



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ
ΣΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ ΑΡΑΧΘΟ

Λαζάρου Αικατερίνη

Επιβλέπων: Μακρόπουλος Χρήστος, Καθηγητής

Αθήνα, Νοέμβριος 2022

Πίνακας περιεχομένων

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	III
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	V
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	VI
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	1
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	2
1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	3
2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	4
2.1 ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ.....	4
2.1.1 Ορισμός.....	4
2.1.2 Αίτια.....	4
2.1.3 Επιπτώσεις.....	4
2.1.4 Κατηγορίες.....	5
2.1.5 Πλημμυρικά φαινόμενα στον Ελληνικό χώρο.....	5
2.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ.....	5
2.2.1 Διακινδύνευση πλημμύρας (Flood risk).....	5
2.2.2 Τρωτότητα (Vulnerability).....	6
2.2.3 Κίνδυνος πλημμύρας (Flood hazard).....	6
2.3 ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗ ΖΗΜΙΑ (FLOOD DAMAGE).....	7
2.3.1 Ορισμός.....	7
2.3.2 Κατηγορίες πλημμυρικής ζημιάς.....	7
2.3.3 Συνάρτηση πλημμυρικής ζημιάς (flood-damage function).....	8
2.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ.....	8
2.4.1 Γενικά.....	8
2.4.2 Παράμετροι.....	8
2.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	11
3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	13
3.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ-ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	13
3.2 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ ΗΠΕΙΡΟΥ (GR05).....	13
3.3 ΠΟΛΗ ΑΡΤΑΣ.....	13
3.4 ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	14
3.4.1 Ποταμός Αράχθος.....	14
3.4.2 Λεκάνη απορροής Αράχθου.....	14
3.5 ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	14
3.6 ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ.....	15
3.7 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ.....	17
4 ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ.....	19
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	19
4.2 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ 2005 ΚΑΙ 2015.....	19
4.3 ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ.....	20
5 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ.....	23
5.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ HEC-RAS.....	23
5.1.1 Πλεονεκτήματα συζευγμένης προσομοίωσης 1D-2D.....	23

5.1.2	Παρουσίαση μοντέλων 1D, 2D και 1D-2D	24
5.1.3	Εξισώσεις 1D και 2D.....	25
5.1.4	Ροή μέσω πλευρικών κατασκευών/αναχωμάτων (lateral structures)	26
5.2	ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	27
5.2.1	Δημιουργία αρχείου γεωμετρικών δεδομένων στο ArcMap.....	28
5.2.2	Εκτέλεση υδραυλικής προσομοίωσης στο HEC-RAS	33
5.2.2.1	Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων και τροποποίηση τους στο HEC-RAS 33	
5.2.2.2	Δημιουργία θεματικού επιπέδου χρήσεων γης (land use).....	36
5.2.2.3	Δημιουργία γεωμετρικών δεδομένων του 1D-2D μοντέλου.....	38
5.2.2.4	Εισαγωγή και επεξεργασία υδρολογικών δεδομένων.....	41
5.2.2.5	Εκτέλεση υδραυλικών υπολογισμών	42
5.2.2.6	Αποτελέσματα υδραυλικών υπολογισμών	43
6	ΣΥΝΘΕΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ	45
7	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ	46
7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	46
7.2	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ	46
7.3	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ	50
7.4	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΚΘΕΣΗΣ.....	51
7.5	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ	52
8	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	53
8.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	53
8.2	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ	53
8.3	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ.....	77
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	81
9.1	ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	81
9.2	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	82
10	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	83
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	88
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΙ ΧΑΡΤΕΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ.....	103

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 3.1: Χάρτης χρήσεων γης (Πηγή: Corine Land Cover, 2018)	16
Σχήμα 3.2: Ποσοστιαία κατανομή χρήσεων γης.....	16
Σχήμα 4.1: Πλημμυρογράφημα πλημμύρας 2005 (Πηγή: Μαμάσης, 2014)	19
Σχήμα 4.2: Πλημμυρογράφημα πλημμύρας 2015 (Πηγή: ΤΕΕ Ηπείρου, 2015)	20
Σχήμα 4.3: Μεθοδολογία παραγωγής συνθετικών πλημμυρογραφημάτων.....	21
Σχήμα 4.4: Πλημμυρογράφημα εκροής σεναρίου 1 (Πηγή: Χ. Ντεμίρογλου, 2020)	21
Σχήμα 4.5: Πλημμυρογράφημα εκροής σεναρίου 2 (Πηγή: Χ. Ντεμίρογλου, 2020)	22
Σχήμα 4.6: Πλημμυρογράφημα εκροής σεναρίου 3 (Πηγή: Χ. Ντεμίρογλου, 2020)	22
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα διαδικασίας υδραυλικής προσομοίωσης.....	27
Σχήμα 5.2: ΨΜΕ της εξεταζόμενης περιοχής.....	28
Σχήμα 5.3: Δημιουργία θεματικών επιπέδων	29
Σχήμα 5.4: Υπολογισμός κύριων χαρακτηριστικών ποταμού	30
Σχήμα 5.5: Υπολογισμός κύριων χαρακτηριστικών διατομών	31
Σχήμα 5.6: Ενδεικτική διατομή ποταμού	32
Σχήμα 5.7: Σχεδίαση θεματικών επιπέδων	32
Σχήμα 5.8: Καρτέλα εξαγωγής δεδομένων.....	33
Σχήμα 5.9: Εντολές εισαγωγής δεδομένων	34
Σχήμα 5.10: Καρτέλα επεξεργασίας δεδομένων διατομής.....	35
Σχήμα 5.11: Τελικές διατομές ποταμού	36
Σχήμα 5.12: Χάρτης χρήσεων γης	37
Σχήμα 5.13: 2D περιοχές ροής.....	39
Σχήμα 5.14: Καρτέλα επεξεργασίας πλευρικών κατασκευών	40
Σχήμα 5.15: Καρτέλα πλημμυρογραφήματος.....	42
Σχήμα 5.16: Καρτέλα ομοιόμορφου βάθους	42
Σχήμα 5.17: Καρτέλα ανάλυσης μη μόνιμης ροής.....	43
Σχήμα 5.18: Καρτέλα δημιουργίας και αποθήκευσης νέων χαρτών	44
Σχήμα 7.1: Συνάρτηση ζημιάς για οικιστικές χρήσεις γης (Πηγή: Joint Research Center).....	47
Σχήμα 7.2: Συνάρτηση ζημιάς για εμπορικές χρήσεις γης (Πηγή: Joint Research Center).....	47
Σχήμα 7.3: Συνάρτηση ζημιάς για βιομηχανικές χρήσεις γης (Πηγή: Joint Research Center).....	47
Σχήμα 7.4: Συνάρτηση ζημιάς για συγκοινωνιακές χρήσεις γης (Πηγή: Joint Research Center).....	48
Σχήμα 7.5: Συνάρτηση ζημιάς για υποδομές (Πηγή: Joint Research Center)	48
Σχήμα 7.6: Συνάρτηση ζημιάς για αγροτικές χρήσεις γης (Πηγή: Joint Research Center)	48
Σχήμα 7.7: Συνάρτηση ζημιάς για δασικές εκτάσεις (Πηγή: Huang, 2015).....	48
Σχήμα 8.1: Γράφημα μέγιστου βάθους ανά κατηγορία χρήσης γης της πλημμύρας του 2005.....	53
Σχήμα 8.2: Γράφημα μέγιστου βάθους ανά κατηγορία χρήσης γης για τις πλημμύρες του 2005 και 2015.....	54
Σχήμα 8.3: Γράφημα μέγιστου βάθους ανά κατηγορία χρήσης γης για τα σενάρια 1-3.....	55
Σχήμα 8.4: Πλημμυρικός χάρτης μέγιστου βάθους νερού της πλημμύρας του 2005	56
Σχήμα 8.5: Πλημμυρικός χάρτης μέγιστου βάθους νερού της πλημμύρας του 2015	57
Σχήμα 8.6: Γράφημα μέγιστης ταχύτητας της πλημμύρας του 2005	58
Σχήμα 8.7: Γράφημα μέγιστης ταχύτητας ανά κατηγορία χρήσης γης για τις πλημμύρες του 2005 και 2015	59
Σχήμα 8.8: Γράφημα μέγιστης ταχύτητας ανά κατηγορία χρήσης γης για τις πλημμύρες των σεναρίων 1-3.....	60
Σχήμα 8.9: Πλημμυρικός χάρτης μέγιστης ταχύτητας της πλημμύρας του 2005	61
Σχήμα 8.10: Πλημμυρικός χάρτης μέγιστης ταχύτητας της πλημμύρας του 2015	61
Σχήμα 8.11: Γράφημα d×n ανά κατηγορία χρήσης γης για την πλημμύρα του 2005	62
Σχήμα 8.12: Γράφημα d×n ανά κατηγορία χρήσης γης για το σύνολο των σεναρίων πλημμύρας	63
Σχήμα 8.13: Γράφημα d×n ανά κατηγορία χρήσης γης των ιστορικών πλημμυρών	63
Σχήμα 8.14: Πλημμυρικός χάρτης d×n της πλημμύρας του 2005	64

Σχήμα 8.15: Πλημμυρικός χάρτης $d \times v$ του σεναρίου 3	65
Σχήμα 8.16: Γράφημα $d \times v^2$ ανά κατηγορία χρήσης γης για την πλημμύρα του 2005	66
Σχήμα 8.17: Γράφημα $d \times v^2$ ανά κατηγορία χρήσης γης για την πλημμύρα του σεναρίου 3... ..	66
Σχήμα 8.18: Γράφημα $d \times v^2$ ανά κατηγορία χρήσης γης για το σύνολο των σεναρίων πλημμύρας	67
Σχήμα 8.19: Γράφημα $d \times v^2$ ανά κατηγορία χρήσης γης των ιστορικών πλημμύρων	68
Σχήμα 8.20: Πλημμυρικός χάρτης $d \times v^2$ της πλημμύρας του 2005	69
Σχήμα 8.21: Πλημμυρικός χάρτης $d \times v^2$ του σεναρίου 3	70
Σχήμα 8.22: Γράφημα πλημμυρικής έκτασης ανά κατηγορία χρήσης γης για το σύνολο των σεναρίων πλημμύρας	71
Σχήμα 8.23: Πλημμυρικός χάρτης έκτασης της πλημμύρας του 2005	72
Σχήμα 8.24: Πλημμυρικός χάρτης έκτασης της πλημμύρας του 2015	73
Σχήμα 8.25: Πλημμυρικός χάρτης έκτασης σεναρίου 1	74
Σχήμα 8.26: Πλημμυρικός χάρτης έκτασης σεναρίου 2	75
Σχήμα 8.27: Πλημμυρικός χάρτης έκτασης σεναρίου 3	76
Σχήμα 8.28: Γράφημα της συνολικής πλημμυρικής έκτασης για το σύνολο των εξεταζόμενων σεναρίων	77
Σχήμα 8.29: Γράφημα πλημμυρικής διακινδύνευσης ανά κατηγορία χρήσης γης για το σύνολο των εξεταζόμενων σεναρίων	78
Σχήμα 8.30: Γράφημα πλημμυρικής διακινδύνευσης ανά κατηγορία χρήσης γης των ιστορικών πλημμυρών	79
Σχήμα 8.31: Γράφημα πλημμυρικής διακινδύνευσης ανά κατηγορία χρήσης γης των σεναρίων 1-3	79
Σχήμα 8.32: Γράφημα της συνολικής πλημμυρικής διακινδύνευσης για το σύνολο των εξεταζόμενων σεναρίων	80

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 3.1: Έκταση και ποσοστιαία κατανομή χρήσεων γης	17
Πίνακας 5.1: Συντελεστής Manning	37
Πίνακας 7.1: Μέγιστο βάθος πλημμύρας (m).....	49
Πίνακας 7.2: Πλημμυρικός κίνδυνος	49
Πίνακας 7.3: Μέγιστη ζημία κατηγοριών χρήσης γης (2010 €/m ²)	51
Πίνακας 7.4: Τρωτότητα κατηγοριών χρήσης γης (2022 €/m ²).....	51
Πίνακας 7.5: Πλημμυρικές εκτάσεις (km ²)	51
Πίνακας 7.6: Πλημμυρική διακινδύνευση (εκατ. €)	52

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα κ. Χρήστο Μακρόπουλο, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την επίβλεψη και καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νίκο Μαμάση, για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά τον Παναγιώτη Δήμα, Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για τη συνεχή καθοδήγηση και την ουσιαστική βοήθεια που μου προσέφερε. Η συμβολή του ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και τους φίλους μου, οι οποίοι με υποστήριξαν σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Με αφορμή την Οδηγία 2007/60/EK της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, η οποία έχει σκοπό τη λήψη μέτρων για την πρόληψη και την αντιμετώπιση των πλημμυρών, εξετάζεται η διαδικασία της υδραυλικής προσομοίωσης στον ποταμό Άραχθο πέριξ της πόλης της Άρτας. Βάσει των αποτελεσμάτων που προκύπτουν, επιτυγχάνεται τελικά η εξαγωγή χαρτών πλημμυρικού κινδύνου και ο υπολογισμός της πλημμυρικής διακινδύνευσης.

Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε είναι ένα τμήμα του ποταμού Άραχθου, μήκους 10 km, το οποίο ξεκινάει στα ανάντη από το φράγμα Πουρνάρι I και στη συνέχεια διατρέχει για ένα τμήμα του παράλληλα την πόλη της Άρτας. Η υδραυλική προσομοίωση του ποταμού πραγματοποιήθηκε με χρήση του συζευγμένου 1D-2D μοντέλου HEC-RAS, σε συνθήκες μη μόνιμης ροής και εκτελέστηκε για πέντε πλημμυρικά σενάρια. Ειδικότερα, προσομοιώθηκαν τα δύο πλημμυρικά φαινόμενα που έπληξαν την Άρτα το 2005 και το 2015, καθώς και τρία επιπλέον σενάρια, τα οποία προέκυψαν από την παραγωγή συνθετικών πλημμυρογραφημάτων και βασίζονται σε σχετική διπλωματική εργασία (Ντεμίρογλου, 2020).

Αρχικά, μέσω του λογισμικού ArcMap και συγκεκριμένα της εργαλειοθήκης HEC-GeoRAS υλοποιήθηκε η δημιουργία αρχείου των γεωμετρικών δεδομένων, το οποίο εισήχθη στη συνέχεια στο HEC-RAS. Μετά την δημιουργία του 1D και 2D μοντέλου, και εν συνεχεία της σύζευξής τους, και την εισαγωγή των υδραυλικών δεδομένων εκτελέστηκε η υδραυλική προσομοίωση για κάθε πλημμυρικό σενάριο. Με βάση τα παραγόμενα πλημμυρικά μεγέθη πραγματοποιήθηκε η σύνθεση των χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης στο περιβάλλον του ArcMap.

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε η εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης βάσει των χρήσεων γης για τα επιλεγμένα σενάρια πλημμύρας. Η διακινδύνευση εκφράστηκε σε νομισματικές μονάδες, ενώ οι τιμές της προέκυψαν συνυπολογίζοντας τις συνιστώσες του πλημμυρικού κινδύνου, της τρωτότητας και της έκθεσης.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων και καταγράφηκαν τα αντίστοιχα συμπεράσματα. Σύμφωνα με αυτά, παρόλο που οι αγροτικές εκτάσεις εμφανίζουν τη μεγαλύτερη επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης, οι αναμενόμενες οικονομικές απώλειες που ενδέχεται να προκύψουν, επιβαρύνουν πολύ περισσότερο τις αστικές περιοχές συγκριτικά με τις αγροτικές. Όσον αφορά τα πλημμυρικά σενάρια, η πλημμύρα του 2015 παρουσίασε πιο ευρύ πλημμυρικό πεδίο και υψηλότερες τιμές διακινδύνευσης σε σχέση με εκείνη του 2005. Για τα επιπλέον σενάρια, παρατηρήθηκε ότι η επιφάνεια της πλημμυρικής κατάκλυσης και οι τιμές των πλημμυρικών παραμέτρων εν γένει αυξάνονται με την περίοδο επαναφοράς ως αναμενόμενες.

Abstract

On the occasion of Directive 2007/60/EC of the European Commission, which aims to take measures to prevent and control floods, the process of hydraulic simulation of Arachthos river near the city of Arta is examined. Based on the obtained results, the extraction of flood hazard maps and an overall flood risk assessment are achieved.

The study area of choice is a section of the Arachthos River, 10 km long, which spans from the exact downstream of Pournari I dam and then flows parallel to the city of Arta. The hydraulic simulation of the river is carried out utilizing the coupled 1D-2D HEC-RAS model, under unsteady flow conditions and is performed for five distinct flooding scenarios. In particular, the two flood phenomena that hit Arta in 2005 and 2015 are simulated, along three additional scenarios, which resulted from the production of synthetic flood hydrographs as explained in the work elaborated in a recent diploma thesis (Demiroglou, 2020).

Initially, the creation of the geometric data file was implemented, through the ArcMap software and specifically the HEC-GeoRAS toolbox which was subsequently imported into HEC-RAS. After creating the 1D and 2D model, and the coupled one and entering the hydraulic data, the hydrodynamic simulation was performed for each flood scenario. Based on the generated flood characteristics, the flood inundation maps were compiled in the ArcMap environment.

Subsequently, the flood risk assessment was carried out based on land uses for the selected flood scenarios. Risk was expressed in monetary units, while its values were derived by considering the components of flood hazard, vulnerability and exposure.

Finally, a comparison was made between the results and the corresponding conclusions were recorded. According to them, even though rural areas show the largest inundation boundary, the expected economic losses that may occur, affect urban areas much more than rural areas. Regarding the flood scenarios, the 2015 flood event presented a wider flood extent and higher risk values than that of 2005. For the additional scenarios, it was observed that the flood inundation area and flood parameter values increase with the return period, as expected.

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά στοιχεία

Οι πλημμύρες αποτελούν σημαντικό ζήτημα για την ασφάλεια του παγκόσμιου πληθυσμού, αφού σχετίζονται με ένα μεγάλο μέρος του συνόλου των ανθρώπινων απωλειών και των οικονομικών επιπτώσεων που οφείλονται στις φυσικές καταστροφές. Τα πλημμυρικά φαινόμενα αποτελούν μέρος της φυσικής υδρολογικής διεργασίας και συμβαίνουν σε περιπτώσεις που το υδρογραφικό δίκτυο δεν δύναται να αποστραγγίσει τον όγκο υδάτων που απορρέουν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υπερχειλίση των υδάτων και την πλημμυρική κατάκλυση τμημάτων χερσαίας έκτασης.

Στην Ελλάδα οι πλημμύρες θεωρούνται από τις πιο επιζήμιες φυσικές καταστροφές, καθιστώντας έτσι αναγκαία την υιοθέτηση ενός πλάνου εκτίμησης και διαχείρισης πλημμυρικού κινδύνου. Η εμφάνιση πλημμυρικών συμβάντων είναι κυρίως απόρροια του έντονου ανάγλυφου που παρουσιάζει, σε συνδυασμό με τη σημαντική γεωγραφική μεταβλητότητα του κλιματικού της προφίλ. Ακόμη, η κλιματική αλλαγή εκτιμάται ότι θα οδηγήσει στην εκδήλωση ισχυρότερων πλημμυρικών φαινομένων (Nafari,2018). Παράλληλα, η αλλαγή των χρήσεων γης, κυρίως εντός περιοχών ευάλωτων σε πλημμύρα, όπως παράκτιες περιοχές ή περιοχές γειτνιάζουσες σε υδάτινο αποδέκτη, συντελούν στην αύξηση του πλημμυρικού κινδύνου στη χώρα. Στην πλειονότητά τους οι πλημμύρες στον ελλαδικό χώρο εκδηλώνονται με τη μορφή ξαφνικής πλημμύρας, η οποία προκαλείται λόγω ακραίων φαινομένων βροχόπτωσης, επιφέροντας δυσμενείς επιπτώσεις σε πολλές περιοχές (Σκουλάτος, 2016).

Προκειμένου να μετριαστεί η επικινδυνότητα των πλημμυρικών φαινομένων πραγματοποιούνται σημαντικές προσπάθειες με στόχο την ενδυνάμωση πρακτικών πρόληψης και αντιμετώπισης. Στο πλαίσιο αυτό, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έθεσε σε ισχύ την Οδηγία 2007/60/ΕΚ, η οποία έχει σκοπό τη «θέσπιση πλαισίου για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, με στόχο τη μείωση των αρνητικών συνεπειών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες που συνδέονται με τις πλημμύρες στην Κοινότητα» (Επίσημη εφημερίδα της Κοινότητας, 06/11/2007). Οι βασικές απαιτήσεις της χωρίζονται σε τρία στάδια:

1. Διεξαγωγή Προκαταρκτικής Αξιολόγησης Κινδύνου Πλημμύρας
2. Κατάρτιση Χαρτών Επικινδυνότητας και Χαρτών Κινδύνων Πλημμύρας
3. Κατάρτιση Σχεδίων Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας

Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται η προκαταρκτική αξιολόγηση κινδύνου πλημμύρας και πιο συγκεκριμένα η αξιολόγηση των δυνητικών αρνητικών συνεπειών των μελλοντικών πλημμυρών με βάση το κόστος ζημιάς, καθώς και η κατάρτιση χαρτών επικινδυνότητας.

Η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου και ο υπολογισμός της πλημμυρικής ζημιάς θεωρούνται τα προκαταρκτικά βήματα της ολοκληρωμένης διαχείρισης του κινδύνου πλημμύρας. Αυτά είναι απαραίτητα για την αναγνώριση περιοχών υψηλής επικινδυνότητας, την επιλογή αποδοτικών μέτρων μείωσης των επιπτώσεων

συμβάντων πλημμύρας, καθώς και τον καλύτερο σχεδιασμό των χρήσεων γης. (Nafari, 2018).

1.2 Αντικείμενο εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη υδραυλικής προσομοίωσης ποταμού, η μετέπειτα σύνθεση χαρτών πλημμυρικού κινδύνου και τελικά η εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης. Εστιάζεται ο υπολογισμός της πλημμυρικής ζημιάς σε νομισματικούς όρους για τις διάφορες χρήσεις γης που συναντώνται στην εξεταζόμενη περιοχή.

Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε το τμήμα του ποταμού Αράχθου που βρίσκεται κατάντη του φράγματος Πουρνάρι Ι και περικλείει την πόλη της Άρτας. Αξίζει να σημειωθεί πως σύμφωνα με το «Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών των Υδατικών Διαμερισμάτων Ηπείρου, Δυτικής Στερεάς Ελλάδας και Θεσσαλίας» του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, (ΥΠΕΝ, 2018), η εν λόγω περιοχή εντάσσεται στις ζώνες δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας. Ειδικότερα, για τις πεδιάδες Άρτας και τη χαμηλή ζώνη του ποταμού Λούρου & Αράχθου στις ζώνες κατάκλυσης από ποτάμιες ροές/λίμνες για περίοδο επαναφοράς 100 ετών, παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα:

- Ποσοστό 1,32% χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλό κίνδυνο
- Ποσοστό 3,21% χαρακτηρίζεται από υψηλό κίνδυνο
- Ποσοστό 11,75% χαρακτηρίζεται από μέτριο κίνδυνο
- Ποσοστό 40,14% χαρακτηρίζεται από χαμηλό κίνδυνο
- Ποσοστό 43,59% χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλό κίνδυνο

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τα ιστορικά δεδομένα οι πλημμύρες που καταγράφονται στα ορεινά της λεκάνης του Αράχθου αφορούν ζημιές σε οικισμούς, πιθανότατα λόγω αστοχίας τεχνικών έργων, ζημιές από διάβρωση λόγω υψηλής βροχόπτωσης κλπ. (Πηγή: ΥΠΕΝ).

Η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου στο ποταμό Άραχθο πραγματοποιήθηκε για πέντε διαφορετικά σενάρια πλημμύρας. Αρχικά, εξετάστηκαν οι ιστορικές πλημμύρες που έπληξαν την περιοχή της Άρτας το 2005 και 2015 και προκάλεσαν εκτεταμένες υλικές καταστροφές. Τα παραπάνω καταστρεπτικά φαινόμενα φανερώνουν την σπουδαιότητα του πλημμυρικού προβλήματος της Άρτας και την αναγκαιότητα πρόληψης του πλημμυρικού κινδύνου. Εν συνεχεία, εξεταστήκαν τρία επιπλέον πλημμυρικά σενάρια, τα οποία προέκυψαν με την παραγωγή συνθετικών πλημμυρογραφημάτων εκροής στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας της Χ. Ντεμίρογλου (2020). Τα εν λόγω πλημμυρογραφήματα αντιστοιχούν σε περιόδους επαναφοράς 5-1000 ετών.

Για τα παραπάνω διαχειριστικά σενάρια πραγματοποιήθηκε υδραυλική προσομοίωση με την βοήθεια του υδροδυναμικού μοντέλου HEC-RAS. Με την εφαρμογή της υδραυλικής ανάλυσης επιτεύχθηκε ο υπολογισμός τις μέγιστης τιμής των μεγθών του βάθους νερού (depth), της ταχύτητας ροής (velocity), του γινομένου βάθους νερού και ταχύτητας ροής ($d \times v$) και του γινομένου βάθους και ταχύτητας υψωμένης στο τετράγωνο ($d \times v^2$). Επιπρόσθετα, μέσω της υδραυλικής ανάλυσης περιεγράφηκε η εξέλιξη της ροής στο υφιστάμενο υδρογραφικό δίκτυο, καθώς και η πιθανή κατάκλυση στα πλημμυρικά πεδία εκατέρωθεν του ποταμού Άραχθου.

Η εκπόνηση χαρτών πλημμύρας των προαναφερθέντων υδραυλικών μεγεθών υλοποιήθηκε μέσω του λογισμικού ArcMap, ενώ στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι τιμές της διακινδύνευσης για τα επιλεγμένα σενάρια βάσει των χρήσεων γης. Τέλος,

πραγματοποιήθηκε η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των πέντε σεναρίων πλημμύρας και καταγράφηκαν τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

1.3 Διάρθρωση εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία συνίσταται από εννιά κεφάλαια. Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των κεφαλαίων:

- Στο κεφάλαιο 1 παρατίθενται μερικά εισαγωγικά στοιχεία των πλημμυρών καθώς και το ισχύον θεσμικό πλαίσιο που αφορά την εκτίμηση και τη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου. Επιπλέον, διατυπώνεται το αντικείμενο της εργασίας και παρουσιάζεται η διάρθρωση αυτής.
- Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο στηρίζεται η εργασία. Πιο συγκεκριμένα, αναλύονται οι έννοιες της πλημμύρας, των μεγεθών του πλημμυρικού κινδύνου, της πλημμυρικής ζημιάς και των μέτρων αποτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου. Τέλος, παρουσιάζονται τα υπολογιστικά λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν.
- Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται η περιοχή μελέτης και τα χαρακτηριστικά της. Αρχικά, παρατίθενται πληροφορίες σχετικά με τη γεωγραφία, τη γεωμορφολογία, το υδρογραφικό δίκτυο και τα βασικά χαρακτηριστικά των φραγμάτων που είναι κατασκευασμένα στην περιοχή. Επίσης, παρουσιάζονται οι χρήσεις γης και τέλος αναφέρονται οι πολιτικές διαχείρισης του φράγματος που ακολουθήθηκαν κατά την διάρκεια των πλημμυρών του 2005 και 2015.
- Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα υδρολογικά δεδομένα των σεναρίων για τα οποία πραγματοποιήθηκε η υδραυλική προσομοίωση.
- Στο κεφάλαιο 5 αρχικά περιγράφεται το υδροδυναμικό μοντέλο HEC-RAS 1D-2D, στη συνέχεια αναπτύσσεται το μεθοδολογικό πλαίσιο της συζευγμένης υδραυλικής προσομοίωσης και τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υδραυλικών υπολογισμών.
- Στο κεφάλαιο 6 περιγράφεται η διαδικασία σύνθεσης των πλημμυρικών χαρτών της εξεταζόμενης περιοχής.
- Στο κεφάλαιο 7 πραγματοποιείται η εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης, αφού πρώτα προσδιοριστούν οι τιμές του κινδύνου, της έκθεσης και της τρωτότητας.
- Στο κεφάλαιο 8 παρατίθενται τα αποτελέσματα της εργασίας, οι συγκριτικές αξιολογήσεις μεταξύ των πλημμυρικών σεναρίων και μερικά συμπεράσματα που απορρέουν από αυτά.
- Στο κεφάλαιο 9 συνοψίζονται τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία και προτείνονται περαιτέρω θέματα προς μελλοντική διερεύνηση.

2 Θεωρητικά στοιχεία

2.1 Πλημμύρες

2.1.1 Ορισμός

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή οδηγία 2007/60/EK, ως πλημμύρα ορίζεται η προσωρινή κατάκλυση του εδάφους από νερό, το οποίο υπό κανονικές συνθήκες, δεν είναι καλυμμένο από νερό. Ο ορισμός περιλαμβάνει πλημμύρες από ποτάμια, ορεινούς χείμαρρους, εφήμερα υδατορέματα, υπερχειλίσεις λιμνών και πλημμύρες που προκαλούνται από υπόγεια ύδατα και τη θάλασσα σε παράκτιες περιοχές. Ακόμη, περιλαμβάνει πλημμύρες από καταστροφές μεγάλων υδραυλικών έργων, όπως θραύσεις αναχωμάτων και φραγμάτων.

2.1.2 Αίτια

Η πλειοψηφία των φυσικών καταστροφών που οφείλονται στις πλημμύρες προέρχονται από διάφορες αιτίες. Τα γενεσιουργά αίτια των πλημμυρών μπορεί να είναι φυσικά, αλλά κάποιες φορές οφείλονται και σε ανθρώπινες παρεμβάσεις.

Ξεκινώντας από τα φυσικά αίτια, οι πλημμύρες κατά κύριο λόγο οφείλονται στις κλιματολογικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, λόγω των έντονων βροχοπτώσεων, τα επίπεδα νερού των ποταμών αυξάνονται, με αποτέλεσμα να προξενούν γρήγορη απορροή και σοβαρές πλημμύρες σε όλη την κοιλάδα των ποταμών, αφού δεν μπορούν να παροχετεύσουν τον περίσσιο όγκο του νερού. Μία πλημμύρα μπορεί να είναι επίσης αποτέλεσμα της εισροής του θαλάσσιου νερού σε μία παράκτια περιοχή, λόγω των παλιρροϊκών φαινομένων και των ακραίων κυμάτων που δημιουργούνται.

Οι πιο κοινές ανθρωπογενείς αιτίες είναι η θραύση φραγμάτων, η οποία προκύπτει όταν σε ένα φράγμα συσσωρευτούν σημαντικές ποσότητες νερού με ταυτόχρονη δομική αστοχία του σώματος του φράγματος (υπερπήδηση ή διασωλήνωση) με αποτέλεσμα την κατάρρευση του φράγματος και την μη ελεγχόμενη απελευθέρωση των αποθηκευμένων όγκων νερού στην κατάντη περιοχή. Ωστόσο, πολλές φορές οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις μπορούν έμμεσα να προκαλέσουν πλημμυρικά φαινόμενα. Μερικές από τις παρεμβάσεις αυτές είναι η αστικοποίηση, ο περιορισμός των χώρων πρασίνου αλλά και ανεξέλεγκτη δόμηση η οποία περιορίζει την κοίτη των ρεμάτων σε οικιστικές περιοχές, καταργώντας σημαντικό μέρος του φυσικού υδρογραφικού δικτύου (Knočka et al, 2018)

2.1.3 Επιπτώσεις

Έχει παρατηρηθεί ότι οι πλημμύρες είναι ανάμεσα στους πιο συχνούς και καταστροφικούς τύπους φυσικών καταστροφών αποτελώντας έναν σημαντικό κοινωνικοοικονομικό κίνδυνο. Μερικές από τις οικονομικές επιπτώσεις των πλημμυρών είναι: οι υλικές ζημιές έργων υποδομής, δικτύων επικοινωνίας, γεωργικών και κτηνοτροφικών εγκαταστάσεων (Downton and Pielke, 2001). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη επισκευής και επαναφοράς των υποδομών στην αρχική τους κατάσταση. Ακόμα, εξαιτίας της καταστροφής της ακίνητης περιουσίας των κατοίκων μιας περιοχής απαιτείται η χρηματική αποζημίωση των πληγέντων.

Οι πλημμύρες αποτελούν έναν από τους κυριότερους φυσικούς κινδύνους, λόγω των θανάτων και των κοινωνικών επιπτώσεων που προκαλούν. Με άλλα λόγια, οι πλημμύρες αποτελούν μεγάλο κίνδυνο για την ανθρώπινη ζωή και υγεία. Επίσης, ιδιαίτερα σημαντικά χαρακτηρίζονται τα συναισθηματικά και ψυχολογικά τραύματα

των πληγέντων. Παρόλα αυτά, τα μεγέθη αυτά δεν είναι δυνατό να εκφραστούν με αριθμούς (Πιστρίκα, 2010).

Σύμφωνα με τα παγκόσμια στατιστικά, από το 1975 έως το 2002 τα πλημμυρικά φαινόμενα προκάλεσαν 175.000 απώλειες ανθρώπινων ζώων και έπληξαν περισσότερους από 2,2 εκατομμύρια ανθρώπους (Doocy et al, 2013).

2.1.4 Κατηγορίες

Σύμφωνα με τους Kourgialas and Karatzas (2016), οι πλημμύρες χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Ποτάμιες πλημμύρες (river floods).
- Αιφνίδιες πλημμύρες (flash floods).
- Παράκτιες πλημμύρες (coastal flooding) .
- Αστικές πλημμύρες (urban floods).
- Πλημμύρες που οφείλονται σε ανεπάρκεια του συστήματος όμβριων υδάτων (sewer flooding).

Από αυτές αξίζει να αναφερθούν η αιφνίδια πλημμύρα (flash flood), η οποία αποτελεί τον πιο κοινό τύπο πλημμύρας στις περιοχές της Μεσογείου, άρα και στον Ελλαδικό χώρο. Η αιφνίδια πλημμύρα προκαλείται λόγω του μικρού μεγέθους των λεκανών απορροής (συγκέντρωση ροής σε σύντομο χρονικό διάστημα), τη γεωμορφολογία του εδάφους (απότομες κλίσεις και χαμηλής διαπερατότητας γεωλογικοί σχηματισμοί), καθώς επίσης και των έντονων βροχοπτώσεων. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν την ταχεία πλημμύρα ένα κοινό φαινόμενο όχι μόνο στις πεδινές ή παρακειμένες σε ποτάμια περιοχές αλλά και στα οροπέδια.

2.1.5 Πλημμυρικά φαινόμενα στον Ελληνικό χώρο

Οι πλημμύρες είναι μια από τις κυριότερες κατηγορίες φυσικών καταστροφών στην Ελλάδα, τόσο από οικονομικής πλευράς όσο και από πλευράς κόστους σε ανθρώπινες ζωές. Σύμφωνα με τη Ειδική Γραμματεία Υδάτων (ΕΓΥ), στη χώρα έχουν καταγραφεί συνολικά 1.627 πλημμυρικά γεγονότα σε 1.076 θέσεις. Αναλυτικότερα, από τα στοιχεία της Υπηρεσία Αποκατάστασης Σεισμοπλήκτων (ΥΑΣ) 749 γεγονότα, από τα στοιχεία του οργανισμού Ελληνικών Γεωργικών Ασφαλίσεων (ΕΛ.Γ.Α.) 429 γεγονότα, ενώ από τις εφημερίδες, τις πανεπιστημιακές εργασίες, τις μελέτες και τις αναφορές των υπηρεσιών καταγράφηκαν 449 γεγονότα. Αναφορικά με την εποχιακή κατανομή των πλημμυρών ο Νοέμβριος είναι ο μήνας με την μεγαλύτερη εκδήλωση πλημμυρικών επεισοδίων. Μία από τις πιο καταστροφικές πλημμύρες όσον αφορά τα ανθρώπινα θύματα έχει σημειωθεί στα Τρίκαλα το 1907 με τουλάχιστον 100 θανάτους. Ακόμα, οι πλημμύρες οι οποίες έπληξαν την Αττική το 1961 και το 1977 είχαν ως αποτέλεσμα το θάνατο πάνω από 30 ανθρώπων. Σε ότι αφορά τις υλικές ζημιές αξίζει να σημειωθεί η πλημμύρα που έλαβε χώρα σε αρκετές περιοχές της Θεσσαλίας και της Βορείου Ελλάδας το 1987 και η οποία προκάλεσε την καταστροφή 80.000 στρεμμάτων καλλιεργειών, καθώς και πολλών σπιτιών και καταστημάτων (Σωτήρχου, 2020).

2.2 Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου

2.2.1 Διακινδύνευση πλημμύρας (Flood risk)

Ως διακινδύνευση πλημμύρας ορίζεται ο συνδυασμός της πιθανότητας να λάβει χώρα πλημμύρα και των δυνητικών αρνητικών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία,

το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται μ' αυτή την πλημμύρα (Ευρωπαϊκή οδηγία 2000/60/ΕΚ). Άρα, οι μονάδες μέτρησης της πλημμυρικής διακινδύνευσης μπορεί να είναι νομισματικοί όροι ή απώλειες ανθρώπινων ζώων, σε περίπτωση που οι ζημιές είναι μετρήσιμες, ή ποιοτικοί όροι στην περίπτωση που οι ζημιές δεν είναι μετρήσιμες. Εναλλακτικά, σύμφωνα με τους Vojinovic et al (2014) η διακινδύνευση (R) μπορεί να οριστεί και ως συνδυασμός του κινδύνου (H) και της τρωτότητας (V).

$$R = H \times V \quad (2.1)$$

Η σχέση αυτή αποτελεί την παραδοσιακή προσέγγιση (ποσοτική ή αναλυτική) της εκτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου. Η εκτίμηση του μεγέθους αυτού μπορεί να θεωρηθεί ως το πρωταρχικό βήμα του σχεδίου πρόληψης των κινδύνων πλημμύρας. (Nafari, 2018).

Η πλημμυρική διακινδύνευση είναι αποκλειστικά ζήτημα ανθρώπινης διαχείρισης. Αυτό σημαίνει ότι από την μία πλευρά οι πλημμύρες είναι μέρος του υδρολογικού κύκλου, αλλά από την άλλη η ανθρώπινη τροποποίηση του περιβάλλοντος οδηγεί στην διατάραξη της φυσικής λειτουργία ενός ποταμού, με αποτέλεσμα την αύξηση της διακινδύνευσης (Schanze 2006).

2.2.2 Τρωτότητα (Vulnerability)

Στη βιβλιογραφία η έννοια της τρωτότητας εμφανίζεται με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Σύμφωνα με τους Nasiri et al (2016), ο όρος τρωτότητα είναι η ζημιά που υφίστανται οι άνθρωποι, τα κτίρια, οι υποδομές και οι δραστηριότητες σε μία κατάσταση κινδύνου. Ωστόσο, μία νέα εκδοχή του όρου αναπτύχθηκε από τους Balica and Wright (2010), οι οποίοι όρισαν την τρωτότητα ως την αλληλεπίδραση μεταξύ της έκθεσης (exposure), της ευαλωτότητας/τρωτότητας (susceptibility) και της ανθεκτικότητας (resilience) μίας κοινότητας σε κατάσταση κινδύνου.

Η τρωτότητα αποτελεί την κυριότερη συνιστώσα στην εκτίμηση της πλημμυρικής ζημιάς. Η μέτρηση της είναι μία πολύπλοκη διαδικασία διότι επηρεάζεται από διάφορα περιβαλλοντικά, οικονομικά, κοινωνικά, ακόμα και πολιτικά στοιχεία σε τοπική κλίμακα (Jixi Gao, 2007).

Τα ανθρώπινα συστήματα είναι ευάλωτα στις πλημμύρες λόγω τριών πτυχών ζωτικής σημασίας:

- 1) Την έκθεση, που αναφέρεται στους ανθρώπους και στον περίγυρο τους καθώς και σε κάθε στοιχείο που βρίσκεται σε μια περιοχή ευάλωτη σε πλημμύρες και τα οποία εκτίθενται στις επιπτώσεις μιας πλημμύρας και υπόκεινται σε πιθανές απώλειες (UNISDR 2009).
- 2) Την ευαλωτότητα/τρωτότητα, που αναφέρεται στην τάση των ανθρώπων, του περιβάλλοντος και των υποδομών να επηρεάζονται από έναν κίνδυνο λόγω του πόσο εύθραυστη είναι η κοινότητα και το περιβάλλον (Cardona et al., 2012).
- 3) Την ανθεκτικότητα, που αναφέρεται στην ικανότητα ενός συστήματος να αντιμετωπίζει και να προσαρμόζεται σε μια ενδεχόμενη καταστροφή (Pelling et al, 2004).

Για παράδειγμα, η τρωτότητα μιας αστικής περιοχής φανερώνει την έκθεση και την ευαλωτότητα της πόλης στον πλημμυρικό κίνδυνο και την ανθεκτικότητα της περιοχής στο να αντιμετωπίζει και να ξεπερνάει τις επιπτώσεις μιας πλημμύρας.

2.2.3 Κίνδυνος πλημμύρας (Flood hazard)

Κίνδυνος πλημμύρας ορίζεται ως η πιθανότητα εκδήλωσης μιας πλημμύρας η οποία αναμένεται να φτάσει μέχρι ένα συγκεκριμένο χωρικό όριο (Camarasa-Belmonte and Soriano-García, 2012). Με άλλα λόγια, σύμφωνα με τους Lindenschmidt et al (2016), η πιθανότητα υπέρβασης ή αλλιώς περίοδος επαναφοράς, μαζί με την ένταση του φυσικού γεγονότος, που εκφράζεται συνήθως σε όρους βάθους πλημμύρας ή πλημμυρικής έκτασης, καθορίζουν τον κίνδυνο που προκαλείται από ένα πλημμυρικό γεγονός. Ο κίνδυνος προκαλείται από ένα επικίνδυνο φαινόμενο το οποίο μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα υλικές απώλειες, όπως κτίρια και υποδομές, καθώς και ‘άυλες’ απώλειες, όπως οι ανθρώπινες ζωές.

Η ακριβής εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου είναι δύσκολη αλλά αρκετά σημαντική. Ιδανικά, ένα επαρκώς μεγάλο ιστορικό αρχείο μετρήσεων δεν θα οδηγούσε σε αυξημένες αβεβαιότητες. Παρόλα αυτά, ακόμα και στην ιδανική περίπτωση, η πιθανότητα υπέρβασης ακραίων πλημμυρικών σεναρίων είναι αδύνατο να υπολογιστεί με ακρίβεια λόγω των μεγάλων περιόδων επαναφοράς που εμφανίζουν.

2.3 Πλημμυρική ζημιά (flood damage)

2.3.1 Ορισμός

Ο όρος πλημμυρική ζημιά γενικά αναφέρεται στις αρνητικές επιπτώσεις που προξενεί ένα πλημμυρικό φαινόμενο στη δημόσια και ιδιωτική περιουσία, όπως για παράδειγμα σε κτίρια, υποδομές, καλλιέργειες κλπ.

2.3.2 Κατηγορίες πλημμυρικής ζημιάς

Η κατηγοριοποίηση της ζημιάς ανάλογα με την φύση της είναι ένα από τα σημαντικότερα βήματα κατά την εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης (Dutta et al. 2003). Η κατηγοριοποίηση των επιπτώσεων που προκύπτουν από ένα πλημμυρικό γεγονός, είναι η διάκριση σε άμεση (direct) και έμμεση (indirect) πλημμυρική ζημιά και σε απτή (tangible) και μη απτή (intangible) πλημμυρική ζημιά.

Άμεσες ζημιές (ζημιά σε περιουσίες, υποδομές, αγροτική γη, οχήματα κλπ) συμβαίνουν λόγω της φυσικής επαφής μεταξύ του πλημμυρικού νερού και των πληγέντων αντικειμένων κατά τη διάρκεια ενός πλημμυρικού γεγονότος. Έμμεσες ζημιές (δυσλειτουργία των μέσων μαζικής μεταφοράς, διακοπή του εμπορίου, μειωμένη παραγωγικότητα κλπ.) καλούνται οι προκαλούμενες επιδράσεις των άμεσων απωλειών, και αυτές μπορούν να συμβούν έξω από τα όρια της κατακλυσμένης έκτασης ή μετά από την εκδήλωση της πλημμύρας. Επομένως, είναι σαφές ότι η αναγνώριση και η ποσοτικοποίηση των έμμεσων ζημιών είναι μία πολύπλοκη διαδικασία επειδή τα πραγματικά κόστη των καταστροφών συμπεριλαμβάνουν κρυμμένα κόστη (Nasiri et al., 2016). Σύμφωνα με τους Kang et al. 2005 συνήθως υπολογίζονται ως ποσοστό επί των άμεσων ζημιών, ενώ μπορούν τα φτάσουν μέχρι και το 75% ως ποσοστό επί των άμεσων ζημιών.

Οι άμεσες και έμμεσες ζημιές χωρίζονται περαιτέρω σε απτές και μη απτές ζημιές, ανάλογα με το αν αυτές οι απώλειες μπορούν να εκφραστούν σε νομισματικούς όρους ή όχι (Smith and Ward, 1998). Πιο συγκεκριμένα, απτή ζημιά είναι η ζημιά, η οποία μπορεί να προσδιοριστεί με νομισματικούς όρους, αφού μπορεί να ποσοτικοποιηθεί σε κόστος αποκατάστασης ή αντικατάστασης των μονάδων που έχουν πληγεί. Μερικές από αυτές είναι οι ζημιές που προκαλούνται σε κτίρια, έργα δημόσιας υποδομής ή οχήματα, καθώς και εκείνες που περιλαμβάνουν έξοδα καθαρισμού των συντριμμιών ή προσωρινής στέγασης των πληγέντων. Αντιθέτως, μη

απτή ζημιά είναι η ζημιά, η οποία δεν μπορεί να μεταφραστεί σε νομισματικές μονάδες, όπως είναι για παράδειγμα, το ψυχολογικό τραύμα, ο τραυματισμός ή ο θάνατος ανθρώπων και η απώλεια πολιτιστικής κληρονομιάς. Παρά το γεγονός ότι οι άμεσες μη απτές ή έμμεσες ζημιές παίζουν έναν σημαντικό ή ακόμα και κυρίαρχο ρόλο στην αξιολόγηση των πλημμυρικών επιπτώσεων, το μεγαλύτερο κομμάτι της βιβλιογραφίας αφορά τις άμεσες απτές ζημιές.

2.3.3 Συνάρτηση πλημμυρικής ζημιάς (flood-damage function)

Η τυπική προσέγγιση της οικονομικής εκτίμησης των άμεσων ζημιών συνήθως επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας τη μέθοδο της συνάρτησης βάθους-ζημιάς. Η συνάρτηση αυτή συσχετίζει τα πλημμυρικά χαρακτηριστικά με την οικονομική αξία της ζημιάς, χωρίς να εξετάζει τους φυσικούς μηχανισμούς που προκάλεσαν τη δομική ζημιά. Τα πλημμυρικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται είναι συχνά αποτέλεσμα υδραυλικών προσομοιώσεων.

Εξ' ορισμού, οι συναρτήσεις βάθους-ζημιάς περιλαμβάνουν το βάθος του νερού ως τον κύριο προσδιοριστικό παράγοντα της άμεσης ζημιάς. Εκτός από το βάθος νερού, αρκετοί άλλοι παράγοντες, όπως για παράδειγμα η ταχύτητα ροής, η διάρκεια πλημμύρας, το φορτίο ιζημάτων, η ύπαρξη συστήματος προειδοποίησης πλημμύρας μπορεί να επηρεάζουν την σοβαρότητα και την έκταση της πλημμυρικής ζημιάς. Ωστόσο, τα μοντέλα πλημμυρικής ζημιάς σπάνια περιέχουν όλους αυτούς τους παράγοντες (Pistrika et al, 2014).

Οι συναρτήσεις αυτές χωρίζονται σε εμπειρικές και συνθετικές συναρτήσεις βάθους-ζημιάς, ανάλογα με το είδος των δεδομένων που χρησιμοποιούνται. Οι συνθετικές συναρτήσεις βάθους-ζημιάς βασίζονται σε μια υποθετική/θεωρητική ανάλυση, η οποία δεν εξαρτάται από τις πληροφορίες ενός πραγματικού πλημμυρικού γεγονότος. Οι συνθετικές πληροφορίες προέρχονται είτε από τις υπάρχουσες βάσεις δεδομένων πλημμυρικής ζημιάς, είτε από στοιχεία που συλλέχθηκαν σε επιτόπιες έρευνες στις πληγείσες περιοχές. Από την άλλη πλευρά, οι εμπειρικές συναρτήσεις βάθους-ζημιάς βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα ζημιών από ιστορικές πλημμύρες (Romali et al, 2015).

2.4 Παράμετροι αποτίμησης πλημμυρικού κινδύνου

2.4.1 Γενικά

Το μέγεθος των ζημιών που προκύπτει από μια πλημμύρα εξαρτάται από μεταβλητές πλημμυρικές παραμέτρους, οι οποίες αντανακλούν τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ενός πλημμυρικού γεγονότος, ενώ οι τιμές τους υπολογίζονται μέσω υδραυλικών προσομοιώσεων. Η σημαντικότερη παράμετρος θεωρείται το βάθος νερού, όμως η πλημμυρική ζημιά προκαλείται και από άλλους διάφορους παράγοντες. Μερικοί από αυτούς είναι η ταχύτητα ροής, το γινόμενο βάθους και ταχύτητας, το γινόμενο βάθους και ταχύτητας υψωμένης στο τετράγωνο, η πλημμυρική έκταση, η διάρκεια πλημμύρας, η συχνότητα πλημμύρας, καθώς και η παρουσία φερτών υλικών. Όλες αυτές οι παράμετροι είναι σημαντικές καθότι επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις πλημμυρικές ζημιές. Παρόλα αυτά, οι περισσότερες επιστημονικές έρευνες επιλέγουν το βάθος νερού ως παράμετρο αποτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου.

2.4.2 Παράμετροι

Βάθος νερού (water depth)

Το βάθος νερού αποτελεί την πιο σημαντική παράμετρο επίπτωσης και χρησιμοποιείται ευρέως για τον υπολογισμό των ζημιών που προκαλούνται από πλημμύρα σε αστικό περιβάλλον (Middelmann-Fernandes 2010). Υπολογίζεται μέσω ενός υδραυλικού/υδροδυναμικού μοντέλου και ορίζεται ως η υψομετρική διαφορά μεταξύ της παρατηρημένης στάθμης πλημμύρας και του φυσικού εδάφους. Σύμφωνα με τους Merz et al., (2010) όσο πιο μεγάλο είναι το βάθος πλημμύρας, τόσο πιο ισχυρή είναι η δύναμη της άνωσης που δέχεται το κτίριο, οπότε τόσο μεγαλύτερη είναι η ζημιά που προκαλείται στο κτίριο και στα περιεχόμενα του. Επιπλέον, το ύψος της πλημμύρας αποτελεί τη δεύτερη πιο σημαντική παράμετρο πλημμυρικού κινδύνου για τις αγροτικές χρήσεις γης (Brémond et al. 2013) μετά από την παράμετρο που σχετίζεται με την εποχή εμφάνισης μιας πλημμύρας.

Ταχύτητα ροής (velocity flow)

Η ταχύτητα ροής αποτελεί επίσης μια σημαντική παράμετρο επίπτωσης. Παρόλα αυτά, συνήθως παραλείπεται από επιστημονικές εργασίες. Αυτό οφείλεται στα ελλιπή δεδομένα και στο γεγονός ότι είναι δύσκολο να βρεθεί η πληροφορία που απαιτείται για την ποσοτικοποίηση της ζημιάς που προκαλεί η παράμετρος αυτή. Οι ερευνητές δεν έχουν αρκετή εμπειρία στο να εκτιμήσουν το μέγεθος της πλημμυρικής ζημιάς που οφείλεται στην ταχύτητα (Thieken et al. 2005), επομένως σε αρκετές περιπτώσεις η περιγραφή της ταχύτητας περιορίζεται σε περιγραφικές κατηγορίες, όπως για παράδειγμα μικρή, μεσαία ή μεγάλη ταχύτητα (Brémond et al. 2013). Σε αστικό περιβάλλον, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του κύματος διάδοσης της πλημμύρας, τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα ζημιάς στην υποδομή ενός κτιρίου (Soetanto and Proverbs, 2004). Η ταχύτητα της ροής προκαλεί σημαντικές ζημιές σε συγκοινωνιακές υποδομές, όπως για παράδειγμα σε δρόμους, ενώ σε αγροτικές περιοχές προκαλεί ζημιές σε μια καλλιέργεια, αφού μπορεί να υποβαθμίσει σημαντικά το έδαφος ή και να προκαλέσει διάβρωση. Τέλος, οι υψηλές ταχύτητες περιορίζουν το διαθέσιμο χρόνο για τη λήψη έκτακτων μέτρων και το χρόνο εκκένωσης (Kreibich et al. 2009)

Γινόμενο βάθους νερού και ταχύτητας ροής ($d \times v$)

Στη βιβλιογραφία εξετάζονται διάφορες συναρτήσεις των μεγεθών βάθους νερού και ταχύτητας ροής με εμπειρικά στοιχεία ζημιάς για τη διερεύνηση του βαθμού συσχέτισης μεταξύ τους. Η επίδραση της ταχύτητας ροής δεν είναι ανεξάρτητη από το βάθος και έτσι μόνη της δεν δείχνει καμία σημαντική συσχέτιση με το βαθμό ζημιάς (Kreibich et al, 2009). Το γινόμενο βάθους και ταχύτητας αναφέρεται και ως 'ένταση' (intensity) από τους Kreibich et al και συμβολίζεται ως $d \times v$. Επίσης, θεωρείται μια κρίσιμη μεταβλητή, αφού έχει αποδειχθεί ότι οδηγεί σε βέλτιστα αποτελέσματα εκτίμησης της άμεσης ζημιάς. Σύμφωνα με τους Schwarz και Maiwald (2008) η σημασία της ταχύτητας ροής σε συνδυασμό με το βάθος νερού πρέπει να διερευνηθεί με σκοπό την καθιέρωση μοντέλων πρόγνωσης της ζημιάς, ειδικά όταν μια ξαφνική αλλαγή στην ταχύτητα ροής είναι αναμενόμενη λόγω υδραυλικών και τοπογραφικών συνθηκών. Ο υπολογισμός της συγκεκριμένης παραμέτρου υλοποιείται με βάση τις μέγιστες τιμές του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής που προκύπτουν από την προσομοίωση πλημμύρας.

