



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ, ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Προσομοίωση πλημμυρικού γεγονότος με χρήση δισδιάστατης υδροδυναμικής
μοντελοποίησης σε επίπεδο λεκάνης απορροής: η περίπτωση της Μάνδρας Αττικής**

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΦΩΤΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Α. ΤΣΙΧΡΙΝΤΖΗΣ

Αθήνα 2022

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται ο υπολογισμός πλημμύρας μέσω του υδραυλικού λογισμικού HEC-RAS, και συγκεκριμένα με την μέθοδο rain-on-grid, χρησιμοποιώντας τις απλοποιημένες εξισώσεις κίνησης (diffusion wave) αλλά και τις πλήρεις (Saint-Venant).

Η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη απορροής της Μάνδρας, η οποία υπάγεται στην λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου, και της οποίας η εξαγωγή έγινε από την προέκταση του λογισμικού HEC-HMS, το HEC-GeoHMS σε περιβάλλον GIS, συγκεκριμένα στο ArcGIS. Η πλημμύρα που προσομοιώθηκε, είναι εκείνη της 15ης Νοεμβρίου 2017, που έλαβε χώρα στην περιοχή της Μάνδρας και είχε καταστρεπτικά αποτελέσματα και θανάτους.

Αρχικά, όπως προαναφέρθηκε, εξήχθη η λεκάνη απορροής προς μελέτη, η οποία εισήχθη στο λογισμικό HEC-RAS. Ύστερα, έγινε η εισαγωγή των αναγκαίων αρχείων στο RAS-Mapper, που είναι ενσωματωμένο περιβάλλον GIS, εντός του λογισμικού HEC-RAS. Στην συνέχεια έγιναν τα ακόλουθα:

- επιλέχθηκε ψηφιακό μοντέλο εδάφους ανάλυσης 5x5 μέτρων σαν υπόβαθρο.
- έγινε εισαγωγή των χρήσεων γης και του λιθολογικού χάρτη
- δημιουργήθηκαν οι γεωμετρίες
- έγινε επεξεργασία των δεδομένων βροχής
- έγινε εισαγωγή των δεδομένων βροχής στο HEC-RAS
- έγινε εξαγωγή των αποτελεσμάτων
- έγινε σύγκριση αποτελεσμάτων με μετρήσεις και δορυφορική εικόνα
- εξήχθησαν συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν βγήκε το συμπέρασμα ότι η μέθοδος rain-on-grid σε αστικό περιβάλλον είναι ικανοποιητική σε αποτελέσματα, αρκεί να υπάρχουν δεδομένα υψηλής ανάλυσης ή αναλυτική μοντελοποίησης με βαθμονομημένες τιμές συντελεστή Manning η στην περίπτωση που δεν υπάρχει διαθέσιμο DSM με την υψομετρική πληροφορία των κτιρίων.

Abstract

In the present diploma thesis, the calculation of a flooded area is presented through the usage of the HEC-RAS hydraulic software, specifically with the rain-on-grid method. The equations that have been used are both the diffusion wave and the Saint-Venant, and there has been a result comparison between them.

The area of interest is the basin of city Mandra. For the preprocess modeling and the data analysis, the GIS software ArcMap has been used, and for the extraction of the basin of Mandra, the hydrologic software HEC-HMS. The simulation time started at the start of the real flood event , but ended 6 hours later after the end of the event , so that the results will be more realistic. The rainfall data were provided by the XPOL Radar of the National Observatory of Athens. The simulations took place for two rainfall data scenarios: the first one used data from the XPOL; the second one, used the Alternate Blocks Method to derive hyetographs for 100, 250, 500 and 1000 years recurrence periods with time of duration 12 hours but also to derive hyetographs for 150 and 5 years recurrence periods with time of duration 28 hours, which is the duration of the real rainfall data.

The flood event chosen to be simulated is the one of 15 November 2017. During this flash flood event, the basin of the city of Mandra sustained an enormous amount of rainfall of significant intensity, which could not be absorbed by the soil, due to the fact that the previous days of the day of the event were very rainy and the soil was already saturated. This sequence of events ended in disastrous results, including human losses.

After running several simulation scenarios, the final results were satisfying and there has been a thorough comparison between the results of the different scenarios. The method of rain-on-grid is giving good results in urban areas , under the condition of high resolution DEM and the existence of DSM, so that the results can be more reliable. The simulations results were also compared with a high resolution satellite image (31 cm) , and the overlap rate between the satellite image and the simulated event was satisfying. Even though, the only result of the Alternate Blocks Method that approach the best the hydrograph of the scenario with the real rainfall data and the complex geometry is the one with the 5

years recurrence periods . Finally, it is very important for the roughness coefficient Manning n values to be calibrated in order to extract good and reliable results.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
1.1 Πλημμύρες.....	17
1.1.1 Αιφνίδιες πλημμύρες	19
1.1.2 Αιφνίδιες Πλημμύρες σε αστικές περιοχές.....	20
1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	20
1.2.1 Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΥΠΟΒΑΘΡΟΥ	23
2.1 Γενική περιγραφή του Λογισμικού HEC-RAS.....	23
2.1.1 Δυνατότητες/Πλεονεκτήματα Μοντελοποίησης Δισδιάστατης Ροής του HEC-RAS.....	23
2.1.2 RAS-Mapper.....	24
2.1.3 Εξισώσεις υδρολογικού μοντέλου HEC-RAS	24
2.1.4 Χρονικό βήμα (Time Step)	25
2.1.5 Μέθοδος κατανεμημένης βροχόπτωσης (Rain on Grid).....	25
2.2 Υδρολογικό μοντέλο	27
2.2.1 Εκτίμηση περισσεύματος βροχής με τη μέθοδο SCS	27
2.2.2 Μέθοδος εναλλασόμενων μπλοκ (alternating block method)	29
2.3 Υδραυλικό μοντέλο	29
2.3.1 Εξισώσεις Saint Venant	29
2.3.2 Συντελεστή τραχύτητας Manning n	31
2.4 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	31
2.5 Λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	37
3.1 Γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση της λεκάνης.....	37
3.2 Υπολεκάνη μελέτης	40
3.2.1 Πλημμύρα Μάνδρας 15/11/2017	40
3.2.2 Ιστορικά Στοιχεία Πλημμυρών της Περιοχής	43
3.2.3. Ανάλυση περιοχής μελέτης.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	51
4.1 Γενικά.....	51
4.1.1 Εδαφολογικά χαρακτηριστικά της Λεκάνης.....	51

4.1.2 Χρήσεις γης στη Λεκάνη	51
4.2 Βήματα Μοντελοποίησης	52
4.3 HEC-GeoHMS	53
4.3.1 Προεπεξεργασία Εδάφους	53
4.4 HEC-RAS	54
4.4.1 Εισαγωγή και Δημιουργία Απαραίτητων Παραμέτρων	54
4.4.1.1 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους	56
4.4.1.2 Χρήσεις γης	58
4.4.1.3 Εδάφη	63
4.4.1.4 Αριθμοί καμπύλης (Curve Number)	64
4.4.1.5 Διήθηση	66
4.4.1.6 Αρχεία γεωμετρίας	70
4.4.1.7 Περίμετρος μοντέλου (Perimeter)	73
4.4.1.8 Δισδιάστατο υπολογιστικό πλέγμα (2D mesh area)	73
4.4.1.9 Breaklines και Refinement Regions	74
4.4.1.10 Κατάντη οριακή συνθήκη (Boundary Condition Line)	75
4.4.1.11 Συντελεστής τραχύτητας Manning n	77
4.4.1.12 Αδιαπερατότητα (imperviousness)	79
4.4.1.13 Ανάλυση μη μόνιμης ροής (Unsteady flow analysis)	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	89
5.1 Εισαγωγή	89
5.2 Όμβριες Καμπύλες Περιόδων Επαναφοράς T=50, 100, 500, 100 έτη	89
5.3 Μέγιστα Βάθη Ροής	104
5.4 Μέγιστες Ταχύτητες Ροής	117
5.5 Παροχή αιχμής	123
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	131
6.1 Συμπεράσματα	131
6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	133
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	135
7.1 Ελληνική Βιβλιογραφία	135
7.2 Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία	137

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους λεκάνης απορροής Σαρανταπόταμου	38
Εικόνα 2 Υπολεκάνες και υδρογραφικό δίκτυο λεκάνης Σαρανταπόταμου.....	39
Εικόνα 3 Χρονοσειρά του στιγμιαίου ρυθμού βροχόπτωσης (Καλογηρος et al. , 2017)	42
Εικόνα 4 Χωρική απεικόνιση της συνολικής βροχόπτωσης στο αναφερόμενο χρονικό διάστημα (α) αναγωγή σε ανάλυση 10 X 10 km των δεδομένων του ραντάρ του ΕΑΑ και (β) το δορυφορικό προϊόν GPM IMERG (Κοντοές et al. , 2018).....	42
Εικόνα 5 Λεκάνη απορροής Μάνδρας	44
Εικόνα 6 Λεκάνη απορροής Μάνδρας	45
Εικόνα 7 Σειρά ιστορικών αεροφωτογραφιών της βιομηχανικής περιοχή βόρεια της αστικής περιοχής της Μάνδρας γύρω από το σημερινό εργοστάσιο του δήμου Μάνδρας (Κοντοές et al., 2018)	47
Εικόνα 8 Διαχρονική επικαλυπτώμενη φυσική πορεία του ρέματος Αγ. Αικατερίνης (Κοντοές et al., 2018)	48
Εικόνα 9 Αλλαγές Ψηφιακού μοντέλου εδάφους.....	57
Εικόνα 10 Χρήσεις γης λεκάνης απορροής Μάνδρας.....	59
Εικόνα 11 Χρήσεις γης πολυγώνων ταξινόμησης εντός της πόλης της Μάνδρας.....	60
Εικόνα 12 Διαφοροποίηση αστικών χρήσεων γης Μάνδρας και Μαγούλας (Μάνδρα αριστερά / Μαγούλα δεξιά)	62
Εικόνα 13 Τύποι εδαφών λεκάνης απορροής Μάνδρας	63
Εικόνα 14 Χάρτης διήθησης λεκάνης απορροής Μάνδρας	68
Εικόνα 15 Γεωμετρίες και συσχετιζόμενα υπόβαθρα.....	71
Εικόνα 16 Σύγκριση απλής και σύνθετης γεωμετρίας	72
Εικόνα 17 Περίμετρος περιοχής μελέτης.....	73
Εικόνα 18 Ενδεικτική εικόνα ανάλυσης κελιών εντός και εκτός της πόλης της Μάνδρας.....	74
Εικόνα 19 Τύποι breakline που χρησιμοποιήθηκαν κατά την μοντελοποίηση	75
Εικόνα 20 Με μπλέ χρώμα απεικονίζεται η γραμμή κλίσης ως κατάντη οριακή συνθήκη.....	76
Εικόνα 21 Χάρτης αδιαπερατότητας λεκάνης απορροής Μάνδρας.....	79
Εικόνα 22 Screenshot με χρονοσειρά πλασματική βροχόπτωσης	81
Εικόνα 23 Screenshot για την τιμή κλίσης στην κατάντη οριακή συνθήκη	82
Εικόνα 24 Μοντέλο μετατροπής των CSV αρχείων σε shapfile	83
Εικόνα 25 Μοντέλο clip των δεδομένων στην περιοχή μελέτης	84
Εικόνα 26 Σημειακές τιμές βροχόπτωσης στην λεκάνη απορροής	84
Εικόνα 27 Μοντέλο μετατροπής shapfile σε raster αρχεία	85
Εικόνα 28 Μοντέλο μετατροπής αρνητικών τιμών.....	85
Εικόνα 29 Screenshot για την έκφραση μετατροπής των αρνητικών τιμών	86
Εικόνα 30 Μοντέλο υπολογισμού στατιστικών στοιχείων των raster αρχείων	86
Εικόνα 31 Screenshot για τις ιδιότητες raster αρχείου με τις τιμές των στατιστικών του	87
Εικόνα 32 Υετογράφημα εισόδου στο HEC-RAS	87
Εικόνα 33 Ομβρία καμπύλη περιόδου επαναφοράς T=50 έτη.....	102
Εικόνα 34 Ομβρία καμπύλη περιόδου επαναφοράς T=100 έτη.....	102
Εικόνα 35 Ομβρία καμπύλη περιόδου επαναφοράς T=500 έτη.....	103
Εικόνα 36 Ομβρία καμπύλη περιόδου επαναφοράς T=1000 έτη.....	103
Εικόνα 37 Μέγιστα βάθη ροής για (α) Απλή γεωμετρία , (β) Σύνθετη γεωμετρία , (γ) T=50 έτη , (δ) T=100 έτη	105
Εικόνα 38 Μέγιστα βάθη ροής για (ε) T=500 έτη , (ζ) T=1000 έτη	106

Εικόνα 39 Οδός Κοροπούλη	107
Εικόνα 40 Σημεία μετρήσεως των ιχνών της πλημμύρας λίγες μέρες μετά το γεγονός (Ραπτάκη,2020).....	108
Εικόνα 41 Σύγκριση βαθών ροής Σύνθετης γεωμετρίας με μετρήσεις της Ραπτάκη (2020).....	110
Εικόνα 42 Σύγκριση βαθών ροής απλής γεωμετρίας με μετρήσεις της Ραπτάκη (2020).....	110
Εικόνα 43 Σύγκριση βαθών ροής T50 με μετρήσεις της Ραπτάκη (2020).....	111
Εικόνα 44 Σύγκριση βαθών ροής T100 με μετρήσεις Ραπτάκη (2020).....	111
Εικόνα 45 Σύγκριση βαθών ροής T500 με μετρήσεις Ραπτάκη (2020).....	112
Εικόνα 46 Σύγκριση βαθών ροής T1000 με μετρήσεις Ραπτάκη (2020).....	112
Εικόνα 47 Σύγκριση βαθών ροής σύνθετης γεωμετρίας με απλή γεωμετρία	113
Εικόνα 48 Σύγκριση βαθών ροής όλων των σεναρίων	114
Εικόνα 49 Χαρτογράφηση πλημμύρας της Μάνδρας στις 15 Νοεμβρίου 2017 με φωτοερμηνεία δορυφορικής εικόνας WorldView-4 υψηλής ανάλυσης 0.31 μέτρων , ημερομηνίας λήψης 21/11/2017 (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών , 2018).....	115
Εικόνα 50 Έκταση προσομοιωμένης πλημμύρας Μάνδρας 15 Νοεμβρίου 2017 με χρήση του λογισμικού HEC-RAS και μεθόδου rain-on-grid με τα δεδομένα του Radar XPOL του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών	116
Εικόνα 51 Ταχύτητες ροής για (α) T=50 έτη , (β) T=100 έτη , (γ) T=500 έτη , (δ) T=1000 έτη	117
Εικόνα 52 Ταχύτητες ροής για (ε) σύνθετη γεωμετρία , (ζ) απλή γεωμετρία	118
Εικόνα 53 Διάγραμμα ταχύτητας ροής στην είσοδο της οδού Κοροπούλη στην πόλη της Μάνδρας (επιλέχθηκε η είσοδος στην πόλη λόγω της απότομης αλλαγής των τιμών Manning εντός της πόλης και των διαστάσεων των κελιών από 25 μέτρα σε 5 μέτρα) για T=50 έτη.....	119
Εικόνα 54 Διάγραμμα ταχύτητας ροής στην είσοδο της οδού Κοροπούλη στην πόλη της Μάνδρας (επιλέχθηκε η είσοδος στην πόλη λόγω της απότομης αλλαγής των τιμών Manning εντός της πόλης και των διαστάσεων των κελιών από 25 μέτρα σε 5 μέτρα) για T=100 έτη.....	119
Εικόνα 55 Διάγραμμα ταχύτητας ροής στην είσοδο της οδού Κοροπούλη στην πόλη της Μάνδρας (επιλέχθηκε η είσοδος στην πόλη λόγω της απότομης αλλαγής των τιμών Manning εντός της πόλης και των διαστάσεων των κελιών από 25 μέτρα σε 5 μέτρα) για T=500 έτη.....	120
Εικόνα 56 Διάγραμμα ταχύτητας ροής στην είσοδο της οδού Κοροπούλη στην πόλη της Μάνδρας (επιλέχθηκε η είσοδος στην πόλη λόγω της απότομης αλλαγής των τιμών Manning εντός της πόλης και των διαστάσεων των κελιών από 25 μέτρα σε 5 μέτρα) για T=1000 έτη.....	120
Εικόνα 57 Διάγραμμα ταχύτητας ροής στην είσοδο της οδού Κοροπούλη στην πόλη της Μάνδρας (επιλέχθηκε η είσοδος στην πόλη λόγω της απότομης αλλαγής των τιμών Manning εντός της πόλης και των διαστάσεων των κελιών από 25 μέτρα σε 5 μέτρα) για την σύνθετη γεωμετρία.....	121
Εικόνα 58 Διάγραμμα ταχύτητας ροής στην είσοδο της οδού Κοροπούλη στην πόλη της Μάνδρας (επιλέχθηκε η είσοδος στην πόλη λόγω της απότομης αλλαγής των τιμών Manning εντός της πόλης και των διαστάσεων των κελιών από 25 μέτρα σε 5 μέτρα) για την απλή γεωμετρία	121
Εικόνα 59 Μέγιστες ταχύτητες ροής διπλωματικής του Σπυρίδων Χανδρινού (Χανδρινός ,2021)	123
Εικόνα 60 Παροχή αιχμής στην έξοδο της υπολογιστικής περιοχής για T=50 έτη και d=12 ώρες.....	124
Εικόνα 61 Παροχή αιχμής στην έξοδο της υπολογιστικής περιοχής για T=100 έτη και d=12 ώρες.....	124
Εικόνα 62 Παροχή αιχμής στην έξοδο της υπολογιστικής περιοχής για T=500 έτη και d=12 ώρες.....	125
Εικόνα 63 Παροχή αιχμής στην έξοδο της υπολογιστικής περιοχής για T=1000 έτη και d=12 ώρες	125
Εικόνα 64 Παροχή αιχμής στην έξοδο της υπολογιστικής περιοχής για την σύνθετη γεωμετρία.....	126
Εικόνα 65 Παροχή αιχμής στην έξοδο της υπολογιστικής περιοχής για την απλή γεωμετρία	126
Εικόνα 66 Σύγκριση υδρογραφημάτων μεταξύ των σεναρίων (α) σύνθετης γεωμετρίας με πραγματικά δεδομένα και (β) όμβριας κατασκευασμένη με την μέθοδο εναλασσόμενων μπλοκ για περίοδο επαναφοράς T=150 έτη και d=28 ώρες.....	129

Εικόνα 67 Σύγκριση υδρογραφημάτων μεταξύ των σεναρίων (α) σύνθετης γεωμετρίας με πραγματικά δεδομένα και (β) όμβριας κατασκευασμένης με την μέθοδο εναλασσόμενων μπλοκ για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη και $d=12$ ώρες.....	129
Εικόνα 68 Σύγκριση υδρογραφημάτων μεταξύ των σεναρίων (α) σύνθετης γεωμετρίας με πραγματικά δεδομένα και (β) όμβριας κατασκευασμένης με την μέθοδο εναλασσόμενων μπλοκ για περίοδο επαναφοράς $T=5$ έτη και $d=28$ ώρες.....	130

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Κατηγοριοποίηση αρχικής υγρασίας	28
Πίνακας 2 Πίνακες Υψομέτρου και κλίσης εδάφους(ΥΠΕΚΑ / Σχέδιο διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας)	49
Πίνακας 3 Χρήσεις γης ευρύτερης περιοχής Μάνδρας (ΟΠΕΚΕΠΕ 2010)	52
Πίνακας 4 Ταξινόμηση τιμών συντελεστή τραχύτητας Manning n για χρήσεις γης	78
Πίνακας 5 Συντελεστής Τραχύτητας Manning's n πολυγώνων ταξινόμησης	78
Πίνακας 6 Τιμές αδιαπερατότητας για τις χρήσεις γης στην λεκάνη απορροής της Μάνδρας	80
Πίνακας 7 (Ομβρια καμπύλη $T=50$).....	89
Πίνακας 8 (Ομβρια καμπύλη $T=100$).....	92
Πίνακας 9 (Ομβρια καμπύλη $T=500$).....	95
Πίνακας 10 (Ομβρια καμπύλη $T=1000$).....	98
Πίνακας 11 Παροχές αιχμής στην έξοδο της υπολογιστικής περιοχής , δηλ. της λεκάνης απορροής της Μάνδρας, για τα 6 σενάρια προσομοίωσης	127

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή μου κ. Βασίλειο Τσιχριντζή για την ευκαιρία που μου δώθηκε και την βοήθεια που μου παρείχε για την περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας καθώς και την τριμελή εξεταστική επιτροπή. Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως την υποψήφια διδάκτορα κ. Ιωάννα Ζώτου, η οποία με καθοδήγησε από την αρχή μέχρι το τέλος. Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, για τα δεδομένα και την βοήθεια που μου παρείχε. Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που ήταν στήριγμα σε όλη την διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων και μη, και τον αδερφό μου που με τον τρόπο του με οδήγησε από τις αρχές του λυκείου έως και σήμερα στο να είμαι αφοσιωμένος στις σπουδές και στα μαθήματα μου.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω όλο τον κόπο και την προσπάθεια, όχι μόνο της διπλωματικής αυτής, αλλά όλης μου της μαθησιακής ζωής, στην μνήμη του πατέρα μου.

1.1 Πλημμύρες

Σύμφωνα με την οδηγία 2007/6^ο/ΕΚ , οι πλημμύρες είναι φυσικά φαινόμενα των οποίων η πρόληψη είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί και πραγματοποιούνται στην περίπτωση που το σύστημα αποστράγγισης δεν έχει την δυνατότητα να διοχετεύσει πλήρως τον υδάτινο όγκο που παράγεται από την βροχόπτωση (Βαχαβιώλος, 2011). Ορισμένες ανθρώπινες παρεμβάσεις (όπως η πυκνωση των οικιστικών περιοχών στις περιοχές πλημμυρικών επεισοδίων καθώς και η μείωση της ικανότητας του εδάφους να κατακρατήσει τους υδάτινους όγκους λόγω αλλαγών στη χρήση γης) και η κλιματική αλλαγή συμβάλλουν στην αυξημένη πιθανότητα πρόκλησης φαινομένων πλημμύρας. Συνεπώς, οι πλημμύρες είναι πολύ πιθανό να προκαλέσουν θανάτους, πληθυσμιακή μετανάστευση και ζημιές στο φυσικό περιβάλλον, να προκαλέσουν μεγάλο πλήγμα στην οικονομική ανάπτυξη και να υπονομεύσουν τις οικονομικές δραστηριότητες της κοινότητας. Η οδηγία αποσκοπεί στη θέσπιση πλαισίου για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, με σκοπό τη μείωση των αρνητικών συνεπειών στην ανθρώπινη υγεία, το φυσικό περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες (ΕΚ, 2007).

Ός πλημμύρα ορίζεται η προσωρινή κατάκλυση από νερό του εδάφους το οποίο, υπό κανονικές συνθήκες, δεν είναι καλυμμένο από νερό. Οι πλημμύρες μπορεί να προκληθούν απο υπερχειλίση ποταμών, ορεινών χειμάρρων, καθώς και από εφήμερα ρέματα της Μεσογείου και πλημμύρες από τη θάλασσα σε παράκτιες ζώνες, και τέλος υπάρχει περίπτωση επίσης να δημιουργηθούν πλημμύρες από συστήματα αποχέτευσης (ΚΥΑ Η.Π. 31822/1542/Ε103, ΦΕΚ Β 1108/21.07.2010). Ός κίνδυνος πλημμύρας ορίζεται ο συνδυασμός της πιθανότητας να λάβει χώρα πλημμύρα και των δυνητικών αρνητικών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται με αυτή την πλημμύρα (ΚΥΑ Η.Π. 31822/1542/Ε103, ΦΕΚ Β 1108/21.07.2010). Ός επικινδυνότητα πλημμύρας ορίζεται η δυνατότητα εμφάνισης πλημμύρας σε συγκεκριμένο χώρο (ποσοτικοποιούμενη μέσω του βάθους νερού, της ταχύτητας ροής ή άλλου

χαρακτηριστικού υδρολογικού ή υδραυλικού μεγέθους) που αντιστοιχεί σε δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης (ΚΥΑ Η.Π. 31822/1542/Ε103, (ΦΕΚ Β 1108/21.07.2010).

Οι πλημμύρες θεωρούνται από τους πιο συχνούς και καταστρεπτικούς τύπους φυσικών καταστροφών. Μερικές από τις πιο σοβαρές επιπτώσεις των πλημμυρών είναι η έκθεση της ανθρώπινης ζωής σε σοβαρό κίνδυνο, αλλά και των περιουσιακών στοιχείων, οι σοβαρές ζημιές αλλά και καταστροφές έργων υποδομής, αλλά και γεωργικών και κτηνοτροφικών εγκαταστάσεων, καθώς και η έντονη διάβρωση εδαφών και η ρύπανση των υδάτων. Οι πλημμύρες επηρεάζουν ένα μεγάλο κομμάτι της ανθρωπότητας και έχουν ως αποτέλεσμα τις περισσότερες ζημιές από οποιοδήποτε άλλο είδος φυσικής καταστροφής (Downton 2001; Golian et al. 2010). Τα πλημμυρικά φαινόμενα είναι εκείνα τα οποία προκαλούν το 1/3 των εκτιμώμενων ζημιών από φυσικές καταστροφές παγκοσμίως (Pilon, 2004).

Ο Ελλαδικός χώρος πλήττεται κατά κύρια βάση από πλημμυρικά φαινόμενα τα οποία προκαλούνται λόγω της έντονης γεωγραφικής μεταβλητότητας των κλιματικών στοιχείων (εναλλαγή ξηράς - θάλασσας) (Γκιόκας, 2009).

Κάποιοι σοβαροί παράγοντες που αυξάνουν την πιθανότητα πλημμυρικών φαινομένων είναι η παρεμπόδιση και φραγή της κοίτης των ρεμμάτων στις οικιστικές περιοχές λόγω της πυκνής δόμησης, ο συνωστισμός διαφόρων φερτών υλικών κατά μήκος των ρεμμάτων, η αστοχία κατασκευής των αναγκαίων και κατάλληλων τεχνικών έργων, η μείωση των δασικών εκτάσεων από τις πυρκαγιές και την αποψίλωση περιμετρικά των λεκανών απορροής, η μείωση της κατείδυσης και η ταυτόχρονη αύξηση της επιφανειακής απορροής εξαιτίας της αστικοποίησης και η αποσπασματική κατασκευή έργων αντιπλημμυρικής προστασίας που είναι ασύμβατα με το περιβάλλον (φυσικό και ανθρωπογενές) και τις συνεχώς μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες (Λέκκας, 2009).

Οι περιοχές που είναι ιδιαιτέρως ευαίσθητες στις πλημμύρες είναι συνήθως, οι κλειστές υδρολογικές λεκάνες με μεγάλες κλίσεις και αδιαπέρατους γεωλογικούς σχηματισμούς, οι πεδιάδες που αποστραγγίζονται από ποταμούς με μικρή παροχετευτικότητα και οι αστικές περιοχές όπου η ανθρώπινη δραστηριότητα αλλάζει τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά.

1.1.1 Αιφνίδιες πλημμύρες

Η ασταμάτητη δόμηση στην παράκτια ζώνη λόγω της αστικοποίησης δημιουργεί συνθήκες άμεσης πρόκλησης πλημμυρών, γνωστές ως αιφνίδιες πλημμύρες (flash floods), οι οποίες επειδή έχουν μικρό χρόνο εκδήλωσης σε σχέση με την έναρξη της βροχής είναι δύσκολο να προληφθούν, αλλά ακόμα πιο δύσκολο να αντιμετωπιστούν (Τσακίρης, 2005). Αυτές οι πλημμύρες θεωρούνται από τους καταστροφικότερους τύπους πλημμυρικών γεγονότων (WMO-No. 1072,2011). Τα χαρακτηριστικά τους είναι τα παρακάτω: Σχετίζονται κυρίως με βίαιες καταιγίδες των οποίων η διάρκεια είναι σύντομη και λαμβάνουν χώρα σε μια μικρή περιοχή. Η εμφάνιση τους μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε περιοχή όπου υπάρχουν απότομες πλαγιές, αλλά είναι πιο κοινές σε ορεινές περιοχές στις οποίες προκαλούνται συχνά σοβαρές καταιγίδες. Είναι συχνά αποτέλεσμα βροχών βραχείας διάρκειας. Συνήθως λαμβάνουν χώρα σε περιοχές όπου το έδαφος είναι πολύ ξηρό για μια μακρά, ξηρή περίοδο (WMO-No. 1072,2011). Στη Μεσόγειο οι αιφνίδιες πλημμύρες είναι ο πιο συνήθης τύπος πλημμύρας, γιατί ευνοείται από τη γεωμορφολογία, τη γεωλογία και τις κλιματικές παραμέτρους (Παπανικολάου και Διακάκης, 2011).

Η έντονη βροχόπτωση είναι αιτία κατολίσθησης και μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένες καταστροφές σε περίπτωση μίας αιφνίδιας πλημμύρας (Lin, 1999). Οι αιφνίδιες πλημμύρες οι οποίες λαμβάνουν χώρα απότομα και τις πιο πολλές φορές με ελάχιστη προειδοποίηση είναι και οι πιο επικίνδυνες (Kourgialas et al., 2012). Οι παράγοντες εκδήλωσης αιφνίδιας πλημμύρας παρουσιάζονται παρακάτω: Η αιφνίδια πλημμύρα είναι το αποτέλεσμα ατμοσφαιρικών διαταραχών που συνδέονται με ραγδαίες βροχοπτώσεις και με μεγάλα ύψη βροχής σε σύντομο χρονικό διάστημα (WMO-No 1072, 2011). Η ένταση της βροχόπτωσης καθώς και η διάρκεια της, η τοπογραφία του εδάφους, οι συνθήκες του εδάφους, η φυτοκάλυψη, η καταστροφή των δασών και η αστικοποίηση είναι επίσης σημαντικοί παράγοντες. Η αύξηση, κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, των πλημμυρικών φαινομένων στα όρια οικιστικών περιοχών οφείλεται στον περιορισμό της κοίτης των ρεμάτων, στο φραγμό των κοιτών, στη μείωση των δασικών εκτάσεων λόγω των πυρκαγιών και στη μείωση της κατεΐσδυσης εντός του αστικού περιβάλλοντος (Λέκκας, 2000; Stathis, 2004).

Οι επιπτώσεις αιφνίδιων πλημμυρών παρουσιάζονται παρακάτω. Οι αιφνίδιες πλημμύρες εμφανίζονται σε μικρό χρονικό διάστημα και έχουν σαν αποτέλεσμα ταχεία ύψωση νερού, το οποίο

μπορεί στο πέρασμα του να προκαλέσει τεράστιες υλικές καταστροφές (π.χ. κτήρια, γέφυρες, να παρασύρει αυτοκίνητα) καθώς και φυσικές καταστροφές (π.χ. να ξεριζώσει δέντρα) (Καυκαλά, 2014). Τα πλημμυρικά φαινόμενα με την απόθεση μεγάλων ποσοτήτων φερτών υλών δημιουργούν προβλήματα στην ομαλή ανάπτυξη των πληγέντων περιοχών και οδηγούν σε ορισμένες περιπτώσεις σε εκτεταμένα φαινόμενα ρύπανσης και μόλυνσης, καθώς διευκόλυναν την κυκλοφορία λυμάτων, βαρέων μετάλλων και άλλων μολυσματικών ουσιών μέσω των πλημμυρικών υδάτων.

Έχοντας σαν βασικό χαρακτηριστικό την ταχεία εξέλιξη τους, είναι το πιο σύνηθες είδος πλημμύρας στην Ελλάδα λόγω της ιδιόμορφης γεωμορφολογίας της χώρας μας, η οποία συμβάλλει στην ανάπτυξη μεγάλου αριθμού ρεμάτων με μικρές σχετικά λεκάνες απορροής, οι οποίες έχουν κατα κύρια βάση έντονες κλίσεις που συντελούν στη ταχεία αποστράγγισή τους.

1.1.2 Αιφνίδιες Πλημμύρες σε αστικές περιοχές

Οι αστικές πλημμύρες συμβαίνουν όταν η χωρητικότητα τόσο των φυσικών όσο και των αποχετευτικών συστημάτων δεν μπορεί να καλύψει τον όγκο της βροχοπτώσης και της απορροής σε μια αστική περιοχή (Wan Mohtar, et al.). Η υψηλή επιφανειακή απορροή από έντονες βροχοπτώσεις λόγω αδιαπέρατων επιφανειών και υψηλής οικοδομικής πυκνότητας κλιμακώνει τις αστικές πλημμύρες (Gaitan et al., 2016).

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παραγωγή πλημμυρικού χάρτη με την χρήση του υδραυλικού λογισμικού HEC-RAS. Η υδρολογική επεξεργασία πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον GIS και συγκεκριμένα στο ArcGIS, με την προέκταση του HEC-GeoHMS. Η υδραυλική επεξεργασία πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό HEC-RAS με χρήση GIS για την μοντελοποίηση. Η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη απορροής της Μάνδρας και το αντικείμενο μελέτης, το πλημμυρικό επεισόδιο που πραγματοποιήθηκε στις 15 Νοεμβρίου 2017.

1.2.1 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από 7 κεφάλαια. Τα κεφάλαια είναι τα εξής:

- Κεφάλαιο 1, η εισαγωγή, η οποία περιλαμβάνει το αντικείμενο της εργασίας καθώς επίσης και την δομή αυτής.
- Κεφάλαιο 2, το θεωρητικό υπόβαθρο της διπλωματικής εργασίας.
- Κεφάλαιο 3, η ανάλυση της περιοχής μελέτης από γεωμορφολογική και υδρολογική άποψη.
- Κεφάλαιο 4, η μεθοδολογία μοντελοποίησης που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων στα λογισμικά HEC-RAS, ArcGIS και HEC-GeoHMS.
- Κεφάλαιο 5, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πλημμυρικές προσομοιώσεις και η ανάλυση αυτών.
- Κεφάλαιο 6, τα συμπεράσματα και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, αλλά και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.
- Κεφάλαιο 7, η βιβλιογραφία και οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

2.1 Γενική περιγραφή του Λογισμικού HEC-RAS

Το HEC-RAS είναι ένα λογισμικό υδραυλικής μοντελοποίησης του Σώματος Μηχανικών του Αμερικάνικου Στρατού (US Army Corps of Engineer), και δημιουργήθηκε από το Κέντρο Υδρολογικής Μηχανικής (Hydrologic Engineering Center - HEC), για την προσομοίωση υδατορεμάτων (River Analysis System – RAS) (HEC-RAS manual). Το λογισμικό αυτό επιτρέπει στον χρήστη να πραγματοποιήσει 1-D και 2-D προσομοιώσεις. Αυτή που παρουσιάζεται στην διπλωματική αυτή εργασία είναι η δισδιάστατη προσομοίωση μη μόνιμης ροής της έκδοσης HEC-RAS 6.0.

2.1.1 Δυνατότητες/Πλεονεκτήματα Μοντελοποίησης Δισδιάστατης Ροής του HEC-RAS

Το HEC-RAS έχει τις ακόλουθες δυνατότητες:

1. Μοντελοποίηση 1-D, 2-D και συνδυασμένη μοντελοποίηση 1-D και 2-D
2. Εξισώσεις ρηχών υδάτων (SWE) ή εξισώσεις κυμάτων διάχυσης (DWE) σε 2-D
3. Αλγόριθμο επίλυσης έντασης πεπερασμένου όγκου
4. 1-D και 2-D αλγόριθμο συζευγμένης λύσης
5. Μη δομημένα ή δομημένα υπολογιστικά πλέγματα
6. Λεπτομερείς πίνακες υδραυλικών ιδιοτήτων για 2-D υπολογιστικές κυψέλες και όψεις κελιών
7. Λεπτομερής χαρτογράφηση πλημμύρας και κινούμενα σχέδια πλημμύρας
8. Αλγόριθμος λύσεων που βασίζεται σε πολλούς επεξεργαστές (παράλληλος υπολογισμός)

9. Υπολογιστικές μηχανές 64-bit

2.1.2 RAS-Mapper

Το HEC-RAS Mapper μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη μοντέλων εδάφους και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων HEC-RAS σε μορφή που βασίζεται σε χάρτη. Το RAS Mapper έχει τις ακόλουθες δυνατότητες: Ανάπτυξη μοντέλων εδάφους για χρήση σε μοντελοποίηση 2-D και οπτικοποίηση αποτελεσμάτων μοντέλων 1-D/2-D (HEC-RAS_Mapper_User's_Manual).

2.1.3 Εξισώσεις υδρολογικού μοντέλου HEC-RAS

Το HEC-RAS έχει τρία είδη εξισώσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση της ροής: τις εξισώσεις κυμάτων διάχυσης, τις αρχικές εξισώσεις ρηχών υδάτων (SWE-ELM, Εξισώσεις Ρηχών Νερών, Μέθοδος Eulerian-Lagrangian) και μια νέα λύση εξισώσεων ρηχών υδάτων που διατηρεί την ορμή (SWE-EM, Εξισώσεις Ρηχών Νερών, Μέθοδος Eulerian) (HEC-RAS 2D User's Manual).

Εξίσωση ρηχών υδάτων (Shallow Water Equations)

Οι εξισώσεις ρηχών υδάτων είναι ένα σύνολο υπερβολικών μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την ροή σε ένα ρευστό. Οι εξισώσεις αυτές ονομάζονται εξισώσεις Saint-Venant.

Εξίσωση κυμάτων διάχυσης (Diffusion Wave Equations)

Οι εξισώσεις κυμάτων διάχυσης είναι μια γενική προσέγγιση κατά την ανάπτυξη ενός δισδιάστατου μοντέλου. Χρησιμοποιούνται στην περίπτωση που δεν είναι γνωστό αν απαιτούνται οι εξισώσεις Saint-Venant για το μοντέλο προς μελέτη ή για τον προσδιορισμό της δυνατότητας χρήσης αυτών.

2.1.4 Χρονικό βήμα (Time Step)

Στις εξισώσεις διάχυσης κύματος (DWE) είναι δυνατό να γίνει χρήση μεγαλύτερων χρονικά βημάτων από ότι μπορεί να συμβεί στις εξισώσεις ρηχών υδάτων (SWE), παρέχοντας έτσι συγχρόνως αριθμητικά σταθερές και ακριβείς λύσεις. Για την επιλογή ενός υπολογιστικού διαστήματος για τις εξισώσεις ρηχών υδάτων και τις εξισώσεις διάχυσης κύματος, πραγματοποιούνται τα παρακάτω:

1. Για τις εξισώσεις ρηχών υδάτων :

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

2. Για τις εξισώσεις διάχυσης κύματος :

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

Όπου :

C [-] = αριθμός Courant

V [m/s] = ταχύτητα πλημμυρικού κύματος

ΔT [s] = υπολογιστικό χρονικό βήμα

ΔX [m] = μέσο μέγεθος κελιού

2.1.5 Μέθοδος κατανεμημένης βροχόπτωσης (Rain on Grid)

Η μέθοδος κατανεμημένης βροχόπτωσης περιλαμβάνει την άμεση εφαρμογή βροχόπτωσης στο υδροδυναμικό μοντέλο επιφανειακής ροής, το οποίο αντιπροσωπεύει τη διήθηση του εδάφους (A. Taylor et al., 2014). Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την επιρροή της τοπογραφίας του εδάφους σε συνδυασμό με την υδραυλική επίλυση δισδιάστατων εξισώσεων Saint-Venant και αποτελεί μια προσέγγιση της πιο απλοποιημένης μεθόδου απευθείας βροχόπτωσης (direct rainfall) (David and Schmalz, 2021).

2.2 Υδρολογικό μοντέλο

2.2.1 Εκτίμηση περισσεύματος βροχής με τη μέθοδο SCS

Η εκτίμηση αυτή περισσεύματος βροχής χρησιμοποιείται στην περίπτωση που δεν υπάρχουν μετρήσεις για τις διάφορες απώλειες βροχής. Η υπηρεσία Soil Conservation Service (SCS), παρουσίασε αυτή τη μέθοδο υπολογισμού του ύψους περισσεύματος της βροχής από μια δεδομένη βροχή χρησιμοποιώντας 3 μεταβλητές, το ύψος βροχής, την αρχική κατάσταση υγρασίας του εδάφους και το υδρολογικό συμπλόκο εδάφους. Σύμφωνα με την μέθοδο SCS, εκτιμάται πως οι αρχικές απώλειες είναι 20% των συνολικών απωλειών, δηλαδή της διαφοράς μεταξύ του ύψους βροχής και του ύψους περισσεύματος αυτής.

Ισχύει ότι :

$$h_r = \frac{(h_r - 0.2S)^2}{(h_r + 0.8S)} \quad \text{για } h_r > 0.2S \quad (1)$$

Και αν $h_r < 0.2S$, $h_r = 0$

Η παράμετρος, η οποία εκφράζει τις συνολικές απώλειες είναι ο αριθμός καμπύλης CN, όπου

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{mm})$$

Ανάλογα με το συνολικό ύψος βροχής των προηγούμενων 5 ημερών, η αρχική κατάσταση υγρασίας κατηγοριοποιείται ως εξής με βάση τον πίνακα 1 :

Πίνακας 1: Κατηγοριοποίηση αρχικής υγρασίας

Κατηγορία	Συνολικό ύψος βροχής των 5 προηγούμενων ημερών (mm)	
	Χειμερινή περίοδος	Περίοδος βλάστησης
I	<13	<35
II	13/28	35/53
III	>28	>53

Τα εδάφη κατηγοριοποιούνται από υδρολογική άποψη σε 4 κατηγορίες.

Κατηγορία A: Εδάφη με υψηλή βασική διηθητικότητα και υψηλή διαπερατότητα (συνήθως αμμώδη ή χαλικώδη εδάφη).

Κατηγορία B: Εδάφη με μέτρια βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα, τα οποία αποτελούνται από μέσης έως ελαφράς σύστασης υλικά.

Κατηγορία C: Εδάφη με μικρή βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα (εδάφη μέσης έως βαριάς σύστασης).

Κατηγορία D: Εδάφη με πολύ μικρή βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα (κυρίως αργιλώδη εδάφη, εδάφη με υψηλή στάθμη υπόγειου νερού ή με αδιαπέρατο στρώμα).

Τέλος, με βάση τον Τσακίρης (2013) (Πίνακας 8.4) γίνεται η κατηγοριοποίηση των CN δεύτερης κατηγορίας αρχικής υγρασίας, ανά χρήση γης και φυτοκάλυψης (Wanielista, 1978) και στηρίζεται στις υποθέσεις ότι η αρχική κατάσταση υγρασίας είναι δεύτερης κατηγορίας και οι αρχικές απώλειες 0.20 S).

2.2.2 Μέθοδος εναλλασόμενων μπλοκ (alternating block method)

Στην παρούσα μελέτη, για την σύγκριση αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των εναλλασόμενων μπλοκ, η οποία βασίζεται στο ότι η συνολική διάρκεια βροχόπτωσης χωρίζεται σε διαστήματα με συγκεκριμένο χρονικό βήμα.

