



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ολοκληρωμένη προσομοίωση πλημμύρας στην αστική λεκάνη απορροής

Αφαίας- Σκαραμαγκά, Δήμου Χαϊδαρίου



**Ειρήνη Ραπτάκη**

Επιβλέπων: Καθηγητής Β. Α. Τσιχριντζής

Αθήνα, Οκτώβριος 2017





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ολοκληρωμένη προσομοίωση πλημμύρας στην αστική λεκάνη απορροής  
Αφαίας- Σκαραμαγκά, Δήμου Χαϊδαρίου**

**Ειρήνη Ραπτάκη**

Επιβλέπων: Καθηγητής Β. Α. Τσιχριντζής

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μονοδιάστατη και δισδιάστατη προσομοίωση πλημμύρας σε αστικές λεκάνες απορροής με χρήση των υπολογιστικών μοντέλων Mike Urban και Mike Flood. Οι λεκάνες που μελετώνται βρίσκονται στην περιοχή Αφαία – Σκαρμαγκαά του Δήμου Χαϊδαρίου. Γίνεται μια προσπάθεια να διερευνηθεί η πιθανότητα εμφάνισης πλημμύρας σε αστικές κυρίως λεκάνες απορροής και η υδρολογική και υδραυλική απόκριση αυτών κάτω από τυπικά συνθετικά γεγονότα βροχόπτωσης. Τα περισσότερα δεδομένα (αγωγοί, φρεάτια, λεκάνες απορροής) για την μοντελοποίηση του συστήματος αντλήθηκαν από πρόσφατη μελέτη του δικτύου ομβρίων της περιοχής που εκπονήθηκε από ομάδα μελετητών με ανάδοχο μελέτης την Αγρονόμο – Τοπογράφο Μηχανικό κ. Λήδα Φωτοπούλου. Σε εκείνη την μελέτη χρησιμοποιήθηκε η ορθολογική μέθοδος για την διαστασιολόγηση των αγωγών και η ένταση της βροχόπτωσης προσδιορίστηκε από την όμβρια καμπύλη των Κουτσογιάννη-Μπαλούτσου (1999) που έχει προσδιοριστεί για το Λεκανοπέδιο Αττικής, βάσει των δεδομένων από τους βροχομετρικούς σταθμούς του Λόφου Νυμφών (περιοχή Αστεροσκοπείου) και Ελληνικού (περιοχή παλαιού αεροδρομίου Αθήνας). Επίσης, η μελέτη εκείνη αναφέρεται σε περίοδο επαναφοράς 50 ετών για τον κύριο αγωγό (αγωγό Α) και περίοδο επαναφοράς 10 ετών για τους υπόλοιπους αγωγούς, ενώ πλήρη υδραυλικά δεδομένα υπήρχαν μόνο για το προτεινόμενο δίκτυο ομβρίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι αναζητήθηκαν, άκαρπα, υδραυλικά δεδομένα για το υπάρχον σύστημα αποχέτευσης ομβρίων από την Τεχνική Υπηρεσία του Δήμου Χαϊδαρίου, τα οποία δεν υπήρχαν διαθέσιμα.

Αρχικά, αναφέρονται οι κανονισμοί οι οποίοι ισχύουν σήμερα στην Ελλάδα για το αποχετευτικό δίκτυο ομβρίων. Περιγράφονται οι τρόποι εκτίμησης της απορροής και γίνεται αναφορά στα μοντέλα προσδιορισμού της ποσότητας απορροής. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται και περιγράφεται αναλυτικά το λογισμικό Mike Urban. Γίνεται ενδελεχής ανάλυση του θεωρητικού υποβάθρου του λογισμικού και περιγράφονται και αναλύονται οι παράμετροι αυτού. Τέλος, παρουσιάζονται μελέτες οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί με το λογισμικό Mike Urban και μελέτες που αφορούν την προσομοίωση πλημμύρας σε αστικό δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων και οι οποίες αποτέλεσαν μέρος της βιβλιογραφικής έρευνας, η οποία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Ακολούθως παρουσιάζεται η περιοχή έρευνας και η πορεία εργασιών η οποία ακολουθήθηκε για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε η Αφαία του Δήμου Χαϊδαρίου και με τη χρήση του λογισμικού Mike Urban μοντελοποιήθηκε το δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων και διερευνήθηκε η υδραυλική συμπεριφορά του συστήματος για διάφορα γεγονότα βροχόπτωσης. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του

δυναμικού κύματος έτσι ώστε να προσεγγίζονται στον καλύτερο δυνατό βαθμό οι πραγματικές συνθήκες. Τα γεγονότα βροχόπτωσης εισήχθησαν στο μοντέλο με την μορφή υετογραμμάτων, τα οποία δημιουργήθηκαν με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ, για περιόδους επαναφοράς 5, 10, 50 και 100 έτη και για διάρκειες βροχόπτωσης 1, 2 και 12 h με το χρονικό βήμα να επιλέγεται 5 min.

Στο κεφάλαιο που έπεται παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του δικτύου για τα γεγονότα βροχής που αναφέρθηκαν, γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την Ορθολογική Μέθοδο και ακολουθεί η ανάλυση ευαισθησίας. Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε για ένα γεγονός βροχόπτωσης χρονικής διάρκειας 1 ώρας και περιόδου επαναφοράς 50 ετών και εξετάστηκε η ευαισθησία των εξής υδρολογικών και υδραυλικών παραμέτρων:

- Curve Number
- Συντελεστής Manning στην επιφάνεια του εδάφους
- Ύψος κτιρίων

Επιλέχθηκαν τέσσερα σημεία ενδιαφέροντος, κοντά στα φρεάτια που πλημμυρίζουν περισσότερο, στα οποία εκτιμήθηκε το μέγιστο βάθος και η μέγιστη ταχύτητα ροής. Κατόπιν κατασκευάστηκαν box plots για την εκτίμηση της συμμετρίας των αποτελεσμάτων της ανάλυσης ευαισθησίας.

Η εργασία ολοκληρώνεται με μια σύνοψη των κυριότερων συμπερασμάτων και τη διατύπωση ορισμένων προτάσεων στην κατεύθυνση της μελλοντικής έρευνας.

## **ABSTRACT**

The subject of this paper is the one-dimensional and two-dimensional flood simulation in urban catchment areas using the computer models Mike Urban and Mike Flood. The catchments studied are located in Aphaia – Skaramangas of the Municipality of Haidari. An effort is being made to investigate the possibility of flooding in urban basins and their hydrological and hydraulic response under typical rainfall events. Most of the primary data used in this paper (such as links, nodes and catchments) were derived from a recent study of the rainfall network of the study-area, conducted by a group of researchers led by Rural and Survey Engineer, L. Fotopoulou. In this study the dimensioning of the links was done using the rational method and the intensity of precipitation was determined by the Rainfall Curve of Koutsoyiannis-Mpaloutsos (1999). The study refers to 50 years return period for the main link (Link A) and 10 years storm for the remaining links.

First of all the regulations for the storm drainage system that are currently in force in Greece are mentioned. Then, the simulation model “Mike Urban” is described and its parameters are analyzed. The research area and the course of work followed for the successful completion of the present work are presented below. For the simulation, the dynamic wave method was used to best approximate the actual conditions. Rainfall events were introduced into the model in the form of Alternate Block Method for 5, 10, 50, and 100 year return period and 1, 2 and 12 hours of rainfall duration with the time step selected for 5 min. The following chapter presents and analyzes the results from the simulation of the network for the reported rain events, compares to the results obtained from the rational method and follows the sensitivity analysis. The sensitivity analysis was performed for a 50 year return period and 1 hour duration rainfall event and was examined the sensitivity of the following hydrological and hydraulic parameters: Curve Number, Manning coefficient and the height of buildings. As results of sensitivity analysis the maximum depth and maximum velocity diagrams were for four nodes were estimated and box-plots were then constructed to estimate the symmetry of the sensitivity analysis results. Finally, a summary of the main conclusions is presented and proposals for further research are made.





# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1	Γενική τοποθέτηση του προβλήματος.....	1
1.2	Σημασία των έργων αποχέτευσης.....	1
1.3	Παντοροϊκά και χωριστικά δίκτυα.....	2
1.4	Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....	2
<b>2</b>	<b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ.....</b>	<b>5</b>
2.1	Εισαγωγή.....	5
2.2	Θεωρητικό υπόβαθρο.....	5
2.2.1	Απώλειες της βροχής.....	5
2.2.2	Δίκτυα Αποχέτευσης ομβρίων.....	6
2.3	Εκτίμηση παροχής ομβρίων.....	7
2.3.1	Γενικά.....	7
2.3.2	Η Ορθολογική Μέθοδος.....	7
2.4	Ελληνικές Τεχνικές Προδιαγραφές.....	13
2.4.1	Γενικά.....	13
2.4.2	Δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων υδάτων.....	13
2.4.3	Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αντιπλημμυρική προστασία.....	14
2.5	Προσομοίωση βροχής απορροής.....	15
2.5.1	HEC-RAS.....	17
2.5.2	FLO-2D.....	17
2.5.3	LISFLOOD-FP.....	17
2.5.4	SWMM.....	18
2.5.5	InfoWorks CS.....	19
2.6	MIKE URBAN - MOUSE.....	19
2.6.1	Το υδρολογικό μοντέλο.....	20
2.6.2	Υδραυλικά στοιχεία.....	21
2.6.3	Time-area method.....	23
2.6.4	Μέθοδος κινηματικού κύματος.....	24
2.6.5	MIKE URBAN-Unit Hydrograph Surface Runoff Model (UHM).....	24
2.7	Μοναδιαίο Υδρογράφημα Απορροής (Unit Hydrograph Routing Model).....	32
2.7.1	Βασικές παραδοχές.....	32
2.7.2	Αρχή των υπολογισμών.....	33
2.7.3	Μοναδιαία Υδρογραφήματα SCS.....	33
2.8	Προηγούμενες Μελέτες με το Λογισμικό MIKE.....	35

2.8.1	Προπτυχιακές και μεταπτυχιακές διπλωματικές εργασίες .....	35
2.8.2	1D/2D Προσομοίωση δικτύου ομβρίων.....	38
<b>3</b>	<b>ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....</b>	<b>41</b>
3.1	Εισαγωγή.....	41
3.2	Αφαία – Σκαρμαγκάς.....	41
3.3	Κλίμα περιοχής.....	43
3.4	Μορφολογία εδάφους .....	43
3.5	Γεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής.....	45
3.6	Χρήσεις Γης.....	46
3.7	Δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων.....	47
3.7.1	Στοιχεία αγωγών.....	47
3.7.2	Στοιχεία φρεατίων .....	48
<b>4</b>	<b>ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ .....</b>	<b>53</b>
4.1	Εισαγωγή.....	53
4.2	Αναλυτική Περιγραφή.....	53
4.2.1	Πορεία εργασιών.....	55
4.2.2	Ψηφιοποίηση και ψηφιακή αναπαράσταση δικτύου .....	57
4.2.3	Κατάρτιση υετογραμμάτων.....	58
4.2.4	Καθορισμός του μοντέλου διήθησης (SCS) και εισαγωγή των απαραίτητων παραμέτρων.....	62
<b>5</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>65</b>
5.1	Περίοδος επαναφοράς T=5 έτη.....	65
5.1.1	T=5 έτη και διάρκεια βροχόπτωσης t=1 ώρα.....	65
5.1.2	T=5 έτη και διάρκεια βροχόπτωσης t=2 ώρες .....	65
5.1.3	T=5 έτη και διάρκεια βροχόπτωσης t=12 ώρες .....	66
5.2	Περίοδος επαναφοράς T=10 έτη .....	70
5.2.1	T=10 έτη και διάρκεια βροχόπτωσης t=1 ώρα.....	70
5.2.2	T=10 έτη και διάρκεια βροχόπτωσης t=2 ώρες .....	70
5.2.3	T=10 έτη και διάρκεια βροχόπτωσης t=12 ώρες .....	70
5.3	Περίοδος επαναφοράς T=50 έτη .....	74
5.3.1	T= 50 έτη και διάρκεια βροχόπτωσης t=1 ώρα.....	74
5.3.2	T= 50 έτη και διάρκεια βροχόπτωσης t=2 ώρες.....	74
5.3.3	T=50 έτη και διάρκεια βροχόπτωσης t=12 ώρες .....	74
5.4	Περίοδος επαναφοράς T=100 έτη .....	78
5.4.1	T=100 έτη και διάρκεια βροχόπτωσης t=1 ώρα.....	78
5.4.2	T=100 έτη και διάρκεια βροχόπτωσης t=2 ώρες .....	78

5.4.3	T=100 έτη και διάρκεια βροχόπτωσης $t=12$ ώρες .....	78
5.5	Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης του αγωγού A με το λογισμικό Mike Urban και την Ορθολογική Μέθοδο .....	82
<b>6</b>	<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ .....</b>	<b>85</b>
6.1	Εισαγωγή .....	85
6.2	Βασική Μεθοδολογία.....	87
6.3	Παράμετροι της ανάλυσης ευαισθησίας .....	88
6.4	Αποτελέσματα Ανάλυσης Ευαισθησίας .....	91
6.5	Box – whisker plots (θηκογράμματα).....	96
6.5.1	Box – whisker plot για το σημείο A7 .....	97
6.5.2	Box – whisker plot για το σημείο A8 .....	98
6.5.3	Box – whisker plot για το σημείο A9 .....	99
6.5.4	Box- whisker plot για το σημείο A31.....	100
<b>7</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>103</b>
7.1	Συμπεράσματα .....	103
7.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	104
<b>8</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>107</b>
8.1	Ελληνική Βιβλιογραφία .....	107
8.2	Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία .....	109
<b>9</b>	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΥΕΤΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ .....</b>	<b>112</b>
<b>10</b>	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ .....</b>	<b>116</b>
10.1	Αγωγός A1 Περίοδος Επαναφοράς T=10 έτη .....	116
10.2	Αγωγός A Περίοδος επαναφοράς T=50 έτη .....	117
10.3	Αγωγός A1.1 Περίοδος Επαναφοράς T=10 έτη .....	118
10.4	Αγωγός A2 Περίοδος επαναφοράς T=10 έτη .....	118
10.5	Αγωγός A3 Περίοδος επαναφοράς T=10 έτη .....	119



## Κατάλογος εικόνων

<b>Εικόνα 3.1:</b> Η περιοχή μελέτης και το δίκτυο ομβρίων.....	42
<b>Εικόνα 3.2:</b> Χάρτης Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου .....	44
<b>Εικόνα 3.3:</b> Γεωλογικός Χάρτης Νομαρχίας Αθηνών (πηγή: Πογιατζή κ.α. 2013) .....	45
<b>Εικόνα 3.4:</b> Χάρτης χρήσεων γης της περιοχής μελέτης. ....	46
<b>Εικόνα 3.5:</b> Δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων στην περιοχή μελέτης.....	49
<b>Εικόνα 4.1:</b> Ψηφιακή αναπαράσταση του δικτύου σε περιβάλλον MOUSE του Mike Urban, DHI. ....	58
<b>Εικόνα 4.2:</b> Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς $T=5$ έτη και χρονική διάρκεια $t=1$ ώρα. ....	59
<b>Εικόνα 4.3:</b> Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς $T=10$ έτη και χρονική διάρκεια $t=2$ ώρες. ....	60
<b>Εικόνα 4.4:</b> Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη και χρονική διάρκεια $t=1$ ώρα. ....	60
<b>Εικόνα 4.5:</b> Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη και χρονική διάρκεια $t=12$ ώρες. ....	61
<b>Εικόνα 4.6:</b> Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη και χρονική διάρκεια $t=1$ ώρα. ....	61
<b>Εικόνα 5.1:</b> Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για $T=5$ έτη και $t=1h$ . ....	67
<b>Εικόνα 5.2:</b> Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για $T=5$ έτη και $t=2h$ . ....	68
<b>Εικόνα 5.3:</b> Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για $T=5$ έτη και $t=12h$ . ....	69
<b>Εικόνα 5.4:</b> Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για $T=10$ έτη και $t=1h$ . ....	71
<b>Εικόνα 5.5:</b> Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για $T=10$ έτη και $t=2h$ . ....	72
<b>Εικόνα 5.6:</b> Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για $T=10$ έτη και $t=12h$ . ....	73
<b>Εικόνα 5.7:</b> Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για $T=50$ έτη και $t=1h$ . ....	75
<b>Εικόνα 5.8:</b> Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για $T=50$ έτη και $t=2h$ . ....	76
<b>Εικόνα 5.9:</b> Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για $T=50$ έτη και $t=12h$ . ....	77
<b>Εικόνα 5.10:</b> Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για $T=100$ έτη και $t=1h$ . ....	79
<b>Εικόνα 5.11:</b> Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για $T=100$ έτη και $t=2h$ . ....	80
<b>Εικόνα 5.12:</b> Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για $T=100$ έτη και $t=12h$ . ....	81
<b>Εικόνα 6.1:</b> Box - whisker plot για το βάθος ροής στο σημείο A7.....	97
<b>Εικόνα 6.2:</b> Box - whisker plot για την ταχύτητα ροής στο σημείο A7. ....	98
<b>Εικόνα 6.3:</b> Box - whisker plot για το βάθος ροής στο σημείο A8.....	98
<b>Εικόνα 6.4:</b> Box - whisker plot για την ταχύτητα ροής στο σημείο A8. ....	99
<b>Εικόνα 6.5:</b> Box - whisker plot για το βάθος ροής στο σημείο A9.....	100
<b>Εικόνα 6.6:</b> Box - whisker plot για την ταχύτητα ροής στο σημείο A9. ....	100
<b>Εικόνα 6.7:</b> Box - whisker plot για το βάθος ροής στο σημείο A31.....	100
<b>Εικόνα 6.8:</b> Box- whisker plot για την ταχύτητα ροής στο σημείο A31.....	101
<b>Εικόνα 9.1:</b> Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς $T=5$ έτη και χρονική διάρκεια $t=2$ ώρες. ....	112
<b>Εικόνα 9.2:</b> Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς $T=5$ έτη και χρονική διάρκεια $t=12$ ώρες. ....	112
<b>Εικόνα 9.3:</b> Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς $T=10$ έτη και χρονική διάρκεια $t=1$ ώρα. ....	113
<b>Εικόνα 9.4:</b> Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς $T=10$ έτη και χρονική διάρκεια $t=12$ ώρες. ....	113

<b>Εικόνα 9.5:</b> Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη και χρονική διάρκεια $t=2$ ώρες. ....	114
<b>Εικόνα 9.6:</b> Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη και χρονική διάρκεια $t=2$ ώρες. ....	114
<b>Εικόνα 9.7:</b> Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη και χρονική διάρκεια $t=12$ ώρες. ....	115

## Κατάλογος πινάκων

<b>Πίνακας 2.1:</b> Τιμές του συντελεστή Manning, $n$ , για αγωγούς και κανάλια (Τσιχριντζής 1999) .....	11
<b>Πίνακας 2.2:</b> Τιμές του συντελεστή Manning, $n$ , για αβαθή διάχυτη ροή (Τσιχριντζής 1999) .....	12
<b>Πίνακας 2.3:</b> Ελάχιστη επιτρεπόμενη κλίση αγωγών ομβρίων από σκυρόδεμα σύμφωνα με τις ελληνικές προδιαγραφές (Π.Δ. 696/74) (Τσακίρης 2010) .....	14
<b>Πίνακας 2.4:</b> Αριθμός καμπύλης – απορροής (Wanielista 1978).....	31
<b>Πίνακας 2.5:</b> Μελέτες 1D/2D προσομοίωσης αστικών λεκανών απορροής.....	38
<b>Πίνακας 3.1:</b> Υδραυλικά χαρακτηριστικά αγωγού A (Περίοδος επαναφοράς 50 έτη) .....	50
<b>Πίνακας 3.2:</b> Υδραυλικά χαρακτηριστικά αγωγού A1 (Περίοδος επαναφοράς 10 έτη) .....	51
<b>Πίνακας 3.3:</b> Υδραυλικά χαρακτηριστικά αγωγού A2 (Περίοδος επαναφοράς 10 έτη) .....	51
<b>Πίνακας 3.4:</b> Υδραυλικά χαρακτηριστικά αγωγού A1.1 (Περίοδος επαναφοράς 10 έτη) .....	52
<b>Πίνακας 3.5:</b> Υδραυλικά χαρακτηριστικά αγωγού A3 (Περίοδος επαναφοράς 10 έτη) .....	52
<b>Πίνακας 5.1:</b> Σύγκριση παροχής αιχμής από Ορθολογική Μέθοδο και λογισμικό Mike Urban για τον αγωγό A.....	82
<b>Πίνακας 6.1:</b> Τιμές παραμέτρων στην ανάλυση ευαισθησίας.....	88
<b>Πίνακας 6.2:</b> Σενάρια ανάλυσης ευαισθησίας.....	89
<b>Πίνακας 6.3:</b> Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας .....	91
<b>Πίνακας 6.4:</b> Μέγιστη διακύμανση παραμέτρων στην ανάλυση ευαισθησίας.....	96
<b>Πίνακας 10.1:</b> Επίλυση δικτύου με την Ορθολογική Μέθοδο. Αγωγός A1.....	116
<b>Πίνακας 10.2:</b> Επίλυση δικτύου με την Ορθολογική Μέθοδο. Αγωγός A.....	117
<b>Πίνακας 10.3:</b> Επίλυση δικτύου με την Ορθολογική Μέθοδο. Αγωγός A1.1.....	118
<b>Πίνακας 10.4:</b> Επίλυση του δικτύου με την Ορθολογική Μέθοδο. Αγωγός A2.....	118
<b>Πίνακας 10.5:</b> Επίλυση του δικτύου με την Ορθολογική Μέθοδο. Αγωγός A3.....	119

## Κατάλογος διαγραμμάτων

<b>Διάγραμμα 2.1:</b> Οι μεταβλητές στην μέθοδο SCS για την εκτίμηση των απωλειών (πηγή: DHI 2016).....	27
<b>Διάγραμμα 2.2:</b> Μοναδιαία υδρογράφηματά κατά την SCS (αριστερά) αδιάστατο καμπυλόγραμμα υδρογράφημα (δεξιά) τριγωνικό υδρογράφημα (πηγή: DHI 2016) .....	34
<b>Διάγραμμα 6.1:</b> Βάθος ροής στο σημείο A7. ....	92
<b>Διάγραμμα 6.2:</b> Ταχύτητα ροής στο σημείο A7. ....	92
<b>Διάγραμμα 6.3:</b> Βάθος ροής στο σημείο A8.....	92
<b>Διάγραμμα 6.4:</b> Ταχύτητα ροής στο σημείο A8. ....	93
<b>Διάγραμμα 6.5:</b> Βάθος ροής στο σημείο A9.....	93
<b>Διάγραμμα 6.6:</b> Ταχύτητα ροής στο σημείο A9. ....	94
<b>Διάγραμμα 6.7:</b> Βάθος ροής στο σημείο A31.....	94
<b>Διάγραμμα 6.8:</b> Ταχύτητα ροής στο σημείο A31. ....	95





## *ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ*

Με την ολοκλήρωση αυτής της εποικοδομητικής προσπάθειας ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στην Σχολή Αγρονόμων – Τοπογράφων Μηχανικών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν στη διάρκεια των σπουδών μου καθώς και στην εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας.

Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα κ. Βασίλειο Τσιχριντζή, Καθηγητή ΕΜΠ, που μου παρείχε την δυνατότητα να αναλάβω την εκπόνηση της συγκεκριμένης έρευνας, για τις συμβουλές του και τη συνεχή υποστήριξή του κατά τη συγγραφή της εργασίας.

Κατόπιν οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Βασίλη Μπέλλο, Μεταδιδακτορικό Ερευνητή, ιδέα του οποίου ήταν το θέμα της παρούσας εργασίας. Με τις γνώσεις του, την υπομονή και την επιμονή του, αν και εκτός Ελλάδας, ήταν «παρών» σε όλη τη διάρκεια της έρευνας.

Ακόμη, χρωστάω ένα ευχαριστώ στον Γιάννη Κούρτη, Υποψήφιο Διδάκτορα, τόσο για την βοήθειά του στη χρήση του λογισμικού προσομοίωσης όσο και για την προθυμία και την υπομονή με τις οποίες αντιμετώπισε κάθε απορία μου, έδωσε λύσεις και συνέβαλλε στην υλοποίηση της παρούσας εργασίας. Τον ευχαριστώ επίσης καθώς μαζί με τον Γιώργο Κοψιαύτη, Υποψήφιο Διδάκτορα, ήταν η καθημερινή μου παρέα στο εργαστήριο, να με στηρίζουν σε κάθε δυσκολία που πρόκυπτε στην πορεία της εργασίας. Στο τελικό αποτέλεσμα, στην εξοικείωσή μου με το λογισμικό ArcGis και στην υλοποίηση των χαρτών παρουσίασης των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας συνέβαλε η Ινώ Παπαγεωργάκη, Υποψήφια Διδάκτορα, την οποία και ευχαριστώ εγκάρδια.

Μείζονος σημασίας είναι η βοήθεια του Νίκου Καραγιάννη, Αντιδήμαρχο Χαϊδαρίου, καθώς χωρίς τη συμβολή του θα ήταν αδύνατη η υλοποίηση αυτής της εργασίας.

Επίσης, θερμά ευχαριστώ στον κ. Ηλία Μουσούλη, αντιπρόσωπο της DHI στην Ελλάδα, τόσο για τη διάθεση των λογισμικών προσομοίωσης Mike Urban και Mike Flood, όσο και για τον ζήλο που επέδειξε στην όποια απορία μου.

Φυσικά, είμαι ευγνώμων για όλους τους φίλους και τις φίλες μου, για τις αξέχαστες στιγμές που περάσαμε, τις συμβουλές τους και την στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου. Στους γονείς μου, Βασίλη και Ελένη, οι οποίοι αποτέλεσαν και αποτελούν πρότυπο και στήριγμα μου σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου. Στον αδερφό μου, Μάνο, και στην ξαδέρφη μου, Μελίνα, για την αμέριστη ψυχολογική υποστήριξη και την διακριτικότητα με την οποία με στηρίζουν σε κάθε επιλογή μου.

***Ειρήνη Ραπτάκη***

***Αθήνα, Οκτώβριος 2017***

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος

Η διαχείριση των υδατικών πόρων, η μελέτη και ο σχεδιασμός υδραυλικών έργων όπως φράγματα, οχετοί, δίκτυα ομβρίων, αντιπλημμυρικές τάφροι απαιτούν μετρήσεις παροχής. Στην Ελλάδα σημειώνεται έλλειψη των μετρήσεων παροχής σε θέσεις υδρολογικού ενδιαφέροντος, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, αφενός διότι η συντήρηση ενός τέτοιου δικτύου είναι δαπανηρή, αφετέρου λόγω έμφασης στα έργα κατασκευής των μεγάλων φραγμάτων της χώρας τις προηγούμενες δεκαετίες.

Για την αντιμετώπιση αυτής της αδυναμίας χρησιμοποιούνται υδρολογικά μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά έχουν προκύψει από μετρήσεις παροχών, βροχόπτωσης και λαμβάνουν ως δεδομένα εισόδου τοπογραφικά και άλλα χαρακτηριστικά (π.χ. γεωλογικά, χρήσεις γης) των οποίων η διαθεσιμότητα αυξάνεται τα τελευταία χρόνια. Η αξιοπιστία των μοντέλων αυτών αυξάνεται μέσω της βαθμονόμησής τους για τον ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων τους.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ολοκληρωμένη προσομοίωση ενός δικτύου αποχέτευσης ομβρίων στην αστική περιοχή της Αφαιίας του Λεκανοπεδίου της Αττικής με χρήση του υδρολογικού μοντέλου Mike Urban της DHI. Η ολοκληρωμένη προσομοίωση αφορά τη σύνδεση των διάφορων μοντέλων (βροχής απορροής, αποχέτευσης, μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και υδατόρεμα) που προσομοιώνουν όλες τις φυσικές διεργασίες που συμπεριλαμβάνονται στον υδρολογικό κύκλο τόσο στο φυσικό όσο και στο αστικό περιβάλλον.

## 1.2 Σημασία των έργων αποχέτευσης

Η σημασία των έργων αποχέτευσης για τη δημόσια υγεία και το επίπεδο ζωής στις αστικές περιοχές είναι ιδιαίτερη. Σε περιοχές χωρίς δίκτυα αποχέτευσης λυμάτων παρατηρείται ρύπανση του εδάφους, των υπόγειων υδροφορέων και των επιφανειακών υδάτινων σωμάτων (Κουτσογιάννης 2011). Αντίστοιχα, σε περιοχές που απουσιάζει ένα αποτελεσματικό δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων, σε κάθε καταιγίδα οι δρόμοι μετατρέπονται σε ρέματα, παραλύει η κίνηση και η ζωή, πλημμυρίζουν κατοικίες και αυτοκίνητα και συχνά χάνονται ανθρώπινες ζωές. Σε μια μεγάλη πόλη, το δίκτυο των ομβρίων ή το παντορροϊκό δίκτυο είναι ένα πολύπλοκο

σύστημα υπονόμων με διατομές σημαντικών διαστάσεων που ακολουθεί το οδικό δίκτυο της πόλης σε όλη της σχεδόν την έκταση (Κουτσογιάννης 2011).

### 1.3 Παντοροϊκά και χωριστικά δίκτυα

Τα παλιότερα δίκτυα αποχέτευσης που κατασκευάστηκαν τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Αμερική είναι παντοροϊκά. Ως παντοροϊκό δίκτυο ήταν γνωστό το κοινό δίκτυο ακαθάρτων και ομβρίων και συναντώταν συχνά σε πολλές πόλεις που διέθεταν συστήματα αποχέτευσης ακόμη και πριν τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο (Τσακίρης 2010).

Σήμερα, στην Ελλάδα εφαρμόζεται σχεδόν κατά αποκλειστικότητα το χωριστικό σύστημα αποχέτευσης και επιτρέπει την πλήρη ανεξαρτησία στο σχεδιασμό των δύο δικτύων. Το δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων σε μια αστική περιοχή αποτελείται κυρίως από αποχετευτικούς αγωγούς που είναι συνήθως κυκλικής διατομής και λειτουργούν με ελεύθερη επιφάνεια και φρεάτια εισόδου μέσω των οποίων το δίκτυο δέχεται τα όμβρια ύδατα. Ενώ ένα δίκτυο ακαθάρτων αποτελείται από αποχετευτικούς αγωγούς που εκβάλλουν σε κεντρικό αγωγό (συλλεκτήρα), ο οποίος μεταφέρει τα αστικά λύματα σε κατάλληλη θέση μακριά από τον οικισμό, σε ένα δίκτυο ομβρίων η συγκέντρωση των ομβρίων υδάτων γίνεται σε παραπάνω από έναν κεντρικούς συλλεκτήρες που οδηγούν τα νερά στον πλησιέστερο αποδέκτη ο οποίος μπορεί να είναι διαφορετικός από τον έναν συλλεκτήρα στον άλλον (Τσακίρης 2010).

### 1.4 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο εισάγει τον αναγνώστη και περιγράφει τη δομή της εργασίας.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιγράφει το θεωρητικό υπόβαθρο και τα διαθέσιμα λογισμικά για την προσομοίωση πλημμύρας.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στην περιοχή μελέτης και το δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων που μελετήθηκε.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται σε βάθος το μεθοδολογικό πλαίσιο που ακολουθήθηκε τόσο για το στήσιμο του μοντέλου όσο και για την προσομοίωση του δικτύου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται με την μορφή χαρτών τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως αυτά προέκυψαν από το λογισμικό Mike Urban και γίνεται μια σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα της Ορθολογικής Μεθόδου.

Το έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε για μια σειρά παραμέτρων του μοντέλου.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία και διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις στην κατεύθυνση της μελλοντικής έρευνας.



## 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ

### 2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύντομη αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο της πρόκλησης πλημμύρας και την σημασία ύπαρξης αποχετευτικού συστήματος ομβρίων σε μια αστική περιοχή. Κατόπιν παρουσιάζονται τα διαθέσιμα λογισμικά για την υδρολογική και υδραυλική προσομοίωση μιας λεκάνης απορροής και γίνεται εκτενής μνεία στην μέθοδο του μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά SCS που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

### 2.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Σε παγκόσμιο επίπεδο υπάρχει μείωση των βιότοπων και αλλοίωση της ποιότητας του νερού των αστικών ρεμάτων. Το φαινόμενο της αστικοποίησης συνοδεύεται από την αύξηση κατασκευής αδιαπέρατων επιφανειών (π.χ. στέγες, δρόμοι) και υδραυλικά αποδοτικών συστημάτων αποστράγγισης, τη συμπύκνωση των εδαφών και τις τροποποιήσεις της βλάστησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των πλημμυρικών ροών, τη διάβρωση και το ενδεχόμενο μείωσης της βασικής ροής (Τσακίρης 2010).

#### 2.2.1 Απώλειες της βροχής

Μετά την πτώση της βροχής και πριν τη δημιουργία της απορροής μεσολαβούν διάφορες διαδικασίες, οι οποίες ονομάζονται απώλειες της βροχής. Αυτές είναι (Τσακίρης 2010):

- Συγκράτηση (interception): ένα μέρος της βροχής συγκρατείται από την βλάστηση και άλλα ψηλά εμπόδια και επιστρέφει στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης.
- Συγκράτηση σε επιφανειακές κοιλότητες: η συγκέντρωση του εναπομείναντος νερού σε επιφανειακές κοιλότητες του αναγλύφου και επιστροφή στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης.
- Διήθηση: η φυσική διεργασία εισόδου και κίνησης του νερού στο έδαφος.

Κατόπιν δημιουργείται η επιφανειακή απορροή, απαλλαγμένη από κάθε είδους απώλειες.

Οι πλημμύρες είναι φυσικά φαινόμενα τα οποία είναι αδύνατο να προληφθούν. Ωστόσο, ορισμένες ανθρώπινες δραστηριότητες (όπως η αύξηση των ανθρωπίνων οικισμών στις πλημμυρικές περιοχές καθώς και η μείωση της φυσικής ικανότητας του εδάφους όσον αφορά την κατακράτηση υδάτων κατά τη χρήση γης) και η αλλαγή του κλίματος συμβάλλουν στην αύξηση της πιθανότητας επέλευσης φαινομένων πλημμύρας και των αρνητικών τους επιπτώσεων.

### 2.2.2 Δίκτυα Αποχέτευσης ομβρίων

Οι αστικές περιοχές υπόκεινται σε πληθώρα φυσικών κινδύνων από τους σημαντικότερους των οποίων είναι οι πλημμύρες. Τα συνήθη αίτια των πλημμυρών αυτών είναι: η επιφανειακή απορροή υδάτων που προέρχονται από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (π.χ. βροχή, χιόνι) απευθείας στην επιφάνεια της ενδιαφέρουσας περιοχής, και η επιφανειακή απορροή προερχόμενη από φυσικές λεκάνες απορροής που γειτνιάζουν με την περιοχή ενδιαφέροντος. Στην πρώτη περίπτωση, το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με την κατασκευή ενός δικτύου υπόγειων αγωγών οι οποίοι οδηγούν το νερό με ασφάλεια εκτός του οικισμού. Στην δεύτερη περίπτωση, κατασκευάζεται έργο για την ασφαλή παροχέτευση του νερού που φθάνει στο εξωτερικό όριο της εξεταζόμενης περιοχής μη επιτρέποντας την είσοδο του σε αυτήν. Για το σκοπό αυτό συνήθως κατασκευάζεται αντιπλημμυρική τάφρος. Κύριες συνιστώσες ενός δικτύου αποχέτευσης ομβρίων μιας αστικής περιοχής αποτελούν: (α) οι αποχετευτικοί αγωγοί κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής, και (β) τα φρεάτια εισόδου μέσω των οποίων τα όμβρια ύδατα εισέρχονται στο δίκτυο, καθώς και άλλα χρήσιμα για τη λειτουργία του δικτύου έργα (π.χ. φρεάτια επίσκεψης). Η συγκέντρωση στα δίκτυα αποχέτευσης ομβρίων γίνεται σε παραπάνω από έναν κεντρικούς συλλεκτήρες που οδηγούν τα νερά στον πλησιέστερο αποδέκτη (π.χ. υδατόρευμα, λίμνη), ο οποίος μάλιστα μπορεί να διαφέρει από τον ένα συλλεκτήρα στον άλλον. Σκοπός της κατασκευής ενός δικτύου είναι η παροχέτευση της ποσότητας του νερού, η οποία κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος βροχόπτωσης φτάνει στο έδαφος και στην περίπτωση απουσίας του εν λόγω δικτύου, ρέει επιφανειακά (Τσακίρης 2010).



## 2.3 Εκτίμηση παροχής ομβρίων

### 2.3.1 Γενικά

Για την εκτίμηση των παροχών σχεδιασμού των δικτύων ομβρίων υδάτων αρχικά χρησιμοποιούνταν εμπειρικές εξισώσεις. Οι εξισώσεις αυτές βασίζονταν στην συσχέτιση της παροχής και μιας σειράς παραμέτρων οι οποίες επηρεάζονταν από την παροχή (Κουτσογιάννης 2011). Σήμερα, καθώς δεν υφίστανται μετρήσεις της απορροής σε μια περιοχή για την περίοδο προ κατασκευής του δικτύου ή ακόμα και να υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα από μετρήσεις, δεν είναι αξιοποιήσιμα στο σχεδιασμό, διότι δεν είναι αντιπροσωπευτικά των μελλοντικών συνθηκών απορροής μετά την κατασκευή του δικτύου, δεδομένου ότι το δίκτυο μεταβάλλει τις συνθήκες ροής, για την εκτίμηση των παροχών των ομβρίων υιοθετείται η Ορθολογική Μέθοδος (Τσακίρης 2010).

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά η Ορθολογική Μέθοδος, που είναι η πλέον διαδεδομένη και χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τη διαστασιολόγηση ενός δικτύου ομβρίων.

