



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ
ΑΤΤΙΚΗΣ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ
ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ
ΤΑΧΕΙΑΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΕ
ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ :
Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ
ΜΑΝΔΡΑΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

ΧΑΝΔΡΙΝΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ
A.M. : 6661

Επιβλέπων: Μπέλλος Βασίλης

Αθήνα, 2021





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΤΙΤΛΟΣ ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΤΑΧΕΙΑΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟ

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ : Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΜΑΝΔΡΑΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Όνοματεπώνυμο φοιτητή :

ΧΑΝΔΡΙΝΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

Η διπλωματική εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή:

ΒΑΣΙΛΗΣ ΜΠΕΛΛΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής

Μέλος

ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΥΜΠΕΘΕΡΟΣ

Καθηγητής

Μέλος

ΜΑΡΙΟΣ-ΠΡΟΚΟΠΙΟΣ ΒΑΛΑΒΑΝΙΔΗΣ

Καθηγητής

Μέλος

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2021

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **Χανδρινός Σπυρίδων** του Νικολάου, με αριθμό μητρώου **44366610226** φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, Κατεύθυνση Υδραυλικών Έργων, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου.»

Ο Δηλών

ΧΑΝΔΡΙΝΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ





Η παρούσα εργασία αποτελεί διπλωματική εργασία στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών « Σχολή Μηχανικών » του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών στην κατεύθυνση των Υδραυλικών Έργων.

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους από τους ανθρώπους που γνώρισα, συνεργάστηκα μαζί τους και έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στην πραγματοποίησή της.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας, τον κύριο Βασίλη Μπέλλο, Μεταδιδακτορικό Ερευνητή, για την επιλογή ενός επίκαιρου και ενδιαφέρον θέματος. Τόσο με την πολύτιμη και συνεχή καθοδήγησή του όσο με τις γνώσεις του αλλά και την εμπιστοσύνη και εκτίμηση που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας.

Στη συνέχεια θα πρέπει να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Ιωάννη Συμπέθερο, καθηγητή Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, όπου με καθοδήγησε και αφιέρωσε πολύ από τον πολύτιμο χρόνο του καθώς και για τις γνώσεις που αποκόμισα καθ' όλη την διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων εντός και εκτός των σπουδών μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένεια μου. Τους γονείς μου, Νίκο, Λίντα, αλλά και στον αδελφό μου Πέτρο, που ήταν δίπλα μου σε κάθε βήμα βοηθώντας με οποιοδήποτε τρόπο για την ολοκλήρωση των σπουδών μου. Στους φίλους, φίλες και συναδέλφους μου για τις αξέχαστες στιγμές που περάσαμε όλα αυτά τα χρόνια, όπου ευελπιστώ στο μέλλον να ξαναβρεθούν οι δρόμοι μας.

ΧΑΝΔΡΙΝΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2021

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

σελ.

Ευχαριστήριο Σημείωμα (Acknowledgements)

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ 9 – 11

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ 12

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 14

ABSTRACT 15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Πλημμύρες 16 - 17

1.2 Πλημμύρα Ταχείας Απόκρισης 17 - 18

1.3 Αστικές Πλημμύρες Ταχείας Απόκρισης 18

1.4 Η Περίπτωση της Μάνδρας 19 - 20

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ

2.1 Γενική Περιγραφή του Λογισμικού *HEC-RAS* 21

2.1.1 Πλεονεκτήματα / Δυνατότητες Μοντελοποίησης Δισδιάστατης Ροής του *HEC-RAS* 21- 22

2.1.2 *RAS-Mapper* 22

2.2 Αναλυτική Περιγραφή Υδρολογικού Μοντέλου *HEC-RAS* 22

2.2.1 Εξισώσεις *Saint Venant* ή Αβαθών Υδάτων (*Full Momentum Equation*)..... 22 - 23

2.2.2 Εξίσωση Διάχυσης Κύματος για Αβαθή Νερά (*Diffusion Wave Equation for shallow water*) 24

2.2.3 Χρονικό Βήμα (*Time step*) 24 - 25

2.2.4 Αρχικό Πλέγμα και Συνδυασμένο Πλέγμα (*Grid and dual grid*) 25 - 26

2.3 Αριθμητικές Μέθοδοι 26

2.3.1 Προσέγγιση Πεπερασμένων Διαφορών (*Finite Difference Approximations*) 26 - 28

2.3.2 Προσέγγιση Πεπερασμένου Όγκου (*Finite Volume Approximation*)..... 28 - 29

2.4 Ανάλυση Ευαισθησίας 29

2.4.1 Εισαγωγή 29 - 30

2.4.2 Βασική Μεθοδολογία 31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1 Γενική Περιγραφή 32

3.2 Μορφολογία Περιοχής 32 - 34

3.3 Ιστορικά Πλημμυρά Γεγονότα της Περιοχής 34 - 35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

4.1 Πορεία Εργασιών	36 - 37
4.2 Αναλυτική Περιγραφή	37 - 39
4.3 Καθορισμός και Εισαγωγή Απαραίτητων Παραμέτρων	39
4.3.1 Εισαγωγή Γεωμετρικών Δεδομένων	39
4.3.2 Δημιουργία Πλέγματος Μοντέλου (<i>Mesh modeling</i>)	39 - 40
4.3.3 Οριακές Συνθήκες (<i>Boundary Conditions</i>)	40-42
4.3.4 Διαχωριστικές Γραμμές (<i>Breaklines</i>)	42
4.3.5 Τροποποίηση 2Δ Πλέγματος	42 - 44
4.3.6 Συντελεστή Τραχύτητας <i>Manning</i>	44 - 48
4.3.7 Γραφική Αναπαράσταση στο <i>RAS-Mapper</i>	49 - 50
4.4 Ανάλυση Μη Μόνιμης Ροής (<i>Unsteady Flow Analysis</i>)	50 - 52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ & ΣΥΝΘΕΣΗ ΧΑΡΤΩΝ

5.1 Εισαγωγή	52 - 53
5.2 Ανάλυση Ευαισθησίας και Βαθμονόμηση των Παραμέτρων	53 - 59
5.3 Μέγιστα Βάθη Ροής	59 - 68
5.4 Μέγιστες Ταχύτητες Ροής	68 - 72
5.5 Στάθμη Επιφάνειας Νερού	73 - 74

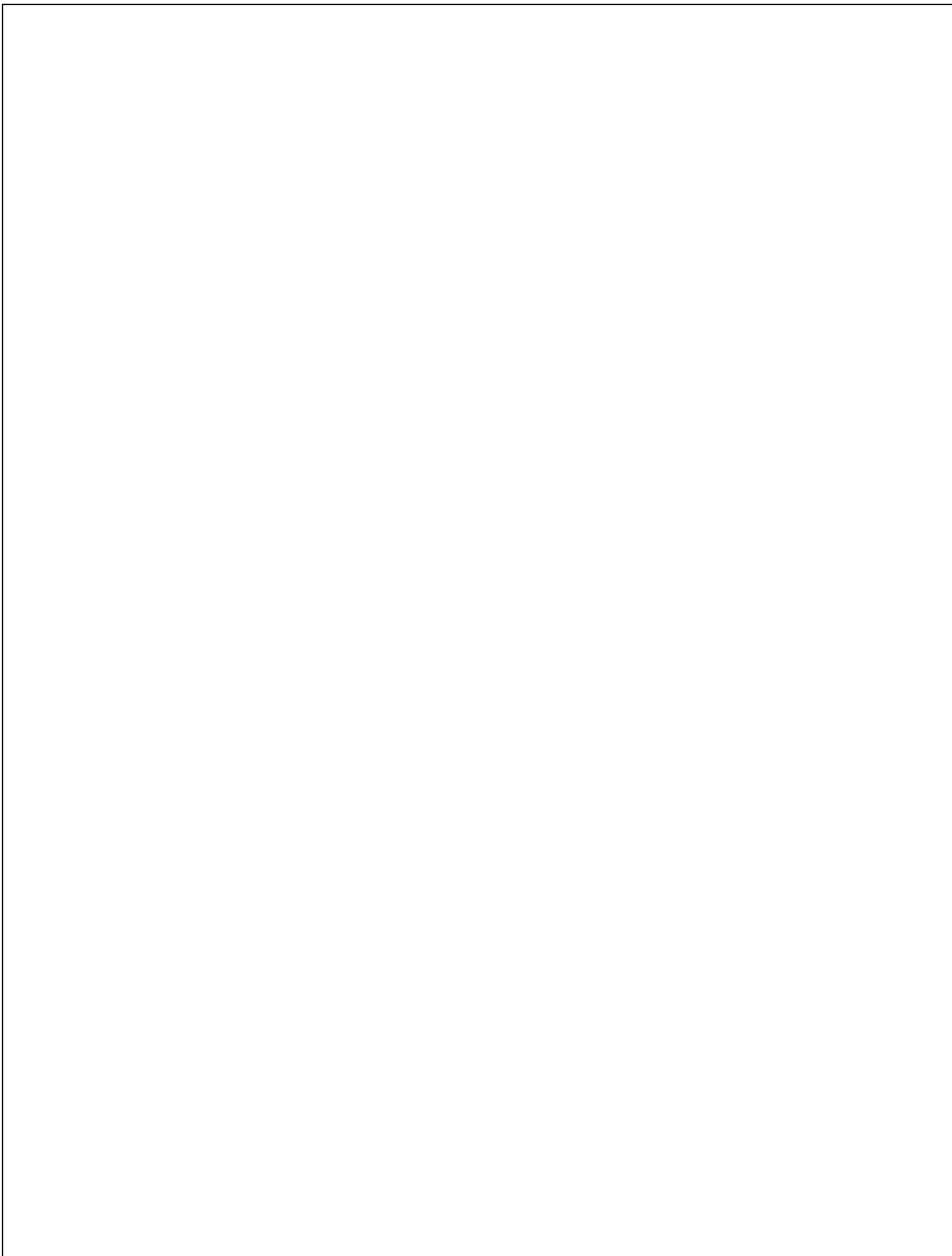
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Συμπεράσματα	75 - 76
6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

7.1 Ελληνική Βιβλιογραφία	77 - 78
7.2 Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία	78 - 82

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	83 - 86
------------------------	----------------



ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

σελ.

Εικόνα 2.1: Αρχικό πλέγμα και τροποποιημένο/συνδυασμένο πλέγμα. (πηγή: Υδραυλικό Εγχειρίδιο, λογισμικό HEC-RAS, έκδοση 5.0.7)	26
Εικόνα 2.2: Γειτονικά κελιά του δισδιάστατου πλέγματος. (πηγή: Υδραυλικό Εγχειρίδιο, λογισμικό HEC-RAS, έκδοση 5.0.7)	27
Εικόνα 2.3: Κελιά βαθυμετρίας (μπλε χρώμα) με κελιά πλέγματος (κόκκινο χρώμα). (πηγή: Υδραυλικό Εγχειρίδιο, λογισμικού HEC-RAS , έκδοση 5.0.7)	29
Εικόνα 3.1.α: Πόλη της Μάνδρας. (πηγή: Google Maps 2020)	32
Εικόνα 3.2.α: Η λεκάνη απορροής της Μάνδρας. (πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)	33
Εικόνα 3.2.β: Οι κλίσεις στην λεκάνη απορροής. (πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)	34
Εικόνα 4.1.α: Ύψος βροχής που καταγράφηκε στην Μάνδρα στις 15/11/2017.(πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)	37
Εικόνα 4.3.3.α: Οριακή συνθήκη υδρογραφήματος ροής στην ανάντη διατομή. (πηγή: στιγμιότυπο Unsteady Flow Data / Flow Hydrograph, HEC-RAS)	41
Εικόνα 4.3.3.β: Οριακή συνθήκη ομοιόμορφου βάθους στην κατάντη διατομή. (πηγή: στιγμιότυπο Μη μόνιμης ροής/ Κανονικό βάθος, λογισμικό HEC-RAS)	41
Εικόνα 4.3.5.α: Προβολή 2Δ πλέγματος με τα κελιά χωρίς την τροποποίηση. (πηγή: στιγμιότυπο γεωμετρικά δεδομένα, λογισμικό HEC-RAS)	43
Εικόνα 4.3.5.β: Προβολή των ορθογώνιων κελιών του τροποποιημένου πλέγματος. (πηγή: στιγμιότυπο γεωμετρικά δεδομένα, λογισμικό HEC-RAS)	43
Εικόνα 4.3.5.γ: Προβολή εσφαλμένων κελιών του 2Δ πλέγματος. (πηγή : στιγμιότυπο γεωμετρικά δεδομένα, λογισμικό HEC-RAS)	44
Εικόνα 4.3.6: Γραφική αναπαράσταση συντελεστή τραχύτητας ανά περιοχή 2Δ πλέγματος. (πηγή: στιγμιότυπο RAS-Mapper, λογισμικό HEC-RAS).....	47
Εικόνα 4.3.7.α: Τελικό αποτέλεσμα ψηφιακού μοντέλου εδάφους και των γεωμετρικών δεδομένων του μοντέλου. (πηγή: στιγμιότυπο RAS-Mapper, λογισμικό HEC-RAS) ..	48
Εικόνα 4.3.7.β: Αεροφωτογραφία και γεωμετρικά δεδομένα περιοχής μελέτης. (πηγή: στιγμιότυπο RAS-Mapper, λογισμικό HEC-RAS)	49

Εικόνα 4.4: Παράμετροι της ανάλυση μη μόνιμης ροής. (πηγή: στιγμιότυπο Ανάλυση μη μόνιμης ροής, λογισμικό HEC-RAS)	50
Εικόνα 5.1: Αποτύπωση των σημείων στην πόλη της Μάνδρας.(πηγή: στιγμιότυπο ψηφιακού στρώματος μέγιστου βάθους ροής, σημεία, λογισμικό QGIS)	53
Εικόνα 5.2.1: Πλημμυρικό υδρογράφημα της περιοχής μελέτης μετά από βροχόπτωση στις 15/11/2017, για τα διαστήματα εμπιστοσύνης 10%, 36.667%, 63.33% και 90%. (πηγή: στιγμιότυπο διαγράμματος EXCEL)	55
Εικόνα 5.2.2: Σχηματική απεικόνιση της ανάλυση ευαισθησίας με βάση το RMSE των σημείων. (πηγή: στιγμιότυπο διαγράμματος στο λογισμικό EXCEL)	56
Εικόνα 5.2.3: 3Δ απεικόνιση συνάρτηση στόχος της βαθμονόμησης των παραμέτρων μ , C.I. βάσει το RMSE των σημείων. (πηγή: στιγμιότυπο διαγράμματος στο λογισμικό EXCEL)	58
Εικόνα 5.3.1: Πλημμυρογράφημα προσομοίωσης μεταξύ ωρών 04:00 – 07:00[h:mm]. (πηγή: στιγμιότυπο RAS-Mapper, λογισμικό HEC-RAS)	60
Εικόνα 5.3.2: Πλημμυρογράφημα προσομοίωσης μεταξύ ωρών 08:00 – 11:00[h:mm]. (πηγή: στιγμιότυπο RAS-Mapper, λογισμικό HEC-RAS)	61
Εικόνα 5.3.3: Πλημμυρογράφημα προσομοίωσης μεταξύ ωρών 12:00 – 15:00[h:mm]. (πηγή: στιγμιότυπο RAS-Mapper, λογισμικό HEC-RAS)	62
Εικόνα 5.3.4: Αεροφωτογραφία με το μέγιστο ύψος ροής της περιοχής. (πηγή: στιγμιότυπο RAS-Mapper, λογισμικό HEC-RAS)	63
Εικόνα 5.3.5: Εδαφικό υπόβαθρο με το μέγιστο βάθος ροής [m] της περιοχής και τμήμα της οδού Αγ.Αικατερίνης – Β.Κοροπούλη. (πηγή: στιγμιότυπο RAS-Mapper, λογισμικό HEC-RAS)	64
Εικόνα 5.3.6: Προβολή των 44 σημείων και τμήμα του χάρτη των μέγιστων βάθη ροής. (πηγή: στιγμιότυπο ψηφιακού στρώματος μέγιστου βάθους ροής, λογισμικό QGIS)	66
Εικόνα 5.3.7: Ραβδοδιάγραμμα τιμών βάθη ροής των μετρημένων και προσομοιωμένων σημείων. (πηγή: στιγμιότυπο διαγράμματος στο λογισμικό EXCEL)	66
Εικόνα 5.3.8: Διάγραμμα μέγιστου βάθους ροής στην οδό Αγ.Αικατερίνης-Β.Κοροπούλη. (πηγή: στιγμιότυπο διαγράμματος Features, RAS-Mapper, λογισμικό HEC-RAS)	67
Εικόνα 5.4.1: Χάρτης μέγιστης ταχύτητας ροής της προσομοίωσης. (πηγή: στιγμιότυπο διαγράμματος RAS-Mapper, λογισμικό HEC-RAS)	68

Εικόνα 5.4.2: Διάγραμμα μέγιστης ταχύτητας ροής στην οδό Αγ.Αικατερίνης-Β.Κοροπούλη. (πηγή: στιγμιότυπο διαγράμματος Features, RAS-Mapper, λογισμικό HEC-RAS)	69
Εικόνα 5.4.3: Απεικόνιση κίνηση σωματιδίων του νερού με βάση το διάγραμμα μέγιστης ταχύτητας ροής [m/s] στην οδό Αγ.Αικατερίνης - Β.Κοροπούλη. (πηγή: στιγμιότυπο διαγράμματος Particle Tracing, RAS-Mapper, λογισμικό HEC-RAS)	70
Εικόνα 5.4.4: Χρωματική κατανομή ταχυτήτων ροής της διατομής στην οδό Αγ.Αικατερίνης-Β.Κοροπούλη τη χρονική στιγμή 07:45[h:mm]. (πηγή: στιγμιότυπο διαγράμματος Features, RAS-Mapper, λογισμικό HEC-RAS)	71
Εικόνα 5.4.5: Χρωματική κατανομή ταχυτήτων ροής της διατομής στην οδό Αγ.Αικατερίνης-Β.Κοροπούλη τη χρονική στιγμή 10:25[h:mm]. (πηγή: στιγμιότυπο διαγράμματος Features, RAS-Mapper, λογισμικό HEC-RAS)	72
Εικόνα 5.5.1: Χρωματική μεταβολή υψομέτρων της επιφάνειας του νερού. (πηγή: στιγμιότυπο διαγράμματος RAS-Mapper, λογισμικό HEC-RAS)	73
Εικόνα 5.5.2: Σχηματική απεικόνιση εδάφους και ελεύθερης επιφάνειας νερού στην οδό Αγ.Αικατερίνης – Β. Κοροπούλη.(πηγή: στιγμιότυπο διαγράμματος RAS-Mapper, λογισμικό HEC-RAS)	74

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

σελ.

Πίνακας 4-α: Κατανομή του συντελεστή και ορίων τραχύτητας Manning's n των διαφορετικών περιοχών χρήσεις γης.	50
Πίνακας 5-α: Συντεταγμένες των 44 σημείων στην περιοχή της Μάνδρας.	84
Πίνακας 5-β: Άνω και κάτω όρια των παραμέτρων για την ανάλυση ευαισθησίας.....	54
Πίνακας 5-γ: Προβολή των 90 συνδυασμών του μοντέλου για την ανάλυση ευαισθησίας.	84 - 86
Πίνακας 5-δ: Προβολή των 27 συνδυασμών του μοντέλου για την βαθμονόμηση (calibration).....	87
Πίνακας 5-ε: Άνω και κάτω όρια των παραμέτρων για την βαθμονόμηση (calibration).	57

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία έχει ως θέμα την δισδιάστατη προσομοίωση πλημμύρας σε αστική λεκάνη που απορρέει, σε περιοχή δυτικά της Αττικής συγκεκριμένα στην πόλη της Μάνδρας. Η ανάλυση αναπαριστά το γεγονός που έλαβε χώρα στις 15 Νοέμβρη του 2017, με τη χρήση του γνωστού υδροδυναμικού λογισμικού *HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's – River Analysis System)*. Για την μοντελοποίηση της πλημμύρας χρησιμοποιήθηκαν 100 υδρογραφήματα που προέρχονται από προσομοίωση της βροχόπτωσης του γεγονότος στο ρέμα της Αγίας Αικατερίνης, το οποίο απορρέει στη Μάνδρα. Η μελέτη επικεντρώνεται στην βαθμονόμηση των παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου συγκρίνοντας αποτελέσματα της προσομοίωσης με μετρημένα δεδομένα του πραγματικού γεγονότος. Αρχικά, για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος *Morris* προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των παραμέτρων που πρέπει να βαθμονομηθούν και συνεπώς να μειωθούν οι διαστάσεις του προβλήματος, καθώς και το υπολογιστικό κόστος. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την ανάλυση ευαισθησίας είναι οι εξής: (α) το διάστημα εμπιστοσύνης των υδρογραφημάτων, (β) ο συντελεστής *Manning* για οικοδομικά τετράγωνα με υψηλή τραχύτητα, (γ) ο συντελεστής *Manning* για οικοδομικά τετράγωνα με χαμηλή τραχύτητα, (δ) ο συντελεστής *Manning* των δρόμων της πόλης και (ε) η κλίση της γραμμής ενέργειας, η οποία απαιτείται για τον ορισμό της κατάντη οριακής συνθήκης. Διαπιστώθηκαν δύο παράμετροι με την μεγαλύτερη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα. Η σημαντικότερη παράμετρος ήταν το διάστημα εμπιστοσύνης του υδρογραφήματος, και δεύτερη, ο συντελεστής τραχύτητας των δρόμων της πόλης. Στη συνέχεια, με βάση την ιεράρχηση των παραμέτρων, βαθμονομήθηκαν οι σημαντικότεροι παράμετροι της προσομοίωσης για τον βέλτιστο συνδυασμό του μοντέλου με τη μέθοδο *grid-search calibration*. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, από το λογισμικό *HEC-RAS*, επικεντρώνοντας στους χάρτες για τα μέγιστα βάθη ροής, τις μέγιστες ταχύτητες ροής και τη μέγιστη στάθμη της επιφάνειας του νερού.

Λέξεις κλειδιά : Πλημμύρα Ταχείας Απόκρισης, Αστική Πλημμύρα, HEC-RAS, Δισδιάστατο Μοντέλο Προσομοίωσης, Συντελεστής Τραχύτητας Manning, Υδρογράφημα, Μάνδρα Αττικής.

ABSTRACT

This study deals with the 2D flood simulation of an urban flash flood event that took place on November 15, 2017 in Mandra, Attica. The well-known hydrodynamic software HEC-RAS was used for the flood simulation. The model input was an ensemble of 100 hydrographs, derived from the simulation of the rainfall-runoff process of Agia Aikaterini catchment, which flows into Mandra. The study focuses on a grid search-based calibration of the model parameters, by comparing simulation results to post-flood field data. A Morris-based sensitivity analysis was used in order to reduce the number of parameters to be calibrated and therefore reduce the dimensions of the problem and the computational cost. Five parameters were selected for the sensitivity analysis: a) the Manning coefficient of the city roads; b) the Manning coefficient of urban blocks characterized by low roughness; c) the Manning coefficient of urban blocks characterized by high roughness; d) the confidence interval of the empirical distribution of the 100 hydrographs ensemble; e) the energy slope used for at the downstream boundaries. It was found that the parameters with the most significant impact were the input hydrographs confidence interval (first) and the Manning coefficient of the city roads (second). Then we proceeded to an additional calibration of the two most important parameters for the optimal combination of the models. Closing, the results are analyzed and displayed from the HEC-RAS software focusing on the maps of max flow depths, velocities and flow elevations of the simulated flood model.

Keywords: Rapid Flash Flood, Urban Flood, HEC-RAS, 2D hydrodynamic model, Hydrograph, Mandra Attica.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Πλημμύρες

Σε ολόκληρο τον κόσμο οι πλημμύρες χαρακτηρίζονται ως φυσικά φαινόμενα. Στις περισσότερες περιπτώσεις έχουν αρνητική επίδραση στους ανθρώπους που ζουν στις πληγείσες περιοχές, με μεγάλες καταστροφές που επιδρούν άμεσα στις κοινότητες, κρατικές και ομοσπονδιακές υπηρεσίες. Για το λόγο αυτό, η διαχείριση και ο έλεγχος των πλημμυρών, απαιτούν μέτρα πρόληψης σε πολλές περιοχές ώστε να αποφευχθούν στο μέλλον η καταστροφικότητα των πλημμυρών. Σύμφωνα με την οδηγία του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, ως πλημμύρα ορίζεται η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο, υπό κανονικές συνθήκες, δεν είναι καλυμμένο από νερό. Η έννοια αυτή περιλαμβάνει πλημμύρες από ποτάμια, ορεινούς χείμαρρους και υδατορέματα εφήμερης ροής, υπερχειλίσεις λιμνών, πλημμύρες από υπόγεια ύδατα και πλημμύρες από τη θάλασσα σε παράκτιες περιοχές. Ακόμη, περιλαμβάνει πλημμύρες από καταστροφές μεγάλων υδραυλικών έργων, όπως θραύσεις αναχωμάτων και φραγμάτων (ΕΚ, 2007).

Οι πλημμύρες είναι φυσικά φαινόμενα, που συμβαίνουν όταν η χωρητικότητα του συστήματος αποστράγγισης, δεν μπορεί να διοχετεύσει τον όγκο νερού που παράγεται από τη βροχόπτωση (Βαχαβιώλος, 2011).

Γενικά, μπορεί να είναι πιο προβλέψιμες από τις υπόλοιπες φυσικές καταστροφές αλλά αποτελούν την πιο συνηθισμένη φυσική καταστροφή παγκοσμίως τα τελευταία 50 χρόνια (EM-DAT, 2019). Στον Ελλαδικό χώρο οι πλημμύρες αποτελούν τη δεύτερη πιο συχνή φυσική καταστροφή, μετά τις δασικές πυρκαγιές (ΕΚ, 2007).

Ιδιαίτερα στην περιοχή της Μεσογείου είναι υπεύθυνες για ένα μεγάλο ποσοστό ζημιών (Barredo 2009, Petersen 2001, Changnon 1999, Vinet et al, 2012) αλλά και για έναν σημαντικό αριθμό θανάτων (Kundzewicz 2005, Gaume et al, 2016). Η κύρια αιτία είναι ευνοούνται από τη γεωμορφολογία, τη γεωλογία και τις κλιματικές παραμέτρους της περιοχής (Παπανικολάου και Διακάκης, 2011).

Ο πλημμυρικός κίνδυνος αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια. Λόγω της αύξησης των βροχοπτώσεων εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής και της προβλεπόμενης αλλαγής των χρήσεων γης, απαιτούνται άμεσες παρεμβάσεις σε κρίσιμες θέσεις του

υδρογραφικού δικτύου και επί των υποδομών. Με βάση το κλίμα της ευρύτερης περιοχής, το οποίο χαρακτηρίζεται από την παρουσία περισσότερο ή λιγότερο σπάνιων ακραίων καταιγίδων (Llasat et al, 2010), προκύπτει ότι οι καταστροφικές πλημμύρες ταχείας απόκρισης ή flash flood (Borga et al, 2010) είναι εξαιρετικά πιθανό να εμφανίζονται πιο συχνά στο μέλλον με εκτεταμένες ζημιές ακόμα και ανθρώπινες απώλειες.

Θέτοντας σε κίνδυνο τόσο την ανθρώπινη ζωή όσο και την περιουσία του, η καταστροφή έργων υποδομής, γεωργικών και κτηνοτροφικών εγκαταστάσεων, η έντονη διάβρωση εδαφών και η ρύπανση των υδάτων είναι μερικές από τις πιο σημαντικές επιπτώσεις τους. Επηρεάζουν το μεγαλύτερο μέρος της ανθρωπότητας και έχουν ως αποτέλεσμα τις περισσότερες ζημιές από κάθε άλλο είδος φυσικής καταστροφής (Golian et al, 2011). Επιπλέον, τα πλημμυρικά φαινόμενα είναι αυτά που προκαλούν το ένα τρίτο των εκτιμώμενων ζημιών από φυσικές καταστροφές παγκοσμίως (Pilon, 2004).