Σύμφωνα με τους Κουτσογιάννη και άλλοι (1998), ο μαθηματικός τύπος που δίνει την ένταση συναρτήσει της περιόδου επαναφοράς και του χρονικού βήματος είναι παρακάτω:

$$i(d, T) = \frac{\lambda'(T^k - \Psi')}{\left(1 + \frac{d}{\theta}\right)^n} \quad (2)$$

όπου για την περιοχή της Μάνδρας, $k=0.125$, $\lambda'=213.4$, $\Psi'=0.641$, $\theta=0.124$, $n=0.622$, T : περίοδος επαναφοράς (έτη), d : χρονική διάρκεια

2.3 Υδραυλικό μοντέλο

2.3.1 Εξισώσεις Saint Venant

Οι εξισώσεις Saint Venant είναι οι διαφορικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τη γενική μονοδιάστατη μη μόνιμη ροή του νερού σε έναν ανοιχτό αγωγό και αποτελούν τις μαθηματικές εκφράσεις των νόμων της διατήρησης της μάζας και της ορμής. Οι εξισώσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν στην υδραυλική προσομοίωση στο λογισμικό του HEC-RAS σε συνθήκες μη μόνιμης ροής. Για έναν οποιονδήποτε ανοιχτό αγωγό, του οποίου οι παρειές και ο πυθμένας σχηματίζουν μικρές γωνίες με τον άξονα του, οι εξισώσεις Saint Venant παίρνουν τις μορφές (Τερζίδης 1997) :

Εξίσωση συνέχειας :

$$\frac{dA}{dt} + \frac{dQ}{dx} = I \quad (3)$$

Εξίσωση κίνησης :

$$\frac{dV}{dt} + V \frac{dV}{dx} + g \frac{dy}{dx} + I \frac{(V-U)}{A} = g(S_0 - S_f) \quad (4)$$

όπου,

A : το εμβαδόν της κύριας διατομής [m^2]

Q : η κύρια παροχή [$\frac{m^3}{T}$]

I : η πλάγια παροχή εισροής ή εκροής από τον αγωγό [$\frac{m^2}{T}$]

t : ο χρόνος [s]

x : η οριζόντια απόσταση [m]

V : η μέση ταχύτητα [m/s]

g : η επιτάχυνση βαρύτητας [$\frac{m}{s^2}$]

y : το βάθος [m]

U : η συνιστώσα της ταχύτητας της πλάγιας εισροής κατά την διεύθυνση x [m/s]

S₀ : η κλίση του πυθμένα [m/m]

S_f : η κλίση τριβής ή κλίση αντιστάσεων ή ενέργειας [m/m]

Στην περίπτωση που δεν είναι γνωστή η ακριβής σχέση μεταξύ της κλίσης της γραμμής ενέργειας και των χαρακτηριστικών μεταβλητών της ροής για μη μόνιμη μη ομοιόμορφη κίνηση, συνήθως χρησιμοποιείται η εμπειρική εξίσωση του Manning (Τερζίδης 1997):

$$S_f = \frac{n^2 V |V|}{R_u^{\frac{4}{3}}}, \quad (5)$$

Όπου, $R_u = \frac{A}{\Pi}$ και είναι η υδραυλική ακτίνα

Π : η περιβρεχόμενη περίμετρος [m]

n : ο συντελεστής τριβών Manning

2.3.2 Συντελεστή τραχύτητας Manning n

Η απώλεια του ενεργειακού φορτίου μεταξύ των δυο διατομών συμβαίνει εξαιτίας της τραχύτητας των τοιχωμάτων του αγωγού και άλλων παραγόντων. Αυτές οι τραχύτητες αντιπροσωπεύονται από το συντελεστή τραχύτητας του Manning n και οι ενεργειακές απώλειες υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Manning (Οδηγία Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ) 12 - Άρθρο 3) :

$$h_L = L \left(\frac{Qn}{AR^{\frac{2}{3}}} \right)^2 \quad (6)$$

Όπου,

L (m) : η απόσταση μεταξύ των διατομών

Q (m³/s) : η παροχή

n (s/m^{1/3}) : ο συντελεστής τραχύτητας manning

A (m²) : η επιφάνεια διατομής

R (m) : η υδραυλική ακτίνα

2.4 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Σύμφωνα με τους Sleimane et al. (2022),σε κλίμακα λεκάνης απορροής, οι προσομοιώσεις rain-on-grid για την μοντελοποίηση δισδιάστατων μη μόνιμων ροών με είσοδο την βροχόπτωση εφαρμόζονται στο HEC-RAS μέσω μιας μεθόδου πεπερασμένου όγκου. Τέτοιου είδους προσομοιώσεις είναι καλές για την τμηματική μοντελοποίηση πολύ μεγάλων λεκάνων απορροής, καθώς σε μια εννιαία πολύ μεγάλη λεκάνη απορροής η απόπειρα προσομοίωσης με την μέθοδο αυτή θα καταλήξει σε overflow. Συμπερασματικά, από υδραυλικής άποψης, τα αποτελέσματα παροχής αιχμής και πλημμυρικού χάρτη που προκύπτουν από την μέθοδο αυτή, στην μελέτη των Sleimane et al. (2022), συμβαδίζουν πολύ καλά με τα δημόσια δεδομένα παροχής αιχμής και τον πλημμυρικό χάρτη που δημιουργήθηκε απο τις εικόνες του SAR Cosmo-Skymed.

Σύμφωνα με τους Amrei et al. (2021), τα δισδιάστατα μοντέλα είχαν πρωτοδημιουργηθεί ως μονοδιάστατα μοντέλα για τον υπολογισμό της στάθμης του νερού κατά μήκος της κύριας ροής ενός ρέματος. Τα μοντέλα μπορούν πλέον να χρησιμοποιηθούν ως ψευδο-δισδιάστατα υδροδυναμικά μοντέλα βροχόπτωσης-απορροών. Με την μέθοδο άμεσης βροχόπτωσης, υπάρχει μια προσέγγιση, γνωστή ως rain-on-grid, στην οποία η εισαγόμενη βροχόπτωση εφαρμόζεται σε όλη την λεκάνη απορροής. Η έρευνα συμπέρανε πως τα προτεινόμενα δεδομένα σε μια λεκάνη της τάξης των 2 τετραγωνικών χιλιομέτρων, είναι ένα πλέγμα ανάλυσης μεταξύ 3 και 5 μέτρων σε συνδυασμό με με ψηφιακό μοντέλο εδάφους ανάλυσης 0.25 έως 1 μέτρο.

Σύμφωνα με τους Pierfranco et al. (2021), η μέθοδος rain-on-grid είναι πολλά υποσχόμενη για προσομοιώσεις πραγματικών γεγονότων αλλά ταυτόχρονα έχει περιορισμούς, οι οποίοι χρειάζονται βελτίωση προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια του μοντέλου. Συγκεκριμένα, αφύσικα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν στην λύση των υδρογραφημάτων του μοντέλου τους εξαιτίας κάποιων αστοχιών των αριθμητικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των εξισώσεων.

Σύμφωνα με τους Sean J. et al. (2021), τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι δισδιάστατες προσομοιώσεις HEC-RAS με την μέθοδο rain-on-grid μπορούν να παράξουν ρεαλιστικά αποτελέσματα στο υδρογράφημα μεταβολής στάθμης όταν : 1) χρησιμοποιείται χωρικά αποτελεσματική βροχόπτωση , 2) το HEC-RAS είναι βαθμονομημένο με τα δεδομένα παρατήρησης κατά την διάρκεια του γεγονότος ενδιαφέροντος, 3) δεν υπάρχουν άλλες πηγές ανύψωσης της στάθμης του νερού εκτός του γεωμετρικού μοντέλου, και 4) κατά τη διάρκεια προηγούμενων κορεσμένων επιφανειακών συνθηκών υγρασίας , τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους περιγράφουν επαρκώς τις χερσαίες διαδρομές ροής. Επιπλέον, τα αποτελέσματα έδειξαν την ανάγκη για χρονικά μεταβαλλόμενους συντελεστές τραχύτητας για να ληφθούν υπόψιν οι συνθήκες υγρασίας του εδάφους.

Σύμφωνα με τους Kuswanto et al. (2019), σε μια αστική περιοχή, οι δρόμοι, τα κτίρια και οι φράχτες έχουν μεγάλη επίδραση στην διάδοση μιας πλημμύρας. Στην μελέτη τους, συμπέραναν πως η

μεγαλύτερη ανάλυση ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους οδηγεί στην αύξηση των βαθών ροής και στην μείωση της πλημμυρικής έκτασης σε μια δισδιάστατη προσομοίωση πλημμύρας. Επίσης, κατέληξαν πως ένα τροποποιημένο ψηφιακό μοντέλο εδάφους χαμηλής ανάλυσης με χειροκίνητη πρόσθεση των δρόμων, κτιρίων και φραχτών σε αυτό σε σύγκριση με το μη-τροποποιημένο έχει αξιοσημείωτη διαφορά στα αποτελέσματα του μοντέλου.

Σύμφωνα με τους Bhandari et al. (2017), τα αποτελέσματα μιας δισδιάστατης προσομοίωσης μη μόνιμης ροής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαχείριση πλημμυρών καθώς επίσης και για αποφάσεις ανάπτυξης χρήσεων γης και υποδομών. Επιπλέον, ανέφεραν πως όσο μικρότερα είναι το υπολογιστικό χρονικό βήμα και το μέγεθος του κελιού τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματα, αν και η προσομοίωση παίρνει περισσότερη ώρα να ολοκληρωθεί. Τέλος, αναφέρουν πως οι δυνατότητες του HEC-RAS για τις δισδιάστατες αναλύσεις μπορούν να αποτελέσουν ένα χρήσιμο εργαλείο για διαχείριση πλημμυρών.

Σύμφωνα με τους Agnihotri G et al. (2020), το δισδιάστατο υδροδυναμικό μοντέλο τους χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της γεωμορφικής βιωσιμότητας των πλημμυρών στο κατάντη όριο της υπό μελέτη λεκάνης απορροής. Επίσης αναφέρουν πως το βάθος ροής, η ταχύτητα διάδοσης και το ύψος της επιφάνειας του νερού, μετά την δισδιάστατη προσομοίωση ροής, χρησιμοποιούνται για την καθορισμό του βαθμού πλημμύρας. Ύστερα, για την ανάλυση μη μόνιμης ροής, κάθε χρονικό βήμα πραγματοποιήθηκε με βάση το υδρογράφημα εισροής, χρησιμοποιώντας το εργαλείο RAS-mapper του HEC-RAS, το οποίο δίνει την χωρική κατανομή της ροής του ποταμού. Εν τέλει, τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαχείριση καταστροφών και πλημμυρών και για το σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης από τις αρμόδιες αρχές.

Σύμφωνα με μια μελέτη των πανεπιστημίων University of Maryland και Texas A&M University, η γήρανση και ανεπαρκείς υποδομές, σε συνδυασμό με την ταχεία ανάπτυξη της γης, αύξησε την ποσότητα της απορροής των καταιγίδων σε ήδη καταπονημένα συστήματα αποχέτευσης, δημιουργώντας θύλακες πλημμύρας σε κακώς εξοπλισμένες και ευάλωτες γειτονιές. Πολλά από τα αστικά συστήματα λυμάτων και ομβρίων υδάτων που παρέχουν την ραχοκοκαλιά για τον μετριασμό

των αστικών πλημμυρών είναι σε κακή κατάσταση και σε ορισμένες τοποθεσίες είναι ανεπαρκή και χρειάζεται ισχυρή υποστήριξη. Οι αστικές πλημμύρες εμφανίζονται ολοένα και πιο συχνά, έχουν τοπική επίδραση και μαζί με άλλες πτυχές της κλιματικής αλλαγής είναι πολύ πιθανό να επηρεάζουν εκείνους που έχουν την λιγότερη οικονομική δυνατότητα να τις αντιμετωπίσουν.

Σύμφωνα με τους Rangari et al. (2019), οι πλημμύρες σε αστικές περιοχές εμφανίζονται ολοένα και περισσότερο εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής και της ανεξέλεγκτης αστικοποίησης. Επίσης, αναφέρουν πως η πρόληψη τέτοιων γεγονότων δεν είναι εφικτή αλλά με μεθόδους δισδιάστατης μοντελοποίησης κρίσιμων γεγονότων βροχόπτωσης μπορούν να προσδιοριστούν οι περιοχές που είναι ευαίσθητες σε πλημμύρες. Αυτό που καθιστά δύσκολο τον προσδιορισμό αστικών πλημμυρών είναι οι απρόβλεπτες συνθήκες ροής σε αυτές εξαιτίας της έντονης εναλλαγής στην τοπογραφία.

Ο Yalcin (2020) αναλύει την επίδραση της ανάλυσης των δεδομένων της τοπογραφίας και των χρήσεων γης στην εκτίμηση της έκτασης της πλημμύρας, βαθών ροής, ταχύτητες ροής και των χρόνων άφιξης ενός δισδιάστατου υδροδυναμικού μοντέλου HEC-RAS υπό διαφορετικές διαστάσεις υπολογιστικού πλέγματος. Τέλος αναφέρει πως ενδέχεται να μην επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό οι διαφορές ανάλυσης των ψηφιακών μοντέλων εδάφους την αξιοπιστία μιας αστικής πλημμύρας με τη χρήση του λογισμικού HEC-RAS.

Σύμφωνα με τους Ongdas et al. (2020), έγινε η χρήση του HEC-RAS με δισδιάστατη μοντελοποίηση, προκειμένου να προσομοιώσουν διάφορα σενάρια πλημμύρας σε έναν ποταμό. Στην μελέτη τους σύγκριναν 3 διαφορετικές αναλύσεις υπολογιστικού πλέγματος (25 , 50 και 75 μέτρα) και κατέληξαν πως δεν υπήρξε σημαντική διαφορά στην απόδοση του μοντέλου αλλά παρόλα αυτά παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά στον χρόνο προσομοίωσης. Επιπλέον, η ύπαρξη των breaklines στο μοντέλο κατάληξε σε βελτίωση στην απόδοση του μοντέλου αλλά και στην μείωση του χρόνου προσομοίωσης.

2.5 Λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση των παρακάτω λογισμικών :

ArcGIS Desktop (10.5.1)

Το ArcGIS Desktop είναι ένα λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται για την δημιουργία, σύνθεση, ανάλυση και διαχείριση γεωγραφικών πληροφοριών. Επιτρέπει την σύνθεση χαρτών , πραγματοποίηση χωρικής ανάλυσης και διαχείρισης δεδομένων.

HEC-GeoHMS

Είναι μια επέκταση του ArcGIS, η οποία χρησιμοποιείται για την υδρολογική μοντελοποίηση (π.χ. εξαγωγή μιας λεκάνης απορροής ή υδρογραφικού δικτύου κλπ) και έχει κατασκευαστεί από το Κέντρο Τεχνικής Υδρολογίας του Σώματος του Αμερικάνικου Στρατού.

HEC-RAS 6.0

Το HEC-RAS είναι ένα λογισμικό υδραυλικής μοντελοποίησης του Σώματος Μηχανικών του Αμερικάνικου Στρατού (US Army Corps of Engineer), και δημιουργήθηκε από το Κέντρο Υδρολογικής Μηχανικής (Hydrologic Engineering Center - HEC), για την προσομοίωση υδατορεμάτων.

Microsoft EXCEL

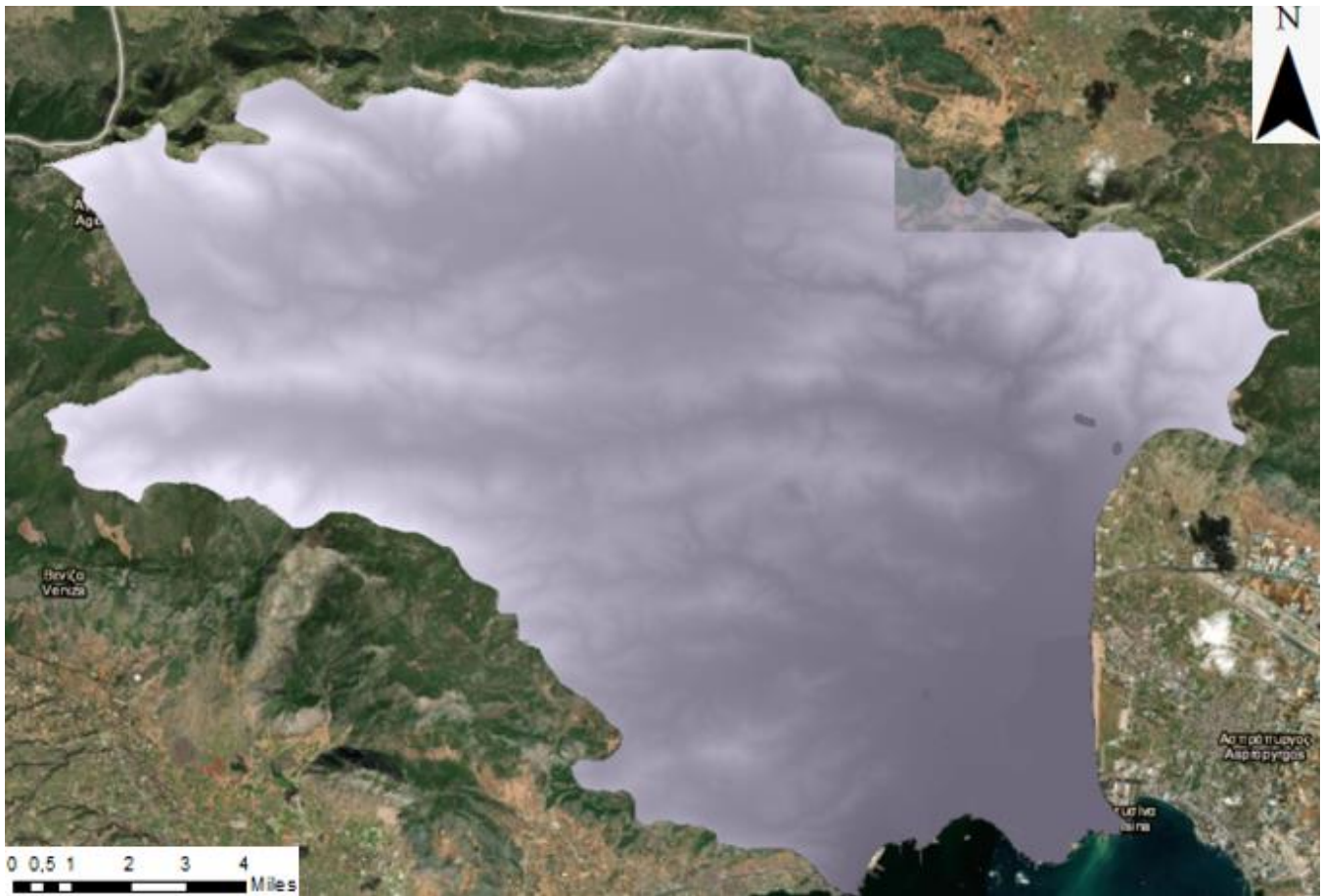
Το EXCEL είναι ένα λογισμικό της Microsoft , το οποίο επιτρέπει στους χρήστες του να μορφοποιούν, να οργανώνουν και να υπολογίζουν δεδομένα σε ένα ή παραπάνω υπολογιστικά φύλλα.

3.1 Γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση της λεκάνης

Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του Θριασίου Πεδίου θεωρείται αρκετά πυκνό και απαρτίζεται κυρίως από εποχιακής ροής χειμάρρους. Τελικός αποδέκτης της απορροής της λεκάνης είναι ο κόλπος της Ελευσίνας.

Ο Σαρανταπόταμος, με λεκάνη απορροής 334.8 km² (απαρτίζεται από τα όρη Πατέρας, Κιθαιρώνας, Πάστρα και Πάρνηθα), πηγάζει από τις υπώρειες του Κιθαιρώνα και λαμβάνει την απορροή μεγάλου αριθμού χειμάρρων εκ των οποίων οι μεγαλύτερα σε επιρροή πηγάζουν από τα όρη Πατέρας και Μακρό Όρο (ΥΠΕΚΑ/Σχέδιο διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας). Το υδρογραφικό δίκτυο του ρέματος είναι 5ης τάξης, βρίσκεται σε στάδιο προχωρημένης ωριμότητας, χαρακτηρίζεται με μέτρια έως πολύ υψηλή πυκνότητα και αποτελεί τον κύριο αποστραγγιστικό αγωγό της επιφανειακής απορροής του Θριασίου Πεδίου μιας και η λεκάνη απορροής του καλύπτει τα 2/3 περίπου της συνολικής έκτασης της λεκάνης απορροής του πεδίου. Πρακτικά ο Σαρανταπόταμος διακλαδίζεται πριν την είσοδό του στο Θριάσιο πεδίο σε δύο κύριους παραποτάμους με διεύθυνση ροής από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Οι σημαντικότεροι χείμαρροι που συμβάλλουν στον Σαρανταπόταμο είναι ο Αγ. Βλάσιος, το Ξηρόρεμα και το Μεγάλο Κατερίνι.

Παρακάτω παρουσιάζεται η λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου με υπόβαθρο ΨΜΕ ανάλυσης 5x5 μέτρα (Εικόνα 1). Στην ανατολική πλευρά της λεκάνης, λόγω έλλειψης μιας πινακίδας, δεν αποτυπώνεται σε εκείνο το κομμάτι το ΨΜΕ της υποπεριοχής (ΥΠΕΚΑ/Σχέδιο διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας).



Εικόνα 1 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους λεκάνης απορροής Σαρανταπόταμου

Στην συνέχεια με τη χρήση του HEC-GeoHMS, στο ArcMap , πραγματοποιήθηκε η προεπεξεργασία του εδάφους όπου υπολογίστηκαν οι υπολεκάνες της συνολικής λεκάνης του Σαρανταπόταμου καθώς και το υδρογραφικό δίκτυο αυτών (εικόνα 2).

3.2 Υπολεκάνη μελέτης

3.2.1 Πλημμύρα Μάνδρας 15/11/2017

Η καταστροφική πλημμύρα που έπληξε τη Μάνδρα στις 15 Νοεμβρίου 2017 είχε ως αποτέλεσμα να παρουσιαστούν 23 νεκροί και αφάνταστες ζημιές, και αποτελεί το τραγικότερο περιστατικό αιφνίδιας πλημμύρας μέσα στις τελευταίες δεκαετίες. Με βάση τα λεγόμενα του Μετεωρολόγου Μανώλη Ανανδρανιστάκη, μια μέρα πριν την καταστροφή είχε παρουσιαστεί μια ισχυρή βροχόπτωση στο όρος Πατέρα, το οποίο είχε ως αποτέλεσμα να συσσωρευτεί μεγάλος όγκος νερού στο βουνό (Ανανδρανιστάκης, 2017).

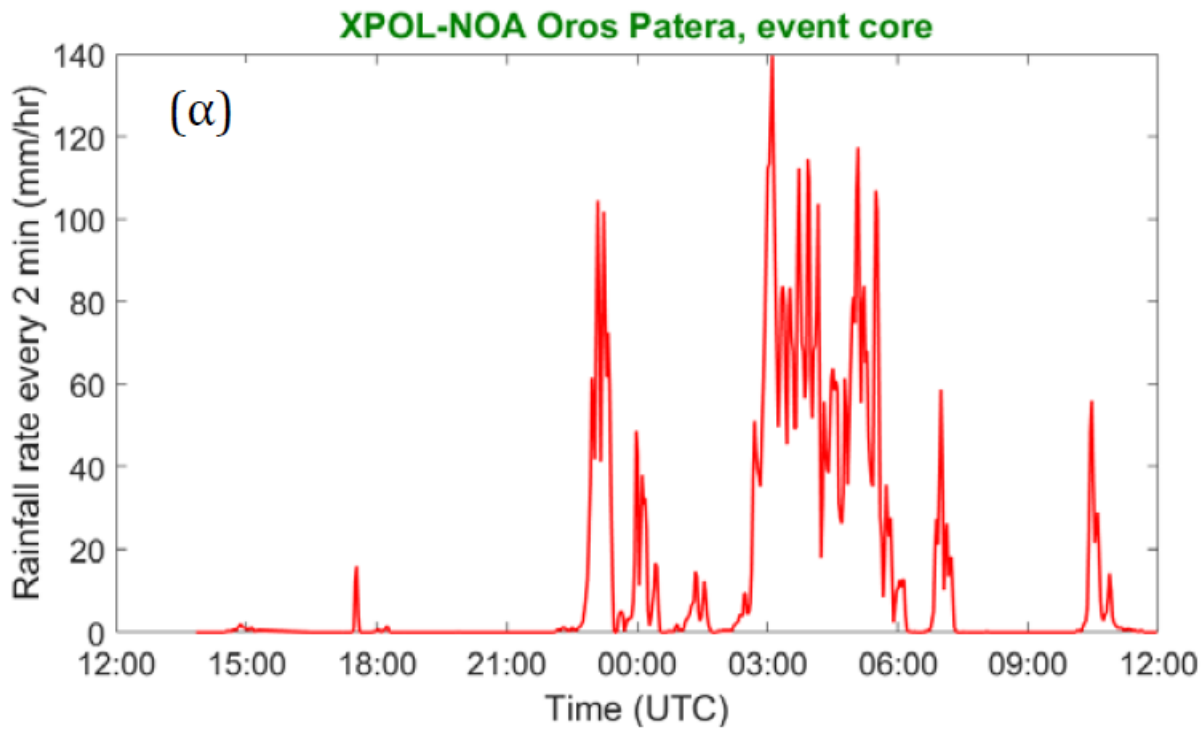
Στην συνέχεια, με βάση το κινητό μετεωρολογικό ραντάρ του Αστεροσκοπείου, την προηγούμενη Τετάρτη στο όρος Πατέρα, στο ύψος της Νέας Περάμου και της Μάνδρας, το συνολικό ύψος βροχής ξεπέρασε τα 200 mm σε χρονικό διάστημα 6 ωρών με την μεγαλύτερη ένταση μεταξύ 5 και 8 το πρωί. Να σημειωθεί πως αυτή η ποσότητα αντιστοιχεί σε 3.5 φορές στη μέση βροχόπτωση ολόκληρου του μήνα Νοεμβρίου στην συγκεκριμένη περιοχή. Ήταν δηλαδή, μια πάρα πολύ ισχυρή και σχετικά σύντομη βροχόπτωση. Το νερό λίμναζε μέσα σε χειμάρρους και ρέματα, όπου λόγω διάφορων φερτών υλικών δημιουργήθηκαν μικρά φράγματα, όπου ένα ένα «έσπαγαν» και μετά αυτό είχε ως αποτέλεσμα ένας μεγάλος συσσωρευμένος όγκος νερού να ξεχυθεί στην πεδιάδα και στις παραθαλάσσιες περιοχές. Συγκεκριμένα, δύο ρέματα, τα οποία ήταν μπαζωμένα (Ρέμα Αγίας Αικατερίνης και Ρέμα Σούρες) , ήταν υπεύθυνα για την μεγάλη πλημμύρα που χτύπησε την Μάνδρα Αττικής εκείνη την μέρα (ΕΑΑ, 2017).

Στη Μάνδρα, λόγω της άναρχης δόμησης και επειδή είχαν αναπτυχθεί οικισμοί και οδικοί και σιδηροδρομικοί άξονες κάθετα στην ροή των ρεμάτων, αλλά και λόγω των καταπατήσεων εντός των ρεμάτων και την κάλυψη των εκβολών τους, αποκόπηκε και περιορίστηκε η φυσική πορεία του νερού και σε συνδυασμό με την σφοδρότητα της καταιγίδας στα ορεινά και τη μεγάλη ποσότητα φερτών υλικών που μετέφεραν οι χειμάρροι έγινε η καταστροφή (Ρέβη και άλλοι, 2017).

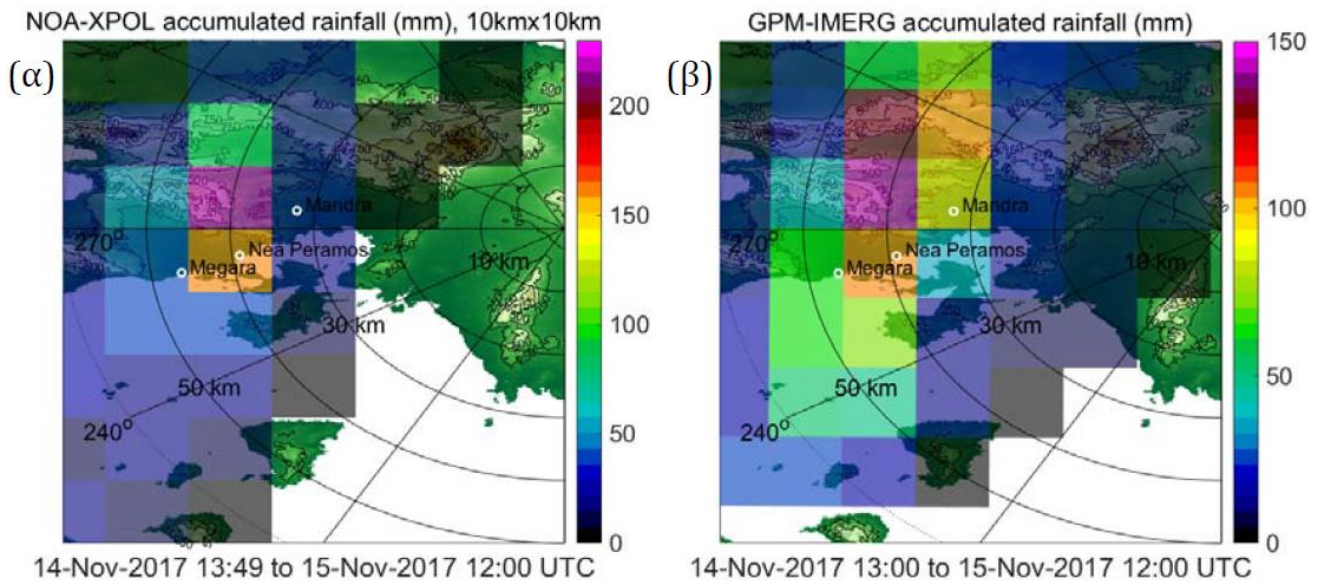
Όσον αφορά τον απολογισμό υλικών ζημιών, αυτές ήταν πολύ μεγάλες, καθώς 1064 κτίρια, και ειδικότερα 794 κατοικίες, 126 επαγγελματικοί χώροι, 8 δημόσια κτίρια και 136 αποθήκες και υπόγεια,

υπέστησαν ζημιές (Γαλάνης, 2017).

Αξίζει να σημειωθεί ότι στις κοίτες των ρεμάτων (Σούρες, Αγίας Αικατερίνης) υπήρχε μια σειρά από αυθαίρετες παρεμβάσεις οι οποίες μαζί με την ανεπάρκεια τεχνικών έργων ή και την πλήρη ανυπαρξία μέτρων αντιπλημμυρικής προστασίας μεγάλωσαν την καταστροφή. Ο μεγαλύτερος αριθμός απωλειών ανθρώπινων ζωών αφορούσε το ανάντη τμήμα του ποταμού Σούρες και αυτό οφείλεται στις αστοχίες της υπάρχουσας εγκεκριμένης μελέτης, καθώς και στο γεγονός ότι η κλίση του δρόμου είναι τόσο μεγάλη όπου το οδόστρωμα λειτούργησε σαν κοίτη με αποτέλεσμα να αυξάνει την ταχύτητα του νερού και τη συρτική του δύναμη. Σε αυτό το ορεινό τμήμα της Μάνδρας είναι αναγκαίο να συνταχθεί μελέτη για την αντιπλημμυρική προστασία και την εξασφάλιση της ασφαλούς κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια σχετικών πλημμυρικών φαινομένων, προκειμένου να μην ξανάυπάρξουν τόσα θύματα (Δανιλάκης, 2020). Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται η χρονοσειρά του στιγμιαίου ρυθμού βροχόπτωσης του radar XPOL του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και στην εικόνα 4 η χωρική απεικόνιση της συνολικής βροχόπτωσης στο αναφερόμενο χρονικό διάστημα (α) αναγωγή σε ανάλυση 10 X 10 km των δεδομένων του ραντάρ του ΕΑΑ και (β) το δορυφορικό προϊόν GPM IMERG.



Εικόνα 3 Χρονοσειρά του στιγμιαίου ρυθμού βροχόπτωσης (Καλογηρος et al. , 2017)



Εικόνα 4 Χωρική απεικόνιση της συνολικής βροχόπτωσης στο αναφερόμενο χρονικό διάστημα (α) αναγωγή σε ανάλυση 10 X 10 km των δεδομένων του ραντάρ του ΕΑΑ και (β) το δορυφορικό προϊόν GPM IMERG (Κοντοές et al. , 2018)

3.2.2 Ιστορικά Στοιχεία Πλημμυρών της Περιοχής

Η περιοχή της Μάνδρας και η γύρω περιοχή έχει αντιμετωπίσει και στο παρελθόν κι άλλες πλημμύρες, όχι βέβαια του ίδιου επιπέδου, αλλά με βάση τον αριθμό πλημμυρών που προ-υπήρξαν και κυρίως με την πλημμύρα στις 15 Νοεμβρίου του 2017, κρίνεται αναγκαία η πρόληψη και αντιμετώπιση μελλοντικών φαινομένων. Μια από τις πρώτες καταστροφικές πλημμύρες με μεγάλο αριθμό θανάτων πραγματοποιήθηκε τον Νοέμβριο του 1977, εξαιτίας της υπερχείλισης των ρεμάτων Γιαννούλα και Μαυριώρα. Ο απολογισμός ήταν 20 θύματα στην Μάνδρα αλλά και στην ευρύτερη περιοχή, με πολλές καταστροφές και σε υποδομές και καλλιέργιες (Η Εφημερίδα των Συντακτών, 2017). Το 1999, στο αεροδρόμιο της Ελευσίνας έγινε πλημμύρα, η οποία επηρέασε τους δήμους Μεγαρέων, Ν. Περάμου, Μάνδρας και Ελευσίνας, με κόστος ζημιών 2934702 (ΥΠΕΚΑ, Σχέδιο διαχείρισης πλημμυρών-Σημαντικές ιστορικές πλημμύρες- Επίπεδο χώρας).

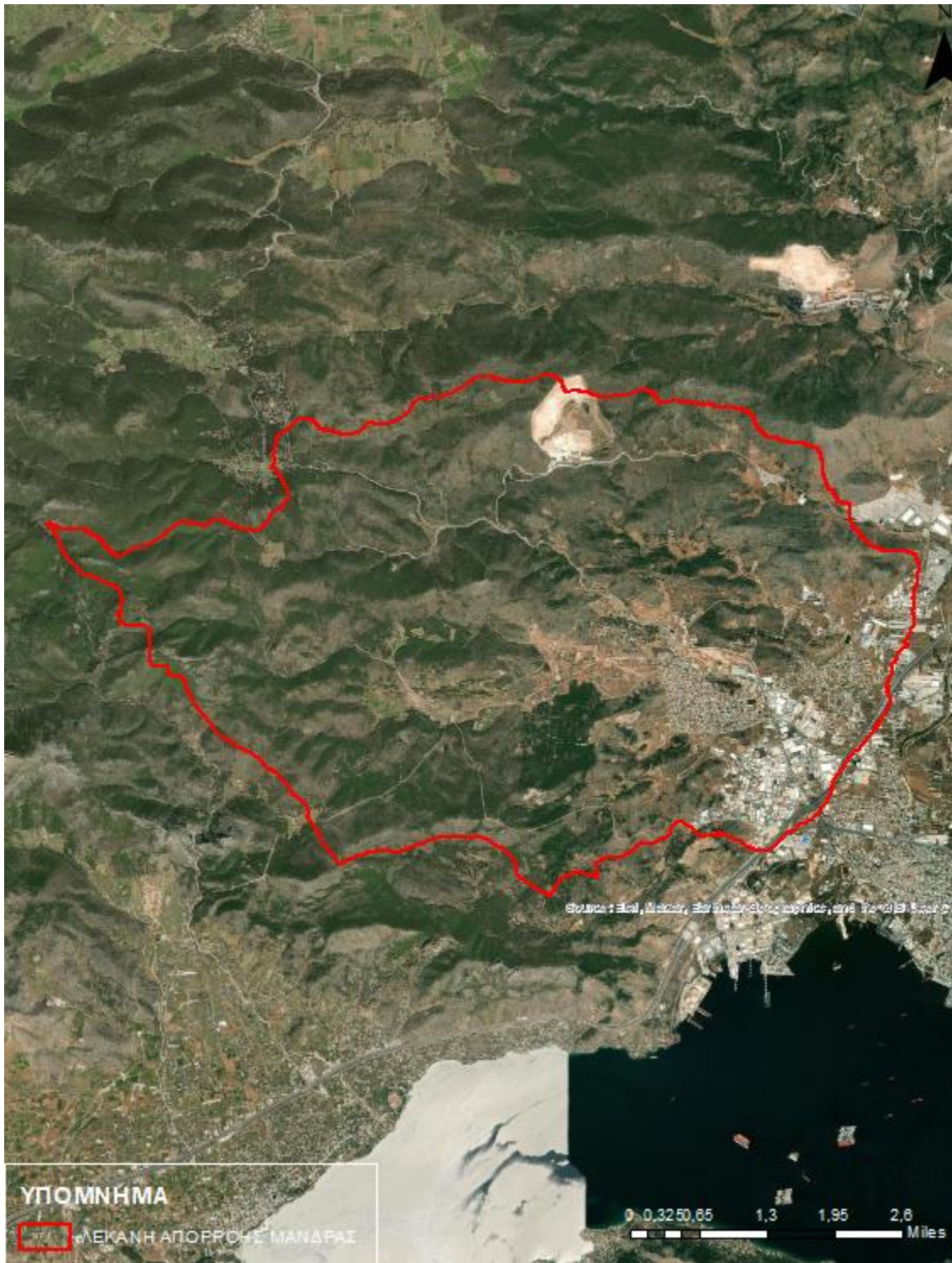
3.2.3. Ανάλυση περιοχής μελέτης

Από την συνολική λεκάνη απορροής του Σαρανταπόταμου (εικόνα 5), η υπολεκάνη μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι αυτή της Μάνδρας (εικόνα 6). Στην υπολεκάνη αυτή πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση της πλημμύρας με την μέθοδο rain-on-grid, βασισμένη στα μετρημένα δεδομένα του radar ΧΡΟΛ, ξεκινώντας από τις 14 Νοεμβρίου 2017 στις 2 το μεσημέρι μέχρι τις 15 Νοεμβρίου 2017 στις 11.40 το πρωί.

Η επιλογή των υπολεκανών που απαρτίζουν την λεκάνη απορροής της Μάνδρας έγινε με βάση τα ρέματα που διασχίζουν αυτές. Τα ρέματα τα οποία καθόρισαν την επιλογή αυτή είναι το ρέμα Σούρες και το ρέμα της Αγίας Αικατερίνης. Η διάκριση και επαλήθευση αυτών των ρεμάτων έγινε έχοντας σαν υπόβαθρο τον δορυφορικό χάρτη. Η λεκάνη απορροής της Μάνδρας έχει έκταση 67.91 km² και υπάγεται στην περιφέρεια Αττικής. Εντός αυτής βρίσκονται οι οικισμοί της Μάνδρας και της Μαγούλας, με πληθυσμούς 17,885 και 8000 κατοίκους αντίστοιχα Βρίσκεται Βόρειο-Δυτικά της Ελευσίνας στο ύψος πάνω από την Αττική Οδό.



Εικόνα 5 Λεκάνη απορροής Μάνδρας



Εικόνα 6 Λεκάνη απορροής Μάνδρας

ΡΕΜΑ ΣΟΥΡΕΣ

Το Ρέμα Σούρες είναι το ένα από τα δύο ρέματα που συντέλεσαν στην πλημμύρα της Μάνδρας στις 15 Νοεμβρίου 2017. Το ρέμα αυτό προκύπτει από την συμβολή δύο υδατορεμάτων , των οποίων η ένωση γίνεται στον Αγιο Χαράλαμπο (Αποστολίδης και άλλοι, 2017).

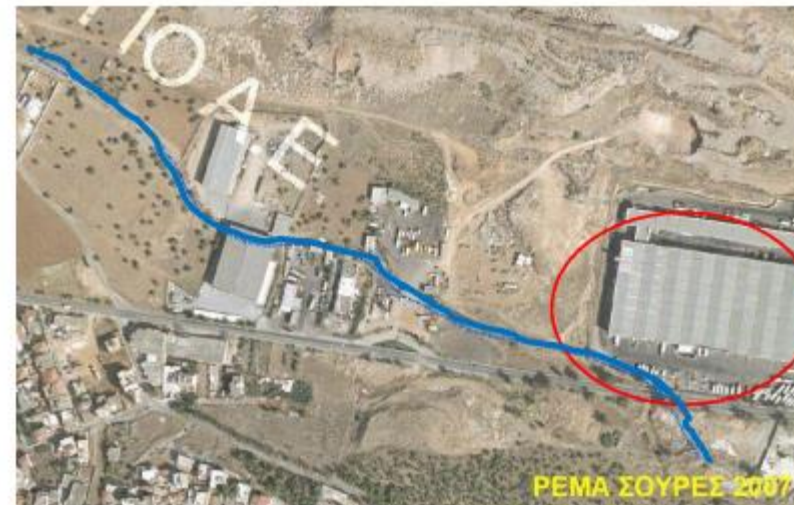
Το Ρέμα Σούρες επικαλύπτεται από την βιομηχανική περιοχή που βρίσκεται βόρεια του αστικού ιστού της Μάνδρας, καθώς στην εικόνα 7 φαίνεται η φυσική ροή του και παρεμπόδιση του λόγω των ανερχόμενων κτισμάτων κατά την πάροδο των ετών.

ΡΕΜΑ ΑΓΙΑΣ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗΣ

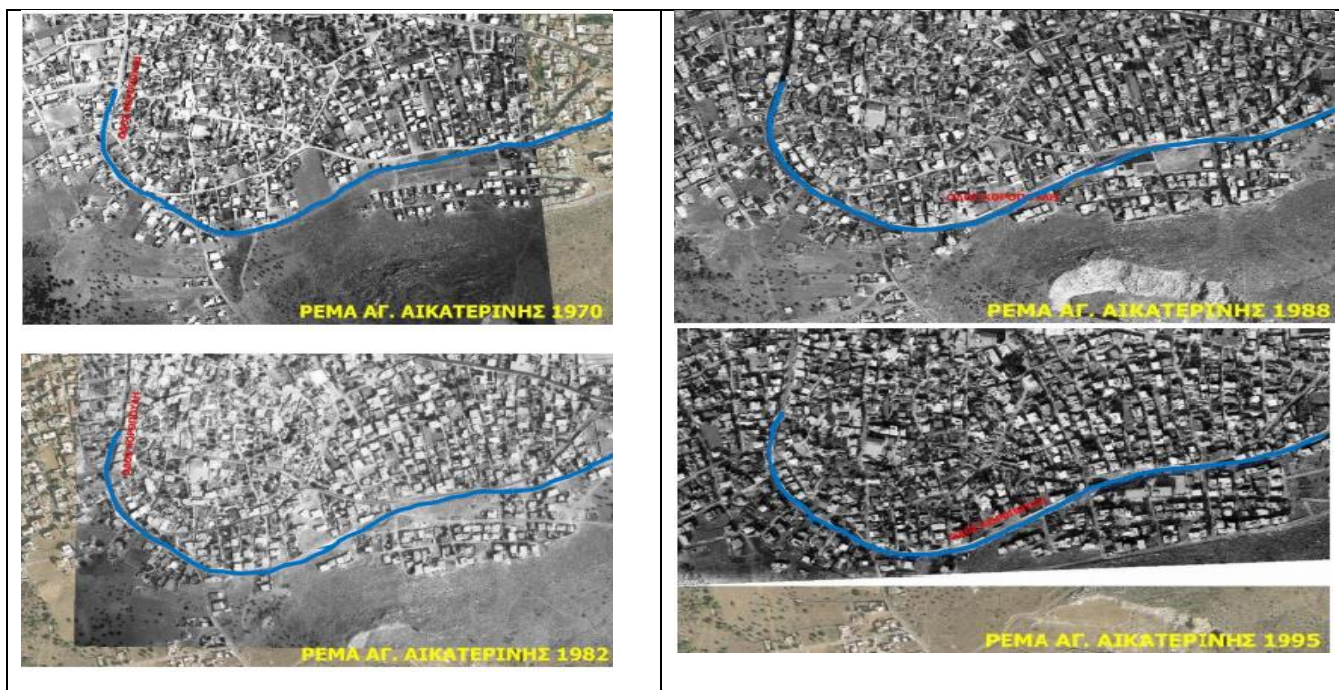
Το ρέμα της Αγίας Αικατερίνης είναι εκείνο το οποίο περνάει διαμπερώς μέσα από την πόλη της Μάνδρας και το οποίο είναι το πιο επικίνδυνο από τα δύο για αυτόν τον λόγο. Στο πιο στενό σημείο του ρέματος έχει κτιστεί ένα αμαξοστάσιο και δίπλα από αυτό ένα σούπερ μάρκετ , τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα το νερό να μην βρίσκει πουθενά δίοδο για να φύγει (Παπανικολάου/2017).

Το ρέμα της Αγίας Αικατερίνης προέρχεται από την συμβολή των χειμάρρων Κατσιμήδι και Οσίου Μελετίου (Αποστολίδης και άλλοι, 2017).

Στην εικόνα 8 φαίνεται η διαχρονική επικαλυπτώμενη φυσική πορεία του ρέματος για όλο το μήκος του:



Εικόνα 7 Σειρά ιστορικών αεροφωτογραφιών της βιομηχανικής περιοχή βόρεια της αστικής περιοχής της Μάνδρας γύρω από το σημερινό εργοστάσιο του δήμου Μάνδρας (Κοντοές et al., 2018)



Εικόνα 8 Διαχρονική επικαλυπτώμενη φυσική πορεία του ρέματος Αγ. Αικατερίνης (Κοντοές et al., 2018)

ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η Μάνδρα εντάσσεται στην χαμηλή ζώνη Ασπρόπυργου-Ελευσίνας, έκτασης 94.31 km², για την οποία σύμφωνα με το ΥΠΕΚΑ και την κατανομή των υψομέτρων για την συγκεκριμένη περιοχή, το ανάγλυφο θεωρείται πεδινό σε ποσοστό 97.35% και ημιορεινό σε ποσοστό 2.53% , ενώ για τις κλίσεις ισχύει ότι το μεγαλύτερο μέρος του αναγλύφου θεωρείται επίπεδο με κλίσεις <5% και με ποσοστό αυτών 84.76%.

