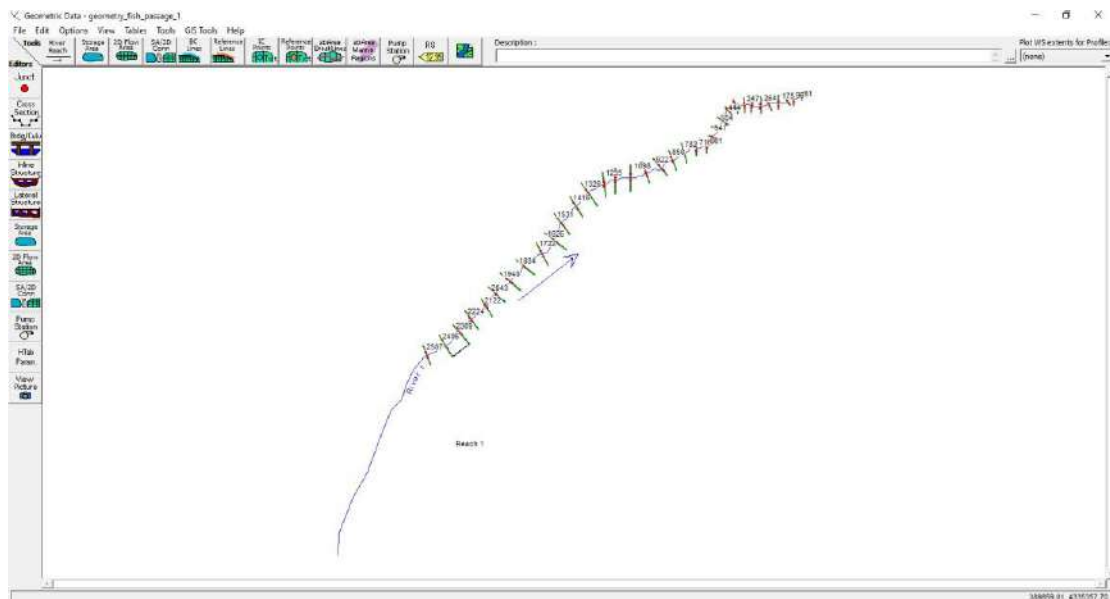
Έπειτα από την δημιουργία ενός νέου project με το άνοιγμα του προγράμματος, απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο ορισμός μονάδων στο σύστημα S.I. (System International) αλλά και οι αλλαγές στην ώρα και την περιοχή για την σωστή εκτέλεση του προγράμματος HEC-RAS. Στο παράθυρο του RAS Mapper δημιουργείται ένα νέο Terrain και προστίθενται τα εξαγόμενα αρχεία (.tif) από το προηγούμενο βήμα. Παρόλα αυτά ο σχεδιασμός του υδατορέματος (Rivers) εκ νέου, με την εντολή 'Edit', είναι απαραίτητος. Ταυτόχρονα σχεδιάζονται οι όχθες 'Bank Lines' παράλληλα στο υδατόρρευμα αλλά και οι διατομές 'Cross Section' κάθετα στο υδατόρρευμα (Εικ. 31), με σκοπό την εύρεση του σημείου της κατασκευής της λαμβάνοντας υπόψιν το υψόμετρο, την παροχή νερού καθώς και τις όχθες του ρέματος.



Εικόνα 31: Προσθήκη αρχείων υπολεκάνης και κύριου υδατορέματος της, σχεδιασμός κύριου υδατορέματος, σχθών, διατομών

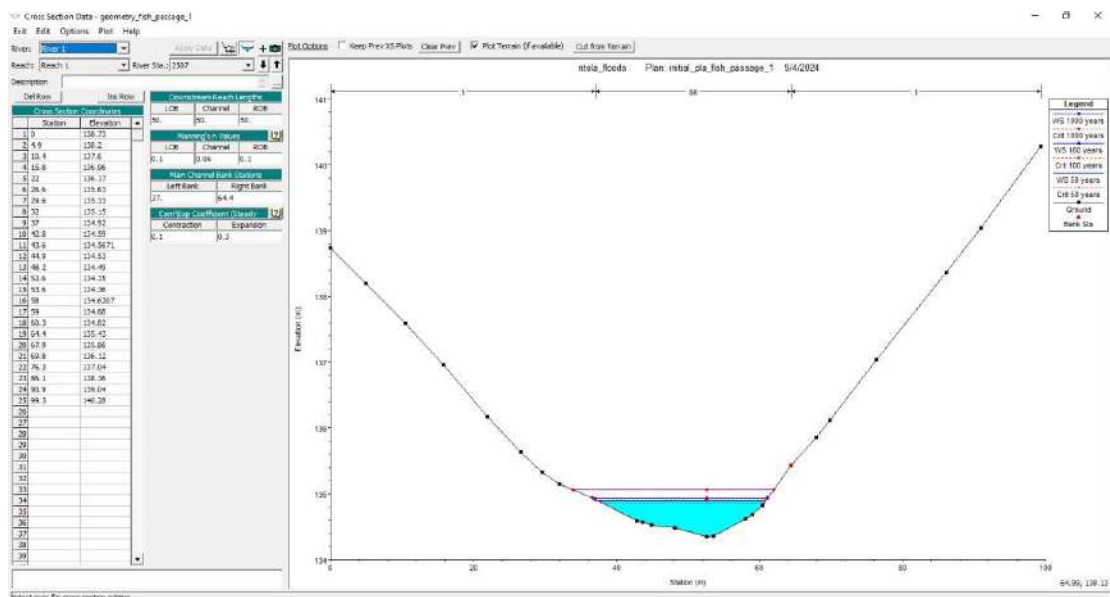
3) Διόρθωση δεδομένων στο περιβάλλον του Cross-Section

Ανοίγοντας το περιβάλλον της γεωμετρίας (Εικ. 32), παρουσιάζεται ο σχεδιασμός που προηγήθηκε. Αποθηκεύοντάς την ως “geometry_fish_passage_1”, εκτελείται επεξεργασία των διατομών ‘Cross Section’ ώστε να διορθωθούν τα σφάλματα του σχεδιασμού.