Γινόμενο βάθους και ταχύτητας υψωμένη στο τετράγωνο ($d \times v^2$)

Η εκτίμηση του κινδύνου που διατρέχουν οι άνθρωποι από μια πλημμύρα έχει υπάρξει αντικείμενο πολλών ερευνών. Γενικά έχουν αναφερθεί δύο μηχανισμοί

αστοχίας αναφορικά με τη ισορροπία του ανθρώπου στα νερά πλημμύρας. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι η ολίσθηση και η ανατροπή. Επιπλέον, αναγνωρίζονται δύο προσεγγίσεις για την εκτίμηση της σταθερότητας του ανθρώπου. Η πρώτη βασίζεται σε εμπειρικά κριτήρια, ενώ η δεύτερη βασίζεται σε μια μηχανική προσέγγιση και υποστηρίζεται από πειράματα. Η κύρια διαφορά μεταξύ της εμπειρικής και της μηχανικής προσέγγισης είναι ότι στη πρώτη η δύναμη ανατροπής είναι ανάλογη του γινόμενου βάθους και ταχύτητας ($d \times v$), ενώ στη δεύτερη η δύναμη ανατροπής είναι ανάλογη του γινόμενου βάθους και ταχύτητας υψωμένη στο τετράγωνο ($d \times v^2$). Επομένως, τα κριτήρια της μηχανικής προσέγγισης είναι περισσότερο επηρεασμένα από υψηλότερες ταχύτητες και ροπές. Έτσι, η μέθοδος αυτή είναι πιο πιθανό να προσαρμοστεί στις απότομες αλλαγές στο καθεστώς της ροή. Συνεπώς, οδηγεί στην πιο ακριβή εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου, γεγονός που είναι αρκετά σημαντικό στις περιπτώσεις αιφνιδίων πλημμυρών λόγω των υψηλών ταχυτήτων που αναπτύσσονται (Knočka et al, 2018).

Έκταση πλημμύρας (flood extent)

Ως έκταση πλημμύρας ορίζεται η περιοχή η οποία έχει πληγεί από ένα πλημμυρικό γεγονός, ή βρίσκεται σε κίνδυνο να πληγεί από μια πλημμύρα λόγω μίας ή περισσότερων πηγών για μια συγκεκριμένη πιθανότητα (Scottish Government, 2016). Η πλημμυρική έκταση υπολογίζεται μέσω ενός υδραυλικού/ υδροδυναμικού μοντέλου και με την χρησιμοποίηση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της εξεταζόμενης περιοχής. Έτσι, βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, η πλημμυρική έκταση απεικονίζεται σε χάρτες, με σκοπό την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου και των άμεσων ζημιών.

Διάρκεια πλημμύρας (flood duration)

Η παράμετρος διάρκειας της πλημμύρας αποτελεί σημαντική παράμετρο κυρίως για τον αγροτικό τομέα. Μια εκτεταμένη σε διάρκεια πλημμύρα οδηγεί στην απώλεια της δομής του εδάφους επιφέροντας αρνητικές επιπτώσεις στις αγροτικές δραστηριότητες. Επιπλέον, σε ότι αφορά τον αγροτικό τομέα θα πρέπει να διευκρινίζεται αν η διάρκεια της πλημμύρας αναφέρεται μόνο στον αριθμό των ημερών της πλημμύρας ή αν περιλαμβάνει και τον χρόνο που χρειάζεται για να στεγνώσει το έδαφος. Γενικά, το πιο συνηθισμένο είναι η διάρκεια πλημμύρας να αναφέρεται μόνο στο χρόνο παραμονής του νερού στην αγροτική έκταση (Brémond et al, 2013). Σε αστικό περιβάλλον, όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια της πλημμύρας, τόσο μεγαλύτερος είναι ο κορεσμός σε νερό του κτιρίου και των περιεχόμενων του, με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερη προσπάθεια και χρόνος για την αφαίρεση/απομάκρυνση των υδάτων (Merz et al, 2010).

Συχνότητα πλημμύρας (flood frequency)

Η συχνότητα της πλημμύρας μπορεί να έχει αθροιστικές επιπτώσεις, αυξάνοντας την πιθανότητα ζημιάς. Από την άλλη πλευρά, η ετοιμότητα αυξάνεται σημαντικά, οδηγώντας σε λιγότερες ζημιές (Merz et al, 2010). Σε αγροτικό περιβάλλον η αυξανόμενη συχνότητα της πλημμύρας μπορεί να επηρεάσει τη χρήση της αγροτικής γης. Ειδικότερα, μετά από μια πλημμύρα είναι πιθανό να εγκαταλειφθούν αγροτικές εκτάσεις αφού δεν είναι πλέον καλλιεργήσιμες και να προκύψουν περιστασιακές ή μόνιμες απώλειες στην αγροτική παραγωγή (Brémond et al, 2013).

Ρύπανση των υδάτων (contamination)

Η ρύπανση των υδάτων της πλημμύρας (floodwater) είναι μια παράμετρος επίπτωσης η οποία προκαλεί ζημιές και επηρεάζει το κόστος καθαρισμού μετά από ένα γεγονός πλημμύρας. Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα των ρυπαντών, τόσο μεγαλύτερη είναι η ζημία, καθώς και το κόστος αποκατάστασής της (Merz et al, 2010). Αναφορικά με τον αγροτικό τομέα, η λάσπη που μεταφέρεται μέσω του νερού εγκαθίσταται στις καλλιέργειες, επηρεάζοντας τις σοδειές. Επίσης, η αλατότητα έχει επιδράσεις στις καλλιέργειες και στο χώμα, προκαλώντας μείωση της σοδειάς εξαιτίας της τοξικότητας του αλατιού για το χώμα. (Brémond et al, 2013).

Παρουσία φερτών υλικών (sediment)

Σε αστικό περιβάλλον, τα φερτά υλικά που περιέχονται στα ύδατα της πλημμύρας, ανάλογα με την ποσότητα, το μέγεθος και το βάρος τους, αυξάνουν τις κινητικές δυνάμεις που ασκούνται στην υποδομή των κτιρίων με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ζημία που προκαλείται στο κτίριο καθώς επίσης και το κόστος καθαρισμού και αποκατάστασής του (Merz et al. 2010). Σε αγροτικό περιβάλλον, η παρουσία φερτών υλικών ευθύνεται για τη μείωση της απόδοσης του εδάφους και τη μείωση της σοδειάς, ενώ παράλληλα απαιτούνται σημαντικές εργασίες για την απομάκρυνσή τους από το χωράφι. Επίσης, τα φερτά υλικά και κυρίως η λάσπη που μεταφέρεται μέσα από μια πλημμύρα είναι πιθανό να περιέχει ρύπους, οι οποίοι αυξάνουν το κόστος καθαρισμού και καθιστούν μη εμπορεύσιμα τα ρυπασμένα προϊόντα (Förster et al. 2008).

2.5 Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών και υποσυστήματα

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.), ευρύτερα γνωστά ως GIS (Geographical Information Systems) είναι λογισμικά που αξιοποιούν τις δυνατότητες των υπολογιστών για αποθήκευση, ανάλυση, διαχείριση και παρουσίαση δεδομένων που συνδέονται άμεσα ή έμμεσα με τη γεωγραφική πληροφορία. Θα πρέπει να θεωρηθούν κάτι παραπάνω από μέσα κωδικοποίησης, αποθήκευσης και ανάκτησης δεδομένων σχετικών με τις ιδιότητες της γήινης επιφάνειας, τα οποία ο χρήστης έχει δυνατότητα να τα μετατρέπει, να τα διαχειρίζεται και να τα απεικονίζει τόσο με μορφή διαγραμμάτων, όσο και με τη μορφή χαρτών.

Αποτελούν απαραίτητο εργαλείο όλων των φυσικών επιστημών που σχετίζονται με τη Γεωπληροφορική και την προσομοίωση πλημμυρών δεδομένου του γεωγραφικού και χωρικού της χαρακτήρα. Η διαχείριση κινδύνου και η εκτίμηση ρίσκου δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την οργάνωση και αξιοποίηση της πληροφορίας μέσω Σ.Γ.Π. Για παράδειγμα, μέσω των Σ.Γ.Π είναι δυνατή η εφαρμογή ενός μοντέλου πλημμυρικού κινδύνου, τροποποιώντας συνεχώς τις παραμέτρους εισόδου, με σκοπό να εντοπιστεί το κατώφλι της κάθε μιας από αυτές. Η ενσωμάτωση των Σ.Γ.Π. στις μελέτες του υδραυλικού μηχανικού είναι απαραίτητη για την κατάρτιση ολοκληρωμένων μελετών και χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας (Εβελπίδου και Αντωνίου, 2015).

Το ArcGIS αποτελεί μια ολοκληρωμένη συλλογή από προϊόντα λογισμικού για Γ.Σ.Π. Απαρτίζεται από εξειδικευμένα υποσυστήματα με αντικείμενο την επισκόπηση, επεξεργασία, ανάλυση και απόδοση χωρικών δεδομένων και συμπληρώνεται από εξειδικευμένες επεκτάσεις (extensions). Οι εφαρμογές αυτές είναι το ArcCatalog, ArcToolbox, ArcMap από τις οποίες δημιουργούνται χάρτες, καταχωρείται η γεωχωρική πληροφορία σε οργανωμένες βάσεις δεδομένων, υλοποιείται η χωρική ανάλυση (spatial analysis) και δημιουργούνται θεματικοί χάρτες αποτελεσμάτων.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το ArcMap το οποίο είναι το κύριο υποσύστημα του ArcGIS. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιείται για όλες τις χαρτογραφικές διαδικασίες αλλά και τις διαδικασίες διόρθωσης (editing) των δεδομένων. Σε μία χαρτογραφική σύνθεση η γεωχωρική πληροφορία αποδίδεται σαν μια συλλογή θεματικών επιπέδων και συμπληρώνεται από άλλα στοιχεία (γραφήματα, εικόνες, υπόμνημα συμβόλων, γραφική και ονομαστική κλίμακα, κάναβοι, τίτλος και λοιπές πληροφορίες περιθωρίου). Υπάρχουν δύο καταστάσεις λειτουργίας του ArcMap: η data frame view και η layout view. Data frame είναι η χαρτογραφούμενη περιοχή όπου απεικονίζεται η γεωγραφική πληροφορία σαν σειρά από θεματικά επίπεδα (layers), ενώ layout view είναι η επισκόπηση του φύλλου του χάρτη όπου διατάσσονται τα στοιχεία της χαρτογραφικής σύνθεσης όπως θα παρουσιαστούν στο τελικό μέσο απόδοσης (Τσούλος κ.ά., 2015).

3 Περιοχή μελέτης

3.1 Γεωγραφικά-Μορφολογικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής

Στην παρούσα εργασία ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε ένα τμήμα του ποταμού Αράχθου που διέρχεται γύρω από την πόλη της Άρτας. Η περιοχή ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Ηπείρου, το οποίο έχει έκταση 9980 km². Η πόλη της Άρτας είναι η πρωτεύουσα του νομού Άρτας. Ο νομός Άρτας βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα της Ελλάδας, καταλαμβάνοντας το N/A τμήμα της Ηπείρου και ανήκει διοικητικά στην Περιφέρεια Ηπείρου. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερο φυσικό περιβάλλον με πολλά δάση και την τεχνητή λίμνη του Πουρναρίου. Το νότιο όριο της περιοχής οριοθετείται από τον Αμβρακικό κόλπο όπου εκτείνεται η παραλιακή ζώνη Μενιδίου-Κορωνησίας. Η κατανομή του ανάγλυφου του εδάφους του νομού Άρτας έχει ως εξής : το 18,6% είναι πεδινό, το 11% ημιορεινό και το 70,4% ορεινό.

3.2 Υδρολογικά στοιχεία Υδατικού Διαμερίσματος Ηπείρου (GR05)

Ο υδροκρίτης του διαμερίσματος ορίζεται ανατολικά από τον όρμο Κοπραίνης του Αμβρακικού Κόλπου και συνεχίζει στους ορεινούς όγκους Βάλτου, Αθαμανικών, οροσειράς βόρειας Πίνδου, Βόιου, και Γράμμου. Στη συνέχεια τα όρια του διαμερίσματος ορίζονται από τα ελληνοαλβανικά σύνορα. Η γεωμορφολογία του Υδατικού Διαμερίσματος χαρακτηρίζεται από την παρουσία της οροσειράς της Πίνδου στην ανατολική πλευρά, η οποία περιλαμβάνει ορισμένους από τους μεγαλύτερους και υψηλότερους ορεινούς όγκους της χώρας. Τα υψόμετρα των κορυφών φθάνουν πάνω από τα 2600-2700 m. Η παρουσία των ορεινών όγκων δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες ορογραφικής βροχόπτωσης, οι οποίες σε συνδυασμό με την επικρατούσα κύρια διεύθυνση των ανέμων κατά το χειμώνα (από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά) έχουν ως αποτέλεσμα την παρουσία στο Υδατικό Διαμέρισμα των υψηλότερων ποσών κατακρήμνισης στη χώρα κατά μέσο όρο. Η μέση ετήσια κατακρήμνιση σε όλη την έκταση του Υδατικού Διαμερίσματος για την περίοδο 1980-2001 υπερβαίνει τα 1300 mm. Όσο προχωρούμε προς τα δυτικά, η μορφολογία γίνεται σταδιακά ηπιότερη και χαρακτηριστική της παράκτιας μορφολογίας, με εκτεταμένες κοιλάδες που ανοίγονται προς τη θάλασσα και πεδινές, επίπεδες εκτάσεις στα νότια (ΥΠΕΝ, 2019).

3.3 Πόλη Άρτας

Η πόλη της Άρτας είναι η δεύτερη μεγαλύτερη πόλη της Ηπείρου μετά τα Ιωάννινα με το δήμο να έχει 41.633 πληθυσμό (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2021). Είναι χτισμένη στη διαχωριστική γραμμή ανάμεσα στην ορεινή κυρίως Ήπειρο και στις πεδινές εκτάσεις κατά μήκος των ακτών του Αμβρακικού κόλπου. Η ιδιαίτερη τοπογραφία της πόλης ενισχύεται εξαιτίας του περιορισμού της από φυσικά εμπόδια, μιας και είναι δομημένη στη βορειοδυτική άκρη της ορεινής μάζας του λόφου Περάνθης και περιβάλλεται από βόρεια, δυτικά και ανατολικά από τον ποταμό Άραχθο. Ο ποταμός αποτελεί το κυρίαρχο υδάτινο στοιχείο της πόλης, ενώ παράλληλα λειτουργεί σαν φυσικό όριο μεταξύ της πόλης και της πεδινής περιοχής.

3.4 Υδρογραφικό δίκτυο

3.4.1 Ποταμός Άραχθος

Ο Άραχθος είναι ο μεγαλύτερος ποταμός της Ηπείρου. Πηγάζει από την οροσειρά της Πίνδου, ρέει με γενική κατεύθυνση Β-Ν και εκβάλλει στον Αμβρακικό κόλπο. Έχει μήκος 110 km και κινείται σε περιοχές με διαφορετικά μορφολογικά χαρακτηριστικά. Σαν αποτέλεσμα, σε όλο το μήκος του διακρίνονται τρία τμήματα το άνω, το μεσαίο και το κατώτερο πεδινό. Στο άνω τμήμα του ο Άραχθος κινείται σε υψόμετρα από 2393 m έως 1000 m, οι κλίσεις των πρανών στο τμήμα αυτό είναι απότομες και η κοίτη του ποταμού στενή. Στο μεσαίο τμήμα του ο ποταμός, από την συμβολή Καλαρρύτεκου έως και την Άρτα διέρχεται από περιοχές με χαμηλότερο υψόμετρο, που κυμαίνεται από 1000 μέτρα έως 100 μέτρα. Στο τελευταίο τμήμα του από την Άρτα έως την εκβολή του στον Αμβρακικό κόλπο διέρχεται από την πεδιάδα της Άρτας. Η εδαφολογική μορφή της κοίτης του Αράχθου αποτελείται από σαθρά αλλά σκληρά και στερεά υλικά και στο μεγαλύτερο μέρος του καλύπτεται από φλύσχη. Επιπλέον, ο ποταμός Άραχθος έχει χαρακτηριστεί ως ο πιο ορμητικός και χειμαρρώδης ποταμός της χώρας και η μέση ετήσια παροχή του κυμαίνεται στα 69,8 m³/s (Λάμπρος Γ., 2018).

3.4.2 Λεκάνη απορροής Αράχθου

Η λεκάνη απορροής του Αράχθου μέχρι τις εκβολές του στον Αμβρακικό κόλπο έχει έκταση 2141 km², ενώ η μέση ετήσια απορροή της είναι περίπου 2080 hm³ (66 m³/s). Το μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης καλύπτεται από αδιαπέρατους σχηματισμούς του φλύσχη οι οποίοι διαβρώνονται εύκολα. Το καθεστώς απορροής χαρακτηρίζεται από μεγάλες διακυμάνσεις της παροχής του με χαμηλές σχετικά θερινές παροχές και υψηλές πλημμυρικές αιχμές. Το Δέλτα του Αράχθου αποτελεί ένα από τα καλύτερα διατηρημένα οικοσυστήματα, τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο ενώ διατηρεί όλα τα χαρακτηριστικά ενός τυπικού μεσογειακού δέλτα. Η λεκάνη του ποταμού Αράχθου, λόγω της γεωμορφολογίας της αλλά και του υδατικού δυναμικού της προσφέρεται ιδιαίτερα για ανάπτυξη στον τομέα παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα εξυπηρετεί και άλλες υδατικές ανάγκες όπως την άρδευση των γύρω περιοχών.

Ανάντη της πόλης της Άρτας είναι κατασκευασμένα δύο υδροηλεκτρικά φράγματα της ΔΕΗ στις θέσεις Πουρνάρι Ι και Πουρνάρι ΙΙ, τα οποία συνεισφέρουν στη ρύθμιση των νερών του ποταμού καθώς και στην άρδευση περίπου 45.000 στρεμμάτων στην πεδιάδα της Άρτας. Αποτέλεσμα της κατασκευής των φραγμάτων αποτελούν οι τεχνητές λίμνες Πουρνάρι και Πουρνάρι ΙΙ. οι οποίες έχουν έκταση 20,6 km² και 0,65 km² αντίστοιχα (Λάμπρος Γ., 2018).

3.5 Φράγματα της περιοχής

Πουρνάρι Ι

Το υδροηλεκτρικό έργο (ΥΗΕ) Πουρνάρι Ι απέχει 4km από την πόλη της Άρτας. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 1981 και ολοκληρώθηκε το 1997. Ο ταμιευτήρας του φράγματος έχει επιφάνεια κατάκλυσης 22 km² ενώ η χωρητικότητα του υπολογίζεται στα 730 hm³. Το συγκεκριμένο φράγμα είναι χωμάτινο με κεντρικό αργιλικό πυρήνα ύψους 102 m με μήκος στέψης 580 m και όγκο φράγματος 9 hm³. Ο εκχειλιστής του φράγματος, ο οποίος έχει μέγιστη παροχетеυτικότητα 6100 m³/sec, συνοδεύεται από

3 μεταλλικά τοξωτά θυροφράγματα διαστάσεων 12,50 x 12,50 m. Ο σταθμός παραγωγής διαθέτει τέσσερις μονάδες, ενώ η εγκατεστημένη ισχύς του ανέρχεται στα 300 MW και η μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια είναι 504 GWh (Πηγή: Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων, 2013).

Το φράγμα εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εξυπηρετεί και την ανάσχεση των πλημμυρών. Επίσης, το νερό μετά την παραγωγή χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών του κάμπου, καθώς και για την τροφοδότηση του κατάντη ταμιευτήρα (ΥΗΕ Πουρνάρι II).

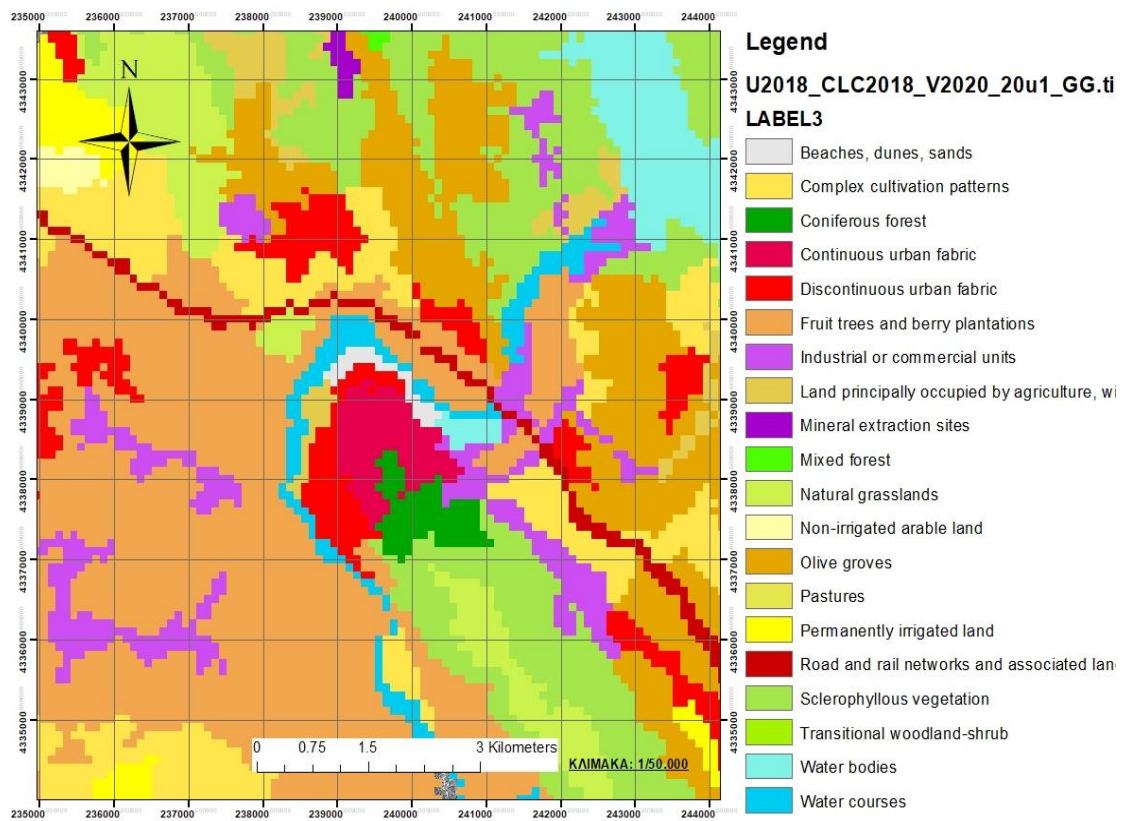
Πουρνάρι II

Το υδροηλεκτρικό έργο Πουρνάρι II βρίσκεται αμέσως κατάντη του ΥΗΕ Πουρνάρι I επί του ποταμού Αράχθου και τέθηκε σε λειτουργία το 2000. Ο ταμιευτήρας του φράγματος έχει επιφάνεια κατάκλυσης 0,7 km². Λειτουργεί ως αναρρυθμιστικός ταμιευτήρας αφού εξασφαλίζει τη συνεχή ροή του νερού στην κοίτη και τις εκβολές του ποταμού Αράχθου, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Με αυτό τον τρόπο συμβάλλει στην ορθολογική και αποτελεσματική αξιοποίηση των αρδευτικών δικτύων της περιοχής. Περιλαμβάνει φράγμα βαρύτητας από σκυρόδεμα ελεύθερης εκροής από τη στέγη, τύπου OGEE. Το φράγμα είναι χωμάτινο με κεντρικό πυρήνα ύψους 15 m, μήκος στέγης 2000 m και όγκο φράγματος 700.000 m³. Ο υπερχειλιστής είναι κατασκευασμένος από σκυρόδεμα και είναι τοποθετημένος εγκάρσια στη κοίτη του ποταμού. Έχει μήκος 150 m και μέγιστη παροχετευτικότητα ίση με 5.890 m³/sec. Ο σταθμός παραγωγής διαθέτει τρεις μονάδες. Η εγκατεστημένη ισχύς του ανέρχεται στα 33 MW και η μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια στα 45 GWh. (Πηγή: Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων, 2013).

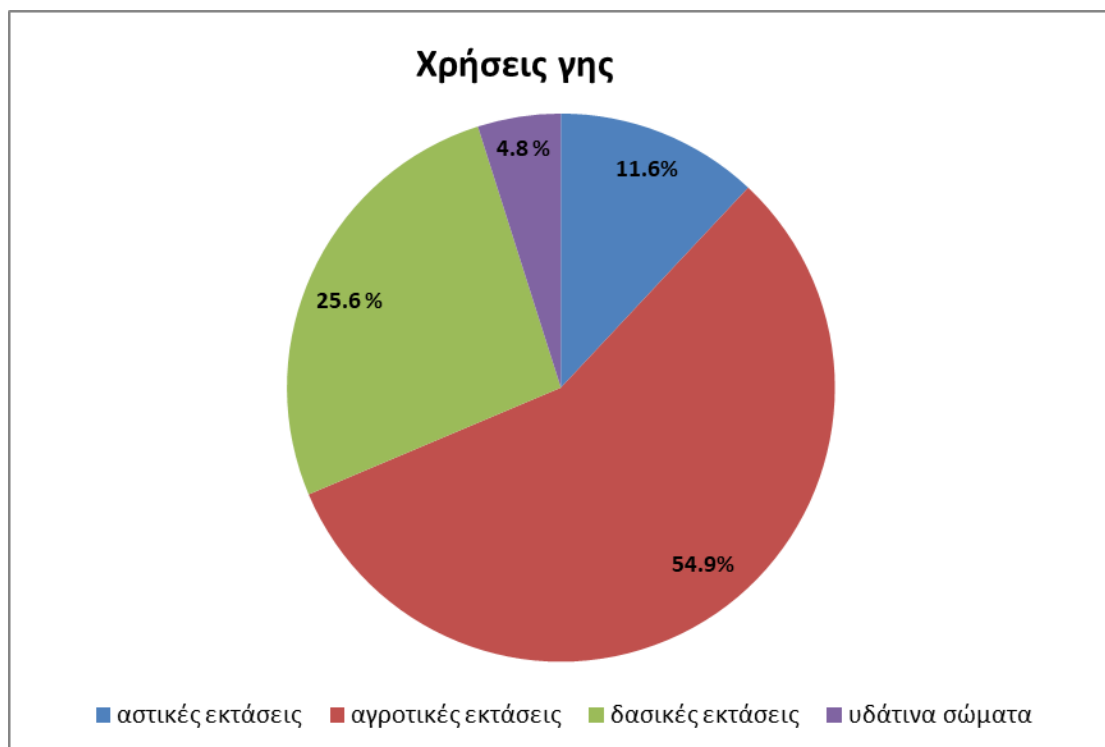
3.6 Χρήσεις γης

Με βάση τα στοιχεία του προγράμματος Corine Land Cover (2018), οι χρήσεις γης που παρατηρούνται στην περιοχή της Άρτας παρουσιάζονται με τη μορφή χάρτη στο Σχήμα 3.1.

Η εξεταζόμενη περιοχή μπορεί να χαρακτηριστεί ως αγροτική, καθώς οι αγροτικές χρήσεις γης καταλαμβάνουν πάνω από το μισό της συνολικής έκτασης (54,8 %). Στον αντίποδα, μικρή είναι η κάλυψη από αστικές δραστηριότητες η οποία είναι 11,6 %. Οι υπόλοιπες εκτάσεις έχουν δασικό χαρακτήρα σε ποσοστό κάλυψης 25,6%. Ένα μικρό ποσοστό αντιπροσωπεύει υδάτινα σώματα της περιοχής (4,8 %). Η ποσοστιαία κατανομή κάλυψης γης σε μορφή διαγράμματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.1: Χάρτης χρήσεων γης (Πηγή: Corine Land Cover, 2018)



Σχήμα 3.2: Ποσοστιαία κατανομή χρήσεων γης

Τα παραπάνω στοιχεία προέκυψαν με τη δημιουργία ενός πίνακα που περιέχει την έκταση για κάθε κατηγορία χρήσης γης της περιοχής που εξετάζεται. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του προγράμματος ArcMap και θα

παρουσιαστεί πιο αναλυτικά στην ενότητα 7. Στον πίνακα 3.1 φαίνεται η έκταση και η ποσοστιαία κατανομή των χρήσεων γης.

Πίνακας 3.1: Έκταση και ποσοστιαία κατανομή χρήσεων γης

Κατηγορίες χρήσης γης		Έκταση (km ²)	%	
1	Αστικές εκτάσεις	Συνεχής αστικός ιστός	15.65	11.6
2		Ασυνεχής αστικός ιστός		
3		Βιομηχανικές/εμπορικές ζώνες		
4		Οδικά/σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη		
5		Χώροι εξόρυξης ορυκτών		
6	Αγροτικές εκτάσεις	Μη αρδεύσιμη-αρόσιμη γη	74.01	54.9
7		Μόνιμα αρδευόμενη γη		
8		Οπωροφόρα δέντρα		
9		Ελαιώνες		
10		Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας		
11		Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης		
12	Δασικές εκτάσεις	Δάση πλατύφυλλων	36.35	25.6
13		Δάση κωνοφόρων		
14		Μικτά δάση		
15		Φυσικοί βοσκότοποι		
16		Σκληροφυλλική βλάστηση		
17		Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις		
18		Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές		
19		Υδάτινα σώματα		
20	Συλλογές υδάτων			

3.7 Ιστορικό πλημμυρών στην περιοχή

Πλημμύρα 2005

Τον Δεκέμβριο 2005 (28-31/12/2005) σημειώθηκε ένα ισχυρό πλημμυρικό γεγονός στον ποταμό Αραχθο το οποίο είχε αρκετή ένταση και διάρκεια. Λόγω αυτού προέκυψαν δύο παροχές αιχμής. Πιο συγκεκριμένα στις 28/12/2005 η παροχή αιχμής

έφτασε τα 1700 m³/s. Έτσι, όταν η παροχή βρισκόταν στα 1600 m³/s οι υπεύθυνοι της Γενικής Διεύθυνσης Παραγωγής της ΔΕΗ άνοιξαν τα θυροφράγματα του εκχειλιστή. Τη στιγμή αυτή η στάθμη ήταν 117,5 m, ενώ το ανώτερο όριο της στάθμης του νερού είναι τα 120 m. Σαν αποτέλεσμα, δημιουργήθηκε επιπρόσθετος αντιπλημμυρικός όγκος στον ταμιευτήρα που συνέβαλλε στην ανάσχεση της πλημμύρας, μειώνοντας όμως παράλληλα τις τιμές της παραγόμενης ενέργειας. Τα θυροφράγματα του εκχειλιστή παρέμειναν ανοιχτά για 60 h. Έτσι όταν στις 30/12/2005 η συνολική παροχή εκροής έφτασε τα 1600 m³/s με ύψος στάθμης ταμιευτήρα τα 117,76 m, η πλημμύρα αντιμετωπίστηκε με επιτυχία χωρίς να δημιουργηθούν προβλήματα στην περιοχή κατάντη των φραγμάτων. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια που τα θυροφράγματα παρέμειναν ανοιχτά, η συνολική παροχή εκροής ήταν 800 m³/s, αφού ο Υδροηλεκτρικός Σταθμός λειτουργούσε συνεχώς και κατανάλωνε 500 m³/s., ενώ η εκροή των θυροφραγμάτων του εκχειλιστή ήταν 300 m³/s. (Μαμάσης, 2014).

Πλημμύρα 2015

Το 2015 (31/1/2015 έως 1/2/2015) ένα ακόμη σημαντικό πλημμυρικό γεγονός σημειώθηκε στον Άραχθο το οποίο προκάλεσε αρκετές έντονες καταστροφές στην ευρύτερη περιοχή. Οι έντονες βροχοπτώσεις προκάλεσαν την εισροή μεγάλης παροχής στον ταμιευτήρα του Πουρναρίου, η οποία έφτασε μέχρι τα 2080 m³/s. Όταν η στάθμη του ταμιευτήρα έφτασε τα 120 m οι υπεύθυνοι αποφάσισαν το άνοιγμα των θυροφραγμάτων του εκχειλιστή. Η μέγιστη παροχή εκροής, λαμβάνοντας υπόψη την εκροή των στροβίλων (500 m³/s) και την εκροή των θυροφραγμάτων (1200 m³/s), έφτασε τα 1700 m³/s (Πηγή: ΤΕΕ Ηπείρου, 2015).

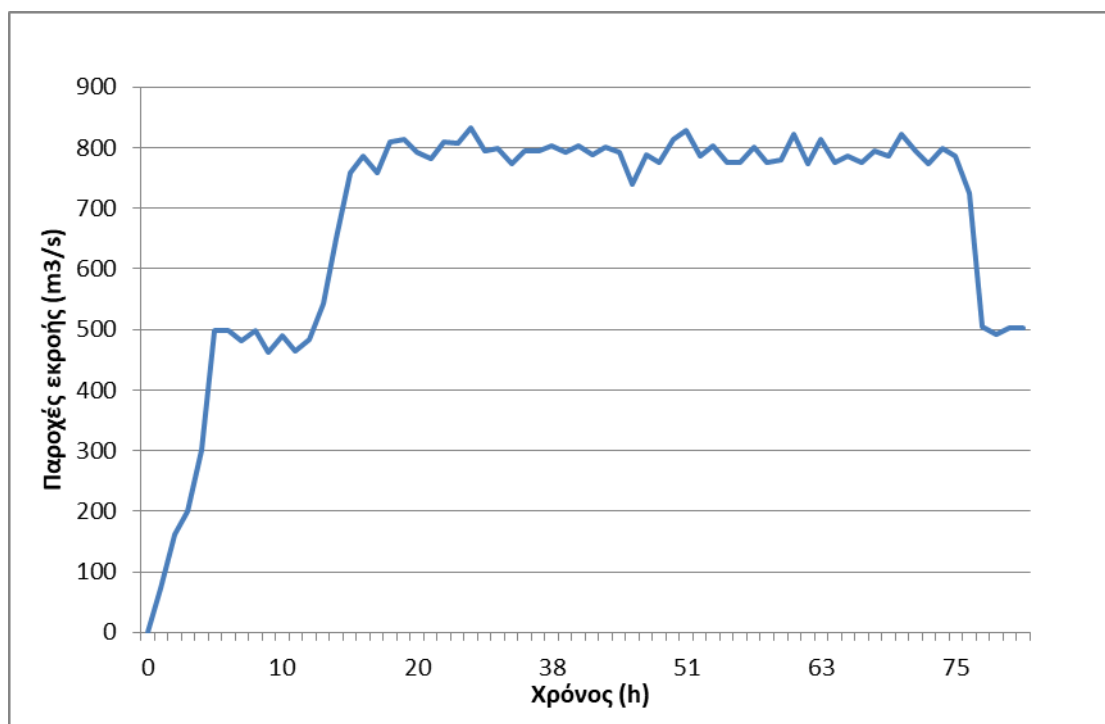
4 Κατάστροση σεναρίων υπολογισμών

4.1 Εισαγωγή

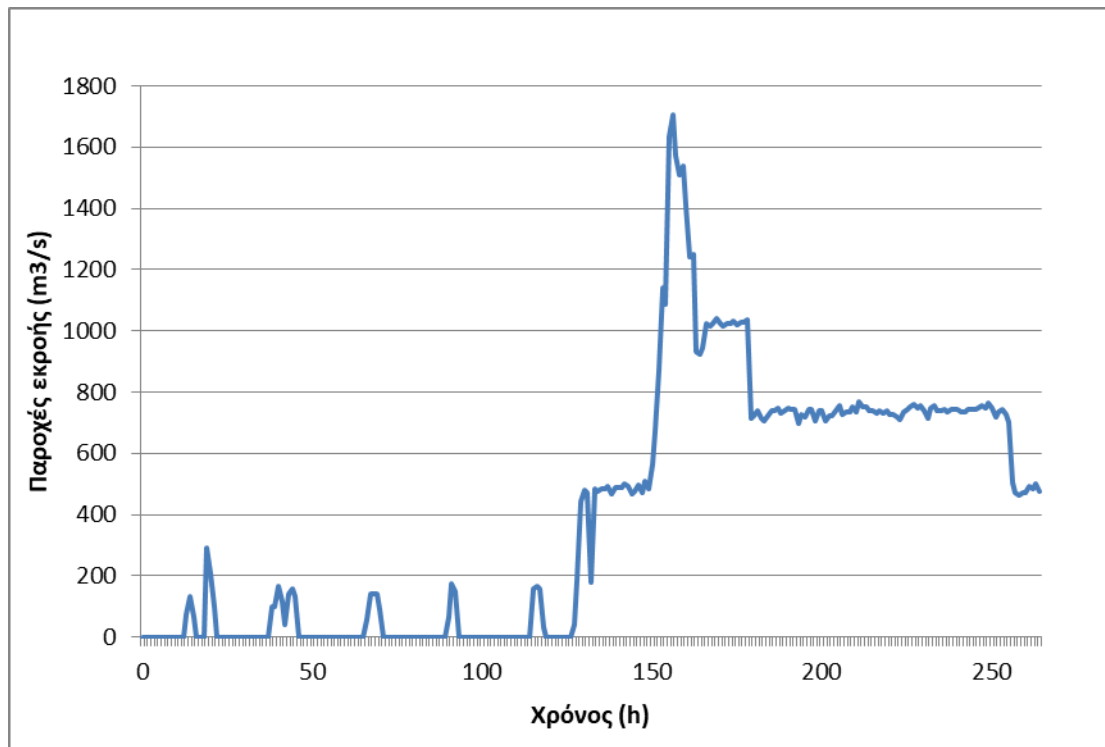
Στην παρούσα εργασία, η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου πραγματοποιήθηκε για πέντε διαφορετικά διαχειριστικά σεναρία πλημμύρας. Για τα πρώτα δύο σεναρία εισήχθησαν στο υδραυλικό μοντέλο τα πλημμυρογραφήματα εκροής των ιστορικών πλημμυρών του 2005 και 2015. Από την άλλη, τα πλημμυρογραφήματα των τριών επιπλέον σεναρίων αντιστοιχούν σε περιόδους επαναφοράς 5-1000 ετών, ενώ παρήχθησαν μετά από επεξεργασία, η οποία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας της Χ. Ντεμίρογλου (2020). Στο κεφάλαιο 4.3 γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε.

4.2 Υδρολογικά δεδομένα πλημμυρών 2005 και 2015

Οι πλημμύρες που συνέβησαν το 2005 και 2015 χαρακτηρίζονται από τα ισχυρότερα πλημμυρικά φαινόμενα στην ιστορία της περιοχής της Άρτας. Στο κεφάλαιο 3 περιγράφηκαν οι χειρισμοί που έγιναν από τους διαχειριστές του φράγματος με σκοπό την ασφαλή διόδευση της πλημμύρας. Τα πλημμυρογραφήματα εκροής των πλημμυρών του 2005 και 2015 απεικονίζονται στα σχήματα 4.1 και 4.2 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.1: Πλημμυρογράφημα πλημμύρας 2005 (Πηγή: Μαμάσης, 2014)

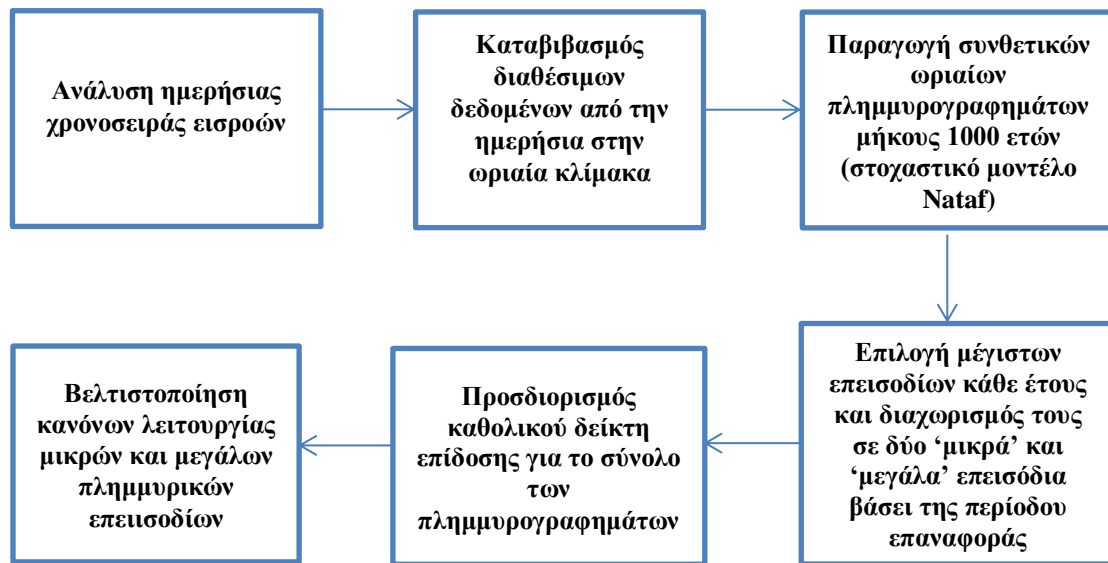


Σχήμα 4.2: Πλημμυρογράφημα πλημμύρας 2015 (Πηγή: ΤΕΕ Ηπείρου, 2015)

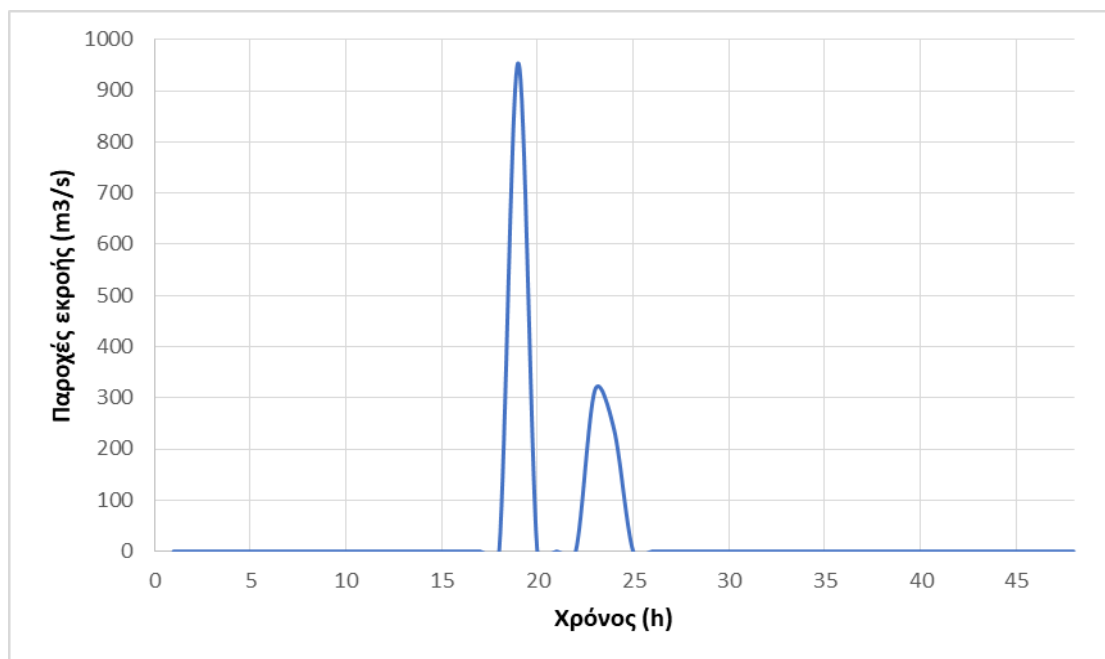
4.3 Επιπλέον διαχειριστικά σενάρια

Η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου απαιτεί ένα αρκετά μεγάλο ιστορικό αρχείο μετρήσεων προκειμένου να μην οδηγεί σε αβεβαιότητες. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί ότι η παραγωγή συνθετικών πλημμυρογραφημάτων με τη χρήση στοχαστικών μοντέλων οδηγεί σε ακριβέστερα αποτελέσματα.

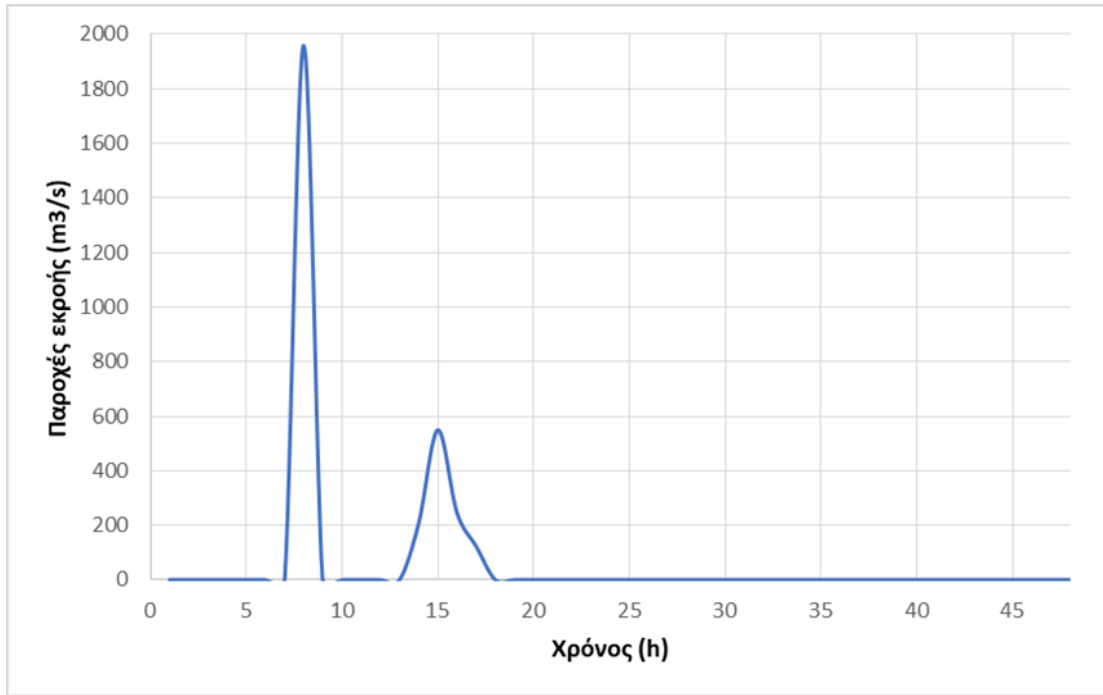
Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν τρία ωριαία συνθετικά πλημμυρογραφήματα, τα οποία παράχθηκαν σύμφωνα με την παρακάτω μεθοδολογία. Αρχικά, δεδομένου ότι η διαθέσιμη χρονοσειρά εισροής βρίσκεται σε ημερήσια κλίμακα, απαιτήθηκε η παραγωγή συνθετικών ωριαίων χρονοσειρών. Αυτό επιτεύχθηκε μέσω του στάσιμου μοντέλου Nataf (Nataf, 1962). Αφού, προσδιορίστηκαν τα στατιστικά μεγέθη των ωριαίων παροχών που απαιτούνται για την εφαρμογή του μοντέλου, παρήχθησαν συνθετικές χρονοσειρές 1000 ετών. Από αυτές, επιλέχθηκαν για κάθε έτος η μέγιστη σειρά μήκους 24 ωρών, ενώ στη συνέχεια οι σειρές που προέκυψαν αντιστοιχηθήκαν σε 1000 ημερήσια πλημμυρικά επεισόδια ωριαίου βήματος. Τα επεισόδια αυτά διακρίθηκαν σε ‘μικρά’ και ‘μεγάλα’ με βάση την περίοδο επαναφοράς τους. Τα ‘μικρά’ πλημμυρικά επεισόδια αντιστοιχούν σε περιόδους επαναφοράς 1-5 ετών (800 επεισόδια), ενώ τα ‘μεγάλα’ σε περιόδους επαναφοράς 5-1000 ετών (200 επεισόδια). Στη συνέχεια, η διάρκεια κάθε πλημμυρικού επεισοδίου τέθηκε ίση με 48 ώρες. Σε επόμενο βήμα της εργασίας, με τη μέθοδο της διόδευσης της πλημμυρικής παροχής σε ταμειωτήρα υπολογίστηκαν οι τιμές δύο κριτηρίων επίδοσης για κάθε ένα από τα παραπάνω επεισόδια. Αυτό είχε στόχο την εύρεση ενός ολικού μέτρου επίδοσης και τη μετέπειτα βελτιστοποίηση των κανόνων λειτουργίας του φράγματος (Χ. Ντεμίρογλου, 2020). Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται συνοπτικά η παραπάνω μεθοδολογία. Τα πλημμυρογραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, παρουσιάζονται στα σχήματα 4.4-4.6.



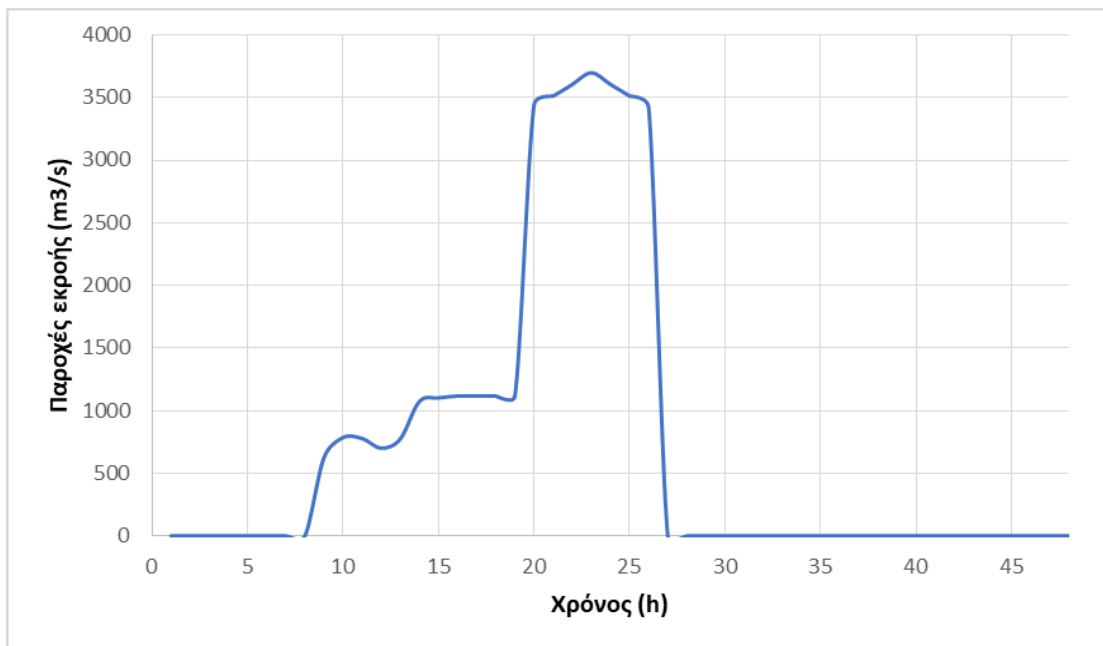
Σχήμα 4.3: Μεθοδολογία παραγωγής συνθετικών πλημμυρογραφημάτων



Σχήμα 4.4: Πλημμυρογράφημα εκροής σεναρίου 1 (Πηγή: Χ. Ντεμίρογλου, 2020)



Σχήμα 4.5: Πλημμυρογράφημα εκροής σεναρίου 2 (Πηγή: Χ. Ντεμίρογλου, 2020)



+Σχήμα 4.6: Πλημμυρογράφημα εκροής σεναρίου 3 (Πηγή: Χ. Ντεμίρογλου, 2020)

5 Υδραυλική προσομοίωση πλημμύρας

5.1 Παρουσίαση υδροδυναμικού μοντέλου HEC-RAS

Τα υδροδυναμικό μοντέλο που επιλέχθηκε για τη μελέτη της πλημμυρικής κατάκλυσης είναι το HEC-RAS στην έκδοση 6.2.

Το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS (<https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>) του U.S. Army Corps of Engineers είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα σε πλημμυρικές μελέτες και χρησιμοποιείται για την υδραυλική/υδροδυναμική ανάλυση ποταμών σε μόνιμες και μη μόνιμες συνθήκες ροής. Αποτελείται από το γραφικό περιβάλλον διεπαφής με το χρήστη (Graphical User Interface GUI), τον πυρήνα υδραυλικών αναλύσεων, ενώ παρέχει δυνατότητες αποθήκευσης και διαχείρισης δεδομένων, καθώς και εργαλεία αναπαράστασης και επεξεργασίας αποτελεσμάτων. Έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει συνθήκες μόνιμης ροής, μη μόνιμης ροής, περιπτώσεις μεταφοράς ιζήματος καθώς επίσης και υπολογισμούς ποιότητας νερού.

Επιπλέον παρέχονται πρόσθετες λειτουργίες οι οποίες ενεργοποιούνται μετά την επίλυση και υπολογισμό του προφίλ επιφανειακών υδάτων. Σε αυτές περιλαμβάνεται και η χαρτογραφική απεικόνιση των υπολογισμένων παραμέτρων της προσομοίωσης, όπως το βάθος του ύδατος, η στάθμη του και η ταχύτητά του, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή εντός του χρονικού παραθύρου προσομοίωσης. Ταυτόχρονα, υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας χάρτη με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των προαναφερθέντων μεγεθών που εμφανίστηκαν σε κάθε σημείο της περιοχής προσομοίωσης και καθ' όλη τη διάρκειά της (U.S. Army Corps of Engineers, 2016).

Το HEC-RAS σχεδιάστηκε ώστε να εκτελεί μονοδιάστατη (1D), διδιάστατη (2D) ή συζευγμένη μονοδιάστατη και διδιάστατη (1D-2D) υδραυλική ανάλυση ποταμών. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται υδραυλική προσομοίωση σε συζευγμένη μονοδιάστατη και διδιάστατη (1D-2D) υδραυλική ανάλυση, η οποία αναλύεται στις παρακάτω ενότητες.