1.2 Πλημμύρα Ταχείας Απόκρισης

Η πλημμύρα ταχείας απόκρισης (Flash Flood) είναι αποτέλεσμα ατμοσφαιρικών διαταραχών, που συνοδεύονται από τις ραγδαίες βροχοπτώσεις, με μεγάλα ποσά βροχής σε σύντομο χρονικό διάστημα. Οι πλημμύρες αυτές προκαλούνται από τις καταιγίδες που κινούνται αργά ή κινούνται πάνω από την ίδια περιοχή. Στη ζώνη των τροπικών προκαλούνται επίσης από τυφώνες ή τροπικούς κυκλώνες. Πολλοί παράγοντες συνηγορούν σε μια ξαφνική πλημμύρα, όπως: η ένταση της βροχής και η διάρκειά της, η τοπογραφία, οι συνθήκες του εδάφους, η φυτοκάλυψη, η καταστροφή των δασών καθώς και η αστικοποίηση.

Οι αιφνίδιες πλημμύρες πραγματοποιούνται σε μικρό χρονικό διάστημα, λίγων ωρών ή λιγότερο και έχουν σαν αποτέλεσμα ταχεία ύψωση νερού, το οποίο στο πέρασμά του μπορεί να προκαλέσει μεγάλες καταστροφές σε κατασκευές, όπως κτίρια, γέφυρες κλπ, να παρασύρει αυτοκίνητα, να ξεριζώσει δέντρα κ.α. Οι πλημμύρες, που προέρχονται από αυτές τις έντονες βροχοπτώσεις μπορεί και να προκαλέσουν καταστροφικές κατολισθήσεις εδαφών (λασποροές – *mud slides*).

Εμφανίζονται σχεδόν σε οποιαδήποτε περιοχή όπου υπάρχουν απότομες πλαγιές, αλλά είναι πιο κοινές σε ορεινές περιοχές που υπόκεινται σε συχνές σοβαρές καταιγίδες. Μπορούν επίσης να συμβούν σε περιοχές που το έδαφος είναι πολύ ξηρό για μια μακρά, ξηρή περίοδο (WMO, 2011). Αυτές που συμβαίνουν ξαφνικά ή όπως τις περισσότερες φορές με ελάχιστη προειδοποίηση συγκαταλέγονται στις πιο επικίνδυνες πλημμύρες με τα περισσότερα θύματα (Kourgialas et al., 2012).

1.3 Αστικές Πλημμύρες Ταχείας Απόκρισης

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα μιας πανελλαδικής έρευνας από τους ειδικούς διαχείρισης των όμβριων υδάτων και πλημμυρών αναφέρουν πως οι αστικές πλημμύρες ταχείας απόκρισης αποτελούν ένα ξεχωριστό φαινόμενο σε σχέση με τα άλλα είδη πλημμυρών (Galloway; Brody et al., 2018). Οι αστικές αυτές πλημμύρες πραγματοποιούνται όταν το νερό ρέει στην περιοχή γρηγορότερα από ότι μπορεί να απορροφηθεί στο έδαφος, να μετακινηθεί ή να αποθηκευτεί σε μια λίμνη ή δεξαμενή. Ωστόσο, λόγω της αστικοποίησης τα τελευταία χρόνια, κάτι τέτοιο είναι εξαιρετικά δύσκολο διότι υπάρχει περιορισμένος χώρος στις πόλεις ώστε να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση νερού, και αφετέρου σχεδόν όλος ο πλημμυρικός όγκος νερού πρέπει να διευθετηθεί.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους είναι ότι προκαλούνται είτε από την αστοχία του αποχετευτικού συστήματος, είτε ακόμα και από την έλλειψη αυτής στην αστική περιοχή. Οι αστικές πλημμύρες ταχείας απόκρισης εμφανίζονται ολοένα και πιο συχνά, έχουν τοπική επίδραση και μαζί με άλλες πτυχές της κλιματικής αλλαγής είναι πολύ πιθανό να επηρεάζει εκείνους που έχουν την λιγότερη οικονομική δυνατότητα να το αντιμετωπίσουν. Η ταχεία αύξηση του πληθυσμού και η αστικοποίηση έχουν οδηγήσει σε καταπατήσεις εντός των ρευμάτων και αλλαγές στη χρήση γης στις λεκάνες απορροής στα ανώτερα αστικά κέντρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι πολλές φορές τα φαινόμενα της πλημμύρας θα μπορούσαν να είχαν αποφευχθεί εάν δεν υπήρχαν ανθρωπογενείς παρεμβάσεις εντός των ρευμάτων. Επιπλέον, κυρίως λόγω της κλιματικής αλλαγής, οι πλημμύρες ταχείας απόκρισης θα συνεχίσουν να αυξάνονται χρόνο με το χρόνο.

1.4 Η Περίπτωση της Μάνδρας

Η φονική κακοκαιρία που έπληξε τη Μάνδρα την 15η Νοεμβρίου 2017, με συνέπεια 24 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους και ανυπολόγιστες ζημιές, αποτελεί το τραγικότερο περιστατικό αιφνίδιας πλημμύρας των τελευταίων δεκαετιών. Σύμφωνα με το μετεωρολόγο Μανώλη Ανανδρανιστάκης, την προηγούμενη μέρα της καταστροφής υπήρξε μια πολύ ισχυρή βροχόπτωση στην πλαγιά του Όρους Πατέρα, με αποτέλεσμα να συσσωρευτούν μεγάλες ποσότητες νερού (Ανανδρανιστάκης, 2017).

Παράλληλα, σύμφωνα με το κινητό μετεωρολογικό ραντάρ του Αστεροσκοπείου, στο όρος Πατέρας, πάνω από το Νέα Πέραμο και τη Μάνδρα, το συνολικό ύψος βροχής στον πυρήνα του συμβάντος υπερέβη τα 200 mm σε χρονικό διάστημα έξι ωρών με μεγαλύτερη ένταση κυρίως μεταξύ τις 5 και 8 το πρωί. Αυτή η ποσότητα αντιστοιχεί σε 3.5 φορές της μέσης βροχόπτωσης ολόκληρου του μήνα Νοεμβρίου στη συγκεκριμένη περιοχή. Τα τοπικά μέγιστα της στιγμιαίας βροχόπτωσης στο όρος Πατέρα έφτασαν μέχρι και τα 120 – 140 mm/hr (ΕΑΑ, 2017). Πρόκειται για μια πάρα πολύ ισχυρή και σχετικά σύντομη βροχόπτωση. Κάτι παρόμοιο είχε συμβεί και στις 26 Μαΐου 2007 στον Λούσιο ποταμό όπου έχασαν τη ζωή τους 8 άνθρωποι.

Η ανάπτυξη οικισμών, οδικών και σιδηροδρομικών αξόνων κάθετα στη ροή των ρεμάτων, αλλά οι καταπατήσεις τόσο εντός των ρεμάτων όσο και η κάλυψη των εκβολών τους, απέκοψε και περιόρισαν τη φυσική πορεία του νερού σε συνδυασμό με τη σφοδρότητα της καταιγίδας στα ορεινά και τη μεγάλη ποσότητα φερτών υλικών που μετέφεραν οι χειμάρροι οδήγησαν στην καταστροφή (Ρέβη et al., 2017). Συγκεκριμένα, η καταστροφική πλημμύρα της πόλης της Μάνδρας οφείλετε κυρίως στα δύο μπαζωμένα ρέματα της Αγίας Αικατερίνης και του Σούρες. Όπως καταδεικνύεται από τα προκαταρκτικά αποτελέσματα μελέτης που εκπονήθηκε από την ερευνητική ομάδα του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Πανεπιστημίου Αθηνών, με επικεφαλής τον καθηγητή Ευθύμιο Λέκκα, το νερό ακολούθησε τη φυσική δίοδο που θα είχε εάν έλειπε η ανθρώπινη παρέμβαση. Το ρέμα Αγίας Αικατερίνης διέρχεται από το σύνολο του κεντρικού άξονα της πόλης, οδός Αγ.Αικατερίνης – Β.Κοροπούλη, όπου μέχρι και σήμερα δεν έχει οριοθετηθεί ποτέ εντός αυτής (Σπίρτζης, 2017).

Ο απολογισμός της καταστροφικής πλημμύρας ήταν οι μεγάλες υλικές ζημιές, τόσο στο οδικό δίκτυο της περιοχής όσο και σε κατοικίες και κτήρια εντός του οικισμού.

Αναλυτικά, στην πόλη της Μάνδρας 794 κατοικίες, 126 επαγγελματικοί χώροι, 8 δημόσια κτήρια και 136 αποθήκες υπέστησαν ζημιές (Γαλάνης, 2017). Η παλιά εθνική οδός και οι δρόμοι της πόλης μετατράπηκαν σε ποτάμι με αποτέλεσμα αυτοκίνητα και φερτά υλικά να παρασυρθούν από τα νερά της πλημμύρας, δρόμοι κόπηκαν στη μέση, κτήρια πλημμύρησαν, ωστόσο τίποτα δεν συγκρίνεται με την τραγωδία όπου 24 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους σε αυτή την καταστροφική πλημμύρα της 15/11/2017.

Στην έρευνα των Jonkman και Penning – Rowsell (2008), αν το βάθος ροής ξεπερνάει 1.55 m και με ταχύτητα μεγαλύτερη από 1m/s υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να παρασυρθεί και θέση σε κίνδυνο τη ζωή του. (Jonkman and Penning–Rowsell, 2008)

Αντίστοιχα, σε μια μελέτη των Teo et al. (2012), ερευνήθηκε η επίδραση πλημμυρικού όγκου νερού σε οχήματα, όπου για βάθη ροής που κυμαίνονται από 1.1 – 2.9 m και με ταχύτητες από 1.9 – 3.9 m/s θεωρούνται καταστάσεις υψηλού κινδύνου των οχημάτων με αποτέλεσμα να επιπλέουν και κατ'επέκταση να παρασυρθούν από τη ροή.

Με βάση των δύο παραπάνω ερευνών και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για τα βάθη και ταχύτητες ροής του πλημμυρικού γεγονότος που έπληξε την πόλη της Μάνδρας στις 15/11/2017 επιβεβαιώνεται η καταστροφικότητα και η επικινδυνότητα της πλημμύρας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ

2.1 Γενική Περιγραφή του Λογισμικού *HEC-RAS*

Το υδραυλικό μοντέλο *HEC-RAS* είναι ένα από τα λογισμικά του Σώματος Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού (*US Army Corps of Engineer*), κατασκευάστηκε από το *Hydrologic Engineering Center (HEC)* για την προσομοίωση υδατορεμάτων (*River Analysis System –RAS*) (Εγχειρίδιο λογισμικού *HEC-RAS*). Τα υδατορέματα μπορεί να είναι φυσικά ή τεχνητά, μεμονωμένα ή συστήματα. Επιτρέπει στο χρήστη να πραγματοποιήσει μονοδιάστατη ανάλυση (*1D*) και προσομοίωση φυσικών υδατορεμάτων, μονοδιάστατους ή δισδιάστατους υπολογισμούς ροής (*2D*), μεταφορά ιζήματος και μοντελοποίηση ποιότητας των υδάτων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση του *HEC-RAS 5.0.7* για την 2Δ προσομοίωση και υπολογισμοί ροής.

2.1.1 Πλεονεκτήματα / Δυνατότητες Μοντελοποίησης Δισδιάστατης Ροής του *HEC-RAS*

Αναλυτικά:

- ❖ Διαθέτει την ικανότητα εκτέλεσης ξεχωριστά 1Δ, 2Δ μοντέλα ή και ο συνδυασμός των δύο μοντέλων.
- ❖ Για την επίλυση των 2Δ εξισώσεων χρησιμοποιεί τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων.
- ❖ Μπορεί να λύσει είτε τις 2Δ εξισώσεις διάχυσης κύματος είτε τις 2Δ εξισώσεις *Saint-Venant*.
- ❖ Το λογισμικό σχεδιάστηκε για να χρησιμοποιεί μη δομημένα ή δομημένα πλέγματα υπολογισμού. Τα όρια του υπολογιστικού πλέγματος καθορίζονται από ένα πολύγωνο πολλαπλών σημείων.
- ❖ Το ψηφιακό εδαφικό υπόβαθρο της περιοχής και το υπολογιστικό πλέγμα πριν την προσομοίωση επεξεργάζονται προκειμένου να δημιουργηθούν λεπτομερείς πίνακες δεδομένων των κελιών. (πχ υψόμετρο εδάφους, συντελεστής τραχύτητας κτλ).

- ❖ Η 1Δ, 2Δ χαρτογράφηση της περιοχής και η απεικόνιση της πλημμύρας μπορούν να γίνουν μέσα στο *RAS*, με τη χρήση του *RAS-Mapper*.
- ❖ Λειτουργεί σε εκδόσεις 64bit και 32bit .

2.1.2 *RAS-Mapper*

Το *HEC-RAS* διαθέτει επίσης στο εσωτερικό του ένα εργαλείο τύπου *GIS* για την επεξεργασία γεωμορφολογικών δεδομένων γνωστό ως *RAS-Mapper*. Μέσα από την εργαλειοθήκη αυτή μπορεί ο χρήστης να εισάγει και να παράγει δεδομένα για περαιτέρω επεξεργασία και οπτικοποίηση των ενσωματωμένων αποτελεσμάτων 1Δ και 2Δ, ενισχύοντας σημαντικά τις δυνατότητες πριν και μετά την επεξεργασία δεδομένων στο λογισμικό.

2.2 Εξισώσεις Υδρολογικού Μοντέλου *HEC-RAS*

Για τη δισδιάστατη προσομοίωση το λογισμικό μπορεί να χρησιμοποιήσει είτε τις 2Δ εξισώσεις διατήρησης της ορμής είτε τις 2Δ εξισώσεις διάχυσης κύματος για αβαθή νερά. Η εξίσωση διάχυσης κύματος (*Diffusion Wave Equation*) είναι η προεπιλεγμένη επιλογή διότι επιτρέπει ταχύτερο χρόνο εκτέλεσης. Ωστόσο, δεν παύει να είναι μια απλοποιημένη έκδοση των εξισώσεων *Saint Venant* (*Full Momentum Equation*). Πολλές όμως καταστάσεις και περιπτώσεις μπορούν να μοντελοποιηθούν με ακρίβεια με τις 2Δ εξισώσεις διάχυσης κύματος για αβαθή νερά. Παρ' όλ' αυτά ο χρήστης μπορεί εύκολα να εναλλάσσεται μεταξύ των δύο εξισώσεων και να δοκιμάζει για οποιοδήποτε δεδομένο πρόβλημα κρίνοντας αν απαιτείται η χρήση ή μη των εξισώσεων *Saint Venant*. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση διάχυσης κύματος για αβαθή νερά.

2.2.1 Εξισώσεις *Saint-Venant* ή αβαθών υδάτων (*Full Momentum Equation*)

Για μη μόνιμη ροή, υποθέτοντας ότι η ροή είναι ασυμπύεστη, ομοιόμορφης πυκνότητας και υδροστατικής πίεσης, η 2Δ μορφή της διαφορικής εξίσωσης ρηχών υδάτων (*Saint Venant*) διατήρησης μάζας (συνέχειας) δίδεται ως:

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

όπου ,

$H(x, y, t)$ [m] = υψόμετρο της επιφάνειας νερού,

$h(x, y, t)$ [m] = το βάθος νερού,

v & u [m/s] = οι συνιστώσες ταχύτητας στις καρτεσιανές διευθύνσεις y & x ,

q [m³/s] = η εισερχόμενη ροή.

Όταν η κατά μήκος κλίμακα είναι πολύ μεγαλύτερη από την κάθετη, η διατήρηση όγκου σημαίνει ότι η κατακόρυφη ταχύτητα είναι μικρή. Η εξίσωση ορμής του *Navier-Stokes* μπορεί να προσδιορίσει ότι η πίεση είναι σχεδόν υδροστατική. Οι όροι κάθετων ταχυτήτων και παραγώγων μπορούν να παραμεληθούν με ασφάλεια και στις δύο εξισώσεις μάζας και ορμής. Οι 2Δ εξισώσεις ορμής αβαθή υδάτων (*Saint Venant*), για την x και y διεύθυνση δίνονται ως εξής:

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

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

όπου : v & u [m/s] = συνιστώσες ταχύτητας στις καρτεσιανές διευθύνσεις y & x ,

$H(x,y,t)$ [m] = υψόμετρο της επιφάνειας νερού,

ν_t [m²/s] = οριζόντιος συντελεστής κινηματικού ιξώδους,

c_f [s⁻¹] = συντελεστής τριβής στον πυθμένα,

g [m/s²] = επιτάχυνση της βαρύτητας,

f [s⁻¹] = παράμετρος *Coriolis*.

Επομένως, δίνεται στον χρήστη τη δυνατότητα προσθήκη στην εξίσωση διατήρησης ορμής την *Coriolis* επίδραση, αν υπάρχει, αλλά δεν λαμβάνει τις κατακόρυφες ταχύτητες και υποθέτει τις υδροστατικές πιέσεις.

2.2.2 Εξίσωση Διάχυσης Κύματος για αβαθή νερά (*Diffusion Wave Equation for shallow water*)

Η προσέγγιση διάχυσης κύματος (*Diffusion Wave*) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει σταδιακά μεταβαλλόμενες ροές σε επίπεδα με μέτριες έως απότομες κλίσεις. Οι 2Δ εξισώσεις ορμής διάχυσης κύματος βασίζονται στις 2Δ εξισώσεις πλήρους ορμής (*Saint Venant*), στις οποίες είναι κυρίαρχοι οι όροι που περιλαμβάνουν την επιτάχυνση της βαρύτητας και το συντελεστή τριβής στον πυθμένα, ενώ το ιξώδες, η παράμετρος *Coriolis* και οι όροι της επιτάχυνσης (αλλαγές στην ταχύτητα σε σχέση με το χρόνο και το χώρο) μπορεί να αγνοηθούν. Επομένως, οι 2Δ εξισώσεις ορμής διάχυσης κύματος διαμορφώνονται από τις εξισώσεις (1), (2) ως εξής:

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + c_f u = 0 \quad (4)$$

$$g \frac{\partial H}{\partial y} + c_f v = 0 \quad (5)$$

Η παραπάνω μορφή της εξίσωσης της ορμής περιέχει μόνο βαρύτητα, τριβή και δυνάμεις υδροστατικών πιέσεων. Η εξίσωση διάχυσης κύματος μπορεί να συνδυαστεί παράλληλα με την εξίσωση συνεχείας. Αυτό καθιστά την εξίσωση ευκολότερη ως προς την επίλυση, γενικά πιο σταθερή για ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων και θα απαιτήσει πολύ λιγότερο υπολογιστικό χρόνο. Ωστόσο, χωρίς τους όρους συσχέτισης στις εξισώσεις, η εξίσωση διάχυσης κύματος είναι λιγότερο ακριβής από τις πλήρεις εξισώσεις και είναι πιο δύσκολο να εφαρμοστεί σε διάφορα προβλήματα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι παραλείπει την οριζόντια και τυρβώδης ροή, οι οποίοι μειώνουν την αποτελεσματικότητα του λογισμικού, έχει πολλά υπολογιστικά πλεονεκτήματα.

Έτσι, σε γενικές γραμμές, οι 2Δ εξισώσεις διάχυσης κύματος επιτρέπουν στο λογισμικό να τρέχει γρηγορότερα και με μεγαλύτερη σταθερότητα, σε αντίθεση με τις εξισώσεις ορμής οι οποίες είναι ικανές να επιλύσουν ένα ευρύτερο φάσμα προβλημάτων.

2.2.3 Χρονικό βήμα (*Time step*)

Στις εξισώσεις διάχυσης κύματος δύνανται να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερα χρονικά βήματα από ότι μπορεί να συμβεί στις εξισώσεις *Saint Venant*, αποδίδοντας

συγχρόνως αριθμητικά σταθερές και ακριβείς λύσεις. Για την επιλογή ενός υπολογιστικού διαστήματος για τις εξισώσεις *Saint Venant* και τις εξισώσεις διάχυσης κύματος, ακολουθούνται τα παρακάτω:

I. Για εξισώσεις *Saint Venant*:

$$C = \frac{V \cdot \Delta T}{\Delta X} \leq 1.0 \text{ (με μέγιστο } C=3.0) \quad (6)$$

II. Για εξισώσεις διάχυσης κύματος (*Diffusion Wave*):

$$C = \frac{V \cdot \Delta T}{\Delta X} \leq 2.0 \text{ (με μέγιστο } C=5.0) \quad (7)$$

όπου : $C [-]$ = αριθμός Courant,

$V [m/s]$ = ταχύτητα πλημμυρικού κύματος,

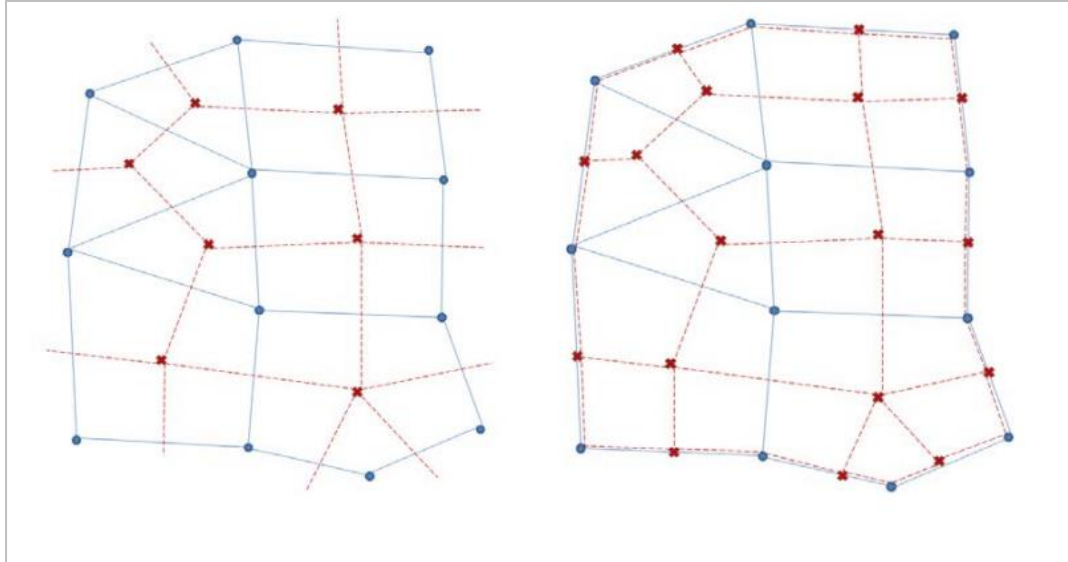
$\Delta T [s]$ = υπολογιστικό χρονικό βήμα,

$\Delta X [m]$ = μέσο μέγεθος κελιού.

2.2.4 Αρχικό Πλέγμα και Συνδυασμένο Πλέγμα (*Grid and dual grid*)

Προκειμένου να εκμεταλλευτεί το λογισμικό τις αριθμητικές μεθόδους, όπου αναλύονται αργότερα, η οριοθετημένη 2Δ περιοχή πρέπει να υποδιαιρεθεί σε μη επικαλυπτόμενα πολύγωνα για να σχηματιστεί ένα πλέγμα. Για μεγαλύτερη ευκολία στον χρήστη, το πλέγμα δεν χρειάζεται να είναι δομημένο. Οι πλευρές των πολυγωνικών κελιών δεν πρέπει να ξεπερνούν τις 8, ούτως ώστε το λογισμικό να είναι πιο αποδοτικό και να εξοικονομεί υπολογιστική μνήμη. Θα χρειαστεί ένα επιπλέον πλέγμα, εκτός από το αρχικό, για να διαμορφωθούν βάσει των αριθμητικών μεθόδων οι διαφορικές εξισώσεις.

Επομένως, δημιουργήθηκε ένα συνδυασμένο πλέγμα που αποτελείται από τον συνδυασμό των αρχικών κόμβων και πλευρών με τον πρόσθετο πλέγμα με επιπλέον κόμβους και πλευρές. Στην **Εικόνα 2.1** παρουσιάζεται, το αρχικό πλέγμα με μπλε χρώμα όπου οι κόμβοι και οι πλευρές των κελιών να αντιπροσωπεύονται από κουκκίδες και συμπαγείς γραμμές, ενώ το τροποποιημένο πλέγμα ή ο συνδυασμός των δύο με κόκκινο χρώμα όπου οι διπλοί κόμβοι και οι πλευρές των διπλών κελιών να αντιπροσωπεύονται από σταυρούς και διακεκομμένες γραμμές.



Εικόνα 2.1: Αρχικό πλέγμα και τροποποιημένο/συνδυασμένο πλέγμα.

Έτσι υπολογίζεται ευκολότερα, μέσω των αριθμητικών μεθόδων, η υψομετρική επιφάνεια του νερού H στα κελιά του πλέγματος (συμπεριλαμβανομένων των τεχνητών κελιών), η ταχύτητα κάθετα ως προς τις πλευρές (προσδιορίζοντας την διεύθυνση της ροής) και το διάλυμα ταχύτητας V .

2.3 Αριθμητικές Μέθοδοι

Ένα υβριδικό σύστημα διακριτοποίησης που συνδυάζει πεπερασμένες διαφορές και πεπερασμένους όγκους χρησιμοποιείται για να εκμεταλλευτεί τις περιοχές ορθογώνιου σχήματος του πλέγματος.

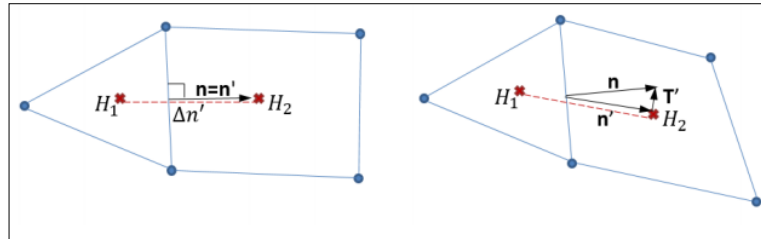
2.3.1 Προσέγγιση Πεπερασμένων Διαφορών (*Finite Difference Approximations*)

Δίνοντας δεδομένα δύο γειτονικά κελιά j_1 και j_2 με υψόμετρο ροής H_1 και H_2 αντίστοιχα, η παράγωγος της κατεύθυνσης στην διεύθυνση n' , που καθορίζεται από τα κέντρα των κελιών, προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$\nabla H \cdot n' = \frac{\partial H}{\partial n'} \approx \frac{H_2 - H_1}{\Delta n'}$$

(8)

όπου $\Delta n'$ είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των κελιών. Στο παρακάτω παράδειγμα **Εικόνα 2.2** η παράγωγο επεκτείνεται από το κελί i_1 έως το i_2 , προς τα δεξιά της εικόνας.



Εικόνα 2.2 : Γειτονικά κελιά του δισδιάστατου πλέγματος.

Εάν η διεύθυνση n' είναι κάθετη ως προς την επιφάνεια που χωρίζει τα δύο κελιά, τότε το πλέγμα λέγεται ότι είναι τοπικά ορθογώνιο και απεικονίζεται στο αριστερό σχήμα στην **Εικόνα 2.2**. Στην περίπτωση αυτή, ο παραπάνω τύπος (8) είναι επαρκής για τον υπολογισμό της παραγωγού της επιφάνειας του νερού της εξίσωσης (9).

$$\frac{\Omega(H^{n+1}) - \Omega(H^n)}{\Delta t} - \sum_k \alpha \nabla H \cdot n + Q = 0 \quad (9)$$

Όπου : $a = a(H) = \frac{(R(H))^{\frac{2}{3}} A_k(H)}{n |\nabla H|^{0.5}}$, R = υδραυλική ακτίνα,

$\Omega(H^n)$ = ο όγκος του κελιού για χρόνο n ,

$A_k(H)$ = η περιοχή της επιφάνειας k ,

Δt = χρονικό βήμα,

∇H = η κλίση της ανύψωσης της επιφάνειας,

n [$s/m^{1/3}$] = συντελεστής τραχύτητας *Manning's n*,

Q [m^3/s] = παροχή.