Εικόνα 32: Παρουσίαση σχεδιασμού υδατορέματος και διατομών στο περιβάλλον της γεωμετρίας

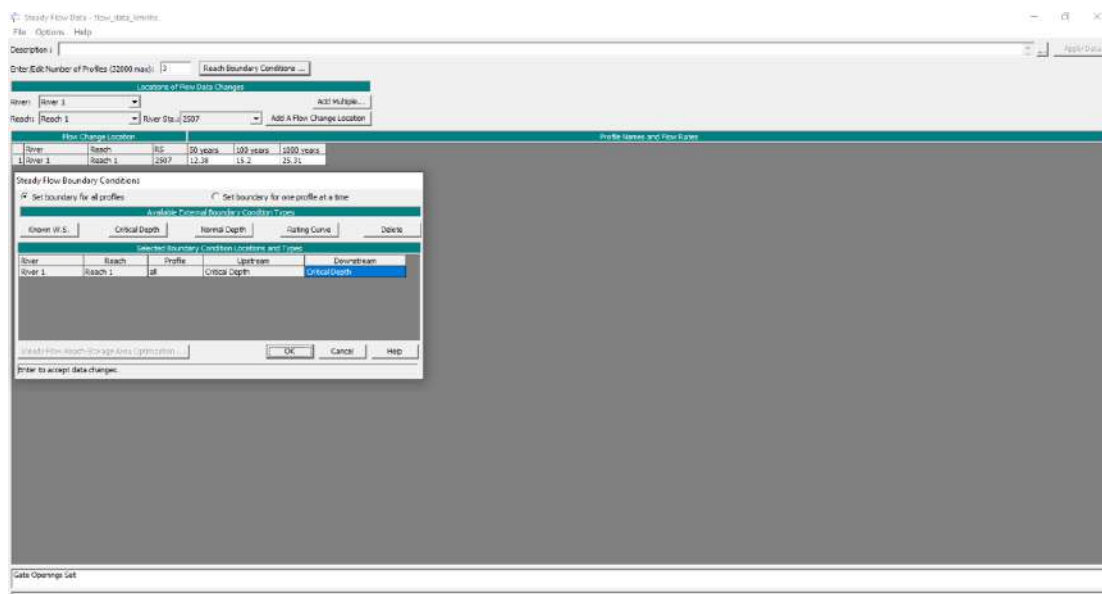
Πιο συγκεκριμένα, για κάθε διατομή γίνεται αποεπιλογή της οριζόντιας διακύμανσης σε n τιμές για να οριστούν οι τιμές n Manning 0.1 για την αριστερή και δεξιά όχθη και 0.06 για ποταμό, ορίζεται η απόσταση μεταξύ των διατομών στα 50 m, πραγματοποιείται διόρθωση των συντεταγμένων (τετμημένης) για τις όχθες και τέλος, ορίζεται η 0.1 για το "στένεμα" του ποταμού και 0.3 για την "επέκταση" του ποταμού (Εικ. 33).



Εικόνα 33: Παρουσίαση πρώτης διατομής με διορθωμένα δεδομένα

4) Προσθήκη τιμών παροχής για 50, 100 και 1.000 έτη

Έχοντας ως σκοπό την προβολή της παροχής για 50, 100 και 1.000 έτη στον σχεδιασμένο ποταμό, πραγματοποιείται η προσθήκη των τιμών της. Στο περιβάλλον του Steady Flow Data, διαμορφώνονται 3 διαφορετικά προφίλ για τα 3 διαφορετικά έτη, δίνοντας τη ανάλογη ονομασία για το καθένα. Στην συνέχεια σε κάθε προφίλ προστίθεται η τιμή παροχής νερού, που υπολογίστηκε στην υποενότητα 2.2.2., και τα δεδομένα αποθηκεύονται ως “flow_data_limnhs”. Τέλος, ορίζονται οι οριακές συνθήκες ως κρίσιμη ροή όπως φαίνεται και στην Εικ. 34.

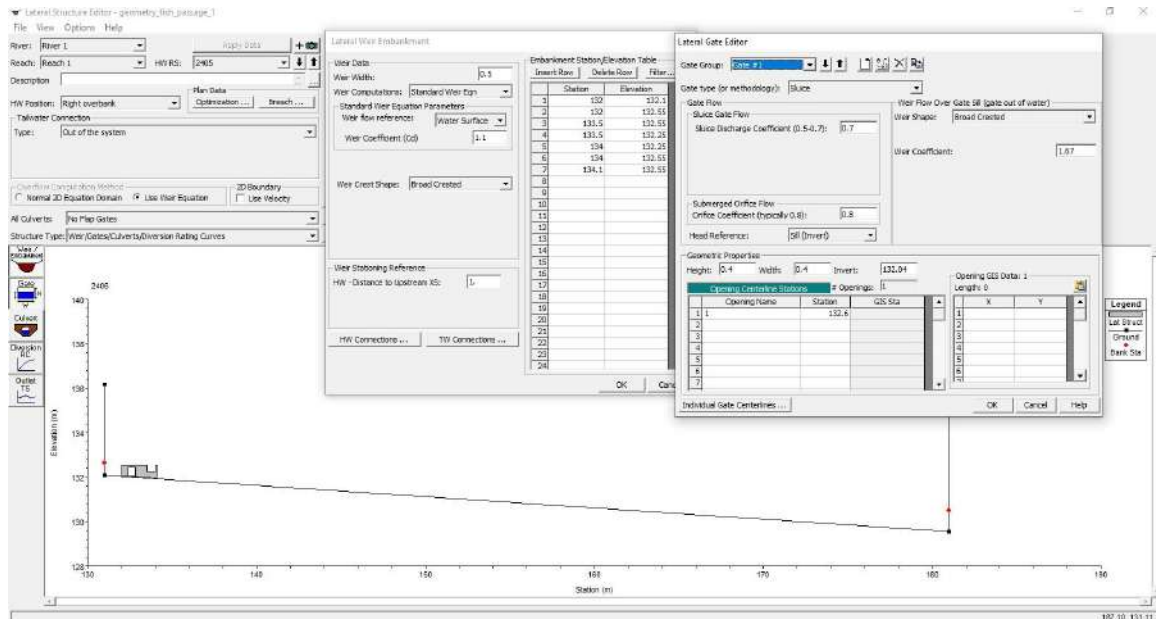


Εικόνα 34: Διαμόρφωση προφίλ για τα 50, 100 και 1.000 έτη με προσθήκη τιμών παροχής και ορισμός κρίσιμης ροής

