



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΤΙΚΗ ΖΩΝΗ ΤΟΥ ΧΕΙΜΑΡΡΟΥ ΚΡΑΥΣΙΔΩΝΑ
ΤΗΣ ΠΟΛΗΣ ΤΟΥ ΒΟΛΟΥ

ΑΣΑΡΙΔΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Επιβλέποντες Καθηγητές:
Καθ. Αθανάσιος Λουκάς
Δρ. Λάμπρος Βασιλειάδης

Βόλος, Οκτώβριος 2017

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΤΙΚΗ ΖΩΝΗ ΤΟΥ ΧΕΙΜΑΡΡΟΥ ΚΡΑΥΣΙΔΩΝΑ
ΤΗΣ ΠΟΛΗΣ ΤΟΥ ΒΟΛΟΥ

Διπλωματική εργασία

του

Ασαρίδη Παναγιώτη

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Καθ. Αθανάσιος Λουκάς

Δρ. Λάμπρος Βασιλειάδης

Βόλος, Οκτώβριος 2017

Περίληψη

Οι πλημμύρες είναι ακραία φυσικά φαινόμενα τα οποία είναι δύσκολο να προληφθούν. Έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στους αποδέκτες τους και διακρίνονται σε ποτάμιες πλημμύρες, στιγμιαίες πλημμύρες, αστικές πλημμύρες και παράκτιες πλημμύρες. Οι αστικές πλημμύρες είναι οι πιο συχνές και δαπανηρές φυσικές καταστροφές, λόγω των ανθρώπινων απωλειών και των οικονομικών ζημιών που προκαλούν. Η αυξητική τους τάση, λόγω κλιματικών αλλαγών, είχε ως αποτέλεσμα την εφαρμογή οδηγίας διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας.

Η παρούσα εργασία αποτελεί μία ολοκληρωμένη μελέτη της επικινδυνότητας της πλημμύρας σε αστική περιοχή. Η εφαρμογή της έγινε στον χειμάρρο Κραυσίδανα που βρίσκεται στην πόλη του Βόλου, του νομού Μαγνησίας, στην κεντρική Ελλάδα. Ο σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι διπλός. Πρώτον, η υδραυλική μοντελοποίηση της πλημμύρας για την αστική περιοχή και η ανάλυση της ευαισθησίας του μοντέλου προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι αβεβαιότητες. Δεύτερον, η εκπόνηση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας στα πλαίσια εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60/EK.

Οι πλημμύρες χαρακτηρίζονται από την πιθανότητα εμφάνισης τους μέσα σε ένα χρονικό διάστημα, η οποία αποδίδεται με τον όρο περίοδο επαναφοράς. Στην παρούσα εργασία η υδραυλική προσομοίωση της ροής του χειμάρρου έγινε για σενάρια με περιόδους επαναφοράς $T=50$, $T=100$ και $T=1000$ έτη. Για κάθε σενάριο παρατίθενται στοιχεία έκτασης της πλημμύρας και στοιχεία χωρικών κατανομών του βάθους νερού και της ταχύτητας ροής. Η διάδοση της πλημμύρας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και πιο συγκεκριμένα από τις χρήσεις γης, την ικανότητα διήθησης και την μορφολογία του εδάφους. Η μοντελοποίηση της πλημμύρας έγινε σε δύο διαστάσεις, το λογισμικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το HEC-RAS, ενώ η δημιουργία του ομοιώματος του χειμάρρου από ψηφιακά γεωγραφικά δεδομένα και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων έγινε σε περιβάλλον ArcGIS. Για να εξετασθούν οι αβεβαιότητες της μοντελοποίησης, έγινε ανάλυση της ευαισθησίας των αρχικών συνθηκών υγρασίας και των συντελεστών τραχύτητας. Οι αρχικές συνθήκες υγρασίας χωρίστηκαν σε τρεις κατηγορίες βάση της μεθόδου που ανέπτυξε η SCS. Αποτέλεσμα, ήταν η εκπόνηση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας για είκοσι επτά σενάρια.

Λέξεις κλειδιά: Πλημμύρες, Οδηγία 2007/60/EK, Υδραυλική προσομοίωση, Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας, Επιφάνεια κατάκλυσης, Συνθήκες υγρασίας, Συντελεστές τραχύτητας

Abstract

Floods are extreme natural phenomena that are difficult to prevent. They have an adverse impact on their recipients and they are distinguished in river floods, flash floods, urban floods and coastal floods. Urban floods are the most frequent and costly natural disasters due to the human losses and financial damage they cause. Their increasing trend, due to climate change, has resulted in a flood risk management directive.

This research is a comprehensive study of the risk of flooding in urban areas. Its implementation took place in the torrent Krausidonas, located in the city of Volos, in the prefecture of Magnesia, in central Greece. The purpose of the thesis is twofold. First, hydraulic flood modeling has been conducted for the urban area and has been complemented with sensitivity analysis of the model in order to cope with uncertainties. Second, flood hazard maps have been developed in the context of the implementation of Directive 2007/60/EC.

Floods are characterized by the possibility of occurring within a period of time, which is represented by a statistical return period term. In this study, the hydraulic simulation of river flow was done for scenarios with return periods $T=50$, $T=100$ and $T=1000$ years. Data of flood extent and data of spatial distribution of water depth and flow velocity are provided for each scenario. Flooding is dependent on the features of the study area, specifically on land uses, filtering capacity and soil morphology. Two-dimensional hydraulic model was developed using the HEC-RAS software, while the creation of the river model from digital geographic data and the presentation of the results was done using the ArcGIS software. In order to consider uncertainties of modeling, a sensitivity analysis of the initial humidity conditions and roughness coefficients was performed. Initial humidity conditions were divided into three categories based on the method developed by SCS. As a result, flood hazard maps were developed for twenty seven scenarios.

Key words: Floods, Directive 2007/60/EC, Hydraulic modeling, Flood hazard maps, Floodplain area, Moisture conditions, Roughness coefficient

*Αφιερώνεται στους γονείς μου, Νίκο και Αλεξία
και στην αδερφή μου, Μαγδαληνή*

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του προγράμματος σπουδών του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Αποτελεί τον τελευταίο κρίκο της αλυσίδας ενός πενταετούς κύκλου σπουδών, γι αυτό και θα αποτελεί πάντα μία ξεχωριστή ανάμνηση για μένα. Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς που με την βοήθεια τους συντέλεσαν στην ολοκλήρωσή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, τον κ. Λουκά Αθανάσιο, καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου στην ανάθεση και επίβλεψη της παρούσας εργασίας. Η επιμονή, η υπομονή και η συνεχή επιστημονική καθοδήγηση και υποστήριξη που μου παρείχε, ήταν τα στοιχεία που με ενθάρρυναν να ασχοληθώ, να κατανοήσω και να εξελιχθώ στο συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο. Η συνεισφορά του ήταν καθοριστική στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στην συνέχεια, θέλω να ευχαριστήσω βαθύτατα τον κ. Βασιλειάδη Λάμπρο, μέλος Ε.Δ.Ι.Π. του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την συνεχή και άμεση ανταπόκριση του στην επίλυση οποιοδήποτε αποριών, αλλά και την προτροπή του να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο πεδίο έρευνας. Ωστόσο πιο πολύ θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την ενέργεια και τη διάθεση που μου μετέδωσε για συνεχή αναζήτηση πληροφοριών και βελτίωση γνώσεων κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου στο πανεπιστήμιο.

Τέλος, θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Παπαϊωάννου Γεώργιο, υποψήφιο διδάκτορα του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για τις γνώσεις, τον χρόνο και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε πάνω στα λογισμικά HEC-RAS της US Army Corps of Engineers και ArcGIS της ESRI. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την παραχώρηση των απαραίτητων για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας δεδομένων. Η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς αυτά.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ABSTRACT	iii
ΑΦΙΕΡΩΣΗ	iv
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	v
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Σκοπός της εργασίας	2
1.3 Διάρθρωση της εργασίας.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	4
2.1 Πλημμύρες	4
2.1.1 Αστικοποίηση πλημμυρών	5
2.1.2 Πλημμύρες στην Ευρώπη.....	6
2.1.3 Πλημμύρες στην Ελλάδα	7
2.2 Θεσμικό πλαίσιο για τη διαχείριση των πλημμυρών	8
2.2.1 Οδηγία 2007/60 για την διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας.....	8
2.2.2 Συντονισμός της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ με την οδηγία 2000/60/ΕΕ.....	10
2.3 Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS).....	11
2.4 Το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS	13
2.5 Διδιάστατη ανάλυση πλημμύρας	14
2.6 Προηγούμενες μελέτες διδιάστατων μοντέλων	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΟΓΚΩΝ	20
3.1 Εισαγωγή.....	20
3.2 Πλέγμα κελιών	21
3.3 Γενικευμένη διατύπωση της μεθόδου πεπερασμένων όγκων	23
3.4 Εφαρμογή της μεθόδου σε διδιάστατο μοντέλο πλημμύρας.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	29
4.1 Εισαγωγή.....	29

4.2 Γεωγραφικά-Πληθυσμιακά στοιχεία.....	29
4.3 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά	31
4.4 Κλίμα.....	33
4.5 Χρήσεις γης.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	35
5.1 Εισαγωγή.....	35
5.2 Επίπεδα εδάφους	35
5.3 Γεωμετρικά δεδομένα	37
5.4 Ταξινόμηση χρήσεων γης.....	39
5.5 Οριακές συνθήκες	40
5.6 Χάρτες πλημμύρας	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	48
6.1 Εισαγωγή.....	48
6.2 Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη	48
6.3 Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη	57
6.4 Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	78
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	80
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	82

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Χάρτης περιοχής μελέτης	2
Σχήμα 2: Καμπύλες συχνότητας πλημμυρών σε διαφορετικά στάδια αστικοποίησης (Λέκκας, 2000).....	5
Σχήμα 3: Πιθανότητα εμφάνισης πλημμυρικών γεγονότων σε αστικές περιοχές της Ευρώπης (ΕΕΑ, 2012)	6
Σχήμα 4: Πλημμυρικά γεγονότα στην Ελλάδα την περίοδο 1880-2010 (Διακάκης, 2012)	7
Σχήμα 5: Πλεονέκτημα βαθυμετρικής προσέγγισης υπό-πλέγματος (Brunner, 2016).....	15
Σχήμα 6: Παράδειγμα λεπτομερούς πλέγματος κελιών	16
Σχήμα 7: Μέθοδοι διάταξης: (a) κεντροκυψελική, (b) κεντροκομβική (Moukalled, 2016)....	21
Σχήμα 8: Δευτερεύων πλέγμα με κεντροκομβική μέθοδο (Abdulaziz, 2017).....	21
Σχήμα 9: Σύνθεση κελιών με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (Brunner, 2016).....	22
Σχήμα 10: Σύνθεση κελιών με τη μέθοδο πεπερασμένων όγκων (Brunner, 2016)	22
Σχήμα 11: Συνιστώσες μοναδιαίου κάθετου διανύσματος	24
Σχήμα 12: Καρτεσιανό πλέγμα (Abdulaziz, 2017)	25
Σχήμα 13: Σχηματική απεικόνιση των παραμέτρων H , h και z_b	26
Σχήμα 14: Υπολογιστικοί κόμβοι δομημένου πλέγματος πεπερασμένων όγκων	27
Σχήμα 15: Χάρτης υψομέτρου της λεκάνης απορροής του Κραυσίδωνα μαζί με τα στοιχεία του μοντέλου βροχής απορροής	30
Σχήμα 16: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής μελέτης	31
Σχήμα 17: Κλίσεις εδάφους περιοχής μελέτης σε μοίρες	32
Σχήμα 18: Χρήσεις γης περιοχής μελέτης	34
Σχήμα 19: Επίπεδο εδάφους στο περιβάλλον RAS Mapper	36
Σχήμα 20: 2D Flow Area Mesh, 2D Area Breaklines και 2D Flow Area Connection	38
Σχήμα 21: Παράδειγμα αποτύπωσης τεχνικού έργου BR51	38
Σχήμα 22: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη	44
Σχήμα 23: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη	44
Σχήμα 24: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη	45
Σχήμα 25: Παράθυρο ανάλυσης μη μόνιμης ροής.....	47
Σχήμα 26: Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη.....	49
Σχήμα 27: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη	50

Σχήμα 28: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη	50
Σχήμα 29: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη	51
Σχήμα 30: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNII και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη.....	51
Σχήμα 31: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNII και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη.....	52
Σχήμα 32: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNII και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη.....	52
Σχήμα 33: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη	53
Σχήμα 34: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη	53
Σχήμα 35: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη	54
Σχήμα 36: Σύγκριση χωρικής κατανομής μέγιστου βάθους για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη.....	55
Σχήμα 37: Σύγκριση χωρικής κατανομής μέγιστης ταχύτητας για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη.....	56
Σχήμα 38: Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη.....	57
Σχήμα 39: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη	58
Σχήμα 40: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη	58
Σχήμα 41: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη	59
Σχήμα 42: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNII και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη.....	59
Σχήμα 43: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNII και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη.....	60

Σχήμα 44: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNII και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη.....	60
Σχήμα 45: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη	61
Σχήμα 46: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη	61
Σχήμα 47: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη	62
Σχήμα 48: Σύγκριση χωρικής κατανομής μέγιστου βάθους για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη.....	63
Σχήμα 49: Σύγκριση χωρικής κατανομής μέγιστης ταχύτητας για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη.....	64
Σχήμα 50: Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη.....	65
Σχήμα 51: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη	66
Σχήμα 52: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη	66
Σχήμα 53: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη	67
Σχήμα 54: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNII και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη.....	67
Σχήμα 55: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNII και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη.....	68
Σχήμα 56: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNII και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη.....	68
Σχήμα 57: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη	69
Σχήμα 58: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη	69
Σχήμα 59: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη	70

Σχήμα 60: Σύγκριση χωρικής κατανομής μέγιστου βάθους για περίοδο επαναφοράς T=1000 έτη.....	71
Σχήμα 61: Σύγκριση χωρικής κατανομής μέγιστης ταχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=1000 έτη.....	72
Σχήμα 62: Ευαισθησία συνθηκών υγρασίας	74
Σχήμα 63: Ευαισθησία συντελεστή τραχύτητας	75
Σχήμα 64: Πίνακες υδραυλικών ιδιοτήτων (Hydraulic properties tables).....	81
Σχήμα 65: Διακύμανση επιφάνειας κατάκλυσης πλημμύρας	82

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκάνης απορροής χειμάρρου Κραυσίδανα (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017).....	31
Πίνακας 2: Ποσοστά κάλυψης κλίσεων εδάφους σε μοίρες.....	32
Πίνακας 3: Ποσοστά κάλυψης χρήσεων γης	34
Πίνακας 4: Τιμές συντελεστών τραχύτητας Manning n για τρία σενάρια.....	39
Πίνακας 5: Κατηγορίες με βάση την υγρασία του εδάφους (SCS, 1972).....	42
Πίνακας 6: Τιμές του CN για διάφορες χρήσεις γης (Miliari et al., 2011).....	43
Πίνακας 7: Παροχές αιμής για την περιοχή μελέτης σε m ³ /s.....	45
Πίνακας 8: Κατηγοριοποίηση χρήσεων γης σύμφωνα με Corine 2000.....	80
Πίνακας 9: Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας σε km ²	82
Πίνακας 10: Αναλογία επιφανειών κατάκλυσης σε km ² με βάθη νερού σε m.....	83
Πίνακας 11: Αναλογία επιφανειών κατάκλυσης σε km ² με ταχύτητα ροής σε m/s.....	84

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Οι πλημμύρες είναι ακραία φυσικά φαινόμενα τα οποία είναι άμεσα συνδεδεμένα με τις κλιματολογικές συνθήκες και για το λόγο αυτό είναι αδύνατη η πλήρης πρόληψη τους. Παρουσιάζουν δυσμενείς επιπτώσεις στον άνθρωπο, στο περιβάλλον, στην πολιτιστική κληρονομιά και στην οικονομική δραστηριότητα. Ιδιαίτερα, η πιθανότητα πλημμύρας σε αστική περιοχή, εξαιτίας υπερχειλίσις ποταμού, μοιάζει με κίνδυνο υψίστης σημασίας λόγω της άμεσης επίδρασης της με τον άνθρωπο. Τα τελευταία χρόνια οι πλημμύρες αποτελούν τις πιο συνήθεις φυσικές καταστροφές στην Ευρώπη και η αυξητική τους τάση έχει προκαλέσει ιδιαίτερη ανησυχία στην κοινή γνώμη. Ως αποτέλεσμα αυτού ήταν η εφαρμογή οδηγίας που εξέδωσε το Ευρωπαϊκό κοινοβούλιο για την αξιολόγηση και την διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας.

Η μοντελοποίηση πλημμύρας και η σύνθεση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας δίνουν την δυνατότητα στο χρήστη να συλλέξει σημαντικές πληροφορίες, για μία υπό μελέτη περιοχή, μετά το πέρας ενός πλημμυρικού γεγονότος. Ανάμεσα σε αυτές τις πληροφορίες ξεχωρίζουν αυτές της εκτίμησης της επιφάνειας κατάκλυσης από το νερό, του μέγιστου βάθους νερού και των μέγιστων ταχυτήτων ροής. Τα μοντέλα υδραυλικής προσομοίωσης είναι μαθηματικοί αλγόριθμοι που ο συνδυασμός τους παρουσιάζει την φυσική ερμηνεία των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια ενός πλημμυρικού γεγονότος. Οι διαδικασίες αυτές ερμηνεύονται με την επίλυση εξισώσεων που εκφράζουν τις αρχές διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας.

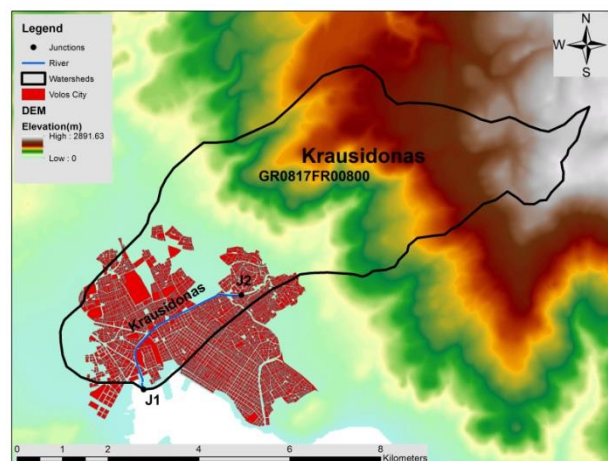
Η ανάλυση της πλημμύρας μπορεί να γίνει σε μία ή δύο διαστάσεις. Είναι εύκολα αντιληπτό πως όσο αυξάνονται οι διαστάσεις του προβλήματος τόσο αυξάνεται και η πολυπλοκότητα του. Για το λόγο αυτό έχουν γίνει αρκετές παραδοχές και απλοποιήσεις έτσι ώστε να διευκολυνθεί μία τόσο απαιτητική διαδικασία. Η διδιάστατη ανάλυση πλημμύρας διαφέρει σημαντικά από την μονοδιάστατη κυρίως στον τρόπο με τον οποίο κατευθύνεται το νερό. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζει η ανάλυση πλημμύρας σε δύο διαστάσεις είναι ότι αποτυπώνει

το πως κατευθύνεται το νερό κατά μήκος του κύριου υδατορρέυματος αλλά και πλευρικά αυτού, στην περιοχή κατάκλισης, όταν αυτό υπερβεί το μέγιστο βάθος νερού του καναλιού. Αυτό επιτυγχάνεται αποτυπώνοντας γεωμετρικά το έδαφος ως μία συνεχή επιφάνεια.

1.2 Σκοπός της εργασίας

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση της ευαισθησίας ενός μοντέλου πλημμύρας δύο διαστάσεων για αστική περιοχή και η σύνθεση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας στα πλαίσια εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60. Για την ανάπτυξη του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή διδιάστατης μοντελοποίησης που είναι διαθέσιμη στο λογισμικό HEC-RAS. Η εφαρμογή αυτή έγινε διαθέσιμη πρόσφατα και η χρησιμοποίηση της στην παρούσα εργασία προάγει το διδιάστατο μοντέλο για περαιτέρω χρήση στο άμεσο μέλλον. Η διδιάστατη μοντελοποίηση πλημμύρας αποτελεί πεδίο έρευνας με αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον. Συνεπώς, η ανάλυση της στην παρούσα εργασία παρέχει στον αναγνώστη την δυνατότητα και την ευκαιρία να κατανοήσει καλύτερα το υπόβαθρο της.

Η ανάλυση της ευαισθησίας του μοντέλου επιτυγχάνεται με την σύγκριση των συντελεστών τραχύτητας και των συνθηκών υγρασίας για διαφορετικές περιόδους επαναφοράς. Στόχος είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου αστικής πλημμύρας το οποίο θα μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις όπου σημαντικές αλλαγές στις χρήσεις γης, στην ικανότητα διήθησης του ανώτερου εδαφικού στρώματος και στη μορφολογία των επιφανειακών υδατορρευμάτων απορροής ενδέχεται να συμβούν. Το αποτέλεσμα της δράσης αυτής είναι η παραγωγή χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας για μια σειρά ιστορικών και συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης (σενάρια). Η υδραυλική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για τον χειμάρρο Κραυσίδωνα της πόλης του Βόλου, του νομού Μαγνησίας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Χάρτης περιοχής μελέτης

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει οργανωθεί σε 7 κεφάλαια. Το κεφάλαιο 1 εισάγει κάποιες βασικές πληροφορίες σχετικά με την πλημμύρα και την διδιάστατη ανάλυση της σε αστική περιοχή. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση όσον αφορά τις πλημμύρες, την οδηγία 2007/60/EK, τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, το μοντέλο υδραυλικής προσομοίωσης HEC-RAS, το διδιάστατο μοντέλο πλημμύρας καθώς και προηγούμενες διατριβές διδιάστατων μοντέλων. Το κεφάλαιο 3 περιγράφει την διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων που εκφράζουν τις αρχές διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας, όπως αυτές αναπτύσσονται και επιλύονται στο υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS. Το κεφάλαιο 4 παρουσιάζει την περιοχή μελέτης και τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της. Στο κεφάλαιο αυτό, αναφέρονται σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την μορφολογία του εδάφους, το κλίμα και τις χρήσεις γης της περιοχής. Το κεφάλαιο 5 παρουσιάζει την μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την υδραυλική προσομοίωση μη μόνιμης ροής σε διδιάστατο μοντέλο. Το κεφάλαιο 6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τρεις περιόδους επαναφοράς $T=50$, $T=100$, $T=1000$ έτη, για συνθήκες υγρασίας ευμενείς, μέσες, δυσμενείς και για τρία σενάρια συντελεστών τραχύτητας, χαμηλό, μέσο και υψηλό. Τέλος, το κεφάλαιο 7 σχολιάζει τα αποτελέσματα και παρουσιάζει τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Πλημμύρες

Σύμφωνα με το άρθρο 2, του πρώτου κεφαλαίου της οδηγίας 2007/60/EK για την διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, πλημμύρα ορίζεται η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, δεν καλύπτεται από νερό. Αυτό περιλαμβάνει πλημμύρες από ποτάμια, ορεινούς χείμαρρους, εφήμερα ρεύματα της Μεσογείου και πλημμύρες από τη θάλασσα σε παράκτιες περιοχές, δύναται δε να εξαιρεί πλημμύρες από συστήματα αποχέτευσης.

Οι κυριότερες αιτίες που τις προκαλούν είναι οι ραγδαίες βροχοπτώσεις και οι ισχυρές καταιγίδες που εμφανίζονται συνήθως κατά τους φθινοπωρινούς μήνες, όπως και η ταχεία τήξη χιονών όπου παρατηρείται συνήθως τους μήνες της άνοιξης. Ακόμη, η υπερχειλίση ποταμού που εμφανίζεται λόγω ανύψωσης της στάθμης του, η πιθανή θραύση φράγματος με δυσμενείς συνέπειες στους αποδέκτες και σε σπάνιες περιπτώσεις η εισροή της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές λόγω έντονου κυματισμού (παράκτια πλημμύρα).

Οι πλημμύρες είναι ακραία φυσικά φαινόμενα τα οποία είναι αποτέλεσμα κλιματολογικών συνθηκών και γι αυτό καθίσταται πολύ δύσκολη η πρόβλεψη και η πρόληψη τους. Ωστόσο, ένας έλεγχος μικρής κλίμακας μπορεί να πραγματοποιηθεί, με την τροποποίηση των γεωλογικών, γεωμορφολογικών και εδαφολογικών συνθηκών, χάρις την παρέμβαση του ανθρώπου (Μαμάσης, 2007).

Κυρίως, εκδηλώνονται είτε ως βραδείας εξέλιξης πλημμύρες, οι οποίες συνήθως εμφανίζονται σε μεγάλους ποτάμους και αρκετό διάστημα μετά την βροχόπτωση, είτε ως ξαφνικά γεγονότα (flash floods), όπου συνήθως εμφανίζονται σε μικρούς ποταμούς εξαιτίας έντονης τοπικής βροχόπτωσης και έχουν σοβαρές επιπτώσεις στις περιοχές που πλήττουν.

Τα βασικά μεγέθη μίας πλημμύρας είναι τα εξής:

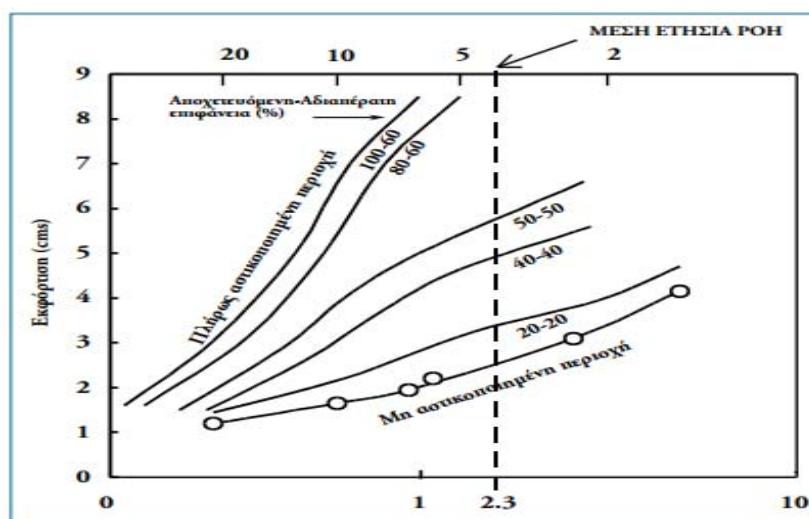
1. Η παροχή αιχμής και αντίστοιχη στάθμη στο υδατόρρευμα.
2. Ο πλημμυρικός όγκος.
3. Η χρονική διάρκεια του πλημμυρικού γεγονότος.

Κύριοι άξονες επιρροής των τριών αυτών μεγεθών είναι η χώρο-χρονική κατανομή της βροχόπτωσης, τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και το υδρογραφικό δίκτυο (Μαμάσης, 2009).

2.1.1 Αστικοποίηση και πλημμύρες

Η χρήση γης από τον άνθρωπο, στο αστικό περιβάλλον, έχει προκαλέσει αύξηση της συχνότητας πλημμυρών. Η αναλογία αδιαπέρατης επιφάνειας (πεζοδρόμια, δρόμοι, σπίτια) και λεκάνης αποστράγγισης (περιοχή με δίκτυο αποχέτευσης) έχει καθοριστικό ρόλο στην εκτίμηση του μεγέθους και της συχνότητας των πλημμυρών. Πιο συγκεκριμένα, αποτελεί ένα μέτρο εκτίμησης του βαθμού αστικοποίησης.

Οι πλημμύρες και η αστικοποίηση δημιουργούν ένα τεράστιο αριθμό μεταβολών στη σχέση βροχόπτωσης-επιφανειακής απορροής, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2 (Λέκκας, 2000). Αυτό κυρίως οφείλεται στο τρόπο με τον οποίο απορροφάται το νερό από το έδαφος. Γενικά, η αστικοποίηση αυξάνει την επιφανειακή απορροή και κατά επέκταση τον κίνδυνο πλημμύρας, χωρίς αυτό όμως να είναι απόλυτο, καθώς αρκετές έρευνες έχουν αποτυπώσει μία περίπλοκη κατάσταση για μικρές λεκάνες αποστράγγισης.

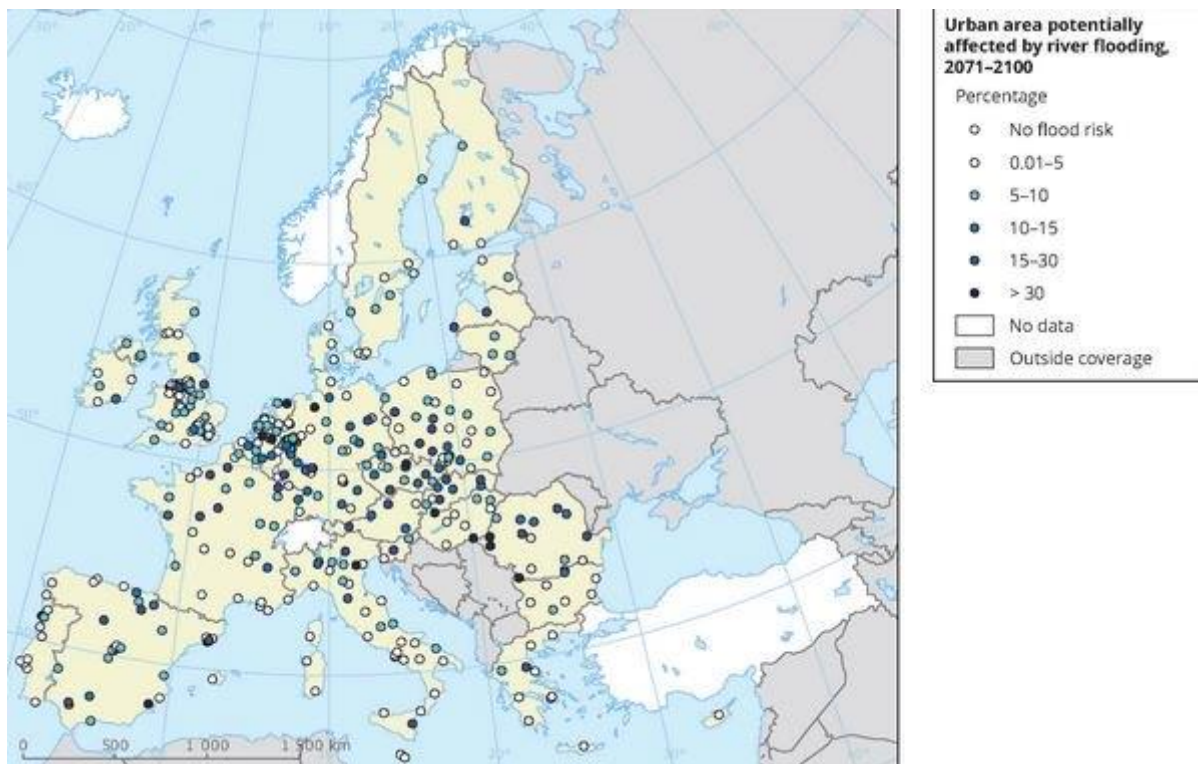


Σχήμα 2: Καμπύλες συχνότητας πλημμυρών σε διαφορετικά στάδια αστικοποίησης (Λέκκας, 2000)

2.1.2 Πλημμύρες στην Ευρώπη

Τις τελευταίες δεκαετίες οι πλημμύρες είναι οι πιο συνηθισμένες φυσικές καταστροφές στην Ευρώπη, λαμβάνοντας ποσοστό μεγαλύτερο του 40%. Η αυξητική τους τάση έχει προκαλέσει ιδιαίτερη ανησυχία στην κοινή γνώμη, λόγω των ανθρώπινων απωλειών και των οικονομικών ζημιών που προκαλούν. Μόνο κατά την περίοδο 1998-2002, η Ευρώπη υπέστη περίπου 100 καταστροφικές πλημμύρες που προκάλεσαν 700 θανάτους, τη μετακίνηση περίπου 500.000 ατόμων και οικονομικές απώλειες τουλάχιστον 25 δισεκατομμυρίων Ευρώ (EEA, 2012).

Οι βασικοί άξονες που υποδεικνύουν την αύξηση του κινδύνου πλημμυρών στην Ευρώπη είναι δύο. Πρώτον, οι κλιματικές αλλαγές που προβλέπονται από μία μεγάλη μερίδα επιστημόνων θα προκαλέσουν εντονότερη βροχόπτωση και αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Δεύτερον, η εγκατάσταση όλο και περισσότερων ανθρώπων και οικονομικών αγαθών σε ζώνες που κινδυνεύουν έντονα από πλημμυρικά επεισόδια. Οι αστικές περιοχές της Ευρώπης που είναι οι πιο επικίνδυνες σε επεισόδια πλημμυρών, ενδέχεται να είναι κατά κύριο λόγο αυτές που βρίσκονται στην κεντρική οικονομική περιοχή της Ευρωπαϊκής Ένωσης, περιοχή πλούσια σε πόρους και με έντονη οικονομική δραστηριότητα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.



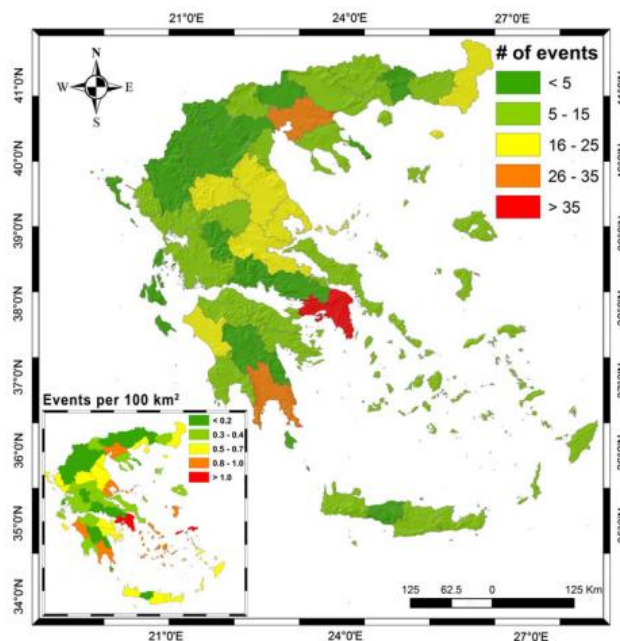
Σχήμα 3: Πιθανότητα εμφάνισης πλημμυρικών γεγονότων σε αστικές περιοχές της Ευρώπης (EEA, 2012)

2.1.3 Πλημμύρες στην Ελλάδα

Η Ελλάδα είναι μια εξαιρετικά πλημμυροπαθής χώρα, με αρκετές περιοχές υψηλού κινδύνου. Πλήττεται κατά κύριο λόγο από πλημμυρικά γεγονότα που προκύπτουν ως απόρροια της έντονης γεωγραφικής μεταβλητότητας των κλιματικών στοιχείων, λόγω της συνύπαρξης ανεπτυγμένης ακτογραμμής και ορογραφίας (Γκιοκάς, 2009). Έτσι, η οροσειρά της Πίνδου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο αποτελώντας ένα "υδρολογικό σύνορο" μιας και η μέση ετήσια βροχόπτωση στη Δυτική Ελλάδα είναι της τάξης των 1800 mm ενώ στα Ανατολικά το αντίστοιχο μέγεθος είναι περίπου 400 mm.

Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι πως αυτή η ανομοιομορφία των βροχοπτώσεων δε συνδέεται με ανάλογη σχέση με την εμφάνιση πλημμυρικών γεγονότων, αλλά περισσότερο με αντιστρόφως ανάλογη. Έτσι, ενώ οι ετήσιες βροχοπτώσεις είναι σχεδόν τρεις φορές μεγαλύτερες στη Δυτική σε σχέση με την Ανατολική Ελλάδα, τα πλημμυρικά γεγονότα στα Ανατολικά είναι πιο συχνά και πιο έντονα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.

Συγκεκριμένα, κατά την χρονική περίοδο 1880-2010 καταγράφηκαν 545 πλημμυρικά γεγονότα, με συνέπεια την απώλεια 686 ανθρώπινων ζώων, προκαλώντας εκτεταμένες ζημιές κατά μήκος της χώρας. Τα περισσότερα γεγονότα καταγράφηκαν τον μήνα Νοέμβριο με τα αστικά κέντρα να εμφανίζουν υψηλότερα ποσοστά επανεμφάνισης πλημμυρών σε σύγκριση με τις αγροτικές και ορεινές περιοχές (Διακάκης, 2012). Σύμφωνα με το Σχήμα 4, ο νομός Μαγνησίας παρουσιάζεται ως αρκετά πλημμυροπαθής αναλογικά με την έκταση του.