Γενικά, όταν η διεύθυνση n' δεν είναι κάθετη ως προς την επιφάνεια που χωρίζει τα δύο κελιά, η τεχνική πεπερασμένων διαφορών συμπληρώνεται από μια τεχνική πεπερασμένου όγκου, όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

2.3.2 Προσέγγιση Πεπερασμένων Όγκων (*Finite Volume Approximation*)

Ο αλγόριθμος αυτός επιτρέπει μεγαλύτερα χρονικά βήματα σε σχέση με άλλες απλές μεθόδους. Η μέθοδος αυτή του πεπερασμένου όγκου εγγυάται καλύτερη σταθερότητα και αντοχή έναντι των παραδοσιακών τεχνικών πεπερασμένων διαφορών και στοιχείων για τα βρεγμένα και μη κελιά του 2Δ πλέγματος. Χρησιμοποιείται για τη διακριτοποίηση της εξίσωσης (9) όταν το 2Δ πλέγμα δεν έχει σχήμα ορθογωνίου.

Επιπλέον, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την προσέγγιση άλλων όρων όπως την τυρβώδη συνεκτικότητα. Η τιμή του όρου ∇h , σε μια περιοχή του πλέγματος, εκτιμάται καθώς ορίζει πρώτον έναν μέσο όρο πάνω από διπλά κελιά (βαθυμετρίας και 2Δ πλέγματος) και δεύτερον χρησιμοποιεί το θεώρημα της απόκλισης *Gauss* για να επιλέξει τον τύπο (10).

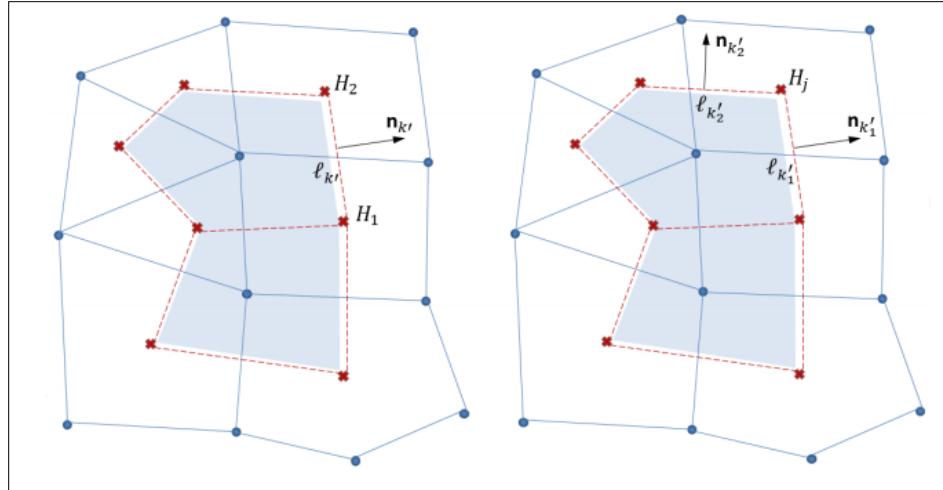
$$\nabla H \approx \frac{\oint_L H n dL}{A'} \quad (10)$$

Όπου, L : το όριο των δύο κελιών,

A' : εμβαδό των επιφανειών των δύο κελιών, σκιασμένη περιοχή στην

Εικόνα 2.3.

Καθώς τα κελιά σχηματίζουν ένα πολύγωνο, η γραμμή ολοκλήρωσης μπορεί να γραφτεί ως άθροισμα των όψεων των δύο αυτών κελιών. Η διπλή επιφάνεια k' που ενώνει τους κόμβους j_1 και j_2 συμβάλλουν στον όρο $n_k l_k (H_1 + H_2)/2$ του ολοκληρώματος, όπου l_k είναι το μήκος της διπλής επιφάνειας k , το n_k είναι το διάνυσμα της επιφάνειας k και H_1, H_2 , είναι οι τιμές ανύψωσης νερού στο κέντρο του κελιού j_1, j_2 όπως φαίνεται στην εικόνα στα αριστερά.



Εικόνα 2.3 : Κελιά βαθυμετρίας (μπλε χρώμα) με κελιά πλέγματος (κόκκινο χρώμα).

Το πρόγραμμα διαθέτει επίσης και την ικανότητα να επιλύσει για την 2Δ προσομοίωση τις αριθμητικές μεθόδους όπως την αριθμητική επίλυση DSW (*Driefeld-Sokolov-Wilson*) και αριθμητική επίλυση SW (*Solid Works*), ωστόσο εξαιτίας της μη πολυπλοκότητας του μοντέλου της εργασίας δεν θα χρειαστεί τα περαιτέρω ανάλυση.

2.4 Ανάλυση Ευαισθησίας

2.4.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση ευαισθησίας καθορίζει πώς διαφορετικές τιμές μιας ανεξάρτητης μεταβλητής επηρεάζουν μια συγκεκριμένη εξαρτημένη μεταβλητή κάτω από ένα δεδομένο σύνολο υποθέσεων. Με άλλα λόγια, η ανάλυση ευαισθησίας μελετά πώς διάφορες πηγές αβεβαιότητας σε ένα μαθηματικό μοντέλο συμβάλλουν στη συνολική αβεβαιότητα του μοντέλου. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται εντός συγκεκριμένων ορίων που εξαρτώνται από μία ή περισσότερες μεταβλητές εισόδου.

Η ανάλυση αυτή είναι εξαιρετικά χρήσιμη σε όλες τις φάσεις της διαδικασίας μοντελοποίησης: διαμόρφωση μοντέλου, βαθμονόμηση μοντέλου και επαλήθευση μοντέλου. Η ευαισθησία των παραμέτρων του μοντέλου πρέπει να αναγνωρίζεται ως ειδική περίπτωση του παραπάνω γενικού ορισμού. Η παραμετρική ευαισθησία είναι ζωτικό μέρος των περισσότερων τεχνικών βελτιστοποίησης (Saltelli et. al., 2004).

Η ανάλυση ευαισθησίας ενός μοντέλου συνήθως διεξάγεται με την χρήση δύο κατηγοριών μεθόδων. Οι μέθοδοι της πρώτης κατηγορίας καλούνται αναλύσεις

ευαισθησίας (*sensitivity analyses*) ή αναλύσεις σφάλματος πρώτης τάξης (*first order error analyses*) (Scavia et al. 1981, Van de Kamer, 1983). Βασίζονται στην μεταβολή της τιμής της κάθε παραμέτρου χωριστά και εξετάζουν την επίδραση μιας παραμέτρου τη φορά στο τελικό αποτέλεσμα ενός μοντέλου οι οποίες μπορεί να χαρακτηριστούν και ως τοπικές μέθοδοι (Saltelli et al., 2008). Παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση που η αβεβαιότητα στις τιμές των παραμέτρων είναι σχετικά περιορισμένη.

Οι μέθοδοι της δεύτερης κατηγορίας καλούνται αναλύσεις σφάλματος (*error analyses*) ή προσομοιώσεις Monte Carlo (*Monte Carlo simulations*) (Gardner et al., 1991). Βασίζονται στην ταυτόχρονη μεταβολή όλων των παραμέτρων θεωρώντας ότι αυτές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και έχουν χαρακτηριστεί ως καθολικές μέθοδοι (Saltelli et al., 2008). Οι καθολικές αυτές μέθοδοι παρέχουν μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά απαιτούν μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων και κατά συνέπεια υπολογιστικό χρόνο και ισχύ. Τόσο, η πρώτη όσο και η δεύτερη κατηγορία μέθοδοι ανάλυσης ευαισθησίας εφαρμόζονται ευρέως στα επιστημονικά πεδία της υδρολογίας και της υδραυλικής (Del Giudice and Padulano 2016; Christelis and Hughes 2018).

Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση της καθολικής μεθόδου ανάλυσης ευαισθησίας, εφαρμόζοντας την μέθοδο *Morris* (1991). Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων μοντέλων, σε διάφορα επιστημονικά πεδία (Christelis et al., 2018). Στηρίζεται στον υπολογισμό των *Elementary Effects (EE)*, τα οποία εκτιμώνται για κάθε συνδυασμό παραμέτρων και τα οποία στη συνέχεια υπόκεινται σε στατιστική επεξεργασία. Αποτέλεσμα της μεθόδου είναι ο υπολογισμός του μέσου όρου $\bar{\mu}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (EE_{i,j})$, όπου $EE_{i,j}$ η i παρατήρηση και n το πλήθος των παρατηρήσεων, ο μέσος όρος της κατανομής των απόλυτων τιμών των στοιχειωδών επιδράσεων των παραγόντων εισόδου $\mu_j^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |EE_{i,j}|$ και της τυπικής απόκλισης $\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[(EE_{i,j} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (EE_{i,j})) \right]^2}$. Όσο μεγαλύτερη η τιμή του μέσου όρου και του απόλυτου μέσου όρου, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση της παραμέτρου στα αποτελέσματα του μοντέλου. Η τυπική απόκλιση είναι ένα μέτρο της αλληλεπίδρασης της παραμέτρου με τις υπόλοιπες.

2.4.2 Βασική Μεθοδολογία

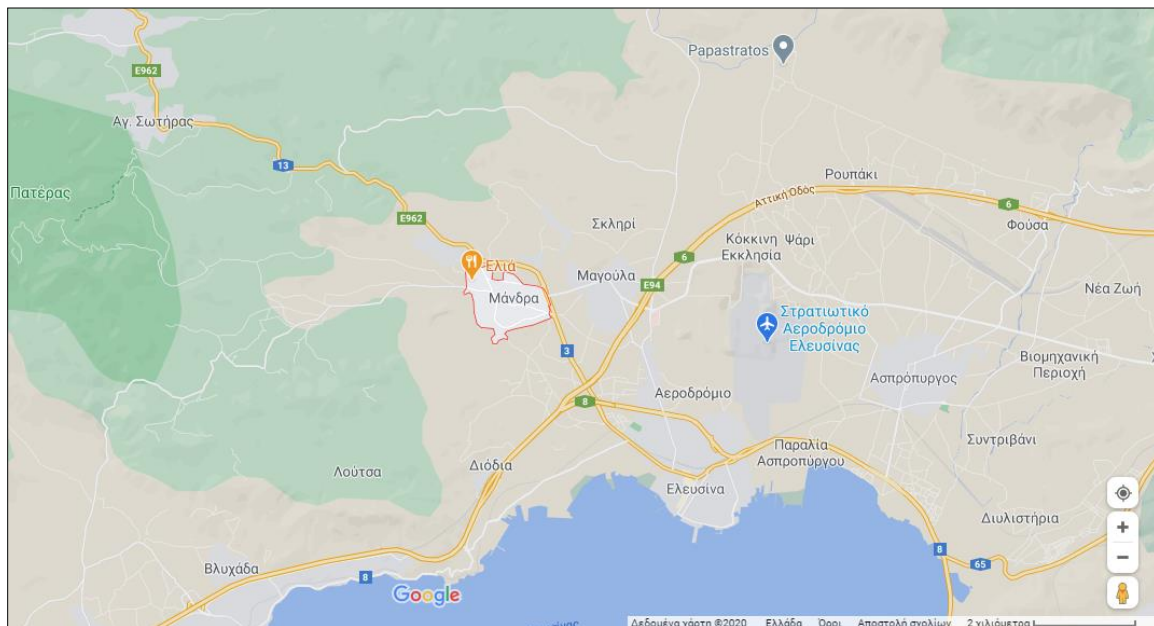
Υπάρχει ένα μεγάλος αριθμός προσεγγίσεων για την εκτέλεση μιας ανάλυσης ευαισθησίας, πολλές από τις οποίες έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση ενός ή περισσότερων περιορισμών. Επίσης διακρίνονται από το είδος του μέτρου της ευαισθησίας στο οποίο βασίζονται. Γενικότερα ωστόσο οι περισσότερες μέθοδοι ακολουθούν την εξής διάρθρωση (Μπαριάμης 2013):

- ❖ Ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας σε κάθε είσοδο (πχ εύρος, κατανομές πιθανότητας).
- ❖ Προσδιορισμός της μεταβλητής εξόδου - αποτελέσματος που πρόκειται να αναλυθεί.
- ❖ Λειτουργία του μοντέλου αρκετές φορές χρησιμοποιώντας κάποια πειράματα σχεδιασμού που υπαγορεύονται από τη μέθοδο της επιλογής και την αβεβαιότητα των δεδομένων εισόδου.
- ❖ Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο, υπολογίζονται τα μέτρα ευαισθησίας σύμφωνα με το ενδιαφέρον της ανάλυσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1 Γενική Περιγραφή

Η πόλη της Μάνδρας (Δημοτική Κοινότητα Μάνδρας - Δημοτική Ενότητα Μάνδρας), είναι η έδρα του δήμο Μάνδρας - Ειδυλλίας της περιφερειακής ενότητας δυτικής Αττικής που βρίσκεται στην Περιφέρεια Αττικής (γεωγραφικό διαμέρισμα Στερεάς Ελλάδας). Έδρα του δήμου είναι η πόλη της Μάνδρας, έχει μέγιστο υψόμετρο 112 m και μέσο υψόμετρο 84 m. Βρίσκεται στο δυτικό τμήμα του Ράριου - Θριάσιου Πεδίου, στους πρόποδες του Όρους Πατέρα. Η πόλη της Μάνδρας παρουσιάζει αύξηση πληθυσμού τις τελευταίες δεκαετίες, ενώ σύμφωνα με την απογραφή του 2011 έχει 12.792 κατοίκους. Η πόλη της Μάνδρας διακρίνεται στην **Εικόνα 3.1.α**.



Εικόνα 3.1.α: Πόλη της Μάνδρας (πηγή: Google Maps 2020)

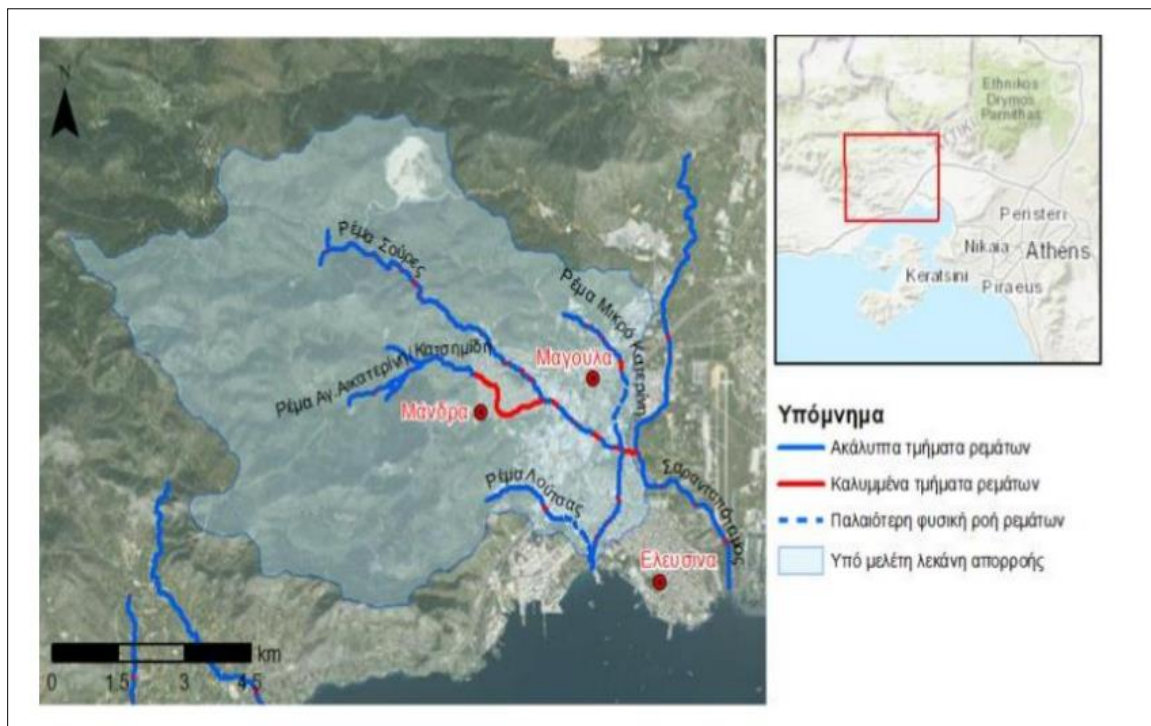
3.2 Μορφολογία Περιοχής

Κύριο χαρακτηριστικό της Μάνδρας είναι οι έντονες εδαφικές κλίσεις και η εναλλαγή των τοπίων και του ανάγλυφου. Η νότια και δυτική περιοχή του Δήμου είναι επίπεδη με λοφώδεις σχηματισμούς και περιβάλλεται από τους ορεινούς όγκους Πατέρα και της Πάρνηθας στα βόρεια και το όρος Αιγάλεω στα ανατολικά. Οι λόφοι που

καταλαμβάνουν τις υπώρειες της Πάρνηθας και του Πατέρα, δημιουργούν στην ενότητα αυτή ένα ήπιο ανάγλυφο, το οποίο καταλήγει προς τη θάλασσα, σε δύο πεδιάδες: το Θριάσιο Πεδίο και την Πεδιάδα των Μεγάρων (Δήμος Μάνδρας, 2011).

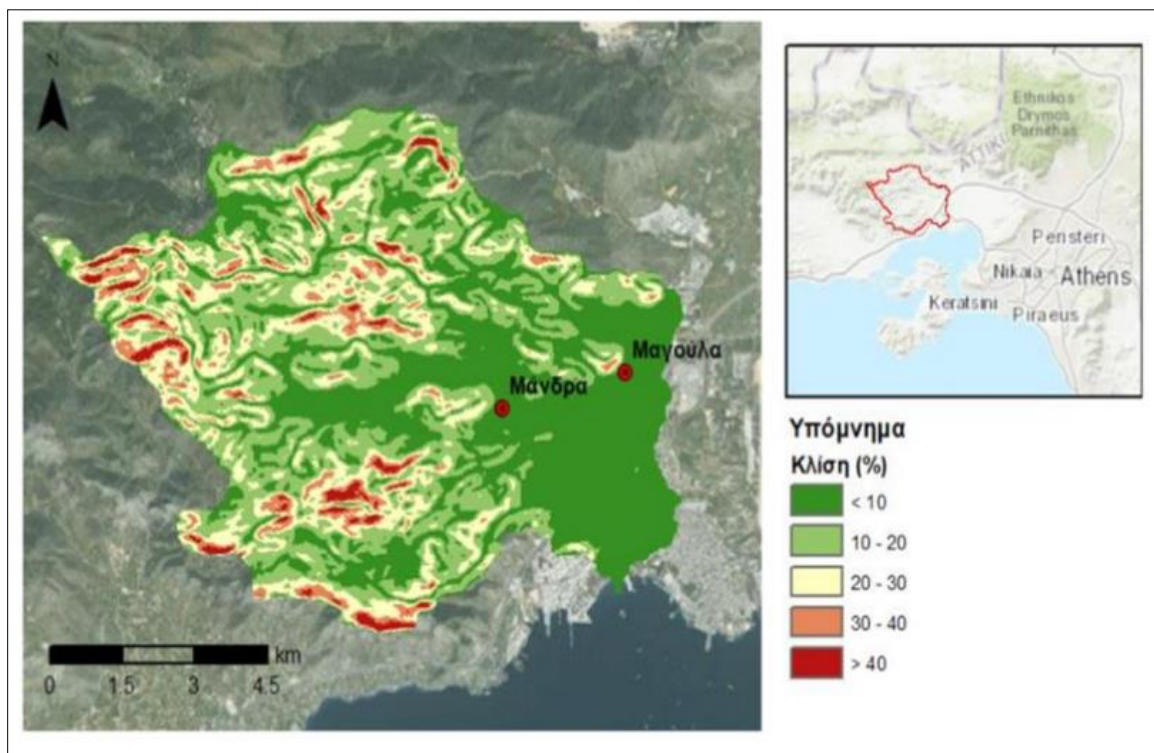
Η υπό μελέτη περιοχή αποτελεί τμήμα της λεκάνης απορροής που ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα της Αττικής (GR06), στο οποίο το μέσο ετήσιο ύψος βροχής είναι 411 mm και η μέση θερμοκρασία κυμαίνεται από 16 °C έως 18 °C, βάση των στοιχείων που δημοσιεύονται στην Ειδική Γραμματεία Υδάτων (ΕΓΥ). Σύμφωνα με το αρχείο της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, η μέση ετήσια βροχόπτωση με βάση τον πλησιέστερο μετεωρολογικό σταθμό της Ελευσίνας ανέρχεται στα 373 mm, ενώ το ύψος της βροχής τον μήνα Νοέμβριο φτάνει τα 59 mm. Η λεκάνη αναπτύσσεται στο μεγαλύτερο μέρος της σε πεδινή τοπογραφία, ενώ στα δυτικά της το ανάγλυφο γίνεται ημιορεινό-ορεινό λόγω του όρους Πατέρα, με μέγιστο υψόμετρο 1132 m.

Στην **Εικόνα 3.2.α.** παρουσιάζεται η λεκάνη απορροής, η οποία συνιστά την περιοχή ενδιαφέροντος, με τα κύρια ρέματα που την διαπερνούν, τα οποία είναι: το ρέμα Αγ. Αικατερίνης / Κατσημίδα, το ρέμα Σούρες, το ρέμα Μικρό Κατερίνη και το ρέμα Λούτσας.



Εικόνα 3.2.α: Η λεκάνη απορροής της Μάνδρας (πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών).

Μια βασική χρονική παράμετρος που συνδέεται με την παροχή αιχμής είναι ο χρόνος συγκέντρωσης (συρροής), ο οποίος αποτελεί τυπικό δεδομένο εισόδου στα υδρολογικά μοντέλα. Ο χρόνος συγκέντρωσης ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το νερό, που ρέει επιφανειακά, από το υδραυλικά πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης μέχρι την διατομή της εξόδου (Dingman, 1994). Από τον ορισμό προκύπτει ότι το χρονικό αυτό μέγεθος συνδέεται εμπειρικά με τη μέγιστη διαδρομή ροής του νερού μέσα στην λεκάνη. Η μέγιστη διαδρομή ροής σε αυτή την λεκάνη καλύπτει ένα μήκος περίπου 18 km. Μια ακόμη παράμετρος που επηρεάζει τις διεργασίες βροχής - απορροής είναι η κλίση του εδάφους. Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 3.2.β.**, η λεκάνη απορροής χαρακτηρίζεται στο μεγαλύτερο μέρος της από ήπιες κλίσεις, με μέση κλίση της τάξης του 15%.



Εικόνα 3.2.β: Οι κλίσεις στην λεκάνη απορροής (πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών).

3.3 Ιστορικά Πλημμυρά Γεγονότα της Περιοχής

Η περιοχή της Μάνδρας θεωρείται από τις πιο πλημμυροπαθείς περιοχές της Αττικής τις τελευταίες δεκαετίες (Diakakis, 2012). Παρόλο που υπήρχε εκτενής αναφορά από τα Μέσα Μαζικής Ενημέρωσης σε προηγούμενα πλημμυρικά γεγονότα, η

επιστημονική προσέγγιση σχετικά με τα χαρακτηριστικά των πλημμυρών (ύψος νερού, έκταση της πλημμύρας και εκτίμηση της απορροής) είναι πολύ περιορισμένη.

Από την δεκαετία του 1960 και έπειτα έχουν καταγραφεί στην βάση δεδομένων πλημμυρών και σε μελέτες τουλάχιστον 5 πλημμυρικά φαινόμενα στην περιοχή της Μάνδρας: Νοέμβριος 1963, Φεβρουάριος 1978, Ιανουάριος 1996, Δεκέμβριος 1999 και Φεβρουάριος 2015 (Υπ. Υποδομών και Μεταφορών, 2015).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

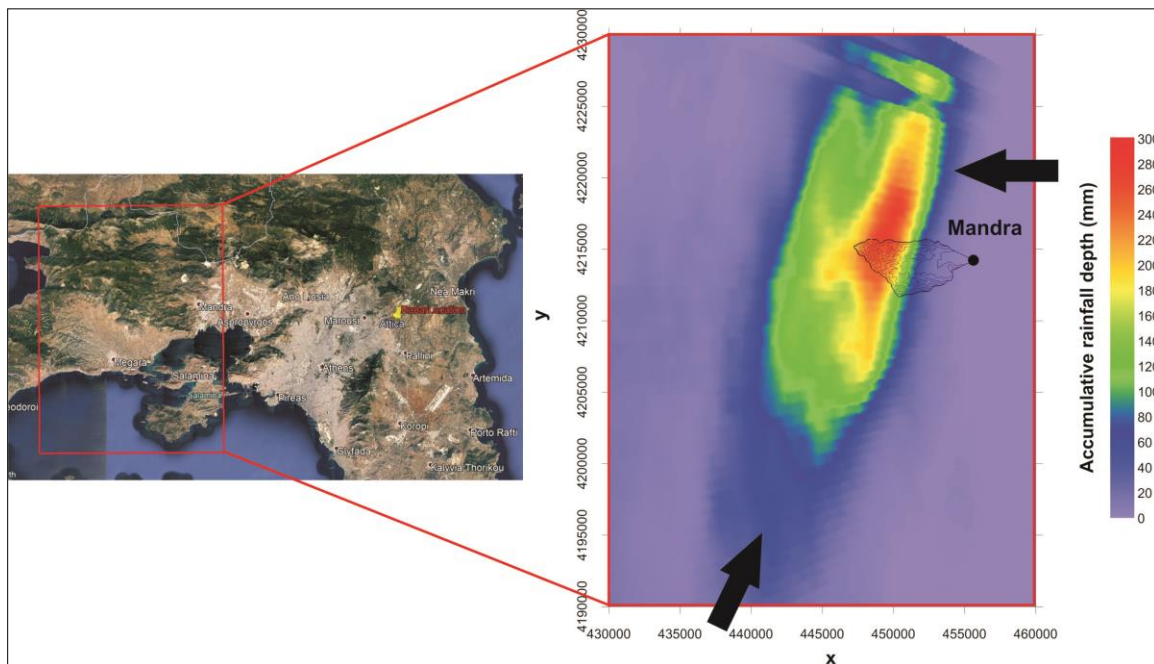
4.1 Αναλυτική Περιγραφή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται διεξοδικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το στήσιμο του υδρολογικού μοντέλου της περιοχής ενδιαφέροντος με τη χρήση του λογισμικού *HEC-RAS*. Για την προσομοίωση της πλημμύρας στην αστική λεκάνη απορροής της πόλης της Μάνδρας χρησιμοποιήθηκαν τα πλημμυρικά υδρογραφήματα που προέκυψε από το συγκεκριμένο γεγονός βροχόπτωσης που έπληξε την Μάνδρα στις 15 Νοεμβρίου 2017.

Η παραγωγή του πλημμυρικού υδρογραφήματος έγινε βάσει της βροχόπτωσης που καταγράφηκε με το μετεωρολογικό ραντάρ *Doppler* διπλής πολικότητας (*XPOL*) του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, το οποίο είναι ένα κινητό ερευνητικό σύστημα, και παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.1.α**. Η προσομοίωση έγινε με τη χρήση του 2Δ υδροδυναμικού λογισμικού *FLOW-R2D*, η οποία βασίζεται στις πλήρες εξισώσεις του 2D-SWE. Το χρονικό βήμα της επεξεργασμένης πληροφορίας είναι 10 min και το χωρικό βήμα των κελιών 200 x 200 m.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας και ανάλυση αβεβαιότητας των παραμέτρων. Η ανάλυση ευαισθησίας, μέσω της μεθόδου Morris (1991), ιεραρχήθηκαν οι 6 παράμετροι για την ανάλυση του μοντέλου. Βρίσκοντας τις 2 πιο σημαντικές παράμετροι, εκτελέστηκε μια ανάλυση αβεβαιότητας που βασίζεται στη τεχνική Monte Carlo. Από την οποία παράχθηκαν 100 τυχαίοι συνδυασμοί των 2 παραμέτρων με τη χρήση του Latin Hypercube Sampling.

Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι: συνολική βροχόπτωση στην υδρολογική λεκάνη του υδατορέματος Αγίας Αικατερίνης ήταν περίπου 160 mm με μέγιστο ρυθμό βροχόπτωσης στη λεκάνη περίπου 40 mm/h, ενώ το μέγιστο του στιγμιαίου ρυθμού βροχόπτωσης στον πυρήνα του συμβάντος έφτασε τα 140 mm/h. Το μεγαλύτερο μέρος της βροχόπτωσης συνέβη στο χρονικό διάστημα 05:00 με 08:00 της 15/11/2017 και περιορίστηκε σε μια ζώνη 18 km x 4 km στην προσήνεμη (νοτιοανατολική) πλευρά του όρους Πατέρας ως αποτέλεσμα σύγκλισης υγρών αερίων μαζών λόγω τοπογραφίας. (Bellos et al., 2020)



Εικόνα 4.1.α: Ύψος βροχής που καταγράφηκε στην Μάνδρα στις 15/11/2017.

4.2 Πορεία Εργασιών

Για την προσομοίωση της πλημμύρας, την εξαγωγή και επεξεργασία των αποτελεσμάτων χρειάστηκαν κάποιες συγκεκριμένες ενέργειες ώστε το μοντέλο να αντιπροσωπεύει όσο το δυνατόν καλύτερα το πραγματικό γεγονός. Συγκεκριμένα, η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι:

- I. Επιλογή και εισαγωγή αρχείων των δεδομένων γεωγραφικών πληροφοριών στο *RAS-Mapper* του *HEC-RAS*:
 - Εισαγωγή υψομετρικής εδαφικής πληροφορία ή βαθυμετρία το οποίο έχει δημιουργηθεί στο γεωδαιτικό σύστημα ΕΓΣΑ'87 ("*GGRS87 / Greek Grid*") σε ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών.
 - Επιλογή αρχείου προβολής κειμένου *Projection File (*.prj)* που περιέχει πληροφορίες σχετικά με το σύστημα συντεταγμένων και την εξαγωγή του χάρτη της περιοχής μελέτης που περιβάλλει την πόλη της Μάνδρας.
- II. Δημιουργία της γεωγραφικής περιοχής μελέτης, χαράζοντας τα όρια του 2D πλέγματος (*2D mesh*) από την καρτέλα επεξεργασίας γεωγραφικών δεδομένων (*GeoData Editor*) του *HEC-RAS*.

- III. Σχεδίαση των πολυγωνικών διαχωριστικών γραμμών (*breaklines*) μέσα στο 2Δ πλέγμα, περιμετρικά των οικοδομικών τετραγώνων, σπιτιών και ανοιχτών χώρων της περιοχής.
- IV. Προσδιορισμός των οριακών συνθηκών (*boundary conditions*) του πλέγματος:
- Όριο εισαγωγής πλημμύρας κάθετα στο ρέμα Αγίας Αικατερίνης, ανάντη (*Upstream boundary conditions*).
 - Όριο εξαγωγής πλημμυρικού όγκου νερού, κατόντη (*Downstream boundary conditions*).
- V. Τροποποίηση πλέγματος:
- Επιλογή διαστάσεων των κελίων του 2Δ πλέγματος (5m x 5m).
 - Επιλογή του συντελεστή τραχύτητας *Manning 'n*.
 - Πύκνωση των κελιών στα σημεία των διαχωριστικών γραμμών (*breaklines*) και σε σημεία ενδιαφέροντος.
- VI. Δημιουργία ενός ψηφιακού στρώματος (*Layer*) όπου αντιπροσωπεύει τις διαφορετικές περιοχές του συντελεστή *Manning*. Για τη προσομοίωση επιλέχθηκαν 5 είδη στρωμάτων με διαφορετικό συντελεστή τραχύτητας:
- α) Υψηλό συντελεστή *Manning 'n* που κυμαίνεται από 40 – 60 [$s/m^{1/3}$], για οικοδομικά τετράγωνα με πυκνή δόμηση.
 - β) Χαμηλό συντελεστή *Manning 'n* κυμαίνεται από 15 – 25 [$s/m^{1/3}$], για οικοδομικά τετράγωνα με αραιή δόμηση.
 - γ) Κτήρια ή μονές κατοικίες με συντελεστή *Manning 'n* 100 [$s/m^{1/3}$].
 - δ) Βλάστηση με συντελεστή *Manning 'n* 0.1 [$s/m^{1/3}$].
 - ε) Ανοιχτοί χώροι με συντελεστή *Manning 'n* 0.04 [$s/m^{1/3}$].
- VII. Προσθήκη του ψηφιακού στρώματος (*Layer*) *Manning 'n* στο 2Δ πλέγμα συσχετίζοντάς το με την εδαφική πληροφορία (*Terrain*) της εντολής I.
- VIII. Ορισμός των δεδομένων για μη μόνιμη ροή στις οριακές συνθήκες:
- Επιλογή του πλημμυρικού υδρογραφήματος (*Flow Hydrograph*) για την ανάντη οριακή συνθήκη. (*Upstream boundary condition*)
 - Επιλογή κανονικού βάθους ροή (*Normal Depth*) για την κατόντη οριακή συνθήκη. (*Downstream boundary condition*)

- IX. Εκτέλεση της 2D προσομοίωση πλημμύρας επιλέγοντας τις κατάλληλες συνθήκες ανάλογα των εδαφικών, υδρολογικών και χρονολογικών πληροφοριών με τα αντίστοιχα μοντέλα για την ανάλυση μη μόνιμης ροής (*Unsteady Flow Analysis*).
- X. Εξαγωγή αποτελεσμάτων είτε απευθείας από το *RAS-Mapper* του *HEC-RAS* είτε ως αρχείο εικόνας (*Tif*) ή ως γεωχωρική διανυσματική μορφή (*Shapefile*) για την επεξεργασία σε λογισμικά συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (*GIS*).
- XI. Επεξεργασία αποτελεσμάτων και στα 2 προγράμματα σχεδιάζοντας τις παρουσιάσεις και τα συμπεράσματα από αυτά.

4.3 Καθορισμός και Εισαγωγή Απαραίτητων Παραμέτρων

Τα βασικά δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση των υδροδυναμικών δεδομένων στο *HEC-RAS* είναι:

4.3.1 Εισαγωγή Γεωμετρικών Δεδομένων

Ως αρχικό δεδομένο, για την υδραυλική προσομοίωση της πλημμύρας, διατίθεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους *DTM (Digital Terrain Model)*. Σε αυτό γίνονται ορισμένες προεπεξεργασίες αυτόματα από το ίδιο το λογισμικό, ώστε να δοθούν τιμές και να συμπληρωθούν οι πίνακες για τις υδραυλικές ιδιότητες της κλίσης σε κάθε σημείο (διαφορά υψομετρικής πληροφορίας). Έτσι, μειώνεται ο υπολογιστικός χρόνος στα επόμενα στάδια της εφαρμογής, ειδικά στα στάδια της δημιουργίας του δισδιάστατου πλέγματος και της εξαγωγής των αποτελεσμάτων.

4.3.2 Δημιουργία Πλέγματος (*Mesh modeling*)

Το αρχείο του πλέγματος περιλαμβάνει πληροφορίες για τη γεωγραφική θέση, το βάθος ροής σε κάθε σημείο του κόμβου του κελιού καθώς και πληροφορίες σχετικά με τη σύνδεση του εκάστοτε κόμβου με τα τριγωνικά, τετραγωνικά ή πολυγωνικά στοιχεία της γειτονικής περιοχής.

Για τη δημιουργία του 2D πλέγματος (*2D mesh*) στο *HEC-RAS* πρέπει πρώτα να χαραχθεί η περίμετρος του πλέγματος στην περιοχή της μελέτης από την εργαλειοθήκη επεξεργασίας γεωγραφικών δεδομένων (*GeoData editor*). Η 2D πλημμυρική επιφάνεια ορίζει τα όρια εντός του οποίου το λογισμικό θα υπολογίσει ότι θα κινηθεί το

πλημμυρικό κύμα. Εφόσον υπάρχει και καλύπτει όλο την περιοχή του πλέγματος το γεωγραφικό εδαφικό υπόβαθρο, καταγράφει δεδομένα από το 2Δ πλέγμα για την μοντελοποίηση της εφαρμογής.

Για την εργασία προέκυψε η περίμετρος του 2Δ πλέγματος ίσο με 5.131 m και έκταση αυτής περίπου ίσο με 1.6 km² (**Εικόνα 4.3.7.α. (i)**). Στη συνέχεια, έχοντας ορίσει την 2Δ περιοχή, δημιουργείται εσωτερικά ένα πλέγμα κελιών με διαστάσεις Δx και Δy. Έγινε τροποποίηση των διαστάσεων των κελιών της προσομοίωσης ως εξής: Δx = 5m και Δy = 5m.

4.3.3 Οριακές Συνθήκες (*Boundary Conditions*)

Οι οριακές συνθήκες πρέπει να καθοριστούν σε όλα τα ανοιχτά όρια της ροής που μοντελοποιούνται. Τα ανάντη άκρα ενός συστήματος μπορούν να μοντελοποιηθούν με τους ακόλουθους τύπους οριακών συνθηκών, υδρογράφημα ροής (πιο συνηθισμένη ανάντη οριακή συνθήκη), υδρογράφημα σχεδιασμού, υετογράφημα ή ο συνδυασμός δύων. Για κατάντη οριακή συνθήκη του συστήματος μπορούν να είναι είτε με την υδραυλική καμπύλη, κανονικό βάθος ροής (εξίσωση *Manning's n*), υδρογράφημα παροχής ή ακόμα και ο συνδυασμός δύων. Για την παρούσα εργασία δημιουργήθηκε ένα αρχείο δεδομένων μη μόνιμης ροής στον *Unsteady Flow Data editor* του *HEC-RAS*.

I. Ανάντη οριακή συνθήκη

Για δεδομένα εισόδου του πλημμυρικού όγκου στην ανάντη διατομή του μελετώμενου τμήματος χρησιμοποιήθηκε ως οριακή συνθήκη το υδρογράφημα της πλημμύρας ανάλογα με το διάστημα εμπιστοσύνης. (*Flow Hydrograph*).

Ακολούθως, στην **Εικόνα 4.3.3.α** παρουσιάζονται τα δεδομένα που εισήχθησαν για την οριακή συνθήκη πλημμυρικού υδρογραφήματος στην ανάντη διατομή:

- **Data time interval : 10 sec**
(Χρονικό βήμα εισαγωγής υδρογραφήματος)
- **Fixed start time : 15/11/2017 00:30**
(Χρονικό όριο εκκίνησης υδρογραφήματος)
- **Number of ordinates : 5401**
(Αριθμός δεδομένων εισαγωγής)

Flow Hydrograph

SA: 2D_Area BCLine: Upstream

Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:

Path:

Enter Table Data time interval: 10 Second

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: 15NOV2017 Time: 0030

Fixed Start Time: Date: 15NOV2017 Time: 0030

No. Ordinates Interpolate Missing Values Del Row Ins Row

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m3/s)
5388	15Nov2017 1527	14:58	3.872
5389	15Nov2017 1528	14:58	3.868
5390	15Nov2017 1528	14:58	3.865
5391	15Nov2017 1528	14:58	3.861
5392	15Nov2017 1528	14:58	3.857
5393	15Nov2017 1528	14:59	3.853
5394	15Nov2017 1528	14:59	3.849
5395	15Nov2017 1529	14:59	3.849
5396	15Nov2017 1529	14:59	3.849
5397	15Nov2017 1529	14:59	3.849
5398	15Nov2017 1529	14:59	3.849
5399	15Nov2017 1529	14:60	3.849
5400	15Nov2017 1529	14:60	3.849
5401	15Nov2017 1530	15:00	3.849

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow: Multiplier: EG Slope for distributing flow along BC Line: 1. TW Check

Plot Data OK Cancel

Εικόνα 4.3.3.α: Οριακή συνθήκη υδρογραφήματος ροής στην ανάντη διατομή.

II. Κατάντη οριακή συνθήκη

Για δεδομένα εξόδου του πλημμυρικού όγκου στην κατάντη διατομή του μελετώμενου τμήματος επιλέχθηκε το κανονικό βάθος ροής (*Normal Depth*) εισάγοντας την κλίση γραμμή ενέργειας (*Friction Slope*).

SA: 2D_Area BCLine: Downstream

Friction Slope:

2D Flow Area Boundary Condition Parameters

Compute separate water surface elevation per face along BC Line

Compute single water surface for entire BC Line

OK Cancel

Εικόνα 4.3.3.β: Οριακή συνθήκη ομοιόμορφου βάθους στην κατάντη διατομή.

Μη έχοντας την δυνατότητα να υπολογιστεί το κανονικό / ομοιόμορφο βάθος ροής/γραμμή κλίση της ενέργειας, για την εργασία μπορεί είτε να γίνει επιλογή της μέσης κλίσης του ρέματος είτε οριστεί μια τυπική τιμή. Στο παρόν μοντέλο έγινε εφαρμογή μίας τυπικής τιμής, στο παράδειγμα, όπως φαίνεται παραπάνω, η γραμμή κλίσης της ενέργειας (*Energy Slope*) θεωρήθηκε ίσο με 0.02.

4.3.4 Διαχωριστικές γραμμές (*Breaklines*)

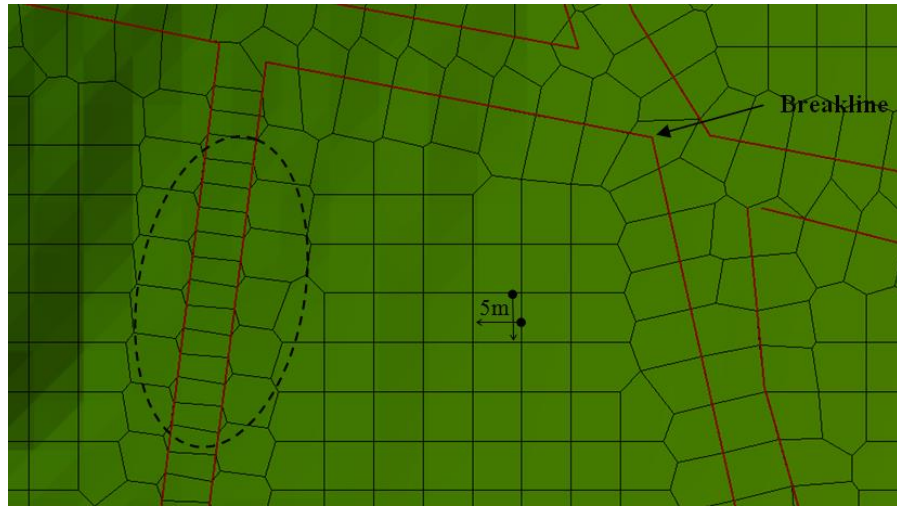
Είναι οριακές συνθήκες εσωτερικά του 2Δ πλέγματος (*internal boundary conditions*). Χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις ξαφνικές αλλαγές στην επιφάνεια του εδάφους και στη ροή των επιφανειακών υδάτων. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να προστεθούν *breaklines* όπου υπάρχει:

- Ξαφνική αλλαγή στη βαθυμετρία, όπως στην κορυφή μιας όχθης, απότομες κλίσεις εδάφους.
- Εμπόδια στη ροή, όπως αναχώματα.
- Διευθετημένη ροή, όπως σε ένα ποτάμι ή ανοιχτός αγωγός.
- Τροποποίηση μεγέθους και σχήματος κελιού, όπως όταν υπάρχουν πολλές απότομες αλλαγές σε μια μικρή περιοχή.
- Αλλαγή στον συντελεστή τραχύτητας (*Manning's n*).

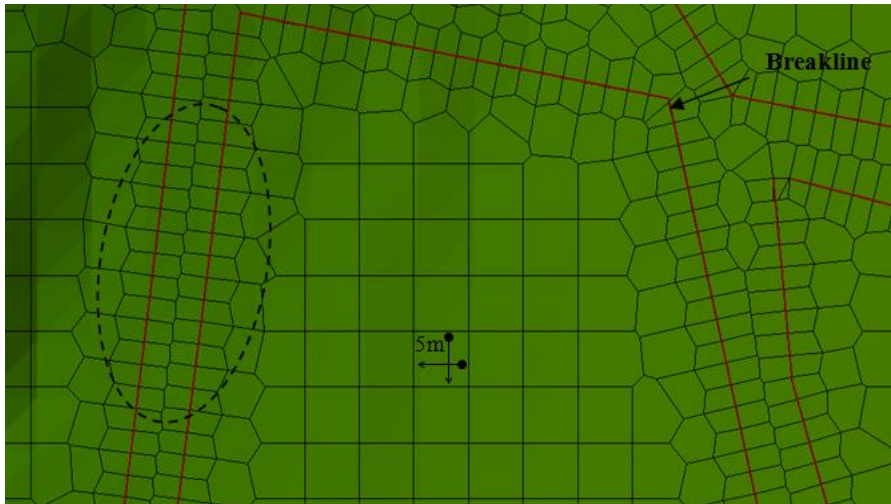
Τέλος, όπως αναλύεται στη συνέχεια της εργασίας, γύρω από κάθε *breakline* ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει ορθογώνια κελιά που εφάπτονται στα γειτονικά πολύγωνα, ο λόγος, όσο τα 2Δ κελιά παραπέμπουν σε ορθογώνια σχήματα τόσο αυξάνεται η αποδοτικότητα, η λειτουργικότητα και αποτελεσματικότητα της 2Δ προσομοίωσης πολυγωνικού πλέγματος του μοντέλου.

4.3.5 Τροποποίηση 2Δ Πλέγματος

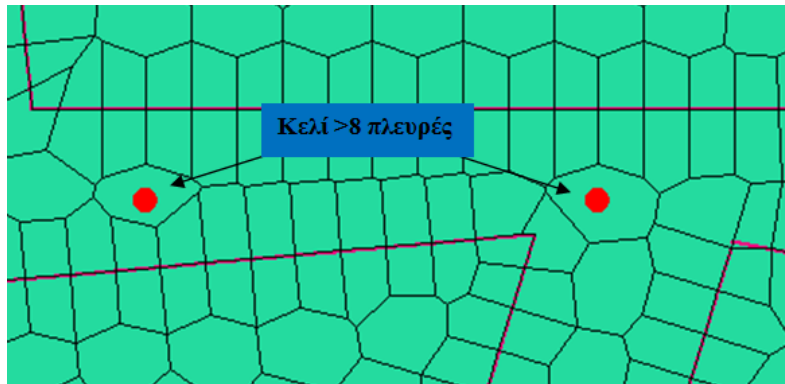
Στην συγκεκριμένη εργασία έγινε πύκνωση κελιών σε περιοχές όπου θεωρήθηκε θα υπήρχαν αλλαγές στην κλίση, στον συντελεστή *Manning's n*, σε απότομες αλλαγές, όσο αφορά το υψόμετρο, και περιμετρικά από κάθε διαχωριστική γραμμή (*breakline*) μέσα στο πλέγμα (*mesh*). Όπως διακρίνεται και στις εικόνες παρακάτω, το 2Δ πλέγμα με τα κελιά χωρίς την τροποποίηση γύρω από τα *breaklines* **Εικόνα 4.3.5.α**, αφού έχουν σχηματιστεί τα ορθογώνια κελιά περιμετρικά των διαχωριστικών γραμμών **Εικόνα 4.3.5.β**, και όταν κάποιο κελί αποτελείται πάνω από 8 πλευρές **Εικόνα 4.3.5.γ**.



Εικόνα 4.3.5.α: Προβολή 2Δ πλέγματος με τα κελιά χωρίς την τροποποίηση.



Εικόνα 4.3.5.β: Προβολή των ορθογώνιων κελιών του τροποποιημένου πλέγματος.



Εικόνα 4.3.5.γ: Προβολή εσφαλμένων κελιών του 2Δ πλέγματος.

Έπειτα από τις τροποποιήσεις και τις απαραίτητες αλλαγές για την προσομοίωση της πλημμύρας, τοποθέτηση ορθογώνιων κελιών περιμετρικά των διαχωριστικών γραμμών (*breaklines*) και προσθέτοντας επιπλέον κελιά στα γειτονικά εσφαλμένα, μειώνοντας έτσι τον αριθμό των πλευρών, παράχθηκαν τα εξής χαρακτηριστικά του 2Δ πλέγματος στην περιοχή της μελέτης:

- Σύνολο αριθμών 2Δ κελιών: 121,583
- Μεγαλύτερη επιφάνεια κελιών (4862): 63.99 m²
- Μικρότερη επιφάνεια κελιών: 0.87 m²
- Μέση επιφάνεια κελιών: 13.17 m²

4.3.6 Συντελεστή Τραχύτητας *Manning's n*

Ο συντελεστής τραχύτητας του *Manning*, n , είναι μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους σε υδρολογικούς υπολογισμούς που αντιπροσωπεύουν την απώλεια ενέργειας. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό απορροής υδάτων και πλημμύρας (Coon 1995). Συνήθως, η τιμή n είναι μια παράμετρος της μοντελοποίησης σε ένα υδρολογικό μοντέλο, όπου χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό απορροής και πλημμύρας σε συνθήκες ισορροπίας. Η τιμή του έχει σημαντική επίδραση στην ακρίβεια της προσομοίωσης της ροής. Ωστόσο, είναι δύσκολο να οριστεί στη φυσική λεκάνη επειδή χαρακτηρίζεται από πολλούς παράγοντες όπως η πυκνότητα της βλάστησης, η ανωμαλία της κοίτης του ρέματος, το πλάτος των επιφανειακών υδάτων και οι διαφορές των συστατικών του εδάφους που συμβάλλουν στην αντίσταση της ροής.

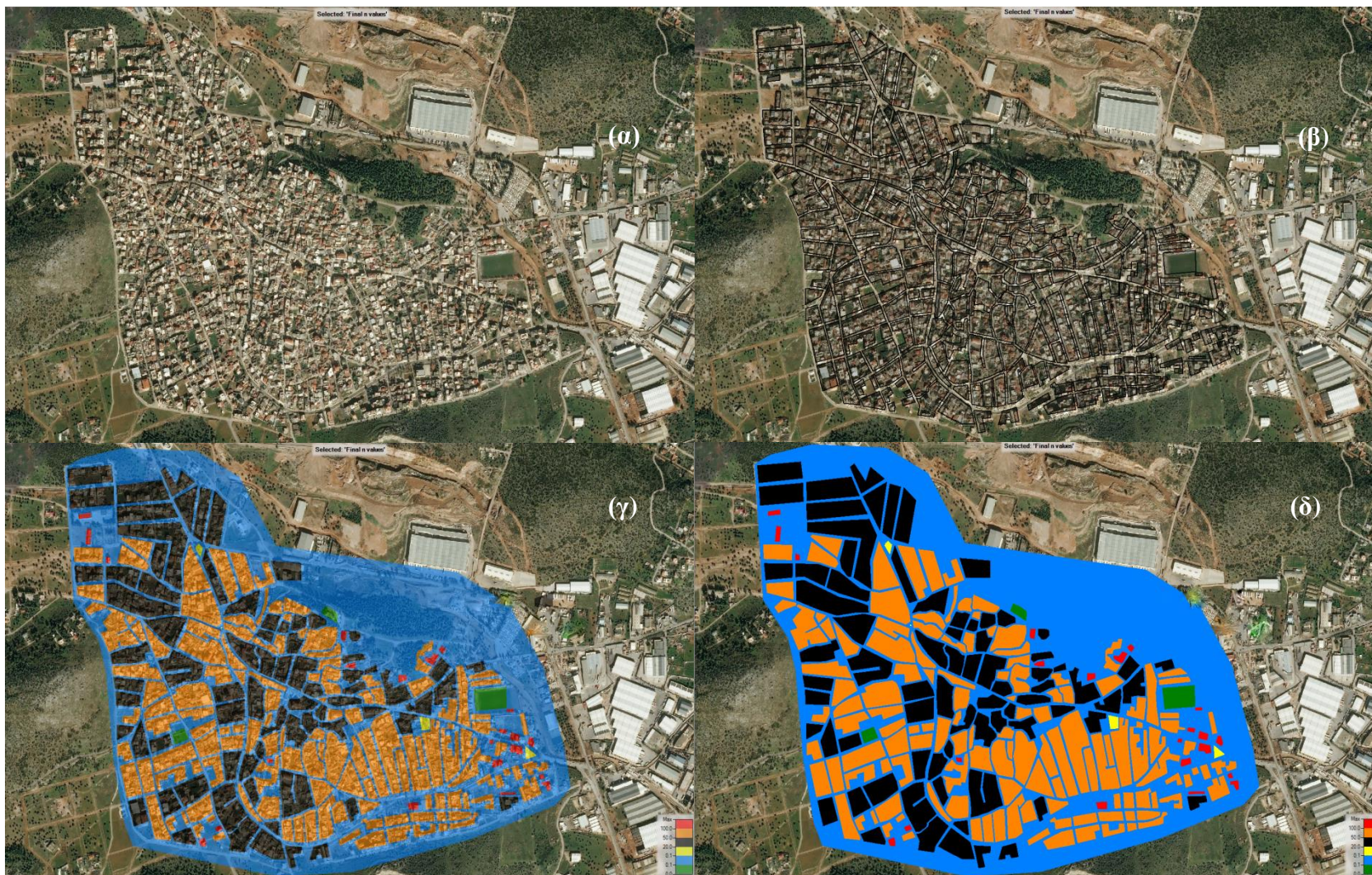
Στο λογισμικό, όσο αφορά τον συντελεστή τραχύτητας *Manning* είναι εφικτό: (i) να εισαχθεί ένα ειδικό ψηφιακό στρώμα με προκαθορισμένα και κατηγοριοποιημένα

Manning, (ii) να δημιουργηθούν χειροκίνητα πολύγωνα για διαφορετικά χρήσεις γης *Manning*, (iii) επιλογή μιας τυπικής τιμής για ολόκληρη την επιφάνεια της 2Δ περιοχής ακόμα και (iv) ο συνδυασμός των παραπάνω. Για την παρούσα διπλωματική λόγω έλλειψης ενός αρχείο τύπου *DTM (Digital Terrain Model)* ψηφιακού μοντέλου εδάφους που να συμπεριλαμβάνει κτήρια, δέντρα, εμπόδια κτλ, χρειάστηκε να δημιουργηθούν κάποια δεδομένα ώστε να αντικατοπτρίζει όσο το δυνατό το πραγματικό ανάγλυφο της περιοχής μελέτης.

Αρχικά, κατασκευάστηκαν τα 5 είδη περιοχών χρήσεις γης *Manning* στο *RAS- Mapper* ως εξής: (i) υψηλό συντελεστή *Manning* που κυμαίνεται από 40 – 60 [$s/m^{1/3}$] για οικοδομικά τετράγωνα με πυκνή δόμηση, n_{High} , (ii) χαμηλό συντελεστή *Manning* που κυμαίνεται από 15 - 25 [$s/m^{1/3}$] για οικοδομικά τετράγωνα με αραιή δόμηση, n_{Low} , (iii) κτήρια ή μονές κατοικίες με συντελεστή *Manning* n 100 [$s/m^{1/3}$], $n_{Building}$, (iv) βλάστηση περιοχής με συντελεστή *Manning* n 0.1 [$s/m^{1/3}$], n_{Trees} , και (v) ανοιχτοί χώροι με συντελεστή *Manning* n 0.04 [$s/m^{1/3}$], n_{Open} . Στην περιοχή μελέτης αφού ορίστηκαν οι περιοχές των διαφορετικών συντελεστών τραχυτήτων, υπολογίστηκαν συνολικά 234 πολύγωνα εσωτερικά των διαχωριστικών γραμμών (*breaklines*), όπου αντιπροσωπεύουν ένα είδος *Manning*. Τέλος, η επιλογή ενός συντελεστή *Manning* της ολόκληρης περιοχής του 2Δ πλέγματος αντιπροσωπεύει τον συντελεστή τραχύτητας των δρόμων. Οι κατασκευασμένες περιοχές *Manning* που επικαλύπτουν τον αρχικό συντελεστή τραχύτητας (τιμή *Manning* ολόκληρης 2Δ περιοχής) αφήνοντας έτσι μόνο ακάλυπτα τους δρόμους εντός του πλέγματος.