5.1.1 Πλεονεκτήματα συζευγμένης προσομοίωσης 1D-2D

Τα βασικά πλεονεκτήματα της συζευγμένης προσέγγισης αναφέρονται συνοπτικά ως εξής:

- 1) Επιτρέπει την ταχεία υδροδυναμική αναπαράσταση εκτεταμένων διασυνδεδεμένων ποτάμιων συστημάτων, επιλύοντας στο ίδιο μοντέλο ανομοιόμορφης ροής τις 1D εξισώσεις στο κυρίως σύστημα των ποταμών/καναλιών και τις 2D εξισώσεις, οπουδήποτε απαιτείται υψηλότερη υδροδυναμική πιστότητα.
- 2) Ακολουθεί την επίλυση μέσω ενός συζευγμένου αλγόριθμου 1D-2D, επιτρέποντας την άμεση ανατροφοδότηση σε κάθε χρονικό βήμα μεταξύ των στοιχείων ροής 1D και 2D. Για παράδειγμα, θεωρώντας ότι ένα ποτάμι/κάνάλι έχει αναπαρασταθεί 1D με την περιοχή πίσω από ένα ανάχωμα να έχει αναπαρασταθεί σε 2D (συνδεδεμένα υδραυλικά μεταξύ τους με μια Πλευρική Κατασκευή – Lateral Structure, LS). Η ροή πάνω από το ανάχωμα (LS) και/ή μέσω οποιασδήποτε αστοχίας (breaching) του αναχώματος υπολογίζεται με βάση την ενέργεια ροής στα ανάντη στο 1D τμήμα και την στάθμη ενέργειας στην περιοχή διδιάστατης ροής στα κατόντη με την οποία είναι διασυνδεδεμένο. Χρησιμοποιείται η εξίσωση ροής υπερχειλιστή (weir equation) για τον υπολογισμό της ροής πάνω από το ανάχωμα ή/και διαμέσου

του ρήγματος (breach). Σε κάθε χρονικό βήμα υπολογισμών, η εξίσωση χρησιμοποιεί τα 1D και 2D αποτελέσματα υπολογισμού της ροής επιτρέποντας την ακριβή καταγραφή της «βύθισης» (submergence) του αναχώματος, σε κάθε χρονικό βήμα, καθώς η εσωτερική -1D- περιοχή υπερχειλίζει. Επιπλέον, η ροή μπορεί να επιστρέψει πίσω στην κυρίως όχθη (από την περιοχή 2D πίσω στην 1D), μόλις υποχωρήσουν οι στάθμες του ποταμού/καναλιού.

- 3) Επιτρέπει την σταδιακή ανάπτυξη/απομόνωση των επιμέρους μοντέλων. Ο υδραυλικός μηχανικός/υπεύθυνος για την ανάπτυξη των μοντέλων μπορεί να ετοιμάσει ένα ευσταθές και αξιόπιστο 1D μοντέλο το οποίο και έχει τη δυνατότητα να παράγει αποτελέσματα σε ένα φάσμα σεναρίων και παροχών, χωρίς να παρουσιάζει αριθμητικές αστάθειες. Στη συνέχεια μπορεί να αξιολογήσει τα σενάρια στα οποία προκύπτουν υπερχειλίσσεις των ποταμών προς τις εκτάσεις εκτεταμένης κατάκλυσης, και να αναπτύξει το -περισσότερο απαιτητικό- συζευγμένο μοντέλο μόνο για την αναπαράσταση των συγκεκριμένων δυσμενών σεναρίων.
- 4) Επιτρέπει την εκτίμηση του πλημμυρικού όγκου που υπερχειλίζει από το κυρίως ποτάμι προς τις εκτάσεις εκτεταμένης κατάκλυσης, παρέχοντας τη δυνατότητα στον μηχανικό/ μελετητή να κάνει μία συγκριτική αξιολόγηση (ranking) των σεναρίων και προκαταρκτικές αξιολογήσεις των επικίνδυνων περιοχών (που γειτνιάζουν με τα έντονα υπερχειλίζοντα αναχώματα/LS) πριν καν προχωρήσει στην αναλυτική 2D προσομοίωση.
- 5) Απομειώνει δραματικά τους χρόνους εκτέλεσης των υδροδυναμικών υπολογισμών. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως για να υπάρξει υψηλή πιστότητα στις περιοχές όπου υπάρχει ποτάμι σε ένα αμιγώς διάστατο υδροδυναμικό μοντέλο απαιτείται πυκνωση του υπολογιστικού πλέγματος. Για να επιτευχθεί η αναγκαία ευστάθεια του πυκνωμένου υπολογιστικού πλέγματος απαιτούνται συνήθως μικρά υπολογιστικά βήματα (computational steps) τα οποία και οδηγούν σε εκτεταμένους συνολικούς χρόνους εκτέλεσης (της τάξεως αρκετών ωρών). Αντίθετα, τα 1D μοντέλα εκτελούν τους υπολογισμούς εντός των ποταμών με μεγάλη ταχύτητα (σε μερικά λεπτά) και πολύ ικανοποιητική ακρίβεια. Ένα συζευγμένο μοντέλο, λοιπόν, συνδυάζει ταχύτητα εκτέλεσης των υπολογισμών με υψηλής ποιότητας αποτελέσματα στα σημεία όπου αυτά απαιτούνται, επιτρέποντας την εκτέλεση πολλαπλών σεναρίων υπό συνθήκες εύλογου χρονικού και υπολογιστικού προϋπολογισμού.

5.1.2 Παρουσίαση μοντέλων 1D, 2D και 1D-2D

Στόχος της υδροδυναμικής προσομοίωσης είναι η επίλυση των εξισώσεων ανομοιόμορφης ροής στην περιοχή μελέτης με ιδιαίτερη έμφαση να δίδεται στην δυνατότητα αναγνώρισης των μηχανισμών με τους οποίους το νερό μεταφέρεται από τα κυρίως τμήματα των ποταμών εντός των οχθών ή/και των αναχωμάτων (channels) στις ευρύτερες πλημμυρικές κοίτες και εκτάσεις πλημμυρικής κατάκλυσης (floodplains).

Η επίλυση των εξισώσεων ανομοιόμορφης ροής πραγματοποιείται μέσω κατάλληλων αριθμητικών προσομοιώσεων των μερικών διαφορικών εξισώσεων (ΜΔΕ). Ανάλογα με τη μορφή των συγκεκριμένων ΜΔΕ μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τα μοντέλα υδροδυναμικής ανάλυσης σε τρεις ευρύτερες κατηγορίες:

- 1) Τα μονοδιάστατα αριθμητικά μοντέλα (1D), στα οποία επιλύονται οι εξισώσεις ποσότητας κίνησης (momentum equation) και συνέχειας (continuity equation) ως προς μία διεύθυνση, τη διεύθυνση ροής του ποταμιού/καναλιού.
- 2) Τα διδιάστατα αριθμητικά μοντέλα (2D), στα οποία οι εξισώσεις επιλύονται σε δύο διευθύνσεις, παραλείποντας τους όρους στην κατακόρυφη διεύθυνση, αναπαριστώντας με επάρκεια την ροή σε περιοχές εκτεταμένης πλημμυρικής κατάκλυσης (floodplains) όπου η κατεύθυνση της ροής είναι σε κάθε περίπτωση ασαφώς προσδιορισμένη και δεν διαθέτει συνιστώσα σαφούς υπεροχής όπως στην περίπτωση του ποταμιού/καναλιού.
- 3) Τα συζευγμένα μονοδιάστατα-διδιάστατα αριθμητικά μοντέλα (coupled 1D-2D). Τα τμήματα όπου αναμένεται σαφώς καθορισμένη συνιστώσα της ροής (κάθετη στο επίπεδο των διατομών) επιλύεται μέσω των μονοδιάστατων εξισώσεων (εξισώσεις αβαθών υδάτων - Shallow Water Equations- SWE, γνωστές και ως εξισώσεις Saint Venant), ενώ τα τμήματα όπου το νερό δεν ακολουθεί προκαθορισμένες τροχιές ή/και δεν έχει συγκεκριμένες διευθύνσεις ροής επιλύονται μέσω των διδιάστατων εξισώσεων (είτε στην πλήρη μορφή τους, είτε μέσω μικρών απλοποιήσεων στη περίπτωση των εξισώσεων διάχυσης κύματος -diffusion wave equations).

Η επιλογή της καταλληλότερης προσέγγισης έχει μεγάλες επιπτώσεις στην υδροδυναμική προσομοίωση και -κατά συνέπεια- στον υπολογισμό των ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών της πλημμυρικής ροής. Η επιλογή συναρτάται με το ανάγλυφο της περιοχής προσομοίωσης και τον χαρακτήρα της ροής: (i) αν το ανάγλυφο παρουσιάζει έντονες κατά μήκος κλίσεις, με όχθες που σχηματίζονται από πρηνή απότομη διαμόρφωση (όπως σε ορεινά ανάγλυφα, έργα ορεινής υδρονομίας) τότε οι μονοδιάστατες αναλύσεις είναι προτιμότερες, αντίθετα (ii) αν το ανάγλυφο είναι σχετικά ήπιο, με περιοχές ευρύτερης κατάκλυσης (για παράδειγμα, εκτάσεις καλλιεργειών/ κτηνοτροφίας, αγροτικές χρήσεις, αστικές περιοχές), τότε προτιμώνται οι διδιάστατες αναλύσεις.

Οι συζευγμένες προσεγγίσεις υιοθετούνται σε περιπτώσεις στις οποίες είναι επιθυμητή η συμπερίληψη των πλεονεκτημάτων των δύο προαναφερθεισών αναλύσεων.

5.1.3 Εξισώσεις 1D και 2D

Οι γενικές εξισώσεις μονοδιάστατης και διδιάστατης ροής γράφονται ως εξής:

1. Μονοδιάστατη ροή (1D)

Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} - q = 0 \quad (5.1)$$

Εξίσωση ποσότητας κίνησης:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_o + S_f + S_h \right) = 0 \quad (5.2)$$

όπου:

- u = ταχύτητα στη διεύθυνση x
- h = βάθος ροής
- g = επιτάχυνση της βαρύτητας
- t = χρόνος

- x θέση κατά τη διεύθυνση x
- q όρος πλευρικών εισροών
- S_o = κλίση πυθμένα
- S_f = Κλίση απώλειας ενέργειας (σχέση Manning)
- S_h = επιπλέον όρος ποσότητας κίνησης

2. Διδιάστατη ροή (2D)

Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} - q = 0 \quad (5.3)$$

Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά τις διευθύνσεις x και y:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (5.5)$$

όπου:

- v = ταχύτητα στη διεύθυνση y
- y = θέση κατά τη διεύθυνση y
- H = στάθμη ελεύθερης επιφάνειας
- v_t = όρος ιξώδους eddy viscosity
- c_f = συντελεστής τριβής πυθμένα
- f = παράμετρος Coriolis

5.1.4 Ροή μέσω πλευρικών κατασκευών/αναχωμάτων (lateral structures)

Η σύζευξη του μονοδιάστατου και του διδιάστατου μοντέλου επιτυγχάνεται μέσω μιας σειράς πλευρικών κατασκευών, στις οποίες τοποθετείται ένας υπερχειλιστής, με την στέψη του να ορίζεται τυπικά 0.1 m υψηλότερα από το υψόμετρο του εδάφους της πλημμυρικής πεδιάδας (floodplain) ή στο ύψος του αναχώματος, αν αυτό υπάρχει. Η παροχή υπερχείλισης δίνεται από την ακόλουθη, τυπική για υπερχειλίσεις ελεύθερης ροής, σχέση:

$$Q = C \times L \times H^{3/2}, \quad (5.6)$$

όπου:

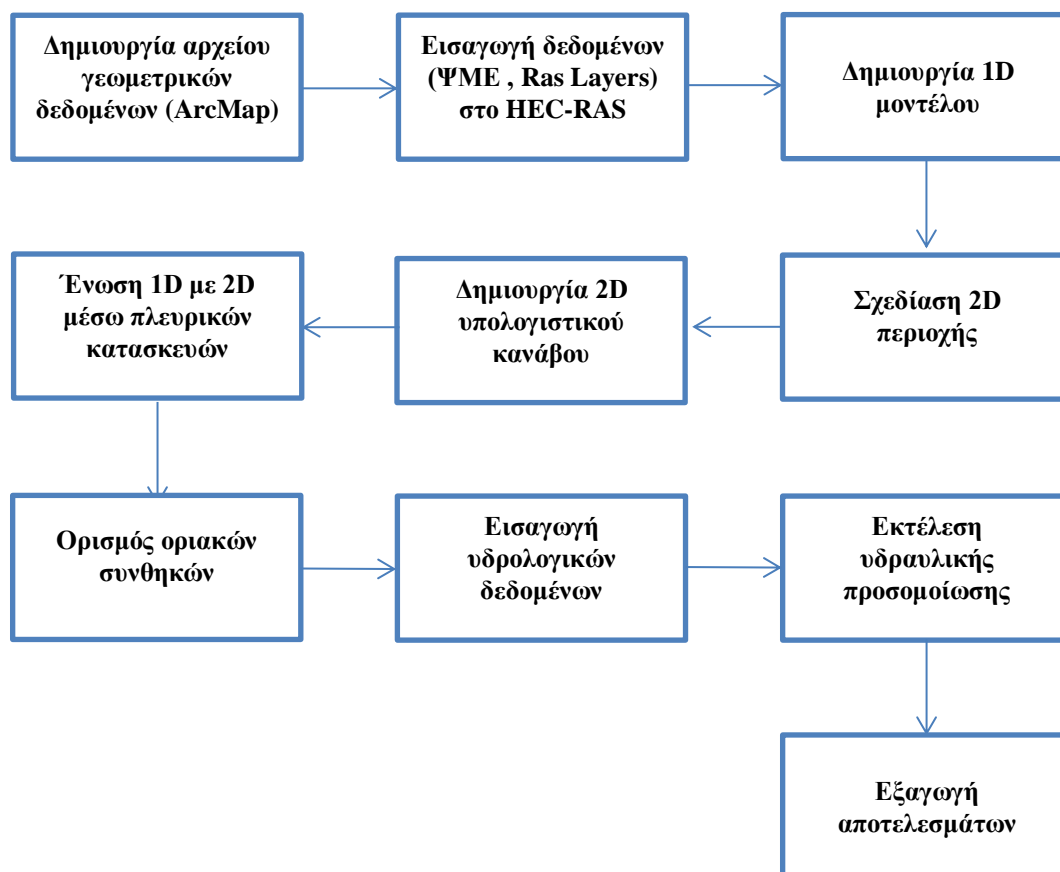
- Q = παροχή υπερχείλισης
- L = μήκος υπερχειλιστή
- H = στάθμη ενέργειας ανάντη της υπερχείλισης
- C = παράμετρος υπερχειλιστή

$$C = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g}, \quad (5.7)$$

Στην παρούσα εργασία ο συντελεστής C_d επιλέγεται ίσος με 0.15 και το πλάτος υπερχείλισης 5.0 m (σύμφωνα με τον πίνακα 1, σελ. 61 του εγχειριδίου «Combined 1D and 2D Modeling with HEC-RAS», Gary W. Brunner, HEC, Oct. 2014).

5.2 Υδραυλικοί υπολογισμοί

Η υδραυλική/υδροδυναμική προσομοίωση της περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκε στο συζευγμένο μονοδιάστατο-διδιάστατο μοντέλο HEC-RAS. Ο σκοπός ήταν η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου των πέντε διαχειριστικών σεναρίων στα οποία έγινε αναλυτική αναφορά στην ενότητα 4. Στο σχήμα 5.1, φαίνεται συνοπτικά η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε προκειμένου να επιτευχθεί η υδραυλική προσομοίωση και τελικά να δημιουργηθούν οι χάρτες πλημμυρικού κινδύνου της περιοχής.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα διαδικασίας υδραυλικής προσομοίωσης

Σύμφωνα με το διάγραμμα, αρχικά απαιτείται η δημιουργία αρχείου εισόδου γεωμετρικών δεδομένων για την προσομοίωση. Το αρχείο γεωμετρίας, το οποίο χαρακτηρίζει την περιοχή μελέτης, προετοιμάστηκε στο περιβάλλον του ArcMap με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης HEC-GeoRAS. Η εργαλειοθήκη αυτή ουσιαστικά, προεπεξεργάζεται τα αρχικά γεωμετρικά δεδομένα με σκοπό την εξαγωγή του κατάλληλου γεωμετρικού μοντέλου. Ως αρχικό δεδομένο εισάγεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ/DEM) της υπό εξέταση περιοχής. Επίσης, εκτός από την δημιουργία γεωμετρικών δεδομένων, το HEC-GeoRAS χρησιμοποιείται για τη σύνθεση των επιμέρους θεματικών επιπέδων. Εν συνεχεία, το γεωμετρικό μοντέλο, που προήλθε από την προεπεξεργασία των αρχικών δεδομένων, εισάγεται στο HEC-RAS. Εκεί, δημιουργούνται τα διδιάστατα γεωμετρικά δεδομένα που απαιτούνται για την εκτέλεση της συζευγμένης ανάλυσης, ενώ έπειτα συμπληρώνονται τα απαραίτητα για την προσομοίωση υδραυλικά δεδομένα (τύπος ροής, πλημμυρογράφημα, οριακές συνθήκες κ.ά.). Ακολούθως πραγματοποιείται η προσομοίωση και με αυτό τον τρόπο

προκύπτουν τα ζητούμενα υδραυλικά στοιχεία. Τα αποτελέσματα αυτά εισάγονται στο ArcMap, όπου με την βοήθεια του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής παράγονται οι χάρτες κατάκλυσης.

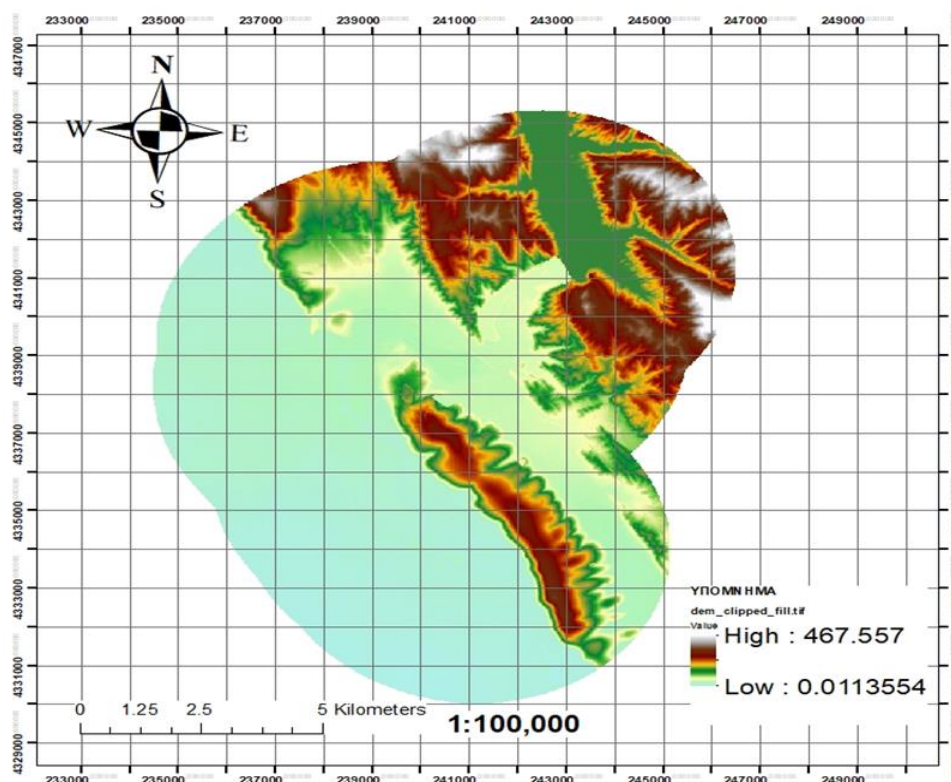
5.2.1 Δημιουργία αρχείου γεωμετρικών δεδομένων στο ArcMap

Τα βήματα που ακολουθούνται για τη δημιουργία του γεωμετρικού αρχείου είναι τα εξής:

- 1) Δημιουργία ΨΜΕ σε μορφή tin
- 2) Δημιουργία θεματικών επιπέδων (RAS Layers) :
 - a) Κύρια γραμμή ροής (Stream Centerline)
 - b) Όχθες (Banks Lines)
 - c) Κύριες διευθύνσεις ροής (Flow Paths Centerline)
 - d) Διατομές (Cross Section Cut Lines)
- 3) Σύνθεση θεματικών επιπέδων και εξαγωγή γεωμετρικού αρχείου

Δημιουργία ΨΜΕ σε μορφή tin

Για την δημιουργία του αρχείου tin απαιτείται η χρήση ΨΜΕ, το οποίο αρχικά βρίσκεται σε μορφή raster. Με τη εντολή Convert → Raster to TIN, της εργαλειοθήκης 3D Analyst του ArcMap, και αφού επιλεγεί το αρχείο εισόδου που είναι το ΨΜΕ, παράγεται το αρχείο TIN. Το ΨΜΕ σε μορφή TIN απεικονίζεται στο σχήμα 5.2

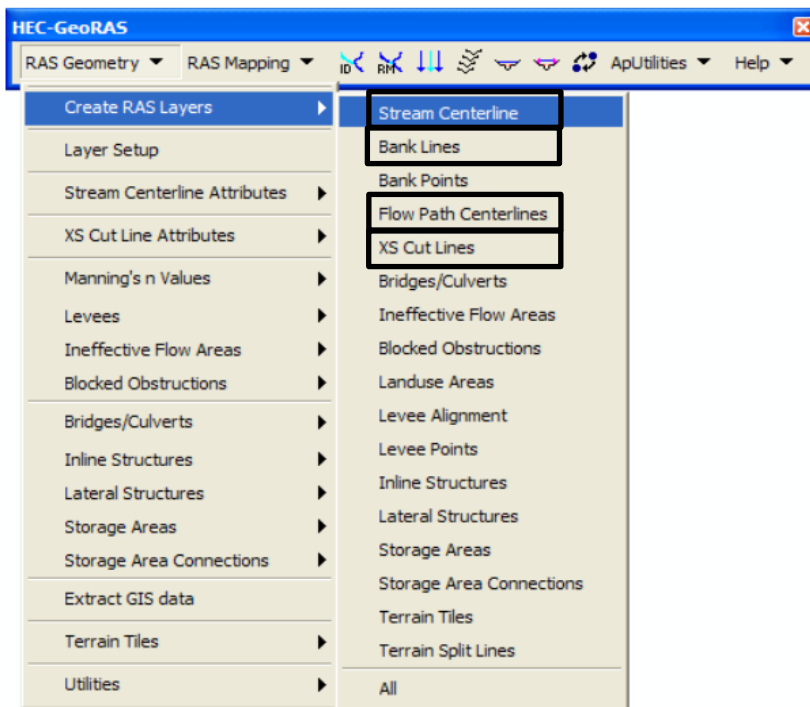


Σχήμα 5.2: ΨΜΕ της εξεταζόμενης περιοχής

Δημιουργία θεματικών επιπέδων (RAS Layers)

Στο βήμα αυτό δημιουργούνται τα θεματικά επίπεδα (RAS Layers), στα οποία περιλαμβάνονται οι απαραίτητες γεωμετρικές πληροφορίες του ποταμού και της

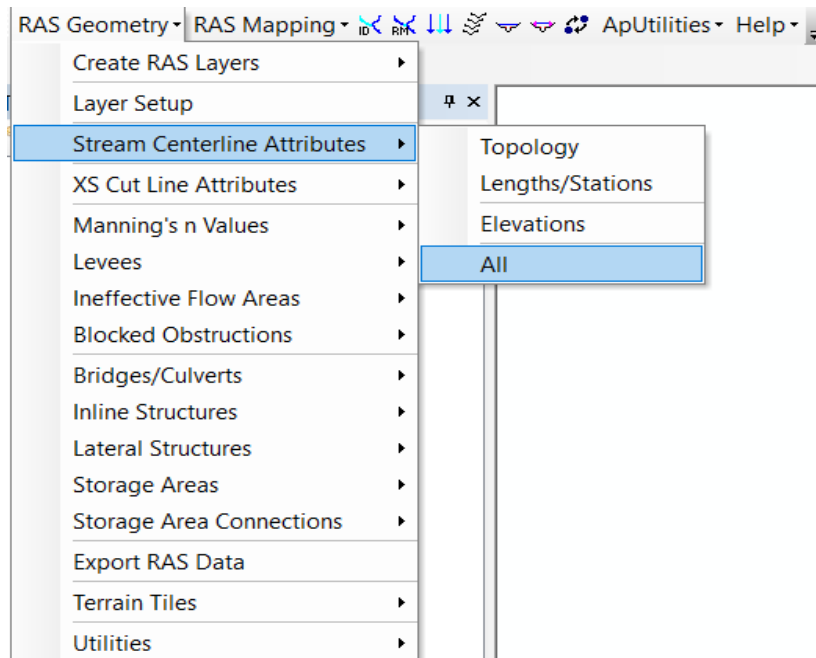
ευρύτερης περιοχής. Τα θεματικά αυτά επίπεδα δημιουργούνται μέσω του μενού RAS Geometry με την εντολή Create RAS Layers, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μια κενή βάση για κάθε θεματικό επίπεδο. Στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκαν τα παρακάτω θεματικά επίπεδα, τα οποία κρίθηκαν απαραίτητα για την μετέπειτα υδραυλική προσομοίωση.



Σχήμα 5.3: Δημιουργία θεματικών επιπέδων

Κύρια γραμμή ροής ποταμού (*Stream Centerline*)

Στο βήμα αυτό ψηφιοποιείται η κύρια γραμμή ροής που έχει επιλεγεί για την υδραυλική προσομοίωση. Η ψηφιοποίηση γίνεται κατά τη φορά της ροής, από τα ανάντη στα κατόντη. Για την κατασκευή του θεματικού αυτού επιπέδου εκτελέστηκαν οι εξής εντολές: RASGeometry → Create RAS Layers → Stream CenterLine. Αφού ψηφιοποιηθεί η κύρια γραμμή ροής θα πρέπει στη συνέχεια να ονομαστεί με τη βοήθεια του εργαλείου «river reach Id». Το παράθυρο που εμφανίζεται επιτρέπει την εισαγωγή του ονόματος του ποταμού. Στη συνέχεια, υπολογίζονται κάποια χαρακτηριστικά του ποταμού με την εκτέλεση της εντολής RAS Geometry → Stream Centerline Attribute → All (Σχήμα 5.4). Με την εντολή Topology ελέγχεται η σύνδεση και ο προσανατολισμός του υδρογραφικού δικτύου που έχει σχηματιστεί. Με την εντολή Lengths/ Stations υπολογίζεται το μήκος της κύριας γραμμής ροής και καθορίζεται η φορά της ροής. Τέλος, η εντολή Elevations μετατρέπει τη διδιάστατη γραμμή ροής σε τρισδιάστατη χρησιμοποιώντας το ΨΜΕ.



Σχήμα 5.4:Υπολογισμός κύριων χαρακτηριστικών ποταμού

Κύριες όχθες (Bank Lines)

Οι όχθες του ποταμού είναι δύο πολυγωνικές γραμμές εκατέρωθεν της κύριας γραμμής του, οι οποίες διαχωρίζουν τη ροή εντός και εκτός της κοίτης του ποταμού. Οι γραμμές αυτές μπορούν να χαραχθούν προς οποιαδήποτε κατεύθυνση, μπορεί να είναι είτε συνεχόμενες είτε διακοπτόμενες, ενώ θα πρέπει να τέμνουν κάθε διατομή. Το θεματικό αυτό επίπεδο δημιουργήθηκε εκτελώντας τις εξής εντολές: RASGeometry → Create RAS Layers→ Bank Lines.

Κύριες διευθύνσεις ροής (Flow paths)

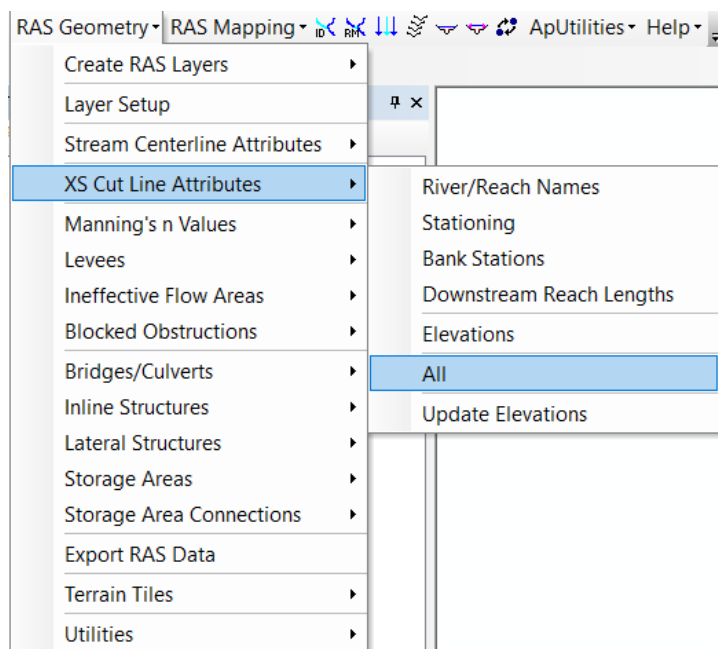
Σκοπός της δημιουργίας των κύριων διευθύνσεων ροής είναι ο καθορισμός της απόστασης κάθε διατομής από την κατάντη. Περιέχουν τρεις τύπους γραμμών: την κεντρική, την αριστερή και τη δεξιά. Οι κύριες διευθύνσεις ροής δημιουργούνται αυτόματα κατά τη διεύθυνση ροής από τα ανάντη στα κατάντη. Η κεντρική διεύθυνση ροής του ποταμού ουσιαστικά προκύπτει από την αντιγραφή της κύριας γραμμής ροής που δημιουργήθηκε παραπάνω, ενώ η αριστερή και η δεξιά διεύθυνση ροής οριοθετούν τον ποταμό και σχεδιάζονται παράλληλα με τις όχθες. Ψηφιοποιήθηκε πρώτα η αριστερή γραμμή και εν συνεχεία η δεξιά γραμμή με διεύθυνση ροής από τα ανάντη στα κατάντη. Για την κατασκευή του θεματικού αυτού επιπέδου εκτελέστηκαν οι εξής εντολές: RASGeometry → Create RAS Layers → Flow Path CenterLine. Τέλος, γίνεται ο καθορισμός του τύπου των τριών αυτών γραμμών με τη χρήση του εργαλείου Assign Line Type.

Διατομές (Cross- sectional cut lines)

Το θεματικό αυτό επίπεδο αφορά στην κατασκευή διατομών σε αντιπροσωπευτικές θέσεις του ποταμού. Οι διατομές αυτές πρέπει πάντα να σχεδιάζονται κάθετα στη διεύθυνση ροής του ποταμού, από αριστερά προς τα δεξιά κοιτώντας προς τα κατάντη, να μην τέμνονται μεταξύ τους, και τέλος να τέμνουν την κύρια γραμμή ροής του ποταμού ακριβώς μία φορά. Η δημιουργία του θεματικού αυτού επιπέδου γίνεται με τις εξής εντολές: RASGeometry → Create RAS Layers →

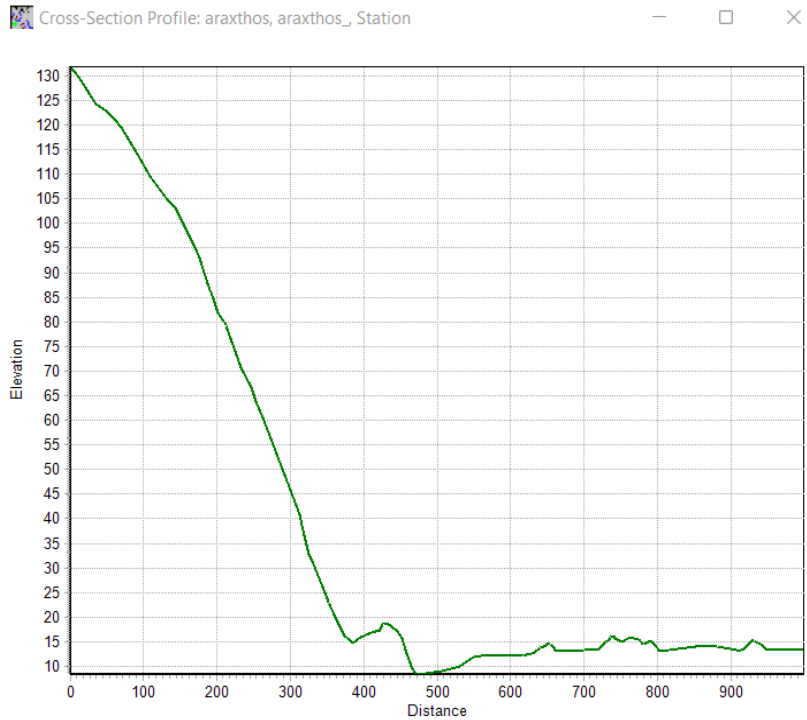
XS Cut Lines. Η σχεδίαση των διατομών μπορεί να γίνει μία προς μία χειροκίνητα ή εναλλακτικά, οι διατομές μπορούν να κατασκευαστούν αυτόματα όλες μαζί με τη βοήθεια του εργαλείου Construct Cut Lines. Με αυτή την εντολή, ο χρήστης καθορίζει την απόσταση μεταξύ των διατομών καθώς και το πλάτος αυτών. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε πλάτος διατομής ίσο με 1000 m και απόσταση μεταξύ τους ίση με 500 m. Στην συνέχεια σχεδιάστηκαν χειροκίνητα ακόμα δύο διατομές, οι οποίες τοποθετήθηκαν στην αρχή και το τέλος του κύριου άξονα του ποταμού. Οι θέσεις των διατομών αυτών ελέγχθηκαν αν τηρούν τις προϋποθέσεις που αναφέρονται παραπάνω.

Αφού σχεδιαστούν οι διατομές προσδιορίζονται ορισμένα χαρακτηριστικά αυτών μέσω μιας σειράς εντολών από το μενού: RASGeometry → XS Cut Lines Attributes → All (Σχήμα 5.5). Αρχικά με την εντολή River / Reach Names προσδιορίζεται το όνομα του ποταμού στο οποίο βρίσκεται η κάθε διατομή. Τα στοιχεία αυτά λαμβάνονται από τον πίνακα της κύριας γραμμής ροής. Στη συνέχεια, η εντολή Stationing υπολογίζει την απόσταση της κάθε διατομής από το πλέον κατάντη σημείο του ποταμού. Μέσω της εντολής Bank Stations υπολογίζεται η απόσταση της διατομής από την αριστερή και δεξιά όχθη αντίστοιχα, ενώ η εντολή Downstream Reach Lengths καθορίζει την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών, λαμβάνοντας υπόψη την διεύθυνση της ροής. Τέλος, η εντολή Elevations υπολογίζει τα υψόμετρα για διάφορα σημεία της διατομής με την βοήθεια του ΨΜΕ και μετατρέπει τις διατομές από διδιάστατες σε τρισδιάστατες.



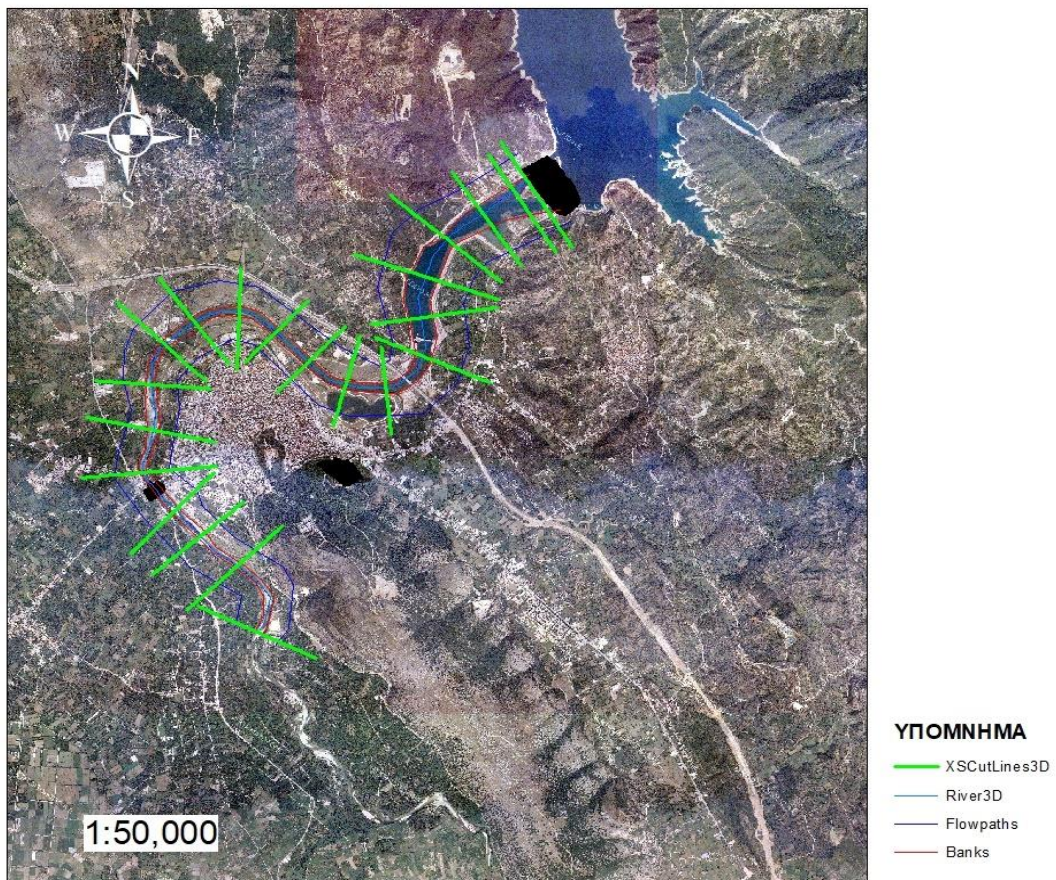
Σχήμα 5.5:Υπολογισμός κύριων χαρακτηριστικών διατομών

Πριν γίνει η εξαγωγή των δεδομένων στο HEC-RAS, υπάρχει επίσης η δυνατότητα για επισκόπηση της γεωμετρίας των διατομών με την βοήθεια του εργαλείου XS Plot. Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται ενδεικτικά η τελευταία κατάντη διατομή.



Σχήμα 5.6: Ενδεικτική διατομή ποταμού

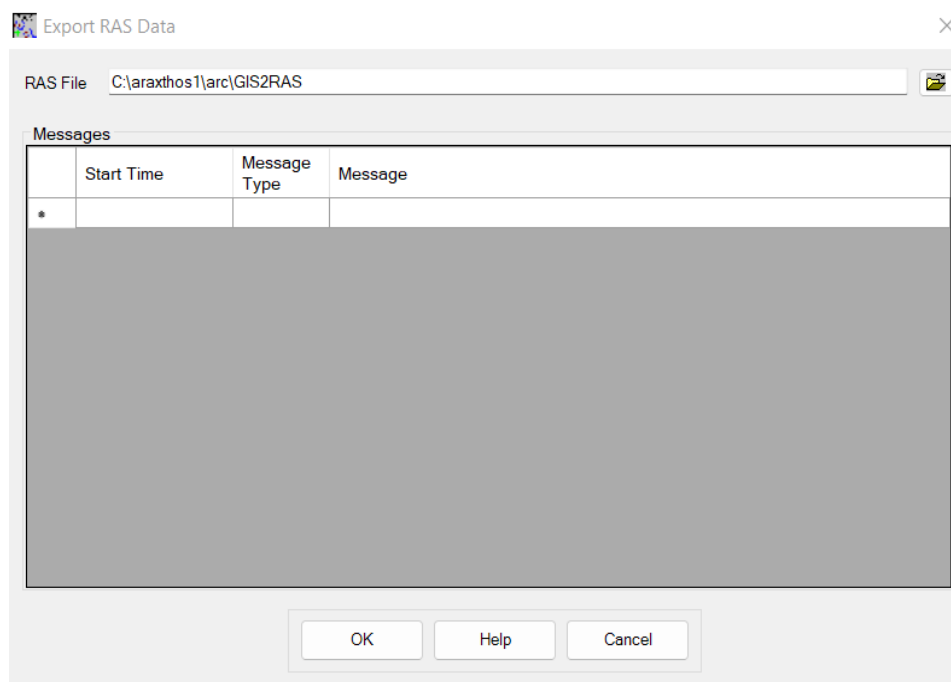
Τέλος, στο Σχήμα 5.7 απεικονίζονται όλα τα παραπάνω θεματικά επίπεδα, όπως αυτά σχεδιάστηκαν στο περιβάλλον του ArcMap.



Σχήμα 5.7: Σχεδίαση θεματικών επιπέδων

Σύνθεση θεματικών επιπέδων και εξαγωγή στο HEC-RAS:

Το τελικό βήμα για την παραγωγή του γεωμετρικού αρχείου εισόδου του προγράμματος HEC-RAS είναι η σύνθεση των δημιουργημένων θεματικών επιπέδων και του ΨΜΕ. Αυτή πραγματοποιείται μέσω της εντολής RAS Geometry → Layer Setup. Τέλος, η εξαγωγή του γεωμετρικού αρχείου γίνεται μέσω της εντολής RAS Geometry → Export Ras Data, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8.

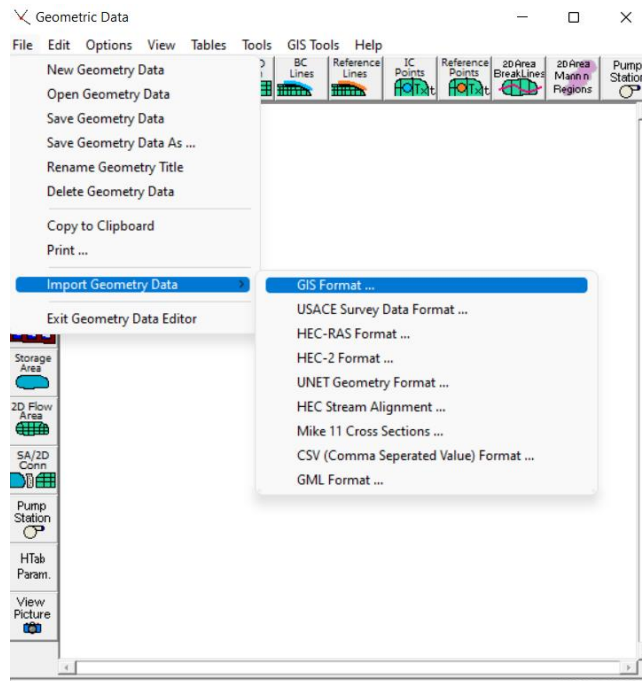


Σχήμα 5.8: Καρτέλα εξαγωγής δεδομένων

5.2.2 Εκτέλεση υδραυλικής προσομοίωσης στο HEC-RAS

5.2.2.1 Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων και τροποποίηση τους στο HEC-RAS

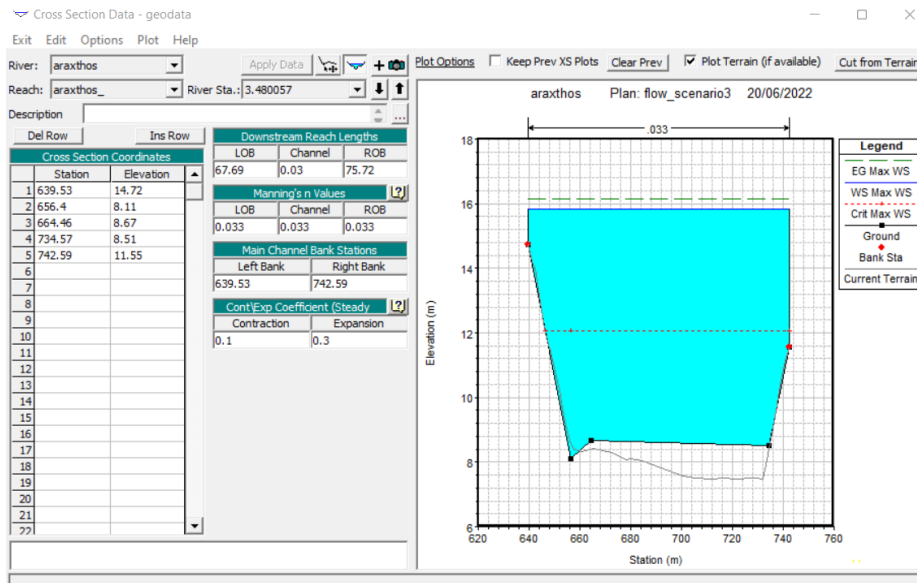
Αρχικά, μέσω των εντολών File → New Project, που βρίσκονται του κεντρικού μενού του HEC-RAS, δημιουργείται ένα νέο project, ενώ στη συνέχεια γίνεται η επιλογή των μονάδων μέτρησης στο μετρικό σύστημα (S.I) μέσω της εντολής Options → Unit System. Η εισαγωγή των γεωμετρικών δεδομένων που δημιουργήθηκαν στο HEC-GeoRAS γίνεται από το παράθυρο των γεωμετρικών δεδομένων (Geometric Data), επιλέγοντας τις εντολές File → Import Geometry Data → GIS Format (Σχήμα 5.9).



Σχήμα 5.9: Εντολές εισαγωγής δεδομένων

Χρησιμοποιώντας την εντολή Cross Section εμφανίζεται μια καρτέλα όπου παρουσιάζονται όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής (Σχήμα 5.10). Με τον τρόπο αυτό, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ελέγξει και να διορθώσει κάποια από αυτά,. Τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής τα οποία εμφανίζονται στο παράθυρο της εντολής Cross Section είναι τα ακόλουθα:

- 1) Ονομα/τμήμα ποταμού στο οποίο ανήκει η διατομή (River/Reach)
- 2) Ο Κωδικός αριθμός της διατομής, ο οποίος δείχνει την απόσταση της διατομής από το αρχικό κατάντη τμήμα του ποταμού (River Station)
- 3) Πίνακας που περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά σημεία της διατομής. Ειδικότερα, την απόστασή τους από το αριστερό άκρο της διατομής με τα αντίστοιχα υψόμετά τους. (Cross Section Coordinates)
- 4) Απόσταση της κάθε διατομής από την κατάντη της (Downstream Reach Lengths)
- 5) Απόσταση της κάθε διατομής από την κατάντη της (Downstream Reach Lengths)
- 6) Αποστάσεις της αριστερής και δεξιάς όχθης από το αριστερό άκρο της διατομής (Main Channel Bank Stations)
- 7) Συντελεστές συστολής/διαστολής, οι οποίοι υπολογίζουν την απώλεια ενέργειας της ροής από μια διατομή στην επόμενη κατάντη διατομή (Cont/Exp Coefficients). Οι προεπιλεγμένες από το πρόγραμμα τιμές των συντελεστών συστολής και διαστολής είναι 0.1 και 0.3, αντίστοιχα.

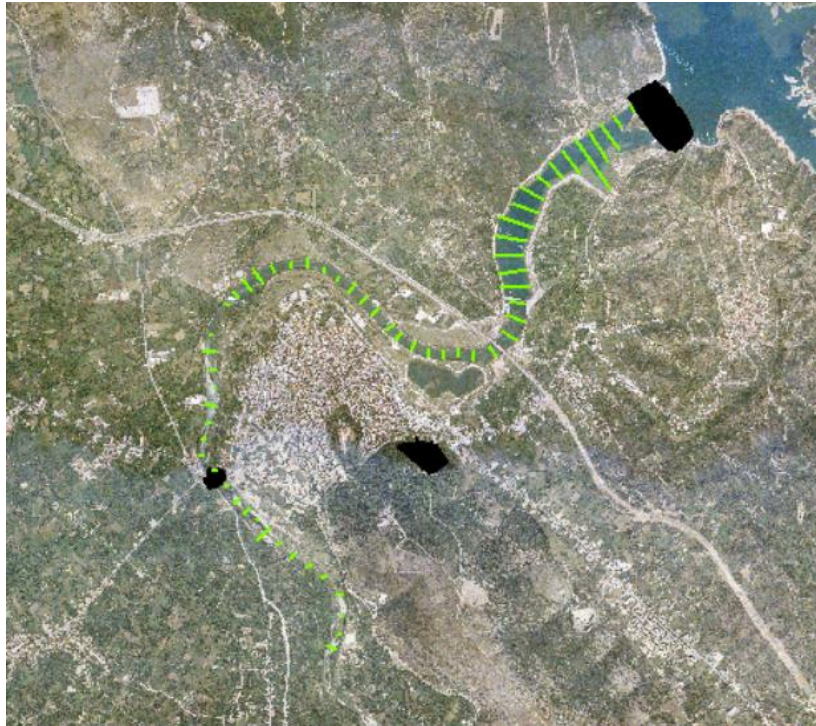


Σχήμα 5.10: Καρτέλα επεξεργασίας δεδομένων διατομής

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά των διατομών προέκυψαν από την προεπεξεργασία του ποταμού και των λοιπών επιπέδων στο HEC-GeoRAS. Ωστόσο, για λόγους ακρίβειας κρίθηκε απαραίτητη η περαιτέρω επεξεργασία των διατομών. Στην παρούσα εργασία, λόγω της ύπαρξης του μικρού ΥΗΕ Πουρνάρι ΙΙ που βρίσκεται αμέσως κατάντη του ταμιευτήρα του Πουρναρίου, στο ΨΜΕ δεν έχει αποτυπωθεί το υψόμετρο πυθμένα, αλλά το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας.

Για το λόγο αυτό, τα υψόμετρα των διατομών, που παρουσίαζαν το συγκεκριμένο πρόβλημα διορθώθηκαν χρησιμοποιώντας τις εντολές Cross Section → Cross Section Coordinates/ Elevation. Επιπλέον, για να υπάρχει μια καλή ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε πύκνωση των διατομών. Ειδικότερα, με τις εντολές Tools → XS Interpolation → Within a Reach, ορίστηκε ο ποταμός και οι διατομές, όπου θα πραγματοποιηθεί πύκνωση, καθώς και η μέγιστη απόσταση μεταξύ των διατομών αυτών. Καθώς οι διατομές περιείχαν πολλά μη απαραίτητα συνευθειακά σημεία, μέσω των εντολών Tools → Cross Section Points Filter, πραγματοποιήθηκε η μείωσή τους. Επίσης, με τη εισαγωγή ενός map layer στο παράθυρο των γεωμετρικών δεδομένων, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των θέσεων των οχθών που είχαν τοποθετηθεί χειροκίνητα με τις πραγματικές θέσεις τους στην περιοχή μελέτης. Έτσι, με τις εντολές Cross Section → Graphic XS Editor πραγματοποιήθηκε η ορθή τοποθέτηση των σημείων τους. Τέλος, με τις εντολές Cross Section → Graphic XS Editor → Delete Objects διαγράφηκαν τα σημεία των διατομών που βρίσκονταν αριστερά κ δεξιά από τις όχθες του ρέματος.

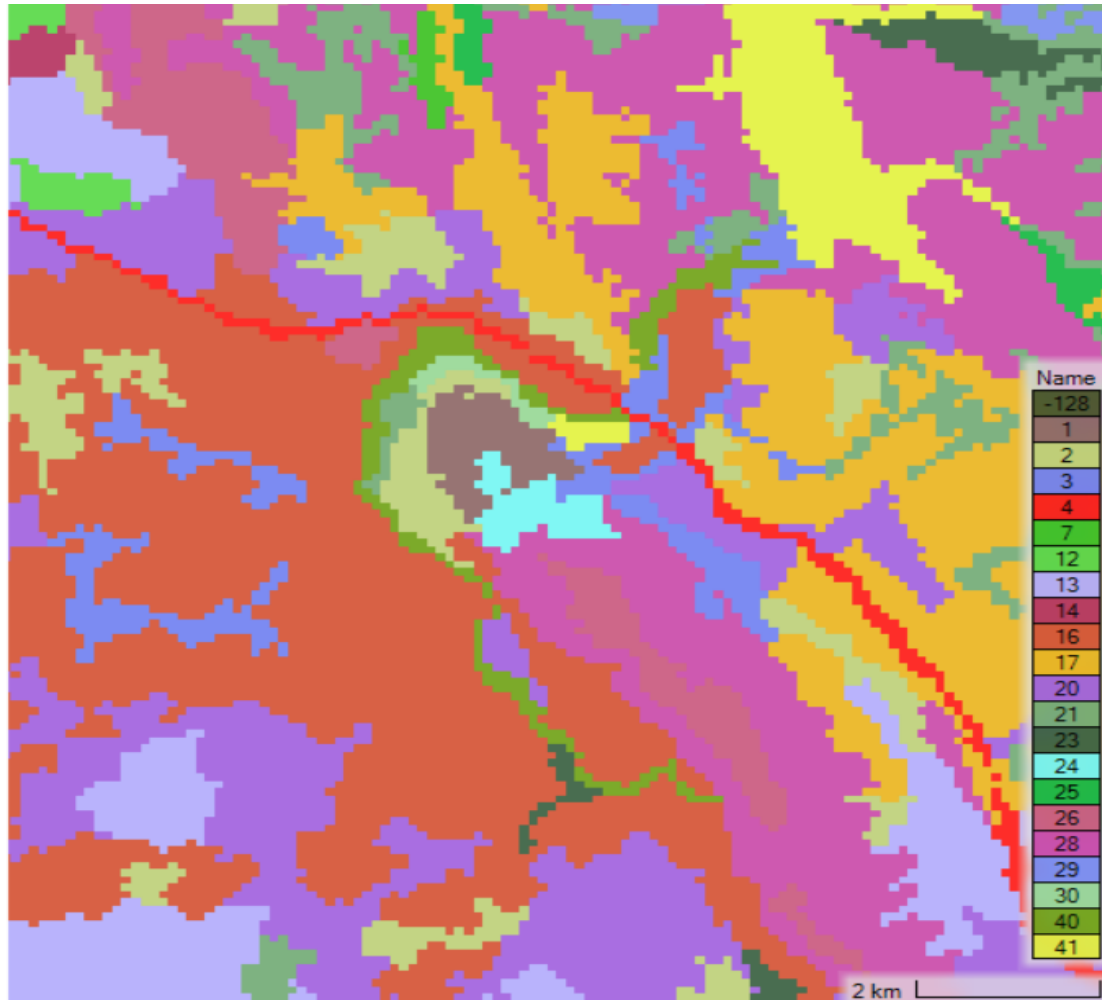
Αυτή η ενέργεια έγινε διότι γύρω από τις όχθες του ποταμού θα σχεδιαστεί στη συνέχεια η διδιάστατη περιοχή του μοντέλου. Στο σχήμα 5.11 φαίνεται η τελική διαμόρφωση των διατομών του ποταμού Αράχθου.