Σχήμα 4: Πλημμυρικά γεγονότα στην Ελλάδα την περίοδο 1880-2010 (Διακάκης, 2012)

2.2 Θεσμικό πλαίσιο για τη διαχείριση των πλημμυρών

Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της 23ης Οκτωβρίου 2007 εξέδωσε την Οδηγία 2007/60/EK για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, που τέθηκε σε ισχύ στις 26 Νοεμβρίου 2007. Η Οδηγία αυτή συμπληρώνει την Οδηγία πλαισίου για τα νερά 2000/60/EK, όσον αφορά στη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου.

2.2.1 Οδηγία 2007/60 για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας

Σκοπός της παρούσας οδηγίας είναι η θέσπιση πλαισίου για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, με στόχο τη μείωση των αρνητικών συνεπειών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες που συνδέονται με τις πλημμύρες στην Κοινότητα (Κεφάλαιο 1, Άρθρο 1).

Σύμφωνα με την οδηγία τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης πρέπει να προβούν στις ακόλουθες τρεις δράσεις:

1. Διεξαγωγή προκαταρκτικής αξιολόγησης κινδύνου πλημμύρας.
2. Κατάρτιση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας και χαρτών κινδύνων πλημμύρας.
3. Κατάρτιση σχεδίων διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας.

Η πρώτη δράση σύμφωνα με το Κεφάλαιο II (Άρθρο 4), περιέχει την διεξαγωγή Προκαταρκτικής αξιολόγησης κινδύνου πλημμύρας για κάθε περιοχή λεκάνης απορροής ποταμού ή τμήμα διεθνούς περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού που βρίσκεται στην επικράτεια τους. Αποσκοπεί στον προσδιορισμό των περιοχών εκείνων όπου υπάρχουν δυνητικοί σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας ή είναι πιθανόν να σημειωθεί πλημμύρα, έχοντας ως τελική ημερομηνία ολοκλήρωσης την 22^η Δεκεμβρίου 2011. Η αξιολόγηση θα περιλαμβάνει τα εξής (Παράγραφος 2):

- χάρτες της περιοχής της λεκάνης απορροής του ποταμού στην κατάλληλη κλίμακα, οι οποίοι περιλαμβάνουν τα όρια των λεκανών και των υπό-λεκανών απορροής ποταμών, και εφόσον υπάρχουν, παράκτιων ζωνών, οι οποίοι περιγράφουν τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά και τη χρήση γης.
- περιγραφή των πλημμυρών οι οποίες σημειώθηκαν κατά το παρελθόν και είχαν σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στις ανθρώπινες ζωές, στις οικονομικές δραστηριότητες και στο περιβάλλον, όταν υπάρχει ακόμη πιθανότητα παρόμοιων μελλοντικών συμβάντων, συμπεριλαμβανομένων της έκτασης της πλημμύρας, των

οδών αποστράγγισης και της αξιολόγησης των αρνητικών επιπτώσεων που προκάλεσαν.

- περιγραφή των σημαντικών πλημμυρών οι οποίες σημειώθηκαν κατά το παρελθόν, εκ των οποίων θα μπορούσαν, ενδεχομένως, να προβλεφθούν οι σημαντικές αρνητικές συνέπειες παρόμοιων φαινομένων στο μέλλον.

Η δεύτερη δράση σύμφωνα με το Κεφάλαιο III (Άρθρο 6), περιέχει την κατάρτιση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας και χαρτών κινδύνων πλημμύρας για τις ανωτέρω περιοχές, όπως αυτές προσδιορίζονται βάσει της προκαταρκτικής αξιολόγησης κινδύνου πλημμύρας. Τα κράτη μέλη θα πρέπει να μεριμνήσουν ώστε η κατάρτιση των χαρτών επικινδυνότητας και των χαρτών κινδύνων πλημμύρας να έχει ολοκληρωθεί έως τις 22 Δεκεμβρίου 2013.

Οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας καλύπτουν τις γεωγραφικές περιοχές που θα μπορούσαν να πλημμυρήσουν σύμφωνα με τα ακόλουθα σενάρια (Παράγραφος 3):

- πλημμύρες χαμηλής πιθανότητας ή σενάρια ακραίων φαινομένων.
- πλημμύρες μέσης πιθανότητας (με πιθανή περίοδο επαναληπτικότητας ≥ 100 χρόνια)
- πλημμύρες υψηλής πιθανότητας, ανάλογα με την περίπτωση.

Για κάθε σενάριο που εκτίθεται στην παράγραφο 3, παρατίθενται τα ακόλουθα στοιχεία (Παράγραφος 4):

- η έκταση της πλημμύρας.
- το βάθος νερού ή η στάθμη νερού ανάλογα με την περίπτωση.
- η ταχύτητα ροής ή η σχετική ροή των υδάτων, ανάλογα με την περίπτωση.

Οι χάρτες κινδύνου πλημμύρας περιγράφουν τις δυνητικές αρνητικές συνέπειες που συνδέονται με τις πλημμύρες υπό τις συνθήκες των σεναρίων της παραγράφου 3 και εκφράζονται ως εξής (Παράγραφος 5):

- ενδεικτικός αριθμός κατοίκων που ενδέχεται να πληγούν
- τύπος οικονομικής δραστηριότητας στην περιοχή που ενδέχεται να πληγεί
- εγκαταστάσεις οι οποίες ενδέχεται να προκαλέσουν τυχαία ρύπανση σε περίπτωση πλημμύρας και προστατευόμενες περιοχές
- άλλες πληροφορίες που το κράτος μέλος θεωρεί χρήσιμες, όπως η επισήμανση των περιοχών όπου υπάρχει το ενδεχόμενο πλημμυρών με αυξημένο ποσοστό

μεταφερόμενων ιζημάτων και πλημμυρών που παρασύρουν υπολείμματα και πληροφορίες για πιθανές άλλες σημαντικές πηγές ρύπανσης.

Τέλος, η τρίτη δράση σύμφωνα με το Κεφάλαιο IV (Άρθρο 7), περιέχει την κατάρτιση συντονισμένων σχεδίων διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας, από τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, βάσει των χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας. Τα κράτη μέλη θα πρέπει να μεριμνήσουν ώστε τα σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας να ολοκληρωθούν και να δημοσιευθούν έως τις 22 Δεκεμβρίου 2015.

Στόχος των σχεδίων θα είναι μείωση των δυνητικών αρνητικών συνεπειών που οι πλημμύρες έχουν για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική δραστηριότητα (Παράγραφος 2).

Τα σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας θα καλύπτουν όλες τις πτυχές της διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας εστιάζοντας στην πρόληψη, την προστασία και την ετοιμότητα, συμπεριλαμβανομένων των προβλέψεων πλημμυρών και των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης και λαμβανομένων υπόψη των χαρακτηριστικών της συγκεκριμένης λεκάνης ή υπό-λεκάνης απορροής του ποταμού. Τα σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας μπορούν επίσης να περιλαμβάνουν την προώθηση βιώσιμων πρακτικών χρήσης γης, βελτίωση της συγκράτησης υδάτων καθώς και την ελεγχόμενη κατάκλυση ορισμένων περιοχών σε περίπτωση πλημμύρας. (Παράγραφος 3)

2.2.2 Συντονισμός της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ με την Οδηγία 2000/60/ΕΕ

Τα κράτη μέλη είναι υποχρεωμένα να λαμβάνουν τα κατάλληλα μέτρα για να συντονίσουν την εφαρμογή της παρούσας οδηγίας με την οδηγία 2000/60/ΕΚ. Απώτερος σκοπός είναι η εξασφάλιση μίας αποτελεσματικότερης και εύλογης χρήσης των πόρων, λαμβάνοντας υπόψη τους περιβαλλοντικούς στόχους της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ (Κεφάλαιο V, Άρθρο 9).

Τα στοιχεία των σχεδίων διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας θα πρέπει να επανεξετάζονται περιοδικά και να επικαιροποιούνται, εάν χρειάζεται, λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές κλιματικές αλλαγές και τις επιπτώσεις που θα έχουν στην πιθανότητα εμφάνισης πλημμυρών. Τα σχέδια διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας θα επανεξετασθούν για πρώτη φορά τον Δεκέμβριο του 2021 και στη συνέχεια ανά εξαετία.

2.3 Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS)

Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών αποτελούν πολυσύνθετα λογισμικά συστήματα. Ως γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών ορίζεται ένα σύνολο εργαλείων για τη συλλογή, τη διαχείριση και την απεικόνιση χωρικών δεδομένων, που υποστηρίζουν τη διαδικασία του σχεδιασμού, παρέχοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να αναλύει γεωγραφικές πληροφορίες για κάποιο συγκεκριμένο σκοπό, σύμφωνα με το δικό του μοντέλο λήψης αποφάσεων (Γραικούσης, 2011).

Η ανάγκη διαχείρισης ενός ευρύ όγκου πληροφοριών καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη ενός συστήματος διαχείρισης βάσης δεδομένων, το οποίο θα πρέπει να είναι εμπλουτισμένο με λειτουργίες γεωγραφικής ανάλυσης. Οι βάσεις δεδομένων που περιέχουν χωρικά δεδομένα ονομάζονται χωρικές βάσεις δεδομένων. Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών είναι προγράμματα που λειτουργούν πάνω σε μία χωρική βάση δεδομένων.

Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών αποτελούνται-συντίθεται από τέσσερα μέρη:

- το υλικό
- το λογισμικό
- τα δεδομένα
- τους ειδικούς

Το υλικό περιλαμβάνει τις μονάδες επεξεργασίας, τις βοηθητικές μονάδες αποθήκευσης, τις περιφερειακές μονάδες εισαγωγής δεδομένων καθώς και εξοπλισμό για τη δημιουργία χαρτών, τεχνικών εκθέσεων και εξοπλισμό που επιτρέπει την επικοινωνία με άλλους σταθμούς εργασίας. Το λογισμικό περιβάλλει το υλικό σε τρία επίπεδα, το λειτουργικό σύστημα, τα ειδικά προγράμματα υποστήριξης του συστήματος και το λογισμικό εφαρμογής. Γενικά όμως ο πυρήνας του λογισμικού περιλαμβάνει τις λειτουργίες γραφικής επεξεργασίας, τις λειτουργίες διαχείρισης βάσεων δεδομένων και εργαλεία βασικής χαρτογραφικής και γεωγραφικής ανάλυσης.

Τα δεδομένα αποτελούνται από δύο βασικές υποκατηγορίες, τα περιγραφικά δεδομένα και τα χωρικά δεδομένα. Τα περιγραφικά δεδομένα αφορούν τις πληροφορίες που περιγράφουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των αντικειμένων που βρίσκονται στο χώρο. Τα χωρικά δεδομένα αφορούν τις πληροφορίες που προσδιορίζουν τη θέση των αντικειμένων σε κάποιο σύστημα συντεταγμένων. Τα δεδομένα οργανώνονται σε επίπεδα (layers) ομοιογενούς πληροφορίας.

Κάθε επίπεδο μπορεί να περιλαμβάνει μόνο ένα είδος γεωγραφικής οντότητας. Προκειμένου να εισαχθούν τα γεωγραφικά δεδομένα σε ένα γεωπληροφοριακό σύστημα και να οργανωθούν σε επίπεδα, πρέπει να μετατραπούν σε ψηφιακά. Η δομή του ψηφιακού αρχείου μπορεί να είναι διανυσματική (vector) ή κανονικοποιημένη (raster). Η διανυσματική δομή ορίζει ως βασική λογική μονάδα στο χώρο τη γραμμή, ως ακολουθία σημείων με συντεταγμένες X, Y. Η κανονικοποιημένη δομή δεδομένων διαιρεί το χώρο σε κάρναβο κανονικού σχήματος. Τέλος, οι ειδικοί μπορεί να ανήκουν σε πλήθος επιστημονικών πεδίων (μηχανικοί, μαθηματικοί, γεωεπιστήμονες, κοινωνιολόγοι, οικονομολόγοι κ.τ.λ.).

Η ανάπτυξη και η εφαρμογή ενός γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών περιλαμβάνει τέσσερα βήματα. Το πρώτο βήμα, στη δημιουργία ενός γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών είναι η εισαγωγή δεδομένων, χωρικών και περιγραφικών, στη βάση δεδομένων του συστήματος. Αρχικά, πρέπει να συλλεχθούν τα δεδομένα, ώστε στη συνέχεια να εισαχθούν στο σύστημα. Όταν ολοκληρωθεί η εισαγωγή των δεδομένων στη βάση δεδομένων ακολουθεί η διαχείριση και η επεξεργασία τους. Η διαχείριση των δεδομένων αφορά την οργάνωση τους βάσει των αναγκών του συγκεκριμένου έργου για το οποίο χρησιμοποιείται το γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών. Στο επίπεδο αυτό, δίνεται η ονοματολογία των επιπέδων και συνδέεται η χωρική με την περιγραφική πληροφορία. Το τελευταίο στάδιο είναι η απεικόνιση των δεδομένων, αλλά και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν στο στάδιο ανάλυσης σε στατικούς και δυναμικούς θεματικούς χάρτες.

Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, ως ένα διεπιστημονικό πεδίο, έχουν μεγάλη εφαρμογή σε πλήθος πραγματικών προβλημάτων και σε μεγάλο εύρος επιστημονικών αντικειμένων. Όσον αφορά την παρούσα εργασία, η οδηγία 2007/60 αναφέρει ότι οι εκθέσεις των χωρικών δεδομένων από τα κράτη μέλη πρέπει να γίνεται σε μορφή γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών. Οι τεχνικές τους είναι απαραίτητες για την δημιουργία ποικίλων επιπέδων (layers) πληροφοριών, όπως των χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής και των υδατικών συστημάτων. Επίσης, είναι απαραίτητες κατά τη διαδικασία της απεικόνισης (σύνθεση χαρτών), για τη δημιουργία επιπέδων (layers) πληροφοριών με δεδομένα έκτασης πλημμυρικής κατάκλυσης, βάθους νερού και ταχύτητας ροής.

2.4 Το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS

Το HEC-RAS είναι ένα ολοκληρωμένο λογισμικό σύστημα, με διαδραστικό περιβάλλον για το χρήστη, που έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει υδραυλικά τη ροή του νερού σε φυσικά ή τεχνητά υδατορρέυματα, καθώς και μεμονωμένα υδατορρέυματα ή συστήματα υδατορρευμάτων. Το μοντέλο αναπτύχθηκε για να βοηθήσει τους υδραυλικούς μηχανικούς στην ανάλυση της ροής υδατορρευμάτων και στον προσδιορισμό της επιφάνειας κατάκλυσης. Περιλαμβάνει πολλές δυνατότητες καταχώρησης δεδομένων, στοιχεία υδραυλικής ανάλυσης, δυνατότητες αποθήκευσης δεδομένων και διαχείρισης, καθώς και δυνατότητες γραφικών και αναφοράς.

Είναι ένα από τα μοντέλα, όπως το HEC-HMS (υδρολογικό μοντέλο), του U.S. Army Corps of Engineers που κατασκευάστηκε από το Hydrologic Engineer Center. Πριν από την πρόσφατη ενημέρωση της έκδοσης 5.0, το πρόγραμμα ήταν μονοδιάστατο, πράγμα που σημαίνει ότι δεν υπήρχε άμεση μοντελοποίηση της υδραυλικής επίδρασης των αλλαγών της εγκάρσιας διατομής, των στροφών και άλλων διαστάσεων πτυχών της ροής. Η απελευθέρωση της έκδοσης 5.0 εισήγαγε τη διδιάστατη μοντελοποίηση της ροής καθώς και τις δυνατότητες μοντελοποίησης μεταφοράς ιζημάτων. Οι χρήστες έχουν πλέον την δυνατότητα μονοδιάστατης μοντελοποίησης μη μόνιμης ροής, διδιάστατης μοντελοποίησης μη μόνιμης ροής (εξισώσεις Saint-Venant, εξισώσεις Difussion wave) και συνδυασμό των δύο αυτών.

Το μοντέλο HEC-RAS περιλαμβάνει τέσσερα τμήματα ανάλυσης:

1. Υπολογισμός του προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε συνθήκες μόνιμης ροής.
2. Υπολογισμοί σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.
3. Υπολογισμοί απόθεσης φερτών υλών.
4. Υπολογισμοί σχετικά με τη ποιότητα του νερού.

Τα τέσσερα αυτά τμήματα ανάλυσης έχουν ως αφετηρία την ύπαρξη κοινών γεωμετρικών δεδομένων και όμοιων υπολογιστικών διαδικασιών. Ακόμη, εκτός των τεσσάρων αυτών τμημάτων ανάλυσης, το μοντέλο έχει τη δυνατότητα υπολογισμού υδραυλικών κατασκευαστικών χαρακτηριστικών σε γέφυρες, οχετούς, υπερχειλιστές, καθώς και τον υπολογισμό της διάβρωσης της κοίτης σε γέφυρες.

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 υπόβαθρου
- Προσδιορισμός συνθηκών ροής
- Προσομοίωση
- Αποτελέσματα
- Έλεγχος αποτελεσμάτων

Συνοψίζοντας, γίνεται αντιληπτό ότι το HEC-RAS είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τον υδραυλικό μηχανικό, καθώς μειώνει αισθητά σε χρόνο και εργασία την υπολογιστική διαδικασία, απαιτεί ελάχιστα δεδομένα εισόδου και δίνει αποτελέσματα σε εύχρηστη μορφή (πίνακες και διαγράμματα). Επίσης, παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον ArcGIS για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση. Ωστόσο, μειονεκτεί όσον αφορά την ψηφιοποίηση των χαρτών που μπορεί να αποδειχθεί μη ακριβής και δαπανηρή. Τέλος, πιο σημαντικό, είναι ότι η εύλογη χρήση του απαιτεί από τον χρήστη καλό γνωστικό υπόβαθρο υδραυλικών συνθηκών.

2.5 Διδιάστατη ανάλυση πλημμύρας

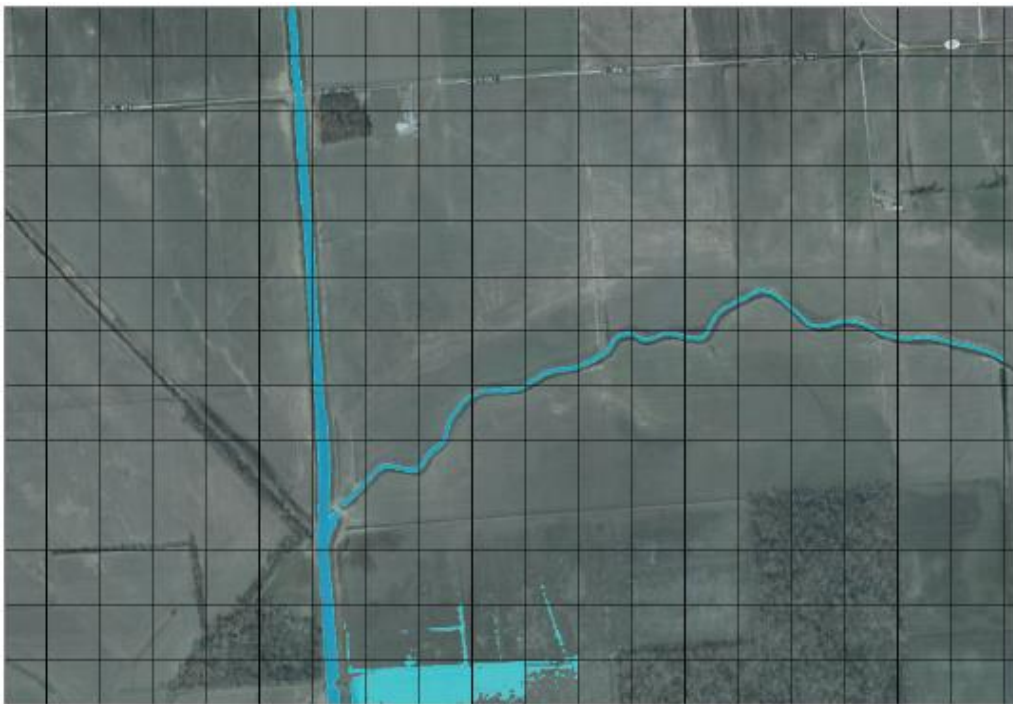
Η θεμελιώδης αρχή πάνω στην οποία στηρίζεται η διδιάστατη μοντελοποίηση πλημμύρας, είναι η απόδοση του φυσικού υδατορρέυματος και της περιοχής κατάκλυσης της πλημμύρας με τη χρήση κελιών. Ουσιαστικά, το δίκτυο κελιών που δημιουργείται είναι ένα πλέγμα το οποίο έχει την μορφή κυψέλης. Το λογισμικό έχει τη δυνατότητα να αναγνωρίζει αμφότερα, ένα μη δομημένο και ένα δομημένο από το χρήστη περιβάλλον κελιών. Συνεπώς, τα κελιά μπορεί να έχουν διαφορετικό σχήμα και μέγεθος, δηλαδή τρίγωνα, τετράγωνα, παραλληλόγραμμα ή ακόμα πεντάγωνα και εξάγωνα. Ωστόσο, η επιλογή ορθογώνιων κελιών έχει ως πλεονέκτημα την απλοποίηση της υπολογιστικής διαδικασίας. Σε κάθε κελί αποδίδονται υψομετρικά δεδομένα και δεδομένα τραχύτητας τα οποία συνδέονται και αναπαριστούν την επιφάνεια του εδάφους και την επίδραση της τριβής στην περιοχή (Brunner, 2016).

Το λογισμικό, χρησιμοποιώντας όρους βαθυμετρίας, προσεγγίζει τα κελιά με τη μορφή υπό-πλέγματος. Κάθε κελί είναι αποτέλεσμα συνδυασμού πολλαπλών κελιών που αποδόθηκαν από το GIS και αναπαριστούν το μοντέλο του εδάφους. Το μοντέλο του εδάφους αποτελεί κύριο παράγοντα στην ανάλυση πλημμύρας δύο διαστάσεων καθώς αποδίδει γεωμετρικά το έδαφος ως συνεχές. Η βαθυμετρική προσέγγιση του υπό-πλέγματος αποδίδει

σε κάθε κελί μία σχέση υψομέτρου-όγκου, βάσει της οποίας προσομοιώνεται η ροή του νερού του εδάφους μέσα στο δίκτυο κελιών. Δηλαδή, κάθε κελί λειτουργεί ως μία διατομή με αντίστοιχες υδραυλικές ιδιότητες, σύμφωνα με τις σχέσεις:

- Καμπύλη Υψομέτρου-Όγκου
- Καμπύλη Υψομέτρου-Βρεχόμενη περιμέτρου
- Καμπύλη Υψομέτρου-Έκτασης
- Καμπύλη Υψομέτρου-Συντελεστή τραχύτητας Manning n
- Καμπύλη Υψομέτρου-Προφίλ στάθμης νερού

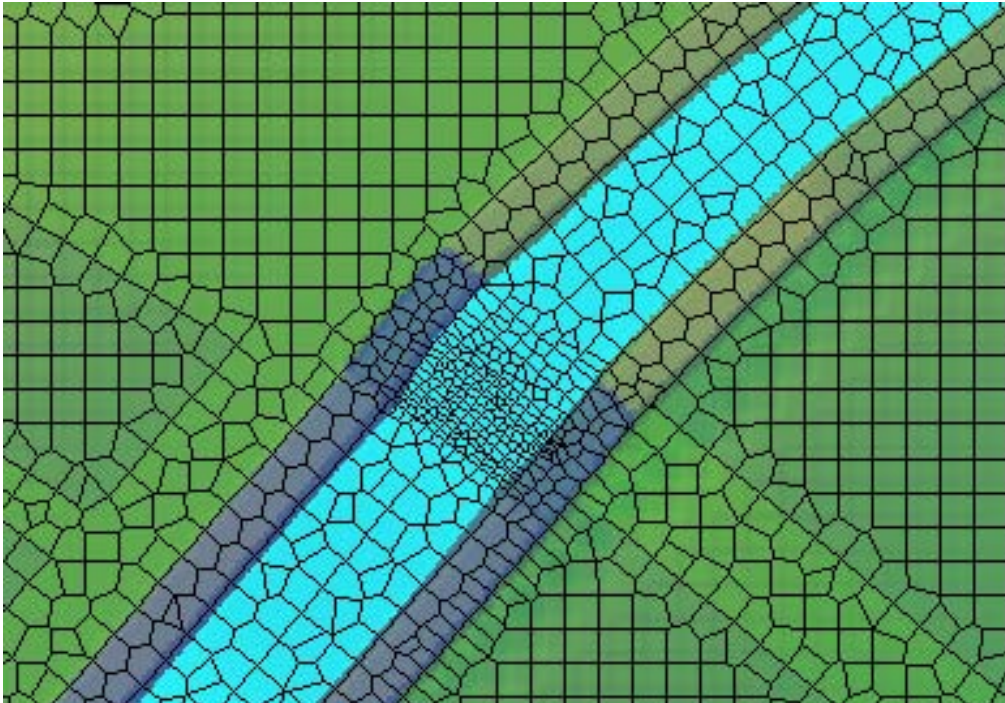
Κατά αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα παρουσίασης της ροής του νερού στο φυσικό υδατόρρευμα, ακόμη και όταν τα πλευρικά όρια του υδατορρεύματος είναι πολύ μικρότερα από το μέγεθος του κελιού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5: Πλεονέκτημα βαθυμετρικής προσέγγισης υπό-πλέγματος (Brunner, 2016)

Το μέγεθος των κελιών καθορίζει την ποιότητα του μοντέλου και των αποτελεσμάτων. Το υψόμετρο της επιφάνειας του νερού μετριέται σε κάθε κελί, για όλα τα σημεία, για κάθε χρονικό βήμα. Είναι σημαντικό, σε σημεία με απότομη αλλαγή κλίσης ή μεγάλης διαφοράς ταχύτητας (δρόμοι, γέφυρες, τοίχοι, κτλ.) να κατασκευάζεται λεπτομερέστερο πλέγμα κελιών. Τα σημεία αυτά, απαιτούν λεπτομερέστερη ανάλυση, λόγω απότομης αλλαγής των υδραυλικών χαρακτηριστικών τους, έτσι ώστε να αποδοθεί το μοντέλο πιο αποτελεσματικά.

Το σχήμα 6 είναι ένα παράδειγμα αντιμετώπισης των χαρακτηριστικών αυτών σημείων, στο οποίο τα κελιά αναπαρίστανται με τις λεπτές μαύρες γραμμές. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η περιοχή όπου το πλέγμα είναι πιο πυκνό είναι μία γέφυρα του ποταμού.



Σχήμα 6: Παράδειγμα λεπτομερούς πλέγματος κελιών

Το HEC-RAS δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να εξετάσει την φυσικό υδατόρρευμα και την περιοχή κατάκλυσης της πλημμύρας χρησιμοποιώντας μόνο πλέγμα κελιών διδιάστατης ροής. Ακόμη, έχει τη δυνατότητα να αποτυπώσει το φυσικό υδατόρρευμα ως μονοδιάστατο μοντέλο και εν συνεχεία να το συνδέσει με την περιοχή κατάκλυσης της πλημμύρας με ποικίλους τρόπους. Μονοδιάστατα και διδιάστατα στοιχεία μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους είτε απευθείας στην ανάντη ή κατάντη περιοχή του φυσικού υδατορρεύματος, είτε μέσω πλευρικών κατασκευών. Επίσης, περιοχές αποθήκευσης νερού αποτυπωμένες με διδιάστατο πλέγμα κελιών μπορούν να συνδεθούν με μονοδιάστατο μοντέλο υδατορρεύματος μέσω φραγμάτων ή αναχωμάτων.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιεί το λογισμικό για τον υπολογισμό της επιφάνειας του νερού σε συγκεκριμένο χώρο και χρόνο, βασίζονται στις αρχές διατήρησης της μάζας και της ορμής. Πιο συγκεκριμένα, η διαφορική μορφή μη μόνιμης ροής της εξίσωσης της αρχής διατήρησης της μάζας είναι η εξίσωση συνέχειας:

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

Εξίσωση 2.1

Όπου t είναι ο χρόνος, H η στάθμη της επιφάνειας του νερού, h το βάθος του νερού, q η ροή προς το κανάλι από άλλες πηγές, όπως από πλημμυρικές κοίτες ή τυχόν παράπλευρα κανάλια και u και v οι συνιστώσες ταχύτητας της ροής στις διευθύνσεις X και Y .

Η διανυσματική μορφή της εξίσωσης συνέχειας είναι:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla hV + q = 0 \quad \text{Εξίσωση 2.2}$$

Όπου $V=(u,v)$ είναι η ταχύτητα και (∇) το διάνυσμα της μερικής παραγώγου $\nabla= (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})$

Η εξίσωση διάχυσης κύματος, που προκύπτει από την αρχή διατήρησης της ορμής, αποτελείται από το διάνυσμα κλίσης της βαροτροπικής πίεσης και την τριβή του πυθμένα.

$$-g\nabla H = C_f V \quad \text{Εξίσωση 2.3}$$

Όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και C_f είναι ο συντελεστής της τριβής του πυθμένα. Εισάγοντας τον συντελεστή Manning στην εξίσωση διάχυσης κύματος προκύπτει:

$$-g\nabla H = \left(\frac{n^2 g |V|}{R^{\frac{4}{3}}}\right) V \quad \text{Εξίσωση 2.4}$$

Όπου n είναι ο συντελεστής τραχύτητας Manning και R η υδραυλική ακτίνα. Ο μόνος άγνωστος της εξίσωσης είναι η στάθμη της επιφάνειας του νερού H . Η ταχύτητα προκύπτει ως κλάσμα της βαροτροπικής πίεσης προς την τριβή του πυθμένα.

$$V = -\frac{(R(H))^{\frac{2}{3}} (\nabla H)}{n (\nabla H)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{Εξίσωση 2.5}$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση διάχυσης κύματος στην εξίσωση αρχής διατήρησης της μάζας προκύπτει:

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \frac{R(H)^{\frac{2}{3}}}{n (\nabla H)^{\frac{1}{2}}} \nabla H + q = 0 \quad \text{Εξίσωση 2.6}$$

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται εκτενέστερη αναφορά στη διαδικασία επίλυσης και στη μεθοδολογία που εφαρμόζεται στο λογισμικό.

2.6 Προηγούμενες μελέτες διδιάστατων μοντέλων

Το διδιάστατο υδροδυναμικό μοντέλο του λογισμικού HEC-RAS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση ποτάμιων συστημάτων. Παρ' όλα αυτά, κάθε προσέγγιση μοντελοποίησης παρουσιάζει διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Κύριος στόχος του διδιάστατου μοντέλου είναι να υπολογίσει το ύψος της επιφάνειας νερού και την κατεύθυνση του στη περιοχή κατάκλυσης της πλημμύρας υπό συνθήκες μη μόνιμης ροής. Το λογισμικό HEC-RAS διασυνδέεται με το λογισμικό ArcGIS για να αποδώσει την επιφάνεια του εδάφους και εφαρμόζει την μέθοδο πεπερασμένων όγκων για την επίλυση των εξισώσεων μη μόνιμης ροής σε δύο διαστάσεις.

Στην περίπτωση που η περιοχή μελέτης είναι κάποια αστική περιοχή εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι για την γεωμετρική αποτύπωση των κτιρίων. Ένας τρόπος είναι η αποτύπωση των οικιστικών τετραγώνων της περιοχής με τη μορφή 'building blocks', δηλαδή αναπαριστώντας τα οικιστικά τετράγωνα ως στερεά όρια (οριακές συνθήκες) όπου το νερό δεν έχει την δυνατότητα εισόδου, αναγκάζοντας το νερό να ρέει πλευρικά αυτών. Άλλος τρόπος είναι η αποτύπωση των οικιστικών τετραγώνων με την τοπική αύξηση των τριβών του πυθμένα, δηλαδή αποδίδοντας τα οικιστικά τετράγωνα υψηλούς συντελεστές τραχύτητας όπου το νερό έχει την δυνατότητα να διεισδύσει, αλληλεπιδρώντας όμως διαφορετικά όσον αφορά τη στάθμη της επιφάνειας νερού και την ταχύτητα ροής του ανάλογα με την τιμή του συντελεστή. Ακόμη, άλλος ένας τρόπος είναι η εμφάνιση του ποσοστού συμμετοχής της πλημμύρας που εισέρχεται στα όρια των οικιστικών τετραγώνων.

Υπάρχουν πολλές διατριβές στις οποίες εφαρμόστηκαν διδιάστατα μοντέλα για την σύνθεση χαρτών πλημμύρας. Τα υδραυλικά μοντέλα που εφαρμόστηκαν ποικίλουν. Ορισμένες από αυτές διεκπεραιώθηκαν με την μέθοδο 'building blocks' και άλλες με τη ρύθμιση των συντελεστών τραχύτητας. Μία πρόσφατη μελέτη έγινε για τον ποταμό Muskingum που βρίσκεται κοντά στην πόλη Zanesville, της πολιτείας Ohio (Lant, 2011). Η σύνθεση χαρτών πλημμύρας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του διδιάστατου μοντέλου του LISFLOOD-FP και του μονοδιάστατου μοντέλου του HEC-RAS, συγκρίνοντας στο τέλος τα αποτελέσματά τους. Ακόμη πραγματοποιήθηκε σύγκριση της επιφάνειας κατάκλυσης για διάφορες παροχές αιχμής υδρογραφήματος, παρατηρώντας ότι η υπερχειλίση του ποταμού πραγματοποιείται για παροχή μεγαλύτερη από 100 κυβικά πόδια ανά δευτερόλεπτο. Σκοπός της μελέτης ήταν να παραδώσει πληροφορίες στους ειδικούς για την ευελιξία και προσαρμοστικότητα της αστικής περιοχής με διάφορα σενάρια.

Επίσης, άλλη μία παρόμοια διατριβή διεκπεραιώθηκε για τη σύνθεση χαρτών κινδύνων πλημμύρας και χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας σε αστική περιοχή (Izadifar, Babaee, 2015). Η περιοχή μελέτης είναι η πόλη Σόντριο της βόρειας Ιταλίας. Το μοντέλο που επιλέχθηκε για τη σύνθεση των χαρτών της περιοχής είναι από το λογισμικό River2D. Το μοντέλο αναπτύχθηκε εφαρμόζοντας την προσέγγιση των 'building blocks'. Αναλύθηκαν τρεις παράμετροι ευαισθησίας του μοντέλου, το μέγεθος των κελιών, το μοναδιαίο υδρογράφημα και ο συντελεστής τραχύτητας. Για την πρώτη παράμετρο ευαισθησίας του μοντέλου τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για 80 m μέγεθος πλέγματος το μοντέλο αντιδρά αποτελεσματικότερα ανάμεσα στα μεγέθη που δοκιμάστηκαν από 20 έως 120 m. Για την δεύτερη παράμετρο ευαισθησίας, ανάμεσα σε δύο υδρογραφήματα με 117 και 68 m³/s παροχή αιχμής, επιλέχθηκε αυτό με την μεγαλύτερη παροχή ως δυσμενέστερη περίπτωση. Τέλος, για την τρίτη παράμετρο βρέθηκε ότι αυξάνοντας τον συντελεστή τραχύτητας παρατηρείται αύξηση του μέγιστου βάθους νερού. Για τη σύνθεση των χαρτών επιλέχθηκε ο μεγαλύτερος συντελεστής καθώς φάνηκε να δίνει πιο ομαλά αποτελέσματα.

Τέλος, άλλη μία μελέτη πραγματοποιήθηκε για την κατάρτιση σχεδίου διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας των λεκανών απορροής ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017). Για την διόδευση των πλημμυρών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό HEC-RAS. Η διόδευση των πλημμυρών υλοποιείται για ποταμούς, ρέματα και χείμαρρους που ανήκουν στις ζώνες δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας. Πραγματοποιείται για περιόδους επαναφοράς T=50,100 και 1000 έτη σε υδατορρέυματα με ή χωρίς σημαντικές αστικές περιοχές. Μία εκ των περιπτώσεων, όπως και στην παρούσα μελέτη, είναι η περίπτωση του χείμαρρου Κραυσίδωνα της αστικής ζώνης του Βόλου. Για την αποτύπωση των οικιστικών τετραγώνων στην μελέτη έγινε η προσέγγιση των 'building blocks', σε αντίθεση με την παρούσα μελέτη όπου έγινε η προσέγγιση της τοπικής αύξησης των τριβών του πυθμένα.