Συγκεκριμένα, στην **Εικόνα 4.3.6** διακρίνονται με διαφορετικά χρώματα τους συντελεστές *Manning*'s n και την πορεία δημιουργίας τους. Τα πολύγωνα με κόκκινο χρώμα είναι κτήρια και μονές κατοικίες, τα οικοδομικά τετράγωνα με μαύρο έχουν υψηλό συντελεστή *Manning* ενώ με πορτοκαλί χαμηλό συντελεστή, με κίτρινο αντιπροσωπεύουν την βλάστηση της περιοχής, με πράσινο χρώμα οι ανοικτοί χώροι και τέλος με μπλε χρώμα τον συντελεστή τραχύτητας για όλο το πλέγμα και κατ επέκταση των δρόμων της πόλης. Αναλυτικά, η περιοχή (α) της **Εικόνας 4.3.6** είναι η αεροφωτογραφία της περιοχής χωρίς καμία τροποποίηση στον *Manning*, (β) διακρίνονται τα όρια των περιοχών για τις διαφορετικές χρήσεις γης, (γ) η χρωματική κατανομή των

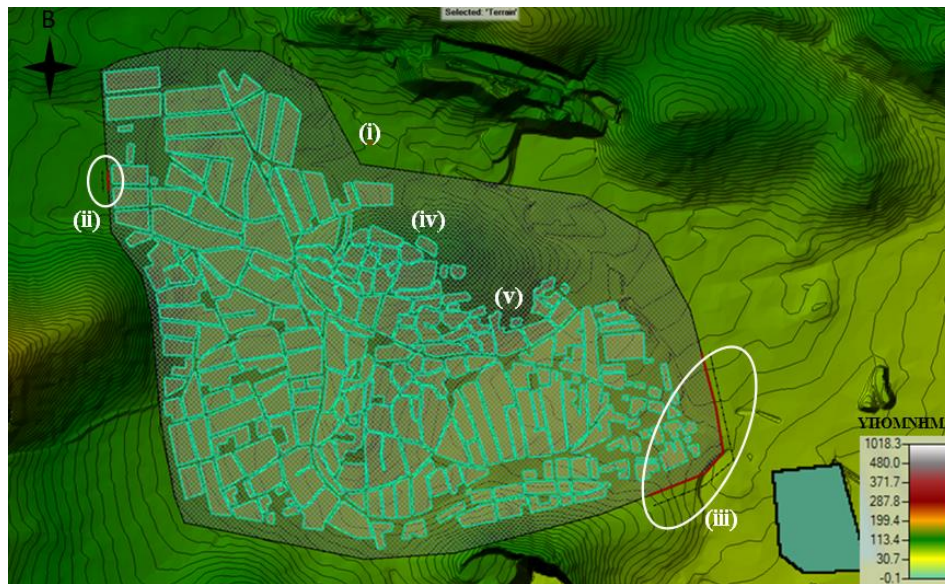
πολυγώνων του συντελεστή *Manning*, ελαφρός ξεθωριασμένη η χρωματική κατανομή και (δ) η πλήρης χρωματική κατανομή του *Manning* για την μελετημένη περιοχή.



Εικόνα 4.3.6: Γραφική αναπαράσταση συντελεστή τραχύτητας [$s/m^{1/3}$] ανά περιοχή του 2Δ πλέγματος στο RAS-Mapper.

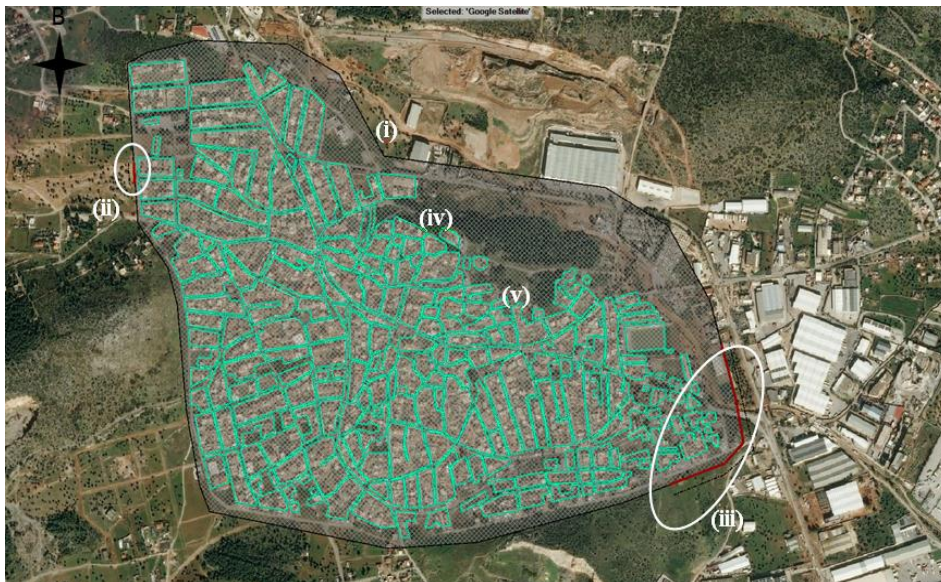
4.3.7 Γραφική Αναπαράσταση στο *RAS-Mapper*

Ανοίγοντας το *RAS-Mapper*, από τις προηγούμενες ενέργειες του 2D πλέγμα της προσομοίωσης, έχει ήδη οριστεί ως γεωαναφορά προβολής το γεωγραφικό σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ'87 ("*GGRS87 / Greek Grid*"). Στην **Εικόνα 4.3.7.α** παρακάτω, φαίνεται το τελικό αποτέλεσμα αναπαράστασης του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και των γεωμετρικών δεδομένων του μοντέλου ενώ στην **Εικόνα 4.3.7.β** η αεροφωτογραφία και τα γεωμετρικά δεδομένα της περιοχής μελέτης, μέσω του *RAS-Mapper*.



Εικόνα 4.3.7.α: Τελικό αποτέλεσμα με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και των γεωμετρικών δεδομένων του μοντέλου, στο *RAS-Mapper*.

Αναλυτικά, στην **Εικόνα 4.3.7.α** διακρίνεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους του υπόβαθρου με ισοϋψείς ανά 2 m, (i) η περίμετρο της δισδιάστατης επιφάνειας του μοντέλου, (ii) διατομή εισαγωγής πλημμυρικού κύματος ή ανάντη όριο με μήκος 57 m, (iii) διατομή εξαγωγής πλημμυρικού κύματος ή κατάντη όριο με μήκος 557 m, (iv) διαχωριστικές γραμμές πλέγματος (*breaklines*) με γαλάζιο χρώμα και (v) εντός των γραμμών αυτών τα πολύγωνα *Manning's n* με γκρι χρώμα. Παράλληλα, στην αμέσως επόμενη **Εικόνα 4.3.7.β**, για τα ίδια γεωμετρικά δεδομένα φαίνονται με ψηφιακό υπόβαθρο τώρα την αεροφωτογραφία της περιοχής μελέτης.



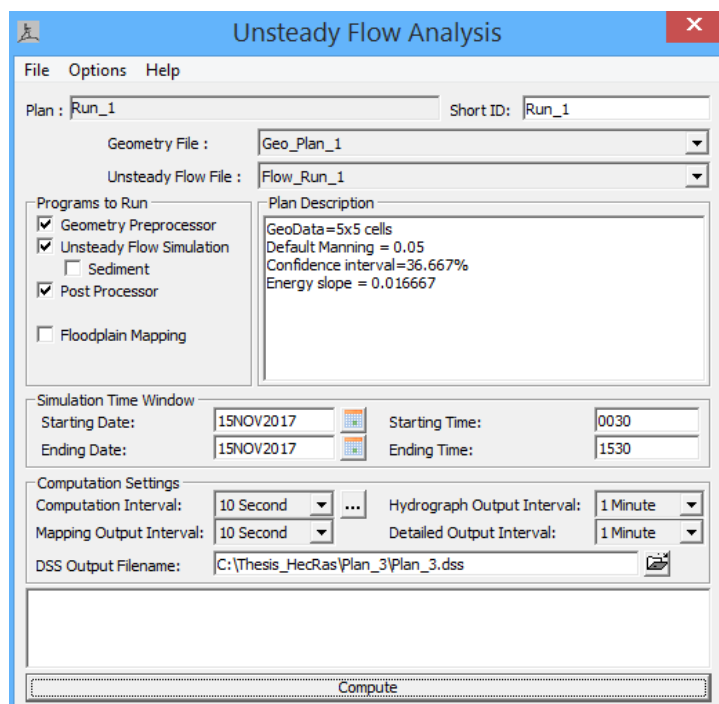
Εικόνα 4.3.7.β: Αεροφωτογραφία και γεωμετρικά δεδομένα περιοχής μελέτης, στο RAS-Mapper.

4.4 Ανάλυση Μη Μόνιμης Ροής (*Unsteady Flow Analysis*)

Αρχικά, δημιουργήθηκε ένα σχέδιο για την επεξεργασία και εκτέλεση της μη μόνιμης ροής της υδραυλικής προσομοίωσης (*Unsteady Flow Analysis editor*). Πριν από την εκτέλεση της προσομοίωσης για 2D μη μόνιμη ροή στο λογισμικό πρέπει να γίνει επιλογή του αντίστοιχου αρχείου γεωμετρικών δεδομένων (*Geometry file*) και του υδραυλικού αρχείου μη μόνιμης ροής (*Unsteady Flow file*) που δημιουργήθηκαν για την εργασία.

Συνοπτικά, αναφέρεται ότι οι υδραυλικοί υπολογισμοί του κατάντη τμήματος εκτελέστηκαν στις 15/11/2017 από ώρα 00:30 έως 15:30, με χρονικό βήμα προσομοίωσης τα 10 sec. Πραγματοποιήθηκε προ-επεξεργασία της γεωμετρίας της προσομοίωσης για τη μη μόνιμη ροή, αλλά και μετά-επεξεργασία της μη μόνιμης ροής. Το βήμα εξαγόμενων λεπτομερών αποτελεσμάτων και υδρογραφημάτων ήταν 1 min, ενώ ως βήμα χαρτογραφημένων αποτελεσμάτων ορίστηκαν τα 10sec. Για κάθε διατομή και για κάθε υπολογιστικό χρονικό βήμα θα εξαχθούν αποτελέσματα για ένα σύνολο μεταβλητών.

Πριν εκτελεστεί το πρόγραμμα, απαραίτητο είναι το πεδίο για την ονομασία εξαγωγής του αρχείου με το όνομα *DSS Output Filename*. Οι παραπάνω επιλογές για την εκτέλεση του προγράμματος διακρίνονται στην **Εικόνα 4.4**.



Εικόνα 4.4 : Παράμετροι της ανάλυσης μη μόνιμης ροής.

Στο παράδειγμα της παραπάνω ανάλυσης μη μόνιμης ροής και αλλά για όλα τα μοντέλα προσομοίωσης, τα γεωμετρικά δεδομένα του 2Δ πλέγματος αποτελούνται από κελιά με διαστάσεις 5m x 5m και οι συντελεστές τραχύτητας διακρίνονται στον **Πίνακα 4** ανάλογα με το μοντέλο. Τα όρια του πίνακα ορίστηκαν για την ανάλυση ευαισθησίας, όπου θα γίνει περαιτέρω ανάλυση παρακάτω.

Πίνακας 4-α: Κατανομή του συντελεστή και ορίων τραχύτητας Manning's n των διαφορετικών περιοχών χρήσεις γης.

Συντελεστής Τραχύτητας Manning's n [$s/m^{1/3}$]	
Υψηλό	40-60
Χαμηλό	15-25
Κτίρια /μονές κατοικίες	100
Βλάστηση	0.1
Ανοικτοί χώροι	0.04
Δρόμων	0.03-0.06

Για τα υδρολογικά δεδομένα στην ανάντη διατομή εισάγονται τα πλημμυρικά υδρογραφήματα του γεγονότος με τα διαφορετικά επίπεδα εμπιστοσύνης όπου κυμαίνονται ανάμεσα από 10%-90%, ανάλογα με το σενάριο μοντέλο προσομοίωσης. Τέλος, όπως έγινε αναφορά στην προηγούμενη ενότητα **4.3.2**, στην κατάντη διατομή γίνεται επιλογή του κανονικού βάθους ροής εισάγοντας την κλίση γραμμής ενέργειας με τιμές από 0.01 - 0.03.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ & ΣΥΝΘΕΣΗ ΧΑΡΤΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πορεία των εργασιών για την ανάλυση ευαισθησίας και κατ'επέκταση της βαθμονόμηση των παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου προσομοίωσης. Επιπλέον, για την προβολή των αποτελεσμάτων στους παραγόμενους χάρτες παρατίθεται υπόμνημα με το εύρος των τιμών για τα βάθη και ταχύτητες ροής, του υψομέτρου της περιοχής καθώς και το υψόμετρο ροής εντός του 2D πλέγματος. Η δυνατότητα για τη δημιουργία όλων των χαρτών πραγματοποιείται στο *RAS-Mapper* του *HEC-RAS* και σ' ένα σύστημα επεξεργασίας γεωγραφικών πληροφοριών *QGIS (Quantum GIS)*. Οι μεταβολές στα βάθη, ταχύτητες και υψόμετρα επιφάνειας ροής σε κάθε χάρτη, αποτυπώνονται μέσω της διακύμανσης της χρωματικής κλίμακας. Αυτό έγινε με επιλογή κατάλληλου χρωματικού υπόβαθρου για κάθε περίπτωση, ώστε να είναι και ξεκάθαρο οπτικά με το υπόβαθρο του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και των αεροφωτογραφιών.

Για τα σημεία ενδιαφέροντος από προηγούμενη έρευνα στην περιοχή, πραγματοποιήθηκε αυτοψία στην πόλη της Μάνδρας 4 ημέρες μετά το πλημμυρικό γεγονός (19/11/2017). Κατά την αυτοψία καταχωρήθηκαν 44 σημεία όπου μετρήθηκε το ύψος νερού με χρήση μετροταινίας, ύστερα και από καθοδήγηση και υπόδειξη, για την πλειοψηφία των μετρημένων σημείων, από κατοίκους της περιοχής. Η μέγιστη στάθμη νερού έγινε εύκολα αντιληπτή μέσα από γραμμές αποξηραμένης λάσπης στις επιφάνειες των κτιρίων, από φύλλα δέντρων κολλημένα σε διάφορα σημεία και από εμφανείς καταστροφές σε κτίρια. Συγχρόνως, καταγράφονταν με *GPS* οι συντεταγμένες στο σύστημα ΕΓΣΑ'87, των παραπάνω σημείων στον **Πίνακα 5-α** (βλέπε παράρτημα) (Ραπτάκη 2019). Τέλος, τα σημεία ενδιαφέροντος απεικονίζονται αριθμημένα, σύμφωνα με τον **Πίνακα 5-α**, στην πόλη της Μάνδρας. (**Εικόνα 5.1**)



Εικόνα 5.1: Αποτύπωση των σημείων στην πόλη της Μάνδρας.

5.2 Ανάλυση Ευαισθησίας και Βαθμονόμηση των Παραμέτρων

Μέσου της ανάλυσης ευαισθησίας θα ιεραρχηθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα, με βάση την ευαισθησία του τελικού αποτελέσματος, όπου για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται η μέθοδος *Morris* (1991).

Στην παρούσα ανάλυση, κριτήριο βαθμονόμησης των παραμέτρων του μοντέλου γίνεται συγκρίνοντας τα βάθη ροής των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη 2Δ προσομοίωση με τα δεδομένα βάθη ροής που μετρήθηκαν 4 ημέρες μετά το πλημμυρικό γεγονός της 15/11/2017 όπου υπολογίστηκε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square Error), που δίνεται από τον τύπο:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (11)$$

όπου:

O_i : το μετρημένο βάθος ροής στο σημείο i ,

S_i : το βάθος ροής του σημείου i από την προσομοίωση,

n : το πλήθος των σημείων i .

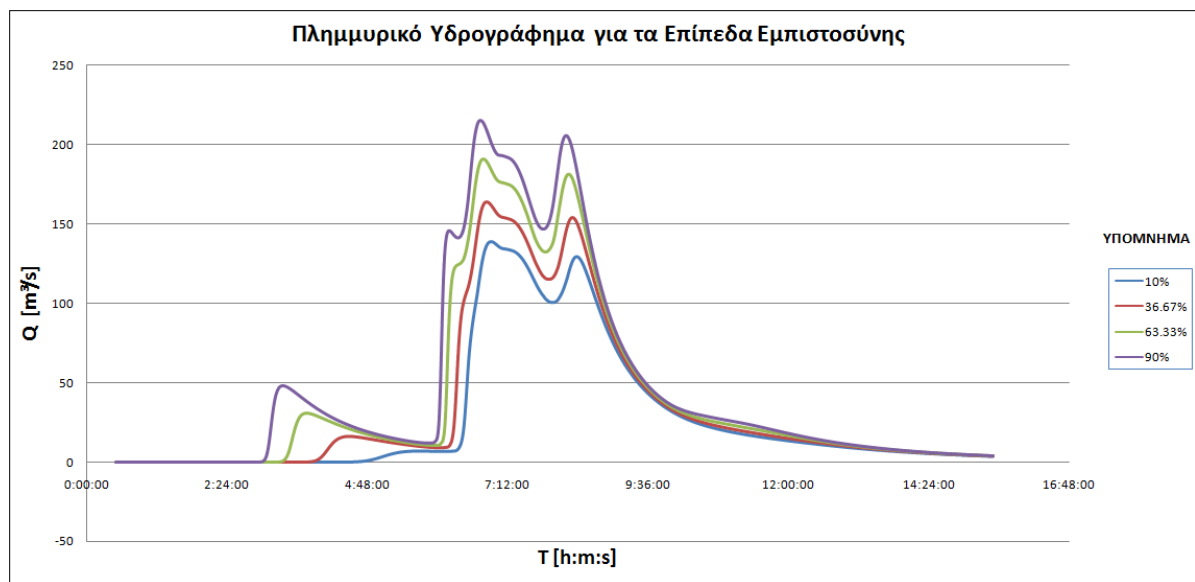
Το RMSE είναι μια συχνά χρησιμοποιούμενη παράμετρος που υπολογίζει τις διαφορές μεταξύ τιμών που προβλέπονται από ένα μοντέλο και τις παρατηρούμενες

τιμές. Επιλέχθηκαν $m=5$ παράμετροι, αναλυτικά: (i) ο συντελεστής *Manning* των δρόμων της πόλης, n_R , (ii) ο συντελεστής *Manning* οικοδομικών τετραγώνων που έχουν χαρακτηριστεί με υψηλό συντελεστή τραχύτητας, n_H , (iii) ο συντελεστής *Manning* των οικοδομικών τετραγώνων που έχουν χαρακτηριστεί με χαμηλό συντελεστή τραχύτητας, n_L , (vi) το διάστημα εμπιστοσύνης των 100 υδρογραφημάτων, $C.I.$, και τέλος (v) η κλίση γραμμή της ενέργειας για την κατάντη οριακή συνθήκη, S_f . Τα όρια μέσα στα οποία κυμαίνονται οι παραπάνω παράμετροι φαίνονται στον **Πίνακα 5-β**.

Πίνακας 5-β: Άνω και κάτω όρια των παραμέτρων για την ανάλυση ευαισθησίας.

Παράμετρος	Κάτω Όριο	Άνω Όριο	
(i) n_R	0.03	0.06	[s/m ^{1/3}]
(ii) n_H	40	60	[s/m ^{1/3}]
(iii) n_L	15	25	[s/m ^{1/3}]
(vi) $C.I.$	10	90	[%]
(v) S_f	0.01	0.03	[-]

Η παρούσα ανάλυση, στην οποία η δειγματοληψία έγινε βάση τον αλγόριθμο SAFE toolbox (Pianosi et al., 2015), παράχθηκαν 90 συνδυασμοί των παραπάνω παραμέτρων του μοντέλου όπως παρατηρείται στον **Πίνακας 5-γ** (βλέπε παράρτημα). Τα όρια του συντελεστή τραχύτητας *Manning*, για τις διαφορετικές χρήσεις γης της περιοχής, δημιουργήθηκαν με βάση τους πίνακες Crow (1959) για διάφορων ειδών πλημμυρών. Τέλος, το πλημμυρικό υδρογράφημα για τα διαφορετικά διαστήματα εμπιστοσύνης αποτυπώνεται στην **Εικόνα 5.2.1**.



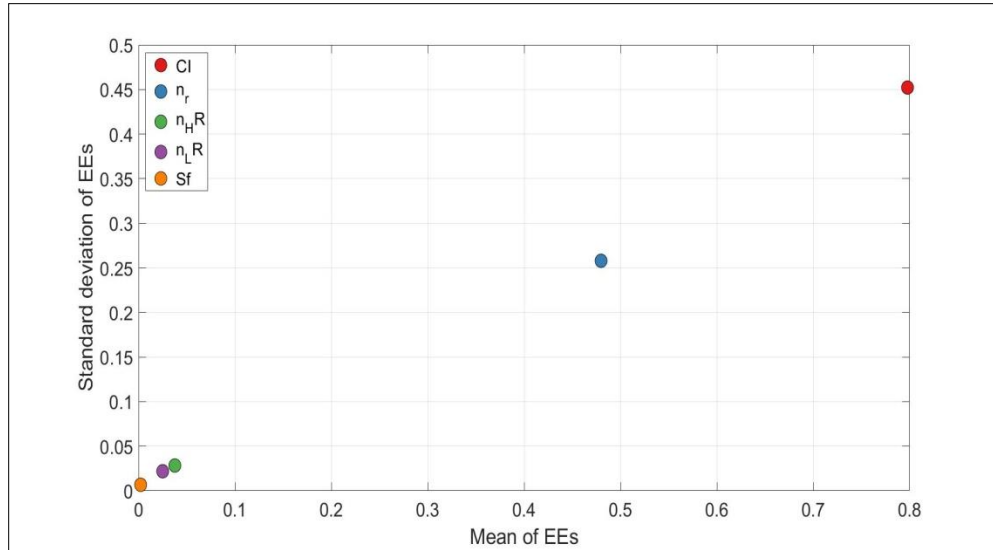
Εικόνα 5.2.1: Πλημμυρικό υδρογράφημα της περιοχή μελέτης μετά από βροχόπτωση στις 15/11/2017, για τα διαστήματα εμπιστοσύνης 10%, 36.667%, 63.33% και 90%.

Για την δημιουργία και εισαγωγή όλων των γεωμετρικών και υδραυλικών δεδομένων του μοντέλου, η εξαγωγή αυτών αλλά και για τους υδραυλικούς υπολογισμούς της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικός υπολογιστής *HP*, τύπου *Laptop*, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- *Windows 8.1 ©Microsoft Corporation*
- Επεξεργαστής: *Intel ® Core™ i7 -4510U, CPU @ 2.60GHz*
- *RAM: 4 GB*
- Λειτουργικό σύστημα: *64 bit*

Επομένως, έχοντας δημιουργήσει ξεχωριστό φάκελο για κάθε ένα από τα 90 μοντέλα, για τα διαφορετικά δεδομένα εισόδου - εξόδου, και τρέχοντας όλα τα μοντέλα προσομοίωσης ένα - ένα έχουμε τα εξής: (i) ο συνολικός χρόνος τρεξίματος των 90 μοντέλων υπολογίστηκε στα 123:51:13 [hr:m:s], με Μ.Ο. 1hr και 22min, (ii) ο Μ.Ο. των εσφαλμένων κελιών του 2Δ πλέγματος βρέθηκε 3.08%, και (iii) ο συνολικός χώρος αποθήκευσης των δεδομένων και αποτελεσμάτων υπολογίστηκε περίπου στα 800GB.

Όσο αφορά την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων, συγκρίνοντας τα βάθη ροής των προσομοιωμένων και μετρημένων σημείων, προέκυψε το παρακάτω σχήμα με βάση το *RMSE (Root Mean Square Error)* των σημείων (**Εικόνα 5.2.2**).



Εικόνα 5.2.2: Σχηματική απεικόνιση της ανάλυση ευαισθησίας με βάση το RMSE των σημείων.

Όπως διακρίνεται στην παραπάνω εικόνα, το διάστημα εμπιστοσύνης, **C.I.**, είναι μακράν η πιο επιδραστική παράμετρος (αναμενόμενο) και ακολουθεί δεύτερη, το Manning των δρόμων, **n_R** . Οι υπόλοιπες τραχύτητες και η κατάντη κλίση παίζουν αμελητέο ρόλο. Βάσει των αποτελεσμάτων της προηγούμενης ανάλυσης, όπου ιεραρχήθηκαν οι σημαντικότεροι παράμετροι της προσομοίωσης, εστιάζει στις δύο παραμέτρους που επηρεάζουν περισσότερο το τελικό αποτέλεσμα: (i) **n_{Road}** , και (ii) **C.I.**. Έχοντας τώρα δύο μόνο μεταβλητές πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση (*calibration*) αυτών των δύο.

Η βαθμονόμηση χρησιμοποιεί τα παρατηρούμενα δεδομένα, αναζητώντας συστηματικά τις παραμέτρους, **n_R** και **C.I.**, ώστε να παρέχουν την καλύτερη προσαρμογή των υπολογισθέντων αποτελεσμάτων (βάθη ροής) με τα μετρημένα βάθη ροής μετά το πλημμυρικό γεγονός. Για την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με ένα Grid-Search calibration. Συγκεκριμένα μια τέτοια βαθμονόμηση χρησιμοποιείται για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων ενός μοντέλου που οδηγεί σε πιο ακριβείς προβλέψεις. Είναι μια εξαντλητική αναζήτηση που πραγματοποιείται σε συγκεκριμένες τιμές εντός των ορίων των παραμέτρων ενός μοντέλου. Δημιουργεί ένα μοντέλο για κάθε δυνατό συνδυασμό των παραμέτρων. Επαναλαμβάνει κάθε συνδυασμό και αποθηκεύει το μοντέλο για κάθε τον συνδυασμό.

Μπορεί να είναι εύκολη στην εφαρμογή και κατανοητή, αλλά δυστυχώς δεν είναι αποτελεσματική όταν ο αριθμός των παραμέτρων είναι μεγάλος και δεν περιορίζονται σε όρια.

Επομένως, για αυτή την ανάλυση παράχθηκαν 27 επιπλέον συνδυασμοί των δύο παραμέτρων, n_R και $C.I.$, (Πίνακας 5-δ, βλέπε παράρτημα), εντός των ορίων του Πίνακα 5-ε ενώ για τις υπόλοιπες, λήφθηκε η μέση τιμή των ορίων ($n_{High} = 50 \text{ s/m}^{1/3}$, $n_{Low} = 20 \text{ s/m}^{1/3}$, $S_f = 0.02$).

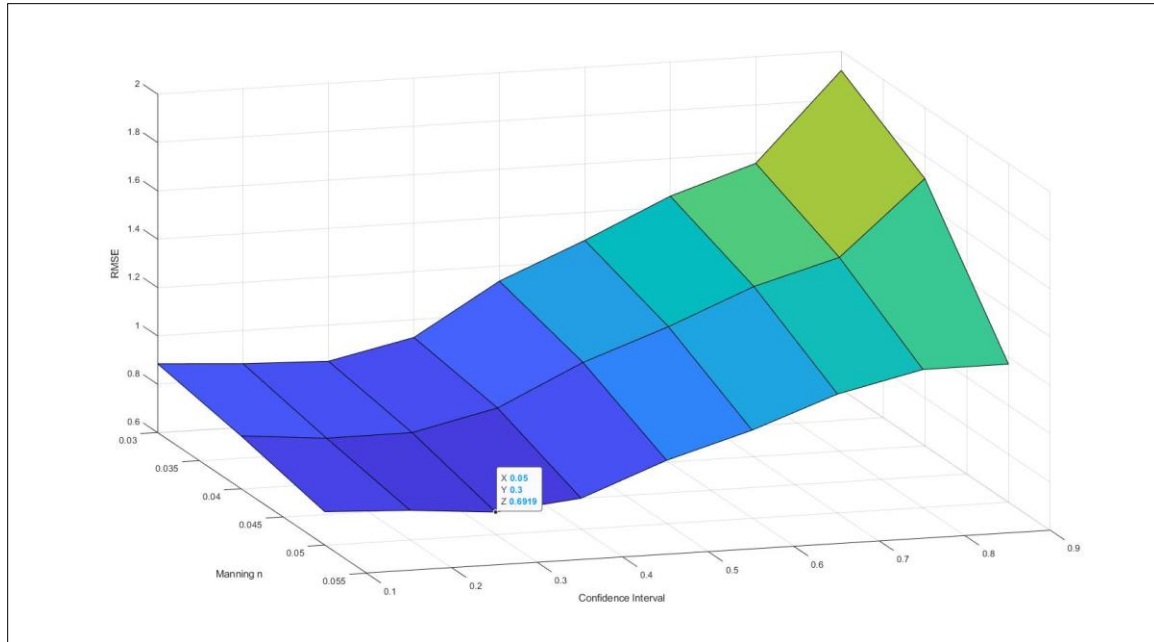
Πίνακας 5-ε: Άνω και κάτω όρια των παραμέτρων για την βαθμονόμηση (calibration).