### 2.3.2 Η Ορθολογική Μέθοδος

Η Ορθολογική Μέθοδος (Kuishling 1889, Τσακίρης 2010) αποτελεί μία μέθοδο υδρολογικού σχεδιασμού, η οποία δίνει τη δυνατότητα της εκτίμησης, στον μελετητή, της παροχής αιχμής ενός υποθετικού πλημμυρικού γεγονότος για μια συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς. Σύμφωνα με τη θεωρία της ορθολογικής μεθόδου, η παροχή είναι ανάλογη της έντασης της βροχόπτωσης και βασίζεται στην ακόλουθη εξίσωση (Τσακίρης 2010, Τσιχριντζής 1999):

$$Q = 0,278 * CfCiA \quad (2.1)$$

Όπου:

Q: παροχή αιχμής του υδρογραφήματος ( $m^3/s$ )

C: συντελεστής επιφανειακής απορροής

C<sub>f</sub>: συντελεστής διόρθωσης του C για την περίοδο επαναφοράς

i: ένταση βροχής (mm/h)

A: εμβαδό λεκάνης απορροής ( $km^2$ )

Ο συντελεστής επιφανειακής απορροής εξαρτάται από (Τσακίρης 2010, Τσιχριντζής 1999):

- ✓ Αδιαπέρατο μέρος της λεκάνης απορροής
- ✓ Εδαφοκάλυψη
- ✓ Χρήσεις γης
- ✓ Κλίση λεκάνης απορροής
- ✓ Συνθήκες εδαφικής υγρασίας στη λεκάνη απορροής
- ✓ Ένταση της βροχόπτωσης
- ✓ Προηγούμενη βροχή στη λεκάνη
- ✓ Ύψος συγκράτησης κοιλοτήτων
- ✓ Υγρασία εδάφους

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τρεις πρώτοι παράγοντες (αδιαπέρατο μέρος της λεκάνης απορροής, εδαφοκάλυψη και χρήσεις γης) είναι αυτοί που επηρεάζουν κατά κύριο λόγο τον συντελεστή απορροής.

Οι τιμές του συντελεστή απορροής δύναται να προκύψουν από Πίνακες. Κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί ότι οι τιμές των πινάκων ισχύουν για περιόδους επαναφοράς μέχρι και 10 έτη. Για μεγαλύτερες περιόδους επαναφοράς είναι απαραίτητη η χρήση του διορθωτικού συντελεστή  $C_f$  (Τσιχριντζής 1999, Τσακίρης 2010).

Εκτός από Πίνακες η τιμή του συντελεστή απορροής  $C$ , μπορεί να προκύψει και από την ακόλουθη σχέση (Τσιχριντζής 1999):

$$C = 0.05 + 0.09I \quad (2.2)$$

Όπου:

$C$ : συντελεστής απορροής

$I$ : αδιαπερατότητα της λεκάνης απορροής

Για την εφαρμογή της Ορθολογικής Μεθόδου η ένταση της σταθερής βροχόπτωσης,  $i$ , λαμβάνεται από τις όμβριες καμπύλες της περιοχής μελέτης ή από διαγράμματα Έντασης-Διάρκειας Συχνότητας (Διάγραμμα ΕΔΣ), τα οποία περιέχουν την ίδια πληροφορία (Τσιχριντζής 1999, Τσακίρης 2010).

Σαν διάρκεια σχεδιασμού για την εκτίμηση της έντασης χρησιμοποιείται ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής,  $t_c$ . Ο χρόνος αυτός ισούται με τον χρόνο αβαθούς ή διάχυτης ροής  $t_0$  (ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το νερό από το πιο απομακρυσμένο σημείο της αποχετευόμενης επιφάνειας στο στόμιο εισόδου στο δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων υδάτων) και του χρόνου μετακίνησης της ροής σε υπονόμους ή ανοικτά κανάλια  $t_L$  (Τσιχριντζής 1999, Τσακίρης 2010).

Ο χρόνος αβαθούς ή διάχυτης ροής υπολογίζεται βάσει εμπειρικών εξισώσεων, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί για το συγκεκριμένο σκοπό. Οι πιο γνωστές είναι (Τσιχριντζής 2010):

- I. Εξίσωση Kerby
- II. Εξίσωση Izzard
- III. Εξίσωση Brasby – Williams
- IV. Εξίσωση της Aviation Agency (Υπηρεσία Αεροπλοΐας) των ΗΠΑ
- V. Εξίσωση Manning Κινηματικού Κύματος

Ακόμη, σε περίπτωση μελέτης αποχετευτικών δικτύων ομβρίων οι Ελληνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (Π.Δ. 696/74) θεωρούν μια σταθερή τιμή, του χρόνου αβαθούς διάχυτης ροής, ίση με δέκα λεπτά. Αντίθετα, οι Αμερικάνικες Τεχνικές Προδιαγραφές δέχονται διαφορετικές τιμές για τον χρόνο αβαθούς ή διάχυτης ροής ανάλογα με τις πολεοδομικές συνθήκες οι οποίες επικρατούν στην περιοχή μελέτης. Σε περίπτωση που η ροή σε έναν κόμβο καταλήγει από πολλές εναλλακτικές διαδρομές ως χρόνος συγκέντρωσης λαμβάνεται ο μεγαλύτερος χρόνος της ροής στις συγκεκριμένες διαδρομές.

Για τον υπολογισμό του χρόνου ροής στους αγωγούς χρησιμοποιείται συνδυαστικά η εξίσωση του Manning (Τσιχριντζής 1999):

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3}S^{1/2} \quad (2.3)$$

και η εξίσωση:

$$t_L = \frac{L}{V} \quad (2.4)$$

Από τις δύο παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι ο χρόνος ροής στον αγωγό δίνεται από την εξίσωση:

$$t_L = \frac{L}{\frac{1}{n}R^{2/3}S^{1/2}} \quad (2.5)$$

Όπου:

Q: παροχή αιχμής (m<sup>3</sup>/s)

V: ταχύτητα ροής στον αγωγό (m/s)

L: μήκος του αγωγού (m)

S: κλίση του αγωγού

A: επιφάνεια ροής στον αγωγό (m<sup>2</sup>)

R: υδραυλική ακτίνα (m)

n: συντελεστής τραχύτητας κατά Manning για αγωγούς και κανάλια. Ο συντελεστής αυτός προσδιορίζεται από τον Πίνακα 2.1 (Τσιχριντζής 1999).

**Πίνακας 2.1:** Τιμές του συντελεστή Manning,  $n$ , για αγωγούς και κανάλια (Τσιχριντζής 1999)

Περιγραφή υλικού αγωγού	Τιμή συντελεστή Manning		
	$n$		
	Ελάχιστη	Κανονική	Μέγιστη
Ορείχαλκος, λείος	0.009	0.010	0.013
Χάλυβας με συγκολλήσεις	0.010	0.012	0.014
Χάλυβας με ύλους	0.013	0.016	0.017
Χυτοσίδηρος με επίστρωση	0.010	0.013	0.014
Χυτοσίδηρος χωρίς επίστρωση	0.011	0.014	0.016
Σφυρήλατος σίδηρος, μαύρος	0.012	0.015	0.016
Σφυρήλατος σίδηρος, γαλβανισμένος	0.013	0.017	0.022
Μεταλλικός αυλακωτός, μικρές αυλακώσεις	0.020	0.022	0.025
Μεταλλικός αυλακωτός, μεγάλες αυλακώσεις	0.020	0.032	0.035
Λείος αυλακωτός από αλουμίνιο	0.030	0.012	0.014
Αγωγός από σκυρόδεμα, ευθύς	0.010	0.012	0.013
Αγωγός από σκυρόδεμα, με καμπύλες	0.011	0.013	0.014
Υπόνομος ομβρίων	0.013	0.015	0.017
Υγειονομικός υπόνομος	0.012	0.013	0.016

Αντίστοιχα, οι τιμές του συντελεστή Manning για αβαθή διάχυτη ροή προσδιορίζονται από τον Πίνακα 2.2 (Τσιχριντζής 1999).

*Πίνακας 2.2: Τιμές του συντελεστή Manning, n, για αβαθή διάχυτη ροή (Τσιχριντζής 1999)*

Περιγραφή υλικού αγωγού	Τιμή συντελεστή Manning		
	n		
	Ελάχιστη	Κανονική	Μέγιστη
Σκυρόδεμα	0.010	0.011	0.013
Άσφαλτος	0.010	0.012	0.015
Γυμνή άμμος	0.010	0.010	0.016
Επιφάνεια με χαλίκι	0.012	0.012	0.030
Γυμνή αργιλώδης τύρφη	0.012	0.012	0.012
Τεχνητό γρασίδι	0.39	0.45	0.63
Κοντό γρασίδι	0.10	0.15	0.20
Πυκνό γρασίδι	0.17	0.24	0.30
Δένδρα δάση	0.30	0.45	0.48

## 2.4 Ελληνικές Τεχνικές Προδιαγραφές

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσονται εν συντομία οι Ελληνικοί κανονισμοί που διέπουν την εκπόνηση μελετών ομβρίων υδάτων καθώς και οι βασικοί κανονισμοί, οι οποίοι είναι απαραίτητο να τηρούνται.

### 2.4.1 Γενικά

Το Νομικό Πλαίσιο το οποίο καθορίζει την εκπόνηση μελετών των δικτύων αποχέτευσης στην Ελλάδα είναι το Προεδρικό Διάταγμα 696/1974. «Περί αμοιβών μηχανικών δια σύνταξιν μελετών, επίβλεψιν, παραλαβήν κ.λ.π. Συγκοινωνιακών, Υδραυλικών και Κτιριακών έργων, ως και Τοπογραφικών, Κτηματογραφικών και Χαρτογραφικών Εργασιών και των σχετικών τεχνικών προδιαγραφών μελετών». Και ειδικότερα τα άρθρα 208 έως και 219, στα οποία καθορίζονται:

- I. Οι όροι εκπόνησης των μελετών αποχέτευσης ομβρίων και ακαθάρτων υδάτων.
- II. Τα στάδια και τα παραδοτέα τεύχη της προκαταρκτικής μελέτης, της προμελέτης και της οριστικής μελέτης για τα ακάθαρτα, τα όμβρια, καθώς και τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας ακαθάρτων.

### 2.4.2 Δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων υδάτων

Με βάση τους Ελληνικούς Κανονισμούς οι βασικοί περιορισμοί, οι οποίοι είναι απαραίτητο να ικανοποιούνται, κατά το σχεδιασμό ενός δικτύου ομβρίων, είναι (Π.Δ. 696/74) :

1. Ελάχιστη διάμετρος αποχετευτικού αγωγού 400 mm για μείωση της πιθανότητας έμφραξης των αγωγών.
2. Ο μέγιστος επιτρεπόμενος λόγος πλήρωσης ορίζεται 0.7 για νέους αγωγούς και 0.8 για τους υφιστάμενους αγωγούς.
3. Η μέγιστη ταχύτητα ροής ορίζεται 6 m/s. Ο περιορισμός αυτός προκύπτει από την απαίτηση αποφυγής διαβρώσεων στους αγωγούς και μείωσης του κινδύνου εμφάνισης ασταθειών στη ροή (Τσακίρης 2010).
4. Η ελάχιστη επιτρεπόμενη κλίση των αγωγών ομβρίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.10. Ο συγκεκριμένος περιορισμός προέκυψε λόγω της απαίτησης

για τήρηση μιας ελάχιστης ταχύτητας ροής ίση με 0.6 m/s για λόγους αυτοκαθαρισμού των αγωγών (Τσακίρης 2010).

**Πίνακας 2.3:** Ελάχιστη επιτρεπόμενη κλίση αγωγών ομβρίων από σκυρόδεμα σύμφωνα με τις ελληνικές προδιαγραφές (Π.Δ. 696/74) (Τσακίρης 2010)

Εσωτερική Διάμετρος αγωγού (mm)	Ελάχιστη επιτρεπόμενη κλίση (%)
400	0.60
500	0.44
600	0.35
700	0.28
800	0.24
900	0.20
1000	0.18
1100	0.16
1200	0.14
1300	0.12
1400	0.11
1500	0.10
1600	0.10
1800	0.10
2000	0.10

#### 2.4.3 Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αντιπλημμυρική προστασία

Στόχος της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2007/60/ΕΚ είναι η μείωση και η διαχείριση των κινδύνων που παρουσιάζουν οι πλημμύρες για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική δραστηριότητα (Υ.ΠΕ.ΚΑ 2007).

Η Οδηγία απαιτεί από τα Κράτη Μέλη :

- Να διεξάγουν αρχικά προκαταρκτική εκτίμηση πλημμυρικής διακινδύνευσης για τον προσδιορισμό των λεκανών απορροής και τις αντίστοιχες παράκτιες περιοχές που διατρέχουν κίνδυνο πλημμυρών.
- Γί αυτές τις περιοχές, θα πρέπει να καταρτίσουν χάρτες πλημμυρικού κινδύνου και πλημμυρικής διακινδύνευσης. Οι χάρτες αυτοί θα πρέπει να



προσδιορίζουν περιοχές με πιθανότητα πλημμύρας (τουλάχιστον 1 στα 100 χρόνια) και ακραία γεγονότα με μικρή πιθανότητα πραγματοποίησης, στις οποίες πρέπει να απεικονίζονται οι στάθμες των υδάτων στις περιοχές που κατακλύζονται. Στις παραπάνω περιοχές πρέπει επίσης να απεικονίζονται ο αριθμός των κατοίκων που δυνητικά βρίσκονται υπό αυτό τον κίνδυνο, καθώς επίσης η πιθανή περιβαλλοντική και οικονομική βλάβη της περιοχής.

- Τέλος, κατάρτιση των σχεδίων διαχείρισης πλημμυρικής διακινδύνευσης για τις ζώνες αυτές. Αυτά τα σχέδια πρέπει να περιλαμβάνουν μέτρα τα οποία θα μειώνουν την πιθανότητα πλημμύρας καθώς και τις πιθανές της επιπτώσεις. Θα καλύπτουν όλες τις φάσεις του κύκλου διαχείρισης πλημμυρικής διακινδύνευσης, αλλά θα εστιάζουν κυρίως στην :

- ❖ **Πρόληψη:** π.χ. πρόληψη ζημιών με την αποφυγή κατασκευής κατοικιών και βιομηχανιών σε σημερινές και μελλοντικές περιοχές που είναι επιρρεπείς σε πλημμύρες ή προσαρμογή των μελλοντικών αναπτυξιακών προγραμμάτων με βάση την πλημμυρική διακινδύνευση.
- ❖ **Προστασία:** με τη λήψη μέτρων μείωσης της πιθανότητας πλημμυρών και/ή τις επιπτώσεις των πλημμυρών σε συγκεκριμένες τοποθεσίες όπως σε υγρά τοπους ή πεδίων κατάκλυσης υπό αποκατάσταση.
- ❖ **Ετοιμότητα:** π.χ. παρέχοντας οδηγίες στο κοινό σχετικά με το τι πρέπει να κάνει σε περίπτωση πλημμύρας .

## 2.5 Προσομοίωση βροχής απορροής

Η επίλυση των εξισώσεων Saint Venant, οι οποίες περιγράφουν τη συμπεριφορά ενός υδρολογικού ή ενός υδραυλικού συστήματος υπό την επίδραση ενός γεγονότος βροχόπτωσης είναι αρκετά πολύπλοκη, δύσκολη αλλά και χρονοβόρα. Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, καθώς και η ανάγκη για παρακολούθηση αυτών των φαινομένων σε πραγματικές συνθήκες οδήγησαν στην ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων (Τσεκούρα 2010).

Σύμφωνα με τον Dingman (1994), ως προσομοίωση μπορεί να οριστεί η προσπάθεια αναπαράστασης του φυσικού κόσμου, και των διεργασιών οι οποίες συντελούνται σε αυτόν με ένα μοντέλο το οποίο αντιπροσωπεύει ένα κομμάτι της φυσικής

πραγματικότητας. Τα μαθηματικά μοντέλα αποτελούν «ρητά σύνολα εξισώσεων, αριθμητικής και λογικών βημάτων», τα οποία μετατρέπουν τις αριθμητικές εισόδους σε αριθμητικά αποτελέσματα.

Τα μοντέλα ανάλογα με τη φιλοσοφία θεώρησης της φύσης των μεταβλητών τους χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες (Μιμίκου 2006):

1. Προσδιοριστικά ή παραμετρικά μοντέλα
2. Στοχαστικά μοντέλα

Μια ακόμη διάκριση των μοντέλων βροχής – απορροής είναι με βάση τις διαδικασίες οι οποίες μοντελοποιούνται, δηλαδή, αυτές που αφορούν στη συμπεριφορά των υδρολογικών λεκανών απορροής και εκείνες σχετικά με τη συμπεριφορά των αποχετευτικών δικτύων, τα οποία λειτουργούν είτε με ελεύθερη επιφάνεια είτε υπό πίεση (Κούρτης, 2016).

Διάφορα μοντέλα είναι διαθέσιμα για τη διαχείριση της απορροής αστικών λεκανών απορροής, ορισμένα από τα οποία είναι (Barco et al. 2008):

- HEC-1
- HEC-2 (HEC-RAS)
- TR-20
- TR-55
- SSARR
- MOUSE
- HydroWorks
- HYDRA
- SWOT
- SWMM

Οι πλατφόρμες αυτές λειτουργούν μέσα από πακέτα λογισμικών. Ευρέως διαδεδομένα λογισμικά για εργασίες προσομοίωσης είναι το HEC-RAS, το FLO-2D, το LISFLOOD-FP, το SWMM, το InfoWorks και το Mike Urban. Ακολουθούν σύντομες περιγραφές.

### 2.5.1 HEC-RAS

Το HEC-RAS είναι ένα από τα μοντέλα που κατασκευάστηκαν από τον Οργανισμό HEC (Hydrological Engineering Center) του Ειδικού Σώματος Μηχανικών του Στρατού των Ηνωμένων Πολιτειών (U.S. Army Corps of Engineers). Είναι ένα πρόγραμμα ηλεκτρονικών υπολογιστών που προσομοιώνει υδραυλικά συστήματα ροής νερού μέσω φυσικών ποταμών και άλλων καναλιών. Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα δισδιάστατης προσομοίωσης, γεγονός που επιτρέπει την μοντελοποίηση του υδραυλικού αποτελέσματος των αλλαγών σχήματος εγκάρσιας διατομής, κάμψεων και άλλων τριών διαστάσεων της ροής. Η βασική υπολογιστική διαδικασία του HEC-RAS για σταθερή ροή βασίζεται στην επίλυση της μονοδιάστατης εξίσωσης ενέργειας. Οι απώλειες ενέργειας εκτιμώνται μέσω της τριβής και της συστολής και επέκτασης. Σε περιπτώσεις ταχείας μεταβολής του επιφανειακού νερού, όπως ύπαρξη υδραυλικών αλμάτων ή συμβολή ποταμών, χρησιμοποιείται η εξίσωση της ορμής (US Army Corps of Engineering 2017).

### 2.5.2 FLO-2D

Το FLO-2D είναι λογισμικό της εταιρίας FLO-2D Software στις Η.Π.Α. που χρησιμοποιείται ευρέως για την προσομοίωση της ροής σε οποιαδήποτε είδους επιφάνειας ανεξαρτήτως τοπογραφίας και τραχύτητας. Το μοντέλο χρησιμοποιεί τις εξισώσεις του St. Venant και ένα κεντρικό σχήμα δρομολόγησης πεπερασμένων διαφορών με οκτώ πιθανές κατευθύνσεις ροής για την πρόβλεψη της εξέλιξης ενός πλημμυρικού κύματος σε ένα σύστημα πλέγματος αποτελούμενο από τετραγωνικά στοιχεία, που κατασκευάζεται με την βοήθεια του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (FLO-2D Software 2009).

### 2.5.3 LISFLOOD-FP

Το LISFLOOD-FP είναι ένα μοντέλο προσομοίωσης πλημμύρας κατασκευασμένο από το Τμήμα Υδρολογίας της Σχολής Γεωργικών Εφαρμογών του Πανεπιστημίου του Μπρίστολ. Είναι ένα δισδιάστατο υδροδυναμικό μοντέλο σχεδιασμένο για να προσομοιώνει πλημμύρες με έναν υπολογιστικά αποδοτικό τρόπο πάνω σε μια σύνθετη τοπογραφία. Έχει την ικανότητα να προσομοιώνει καννάβους με έως και  $10^6$  κελιά για δυναμικά εξελισσόμενα πλημμυρικά φαινόμενα και μπορεί να επωφεληθεί

από νέες πηγές πληροφοριών εδάφους από τεχνικές τηλεπισκόπησης όπως τον εναέριο υψομετρητή laser ή κάποιο δορυφορικό ραντάρ.

Το μοντέλο προβλέπει βάθη νερού σε κάθε κελί για κάθε χρονικό βήμα και ως εκ τούτου μπορεί να προσομοιώνει τη δυναμική διάδοση των πλημμυρικών κυμάτων πάνω στις πλημμυρικές περιοχές είτε αυτές είναι ποτάμιες, παράκτιες ή εκβολές ποταμών. Το LISFLOOD-FP έχει ευρεία χρήση κυρίως σε ερευνητικές μελέτες σε έναν αριθμό Πανεπιστημιακών Ιδρυμάτων τόσο στην Ευρώπη όσο και στις Η.Π.Α (LISFLOOD-FP User Manual 2013) .

#### 2.5.4 SWMM

Το λογισμικό Storm Water Management Model (SWMM) αναπτύχθηκε το 1971 από τον Αμερικάνικο Οργανισμό Προστασίας του Περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency - EPA), σαν ένα εργαλείο που βασίζεται σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές για την προσομοίωση των απορροών των ομβρίων, τόσο από ποσοτικής όσο και από ποιοτικής άποψης. Από το 1971 μέχρι σήμερα έχει υποστεί αρκετές αναβαθμίσεις με τελευταία έκδοση την SWMM 5.1.012 που κυκλοφόρησε το 2017. Το εν λόγω λογισμικό χρήζει ευρείας εφαρμογής ανά τον κόσμο για προβλήματα προγραμματισμού, ανάλυσης και σχεδιασμού, τα οποία σχετίζονται με την απορροή των ομβρίων, με παντοροϊκά και αποχετευτικά δίκτυα σε αστικές ή μη περιοχές (Rossman 2010).

Αποτελεί ένα δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης βροχής απορροής, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για ένα μεμονωμένο γεγονός βροχόπτωσης, όσο και για συνεχή προσομοίωση της ποσότητας και της ποιότητας της απορροής σε αστικές περιοχές. Το μοντέλο αντιλαμβάνεται την απορροή ως το σύνολο της κατακρήμνισης στις υπολεκάνες της περιοχής μελέτης (Rossman, 2010). Η διόδευση, μέχρι το σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής, πραγματοποιείται μέσω ενός συστήματος αποτελούμενο από αγωγούς, κανάλια, δεξαμενές κατακράτησης, αντλίες κ.α. Το μοντέλο υπολογίζει την ποιότητα και την ποσότητα της παραγόμενης από κάθε υπολεκάνη απορροής, την ταχύτητα ροής, το βάθος ροής και την ποιότητα νερού στο αποχετευτικό σύστημα, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, η οποία αποτελείται από πολλαπλά χρονικά βήματα (Rossman 2010).

### 2.5.5 InfoWorks CS

Το InfoWorks CS αποτελεί ένα εργαλείο για την προσομοίωση υδρολογικών μοντέλων του ολοκληρωμένου αστικού κύκλου ύδατος της εταιρίας Innowyze, ενώ κυκλοφορούν στην αγορά ανανεωμένες εκδόσεις του σε εξαμηνιαία βάση. Πέρα από τη δυνατότητα προσομοίωσης του δικτύου αποχέτευσης σε πραγματικό χρόνο, το μοντέλο παρέχει πρόβλεψη της ρύπανσης, μοντελοποίηση της ποιότητας των υδάτων και της μεταφοράς των ιζημάτων σε όλο το δίκτυο (Innowyze 2016).

## 2.6 MIKE URBAN - MOUSE

Το πρόγραμμα ηλεκτρονικών υπολογιστών MOUSE που αποτελεί συντομογραφία του Model for Urban Sewers, αναπαριστά το σύστημα αποχέτευσης αστικών λυμάτων και ομβρίων. Αναπτύχθηκε από την δανέζικη εταιρία DHI και χρησιμοποιείται στο λογισμικό υδραυλικής προσομοίωσης MIKE URBAN. Θεωρείται κατάλληλο για την πρόβλεψη της απορροής από μικρές λεκάνες λόγω της δυνατότητάς του να δέχεται χρονική κλίμακα μικρότερη της τάξης του λεπτού (Elliot and Trowsdale 2005). Κάθε λεκάνη απορροής συνδέεται με έναν κόμβο του δικτύου στους οποίους τοποθετούνται φρεάτια. Κατόπιν οι κόμβοι με τη σειρά τους συνδέονται με στοιχεία αποστράγγισης (αγωγοί ή κανάλια). Παρέχεται η δυνατότητα κατανομής των λεκανών απορροής ανάλογα με τις χρήσεις γης και διαίρεσή τους σε διαπερατά και αδιαπερατά μέρη για την παραγωγή της απορροής. Ωστόσο, ο βαθμός λεπτομέρειας των αποτελεσμάτων μπορεί να περιορίζεται εξαιτίας υπολογιστικών περιορισμών, ειδικά σε μακροχρόνια προσομοίωση και δυναμική δρομολόγηση πλημμυρών. Το λογισμικό MOUSE είναι αρκετά ευέλικτο στους τύπους εκροής, στις λεπτομέρειες των προδιαγραφών εκροής και στις προδιαγραφές των διαστάσεων των μηχανισμών (π.χ. αγωγοί, φρεάτια). Επίσης, είναι το μοναδικό λογισμικό προσομοίωσης ικανό να αντιμετωπίσει το διαλυμένο οξυγόνο στα ρεύματα, τους παθογόνους οργανισμούς και άλλους συναφείς βακτηριακούς δείκτες, είτε χρησιμοποιώντας γενικές επιλογές δημιουργίας και θεραπείας ρύπων είτε μοντελοποιώντας έναν άλλο παράγοντα μόλυνσης με παρόμοια συμπεριφορά είτε καθορίζοντας τη σύνδεση του εν λόγω ρύπου με τα ιζήματα (Elliot and Trowsdale, 2005). Ως επισκόπηση της λειτουργίας του προγράμματος, η διαδικασία μοντελοποίησης μπορεί να περιγραφεί στα ακόλουθα βήματα (DHI 2010):

- Ορισμός των δεδομένων απορροής και του δικτύου.
- Προσδιορισμός των οριακών συνθηκών.
- Καθορισμός των υπολογιστικών παραμέτρων και εκτέλεση των προσομοιώσεων.
- Ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Το λογισμικό MIKE URBAN επιλύει τόσο το μοντέλο απορροής όσο και το δίκτυο αποχέτευσης με τις μεθόδους που αναφέρονται ακολούθως. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η προσομοίωση της πλημμύρας στην περιοχή της Αφαιάς – Σκαραμαγκά να γίνει με την μέθοδο του μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά SCS. Η μέθοδος time-area θεωρήθηκε αρκετά απλοϊκή και στην μέθοδο kinematic wave δεν υπήρχαν επαρκή διαθέσιμα δεδομένα ούτως ώστε να εφαρμοστεί η μέθοδος με την απαιτούμενη ακρίβεια.

#### 2.6.1 Το υδρολογικό μοντέλο

Η απορροή προσομοιώνεται μέσω ενός υδρολογικού μοντέλου για τις αστικές λεκάνες απορροής. Το MIKE URBAN περιλαμβάνει δύο τύπους μοντέλων: το μοντέλο επιφανειακής απορροής και το συνεχές υδρολογικό μοντέλο (DHI 2011). Από τη μία πλευρά, το μοντέλο επιφανειακής απορροής λαμβάνει υπόψη την επιφανειακή απορροή που δημιουργείται κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος βροχοπτώσεως, με αποτέλεσμα ασυνεχή υδρογραφήματα απορροής. Από την άλλη πλευρά, το συνεχές υδρολογικό μοντέλο υπολογίζει το ισοζύγιο όγκου κατακρημνίσεων, που περιλαμβάνει τόσο τη χερσαία όσο και την θαλάσσια απορροή. Το καταλληλότερο μοντέλο για μια αστική περιοχή που επηρεάζεται από συχνές και έντονες βροχοπτώσεις, όπως η περιοχή μελέτης μας, είναι ένα μοντέλο επιφανειακής απορροής, δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος της απορροής δημιουργείται σε αδιαπέρατες επιφάνειες κατά τη διάρκεια των βροχοπτώσεων και σταματά όταν τελειώσει το γεγονός (DHI 2010).

Η επιφανειακή απορροή ξεκινά όταν το ύψος της βροχής φτάσει την τιμή της αρχικής απώλειας, η οποία καθορίζει το νερό που διατηρείται στην επιφάνεια της γης είτε σε παραμορφώσεις είτε σε επιφανειακές τάσεις. Με τον ίδιο τρόπο η παραγωγή

απορροής σταματά όταν το ύψος της βροχής είναι μικρότερο από την αρχική παράμετρο της απώλειας (DHI 2011).

Ο όγκος της απορροής σε κάθε κελί υπολογίζεται ως το υπόλοιπο της εισροής από το ανάντη κελί, της εκροής προς το κατάντη κελί και την βροχόπτωση που πέφτει στο συγκεκριμένο κελί. Η εκροή στο αμέσως κατάντη κελί είναι το υδρογράφημα της επιφανειακής απορροής. Ωστόσο, η απορροή μειώνεται στις αδιαπέρατες επιφάνειες για να ληφθεί υπόψη η καθορισμένη υδρολογική απώλεια (π.χ. εξατμισοδιαπνοή, ποσοστό αδιεπερατότητας του εδάφους) (DHI 2010). Η υπολογιζόμενη απορροή είναι το φορτίο του δικτύου συλλογής των ομβρίων.

### 2.6.2 Υδραυλικά στοιχεία

Η απόδοση του δικτύου αναλύεται με το μοντέλο MOUSE Pipe Flow Model, που προσομοιώνει την μη μόνιμη ροή με ελεύθερη επιφάνεια όσο και η υπό πίεση. Οι υπολογισμοί των συνθηκών ροής στο δίκτυο πραγματοποιούνται με την επίλυση των πλήρων εξισώσεων Saint Venant σε διάφορα σημεία των αγωγών και των φρεατίων. Οι εξισώσεις που ακολουθούν αντιπροσωπεύουν τη διατήρηση της μάζας και της ορμής, αντίστοιχα κατά μήκος ενός αγωγού. (DHI 2010).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA I_f = gA I_0 \quad (2.7)$$

Όπου:

Q: παροχή νερού (m<sup>3</sup>/s)

A: εμβαδό υγρής επιφάνειας (m<sup>2</sup>)

x: η συντεταγμένη κατά μήκος του άξονα ροής

t: χρόνος (sec)

α: συντελεστής κατανομής της ταχύτητας

γ: βάθος ροής (m)

g: επιτάχυνση βαρύτητας (m/s<sup>2</sup>)

I<sub>f</sub>: η κλίση της γραμμής ενέργειας

I<sub>0</sub>: η κλίση του πυθμένα

Οι εξισώσεις αυτές έχουν κάποιες βασικές παραδοχές που δεν ισχύουν στην περίπτωση ροής υπό πίεση. Παρόλα αυτά, είναι δυνατό να γενικευτούν οι εξισώσεις για ροή με ελεύθερη επιφάνεια σε ανοικτούς αγωγούς σε υπό πίεση ροή σε κλειστούς αγωγούς εισάγοντας μια πλασματική σχισμή στην κορυφή του αγωγού (DHI 2010).

#### 2.6.2.1 Αγωγοί

Οι σύνδεσμοι στο MIKE URBAN θεωρούνται ως μονοδιάστατοι αγωγοί που μεταφέρουν το νερό μεταξύ των κόμβων. Σε αυτήν την περίπτωση το μοντέλο περιλαμβάνει μόνο κλειστούς αγωγούς, αν και υπάρχει η δυνατότητα μοντελοποίησης ανοικτών αγωγών. Οι αγωγοί καθορίζονται από τρεις κύριες ιδιότητες: γεωμετρία της διατομής, κλίση του πυθμένα και ιδιότητες τριβής (DHI 2011).

Η γεωμετρία διατομής των σωλήνων μπορεί να οριστεί υιοθετώντας ένα τυποποιημένο σχήμα (κυκλικό, ορθογώνιο, ωοειδές, τετραγωνικό). Η κλίση καθορίζεται από τα ανάντη και κατάντη υψόμετρα και το μήκος των αγωγών. Το υλικό σύνδεσης χαρακτηρίζεται από έναν συντελεστή τραχύτητας, ο οποίος μπορεί να είναι ο συντελεστής Manning, ή ο συντελεστής Colebrook – White, ή ο συντελεστής Hazen – Williams. (DHI 2011).

#### 2.6.2.2 Κόμβοι

Οι κόμβοι είναι τα αρχικά και τα τελικά σημεία ενός αγωγού σε ένα δίκτυο. Εάν περισσότεροι από ένας αγωγοί ξεκινούν ή τελειώνουν στον ίδιο κόμβο, τότε ονομάζεται διασταύρωση. Οι κόμβοι συμβολίζονται είτε με κυκλικά φρεάτια στο δίκτυο αποχέτευσης είτε με άλλες εγκαταστάσεις αποθήκευσης όπως λεκάνες ή δεξαμενές. Το πρόγραμμα διακρίνει τέσσερις τύπους κόμβων: φρεάτια, ανθρωποθυρίδες, φρεάτια εξόδου και δεξαμενές (DHI 2011).

Οι ανθρωποθυρίδες είναι σημεία πρόσβασης που επιτρέπουν την επιθεώρηση και τον καθαρισμό του συστήματος. Βρίσκονται σε σημεία αλλαγής κατεύθυνσης, μεταβολής της κλίσης ή του μεγέθους ή σε μεγάλες διασταυρώσεις με άλλους



υπονόμους (Butler and Davies 2000). Στο μοντέλο, αντιπροσωπεύονται από κυκλικούς κυλίνδρους που καθορίζονται από το επίπεδο πυθμένα, το επίπεδο εδάφους, τη διάμετρο και το σχήμα.

Οι δεξαμενές είναι κόμβοι που αντιπροσωπεύουν εγκαταστάσεις με πολύ μεγάλο όγκο. Είναι εγκαταστάσεις αποθήκευσης που διαχειρίζονται την απορροή για να μειώσουν τις μέγιστες παροχές. Ως εκ τούτου, το πλεόνασμα νερού πρέπει να αποθηκευτεί και να απελευθερωθεί μετά υπό έλεγχο (Butler and Davies 2000). Ο όγκος των δεξαμενών προστίθεται στο συνολικό όγκο του συστήματος και περιλαμβάνεται στους υπολογισμούς (DHI 2011).

Οι κόμβοι εξόδου είναι τα σημεία εκκένωσης όπου το νερό απελευθερώνεται σε υδατικά συστήματα ή συστήματα μεταφοράς σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Στο μοντέλο, οι έξοδοι συνδέουν το σύστημα αποχέτευσης με εξωτερικούς όγκους νερού των οποίων η στάθμη είναι ανεξάρτητη από το νερό που λαμβάνουν. Οι έξοδοι καθορίζονται από το επίπεδο του πυθμένα του αγωγού εξόδου και της επιφάνειας του νερού. Οι έξοδοι δεν τροποποιούν τη ροή των κοντινών συνδέσμων, έτσι ώστε να αποφεύγονται οι αντίθετες ροές (DHI 2010).

Οι συνθήκες ροής στους κόμβους είναι σημαντικές στην περιγραφή της συνολικής ροής, αφού οι γενικές εξισώσεις ροής ισχύουν μόνο για συνεχείς αγωγούς. Οι υδραυλικές συνθήκες στους κόμβους υπολογίζονται ως στάθμη νερού και ύψος ταχύτητας, οι οποίες επίσης εξαρτώνται από την περιοχή που περιβάλλει τον κόμβο. Οι υπολογισμοί διεξάγονται ώστε να ικανοποιείται η διατήρηση της μάζας και το ενεργειακό ισοζύγιο που αντιπροσωπεύει τις απώλειες της ενέργειας λόγω της ροής (DHI 2010).

### 2.6.3 Time-area method

Στη συγκεκριμένη μέθοδο, η ποσότητα της απορροής εξαρτάται από τις αρχικές απώλειες, το μέγεθος της λεκάνης απορροής και από τις συνεχείς υδρολογικές απώλειες. Το σχήμα του υδρογραφήματος της απορροής εξαρτάται από τον χρόνο συγκέντρωσης και την καμπύλη χρόνου-επιφάνειας (time-area curve). Αυτές οι δύο παράμετροι αντιπροσωπεύουν την περιγραφή της ταχύτητας αντίδρασης και του σχήματος της λεκάνης απορροής. Σαν δεδομένα εισόδου δέχεται (DHI 2016):

- 1) Στοιχεία για τις λεκάνες απορροής: συντεταγμένες των ορίων των λεκανών, εμβαδό, αριθμό των κατοίκων, ροή του νερού.
- 2) Υδρολογικές παραμέτρους: αρχικές απώλειες, υδρολογικές μετατροπές, καμπύλη χρόνου- επιφάνειας (time-area curve), και συντελεστής χρόνου- επιφάνειας.
- 3) Παραμέτρους του συγκεκριμένου μοντέλου: ποσοστό αδιαπερατότητας (impervious) της λεκάνης απορροής

#### 2.6.4 Μέθοδος κινηματικού κύματος

Η επιφανειακή απορροή υπολογίζεται ως ροή σε ένα ανοικτό κανάλι, λαμβάνοντας υπόψιν μόνο τις βαρυτικές δυνάμεις και αυτές της τριβής. Η απορροή εξαρτάται από τις υδρολογικές απώλειες και το μέγεθος της λεκάνης απορροής. Το σχήμα του υδρογραφήματος απορροής εξαρτάται από τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την λεκάνη απορροής: την κλίση, το μήκος και την τραχύτητα της επιφάνειας της λεκάνης. Σαν δεδομένα εισόδου πέρα από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής που αναφέρθηκαν, η επιλογή της μεθόδου απαιτεί τις εξής υδρολογικές παραμέτρους: απώλειες λόγω υγρασίας, απώλειες λόγω αποθήκευσης, μέγιστο και ελάχιστο ποσοστό διήθησης για δεδομένο τύπου εδάφους, τον εκθέτη Horton, την αντίστροφη εξίσωση Horton (ρυθμός της ικανότητας ανάκαμψης της διήθησης του εδάφους μετά από βροχοπτώσεις) και τον συντελεστή Manning για την τραχύτητα της επιφάνειας της λεκάνης (DHI 2016).

#### 2.6.5 MIKE URBAN-Unit Hydrograph Surface Runoff Model (UHM)

Το μοναδιαίο υδρογράφημα επιφανειακής απορροής προσομοιώνει την απορροή από την εκδήλωση ενός γεγονότος βροχόπτωσης για τον αριθμό των λεκανών απορροής που ορίζονται στο μοντέλο. Υπολογίζει την περίσσεια βροχής, υποθέτοντας είτε ότι οι απώλειες σε διήθηση είναι σταθερές και συνεχείς, ή αναλογικές όπως στην ορθολογική μέθοδο, είτε με την χρήση των αριθμών καμπύλης απορροής (Curve Numbers) της αμερικάνικης υπηρεσίας προστασίας του εδάφους (U.S. Soil Conservation Service) είτε με τη μέθοδο των γενικευμένων απωλειών της SCS (DHI 2016).

