



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ
ΤΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΕΙΣΡΟΗΣ
ΣΤΗΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ
ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ TELEMAC -
Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΜΑΝΔΡΑΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

Κωνσταντίνος Μαυρογεώργος

Επιβλέπων: Αναστάσιος Ι. Στάμου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και των σπουδών μου στην Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π κρίνω αναγκαίο να ευχαριστήσω όλους αυτούς που μου συμπαραστάθηκαν κατά τρόπον ψυχικό, πνευματικό, υλικό ή χρηματικό αλλά και αυτούς που μου στάθηκαν ως απλοί φίλοι και προφανώς όλους όσους συντέλεσαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Καταρχάς θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Γιώργο & Ελένη, για την ηθική και υλική στήριξη καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Δράττομαι όμως της ευκαιρίας να τους ευχαριστήσω και για όλα όσα απλόχερα μου χάρισαν σε όλη μου τη ζωή και κυρίως για τις αξίες που μου μεταλαμπάδευσαν και την ανατροφή που μου έδωσαν. Ευχαριστώ επίσης τα αδέρφια μου, Μαρία & Μιχαήλ, για τα παιχνίδια που κάναμε μαζί όταν είμαστε μικροί και για την συντροφιά τους τότε και τώρα.

Στην συνέχεια θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Αναστάσιο Στάμου, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό και καθηγητή του ΕΜΠ, αφενός μεν για την επίβλεψη της εργασίας και την συνεχή καθοδήγησή του, αφετέρου δε για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ πάνω σε ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα στον τομέα της υπολογιστικής υδραυλικής που ήταν ανέκαθεν της αρεσκείας μου. Με τις γνώσεις του και την εμπειρία του συνέβαλε τα μέγιστα για την αντιμετώπιση των ζητημάτων που ανέκυπταν καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά τον Δρ. Πολιτικό Μηχανικό κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη, ΕΔΙΠ ΕΜΠ, για την πολύτιμη βοήθειά του στο υδρολογικό μέρος της εργασίας, την προθυμία που επέδειξε κάθε φορά που τον χρειαζόμουν και τον χρόνο που διέθεσε προς χάριν μου.

Θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Γιώργο Μητσόπουλο, διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό, MSc και υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ. Επέδειξε απίστευτη προθυμία για την επίλυση κάθε τεχνικού ζητήματος και με βοήθησε κάθε στιγμή που τον είχα ανάγκη. Τον ευχαριστώ επίσης για τις συζητήσεις που κάναμε μαζί όσον αφορά το μαθηματικό μοντέλο TELEMAT και την υπολογιστική υδραυλική γενικότερα. Χωρίς αυτόν η ολοκλήρωση της εργασίας θα ήταν ενδεχομένως αδύνατη.

Ευχαριστώ πολύ τον Γιώργο Μαρκόπουλο-Σαρίκα για την παραχώρηση πολύτιμων στοιχείων από την δική του διπλωματική εργασία και για την συνολική βοήθεια που μου προσέφερε. Ευχαριστώ πολύ τον Χρήστο Θεοδωρόπουλο (υποψήφιο διδάκτορα ΕΜΠ) και τον Ανδρέα Παπαδημητρίου για την βοήθειά τους με την εγκατάσταση του λογισμικού. Ευχαριστώ επίσης την Γεωργία Παπαδονικολάκη (υποψήφια διδάκτορα ΕΜΠ) για την πολύτιμη βοήθειά της στο τελευταίο στάδιο της εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Κτηματολόγιο Α.Ε. για την παραχώρηση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους για την περιοχή μελέτης, το γραφείο μελετών HYDROMENT ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε για την χορήγηση της υδρολογικής μελέτης του ρ. Σούρες και το γραφείο μελετών ΕΤΜΕ - ΠΕΠΠΑΣ & ΣΥΝΕΡΓΑΤΕΣ Ε.Ε για την έγκριση της χορήγησης και τη χορήγηση στοιχείων της ΜΕΛΕΤΗΣ ΕΚΤΡΟΠΗΣ ΧΕΙΜΑΡΡΟΥ ΑΓ. ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΚΑΙ ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΗΣ ΧΕΙΜΑΡΡΟΥ ΣΟΥΡΕΣ ΘΡΙΑΣΙΟΥ ΠΕΔΙΟΥ.

Ευχαριστώ θερμά το ΙΔΡΥΜΑ ΒΑΡΩΝΟΥ ΜΙΧΑΗΛ ΤΟΣΙΤΣΑ και την ΦΟΙΤΗΤΙΚΗ ΕΣΤΙΑ ΤΟΣΙΤΣΑ στην ΚΗΦΙΣΙΑ για την στέγαση, την υλική στήριξη και την οικονομική βοήθεια που μου παρείχε για τις σπουδές μου.

Κλείνοντας, θα ήθελα να αποδώσω ευχαριστίες και στους φίλους μου. Στον φίλο μου, πατήρ Σπυρίδων Ταλάρη για την φιλοξενία και την βοήθειά του τον πρώτο καιρό στην Αθήνα και για την ευχάριστη παρέα του. Στους φίλους μου από την φοιτητική εστία στην Κηφισιά για όλα αυτά που περάσαμε μαζί και ιδιαίτερα τους συγχωριανούς μου με τους οποίους έζησα και συναναστράφηκα τον περισσότερο καιρό και μέχρι το τέλος. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω και στον παιδικό μου φίλο Παναγιώτη Τζαλονίκο, για την φιλία του, για όλες τις όμορφες στιγμές που περάσαμε μαζί στα μαθητικά και στα φοιτητικά μας χρόνια, αλλά και γιατί κατανοεί τον δύσκολο χαρακτήρα μου και τις ιδιορρυθμίες μου και επιμένει να είναι φίλος μου και να με στηρίζει.

Κωνσταντίνος Μαυρογεώργος
Ιούλιος 2019, Αθήνα

ABSTRACT

On November 15, 2017, a catastrophic flood occurred in the city of Mandra, located in Thriasio Plateau, in Western Attica, Greece. The flood was caused as a result of the heavy rainfall in the mountainous area northwest of the city, the extremely small cross-sectional areas of the two streams and the lack of significant flood defense works. The flood wave affected also the industrial area of Mandra and the neighboring settlements of Magoula and Elefsina.

The scope of this thesis is the development of a numerical model in the open source code TELEMAC-2D software for the wider area of Mandra, its calibration using collected data of the aforementioned incident and its further application to various hydrological scenarios in order to assess the flood regime of Mandra and to investigate the effect of incoming hydrograph on hydraulic calculations.

Initially, a hydrological simulation of the storm event was made and the inflows into the two streams were calculated by applying the classical approach of SCS-CN to estimate the effective rainfall and the synthetic unit hydrograph to propagate the runoff to the basins outlets. The model geometry was represented by the digital elevation model (DEM), provided by National Cadastre and Mapping Agency SA. The friction zones were determined by the CORINE 2012 land usage maps. The calibration of the hydraulic model was performed via the comparison of maximum calculated and recorded flood inundation and the reproduction by the model of the maximum flow depths at selected cross sections along the two streams. The appropriate data used in the process of calibration were collected from relevant research works and in-situ investigation.

After the calibration, four hydrological scenarios were prepared in which the rainfall depth is calculated from the idf curves with return periods of 20, 50, 100, and 1000 years respectively. Finally, the conclusions of all analyzes were recorded and proposals were expressed for further research.

Keywords: Flash flood, Mandra, rainfall-runoff modelling, numerical simulation, TELEMAC-2D

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις 15 Νοεμβρίου του 2017 μια καταστροφική πλημμύρα εκδηλώθηκε στην πόλη της Μάνδρας που βρίσκεται στο Θριάσιο Πεδίο της Δυτικής Αττικής. Οι βασικές αιτίες της πλημμύρας ήταν η έντονη βροχόπτωση στον ορεινό όγκο βορειοδυτικά της πόλης, η μικρή ή και ανύπαρκτη διατομή των ρεμάτων και η έλλειψη σημαντικών έργων αντιπλημμυρικής προστασίας. Η πλημμύρα επεκτάθηκε εκατέρωθεν του άξονα των ρεμάτων και επλήγη μεγάλο μέρος της πόλης και η βιομηχανική περιοχή της Μάνδρας αλλά και σε μικρότερο βαθμό οι γειτονικοί οικισμοί της Μαγούλας και της Άνω Ελευσίνας.

Το αντικείμενο της εργασίας είναι η δόμηση ενός μοντέλου στο ελεύθερο λογισμικό TELEMAC-2D για την ευρύτερη περιοχή της Μάνδρας, η βαθμονόμησή του από τα δεδομένα της πλημμύρας του 2017 και η περαιτέρω εφαρμογή του για διάφορα υδρολογικά σενάρια με σκοπό να εκτιμηθεί το πλημμυρικό καθεστώς της Μάνδρας και να διερευνηθεί η επίδραση που έχει το πλημμυρογράφημα εισόδου στους υδραυλικούς υπολογισμούς της πλημμύρας.

Σε πρώτο στάδιο έγινε υδρολογική προσομοίωση του εν λόγω επεισοδίου βροχής και υπολογίστηκαν τα πλημμυρογραφήματα εισόδου στα δύο ρέματα με εφαρμογή της συνδυαστικής μεθόδου SCS-CN και του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος. Σε δεύτερο στάδιο δομήθηκε το γεωμετρικό μοντέλο με χρήση του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους που χορηγήθηκε από την Κτηματολόγιο Α.Ε και επιπλέον σημεία που αντλήθηκαν από μελέτες ή κατασκευάστηκαν στο περιβάλλον Excel. Στο μοντέλο ελήφθησαν υπόψη ζώνες διαφορετικής τραχύτητας οι οποίες προσδιορίστηκαν από τους χάρτες χρήσεων γης CORINE 2012. Η βαθμονόμηση του υδραυλικού μοντέλου έγινε με κριτήριο την αναπαράσταση της μέγιστης καταγεγραμμένης έκτασης της πλημμύρας και την αναπαραγωγή των μέγιστων βαθών ροής σε επιλεγμένες θέσεις. Τα δεδομένα προήλθαν από σχετικές με το φαινόμενο ερευνητικές εργασίες και από την επιτόπια αυτοψία που πραγματοποιήσαμε.

Μετά την βαθμονόμηση καταρτίστηκαν τέσσερα υδρολογικά σενάρια, στα οποία η βροχόπτωση δίνεται από τις όμβριες καμπύλες για τις περιόδους επαναφοράς 20, 50, 100 και 1000 έτη και έγιναν οι κατάλληλες προσομοιώσεις. Στο τέλος καταγράφονται τα συμπεράσματα από όλες τις αναλύσεις και κατατίθενται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα πάνω στο αντικείμενο.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	ii
ABSTRACT	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	vi
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Αντικείμενο της εργασίας	1
1.2 Διάρθρωση της εργασίας.....	1
2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	2
2.1 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	2
2.1.1 Γενική μεθοδολογία εκτίμησης των πλημμυρικών μεγεθών.....	2
2.1.2 Παραμετρικό Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα	2
2.1.3 Χρόνος συρροής	4
2.1.4 Εκτίμηση των υδρολογικών ελλειμμάτων.....	4
2.1.5 Όμβριες καμπύλες.....	7
2.1.6 Επιφανειακή αναγωγή	7
2.1.7 Καταιγίδες σχεδιασμού.....	8
2.2 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ-ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ TELEMAC-2D.....	9
2.2.1 Γενικά	9
2.2.2 Εξισώσεις.....	10
2.2.3 Αρχεία εισόδου & εξόδου	10
2.2.4 Οριακές συνθήκες.....	11
2.2.5 Δόμηση του υπολογιστικού πλέγματος.....	12
3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ.....	13
3.1 Γενικά	13
3.2 Οδικό δίκτυο	14
3.3 Το ρέμα Σούρες	15
3.4 Το ρέμα Αγία Αικατερίνη	15
3.5 Λεκάνες απορροής.....	15
3.6 Περιγραφή του πλημμυρικού γεγονότος της 15/11/2017	17
3.6.1 Χωροχρονική εξέλιξη του κύματος.....	17
3.7 Επιτόπια αυτοψία στην Μάνδρα	19
4 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....	22
4.1 Επιλογή βροχής.....	22
4.2 Χρόνος συρροής.....	22
4.3 Αποτελέσματα.....	23
4.4 Συνθετικά υδρογραφήματα	25

4.4.1	Όμβριες καμπύλες.....	25
4.4.2	Υπολογιστική διαδικασία	25
4.4.3	Αποτελέσματα	26
5	ΡΥΘΜΙΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΤΟΥ 2017.....	29
5.1	ΔΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΑΡΧΕΙΟΥ	29
5.1.1	Γενικά	29
5.1.2	Δημιουργία του πλέγματος	29
5.1.3	Ψηφιακό μοντέλο εδάφους	31
5.1.4	Επεξεργασία της φυσικής κοίτης του ρ. Σούρες	31
5.1.5	Επεξεργασία της τεχνητής κοίτης.....	33
5.1.6	Απόδοση τιμών του συντελεστή Manning στο πλέγμα	35
5.1.7	Τεχνικά Έργα.....	36
5.1.8	Οριακές συνθήκες και παράμετροι της προσομοίωσης	38
5.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥΣ	39
5.2.1	Βάθη ροής	40
5.2.2	Παροχές.....	44
5.2.3	Πλημμυρική έκταση και χρόνοι άφιξης.....	48
5.2.4	Σχολιασμός των αποτελεσμάτων	56
6	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	57
6.1	Εισαγωγή	57
6.2	Υδραυλικοί υπολογισμοί.....	58
6.2.1	Παροχές.....	58
6.2.2	Βάθη ροής	61
6.2.3	Χρόνοι άφιξης.....	64
6.2.4	Πλημμυρική έκταση	64
6.3	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	67
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	69
7.1	Συμπεράσματα.....	69
7.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	69
	ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	70
	ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	71
	ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	72
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ	73

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Την 14^η και την 15^η Νοεμβρίου του 2017, μια αρκετά ισχυρή καταιγίδα πάνω από το όρος Πατέρα της Δυτικής Αττικής είχε ως αποτέλεσμα την ενεργοποίηση των υδρολογικών λεκανών και την εκδήλωση ξαφνικών πλημμυρών στις πόλεις που βρίσκονται κοντά στην θάλασσα και κυρίως στην πόλη της Μάνδρας η οποία είναι χωροθετημένη ακριβώς στην έξοδο δύο λεκανών απορροής. Ο απολογισμός της πλημμύρας ήταν οι σημαντικές υλικές ζημιές και η απώλεια 23 ανθρώπων, καθιστώντας την ως την τρίτη φονικότερη πλημμύρα στα δυτικά προάστια της Αττικής.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι πρώτον, η υδρολογική προσομοίωση του πλημμυρικού επεισοδίου και η χρήση των αποτελεσμάτων για την βαθμονόμηση του μαθηματικού μοντέλου TELEMAC-2D. Η βαθμονόμηση γίνεται με κριτήριο την αναπαράσταση της μέγιστης χωρικής εξάπλωσης της πλημμύρας και την αναπαραγωγή των μέγιστων βαθών ροής. Δεύτερον, η εφαρμογή του βαθμονομημένου μοντέλου για 4 σενάρια βροχόπτωσης ώστε να εξεταστεί το πλημμυρικό καθεστώς της Μάνδρας και να διερευνηθεί η επίδραση του πλημμυρογραφήματος εισροής στην υδραυλική συμπεριφορά της πλημμύρας.

1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει μαζί με το παρόν 7 κεφάλαια που περιγράφονται συνοπτικά στην συνέχεια.

- **Στο Κεφάλαιο 2**, γίνεται περιγραφή των εργαλείων που χρησιμοποιούνται στον υδρολογικό σχεδιασμό, παρουσίαση της θεωρίας του λογισμικού TELEMAC και βασικά στοιχεία για την ανάπτυξη και εφαρμογή ενός γεωμετρικού μοντέλου στο παραπάνω λογισμικό.
- **Στο Κεφάλαιο 3**, γίνεται περιγραφή της περιοχής μελέτης και των ορεινών λεκανών που χρησιμοποιήθηκαν στην υδρολογική ανάλυση καθώς και περιγραφή του πλημμυρικού γεγονότος του Νοεμβρίου του 2017.
- **Στο Κεφάλαιο 4**, δίνονται τα βασικά εργαλεία και οι παραδοχές που έγιναν για την υδρολογική προσομοίωση και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή.
- **Στο Κεφάλαιο 5**, περιγράφεται η διαδικασία μοντελοποίησης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων.
- **Στο Κεφάλαιο 6**, γίνεται η εφαρμογή του βαθμονομημένου μοντέλου και εξάγονται τα βασικά συμπεράσματα από αυτήν.
- **Στο Κεφάλαιο 7**, γίνεται ανακεφαλαίωση των συμπερασμάτων της παρούσας εργασίας καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και βελτίωση.

2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

2.1 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

2.1.1 Γενική μεθοδολογία εκτίμησης των πλημμυρικών μεγεθών

Η ανάλυση κάθε πλημμυρικού επεισοδίου έχει ως στόχο την εξαγωγή των χαρακτηριστικών της βροχόπτωσης (όπως ενεργός βροχόπτωση, συντελεστής απορροής και περίοδος επαναφοράς) και των χαρακτηριστικών της απορροής (χρονική κατανομή, παροχή αιχμής). Τα αποτελέσματα κάθε ανάλυσης αποτελούν μία χρήσιμη πηγή δεδομένων για μελλοντικές εργασίες. Η συνηθέστερη μέθοδος μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε απορροή είναι εκείνη του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Το μοναδιαίο υδρογράφημα διάρκειας d ωρών είναι το υδρογράφημα που παράγεται από ενεργό βροχόπτωση διάρκειας d ωρών και ύψους 10 mm με σταθερή ένταση ως προς τον χώρο και τον χρόνο. Η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος διέπεται από δύο βασικές αρχές (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012):

- **Η αρχή της αναλογίας:** Δύο ενεργές βροχές της ίδιας διάρκειας αλλά με διαφορετικές εντάσεις δημιουργούν υδρογραφήματα με την ίδια χρονική βάση και τεταγμένες που σε κάθε χρονική στιγμή έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με τον λόγο των εντάσεων.
- **Η αρχή της επαλληλίας:** Το συνολικό υδρογράφημα που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων.

Η κατάρτιση του μοναδιαίου υδρογραφήματος σε μια λεκάνη ενδιαφέροντος απαιτεί υδρομετρικά δεδομένα από πραγματικά πλημμυρικά επεισόδια. Στις περισσότερες λεκάνες δεν υπάρχουν οι κατάλληλες μετρήσεις, αλλά και όταν υπάρχουν, η απευθείας κατάρτιση μοναδιαίου υδρογραφήματος ενέχει κινδύνους λόγω της αξιοπιστίας των μετρήσεων αφενός και των παραδοχών που πρέπει να γίνουν για την εξαγωγή του αφετέρου. Έτσι λοιπόν, η τεχνική του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος (ΣΜΥ) εφαρμόζεται σχεδόν αποκλειστικά στις υδρολογικές αναλύσεις και αποτελεί ένα κοινώς αποδεκτό εργαλείο από τους υδραυλικούς μηχανικούς ανά τον κόσμο. Η κατάρτιση του ΣΜΥ είναι σχετικά εύκολη καθώς βασίζεται στα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της μελετώμενης λεκάνης. Στην βιβλιογραφία υπάρχει πλήθος μεθόδων εκτίμησης του ΣΜΥ. Στην Ελλάδα βρίσκουν εφαρμογή το τριγωνικό ΣΜΥ του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (Sutcliffe, 1978), το ΣΜΥ του Snyder (Snyder, 1938) και το αδιάστατο (λείο) ΣΜΥ της Αμερικανικής Υπηρεσίας Διατήρησης Εδαφών (Soil Conservation Service - SCS, 1972).

2.1.2 Παραμετρικό Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα

Για τις ελληνικές λεκάνες μπορεί να χρησιμοποιείται και το παραμετρικό συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα που αναπτύχθηκε από αναλύσεις επεισοδίων στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ (Ευστρατιάδης κ.α., 2014). Το συγκεκριμένο ΣΜΥ συντίθεται από έναν γραμμικό ανοδικό κλάδο και από έναν εκθετικά μειούμενο καθοδικό κλάδο. Για την κατάρτισή του υπολογίζονται αρχικά ο χρόνος ανόδου από την σχέση:

$$t_p = \frac{d}{2} + \beta t_c \quad (2.1)$$

Και ο χρόνος βάσης από την σχέση:

$$t_b = d + \gamma t_c \quad (2.2)$$

όπου β , γ αδιάστατες παράμετροι με $0 < \beta < 1$ και $\gamma \geq 1$, d είναι η διάρκεια της μοναδιαίας βροχής και t_c ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης. Οι παραπάνω χαρακτηριστικοί χρόνοι στρογγυλοποιούνται

ώστε να είναι ακέραια πολλαπλάσια της διάρκειας d και κατόπιν υπολογίζεται η παροχή αιχμής Q_p και οι τεταγμένες του υδρογραφήματος σε κάθε χρονικό βήμα. Η παροχή Q_p υπολογίζεται από τον όγκο του ΣΜΥ για τον οποίο ισχύει $V_0 = h_0 \cdot A$, όπου $h_0=10$ mm το ύψος της μοναδιαίας βροχής και A η έκταση της λεκάνης. Για την παροχή αιχμής δεν υπάρχει αναλυτικός τύπος γιατί από την εξίσωση του όγκου προκύπτει μία πεπλεγμένη σχέση η οποία επιλύεται αριθμητικά.

Για $t \leq t_p$ οι παροχές υπολογίζονται ως εξής:

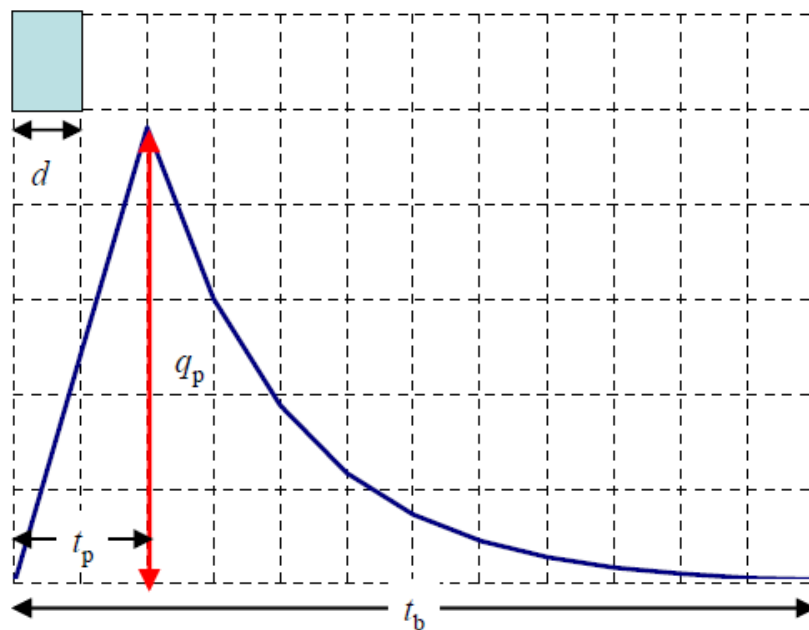
$$u(t) = Q_p t / t_p \quad (2.3)$$

Για $t > t_p$ οι παροχές υπολογίζονται από την εκθετική σχέση:

$$u(t) = Q_p \exp\left(\frac{-k t}{t_b}\right) \quad (2.4)$$

Όπου k είναι ο συντελεστής στείρευσης που υπολογίζεται έτσι ώστε για $t=t_b$ η παροχή να λαμβάνει μία ελάχιστη τιμή Q_0 , η οποία λαμβάνεται συνήθως ίση με 0.01 m³/s. Με εφαρμογή της σχέσης (2.4) προκύπτει ότι ο συντελεστής k υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$k = -\ln(Q_0/Q_p) \quad (2.5)$$



Εικόνα 2.1-1: Το παραμετρικό ΣΜΥ με τα χαρακτηριστικά του μεγέθη (Ευστρατιάδης κ.α., 2014)

Από τις αναλύσεις των πλημμυρικών επεισοδίων στο προαναφερθέν ερευνητικό έργο προτείνεται η χρήση των τιμών $\beta=0.30$ για λεκάνες με μεγάλες κλίσεις έως $\beta=0.60$ για ήπιες κλίσεις. Για την παράμετρο του χρόνου βάσης προτείνονται οι τιμές :

- $\gamma=1$ για αστικές λεκάνες πυκνής δόμησης, με ανεπτυγμένο δίκτυο ομβρίων
- $\gamma=5$ για λεκάνες χαμηλής περατότητας
- $\gamma=10$ για λεκάνες μέτριας έως υψηλής υδατοπερατότητας
- $\gamma=20$ για καρστικές λεκάνες, με κυριαρχία υποδερμικής ροής

2.1.3 Χρόνος συρροής

Ο χρόνος συρροής ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται ώστε το νερό από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης να φτάσει στην έξοδο. Αποτελεί θεμελιώδες μέγεθος της λεκάνης απορροής και έχει ιδιαίτερη σημασία στον υδρολογικό σχεδιασμό καθώς επηρεάζει πληθώρα μεγεθών, όπως το χρονικό βήμα των υπολογισμών, την διάρκεια της καταιγίδας σχεδιασμού, το σχήμα και την αιχμή του μοναδιαίου υδρογραφήματος.

Για την εκτίμηση του χρόνου συρροής έχει αναπτυχθεί μια πληθώρα εμπειρικών σχέσεων που διατίθεται στην βιβλιογραφία. Στις υδρολογικές μελέτες στον Ελλαδικό χώρο αποτελεί κοινή πρακτική η χρησιμοποίηση της σχέσης του Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta z}} \quad (2.6)$$

Όπου A (km^2) είναι η επιφάνεια της λεκάνης, L (km) είναι το μήκος της κύριας μισγάγγειας, Δz (m) είναι η διαφορά του μέσου υψομέτρου της λεκάνης από το υψόμετρο της εξόδου της και ο χρόνος t_c δίνεται σε h .

Ο χρόνος συγκέντρωσης δεν θα πρέπει να θεωρείται σταθερός αφού εξαρτάται από την ταχύτητα της επιφανειακής απορροής. Δηλαδή, μεγαλύτερα ύψη βροχής συνεπάγονται υψηλότερες ταχύτητες στην επιφάνεια της λεκάνης και στο υδρογραφικό δίκτυο και άρα μείωση του χρόνου συγκέντρωσης. Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ (<http://deucalionproject.itia.ntua.gr/>) προτείνεται η μείωση του χρόνου που προκύπτει από την σχέση του Giandotti σύμφωνα με την ακόλουθη εμπειρική σχέση (Ευστρατιάδης κ.α., 2014):

$$t_c(T) = t_c \sqrt{\frac{i(5)}{i(T)}} \quad (2.7)$$

Όπου $i(5)$ είναι η ένταση της βροχής που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 5 ετών, για την οποία θεωρείται αντιπροσωπευτική η εκτίμηση του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti και $i(T)$ η ένταση της βροχής για την περίοδο επαναφοράς της μελέτης.

2.1.4 Εκτίμηση των υδρολογικών ελλειμμάτων

Το μοναδιαίο υδρογράφημα αποτελεί ένα εργαλείο μετασχηματισμού της ενεργού βροχόπτωσης σε πλημμυρική απορροή. Επομένως, πριν την εφαρμογή του είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός των υδρολογικών ελλειμμάτων από το συνολικό υετογράφημα, δηλαδή του μέρους της βροχόπτωσης που κατακρατείται από το έδαφος και την βλάστηση. Η πλέον συνήθης μέθοδος για την εκτίμηση των υδρολογικών ελλειμμάτων είναι εκείνη του αριθμού καμπύλης απορροής (runoff curve number – CN) που αναπτύχθηκε από την Soil Conservation Service (SCS, 1972). Οι βασικές παραδοχές της μεθόδου είναι οι εξής:

- Από την αρχή του επεισοδίου και μέχρι κάποιο χρόνο t_0 όλη η ποσότητα της βροχόπτωσης μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε απώλειες. Η ποσότητα αυτή καλείται αρχικό έλλειμμα I_α και αποτελεί παράμετρο της μεθόδου. Συνεπώς, μετά τον χρόνο t_0 η ενεργός βροχόπτωση P_e δεν μπορεί να υπερβεί την δυνητική απορροή $P - I_\alpha$, όπου P το ολικό ύψος βροχής.
- Επίσης μετά τον χρόνο t_0 το πρόσθετο ποσό του νερού που συγκρατείται στην λεκάνη F_α , δεν μπορεί να ξεπεράσει ένα άνω όριο που καλείται μέγιστη δυνητική κατακράτηση S , και αποτελεί παράμετρο της μεθόδου.
- Σε κάθε χρονική στιγμή $t > t_0$, οι λόγοι του ενεργού ύψους βροχής P_e και του πρόσθετου ελλειμματικού F_α , προς τα αντίστοιχα δυνητικά μεγέθη ($P - I_\alpha$ και S αντίστοιχα), είναι ίσοι.

Επομένως ισχύει:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (2.8)$$

Από το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης έχουμε:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (2.9)$$

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει η εξίσωση υπολογισμού της ενεργού βροχόπτωσης:

$$P_e = \begin{cases} 0 & , \quad P \leq I_a \\ \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} & , \quad P > I_a \end{cases} \quad (2.10)$$

Συνήθως το αρχικό έλλειμμα λαμβάνεται ως ποσοστό της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης. Με αυτήν την απλοποίηση η παραπάνω σχέση μετασχηματίζεται ως:

$$P_e = \begin{cases} 0 & , \quad P \leq \alpha S \\ \frac{(P - \alpha S)^2}{P + (1 - \alpha)S} & , \quad P > \alpha S \end{cases} \quad (2.11)$$

Γενικά το ποσοστό α λαμβάνεται ίσο με 20% του S , τιμή που έχει προκύψει από πειραματικά αποτελέσματα σε μικρές αγροτικές λεκάνες των ΗΠΑ με ήπιες κλίσεις. Ωστόσο, από τις αναλύσεις σε δείγματα βροχής απορροής του έργου ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ, στις περισσότερες πιλοτικές λεκάνες (ως επί το πλείστον ορεινές) το ποσοστό κυμάνθηκε μεταξύ 2-5%. Τελικά, για την εφαρμογή του παραπάνω σχήματος απαιτείται μία μόνο παράμετρος, η τιμή της οποίας μπορεί να εκτιμηθεί από μετρήσεις απορροής ή από την παρακάτω εμπειρική σχέση:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (2.12)$$

Ο αριθμός καμπύλης απορροής CN παίρνει τιμές από 0 μέχρι 100 και εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους, τις χρήσεις γης στην υδρολογική λεκάνη και τις συνθήκες της προηγούμενης εδαφικής υγρασίας όπως αυτές καθορίζονται από την SCS.

Κατά την μέθοδο SCS τα εδάφη κατατάσσονται σε 4 τύπους (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 2016):

Ομάδα Α: Εδάφη με μεγάλους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδη και χαλικώδη με πολύ μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου.

Ομάδα Β: Εδάφη με μέσους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδης πηλός.

Ομάδα C: Εδάφη με μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη από αργιλοπηλό, εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό.

Ομάδα D: Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη που διογκώνονται σημαντικά όταν διαβραχούν, πλαστικές άργιλοι. Στην ίδια ομάδα περιλαμβάνονται εδάφη μικρού βάθους με σχεδόν αδιαπέρατους υπο-οριζόντες κοντά στην επιφάνεια.

Ακόμη σύμφωνα με την τυποποίηση της SCS, θεωρούνται τρεις τύποι συνθηκών υγρασίας (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 2016):

Τύπος I: Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά, αλλά πάνω από το σημείο μαρασμού), που αναφέρονται στην περίπτωση που η αθροιστική βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι <13 mm (ή <35 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Τύπος II: Μέσες συνθήκες, που αντιστοιχούν σε αθροιστική βροχόπτωση 5 ημερών μεταξύ 13 και 38 mm (ή μεταξύ 35 και 53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Τύπος III: Υγρές συνθήκες (εδάφη σχεδόν κορεσμένα), που αντιστοιχούν σε αθροιστική βροχόπτωση 5 ημερών >38 mm (ή >53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και την χρήση της γης επιλέγεται η τιμή του συντελεστή CN_{II} για μέσες συνθήκες υγρασίας από κατάλληλους πίνακες της βιβλιογραφίας, ενώ για τις άλλες συνθήκες γίνεται αναγωγή μέσω των σχέσεων:

$$C_I = \frac{4.2 CN_{II}}{10 - 0.058CN_{II}} \quad (2.13)$$

$$C_{III} = \frac{23 CN_{II}}{10 + 0.13CN_{II}} \quad (2.14)$$

Δεδομένου ότι οι τιμές του συντελεστή CN που δίνονται στην βιβλιογραφία ισχύουν για $\alpha=0.2$, σε περίπτωση επιλογής διαφορετικής τιμής απαιτείται τροποποίηση της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης S. Για τον σκοπό αυτό ακολουθείται η εξής διαδικασία:

1. Με την τιμή του CN_{20} , από την σχέση (2.12) υπολογίζεται η τιμή της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης S_{20} που αναφέρεται σε ποσοστό αρχικών απωλειών 20%.
2. Μέσω της σχέσης (2.11) υπολογίζεται το ολικό ενεργό ύψος βροχής P_e , συναρτήσει των P, α και S_{20} .
3. Για το επιθυμητό ποσοστό α , με γνωστά αυτή τη φορά τα P και P_e , βρίσκουμε την διορθωμένη τιμή S_a λύνοντας την σχέση (2.11) ως προς S_a ως εξής (Risva, 2018):

$$S(a) = \frac{2aP + (1 - a)P_e - \sqrt{P_e [P_e (1 - a)^2 + 4aP]}}{2a^2} \quad (2.15)$$

Πίνακας 2.1-1: Προτεινόμενες τιμές του ποσοστού αρχικών απωλειών (Ευστρατιάδης κ.α., 2014)

α (%)	Τύπος λεκάνης
5	Αστικές λεκάνες, λεκάνες με σημαντική κλίση, εδάφη χαμηλής διηθητικότητας
10	Μη αστικές λεκάνες μέτριας υδατοπερατότητας και βλάστησης
20	Αγροτικές και δασικές λεκάνες, λεκάνες με σημαντικά έργα ανάσχεσης

2.1.5 Όμβριες καμπύλες

Στην γενική περίπτωση διαστασιολόγησης των υδραυλικών έργων η εκτίμηση των πλημμυρικών αιχμών γίνεται με χρήση των όμβριων καμπυλών. Οι καμπύλες αυτές είναι μαθηματικές εκφράσεις που αποδίδουν την ένταση της βροχόπτωσης i συναρτήσει της διάρκειας της βροχόπτωσης d και της περιόδου επαναφοράς T . Η κατάρτιση των όμβριων καμπυλών βασίζεται στην στατιστική ανάλυση των μέγιστων καταγεγραμμένων καταιγίδων για διάφορες χρονικές κλίμακες από 5 λεπτά μέχρι 48 ώρες. Η γενική σχέση των όμβριων καμπυλών είναι της μορφής (Koutsoyiannis et. al., 1998):

$$i = \frac{a(T)}{b(d)} \quad (2.16)$$

όπου $a(T)$ είναι η συνάρτηση της περιόδου επαναφοράς που προκύπτει από την συνάρτηση κατανομής που προσαρμόζεται στο δείγμα των μετρήσεων και $b(d)$ είναι η συνάρτηση της διάρκειας, η μορφή της οποίας δίνεται από εμπειρικές σχέσεις. Ανάλογα με τις σχέσεις που επιλέγονται για τις συναρτήσεις $a(T)$ και $b(d)$ η τελική μορφή των όμβριων καμπυλών ποικίλει. Στο τεύχος «ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΟΜΒΡΙΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΧΩΡΑΣ» που συντάχθηκε από την Ειδική Γραμματεία Υδάτων στο πλαίσιο εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ, προτείνεται η χρήση ενιαίας μεθοδολογίας για όλα τα υδατικά διαμερίσματα όπως αυτή αναπτύχθηκε από τους Koutsoyiannis et. al., 1998. Σύμφωνα με την ΕΓΥ, οι όμβριες καμπύλες που καταρτίστηκαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της έντασης της βροχόπτωσης σχεδιασμού, για επιλεγμένη διάρκεια και περίοδο επαναφοράς, σε οποιαδήποτε θέση ή λεκάνη απορροής της χώρας. Η τελική μορφή της καμπύλης βασίζεται στην κατανομή *Γενική Ακραίων Τιμών* (ΓΑΤ) και έχει ως εξής:

$$i(d, T) = \frac{\lambda'(T^\kappa + \psi')}{\left(1 + \frac{d}{\theta}\right)^\eta} \quad (2.17)$$

Όπου λ' , ψ' και κ είναι οι παράμετροι κλίμακας, θέσης και σχήματος αντίστοιχα της κατανομής ΓΑΤ.

2.1.6 Επιφανειακή αναγωγή

Η κατάρτιση των όμβριων καμπυλών βασίζεται σε σημειακές μετρήσεις στις θέσεις των βροχογράφων. Στον υδρολογικό σχεδιασμό όμως πρέπει να χρησιμοποιείται η μέση επιφανειακή βροχόπτωση της λεκάνης. Λόγω της χωρικής μεταβλητότητας της βροχής πάνω από μια λεκάνη, είναι αδύνατο να καταγράφεται ταυτόχρονα μέγιστη ένταση σε όλη την λεκάνη. Για την επιφανειακή αναγωγή της έντασης, οι τιμές της όμβριας καμπύλης πολλαπλασιάζονται με τον συντελεστή επιφανειακής απομείωσης (areal reduction factor) ϕ . Ο συντελεστής ϕ έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

1. Είναι πάντα μικρότερος της μονάδας
2. Είναι φθίνουσα συνάρτηση της έκτασης της λεκάνης
3. Είναι αύξουσα συνάρτηση της διάρκειας της βροχής

Στην Ελλάδα χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση που δίνεται από τους (Κουτσογιάννη και Ξανθόπουλο, 2016):

$$\phi = \max\left(1 - \frac{0.048 A^{0.36 - 0.01 \ln A}}{d^{0.35}}, 0.25\right) \quad (2.18)$$

Όπου ϕ είναι ο συντελεστής επιφανειακής αναγωγής, A η έκταση της λεκάνης σε km^2 και d η διάρκεια βροχής σε h . Η σχέση βασίστηκε σε πινακοποιημένα αποτελέσματα του National Environmental Research Council (1975) της Μεγάλης Βρετανίας.