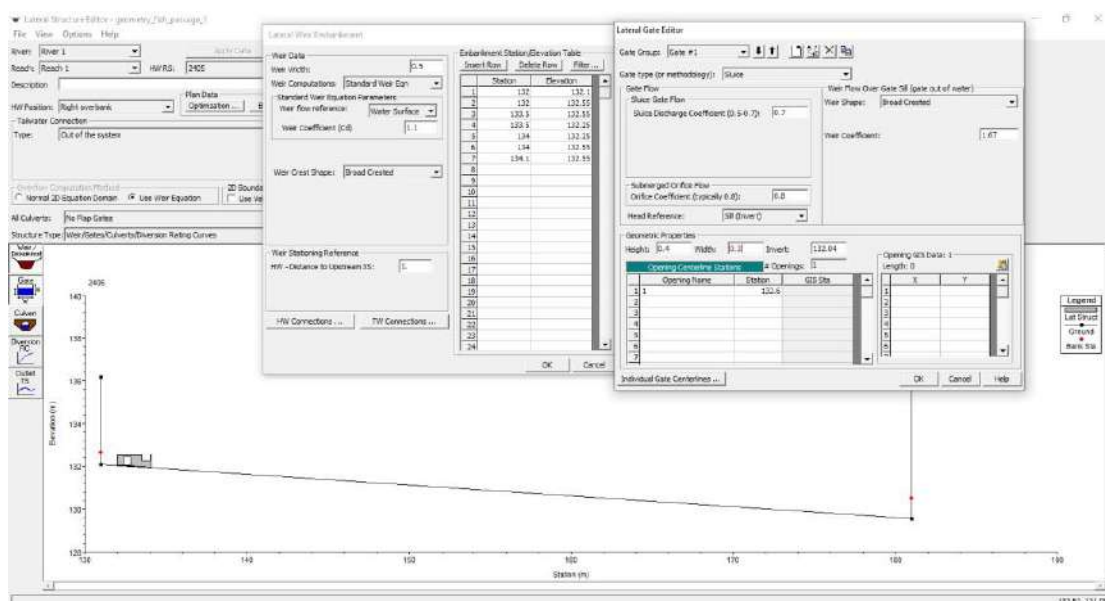
5) Δημιουργία πλευρικών κατασκευών 2 περιπτώσεων

Για την δημιουργία κατασκευών, μέσα από το περιβάλλον της γεωμετρίας, επιλέγεται να σχεδιαστούν έξι πλευρικές κατασκευές θυροφραγμάτων στη σειρά (‘Lateral Structure’). Ορίζοντας, λοιπόν, ένα μέτρο κατάντη της δεύτερης διατομής, προστίθενται στο περιβάλλον ‘Weir Embankment’, σύμφωνα με τον Πιν.1 , το πλάτος της κατασκευής (weir width) 0.5 m, η στέψη του εκχυλιστή (weir coefficient) 1.1 m και οι συντεταγμένες του φράγματος. Οι τιμές της τετμήμενης (station) συμπληρώνονται έτσι ώστε να σχηματιστεί και ο εκχυλιστής. Για την δημιουργία θυρών στα φράγματα, στο περιβάλλον ‘Gate’ ορίζονται: το ύψος των θυρών (height)

0.4 m, το βάθος (width) 0.4 m, η κατώτερη στάθμη τους (invert) να ισούται με την τιμή τεταγμένης λίγα μέτρα πάνω από τον πυθμένα. Ο αριθμός των θυρών που επιλέγεται στην παρούσα μελέτη είναι μια θύρα και το σημείο κατασκευής της ορίζεται τιμή τετμημένης εντός του φράγματος. Για την εύρεση βέλτιστης κατασκευής, δημιουργείται και μια δεύτερη περίπτωση, ομοίως με την πρώτη αλλά το βάθος (width) να ισούται με 0.3 m.



Εικόνα 35: Συμπλήρωση δεδομένων για την δημιουργία θυροφραγμάτος μετά την δεύτερη διατομή (α' περίπτωση: ύψος ανοίγματος θυρών 0.4 m)



Εικόνα 36: Συμπλήρωση δεδομένων για την δημιουργία θυροφραγμάτος μετά την δεύτερη διατομή (α' περίπτωση: ύψος ανοίγματος θυρών 0.3 m)

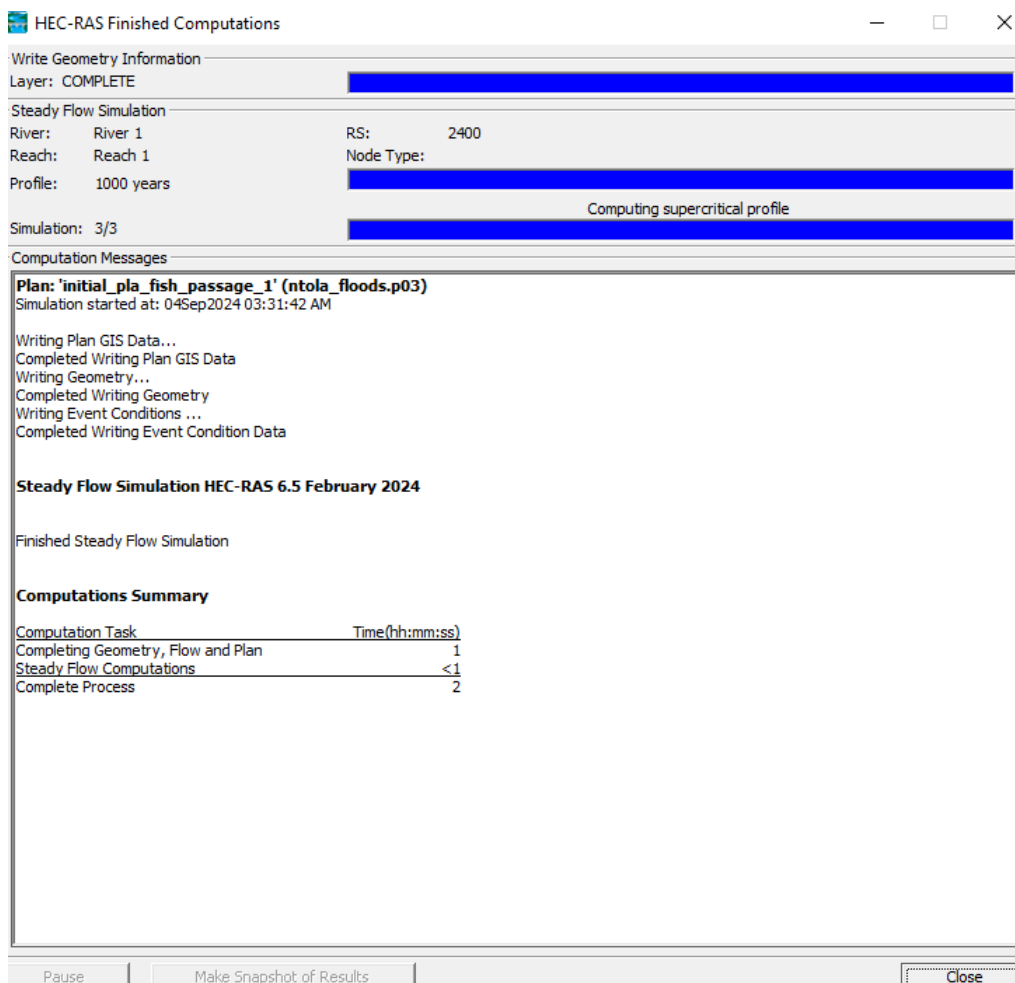
Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για την δημιουργία ακόμα 5 πλευρικών κατασκευών θυροφράγματος ανά 1 μέτρο. Η προσθήκη παροχής νερού στις πλευρικές κατασκευές γίνεται στο περιβάλλον του Steady Flow Data, στην επιλογή ‘Gate Openings’ όπου για την κάθε κατασκευή, το ύψος της θύρας που θα ανοίγει, για την διέλευση του νερού στα 50, 100 και 1.000 έτη, να ισούται με τη δεδομένη τιμή ύψους που έχει δοθεί για τις θύρες, δηλαδή 0.4 m. Αντίστοιχα, συμπληρώνονται τα m για την δεύτερη περίπτωση κατασκευής, που ισούται με 0.3 m.