Πιο συγκεκριμένα με βάση τους πίνακες του ΥΠΕΚΑ (πίνακας 2) προκύπτουν τα παρακάτω :

Πίνακας 2 Πίνακες Υψομέτρου και κλίσης εδάφους(ΥΠΕΚΑ / Σχέδιο διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας)

Πίνακας 7.71: Υψόμετρο εδάφους

Υψόμετρα	Χαρακτηρισμός αναγλύφου	% έκτασης ΖΔΥΚΠ
0-200	Πεδινό	97,35
200-600	Ημιορεινό	2,53
>600	Ορεινό	0,00

Πίνακας 7.72: Κλίσεις εδάφους

Κλίσεις	Χαρακτηρισμός αναγλύφου	% έκτασης ΖΔΥΚΠ
0-5%	Επίπεδο	84,76
5-10%	Κυματώδες	12,28
10-30%	Λοφώδες	2,84
>30%	Επικλινές	0,01

Όσον αφορά το υδρογραφικό δίκτυο, θεωρείται αρκετά πυκνό με κυρίως εποχιακής ροής χειμάρρους με αποδέκτη της απορροής της λεκάνης τον κόλπο της Ελευσίνας.

ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η χαμηλή ζώνη του Ασπρόπυργου-Ελευσίνας απαρτίζεται από τεταρτογενή κατά κύρια βάση ιζήματα , τα οποία έχουν επικαλύψει ανθρακικούς σχηματισμούς οι οποίοι εμφανίζονται περιμετρικά της ζώνης αυτής.

4.1 Γενικά

4.1.1 Εδαφολογικά χαρακτηριστικά της Λεκάνης

Πρόκειται για ζώνη μέσης επιφάνειας με το 50% των εδαφών να είναι για γεωργική χρήση, και τα υψόμετρα κυμαίνονται από 4 έως 334 μέτρα. Στη ζώνη αυτή ωστόσο περιλαμβάνεται υψηλό ποσοστό των πολεοδομικών ιστών, εκ των οποίων ο ένας είναι της Μάνδρας. Τα εδάφη έχουν κυρίαρχο τύπο C που καλύπτει περί τα 3/5 αυτής. Στο ανατολικό και δυτικό τμήμα της κυριαρχούν εδάφη τύπου B (ΥΠΕΚΑ / Σχέδιο διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας)

4.1.2 Χρήσεις γης στη Λεκάνη

Στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής κυριαρχούν οι δασικές εκτάσεις με συγκόμωση >75% και ποσοστό κάλυψης 45.06% , και ύστερα εκτάσεις γυμνού εδάφους με ποσοστό κάλυψης 15.05% (ΥΠΕΚΑ / Σχέδιο διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας).Αναλυτικότερα παρουσιάζεται στον πίνακα 3 η εκτενής και πλήρης κάλυψη χρήσεων γης.

Πίνακας 3 Χρήσεις γης ευρύτερης περιοχής Μάνδρας (ΟΠΕΚΕΠΕ 2010)

Πίνακας 7.76: Χρήσεις γης ευρύτερης περιοχής και εντός της ΖΔΥΚΠ GR06RAK0005

ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ GR06RAK0005					
Κωδ.	Περιγραφή	ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ		ΕΝΤΟΣ GR06RAK0005	
		Έκταση (km ²)	Ποσοστό (%)	Έκταση (km ²)	Ποσοστό (%)
770	Αστικές περιοχές με πυκνή δόμηση (αδιαπέρατες επιφάνειες > 40%)	22,452	4,30	9,372	9,95
720	Χωριά και οικισμοί με αραιή δόμηση (αδιαπέρατες επιφάνειες < 40%)	0,338	0,06	0,000	0,00
690	Δάση με συγκόμωση > 75%	235,450	45,06	1,503	1,60
665	Δάση με συγκόμωση 50 – 75%	61,313	11,73	0,567	0,60
630	Δάση με συγκόμωση 25 – 50%	28,767	5,51	0,430	0,46
600	Δενδρόκηποι ή δενδροκαλλιέργειες	37,374	7,15	21,118	22,43
400	Χορτολιβαδικές εκτάσεις	28,752	5,50	2,464	2,62
330	Πυκνές καλλιέργειες	6,617	1,27	2,255	2,40
320	Καλλιέργειες σιτηρών	14,659	2,81	4,786	5,08
310	Ευρείες γραμμικές καλλιέργειες	3,734	0,71	0,385	0,41
200	Γυμνό έδαφος	78,628	15,05	49,030	52,08
100	Αδιαπέρατες επιφάνειες και επιφάνειες νερού	4,444	0,85	2,241	2,38
Σύνολο		522,527	100,00	94,150	100,00

4.2 Βήματα Μοντελοποίησης

Χρήση του HEC-GeoHMS για τον προσδιορισμό της λεκάνης απορροής της Μάνδρας με την διαδικασία της προεπεξεργασίας εδάφους (Terrain preprocessing)

1. Επεξεργασία του λιθολογικού χάρτη και του χάρτη χρήσεων γης της λεκάνης απορροής της Μάνδρας
2. Εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων στο HEC-RAS και εκκίνηση της μοντελοποίησης στο RAS- Mapper
3. Δημιουργία χάρτη διήθησης με μέθοδο διήθησης SCS Curve number
4. Δημιουργία των δύο γεωμετριών (μια απλή και μια σύνθετη)

5. Προσδιορισμός απαραίτητων υδραυλικών και υδρολογικών δεδομένων στο RAS-Mapper
6. Διαδικασία υπολογισμού των δεδομένων βροχόπτωσης για την εισαγωγή τους στο HEC-RAS
7. Μοντέλο μη μόνιμης ροής με χρήση της μεθόδου ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχής
8. Εξαγωγή αποτελεσμάτων
9. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

4.3 HEC-GeoHMS

Πρωτού ξεκινήσει η μοντελοποίηση στο λογισμικό HEC-RAS, έπρεπε να προσδιοριστεί η υπολεκάνη απορροής προς μελέτη, η οποία προσδιορίστηκε με την διαδικασία της προεπεξεργασίας του εδάφους στην επέκταση του HEC-HMS συμβατή με το ArcMap, το HEC-GeoHMS.

4.3.1 Προεπεξεργασία Εδάφους

Η προεπεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους είναι μια απαραίτητη διαδικασία, προκειμένου να εξαχθούν ποιοτικά και αξιόπιστα αποτελέσματα όσον αφορά τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, έτσι ώστε στην συνέχεια να επιλεγθούν ένα μέρος αυτών για την περαιτέρω μοντελοποίηση του δισδιάστατου υδραυλικού μοντέλου. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιήθηκε έχει ανάλυση 5x5 μέτρα και διατέθηκε από το Ελληνικό Κτηματολόγιο .

Σαν δεδομένο εισόδου για την έναρξη της επεξεργασίας είναι το Ψηφιακό μοντέλο Εδάφους .

ΒΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

- Επεξεργασία του ΨΜΕ για την συμπλήρωση κενών
- Υπολογισμός κατευθύνσεων ροής

- Υπολογισμός συσσώρευσης ροής
- Προσδιορισμός ρέματος
- Τμηματοποίηση ρέματος
- Οριοθέτηση του πλέγματος της λεκάνης απορροής
- Επεξεργασία των πολυγώνων της λεκάνης απορροής
- Δημιουργία υδρογραφικού δικτύου
- Υπολογισμός υπολεκάνων απορροής
- Υπολογισμός σημείων αποστράγγισης των υπολέκωνων απορροής

4.4 HEC-RAS

Μετά την τροποποίηση και υπολογισμό των δεδομένων στο HEC-geoHMS, μπορούσε να ξεκινήσει η διαδικασία μοντελοποίησης στο RAS-Mapper.

4.4.1 Εισαγωγή και Δημιουργία Απαραίτητων Παραμέτρων

Αρχικά ορίστηκε το προβολικό σύστημα στο οποίο βρίσκονταν όλα τα δεδομένα που εισάχθηκαν και δημιουργήθηκαν, το οποίο είναι το Greek Grid.

Στην συνέχεια εισάχθηκαν σαν αναγκαία αρχεία εισόδου τα παρακάτω :

- το ψηφιακό μοντέλο εδάφους ανάλυσης 25x25 μέτρα (σαν terrain layer)
- το αρχείο χρήσεων γης της περιοχής μελέτης (σαν land cover layer)
- το αρχείο λιθολογικού χάρτη της περιοχής μελέτης (σαν Soils layer)
- οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας (Manning n) αναλόγως με τη χρήση γης
- η τιμή αδιαπερατότητας για κάθε χρήση γης της περιοχής μελέτης (Imperviousness)
- η λεκάνη απορροής που προέκυψε από το HEC-geoHMS και στις δύο γεωμετρίες (σαν perimeter)

Στην συνέχεια με βάση τα παραπάνω δεδομένα δημιουργήθηκαν τα παρακάτω αρχεία :

- ο χάρτης διήθησης του εδάφους με βάση τους χάρτες χρήσεων γης και λιθολογικό (Infiltration layer)
- οι αριθμοί καμπύλης απορροής (curve number) των χρήσεων γης αναλόγως με τον τύπο εδάφους της περιοχής μελέτης (CN_{III})
- Το πολύγωνο το οποίο περιέχει όλη την πόλη της Μάνδρας (refinement region)
- Με βάση το αρχείο χρήσεων γης, ψηφιοποιήθηκαν όλα τα οικοδομικά τετράγωνα της πόλης της Μάνδρας και ταξινομήθηκαν σε τέσσερις κατηγορίες αναλόγως με τον τύπο τους αλλά και με τέσσερις διαφορετικές τιμές συντελεστή τραχύτητας Manning η ανάλογα με τον τύπο του οικοδομικού τετραγώνου (Classification polygons)
- Το υπολογιστικό πλέγμα (computational mesh) ανάλυσης 25x25 μέτρων για όλη την λεκάνη εκτός από την πόλη της Μάνδρας όπου δημιουργήθηκε νέο πλέγμα ανάλυσης 5x5 μέτρων
- Τα breaklines τα οποία αντιπροσωπεύουν τις κεντρικές οδικές αρτηρίες αλλά και τα δύο ρέματα (Σούρες και Αγία Αικατερίνη)
- Η κατάντη οριακή συνθήκη (Boundary condition line)

Στην συνέχεια αφού το μοντέλο ολοκληρώθηκε και επικυρώθηκε ξεκίνησε η διαδικασία των σεναρίων προσομοίωσης πλημμύρας μη μόνιμης ροής για δισδιάστατη ροή για τις δυο γεωμετρίες (την απλή και την σύνθετη, όπου η μόνη διαφορά τους είναι ότι στην σύνθετη, η οποία είναι και η βασική, υπάρχουν τα πολύγωνα ταξινόμησης των χρήσεων γης εντός της πόλης της Μάνδρας, ενώ στην απλή χρησιμοποιήθηκε η αντίστοιχη χρήση γης). Αρχικά, για τον έλεγχο και την αξιοπιστία του μοντέλου, οι πρώτες προσομοιώσεις έγιναν με πλασματική βροχή αλλά με την ίδια μέθοδο, αυτήν της, χρησιμοποιώντας τις απλές εξισώσεις κυμάτων διάχυσης (diffusion wave equation). Αφού οριστικοποιήθηκε η αξιοπιστία του μοντέλου, ξεκίνησε η επεξεργασία των δεδομένων βροχόπτωσης που καταγράφηκαν από το radar του αστεροσκοπείου X-POL.

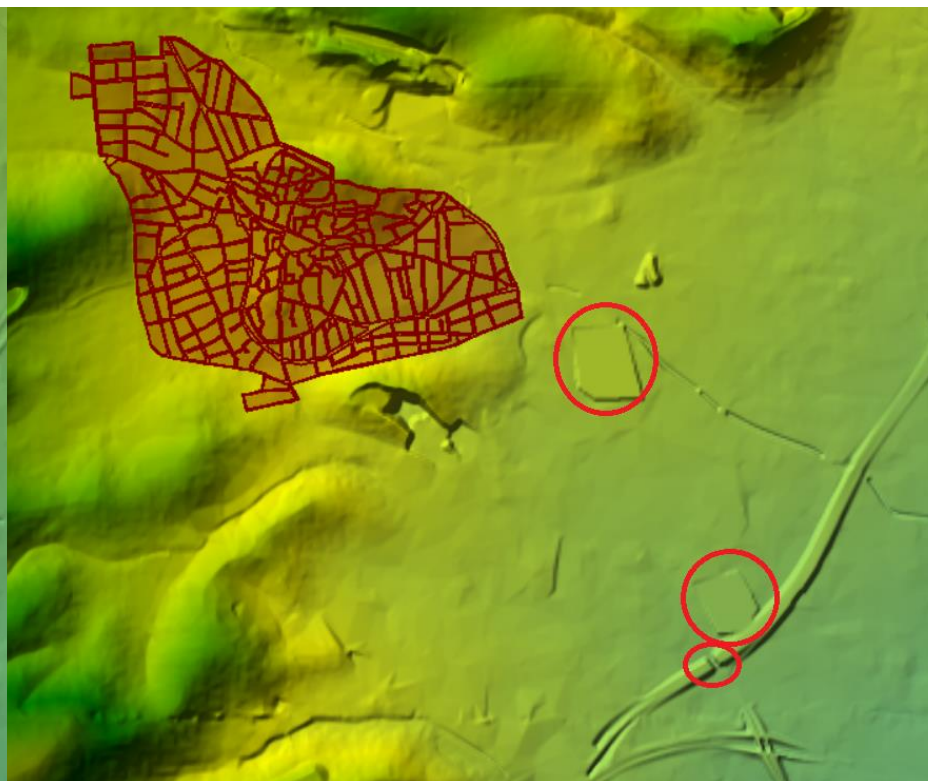
4.4.1.1 Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

Όπως προαναφέρθηκε, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους είναι το υπόβαθρο πάνω στο οποίο πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί και είναι πολύ μεγάλης σημασίας για την ακεραιότητα του μοντέλου. Το αρχικό ψηφιακό μοντέλο εδάφους είχε μηδενικές τιμές ριxel σε δύο περιοχές, επομένως χρειάστηκε να γίνει συμπλήρωση αυτών των μηδενικών τιμών, η οποία πραγματοποιήθηκε μέσω εργαλείων του ArcGIS. Επιπλέον, χρειάστηκε να γίνει επεξεργασία των τιμών των ριxel στο κατάντη όριο της λεκάνης, επειδή στην προσομοίωση του HEC-RAS, ο υπολογιστής θεωρούσε το σημείο εκείνο σαν φράγμα, ενώ στην πραγματικότητα είναι ανισόπεδος κόμβος, επομένως οι νέες τιμές των ριxel ήταν εκείνες του κάτω επιπέδου του κόμβου, καθώς είναι πιο αντιπροσωπευτικές για την αξιοπιστία και την λήψη πιο αντιπροσωπευτικών αποτελεσμάτων του μοντέλου εικόνα 9.

ΑΡΧΙΚΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ



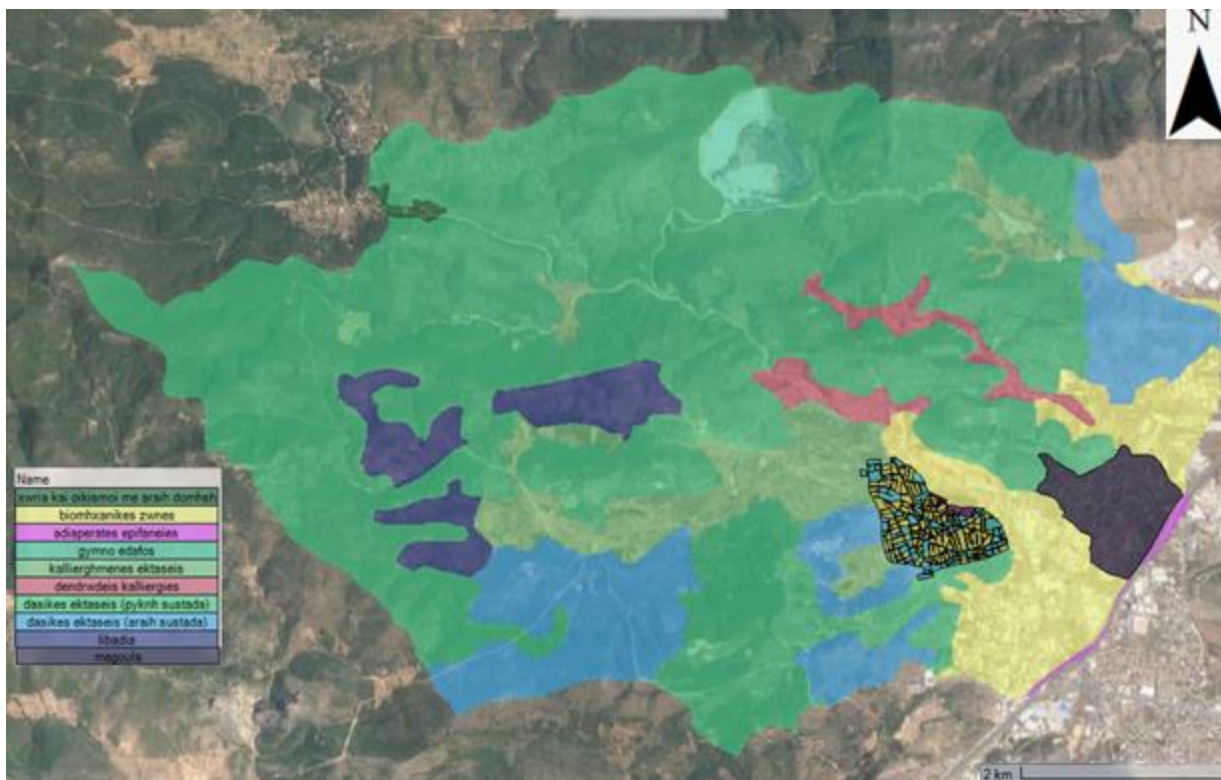
ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ



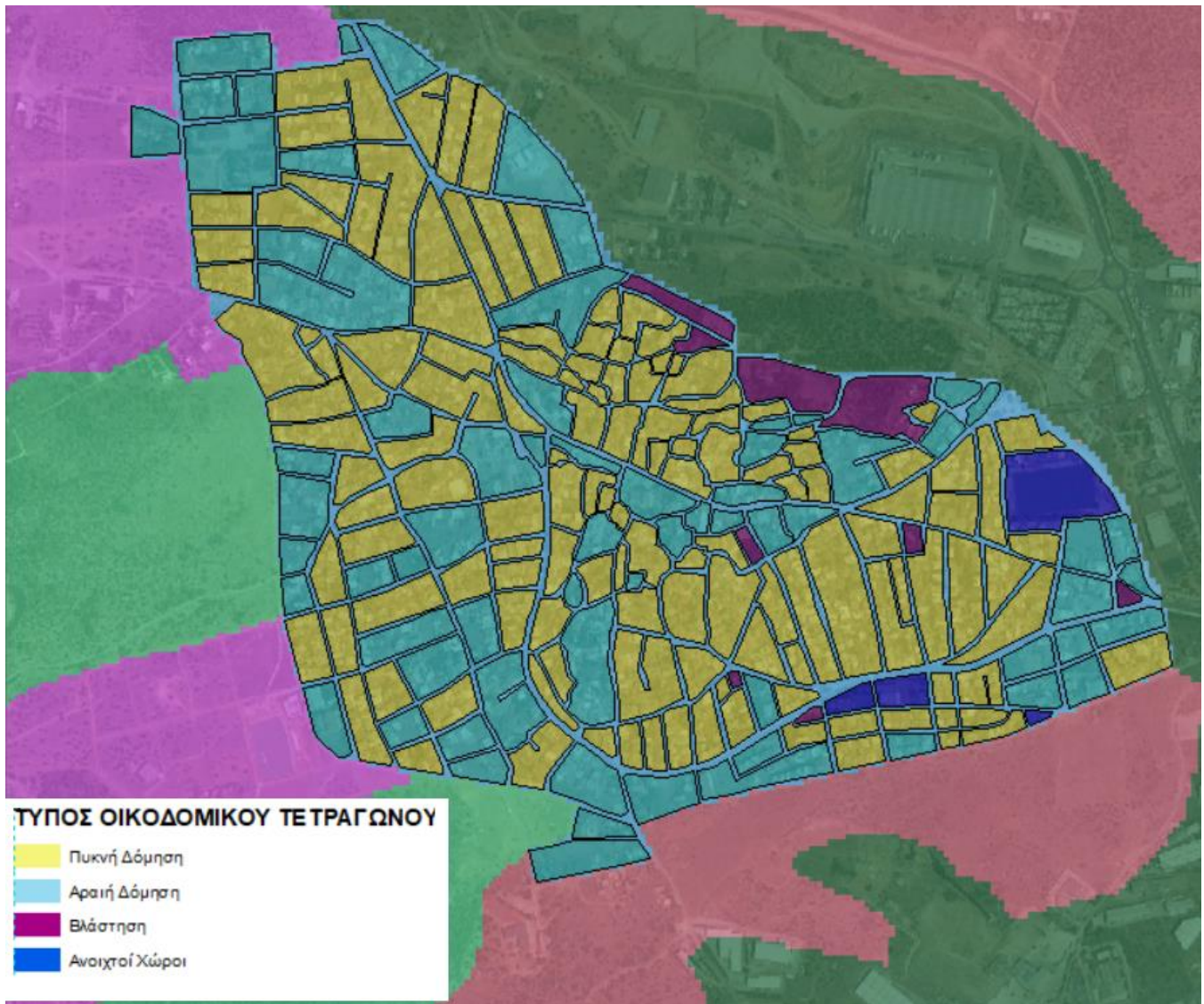
Εικόνα 9 Αλλαγές Ψηφιακού μοντέλου εδάφους

4.4.1.2 Χρήσεις γης

Στην έκδοση 6.0 οι χρήστες μπορούν να εισάγουν το αρχείο χρήσεων γης και σε μορφή shapefile και σε μορφή raster. Οι χρήσεις γης (εικόνα 10) επίσης, αφού δημιουργηθούν, συνδέονται με μια γεωμετρία. Στις χρήσεις γης που εισάχθηκαν στο RAS-Mapper σε μορφή raster για την δημιουργία του μοντέλου, έγιναν κάποιες αλλαγές. Καθώς χρησιμοποιήθηκαν δύο γεωμετρίες, χρειάστηκαν και δύο layers χρήσεων γης. Στην σύνθετη γεωμετρία όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιήθηκε μια πιο αναλυτική μορφή χρήσεων γης, στην οποία έχουν ψηφιοποιηθεί όλα τα οικοδομικά τετράγωνα εντός της πόλης της Μάνδρας (εικόνα 11) . Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η πόλη της Μάνδρας να φερθεί σαν αυτόνομο layer με δικές του τιμές Manning n, επομένως να «αφαιρεθούν» από την κατηγορία «χωριά και οικισμοί με χαμηλή δόμηση» των χρήσεων γης. Στην περιοχή μελέτης υπάρχουν δύο στοιχεία που είναι ενταγμένα στην κατηγορία «χωριά και οικισμοί με χαμηλή δόμηση», η πόλη της Μάνδρας και η πόλη της Μαγούλας. Επομένως, η «αφαίρεση» αυτή στην ουσία σημαίνει ότι η δεύτερη πόλη, δηλαδή η Μαγούλα, ψηφιοποιήθηκε ξεχωριστά. Η ψηφιοποίηση της Μαγούλας σαν ξεχωριστή χρήση γης (εικόνα 12) ήταν αναγκαία, γιατί στην αρχική χρήση γης «χωριά και οικισμοί με χαμηλή δόμηση» κρατήθηκε η Μάνδρα για να αποδοθούν οι τιμές Manning των δρόμων, οι οποίοι πρακτικά είναι τα διαστήματα ανάμεσα στα μη-ψηφιοποιημένα οικοδομικά τετράγωνα. Στην απλή γεωμετρία χρησιμοποιήθηκε το αρχικό αρχείο χρήσεων γης. Τέλος, οι χρήσεις γης επαναταξινομήθηκαν από 14 σε 9 ευρύτερες χρήσεις γης (πίνακας 4).



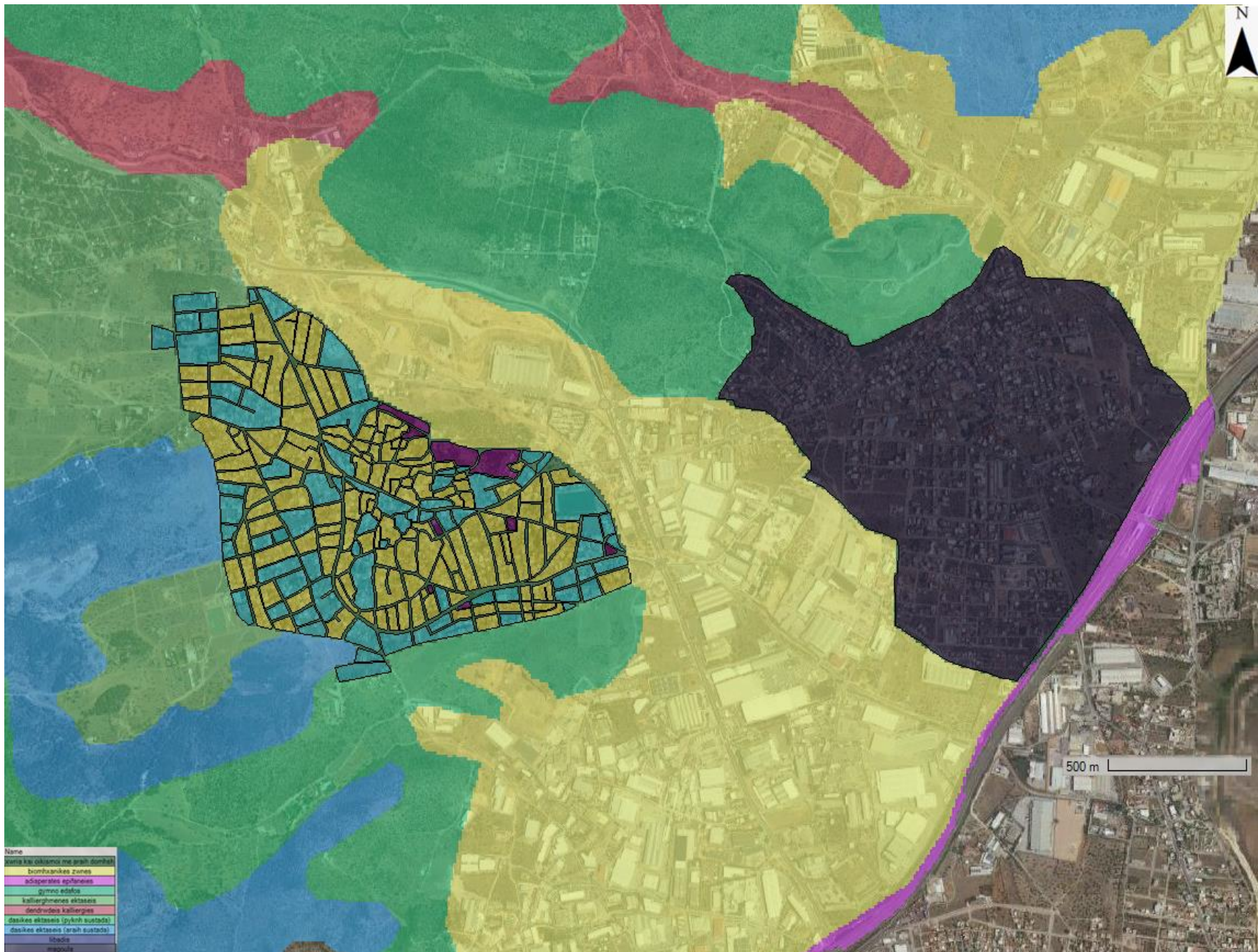
Εικόνα 10 Χρήσεις γης λεκάνης απορροής Μάνδρας



Εικόνα 11 Χρήσεις γης πολυγώνων ταξινόμησης εντός της πόλης της Μάνδρας

Πίνακας 4 Επαναταξινόμηση χρήσεων γης λεκάνης απορροής Μάνδρας

CORINE Land Cover Code	Corine Land Cover Description	Reclassified Land Use Category	Reclassified Land Use Category (Description)
112	Discontinuous urban construction	1	Χωριά και οικισμοί με αραιή δόμηση (αδιαπέρατες επιφάνειες < 40%)
121	Industrial or commercial zones	2	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες
122	Road and rail network	3	Αδιαπέρατες επιφάνειες (δρόμοι, χώροι παρκινγκ, αεροδρόμια)
131	Mineral extraction sites	4	Γυμνό έδαφος
211	Non-irrigable arable land	5	Καλλιεργημένες εκτάσεις
223	olive groves	6	Δενδρώδεις καλλιέργειες
242	Complex crop systems	5	Καλλιεργημένες εκτάσεις
243	Land covered mainly by crops with significant areas of natural vegetation	5	Καλλιεργημένες εκτάσεις
312	Coniferous forests	7	Δασικές εκτάσεις (πυκνή συστάδα)
313	Mixed forests	7	Δασικές εκτάσεις (πυκνή συστάδα)
321	Natural grasslands	9	Λιβάδια
323	Hardwood vegetation	7	Δασικές εκτάσεις (πυκνή συστάδα)
324	Transitional bushy areas	8	Δασικές εκτάσεις (αραιή συστάδα)
333	Sparse vegetation	8	Δασικές εκτάσεις (αραιή συστάδα)

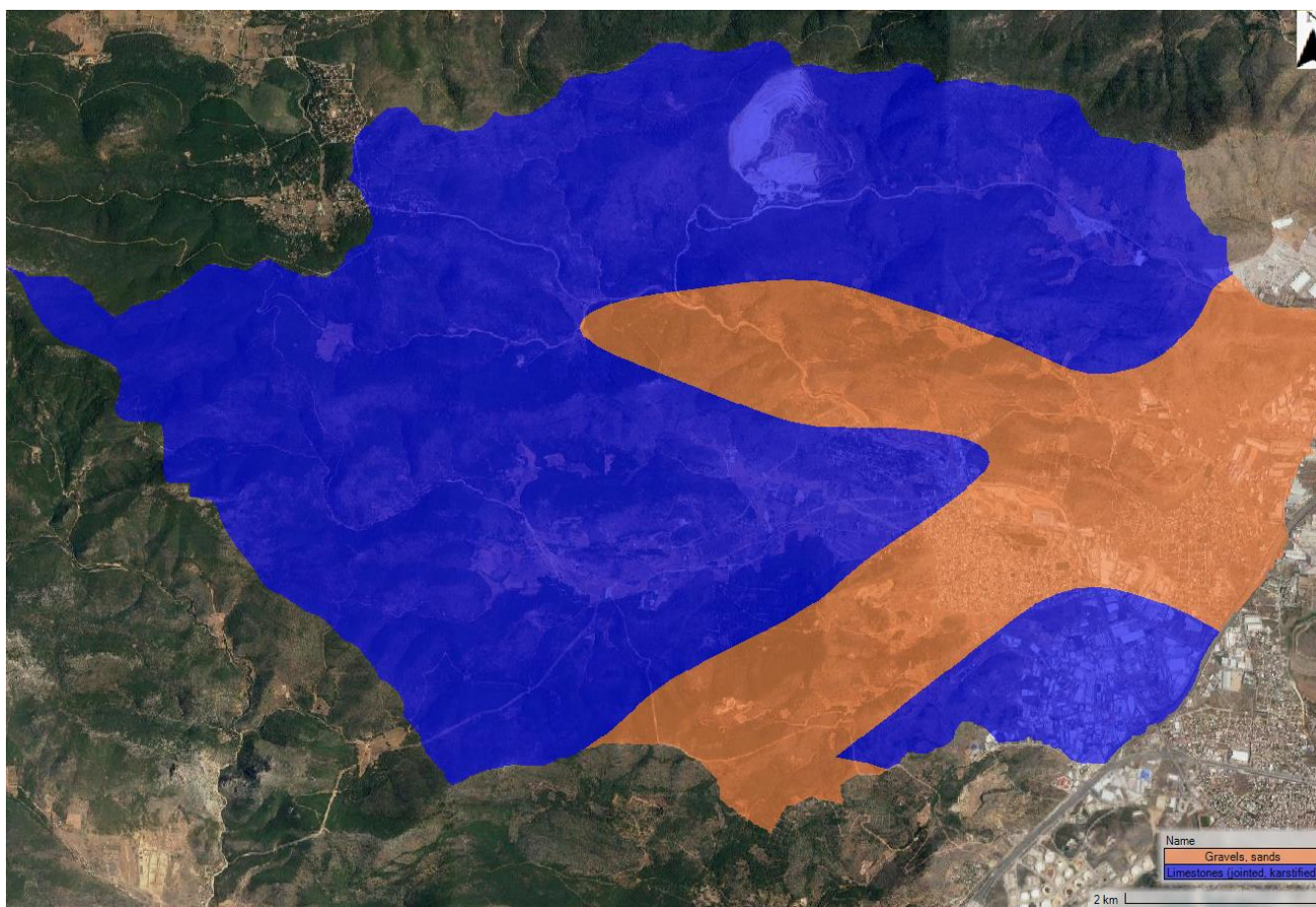


Εικόνα 12 Διαφοροποίηση αστικών χρήσεων γης Μάνδρας και Μαγούλας (Μάνδρα αριστερά / Μαγούλα δεξιά)

4.4.1.3 Εδάφη

Η χρήση των εδαφικών δεδομένων είναι προαιρετική στο HEC-RAS. Αυτά χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της διήθησης για την μοντελοποίηση της απορροής της βροχόπτωσης. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της χωρικής μεταφοράς φερτών σε δισδιάστατη μοντελοποίηση.

Στην λεκάνη απορροής που εξήχθη, βρέθηκαν δύο είδη εδαφών, τα χαλικιώδη/αμμώδη και τα ασβεστολιθικά. Η κατηγορία του έδαφους είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό των αριθμών καμπύλης (CN). Στην Εικόνα 13, με μπλε χρώμα φαίνονται τα ασβεστολιθικά εδάφη και με πορτοκαλί τα χαλικιώδη/αμμώδη.



Εικόνα 13 Τύποι εδαφών λεκάνης απορροής Μάνδρας

4.4.1.4 Αριθμοί καμπύλης (Curve Number)

Οι αριθμοί καμπύλης κατατάσσονται σε 3 κατηγορίες ανάλογα με τις συνθήκες πρότερης εδαφικής υγρασίας. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου μοντέλου, θεωρήθηκε αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν τα CN_{III} (πίνακας 5) ,καθώς μετά από πολλά σενάρια προσομοιώσεων φαινόταν ότι δεν επαρκούσε η τιμή των CN_{II} γιατί το γεγονός ήταν ακραίο με πολύ υψηλή περίοδο επαναφοράς. Ο τύπος μετατροπής απο CN_{II} σε CN_{III} είναι ο εξής (ΥΠΕΚΑ,Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας) :

$$CN_{III} = \frac{(2.3 CN_{II})}{(1+0.013 CN_{II})} \quad (7)$$

Πίνακας 5 Αριθμοί καμπύλης απορροής CN2/CN3 για τις επαναταξινομημένες χρήσεις γης

Corine Land Cover Description	Reclassified Land Use Category (Description)	CN2 value per land use and soil category				CN3 value per land use and soil category			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Discontinuous urban construction	Χωριά και οικισμοί με αραιή δόμηση (αδιαπέρατες επιφάνειες < 40%)			75				87	
Industrial or commercial zones	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες			88				94	
Road and rail network	Αδιαπέρατες επιφάνειες (δρόμοι, χώροι παρκινγκ, αεροδρόμια)			98				99	
Mineral extraction sites	Γυμνό έδαφος			86				93	
Non-irrigable arable land	Καλλιεργημένες εκτάσεις			81				90	
olive groves	Δενδρώδεις καλλιέργειες			66				81	
Complex crop systems	Καλλιεργημένες εκτάσεις			81				90	
Land covered mainly by crops with significant areas of natural vegetation	Καλλιεργημένες εκτάσεις			81				90	
Coniferous forests	Δασικές εκτάσεις (πυκνή συστάδα)			55				73	
Mixed forests	Δασικές εκτάσεις (πυκνή συστάδα)			55				73	
Natural grasslands	Λιβάδια			58				76	
Hardwood vegetation	Δασικές εκτάσεις (πυκνή συστάδα)			55				73	
Transitional bushy areas	Δασικές εκτάσεις (αραιή συστάδα)			66				81	
Sparse vegetation	Δασικές εκτάσεις (αραιή συστάδα)			66				81	

4.4.1.5 Διήθηση

Όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SCS, η οποία υπολογίζει το περίσσειμα βροχόπτωσης συναρτήσει αθροιστικού βάθους βροχής, της κάλυψης του εδάφους, της χρήσης γης και της προηγούμενης εδαφικής υγρασίας ως:

$$P_e = \begin{cases} 0 & \text{για } P < I_a \\ \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} & \text{για } P \geq I_a \end{cases} \quad (8)$$

όπου:

P_e : το συνολικό περίσσειμα βροχής

P : το συνολικό ύψος βροχόπτωσης

I_a : η αρχική απώλεια βροχής

S : η πιθανή μέγιστη εδαφική κατακράτηση

Η αρχική απώλεια βροχής μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει της πιθανής μέγιστης εδαφικής κατακράτησης ως:

$$I_a = r S \quad (9)$$

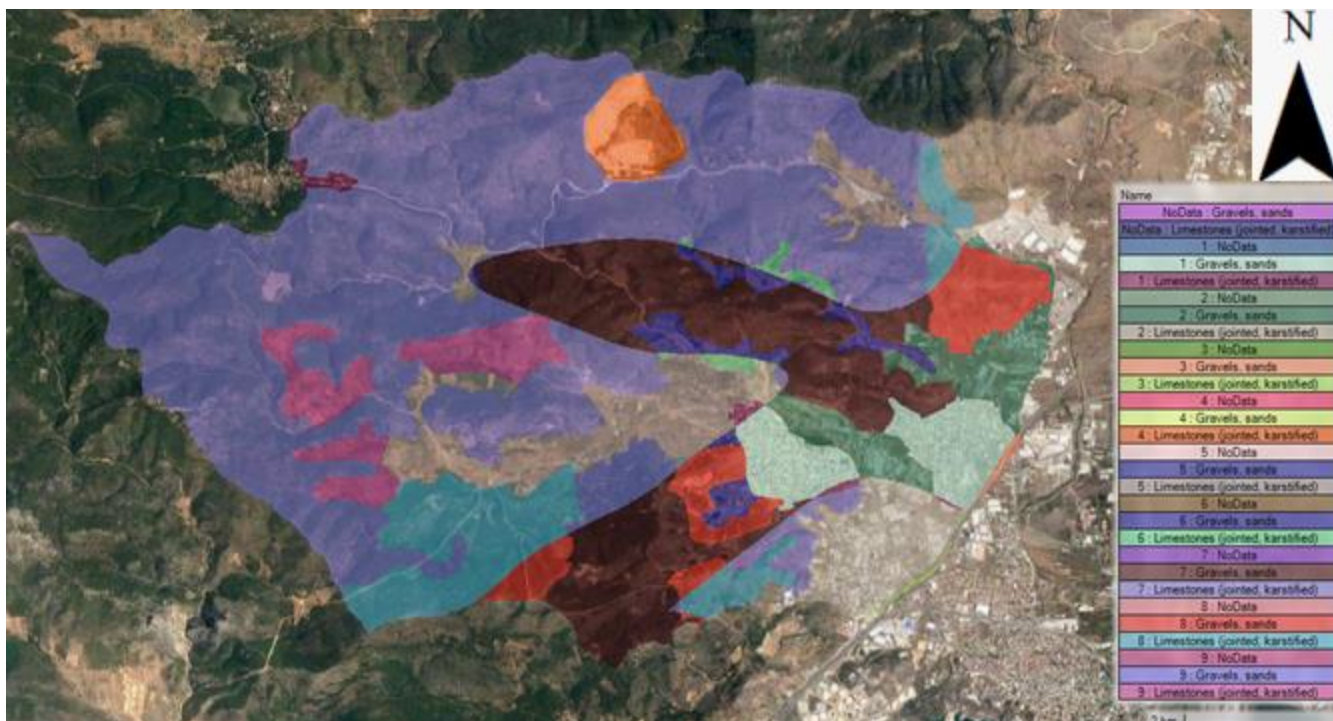
όπου:

r : αριθμός μεταξύ 0.05-0.2

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (10)$$

όπου, οι τιμές του αριθμού καμπύλης κυμαίνονται από 30 για διαπερατά εδάφη με υψηλό βαθμό διήθησης έως 100 για υδάτινα σώματα και εδάφη με χαμηλό βαθμό διήθησης (HEC-RAS 6.0 Reference manual).

Η μέθοδος SCS παρόλα αυτά έχει το πρόβλημα, ότι, όσο αυξάνεται η βροχόπτωση, η διήθηση μπορεί να γίνει εξωπραγματικά μικρή. Για τον λόγο αυτό, η μέθοδος έχει τροποποιηθεί έτσι, ώστε να υπάρχει ένας ελάχιστος ρυθμός διήθησης που μπορεί να καθοριστεί από τον χρήστη, ο οποίος χρησιμοποιείται κάθε φορά που ο ρυθμός διήθησης πέφτει κάτω από αυτόν τον ρυθμό και υπάρχει επαρκής βροχόπτωση. Τέλος, το layer της διήθησης απαρτίζεται από τον συνδυασμό των χρήσεων γης και εδαφών και το οπτικό του αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 14. Κάθε ένα χρώμα αντιπροσωπεύει έναν συνδυασμό χρήσης γης/τύπου εδάφους και έχει μια τιμή αριθμού καμπύλης απορροής (CN) (πίνακας 6).



Εικόνα 14 Χάρτης διήθησης λεκάνης απορροής Μάνδρας

Πίνακας 6 Συνδυασμός χρήσης γης/τύπου εδάφους συνοδευόμενα από μια τιμή αριθμού καμπύλης απορροής (CN) για κάθε ένα από αυτά για την συγκεκριμένη περιοχή μελέτης)

ID	NAME	CN3
0	NoData	80
1	NoData : Gravels, sands	80
2	NoData : Limestones (jointed, karstified)	80
3	Χωριά και οικισμοί με αραιή δόμηση (αδιαπέρατες επιφάνειες < 40%) : NoData	87
4	Χωριά και οικισμοί με αραιή δόμηση (αδιαπέρατες επιφάνειες < 40%) : Gravels, sands	87
5	Χωριά και οικισμοί με αραιή δόμηση (αδιαπέρατες επιφάνειες < 40%) : Limestones (jointed, karstified)	87

6	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες : NoData	94
7	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες : Gravels, sands	94
8	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες : Limestones (jointed, karstified)	94
9	Αδιαπέρατες επιφάνειες (δρόμοι, χώροι παρκινγκ, αεροδρόμια) : NoData	99
10	Αδιαπέρατες επιφάνειες (δρόμοι, χώροι παρκινγκ, αεροδρόμια) : Gravels, sands	99
11	Αδιαπέρατες επιφάνειες (δρόμοι, χώροι παρκινγκ, αεροδρόμια) : Limestones (jointed, karstified)	99
12	Γυμνό έδαφος : NoData	93
13	Γυμνό έδαφος : Gravels, sands	93
14	Γυμνό έδαφος : Limestones (jointed, karstified)	93
15	Καλλιεργημένες εκτάσεις : NoData	91
16	Καλλιεργημένες εκτάσεις : Gravels, sands	91
17	Καλλιεργημένες εκτάσεις : Limestones (jointed, karstified)	91
18	Δενδρώδεις καλλιέργειες : NoData	82
19	Δενδρώδεις καλλιέργειες : Gravels, sands	82
20	Δενδρώδεις καλλιέργειες : Limestones (jointed, karstified)	82
21	Δασικές εκτάσεις (πυκνή συστάδα) : NoData	76

22	Δασικές εκτάσεις (πυκνή συστάδα) : Gravels, sands	76
23	Δασικές εκτάσεις (πυκνή συστάδα) : Limestones (jointed, karstified)	76
24	Δασικές εκτάσεις (αραιή συστάδα) : NoData	82
25	Δασικές εκτάσεις (αραιή συστάδα) : Gravels, sands	82
26	Δασικές εκτάσεις (αραιή συστάδα) : Limestones (jointed, karstified)	82
27	Λιβάδια : NoData	74
28	Λιβάδια : Gravels, sands	74
29	Λιβάδια : Limestones (jointed, karstified)	74

Τα κελιά των name τα οποία περιέχουν NoData, προέκυψαν από προβληματικό κόψιμο των στωμάτων χρήσης γης και εδάφους στα όρια της λεκάνης, και πρακτικά είναι μεμονομένες τιμές εικονοστοιχείων οι οποίες δεν έχουν τιμή στα όρια της λεκάνης.

