

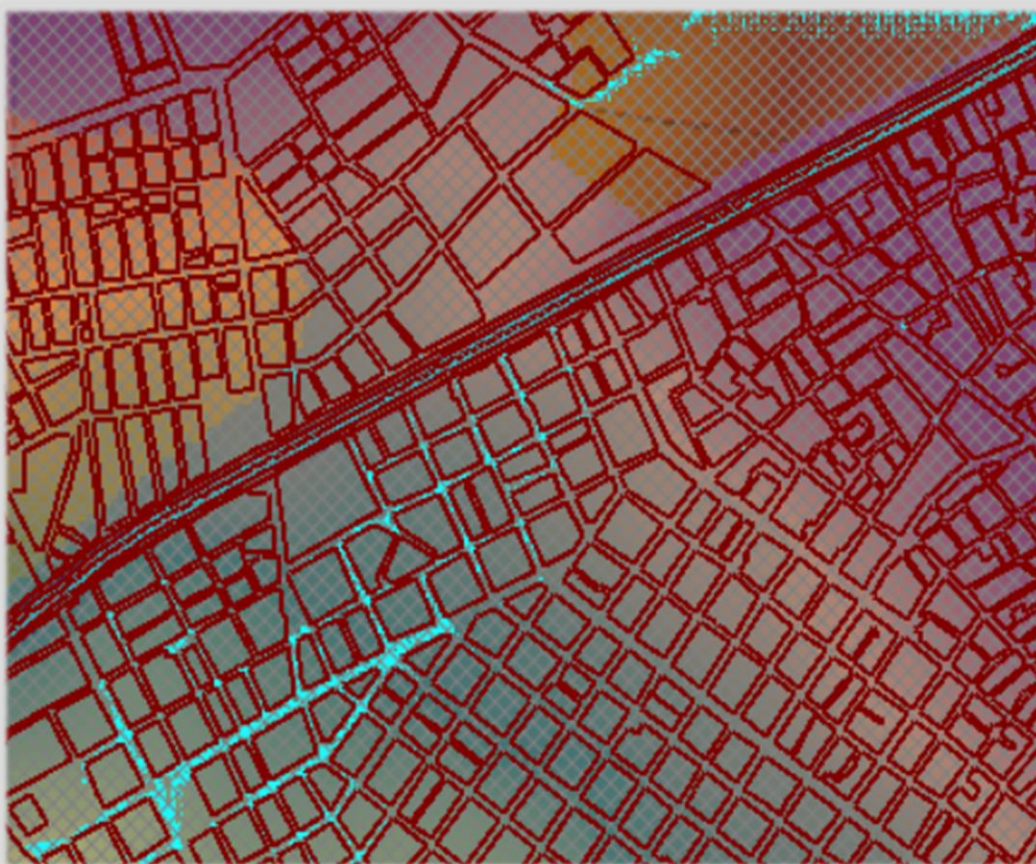


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ ΣΕ ΑΣΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ ΚΕΧΑΓΙΑ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2025

© 2025 Αικατερίνη Κεχαγιά

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Βασιλειάδης Λάμπρος, Επίκουρος Καθηγητής
(Επιβλέπων)

Δεύτερος Εξεταστής Μυλόπουλος Νικήτας, Καθηγητής

Τρίτος Εξεταστής Δριτσέλης Χρήστος, Επίκουρος Καθηγητής

Πρόλογος

Η προσομοίωση πλημμυρών σε αστικό περιβάλλον είναι ένας κρίσιμος κλάδος του επιστημονικού τομέα της διαχείρισης ακραίων υδρολογικών φαινομένων, που απαιτεί τη δημιουργία υπολογιστικών μοντέλων με ακρίβεια και αξιοπιστία. Δεδομένης της αυξανόμενης συχνότητας και σοβαρότητας των αστικών πλημμυρών, οι οποίες προκαλούν εκτεταμένες κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές ζημιές, η ζήτηση για ολοκληρωμένη υδροδυναμική μοντελοποίηση έχει αυξηθεί. Μεταξύ των διαφόρων προσεγγίσεων μοντελοποίησης, τα διδιάστατα (2D) υδροδυναμικά μοντέλα πλημμυρών έχουν αναδειχθεί ως απαραίτητα εργαλεία λόγω της ικανότητάς τους να προσομοιώνουν τη δυναμική των πλημμυρών με υψηλή χωρική ανάλυση και ρεαλισμό.

Αικατερίνη Κεχαγιά

ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ ΣΕ ΑΣΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

Αικατερίνη Κεχαγιά

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2025

Επιβλέπων Καθηγητής: Λάμπρος Βασιλειάδης, Επ. Καθηγητής

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη εξετάζει τις επιδράσεις της ανάλυσης της τοπογραφίας και της κάλυψης γης στην εκτίμηση της έκτασης της πλημμύρας, του βαθμού επικινδυνότητας και των χρόνων άφιξης ενός διδιάστατου (2D) υδροδυναμικού μοντέλου HEC-Ras υπό δομές πλέγματος διαφορετικού μεγέθους, χρησιμοποιώντας υδρογραφήματα της περιοχής του Βόλου για περίοδο επαναφοράς 50 χρόνων. Παράγονται δεκαπέντε ψηφιακά μοντέλα για τα υδρογραφήματα των ετών 2017 και 2023, δύο διαφορετικών αναλύσεων (2m x 2m) και (5m x 5m) και τριών διαφορετικών χρήσεων γης. Η προσομοίωση που πραγματοποιείται για την πιο λεπτομερή διαμόρφωση του μοντέλου χρησιμοποιείται ως βασική προσομοίωση για τη σύγκριση των επιδόσεων των άλλων προσομοιώσεων. Η ευαισθησία του μοντέλου στο συντελεστή τραχύτητας Manning φαίνεται κρίσιμη, καθώς επίσης υποδεικνύεται πως μια ανάλυση τοπογραφίας μικρότερη των 2m x 2m δεν είναι απαραίτητη για την παραγωγή αξιόπιστων προσομοιώσεων.

Λέξεις Κλειδιά: 2D Υδροδυναμική προσομοίωση, Έκταση πλημμύρας, Χρόνος άφιξης, Επικινδυνότητα πλημμύρας, Χρήσεις γης, Αστικές πλημμύρες, HEC-Ras

TWO-DIMENSIONAL HYDRODYNAMIC FLOOD SIMULATION IN URBAN AREAS

Aikaterini Kechagia

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2025

Supervisor: Lampros Vasiliades, Professor

Abstract

This study examines the effects of topography and land cover analysis on the estimation of inundation boundary, flood risk and arrival time of a two-dimensional (2D) hydrodynamic HEC-Ras model under grid structures of different sizes, using hydrographs of the city of Volos for return period of 50 years. Fifteen digital models are produced using 2017 and 2023 hydrographs, two different resolutions (2m x 2m) and (5m x 5m) and three different land covers. The simulation carried out for the most detailed model configuration is used as a baseline simulation to compare the performance of the other simulations. The Manning roughness coefficient appears to be critical for the sensitivity of the model. Furthermore, it is indicated that topographic resolution finer than 2m x 2m is not necessary for producing reliable simulations.

Keywords: *2D Hydrodynamic modeling, Inundation boundary, Arrival time, Flood risk, Land cover data, Urban flooding, HEC-Ras*

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	1
1.1	Γενικά	1
1.2	Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	2
1.3	Οργάνωση διπλωματικής εργασίας	3
Κεφάλαιο 2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	4
2.1	Πλημμύρες	4
2.2	Πρόσφατα πλημμυρικά γεγονότα	5
2.3	Αίτια πλημμυρικών επεισοδίων	6
2.4	Οδηγία 2007/60 για την διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας	6
2.5	Το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS	7
2.6	Διδιάστατη ανάλυση πλημμύρας	8
Κεφάλαιο 3	Μέθοδος πεπερασμένων όγκων	10
3.1	Βασικές αρχές της μεθόδου πεπερασμένων όγκων	10
3.2	Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος	14
Κεφάλαιο 4	Περιοχή μελέτης	17
4.1	Η περιοχή του Βόλου	17
4.2	Γεωγραφικά-Πληθυσμιακά στοιχεία	17
4.3	Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά	18
4.3.1	Λεκάνες απορροής	19
4.4	Κλίμα	21
Κεφάλαιο 5	Υδραυλική προσομοίωση	22

5.1	Εισαγωγή	22
5.2	Δεδομένα εδάφους	23
5.2.1	Σύγκριση της ανάλυσης τοπογραφίας (5m x 5m) και (2m x 2m)	26
5.3	Χρήσεις γης	27
5.3.1	CORINE LAND COVER	27
5.3.2	ArcGIS Living Atlas (ESRI)	30
5.4	Γεωμετρία διδιάστατου πλέγματος	32
5.5	Υδρογραφήματα εισόδου	33
Κεφάλαιο 6 Αποτελέσματα		40
6.1	Εισαγωγή	40
6.1.1	Χρόνος άφιξης	40
6.1.2	Επικινδυνότητα πλημμύρας	40
6.1.3	Όρια κατάκλισης	44
6.2	Επιρροή της προσομοίωσης των κτιρίων ως αδιαπέραστη επιφάνεια	44
6.3	Επιρροή της αλλαγής στην ανάλυσης πλέγματος τοπογραφίας	51
6.4	Σύγκριση ανάλυσης πλέγματος 2x2m και 5x5m με προσομοίωση των κτιρίων	56
6.5	Επιρροή της αλλαγής του υδρογραφήματος	60
6.6	Επιρροή της αλλαγής του συντελεστή τραχύτητας	65
6.7	Σύγκριση των αποτελεσμάτων με χρήση δεδομένων στις βάσης CORINE και ESRI	70
Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα		75
Βιβλιογραφία		76
Παράρτημα Α		79

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Τιμές συντελεστών τραχύτητας Manning 2017 CORINE	28
Πίνακας 2 Τιμές συντελεστών τραχύτητας Manning 2023 CORINE	29
Πίνακας 3 Τιμές συντελεστών τραχύτητας Manning 2023 HEC-Ras (ESRI).....	31
Πίνακας 4 Αποτελέσματα ανάλυσης υπολογιστικού πλέγματος.....	32
Πίνακας 5 Χρόνος ολοκλήρωσης των προσομοιώσεων	34
Πίνακας 6 Συγκεντρωτικός πίνακας υδρογραφημάτων	35
Πίνακας 7 Κατηγοριοποίηση του βαθμού επικινδυνότητας.....	42
Πίνακας 8 Στατιστικά αποτελέσματα για μέγιστη ταχύτητα ροής.....	45
Πίνακας 9 Στατιστικά στοιχεία ανάλυσης μέγιστου βάθους ροής, τοπογραφίας με και χωρίς κτίρια.....	48
Πίνακας 10 Στατιστικά αποτελέσματα για μέγιστη ταχύτητα ροής.....	53
Πίνακας 11 Στατιστικά στοιχεία ανάλυσης βάθους τοπογραφίας 5m x 5m και 2m x 2m.....	54
Πίνακας 12 Στατιστικά αποτελέσματα για μέγιστη ταχύτητα ροής.....	57
Πίνακας 13 Στατιστικά στοιχεία ανάλυσης βάθους τοπογραφίας 5m x 5m και 2m x 2m.....	58
Πίνακας 14 Στατιστικά αποτελέσματα για μέγιστη ταχύτητα ροής.....	62
Πίνακας 15 Στατιστικά στοιχεία ανάλυσης μέγιστου βάθους ροής, υδρογραφημάτων 2017 και 2023.....	63
Πίνακας 16 Στατιστικά αποτελέσματα για μέγιστη ταχύτητα ροής.....	67
Πίνακας 17 Στατιστικά στοιχεία ανάλυσης μέγιστου βάθους ροής, manning 2017 και 2023	67
Πίνακας 18 Στατιστικά αποτελέσματα για μέγιστη ταχύτητα ροής.....	71
Πίνακας 19 Στατιστικά στοιχεία ανάλυσης μέγιστου βάθους ροής, με δεδομένα χρήσης γης και η Manning CORINE και ESRI.....	72

Κατάλογος Υδρογραφημάτων

Υδρογράφημα 1 Υδρογραφήματα εισόδου Άναυρου του 2017 για μέσες συνθήκες και περίοδο επαναφοράς 50, 100 και 1000 χρόνια.....	38
Υδρογράφημα 2 Υδρογραφήματα εισόδου Άναυρου του 2023 για μέσες συνθήκες και περίοδο επαναφοράς 50, 100 και 1000 χρόνια.....	38
Υδρογράφημα 3 Υδρογραφήματα εισόδου Κραυσίδωνα του 2017 για μέσες συνθήκες και περίοδο επαναφοράς 50, 100 και 1000 χρόνια.....	39
Υδρογράφημα 4 Υδρογραφήματα εισόδου Κραυσίδωνα του 2023 για μέσες συνθήκες και περίοδο επαναφοράς 50, 100 και 1000 χρόνια.....	39

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1 Καρτεσιανό πλέγμα: κεντροκυψελική διάταξη(Σαρρής et al., 2024).....	15
Εικόνα 2 Καρτεσιανό πλέγμα: κεντροκομβική διάταξη(Σαρρής et al., 2024).....	15
Εικόνα 3 Δευτερεύων πλέγμα με κεντροκομβική μέθοδο (Huang & Jin, 2019)	16
Εικόνα 4 Χάρτης περιοχής μελέτης, όπου απεικονίζεται η σχηματοποίηση των κόμβων και κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και των υπολεκανών του Κραυσίδωνα.....	20
Εικόνα 5 Χάρτης περιοχής μελέτης, όπου απεικονίζεται η σχηματοποίηση των κόμβων και κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και των υπολεκανών του Άναυρου.....	20
Εικόνα 6 Μέση ετήσια θερμοκρασία στην περιοχή του Βόλου (meteoblue, 2024).....	21
Εικόνα 7 Εδαφικό υπόβαθρο με ενσωματωμένα κτίρια, ανάλυσης 5m x 5m.....	24
Εικόνα 8 Εδαφικό υπόβαθρο χωρίς κτίρια, ανάλυσης 5m x 5m.....	24
Εικόνα 9 Εδαφικό υπόβαθρο χωρίς κτίρια, ανάλυσης 2m x 2m.....	25
Εικόνα 10 Σύγκριση ανάλυσης 5m με 2m	26
Εικόνα 11 Χρήσεις γης από την βάση δεδομένων CORINE	30
Εικόνα 12 Χρήσεις γης από την βάση δεδομένων ESRI.....	31
Εικόνα 13 Κατηγοριοποίηση γινομένου επικινδυνότητας πλημμύρας (Department of Planning and Environment Flood Hazard, 2022)	41
Εικόνα 14 Κατώτατα όρια για τη σταθερότητα των ανθρώπων στις πλημμύρες (Department of Planning and Environment Flood Hazard, 2022)	41
Εικόνα 15 α. Ανάπτυξη της ροής με αναπαράσταση κτιρίων, b. Ανάπτυξη της ροής χωρίς την αναπαράσταση κτιρίων	46
Εικόνα 16 Αποτελέσματα των προσομοιώσεων των ταχυτήτων της περιοχής του Άναυρου.....	46
Εικόνα 17 Προσομοίωση κτιρίων χωρίς αναπαράσταση του αστικού ιστού: α. Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα	47
Εικόνα 18 Προσομοίωση κτιρίων του αστικού ιστού ως αδιαπέραστη επιφάνεια: α. Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα	47
Εικόνα 19 Αποτελέσματα της προσομοίωσης του αστικού ιστού σε μεγέθυνση: α. Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα	48
Εικόνα 20 Μοντέλο χωρίς ενσωματωμένα κτίρια και μοντέλο με ενσωματωμένα κτίρια, διαφορά βάθους ροής	49
Εικόνα 21 Σύγκριση αποτελεσμάτων για αλλαγή τοπογραφικών δεδομένων με κτίρια για: α. Χρόνος άφιξης, b. Επικινδυνότητα, c. Όρια κατάκλισης	50

Εικόνα 22 DSM (5m x 5m): Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα.....	52
Εικόνα 23 DSM (2m x 2m): Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα.....	52
Εικόνα 24 Διαφορά βάθους ροής για ανάλυση τοπογραφίας 5m x 5m και 2m x 2m.....	54
Εικόνα 25 Σύγκριση αποτελεσμάτων για αλλαγή ανάλυσης πλέγματος από 5m x 5m σε 2m x 2m για: a. Χρόνος άφιξης, b. Επικινδυνότητα, c. Όρια κατάκλισης	55
Εικόνα 26 DSM (5m x 5m) με κτίρια: Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα	57
Εικόνα 27 DSM (2m x 2m) με κτίρια: Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα	57
Εικόνα 28 Σύγκριση της προσομοίωσης του αστικού ιστού σε μεγέθυνση: a. Ανάλυση τοπογραφίας 5m x 5m, b. Ανάλυση τοπογραφίας 2m x 2m	58
Εικόνα 29 Διαφορά βάθους ροής για ανάλυση τοπογραφίας 5m x 5m και 2m x 2m	59
Εικόνα 30.....	60
Εικόνα 31 Υδρογράφημα 2017: Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα	62
Εικόνα 32 Υδρογράφημα 2023: Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα	62
Εικόνα 33 Διαφορά βάθους ροής για υδρογραφήματα 2017 και 2023	64
Εικόνα 34 Σύγκριση αποτελεσμάτων για αλλαγή των υδρογραφημάτων σε αυτά του 2023 για: a. Χρόνος άφιξης, b. Επικινδυνότητα, c. Όρια κατάκλισης	65
Εικόνα 35 Manning 2017: Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα	66
Εικόνα 36 Manning 2023: Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα	67
Εικόνα 37 Διαφορά βάθους ροής για n Manning 2017 και 2023	68
Εικόνα 38 Σύγκριση αποτελεσμάτων για αλλαγή συντελεστή n Manning 2023 για: a. Χρόνος άφιξης, b. Επικινδυνότητα, c. Όρια κατάκλισης	69
Εικόνα 39 Δεδομένα CORINE: Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα ..	71
Εικόνα 40 Δεδομένα ESRI: Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα	71
Εικόνα 41 Διαφορά βάθους ροής για δεδομένα CORINE και ESRI	73
Εικόνα 42 Σύγκριση αποτελεσμάτων για αλλαγή βάσης δεδομένων CORINE και ESRI για: a. Χρόνος άφιξης, b. Επικινδυνότητα, c. Όρια κατάκλισης	74

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Οι πλημμύρες είναι ακραία φυσικά φαινόμενα που συνδέονται στενά με τις ακραίες κλιματικές συνθήκες, καθιστώντας αδύνατη την πλήρη πρόληψή τους. Αποτελούν σημαντική απειλή για τον άνθρωπο, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική δραστηριότητα. Οι πλημμύρες στις αστικές περιοχές, ιδίως από υπερχειλίσσεις ποταμών, αποτελούν κρίσιμη ανησυχία λόγω των άμεσων επιπτώσεών τους στην ανθρώπινη ζωή. Τα τελευταία χρόνια, οι πλημμύρες έχουν καταστεί η συχνότερη φυσική καταστροφή στην Ευρώπη, με την αυξανόμενη εμφάνισή τους να προκαλεί ευρεία ανησυχία. Ανταποκρινόμενο σε αυτό το ζήτημα, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο εφαρμόζει μια οδηγία με στόχο την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας.

Η μοντελοποίηση των πλημμυρών και η ανάπτυξη χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες για μια περιοχή πριν ή μετά από ένα πλημμυρικό γεγονός. Τα βασικά δεδομένα περιλαμβάνουν εκτιμήσεις της πλημμυρισμένης περιοχής, του μέγιστου βάθους νερού και των μέγιστων ρυθμών ροής. Τα υδραυλικά μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία χρησιμοποιούν μαθηματικούς αλγορίθμους, παρέχουν μια φυσική αναπαράσταση της δυναμικής των πλημμυρών, επιλύοντας εξισώσεις με βάση τις αρχές της μάζας, της ορμής και της ενέργειας.

Η ανάλυση πλημμυρών μπορεί να διεξαχθεί σε μία ή δύο διαστάσεις, με την πολυπλοκότητα να αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των διαστάσεων, απαιτώντας πιο προηγμένες υπολογιστικές τεχνικές και υποθέσεις. Η μονοδιάστατη ανάλυση πλημμυρών επικεντρώνεται συνήθως στη ροή του νερού κατά μήκος μιας μόνο κατεύθυνσης, όπως ένα ποτάμι ή ένα κανάλι, παρέχοντας μια απλοποιημένη εικόνα της δυναμικής των πλημμυρών. Αντίθετα, η Διδιάστατη ανάλυση πλημμυρών προσφέρει μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση

λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη διαμήκη όσο και την πλευρική κίνηση του νερού, καταγράφοντας και την πλευρική εξάπλωση του, όταν το κανάλι υπερβαίνει τη χωρητικότητά του. Αυτή η επιπλέον πληροφορία που μας δίνει η διδιάστατη προσομοίωση είναι κρίσιμη, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου τα πλημμυρικά ύδατα υπερχειλίζουν αναχώματα και κατακλύζουν εκτάσεις γης.

Η πολυπλοκότητα της διδιάστατης ανάλυσης πηγάζει από την ανάγκη μοντελοποίησης του εδάφους ως συνεχούς επιφάνειας, η οποία απαιτεί προηγμένη γεωμετρική χαρτογράφηση για την ακριβή προσομοίωση του τρόπου με τον οποίο το νερό αλληλοεπιδρά με το τοπίο. Αυτό περιλαμβάνει όχι μόνο την τοπογραφία αλλά και άλλους παράγοντες όπως η χρήση γης, τα εμπόδια και η παρουσία αστικών υποδομών, τα οποία επηρεάζουν τη συμπεριφορά των πλημμυρικών υδάτων. Με την επίλυση εξισώσεων, τα διδιάστατα μοντέλα πλημμύρας παρέχουν μια λεπτομερή και δυναμική αναπαράσταση των διαδικασιών που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια ενός πλημμυρικού γεγονότος. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στην πρόβλεψη της έκτασης, των βαθών και των ταχυτήτων σε σύγκριση με τα μονοδιάστατα μοντέλα, καθιστώντας το απαραίτητο εργαλείο για την αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας σε πολύπλοκα περιβάλλοντα όπως αστικές περιοχές, όπου η ροή του νερού επηρεάζεται από κτίρια, δρόμους και άλλες ανθρωπογενείς κατασκευές.

1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην ανάλυση ενός διδιάστατου μοντέλου πλημμύρας ειδικά σχεδιασμένου για την αστική περιοχή του Βόλου, καθώς και στη σύγκριση αποτελεσμάτων διάφορων συνθηκών όπως η αλλαγή της χρήσης γης (Land Cover data), των αρχικών υδρογραφημάτων και των εδαφικών δεδομένων. Για την ανάπτυξη αυτού του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System). Η τελευταία έκδοση του HEC-RAS προσφέρει προηγμένες λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένων πλήρως δυναμικών εξισώσεων, της δυνατότητας εφαρμογής βροχόπτωσης και ανέμων απευθείας σε ένα διδιάστατο πλέγμα, το οποίο ενισχύει την ακρίβεια στις προσομοιώσεις πλημμύρας σε σύγκριση με τα μονοδιάστατα μοντέλα.

Η διδιάστατη μοντελοποίηση πλημμυρών αναγνωρίζεται όλο και περισσότερο ως απαραίτητη στην έρευνα και τις πρακτικές εφαρμογές, ιδιαίτερα για την ακριβή πρόβλεψη της συμπεριφοράς των πλημμυρών σε πολύπλοκα αστικά περιβάλλοντα. Αναλύοντας τον συγκεκριμένο τρόπο μελέτης θα ερευνήσουμε περαιτέρω τις δυνατότητες που μας προσφέρει ένα εργαλείο σαν το HEC-RAS στη διδιάστατη σχεδίαση πλημμυρών.

1.3 Οργάνωση διπλωματικής εργασίας

Το υπόλοιπο αυτής της διπλωματικής εργασίας χωρίζεται σε πέντε ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 2 - 7, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια της πλημμύρας, στα αίτια, σε πρόσφατα πλημμυρικά επεισόδια, καθώς και στο λογισμικό HEC-RAS.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης της πόλης του Βόλου.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται η διαδικασία της υδραυλικής προσομοίωσης.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Τα τελικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7.

Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Πλημμύρες

Η μείωση των ζημιών από τις πλημμύρες έχει καταστεί κρίσιμο παγκόσμιο ζήτημα λόγω της αυξανόμενης συχνότητας, μεγέθους και έντασης των πλημμυρικών φαινομένων, ιδίως στην περιοχή της Μεσογείου. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από μικρού έως μεσαίου μεγέθους λεκάνες απορροής με σημαντικές υψομετρικές αλλαγές από βουνά σε παράκτιες πεδιάδες, καθιστώντας την ιδιαίτερα ευαίσθητη σε πλημμύρες. Οι αστικές και προαστιακές ζώνες στις πεδινές περιοχές είναι ιδιαίτερα ευάλωτες και οι έντονες βροχοπτώσεις συχνά οδηγούν σε αστραπιαίες πλημμύρες (Papaioannou et al., 2018). Η διαχείριση των αστικών πλημμυρών σε αυτές τις περιοχές είναι ιδιαίτερα δύσκολη λόγω της πολύπλοκης αλληλεπίδρασης των κλιματικών, τοπογραφικών, υδρολογικών και υδραυλικών συνθηκών, οι οποίες ποικίλουν σημαντικά μεταξύ των μεσογειακών χωρών.

Η Ελλάδα, έχει ποικίλες γεωμορφολογικές και κλιματικές συνθήκες που επηρεάζουν τη δημιουργία καταιγίδων. Επιπλέον, παράγοντες όπως η ταχεία αστικοποίηση, ο τουρισμός, η αποψίλωση, οι πυρκαγιές των δασών και η διάβρωση συμβάλλουν στην αύξηση των κινδύνων πλημμύρας. Οι παράκτιες πλημμύρες στη Μεσόγειο συχνά οδηγούν σε σοβαρές κοινωνικοοικονομικές απώλειες, υποβάθμιση του περιβάλλοντος και μόλυνση των υδάτινων πόρων λόγω της διείσδυσης αλμυρού νερού. Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, έχουν εφαρμοστεί διάφορα μέτρα μετριασμού των πλημμυρών, συμπεριλαμβανομένων παράκτιων κατασκευών, βελτιωμένων συστημάτων αποστράγγισης και λύσεων που βασίζονται στη φύση, όπως οι υγρότοποι. Ωστόσο, η επιτυχής εφαρμογή αυτών των μέτρων απαιτεί την ενεργή συμμετοχή των ενδιαφερόμενων μερών (Ciampa et al., 2021).

2.2 Πρόσφατα πλημμυρικά γεγονότα

Οι επιρρεπείς σε πλημμύρες περιοχές στην Ελλάδα συνδέονται κυρίως με δύο σημαντικούς παράγοντες: μεγάλα ποτάμια που δεν διαθέτουν επαρκή ικανότητα διαχείρισης φυσικών πλημμυρών και εφήμερα ρέματα όπου οι ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η αστική εξάπλωση και οι αλλαγές χρήσης γης, έχουν μειώσει σημαντικά τις διαστάσεις της διατομής (Koutsoyiannis, 2012). Αυτές οι ανθρωπογενείς μεταβολές επιδεινώνουν τους κινδύνους πλημμύρας σε περιοχές όπου τα ποτάμια συστήματα δεν μπορούν πλέον να διοχετεύσουν αποτελεσματικά τα πλημμυρικά ύδατα. Το ζήτημα αυτό επιδεινώνεται από την έλλειψη εκτεταμένων δεδομένων σχετικά με τις πλημμύρες, λόγω του περιορισμένου δικτύου μέτρησης στις λεκάνες απορροής.

Για παράδειγμα, οι σοβαρές πλημμύρες στην πόλη της Καρδίτσας το 2020, που προκλήθηκαν από την κακοκαιρία ΙΑΝΟΣ, ανέδειξαν τις συνέπειες αυτών των υδρολογικών και ανθρωπογενών παραγόντων. Το γεγονός αυτό, που χαρακτηρίζεται από βροχόπτωση έως και 530 mm σε ορισμένες περιοχές, είχε ως αποτέλεσμα εκτεταμένες ζημιές σε υποδομές, σπίτια και δημόσιες υπηρεσίες (Tegos et al., 2022). Το συμβάν αυτό υπογράμμισε τη σημασία της ολοκληρωμένης διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας, η οποία πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις αβεβαιότητες σε υδρολογικούς, υδραυλικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς παράγοντες.

Τέλος, δεν θα μπορούσαν να παραληφθούν οι πλημμύρες του Βόλου τον Σεπτέμβριο του 2023, οι οποίες ανέδειξαν περαιτέρω αυτές τις προκλήσεις. Η περιοχή μελέτης επλήγη σοβαρά από δύο μεγάλες καταιγίδες: Daniel και Elias. Η πόλη του Βόλου και οι γύρω περιοχές καταστράφηκαν από καταρρακτώδεις βροχές που σε συνδυασμό με τις πυρκαγιές του Ιουλίου 2023 και τον σεισμό στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλίας το 2021, επιδείνωσαν την κατάσταση, οδηγώντας σε εκτεταμένες καταστροφές υποδομών και κατοικιών. Οι καταιγίδες στον Βόλο, στην Καρδίτσα (η οποία επλήγη ξανά το 2023) και σε άλλα μέρη της Θεσσαλίας προκάλεσαν ζημιές εκατομμυρίων ευρώ καθώς και 17 θανάτους (Public EM-DAT, n.d.).

2.3 Αίτια πλημμυρικών επεισοδίων

Οι κακοκαιρίες Daniel και Elias προκάλεσαν αθροιστικά ύψη βροχής στην περιοχή του Βόλου 617mm και 316mm αντίστοιχα. Λόγω της συνεχόμενης βροχόπτωσης και το μικρό χρονικό διάστημα που μεσολάβησε ανάμεσα σε αυτά τα ακραία καιρικά φαινόμενα, οι όχθες των ποταμών Κραυσίδωνα και Άναυρου πλημμύρισαν. Τα αίτια, επομένως, ήταν κυρίως δύο:

Φυσική υπερχειλίση (A21). Η κατάκλιση της παραχειμάρριας περιοχής, Βόλου και Νέας Ιωνίας από το νερό και τα φερτά υλικά του Κραυσίδωνα έγινε επειδή η παροχή του χειμάρρου ξεπέρασε τη φέρουσα ικανότητά του.

Παραμπόδιση ροής (A24). Η πλημμύρα οφείλεται και σε τεχνητή παρεμπόδιση της ροής του Κραυσίδωνα, λόγω συγκέντρωσης φερτών υλικών στην κοίτη του με αποτέλεσμα να περιοριστεί σχεδόν ολοκληρωτικά η παροχευευστικότητα του. Συμπληρωματικά στην υπερχειλίση του χειμάρρου, συνετέλεσαν και δυο γέφυρες που βρίσκονται μέσα στην πόλη του Βόλου (γέφυρες οδών Παπαδιαμάντη και 2ας Νοεμβρίου), οι οποίες μειώνουν σημαντικά την διατομή του. (EKTHESH-AYTOPSIAS-BOLOS-PHLIO, n.d.)

2.4 Οδηγία 2007/60 για την διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας

Στις 23 Οκτωβρίου 2007 το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο υιοθέτησε την οδηγία 2007/60/ΕΚ, η οποία επικεντρώνεται στην αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Η οδηγία αυτή, που τέθηκε σε ισχύ από τις 26 Νοεμβρίου, θέσπισε ένα πλαίσιο για τον εντοπισμό, την αξιολόγηση και τον μετριασμό των κινδύνων πλημμύρας, ιδίως σε επικίνδυνες ζώνες. Η οδηγία αυτή συμπληρώνει την Οδηγία-Πλαίσιο για τα ύδατα 2000/60/ΕΚ, ώστε να συμπεριλαμβάνει ζητήματα σχετικά με την κλιματική αλλαγή και τη χρήση γης.

Η οδηγία απαιτεί από τα κράτη μέλη να αξιολογούν τους κινδύνους πλημμύρας σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού και παράκτια ζώνης, να αναπτύσσουν χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας και να εφαρμόσουν σχέδια διαχείρισης. Αυτά τα σχέδια δίνουν έμφαση στην πρόληψη, την προστασία και την ετοιμότητα για την ελαχιστοποίηση των δυσμενών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία, την οικονομία, την πολιτιστική κληρονομιά και το περιβάλλον. Οι αξιολογήσεις, οι χάρτες και τα σχέδια διαχείρισης υποβάλλονται σε

τακτική επανεξέταση κάθε έξι χρόνια, ώστε να διασφαλίζεται ότι παραμένουν αποτελεσματικά.

Επίσης αναγνωρίζεται ότι, ενώ οι πλημμύρες είναι φυσικά φαινόμενα, οι ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η αστικοποίηση, η αποψίλωση των δασών και η ακατάλληλη χρήση γης αυξάνουν την συχνότητα και την έντασή τους. Τέλος, είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι, η συνεργασία μεταξύ των εθνών της ΕΕ είναι κρίσιμη, δεδομένου ότι πολλές λεκάνες απορροής ποταμών διασχίζουν εθνικά σύνορα.