	Παράμετρος	Κάτω Όριο	Άνω Όριο	
(i)	n_R	0.03	0.05	[s/m ^{1/3}]
(ii)	$C.I.$	10	90	[%]

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, (δημιουργία - εισαγωγή δεδομένων και εξαγωγή αποτελεσμάτων) υπολογίστηκε ο συνολικός χρόνος τρεξίματος 32:39:11 [hr:m:s], με Μ.Ο. 1hr και 12min και ο συνολικός χώρος αποθήκευσης των δεδομένων και αποτελεσμάτων περίπου στα 160GB.

Μετά από την ολοκλήρωση της κάθε προσομοίωσης η εργαλειοθήκη *RAS-Mapper* εξάγει όλους τους χάρτες (βάθος, ταχύτητα, υψόμετρο ελεύθερης επιφάνειας ροής κ.α.) σε αρχείο τύπου *VRT (Virtual World File)*. Ένα μειονέκτημα που έχει το *RAS-Mapper* δεν μπορεί να προβάλει σημειακά αποτελέσματα των διαφορετικών χαρτών. Δημιουργώντας λοιπόν ένα αρχείο τύπου *Tif*, μπορεί να γίνει εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών, τύπου *QGIS (Quantum Geographic Information System)*. Δίνεται έτσι η δυνατότητα να εμφανίζονται τα βάθη ροής, ξεχωριστά των 44 σημείων, της κάθε προσομοίωσης του μοντέλου στην περιοχή μελέτης.

Από τη σύγκριση των σημαντικότερων παραμέτρων, με βάση το *RMSE* των σημείων, προκύπτουν τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στην **Εικόνα 5.2.3**.



Εικόνα 5.2.3: 3Δ απεικόνιση συνάρτηση στόχος της βαθμονόμησης των παραμέτρων n_R , $C.I.$, βάσει το RMSE των σημείων.

Η 3Δ γραφική απεικόνιση τον βέλτιστο συνδυασμό των δύο παραμέτρων n_R , $C.I.$, με βάση το RMSE των σημείων. Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι, όσο μεγαλώνει ο συντελεστής τραχύτητας των δρόμων τόσο συγκλίνει στον βέλτιστο συνδυασμό των παραμέτρων. Κάποια στιγμή θα σταματήσει αυτή η μείωση και θα υπάρξει αύξηση της παράμετρος αυτής, όταν επιτευχθεί αυτό εκεί θα είναι και ο βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων. Αξίζει να σημειωθεί όμως από την εικόνα φαίνεται ότι δεν ερευνήθηκε διεξοδικά όλος ο χώρος, καθότι έχει παγιδευτεί σε κάποιο άκρο. Μία λύση θα ήταν να δοκιμαστούν περισσότερα και μεγαλύτερα *Manning* των δρόμων ώστε να βρεθούν καλύτερες λύσεις.

Το αποτέλεσμα της παρούσας μελέτης δείχνει ότι ο βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων, βάσει της παραπάνω 3Δ συνάρτησης στόχου για αυτό το συγκεκριμένο υδραυλικό μοντέλο, είναι για συντελεστή *Manning* των δρόμων της πόλης, $n_R = 0.05$ [s/m^{1/3}], και με επίπεδο εμπιστοσύνης υδρογραφήματος, $C.I.=30\%$. Εν ολίγοις, το σενάριο 21 από τον **Πίνακα 5-δ** αντικατοπτρίζει τον καλύτερο συνδυασμό παραμέτρων του μοντέλου:

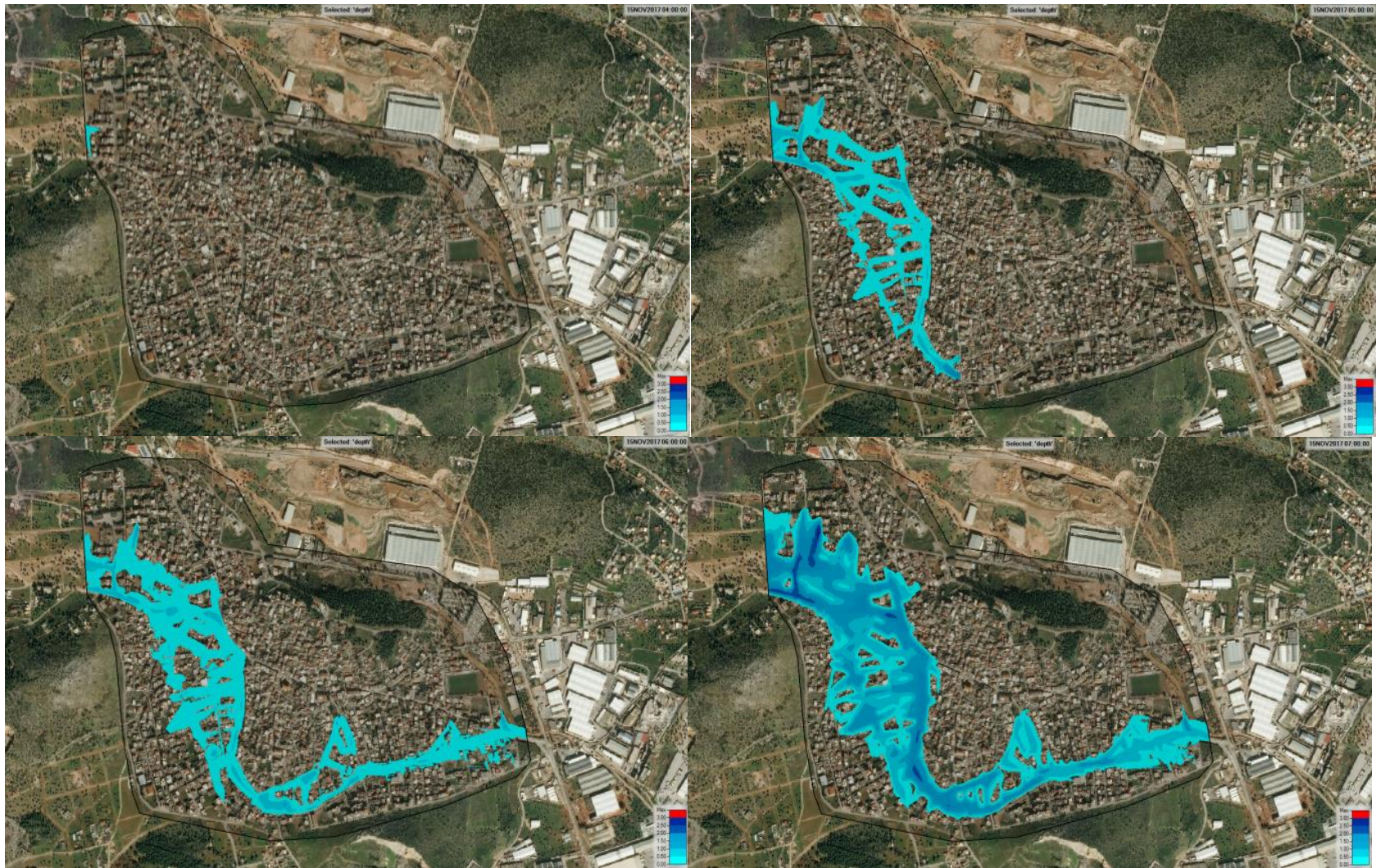
- Συντελεστή *Manning* των δρόμων της πόλης, $n_R = 0.05$ [s/m^{1/3}]

- Διάστημα εμπιστοσύνης υδρογραφήματος, $C.I.=30$ [%]
- Υψηλό συντελεστή *Manning* οικοδομικών τετραγώνων, $n_H = 50$ [s/m^{1/3}]
- Χαμηλό συντελεστή *Manning* οικοδομικών τετραγώνων, $n_L = 20$ [s/m^{1/3}]
- Συντελεστή *Manning* μονές κατοικίες/κτήρια , $n_B = 100$ [s/m^{1/3}]
- Κλίση γραμμής ενέργειας, $S_f = 0.02$ [-]
- Συντελεστή *Manning* των ανοικτών χώρων, $n_O = 0.04$ [s/m^{1/3}]
- Συντελεστή *Manning* βλάστησης της περιοχής, $n_T = 0.1$ [s/m^{1/3}]

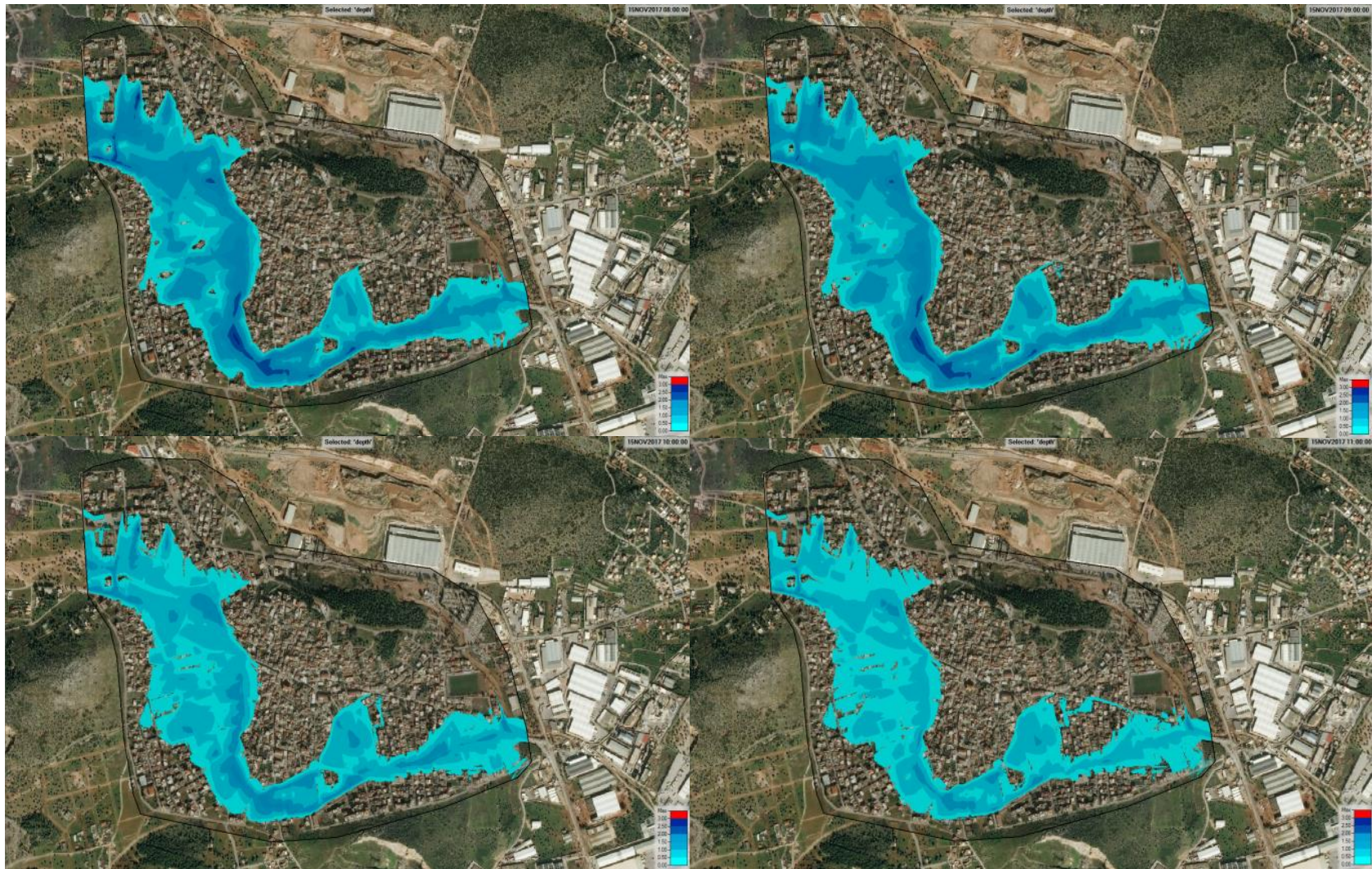
5.3 Μέγιστα Βάθη Ροής

Η παρουσίαση αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε στο *RAS-Mapper* και προκύπτουν για δεδομένα εισόδου για το σενάριο 21 του μοντέλο προσομοίωσης. Στους χάρτες για τα βάθη ροής, επιλέχθηκε η διακύμανση του μπλε χρώματος, με τις μικρές τιμές να αποδίδονται με ανοιχτό και λιγότερο έντονο γαλάζιο χρώμα σε αντίθεση με τις μεγαλύτερες τιμές που αποτυπώθηκαν πιο έντονες-σκούρες μπλε, ενώ το ανώτερο όριο αποτυπώθηκε με κόκκινο χρώμα.

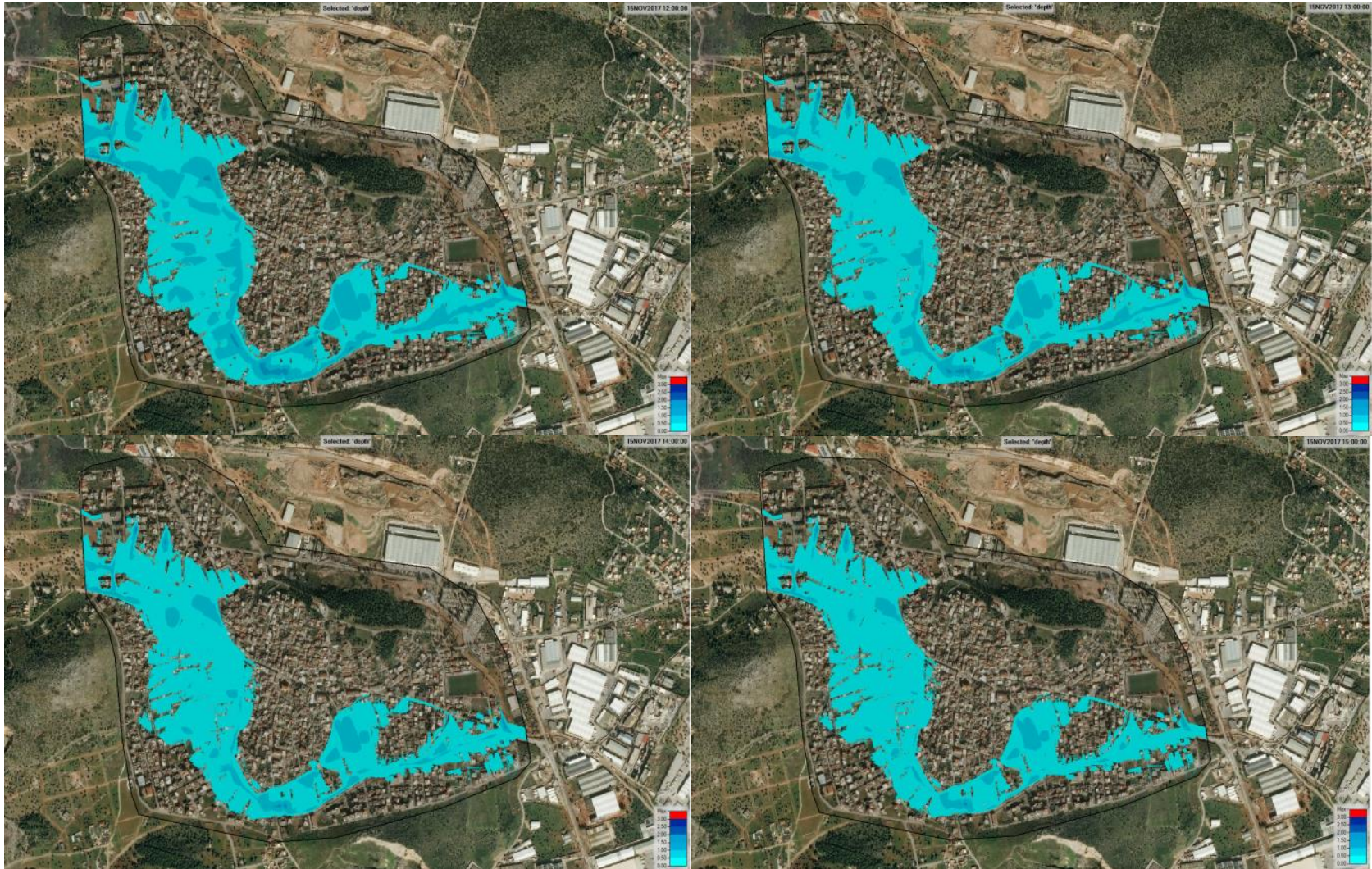
Στις **Εικόνες 5.3.1 , 5.3.2 , 5.3.3** διακρίνονται η χωρική κατανομή του μέγιστου βάθους νερού στην περιοχή της Μάνδρας από τις 00:30 πμ. – 15:30 μμ. της 15/11/2017, ίδιο χρονικό όριο με τα δεδομένα εισόδου υδρογραφήματος. Επειδή στην ανάντη διατομή το νερό δεν εισέρχεται στο 2Δ πλέγμα μέχρι και τις 04:00 πμ, επομένως οι εικόνες έχουν όρια από τις 04:00 πμ. – 15:30 μμ. με χρονικό βήμα ανά μία ώρα.



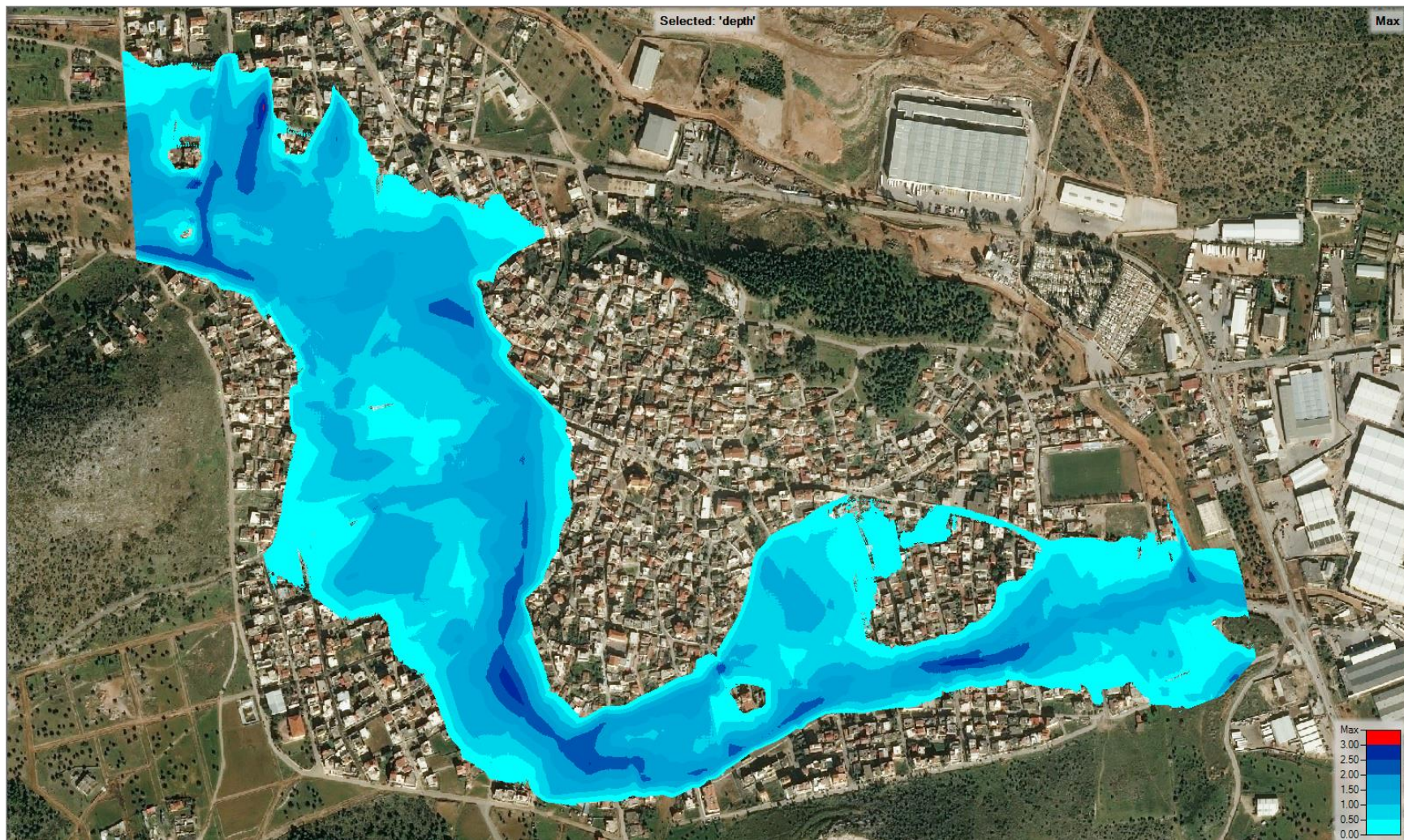
Εικόνα 5.3.1: Πλημμυρογράφημα προσομοίωσης μεταξύ ωρών 04:00 (αριστερά πάνω) – 07:00 (δεξιά κάτω)[h:mm].



Εικόνα 5.3.2: Πλημμυρογράφημα προσομοίωσης μεταξύ ωρών 08:00 (αριστερά πάνω) – 11:00 (δεξιά κάτω)[h:mm].



Εικόνα 5.3.3: Πλημμυρογράφημα προσομοίωσης μεταξύ ωρών 12:00 (αριστερά πάνω) – 15:00 (Δεξιά κάτω)[h:mm].



Εικόνα 5.3.4: Αεροφωτογραφία με το μέγιστο βάθος ροής[m] της περιοχής. ΚΛΙΜΑΚΑ 1:5000



Εικόνα 5.3.5: Εδαφικό υπόβαθρο με το μέγιστο βάθος ροής [m] της περιοχής και τμήμα της οδού Αγ.Αικατερίνης – Β.Κοροπούλη. ΚΛΙΜΑΚΑ 1: 5000

Όπως είναι εμφανές στις **Εικόνες 5.3.1 - 5.3.3** το νερό εισέρχεται στο αστικό τμήμα της Μάνδρας, κατευθύνεται νότια και ανατολικά περιμετρικά των κτισμάτων και λόγω ανάγλυφου ρέει βορειοανατολικά του οικισμού. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση του όγκου νερού κυλάει στην οδό Αγία Αικατερίνη και Βαγγέλη Κοροπούλη (ορισμένο τμήμα διαχωρισμένο ανά 100 m της **Εικόνας 5.3.5**) όπου και σημειώνετε το μέγιστο βάθος ροής κατά μήκος σε αυτή, κυμαίνετε από 2 - 2.75 m . Όπως θα αναλυθεί και παρακάτω, το μεγαλύτερο τμήμα των δρόμων Αγ.Αικατερίνης και Β.Κοροπούλη, εφάπτονται πάνω στο παλιό ρέμα Αγία Αικατερίνης.

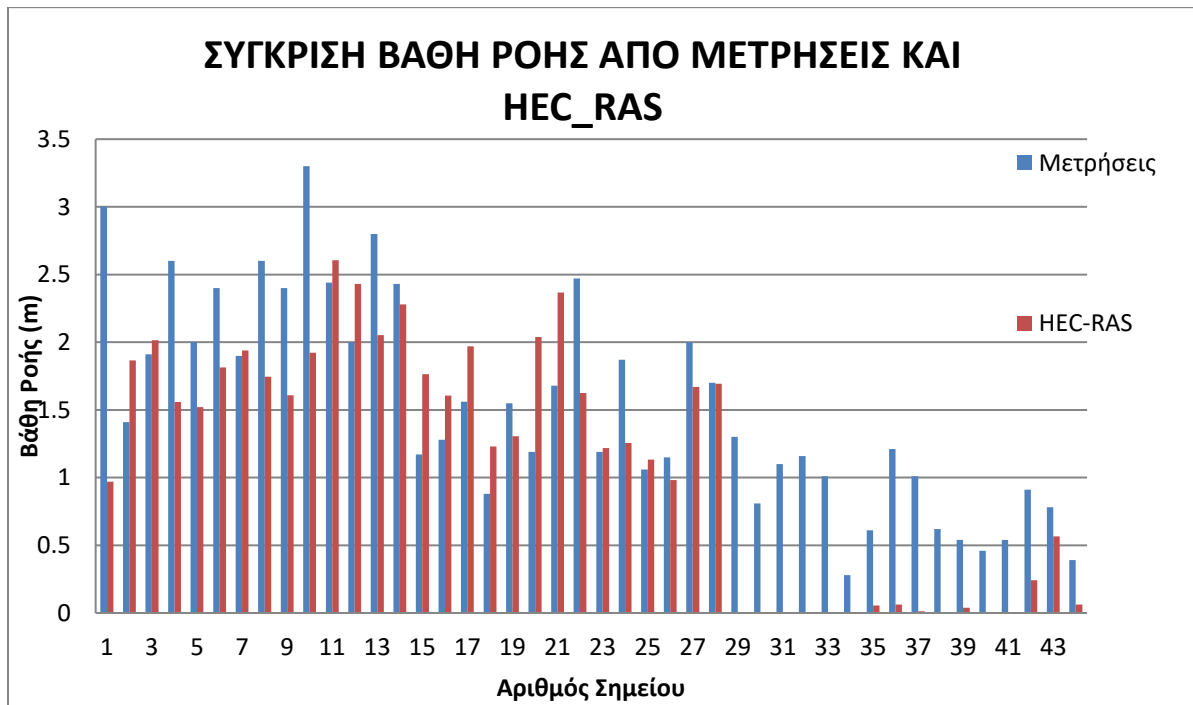
Αντίστοιχα, στην **Εικόνα 5.3.4** παριστάνεται το μέγιστο βάθος νερού σε όλη την 2Δ περιοχή μελέτης με υπόβαθρο την αεροφωτογραφία της περιοχής. Το βάθος ροής δεν ξεπερνά τα 3 m εκτός από ένα σημείο κοντά στην ανάντη διατομή, συγκεκριμένα με βάθος 3.10 m και συντεταγμένες στο ΕΓΣΑ'87 (455321.61, 4214408.60). Από την άλλη, στο μεγαλύτερο μέρος του πλημμυρικού όγκου νερού το βάθος ροής δεν υπερβαίνει τα 2 m (σκούρο μπλε) παρά μόνο σε κάποιες περιοχές, όπως νοτιοδυτικά περιοχές του οικισμού, σε τμήμα της οδό Αγία Αικατερίνη και σε όλο το μήκος της οδού Βαγγέλη Κοροπούλη. Αυτό οφείλετε κυρίως στην μορφολογία του εδάφους, όσο αφορά την διεύθυνση και βάθος ροής όπου παρουσιάζεται αναλυτικά στην **Εικόνα 5.3.5**. Χαρακτηριστικά διακρίνεται από την μορφολογία και μόνο της περιοχής, την φυσική πορεία/ροή του υδατορέματος που διαπερνά την πόλη της Μάνδρας.

Στην **Εικόνα 5.3.6**, παρουσιάζονται τα 44 σημεία εντός της πόλης και τον χάρτη των μέγιστων βάθη ροής της προσομοίωσης με τη χρήση του λογισμικού *QGIS*.



Εικόνα 5.3.6: Προβολή των 44 σημείων και τμήμα του χάρτη των μέγιστων βάθη ροής.