Gate Group	# Openings	Gate Ht (m)	50 years # Open	100 years # Open	1000 year # Open
Gate #1	1	0.4	1	1	1

Εικόνα 37: Ορισμός μέτρων ανοίγματος της θύρας για τα 50, 100 και 1.000 έτη στην πρώτη πλευρική κατασκευή

Τέλος, η εμφάνιση των διατομών με τις πλευρικές κατασκευές που διέρχονται από συγκεκριμένες τιμές παροχής νερού, γίνεται με την εντολή ‘Steady Flow Analysis’, όπου και αποθηκεύεται ως πλάνο “initial_plan_fish_passange_1”, συμπληρώνοντας τα δεδομένα της γεωμετρίας και την παροχή νερού (Εικ. 38).

Εικόνα 38: Συμπλήρωση δεδομένων για την εκτέλεση του προγράμματος



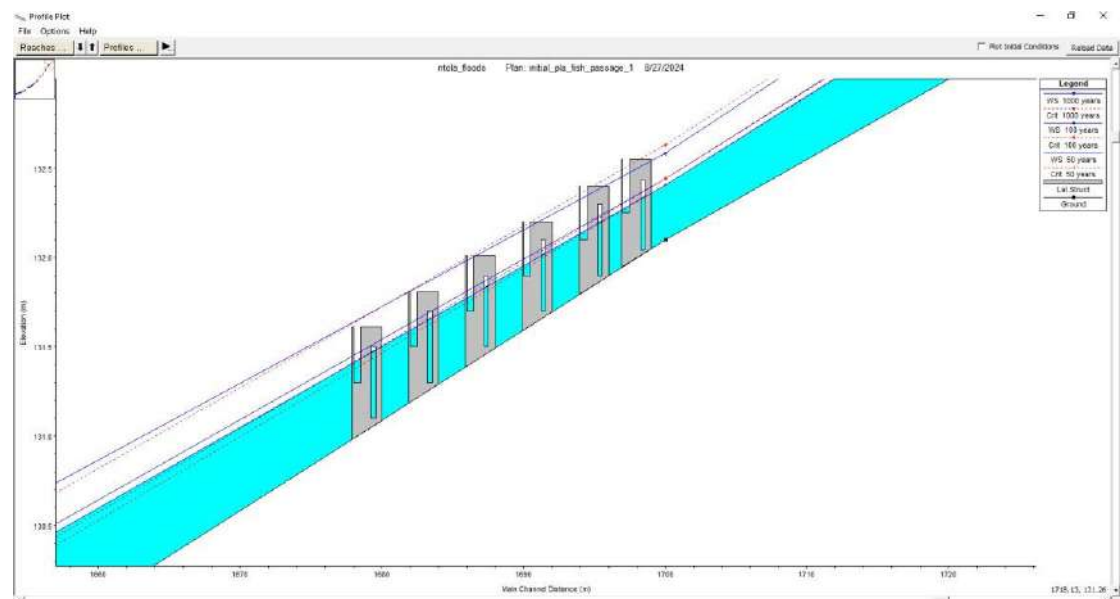
Εικόνα 39: Εκτέλεση του προγράμματος

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

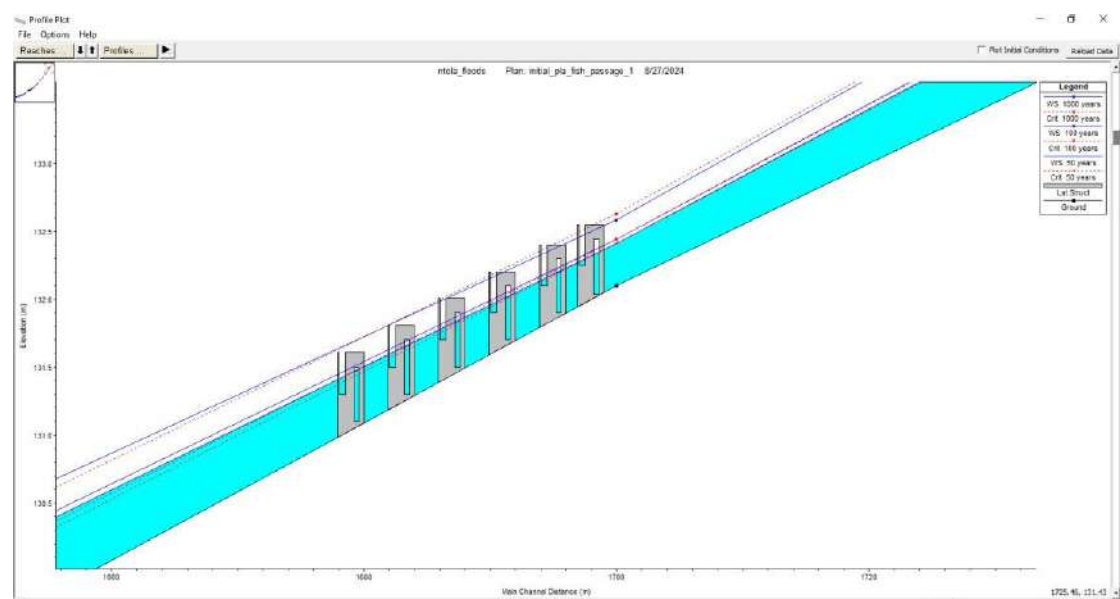
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της ανάλυσης των υδραυλικών συνθηκών στο περιβάλλον ‘View Water Surface Profiles’ (Εικ. 40, Εικ. 41), αποκαλύπτουν ότι η παροχή νερού στην υπολεκάνη του ποταμού που ρέει δίπλα στις λίμνες Ζερέλια είναι ανεπαρκής για τη βέλτιστη λειτουργία των κατασκευών κλίμακας ‘Pool Weir’, και για τις δύο περιπτώσεις κατασκευής. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια των περιόδων χαμηλών παροχών, όπως στην περίπτωση μικρής έντασης και διάρκεια βροχόπτωσης, το βάθος της ροής μειώνεται δραματικά. Η μείωση αυτή καθιστά δύσκολη τη διέλευση των ιχθύων, καθώς δεν υπάρχει επαρκές βάθος ροής για να επιτρέψει τους ιχθύες να κινηθούν κατά μήκος του ποταμού.