- Το μοντέλο απωλειών (Loss Model)

Κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας ένα μέρος της βροχόπτωσης εισχωρεί στο έδαφος από το οποίο μέρος το περισσότερο εξατμίζεται ενώ ένα ελάχιστο μέρος εισχωρεί στο δίκτυο αποχέτευσης. Ως εκ τούτου τα μοντέλα προσομοίωσης μεμονωμένων συμβάντων, όπως το UHM θεωρούν το μεγαλύτερο μέρος της διήθησης ως απώλεια.

Το μοναδιαίο υδρογράφημα περιλαμβάνει τέσσερις μεθόδους υπολογισμού της επιφανειακής απορροής. Κάθε μέθοδος θεωρεί κάθε λεκάνη απορροής σαν μονάδα και για αυτό οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται αντιπροσωπεύουν μέσες τιμές για την λεκάνη απορροής. Ακόμη περιλαμβάνεται ένας συντελεστής προσαρμογής για κάθε περιοχή, αντιπροσωπευτικός της ανομοιόμορφης κατανομής των κατακρημνίσεων στην εκάστοτε λεκάνη (DHI 2016).

- Αναλογικές απώλειες (Ορθολογική Μέθοδος)

Οι απώλειες υποτίθεται ότι είναι ανάλογες με τον ρυθμό κατακρήμνισης και έτσι το ενεργό ύψος βροχόπτωσης δίνεται από τον τύπο:

$$P_{\text{excess}} = a * A_f * P \quad (2.8)$$

Όπου:

a: συντελεστής απορροής,  $0 < a < 1$ , καθορισμένος από τον χρήστη

$A_f$ : συντελεστής προσαρμογής περιοχής

P: ρυθμός βροχόπτωσης (mm/h)

- Σταθερή αρχική και σταθερές απώλειες

Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο δεν νοείται απορροή πριν καθοριστούν οι αρχικές απώλειες από τον χρήστη. Έτσι, η επιφανειακή απορροή δημιουργείται όταν ο ρυθμός βροχόπτωσης υπερβαίνει έναν καθορισμένο σταθερό ρυθμό απώλειας. Πιο συγκεκριμένα (DHI 2016):

$$P_{\text{excess}} = \begin{cases} 0 & , \text{αν } P_{\text{sum}} < I_a + I_c * dt \\ A_f * P * I_c & , \text{αν } P_{\text{sum}} > I_a \end{cases} \quad (2.9)$$

Όπου:

$P_{\text{excess}}$ : ενεργό ύψος βροχόπτωσης (mm/h)

$P_{\text{sum}}$ : συσσωρευμένη κατακρήμνιση από την έναρξη της καταιγίδας (mm)

$I_a$ : αρχικές απώλειες (mm), καθορισμένες από τον χρήστη

$I_c$ : σταθερός ρυθμός απώλειας (mm/h), καθορισμένος από τον χρήστη

$P$ : ρυθμός βροχόπτωσης (mm/h)

$dt$ : χρονικό βήμα υπολογισμών (h)

Σε μεγάλο βαθμό, η μέθοδος αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι οι απώλειες είναι μεγαλύτερες κατά την έναρξη της καταιγίδας.

- SCS Loss Model ( Μοντέλο απωλειών της U.S. Soil Conservation Service)

Η Αμερικάνικη Υπηρεσία Προστασίας του εδάφους ανέπτυξε τη μέθοδο αυτή για τον υπολογισμό των απωλειών της βροχόπτωσης το 1972, η οποία βασίζεται στις εξής αρχές (DHI 2016):

- Για ένα αρχικό χρονικό διάστημα  $t_{a0}$  η πραγματική βροχόπτωση συνολικού ύψους  $h_{a0}$  αποτελεί εξ ολοκλήρου αρχική απώλεια, χωρίς να δίνει καθόλου απορροή. Συνεπώς, για το σύνολο της βροχόπτωσης το μέγιστο ύψος περισσεύματος βροχής ή η άμεση απορροή  $P_e$  είναι πάντοτε μικρότερο ή ίσο από το ύψος της βροχόπτωσης  $P$ .
- Μόλις αρχίσει η απορροή το επιπλέον ύψος νερού που συγκρατείται στην λεκάνη απορροής  $F_a$  είναι μικρότερο ή ίσο της μέγιστης κατακράτησης  $S$ .
- Για ένα ορισμένο ποσό βροχόπτωσης  $I_a$  (αρχικές απώλειες) η απορροή δε λαμβάνει χώρα και έτσι η δυνητική απορροή ανέρχεται σε  $P-I_a$ .

Η υπόθεση της μεθόδου της U.S. SCS είναι ότι οι αναλογίες των δύο πραγματικών και των δύο υποθετικών μεταβλητών είναι ίσες. Δηλαδή:

$$\frac{Fa}{S} = \frac{Pe}{P-Ia} \quad (2.10)$$

Η αρχή της συνέχειας έχει ως αποτέλεσμα:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (2.11)$$

Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω εξισώσεων δίνει το εξής:

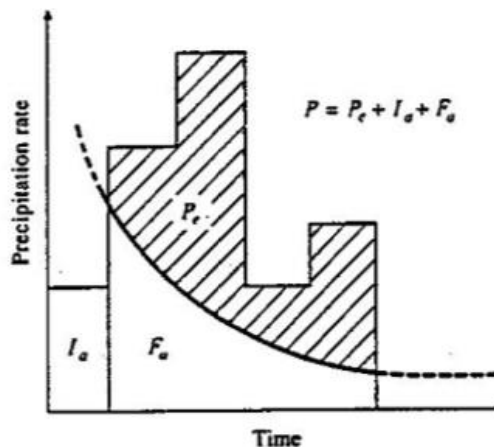
$$P_e = \frac{(P-Ia)^2}{P-Ia+S}, \quad (2.12)$$

η οποία είναι η βασική εξίσωση για τον υπολογισμό του ενεργού ύψους βροχόπτωσης ή της άμεσης απορροής από μια καταιγίδα σύμφωνα με την μέθοδο της SCS.

Τα αποτελέσματα από πολλές πειραματικές μικρές λεκάνες απορροής χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργηθεί η εμπειρική σχέση:  $I_a = 0.2 * S$

Η βασική εξίσωση που χρησιμοποιείται σε αυτό το μοντέλο προκύπτει από τον συνδυασμό των δύο παραπάνω εξισώσεων και είναι η (DHI 2016):

$$P_e = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \quad (2.13)$$



**Διάγραμμα 2.1:** Οι μεταβλητές στην μέθοδο SCS για την εκτίμηση των απωλειών (πηγή: DHI 2016)

Στο Διάγραμμα 2.1 απεικονίζονται οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο της SCS. Πιο συγκεκριμένα αυτές είναι:

$I_a$ : αρχικές απώλειες

$P_e$ : ύψος περισεύματος βροχής

$F_a$ : συνεχείς απώλειες

$P$ : συνολική βροχόπτωση

Η δυναμικά μέγιστη κατακράτηση (συνολικές απώλειες)  $S$  υπολογίζεται βάσει του εμπειρικού τύπου της SCS που έχει προκύψει από την ανάλυση της σχέσης βροχής-απορροής σε ένα μεγάλο αριθμό λεκανών απορροής με χρήση του αδιάστατου αριθμού καμπύλης απορροής (Curve Number):

$$S = ( (1000/CN) - 10 ) * 25.4 \text{ (mm)} \quad (2.14)$$

Η παράμετρος CN εξαρτάται από τη γεωλογική σύσταση της περιοχής, τις χρήσεις γης και την προηγούμενη κατάσταση υγρασίας και οι τιμές της κυμαίνονται μεταξύ του 0, όπου δεν υπάρχει απορροή και του 100, όπου το ενεργό ύψος βροχόπτωσης ισούται με το πραγματικό ύψος βροχόπτωσης. Για φυσικές λεκάνες απορροής συνήθως ισχύει  $50 < CN < 100$ .

Η μέθοδος κατατάσσει τα εδάφη σε τέσσερις εδαφικούς τύπους A, B, C και D των οποίων τα εδαφικά χαρακτηριστικά είναι (DHI 2016):

- Τύπος A: Εδάφη με μεγάλη τελική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Βαθιά αμμώδη, βαθιά πηλώδη, συσσωματούμενα ιλυώδη.
- Τύπος B: Εδάφη με μέτρια τελική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Ρηχά πηλώδη, πηλοαμμώδη.
- Τύπος C: Εδάφη με μικρή τελική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Αργιλοπηλώδη, ρηχά πηλοαμμώδη, εδάφη με χαμηλή περιεκτικότητα σε οργανική ουσία, εδάφη πλούσια σε άργιλο.
- Τύπος D: Εδάφη με πολύ μικρή τελική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Εδάφη τα οποία όταν υγραίνονται διογκώνονται, έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε μοντμοριλοντική άργιλο και ορισμένα αλατούχα εδάφη.

Ακόμη, η μέθοδος ορίζει τρεις τύπους προηγούμενων συνθηκών υγρασίας (DHI 2016):

- AMC(I): ξηρές συνθήκες, δηλαδή ξηρά εδάφη αλλά πάνω από το σημείο μαρασμού, που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημέρων μικρότερη από 13 mm (ή μικρότερη από 35 mm για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
- AMC(II): μέσες συνθήκες, που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών μεταξύ 13 και 38 mm (ή μεταξύ 35 και 53 mm για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
- AMC(III): υγρές συνθήκες, δηλαδή εδάφη σχεδόν κορεσμένα, που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών μεγαλύτερη από 38 mm (ή μεγαλύτερη των 53 mm για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Είναι ωστόσο πολύ πιθανό σε μια περιοχή μελέτης να υπάρχουν παραπάνω από ένας τύπος εδάφους και πολλές χρήσεις γης. Μετά τον υπολογισμό του CN για κάθε τύπο εδάφους και χρήσης γης που συναντάται στην περιοχή μελέτης, ο CN ολόκληρης της περιοχής μελέτης προκύπτει ως σταθμισμένος μέσος όρος με βάρος την έκταση που καταλαμβάνει κάθε συνδυασμός τύπου εδάφους και χρήσης γης.

Για τις συνθήκες υγρασίας AMC(II) η SCS παρέχει αναλυτικούς πίνακες με τιμές του CN για κάθε υδρολογική ομάδα και χρήσεις γης που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (Wanielista 1978).

Ο πίνακας αυτός προσομοιώνει καλύτερα τις ελληνικές συνθήκες και ισχύει για συνθήκες υγρασίας τύπου II. Για τις συνθήκες υγρασίας των δύο άλλων τύπων προηγούμενων συνθηκών υγρασίας γίνεται αναγωγή μέσω των τύπων:

$$CN_I = \frac{4.2 * CN_{II}}{10 - 0.058 * CN_{II}} \quad (2.15)$$

$$CN_{III} = \frac{23 * CN_{II}}{10 + 0.13 * CN_{II}} \quad (2.16)$$

Για κάθε χρονικό βήμα υπολογισμού το ενεργό ύψος βροχόπτωσης είναι ίσο με τη διαφορά της συσσωρευμένης περίσσειας βροχόπτωσης μεταξύ της αρχής και του τέλους του χρονικού βήματος.

Η μέθοδος της SCS αναπτύχθηκε στη βάση των ημερήσιων βροχοπτώσεων και κατά συνέπεια το πρόγραμμα θεωρεί νέα περίοδο διάρκειας 24 ωρών κατά την έναρξη μιας νέας βροχόπτωσης. Πιο συγκεκριμένα:

- Κάθε 24 ώρες, η υπάρχουσα κατάσταση υγρασίας (AMC) ενημερώνεται κατά μία τάξη για κάθε 16 χιλιοστά βροχής που πέφτουν στην διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης.
- Ο αριθμός καμπύλης απορροής (CN) και η μέγιστη κατακράτηση (S) υπολογίζονται σύμφωνα με την τελευταία τιμή της υπάρχουσας υγρασίας (AMC).
- Η συσσωρευμένη ποσότητα βροχόπτωσης  $P_e$  ορίζεται ίση με το μηδέν.



Πίνακας 2.4: Αριθμός καμπύλης – απορροής (Wanielista 1978)

Χρήσεις γης	Υδρολογικός τύπος εδάφους			
	A	B	C	D
<i>Καλλιεργημένες εκτάσεις</i>				
• Χωρίς έργα συντήρησης	72	81	88	91
• Με έργα συντήρησης	62	71	78	81
<i>Ορεινοί βοσκότοποι</i>				
• Κακή κατάσταση	68	79	86	89
• Καλή κατάσταση	39	61	74	80
<i>Λιβαδικές εκτάσεις</i>				
• Καλή κατάσταση	30	58	71	78
<i>Δασικές εκτάσεις</i>				
• Αραιή συστάδα	45	66	77	83
• Πυκνή συστάδα	25	55	70	77
<i>Ελεύθερες εκτάσεις, γήπεδα γκολφ, πάρκα</i>				
• Καλή κατάσταση, κάλυψη με γρασίδι στο 75% της έκτασης	39	61	74	80
• Μέτρια κατάσταση, κάλυψη με γρασίδι στο 50% της έκτασης	49	69	79	84
<i>Εμπορικές περιοχές (85% αδιαπέρατες)</i>	89	92	94	95
<i>Βιομηχανικές περιοχές (72% αδιαπέρατες)</i>	81	88	91	93
<i>Οικιστικές περιοχές</i>				
Μέσο μέγεθος οικοπέδου				
Ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας				
<500	77	85	90	92
1000	61	75	83	87
1500	57	72	81	86
2000	54	70	80	85
4000	51	68	79	84
<i>Χώροι πάρκινγκ, στέγες κλπ</i>	98	98	98	98
<i>Δρόμοι</i>				
• με οδόστρωμα και αγωγούς ομβρίων	98	98	98	98
• χαλικόστρωτοι	76	85	89	91
• χωματόδρομοι	72	82	87	89
<i>Αστικές συνθήκες</i>				
• Γυμνό έδαφος	77	86	91	94
• Κήποι ή θάμνοι	72	82	88	91
• Μεγάλη κάλυψη με πράσινο (>75% της διαπερατής περιοχής)	39	61	74	80
• Μέτρια κάλυψη πρασίνου (50-75% της διαπερατής περιοχής)	49	69	79	84
• Μικρή κάλυψη πρασίνου (<50% της διαπερατής περιοχής)	68	79	86	89
• Άλση	36	60	73	79

## 2.7 Μοναδιαίο Υδρογράφημα Απορροής (Unit Hydrograph Routing Model)

### 2.7.1 Βασικές παραδοχές

Το μοναδιαίο υδρογράφημα είναι ένα απλό γραμμικό μοντέλο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία του υδρογραφήματος που προκύπτει από οποιαδήποτε περίσσεια βροχής. Αποτελεί, δηλαδή το υδρογράφημα της άμεσης απορροής που προκύπτει από περίσσειμα βροχής ίσο με 1cm χρονικής διάρκειας tr.

Το μοντέλο είναι συνυφασμένο με τις ακόλουθες παραδοχές:

- ✓ Η ένταση της βροχής είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του γεγονότος της βροχής
- ✓ Η περίσσεια βροχόπτωσης κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής
- ✓ Περισσότερες από μια ραγδαίες βροχές της ίδιας διάρκειας αλλά διαφορετικού ύψους περισεύματος βροχής δημιουργούν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με τεταγμένες ανάλογες των υψών περισεύματος βροχής (συνθήκη γραμμικότητας-linearity)
- ✓ Για μια λεκάνη απορροής το σχήμα του μοναδιαίου υδρογραφήματος δεδομένης διάρκειας βροχής αντιπροσωπεύει τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης
- ✓ Το συνολικό Υδρογράφημα Άμεσης Απορροής που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των Υδρογραφημάτων Άμεσης Απορροής των επιμέρους βροχοπτώσεων (αρχή της επαλληλίας)

Δύο γεγονότα με περίσσειμα βροχόπτωσης της ίδιας διάρκειας αλλά με διαφορετικές εντάσεις περισεύματος βροχόπτωσης δημιουργούν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με την ίδια χρονική βάση, αλλά με τεταγμένες σε κάθε χρονική στιγμή που έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με το λόγο των εντάσεων (αρχή της αναλογίας).

Υπό φυσιολογικές συνθήκες είναι αδύνατο οι παραπάνω υποθέσεις να πληρούνται 100%. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις οι υδρολογικές συνθήκες είναι αρκετά κοντά στις παραδοχές αυτές για την απόδοση ικανοποιητικών αποτελεσμάτων (DHI 2016).

### 2.7.2 Αρχή των υπολογισμών

Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας για κάθε χρονικό βήμα υπολογισμού, καθορίζεται το υδρογράφημα που αντιστοιχεί στο ύψος περισεύματος βροχόπτωσης, όπως αυτό υπολογίζεται από το μοντέλο απωλειών για το δεδομένο χρονικό βήμα, και στη συνέχεια αυτό προστίθεται στην συμβολή της ροής που δημιουργείται από τα προηγούμενα χρονικά βήματα.

### 2.7.3 Μοναδιαία Υδρογραφήματα SCS

Ένα μοναδιαίο υδρογράφημα χαρακτηρίζεται από τη διάρκεια μεμονωμένης ραγδαίας βροχής  $t_r$  και τον χρόνο υστέρησης (lag time,  $t_l$ ), που θεωρείται η χρονική απόσταση από το κέντρο μάζας του υετογράμματος μέχρι την αιχμή του υδρογραφήματος.

Η χρονική βάση του μοναδιαίου υδρογραφήματος ( $T_p$ ), δηλαδή ο χρόνος που μεσολαβεί από την αρχή του γεγονότος της βροχής έως την εμφάνιση της μέγιστης απορροής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_l \quad (2.17)$$

Στην πραγματικότητα, το μοναδιαίο υδρογράφημα μιας δεδομένης λεκάνης απορροής είναι μοναδικό. Εντούτοις, έχουν καταβληθεί προσπάθειες για συνθετικό προσδιορισμό του μοναδιαίου υδρογραφήματος με γενικότερη εφαρμογή. Δύο τέτοια υδρογραφήματα, που είναι καθορισμένα στο μοντέλο είναι το αδιάστατο καμπυλόγραμμα ΜΥΓ της SCS και το τριγωνικό μοναδιαίο ΜΥΓ της SCS (DHI 2016).

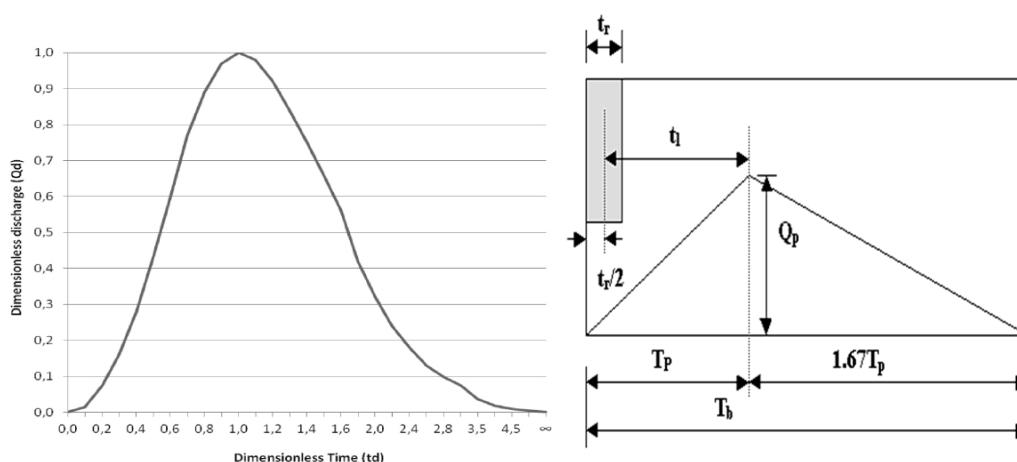
#### 2.7.3.1 *Καμπυλόγραμμα ΜΥΓ της SCS*

Η μέθοδος του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος που προτάθηκε από την υπηρεσία Soil Conservation System των ΗΠΑ έχει προκύψει από την ανάλυση ενός μεγάλου αριθμού μοναδιαίων υδρογραφημάτων για μικρές υδρολογικές λεκάνες, που καλύπτουν ένα μεγάλο αριθμό γεωγραφικών περιοχών.

Το αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS είναι ένα υδρογράφημα στο οποίο η τεταγμένη εκφράζεται ως ο λόγος της παροχής (U) ως προς την αιχμή (U<sub>p</sub>) και η τετμημένη ως ο λόγος του χρόνου ως προς τον χρόνο που παρατηρείται η μέγιστη παροχή (t<sub>p</sub>) (DHI 2016).

### 2.7.3.2 Τριγωνικό ΜΥΓ της SCS

Το τριγωνικό μοναδιαίο της SCS προκύπτει από το αδιάστατο καμπυλόγραμμο μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η παροχή αιχμής (U<sub>p</sub>) και ο χρόνος μέχρι την αιχμή (t<sub>p</sub>) παραμένουν όπως στο προηγούμενο υδρογράφημα. Αυτό που αλλάζει είναι η χρονική βάση του υδρογραφήματος που είναι 2,67\* t<sub>p</sub> σε αντίθεση με τα 5\*t<sub>p</sub> του προηγούμενου (DHI 2016).



**Διάγραμμα 2.2:** Μοναδιαία υδρογραφήματα κατά την SCS (αριστερά) αδιάστατο καμπυλόγραμμο υδρογράφημα (δεξιά) τριγωνικό υδρογράφημα (πηγή: DHI 2016)

Ο χρήστης πρέπει να καθορίσει το χρόνο υστέρησης που θα χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς. Ο χρόνος υστέρησης (t<sub>i</sub>) μπορεί είτε να προσδιοριστεί άμεσα είτε να υπολογιστεί από τον τύπο της SCS:

$$t_i = (L * 3,28 * 10^3)^{0,8} * \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0,7} / (1900 * \gamma^{0,5}) \quad (2.18)$$

όπου:

t<sub>i</sub>: χρόνος υστέρησης (h)

L: υδραυλικό μήκος της λεκάνης (km)

CN: αριθμός καμπύλης απορροής της SCS

Υ: μέση κλίση της λεκάνης απορροής (%)

## 2.8 Προηγούμενες Μελέτες με το Λογισμικό MIKE

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσονται συνοπτικά και γίνεται αναφορά σε μια σειρά από διπλωματικές εργασίες, μεταπτυχιακές διπλωματικές εργασίες και μελέτες, οι οποίες βρέθηκαν κατά την βιβλιογραφική ανασκόπηση του παρόντος θέματος και θεωρήθηκε πως καταδεικνύουν και αποδεικνύουν το μεγάλο εύρος εφαρμογής τόσο των προγραμμάτων Mike Urban και Mike Zero, όσο και της 1D/2D προσομοίωσης πλημμύρας.

### 2.8.1 Προπτυχιακές και μεταπτυχιακές διπλωματικές εργασίες

Κατά την εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση δεν βρέθηκε κάποια προπτυχιακή ή μεταπτυχιακή εργασία στη Ελλάδα που να έχει διεκπεραιωθεί με το πρόγραμμα Mike Urban. Ωστόσο, το λογισμικό Mike Zero έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές προπτυχιακές και μεταπτυχιακές εργασίες τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό.

Ορισμένες είναι: Μόσχου (2014), Κατσίμπας (2013), Τσιγαρίδα (2014), Gharbi (2015), Sande Beiro and Serrano Manso (2012).

Στη διπλωματική εργασία του κ. Κατσίμπα (2013) έγινε υδραυλική προσομοίωση της λεκάνης απορροής Ντραφίου και εκτιμήθηκε ο πλημμυρικός της κίνδυνος με την πλατφόρμα Mike 11 του Mike Zero. Για την υλοποίηση της εργασίας αρχικά μοντελοποιήθηκε ο ποταμός και εισήχθησαν οι απαραίτητες πληροφορίες για κάθε διατομή του. Κάθε διατομή είναι μοναδική και ταυτοποιείται από τα εξής στοιχεία (Κατσίμπας 2013):

- Το όνομα του ποταμού (river name)
- «Τοπογραφική ταυτότητα» (TopoID)
- Χιλιομετρική θέση (chainage)

Στη συνέχεια, αφού ορίστηκαν τα όρια της κοίτης και των πλημμυρικών πεδίων, ορίστηκαν οι οριακές συνθήκες και οι χρονοσειρές για τις οποίες θα προσομοιωθεί η λεκάνη απορροής. Ως χρονικό βήμα επιλέχθηκαν τα 5 sec για την εξαγωγή

ακριβέστερων αποτελεσμάτων και ως συνθήκη ροής ορίστηκε η σταθερή ροή (steady flow).

Η υδραυλική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για 5 βροχομετρικά επεισόδια διάρκειας 5 ημερών, για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμες παρατηρημένες τιμές της στάθμης στην έξοδο της λεκάνης, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην συνέχεια για τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Τα ζητούμενα αποτελέσματα για κάθε βροχομετρικό επεισόδιο αποτελούντο από την καμπύλη στάθμης – χρόνου στην διατομή στην έξοδο της λεκάνης και τον χάρτη κατανομής μέγιστου βάθους (πλημμυρικού κινδύνου) (Κατσιμπας 2013). Ακολούθησε η βαθμονόμηση του μοντέλου και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις παρατηρημένες τιμές. Ως μέτρο σφάλματος χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής προσδιορισμού (Nash and Sutcliffe 1974):

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q'_t - Q'_m)^2}{\sum_{t=1}^T (Q'_t - \bar{Q}_0)^2} \quad (2.19)$$

Όπου

$Q_0$ : παρατηρημένες τιμές στάθμης νερού

$Q_m$ : προσομοιωμένες τιμές στάθμης νερού

$\bar{Q}_0$ : μέση τιμή της παρατηρημένης χρονοσειράς στάθμης νερού

T: χρονικός ορίζοντας ελέγχου

Για τα αποτελέσματα, η προσομοίωση κρίθηκε μερικώς ικανοποιητική στα 3 από τα 5 πλημμυρογραφήματα ενώ στα άλλα 2 μη ικανοποιητική, γεγονός που οφείλεται στη θεώρηση της σχεδόν μόνιμης ροής με αποτέλεσμα να μην τροποποιηθούν οι προεπιλεγμένες από το πρόγραμμα τιμές των υδρομετρικών παραμέτρων εκτός του συντελεστή Manning. Σε ό,τι αφορά τη σύνθεση πλημμυρικών χαρτών, στα ανάντη παρατηρήθηκε ότι όσο πιο έντονο είναι το πλημμυρικό φαινόμενο τόσο μεγαλύτερες είναι οι πλημμυρικές εκτάσεις. Αντίθετα, στα κατόντη, όπου υπάρχει το κύριο κομμάτι του αστικού ιστού και της αγροτικής δραστηριότητας, παρατηρείται η ίδια πλημμυρική έκταση παρά τις διαφορές στην παροχή αιχμής (Κατσιμπας 2013).

Αρκετό ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μεταπτυχιακή εργασία των Sande Beiro και Serrano Manso (2012) στην οποία επιχειρείται η υδρολογική προσομοίωση της αστικής λεκάνης απορροής στο Lundby – Kyrkyn, Göteborg με σκοπό την αξιολόγηση τρόπων για την αποφυγή γεγονότων πλημμύρας. Η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε 733 υπολεκάνες απορροής ενώ το δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων αποτελείτο από 836 φρεάτια κυκλικής διατομής με διάμετρο του ενός μέτρου, 839 αγωγούς από τους οποίους οι 837 είναι κυκλικοί και έχουν συντελεστή Manning 0,15, ενώ οι άλλοι δύο είναι κατασκευασμένοι από σίδηρο και έχουν συντελεστή Manning ίσο με 0,013, 2 αντλίες και ένα φράγμα.

Επιπλέον, το μοντέλο περιλαμβάνει οριακές συνθήκες, αντιπροσωπευτικές για διάφορους τύπους φορτίων νερού, όπως διήθηση ή σταθερά επίπεδα νερού. Τα γεγονότα βροχόπτωσης εισάγονται στο μοντέλο συνδυάζοντας κάθε υπολεκάνη απορροής με τη χρονοσειρά των βροχοπτώσεων. Η γενική απόδοση του δικτύου καθορίζεται από τα ποσοστά διείσδυσης και τη μέση ροή λυμάτων, δηλαδή τη ροή ξηρού καιρού (DWF), η οποία καταλογίζει τα μέσα λύματα που παράγονται από τα νοικοκυριά και μεταφέρονται από το σύστημα στη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων. Η ποσότητα του παραγόμενου νερού εξαρτάται άμεσα από την ημέρα της εβδομάδας και τη συγκεκριμένη ώρα της ημέρας. Ως εκ τούτου, η μέση παραγωγή λυμάτων σε κάθε κόμβο πολλαπλασιάστηκε με μια κυκλική διακύμανση που δημιουργήθηκε προκειμένου να ληφθούν υπόψη αυτές οι διακυμάνσεις στην παραγωγή του νερού. Επιπλέον, υπάρχουν δύο φορτία διήθησης στο σύστημα, ένα από τα οποία επηρεάζει την πλειονότητα των κόμβων σε ολόκληρο το μοντέλο, ενώ ένα δεύτερο φορτίο διήθησης συνδέεται μόνο με μια μικρή περιοχή (Sande Beiro and Serrano Manso 2012).

Η προσομοίωση του μοντέλου έγινε για βροχοπτώσεις με περιόδους επαναφοράς (T) 5, 10, 20, 50 και 100 έτη και χρονικής διάρκειας (t) 10,20 και 30 λεπτών.

Σε ό,τι αφορά τα αποτελέσματα, αποδείχτηκε ότι οι συνεχείς βροχοπτώσεις μικρής διάρκειας αλλά μεγάλης έντασης είναι το δυσμενέστερο σενάριο για τον κίνδυνο πλημμύρας του συγκεκριμένου δικτύου. Επιπροσθέτως, το δίκτυο κρίθηκε ακατάλληλο να αντιμετωπίσει τις επερχόμενες προβλεπόμενες βροχοπτώσεις στην Σουηδία, καθώς το 67% των αγωγών λειτουργούσαν υπό πίεση κατά τη βροχόπτωση

με περίοδο επαναφοράς τα 5 έτη και το 23% των φρεατίων πλημμύρισαν κατά τη βροχόπτωση με περίοδο επαναφοράς τα 10 έτη. Κρίνεται, λοιπόν απαραίτητη η τροποποίηση του συστήματος και προτείνεται φιλική προς το περιβάλλον χρήση συστημάτων αποστράγγισης για την μείωση των μέγιστων ροών και την αύξηση της χωρητικότητας στο σύστημα (Sande Beiro and Serrano Manso 2012).

### 2.8.2 1D/2D Προσομοίωση δικτύου ομβρίων

Στη διεθνή βιβλιογραφία παρουσιάζονται αρκετές εργασίες μονοδιάστατης και δισδιάστατης προσομοίωσης αστικών λεκανών. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένες και στη συνέχεια της παραγράφου παρουσιάζεται αναλυτικά μία εξ' αυτών.

*Πίνακας 2.5: Μελέτες 1D/2D προσομοίωσης αστικών λεκανών απορροής.*

<b>Συγγραφείς</b>	<b>Έτος Δημοσίευσης</b>
Bisht et al.	2016
Adeogun et al.	2015
Salvan et al.	2016
Liu et al.	2014
Leandro et al.	2009
Shlauß	2016
Paquier et al.	2015
Chen et al.	2012
Gallegos et al.	2009
Syme et al.	2004

Στην εργασία του Leandro et al. (2009) γίνεται σύγκριση της 1D/1D και της 1D/2D προσομοίωσης αστικών δικτύων αποχέτευσης ομβρίων στην περιοχή Keighley της



Μεγάλης Βρετανίας και προτείνονται τρόποι για την βαθμονόμηση των 1D/1D μοντέλων με βάση τα αποτελέσματα ενός 1D/2D μοντέλου.

Τα μοντέλα 1D/2D είναι ακριβέστερα από τα μοντέλα 1D/1D, λόγω του δισδιάστατου πλέγματος που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της επιφάνειας σε αντίθεση με το μονοδιάστατο επιφανειακό δίκτυο καναλιών που χρησιμοποιείται στο μοντέλο 1D/1D (Hankin et al. 2008).

Στην συγκεκριμένη εργασία επιχειρείται η βαθμονόμηση του μοντέλου SIPSON. Το SIPSON περιλαμβάνει ένα φυσικά κατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο για τον υπολογισμό υδρογραφημάτων επιφανειακής απορροής (BEMUS). Ο αλγόριθμος που εμφανίζεται στα υδρογραφήματα επιφανειακής απορροής βασίζεται στη μεθοδολογία που περιεγράφηκε αρχικά από τους Radojkovic και Maksimovic (1984) και στη συνέχεια από τους Khu et al. (2006). Το μοντέλο επιλύει τις εξισώσεις του St.Venant στα κύρια και δευτερεύοντα δίκτυα ως σύνολο σωληνώσεων (που αντιπροσωπεύουν κανάλια ή αγωγούς) και κόμβων (που αντιπροσωπεύουν ξεχωριστά σημεία, όπως επιφανειακές λίμνες ή φρεάτια). Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου χρησιμοποιείται το SIPSON/UID, όπου επιλύει τις εξισώσεις 2D μη-αδράνειας ροής στο κύριο σύστημα και τις 1D St. Venant εξισώσεις στο δευτερεύον σύστημα (Chen et al. 2005).

Για τη διάταξη της βαθμονόμησης θεωρήθηκαν σταθερές ομοιόμορφες παράμετροι (π.χ. τραχύτητα) σε όλο το χώρο τόσο για τα 1D/1D όσο και για τα 1D/2D μοντέλα και ένα χωρικά ομοιόμορφο γεγονός βροχόπτωσης στο υδρολογικό μοντέλο που τροφοδοτεί και τα δύο υδραυλικά μοντέλα (Leandro et al. 2009).

Η λεκάνη απορροής στη περιοχή του Keighley βρίσκεται σε σχεδόν επίπεδο έδαφος με κλίση που κυμαίνεται από 0.08% έως 1.40% με μέση κλίση εδάφους 0.76%. Το δευτερεύον δίκτυο αποτελείται από 150 αγωγούς, ενώ το κύριο δίκτυο από 55 επιφανειακά μονοπάτια και 22 λίμνες που παράγονται αυτόματα σε περιβάλλον GIS με την χρήση ενός ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου (DEM) που λαμβάνεται από το LiDAR (Boonya – Aroonnet et al. 2007). Το κύριο και το δευτερεύον δίκτυο ενώνονται μεταξύ τους μέσω 10 κόμβων, ενώ για τη σύνταξη των πλημμυρικών χαρτών

πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με βροχόπτωση διάρκειας μίας ώρας και περιόδου επαναφοράς 200 ετών.

Συμπερασματικά, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι για την ίδια στάθμη νερού, η πλημμύρα στο 1D/1D μοντέλο φαίνεται να κινείται γρηγορότερα από ότι στο 1D/2D, παρά το γεγονός ότι υπάρχει συμφωνία στην πλήρωση των φρεατίων. Ένα δεύτερο συμπέρασμα είναι ότι το 1D/1D μοντέλο υπερεκτιμάει το ύψος του νερού στην επιφάνεια λόγω της αναπαράστασης των λιμνών ως φρεάτια. Για την βαθμονόμηση του μοντέλου κρίνεται απαραίτητη η κατάλληλη επιλογή της παραμέτρου βαθμονόμησης, της μεταβλητής δηλαδή που πρέπει να βελτιστοποιηθεί και των διαφορών στον τρόπο λειτουργίας των μονοδιάστατων από τα δισδιάστατα μοντέλα (π.χ. χρόνος τρεξίματος μοντέλου). Τέλος, προτείνεται το 1D/2D μοντέλο να βαθμονομείται βάσει ιστορικών γεγονότων πλημμύρας πριν την διαδικασία που αναλύεται στην εργασία, ούτως ώστε να επιτευχθεί μέγιστη αξιοπιστία στο βαθμονομημένο 1D/1D μοντέλο (Leandro et al. 2009).

## 3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

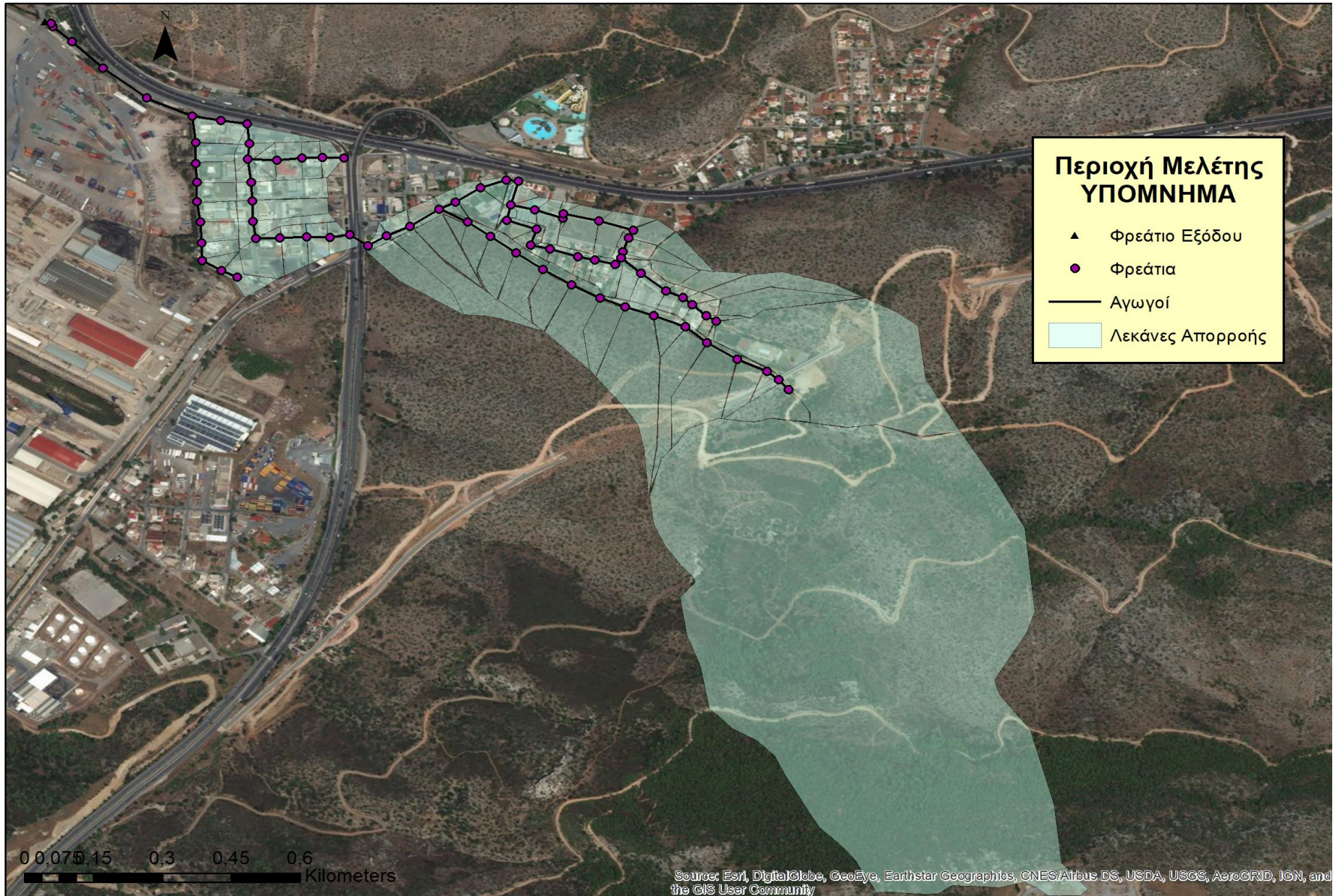
### 3.1 Εισαγωγή

Το Χαϊδάρι είναι δήμος του Δυτικού Τομέα Αθηνών. Από γεωγραφικής άποψης βρίσκεται κοντά στο όρος Αιγάλεω, νοτιοανατολικά της Ελευσίνας, νότια της Αττικής Οδού και δυτικά του Κηφισού ποταμού και της λεωφόρου Κηφισού.