2.1.7 Καταιγίδες σχεδιασμού

Η σύνθεση της καταιγίδας σχεδιασμού περιλαμβάνει τον καθορισμό της συνολικής διάρκειάς της, τον καθορισμό του χρονικού βήματος των υπολογισμών και τον χρονικό επιμερισμό της, δηλαδή την εύρεση των τμηματικών υψών βροχόπτωσης σε κάθε χρονικό βήμα. Σημειώνεται ότι η συνολική διάρκεια της καταιγίδας πρέπει να λαμβάνεται ως πολλαπλάσιο του χρόνου συγκέντρωσης της λεκάνης (ενδεικτικά $d > 3t_c$) και το χρονικό βήμα θα πρέπει να λαμβάνεται ως υποπολλαπλάσιο του χρόνου συγκέντρωσης της λεκάνης (ενδεικτικά $\Delta t < 3t_c$).

Οι μέθοδοι για την χρονική κατανομή των καταιγίδων σχεδιασμού χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- **Αδιάστατες αθροιστικές καμπύλες:** Σε κάθε χρονικό βήμα το ύψος βροχής δίνεται ως ποσοστό του συνολικού.
- **Απλοποιημένες μέθοδοι τμηματικών υψών βροχής:** Σε κάθε χρονικό βήμα το ύψος βροχής εκτιμάται μέσω της όμβριας καμπύλης με την ίδια περίοδο επαναφοράς με το συνολικό ύψος.
- **Μοντέλα στοχαστικού επιμερισμού:** Η χρονική κατανομή προκύπτει από πλήθος σεναρίων που αναπαράγουν την στατιστική δομή των καταγεγραμμένων καταιγίδων.

Στην πράξη, πιο συχνά εφαρμόζεται η δεύτερη μέθοδος και συγκεκριμένα η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ (alternating block method – Sutcliffe, 1978 & Chow et. al., 1988) και η μέθοδος της δυσμενέστερης διάταξης (worst profile – U.S Department of the Interior, 1977).

Στην μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ, το μέγιστο τμηματικό ύψος τοποθετείται στο μέσον της καταιγίδας και τα υπόλοιπα τοποθετούνται με φθίνουσα σειρά αριστερά και δεξιά από το κεντρικό μπλοκ.

Στην μέθοδο της δυσμενέστερης διάταξης τα τμηματικά ύψη τοποθετούνται αρχικά κατά αντιστοιχία με τις τεταγμένες του μοναδιαίου υδρογραφήματος, δηλαδή το μέγιστο ύψος βροχής βρίσκεται στην ίδια χρονική θέση με την μέγιστη τεταγμένη του μοναδιαίου υδρογραφήματος, το αμέσως μικρότερο ύψος στην ίδια θέση με την αμέσως μικρότερη τεταγμένη, κ.ο.κ. Στη συνέχεια η διάταξη αντιστρέφεται και προκύπτει το τελικό υετόγραμμα.

2.2 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ-ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ TELEMAC-2D

2.2.1 Γενικά

Το υδροδυναμικό μοντέλο Telemac – 2D αποτελεί μία από τις ενότητες του συστήματος TELEMAC – MASCARET (www.opentelemac.org). Το σύστημα TELEMAC αποτελεί μία πλατφόρμα λογισμικών ελεύθερης πρόσβασης και ανοιχτού κώδικα. Το τελευταίο σημαίνει ότι ο εκάστοτε χρήστης μπορεί αν επιθυμεί να προγραμματίσει λειτουργίες που δεν παρέχονται από την κανονική έκδοση, εφόσον διαθέτει τις απαραίτητες στοιχειώδεις γνώσεις στην γλώσσα Fortran. Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε από το εργαστήριο *Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE)* της διεύθυνσης έρευνας & ανάπτυξης (*Direction des Recherches et Développements, R&D*) της Γαλλικής Εταιρείας Ηλεκτρισμού (*Electricité de France, EDF*).

Το λογισμικό χρησιμοποιείται κυρίως σε προβλήματα θαλάσσιας ή ποτάμιας υδραυλικής όπου εμφανίζονται ροές με ελεύθερη επιφάνεια. Η βασική του λειτουργία είναι η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων της διδιάστατης ροής (depth-averaged free surface flow equations ή shallow water equations) όπως αυτές διατυπώθηκαν για πρώτη φορά από τον Barré de Saint-Venant το 1871. Τα αποτελέσματα του μοντέλου σε κάθε υπολογιστικό κόμβο είναι το βάθος ροής και οι μέσες ταχύτητες καθ' ύψος της διατομής στις δύο διαστάσεις της ροής.

Το Telemac – 2D μπορεί να προσομοιώσει πλήθος φυσικών διεργασιών, από τις πιο βασικές

- Τριβή στον πυθμένα
- Τύρβη
- Υποκρίσιμες & υπερκρίσιμες ροές
- Εισαγωγή υπερχειλιστών, αναχωμάτων, οχετών και άλλων τεχνικών στο υπολογιστικό πεδίο
- Εισαγωγή περιοχών που παραμένουν στεγνές κατά την προσομοίωση, όπως πλημμυρικά πεδία σε ποταμούς ή παλιρροιακά πεδία στην θάλασσα (flood-plains ή tidal flats)
- Μεταφορά και διάχυση ιχνηθετών εξαιτίας του ρεύματος, συμπεριλαμβανομένων και των όρων δημιουργίας ή αποδόμησης
- Μετάδοση κυμάτων με μεγάλο μήκος λαμβάνοντας υπόψη και μη γραμμικά φαινόμενα

Έως τις πιο εξειδικευμένες,

- Υπολογισμός της ποιοτικής κατάστασης του υδάτινου σώματος (σε ζεύξη με μοντέλα ποιότητας υδάτων, π.χ. DELWAQ)
- Υπολογισμός στερεομεταφοράς και άλλων φυσικών διεργασιών που συνδέονται με την ύπαρξη κινητού πυθμένα (σε ζεύξη με το μοντέλο SISYPHE)
- Την επίδραση μετεωρολογικών φαινομένων, όπως ατμοσφαιρική πίεση, άνεμος και βροχή στην ελεύθερη επιφάνεια ή και εξάτμιση από αυτήν.
- Την επίδραση της θερμοκρασίας και της αλατότητας στην πυκνότητα του ρευστού.
- Την επίδραση της δύναμης Coriolis
- Δημιουργία του υπολογιστικού πεδίου σε καρτεσιανές ή σε σφαιρικές συντεταγμένες για μεγάλα πεδία
- Διάρρηξη αναχώματος
- Δυνάμεις αντίστασης εξαιτίας κατακορύφων κατασκευών
- Παρακολούθηση σωματιδίων και υπολογισμός ρεύματος κατά Lagrange
- Παραγωγή ρεύματος από κυματισμό (σε ζεύξη με το μοντέλο TOMAWAC)

Το λογισμικό βρίσκει εφαρμογή σε πληθώρα προβλημάτων του πολιτικού μηχανικού. Όσον αφορά την θαλάσσια υδραυλική, στην διαστασιολόγηση λιμένων, στην διαστασιολόγηση κυματοθραυστών, στην μελέτη των επιπτώσεων των βυθοκορήσεων, στην μελέτη των επιπτώσεων από την διάθεση υγρών αποβλήτων στο παράκτιο περιβάλλον, στην μελέτη των επιπτώσεων από την εκροή θερμής

φλέβας στην θάλασσα και στην διερεύνηση της εξάπλωσης πετρελαιοκηλίδας. Όσον αφορά την ποτάμια υδραυλική, στην μελέτη της επίδρασης των κατασκευών στην ροή (όπως γέφυρες, υπερχειλιστές κ.α.), στις μελέτες πλημμυρών, στις μελέτες διόδευσης του πλημμυρικού κύματος από την αστοχία φράγματος και στις μελέτες μεταφοράς συντηρητικών ή μη συντηρητικών ρύπων. Εκτός από τα παραπάνω έχει χρησιμοποιηθεί και σε ορισμένες ειδικές εφαρμογές, όπως πιθανή αστοχία βιομηχανικών δεξαμενών ή χιονοστιβάδες που πέφτουν εντός ταμιευτήρα κ.α.

2.2.2 Εξισώσεις

Το μοντέλο επιλύει ταυτόχρονα τις παρακάτω τέσσερις εξισώσεις (Galland et. al., 1991 and Riadh Ata, 2018):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(h) + h \cdot \text{div}(\vec{u}) = S_h \quad \text{εξίσωση συνέχειας} \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(u) = -g \cdot \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \cdot \text{div}(h\nu_t \vec{\nabla}(u)) \quad \text{εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά x} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(v) = -g \cdot \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \cdot \text{div}(h\nu_t \vec{\nabla}(v)) \quad \text{εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά y} \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(T) = S_T + \frac{1}{h} \cdot \text{div}(h\nu_T \vec{\nabla}(T)) \quad \text{ισοζύγιο μάζας του ιχνηθέτη T} \quad (2.22)$$

όπου:

h	(m)	το βάθος του νερού
u, v	(m/s)	οι συνιστώσες της ταχύτητας
T	(°C ή gr/l)	παθητικός ιχνηθέτης
g	(m/s ²)	η επιτάχυνση της βαρύτητας
ν_t, ν_T	(m ² /s)	συντελεστές διάχυσης ορμής & ιχνηθέτη αντίστοιχα. Ο συντελεστής ν_t μπορεί να είναι σταθερός και η τιμή του να παρέχεται από τον χρήστη ή να υπολογίζεται ταυτόχρονα από το Telemac με κάποιο μοντέλο τύρβης. Τα μοντέλα που διατίθενται στο Telemac είναι: constant viscosity, Elder model, k-epsilon model και Smagorinski model.
Z	(m)	ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας
t	(sec)	χρόνος
x, y	(m)	συντεταγμένες του επιπέδου
S_h	(m/s)	παροχή ή απώλεια ρευστού
S_x, S_y	(m/s ²)	όρος πηγής ή απώλειας ορμής. Όροι πηγής είναι η επίδραση του ανέμου, η τριβή του πυθμένα και η δύναμη Coriolis
S_T	(gr/l/s)	όρος πηγής ή απώλειας για τον ιχνηθέτη

Όπως προαναφέρθηκε το πρόγραμμα επιλύει τις εξισώσεις του Saint-Venant. Η προκαθορισμένη μέθοδος επίλυσης είναι με πεπερασμένα στοιχεία αλλά δίνεται και η δυνατότητα επίλυσης με την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Επίσης δίνεται η δυνατότητα επίλυσης και των εξισώσεων Boussinesq όταν τα μη υδροστατικά φαινόμενα δεν μπορούν να αγνοηθούν. Οι εξισώσεις του Boussinesq προκύπτουν με την προσθήκη των παρακάτω όρων στο 2^ο μέλος των εξισώσεων του Saint-Venant :

$$-\frac{H_0^2}{6} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \left[\text{div} \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right) \right] + \frac{H_0}{2} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} \left[\text{div} \left(H_0 \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right) \right]$$

2.2.3 Αρχεία εισόδου & εξόδου

Για την εκκίνηση και την επιτυχή λειτουργία του προγράμματος χρειάζονται ορισμένα αρχεία. Από αυτά άλλα είναι υποχρεωτικά και άλλα προαιρετικά. Στο παρόν θα αναφερθούν μόνο τα υποχρεωτικά για να δώσουν στον αναγνώστη να καταλάβει πως δομείται ένα απλό μοντέλο Telemac – 2D. Τα

προαιρετικά – λόγω του πλήθους τους – δεν είναι δυνατόν να αναφερθούν εδώ. Τα υποχρεωτικά, λοιπόν, έχουν ως εξής:

- Το αρχείο **οδηγός (steering file)** – Δίνεται σε μορφή (.cas) – Πρόκειται για ένα αρχείο κειμένου το οποίο αποτελείται από συγκεκριμένες λέξεις κλειδιά αναγνωρίσιμες από το λεξικό του TELEMAC. Κάθε μία απ' αυτές παίρνει μία αντιπροσωπευτική τιμή (λογική, αριθμητική ή κείμενο αν πρόκειται η λέξη να αντιπροσωπεύει αρχείο). Μέσω των λέξεων κλειδιών επιλέγονται όλες οι παράμετροι της προσομοίωσης (φυσικές, αριθμητικές ή γραφικές) καθώς και οι επιθυμητές μέθοδοι/εξισώσεις υπολογισμού. Επιπλέον, με αντίστοιχες λέξεις κλειδιά δίνονται όλα τα ονόματα των υπολοίπων αρχείων (υποχρεωτικών και μη) καθώς και η θέση τους ώστε να ανατρέξει το πρόγραμμα στην κατάλληλη θέση και να «διαβάσει» τα αρχεία. Είναι το 1^ο αρχείο που «διαβάζει» το λογισμικό.
- Το **γεωμετρικό** αρχείο (**geometry file**) – Δίνεται σε μορφή selafin (.slf) – Περιέχει το υπολογιστικό πλέγμα (mesh) συνήθως σε όρους βαθυμετρίας. Εναλλακτικά, μπορεί να περιέχει το επίπεδο πλέγμα και η βαθυμετρία να δίνεται σε άλλο αρχείο (bottom topography file). Το αρχείο αυτό κατασκευάζεται με το λογισμικό ελεύθερης πρόσβασης BLUE KENUE (https://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/advisory/blue_kenue_index.html) που αναπτύχθηκε από το *Canadian Hydraulics Centre* του *National Research Council of Canada* (CHC – NRCC).
- Το αρχείο **οριακών συνθηκών (boundary conditions file)** – Δίνεται σε μορφή (.cli) – Περιέχει τα ανοιχτά και κλειστά όρια του υπολογιστικού πεδίου. Το αρχείο αυτό υλοποιείται στο λογισμικό BLUE KENUE ή σε άλλα λογισμικά διαχείρισης δεδομένων που παρέχονται από την EDF. Μπορεί επίσης να κατασκευαστεί ή να τροποποιηθεί σε έναν απλό επεξεργαστή κειμένου εφόσον ο χρήστης γνωρίζει τους συντακτικούς κανόνες.

Όσον αφορά τα αρχεία εξόδου, το πιο βασικό είναι:

- Το αρχείο των **αποτελεσμάτων (results file)** – Δίνεται σε μορφή (.slf) – «Ανοίγει» με το Blue Kenue. Περιέχει τις τιμές των μεταβλητών που προκύπτουν από τις εξισώσεις (2.19 – 2.22) και πλήθος άλλων μεταβλητών που επιλέγεται να γραφούν σ' αυτό μέσω του οδηγού αρχείου.

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα αρχεία, τον σκοπό τους, την σύνταξή τους και τον τρόπο κατασκευής τους αλλά και γενικότερα για τον τρόπο δόμησης και εφαρμογής ενός μοντέλου στο περιβάλλον TELEMAC ο αναγνώστης παραπέμπεται στα εγχειρίδια χρήσης.

2.2.4 Οριακές συνθήκες

Για την διενέργεια μιας υδροδυναμικής προσομοίωσης απαραίτητο στοιχείο αποτελεί ο καθορισμός των οριακών συνθηκών. Οι οριακές συνθήκες δίνονται για κάθε σημείο στα όρια του υπολογιστικού πεδίου και αφορούν τις μεταβλητές των εξισώσεων (2.19 - 2.22) και άλλες μεταβλητές που σχετίζονται άμεσα με αυτές όπως είναι η παροχή και η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. Ο τρόπος με τον οποίο καθορίζονται οι οριακές συνθήκες σε κάθε όριο του πεδίου διαφοροποιείται ανάλογα με την χωρική και χρονική τους μεταβλητότητα σε 5 τύπους:

- *Σταθερές συνθήκες στο όριο και στον χρόνο.* Οι συνθήκες αυτές υλοποιούνται πολύ εύκολα μέσω κατάλληλων λέξεων-κλειδιών που δίνονται στο αρχείο οδηγός.
- *Σταθερές συνθήκες στο όριο και μεταβλητές στον χρόνο.* Οι μεταβλητές τιμές που αναφέρονται στην παροχή, την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, την ταχύτητα (ή τον ιχνηθέτη, αν υπάρχει) δίνονται μέσω εξωτερικού αρχείου (liquid boundaries file).
- *Μεταβλητές συνθήκες στον χώρο και σταθερές στον χρόνο.* Οι συνθήκες αυτές υλοποιούνται μέσω του αρχείου των οριακών συνθηκών (boundary conditions file).

- *Μεταβλητές συνθήκες στον χώρο και στον χρόνο.* Υλοποιούνται με τον προγραμματισμό κατάλληλης υπορουτίνας (bord.f).
- *Μεταβλητός τύπος του ορίου στον χρόνο.* Υλοποιείται με τον προγραμματισμό κατάλληλης υπορουτίνας (propriin_telemac2d.f).

Στο λογισμικό TELEMAC-2D παρέχονται οι εξής τύποι οριακών συνθηκών για κάθε μεταβλητή:

Για το βάθος ροής

1. Ανοιχτό όριο με προκαθορισμένο βάθος
2. Ανοιχτό όριο με ελεύθερο βάθος
3. Κλειστό όριο (τοίχος)

Για την παροχή ή την ταχύτητα

1. Ανοιχτό όριο με προκαθορισμένη παροχή
2. Ανοιχτό όριο με προκαθορισμένη ταχύτητα
3. Ανοιχτό όριο με ελεύθερη ταχύτητα
4. Κλειστό όριο με γλίστρημα ή τριβή
5. Κλειστό όριο με μηδενική τιμή για μία ή και για τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας

Για τον ιχνηθέτη

1. Ανοιχτό όριο με προκαθορισμένη τιμή
2. Ανοιχτό όριο με ελεύθερη τιμή
3. Κλειστό όριο (τοίχος)

2.2.5 Δόμηση του υπολογιστικού πλέγματος

Το λογισμικό TELEMAC 2D , όπως έχει αναφερθεί, επιλύει τις εξισώσεις του Saint-Venant χρησιμοποιώντας μη δομημένο πλέγμα κυρίως με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το πλέγμα δομείται στο γραφικό περιβάλλον BLUE KENUE. Το λογισμικό παρέχει πληθώρα δυνατοτήτων για την δόμηση του πλέγματος, όπως:

1. Την κατασκευή δομημένου πλέγματος (structured mesh) με τριγωνικά στοιχεία για τις περιοχές όπου επικρατούν κυρίως μονοδιάστατες συνθήκες ροής, όπως ποτάμια και κανάλια. Για την κατασκευή του απαιτούνται οι όχθες του ποταμού σε μορφή ανοιχτών γραμμών και δύο παράμετροι, ο αριθμός των κόμβων σε κάθε διατομή και η απόσταση μεταξύ των διατομών. Γενικώς προτείνεται η απόσταση μεταξύ των διατομών να είναι μεγαλύτερη από την απόσταση των κόμβων στην εγκάρσια διεύθυνση του ποταμού. Έτσι τα στοιχεία επιμηκύνονται κατά την κατεύθυνση του ρεύματος, μειώνεται ο συνολικός αριθμός τους και άρα εξοικονομείται υπολογιστικός χρόνος.
2. Τον καθορισμό περιοχών πυκνότητας για το μέγεθος των πλευρών των στοιχείων.
3. Την αυστηρή τοποθέτηση των υπολογιστικών κόμβων σε δεδομένες θέσεις, οι συντεταγμένες των οποίων δίνονται από σημεία (hard points) ή γραμμές (hard lines).
4. Τον καθορισμό περιοχών χωρίς κόμβους στο εσωτερικό τους, όπως νησιά ή κτήρια (closed hard lines).
5. Την κατασκευή μη δομημένου πλέγματος (unstructured mesh) με ενσωμάτωση όλων των παραπάνω χαρακτηριστικών. Για την κατασκευή του απαιτείται το περίγραμμα της μελετώμενης περιοχής σε μορφή πολυγώνου, το βασικό μήκος των πλευρών των τριγωνικών στοιχείων και ένας συντελεστής που καθορίζει τον μέγιστο λόγο των πλευρών που συντρέχουν σε κάθε υπολογιστικό κόμβο.

Όλα τα παραπάνω μπορούν να χρησιμοποιηθούν καταλλήλως προκειμένου το τελικό πλέγμα της προσομοίωσης να περιλαμβάνει όλες τις απαιτήσεις της μελέτης.

3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ

3.1 Γενικά

Η περιοχή μελέτης είναι η πόλη της Μάνδρας στην δυτική Αττική. Η Μάνδρα είναι η έδρα του δήμου Μάνδρας – Ειδυλλίας που διοικητικά υπάγεται στην Περιφερειακή Ενότητα Δυτικής Αττικής της Περιφέρειας Αττικής. Ο πληθυσμός της πόλης ανέρχεται σε 11.327 μόνιμους κατοίκους σύμφωνα με την απογραφή του 2011 από την ΕΛΣΤΑΤ. Η πόλη είναι χωροθετημένη στην έξοδο δύο λεκανών απορροής, της λεκάνης του ρέματος Σούρες και της λεκάνης του ρέματος Αγία Αικατερίνη, που είναι τα ρέματα που προκάλεσαν την πλημμύρα της 15/11/2017. Οι λεκάνες αυτές, όπως και η πόλη ανήκουν στην ευρύτερη περιοχή του Θριάσιου πεδίου που περιγράφεται στην συνέχεια. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η θέση της περιοχής μελέτης στον Ελλαδικό χώρο και η πόλη της Μάνδρας μαζί με το υδρογραφικό της δίκτυο. Στα δεξιά, με το πράσινο χρώμα φαίνονται τα ανοιχτά τμήματα των ρεμάτων ενώ με το κόκκινο τα εγκιβωτισμένα. Με το μπλε χρώμα φαίνεται ο χείμαρρος Σαρανταπόταμος στον οποίο εκβάλλει το ρέμα Σούρες.



Εικόνα 3.1-1: Η περιοχή μελέτης

Γενικότερα, το Θριάσιο πεδίο είναι πεδινή περιοχή δυτικά των Αθηνών που οριοθετείται από το όρος Πάρνηθα στον βορρά, από το όρος Αιγάλεω στα ανατολικά, από το όρος Πατέρα στα δυτικά και από τον κόλπο της Ελευσίνας στον νότο. Τα κυριότερα υδάτινα σώματα του Θριάσιου πεδίου, από τα ανατολικά προς τα δυτικά είναι:

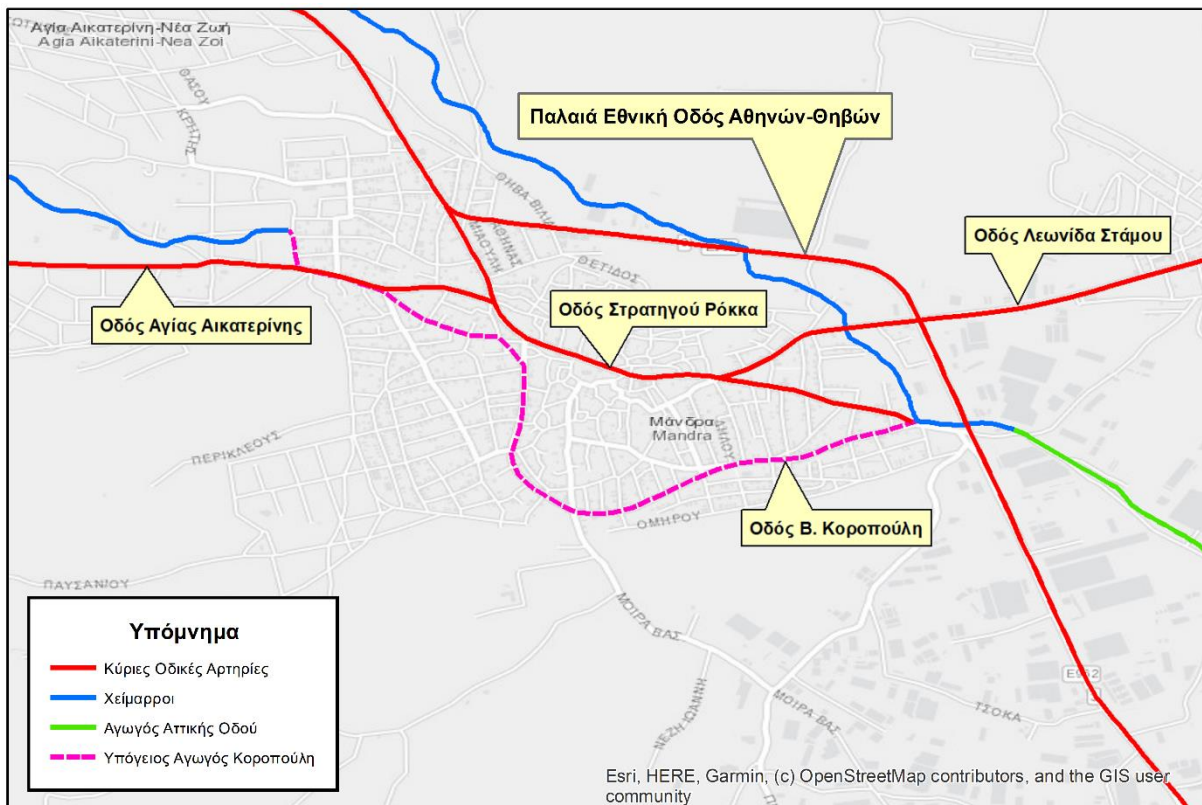
1. Το ρέμα Αγίου Γεωργίου ή Γιαννούλας, που πηγάζει από τις νοτιοδυτικές παρυφές της Πάρνηθας, κινείται ανατολικά του Ασπροπύργου και εκβάλλει στην θάλασσα κοντά στην περιοχή των κρατικών διυλιστηρίων (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας, ΕΓΥ, 2017).
2. Το ρέμα Αγίου Ιωάννη, που πηγάζει από τις νοτιοδυτικές παρυφές της Πάρνηθας, κινείται δυτικά του Ασπροπύργου και εκβάλλει στην θάλασσα στην περιοχή της Χαλυβουργικής.
3. Ο χείμαρρος Σαρανταπόταμος που προέρχεται από την συμβολή δύο κλάδων, του ρ. Πέλκας που πηγάζει από το όρος Κιθαιρώνας και διασχίζει την κοιλάδα της Οινόης και του ρ. Αγίου Γεωργίου που πηγάζει από την ανατολική πλαγιά του όρους Πατέρα και διασχίζει την ομώνυμη κοιλάδα δίπλα από την κοιλάδα της Οινόης. Ο χείμαρρος Σαρανταπόταμος μετά την συμβολή των δύο κυριότερων κλάδων διατρέχει το Θριάσιο πεδίο και εκβάλλει τελικώς στον κόλπο της Ελευσίνας στην περιοχή της Χαλυβουργικής. Οι κυριότεροι χείμαρροι που συμβάλλουν στον Σαρανταπόταμο είναι ο Αγ. Βλάσιος, το Ξηρόρεμα και το Μεγάλο Κατερίνι (Μιχαηλίδη, 2013).
4. Το ρέμα Σούρες, με συμβάλλοντα τα ρέματα Αγία Αικατερίνη και Μικρό Κατερίνι, που αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας μελέτης και περιγράφεται λεπτομερώς παρακάτω.

3.2 Οδικό δίκτυο

Η βασικότερη οδική αρτηρία της περιοχής μελέτης είναι η Ελεύθερη Λεωφόρος Ελευσίνας-Σταυρού-Αεροδρομίου Σπάτων (Ε.Λ.Ε.Σ.Σ) ή εν συντομία Αττική Οδός. Η Αττική Οδός αποτελεί ταυτόχρονα ένα σημαντικό συγκοινωνιακό έργο και ένα σημαντικό υδραυλικό έργο μεγάλης κλίμακας. Η κατασκευή της άλλαξε ριζικά την τοπογραφία και το υδρογραφικό δίκτυο της Αττικής. Αποτελεί πλέον ένα τεχνητό υδροκρίτη που αποκόπτει από τα ρέματα την φυσική τους συνέχεια. Η Αττική Οδός διασχίζει την περιοχή μελέτης με κατεύθυνση από βορειοανατολικά προς νοτιοδυτικά και περνά μεταξύ της Άνω Ελευσίνας και της βιομηχανικής περιοχής της Μάνδρας.

Σημαντικός είναι επίσης ο άξονας της παλαιάς Εθνικής Οδού Αθηνών-Θηβών, καθώς εξυπηρετεί το σύνολο της βιομηχανικής περιοχής της Μάνδρας και όλους τους οικισμούς προς τα όρη Πατέρα, Πάστρα και Κιθαιρώνας. Σχετίζεται άμεσα με το ρ. Σούρες καθώς διασχίζει την κοιλάδα του και διασταυρώνεται με αυτό σε πολλά σημεία. Η ΠΕΟΑΘ ξεκινώντας ουσιαστικά από την ανατολική είσοδο της Ελευσίνας, διασχίζει την πόλη και στην συνέχεια τέμνει διαδοχικά την Ολυμπία Οδό και την Αττική Οδό. Κατόπιν διέρχεται ανάμεσα από την ΒΙ.ΠΕ. Μάνδρας, περνά από το δυτικό όριο της πόλης, κινείται βόρεια αυτής και συνεχίζει την πορεία της προς τα ορεινά.

Στο εσωτερικό δίκτυο της Μάνδρας οι βασικότερες οδοί είναι τέσσερις. Η οδός Στρατηγού Νικολάου Ρόκκα που ξεκινά από την είσοδο της πόλης κοντά στην ΠΕΟΑΘ και καταλήγει και πάλι στην ΠΕΟΑΘ στο βορειοδυτικό σύνορο της Μάνδρας. Η οδός Βαγγέλη Κοροπούλη που ξεκινά από το ίδιο σημείο με την Ρόκκα και συνδέεται και πάλι με αυτήν στο κέντρο της Μάνδρας. Τέλος, η οδός Αγίας Αικατερίνης που κινείται παραπλεύρως με το ομώνυμο ρέμα και η οδός Λούκα ή Λεωνίδα Στάμου που συνδέει την Μάνδρα με τον γειτονικό οικισμό της Μαγούλας.



Εικόνα 3.2-1: Το βασικό οδικό δίκτυο της Μάνδρας

3.3 Το ρέμα Σούρες

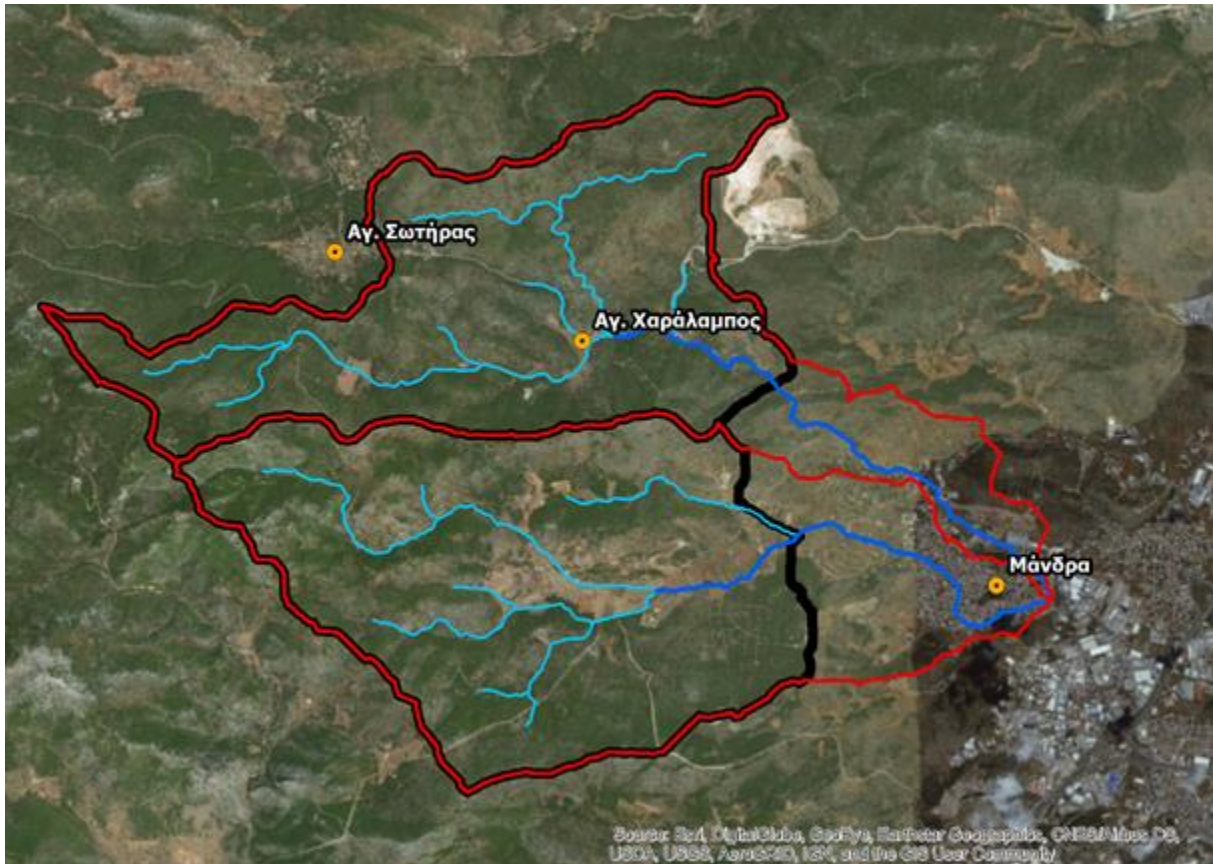
Το ρέμα Σούρες προέρχεται από την συμβολή δύο υδατορευμάτων, τα οποία ενώνονται στην θέση Άγιος Χαράλαμπος. Πρόκειται για τον χείμαρρο Σκυλόρεμα που πηγάζει από τις νοτιοανατολικές παρυφές του όρους Πατέρα και τον χείμαρρο Αγία Σωτήρα που πηγάζει από την περιοχή Ράχη Σωτήρος (Αποστολίδης κ.α., 2017). Ο χείμαρρος Σκυλόρεμα έχει μήκος 6.7 km και ο χείμαρρος Αγία Σωτήρα έχει μήκος 4.7 km. Μετά την ένωση των δύο κλάδων, το ρέμα Σούρες συνεχίζει την πορεία του εκατέρωθεν της παλαιάς Εθνικής Οδού Αθηνών-Θηβών, διέρχεται από τα βόρεια της πόλης και συμβάλλει τελικά με το ρ. Αγία Αικατερίνη έπειτα από 6.5 km στην είσοδο της Μάνδρας. Η έκταση της λεκάνης απορροής του ρ. Σούρες στην θέση της συμβολής ισούται με 19.35 km². Σε απόσταση περίπου 100 μέτρων από την συμβολή, το ρ. Σούρες διασταυρώνεται ξανά με την Παλαιά Εθνική Οδό Αθηνών-Θηβών και έπειτα από 125 μέτρα περίπου συναντά το διευθετημένο τμήμα του, που κατασκευάστηκε στα πλαίσια των έργων της Αττικής Οδού. Το έργο συνίσταται από δίδυμο ορθογωνικό αγωγό από σκυρόδεμα με διαστάσεις 2Χ4.00Χ3.00 m και μήκος L=2.200 m. Το έργο παραλαμβάνει τις απορροές των δύο ρεμάτων της Μάνδρας καθώς και του ρέματος Μικρό Κατερίνη που έρχεται από τον οικισμό της Μαγούλας και τις εκτρέπει προς τον χείμαρρο Σαρανταπόταμο. Παλαιότερα το ρ. Σούρες μετά την συμβολή με το ρ. Μικρό Κατερίνη κινούνταν με κατεύθυνση Β-Ν προς την Ελευσίνα, περνούσε μέσα από την πόλη και έφτανε στην θάλασσα στο δυτικό όριο της πόλης. Η εκτροπή του Σούρες στον Σαρανταπόταμο είχε προταθεί ήδη από το 1979 με την μελέτη «ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΘΡΙΑΣΙΟΥ ΠΕΔΙΟΥ Ν. ΑΤΤΙΚΗΣ» (Πέππας και Καραβοκύρης, 2004) και υλοποιήθηκε τελικά από την Αττική Οδό.

3.4 Το ρέμα Αγία Αικατερίνη

Το ρέμα Αγία Αικατερίνη προέρχεται από την συμβολή δύο υδατορευμάτων. Πρόκειται για τον χείμαρρο Κατσιμήδι και τον χείμαρρο Οσίου Μελετίου (Αποστολίδης κ.α., 2017). Ο χείμαρρος Κατσιμήδι έχει μήκος 6.4 km, ο χείμαρρος Οσίου Μελετίου έχει μήκος 4.2 km και ο χείμαρρος Αγία Αικατερίνη από την ένωση μέχρι το όριο της πόλης στην οδό Ομήρου έχει μήκος 3.0 km. Στα τελευταία 500 m περίπου πριν την οδό Ομήρου το ρέμα Αγία Αικατερίνη δεν είχε διαμορφωμένη κοίτη πριν την πλημμύρα. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τους ορθοφωτοχάρτες της Κτηματολόγιο Α.Ε και από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που έχουμε στη διάθεσή μας. Από την οδό Ομήρου και έπειτα, η ιστορική κοίτη του ρέματος μετατράπηκε σε οδικούς άξονες και τα νερά απάγονται μέσω εγκιβωτισμένου αγωγού από σκυρόδεμα στο σημείο ένωσης με το ρ. Σούρες. Ο αγωγός διαστάσεων 2.00Χ1.70 m και μήκους L=2.300 m περίπου, διέρχεται από τις οδούς Ομήρου, Αγίας Αικατερίνης, Στρατηγού Νικολάου Ρόκκα και Βαγγέλη Κοροπούλη και εκβάλλει στο ρ. Σούρες στην είσοδο της πόλης. Η έκταση της λεκάνης απορροής του ρ. Αγία Αικατερίνη στην θέση της συμβολής ισούται με 22.80 km².