2.5 Το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS

Το HEC-RAS είναι ένα προηγμένο λογισμικό υδραυλικής μοντελοποίησης που έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει τη ροή του νερού τόσο σε φυσικά όσο και σε τεχνικά κανάλια. Η πλατφόρμα επιτρέπει στους χρήστες να μοντελοποιήσουν μια σειρά υδραυλικών συνθηκών σε ποτάμια δίκτυα, κλειστά κανάλια και συστήματα ελέγχου πλημμυρών. Αναπτύχθηκε από το Σώμα Μηχανικών του Στρατού των ΗΠΑ και χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση του κινδύνου πλημμύρας, τη χαρτογράφηση πλημμυρικών περιοχών και το σχεδιασμό αντιπλημμυρικών μέτρων.

Τα βασικά πλεονεκτήματά του περιλαμβάνουν την ικανότητα προσομοίωσης τόσο μόνιμης όσο και μη μόνιμης ροής, μοντελοποίησης σύνθετων συστημάτων νερού και εκτίμησης του κινδύνου πλημμύρας σε διαφορετικά εδάφη. Το λογισμικό μπορεί να υπολογίσει τα προφίλ της επιφάνειας νερού, τις πλημμυρικές εκτάσεις και τις ταχύτητες ροής, πληροφορίες ανεκτίμητες για τον σχεδιασμό αντιπλημμυρικών έργων και τη διαχείριση των υδάτινων πόρων.

Το μοντέλο HEC-RAS περιλαμβάνει τέσσερα τμήματα ανάλυσης:

- Υπολογισμός του προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε συνθήκες μόνιμης ροής.
- Υπολογισμός σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.
- Υπολογισμός απόθεσης φερτών υλικών
- Υπολογισμοί σχετικά με τη ποιότητα του νερού.

Ένα από τα πιο ισχυρά χαρακτηριστικά του HEC-RAS είναι το φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον το οποίο παρέχει εργαλεία εισαγωγής δεδομένων, εξελιγμένων υδραυλικών αναλύσεων και ισχυρών δυνατοτήτων οπτικοποίησης για χαρτογράφηση

πλημμυρών. Η ικανότητά του να αναπαριστά την τοπογραφία ως συνεχή επιφάνεια και να προσομοιώνει τη ροή του νερού σε δύο διαστάσεις είναι ιδιαίτερα χρήσιμη. Επιπλέον, υποστηρίζει τόσο 1D όσο και 2D μοντελοποίηση, παρέχοντας ευελιξία ανάλογα με την πολυπλοκότητα του υδάτινου ρέματος ή του αστικού περιβάλλοντος που μελετάται.

Ο χρήστης καλείται για να δομήσει κατάλληλα το μοντέλο του να εισάγει γεωμετρικά δεδομένα, δεδομένα σταθερής ή ασταθούς ροής, ιζηματολογικά δεδομένα (προαιρετικό) και δεδομένα υδραυλικού σχεδιασμού.

Η διαδικασία μοντελοποίησης αποτελείται από τα εξής επιμέρους στάδια:

- Κατασκευή γεωμετρικού υποβάθρου
- Προσδιορισμός συνθηκών ροής
- Προσομοίωση
- Αποτελέσματα
- Έλεγχος αποτελεσμάτων

Συνοψίζοντας, ενώ παραμένει ένα από τα πιο ευρέως προσβάσιμα εργαλεία υδραυλικής μοντελοποίησης λόγω της δωρεάν διαθεσιμότητάς του και του εύχρηστου περιβάλλοντος, το HEC-RAS μπορεί να είναι λιγότερο αποτελεσματικό για εξαιρετικά περίπλοκα σενάρια αστικών πλημμυρών. Αυτό συμβαίνει καθώς μειονεκτεί όσον αφορά την ψηφιοποίηση των χαρτών που μπορεί να αποδειχθεί μη ακριβής και δαπανηρή.

2.6 Διδιάστατη ανάλυση πλημμύρας

Η διδιάστατη μοντελοποίηση πλημμυρών λειτουργεί αναπαριστώντας το φυσικό ή τεχνητό ρεύμα και τις γύρω πλημμυρικές περιοχές ως ένα πλέγμα κελιών, προσομοιώνοντας την συμπεριφορά της ροής κατά τη διάρκεια πλημμυρικών φαινομένων. Τα κελιά που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία πλέγματος μπορούν να έχουν σχήματα πολύγωνων έως και οκτώ πλευρών. Σε κάθε κελί αποδίδονται δεδομένα σχετικά με το υψόμετρο και την τραχύτητα της επιφάνειας, επιτρέποντας μια λεπτομερή απεικόνιση του εδάφους και του τρόπου με τον οποίο το νερό αλληλοεπιδρά με αυτό.

Ένα διδιάστατο μοντέλο γίνεται πιο ακριβές από την ικανότητά του να προσομοιώνει τόσο την πλευρική όσο και την οριζόντια κίνηση του νερού, την οποία τα μονοδιάστατα μοντέλα δεν προσομοιώνουν με την ίδια ακρίβεια. Αυτή η διάκριση είναι

ζωτικής σημασίας ειδικά όταν πρόκειται να μελετήσουμε μια αστική περιοχή, όπου υπάρχει ροή όχι μόνο κατά μήκος του κύριου καναλιού αλλά και στις γύρω πλημμυρικές περιοχές (Bomers et al., 2019).

Για να απλοποιηθεί ο όγκος πληροφορίας που μας προσφέρουν οι δορυφορικές εικόνες, το σύστημα χρησιμοποιεί την μέθοδο της βαθυμετρίας και την προσέγγιση των κελιών με την μορφή υπό-πλέγματος. Τα κελιά υπολογιστικού πλέγματος περιέχουν πληροφορίες που τους έχουν αποδοθεί από το GIS και βοηθούν το σύστημα να αντιληφθεί το έδαφος ως συνεχές. Στο πλέγμα αυτό αποδίδεται η πληροφορία υψομέτρου- όγκου νερού, με βάση την οποία γίνεται η προσομοίωση. Δηλαδή, κάθε κελί λειτουργεί ως μια διατομή με αντίστοιχες υδραυλικές ιδιότητες, σύμφωνα με τις σχέσεις:

- Καμπύλη υψομέτρου- Όγκου
- Καμπύλη υψομέτρου- Βρεχόμενης περιοχής
- Καμπύλη υψομέτρου- Έκτασης
- Καμπύλη υψομέτρου- Συντελεστή τραχύτητας n Manning
- Καμπύλη υψομέτρου- Προφίλ στάθμης νερού

Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η προσομοίωση της ροής σε όλο το πλέγμα. Είναι επόμενο λοιπόν, ότι όσο πιο λεπτομερές είναι το πλέγμα, με περισσότερα κελιά, τόσο καλύτερη θα είναι η απόδοση της ροής. Ωστόσο, αυτό συνεπάγεται σε μεγαλύτερους χρόνους υπολογισμού και γι' αυτό επιλέγουμε τον υπολογισμό λεπτομερέστερων πλεγμάτων για συγκεκριμένες διατομές όπως τις κοίτες των ποταμών, γέφυρες και άλλα τεχνικά έργα.

Το Hec-Ras προσφέρει την δυνατότητα προσομοίωσης μόνο με τη χρήση υπολογιστικού πλέγματος για τη διδιάστατη ροή, αλλά και την προσομοίωση των ρεμάτων μονοδιάστατα και σε επόμενο στάδιο την σύνδεσή τους σε διδιάστατο υπολογιστικό πλέγμα. Μονοδιάστατα και διδιάστατα στοιχεία μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους είτε απευθείας στην ανάντη ή κατάντη περιοχή του φυσικού υδατορεύματος, είτε μέσω πλευρικών κατασκευών. Επίσης, περιοχές αποθήκευσης νερού αποτυπωμένες με διδιάστατο πλέγμα κελιών μπορούν να συνδεθούν με μονοδιάστατο μοντέλο υδατορεύματος μέσω φραγμάτων ή αναχωμάτων (HEC-RAS 2D User's Manual, 2024).

Κεφάλαιο 3 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων

Η μέθοδος πεπερασμένων όγκων αποτελεί εφαρμογή της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε προβλήματα που βασίζονται τους νόμους της διατήρησης της μάζας και της ορμής, και έχει καθιερωθεί ως βασική μέθοδο στη μοντελοποίηση υδραυλικών συστημάτων. Η εφαρμογή της σε λογισμικά, όπως το HEC-RAS, βοηθάει σημαντικά στην ακρίβεια και την ευελιξία των προσομοιώσεων διδιάστατης ροής σε ποτάμια και πλημμυρικές περιοχές.

Στην πρακτική, η διαδικασία της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής περιλαμβάνει τα εξής βασικά βήματα:

- Ορισμός του Προβλήματος: Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τον καθορισμό του προβλήματος, συμπεριλαμβανομένης της γεωμετρίας, των συνθηκών ροής και των απαιτήσεων της προσομοίωσης.
- Διακριτοποίηση του χώρου και υπολογιστική μέθοδος: Στη συνέχεια, πρέπει να επιλεγούν μία αριθμητική μέθοδος και μία στρατηγική για τον διαμοιρασμό του πεδίου ροής σε κελιά ή στοιχεία.
- Επίλυση των εξισώσεων της ροής: Μόλις καθοριστεί το πρόβλημα, πρέπει να επιλεγεί ένα κατάλληλο σύνολο εξισώσεων και συνοριακών συνθηκών.
- Ανάλυση αποτελεσμάτων: Μετά την επίλυση, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πρέπει να αξιολογηθούν και να ερμηνευτούν.

(Σαρρή et al., 2024)

3.1 Βασικές αρχές της μεθόδου πεπερασμένων όγκων

Η μέθοδος βασίζεται στην έννοια των στοιχειωδών όγκων ελέγχου, οι οποίοι διαιρούν τον υπολογιστικό χώρο σε διακριτά κελιά. Στη θεωρία, το σχήμα των πεπερασμένων αυτών όγκων μπορεί να είναι οποιοδήποτε, αν και συνηθέστερα χρησιμοποιούνται τετράεδρα ή

εξάεδρα στον τρισδιάστατο χώρο και αντίστοιχα τρίγωνα ή τετράγωνο στον χώρο των δύο διαστάσεων.

Για να γίνει ευκολότερα κατανοητό μπορούμε να σκεφτούμε ένα ελεύθερο σώμα ως έναν κλειστό όγκο ελέγχου. Από το σημείο αυτό είναι εύκολο να φανταστεί κανείς πως και το σύνολο του συστήματος, που επιθυμούμε να μελετήσουμε, μπορεί να διακριτοποιηθεί σε έναν πεπερασμένο αριθμό μικρότερων όγκων. Σε καθέναν από τους μικρότερους αυτούς όγκους επιλύεται το σύστημα των καταστατικών εξισώσεων του προβλήματος, γεγονός το οποίο οδηγεί σε ένα μεγάλο σύστημα συζευγμένων αλγεβρικών εξισώσεων, το οποίο μπορεί να επιλυθεί με τη βοήθεια κατάλληλων αριθμητικών μεθόδων και τη χρήση υπολογιστή (πχ. SIMPLE)(Σαρρής et al., 2024).

Στην περίπτωση μας η ροή περιγράφεται από τις εξισώσεις Saint-Venant ή αλλιώς ρηχών νερών (Shallow Water Equations), οι οποίες ολοκληρώνονται σε κάθε κελί, διασφαλίζοντας ότι οι ροές στις επιφάνειες είναι ισορροπημένες. Αυτή η τοπική εφαρμογή νόμων διατήρησης εξασφαλίζει φασικά συνεπή προσομοίωση, ακόμα και σε σύνθετα σενάρια.

Οι εξισώσεις Saint-Venant είναι μια απλοποιημένη μορφή των εξισώσεων Navier-Stokes, σχεδιασμένη να περιγράφει την ροή του ρευστού όταν η οριζόντια διάσταση είναι πολύ μεγαλύτερη της κάθετης διάστασης. Ποιο συγκεκριμένα οι παραδοχές που χρησιμοποιούνται αναφέρονται παρακάτω.

Εξίσωση συνέχειας (διατήρηση μάζας)

Η διαφορική μορφή μη μόνιμης ροής της εξίσωσης της αρχής διατήρησης της μάζας είναι η εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} + q = 0 \quad (1)$$

- t: χρόνος
- H: η στάθμη της επιφάνειας του νερού
- h: Βάθος του νερού
- q: Η ροή προς το κανάλι από άλλες πηγές

- u και v : Οι συνιστώσες ταχύτητας της ροής στις διευθύνσεις X και Y
- Η εξίσωση συνέχειας στην διανυσματική της μορφή:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot hV + q = 0 \quad (2)$$

- $V=(u,v)$: είναι η ταχύτητα
- ∇ : διάνυσμα της μερικής παραγώγου

Εξίσωση κίνησης (διατήρηση ορμής)

Θεωρώντας την ταχύτητα στον κατακόρυφο άξονα κατά πολύ μικρότερη της οριζόντιας, υδροστατική πίεση και σταθερή πυκνότητα, μπορούμε να αμελήσουμε την κατακόρυφη ταχύτητα και τους κατακόρυφους όρους των εξισώσεων Navier-Stokes, καταλήγοντας παρακάτω:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f_u \quad (4)$$

Όπου,

- u, v : οι ταχύτητες ροής στις καρτεσιανές διευθύνσεις x, y (m/s)
- g : επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s²)
- ν_t : το ιξώδες τύρβης
- c_f : ο συντελεστής τραχύτητας του πυθμένα
- f : η δύναμη Coriolis

Στην αριστερή πλευρά έχουμε τους όρους επιτάχυνσης, ενώ στην δεξιά τις εσωτερικές και εξωτερικές δυνάμεις που δέχεται το υγρό (δεύτερος νόμος του Νεύτωνα).

Συντελεστής ιξώδους $\nu_t = Dh u_*$ εισάγει τη τριβή, όπου D μια αδιάστατη εμπειρική σταθερά ενώ u_* η διατμητική ταχύτητα η οποία υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$u_* = \sqrt{gRS} = \frac{\sqrt{g}}{C} |V| = \frac{n\sqrt{g}}{R^{\frac{1}{6}}} |V| \quad (5)$$

Συντελεστής τριβής c_f , εισάγει την τραχύτητα του πυθμένα

$$c_f = \frac{n^2 g |V|}{R^{\frac{4}{3}}} \quad (6)$$

Όπου,

- n : ο συντελεστής τραχύτητας Manning ($s/m^{1/3}$)
- g : η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)
- $|V|$: το μέτρο της ταχύτητας (m/s)
- R : η υδραυλική ακτίνα (m)

Συντελεστής επίδρασης της δύναμης Coriolis

$$f = 2\omega \sin\varphi \quad (7)$$

όπου ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γης και φ το γεωγραφικό πλάτος.

Εξισώσεις διάχυσης κύματος (DWE)

Το λογισμικό HEC-Ras μας δίνει την επιλογή να χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις Saint-Venant είτε την ακόμα πιο απλοποιημένη τους μορφή γνωστή ως 'Diffusion Wave Equations'. Αυτή η μορφή εξισώσεων ενώ μειώνει κατά πολύ τον υπολογιστικό χρόνο δεν μας δίνει ακριβή αποτελέσματα.

Όπως μπορούμε να δούμε στην περίπτωση των (Costabile et al., 2017), οι εφαρμογές των δύο μοντέλων σε πειραματικές περιπτώσεις δοκιμών, που αναπαριστούν μια αστική περιοχή, ανέδειξαν τους ισχυρούς περιορισμούς του μοντέλου που χρησιμοποιεί DWE εφαρμοσμένο σε αστική πλημμύρα, λόγω της αδυναμίας του στην περιγραφή των κρουστικών κυμάτων που ενδέχεται να παραχθούν από την αλληλεπίδραση μεταξύ της

διάδοσης της πλημμύρας και των κτιρίων. Το φαινόμενο αυτό υποτιμάται σημαντικά από το μοντέλο DWE. Τέλος, φαίνεται ότι η απόδοση του μοντέλου DWE χειροτερεύει σε πιο σύνθετες διατάξεις κτιρίων.

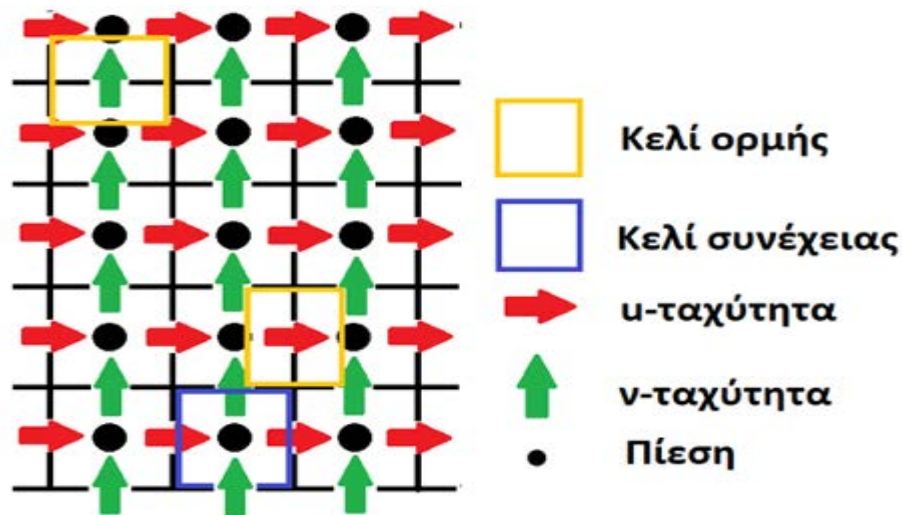
3.2 Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου πεπερασμένων όγκων έγκειται στην άμεση χωρική διακριτοποίηση εντός του φυσικού χώρου, εξαλείφοντας την ανάγκη για μετασχηματισμούς μεταξύ των φυσικών και υπολογιστικών συστημάτων συντεταγμένων, οι οποίοι συχνά απαιτούνται σε άλλες αριθμητικές μεθόδους. Επιπλέον, η μέθοδος επιδεικνύει σημαντική ευελιξία, καθώς είναι εύκολα εφαρμόσιμη τόσο σε δομημένα όσο και σε μη δομημένα πλέγματα. Αυτή η ευελιξία καθιστά τη μέθοδο πεπερασμένων όγκων ιδιαίτερα κατάλληλη για την προσομοίωση ροών ρευστών μέσα ή γύρω από γεωμετρικά πολύπλοκες διαμορφώσεις (Jiri Blazek, 2015).

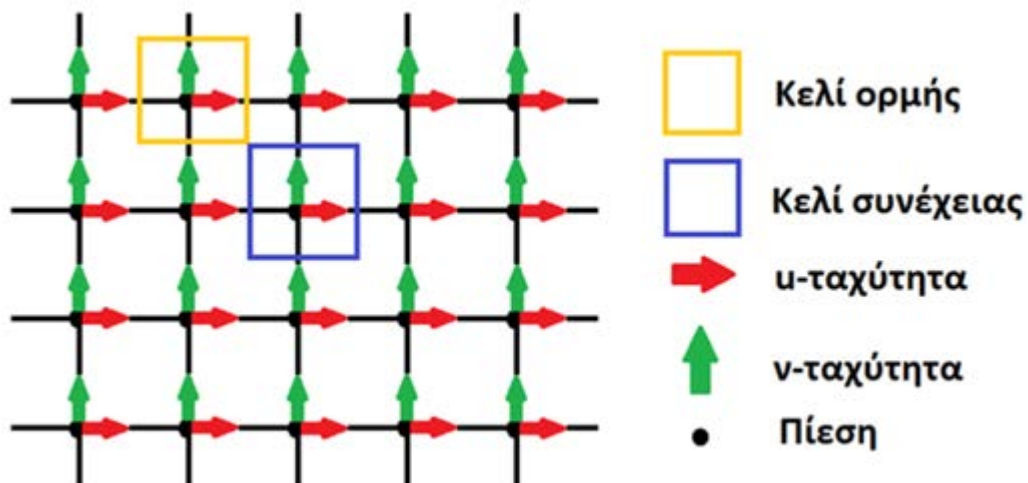
Σημαντική κρίνεται και η αναφορά στην επιλογή των κατάλληλων θέσεων υπολογισμού των εξισώσεων που διέπουν το κάθε υπολογιστικό κελί. Ο τρόπος με τον οποίο κατανέμονται τα υπολογιστικά σημεία είναι πολύ σημαντικός, καθώς σε αυτόν βασίζεται ο τρόπος που θα συνδυαστούν οι εξισώσεις για την επίλυση των διανυσματικών πεδίων. Οι τρόποι παρουσιάζονται συνοπτικά:

Κεντροκυψελική διάταξη: Εδώ οι ποσότητες ροής αποθηκεύονται στα κεντροειδή των κελιών του πλέγματος. Οι όγκοι ελέγχου είναι, επομένως, ταυτόσημοι με τα κελιά του πλέγματος.

Κεντροκομβική διάταξη: Εδώ τα μεγέθη ροής αποθηκεύονται στα σημεία του πλέγματος. Με αυτόν τον τρόπο τα σημεία ή ο όγκος είναι η ένωση όλων των κελιών που μοιράζονται το σημείο του πλέγματος ή ένας όγκος με κέντρο το σημείο του πλέγματος



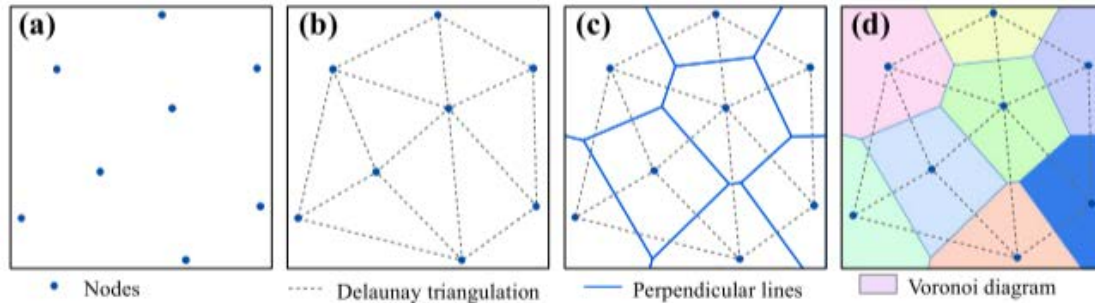
Εικόνα 1 Καρτεσιανό πλέγμα: κεντροκυβελική διάταξη(Σαρρής et al., 2024)



Εικόνα 2 Καρτεσιανό πλέγμα: κεντροκομβική διάταξη(Σαρρής et al., 2024)

Η κεντροκομβική μέθοδος (cell-vertex method), που ονομάζεται και διπλή, σχηματίζει ένα δευτερεύον πλέγμα που αποτελείται από κελιά τα οποία προκύπτουν από τις κορυφές του κύριου πλέγματος. Στην εικόνα 3 φαίνεται το κύριο πλέγμα στο σχήμα (b) όπου τα σημεία ενώνονται για τη δημιουργία τριγωνικών σχημάτων. Έπειτα, το HEC-RAS δημιουργεί ένα νέο κελί για κάθε κορυφή του κύριου πλέγματος συνδέοντας τα κέντρα των κελιών, τα οποία απεικονίζονται με μπλε συνεχές χρώμα. Η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων εφαρμόζεται σε αυτά τα νέα κελιά, πολύχρωμα κελιά στο σχήμα (d). Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα της απλοποίησης των οριακών συνθηκών επειδή τα κέντρα των νέων κελιών βρίσκονται στα όρια του κύριου πλέγματος. Ωστόσο, η κατασκευή του

δευτερεύοντος πλέγματος και η αλληλεπίδρασή του με κατασκευές μπορεί να επιβαρύνει την διαδικασία αν δεν αντιμετωπιστεί σωστά (Alzahrani, 2017).



Εικόνα 3 Δευτερέων πλέγμα με κεντροκομβική μέθοδο (Huang & Jin, 2019)

Η μέθοδος υπολογίζει τη ροή στα όρια κάθε κελιού, λαμβάνοντας υπόψη την εισροή, την εκροή και άλλες αλληλεπιδράσεις. Αυτή η προσέγγιση είναι κατάλληλη για τη μοντελοποίηση μεταβλητών εδαφών και ακανόνιστων γεωμετριών, καθώς τα κελιά μπορούν να προσαρμοστούν στο τοπογραφικό ανάγλυφο.

Κεφάλαιο 4 Περιοχή μελέτης

4.1 Η περιοχή του Βόλου

Στην ενότητα αυτή αναλύεται η περιοχή μελέτης των λεκανών απορροής των χειμάρρων Κραυσίδωνα και Αναύρου, της αστική περιοχής της πόλης του Βόλου. Ο Βόλος, που βρίσκεται στη νοτιοανατολική περιφέρεια της Θεσσαλίας στο νομό Μαγνησίας, κατατάσσεται στην έκτη μεγαλύτερη πόλη της χώρας σε πληθυσμό κτισμένη στη βάση του όρους Πήλιο, η πόλη εκτείνεται ως την ακτογραμμή του Παγασητικού κόλπου, όπου εκβάλλουν οι δύο χείμαρροι υπό μελέτη. Στις παρακάτω υποενότητες γίνεται αναφορά στα γεωγραφικά και πληθυσμιακά στοιχεία, στα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, στο κλίμα και τις χρήσεις γης.

4.2 Γεωγραφικά-Πληθυσμιακά στοιχεία

Η περιοχή του Βόλου αποτελεί την πρωτεύουσα του νομού Μαγνησίας και τοποθετείται γεωγραφικά στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας (GR08). Απαρτίζεται από τρεις λεκάνες απορροής αυτές του Ξηριά, του Κραυσίδωνα και του Άναυρου. Οι λεκάνες αυτές εκτείνονται από το όρος Πήλιο ως τον Παγασητικό κόλπο όπου και εκβάλλουν.

Ο πληθυσμός του διευρυμένου καλλικρατικού Δήμου Βόλου ανέρχεται σε 138.865 μόνιμους κατοίκους σύμφωνα με την (ΕΣΥΕ, 2021), σε έκταση 387,14 Km². Η περιοχή που καταλαμβάνει το πολεοδομικό συγκρότημα περιβάλλεται βορειοανατολικά από το όρος Πήλιο και το λόφο της Γορίτσας, νότια βρέχεται από τον Παγασητικό κόλπο και δυτικά καλύπτεται από τις πεδινές εκτάσεις της Θεσσαλίας.

Ο Κραυσίδωνας βρίσκεται ανατολικά του χείμαρρου Ξηριά και δυτικά του χείμαρρου Άναυρου και διατρέχει το κέντρο της πόλης του Βόλου. Το μήκος του είναι 12

χιλιόμετρα εκ των οποίων μελετιούνται τα τελευταία 3.7 χιλιόμετρα στην παρούσα εργασία. Ξεκινά από τις κορυφές του Πηλίου, συγκεκριμένα από το Πιασίδι, σε υψόμετρο 1350 μέτρα. Η συνολική του έκταση είναι 24,9 τετρ. χιλιόμετρα, ενώ το πεδινό του τμήμα έχει έκταση 5,5 τετρ. χιλιόμετρα. Ο χείμαρρος περνάει μέσα από την πόλη του Βόλου και την χωρίζει σε δύο δήμους, το δήμο Νέας Ιωνίας και το δήμο Βόλου. Ο Κραυσίδωνας είναι ένας χείμαρρος ενταγμένος στη πόλη αφού σε μήκος 1.3 χιλιομέτρων εντός της πόλης έχει διαστρωθεί με τσιμέντο. Η υδρολογική του κατάσταση τον χειμώνα είναι έντονη σε περιόδους βροχοπτώσεων, ενώ το καλοκαίρι μπορεί να έχει ελάχιστη έως και καθόλου ροή.

Στο ανατολικό κομμάτι της πόλης του Βόλου βρίσκεται ο χείμαρρος Άναυρος με λεκάνη απορροής 13.9 τετ. χιλιόμετρα. Ξεκινάει από το Πήλιο και καταλήγει στο πεδινό τμήμα του Βόλου, ενώ ανατολικά υπάρχει ο λόφος της Γορίτσας. Το μήκος που μελετάται είναι τα τελευταία 2 χιλιόμετρα, ενώ ολόκληρος έχει μήκος 11 χιλιόμετρα. Και αυτός ο χείμαρρος το καλοκαίρι έχει μικρή έως καθόλου ροή σε αντίθεση με το χειμώνα όπου ενδέχεται να πλημμυρίζει. Σε μήκος 1.2 χιλιομέτρων εντός της πόλης οι όχθες του έχουν επίστρωση τσιμέντου ώστε η διαδρομή των πεζών να είναι πιο προσβάσιμη.

4.3 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά

Το τοπίο του Βόλου παρουσιάζει ήπιες κλίσεις στα δυτικά της πόλης και κατά μήκος της ακτογραμμής της, ενώ οι πλαγιές γίνονται πιο απότομες βόρεια της περιφερειακής οδού του Βόλου και ανατολικά του ποταμού Άναυρου. Αναφορικά με το ανάγλυφο της περιοχής, το υψόμετρο κυμαίνεται από 0 έως 73 μέτρα με το υψηλότερο σημείο να βρίσκεται στους πρόποδες του όρους Πηλίου. Επειδή ο όγκος αυτός του Πηλίου καταλήγει απότομα στο Αιγαίο Πέλαγος και τον Παγασητικό κόλπο, προκαλεί μια σχεδόν απ' ευθείας ροή. Λόγω της ιδιαίτερης αυτής μορφολογίας του Βόλου, το υδρολογικό δίκτυο του νομού δεν είναι τόσο ανεπτυγμένο και οι απορροές διοχετεύονται στην θάλασσα χωρίς μεγάλη επεξεργασία. Τα κύρια ρέματα στην πόλη του Βόλου είναι ο Κραυσίδωνας, ο Ξηριάς και ο Άναυρος, τα οποία διασχίζουν την πόλη και χρησιμεύουν ως κύρια κανάλια επιφανειακής απορροής του όρους Πηλίου στην Παγασητικό κόλπο.

4.3.1 ΛΕΚΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Γενικά όσων αφορά τις τρεις κύριες λεκάνες απορροής του Βόλου, στα ορεινά οι χρήσεις γης σχετίζονται κυρίως με γεωργικές καλλιέργειες, δασικές εκτάσεις κοντά στις πηγές του χειμάρρου και αραιή δόμηση. Στα πεδινά κυριαρχεί η πυκνή αστική δόμηση της πόλης του Βόλου.

Η λεκάνη απορροής του ρέματος Κραυσίδωνα έχει χωριστεί σε δύο υπολεκάνες, δύο κόμβους και έναν κλάδο υδρογραφικού δικτύου σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Η λεκάνη έχει τα εξής χαρακτηριστικά μεγέθη:

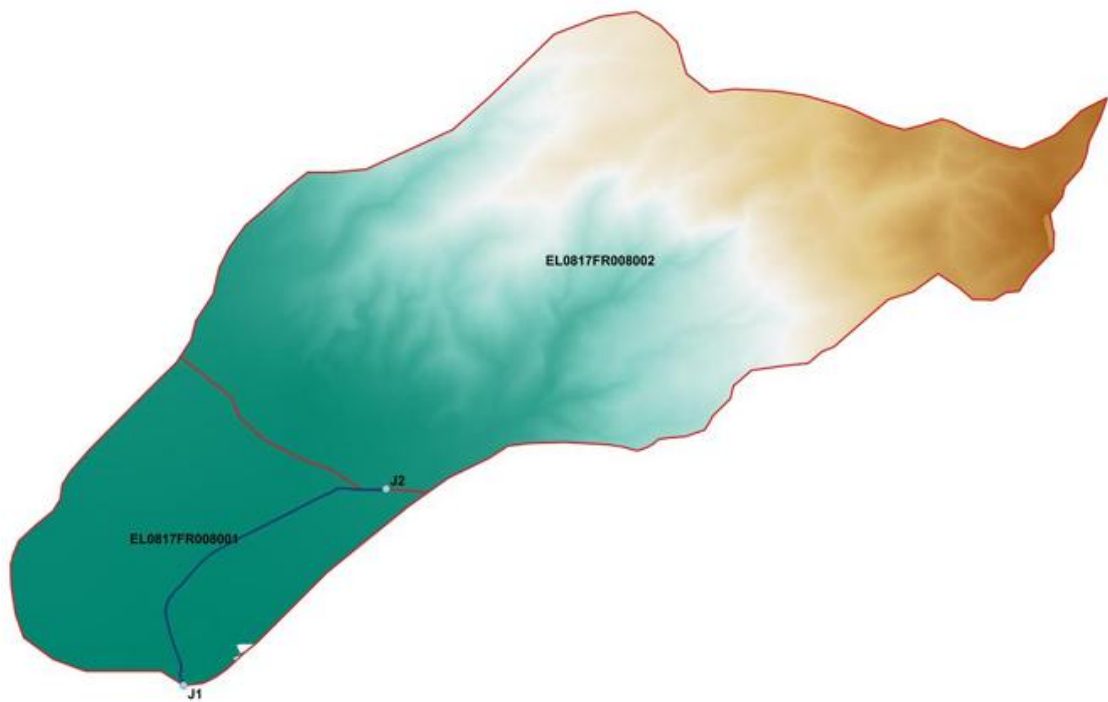
- $A = 35.57 \text{ km}^2$ έκταση
- $Z_m = 486.3 \text{ m}$ μέσο υψόμετρο
- $Z_k = 0.0 \text{ m}$ υψόμετρο κόμβου εξόδου
- $L_{\max} = 15.02 \text{ m}$ μέγιστο μήκος ροής
- $t_c = 2.63 \text{ h}$ χρόνο συγκέντρωσης

Στην μελέτη αυτή θα επικεντρωθούμε στο τμήμα J1 που εκβάλει στον Παγασητικό κόλπο. Το τμήμα αυτό που παρουσιάζεται και στην Εικόνα (4), έχει έκταση 8.181 km^2 , μέσο υψόμετρο 17.4 m και μέγιστο μήκος ροής 4.110 km .