Το ανατολικό τμήμα του Χαϊδαρίου ήταν κυρίως βοσκοτόπια, με την αστική ανάπτυξη όμως ανάμεσα στις δεκαετίες του '50 και του '80 η περιοχή έχει γίνει αστική. Το 1955 ο δήμος Χαϊδαρίου αριθμούσε 13.773 κατοίκους, ενώ με την απογραφή του 2011 το Χαϊδάρι αριθμεί 46.897 κατοίκους. Περιοχές στις οποίες χωρίζεται γεωγραφικά το Χαϊδάρι είναι: το κέντρο Χαϊδαρίου, η Αστυθέα, η Άνοιξη, το Δάσος, το Δαφνί και ο Σκαραμαγκάς. Την περιοχή του Χαϊδαρίου τη διασχίζει η Λεωφόρος Αθηνών (ή Καβάλας) μέχρι την περιοχή του Δαφνίου, η οποία από κει και ύστερα είναι συνέχεια της Ιεράς οδού που διασχίζει τον Σκαραμαγκά, τα Διυλιστήρια Ασπροπύργου και την παραλία και καταλήγει στην Ελευσίνα στο ύψος της Χαλυβουργικής από το οποίο αρχίζει η Εθνική Οδός Αθηνών - Κορίνθου.

### 3.2 Αφαία – Σκαραμαγκάς

Η υπό μελέτη περιοχή, που διακρίνεται στην Εικόνα 3.1, είναι ο οικισμός «Κάτω Αφαία - Σκαραμαγκάς» που ανήκει διοικητικά στον Δήμο Χαϊδαρίου. Ο Σκαραμαγκάς είναι κωμόπολη στα δυτικά της Αθήνας με πληθυσμό 2.606 κατοίκων (Απογραφή 2001) ενώ στην περιοχή υπάρχει ναυπηγείο. Εξυπηρετείται από δύο κύριες οδικές αρτηρίες, την λεωφόρο Αθηνών / εθνική οδό Αθηνών - Κορίνθου και την περιφερειακή λεωφόρο Σχιστού - Σκαραμαγκά η οποία ξεκινάει από το Κερατσίνι. Αποτελεί τμήμα της υδρολογικής υπολεκάνης του Χαϊδαρίου, η οποία έχει εμβαδόν 25,1 km<sup>2</sup>. Το δίκτυο της περιλαμβάνει 61 κλάδους πρώτης τάξης συνολικού μήκους 45,5 km, 16 κλάδους δεύτερης τάξης συνολικού μήκους 18,5 km, 6 κλάδους τρίτης τάξης συνολικού μήκους 16 km και 2 κλάδους τέταρτης τάξης συνολικού μήκους 4 km και είναι δενδριτικού τύπου.



Εικόνα 3.1: Η περιοχή μελέτης και το δίκτυο ομβρίων.

### 3.3 Κλίμα περιοχής

Το κλίμα της Αττικής μπορεί να χαρακτηριστεί μεσογειακό, με εξαίρεση τα υψηλά σημεία, όπου το κλίμα είναι ορεινό. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κυμαίνεται από 350 mm στο λεκανοπέδιο Αττικής μέχρι 1.000 mm στα ορεινά τμήματα (Πάρνηθα), ενώ οι ημέρες βροχής κυμαίνονται από 50 μέχρι 100 ετησίως και είναι συνήθως μεταξύ Οκτωβρίου και Απριλίου. Η χιονόπτωση είναι σπάνια στις παράκτιες περιοχές, ενώ αυξάνει σημαντικά στο εσωτερικό του. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 16°C μέχρι 18°C, ανάλογα με το υψόμετρο και την απόσταση από τη θάλασσα, ενώ το ετήσιο θερμομετρικό εύρος είναι περίπου 16°C.

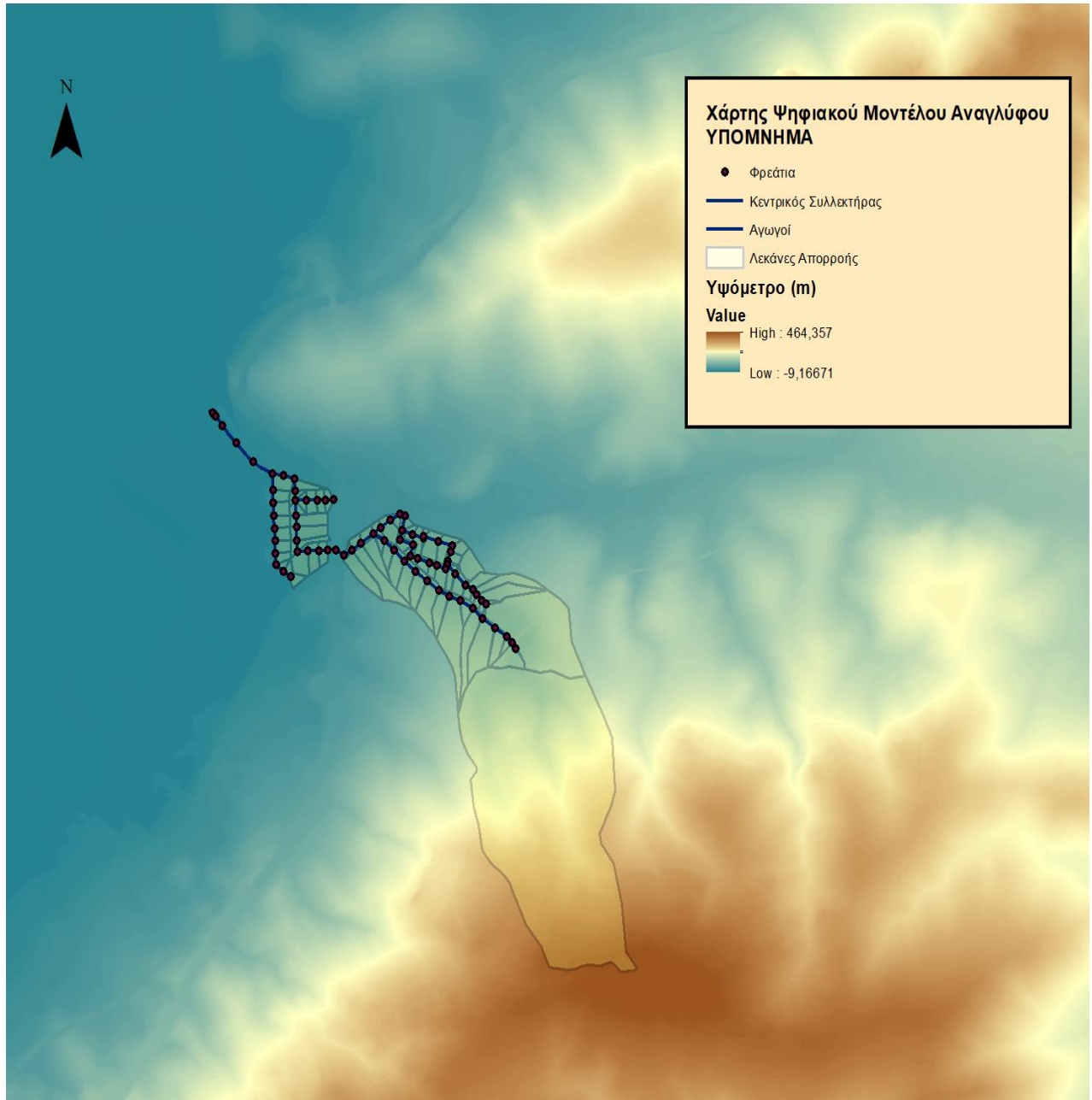
Ο Δήμος Χαϊδαρίου αντιμετωπίζει σημαντικό πρόβλημα με την αποχέτευση των ομβρίων υδάτων. Λόγω των κλίσεων των εδαφών, οι βροχοπτώσεις ακολουθούνται από πλημμυρικά φαινόμενα, ιδιαίτερα στις πεδινές περιοχές, οι οποίες δέχονται μεγάλους όγκους ομβρίων υδάτων από τις υψηλότερες περιοχές του Δήμου. Τα πλημμυρικά φαινόμενα παρατηρούνται κυρίως κατά μήκος και εκατέρωθεν της Λ. Αθηνών – Κορίνθου, ενώ η κατάσταση επιδεινώνεται από τον διαχρονικά ελλιπή σχεδιασμό για τη δημιουργία κεντρικού αγωγού αποχέτευσης όμβριων υδάτων.

### 3.4 Μορφολογία εδάφους

Η μορφολογία της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη:

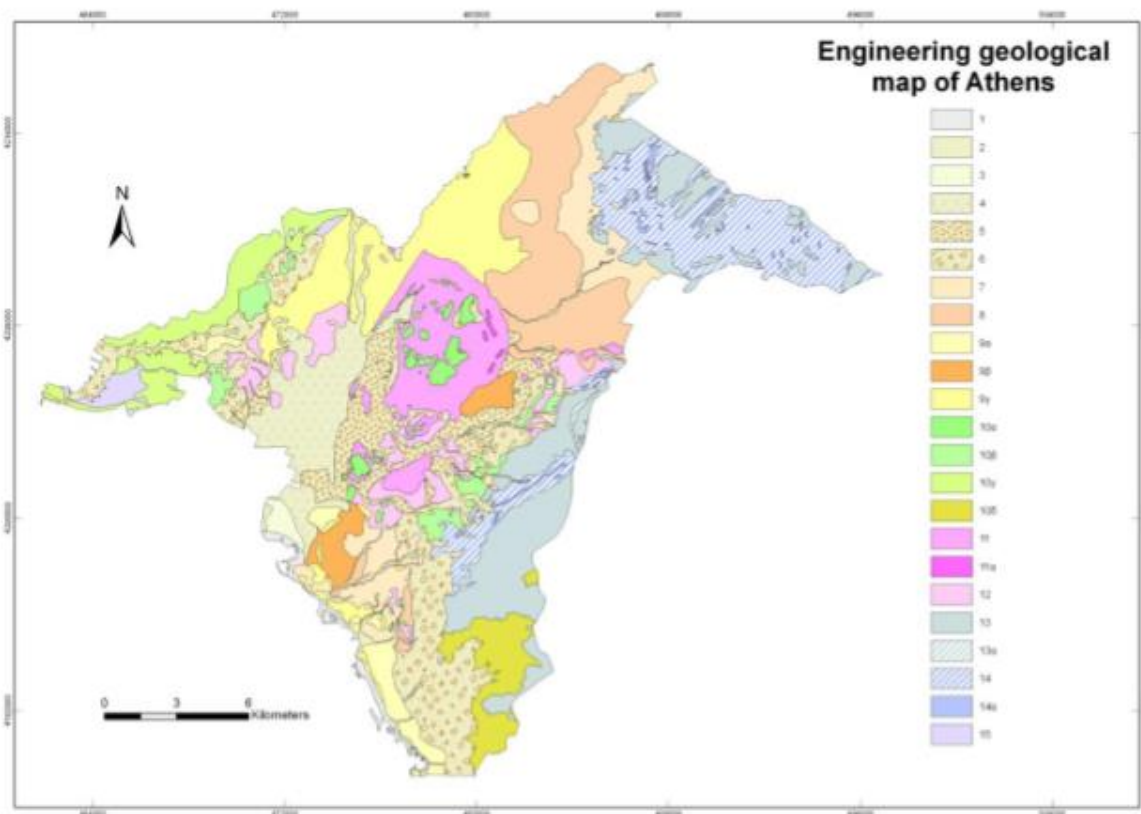
- χειμάρρου, με σημαντική λεκάνη (5,5 km<sup>2</sup>) του οποίου η κοίτη εκφυλίζεται αμέσως ανάντη του οικισμού της Κάτω Αφαίας, με αποτέλεσμα την κατάκλυση του τελευταίου από τη σχετική επιφανειακή απορροή,
- του Ναυπηγείου Σκαραμαγκά στα δυτικά της περιοχής, η οποία ανακόπτει τη συνέχεια τμήματος της επιφανειακής απορροής προς τη θάλασσα,
- της λεωφόρου Σχιστού, η χάραξη της οποίας αλλοίωσε το φυσικό ανάγλυφο και το «μοντέλο» ανάπτυξης της επιφανειακής απορροής των γειτονικών λεκανών
- της Εθνικής Οδού Αθηνών – Κορίνθου, η οποία σαφώς αλλοιώνει το αρχικό ρευματικό δίκτυο της περιοχής.

Από την Εικόνα 3.2 που παρουσιάζεται το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου είναι εμφανές ότι η περιοχή ενδιαφέροντος είναι κατά κύριο λόγο πεδινή με αρκετά χαμηλά υψόμετρα.



*Εικόνα 3.2: Χάρτης Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου*

### 3.5 Γεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής



Εικόνα 3.3: Γεωλογικός Χάρτης Νομαρχίας Αθηνών (πηγή: Πογιατζή κ.α. 2013)

Ο χάρτης που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.3 προέκυψε μετά τη χαρτογράφηση του Λεκανοπεδίου Αθηνών. Σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη λοιπόν η περιοχή μελέτης εδράζεται στις κατηγορίες 5 και 10<sup>α</sup>.

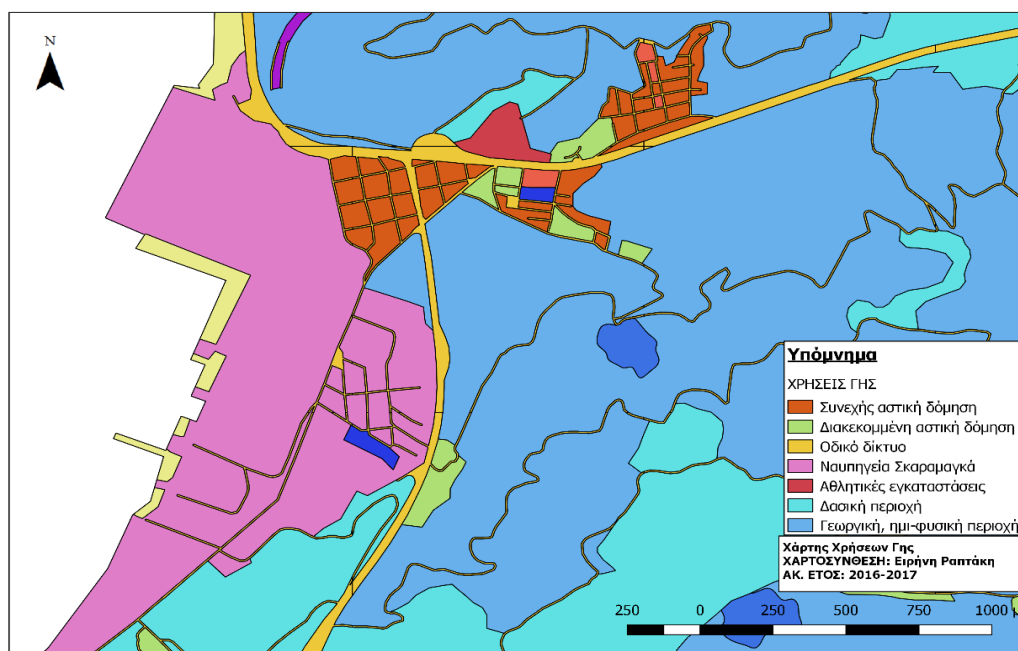
Η κατηγορία 5 πρόκειται για χαλαρές αποθέσεις μικτών φάσεων με επικράτηση κυρίως των αδρομερών. Επικρατούν οι αργιλώδεις άμμοι – αμμοάργιλοι (SC) καθώς και τα αργιλο – ιλυώδη χαλίκια (GC, GM, GC – GM) καστανού – καστανότεφρου χρώματος. Επίσης συμμετέχουν στιφρές, μέσης πλαστικότητας, αμμώδεις άργιλοι (CL) και αμμοϊλύες (SM-SC). Είναι ποταμοχερσαίες αποθέσεις, γενικά χαλαρές μέχρι μέτρια συνεκτικές που απαντώνται στην περιοχή ενδιαφέροντος. Μέγιστο πάχος 15 m περίπου. Τοπικά μεταβαίνουν, τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφα, στον προαναφερόμενο ορίζοντα των μικτών φάσεων με επικράτηση των λεπτομερών. Παρουσιάζουν αυξημένη υδροπερατότητα και αναπτύσσουν πτωχούς γενικά υδροφόους ορίζοντες, κυρίως στην επαφή τους με το υπόβαθρο. Οι μηχανικοί

χαρακτήρες του σχηματισμού μεταβάλλονται τοπικά και σαν έδαφος θεμελίωσης παρουσιάζει σχετικά καλή συμπεριφορά (Πογιατζή κ.α. 2013).

Η κατηγορία 10<sup>α</sup> αποτελείται από ασβεστόλιθους λευκότεφρους έως τεφρούς, μικροκρυσταλλικούς, κατά θέσεις κλαστικούς ή λατυποπαγείς, μέτριας σκληρότητας, πολύ χαμηλής αντοχής, χαμηλής παραμορφωσιμότητας. Το πάχος τους υπερβαίνει τα 100 m. Συνήθως είναι μέσο – παχυστρωματώδεις και κατά θέσεις άστρωτοι, τέμνονται από διαρρήξεις και τοπικά από πυκνό δίκτυο διακλάσεων. Παρουσιάζουν αυξημένη υδροπερατότητα (Πογιατζή κ.α. 2013).

### 3.6 Χρήσεις Γης

Η περιοχή του Σκαραμαγκά εμφανίζει μεταβολές στις χρήσεις γης συγκριτικά με παλαιότερα. Η παραθεριστική κατοικία που αναπτύχθηκε παλαιότερα, εκδιώχθηκε την δεκαετία του 1950 προς όφελος της βιομηχανίας – βιοτεχνίας και του χονδρεμπορίου για να εγκατασταθεί στη γειτονική περιοχή της Αφαίας. Η περιοχή μελέτης αποτελείται κατά κύριο λόγο από αστική δόμηση, ενώ στο ανατολικό τμήμα της συνορεύει με την περιοχή των Ναυπηγείων Σκαραμαγκά. Στην Εικόνα 3.4 απεικονίζονται οι χρήσεις γης για την περιοχή μελέτης όπως αυτές δημιουργήθηκαν σε περιβάλλον QGIS με τη βοήθεια του Corine Landcover.



Εικόνα 3.4: Χάρτης χρήσεων γης της περιοχής μελέτης.



### 3.7 Δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων

#### 3.7.1 Στοιχεία αγωγών

Το δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων στην περιοχή της Αφαίας αποτελείται από 75 αγωγούς, 53 εκ των οποίων είναι κυκλικοί και 22 κιβωτοειδείς. Οι κυκλικοί αγωγοί είναι κατασκευασμένοι από οπλισμένο σκυρόδεμα, ελάχιστης διαμέτρου 500 mm, της σειράς 150/Τοίχωμα Β, κατά τις προδιαγραφές του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., που αναφέρονται στην Υπουργική Απόφαση ΕΔ2α/Ο2/44/Φ1.1. (Φ.Ε.Κ. 253/24-04-84). Οι αγωγοί τοποθετούνται κατά μήκος του άξονα των οδών και το ελάχιστο ύψος επίχωσής τους από το κατάστρωμα της οδού είναι τουλάχιστον 1,00 m.

Οι αγωγοί εδράζονται σε βάση από σκυρόδεμα, ύψους αντίστοιχου της επίκεντρης γωνίας 120° και επιχώνονται με άμμο μέχρι ύψους 30 cm από το ανωρράχιο του αγωγού. Ακολουθεί επίχωση με επιλεγμένα προϊόντα εκσκαφών ή θραυστό αμμοχάλικο. Η απόσταση μεταξύ των παρειών του αγωγού και του σκάμματος τοποθέτησής του είναι 30 cm εκατέρωθεν του αγωγού.

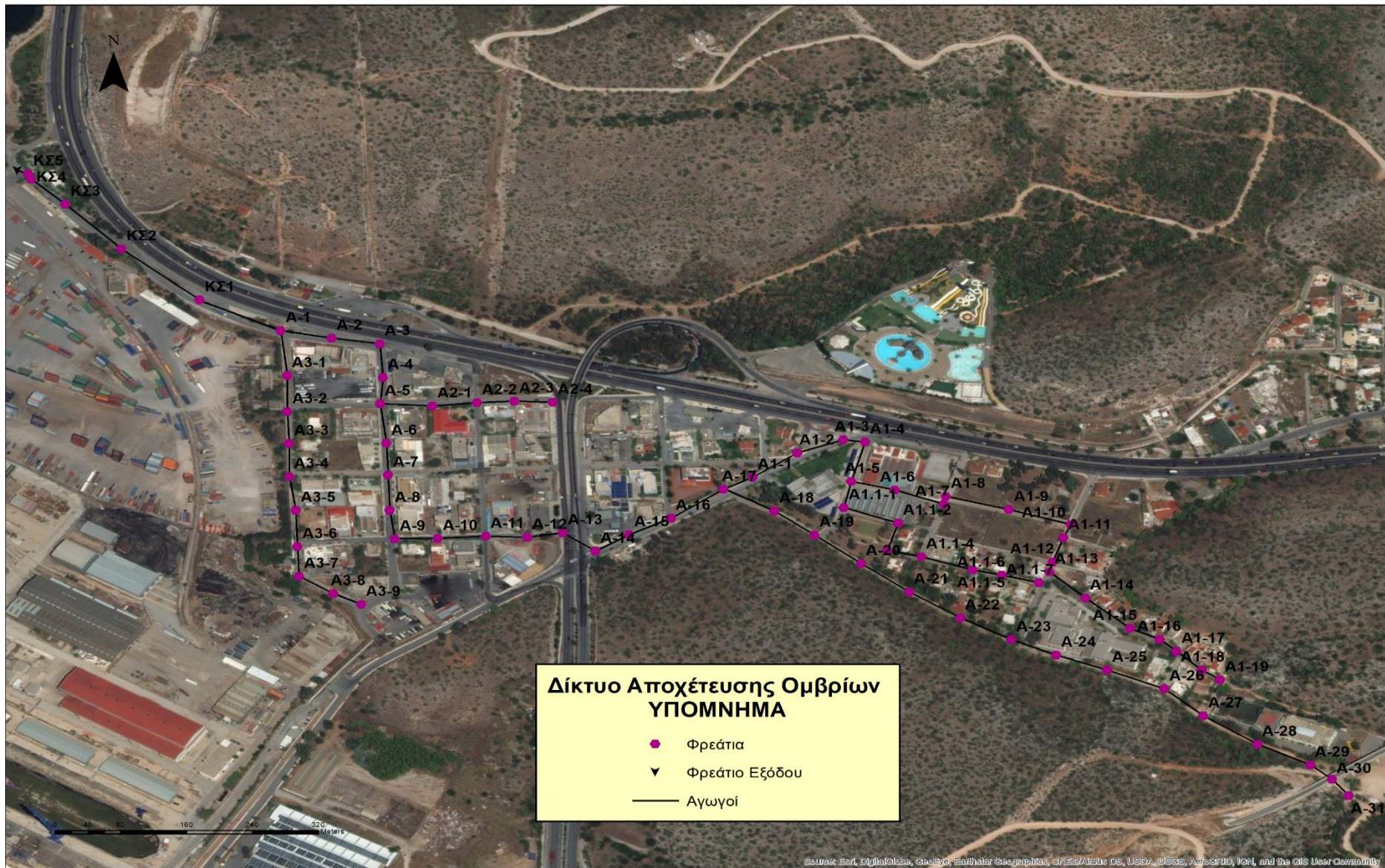
Οι κιβωτοειδείς οχετοί κατασκευάζονται επί τόπου του έργου με σκυροδέτηση από οπλισμένο σκυρόδεμα C20/25, πάνω σε εξομαλυντική στρώση από άοπλο σκυρόδεμα C12/15, μέσου πάχους 0,10 m. Η πλήρωση του σκάμματος του οχετού γίνεται όπως και για τους σωληνωτούς οχετούς. Σε περίπτωση επιφανειακής τοποθέτησης σε κυκλοφορούμενη επιφάνεια, προβλέπονται πλάκες πρόσβασης. Δημιουργούνται κατασκευαστικοί αρμοί με μέγιστη απόσταση 10 m, οι οποίοι πρέπει να στεγανοποιηθούν κατάλληλα, τόσο οι κατακόρυφοι, όσο και οι οριζόντιοι, για να εμποδιστεί η διαφυγή υδάτων από τον οχετό. Οι κατακόρυφες παρειές εξωτερικά, πρέπει να καλυφθούν με διπλή ασφαλτική επάλειψη, ενώ οι αρμοί διαμορφώνονται με υλικό τύπου Flexcell ή αναλόγου, πάχους 12 mm. Οι κατακόρυφοι αρμοί σφραγίζονται με υλικό σφράγισης τύπου Plastijoint ή αναλόγου, και οι οριζόντιοι αρμοί σφραγίζονται με υλικό σφράγισης τύπου Plastic 77 ή αναλόγου, ενώ η άνω πλάκα προς την πλευρά του επιχώματος μονώνεται με διπλό ασφαλτόπανο και τσιμεντοκονία (Φωτοπούλου 2016).

### 3.7.2 Στοιχεία φρεατίων

Το δίκτυο αποτελείται επίσης από 76 φρεάτια «επισκέψεως» και «πτώσεως». Τα φρεάτια επισκέψεως τοποθετούνται σε περιπτώσεις συμβολής ή αλλαγής διευθύνσεως ή αλλαγής κλίσεως μηκοτομής, απέχουν μέγιστη απόσταση μεταξύ τους 60 m. Για αγωγούς μέχρι  $D=1,20$  m τα φρεάτια επίσκεψης είναι συνδυασμένης μορφής, με προκατασκευασμένα τεμάχια από οπλισμένους τσιμεντοσωλήνες εσωτερικής διαμέτρου 1 m, και με τμήματα με επί τόπου του έργου σκυροδέτηση από σκυρόδεμα C20/25. Για αγωγούς μεγαλύτερων διαμέτρων και φρεάτια ειδικών περιπτώσεων (φρεάτια σε μικρά βάθη) κατασκευάζονται χυτά επί τόπου.

Τα φρεάτια πτώσεως είναι έγχυτα. Κάθετα στην εισερχόμενη εντός του φρεατίου ροή από τον αγωγό, διατάσσεται ένα τοιχείο – δοκός πρόσκρουσης, σε κατάλληλη απόσταση από το στόμιο εξόδου του αγωγού ίση με το ήμισυ του εσωτερικού πλάτους του φρεατίου. Η κινητική ενέργεια της ροής καταστρέφεται με την πρόσκρουση επί του εγκάρσιου τοιχείου και το νερό πέφτει κατακόρυφα στον κατάλληλα διαμορφωμένο πυθμένα του φρεατίου, όπου υπάρχει η αρχή του κατάντη αγωγού ομβρίων. Ο πυθμένας του φρεατίου διαμορφώνεται ως ημικύκλιο για την καθοδήγηση της ροής στον εισερχόμενο αγωγό. Κατάντη του χώρου καταστροφής ενέργειας και του τοιχείου πρόσκρουσης υπάρχει χώρος εντός του φρεατίου μήκους 1,50 m (κατά τη διεύθυνση της ροής), όπου είναι δυνατή η παραμονή και εργασία προσωπικού για τη συντήρηση του δικτύου, χωρίς να ενοχλείται από την καταστροφή της ενέργειας της ροής και την κατακόρυφη πτώση του νερού. Επιπλέον η ανοικτή αυτή διάταξη του φρεατίου πτώσεως επιτρέπει τις εργασίες συντήρησης και απόφραξης του φρεατίου και των αγωγών που συντρέχουν σε αυτό (Φωτοπούλου 2016).

Στην Εικόνα 3.5 παρουσιάζεται το δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων στην περιοχή της Αφαίας ενώ στους Πίνακες 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 και 3.5 που ακολουθούν αναγράφονται τα υδραυλικά χαρακτηριστικά (φρεάτιο αρχής και πέρατος του αγωγού, υψόμετρο πυθμένα και εδάφους κάθε φρεατίου, μήκος και κλίση του αγωγού) των αγωγών στην περιοχή μελέτης.



Εικόνα 3.5: Δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων στην περιοχή μελέτης.

Πίνακας 3.1: Υδραυλικά χαρακτηριστικά αγωγού Α (Περίοδος επαναφοράς 50 έτη)

ΦΡΕΑΤΙΑ		ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΕΔΑΦΟΥΣ(m)		ΜΗΚΟΣ (m)	ΚΛΙΣΗ ΑΓΩΓΟΥ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΠΥΘΜΕΝΑ(m)	
ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ	ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ			ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ
A-31	A-30	72.120	71.100	26.100	0.02107	68.680	68.130
A-30	A-29	71.100	68.800	30.435	0.02037	66.450	65.830
A-29	A-28	68.800	62.500	59.999	0.02033	60.750	59.530
A-28	A-27	62.500	56.800	62.125	0.02044	55.100	53.830
A-27	A-26	56.800	51.900	53.937	0.01984	50.000	48.930
A-26	A-25	51.900	51.500	59.999	0.01967	48.930	47.750
A-25	A-24	51.500	44.000	50.000	0.01940	42.000	41.030
A-24	A-23	44.000	43.500	47.815	0.01527	41.030	40.300
A-23	A-22	43.500	42.000	59.979	0.01917	40.180	39.030
A-22	A-21	42.000	38.000	59.990	0.01950	36.200	35.030
A-21	A-20	38.000	33.000	59.999	0.01867	31.150	30.030
A-20	A-19	33.000	29.000	59.173	0.01893	27.150	26.030
A-19	A-18	29.000	25.500	50.001	0.01840	23.450	22.530
A-18	A-17	25.500	24.040	58.070	0.01860	22.150	21.070
A-17	A-16	24.040	22.070	62.579	0.01835	21.070	19.922
A-16	A-15	22.070	21.000	45.999	0.01835	19.922	19.078
A-15	A-14	21.000	19.780	39.130	0.01835	19.078	18.360
A-14	A-13	19.780	19.400	37.350	0.00991	18.360	17.990
A-13	A-12	19.400	17.050	34.604	0.01792	14.970	14.350
A-12	A-11	17.050	16.010	39.206	0.01658	14.350	13.700
A-11	A-10	16.010	14.700	44.000	0.02273	13.700	12.700
A-10	A-9	14.700	13.610	45.000	0.01889	12.200	11.350
A-9	A-8	13.610	13.600	40.000	0.01750	11.350	10.650
A-8	A-7	13.600	13.550	49.721	0.01640	10.650	9.835
A-7	A-6	13.550	13.250	41.000	0.01640	9.835	9.162
A-6	A-5	13.250	12.900	51.399	0.01640	9.162	8.319
A-5	A-4	12.900	12.780	38.000	0.01640	8.319	7.696
A-4	A-3	12.780	12.600	42.809	0.01640	7.696	6.994
A-3	A-2	12.600	11.850	47.000	0.01640	6.994	6.223
A-2	A-1	11.850	10.900	47.768	0.01640	6.223	5.440

**Πίνακας 3.2:** Υδραυλικά χαρακτηριστικά αγωγού A1 (Περίοδος επαναφοράς 10 έτη)

ΦΡΕΑΤΙΑ		ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΕΔΑΦΟΥΣ(m)		ΜΗΚΟΣ (m)	ΚΛΙΣΗ ΑΓΩΓΟΥ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΠΥΘΜΕΝΑ(m)	
ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ	ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ			ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ
A1-19	A1-18	54.120	52.440	23.001	0.07304	52.330	50.650
A1-18	A1-17	52.440	49.800	32.950	0.06798	50.250	48.010
A1-17	A1-16	49.800	48.190	22.000	0.07318	48.010	46.400
A1-16	A1-15	48.190	45.400	35.000	0.06686	45.950	43.610
A1-15	A1-14	45.400	41.220	60.000	0.05950	42.900	39.330
A1-14	A1-13	41.220	38.240	48.965	0.06086	39.330	36.350
A1-13	A1-12	38.240	37.760	13.000	0.04231	36.350	35.800
A1-12	A1-11	37.760	36.400	36.000	0.04722	35.800	34.100
A1-11	A1-10	36.400	35.970	21.000	0.02714	34.000	33.430
A1-10	A1-9	35.970	32.830	59.999	0.04333	33.430	30.830
A1-9	A1-8	32.830	29.460	64.999	0.05339	30.830	27.360
A1-8	A1-7	29.460	29.600	7.000	0.03714	27.360	27.100
A1-7	A1-6	29.600	28.400	46.000	0.02150	27.100	26.111
A1-6	A1-5	28.400	27.420	47.000	0.02151	26.111	25.100
A1-5	A1-4	27.420	27.140	57.000	0.02632	25.000	23.500
A1-4	A1-3	27.140	26.520	26.000	0.01538	23.400	23.000
A1-3	A1-2	26.520	25.570	45.000	0.01000	23.000	22.550
A1-2	A1-1	25.570	24.450	50.000	0.01100	22.550	22.000
A1-1	A-17	24.450	24,040	37.421	0.01069	22.000	21.600

**Πίνακας 3.3:** Υδραυλικά χαρακτηριστικά αγωγού A2 (Περίοδος επαναφοράς 10 έτη)

ΦΡΕΑΤΙΑ		ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΕΔΑΦΟΥΣ(m)		ΜΗΚΟΣ (m)	ΚΛΙΣΗ ΑΓΩΓΟΥ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΠΥΘΜΕΝΑ(m)	
ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ	ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ			ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ
A2-4	A2-3	17.770	17.100	37.770	0.01774	16.290	15.540
A2-3	A2-2	17.100	16.420	36.146	0.01881	15.540	14.860
A2-2	A2-1	16.420	14.260	43.862	0.04925	14.860	12.700
A2-1	A-5	14.260	12.90	47.098	0.02888	12.700	11.340

**Πίνακας 3.4:** Υδραυλικά χαρακτηριστικά αγωγού Α1.1 (Περίοδος επαναφοράς 10 έτη)

ΦΡΕΑΤΙΑ		ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΕΔΑΦΟΥΣ(m)		ΜΗΚΟΣ (m)	ΚΛΙΣΗ ΑΓΩΓΟΥ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΠΥΘΜΕΝΑ(m)	
ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ	ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ			ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ
A1.1-7	A1.1-6	38.850	36.760	40.002	0.05225	37.290	35.200
A1.1-6	A1.1-5	36.760	35.200	29.999	0.05200	35.200	33.640
A1.1-5	A1.1-4	35.200	32.510	52.000	0.05173	33.640	30.950
A1.1-4	A1.1-3	32.510	30.890	33.000	0.04909	30.950	29.330
A1.1-3	A1.1-2	30.890	29.200	40.000	0.04225	29.330	27.640
A1.1-2	A1.1-1	29.200	27.600	57.247	0.02795	27.640	26.040
A1.1-1	A1-5	27.600	27.420	35.924	0.00807	26.040	25.750

**Πίνακας 3.5:** Υδραυλικά χαρακτηριστικά αγωγού Α3 (Περίοδος επαναφοράς 10 έτη)

ΦΡΕΑΤΙΑ		ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΕΔΑΦΟΥΣ(m)		ΜΗΚΟΣ (m)	ΚΛΙΣΗ ΑΓΩΓΟΥ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΠΥΘΜΕΝΑ(m)	
ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ	ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ			ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ
A3-9	A3-8	10.950	10.600	33.952	0.01031	9.390	9.040
A3-8	A3-7	10.600	10.200	40.337	0.00992	9.040	8.640
A3-7	A3-6	10.200	10.630	41.884	0.00439	8.640	8.456
A3-6	A3-5	10.630	10.790	46.972	0.00439	8.456	8.250
A3-5	A3-4	10.790	10.960	43.870	0.00365	8.150	7.990
A3-4	A3-3	10.960	10.500	46.098	0.00282	7.890	7.760
A3-3	A3-2	10.500	10.170	45.979	0.00283	7.760	7.630
A3-2	A3-1	10.170	10.450	46.036	0.00391	7.630	7.450
A3-1	A-1	10.450	10.90	58.211	0.00533	7.450	7.140

## 4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται διεξοδικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το στήσιμο του υδρολογικού και υδραυλικού μοντέλου της περιοχής μελέτης αρχικά σε περιβάλλον ArcMap και έπειτα στο λογισμικό Mike Urban. Για την ολοκληρωμένη προσομοίωση της πλημμύρας στην αστική λεκάνη απορροής της περιοχής Αφαίας – Σκαραμαγκά κατασκευάστηκαν 5 υετογράμματα σχεδιασμού σύμφωνα με την όμβρια καμπύλη των Κουτσογιάννη – Μπαλούτσου (1999) για την περιοχή της Αττικής, ούτως ώστε να καλύπτεται ένα ευρύ φάσμα συνδυασμών περιόδου επαναφοράς και διάρκειας βροχόπτωσης.

### 4.2 Αναλυτική Περιγραφή

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση του δικτύου αποχέτευσης ομβρίων της περιοχής Αφαία – Σκαραμαγκά, σύμφωνα με πιθανές εκτιμήσεις βροχόπτωσης. Το δίκτυο της περιοχής μελετήθηκε και σχεδιάστηκε το 2016 από ομάδα μηχανικών με επικεφαλής την Αγρονόμο – Τοπογράφο Μηχανικό Λ. Φωτοπούλου έπειτα από έντονα πλημμυρικά φαινόμενα στην περιοχή εξαιτίας των ραγδαίων βροχοπτώσεων που εκδηλώθηκαν την 22<sup>α</sup> Οκτωβρίου 2015. Χρησιμοποιήθηκε η Ορθολογική Μέθοδο, όπου και ελήφθη:

- Μέγιστη (πλημμυρική) παροχή Q από την σχέση 2.1
- Χρόνος συγκέντρωσης σύμφωνα με τις σχετικές διατάξεις του Π.Δ. 696/74, δηλαδή:

$$T_c = t_e + t_p = t_e + \sum \frac{L_i}{v_i}, \quad (4.1)$$

όπου :  $T_c$ , ο χρόνος συγκεντρώσεως,

$t_e$ , ο χρόνος εισόδου, στο δίκτυο, όπου αξιωματικά υιοθετείται ίσος με 10',

$t_p$ , ο χρόνος ροής στο ανάντη τμήμα του αγωγού ίσος με  $\sum \frac{L_i}{v_i}$ ,

όπου :

$L_i$ , το μήκος του αγωγού  $i$  ανάντη και

$V_i$ , η ταχύτητα στον αγωγό  $i$ .