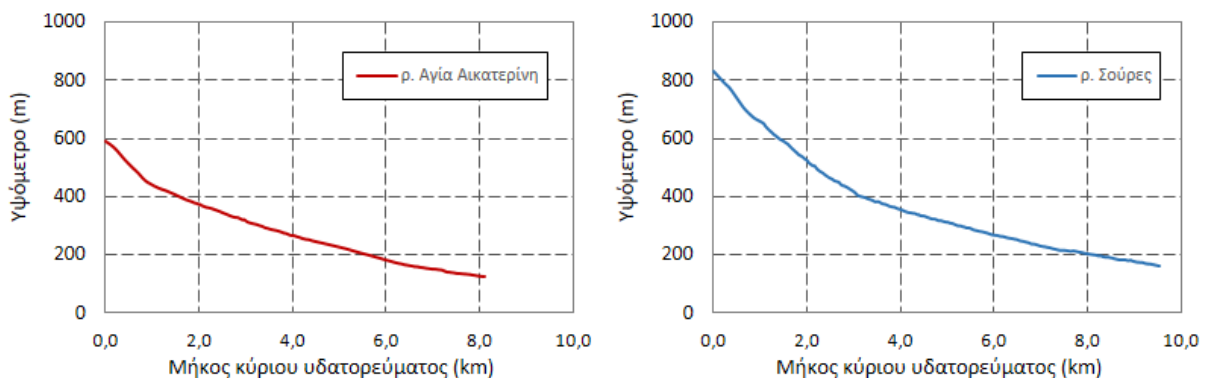
3.5 Λεκάνες απορροής

Η χάραξη των λεκανών ενδιαφέροντος για την υδρολογική ανάλυση έγινε με χρήση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM), ανάλυσης 5Χ5 m, που παραχωρήθηκε από την Κτηματολόγιο Α.Ε. Οι έξοδοι των δύο λεκανών επιλέχθηκαν με υπόδειγμα τις αντίστοιχες λεκάνες της περιοχής από το «ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ» του ΥΠΕΚΑ για το υδατικό διαμέρισμα Αττικής (GR06). Έτσι, η λεκάνη απορροής για το ρέμα Σούρες ταυτίζεται με την λεκάνη «GR0626FR00197» και η λεκάνη απορροής για το ρέμα Αγία Αικατερίνη είναι το άθροισμα των λεκανών «GR0626FR00155» & «GR0626FR00157».



Εικόνα 3.5-1: Οι λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης. Με κόκκινο χρώμα εικονίζονται οι λεκάνες των δύο ρεμάτων στην θέση της συμβολής τους και με μαύρο χρώμα οι λεκάνες που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό των πλημμυρογραφημάτων.

Η έκταση της λεκάνης του ρ. Αγία Αικατερίνη στην επιλεγείσα θέση είναι 18.30 km² και τα υψόμετρά της κυμαίνονται από 123.8 έως 591.2 m. Το μήκος της κύριας μισγάγγειας είναι 8.7 km και η μέση κλίση κατά μήκος αυτής είναι 4.85%. Η έκταση της λεκάνης του ρ. Σούρες είναι 16.06 km² και τα υψόμετρά της κυμαίνονται από 161.5 έως 841.4 m. Το μήκος της κύριας μισγάγγειας είναι 10.03 km και η μέση κλίση κατά μήκος αυτής είναι 5.13%.

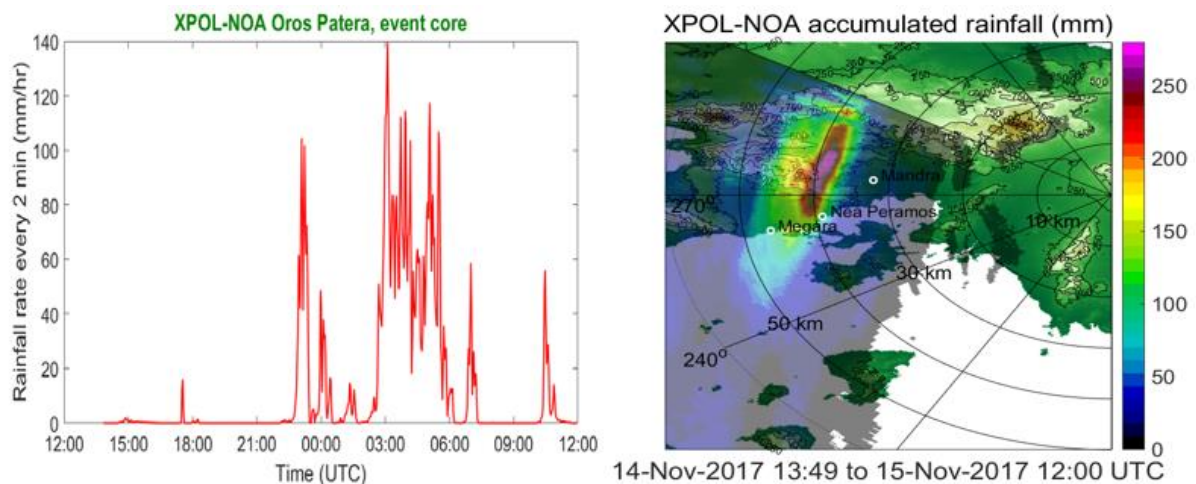


Διάγραμμα 3.5-1: Μηκοτομές της κύριας μισγάγγειας των δύο ρεμάτων

3.6 Περιγραφή του πλημμυρικού γεγονότος της 15/11/2017

Την 14^η και την 15^η Νοεμβρίου του 2017, μια αρκετά ισχυρή καταιγίδα έλαβε χώρα στις πλαγιές του όρους Πατέρα προκαλώντας ξαφνικές πλημμύρες στις υδρολογικές λεκάνες της περιοχής και συγκεκριμένα στην λεκάνη του χειμάρρου Γιώργη (ή Ζωϊρέζα) που καταλήγει στην Νέα Πέραμο, στις λεκάνες των ρεμάτων Σούρες και Αγία Αικατερίνη που καταλήγουν στην Μάνδρα και στην λεκάνη του χ. Σαρανταπόταμου. Ωστόσο ο κύριος όγκος της καταιγίδας έπεσε εντός των λεκανών Σούρες και Αγία Αικατερίνη και προκάλεσε σημαντικές καταστροφές στην πόλη της Μάνδρας. Από την πλημμύρα της Μάνδρας επηρεάστηκαν επίσης η Ελευσίνα και η Μαγούλα.

Το γεγονός κατέγραψε το κινητό μετεωρολογικό ραντάρ X-POL του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ). Αν και οι εκτιμήσεις των ραντάρ είναι αρκετά αβέβαιες ως προς το ύψος του συνολικού υετού, παρέχουν σημαντικές πληροφορίες ως προς την χωρική και την χρονική εξέλιξη του επεισοδίου. Σύμφωνα λοιπόν με τις καταγραφές του ραντάρ, η ζώνη βροχόπτωσης ήταν αρκετά περιορισμένη με μήκος περίπου 18 km, πλάτος περίπου 4 km και κατεύθυνση από νοτιοδυτικά προς βορειοανατολικά, υποδεικνύοντας ένα αρκετά τοπικό και παράλληλα ισχυρό φαινόμενο. Η καταιγίδα ξεκίνησε από το βράδυ της Τρίτης 14 Νοεμβρίου με ένα σύντομο και αρκετά μικρό επεισόδιο γύρω στις 20:00 ώρα Ελλάδος. Από τα μεσάνυχτα και μετά η βροχή συνεχίστηκε για 8 ώρες περίπου ενώ ο πυρήνας της καταιγίδας σημειώθηκε μεταξύ 05:00 με 08:00 τοπική ώρα. Το συνολικό ύψος βροχής ξεπέρασε τα 200 mm σε διάστημα 6 ωρών.



Εικόνα 3.6-1: Υετογράφημα βροχόπτωσης (αριστερά) και συνολικός υετός (δεξιά) από τις εκτιμήσεις του ραντάρ X-POL (Καλόγηρος κ.α., 2017)

3.6.1 Χωροχρονική εξέλιξη του κύματος

Σύμφωνα με όσα μας κατέθεσαν οι κάτοικοι της Μάνδρας κατά την επιτόπια αυτοψία, το πλημμυρικό κύμα από το ρ. Αγία Αικατερίνη έφτασε στο δυτικό όριο της πόλης στις 06:00 η ώρα περίπου ενώ από το ρ. Σούρες έφτασε στο βορειοδυτικό όριο της πόλης στις 06:45 περίπου. Το κύμα συνοδεύονταν από μεγάλες ποσότητες φερτών υλών και κυρίως άργιλο που του προσέδωσε το χαρακτηριστικό καφετί χρώμα που φαίνεται στις φωτογραφίες και τις βιντεοσκοπήσεις. Από το σημείο αφανισμού της κοίτης του ρ. Αγία Αικατερίνη και έπειτα, δημιουργήθηκε πλημμυρικό κύμα πολύ μεγάλου πλάτους που κατέλαβε την πεδινή περιοχή ανάντη της πόλης και στην συνέχεια έπληξε τον αστικό ιστό σε όλο το μήκος του. Στο ρέμα Σούρες καθοριστικό ρόλο στην εξάπλωση της πλημμύρας έπαιξαν οι μορφολογικές αλλαγές εξαιτίας των έντονων κατασκευαστικών δραστηριοτήτων στην ευρύτερη περιοχή που είχαν σαν αποτέλεσμα την δραματική μείωση του διαθέσιμου εμβαδού διατομής του ρέματος (Stamou, 2018). Το πλημμυρικό κύμα υπερχείλισε από την κοίτη καθ' όλο το μήκος της από την βορειοδυτική είσοδο της πόλης (στην θέση της γέφυρας της νέας χάραξης της ΠΕΟΑΘ) μέχρι την συμβολή στη διασταύρωση των οδών Ρόκκα & Κοροπούλη. Όλες οι παρακείμενες εγκαταστάσεις

επλήγησαν από την πλημμύρα, όπως είναι το κτήριο της Βακόντιος ΑΕΒΕ, το αμαξοστάσιο του Δ. Μάνδρας, το κτήριο Logistics της ΜΕΤΡΟ ΑΕ και το κοιμητήριο της Μάνδρας. Μεγάλο μέρος της πλημμύρας ακολούθησε τον άξονα της ΠΕΟΑΘ και από εκεί οδηγήθηκε είτε στην είσοδο της πόλης είτε στην περιοχή της Μαγούλας μέσω της οδού Λ. Στάμου. Οι πλημμυρικές απορροές από τα 2 ρέματα έφτασαν στην συμβολή στις 07:05 π.μ. (Αποστολίδης κ.α., 2017). Το σύνολο των απορροών δεν ήταν δυνατό να διοχετευτεί προς τον τεχνητό αγωγό αφενός γιατί ο οχετός που βρίσκεται κάτω από την παλαιά Εθνική Οδό είχε πολύ μικρή διατομή αφετέρου γιατί τα νερά είχαν ήδη βγει εκτός κοίτης και κινούνταν σε πολλαπλές κατευθύνσεις. Έτσι, η παροχή μοιράστηκε μεταξύ του καναλιού και της εθνικής οδού. Στην συνέχεια πλημμύρισε η βιομηχανική περιοχή της Μάνδρας και τελικά τα νερά εγκλωβίστηκαν πίσω από το πρηνές της Αττικής Οδού. Τέλος, η παροχή από τα ανάντη της Αττικής Οδού παροχετεύεται κάτω από την γέφυρα και πλημμυρίζει την περιοχή Παπακώστα.



Εικόνα 3.6-2: Διέλευση του κύματος κάτω από την γέφυρα της Αττικής Οδού (Λέκκας κ.α., 2017)

Η έκταση των πλημμυρισμένων εκτάσεων αποτυπώθηκε από επιστημονική ομάδα της υπηρεσίας **FloodHub** (<http://beyond-eocenter.eu/index.php/floods>) του Κέντρου Αριστείας Διαχείρισης Φυσικών Καταστροφών **BEYOND** του Ινστιτούτου Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Η χαρτογράφηση της μέγιστης έκτασης της πλημμύρας έγινε κατά βάση με χρήση δορυφορικής τηλεπισκόπησης και φωτοερμηνείας. Η αποτύπωση βασίστηκε κυρίως σε πολυφασματική εικόνα από τον οπτικό δέκτη του δορυφόρου WorldView-4, της οποίας η λήψη πραγματοποιήθηκε στις 21/11/2017 και πρόκειται για υψηλής χωρικής ανάλυσης εικόνα με διακριτική ικανότητα 31 cm. Βασίστηκε επίσης στην συνδυαστική χρήση μη επιβλεπόμενων μεθόδων ταξινόμησης εικόνας και φωτοερμηνείας. Οι εν λόγω διαδικασίες πραγματοποιήθηκαν σε κατάλληλους συνδυασμούς φασματικών καναλιών της δορυφορικής εικόνας προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη και λεπτομερέστερη αποτύπωση των πλημμυρισμένων εκτάσεων. Η τελική χαρτογράφηση της έκτασης της πλημμύρας (Εικόνα 3.6-3) είναι ένα υβριδικό αποτέλεσμα της ταξινόμησης της δορυφορικής εικόνας με αυτόματη μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση (με αλγόριθμο που εντοπίζει τα κορεσμένα σε νερό εδάφη), των διορθώσεων με φωτοερμηνεία (στις περιπτώσεις σύγχυσης της αυτόματης διαδικασίας), και της αξιοποίησης των στοιχείων που συλλέχθηκαν κατά την αυτοψία υπαίθρου (21-23/11/2017), αλλά και επιπλέον στοιχείων που είδαν το φως της δημοσιότητας (Κοντοές κ.α., 2018).



Εικόνα 3.6-3: Τελική αποτύπωση της έκτασης της πλημμύρας (Κοντοές κ.α., 2018)

Η τελική αποτύπωση της έκτασης της πλημμύρας χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία για την βαθμονόμηση και την τελική αξιολόγηση του υδραυλικού μοντέλου.

3.7 Επιτόπια αυτοψία στην Μάνδρα

Το φθινόπωρο του 2018 πραγματοποιήθηκαν συνολικά 4 επισκέψεις στην πόλη της Μάνδρας προκειμένου να γίνει αναγνώριση της περιοχής μελέτης, να γίνει καλύτερα αντιληπτός ο μηχανισμός της πλημμύρας και να συλλεχθούν απαραίτητα στοιχεία για την παρούσα εργασία και άλλες συναφείς εργασίες που έγιναν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του ΕΜΠ. Οι επισκέψεις πραγματοποιήθηκαν την 27^η Σεπτεμβρίου, την 3^η και την 29^η Οκτωβρίου και την 8^η Νοεμβρίου αντίστοιχα. Οι ομάδες που συγκροτήθηκαν αποτελούνταν από προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές ενώ τον συντονισμό και την επιστημονική καθοδήγηση είχε ο καθηγητής κ. Αναστάσιος Στάμου.

Βασικός στόχος των δύο πρώτων επισκέψεων ήταν η μέτρηση του βάθους ροής σε αρκετές θέσεις κατά μήκος των 2 ρεμάτων ώστε να χρησιμοποιηθούν για την βαθμονόμηση του υδραυλικού μοντέλου και η καταγραφή των διαστάσεων των οχετών που λαμβάνονται υπόψη για την υδροδυναμική προσομοίωση. Στην πρώτη επίσκεψη διερευνήθηκε το ρ. Αγία Αικατερίνη από την οδό Ομήρου και προς τα ανάντη και το ρ. Σούρες από την θέση Άγιος Χαράλαμπος μέχρι την συμβολή. Στην δεύτερη επίσκεψη διερευνήθηκε η πόλη, το διευθετημένο τμήμα του ρ. Σούρες σε όλο το μήκος του, η Μαγούλα και τέλος η ΒΙ.ΠΕ. Μάνδρας. Οι θέσεις μέτρησης του βάθους ροής προέκυψαν έπειτα από εκτενή έρευνα σε βίντεο που είδαν το φως της δημοσιότητας από αυτόπτες μάρτυρες του πλημμυρικού επεισοδίου. Οι θέσεις επιλέχθηκαν κατά τέτοιον τρόπο ώστε να δίνεται η δυνατότητα μέσω του βίντεο να καθοριστεί το βάθος ροής και να υπάρχει σαφής τρόπος μέτρησης στο πεδίο. Πριν την επίσκεψη συντάχθηκε κατάλληλο έγγραφο για την διευκόλυνση των καταγραφών. Πέραν όμως των προμελετημένων θέσεων, μετρήθηκαν και βάθη ροής πάνω σε δομικά στοιχεία στα οποία υπήρχε το ίχνος της πλημμύρας μήνες μετά από αυτήν λόγω της στερεομεταφοράς.

Επιπλέον, κατά τις επισκέψεις πραγματοποιήθηκαν συνεντεύξεις των κατοίκων που ήταν εξαιρετικά χρήσιμες για την κατανόηση της χωροχρονικής εξέλιξης της πλημμύρας. Τέλος, έγινε επιβεβαίωση της μέγιστης καταγεγραμμένης έκτασης της πλημμύρας όπως αυτή αποτυπώθηκε από την ομάδα του ΕΑΑ. Στην τρίτη και τέταρτη επίσκεψη έγινε διανομή ερωτηματολογίου στους κατοίκους της Μάνδρας

στα πλαίσια εκπόνησης διπλωματικής εργασίας σχετικά με τον σχεδιασμό ενός Συστήματος Έγκαιρης Προειδοποίησης στην περιοχή.

Οι θέσεις και τα αντίστοιχα βάθη που χρησιμοποιούνται τελικά για την βαθμονόμηση του υδραυλικού μοντέλου και την τελική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας δίνονται στον παρακάτω πίνακα. Το σημείο αναφοράς για την χιλιομέτρηση των διατομών είναι η συμβολή των 2 ρεμάτων στην διασταύρωση των οδών Ρόκκα & Κοροπούλη.

Πίνακας 3.7-1: Βάθη ροής στις διατομές ελέγχου (Μαρκόπουλος, 2018, μετά από προσαρμογή)

Σημείο	Θέση (m)	Περιγραφή	Βάθος ροής (m) (Ωρα)
Σ1	3930	ΠΕΟ Ελευσίνας-Θηβών κατάντη των καντίνων	0.15 (6:15) 0.50 (6:30) 1.20 (6:45) 2.50 (7:00) 3.70 (7:15)
Σ2	2060	Βενζινάδικο Cyclon- Γήπεδο	2.85 (max)
Σ3	1690	Οδός Μακρυγιάννη (Γέφυρα νέας χάραξης της ΠΕΟΑΘ)	0.15 (6:15) 0.25 (6:30) 0.50 (6:45) 1.50 (6:55) 1.90 (7:00) 3.50 (7:15) 2.70 (9:15)
Σ4	1140	Εγκαταστάσεις της μονάδας ΒΑΚΟΝΤΙΟΣ Α.Ε.Β.Ε.	0.1 (6:30) 1.20 (6:45) 2.17 (7:00) 2.90 (7:30) 3.04 (8:30) 2.52 (9:15) 1.90 (10:00)
Σ5	1020	Εργοτάξιο Δήμου Μάνδρας-Ειδυλλίας	
Σ6	763	Κτήριο Logistics ΜΕΤΡΟ	4.00 (max)
Σ7	526	Κοιμητήριο Μάνδρας	3.00 (max)
Σ8	316	Κατάντη γέφυρας Μεγάλου/Βασιλείου Λουκά	3.60 (max)
Σ9	0	Συμβολή ρ. Σούρες με ρ. Αγία Αικατερίνη	0.50 (6:46) 0.50 (7:00) 3.65 (7:30)
Σ10	-120	Κατάντη της γέφυρας ΠΕΟ Ελευσίνας-Θηβών πάνω από Σούρες	5.50 (max)

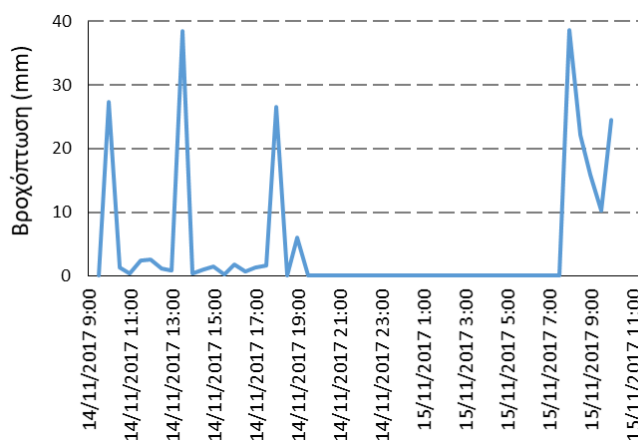
Σ11	-439	Είσοδος της διδυμης διώρυγα Σούρες	5.20 (max)
Σ12	-1340	Συμβολή διευθετημένου Σούρες με Αττική οδό	3.80 (max)
Σ13	-2230	Εκβολή Σούρες στον Σαρανταπόταμο	2.50 (max)
AA3	2810	Διασταύρωση ρ. Αγ. Αικατερίνης με την οδό Αγ. Αικατερίνης προς Νέα Ζωή	2.10 (max)
AA4	2120	Διασταύρωση οδών Αίαντος & 25ης Μαρτίου	0.80 (6:45) 1.55 (7:38) 1.25 (8:30) 0.10 (10:30)
AA5	2090	Οδός Ικάρου	0.10 (6:30) 0.50 (6:45) 1.00 (7:00) 1.38 (7:15) 1.45 (7:30) 1.30 (7:42) 0.50 (8:45)
AA6	1710	Διασταύρωση οδών Στρατηγού Νικ. Ρόκκα και Αγ. Αικατερίνης (super market Γαλαξίας)	0.2 (6:30) 0.55 (6:46) 0.76 (6:55) 0.90 (7:01) 1.03 (7:09) 1.15 (7:13) 1.15 (7:42) 0.85 (8:08) 0.2 (9:21)
AA7	1430	Βαγγέλη Κοροπούλη 10	1.45 (7:03) 1.55 (8:15)
AA8	466	Βαγγέλη Κοροπούλη 81 (5° Δημοτικό Σχολείο Μάνδρας)	1.55 (max)

4 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

4.1 Επιλογή βροχής

Για την καλύτερη δυνατή αναπαραγωγή του επεισοδίου και την εκτίμηση των μέγιστων παροχών που έπληξαν την πόλη της Μάνδρας τον Νοέμβριο του 2017, απαραίτητο στοιχείο αποτελεί η καταγραφή της βροχόπτωσης. Ωστόσο στις λεκάνες ενδιαφέροντος δεν υπήρχε βροχομετρικός σταθμός, γεγονός που θα διευκόλυνε κατά πολύ την υδρολογική ανάλυση. Επιπλέον, από τους βροχομετρικούς σταθμούς της ανατολικής Αττικής, κανείς δεν βρίσκεται μέσα στην ζώνη βροχόπτωσης, όπως αυτή καταγράφηκε από το μετεωρολογικό ραντάρ X-POL του ΕΑΑ, με αποτέλεσμα να έχουν υποεκτιμηθεί το γεγονός. Άρα, οι καταγραφές τους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των μέγιστων παροχών.

Στην εργασία του (Ntigkakis, 2018) γίνεται προσπάθεια αναπαραγωγής του επεισοδίου ως προς το μέγεθος και την χρονική εξέλιξη, μέσω αντίστροφης υδρολογικής ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, από καταγραφές στάθμης σε οχετό στην θέση «Γύρα Στεφανής» στην γειτονική λεκάνη του Σαρανταπόταμου, επιχειρείται η εκτίμηση της χρονοσειράς της βροχόπτωσης σε έναν υποθετικό σταθμό Χ που θεωρείται αντιπροσωπευτικός της καταιγίδας. Επιπλέον, για την καλύτερη εκτίμηση της αβεβαιότητας εφαρμόστηκε ανάλυση Monte Carlo και παρήχθησαν συνολικά 1000 χρονοσειρές στον σταθμό Χ. Όπως συμπεραίνεται στην προαναφερθείσα εργασία, αν και η ανάλυση βασίστηκε σε λιγοστά δεδομένα τα αποτελέσματα φαίνονται εύλογα και θα μπορούσαν να επεκταθούν για την υδρολογική ανάλυση στις λεκάνες των ρεμάτων Σούρες & Αγία Αικατερίνη. Στην παρούσα εργασία, έπειτα από δοκιμές χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά του σταθμού Χ που προέκυψε από την ανάλυση Monte Carlo και αντιστοιχεί σε διάστημα εμπιστοσύνης 95%. Η χρονοσειρά αυτή βρίσκεται στο χρονικό διάστημα από 14 Νοεμβρίου 09:30 π.μ. μέχρι 15 Νοεμβρίου 10:00 π.μ. και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Διάγραμμα 4.1-1: Η προσομοιωμένη βροχόπτωση για διάστημα εμπιστοσύνης 95% στον εικονικό σταθμό Χ (Ntigkakis, 2018, μετά από προσαρμογή)

4.2 Χρόνος συρροής

Στην παρούσα εργασία για την μείωση του χρόνου συρροής, δεν μπορεί να εφαρμοστεί η σχέση (2.7) καθώς δεν είναι γνωστή η περίοδος επαναφοράς του επεισοδίου. Προκειμένου όμως να ληφθεί υπόψη η εξάρτηση του χρόνου συγκέντρωσης από την ένταση της βροχόπτωσης θα χρησιμοποιηθεί η σχέση αναγωγής που συστήνεται από τους (Michailidi et. al., 2018). Στην συγκεκριμένη εργασία ο υπολογισμός του χρόνου συγκέντρωσης βασίστηκε σε δεδομένα από 30 λεκάνες στην Ελλάδα, την Κύπρο και την Ιταλία. Σύμφωνα με αυτήν ο τελικός χρόνος συγκέντρωσης προκύπτει με εφαρμογή των παρακάτω τριών σχέσεων:

$$t_c = t_0 \cdot i_e^{-\beta} \quad (4.1)$$

όπου t_0 σε h είναι ο μοναδιαίος χρόνος συγκέντρωσης, i_e σε mm/h είναι η ένταση της ενεργού βροχόπτωσης και β είναι ένας συντελεστής ύψους. Ισχύουν:

$$t_0 = 9.00 n A^{0.028} L^{0.216} b^{0.081} J^{-0.5} \quad (4.2) \quad \& \quad \beta = 0.40 - 0.80 A^{0.186} L^{-0.5} b^{-0.356} \quad (4.3)$$

όπου A είναι η έκταση της λεκάνης (km^2), L είναι το μήκος της μέγιστης διαδρομής (km), b είναι το μέσο πλάτος του κύριου υδατορεύματος (m), J είναι η μέση κλίση του κύριου υδατορεύματος και n είναι ο μέσος συντελεστής τραχύτητας κατά Manning.

Πίνακας 4.2-1: Υπολογισμός χρόνου συρροής κατά Giandotti

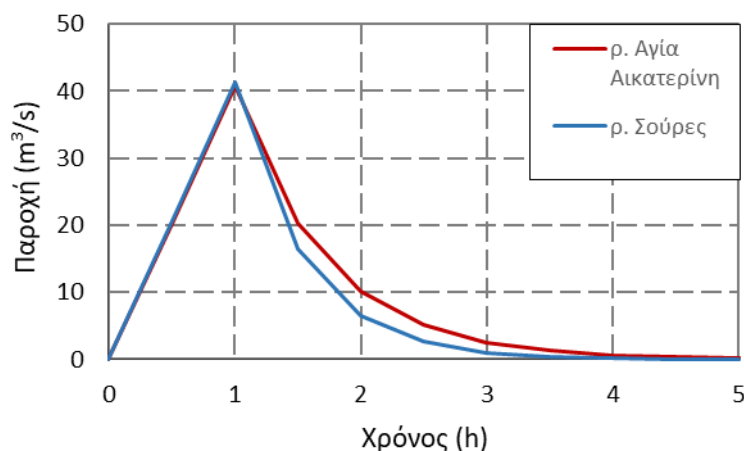
Λεκάνη	A (km^2)	L (km)	H _{mean} (m)	H _{exit} (m)	ΔH (m)	Χρόνος συρροής t_c (h)
Αγ. Αικατερίνη	18.30	8.7	302.5	123.8	178.7	2.82
Σούρες	16.06	10.03	377.8	161.5	216.3	2.65

Πίνακας 4.2-2: Υπολογισμός χρόνου συρροής

Λεκάνη	A (km^2)	L (km)	n	b_{aver} (m)	J (%)	t_0 (h)	β	i_e (mm/h)	t_c (h)	Απομείωση από Giandotti
Αγ. Αικατερίνη	18.30	8.7	0.04	4.30	4.85	3.18	0.123	53.80	1.95	0.69
Σούρες	16.06	10.03	0.04	5.60	5.13	3.25	0.171	41.30	1.72	0.65

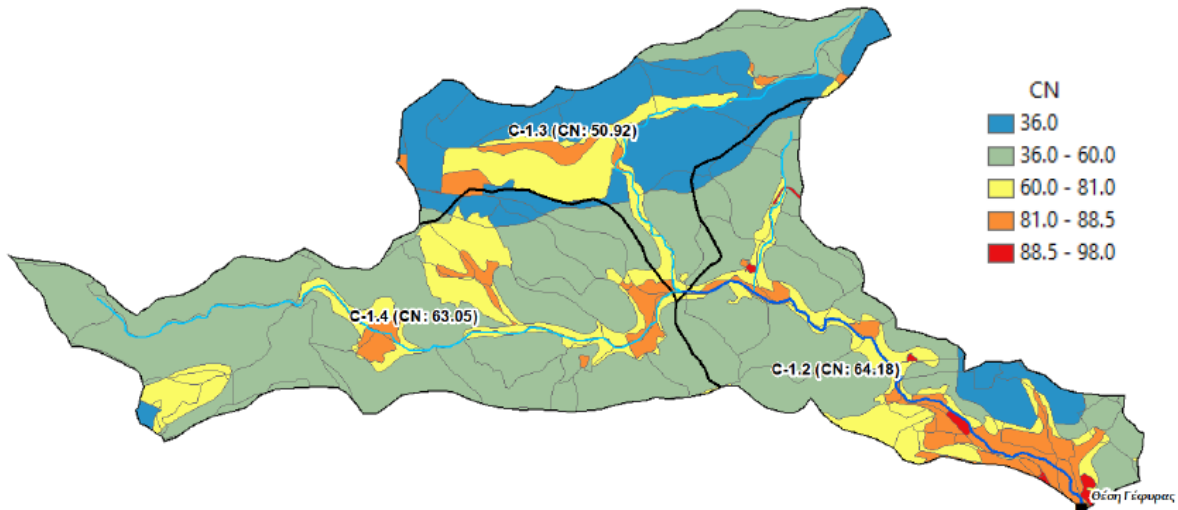
4.3 Αποτελέσματα

Ο υπολογισμοί έγιναν με κατάλληλο πρόγραμμα το οποίο υπολογίζει το ενεργό υετόγραμμα με εφαρμογή της μεθόδου SCS, συνθέτει το παραμετρικό ΣΜΥ και τα συνδυάζει ώστε να προκύψει το πλημμυρογράφημα. Το χρονικό βήμα των υπολογισμών ελήφθη ίσο με 0.5 h, ίσο με την χρονική διακριτοποίηση της επιλεχθείσας καταιγίδας. Για την κατάρτιση του ΣΜΥ η παράμετρος του χρόνου ανόδου β θεωρήθηκε ίση με 0.3 και η παράμετρος του χρόνου βάσης γ ίση με 3 και για τις δύο υπόψη λεκάνες.



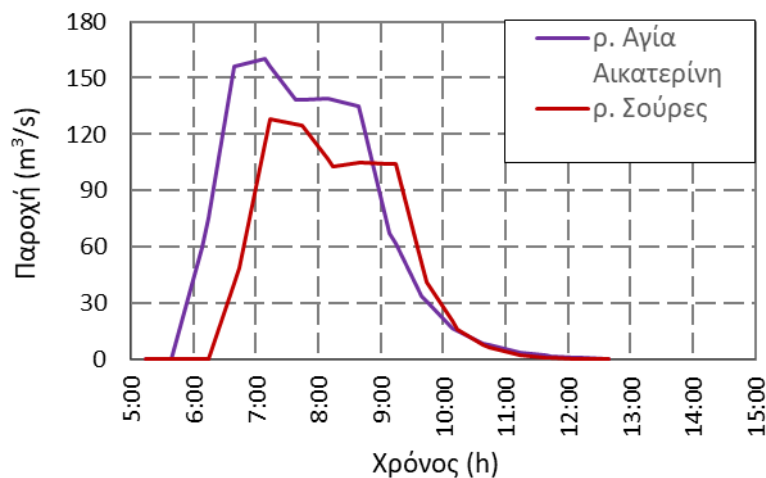
Διάγραμμα 4.3-1: Τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα για διάρκεια βροχής $d=0.5$ h

Ο υπολογισμός των απωλειών έγινε για το συνολικό επεισόδιο που επιλέχθηκε, με διάρκεια από 14/11/2017 09:30 μέχρι 15/11/2018 10:00. Στους σταθμούς της Ελευσίνας και των Βιλλίων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, που βρίσκονται πιο κοντά στην περιοχή μελέτης, ο συνολικός υετός των 5 προηγούμενων ημερών ανέρχεται σε 20.6 mm και 26.2 mm αντίστοιχα. Γι' αυτό επιλέχθηκαν μέσες συνθήκες προηγούμενης εδαφικής υγρασίας. Η παράμετρος CN_{II} ελήφθη από την μελέτη υδρολογίας της (HYDROMENT, 2018). Στην συγκεκριμένη μελέτη ο αριθμός CN για το ρέμα Σούρες υπολογίστηκε με βάση τον υδρογεωλογικό χάρτη και τις χρήσεις γης της περιοχής αλλά και με βάση επιτόπιες αυτοψίες. Από τα στοιχεία της μελέτης, η τιμή του CN_{II} στην λεκάνη του ρ. Σούρες προκύπτει ίση με 60. Η τιμή του CN_{II} στην λεκάνη του ρ. Αγία Αικατερίνη προέκυψε ίση με 70, μέσω κατάλληλης αναγωγής από τα στοιχεία που διαθέτουμε.



Εικόνα 4.3-1: Υπολογισμός του αριθμού CN στην λεκάνη του ρ. Σούρες (HYDROMENT, 2018)

Το ποσοστό αρχικών απωλειών α ελήφθη ίσο με 20%. Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω υπολογίστηκαν για τα δύο ρέματα τα υδρογραφήματα που θα χρησιμοποιηθούν στο υδραυλικό μοντέλο. Οι παροχές αιχμής προέκυψαν ίσες με $160 \text{ m}^3/\text{s}$ και $128.4 \text{ m}^3/\text{s}$ για το ρ. Αγία Αικατερίνη και για το ρ. Σούρες αντίστοιχα. Ο χρόνος βάσης της πλημμύρας είναι ίσος με 7 ώρες και τα δύο ρέματα. Σημειώνεται ότι οι ώρες εισόδου των πλημμυρογραφημάτων στο υδραυλικό μοντέλο καθορίζονται έτσι ώστε τα υπολογιζόμενα βάθη ροής να ταιριάζουν με τις διαθέσιμες μετρήσεις και δεν ταυτίζονται αυστηρά με τις ώρες που προκύπτουν από την υδρολογική ανάλυση. Εδώ οι ώρες εισόδου τέθηκαν ίσες με 05:40 π.μ. για το ρ. Αγία Αικατερίνη και 06:15 π.μ. για το ρ. Σούρες.

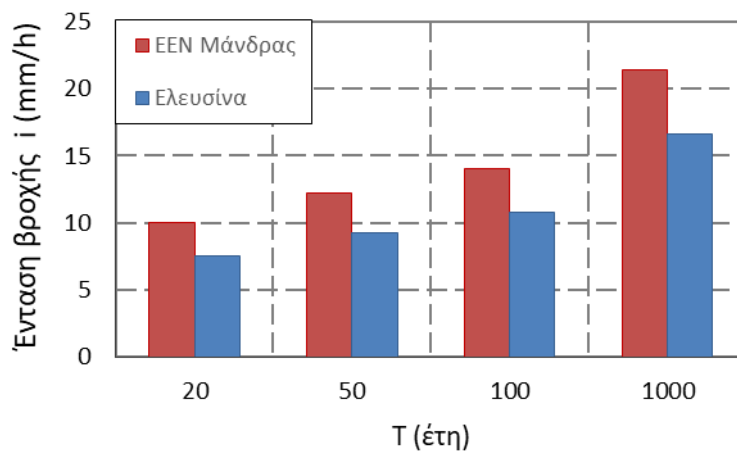


Διάγραμμα 4.3-2: Πλημμυρογραφήματα εισόδου του υδραυλικού μοντέλου

4.4 Συνθετικά υδρογραφήματα

4.4.1 Όμβριες καμπύλες

Για την παραγωγή των συνθετικών υδρογραφημάτων αναζητήθηκαν οι μετεωρολογικοί σταθμοί στους οποίους παρήχθησαν οι όμβριες καμπύλες από την ΕΓΥ στο πλαίσιο εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ. Στην περιοχή μελέτης βρίσκονται, ο σταθμός της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Νερού της Μάνδρας, ιδιοκτησίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, με υψόμετρο 258 m και ο σταθμός της Ελευσίνας, ιδιοκτησίας της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, με υψόμετρο 31 m. Οι αποστάσεις των δύο σταθμών από τα κέντρα βάρους των δύο λεκανών είναι περίπου οι ίδιες. Λαμβανομένων υπόψη των μέσων υψομέτρων των δύο λεκανών (377.8 m για το ρ. Σούρες & 302.5 m για το ρ. Αγία Αικατερίνη) θεωρήθηκε καταλληλότερος ο σταθμός της Μάνδρας διότι παρουσιάζει την μικρότερη υψομετρική διαφορά και με τις δύο λεκάνες. Επιπλέον, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, η όμβρια της Μάνδρας δίνει υψηλότερες τιμές των εντάσεων για την επιλεγείσα διάρκεια της καταιγίδας (ιση με 12 h), που είναι άλλος ένας λόγος για την επιλογή της συγκεκριμένης καμπύλης.