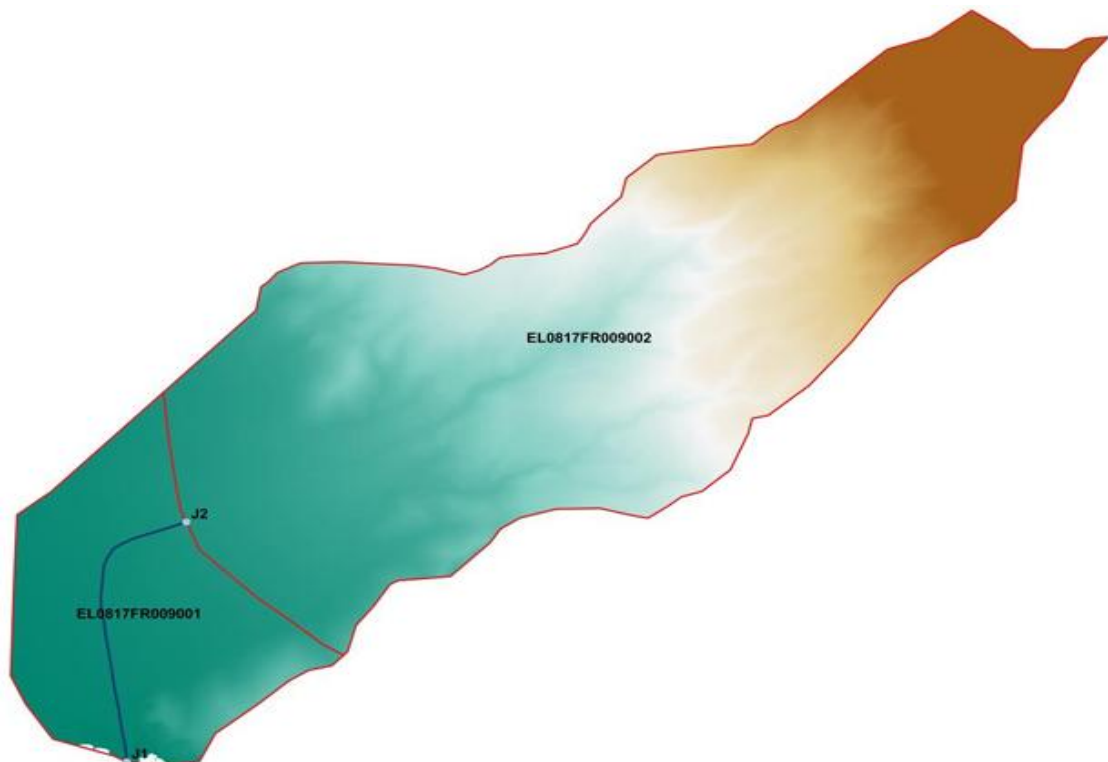
Η λεκάνη απορροής του ρέματος Άναυρου αποτελείται από δύο υπολεκάνες, δύο κόμβους και έναν κλάδο υδρογραφικού δικτύου. Τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής είναι τα εξής:

- $A = 13.87 \text{ km}^2$ έκταση
- $Z_m = 381.6 \text{ m}$ μέσο υψόμετρο
- $Z_k = 0.0 \text{ m}$ υψόμετρο κόμβου εξόδου
- $L_{\max} = 9.65 \text{ km}$ μέγιστο μήκος ροής
- $t_c = 1.88 \text{ h}$ χρόνο συγκέντρωσης

Η προσομοίωση πραγματοποιείται και εδώ για το κατάντη τμήμα J1 με έκταση 2.932 km^2 , μέσο υψόμετρο 38.7 m και μέγιστο μήκος ροής 1.580 km .



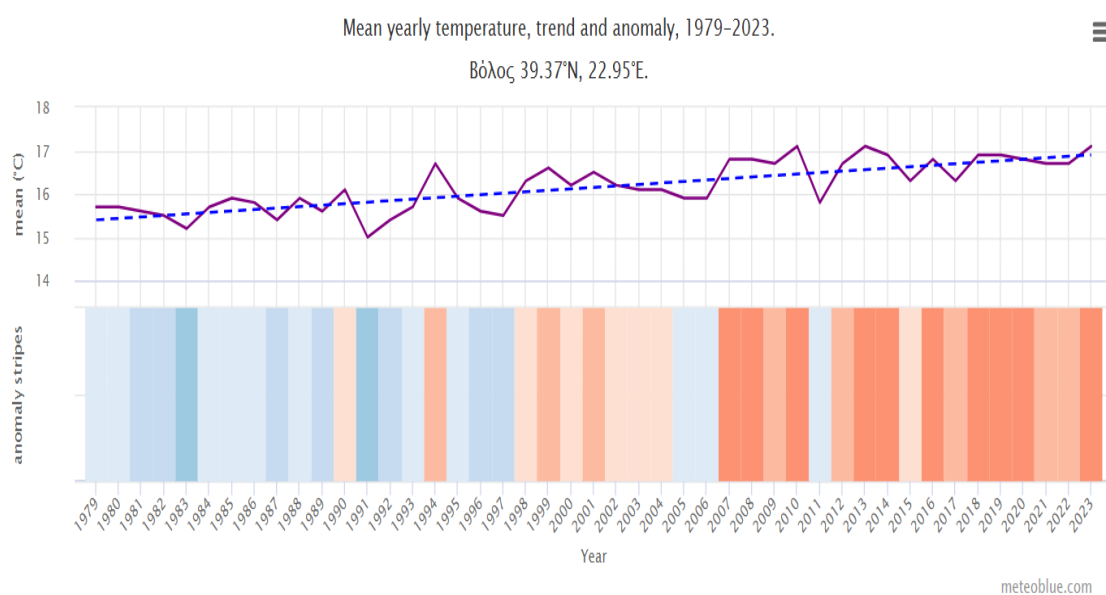
Εικόνα 4 Χάρτης περιοχής μελέτης, όπου απεικονίζεται η σχηματοποίηση των κόμβων και κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και των υπολεκανών του Κραυσίδωνα



Εικόνα 5 Χάρτης περιοχής μελέτης, όπου απεικονίζεται η σχηματοποίηση των κόμβων και κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και των υπολεκανών του Άναυρου

4.4 Κλίμα

Το κλίμα του Βόλου μπορεί να χαρακτηριστεί ως μεσογειακό κλίμα παραθαλάσσιας περιοχής με το όρος Πήλιο να το επηρεάζει. Τα καλοκαίρια είναι θερμά και ξηρά με τις θερμοκρασίες να φτάνουν έως και τους 40°C (meteoblue, 2024). Η ετήσια διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας ανέρχεται των 30°C (Παραϊοαννου et al., 2018). Μετρήσεις της εθνικής μετεωρολογικής υπηρεσίας έδειξαν ότι η μέση ετήσια υγρασία ανέρχεται στο 73,2%. Η χειμερινή περίοδος ξεκινά περίπου τον μήνα Οκτώβριο όπου παρατηρούνται οι περισσότερες βροχοπτώσεις με τους μήνες Νοέμβριο και Δεκέμβριο να συνεχίζουν με παρόμοιες καιρικές συνθήκες. Η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι συνήθως από 400 έως 770mm. Τέλος, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, τα τελευταία χρόνια παρατηρούνται πλημμύρες μεγάλης έντασης.



Εικόνα 6 Μέση ετήσια θερμοκρασία στην περιοχή του Βόλου (meteoblue, 2024)

Κεφάλαιο 5 Υδραυλική προσομοίωση

5.1 Εισαγωγή

Οι υδραυλικές προσομοιώσεις είναι σημαντικές στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς της ροής του νερού σε φυσικό και τεχνητό περιβάλλον, εκτιμώντας την επικινδυνότητα της πλημμύρας και τη διαχείριση των υδατικών πόρων. Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στο πως οι δισδιάστατες υδροδυναμικές προσομοιώσεις κτίζονται, ώστε να παρέχουν λεπτομερή χωρική δυναμική ροής. Οι αξιόπιστες προσομοιώσεις απαιτούν υψηλής ποιότητας δεδομένα εισόδου και ακριβή αναπαράσταση των υδρολογικών και υδραυλικών διεργασιών.

Τα δεδομένα εδάφους, που προέρχονται από ψηφιακά μοντέλα υψομέτρων (DEM) μέσω τεχνικών όπως το LiDAR ή η φωτογραμμετρία, αποτυπώνουν τοπογραφικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τις διαδρομές ροής και την έκταση της πλημμύρας. Τα δεδομένα κάλυψης γης και χρήσης γης, που λαμβάνονται από δορυφορικές εικόνες, αεροφωτογραφίες και χάρτες ζωνών, καθορίζουν την υδραυλική τραχύτητα και την αντίσταση στη ροή, δημιουργώντας τους συντελεστές τραχύτητας Manning.

Η γεωμετρία του υδραυλικού μοντέλου περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση της περιοχής μελέτης σε υπολογιστικά πλέγματα, εξισορροπώντας τη χωρική ανάλυση και την υπολογιστική απόδοση. Η ακριβής γεωμετρία του μοντέλου βελτιώνει τις προβλέψεις ροής και την αριθμητική σταθερότητα. Τα υδρογραφήματα, που προέρχονται από μετρήσεις πεδίου ή υδρολογικά μοντέλα, παρέχουν οριακές συνθήκες καθορίζοντας τις χρονικές μεταβολές των ρυθμών ροής ή των επιπέδων νερού. Αυτές οι εισροές οδηγούν τις προσομοιώσεις και εξασφαλίζουν τη δυνατότητα εφαρμογής στην πραγματικότητα.

Η ενσωμάτωση των δεδομένων εδάφους, κάλυψης γης και χρήσης γης, μαζί με την ακριβή γεωμετρία του μοντέλου και τα υδρογραφήματα, δημιουργούν ισχυρές υδραυλικές προσομοιώσεις. Στις επόμενες υπο-ενότητες περιγράφονται λεπτομερώς η απόκτηση

δεδομένων, η προ επεξεργασία και η ανάπτυξη μοντέλων, ενώ ακολουθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων.

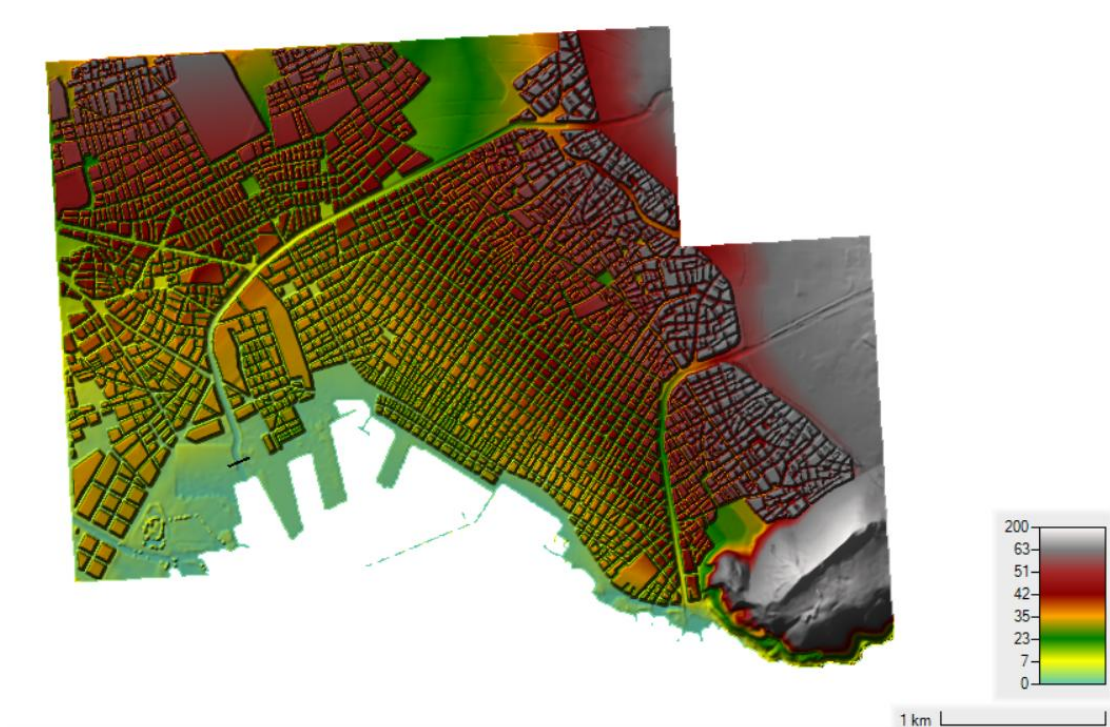
5.2 Δεδομένα εδάφους

Για τη διδιάστατη προσομοίωση ενός πλημμυρικού γεγονότος η σημαντικότερη πληροφορία που χρειαζόμαστε είναι τα εδαφικά δεδομένα. Πληροφορίες όπως μια καλή αναπαράσταση των υψομέτρων της επιφάνειας του εδάφους της πλημμυρικής πεδιάδας και της κοίτης του ποταμού είναι απαραίτητα για την αναπαράσταση χαρακτηριστικών που ελέγχουν την ροή. Ο πυθμένας, οι όχθες του καναλιού καθώς και δρόμοι ή τα αναχώματα είναι σημαντικά στοιχεία για μια λεπτομερή προσομοίωση.

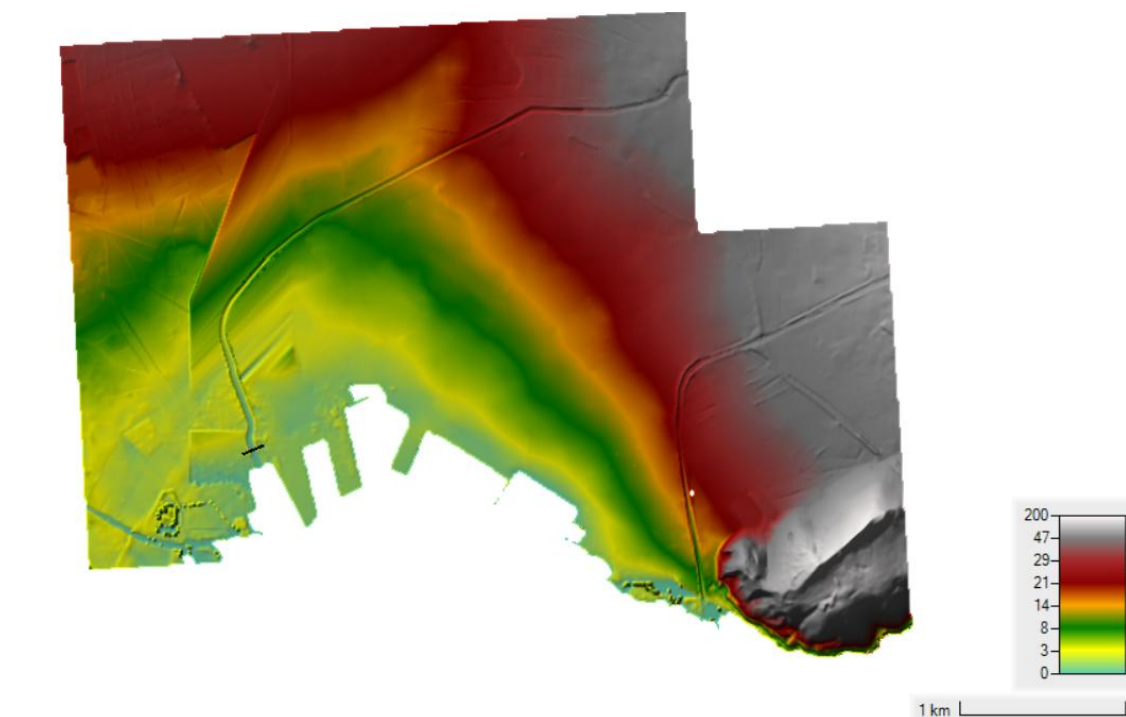
Για την παρουσίαση της τοπογραφικής επιφάνειας έγινε η σύνδεση των ήδη διαμορφωμένων, επιμέρους ψηφιακών μοντέλων των περιοχών του Άναυρου και του Κραυσίδωνα στο μοντέλο της υπό μελέτη περιοχής. Στα αρχικά εδαφικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν φαίνεται πως η διαδικασία καθαρισμού της κοίτης έχει ήδη πραγματοποιηθεί για το μεγαλύτερο μέρος του ποταμού, ενώ υπάρχει ένα σημείο του ποταμού Άναυρου κοντά στον περιφερειακό όπου φαίνεται πως η κοίτη δεν είναι αρκετά διακριτή, πράγμα που ενδεχόμενος να δημιουργήσει μια αύξηση στην πλημμυρική ζώνη. Παρατηρούμε ότι το μέγιστο υψόμετρο της περιοχής είναι τα 200m ενώ το χαμηλότερο υψόμετρο είναι η επιφάνεια της θάλασσας. Το μέσο υψόμετρο επιφάνειας της περιοχής είναι τα 25m.

Στο περιβάλλον του Ras Mapper τα δεδομένα εδάφους μπορούν να εισαχθούν σε διάφορες μορφές, όπως πλέγματα (*.flt), GeoTIFF (*.tif), σε μορφή αρχείου πλέγματος ESRI και άλλα. Το σύστημα χωρικών συντεταγμένων ορίζεται στην αρχή και για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκε το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ'1987).

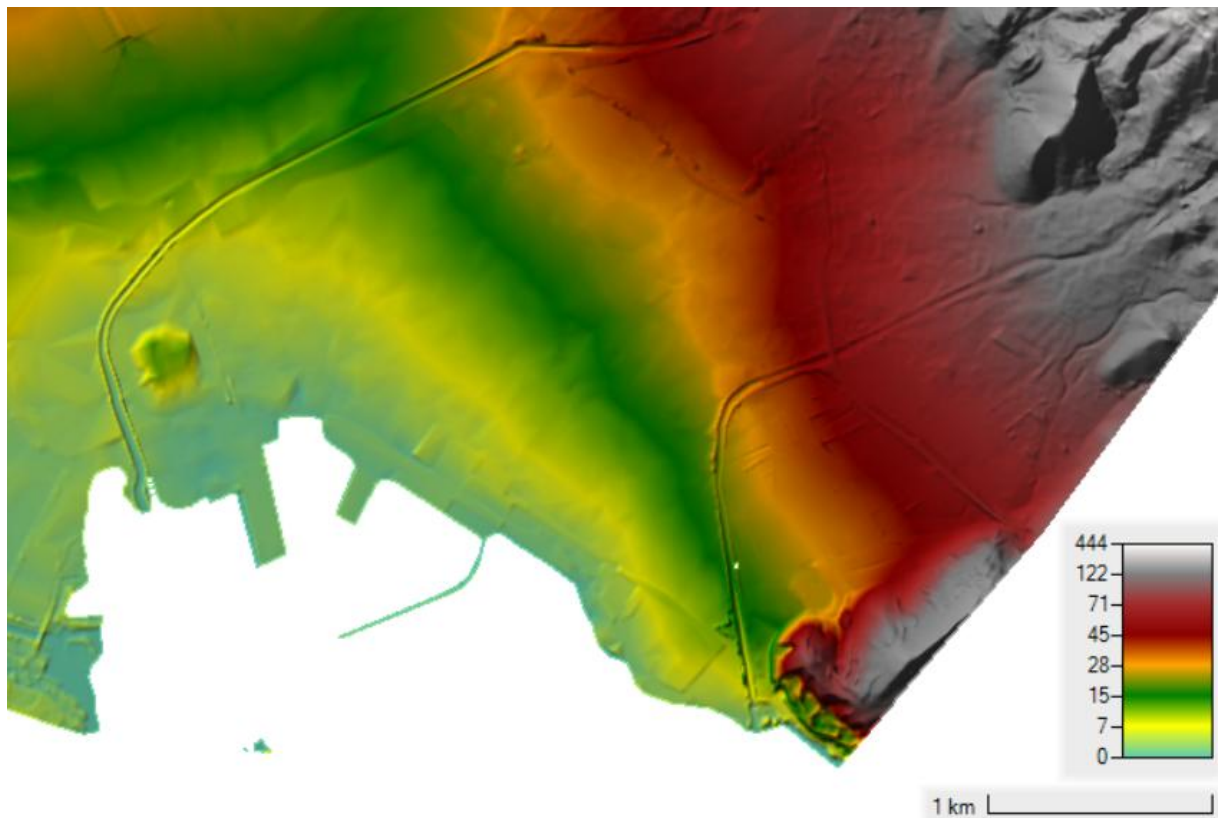
Παρακάτω παρουσιάζονται τα τρία εδαφικά υπόβαθρα που χρησιμοποιήθηκαν:



Εικόνα 7 Εδαφικό υπόβαθρο με ενσωματωμένα κτίρια, ανάλυσης 5m x 5m



Εικόνα 8 Εδαφικό υπόβαθρο χωρίς κτίρια, ανάλυσης 5m x 5m

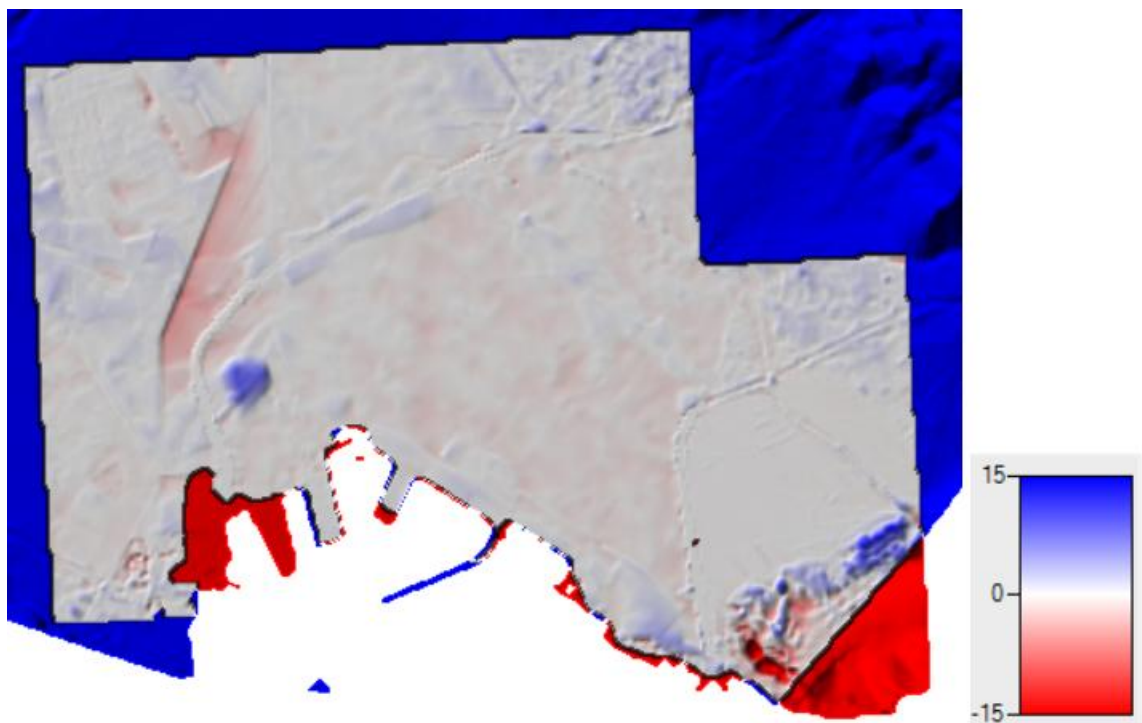


Εικόνα 9 Εδαφικό υπόβαθρο χωρίς κτίρια, ανάλυσης 2m x 2m

5.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ (5M X 5M) ΚΑΙ (2M X 2M)

Πραγματοποιούμε μια γρήγορη σύγκριση της τοπογραφίας με ανάλυση (5m x 5m) με αυτή της (2m x 2m) στο περιβάλλον του HEC-Ras με το εργαλείο raster calculator. Αφαιρώντας, λοιπόν, τις τιμές του αρχείου της ανάλυσης των 5m x 5m από αυτό των 2m x 2m έχει δημιουργηθεί ένας χάρτης που μας δείχνει σε άσπρο χρώμα τις κοινές περιοχές των δύο αρχείων, σε μπλε της περιοχές όπου το αρχείο 2m x 2m δίνει μεγαλύτερες τιμές υψομετρίας και με κόκκινο όπου το αρχείο 5m x 5m δίνει μεγαλύτερες τιμές υψομετρίας.

Αρχικά παρατηρούμε ότι τα αρχεία υψομετρικών δεδομένων έχουν ελάχιστη διαφορά για το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής, ενώ η απεικόνιση του λόφου όπου βρίσκεται ο ναός των Αγίων Θεοδώρων γίνεται με περισσότερη λεπτομέρεια στην ανάλυση 2m x 2m. Η ανύψωση του εδάφους στο σημείο εκείνο μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα. Τέλος, είναι εμφανές ότι κάποια τμήματα του λιμανιού λείπουν και από τα δύο αρχεία. Συγκεκριμένα, στο αρχείο με ανάλυση 5m x 5m έχει παραληφθεί η απεικόνιση του κυματοθραύστη του λιμανιού ενώ στο αρχείο με ανάλυση 2m δεν παρουσιάζεται μέρος της πρώτης αποβάθρας. Αυτή η παράληψη μπορεί να οδηγήσει σε μικρές απώλειες στην πλημμυρική έκταση, ωστόσο είναι αμελητέες.



Εικόνα 10 Σύγκριση ανάλυσης 5m με 2m

5.3 Χρήσεις γης

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές πηγές δεδομένων χρήσης γης. Έχουμε δεδομένα που έχουν συλλεχθεί από την βάση δεδομένων CORINE η οποία είναι Ευρωπαϊκή βάση και το ESRI (Environmental Systems Research Institute) Αμερικανική βάση.

Αρχικά, τα εδαφικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν συλλέχθηκαν από την βάση δεδομένων CORINE η οποία είναι ένα ολοκληρωμένο, λεπτομερές και εναρμονισμένο σύνολο δεδομένων για την κάλυψη και χρήση γης της ευρωπαϊκής ηπείρου (CORINE). Το πρόγραμμα αυτό αναπτύχθηκε στις αρχές του 1980 στην προσπάθεια δημιουργίας μια τυποποιημένης μεθοδολογίας για την παραγωγή χαρτών κάλυψης γης, βιοτόπων και ποιότητας αέρα σε κλίμακα ηπείρου. Σήμερα, μέσω των ακόμα πιο προηγμένων δορυφόρων που χρησιμοποιούνται (Sentinel-2 and Landsat-8) προσφέρει μια πανευρωπαϊκή απογραφή κάλυψης και χρήσεως γης με 44 θεματικές τάξεις.

Το ArcGIS Living Atlas προσφέρει έναν ολοκληρωμένο, ακριβή και ενημερωμένο παγκόσμιο χάρτη LULC, ο οποίος δημιουργήθηκε μετά από συνεργασία μεταξύ της ESRI και του Impact Observatory. Χρησιμοποιώντας πληροφορίες από τον δορυφόρο Sentinel-2 έχει δημιουργηθεί ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση και την οπτικοποίηση των αλλαγών στη χρήση γης και την κάλυψη γης. Αξιοποιώντας ετήσια δεδομένα LULC 10m του Sentinel 2, το περιβάλλον παρέχει δυναμική ανάλυση αλλαγών χρήσης γης. Επιπλέον, η πλατφόρμα προσφέρει δυναμική στατιστική ανάλυση με βάση το έτος, την έκταση του χάρτη και την κατηγορία κάλυψης γης, επιτρέποντας λεπτομερή ανάλυση χωρικών και χρονικών τάσεων. Άλλα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν τη δυνατότητα επιλογής με βάση συγκεκριμένες κλάσεις κάλυψης γης, προβολής στατιστικών περιφερειακών κλάσεων συνοπτικά ανά διοικητικά όρια και επικύρωση δεδομένων κάλυψης γης. Τέλος, παρέχεται η δυνατότητα απεικόνισης καναλιών του δορυφόρου όπως η SWIR που ενισχύουν την οπτική διερεύνηση. (Living Atlas ArcGIS, n.d.)

5.3.1 CORINE LAND COVER

Αρχικά οι υδραυλικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για τα δεδομένα της βάσης CORINE. Ειδικότερα, οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας που αποδόθηκαν στα οικιστικά τετράγωνα ήταν σταθερά υψηλές σε όλα τα σενάρια, με τιμή 0,11. Αυτή η αυξημένη

τραχύτητα αποδίδεται στην επιλεγμένη μέθοδο αναπαράστασης των κτιρίων, η οποία περιλάμβανε την εξέταση των τοπικών αυξήσεων της τριβής του εδάφους. Επιπλέον, υπάρχει διακύμανση των συντελεστών τραχύτητας για τρία τμήματα του κάθε ρέματος ώστε να αντικατοπτρίζεται το ποσοστό των δομικών ρυθμίσεων εντός των εν λόγω τμημάτων, τα οποία επηρεάζουν τα υδραυλικά χαρακτηριστικά που μοντελοποιούνται στις προσομοιώσεις.

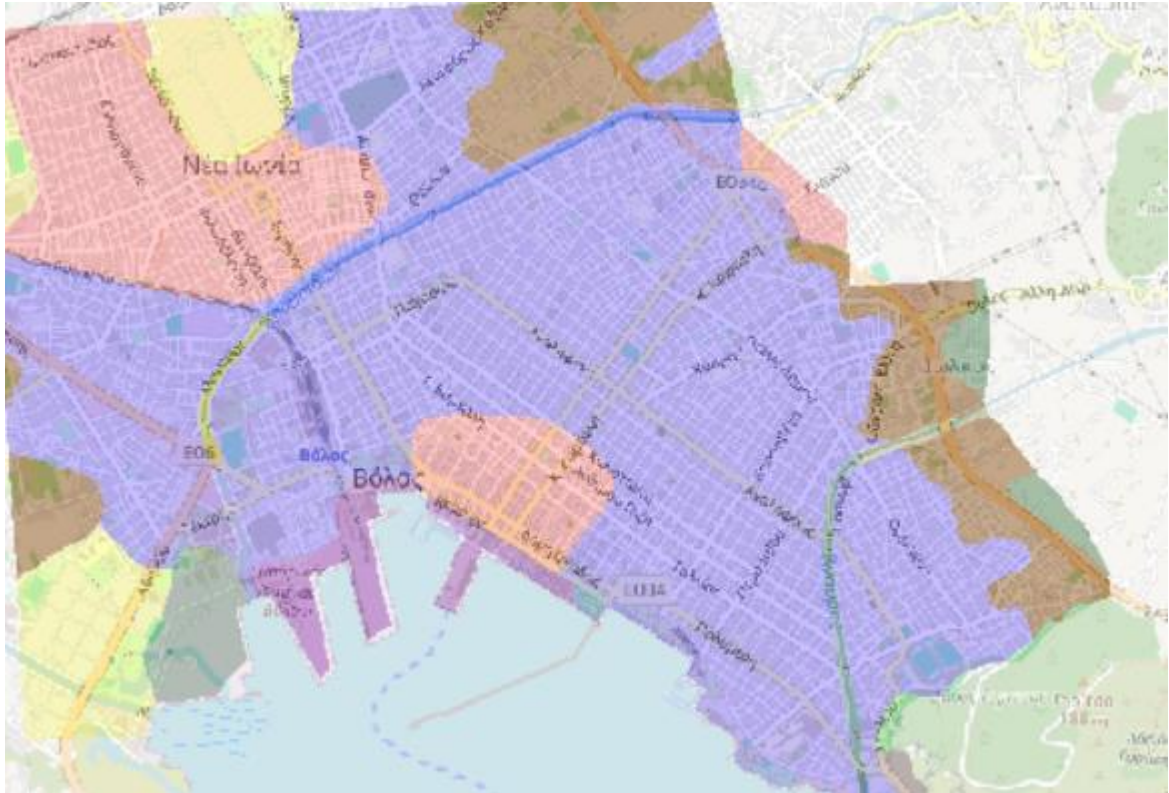
Πίνακας 1 Τιμές συντελεστών τραχύτητας Manning 2017 CORINE

Κωδικός Corine	Χρήσεις γης	Συντελεστής τραχύτητας Manning n
-	Οικιστικά τετράγωνα	0.11
111	Συνεχής αστική οικοδόμηση	0.013
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.013
123	Ζώνες λιμένων	0.013
231	Λιβάδια	0.018
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	0.08
311	Δάσος πλατύφυλλων	0.06
312	Δάσος κωνοφόρων	0.015
321	Φυσικοί βοσκότοποι	0.04
511	Ροές υδάτων	0.013

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε επίσης για νέους συντελεστές τραχύτητας Manning οι οποίοι επιλέχθηκαν από τα σχέδια διαχείρισης κίνδυνου πλημμύρας του ΥΠΕΚΑ για το 2023.