4.4.1.6 Αρχεία γεωμετρίας

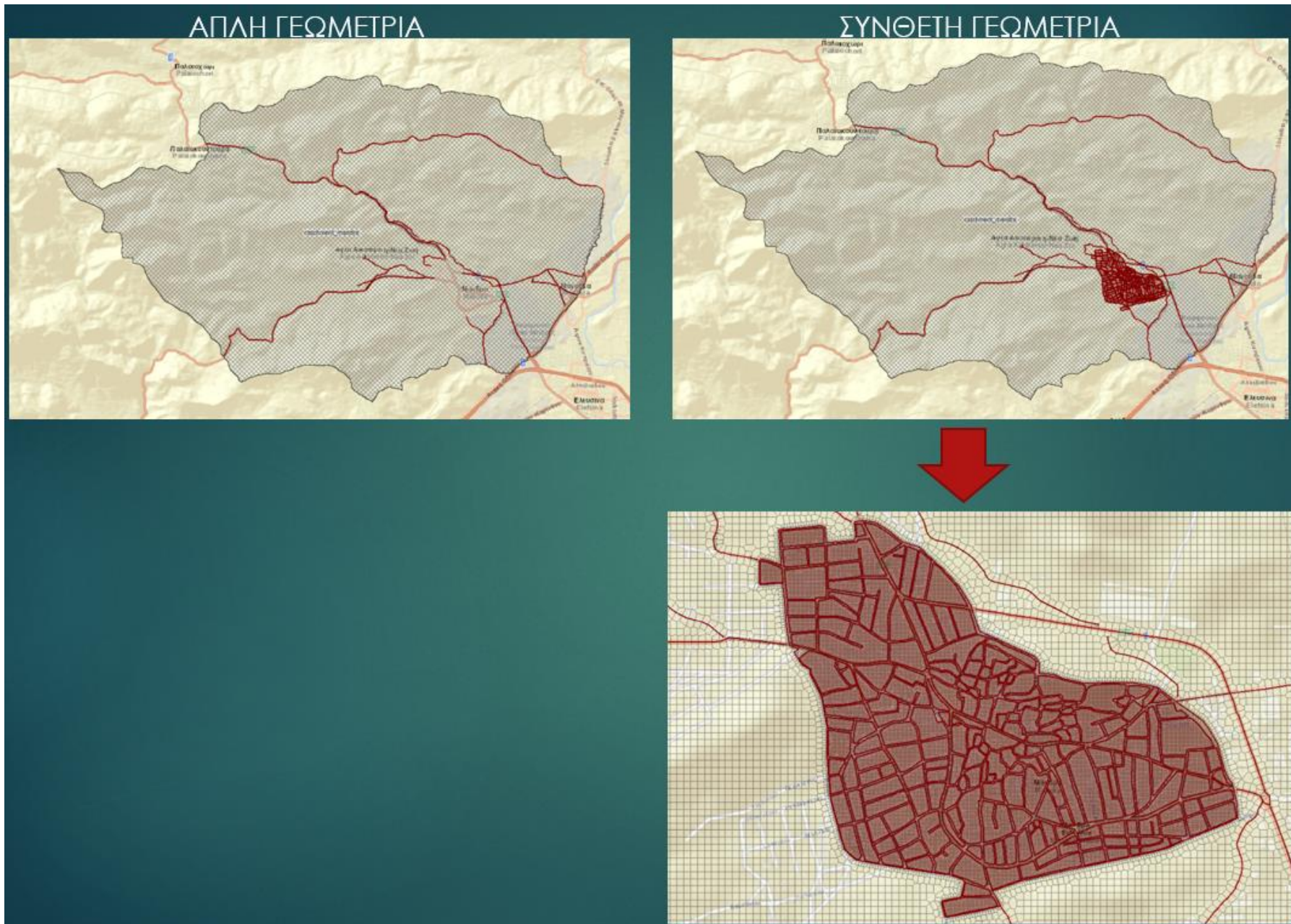
Όπως προαναφέρθηκε, δημιουργήθηκαν δύο γεωμετρίες, μια απλή και μια σύνθετη. Η μόνη τους διαφορά βρίσκεται στην αναπαράσταση της πόλης της Μάνδρας (εικόνα 16). Στην σύνθετη γεωμετρία, η πόλη της Μάνδρας μοντελοποιήθηκε με λεπτομέρεια, προκειμένου να υπάρξουν αξιόπιστα και ρεαλιστικά δεδομένα με όσο τον δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια γίνεται. Η απλή γεωμετρία είναι ένα είδος μέτρου σύγκρισης και αξιολόγησης αυτής σε σχέση με την σύνθετη, δηλαδή κατά πόσο έχει διαφορά στα αποτελέσματα πλημμυρικών αποτελεσμάτων η λεπτομερής αυτή μοντελοποίηση.

Η κάθε γεωμετρία έχει ένα σύνολο αρχείων που είναι συνδεδεμένα μαζί της (εικόνα 15), τα οποία είναι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, οι τιμές των συντελεστών τραχύτητας Manning n, το αρχείο διήθησης, το ποσοστό αδιαπερατότητας και το αρχείο εδαφών.

Manage Layer Associations >

Type	RAS Geometry Layers	Terrain	Manning's n	Infiltration	% Impervious	Sediment Bed Material Layer
Geometry	mandra	fixed_terrain_V4	LandCover	Infiltration	LandCover	(None)
Geometry	O_T_geometry	fixed_terrain_V4	Landcover_O_T_geom...	Infiltration	Landcover_O_T_geom...	(None)

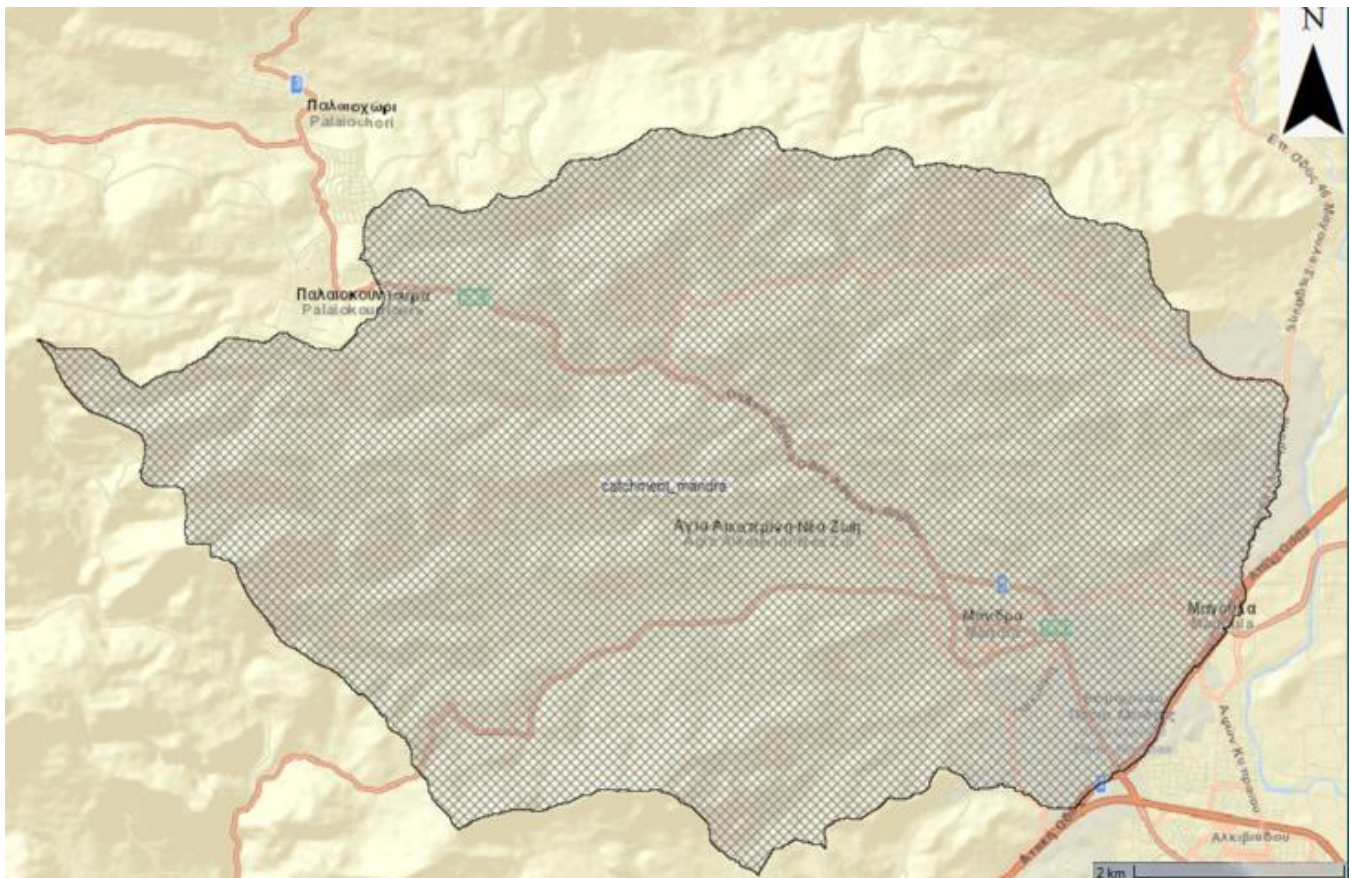
Εικόνα 15 Γεωμετρίες και συσχετιζόμενα υπόβαθρα



Εικόνα 16 Σύγκριση απλής και σύνθετης γεωμετρίας

4.4.1.7 Περίμετρος μοντέλου (Perimeter)

Η περίμετρος του μοντέλου (εικόνα 17) καθορίζει τα όρια με βάση τα οποία θα τρέξει η προσομοίωση. Στην μελέτη αυτή η περίμετρος είναι η λεκάνη απορροής της Μάνδρας όπως αυτή προέκυψε από το HEC-geoHMS.

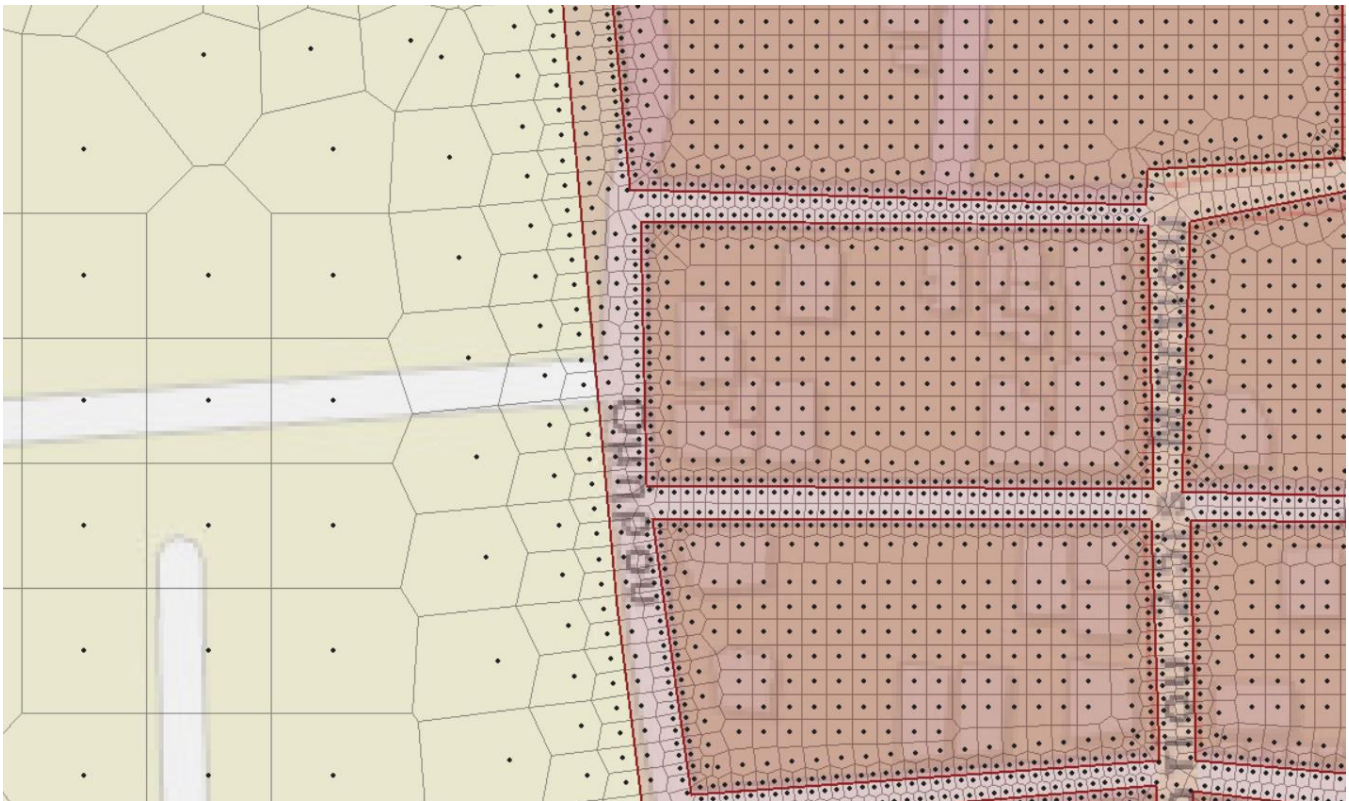


Εικόνα 17 Περίμετρος περιοχής μελέτης

4.4.1.8 Δισδιάστατο υπολογιστικό πλέγμα (2D mesh area)

Το υπολογιστικό πλέγμα καθορίζει τις διαστάσεις του κάθε κελιού εντός της περιμέτρου και συνήθως πρέπει να είναι ανάλογο της ανάλυσης του ψηφιακού μοντέλου εδάφους που έχει υπόβαθρο, όπου στην περίπτωση αυτή είναι 25x25 μέτρα. Είναι σημαντικό να κατανοηθεί ο τρόπος με τον οποίο το υπολογιστικό πλέγμα αναπαριστά το υποκείμενο ψηφιακό μοντέλο εδάφους προκειμένου να παρθεί

για μια σωστή απόφαση σχετικά με το πόσα κελιά και τι μεγέθους θα είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν ώστε να μοντελοποιηθεί το έδαφος και το γεγονός με ακρίβεια. Εντός της πόλης της Μάνδρας, το υπολογιστικό πλέγμα για μεγαλύτερη λεπτομέρεια (εικόνα 18) έχει 5x5 μέτρα ανάλυση μέσω της δημιουργίας των refinement region και των breaklines. Επιπλέον, για υψηλότερη ανάλυση περιμετρικά των πολυγώνων, επιλέγεται ανάλυση 2.5 μέτρων.

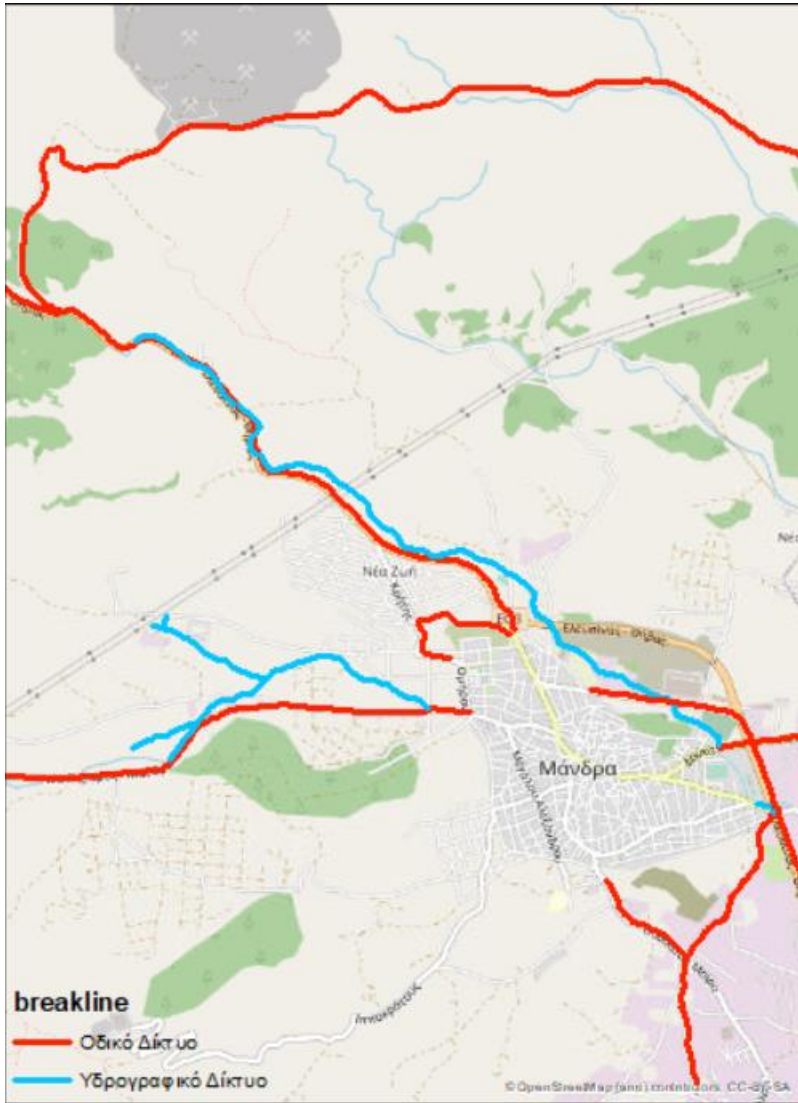


Εικόνα 18 Ενδεικτική εικόνα ανάλυσης κελιών εντός και εκτός της πόλης της Μάνδρας

4.4.1.9 Breaklines και Refinement Regions

Τα breaklines καθώς και τα refinement regions, μπορούν να τοποθετηθούν εντός μια δισδιάστατης περιοχής ροής προκειμένου να προσαρμόσουν στο πλέγμα ένα γεωμετρικό στοιχείο. Στην παρούσα περίπτωση, αντιπροσωπεύουν τις κεντρικές οδικές αρτηρίες όπως αυτές αποτυπώνονται στο OpenStreetMap αλλά και με επαλήθευση αυτών μέσω του Google Satellite, αλλά και τα δύο ρέματα που αφορούν την λεκάνη απορροής της Μάνδρας (εικόνα 19), του ρέματος Σούρες και Αγίας Αικατερίνης. Η χρήση των breaklines και των refinement regions είναι καθοριστική για την λεπτομερή

μοντελοποίηση αλλά και απαραίτητη, καθώς χωρίς την ύπαρξη τους το μοντέλο δεν θα μπορούσε να τρέξει λόγω πολλών σφαλμάτων και ασαφειών.



Εικόνα 19 Τύποι breakline που χρησιμοποιήθηκαν κατά την μοντελοποίηση

4.4.1.10 Κατάντη οριακή συνθήκη (Boundary Condition Line)

Σαν οριακές συνθήκες μπορούν να ορισθούν οι παρακάτω :

- Καμπύλη μεταβολής στάθμης ροής (Stage hydrograph)
- Υδρογράφημα επιφανειακής απορροής (Flow hydrograph)

- Καμπύλη μετρήσεως παροχής κατάντη (Rating curve)
- Ομοιόμορφο βάθος (Normal depth)

Για το ομοιόμορφο βάθος, ο χρήστης χρειάζεται να επιλέξει μια τιμή για την κλίση, η οποία βασίζεται στην κατα μήκος γραμμή της οριακής συνθήκης, και η οποία χρησιμοποιείται μαζί με την εξίσωση Manning για να υπολογιστεί το ομοιόμορφο βάθος.

Στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε μόνο κατάντη οριακή συνθήκη, καθώς η βροχή έπεφτε ομοιόμορφα σε όλη την λεκάνη και αυτή ήταν η οριακή συνθήκη μη μόνιμης ροής. Σαν κατάντη οριακή συνθήκη ορίστηκε το ομοιόμορφο βάθος με κλίση (εικόνα 20), η οποία επιλέχθηκε μετά από δοκιμές και είναι ίση με 0.001.



Εικόνα 20 Με μπλέ χρώμα απεικονίζεται η γραμμή κλίσης ως κατάντη οριακή συνθήκη

4.4.1.11 Συντελεστής τραχύτητας Manning n

Ο συντελεστής τραχύτητας Manning n είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος στις υδρολογικές διεργασίες και εκφράζει την απώλεια της ενέργειας. Ορισμένες τρέχουσες μέθοδοι για την εκτίμηση της τραχύτητας του Manning (Harun-ur-Rashid, 1990) απαιτούν τη συλλογή δεδομένων για το βάθος των επιφανειακών υδάτων (Zhe li et al., 2001). Η τιμή του Manning παίζει καθοριστικό ρόλο στην έκβαση αντιπροσωπευτικών και αξιόπιστων αποτελεσμάτων, στην περίπτωση που δεν είναι γνωστές οι ακριβείς τιμές και γίνεται μια προσέγγιση. Στην παρούσα εργασία δεν έγινε βαθμονόμηση των τιμών, και επιλέχθηκαν για τις γενικές χρήσεις γης που απαρτίζουν την περιοχή μελέτης οι μέσες τιμές των ευρών τιμών για κάθε χρήση γης (πίνακας 7), και για τα πολύγωνα ταξινόμησης οι τιμές 50, 20, 0.1, 0.04 για την πυκνή δόμηση, αραιή δόμηση, βλάστηση και ανοιχτούς χώρους αντίστοιχα (πίνακας 8), με βάση την διπλωματική εργασία του Σπύρου Χανδρινού (Χανδρινός/2021), στην οποία μετά από βαθμονόμηση των τιμών των συντελεστών Manning, αυτές είναι οι καταληκτικές. Ο συντελεστής της ευρύτερης περιοχής της πόλης της Μάνδρας αντιπροσωπεύει την τιμή Manning των δρόμων, η οποία είναι 0.05. Παρόλα αυτά, το αρνητικό αυτών των υψηλών τιμών εντός της πόλης, είναι πως καθώς οι τιμές 50 και 20 είναι μη ρεαλιστικές τιμές και χρησιμοποιούνται καθαρά λόγω έλλειψης δεδομένων DSM, ως εναλλακτική λύση, οι ταχύτητες που αναπτύσσονται εντός αυτών των πολυγώνων, είναι τόσο μικρές που το νερό στις προσομοιώσεις δεν προλαβαίνει να κυλήσει έξω από αυτά εντός του χρόνου προσομοίωσης, και αυτό οφείλεται στην επιλογή της οριακής συνθήκης που επιλέχθηκε.

Πίνακας 4 Ταξινόμηση τιμών συντελεστή τραχύτητας Manning n για χρήσεις γης

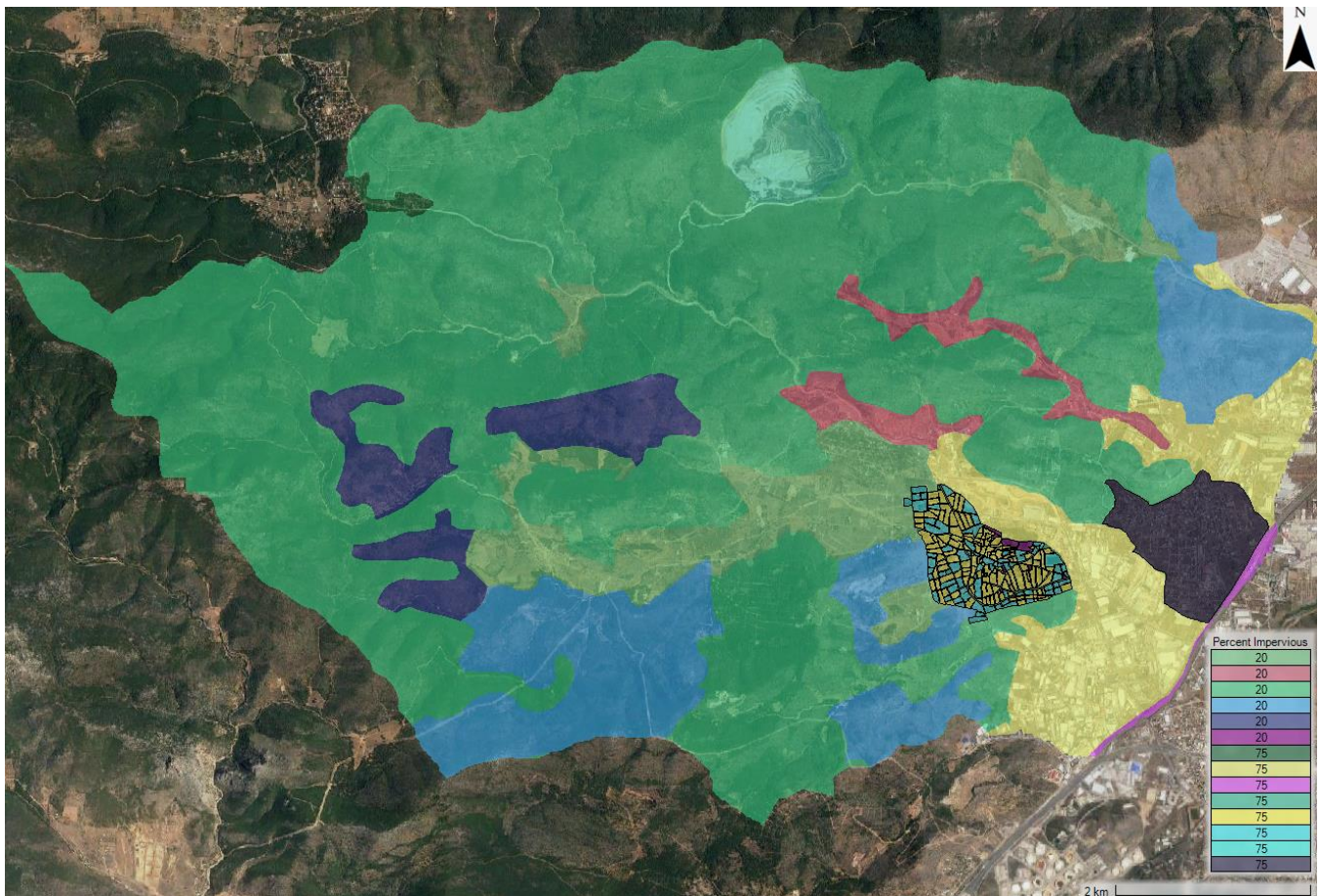
Manning's roughness coefficient classification			
Land Use Categorization according to HEC-RAS 2D Manual	Reclassified Land Use Code	Roughness coefficient range	Manning's
Developed, Medium Intensity	1, 2	0.08 - 0.16	0.12
Barren Land (Rock/Sand/Clay)	4	0.023 - 0.03	0.0265
Mixed forests (deciduous or evergreen)	7	0.08 - 0.2	0.14
Shrub/scrub	8	0.07 - 0.16	0.115
Pasture/ grasslands	9	0.025 - 0.05	0.0375
Cultivated Crops	5, 6	0.020 - 0.05	0.035
Paved roads/car park/driveways	3	0.02 - 0.03	0.025

Πίνακας 5 Συντελεστής Τραχύτητας Manning's n πολυγώνων ταξινόμησης

Συντελεστής Τραχύτητας Manning's n πολυγώνων ταξινόμησης [s/m^{1/3}]	
Πυκνή δόμηση	50
Αραιή δόμηση	20
Βλάστηση	0.1
Ανοιχτοι χώροι	0.04

4.4.1.12 Αδιαπερατότητα (imperviousness)

Για τον προσδιορισμό της αδιαπερατότητας χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του Copernicus, τα οποία περιέχουν τις τιμές για κάθε ποσοστιαία τιμή από 1% έως 100% αδιαπερατότητας, και προσαρμόστηκαν στην περιοχή μελέτης αλλά και έγινε επαναταξινόμηση των τιμών αυτών σε 5 κλάσεις ποσοστιαίων τιμών: 20%, 40%, 60%, 80% και 100%. Οι τιμές αδιαπερατότητας χρειάστηκαν ουσιαστικά μέσα στην πόλη της Μάνδρας, αλλά και για την συνολική λεκάνη (εικόνα 21). Μετά την επαναταξινόμηση, έγινε ένα είδος μέσης τιμής για κάθε χρήση γης, για να υπολογιστούν οι τελικές τιμές (πίνακας 9).



Εικόνα 21 Χάρτης αδιαπερατότητας λεκάνης απορροής Μάνδρας

Πίνακας 6 Τιμές αδιαπερατότητας για τις χρήσεις γης στην λεκάνη απορροής της Μάνδρας

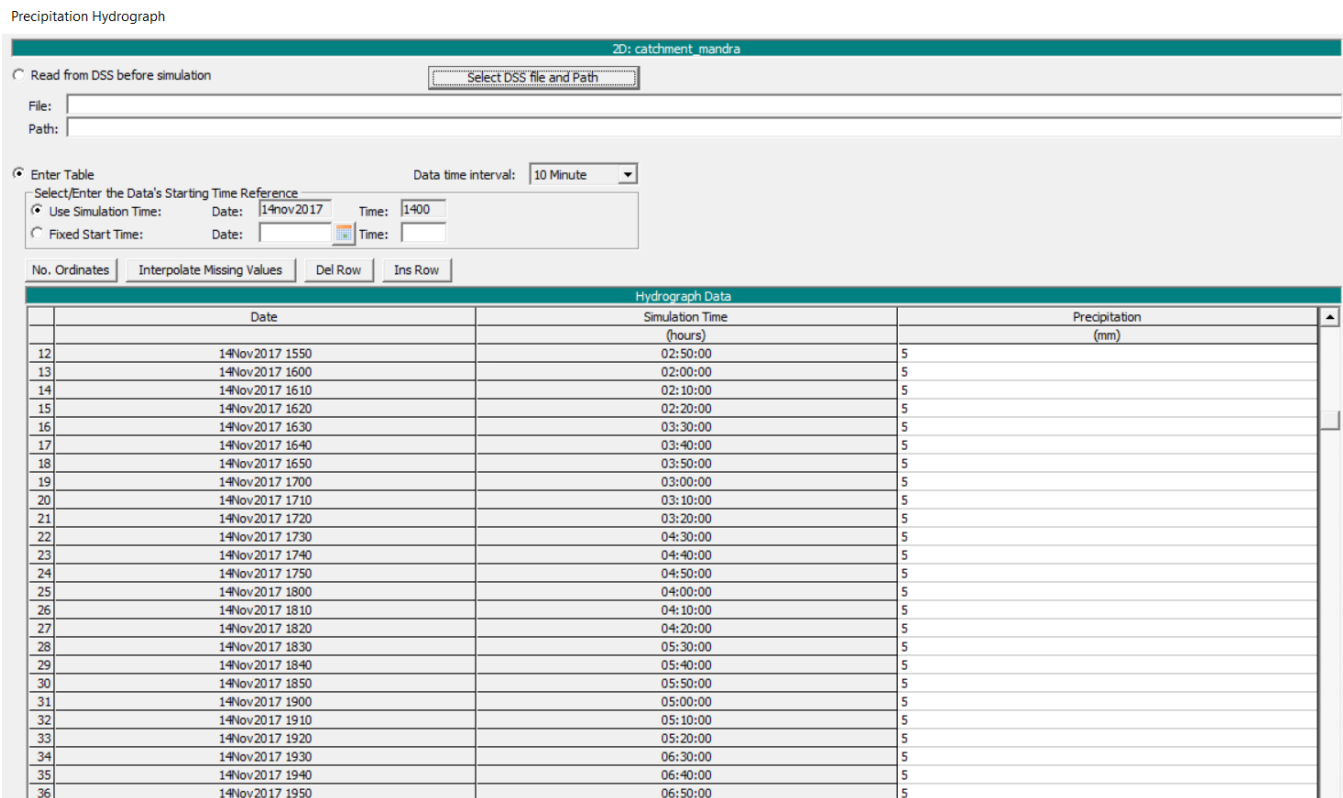
ID	NAME	Percent Imperviouss
1	Χωριά και οικισμοί με αραιή δόμηση	75
0	NoData	0
14	Μαγούλα	75
9	Λιβάδια	20
5	Καλλιεργημένες Εκτάσεις	20
4	Γυμνό Έδαφος	75
6	Δενδρώδεις καλλιέργιες	20
7	Δασικές εκτάσεις (πυκνή συστάδα)	20
8	Δασικές εκτάσεις(αραιή συστάδα)	20
2	Βιομηχανικές ζώνες	75
3	Αδιαπέρατες επιφάνειες	75
13	Ανοιχτοί χώροι	75
12	Βλάστηση	20
11	Αραιή δόμηση	75
10	Πυκνή δόμηση	75

4.4.1.13 Ανάλυση μη μόνιμης ροής (Unsteady flow analysis)

Αφού πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση και επαληθεύτηκε η ορθότητα της, ξεκίνησε η διαδικασία των πλημμυρικών προσομοιώσεων στο μοντέλο. Οι συνθήκες ανάλυσης είναι μη μόνιμης ροής, και οι πρώτες προσομοιώσεις έγιναν με τις απλές εξισώσεις ώστε να ελεγχθεί ότι το μοντέλο δεν έχει

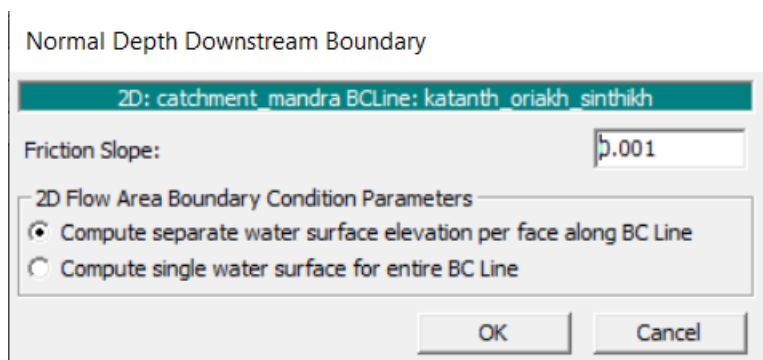
σφάλματα, ή αν έχει να διορθωθούν. Επιπλέον, με την χρήση των απλών εξισώσεων έγιναν δοκιμές για διάφορα σενάρια, πρωτού χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις Saint Venant.

Στην αρχή, έγινε χρήση πλασματικής βροχόπτωσης (εικόνα 22) για τον έλεγχο της μεθόδου rain-on-grid, και μετά τον επιτυχή έλεγχο, εισήχθη η πραγματική βροχόπτωση. Η πλασματική αυτή βροχόπτωση, προέκυπτε από το συνολικό ύψος βροχής που ήταν 200 mm κατανεμημένο ανά 10-λεπτο βήμα για 6 ώρες και 40 λεπτά , δηλ. 5 mm ανά 10-λεπτο. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 2 αρχεία πλασματικής βροχής , όπου τα δεδομένα βροχόπτωσης ήταν ίδια, και η μόνη διαφορά τους ήταν ότι ήταν ένα για κάθε είδος γεωμετρίας, δηλαδή ένα για την σύνθετη και ένα για την απλή.



Εικόνα 22 Screenshot με χρονοσειρά πλασματική βροχόπτωσης

Στην συνέχεια ως κατάντη οριακή συνθήκη όπως έχει προαναφερθεί, χρησιμοποιήθηκε η κλίση, όπου μετά απο δοκιμές των τιμών της, θεωρήθηκε σαν μέση κλίση η τιμή 0.001 (εικόνα 23) , και αυτή χρησιμοποιήθηκε για όλες τις τελικές προσομοιώσεις.



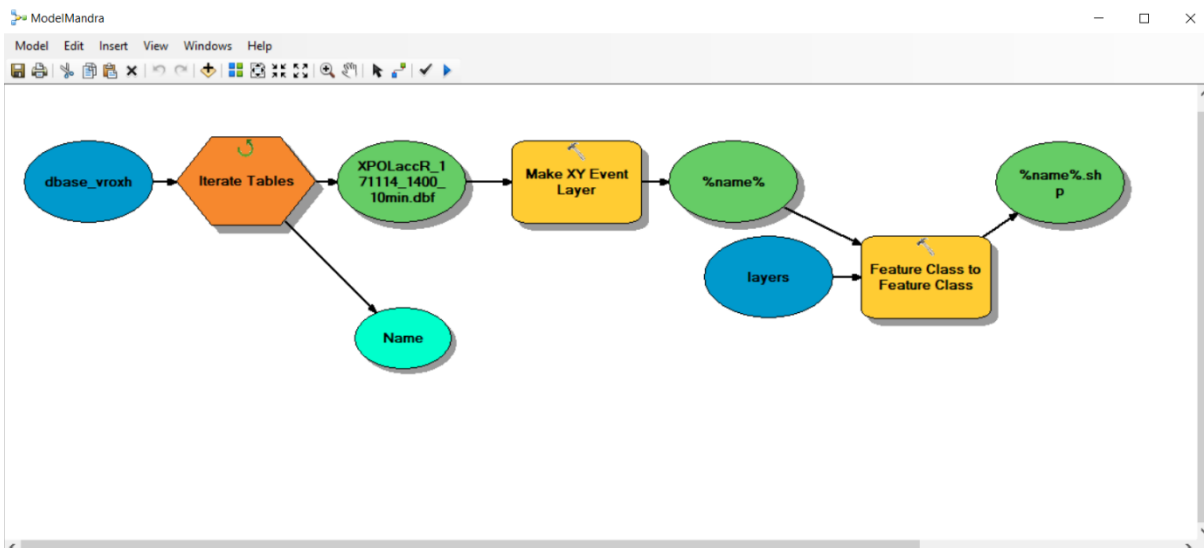
Εικόνα 23 Screenshot για την τιμή κλίσης στην κατάντη οριακή συνθήκη

Τα βροχομετρικά δεδομένα τα οποία εν τέλει εισήχθησαν είναι τα παρακάτω, τα οποία βασίζονται στις μετρήσεις του radar X-POL του Αστεροσκοπείου Αθηνών. Ως ημερομηνία έναρξης έχει εισαχθεί η 14^η Νοεμβρίου 2017 και ώρα 14:00 το μεσημέρι, και ημερομηνία λήξης η 15^η Νοεμβρίου 2017 και ώρα 18:00 , δηλαδή προστέθηκαν 6 ώρες ακόμα μετά το γεγονός. Αυτό έγινε προκειμένου το νερό να απορρεύσει μετά τη λήξη της πλημμύρας και να προκύψουν έτσι τα τελικά βάθη.

Η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων της βροχόπτωσης έγινε στο ArcMap. Τα δεδομένα ήταν σε μορφή CSV, επομένως χρησιμοποιήθηκε εργαλείο του ArcGIS που τα μετέτρεψε σε σημειακά shapefile. Επίσης, επειδή τα αρχεία που καταγράφηκαν από το radar ήταν βροχόπτωση 10-λέπτου βήματος αλλά για διάρκεια 20 ώρες και 40 λεπτά, τα CSV αρχεία ήταν πάρα πολλά σε αριθμοί, επομένως ό,τι εργαλείο και διαδικασία χρησιμοποιήθηκε στο ArcMap ήταν με χρήση επαναληπτικής διαδικασίας (Batch process).