Διάγραμμα 4.4-1: Σύγκριση όμβριων καμπυλών για διάρκεια βροχής ($d=12$ h) για τις 4 εξεταζόμενες περιόδους επαναφοράς

Τελικά, η εξίσωση της χρησιμοποιούμενης όμβριας καμπύλης είναι η εξής:

$$i(d, T) = \frac{213.4 (T^{0.125} - 0.641)}{\left(1 + \frac{d}{0.124}\right)^{0.622}} \quad (4.4)$$

4.4.2 Υπολογιστική διαδικασία

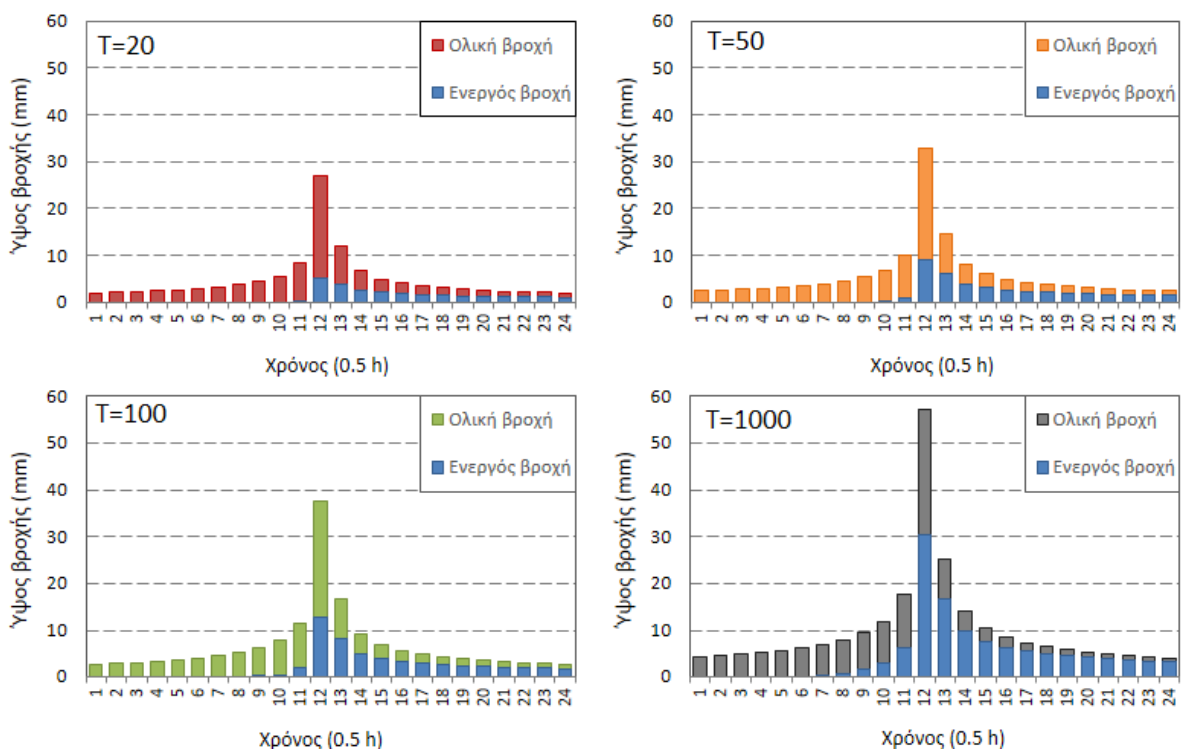
Για την σύνθεση των υετογραφημάτων, η συνολική διάρκεια της βροχόπτωσης ελήφθη ίση με 12 h (αρκετά μεγαλύτερη του μεγαλύτερου χρόνου συγκέντρωσης των δύο λεκανών) και το χρονικό βήμα των υπολογισμών ελήφθη ίσο με 0.5 h (αρκετά μικρότερο του μικρότερου χρόνου συγκέντρωσης των δύο λεκανών). Η χρονική κατανομή της βροχόπτωσης έγινε με την μέθοδο των *εναλλασσόμενων μπλοκ*, η οποία χρησιμοποιείται πιο συχνά για τις μικρές περιόδους επαναφοράς. Μετά την χρονική κατανομή, εφαρμόστηκε η μέθοδος SCS-CN με θεώρηση μέσω συνθηκών προηγούμενης εδαφικής υγρασίας και υπολογίστηκε το ενεργό υετόγραμμα και η διάρκεια της ενεργού βροχόπτωσης. Ακολούθως υπολογίστηκε η ένταση της ενεργού βροχόπτωσης και έγινε μείωση του χρόνου συγκέντρωσης για κάθε περίοδο επαναφοράς με εφαρμογή της σχέσης (4.1). Από τον χρόνο συγκέντρωσης καταρτίστηκαν τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα με την μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2.1.2, τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 4.4-1 για

το ρ . Σούρες και στον Πίνακα 4.4-2 για το ρ . Αγία Αικατερίνη. Τέλος, υπολογίστηκαν τα πλημμυρογραφήματα για τις διάφορες περιόδους επαναφοράς. Σημειώνεται ότι η βασική ροή θεωρήθηκε μηδέν, τιμή που δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα αφού η ροή στα 2 ρέματα είναι εφήμερη.

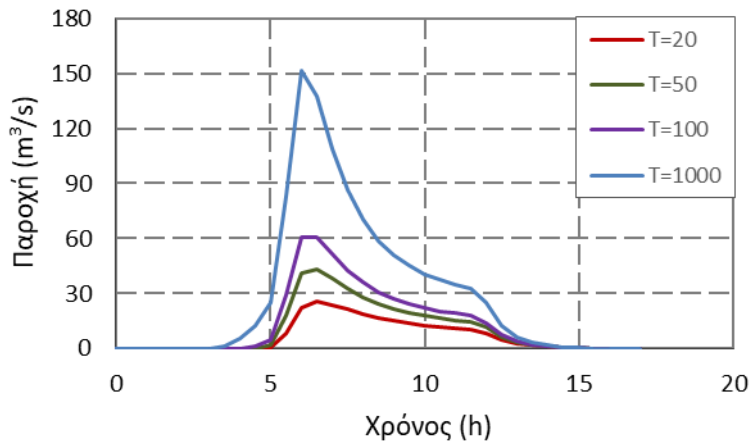
4.4.3 Αποτελέσματα

Πίνακας 4.4-1: Εκτίμηση των μεγεθών του ΣΜΥ του ρ . Σούρες για τις εξεταζόμενες περιόδους επαναφοράς

Περίοδος επαναφοράς T (έτη)	20	50	100	1000
Ολικό ύψος σημειακής βροχής (mm)	120.4	146.5	168.4	256.2
Ολικό ύψος επιφανειακής βροχής, h (mm)	114.3	139.1	159.9	243.2
Ολικό ενεργό ύψος βροχής, h_e (mm)	25.9	40.3	53.8	115.8
Ένταση της ενεργού βροχόπτωσης, i_e (mm/h)	3.70	5.38	6.72	12.86
Τελικός χρόνος συγκέντρωσης, t_c (h)	2.60	2.44	2.35	2.10
Χρόνος ανόδου t_p (h)	1	1	1	1
Χρόνος βάσης t_b (h)	8.5	8	7.5	7
Παροχή αιχμής Q_{peak} (m^3/s)	30.6	32.1	33.6	35.3



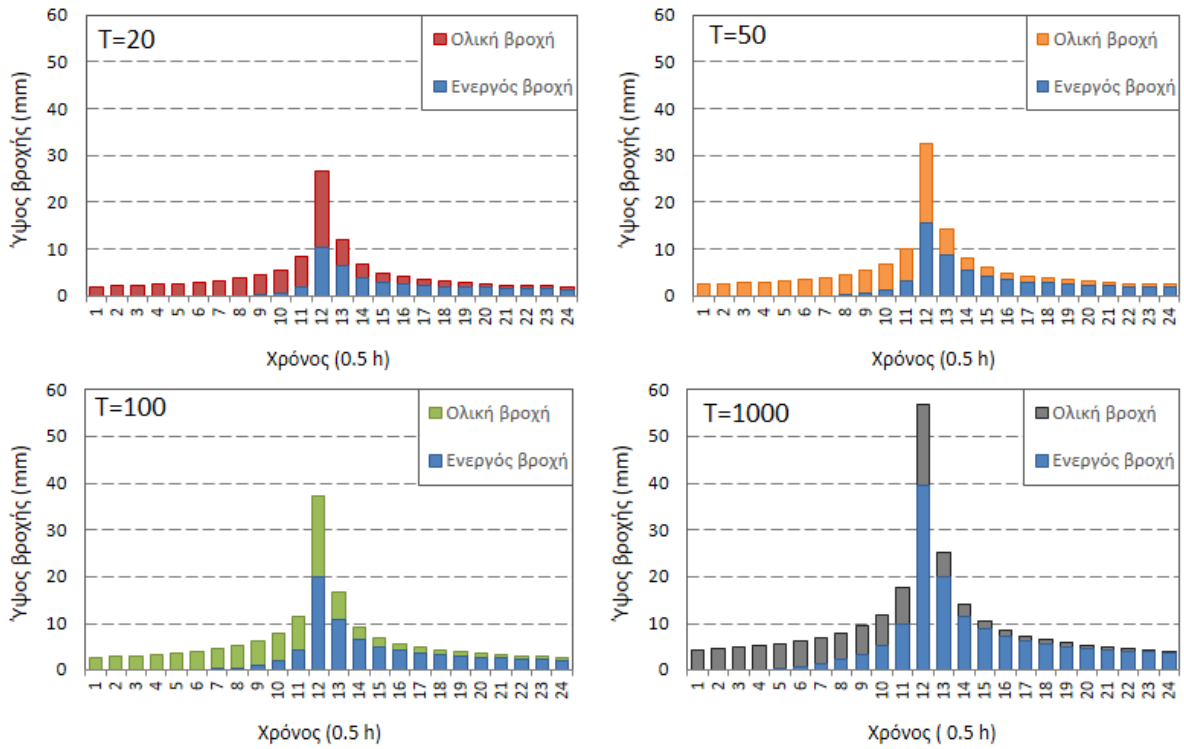
Διάγραμμα 4.4-2: Επιφανειακά υετογραφήματα στην λεκάνη του ρ . Σούρες



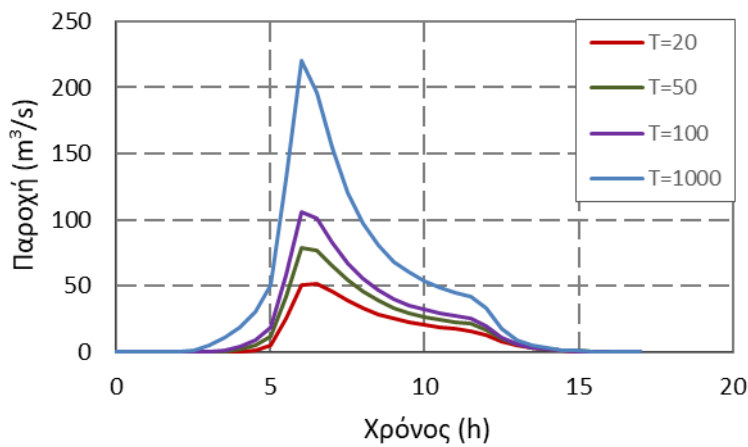
Διάγραμμα 4.4-3: Πλημμυρογραφήματα εισόδου του υδραυλικού μοντέλου για το ρ. Σούρες

Πίνακας 4.4-2: Εκτίμηση των μεγεθών του ΣΜΥ του ρ. Αγία Αικατερίνη για τις εξεταζόμενες περιόδους επαναφοράς

Περίοδος επαναφοράς T (έτη)	20	50	100	1000
Ολικό ύψος σημειακής βροχής (mm)	120.4	146.5	168.4	256.2
Ολικό ύψος επιφανειακής βροχής, h (mm)	114.1	138.8	159.5	242.7
Ολικό ενεργό ύψος βροχής, h_e (mm)	42.4	60.7	77.0	148.0
Ένταση της ενεργού βροχόπτωσης, i_e (mm/h)	5.29	7.14	8.55	14.80
Τελικός χρόνος συγκέντρωσης, t_c (h)	2.59	2.50	2.44	2.28
Χρόνος ανόδου t_p (h)	1	1	1	1
Χρόνος βάσης t_b (h)	8.5	8	8	7.5
Παροχή αιχμής Q_{peak} (m³/s)	33.8	35.3	36.9	38.7



Διάγραμμα 4.4-4: Επιφανειακά υετογραφήματα στην λεκάνη του ρ. Αγία Αικατερίνη



Διάγραμμα 4.4-5: Πλημμυρογραφήματα εισόδου του υδραυλικού μοντέλου για το ρ. Αγία Αικατερίνη

Πίνακας 4.4-3: Παροχές αιχμής των πλημμυρογραφημάτων (m^3/s) για τις εξεταζόμενες περιόδους επαναφοράς

Περίοδος επαναφοράς T (έτη)	Ρ. Σούρες	Ρ. Αγία Αικατερίνη
20	25.5	51.6
50	43.5	78.7
100	61.0	106.4
1000	151.1	220.8

5 ΡΥΘΜΙΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΤΟΥ 2017

5.1 ΔΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΥ ΑΡΧΕΙΟΥ

5.1.1 Γενικά

Το γεωμετρικό αρχείο περιέχει το υπολογιστικό πλέγμα με τις απαραίτητες πληροφορίες που χρειάζεται ο κώδικας, όπως είναι ο αριθμός των υπολογιστικών κόμβων και οι συντεταγμένες τους, ο αριθμός των τριγωνικών στοιχείων και η συνδεσιμότητα μεταξύ κόμβων και στοιχείων. Συνήθως το πλέγμα δίνεται στο γεωμετρικό αρχείο σε όρους βαθυμετρίας, δηλαδή κάθε κόμβος έχει και μία τιμή για το υψόμετρο. Το πλέγμα αυτό εισάγεται στο γεωμετρικό αρχείο με το όνομα «BOT TOM». Όταν στην περιοχή μελέτης υπάρχουν ζώνες με διαφορετική τραχύτητα, το γεωμετρικό αρχείο περιέχει και έναν δεύτερο πλέγμα όπου σε κάθε υπολογιστικό κόμβο δίνεται μία τιμή για τον συντελεστή τριβής. Το πλέγμα αυτό εισάγεται στο γεωμετρικό αρχείο με το όνομα «BOT TOM FRICTION».

5.1.2 Δημιουργία του πλέγματος

Το πρώτο βήμα για το πλέγμα είναι ο καθορισμός της έκτασης της προσομοίωσης. Στα ανάντη, η έκταση οριοθετείται από τις εξόδους των επιλεγμένων λεκανών απορροής. Στα κατόντη, η έκταση οριοθετείται από την πλημμυρισμένη έκταση του Νοεμβρίου του 2017 και τις θέσεις των οριακών συνθηκών. Έτσι, το πλέγμα εκτείνεται στα ανατολικά μέχρι την συμβολή του ρ. Σούρες με τον χ. Σαρανταπόταμο και στα νότια μέχρι την Άνω Ελευσίνα, κάτω από την Εθνική Οδό Αθηνών-Κορίνθου. Αφού καθορισθεί η έκταση της προσομοίωσης, χαράσσεται το περίγραμμά της σε μορφή κλειστού πολυγώνου ώστε να χρησιμοποιηθεί από το λογισμικό Blue Kenue. Η χάραξη έγινε στο περιβάλλον ArcGIS® με υπόβαθρο τον ορθοφωτοχάρτη της Κτηματολόγιο Α.Ε. (https://www.ktimanet.gr/CitizenWebApp/Orthophotographs_Page.aspx) στο γεωγραφικό σύστημα συντεταγμένων WGS '84. Στην συνέχεια, σχεδιάστηκαν οι όχθες των ρεμάτων σε μορφή ανοιχτών γραμμών, που απαιτούνται για την κατασκευή των δομημένων πλεγμάτων. Στην παρούσα εργασία, κατασκευάστηκαν 4 δομημένα πλέγματα. Ένα πλέγμα για την φυσική κοίτη του ρ. Σούρες, από την είσοδο του υδραυλικού μοντέλου μέχρι την διασταύρωσή του με την Παλαιά Εθνική Οδό Αθηνών-Θηβών. Δύο πλέγματα για το διευθετημένο τμήμα του ρ. Σούρες, από την DHL μέχρι την Αττική Οδό και από την Αττική Οδό μέχρι την συμβολή με το ρ. Μικρό Κατερίνι. Και τέλος, ένα πλέγμα για το ρ. Αγία Αικατερίνη από την είσοδο του υδραυλικού μοντέλου μέχρι το σημείο όπου ουσιαστικά χάνεται η κοίτη του.



Εικόνα 5.1-1: Η περιοχή προσομοίωσης. Με κόκκινο χρώμα εικονίζεται το εξωτερικό όριο του πλέγματος και με μπλε χρώμα τα ρέματα όπου τοποθετήθηκαν δομημένα πλέγματα.

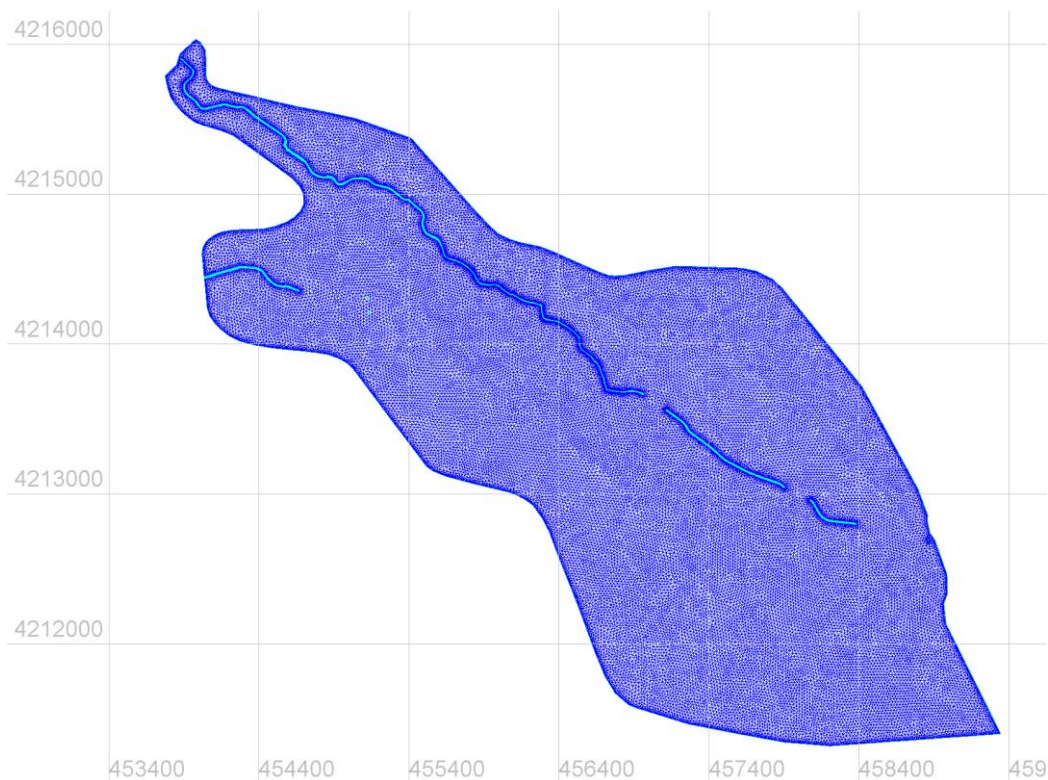
Μετά την χάραξη, έγινε μετατροπή των συντεταγμένων των όχθων και του περιγράμματος από το σύστημα WGS '84 στο σύστημα ΕΓΣΑ '87, εισήχθησαν στο λογισμικό Blue Kenue και παρήχθησαν πρώτα τα δομημένα πλέγματα με τις παραμέτρους που φαίνονται στον Πίνακα 5.1-1 και μετά το πρωτογενές υπολογιστικό πλέγμα για όλο το πεδίο, με τις παραμέτρους που φαίνονται στον Πίνακα 5.1-2.

Πίνακας 5.1-1: Χαρακτηριστικά των δομημένων πλεγμάτων

Τοποθεσία	Πλήθος κόμβων σε κάθε διατομή (συμπεριλαμβανομένων και των κόμβων στις όχθες)	Απόσταση μεταξύ των διατομών (m)
ρ. Σούρες (φυσική κοίτη)	5	1
ρ. Σούρες (τεχνητή κοίτη)	5	3.5
ρ. Αγία Αικατερίνη	5	4

Πίνακας 5.1-2: Χαρακτηριστικά του γενικού πλέγματος

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Βασική απόσταση μεταξύ των κόμβων (m)	20
Συντελεστής μέγιστου λόγου των πλευρών	1.5
Πλήθος κόμβων	60247
Πλήθος τριγωνικών στοιχείων	116112



Εικόνα 5.1-2: Το πρωτογενές υπολογιστικό πλέγμα. Με ανοιχτό χρώμα διακρίνονται τα 4 δομημένα πλέγματα.

5.1.3 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους

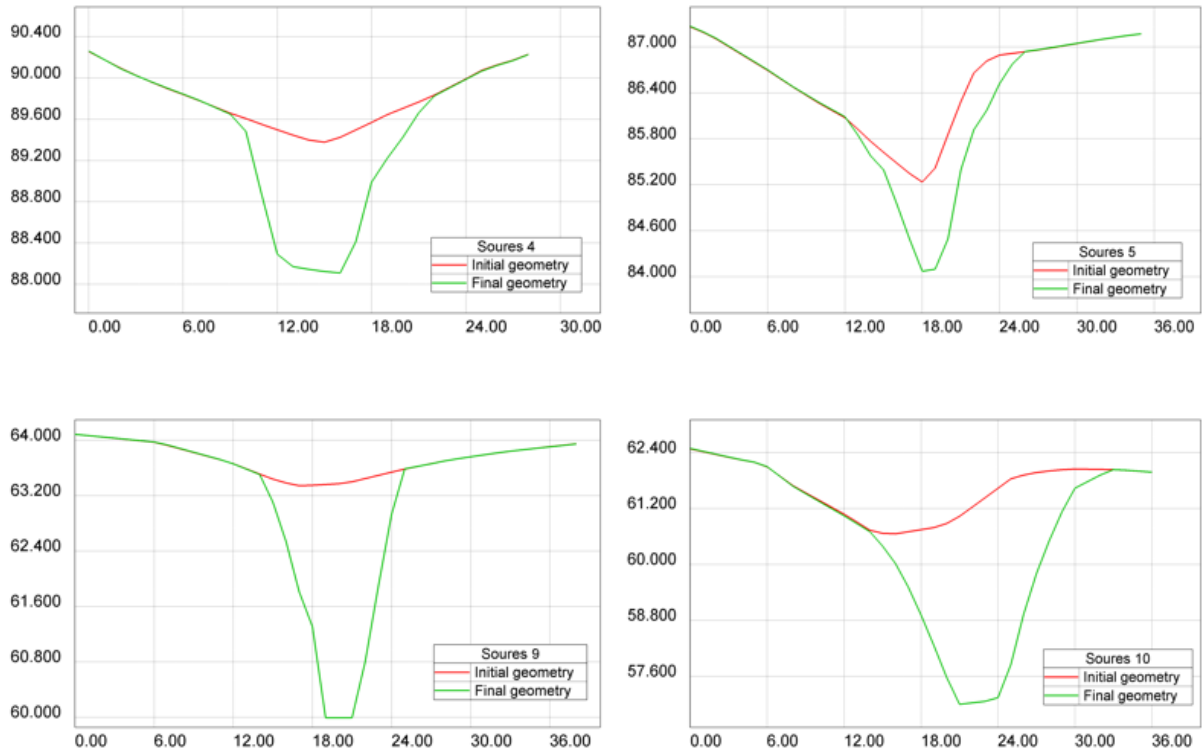
Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους χρησιμοποιείται για την αρχική απόδοση της βαθυμετρίας στο πρωτογενές υπολογιστικό πλέγμα. Η χωρική διακριτοποίηση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, επιλέγεται σύμφωνα με την μορφολογία της μελετώμενης περιοχής και την επιθυμητή ακρίβεια στους υδραυλικούς υπολογισμούς. Στην συνέχεια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιπλέον τοπογραφικές αποτυπώσεις για την καλύτερη αναπαράσταση του εδάφους σε σημεία όπου το ΨΜΕ παρουσιάζει ελλείψεις ή λάθη. Τα επιπλέον τοπογραφικά δεδομένα χρησιμοποιούνται επίσης για την ρεαλιστικότερη αναπαράσταση και βέλτιστη μοντελοποίηση διαφόρων υποδομών που επηρεάζουν την ροή, όπως αυτοκινητόδρομοι, σιδηροδρομικές γραμμές, αναχώματα, δίκτυα αποστράγγισης, οχετοί και κανάλια.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε αρχικά το ΨΜΕ με ανάλυση 5X5 m, που παραχωρήθηκε από την Κτηματολόγιο Α.Ε σε μορφή raster. Αφού έγινε μετατροπή του raster στην μορφή TIN (Triangulated Irregular Network) πραγματοποιήθηκε οπτικός έλεγχος του ΨΜΕ. Παρατηρήθηκε ότι στο ρ. Αγία Αικατερίνη, από την οδό Ομήρου στο δυτικό όριο της πόλης και για 500 περίπου μέτρα στα ανάντη δεν απεικονίζεται η κοίτη του. Από την σύγκριση όμως με τους ορθοφωτοχάρτες βρέθηκε ότι αυτό συνάδει με την πραγματικότητα, άρα δεν αποτελεί ατέλεια του ΨΜΕ.

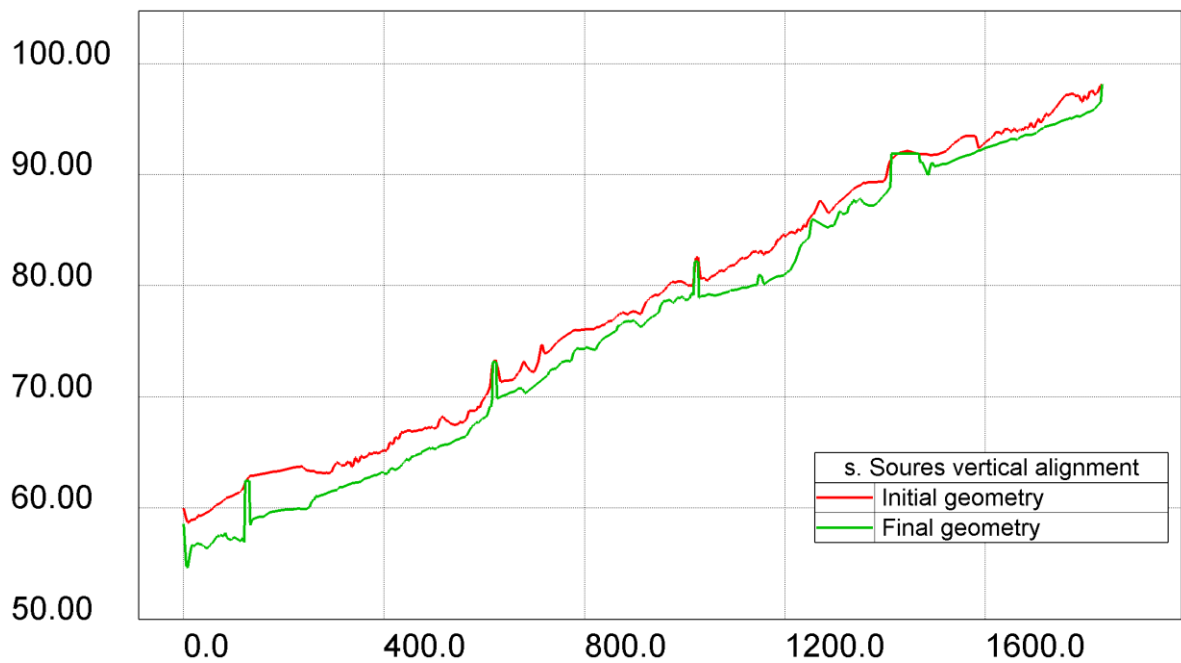
Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η φυσική κοίτη του ρ. Σούρες σε πολλά τμήματα δεν αναπαρίσταται καλά από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Μάλιστα, στο τμήμα από την συμβολή των δύο ρεμάτων μέχρι τον 1^ο οχετό του διευθετημένου τμήματος κάτω από την DHL, το ΨΜΕ ήταν σχεδόν επίπεδο και η κοίτη σχεδόν ανύπαρκτη. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι και το διευθετημένο τμήμα του Σούρες δεν αναπαρίσταται σωστά.

5.1.4 Επεξεργασία της φυσικής κοίτης του ρ. Σούρες

Για την καλύτερη απόδοση της βαθυμετρίας της φυσικής κοίτης του ρ. Σούρες στο υπολογιστικό πλέγμα, χρησιμοποιήθηκαν τα σημεία από τις τοπογραφικές εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης «**ΜΕΛΕΤΗ ΕΚΤΡΟΠΗΣ ΧΕΙΜΑΡΡΟΥ ΑΓ. ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΚΑΙ ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΗΣ ΧΕΙΜΑΡΡΟΥ ΣΟΥΡΕΣ ΘΡΙΑΣΙΟΥ ΠΕΔΙΟΥ**». Τα δεδομένα δόθηκαν σε αρχείο AUTOCAD από όπου έγινε εξαγωγή των σημείων σε μορφή (.xyz) η οποία υποστηρίζεται από το λογισμικό Blue Kenue και χρησιμοποιείται στο εργαλείο που κάνει την παρεμβολή των υψομέτρων στους κόμβους του πλέγματος. Τα σημεία που κυρίως αντλήθηκαν από την τοπογραφική αποτύπωση βρίσκονται στο πόδι και το φρύδι των 2 πρηνών και στον άξονα του ρέματος. Συνεπώς, κάθε υποθετική διατομή αποτελείται κατά βάση από 5 σημεία. Σε πρώτη φάση, με την χρήση των παραπάνω σημείων διαπιστώθηκε ότι η παρεμβολή δεν δίνει καλά αποτελέσματα και το πλέγμα έβγαине αρκετά «τραχύ» και ακανόνιστο. Αυτό οφειλόταν στην έντονη χωρική μεταβλητότητα των σημείων και στην μεγάλη απόσταση μεταξύ των διατομών. Γι' αυτό πραγματοποιήθηκε πύκνωση των σημείων με κατάλληλη υπορουτίνα στο Excel μέσω γραμμικής παρεμβολής. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν δύο ξεχωριστές παρεμβολές, η πρώτη με το σύνολο των σημείων για την αρχική διαμόρφωση της κοίτης και η δεύτερη με τα σημεία του πυθμένα μόνο, για την επιπλέον τροποποίηση των υπολογιστικών κόμβων που βρίσκονται στον πυθμένα του ρέματος. Στο τέλος, η γεωμετρία του ρ. Σούρες ήταν αρκούντως ικανοποιητική, όπως φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα. Στην Εικόνα 5.1-3 παρουσιάζονται ενδεικτικά τέσσερις διατομές και στην Εικόνα 5.1-4 παρουσιάζεται η μηκοτομή του ρέματος με την αρχική και την τελική γεωμετρία.



Εικόνα 5.1-3: Σύγκριση αρχικής και τελικής γεωμετρίας στην φυσική κοίτη του ρ. Σούρες

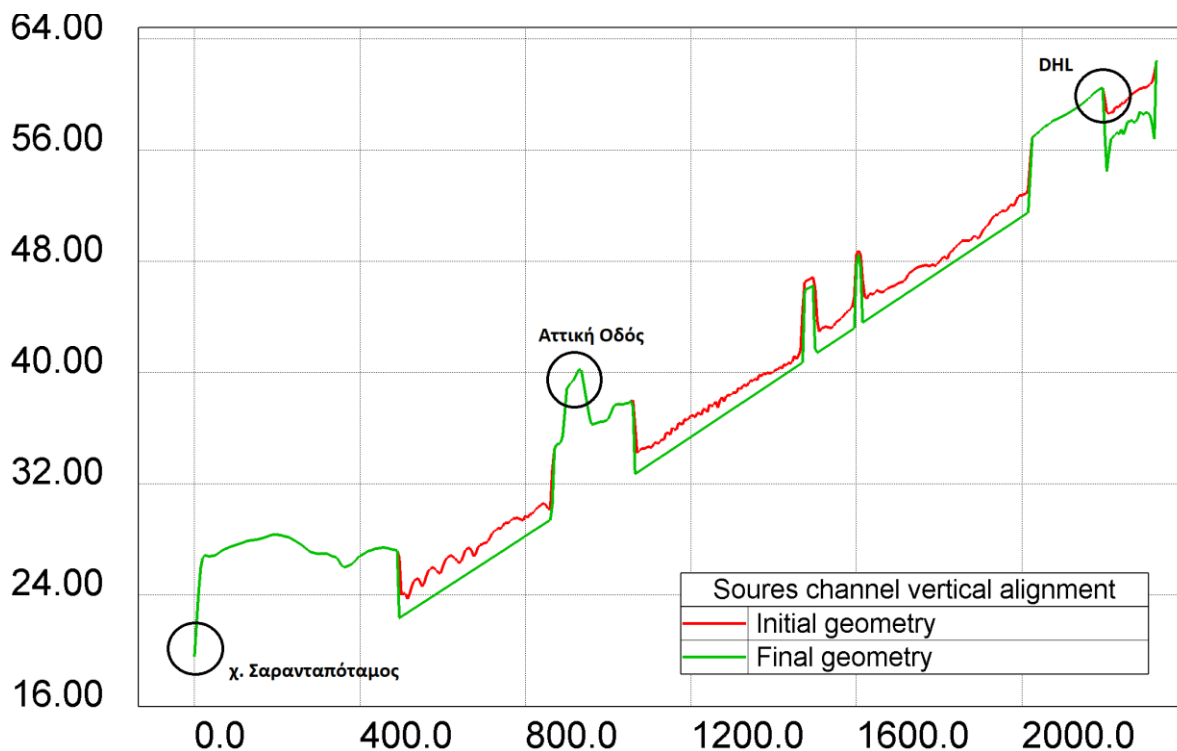


Εικόνα 5.1-4: Σύγκριση αρχικής και τελικής γεωμετρίας στην μηκοτομή της φυσικής κοίτης του ρ. Σούρες

5.1.5 Επεξεργασία της τεχνητής κοίτης

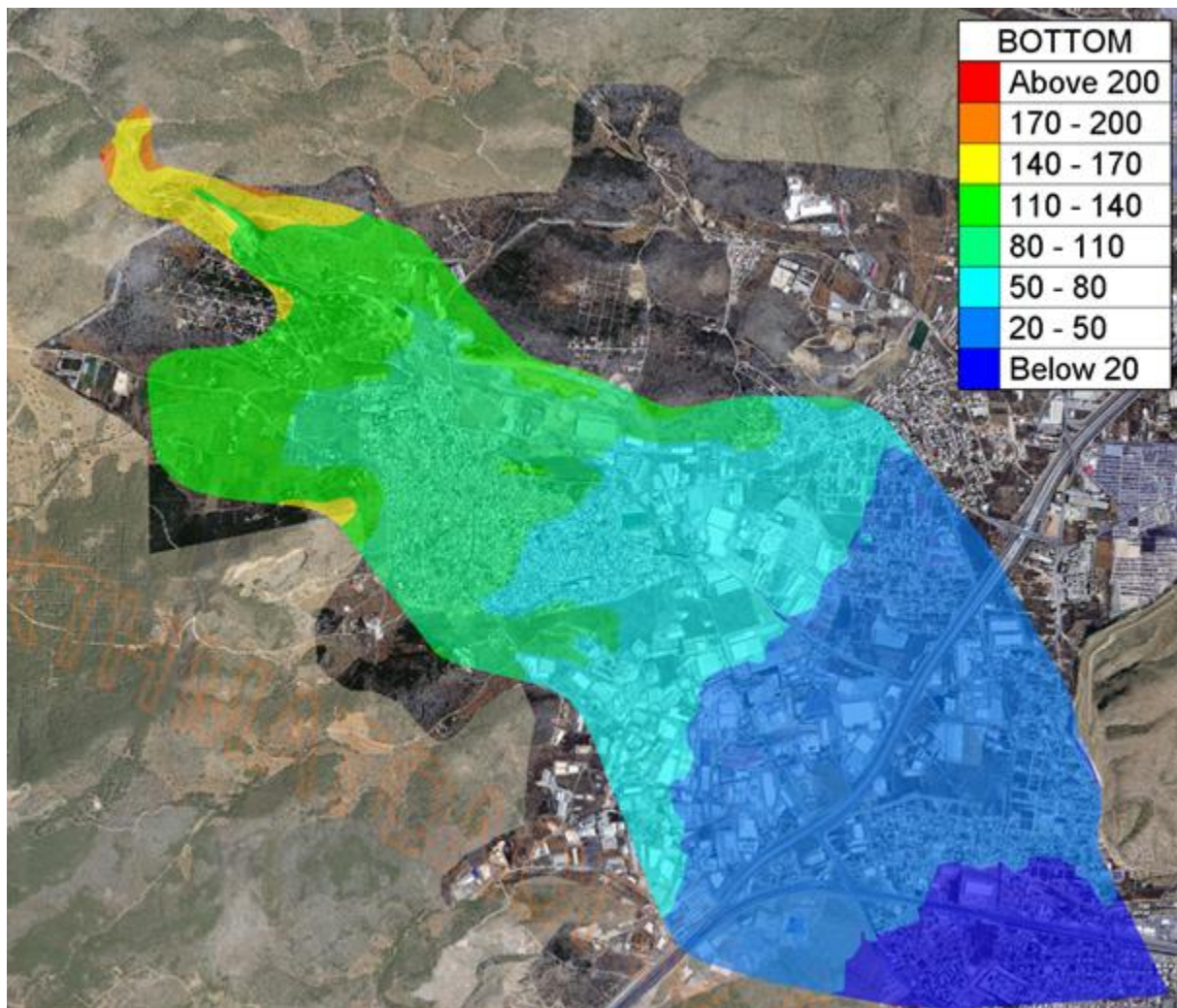
Για την επεξεργασία της τεχνητής κοίτης του ρ. Σούρες λόγω έλλειψης άλλων στοιχείων ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Στο περιβάλλον ArcGIS ψηφιοποιήθηκε ο άξονας και οι όχθες του καναλιού και έγινε πύκνωση των γραμμών ώστε να περιέχουν σημεία ανά 5m. Κατόπιν έγινε παρεμβολή υψομέτρου σ' αυτά τα σημεία από το TIN και δημιουργήθηκαν οι μηκοτομές στις τρεις θέσεις του καναλιού.
- Όπως μπορεί να φανεί και από την Εικόνα 5.1-5 υπήρχε έντονη μεταβολή του υψομέτρου από θέση σε θέση.
- Αφού αφαιρέθηκαν τα τεχνικά, υπολογίστηκε η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων και η κλίση του εδάφους στον άξονα και τις όχθες. Η κλίση στις τρεις θέσεις του καναλιού ήταν ίδια αλλά η υψομετρική διαφορά μεταξύ των όχθων και του άξονα δεν ήταν όσο το ύψος του ορθογωνικού αγωγού (3 m). Συγκεκριμένα, στο πρώτο τμήμα του καναλιού, από την DHL μέχρι τα ανάντη της Αττικής Οδού η υψομετρική διαφορά ήταν 1.67 m ενώ στο δεύτερο τμήμα, από την Αττική Οδό μέχρι το ρ. Μικρό Κατερίνι ήταν 1.25 m. Οι κλίσεις που προκύπτουν από τα ελάχιστα τετράγωνα είναι 1.98% και 1.93% για το 1^ο και το 2^ο τμήμα αντίστοιχα.
- Χρησιμοποιώντας την εξίσωση της ευθείας των ελαχίστων τετραγώνων αποδόθηκαν οι νέες τιμές του υψομέτρου στην αριστερή και την δεξιά όχθη, στον άξονα και σε απόσταση ¼ και ¾ από τον τοίχο του καναλιού. Όλα τα υψόμετρα υπολογίστηκαν στο επίπεδο των όχθων. Αφού ενοποιήθηκαν οι πέντε γραμμές είχε δημιουργηθεί πλέον ένα πυκνό δίκτυο σημείων εντός του καναλιού.
- Τέλος, σε κάθε σημείο έγινε μείωση του υψομέτρου κατά 3 m και δημιουργήθηκε μ' αυτόν τον τρόπο ο πυθμένας του καναλιού (βλέπε την πράσινη γραμμή στην Εικόνα 5.1-5).