Πίνακας 2 Τιμές συντελεστών τραχύτητας Manning 2023 CORINE

Κωδικός Corine	Χρήσεις γης	Συντελεστής τραχύτητας Manning n
-	Οικιστικά τετράγωνα	0.11
111	Συνεχής αστική οικοδόμηση	0.035
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.025
123	Ζώνες λιμένων	0.020
231	Λιβάδια	0.040
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	0.035
311	Δάσος πλατύφυλλων	0.070
312	Δάσος κωνοφόρων	0.055
321	Φυσικοί βοσκότοποι	0.040
511	Ροές υδάτων	0.020



Εικόνα 11 Χρήσεις γης από την βάση δεδομένων CORINE

5.3.2 ArcGIS Living Atlas (ESRI)

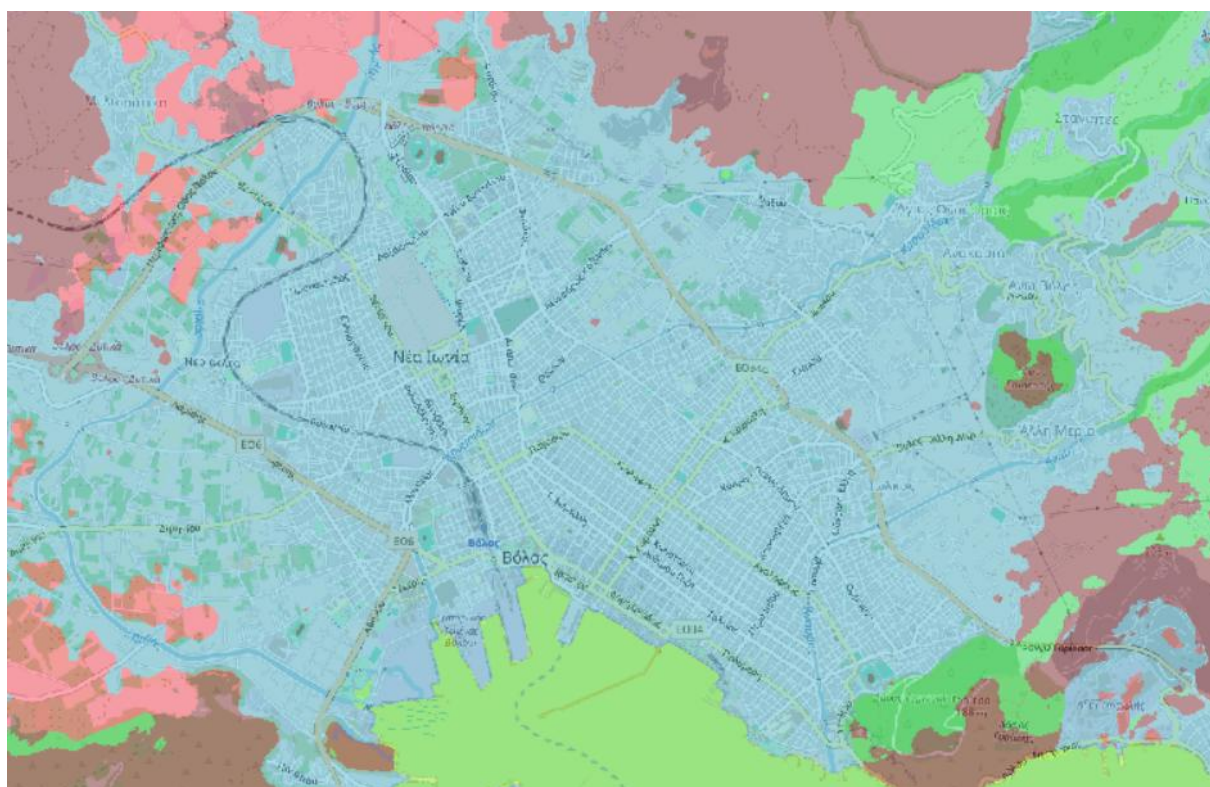
Έπειτα πραγματοποιήθηκε και η προσομοίωση με τα δεδομένα κάλυψης εδάφους από την διαδικτυακή πλατφόρμα Living Atlas. Τα δεδομένα δίνονται ανά 10 μέτρα γης και διαφέρουν εμφανώς από την κάλυψη γης του CORINE. Τα δεδομένα μας δίνονται σε παγκόσμια κλίμακα και ανανεώνονται ετησίως κάνοντας τα πιο επικαιροποιημένα. Ωστόσο, εδώ οι χρήσεις γης περιορίζονται σε 6 υποενότητες.

- Υδάτινα σώματα
- Βλάστηση
- Καλλιεργήσιμη γη
- Αστικός ιστός
- Άγονη γη
- Βοσκοτόπια

Επομένως, τα όρια των περιοχών με διαφορετικές χρήσης γης δεν είναι τόσο λεπτομερή όσο της CORINE.

Πίνακας 3 Τιμές συντελεστών τραχύτητας Manning 2023 HEC-Ras (ESRI)

Ονομασία ESRI	Συντελεστής τραχύτητας Manning n
Υδάτινα σώματα	0.025
Βλάστηση	0.1
Καλλιεργήσιμη γη	0.02
Αστικός ιστός	0.12
Άγονη γη	0.03
Βοσκοτόπια	0.025



Εικόνα 12 Χρήσεις γης από την βάση δεδομένων ESRI

5.4 Γεωμετρία διδιάστατου πλέγματος

Όπως αναφέρθηκε πιο λεπτομερώς στο κεφάλαιο 3, για τον σχεδιασμό του διδιάστατου πλέγματος το HEC-RAS χρησιμοποιεί την μέθοδο διακριτοποίησης του πεπερασμένου όγκου. Ο αλγόριθμος αυτός έχει αναπτυχθεί για την δημιουργία και επίλυση υπολογιστικών πλεγμάτων που μπορούν να περιέχουν και δομές. Το πλέγμα αυτό αποτελείται από τραπεζοειδή κελιά τα οποία μπορούν να έχουν έως οκτώ πλευρές. Τα κελιά υπολογίζονται από το λογισμικό εφ' όσων έχουμε ορίσει την ανάλυση πλέγματος.

Η ανάλυση πλέγματος ορίζει το μέγεθος των κελιών που θα δημιουργήσει το λογισμικό. Με την χρήση των υψομετρικών δεδομένων και επιλύοντας την μερική διαφορική εξίσωση κίνησης των ρευστών Navier-Stokes με την μέθοδο του πεπερασμένου όγκου, το λογισμικό HEC-RAS δίνει σε κάθε κελί μια τιμή ανάλογα με το αν υπάρχει ή όχι ροή μέσα σε αυτό. Όσο μικρότερα σε μέγεθος είναι τα κελιά τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια θα έχουμε στην προσομοίωση της ροής στο έδαφος. Ωστόσο, ο χρόνος επίλυσης αυξάνεται αφού για το ίδιο εμβαδόν την περιοχής χρειάζονται πολλά παραπάνω κελιά. Για την περιοχή του Βόλου επιλέξαμε κελιά μεγέθους 5m x 5m στην ευρεία περιοχή, ενώ στις κοίτες και όχθες των ποταμών το μέγεθος είναι 2m x 2m ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ευκρίνεια.

Πίνακας 4 Αποτελέσματα ανάλυσης υπολογιστικού πλέγματος

Ανάλυση πλέγματος	με κτίρια (5m x 5m) και (2m x 2m)	χωρίς κτίρια (5m x 5m)	χωρίς κτίρια (2m x 2m)
Αριθμός κελιών	496628	482133	469244
Μέσο μέγεθος κελιών	24	24	24
Μέγιστο μέγεθος κελιών	68	47	52
Ελάχιστο μέγεθος κελιών	0	1	0

5.5 Υδρογραφήματα εισόδου

Το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας εφαρμόζει ανα έξι χρόνια την οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αναθεώριση των υδρογραφημάτων και τη δημιουργία νέων χαρτών επικινδυνότητας. Στην παρούσα εργασία έχουν συλλεχθεί και χρησιμοποιηθεί υδρογραφήματα των ετών 2017 και 2023 για περιόδους επαναφοράς 50, 100 και 1000 χρόνια. Εισάγουμε τα υδρογραφήματα 24 ωρών στο περιβάλλον μη μόνιμων ροών ή unsteady flow data για κάθε όριο εισόδου ροής που έχουμε θέσει. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε επιλέξει δύο σημεία εισροής στα ανάντη του Κραυσίδωνα και του Άναυρου και για όριο εκροής έχουμε επιλέξει μια περίμετρο της πόλης του Βόλου. Για την εκροή έχει επιλεγεί το κανονικοποιημένο βάθος με τριβή κλίσης 0.016.

Αναφορικά με την διαδικασία ανάλυσης της μη μόνιμης ροής στο περιβάλλον “Unsteady Flow Analysis” έχουμε αρχικά επιλέξει να τρέξουμε μια σταθερή ελάχιστη ροή για τέσσερις ώρες ώστε να υπάρχει μια μικρή ροή στους ποταμούς πριν την διόδευση του υδρογραφήματος. Τα υδρογραφήματα υπολογίζονται για διάρκεια 24 ωρών με χρονικό διάστημα υπολογισμού α) 15 δευτερόλεπτα σταθερά ή β) 15 δευτερόλεπτα μεταβλητά, ελεγχόμενα από την μέθοδο Courant η οποία υποπολλαπλασιάζει ή πολλαπλασιάζει το χρονικό βήμα σύμφωνα με το αν το πηλίκο ταχύτητα διά απόσταση μεταξύ δύο κελιών ξεπερνάει μια συγκεκριμένη τιμή. Τέλος, η απεικόνιση υδρογραφήματος εξόδου γίνεται ανά 10 λεπτά.

Στον πίνακα (5) παρουσιάζεται η διάρκεια υπολογισμού των προσομοιώσεων σε ώρες. Οι προσομοιώσεις που έγιναν με σταθερό χρονικό βήμα ολοκληρώθηκαν πιο γρήγορα, ενώ για μεταβλητό χρονικό βήμα οι χρόνοι προσομοίωσης κυμένονται στις ίδιες ώρες για κάθε περίοδο επαναφοράς. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι για υδρογραφήματα που αντιστηχούν σε περίοδο επαναφοράς 50 ετών η διάρκεια προσομοίωσης είναι περίπου 8 ώρες, για περίοδο επαναφοράς 100 ετών 10 ώρες και για περίοδο επαναφοράς 1000 ετών 12 ώρες.

Πίνακας 5 Χρόνος ολοκλήρωσης των προσομοιώσεων

α) Σταθερά		β) Μεταβλητά	
Περίοδος επαναφοράς	Χρόνος (h)	Περίοδος επαναφοράς	Χρόνος (h)
Υδρογραφήματα 2017, ανάλυση πλέγματος 5m x 5m, CORINE, με κτίρια		Υδρογραφήματα 2017, ανάλυση πλέγματος, 5m x 5m, CORINE	
T50	01:49	T50	08:40
T100	02:40	T100	10:58
T1000	02:44	T1000	12:54
Υδρογραφήματα 2017, ανάλυση πλέγματος 2m x 2m CORINE		Υδρογραφήματα 2023, ανάλυση πλέγματος 2m x 2m, ESRI	
T50	06:00	T50	08:18
T100	07:53	T100	09:54
T1000	09: 18	T1000	12:09
		Υδρογραφήματα 2023, ανάλυση πλέγματος 2m x 2m, CORINE	
		T50	07:51
		T100	09:31
		T1000	12:31

Συγκρίνοντας το νέο υδρογράφημα για περίοδο επαναφοράς πλημμύρας 50 χρόνια και για μέσες συνθήκες με τα υδρογραφήματα του 2017 παρατηρούμε ότι συγκλίνει περισσότερο σε αυτό με περίοδο επαναφοράς 100, μέσες συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας Manning. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι περισσότερες δομές κατασκευάζονται με βάση μέσες συνθήκες υγρασίας CNII και περίοδο επαναφοράς 50

χρόνων, επομένως, είναι πιθανό οι δομές που έχουν κατασκευαστεί με βάση τις προηγούμενες συθήκες να χρειάζονται ενίσχυση ή συντήρηση.

Πίνακας 6 Συγκεντρωτικός πίνακας υδρογραφημάτων

Περίοδος επαναφοράς	Συνολική παροχή αιχμής (m ³ / s)	Ώρα εμφάνισης μέγιστης πλημμυρικής παροχής (h)	Πλημμυρικός όγκος (hm ³)
Άναυρος 2017			
T50	114.07	6:40	1076.39
T100	145.12	6:40	1310.06
T1000	302.85	11:50	2237.92
Άναυρος 2023			
T50	129.56	8:00	1388.94
T100	166.65	7:50	1750.42
T1000	360.1	10:00	3367.34
Κραυσίδωνας 2017			
T50	157.42	07:00	1799.68
T100	210.6	07:00	2289.88
T1000	564.62	11:50	4336.82
Κραυσίδωνας 2023			
T50	249.3	08:00	4472.74
T100	330.4	07:50	5529.06
T1000	754.29	10:00	10502.34

Για την παραγωγή των τελικών υδρογραφημάτων σχεδιασμού έχει χρησιμοποιηθεί η παρακάτω μέθοδος στο περιβάλλον του HEC-HMS, σύμφωνα με την μελέτη του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας που πραγματοποιήθηκε για την παραγωγή χαρτών επικινδυνότητας, η οποία περιλαμβάνει:

- 1. Τον διαχωρισμό των υδρολογικών ελλειμμάτων από το συνολικό υετογράφημα, με τη μέθοδο SCS-CN, ώστε να προκύψει η επιφανειακή απορροή κάθε υπολεκάνης.**

Παρακάτω περιγράφεται συνοπτικά η διαδικασία:

Το περίσσειμα βροχής h_e βρίσκεται από την σχέση (6), όπου h το ολικό ύψος βροχής και S η μέγιστη δυνητική κατακράτηση.

$$h_e = \begin{cases} 0, & h \leq 0.2S \\ \frac{(h - 0.2S)^2}{h + 0.8S}, & h > 0.2S \end{cases} \quad (8)$$

Η τιμή της παραμέτρου S εκτιμάται εμπειρικά, συναρτήσει του αριθμού καμπύλης απορροής (runoff curve number, CN) της λεκάνης, ως εξής:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (9)$$

Η παράμετρος CN εξαρτάται από τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά, τις χρήσεις γης και τις προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας στη λεκάνη. Σε αυτή τη μελέτη έχουν χρησιμοποιηθεί συνθήκες υγρασίας τύπου II, όπου η SCS δίνει αναλυτικούς πίνακες με τιμές του CN για κάθε υδρολογική ομάδα εδαφών και για διάφορες χρήσεις γης

- 2. Τον μετασχηματισμό της επιφανειακής απορροής σε πλημμυρογράφημα σε έξοδο της υπολεκάνης, με εφαρμογή της θεωρίας του μοναδιαίου υδρογραφήματος.**

Το ΜΥ αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος κάθε υπολεκάνης, για την εκτίμησή του εφαρμόζεται, σύμφωνα με τις προδιαγραφές, το λείο συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα (ΣΜΥ) της Soil Conservation Service (SCS). Στη μελέτη, η κατάρτιση του συνθετικού ΜΥ γίνεται στο περιβάλλον του HEC-HMS, δίνοντας ως μοναδική είσοδο τον χρόνο υστέρησης t_L .

Το t_L ορίζεται ως η απόσταση του κέντρου βάρους του ΜΥ, διάρκειας D , από το κέντρο βάρους της βροχόπτωσης, που αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή $t = D/2$, δεδομένου ότι ο χρόνος υστέρησης μπορεί να εκτιμηθεί συναρτήσει του χρόνου συγκέντρωσης t_c από την τυπική βιβλιογραφική σχέση $t_L = 0.6 t_c$. Όπου t_c δίνεται από την εξίσωση 10.

$$t_c(T) = t_c \sqrt{\frac{i(5)}{i(T)}} \quad (10)$$

Το πρόγραμμα HEC-HMS υπολογίζει τον χρόνο ανόδου σύμφωνα με τη σχέση

$$t_p = t_L + D/2 \quad (11)$$

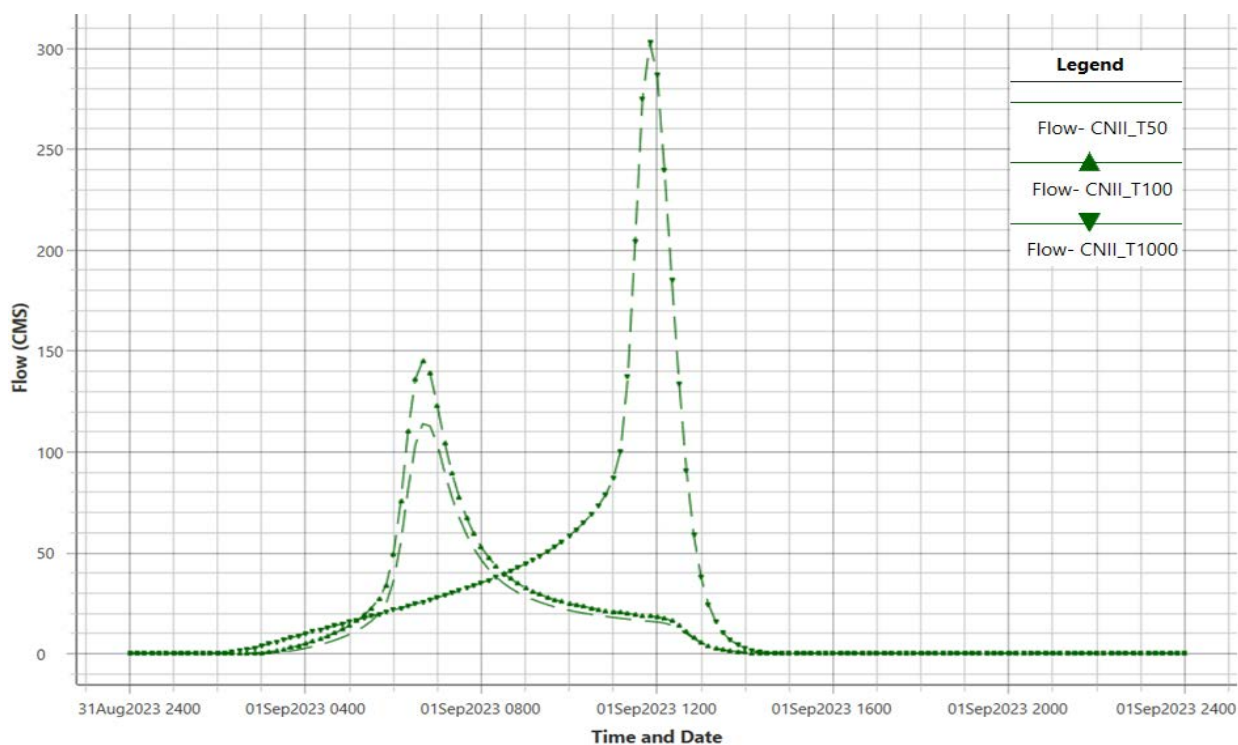
Όπου το ΜΥ έχει χρόνο βάσης $t_b=5t_p$, ενώ η παροχή αιχμής του δίνεται από τη σχέση:

$$Q_p = \frac{2.08A}{t_p} \quad (12)$$

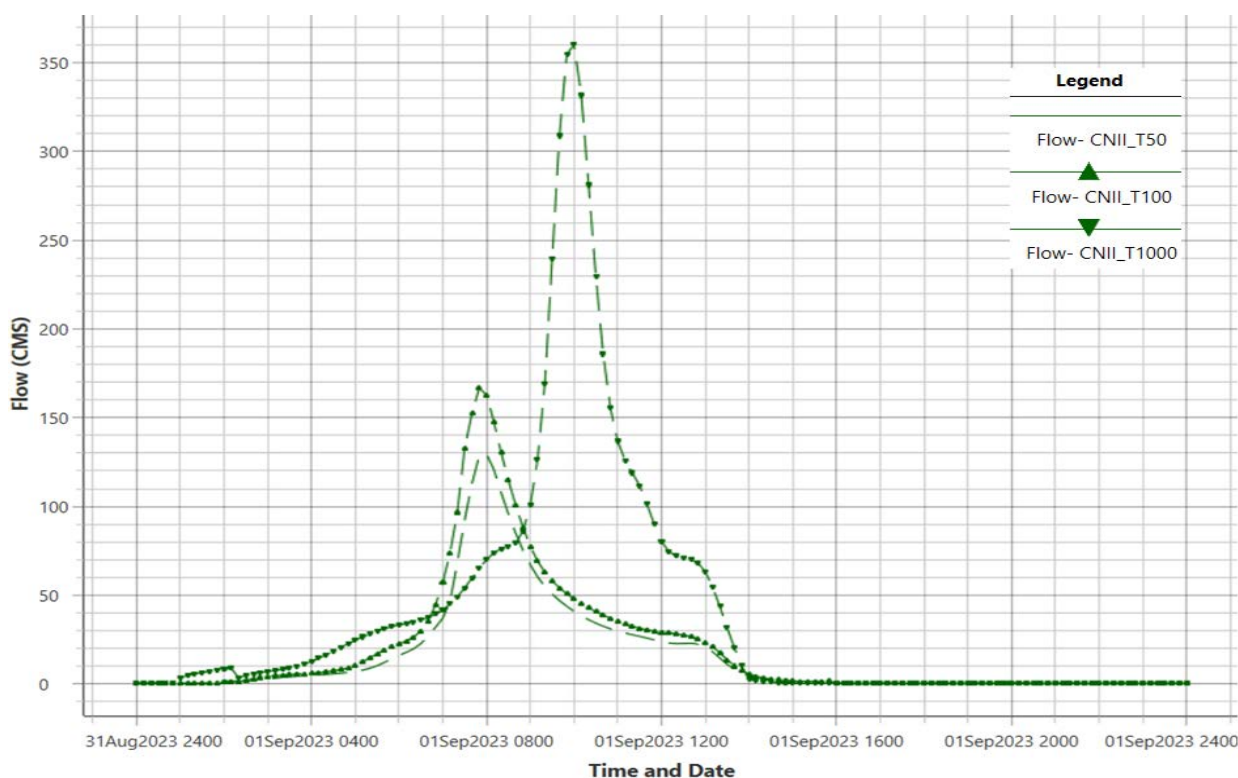
όπου A η έκταση της υπολεκάνης (km^2) και t_p ο χρόνος ανόδου (h).

3. Την προσθήκη της βασικής ροής της υπολεκάνης.

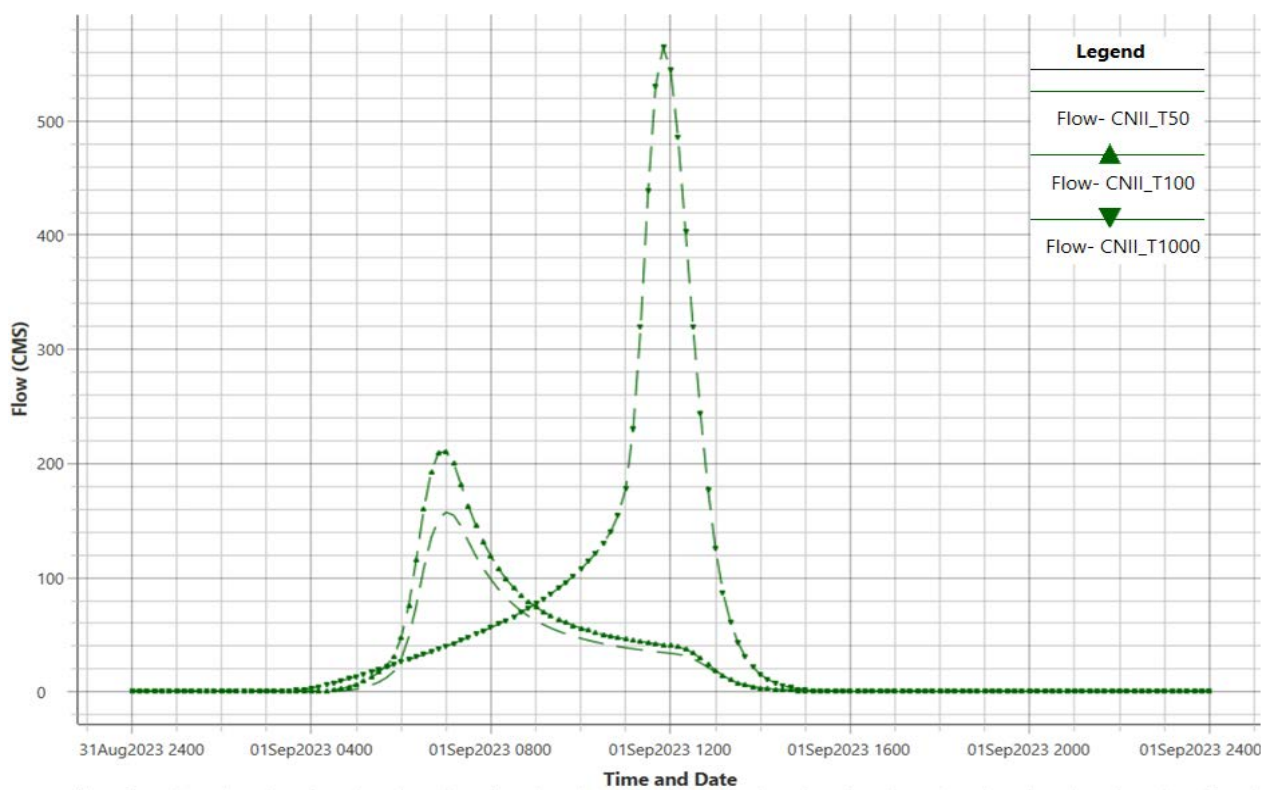
Κατά τη διάρκεια των πλημμυρικών επεισοδίων η βασική απορροή αποτελεί μικρό ποσοστό της συνολικής παροχής, που μειώνεται περαιτέρω όσο αυξάνεται η περίοδος επαναφοράς. Στις μελέτες πλημμυρών, συνήθως θεωρείται μια σταθερή τιμή ίση με τη μέση ετήσια παροχή του ποταμού (ή τη μέση παροχή του υγρότερου μήνα). Γενικά εφαρμόζονται οι τιμές ειδικής παροχής 0.01, 0.02 και 0.05 $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$, που αντιστοιχούν σε περιόδους επαναφοράς 50, 100 και 1000 έτη. Επειδή όμως, η αβεβαιότητα που μας δίνει η εκτίμηση της βασικής ροής είναι μικρής σημασίας, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες αβεβαιότητες της διαδικασίας υδρολογικής προσομοίωσης, έχει μικρή επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα.



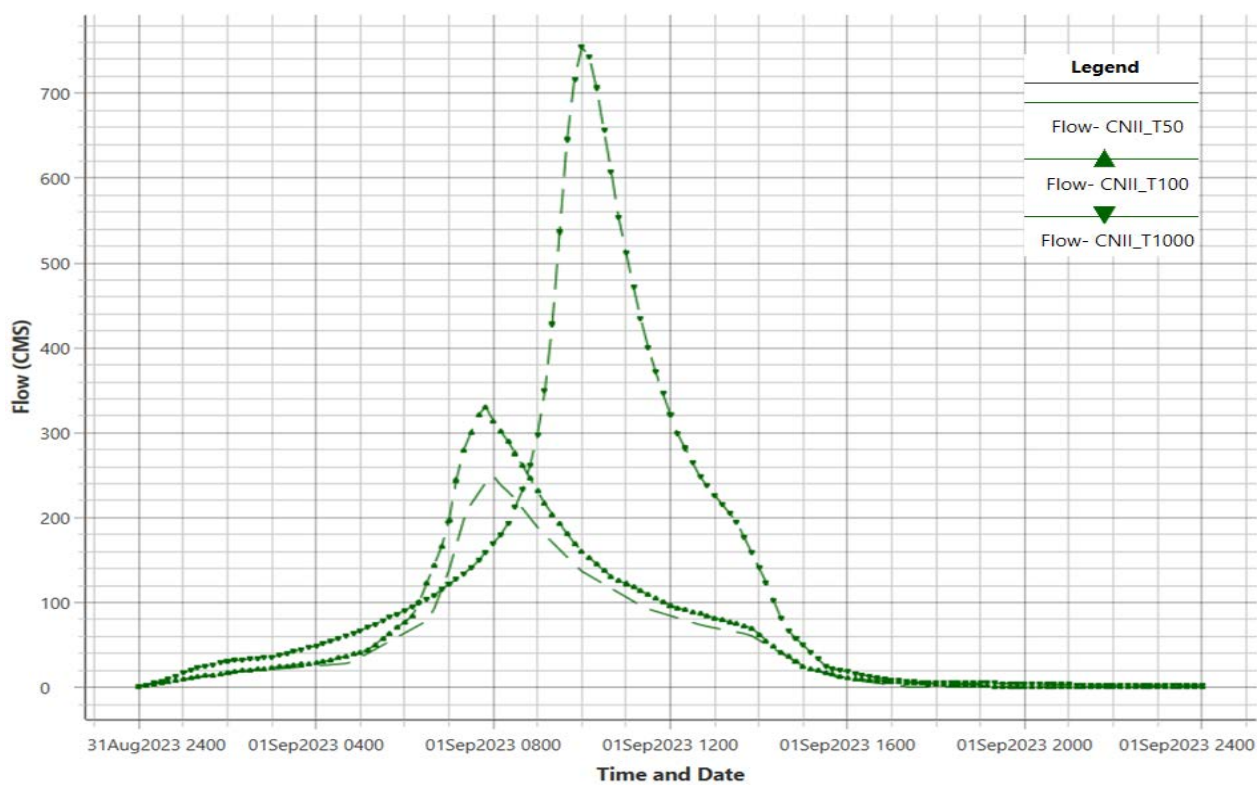
Υδρογράφημα 1 Υδρογραφήματα εισόδου Άναυρου του 2017 για μέσες συνθήκες και περίοδο επαναφοράς 50, 100 και 1000 χρόνια.



Υδρογράφημα 2 Υδρογραφήματα εισόδου Άναυρου του 2023 για μέσες συνθήκες και περίοδο επαναφοράς 50, 100 και 1000 χρόνια.



Υδρογράφημα 3 Υδρογραφήματα εισόδου Κραυσίδωνα του 2017 για μέσες συνθήκες και περίοδο επαναφοράς 50, 100 και 1000 χρόνια.



Υδρογράφημα 4 Υδρογραφήματα εισόδου Κραυσίδωνα του 2023 για μέσες συνθήκες και περίοδο επαναφοράς 50, 100 και 1000 χρόνια.

Κεφάλαιο 6 Αποτελέσματα

6.1 Εισαγωγή

6.1.1 ΧΡΟΝΟΣ ΑΦΙΞΗΣ

Ο χρόνος άφιξης της αιχμής των πλημμυρών είναι μια κρίσιμη παράμετρος που πρέπει να προσδιοριστεί και να προβλεφθεί εκ των προτέρων για τον αποτελεσματικό μετριασμό των καταστροφών. Η πρόβλεψη αυτής της παραμέτρου καθορίζει το χρονικό πλαίσιο εκκένωσης για τους τοπικούς πληθυσμούς. Επιπλέον, ο χρόνος άφιξης της μέγιστης πλημμύρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη γεγονότων υπερπήδησης και του χρόνου άφιξης των πλημμυρικών υδάτων σε πόλεις στα κατάντη. Ωστόσο, είναι πιθανό να υπάρχει αβεβαιότητα στην προσομοίωση του χρόνου άφιξης.