Ένα από τα βασικά προβλήματα που παρατηρήθηκαν είναι το χαμηλό βάθος ροής, το οποίο μειώνει τη δυνατότητα των ιχθύων να ξεπεράσουν τα φράγματα. Οι ιχθυολόγοι γνωρίζουν ότι το κατάλληλο βάθος και η ταχύτητα της ροής είναι κρίσιμα για την επιτυχή μετακίνηση των ιχθύων, καθώς οι ιχθύες χρησιμοποιούν ενέργεια για να προχωρήσουν. Το μικρό βάθος της ροής σε περιόδους χαμηλής παροχής αυξάνει τον κίνδυνο τραυματισμού ή παγίδευσης των ιχθύων, αφού οι ίδιοι δυσκολεύονται να περάσουν πάνω από τα υδραυλικά εμπόδια ή να διαφύγουν από περιοχές με στασιμότητα νερού.

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το περιβάλλον ‘View Profile Summary Table’ (Πιν. 8, Πιν. 9) επιβεβαιώνουν ότι η παροχή του ποταμού στην περιοχή μελέτης δεν επαρκεί για την υποστήριξη της αποτελεσματικής λειτουργίας των κατασκευών κλίμακας Pool Weir. Όπως αποδεικνύεται και από τον Πιν. 8 για την περίπτωση κατασκευής με πλάτος θυρών 0.3 m το βάθος ροής για περίοδο επαναφοράς 50 έτη ισούται με 0.31 m, για τα 100 έτη ισούται με 0.34 m και για τα 1.000 έτη ισούται με 0.43 m. Οι ταχύτητες ροής ισούνται αντίστοιχα με 1.47 m/s για τα 50 έτη, 1.55 m/s για τα 100 έτη και 1.86 m/s για τα 1.000 έτη, τιμές που είναι μη κατάλληλες για την διέλευση των ιχθύων σε ιχθυοπέραςμα. Ομοίως και στον Πιν. 9 για την περίπτωση κατασκευής με πλάτος θυρών να είναι ίσο με 0.4 m, να παρατηρούνται οι ίδιες τιμές για τα βάθη και τις ταχύτητες ροής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μη ομαλή διέλευση των ιχθύων, γεγονός που υποβαθμίζει την οικολογική υγεία της περιοχής και απειλεί τη βιοποικιλότητα των υδάτινων οικοσυστημάτων.



Εικόνα 40: Αποτελέσματα πλευρικών κατασκευών θυροφραγμάτων με παροχή νερού για 50, 100 και 1.000 έτη (α' περίπτωση με βάθος ανοίγματος των θυρών 0.3 m)



Εικόνα 41: Αποτελέσματα πλευρικών κατασκευών θυροφραγμάτων με παροχή νερού για 50, 100 και 1.000 έτη (α' περίπτωση με βάθος ανοίγματος των θυρών 0.4 m)

Πίνακας 7: Υδραυλικά αποτελέσματα για την α' περίπτωση κατασκευής (με βάθος ανοίγματος των θυρών 0.3 m)

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach 1	2507	50 years	12.38	134.35	134.89	134.87	135.03	0.042401	1.63	7.62	23.32	0.91
Reach 1	2507	100 years	15.20	134.35	134.94	134.92	135.09	0.044282	1.77	8.61	24.40	0.94
Reach 1	2507	1000 years	25.31	134.35	135.06	135.06	135.30	0.044878	2.14	12.02	28.10	0.99
Reach 1	2406	50 years	12.38	132.10	132.41	132.41	132.52	0.059984	1.47	8.44	39.22	1.01
Reach 1	2406	100 years	15.20	132.10	132.44	132.44	132.56	0.057870	1.55	9.80	40.76	1.01
Reach 1	2406	1000 years	25.31	132.10	132.53	132.54	132.71	0.059607	1.86	13.57	43.72	1.07
Reach 1	2405		Lat Struct									
Reach 1	2404		Lat Struct									
Reach 1	2403		Lat Struct									
Reach 1	2402		Lat Struct									
Reach 1	2401		Lat Struct									
Reach 1	2400		Lat Struct									
Reach 1	2309	50 years	12.38	129.57	130.14	130.06	130.23	0.025467	1.31	9.44	27.24	0.71
Reach 1	2309	100 years	15.20	129.57	130.19	130.11	130.29	0.026584	1.41	10.76	28.65	0.74
Reach 1	2309	1000 years	25.31	129.57	130.33	130.25	130.47	0.028672	1.68	15.04	32.62	0.79
Reach 1	2224	50 years	12.38	127.86	128.36	128.36	128.53	0.047279	1.84	7.05	23.35	0.98
Reach 1	2224	100 years	15.20	127.86	128.41	128.41	128.60	0.043883	1.95	8.36	25.03	0.96
Reach 1	2224	1000 years	25.31	127.86	128.57	128.57	128.82	0.037978	2.26	12.86	30.84	0.95
Reach 1	2122	50 years	12.38	125.21	125.73	125.65	125.83	0.023940	1.52	9.74	29.18	0.72
Reach 1	2122	100 years	15.20	125.21	125.79	125.71	125.90	0.022818	1.61	11.56	31.21	0.72
Reach 1	2122	1000 years	25.31	125.21	125.95	125.86	126.11	0.022810	1.93	17.00	36.13	0.75
Reach 1	2043	50 years	12.38	123.59	124.15	124.12	124.30	0.040509	1.71	7.27	20.69	0.90
Reach 1	2043	100 years	15.20	123.59	124.20	124.18	124.37	0.042888	1.86	8.22	21.93	0.94
Reach 1	2043	1000 years	25.31	123.59	124.34	124.34	124.60	0.041495	2.25	11.69	26.00	0.98
Reach 1	1940	50 years	12.38	121.49	121.89	121.88	122.01	0.051918	1.52	8.15	33.19	0.96
Reach 1	1940	100 years	15.20	121.49	121.93	121.92	122.06	0.049520	1.63	9.41	34.71	0.96
Reach 1	1940	1000 years	25.31	121.49	122.02	122.04	122.23	0.053909	2.04	12.80	38.51	1.05
Reach 1	1834	50 years	12.38	119.15	119.46		119.52	0.047009	1.34	11.82	53.34	0.90
Reach 1	1834	100 years	15.20	119.15	119.48		119.56	0.049676	1.47	13.22	53.99	0.94
Reach 1	1834	1000 years	25.31	119.15	119.56	119.54	119.69	0.055122	1.83	17.65	55.90	1.03
Reach 1	1722	50 years	12.38	116.60	116.95	116.95	117.07	0.051051	1.58	8.32	37.42	0.97
Total flow in cross section.												