Εικόνα 5.1-5: Σύγκριση αρχικής και τελικής γεωμετρίας στην μηκοτομή του καναλιού του ρ. Σούρες

Κατόπιν όλων των παραπάνω, δομήθηκε το πλέγμα που αναπαριστά την γεωμετρία του εδάφους το οποίο απεικονίζεται στην Εικόνα 5.1-6 και εισήχθη στο γεωμετρικό αρχείο. Σημειώνεται ότι τα κτήρια του αστικού ιστού της Μάνδρας καθώς και τα κτήρια της βιομηχανικής περιοχής έχουν προσομοιωθεί με την μέθοδο αύξησης της τραχύτητας. Για την ακριβέστερη προσομοίωσή τους θα απαιτούνταν η περίμετρος εκάστου κτηρίου να οριστεί ως στερεό όριο και η επιφάνεια εντός αυτής να είναι κενή, δηλαδή να μην περιέχει υπολογιστικούς κόμβους. Έτσι θα έμενε μόνο η επιφάνεια των δρόμων για την κίνηση του νερού. Επειδή οι δρόμοι έχουν σχετικά μικρό πλάτος θα έπρεπε να μειωθεί πάρα πολύ το μήκος των πλευρών των τριγωνικών στοιχείων του πλέγματος, στην τάξη του ενός-δύο μέτρων. Αυτό θα οδηγούσε σε σημαντική αύξηση των υπολογιστικών κόμβων και παράλληλα με την μείωση του χρονικού βήματος των υπολογισμών εξαιτίας της μικρής διάστασης των στοιχείων, θα έκανε την προσομοίωση εξαιρετικά δυσχερή και χρονοβόρα.



Εικόνα 5.1-6: Το τελικό πλέγμα της γεωμετρίας του εδάφους

5.1.6 Απόδοση τιμών του συντελεστή Manning στο πλέγμα

Για την απόδοση του συντελεστή Manning σε κάθε υπολογιστικό κόμβο χρησιμοποιήθηκαν τα γεωχωρικά δεδομένα του προγράμματος Corine Land Cover για το έτος 2012, τα οποία διατίθενται δωρεάν σε κάθε ενδιαφερόμενο από την Κτηματολόγιο Α.Ε μέσω του συνδέσμου (<http://www.ktimatologio.gr/forestmaps/Pages/xrasis-gis.aspx>). Τα δεδομένα δίνονται σε μορφή shapefile στο οποίο κάθε διαφορετική χρήση τη γης οριοθετείται από ένα κλειστό πολύγωνο. Με το λογισμικό ArcGIS® έγινε εξαγωγή των πολυγώνων της περιοχής μελέτης στην μορφή που υποστηρίζεται από το λογισμικό Blue Kenue, δόθηκε σε κάθε πολύγωνο η κατάλληλη τιμή του συντελεστή τριβής όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1-3 και κάθε υπολογιστικός κόμβος έλαβε την τιμή του πολυγώνου στο οποίο περιέχεται.

Πίνακας 5.1-3: Αντιστοίχιση του συντελεστή τριβής με τις χρήσεις γης (Μαρκόπουλος, 2018)

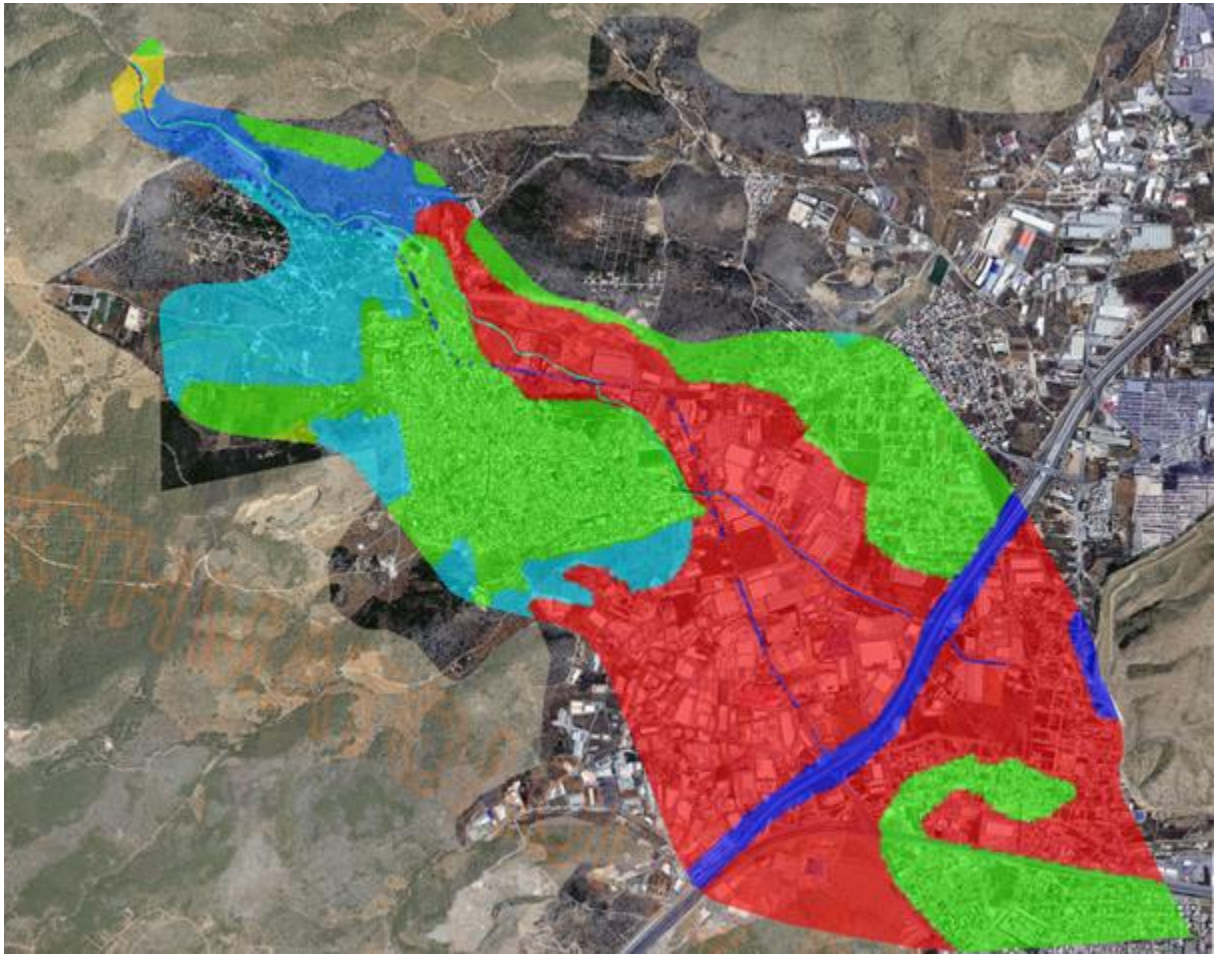
ΚΩΔΙΚΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	ΕΠΙΛΟΓΗ
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.060 - 0.115	0.100
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0.115 - 0.230	0.200
122	Οδικά σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	0.013 - 0.038	0.020
223	Ελαιώνες	0.043 - 0.050	0.045
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	0.058 - 0.100	0.060
313	Μικτό δάσος	0.100 - 0.230	0.140
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	0.072 - 0.125	0.100
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	0.050 - 0.070	0.070

Εκτός από τις περιοχές που καθορίζονται από το Corine, χρησιμοποιήθηκαν 4 επιπλέον ζώνες τραχύτητας και αποδόθηκε σε αυτές ξεχωριστός συντελεστής τριβής. Οι επιπλέον ζώνες είναι, η κοίτη του ρ. Αγία Αικατερίνη, η φυσική κοίτη του ρ. Σούρες, το διευθετημένο τμήμα του ρ. Σούρες και η Παλαιά Εθνική Οδός Αθηνών-Θηβών. Οι τελικές τιμές του συντελεστή τριβής φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.1-4: Συντελεστής τριβής για τα ρέματα (Μαρκόπουλος, 2018, μετά από προσαρμογή)

ΧΕΙΜΑΡΡΟΙ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	ΕΠΙΛΟΓΗ
Κοίτη Αγίας Αικατερίνης	Βραχώδης, χορταριασμένο	0.050-0.080	0.065
Κοίτη Σούρες ανεπένδυτη	Βραχώδης, χορταριασμένο	0.050-0.080	0.065
Κοίτη Σούρες επενδυμένη	Φινιρισμένο σκυρόδεμα (float finish)	0.013-0.016	0.016
Παλαιά Εθνική Οδός ΑΘ	Άσφαλτος	0.012-0.020	0.013

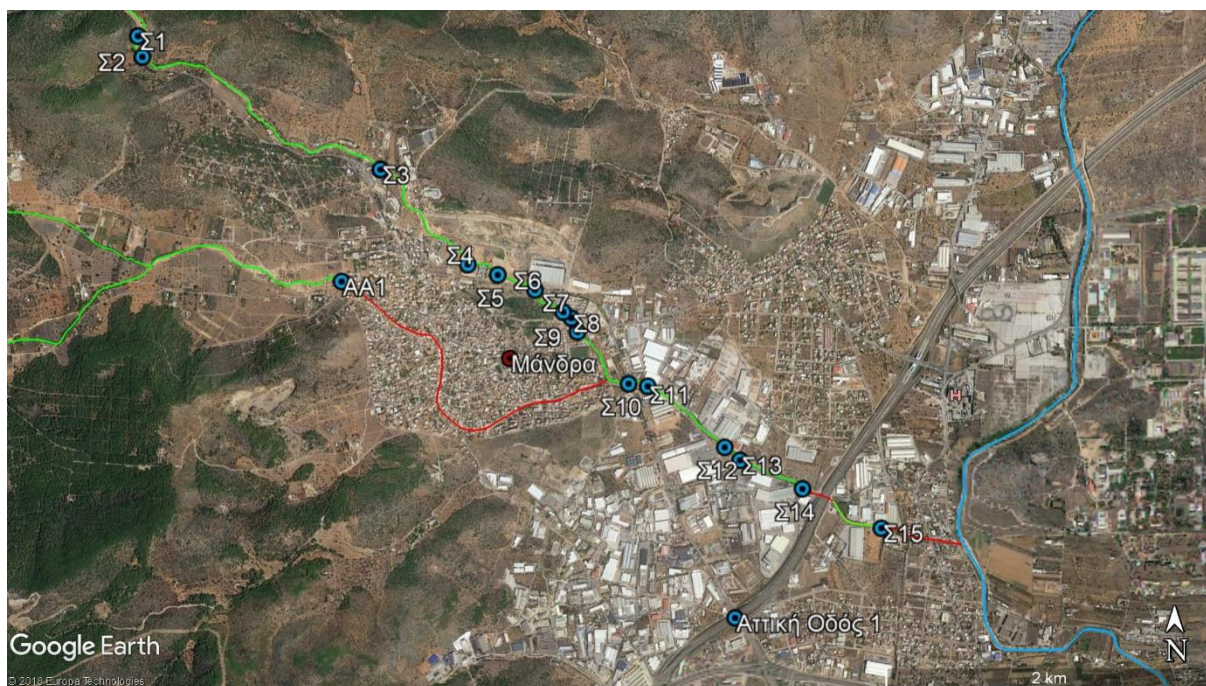
Με βάση τα παραπάνω, κατασκευάστηκε το πλέγμα με τους συντελεστές Manning το οποίο απεικονίζεται στην εικόνα 5.1-7 και εισήχθη στο γεωμετρικό αρχείο.



Εικόνα 5.1-7: Το τελικό πλέγμα με τους συντελεστές Manning

5.1.7 Τεχνικά Έργα

Στην περιοχή μελέτης υπάρχουν 15 οχετοί κατά το μήκος του ρέματος Σούρες (από την είσοδο του μοντέλου μέχρι και την εκβολή του καναλιού στον Σαρανταπόταμο), ο υπόγειος αγωγός της Κοροπούλη και η γέφυρα του ανισόπεδου κόμβου της Αττικής Οδού με την Ε.Ο. Ελευσίνας-Θηβών. Τα τεχνικά παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.1-8 και στον Πίνακα 5.1-5 δίνονται οι θέσεις τους και οι διαστάσεις τους, οι οποίες μετρήθηκαν κατά την επιτόπια αυτοψία και επιβεβαιώθηκαν και από εκθέσεις και πορίσματα που δημοσιεύτηκαν σχετικά με την πλημμύρα της Μάνδρας.



Εικόνα 5.1-8: Οι θέσεις των τεχνικών που εισήχθησαν στο λογισμικό TELEMAT

Πίνακας 5.1-5: Χαρακτηριστικά μεγέθη των τεχνικών

Όνομα τεχνικού	Τοποθεσία	Διάμετρος/ Πλάτος (m)	Υψος (m)	Μήκος (m)	Διατομή
Σ1	Είσοδος μοντέλου	3	1.5	15	Ορθογωνικός
Σ2	Αμέσως κατάντη του 1ου τεχνικού	3	1.5	35	Ορθογωνικός
Σ3	Πίσω από το πρατήριο CYCLON	2	1	12	Ορθογωνικός
Σ4	Εγκαταστάσεις ΒΑΚΟΝΤΙΟΣ ΑΕΒΕ	4	1.25	61	Δίδυμος ορθογωνικός
Σ5	Αμαξοστάσιο Δήμου Μάνδρας	0.8	-	30	Δίδυμος κυκλικός
Σ6	Κτήριο Logistics ΜΕΤΡΟ	3.5	2	15	Ορθογωνικός
Σ7	ΠΡΙΝ το Κοιμητήριο	1.2	-	14	Κυκλικός
Σ8	Οδός Βασιλείου Δούκα -Κοιμητήριο	1.2	-	13	Κυκλικός
Σ9	Οδός Λούκα	5	1.9	15	Ορθογωνικός
Σ10	ΠΕΟΑΘ	5.5	4.5	18	Ορθογωνικός
Σ11	Στρατηγού Δεληγιάννη - Κανάλι 1	4	3	185	Δίδυμος ορθογωνικός
Σ12	Κανάλι 2	4	3	16	
Σ13	Οδός Ψηλορείτη - Κανάλι 3	4	3	31	
Σ14	Αττική Οδός - Κανάλι 4	4	3	200	
Σ15	Κανάλι 5	4	3	497	
AA1	Υπόγειος αγωγός Κοροπούλη	2	1.7	2319	Ορθογωνικός
Αττική Οδός 1	Διασταύρωση ΠΕΟΑΘ με Αττική Οδό	25	6	50	Ορθογωνικός

5.1.8 Οριακές συνθήκες και παράμετροι της προσομοίωσης

Απαραίτητο στοιχείο για την εκτέλεση μιας υδροδυναμικής προσομοίωσης αποτελούν οι οριακές συνθήκες της ροής. Γενικά στα ανάντη του υπολογιστικού πεδίου τίθεται οριακή συνθήκη με προκαθορισμένη παροχή, είτε σταθερή είτε μεταβλητή ως προς τον χρόνο (υδρογράφημα). Στα κατάντη του υπολογιστικού πεδίου τίθεται γενικώς σταθερό βάθος ροής ή καμπύλη στάθμης παροχής.

Εδώ δημιουργήθηκαν τέσσερα ρευστά όρια (liquid boundaries), δύο στα ανάντη των ρεμάτων με δεδομένη την παροχή, ένα όριο στο πέρας του διευθετημένου τμήματος του ρ. Σούρες επί του χ. Σαρανταπόταμου και ένα ακόμη στην περιοχή Εργατικές Κατοικίες κάθετα στο ρέμα Μικρό Κατερίνι. Για τα κατάντη όρια θεωρήσαμε σταθερό βάθος ροής εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων για την χρησιμοποίηση καμπύλης στάθμης παροχής. Ωστόσο, το λογισμικό TELEMAC δίνει την δυνατότητα εφαρμογής μιας μεθόδου, η οποία ονομάζεται Thomson boundary conditions κατά την οποία επιτρέπονται μικρές μεταβολές του βάθους ροής οι οποίες συμβαδίζουν με την θεωρία των χαρακτηριστικών. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε στα δύο κατάντη όρια. Τελικά, ορίστηκε βάθος ροής στον Σαρανταπόταμο 2.5 m και στάθμη ελεύθερης επιφάνειας στο ρ. Μικρό Κατερίνι στα +10.20 m προκειμένου να υπάρχουν χαμηλά βάθη ροής στον γειτονικό δρόμο ο οποίος έχει υψόμετρο +9.90 m. Οι παραπάνω τιμές ελήφθησαν από την συναφή διπλωματική εργασία του (Μαρκόπουλος, 2018).

Όσον αφορά τις παραμέτρους της προσομοίωσης, αυτές που αξίζει να αναφερθούν εδώ είναι ο νόμος τριβής του πυθμένα, το μοντέλο τύρβης και το χρονικό βήμα των υπολογισμών. Για την τριβή επιλέχθηκε ο νόμος του Manning που είναι ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος και για τον οποίο βρίσκονται εύκολα στην βιβλιογραφία οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας. Για την τύρβη επιλέχθηκε το μοντέλο k-epsilon. Τέλος, για την εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου επιλέχθηκε μεταβλητό χρονικό βήμα. Με αυτόν τον τρόπο το λογισμικό υπολογίζει σε κάθε επανάληψη το κατάλληλο χρονικό βήμα ώστε ο αριθμός Courant να είναι μικρότερος από μια δοθείσα τιμή. Η δυνατότητα αυτή ενεργοποιείται με την προσθήκη της εντολής VARIABLE TIME STEP=YES στο αρχείο οδηγός. Η μέγιστη τιμή του αριθμού Courant δίνεται με την προσθήκη της εντολής DESIRED COURANT NUMBER στο αρχείο οδηγός και τέθηκε ίση με 0.9 προκειμένου τα αποτελέσματα να έχουν επαρκή ποιότητα.

5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥΣ

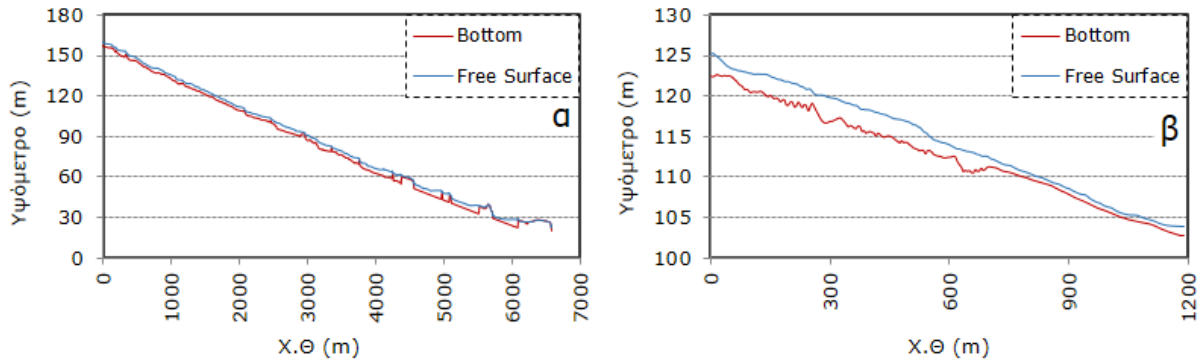
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του υδραυλικού μοντέλου στις διατομές ελέγχου που προέκυψαν ύστερα από την επιτόπια αυτοψία. Οι διατομές περιγράφονται λεπτομερώς στον Πίνακα 3.7-1 και απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα.



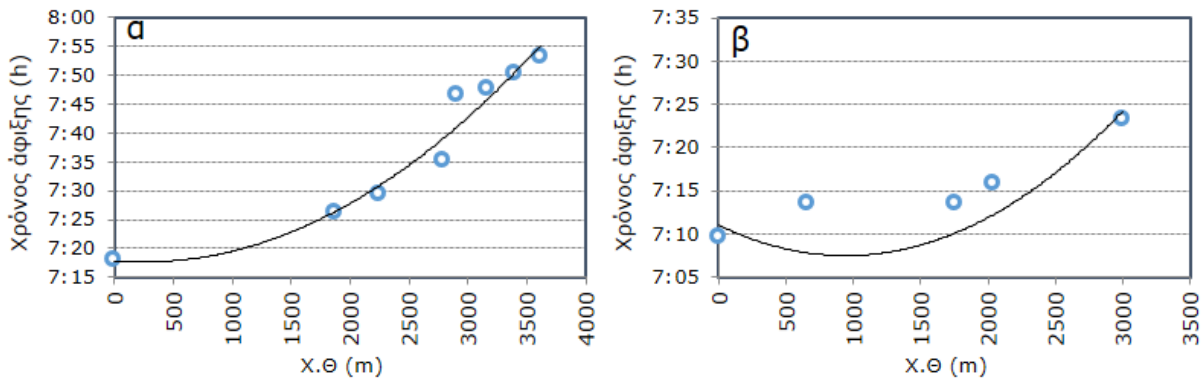
Εικόνα 5.2-1: Χάρτης διατομών ελέγχου

5.2.1 Βάθη ροής

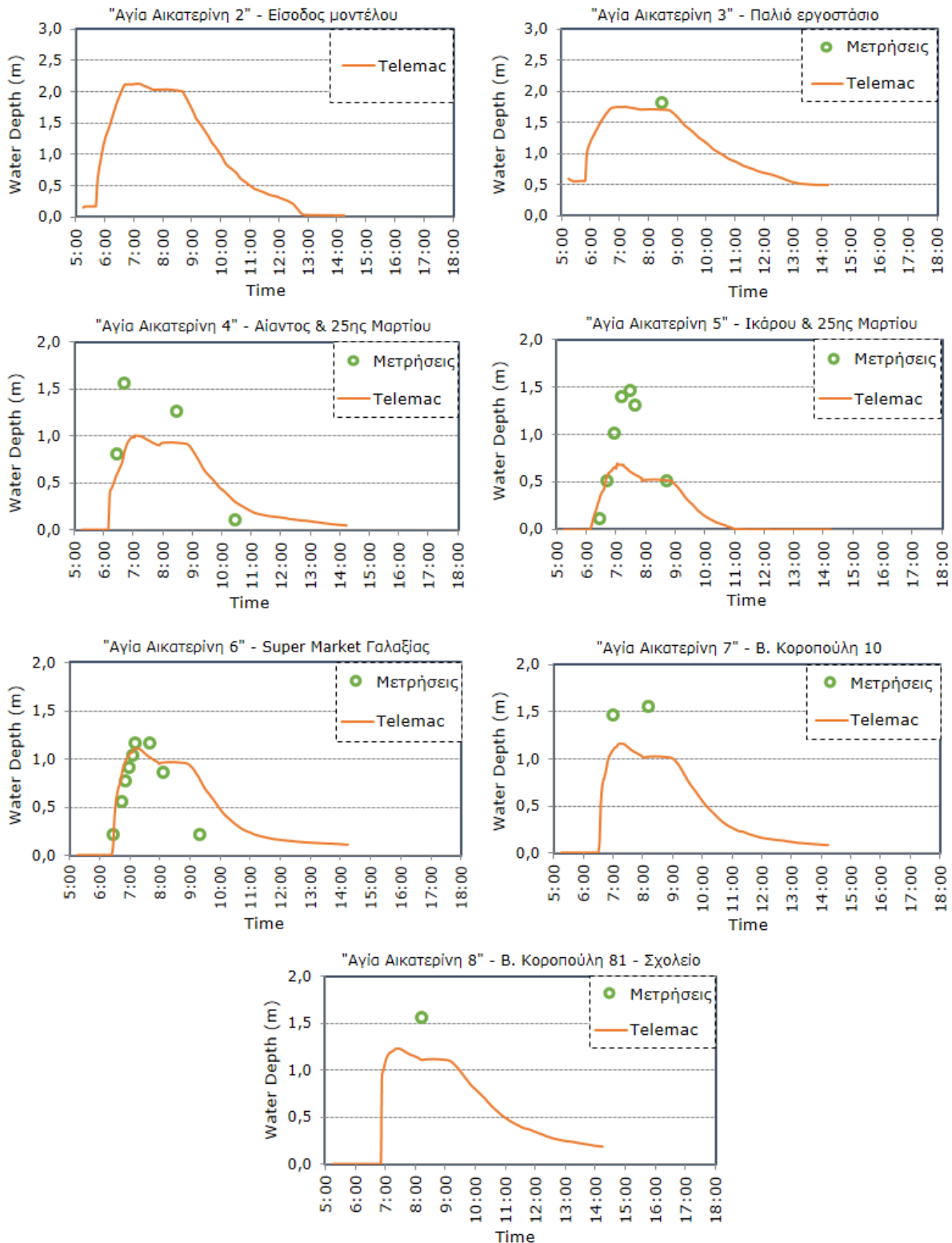
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου TELEMAC-2D όσον αφορά τα βάθη ροής. Στο Διάγραμμα 5.2-1 δίνεται το προφίλ της μέγιστης ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Στο Διάγραμμα 5.2-2 δίνονται οι χρόνοι άφιξης του μέγιστου βάθους του πλημμυρικού κύματος στις διατομές ελέγχου των δύο ρεμάτων που βρίσκονται ανάντη της συμβολής τους. Στα Διαγράμματα 5.2-3, 5.2-4 και 5.2-5 δίνεται η χρονική εξέλιξη του βάθους ροής παράλληλα με τις μετρήσεις. Σημειώνεται ότι στα παραπάνω διαγράμματα τα βάθη δίνονται στον άξονα των ρεμάτων ή στον άξονα των δρόμων ανάλογα, όπως μετρήθηκαν και κατά την επιτόπια αυτοψία. Τέλος, στο Διάγραμμα 5.2-6 γίνεται σύγκριση των υπολογισμένων και καταγεγραμμένων μέγιστων βαθών ροής.



Διάγραμμα 5.2-1: Μέγιστη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του ρ. Σούρες (α) και του ρ. Αγία Αικατερίνη (β)



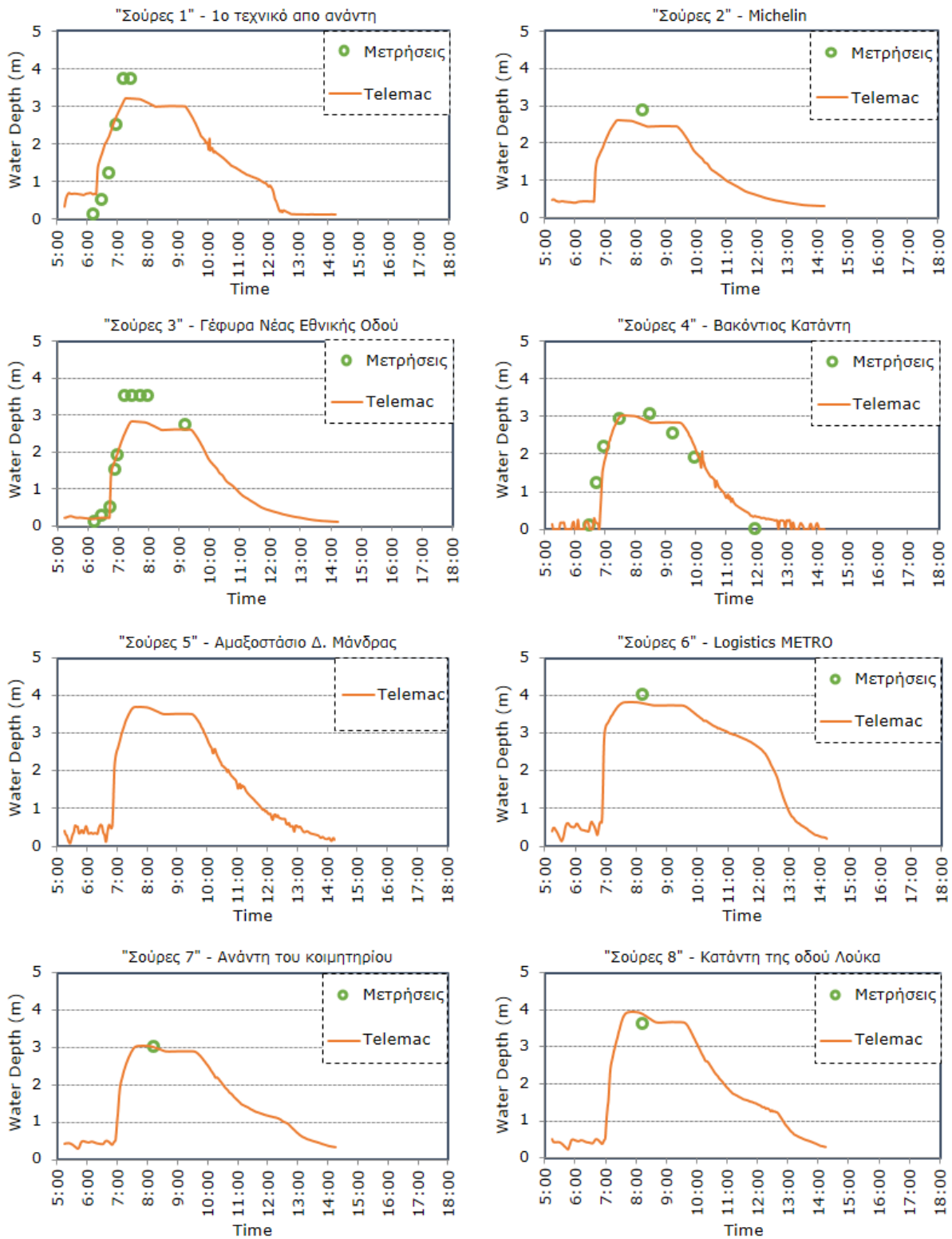
Διάγραμμα 5.2-2: Χρόνοι άφιξης του μέγιστου βάθους του πλημμυρικού κύματος κατά μήκος των ρεμάτων Σούρες (α) και Αγία Αικατερίνη (β)



Διάγραμμα 5.2-3: Μεταβολή του βάθους ροής στις διατομές ελέγχου του ρ. Αγία Αικατερίνη

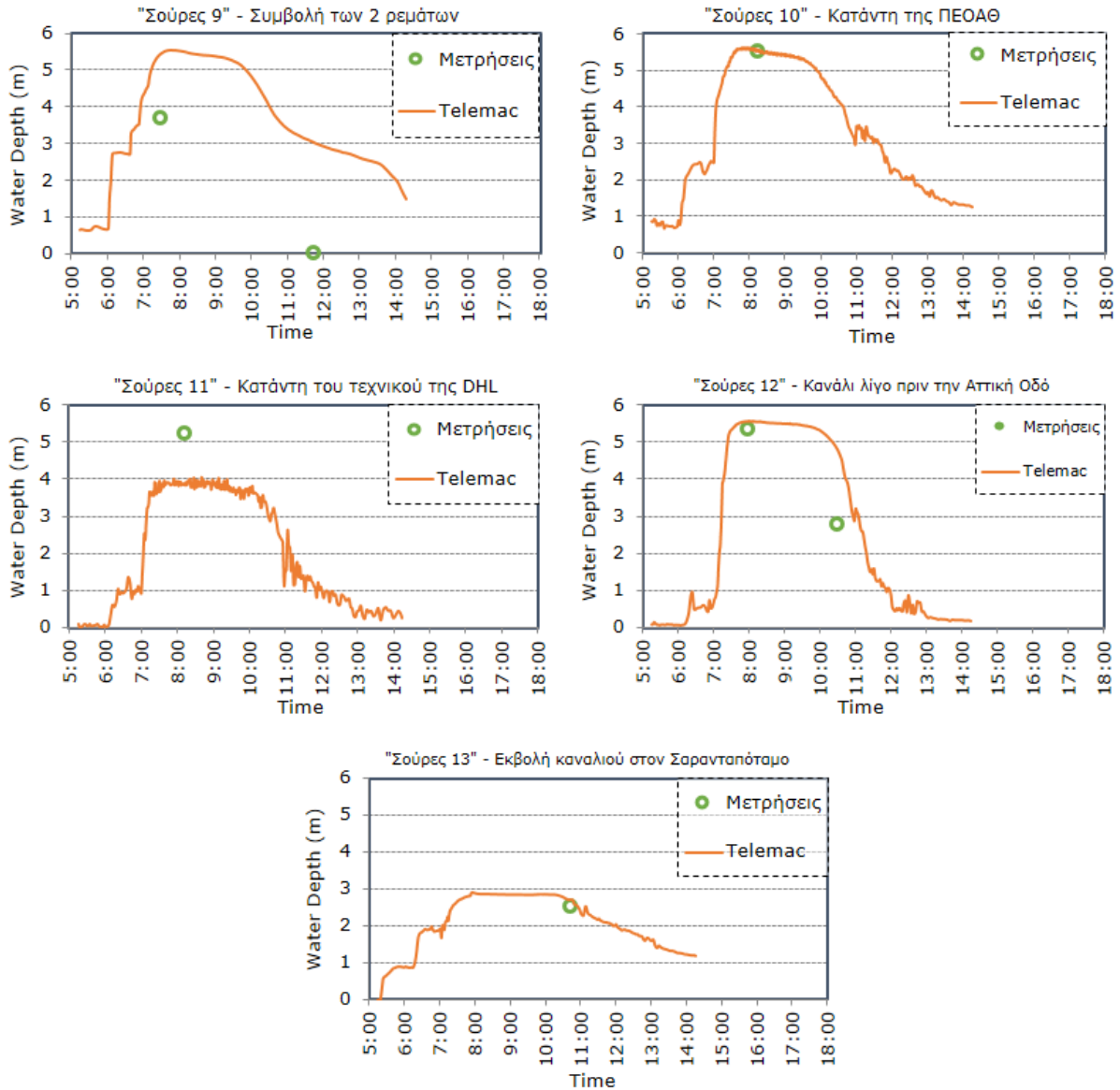
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το ρέμα Αγία Αικατερίνη στο τελευταίο τμήμα του πριν την πόλη της Μάνδρας δεν είχε διαμορφωμένη κοίτη. Το σημείο που εξαφανίζεται η κοίτη του ταυτίζεται με την διατομή ελέγχου ΑΑ3. Από εκεί και έπειτα το κύμα απλώθηκε στο πλημμυρικό πεδίο και έπληξε σχεδόν όλο το μέτωπο της πόλης στην οδό Ομήρου. Παρατηρούμε ότι το μοντέλο αναπαριστά με ακρίβεια το μέγιστο βάθος στην διατομή 3 με απόκλιση μόλις 3% και από εκεί και έπειτα υποεκτιμά

τις αιχμές του βάθους ροής. Ωστόσο από τις διατομές 4, 5 & 6 φαίνεται ότι το παραχθέν υδρογράφημα αναπαριστά ικανοποιητικά τον ανοδικό και τον καθοδικό κλάδο της πλημμύρας.

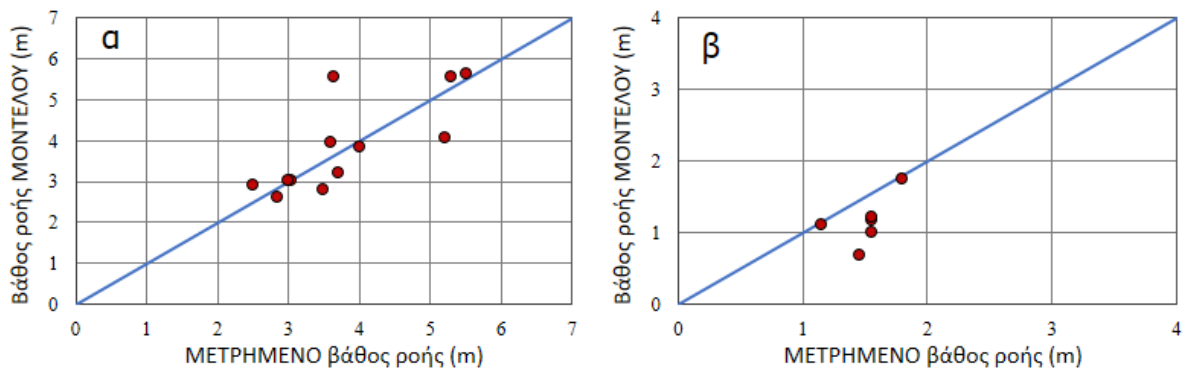


Διάγραμμα 5.2-4: Μεταβολή του βάθους ροής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες ανάντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη

Παρατηρούμε ότι στο ρέμα Σούρες τα βάθη ροής είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερα από τα βάθη ροής στην Αγία Αικατερίνη. Αυτό οφείλεται στο ότι το ρέμα Σούρες είχε διαμορφωμένη κοίτη η οποία ενσωματώθηκε στο μοντέλο όπως περιγράφεται στην ενότητα 5.1.4 και η ροή διατηρήθηκε εν μέρει μέσα σ' αυτήν. Εκτός από τις τρεις πρώτες διατομές το μοντέλο δίνει πολύ καλές εκτιμήσεις για την αιχμή της πλημμύρας. Επίσης όπως φαίνεται στις διατομές 1, 3 και 4 το παραχθέν υδρογράφημα αναπαριστά ικανοποιητικά τον ανοδικό κλάδο της πλημμύρας.