Οι ελάχιστοι και μέγιστοι χρόνοι εκκένωσης καθορίζονται από τον χρόνο που απαιτείται για να φτάσει κάποιος στην περίμετρο της πλημμυρικής περιοχής και τον διαθέσιμο χρόνο που έχει ο πληθυσμός από την έκδοση της προειδοποίησης μέχρι την άφιξη του νερού στην πόλη. Αυτοί οι χρόνοι μπορεί να διαφέρουν εάν εφαρμοστεί ένα δημοτικό σχέδιο έκτακτης ανάγκης που περιλαμβάνει εκτιμώμενο χρόνο προειδοποίησης. Για αυτόν τον δείκτη, οι τιμές κανονικοποίησης είναι διακριτές, λαμβάνοντας την τιμή 0 όταν ο απαιτούμενος χρόνος υπερβαίνει τον διαθέσιμο χρόνο, υποδεικνύοντας μέγιστο επίπεδο έκθεσης. (Tascón-González et al., 2020)

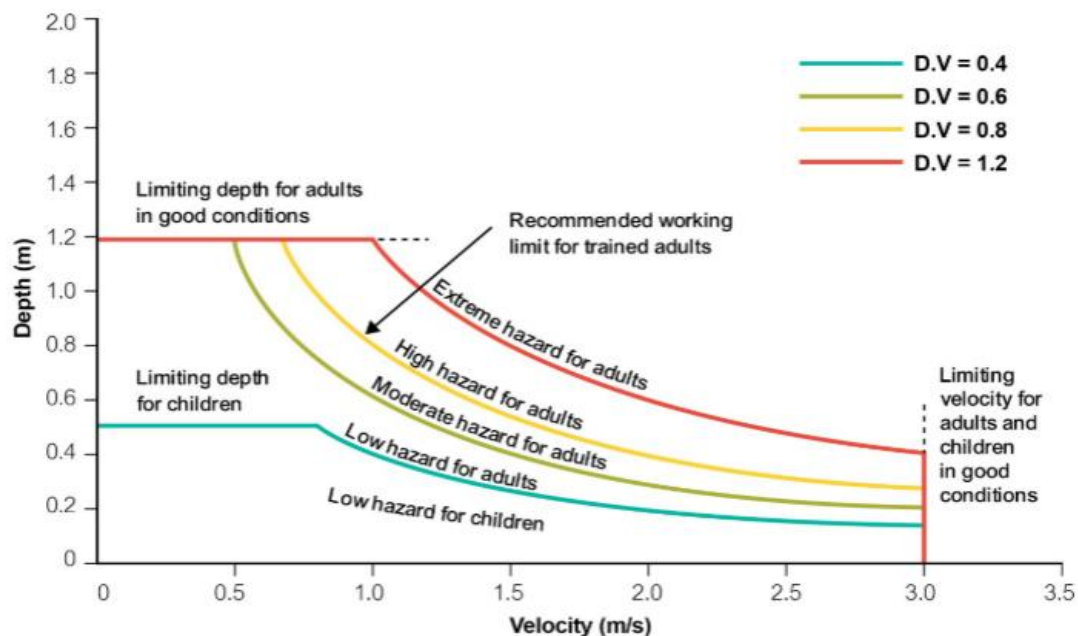
6.1.2 ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ

Οι ασυνείδητες συμπεριφορές αποτελούν κύρια αιτία τραυματισμών και θανάτων κατά τη διάρκεια πλημμυρικών φαινομένων. Πολλά άτομα υποτιμούν τη δύναμη του νερού που ρέει, θέτοντας ακούσια τους εαυτούς τους αλλά και τους άλλους σε κίνδυνο διασχίζοντας τα πλημμυρικά ρεύματα. Η επικινδυνότητα μιας πλημμύρας μπορεί να οριστεί με το γινόμενο της ταχύτητας επί του βάθους ροής. Τα κατώτατα όρια που έχουν υπολογιστεί

μετά από θεωρητικές έρευνες αλλά και έρευνες πεδίου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Ο πίνακας αυτός κατηγοριοποιεί τα πλημμυρικά επεισόδια σε έξι υποκατηγορίες λαμβάνοντας υπ' όψει την επικινδυνότητα για τον άνθρωπο, τα οχήματα και τα κτίρια.

Hazard vulnerability classification	Description	Classification limit (D and V in combination) m^2/s	Limiting still water depth (D) m	Limiting velocity (V) m/s
H1	Generally safe for vehicles, people and buildings	$D*V \leq 0.3$	0.3	2.0
H2	Unsafe for small vehicles	$D*V \leq 0.6$	0.5	2.0
H3	Unsafe for vehicles, children and the elderly	$D*V \leq 0.6$	1.2	2.0
H4	Unsafe for vehicles and people	$D*V \leq 1.0$	2.0	2.0
H5	Unsafe for vehicles and people. All building types vulnerable to structural damage. Some less robust building types vulnerable to failure	$D*V \leq 4.0$	4.0	4.0
H6	Unsafe for vehicles and people. All building types considered vulnerable to failure	$D*V > 4.0$	—	—

Εικόνα 13 Κατηγοριοποίηση γινομένου επικινδυνότητας πλημμύρας (Department of Planning and Environment Flood Hazard, 2022)



Εικόνα 14 Κατώτατα όρια για τη σταθερότητα των ανθρώπων στις πλημμύρες (Department of Planning and Environment Flood Hazard, 2022)

Στον οδηγό διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας της Νέας Νότιας Ουαλίας (Department of Planning and Environment Flood Hazard, 2022) προτείνεται και μία πιο απλοποιημένη μορφή του πίνακα όπου οι υποκατηγορίες H2-H4 έχουν ομαδοποιηθεί.

Πίνακας 7 Κατηγοριοποίηση του βαθμού επικινδυνότητας

Ταξινόμηση του κινδύνου	Περιγραφή	Όριο ταξινόμησης
H1	Ασφαλή προς τους ανθρώπους, τα οχήματα και τα κτίρια	$D*V \leq 0.3$
H2	Μη ασφαλή προς τους ανθρώπους και τα οχήματα	$D*V \leq 1$
H3	Μη ασφαλή για τους ανθρώπους και τα οχήματα. Τα κτίρια χρειάζονται ειδικό αντιπλημμυρικό σχεδιασμό	$D*V \leq 4$
H4	Μη ασφαλή για τους ανθρώπους και τα οχήματα. Όλοι οι τύποι κτιρίων θεωρούνται ευάλωτοι και μπορεί να καταρρεύσουν	$D*V \geq 4$

Ένας ακόμη τρόπος για τον ορισμό των επιπέδων κινδύνου πλημμύρας είναι αυτός που προτείνεται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Τροφίμων και Αγροτικών Υποθέσεων του Ηνωμένου Βασιλείου (DEFRA). Στο συγκεκριμένο σχέδιο διαχείρισης λαμβάνεται υπόψη ο παράγοντας των φερτών υλικών καθώς και η σταθερά n (HR Wallingford, 2006). Η οδηγία αυτή περιλαμβάνει τη μέθοδο αξιολόγησης κινδύνου, η οποία περιγράφεται λεπτομερώς στην εξίσωση (8).

$$HR = d(v + n) + DF \quad (13)$$

Όπου,

- HR: αξιολόγηση κινδύνου
- d : βάθος πλημμύρας (m)
- v : ταχύτητα ροής (m/s)
- DF: παράγοντας φερτών (= 0, 1, 2 ανάλογα με την πιθανότητα που έχουν τα φερτά να οδηγήσουν σε υψηλότερο κίνδυνο
- n : σταθερά ίση με 0.5

Με αυτόν τον τρόπο οι τιμές χωρίζονται σε τέσσερις υποκατηγορίες, $HR \leq 0.75$, $0.75 \leq HR < 1.25$, $1.25 \leq HR < 2.0$, και $HR \geq 2.0$, και η διαβάθμιση του κινδύνου πλημμύρας μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις τύπους: πολύ χαμηλός κίνδυνος (διασχίζουμε με προσοχή), κίνδυνος για ορισμένες ομάδες (όπως τα παιδιά, οι ηλικιωμένοι και τα άτομα με ειδικές ανάγκες), κίνδυνος για τις περισσότερες ομάδες (συμπεριλαμβανομένων των περισσότερων πολιτών) και κίνδυνος για όλες τις ομάδες (συμπεριλαμβανομένων και των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης).

Όσο για την τρωτότητα των κτιρίων, πρόσφατη μελέτη (Santos et al., 2024) εισαγάγει μια απλή μεθοδολογία για την αξιολόγηση της φυσικής τρωτότητας των κτιρίων χρησιμοποιώντας μόνο απογραφικά και λιθολογικά δεδομένα. Οι βασικοί παράγοντες που συμβάλλουν σε έναν αυξημένο δείκτη φυσικής τρωτότητας περιλαμβάνουν την ηλικία του κτιρίου, τον αριθμό των ορόφων και το γεωλογικό πλαίσιο. Αντίθετα, το υλικό που χρησιμοποιείται για την εξωτερική επένδυση και η παρουσία κτιρίων με αναβαθμούς

συνδέονται με μειωμένη έκθεση σε ζημιές από πλημμύρες και χαμηλότερη φυσική τρωτότητα.

6.1.3 ΌΡΙΑ ΚΑΤΑΚΛΙΣΗΣ

Το λογισμικό HEC-Ras δίνει την επιλογή υπολογισμού της ζώνης κατάκλισης ως ξεχωριστό χάρτη, δεδομένο που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην χαρτογράφηση του κινδύνου πλημμύρας και στην λήψη αποφάσεων για σχεδιασμό προστασίας ή μετριασμού των επιπτώσεων.

Ακόμα τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως στην εκτίμηση των ζημιών λόγω πλημμύρας, στην πρόβλεψη πλημμύρας σε πραγματικό χρόνο, στη μηχανική που σχετίζεται με πλημμύρες και στον σχεδιασμό των υδατικών πόρων, ενώ αποτελούν σημαντική προϋπόθεση για τη διερεύνηση της διάβρωσης των πρανών των ποταμών και της μεταφοράς ιζημάτων στην πεδιάδα, της μεταφοράς ρύπων, της οικολογίας της πεδιάδας, της υδρολογίας των ποτάμιων συστημάτων και της υδρολογίας των λεκανών.

Στους παρακάτω χάρτες έχουν συνδυαστεί τα μοντέλα μέγιστου βάθους και ορίων κατάκλισης ώστε να δημιουργηθούν χάρτες επικινδυνότητας.

6.2 Επιρροή της προσομοίωσης των κτιρίων ως αδιαπέραστη επιφάνεια

Ένας πλημμυρικός χάρτης παράγεται κυρίως για τον εντοπισμό των ορίων των περιοχών που κινδυνεύουν από μια πλημμύρα. Τα όρια αυτά συνήθως υπολογίζονται με την προσομοίωση των κτιρίων της πόλης ως μια πολύ τραχιά επιφάνεια, αυξάνοντας έτσι τον συντελεστή n Manning. Στην παρούσα μελέτη για την προσομοίωση των κτιρίων της περιοχής του Βόλου, εκτός από την αύξηση του συντελεστή Manning, έχει γίνει και η ενσωμάτωση των κτιρίων στο εδαφικό υπόβαθρο. Με αυτόν τον τρόπο το έδαφος έχει ανυψωθεί για να γίνει μια σωστή αναπαράσταση του αστικού ιστού, προσθέτοντας και τις γραμμές των κτιρίων ως αδιαπέραστες επιφάνειες. Γίνεται, λοιπόν, μια σύγκριση απεικόνισης της ανεμπόδιστης ροής και της ροής που εμποδίζεται από το κτιριακό σύμπλεγμα.

α) Χρόνος άφιξης

Όσον αφορά τον χρόνο άφιξης του μέγιστου πλημμυρικού ύψους παρατηρούμε ότι και στις δύο προσομοιώσεις κυμαίνεται μεταξύ των 6 και 8 ωρών. Αυτό σημαίνει ότι η

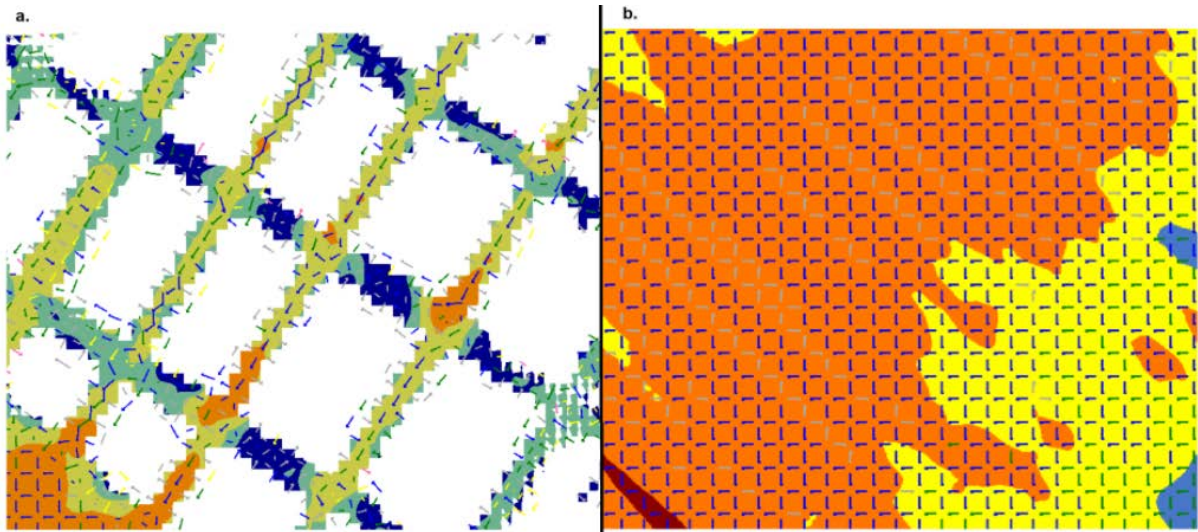
επικινδυνότητα είναι μέγιστη περίπου 6 ώρες μετά την έναρξη του πλημμυρικού επεισοδίου σύμφωνα με τις παρούσες προσομοιώσεις.

b) Επικινδυνότητα

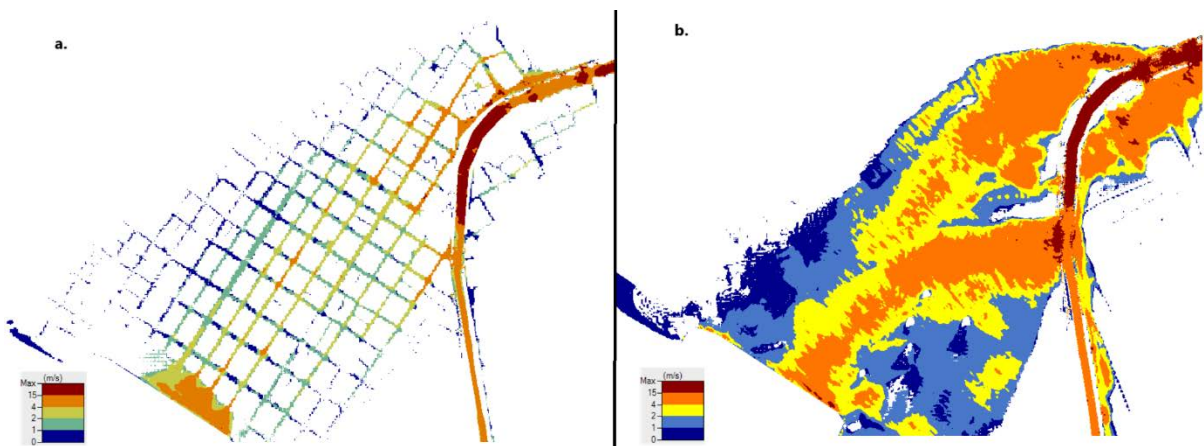
Αρχικά, παρατηρώντας τα στατιστικά αποτελέσματα της προσομοίωσης γίνεται αντιληπτό ότι η αλλαγή του εδάφους έχει προκαλέσει μείωση των μέγιστων τιμών ταχύτητας. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή που παρατηρήθηκε στην αρχική προσομοίωση έχει μειωθεί κατά 54%, φτάνοντας στα 22.45 m/s. Αυτό συμβαίνει καθώς στην δεύτερη περίπτωση τα κτίρια ανακόπτουν την ταχύτητα και αναγκάζουν την ροή να επιστρέψει πίσω σε κάποια σημεία, εμποδίζοντας την ροή από το να αναπτυχθεί ελεύθερα (Εικόνα 15). Ακόμα το μέσο και η τυπική απόκλιση έχουν αυξηθεί, το οποίο σημαίνει ότι έχουμε περισσότερες τιμές ταχύτητας που κυμαίνονται γύρω από το μέσο παρά γύρω από την μέγιστη ταχύτητα της προσομοίωσης. Στην Εικόνα 16, όπου φαίνεται σε μεγέθυνση η περιοχή του Άναυρου που πλημμυρίζει, μπορούμε να επιβεβαιώσουμε τα παραπάνω και οπτικά.

Πίνακας 8 Στατιστικά αποτελέσματα για μέγιστη ταχύτητα ροής

	Χωρίς κτήρια	Με κτήρια
Ελάχιστη τιμή	0	0
Μέγιστη τιμή	49.5	22.45
Μέσο	0.23	0.71
Τυπική απόκλιση	0.80	1.23



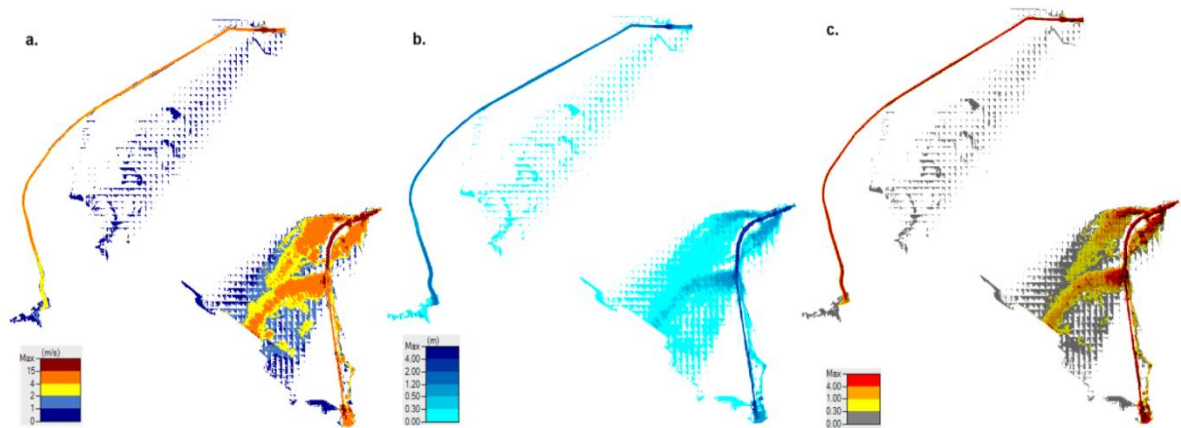
Εικόνα 15 α. Ανάπτυξη της ροής με αναπαράσταση κτιρίων, β. Ανάπτυξη της ροής χωρίς την αναπαράσταση κτιρίων



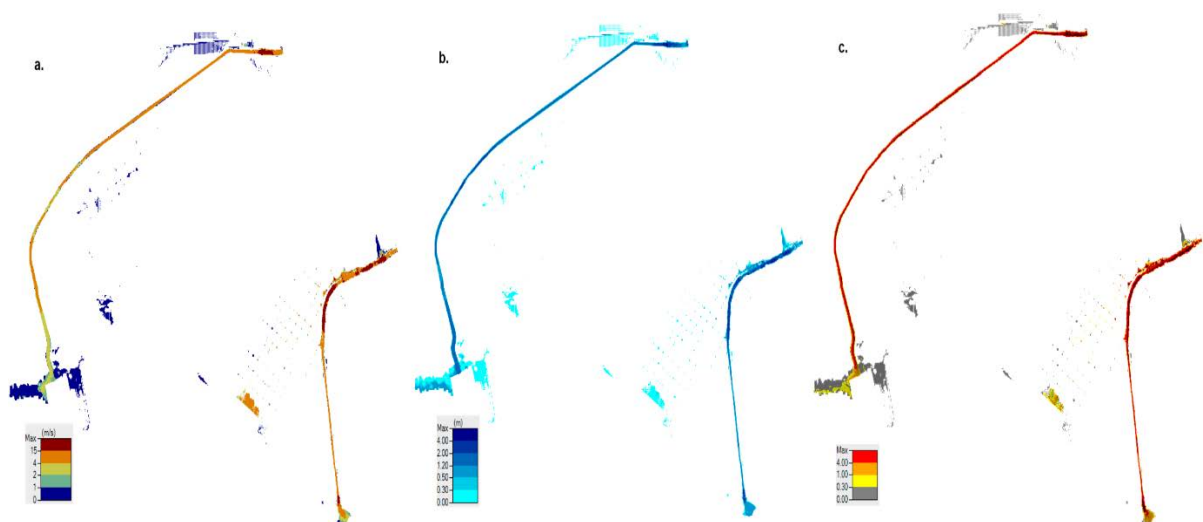
Εικόνα 16 Αποτελέσματα των προσομοιώσεων των ταχυτήτων της περιοχής του Άναυρου

Στην Εικόνα 17 και Εικόνα 18 παρουσιάζονται οι τρεις χάρτες: α. Μέγιστης ταχύτητας, β. Μέγιστου βάθους και γ. Επικινδυνότητας. Γενικά τα αποτελέσματα και στις δύο προσομοιώσεις μας έδειξαν ότι υπάρχει μια μικρή υπερχειλίση στην αρχή του ποταμού Κραυσίδωνα, η οποία δημιουργεί μικρές ταχύτητες ροής και βάθη, ενώ ο ποταμός Άναυρος υπερχειλίζει έχοντας δυσμενέστερες επιπτώσεις. Ωστόσο, είναι φυσιολογικό και αναμενόμενο να υπάρχει μια υπερεκτίμηση στο μοντέλου που δεν έχουν ενταχθεί τα κτίρια στο εδαφικό υπόβαθρο. Το τι συμβαίνει στην πραγματικότητα είναι δύσκολο να υπολογιστεί με ακρίβεια, καθώς θα έπρεπε να ληφθούν δεδομένα πεδίου, αλλά πάντα οι υπολογισμοί πρέπει να πραγματοποιούνται προς τη μεριά της ασφάλειας. Τέλος, στην Εικόνα 19, παρουσιάζεται ο αστικός ιστός κοντά στον ποταμό Άναυρο σε μεγέθυνση. Ένας

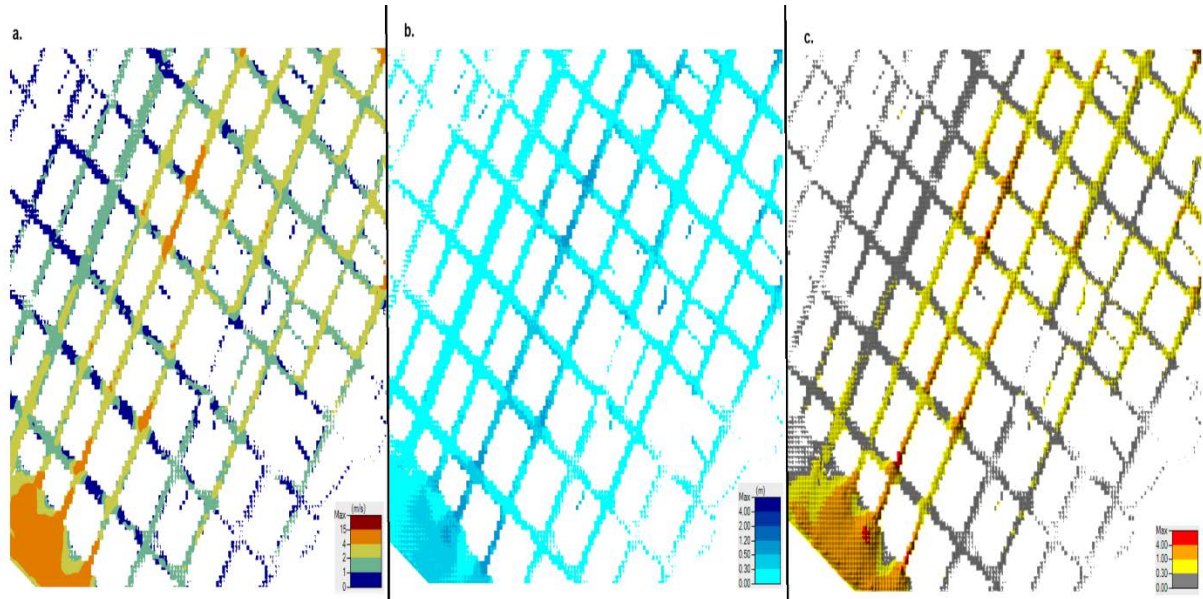
τέτοιος χάρτης μπορεί να φανεί χρήσιμος για τον εντοπισμό των δρόμων με το υψηλότερο ρίσκο έκθεσης σε ένα πλημμυρικό γεγονός.



Εικόνα 17 Προσομοίωση κτιρίων χωρίς αναπαράσταση του αστικού ιστού: α. Μέγιστη ταχύτητα ροής, β. Μέγιστο βάθος και γ. Επικινδυνότητα



Εικόνα 18 Προσομοίωση κτιρίων του αστικού ιστού ως αδιαπέραστη επιφάνεια: α. Μέγιστη ταχύτητα ροής, β. Μέγιστο βάθος και γ. Επικινδυνότητα



Εικόνα 19 Αποτελέσματα της προσομοίωσης του αστικού ιστού σε μεγέθυνση: α. Μέγιστη ταχύτητα ροής, β. Μέγιστο βάθος και γ. Επικινδυνότητα

γ) Βάθη ροής και όρια κατάκλισης

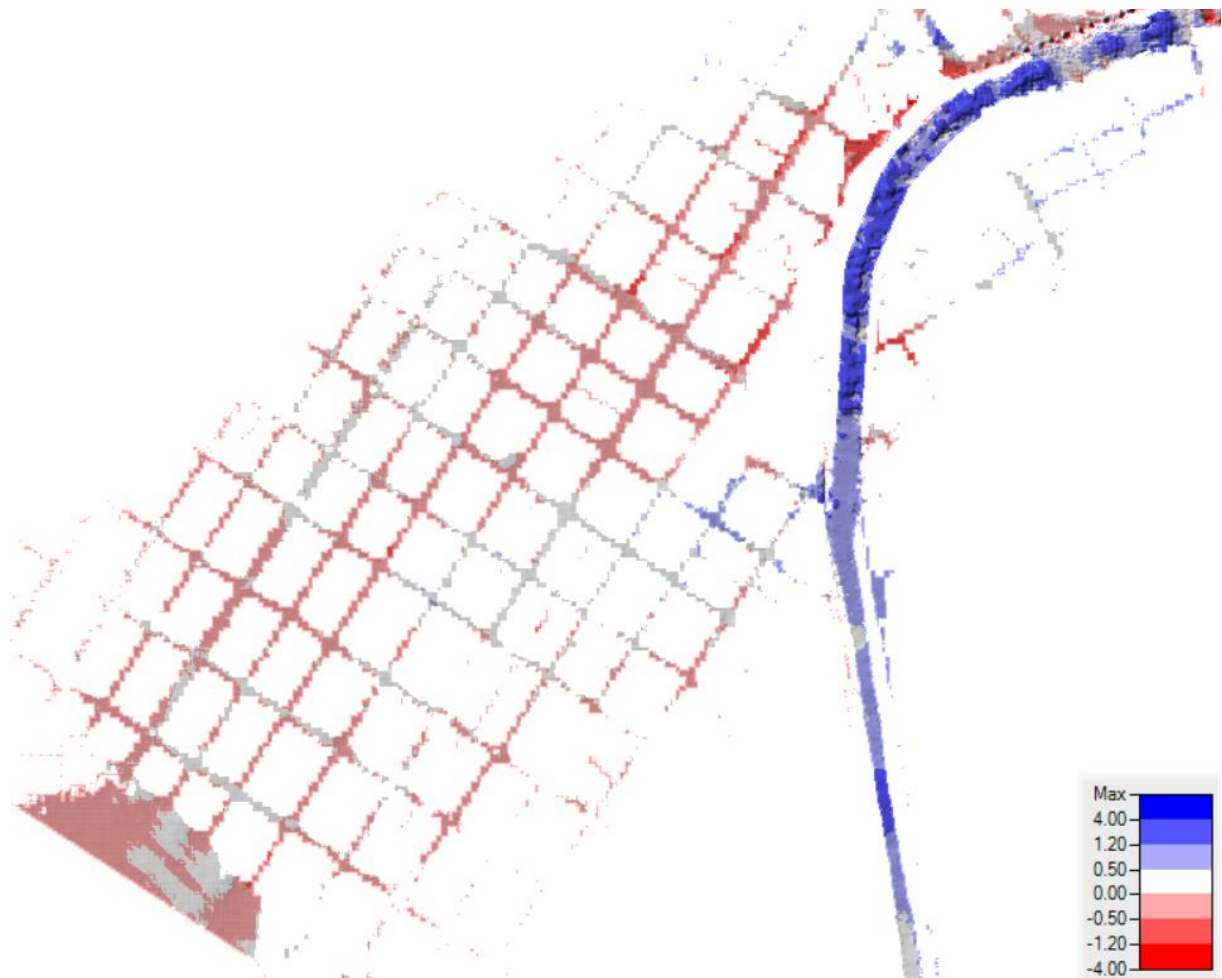
Παρακάτω γίνεται περαιτέρω ανάλυση για τα βάθη ροής και τα όρια κατάκλισης. Αρχικά, στον υπολογισμό των στατιστικών στοιχείων βάθους ροής της προσομοίωσης, όπου έχει χρησιμοποιηθεί εδαφικό υπόβαθρο με ενσωματωμένα κτίρια, έχει παρουσιαστεί μικρότερη μέγιστη τιμή. Εξετάζοντας πιο προσεκτικά το μοντέλο παρατηρήθηκε πως το μέγιστο βάθος δεν ξεπερνά τα 7 μέτρα και βρίσκεται την αρχή του ποταμού Κραυσίδωνα, σύμφωνα με το μοντέλο εδάφους ανάλυσης 5m x 5m που έχει χρησιμοποιηθεί και στις δύο περιπτώσεις.

Πίνακας 9 Στατιστικά στοιχεία ανάλυσης μέγιστου βάθους ροής, τοπογραφίας με και χωρίς κτίρια.

	Χωρίς κτίρια	Με κτίρια
Ελάχιστη τιμή	0.001	0.001
Μέγιστη τιμή	9.10	7.00
Μέσο	0.44	0.55
Τυπική απόκλιση	0.78	0.78
Μήκος (m)	55405.85	166758.30
Έκταση (m ²)	1062230.36	569642.05

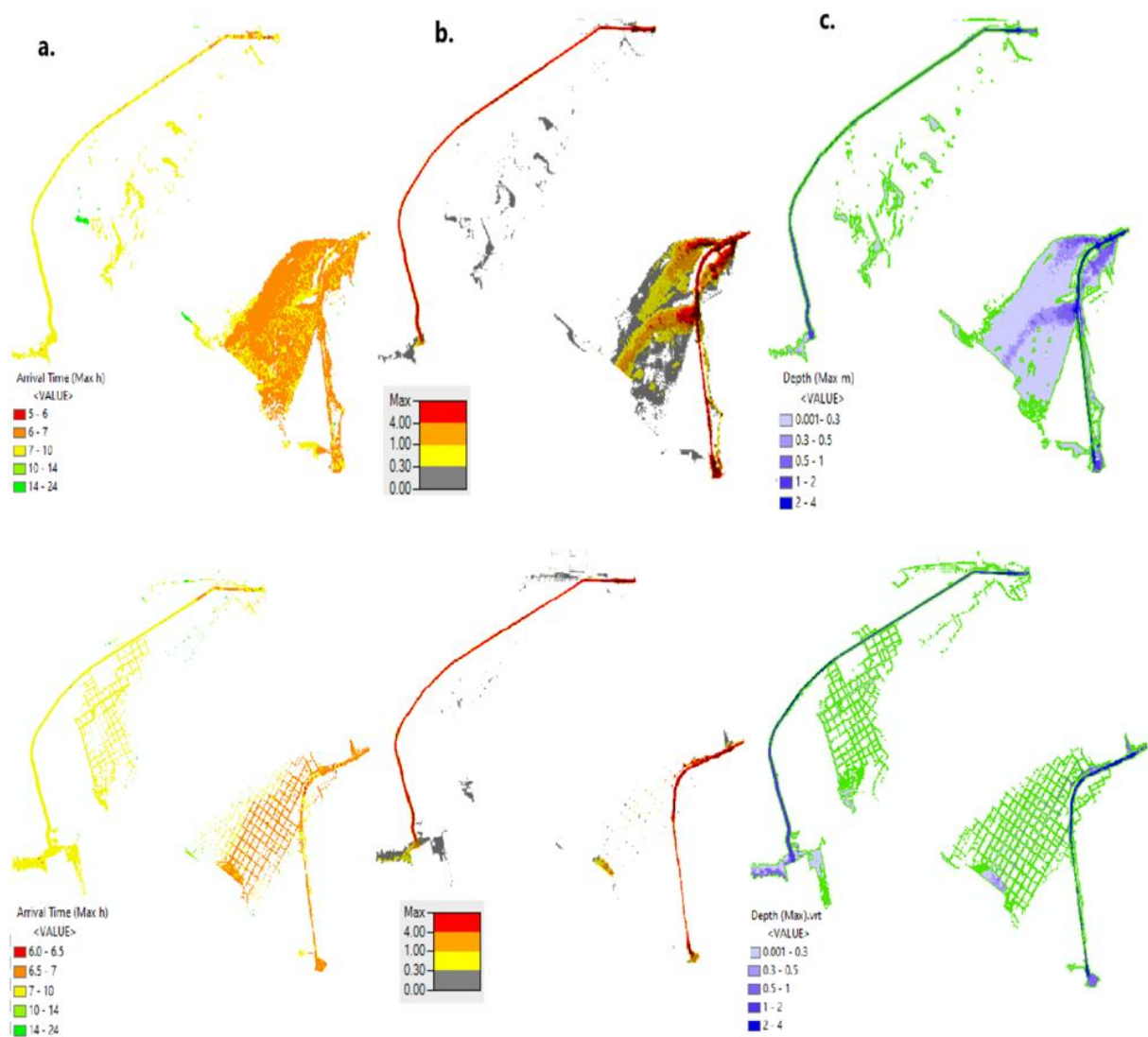
Στην Εικόνα 20 έχουμε τη διαφορά μεταξύ του βάθους ροής των δύο μοντέλων όπου υπάρχει ροή και για τις δύο προσομοιώσεις. Όπου υπερσχύει το κόκκινο χρώμα έχουμε

μεγαλύτερες τιμές για το μοντέλο με τα ενσωματωμένα κτίρια, ενώ όπου υπάρχει μπλε οι τιμές είναι μεγαλύτερες για το μοντέλο χωρίς κτίρια. Παρατηρούμε ότι στον αστικό ιστό οι διαφορές κυμαίνονται μεταξύ των 0.1-0.2 μέτρων, ενώ για την περιοχή του ποταμού Άναυρου, καθώς και για τον Κραυσίδωνα, οι τιμές αυξάνονται στην προσομοίωση χωρίς κτίρια. Τέλος, στην προσομοίωση με τα κτίρια το μήκος των ορίων κατάκλισης είναι σχεδόν το διπλάσιο ενώ η έκταση είναι μισή, σε σχέση με την αρχική προσομοίωση.