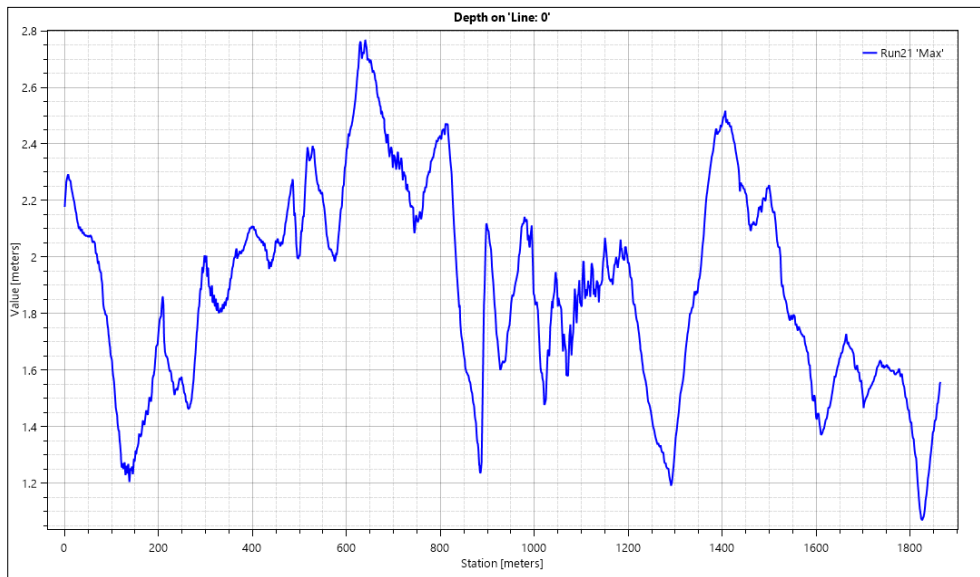
Παρατηρώντας την παραπάνω εικόνα, κάποια σημεία δεν έρχονται καθόλου σε επαφή με το πλημμυρικό όγκο νερού της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, στο ραβδοδιάγραμμα της **Εικόνας 5.3.7** αποτυπώνονται όλα τα σημεία με το βάθος ροής τους, των μετρημένων και τα προσομοιωμένα από το *HEC-RAS*.



Εικόνα 5.3.7: Ραβδοδιάγραμμα τιμών βάθη ροής των μετρημένων και προσομοιωμένων σημείων.

Αρχικά, από το ραβδοδιάγραμμα διακρίνονται οι μέγιστες τιμές του βάθου ροής σε κάθε ένα από τα 44 σημεία ενδιαφέροντος. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν μετά το γεγονός αποτυπώνονται με μπλε χρώμα, ενώ τα αποτελέσματα του *HEC-RAS* με κόκκινο χρώμα. Αναλυτικά τώρα, από τα 44 σημεία, σε 35 από αυτά έφτασε κάποια ποσότητα του πλημμυρικού όγκου νερού, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα 9, δεν ήρθαν καθόλου σε επαφή με το νερό (σημεία 29 – 34, 38, 40, 41) όπως φαίνονται και στην **Εικόνα 5.3.6, 5.3.7** αλλά και στον **Πίνακα 5-α** (βλέπε παράρτημα). Από τα 35, την μεγαλύτερη απόκλιση στο βάθος ροής έχει το πρώτο σημείο, 1, με την διαφορά να φτάνει τα 2 m και δεύτερο το σημείο, 10, με 1.4 m. Κλείνοντας, η απόκλιση στις τιμές του βάθου ροής των υπολοίπων κυμαίνονται από ± 1 m.

Το χωρισμένο τμήμα της **Εικόνας 5.3.5** έχει χαραχτεί πάνω από την οδό Αγίας Αικατερίνης – Βαγγέλη Κοροπούλη εντός του οικισμού της Μάνδρας. Το ρέμα Αγίας Αικατερίνης διέρχονταν από 1945 εντός τμήματος της πόλης, συγκεκριμένα διαχέεται επιφανειακά στην πόλη μέσω των οδών Αγ.Αικατερίνης, Β. Κοροπούλη και εξέρχεται σε φυσική κοίτη στις παρυφές αυτής (Σπίρτζης, 2017). Για το λόγω αυτό αποτελούν περιοχή ενδιαφέροντος οι οδοί αυτοί. Από τη αρχή του τμήματος μέχρι τη Χ.Θ. 0+300 καλύπτει ένα μήκος της οδό Αγ. Αικατερίνης, ενώ το υπόλοιπο τμήμα βρίσκεται εντός της οδού Β.Κοροπούλη. Στη συνέχεια της έρευνας, προβάλλονται τα βάθη ροής κατά μήκος του υδατορέματος που προέκυψε από την προσομοίωση στο διάγραμμα της **Εικόνας 5.3.8**.

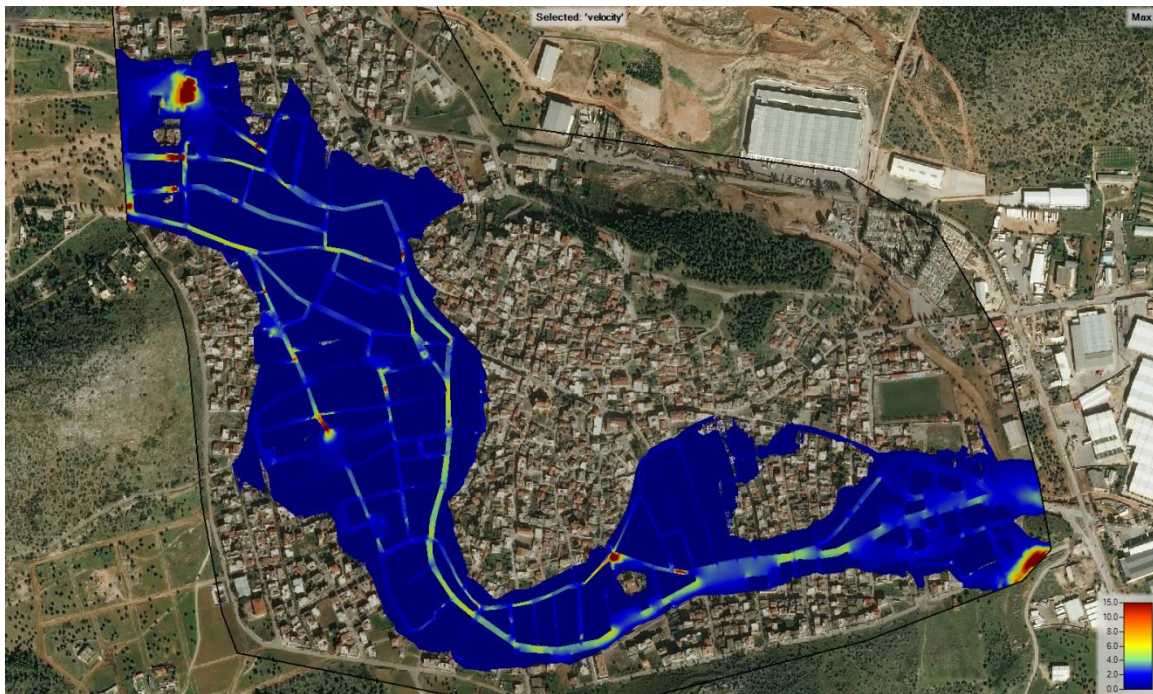


Εικόνα 5.3.8: Διάγραμμα μέγιστου βάθου ροής στην οδό Αγ.Αικατερίνης-Β. Κοροπούλη.

Λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία του διαγράμματος, δεν υπάρχει κάποια στεθερότητα στο βάθος ροής, εστιάζοντας όμως μεταξύ τις Χ.Θ. 180 - 650 m του υδατορέματος ο αριθμός αυξάνεται σημαντικά με κορύφωση στη Χ.Θ. 0 + 640 m και μέγιστο βάθος ροής τα 2.77 m, όπου αποτελεί το δεύτερο μεγαλύτερο βάθος της προσομοίωσης. Για τα επόμενα 760 m περίπου, εμφανίζει μια σχετική μικρή μείωση στο βάθος, με αποτέλεσμα να πέφτει στα 1.19 m στη Χ.Θ. 1 + 290 m. Στη συνέχεια, παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση στο βάθος ροής πάλι, με αποκορύφωμα τα 2.51 m στη Χ.Θ. 1 + 406 m. Τέλος, 38 m πριν από το κατάντη όριο του υδατορέματος μειώνεται το βάθος ροής στο 1 m, όπου αποτελεί και το χαμηλότερο βάθος ροής.

5.4 Μέγιστες Ταχύτητες Ροής

Στους χάρτες των μέγιστων ταχυτήτων επιλέχθηκε η εναλλαγή μπλε – κίτρινου - κόκκινου χρώματος, με τις μικρότερες τιμές να αποτυπώνονται με σκούρο μπλε, ενδιάμεσα με ανοιχτό κίτρινο, και τις μεγαλύτερες με σκούρο κόκκινο χρώμα. Η προσομοίωση της λεκάνης απορροής της Μάνδρας για τη βέλτιστη πιθανή περίπτωση, με χαρακτηριστικά όπως αποτυπώθηκαν στην **Ενότητα 5.2**, έδωσε τα αποτελέσματα που φαίνονται στην **Εικόνα 5.4.1** για τις μέγιστες ταχύτητες ροής της 2Δ περιοχής.

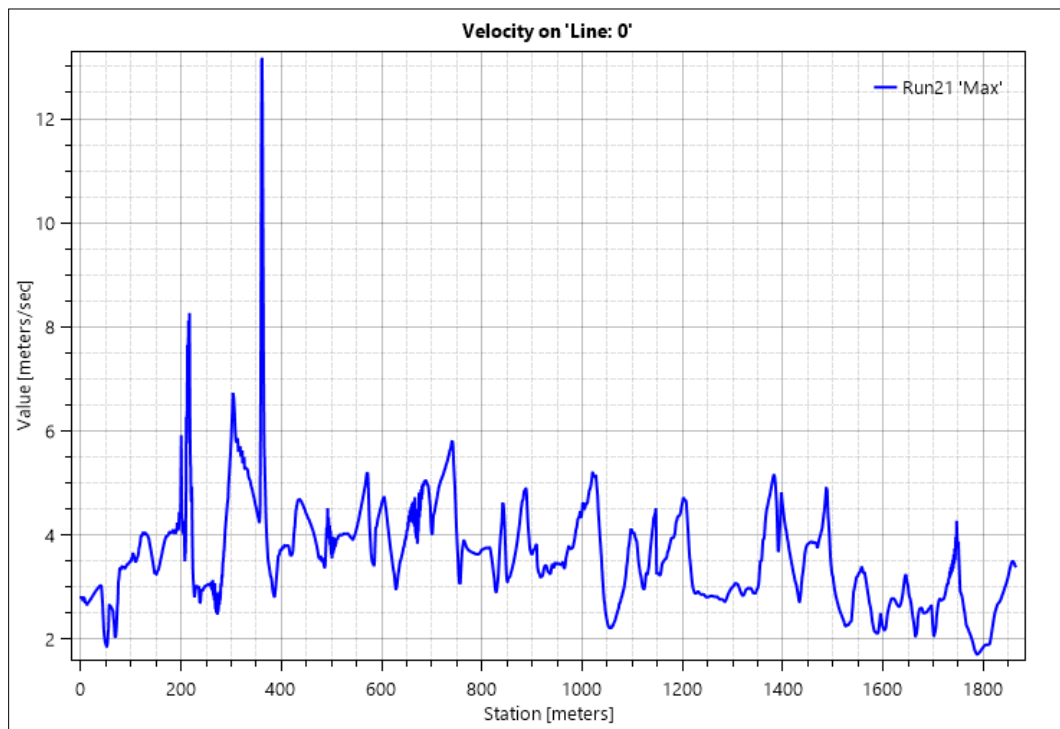


Εικόνα 5.4.1: Χάρτης μέγιστης ταχύτητας ροής[m/s] της προσομοίωσης. ΚΛΙΜΑΚΑ 1:5000

Στην **Εικόνα 5.4.1.** παρουσιάζεται η κατανομή της ταχύτητας του νερού που ρέει στην επιφάνεια του εδάφους. Τα τελικά αποτελέσματα, όσο αφορά τις μέγιστες ταχύτητες ροής, είναι ξεκάθαρο και οπτικά πως οι τιμές αυτές εμφανίζονται και σε αυτή την περίπτωση στο βορειοδυτικό άκρο της πόλης, καθώς εισέρχεται ο πλημμυρικός όγκος νερού στο πλέγμα, παράλληλα και στους πλημμυρισμένους δρόμους του οικισμού.

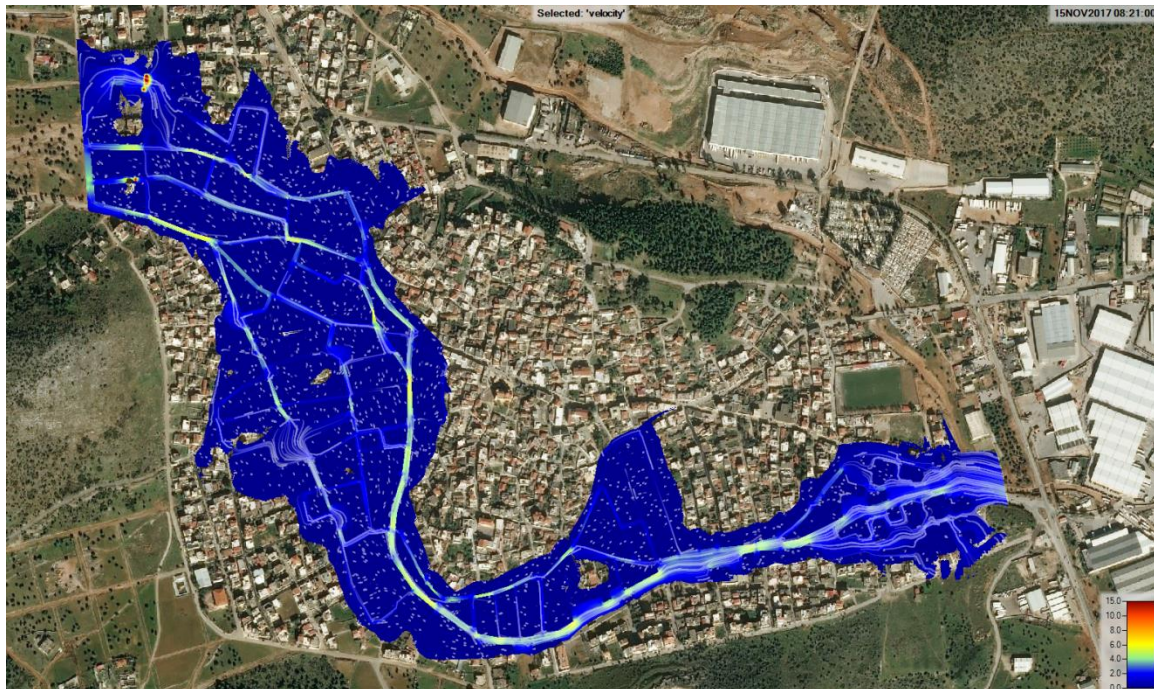
Ωστόσο, είναι εμφανές ότι στην οδό Αγ.Αικατερίνης - Β.Κοροπούλη διακρίνονται οι μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τους άλλους δρόμους. Η διαφοροποίηση μεταξύ των δρόμων και οικοδομικών τετραγώνων, σπίτια κτλ., έγκειται κυρίως στον συντελεστή τραχύτητας. Έχοντας στήσει το μοντέλο έτσι ώστε το νερό της πλημμύρας να βρίσκει αντίσταση και εμπόδια στο διάβα του, με αποτέλεσμα να ξεχύνεται στα ελεύθερα όρια (δρόμους) της περιοχής. Είναι σαφές, οι τιμές ταχυτήτων που ξεπερνούν τα 10 - 15 m/s εντός της 2Δ περιοχής να φαίνονται αρκετά μεγάλες, όμως αξίζει να σημειωθεί ότι, στις περιοχές αυτές οι τιμές αντιπροσωπεύουν στιγμιαίες ταχύτητες ροής και όχι μέση ταχύτητα του τμήματος.

Αναλυτικά τώρα, για το υποτιθέμενο υδατόρεμα (οδό Αγ.Αικατερίνης-Β.Κοροπούλη), στην **Εικόνα 5.4.2.** προβάλλονται οι τιμές των ταχυτήτων κατά μήκος της οδού.



Εικόνα 5.4.2: Διάγραμμα μέγιστης ταχύτητας ροής στην οδό Αγ.Αικατερίνης-Β.Κοροπούλη.

Με εξαίρεση τις δύο τιμές στην Χ.Θ. 0 + 217 m και 0 + 361 m με ταχύτητες ροής 8.2 m/s και 13.2 m/s αντίστοιχα, παρατηρείται μια σταθερότητα του διαγράμματος μεταξύ των τιμών 2 - 5 m/s. Λαμβάνοντας υπόψη τα στατιστικά αποτελέσματα της οδού Αγ.Αικατερίνης – Β.Κοροπούλη, το νερό κινείται με μέση ταχύτητα 3.6 m/s.



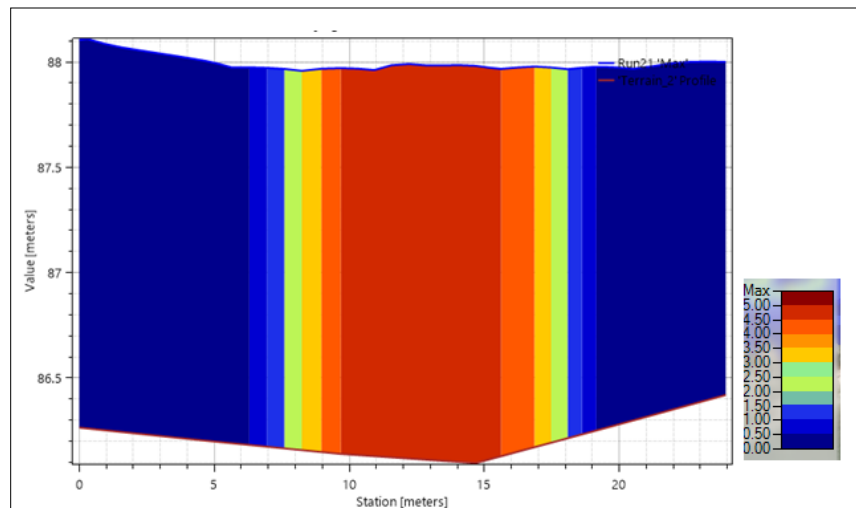
Εικόνα 5.4.3: Απεικόνιση κίνηση σωματιδίων του νερού με βάση το διάγραμμα μέγιστης ταχύτητας ροής[m/s] στην οδό Αγ.Αικατερίνης - Β.Κοροπούλη. ΚΛΙΜΑΚΑ 1:5000

Στην παραπάνω εικόνα, απεικονίζεται η κίνηση των σωματίδια του νερού με γκρι χρώμα μέσα στο πλημμυρισμένο όγκο νερού του μοντέλου. Για την εικονική αυτή σχεδίαση, η εργαλειοθήκη του λογισμικού *HEC-RAS*, το *RAS-Mapper* χρησιμοποιεί μόνο ως υπόβαθρο τον χάρτη ταχυτήτων μιας συγκεκριμένης στιγμής και όχι τον χάρτη των μέγιστων τιμών ταχυτήτων. Προβάλλει αποτελέσματα για κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης την κίνηση που έχουν τα σωματίδια, είτε αν αυτά κινούνται αργά έως καθόλου (φαίνονται σαν άσπρες κουκίδες) είτε όταν ταξιδεύουν με μεγάλη ταχύτητα (μικρές γκρι ακανόνιστες γραμμές). Γενικά, όσο μεγαλύτερη ταχύτητα έχει ένα σωματίδιο τόσο μεγαλώνει η κουκίδα με αποτέλεσμα να σχηματίζει γραμμή.

Από την **Εικόνα 5.4.3**, οι κουκίδες εντοπίζονται μόνο εντός των οικοδομικών τετραγώνων, που είχαν σχεδιαστεί, και βρίσκονται αρκετά απομακρυσμένες μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι, όποια μικρή ποσότητα νερού μπόρεσε να εισέρθει στα

πολύγωνα δεν καταφέρνει να κινηθεί και μένει σχεδόν στάσιμο. Παράλληλα, στους δρόμους της πόλης, όπου και είναι αρκετά ευδιάκριτο, διακρίνονται οι γραμμές από την κίνηση των σωματιδίων. Τα σωματίδια κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα γι' αυτό υπάρχει και πύκνωση γραμμών στις περιοχές αυτές σε όλο το μήκος και πλάτος του πλημμυρικού χάρτη.

Μέσου του *RAS-Mapper* τώρα, τοποθετήθηκε μια τυχαία διατομή εγκάρσια στη ροή πάνω στην οδό Β.Κοροπούλη. Η διατομή χρησιμοποιεί ως υπόβαθρο τα εξαγόμενα δεδομένα του χάρτη της ταχύτητας ροής για τη δεδομένη χρονική στιγμή 07:45 [h:mm]. Βρίσκεται στη Χ.Θ. 0 + 347 m από την αρχή του υδατορέματος και έχει μήκος 24 m (**Εικόνα 5.4.4**). Από την εικόνα παρατηρείται το βάθος ροής (κάθετος άξονας), το μήκος της διατομής (οριζόντιος άξονας), την επιφάνεια του εδάφους (η κάτω κόκκινη γραμμή) και την χρωματική κατανομή της ταχύτητας στην διατομή.

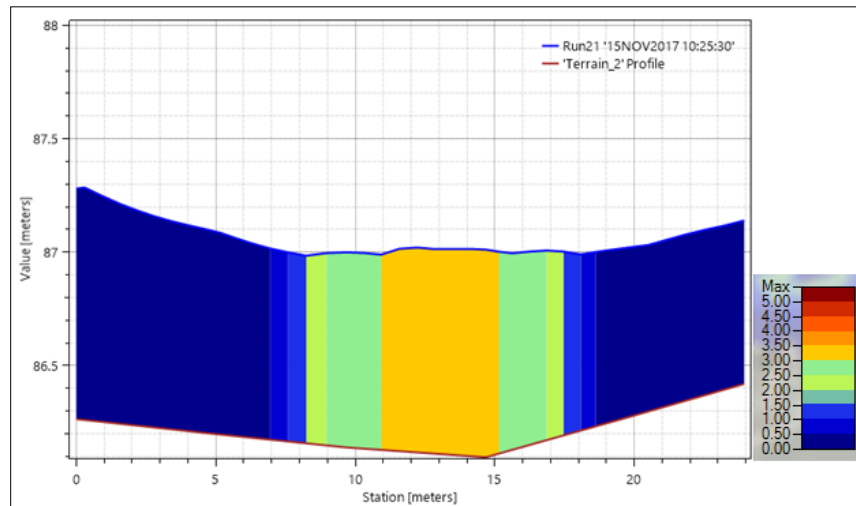


Εικόνα 5.4.4 : Χρωματική κατανομή ταχυτήτων ροής [m/s] διατομής στην οδό Β.Κοροπούλη για τη χρονική στιγμή 07:45[h:mm].

Αναλυτικά, από το εικονιζόμενο διάγραμμα παραπάνω, τα δύο άκρα του σχήματος η χρωματική κατανομή ταχυτήτων προβάλλονται με σκούρο μπλε. Οι τιμές αυτές, όπου είναι σχεδόν μηδενική η ταχύτητα, καλύπτουν την μεγαλύτερη επιφάνεια της διατομής. Αυτό οφείλετε κυρίως στο ότι τα άκρα της διατομής βρίσκονται εντός των περιοχών με υψηλό συντελεστή *Manning*. Από τα γεωμετρικά δεδομένα, τα πολύγωνα χρήσεις γης *Manning*, που βρίσκονται στα όρια του πλημμυρισμένου δρόμου, απέχουν 7.7 m και 18.7 m από την αρχή του οριζόντιου αξόνων. Στα σημεία αυτά, βρίσκονται και τα δύο όρια των πολυγώνων, δεξιά και αριστερά αντίστοιχα, όπου έχουν την ίδια

περίπου ταχύτητα, 1 - 1.5 m/s. Στη συνέχεια, από τα όρια αυτά, αυξάνεται η ταχύτητα συμμετρικά ως προς το μέσο της διατομής από τα 1.5 m/s μέχρι τα 5 m/s. Τέλος, το υψόμετρο της επιφάνειας του νερού στην διατομή ανέρχεται στα 88.1 m και βάθος ροής κοντά στα 2 m.

Αντιθέτως, μετά από 3 ώρες περίπου (10:25[h:mm]) διακρίνεται σημαντική μείωση τόσο στο βάθος όσο και στη ταχύτητα ροής.

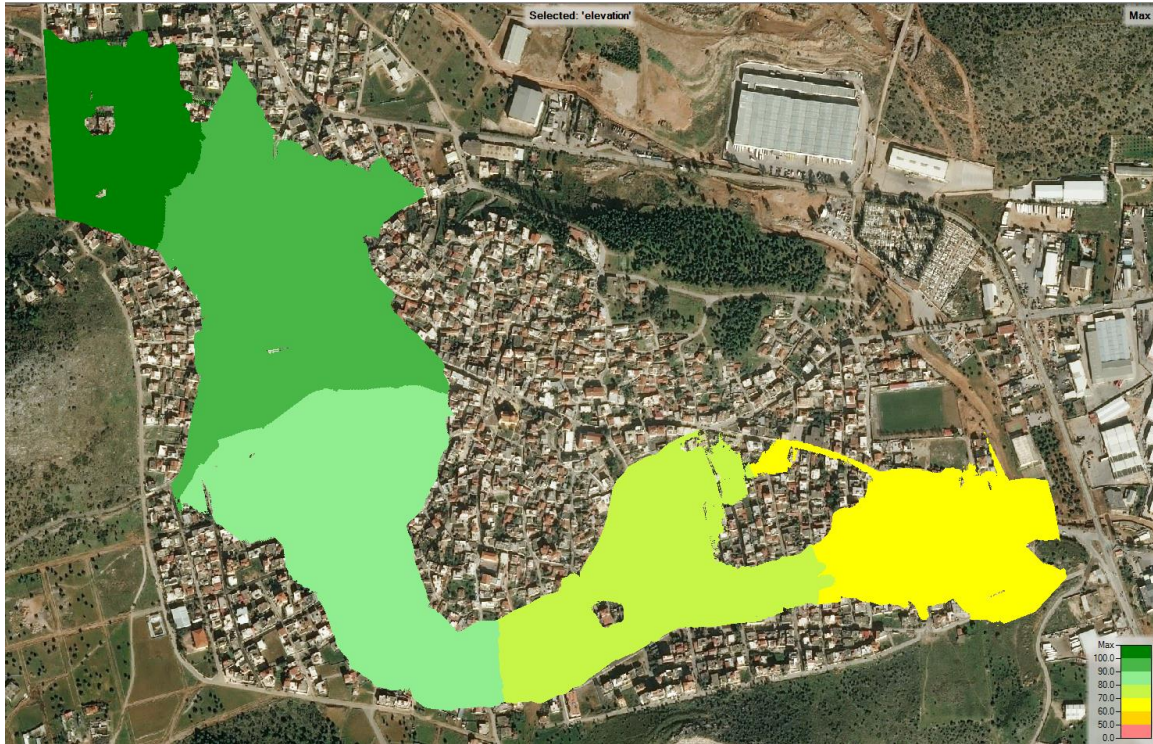


Εικόνα 5.4.5: Χρωματική κατανομή ταχυτήτων ροής [m/s] της διατομής στην οδό Β.Κοροπούλη τη χρονική στιγμή 10:25[h:mm].

Βάσει της μείωσης του όγκου νερού που εισέρχεται για την εκάστοτε χρονική στιγμή στο 2Δ πλέγμα, ήταν αναμενόμενο μια τέτοια μεταβολή στην ταχύτητα και βάθος ροής. Παρατηρείται μια πιο ομαλή μετάβαση από την μικρότερη στη μεγαλύτερη τιμή της ταχύτητας (αύξηση πλάτους των χρωματικών πολυγώνων). Είναι προφανές ότι στα δύο άκρα υπερिशύει ξανά η απόχρωση του σκούρο μπλε και η μέγιστη τιμή της ταχύτητας εμφανίζεται στο κέντρο της διατομής με το πορτοκαλί χρώμα. Ομοίως για τα όρια των πολυγώνων του συντελεστή *Manning*, στα 7.7 m δεν υπάρχει μεταβολή στην ταχύτητα ενώ στα 18.7 m διακρίνεται μια μικρή μείωση στην ταχύτητα, από 1-1.5 m/s στα 0.5 – 1 m/s. Αναλυτικά στην **Εικόνα 5.4.5** το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας του νερού μετά από 3 ώρες έπεσε στα 87.3 m από 88.1 m, όπως μειώθηκε και το βάθος ροής από 2 m στα 1.1 m.