- Συντελεστής Απορροής  $C=0,60$  για τις περιοχές εντός του οικιστικού χώρου, ενώ για τις λοιπές ψηλότερες, εκτός του σχεδίου πόλης, επίσης  $C = 0,60$  (στις οικιστικές περιοχές, η κάλυψη με οδοστρώματα – σκυροδέματα είναι μεγαλύτερη, ενώ στις μη οικιστικές η κλίση παίρνει μεγαλύτερες τιμές) για τους εξής λόγους:

α) λόγω του έντονου αναγλύφου,

β) λόγω της περιορισμένης σε έκταση βλάστησης,

γ) λόγω της παρουσίας φυτικής γης στην εξωτερική ως προς τον οικισμό επιφάνεια των λεκανών,

δ) λόγω του γεγονότος ότι οι αγωγοί σχεδιάζονται για τιμή της περιόδου επαναφοράς  $T = 10$  έτη για το εσωτερικό δίκτυο και  $T = 50$  έτη για τους συλλεκτήρες ομβρίων.

ε) λόγω του γεγονότος της παρουσίας των αδιαπέρατων επιφανειών οδοστρωμάτων και σκυροδεμάτων.

- Όμβρια Καμπύλη των Κουτσογιάννη-Μπαλούτσου (1999) που έχει καταρτιστεί για το Λεκανοπέδιο Αττικής με βάση τα δεδομένα των βροχομετρικών σταθμών Λόφου Νυμφών (περιοχή Αστεροσκοπείου) και Ελληνικού (περιοχή παλαιού αεροδρομίου Αθήνας). Η γενικευμένη εξίσωση όμβριας καμπύλης των Κουτσογιάννη –Μπαλούτσου είναι η ακόλουθη :

$$i = \frac{40,60 * (T^{0,185} - 0,45)}{(t + 0,189)^{0,796}} \quad (4.2)$$

όπου :  $i$ , η ένταση της βροχόπτωσης σε mm/h,

$T$ , η περίοδος επαναφοράς σε έτη και

$t$ , ο χρόνος συγκεντρώσεως σε h.



Η εξίσωση για περίοδο επαναφοράς ίση με  $T = 10$  έτη μπορεί να γραφεί με τη μορφή :

$$i = \frac{43,89}{(t + 0,189)^{0,796}} \quad (4.3)$$

ενώ για περίοδο επαναφοράς ίση με  $T = 50$  έτη μπορεί να γραφεί με τη μορφή :

$$i = \frac{65,45}{(t+0,189)^{0,796}} \quad (4.4)$$

όπου :  $i$ , η κρίσιμη ένταση σε mm/h και

$t$ , η διάρκεια της κρίσιμης βροχής, ίση με το χρόνο συγκεντρώσεως της λεκάνης.

- Η τιμή της περιόδου επαναφοράς επελέγη  $T=10$  έτη, σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές του Π.Δ. 696/74 και  $T=50$  έτη για τους συλλεκτήρες ομβρίων. Έτσι, για τον αγωγό Α επελέγη  $T=50$  έτη και για τους υπόλοιπους αγωγούς  $T=10$  έτη.

#### 4.2.1 Πορεία εργασιών

Για την προσομοίωση πλημμύρας και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητες ορισμένες εργασίες. Συνοπτικά, η πορεία που ακολουθήθηκε είναι:

- i. Εισαγωγή του σχεδίου της περιοχής στο λογισμικό ArcGis και γεωαναφορά αυτού.
- ii. Δημιουργία Βάσης Δεδομένων και ψηφιοποίηση των εξής στοιχείων:
  - Οικοδομικά τετράγωνα
  - Δρόμοι
  - Φρεάτια
  - Αγωγοί
  - Λεκάνες απορροής
- iii. Εισαγωγή της Βάσης Δεδομένων στο λογισμικό Mike Urban και ψηφιοποίηση των στοιχείων με τα αντίστοιχα του περιβάλλοντος MOUSE.

- iv. Καταχώρηση πληροφοριών στα ψηφιοποιημένα στοιχεία σύμφωνα με την μελέτη.
- v. Σύνδεση των λεκανών απορροής στους αντίστοιχους κόμβους που εκβάλουν σύμφωνα με την υπάρχουσα μελέτη.
- vi. Δημιουργία υετογραμμάτων για περιόδους επαναφοράς (T) 5, 10, 50 και 100 έτη και για διάρκειες βροχόπτωσης (t) 1, 2 και 12 ώρες με χρονικό βήμα 5 λεπτών, με την μέθοδο των εναλλασσόμενων υψών βροχής και εισαγωγή της βροχής στο λογισμικό Mike Urban.
- vii. Συμπλήρωση του Ψηφιακού Μοντέλου Αναγλύφου (DEM) της περιοχής ψηφιοποιώντας τα οικοδομικά τετράγωνα πάνω σε αυτό.
- viii. Καθορισμός του μοντέλου διήθησης (SCS) και εισαγωγή των απαραίτητων παραμέτρων.
- ix. Καθορισμός των παραμέτρων προσομοίωσης και του μοντέλου προσομοίωσης.
- x. 1D υδρολογική προσομοίωση (Runoff) για κάθε συνδυασμό περιόδου επαναφοράς και χρονικής διάρκειας βροχόπτωσης.
- xi. 1D υδραυλική προσομοίωση (Network) για κάθε συνδυασμό περιόδου επαναφοράς και χρονικής διάρκειας βροχόπτωσης.
- xii. 2D προσομοίωση πλημμύρας για κάθε συνδυασμό περιόδου επαναφοράς και χρονικής διάρκειας βροχόπτωσης.
- xiii. Εξαγωγή αποτελεσμάτων.
- xiv. Επανακαθορισμός παραμέτρων για την ανάλυση ευαισθησίας.
- xv. Προσομοίωση του συστήματος και εξαγωγή αποτελεσμάτων.
- xvi. Επεξεργασία των αποτελεσμάτων.
- xvii. Αναζήτηση και απόδοση τρόπων αντιμετώπισης πλημμυρικών φαινομένων.

#### 4.2.2 Ψηφιοποίηση και ψηφιακή αναπαράσταση δικτύου

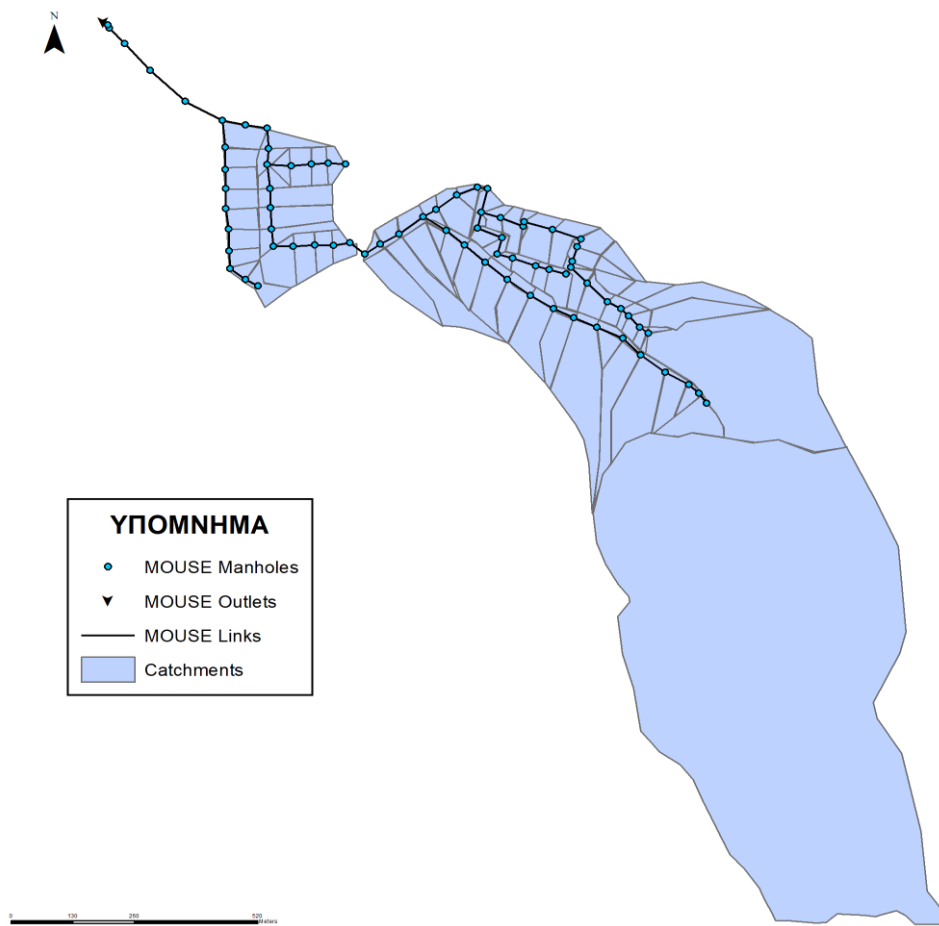
Τα στοιχεία του δικτύου, που είχαμε στη διάθεσή μας, ήταν σε μορφή Autocad, γεγονός που τα έχρηζε ψηφιοποίησης σε περιβάλλον ArcGis ούτως ώστε να ψηφιοποιηθούν μετέπειτα στο περιβάλλον του Mike Urban. Η ψηφιοποίηση του δικτύου σε κλίμακα 1:5000 πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού ArcMap. Τα στοιχεία τα οποία ψηφιοποιήθηκαν ήταν:

- Δρόμοι
- Οικοδομικά Τετράγωνα
- Φρεάτια
- Αγωγοί
- Λεκάνες Απορροής

Κατόπιν, τα στοιχεία που αναφέρθηκαν εισήχθησαν στο Mike Urban, όπου και πραγματοποιήθηκε εκ νέου ψηφιοποίηση τους. Εκτός από την ψηφιοποίηση εισήχθησαν στο λογισμικό Mike Urban, για την καλύτερη αναπαράσταση και διαχείρισή τους τα εξής στοιχεία:

- Οικοδομικά τετράγωνα: Υψόμετρο κτιρίων. Θεωρήθηκε ίσο με 50 m.
- Φρεάτια: Ονομασία φρεατίων, Υψόμετρο στέψης, Υψόμετρο πυθμένα.
- Αγωγοί: Ονομασία αγωγών, Φρεάτιο αρχής, Φρεάτιο πέρατος, Είδος αγωγού, Διάμετρος/Υψόμετρο αγωγού, Μήκος, Κλίση.
- Λεκάνες απορροής: Ονομασία λεκάνης, Εμβαδό λεκάνης, Φρεάτιο εκβολής της λεκάνης απορροής.

Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται το δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων στην περιοχή της Αφαιάς, όπως αυτό προέκυψε μετά την ψηφιοποίηση.



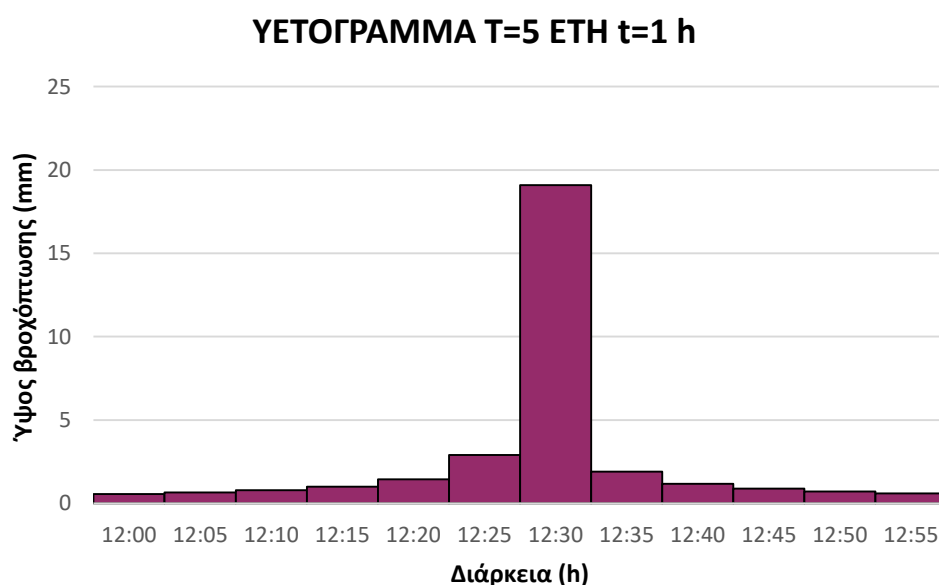
*Εικόνα 4.1: Ψηφιακή αναπαράσταση του δικτύου σε περιβάλλον MOUSE του Mike Urban, DHI.*

#### 4.2.3 Κατάρτιση υετογραμμάτων

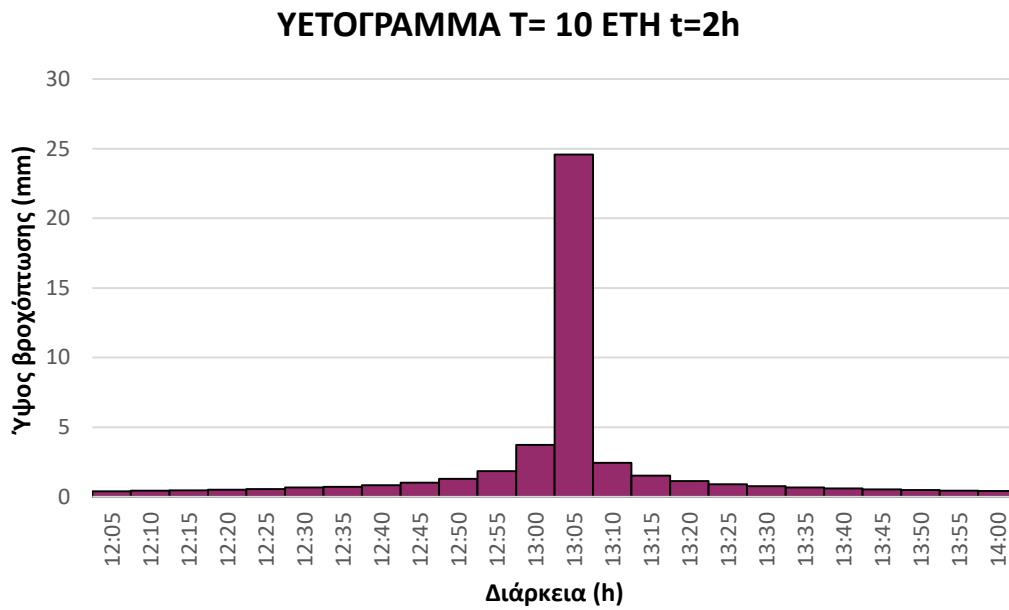
Λόγω αδυναμίας εύρεσης πραγματικού γεγονότος βροχόπτωσης η προσομοίωση του δικτύου έγινε με συνθετικές βροχές. Για την κατασκευή των βροχοπτώσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ (Alternating Block Method). Η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι άλλων συνήθων μεθόδων της πράξης. Πρώτο, βασίζεται αποκλειστικά σε δεδομένα που έχουν μετρηθεί στην περιοχή μελέτης (όμβριες καμπύλες) και όχι σε διαγράμματα της βιβλιογραφίας. Δεύτερο, οδηγεί σε ένα μοναδικό υετογράφημα σχεδιασμού χωρίς να απαιτεί καμία πρόσθετη παραδοχή. Τρίτο, έχει δείχτει μέσω σύγκρισης με πληρέστερα στοχαστικά μοντέλα (Κουτσογιάννης 1994) ότι τα αποτελέσματά της είναι σαφώς πιο εύλογα και συνεπή, σε σχέση με αυτά άλλων μεθόδων.

Η βασική παραδοχή της μεθόδου είναι ότι σε κάθε επιμέρους διάρκεια το ύψος βροχής έχει την ίδια περίοδο επαναφοράς με το τελικό (συνολικό) ύψος βροχής. Βεβαίως, η παραδοχή αυτή δεν είναι ρεαλιστική, γεγονός που αποτελεί και το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου. Το υετογράφημα προκύπτει με της εξής μεθοδολογία: Αρχικά γίνεται ο υπολογισμός των τμηματικών υψών των επιμέρους διαρκειών από τις όμβριες καμπύλες. Στη συνέχεια τα τμηματικά ύψη διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να προκύψει ένα ρεαλιστικό και ταυτόχρονα δυσμενές υετογράφημα. Αναλυτικά, το μέγιστο διατάχθηκε στο μέσο της επιλεγμένης συνολικής διάρκειας και τα υπόλοιπα σε φθίνουσα σειρά εναλλακτικά εκατέρωθεν του μεγίστου (Ευστρατιάδης κ.α 2012).

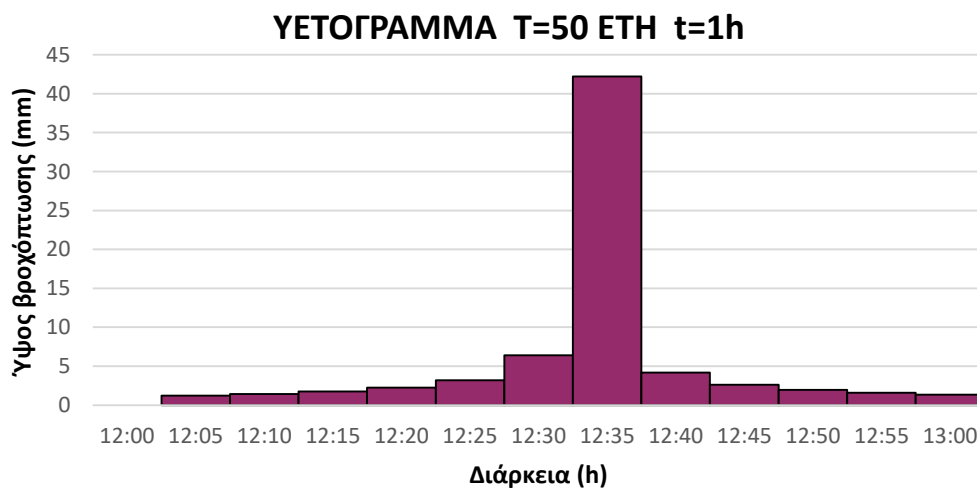
Για την πληρέστερη προσομοίωση του δικτύου ομβρίων σχεδιάστηκαν υετογράμματα για περιόδους επαναφοράς  $T= 5, 10, 50$  και  $100$  ετών και χρονικής διάρκειας  $t= 1, 2$  και  $12$  ωρών. Ακολουθούν ενδεικτικά τα υετογράμματα σχεδιασμού για  $T=5$  έτη και  $t=1$  ώρα,  $T=10$  έτη και  $t=2$  ώρες,  $T=50$  έτη και  $t=1$  ώρα,  $T=50$  έτη και  $t=12$  ώρες και  $T=100$  έτη και  $t= 1$  ώρα, ενώ συνολικά τα υετογραφήματα σχεδιασμού παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α:



**Εικόνα 4.2:** Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς  $T=5$  έτη και χρονική διάρκεια  $t=1$  ώρα.

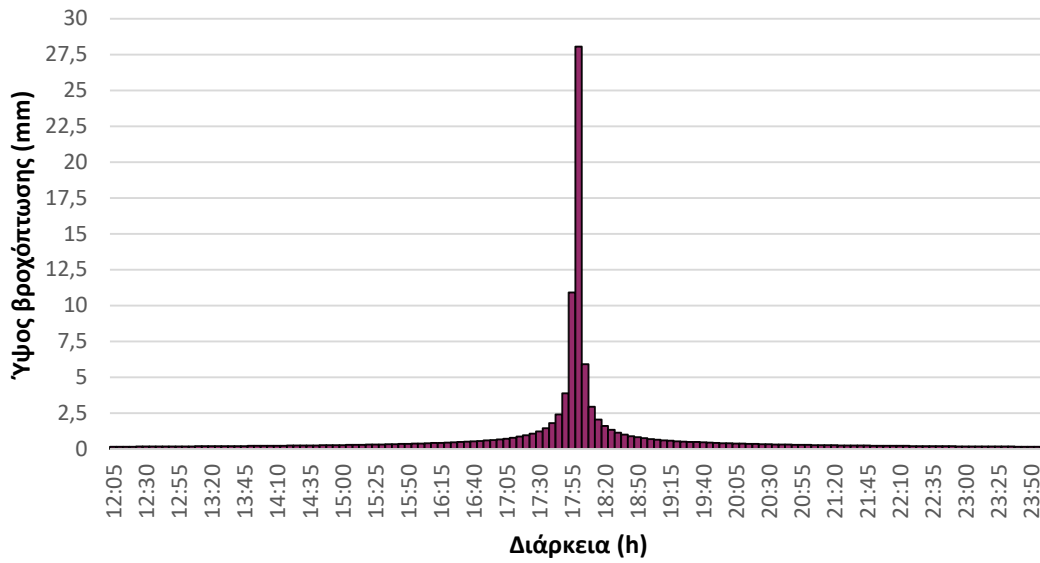


Εικόνα 4.3: Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς T=10 έτη και χρονική διάρκεια t=2 ώρες.



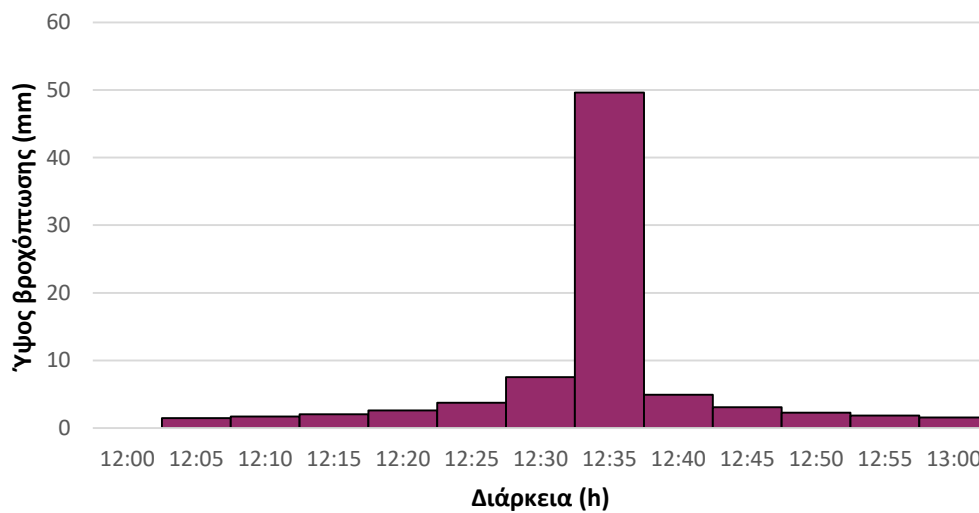
Εικόνα 4.4: Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς T=50 έτη και χρονική διάρκεια t=1 ώρα.

### ΥΕΤΟΓΡΑΜΜΑ T=50 ΕΤΗ t=12 h



Εικόνα 4.5: Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς T=50 έτη και χρονική διάρκεια t=12 ώρες.

### ΥΕΤΟΓΡΑΜΜΑ T=100 ΕΤΗ t=1h



Εικόνα 4.6: Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς T=100 έτη και χρονική διάρκεια t=1 ώρα.

#### 4.2.4 Καθορισμός του μοντέλου διήθησης (SCS) και εισαγωγή των απαραίτητων παραμέτρων.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, η προσομοίωση πλημμύρας στην περιοχή της Αφαιάς επιλέχθηκε να γίνει με την μέθοδο του μοναδιαίου υδρογραφήματος της SCS. Κρίθηκαν απαραίτητα ο υπολογισμός και η εισαγωγή ορισμένων βασικών παραμέτρων για κάθε λεκάνη απορροής στο λογισμικό MOUSE. Αυτές είναι:

- Ο υπολογισμός του εμβαδού κάθε λεκάνης απορροής.
- Η μετατροπή του εμβαδού αυτού σε στρέμματα.
- Ο υπολογισμός του υδραυλικού μήκους της λεκάνης (flow length) σύμφωνα με την σχέση (SCS 2015):

$$L=209*A^{0.6} \quad (4.5)$$

Όπου:

- $L$ : το υδραυλικό μήκος της λεκάνης (ft)
- $A$ : το εμβαδό της λεκάνης (acres).
- Ο υπολογισμός της κλίσης κάθε λεκάνης απορροής.

Η κλίση κάθε υπολεκάνης υπολογίστηκε σε περιβάλλον ArcMap με την βοήθεια του DEM της περιοχής απομονώνοντας κάθε φορά την εκάστοτε υπολεκάνη και με την εντολή «slope» εξαγόταν η μέση κλίση της.

- Ο αριθμός καμπύλης – απορροής (Curve Number).

Λόγω αδυναμίας εύρεσης υδρογεωλογικών πληροφοριών για την περιοχή της Αττικής ο αριθμός CN χρησιμοποιήθηκε προσεγγιστικά βάσει του Πίνακα 2.4 και χωρίζοντας την περιοχή ενδιαφέροντος σε 3 κατηγορίες. Το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης είναι αστικό και αποτελείται από κατοικίες, χώρους πάρκινγκ και στέγες. Σύμφωνα με τον Πίνακα 2.4 ο CN για οικιστικές περιοχές είναι 90, για χώρους πάρκινγκ και στέγες 98, για αστικές συνθήκες και περιοχές με μεγάλη κάλυψη πρασίνου ισούται με 39, ενώ για μικρή κάλυψη πρασίνου είναι ίσος με 86. Έτσι επιλέχθηκε για:



- Αστικές λεκάνες απορροής: CN=95
  - Φυσικές λεκάνες απορροής: CN=40
  - Ημι-αστικές λεκάνες απορροής: CN=85
- Ο υπολογισμός του χρόνου υστέρησης (lag time)

Για τον υπολογισμό του χρόνου υστέρησης χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση 2.18.

- Ο υπολογισμός του αδιαπερατού ποσοστού της λεκάνης απορροής.

Το ποσοστό της αδιαπερατότητας κάθε υπολεκάνης υπολογίστηκε σε περιβάλλον Google Earth. Μετρήθηκε το εμβαδό της αδιαπέρατης επιφάνειας (κτίσματα, δρόμοι, πεζοδρόμια) και έγινε αναγωγή στο επί τοις εκατό ποσοστό του συνολικού εμβαδού κάθε υπολεκάνης.

- Καθορισμός του συντελεστή Manning στους αγωγούς.

Ο συντελεστής Manning εκφράζει τις αντιστάσεις των τριβών, οι οποίες οφείλονται στην τραχύτητα της βρεχόμενης περιμέτρου. Σε κανονικές μορφές της υδάτινης διατομής ο συντελεστής λαμβάνεται σταθερός, ανεξάρτητος δηλαδή της παροχής και της ταχύτητας κατά μήκος του αγωγού. Έτσι, ανάλογα με το υλικό κατασκευής των αγωγών ο συντελεστής Manning παίρνει τις ακόλουθες τιμές (Δερμίσσης 2010) :

- Πλαστικοί αγωγοί:  $n = 0,011$
- Αργιλοπυριτικοί αγωγοί:  $n = 0,013$
- Αγωγοί από σκυρόδεμα:  $n = 0,013$

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.7.1 οι αγωγοί της περιοχής μελέτης είναι κυκλικής και κιβωτοειδούς διατομής κατασκευασμένοι από οπλισμένο σκυρόδεμα με ελάχιστη διάμετρο  $D=500$  mm. Έτσι, σύμφωνα με τον Πίνακα 2.3 επιλέχθηκε ο συντελεστής Manning στους αγωγούς να είναι σταθερός και ίσος με 0,013.

- Καθορισμός του συντελεστή Manning στην επιφάνεια του εδάφους.

Η τυπική τιμή του συντελεστή Manning στην επιφάνεια του εδάφους που επιλέχθηκε είναι αυτή που χρησιμοποιείται κατά κόρον στις μελέτες, δηλαδή 0,03. Παρόλα αυτά έχει βρεθεί ότι οι πραγματικές τιμές είναι αρκετά μεγαλύτερες, καθώς μέσα στις τιμές αυτές ενσωματώνονται και οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβής (Christelis et al. 2016).



## 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι χάρτες των αποτελεσμάτων για γεγονότα βροχόπτωσης με περίοδο επαναφοράς (T) 5, 10, 50 και 100 έτη και χρονική διάρκεια (t) 1,2 και 12 ώρες. Ο σχεδιασμός των χαρτών πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον ArcGis. Η πορεία των εργασιών που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση τους είναι η εξής:

1. Εισαγωγή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στο περιβάλλον Mike Urban.
2. Layout των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον ArcGis.
3. Μετατροπή του συστήματος αναφοράς των αποτελεσμάτων από GRS87 σε WGS84, προκειμένου να επιτευχθεί συνύπαρξη του συστήματος αναφοράς των αποτελεσμάτων με το χαρτογραφικό υπόβαθρο του περιβάλλοντος ArcMap.
4. Εισαγωγή του χαρτογραφικού υπόβαθρου «Basemap».
5. Σχεδιασμός του χάρτη με την προσθήκη της πυξίδας, της κλίμακας και του υπομνήματος.

### 5.1 Περίοδος επαναφοράς T=5 έτη

#### 5.1.1 T=5 έτη και διάρκεια βροχόπτωσης t=1 ώρα

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3 το δίκτυο είναι διαστασιολογημένο για γεγονότα βροχόπτωσης με περίοδο επαναφοράς 50 έτη για τον Κεντρικό Συλλεκτήρα και τον αγωγό A, και 10 έτη για τους υπόλοιπους αγωγούς. Είναι, λοιπόν, εμφανές στην Εικόνα 5.1 ότι για ένα γεγονός βροχόπτωσης περιόδου επαναφοράς 5 ετών και διάρκειας 1 ώρας δεν υπάρχει πλήρωση των φρεατίων.

#### 5.1.2 T=5 έτη και διάρκεια βροχόπτωσης t=2 ώρες

Στην Εικόνα 5.2 είναι εμφανές ότι για ένα γεγονός βροχής χρονικής διάρκειας 2 ωρών και περιόδου επαναφοράς 5 ετών το φρεάτιο A-8 έχει πλημμυρίσει και παρουσιάζεται ροή στην επιφάνεια με μέγιστο ύψος τα 0,25 μέτρα. Το γεγονός αυτό οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στην ύπαρξη ενός «βυθίσματος» γύρω από την περιοχή του φρεατίου A-8, καθώς στο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους φαίνεται σημαντική διαφορά στο υψόμετρο της περιοχής της τάξης των 0,6 m.

### 5.1.3 T=5 έτη και διάρκεια βροχόπτωσης t=12 ώρες.

Στην Εικόνα 5.3 παρατηρείται ότι για μια βροχόπτωση σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 5 ετών και συνολικής διάρκειας 12 ωρών το νερό που ρέει από το φρεάτιο A-31 στην νοτιανατολική πλευρά της περιοχής μελέτης έχει φτάσει τα 2 μέτρα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ύπαρξη «βυθίσματος» στην περιοχή. Βάσει του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους η διαφορά στο υψόμετρο στα γειτονικά κελιά είναι 13m. Το γεγονός αυτό αιτιολογεί την ύπαρξη νερού στην επιφάνεια του εδάφους, δεν αποτελεί όμως πρόβλημα για την περιοχή καθώς το νερό ρέει προς τα κατάντη και δεν συσσωρεύεται.



Εικόνα 5.1: Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για T=5 έτη και t=1h.



Εικόνα 5.2: Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για  $T=5$  έτη και  $t=2h$ .



Εικόνα 5.3: Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για  $T=5$  έτη και  $t=12h$ .

## 5.2 Περίοδος επαναφοράς $T=10$ έτη

### 5.2.1 $T=10$ έτη και διάρκεια βροχόπτωσης $t=1$ ώρα

Στην Εικόνα 5.4 φαίνεται ότι για ένα γεγονός βροχόπτωσης διάρκειας 1 ώρας και περιόδου επαναφοράς 10 ετών ο αγωγός A έχει ξεπεράσει την παροχτευτικότητα του και τα φρεάτια A-7 και A-8 πλημμυρίζουν. Αντίθετα, οι υπόλοιποι αγωγοί του δικτύου (A1,A2,A3,A1.1) που είναι σχεδιασμένοι για βροχοπτώσεις με περιόδους επαναφοράς τα 10 έτη, είναι επαρκείς και παροχτεύουν το σύνολο της απορροής χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα πλημμυρισμού των κόμβων.

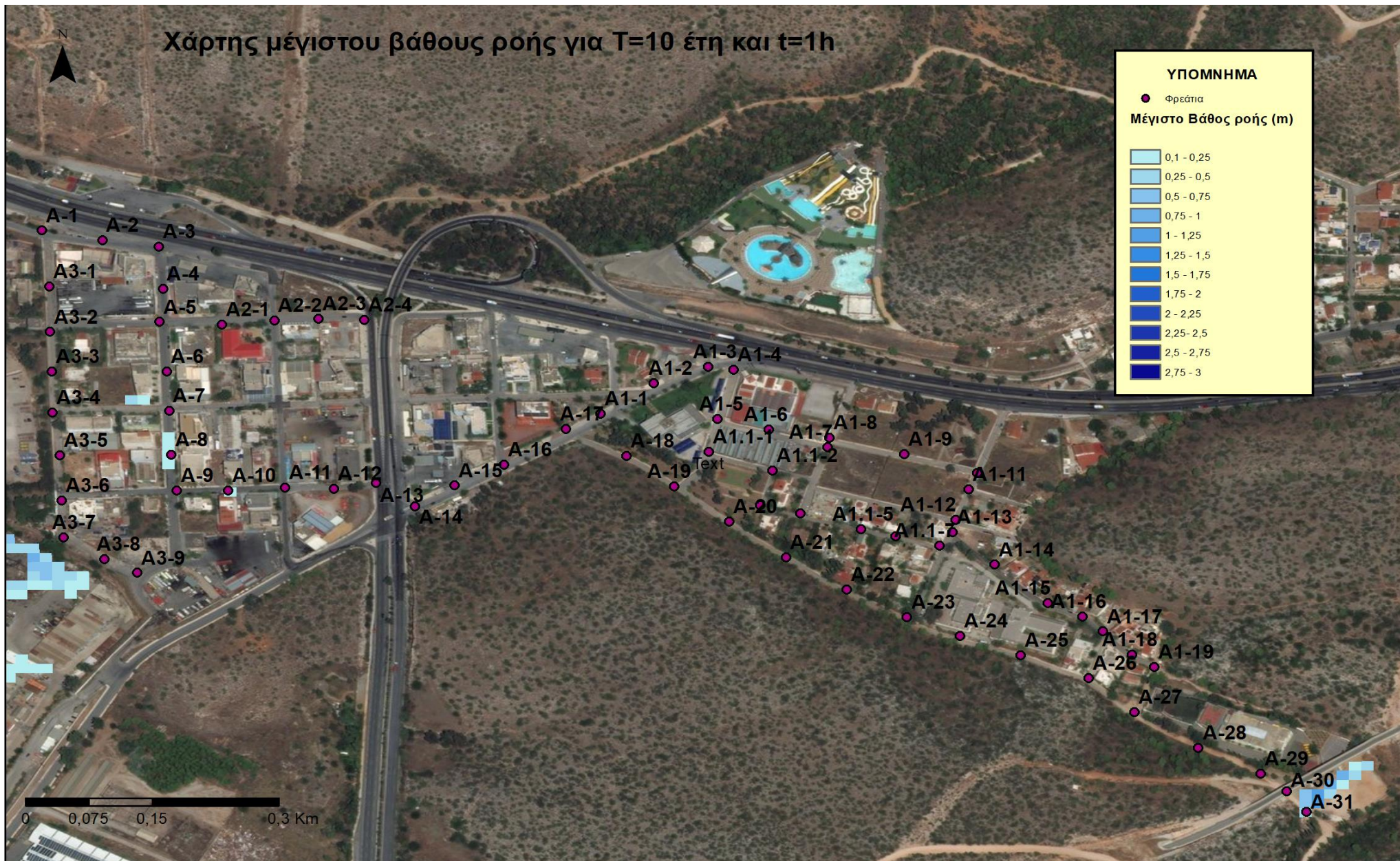
### 5.2.2 $T=10$ έτη και διάρκεια βροχόπτωσης $t=2$ ώρες

Στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζεται για ένα γεγονός βροχόπτωσης περιόδου επαναφοράς 10 ετών και χρονικής διάρκειας 2 ωρών το νερό που ρέει στην επιφάνεια λόγω πλήρωσης των φρεατίων. Αν και ο αγωγός A είναι διαστασιολογημένος για βροχοπτώσεις με περίοδο επαναφοράς 50 έτη, φαίνεται ότι δύο φρεάτια του (A-7 και A-8) είναι πλήρη σε μία βροχόπτωση με περίοδο επαναφοράς 10 έτη και διάρκειας 2 ωρών. Αντίστοιχα, και ο αγωγός A1 είναι υποδιαστασιολογημένος, καθώς από τα φρεάτια A1-19 και A1-18 εξέρχεται νερό στην επιφάνεια του εδάφους.