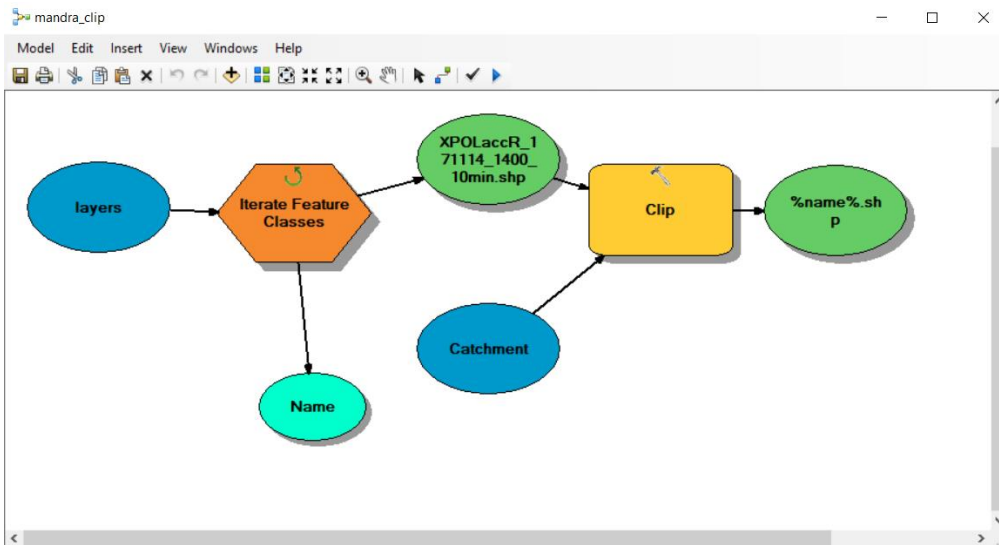
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων βροχής είναι η εξής :

- Μετατροπή των δεδομένων βροχής από CSV σε σημειακά shapefile (εικόνα 24) με βάση τις X Y συντεταγμένες τους από το αρχείο CSV και σαν Z πληροφορία θεωρήθηκε το ύψος βροχής



Εικόνα 24 Μοντέλο μετατροπής των CSV αρχείων σε shapefile

- «Κόψιμο» (εικόνα 25) των σημειακών δεδομένων (εικόνα 26) στην περιοχή μελέτης

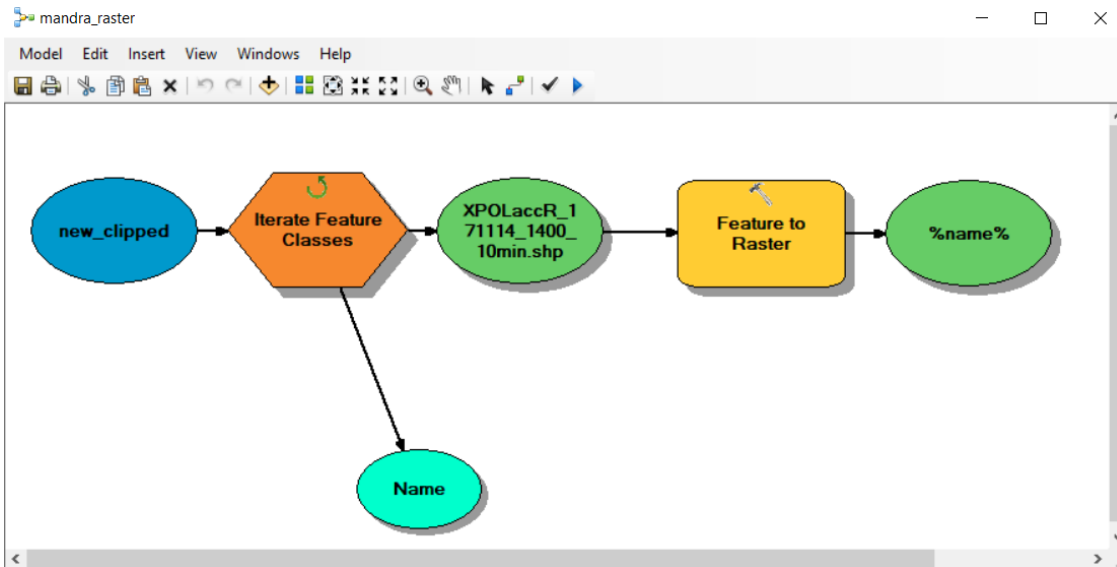


Εικόνα 25 Μοντέλο clip των δεδομένων στην περιοχή μελέτης



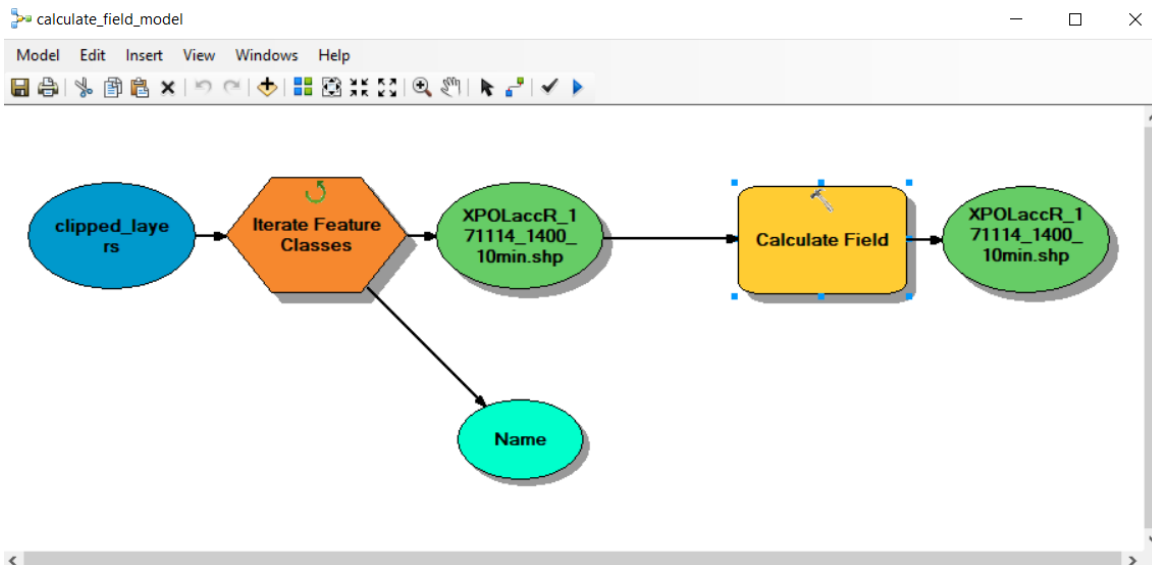
Εικόνα 26 Σημειακές τιμές βροχόπτωσης στην λεκάνη απορροής

- Μετατροπή των κομμένων σημειακών δεδομένων σε αρχεία raster (εικόνα 27)

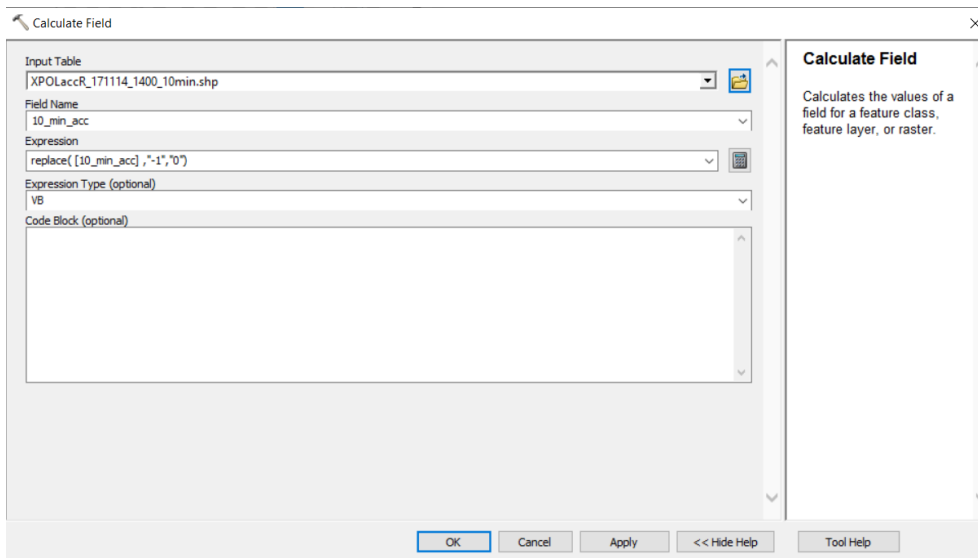


Εικόνα 27 Μοντέλο μετατροπής shapefile σε raster αρχεία

- Αντικαταστήθηκαν όλες οι τιμές των rixel που ήταν -1 σε 0 , δηλαδή όσα rixel δεν είχαν τιμή τους δώθηκε η τιμή 0 για να γίνουν οι υπολογισμοί (εικόνες 28,29)

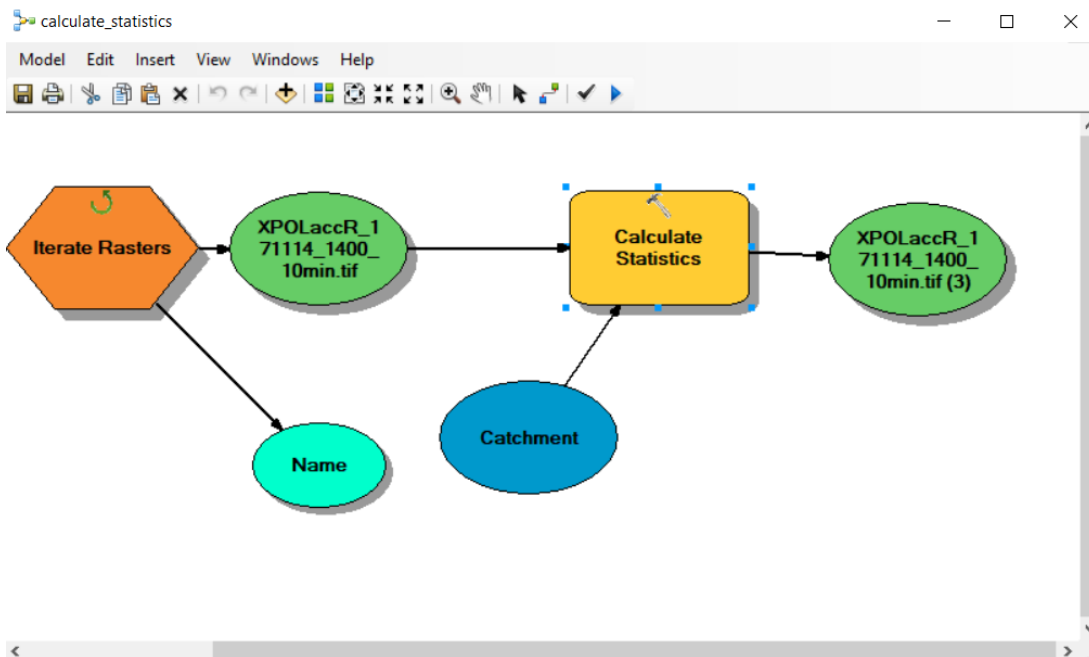


Εικόνα 28 Μοντέλο μετατροπής αρνητικών τιμών

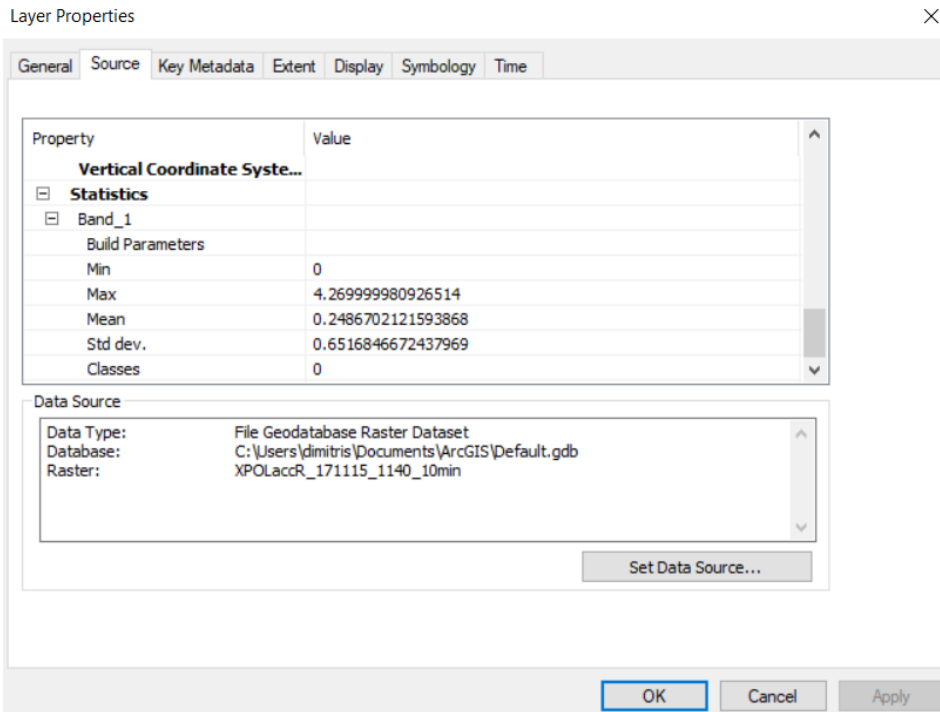


Εικόνα 29 Screenshot για την έκφραση μετατροπής των αρνητικών τιμών

- Τέλος, έγινε ο υπολογισμός στατιστικών (εικόνα 30), όπου βρέθηκαν οι μέσες τιμές της βροχής για κάθε ένα αρχείο 10-λεπτης βροχής (εικόνα 31) και οι οποίες αποτελούν τα δεδομένα εισόδου στο HEC-RAS

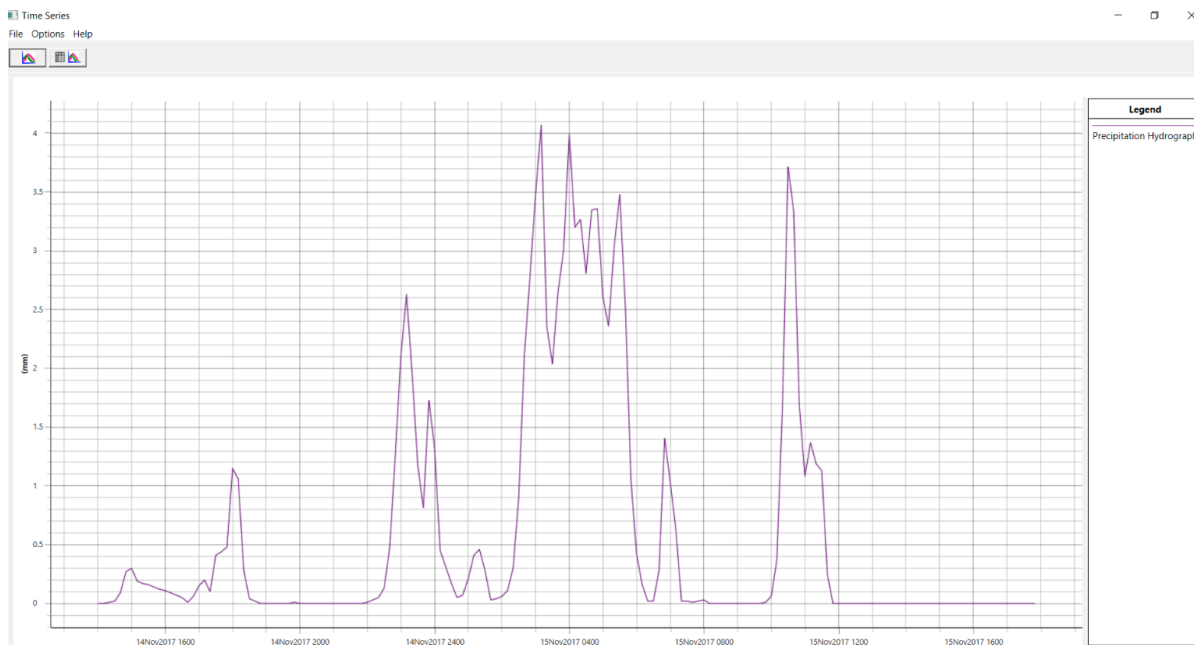


Εικόνα 30 Μοντέλο υπολογισμού στατιστικών στοιχείων των raster αρχείων



Εικόνα 31 Screenshot για τις ιδιότητες raster αρχείου με τις τιμές των στατιστικών του

Εν τέλει, το υετογράφημα που εισήχθη στο HEC-RAS για τις προσομοιώσεις της απλής και της σύνθετης γεωμετρίας είναι το παρακάτω (εικόνα 32):



Εικόνα 32 Υετογράφημα εισόδου στο HEC-RAS

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 32 η βροχή είχε 4 απότομες εναλλαγές έντασης και αυτό δυσκόλεψε αρκετά τις προσομειώσεις, καθώς έπρεπε να προσαρμοστεί αναλόγως το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, κάτι που πήρε πολλές χρονοβόρες δοκιμές μέχρι να σταματήσει να βγάζει σφάλματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Εισαγωγή

Μετά την μοντελοποίηση και επεξεργασία όλων των δεδομένων, έγινε η εξαγωγή των αποτελεσμάτων, τα οποία παρίστανται σε μορφή εικόνων, πινάκων και διαγραμμάτων.

Στο HEC-RAS, τα αποτελέσματα της κάθε μιας πλημμυρικής προσομοίωσης περιλάμβαναν τα βάθη ροής, τις ταχύτητες ροής, τις παροχές αιχμής και την στάθμη επιφάνειας του νερού (από μέγιστη έως ελάχιστη). Οι πλημμυρικές προσομοιώσεις έγιναν όπως προαναφέρθηκε για περιόδους επαναφοράς $T=50, 100, 500$ και 1000 έτη και για τις δύο γεωμετρίες (απλή και σύνθετη).

5.2 Όμβριες Καμπύλες Περιόδων Επαναφοράς $T=50, 100, 500, 100$ έτη

Για την περαιτέρω σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα πραγματικά δεδομένα κατασκευάστηκαν οι όμβριες καμπύλες των περιόδων επαναφοράς $T=50$ (πίνακας 10, εικόνα 33), 100 (πίνακας 11, εικόνα 34), 500 (πίνακας 12, εικόνα 35), 1000 (πίνακας 13, εικόνα 36) έτη, χρησιμοποιήθηκε 12ώρη βροχή, ως χρονικό βήμα 10 λεπτά και υπολογίστηκαν οι όμβριες καμπύλες με την μέθοδο του Κουτσογιάννης et al. (1998) όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, όπου για τις τέσσερις αυτές περιόδους επαναφοράς δημιουργήθηκαν τέσσερις αντίστοιχα συνθετικές βροχές διάρκειας 12 ωρών και με χρονικό βήμα 10 λεπτά.

Πίνακας 7 (Όμβρια καμπύλη $T=50$)

ΟΜΒΡΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗ $T=50$					
i	d	T	h	Δh	ΤΕΛΙΚΗ ΒΡΟΧΗ
124.33	0.17	50.00	20.72	20.72	0.79
93.79	0.33	50.00	31.26	10.54	0.81

77.30	0.50	50.00	38.65	7.39	0.82
66.72	0.67	50.00	44.48	5.83	0.84
59.24	0.83	50.00	49.36	4.88	0.86
53.61	1.00	50.00	53.61	4.24	0.87
49.19	1.17	50.00	57.39	3.78	0.89
45.61	1.33	50.00	60.81	3.43	0.91
42.64	1.50	50.00	63.96	3.15	0.93
40.13	1.67	50.00	66.88	2.92	0.96
37.97	1.83	50.00	69.60	2.73	0.98
36.08	2.00	50.00	72.17	2.56	1.01
34.43	2.17	50.00	74.59	2.43	1.03
32.96	2.33	50.00	76.90	2.30	1.06
31.64	2.50	50.00	79.09	2.20	1.09
30.45	2.67	50.00	81.20	2.10	1.13
29.37	2.83	50.00	83.21	2.02	1.16
28.39	3.00	50.00	85.16	1.94	1.21
27.48	3.17	50.00	87.03	1.87	1.25
26.65	3.33	50.00	88.83	1.81	1.30
25.88	3.50	50.00	90.58	1.75	1.35
25.17	3.67	50.00	92.28	1.70	1.41
24.50	3.83	50.00	93.93	1.65	1.48
23.88	4.00	50.00	95.53	1.60	1.56
23.30	4.17	50.00	97.09	1.56	1.65
22.76	4.33	50.00	98.61	1.52	1.75
22.24	4.50	50.00	100.09	1.48	1.87
21.76	4.67	50.00	101.53	1.45	2.02

21.30	4.83	50.00	102.94	1.41	2.20
20.87	5.00	50.00	104.33	1.38	2.43
20.45	5.17	50.00	105.68	1.35	2.73
20.06	5.33	50.00	107.00	1.32	3.15
19.69	5.50	50.00	108.30	1.30	3.78
19.34	5.67	50.00	109.58	1.27	4.88
19.00	5.83	50.00	110.82	1.25	7.39
18.68	6.00	50.00	112.05	1.23	20.72
18.37	6.17	50.00	113.26	1.21	10.54
18.07	6.33	50.00	114.44	1.18	5.83
17.79	6.50	50.00	115.61	1.16	4.24
17.51	6.67	50.00	116.75	1.15	3.43
17.25	6.83	50.00	117.88	1.13	2.92
17.00	7.00	50.00	118.99	1.11	2.56
16.76	7.17	50.00	120.08	1.09	2.30
16.52	7.33	50.00	121.16	1.08	2.10
16.30	7.50	50.00	122.22	1.06	1.94
16.08	7.67	50.00	123.27	1.05	1.81
15.87	7.83	50.00	124.30	1.03	1.70
15.66	8.00	50.00	125.32	1.02	1.60
15.47	8.17	50.00	126.32	1.01	1.52
15.28	8.33	50.00	127.32	0.99	1.45
15.09	8.50	50.00	128.29	0.98	1.38
14.91	8.67	50.00	129.26	0.97	1.32
14.74	8.83	50.00	130.22	0.96	1.27
14.57	9.00	50.00	131.16	0.94	1.23

14.41	9.17	50.00	132.10	0.93	1.18
14.25	9.33	50.00	133.02	0.92	1.15
14.10	9.50	50.00	133.93	0.91	1.11
13.95	9.67	50.00	134.83	0.90	1.08
13.80	9.83	50.00	135.72	0.89	1.05
13.66	10.00	50.00	136.61	0.88	1.02
13.52	10.17	50.00	137.48	0.87	0.99
13.39	10.33	50.00	138.34	0.86	0.97
13.26	10.50	50.00	139.20	0.86	0.94
13.13	10.67	50.00	140.05	0.85	0.92
13.00	10.83	50.00	140.89	0.84	0.90
12.88	11.00	50.00	141.72	0.83	0.88
12.76	11.17	50.00	142.54	0.82	0.86
12.65	11.33	50.00	143.35	0.81	0.85
12.54	11.50	50.00	144.16	0.81	0.83
12.43	11.67	50.00	144.96	0.80	0.81
12.32	11.83	50.00	145.75	0.79	0.80
12.21	12.00	50.00	146.54	0.79	0.79

Πίνακας 8 (Ομβρία καμπύλη T=100)

ΟΜΒΡΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗ T=100					
i	d	T	h	Δh	ΤΕΛΙΚΗ ΒΡΟΧΗ
142.87	0.17	100.00	23.81	23.81	0.91
107.77	0.33	100.00	35.92	12.11	0.93
88.83	0.50	100.00	44.42	8.49	0.95
76.67	0.67	100.00	51.11	6.70	0.96
68.07	0.83	100.00	56.72	5.61	0.98

61.60	1.00	100.00	61.60	4.88	1.00
56.53	1.17	100.00	65.95	4.34	1.03
52.41	1.33	100.00	69.88	3.94	1.05
49.00	1.50	100.00	73.50	3.61	1.07
46.11	1.67	100.00	76.85	3.35	1.10
43.63	1.83	100.00	79.98	3.13	1.13
41.46	2.00	100.00	82.93	2.95	1.15
39.56	2.17	100.00	85.72	2.79	1.19
37.87	2.33	100.00	88.36	2.65	1.22
36.36	2.50	100.00	90.89	2.53	1.26
34.99	2.67	100.00	93.31	2.42	1.30
33.75	2.83	100.00	95.62	2.32	1.34
32.62	3.00	100.00	97.85	2.23	1.38
31.58	3.17	100.00	100.00	2.15	1.44
30.62	3.33	100.00	102.08	2.08	1.49
29.74	3.50	100.00	104.09	2.01	1.55
28.92	3.67	100.00	106.04	1.95	1.62
28.16	3.83	100.00	107.93	1.89	1.70
27.44	4.00	100.00	109.77	1.84	1.79
26.78	4.17	100.00	111.57	1.79	1.89
26.15	4.33	100.00	113.31	1.74	2.01
25.56	4.50	100.00	115.01	1.70	2.15
25.00	4.67	100.00	116.67	1.66	2.32
24.48	4.83	100.00	118.30	1.62	2.53
23.98	5.00	100.00	119.88	1.59	2.79
23.50	5.17	100.00	121.44	1.55	3.13

23.06	5.33	100.00	122.96	1.52	3.61
22.63	5.50	100.00	124.45	1.49	4.34
22.22	5.67	100.00	125.92	1.46	5.61
21.83	5.83	100.00	127.35	1.44	8.49
21.46	6.00	100.00	128.76	1.41	20.72
21.10	6.17	100.00	130.15	1.38	12.11
20.76	6.33	100.00	131.51	1.36	6.70
20.44	6.50	100.00	132.85	1.34	4.88
20.12	6.67	100.00	134.16	1.32	3.94
19.82	6.83	100.00	135.46	1.30	3.35
19.53	7.00	100.00	136.73	1.28	2.95
19.25	7.17	100.00	137.99	1.26	2.65
18.99	7.33	100.00	139.23	1.24	2.42
18.73	7.50	100.00	140.45	1.22	2.23
18.48	7.67	100.00	141.65	1.20	2.08
18.23	7.83	100.00	142.84	1.19	1.95
18.00	8.00	100.00	144.01	1.17	1.84
17.77	8.17	100.00	145.16	1.15	1.74
17.56	8.33	100.00	146.30	1.14	1.66
17.34	8.50	100.00	147.43	1.13	1.59
17.14	8.67	100.00	148.54	1.11	1.52
16.94	8.83	100.00	149.64	1.10	1.46
16.75	9.00	100.00	150.72	1.09	1.41
16.56	9.17	100.00	151.79	1.07	1.36
16.38	9.33	100.00	152.85	1.06	1.32
16.20	9.50	100.00	153.90	1.05	1.28

16.03	9.67	100.00	154.94	1.04	1.24
15.86	9.83	100.00	155.96	1.03	1.20
15.70	10.00	100.00	156.98	1.01	1.17
15.54	10.17	100.00	157.98	1.00	1.14
15.38	10.33	100.00	158.98	0.99	1.11
15.23	10.50	100.00	159.96	0.98	1.09
15.09	10.67	100.00	160.93	0.97	1.06
14.94	10.83	100.00	161.90	0.96	1.04
14.80	11.00	100.00	162.85	0.95	1.01
14.67	11.17	100.00	163.80	0.95	0.99
14.54	11.33	100.00	164.73	0.94	0.97
14.41	11.50	100.00	165.66	0.93	0.95
14.28	11.67	100.00	166.58	0.92	0.94
14.15	11.83	100.00	167.49	0.91	0.92
14.03	12.00	100.00	168.39	0.90	0.90

Πίνακας 9 (Ομβρία καμπύλη T=500)

ΟΜΒΡΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗ T=500					
i	d	T	h	Δh	ΤΕΛΙΚΗ ΒΡΟΧΗ
192.65	0.17	500.00	32.11	32.11	1.23
145.32	0.33	500.00	48.44	16.33	1.25
119.78	0.50	500.00	59.89	11.45	1.27
103.38	0.67	500.00	68.92	9.03	1.30
91.79	0.83	500.00	76.49	7.57	1.33
83.07	1.00	500.00	83.07	6.58	1.35
76.22	1.17	500.00	88.92	5.86	1.38
70.68	1.33	500.00	94.23	5.31	1.41

66.07	1.50	500.00	99.11	4.87	1.45
62.18	1.67	500.00	103.63	4.52	1.48
58.83	1.83	500.00	107.85	4.22	1.52
55.91	2.00	500.00	111.83	3.97	1.56
53.35	2.17	500.00	115.58	3.76	1.60
51.07	2.33	500.00	119.15	3.57	1.65
49.02	2.50	500.00	122.56	3.40	1.69
47.18	2.67	500.00	125.82	3.26	1.75
45.51	2.83	500.00	128.94	3.13	1.80
43.98	3.00	500.00	131.95	3.01	1.87
42.58	3.17	500.00	134.85	2.90	1.94
41.30	3.33	500.00	137.65	2.80	2.01
40.10	3.50	500.00	140.36	2.71	2.10
39.00	3.67	500.00	142.99	2.63	2.19
37.97	3.83	500.00	145.54	2.55	2.29
37.01	4.00	500.00	148.02	2.48	2.41
36.11	4.17	500.00	150.44	2.41	2.55
35.26	4.33	500.00	152.79	2.35	2.71
34.46	4.50	500.00	155.09	2.29	2.90
33.71	4.67	500.00	157.33	2.24	3.13
33.00	4.83	500.00	159.52	2.19	3.40
32.33	5.00	500.00	161.66	2.14	3.76
31.69	5.17	500.00	163.75	2.10	4.22
31.09	5.33	500.00	165.81	2.05	4.87
30.51	5.50	500.00	167.82	2.01	5.86
29.96	5.67	500.00	169.79	1.97	7.57

29.44	5.83	500.00	171.73	1.94	11.45
28.94	6.00	500.00	173.63	1.90	20.72
28.46	6.17	500.00	175.49	1.87	16.33
28.00	6.33	500.00	177.33	1.84	9.03
27.56	6.50	500.00	179.13	1.80	6.58
27.14	6.67	500.00	180.91	1.78	5.31
26.73	6.83	500.00	182.66	1.75	4.52
26.34	7.00	500.00	184.38	1.72	3.97
25.96	7.17	500.00	186.07	1.69	3.57
25.60	7.33	500.00	187.74	1.67	3.26
25.25	7.50	500.00	189.39	1.65	3.01
24.91	7.67	500.00	191.01	1.62	2.80
24.59	7.83	500.00	192.61	1.60	2.63
24.27	8.00	500.00	194.19	1.58	2.48
23.97	8.17	500.00	195.74	1.56	2.35
23.67	8.33	500.00	197.28	1.54	2.24
23.39	8.50	500.00	198.80	1.52	2.14
23.11	8.67	500.00	200.30	1.50	2.05
22.84	8.83	500.00	201.78	1.48	1.97
22.58	9.00	500.00	203.24	1.46	1.90
22.33	9.17	500.00	204.69	1.45	1.84
22.08	9.33	500.00	206.12	1.43	1.78
21.85	9.50	500.00	207.53	1.41	1.72
21.61	9.67	500.00	208.93	1.40	1.67
21.39	9.83	500.00	210.31	1.38	1.62
21.17	10.00	500.00	211.68	1.37	1.58

20.95	10.17	500.00	213.03	1.35	1.54
20.75	10.33	500.00	214.37	1.34	1.50
20.54	10.50	500.00	215.70	1.33	1.46
20.34	10.67	500.00	217.01	1.31	1.43
20.15	10.83	500.00	218.31	1.30	1.40
19.96	11.00	500.00	219.59	1.29	1.37
19.78	11.17	500.00	220.87	1.27	1.34
19.60	11.33	500.00	222.13	1.26	1.31
19.42	11.50	500.00	223.38	1.25	1.29
19.25	11.67	500.00	224.62	1.24	1.26
19.09	11.83	500.00	225.85	1.23	1.24
18.92	12.00	500.00	227.07	1.22	1.22

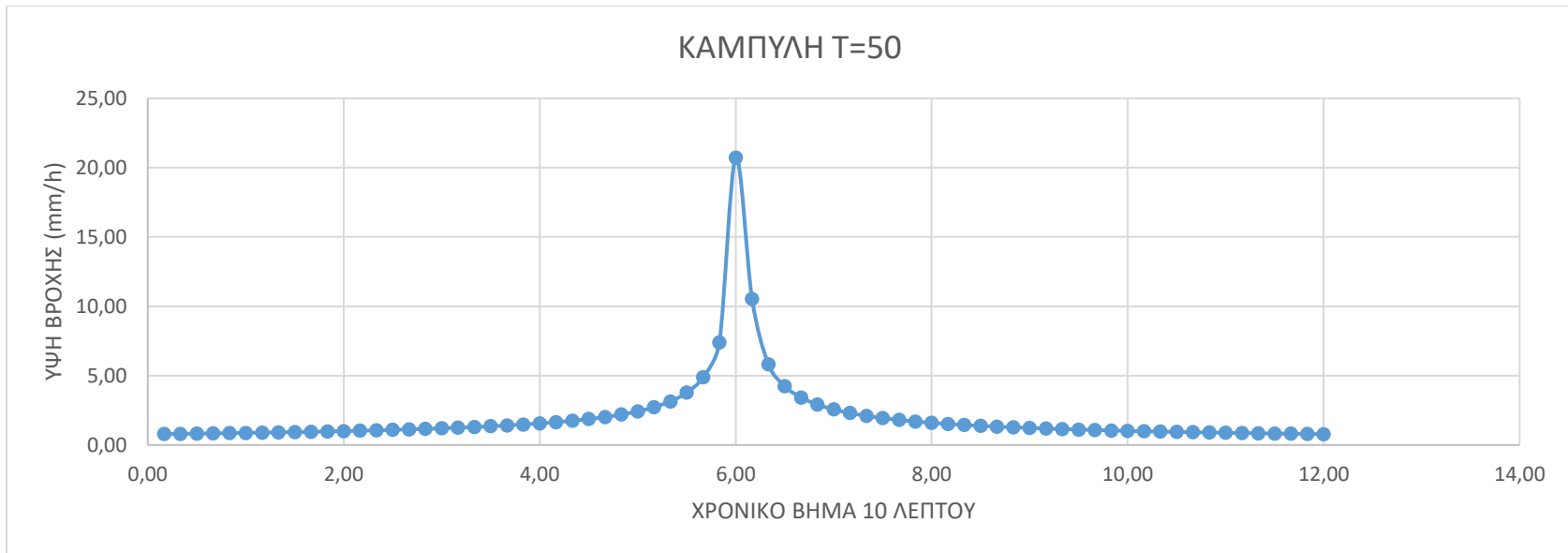
Πίνακας 10 (Ομβρία καμπύλη T=1000)

ΟΜΒΡΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗ T=1000					
i	d	T	h	Δh	ΤΕΛΙΚΗ ΒΡΟΧΗ
217.38	0.17	1000.00	36.23	36.23	1.39
163.98	0.33	1000.00	54.66	18.43	1.41
135.16	0.50	1000.00	67.58	12.92	1.44
116.65	0.67	1000.00	77.77	10.19	1.47
103.57	0.83	1000.00	86.31	8.54	1.50
93.73	1.00	1000.00	93.73	7.42	1.53
86.00	1.17	1000.00	100.34	6.61	1.56
79.75	1.33	1000.00	106.33	5.99	1.59
74.55	1.50	1000.00	111.83	5.50	1.63
70.16	1.67	1000.00	116.93	5.10	1.67
66.38	1.83	1000.00	121.69	4.77	1.71

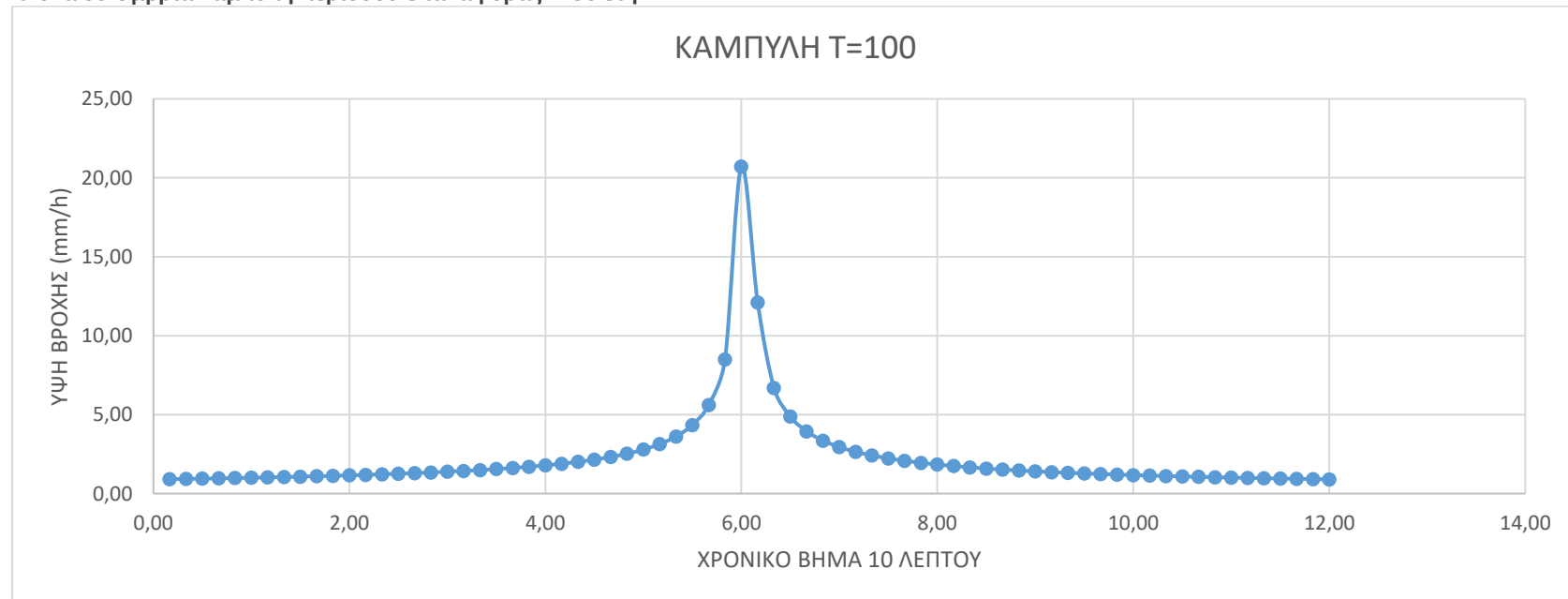
63.09	2.00	1000.00	126.18	4.48	1.76
60.19	2.17	1000.00	130.42	4.24	1.80
57.62	2.33	1000.00	134.45	4.03	1.86
55.32	2.50	1000.00	138.29	3.84	1.91
53.24	2.67	1000.00	141.96	3.68	1.97
51.35	2.83	1000.00	145.49	3.53	2.04
49.63	3.00	1000.00	148.89	3.39	2.11
48.05	3.17	1000.00	152.16	3.27	2.18
46.60	3.33	1000.00	155.32	3.16	2.27
45.25	3.50	1000.00	158.38	3.06	2.36
44.00	3.67	1000.00	161.34	2.97	2.47
42.84	3.83	1000.00	164.22	2.88	2.59
41.76	4.00	1000.00	167.02	2.80	2.72
40.74	4.17	1000.00	169.75	2.72	2.88
39.78	4.33	1000.00	172.40	2.65	3.06
38.89	4.50	1000.00	174.99	2.59	3.27
38.04	4.67	1000.00	177.52	2.53	3.53
37.24	4.83	1000.00	179.99	2.47	3.84
36.48	5.00	1000.00	182.40	2.42	4.24
35.76	5.17	1000.00	184.77	2.36	4.77
35.08	5.33	1000.00	187.09	2.32	5.50
34.43	5.50	1000.00	189.36	2.27	6.61
33.81	5.67	1000.00	191.58	2.23	8.54
33.22	5.83	1000.00	193.77	2.18	12.92
32.65	6.00	1000.00	195.91	2.14	20.72
32.11	6.17	1000.00	198.02	2.11	18.43

31.59	6.33	1000.00	200.09	2.07	10.19
31.10	6.50	1000.00	202.12	2.04	7.42
30.62	6.67	1000.00	204.13	2.00	5.99
30.16	6.83	1000.00	206.10	1.97	5.10
29.72	7.00	1000.00	208.04	1.94	4.48
29.30	7.17	1000.00	209.95	1.91	4.03
28.89	7.33	1000.00	211.83	1.88	3.68
28.49	7.50	1000.00	213.69	1.86	3.39
28.11	7.67	1000.00	215.52	1.83	3.16
27.74	7.83	1000.00	217.33	1.80	2.97
27.39	8.00	1000.00	219.11	1.78	2.80
27.04	8.17	1000.00	220.86	1.76	2.65
26.71	8.33	1000.00	222.60	1.73	2.53
26.39	8.50	1000.00	224.31	1.71	2.42
26.08	8.67	1000.00	226.00	1.69	2.32
25.77	8.83	1000.00	227.67	1.67	2.23
25.48	9.00	1000.00	229.32	1.65	2.14
25.20	9.17	1000.00	230.96	1.63	2.07
24.92	9.33	1000.00	232.57	1.61	2.00
24.65	9.50	1000.00	234.16	1.59	1.94
24.39	9.67	1000.00	235.74	1.58	1.88
24.13	9.83	1000.00	237.30	1.56	1.83
23.88	10.00	1000.00	238.84	1.54	1.78
23.64	10.17	1000.00	240.37	1.53	1.73
23.41	10.33	1000.00	241.88	1.51	1.69
23.18	10.50	1000.00	243.38	1.50	1.65

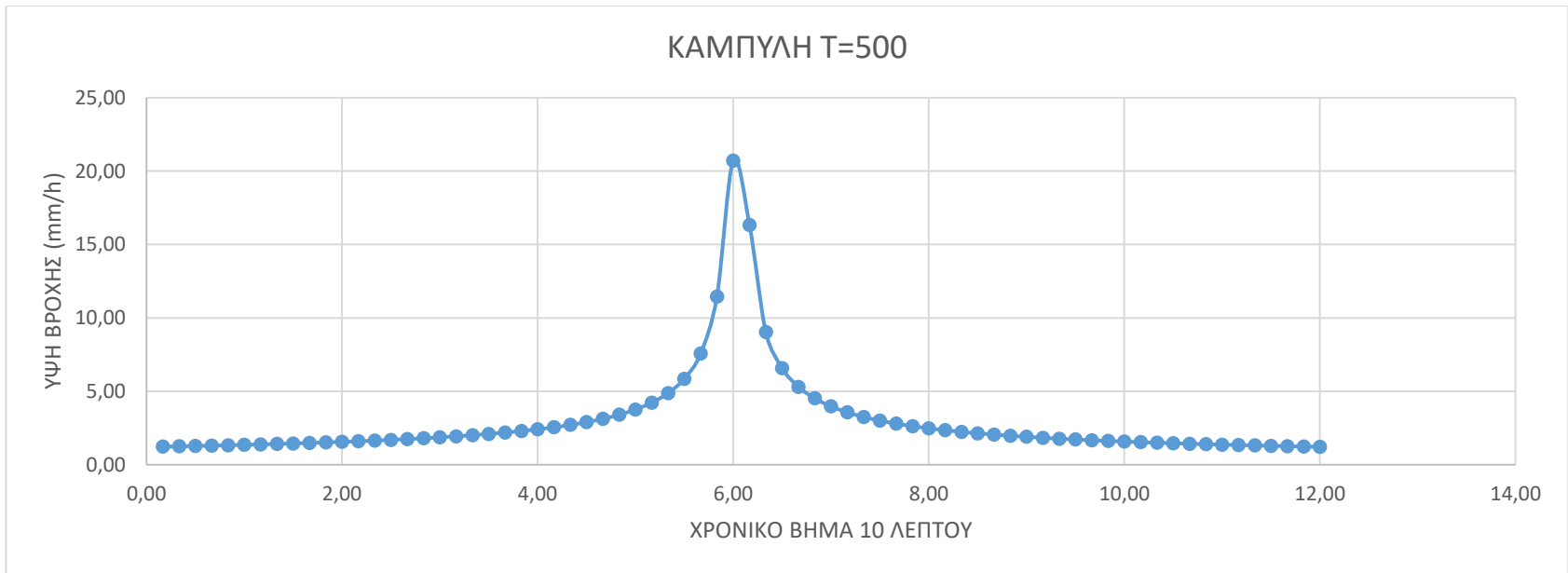
22.96	10.67	1000.00	244.86	1.48	1.61
22.74	10.83	1000.00	246.32	1.47	1.58
22.53	11.00	1000.00	247.78	1.45	1.54
22.32	11.17	1000.00	249.22	1.44	1.51
22.12	11.33	1000.00	250.64	1.42	1.48
21.92	11.50	1000.00	252.05	1.41	1.45
21.72	11.67	1000.00	253.45	1.40	1.42
21.54	11.83	1000.00	254.84	1.39	1.40
21.35	12.00	1000.00	256.21	1.37	1.37



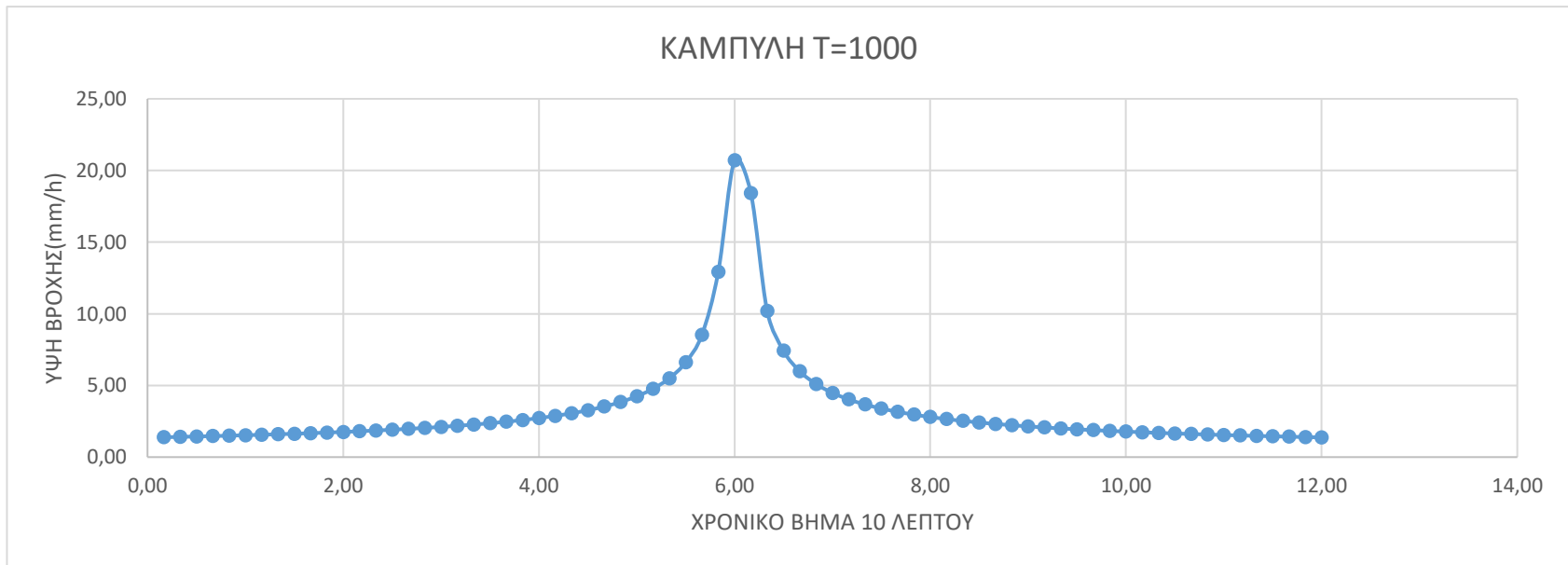
Εικόνα 33 Ομβρια καμπύλη περιόδου επαναφοράς T=50 έτη



Εικόνα 34 Ομβρια καμπύλη περιόδου επαναφοράς T=100 έτη



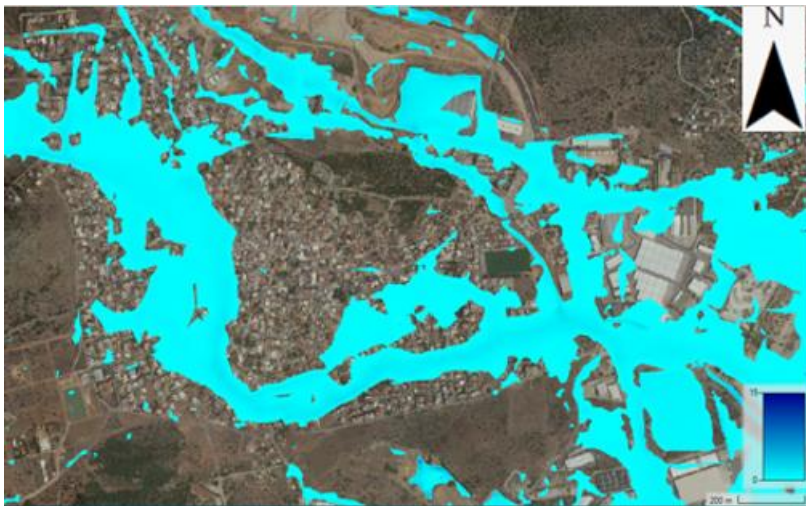
Εικόνα 35 Ομβρια καμπύλη περιόδου επαναφοράς T=500 έτη



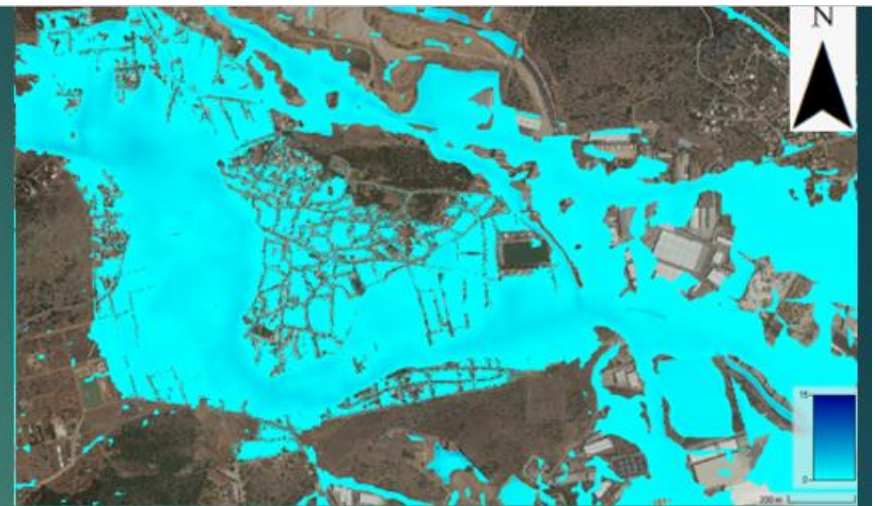
Εικόνα 36 Ομβρια καμπύλη περιόδου επαναφοράς T=1000 έτη

5.3 Μέγιστα Βάθη Ροής

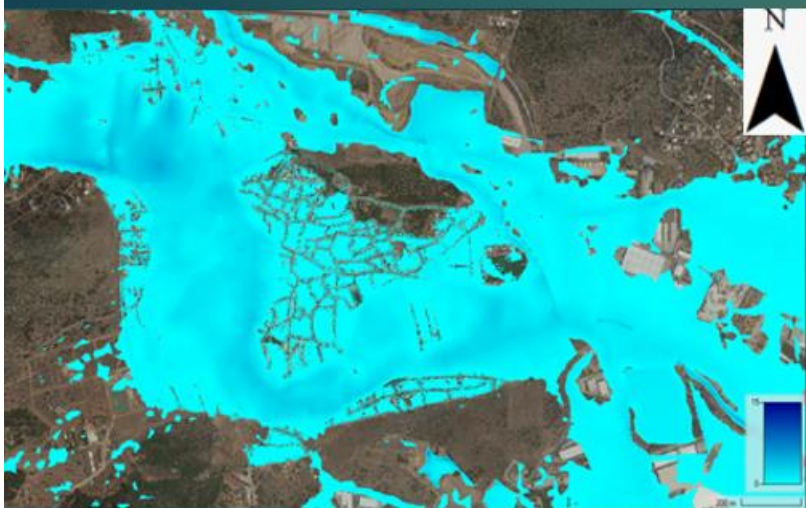
Τα μέγιστα βάθη ροής, είναι εκείνα τα οποία καθορίζουν την αποδοτικότητα του μοντέλου, δηλαδή το γεγονός του κατα πόσο κοντά είναι στα μετρημένα βάθη ροής (εικόνα 40). Στις εικόνες 37,38 παρουσιάζονται τα μέγιστα βάθη ροής για όλα τα σεναρία, μετά από δοκιμές για την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού μεταξύ χρονικού βήματος, εξισώσεων επίλυσης, μοντέλου εδάφους και γεωμετρίας.