Σχήμα 5.11: Τελικές διατομές ποταμού

5.2.2.2 Δημιουργία θεματικού επιπέδου χρήσεων γης (land use)

Το επίπεδο χρήσεων γης αξιοποιείται για την εκτίμηση της τραχύτητας, δηλαδή του συντελεστή Manning (n), κατά μήκος κάθε διατομής. Ο συντελεστής n υπολογίζεται με την βοήθεια του χάρτη των χρήσεων γης, ο οποίος έχει προκύψει από τη βάση δεδομένων του προγράμματος της Ευρωπαϊκής Ένωσης Corine (2018). Οι τιμές n του Manning προσδιορίστηκαν με την βοήθεια του εργαλείου RAS Mapper, σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία. Αρχικά, εισάγοντας στο RAS Mapper το αρχείο χρήσεων γης Corine 2018, δημιουργείται ένα θεματικό επίπεδο, το οποίο περιέχει τα πολύγωνα των χρήσεων γης. Στο σχήμα 5.12 φαίνεται ο χάρτης χρήσεων γης, όπως αυτός απεικονίζεται στο περιβάλλον του RAS Mapper.



Σχήμα 5.12: Χάρτης χρήσεων γης

Στη συνέχεια, μέσω της εντολής Edit Land Cover Data Table, συμπληρώνεται ο πίνακας με τις τιμές του συντελεστή Manning. Πιο συγκεκριμένα, ο πίνακας αυτός περιλαμβάνει μια στήλη που περιέχει την κωδική ονομασία των πολυγώνων χρήσεων γης και μία δεύτερη κενή στήλη, όπου συμπληρώνονται οι αντίστοιχες τιμές συντελεστή Manning. Οι ορισθείσες τιμές προέκυψαν με βάση τον πίνακα του Chow (1959). Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή Manning για τις διάφορες χρήσεις γης που εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης. Τελευταίο βήμα της διαδικασίας είναι η συσχέτιση της γεωμετρίας με το θεματικό επίπεδο των χρήσεων γης, η οποία υλοποιείται μέσω της εντολής Manage Geometry Associations.

Πίνακας 5.1: Συντελεστής Manning

Name	Ονοματολογία Corine Land Use	Συντελεστής Manning
1	Συνεχής αστικός ιστός	0,013
2	Ασυνεχής αστικός ιστός	0,013
3	Βιομηχανικές/εμπορικές ζώνες	0,013
4	Οδικά/σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	0,013
7	Χώροι εξόρυξης ορυκτών	0,013
12	Μη αρδεύσιμη- αρόσιμη	0,03

Name	Ονοματολογία Corine Land Use	Συντελεστής Manning
	γη	
13	Μόνιμα αρδευόμενη γη	0,03
14	Ορύζωνες	0,03
16	Οπωροφόρα δέντρα	0,08
17	Ελαιώνες	0,08
20	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	0,04
21	Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	0,05
23	Δάση πλατύφυλλων	0,1
24	Δάση κωνοφόρων	0,1
25	Μικτά δάση	0,1
26	Φυσικοί βοσκότοποι	0,04
28	Σκληροφυλλική βλάστηση	0,05
29	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	0,06
30	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	0,025
40	Ροές υδάτων	0,05
41	Συλλογές υδάτων	0,05

5.2.2.3 Δημιουργία γεωμετρικών δεδομένων του 1D-2D μοντέλου

Δημιουργία 2D γεωμετρικών δεδομένων

Το συζευγμένο 1D-2D μοντέλο, εκτός από την ανάπτυξη της 1D ανάλυσης η οποία παρουσιάστηκε παραπάνω, απαιτεί επίσης την δημιουργία 2D γεωμετρικών δεδομένων. Τα βήματα που ακολουθούνται για τη δημιουργία των δεδομένων αυτών είναι τα ακόλουθα:

- 1) Σχεδίαση των 2D περιοχών ροής (2D Flow Areas)
- 2) Δημιουργία ενός 2D υπολογιστικού καννάβου (2D Computational Mesh)
- 3) Ένωση των 2D περιοχών ροής με τα δεδομένα του 1D μοντέλου μέσω πλευρικών κατασκευών (lateral structures)
- 4) Προσδιορισμός των συνοριακών συνθηκών (Boundary Conditions)

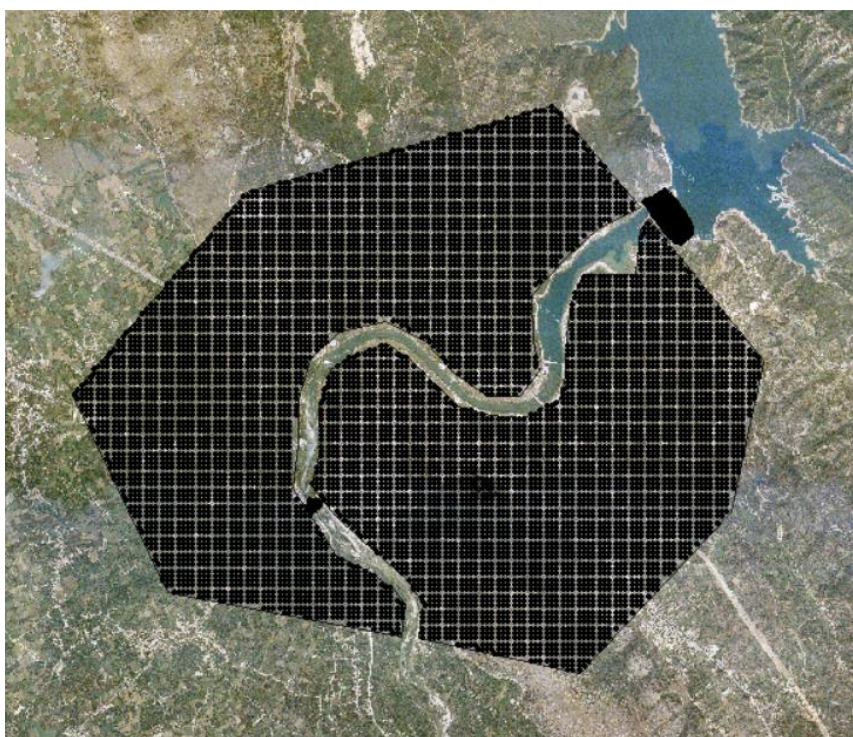
Σχεδίαση των 2D περιοχών ροής (2D Flow Areas)

Οι 2D εκτάσεις είναι οι περιοχές ενός μοντέλου στις οποίες ο υπολογισμός της ροής πραγματοποιείται με υπολογιστικούς αλγορίθμους διδιάστατης ροής. Οι εκτάσεις αυτές προσδιορίζονται σχεδιάζοντας ένα πολύγωνο, το οποίο αντιπροσωπεύει το εξωτερικό σύνορο της 2D περιοχής. Η 2D περιοχή μπορεί να βρίσκεται στην αρχή, στο τέλος ή πλευρικά ενός ποταμού. Στην παρούσα εργασία σχεδιάστηκαν δύο 2D περιοχές ροής πλευρικά του εξεταζόμενου ρέματος, μέσω της

εντολής 2D Flow Area που βρίσκεται στην άνω στήλη του παραθύρου των γεωμετρικών δεδομένων.

Δημιουργία ενός 2D υπολογιστικού κανάβου (2D Computational Mesh)

Η παραγωγή των υπολογιστικών σημείων της διδιάστατης περιοχής επιτυγχάνεται μέσω της εντολής *Generate Computational points on regular Interval with All Breaklines* η οποία βρίσκεται στην αριστερή στήλη του παραθύρου των γεωμετρικών δεδομένων. Με αυτή την εντολή προσδιορίζεται το μέγεθος του υπολογιστικού κελιού του κανάβου. Το μέγεθος των κελιών επιλέχθηκε να είναι 50×50. Για τα υπόλοιπα πεδία του εργαλείου 2D Flow Areas Editor κρατήθηκαν οι προκαθορισμένες από το πρόγραμμα τιμές. Στο σχήμα 5.13 απεικονίζονται οι διδιάστατες περιοχές ροής και οι κανάβοι υπολογισμών.



Σχήμα 5.13: 2D περιοχές ροής

Ένωση των 2D περιοχών ροής με τα δεδομένα του 1D μοντέλου μέσω πλευρικών κατασκευών (lateral structures)

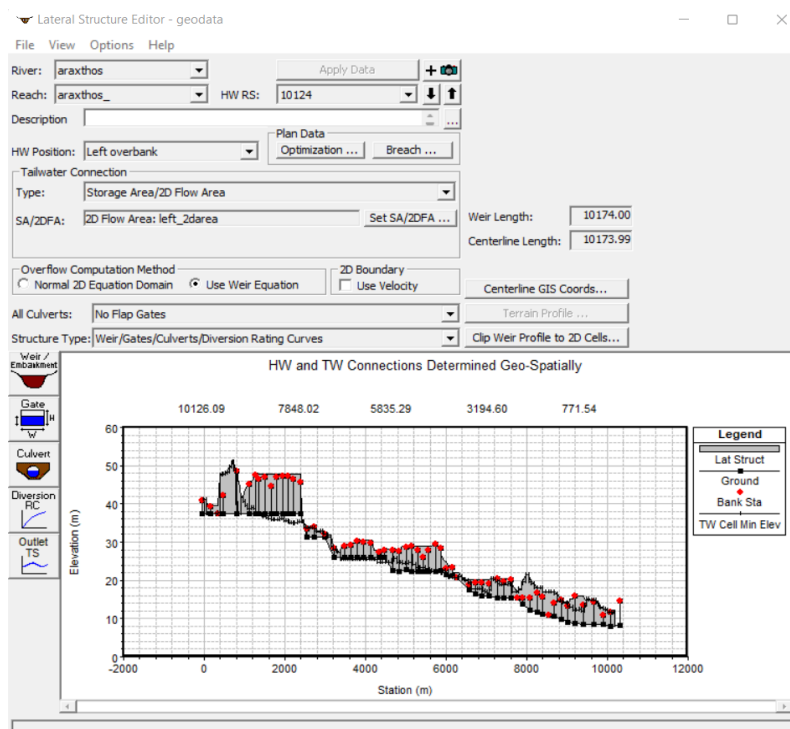
Οι πλευρικές κατασκευές χρησιμοποιούνται στο HEC-RAS με σκοπό την μεταφορά της ροής από το ποτάμι, στο οποίο πραγματοποιήθηκε η μονοδιάστατη ανάλυση, προς την διδιάστατη περιοχή του μοντέλου. Οι κατασκευές αυτές τοποθετούνται κατά μήκος εδάφους με σχετικά υψηλό υψόμετρο, κοντά στις όχθες του ποταμού. Με άλλα λόγια, σχεδιάζονται στο τέλος των διατομών. Οι τύποι πλευρικών κατασκευών που μπορούν να μοντελοποιηθούν στο HEC-RAS είναι οι αναβαθμοί (weir), τα θυροφράγματα (gated spillways), οι οχετοί υδάτων (culverts) κ.ά.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι πλευρικοί αναβαθμοί. Οι αναβαθμοί είναι μια κατασκευή, η οποία λειτουργεί σαν τον υπερχειλιστή ενός μικρού φράγματος, και είναι κατασκευασμένη παράλληλα σε ένα ποτάμι. Σκοπός της κατασκευής αυτής είναι η εκτροπή της ροής του νερού από το ποτάμι προς την

διδιάστατη περιοχή. Μια πλευρική κατασκευή εισάγεται με τις εντολές Lateral Structure Editor → Add Lateral Structure.

Τα στοιχεία των πλευρικών κατασκευών συμπληρώνονται στην καρτέλα Lateral Structure Editor (Σχήμα 5.14). Αρχικά, προσδιορίζεται η χιλιομετρική θέση από την οποία θα ξεκινήσει η σχεδίαση της κατασκευής. Έτσι, η τοποθεσία της κατασκευής επιλέχθηκε να σχεδιαστεί 1 μέτρο μετά την πρώτη ανάντη διατομή. Έπειτα, προσδιορίζεται η θέση που θα τοποθετηθεί η πλευρική κατασκευή, καθώς και η διδιάστατη περιοχή προς την οποία θα μεταφερθεί το νερό. Επίσης, απαιτούνται οι γεωγραφικές συντεταγμένες του άξονα της κάθε πλευρικής κατασκευής. Οι συντεταγμένες αυτές βρέθηκαν με την βοήθεια των εντολών Geometric Data→GIS Tools→Storage Area/2D Flow Area Outlines Table. Στην καρτέλα αυτή περιέχονται οι συντεταγμένες του περιγράμματος της διδιάστατης περιοχής, οι οποίες ταυτίζονται με τις συντεταγμένες της πλευρικής κατασκευής. Επομένως, οι συντεταγμένες αυτές θα πρέπει να εισαχθούν στην καρτέλα Lateral Structure Centerlines GIS Coordinates. Με αυτό τον τρόπο, έχει προσδιοριστεί επίσης αυτόματα το μήκος της κατασκευής, το οποίο ταυτίζεται με το μήκος του άξονα της. Τα μήκη αυτά συμπληρώνονται στην καρτέλα Lateral Structure Editor.

Τέλος, στην καρτέλα Lateral Weir Embankment συμπληρώνονται οι παράμετροι του αναβαθμού, δηλαδή το πλάτος και ο συντελεστής του. Όπως αναφέρθηκε και στην υποενότητα 5.1.4, τέθηκαν $Cd = 0.15$ και $weir\ width = 5\ m$. Τέλος, ο πίνακας της καρτέλας περιέχει τη χιλιομετρική θέση και το αντίστοιχο υψόμετρό του. Όταν ολοκληρωθεί η προσομοίωση του μοντέλου, το πρόγραμμα ελέγχει αν τα υψόμετρα των πλευρικών κατασκευών είναι μεγαλύτερα από τα υψόμετρα του εδάφους. Αν αυτό δεν ισχύει, το πρόγραμμα θα εμφανίσει στον χρήστη ένα μήνυμα σφάλματος. Άρα, για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης απαιτείται να γίνει επαναπροσδιορισμός των υψομέτρων της κατασκευής μέχρι να ικανοποιείται ο παραπάνω περιορισμός.



Σχήμα 5.14: Καρτέλα επεξεργασίας πλευρικών κατασκευών

Προσδιορισμός των οριακών συνθηκών (Boundary Conditions) της διδιάστατης περιοχής

Στη διδιάστατη ανάλυση, τα είδη εξωτερικών οριακών συνθηκών που μπορούν να ορισθούν είναι τα εξής:

- 1) Υδρογράφημα Παροχής (Flow Hydrograph)
- 2) Υδρογράφημα Στάθμης (Stage Hydrograph)
- 3) Ομοιόμορφο Βάθος (Normal Depth)
- 4) Καμπύλη Στάθμης – Παροχής (Rating Curve)

Το ομοιόμορφο βάθος και η καμπύλη στάθμης-παροχής μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν οριακές συνθήκες μόνο σε περιοχές όπου η ροή εξέρχεται από την διδιάστατη περιοχή. Από την άλλη, οι οριακές συνθήκες του υδρογραφήματος παροχής και στάθμης μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σε περίπτωση εισροής του νερού στη διδιάστατη περιοχή, είτε σε περίπτωση εκροής από αυτή. Η σχεδίαση των οριακών συνθηκών έγινε μέσω της εντολής BC Lines που βρίσκεται στην πάνω στήλη του παραθύρου των γεωμετρικών δεδομένων. Στη συνέχεια, ο τύπος ροής, ο οποίος είναι το ομοιόμορφο βάθος, καθώς και τα δεδομένα των οριακών συνθηκών εισάγονται αυτόματα στο παράθυρο των δεδομένων μη μόνιμης ροής.

5.2.2.4 Εισαγωγή και επεξεργασία υδρολογικών δεδομένων

Για συνθήκες μη μόνιμης ροής, τα υδρολογικά δεδομένα εισάγονται μέσω των εντολών Edit → Unsteady Flow Data. Αρχικά, γίνεται ο προσδιορισμός των οριακών συνθηκών από την καρτέλα Boundary Conditions. Οι οριακές συνθήκες εισάγονται επιλέγοντας πρώτα ένα κελί του πίνακα για μια συγκεκριμένη τοποθεσία, και έπειτα διαλέγοντας τον επιθυμητό τύπο οριακής συνθήκης για την τοποθεσία αυτή.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι οριακών συνθηκών που είναι διαθέσιμοι για τον χρήστη. Μερικοί από αυτούς είναι οι εξής:

- 1) Υδρογράφημα Παροχής (Flow Hydrograph), το οποίο μπορεί να οριστεί είτε ως ανάντη είτε ως κατάντη οριακή συνθήκη.
- 2) Υδρογράφημα Στάθμης (Stage Hydrograph), το οποίο μπορεί να οριστεί είτε ως ανάντη είτε ως κατάντη οριακή συνθήκη.
- 3) Υδρογράφημα Στάθμης και Παροχής (Stage and Flow Hydrograph), το οποίο μπορεί να οριστεί είτε ως ανάντη είτε ως κατάντη οριακή συνθήκη
- 4) Καμπύλη Στάθμης – Παροχής (Rating Curve), η οποία μπορεί να οριστεί ως κατάντη οριακή συνθήκη
- 5) Ομοιόμορφο Βάθος (Normal Depth), το οποίο μπορεί να οριστεί μόνο ως κατάντη οριακή συνθήκη.

Ως ανάντη οριακή συνθήκη ορίστηκε το υδρογράφημα παροχής. Αρχικά, για κάθε σενάριο που εξετάστηκε, ορίστηκαν η ημερομηνία και ο χρόνος έναρξης του ωριαίου πλημμυρογραφήματος και οι τιμές αυτές συμπληρώθηκαν στον πίνακα υδρολογικών δεδομένων. Επίσης, η κλίση της γραμμής ενέργειας τέθηκε ίση με 0,1 (σχήμα 5.15).

Flow Hydrograph

River: araxthos Reach: araxthos RS: 10126.09

Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:

Path:

Enter Table Data time interval: 1 Hour

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: 28DEC2005 Time: 0000

Fixed Start Time: Date: 28DEC2005 Time: 0000

No. Ordinates

Hydrograph Data		
	Date	Flow (m ³ /s)
	Simulation Time (hours)	
1	27Dec2005 2400	0
2	28Dec2005 0100	73.008
3	28Dec2005 0200	162.468
4	28Dec2005 0300	199.486
5	28Dec2005 0400	301.285
6	28Dec2005 0500	498.715
7	28Dec2005 0600	498.715
8	28Dec2005 0700	480.206
9	28Dec2005 0800	498.715
10	28Dec2005 0900	461.697
11	28Dec2005 1000	489.46
12	28Dec2005 1100	464.782
13	28Dec2005 1200	483.291
14	28Dec2005 1300	541.902
15	28Dec2005 1400	649.872

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow: 10. Multiplier: EG Slope for distributing flow along BC Line: 0.01 TW Check

Σχήμα 5.15: Καρτέλα πλημμυρογραφήματος

Ως κατάντη οριακή συνθήκη ορίστηκε το ομοιόμορφο βάθος. Στη περίπτωση αυτή, το λογισμικό χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Manning, υπολογίζει μια τιμή στάθμης για κάθε τιμή παροχής. Οπότε, απαιτείται από τον χρήστη ο προσδιορισμός της κλίσης απώλειας ενέργειας του ποταμού στην κατάντη περιοχή. Η τιμή της κλίσης αυτής προσεγγιστικά θεωρήθηκε ίση με την κλίση της επιφάνειας του νερού και υπολογίστηκε ίση με 0,0006 (σχήμα 5.16).

Normal Depth Downstream Boundary

River: araxthos Reach: araxthos RS: 3.480057

Friction Slope:

2D Flow Area Boundary Condition Parameters

Compute separate water surface elevation per face along BC Line

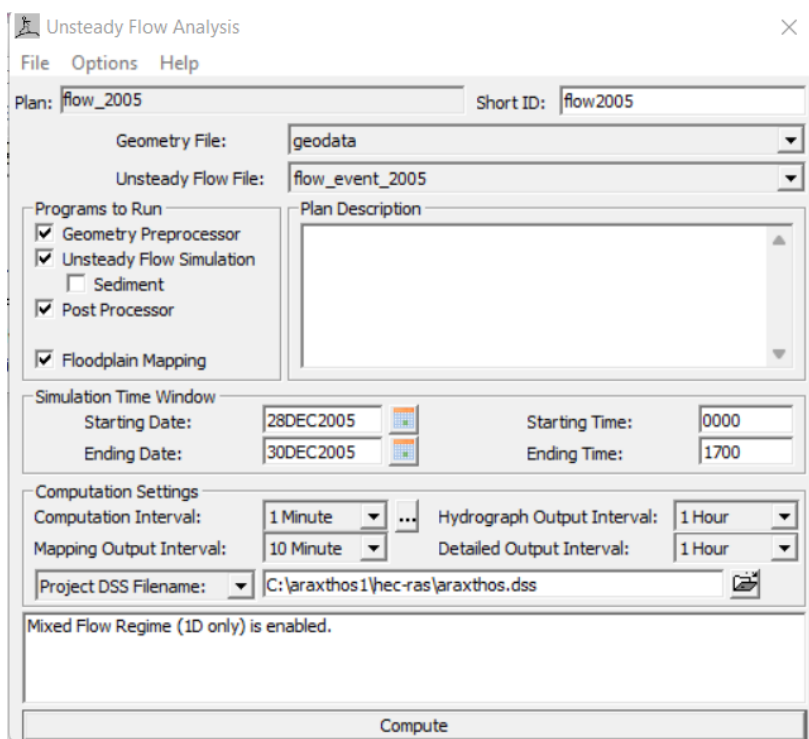
Compute single water surface for entire BC Line

Σχήμα 5.16: Καρτέλα ομοιόμορφου βάθους

5.2.2.5 Εκτέλεση υδραυλικών υπολογισμών

Η εκτέλεση των υδραυλικών υπολογισμών αποτελεί το τελικό βήμα της υδραυλικής προσομοίωσης. Η προσομοίωση αυτή πραγματοποιείται μέσω των εντολών Run → Unsteady Flow analysis. Σε αυτό το παράθυρο ζητείται από το χρήστη η δημιουργία ενός αρχείου σχεδίου (Plan). Το 'Plan' καθορίζει ποιο αρχείο γεωμετρίας και υδρολογικών δεδομένων θα χρησιμοποιηθεί κατά την προσομοίωση. Επιπλέον, ορίζονται οι ημερομηνίες και ώρες έναρξης και λήξης της προσομοίωσης σε αντιστοιχία με αυτούς του πλημμυρογραφήματος της προσομοιωμένης περιοχής. Εν συνεχεία, ενεργοποιείται η εκτέλεση της προεπεξεργασίας της γεωμετρίας (Geometry Preprocessor), προσομοίωσης της μη μόνιμης ροής (Unsteady Flow Simulation), μετεπεξεργασίας της μη μόνιμης ροής (Post Processor) και της απεικόνισης του πεδίου πλημμύρας σε σχετικό χάρτη (Floodplain Mapping). Ως χρονικό βήμα εκτέλεσης των υπολογισμών ορίζεται το διάστημα του 1 min, ενώ για την εξαγωγή χαρτογραφημένων αποτελεσμάτων τίθεται χρονικό βήμα ίσο με 1 hr. Η

καρτέλα ανάλυσης μη μόνιμης ροής που περιέχει τις παραπάνω επιλογές παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.17.

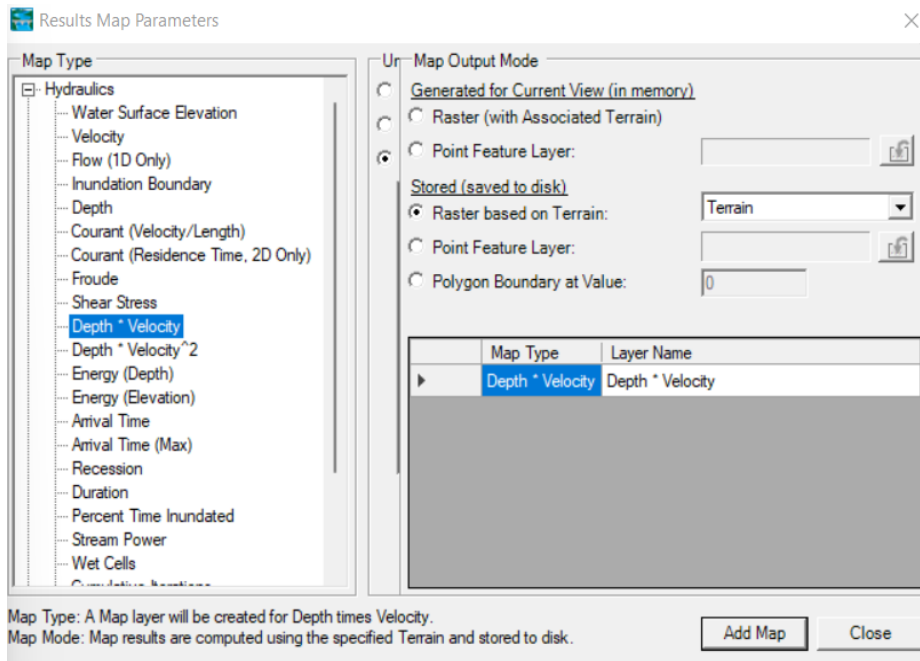


Σχήμα 5.17: Καρτέλα ανάλυσης μη μόνιμης ροής

5.2.2.6 Αποτελέσματα υδραυλικών υπολογισμών

Μετά την ολοκλήρωση των υδραυλικών υπολογισμών ακολουθεί η καταγραφή των αποτελεσμάτων για κάθε σενάριο πλημμυρικού γεγονότος. Τα μονοδιάστατα δεδομένα απεικονίζονται σε μορφή γραφήματος ή πίνακα. Τα διδιάστατα δεδομένα καταγράφονται στο περιβάλλον του RAS Mapper με τη μορφή χαρτών, οι οποίοι απεικονίζουν τις πλημμυρισμένες εκτάσεις. Το RAS Mapper διαθέτει ένα θεματικό επίπεδο αποτελεσμάτων (Results Layer) στο οποίο περιέχονται τα θεματικά επίπεδα για κάθε σενάριο προσομοίωσης. Σε αυτά παρουσιάζονται τα γεωμετρικά και τα διδιάστατα δεδομένα. Επιπλέον, το κάθε θεματικό επίπεδο αποτελεσμάτων έχει το ίδιο όνομα με το 'Plan' για το οποίο εκτελέστηκε προηγουμένως η προσομοίωση. Οι προκαθορισμένοι χάρτες που προσφέρει το HEC-RAS μετά από κάθε επιτυχή προσομοίωση είναι αυτοί του βάθους και της ταχύτητας. Ο χρήστης μπορεί επίσης να δημιουργήσει μερικούς ακόμα χάρτες υδραυλικών δεδομένων.

Η δημιουργία των νέων χαρτών πλημμύρας επιτυγχάνεται μέσω των εντολών Tools → Manage Results Map → Add New Map. Στο παράθυρο που εμφανίζεται, αρχικά προσδιορίζεται ο τύπος του χάρτη. Έπειτα, επιλέγεται να εμφανίζεται ο παραγόμενος χάρτης κατάκλυσης ή άλλου μεγέθους. Με την επιλογή Save to Disk και τις εντολές Raster based on Terrain → Add map γίνεται αποθήκευση του χάρτη (Σχήμα 5.18). Στη συνέχεια, το αρχείο μορφής raster που δημιουργήθηκε μπορεί να εισαχθεί σε πρόγραμμα GIS με σκοπό την περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.



Σχήμα 5.18: Καρτέλα δημιουργίας και αποθήκευσης νέων χαρτών

6 Σύνθεση χαρτών πλημμύρας

Οι χάρτες πλημμυρικής κατάκλυσης απεικονίζουν το πλημμυρικό πεδίο για μια συγκεκριμένη πλημμύρα σχεδιασμού με ακριβή όρια, ενώ παράλληλα δίνουν πληροφορίες για διάφορα πλημμυρικά μεγέθη, όπως για παράδειγμα το βάθος και η ταχύτητα ροής.

Μετά την ολοκλήρωση των υδραυλικών υπολογισμών, δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής των δεδομένων στο ArcMap με σκοπό τη σύνθεση χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης, ακολουθώντας την ακόλουθη μεθοδολογία. Αρχικά, με την εντολή Add Data εισάγονται στο πρόγραμμα τα αρχεία raster των υδραυλικών παραμέτρων, δημιουργώντας έτσι ένα νέο θεματικό επίπεδο. Για την καλύτερη απεικόνιση των πλημμυρικών χαρτών εισάγονται συμπληρωματικά ο γεωμορφολογικός χάρτης της περιοχής και ο χάρτης χρήσεων γης. Μετά την εισαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων, ακολουθεί η προσθήκη των βασικών χαρακτηριστικών στοιχείων ενός χάρτη. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να εισαχθούν από την καρτέλα layout view.

Πιο συγκεκριμένα, με την εντολή Insert στο μενού του ArcMap, σε κάθε ένα χάρτη πλημμύρας που κατασκευάστηκε, προστέθηκαν κλίμακα, υπόμνημα, προσανατολισμός καθώς και κάναβος. Η κλίμακα των χαρτών τέθηκε ίση με 1 προς 50.000. Τέλος, μέσω των εντολών File → Export Map είναι εφικτή η εξαγωγή των πλημμυρικών χαρτών σε διάφορες μορφές αρχείων, όπως PNG, JPEG κ.ά. Στη παρούσα εργασία επιλέχθηκε η απεικόνιση των εξής χαρτών πλημμύρας:

- 1) Χάρτης βάθους νερού (Depth of water)
- 2) Χάρτης ταχύτητας (Velocity)
- 3) Χάρτης γινομένου βάθους και ταχύτητας (Depth*Velocity)
- 4) Χάρτης γινομένου βάθους και ταχύτητας υψωμένη στο τετράγωνο (Depth*Velocity²)
- 5) Χάρτης έκτασης πλημμύρας (Inundation Boundary)

Η παρουσίαση των παραπάνω χαρτών πραγματοποιείται αναλυτικά στην ενότητα 9.

7 Εκτίμηση πλημμυρικής διακινδύνευσης

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιείται η εκτίμηση της πλημμυρικής διακινδύνευσης, εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία η οποία παρουσιάζεται στην τεχνική έκθεση του Κοινού Κέντρου Ερευνών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Joint Research Centre (JRC) (2017). Ειδικότερα, για κάθε χρήση γης της υπό εξέταση περιοχής πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της πλημμυρικής διακινδύνευσης με βάση τον ακόλουθο τύπο:

$$R = H \times V \times E \quad (7.1)$$

όπου, R είναι η διακινδύνευση, H είναι ο κίνδυνος (hazard), V είναι η τρωτότητα (vulnerability) και E είναι η έκθεση (exposure). Το αποτέλεσμα της παραπάνω συνάρτησης εκφράζει το κόστος σε χρηματικές μονάδες που θα μπορούσε να προκαλέσει η συγκεκριμένη πλημμύρα.

Οι κυρίες κατηγορίες χρήσεων γης βάσει των στοιχείων του προγράμματος Corine Land Cover (2018) (CLC) είναι οι εξής:

1. Οικιστικές χρήσεις
2. Βιομηχανικές και Εμπορικές χρήσεις
3. Συγκοινωνιακές Υποδομές
4. Αγροτικές εκτάσεις
5. Υποδομές
6. Δασικές εκτάσεις
7. Υδάτινα σώματα

7.2 Εκτίμηση κινδύνου

Με σκοπό την εκτίμηση του κινδύνου χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση πλημμυρικής ζημιάς (flood-damage function). Η συνάρτηση αυτή, συσχετίζει το βάθος της πλημμύρας με το ποσοστό πλημμυρικής καταστροφής σε κάθε χρήσης γης.

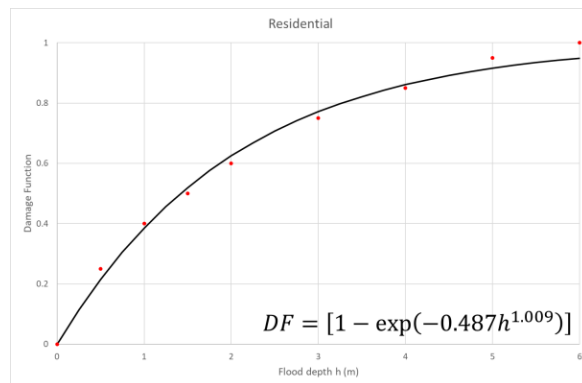
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι συναρτήσεις πλημμυρικής ζημιάς που προτείνει το JRC. Σύμφωνα με αυτό, οι διαθέσιμες συναρτήσεις ζημιάς χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες υπό τη μορφή συναρτήσεων:

1. Οικιστικές
2. Εμπορικές
3. Βιομηχανικές
4. Συγκοινωνιακές
5. Αγροτικές εκτάσεις
6. Υποδομές

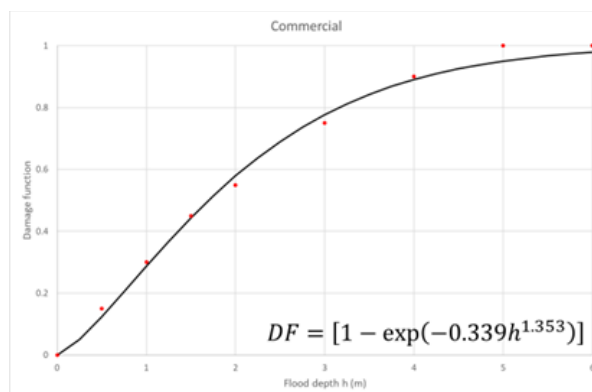
Παρατηρείται ότι με βάση τα δεδομένα του CLC οι βιομηχανικές και εμπορικές χρήσεις ανήκουν στην ίδια κατηγορία χρήσεων γης. Αντιθέτως, η μελέτη του JRC περιέχει ξεχωριστές καμπύλες πλημμυρικής ζημιάς για τις προαναφερθείσες χρήσεις. Επομένως, στους παρακάτω υπολογισμούς, υπέρ της ασφαλείας, σαν τελική τιμή λήφθηκε η μέγιστη εκ των δύο.

Για την εκτίμηση του κινδύνου πλημμύρας, το ποσοστό των ζημιών μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση τεχνικών παρεμβολής (όπως προτείνει το JRC). Σε ότι αφορά τις δασικές εκτάσεις, στην τεχνική έκθεση του JRC δεν περιλαμβάνεται κάποια σχετική συνάρτηση. Για το λόγο αυτό, η καμπύλη ζημιάς αποκτήθηκε από τη

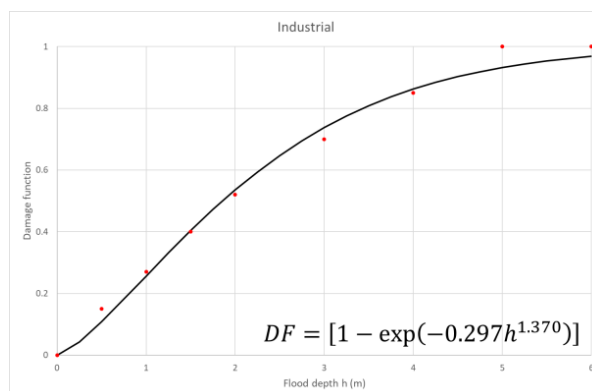
δημοσίευση του Huang (2015). Στα σχήματα 7.1-7.7 φαίνονται οι ευρωπαϊκές συναρτήσεις ζημιάς για τις επτά κατηγορίες χρήσης γης.



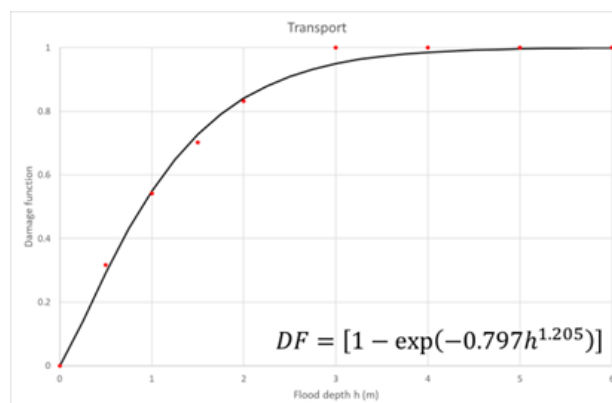
Σχήμα 7.1: Συνάρτηση ζημιάς για οικιστικές χρήσεις γης (Πηγή: Joint Research Center)



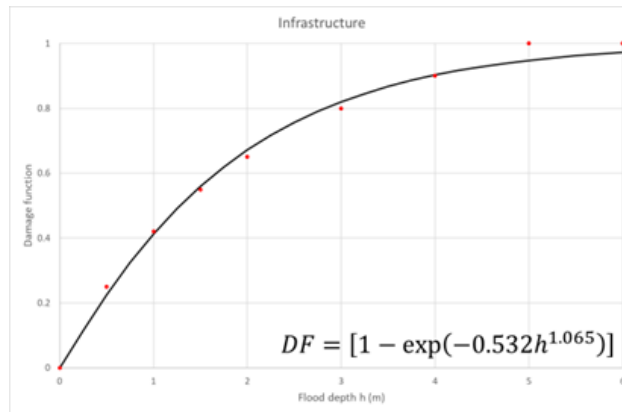
Σχήμα 7.2: Συνάρτηση ζημιάς για εμπορικές χρήσεις γης (Πηγή: Joint Research Center)



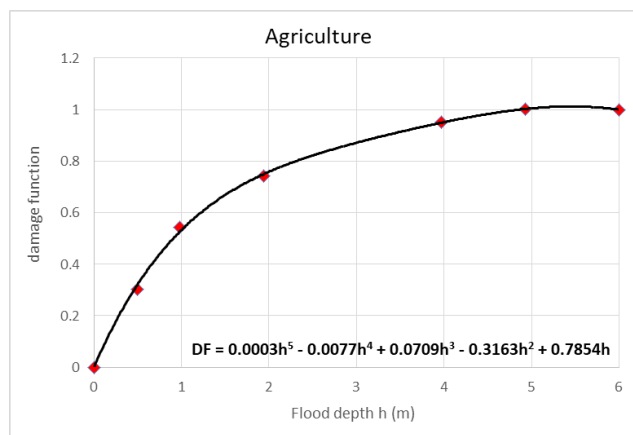
Σχήμα 7.3: Συνάρτηση ζημιάς για βιομηχανικές χρήσεις γης (Πηγή: Joint Research Center)



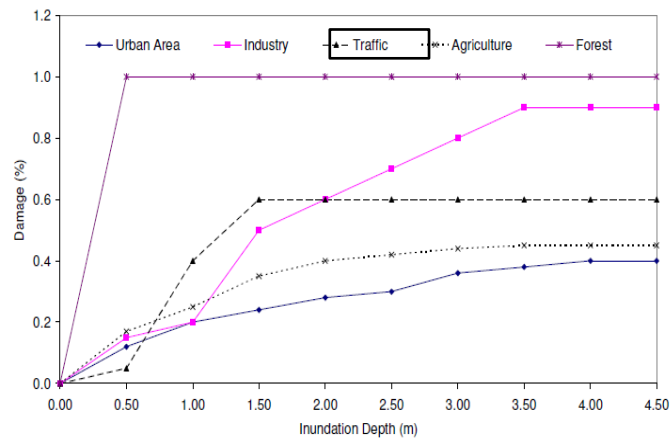
Σχήμα 7.4: Συνάρτηση ζημιάς για συγκοινωνιακές χρήσεις γης (Πηγή: Joint Research Center)



Σχήμα 7.5: Συνάρτηση ζημιάς για υποδομές (Πηγή: Joint Research Center)



Σχήμα 7.6: Συνάρτηση ζημιάς για αγροτικές χρήσεις γης (Πηγή: Joint Research Center)



Σχήμα 7.7: Συνάρτηση ζημιάς για δασικές εκτάσεις (Πηγή: Huang, 2015)

Στη συνέχεια, με σκοπό την εφαρμογή των συναρτήσεων πλημμυρικής ζημιάς προσδιορίστηκαν οι τιμές του μέγιστου βάθους για κάθε χρήση γης. Οι τιμές αυτές προέκυψαν με τη βοήθεια του εργαλείου Zonal Statistics στο περιβάλλον του ArcMap. Ειδικότερα, με τις εντολές ArcToolbox → Zonal Statistics as Table και εισάγοντας το αρχείο raster που περιέχει τα βάθη ροής, όπως αυτά υπολογίστηκαν μετά την υδραυλική προσομοίωση, δημιουργείται ένας πίνακας με τα στατιστικά στοιχεία του βάθους ροής για κάθε χρήση γης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγονται οι τιμές του μέγιστου βάθους. Οι τιμές του μέγιστου βάθους πλημμύρας για τις χρήσεις γης κάθε σεναρίου που εξετάστηκε παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1: Μέγιστο βάθος πλημμύρας (m)

Κατηγορίες χρήσεων γης	Πλημμυρικά σενάρια				
	2005	2015	1ο	2ο	3ο
Συνεχής αστικός ιστός	1.084	1.732	0.164	0.787	3.141
Ασυνεχής αστικός ιστός	5.287	6.788	3.723	5.435	8.947
Βιομηχανικές/εμπορικές ζώνες	4.020	5.004	3.924	5.025	6.592
Οδικά/σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	3.684	4.743	3.581	4.766	6.441
Οπωροφόρα δέντρα	5.190	6.667	3.843	5.462	8.553
Ελαιώνες	-	-	-	-	1.316
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	4.604	5.989	3.263	4.732	7.613
Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	4.436	5.233	3.406	4.512	6.406
Συλλογές υδάτων	3.060	3.720	2.133	2.759	5.146
Δάση κανοφόρων	0.361	0.467	0.035	0.204	0.655
Φυσικοί βοσκότοποι	0.436	1.256	-	-	3.307
Σκληροφυλλική βλάστηση	3.294	4.420	3.182	4.483	6.264
Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	3.051	3.694	2.132	2.754	5.095
Ροές υδάτων	5.482	6.634	4.255	5.821	7.954

Με την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας, επιλέγοντας την κατάλληλη καμπύλη ζημιάς, το χαρακτηριστικό βάθος πλημμύρας μετατρέπεται σε ποσοστό ζημιάς DF. Οι τιμές του κινδύνου για τις χρήσεις γης κάθε σεναρίου που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2.

Πίνακας 7.2: Πλημμυρικός κίνδυνος

Κατηγορίες χρήσεων γης	Πλημμυρικά σενάρια				
	2005	2015	1ο	2ο	3ο
Συνεχής αστικός ιστός	0.41	0.57	0.08	0.32	0.79
Ασυνεχής αστικός ιστός	0.93	0.97	0.84	0.93	0.99
Βιομηχανικές/εμπορικές ζώνες	0.89	0.95	0.88	0.95	0.99
Οδικά/σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	0.95	0.98	0.95	0.98	1.00

Οπωροφόρα δέντρα	1.00	0.93	0.94	1.00	0.47
Ελαιώνες	-	-	-	-	0.63
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	0.99	0.99	0.90	1.00	0.74
Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	0.98	1.00	0.91	0.99	0.96
Συλλογές υδάτων	0.83	0.88	0.70	0.79	0.95
Δάση κωνοφόρων	0.72	0.93	0.07	0.41	1.00
Φυσικοί βοσκότοποι	0.87	1.00	-	-	1.00
Σκληροφυλλική βλάστηση	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Ροές υδάτων	-	-	-	-	-

7.3 Εκτίμηση Τρωτότητας

Η τρωτότητα αφορά τον υπολογισμό των μέγιστων οικονομικών απωλειών (ή αλλιώς της μέγιστης ζημιάς) από ενδεχόμενη πλημμύρα για κάθε χρήση γης (δηλαδή η τιμή DF είναι ίση με 1). Οι βιβλιογραφικές τιμές που προέρχονται από την τεχνική έκθεση του JRC δίνονται για το έτος 2010 και, ως εκ τούτου, θα πρέπει να επικαιροποιηθούν με ένα επιτόκιο ίσο με 1,5%, σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$F = P(1 + i)^N \quad (7.2)$$

όπου F είναι η τρέχουσα τιμή, P είναι η τιμή που αναφέρεται στη βιβλιογραφία και N είναι τα έτη που έχουν μεσολαβήσει από το 2010 έως σήμερα. Η τρωτότητα έχει δύο μορφές:

1. Βάσει αντικειμένου (ευρώ/m²), σε περίπτωση που ο χάρτης κινδύνου πλημμύρας είναι «πυκνός» (dense) σε σχέση με το πλημμυρισμένο αντικείμενο.
2. Βάσει της χρήσης γης (ευρώ/m²), σε περίπτωση που ο χάρτης κινδύνου πλημμύρας, είναι αδρομερής σε σχέση με το πλημμυρισμένο αντικείμενο.

Στην παρούσα εργασία η τρωτότητα εκτιμάται βάσει της χρήσης γης και εκφράζεται σε ευρώ/m².

Για τις οικιστικές, εμπορικές και βιομηχανικές κατηγορίες, η τρωτότητα έχει καταγραφεί για κάθε χώρα, ενώ για τις κατηγορίες μεταφορών και υποδομών έχει καταγραφεί μόνο για κάθε ήπειρο. Για να μετατραπεί αυτή η αξία σε ελληνικό συνάλλαγμα, πολλαπλασιάζεται με το λόγο του ελληνικού ΑΕΠ προς το ΑΕΠ της ΕΕ. Από την άλλη πλευρά, για την εκτίμηση της τρωτότητας σε αγροτικές εκτάσεις έχει υιοθετηθεί μία διαφορετική προσέγγιση. Σε αυτές, η ζημιά σχετίζεται με την απώλεια παραγωγής των αγροτικών εκτάσεων που καταστρέφονται από την πλημμύρα. Επομένως, η τρωτότητα εκφράζεται ως προστιθέμενη αξία για κάθε εκτάριο (VA/ha). Τέλος, σύμφωνα με τον Huang (2015), η τρωτότητα για τις δασικές εκτάσεις είναι ίση με 1,14 (ευρώ/m²). Στον Πίνακα 7.3, φαίνονται μέγιστες τιμές

ζημίας και για τις επτά κατηγορίες χρήσης γης, ενώ στον Πίνακα 7.4, οι τελικές τιμές της τρωτότητας.

Πίνακας 7.3: Μέγιστη ζημία κατηγοριών χρήσης γης (2010 €/m²)

Οικιστικές	Βιομηχανικές / Εμπορικές	Συγκοινωνιακές	Αγροτικές εκτάσεις	Υποδομές	Δασικές
132	278	47	0,08	16	1,14

Πίνακας 7.4: Τρωτότητα κατηγοριών χρήσης γης (2022 €/m²)

Οικιστικές	Βιομηχανικές / Εμπορικές	Συγκοινωνιακές	Αγροτικές εκτάσεις	Υποδομές	Δασικές
158	332	55	0,1	19	1,6

7.4 Εκτίμηση έκθεσης

Έκθεση ορίζεται ως η πλημμυρική έκταση για κάθε σενάριο πλημμύρας. Η τιμή της επιφάνειας κατάκλυσης για κάθε χρήση γης, εκφραζόμενη σε m², περιέχεται στον πίνακα με τα στατιστικά στοιχεία των υδραυλικών παραμέτρων. Οι τιμές της έκθεσης για τις χρήσεις γης κάθε σεναρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.5.

Πίνακας 7.5: Πλημμυρικές εκτάσεις (km²)

Κατηγορίες χρήσεων γης	Πλημμυρικά σενάρια				
	2005	2015	1ο	2ο	3ο
Συνεχής αστικός ιστός	0.04	0.11	0.03	0.04	0.11
Ασυνεχής αστικός ιστός	0.25	0.6	0.08	0.24	1.1
Βιομηχανικές/εμπορικές ζώνες	0.78	0.92	0.45	0.67	1.19
Οδικά/σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτινάζουσα γη	0.26	0.33	0.19	0.24	0.44
Οπωροφόρα δέντρα	2.84	4.21	0.87	2.15	6.67
Ελαιώνες					0.01
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	0.52	0.59	0.26	0.43	0.93
Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	0.21	0.25	0.11	0.22	0.28
Συλλογές υδάτων	0.26	0.27	0.24	0.25	0.27
Δάση κωνοφόρων	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Φυσικοί βοσκότοποι	0.01	0.01			0.03

Σκληροφυλλική βλάστηση	0.02	0.04	0.02	0.03	0.08
Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	0.16	0.19	0.11	0.16	0.21
Ροές υδάτων	0.98	1.01	0.96	1.01	1.06

7.5 Εκτίμηση διακινδύνευσης

Οι τιμές της πλημμυρικής διακινδύνευσης προκύπτουν με την εφαρμογή της εξίσωσης (7.1), όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.6.

Πίνακας 7.6: Πλημμυρική διακινδύνευση (εκατ. €)

Κατηγορίες χρήσεων γης	Πλημμυρικά σενάρια				
	2005	2015	1ο	2ο	3ο
Συνεχής αστικός ιστός	2.6	9.9	0.4	2.0	13.7
Ασυνεχής αστικός ιστός	36.6	91.4	10.6	35.3	171.6
Βιομηχανικές/εμπορικές ζώνες	231.3	290.5	132.2	211.7	390.4
Οδικά/σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	13.8	18.1	10.1	13.2	24.5
Οπωροφόρα δέντρα	0.3	0.4	0.1	0.2	0.3
Ελαιώνες	-	-	-	-	0.0
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	0.15	0.06	0.02	0.04	0.07
Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03
Συλλογές υδάτων	4.0	4.4	3.1	3.7	4.8
Δάση κωνοφόρων	0.02	0.03	0.002	0.01	0.003
Φυσικοί βοσκότοποι	0.01	0.02	-	-	0.005
Σκληροφυλλική βλάστηση	0.03	0.06	0.003	0.05	0.1
Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3
Ροές υδάτων	-	-	-	-	-

8 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

8.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται σχολιασμός των πλημμυρικών μεγεθών και των τιμών της πλημμυρικής διακινδύνευσης, όπως αυτά προέκυψαν με την εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιεγράφηκε παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, με τη βοήθεια γραφημάτων και των πλημμυρικών χαρτών που παράχθηκαν προηγουμένως, συγκρίνονται οι τιμές των πλημμυρικών παραμέτρων και της διακινδύνευσης βάσει των χρήσεων γης για τα εξεταζόμενα σενάρια πλημμύρας και έτσι εξάγονται κάποια χρήσιμα συμπεράσματα.

8.2 Σχολιασμός πλημμυρικών μεγεθών

Μέγιστο βάθος πλημμύρας

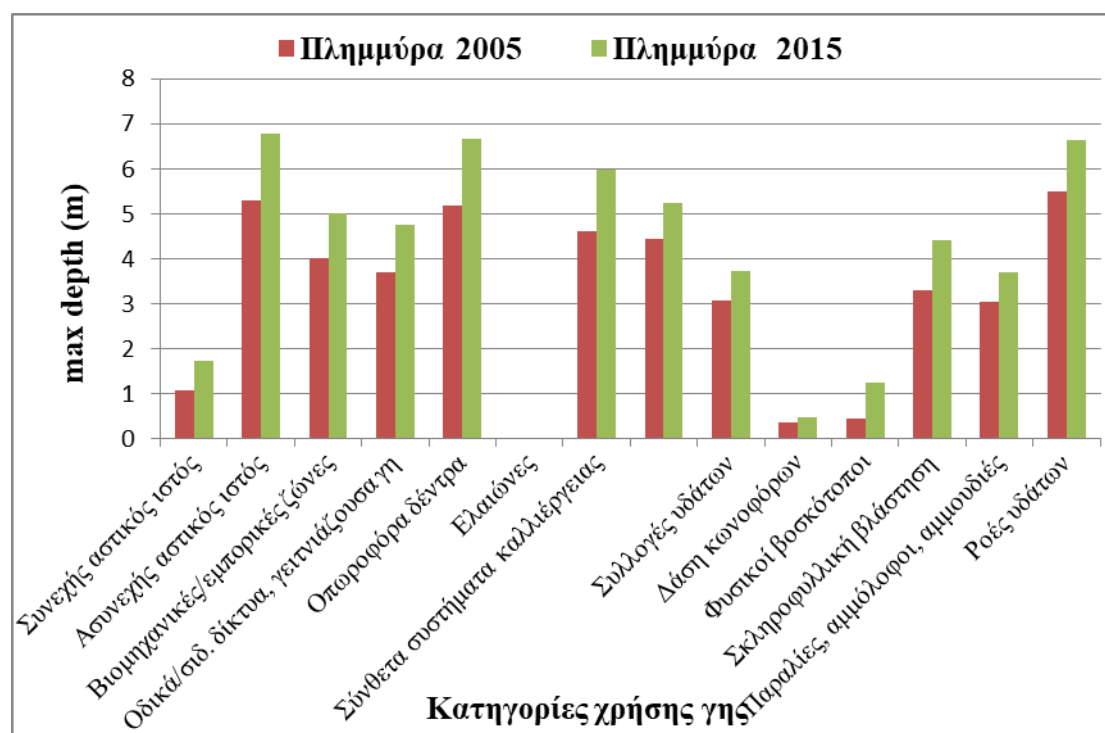
Σύμφωνα με τα γραφήματα μέγιστου βάθους ανά κατηγορία χρήσης γης των πέντε πλημμυρικών σεναρίων, τα υψηλότερα βάθη ροής εμφανίζονται κυρίως εντός της κοίτης του Αράχθου. Υψηλά βάθη πλημμύρας παρουσιάζουν επίσης οι χρήσεις γης που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τις όχθες του ποταμού και πιο συγκεκριμένα τμήματα των αστικών και αγροτικών εκτάσεων. Στο σχήμα 8.1 απεικονίζεται ενδεικτικά το γράφημα μέγιστου βάθους ανά κατηγορία χρήσης γης για την πλημμύρα του 2005, ενώ τα αντίστοιχα γραφήματα των υπόλοιπων σεναρίων παρατίθενται στο Παράρτημα Α.