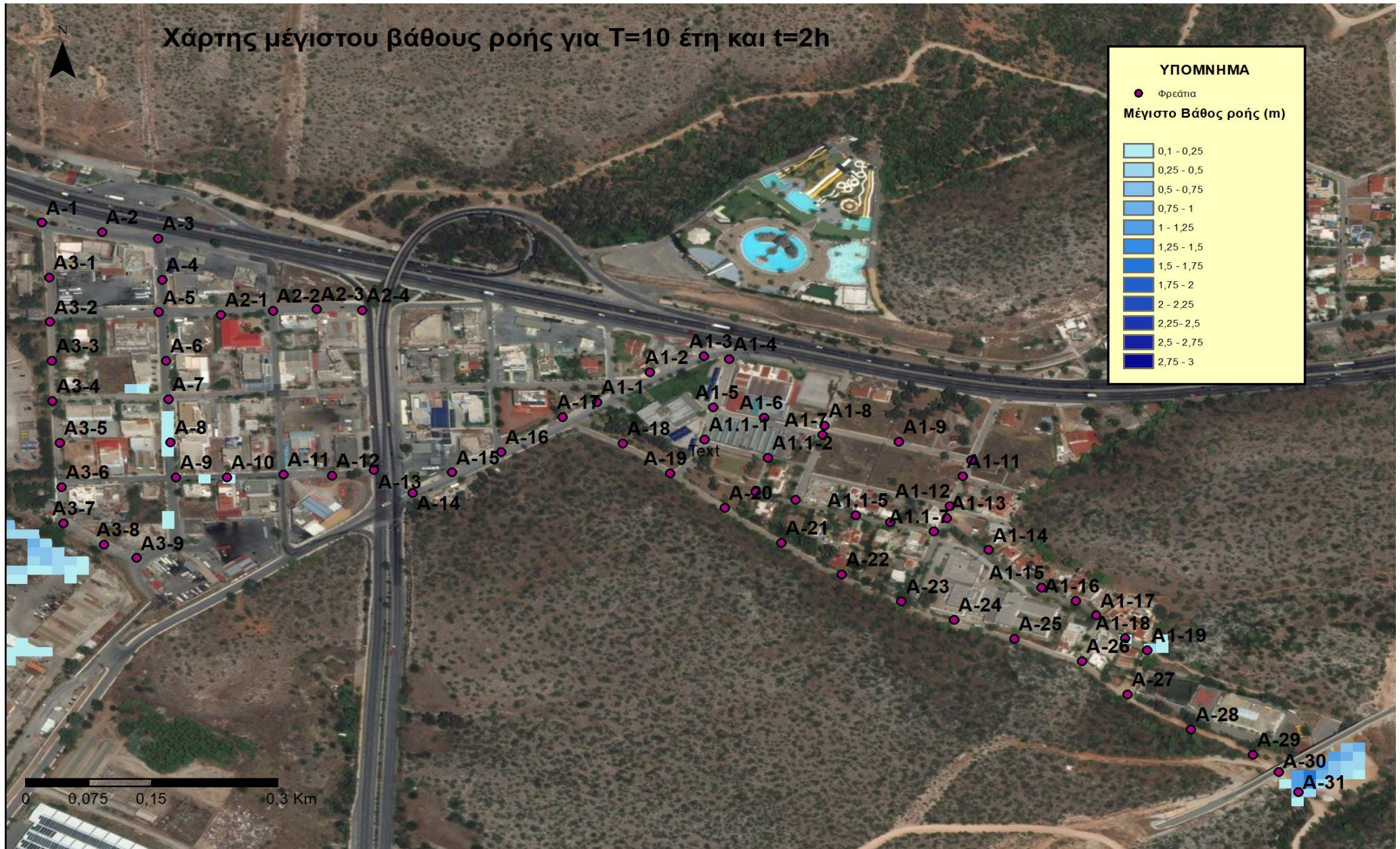
### 5.2.3 $T=10$ έτη και διάρκεια βροχόπτωσης $t=12$ ώρες

Στην Εικόνα 5.6 για μια βροχόπτωση σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 10 ετών και χρονικής διάρκειας 12 ωρών κρίνεται σαφές ότι ο αγωγός A1 είναι υποδιαστασιολογημένος καθώς το φρεάτιο A1-19 έχει πλημμυρίσει και διοχετεύει νερό στην επιφάνεια σε ύψος 0,5 m. Είναι επίσης φανερό ότι έχει διοχετευτεί νερό στην επιφάνεια γύρω από το φρεάτιο A-31, γεγονός που όπως αναφέρθηκε οφείλεται στην μεγάλη υψομετρική διαφορά που παρατηρείται στην περιοχή.





Εικόνα 5.4: Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για  $T=10$  έτη και  $t=1h$ .



Εικόνα 5.5: Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για  $T=10$  έτη και  $t=2h$ .



Εικόνα 5.6: Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για  $T=10$  έτη και  $t=12h$ .

### 5.3 Περίοδος επαναφοράς $T=50$ έτη

#### 5.3.1 $T=50$ έτη και διάρκεια βροχόπτωσης $t=1$ ώρα

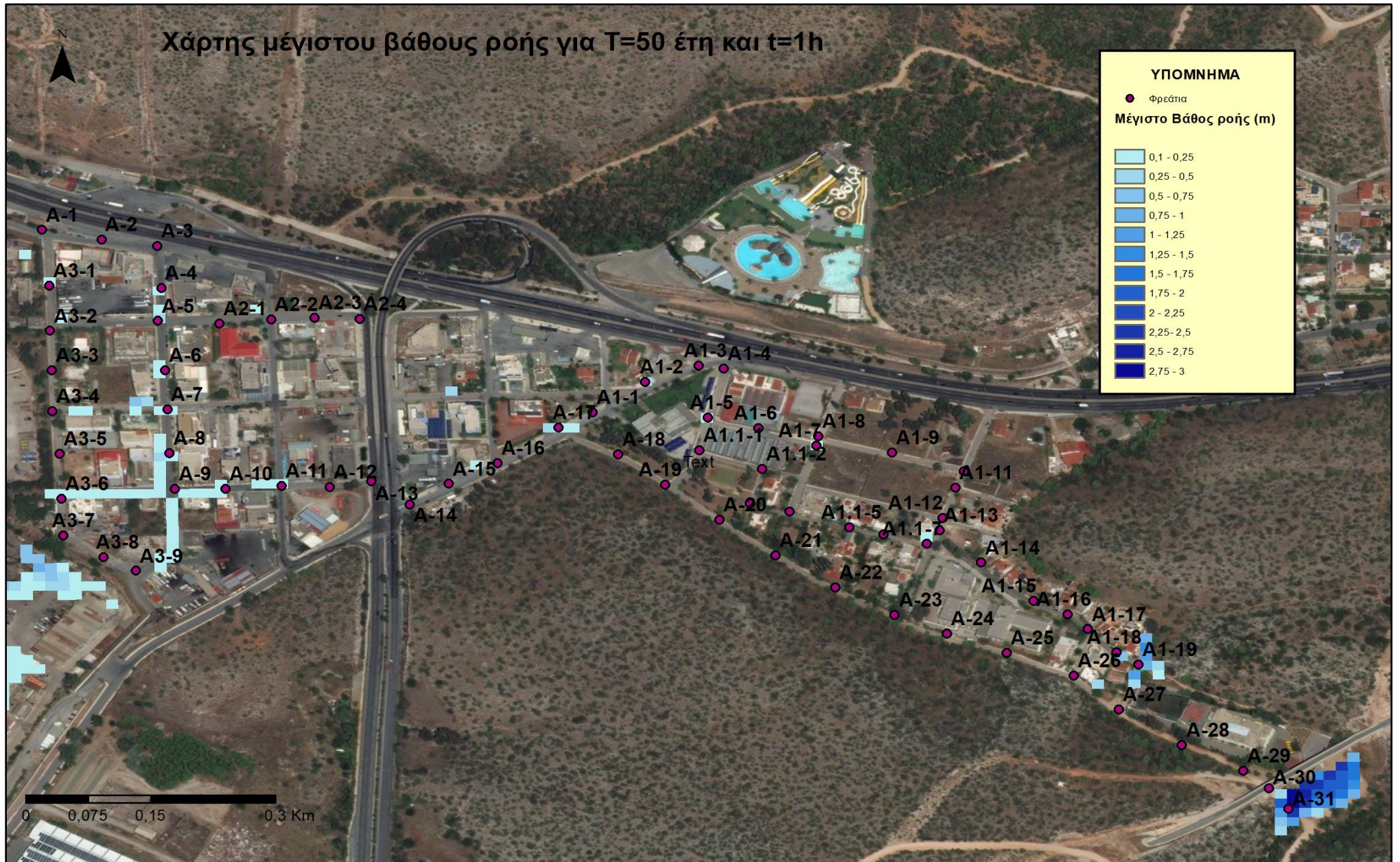
Όπως σημειώθηκε στο κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας ο αγωγός A είναι διαστασιολογημένος για να παροχετεύει την απορροή που προκύπτει από βροχοπτώσεις με περίοδο επαναφοράς τα 50 έτη. Στην Εικόνα 5.7 είναι φανερό ότι για μια βροχή χρονικής διάρκειας 1 ώρας και περιόδου επαναφοράς 50 ετών το δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων είναι υποδιαστασιολογημένο, καθώς ο αγωγός A έχει ξεπεράσει την παροχετευτικότητά του, τα φρεάτια πλημμυρίζουν και το νερό ρέει στην επιφάνεια. Ακόμη είναι εμφανές πως το νερό στην επιφάνεια του εδάφους που προέρχεται από το φρεάτιο A1-19 φτάνει το 1,5 μέτρο, γεγονός ικανό να προκαλέσει πολλές υλικές ζημιές στην περιοχή.

#### 5.3.2 $T=50$ έτη και διάρκεια βροχόπτωσης $t=2$ ώρες

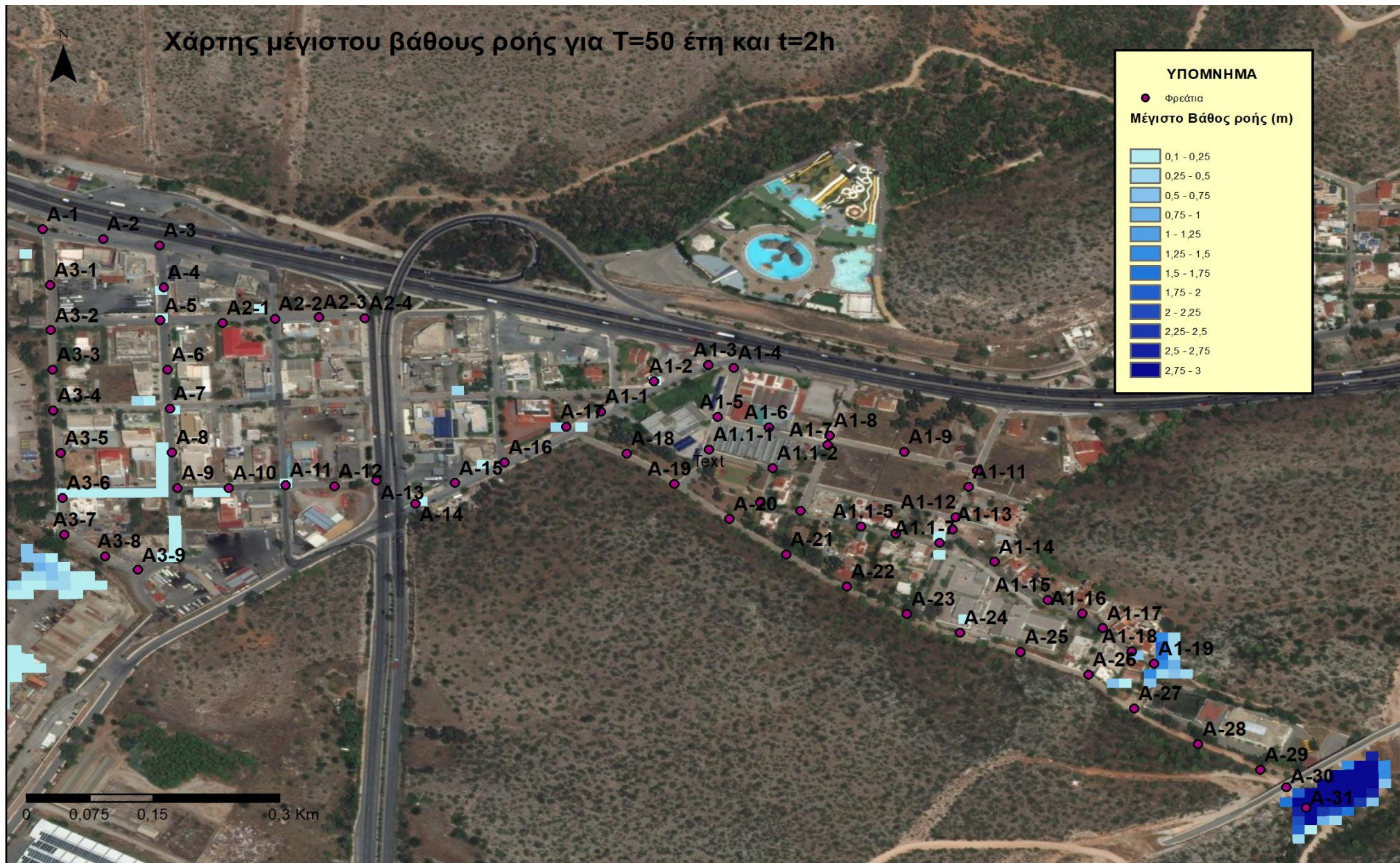
Και στην περίπτωση μιας βροχόπτωσης σχεδιασμού με περίοδο επαναφοράς τα 50 έτη και χρονική διάρκεια 2 ώρες, όπως είναι λογικό, οι αγωγοί του δικτύου ομβρίων δεν είναι επαρκείς, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται φαινόμενα πλημμύρας. Τα συνοπτικά αποτελέσματα από την προσομοίωση του δικτύου παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.8, ενώ όπως γίνεται αντιληπτό εκρέει νερό στην επιφάνεια και από το φρεάτιο A-31.

#### 5.3.3 $T=50$ έτη και διάρκεια βροχόπτωσης $t=12$ ώρες

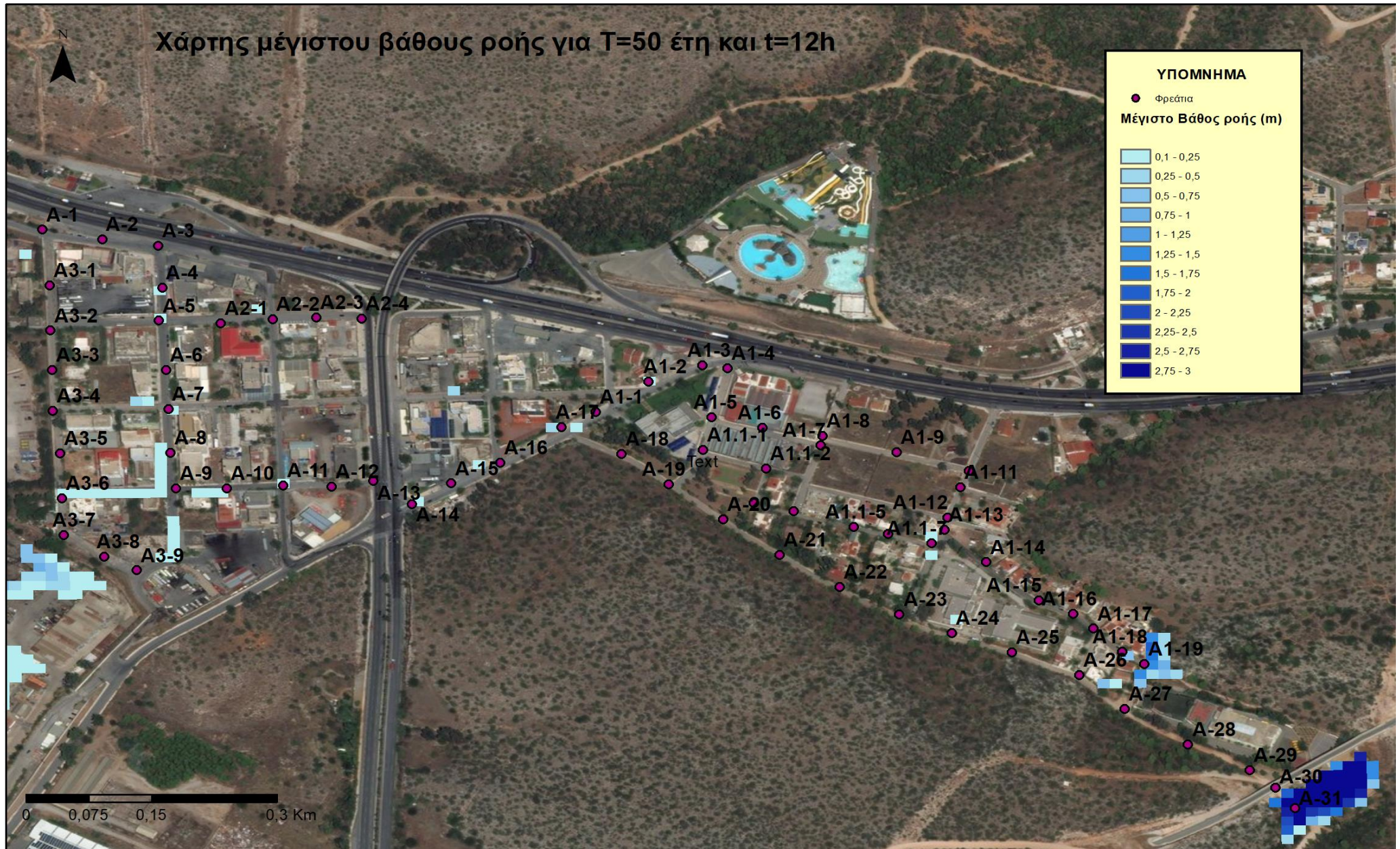
Κατά την προσομοίωση του αποχετευτικού δικτύου ομβρίων για βροχόπτωση σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 ετών και χρονικής διάρκειας 12 ωρών διαπιστώθηκε, όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 5.9 πως ένα σημαντικό μέρος των αγωγών πληρώνεται και τα φρεάτια A-4, A-5, A-7, A-10, A-11, A-14, A-17 του αγωγού A, καθώς και τα A3-6, A1.1-7, A1-18 και A1-19 πλημμυρίζουν με αποτέλεσμα την εκροή νερού στην επιφάνεια. Αξιοσημείωτη είναι η ροή που προέρχεται από το φρεάτιο A-19, καθώς φτάνει τα 2 μέτρα σε αστική περιοχή. Αυτό αποτελεί γεγονός που εγκυμονεί πολλούς κινδύνους για τους κατοίκους της περιοχής και συνεπώς απαιτείται καλύτερος σχεδιασμός των αγωγών του δικτύου.



Εικόνα 5.7: Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για  $T=50$  έτη και  $t=1h$ .



Εικόνα 5.8: Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για  $T=50$  έτη και  $t=2h$ .



Εικόνα 5.9: Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για  $T=50$  έτη και  $t=12h$ .

## 5.4 Περίοδος επαναφοράς $T=100$ έτη

### 5.4.1 $T=100$ έτη και διάρκεια βροχόπτωσης $t=1$ ώρα

Η προσομοίωση του δικτύου αποχέτευσης ομβρίων με το λογισμικό Mike Urban για βροχή σχεδιασμού 1 ώρα και περιόδου επαναφοράς 100 ετών έδωσε τα αποτελέσματα που φαίνονται στην Εικόνα 5.10. Καθώς οι αγωγοί του δικτύου, πλην του αγωγού A που είναι διαστασιολογημένος για βροχοπτώσεις με περίοδο επαναφοράς 50 έτη, είναι διαστασιολογημένοι για γεγονότα βροχής με περίοδο επαναφοράς τα 10 έτη, είναι λογικό τα φρεάτια να πλημμυρίζουν και να διοχετεύουν νερό στην επιφάνεια του εδάφους. Είναι εμφανές ότι η πλειοψηφία των φρεατίων πλημμυρίζει και το νερό που εξέρχεται από αυτά, ρέει ελεύθερο στην επιφάνεια του εδάφους και φτάνει σε ύψος τα 50 εκατοστά.

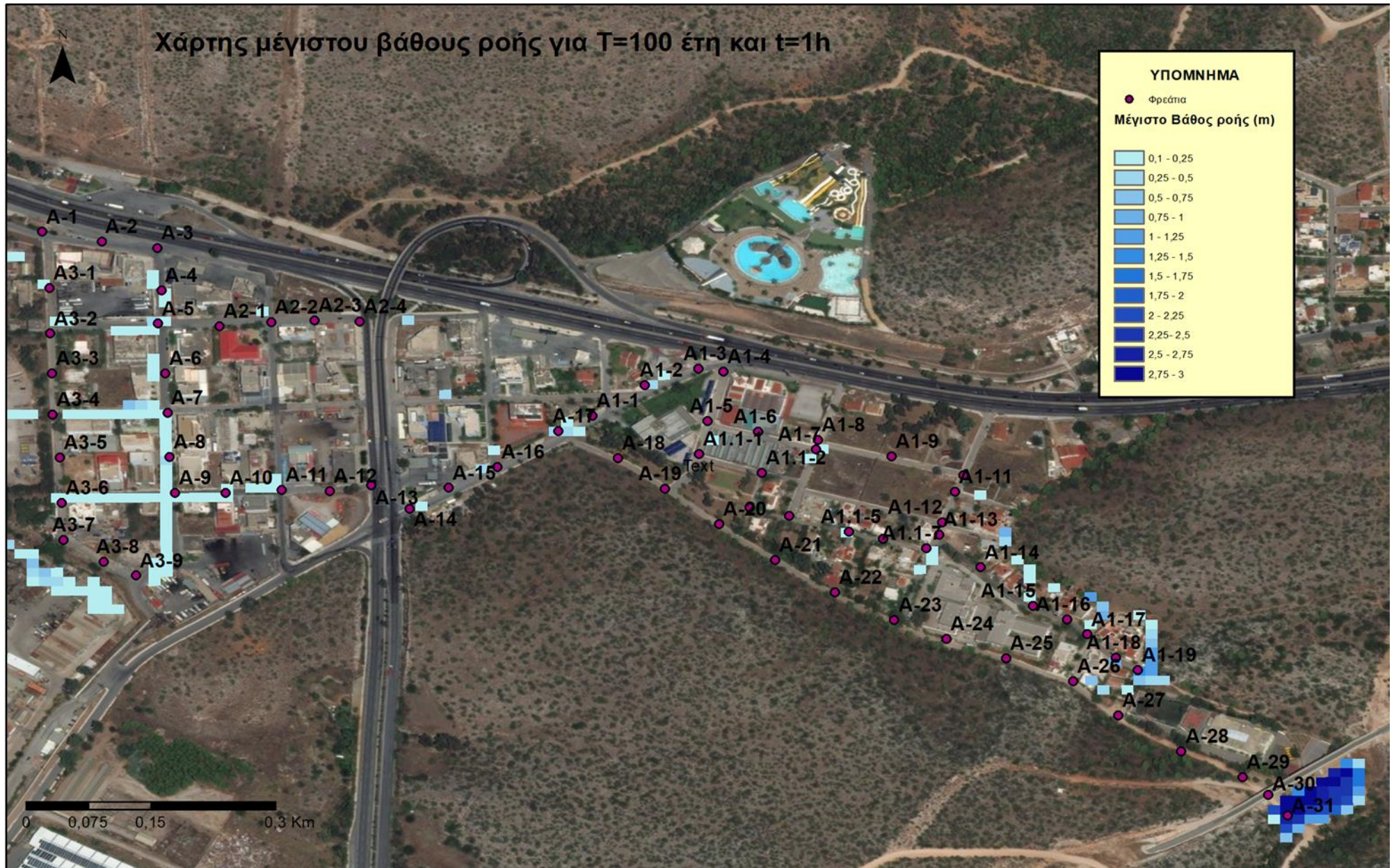
### 5.4.2 $T=100$ έτη και διάρκεια βροχόπτωσης $t=2$ ώρες

Το δίκτυο, στην περίπτωση ενός γεγονότος βροχής χρονικής διάρκειας 2 ωρών και περιόδου επαναφοράς 100 ετών, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, κρίνεται ανεπαρκές να αποχετεύσει το σύνολο της απορροής με αποτέλεσμα να δημιουργούνται φαινόμενα πλημμυρισμού των κόμβων. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.11 το νερό που προέρχεται από τα φρεάτια A-4, A-5, A-6, A-7, A-8 και A-9 ρέει στην οδό Ποσειδώνος σε ύψος 0,5 μέτρα λόγω πλήρωσης όλων των προαναφερθέντων φρεατίων.

### 5.4.3 $T=100$ έτη και διάρκεια βροχόπτωσης $t=12$ ώρες

Και στην περίπτωση μιας βροχόπτωσης σχεδιασμού με περίοδο επαναφοράς τα 100 έτη και χρονική διάρκεια 12 ώρες οι αγωγοί αποχέτευσης ομβρίων, όπως και προηγουμένως, δεν είναι επαρκείς με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται φαινόμενα πλημμύρας. Όπως είναι λογικό, περισσότεροι κόμβοι του δικτύου πληρώνονται και πλημμυρίζουν σε σχέση με την βροχόπτωση διάρκειας 2 ωρών και ίδιας περιόδου επαναφοράς. Στην Εικόνα 5.12 είναι εμφανής η ύπαρξη επιφανειακής απορροής σχεδόν από όλους του κόμβους του δικτύου. Ένα τέτοιο γεγονός βροχόπτωσης μπορεί να οδηγήσει σε ανεκδιήγητες καταστροφές για τον οικισμό της Αφαίας.





Εικόνα 5.10: Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για  $T=100$  έτη και  $t=1h$ .



Εικόνα 5.11: Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για  $T=100$  έτη και  $t=2h$ .



Εικόνα 5.12: Χάρτης μέγιστου βάθους ροής για  $T=100$  έτη και  $t=12h$ .

## 5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης του αγωγού A με το λογισμικό Mike Urban και την Ορθολογική Μέθοδο

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζεται η παροχή αιχμής για τον αγωγό A του δικτύου αποχέτευσης ομβρίων στην περιοχή της Αφαίας, όπως αυτή προέκυψε από την επίλυση του δικτύου με την Ορθολογική Μέθοδο και όπως αυτή προέκυψε από την προσομοίωση του δικτύου με το λογισμικό Mike Urban για μια βροχόπτωση σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 ετών και χρονικής διάρκειας 1 ώρας.

*Πίνακας 5.1: Σύγκριση παροχής αιχμής από Ορθολογική Μέθοδο και λογισμικό Mike Urban για τον αγωγό A.*

ΦΡΕΑΤΙΑ		Q	Q
ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ	(m <sup>3</sup> /s) Ορθολογική Μέθοδος	(m <sup>3</sup> /s) Mike Urban
A-31	A-30	9.060	9.527
A-30	A-29	9.085	9.578
A-29	A-28	9.181	9.711
A-28	A-27	9.430	9.974
A-27	A-26	9.634	10.216
A-26	A-25	9.692	10.315
A-25	A-24	10.061	10.681
A-24	A-23	10.180	10.836
A-23	A-22	10.342	11.007
A-22	A-21	10.457	11.140
A-21	A-20	10.577	11.270
A-20	A-19	10.688	11.396
A-19	A-18	10.750	11.482
A-18	A-17	10.777	11.516
A-17	A-16	15.391	26.189
A-16	A-15	15.632	26.506
A-15	A-14	15.807	26.784
A-14	A-13	15.807	26.769

**Πίνακας 5.1(συνέχεια): Σύγκριση παροχής αιχμής από Ορθολογική Μέθοδο και λογισμικό Mike Urban για τον αγωγό Α.**

ΦΡΕΑΤΙΑ		Q	Q
ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ	(m <sup>3</sup> /s) Ορθολογική Μέθοδος	(m <sup>3</sup> /s) Mike Urban
A-12	A-11	15.896	27.105
A-11	A-10	15.977	28.072
A-10	A-9	16.090	29.116
A-9	A-8	16.166	30.101
A-8	A-7	16.277	30.486
A-7	A-6	16.498	30.882
A-6	A-5	16.535	31.824
A-5	A-4	16.896	33.621
A-4	A-3	16.956	33.860
A-3	A-2	16.956	34.587
A-2	A-1	16.956	35.319

Όπως είναι εμφανές, από την επίλυση του δικτύου με την Ορθολογική Μέθοδο προκύπτουν χαμηλότερες τιμές για την παροχή αιχμής σε σχέση με την προσομοίωση του με το λογισμικό Mike Urban. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην χαμηλή εκτίμηση του συντελεστή απορροής που χρησιμοποιήθηκε κατά τον σχεδιασμό του δικτύου. Σύμφωνα με την μελέτη για τον σχεδιασμό του δικτύου αποχέτευσης ομβρίων ο συντελεστής απορροής C για τις περιοχές εντός του οικιστικού χώρου λαμβάνει την τιμή 0,60, ενώ για τις λοιπές ψηλότερες, εκτός του σχεδίου πόλης, επίσης C = 0,60 (στις οικιστικές περιοχές, η κάλυψη με οδοστρώματα – σκυροδέματα είναι μεγαλύτερη, ενώ στις μη οικιστικές η κλίση παίρνει μεγαλύτερες τιμές) (Φωτοπούλου 2016). Κρίνεται, λοιπόν ότι η Ορθολογική Μέθοδος υποεκτιμά σε σχέση με το

μοντέλο την πραγματική κατάσταση (κλίση και δομή του εδάφους, κάλυψη ή μη της εδαφικής επιφάνειας από οδοστρώματα) στην περιοχή μελέτης.

## 6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

### 6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα μιας ανάλυσης ευαισθησίας για τέσσερα σημεία ενδιαφέροντος του δικτύου αποχέτευσης ομβρίων. Τα σημεία που επιλέχθηκαν είναι δίπλα στα φρεάτια A-7, A-8, A-9 και A-31 αντίστοιχα και διαλέχθηκαν καθώς τα φρεάτια αυτά παρουσίασαν πλήρωση στις περισσότερες περιπτώσεις των βροχοπτώσεων σχεδιασμού για τις οποίες προσομοιώθηκε το δίκτυο. Για την ανάλυση ευαισθησίας επιλέχτηκε το δίκτυο να προσομοιωθεί για βροχόπτωση σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 50 έτη και χρονικής διάρκειας 1 ώρας. Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη βροχόπτωση σχεδιασμού, καθώς σύμφωνα και με το Π.Δ. 696/74, ο κεντρικός αγωγός του δικτύου (Αγωγός Α) είναι διαστασιολογημένος να παροχετεύει την απορροή για γεγονότα βροχής με περίοδο επαναφοράς τα 50 έτη. Για την εκπόνηση της λήφθηκαν υπόψη οι εξής μεταβλητές:

- Curve Number (CN)
- Συντελεστής Manning στην επιφάνεια του εδάφους
- Ύψος κτιρίων

Κατόπιν, εκτιμήθηκαν σε κάθε σενάριο της ανάλυσης ευαισθησίας, για κάθε σημείο ενδιαφέροντος, το βάθος ροής και οι δύο συνιστώσες της ταχύτητας ροής, από όπου και προέκυψε η συνισταμένη της ταχύτητας ροής σύμφωνα με τον τύπο:

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (6.1)$$

Όπου:

V: η συνισταμένη της ταχύτητας ροής

u: η ταχύτητα ροής στον άξονα χ'χ

v: η ταχύτητα ροής στον άξονα γ'γ

Με την βοήθεια υπολογιστικών φύλλων Excel εκτιμήθηκε η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του βάθους και της ταχύτητας ροής για κάθε σημείο και σχεδιάστηκαν θηκογράμματα (box – whisker plots), μέσα από τα οποία απεικονίζεται η διακύμανση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης ευαισθησίας.

Ως ανάλυση ευαισθησίας, ορίζεται η μελέτη του πως η αβεβαιότητα στο παράγωγο αποτέλεσμα ενός μαθηματικού μοντέλου ή συστήματος (αριθμητικό ή όχι) μπορεί να κατανεμηθεί σε διάφορες πηγές στα δεδομένα εισόδου του (Saltelli et al. 2008). Μια σχετική πρακτική είναι η ανάλυση αβεβαιότητας, η οποία εστιάζει κυρίως στην ποσοτικοποίηση και διάδοση της αβεβαιότητας. Στην ιδανική περίπτωση τόσο η ανάλυση αβεβαιότητας όσο και ευαισθησίας θα πρέπει να εκτελούνται σε συνδυασμό μεταξύ τους. Η ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να είναι χρήσιμη σε ένα εύρος στόχων τα οποία περιλαμβάνουν (Pannell 1997):

- ❖ Δοκιμές ευρωστίας (robustness) των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου, υπό την παρουσία της αβεβαιότητας.
- ❖ Περαιτέρω κατανόηση των σχέσεων μεταξύ μεταβλητών εισόδου και εξόδου σε ένα σύστημα ή μοντέλο.
- ❖ Μείωση της αβεβαιότητας μέσω του προσδιορισμού των δεδομένων εισόδου του μοντέλου που προκαλούν σημαντική αβεβαιότητα στο παραγόμενο αποτέλεσμα και επομένως θα πρέπει να είναι στο επίκεντρο της προσοχής εφόσον η ευρωστία του μοντέλου πρέπει να αυξηθεί (με περαιτέρω έρευνα).
- ❖ Αναζήτηση σφαλμάτων σε ένα μοντέλο (αντιμετωπίζοντας απροσδόκητες σχέσεις μεταξύ δεδομένων εισόδου και παραγόμενων αποτελεσμάτων).
- ❖ Απλούστευση του μοντέλου με τη διόρθωση των δεδομένων εισόδου τα οποία δεν έχουν καμία επίδραση στο αποτέλεσμα, ή αναγνωρίζοντας και αφαιρώντας περιττα τμήματα της δομής του μοντέλου.
- ❖ Ενίσχυση της επικοινωνίας μεταξύ των δημιουργών του μοντέλου με υπεύθυνους λήψης αποφάσεων (π.χ. κάνοντας τις προτάσεις ακόμα πιο αξιόπιστες, κατανοητές και πειστικές).
- ❖ Η εύρεση περιοχής στο πεδίο ορισμού των παραγόντων εισόδου, για την οποία το αποτέλεσμα είναι είτε μέγιστο είτε ελάχιστο, είτε πληροί κάποιο βέλτιστο κριτήριο (βελτιστοποίηση και μέθοδος Monte Carlo).

Ένα μαθηματικό μοντέλο, ορίζεται από μια σειρά εξισώσεων, μεταβλητών εισόδου και τις παραμέτρων που αποσκοπούν στο χαρακτηρισμό κάποιας διαδικασίας υπό έρευνα. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν ένα μοντέλο μελέτης του κλίματος, ένα οικονομικό μοντέλο ή στον τομέα της μηχανικής ένα υδρολογικό μοντέλο μελέτης



περιβάλλοντος ή ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στη διερεύνηση μηχανικής συμπεριφοράς ενός φορέα.

Αρκετά συχνά όμως, μερικές ή όλες από τις εισόδους του μοντέλου υπόκεινται σε πηγές αβεβαιότητας, συμπεριλαμβανομένων των σφαλμάτων μέτρησης, της έλλειψης πληροφοριών και της μερικής κατανόησης των κινητήριων δυνάμεων και μηχανισμών του υπό προσομοίωση συστήματος. Αυτή η αβεβαιότητα επιβάλλει ένα όριο όσον αφορά την εμπιστοσύνη μας στην απόκριση του μοντέλου. Επιπλέον, τα μοντέλα μπορεί να χρειαστεί να αντιμετωπίσουν φυσική εγγενή μεταβλητότητα του συστήματος (τυχαία), όπως η εμφάνιση στοχαστικών γεγονότων (Kiureghian 2009).

Η επιλογή της μεθόδου ανάλυσης ευαισθησίας τυπικά καθορίζεται από έναν αριθμό περιορισμών που καθορίζονται από το πρόβλημα. Μερικοί από τους πιο συχνούς είναι:

1. Υπολογιστικό κόστος καθότι σχεδόν πάντα η ανάλυση ευαισθησίας εκτελείται με πολλαπλές επαναλήψεις του μοντέλου.
2. Συσχετιζόμενα δεδομένα εισόδου, όπου συχνά θεωρούμε την ανεξαρτησία μεταξύ των μεταβλητών εισόδου, ενώ αυτό στην πραγματικότητα μπορεί να μην συμβαίνει.
3. Η μη γραμμικότητα των αποτελεσμάτων, να προσεγγίζεται με γραμμική μέθοδο (πχ. γραμμική παλινδρόμηση).
4. Αλληλεπιδράσεις του μοντέλου: συνήθως συμβαίνουν όταν η διαταραχή ενός ή περισσότερων μεταβλητών εισόδου, ταυτόχρονα προκαλεί μεταβολή στο αποτέλεσμα μεγαλύτερο από εκείνο που θα προκαλούσαν καθεμία ξεχωριστά

## 6.2 Βασική Μεθοδολογία

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

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

### 6.3 Παράμετροι της ανάλυσης ευαισθησίας

Για την εκπόνηση της ανάλυσης ευαισθησίας λήφθηκαν υπόψη οι υδραυλικές και υδρολογικές παράμετροι που αναφέρονται στον Πίνακα 6.1:

*Πίνακας 6.1: Τιμές παραμέτρων στην ανάλυση ευαισθησίας.*

Μεταβλητές	Αρχικές Τιμές			Ανάλυση ευαισθησίας		
	Αστική λεκάνη απορροής	Ημι-αστική λεκάνη απορροής	Φυσική λεκάνη απορροής	Αστική λεκάνη απορροής	Ημι-αστική λεκάνη απορροής	Φυσική λεκάνη απορροής
CN	95	85	40	100	90	50
				90	80	30
Συντελεστής Manning	0,03			0,02		
				0,05		
Ύψος κτιρίων (m)	50			20		
				100		

Έτσι λοιπόν, τα 32 σενάρια για το οποία πραγματοποιήθηκε η ανάλυση ευαισθησίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2.

*Πίνακας 6.2: Σενάρια ανάλυσης ευαισθησίας.*

<b>α/α</b>	<b>CN1</b>	<b>CN2</b>	<b>CN3</b>	<b>n</b>	<b>Ύψος κτιρίων</b>
<b>1</b>	100	90	50	0,02	20
<b>2</b>	100	90	50	0,02	100
<b>3</b>	100	90	50	0,05	20
<b>4</b>	100	90	50	0,05	100
<b>5</b>	100	90	30	0,02	20
<b>6</b>	100	90	30	0,02	100
<b>7</b>	100	90	30	0,05	20
<b>8</b>	100	90	30	0,05	100
<b>9</b>	100	80	50	0,02	20
<b>10</b>	100	80	50	0,02	100
<b>11</b>	100	80	50	0,05	20
<b>12</b>	100	80	50	0,05	100
<b>13</b>	100	80	30	0,02	20
<b>14</b>	100	80	30	0,02	100
<b>15</b>	100	80	30	0,05	20
<b>16</b>	100	80	30	0,05	100
<b>17</b>	90	90	50	0,02	20
<b>18</b>	90	90	50	0,02	100
<b>19</b>	90	90	50	0,05	20
<b>20</b>	90	90	50	0,05	100
<b>21</b>	90	90	30	0,02	20
<b>22</b>	90	90	30	0,02	100
<b>23</b>	90	90	30	0,05	20
<b>24</b>	90	90	30	0,05	100

**Πίνακας 6.2(συνέχεια):** Σενάρια ανάλυσης ευαισθησίας

<b>α/α</b>	<b>CN1</b>	<b>CN2</b>	<b>CN3</b>	<b>n</b>	<b>Ύψος κτιρίων</b>
<b>25</b>	90	80	50	0,02	20
<b>26</b>	90	80	50	0,02	100
<b>27</b>	90	80	50	0,05	20
<b>28</b>	90	80	50	0,05	100
<b>29</b>	90	80	30	0,02	20
<b>30</b>	90	80	30	0,02	100
<b>31</b>	90	80	30	0,05	20
<b>32</b>	90	80	30	0,05	100

Σε ό,τι αφορά την παράμετρο του ύψους κτιρίων επιλέχθηκε η μέθοδος των στερεών ορίων (μέθοδος ανάκλασης), καθώς είναι ο πιο αντιπροσωπευτικός τρόπος για την καταγραφή κτιρίων σε μια πλημμυρική περιοχή. Η μέθοδος δεν χρειάζεται καμία πρόσθετη μεταβλητή που θα πρέπει να βαθμονομείται για κάθε μελέτη πραγματικών γεγονότων. Αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα δεδομένης της έλλειψης στοιχείων από πραγματικά γεγονότα πλημμύρας μιας και η βαθμονόμηση μιας επιπλέον μεταβλητής θα προκαλούσε περαιτέρω επιβάρυνση. Σύμφωνα με την μέθοδο των στερεών ορίων, δεν εξάγονται από το μοντέλο αποτελέσματα για το βάθος και τις ταχύτητες ροής του νερού και για την απεικόνιση του χάρτη πλημμυρών γίνεται γραμμική παρεμβολή μέσω των γειτονικών κελιών (Syme 2008). Λόγω της φύσης της μεθόδου των στερεών ορίων δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν λεπτομερή τοπογραφικά δεδομένα σχετικά με το ύψος κάθε κτιρίου. Τα κτίρια αντιπροσωπεύονται από την ύψωση του εδάφους. Στην πραγματικότητα, το ύψος των κτιρίων έχει την ίδια επιρροή αν το νερό κυλάει σε επιφάνεια με κάθετα τοιχώματα από σκυρόδεμα ανεξάρτητα αν το ύψος τους είναι 10 ή 100 m. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως καθώς είναι αρκετά απλή και εύκολη στη χρήση. Με τις κατάλληλες τροποποιήσεις κάθε κτίριο μπορεί να αποτελεί μια

αδιαπέρατη επιφάνεια, το οποίο φαίνεται πιο ρεαλιστικό για την προσομοίωση σε πραγματικές συνθήκες (Bellos et al. 2014).