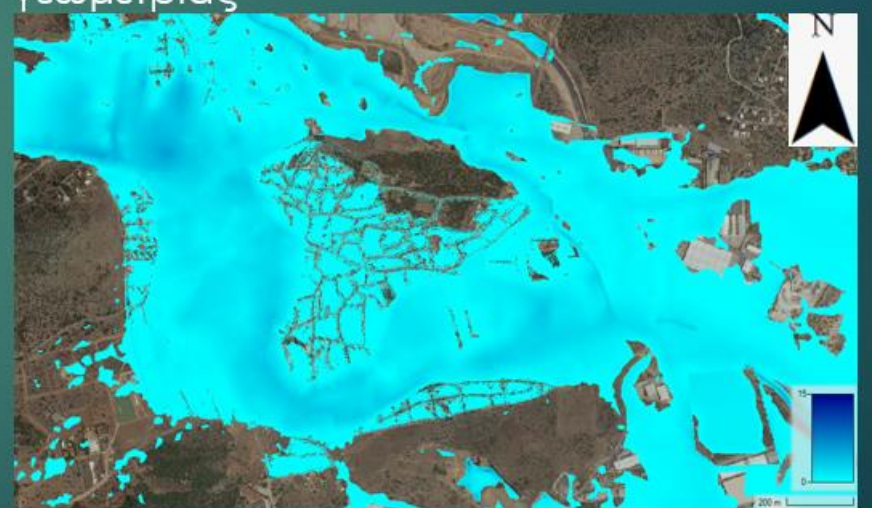
(α) Μέγιστα βάθη ροής απλής γεωμετρίας



(β) Μέγιστα βάθη ροής σύνθετης γεωμετρίας

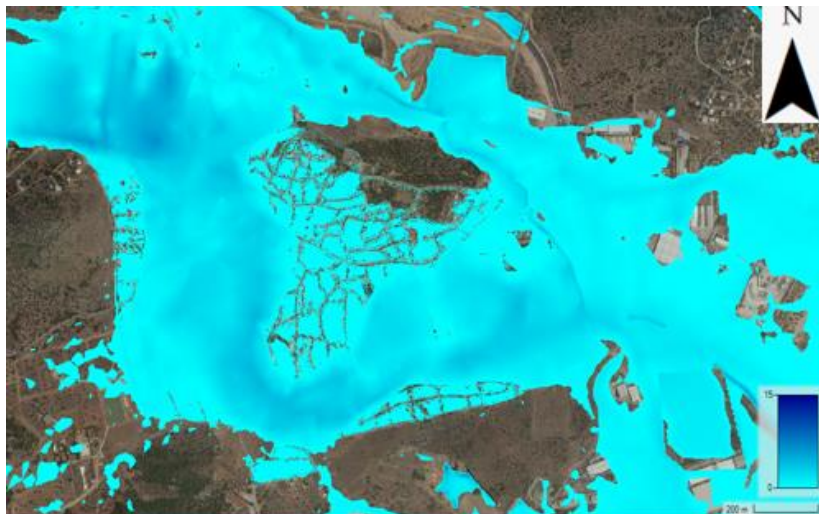


(γ) Μέγιστα βάθη ροής για $T=50$ έτη

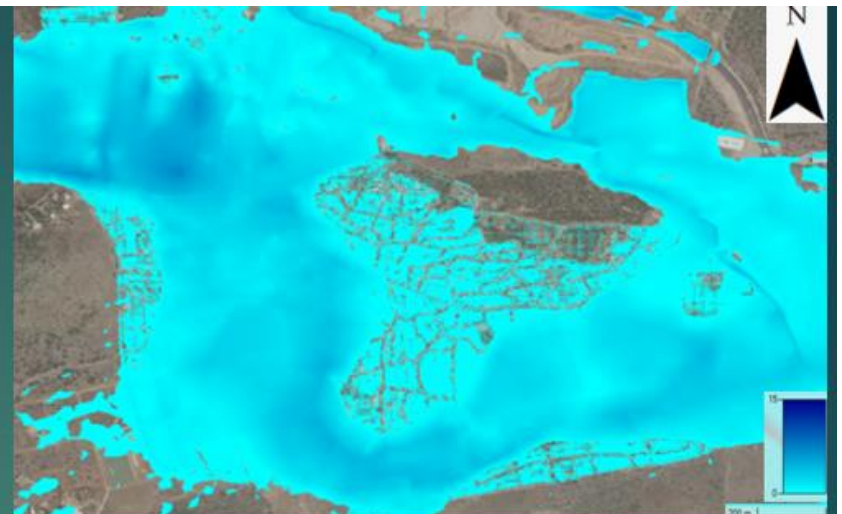


(δ) Μέγιστα βάθη ροής για $T=100$ έτη

Εικόνα 37 Μέγιστα βάθη ροής για (α) Απλή γεωμετρία , (β) Σύνθετη γεωμετρία , (γ) $T=50$ έτη , (δ) $T=100$ έτη

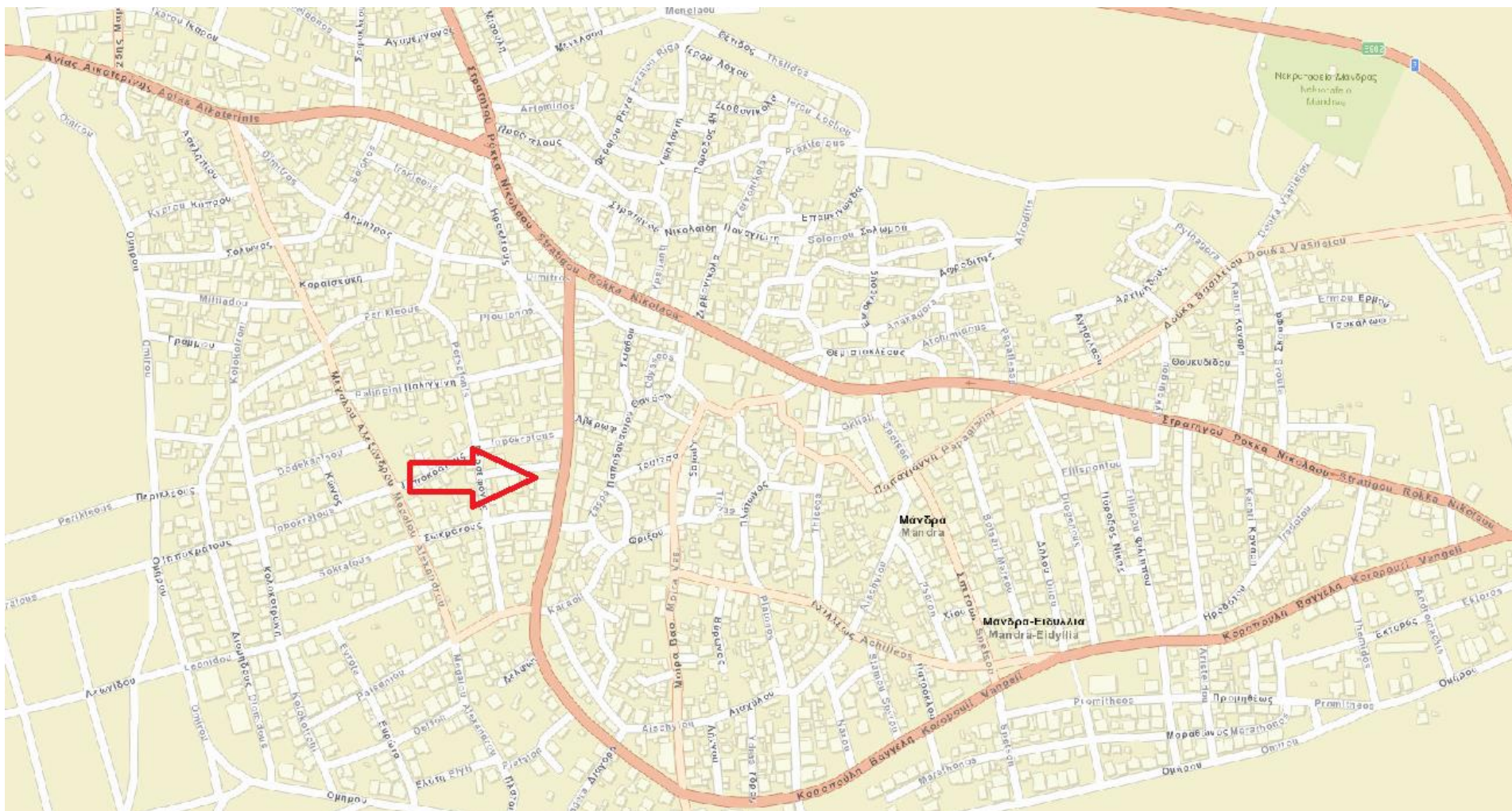


(ε) Μέγιστα βάθη ροής για $T=500$ έτη



(ζ) Μέγιστα βάθη ροής για $T=1000$ έτη

Εικόνα 38 Μέγιστα βάθη ροής για (ε) $T=500$ έτη , (ζ) $T=1000$ έτη



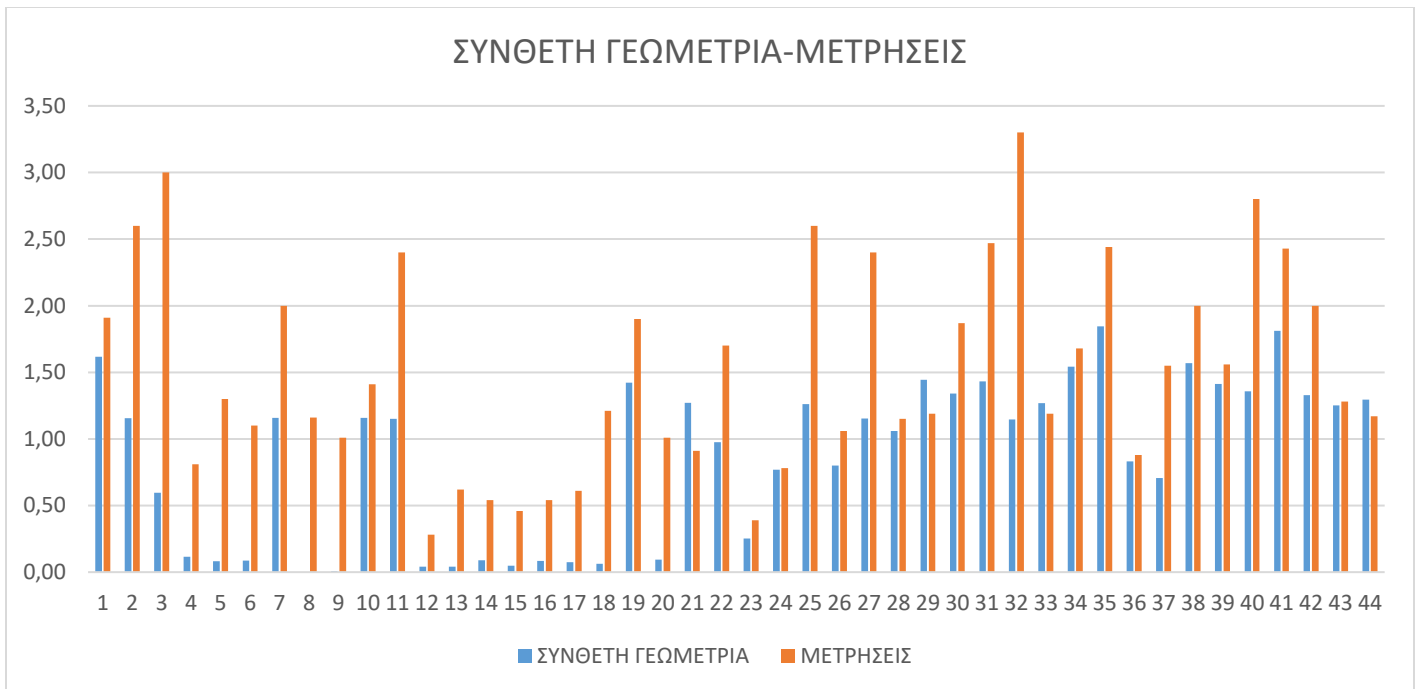
Εικόνα 39 Οδός Κοροπούλη



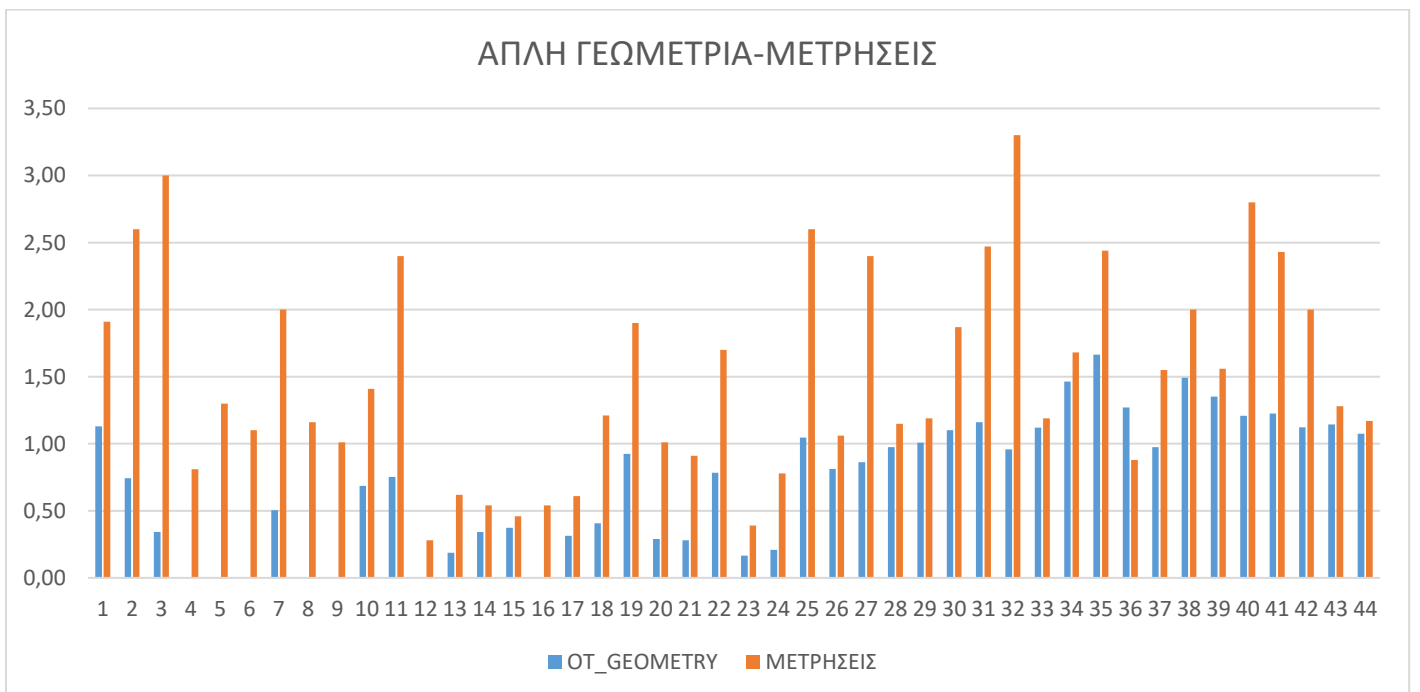
Εικόνα 40 Σημεία μετρήσεως των ιχνών της πλημμύρας λίγες μέρες μετά το γεγονός (Ραπτάκη,2020)

Όπως φαίνεται και στις Εικόνες 37,38 , το βάθος αυξάνεται όσο αυξάνεται και η περίοδος επαναφοράς, και παρατηρείται μια ουσιαστική διαφορά μεταξύ της απλής και της σύνθετης γεωμετρίας όσον αφορά την πλημμυρισμένη έκταση. Λόγω των πολυγώνων ταξινόμησης, της σύνθετης γεωμετρίας, παρατηρείται το πρόβλημα που προαναφέρθηκε σχετικά με τις τιμές των συντελεστών τραχύτητας Manning n , όπου το νερό λόγω των πολύ χαμηλών ταχυτήτων που αναπτύσσονται εντός αυτών των πολυγώνων, δεν προλαβαίνει να απορρεύσει εντός του χρόνου προσομοίωσης και φαίνονται πλημμυρισμένα με πολύ μικρές τιμές βάθους ακόμα και τα οικοδομικά τετράγωνα. Επιπλέον, τα βάθη μεταξύ της απλής και της σύνθετης γεωμετρίας διαφοροποιούνται όχι μόνο σε έκταση αλλά και σε τιμές, τα βάθη της σύνθετης γεωμετρίας είναι μεγαλύτερα απο αυτά της απλής. Η περιοχή η οποία έχει υψηλότερα βάθη είναι κατα μήκος της οδού Κοροπούλη (εικόνα 39).

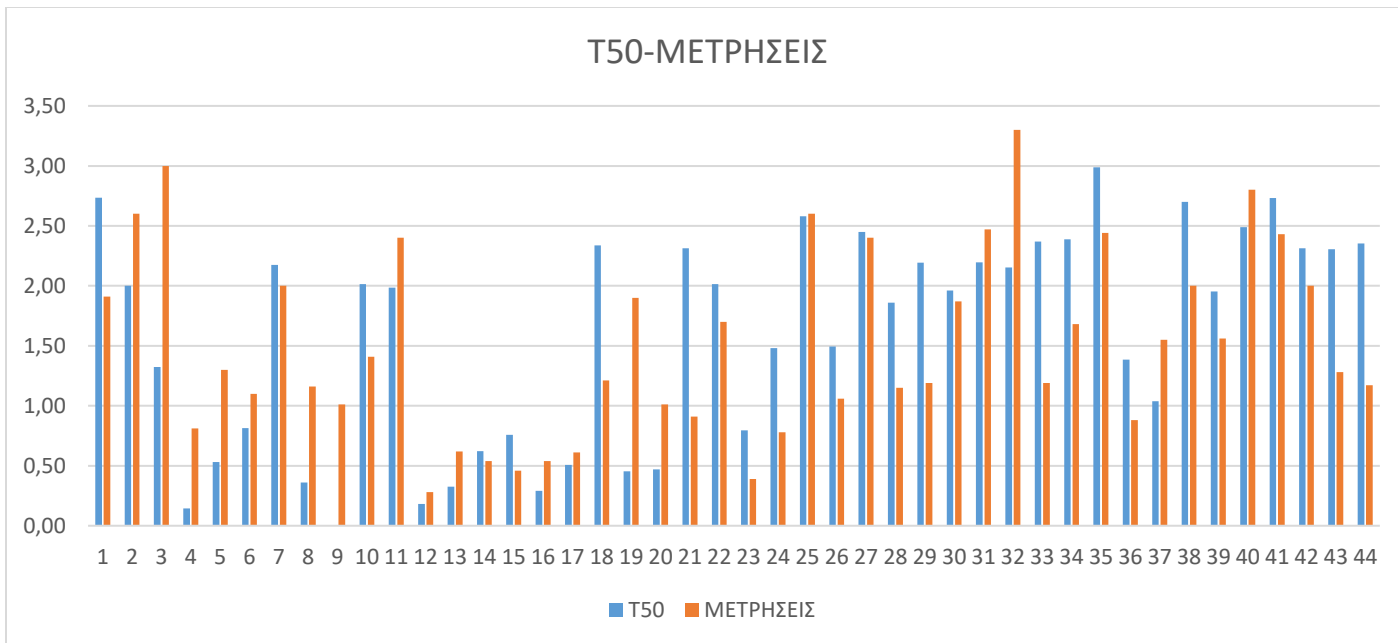
Για αναλυτικότερη σύγκριση των βαθών, έχουν χρησιμοποιηθεί και 44 μετρημένα σημεία, τα οποία πάρθηκαν απο την διπλωματική εργασία της Ειρήνης Ραπτάκης (Ραπτάκη, 2020). Γίνεται άμμεση σύγκριση αυτών των σημείων με τα αντίστοιχα σημεία, για κάθε ένα απο τα 6 σενάρια όπως παρουσιάζεται στις εικόνες 41-47.



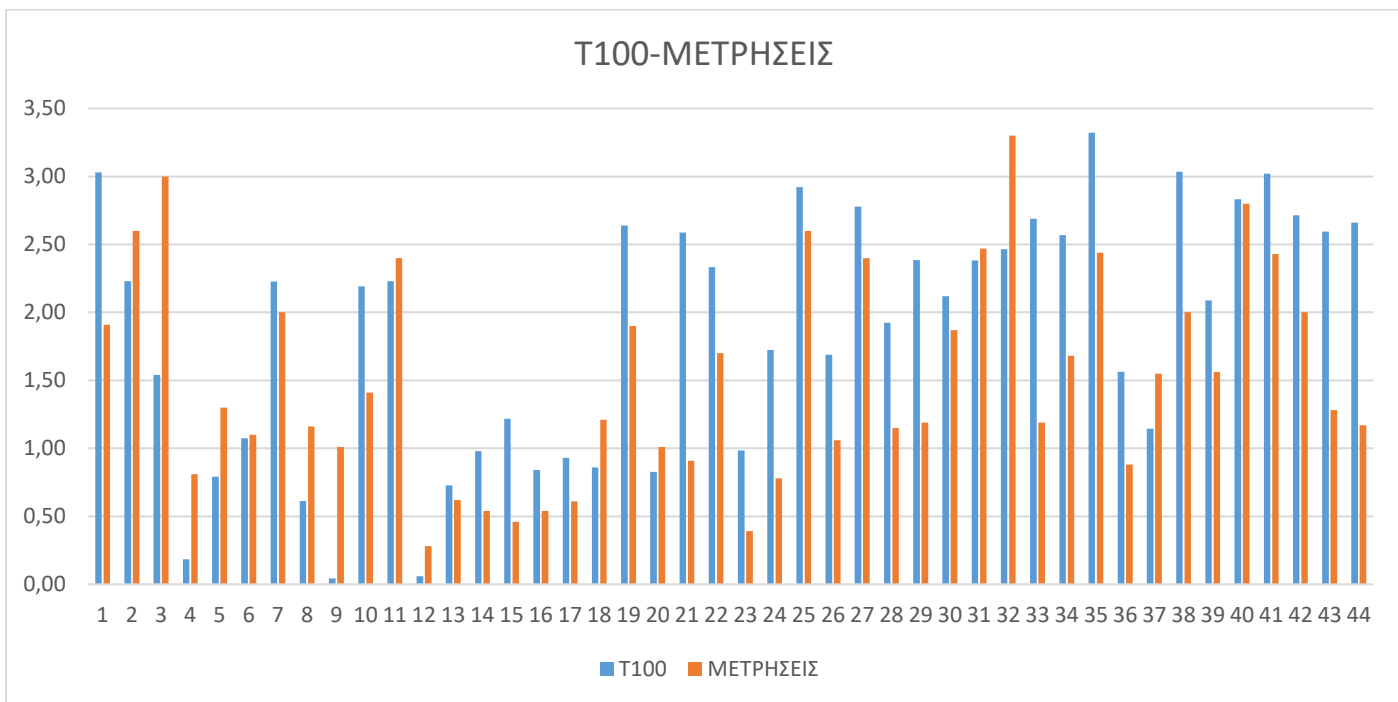
Εικόνα 41 Σύγκριση βαθών ροής σύνθετης γεωμετρίας με μετρήσεις της Ραπτάκη (2020)



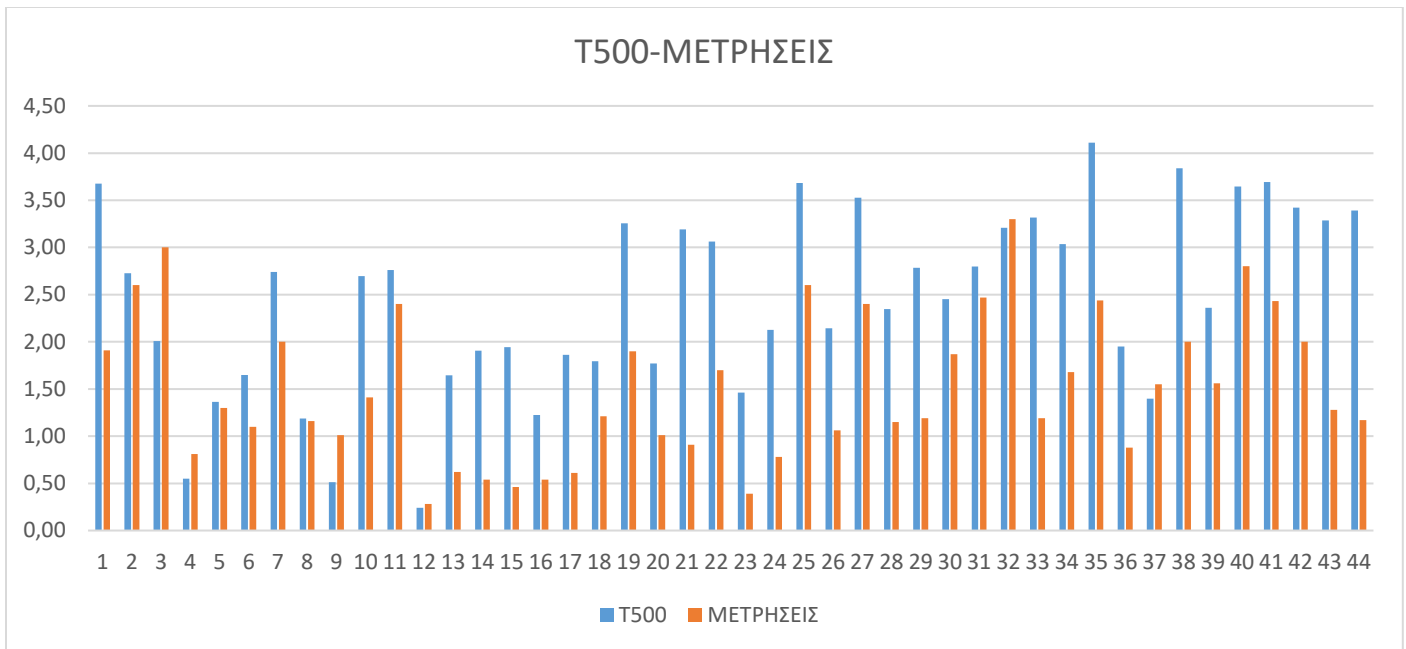
Εικόνα 42 Σύγκριση βαθών ροής απλής γεωμετρίας με μετρήσεις της Ραπτάκη (2020)



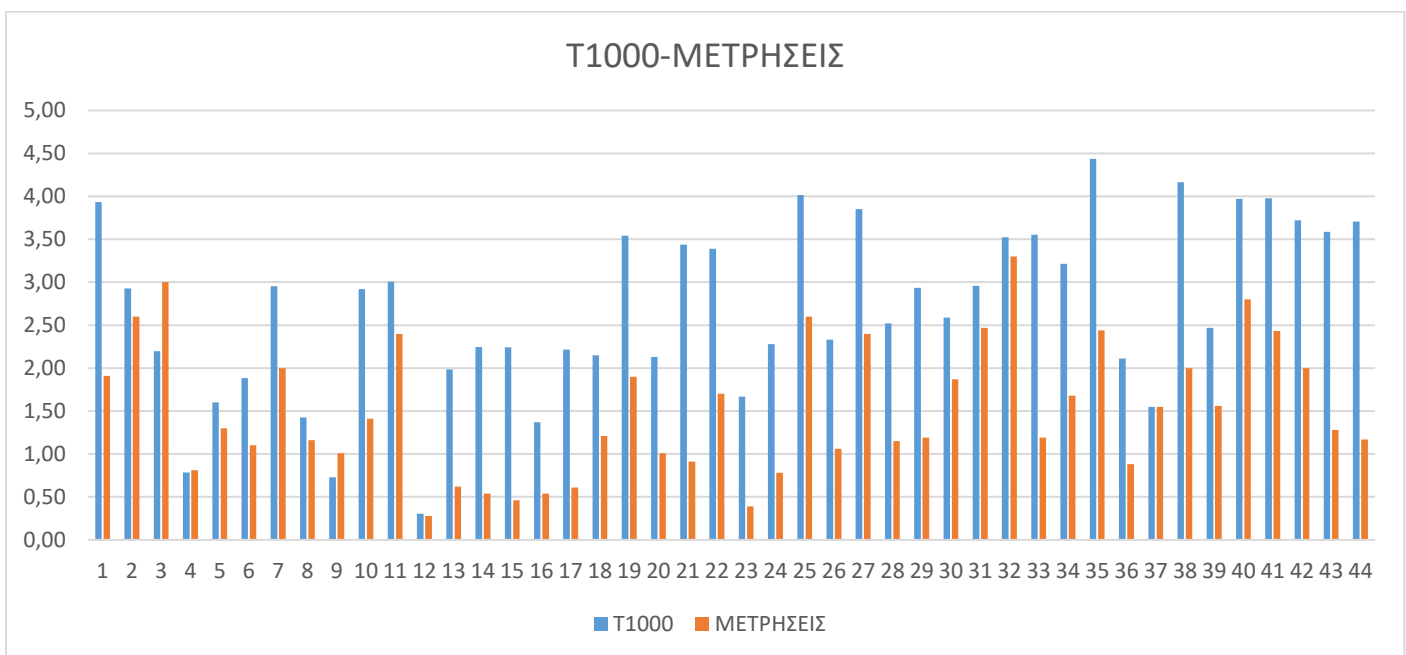
Εικόνα 43 Σύγκριση βαθών ροής T50 με μετρήσεις της Ραπτάκη (2020)



Εικόνα 44 Σύγκριση βαθών ροής T100 με μετρήσεις Ραπτάκη (2020)



Εικόνα 45 Σύγκριση βαθών ροής T500 με μετρήσεις Ραπτάκη (2020)

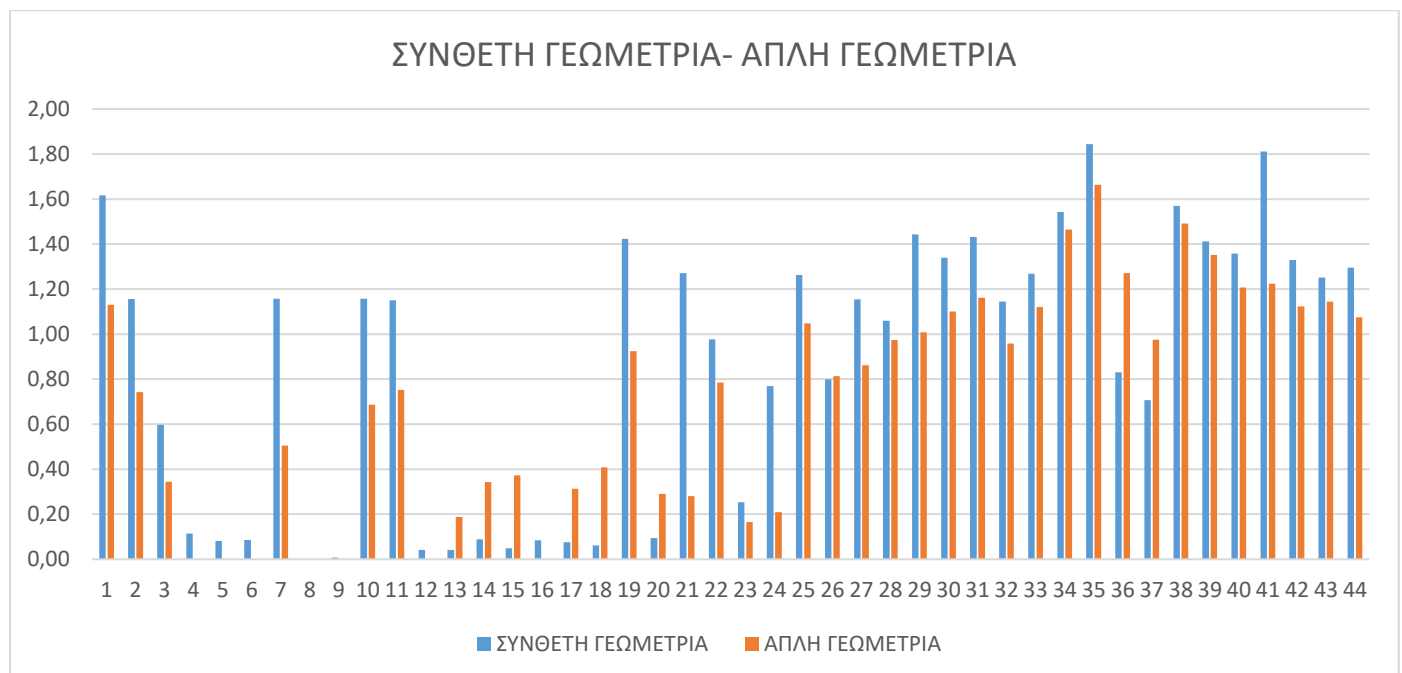


Εικόνα 46 Σύγκριση βαθών ροής T1000 με μετρήσεις Ραπτάκη (2020)

Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα, σε μερικά μετρημένα σημεία, τα αντίστοιχα υπολογισμένα έχουν βγάλει τιμή 0. Συγκεκριμένα, στην T50 το σημείο 9, στην σύνθετη γεωμετρία το σημείο 8 και στην απλή γεωμετρία τα σημεία 4, 5, 6, 8, 9, 12 και 16.

Από το διάγραμμα σύγκρισης της σύνθετης γεωμετρίας με τις μετρήσεις, φαίνεται πως στα σημεία τα οποία είναι εκτός της οδού Κοροπούλη, οι υπολογισμένες τιμές απέχουν πολύ από τις μετρημένες. Το ίδιο ισχύει και για την απλή γεωμετρία. Αυτό συμβαίνει λόγω των προβλημάτων που προαναφέρθηκαν σχετικά με τις τιμές των συντελεστών Manning, δηλαδή στο ότι στην σύνθετη γεωμετρία σε αντίθεση με την απλή, η πόλη της Μάνδρας είναι ψηφιοποιημένη και έχει διαφορετικές τιμές Manning, εντός αυτής.

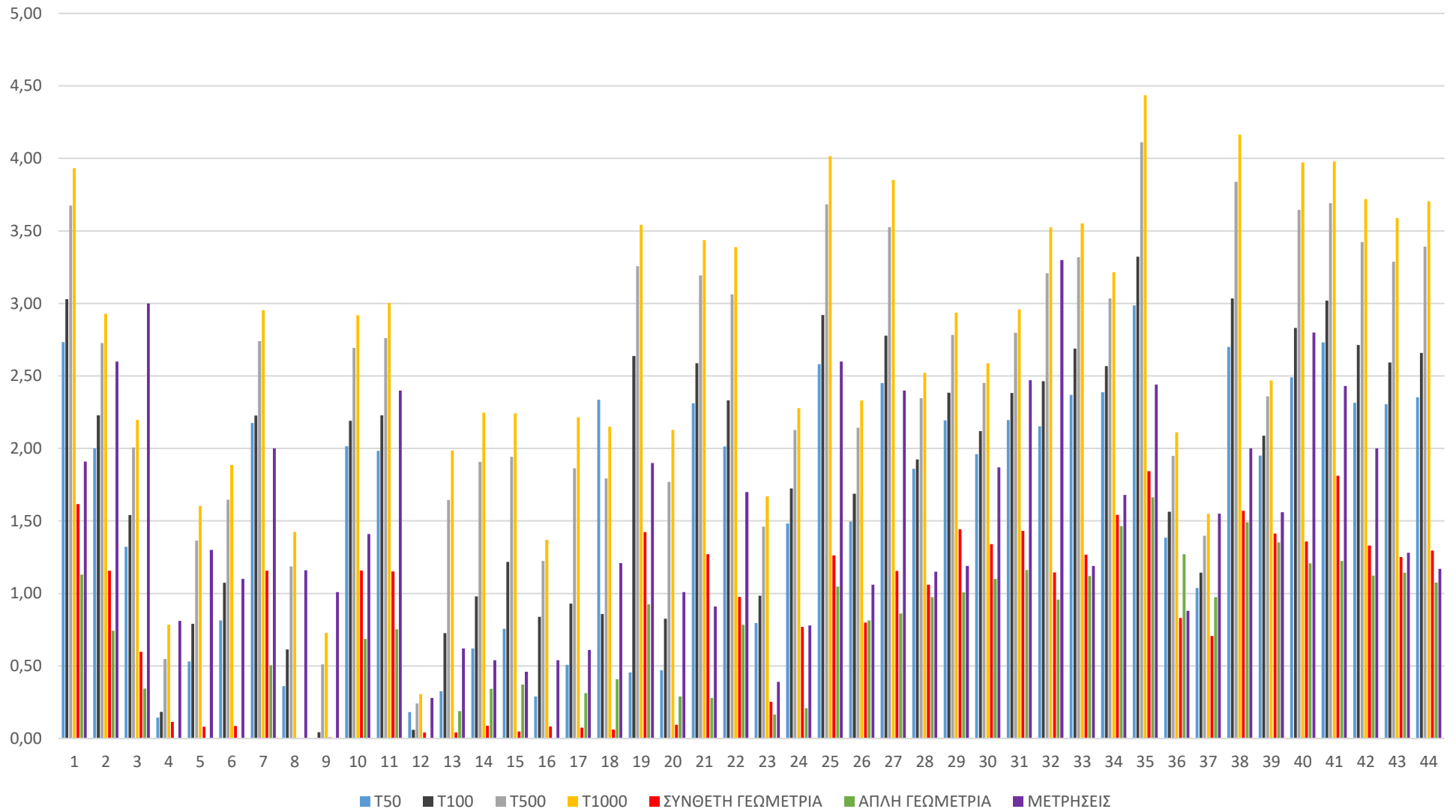
Τα πιο καλά και αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα προέκυψαν από την καμπύλη περιόδου επαναφοράς $T=100$ έτη. Επιπλέον, έγινε σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της απλής και της σύνθετης γεωμετρίας, και φαίνεται πως στην απλή γεωμετρία οι τιμές των βαθών είναι μικρότερες από αυτές της σύνθετης γεωμετρίας σε όλα τα σημεία εκτός από τα σημεία 13, 14, 15, 17, 18, 20, 26, 36 και 37, όπως φαίνεται στην εικόνα 47.



Εικόνα 47 Σύγκριση βαθών ροής σύνθετης γεωμετρίας με απλή γεωμετρία

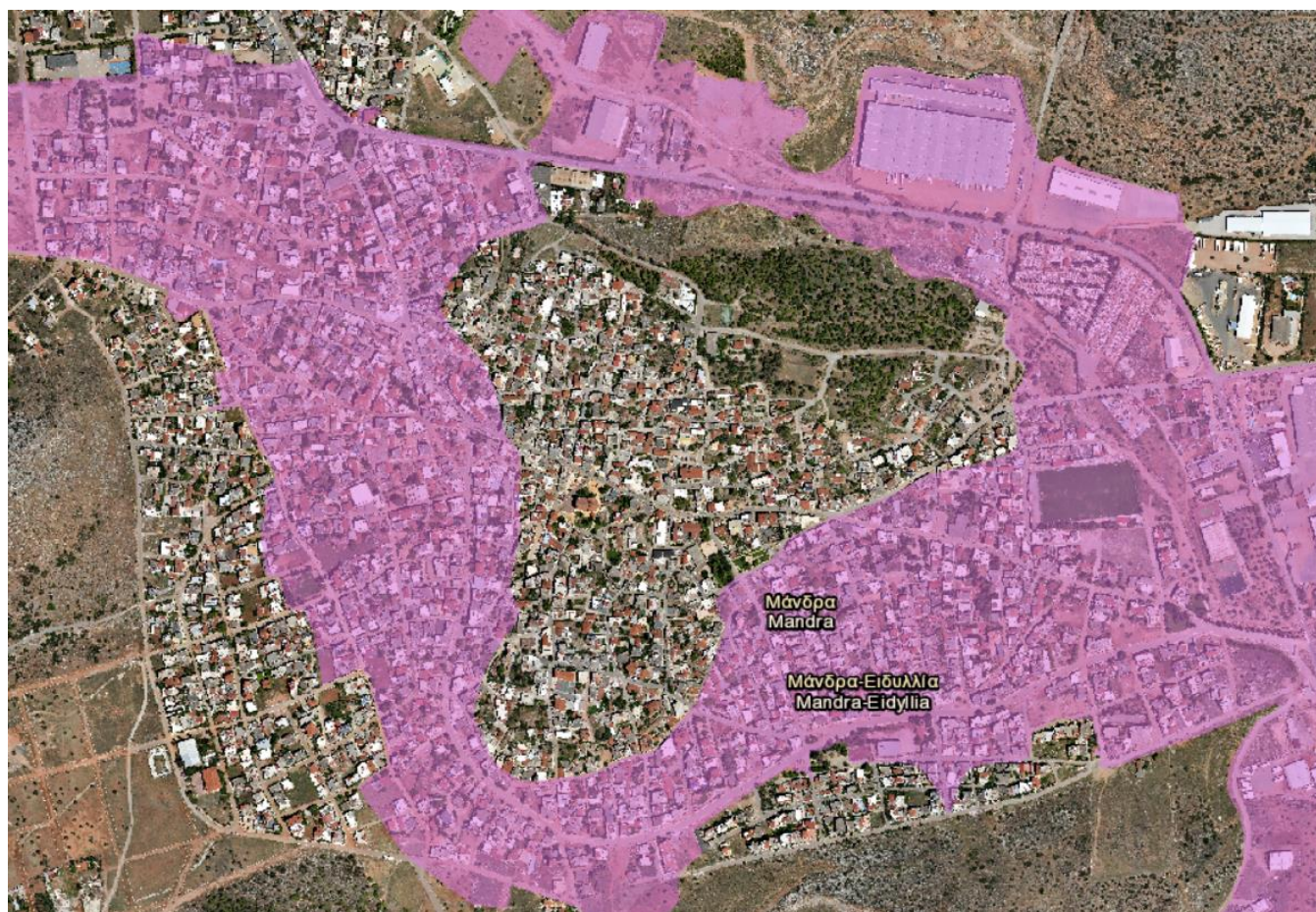
Τέλος, έγινε ένα διάγραμμα (εικόνα 48) το οποίο δείχνει ταυτόχρονα τις διαφορές των τιμών βάθους όλων των σεναρίων (Απλή γεωμετρία/Σύνθετη γεωμετρία/ $T=50,100,500,1000$ έτη/μετρήσεις Ραπτάκη).