Σχήμα 8.1: Γράφημα μέγιστου βάθους ανά κατηγορία χρήσης γης της πλημμύρας του 2005

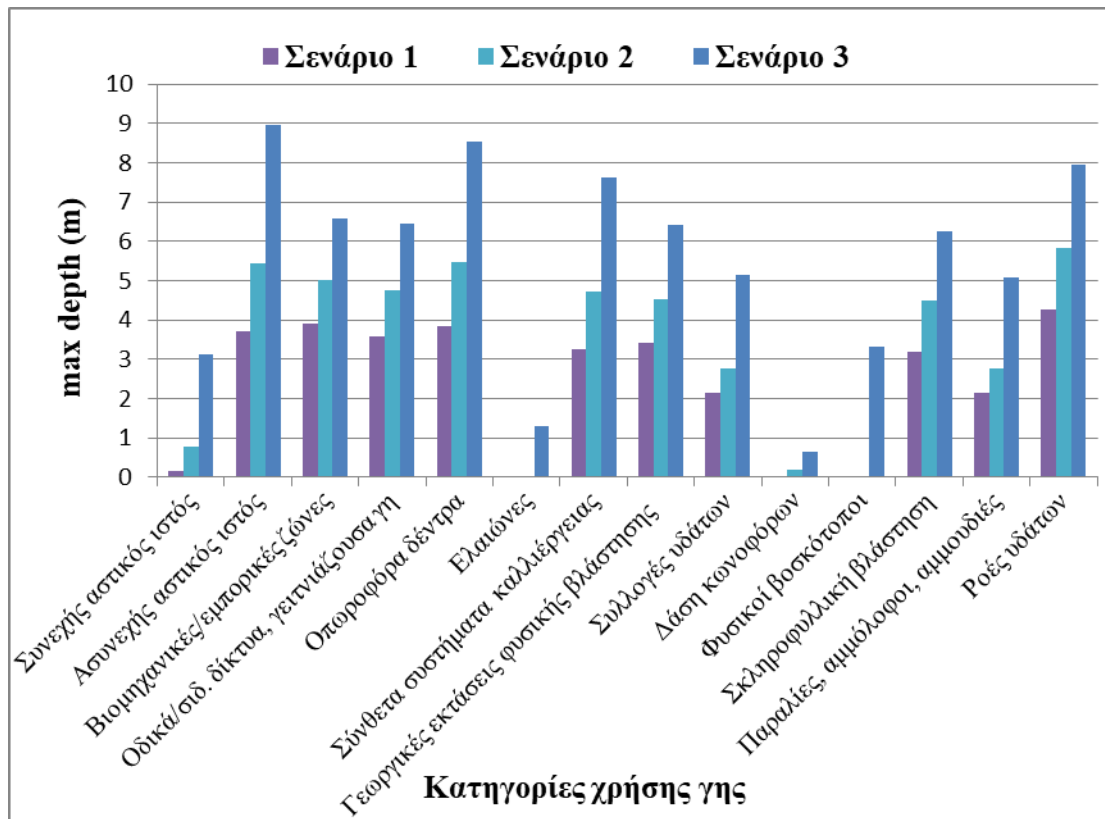
Επιπλέον, όπως αποτυπώνεται στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 8.2), η πλημμύρα του 2015 παρουσίασε υψηλότερα βάθη νερού συγκριτικά με το πλημμυρικό επεισόδιο του 2005. Η μεγαλύτερη μέγιστη τιμή βάθους της πλημμύρας του 2015

έφτασε κοντά στα 7 m, ενώ η αντίστοιχη τιμή για την πλημμύρα του 2005 βρέθηκε ίση με 5 m.



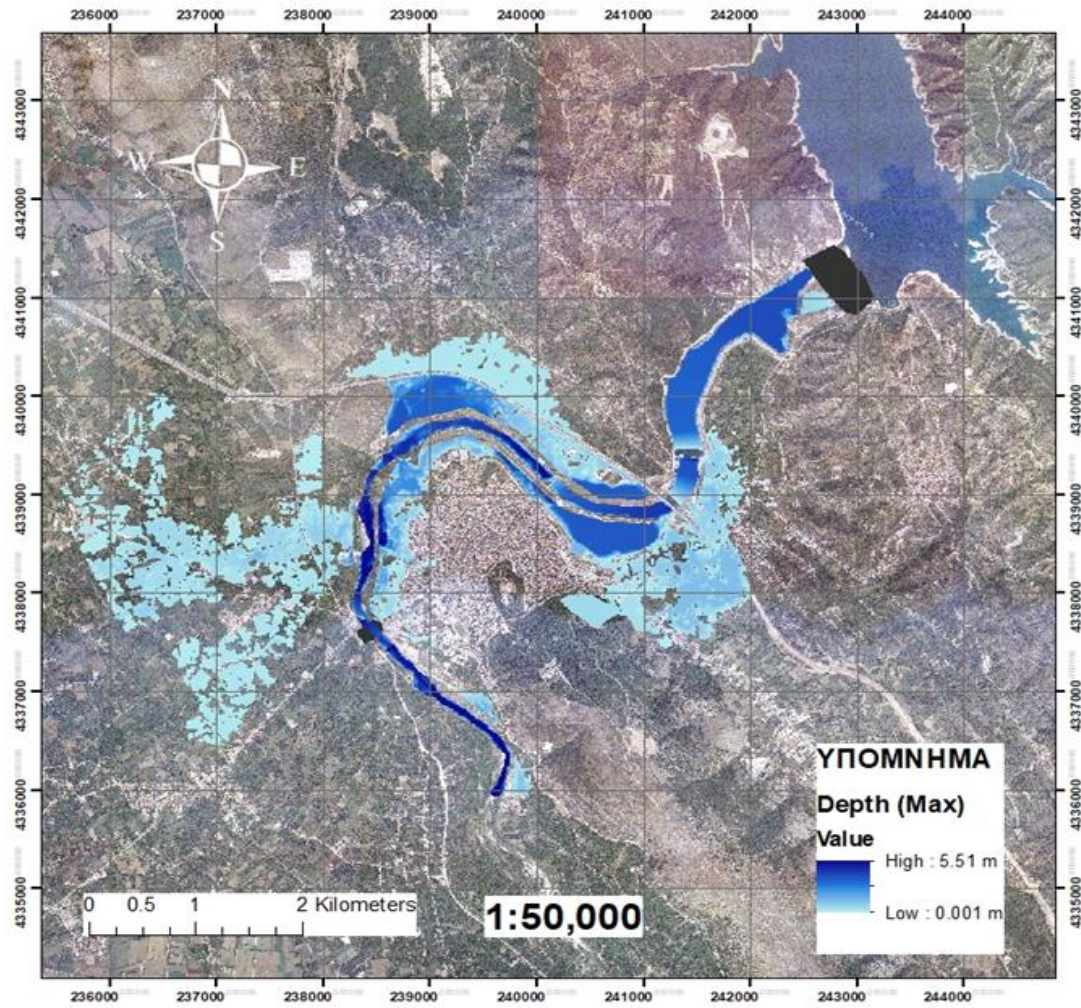
Σχήμα 8.2: Γράφημα μέγιστου βάθους ανά κατηγορία χρήσης γης για τις πλημμύρες του 2005 και 2015

Όσον αφορά τα επιπλέον σενάρια παρατηρήθηκε αύξηση των τιμών του βάθους ροής με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς. Επίσης, αναφέρεται ότι η μεγαλύτερη μέγιστη τιμή βάθους του σεναρίου 3 είναι ίση με 9 m, του σεναρίου 2 ίση με 5 m, και του σεναρίου 1 ίση με 4 m (Σχήμα 8.3).

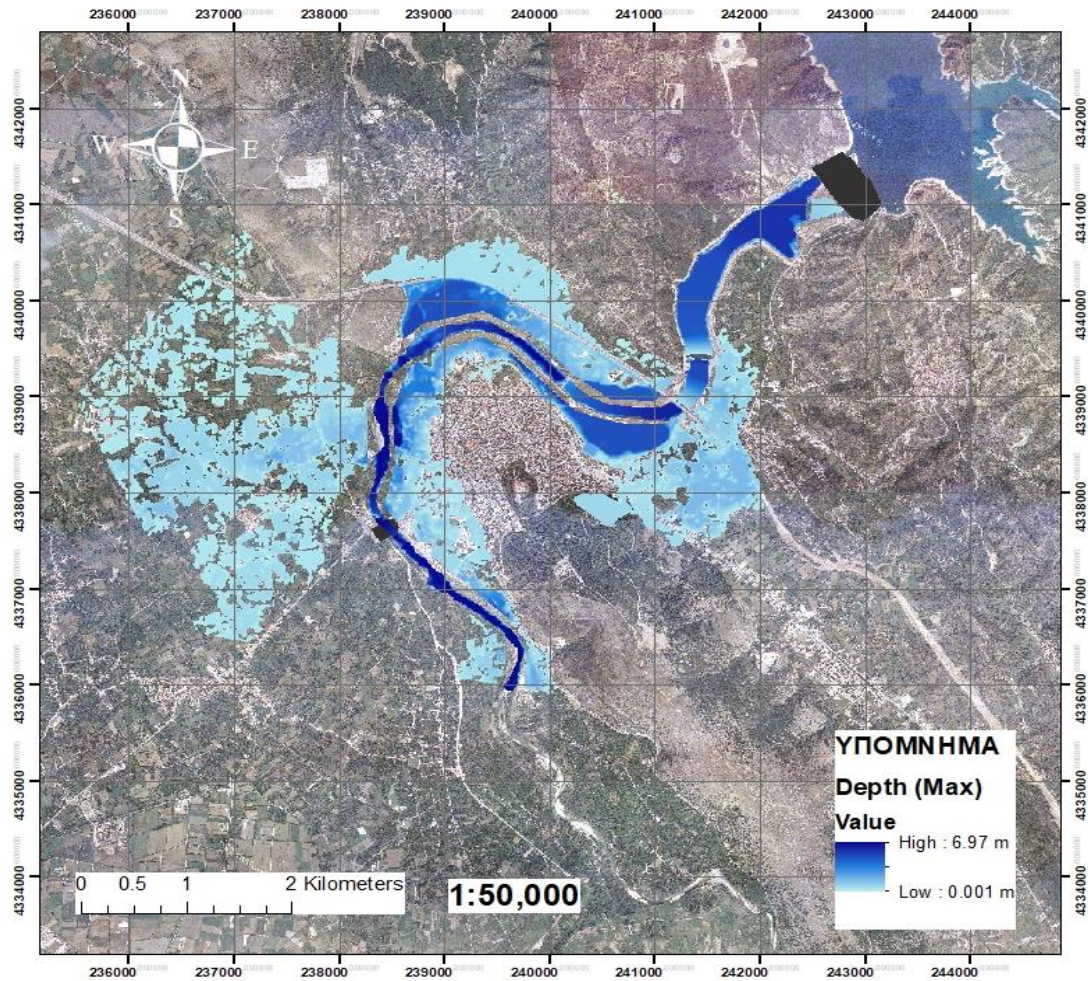


Σχήμα 8.3: Γράφημα μέγιστου βάθους ανά κατηγορία χρήσης γης για τα σενάρια 1-3

Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται παρατηρώντας τον πλημμυρικό χάρτη βάθους της περιοχής. Παρατηρείται ότι εκτός από τις επιφάνειες του ποταμού και της λίμνης της Άρτας, μεγάλα βάθη νερού εμφανίζονται στην δεξιά όχθη του ποταμού, βόρεια της περιοχής. Ωστόσο, λόγω της ύπαρξης του κεντρικού οδικού δικτύου στο σημείο αυτό, η ροή του νερού ανακόπτεται και έτσι οι υψηλές τιμές του βάθους μειώνονται σημαντικά. Στα σχήματα 8.4 και 8.5 παρουσιάζονται οι χάρτες των πλημμυρών του 2005 και 2015, ενώ ίδια εικόνα παρατηρείται στους χάρτες των επιπλέον σεναρίων, οι οποίοι παρατίθενται στο Παράρτημα Α του τεύχους.



Σχήμα 8.4: Πλημμυρικός χάρτης μέγιστου βάθους νερού της πλημμύρας του 2005



Σχήμα 8.5: Πλημμυρικός χάρτης μέγιστου βάθους νερού της πλημμύρας του 2015

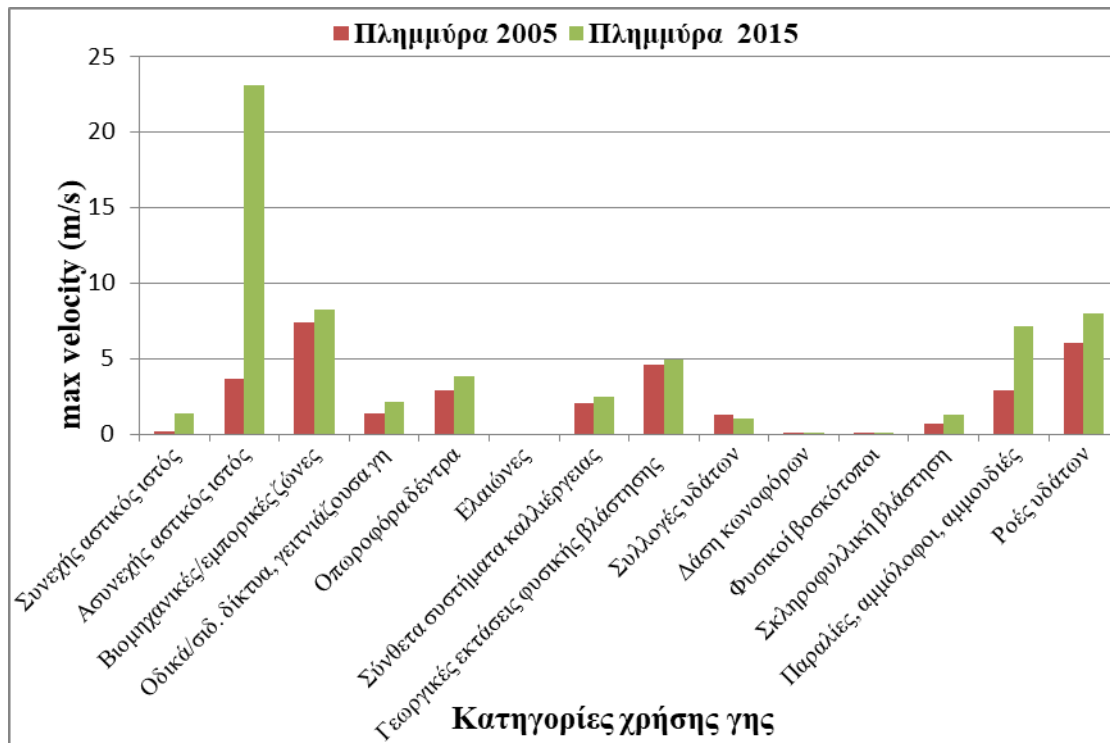
Μέγιστη ταχύτητα πλημμύρας

Μελετώντας τα γραφήματα της μέγιστης ταχύτητας ανά χρήση γης των εξεταζόμενων πλημμυρικών σεναρίων διαπιστώνεται πως οι υψηλότερες ταχύτητες ροής σημειώθηκαν στις αστικές, βιομηχανικές/εμπορικές ζώνες, καθώς και εντός της κοίτης του υδατορέματος (Σχήμα 8.6).



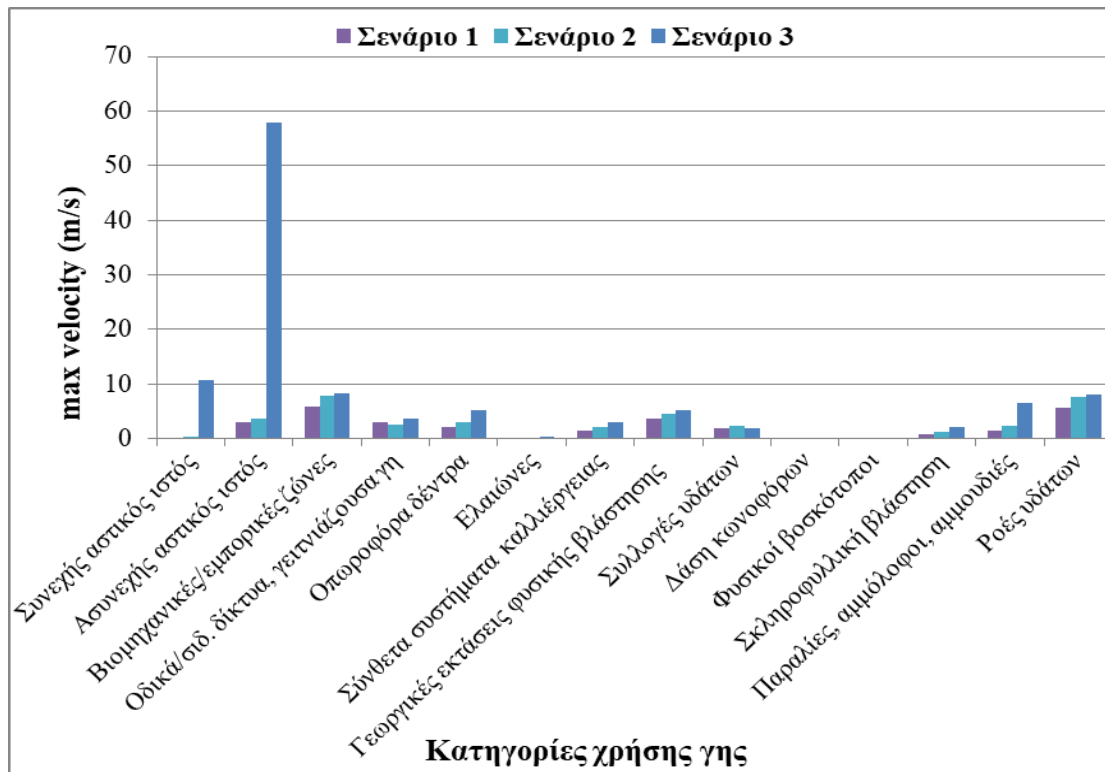
Σχήμα 8.6: Γράφημα μέγιστης ταχύτητας της πλημμύρας του 2005

Η μεγαλύτερη μέγιστη τιμή ταχύτητας της πλημμύρας του 2005 παρατηρήθηκε στον ασυνεχή αστικό ιστό και είναι ίση με 23 m/s. Από την άλλη, η υψηλότερη μέγιστη τιμή ταχύτητας της πλημμύρας του 2015 εμφανίζεται στις βιομηχανικές/εμπορικές χρήσεις γης και είναι ίση με 7 m/s (Σχήμα 8.7).



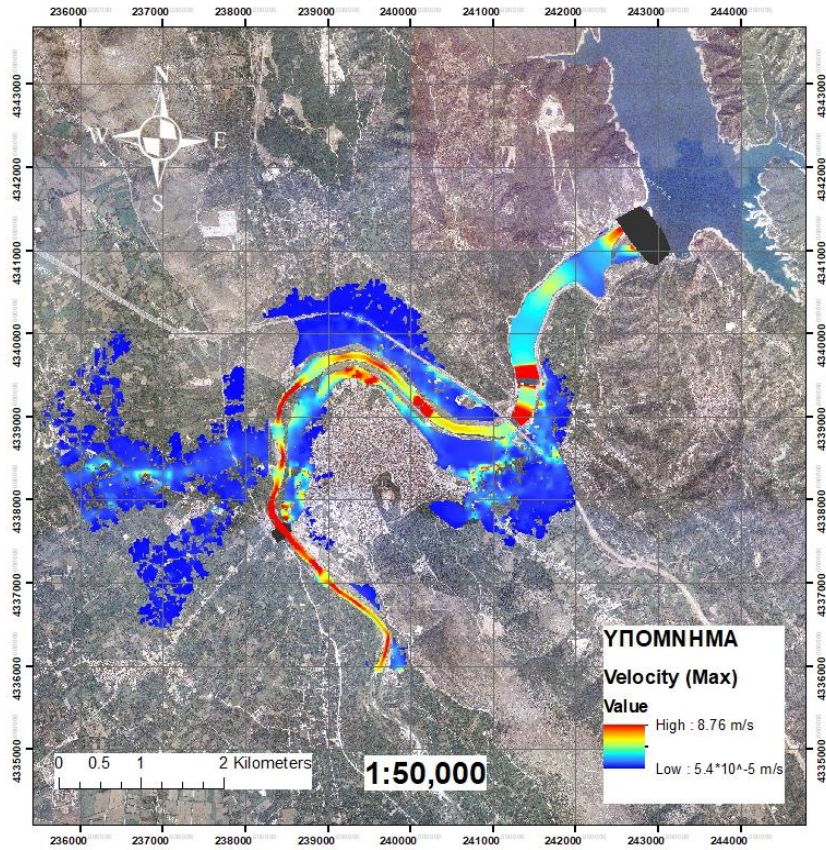
Σχήμα 8.7: Γράφημα μέγιστης ταχύτητας ανά κατηγορία χρήσης γης για τις πλημμύρες του 2005 και 2015

Σε ότι αφορά τα επιπλέον πλημμυρικά σενάρια, σημειώνεται ότι η μεγαλύτερη μέγιστη τιμή της ταχύτητας του σεναρίου 3 εμφανίζεται στον ασυνεχή αστικό ιστό περίπου ίση με 60 m/s. Ωστόσο, η τιμή αυτή πιθανόν να οφείλεται σε τοπική αριθμητική αστάθεια του μοντέλου, επομένως δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη. Από την άλλη, οι μέγιστες ταχύτητες των σεναρίων 2 και 3 παρατηρούνται στις βιομηχανικές/εμπορικές εκτάσεις και εντός της κοίτης του ρέματος είναι ίσες με 6 και 8 m, αντίστοιχα (Σχήμα 8.8).

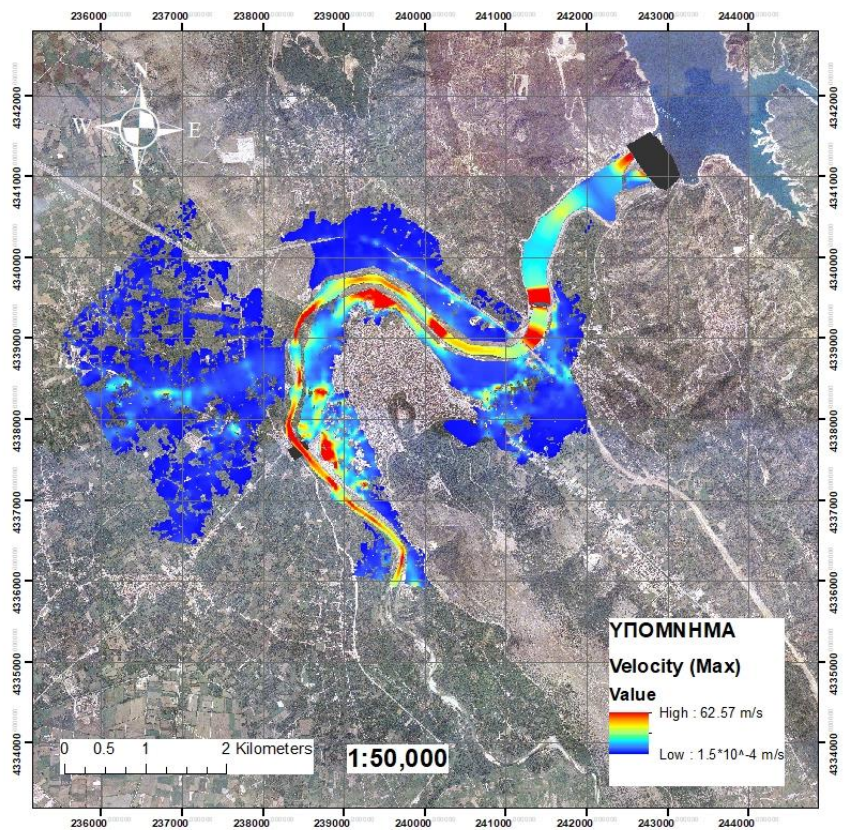


Σχήμα 8.8: Γράφημα μέγιστης ταχύτητας ανά κατηγορία χρήσης γης για τις πλημμύρες των σεναρίων 1-3

Αναφορικά με την κοίτη του ποταμού, όπως απεικονίζεται στους πλημμυρικούς χάρτες μέγιστης ταχύτητας και των πέντε σεναρίων, οι μεγαλύτερες ταχύτητες εμφανίζονται στις θέσεις των φραγμάτων και γεφυρών και στα σημεία όπου τα πλάτη του ρέματος μειώνονται. Τέλος, για την πλημμύρα του 2015 διαπιστώνεται ότι υψηλές ταχύτητες αναπτύχθηκαν στις αστικές εκτάσεις που συνορεύουν με τις όχθες του Αράχθου, ενώ στην πλημμύρα του 2005 δεν παρατηρήθηκε κάτι αντίστοιχο (Σχήματα 8.9, 8.10).



Σχήμα 8.9: Πλημμυρικός χάρτης μέγιστης ταχύτητας της πλημμύρας του 2005



Σχήμα 8.10: Πλημμυρικός χάρτης μέγιστης ταχύτητας της πλημμύρας του 2015

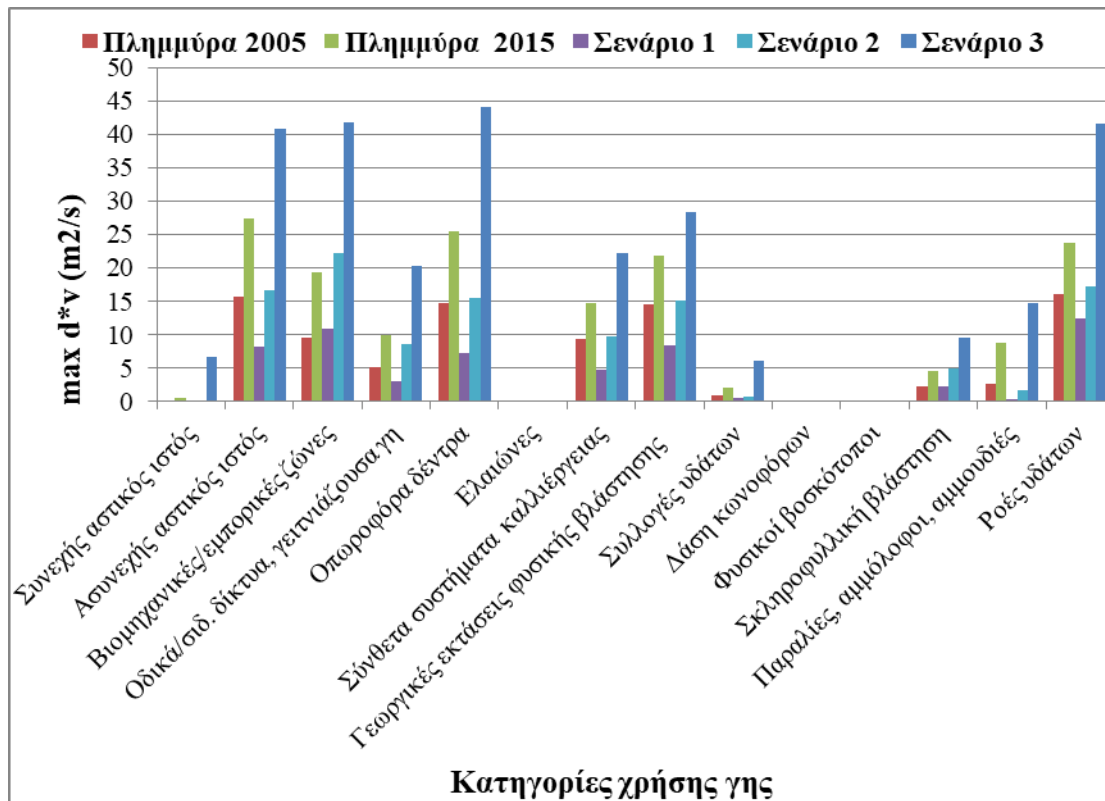
Γινόμενο βάθους νερού και ταχύτητας ροής ($d \times v$)

Όπως αποτυπώνεται από τα γραφήματα της παραμέτρου $d \times v$ ανά χρήση γης των πλημμυρικών σεναρίων (Σχήμα 8.11), το μέγεθος αυτό εμφανίζει υψηλές τιμές σε αστικές, βιομηχανικές/εμπορικές εκτάσεις, σε αγροτικές καλλιέργειες, κυρίως στις εκτάσεις με οπωροφόρα δέντρα και φυσική βλάστηση, καθώς επίσης και κατά μήκος της επιφάνειας του υδατορέματος.



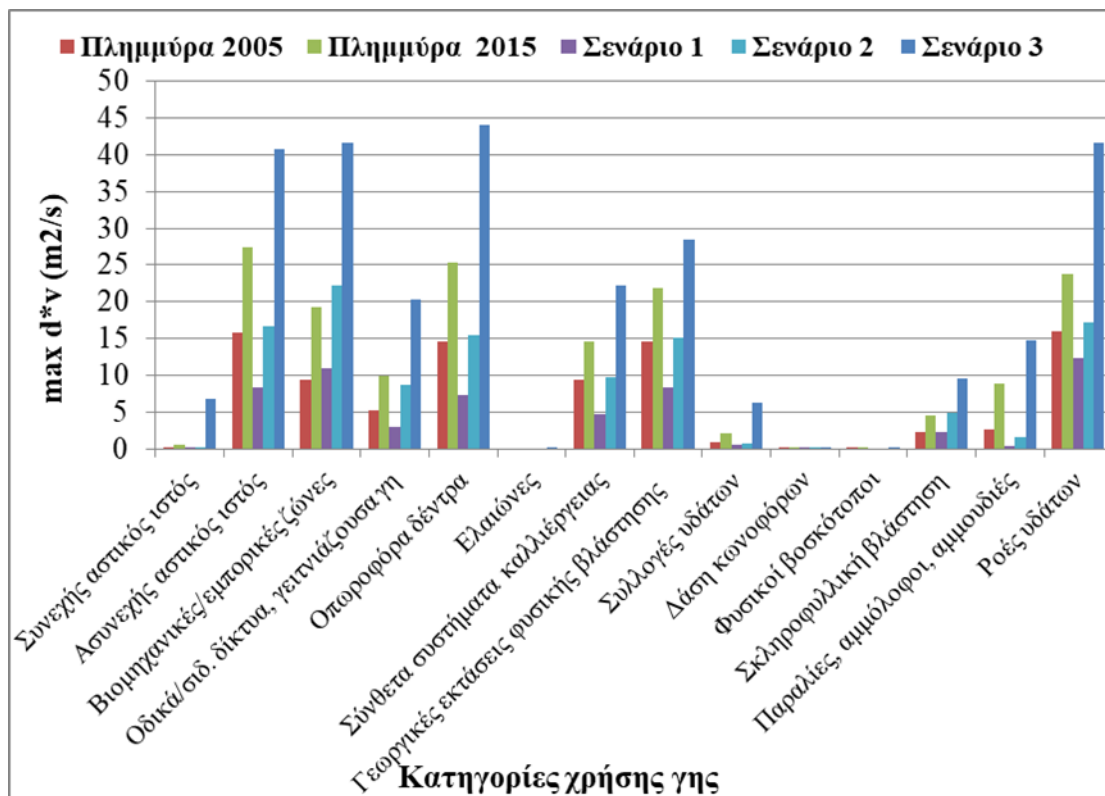
Σχήμα 8.11: Γράφημα $d \times v$ ανά κατηγορία χρήσης γης για την πλημμύρα του 2005

Ακόμη, όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 8.12) για το πλημμυρικό σενάριο 3 οι τιμές της προαναφερθείσας μεταβλητής είναι αρκετά μεγαλύτερες σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σενάρια. Ειδικότερα, η υψηλότερη μέγιστη τιμή της παραμέτρου $d \times v$ του σεναρίου 3 φτάνει τα 44 m²/s και εντοπίζεται στον ασυνεχή αστικό ιστό, τις βιομηχανικές/εμπορικές και γεωργικές εκτάσεις, καθώς και εντός του ρέματος.



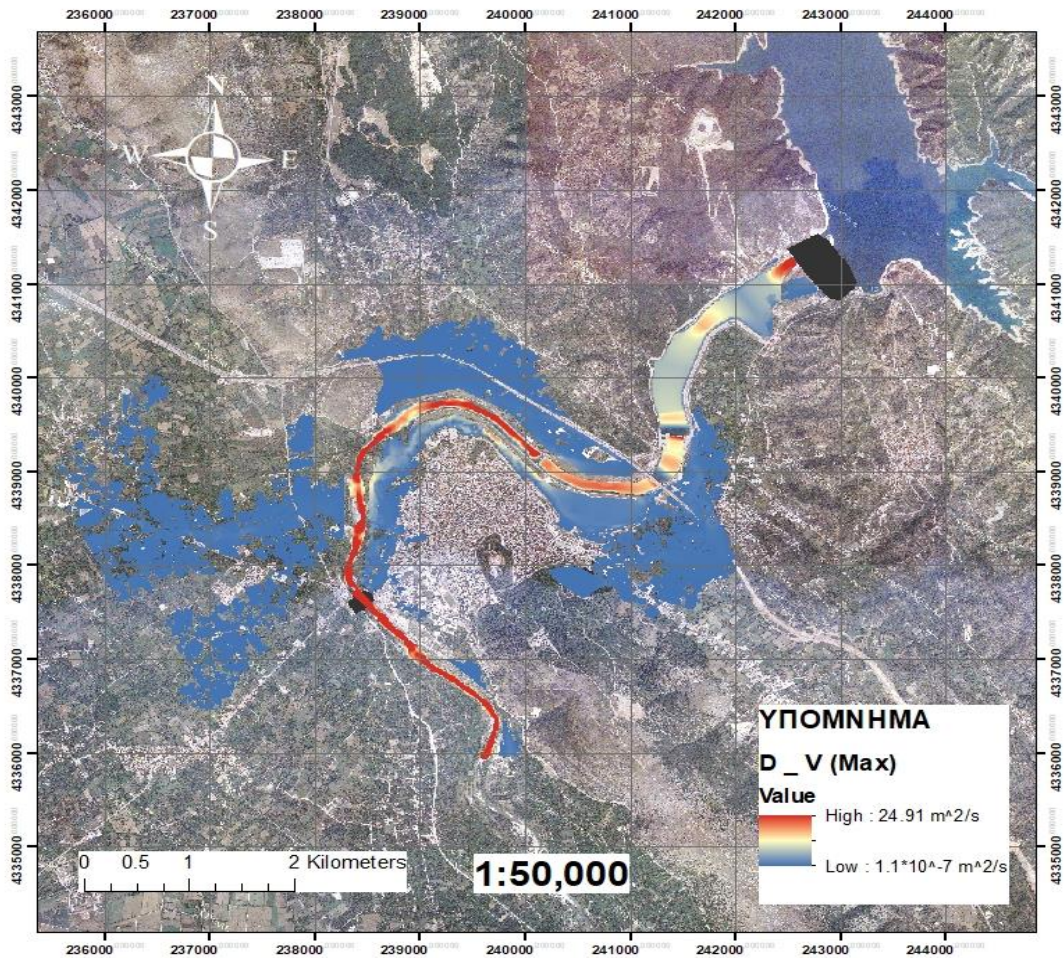
Σχήμα 8.12: Γράφημα $d \times v$ ανά κατηγορία χρήσης γης για το σύνολο των σεναρίων πλημμύρας

Επιπρόσθετα, σύμφωνα με το Σχήμα 8.13, η μεγαλύτερη μέγιστη τιμή της συγκεκριμένης παραμέτρου για την πλημμύρα του 2005 είναι ίση με $16 \text{ m}^2/\text{s}$, ενώ η αντίστοιχη τιμή για την πλημμύρα του 2015 βρέθηκε ίση με $27 \text{ m}^2/\text{s}$.

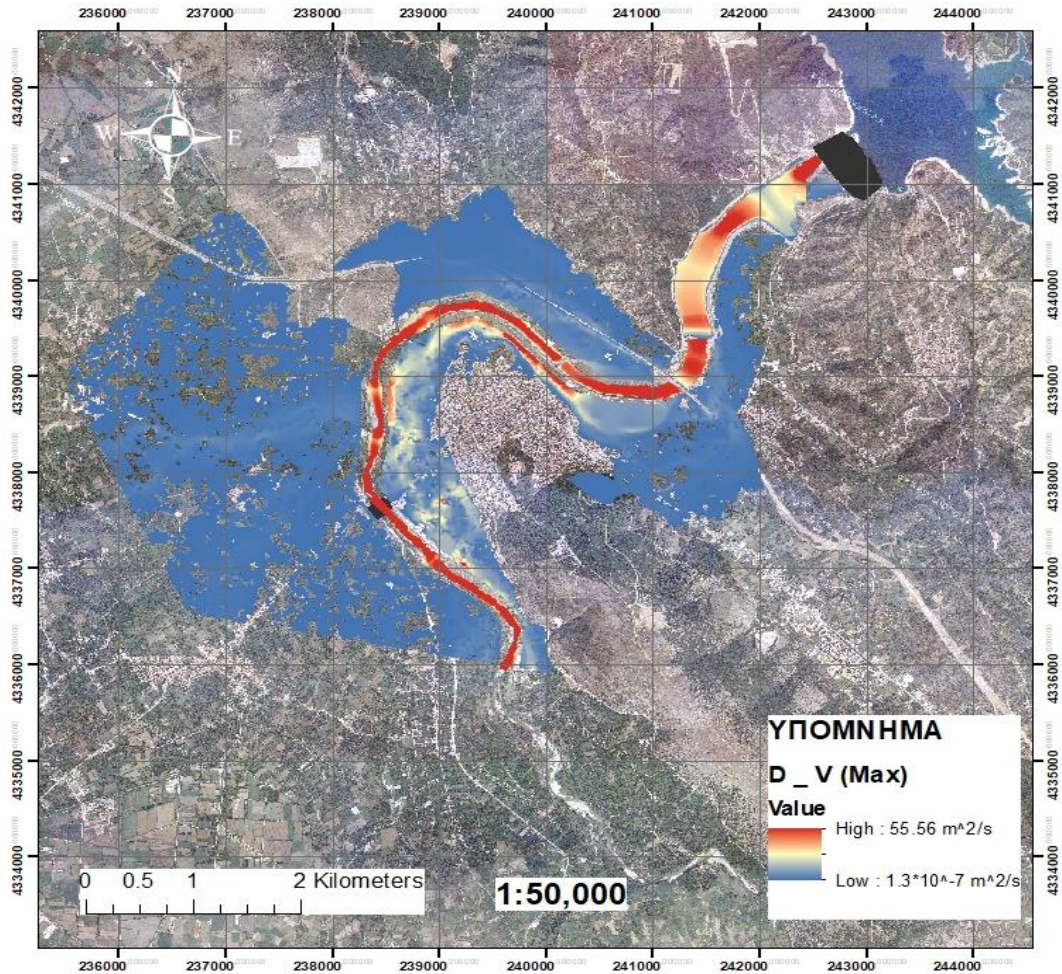


Σχήμα 8.13: Γράφημα $d \times v$ ανά κατηγορία χρήσης γης των ιστορικών πλημμυρών

Στον πλημμυρικό χάρτη d_{xn} διακρίνονται γεωγραφικά οι τιμές του μεγέθους αυτού. Παρατηρώντας τον πλημμυρικό χάρτη, διαπιστώνεται το πώς κυμαίνονται οι τιμές του μεγέθους αυτού εντός της κοίτης του υδατορέματος. Οι υψηλότερες τιμές της παραμέτρου εντοπίζονται αμέσως κατάντη του φράγματος του Πουρναρίου, ενώ μεγάλες τιμές διακρίνονται σε θέσεις όπου η κοίτη του ποταμού είναι στενή. Τα παραπάνω παρατηρούνται στους πλημμυρικούς χάρτες όλων των σεναρίων. Στα Σχήματα 8.14 και 8.15 παρουσιάζεται ενδεικτικά οι χάρτες των πλημμυρών του 2005 και του σεναρίου 3, ενώ οι χάρτες των λοιπών σεναρίων βρίσκονται στο Παράρτημα Β.



Σχήμα 8.14: Πλημμυρικός χάρτης d_{xn} της πλημμύρας του 2005



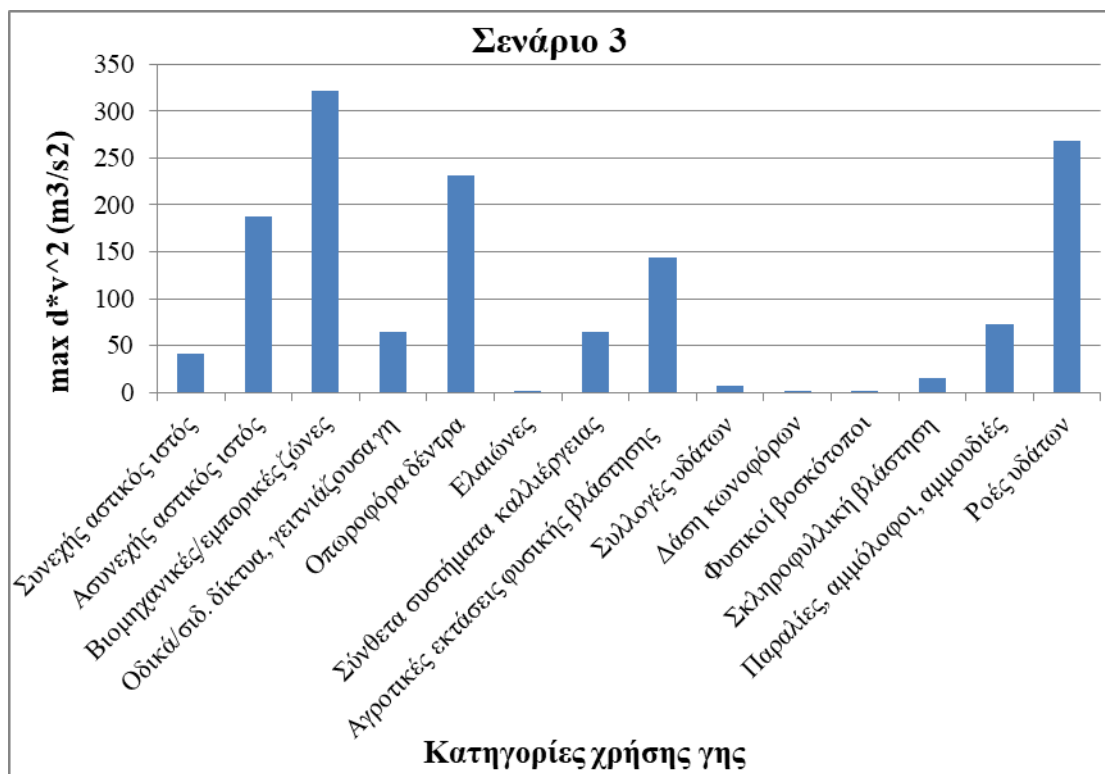
Σχήμα 8.15: Πλημμυρικός χάρτης $d \times v$ του σεναρίου 3

Γινόμενο βάθους και ταχύτητας υψωμένη στο τετράγωνο ($d \times v^2$)

Εξετάζοντας τα γραφήματα της μεταβλητής $d \times v^2$ ανά χρήση γης των εξεταζόμενων πλημμυρικών σεναρίων, διαπιστώνεται ότι για τις πλημμύρες του 2005 και 2015, οι υψηλότερες τιμές του μεγέθους αυτού σημειώθηκαν στην αστική περιοχή, τις αγροτικές καλλιέργειες, κυρίως στις εκτάσεις με φυσική βλάστηση, καθώς επίσης και εντός της κοίτης του υδατορέματος. Επίσης, για τις πλημμύρες των τριών σεναρίων υψηλότερες τιμές παρατηρούνται στις βιομηχανικές/εμπορικές εκτάσεις καθώς και εντός της επιφανείας του ποταμού. Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά τα γραφήματα των πλημμυρών του 2005 και του σεναρίου 3 (Σχήματα 8.16, 8.17).

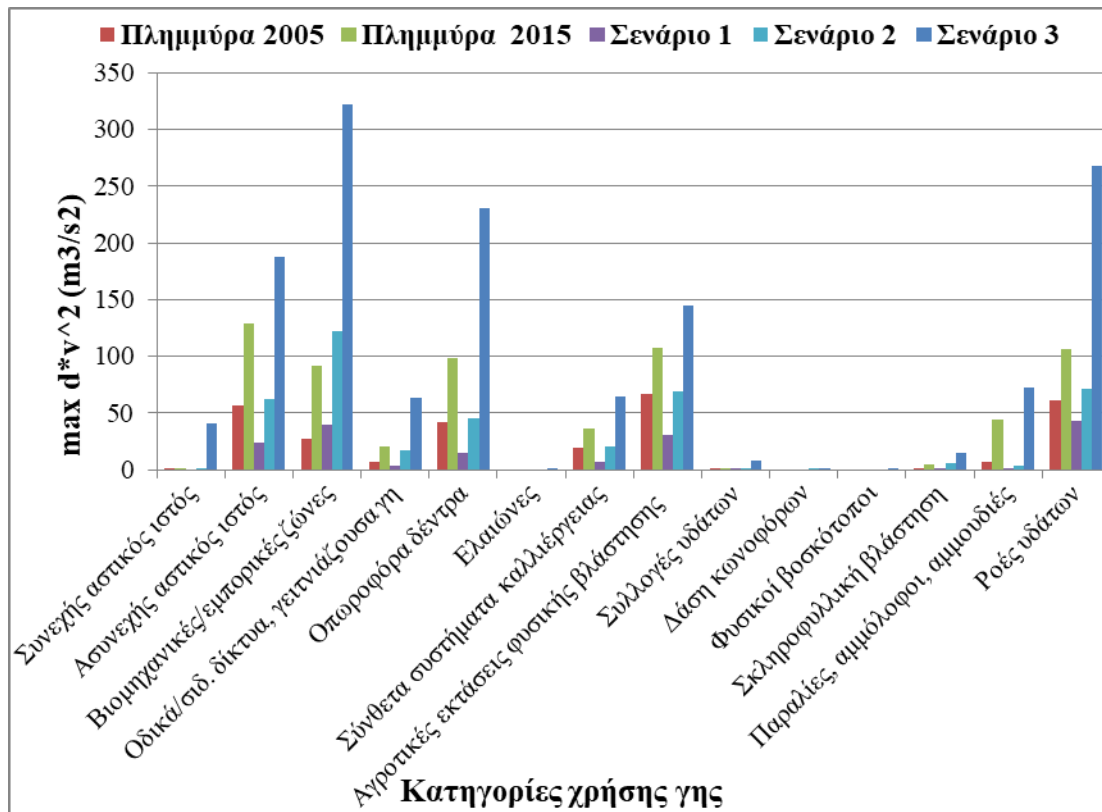


Σχήμα 8.16: Γράφημα $d \times v^2$ ανά κατηγορία χρήσης γης για την πλημμύρα του 2005



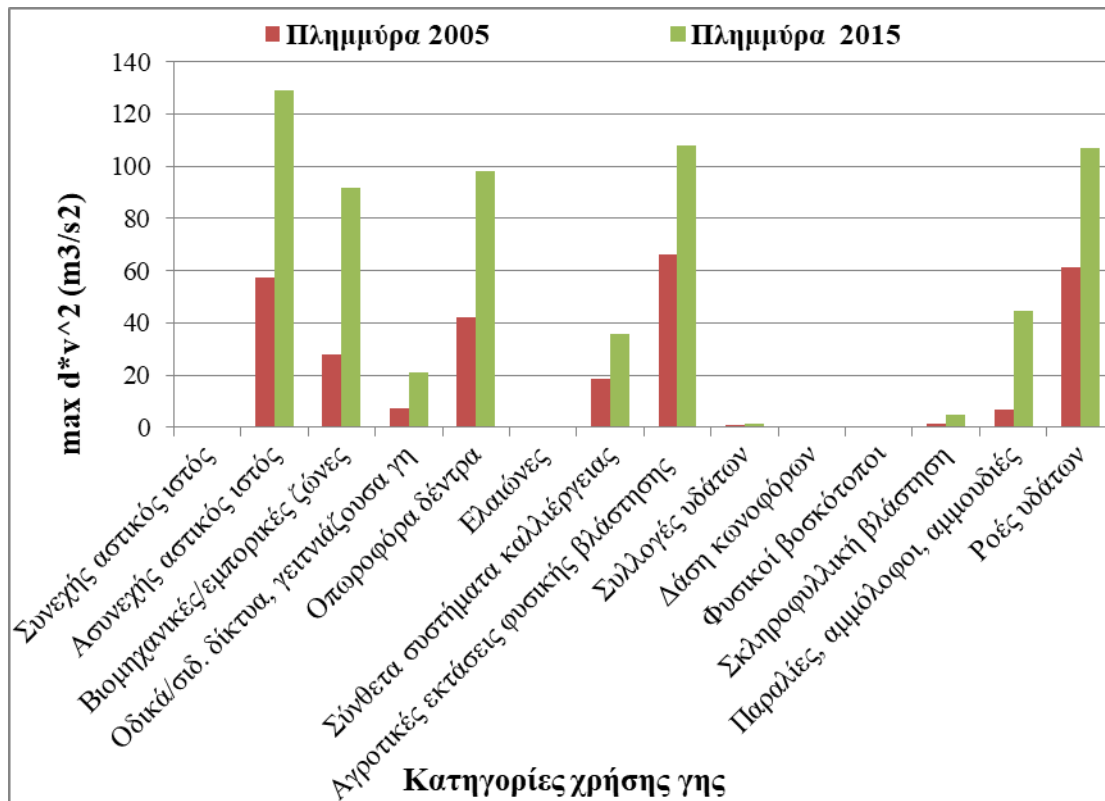
Σχήμα 8.17: Γράφημα $d \times v^2$ ανά κατηγορία χρήσης γης για την πλημμύρα του σεναρίου 3

Όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα, (Σχήμα 8.18) για το πλημμυρικό σενάριο 3 οι τιμές της εν λόγω παραμέτρου είναι αρκετά μεγαλύτερες σε σύγκριση με τα υπόλοιπα σενάρια. Ειδικότερα, στις βιομηχανικές/εμπορικές ζώνες της περιοχής η τιμή της φτάνει τα 320 m³/s².



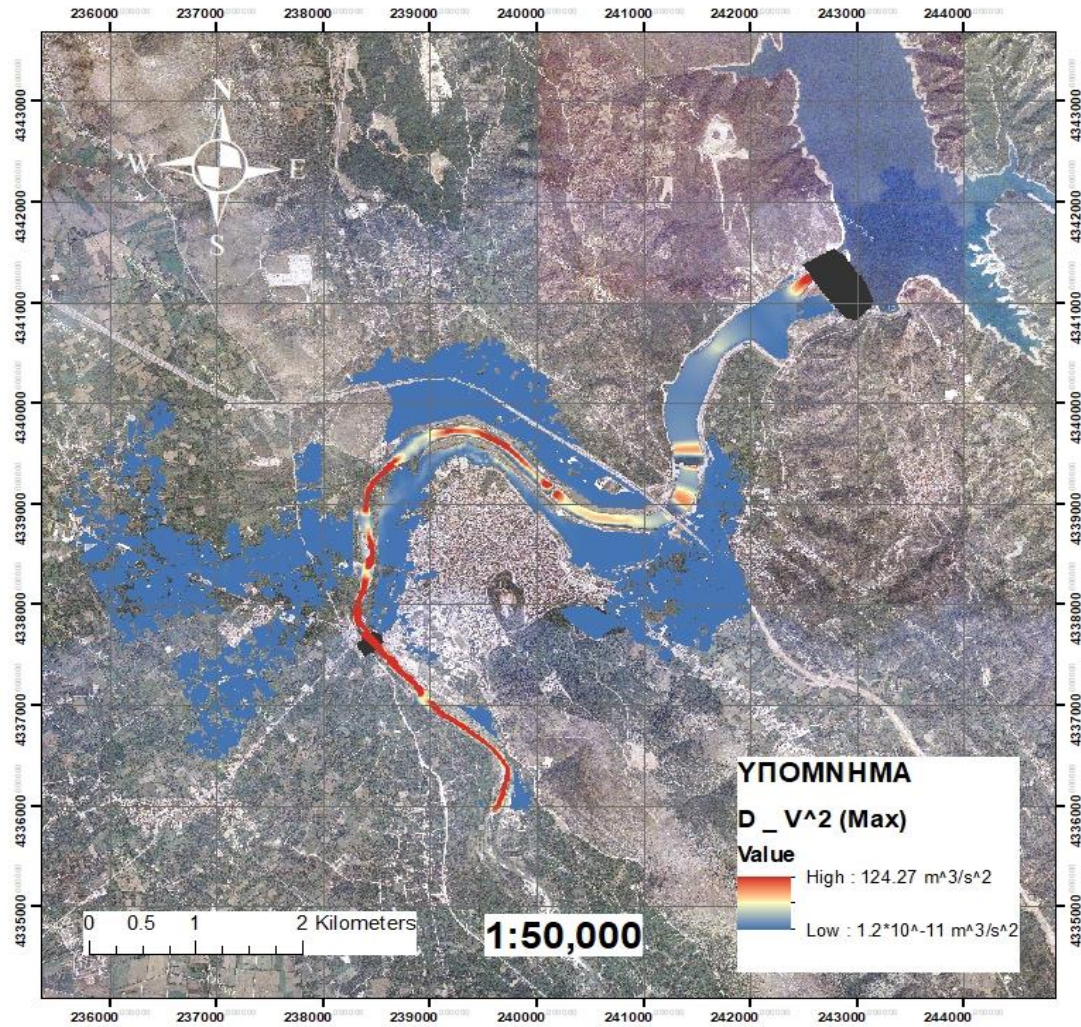
Σχήμα 8.18: Γράφημα $d \times v^2$ ανά κατηγορία χρήσης γης για το σύνολο των σεναρίων πλημμύρας

Επιπλέον, αναφορικά με την πλημμύρα του 2015 η μεγαλύτερη μέγιστη τιμή του μεγέθους $d \times v^2$ παρατηρήθηκε στον ασυνεχή αστικό ιστό και είναι ίση με $130 \text{ m}^3/\text{s}^2$. Από την άλλη, η αντίστοιχη τιμή της πλημμύρας του 2005 πλησιάζει τα $60 \text{ m}^3/\text{s}^2$ (Σχήμα 8.19).