Εικόνα 20 Μοντέλο χωρίς ενσωματωμένα κτίρια και μοντέλο με ενσωματωμένα κτίρια, διαφορά βάθους ροής

Παρακάτω παρουσιάζονται οι χάρτες που παράχθηκαν για τις δύο προσομοιώσεις για τον χρόνο άφιξης, την επικινδυνότητα και τα όρια κατάκλισης:



Εικόνα 21 Σύγκριση αποτελεσμάτων για αλλαγή τοπογραφικών δεδομένων με κτίρια για: α. Χρόνος άφιξης, β. Επικινδυνότητα, γ. Όρια κατάκλισης

6.3 Επιρροή της αλλαγής στην ανάλυση πλέγματος τοπογραφίας

Ένα πλέγμα τοπογραφίας που χρησιμοποιείται ως επίπεδο εδάφους για μια 2D προσομοίωση χαρακτηρίζεται από την ανάλυση των στοιχείων του. Η ανάλυση αυτή μας δίνει την έκταση που αντιστοιχεί στην πληροφορία του κάθε τετραγώνου. Επομένως, όσο μεγαλύτερα είναι τα τετράγωνα που χαρακτηρίζουν μια τοπογραφική έκταση τόσο η πληροφορία γίνεται πιο γενική. Ένα πλέγμα υψηλής ευκρίνειας είναι απαραίτητο για την ύπαρξη μια λεπτομερούς αποτύπωσης του εδάφους.

Στην περίπτωση μας έχουμε χρησιμοποιήσει δύο πλέγματα, ένα των δύο τετραγωνικών μέτρων και ένα των πέντε τετραγωνικών μέτρων. Είναι γνωστό ότι η ικανότητα ενός 2D μοντέλου προσομοίωσης πλημμυρών να παράγει αξιόπιστες εκτιμήσεις εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα των χρησιμοποιούμενων δεδομένων εδάφους, τις τιμές τραχύτητας που έχουν οριστεί και τη διαμόρφωση του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων (Yalcin, 2020). Τα υδρογραφήματα, οι χρήσεις γης και οι συντελεστές Manning παραμένουν ίδια ώστε να μελετηθεί η επιρροή της ανάλυσης της τοπογραφίας στα αποτελέσματα.

a) Χρόνος άφιξης

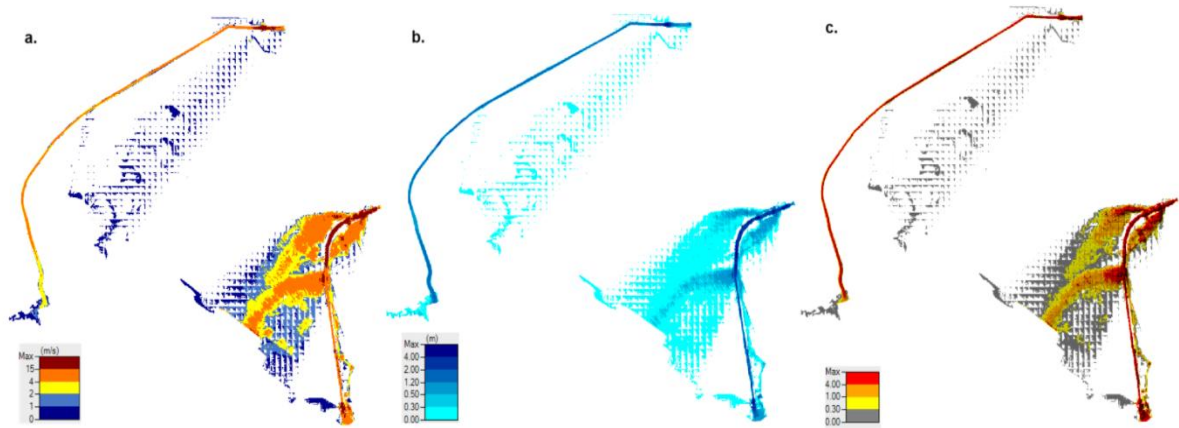
Όσον αφορά τον χρόνο άφιξης του μέγιστου πλημμυρικού ύψους, παρατηρούμε ότι και στις δύο προσομοιώσεις κυμαίνεται μεταξύ των 6 και 7 ωρών. Αυτό σημαίνει ότι η επικινδυνότητα είναι μέγιστη περίπου 6 ώρες μετά την έναρξη του πλημμυρικού επεισοδίου, σύμφωνα με τις παρούσες προσομοιώσεις.

b) Επικινδυνότητα

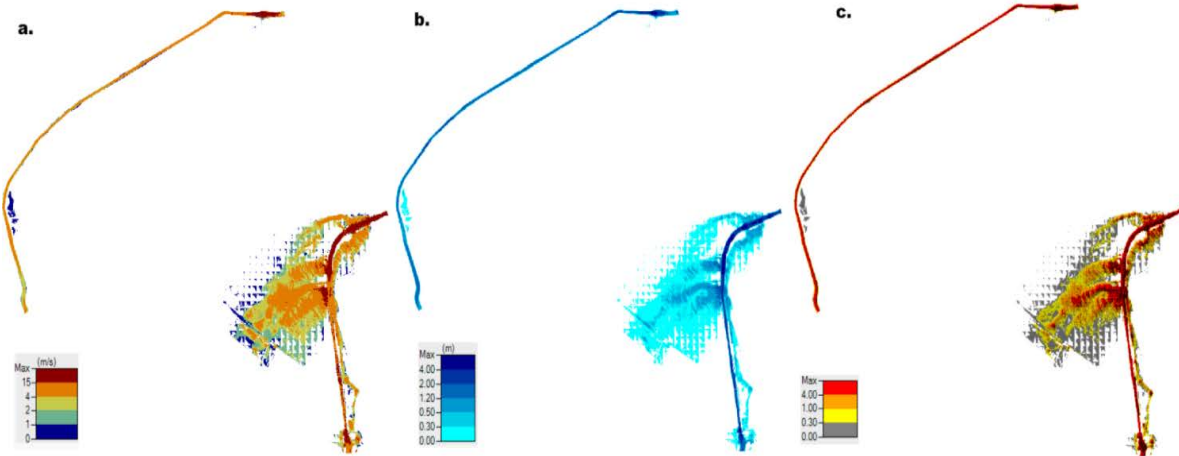
Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, ένας τρόπος για υπολογίσουμε την επικινδυνότητα ενός πλημμυρικού γεγονότος είναι να πολλαπλασιάσουμε το πλημμυρικό βάθος με την ταχύτητα ροής. Στην παρούσα μελέτη έχει υπολογιστεί η επικινδυνότητα για την μέγιστη ταχύτητα και το μέγιστο βάθος που αναπτύσσεται. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι ένας χάρτης επικινδυνότητας που δημιουργείτε με αυτόν τον τρόπο τείνει να υπερεκτιμά τον πραγματικό κίνδυνο. Αυτό συμβαίνει καθώς δεν λαμβάνεται υπ' όψη η πολυπλοκότητα του ανθρώπινου παράγοντα (Lazzarin et al., 2024).

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα στην Εικόνα 22 και Εικόνα 23 καθώς και τα στατιστικά στοιχεία συμπεραίνουμε ότι η ανάλυση εδάφους (2m x 2m) για την στιγμή όπου οι ταχύτητες είναι μέγιστες στην προσομοίωση εμφανίζει συνολικά περισσότερα σημεία

όπου η ταχύτητα θεωρείται επικίνδυνη για τον άνθρωπο (πάνω από 2m/s) στην πλημμυρική της έκταση. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα της ταχύτητας και του βάθους ροής έχουμε χωρίσει τα αποτελέσματα σε τέσσερις κλάσεις H1, H2, H3 και H4, σύμφωνα με την υπο- ενότητα 6.1.2, για γινόμενο έως 0.3, 1, 4 και γινόμενο μεγαλύτερο του 4 όπου βρίσκονται και οι περιοχές που κινδυνεύουν περισσότερο.



Εικόνα 22 DSM (5m x 5m): Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα



Εικόνα 23 DSM (2m x 2m): Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα

Πίνακας 10 Στατιστικά αποτελέσματα για μέγιστη ταχύτητα ροής

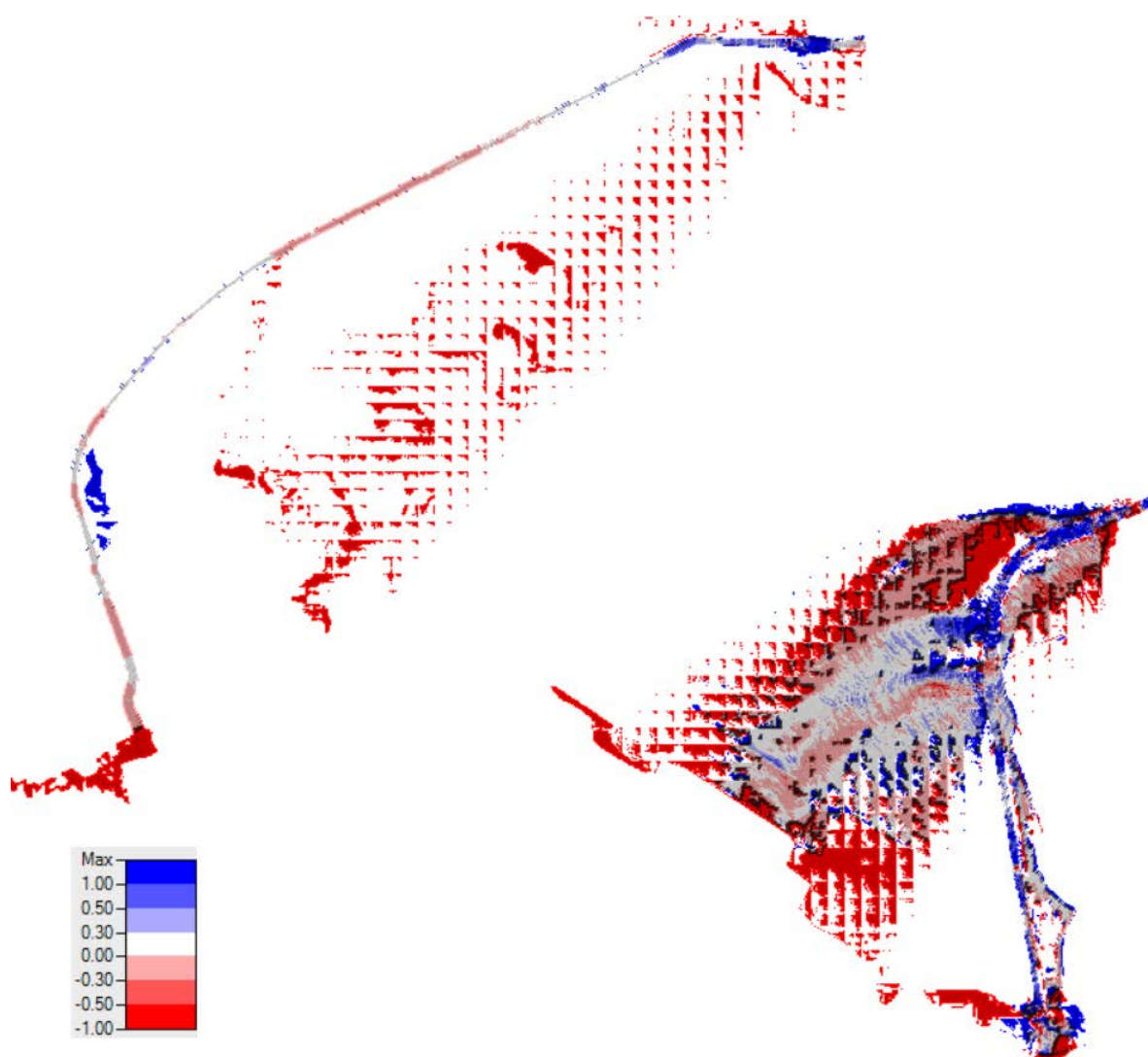
	5m x 5m	2m x 2m
Ελάχιστη τιμή	0	0
Μέγιστη τιμή	49.5	40
Μέσο	0.23	1.03
Τυπική απόκλιση	0.80	1.7

c) Βάθη και όρια κατάκλισης

Για την ανάλυση του βάθους ροής και των ορίων κατάκλισης αντλούμε στατιστικά δεδομένα από το HEC-Ras. Συγκεκριμένα στον Πίνακα 7 έχουμε τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές, τον μέσο όρο και την τυπική απόκλιση των τιμών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το αρχείο τοπογραφίας με την υψηλότερη ανάλυση (2m x 2m) δίνει μεγαλύτερη μέγιστη τιμή βάθους και σύμφωνα με την τυπική απόκλιση οι τιμές των βαθών ροής αυξάνονται γενικότερα. Ακόμα, παρατηρούμε πως με την χρήση της τοπογραφίας ανάλυσης 5m x 5m υπάρχει υπερχειλίση του Κραυσίδωνα και ροή προς το κέντρο της πόλης του Βόλου, που είναι ωστόσο ελάχιστη, ενώ στην ανάλυση 2m x 2m δεν υπάρχει αυτή η έκταση. Αντιθέτως, φαίνεται πως και στις δύο περιπτώσεις η κήτη του Άναυρου υπερχειλίζει με δυσμενέστερα αποτελέσματα στην περίπτωση της ανάλυσης 5m x 5m, όπου έχουμε μεγαλύτερη πλημμυρική έκταση. Στην Εικόνα 16 οι περιοχές με μπλε χρώμα είναι τα σημεία όπου η ανάλυση 2m x 2m δίνει μεγαλύτερα βάθη ροής ενώ με κόκκινο όπου η ανάλυση 5m x 5m δίνει μεγαλύτερα βάθη. Τέλος, με τον υπολογισμό της διαφοράς (%) για την πλημμυρική έκταση, φαίνεται πως το μοντέλο με ανάλυση (5m x 5m) είναι κατά 32% μεγαλύτερο.

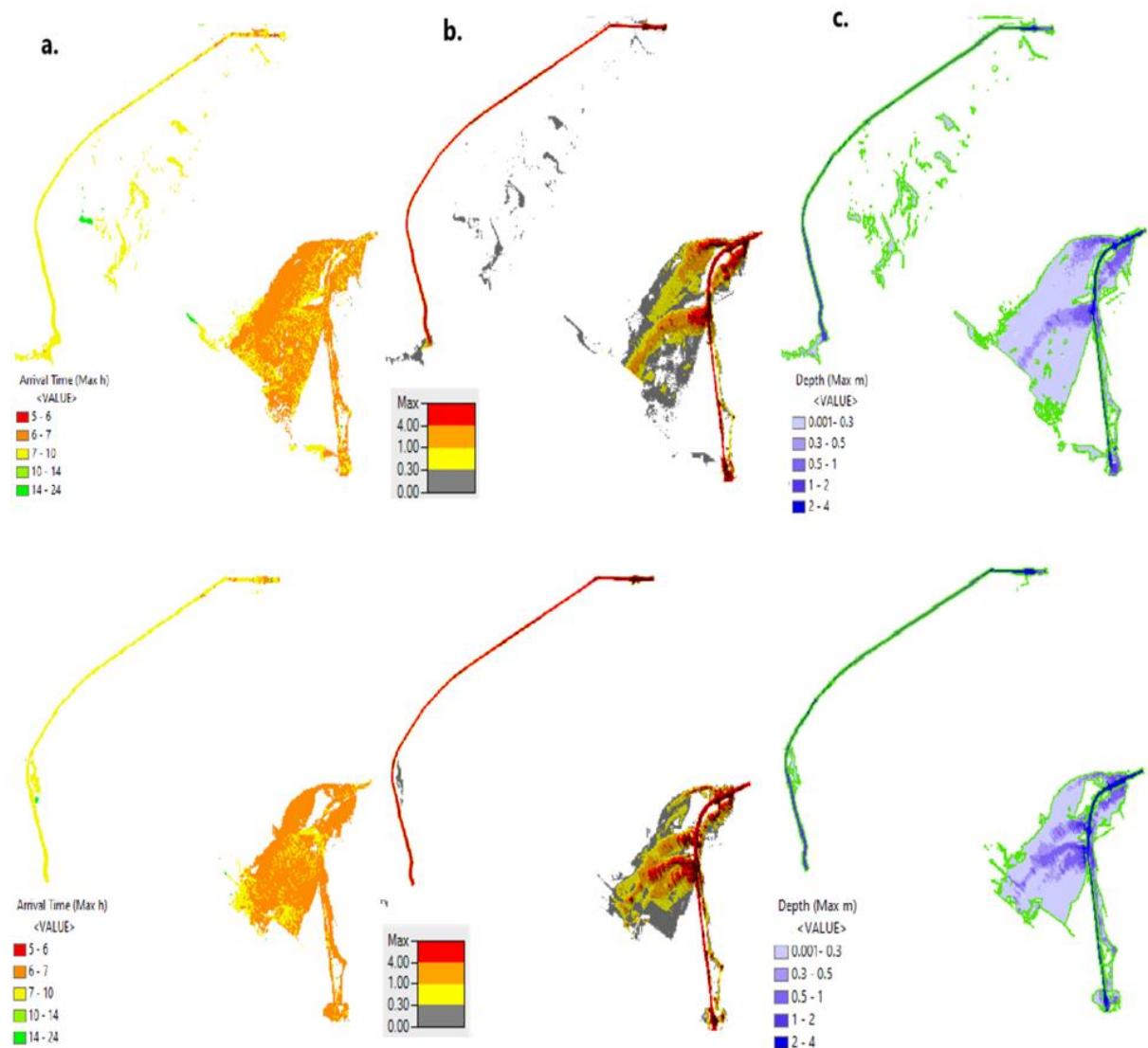
Πίνακας 11 Στατιστικά στοιχεία ανάλυσης βάθους τοπογραφίας 5m x 5m και 2m x 2m

	5m x 5m	2m x 2m
Ελάχιστη τιμή	0.001	0.001
Μέγιστη τιμή	9.10	8
Μέσο	0.44	0.77
Τυπική απόκλιση	0.78	0.73
Μήκος (m)	55405.85	31761.97
Έκταση (m ²)	1062230.36	766961.34



Εικόνα 24 Διαφορά βάθους ροής για ανάλυση τοπογραφίας 5m x 5m και 2m x 2m

Τέλος, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τον χρόνο άφιξης, την επικινδυνότητα και τα βάρη ροής μαζί με τα όρια κατάκλισης:



Εικόνα 25 Σύγκριση αποτελεσμάτων για αλλαγή ανάλυσης πλέγματος από 5m x 5m σε 2m x 2m για:
α. Χρόνος άφιξης, β. Επικινδυνότητα, γ. Όρια κατάκλισης

6.4 Σύγκριση ανάλυσης πλέγματος 2x2m και 5x5m με προσομοίωση των κτιρίων

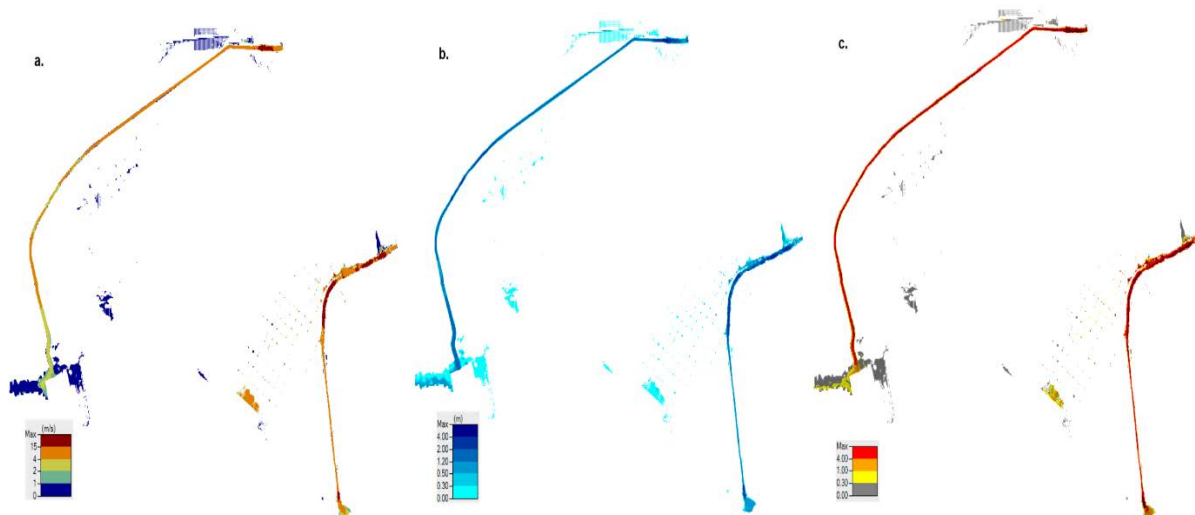
Παρακάτω πραγματοποιείται η ανάλυση της προσομοίωσης του μοντέλου με ανάλυση πλέγματος 2x2m, τιμές συντελεστή τραχύτητας κα χρήσεις γης από την βάση CORINE και υδρογραφήματα του 2017. Παράλληλα γίνεται η σύγκριση του μοντέλου μας, με το μοντέλο που υπολογίστηκε στην υπο ενότητα 6.2 για ανάλυση πλέγματος 5x5m. Οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας, οι χρήσεις γης και το υδρογράφημα παραμένουν τα ίδια και στις δύο προσομοιώσεις.

d) Χρόνος άφιξης

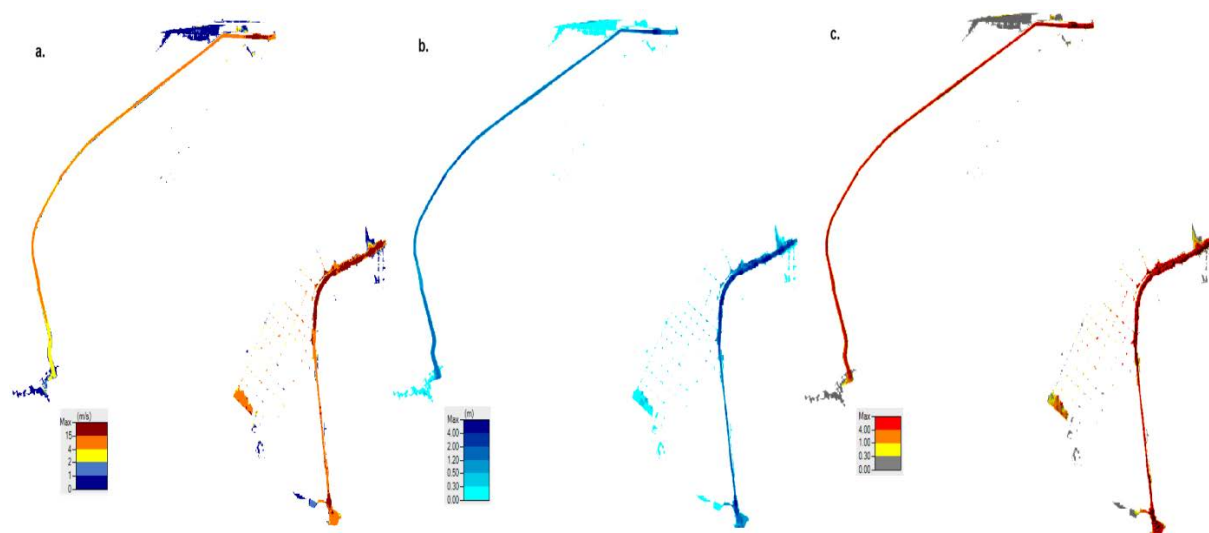
Όσον αφορά τον χρόνο άφιξης του μέγιστου πλημμυρικού ύψους παρατηρούμε ότι και στις δύο προσομοιώσεις κυμαίνεται μεταξύ των 6.30 – 7.30 ωρών. Αυτό υποδηλώνει ότι η επικινδυνότητα είναι μέγιστη περίπου 6.30 ώρες μετά την έναρξη του πλημμυρικού επεισοδίου σύμφωνα με τις παρούσες προσομοιώσεις.

e) Επικινδυνότητα

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα στην Εικόνα 26 και Εικόνα 27 καθώς και τα στατιστικά στοιχεία, συμπεραίνουμε ότι η ανάλυση εδάφους (2m x 2m) για την στιγμή όπου οι ταχύτητες είναι μέγιστες μας δίνει μεγαλύτερες τιμές συνολικά. Επομένως, αφού η ταχύτητα αυξάνεται για μεγαλύτερη ανάλυση πλέγματος περιμένουμε να υπάρχει αύξηση και στην επικινδυνότητα. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα της ταχύτητας και του βάθους ροής έχουμε χωρίσει τα αποτελέσματα σε τέσσερις κλάσεις H1, H2, H3 και H4, σύμφωνα με την υπο- ενότητα 6.1.2, για γινόμενο έως 0.3, 1, 4 και γινόμενο μεγαλύτερο του 4 όπου βρίσκονται και οι περιοχές που κινδυνεύουν περισσότερο.



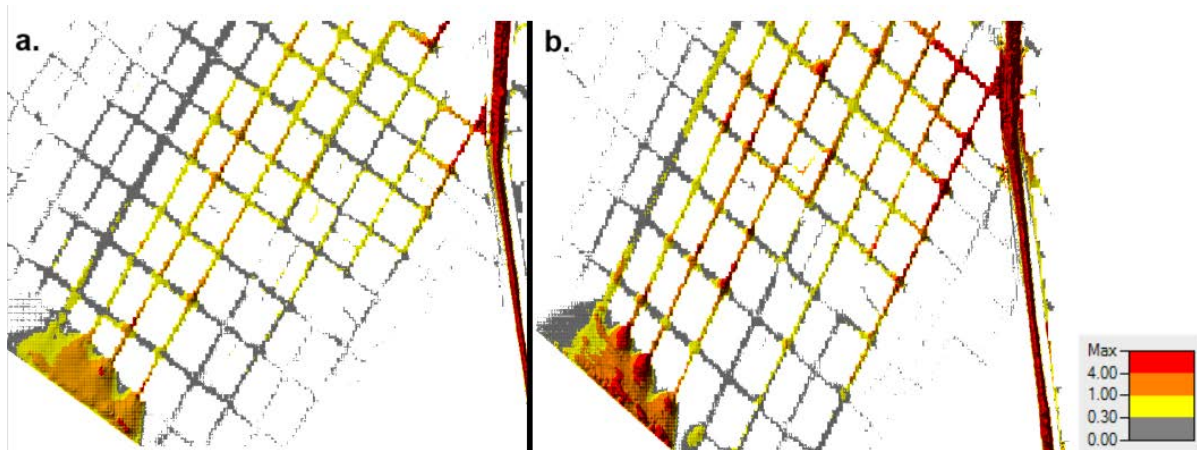
Εικόνα 26 DSM (5m x 5m) με κτίρια: Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα



Εικόνα 27 DSM (2m x 2m) με κτίρια: Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα

Πίνακας 12 Στατιστικά αποτελέσματα για μέγιστη ταχύτητα ροής

Με κτίρια	5m x 5m	2m x 2m
Ελάχιστη τιμή	0	0
Μέγιστη τιμή	22.45	68
Μέσο	0.71	0.74
Τυπική απόκλιση	1.23	1.42



Εικόνα 28 Σύγκριση της προσομοίωσης του αστικού ιστού σε μεγέθυνση: a. Ανάλυση τοπογραφίας 5m x 5m, b. Ανάλυση τοπογραφίας 2m x 2m

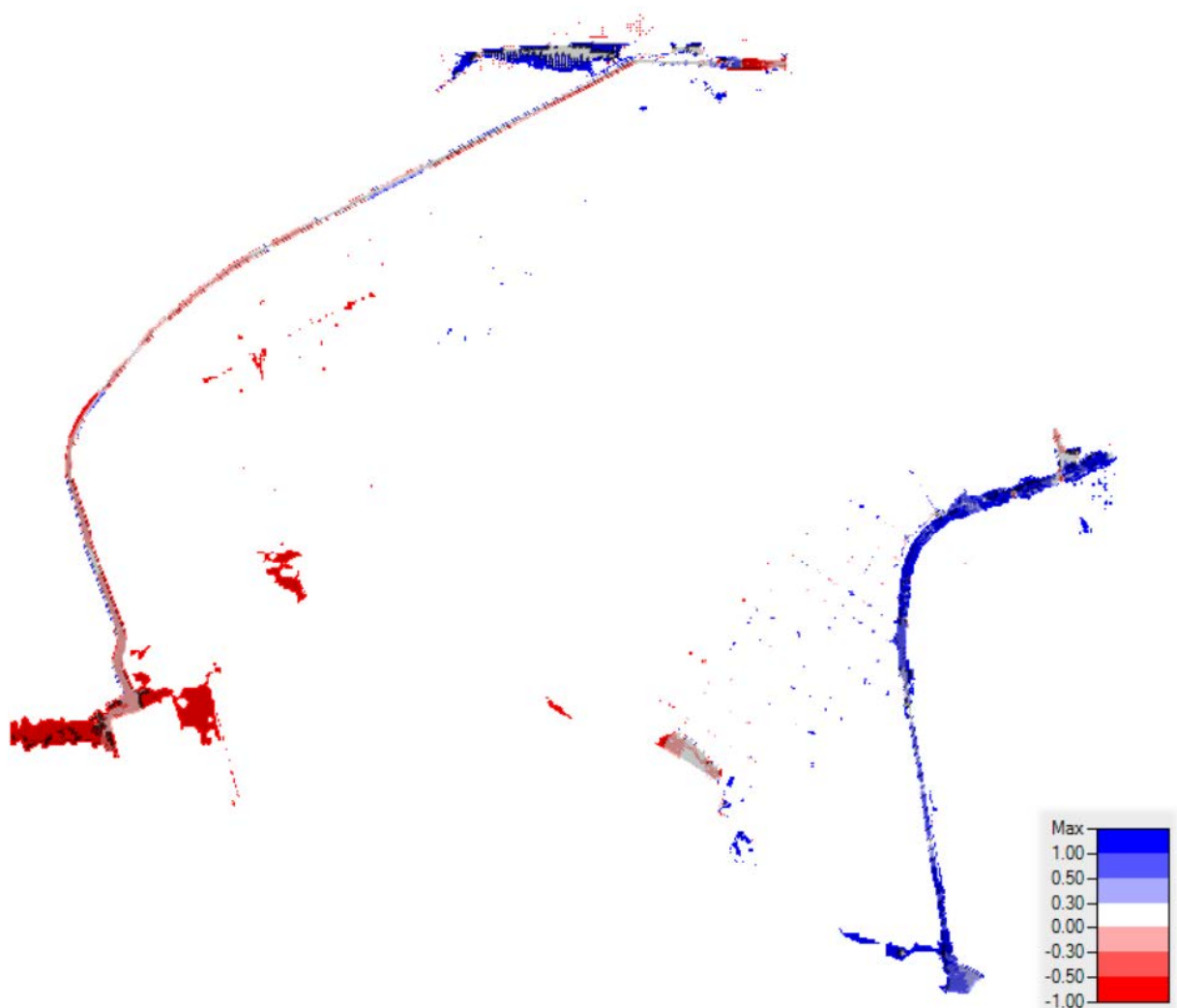
f) Βάθη και όρια κατάκλισης

Για την ανάλυση του βάθους ροής και των ορίων κατάκλισης αντλούμε στατιστικά δεδομένα από το HEC-Ras. Συγκεκριμένα στον Πίνακα 13 έχουμε τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές, τον μέσο όρο και την τυπική απόκλιση των τιμών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το αρχείο τοπογραφίας με την υψηλότερη ανάλυση (2m x 2m) δίνει μεγαλύτερη μέγιστη τιμή βάθους και σύμφωνα με την τυπική απόκλιση οι τιμές των βαθών ροής αυξάνονται γενικότερα. Στην Εικόνα 30.c παρατηρείται ότι με την ανάλυση (2m x 2m) η περιοχή του Κραυσίδωνα υπερχειλίζει μόνο στην αρχή του ποταμού, ωστόσο και στις δύο προσομοιώσεις το βάθος της πλημμυρικής έκτασης δεν ξεπερνάει τα 0.30 μέτρα. Επομένως, παρατηρούμε πως το μήκος και η έκταση των ορίων κατάκλισης έχουν μειωθεί σε σχέση με τα αποτελέσματα της ανάλυσης 5m x 5m.