Επομένως, υπάρχει μία ποικιλία διατριβών που αναλύουν διδιάστατα μοντέλα πλημμύρας σε αστική περιοχή. Η ανάλυση επιτυγχάνεται για διάφορους παραμέτρους ευαισθησίας των μοντέλων με απώτερο σκοπό την σύνθεση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας. Στην παρούσα μελέτη αναλύεται το διδιάστατο μοντέλο HEC-RAS με εφαρμογή σε αστική περιοχή, εξετάζοντας την ευαισθησία του συντελεστή τραχύτητας και των συνθηκών υγρασίας. Παρόλο που η προσέγγιση των 'building blocks' μοιάζει ως η αποτελεσματικότερη μέθοδος αναπαράστασης των οικιστικών τετραγώνων, η προσέγγιση της τοπικής αύξησης των τριβών του πυθμένα φαίνεται να δίνει εξίσου καλά αποτελέσματα (Μπέλλος, 2015).

Κεφάλαιο 3

Μέθοδος πεπερασμένων όγκων

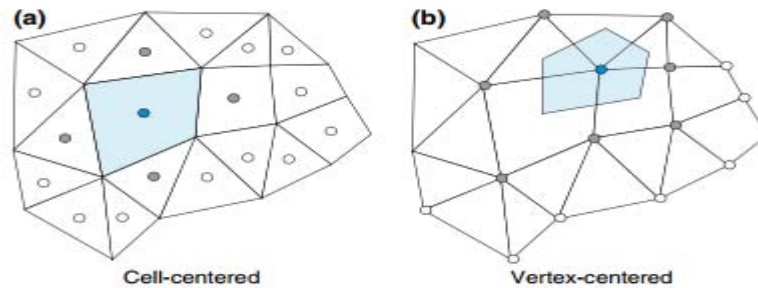
3.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος πεπερασμένων όγκων είναι μία ευρέως διαδεδομένη υπολογιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται σε προβλήματα ρευστομηχανικής. Παρόμοια με άλλες αριθμητικές μεθόδους που αναπτύχθηκαν για την προσομοίωση της ροής του ρευστού, η μέθοδος πεπερασμένων όγκων μετατρέπει το σύνολο των μερικών διαφορικών εξισώσεων σε ένα σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων. Το σημείο εκκίνησης στην ανάπτυξη και κατανόηση του θεωρήματος είναι η προσεκτική διάκριση μεταξύ του όγκου ελέγχου που έχουμε επιλέξει και του συστήματος το οποίο κατά την τυχούσα χρονική στιγμή t καταλαμβάνει τον χώρο του όγκου ελέγχου (Λιακόπουλος, 2010). Οι όγκοι ελέγχου περιέχουν τα διακριτά σημεία του πεδίου, στα οποία θα υπολογιστούν οι μεταβλητές επίλυσης, τα οποία καλούνται και υπολογιστικοί κόμβοι, δηλαδή το κέντρο κάθε όγκου αναφοράς αποτελεί και ένα διακριτό σημείο του πεδίου στο οποίο θα υπολογιστούν οι τιμές των μεταβλητών του προβλήματος, όπως η ταχύτητα, το βάθος νερού και η πίεση. Στην παρούσα μελέτη, ως όγκος ελέγχου μπορεί να θεωρηθεί κάθε κελί του δευτερεύων πλέγματος, ενώ ως σύστημα μπορεί να θεωρηθεί η ροή του νερού.

Η διαδικασία διακριτοποίησης της μεθόδου περιλαμβάνει δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα, οι μερικές διαφορικές εξισώσεις ολοκληρώνονται και μετατρέπονται σε εξισώσεις ισορροπίας ενός όγκου ελέγχου (κελιού). Αυτό συνεπάγεται, την αλλαγή των επιφανειακών και επικαμπύλιων ολοκληρωμάτων σε αλγεβρικές σχέσεις ποσοτήτων οι οποίες υπολογίζονται εντός του όγκου ελέγχου και πάνω στην επιφάνεια ελέγχου, χρησιμοποιώντας εγκεκριμένες μεθόδους αριθμητικής ολοκλήρωσης. Το αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο ημι-διακριτοποιημένων εξισώσεων. Στο δεύτερο βήμα, σύμφωνα με την μέθοδο γραμμικής παρεμβολής προσεγγίζεται η μεταβολή των μεταβλητών εντός του όγκου ελέγχου (κελιού) και σχετίζονται οι τιμές των μεταβλητών της επιφάνειας ελέγχου με τις τιμές των όγκων ελέγχου (κελιών) έτσι ώστε να μετατρέψουν τις αλγεβρικές σχέσεις σε αλγεβρικές εξισώσεις (Moukalled, 2016).

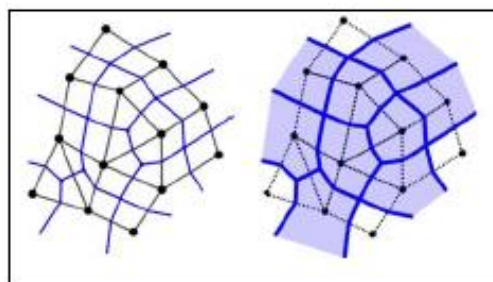
3.2 Πλέγμα κελιών

Υφίστανται δύο μέθοδοι διάταξης των μεταβλητών στα κελιά του κυρίου πλέγματος, η κεντροκυβελική μέθοδος (cell centered) και η κεντροκομβική μέθοδος (cell vertex), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7: Μέθοδοι διάταξης: (a) κεντροκυβελική, (b) κεντροκομβική (Moukalled, 2016)

Η μέθοδος διάταξης των μεταβλητών στην κορυφή γνωστή και ως ‘cell vertex method’ χρησιμοποιεί ένα δευτερεύων πλέγμα που δομείται από κελιά τα οποία προκύπτουν από τις κορυφές του κύριου πλέγματος. Το κύριο πλέγμα κελιών παρουσιάζεται με μαύρο χρώμα στο Σχήμα 8. Το HEC-RAS δημιουργεί νέα κελιά για κάθε κορυφή συνδέοντας τα κέντρα των κελιών του κυρίου πλέγματος, τα οποία παρουσιάζονται με μπλε χρώμα. Η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων εφαρμόζεται σε αυτά τα νέα δημιουργημένα κελιά. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η εφαρμογή των οριακών συνθηκών καθίσταται ευκολότερη επειδή τα κέντρα των κελιών βρίσκονται στα όρια του κυρίου πλέγματος. Παρ’ όλα αυτά, η κατασκευή δευτερεύων πλέγματος και η αλληλεπίδρασή του με τυχόν κατασκευές μπορεί να αποδειχθεί μοιραία αν δεν γίνει ο σωστός χειρισμός και η διαμόρφωσή του.



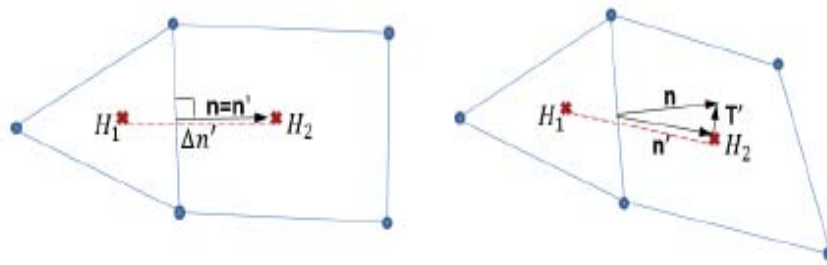
Σχήμα 8: Δευτερεύων πλέγμα με κεντροκομβική μέθοδο (Abdulaziz, 2017).

Το HEC-RAS χρησιμοποιεί μια υβριδική μέθοδο για να υπολογίσει τη κλίση ∇H της συνάρτησης επιφάνειας (Brunner, 2016). Όταν η κατεύθυνση της υδραυλικής κλίσης είναι κάθετη ως προς την όψη του κελιού, όπως εμφανίζεται και στο Σχήμα 9, τότε το HEC-RAS

χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για την εύρεση της κλίσης της συνάρτησης επιφάνειας, όπως παρουσιάζεται και στην εξίσωση 3.1 παρακάτω.

$$\nabla H = \frac{H_2 - H_1}{\Delta L} \quad \text{Εξίσωση 3.1}$$

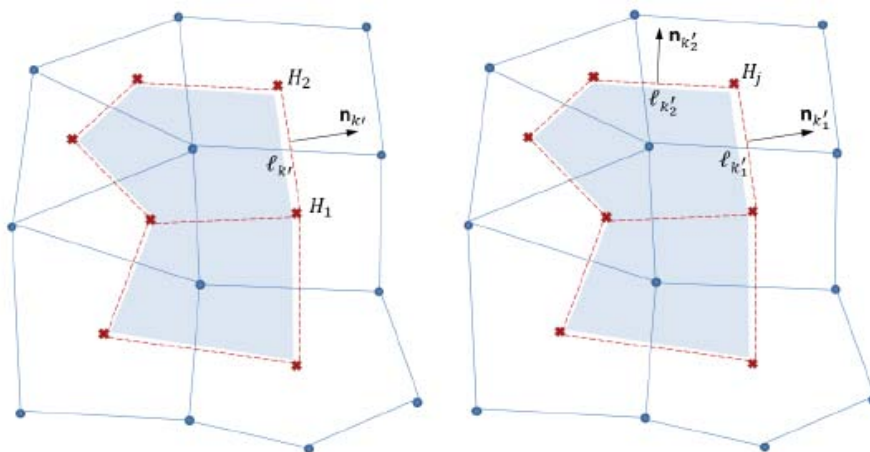
Σε αυτήν την περίπτωση, τα κελιά έχουν ορθογωνική μορφή, H_2 και H_1 είναι τα υψόμετρα επιφανειών των κελιών 2 και 1 αντίστοιχα και ΔL είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των κελιών 2 και 1.



Σχήμα 9: Σύνθεση κελιών με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (Brunner, 2016).

Όταν η κατεύθυνση της υδραυλικής κλίσης δεν είναι κάθετη στην όψη του κελιού, όπως φαίνεται και στο σχήμα 10, τότε το HEC-RAS χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου. Σύμφωνα με το θεώρημα απόκλισης του Gauss, η τιμή της κλίσης της συνάρτησης επιφάνειας στην όψη του κελιού ορίζεται ως το αριθμητικό άθροισμα του υψομέτρου της επιφάνειας του νερού στην όψη του κελιού k , πολλαπλασιασμένο με το μήκος της όψης του κελιού k , διαιρεμένο με την έκταση του κελιού του δευτερεύον πλέγματος.

$$\nabla H = \frac{\sum_j n_k L_k H_k}{A_j} \quad \text{Εξίσωση 3.2}$$



Σχήμα 10: Σύνθεση κελιών με τη μέθοδο πεπερασμένων όγκων (Brunner, 2016).

3.3 Γενικευμένη διατύπωση της μεθόδου πεπερασμένων όγκων

Για να διατυπώσουμε την μέθοδο πεπερασμένων όγκων ας εξετάσουμε αρχικά την μερική διαφορική εξίσωση που παρουσιάζεται στην εξίσωση 3.3, η οποία αντιπροσωπεύει μία γενικευμένη εξίσωση. Η εξίσωση είναι ασταθής όπως φαίνεται από τον όρο ∂t όπου t είναι ο χρόνος και δύο διαστάσεων όπως αποδεικνύεται από τους όρους ∂x και ∂y που εκφράζουν την απόσταση στους άξονες x και y αντίστοιχα. Η ποσότητα U αναπαριστά το διάνυσμα της μεταβλητής, οι ποσότητες f και g τις συνιστώσες του διανύσματος ροής και η ποσότητα Q τυχόν βαθμωτές συναρτήσεις πηγών ενέργειας.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} = Q \quad \text{Εξίσωση 3.3}$$

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση για έναν όγκο ελέγχου (κελί), μπορούμε να διατυπώσουμε την εξίσωση με τη μορφή της εξίσωσης 3.4 όπου A είναι η επιφάνεια του κελιού και Ω ο όγκος ελέγχου.

$$\iint_{\Omega} \frac{\partial U}{\partial t} dA + \iint_{\Omega} \left(\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} \right) dA = \iint_{\Omega} Q dA \quad \text{Εξίσωση 3.4}$$

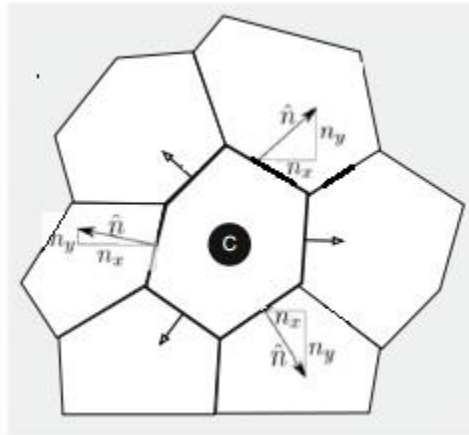
Το επόμενο βήμα είναι η απλοποίηση της εξίσωσης, το οποίο μας οδηγεί στην διατύπωση της μεθόδου πεπερασμένων όγκων. Αρχικά, απλοποιούμε τον όρο U λαμβάνοντας την μέση τιμή του, το οποίο ορίζεται ως το ολοκλήρωμα του όρου U διαιρεμένο με την έκταση του κελιού. Παρομοίως, το ολοκλήρωμα της βαθμωτής συνάρτησης απλοποιείται λαμβάνοντας την μέση τιμή της όπως παρουσιάζεται παρακάτω στις εξισώσεις 3.5 και 3.6.

$$\bar{U} = \frac{1}{A} \iint_{\Omega} U dA \quad \text{Εξίσωση 3.5}$$

$$\bar{Q} = \frac{1}{A} \iint_{\Omega} Q dA \quad \text{Εξίσωση 3.6}$$

Από τα πιο καίρια σημεία της μεθόδου είναι η μετατροπή των επικαμπύλιων ολοκληρωμάτων σε επιφανειακά ως προς κάθε πλευρά των πεπερασμένων όγκων (κελιού). Η μετατροπή επιτυγχάνεται βασιζόμενοι στο θεώρημα Gauss (απόκλισης). Το εν λόγω θεώρημα δίνει τη μαθηματική σχέση μεταξύ ενός ολοκληρώματος σε ένα όγκο V και ενός ολοκληρώματος κατά μήκος της επιφάνειας S που ορίζει τον όγκο V . Το παρακάτω Σχήμα 11 αποτελεί τη σχηματική αναπαράσταση του θεωρήματος του Gauss εφαρμοσμένο σε πλέγμα κελιών. Το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα έχει συνιστώσες n_x και n_y οι οποίες διαφέρουν για κάθε όψη

κελιού. Το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα έχει κατεύθυνση προς τα γειτονικά κελιά και όχι προς το εσωτερικό του κελιού.



Σχήμα 11: Συνιστώσες μοναδιαίου κάθετου διανύσματος

Έτσι, ολοκληρώνοντας ως προς όλες τις όψεις του κελιού, αντικαθίσταται ο δεύτερος όρος της εξίσωσης 3.4 από την εξίσωση 3.7. Εν συνεχεία, η εξίσωση 3.7 μπορεί να απλοποιηθεί περεταίρω με την απλοποίηση των μέσων τιμών έτσι ώστε να λάβει τη τελική μορφή της εξίσωσης 3.9.

$$\oint_S (f_{n,x} + g_{n,y}) dS \quad \text{Εξίσωση 3.7}$$

$$\sum_{ABCD} \int_S (f_{n,x} + g_{n,y}) dS \quad \text{Εξίσωση 3.8}$$

$$\sum_{ABCD} (f_{n,x} + g_{n,y}) \Delta S \quad \text{Εξίσωση 3.9}$$

Η μέθοδος πεπερασμένων όγκων διατυπώνεται για την εύρεση της ροής του νερού μεταξύ των κελιών του πλέγματος. Ο συνδυασμός των εξισώσεων 3.5, 3.8 και 3.9 είναι το τελικό βήμα της μεθόδου από το οποίο προκύπτει η εξίσωση 3.10

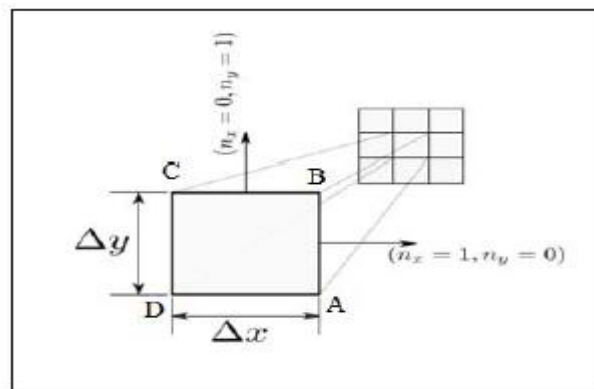
$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{U}A + \sum_{ABCD} (f_{n,x} + g_{n,y}) \Delta S = \bar{Q}A \quad \text{Εξίσωση 3.10}$$

3.4 Εφαρμογή της μεθόδου σε διδιάστατο μοντέλο πλημμύρας

Η διατύπωση της μεθόδου πεπερασμένων όγκων βασίζεται στην γενικευμένη εξίσωση δύο διαστάσεων 3.11.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} + q = 0 \quad \text{Εξίσωση 3.11}$$

Όπου για $h=h(x, y, t)$, t ο χρόνος, h το βάθος νερού, q τυχόν πλευρικές εισροές και u και v οι συνιστώσες ταχύτητας για τις κατευθύνσεις x και y αντίστοιχα. Για την επίλυση της εξίσωσης σε δύο διαστάσεις εφαρμόζουμε καρτεσιανές συντεταγμένες στα κελιά του πλέγματος, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 12.



Σχήμα 12: Καρτεσιανό πλέγμα (Abdulaziz, 2017)

Στην συνέχεια, ακολουθούμε την ίδια διαδικασία που αναφέρθηκε προηγουμένως στην υποενότητα 3.3. Τώρα όμως η επιφάνεια του κελιού αντί για τον όρο A αποδίδεται από τις συνιστώσες του ΔX και ΔY , για ορθογωνικό κελί του πλέγματος. Με τη χρήση του θεωρήματος απόκλισης του Gauss προκύπτει τελικά η εξίσωση 3.14.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} = 0 \quad \text{Εξίσωση 3.12}$$

$$\iint_{\Omega} \frac{\partial h}{\partial t} dx dy + \iint_{\Omega} \left(\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} \right) dx dy = 0 \quad \text{Εξίσωση 3.13}$$

$$\Delta X \Delta Y \frac{\partial}{\partial t} \bar{h} + \oint_S (f_{n,x} + g_{n,y}) \Delta X \Delta Y = 0 \quad \text{Εξίσωση 3.14}$$

Με γραμμική ολοκλήρωση η παρένθεση απλοποιείται και διαχωρίζονται οι δύο όροι. Στο καρτεσιανό πλέγμα, για τις κάθετες πλευρές του κελιού η συνιστώσα του μοναδιαίου κάθετου διανύσματος $n_y=0$ μηδενίζεται και επομένως ο όρος $g_{n,y}$ παραλείπεται. Αντίστοιχα για τις οριζόντιες πλευρές του κελιού η συνιστώσα του μοναδιαίου κάθετου διανύσματος $n_x=0$

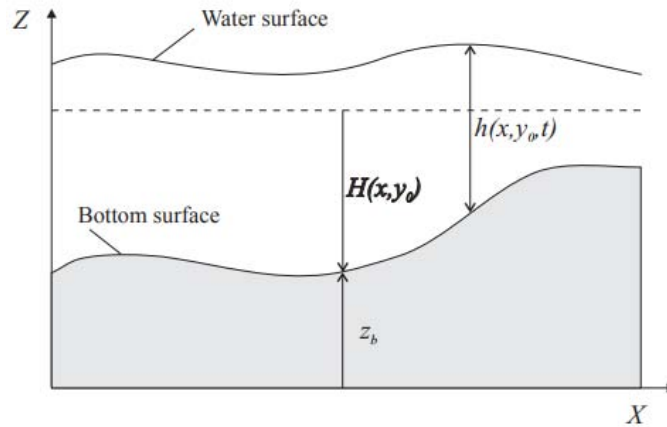
μηδενίζεται και ο όρος $f_{n,x}$ παραλείπεται. Επίσης, η εξίσωση απλοποιείται περαιτέρω λαμβάνοντας τις μέσες τιμές της ροής προς όλες τις πλευρές του κελιού. Τέλος, με αντικατάσταση των όρων f και g προκύπτει η εξίσωση 3.17.

$$\Delta X \Delta Y \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} = - \oint_S (f_{n,x}) \Delta X - \oint_S (g_{n,y}) \Delta Y \quad \text{Εξίσωση 3.15}$$

$$\Delta X \Delta Y \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} = - \sum_{ABCD} (\bar{f}_{n,x}) \Delta X - \sum_{ABCD} (\bar{g}_{n,y}) \Delta Y \quad \text{Εξίσωση 3.16}$$

$$\Delta X \Delta Y \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} = - \sum_{ABCD} \bar{u} \bar{h} \Delta X_{n,x} - \sum_{ABCD} \bar{v} \bar{h} \Delta Y_{n,y} \quad \text{Εξίσωση 3.17}$$

Στην συνέχεια, αντικαθιστώντας στην εξίσωση 3.17 τους παρακάτω όρους, λαμβάνουμε την εξίσωση 3.19. Όπου $\Omega(H) = \Delta X \times \Delta Y \times h$ είναι ο όγκος του κελιού, $A(H) = \Delta X \times \bar{h}$ και $\Delta Y \times \bar{h}$ η επιφάνεια των πλευρών του κελιού και $h = H - z_b$ όπου H η στάθμη επιφάνειας του νερού και z_b η στάθμη του πυθμένα, όπως εμφανίζεται και στο σχήμα 13.



Σχήμα 13: Σχηματική απεικόνιση των παραμέτρων H , h και z_b

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{\Omega}(H) = - \sum \bar{u} A(H)_{n,x} - \sum \bar{v} A(H)_{n,y} \quad \text{Εξίσωση 3.18}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{\Omega}(H) = - \sum_{ABCD} (VA(H)) \cdot n \quad \text{Εξίσωση 3.19}$$

Έπειτα, με βάση τις καρτεσιανές συντεταγμένες, θεωρούμε την δεξιά πλευρά του κελιού ως $i + \frac{1}{2}$, την αριστερή πλευρά του κελιού ως $i - \frac{1}{2}$, την πάνω πλευρά του κελιού ως $j + \frac{1}{2}$, και την κάτω πλευρά του κελιού ως $j - \frac{1}{2}$. Επομένως, προκύπτει ο συντελεστής n_x θετικός για την δεξιά πλευρά του κελιού και αρνητικός για την αριστερή. Αντίστοιχα, ο συντελεστής n_y θετικός για την πάνω πλευρά του κελιού και αρνητικός για την κάτω. Έτσι, προκύπτει η τελική μορφή της εξίσωσης της μεθόδου πεπερασμένων όγκων 3.20.

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{\Omega}(H) = -\frac{1}{\Delta X} (\bar{u}A(H)_{(i+\frac{1}{2})} - \bar{u}A(H)_{(i-\frac{1}{2})}) - \frac{1}{\Delta Y} (\bar{v}A(H)_{(j+\frac{1}{2})} - \bar{v}A(H)_{(j-\frac{1}{2})})$$

Εξίσωση 3.20

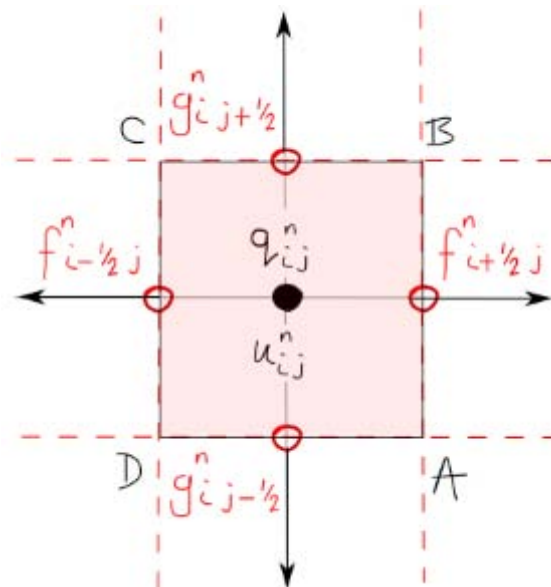
Όσον αφορά τον υπολογισμό των μεταβλητών της ροής, μία από τις εκδοχές της μεθόδου πεπερασμένων όγκων είναι η κεντροκομβική μέθοδος που αναλύθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 14. Για τον υπολογισμό των συνιστωσών της ροής γίνεται χρήση των εξισώσεων 3.21 και 3.22.

$$f_{AB} = \frac{f_{(i,j)} + f_{(i+1,j)}}{2}$$

Εξίσωση 3.21

$$g_{BC} = \frac{g_{(i,j)} + g_{(i,j+1)}}{2}$$

Εξίσωση 3.22



Σχήμα 14: Υπολογιστικοί κόμβοι δομημένου πλέγματος πεπερασμένων όγκων

Η εφαρμογή των εξισώσεων 3.21 και 3.22 στην εξίσωση 3.20 έχει ως αποτέλεσμα την απόδοση της εξίσωσης 3.23.

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{\Omega}(H)_{i,j} = -\frac{1}{2\Delta X} (u A(H)_{i+1,j} - u A(H)_{i-1,j}) - \frac{1}{2\Delta Y} (v A(H)_{i,j+1} - v A(H)_{i,j-1})$$

Εξίσωση 3.23

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, το HEC-RAS συνδυάζει τις εξισώσεις συνέχειας και διάχυσης κύματος σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ορμής για να υπολογίσει τη στάθμη της επιφάνειας του νερού. Αρχικά αντικαθίσταται η εξίσωση διάχυσης κύματος στην αρχή

διατήρησης της μάζας και εν συνεχεία ολοκληρώνεται η εξίσωση 2.6. Το αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης είναι η εξίσωση 3.19.

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{\Omega}(H) + \sum_{ABCD} VA(H)n = 0 \quad \text{Εξίσωση 3.24}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{\Omega}(H) - \sum_{ABCD} \frac{Ak(H)R(H)^{\frac{2}{3}}}{n} \frac{\nabla H}{\nabla H^{\frac{1}{2}}} n = 0 \quad \text{Εξίσωση 3.25}$$

Ορίζουμε ως K την γεωμετρική απόδοση του καναλιού μέσα στο οποίο πραγματοποιείται η ροή του ποταμού, σύμφωνα με την εξίσωση 3.26.

$$K = \frac{1.486Ak(H)R(H)^{\frac{2}{3}}}{n} \quad \text{Εξίσωση 3.26}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{\Omega}(H) - \sum_{ABCD} K \nabla H^{\frac{1}{2}} n = 0 \quad \text{Εξίσωση 3.27}$$

Η ροή (Q) ισούται με:

$$Q = K \sqrt{\nabla H} \quad \text{Εξίσωση 3.28}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{\Omega}(H) - \sum_{ABCD} Qn = 0 \quad \text{Εξίσωση 3.29}$$

Το παράρτημα Α εμπεριέχει όλους τους πίνακες υδραυλικών ιδιοτήτων για ένα κελί (Hydraulic properties tables). Σύμφωνα με αυτούς του πίνακες λαμβάνονται οι απαραίτητες τιμές που χρησιμοποιούνται στον υπολογιστικό αλγόριθμο του λογισμικού για την προσομοίωση της ροής.

Κεφάλαιο 4

Περιοχή μελέτης

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναλυτική περιγραφή της περιοχής μελέτης. Στην παρούσα εργασία ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε η λεκάνη απορροής του χειμάρρου Κραυσίδανα, της αστικής περιοχής της πόλης του Βόλου, του νομού Μαγνησίας. Συγκεκριμένα, στις επόμενες υποενότητες γίνεται αναφορά στα γεωγραφικά, πληθυσμιακά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής. Ακόμη, αναλύεται το κλίμα της περιοχής και παρουσιάζονται χάρτες χρήσεων γης.

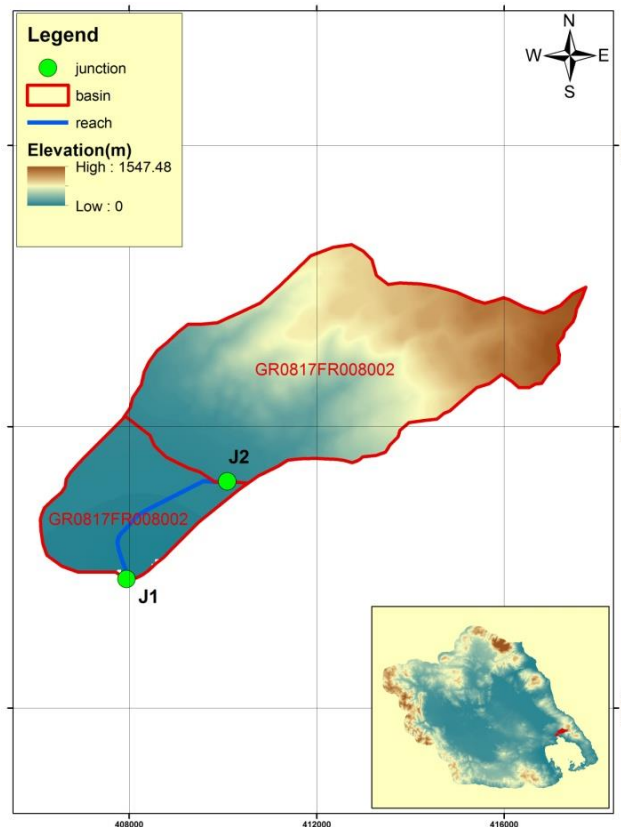
4.2 Γεωγραφικά- Πληθυσμιακά στοιχεία

Η αστική περιοχή του Βόλου αποτελεί την πρωτεύουσα του Νομού Μαγνησίας και τοποθετείται γεωγραφικά στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας (GR08). Το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας παρουσιάζει πολύ μεγάλη ομοιότητα με το αντίστοιχο γεωγραφικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Εξάιρεση αποτελούν μικρά τμήματα του γεωγραφικού διαμερίσματος, κυρίως στα νότια και νοτιοδυτικά, τα οποία περιλαμβάνονται σε γειτονικά υδατικά διαμερίσματα. Σε τοπικό επίπεδο, το πολεοδομικό συγκρότημα του Βόλου βρίσκεται στο μυχό του Παγασητικού κόλπου, σε μικρή απόσταση από τον κύριο οδικό άξονα της χώρας, σε απόσταση 330 χλμ. από την πρωτεύουσα Αθήνα και 214 χλμ. από τη Θεσσαλονίκη, οι δύο μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας.

Σύμφωνα με την απογραφή της ΕΛΣΤΑΤ του 2011, ο μόνιμος πληθυσμός της Δημοτικής Ενότητας Βόλου ανέρχεται σε 86.046 κατοίκους ενώ το πολεοδομικό συγκρότημα αριθμεί 125.248 κατοίκους. Ο διευρυμένος Καλλικρατικός Δήμος Βόλου έχει έκταση 387,14 Km² και πληθυσμό που ανέρχεται στους 144.449 κατοίκους. 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. Είναι κτισμένη με μέτωπο κυρίως στον Παγασητικό κόλπο και εκτείνεται ως τις παρυφές του Πηλίου.

Ο Κραυσίδωνας αποτελεί τον πιο αξιόλογο χείμαρρο ανάμεσα στους δύο άλλους χειμάρους, τον Ξηριά και τον Άναυρο, που υπάγονται στο πολεοδομικό συγκρότημα της πόλης. Πηγάζει από τις κορυφές του Πηλίου και συγκεκριμένα από το Πιασίδι. Στην ορεινή ζώνη αποτελείται επίσης από ένα σύστημα πηγών και ρεματιών που διοχετεύουν τα νερά τους μέσω της κοίτης του χείμαρρου. Ο χείμαρρος στο μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής του, ως τις εκβολές του, περνάει μέσα από την πόλη, διασχίζοντας ολόκληρο τον πολεοδομικό ιστό και χωρίζοντάς τον σε δύο δήμους, το δήμο Ν. Ιωνίας και το δήμο Βόλου. Ο Κραυσίδωνας δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένας χείμαρρος, ο οποίος σε περιόδους έντονων βροχοπτώσεων τον χειμώνα μπορεί να πλημμυρίσει, ενώ κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, το νερό μπορεί να είναι ελάχιστο ως και ανύπαρκτο.

Στην παρούσα εργασία προσομοιώθηκε μικρότερο μέρος του χείμαρρου, από την χιλιομετρική θέση 3+691 m έως την εκβολή του. Η λεκάνη απορροής του χείμαρρου Κραυσίδωνα τοποθετείται γεωγραφικά ανάμεσα σε δύο υπολεκάνες του Υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας, περιλαμβάνει δύο κόμβους και ένα κλάδο υδρογραφικού δικτύου (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 15. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη της λεκάνης απορροής του χείμαρρου.



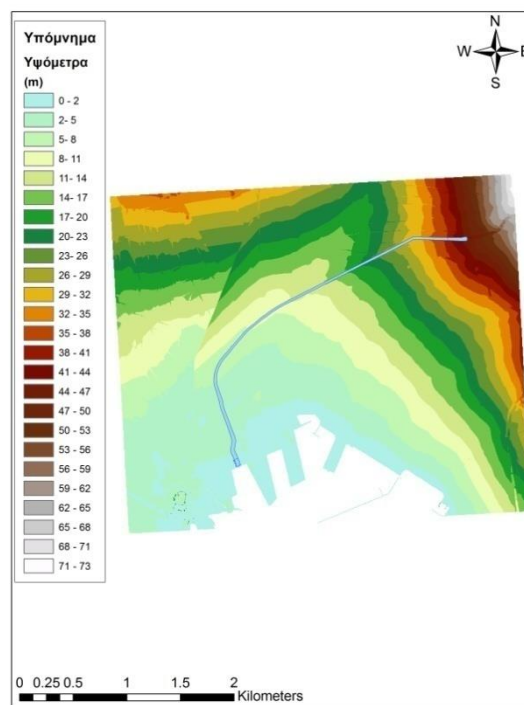
Σχήμα 15: Χάρτης υψομέτρου της λεκάνης απορροής του Κραυσίδωνα μαζί με τα στοιχεία του μοντέλου βροχής απορροής

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκάνης απορροής χειμάρρου Κραυσίδωνα (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017)

Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκάνης απορροής ρέματος Κραυσίδωνα			
Έκταση (km ²)	35.57	Υψόμετρο εξόδου (m)	0.0
Αδιαπέρατη επιφάνεια (%)	0.00	Χρόνος συγκέντρωσης (h)	2.63
Μέγιστο μήκος ροής (km)	15.02	Διάρκεια βροχόπτωσης σχεδιασμού (h)	12.00
Μέσο υψόμετρο (m)	486.3	Χρονικό βήμα (h)	0.25

4.3 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά

Η αστική περιοχή του Βόλου παρουσιάζει απλή γεωμορφολογική εικόνα, με τα ορεινά τμήματά της στα βορειοανατολικά και τα πεδινά στα δυτικά. Σε ότι αφορά το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης το υψόμετρο κυμαίνεται από 0 έως 73 m. Το υψηλότερο υψόμετρο θεωρούμε ότι βρίσκεται στους πρόποδες του όρους Πηλίου. Αντίθετα τα χαμηλότερα υψόμετρα αποδίδονται στην ακτογραμμή της περιοχής μελέτης. Η προσομοίωση του ποταμού ξεκίνησε από τη χιλιομετρική θέση 3+691 m με υψόμετρο κοντά στα 43 m., όπως εμφανίζεται και στο Σχήμα 16. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) αποδόθηκε από το εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων, του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

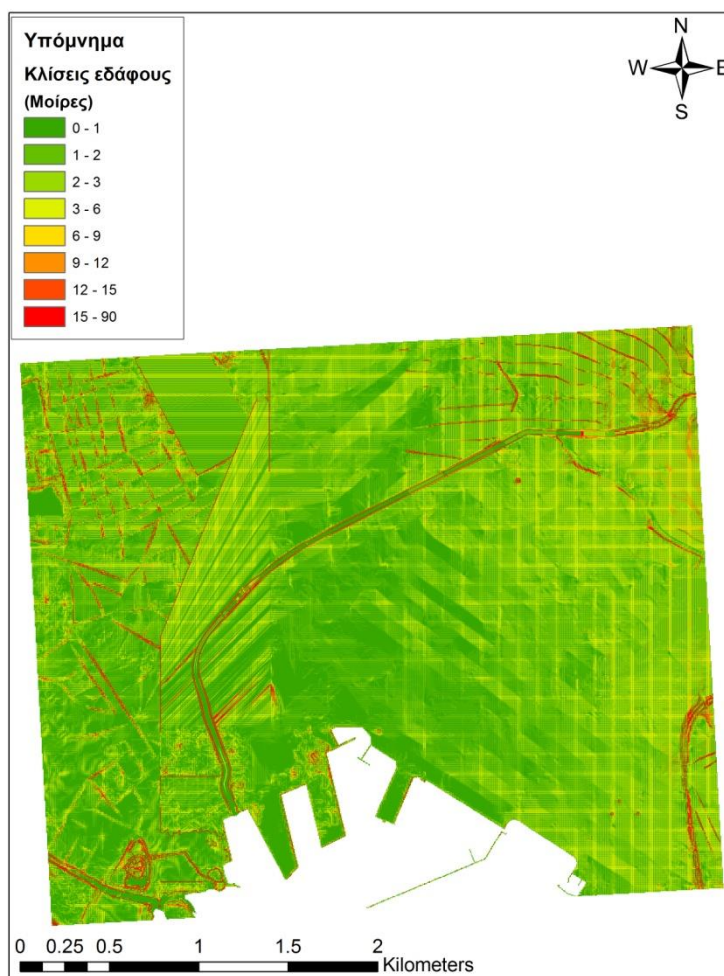


Σχήμα 16: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής μελέτης

Όσον αφορά τις κλίσεις του εδάφους, θεωρούμε ότι η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται ως ομαλή αποτελούμενη από ήπιες κλίσεις. Παρατηρείται ότι οι εντονότερες κλίσεις βρίσκονται στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, με κλίσεις της τάξεως 6-9 μοιρών, όπως προέκυψε από την ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου το εδάφους (DEM). Επίσης, σύμφωνα με το Σχήμα 17, στην εκβολή του ποταμού παρατηρούνται οι ηπιότερες κλίσεις της τάξεως 0-1 μοιρών. Τέλος, τα ποσοστά των κλίσεων εδάφους παρατίθενται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Ποσοστά κάλυψης κλίσεων εδάφους σε μοίρες

Κλίσεις εδάφους σε μοίρες (°)	0-1	1-2	2-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-90
Πόσοστό (%)	33%	9%	9%	10%	18%	6%	3%	11%



Σχήμα 17: Κλίσεις εδάφους περιοχής μελέτης σε μοίρες

4.4 Κλίμα

Η αστική περιοχή του Βόλου απολαμβάνει ένα ήπιο μεσογειακό κλίμα. Χαρακτηρίζεται από ήπιους χειμώνες και σχετικά υποφερτή ζέστη το καλοκαίρι. Δεδομένου του ότι είναι παραθαλάσσια περιοχή, το κλίμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως υγρό με υψηλή σχετική υγρασία. Σύμφωνα με δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού του Βόλου, με απόλυτο υψόμετρο 3 m, για τη χρονική περίοδο 42 ετών 1960-2002, η μέση ετήσια θερμοκρασία ανέρχεται στους 17.2 C°. Επίσης, οι υψηλότερες βροχοπτώσεις παρατηρούνται τους μήνες Οκτώβριο, Νοέμβριο και Δεκέμβριο ενώ οι πιο ξηροί μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Η μέση ετήσια βροχόπτωση αγγίζει τα 460.7 mm. Τέλος, μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού για τη χρονική περίοδο 25 ετών 1958-1983, έδειξαν ότι η μέση ετήσια σχετική υγρασία είναι 67.2%.