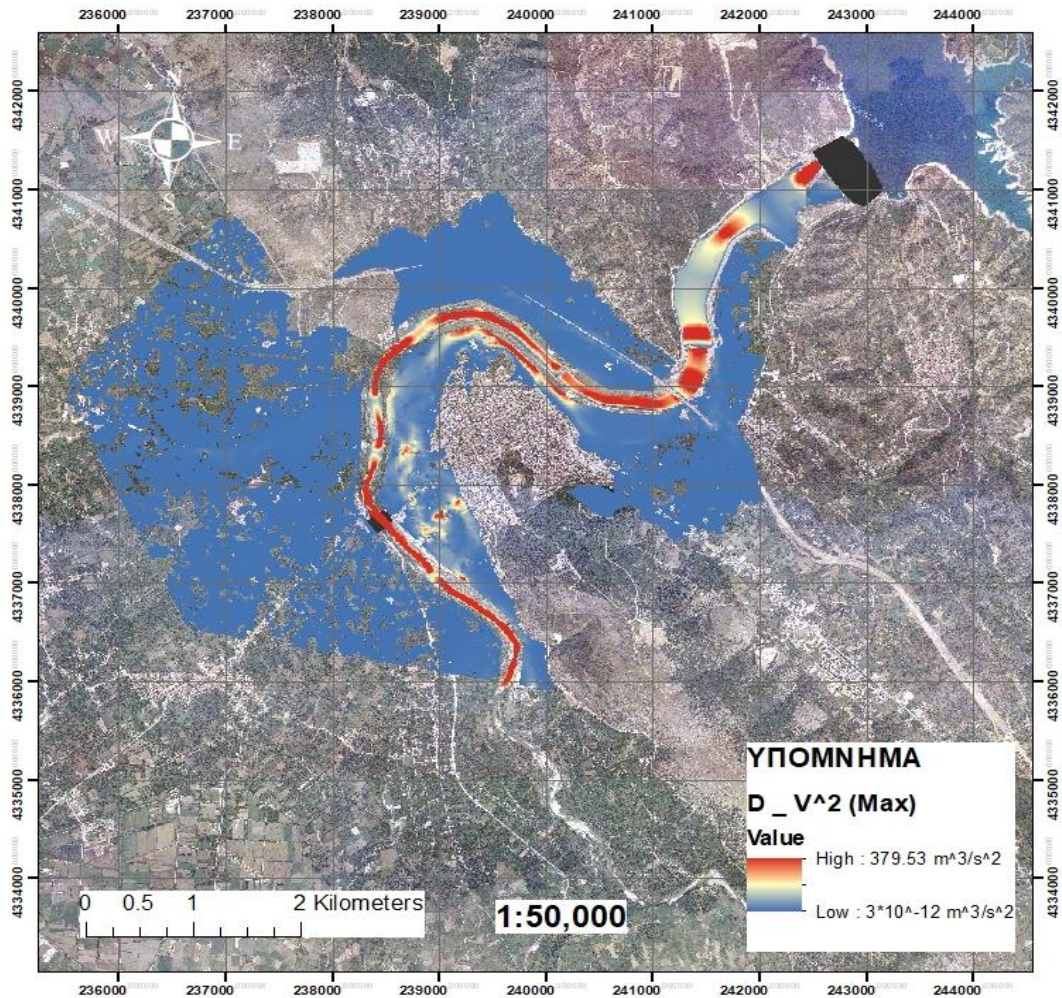


Σχήμα 8.19: Γράφημα $d \times v^2$ ανά κατηγορία χρήσης γης των ιστορικών πλημμυρών

Στον παρακάτω πλημμυρικό χάρτη διακρίνονται χωρικά οι τιμές της παραμέτρου $d \times v^2$. Μελετώντας τον πλημμυρικό χάρτη φαίνεται το πώς κυμαίνονται οι τιμές του μεγέθους αυτού εντός της κοίτης του ποταμού. Οι υψηλότερες τιμές της μεταβλητής εντοπίζονται στις θέσεις των φραγμάτων και γεφυρών και στα σημεία όπου τα πλάτη του ποταμού μειώνονται. Οι παραπάνω παρατηρήσεις αφορούν τους χάρτες όλων των σεναρίων. Στα Σχήματα 8.20 και 8.21 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι χάρτες των πλημμυρών του 2005 και του σεναρίου 3, ενώ οι χάρτες των λοιπών σεναρίων βρίσκονται στο Παράρτημα Β.



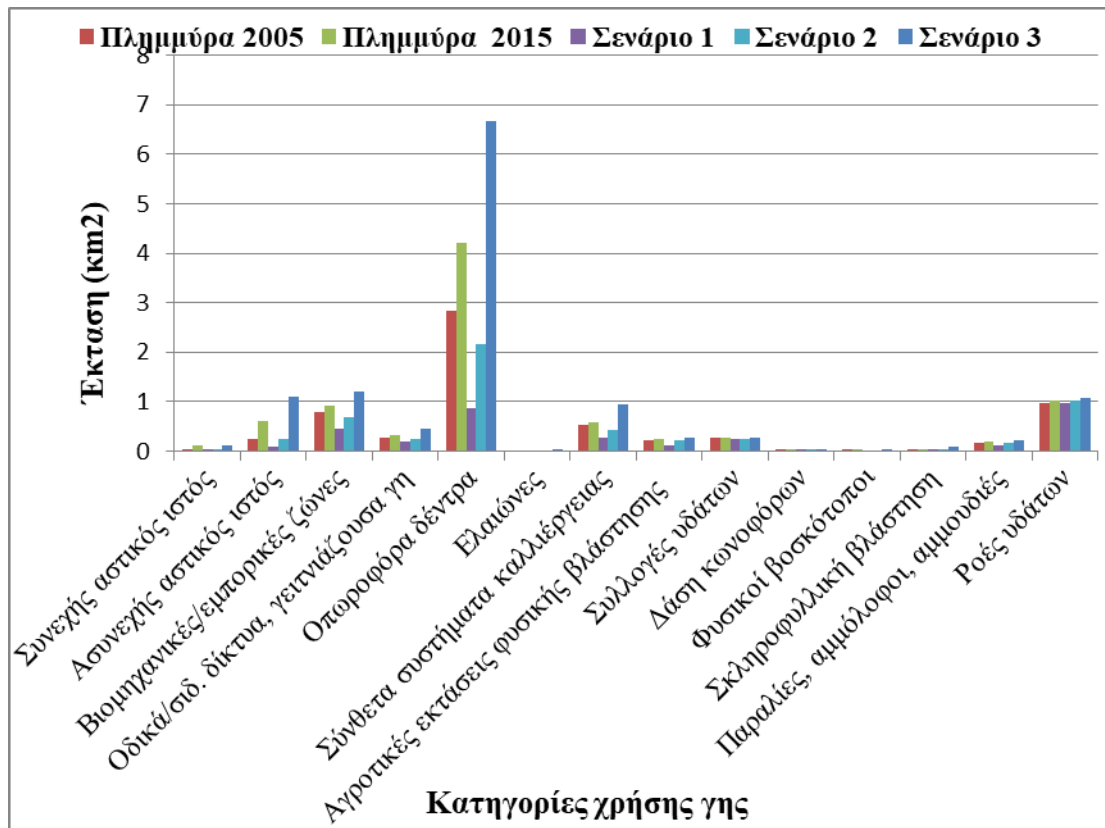
Σχήμα 8.20: Πλημμυρικός χάρτης $d \times v^2$ της πλημμύρας του 2005



Σχήμα 8.21: Πλημμυρικός χάρτης $d \times v^2$ του σεναρίου 3

Έκταση πλημμύρας

Από το παρακάτω γράφημα πλημμυρικής έκτασης ανά χρήση γης (Σχήμα 8.22), φαίνεται πως η χρήση γης που καταλαμβάνει την μεγαλύτερη έκταση πλημμυρικού πεδίου είναι οι καλλιέργειες οπωροφόρων δέντρων. Τα εμβαδά κατάκλισης της προαναφερθείσας χρήσης γης για τις πλημμύρες του 2005 και 2015 ήταν ίσα με 2.8 km² και 4.2 km² αντίστοιχα.

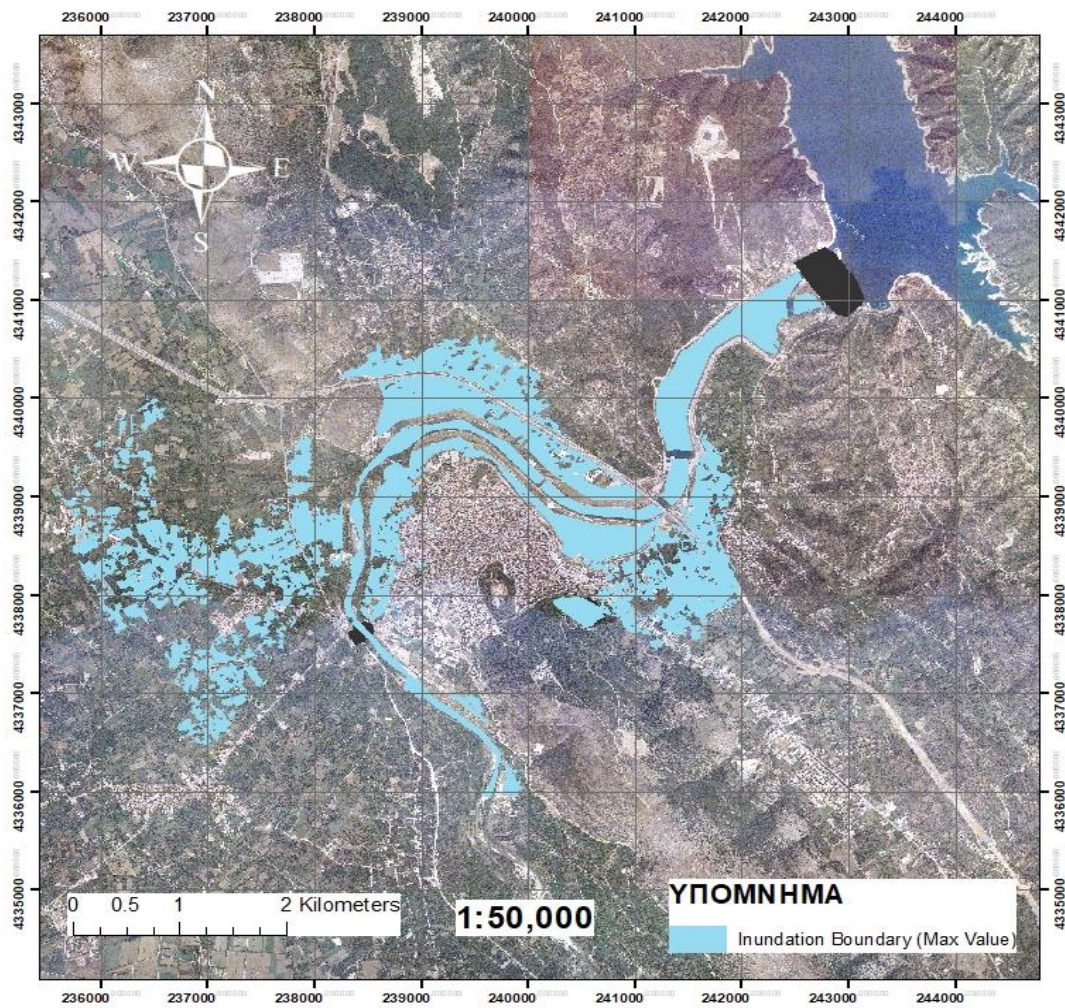


Σχήμα 8.22: Γράφημα πλημμυρικής έκτασης ανά κατηγορία χρήσης γης για το σύνολο των σεναρίων πλημμύρας

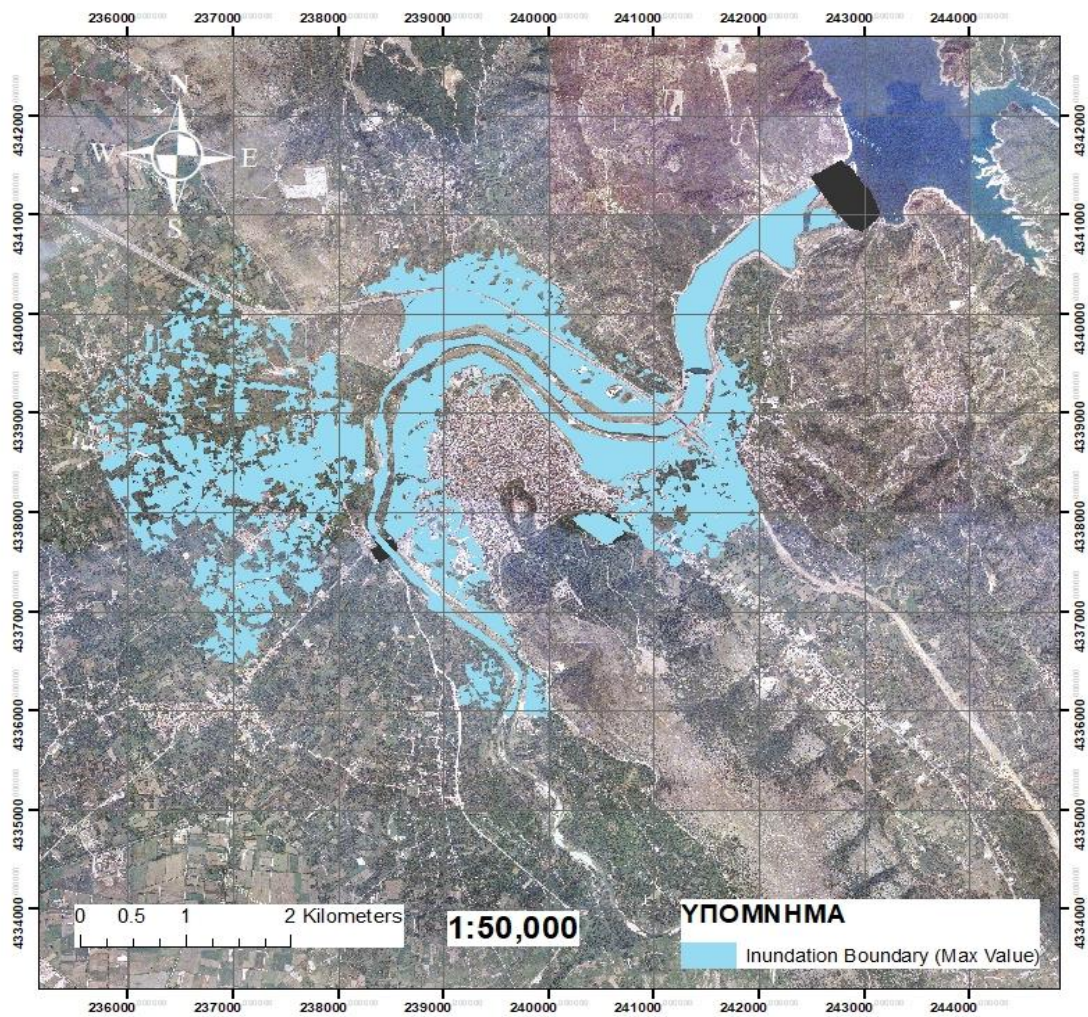
Στη συνέχεια, εξετάζονται οι χάρτες έκτασης πλημμύρας (Σχήματα 8.23-8.27). Αρχικά, παρατηρείται ότι για όλα τα σεναρία οι πλημμύρες είναι πιο εκτεταμένες στις πιο πεδινές περιοχές και σε κοντινή απόσταση από την κοίτη του Αράχθου. Επιπλέον, όπως είναι λογικό, η επιφάνεια του πλημμυρικού πεδίου είναι περιορισμένη στις ορεινότερες περιοχές, οι οποίες εντοπίζονται στα ανατολικά, και έτσι δεν παρουσίασε μεγάλες μεταβολές στα πλημμυρικά γεγονότα.

Επίσης, μελετώντας τους παρακάτω πλημμυρικούς χάρτες (Σχήματα 8.23 και 8.24) διαπιστώνεται ότι στις πεδινές εκτάσεις που βρίσκονται δυτικά της περιοχής καθώς και εντός του αστικού ιστού, οι επιφάνειες κατάκλυσης της πλημμύρας του 2015 είναι αρκετά μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές του 2005.

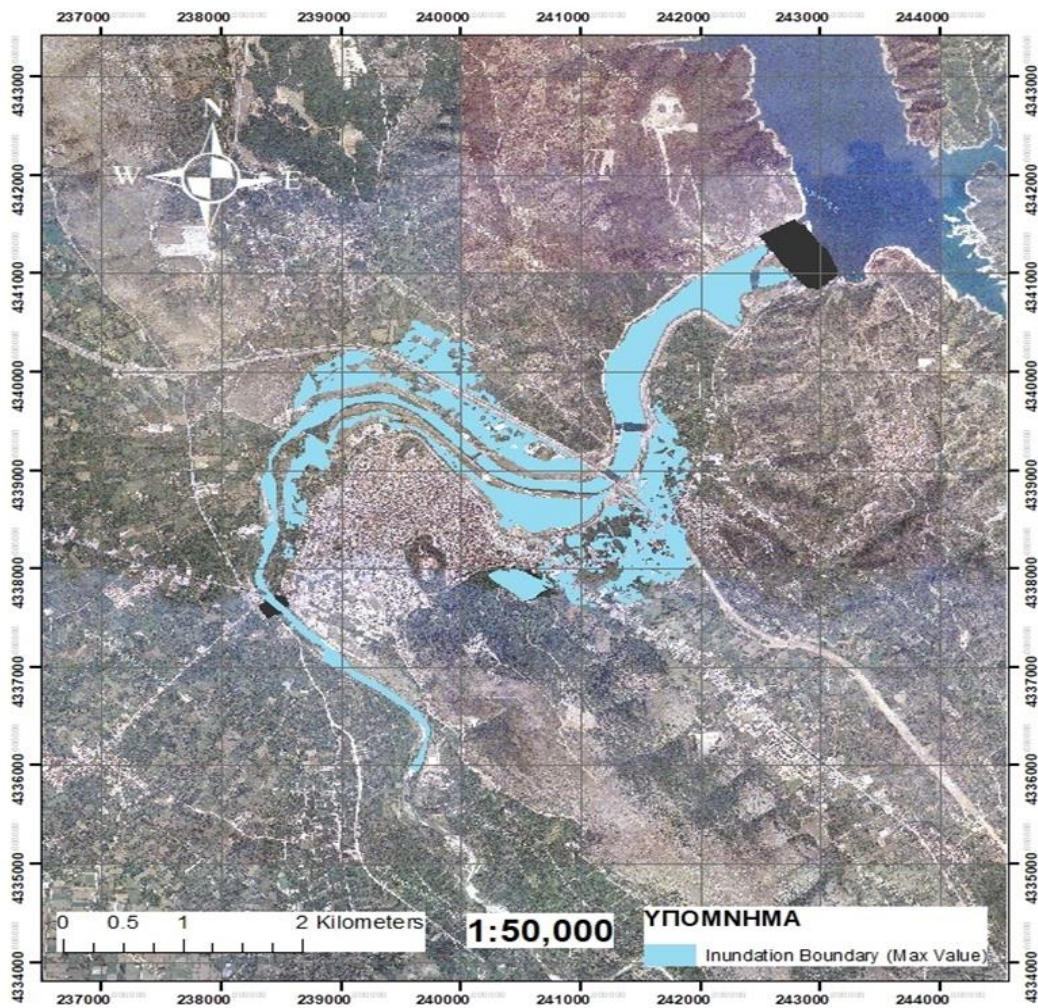
Τέλος, για το πλημμυρικό σενάριο 3 αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τις αστικές και αγροτικές περιοχές, οι κατακλυσμένες εκτάσεις καλύπτουν ένα μεγάλο μέρος του οδικού δικτύου (Σχήμα 8.27).



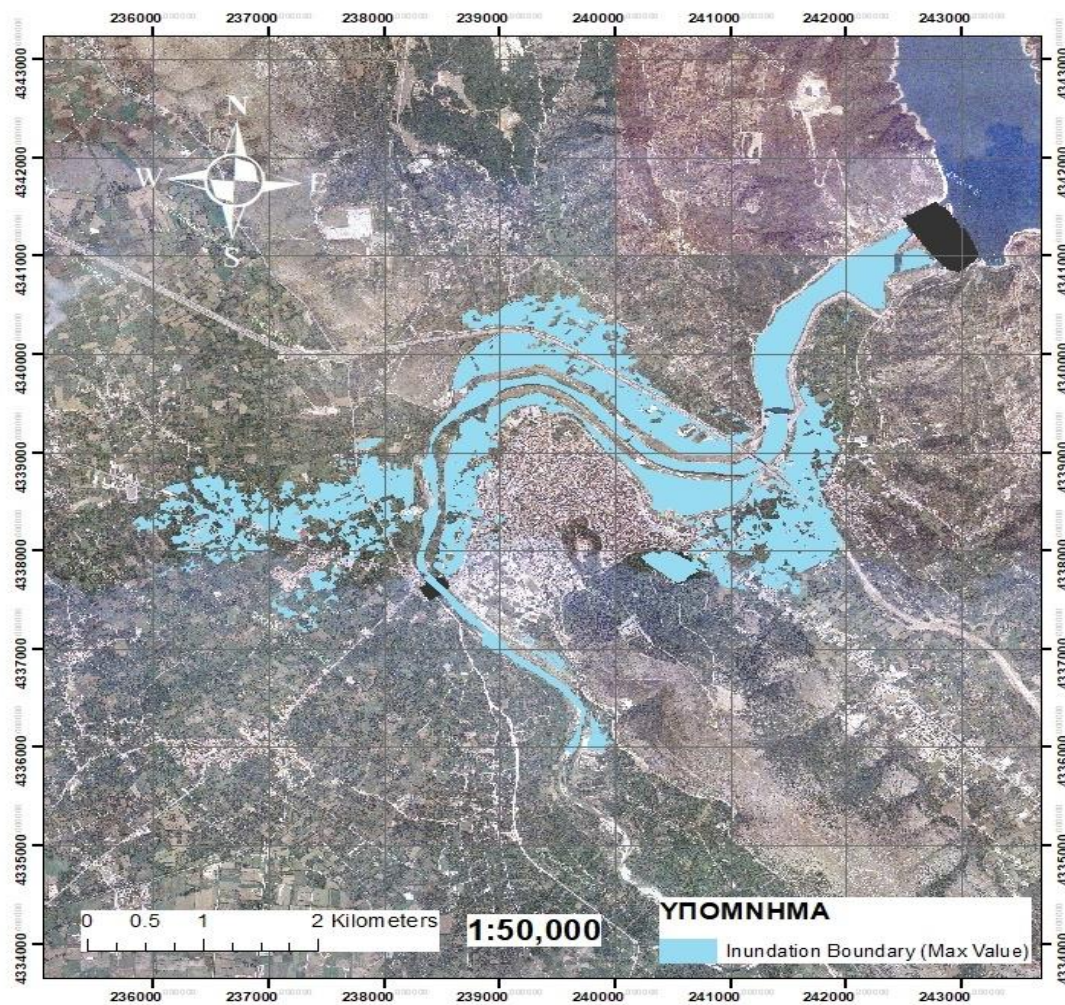
Σχήμα 8.23: Πλημμυρικός χάρτης έκτασης της πλημμύρας του 2005



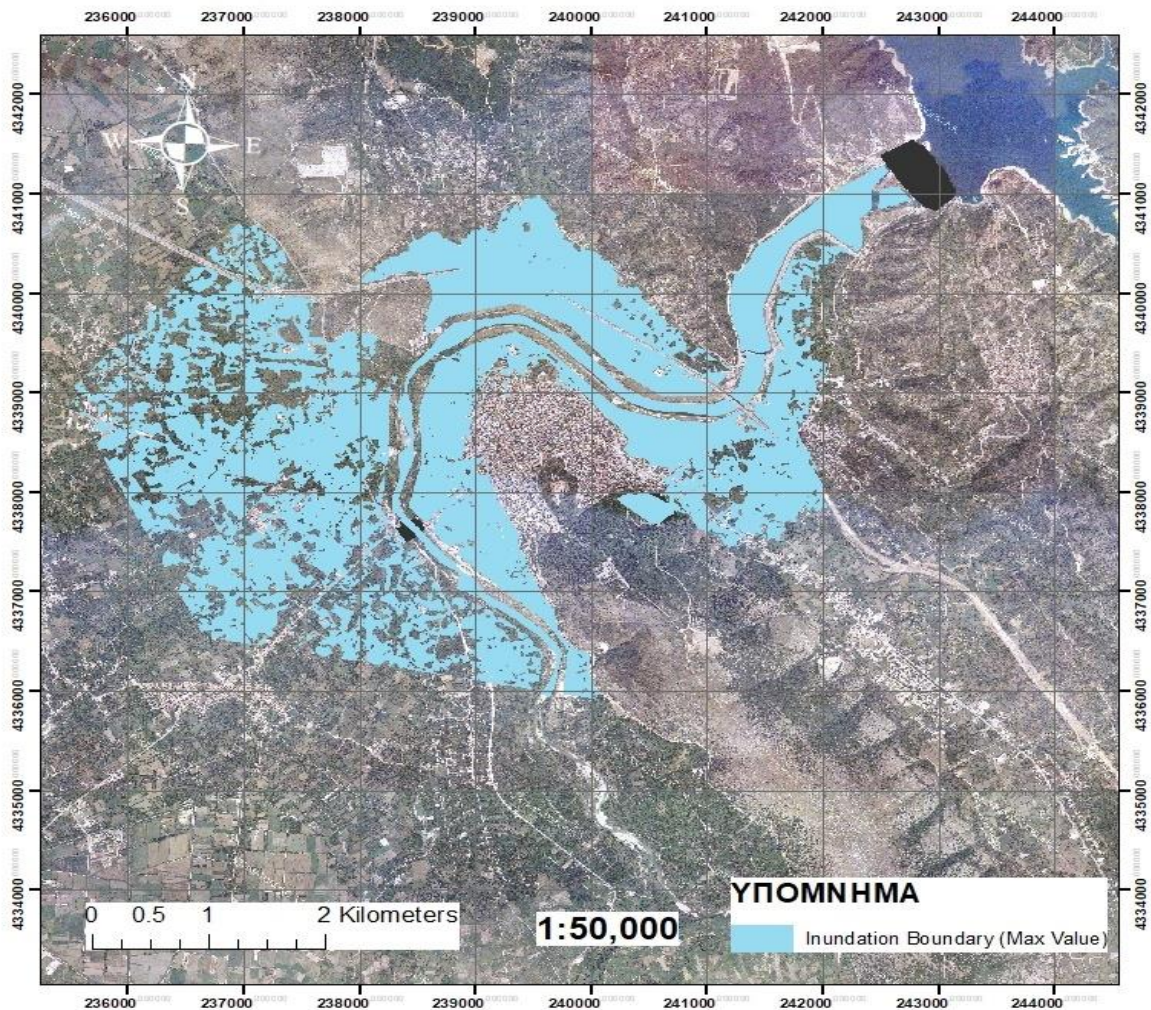
Σχήμα 8.24: Πλημμυρικός χάρτης έκτασης της πλημμύρας του 2015



Σχήμα 8.25: Πλημμυρικός χάρτης έκτασης σεναρίου 1

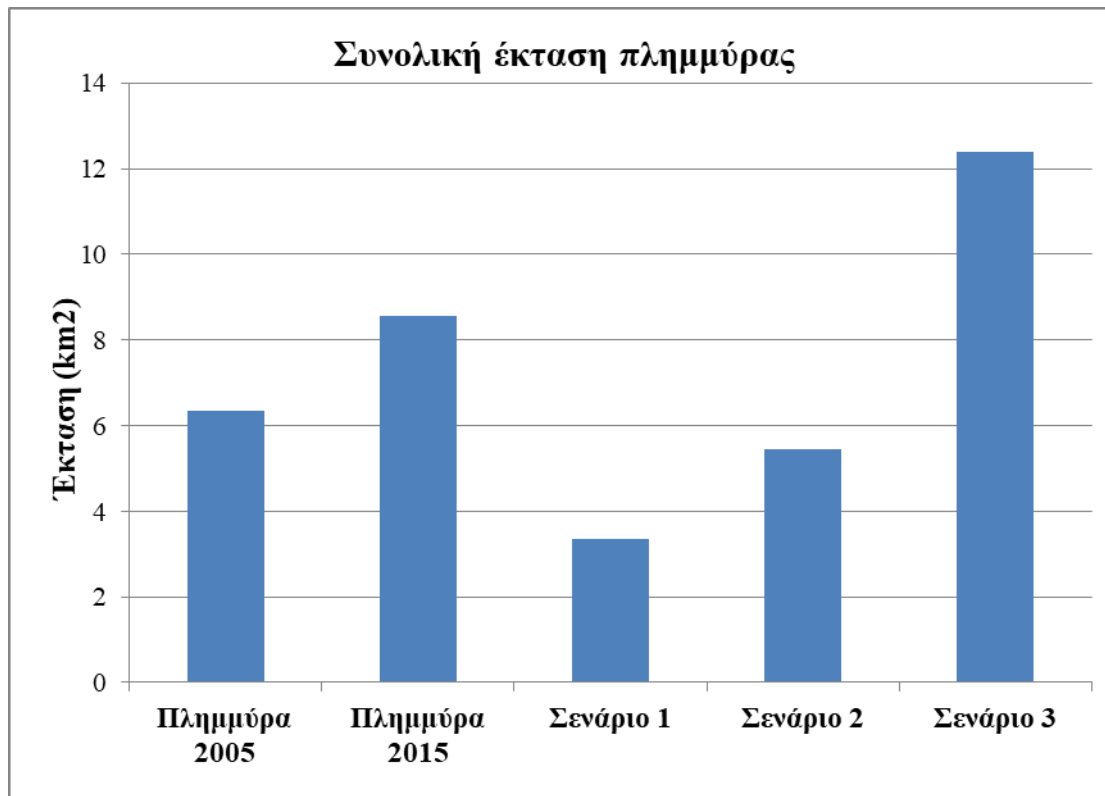


Σχήμα 8.26: Πλημμυρικός χάρτης έκτασης σεναρίου 2



Σχήμα 8.27: Πλημμυρικός χάρτης έκτασης σεναρίου 3

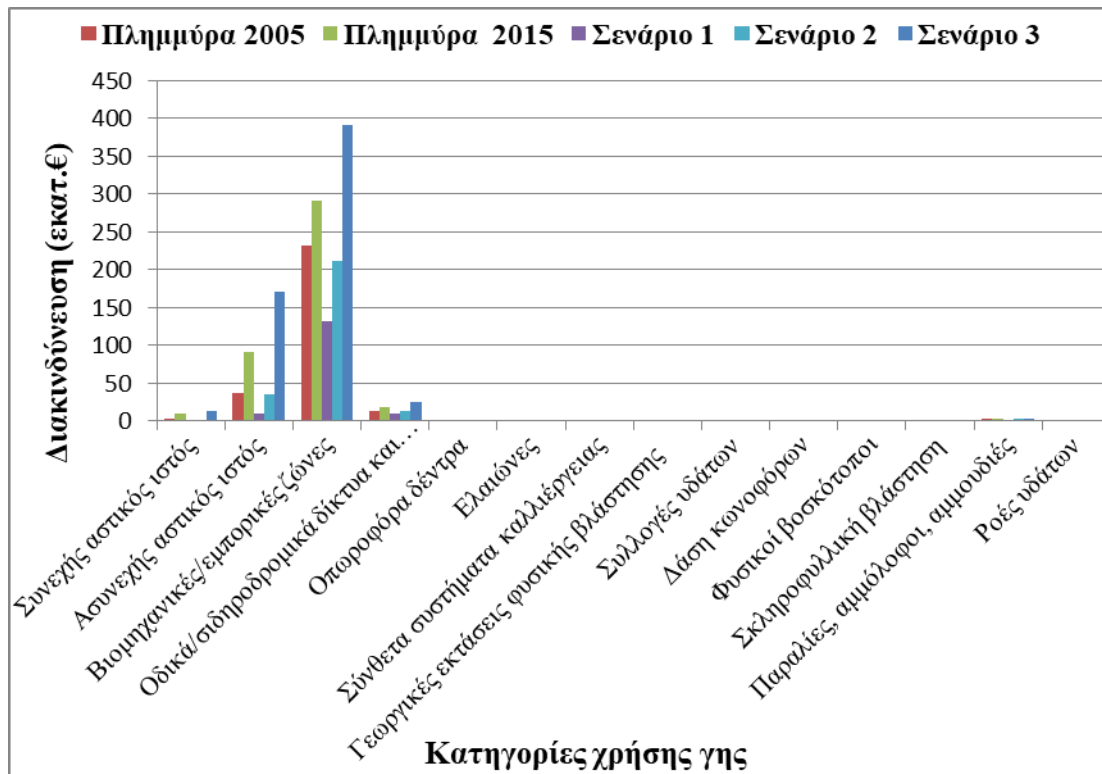
Στο Σχήμα 8.28 παρουσιάζεται το γράφημα της συνολικής πλημμυρικής έκτασης των εξεταζόμενων σεναρίων. Συγκρίνοντας τα επιπλέον διαχειριστικά σενάρια παρατηρείται αύξηση του εμβαδού της πλημμυρικής κατάκλυσης με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, για τα σενάρια 1-3, οι επιφάνειες των πλημμυρισμένων περιοχών υπολογίστηκαν ίσες με 3.5 km^2 , 5.5 km^2 και 12.52 km^2 αντίστοιχα. Τέλος, σημειώνεται πως η επιφάνεια κατάκλυσης του πλημμυρικού επεισοδίου του 2005 ήταν ίση με 6.5 km^2 , ενώ της πλημμύρας του 2015 βρέθηκε ίση με 8.5 km^2 .



Σχήμα 8.28: Γράφημα της συνολικής πλημμυρικής έκτασης για το σύνολο των εξεταζόμενων σεναρίων

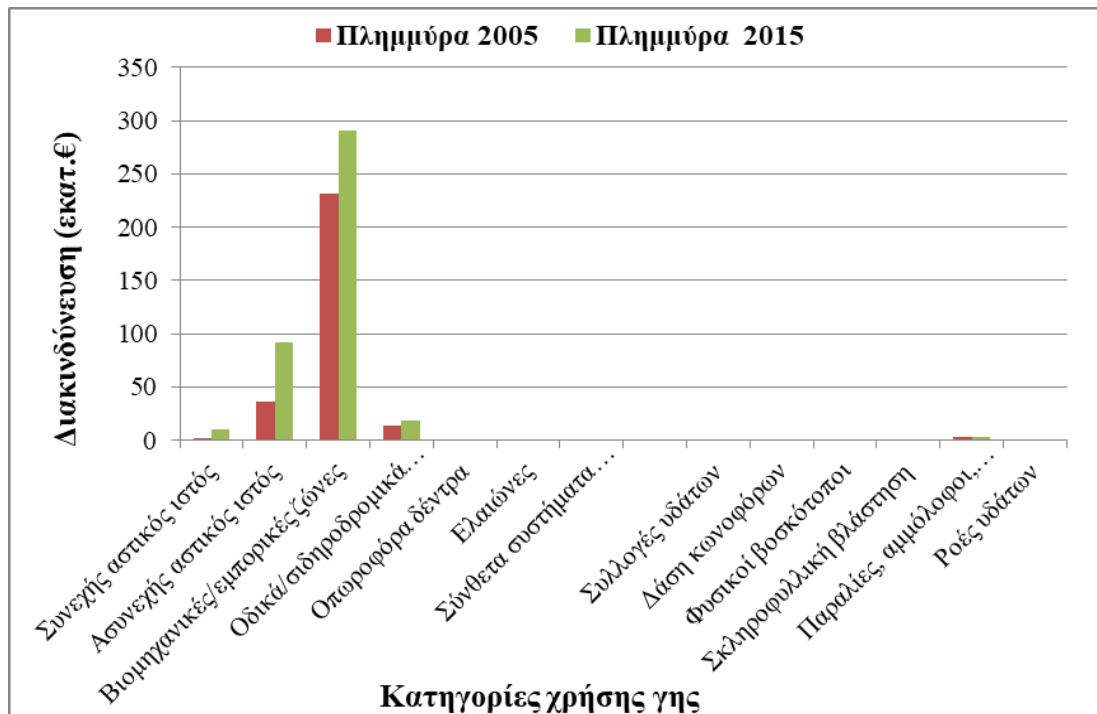
8.3 Σχολιασμός πλημμυρικής διακινδύνευσης

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 7, η διακινδύνευση είναι συνάρτηση του μέγιστου βάθους ροής, της τρωτότητας και της πλημμυρικής έκτασης. Όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 8.29), οι βιομηχανικές και εμπορικές εκτάσεις παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές διακινδύνευσης. Αυτό οφείλεται στις υψηλές τιμές τρωτότητας της συγκεκριμένης χρήσης γης.



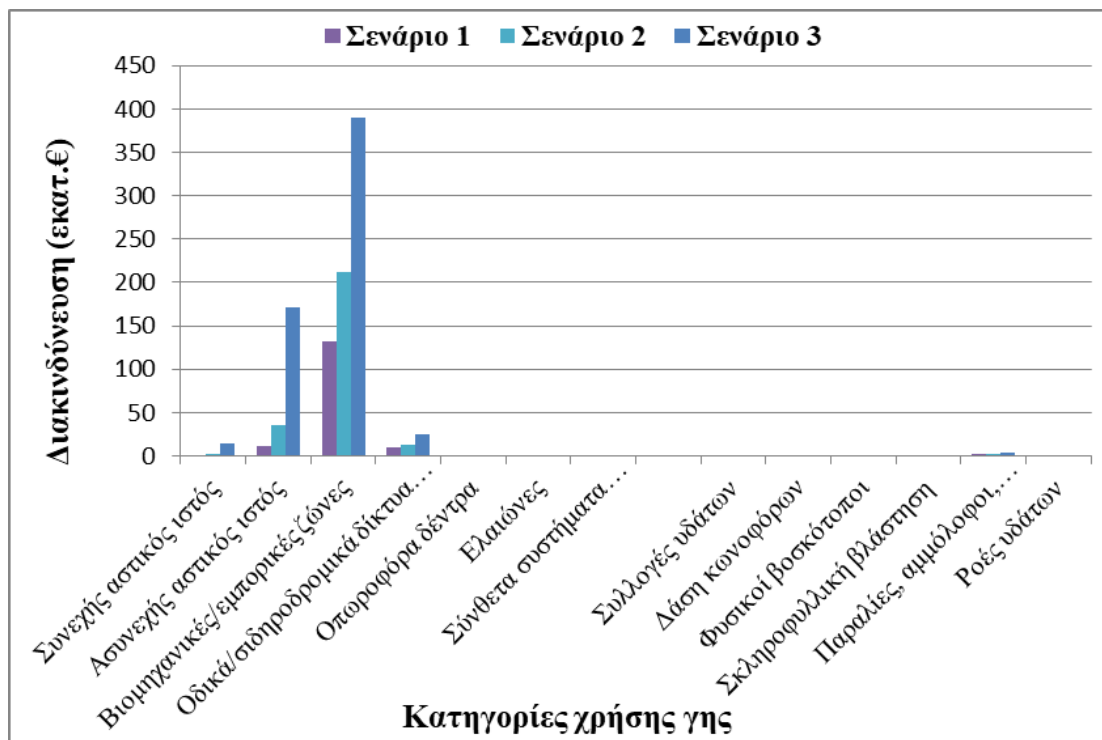
Σχήμα 8.29: Γράφημα πλημμυρικής διακινδύνευσης ανά κατηγορία χρήσης γης για το σύνολο των εξεταζόμενων σεναρίων

Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι πλημμύρες του 2005 και 2015 επιφέρουν σημαντικές χρηματικές απώλειες στην περιοχή του ασυνεχή αστικού ιστού και στις βιομηχανικές/εμπορικές εκτάσεις. Συγκεκριμένα, για τις παραπάνω χρήσεις γης, η πλημμυρική διακινδύνευση της πλημμύρας του 2015 εκτιμάται πως είναι κατά 200 εκατ. € υψηλότερη από αυτή της πλημμύρας του 2005 (Σχήμα 8.30).



Σχήμα 8.30: Γράφημα πλημμυρικής διακινδύνευσης ανά κατηγορία χρήσης γης των ιστορικών πλημμυρών

Σε ότι αφορά τα επιπλέον διαχειριστικά σενάρια, διαπιστώνεται ότι στις βιομηχανικές/εμπορικές περιοχές, η τιμή της διακινδύνευσης του σεναρίου 3 με τις τιμές των σεναρίων 2 και 1 εμφανίζουν μια διαφορά της τάξης των 260 εκατ. € και των 180 εκατ. € αντίστοιχα. (Σχήμα 8.31)



Σχήμα 8.31: Γράφημα πλημμυρικής διακινδύνευσης ανά κατηγορία χρήσης γης των σεναρίων 1-3

Τέλος, στο Σχήμα 8.32 παρουσιάζονται οι συνολικές τιμές της διακινδύνευσης, εκφρασμένες σε εκατ. €, για τα πέντε πλημμυρικά σενάρια. Παρατηρείται ότι συνολική διακινδύνευση των πλημμυρών του 2015 και 2005 διαμορφώθηκε στα 410 εκατ. € και τα 290 εκατ. € αντίστοιχα. Από την άλλη, οι οικονομικές απώλειες που ενδέχεται να προκαλέσουν οι πλημμύρες των επιπλέον σεναρίων είναι οι ακόλουθες: 600 εκατ. € για το σενάριο 3, 270 εκατ. € για το σενάριο 2 και 160 εκατ. € για το σενάριο 1.



Σχήμα 8.32: Γράφημα της συνολικής πλημμυρικής διακινδύνευσης για το σύνολο των εξεταζόμενων σεναρίων

9 Συμπεράσματα-Μελλοντική έρευνα

9.1 Τελικά συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου στον ποταμό Άραχθο υπό πέντε διαχειριστικά σενάρια με χρήση του συζευγμένου 1D-2D μοντέλου HEC-RAS. Τελικά προϊόντα της διαδικασίας αυτής αποτέλεσαν οι χάρτες κινδύνου πλημμύρας, καθώς και οι τιμές της πλημμυρικής διακινδύνευσης βάσει των χρήσεων γης. Με την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Υψηλά βάθη ροής εντοπίζονται κυρίως στις παραποτάμιες αστικές εκτάσεις και σε ένα τμήμα του οδικού δικτύου.
- Εντός της κοίτης του Αράχθου οι υψηλότερες ταχύτητες ροής καταγράφονται στις θέσεις των φραγμάτων και γεφυρών και στα σημεία όπου τα πλάτη του ρέματος μειώνονται.
- Το σενάριο 3, το οποίο είναι και το δυσμενέστερο, παρουσιάζει πολύ υψηλές ταχύτητες ροής σε μια μεγάλη αστική έκταση στο νοτιοδυτικό τμήμα της πόλης, οι οποίες ωστόσο κατά πάσα πιθανότητα οφείλονται σε αριθμητική αστάθεια του μοντέλου και δεν κρίνονται αντιπροσωπευτικές.
- Το πλημμυρικό μέγεθος $d \times v$ εμφανίζει υψηλές τιμές σε αστικές, βιομηχανικές/εμπορικές και αγροτικές εκτάσεις.
- Οι τιμές του πλημμυρικού μεγέθους $d \times v^2$ είναι αρκετά μεγαλύτερες για το σενάριο 3 συγκριτικά με τα υπόλοιπα σενάρια.
- Η χρήση γης που καταλαμβάνει την μεγαλύτερη έκταση πλημμυρικού πεδίου είναι οι καλλιέργειες οπωροφόρων δέντρων.
- Όπως είναι αναμενόμενο, η έκταση της πλημμυρικής κατάκλυσης είναι αρκετά εκτεταμένη στα πεδινά εδάφη.
- Για το σενάριο 3 αξίζει να σημειωθεί ότι οι κατακλυσμένες εκτάσεις καλύπτουν μεγάλο μέρος του οδικού δικτύου.
- Η πλημμύρα του 2015 εμφανίζει μεγαλύτερη πλημμυρική επιφάνεια από την πλημμύρα του 2005. Οι διαφορές εντοπίζονται στις δυτικές αγροτικές και αστικές εκτάσεις της περιοχής.
- Για τα σενάρια 1-3 παρατηρήθηκε ότι η επιφάνεια της πλημμυρικής κατάκλυσης και οι τιμές των υδραυλικών μεγεθών αυξάνονται με την περίοδο επαναφοράς ευθέως. Ωστόσο, η αύξηση των παραπάνω μεγεθών δεν συσχετίζεται με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς, αλλά κυρίως με την αιχμή και μορφή του πλημμυρικού επεισοδίου.
- Οι βιομηχανικές/εμπορικές εκτάσεις παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές διακινδύνευσης, γεγονός που οφείλεται στις υψηλές τιμές τρωτότητας της εν λόγω χρήσης γης. Χαρακτηριστικά αναφέρεται πως η τρωτότητα των εμπορικών/βιομηχανικών περιοχών είναι ίση με 332 €/m^2 .
- Η συνολική πλημμυρική διακινδύνευση της πλημμύρας του 2005 υπολογίστηκε στα 290 εκατ. €, ενώ της πλημμύρας του 2015 αυξάνεται στα 410 εκατ. €. Η διάφορα αυτή αποδίδεται στο εμβαδόν της πλημμυρικής κατάκλυσης, το οποίο είναι κατά 2 km^2 μεγαλύτερο στην περίπτωση της πλημμύρας του 2015.
- Ομοίως, για τα επιπλέον εξεταζόμενα σενάρια η τιμή της διακινδύνευσης αυξάνεται με την περίοδο επαναφοράς. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η

πλημμυρική διακινδύνευση του σεναρίου 3 έφτασε τα 600 εκατ. €. Όσον αφορά τα πλημμυρικά σενάρια 2 και 1 η διακινδύνευση βρέθηκε ίση με 270 εκατ. € και 160 εκατ. €, αντίστοιχα

- Οι αγροτικές χρήσεις γης, παρόλο που καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του πλημμυρικού πεδίου, δεν παρουσιάζουν υψηλές τιμές διακινδύνευσης, αφού η τρωτότητα στις καλλιέργειες είναι ιδιαίτερα χαμηλή. Οι δυνητικές οικονομικές απώλειες των αγροτικών περιοχών κυμαίνονται από 100 χιλ. € για το σενάριο 1 έως τις 480 χιλ. € για τη πλημμύρα του 2005.

9.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ο ποταμός Άραχθος διέρχεται την πεδιάδα της Άρτας κάνοντας την περιοχή ευάλωτη στον πλημμυρικό κίνδυνο. Οι προτάσεις μελλοντικής εξέλιξης της παρούσας εργασίας, που εκτιμάται ότι θα διασφαλίσουν την πλημμυρική προστασία της περιοχής, είναι οι ακόλουθες:

- Σε συνέχεια της υλοποίησης των χαρτών πλημμυρικού κινδύνου, προτείνεται η κατάρτιση των χαρτών πλημμυρικής διακινδύνευσης για τα πέντε διαχειριστικά σενάρια που εξετάστηκαν.
- Η εφαρμογή υδραυλικής/υδροδυναμικής προσομοίωσης για ένα πλήθος συνθετικών πλημμυρογραφημάτων εκροής και η μετέπειτα εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου και του αναμενόμενου κόστους ζημιών (Efstratiadis et al, 2022).
- Με βάση τους χάρτες πλημμυρικής διακινδύνευσης προτείνεται η κατάρτιση σχεδίων πλημμυρικού κινδύνου με σκοπό την εύρεση κατάλληλων μέτρων για την ελαχιστοποίηση των δυσμενών συνεπειών των πλημμυρικών φαινομένων.
- Η υδραυλική προσομοίωση με χρήση διαφόρων υδραυλικών/υδροδυναμικών μοντέλων με σκοπό την επιλογή εκείνου που οδηγεί στη εξαγωγή ακριβέστερων αποτελεσμάτων.
- Η εκτέλεση υδραυλικής/υδροδυναμικής προσομοίωσης για επιπλέον ιστορικά επεισόδια πλημμύρας και η σύγκριση τους με τα πραγματικά γεγονότα, έτσι ώστε στη συνέχεια να γίνει αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας.