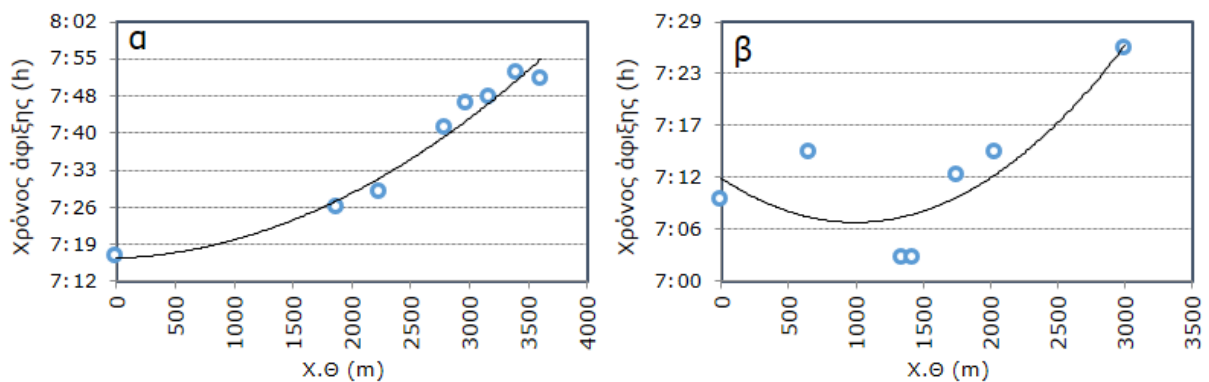
Διάγραμμα 5.2-5: Μεταβολή του βάθους ροής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες καπάνη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη



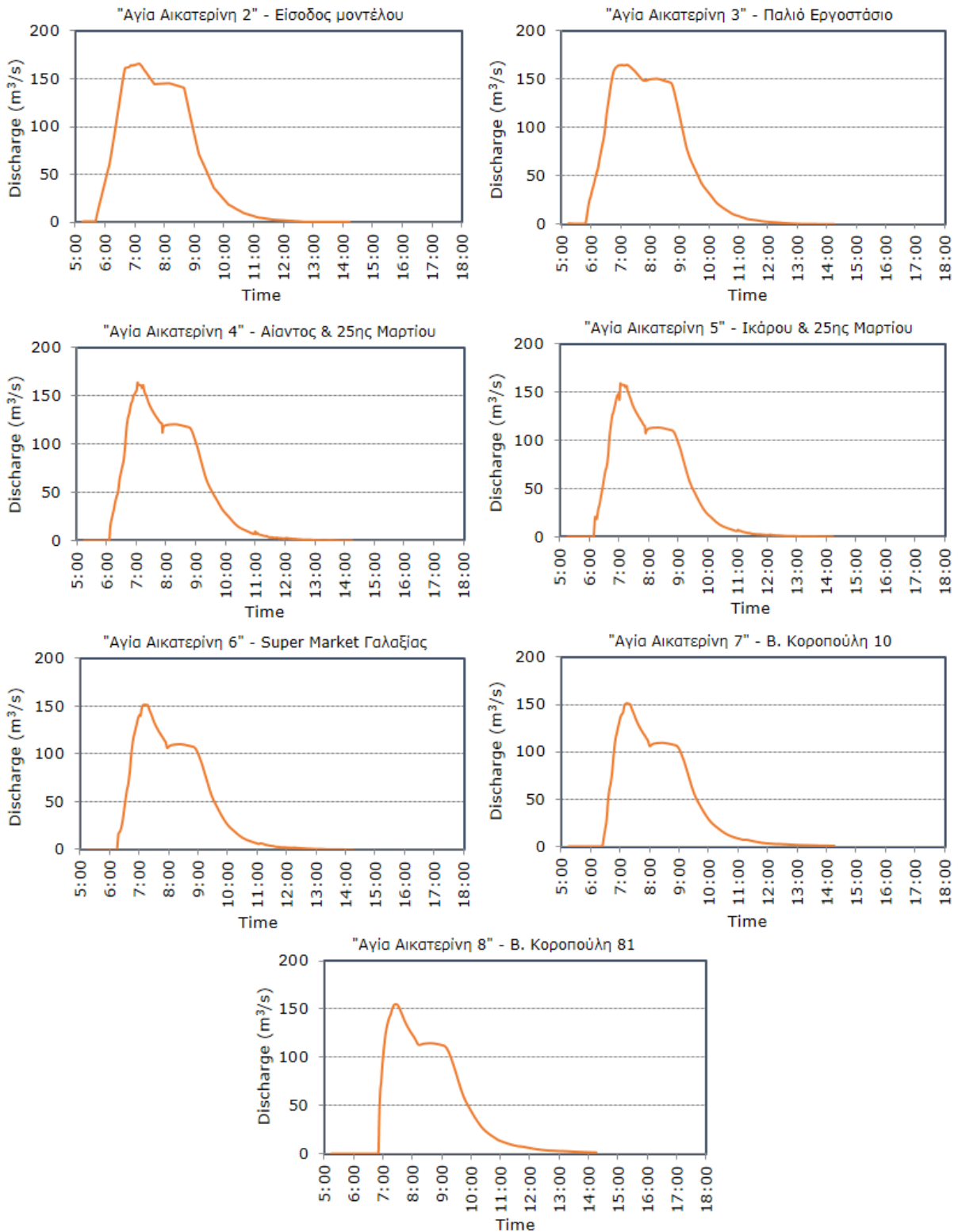
Διάγραμμα 5.2-6: Σύγκριση μέγιστων βαθών μεταξύ μετρήσεων και προσομοίωσης στα ρέματα Σούρες (α) και Αγία Αικατερίνη (β)

5.2.2 Παροχές

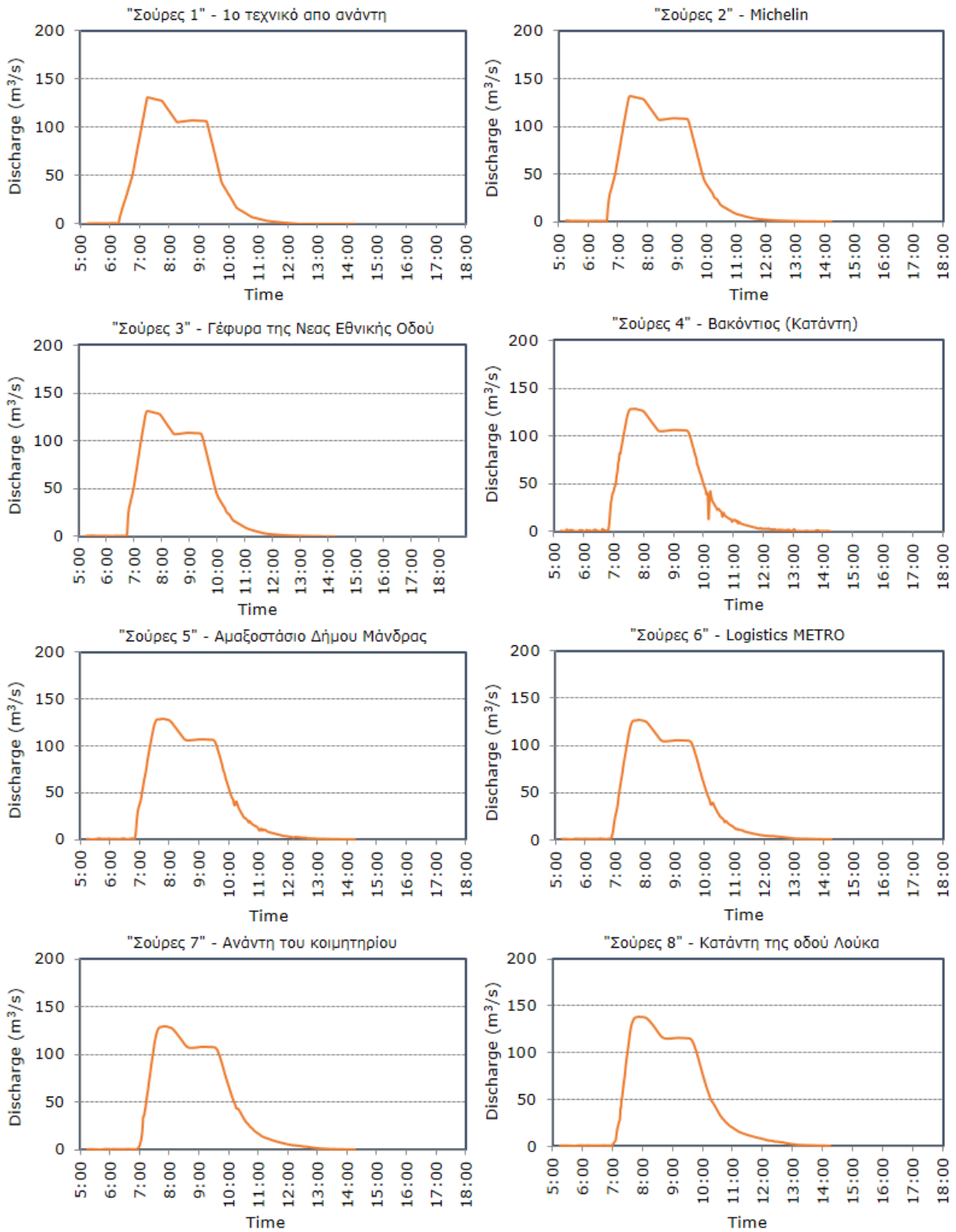
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου TELEMAC-2D όσον αφορά στην διόδευση των πλημμυρικών παροχών.



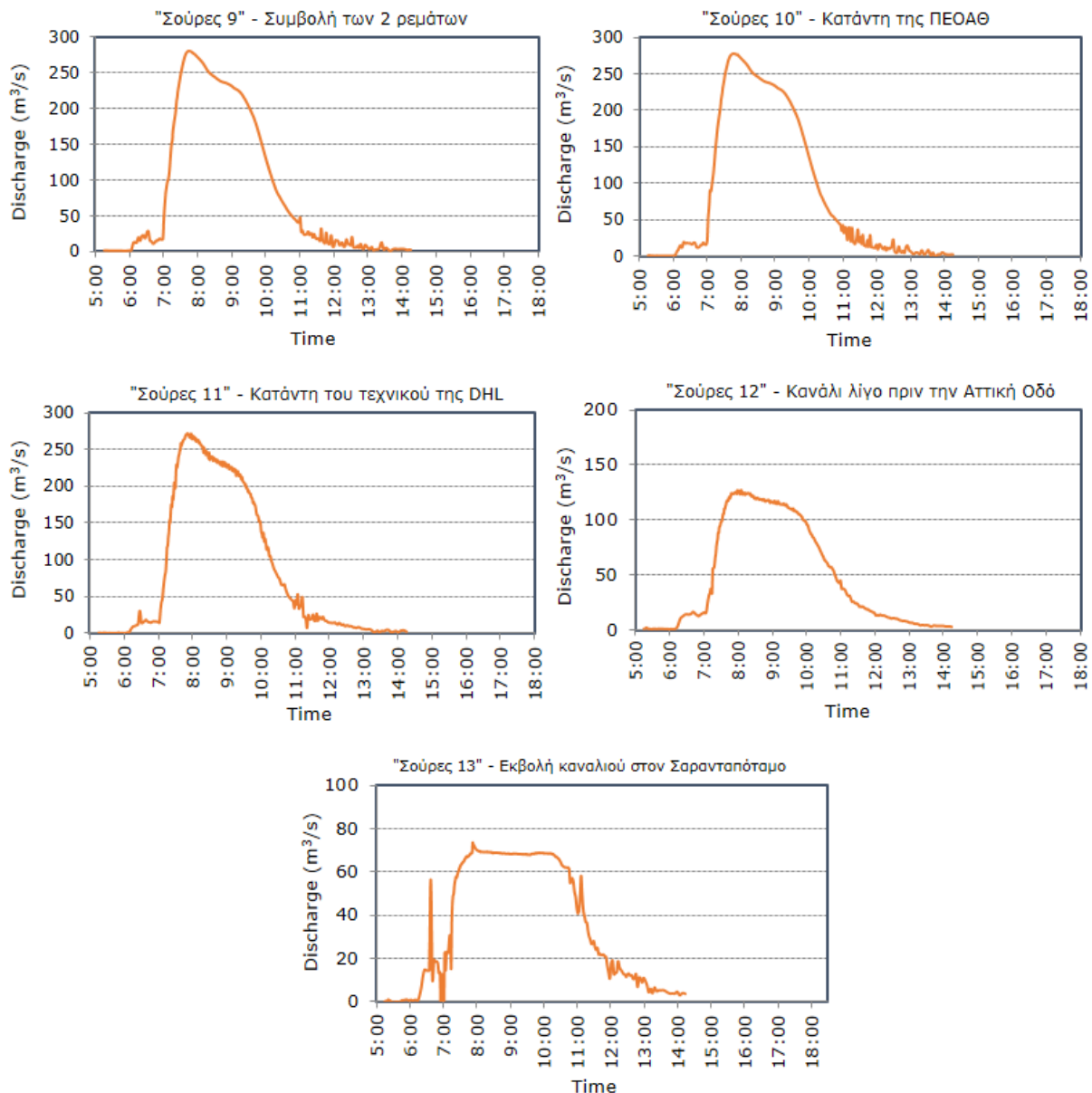
Διάγραμμα 5.2-7: Χρόνοι άφιξης της μέγιστης παροχής του πλημμυρικού κύματος κατά μήκος των ρεμάτων Σούρες (α) και Αγία Αικατερίνη (β)



Διάγραμμα 5.2-8: Μεταβολή της παροχής στις διατομές ελέγχου του ρ. Αγία Αικατερίνη



Διάγραμμα 5.2-9: Μεταβολή της παροχής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες ανάντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη



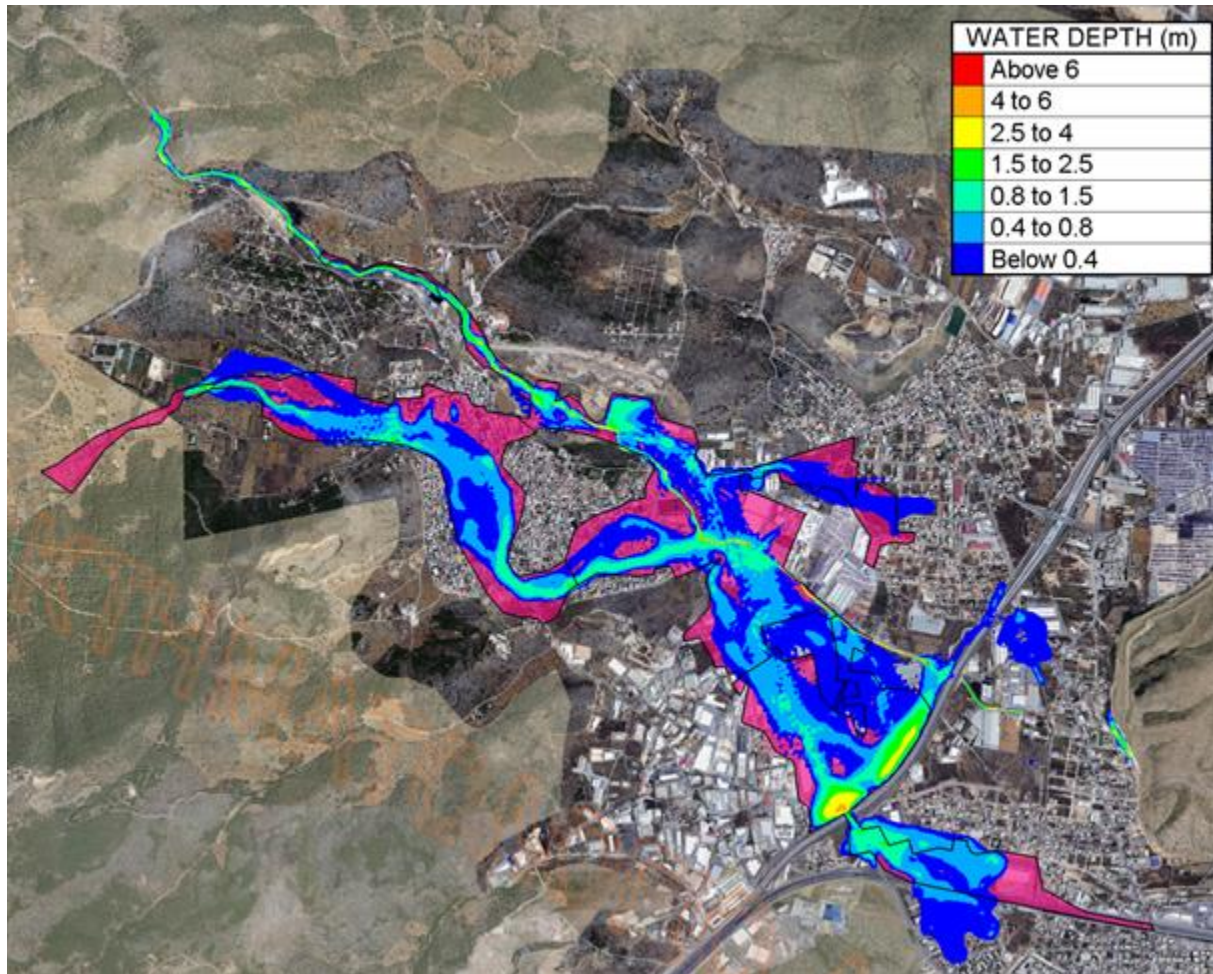
Διάγραμμα 5.2-10: Μεταβολή της παροχής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες κατάντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη

Από το διάγραμμα 5.2-8 παρατηρούμε ότι η αιχμή του πλημμυρογραφήματος φθίνει ελάχιστα καθώς το κύμα οδεύει προς τα κατάντη. Η απόσβεση της μέγιστης παροχής σε απόσταση 3 km από την είσοδο του μοντέλου μέχρι την διατομή AA8 είναι ίση με 9 %. Παρατηρούμε επίσης ότι η δεύτερη αιχμή του πλημμυρογραφήματος αλλάζει σημαντικά από την διατομή 3 στην διατομή 4 και από εκεί και έπειτα δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα. Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται στον υπόγειο αγωγό που έχουμε εισάγει στο λογισμικό, ο οποίος παραλαμβάνει μέρος της παροχής από την οδό Ομήρου που βρίσκεται μεταξύ των διατομών 3 και 4 και το οδηγεί στην συμβολή των 2 ρεμάτων. Από το διάγραμμα 5.2-9 παρατηρούμε ότι το σχήμα του πλημμυρογραφήματος δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα από διατομή σε διατομή. Αυτό δείχνει ότι οι οχετοί που βρίσκονται κατά μήκος του ρέματος Σούρες δεν προκάλεσαν ανάσχεση του πλημμυρικού κύματος όπως θα ήταν αναμενόμενο. Η απόσβεση της μέγιστης παροχής σε απόσταση 3.5 km από την είσοδο του μοντέλου μέχρι την διατομή Σ8 είναι ίση με 2%. Τέλος, από το διάγραμμα 5.2-10 παρατηρούμε σημαντική διαφοροποίηση του πλημμυρογραφήματος στην διατομή Σ12. Αυτό οφείλεται στο ότι μέρος της απορροής κινήθηκε προς την βιομηχανική περιοχή της Μάνδρας και δεν πέρασε όλος ο όγκος της πλημμύρας από το τεχνητό

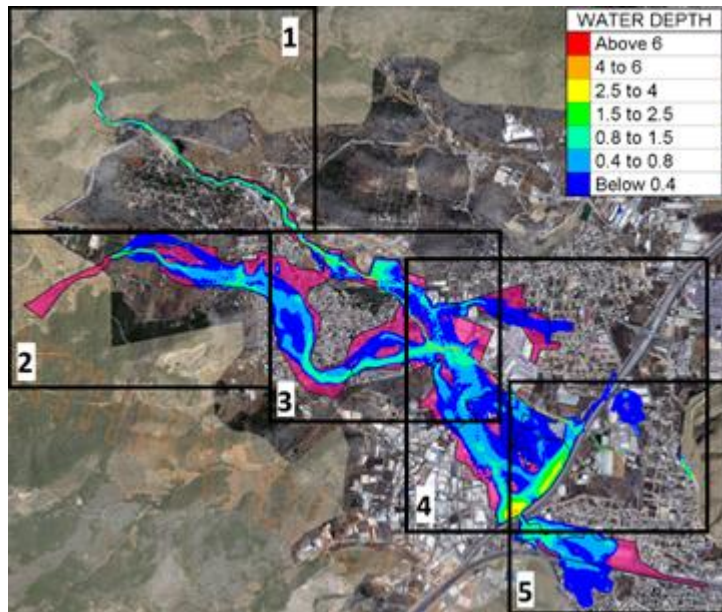
κανάλι. Επίσης, τα τεχνικά Σ12 και Σ13 υπερχείλισαν και τα πλεονάζοντα ύδατα κινήθηκαν προς την βιομηχανική περιοχή. Το τελευταίο φαίνεται και στην Εικόνα 5.2-6 παρακάτω.

5.2.3 Πλημμυρική έκταση και χρόνοι άφιξης

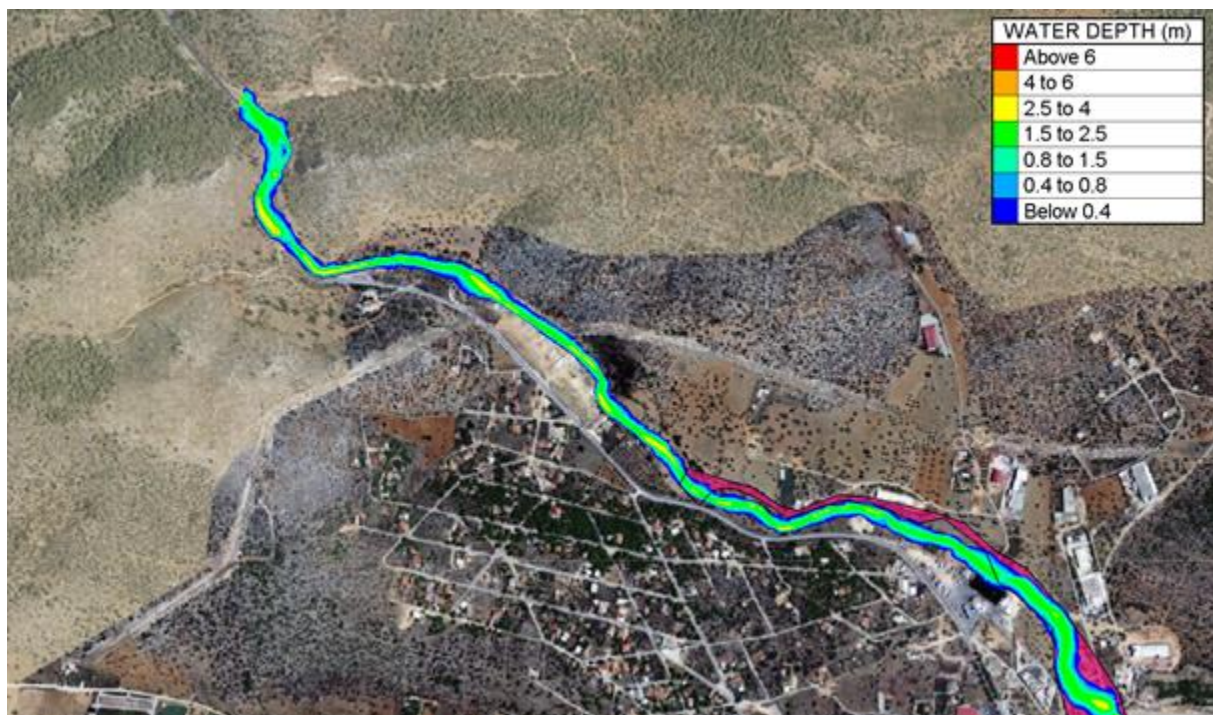
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η έκταση του πλημμυρικού κύματος που προκύπτει από το μοντέλο TELEMAC και γίνεται σύγκριση με την καταγεγραμμένη πλημμυρισμένη έκταση. Στην Εικόνα 5.2-1 παρουσιάζεται αρχικά ολόκληρη η περιοχή μελέτης και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι επιμέρους περιοχές και γίνεται και σχολιασμός των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 5.2-1: Σύγκριση καταγεγραμμένης και προσομοιωμένης πλημμυρικής κατάκλυσης τη χρονική στιγμή 08:30 π.μ. (ροζ έκταση: καταγεγραμμένη έκταση πλημμύρας)



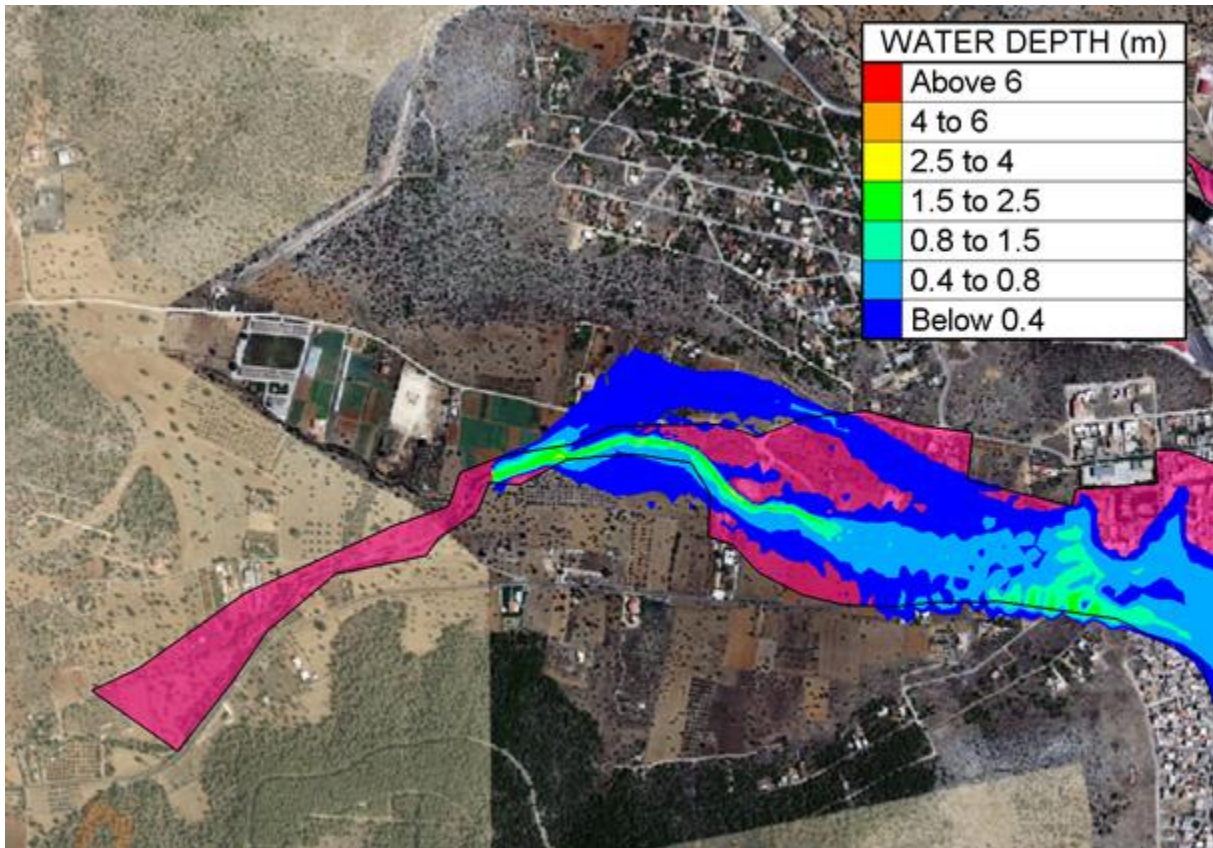
Εικόνα 5.2-2: Διαίρεση του χάρτη σε 5 τμήματα



Εικόνα 5.2-3: Σύγκριση καταγεγραμμένης και προσομοιωμένης πλημμυρικής κατάκλυσης τη χρονική στιγμή 08:30 π.μ. – Τμήμα 1

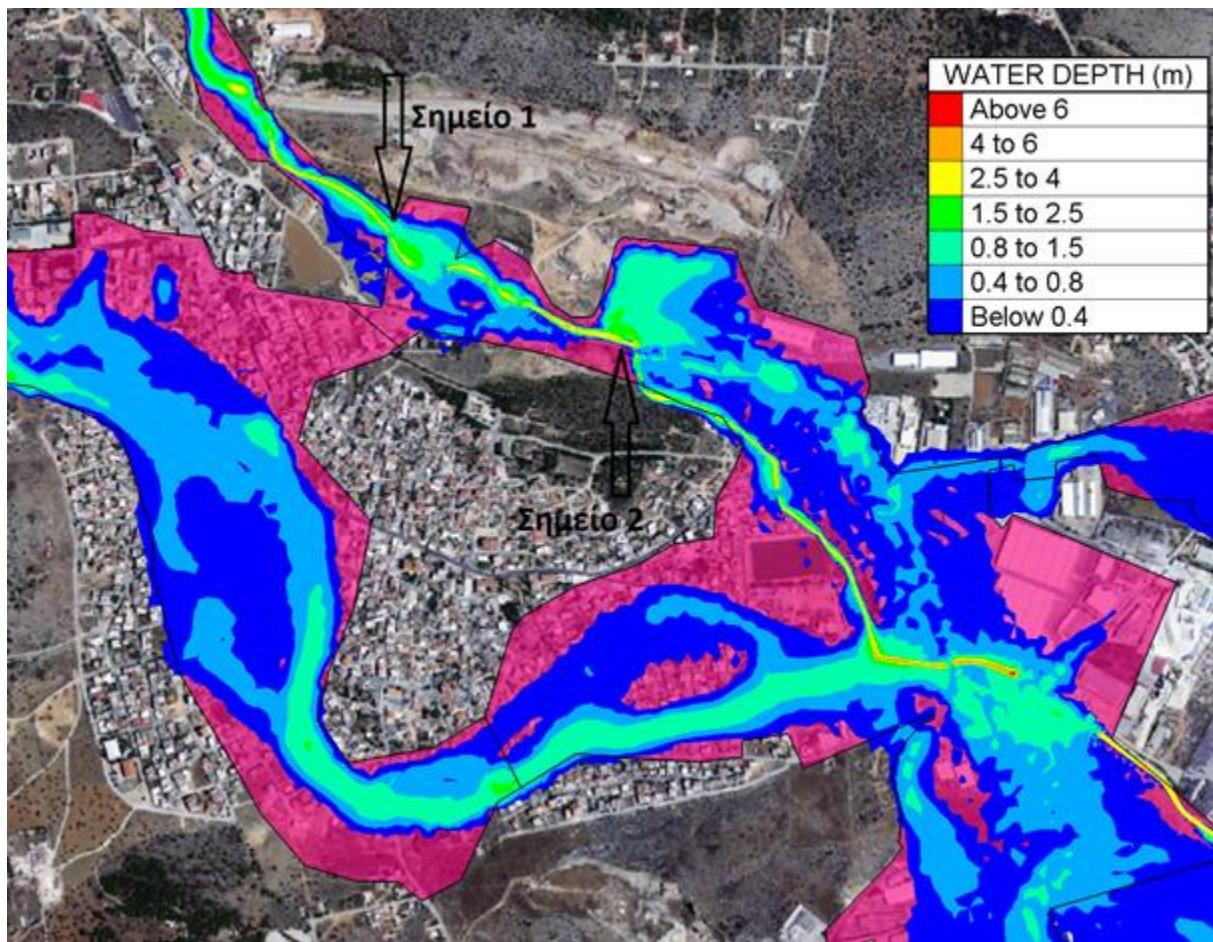
Στο τμήμα 1, δεν υπάρχει σε όλο το μήκος του ρέματος καταγραφή της πλημμύρας, ωστόσο στο τμήμα που υπάρχει διακρίνεται καλή προσαρμογή του μοντέλου με την πραγματικότητα. Παρατηρούμε ότι η πλημμύρα περιορίζεται εντός μιας στενής λωρίδας και αυτό γιατί πέρα από τις όχθες του ρέματος υψώνονται σχετικά μεγάλα πρανή που συγκρατούν τα νερά ανάμεσά τους. Αυτό συμβαίνει και στην είσοδο του υδραυλικού μοντέλου, όπου το νερό υπερχειλίζει από την πολύ μικρή κοίτη του ρέματος, πλημμυρίζει την οδό και καταλαμβάνει όλο τον χώρο μεταξύ των εκατέρωθεν λόφων. Στο τμήμα 1,

υπάρχουν και τα τεχνικά Σ1 & Σ2 στα οποία σύμφωνα με το μοντέλο η ροή πέρασε από πάνω. Αυτό διαπιστώθηκε και στην επιτόπια αυτοψία.



Εικόνα 5.2-4: Σύγκριση καταγεγραμμένης και προσομοιωμένης πλημμυρικής κατάκλυσης τη χρονική στιγμή 08:30 π.μ. – Τμήμα 2

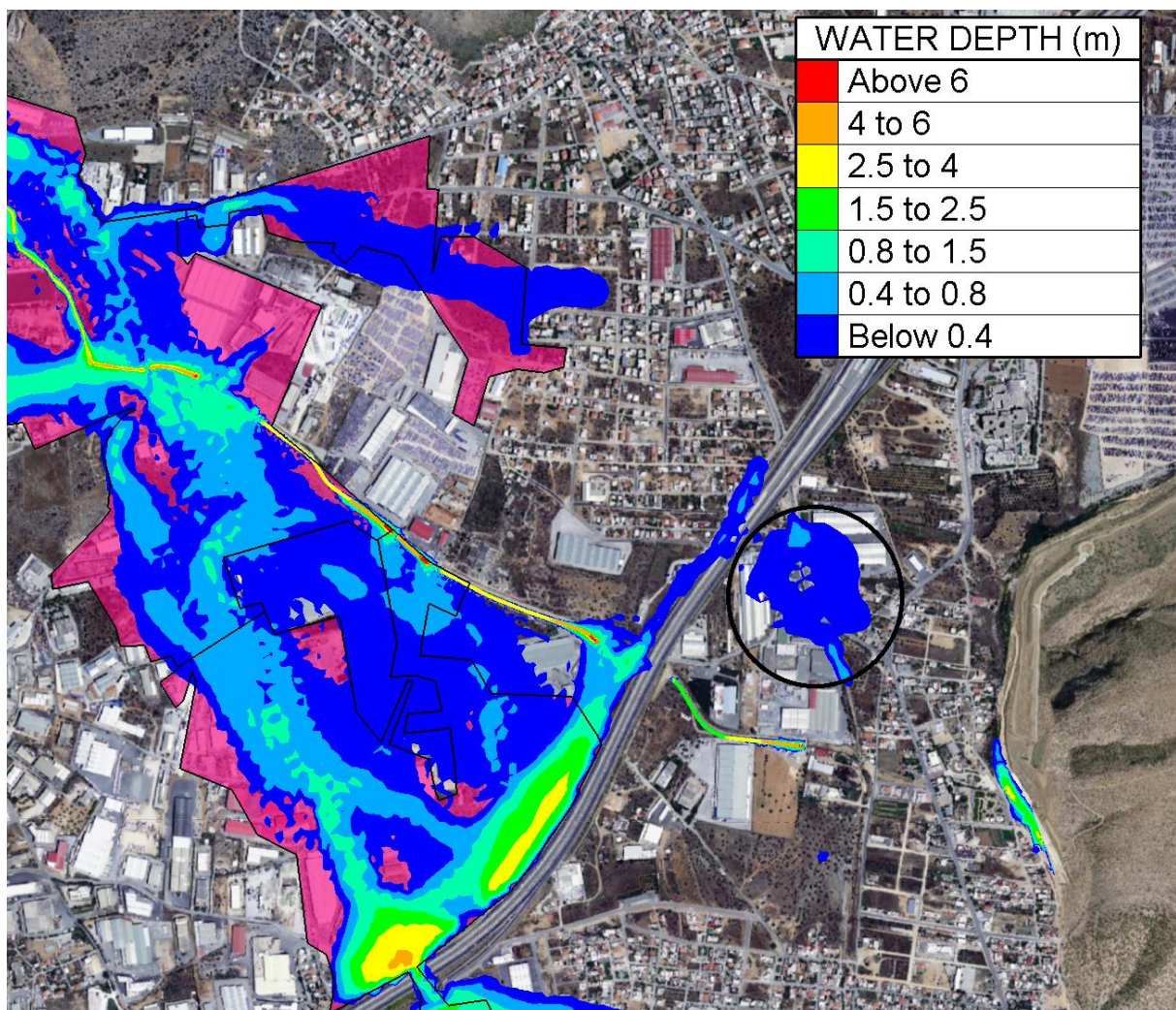
Στο τμήμα 2, παρατηρούμε ότι λίγο μετά την είσοδο του υδραυλικού μοντέλου, το νερό υπερχειλίζει εκατέρωθεν της κοίτης του ρέματος και στην συνέχεια η ροή διαχωρίζεται σε 2 κλάδους. Από την εξέταση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους διαπιστώθηκε ότι στο σημείο αυτό στενεύει η διατομή του ρέματος και γι' αυτό προξενείται η υπερχείλιση. Ο διαχωρισμός της ροής εξηγεί την ασυμφωνία μεταξύ προσομοιωμένης και καταγεγραμμένης έκτασης στο κέντρο της φωτογραφίας. Σε γενικές γραμμές όμως υπάρχει ικανοποιητική προσαρμογή του μοντέλου. Η υπόλοιπη ποσότητα του νερού συνεχίζει κατά βάση εντός της κοίτης, ενώ από το σημείο αφανισμού της κοίτης και έπειτα το κύμα «απλώνεται» και πλήγει στην συνέχεια όλο το μέτωπο της Μάνδρας. Ωστόσο, ο κύριος όγκος της πλημμύρας, που διακρίνεται με το πράσινο χρώμα, εισέρχεται στην πόλη από την οδό Αγίας Αικατερίνης αφού αυτή βρίσκεται υψομετρικά χαμηλότερα από τις υπόλοιπες οδούς.



Εικόνα 5.2-5: Σύγκριση καταγεγραμμένης και προσομοιωμένης πλημμυρικής κατάκλυσης τη χρονική στιγμή 08:30 π.μ. – Τμήμα 3

Στο τμήμα 3 απεικονίζεται το σύνολο της Μάνδρας και τα 2 ρέματα. Στο ρ. Σούρες τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι εξαιρετικά εκτός από την περιοχή του ΦΡΑΓΚΕΙΟΥ δημοτικού γηπέδου. Παρατηρούμε ότι όλα τα τεχνικά υπερχειλίζουν και η πλημμύρα περνάει από πάνω τους. Αυτό είναι αναμενόμενο λόγω των μικρών τους διαστάσεων αλλά και επειδή ο σχεδιασμός τους αποκλείεται να είχε γίνει για τις παροχές της τάξεως του Νοεμβρίου του 2017. Μόλις το κύμα φτάνει στις εγκαταστάσεις της μονάδας ΒΑΚΟΝΤΙΟΣ (Σημείο 1), αρχίζει η έντονη εξάπλωσή του και πλημμυρίζει όλα τα γειτονικά κτήρια και την παλαιά Εθνική Οδό. Στην συνέχεια το κύμα προχωρά προς τον οχετό Σ6 όπου το ρέμα σχηματίζει ορθή γωνία (Σημείο 2). Προφανώς το κύμα αδυνατεί να ακολουθήσει τον άξονα του ρέματος. Η ροή διαχωρίζεται σε τρία μέρη. Ένα μέρος διοχετεύεται μέσω του οχετού στην κοίτη του ρέματος, ένα μέρος εκτρέπεται προς τα αριστερά και πλήττει το κτήριο Logistics του ΜΕΤΡΟ και ένα μέρος υπερπηδά τον πτερυγότοιχο του οχετού και ακολουθεί τον άξονα της ΠΕΟΑΘ. Τέλος, ένα μέρος της ροής που κινήθηκε στην ΠΕΟΑΘ επέστρεψε στην κοίτη και ένα άλλο μέρος κινήθηκε μέσω της οδού Λεωνίδα Στάμου προς την περιοχή της Μαγούλας.