Πίνακας 8: Υδραυλικά αποτελέσματα για την β' περίπτωση κατασκευής (με βάθος ανοίγματος των θυρών 0.3 m)

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach 1	2507	50 years	12.38	134.35	134.89	134.87	135.03	0.042401	1.63	7.62	23.32	0.91
Reach 1	2507	100 years	15.20	134.35	134.94	134.92	135.09	0.044282	1.77	8.61	24.40	0.94
Reach 1	2507	1000 years	25.31	134.35	135.06	135.06	135.30	0.044878	2.14	12.02	28.10	0.99
Reach 1	2406	50 years	12.38	132.10	132.41	132.41	132.52	0.059984	1.47	8.44	39.22	1.01
Reach 1	2406	100 years	15.20	132.10	132.44	132.44	132.56	0.057870	1.55	9.80	40.76	1.01
Reach 1	2406	1000 years	25.31	132.10	132.53	132.54	132.71	0.059607	1.86	13.57	43.72	1.07
Reach 1	2405		Lat Struct									
Reach 1	2404		Lat Struct									
Reach 1	2403		Lat Struct									
Reach 1	2402		Lat Struct									
Reach 1	2401		Lat Struct									
Reach 1	2400		Lat Struct									
Reach 1	2309	50 years	12.38	129.57	130.14	130.06	130.23	0.025467	1.31	9.44	27.24	0.71
Reach 1	2309	100 years	15.20	129.57	130.19	130.11	130.29	0.026584	1.41	10.76	28.65	0.74
Reach 1	2309	1000 years	25.31	129.57	130.33	130.25	130.47	0.028672	1.68	15.04	32.62	0.79
Reach 1	2224	50 years	12.38	127.86	128.36	128.36	128.53	0.047279	1.84	7.05	23.35	0.98
Reach 1	2224	100 years	15.20	127.86	128.41	128.41	128.60	0.043883	1.95	8.36	25.03	0.96
Reach 1	2224	1000 years	25.31	127.86	128.57	128.57	128.82	0.037978	2.26	12.86	30.84	0.95
Reach 1	2122	50 years	12.38	125.21	125.73	125.65	125.83	0.023940	1.52	9.74	29.18	0.72
Reach 1	2122	100 years	15.20	125.21	125.79	125.71	125.90	0.022818	1.61	11.56	31.21	0.72
Reach 1	2122	1000 years	25.31	125.21	125.95	125.86	126.11	0.022810	1.93	17.00	36.13	0.75
Reach 1	2043	50 years	12.38	123.59	124.15	124.12	124.30	0.040509	1.71	7.27	20.69	0.90
Reach 1	2043	100 years	15.20	123.59	124.20	124.18	124.37	0.042888	1.86	8.22	21.93	0.94
Reach 1	2043	1000 years	25.31	123.59	124.34	124.34	124.60	0.041495	2.25	11.69	26.00	0.98
Reach 1	1940	50 years	12.38	121.49	121.89	121.88	122.01	0.051918	1.52	8.15	33.19	0.96
Reach 1	1940	100 years	15.20	121.49	121.93	121.92	122.06	0.049520	1.63	9.41	34.71	0.96
Reach 1	1940	1000 years	25.31	121.49	122.02	122.04	122.23	0.053909	2.04	12.80	38.51	1.05
Reach 1	1834	50 years	12.38	119.15	119.46		119.52	0.047009	1.34	11.82	53.34	0.90
Reach 1	1834	100 years	15.20	119.15	119.48		119.56	0.049676	1.47	13.22	53.99	0.94
Reach 1	1834	1000 years	25.31	119.15	119.56	119.54	119.69	0.055122	1.83	17.65	55.90	1.03
Reach 1	1722	50 years	12.38	116.60	116.95	116.95	117.07	0.051051	1.58	8.32	37.42	0.97

Minimum channel elevation.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης, είναι προφανές ότι οι υφιστάμενες κατασκευές Pool Weir δεν λειτουργούν αποδοτικά υπό τις υφιστάμενες συνθήκες παροχής του ποταμού στην περιοχή Ζερέλια. Το χαμηλό βάθος ροής, εμποδίζει τη διέλευση των ιχθύων και δημιουργεί μη ιδανικές υδραυλικές συνθήκες. Οι κατασκευές αυτές, σχεδιασμένες για να διευκολύνουν την κίνηση των ιχθύων, δεν αποδίδει η λειτουργία τους για τις τιμές παροχής νερού στην συγκεκριμένη περιοχή, με αποτέλεσμα οι ιχθύες να αντιμετωπίζουν κινδύνους όπως ο τραυματισμός ή η αδυναμία να προχωρήσουν προς τα ανάντη.

Για να βελτιωθούν οι συνθήκες διέλευσης των ιχθύων και να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία των κατασκευών κλίμακας Pool Weir, προτείνεται η αύξηση της παροχής νερού στον ποταμό. Μια πιθανή λύση είναι η διοχέτευση παροχής από ένα γειτονικό υδατόρρευμα, το οποίο θα μπορούσε να τροφοδοτήσει το ποτάμι με επιπλέον νερό. Αυτή η προσθήκη παροχής από παρακείμενα υδατορρεύματα θα μπορούσε να αυξήσει το συνολικό υδραυλικό δυναμικό του ποταμού, διασφαλίζοντας ότι οι κατασκευές κλίμακας Pool Weir θα λειτουργούν αποτελεσματικά.