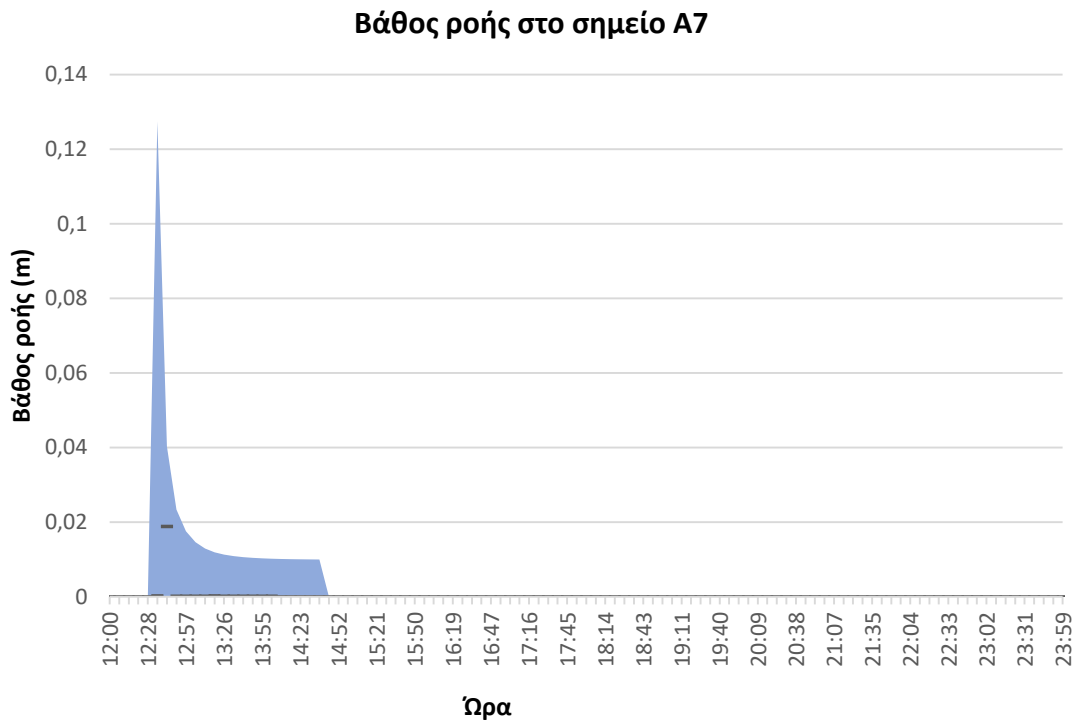
#### 6.4 Αποτελέσματα Ανάλυσης Ευαισθησίας

Μετά την προσομοίωση του αποχετευτικού δικτύου ομβρίων στην περιοχή της Αφαίας για τα σενάρια που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2 υπολογίστηκαν το ελάχιστο και το μέγιστο βάθος ροής και η ελάχιστη και μέγιστη ταχύτητα ροής για τα σημεία ενδιαφέροντος. Τα σημεία ενδιαφέροντος είναι ονομασμένα σύμφωνα με το πλησιέστερο φρεάτιο. Κατόπιν, στα Διαγράμματα 6.1 – 6.8 παρουσιάζεται γραφικά η δέσμη των λύσεων που προέκυψε από την ανάλυση ευαισθησίας για κάθε σημείο. Για κάθε σημείο ενδιαφέροντος προέκυψαν οι δέσμες λύσεων τόσο για το βάθος όσο και για την ταχύτητα ροής που παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 6.1 – 6.8. Σύμφωνα, λοιπόν, με τα Διαγράμματα 6.1 – 6.8 προκύπτει ότι στην οδό Ποσειδώνος που βρίσκονται τα σημεία ενδιαφέροντος A-7, A-8 και A-9 το μέγιστο βάθος ροής κυμαίνεται από 0,1 έως 0,3 m, διακύμανση ιδιαίτερα σημαντική στον αστικό ιστό. Αντίστοιχη είναι και η διακύμανση της μέγιστης ταχύτητας ροής, της οποίας το εύρος είναι μεταξύ 0,1 και 0,5 m/s. Έτσι, γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτή η αβεβαιότητα του μοντέλου στην αριθμητική επίλυση και ότι το μοντέλο χρήζει μεγαλύτερης έμφασης στις συγκεκριμένες παραμέτρους, καθώς είναι μείζονος σημασίας στην προσομοίωση ενός αστικού δικτύου αποχέτευσης ομβρίων.

*Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας*

Σημείο ενδιαφέροντος	Βάθος ροής (m)		Ταχύτητα (m/s)	
	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή
<b>A7</b>	0	0.1	0	0.4
<b>A8</b>	0	0.3	0	0.1
<b>A9</b>	0	0.1	0	0.6
<b>A31</b>	0	2.9	0	0.1

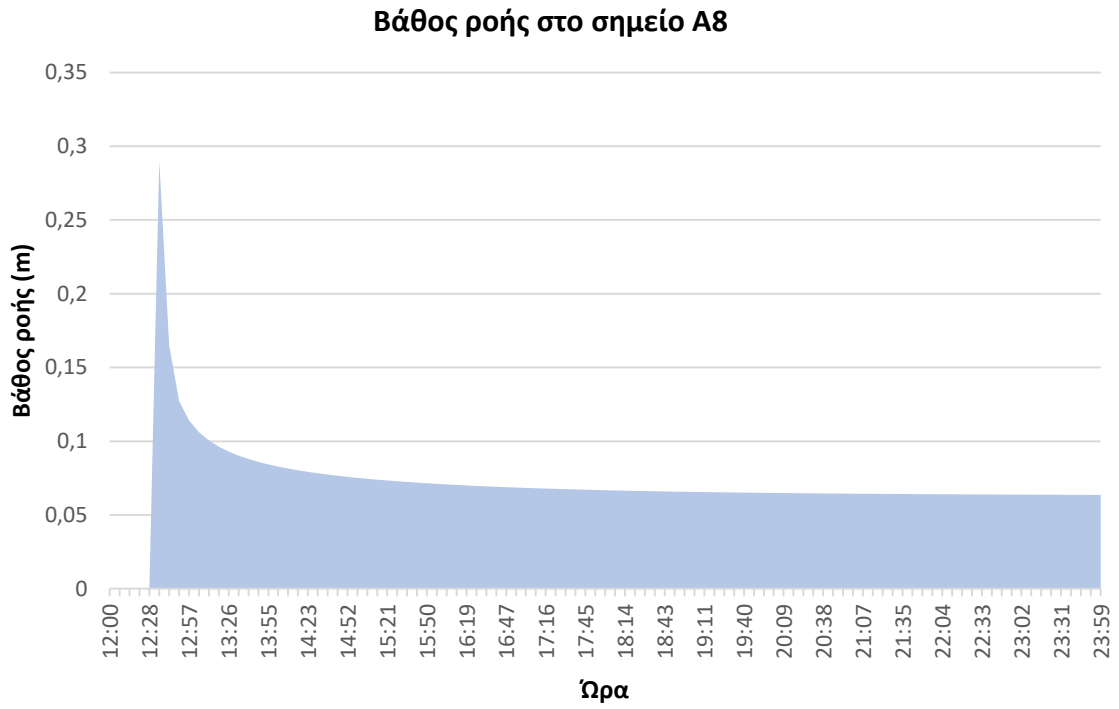
**Διάγραμμα 6.1:** Βάθος ροής στο σημείο A7.



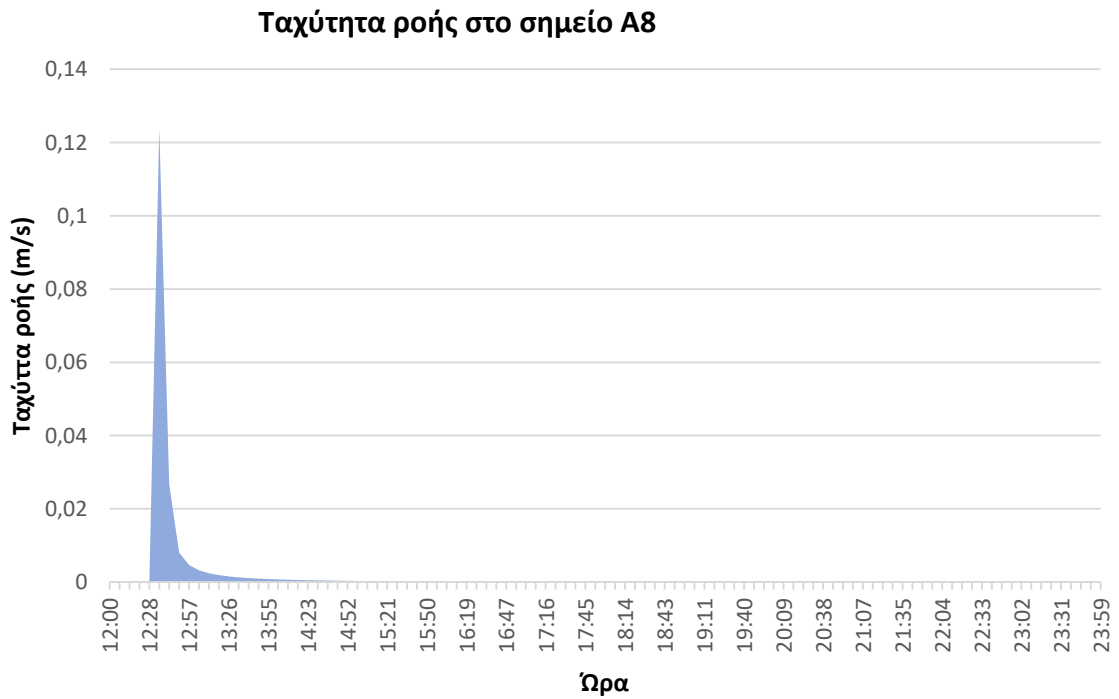
**Διάγραμμα 6.2:** Ταχύτητα ροής στο σημείο A7.



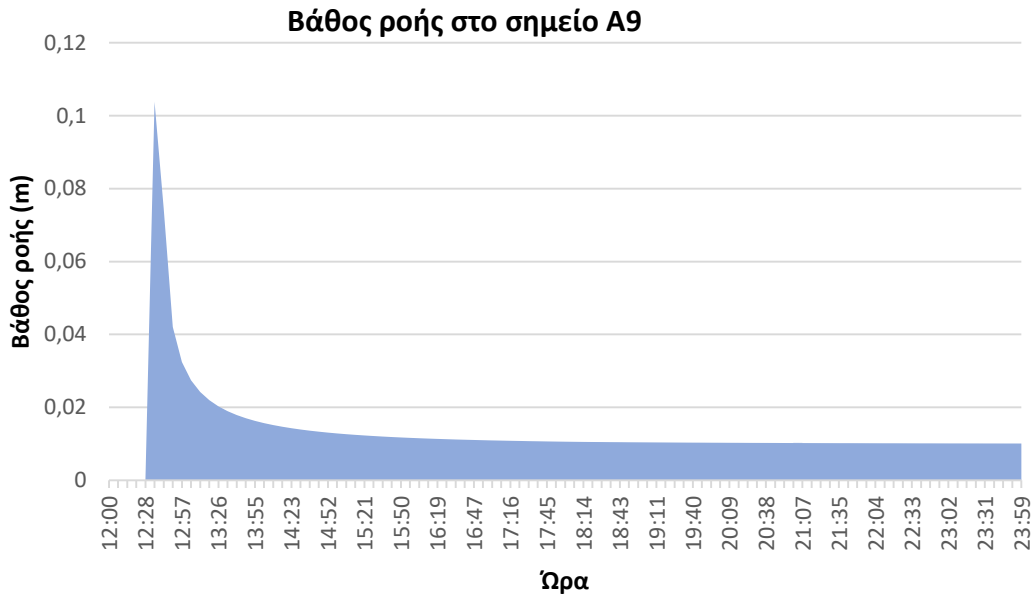
**Διάγραμμα 6.3:** Βάθος ροής στο σημείο A8.



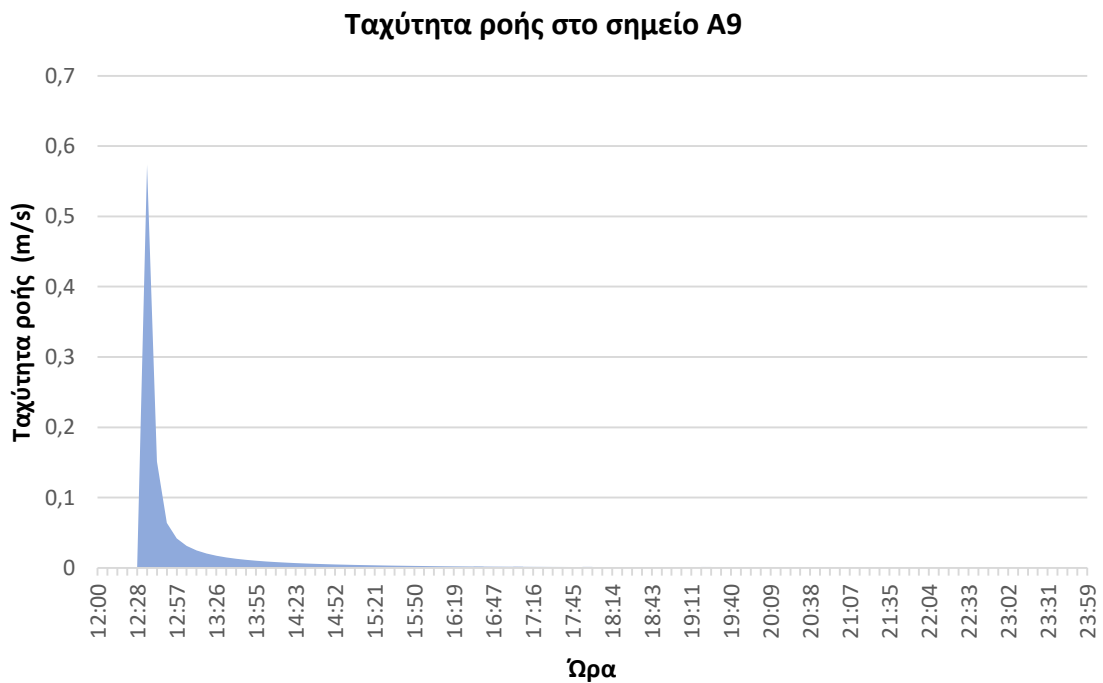
*Διάγραμμα 6.4: Ταχύτητα ροής στο σημείο A8.*



*Διάγραμμα 6.5: Βάθος ροής στο σημείο A9.*



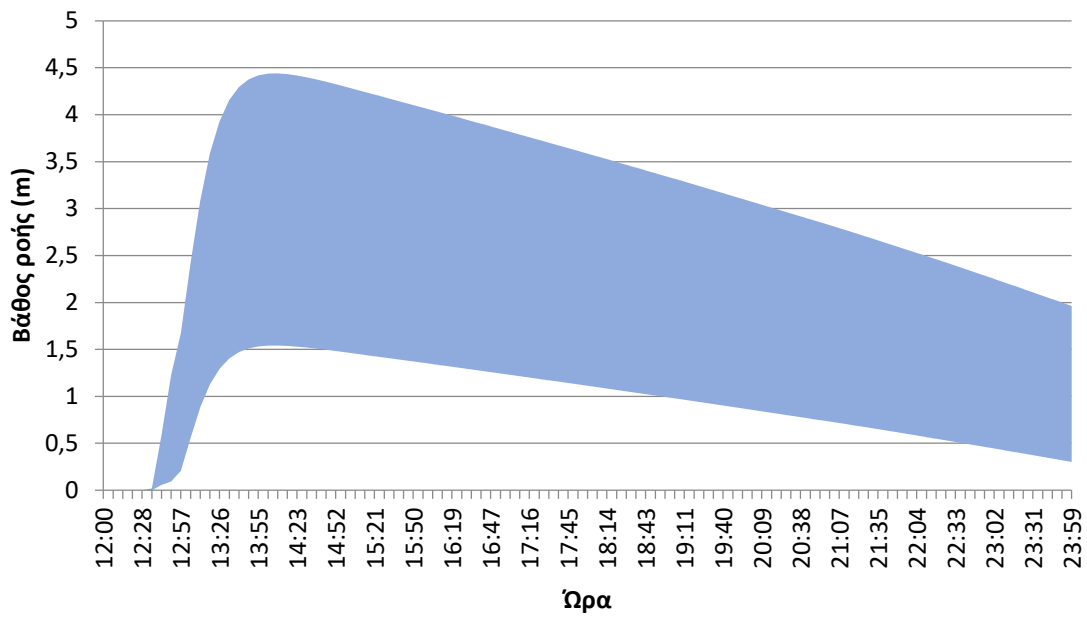
**Διάγραμμα 6.6:** Ταχύτητα ροής στο σημείο A9.



**Διάγραμμα 6.7:** Βάθος ροής στο σημείο A31.

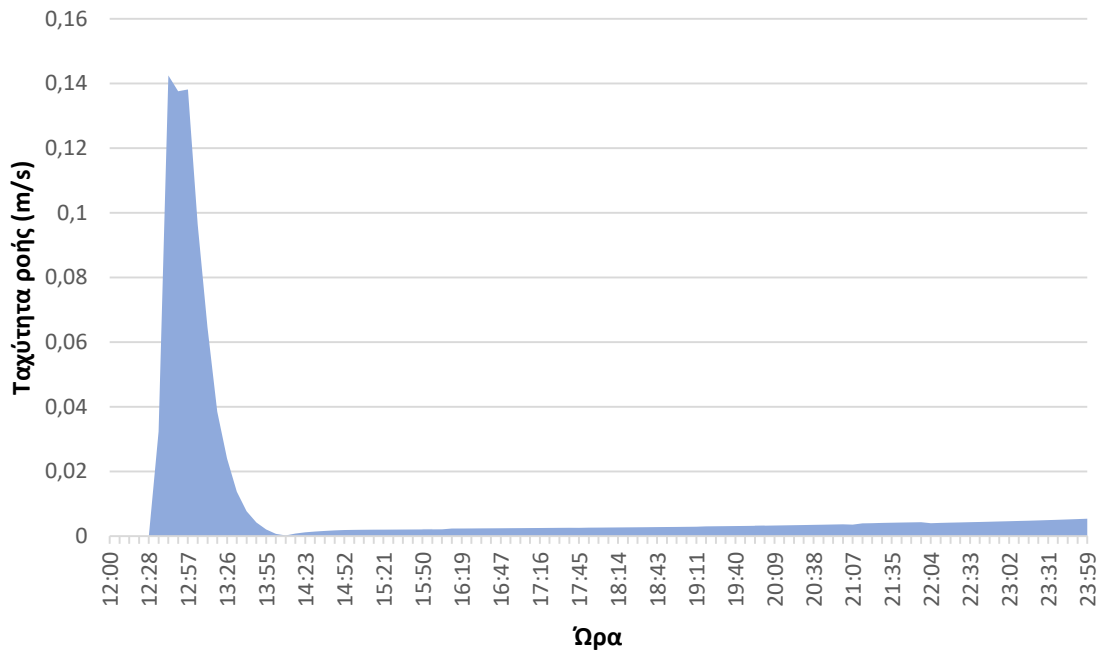


### Βάθος ροής στο σημείο A31



Διάγραμμα 6.8: Ταχύτητα ροής στο σημείο A31.

### Ταχύτητα ροής στο σημείο A31



Για την εύρεση της παραμέτρου με την μεγαλύτερη ευαισθησία εφαρμόστηκε η εξής διαδικασία για κάθε σημείο ενδιαφέροντος και για το βάθος και την ταχύτητα ροής: Αρχικά, υπολογίστηκαν τα μέγιστα της κάθε χρονοσειράς στα 32 σενάρια και ακολούθως η διακύμανσή τους. Για κάθε μία παράμετρο που εξετάστηκε υπολογίστηκαν δυο διακυμάνσεις, χωρίζοντας τα 32 σενάρια στην μέση, με σκοπό να διατηρείται σταθερή η τιμή της εκάστοτε παραμέτρου. Τέλος, υπολογίστηκε το πηλίκο της διαφοράς των δύο διακυμάνσεων προς την συνολική διακύμανση, όπου και η μεγαλύτερη ποσότητα επιδεικνύει και την πιο ευαίσθητη παράμετρο. Οι υπολογισμοί έγιναν σε λογιστικό φύλλο Excel και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4.

*Πίνακας 6.4: Μέγιστη διακύμανση παραμέτρων στην ανάλυση ευαισθησίας.*

Παράμετρος	Δείκτης ευαισθησίας
CN1 (αστικές λεκάνες απορροής)	1,33
CN2 (ημι-αστικές λεκάνες απορροής)	1,25
CN3 (φυσικές λεκάνες απορροής)	1,40
Συντελεστής Manning στην επιφάνεια	1,34
Ύψος κτιρίων	1,25

Καθίσταται, λοιπόν εμφανές, σύμφωνα με τον Πίνακα 6.4 ότι από τις υπό εξέταση παραμέτρους αυτή που εμφανίζει την μεγαλύτερη ευαισθησία είναι το Curve Number και ιδιαίτερα στις φυσικές λεκάνες απορροής, καθώς η παράμετρος CN εξαρτάται από τη γεωλογική σύσταση της περιοχής, τις χρήσεις γης και την προηγούμενη κατάσταση υγρασίας του εδάφους.

## 6.5 Box – whisker plots (θηκογράμματα)

Το λεγόμενο θηκογράμμα είναι ένας απλός τρόπος παρουσίασης των κυριότερων χαρακτηριστικών μιας κατανομής μέσω μιας γραφικής παράστασης. Για την κατασκευή τους αρχικά γίνεται εκτίμηση της πρώτης και τρίτης τεταρτητόμου καθώς και της διαμέσου  $x_{1/4}$ ,  $x_{3/4}$  και  $x_6$  αντίστοιχα. Η διάμεσος είναι ένα μέτρο του κέντρου των δεδομένων και ορίζεται ως η κεντρική τιμή όταν τα δεδομένα διαταχθούν σε αύξουσα σειρά. Αν το μέσο της σειράς βρίσκεται μεταξύ δύο ανόμοιων τιμών, ως διάμεσος λαμβάνεται το ημίθροισμά τους. Όταν το πλήθος των τιμών της μεταβλητής είναι περιττό το μέσο της σειράς ταυτίζεται με μία μόνο τιμή. Άρα η διάμεσος είναι η τιμή που αντιστοιχεί στη θέση  $(n+1)/2$ . Κατασκευάζεται ένα ορθογώνιο με κάτω βάση στο  $x_{1/4}$  και άνω βάση στο  $x_{3/4}$ , ενώ το μήκος του ορθογωνίου λαμβάνεται αυθαίρετα. Η διάμεσος παριστάνεται σαν ένα ευθύγραμμο τμήμα μέσα στο

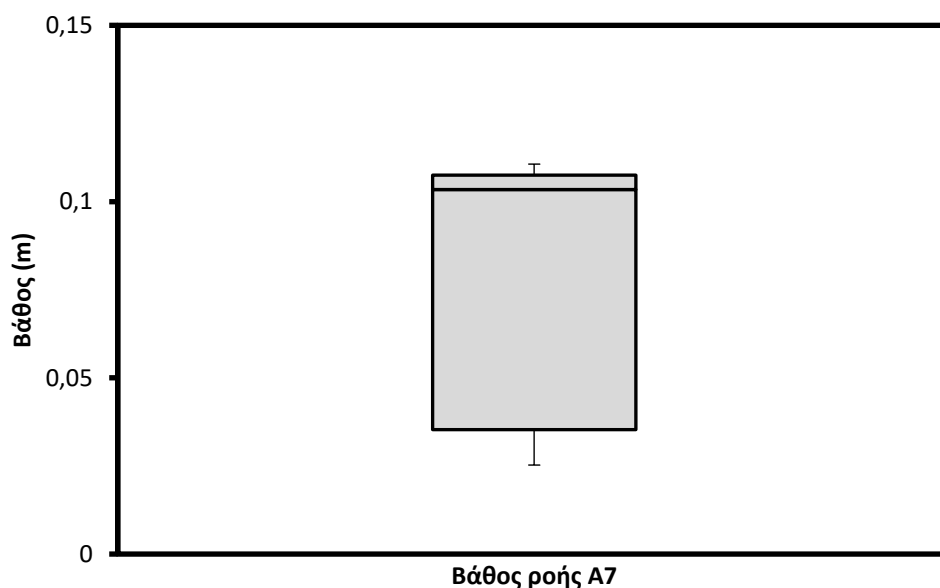
ορθογώνιο, παράλληλο με τις βάσεις. Στη συνέχεια διακεκομμένες γραμμές εκτείνονται από τα μέσα των βάσεων του ορθογωνίου μέχρι τις οριακές τιμές που προκύπτουν ως εξής: Η άνω οριακή τιμή ορίζεται ως η μεγαλύτερη παρατήρηση, η οποία είναι μικρότερη ή ίση από το  $x_{3/4} + 1,5*(x_{3/4} - x_{1/4})$ , ενώ η κάτω οριακή τιμή ορίζεται σαν η μικρότερη παρατήρηση και ισούται με  $x_{1/4} - 1,5*(x_{3/4} - x_{1/4})$ . Εάν υπάρχουν ακόμη παρατηρήσεις που βρίσκονται έξω από το εύρος των δύο οριακών τιμών, τότε αυτές καλούνται εξωτερικές τιμές και παριστάνονται με κάποιο ιδιαίτερο σύμβολο (π.χ. •).

Το θηκόγραμμα μας δίνει το κεντρικό διάστημα με το 50% των παρατηρήσεων. Οι διακεκομμένες γραμμές και η θέση της διαμέσου μας δίνουν μια εικόνα για την συμμετρικότητα της κατανομής της μεταβλητής μας, ενώ οι εξωτερικές τιμές μπορεί να μας οδηγήσουν στην αναζήτηση τυχόν έκτροπων τιμών.

Η κατασκευή των box-whisker plots έγινε με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω σε λογιστικό φύλλο Excel.

#### 6.5.1 Box – whisker plot για το σημείο A7

Στην Εικόνα 6.1 είναι εμφανής η ασυμμετρία στις τιμές του βάθους ροής στο σημείο A7 για κάθε σενάριο της ανάλυσης ευαισθησίας, καθώς το μεγαλύτερο μέρος των τιμών είναι μικρότερο από την τιμή της διαμέσου. Αντίστοιχη εικόνα παρουσιάζεται και στις λύσεις της ανάλυσης ευαισθησίας για την ταχύτητα ροής.



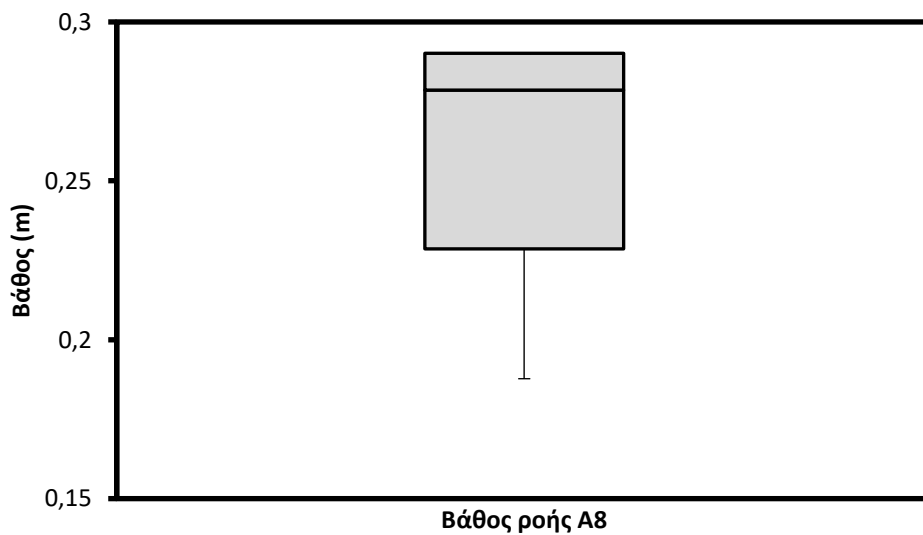
Εικόνα 6.1: Box - whisker plot για το βάθος ροής στο σημείο A7.



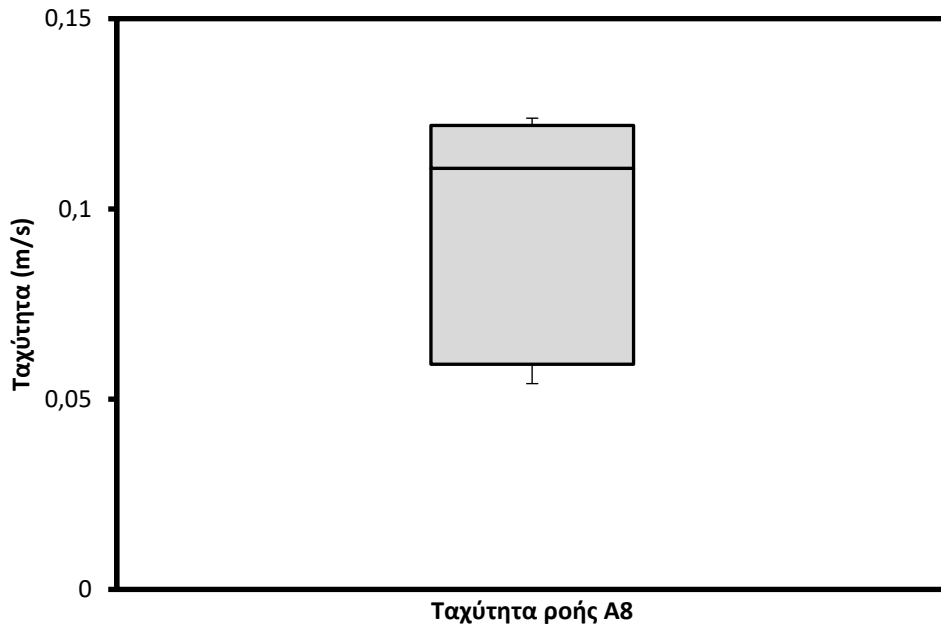
*Εικόνα 6.2: Box - whisker plot για την ταχύτητα ροής στο σημείο A7.*

#### 6.5.2 Box – whisker plot για το σημείο A8

Όπως διακρίνεται στις Εικόνες 6.3 και 6.4, το εύρος των λύσεων της ανάλυσης ευαισθησίας στο σημείο A8 παρουσιάζει επίσης μια μορφή ασυμμετρίας, καθώς τόσο η διάμεσος του βάθους όσο και της ταχύτητας ροής αποκλίνουν σημαντικά προς το πρώτο και προς το τρίτο τεταρτημόριο.



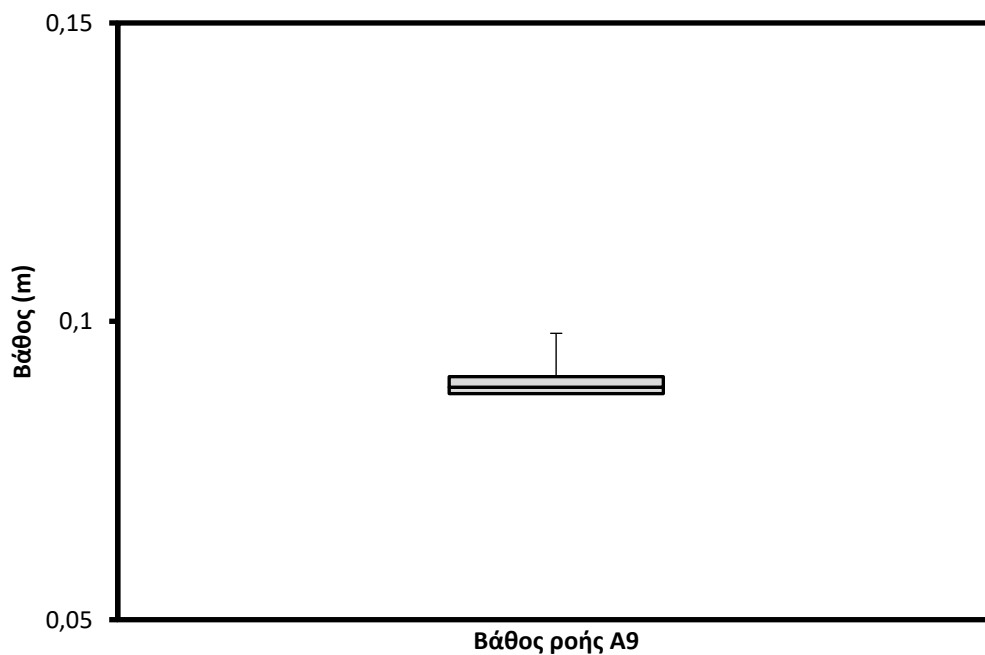
*Εικόνα 6.3: Box - whisker plot για το βάθος ροής στο σημείο A8.*



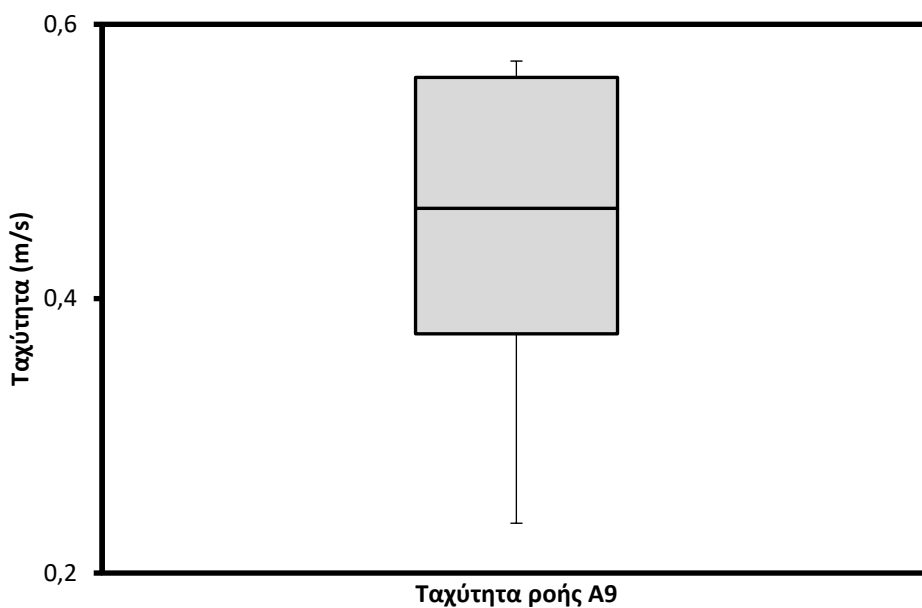
*Εικόνα 6.4: Box - whisker plot για την ταχύτητα ροής στο σημείο A8.*

### 6.5.3 Box – whisker plot για το σημείο A9

Στις Εικόνες 6.5 και 6.6 γίνεται σαφές ότι οι λύσεις της ανάλυσης ευαισθησίας για το σημείο A9 είναι συμμετρικές προς την διάμεσο. Αυτό σημαίνει ότι η κατανομή της μεταβλητής της ταχύτητας που παρατηρήσαμε είναι κανονική, δηλαδή οι τιμές της ταχύτητας ροής τείνουν να συγκεντρώνονται γύρω από την μέση τιμή της.



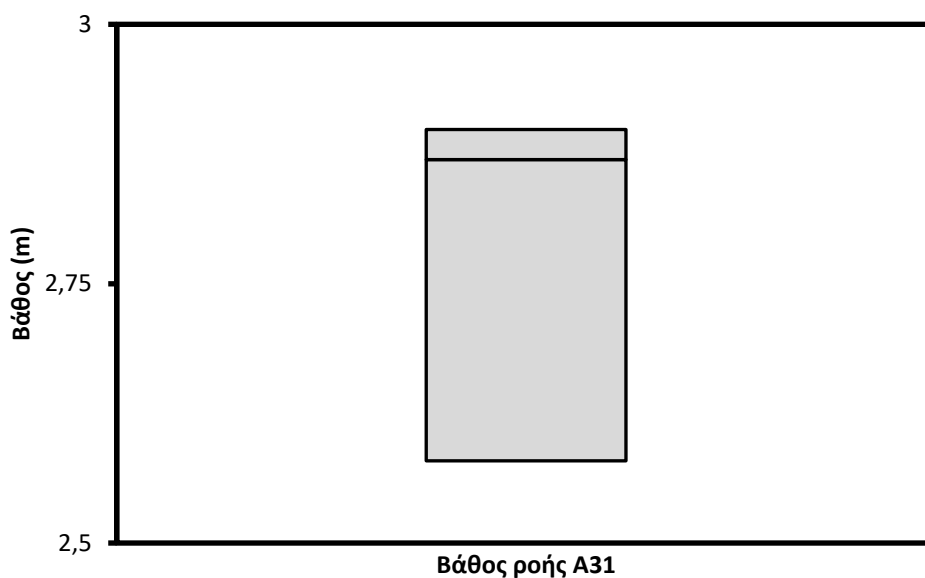
Εικόνα 6.5: Box - whisker plot για το βάθος ροής στο σημείο A9.