5.5 Στάθμη Επιφάνειας Νερού

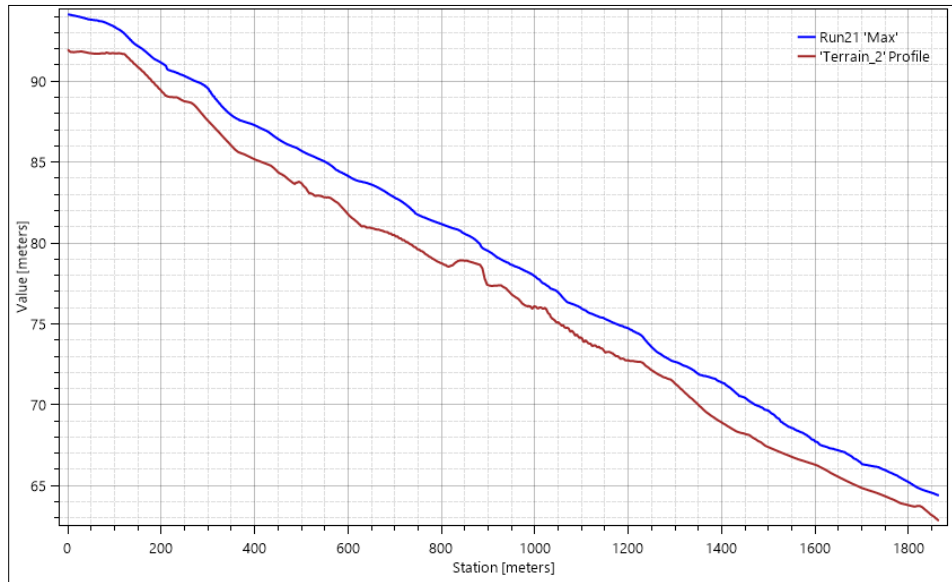
Στους χάρτες επιλέχθηκε η εναλλαγή πράσινου – κίτρινου - κόκκινου χρώματος, με τις μικρότερες τιμές να αποτυπώνονται με ανοικτό κόκκινο, ενδιάμεσα με κίτρινο, και τις μεγαλύτερες με εναλλαγές του πράσινου χρώματος.



Εικόνα 5.5.1: Χρωματική μεταβολή υψομέτρων της επιφάνειας του νερού. ΚΛΙΜΑΚΑ 1:5000

Αναλυτικά, η μέγιστη στάθμη της επιφάνειας του νερού για αυτή την προσομοίωση υπολογίστηκε στα $h=104.5$ m, στην ανάντη περιοχή εισαγωγής υδρογραφήματος, βορειοδυτική πλευρά του μοντέλου όπου και φαίνεται με σκούρο πράσινο χρώμα. Έπειτα από 250 m με κατεύθυνση NNA, η στάθμη πέφτει κάτω από τα $h=100$ m και συνεχίζει να μειώνεται σταδιακά για 415 m μέχρι να φτάσει στο υψόμετρο των 90 μέτρων (ανοικτό πράσινο). Στη συνέχεια, με τον περισσότερο όγκο νερού να συσσωρεύεται προς την οδό Β.Κοροπούλη, το νερό χρειάστηκε να κυλήσει ΝΑ τώρα για 580 m (λαχανί χρώμα) ώστε να πέσει η τιμή της ελεύθερης επιφάνειας νερού στα $h=80$ m. Για να μεταβεί από το υψόμετρο $h=80$ m στα $h=70$ m το νερό ταξίδεψε περίπου 550 m Ανατολικά προς τη κατάντη οριακή διατομή (πρασινοκίτρινο χρώμα). Τέλος, για το τελικό στάδιο, με κατεύθυνση ABA, χρειάστηκαν τώρα 300 m για να φτάσει η στάθμη της επιφάνειας του νερού στα $h=65$ m (κίτρινο χρώμα).

Στην **Εικόνα 5.5.2** παρατηρείται η εδαφική υψομετρική διαμόρφωση κατά μήκος της οδού Αγ.Αικατερίνης – Β. Κοροπούλη, με κόκκινο χρώμα, μαζί με τη μέγιστη στάθμη του νερού, όπου απεικονίζεται με μπλε χρώμα.



Εικόνα 5.5.2: Σχηματική απεικόνιση εδάφους και ελεύθερης επιφάνειας νερού στην οδό Αγ.Αικατερίνης – Β. Κοροπούλη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΙΕΣ

6.1 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας προπτυχιακής διπλωματικής εργασίας επιχειρήθηκε μοντελοποίηση, προσομοίωση, ανάλυση ευαισθησίας καθώς και βαθμονόμηση των παραμέτρων εισόδου στην περιοχή της Μάνδρας στην Δυτική Αττική με το γνωστό υδραυλικό λογισμικό *HEC-RAS* 5.0.7.

Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- Το λογισμικό *HEC-RAS*, έκδοση 5.0.7 του Σώματος Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού.
- Το λογισμικό *QGIS*.
- Το λογισμικό Excel της Microsoft.
- Το λογισμικό Word της Microsoft.

Για τη λεπτομερή προσομοίωση της πλημμύρας στην λεκάνη απορροής στην πόλη της Μάνδρας ήταν απαραίτητη η δημιουργία ενός πολύ πυκνού πολυγωνικού πλέγματος μέσω του εργαλείου *GeoEditor* στο λογισμικό *HEC-RAS* με κελιά (5m x 5m). Το πυκνό αυτό υπολογιστικό πλέγμα απαιτεί, με τη σειρά του, ένα Ψηφιακό Αρχείο Εδάφους (*DTM*) για τη δημιουργία του αρχείου της βαθυμετρίας. Δημιουργήθηκε, επίσης ένα ψηφιακό αρχείο χρήσεις γης (*Layer*) για τον συντελεστή *Manning*, έτσι ώστε να αντιπροσωπεύει όσο το δυνατόν καλύτερα την μορφολογία της περιοχής. Με τις ενέργειες αυτές, η δημιουργία των αρχείων προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση της ροής σε όλη τη 2Δ περιοχή του μοντέλου ειδικά στους δρόμους και στα εμπόδια της ροής.

Τα κύρια συμπεράσματα, τα οποία προέκυψαν από την προσομοίωση της πλημμυρικής ροής στη Μάνδρα είναι:

- Με βάση τη σύγκριση των πραγματικών δεδομένων, διαπιστώσαμε ότι είναι αρκετά δύσκολη μία ακριβής και “καλή” προσομοίωση, ακόμα και με ισχυρά λογισμικά όπως το *HEC-RAS*.
- Ένα υπολογιστικό “ακριβό” μοντέλο όπως το *HEC-RAS*, είναι δύσκολο να βαθμονομηθεί. Γι’ αυτό το λόγο προτείνεται η διαδικασία που ακολουθήσαμε στην παρούσα εργασία, αναλυτικά:

1. Επιλογή παραμέτρων του μοντέλου.
 2. Πραγματοποίηση ανάλυση ευαισθησίας.
 3. Κατηγοριοποίηση των πιο ουσιαστικών παραμέτρων.
 4. Βαθμονόμηση σημαντικότερων παραμέτρων, στην προκειμένη περίπτωση έγινε με *Grid-search*. Δημιουργήθηκαν συνολικά $90 + 27$ τρεξίματα (ανάλυση ευαισθησίας + βαθμονόμηση), επομένως είχαμε ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Αν θέλαμε να βαθμονομήσουμε 5 παράμετροι έναντι των 2 στην εργασία, με κάποια άλλη μέθοδο θα χρειαζόμασταν 5000 τρεξίματα.
- Το σημαντικότερο δεδομένο εισαγωγής του μοντέλου (*Input Data*), βάση της εργασίας, φαίνεται να είναι η εισαγόμενη παροχή. Όπου, για την παράμετρο αυτή, χρησιμοποιήθηκε το υδρογράφημα του πλημμυρικού γεγονότος στις 15/11/2017 με διάστημα εμπιστοσύνης **C.I.=30%**. Η δεύτερη πιο βασική παράμετρος βρέθηκε ο συντελεστής τραχύτητας των δρόμων της πόλης, με τη βέλτιστη τιμή να υπολογίζεται στα **$n_R = 0.05$** [$s/m^{1/3}$]. Από την άλλη, τόσο οι υπόλοιπες διαφορετικές χρήσεις γης του συντελεστή Manning (**n_L, n_H, n_T, n_B, n_O**) όσο και η κλίση του κατάντη ορίου παίζουν μικρότερη ή και αμελητέο ρόλο στην επίδραση του τελικού αποτελέσματος.

6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Παρόλο που το θέμα της έρευνάς μας μπορεί να μοιάζει αρκετά συγκεκριμένο, ωστόσο τα περιθώρια για μελλοντική έρευνα είναι αρκετά και ξεπερνούν τα τυπικά όρια ενός θέματος. Ενδεικτικά παρατίθενται στην συνέχεια ορισμένες προτάσεις, που θα μπορούσαν να αποτελέσουν θέματα μελλοντικής έρευνας:

- Μοντελοποίηση και ανάλυση μεγαλύτερης έκτασης της περιοχής ενδιαφέροντος.
- Σχεδιασμός δικτύου αποχέτευσης όμβριων υδάτων για όλη την περιοχή της Μάνδρας, μαζί με συνδυασμένη μοντελοποίηση $1\Delta/2\Delta$.
- Προσομοίωση της πλημμύρας με διαφορετικές εξισώσεις επίλυσης του υδροδυναμικού μοντέλου.
- Στην υπάρχουσα εργασία να προστεθεί και το ρέμα Σούρες στην προσομοίωση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

7.1 Ελληνική Βιβλιογραφία

Ανανδρανιστάκης Μ., (2017). Η ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΗ, Newsroom, Νοέμβριος 2017.

Βαχαβιώλος Θ., (2011). Μεθοδολογία προσδιορισμού περιοχών ευάλωτων σε πλημμύρες, Διπλωματική εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2011.

Γαλάνης Μ., (2017). ΠΡΩΤΟ ΘΕΜΑ , Μάνδρα : Ερειπωμένη πόλη 10 ημέρες μετά τις φονικές καταστροφές, Νοέμβριος 2017.

Δήμος Μάνδρας, (2011). Απόσπασμα από το πρακτικό της υπ' αριθμό. 18/ 2011 Συνεδρίασης του Δημοτικού Συμβουλίου Μάνδρας- Ειδυλλίας.

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, (2017). Δελτίο Τύπου Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών της 16^{ης} Νοεμβρίου 2017.

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, (2018). Ανάλυση της πλημμύρα της 15/11/2017 στη Δυτική Αττική με αξιοποίηση δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Κέντρο Αριστείας Διαχείρισης Φυσικών Καταστροφών BEYOND. Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης.

Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, (2007). Για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρα, Οδηγία 2007/60, Οκτώβριος 2007.

Μπαριάμης Γ., (2013). Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS και εφαρμογή στη λεκάνη του ρέματος Ραφήνας. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διεπιστημονικό – Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Αθήνα.

Παπανικολάου Δ., Διακάκης Μ., (2011). Μεταβολές στην Ένταση και την Κατανομή των Φυσικών Καταστροφών, Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, Ιούνιος 2011.

Ραπτάκη Ε., (2019). Προσομοίωση πλημμύρας σε αστική λεκάνη απορροής για την εκτίμηση κινδύνου από πλημμύρες ταχείας απόκρισης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διπλωματική Διεπιστημονικό - Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών « Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών πόρων», Αθήνα.

Ρέβη Ε., Λιλιπούλου Μ., Βογιαζτάκη Σ., (2017). Μάνδρα: Το πόρισμα που ρίχνει φως στα αίτια της τραγωδίας, Το Έθνος της Κυριακής, Ιανουάριος 2017.

Σπίρτζης Χ., (2017). 8^ο Περιφερειακό Συνέδριο για την παραγωγική ανασυγκρότηση: Ανάταξη Δυτικής Αττικής, στη θεματική συνεδρία Υποδομές και Πολιτική Προστασία.

Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, (2015). Τμήμα Επιπτώσεων Φυσικών Καταστροφών. Οριοθέτηση περιοχών και χορήγηση στεγαστικής συνδρομής για την αποκατάσταση των ζημιών σε κτίρια από τις πλημμύρες της 6 ης και 7 ης Μαρτίου 2015 σε περιοχές του Δήμου Οιχαλίας της Περιφερειακής Ενότητας Μεσσηνίας της Περιφέρειας Πελοποννήσου, Αθήνα.

7.2 Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Barredo J.I., (2009). European Commission – Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Via E. Fermi 2749, TP-261, Ispra, Italy.

Bellos V, Papageorgaki I., Kourtis I., Vangelis H., Kalogiros I., Tsakiris G., (2020). Reconstruction of a flash flood event using a 2D hydrodynamic model under spatial and temporal variability of storm, Natural Hazards, Springer, February 2020.

Borga M., Anagnostou N.E., Blöschl G., Creutin J., (2010). Flash floods: Observations and analysis of hydro-meteorological controls, Journal of Hydrology, Volume 394, Issues (1-2).

Changnon S.A., (1999). The historical struggle with floods in the Mississippi River Basin: Impacts of recent floods and lessons for future flood management and policy. Int. Water resources assoc., Southern Illinois University, Water International, Volume 23, Issue 4, pp 263–271.

Chow V.T., (1959). Manning's n for Channels, FishXing, Version 3.0 Beta, 2006.

Christelis V. and Hughes G. A., (2018). Metamodel-assisted analysis of an integrated model composition: an example using linked surface water – groundwater models. Environmental Modeling & Software, British Geological Survey, 107. pp 298-306, Keyworth, Nottingham, UK.

Coon W.F., (1995). Estimates of Roughness Coefficients for Selected Natural Stream Channels with Vegetated Banks in New York, US Geological Survey, USGC water supply paper 2441, open file report 93-161.

Del Giudice G. and Padulano R., (2016). Sensitivity Analysis and Calibration of a Rainfall-Runoff Model with the Combined Use of EPA-SWMM and Genetic Algorithm, Università di Napoli Federico II, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, Acta Geophysica, Naples, Italy.

Diakakis M., Mavroulis S., Deligiannakis G., (2012). Floods in Greece, a statistical and spatial approach, Natural Hazards 62, Springer, pp 485-500.

Dingman S. L., (1994). Physical Hydrology. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.

Ritchie H. and Roser M., (2019), EM-DAT, Natural Disasters, Our World in Data.

Gardner H.R., Rose A.K., Smith P.E., Brenkert L.A., Bartell M.S., (1991). Parameter sensitivities, Monte Carlo filtering, and model forecasting under uncertainty, *Journal of Forecasting*, Volume , Issue 1-2, pp 117-133, John Wiley & Sons, Ltd.

Gaume E., Borga M., Llassat M. C., Maouche S., Lang M. and Diakakis M., (2017). Mediterranean extreme floods and flash floods. The Mediterranean Region under Climate Change. A Scientific Update, IRD Editions, pp.133-144, 2016, Coll. Syntheses, 978-2-7099-2219-7. hal-01465740v2.

Golian S., Saghafian B., Elmi M. and Maknoon R., (2011). Probabilistic rainfall thresholds for flood forecasting: evaluating different methodologies for modeling rainfall spatial correlation, Volume 25, Issue 13, pp 2046-2055, John Wiley & Sons, Ltd.

HEC-RAS, (2016). 2D Modeling & User's Manual, Version 5.0, US Army Corps of Engineering.

HEC-RAS, (2016). Hydraulic Reference Manual, Version 5.0, CPD-69, US Army Corps of Engineering.

HEC-RAS, (2016). Reference Manual, Version 5.0, US Army Corps of Engineering.

HEC-RAS, (2020) . RAS-Mapper User's Manual, Version 6.0, US Army Corps of Engineering.

HEC-RAS, (2020). BSTEM Technical Reference & User's Manual, CPD-68B, US Army Corps of Engineering.

Jonkman S.N. and Penning-Rowsell E., (2008). Human instability in flood flows. *Journal of the American Water Resources Association* 44 (4).

Kourgialas N. P., (2012). *Journal of Hydrology*, Hydrologic and geochemical modeling of a karstic Mediterranean watershed, Volume 477, pp 129-18.

Kundzewicz W.Z., Ulbrich U., Brücher T., Graczyk D., Krüger A., Leckebusch C.G., Menzel L., Pińskwar I., Radziejewski M. and Szwed M., (2005). Summer Floods in Central Europe- Climate Change Track?, Natural Hazards, Springer, Volume 36, pp 165-189.

Llasat C.M., Llasat-Botija M., Prat M.A., Porcu F., Price C., Mugnai A., Lagouvardos K., Kotroni V., Katsanos D., Michaelides S., Yair Y., Savvidou K. and Nicolaidis K.,(2010). High-impact floods and flash floods in Mediterranean countries: the Flash preliminary database, Advances in Geosciences, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union. Volume 23, pp 47-55.

Morris M.D., (1991). Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments Technometrics, American Statistical Association ,Vol. 33, No. 2., pp. 161-174.

Petersen S.M., (2001). Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics University of Arizona, Springer, pp 11-13, Tucson, USA.

Pianosi F., Sarrazin F., Wagener T., (2015). A Mat lab toolbox for Global Sensitivity Analysis. Environmental Modeling & Software, Volume 70, pp 80-85, August 2015.

Pilon J. P., (2004). Guidelines for Reducing Flood Losses, United States of America, National Oceanic and Atmospheric Administration, (USA NOAA) and the Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC).

Saltelli A., Ratto M., Andres T., Campolongo F., (2004). Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models, John Wiley & Sons, Ltd.

Saltelli A., Ratto M., Andres T., Campolongo F., Cariboni J., Gatelli D., Saisana M. and Tarantola S. (2008). Global Sensitivity Analysis. The Primer, John Wiley & Sons, Ltd.

Scavia D., Powers F.W., Canale P.R., Moody L. J.,(1981). Comparison of first-order error analysis and Monte Carlo Simulation in time-dependent lake eutrophication models, Volume 1, Issue, pp 1051-1059, published in 1981 by the American Geophysical Union-10, August 1981.

Teo F.Y., Xia J., Falconer R. and Lin B., (2012). Experimental studies on the interaction between vehicles and floodplain flows. *International J. River Basin Management* iFirst 2012: 1-12.

Galloway E.G., Reilly A., Ryoo S., Riley A., Haslam M., Brody S., Highfeld W., Gunn J., Rainey J., Parker S., (2018). *The Growing Threat of Urban Flooding: A National Challenge*, University of Maryland and Texas A&M University.

Van de Kamer, J.P.G., (1983). Monte Carlo simulation and first order error analysis: two possible methods to cope with uncertainties in water quality modeling. IIASA, WP 83-89.

Vinet F., El Mehdi S. M., Douvinet J., Fehri N., Nasrallah W., Wahiba Menad et Samira Mellas, (2012). *The Mediterranean Region Under Climate Change, Urbanization and land use as a driver of flood risk*, Sub-chapter 3.4.1, pp 563-575.

WMO-No.1072 World Meteorological Organization, (2011). *Manual on Flood Forecasting and Warning*, Edition 2011, CH-1211 Geneva 2, Switzerland.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 5-α: Συντεταγμένες των 44 σημείων στο ΕΓΣΑ'87, μετρημένα και προσομοιωμένα βάθη ροής στην περιοχή της Μάνδρας.

Σημείο	Συντεταγμένες στο ΕΓΣΑ'87		Μετρημένα βάθη ροής (m)	Σενάριο 21 βάθη ροής (m)	Σημείο	Συντεταγμένες στο ΕΓΣΑ'87		Μετρημένα βάθη ροής (m)	Σενάριο 21 βάθη ροής (m)
	x	y				x	y		
1	455668.26	4214030.3	3	0.97	23	456555.17	4213651.4	1.19	1.22
2	455714.03	4213859.4	1.41	1.87	24	456597.32	4213639.6	1.87	1.26
3	455618.13	4214090	1.91	2.01	25	456662.01	4213690	1.06	1.13
4	455648.75	4214045.8	2.6	1.56	26	456690.62	4213659.4	1.15	0.98
5	455715.72	4213941.2	2	1.52	27	455950.36	4213418.9	2	1.67
6	455714.76	4213840.8	2.4	1.81	28	455722.53	4213734.9	1.7	1.69
7	455708.89	4213757.7	1.9	1.94	29	455761.57	4213956.8	1.3	-
8	455718.15	4213696.7	2.6	1.75	30	455764.46	4213970.1	0.81	-
9	455711.43	4213686.7	2.4	1.61	31	455770.26	4213945.5	1.1	-
10	455693.37	4213585.9	3.3	1.92	32	455783.06	4213940.5	1.16	-
11	455683.15	4213546.1	2.44	2.61	33	455811.71	4213918.2	1.01	-
12	455694.27	4213522	2	2.43	34	456228.1	4213834.4	0.28	-
13	455724.76	4213510.7	2.8	2.05	35	456335.98	4213774.6	0.61	0.06
14	455815.02	4213431.7	2.43	2.28	36	456306.82	4213760.8	1.21	0.06
15	455893.3	4213392.1	1.17	1.76	37	456333.71	4213759.4	1.01	0.01
16	455950.55	4213396.1	1.28	1.61	38	456346.24	4213821.6	0.62	-
17	456148.23	4213517.8	1.56	1.97	39	456344.89	4213802.9	0.54	0.04
18	456149.93	4213543.6	0.88	1.23	40	456422.41	4213797.8	0.46	-
19	456244.99	4213542.8	1.55	1.30	41	456529.02	4213792.9	0.54	-
20	456349.96	4213582.1	1.19	2.04	42	456528.49	4213751.5	0.91	0.24
21	456405.95	4213583	1.68	2.37	43	456557.32	4213704	0.78	0.56
22	456498.32	4213605	2.47	1.63	44	456652.54	4213731.8	0.39	0.06

Πίνακας 5-γ: Προβολή των 90 συνδυασμών και παραμέτρων του μοντέλου για την ανάλυση ευαισθησίας.

α/α	Συντελεστής Manning n [s/m ^{1/3}]			Διάστημα Εμπιστοσύνης Υδρογραφήματος <i>Confidence Interval</i>	Κλίση γραμμής Ενέργειας <i>Energy slope</i>
	Προεπιλογή	Χαμηλή τραχύτητα	Υψηλή τραχύτητα		
Run	<i>Default</i>	<i>Low_roughness</i>	<i>High_roughness</i>		
1	0.05	25	40	0.36667	0.016667
2	0.03	25	40	0.36667	0.016667
3	0.03	18.333	40	0.36667	0.016667
4	0.03	18.333	40	0.9	0.016667
5	0.03	18.333	53.333	0.9	0.016667
6	0.03	18.333	53.333	0.9	0.03
7	0.03	18.333	46.667	0.9	0.01
8	0.03	25	46.667	0.9	0.01

9	0.03	25	46.667	0.36667	0.01
10	0.03	25	46.667	0.36667	0.0233
11	0.03	25	60	0.36667	0.0233
12	0.05	25	60	0.36667	0.0233
13	0.03	15	60	0.36667	0.0233
14	0.03	21.667	60	0.36667	0.0233
15	0.05	21.667	60	0.36667	0.0233
16	0.05	21.667	46.667	0.36667	0.0233
17	0.05	21.667	46.667	0.9	0.0233
18	0.05	21.667	46.667	0.9	0.01
19	0.06	21.667	46.667	0.1	0.0233
20	0.06	15	46.667	0.1	0.0233
21	0.06	15	60	0.1	0.0233
22	0.06	15	60	0.63333	0.0233
23	0.04	15	60	0.63333	0.0233
24	0.04	15	60	0.63333	0.01
25	0.06	18.333	40	0.9	0.0233
26	0.06	25	40	0.9	0.0233
27	0.06	25	53.333	0.9	0.0233
28	0.04	25	53.333	0.9	0.0233
29	0.04	25	53.333	0.9	0.01
30	0.04	25	53.333	0.36667	0.01
31	0.04	21.667	46.667	0.1	0.016667
32	0.04	15	46.667	0.1	0.016667
33	0.06	15	46.667	0.1	0.016667
34	0.06	15	60	0.1	0.016667
35	0.06	15	60	0.63333	0.016667
36	0.06	15	60	0.63333	0.03
37	0.04	21.667	53.333	0.9	0.0233
38	0.04	15	53.333	0.9	0.0233
39	0.06	15	53.333	0.9	0.0233
40	0.06	15	40	0.9	0.0233
41	0.06	15	40	0.36667	0.0233
42	0.06	15	40	0.36667	0.01
43	0.06	21.667	60	0.9	0.01
44	0.06	21.667	46.667	0.9	0.01
45	0.04	21.667	46.667	0.9	0.01
46	0.04	21.667	46.667	0.36667	0.01
47	0.04	21.667	46.667	0.36667	0.0233
48	0.04	15	46.667	0.36667	0.0233
49	0.03	15	53.333	0.63333	0.03
50	0.05	15	53.333	0.63333	0.03
51	0.05	15	53.333	0.63333	0.016667
52	0.05	15	53.333	0.1	0.016667
53	0.05	15	40	0.1	0.016667
54	0.05	21.667	40	0.1	0.016667

55	0.03	15	40	0.63333	0.0233
56	0.03	21.667	40	0.63333	0.0233
57	0.05	21.667	40	0.63333	0.0233
58	0.05	21.667	40	0.63333	0.01
59	0.05	21.667	53.333	0.63333	0.01
60	0.05	21.667	53.333	0.1	0.01
61	0.05	21.667	53.333	0.1	0.03
62	0.05	21.667	53.333	0.1	0.016667
63	0.03	21.667	53.333	0.1	0.016667
64	0.03	21.667	53.333	0.63333	0.016667
65	0.03	15	53.333	0.63333	0.016667
66	0.03	15	40	0.63333	0.016667
67	0.04	25	53.333	0.63333	0.03
68	0.04	25	53.333	0.1	0.03
69	0.04	18.333	53.333	0.1	0.03
70	0.06	18.333	53.333	0.1	0.03
71	0.06	18.333	53.333	0.1	0.016667
72	0.06	18.333	40	0.1	0.016667
73	0.06	25	40	0.63333	0.01
74	0.04	25	40	0.63333	0.01
75	0.04	18.333	40	0.63333	0.01
76	0.04	18.333	53.333	0.63333	0.01
77	0.04	18.333	53.333	0.63333	0.0233
78	0.04	18.333	53.333	0.1	0.0233
79	0.04	18.333	46.667	0.9	0.03
80	0.06	18.333	46.667	0.9	0.03
81	0.06	18.333	46.667	0.36667	0.03
82	0.06	25	46.667	0.36667	0.03
83	0.06	25	60	0.36667	0.03
84	0.06	25	60	0.36667	0.016667
85	0.06	21.667	53.333	0.9	0.023333
86	0.06	21.667	40	0.9	0.023333
87	0.06	21.667	40	0.36667	0.023333
88	0.06	21.667	40	0.36667	0.01
89	0.06	15	40	0.36667	0.01
90	0.04	15	40	0.36667	0.01

Πίνακας 5-δ: Προβολή των 27 συνδυασμών του μοντέλου για την βαθμονόμηση (calibration).

<i>a/a</i>	<i>Συντελεστής Manning n [s/m^{1/3}]</i>	<i>Διάστημα Εμπιστοσύνης Υδρογραφήματος Confidence Interval</i>
<i>Σενάριο Run</i>	<i>Προεπιλογή Default</i>	
1	0.03	0.1
2	0.03	0.2
3	0.03	0.3
4	0.03	0.4
5	0.03	0.5
6	0.03	0.6
7	0.03	0.7
8	0.03	0.8
9	0.03	0.9
10	0.4	0.1
11	0.4	0.2
12	0.4	0.3
13	0.4	0.4
14	0.4	0.5
15	0.4	0.6
16	0.4	0.7
17	0.4	0.8
18	0.4	0.9
19	0.5	0.1
20	0.5	0.2
21	0.5	0.3
22	0.5	0.4
23	0.5	0.5
24	0.5	0.6
25	0.5	0.7
26	0.5	0.8
27	0.5	0.9