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΒΑΘΩΝ

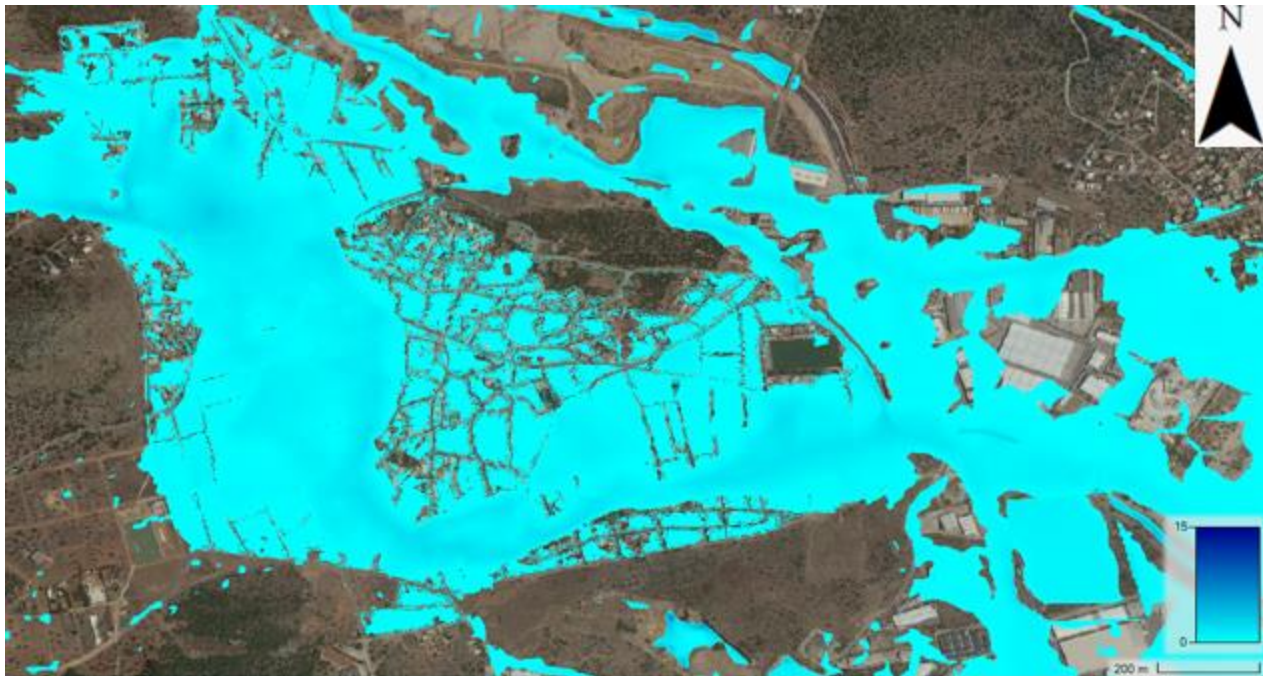


Εικόνα 48 Σύγκριση βαθών ροής όλων των σεναρίων

Όπως φαίνεται, οι μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζονται στο διάγραμμα της περιόδου επαναφοράς $T=1000$ έτη.



Εικόνα 49 Χαρτογράφηση πλημμύρας της Μάνδρας στις 15 Νοεμβρίου 2017 με φωτοερμηνεία δορυφορικής εικόνας WorldView-4 υψηλής ανάλυσης 0.31 μέτρων , ημερομηνίας λήψης 21/11/2017 (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών , 2018)

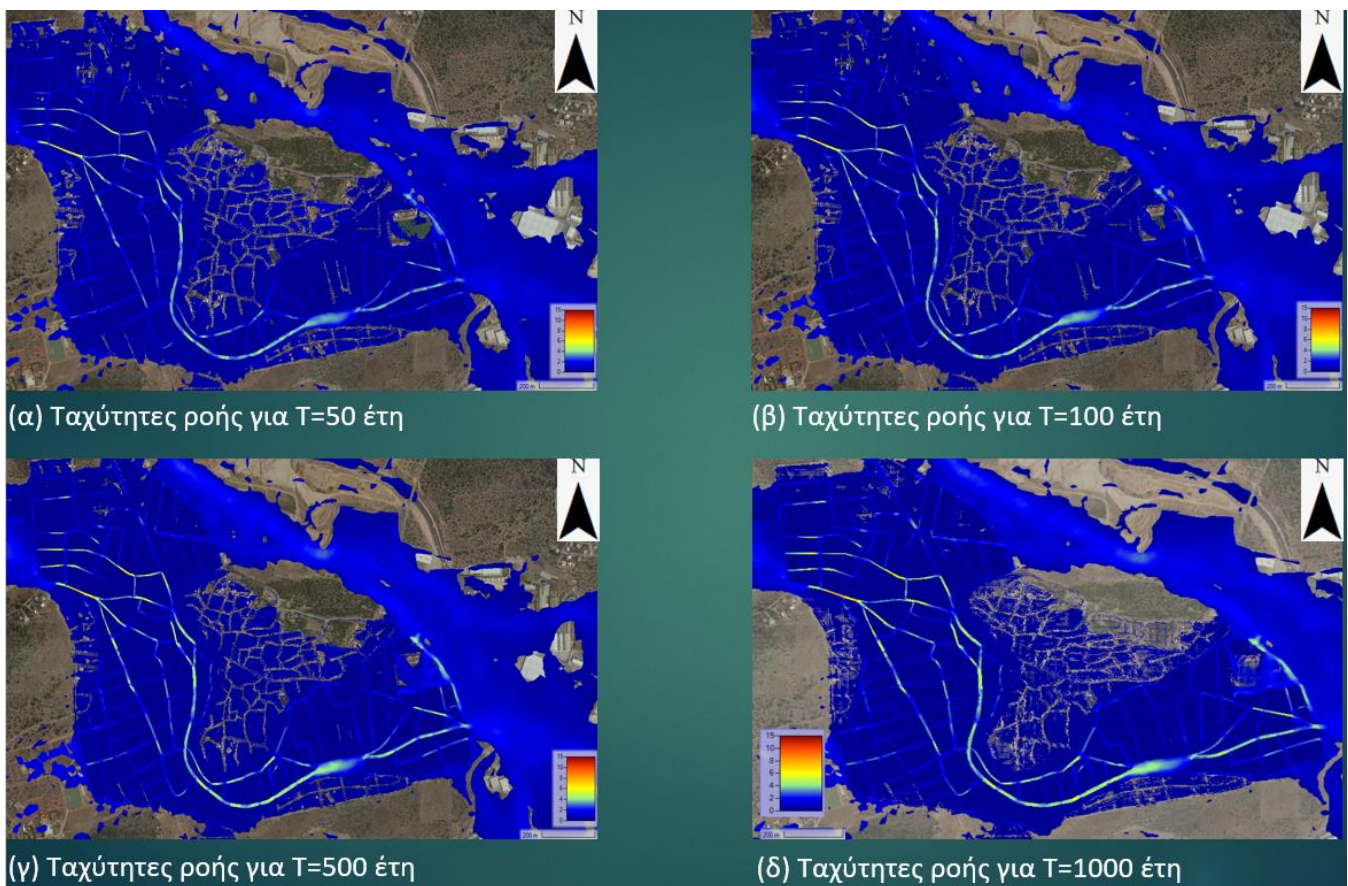


Εικόνα 50 Έκταση προσομοιωμένης πλημμύρας Μάνδρας 15 Νοεμβρίου 2017 με χρήση του λογισμικού HEC-RAS και μεθόδου rain-on-grid με τα δεδομένα του Radar XPOL του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών

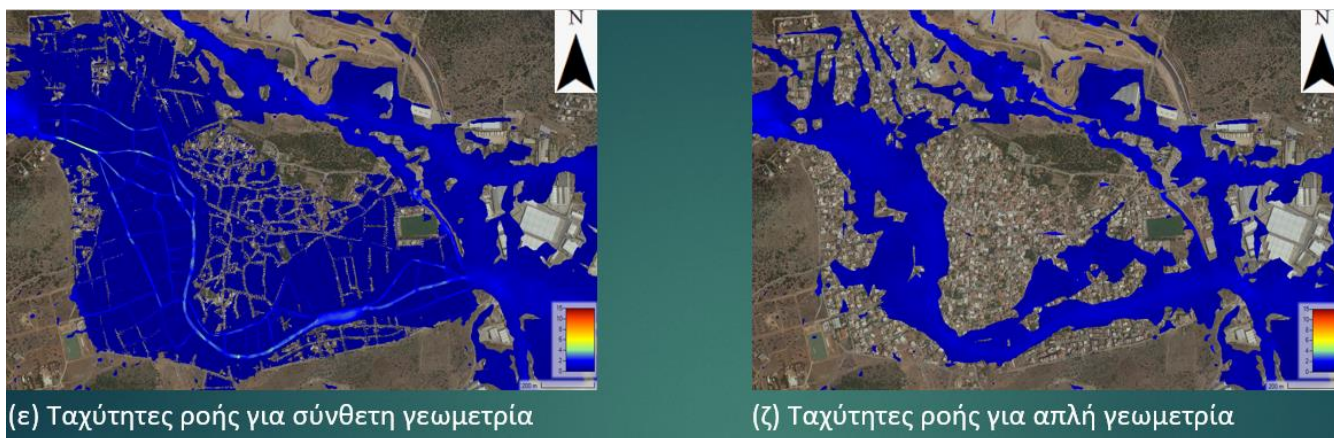
Η ανάλυση της πλημμυρικής έκτασης της δορυφορικής εικόνας (εικόνα 49) έγινε με φωτοερμηνεία, με βάση το ίχνος της πλημμύρας λίγες μέρες μετά το πλημμυρικό γεγονός και όπως φαίνεται από την σύγκριση με την προσομοίωση πλημμύρας με την μέθοδο της rain-on-grid με τα δεδομένα βροχής του radar XPOL (εικόνα 50), η πλημμυρική έκταση έχει πολύ μεγάλο κοινό ποσοστό επικάλυψης. Οι κύριες διαφορές οφείλονται στο γεγονός που προαναφέρθηκε σχετικά με τα λιμνάζοντα νερά, τα οποία οφείλονται στις πολύ υψηλές τιμές Manning εντός των οικοδομικών τετραγώνων, οι οποίες ωθούν το νερό λόγω των μικρών ταχυτήτων που αναπτύσσονται εντός αυτών να μην απορρέει εκτός αυτών. Παρόλα αυτά, το αποτέλεσμα της προσομοίωσης όσον αφορά την έκταση της πλημμυρικής επιφάνειας είναι ικανοποιητικά για τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.

5.4 Μέγιστες Ταχύτητες Ροής

Οι ταχύτητες ροής αποτελούν έναν σημαντικό παράγοντα σε μια πλημμύρα, καθώς όσο πιο μεγάλες είναι τόσο πιο ορμητικά θα είναι τα νερά και τόσο πιο επικίνδυνο θα είναι να υπάρξουν ανθρώπινες απώλειες, αλλά και τόσο πιο πιθανό θα είναι να υπάρξουν φυσικές καταστροφές και καταστροφές υποδομών. Από τα αποτελέσματα του HEC-RAS προέκυψαν και οι μέγιστες ταχύτητες ροής μέσα στην πόλη της Μάνδρας (εικόνας 51,52).

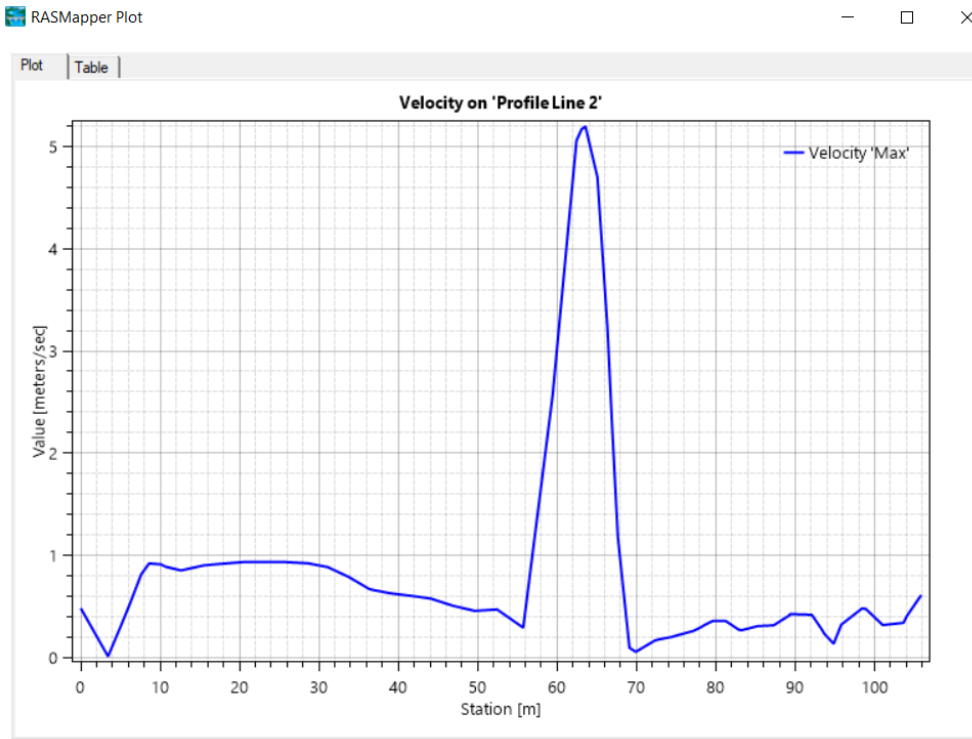


Εικόνα 51 Ταχύτητες ροής για (α) T=50 έτη , (β) T=100 έτη , (γ) T=500 έτη , (δ) T=1000 έτη

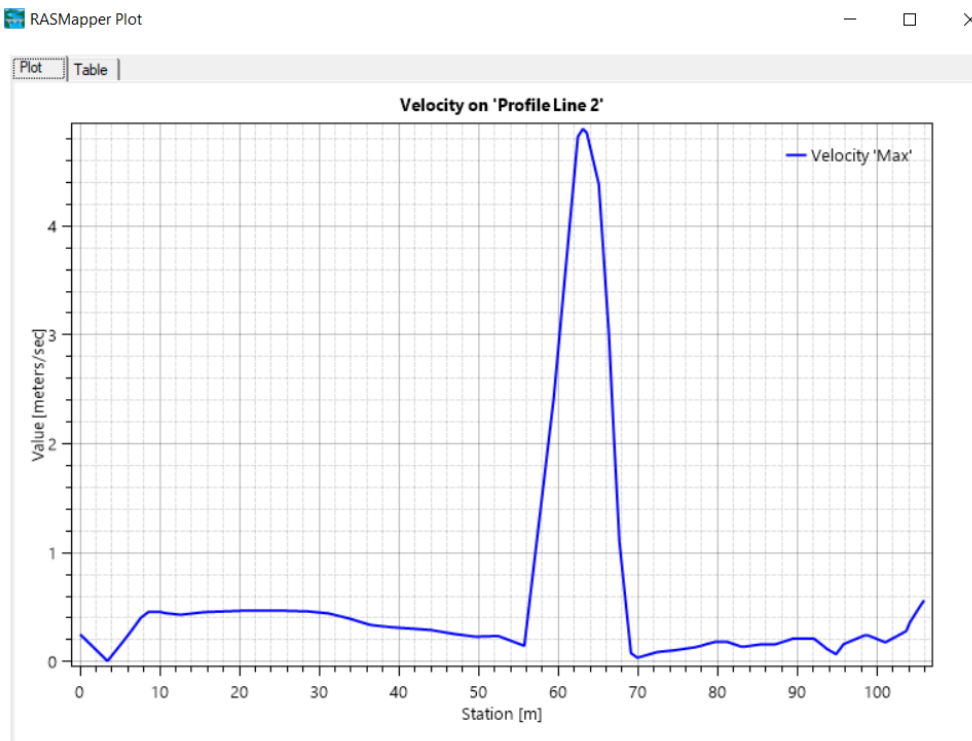


Εικόνα 52 Ταχύτητες ροής για (ε) σύνθετη γεωμετρία , (ζ) απλή γεωμετρία

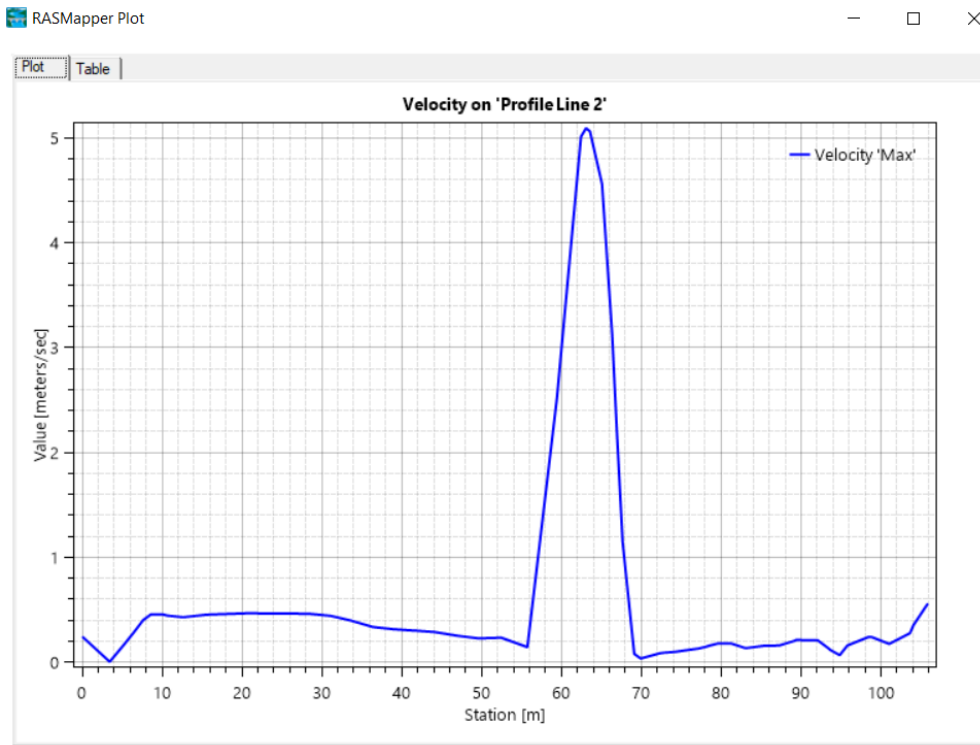
Όπως φαίνεται και στις Εικόνες 51,52 , το νερό καθώς ρέει απο τα δυτικά περνώντας διαμπερώς από την πόλη, αποκτά στα σενάρια των όμβριων καμπυλών για περιόδους επαναφοράς $T=50, 100, 500$ και 1000 μεγαλύτερες ταχύτητες από ότι στα σενάρια της απλής και σύνθετης γεωμετρίας, που είναι βασισμένα όπως προαναφέρθηκε στα δεδομένα πραγματικής βροχόπτωσης. Είναι λογικό σε μια επιφάνεια με πολύ μικρή διαπερατότητα, να αναπτυχθούν μεγάλες ταχύτητες καθώς επίσης κι όλες, η τιμή των Manning στους δρόμους εντός της πόλης της Μάνδρας είναι σχετικά μικρές, άρα πρόκειται για μια υψηλά αδιαπέρατη επιφάνεια με μικρές τριβές. Συγκεκριμένα στην είσοδο της πόλης στο ύψος της οδού Κοροπούλη (εικόνα 39), μετρήθηκαν οι ταχύτητες του νερού μέσα απο το λογισμικό HEC-RAS, για να γίνει πιο ενδελεχής έλεγχος των τιμών αυτής ανά σενάριο (εικόνες 53-58), και η αξιολόγηση τους.



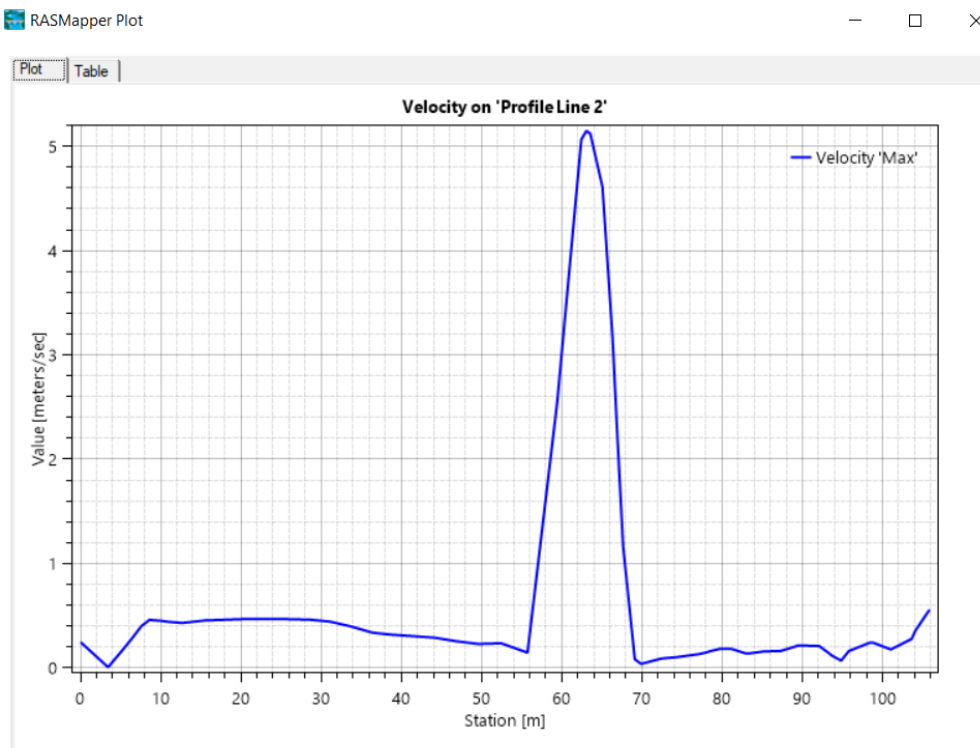
Εικόνα 53 Διάγραμμα ταχύτητας ροής στην είσοδο της οδού Κοροπούλη στην πόλη της Μάνδρας (επιλέχθηκε η είσοδος στην πόλη λόγω της απότομης αλλαγής των τιμών Manning εντός της πόλης και των διαστάσεων των κελιών από 25 μέτρα σε 5 μέτρα) για T=50 έτη



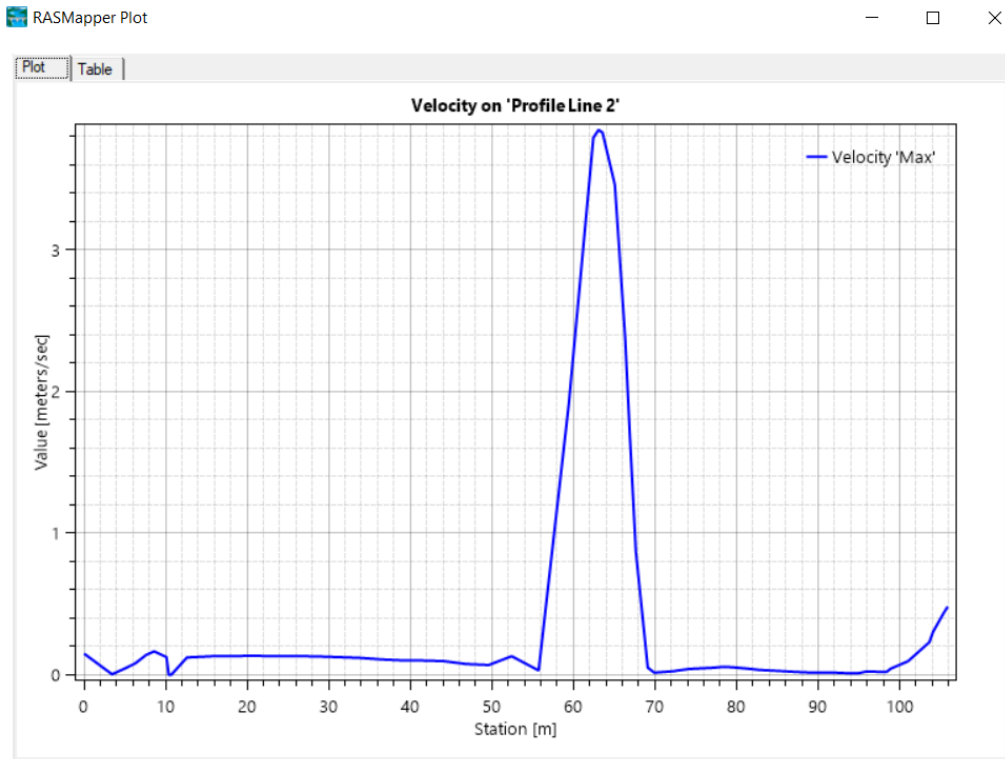
Εικόνα 54 Διάγραμμα ταχύτητας ροής στην είσοδο της οδού Κοροπούλη στην πόλη της Μάνδρας (επιλέχθηκε η είσοδος στην πόλη λόγω της απότομης αλλαγής των τιμών Manning εντός της πόλης και των διαστάσεων των κελιών από 25 μέτρα σε 5 μέτρα) για T=100 έτη



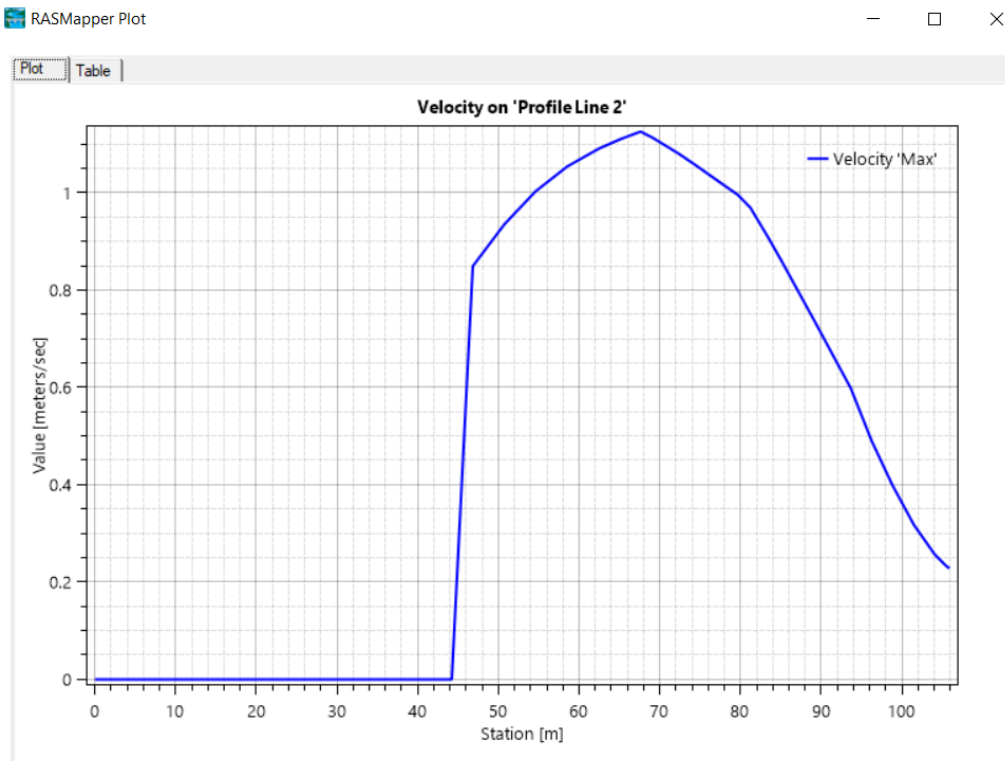
Εικόνα 55 Διάγραμμα ταχύτητας ροής στην είσοδο της οδού Κοροπούλη στην πόλη της Μάνδρας (επιλέχθηκε η είσοδος στην πόλη λόγω της απότομης αλλαγής των τιμών Manning εντός της πόλης και των διαστάσεων των κελιών από 25 μέτρα σε 5 μέτρα) για T=500 έτη



Εικόνα 56 Διάγραμμα ταχύτητας ροής στην είσοδο της οδού Κοροπούλη στην πόλη της Μάνδρας (επιλέχθηκε η είσοδος στην πόλη λόγω της απότομης αλλαγής των τιμών Manning εντός της πόλης και των διαστάσεων των κελιών από 25 μέτρα σε 5 μέτρα) για T=1000 έτη



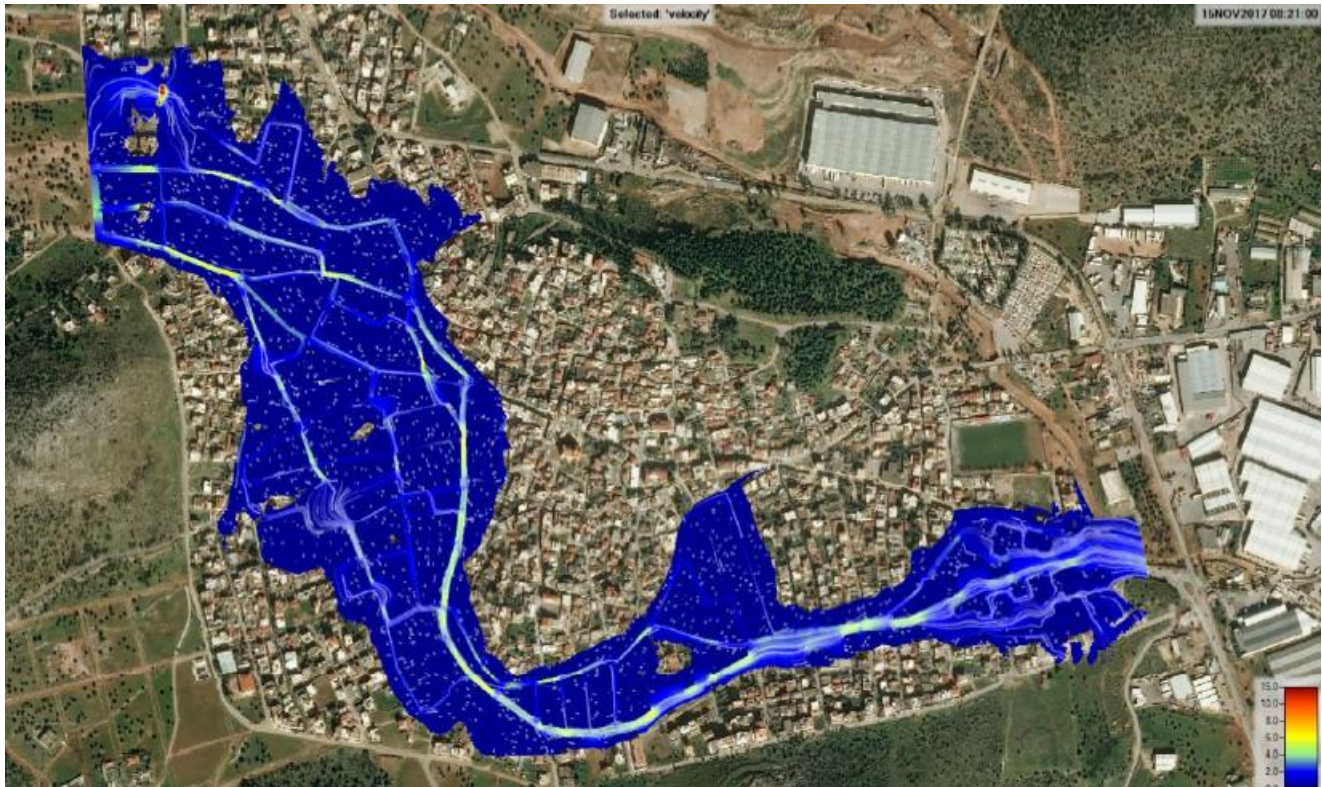
Εικόνα 57 Διάγραμμα ταχύτητας ροής στην είσοδο της οδού Κοροπούλη στην πόλη της Μάνδρας (επιλέχθηκε η είσοδος στην πόλη λόγω της απότομης αλλαγής των τιμών Manning εντός της πόλης και των διαστάσεων των κελιών από 25 μέτρα σε 5 μέτρα) για την σύνθετη γεωμετρία



Εικόνα 58 Διάγραμμα ταχύτητας ροής στην είσοδο της οδού Κοροπούλη στην πόλη της Μάνδρας (επιλέχθηκε η είσοδος στην πόλη λόγω της απότομης αλλαγής των τιμών Manning εντός της πόλης και των διαστάσεων των κελιών από 25 μέτρα σε 5 μέτρα) για την απλή γεωμετρία

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται η μέγιστη ταχύτητα στο σημείο της διατομής, το οποίο είναι στην είσοδο της οδού Κοροπούλη στον αστικό ιστό της Μάνδρας. Οι μέγιστες ταχύτητες αυτής της διατομής δεν διαφέρουν πολύ μεταξύ των ομβρίων καμπυλών των περιόδων επαναφοράς, παρόλο που αξίζει να σημειωθεί πως η μέγιστη ταχύτητα της περιόδου επαναφοράς $T=100$ έτη είναι μικρότερη αυτής της $T=50$ έτη και πιθανώς να οφείλεται σε σφάλμα της προσομοίωσης για $T=100$ καθώς δεν επικρατεί η ίδια διαφορά στα μεταξύ των $T=500,1000$ αντίστοιχα . Η διαφορά των μέγιστων ταχυτήτων ανάμεσα στις δύο γεωμετρίες είναι επίσης σχετικά μεγάλη, σχεδόν 2 m/s , και αυτό οφείλεται στην αναλυτικότερη μοντελοποίηση της σύνθετης ως προς την απλή, δηλαδή στο ότι η πόλη της Μάνδρας στην σύνθετη είναι ψηφιοποιημένη με διαφορετικές τιμές Manning και διαφορετικό μέγεθος κελιών εντός αυτής , ενώ στην απλή η πόλη της Μάνδρας ακολουθεί τις τιμές Manning των χρήσεων γης για αστική περιοχή και έχει τις διαστάσεις του συνολικού πλέγματος δηλαδή 25 μέτρα. Επιπλέον, παρατηρείται πως η αλλαγή της τιμής ταχύτητας είναι πολύ απότομη σε όλα τα σενάρια εκτός από αυτό της απλής γεωμετρίας, και αυτό οφείλεται πιθανώς στην απότομη αλλαγή των τιμών Manning από την μια χρήση γης στην άλλη, καθώς επίσης και μεταξύ του δρόμου και των οικοδομικών τετραγώνων.

Παρατηρείται επίσης πως κατά μήκος σχεδόν όλης της οδού Κοροπούλη έχουν αναπτυχθεί οι υψηλότερες ταχύτητες, και αυτό δικαιολογείται από την μορφολογία του εδάφους, καθώς η οδός Κοροπούλη είναι η καλυμμένη προέκταση του ρέματος Αγίας Αικατερίνης, άρα είναι φυσικό εξαρχής να αναπτυχθούν υψηλές ταχύτητες κατά μήκος της κοίτης του ρέματος, πόσο μάλλον όταν το ρέμα είναι επικαλυμένο και έχει χαμηλό συντελεστή Manning.

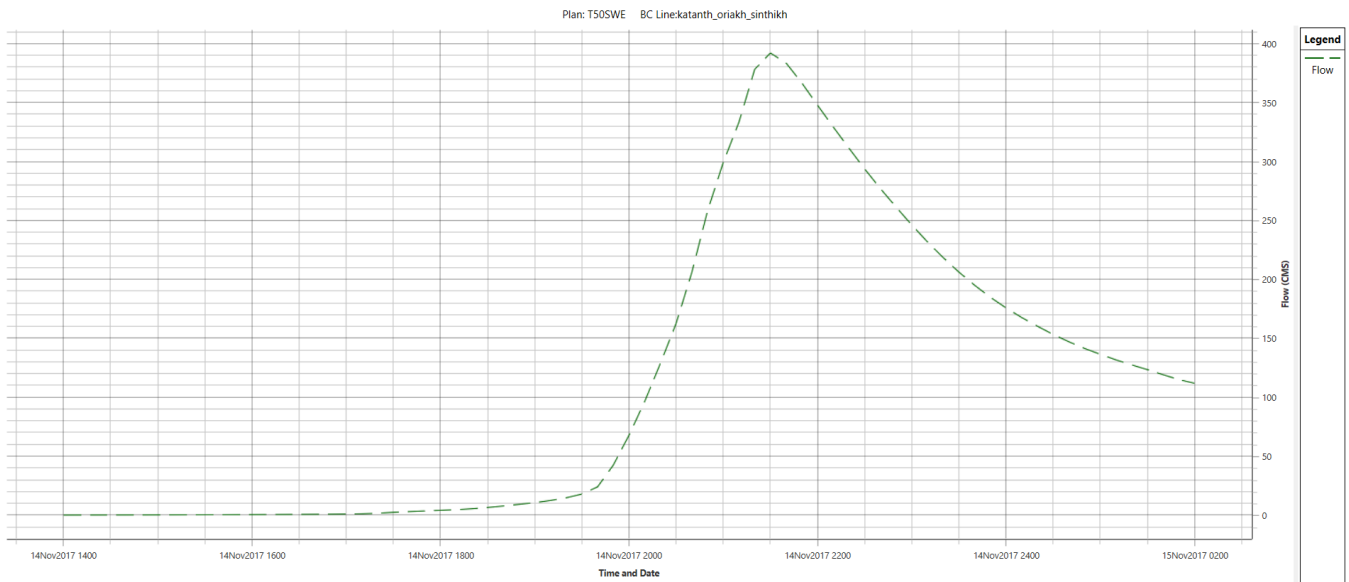


Εικόνα 59 Μέγιστες ταχύτητες ροής διπλωματικής του Σπυρίδων Χανδρινού (Χανδρινός ,2021)

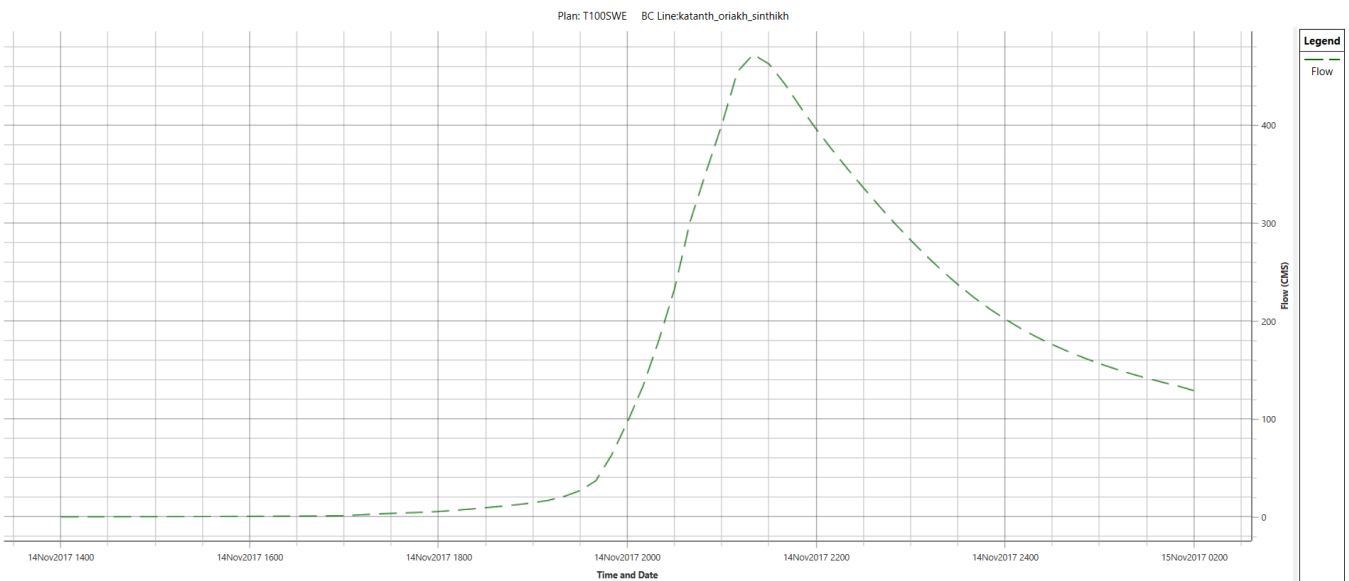
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μεταξύ της Εικόνας 59 (Χανδρινός,2021) και της Εικόνας 52 (ε) ??? (Φωτόπουλος σύνθετη,2022), φαίνεται πως υπάρχει διαφορά στις τιμές των ταχυτήτων που έχουν αναπτυχθεί κατά μήκος της οδού Κοροπούλη, και όπου οι τιμές της Εικόνας 54 (Χανδρινός,2021) είναι πιο κοντά στις τιμές των Εικόνων ??? (όλα τα T). Αυτό πιθανώς να οφείλεται στην διαφορετική μέθοδο υπολογισμού της πλημμυρικής έκτασης, καθώς στην παρούσα εργασία, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της rain-on-grid, ενώ στην εργασία του Χανδρινού (2021) , χρησιμοποιήθηκε υδρογράφημα ροής ως οριακή συνθήκη.

5.5 Παροχή αιχμής

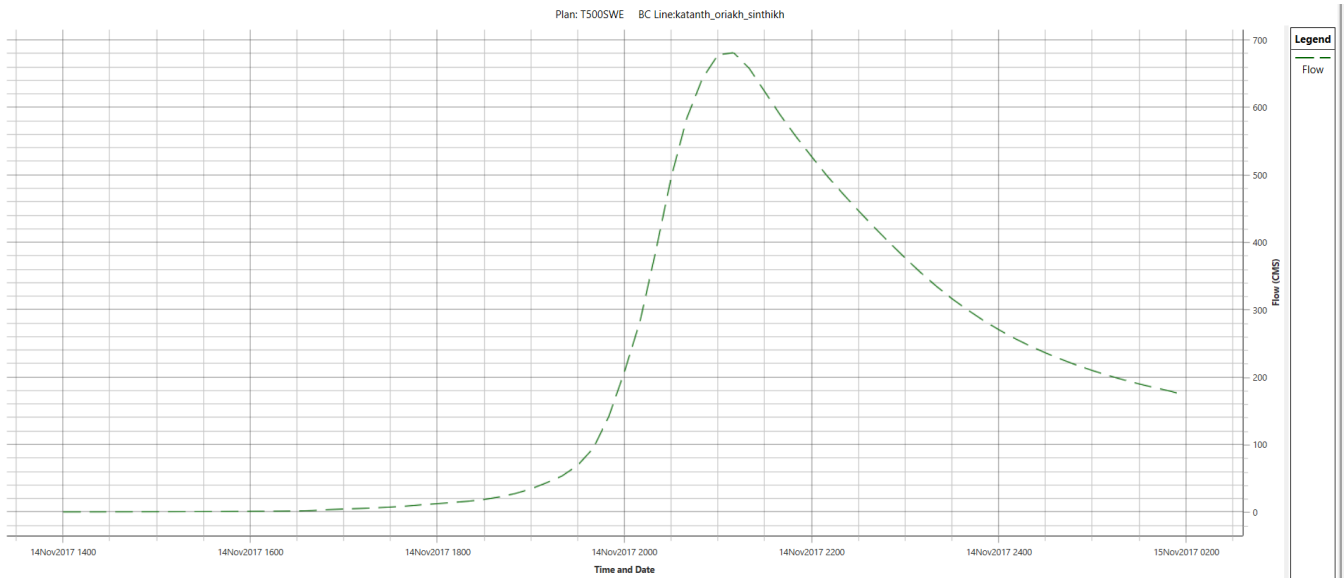
Οι παροχές αιχμής (εικόνες 60-65 και πίνακας 14) (peak discharge) παρουσιάζουν τις μέγιστες τιμές παροχής που υπήρξαν στο κάθε σενάριο. Παρατηρείται πως η παροχή αιχμής του υδρογραφήματος για περίοδο επαναφοράς T=5 έτη, είναι εκείνη που προσεγγίζει την παροχή αιχμής των πραγματικών δεδομένων περισσότερο.