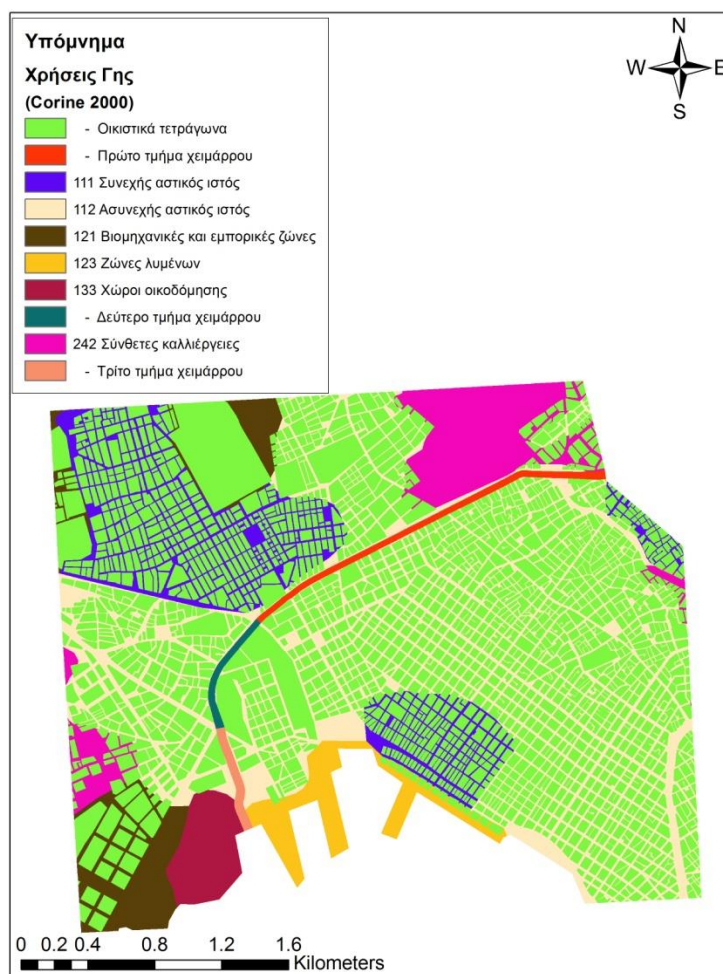
4.5 Χρήσεις γης

Στην υδραυλική προσομοίωση, για την ανάπτυξη του μοντέλου, αποδίδονται συντελεστές τραχύτητας για τις διάφορες χρήσεις γης. Η κατηγοριοποίηση των χρήσεων γης έγινε σύμφωνα με στοιχεία του προγράμματος Corine 2000 της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 8 στο Παράρτημα Α. Στην παρούσα μελέτη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 18, το κύριο υδατόρρευμα χωρίστηκε σε τρία τμήματα, όπου για το καθένα αποδόθηκε διαφορετικός συντελεστής τραχύτητας. Ακόμη, τα οικιστικά τετράγωνα, που καλύπτουν πολύ μεγάλο μέρος της περιοχής μελέτης, προσομοιώθηκαν λαμβάνοντας ξεχωριστή τιμή συντελεστή τραχύτητας. Παραπάνω, στην ενότητα 2.6, είχαμε αναφέρει ότι άλλοι τρόποι προσομοίωσης των οικιστικών τετραγώνων είναι με την μορφή των στερεών ορίων (building blocks) ή με την εμφάνιση του ποσοστού της πλημμύρας που εισέρχεται στα όρια των κτιρίων.

Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3, ο συνεχής αστικός ιστός και οι σύνθετες καλλιέργειες κυριαρχούν με ποσοστό ίσο με 20%. Την επόμενη μεγαλύτερη έκταση καταλαμβάνουν τα οικιστικά τετράγωνα με ποσοστό 19% της συνολικής έκτασης. Ακολουθούν οι βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες, όπου βρίσκονται προς τα δυτικά της περιοχής, με ποσοστό 13%. Ο ασυνεχής αστικός ιστός καταλαμβάνει ποσοστό 7%. Ομοίως, οι χώροι οικοδόμησης, που βρίσκονται δίπλα στην εκβολή του χειμάρρου, έχουν το ίδιο ποσοστό. Τέλος, όσον αφορά το κύριο υδατόρρευμα, το ανώτερο τμήμα του κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό της τάξεως του 3%, ενώ το μεσαίο και το τμήμα που περιλαμβάνει την εκβολή του χειμάρρου κατέχουν εξίσου το μικρότερο ποσοστό 1%.

Πίνακας 3: Ποσοστά κάλυψης χρήσεων γης

Κωδικός Corine	Χρήσεις γης	Ποσοστό %
-	Οικιστικά τετράγωνα	19%
-	Πρώτο τμήμα χειμάρρου	3%
111	Συνεχής αστικός ιστός	20%
112	Ασυνεχής αστικός ιστός	7%
121	Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες	13%
123	Ζώνες λυμένων	9%
133	Χώροι οικοδόμησης	7%
-	Δεύτερο τμήμα χειμάρρου	1%
242	Σύνθετες καλλιέργειες	20%
-	Τρίτο τμήμα χειμάρρου	1%



Σχήμα 18: Χρήσεις γης περιοχής μελέτης


Κεφάλαιο 5

Υδραυλική προσομοίωση

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία υδραυλικής προσομοίωσης. Η ανάπτυξη του μοντέλου πραγματοποιήθηκε στις δύο διαστάσεις με τη χρήση διδιάστατου πλέγματος, χωρίς την ύπαρξη μονοδιάστατων στοιχείων (διατομών). Η δόμηση του μοντέλου επιτυγχάνεται σταδιακά με την επεξεργασία των δεδομένων. Αρχικά, διαμορφώνονται τα επίπεδα του εδάφους και εισάγονται τα γεωμετρικά δεδομένα. Έπειτα, δομείται το πλέγμα κελιών, ορίζονται οι οριακές συνθήκες και κατηγοριοποιούνται οι διάφορες χρήσεις γης. Τελευταίο βήμα αποτελεί η εξαγωγή των χαρτών πλημμύρας.

5.2 Επίπεδα εδάφους

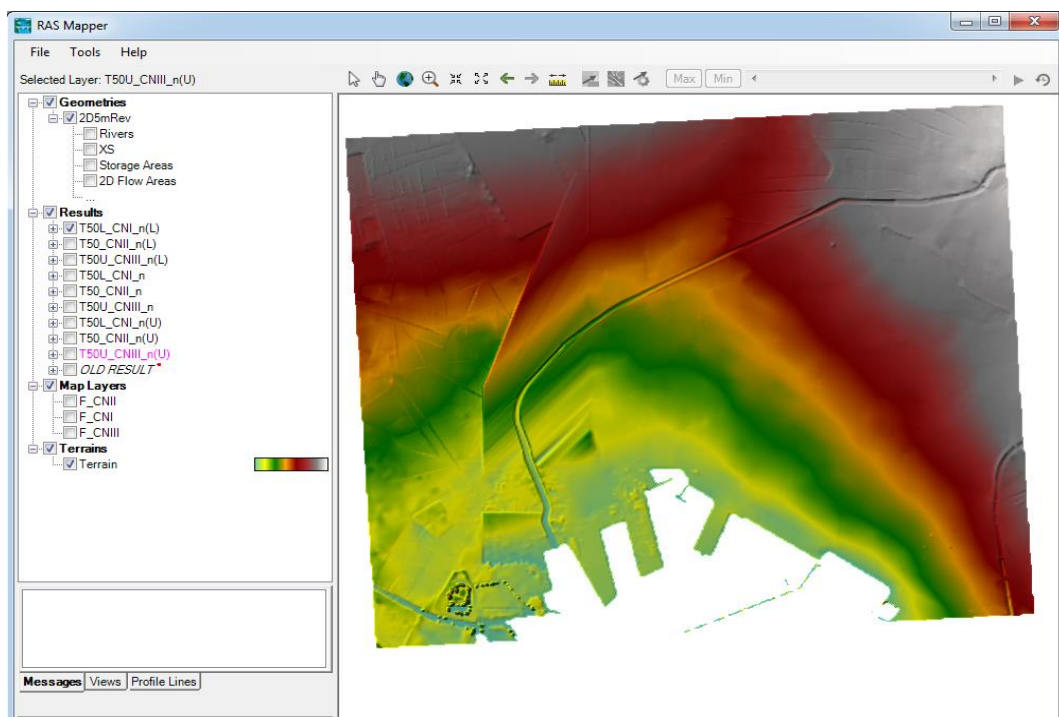
Ισχυρή προϋπόθεση για την ανάπτυξη σωστού υδραυλικού μοντέλου είναι η δημιουργία ακριβούς και λεπτομερούς μοντέλου εδάφους. Οι διαδικασίες ανάπτυξης του μοντέλου εδάφους γίνονται στο περιβάλλον RAS Mapper  του λογισμικού. Στο περιβάλλον RAS Mapper μπορούν να εισαχθούν δεδομένα εδάφους τα οποία βρίσκονται υπό μορφή πλέγματος πλωτών σημείων (*.flt), μορφή GeoTIFF(*.tif), μορφή αρχείων πλέγματος ESRI κτλ (Brunner, 2016). Αρχικά, προσδιορίζεται το σύστημα χωρικών συντεταγμένων. Στην παρούσα μελέτη, για την ανάπτυξη του μοντέλου επιλέχθηκε το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 ή αλλιώς ΕΓΣΑ'1987. Το επίπεδο εδάφους που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του μοντέλου εδάφους αποτελείται από εικόνα raster διαστάσεων 3.940 m x 3.940 m. Το αρχείο εικόνας raster εμπεριέχει 13.238.400 κελία (pixel), με το κάθε κελί (pixel) να έχει διαστάσεις 1 m x 1 m και ξεχωριστό υψόμετρο.

Σε πολλές περιπτώσεις, το βάθος του υδατορρεύματος δεν αποδίδεται σωστά από τα υψομετρικά δεδομένα του εδάφους. Για το λόγο αυτό το HEC-RAS παρέχει τη δυνατότητα στον χρήστη να μορφοποιήσει τη βαθυμετρία του υδατορρεύματος τροποποιώντας τα δεδομένα.

Η τροποποίηση γίνεται ελέγχοντας τα δεδομένα των επιπέδων (Brunner, 2016):

- River (stream centerline)
- Bank Line
- XS (cross sections)
- XS Interpolation Surface

Στην παρούσα εργασία η βαθυμετρία του υδατορρέυματος αποδόθηκε τροποποιώντας τα δεδομένα των παραπάνω επιπέδων. Εντούτοις, αποτυπώθηκε το υδατόρρευμα ως μονοδιάστατο μοντέλο και εν συνεχεία συνδέθηκε με το διδιάστατο μοντέλο της επιφάνειας κατάκλυσης της πλημμύρας. Το μοντέλο του εδάφους και η βαθυμετρία του υδατορρέυματος αποδόθηκαν από το εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων, του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το επίπεδο εδάφους παρουσιάζεται στο επόμενο Σχήμα 19.



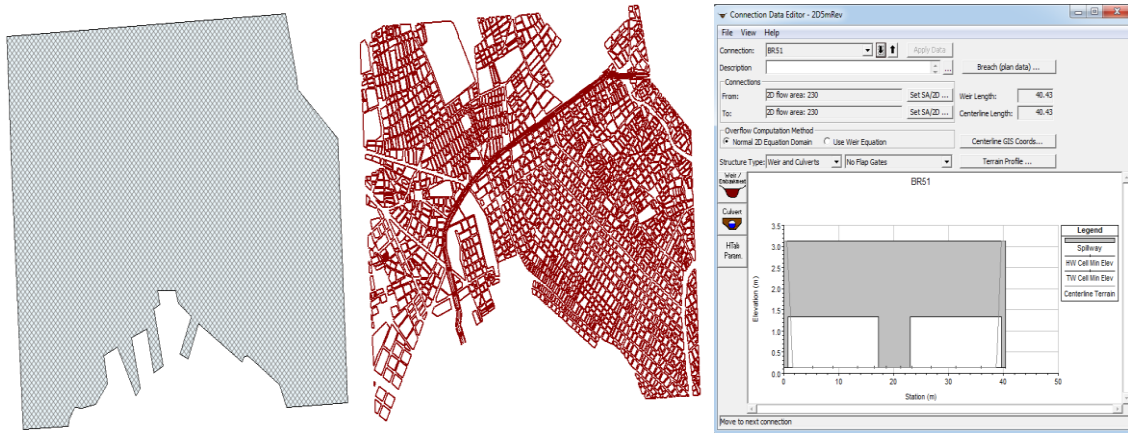
Σχήμα 19: Επίπεδο εδάφους στο περιβάλλον RAS Mapper

5.3 Γεωμετρικά δεδομένα

Το διδιάστατο πλέγμα κελιών είναι βασικό μέρος της υδραυλικής προσομοίωσης σε δύο διαστάσεις. Όπως προαναφέρθηκε στην υποενότητα 3.2, βάση των μεθόδων πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων όγκων, το λογισμικό υπολογίζει το ύψος της επιφάνειας του νερού σε κάθε υπολογιστικό σημείο του πλέγματος και για κάθε χρονικό βήμα. Η δημιουργία του διδιάστατου πλέγματος γίνεται με την χρήση της εντολής 2D Flow Area. Με την εντολή 2D Flow Area ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ορίσει τα όρια του υδατορρέυματος και της επιφάνειας κατάκλυσης.

Αρχικά, με την εντολή 2D Flow Area, δημιουργείται το σχήμα του διδιάστατου πλέγματος το οποίο λαμβάνει χωρικές συντεταγμένες, επιλέγεται το μέγεθος των κελιών και αποδίδονται συντελεστές τραχύτητας για τα κελιά του πλέγματος. Η χρήση των συντελεστών τραχύτητας ερμηνεύεται καλύτερα στην επόμενη υποενότητα. Έπειτα, με την χρήση της εντολής 2D Area Breaklines, προσδιορίζονται τα σημεία εκείνα τα οποία χρήζουν λεπτομερέστερης ανάλυσης. Συγκεκριμένα, γίνεται ο προσδιορισμός των υψομέτρων και των χωρικών συντεταγμένων των σημείων. Συνήθως, είναι σημεία τα οποία έχουν απότομη αλλαγή κλίσης ή μεγάλη διαφορά ταχύτητας. Στην παρούσα μελέτη, όλα τα οικιστικά τετράγωνα καθώς και η γεωμετρία του υδατορρέυματος, δηλαδή η κεντρική κοίτη και οι όχθες του χειμάρρου, αποδόθηκαν με τη χρήση της εντολής 2D Area Breaklines. Τέλος, με την χρήση της εντολής 2D Area BC Lines ορίζονται χωρικά οι οριακές συνθήκες εισροής και εκροής, δίνοντας χωρικές συντεταγμένες στα όρια του διδιάστατου πλέγματος. Στην συνέχεια ορίζεται ο τύπος των οριακών συνθηκών όπως θα αναλυθεί παρακάτω, σε επόμενη υποενότητα.

Στην περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας, το υδατόρρευμα απαρτίζεται από 20 γέφυρες. Η απόδοση των γεφυρών έγινε θεωρώντας μία παραδοχή, αυτή της χρήσης της εντολής 2D Flow Area Connections. Σύμφωνα με αυτήν την παραδοχή, οι γέφυρες αποτυπώνονται με την μορφή οχετού, υπολογίζοντας το συνολικό όγκο που μπορεί να διοχετευτεί μέσω της διατομής τους. Η υδραυλική κατασκευή, στην προκειμένη περίπτωση η γέφυρα, τοποθετείται ενδιάμεσα δύο περιοχών διδιάστατου πλέγματος και με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται η ροή που διαπερνά από μία σειρά κελιών στην άλλη. Στο Σχήμα 20 παρουσιάζεται το διδιάστατο πλέγμα, τα Breaklines της περιοχής μελέτης και η γεωμετρία της τελευταίας πριν την εκροή του χειμάρρου γέφυρας. Στο Σχήμα 21 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αποτύπωσης τεχνικού έργου, όπου με βάση τα στοιχεία των συντεταγμένων του έγινε η ψηφιοποίηση των γεφυρών.



Σχήμα 20: 2D Flow Area Mesh, 2D Area Breaklines, και 2D Flow Area Connection

ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΡΓΟ	ΓΕΦΥΡΕΣ
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ: ΓΕΦΥΡΑ (BR)	
ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΡΓΟΥ: BR_51	
ΠΕΡΙΟΧΗ: GR08_ΒΟΛΟΣ	
ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑ: ΚΡΑΥΣΙΔΩΝΑΣ	
ΗΜ/ΝΙΑ ΑΠΟΤ.: 17/02/2016	
ΟΜΑΔΑ ΑΠΟΤ.: ΧΡΗΣΤΟΣ ΣΑΛΟΓΙΑΝΝΟΣ	
ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ	ΣΗΜΕΙΟ
X	407932,848
Y	4356782,977
Z	2,752

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ	
ΤΥΠΟΣ	ΠΛΑΚΟΣΚΕΠΗΣ
ΥΛΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (ΜxΠ)	50,44 x 20,61
ΚΑΘΑΡΟ ΠΛΑΤΟΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ/ΩΝ	ΑΝΑΝΤΗ: 33,05 m ΚΑΤΑΝΤΗ: 33,05 m
ΥΨΟΜ. ΠΥΘΜ. ΚΟΙΤΗΣ:	0,052 m
ΥΨΟΜ. ΔΙΑΦΟΡΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ / ΑΡΧΗ ΓΕΦΥΡΑΣ	2,70 m
ΤΥΠΟΣ ΡΟΗΣ	ΣΤΑΘΕΡΗ / ΔΗΛ.ΣΤΑΘΕΡΗ
ΣΤΑΘΜΗ ΝΕΡΟΥ	0,50 m
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ	
ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	
ΥΠΑΡΧ. ΕΜΠΟΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΡΟΗ	ΝΑΙ / ΟΧΙ
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ:	1 x 3,40 x 1,80 1 x 5,80 x 1,20
ΤΥΠΟΣ ΟΔΟΣΤ/ΤΟΣ:	ΠΛΑΤΟΣ ΟΔΟΣΤ/ΤΟΣ: 17,41 m ΑΣΦΑΛΤΟΣ
ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΑ ΟΔΟΣ/ΤΟΣ: ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΚΙΓΚΛΙΑΔΩΜΑ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΟΔΟΣ/ΤΟΣ: 2,602 m
ΥΨΟΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΩΝ:	1,10 m
ΠΑΧΟΣ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ:	
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ:	P125608, P125611, P130711,

ΟΨΗ

ΚΑΤΟΨΗ

<p>P125608</p>	<p>P125611</p>
<p>P130711</p>	<p>P133808</p>

Σχήμα 21: Παράδειγμα αποτύπωσης τεχνικού έργου BR51

5.4 Ταξινόμηση χρήσεων γης

Το HEC-RAS χρησιμοποιεί την εξίσωση Manning για να υπολογίσει τις απώλειες λόγω τριβής πάνω στην επιφάνεια του εδάφους. Οι απώλειες λόγω τριβής εισέρχονται στην εξίσωση της αρχής διατήρησης της ορμής, όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 2.5 εξίσωση 2.4, σύμφωνα με την υπολογιστική διαδικασία που αναπτύσσεται στο λογισμικό. Η συσχέτιση των τιμών των συντελεστών τραχύτητας με το διδιάστατο πλέγμα γίνεται με την δημιουργία τριών αρχείων χρήσεων γης (shape files) στο περιβάλλον ArcGIS και την εισαγωγή τους στο περιβάλλον RAS Mapper του λογισμικού.

Στο περιβάλλον RAS Mapper αρχικά δημιουργούνται πολύγωνα για κάθε είδος χρήσεων γης και εν συνεχεία αποδίδονται τιμές συντελεστών σε κάθε είδος. Επιπλέον, συσχετίζονται τα δεδομένα κατηγοριοποίησης χρήσεων γης με τα γεωμετρικά δεδομένα. Μέσω της εντολής Manning's n by land cover ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επεξεργαστεί τα δεδομένα χρήσεων γης και να προσδιορίσει τις τιμές των συντελεστών που επιθυμεί. Στην παρούσα εργασία, όπως έχουμε προαναφέρει, η υδραυλική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για τρία σενάρια συντελεστών τραχύτητας. Σενάριο χαμηλού συντελεστή τραχύτητας $n(L)$, μέσου n και υψηλού $n(U)$. Οι τιμές που αποδόθηκαν σε κάθε σενάριο παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Οι τιμές των συντελεστών τραχύτητας για τα οικιστικά τετράγωνα είναι πολύ υψηλές και ίδιες για τα τρία σενάρια. Ανέρχονται σε 0.11 και η υψηλή τους τιμή οφείλεται στην μέθοδο αποτύπωσης των κτιρίων που επιλέχθηκε, δηλαδή της τοπικής αύξησης των τριβών του πυθμένα. Επίσης, οι διαφορετικές τιμές των συντελεστών τραχύτητας για κάθε τμήμα του χειμάρρου οφείλονται στο ποσοστό της διευθέτησης των τμημάτων του.

Πίνακας 4: Τιμές συντελεστών τραχύτητας Manning n για τρία σενάρια

Κωδικός Corine	Χρήσεις γης	Συντελεστής τραχύτητας Manning		
		$n(L)$	n	$n(U)$
-	Οικιστικά τετράγωνα	0.11	0.11	0.11
-	Πρώτο τμήμα χειμάρρου	0.011	0.022	0.033
111	Συνεχής αστικός ιστός	0.0065	0.013	0.0195
112	Ασυνεχής αστικός ιστός	0.0065	0.013	0.0195
121	Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες	0.0065	0.013	0.0195
123	Ζώνες λυμένων	0.0065	0.013	0.0195
133	Χώροι οικοδόμησης	0.0065	0.013	0.0195
-	Δεύτερο τμήμα χειμάρρου	0.009	0.018	0.027
242	Σύνθετες καλλιέργειες	0.02	0.04	0.06
-	Τρίτο τμήμα χειμάρρου	0.0075	0.015	0.0225

5.5 Οριακές συνθήκες

Μετά την κατασκευή του διδιάστατου πλέγματος και την επεξεργασία των γεωμετρικών δεδομένων έχει δημιουργηθεί το υπόβαθρο για την διεξαγωγή της προσομοίωσης μη μόνιμης ροής. Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή των οριακών συνθηκών. Το HEC-RAS έχει 5 διαθέσιμες επιλογές για τον ορισμό των εξωτερικών οριακών συνθηκών:

- Flow Hydrograph
- Stage Hydrograph
- Normal Depth
- Rating Curve
- Precipitation

Η πιο δημοφιλής επιλογή είναι αυτή του υδρογραφήματος (Flow Hydrograph). Το υδρογράφημα παρουσιάζει τη χρονική μεταβολή της απορροής μιας περιοχής (λεκάνη απορροής). Με τον όρο απορροή εννοούμε τον όγκο νερού που διοχετεύεται μέσω μιας λεκάνης απορροής ανά μονάδα χρόνου. Συνήθως, η μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιείτε είναι τα κυβικά μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m^3/s).

Το HEC-RAS παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να χρησιμοποιήσει το υδρογράφημα σαν οριακή συνθήκη εισροής ή εκροής του υδατορρέυματος. Ωστόσο, συνήθως επιλέγεται το υδρογράφημα ως οριακή συνθήκη εισροής στο υδατόρρευμα και το ομοιόμορφο βάθος (Normal Depth) ως οριακή συνθήκη εκροής. Παρόλα αυτά, αρχικό μέλημα και στις δύο περιπτώσεις είναι ο ορισμός των οριακών συνθηκών που γίνεται με τη χρήση της εντολής SA/2D Area BC Lines. Απαραίτητη προϋπόθεση, για την επιλογή του ομοιόμορφου βάθους (Normal Depth), ως οριακή συνθήκη εκροής, είναι ο υπολογισμός της κλίσης του πυθμένα του υδατορρέυματος, δηλαδή της κλίσης της γραμμής ενέργειας (friction slope). Στην εκροή του υδατορρέυματος το HEC-RAS χρησιμοποιεί την εξίσωση Manning για την εκτίμηση της στάθμης νερού που προέκυψε κατά την προσομοίωση. Στην παρούσα εργασία η κλίση του χειμάρρου Κραυσίδωνα υπολογίστηκε ίση με 0,006 m/m.

Τα υδρογραφήματα εισροής που χρησιμοποιήθηκαν ως οριακές συνθήκες στην προσομοίωση προέκυψαν σύμφωνα με τη μέθοδο SCS Runoff Curve Number που ανέπτυξε η Soil Conservation Service. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του περισσεύματος της βροχής ή την εκτίμηση της συνολικής απορροής που προήλθε από βροχή συγκεκριμένης διάρκειας με τη βοήθεια τριών μεταβλητών (SCS, 1972).

Οι τρεις μεταβλητές είναι:

- το ύψος βροχής
- η αρχική κατάσταση υγρασίας του εδάφους
- και το υδρολογικό σύμπλοκο εδάφους-καλύμματος

Το περίσσειμα βροχής βρίσκεται βάση της εξίσωση 5.1.

$$P_e = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} \quad \text{Εξίσωση 5.1}$$

Όπου P_e είναι το ύψος περισσεύματος της βροχής, P είναι το ύψος της βροχή, I_a είναι οι αρχικές απώλειες και S οι συνολικές απώλειες του εδάφους.

Σύμφωνα με τη μέθοδο της SCS έγινε εκτίμηση ότι οι αρχικές απώλειες (συγκράτησης και εξάτμισης) είναι το 20% των συνολικών απωλειών, δηλαδή της διαφοράς μεταξύ βροχής P και περισσεύματος βροχής P_e . Επομένως, σύμφωνα με την εμπειρική αυτή σχέση προκύπτει η εξίσωση 5.3.

$$I_a = 0.2 S \quad \text{Εξίσωση 5.2}$$

$$P_e = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8 S} \quad \text{Εξίσωση 5.3}$$

Όπου η παράμετρος S των συνολικών απωλειών, γνωστή και ως αριθμός καμπύλης CN, υπολογίζεται (σε mm) από την εξίσωση 5.4.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Εξίσωση 5.4}$$

Ο αριθμός καμπύλης CN για μία λεκάνη απορροής μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει των χρήσεων γης, των εδαφικών τύπων και των αρχικών συνθηκών υγρασίας. Ο υπολογισμός του γίνεται με βάση πίνακες που εξέδωσε η Soil Conservation Service. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο υπολογισμός του αριθμού καμπύλης απορροής CN στηρίζεται στις υποθέσεις αρχικής κατάστασης υγρασίας II και αρχικών απωλειών 0.2S. Για την αναγωγή του CN για άλλες κατηγορίες αρχικής υγρασίας αναπτύχθηκαν οι εμπειρικές σχέσεις των εξισώσεων 5.5 και 5.6.

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.4036+0.0059CN_{II}} \quad \text{Εξίσωση 5.5}$$

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.334+0.01334CN_{II}} \quad \text{Εξίσωση 5.6}$$

Η αρχική κατάσταση υγρασίας χαρακτηρίζεται με βάση το συνολικό ύψος βροχής των προηγούμενων 5 ημερών. Διακρίνονται τρεις κατηγορίες σύμφωνα με τον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Κατηγορίες με βάση την υγρασία εδάφους (SCS, 1972)

Κατηγορία	Συνολικό ύψος βροχής των προηγούμενων 5 ημερών	
	Χειμερινή περίοδος	Περίοδος βλάστησης
CNI	<13	<35
CNII	13÷28	35÷53
CNIII	>28	>53

Η SCS κατατάσσει τα εδάφη σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με τη διαπερατότητα τους:

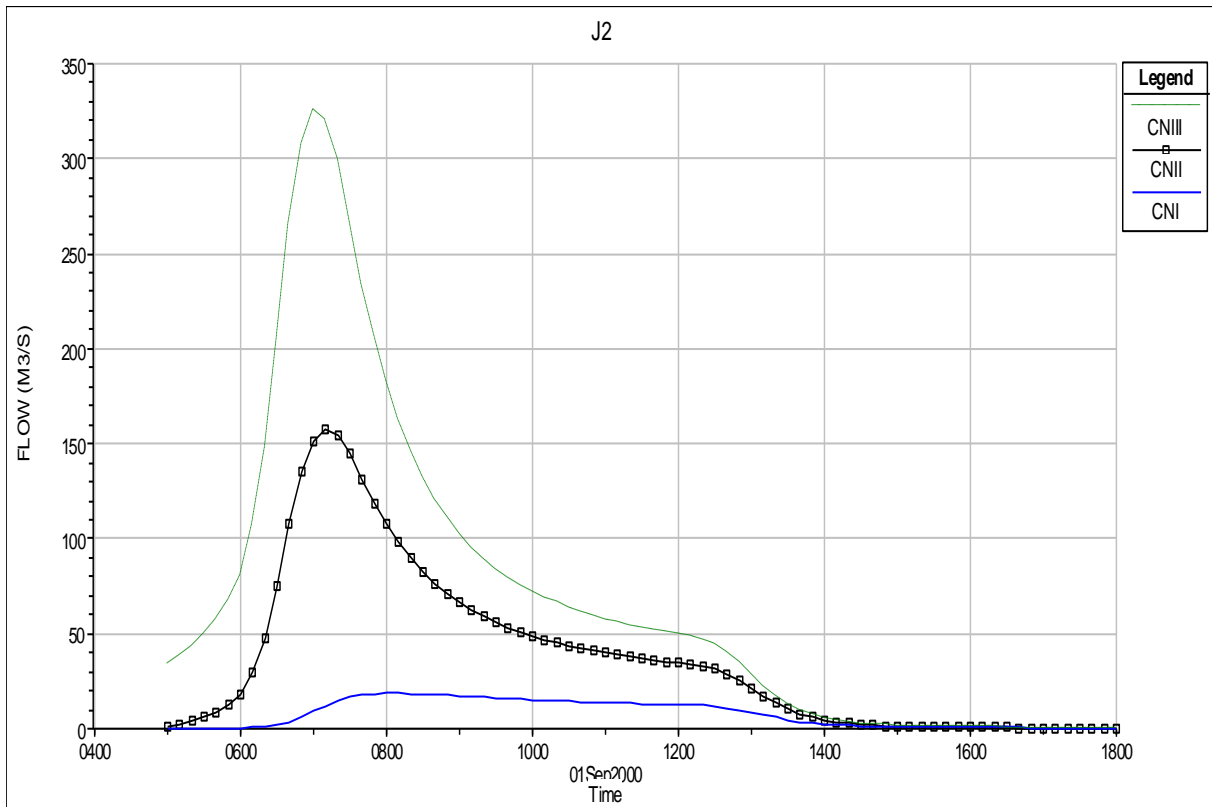
- Κατηγορία Α: Εδάφη με υψηλή βασική διηθητικότητα και υψηλή διαπερατότητα. Συνήθως αμμώδη ή χαλικώδη εδάφη.
- Κατηγορία Β: Εδάφη με μέτρια βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα που αποτελούνται από μέσης μέχρι ελαφρός σύστασης εδάφη.
- Κατηγορία Γ: Εδάφη με μικρή βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Περιλαμβάνουν εδάφη μέσης μέχρι βαριάς σύστασης.
- Κατηγορία Δ: Εδάφη με πολύ μικρή βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Περιλαμβάνουν κυρίως αργιλώδη εδάφη, εδάφη με υψηλή στάθμη υπόγειου νερού ή με αδιαπέρατο στρώμα.

Για συνθήκες υγρασίας τύπου CNII, η SCS δίνει πίνακα με τις τιμές του CN για κάθε ομάδα εδαφών και για διάφορες χρήσεις γης. Ο Πίνακας 6 είναι ένας μεταφρασμένος πίνακας που παρουσιάζει τις τιμές του CNII για χρήσεις γης σύμφωνα με την CORINE 2000.