Πίνακας 13 Στατιστικά στοιχεία ανάλυσης βάθους τοπογραφίας 5m x 5m και 2m x 2m

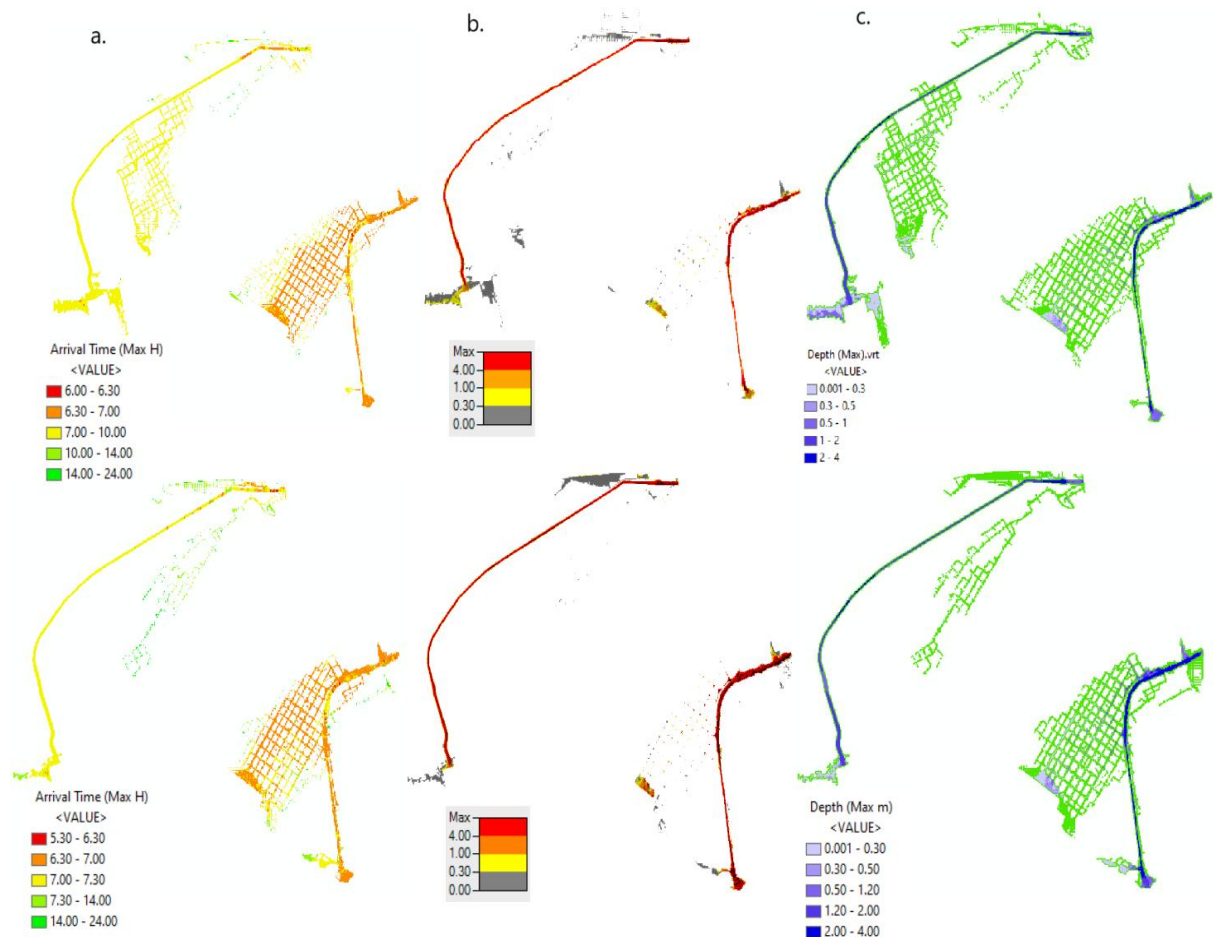
Με κτίρια	5m x 5m	2m x 2m
Ελάχιστη τιμή	0.001	0.001
Μέγιστη τιμή	7.00	7.27
Μέσο	0.55	0.69
Τυπική απόκλιση	0.78	0.69
Μήκος (m)	166758.30	140561.30
Έκταση (m ²)	569642.05	466624.55

Στην Εικόνα 26 οι περιοχές με μπλε χρώμα είναι τα σημεία όπου η ανάλυση 2m x 2m δίνει μεγαλύτερα βάθη ροής ενώ με κόκκινο όπου η ανάλυση 5m x 5m δίνει μεγαλύτερα βάθη. Τέλος, με τον υπολογισμό της διαφοράς (%) για την πλημμυρική έκταση, φαίνεται πως το μοντέλο με ανάλυση (5m x 5m) είναι κατά 18% μεγαλύτερο.



Εικόνα 29 Διαφορά βάθους ροής για ανάλυση τοπογραφίας 5m x 5m και 2m x 2m

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τον χρόνο άφιξης, την επικινδυνότητα και τα βάθη ροής μαζί με τα όρια κατάκλισης :



Εικόνα 30

Επομένως, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όσο μεγαλύτερη ευκρίνεια έχουμε στην ανάλυση της τοπογραφίας: α) Τα βάθη ροής αυξάνονται, β) Οι ταχύτητες ροής αυξάνονται και γ) Τα όρια κατάκλισης μειώνονται.

6.5 Επιρροή της αλλαγής του υδρογραφήματος

Σε αυτή την υπο-ενότητα αναλύονται τα αποτελέσματα της αλλαγής του υδρογραφήματος της προσομοίωσης σε αυτό του 2023. Το υδρογράφημα του 2023, το οποίο δίνεται στην υπο-ενότητα 5.4, εμφανίζει αύξηση της παροχής αιχμής και για τους δύο χειμάρρους. Η

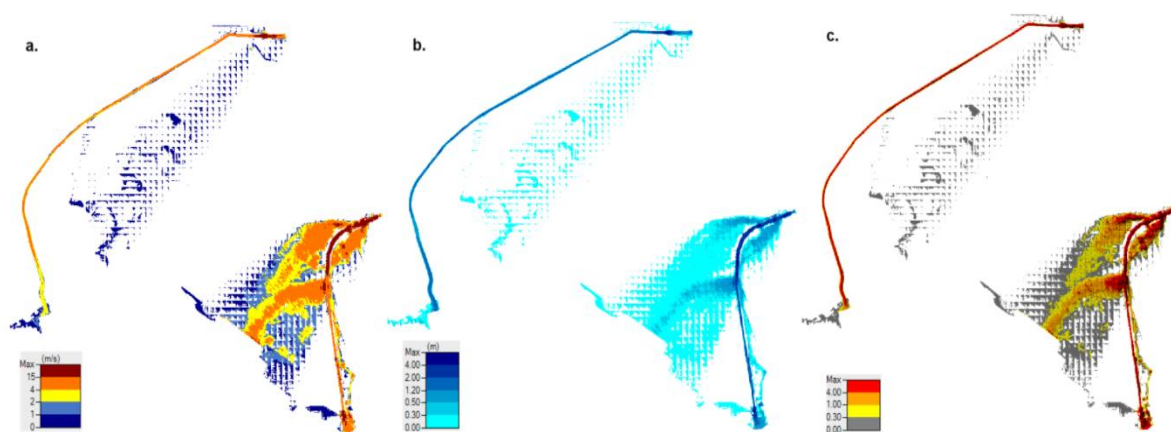
προσομοίωση αρχικά γίνεται μόνο για την αλλαγή του υδρογραφήματος, κρατώντας σταθερά τις τιμές τραχύτητας Manning και την ανάλυση τοπογραφίας 5m x 5m. Έπειτα, παρουσιάζεται το πως η αλλαγή σε δεδομένα τραχύτητας Manning του 2023 αλλάζει την απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

a. Χρόνος άφιξης

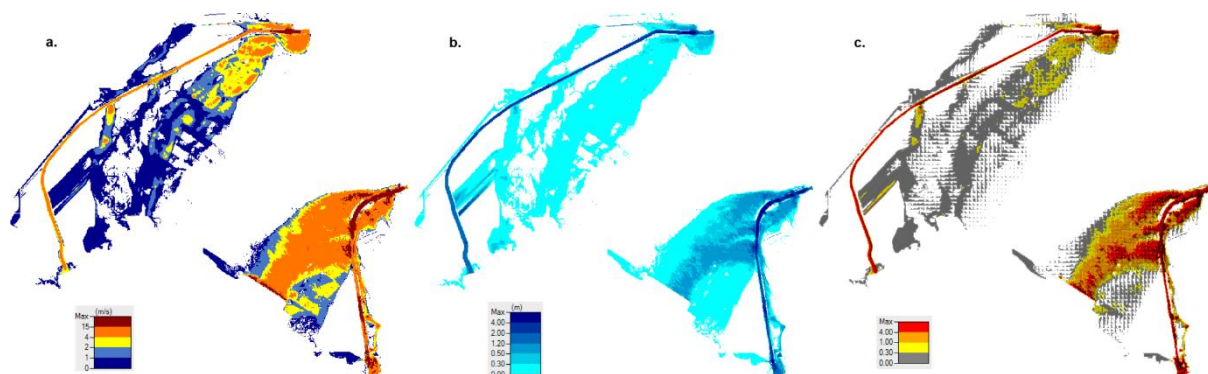
Για τη μεγαλύτερη έκταση του αρχικού μας πλημμυρικού μοντέλου υπολογίζεται πως ο χρόνος άφιξης της πλημμυρικής αιχμής κυμαίνεται στις 6 - 8 ώρες μετά την έναρξη του πλημμυρικού επεισοδίου. Μετά την αλλαγή του υδρογραφήματος το μεγαλύτερο ποσοστό πλημμυρισμένης έκτασης παίρνει την μέγιστη τιμή κατάκλισης μετά από 8 – 10 ώρες. Το σημείο που πλημμυρίζει πιο σύντομα από όλα βρίσκεται στην αρχή του ποταμού Κραυσίδωνα και ενώ στο αρχικό μοντέλο η μέγιστη κατάκλιση δεν συμβαίνει για έως και 5 ώρες και 30 λεπτά μετά την αρχή της προσομοίωσης, στο καινούριο μοντέλο η μέγιστη τιμή έρχεται μετά από 3 ώρες.

b. Επικινδυνότητα

Χωρίζοντας τον χάρτη επικινδυνότητας του καινούριου μοντέλου σε τέσσερις ομάδες H1, H2, H3, H4 σύμφωνα με τον Πίνακα 6, παρατηρούμε πως για τον χείμαρρο Κραυσίδωνα η περιοχή που έχει πλημμυρίσει είναι σημαντικά μεγαλύτερη και οι τιμές της ταχύτητας ροής έχουν αυξηθεί στο σημείο της υπερχειλίσης. Παράλληλα, στην περιοχή του χείμαρρου Άναυρου έχουμε σημαντική αύξηση των ταχυτήτων και των βαθών ροής, σε σημείο που ένα σημαντικό ποσοστό κατατάσσεται στις ομάδες H3 και H4. Παρατηρώντας τους χάρτες επικινδυνότητας του έτους 2017 το υδρογράφημα του 2023 φαίνεται να δημιουργεί πλημμύρα περιόδου επαναφοράς 100 ετών για μέσες συνθήκες CNII και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας Manning.



Εικόνα 31 Υδρογράφημα 2017: Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα



Εικόνα 32 Υδρογράφημα 2023: Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα

Πίνακας 14 Στατιστικά αποτελέσματα για μέγιστη ταχύτητα ροής

Υδρογράφημα	2017	2023
Ελάχιστη τιμή	0	0
Μέγιστη τιμή	49.5	36.14
Μέσο	0.23	0.31
Τυπική απόκλιση	0.80	0.92

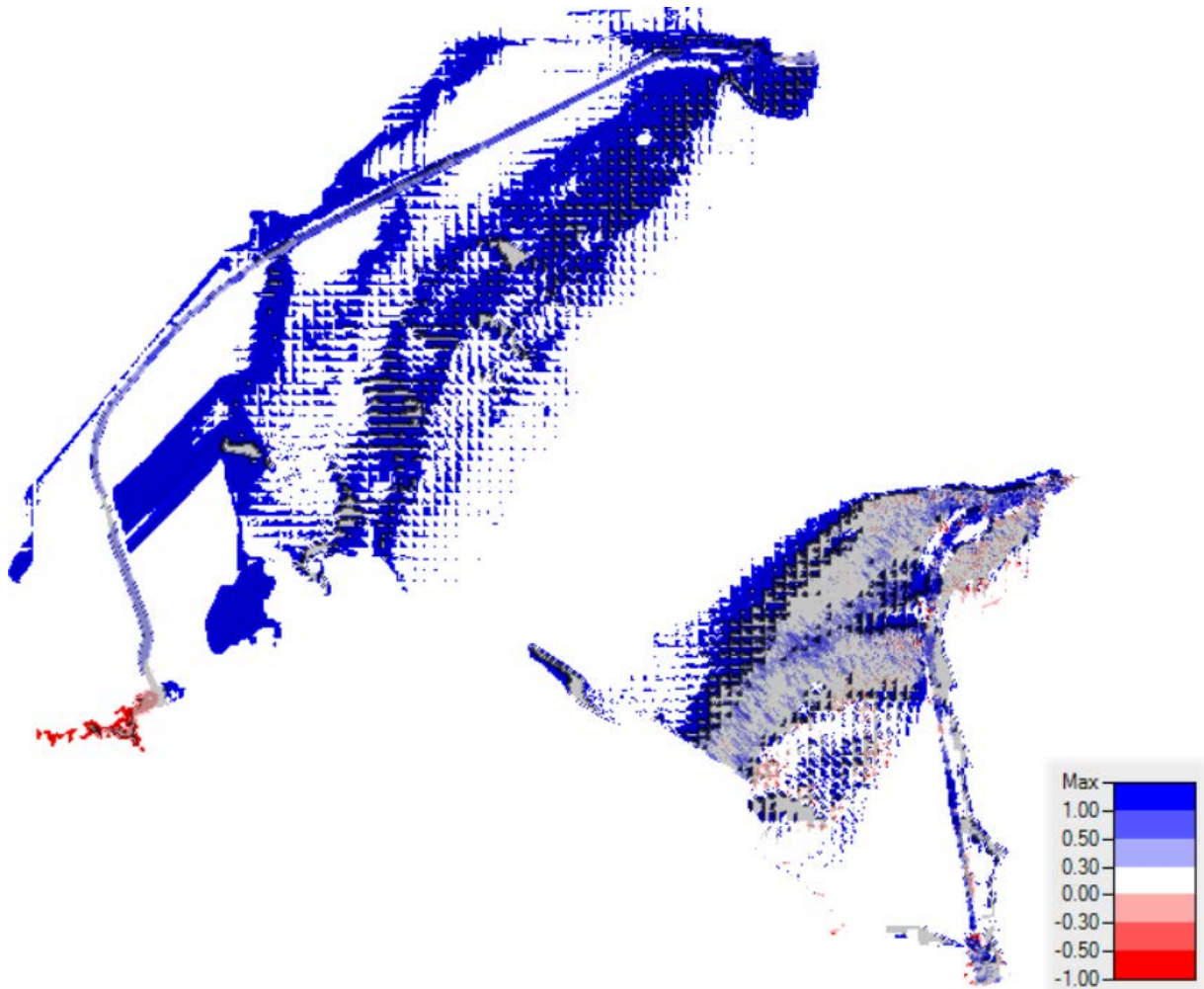
γ. Όρια κατάκλισης και βάθη ροής

Αυξάνοντας τον όγκο του υδρογραφήματος παρατηρούμε ότι η πλημμυρική έκταση επεκτείνεται. Στην Εικόνα 34. γ και Εικόνα 33, όπου φαίνονται τα όρια κατάκλισης και η διαφορά βάθους αντίστοιχα, είναι εμφανές πως για τον χείμαρρο Κραυσίδωνα τα όρια κατάκλισης έχουν αυξηθεί, ενώ για τον χείμαρρο Άναυρο δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές. Ωστόσο, συνολικά υπάρχει αύξηση τόσο στο μήκος (+33%) όσο και στην έκταση (+54%) σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 15.

Όσον αφορά τα βάθη ροής, τα στατιστικά στοιχεία δείχνουν αύξηση της μέγιστης τιμής, αλλά μείωση του μέσου και της τυπικής απόκλισης. Αυτό υποδεικνύει ότι, παρόλο που η πλημμυρική έκταση έχει διευρυνθεί, τα βάθη ροής διατηρούν χαμηλές τιμές στο μεγαλύτερο ποσοστό τους (0.30 – 0.50 μέτρα). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πλημμυρική έκταση του Κραυσίδωνα, η οποία εκτιμάται στα 1.500.000 m², παρουσιάζει μικρότερα βάθη σε σύγκριση με τη πλημμυρική έκταση του Αναύρου (800.000 m²), μειώνοντας έτσι το συνολικό μέσο βάθος του μοντέλου.

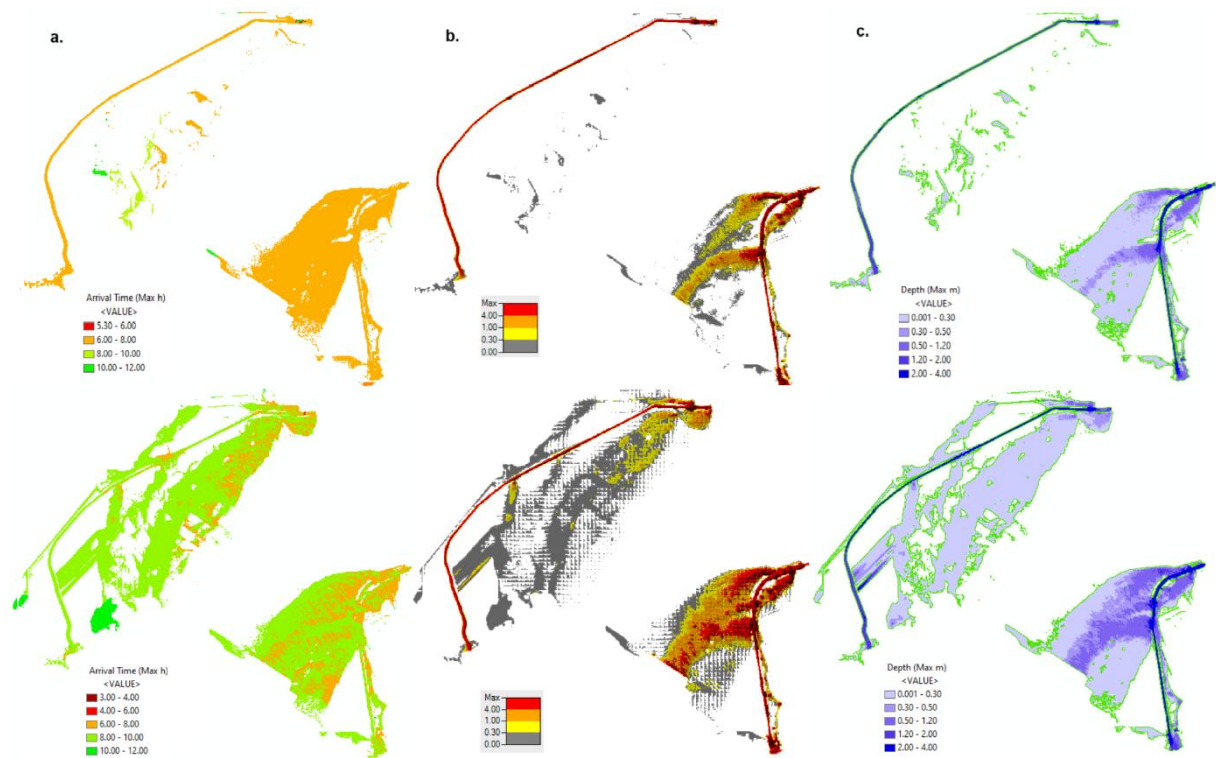
Πίνακας 15 Στατιστικά στοιχεία ανάλυσης μέγιστου βάθους ροής, υδρογραφημάτων 2017 και 2023

Υδρογραφήματα	2017	2023
Ελάχιστη τιμή	0.001	0.001
Μέγιστη τιμή	9.10	14.22
Μέσο	0.44	0.32
Τυπική απόκλιση	0.78	0.70
Μήκος (m)	55405.85	83343.21
Έκταση (m ²)	1062230.36	2387731.81



Εικόνα 33 Διαφορά βάθους ροής για υδρογραφήματα 2017 και 2023

Τέλος, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τον χρόνο άφιξης, την επικινδυνότητα και τα βάθη ροής μαζί με τα όρια κατάκλισης :



Εικόνα 34 Σύγκριση αποτελεσμάτων για αλλαγή των υδρογραφήματων σε αυτά του 2023 για: α. Χρόνος άφιξης, β. Επικινδυνότητα, γ. Όρια κατάκλισης

6.6 Επιρροή της αλλαγής του συντελεστή τραχύτητας

Σε αυτή την υποενότητα θα μελετήσουμε πως ο συντελεστής τραχύτητας ή αλλιώς η Manning επηρεάζει την προσομοίωση. Συγκεκριμένα, οι πίνακες με τις τιμές που έχουν χρησιμοποιηθεί δίνονται στην υποενότητα 5.1 και δημιουργήθηκαν από τα δεδομένα της Ευρωπαϊκής βάσης CORINE για τα έτη 2017 και 2023. Είναι εμφανές πως οι τιμές που χρησιμοποιούνται πλέον στην προσομοίωση έχουν αυξηθεί σε σχέση με τις τιμές του 2017. Παρακάτω αναλύεται πώς επηρεάζει αυτή η αλλαγή το καινούριο μας μοντέλο με ανάλυση 5m x 5m και υδρογράφημα του 2023.

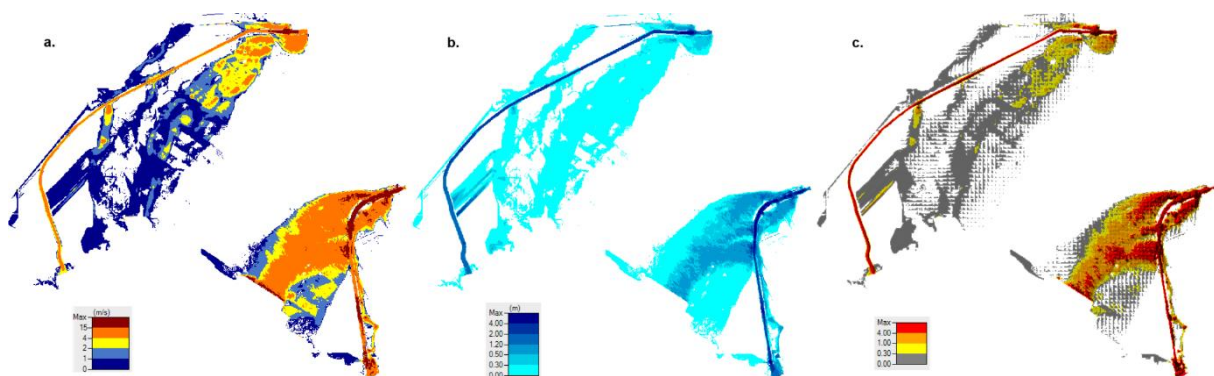
α. Χρόνος άφιξης

Και για τις δύο προσομοιώσεις το μεγαλύτερο ποσοστό βρεχόμενης έκτασης φτάνει στη μέγιστη τιμή κατάκλισης μετά από 8 – 10 ώρες. Το σημείο που πλημμυρίζει πιο σύντομα από όλα βρίσκεται στην αρχή του ποταμού Κραυσίδωνα και ενώ στο μοντέλο με τους μικρότερους συντελεστές πλημμυρίζει μετά από 3 ώρες, στο νέο μοντέλο η μέγιστη

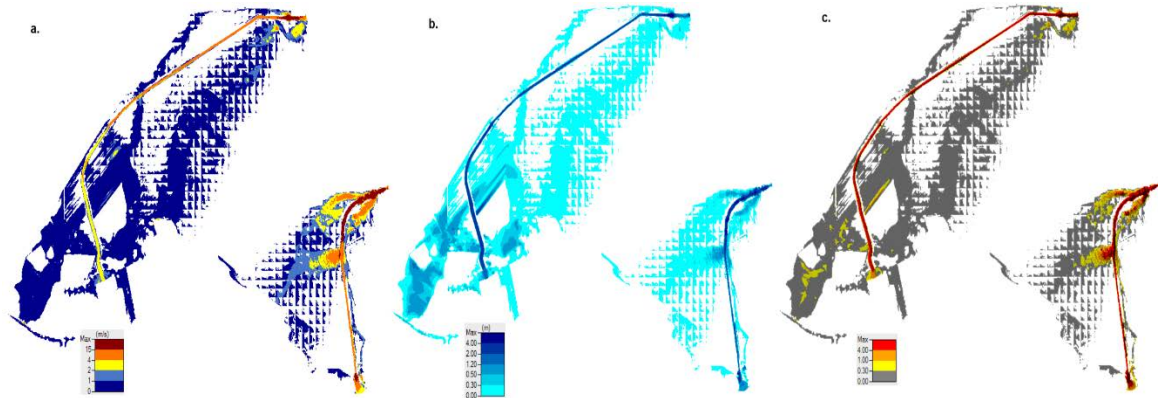
κατάκλιση συμβαίνει μετά από 2 ώρες και 30 λεπτά. Η διαφορά αυτή των 30 λεπτών δεν θεωρείται σημαντική καθώς μια υδραυλική προσομοίωση περιέχει σφάλμα αβεβαιότητας. Για παράδειγμα, σε πρόσφατη έρευνα (Fan et al., 2020) όπου υπολογίστηκαν οι χρόνοι άφιξης της μέγιστης ροής για ένα πλημμυρικό γεγονός τα τελικά αποτελέσματα περιέχουν μια αβεβαιότητα ± 30 λεπτών.

b. Επικινδυνότητα

Ο συντελεστής τραχύτητας Manning είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους στον υπολογισμό των υδραυλικών προσομοιώσεων, καθώς έχει άμεση και αντιστρόφως ανάλογη σχέση με τη ταχύτητα ροής. Επομένως, αυξάνοντας τον συντελεστή τραχύτητας στη νέα προσομοίωση, παρατηρούμε στην Εικόνα 30 ότι οι παραγόμενες ταχύτητες έχουν μειωθεί, γεγονός που οδηγεί σε ελάττωση τόσο των βαθών ροής όσο και της επικινδυνότητας. Σύμφωνα με τον Πίνακα 6 της υποενότητας 6.1, το μεγαλύτερο μέρος της βρεχόμενης περιοχής του Κραυσίδωνα μπορεί πλέον και καταταχθεί στην ομάδα H1, όπου δεν υπάρχει σημαντικός κίνδυνος λόγω της υπερχειλίσης του χειμάρρου. Το ίδιο παρατηρείται και για τον χείμαρρο Άναυρο, όπου πλέον στις ομάδες H2, H3 και H4 κατατάσσονται κυρίως οι περιοχές στα όρια της υπερχειλίσης. Τέλος, τα στατιστικά αποτελέσματα δείχνουν ότι, ενώ η μέγιστη τιμή της ταχύτητας ροής εμφανίζει μια μικρή αλλά αμελητέα αύξηση, οι συνολικές τιμές μειώνονται.



Εικόνα 35 Manning 2017: Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα



Εικόνα 36 Manning 2023: Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα

Πίνακας 16 Στατιστικά αποτελέσματα για μέγιστη ταχύτητα ροής

Manning	2017	2023
Ελάχιστη τιμή	0	0
Μέγιστη τιμή	36.14	36.80
Μέσο	0.31	0.23
Τυπική απόκλιση	0.92	0.80

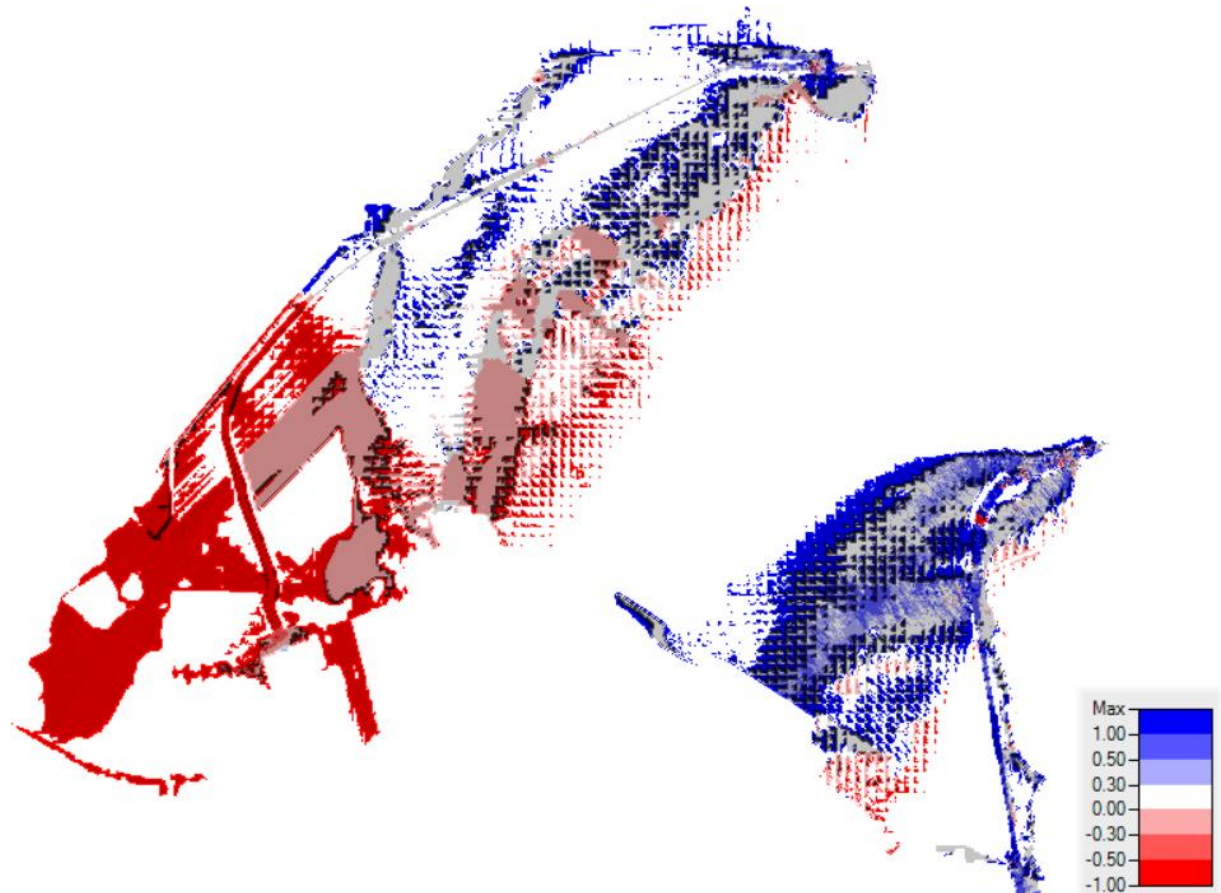
c. Όρια κατάκλισης

Αυξάνοντας τον συντελεστή τραχύτητας Manning, παρατηρούμε ότι η πλημμυρική έκταση αυξήθηκε κατά 15%, ενώ τα όρια κατάκλισης παρουσίασαν αύξηση 20%. Σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία, η μέγιστη τιμή του βάθους ροής έχει μειωθεί, ενώ στο μεγαλύτερο μέρος της βρεχόμενης έκτασης οι τιμές βάθους εξακολουθούν να κυμαίνονται στα 0.30 – 0.50 μέτρων.

Πίνακας 17 Στατιστικά στοιχεία ανάλυσης μέγιστου βάθους ροής, manning 2017 και 2023

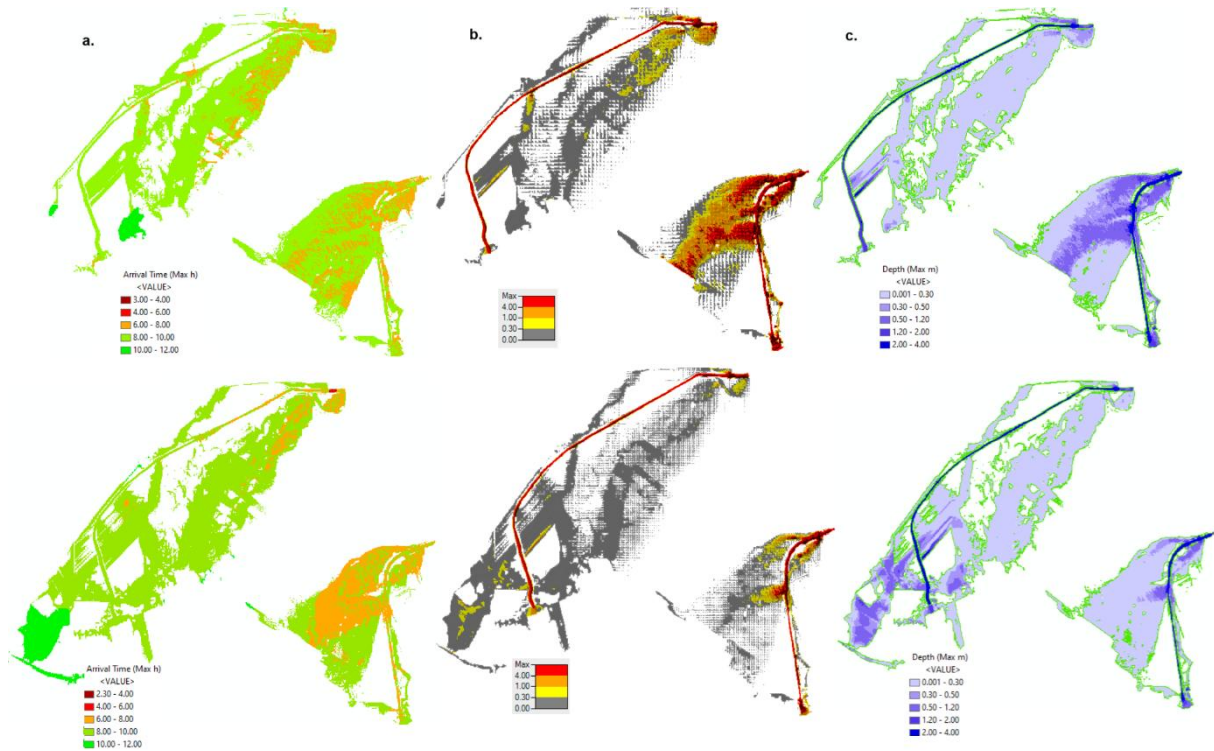
Manning	2017	2023
Ελάχιστη τιμή	0.001	0.001
Μέγιστη τιμή	14.22	8.30
Μέσο	0.32	0.27
Τυπική απόκλιση	0.70	0.62
Μήκος (m)	83343.21	105400.72
Έκταση (m ²)	2387731.81	2842415.89

Αφαιρώντας τα δύο αρχεία βάθους ροής στην Εικόνα 37, παρατηρούμε πως οι μπλε τιμές, που αντιστοιχούν στο μοντέλο με συντελεστές τραχύτητας του 2017, επικρατούν στην περιοχή του ποταμού Άναυρου. Παράλληλα, έχει σχηματιστεί μια νέα πλημμυρική έκταση νοτιοδυτικά του χειμάρρου Κραυσίδωνα, ενώ οι περιοχές στα βορειοανατολικά εμφανίζουν αυξημένα βάθη ροής για τους συντελεστές τραχύτητας του 2017.