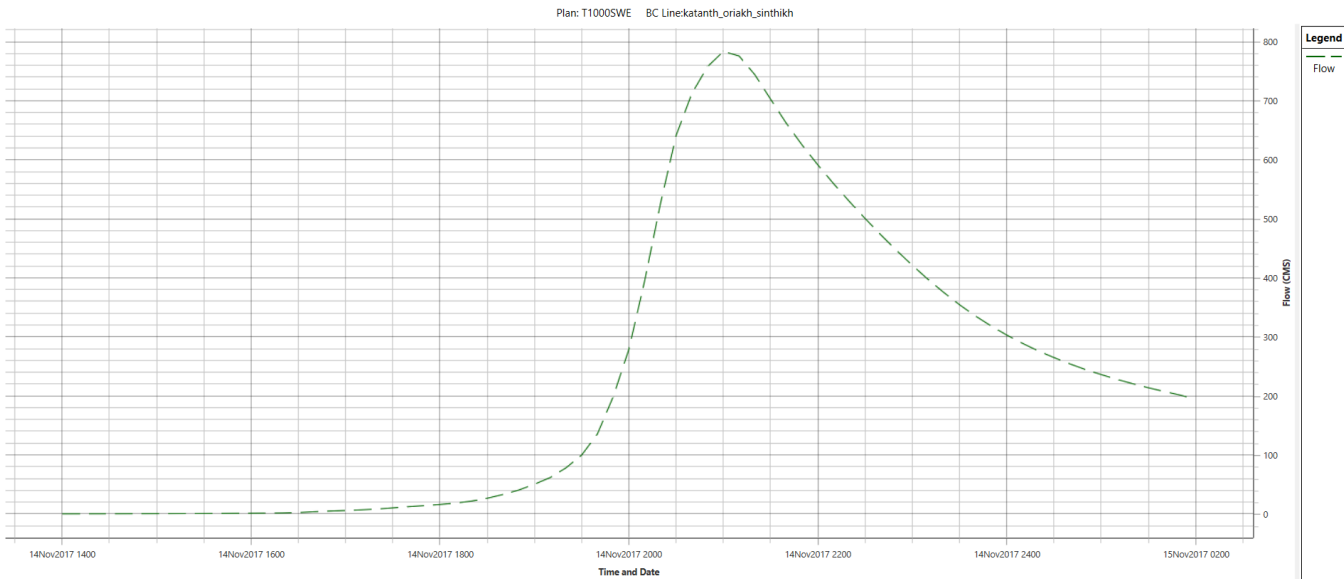
Εικόνα 60 Παροχή αιχμής στην έξοδο της υπολογιστικής περιοχής για T=50 έτη και d=12 ώρες



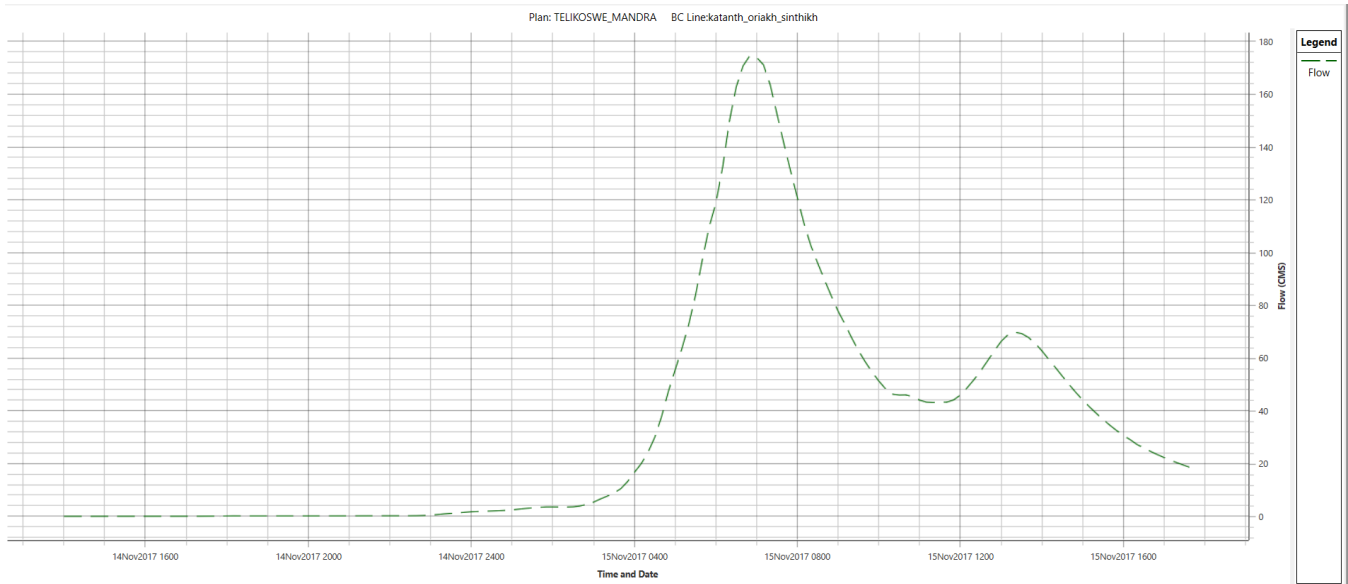
Εικόνα 61 Παροχή αιχμής στην έξοδο της υπολογιστικής περιοχής για T=100 έτη και d=12 ώρες



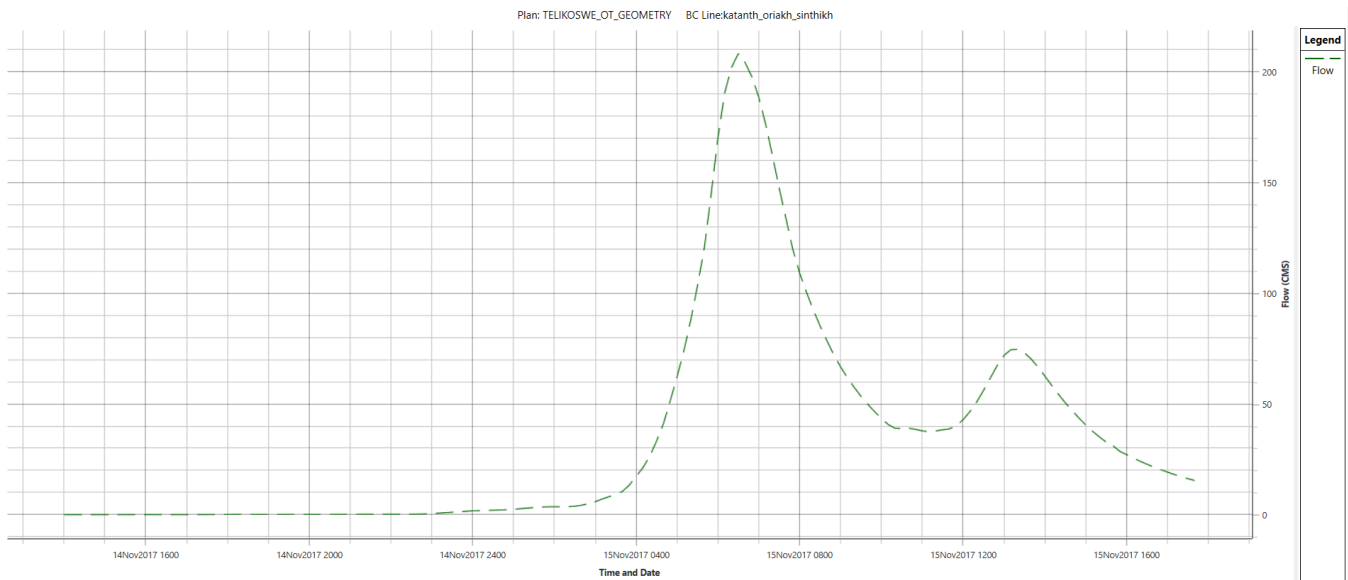
Εικόνα 62 Παροχή αιχμής στην έξοδο της υπολογιστικής περιοχής για T=500 έτη και d=12 ώρες



Εικόνα 63 Παροχή αιχμής στην έξοδο της υπολογιστικής περιοχής για T=1000 έτη και d=12 ώρες



Εικόνα 64 Παροχή αιχμής στην έξοδο της υπολογιστικής περιοχής για την σύνθετη γεωμετρία



Εικόνα 65 Παροχή αιχμής στην έξοδο της υπολογιστικής περιοχής για την απλή γεωμετρία

Πίνακας 11 Παροχές αιχμής στην έξοδο της υπολογιστικής περιοχής , δηλ. της λεκάνης απορροής της Μάνδρας, για τα 6 σενάρια προσομοίωσης

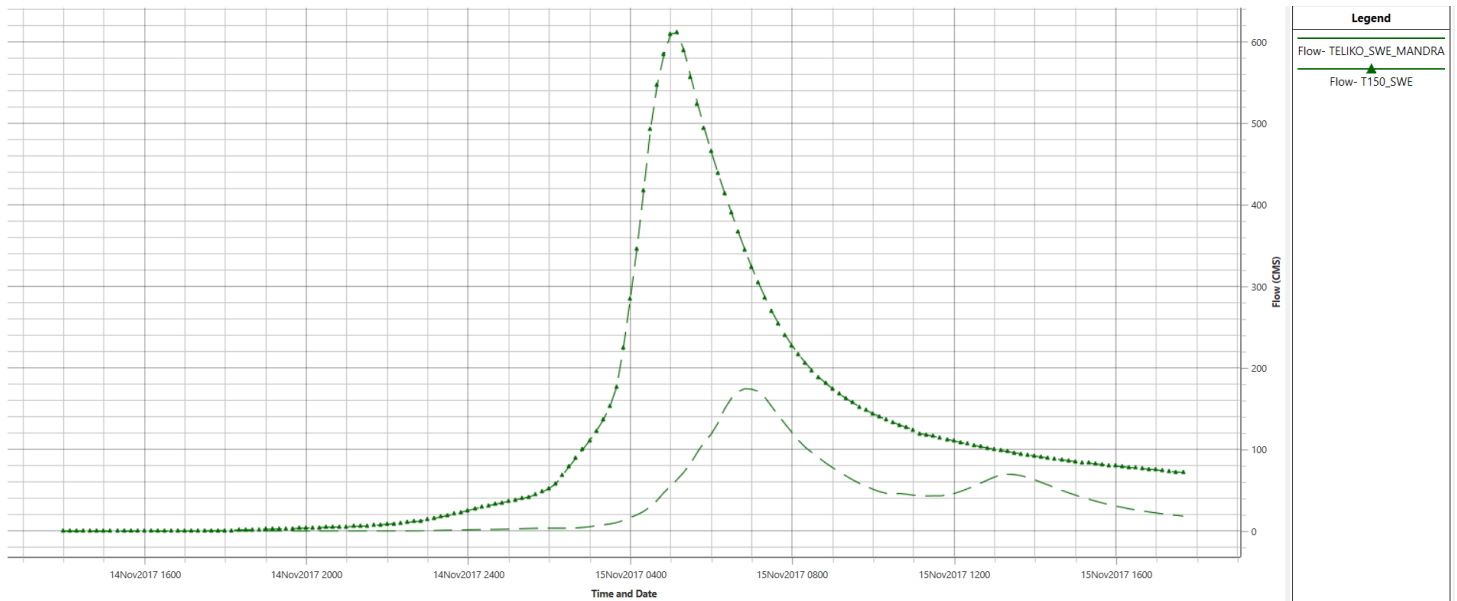
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Time Series</th> <th>Maximum</th> <th>Time at Max</th> <th>Volume 1000 m³</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stage</td> <td>33.6</td> <td>14Nov2017 2140</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Flow</td> <td>392.03</td> <td>14Nov2017 2130</td> <td>4862.62</td> </tr> </tbody> </table>	Time Series	Maximum	Time at Max	Volume 1000 m ³	Stage	33.6	14Nov2017 2140		Flow	392.03	14Nov2017 2130	4862.62	T50
Time Series	Maximum	Time at Max	Volume 1000 m ³										
Stage	33.6	14Nov2017 2140											
Flow	392.03	14Nov2017 2130	4862.62										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Time Series</th> <th>Maximum</th> <th>Time at Max</th> <th>Volume 1000 m³</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stage</td> <td>34.04</td> <td>14Nov2017 2130</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Flow</td> <td>472.19</td> <td>14Nov2017 2120</td> <td>5863.98</td> </tr> </tbody> </table>	Time Series	Maximum	Time at Max	Volume 1000 m ³	Stage	34.04	14Nov2017 2130		Flow	472.19	14Nov2017 2120	5863.98	T100
Time Series	Maximum	Time at Max	Volume 1000 m ³										
Stage	34.04	14Nov2017 2130											
Flow	472.19	14Nov2017 2120	5863.98										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Time Series</th> <th>Maximum</th> <th>Time at Max</th> <th>Volume 1000 m³</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stage</td> <td>35.06</td> <td>14Nov2017 2120</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Flow</td> <td>681.12</td> <td>14Nov2017 2110</td> <td>8651.47</td> </tr> </tbody> </table>	Time Series	Maximum	Time at Max	Volume 1000 m ³	Stage	35.06	14Nov2017 2120		Flow	681.12	14Nov2017 2110	8651.47	T500
Time Series	Maximum	Time at Max	Volume 1000 m ³										
Stage	35.06	14Nov2017 2120											
Flow	681.12	14Nov2017 2110	8651.47										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Time Series</th> <th>Maximum</th> <th>Time at Max</th> <th>Volume 1000 m³</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stage</td> <td>35.52</td> <td>14Nov2017 2120</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Flow</td> <td>783.56</td> <td>14Nov2017 2100</td> <td>10076.43</td> </tr> </tbody> </table>	Time Series	Maximum	Time at Max	Volume 1000 m ³	Stage	35.52	14Nov2017 2120		Flow	783.56	14Nov2017 2100	10076.43	T1000
Time Series	Maximum	Time at Max	Volume 1000 m ³										
Stage	35.52	14Nov2017 2120											
Flow	783.56	14Nov2017 2100	10076.43										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Time Series</th> <th>Maximum</th> <th>Time at Max</th> <th>Volume 1000 m³</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stage</td> <td>32.08</td> <td>15Nov2017 0710</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Flow</td> <td>174.6</td> <td>15Nov2017 0650</td> <td>3419.02</td> </tr> </tbody> </table>	Time Series	Maximum	Time at Max	Volume 1000 m ³	Stage	32.08	15Nov2017 0710		Flow	174.6	15Nov2017 0650	3419.02	ΣΥΝΘΕΤΗ
Time Series	Maximum	Time at Max	Volume 1000 m ³										
Stage	32.08	15Nov2017 0710											
Flow	174.6	15Nov2017 0650	3419.02										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Time Series</th> <th>Maximum</th> <th>Time at Max</th> <th>Volume 1000 m³</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stage</td> <td>32.42</td> <td>15Nov2017 0630</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Flow</td> <td>208.39</td> <td>15Nov2017 0630</td> <td>3507.98</td> </tr> </tbody> </table>	Time Series	Maximum	Time at Max	Volume 1000 m ³	Stage	32.42	15Nov2017 0630		Flow	208.39	15Nov2017 0630	3507.98	ΑΠΛΗ
Time Series	Maximum	Time at Max	Volume 1000 m ³										
Stage	32.42	15Nov2017 0630											
Flow	208.39	15Nov2017 0630	3507.98										

Στα διαγράμματα των περιόδων επαναφοράς, παρατηρείται ένα μέγιστο έντασης βροχής, ενώ στα διαγράμματα με τα πραγματικά δεδομένα, παρατηρούνται δύο μέγιστα, όπου το ένα είναι στις 6:50 το πρωί για την σύνθετη και στις 6:30 το πρωί για την απλή και το άλλο γύρω στις 13:00 το μεσημέρι.

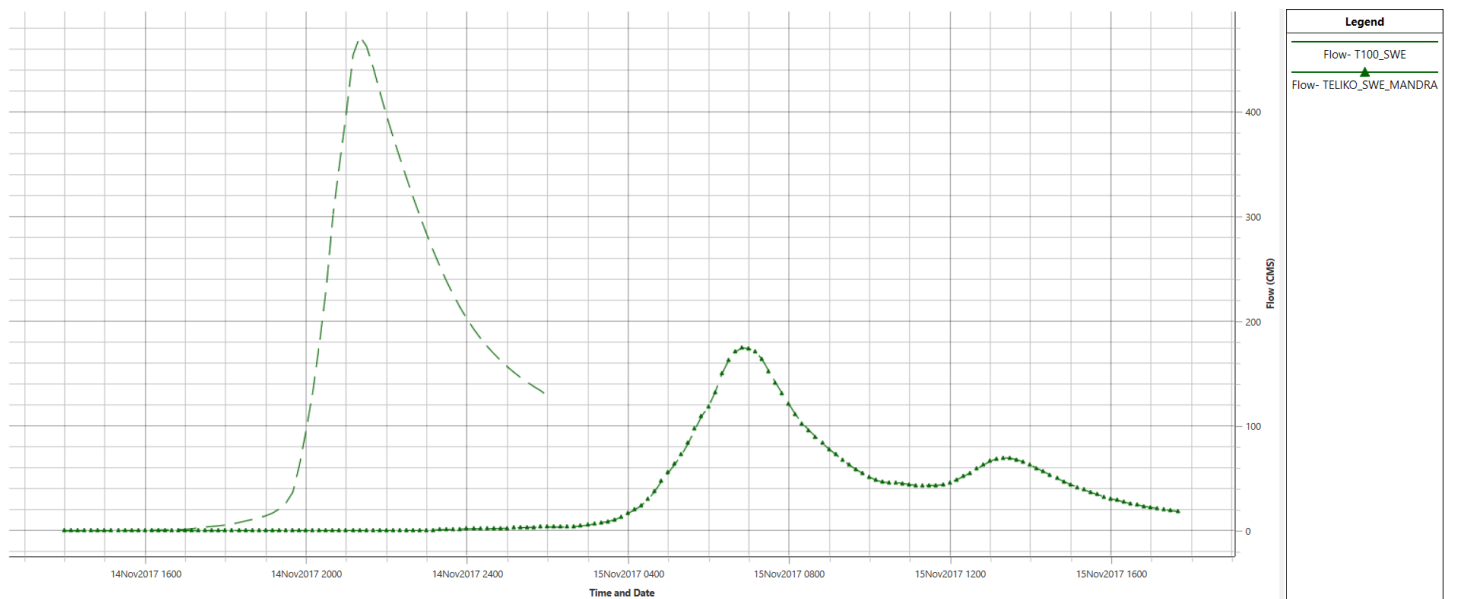
Είναι φυσιολογικό παρόλα αυτά να παρατηρείται ένα στις καμπύλες των περιόδων επαναφοράς, καθώς η ένταση προέκυψε από την μέθοδο των εναλλασόμενων μπλοκ, της οποίας η μεθοδολογία εξ ολοκλήρου βασίζεται στο ότι η βροχή πιάνει ένα μέγιστο. Τα διαγράμματα των περιόδων επαναφοράς T=50,100,500,1000 έχουν υψηλότερες τιμές μέγιστης απορροής πιθανώς επειδή η χρονική διάρκεια μεταξύ των γεγονότων διαφέρει , δηλαδή στα σενάρια της απλής και σύνθετης γεωμετρίας επιλέχθηκε χρονική διάρκεια βροχής 25 ώρες , ενώ στα σενάρια των T=50,100,500,1000 επιλέχθηκε χρονική

διάρκεια 12 ώρες καθώς επίσης και στο γεγονός ότι λόγω της χωρικής ολοκλήρωσης που έγινε στα raster των πραγματικών δεδομένων μειώθηκε το συνολικό ύψος βροχής , αφού επιλέχθηκε ο μέσος όρος της βροχής όλης της λεκάνης για κάθε ένα από αυτά και οι πολλές τιμές μηδενικής βροχόπτωσης εντός αυτών επηρέασαν σημαντικά την μέση αυτή τιμή .

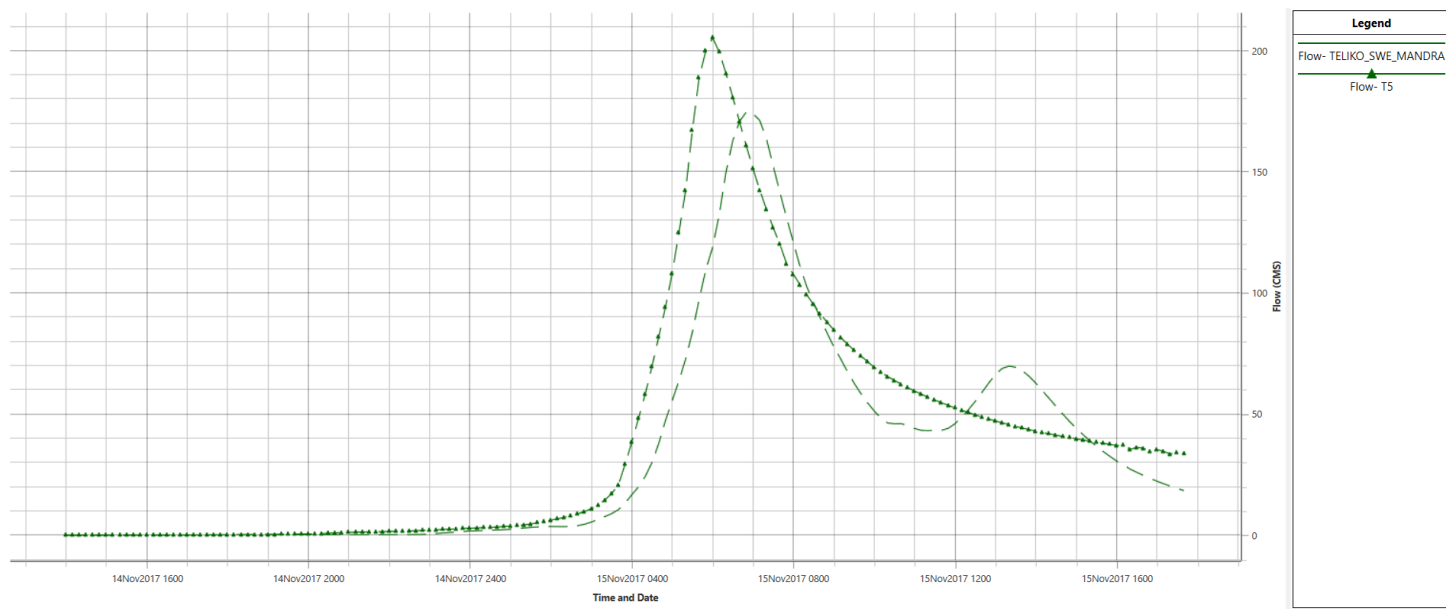
Παρατηρείται επιπλέον, πως η μέγιστη απορροή της απλής γεωμετρίας είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη απορροή της σύνθετης γεωμετρίας, και αυτό ίσως οφείλεται στις υψηλές τιμές Manning εντός της πόλης οι οποίες ανάγκασαν ένα μέρος του νερού να μην προλάβει να απορρεύσει εκτός από τα οικοδομικά τετράγωνα. Επιπλέον, από τον πίνακα 14, παρατηρείται ότι στις μέγιστες τιμές απορροής των περιόδων επαναφοράς σε σχέση με την χρονική στιγμή που τις έπιασαν αυτές, ότι η χρονική στιγμή μειώνεται όσο αυξάνεται η περίοδος επαναφοράς. Τέλος, το γεγονός ότι στα σενάρια των $T=50,100,500,1000$ η χρονική διάρκεια της βροχής είναι 12 ώρες επηρεάζει την σύγκριση των υδρογραφήματων τους με το υδρογράφημα των πραγματικών δεδομένων της σύνθετης γεωμετρίας, καθώς σε εκείνο η διάρκεια είναι 28 ώρες (εικόνα 67). Για την περαιτέρω έρευνα, δημιουργήθηκε και ένα σενάριο για $T=150$ έτη αλλά αυτή τη φορά με χρονική διάρκεια ακριβώς όσες οι ώρες του γεγονότος των πραγματικών δεδομένων, δηλαδή 28 ώρες και έγινε η σύγκριση μεταξύ αυτών των δύο (εικόνα 66) (Υδρογραφήματος δηλαδή για $T=150$ έτη και υδρογραφήματος των πραγματικών δεδομένων) , και έτσι ανιχνεύθηκε το πρόβλημα που προαναφέρθηκε σχετικά με τη χωρική ολοκλήρωση των δεδομένων του radar ΧΡΟΛ. Τελικά το σενάριο το οποίο προσεγγίζει καλύτερα το υδρογράφημα του σεναρίου των πραγματικών δεδομένων της σύνθετης γεωμετρίας, είναι εκείνο για περίοδο επαναφοράς $T=5$ έτη (εικόνα 68), καθώς έχει συνολικό ύψος βροχής πολύ κοντά στο συνολικό ύψος βροχής των χωρικά ολοκληρωμένων πραγματικών δεδομένων.



Εικόνα 66 Σύγκριση υδρογραφημάτων μεταξύ των σεναρίων (α) σύνθετης γεωμετρίας με πραγματικά δεδομένα και (β) όμβριας κατασκευασμένη με την μέθοδο εναλασσόμενων μπλοκ για περίοδο επαναφοράς $T=150$ έτη και $d=28$ ώρες



Εικόνα 67 Σύγκριση υδρογραφημάτων μεταξύ των σεναρίων (α) σύνθετης γεωμετρίας με πραγματικά δεδομένα και (β) όμβριας κατασκευασμένης με την μέθοδο εναλασσόμενων μπλοκ για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη και $d=12$ ώρες



Εικόνα 68 Σύγκριση υδρογραφημάτων μεταξύ των σεναρίων (α) σύνθετης γεωμετρίας με πραγματικά δεδομένα και (β) όμβριας κατασκευασμένης με την μέθοδο εναλασσόμενων μπλοκ για περίοδο επαναφοράς T=5 έτη και d=28 ώρες

6.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία σχετίζεται με την πλημμυρική αποτύπωση , ενός πλημμυρικού συμβάντος που έχει ήδη εκδηλωθεί , και σκοπός της είναι η αξιολόγηση μιας μεθοδού σχετικά με το κατά πόσο κοντά πέφτουν οι υπολογισμοί αυτής με την πραγματικότητα. Στην συνέχεια γίνονται διαφόρων ειδών συγκρίσεις , για την εύρεση των βέλτιστων αποτελεσμάτων και βέλτιστης αξιολόγησης αυτών. Αρχικά η σύγκριση, μεταξύ των όμβριων καμπυλών των περιόδων επαναφοράς και των πραγματικών δεδομένων. Στην συνέχεια, η σύγκριση βαθών με τις μετρημένες τιμές των ιχνών της πλημμύρας λίγες μέρες μετά την εκδήλωση της. Στην συνέχεια, η σύγκριση της υδραυλικής αυτής προσομοίωσης με δορυφορική εικόνα που αποτυπώνει τα ίχνη της πλημμύρας επίσης λίγες μέρες μετά. Τέλος, η σύγκριση των μέγιστων βαθών με τα βάθη που προέκυψαν με άλλη μέθοδο στην διπλωματική εργασία ενός άλλου φοιτητή (Χανδρινός,2021).

Η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη απορροής της Μάνδρας, και στην οποία πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές πλημμυρικές προσομοιώσεις, για την εύρεση της βέλτιστης απο αυτές. Η λεκάνη απορροής προέκυψε απο το plug-in του HEC-HMS, HEC-geoHMS, εντός του λογισμικού Arcmap. Οι πλημμυρικές προσομοιώσεις καθώς και η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό HEC-RAS. Η επεξεργασία των βροχομετρικών δεδομένων έγινε στο Arcmap, με την χρήση μοντέλων και εργαλίων , και επαναληπτικών μεθόδων για την τελική εξαγωγή αυτων , σε μορφή τέτοια ώστε να μπορεί να εισαχθεί στο μοντέλο. Η προσομοίωση της βροχής διήρκησε 28 ωρες , με την πρόσθεση της δωρης μηδενικής βροχόπτωσης.

Τα συμπεράσματα από τις προσομοιώσεις είναι τα εξής :

- Ο συνδυασμός της μεθόδου rain-on-grid με τις εξισώσεις Saint-Venant δίνει καλά αποτελέσματα, δεδομένου ότι η περιοχή μελέτης είναι σχετικά μικρή, διότι αλλιώς, η προσομοίωση διαρκεί υπερβολικά πολύ ώρα και αυτό έχει το μειονέκτημα ότι αν υπάρχει κάπου λάθος στο μοντέλο, μπορεί να χρειαστεί να περιμένει ο χρήστης να ολοκληρωθεί όλη η προσομοίωση, στην περίπτωση που το λάθος βρίσκεται προς το τέλος.
- Οι απλές εξισώσεις δίνουν λιγότερο ρεαλιστικά αποτελέσματα όσον αφορά την έκταση της πλημμυρικής επιφάνειας συγκριτικά με τις Saint-Venant αλλά ο χρόνος προσομοίωσης είναι πολύ μικρότερος
- Η σύγκριση της σύνθετης και της απλής γεωμετρίας, έδειξε πολύ μεγάλες διαφορές όσον αφορά την πλημμυρισμένη επιφάνεια αλλά κατα τόπους, καθώς επίσης και στα βάθη και ταχύτητες ροής
- Το σενάριο το οποίο προσεγγίζει καλύτερα το υδρογράφημα του σεναρίου των πραγματικών δεδομένων της σύνθετης γεωμετρίας, είναι εκείνο για περίοδο επαναφοράς $T=5$ έτη, καθώς έχει συνολικό ύψος βροχής πολύ κοντά στο συνολικό ύψος βροχής των χωρικά ολοκληρωμένων πραγματικών δεδομένων.
- Αν υπήρχε η δυνατότητα καλύτερου ψηφιακού μοντέλου εδάφους, τα αποτελέσματα θα ήταν πιο κοντά στην πραγματικότητα, καθώς η ανάλυση εντός της πόλης θα ήταν μεγαλύτερη.
- Προκειμένου να μην επηρεαστούν τα αποτελέσματα από τις κατάντη οριακές συνθήκες, θα έπρεπε να απομακρυνθεί το κατάντη όριο της υπολογιστικής περιοχής, συγκεκριμένα να επεκταθεί προς τα κατάντη, καθώς είναι κοντά στην πόλη της Μάνδρας

6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Καθώς οι πλημμύρες αποτελούν μια από τις καταστροφικότερες φυσικές καταστροφές, και λόγω της έντονης κλιματικής αλλαγής που βιώνουμε, είναι αναγκαίο η έρευνα για την πρόβλεψη αλλά και αντιμετώπιση πλημμυρών να αναπτύσσεται συνεχώς.

Οι προτάσεις που προέκυψαν για μελλοντική έρευνα με βάση τα αποτελέσματα και συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι οι εξής :

- Να γίνει διαφορετική βαθμονόμηση για τις τιμές του συντελεστή τραχύτητας manning εντός της πόλης της Μάνδρας
- Να γίνει διαφορετική προσέγγιση των κτιρίων , καθώς ενδέχεται η μέθοδος αναπαράστασης των κτιρίων με τις υψηλές τιμές manning να μην ταιριάζει στη μέθοδο rain-on-grid
- Να γίνει μια χωρικά κατανομημένη βροχόπτωση και σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτής με τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας
- Να χρησιμοποιηθούν δεδομένα υψηλότερης ανάλυσης για την μέθοδο rain-on-grid και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της παρούσας διπλωματικής εργασίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

7.1 Ελληνική Βιβλιογραφία

[1]

“Κεφάλαιο 3: Θεμελιώδεις υδραυλικές έννοιες.” http://nomoskopio.gr/omoe_12_3.php?toc=0&printWindow& (accessed Jun. 16, 2022).

Γ.Τσακίρης – «ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ : Ι. ΤΕΧΝΙΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ & ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ» - Καθηγητής ΕΜΠ - Αθήνα 2013

Γεώργιος Α. Τερζίδης – «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ» -Καθηγητής Υδραυλικής ΑΠΘ - 1997

[1]

“4η Παρουσίαση_Αιφνίδιες-Πλημμύρες_Οι περιπτώσεις της Μάνδρας και της Σαμοθράκης.pdf.” Accessed: May 05,2022.[Online].Available:https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/ENG121/4%CE%B7%20%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%BF%CF%85%CF%83%CE%AF%CE%B1%CF%83%CE%B7_%CE%91%CE%B9%CF%86%CE%BD%CE%AF%CE%B4%CE%B9%CE%B5%CF%82-%CE%A0%CE%BB%CE%B7%CE%BC%CE%BC%CF%8D%CF%81%CE%B5%CF%82_%CE%9F%CE%B9%20%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%B9%CF%80%CF%84%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82%20%CF%84%CE%B7%CF%82%20%CE%9C%CE%AC%CE%BD%CE%B4%CF%81%CE%B1%CF%82%20%CE%BA%CE%B1%CE%B9%20%CF%84%CE%B7%CF%82%20%CE%A3%CE%B1%CE%BC%CE%BF%CE%B8%CF%81%CE%AC%CE%BA%CE%B7%CF%82.pdf

[1]

Κ.Ρέβη, “288 αιφνίδιες πλημμύρες μέσα σε 16 χρόνια,” *ΤΑ ΝΕΑ*, Nov. 22, 2017. <https://www.tanea.gr/2017/11/22/greece/288-aifnidies-plimmyres-mesa-se-16-xronia/> (accessed May 05, 2022).

[1]

“ABSTRACT.pdf.” Accessed: Apr.26,2022.[Online].Available:<https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/50764/ABSTRACT.pdf?sequence=3>

[2]

“Thesis_MAVROGEOGOS_July_2019_FINAL1.pdf.” Accessed: Apr. 26, 2022. [Online]. Available: https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/50156/Thesis_MAVROGEOGOS_July_2019_FINAL1.pdf?sequence=1

[3]

“Το φαινόμενο των αιφνίδιων αστικών πλημμυρών (Urban Flash Floods). Η περίπτωση της πλημμύρας στην Μάνδρα Αττικής στις 15.11.2017: Αποτέλεσμα κλιματικής αλλαγής ή ανθρώπινης παρέμβασης ; – GreenApple.”

<https://greenapple.gr/2020/10/07/to-%cf%86%ce%b1%ce%b9%ce%bd%cf%8c%ce%bc%ce%b5%ce%bd%ce%bf-%cf%84%cf%89%ce%bd-%ce%b1%ce%b9%cf%86%ce%bd%ce%af%ce%b4%ce%b9%cf%89%ce%bd-%ce%b1%cf%83%cf%84%ce%b9%ce%ba%cf%8e%ce%bd-%cf%80%ce%bb%ce%b7%ce%bc/> (accessed May 05, 2022).

[1]

Σ. Μπάμπου, “Διερεύνηση επιπτώσεων των φυσικών καταστροφών στο περιβάλλον. Μελέτη περίπτωσης: πλημμυρικά φαινόμενα στο δήμο Μάνδρας – Ειδυλλίας,” *Investigation of the impact of natural disasters on the environment. Case study: the flood event in the Municipality of Mandras - Idillyas*, Mar. 2019, Accessed: Apr. 26, 2022. [Online]. Available: <http://okeanis.lib2.uniwa.gr/xmlui/handle/123456789/4840>

[2]

“Έτσι ‘πνίγηκε’ η Μάνδρα – Πως έγινε η τρίτη μεγαλύτερη καταστροφή από πλημμύρες στην Αττική,” *NewsIT*, Nov. 16, 2017. <https://www.newsit.gr/ellada/etsi-pnigike-mandra-pos-egine-triti-megalyteri-katastrofi-apo-plimmyres-stin-attiki/2293548/> (accessed Jun. 16, 2022).

[3]

“Θεσμικό οριοθέτησεων ρεμάτων: Ασπίδα αντιπλημμυρικής προστασίας – Η περίπτωση της Μάνδρας Αττικής,” *Κατασκευές Κτιρίων*, Apr. 20, 2018. <https://kataskevesktirion.gr/%CE%B8%CE%B5%CF%83%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%8C-%CE%BF%CF%81%CE%B9%CE%BF%CE%B8%CE%B5%CF%84%CE%AE%CF%83%CE%B5%CF%89%CE%BD-%CF%81%CE%B5%CE%BC%CE%AC%CF%84%CF%89%CE%BD-%CE%B1%CF%83%CF%80%CE%AF%CE%B4%CE%B1/> (accessed Apr. 26, 2022).

[4]

“Μαγούλα Αττικής,” *Βικιπαίδεια*. Mar. 22, 2022. Accessed: May 30, 2022. [Online]. Available: https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%9C%CE%B1%CE%B3%CE%BF%CF%8D%CE%BB%CE%B1_%CE%91%CF%84%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82&oldid=9386014

[5]

“Μάνδρα: Ερειπωμένη πόλη 10 ημέρες μετά τις φονικές πλημμύρες,” *ProtoThema*, Nov. 25, 2017. <https://www.protothema.gr/greece/article/735129/mandra-ereipomeni-poli-10-imeres-meta-tis-foinikes-plimmures-/> (accessed May 05, 2022).

[6]

“Πώς εξαφανίστηκαν τα ρέματα στη Μάνδρα Αττικής (pics),” *Reader*. <https://www.reader.gr/koinonia/237457/pos-exafanistikan-ta-remata-sti-mandra-attikis-pics> (accessed Apr. 26, 2022).

[7]

“Στατιστικές - ELSTAT.” <https://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SAM03/2011> (accessed May 30, 2022).

[8]

A. Καρυστινός, “Συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης για πλημμυρικό κίνδυνο,” *Flood early warning systems*, Jul. 2021, doi: [10.26265/polynoe-813](https://doi.org/10.26265/polynoe-813).

[9]

K.-Σ. Μαλακοδήμος, “Χαρτογράφηση ζημιών από πλημμύρες στη Μάνδρα Αττικής,” Jan. 2020, Accessed: Apr. 26, 2022. [Online]. Available: <http://oceanis.lib2.uniwa.gr/xmlui/handle/123456789/5165>

[1]

“I_1_P01_EL06.pdf.” Accessed: May 20, 2022. [Online]. Available: https://floods.ypeka.gr/egyfloods/gr06/report/I_1_P01_EL06.pdf

[1]

“civ_6661.pdf.” Accessed: Jun. 28, 2022. [Online] Available: https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/610/civ_6661.pdf?sequence=1&isAllowed=y

“dmeot7.pdf.” Accessed: Oct. 18, 2022. [Online]. Available: <http://www.ggde.gr/dmdocuments/dmeot7.pdf>

E. Ραπτάκη and E. Raptaki, “Προσομοίωση πλημμύρας σε αστική λεκάνη απορροής για την εκτίμηση κινδύνου από πλημμύρες ταχείας απόκρισης,” May 2020, doi: [10.26240/heal.ntua.18402](https://doi.org/10.26240/heal.ntua.18402).

7.2 Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

HEC-RAS_6.0_2D_Modeling_Users_Manual - US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center

HEC-RAS_6.0_Reference_Manual - US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center

HEC-RAS_6.0_Users_Manual - US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center

HEC-RAS Mapper_User's_Manual - US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center

HEC-GeoHMS_Users_Manual_10.1 - US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center

[1]

A. K. I. Pathan and P. G. Agnihotri, “2-D Unsteady Flow Modelling and Inundation Mapping for Lower Region of Purna Basin Using HEC-RAS,” *Nature Environment and Pollution Technology*, vol. 19, no. 1, p. 9, 2020.

[1]

“HEC-RAS Documentation.” <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx> (accessed Jun. 30, 2022).

[2]

M. Bhandari, N. Nyaupane, S. R. Mote, A. Kalra, and S. Ahmad, "2D Unsteady Flow Routing and Flood Inundation Mapping for Lower Region of Brazos River Watershed," in *World Environmental and Water Resources Congress 2017*, Sacramento, California, May 2017, pp. 292–303. doi: [10.1061/9780784480625.027](https://doi.org/10.1061/9780784480625.027).

[3]

N. Ongdas, F. Akiyanova, Y. Karakulov, A. Muratbayeva, and N. Zinabdin, "Application of HEC-RAS (2D) for Flood Hazard Maps Generation for Yesil (Ishim) River in Kazakhstan," *Water*, vol. 12, no. 10, Art. no. 10, Oct. 2020, doi: [10.3390/w12102672](https://doi.org/10.3390/w12102672).

[4]

Z. Li and J. Zhang, "Calculation of Field Manning's Roughness Coefficient," *Agricultural Water Management*, vol. 49, no. 2, pp. 153–161, Jul. 2001, doi: [10.1016/S0378-3774\(00\)00139-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00139-6).

[1]

W. H. M. Wan Mohtar, J. Abdullah, K. N. Abdul Maulud, and N. S. Muhammad, "Urban flash flood index based on historical rainfall events," *Sustainable Cities and Society*, vol. 56, p. 102088, May 2020, doi: [10.1016/j.scs.2020.102088](https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102088).

[2]

"Urban-flooding-report-online.pdf." Accessed: May 06, 2022. [Online]. Available: <https://today.tamu.edu/wp-content/uploads/sites/4/2018/11/Urban-flooding-report-online.pdf>

[1]

S. Hariri, S. Weill, J. Gustedt, and I. Charpentier, "A balanced watershed decomposition method for rain-on-grid simulations in HEC-RAS," *Journal of Hydroinformatics*, vol. 24, no. 2, pp. 315–332, Jan. 2022, doi: [10.2166/hydro.2022.078](https://doi.org/10.2166/hydro.2022.078).

[2]

A. David and B. Schmalz, "A Systematic Analysis of the Interaction between Rain-on-Grid-Simulations and Spatial Resolution in 2D Hydrodynamic Modeling," *Water*, vol. 13, no. 17, Art. no. 17, Jan. 2021, doi: [10.3390/w13172346](https://doi.org/10.3390/w13172346).

[3]

A. Mustafa and M. Szydłowski, "Application of different building representation techniques in HEC-RAS 2-D for urban flood modeling using the Toce River experimental case," *PeerJ*, vol. 9, p. e11667, Jul. 2021, doi: [10.7717/peerj.11667](https://doi.org/10.7717/peerj.11667).

[4]

V. A. Rangari, V. Sridhar, N. V. Umamahesh, and A. K. Patel, "Floodplain Mapping and Management of Urban Catchment Using HEC-RAS: A Case Study of Hyderabad City," *J. Inst. Eng. India Ser. A*, vol. 100, no. 1, pp. 49–63, Mar. 2019, doi: [10.1007/s40030-018-0345-0](https://doi.org/10.1007/s40030-018-0345-0).

[5]

“Full article: Estimating urban flooding potential near the outlet of an arid catchment in Saudi Arabia.” <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475705.2016.1255668> (accessed Apr. 28, 2022).

[6]

P. Costabile, C. Costanzo, D. Ferraro, and P. Barca, “Is HEC-RAS 2D accurate enough for storm-event hazard assessment? Lessons learnt from a benchmarking study based on rain-on-grid modelling,” *Journal of Hydrology*, vol. 603, p. 126962, Dec. 2021, doi: [10.1016/j.jhydrol.2021.126962](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126962).

[7]

S. J. Zeiger and J. A. Hubbart, “Measuring and modeling event-based environmental flows: An assessment of HEC-RAS 2D rain-on-grid simulations,” *Journal of Environmental Management*, vol. 285, p. 112125, May 2021, doi: [10.1016/j.jenvman.2021.112125](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112125).

[8]

A. Taylor, C. Johnson, and D. Kapugama, “Never mind the subcatchments, here’s the rain on grid,” *Hydrology and Water Resources Symposium 2014, HWRS 2014 - Conference Proceedings*, pp. 86–93, Jan. 2014.

[9]

S. Malik and S. C. Pal, “Potential flood frequency analysis and susceptibility mapping using CMIP5 of MIROC5 and HEC-RAS model: a case study of lower Dwarkeswar River, Eastern India,” *SN Appl. Sci.*, vol. 3, no. 1, p. 31, Jan. 2021, doi: [10.1007/s42452-020-04104-z](https://doi.org/10.1007/s42452-020-04104-z).

[10]

C. Doan, J. Liu, S.-Y. Liong, A. Verwey, and A. T. Dao, *RAINFALL-RUNOFF STUDY FOR SINGAPORE RIVER CATCHMENT*. 2012.

[11]

M. R. Knebl, Z.-L. Yang, K. Hutchison, and D. R. Maidment, “Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event,” *Journal of Environmental Management*, vol. 75, no. 4, pp. 325–336, Jun. 2005, doi: [10.1016/j.jenvman.2004.11.024](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.024).

[12]

K. Marko, A. Elfeki, N. Alamri, and A. Chaabani, “Two Dimensional Flood Inundation Modelling in Urban Areas Using WMS, HEC-RAS and GIS (Case Study in Jeddah City, Saudi Arabia),” in *Advances in Remote Sensing and Geo Informatics Applications*, Cham, 2019, pp. 265–267. doi: [10.1007/978-3-030-01440-7_62](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01440-7_62).

[1]

E. Yalcin, “Assessing the impact of topography and land cover data resolutions on two-dimensional HEC-RAS hydrodynamic model simulations for urban flood hazard analysis,” *Nat Hazards*, vol. 101, no. 3, pp. 995–1017, Apr. 2020, doi: [10.1007/s11069-020-03906-z](https://doi.org/10.1007/s11069-020-03906-z).

[2]

V. A. Rangari, N. V. Umamahesh, and C. M. Bhatt, “Assessment of inundation risk in urban floods using HEC RAS 2D,” *Model. Earth Syst. Environ.*, vol. 5, no. 4, pp. 1839–1851, Dec. 2019, doi: [10.1007/s40808-019-00641-8](https://doi.org/10.1007/s40808-019-00641-8).

[1]

“Urban-flooding-report-online.pdf.” Accessed: Oct. 18, 2022. [Online]. Available: <https://today.tamu.edu/wp-content/uploads/sites/4/2018/11/Urban-flooding-report-online.pdf>