Μια άλλη πρόταση είναι η δημιουργία συστημάτων αποθήκευσης νερού, τα οποία θα μπορούσαν να συγκρατούν νερό την περίοδο έντονων βροχοπτώσεων και να το απελευθερώνουν σταδιακά στο υδατόρρευμα κατά τις περιόδους με μικρή ή μηδενική διάρκεια και ένταση βροχόπτωσης. Αυτή η στρατηγική θα μπορούσε να διασφαλίσει την απαιτούμενη παροχή για τη λειτουργία των κατασκευών κλίμακας Pool Weir, ενώ ταυτόχρονα θα μειώσει τον κίνδυνο πλημμυρών κατά τις έντονες βροχοπτώσεις.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι η βελτίωση των υδραυλικών συνθηκών θα έχει θετικό αντίκτυπο στην οικολογική ισορροπία της περιοχής. Η παροχή νερού που εξασφαλίζει τη διαρκή λειτουργία των Pool Weir θα συμβάλει στη διατήρηση της βιοποικιλότητας, ενώ ταυτόχρονα θα ενισχύσει την αειφορία των υδάτινων οικοσυστημάτων, εξασφαλίζοντας ότι τα φυσικά υδατορεύματα θα συνεχίσουν να υποστηρίζουν την υδρόβια ζωή.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

5.1. Ξένη βιβλιογραφία

- Bacchi, B., & Ranzi, R. (1996). On the derivation of the areal reduction factor of storms. *Atmospheric Research*, 42, 123–135.
- Beitz, E. (1997). Development of fishlocks in Queensland. In A. P. Berghuis, P. E. Long, & I. G. Stuart (Eds.), *Proceedings of the Fish Passage Workshop*. Queensland, Australia: Fish Passage Development Group.
- Burrough, P. A. (1983). Multiscale sources of spatial variation in soil. *Journal of Soil Science*, 34, 577–620.
- Fan, C., Ko, C.-H., & Wang, W.-S. (2009). An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on river water quality simulation. *Environmental Management*, 90(5), 1824–1832.
- FAO. (2002). *Fish Passes: Design dimensions and monitoring*. Chapter 5: Technical Fish Passes. Technical Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN: 92-5-104894-0.
- Ghanbarpour, M. R., Salimi, S., & Hipel, K. W. (2013). A comparative evaluation of flood mitigation alternatives using GIS-based river hydraulics modeling and multicriteria decision analysis. *Journal of Flood Risk Management*, 6(4), 319–331.
- Giandotti, M. (1934). Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua. *Istituto Poligrafico dello Stato*, 8, 107–117.
- Hwang, N. H. C., & Houghtalen, R. J. (1996). *Fundamentals of hydraulic engineering systems*. Prentice Hall Inc., New Jersey, USA.
- Khattak, M. S., Anwar, F., Saeed, T. U., Sharif, M., Sheraz, K., & Ahmed, A. (2016). Floodplain mapping using HEC-RAS and ArcGIS: A case study of Kabul River. *Arab Journal of Science and Engineering*, 41, 1375–1390.
- Knebl, M. R., Yang, Z. L., Hutchison, K., & Maidment, D. R. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: A case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Environmental Management*, 75, 325–336.
- Lagios, E., Dietrich, V., Gartzos, E., & others. (2010). Mineralogical and geophysical investigations on the twin-meteorite impact craters in Thessaly (central Greece). *Solid Earth Discussions*, SE-2013-41. <https://doi.org/10.5194/se-2013-41>

- Larinier, M. (1992). Implantation des passes à poisson. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 326-327.
- Maidment, D. R. (1993). Precipitation. In D. R. Maidment (Ed.), *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill.
- Maidment, D. R. (2002). Why Arc Hydro? In *Arc Hydro GIS for Water Resources* (pp. 1–12). ESRI Press.
- Pappenberger, F., Beven, K. J., Horritt, M., & Blazkova, S. (2005). Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *Journal of Hydrology*, 302, 46–69.
- Philippe, L. (1897). Rapport sur les échelles à poissons. Ministère de l'Agriculture, Commission des Améliorations Agricoles et Forestières.
- Rajaratnam, N., & Katopodis, C. (1991). Hydraulics of steep pass fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114, 939–944.
- Rajaratnam, N., Katopodis, C., & Mainali, A. (1988). Plunging and streaming flows in pool and weir fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114, 939–944.
- Reinders, H. R. (2004). *Prehistoric sites at the Almyros and Sourpi plains (Thessaly, Greece)*. Thessaly, Greece: Archaeological Reports.
- Rodriguez, L. B., Cello, P. A., Vionnet, C. A., & Goodrich, D. (2008). Fully conservative coupling of HEC-RAS with MODFLOW to simulate stream–aquifer interactions in a drainage basin. *Journal of Hydrology*, 353(1-2), 129–142.
- Saleh, F., Flipo, N., Habets, F., Ducharne, A., Oudin, L., Vionnot, P., & Ledoux, E. (2011). Modeling the impact of in-stream water level fluctuations on stream–aquifer interactions at the regional scale. *Journal of Hydrology*, 400(3-4), 490–500.
- Smith, J. A. (1993). Precipitation. In D. R. Maidment (Ed.), *Handbook of Hydrology* (pp. 3–xx). McGraw-Hill.
- 5.2. Ελληνική βιβλιογραφία
- Βουζαξάκης, Κ., (2008). *Γεωγραφικά πρότυπα και θεωρίες του διακοινοτικού χώρου στη νεολιθική Θεσσαλία*. [Διδακτορική Διατριβή]
- Γαϊτανόπουλος, Α., (2014). *Γεωμορφολογική μελέτη της υδρολογικής λεκάνης του ρέματος Ξεριά και των λιμνών Ζερέλια με τη χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS) και δορυφορικών δεδομένων*. Μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης, Θεσσαλονίκη.

- Γαλανάκης Δ., (1997): *Νεοτεκτονική δομή και στρωματογραφία των Νεογενών-Τεταρτογενών ιζημάτων της λεκάνης του Αλμυρού-Παγασητικού, Πηλίου, Διαυλου Ωρεων-Τρικεριού και Μαλιακού, Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη*
- Γεωργιάδου Ι.,(2015): *Προσομοίωση και διαχείριση υπόγειου υδροφορέα στη λεκάνη απορροής του Αλμυρού, Μαγνησίας, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Βόλος*
- Δήμος Αλμυρού. (2019). Η γεωγραφία του Αλμυρού και της ευρύτερης περιοχής. Αλμυρός, Ελλάδα: Δήμος Αλμυρού.
- Δήμος Αλμυρού. (2021). Οικολογική σημασία των λιμνών Ζερέλια. Αλμυρός, Ελλάδα: Δήμος Αλμυρού.
- Εφραιμίδης Α., Μυρωνίδης Δ. και Εμμανουλούδης Δ., 2006. *Η επίδραση των συμβαλλόντων του Στρυμόνα σε τμήματα του πεδινού ρού του*. 10ο Πανελλήνιο Συνέδριο της Ε.Υ.Ε.: 55-62.
- Κουτσογιάννης, Δ., Αριθμητική προσέγγιση του νομογραφήματος Hershfield για την εκτίμηση της PMP, Ανέκδοτη έκθεση, 1997β.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος. «Τεχνική Υδρολογία», Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Κουτσογιάννης, Δ., Ηλιοπούλου, Θ., Κουκουβίνος, Α., Μαλάμος, Ν., Μαμάσης, Ν., Δημητριάδης, Π., Τεπετίδης, Ν., & Μαρκαντώνης, Δ. (2023). *Παραγωγή χαρτών με επικαιροποιημένες παραμέτρους των ομβρίων καμπυλών σε επίπεδο χώρας (εφαρμογή της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ της ΕΕ στην Ελλάδα)*. Τεχνική Έκθεση, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κουτσόπουλος, Κ.(2005), Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και ανάλυση χώρου, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα
- Μαλακασίωτη, Ζ., Ροντήρη, Β., Βουζαξάκης, Κ., Καλογιάννη, Α., (2008). *Η αρχαιολογική έρευνα της ΙΓ'Ε.Π.Κ.Α στη Μαγούλα Ζερέλια. Δ'Συνέδριο Αλμυριώτικων Σπουδών. Αχαιοφθιωτικά*
- Μαρίνος Γ.,(1963). *Περί δύο εμβρυωδών ηφαιστειών τύπου maar παρά τον Αλμυρόν Θεσσαλίας*
- Μπούρη, Σ. (2008). *Οριοθέτηση υδατορρέματος μικρής λεκάνης απορροής χωρίς υδρομετρήσεις με τα λογισμικά ArcGIS, HEC-GeoRAS και HEC-RAS*. Μεταπτυχιακή εργασία, Θεσσαλονίκη.
- Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. «Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων», Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούδη, 2001.