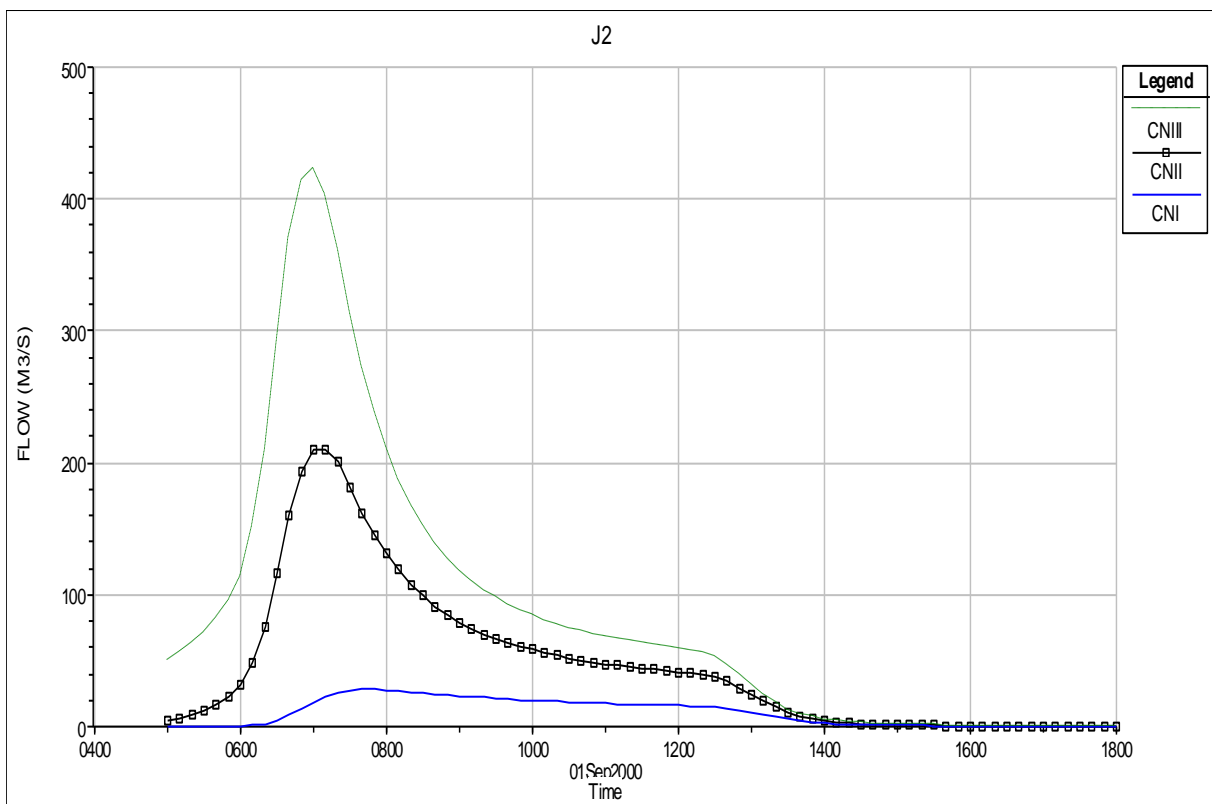
Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκαν και οι τρεις κατηγορίες αρχικών συνθηκών υγρασίας για τις περιόδους επαναφοράς T=50, T=100 και T=1000 έτη. Με αυτό τον τρόπο ελέγχθηκε η ευαισθησία του μοντέλου για τις διάφορες συνθήκες υγρασίας, ευμενείς, μέσες και δυσμενείς. Στα Σχήματα 22, 23 και 24 παρουσιάζονται τα υδρογραφήματα εισροής που χρησιμοποιήθηκαν στην υδραυλική προσομοίωση.

Πίνακας 6: Τιμές του CN για διάφορες χρήσεις γης (Miliani et al., 2011)

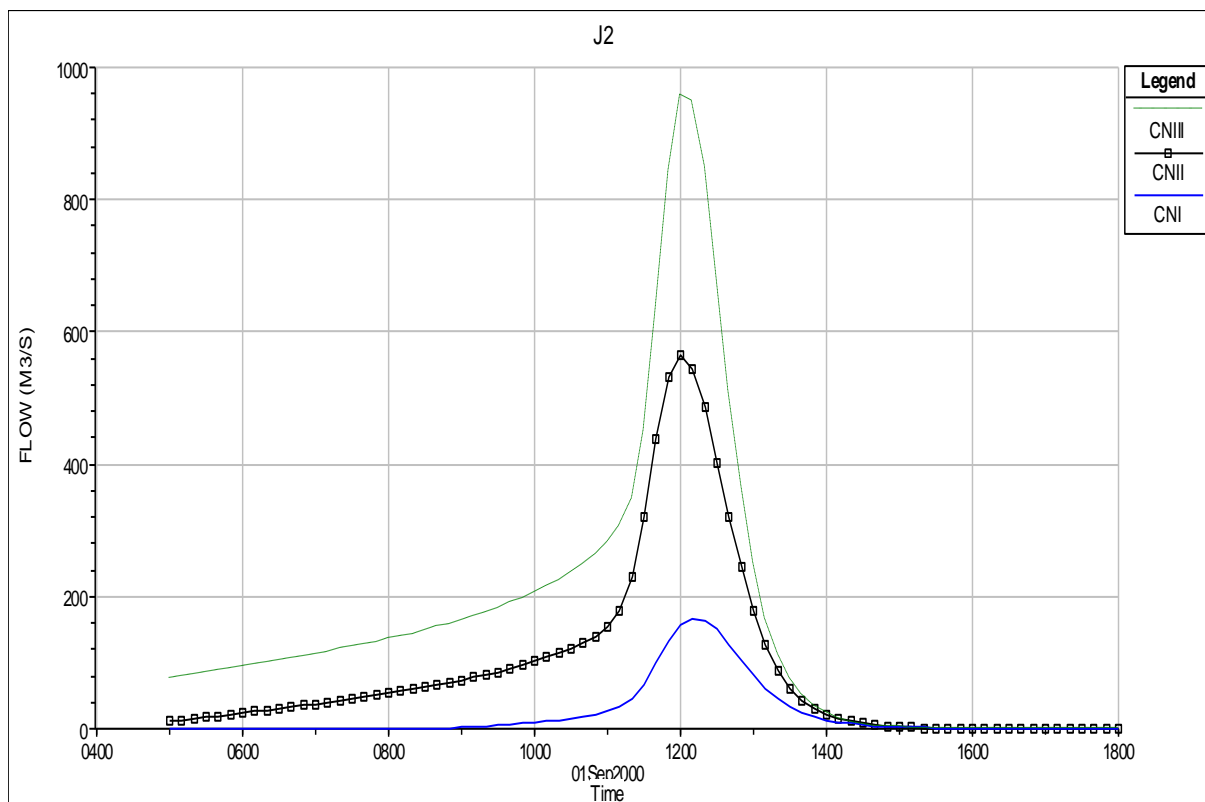
CORINE CLC 2000	Υδρολογικοί τύποι εδαφών			
	A	B	C	D
1.1.1 Συνεχής αστικός ιστός	89	92	94	95
1.1.2 Ασυνεχής αστικός ιστός	77	85	90	92
1.2.1 Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες	81	88	91	93
1.2.2 Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα	98	98	98	98
1.2.3 Ζώνες λιμένων	81	88	91	93
1.2.4 Αεροδρόμια	72	82	87	89
1.3.1 Χώροι εξορύξεως ορυκτών	72	82	87	89
1.3.2 Χώροι απορρίψεως απορριμμάτων	72	82	87	89
1.3.3 Χώροι οικοδόμησης	72	82	87	89
1.4.1 Περιοχές αστικού πρασίνου	68	79	86	89
1.4.2 Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	49	69	79	84
2.1.1 Μη αρδευόμενη γη	49	69	79	84
2.1.2 Μόνιμα αρδευόμενη γη	49	69	79	84
2.1.3 Ορυζώνες	59	70	78	81
2.2.1 Αμπελώνες	67	77	83	87
2.2.2 Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	65	75	82	86
2.2.3 Ελαιώνες	65	75	82	86
2.3.1 Λιβάδια	49	69	79	84
2.4.1 Ετήσιες καλλιέργειες που σχετίζονται με μόνιμες καλλιέργειες	62	71	78	81
2.4.2 Σύνθετες καλλιέργειες	67	78	85	89
2.4.3 Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης	67	78	85	89
2.4.4 Αγρο-δασικές περιοχές	45	66	77	83
3.1.1 Δάσος πλατύφυλλων	60	65	70	77
3.1.2 Δάσος κωνοφόρων	60	65	70	77
3.1.3 Μικτό δάσος	60	65	70	77
3.2.1 Φυσικοί βοσκότοποι	60	65	74	80
3.2.2 Θάμνοι και χερσότοποι	60	65	74	80
3.2.3 Σκληροφυλλική βλάστηση	60	65	74	80
3.2.4 Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	60	65	74	80
3.3.1 Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	25	55	70	77
3.3.2 Απογυμνωμένοι βράχοι	68	79	86	89
3.3.3 Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	68	79	86	89
3.3.4 Αποτεφρωμένες εκτάσεις	68	79	86	89
3.3.5 Παγετώνες και ανέασα χιόνι	79	79	79	79
4.1.1 Βάλτοι στην ενδοχώρα	98	98	98	98
5.1.1 Υδατορρέυματα	99	99	99	99
5.1.2 Επιφάνειες στάσιμου ύδατος	99	99	99	99
5.2.1 Παράκτιες λιμνοθάλασσες	99	99	99	99



Σχήμα 22: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς T=50 έτη



Σχήμα 23: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς T=100 έτη



Σχήμα 24: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη

Τέλος, παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται ο τύπος συνθηκών υγρασίας τόσο αυξάνεται η παροχή αιχμής των υδρογραφημάτων εισροής. Το αποτέλεσμα αυτό είναι βέβαια λογικό, καθώς οι συνθήκες αυτές καθορίζουν εμμέσως το πόσο κορεσμένο είναι το έδαφος στην περιοχή, γεγονός που επηρεάζει άμεσα την απορροή. Πιο συγκεκριμένα, όσο πιο κορεσμένο είναι το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη απορροή προκύπτει και αντιστρόφως όσο πιο ακόρεστο είναι, τόσο μικρότερη απορροή. Τα δεδομένα των υδρογραφημάτων εισροής της περιοχής μελέτης συμφωνούν με αυτό, όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Παροχές αιχμής για την περιοχή μελέτης σε m^3/s

Περίοδος επαναφοράς	Τύπος συνθηκών υγρασίας		
	CNI	CNII	CNIII
T=50	18.55	157.42	325.55
T=100	28.40	210.60	423.14
T=1000	166.44	564.62	956.83

5.6 Χάρτες πλημμύρας

Η εκτέλεση της υδραυλικής προσομοίωσης και η εξαγωγή των χαρτών πλημμύρας αποτελεί το τελευταίο βήμα της διαδικασίας. Επιλέγοντας την εντολή Unsteady Flow Analysis γίνεται η οργάνωση της υδραυλικής προσομοίωσης. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει ένα σενάριο (plan), επιλέγοντας τα γεωμετρικά δεδομένα και τις οριακές συνθήκες για τις οποίες επιθυμεί να γίνει ο έλεγχος του πλημμυρικού γεγονότος. Τα γεωμετρικά δεδομένα και οι οριακές συνθήκες εισάγονται επιλέγοντας τα κατάλληλα αρχεία από τη λίστα των παραθύρων Geometry File και Unsteady Flow File αντίστοιχα.

Παρακάτω, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τα προγράμματα ως προς εκτέλεση που επιθυμεί. Η λίστα των εντολών εμπεριέχει τα εξής προγράμματα:

- Geometry Preprocessor
- Unsteady Flow Simulation
- Post Processor
- και Floodplain Mapping.

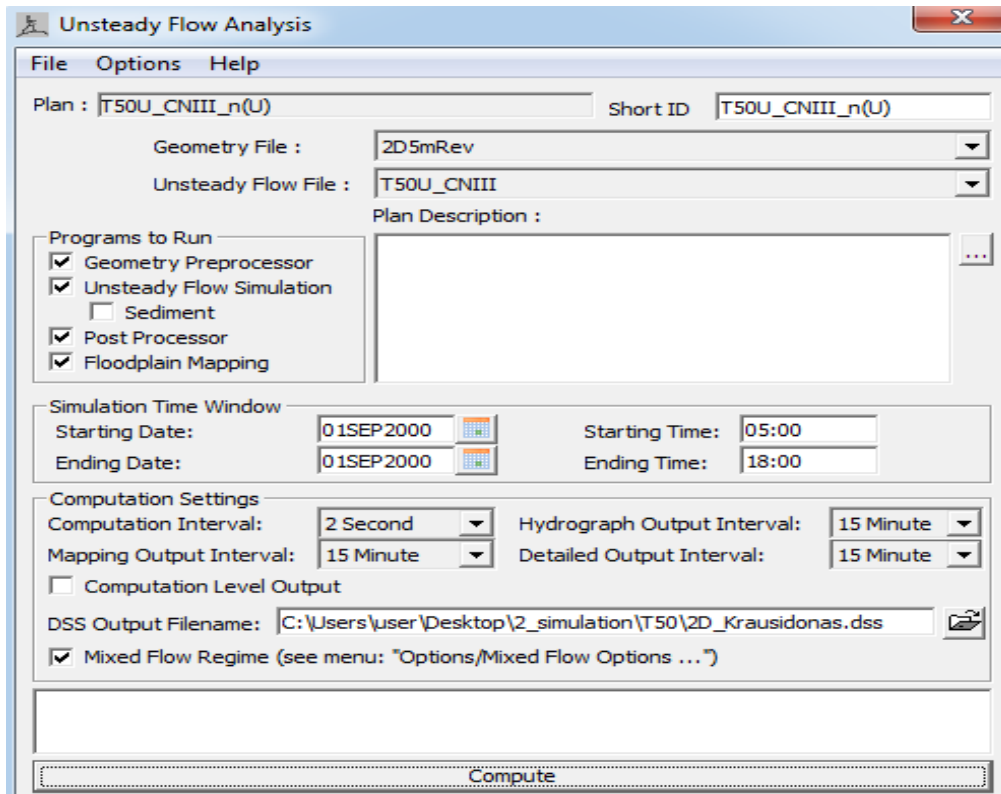
Η επιλογή Floodplain Mapping έχει ως αποτέλεσμα την απόδοση της χωρικής κατανομής του μέγιστου βάθους σε όλα τα σημεία της επιφάνειας κατάκλυσης.

Η επιλογή Geometry Preprocessor υπολογίζει την καμπύλη υψομέτρου-όγκου για κάθε κελί βασιζόμενη στα υψομετρικά δεδομένα του εδάφους. Επίσης, αυτή η δυνατότητα δίνεται στον χρήστη και από το περιβάλλον RAS Mapper, όπου υπολογίζονται οι πίνακες υδραυλικών ιδιοτήτων (hydraulic properties tables).

Επιπλέον, ο χρήστης επιλέγει το χρονικό διάστημα του πλημμυρικού γεγονότος στο οποίο επιθυμεί να γίνει η προσομοίωση. Στην παρούσα εργασία, έγινε προσομοίωση πλημμυρικού γεγονότος 13 ωρών, με ώρα έναρξης στις 5:00 της 1ης Σεπτεμβρίου του 2000 και ώρα λήξης στις 18:00 της ίδια μέρας. Τέλος, ρυθμίζονται τα χρονικά βήματα της προσομοίωσης:

- Computation Interval
- Mapping Output Interval
- Hydrograph Output Interval
- και Detailed Output Interval

Η εντολή Computation Interval ρυθμίζει το χρονικό βήμα στο οποίο θα γίνονται οι υπολογισμοί, στο σύνολο ωρών της προσομοίωσης (13 ώρες), ενώ η εντολή Mapping Output Interval το χρονικό βήμα στο οποίο θα εξάγονται οι μεταβλητές υπολογισμού στους χάρτες. Όπως είναι εύκολα κατανοητό, η ρύθμιση μικρότερου χρονικού βήματος υπολογισμού αποδίδει μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων. Στην παρούσα μελέτη το χρονικό βήμα των υπολογισμών ορίστηκε ανά 2 δευτερόλεπτα ενώ το χρονικό βήμα των υπόλοιπων τριών εντολών στα 15 λεπτά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 25.



Σχήμα 25: Παράθυρο ανάλυσης μη μόνιμης ροής

Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα προσομοίωσης

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης. Ειδικότερα, αποδίδονται χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας για τρεις περιόδους επαναφοράς, $T=50$, $T=100$ και $T=1000$ έτη. Επίσης, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων, σε κάθε περίοδο επαναφοράς, όσον αφορά τους συντελεστές τραχύτητας και τις συνθήκες υγρασίας που επιλέχθηκαν. Για κάθε ένα από τα είκοσι επτά σενάρια που προέκυψαν παρατίθενται στοιχεία για την έκταση της πλημμύρας, το βάθος νερού και την ταχύτητα ροής.

6.2 Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη

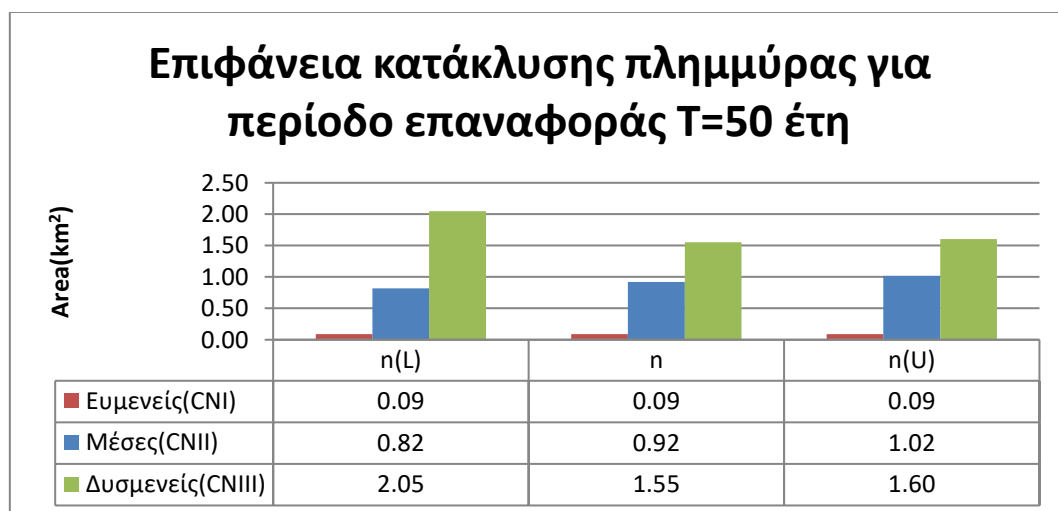
Από την εφαρμογή της υδραυλικής προσομοίωσης του υδατορρεύματος για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη, προέκυψαν ομαλά αποτελέσματα όσον αφορά την αναλογία της έκτασης της πλημμύρας συναρτήσει των συνθηκών υγρασίας. Πιο συγκεκριμένα, για δυσμενέστερες συνθήκες υγρασίας διαπιστώνεται αύξηση της επιφάνεια κατάκλυσης της πλημμύρας και αντίστροφα. Ωστόσο, όσον αφορά τους συντελεστές τραχύτητας, διαπιστώνεται μία ιδιομορφία στα αποτελέσματα, όπως θα αναφερθεί παρακάτω. Αρχικά, παρατηρείται ότι για ευμενείς συνθήκες υγρασίας και για τα τρία σενάρια συντελεστών τραχύτητας ο χείμαρρος Κραυσίδωνας δεν πλημμυρίζει. Δηλαδή η στάθμη της επιφάνειας του νερού δεν ξεπερνά τη στάθμη της ανώτερης επιφάνειας του υδατορρεύματος.

Τα επόμενα τρία σενάρια για μέσες συνθήκες υγρασίας εμφανίζουν ομαλά αποτελέσματα. Η αύξηση του συντελεστή τραχύτητας έχει ως συνέπεια τη μείωση της ταχύτητας ροής του νερού στη διάρκεια ενός πλημμυρικού γεγονότος, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 11 στο Παράρτημα Β. Αντίστοιχα, η μείωση της ταχύτητας ροής προκαλεί αύξηση του βάθους νερού. Επομένως, στα όρια ενός ποταμού, στο σενάριο με χαμηλό συντελεστή τραχύτητας, το νερό διοχετεύεται και εκρέει πριν προλάβει το βάθος νερού να ξεπεράσει το βάθος του υδατορρεύματος λόγω των υψηλών ταχυτήτων της ροής. Ενώ, στο σενάριο με τον υψηλό

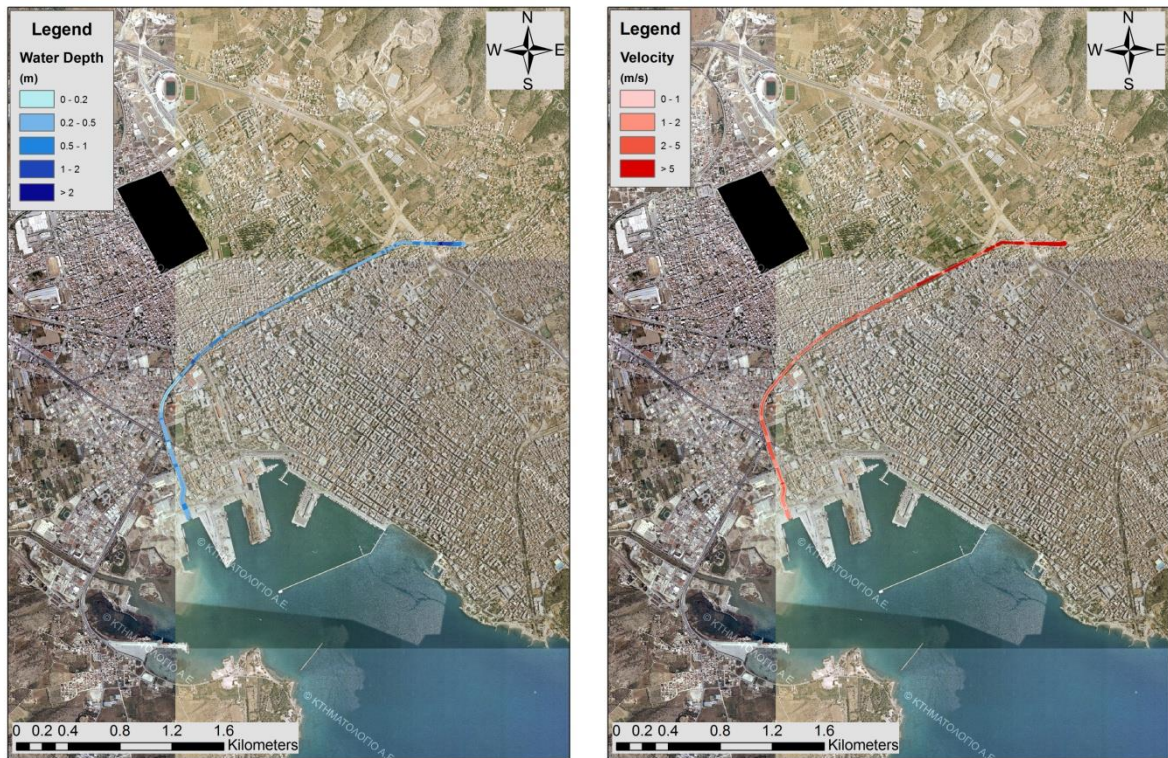
συντελεστή τραχύτητας, οι ταχύτητες μειώνονται, τα βάθη του νερού αυξάνονται και ξεπερνούν τα βάθη του ποταμού, το υδατόρρευμα πλημμυρίζει και κατακλύζει όλο και μεγαλύτερη επιφάνεια. Εντούτοις, στο σενάριο με τον υψηλό συντελεστή τραχύτητας η επιφάνεια κατάκλυσης έχει την μεγαλύτερη τιμή ίση με 1.02 km².

Τέλος, στα τρία σενάρια με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας παρατηρείται μία ιδιομορφία όσον αφορά τους συντελεστές τραχύτητας. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η επιφάνεια κατάκλυσης της πλημμύρας είναι μεγαλύτερη στο σενάριο με τον χαμηλό συντελεστή τραχύτητας, γεγονός το οποίο δεν συνάδει με τον τρόπο επίδρασης των συντελεστών σε σχέση με την επιφάνεια κατάκλυσης. Αυτό οφείλεται στην υπερχείλιση του χειμάρρου που παρατηρείται στην αρχή του υδατορρέυματος, σε σημείο όπου υφίσταται αναβαθμός. Η επιφάνεια κατάκλυσης αυτού του σεναρίου είναι ίση με 2.05 km². Παρόλο που οι επιφάνειες κατάκλυσης παρουσιάζουν μία ιδιομορφία σε σχέση με τους συντελεστές τραχύτητας, δεν παρατηρείται το ίδιο γεγονός για τα μέγιστα βάθη νερού. Αντιθέτως, παρατηρείται ότι όσο αυξάνονται οι τιμές των συντελεστών τραχύτητας τόσο αυξάνονται τα βάθη νερού, όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 10 που βρίσκεται στο Παράρτημα Β.

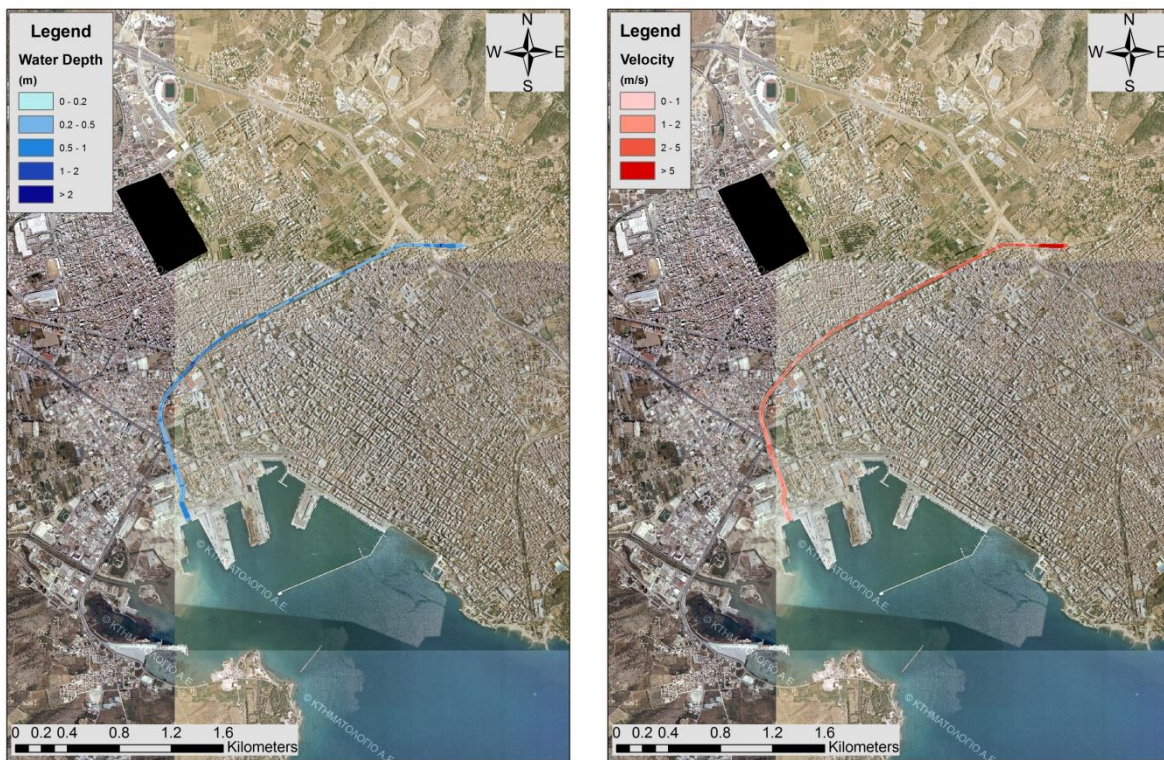
Τα μέγιστα βάθη νερού έχουν μεγαλύτερες τιμές στην κοίτη του χειμάρρου και σε κάποιες κοιλότητες που εμφανίζονται στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω αστάθειας του μοντέλου παρατηρούνται πολύ μεγάλες τιμές μεγίστων βαθών νερού σε μερικά σημεία της κλίμακας των μερικών pixel. Στο Σχήμα 26 παρουσιάζονται οι τιμές της έκτασης της πλημμύρας σε Km² για τα 9 σενάρια με περίοδο επαναφοράς T=50 έτη. Στα Σχήματα 27-37 παρουσιάζονται οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας όσον αφορά την χωρική κατανομή του μέγιστου βάθους νερού και της μέγιστης ταχύτητας ροής.



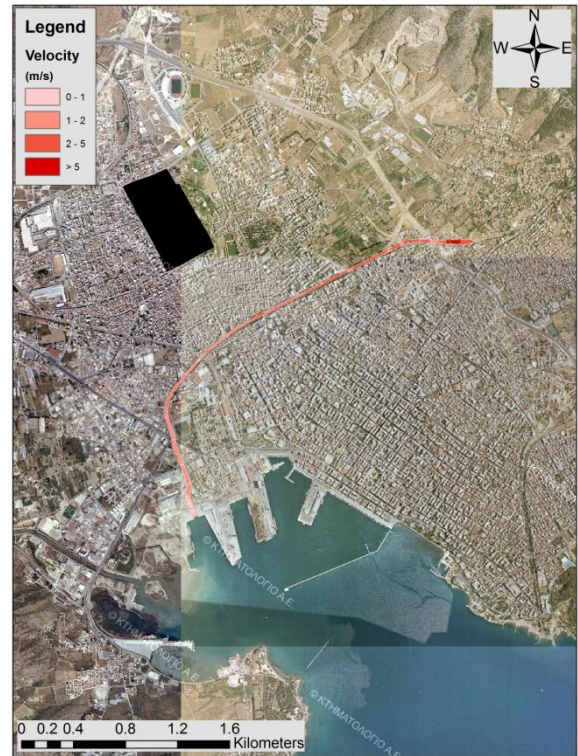
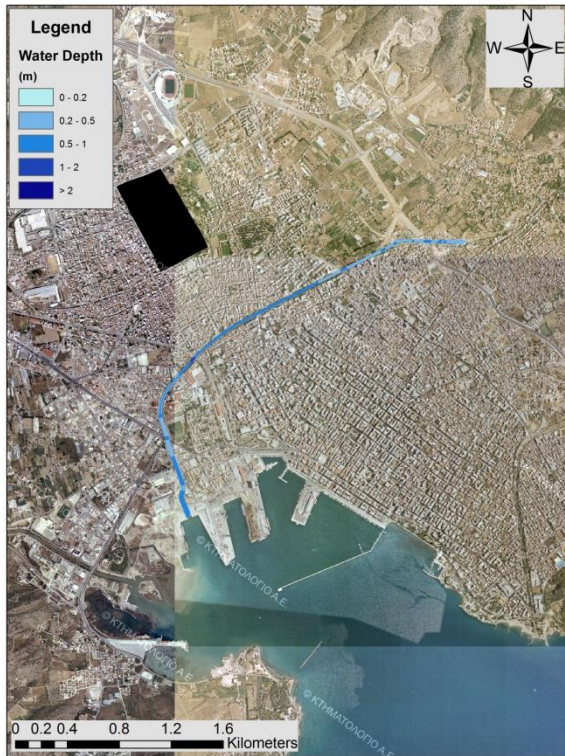
Σχήμα 26: Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς T=50 έτη



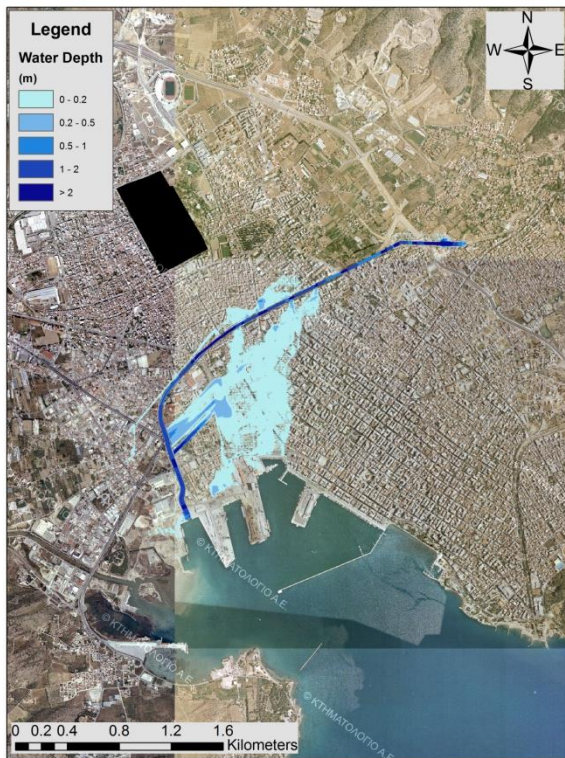
Σχήμα 27: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη



Σχήμα 28: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη



Σχήμα 29: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη



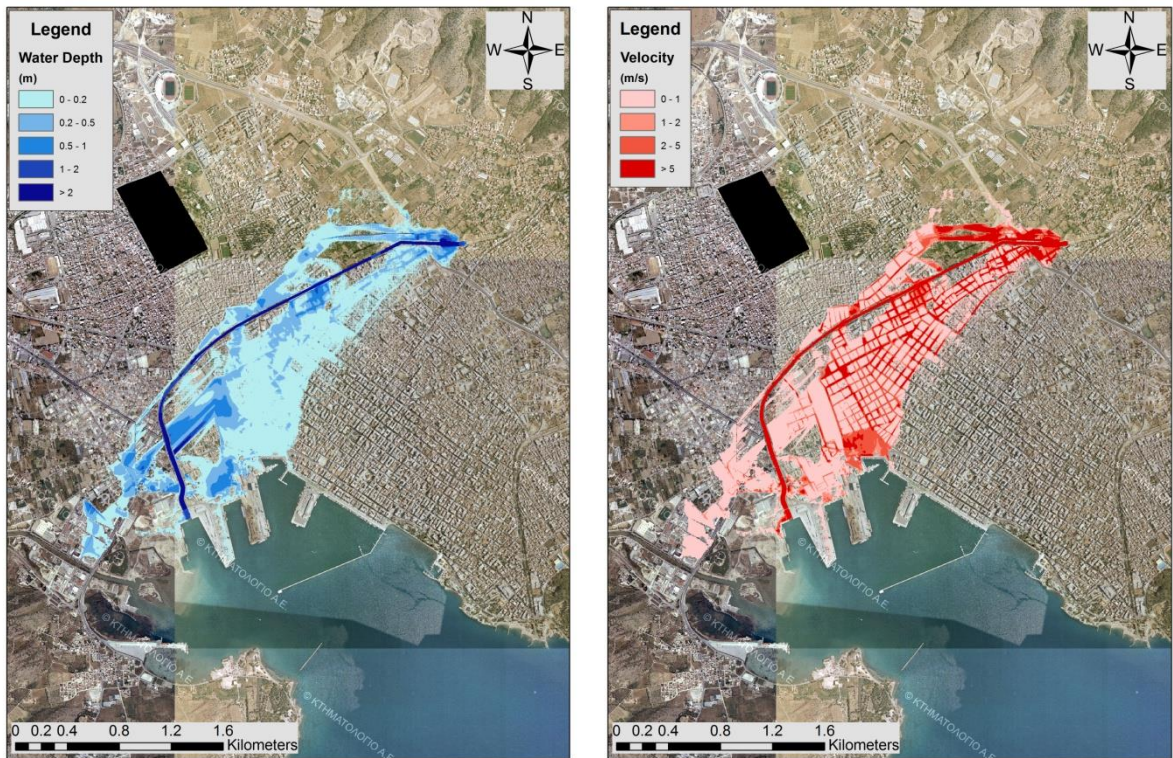
Σχήμα 30: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNI και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη



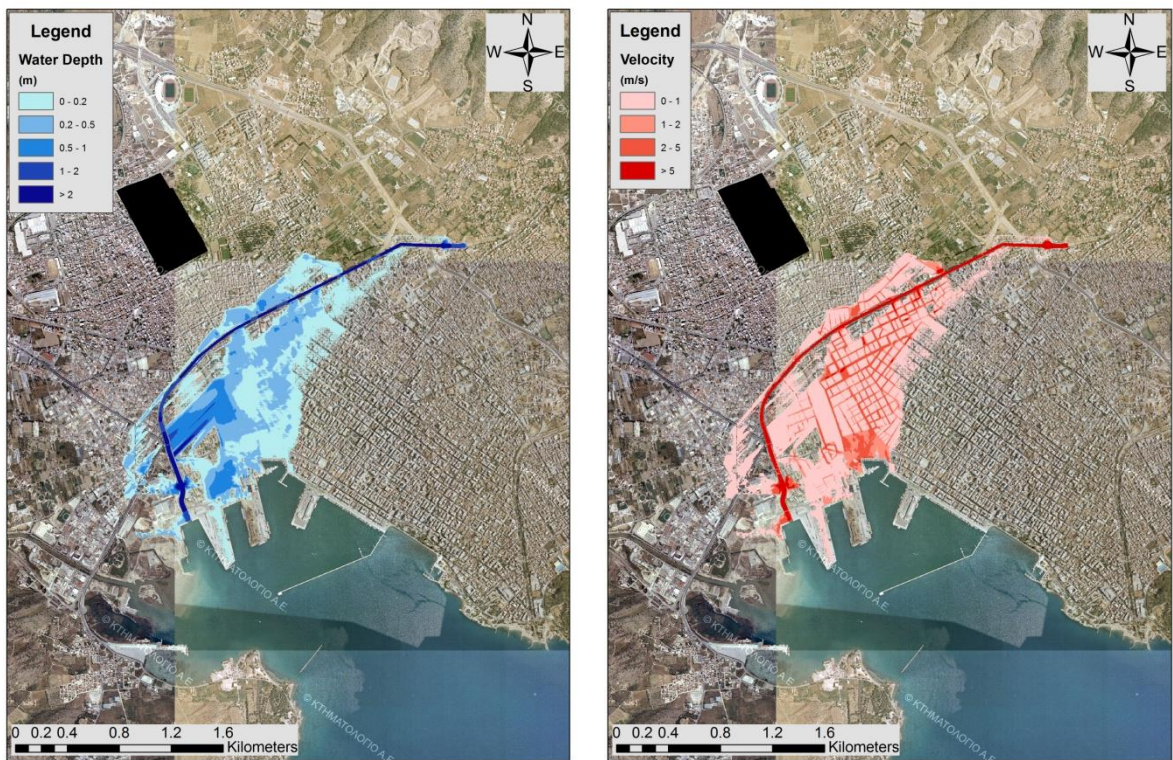
Σχήμα 31: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNIΙ και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη



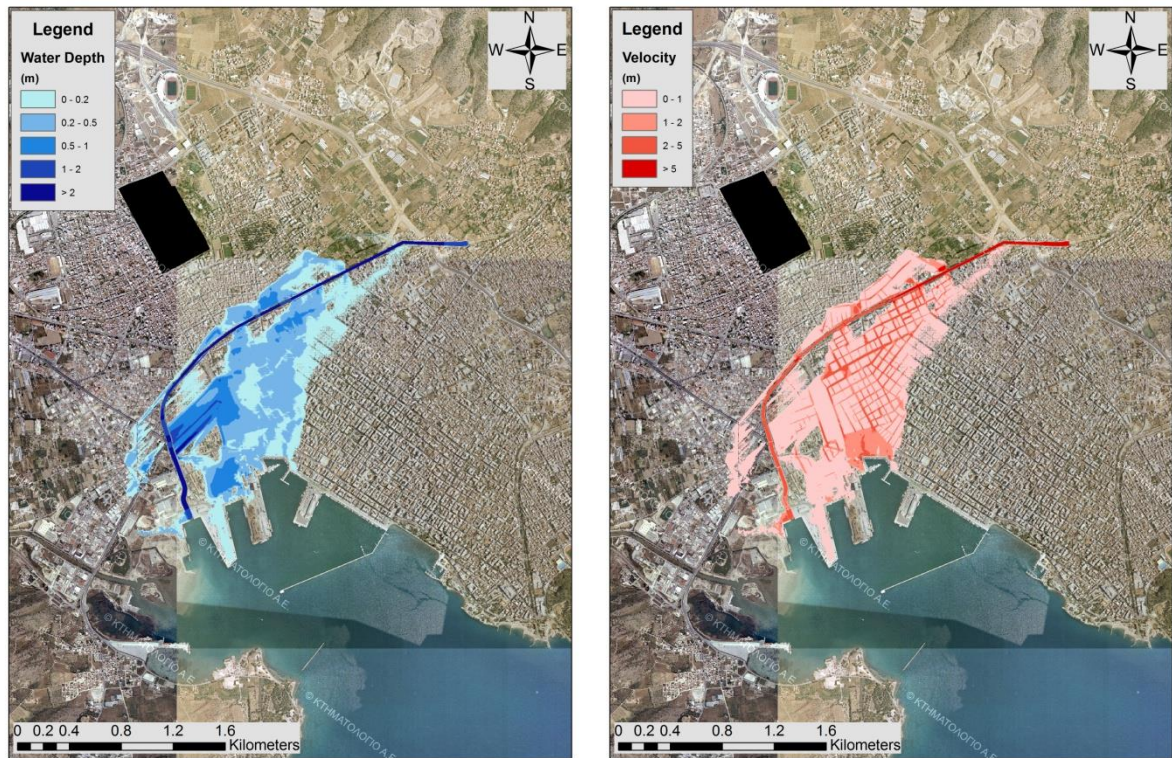
Σχήμα 32: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNIΙ και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη



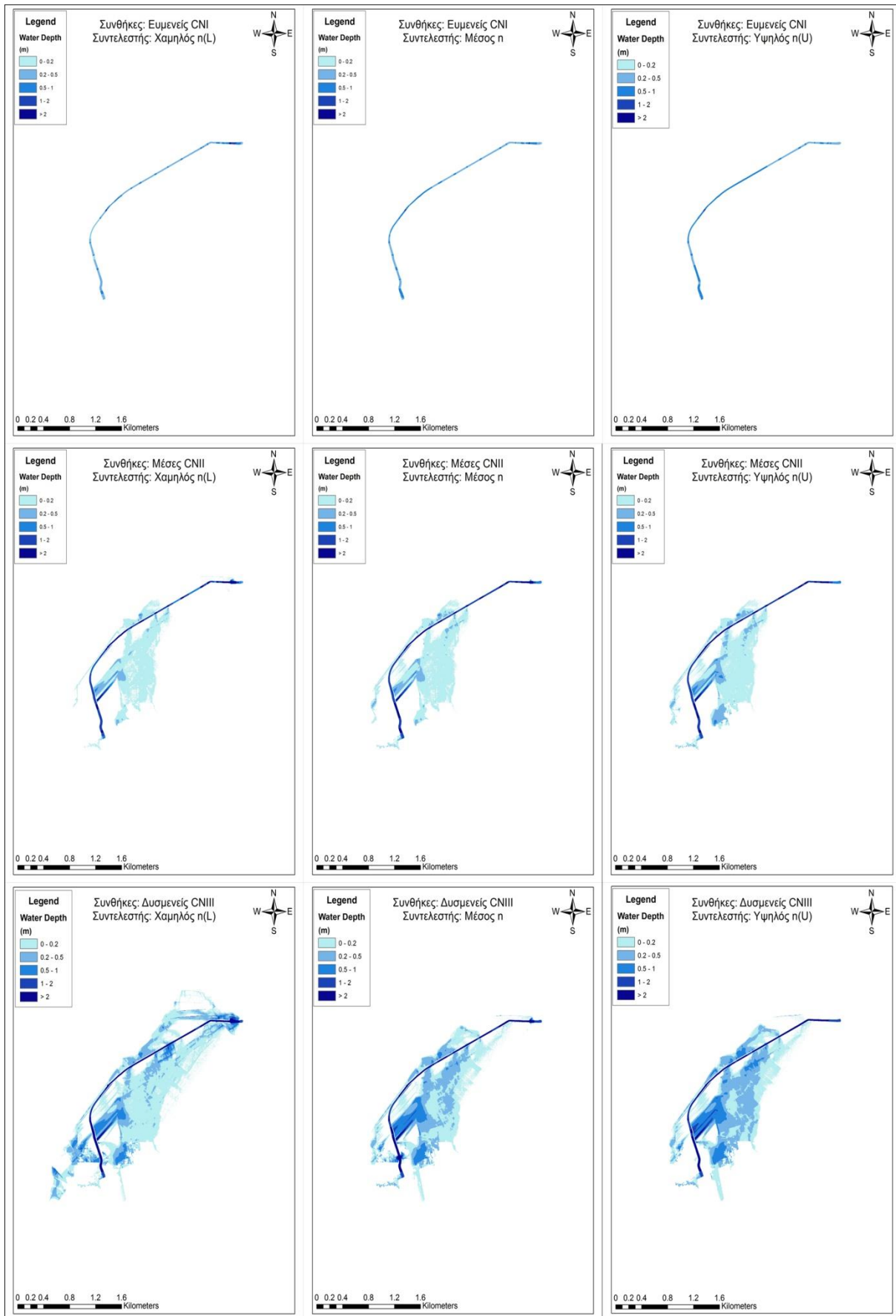
Σχήμα 33: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη



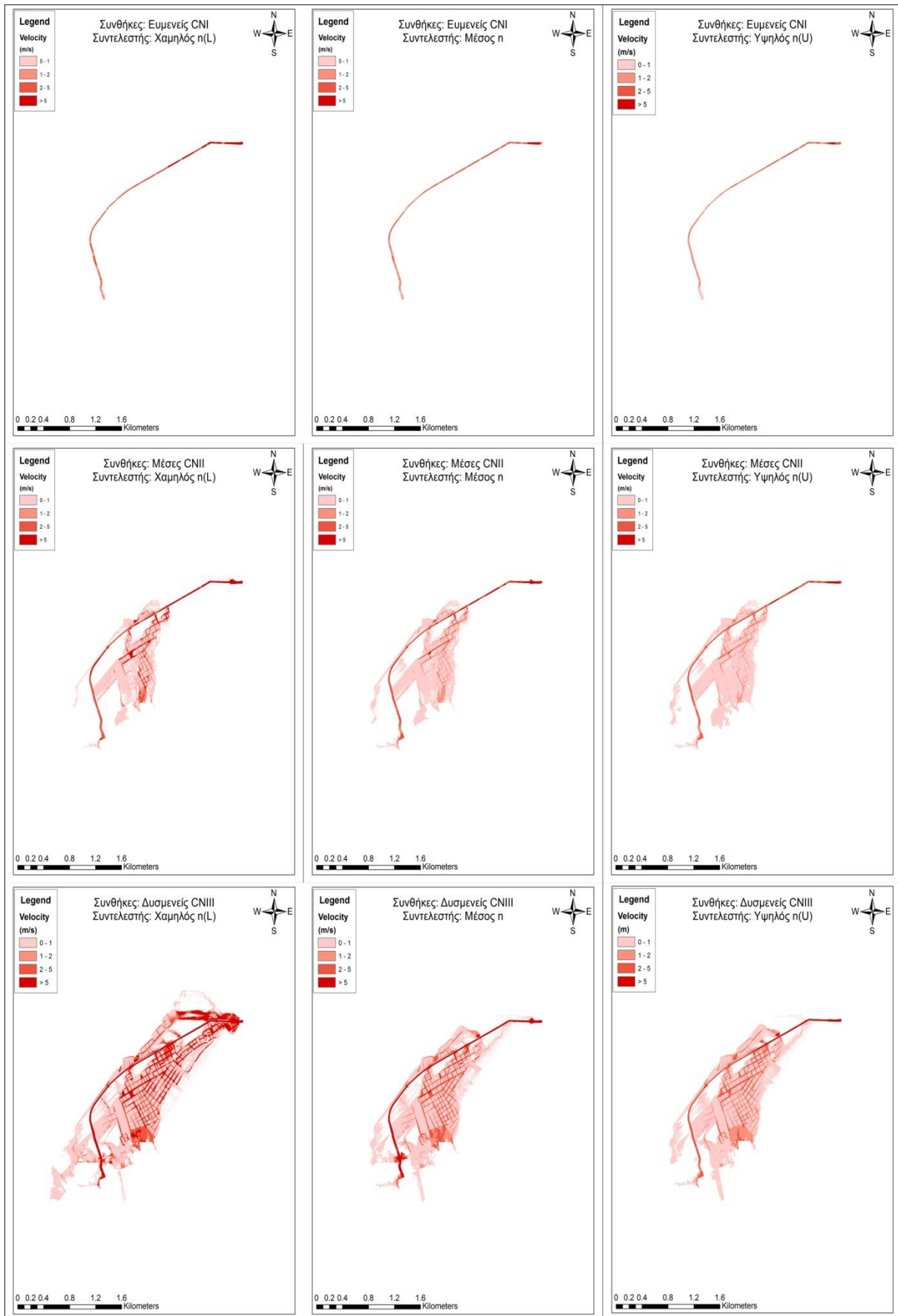
Σχήμα 34: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη



Σχήμα 35: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη



Σχήμα 36: Σύγκριση χωρικής κατανομής μέγιστου βάθους για περίοδο επαναφοράς T=50 έτη

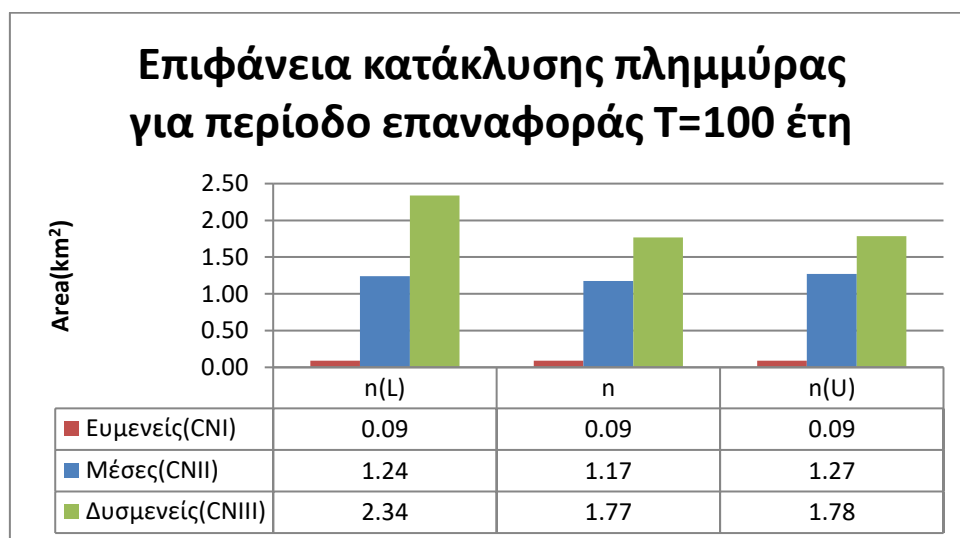


Σχήμα 37: Σύγκριση χωρικής κατανομής μεγίστου βάθους για περίοδο επαναφοράς T=50 έτη

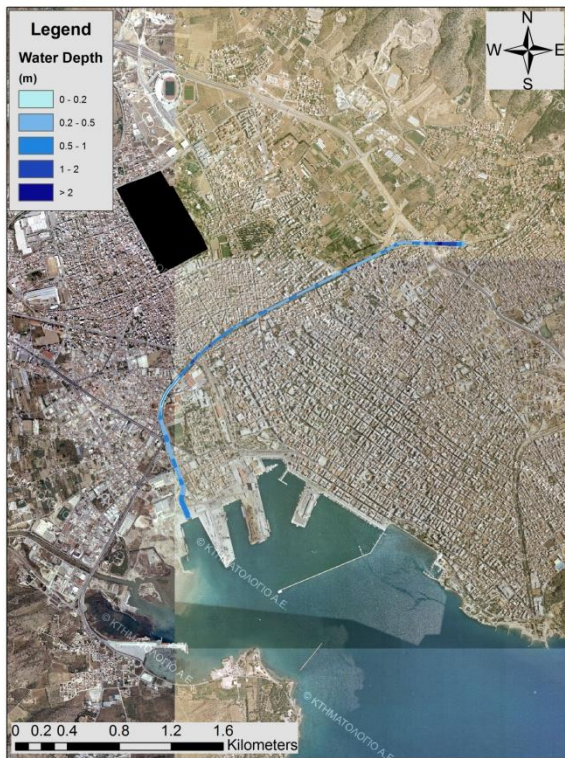
6.3 Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς T=100 έτη

Τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης για περίοδο επαναφοράς T=100 έτη, προέκυψαν εξίσου ομαλά όσον αφορά την έκταση της πλημμύρας αναλογικά με τις συνθήκες υγρασίας. Ωστόσο, για αυτή τη περίοδο επαναφοράς, παρουσιάστηκαν ιδιομορφίες σε δύο σενάρια όσον αφορά την επίδραση των συντελεστών τραχύτητας. Όπως και στην περίοδο επαναφοράς T=50 έτη, δεν παρατηρείται υπερχειλίση του χειμάρρου στα τρία σενάρια με ευμενείς συνθήκες υγρασίας. Η πρώτη ιδιομορφία παρατηρείται στα σενάρια με μέσες συνθήκες υγρασίας. Πιο συγκεκριμένα, το σενάριο με τον χαμηλό συντελεστή τραχύτητας κατακλύζει μεγαλύτερη επιφάνεια από τον μέσο συντελεστή τραχύτητας, ενώ κατακλύζει περίπου ίση επιφάνεια σε σχέση με τον υψηλό συντελεστή. Αυτό οφείλεται στην υπερχειλίση που παρατηρείται στην αρχή του υδατορρέυματος (αναβαθμός), σε αντίθεση με τα άλλα δύο σενάρια όπου η υπερχειλίση ξεκινά αργότερα, σε πολύ μεγάλη απόσταση από την αρχή του.

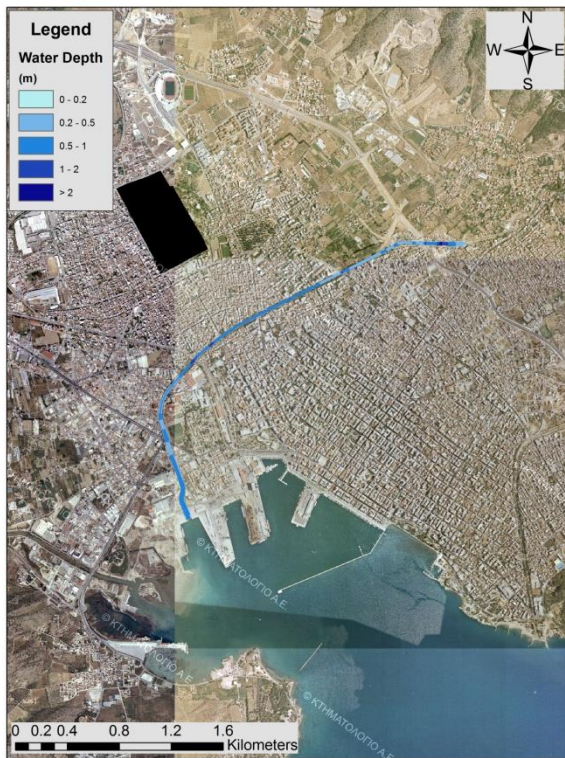
Το ίδιο ισχύει και για την ιδιομορφία που εμφανίζεται στα σενάρια με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας, μόνο που αυτήν την φορά στα σενάρια με μέσο και υψηλό συντελεστή τραχύτητας η υπερχειλίση του χειμάρρου ξεκινά λίγο νωρίτερα, στο σημείο που είναι οι πρώτες γέφυρες, το οποίο βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από την αρχή του υδατορρέυματος. Ακόμη, παρόλο που τα σενάρια με μέσο και υψηλό συντελεστή τραχύτητας κατακλύζουν περίπου ίση επιφάνεια, η επιφάνεια αυτή κατακλύζεται από μεγαλύτερα βάθη νερού για το σενάριο με τον υψηλό συντελεστή. Στο Σχήμα 38 παρουσιάζονται οι τιμές της έκτασης της πλημμύρας, ενώ στα Σχήματα 39-49 παρουσιάζονται οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας όσον αφορά την χωρική κατανομή του μέγιστου βάθους νερού και της μέγιστης ταχύτητας ροής.



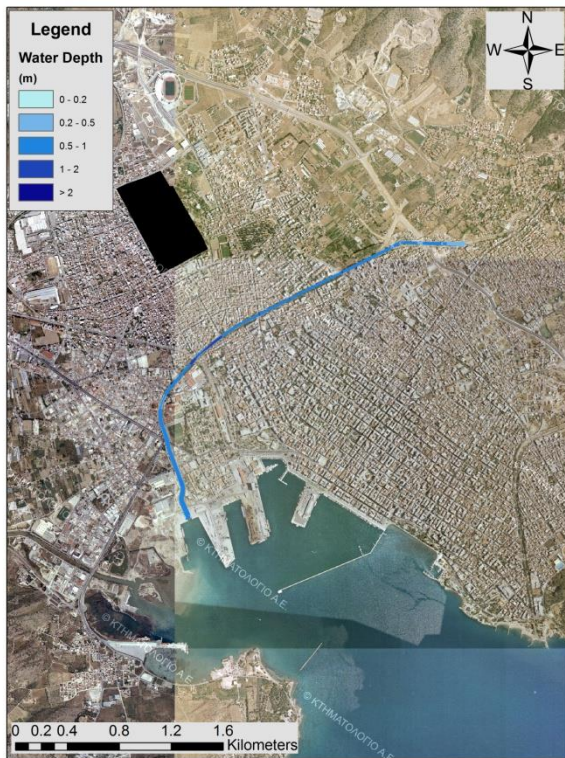
Σχήμα 38: Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς T=100 έτη



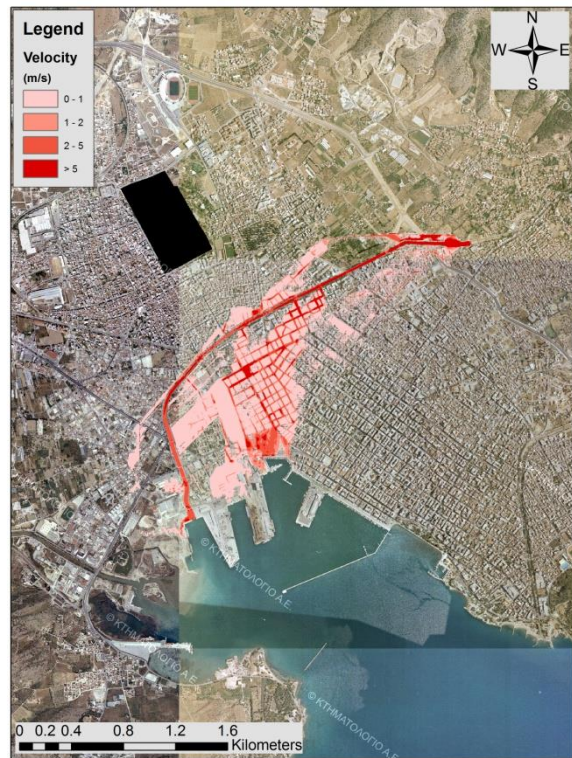
Σχήμα 39: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη



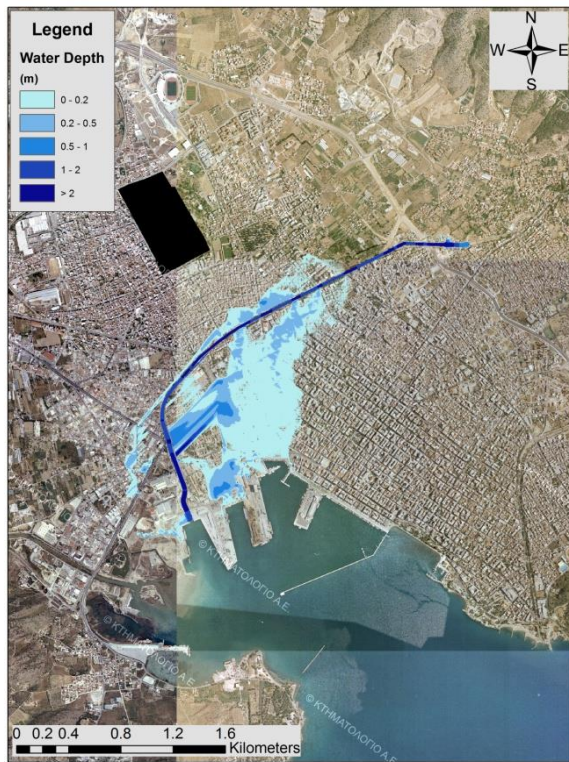
Σχήμα 40: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη



Σχήμα 41: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη



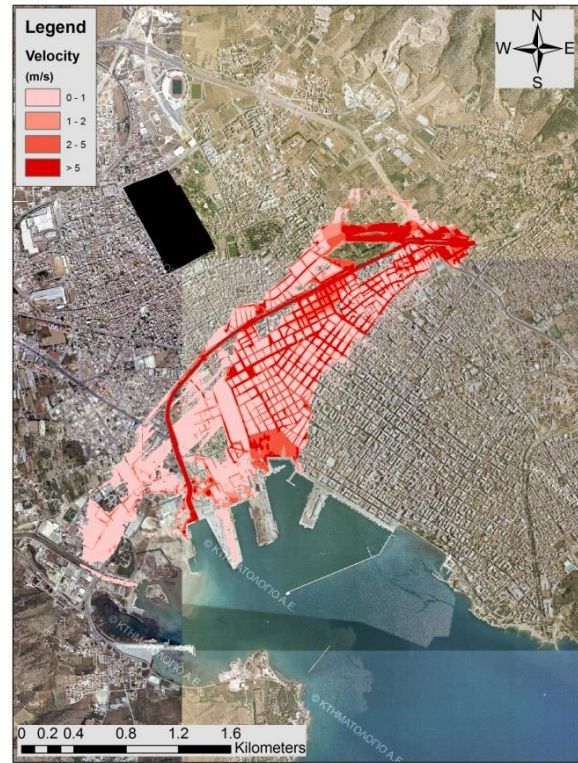
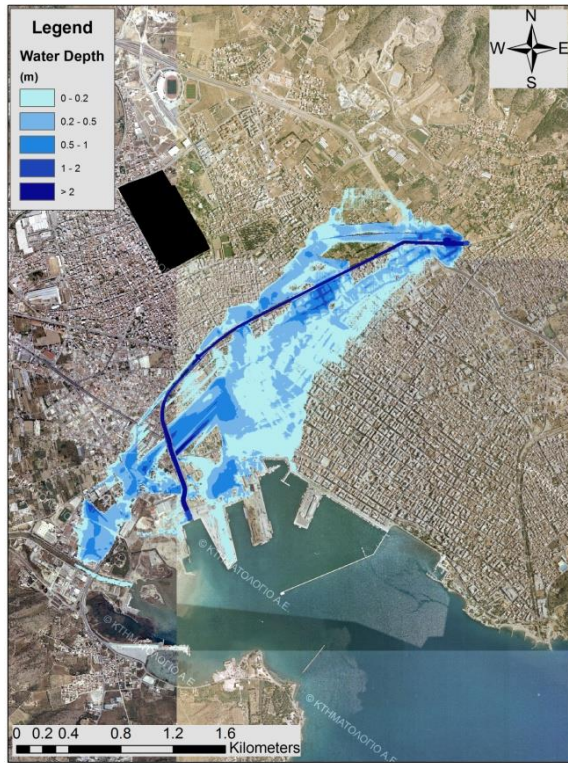
Σχήμα 42: Χωρική κατανομή μέγιστους βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNI και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη



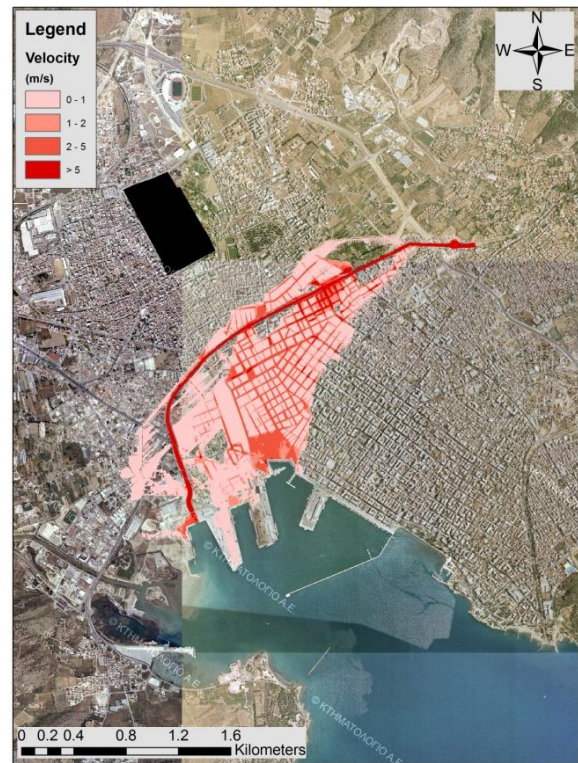
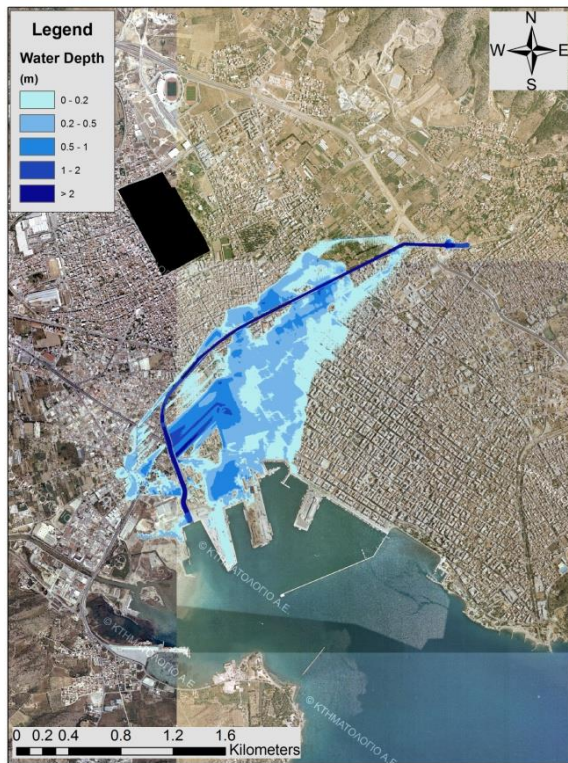
Σχήμα 43: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNII και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη



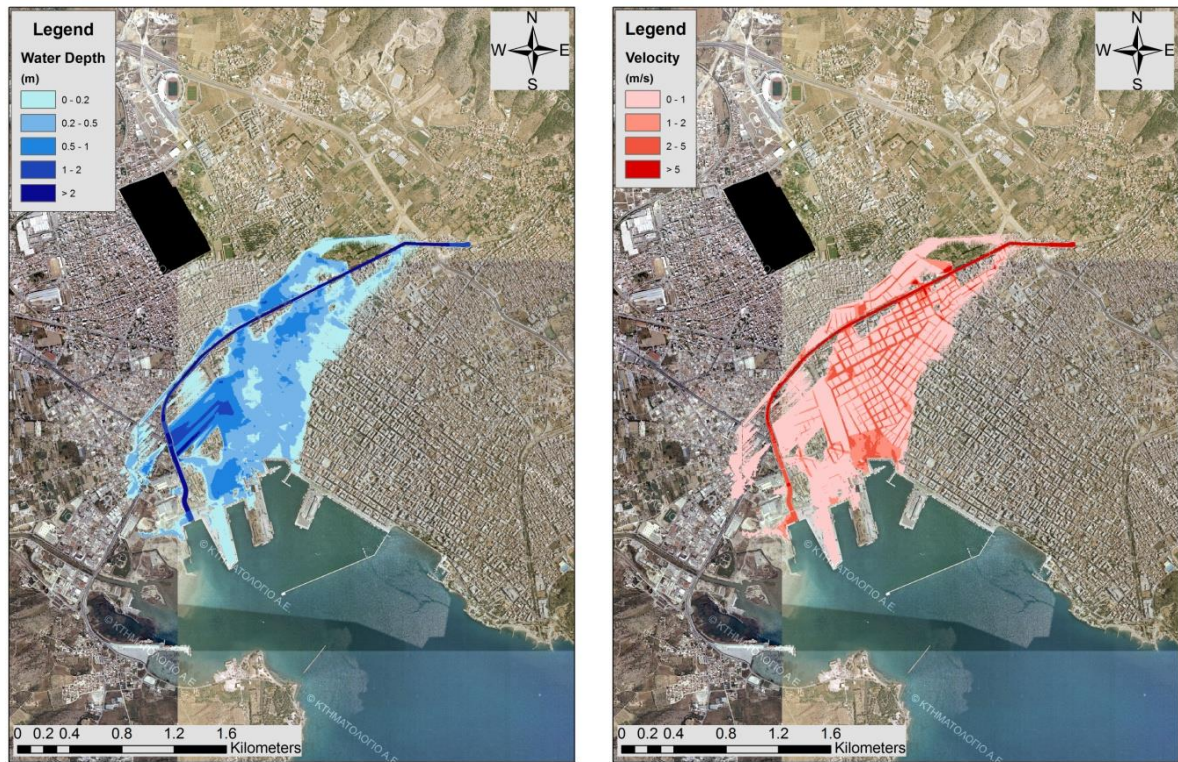
Σχήμα 44: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNII και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη



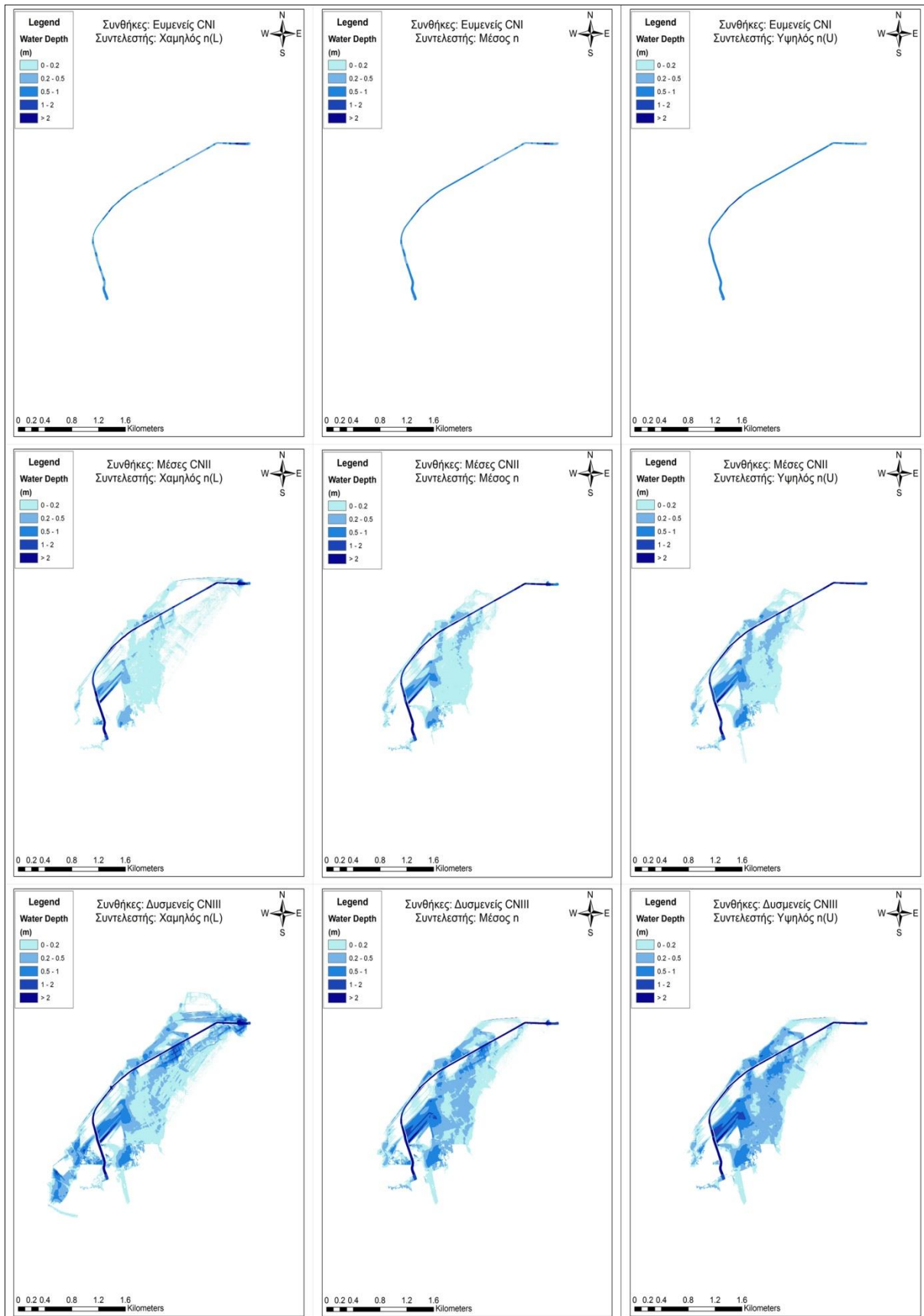
Σχήμα 45: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη



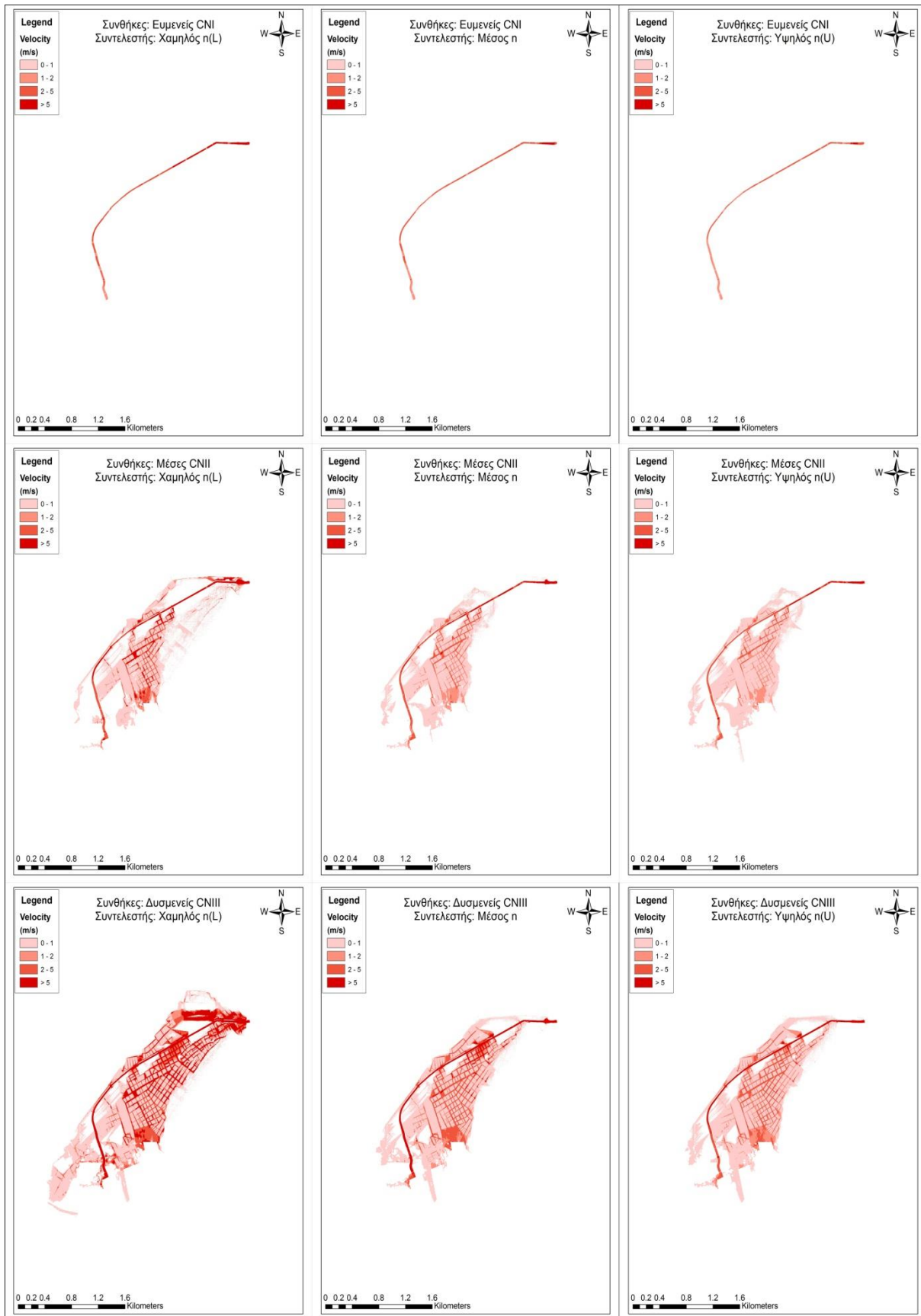
Σχήμα 46: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη



Σχήμα 47: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη



Σχήμα 48: Σύγκριση χωρικής κατανομής μέγιστου βάθους για περίοδο επαναφοράς
T=100 έτη

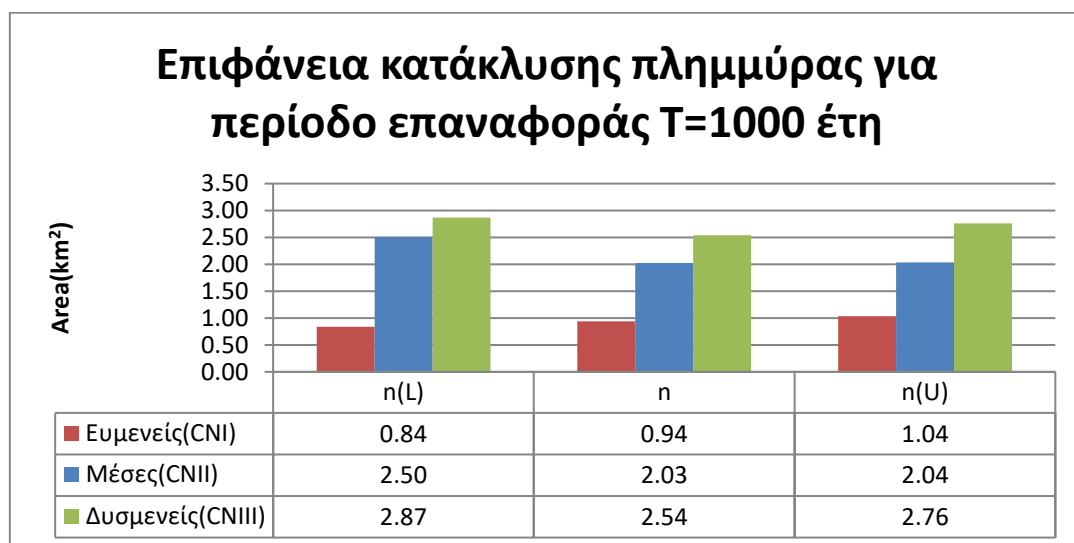


Σχήμα 49: Σύγκριση χωρικής κατανομής μέγιστης ταχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=100 έτη

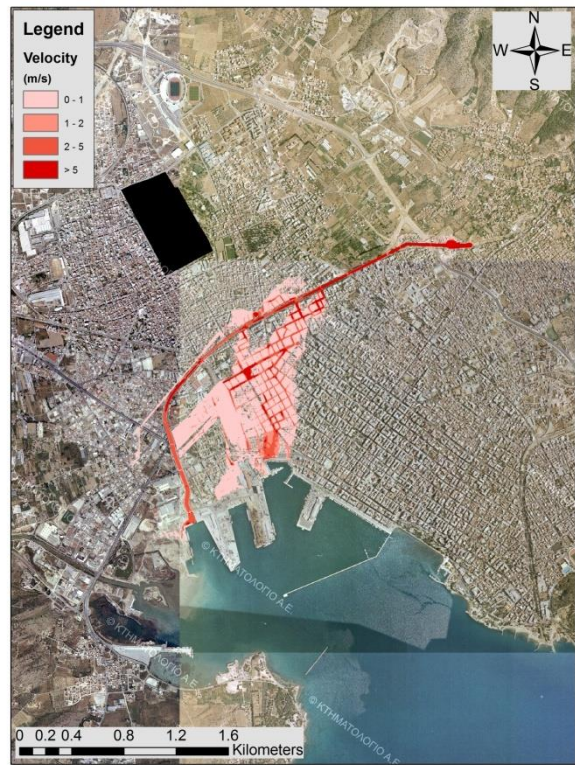
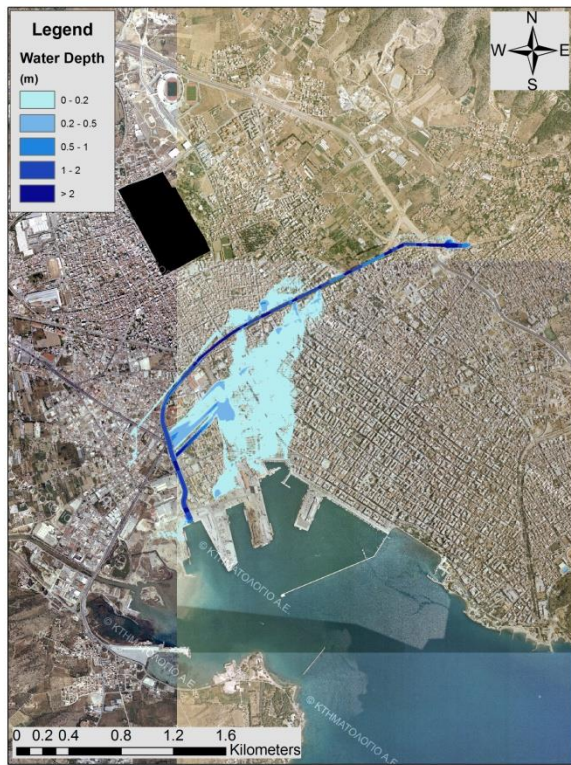
6.4 Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς T=1000 έτη

Από την εφαρμογή της υδραυλικής προσομοίωσης του υδατορρεύματος για περίοδο επαναφοράς T=1000 έτη, προέκυψαν ξανά ομαλά αποτελέσματα όσον αφορά την έκταση της πλημμύρας αναλογικά με τις αρχικές συνθήκες υγρασίας. Αντίστοιχα, παρατηρούνται ξανά ιδιομορφίες σε σχέση με τους συντελεστές τραχύτητας. Όμως, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής της περιόδου επαναφοράς έδειξαν ότι ο χειμάρρος υπερχειλίζει και για τα σενάρια με ευμενείς συνθήκες υγρασίας. Τα τρία αυτά σενάρια εμφανίζουν μία ομαλότητα σε σχέση με τους συντελεστές τραχύτητας με το σενάριο με τον υψηλό συντελεστή τραχύτητας να κατακλύζει την μεγαλύτερη επιφάνεια. Ιδιομορφία παρατηρείται στα σενάρια με μέσες συνθήκες υγρασίας όπου το σενάριο με τον χαμηλό συντελεστή κατακλύζει τη μεγαλύτερη επιφάνεια. Τα σενάρια με μέσο και υψηλό συντελεστή έχουν περίπου ίση έκταση ωστόσο το σενάριο με τον υψηλό συντελεστή παρουσιάζει μεγαλύτερα βάθη νερού.

Αντίστοιχα, όσον αφορά τα σενάρια με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας, παρατηρείται ότι το σενάριο με τον χαμηλό συντελεστή τραχύτητας κατακλύζει μεγαλύτερη επιφάνεια από το σενάρια με μέσο και υψηλό συντελεστή τραχύτητας. Τόσο για τα σενάρια με μέσες συνθήκες υγρασίας όσο και για τα σενάρια με δυσμενείς συνθήκες, η ιδιομορφία αυτή οφείλεται στην υπερχειλίση του χειμάρρου στην αρχή του υδατορρεύματος (αναβαθμός) σε αντίθεση με τα σενάρια των άλλων συντελεστών που η υπερχειλίση παρατηρείται στο σημείο όπου ξεκινούν τα κατασκευαστικά έργα. Στο Σχήμα 50 παρουσιάζονται οι τιμές της έκτασης της πλημμύρας, ενώ στα Σχήματα 51-61 παρουσιάζονται οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας όσον αφορά την χωρική κατανομή του μέγιστου βάθους νερού και της μέγιστης ταχύτητας ροής.



Σχήμα 50: Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς T=1000 έτη



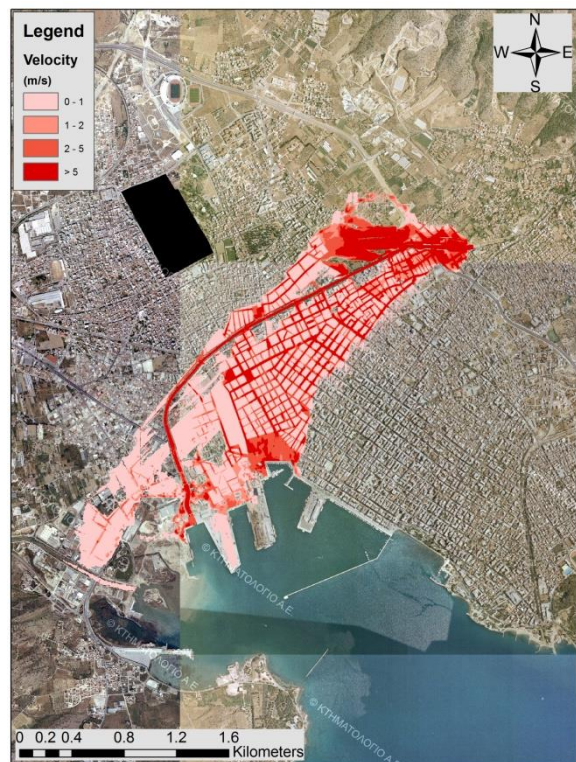
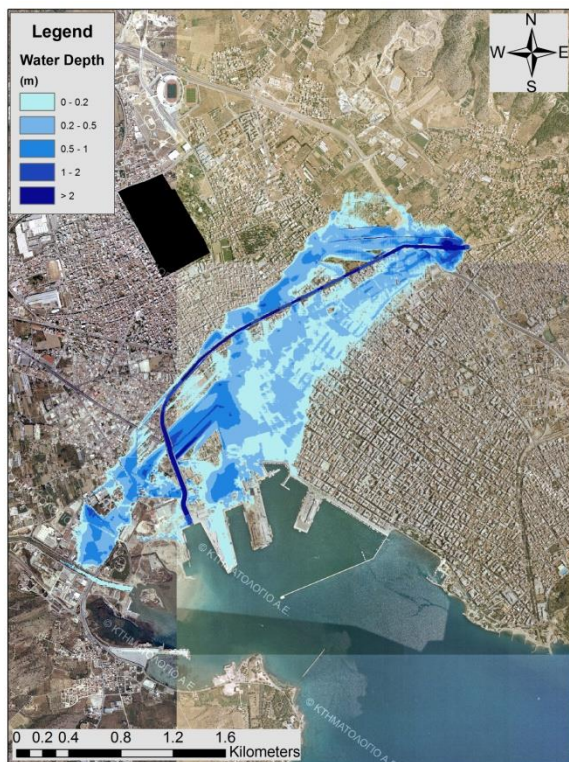
Σχήμα 51: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη



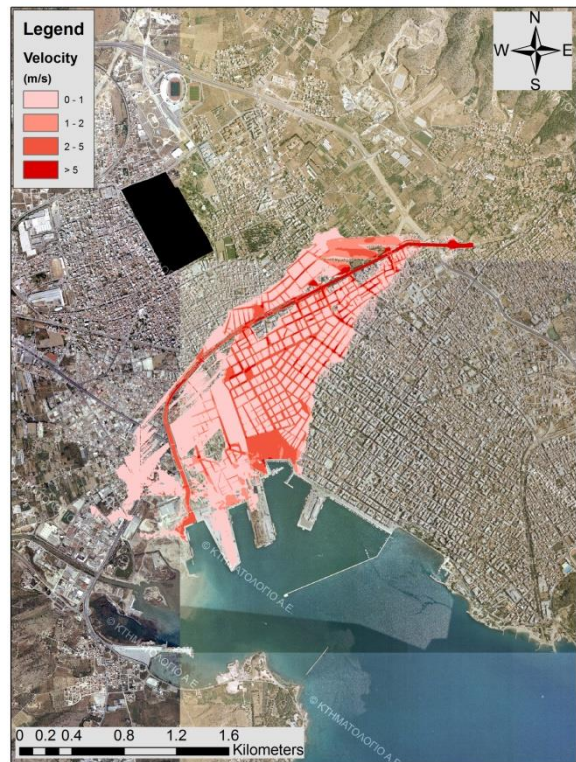
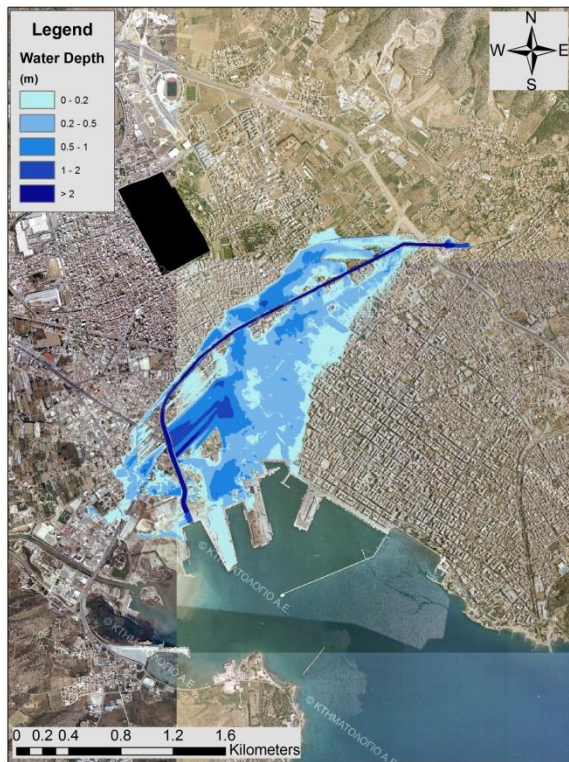
Σχήμα 52: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη



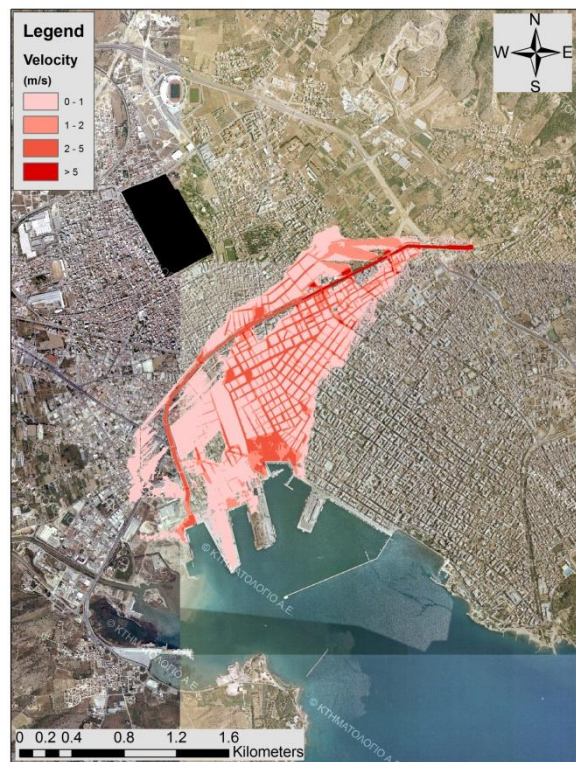
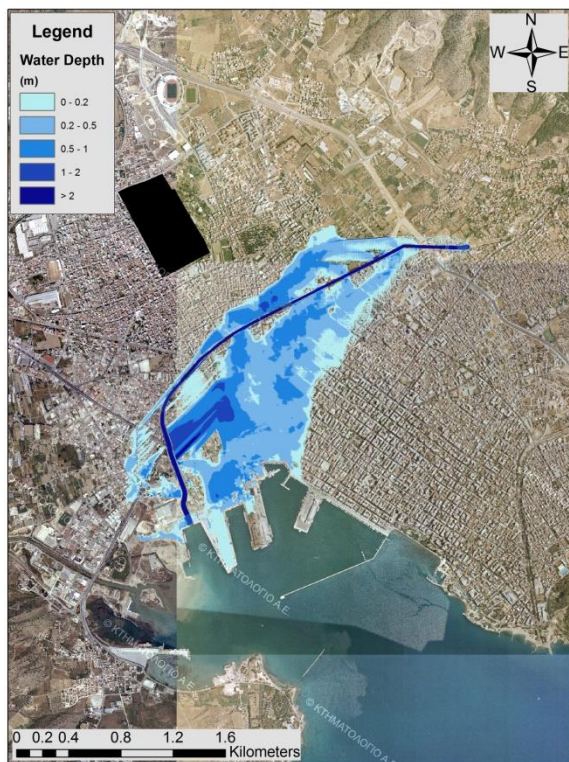
Σχήμα 53: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με ευμενείς συνθήκες υγρασίας CNI και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη



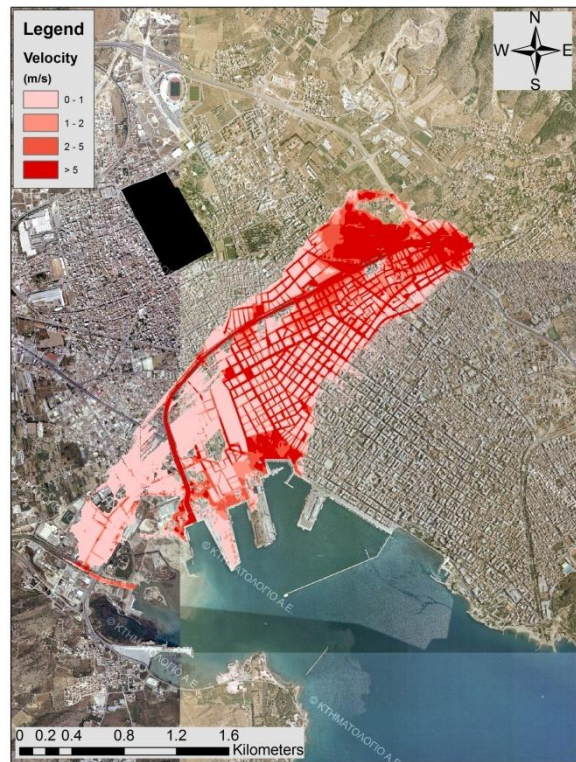
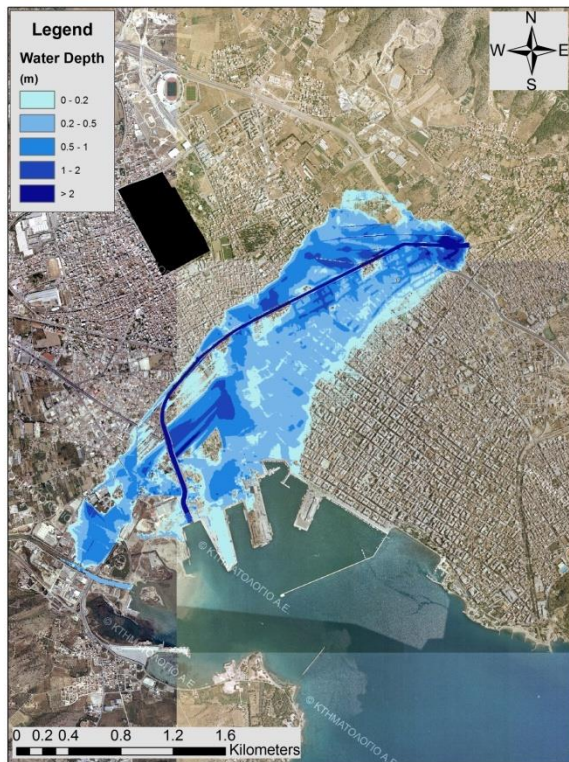
Σχήμα 54: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNI και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη



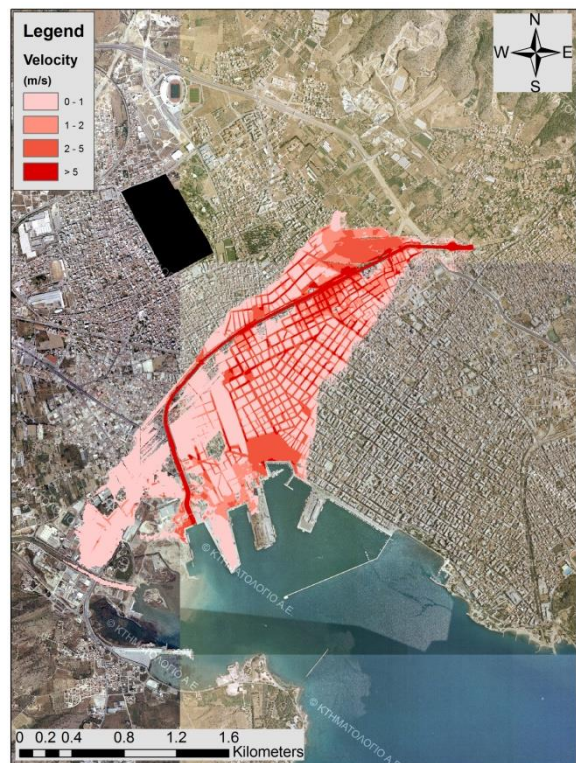
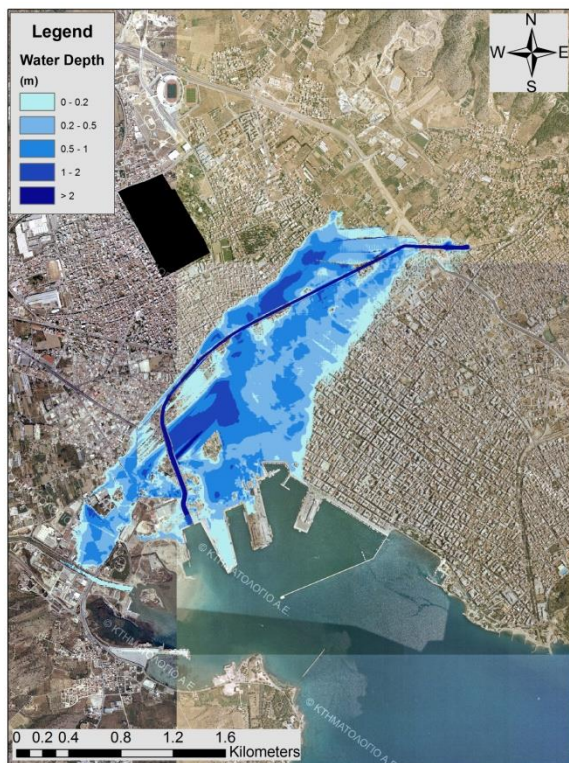
Σχήμα 55: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNII και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη



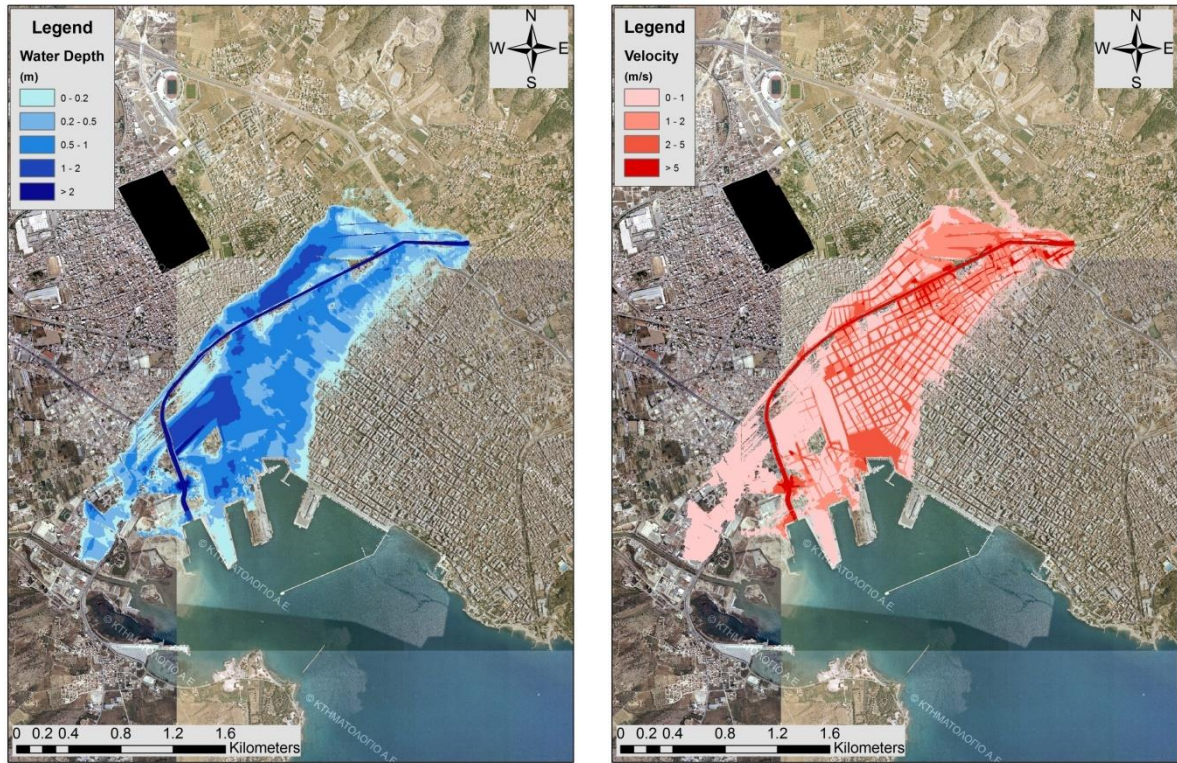
Σχήμα 56: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με μέσες συνθήκες υγρασίας CNII και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη



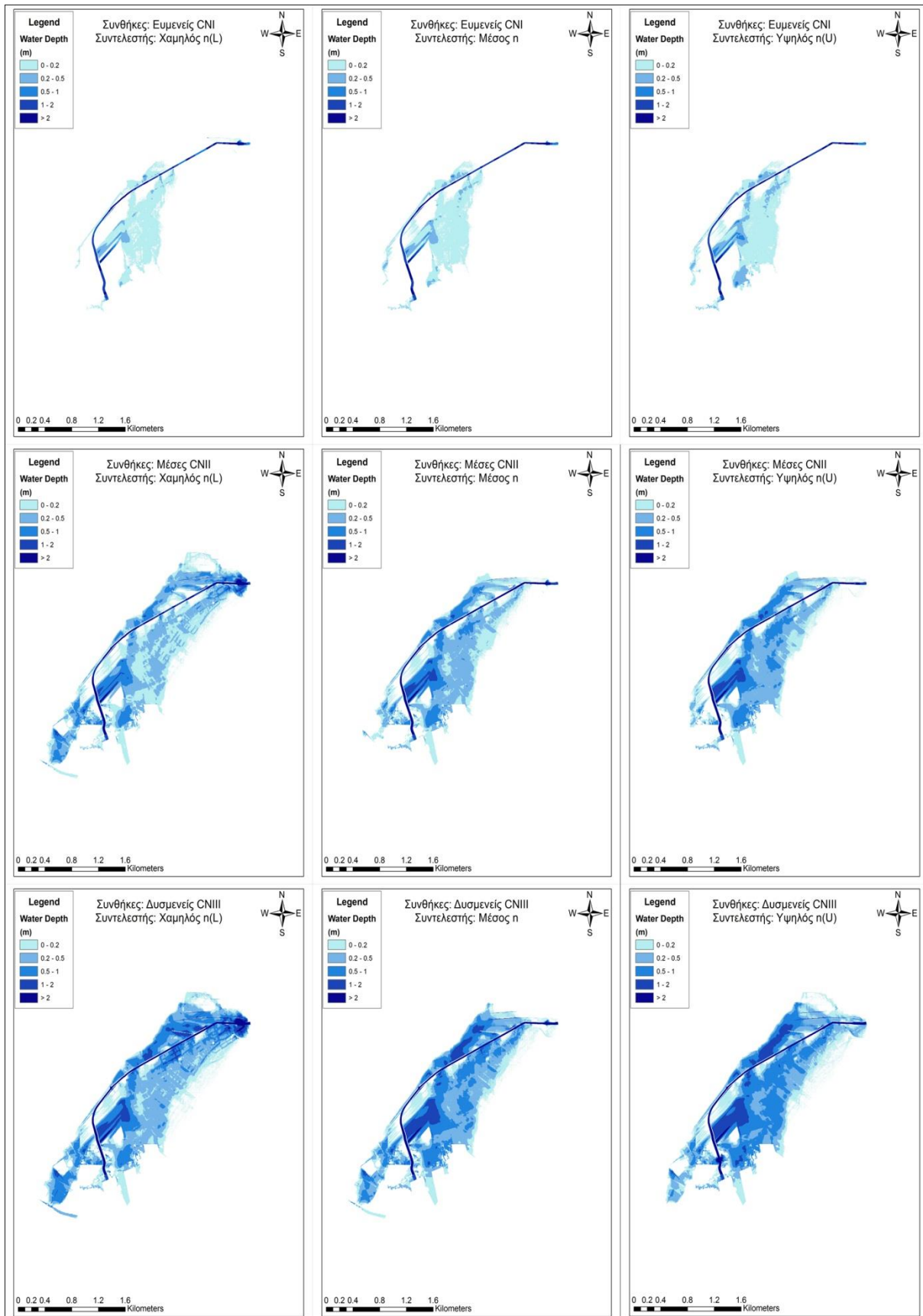
Σχήμα 57: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n(L)$ για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη



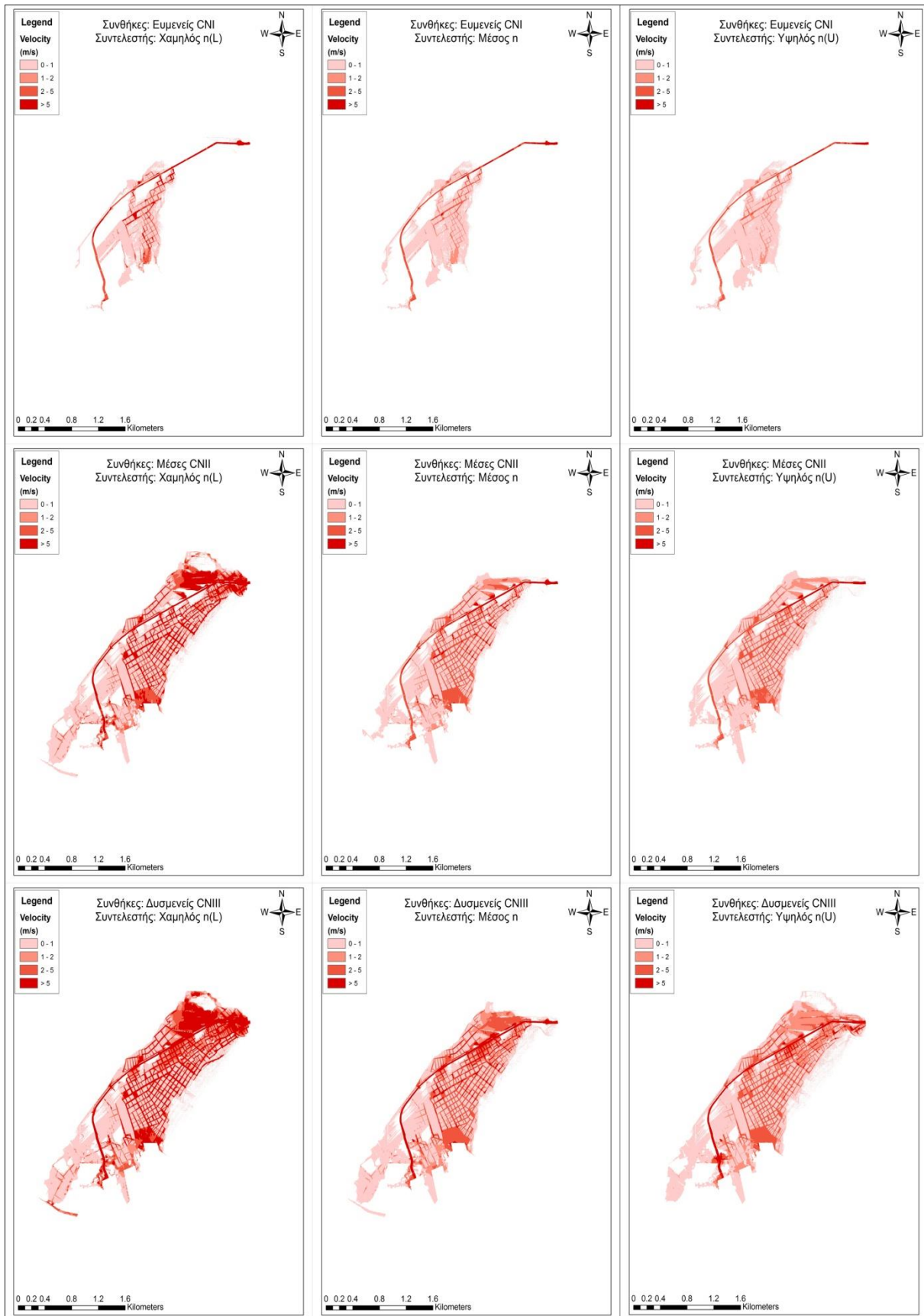
Σχήμα 58: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και μέσο συντελεστή τραχύτητας n για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη



Σχήμα 59: Χωρική κατανομή μέγιστου βάθους και μέγιστης ταχύτητας με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας CNIII και υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n(U)$ για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη



Σχήμα 60: Σύγκριση χωρικής κατανομής μέγιστου βάθους για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη



Σχήμα 61: Σύγκριση χωρικής κατανομής μέγιστης ταχύτητας για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη

Κεφάλαιο 7

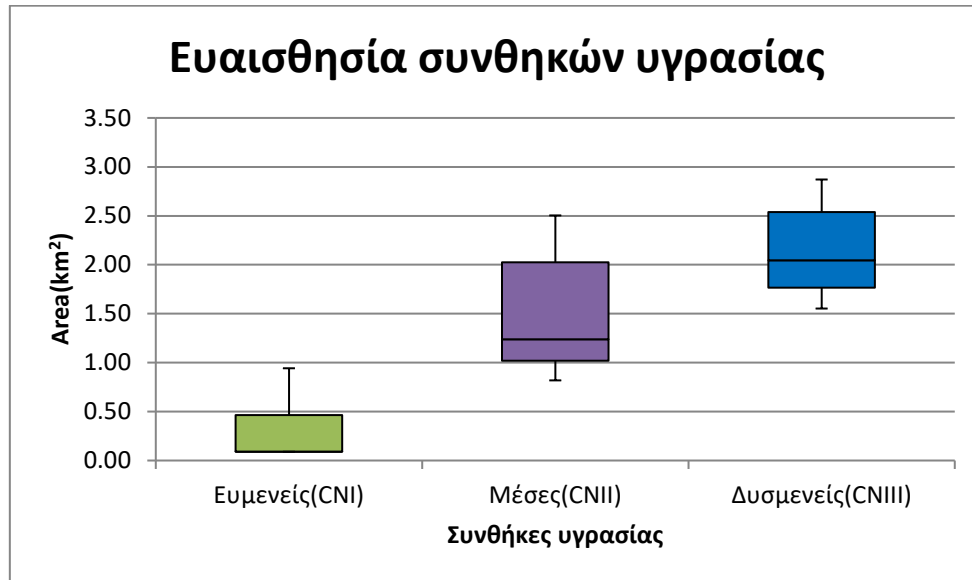
Σχολιασμός - Συμπεράσματα

Στην περίπτωση ανάλυσης της ευαισθησίας πλημμύρας σχεδιασμού για την αστική ζώνη του χειμάρρου Κραυσίδωνα, αξιολογήθηκε η ευαισθησία του διδιάστατου μοντέλου με την εξέταση δύο παραμέτρων. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν οι αρχικές συνθήκες υγρασίας και οι συντελεστές τραχύτητας. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές που θέτει η Οδηγία 2007/60 της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Η υδραυλική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για τρεις περιόδους επαναφοράς $T=50$, $T=100$ και $T=1000$ έτη.