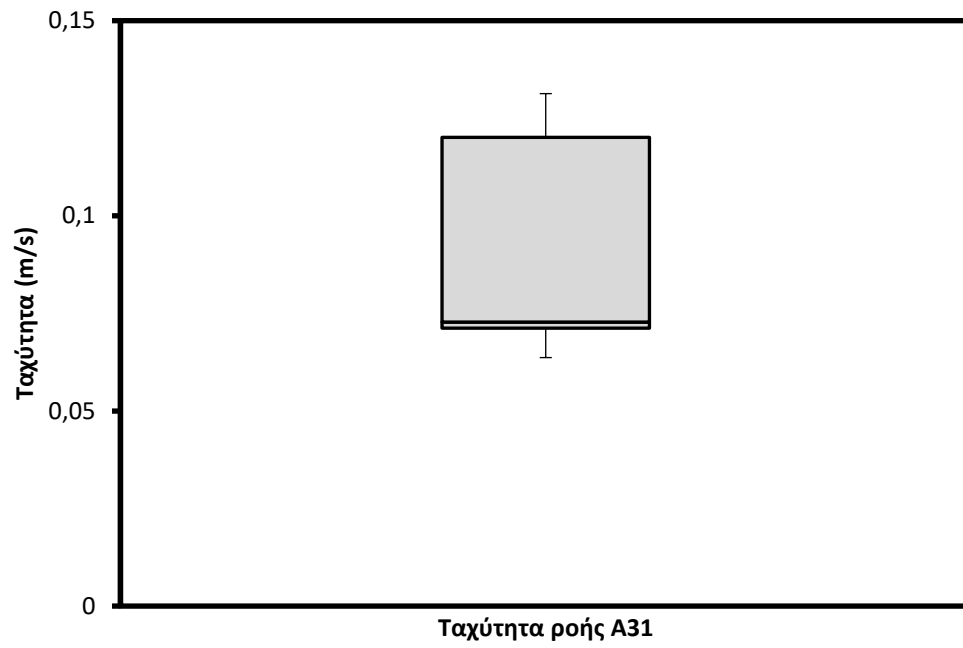
Εικόνα 6.6: Box - whisker plot για την ταχύτητα ροής στο σημείο A9.

#### 6.5.4 Box- whisker plot για το σημείο A31

Στις Εικόνες 6.7 και 6.8 παρατηρείται έντονο το φαινόμενο της ασυμμετρίας των λύσεων από την προσομοίωση του δικτύου για τα σενάρια που επιλέχθηκαν στην ανάλυση ευαισθησίας. Σε ό,τι αφορά το βάθος ροής η διάμεσος προσεγγίζει το τρίτο τεταρτημόριο, ενώ από την άλλη σε ό,τι αφορά την ταχύτητα ροής η διάμεσος κυμαίνεται πλησίον του πρώτου τεταρτημορίου του εύρους τιμών.



Εικόνα 6.7: Box - whisker plot για το βάθος ροής στο σημείο A31.



*Εικόνα 6.8: Box- whisker plot για την ταχύτητα ροής στο σημείο A31.*





## 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 7.1 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιχειρήθηκε η μοντελοποίηση, προσομοίωση, ανάλυση καθώς και ανάλυση ευαισθησίας του δικτύου αποχέτευσης ομβρίων στην περιοχή της Αφαίας του Δήμου Χαϊδαρίου με το λογισμικό Mike Urban. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του δικτύου συγκρίθηκαν με την Ορθολογική Μέθοδο (Παράρτημα Β), με την οποία έχει σχεδιαστεί.

Τα λογισμικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- ❖ Το λογισμικό Mike Urban της DHI.
- ❖ Το λογισμικό Excel της Microsoft.
- ❖ Το λογισμικό ArcGis της ESRI.
- ❖ Το λογισμικό Qgis.

Τα κύρια συμπεράσματα, τα οποία προέκυψαν από την επίλυση του δικτύου με την Ορθολογική Μέθοδο είναι:

- Αν και οι Ελληνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (Π.Δ. 696/74) ορίζουν ως περίοδο επαναφοράς τα 10 έτη, ορισμένοι αγωγοί του δικτύου (αγωγός Α και Κεντρικός Συλλεκτήρας) είναι διαστασιολογημένοι για περίοδο επαναφοράς 50 έτη.
- Ο χρόνος ροής μέχρι τα φρεάτια εισόδου θεωρείται αυθαίρετα ίσος με 10 λεπτά σύμφωνα με τις Τεχνικές Προδιαγραφές, κάτι που δεν ισχύει στην πραγματικότητα.

Η Ορθολογική Μέθοδος, σύμφωνα με την οποία είναι σχεδιασμένο το δίκτυο, είναι κατάλληλη για την εκτίμηση μόνο της μέγιστης παροχής, η οποία αναμένεται να πραγματοποιηθεί κάτω από πολύ συγκεκριμένες συνθήκες και όχι για την παρακολούθηση της χρονικής εξέλιξης της παροχής. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η ανάλυση και προσομοίωση του δικτύου με ένα δυναμικό μοντέλο, το λογισμικό MOUSE μέσα από το Mike Urban.

Το συγκεκριμένο λογισμικό απαριθμεί κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα τα οποία είναι:

- Απεικόνιση του συνόλου των υδρολογικών και υδραυλικών μεγεθών.
- Ευκολία στην αναπαράσταση των υδρολογικών και υδραυλικών μεγεθών.
- Δυνατότητα επικοινωνίας με το Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών ArcGis της ESRI.
- Δυνατότητα μεταφοράς πληροφορίας από και προς λογιστικά φύλλα τύπου Excel.

Σύμφωνα με την προσομοίωση του δικτύου ομβρίων, με το λογισμικό Mike Urban, διαπιστώθηκε ότι για ένα γεγονός βροχόπτωσης με χρονική διάρκεια 1 ώρα και περίοδο επαναφοράς 5 έτη, το αποχετευτικό δίκτυο είναι ικανό να διοχετεύσει σχεδόν όλη την ποσότητα του νερού που απορρέει. Εξάριση αποτελεί μια μικρή περιοχή στην νοτιοανατολική πλευρά του δικτύου, στην οποία σύμφωνα και με το Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου υπάρχει «βύθισμα». Αντίθετα, για μεγαλύτερες περιόδους επαναφοράς παρατηρούνται φαινόμενα πλημμυρισμού φρεατίων, πλήρωσης των υπόγειων αγωγών, με αποτέλεσμα το ύψος του νερού να ξεπερνάει το ύψος του κρασπέδου. Αυτό συμβαίνει καθώς τα φρεάτια του δικτύου αδυνατούν να συλλέξουν επιτυχώς παροχές μεγαλύτερες της πενταετίας, παρά το γεγονός ότι το δίκτυο είναι διαστασιολογημένο για περιόδους επαναφοράς 50 έτη για τον κεντρικό αγωγό Α και τον κεντρικό συλλεκτήρα και 10 έτη για τους υπόλοιπους αγωγούς, κάτι που εγκυμονεί σοβαρούς κινδύνους για την περιοχή.

Μετά την προσομοίωση του δικτύου πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας ορισμένων παραμέτρων του δικτύου. Οι παράμετροι οι οποίες εξετάστηκαν είναι: ο συντελεστής CN της μεθόδου SCS, ο συντελεστής Manning στην επιφάνεια του εδάφους και το ύψος των κτιρίων της περιοχής μελέτης. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι:

- Σημαντικό εύρος στο μέγιστο βάθος και στην μέγιστη ταχύτητα ροής.
- Κρίνεται απαραίτητη η έμφαση στις συγκεκριμένες παραμέτρους (CN, συντελεστής Manning, ύψος κτιρίων), καθώς παίζουν σημαντικό ρόλο στην προσομοίωση του αστικού δικτύου αποχέτευσης ομβρίων.
- Καθώς το δίκτυο δεν έχει κατασκευαστεί ακόμη, δεν έχουμε στην διάθεση μας περεταίρω δεδομένα ούτως ώστε να είναι δυνατή η βαθμονόμηση του μοντέλου.

## 7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Οι διατάξεις του Π.Δ. 696/74 καθορίζουν επακριβώς τα επιμέρους αντικείμενα των μελετών, τους όρους και τις μεθοδολογίες εκπόνησής τους. Ωστόσο, εξαιτίας της παλαιότητας της οδηγίας, δεν λαμβάνεται υπόψη η πρόοδος η οποία έχει συντελεστεί στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, στα υδρολογικά και υδραυλικά μοντέλα καθώς και στην σύνδεσή τους με τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών. Ένα βήμα προς τη χρήση μοντέλων προσομοίωσης των αποχετευτικών δικτύων ώστε να εξετάζεται η λειτουργία και η διαχείριση των δικτύων τόσο κάτω από φυσιολογικές όσο και κάτω από ακραίες συνθήκες θα ήταν καίριο και θα συνέβαλε σημαντικά στη μελέτη, κατασκευή και διαχείριση των δικτύων.

Ειδικότερα, ως προς τη μελέτη του δικτύου αποχέτευσης ομβρίων του Δήμου Χαϊδαρίου, ένα κομμάτι του οποίου μελετήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία, θα μπορούσαν να διατυπωθούν ορισμένες προτάσεις προς την κατεύθυνση βελτίωσης – εξέλιξής του. Συγκεκριμένα:

- ❖ Έρευνα για τον εντοπισμό υπάρχοντων φρεατίων συλλογής ομβρίων καθ' όλη την έκταση του Δήμου και σύνδεση του υπό μελέτη δικτύου με το υπάρχον.
- ❖ Σχεδιασμός δικτύου αποχέτευσης ομβρίων για όλη την περιοχή του Δήμου Χαϊδαρίου.
- ❖ Μοντελοποίηση και ανάλυση του συνόλου των ζωνών του δικτύου αποχέτευσης ομβρίων στην περιοχή του Χαϊδαρίου.
- ❖ Εφαρμογή της μεθοδολογίας HYDROPLAN στο δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων.  
Η συγκεκριμένη μεθοδολογία στοχεύει στην πρόληψη αστοχιών μέσω του καθορισμού των απαραίτητων ενεργειών. Οι ενέργειες ιεραρχούνται με βάση την αστοχία την οποία πρόκειται να προλάβουν και συνοδεύονται από το κόστος εφαρμογής τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο διαχειριστής του δικτύου να είναι σε θέση να γνωρίζει το συνολικό κόστος των προληπτικών έργων οπότε και να μπορεί να πραγματοποιήσει τον προγραμματισμό των απαιτούμενων ενεργειών με βάση τα κονδύλια τα οποία έχει στη διάθεσή του.



## 8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### 8.1 Ελληνική Βιβλιογραφία

Δερμίσης Β. *Διευθετήσεις Υδατορρευμάτων*, 2010. Εκδόσεις Τζιόλας.

Εταιρεία Ύδρευσης και Αποχέτευσης Πρωτεύουσας (ΕΥΔΑΠ) (2013). *Ο κύκλος του νερού στην Αττική γη*.

Ευστρατιάδης Α., Κουτσογιάννης Δ., Παπαλεξίου Σ.Μ. (2012). *Περιγραφή μεθοδολογίας ανάλυσης ισχυρών επεισοδίων βροχής. ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ- Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού - πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων*. Ανάδοχοι: ΕΤΜΕ: Πέππας & Συν/τες Ε.Ε., Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών.

Κατσίμπας Α. (2014). *Υδραυλική προσομοίωση της λεκάνης απορροής Ντραφίου και υπολογισμός του πλημμυρικού κινδύνου για διάφορα σενάρια με το μοντέλο Mike 11*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διεπιστημονικό Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Αθήνα.

Κούρτης Ι. (2016). *Προσομοίωση παντοροϊκού δικτύου με το λογισμικό SWMM και πρόταση μέτρων αντιμετώπισης πλημμυρικών φαινομένων*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διεπιστημονικό Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Αθήνα.

Κουτσογιάννης Δ. (2011). *Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης*, Έκδοση 4, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Μόσχου Ε. (2014). *Διερεύνηση πλημμυρικής κατάκλυσης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής με τη χρήση λογισμικών υδραυλικής προσομοίωσης. Εφαρμογή στον Πηνειό Θεσσαλίας*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διεπιστημονικό Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Αθήνα.

Μπαριάμης Γ. (2013). *Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS και εφαρμογή στη λεκάνη του ρέματος Ραφήνας*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διεπιστημονικό Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Αθήνα.

Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για τη *Θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων*. Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων L327/1, 22 Δεκεμβρίου 2000.

Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την *Αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας*. Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων L288/27, 6 Νοεμβρίου 2007.

Π.Δ. 696/74 (1974). *Περί αμοιβών μηχανικών δια σύνταξιν μελετών, επίβλεψιν, παραλαβήν κ.λ.π. Συγκοινωνιακών, Υδραυλικών και Κτιριακών Έργων, ως και Τοπογραφικών, Κτηματογραφικών και Χαρτογραφικών Εργασιών και των σχετικών τεχνικών προδιαγραφών μελετών*.

Πογιατζή Ε., Σπανού Ν., Κοντογιάννη Β., Παπαδόπουλος Κ., Κωνσταντοπούλου Γ., Στεφούλη Μ., ΙΓΜΕΜ (2013). *Περιγραφή Γεωκινδύνων για την Αθήνα*, Seventh Framework Programme Cooperation: Space Call 3, FP7-SPACE-2010-1, Version 1, Αύγουστος.

Τσακίρης Γ. (1995). *Υδατικοί Πόροι: I: Τεχνική Υδρολογία*. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

Τσακίρης Γ. (2010). *Υδραυλικά Έργα, Σχεδιασμός και Διαχείριση, Τόμος I: Αστικά Υδραυλικά Έργα*. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

Τσακίρης Γ. & Βαγγέλης Χ. (2009). *Υδατικοί Πόροι: II: Εφαρμογές Τεχνικής Υδρολογίας*. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

Τσεκούρα Χ. (2010). *Εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου σε αστικές λεκάνες απορροής: Η περίπτωση των λεκανών Ψυχικού- Φιλοθέης*. Προπτυχιακή Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα.

Τσιγαρίδα Α. (2014). *Προσομοίωση ποιοτικών χαρακτηριστικών ποταμού μέσω του λογισμικού Mike11/ECO Lab*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διεπιστημονικό Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Αθήνα.

Τσιχριντζής Β.Α. (1999). *Οικολογική Μηχανική και Τεχνολογία Τόμος I: Διαχείριση Απορροής, Ρύπων και Φερτών*. Εκδόσεις Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη.

## 8.2 Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Adeogun A.G., Daramola M.O., Pathirana A. (2015). *Coupled 1D/2D Hydrodynamic inundation model for sewer overflow: Influence of model parameters*. Water Science 29, 146-155.

American Society of Civil Engineers (ASCE) (1992). *Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems*, American Society of Civil Engineers, New York.

ASCE (1970). *Design and Construction of Sanitary Sewers*, Manual of Practice No.37.

Bellos V., Tsakiris G. (2014). *Comparing Various Methods of Building Representation for 2D Flood Modelling in Built-Up Areas*. Springer Science and Business Media, Dordrecht.

Bisht D.S., Chatterjee C., Upadhyay P. (2016). *Modelling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN: a case study*. Natural Hazards DOI: 10.1007/s11069-016-2455-1, Springer Science + Business Media, Dordrecht.

Chen A., Evans B., Djordjevic S., Savic D. (2012). *A coarse-grid approach to representing building blockage effects in 2D urban flood modeling*. Journal of Hydrology, Vol. 426-427, 1 -16.

Christelis V., Bellos V., Tsakiris G. (2016). *Employing surrogate modelling for the calibration of a 2D flood simulation model*. Proceedings of 4<sup>th</sup> European Congress of IAHR, “Sustainable Hydraulics in the era of global change”, edited by S. Erpicum, B. Dewals, P. Archambeau, M.Pirotton, Liege, Belgium: 727-732.

DHI (2010). *Mike Urban Model Manager*.

DHI (2016). *Mike Urban Model Manager*.

DHI (2016). *Mike Urban MOUSE Runoff Reference*.

DHI (2016). *Mike\_Flood\_User\_Manual*.

Gallegos H., Schubert J., Sanders B. (2009). *Two-dimensional, high resolution modeling of urban dam-break flooding: A case study of Baldwin Hills, California*. Advances in Water Resources, 32, 1323-1335.

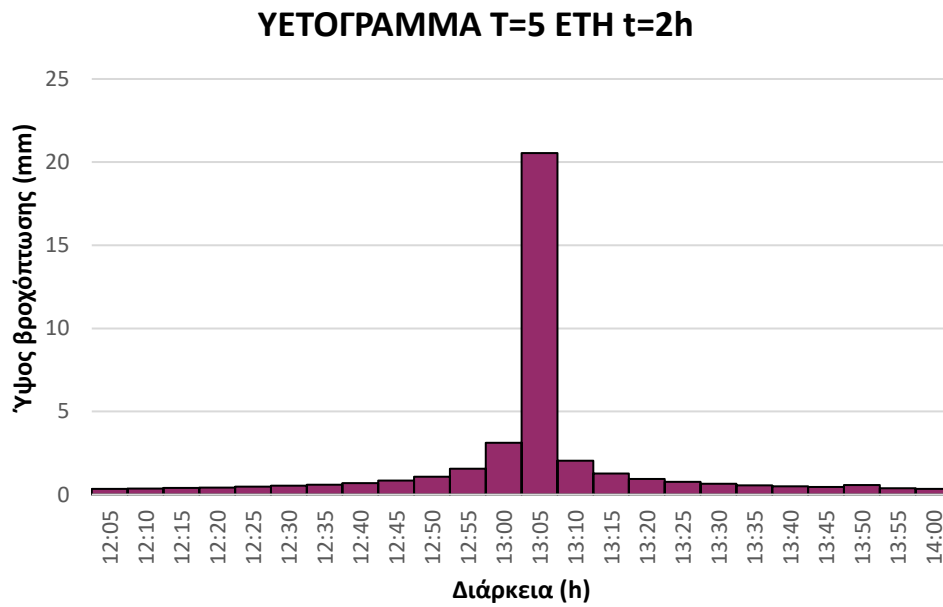
Gharbi M., Soualmia A., Dartus D., Mabernat L. (2016) *Comparison of 1D and 2D Hydraulic Models for Floods Simulation on the Medjerda River in Tunisia*. J. Mater. Environ. Sci., 8, 3017-3026.

- Jarett R. (1985). *Determination of roughness coefficients for streams in Colorado*, Water Resources Investigations Report 85-4004, US Geological Survey.
- Kiureghian A., Ditlevsen O. (2009), *Aleatory or epistemic? Does it matter?* Structural Safety 31 (2), 105-112
- Koutsogiannis D. (1994), *A stochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis*. Journal of Hydrology, 156, 193-225.
- Leandro J., Chen A., Djordjevic S., Savic D. (2009). *Comparison of 1D/1D and 1D/2D Coupled (Sewer/Surface) Hydraulic Models for Urban Flood Simulation*. Journal of Hydraulic Engineering DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000037.
- Liu L., Liu Y., Wang X., Yu D., Liu K., Huang H., Hu G. (2014). *Developing an effective 2D urban flood inundation model for city emergency management based on cellular automata*, Natural Hazards Earth Syst. Sci.,15, 2015, 381-391.
- Pannel D.J. (1997). *Sensitivity analysis of normative economic models: Theoretical framework and practical strategies*. Agricultural Economics, 16, 139-152.
- Paquier A., Mignot E., Bazin P.-H.(2015). *From hydraulic modelling to urban flood risk*. Science Direct, 115, 37-44.
- Saltelli A., Ratto M., Andres T., Campolongo F., Cariboni J., Gatelli D., Saisana M., Tarantola S. (2008), *Global Sensitivity Analysis, The Primer*, John Wiley & Sons.
- Salvan L., Abily M., Gouberville P., Schoorens J. (2016). *Drainage system and detailed urban topography: towards operational 1D-2D modelling for stormwater management*. Science Direct, 154 890-897.
- Sande Beiro T., Serrano Manso A. (2012). *Modelling and Analysis of Urban Flooding in Lundby – Kyrkbyn, Goteborg*. Master of Science thesis in the Master's Programme Infrastructural and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
- Sclauß S., Grottker M. (2016). *Coupling Process for 1D-2D Numerical Flash Flood Simulation: A Parameter Study of Involved Variables for Gullies and Manholes*. International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures.

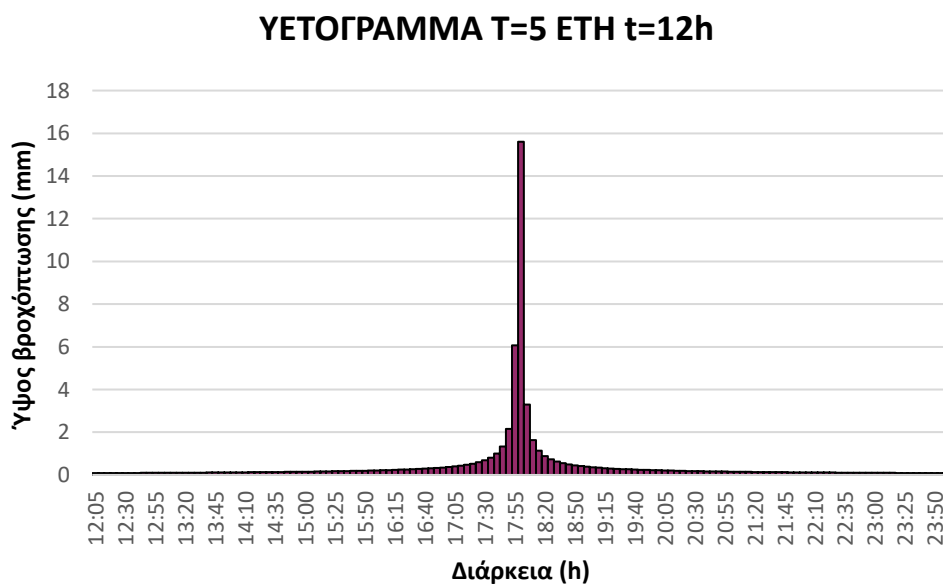


Syme WJ (2008). *Flooding in urban areas – 2D modelling approaches for building and fences*. Proceedings of the 9<sup>th</sup> National Conference on Hydraulics in Water Engineering, Australia, 25-32.

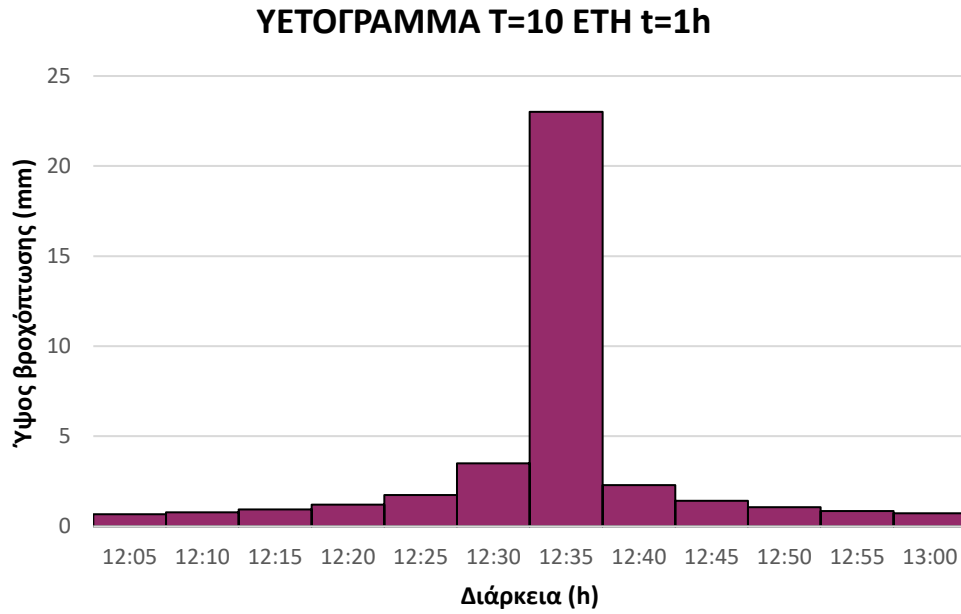
## 9 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΥΕΤΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ



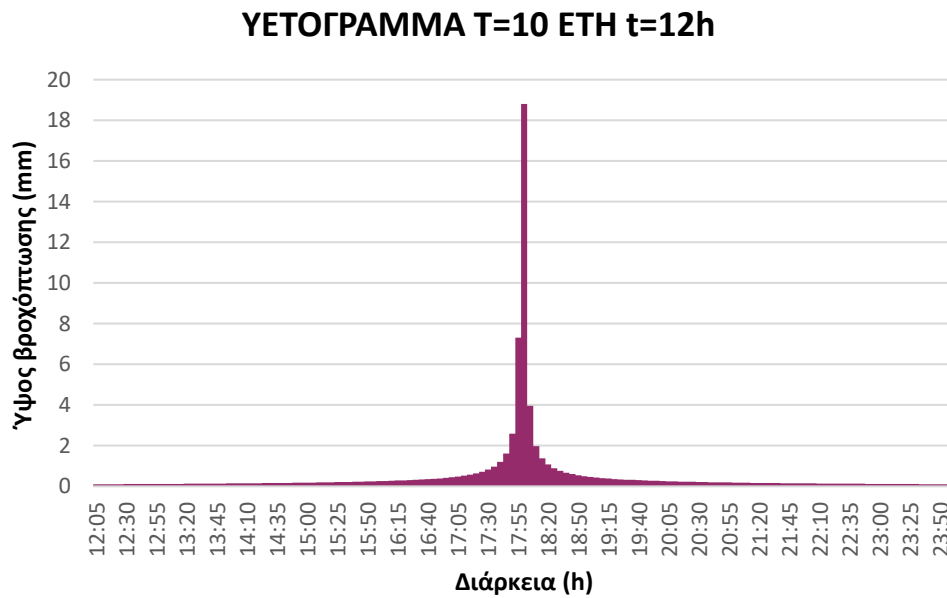
Εικόνα 9.1: Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς  $T=5$  έτη και χρονική διάρκεια  $t=2$  ώρες.



Εικόνα 9.2: Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς  $T=5$  έτη και χρονική διάρκεια  $t=12$  ώρες.

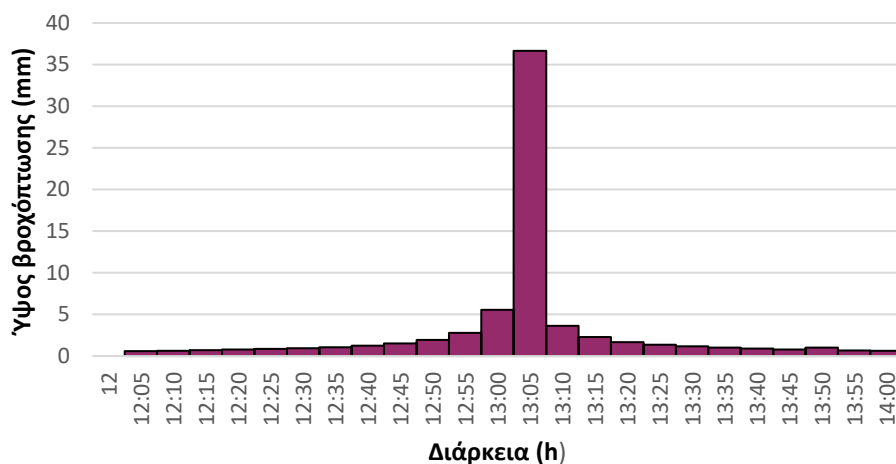


Εικόνα 9.3: Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς  $T=10$  έτη και χρονική διάρκεια  $t=1$  ώρα.



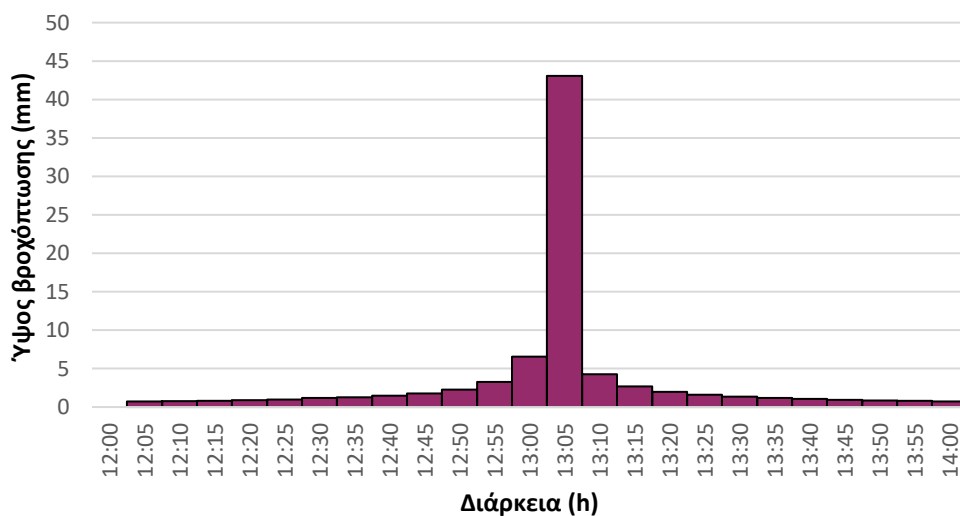
Εικόνα 9.4: Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς  $T=10$  έτη και χρονική διάρκεια  $t=12$  ώρες.

### ΥΕΤΟΓΡΑΜΜΑ T=50 ΕΤΗ t=2h



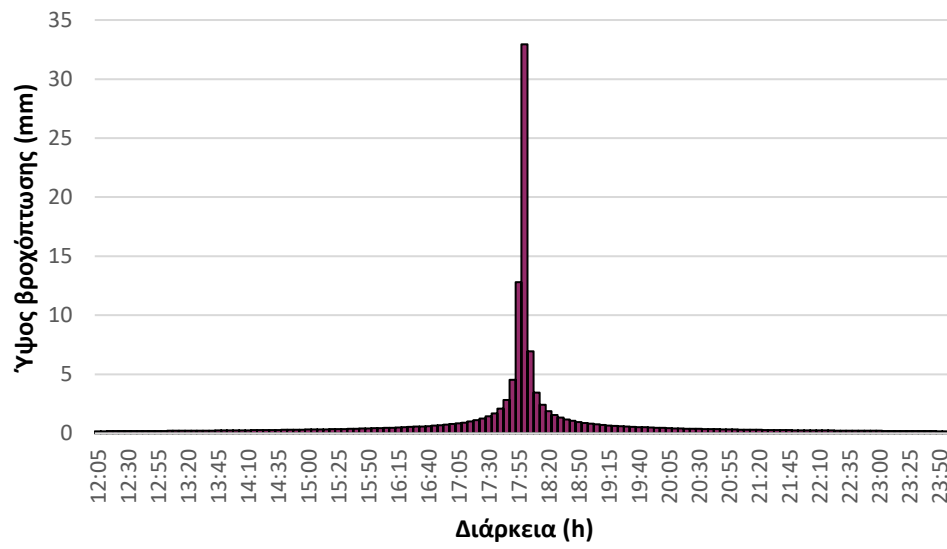
Εικόνα 9.5: Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς T=50 έτη και χρονική διάρκεια t=2 ώρες.

### ΥΕΤΟΓΡΑΜΜΑ T=100 ΕΤΗ t=2h



Εικόνα 9.6: Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς T=100 έτη και χρονική διάρκεια t=2 ώρες.

### ΥΕΤΟΓΡΑΜΜΑ T=100 ΕΤΗ t=12h



Εικόνα 9.7: Υετογράφημα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς T=100 έτη και χρονική διάρκεια t=12 ώρες.

## 10 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ

### 10.1 Αγωγός Α1 Περίοδος Επαναφοράς T=10 έτη

*Πίνακας 10.1: Επίλυση δικτύου με την Ορθολογική Μέθοδο. Αγωγός Α1.*

ΦΡΕΑΤΙΑ		ΜΗΚΟΣ (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	ΚΛΙΣΗ ΑΓΩΓΟΥ	t/D	V (m/s)
ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ					
A1-19	A1-18	23.001	1.363	0.07304	0.57	5.96
A1-18	A1-17	32.950	1.546	0.06798	0.64	5.96
A1-17	A1-16	22.000	1.707	0.07318	0.67	6.26
A1-16	A1-15	35.000	1.802	0.06686	0.72	6.07
A1-15	A1-14	60.000	1.919	0.05950	0.61	5.99
A1-14	A1-13	48.965	1.977	0.06086	0.62	6.09
A1-13	A1-12	13.000	1.990	0.04231	0.70	5.26
A1-12	A1-11	36.000	2.060	0.04722	0.69	5.54
A1-11	A1-10	21.000	2.160	0.02714	0.70	4.55
A1-10	A1-9	59.999	2.254	0.04333	0.61	5.54
A1-9	A1-8	64.999	2.372	0.05339	0.59	6.07
A1-8	A1-7	7.000	2.386	0.03714	0.67	5.27
A1-7	A1-6	46.000	2.447	0.02150	0.68	4.31
A1-6	A1-5	47.000	2.487	0.02151	0.69	4.33
A1-5	A1-4	57.000	2.771	0.02632	0.58	4.85
A1-4	A1-3	26.000	2.774	0.01538	0.59	3.96
A1-3	A1-2	45.000	2.807	0.01000	0.70	3.34
A1-2	A1-1	50.000	2.906	0.01100	0.69	3.50
A1-1	A-17	37.421	2.942	0.01069	0.70	3.46

## 10.2 Αγωγός Α Περίοδος επαναφοράς T=50 έτη

Πίνακας 10.2: Επίλυση δικτύου με την Ορθολογική Μέθοδο. Αγωγός Α.

ΦΡΕΑΤΙΑ		ΜΗΚΟΣ (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	ΚΛΙΣΗ ΑΓΩΓΟΥ	t/D	v (m/s)
ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ					
A-31	A-30	26.100	9.060	0.02107	0.57	6.00
A-30	A-29	30.435	9.085	0.02037	0.58	5.92
A-29	A-28	59.999	9.181	0.02033	0.59	5.93
A-28	A-27	62.125	9.430	0.02044	0.59	5.98
A-27	A-26	53.937	9.634	0.01984	0.61	5.94
A-26	A-25	59.999	9.692	0.01967	0.61	5.93
A-25	A-24	50.000	10.061	0.01940	0.63	5.94
A-24	A-23	47.815	10.180	0.01527	0.69	5.40
A-23	A-22	59.979	10.342	0.01917	0.65	5.95
A-22	A-21	59.990	10.457	0.01950	0.65	6.00
A-21	A-20	59.999	10.577	0.01867	0.66	5.91
A-20	A-19	59.173	10.688	0.01893	0.66	5.96
A-19	A-18	50.001	10.750	0.01840	0.67	5.90
A-18	A-17	58.070	10.777	0.01860	0.67	5.92
A-17	A-16	62.579	15.391	0.01835	0.68	6.02
A-16	A-15	45.999	15.632	0.01835	0.69	6.04
A-15	A-14	39.130	15.807	0.01835	0.70	6.06
A-14	A-13	37.350	15.807	0.00991	0.71	4.46
A-13	A-12	34.604	15.840	0.01792	0.70	6.02
A-12	A-11	39.206	15.896	0.01658	0.72	5.86
A-11	A-10	44.000	15.977	0.02273	0.65	6.56
A-10	A-9	45.000	16.090	0.01889	0.70	6.16
A-9	A-8	40.000	16.166	0.01750	0.72	6.00
A-8	A-7	49.721	16.277	0.01640	0.74	5.88
A-7	A-6	41.000	16.498	0.01640	0.74	5.89
A-6	A-5	51.399	16.535	0.01640	0.74	5.90
A-5	A-4	38.000	16.896	0.01640	0.76	5.93
A-4	A-3	42.809	16.956	0.01640	0.76	5.94
A-3	A-2	47.000	16.956	0.01640	0.76	5.94
A-2	A-1	47.768	16.956	0.01640	0.76	5.94

### 10.3 Αγωγός A1.1 Περίοδος Επαναφοράς T=10 έτη

Πίνακας 10.3: Επίλυση δικτύου με την Ορθολογική Μέθοδο. Αγωγός A1.1.

ΦΡΕΑΤΙΑ		ΜΗΚΟΣ (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	ΚΛΙΣΗ ΑΓΩΓΟΥ	t/D	V (m/s)
ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ					
A1.1-7	A1.1-6	40.002	0.069	0.05225	0.20	2.38
A1.1-6	A1.1-5	29.999	0.101	0.05200	0.25	2.66
A1.1-5	A1.1-4	52.000	0.146	0.05173	0.30	2.95
A1.1-4	A1.1-3	33.000	0.166	0.04909	0.33	3.00
A1.1-3	A1.1-2	40.000	0.191	0.04225	0.36	2.95
A1.1-2	A1.1-1	57.247	0.229	0.02795	0.45	2.66
A1.1-1	A1-5	35.924	0.247	0.00807	0.70	1.68

### 10.4 Αγωγός A2 Περίοδος επαναφοράς T=10 έτη

Πίνακας 10.4: Επίλυση του δικτύου με την Ορθολογική Μέθοδο. Αγωγός A2.

ΦΡΕΑΤΙΑ		ΜΗΚΟΣ (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	ΚΛΙΣΗ ΑΓΩΓΟΥ	t/D	V (m/s)
ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ					
A2-4	A2-3	37.770	0.045	0.01774	0.22	1.43
A2-3	A2-2	36.146	0.099	0.01881	0.32	1.84
A2-2	A2-1	43.862	0.168	0.04925	0.33	3.01
A2-1	A-5	47.098	0.204	0.02888	0.42	2.61



## 10.5 Αγωγός Α3 Περίοδος επαναφοράς T=10 έτη

Πίνακας 10.5: Επίλυση του δικτύου με την Ορθολογική Μέθοδο. Αγωγός Α3.

ΦΡΕΑΤΙΑ		ΜΗΚΟΣ (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	ΚΛΙΣΗ ΑΓΩΓΟΥ	t/D	v (m/s)
ΑΝΑΝΤΗ	ΚΑΤΑΝΤΗ					
A3-9	A3-8	33.952	0.063	0.01031	0.30	1.30
A3-8	A3-7	40.337	0.089	0.00992	0.36	1.41
A3-7	A3-6	41.884	0.130	0.00439	0.56	1.15
A3-6	A3-5	46.972	0.184	0.00439	0.71	1.24
A3-5	A3-4	43.870	0.242	0.00365	0.65	1.25
A3-4	A3-3	46.098	0.296	0.00282	0.61	1.20
A3-3	A3-2	45.979	0.358	0.00283	0.70	1.24
A3-2	A3-1	46.036	0.412	0.00391	0.69	1.46
A3-1	A-1	58.211	0.493	0.00533	0.70	1.71