Στείρος, Σ., Παπαγεωργίου, Σ., (1989). *Άνω Ολοκαινικές μεταβολές της θάλασσας και μμερικά συμπεράσματα για την ενεργό τεκτονική της κεντρικής Ελλάδας*, Δ.Ε.Γ.Ε., Τόμος XXIII/1, σελ. 259-269

Τσακίρης, Γ. «Υδατικοί Πόροι Ι. Τεχνική Υδρολογία», Εκδόσεις Συμμετρία, 1995.

ΥΠΕΧΩΔΕ, ΓΓΔΕ, 2002. Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ). Τεύχος 8: Αποχέτευση - Στράγγιση Υδραυλικά Έργα Οδών (ΟΜΟΕ -ΑΣΥΕΟ)

ΥΠΕΧΩΔΕ, ΓΓΔΕ, 2002. Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ). Τεύχος 8: Αποχέτευση - Στράγγιση Υδραυλικά Έργα Οδών (ΟΜΟΕ -ΑΣΥΕΟ).

Ψιλοβίκος Α., 2016. *Οικοϋδραυλική. Πανεπιστημιακές παραδόσεις του ομώνυμου μαθήματος*. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Θεσ Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας Υδάτινου Περιβάλλοντος, Βόλος

5.3. Ιστοσελίδες

ESRI. (χ.χ.). HEC-GeoRAS for ArcGIS. ESRI.

https://www.esri.com/content/dam/esrisites/sitecore-archive/Files/Pdfs/library/fliers/pdfs/hec-georas-arcgis.pdf?srsid=AfmBOoo68ICDjK5wvpG8QNjk_iY1SGxOSdf_aa-2ZPNU0eT_kQRbS7j

Food and Agriculture Organization (FAO). (χ.χ.). *Water quality guidelines*.

<https://www.fao.org/3/y4454e/y4454e02.pdf>

Food and Agriculture Organization (FAO). (χ.χ.). *Water resources report*.

<https://www.fao.org/3/y4454e/y4454e01.pdf>

Natura Graeca. (χ.χ.). *Natura Graeca*. <https://www.naturagraeca.com>

Restart Tourism. (χ.χ.). Αλμυρός Βόλου. *Restart Tourism*.

<https://www.restarttourism.gr/tag/almiros-voloy/>

Solvusoft Corporation. (χ.χ.). HEC-RAS software. Solvusoft.

<https://www.solvusoft.com/el/file-extensions/software/u-s-army-corps-of-engineers/HEC-RAS/>

Βικιπαίδεια. (χ.χ.). Αλμυρός. *Wikipedia*.

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BB%CE%BC%CF%85%CF%81%CF%8C%CF%82>

Εθνικό Κτηματολόγιο. (χ.χ.). Δεδομένα Κτηματολογίου. *Εθνικό Κτηματολόγιο*.

<https://data.ktimatologio.gr/dataset/7ee0866a-5002-42b8-84be-2c0035940c02>

- Ελληνική Ορνιθολογική Εταιρεία. (χ.χ.). Περιγραφή CORINE Landcover. *Ελληνική Ορνιθολογική Εταιρεία*.
https://files.ornithologiki.gr/docs/hcbm/Description_Corine_2000_Landcover.pdf
- Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2007). Οδηγία 2007/60/EK για την εκτίμηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. *Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας*.
<https://floods.ypeka.gr/wp-content/uploads/2023/10/2007-60-EC.pdf>
- Ελληνική Στατιστική Αρχή. (χ.χ.). Στοιχεία απογραφών. *Ελληνική Στατιστική Αρχή*.
<https://www.statistics.gr/documents/20181/4fd151d1-325c-4f77-b92f-1c83aea7c2e0>
- Λουκάς, Α. (χ.χ.). *Ενότητα 9: Μέθοδοι εκτίμησης πλημμύρας σχεδιασμού*. Υδρολογία. Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή.
http://archive.eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/MHXC160/%CE%98%CE%B5%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1_9.pdf
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (χ.χ.). *Σχέδια διαχείρισης υδάτων Θεσσαλίας - ΥΔ GR 08: Χάρτες και κείμενα*.
<https://www.ypethe.gr/archive/shedia-diaheirisis-ydaton-thessalias-yd-gr-08-hartes-keimena-fek>
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (χ.χ.). *Σχέδια διαχείρισης υδάτων Θεσσαλίας. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας*.
<https://www.ypethe.gr/archive/shedia-diaheirisis-ydaton-thessalias-yd-gr-08-hartes-keimena-fek>
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (χ.χ.). *Σχέδιο διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας*.
<https://floods.ypeka.gr/sdkp-lap/maps-1round/sdkp-el08-1round/>
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (χ.χ.). *Σχέδιο διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας (Γύρος 1). Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας*.
<https://floods.ypeka.gr/sdkp-lap/maps-1round/sdkp-el08-1round/>
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (χ.χ.). *Σχέδιο Διαχείρισης Όμβριων Υδάτων (Γύρος 2). Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας*.
<https://floods.ypeka.gr/sdkp-lap/omvries-2round/>
- Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών. (χ.χ.). *ΟΜΟΕ-8: Αποχέτευση - Στράγγιση Υδραυλικά Έργα Οδών (ΟΜΟΕ - ΑΣΥΕΟ)*. https://www.prodiagrafes.gr/wp-content/uploads/PRODIAGRAFES/OMOE/omoe_8.pdf