Η σύγκριση της επιφάνειας κατάκλυσης για τις τρεις αρχικές συνθήκες υγρασίας και τις τρεις περιόδους επαναφοράς συνάγει στο συμπέρασμα ότι η χαμηλή παροχή εισροής μπορεί να αποτελέσει παράμετρο ευαισθησίας του μοντέλου. Αυτό συμβαίνει συνήθως διότι αποδίδει πολύ μικρά βάθη νερού. Για παράδειγμα, στα σενάρια με ευμενείς συνθήκες υγρασίας, όπου υφίσταται πολύ χαμηλή παροχή, για τις περιόδους επαναφοράς $T=50$ και $T=100$ έτη, ο χείμαρρος δεν πλημμυρίζει. Δηλαδή η στάθμη της επιφάνειας του νερού δεν ξεπερνά τη στάθμη της ανώτερης επιφάνειας του υδατορρέυματος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτά τα σενάρια μπορούμε να πούμε ότι ο ποταμός μπορεί να δεχτεί ένα υδρογράφημα εισροής με παροχή αιχμής $80 \text{ m}^3/\text{s}$ περίπου χωρίς τον κίνδυνο πλημμύρας.

Ακόμη, παρόλο που στα σενάρια με ευμενείς συνθήκες υγρασίας για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη το ποτάμι πλημμυρίζει, η επιφάνεια που κατακλύζεται από νερό αποτελείται κυρίως από βάθη νερού της κλίμακας $0-0.2 \text{ m}$, τα οποία δεν είναι ικανά να προκαλέσουν σημαντικές καταστροφές. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η υψηλή παροχή αιχμής αποδίδει μεγαλύτερες επιφάνειες κατάκλυσης της πλημμύρας και αντίστροφα η χαμηλή παροχή αιχμής αποδίδει μικρότερες επιφάνειες κατάκλυσης. Παρατηρείται σε όλα τα σενάρια συνθηκών υγρασίας και για τις τρεις περιόδους επαναφοράς. Επίσης, αυτό διαπιστώνεται και μεταξύ των σεναρίων για μέσες συνθήκες υγρασίας της περιόδου επαναφοράς $T=50$ και ευμενείς συνθήκες υγρασίας της περιόδου επαναφοράς $T=1000$ έτη. Τα σενάρια αυτά έχουν παρόμοιες παροχές αιχμής και παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα για την επιφάνεια κατάκλυσης.

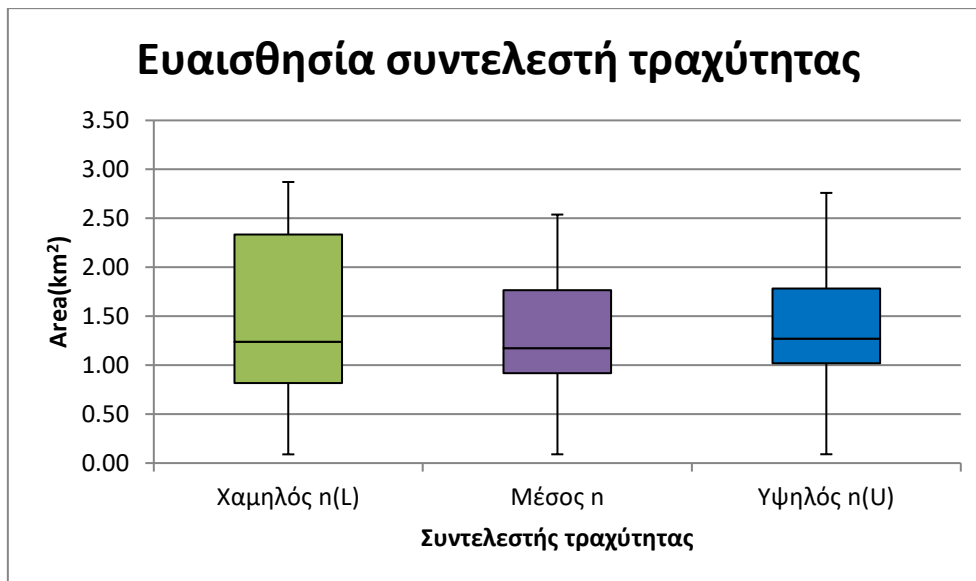
Στο Σχήμα 62 παρουσιάζεται η ευαισθησία των αρχικών συνθηκών υγρασίας εξεταζόμενη σε συνάρτηση με την επιφάνεια κατάκλυσης. Το Σχήμα 62 προέκυψε με τη μέθοδο Box Whisker Plot, σύμφωνα με την οποία αποδίδεται η διακύμανση της επιφάνειας κατάκλυσης για τα εννιά σενάρια κάθε συνθήκης υγρασίας.



Σχήμα 62: Ευαισθησία συνθηκών υγρασίας

Οι συντελεστές τραχύτητας Manning n μπορούν να αποτελέσουν ακόμα μία παράμετρο ευαισθησίας του μοντέλου. Οι χαμηλές τιμές των συντελεστών τραχύτητας Manning n αποδίδουν χαμηλότερα βάθη, υψηλότερες ταχύτητες, υπερκρίσιμη ροή και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη και μεταβάσεις ροής. Αυτή η κατάσταση είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε τμήματα του υδατορρέυματος με έντονες τοπικά κατά μήκος κλίσεις, όπου οι ταχύτητες είναι ήδη υψηλές.

Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στα σενάρια με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας για τις τρεις περιόδους επαναφοράς, όπως και στα σενάρια με μέσες συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας για περιόδους επαναφοράς $T=100$ και $T=1000$ έτη. Συγκεκριμένα, σε αυτά τα σενάρια η έκταση της επιφάνειας κατάκλυσης είναι παραδόξως μεγαλύτερη σε σύγκριση με τα σενάρια με ίδιες συνθήκες αλλά υψηλότερο συντελεστή τραχύτητας. Αυτή η ανομοιομορφία παρατηρείται και στο Σχήμα 63, όπου παρουσιάζεται η διακύμανση της επιφάνειας κατάκλυσης σε σύγκριση με τους συντελεστές τραχύτητας. Το Σχήμα 63 αποδίδει την ευαισθησία του συντελεστή τραχύτητας σύμφωνα με την μέθοδο Box Whisker Plot.



Σχήμα 63: Ευαισθησία συντελεστή τραχύτητας

Το φαινόμενο αυτό είναι απόρροια απότομα μεταβαλλόμενης ροής που προκαλεί την εμφάνιση υδραυλικού άλματος στο τμήμα με έντονες τοπικά κατά μήκος κλίσεις, που βρίσκεται στην αρχή του υδατορρεύματος. Το υδραυλικό άλμα είναι ένα φαινόμενο που εμφανίζεται όταν η ροή σε έναν ανοικτό αγωγό μεταβαίνει από υπερκρίσιμη σε υποκρίσιμη. Σε αυτήν την περίπτωση η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού αυξάνεται απότομα προς την κατεύθυνση της ροής. Το υδραυλικό άλμα περιγράφεται από την εξίσωση συνέχειας και την εξίσωση ορμής.

Το απότομο τμήμα του υδατορρεύματος σε συνδυασμό με τον χαμηλό συντελεστή τραχύτητας και την υψηλή παροχευτικότητα των σεναρίων που αναφέρθηκαν προηγουμένως έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία πολύ υψηλών ταχυτήτων στο συγκεκριμένο σημείο. Οι πολύ υψηλές ταχύτητες προκαλούν στόμωση και πετούν το νερό έξω και πλευρικά του καναλιού. Καθώς ο αριθμός Froude τείνει να αγγίζει την μονάδα (κρίσιμο βάθος), οι αδρανειακοί όροι των εξισώσεων Saint-Venant και τα παράγωγά τους, τείνουν να προκαλέσουν αστάθειες στο μοντέλο. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι πολύ υψηλές ταχύτητες που παρουσιάζονται στο συγκεκριμένο σημείο δεν μπορούν να ερμηνευτούν φυσικά και αποδίδονται σε αριθμητικές αστάθειες του μοντέλου (numerical instabilities). Οι αριθμητικές αστάθειες οφείλονται στην παραδοχή που εφαρμόζει το μοντέλο στις εξισώσεις που χρησιμοποιεί για την προσομοίωση της ροής του νερού. Σύμφωνα με την παραδοχή θεωρήθηκε ότι η ταχύτητα ροής στον κατακόρυφο άξονα z είναι αμελητέα σε σχέση με τους άλλους δύο άξονες x, y . Αποτέλεσμα της παραδοχής είναι η μετάβαση από εξισώσεις τριών διαστάσεων σε εξισώσεις δύο διαστάσεων.

Αντίθετα, οι υψηλές τιμές των συντελεστών τραχύτητας Manning n μπορεί να προκαλέσουν τοπικά μεγαλύτερα βάθη νερού και εξασθένιση του υδρογραφήματος εισροής καθώς κινούμαστε προς τα κατάντη, δίνοντας μη ρεαλιστικά αποτελέσματα. Η κατάσταση αυτή παρατηρείται στα σενάρια με δυσμενείς συνθήκες υγρασίας, με μέσο και υψηλό συντελεστή τραχύτητας για τις δύο περιόδους επαναφοράς $T=50$ και $T=100$ έτη, όπως και στα σενάρια με μέσες συνθήκες υγρασίας, με μέσο και υψηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη. Σε αυτά τα σενάρια η επιφάνεια κατάκλυσης της πλημμύρας έχει περίπου την ίδια τιμή, ωστόσο τα βάθη νερού είναι μεγαλύτερα και οι ταχύτητες ροής μικρότερες στα σενάρια με τον υψηλό συντελεστή τραχύτητας.

Το μοντέλο παρουσιάζει αστάθειες και όσον αφορά τις γέφυρες ή καλύτερα στην παρούσα μελέτη τους οχετούς που υπάρχουν κατά μήκος του υδατορρέυματος. Στην παρούσα μελέτη παρατηρείται η ύπαρξη πολλών γεφυρών-οχετών σε πολύ μικρό μήκος υδατορρέυματος, συγκεκριμένα 20 γεφυρών-οχετών σε μήκος 3691 m. Στα σημεία των γεφυρών-οχετών είναι πολύ σύνηθες η ύπαρξη απότομων αλλαγών στο βάθος νερού και την ταχύτητα ροής εξαιτίας της στένωσης που υφίσταται. Καθώς το νερό μεταβαίνει από χαμηλές τιμές ροής σε ροή με υψηλές τιμές πίεσης στο σημείο της κατασκευής, η επιφάνεια νερού προς τα ανάντη ανεβαίνει πολύ γρήγορα. Δηλαδή, όταν η ροή του νερού χτυπά την γέφυρα το νερό υπερπηδά την γέφυρα και κατακλύζει την επιφάνεια πλευρικά της κατασκευής. Σε ορισμένες περιπτώσεις το νερό υπερπηδά την κατασκευή καθώς σε άλλες διοχετεύεται μέσα από αυτήν.

Η υπερχειλίση του χειμάρρου εξαιτίας της στένωσης που εμφανίζεται στις γέφυρες παρατηρείται κυρίως σε δύο σημεία. Είτε στο σημείο όπου αρχίζει η παρουσία γεφυρών στο υδατόρρευμα, είτε αργότερα, εκεί όπου υπάρχει μεγάλη παρουσία γεφυρών σε μικρό μήκος, περίπου στη μέση του υδατορρέυματος. Ειδικότερα, σε δύο γέφυρες παρατηρούνται βάθη με νερού πολύ υψηλές τιμές οι οποίες δεν μπορούν να ερμηνευτούν φυσικά και οφείλονται σε αριθμητικές αστάθειες του μοντέλου (numerical instabilities).

Στην παρούσα εργασία έγινε ανάλυση της ευαισθησίας των αρχικών συνθηκών υγρασίας και των συντελεστών τραχύτητας έτσι ώστε να εξεταστούν οι αβεβαιότητες της μοντελοποίησης. Επομένως, μία πρόταση για περαιτέρω διερεύνηση είναι η ανάλυση της ευαισθησίας και άλλων παραμέτρων, όπως αυτής του μεγέθους των κελιών του πλέγματος. Ακόμη, επιλέχθηκε η μέθοδος αποτύπωσης των κτιρίων με την τοπική αύξηση των τριβών του πυθμένα. Προτείνεται λοιπόν, άλλη επιλογή μεθόδου αποτύπωσης των κτιρίων, αυτής με την εμφάνιση του ποσοστού της πλημμύρας που εισέρχεται στα όρια των κτιρίων.

Επιπλέον, αποδόθηκαν τιμές συντελεστών τραχύτητας για τρία σενάρια στα όρια του υδατορρέυματος αλλά και στην επιφάνεια κατάκλυσης της πλημμύρας. Επομένως, άλλη μία πρόταση είναι η κατάρτιση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας αποδίδοντας τιμές συντελεστών τραχύτητας για τρία σενάρια στο υδατόρρευμα αλλά κρατώντας σταθερές τις τιμές των συντελεστών στην επιφάνεια κατάκλυσης. Τέλος, ενδιαφέρον θα είχε η υδραυλική προσομοίωση να πραγματοποιηθεί και με άλλες τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning, ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση του, στις εκτάσεις των πλημμυρικών πεδίων.

Στόχος την παρούσας μελέτης ήταν η ανάλυση της ευαισθησίας του μοντέλου όσον αφορά τις αρχικές συνθήκες υγρασίας και τους συντελεστές τραχύτητας. Απώτερος σκοπός ήταν η εκπόνηση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας προκειμένου να δοθεί μία γενική εικόνα της πλημμύρας που προκαλείται στις περιόδους επαναφοράς που ορίστηκαν. Είναι φανερό πως η ανάλυση της ευαισθησίας των μοντέλων πλημμύρας είναι ένα σύνθετο πρόβλημα στην περίπτωση μη μόνιμης ροής οποιαδήποτε μεγέθους ή οποιαδήποτε πολυπλοκότητας διαστάσεων.

Βιβλιογραφία

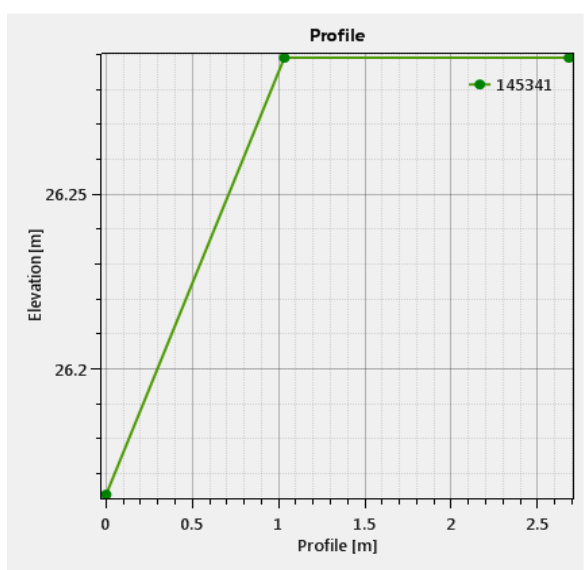
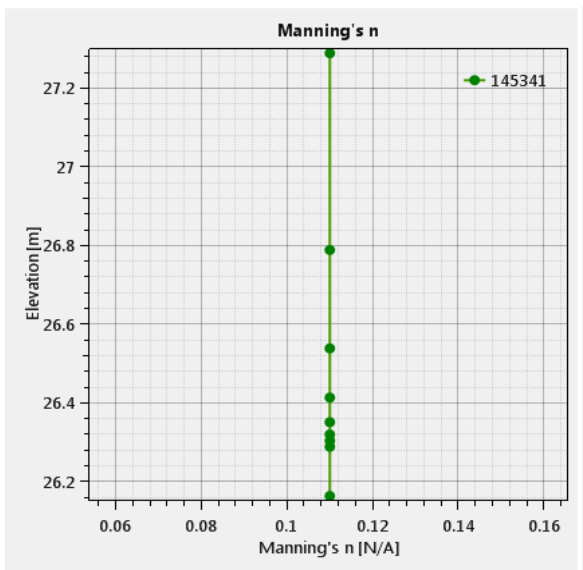
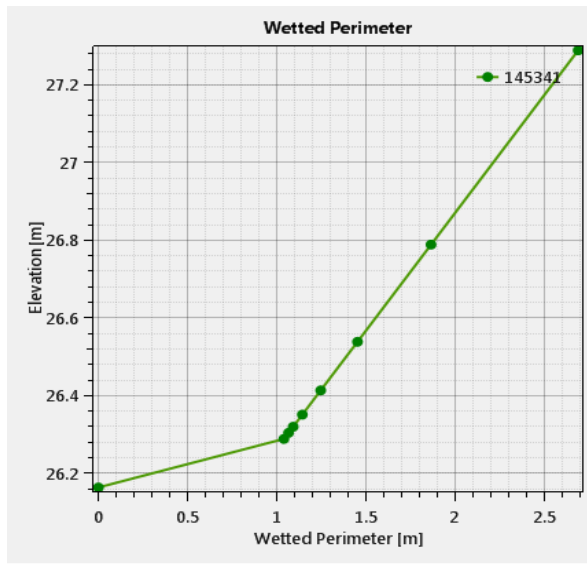
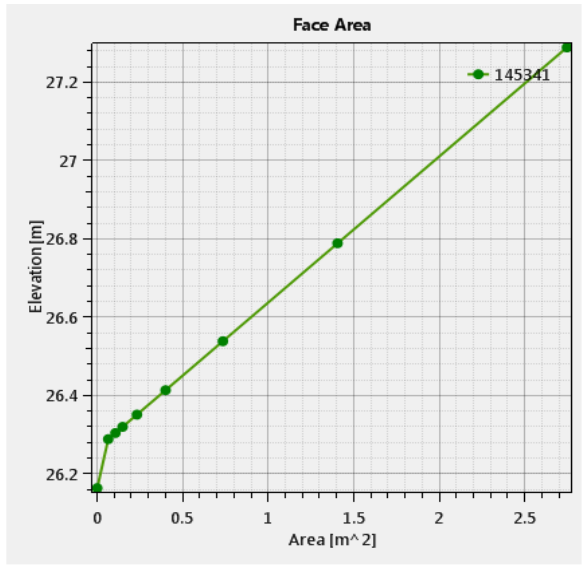
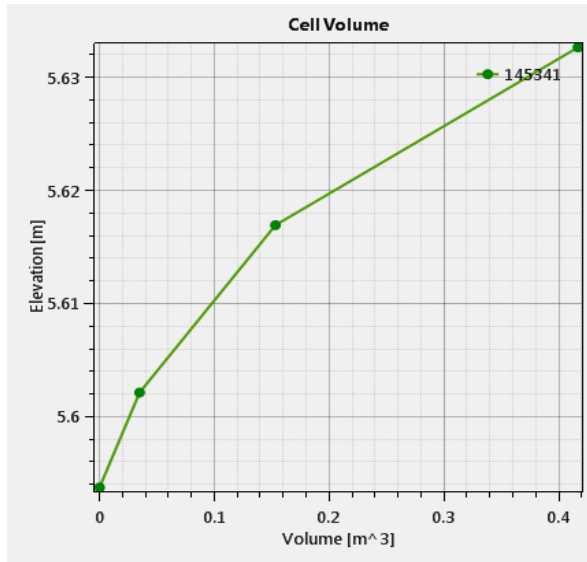
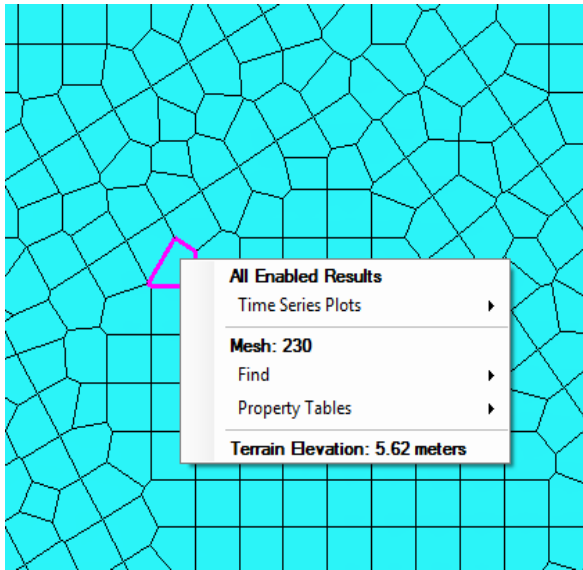
- Γκιοκάς, Α., 2009. *Κατάρτιση μεθοδολογικού πλαισίου για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Αθήνα.
- Γραικούσης, Γ., και Λάγος, Α., 2011. *Αρχές Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής*, Σύγχρονη Εκδοτική, Αθήνα.
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017. *Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας, των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας*, ΥΠΕΚΑ.
- Ε.Κ., 2000. *Οδηγία 2000/60 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων*, 22.12.2000, Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων.
- Ε.Κ., 2007. *Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2007 για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας*, 6.11.2007, Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.
- ΕΣΥΕ, 2011. *Πραγματικός πληθυσμός, επιφάνεια και πυκνότητα του πληθυσμού, με διάκριση σε αστικές και αγροτικές περιοχές καθώς, και σε πεδινές, ημιορεινές και ορεινές περιοχές της Ελλάδος κατά νομούς, δήμους, δημοτικά διαμερίσματα και οικισμούς*, Απογραφή πληθυσμού του Μαΐου 2011, Αθήνα.
- Κουγιουμτζίδου, Κ., 2011. *Εφαρμογή της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ, για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, στο Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ «Οικολογική ποιότητα και διαχείριση υδάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής», Θεσσαλονίκη.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος., 1999. *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Λέκκας, Ε., 2000. *Φυσικές και τεχνολογικές καταστροφές*, 2η έκδοση, Αθήνα.
- Λιακόπουλος, Α., 2010. *Μηχανική Ρευστών*, Εκδόσεις Τζιόλα, Βόλος.
- Μαμάσης, Ν., 2007. *Διαχείριση Πλημμυρικού Κινδύνου*, Σημειώσεις μαθήματος Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά Έργα, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Μαμάσης, Ν., 2009. *Πλημμύρες – Εκτίμηση Πλημμυρικών Παροχών*, Σημειώσεις μαθήματος Υδρομετεωρολογίας, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Μιμίκου, Μ., 2006. *Τεχνολογία Υδατικών Πόρων*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 3^η Έκδοση, Αθήνα.
- Abdulaziz, A., 2017. *Application of Two-Dimensional Hydraulic Modeling in Riverine Systems Using HEC-RAS*, Master Thesis, University of Dayton, Ohio.

- Ackerman, P.E., and Cameron, T., 2012. *HEC-GeoRAS, GIS Tools for Support of HEC-RAS using Arc GIS® User's Manual*, Version 10, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center.
- Babae, A., Izadifar, B., 2015. *Hazard Modeling and Risk Assessment for Urban Flood Scenario*. Master Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano.
- Bellos, V. and Tsakiris, G., 2015. *Comparing various methods of building representation for 2d flood modeling in built-up areas*, Water Resources Management, vol.29, 379-397.
- Brunner, G., 2016. *HEC-RAS, River Analysis System 2D Modeling User's Manual*, Version 5.0, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic engineering center.
- Brunner, G., Piper, S., Marston, L., Warner, J., Wolfe, B., 2016. *HEC-RAS, River Analysis System Application Guide, Version 5.0*, US Army Corps of Engineers, Hydrologic, Engineering Center.
- Brunner, G., 2016. *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*, Version 5.0, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., and Mays, L. W., 1988. *Applied Hydrology*, McGraw-Hill.
- Diakakis M., Mavroulis S., Deligiannakis G., 2012. *Floods in Greece, a statistical and spatial approach*, Natural Hazards, Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards.
- EEA, 2012. *Urban Adaption to Climate Change in Europe, Challenges and Opportunities for Cities Together with Supportive National and European Policies*, Version of 12.12.2012, Report.
- Lant, J., 2011. *A Hydraulic Modeling Framework for Producing Urban Flood Maps for Zanesville, Ohio*, Master Thesis, The Ohio State University.
- Leon, A., 2015. *Tutorial on using HEC-GeoRAS 10.1 (or newer) with ArcMap 10.1 (or newer) and HEC- RAS 4.1.0 (or newer) for flood inundation mapping in Steady and Unsteady Flow Conditions*, School of Civil and Construction Engineering, Oregon State University.
- Miliani, F., Ravazzani, G., Mancini, M., 2011. *Adaption of precipitation index for the estimation of antecedent moisture condition in large mountainous basins*, J, Hydrol, Eng, 16, 218-227.
- Moukalled, F., Mangani, L., and Darwish, M., 2016. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics, An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab®, Springer*.
- Papaioannou, G., Vasiliades, L., Loukas, A. and Aronica, G.T., 2017. *Probabilistic flood inundation mapping at ungauged streams due to roughness coefficient uncertainty in hydraulic modelling*, Advances in Geosciences, EGU.

Παράρτημα Α

Πίνακας 8: Κατηγοριοποίηση χρήσεων γης σύμφωνα με Corine 2000

1ο επίπεδο	2ο επίπεδο	3ο επίπεδο
1. ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ	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. ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	2.1 ΑΡΩΣΙΜΗ ΓΗ	2.1.1 Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη 2.1.2 Μόνιμα αρδευόμενη 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 ΛΙΒΑΔΙΑ	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 ΗΜΙΦΥΣΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	3.1 ΔΑΣΗ	3.1.1 Δάσος πλατύφυλλων 3.1.2 Δάσος κωνοφόρων 3.1.3 Μικτό δάσος
	3.2 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΘΑΜΝΩΔΟΥΣ Η/ΚΑΙ ΠΟΩΔΟΥΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ	3.2.1 Φυσικοί βοσκότοποι 3.2.2 Θάμνοι και χερσότοποι 3.2.3 Σκληροφυλλική βλάστηση 3.2.4 Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις
	3.3 ΑΝΟΙΧΤΟΙ ΧΩΡΟΙ ΜΕ ΛΙΓΗ Ή ΚΑΘΟΛΟΥ ΒΛΑΣΤΗΣΗ	3.3.1 Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές 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. ΥΓΡΟΤΟΠΟΙ	4.1 ΥΓΡΟΤΟΠΟΙ ΕΝΔΟΧΩΡΑΣ	4.1.1 Βάλτοι στην ενδοχώρα 4.1.2 Τυρφώνες
	4.2 ΠΑΡΑΘΑΛΑΣΣΙΟΙ ΥΓΡΟΤΟΠΟΙ	4.2.1 Παραθαλάσσιοι βάλτοι 4.2.2 Αλυκές 4.2.3 Ζώνες που καλύπτονται από παλιρροιακά ύδατα
5. ΥΔΑΤΙΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ	5.1 ΧΕΡΣΑΙΑ ΥΔΑΤΑ	5.1.1 Υδατορρεύματα 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

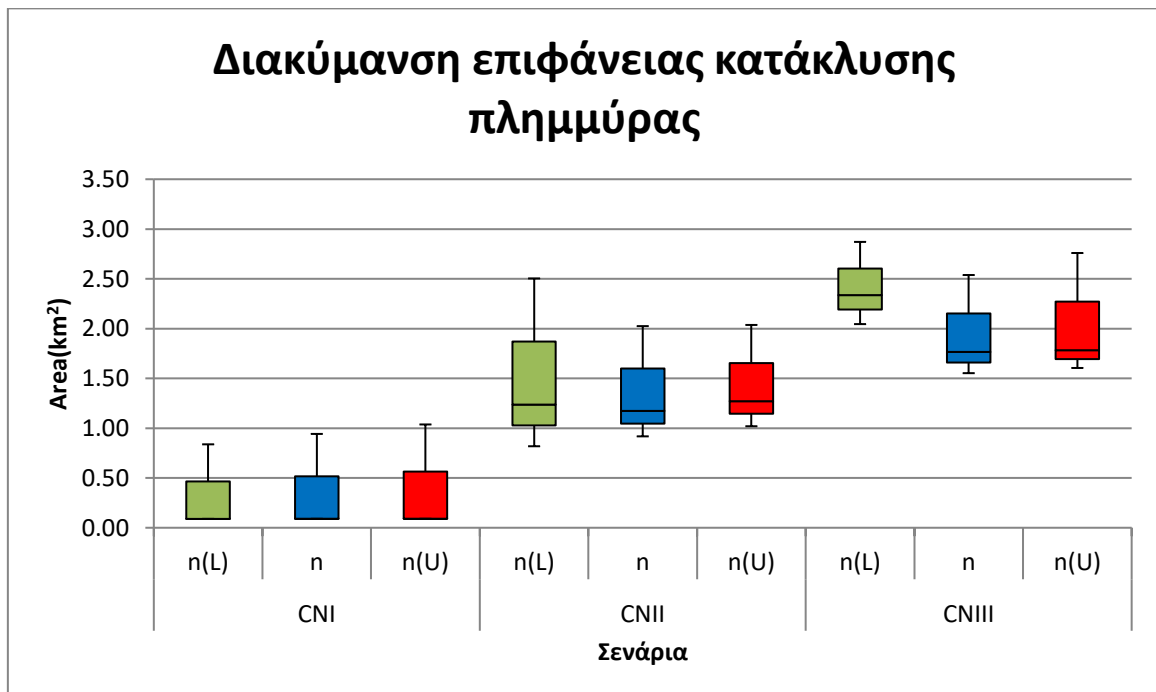


Σχήμα 64: Πίνακες υδραυλικών ιδιοτήτων (Hydraulic properties tables)

Παράρτημα Β

Πίνακας 9: Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας σε km²

Κωδικός	Περίοδος Επαναφοράς	Συνθήκες	n(L)	n	n(U)
GR0817FR00800	T50	Ευμενείς(CNI)	0.09	0.09	0.09
		Μέσες(CNII)	0.82	0.92	1.02
		Δυσμενείς(CNIII)	2.05	1.55	1.60
GR0817FR00800	T100	Ευμενείς(CNI)	0.09	0.09	0.09
		Μέσες(CNII)	1.24	1.17	1.27
		Δυσμενείς(CNIII)	2.34	1.77	1.78
GR0817FR00800	T1000	Ευμενείς(CNI)	0.84	0.94	1.04
		Μέσες(CNII)	2.50	2.03	2.04
		Δυσμενείς(CNIII)	2.87	2.54	2.76



Σχήμα 65: Διακύμανση επιφάνειας κατάκλυσης πλημμύρας

Πίνακας 10: Αναλογία επιφανειών κατάκλυσης σε km² με βάθη νερού σε m

Κωδικός	Περίοδος Επαναφοράς	Συντελεστής	Συνθήκες	0-0.2	0.2-0.5	0.5-1	1-2	>2
GR0817FR00800	T50	n(L)	Ευμενείς(CNI)	0.01	0.06	0.02	0.00	0.00
			Μέσες(CNII)	0.64	0.07	0.03	0.06	0.03
			Δυσμενείς(CNIII)	1.29	0.49	0.16	0.03	0.08
GR0817FR00800		n	Ευμενείς(CNI)	0.00	0.05	0.03	0.00	0.00
			Μέσες(CNII)	0.71	0.10	0.01	0.06	0.03
			Δυσμενείς(CNIII)	0.78	0.50	0.16	0.04	0.07
GR0817FR00800		n(U)	Ευμενείς(CNI)	0.00	0.04	0.05	0.00	0.00
			Μέσες(CNII)	0.70	0.19	0.03	0.06	0.04
			Δυσμενείς(CNIII)	0.66	0.63	0.20	0.05	0.07
GR0817FR00800	T100	n(L)	Ευμενείς(CNI)	0.01	0.04	0.04	0.01	0.00
			Μέσες(CNII)	0.95	0.16	0.03	0.05	0.05
			Δυσμενείς(CNIII)	1.12	0.79	0.28	0.05	0.09
GR0817FR00800		n	Ευμενείς(CNI)	0.00	0.03	0.06	0.00	0.00
			Μέσες(CNII)	0.77	0.25	0.06	0.05	0.05
			Δυσμενείς(CNIII)	0.73	0.66	0.24	0.05	0.08
GR0817FR00800		n(U)	Ευμενείς(CNI)	0.00	0.01	0.07	0.01	0.00
			Μέσες(CNII)	0.73	0.34	0.10	0.05	0.05
			Δυσμενείς(CNIII)	0.60	0.75	0.30	0.06	0.08
GR0817FR00800	T1000	n(L)	Ευμενείς(CNI)	0.66	0.07	0.02	0.06	0.03
			Μέσες(CNII)	1.00	0.97	0.38	0.08	0.08
			Δυσμενείς(CNIII)	0.69	1.13	0.74	0.20	0.11
GR0817FR00800		n	Ευμενείς(CNI)	0.72	0.11	0.01	0.06	0.04
			Μέσες(CNII)	0.68	0.84	0.35	0.08	0.08
			Δυσμενείς(CNIII)	0.56	0.92	0.75	0.21	0.09
GR0817FR00800		n(U)	Ευμενείς(CNI)	0.70	0.21	0.03	0.06	0.04
			Μέσες(CNII)	0.56	0.83	0.48	0.09	0.08
			Δυσμενείς(CNIII)	0.62	0.84	0.94	0.27	0.10

Πίνακας 11: Αναλογία επιφανειών κατάκλυσης σε km² με ταχύτητες ροής σε m/s

Κωδικός	Περίοδος Επαναφοράς	Συντελεστής	Συνθήκες	0-1	1-2	2-5	>5
GR0817FR00800	T50	n(L)	Ευμενείς(CNI)	0.01	0.02	0.04	0.02
			Μέσες(CNII)	0.56	0.08	0.11	0.07
			Δυσμενείς(CNIII)	1.21	0.21	0.29	0.33
GR0817FR00800		n	Ευμενείς(CNI)	0.02	0.04	0.03	0.01
			Μέσες(CNII)	0.71	0.10	0.08	0.03
			Δυσμενείς(CNIII)	1.05	0.21	0.19	0.10
GR0817FR00800		n(U)	Ευμενείς(CNI)	0.02	0.05	0.02	0.00
			Μέσες(CNII)	0.83	0.10	0.07	0.01
			Δυσμενείς(CNIII)	1.13	0.28	0.16	0.03
GR0817FR00800	T100	n(L)	Ευμενείς(CNI)	0.01	0.02	0.04	0.02
			Μέσες(CNII)	0.84	0.13	0.16	0.10
			Δυσμενείς(CNIII)	1.27	0.26	0.35	0.45
GR0817FR00800		n	Ευμενείς(CNI)	0.01	0.03	0.04	0.01
			Μέσες(CNII)	0.85	0.17	0.12	0.03
			Δυσμενείς(CNIII)	1.13	0.22	0.28	0.13
GR0817FR00800		n(U)	Ευμενείς(CNI)	0.01	0.04	0.03	0.00
			Μέσες(CNII)	0.98	0.18	0.09	0.02
			Δυσμενείς(CNIII)	1.21	0.29	0.22	0.07
GR0817FR00800	T1000	n(L)	Ευμενείς(CNI)	0.56	0.09	0.11	0.07
			Μέσες(CNII)	1.32	0.27	0.39	0.52
			Δυσμενείς(CNIII)	1.29	0.36	0.42	0.81
GR0817FR00800		n	Ευμενείς(CNI)	0.71	0.12	0.09	0.03
			Μέσες(CNII)	1.24	0.29	0.40	0.09
			Δυσμενείς(CNIII)	1.39	0.40	0.51	0.23
GR0817FR00800		n(U)	Ευμενείς(CNI)	0.83	0.12	0.08	0.01
			Μέσες(CNII)	1.29	0.37	0.34	0.04
			Δυσμενείς(CNIII)	1.53	0.60	0.49	0.14