10 Βιβλιογραφία

- 1 ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΜΕΓΑΛΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ. «Τα Φράγματα της Ελλάδας». (Νοέμβριος 2013). http://www.eeft.gr/Fragmata_Elladas_201311.pdf
- 2 Ελληνική Στατιστική Αρχή (2021). «Αποτελέσματα Απογραφής Πληθυσμού - Κατοικιών 2021». https://elstat-outsourcers.statistics.gr/Census2022_GR.pdf
- 3 Ευελπίδου, Ν., & Αντωνίου, Β. (2015). «Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών» [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <http://hdl.handle.net/11419/1044>
- 4 Δ. Κουτσογιάννης, Ι. Μαρκόνης, Α. Κουκουβίνος, και Ν. Μαμάσης, Υδρολογική μελέτη πλημμυρών Αράχθου, Οριστική Οριοθέτηση Τμήματος Κοίτης Ποταμού Αράχθου που Διέρχεται στα Όρια του Δήμου Αρταίων, Ανάθεση: Δήμος Αρταίων, Ανάδοχοι: ΑΔΚ - Αρώνης – Δρέττας – Καρλαύτης Σύμβουλοι Μηχανικοί ΑΕ, ΥΔΡΟΤΕΚ - Υδραυλικές Μελέτες ΑΕ, Β. Μούζος, 272 pages, 2010.
- 5 Λάμπρος Γ., «Προσομοίωση λεκάνης απορροής ποταμού Άραχθου», Μεταπτυχιακή Διατριβή, 101 σ., Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Σεπτέμβριος 2018.
- 6 Ντεμίρογλου, Χ., «Βελτιστοποίηση διαχείρισης θυροφραγμάτων υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων – Εφαρμογή στο φράγμα Αράχθου». Διπλωματική εργασία, 164 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Νοέμβριος 2020.
- 7 Πιστρίκα, Α., «Εκτίμηση άμεσης πλημμυρικής ζημιάς σε δομημένο περιβάλλον», Διδακτορική Διατριβή, 329 σ., Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2010.
- 8 Σκουλάτος, Δ., «Αντιμετώπιση πλημμυρικών φαινομένων σε νησιωτικές περιοχές: Η περίπτωση της Σύρου», Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, 155σ., Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2016.
- 9 Σωτήρχου, Δ., «Η σχέση του νομικού πλαισίου των πλημμυρών με την εκδήλωση πλημμυρικών καταστροφών και άλλων παραγόντων στον Ελληνικό χώρο». Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, 121 σ., Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2020.
- 10 Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος Τμήμα Ηπείρου (2015), «Αντιπλημμυρική προστασία περιοχής Αράχθου κατάντη φραγμάτων Πουρνάρι Ι και ΙΙ», <http://www.teeepirus.gr/files/article/file/arta.pdf>
- 11 Τσούλος, Λ., Σκοπελίτη, Α., & Στάμου, Λ. (2015). Χαρτογραφική Γενίκευση [Κεφάλαιο]. Στο Τσούλος, Λ., Σκοπελίτη, Α., & Στάμου, Λ. 2015. Χαρτογραφική σύνθεση και απόδοση σε ψηφιακό περιβάλλον [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. κεφ 9. <http://hdl.handle.net/11419/2515>

- 12 Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας,, Δ/ση Προστασίας και Διαχείρισης Υδάτινου Περιβάλλοντος της Γενικής Γραμματείας Φυσικού Περιβάλλοντος και Υδάτων, 1^η Αναθεώρηση Προκαταρκτικής Αξιολόγησης Κινδύνων Πλημμύρας σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60/ΕΚ, 2019.
- 13 Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Ειδική Γραμματεία Υδάτων, Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ηπείρου (EL05), Στάδιο II, 6^η Φάση, 2018
- 14 Balica, Stefania, and Nigel G. Wright. “Reducing the Complexity of the Flood Vulnerability Index.” *Environmental Hazards* 9, no. 4 (December 1, 2010): 321–39. <https://doi.org/10.3763/ehaz.2010.0043>
- 15 Brémond, P., F. Grelot, and A.-L. Agenais. “Review Article: Economic Evaluation of Flood Damage to Agriculture – Review and Analysis of Existing Methods.” *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13, no. 10 (October 9, 2013): 2493–2512. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2493-2013>
- 16 Brunner, G. HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, Version 5.0. US Army Corps of Engineers–Hydrologic Engineering Center, 2016a; pp. 1–538. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
- 17 Brunner, Gary W., et al. "Combined 1D and 2D hydraulic modeling within HEC-RAS." World Environmental and Water Resources Congress 2015. <https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/9780784479162.141>
- 18 Camarasa-Belmonte, A.M., and J. Soriano-García. “Flood Risk Assessment and Mapping in Peri-Urban Mediterranean Environments Using Hydrogeomorphology. Application to Ephemeral Streams in the Valencia Region (Eastern Spain).” *Landscape and Urban Planning* 104, no. 2 (February 2012): 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.10.009>
- 19 Cardona, O., Van Aalst, M., Birkmann, J., Fordham, M., McGregor, G., Perez, R., . . . Thomalla, F. (2012). Determinants of Risk: Exposure and Vulnerability. In C. Field, V. Barros, T. Stocker, & Q. Dahe (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 65-108). Cambridge: Cambridge University Press. [doi:10.1017/CBO9781139177245.005](https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.005)
- 20 Doocy, Shannon, Amy Daniels, Sarah Murray, and Thomas D. Kirsch. “The Human Impact of Floods: A Historical Review of Events 1980-2009 and Systematic Literature Review.” *PLoS Currents*, 2013. <https://doi.org/10.1371/currents.dis.f4deb457904936b07c09daa98ee8171a>
- 21 Downton, Mary W., and Roger A. Pielke. “Discretion without Accountability: Politics, Flood Damage, and Climate.” *Natural Hazards Review* 2, no. 4 (November 2001): 157–66. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2001\)2:4\(157\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2001)2:4(157))
- 22 Dutta, Dushmanta, Srikantha Herath, and Katumi Musiaka. “A Mathematical Model for Flood Loss Estimation.” *Journal of Hydrology* 277, no. 1–2 (June 2003): 24–49. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00084-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00084-2)

- 23 A. Efstratiadis, P. Dimas, G. Pouliasis, I. Tsoukalas, P. Kossieris, V. Bellos, G.-K. Sakki, C. Makropoulos, and S. Michas, Revisiting flood hazard assessment practices under a hybrid stochastic simulation framework, *Water*, 14 (3), 457, 2022 [doi:10.3390/w14030457](https://doi.org/10.3390/w14030457)
- 24 European Commission. Joint Research Centre. *Global Flood Depth-Damage Functions: Methodology and the Database with Guidelines*. LU: Publications Office, 2016. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/16510>
- 25 Förster, S., B. Kuhlmann, K.-E. Lindenschmidt, and A. Bronstert. “Assessing Flood Risk for a Rural Detention Area.” *Natural Hazards and Earth System Sciences* 8, no. 2 (April 10, 2008): 311–22. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-311-2008>
- 26 Gao, J., Nickum, J.E. and Pan, Y. (2007), An assessment of flood hazard vulnerability in the Dongting Lake Region of China. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 12: 27-34. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2007.00318.x>
- 27 Huang, Y. *Appropriate Modeling for Integrated Flood Risk Assessment*. Enschede: University of Twente, 2005.
- 28 Huizinga, J., de Moel, H., & Szewczyk, W., “Global flood depth-damage functions”, JRC Technical Reports, 2017.
- 29 Kang, Jui-Lin, Ming-Daw Su, and Ling-Fang Chang. “LOSS FUNCTIONS AND FRAMEWORK FOR REGIONAL FLOOD DAMAGE ESTIMATION IN RESIDENTIAL AREA.” *Journal of Marine Science and Technology* 13, no. 3 (September 15, 2005). <https://doi.org/10.51400/2709-6998.2126>
- 30 Kourgialas, Nektarios N., and George P. Karatzas. “A National Scale Flood Hazard Mapping Methodology: The Case of Greece – Protection and Adaptation Policy Approaches.” *Science of The Total Environment* 601–602 (December 2017): 441–52. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.197>
- 31 Kreibich, H., K. Piroth, I. Seifert, H. Maiwald, U. Kunert, J. Schwarz, B. Merz, and A. H. Thielen. “Is Flow Velocity a Significant Parameter in Flood Damage Modelling?” *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9, no. 5 (October 14, 2009): 1679–92. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1679-2009>
- 32 Kvočka, Davor, Reza Ahmadian, and Roger A Falconer. “Predicting Flood Hazard Indices in Torrential or Flashy River Basins and Catchments.” *Water Resources Management* 32, no. 7 (May 2018): 2335–52. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1932-6>
- 33 Lindenschmidt, K.-E., U. Herrmann, I. Pech, U. Suhr, H. Apel, and A. Thielen. “Risk Assessment and Mapping of Extreme Floods in Non-Dyked Communities along the Elbe and Mulde Rivers.” *Advances in Geosciences* 9 (September 26, 2006): 15–23. <https://doi.org/10.5194/adgeo-9-15-2006>
- 34 Merz, B., H. Kreibich, R. Schwarze, and A. Thielen. “Review Article "Assessment of Economic Flood Damage"” *Natural Hazards and*

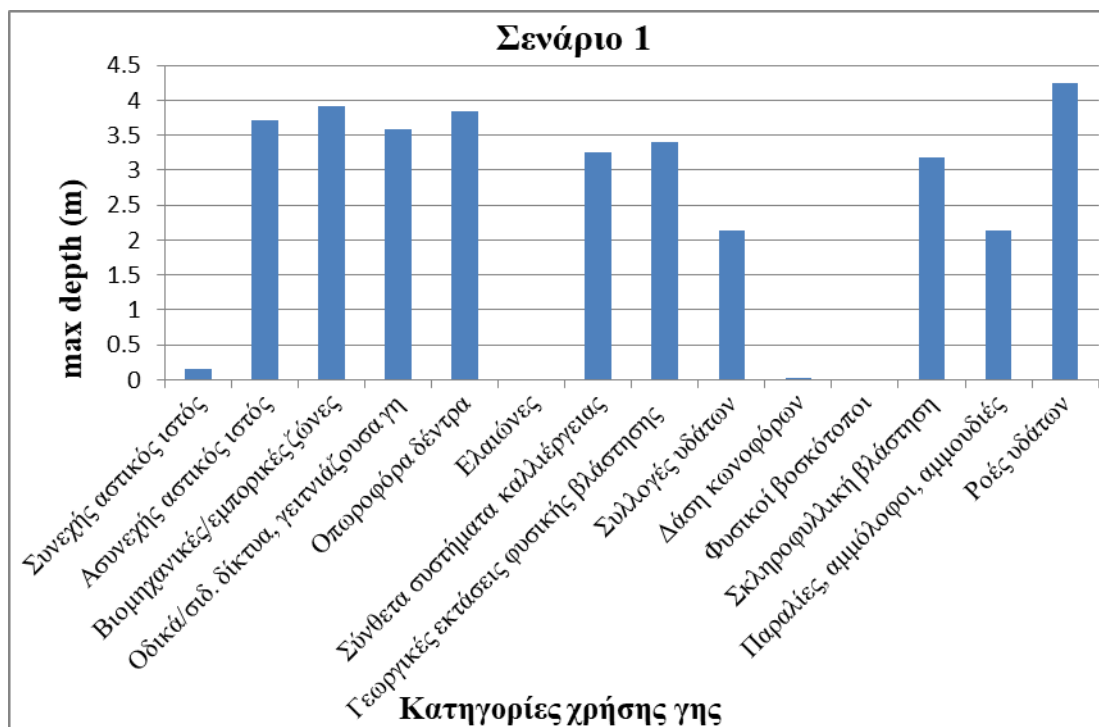
- Earth System Sciences* 10, no. 8 (August 18, 2010): 1697–1724.
<https://doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010>
- 35 Middelmann-Fernandes, M. (2010), Flood damage estimation beyond stage–damage functions: an Australian example. *Journal of Flood Risk Management*, 3: 88–96. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2009.01058.x>
 - 36 Nafari, Roozbeh Hasanzadeh. “Flood Damage Assessment in Urban Areas,” PhD thesis, p 248, Department of Infrastructure Engineering, The University of Melbourne, January 2018.
 - 37 Nasiri, Hajar, Mohd Johari Mohd Yusof, and Thamer Ahmad Mohammad Ali. “An Overview to Flood Vulnerability Assessment Methods.” *Sustainable Water Resources Management* 2, no. 3 (September 2016): 331–36. <https://doi.org/10.1007/s40899-016-0051-x>
 - 38 Nataf, A., 1962. Statistique mathematique-determination des distributions de probabilites dont les marges sont donnees. *Comptes Rendus de l’Academie des Sciences*, 255, 42–43.
 - 39 Pistrika, A. “Flood Damage Estimation Based on Flood Simulation Scenarios and a GIS Platform,” 2010, 9.
 - 40 Pistrika, Aimilia, George Tsakiris, and Ioannis Nalbantis. “Flood Depth-Damage Functions for Built Environment.” *Environmental Processes* 1, no. 4 (December 2014): 553–72. <https://doi.org/10.1007/s40710-014-0038-2>
 - 41 Romali, Noor Suraya, Muhammad @ S. A. Khushren Sulaiman, Zulkifli Yusop, and Zuhilmi Ismail. “Flood Damage Assessment: A Review of Flood Stage–Damage Function Curve.” In *ISFRAM 2014*, edited by Sahol Hamid Abu Bakar, Wardah Tahir, Marfiah Ab. Wahid, Siti Rashidah Mohd Nasir, and Rohana Hassan, 147–59. Singapore: Springer Singapore, 2015. https://doi.org/10.1007/978-981-287-365-1_13
 - 42 Schanze, Jochen, Evzen Zeman, and J. Marsalek, eds. *Flood Risk Management: Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*. NATO Science Series. Series IV, Earth and Environmental Sciences, vol. 67. Dordrecht: Springer, 2006.
 - 43 Schwarz, Jochen, and Holger Maiwald. “Damage and Loss Prediction Model Based on the Vulnerability of Building Types,” 2008. <https://doi.org/10.13140/2.1.1358.3043>
 - 44 Scottish Government (2016). “Appraisal guidance for the Scottish Environment Protection Agency (SEPA) and responsible ”. Scottish Government, Edinburgh. <https://www.gov.scot/publications/guidance-support-sepa-responsible-authorities/pages/14/>
 - 45 Smith, Rhona. “Directive 2008/94/EC of the European Parliament and of the Council of 22 October 2008.” In *Core EU Legislation*, by Rhona Smith, 423–26. London: Macmillan Education UK, 2015. https://doi.org/10.1007/978-1-137-54482-7_44

- 46 Smith, K., & Ward, R. (1998). *Floods: Physical Processes and Human Impacts* (337 p). New York: John Wiley.
- 47 Soetanto, Robby, and David G. Proverbs. "Impact of Flood Characteristics on Damage Caused to UK Domestic Properties: The Perceptions of Building Surveyors." *Structural Survey* 22, no. 2 (April 1, 2004): 95–104. <https://doi.org/10.1108/02630800410538622>
- 48 Thielen, Annegret H., Meike Müller, Heidi Kreibich, and Bruno Merz. "Flood Damage and Influencing Factors: New Insights from the August 2002 Flood in Germany: FLOOD DAMAGE AND INFLUENCING FACTORS." *Water Resources Research* 41, no. 12 (December 2005). <https://doi.org/10.1029/2005WR004177>.
- 49 Pelling, M., et al. *Reducing Disaster Risk: A Challenge for Development, a Global Report*. New York: United Nations Development Programme, 2004.
- 50 UNISDR, 2009. *Terminology on Disaster Risk Reduction*. Geneva, Switzerland: UNISDR. <http://unisdr.org/eng/terminology/UNISDR-Terminology-English.pdf>.
- 51 US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (USACE) (2009), HEC- GeORAS GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS, User's Manual. Version 4.2. https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/documentation/HEC-GeoRAS42_UsersManual.pdf
- 52 Vojinovic, Zoran, Michael Hammond, Daria Golub, Sianee Hirunsalee, Sutat Weesakul, Vorawit Meesuk, Neiler Medina, Arlex Sanchez, Sisira Kumara, and Michael Abbott. "Holistic Approach to Flood Risk Assessment in Areas with Cultural Heritage: A Practical Application in Ayutthaya, Thailand." *Natural Hazards* 81, no. 1 (March 2016): 589–616. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2098-7>

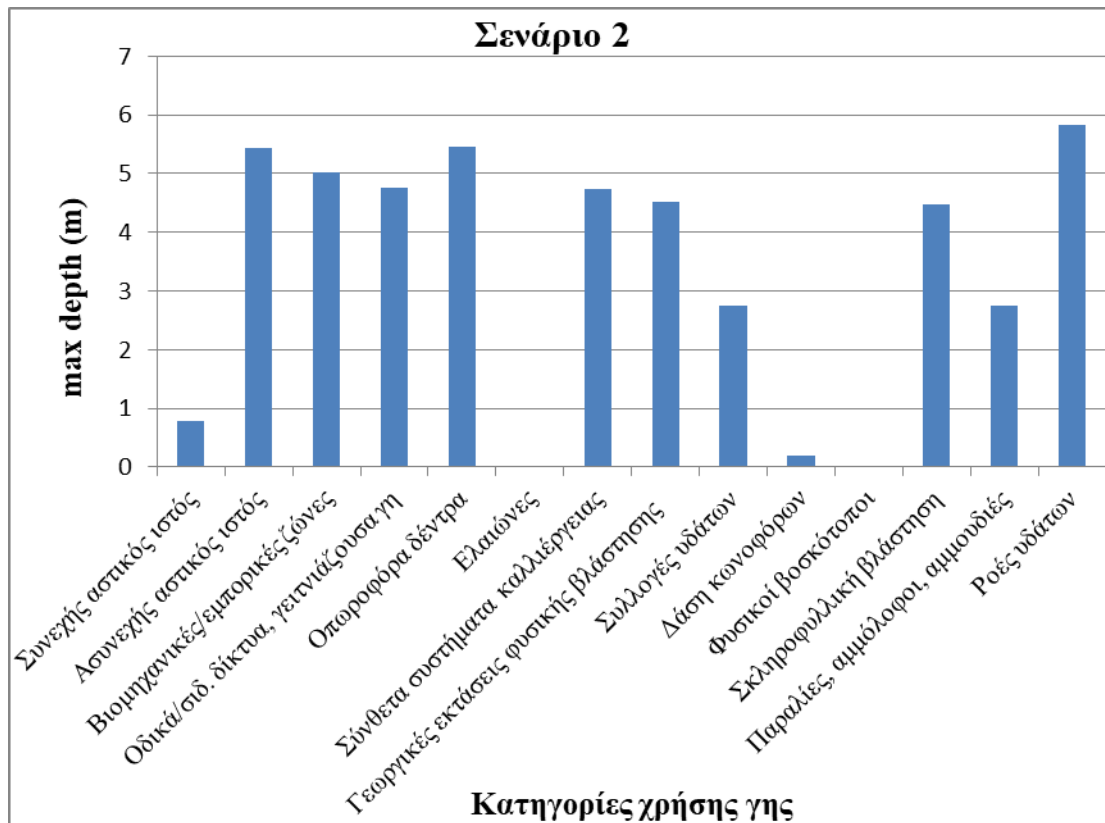
Παράρτημα Α. Γραφήματα πλημμυρικών παραμέτρων



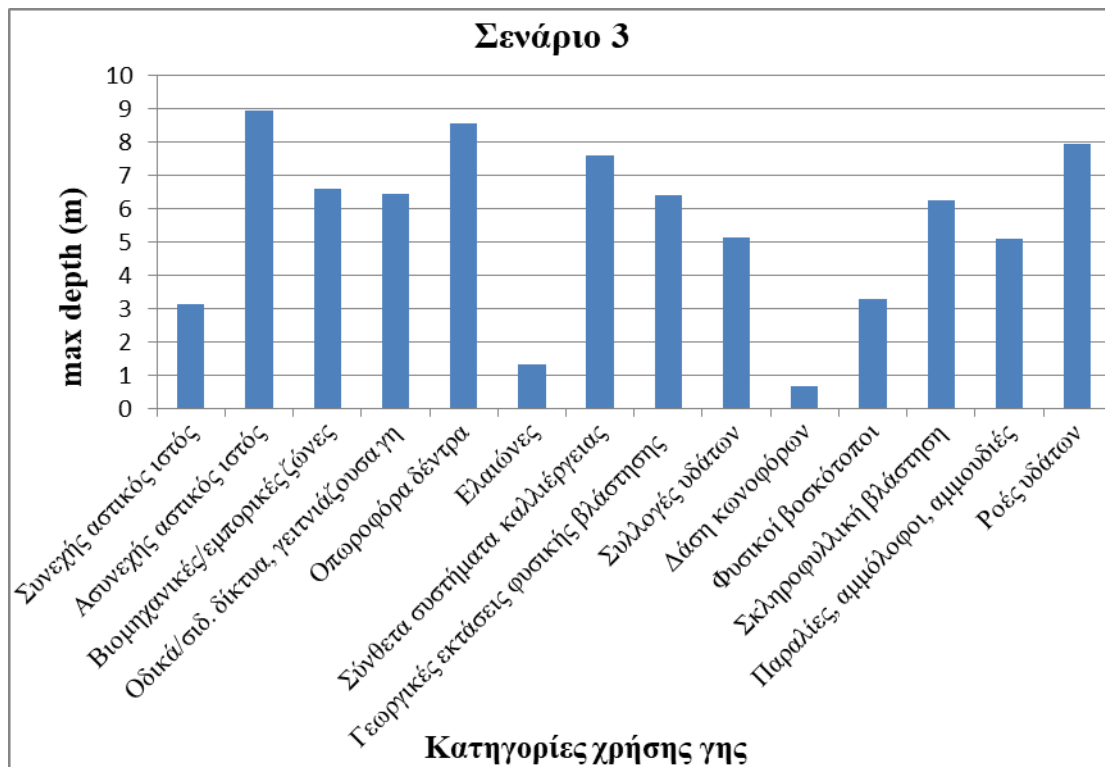
Σχήμα Α 1: Γράφημα μέγιστου βάθους ανά κατηγορία χρήσης γης της πλημμύρας του 2015



Σχήμα Α 2: Γράφημα μέγιστου βάθους ανά κατηγορία χρήσης γης του σεναρίου 1



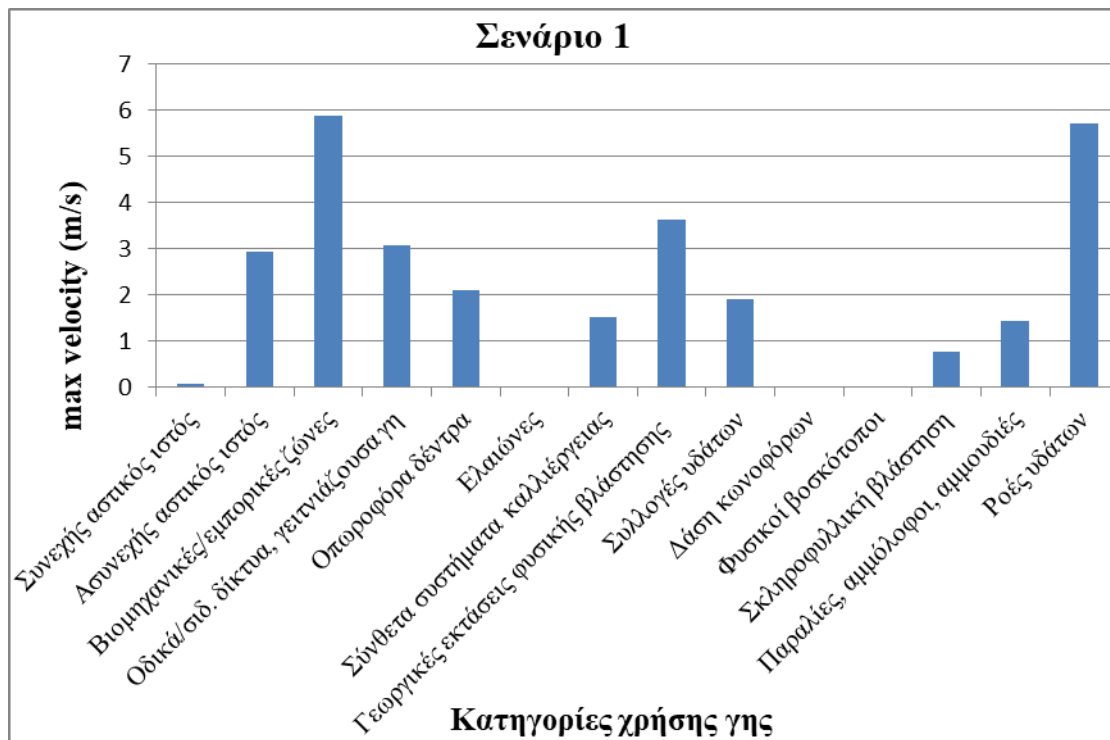
Σχήμα A 3: Γράφημα μέγιστου βάθους ανά κατηγορία χρήσης γης του σεναρίου 2



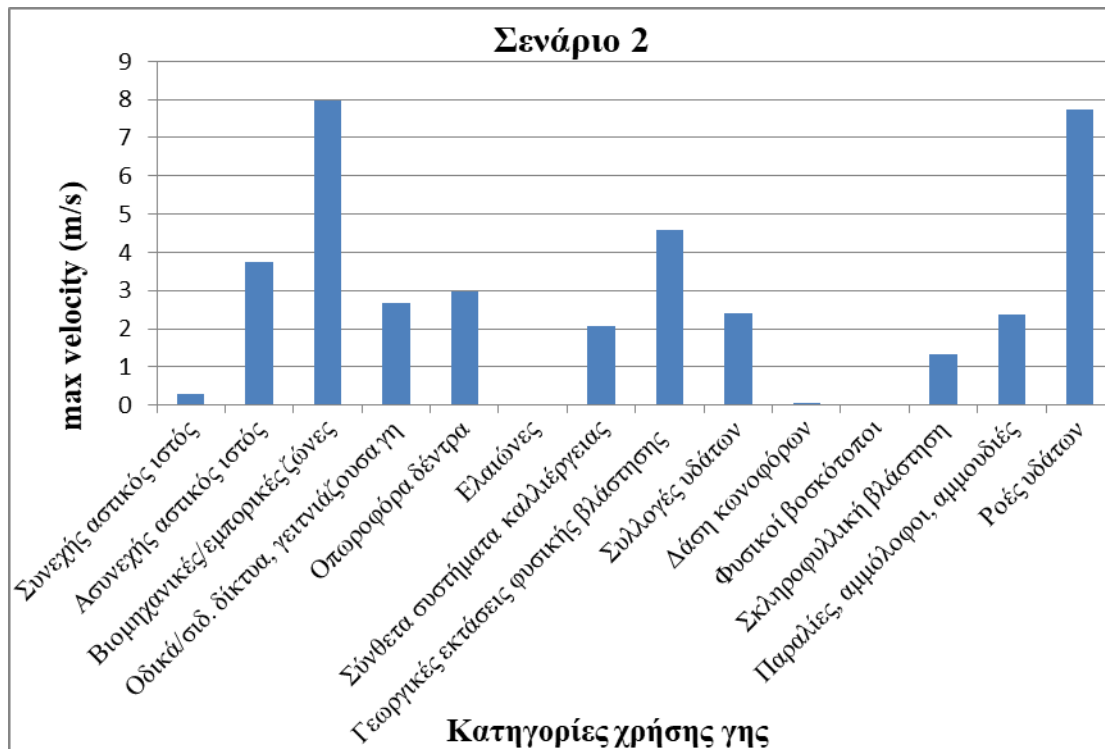
Σχήμα A 4: Γράφημα μέγιστου βάθους ανά κατηγορία χρήσης γης του σεναρίου 3



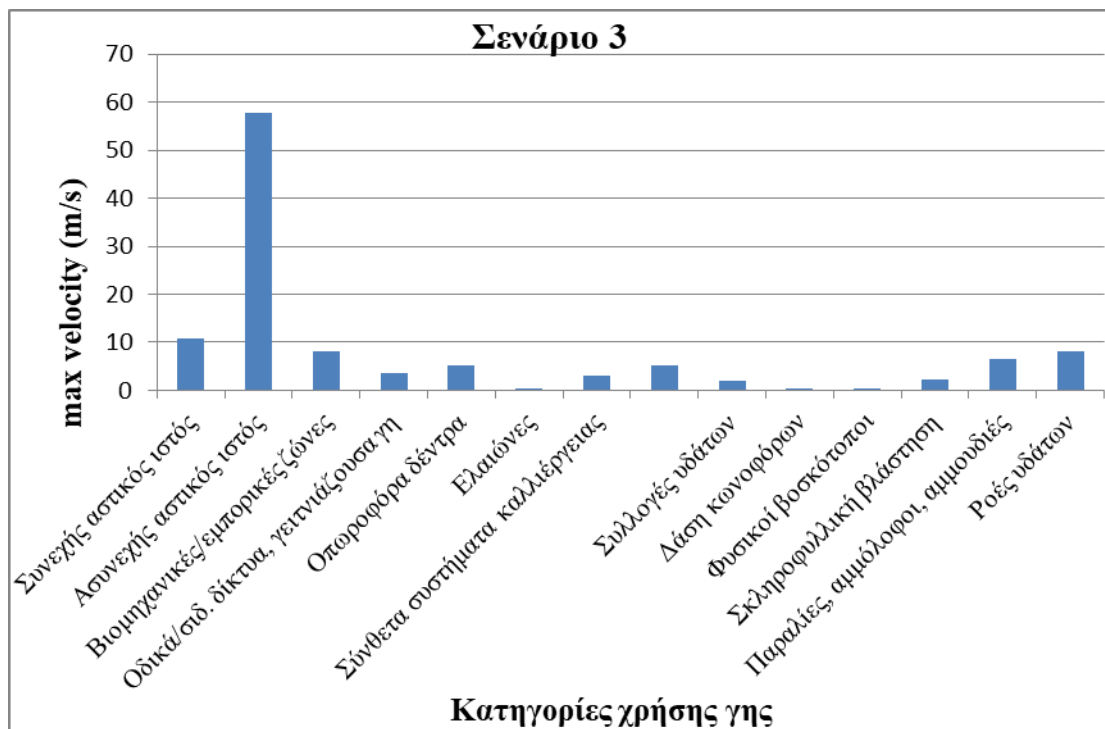
Σχήμα A 5: Γράφημα μέγιστης ταχύτητας ανά κατηγορία χρήσης γης της πλημμύρας του 2015



Σχήμα A 6: Γράφημα μέγιστης ταχύτητας ανά κατηγορία χρήσης γης του σεναρίου 1



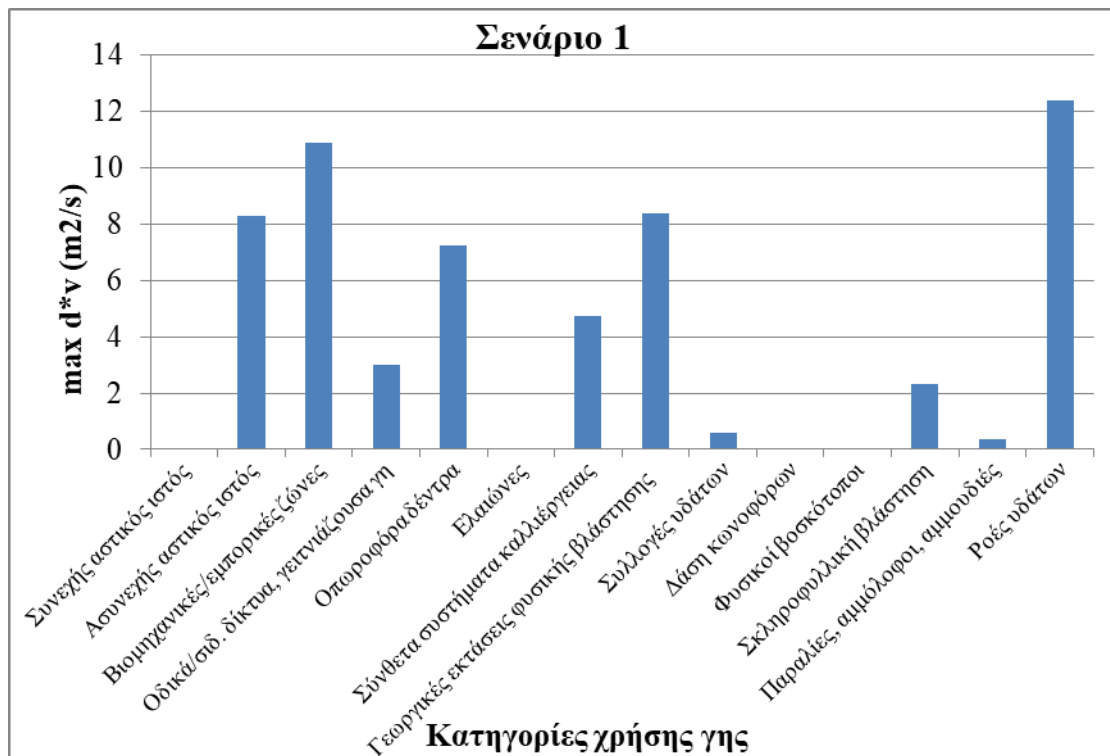
Σχήμα A 7: Γράφημα μέγιστης ταχύτητας ανά κατηγορία χρήσης γης του σεναρίου 2



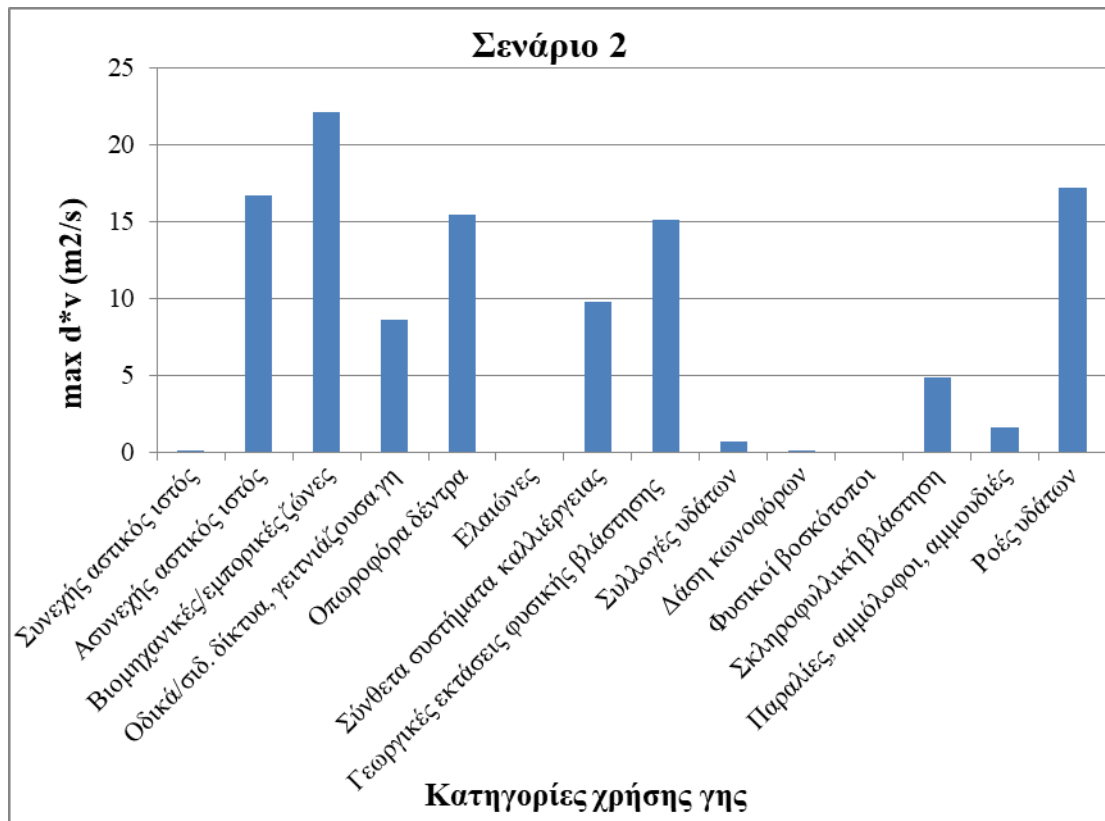
Σχήμα A 8: Γράφημα μέγιστης ταχύτητας ανά κατηγορία χρήσης γης του σεναρίου 2



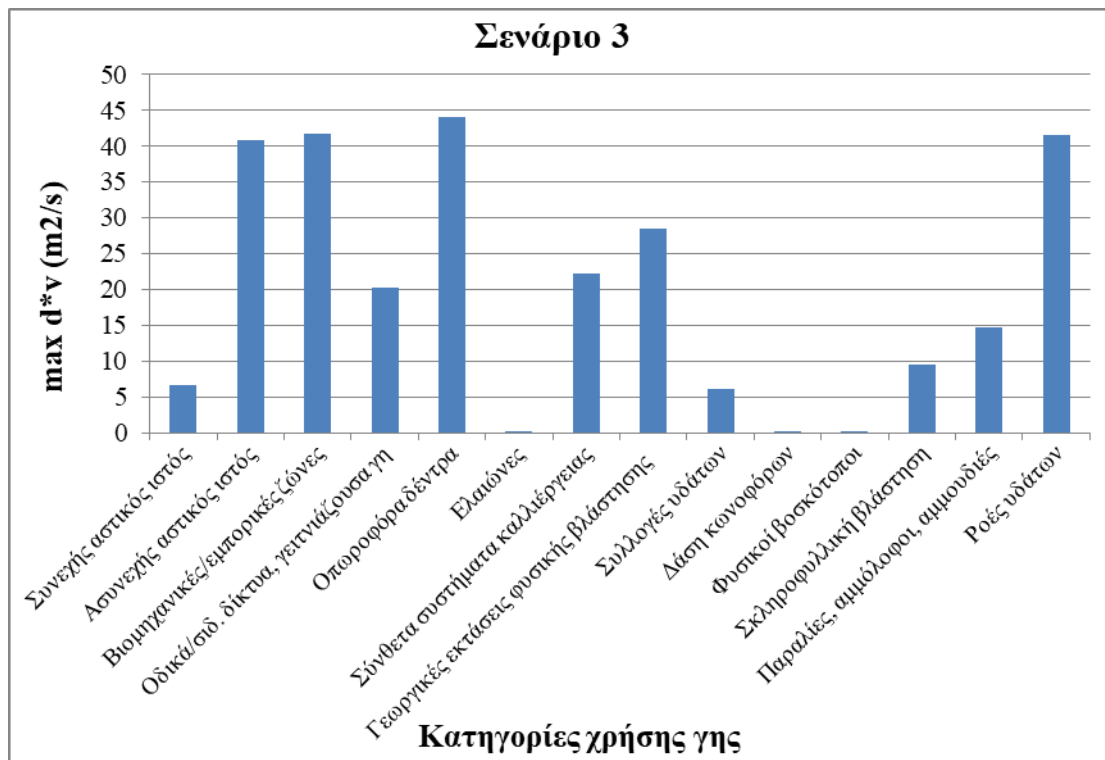
Σχήμα A 9: Γράφημα d*v ανά κατηγορία χρήσης γης για την πλημμύρα του σεναρίου 3



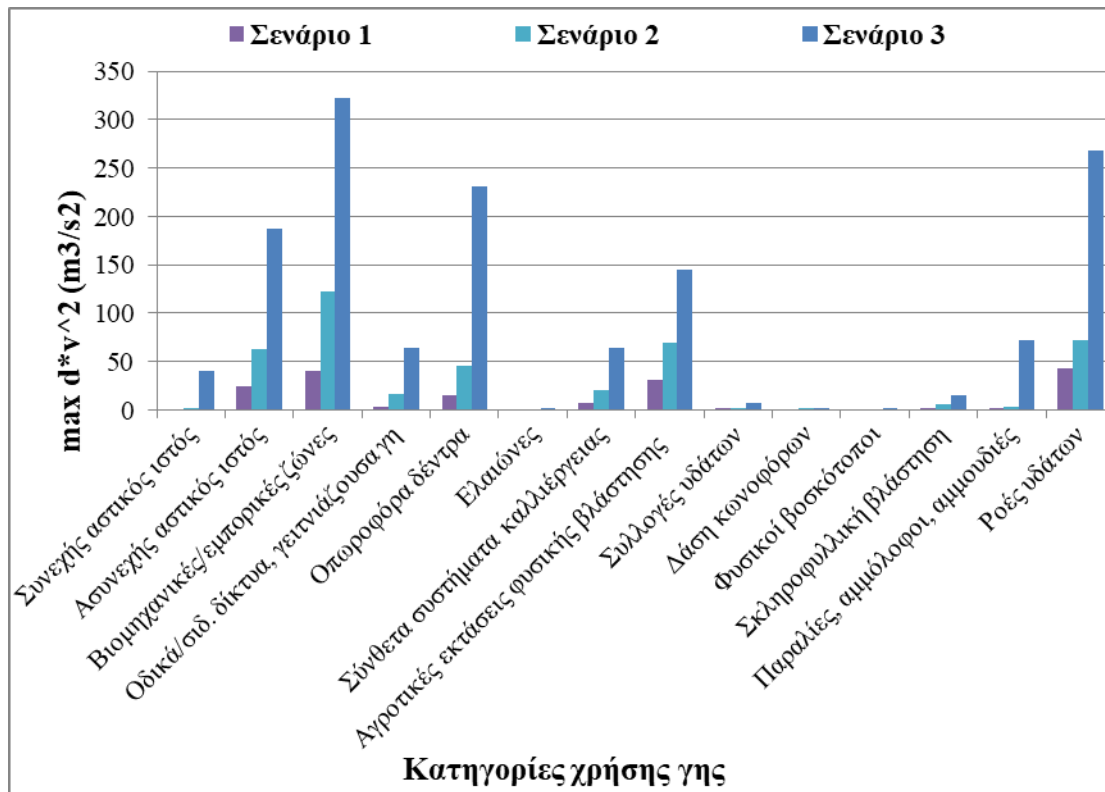
Σχήμα A 10: Γράφημα d*v ανά κατηγορία χρήσης γης για την πλημμύρα του σεναρίου 1



Σχήμα A 11: Γράφημα $d \times v$ ανά κατηγορία χρήσης γης για την πλημμύρα του σεναρίου 2



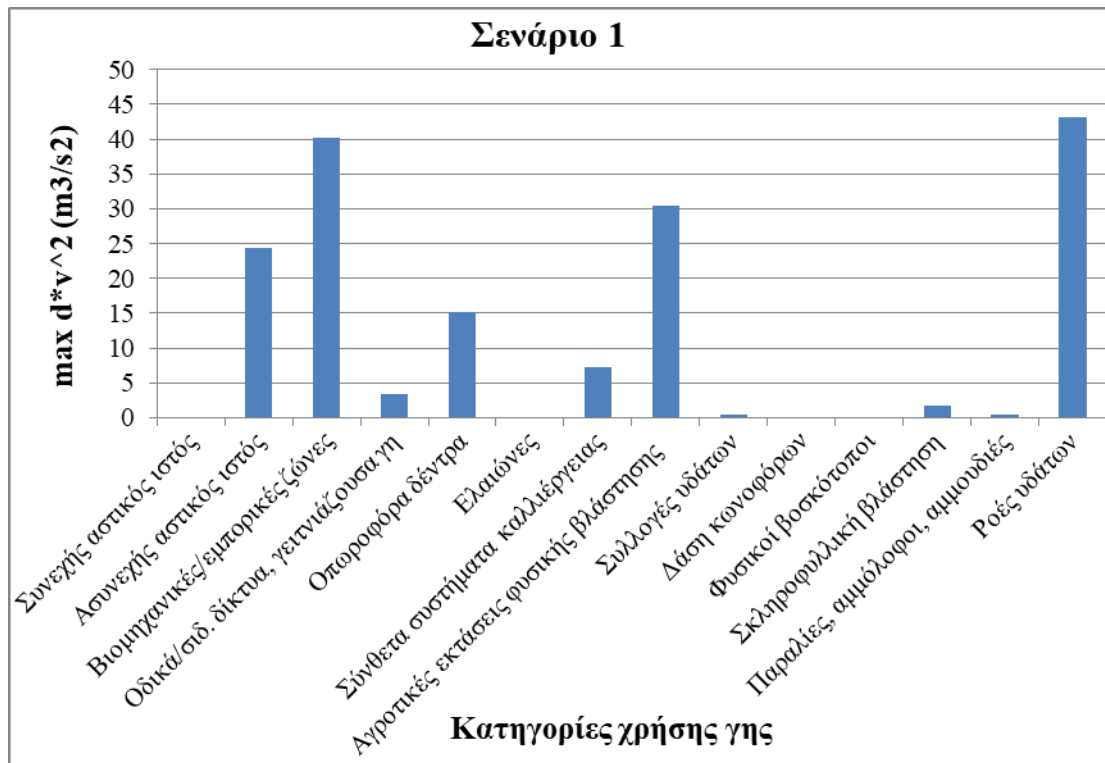
Σχήμα A 12: Γράφημα $d \times v$ ανά κατηγορία χρήσης γης για την πλημμύρα του σεναρίου 3



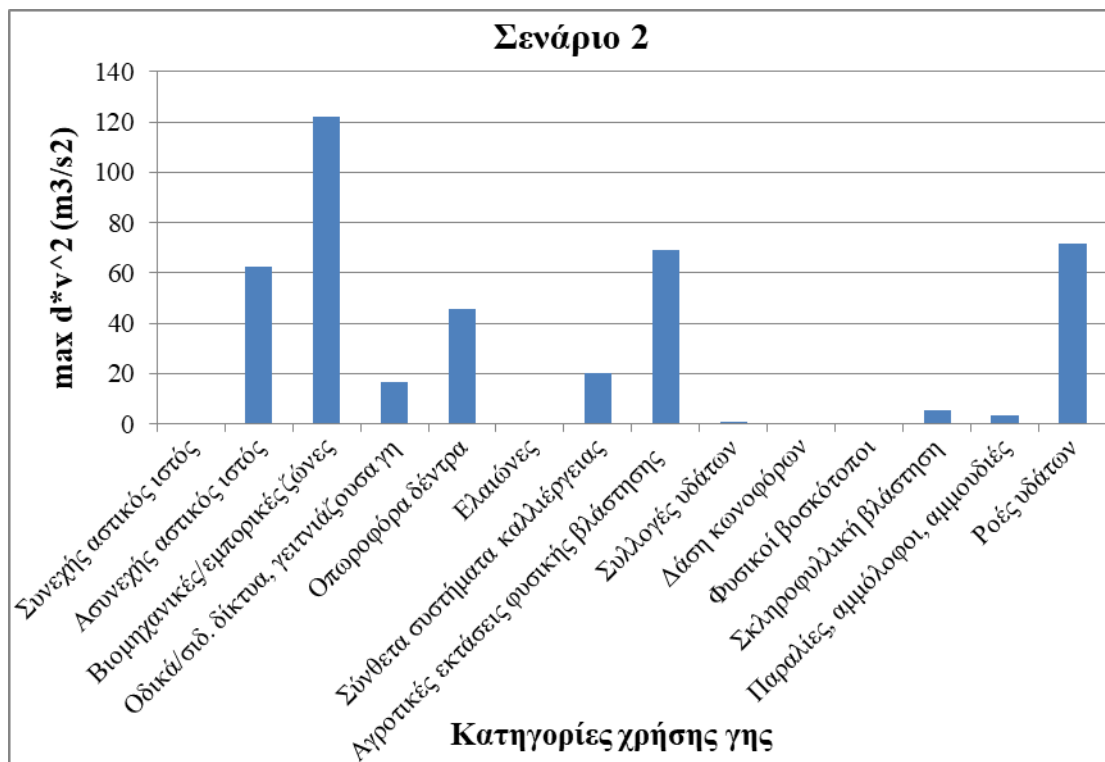
Σχήμα A 13: Γράφημα $d \cdot v$ ανά κατηγορία χρήσης γης των σεναρίων 1-3



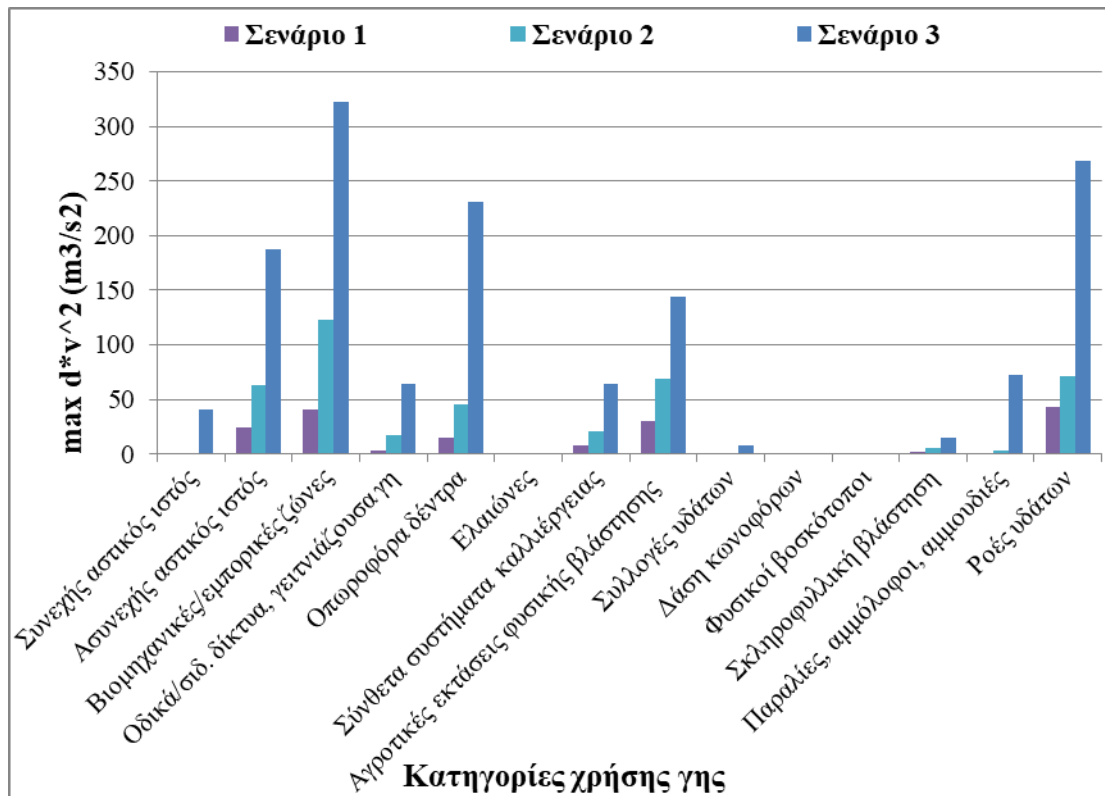
Σχήμα A 14: Γράφημα $d \cdot v^2$ ανά κατηγορία χρήσης γης της πλημμύρα του 2015



Σχήμα Α 15: Γράφημα $d \cdot v^2$ ανά κατηγορία χρήσης γης της πλημμύρας του σεναρίου 1



Σχήμα Α 16: Γράφημα $d \cdot v^2$ ανά κατηγορία χρήσης γης της πλημμύρας του σεναρίου 2



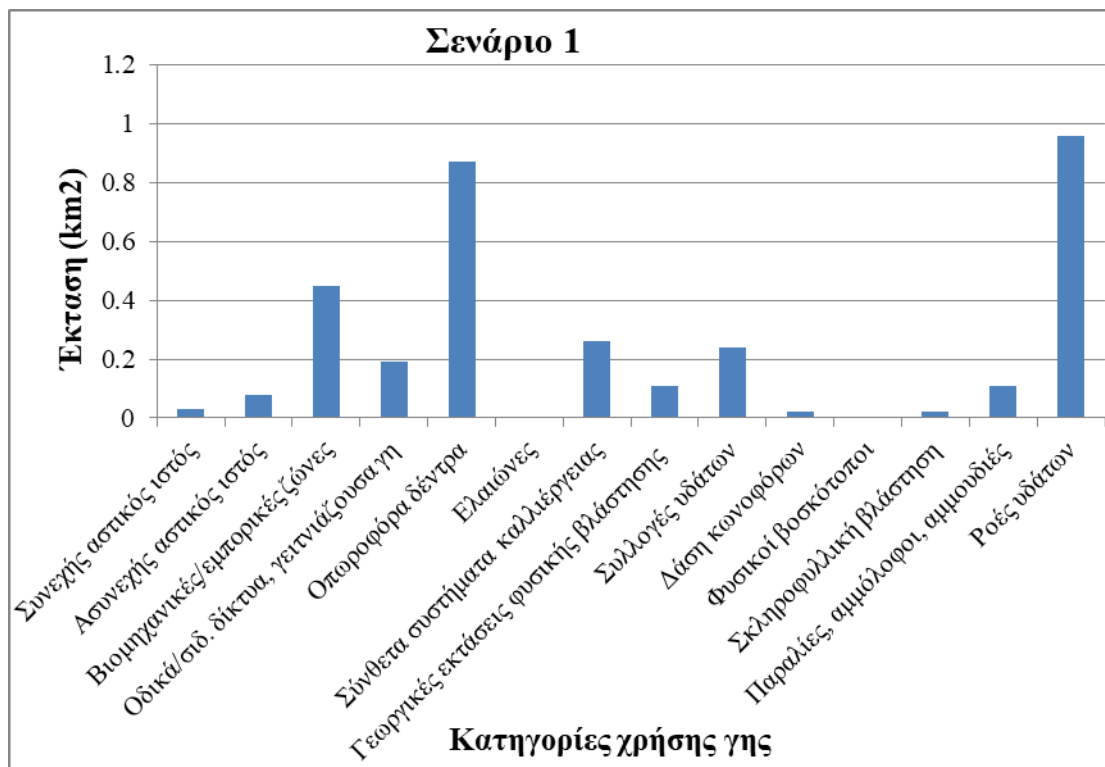
Σχήμα A 17: Γράφημα $d \times v^2$ ανά κατηγορία χρήσης γης των σεναρίων 1-3



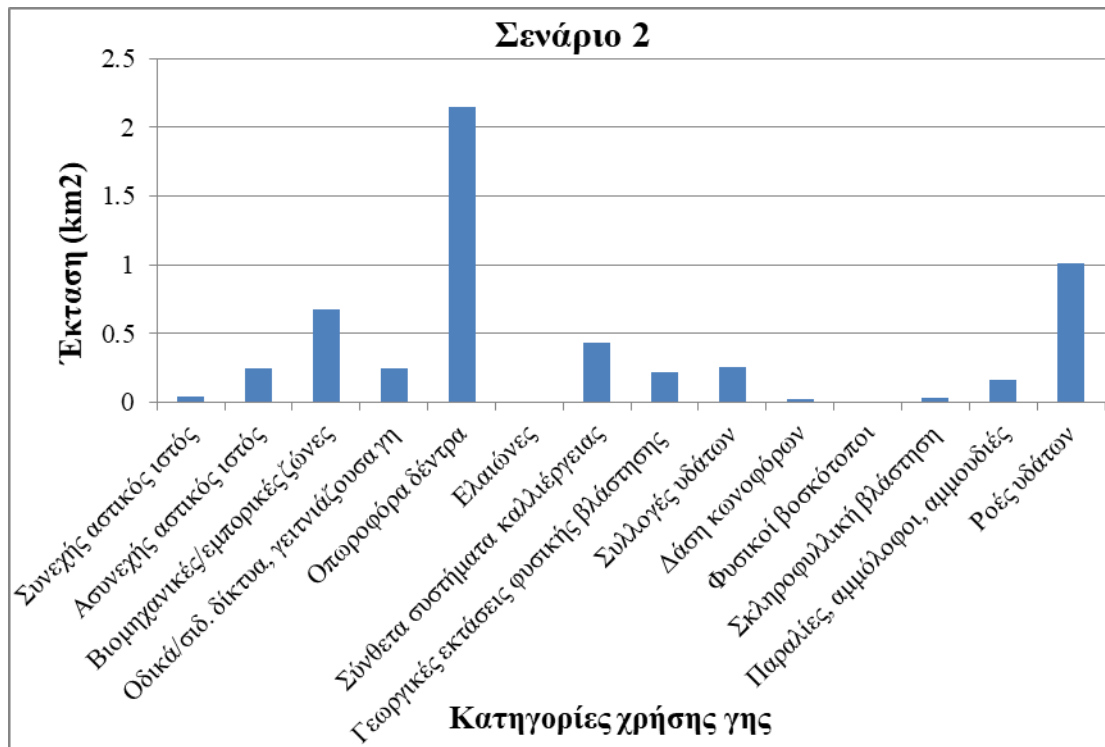
Σχήμα A 18: Γράφημα πλημμυρικής έκτασης ανά κατηγορία χρήσης γης της πλημμύρας του 2005



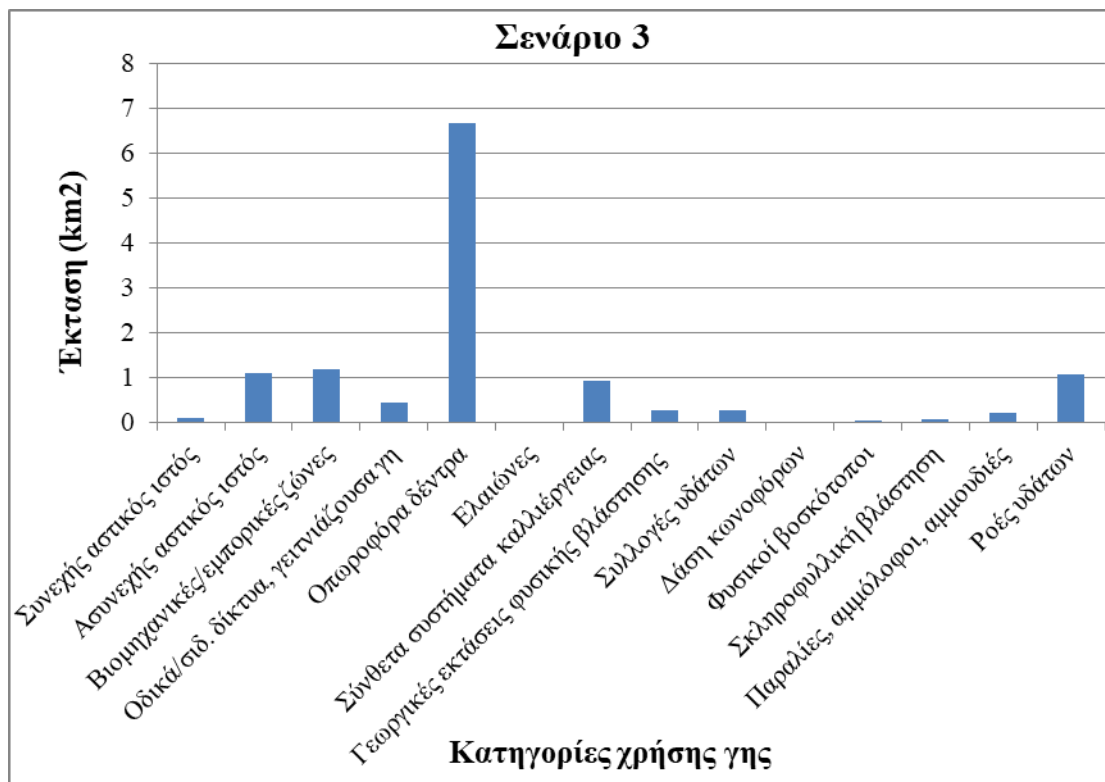
Σχήμα Α 19: Γράφημα πλημμυρικής έκτασης ανά κατηγορία χρήσης γης της πλημμύρας του 2005



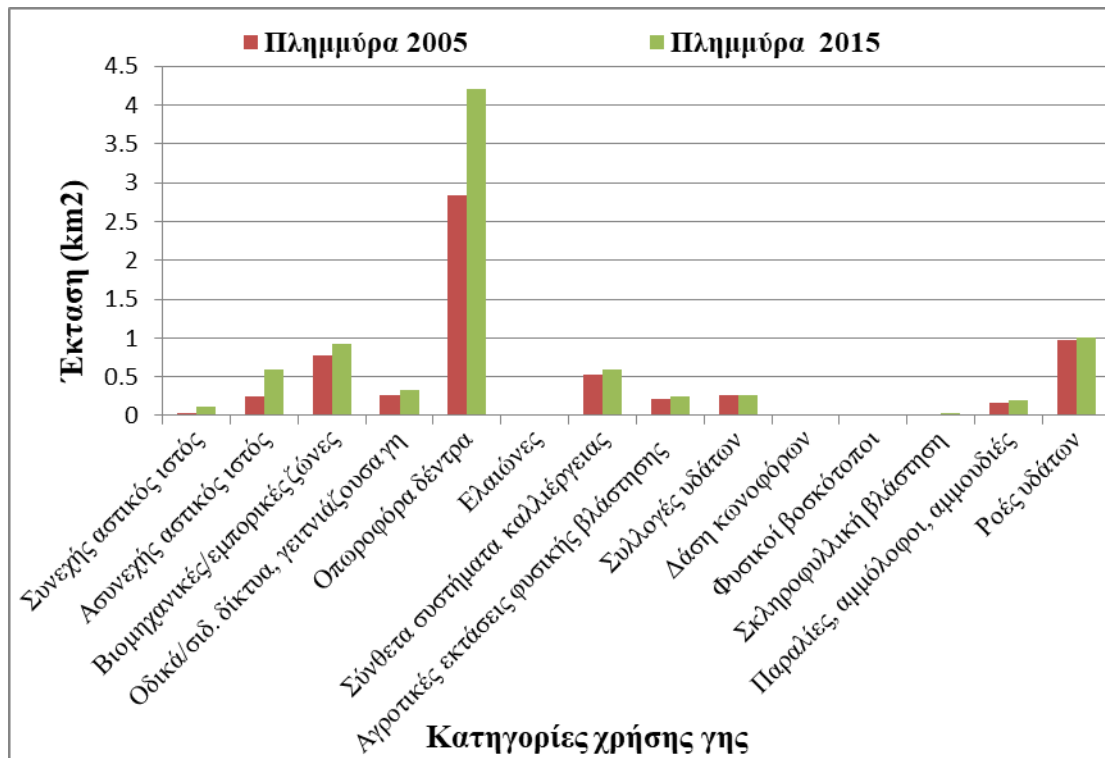
Σχήμα Α 20: Γράφημα πλημμυρικής έκτασης ανά κατηγορία χρήσης γης της πλημμύρας του σεναρίου 1