Εικόνα 37 Διαφορά βάθους ροής για η Manning 2017 και 2023

Τέλος, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τον χρόνο άφιξης, την επικινδυνότητα και τα βάθη ροής μαζί με τα όρια κατάκλισης :



Εικόνα 38 Σύγκριση αποτελεσμάτων για αλλαγή συντελεστή η Manning 2023 για: α. Χρόνος άφιξης, β. Επικινδυνότητα, γ. Όρια κατάκλισης

6.7 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με χρήση δεδομένων στις βάσεις CORINE και ESRI

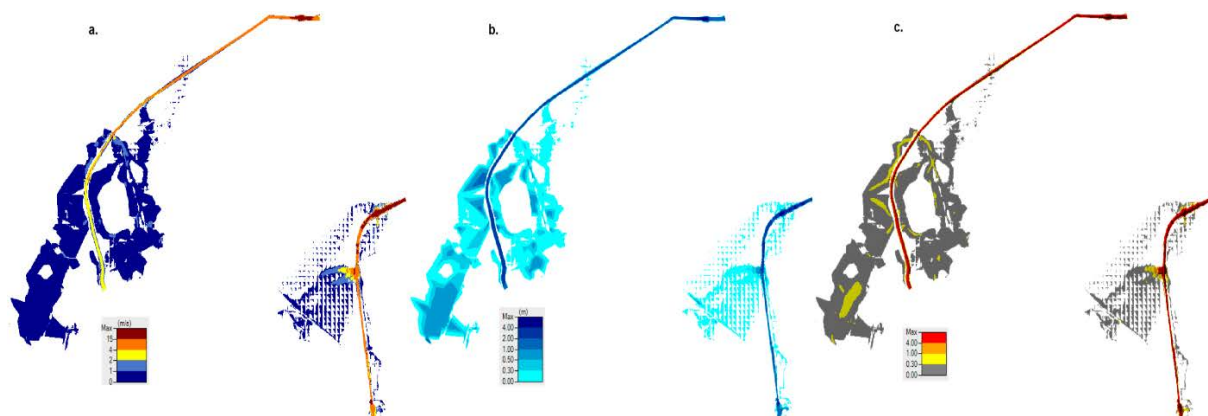
Σε αυτό το σημείο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα υδρογραφήματα του 2023, ανάλυση τοπογραφίας 2m x 2m, δεδομένα χρήσης γης και συντελεστή η Manning από την Ευρωπαϊκή βάση CORINE σε σύγκριση με τα δεδομένα χρήσης γης και συντελεστή τραχύτητας από την Αμερικανική βάση ESRI. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτές του Πίνακα 2 και Πίνακα 3 της υποενότητας 5.3.

a. Χρόνος άφιξης

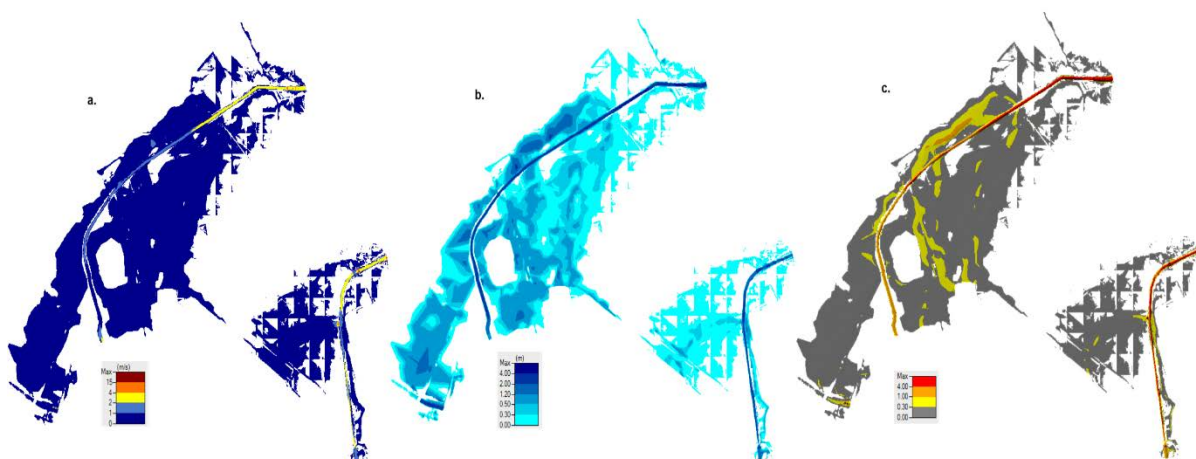
Για τη μεγαλύτερη έκταση και των δύο πλημμυρικών μοντέλων, ο χρόνος άφιξης της πλημμυρικής αιχμής υπολογίζεται στις 8 - 10 ώρες μετά την έναρξη του πλημμυρικού επεισοδίου.

b. Επικινδυνότητα

Αρχικά, παρατηρούμε πως και για τις δύο προσομοιώσεις δεν αναπτύσσονται ταχύτητες μεγαλύτερες του 1m/s στις πλημμυρικές περιοχές του Κραυσίδωνα και του Άναυρου. Στις κοίτες των ποταμών αναπτύσσονται μεγαλύτερες ταχύτητες για δεδομένα της βάσης CORINE καθώς υπάρχει αλλαγή του συντελεστή τραχύτητας κατά μήκος των ποταμών. Η μικρή ταχύτητα που αναπτύσσεται στις πλημμυρικές περιοχές σε συνδυασμό με σχετικά χαμηλά ύψη ροής έχουν σαν αποτέλεσμα να μην δημιουργείται κίνδυνος λόγω της πλημμύρας. Βλέπουμε, λοιπόν, πως μεγάλο μέρος και των δύο προσομοιώσεων κατατάσσεται στην ομάδα H1, σύμφωνα με τον Πίνακα 7. Τέλος, περιοχές που κατατάσσονται στην ομάδα H2 βρίσκονται κοντά στο ποτάμι, ενώ στις ομάδες H3 και H4 βρίσκονται οι κοίτες των ποταμών.



Εικόνα 39 Δεδομένα CORINE: Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα



Εικόνα 40 Δεδομένα ESRI: Μέγιστη ταχύτητα ροής, b. Μέγιστο βάθος και c. Επικινδυνότητα

Πίνακας 18 Στατιστικά αποτελέσματα για μέγιστη ταχύτητα ροής

Βάση δεδομένων	CORINE	ESRI
Ελάχιστη τιμή	0	0
Μέγιστη τιμή	52.52	4.75
Μέσο	1.23	0.41
Τυπική απόκλιση	1.76	0.58

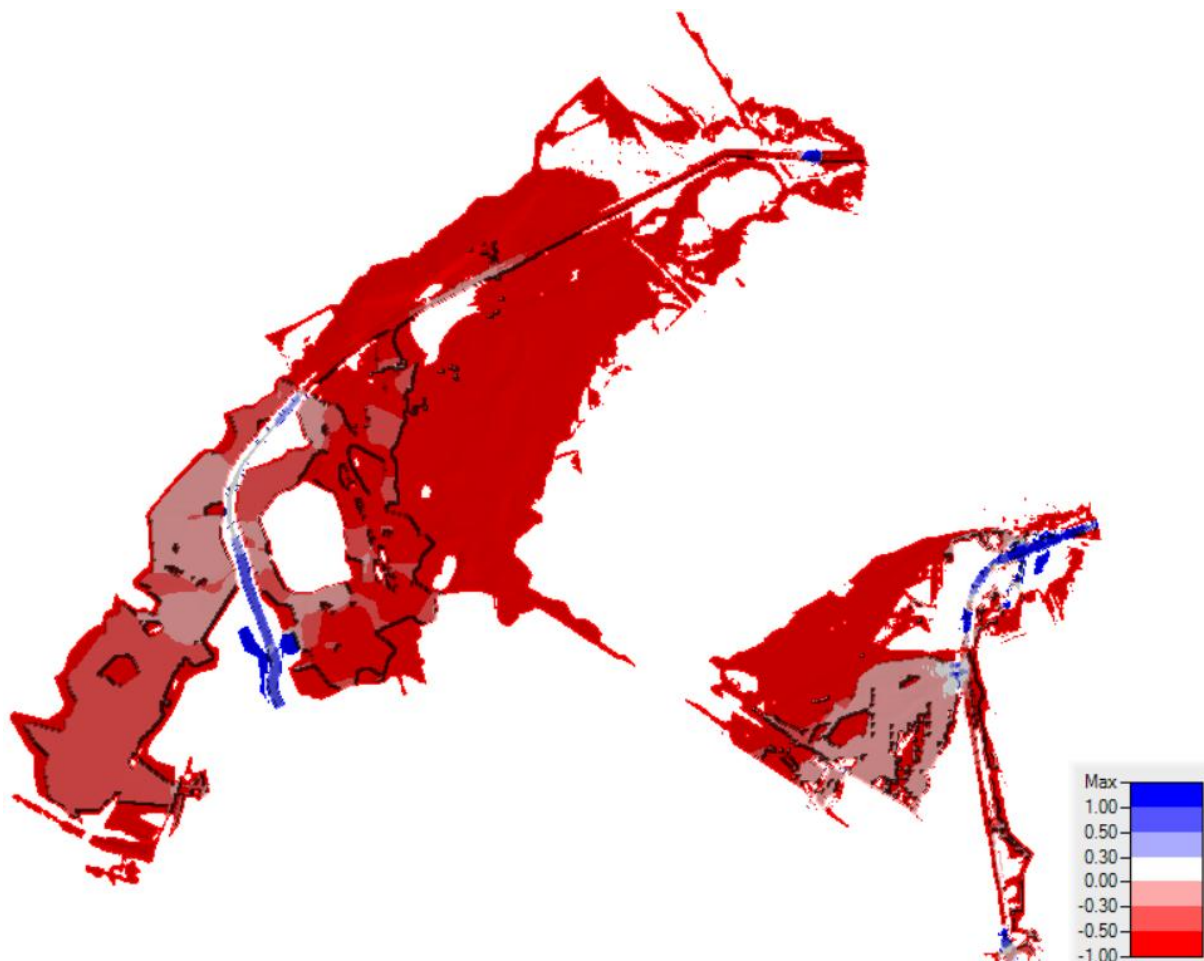
γ. Όρια κατάκλισης

Όσον αφορά τα όρια κατάκλισης η διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα είναι σημαντική. Συγκεκριμένα, από τον Πίνακα 19 υπολογίζεται ότι τα αποτελέσματα της βάσης δεδομένων ESRI δίνουν 34% αύξηση στο μήκος και 61% αύξηση στην έκταση της πλημμυρική περιοχής. Αυτό συμβαίνει επειδή, όπως μπορούμε να δούμε στην Εικόνα 11 και Εικόνα 12 της υποενότητας 5.3, τα δεδομένα χρήσης γης της βάσης CORINE είναι χωρισμένα σε περισσότερες και πιο λεπτομερείς κλάσεις με αποτέλεσμα να υπάρχει καλύτερη αναπαράσταση στην προσομοίωση των συντελεστών τραχύτητας. Τα δεδομένα χρήσης γης και οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας της βάσης CORINE στην μελέτη αυτή δίνουν μια καλύτερη αναπαράσταση του εδάφους, καθώς προέρχονται από Ευρωπαϊκή βάση όπου πιθανός έχει γίνει καλύτερη μελέτη για την περιοχή του Βόλου.

Πίνακας 19 Στατιστικά στοιχεία ανάλυσης μέγιστου βάθους ροής, με δεδομένα χρήσης γης και η Manning CORINE και ESRI

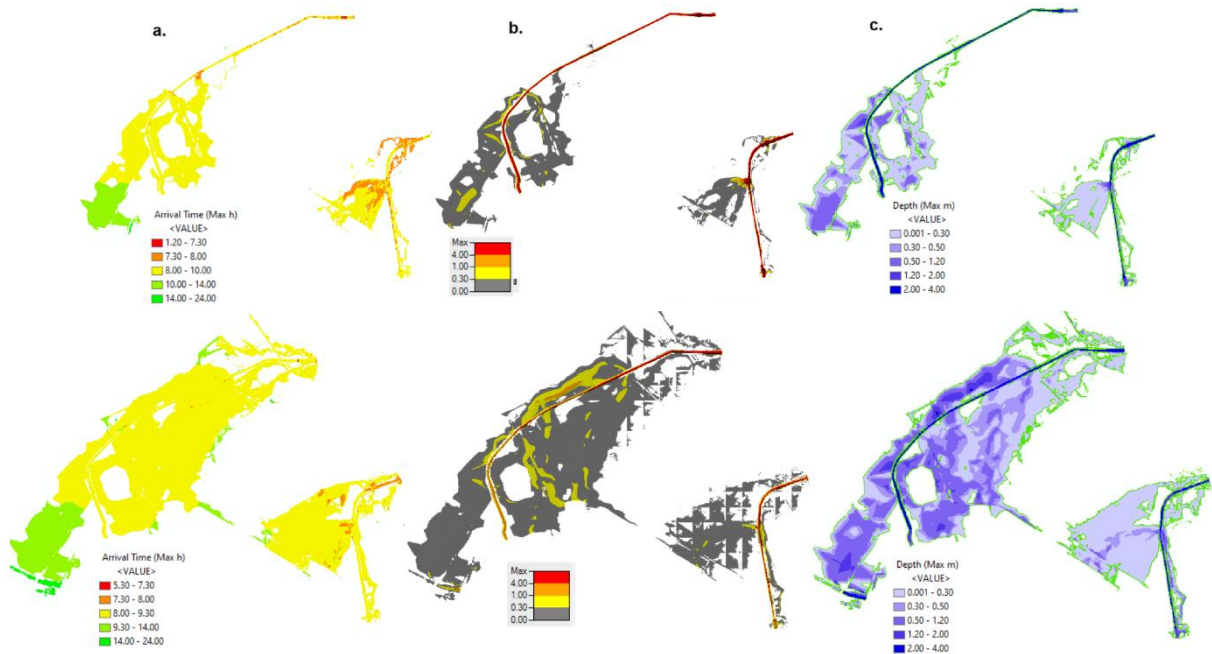
Βάση δεδομένων	CORINE	ESRI
Ελάχιστη τιμή	0.001	0.001
Μέγιστη τιμή	18.21	5.00
Μέσο	0.48	0.46
Τυπική απόκλιση	0.78	0.58
Μήκος (m)	59919.97	91707.51
Έκταση (m ²)	1335880.61	3457724.97

Με χρήση του εργαλείου raster calculator, έχει υπολογιστεί στην Εικόνα 41 η διαφορά στα βάθη ροής των δύο μοντέλων. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η έκταση κατάκλισης για δεδομένα της βάσης ESRI ενώ με μπλε χρώμα για τα δεδομένα της βάσης CORINE 2023.



Εικόνα 41 Διαφορά βάθους ροής για δεδομένα CORINE και ESRI

Τέλος, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τον χρόνο άφιξης, την επικινδυνότητα και τα βάθη ροής μαζί με τα όρια κατάκλισης :



Εικόνα 42 Σύγκριση αποτελεσμάτων για αλλαγή βάσης δεδομένων CORINE και ESRI για: α. Χρόνος άφιξης, β. Επικινδυνότητα, γ. Όρια κατάκλισης

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη διερευνά τον τρόπο με τον οποίο η ανάλυση της τοπογραφίας και των δεδομένων κάλυψης γης επηρεάζουν τις προσομοιώσεις ενός διδιάστατου υδροδυναμικού μοντέλου που αναπτύχθηκε στο λογισμικό HEC-Ras για την αστική πλημμύρα της περιοχής της πόλης του Βόλου. Τα αποτελέσματα των χωρικών και στατιστικών αναλύσεων των προσομοιώσεων του μοντέλου μπορούν να συνοψιστούν σε τρία βασικά σημεία:

1. Η προσομοίωση των κτιρίων ως αδιαπέραστη επιφάνεια μπορεί να δώσει μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση ενός πλημμυρικού επεισοδίου
2. Η ανάλυση της τοπογραφίας δεν πρέπει να είναι χαμηλότερη από 2m x 2m. Σε περίπτωση μικρότερης ανάλυσης υπάρχει κίνδυνος υποεκτίμησης των αποτελεσμάτων.
3. Οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας n Manning πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά και ενδεχομένως να λαμβάνεται δείγμα πεδίου για την σωστότερη απεικόνιση της πλημμυρικής έκτασης.

Λαμβάνοντας υπόψιν την ισορροπία μεταξύ κόστους απόκτησης δεδομένων και χρονικής αποδοτικότητας, ο καθορισμός των καλύτερων δεδομένων εισόδου και η ανάλυση πλέγματος είναι κρίσιμα για την παραγωγή αξιόπιστων, αν όχι απολύτως ακριβών, προσομοιώσεων πλημμύρας με τη χρήση ενός διδιάστατου μοντέλου προσομοίωσης. Αν και η παρούσα μελέτη επιδιώκει να δώσει μια αρχική απάντηση σχετικά με τις ελάχιστες απαιτούμενες αναλύσεις ψηφιακού μοντέλου επιφάνειας και δεδομένων κάλυψης γης για τη διαμόρφωση ενός μοντέλου HEC-Ras για αξιόπιστη προσομοίωση αστικών πλημμυρών, απαιτείται περαιτέρω έρευνα. Οι έρευνες αυτές θα πρέπει να στοχεύουν στη βελτίωση της ακρίβειας των εκτιμήσεων για την έκταση κατάκλισης και τη ταχύτητα ροής, ενσωματώνοντας παράλληλα την ευαισθησία του μοντέλου στους καθορισμένους συντελεστές τραχύτητας της επιφάνειας.

Βιβλιογραφία

- Alzahrani, A. S. (2017). *APPLICATION OF TWO-DIMENSIONAL HYDRAULIC MODELING IN RIVERINE SYSTEMS USING HEC-RAS*.
<https://www.researchgate.net/publication/331984335>
- Bomers, A., Schielen, R. M. J., & Hulscher, S. J. M. H. (2019). The influence of grid shape and grid size on hydraulic river modelling performance. *Environmental Fluid Mechanics*, 19(5), 1273–1294. <https://doi.org/10.1007/s10652-019-09670-4>
- Ciampa, F., Seifollahi-Aghmiuni, S., Kalantari, Z., & Ferreira, C. S. S. (2021). Flood mitigation in mediterranean coastal regions: Problems, solutions, and stakeholder involvement. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 18). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/su131810474>
- Costabile, P., Costanzo, C., & Macchione, F. (2017). Performances and limitations of the diffusive approximation of the 2-d shallow water equations for flood simulation in urban and rural areas. *Applied Numerical Mathematics*, 116, 141–156.
<https://doi.org/10.1016/j.apnum.2016.07.003>
- Department of Planning and Environment Flood Hazard. (2022). *Flood Risk Management Guide FB03 environment.nsw.gov.au*. www.environment.nsw.gov.au
- EKTHESH-AYTOPSIAS-BOLOS-PHLIO. (n.d.).
- Fan, X., Yang, F., Siva Subramanian, S., Xu, Q., Feng, Z., Mavrouli, O., Peng, M., Ouyang, C., Jansen, J. D., & Huang, R. (2020). Prediction of a multi-hazard chain by an integrated numerical simulation approach: the Baige landslide, Jinsha River, China. *Landslides*, 17(1), 147–164. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01313-5>
- HEC-RAS 2D User's Manual. (2024).

- HR Wallingford. (2006). *Defra /Environment Agency Flood and Coastal Defence R&D Programme Flood Risks to People Phase 2 FD2321/TR2 Guidance Document*. www.defra.gov.uk/envIRON/fcd
- Huang, M., & Jin, S. (2019). A methodology for simple 2-D inundation analysis in urban area using SWMM and GIS. *Natural Hazards*, 97(1), 15–43. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03623-2>
- Jiri Blazek. (2015). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*.
- Lazzarin, T., Chen, A. S., & Viero, D. P. (2024). Beyond flood hazard. Mapping the loss probability of pedestrians to improve risk estimation and communication. *Science of the Total Environment*, 912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168718>
- meteoblue. (2024). *Κλιματική αλλαγή Βόλος*. https://www.meteoblue.com/el/climate-change/%ce%92%cf%8c%ce%bb%ce%bf%cf%82_%ce%95%ce%bb%ce%bb%ce%ac%ce%b4%ce%b1_251833
- Papaioannou, G., Efstratiadis, A., Vasiliades, L., Loukas, A., Papalexiou, S. M., Koukouvinos, A., Tsoukalas, I., & Kossieris, P. (2018). An operational method for Flood Directive implementation in ungauged urban areas. *Hydrology*, 5(2). <https://doi.org/10.3390/hydrology5020024>
- Santos, P. P., Pereira, S., Zêzere, J. L., Reis, E., Oliveira, S. C., Garcia, R. A. C., & Ferreira, T. M. (2024). Understanding flood risk in urban environments: spatial analysis of building vulnerability and hazard areas in the Lisbon metropolitan area. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06731-w>
- Tascón-González, L., Ferrer-Julià, M., Ruiz, M., & García-Meléndez, E. (2020). Social vulnerability assessment for flood risk analysis. *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020558>
- Tegos, A., Ziogas, A., Bellos, V., & Tzimas, A. (2022). Forensic Hydrology: A Complete Reconstruction of an Extreme Flood Event in Data-Scarce Area. *Hydrology*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/hydrology9050093>
- Yalcin, E. (2020). Assessing the impact of topography and land cover data resolutions on two-dimensional HEC-RAS hydrodynamic model simulations for urban flood hazard

analysis. *Natural Hazards*, 101(3), 995–1017. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03906-z>

Σαρρής, Ι., Καρβέλας, Ε., & Σοφιάδης, Γ. (2024). *Υπολογιστική Ρευστοδυναμική [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

Παράρτημα Α

1ο επίπεδο	2ο επίπεδο	3ο επίπεδο
1. ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙ ΕΣ	1.1 ΑΣΤΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ	1.1.1 Συνεχής αστικός ιστός
		1.1.2 Ασυνεχής αστικός ιστός
	1.2 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ- ΕΜΠΟΡΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ	1.2.1 Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες
		1.2.2 Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα
		1.2.3 Ζώνες λιμένων
		1.2.4 Αεροδρόμια
	1.3 ΟΡΥΧΕΙΑ, ΧΩΡΟΙ ΑΠΟΡΡΙΨΕΩΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΧΩΡΟΙ ΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗΣ	1.3.1 Χώροι εξορύξεως ορυκτών
		1.3.2 Χώροι απορρίψεως απορριμμάτων
		1.3.3 Χώροι οικοδόμησης
	1.4 ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΜΗ ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΠΡΑΣΙΝΟΥ	1.4.1 Περιοχές αστικού πρασίνου
		1.4.2 Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής
2. ΓΕΩΡΓΙΚΕ Σ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	2.1 ΑΡΩΣΙΜΗ ΓΗ	2.1.1 Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη
		2.1.3 Ορυζώνες
	2.2 ΜΟΝΙΜΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ	2.2.1 Αμπελώνες
		2.2.2 Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς
		2.2.3 Ελαιώνες
		2.3.1 Λιβάδια
	2.4 ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	2.4.1 Ετήσιες καλλιέργειες που σχετίζονται με μόνιμες καλλιέργειες
		2.4.2 Σύνθετες καλλιέργειες
		2.4.3 Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης
		2.4.4 Γεωργο-δασικές περιοχές
3. ΔΑΣΗ ΚΑΙ ΗΜΙΦΥΣΙΚ ΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	3.1 ΔΑΣΗ	3.1.1 Δάσος πλατύφυλλων
		3.1.2 Δάσος κωνοφόρων
		3.1.3 Μικτό δάσος
		3.2.1 Φυσικοί βοσκότοποι
	3.2 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΘΑΜΝΩΔΟΥΣ Η/ΚΑΙ ΠΟΩΔΟΥΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ	3.2.2 Θάμνοι και χερσότοποι
		3.2.3 Σκληροφυλλική βλάστηση
		3.2.4 Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις
		3.3.1 Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές
	3.3 ΑΝΟΙΧΤΟΙ ΧΩΡΟΙ ΜΕ ΛΙΓΗ Ή ΚΑΘΟΛΟΥ ΒΛΑΤΗΣΗ	3.3.2 Απογυμνωμένοι βράχοι
		3.3.3 Εκτάσεις με αραιή βλάστηση
		3.3.4 Αποτεφρωμένες εκτάσεις
		3.3.5 Παγετώνες και αέναςο χιόνι
		4.1.1 Βάλτοι στην ενδοχώρα
4. ΥΓΡΟΤΟΠ ΟΙ	4.1 ΥΓΡΟΤΟΠΟΙ ΕΝΔΟΧΩΡΑΣ	4.1.2 Τυρφώνες
	4.2 ΠΑΡΑΘΑΛΑΣΣΙΟΙ ΤΓΡΟΤΟΠΟΙ	4.2.1 Παραθαλάσσιοι βάλτοι
		4.2.2 Αλυκές
		4.2.3 Ζώνες που καλύπτονται από παλιρροιακά ύδατα
5. ΥΔΑΤΙΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙ ΕΣ	5.1 ΧΕΡΣΑΙΑ ΥΔΑΤΑ	5.1.1 Υδατορρέυματα
		5.1.2 Επιφάνειες στάσιμου ύδατος
	5.2 ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΥΔΑΤΑ	5.2.1 Παράκτιες λιμνοθάλασσες
		5.2.2 Εκβολές ποταμών
		5.2.3 Θάλασσες και ωκεανοί

	τιμή n Manning	Περιγραφή
11	0.025 - 0.05	Ανοιχτά ύδατα - περιοχές ανοιχτών υδάτων, γενικά με λιγότερο από 25% κάλυψη βλάστησης ή εδάφους. Για φυσικά ρέματα σε ήπιες έως μέτριες πλαγιές.
12	n/a	Πολυετής πάγος/Χιόνι - περιοχές που χαρακτηρίζονται από πολυετή κάλυψη πάγου και/ή χιονιού, γενικά μεγαλύτερη από το 25% της συνολικής κάλυψης.
21	0.03 - 0.05	Αναπτυγμένος, Ανοιχτός Χώρος - περιοχές με μείγμα ορισμένων κατασκευών, αλλά κυρίως βλάστηση με τη μορφή χόρτων. Οι αδιαπέραστες επιφάνειες ανηπρωσωπεύουν λιγότερο από το 20% της συνολικής κάλυψης. Αυτές οι περιοχές περιλαμβάνουν συνήθως πολυκατοικίες, μονοκατοικίες, πάρκα, γήπεδα και βλάστηση που φυτεύεται σε ανεπτυγμένους χώρους για αναψυχή, διαβρωτικό έλεγχο ή αισθητικούς σκοπούς.
22	0.06 - 0.12	Αναπτυγμένες, Χαμηλής Έντασης - περιοχές με μείγμα κατασκευών και βλάστησης. Οι αδιαπέραστες επιφάνειες ανηπρωσωπεύουν το 20% έως 49% της εκατό της συνολικής κάλυψης. Αυτές οι περιοχές περιλαμβάνουν συνήθως μονοκατοικίες.
23	0.08 - 0.16	Αναπτυγμένες, Μέσης Έντασης -περιοχές με μείγμα κατασκευών και βλάστησης. Οι αδιαπέραστες επιφάνειες αποτελούν το 50% έως 79% της συνολικής κάλυψης. Αυτές οι περιοχές περιλαμβάνουν συνήθως μονοκατοικίες.
24	0.12 - 0.20	Αναπτυγμένες περιοχές υψηλής έντασης -υψηλά ανεπτυγμένες περιοχές όπου κατοικούν ή εργάζονται σε μεγάλους αριθμούς. Παραδείγματα περιλαμβάνουν συγκροτήματα διαμερισμάτων, πολυκατοικίες και εμπορικά/βιομηχανικά. Οι αδιαπέραστες επιφάνειες αποτελούν το 80% έως 100% της συνολικής κάλυψης.
31	0.023 - 0.030	Άγονη γη (Βράχος/Άμμος/Άργιλος) - περιοχές με βράχο, έρημο, σκάρπες, ηφαιστειακό υλικό, συντρίμια παγετώνων, αμμόλοφους, ορυχεία λωρίδων, χαλίκια και άλλες συσσωρεύσεις χωμάτινου υλικού. Γενικά, η βλάστηση ανηπρωσωπεύει λιγότερο από το 15% της συνολικής κάλυψης.
41	0.10 - 0.20	Φυλλοβόλα Δάση - εκτάσεις στις οποίες κυριαρχούν δέντρα γενικά με ύψος μεγαλύτερο από 5 μέτρα και μεγαλύτερο από το 20% της συνολικής βλάστησης. Περισσότερο από το 75% των ειδών δέντρων ρίχνει το φύλλωμα ταυτόχρονα με την εποχική αλλαγή.
42	0.08 - 0.16	Αειθαλές Δάσος - περιοχές όπου κυριαρχούν δέντρα γενικά με ύψος μεγαλύτερο από 5 μέτρα και μεγαλύτερο από το 20% της συνολικής βλάστησης. Πάνω από το 75% των ειδών δέντρων διατηρούν τα φύλλα τους όλο το χρόνο. Η περιοχή δεν μένει χωρίς πράσινο φύλλωμα.
43	0.08 - 0.20	Μικτά Δάση - εκτάσεις στις οποίες κυριαρχούν δέντρα γενικά με ύψος μεγαλύτερο από 5 μέτρα και μεγαλύτερο από το 20% της συνολικής βλάστησης. Ούτε τα φυλλοβόλα ούτε τα αειθαλή είδη υπερβαίνουν το 75% της συνολικής δενδροκάλυψης.
52	0.07 - 0.16	Θάμνοι - περιοχές όπου κυριαρχούν θάμνοι λιγότερο από 5 μέτρα ύψος με θάμνους τυπικά σε ποσοστό μεγαλύτερο του 20% της συνολικής περιοχής. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει αληθινούς θάμνους, νεαρά δέντρα σε πρώιμο στάδιο.
71	0.025 - 0.05	Λιβάδια/Ποώδη - εκτάσεις στις οποίες κυριαρχεί η γραμνοειδής ή ποώδης βλάστηση, γενικά μεγαλύτερη από το 80% της συνολικής βλάστησης.
81	0.025 - 0.05	Βοσκότοποι/ Σανό - εκτάσεις με χόρτα, ψυχανθή ή μείγματα γρασιδιού-όσπριων που φυτεύονται για βοσκή ζώων ή για την παραγωγή σπόρων ή καλλιεργειών σανού, συνήθως σε πολυετή κύκλο. Η βλάστηση βοσκοτόπων/σανού ανηπρωσωπεύει περισσότερο από το 20% της συνολικής βλάστησης.
82	0.020 - 0.05	Καλλιεργημένες Καλλιέργειες -περιοχές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ετήσιων καλλιεργειών, όπως καλαμπόκι, σόγια, λαχανικά, καπνός και βαμβάκι, καθώς και πολυετείς ξυλώδεις καλλιέργειες όπως οπωρώνες και αμπελώνες. Η φυτική βλάστηση ανηπρωσωπεύει περισσότερο από το 20% της συνολικής βλάστησης. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει επίσης όλη τη γη που καλλιεργείται ενεργά.
90	0.045 - 0.15	Ξυλώδεις υγρότοποι - περιοχές όπου η δασική ή θαμνώδης βλάστηση ανηπρωσωπεύει περισσότερο από το 20% της φυτικής κάλυψης και το έδαφος ή το υπόστρωμα περιοδικά καλύπτεται με νερό.