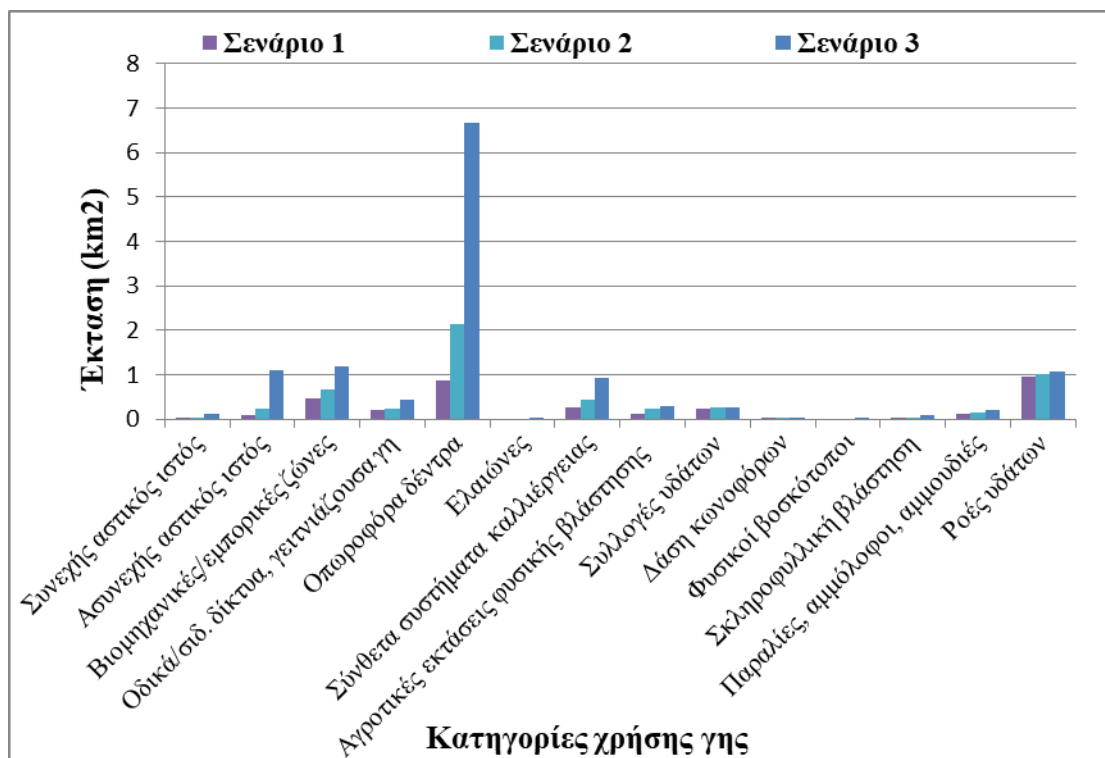
Σχήμα Α 21: Γράφημα πλημμυρικής έκτασης ανά κατηγορία χρήσης γης της πλημμύρας του σεναρίου 2



Σχήμα Α 22: Γράφημα πλημμυρικής έκτασης ανά κατηγορία χρήσης γης της πλημμύρας του σεναρίου 3



Σχήμα Α 23: Γράφημα πλημμυρικής έκτασης ανά κατηγορία χρήσης γης των ιστορικών πλημμυρών



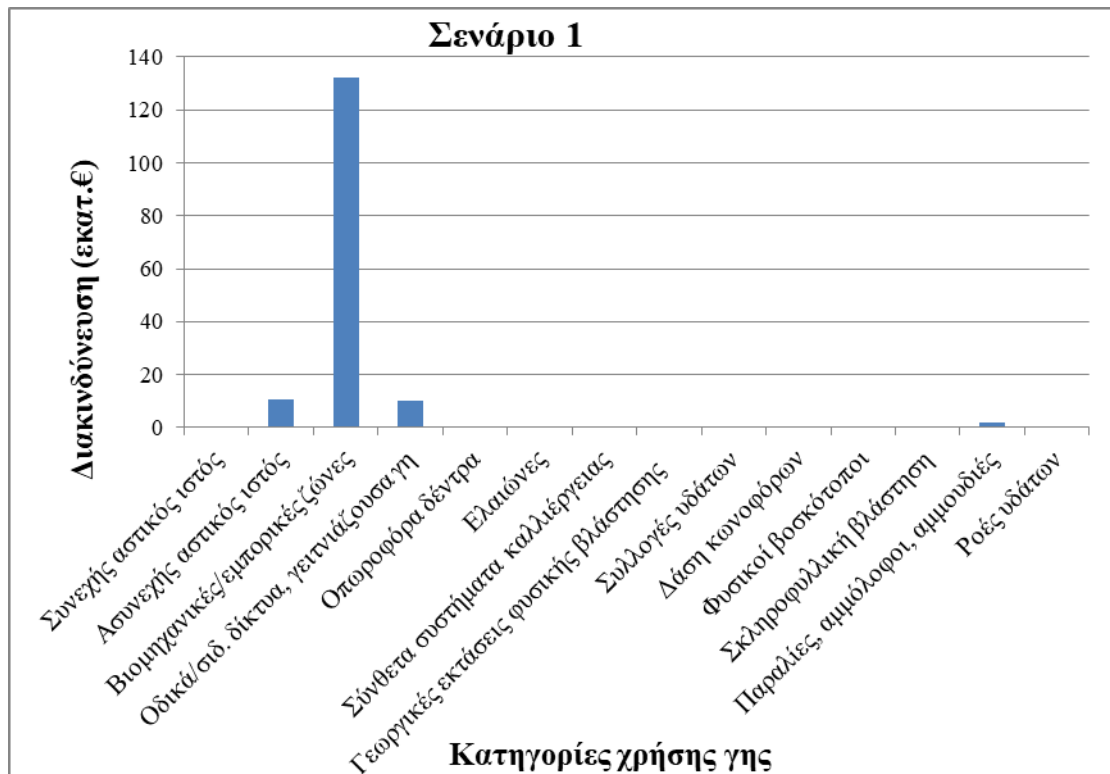
Σχήμα Α 24: Γράφημα πλημμυρικής έκτασης ανά κατηγορία χρήσης γης των σεναρίων 1-3



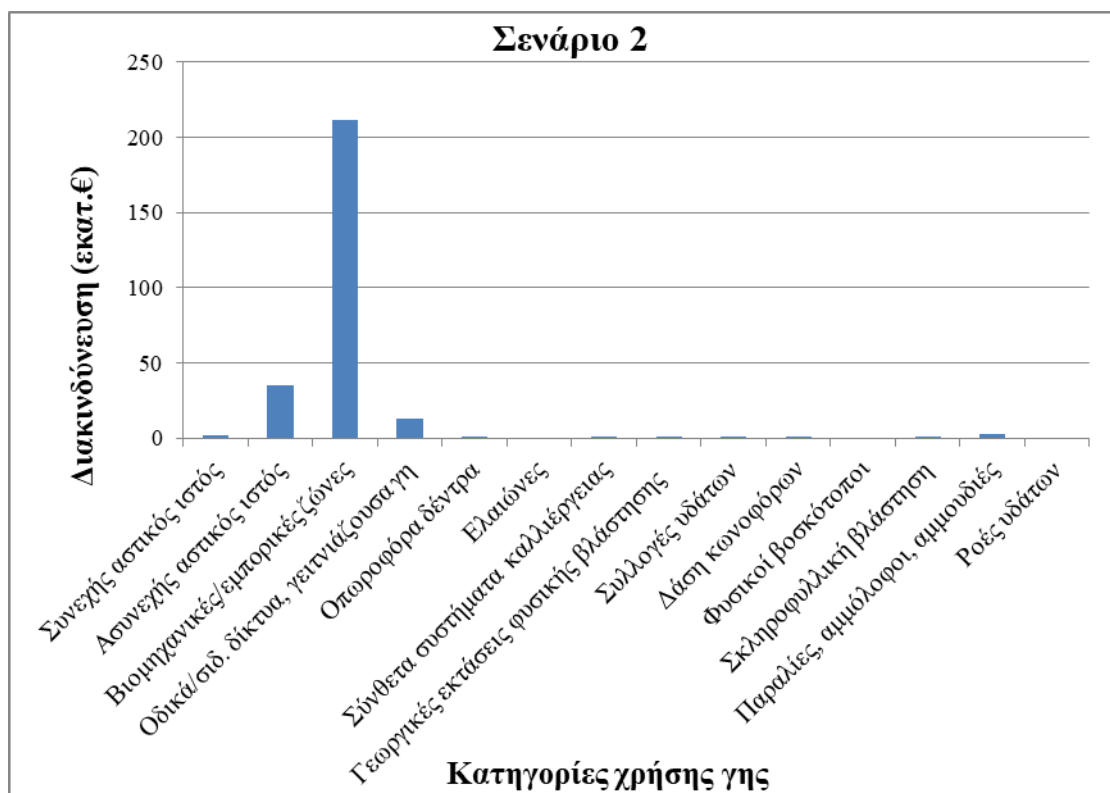
Σχήμα Α 25: Γράφημα πλημμυρικής διακινδύνευσης ανά κατηγορία χρήσης γης της πλημμύρας του 2005



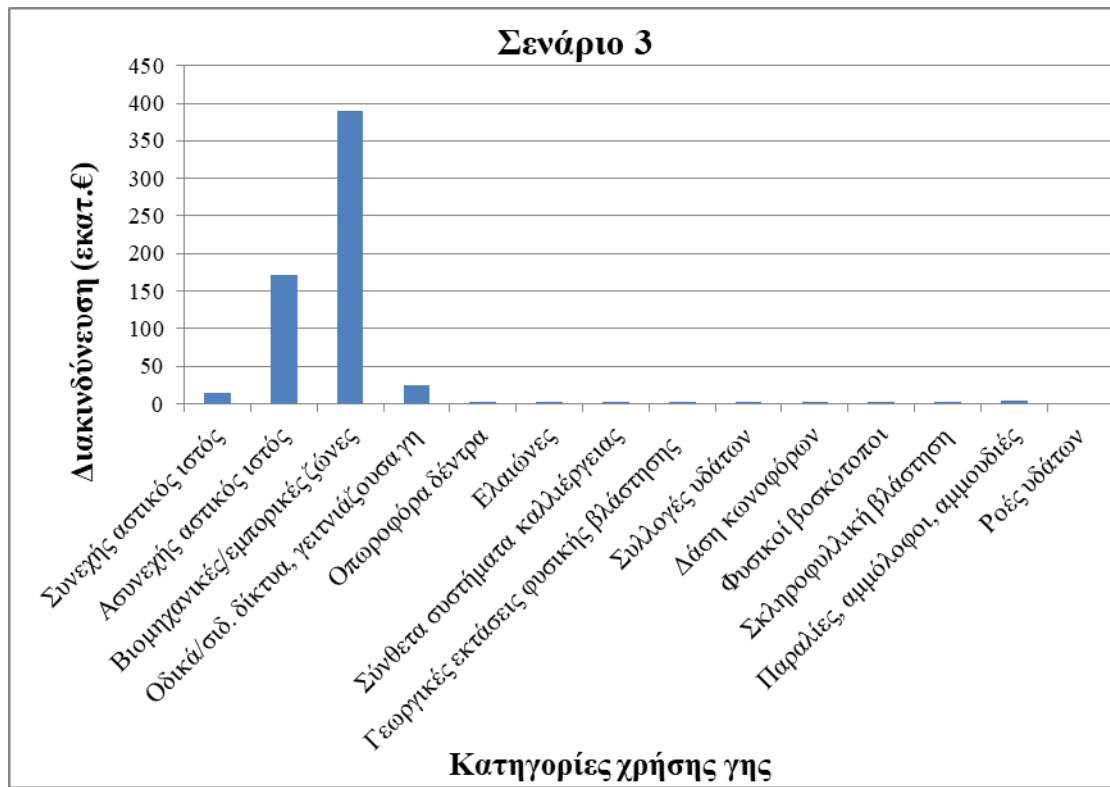
Σχήμα Α 26: Γράφημα πλημμυρικής διακινδύνευσης ανά κατηγορία χρήσης γης της πλημμύρας του 2015



Σχήμα A 27: Γράφημα πλημμυρικής διακινδύνευσης ανά κατηγορία χρήσης γης του σεναρίου 1

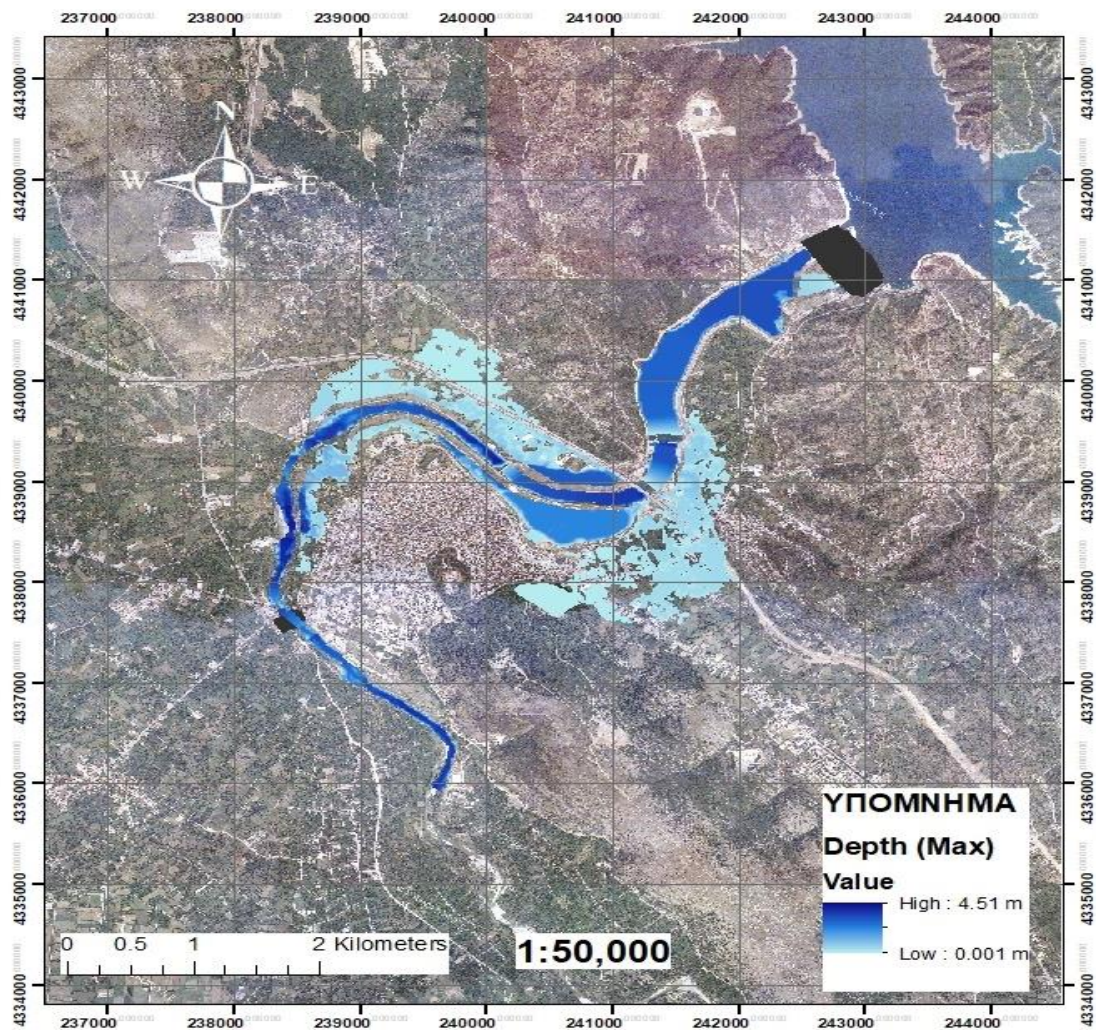


Σχήμα A 28: Γράφημα πλημμυρικής διακινδύνευσης ανά κατηγορία χρήσης γης του σεναρίου 2

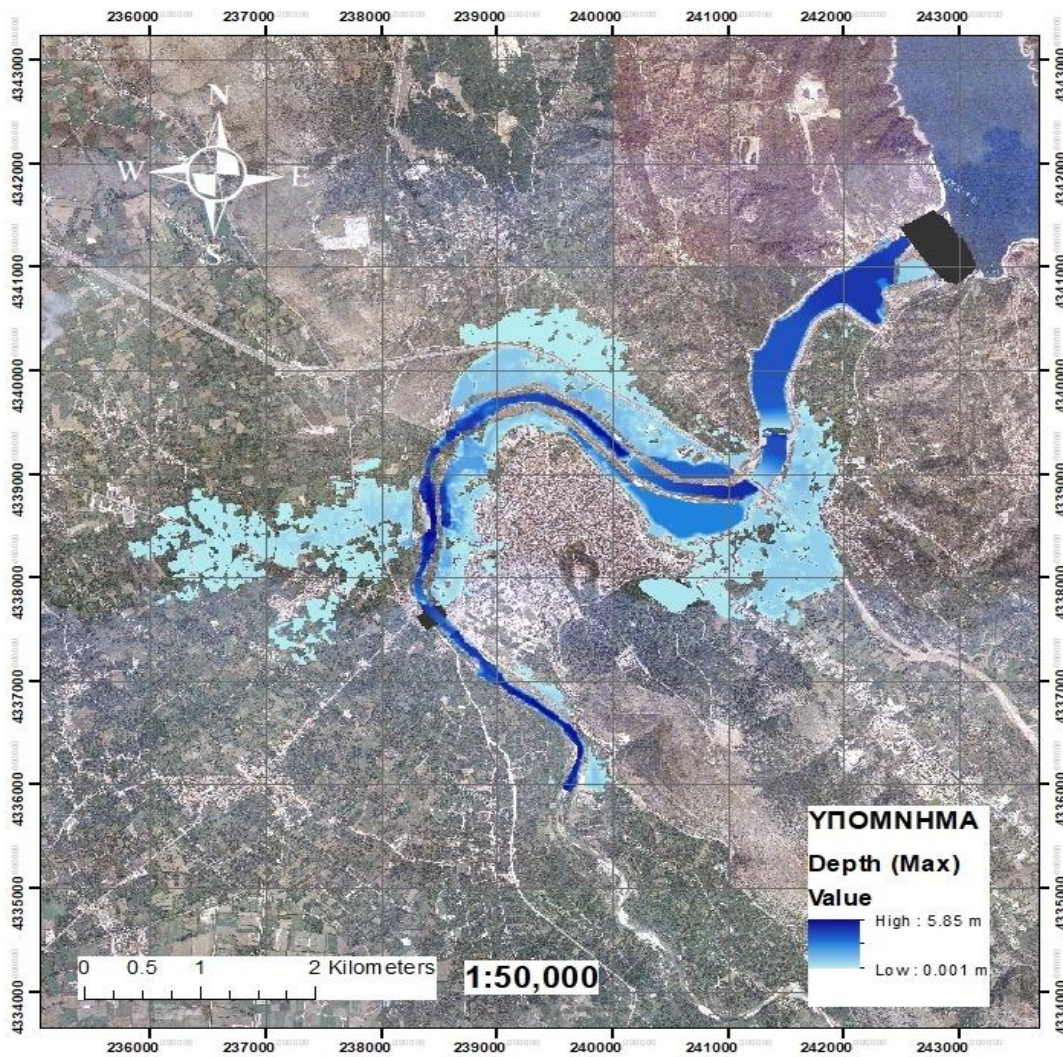


Σχήμα Α 29: Γράφημα πλημμυρικής διακινδύνευσης ανά κατηγορία χρήσης γης του σεναρίου

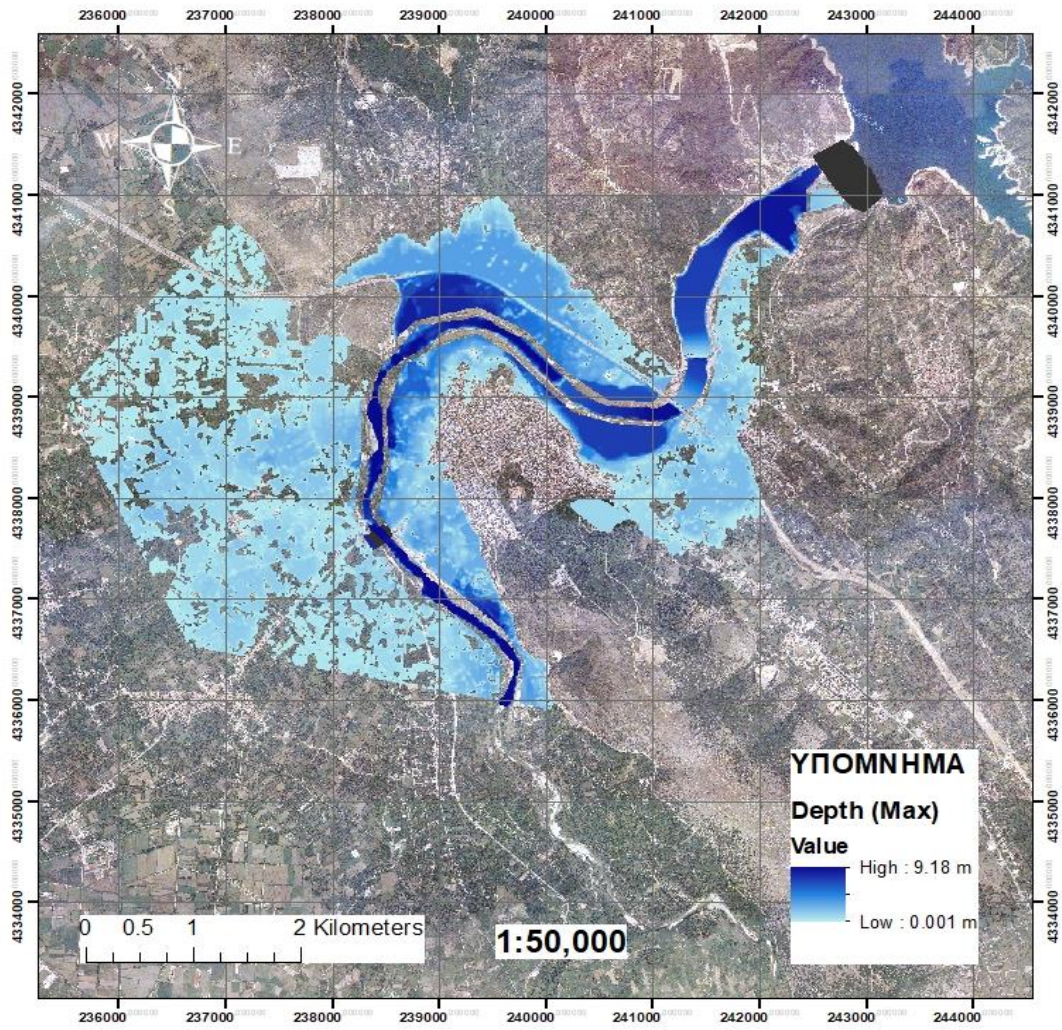
Παράρτημα Β. Πλημμυρικοί χάρτες κατάκλυσης



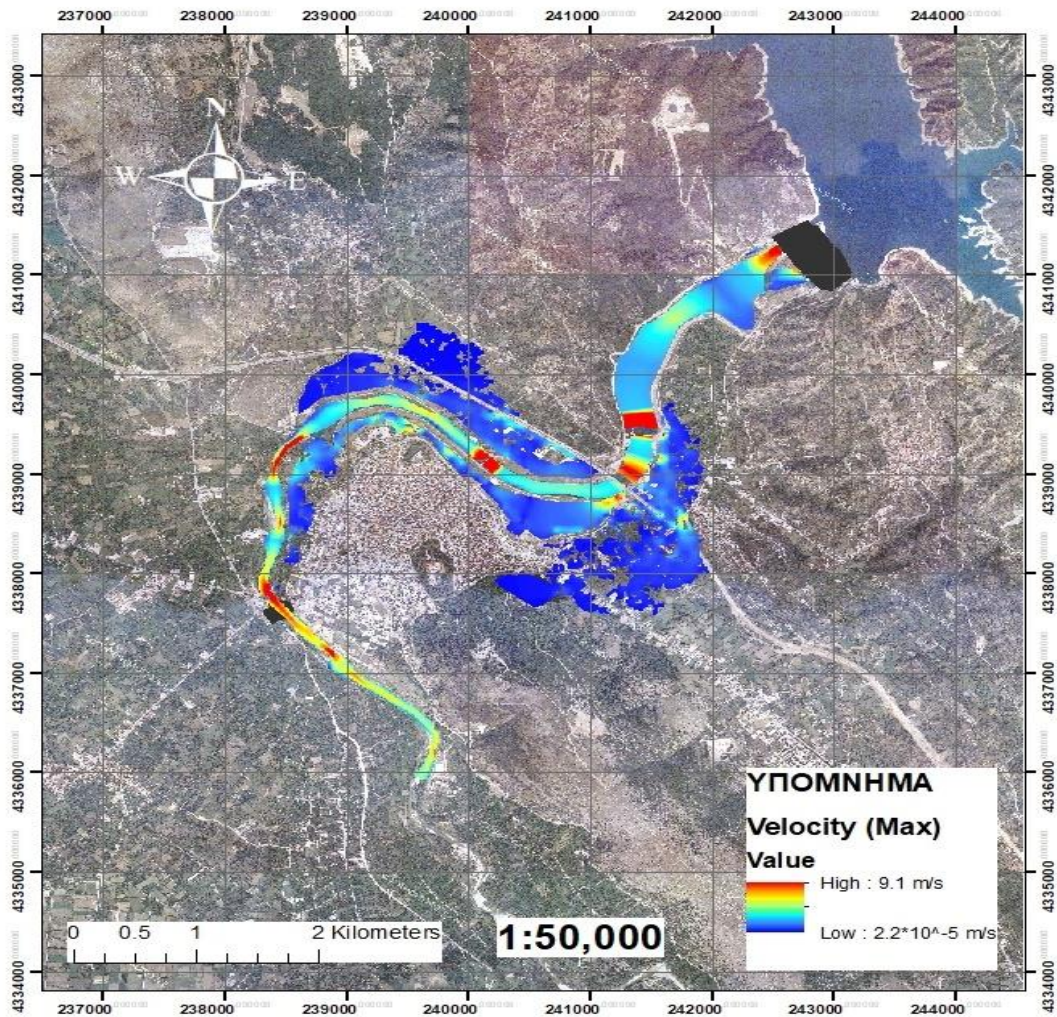
Σχήμα Β1: Πλημμυρικός χάρτης μέγιστου βάθους νερού της πλημμύρας του σεναρίου 1



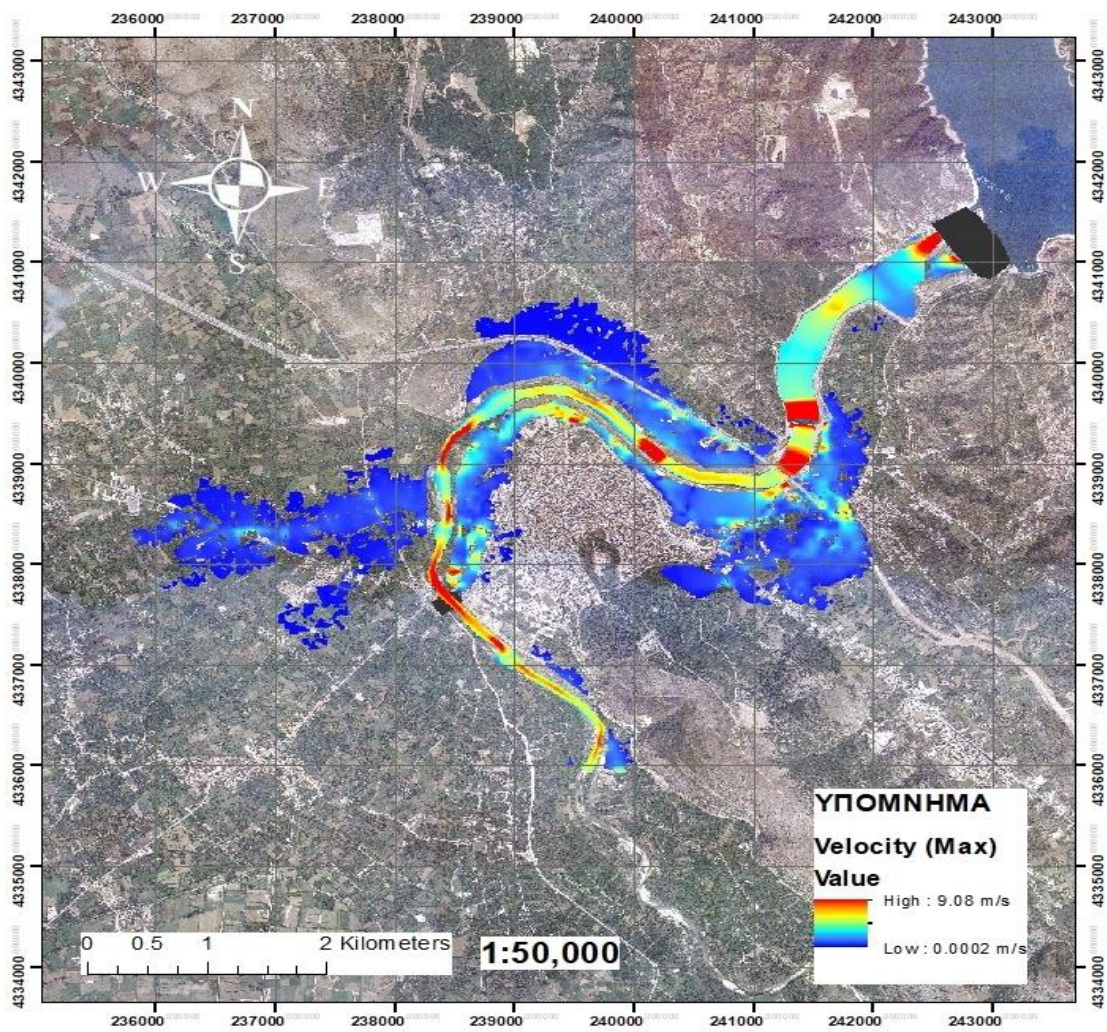
Σχήμα Β2: Πλημμυρικός χάρτης μέγιστου βάθους νερού της πλημμύρας του σεναρίου 2



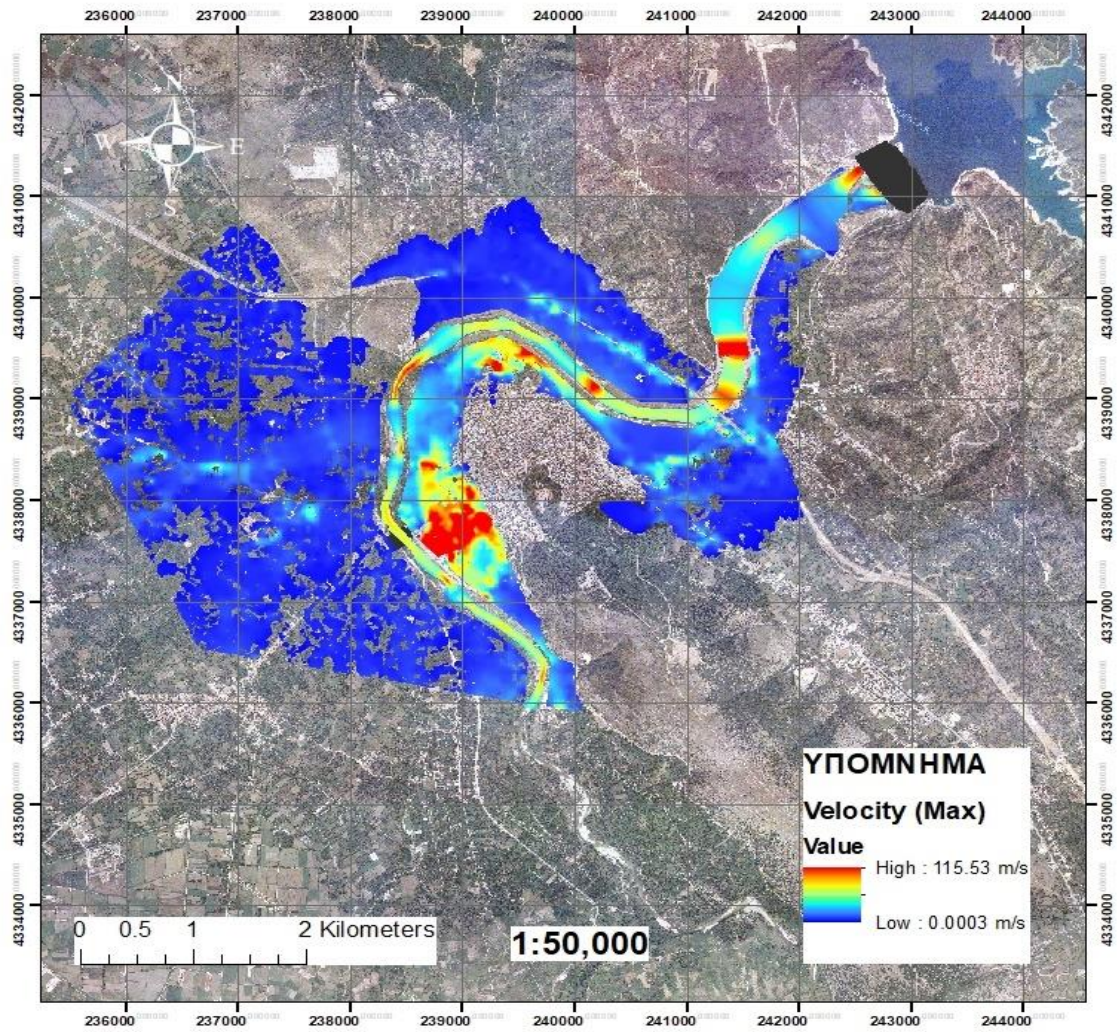
Σχήμα Β3: Πλημμυρικός χάρτης μέγιστου βάθους νερού της πλημμύρας του σεναρίου 3



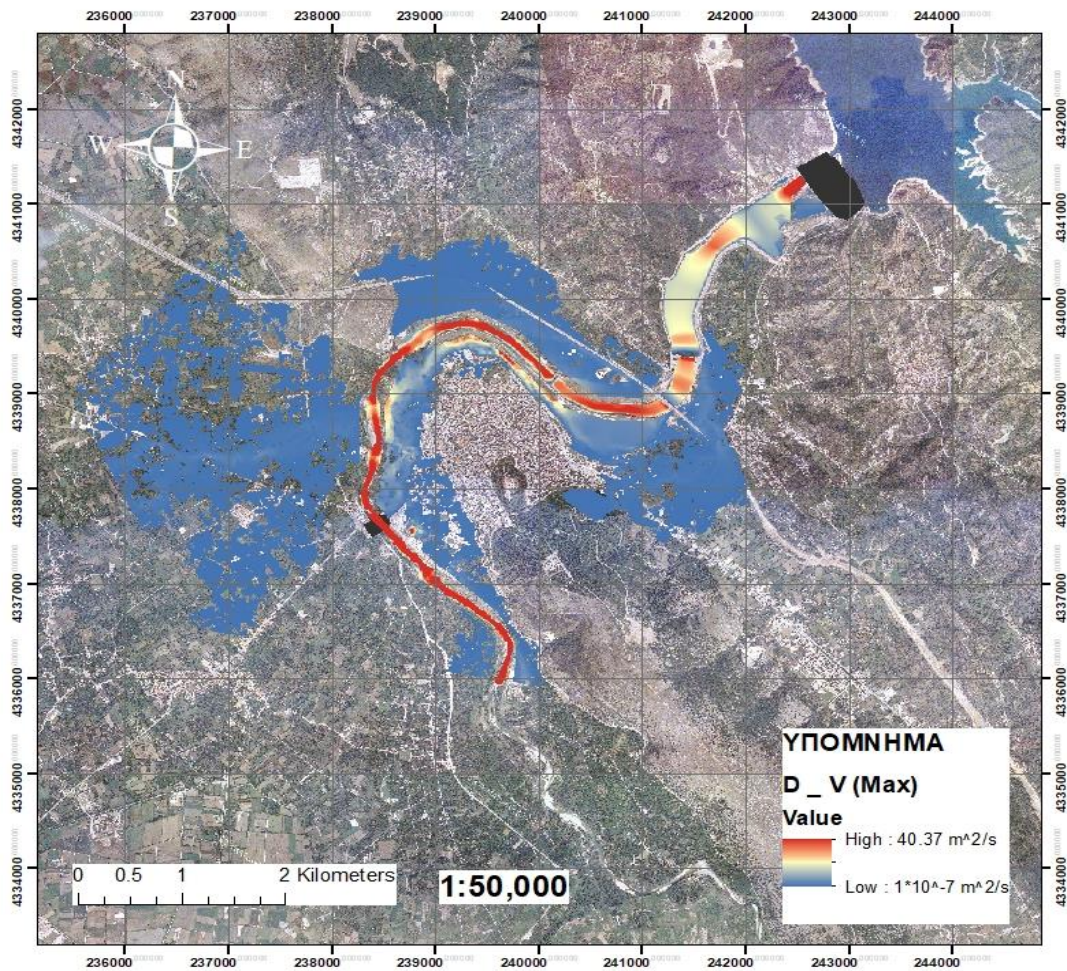
Σχήμα Β4: Πλημμυρικός χάρτης μέγιστης ταχύτητας της πλημμύρας του σεναρίου 1



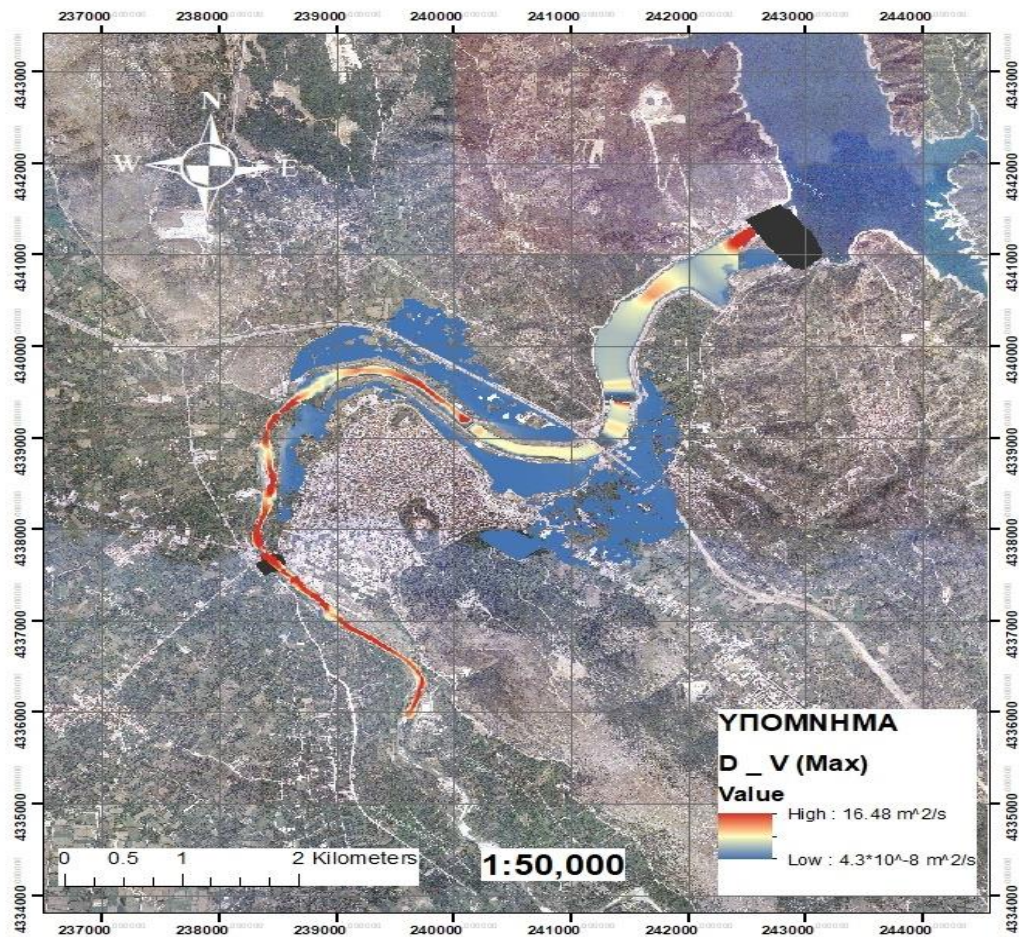
Σχήμα Β5: Πλημμυρικός χάρτης μέγιστης ταχύτητας της πλημμύρας του σεναρίου 2



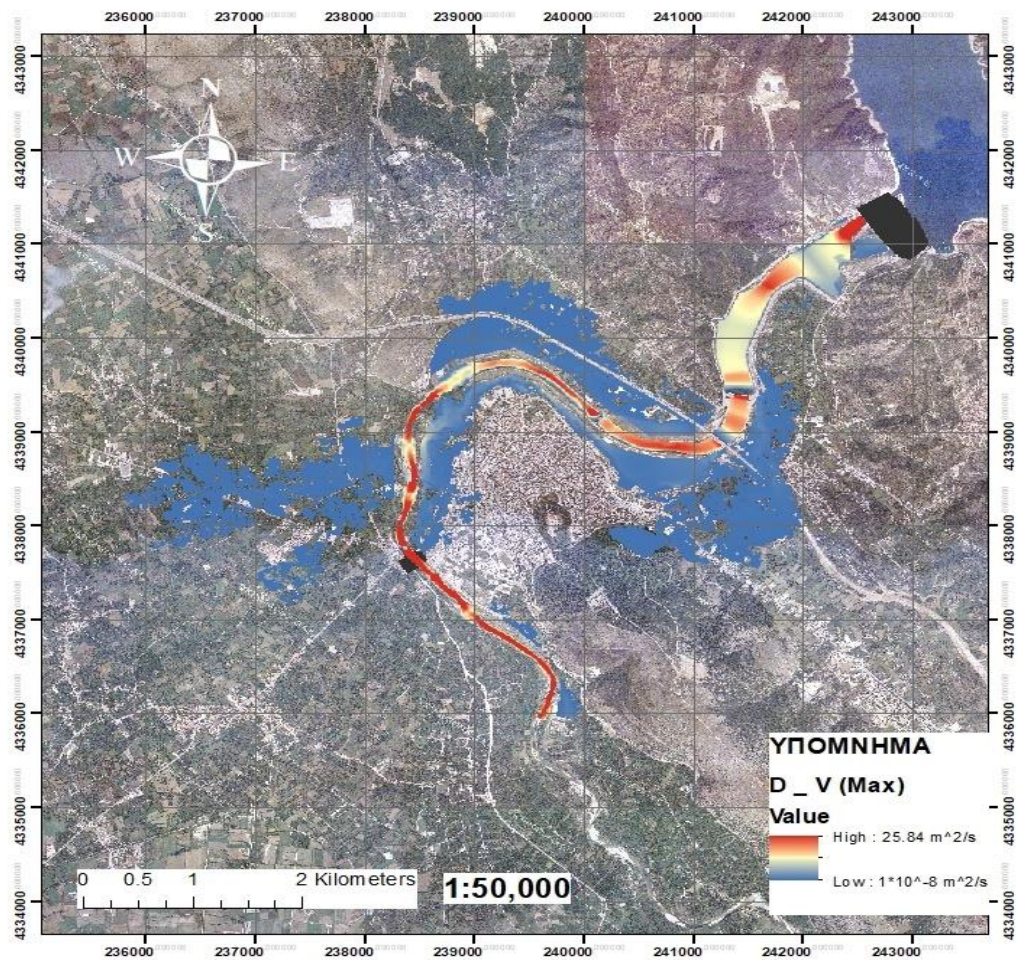
Σχήμα Β6: Πλημμυρικός χάρτης μέγιστης ταχύτητας της πλημμύρας του σεναρίου 3



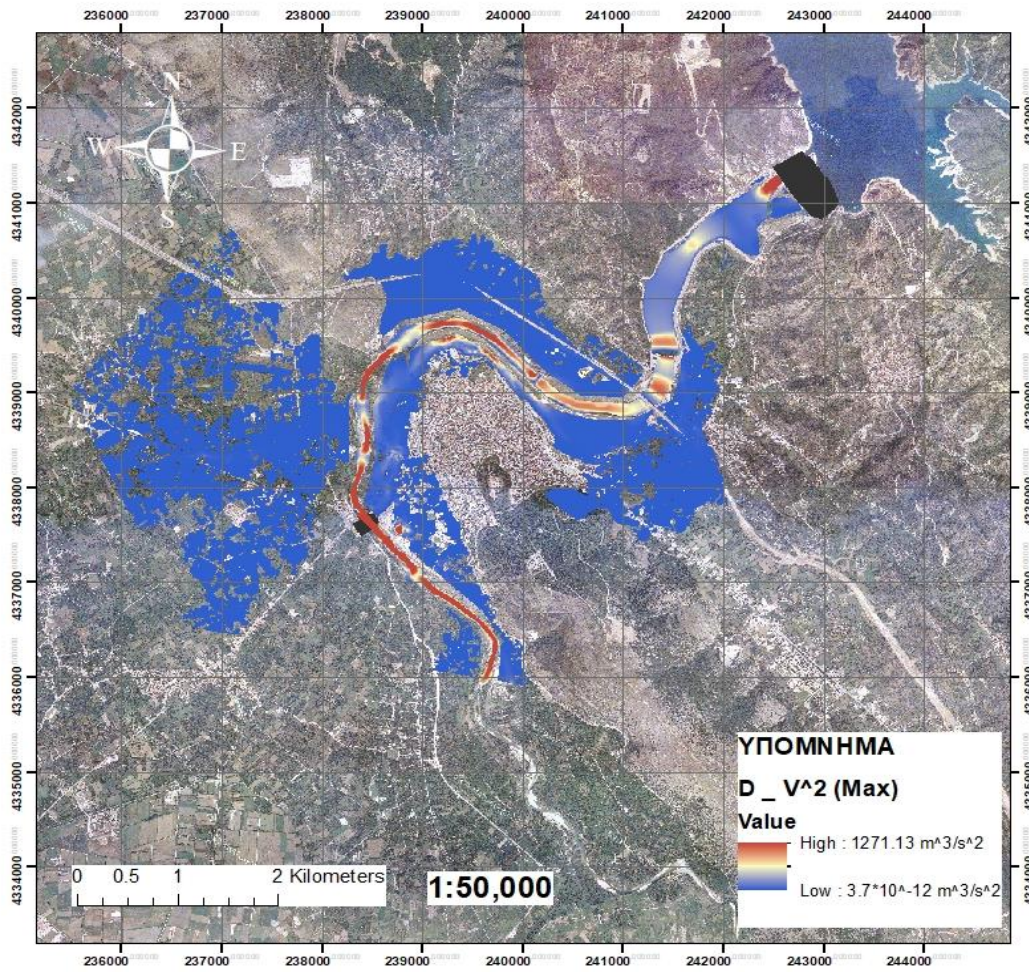
Σχήμα Β7: Πλημμυρικός χάρτης δυν της πλημμύρας του 2015



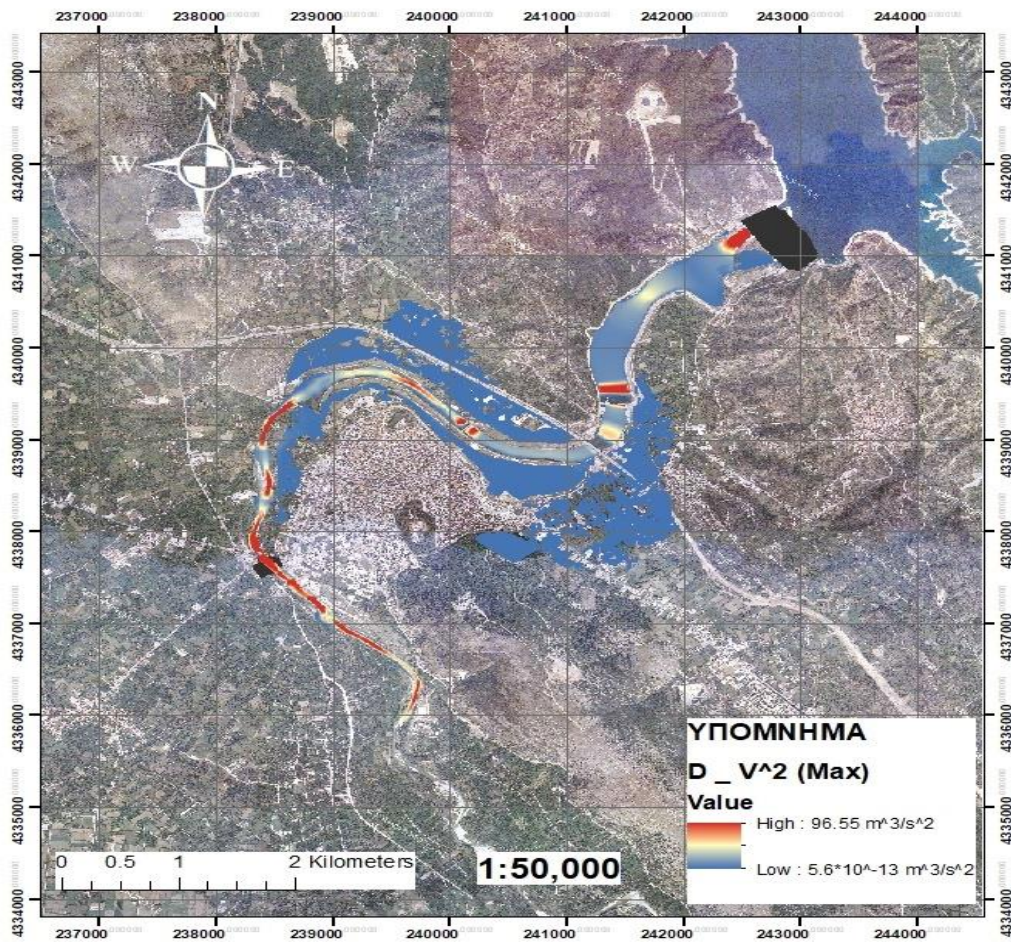
Σχήμα Β8: Πλημμυρικός χάρτης d×v της πλημμύρας του σεναρίου 1



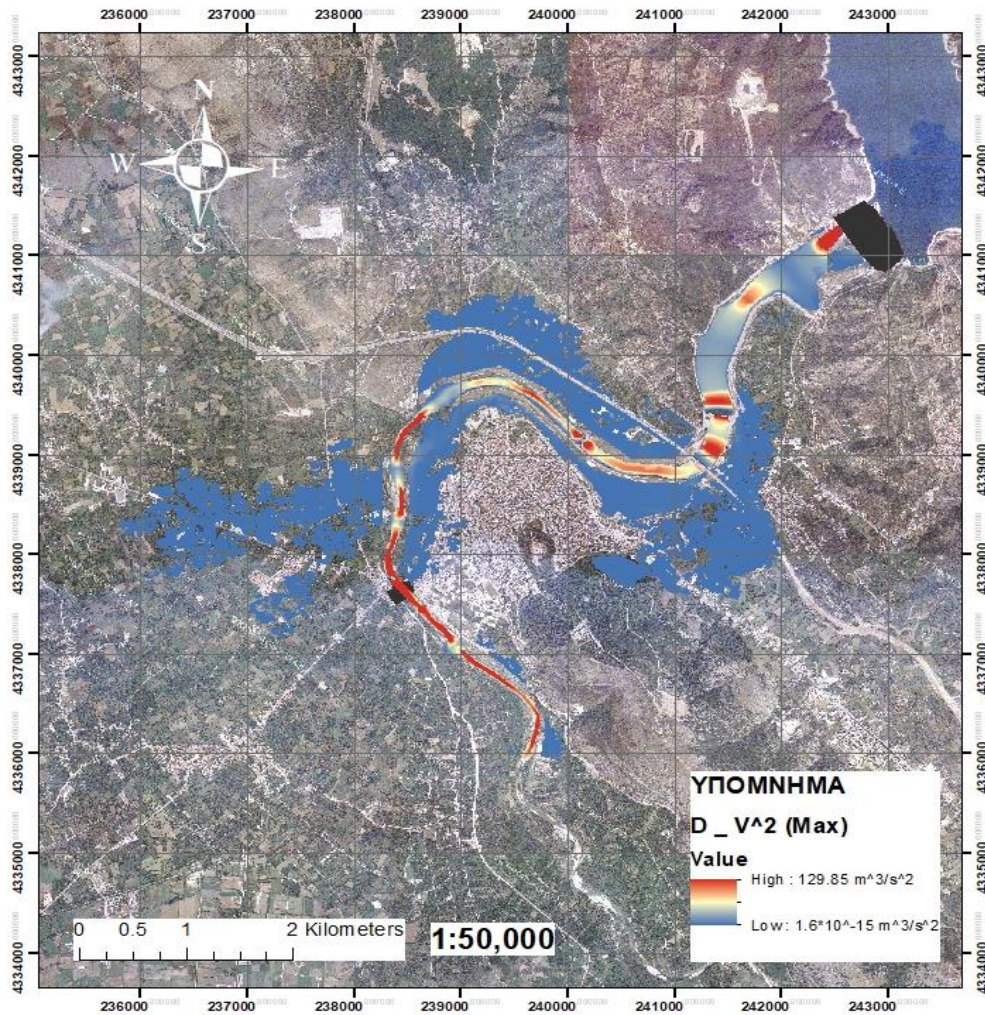
Σχήμα Β9: Πλημμυρικός χάρτης dxn του σεναρίου 2



Σχήμα Β10: Πλημμυρικός χάρτης $d \times v^2$ της πλημμύρας του 2015



Σχήμα Β11: Πλημμυρικός χάρτης $d \cdot v^2$ της πλημμύρας του σεναρίου 1



Σχήμα Β12: Πλημμυρικός χάρτης $d \times v^2$ της πλημμύρας του σεναρίου 2