Στο ρ. Αγία Αικατερίνη τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά με εξαίρεση μια περιοχή στα βόρεια της πόλης. Το κύμα που εισέρχεται από τα δυτικά ωθείται προς τα χαμηλότερα υψόμετρα και δεν διαχέεται μέχρι την συγκεκριμένη περιοχή, όπως υποδεικνύεται από την καταγραφή. Αυτό οφείλεται στο ότι τα σπίτια δεν έχουν ενσωματωθεί στην γεωμετρία του μοντέλου και το νερό μη βρίσκοντας εμπόδια, δεν εκτρέπεται προς τα εκεί. Στην συνέχεια, το πλημμυρικό κύμα διοδεύεται κυρίως μέσω της οδού Κοροπούλη, όπου σχηματίζει και τα μεγαλύτερα βάθη ροής και όταν φτάσει στην περιοχή της συμβολής, ένα μέρος «πέφτει» στην κοίτη του ρέματος και το υπόλοιπο κινείται προς την βιομηχανική περιοχή της Μάνδρας και την Αττική Οδό.

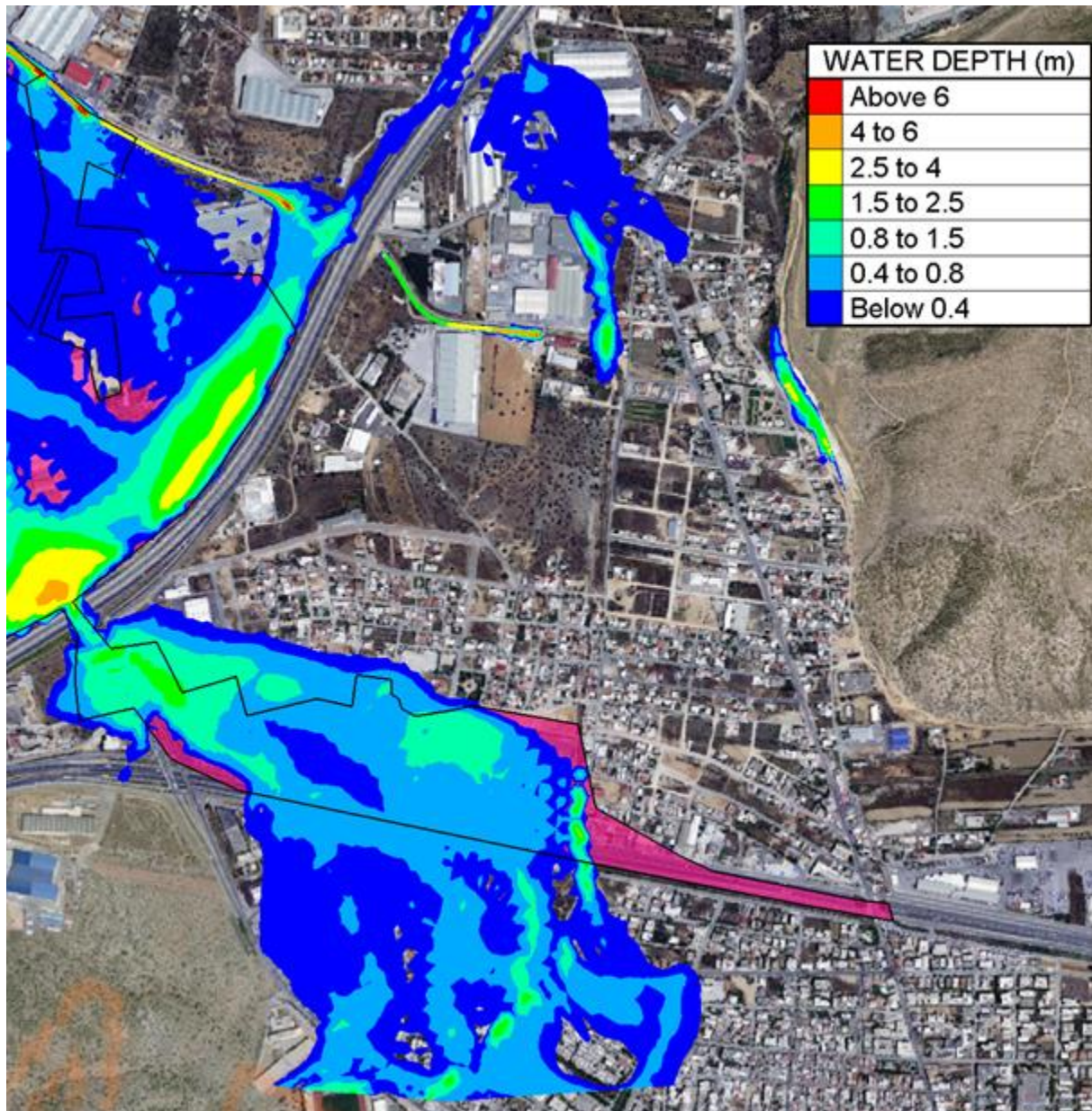


Εικόνα 5.2-6: Σύγκριση καταγεγραμμένης και προσομοιωμένης πλημμυρικής κατάκλυσης τη χρονική στιγμή 08:30 π.μ. – Τμήμα 4

Στο τμήμα 4 απεικονίζονται το διευθετημένο τμήμα του ρ. Σούρες (από την συμβολή με το ρ. Αγία Αικατερίνη έως και την εκβολή του στον Σαρανταπόταμο), ο οικισμός της Μαγούλας, η βιομηχανική περιοχή της Μάνδρας και η Αττική Οδός. Σχετικά με τον τεχνητό αγωγό του ρ. Σούρες παρατηρούμε ότι τα τεχνικά Σ11, Σ12 & Σ13 υπερχειλίζουν και τα πλεονάζοντα ύδατα κινούνται προς την βιομηχανική περιοχή. Το τεχνικό Σ14 υπερχειλίζει και τα νερά διοχετεύονται και προς τις δύο κατευθύνσεις ακολουθώντας τον άξονα της Αττικής Οδού. Η κίνηση προς τον βορρά, δεν είναι δικαιολογημένη και οφείλεται σε ατέλεια του ΨΜΕ που αποδίδει κατωφέρεια στην συγκεκριμένη περιοχή. Η ποσότητα του νερού που κινείται προς τον βορρά, διασχίζει κάποια στιγμή την Αττική Οδό σε μια περιοχή που η ερυθρά της ταυτίζεται υψομετρικά με το έδαφος και πλημμυρίζει την περιοχή που σημειώνεται με κύκλο. Ακολούθως, τα νερά αυτά οδηγούνται προς την κοίτη του ρέματος Μικρό Κατερίνη και μετά στον οικισμό «Παπακώστα» βόρεια της Ελευσίνας. Όπως προκύπτει από το μοντέλο TELEMAC, τα συγκεκριμένα τεχνικά, διαστάσεων 2X(4X3) το καθένα, υπερχειλίζουν καθώς η εισερχόμενη σ' αυτά παροχή ξεπερνά την παροχή σχεδιασμού τους η οποία είναι 125 m³/s.

Όσον αφορά την βιομηχανική περιοχή η έκταση της πλημμύρας έχει προσομοιωθεί με μεγάλη ακρίβεια πλην μιας περιοχής στο κέντρο της, η οποία δεν πλημμύρισε λόγω της ύπαρξης των περιμετρικών τοίχων των βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Οι μαντρότοιχοι δεν έχουν ενσωματωθεί

στην γεωμετρία του υπολογιστικού μοντέλου και για αυτό υπερεκτιμάται η έκταση της πλημμύρας. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η Αττική Οδός, όπως είναι λογικό, συγκρατεί τα νερά που συρρέουν σ' αυτήν, προκαλεί σημαντική ανάσχεση και ανάπτυξη μεγάλων βαθών στα ανάντη. Τέλος, παρατηρούμε ότι στην περιοχή της Μαγούλας η προσομοιωμένη έκταση ταιριάζει ικανοποιητικά με την καταγεγραμμένη.


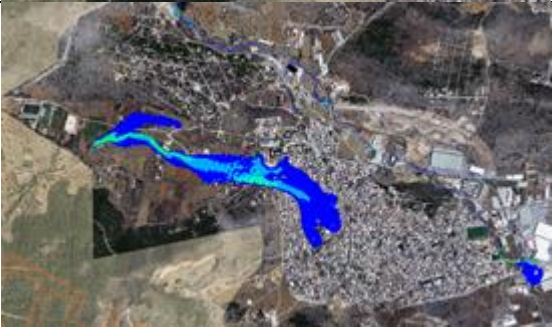





Εικόνα 5.2-7: Σύγκριση καταγεγραμμένης και προσομοιωμένης πλημμυρικής κατάκλυσης τη χρονική στιγμή 09:00 π.μ. – Τμήμα 5 - (μαύρη γραμμή: περίγραμμα καταγεγραμμένης πλημμυρισμένης έκτασης)

Στο τμήμα 5, απεικονίζονται το τελευταίο ανοιχτό τμήμα του τεχνητού αγωγού του ρ. Σούρες, πριν την υπογειοποίησή του και την εκβολή του στον χείμαρρο Σαρανταπόταμο, το ρ. Μικρό Κατερίνι, και οι οικισμοί «Παπακώστα» και «Εργατικές Κατοικίες» που βρίσκονται αντιστοίχως βόρεια και νότια της Εθνικής Οδού Αθηνών-Κορίνθου. Αρχικά παρατηρούμε ότι επειδή η φωτογραφία έχει τραβηχτεί μισή ώρα αργότερα, τα νερά από το ρ. Μικρό Κατερίνι έχουν κατηφορίσει ακόμη περισσότερο, όπως


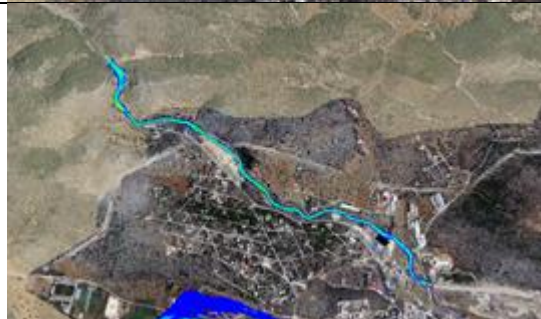

περιγράψαμε παραπάνω. Στην συνέχεια της προσομοίωσης κινούνται ακόμη νοτιότερα και φτάνουν μέχρι τον οικισμό «Παπακώστα». Ο υδάτινος όγκος που κινήθηκε στην ΠΕΟΑΘ περνά κάτω από την γέφυρα της Αττικής Οδού και διοχετεύεται αρχικά στον οικισμό «Παπακώστα». Στην συνέχεια διασχίζει την οδό, πλημμυρίζει τον οικισμό «Εργατικές Κατοικίες» και φτάνει μέχρι το ανοιχτό όριο του υπολογιστικού πεδίου και εξέρχεται από αυτό. Όπως φαίνεται από την καταγραφή της ομάδας FloodHub του ΕΑΑ, η πλημμύρα δεν επεκτάθηκε νότια της Ολυμπίας οδού. Ωστόσο το μοντέλο αδυνατεί να περιγράψει την συγκεκριμένη συμπεριφορά, καθώς ορισμένα εμπόδια της ροής που υπάρχουν στην οδό δεν συμπεριλαμβάνονται στο ΨΜΕ και δεν λαμβάνονται υπόψη στην γεωμετρία του μοντέλου (όπως π.χ. τα ηχοπετάσματα).



Πίνακας 5.2-1: Βάθη ροής την στιγμή της άφιξης του κύματος στις διατομές ελέγχου του ρ. Αγία Αικατερίνη

Διατομή Ελέγχου	Βάθος ροής (Όρα)		Εικόνα
	Μοντέλο	Παρατηρήσεις	
ΑΑ4 Αϊαντος & 25ης Μαρτίου	0.12 m (06:13)	0.80 m (6:30)	
ΑΑ6 Διασταύρωση των οδών Στρατηγού Ρόκκα και Αγ. Αικατερίνης (Super Market Γαλαξίας)	0.14 m (06:32)	0.20 m (6:30)	
ΑΑ7 Βαγγέλη Κοροπούλη 10	0.36 m (06:39) 0.97 m (07:03)	1.45 m (7:03)	
ΑΑ8 Βαγγέλη Κοροπούλη 81 (5ο Δημοτικό Σχολείο Μάνδρας)	0.9 m (06:58)		

Σ9 Λίγο ανάντη της συμβολής των 2 ρεμάτων επί της οδού Κοροπούλη	0.4 m (07:05)	0.5 m (07:00)	
--	---------------	---------------	--

Πίνακας 5.2-2: Βάθη ροής την στιγμή της άφιξης του κύματος στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες

Διατομή Ελέγχου	Βάθος ροής (Ώρα)		Εικόνα
	Μοντέλο	Παρατηρήσεις	
Σ1 ΕΟ Ελευσίνας-Θηβών στην θέση του 1 ^{ου} οχετού	0.85 m (06:20)	0.50 m (06:30)	
Σ3 οδός Μακρυγιάννη, Ακρόβαθρο γέφυρας της νέας χάραξης της ΠΕΑΟΘ	1.22 m (06:45)	0.25 m (06:30) 0.50 m (06:45)	
Σ4 Εγκαταστάσεις της μονάδας ΒΑΚΟΝΤΙΟΣ Α.Ε.Β.Ε.	0.15 m (06:47)	0.10 m (06:30)	

Σ9 Λίγο ανάντη της συμβολής των 2 ρεμάτων επί του ρέματος Σούρες	0.53 m (07:05)	0.5 m (07:00)	
Σ12 Συμβολή διευθετημένου Σούρες με Αττική Οδό	0.69 m (07:12) 5.62 m (08:00)	5.30 m (08:00)	

5.2.4 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Από την προσομοίωση της πλημμύρας του Νοεμβρίου του 2017 στην Μάνδρα με το μαθηματικό μοντέλο TELEMAC-2D εξάγονται τα εξής:

- Οι ώρες έναρξης της πλημμύρας στα επιλεγμένα «υγρά όρια» του υπολογιστικού πεδίου ισούνται με 05:40 π.μ για το ρ. Αγία Αικατερίνη και με 06:15 π.μ για το ρ. Σούρες. Οι ώρες αυτές καθορίζονται έτσι ώστε η χρονική εξέλιξη του βάθους ροής στις διατομές ελέγχου να ταυτίζεται κατά το δυνατόν με την χρονική εξέλιξη των διαθέσιμων μετρήσεων. Οι διατομές Σ1, Σ3 και Σ4 του ρ. Σούρες και οι διατομές AA5 και AA6 του ρ. Αγία Αικατερίνη επιβεβαιώνουν τις ώρες εισόδου και ταυτόχρονα υποδεικνύουν ότι τα πλημμυρογραφήματα που προέκυψαν από την υδρολογική προσομοίωση αναπαριστούν ικανοποιητικά τον ανοδικό κλάδο της πλημμύρας.
- Τα μέγιστα βάθη κατά μήκος του ρ. Σούρες κυμαίνονται από 2.6 έως 4.0 m ανάντη της συμβολής και από 4.0 έως 5.5 m κατάντη της συμβολής. Το μοντέλο προσομοιώνει με καλή ακρίβεια τα μετρημένα μέγιστα βάθη ροής.
- Τα μέγιστα βάθη κατά μήκος του ρ. Αγία Αικατερίνη κυμαίνονται στα 2m έξω από την πόλη και από 0.7 έως 1.20 m μέσα στην πόλη. Το μοντέλο αδυνατεί να αναπαραστήσει τα μέγιστα βάθη, πιθανώς λόγω της μη ύπαρξης των κτισμάτων στο υπολογιστικό πεδίο.
- Η χωροχρονική εξέλιξη της πλημμύρας που περιγράφεται λεπτομερώς στις εικόνες 5.2-3 μέχρι 5.2-7 είναι αρκετά συνεπής με την πραγματική και η πλημμυρική κατάκλυση που εξάγεται από την προσομοίωση ταιριάζει ικανοποιητικά με την καταγεγραμμένη έκταση της πλημμύρας. Ορισμένες ασυνέπειες οφείλονται είτε στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους είτε στην αδυναμία προσομοίωσης όλων των γεωμετρικών στοιχείων της περιοχής μελέτης.
- Οι μέγιστες παροχές των 2 ρεμάτων που έπληξαν την Μάνδρα τον Νοέμβριο του 2017, όπως προέκυψαν από την υδρολογική ανάλυση και εν μέρει επιβεβαιώθηκαν από το υδραυλικό μοντέλο είναι της τάξεως των 130 m³/s και των 160 m³/s για το ρ. Σούρες και για το ρ. Αγία Αικατερίνη αντίστοιχα.

6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

6.1 Εισαγωγή

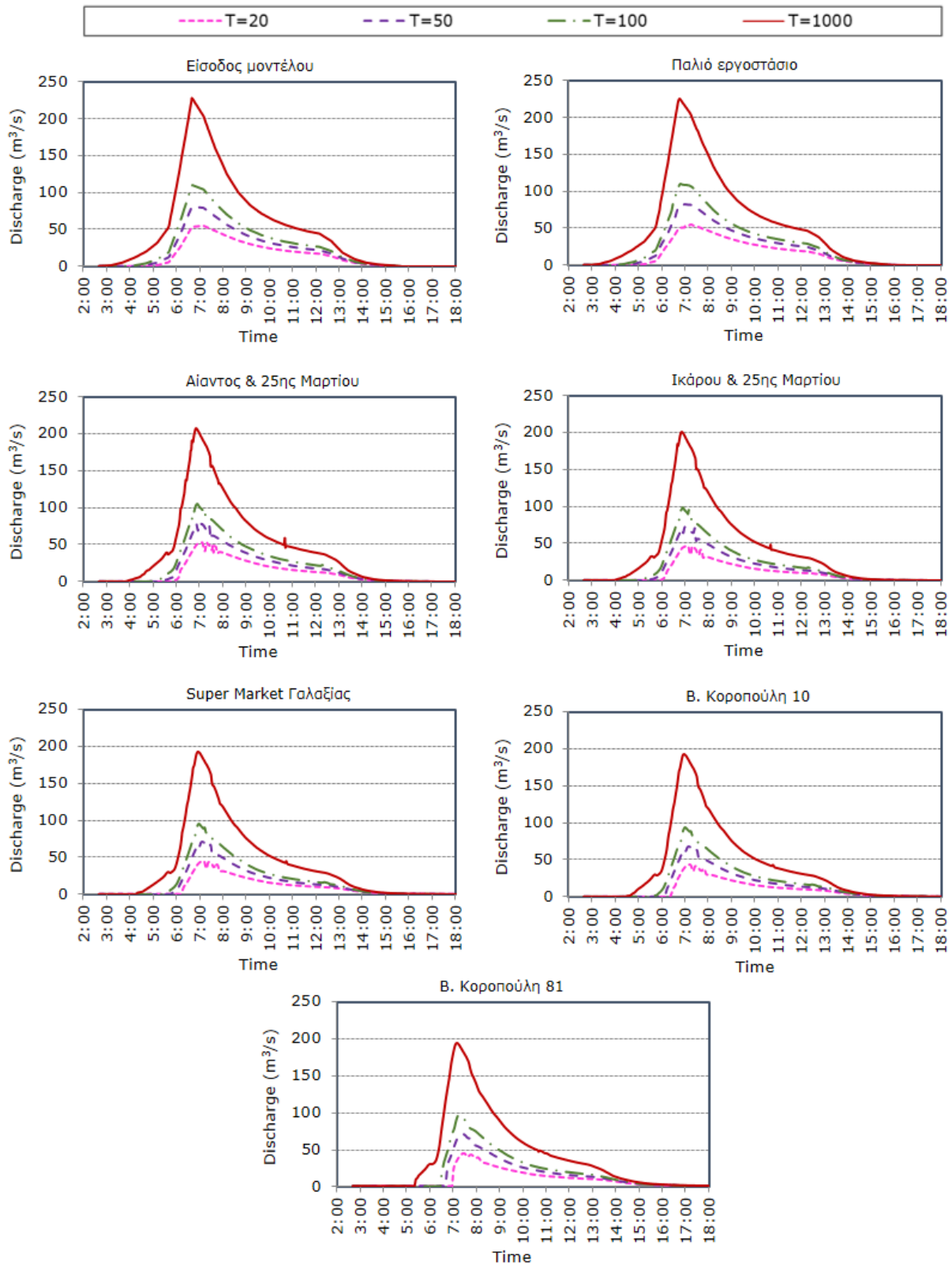
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα διαγράμματα με τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του βαθμονομημένου μοντέλου σε τέσσερα συνθετικά υδρογραφήματα που αντιστοιχούν σε τέσσερις περιόδους επαναφοράς.

Πίνακας 6.1-1: Συνοπτική παρουσίαση των διαγραμμάτων από την εφαρμογή του υδραυλικού μοντέλου

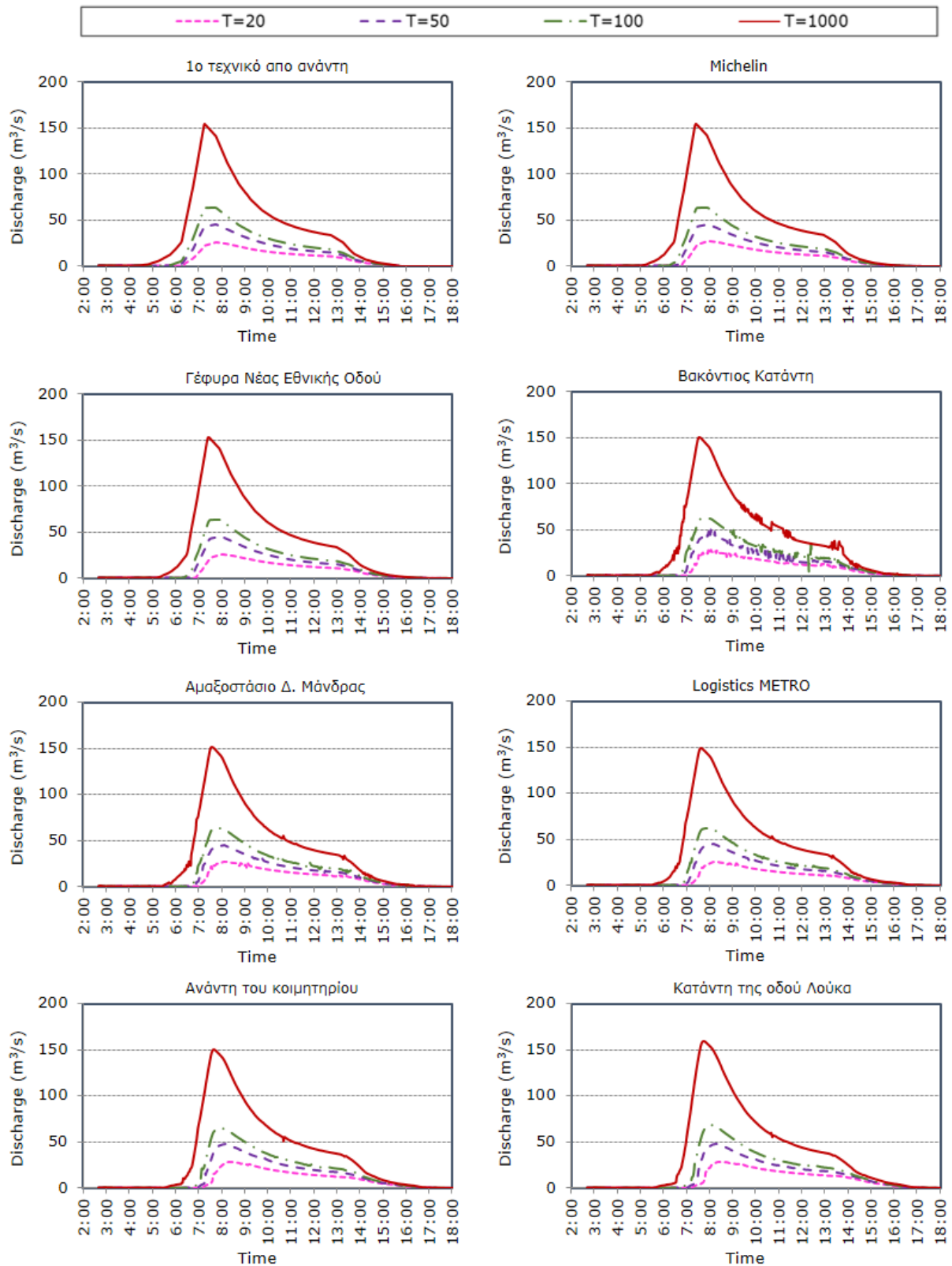
Αρίθμηση	Περιγραφή
Διάγραμμα 6.2-1	Μεταβολή της παροχής στις διατομές ελέγχου του ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια
Διάγραμμα 6.2-2	Μεταβολή της παροχής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες ανάντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια
Διάγραμμα 6.2-3	Μεταβολή της παροχής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες κατόντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια
Διάγραμμα 6.2-4	Μεταβολή του βάθους ροής στις διατομές ελέγχου του ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια
Διάγραμμα 6.2-5	Μεταβολή του βάθους ροής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες ανάντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια
Διάγραμμα 6.2-6	Μεταβολή του βάθους ροής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες κατόντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια
Διάγραμμα 6.2-7	Χρόνοι άφιξης του μέγιστου βάθους του πλημμυρικού κύματος κατά μήκος των ρεμάτων Σούρες και Αγία Αικατερίνη
Διάγραμμα 6.2-8	Χρόνοι άφιξης της μέγιστης παροχής του πλημμυρικού κύματος κατά μήκος των ρεμάτων Σούρες και Αγία Αικατερίνη
Εικόνα 6.2 -1	Χωρική κατανομή του μέγιστου βάθους ροής για κάθε περίοδο επαναφοράς
Εικόνα 6.2-2	Σύγκριση μέγιστης έκτασης της πλημμύρας για κάθε περίοδο επαναφοράς

6.2 Υδραυλικοί υπολογισμοί

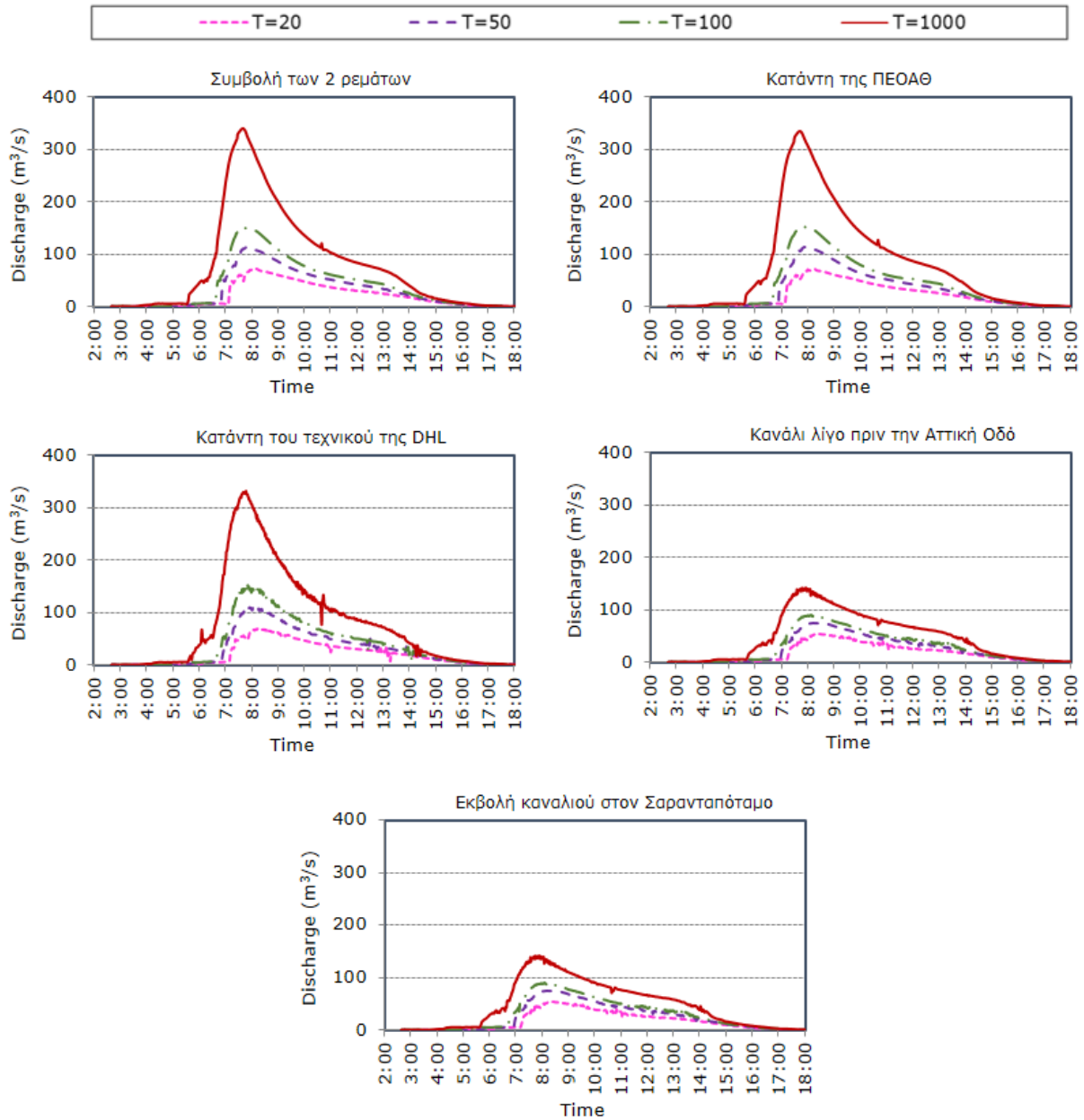
6.2.1 Παροχές



Διάγραμμα 6.2-1: Μεταβολή της παροχής στις διατομές ελέγχου του ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια

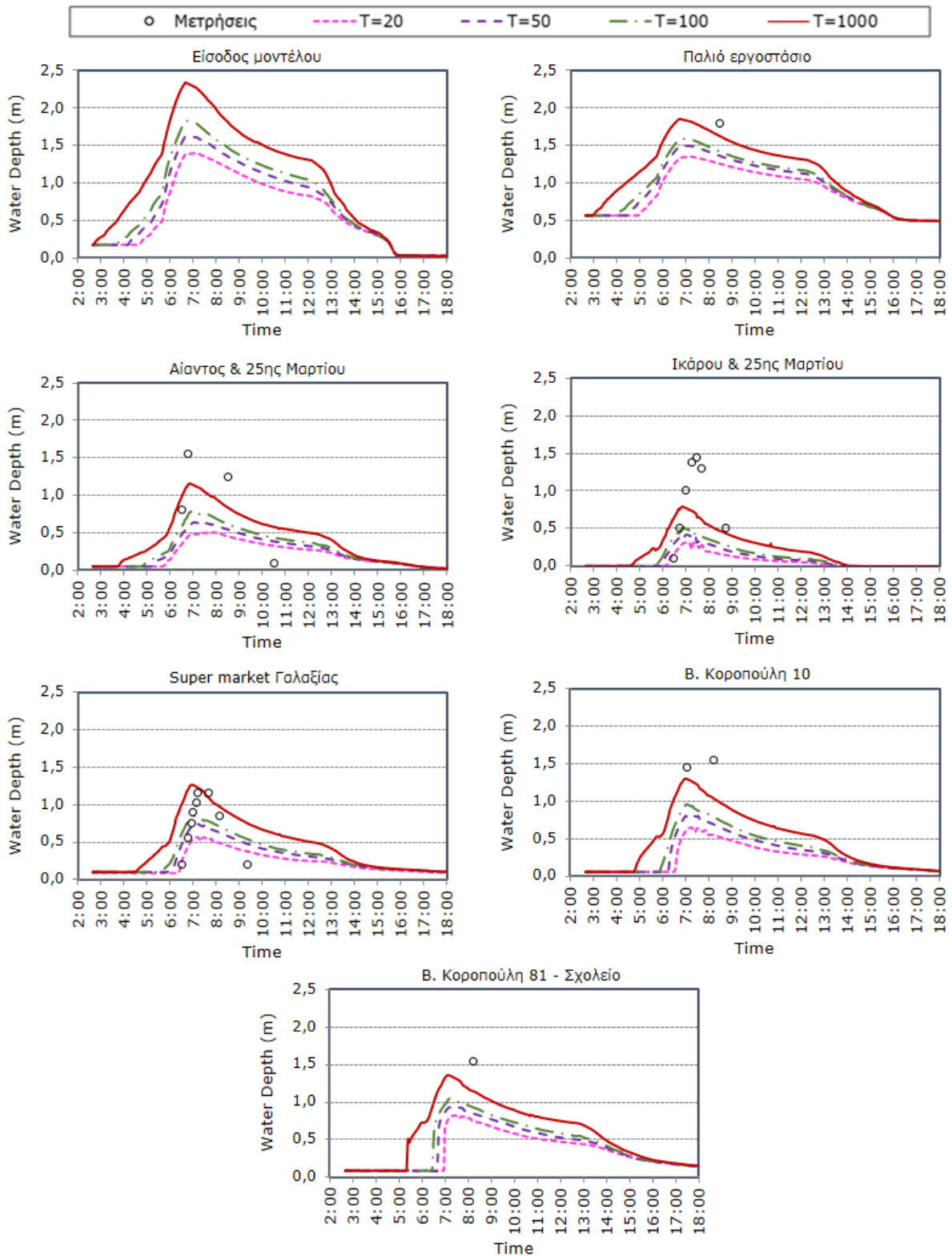


Διάγραμμα 6.2-2: Μεταβολή της παροχής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες ανάντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια

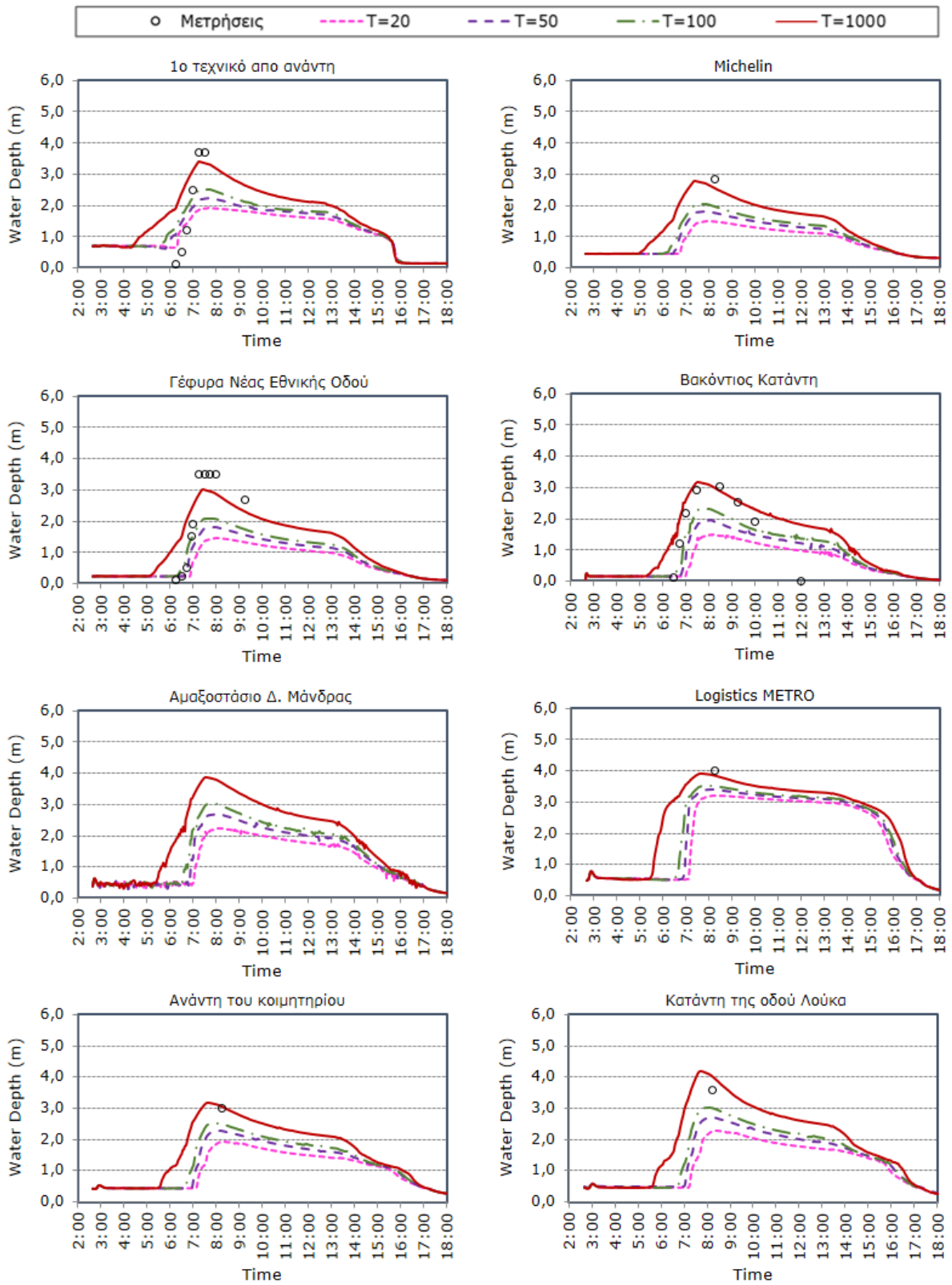


Διάγραμμα 6.2-3: Μεταβολή της παροχής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες κατάντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια

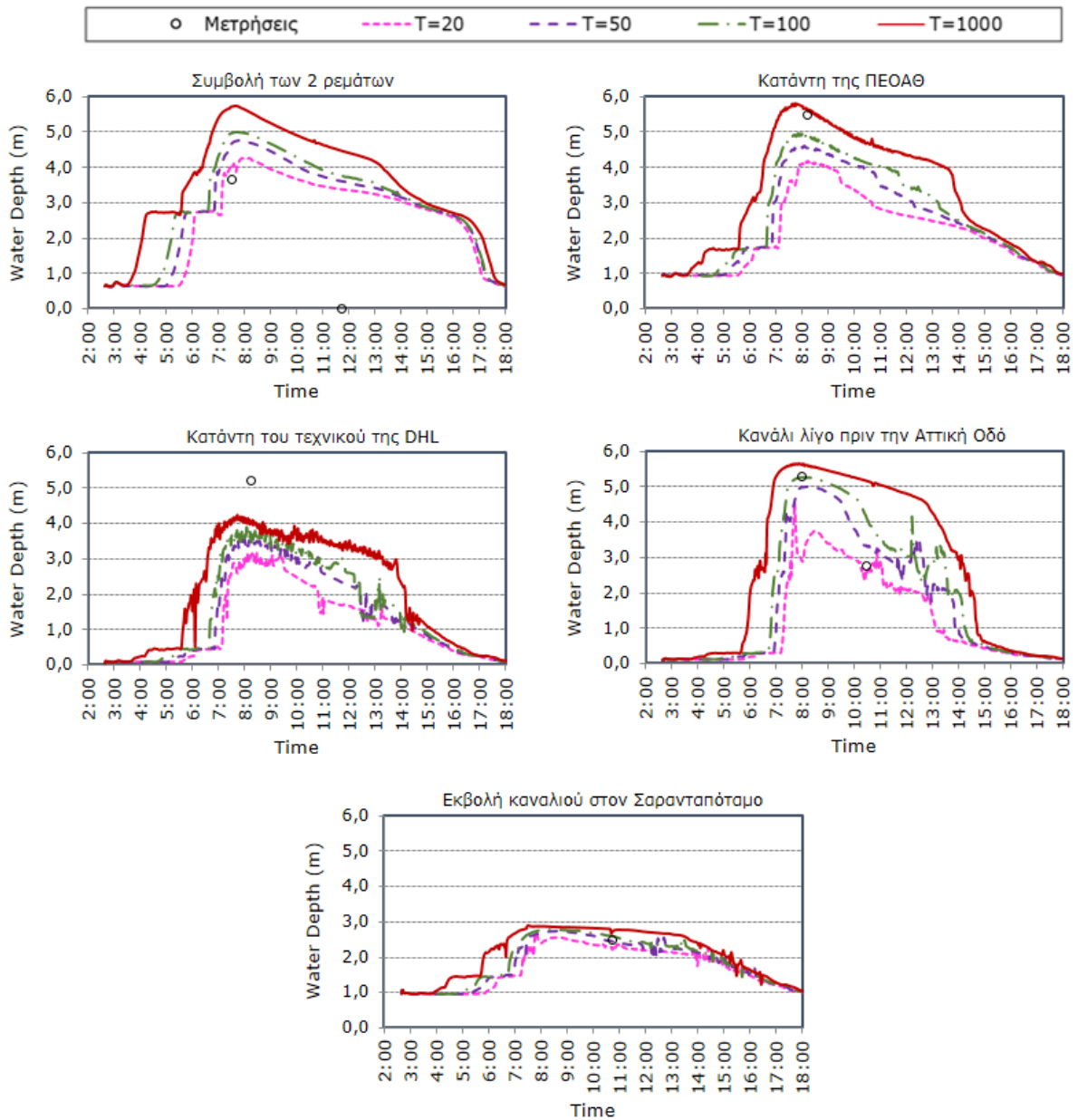
6.2.2 Βάθη ροής



Διάγραμμα 6.2-4: Μεταβολή του βάθους ροής στις διατομές ελέγχου του ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια

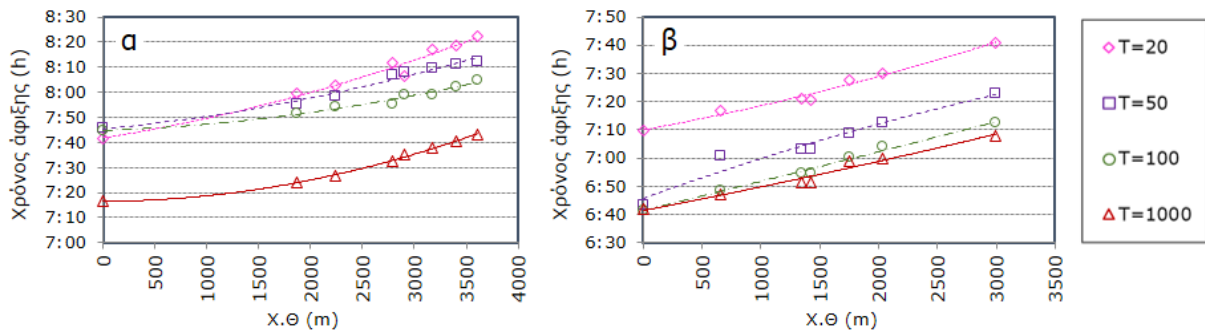


Διάγραμμα 6.2-5: Μεταβολή του βάθους ροής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες ανάντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια

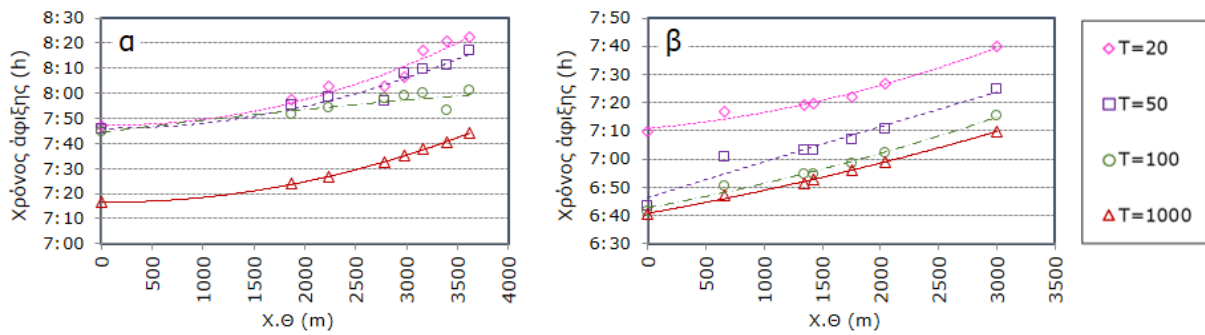


Διάγραμμα 6.2-6: Μεταβολή του βάθους ροής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες κατάνη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια

6.2.3 Χρόνοι άφιξης



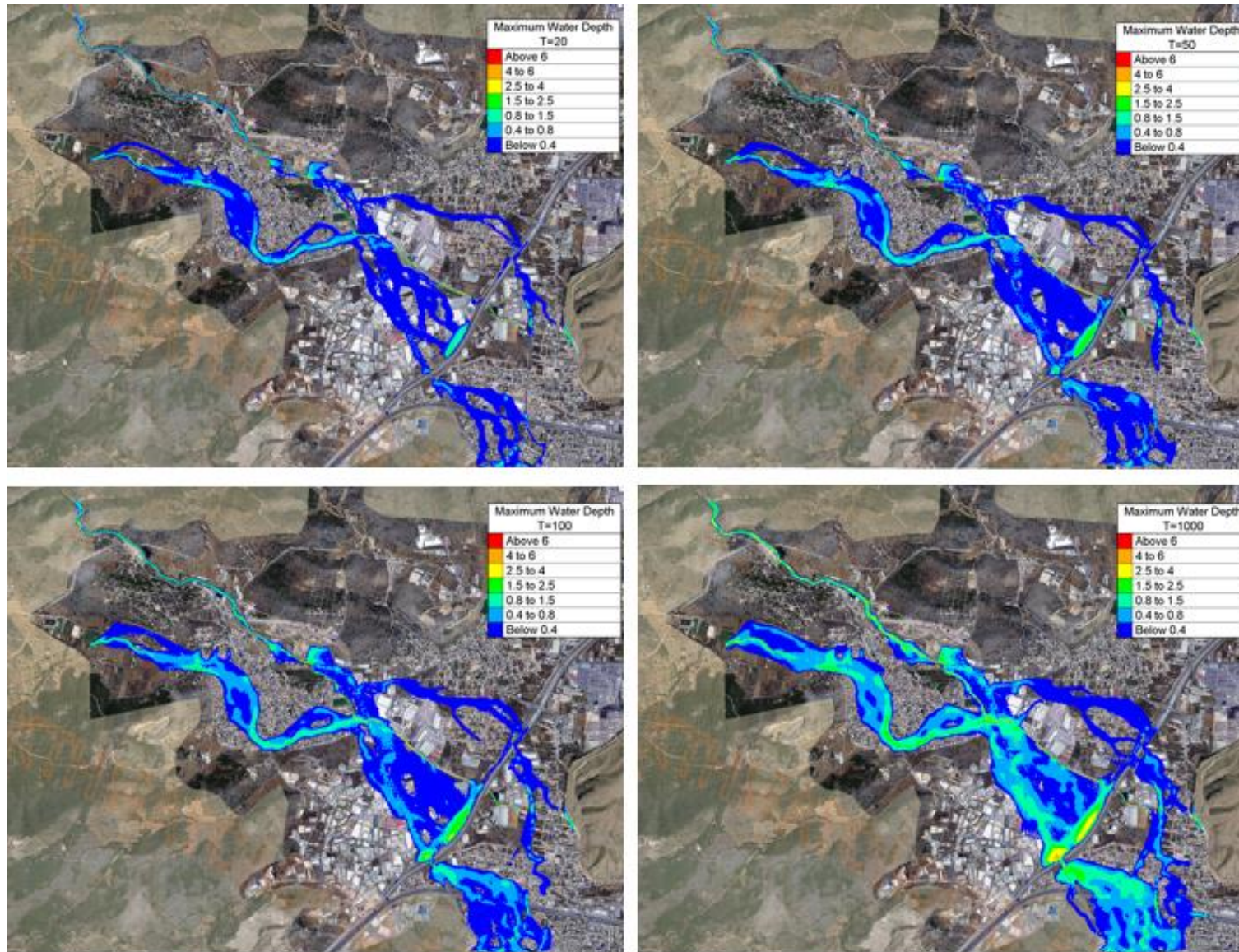
Διάγραμμα 6.2-7: Χρόνοι άφιξης του μέγιστου βάθους του πλημμυρικού κύματος κατά μήκος των ρεμάτων Σούρες (α) και Αγ. Αικατερίνη (β)



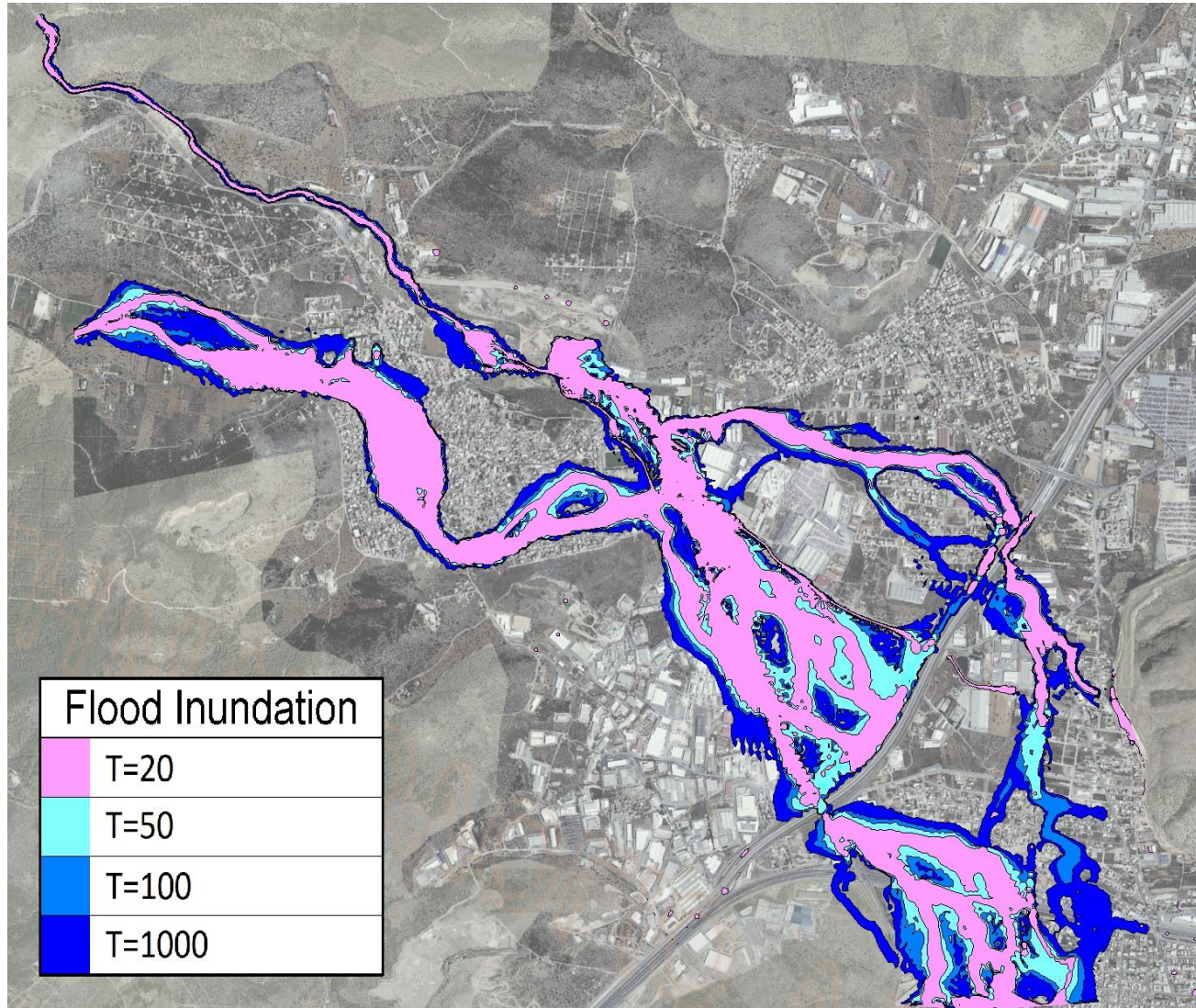
Διάγραμμα 6.2-8: Χρόνοι άφιξης της μέγιστης παροχής του πλημμυρικού κύματος κατά μήκος των ρεμάτων Σούρες (α) και Αγ. Αικατερίνη (β)

6.2.4 Πλημμυρική έκταση

Στους παρακάτω χάρτες απεικονίζεται η χωρική κατανομή του μέγιστου βάθους ροής και γίνεται σύγκριση της μέγιστης έκτασης της πλημμύρας για κάθε περίοδο επαναφοράς.



Εικόνα 6.2-1: Χωρική κατανομή του μέγιστου βάθους ροής για κάθε περίοδο επαναφοράς



Εικόνα 6.2-1: Σύγκριση της έκτασης της πλημμύρας για κάθε περίοδο επαναφοράς

6.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Με βάση τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης, για την πλημμυρική κατάκλυση προκύπτουν τα ακόλουθα για κάθε περίοδο επαναφοράς:

1. Για $T=20$ έτη, ο κύριος όγκος της πλημμύρας περνά από τις οδούς Αγία Αικατερίνη και Κοροπούλη. Το κεντρικό τμήμα της Μάνδρας πλημμυρίζει αλλά με μικρό βάθος. Το βάθος ροής μέσα στην πόλη δεν ξεπερνά το 1m. Στο ρέμα Σούρες η πλημμύρα περιορίζεται κατά βάση εντός της κοίτης με μια μικρή εξαίρεση στην θέση Logistics METRO και το κανάλι δεν υπερχειλίζει. Η ΠΕΟΑΘ πλημμυρίζει ελάχιστα ανάντη και κατάντη της γέφυρας πάνω από το ρέμα.
2. Για $T=50$ έτη, το σύνολο της ζώνης εκατέρωθεν της παλαιάς κοίτης της Αγίας Αικατερίνης πλημμυρίζει με βάθη που δεν ξεπερνούν τα 40 cm. Σημαντικότερα είναι τα βάθη στην οδό Αγ. Αικατερίνης και την οδό Κοροπούλη στο νότιο τμήμα της και κυμαίνονται από 0.80 έως 1.40 m και για τις δύο οδούς. Στο ρέμα Σούρες υπερχειλίζει το κτήριο Logistics και το κτήριο της Βακόντιος ΑΕΒΕ. Οι οχετοί του τεχνητού αγωγού υπερχειλίζουν και η ΒΙΠΕ Μάνδρας κατακλύζεται με βάθη από 0.1-0.2 m. Ο άξονας της ΠΕΟΑΘ πλημμυρίζει με μέσο βάθος 0.5 m. Η γέφυρα της Αττικής οδού διοχετεύει με άνεση τα νερά προς την Ελευσίνα.
3. Για $T=100$ έτη, δεν υπάρχει αξιόλογη διαφοροποίηση της πλημμύρας σε σχέση με την πλημμύρα πεντηκονταετίας εκτός από την γέφυρα στον ανισόπεδο κόμβο της Αττικής Οδού όπου εμφανίζεται μικρή ανάσχεση προς τα ανάντη και το βάθος ροής μπροστά από το τεχνικό φτάνει τα 3 m. Τα βάθη ροής κατά μήκος της οδού Αγ. Αικατερίνης κυμαίνονται από 1-2 m και κατά μήκος της οδού Κοροπούλη κυμαίνονται από 0.8-1.60 m. Ο άξονας της ΠΕΟΑΘ εντός της βιομηχανικής περιοχής έχει μέσο βάθος 0.7 m.
4. Για $T=1000$ έτη, παρατηρούμε ότι πλημμυρίζει το σύνολο της πεδιάδας στα ανάντη της πόλης. Στην οδό Αγίας Αικατερίνης τα μέγιστα βάθη ροής κυμαίνονται από 1.2-2.4 m. Στην οδό Κοροπούλη τα μέγιστα βάθη ροής κυμαίνονται από 1.2-2.0 m. Στο ρέμα Σούρες παρατηρούμε ότι στην θέση Βακόντιος η πλημμύρα φτάνει μέχρι και την εθνική οδό. Από την θέση Σ6 και μετά όλη η περιοχή ανάμεσα στην ΠΕΟΑΘ και το ρέμα είναι πλημμυρισμένη. Το σύνολο της ΒΙΠΕ έχει πλημμυρίσει και το μέσο βάθος στον άξονα της οδού είναι 1.30 m. Σημαντική διαφοροποίηση ως προς τα άλλα τρία σενάρια αποτελούν οι ζώνες πολύ μεγάλου βάθους ροής (2.5-4.0 m) στα ανάντη της Αττικής Οδού (βλέπε Εικόνα 6.2-1, κάτω δεξιά) και η έντονη πλημμύρα της περιοχής Παπακώστα, με βάθη από 0.5-2 m που δεν παρατηρείται στα άλλα σενάρια.

Όσον αφορά τα βάθη ροής, παρατηρούμε ότι η μέση αύξηση των μέγιστων βαθών στις διατομές ελέγχου δεν είναι ανάλογη της αύξησης της μέγιστης παροχής. Συγκεκριμένα:

1. Στην Αγία Αικατερίνη, η αύξηση της παροχής κατά 52.5% από τα 20 στα 50 έτη συνεπάγεται αύξηση κατά 22.6%. Από τα 50 στα 100 έτη, η αύξηση της παροχής ισούται με 35.2% και η αύξηση των μέγιστων βαθών ισούται με 15.0%. Από τα 100 στα 1000 έτη, η αύξηση της παροχής κατά 107.5% οδηγεί σε αύξηση 36.9% των μέγιστων βαθών. Προκύπτει έτσι ένας μέσος όρος αύξησης 40%.
2. Στο Σούρες, ανάντη της συμβολής (διατομές Σ1-Σ8) η αύξηση της παροχής κατά 70.6% από τα 20 στα 50 έτη συνεπάγεται αύξηση κατά 19.8%. Από τα 50 στα 100 έτη, η αύξηση της παροχής είναι 40.2% και η αύξηση των βαθών είναι 11.8%. Από τα 100 στα 1000 έτη, η αύξηση της παροχής είναι 147.7% και η αύξηση των βαθών είναι 32.1%. Προκύπτει έτσι ένας μέσος όρος αύξησης 26%.
3. Στο Σούρες, κατάντη της συμβολής (διατομές Σ9-Σ12) ο λόγος των δύο μεταβλητών είναι ακόμη μικρότερος. Από τα 20 στα 50 έτη, αύξηση της παροχής κατά 53.2% συνεπάγεται αύξηση των μέγιστων βαθών κατά 12.2%. Από τα 50 στα 100 έτη, η αύξηση της παροχής είναι

31.3% και η αύξηση των βαθών είναι 6.4%. Από τα 100 στα 1000 έτη, η αύξηση της παροχής είναι 104.8% και η αύξηση των βαθών είναι 12%. Προκύπτει έτσι ένας μέσος όρος αύξησης 18%.

Από τα διαγράμματα 6.2-7 και 6.2-8 διαπιστώνουμε ότι οι χρόνοι ταξιδιού του μέγιστου βάθους και της παροχής αιχμής είναι μεταξύ τους ίσοι για κάθε ρέμα αντίστοιχα. Για το ρέμα Αγία Αικατερίνη ο χρόνος ταξιδιού είναι 31, 41, 35 και 29 λεπτά για T=20, 50, 100 και 1000 αντίστοιχα. Για το ρέμα Σούρες ο χρόνος ταξιδιού είναι 39, 29, 18 και 27 λεπτά για T=20, 50, 100 και 1000 αντίστοιχα.

Από τα διαγράμματα μεταβολής της παροχής διαπιστώνουμε ότι η απόσβεση της πλημμύρας κατά μήκος του ρέματος Σούρες μέχρι την συμβολή είναι αμελητέα ενώ η απόσβεση της πλημμύρας κατά μήκος του ρέματος Αγία Αικατερίνη είναι της τάξεως του 12% για κάθε σενάριο.

Από την σύγκριση των μέγιστων βαθών ροής που υπολογίζονται από τα συνθετικά σενάρια και των μετρήσεων προκύπτει ότι η πλημμύρα του Νοεμβρίου του 2017 ήταν τουλάχιστον εκατονταετίας.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το πλημμυρικό γεγονός στην Μάνδρα Αττικής τον Νοέμβριο του 2017 αλλά και η πλημμυρική απόκριση των ρεμάτων που την διασχίζουν και της ευρύτερης περιοχής για τέσσερα υδρολογικά σενάρια. Από τις αναλύσεις προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Η μέγιστη παροχή του ρέματος Σούρες όπως προκύπτει από την υδρολογική ανάλυση και επιβεβαιώνεται από την σύγκριση των μετρημένων και των υπολογιζόμενων βαθών ροής ήταν της τάξεως των $130 \text{ m}^3/\text{s}$. Η μέγιστη παροχή του ρέματος Αγία Αικατερίνη ήταν της τάξεως των $160 \text{ m}^3/\text{s}$ ή και μεγαλύτερη καθώς σε ορισμένες διατομές το υδραυλικό μοντέλο δεν δίνει την απαιτούμενη αιχμή του βάθους ροής.
2. Καθοριστικό ρόλο στην εξάπλωση της πλημμύρας έπαιξαν οι παρεμβάσεις εντός της κοίτης του ρ. Σούρες και τα υποδιαστασιοποιημένα τεχνικά. Επίσης, η ανύπαρκτη κοίτη του ρ. Αγία Αικατερίνη, η έλλειψη οριοθέτησης του και η μη υλοποίηση των προβλεπόμενων αντιπλημμυρικών έργων οδήγησε στην δημιουργία ενός πλημμυρικού κύματος πολύ μεγάλου πλάτους που έπληξε το δυτικό σύνορο της πόλης.
3. Η μέγιστη έκταση της πλημμύρας που προκύπτει από το μοντέλο TELEMAC δείχνει σαφώς την ανάγκη χρησιμοποίησης υψηλής ποιότητας γεωμετρικών δεδομένων για την διδιάστατη υδραυλική προσομοίωση.
4. Από την εφαρμογή του μοντέλου στα συνθετικά υδρογραφήματα φαίνεται ότι πλημμυρίζει η Μάνδρα για τις περιόδους επαναφοράς 20 και 50 έτη και κυρίως οι οδοί Αγίας Αικατερίνης και Κοροπούλη. Επίσης πλημμυρίζουν έστω και με μικρά βάθη η ΠΕΟΑΘ και η ΒΙΠΕ Μάνδρας. Αναλογιζόμενοι ότι αυτές είναι οι συνήθεις τιμές για την διαστασιολόγηση υδραυλικών έργων, συμπεραίνουμε ότι πρέπει να υλοποιηθούν άμεσα τα προβλεπόμενα αντιπλημμυρικά έργα για να μην έχουμε την εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων για τις παροχές της ίδιας τάξης μεγέθους.
5. Επίσης από τα αποτελέσματα των τεσσάρων υδρολογικών σεναρίων παρατηρούμε ότι η αύξηση της παροχής δεν συνεπάγεται αντίστοιχη αύξηση των μέγιστων βαθών ροής.

7.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα προτείνεται για μελλοντική έρευνα:

1. Η διενέργεια προσομοίωσης με την ενσωμάτωση των κτισμάτων στο υπολογιστικό πλέγμα του μοντέλου και η διερεύνηση της επίδρασής τους στο υδροδυναμικό πεδίο.
2. Η ανάπτυξη ενός μοντέλου που θα αναπαριστά την μελλοντική γεωμετρία των ρεμάτων όταν κατασκευαστούν τα αντιπλημμυρικά έργα, η εφαρμογή του για την πλημμύρα του 2017 και η αποτίμηση της λειτουργίας των υδραυλικών έργων.

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1-1: Το παραμετρικό ΣΜΥ με τα χαρακτηριστικά του μεγέθη (Ευστρατιάδης κ.α., 2014).....	3
Εικόνα 3.1-1: Η περιοχή μελέτης	13
Εικόνα 3.2-1: Το βασικό οδικό δίκτυο της Μάνδρας.....	14
Εικόνα 3.5-1: Οι λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης. Με κόκκινο χρώμα εικονίζονται οι λεκάνες των δύο ρεμάτων στην θέση της συμβολής τους και με μαύρο χρώμα οι λεκάνες που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό των πλημμυρογραφημάτων.	16
Εικόνα 3.6-1: Υετογράφημα βροχόπτωσης (αριστερά) και συνολικός υετός (δεξιά) από τις εκτιμήσεις του ραντάρ X-POL (Καλόγηρος κ.α., 2017)	17
Εικόνα 3.6-2: Διέλευση του κύματος κάτω από την γέφυρα της Αττικής Οδού (Λέκκας κ.α., 2017) ..	18
Εικόνα 3.6-3: Τελική αποτύπωση της έκτασης της πλημμύρας (Κοντοές κ.α., 2018)	19
Εικόνα 4.3-1: Υπολογισμός του αριθμού CN στην λεκάνη του ρ. Σούρες (HYDROMENT, 2018)	24
Εικόνα 5.1-1: Η περιοχή προσομοίωσης. Με κόκκινο χρώμα εικονίζεται το εξωτερικό όριο του πλέγματος και με μπλε χρώμα τα ρέματα όπου τοποθετήθηκαν δομημένα πλέγματα.	29
Εικόνα 5.1-2: Το πρωτογενές υπολογιστικό πλέγμα. Με ανοιχτό χρώμα διακρίνονται τα 4 δομημένα πλέγματα.....	30
Εικόνα 5.1-3: Σύγκριση αρχικής και τελικής γεωμετρίας στην φυσική κοίτη του ρ. Σούρες	32
Εικόνα 5.1-4: Σύγκριση αρχικής και τελικής γεωμετρίας στην μηκοτομή της φυσικής κοίτης του ρ. Σούρες.....	32
Εικόνα 5.1-5: Σύγκριση αρχικής και τελικής γεωμετρίας στην μηκοτομή του καναλιού του ρ. Σούρες.....	33
Εικόνα 5.1-6: Το τελικό πλέγμα της γεωμετρίας του εδάφους	34
Εικόνα 5.1-7: Το τελικό πλέγμα με τους συντελεστές Manning.....	36
Εικόνα 5.1-8: Οι θέσεις των τεχνικών που εισήχθησαν στο λογισμικό TELEMAC.....	37
Εικόνα 5.2-1: Χάρτης διατομών ελέγχου	39
Εικόνα 5.2-1: Σύγκριση καταγεγραμμένης και προσομοιωμένης πλημμυρικής κατάκλυσης τη χρονική στιγμή 08:30 π.μ. (ροζ έκταση: καταγεγραμμένη έκταση πλημμύρας)	48
Εικόνα 5.2-2: Διαίρεση του χάρτη σε 5 τμήματα.....	49
Εικόνα 5.2-3: Σύγκριση καταγεγραμμένης και προσομοιωμένης πλημμυρικής κατάκλυσης τη χρονική στιγμή 08:30 π.μ. – Τμήμα 1	49
Εικόνα 5.2-4: Σύγκριση καταγεγραμμένης και προσομοιωμένης πλημμυρικής κατάκλυσης τη χρονική στιγμή 08:30 π.μ. – Τμήμα 2	50
Εικόνα 5.2-5: Σύγκριση καταγεγραμμένης και προσομοιωμένης πλημμυρικής κατάκλυσης τη χρονική στιγμή 08:30 π.μ. – Τμήμα 3	51
Εικόνα 5.2-6: Σύγκριση καταγεγραμμένης και προσομοιωμένης πλημμυρικής κατάκλυσης τη χρονική στιγμή 08:30 π.μ. – Τμήμα 4	52
Εικόνα 5.2-7: Σύγκριση καταγεγραμμένης και προσομοιωμένης πλημμυρικής κατάκλυσης τη χρονική στιγμή 09:00 π.μ. – Τμήμα 5 - (μαύρη γραμμή: περίγραμμα καταγεγραμμένης πλημμυρισμένης έκτασης)	53
Εικόνα 6.2-1: Χωρική κατανομή του μέγιστου βάθους ροής για κάθε περίοδο επαναφοράς	65

Εικόνα 6.2-1: Σύγκριση της έκτασης της πλημμύρας για κάθε περίοδο επαναφοράς	66
--	----

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 3.5-1: Μηκοτομές της κύριας μισγάγγειας των δύο ρεμάτων	16
Διάγραμμα 4.1-1: Η προσομοιωμένη βροχόπτωση για διάστημα εμπιστοσύνης 95% στον εικονικό σταθμό Χ (Ntigliakakis, 2018, μετά από προσαρμογή)	22
Διάγραμμα 4.3-1: Τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα για διάρκεια βροχής $d=0.5$ h	23
Διάγραμμα 4.3-2: Πλημμυρογραφήματα εισόδου του υδραυλικού μοντέλου	24
Διάγραμμα 4.4-1: Σύγκριση όμβριων καμπυλών για διάρκεια βροχής ($d=12$ h) για τις 4 εξεταζόμενες περιόδους επαναφοράς	25
Διάγραμμα 4.4-2: Επιφανειακά υετογραφήματα στην λεκάνη του ρ. Σούρες	26
Διάγραμμα 4.4-3: Πλημμυρογραφήματα εισόδου του υδραυλικού μοντέλου για το ρ. Σούρες	27
Διάγραμμα 4.4-4: Επιφανειακά υετογραφήματα στην λεκάνη του ρ. Αγία Αικατερίνη	28
Διάγραμμα 4.4-5: Πλημμυρογραφήματα εισόδου του υδραυλικού μοντέλου για το ρ. Αγία Αικατερίνη	28
Διάγραμμα 5.2-1: Μέγιστη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του ρ. Σούρες (α) και του ρ. Αγία Αικατερίνη (β)	40
Διάγραμμα 5.2-2: Χρόνοι άφιξης του μέγιστου βάθους του πλημμυρικού κύματος κατά μήκος των ρεμάτων Σούρες (α) και Αγία Αικατερίνη (β)	40
Διάγραμμα 5.2-3: Μεταβολή του βάθους ροής στις διατομές ελέγχου του ρ. Αγία Αικατερίνη	41
Διάγραμμα 5.2-4: Μεταβολή του βάθους ροής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες ανάντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη.....	42
Διάγραμμα 5.2-5: Μεταβολή του βάθους ροής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες κατόντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη.....	43
Διάγραμμα 5.2-6: Σύγκριση μέγιστων βαθών μεταξύ μετρήσεων και προσομοίωσης στα ρέματα Σούρες (α) και Αγία Αικατερίνη (β).....	44
Διάγραμμα 5.2-7: Χρόνοι άφιξης της μέγιστης παροχής του πλημμυρικού κύματος κατά μήκος των ρεμάτων Σούρες (α) και Αγία Αικατερίνη (β)	44
Διάγραμμα 5.2-8: Μεταβολή της παροχής στις διατομές ελέγχου του ρ. Αγία Αικατερίνη	45
Διάγραμμα 5.2-9: Μεταβολή της παροχής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες ανάντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη.....	46
Διάγραμμα 5.2-10: Μεταβολή της παροχής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες κατόντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη.....	47
Διάγραμμα 6.2-1: Μεταβολή της παροχής στις διατομές ελέγχου του ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια.....	58
Διάγραμμα 6.2-2: Μεταβολή της παροχής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες ανάντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια.....	59
Διάγραμμα 6.2-3: Μεταβολή της παροχής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες κατόντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια.....	60

Διάγραμμα 6.2-4: Μεταβολή του βάθους ροής στις διατομές ελέγχου του ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια.....	61
Διάγραμμα 6.2-5: Μεταβολή του βάθους ροής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες ανάντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια	62
Διάγραμμα 6.2-6: Μεταβολή του βάθους ροής στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες κατόντη της συμβολής με το ρ. Αγία Αικατερίνη για τα 4 εξεταζόμενα σενάρια	63
Διάγραμμα 6.2-7: Χρόνοι άφιξης του μέγιστου βάθους του πλημμυρικού κύματος κατά μήκος των ρεμάτων Σούρες (α) και Αγ. Αικατερίνη (β).....	64
Διάγραμμα 6.2-8: Χρόνοι άφιξης της μέγιστης παροχής του πλημμυρικού κύματος κατά μήκος των ρεμάτων Σούρες (α) και Αγ. Αικατερίνη (β).....	64

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1-1: Προτεινόμενες τιμές του ποσοστού αρχικών απωλειών (Ευστρατιάδης κ.α., 2014).....	6
Πίνακας 3.7-1: Βάθη ροής στις διατομές ελέγχου (Μαρκόπουλος, 2018, μετά από προσαρμογή)....	20
Πίνακας 4.2-1: Υπολογισμός χρόνου συρροής κατά Giandotti	23
Πίνακας 4.2-2: Υπολογισμός χρόνου συρροής	23
Πίνακας 4.4-1: Εκτίμηση των μεγεθών του ΣΜΥ του ρ. Σούρες για τις εξεταζόμενες περιόδους επαναφοράς.....	26
Πίνακας 4.4-2: Εκτίμηση των μεγεθών του ΣΜΥ του ρ. Αγία Αικατερίνη για τις εξεταζόμενες περιόδους επαναφοράς.....	27
Πίνακας 4.4-3: Παροχές αιχμής των πλημμυρογραφημάτων (m^3/s) για τις εξεταζόμενες περιόδους επαναφοράς.....	28
Πίνακας 5.1-1: Χαρακτηριστικά των δομημένων πλεγμάτων	30
Πίνακας 5.1-2: Χαρακτηριστικά του γενικού πλέγματος.....	30
Πίνακας 5.1-3: Αντιστοίχιση του συντελεστή τριβής με τις χρήσεις γης (Μαρκόπουλος, 2018).....	35
Πίνακας 5.1-4: Συντελεστής τριβής για τα ρέματα (Μαρκόπουλος, 2018, μετά από προσαρμογή) ...	35
Πίνακας 5.1-5: Χαρακτηριστικά μεγέθη των τεχνικών	37
Πίνακας 5.2-1: Βάθη ροής την στιγμή της άφιξης του κύματος στις διατομές ελέγχου του ρ. Αγία Αικατερίνη.....	54
Πίνακας 5.2-2: Βάθη ροής την στιγμή της άφιξης του κύματος στις διατομές ελέγχου του ρ. Σούρες	55
Πίνακας 6.1-1: Συνοπτική παρουσίαση των διαγραμμάτων από την εφαρμογή του υδραυλικού μοντέλου	57

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Αποστολίδης, Η., Β. Περλέρος, Β. Τσατήρης, και Γ. Βασιλόπουλος, *Έκθεση για την πλημμύρα της 15ης Νοεμβρίου 2017 στην Μάνδρα και Νέα Πέραμο Αττικής*, 46 σελίδες, Γεωτεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος-Παράρτημα Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας, Αθήνα, Δεκέμβριος 2017.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Α. Κούσης, Ν. Μαμάσης, Ε. Γαλιούνα, Κ. Τζούκα, Ε. Μιχαηλίδη, και Δ. Κουτσογιάννης, *Τεχνική έκθεση περιγραφής περιοχικών σχέσεων εκτίμησης χαρακτηριστικών υδρολογικών μεγεθών, 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, Ιούλιος 2014.
- Καλόγηρος, Ι., Α. Ρετάλης, Δ. Κατσάνος, Μ. Αναγνώστου, και Ε. Νικολόπουλος, *Δελτίο τύπου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στις 20-11-2017*, (Διαθέσιμο στο διαδίκτυο στην διεύθυνση: http://www.noa.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=1074&catid=86&Itemid=547&lang=el).
- Κοντοές, Χ., Σ. Αντωνιάδη, Ε. Ιερωνυμίδα, Κ. Καραγιαννοπούλου, και Α. Τσουνη, *Ανάλυση της πλημμύρας στη δυτική Αττική στις 15/11/2017 με αξιοποίηση δορυφορικής τηλεπισκόπησης*, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Αθήνα, Ιανουάριος 2018.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 4, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2016.
- Λέκκας, Ε., Ν. Βούλγαρης, και Σ. Λόζιος, *Πλημμύρες στην Δυτική Αττική (Μάνδρα, Νέα Πέραμος) 15 Νοεμβρίου 2017*, Μη περιοδική έκδοση του Π.Μ.Σ «Στρατηγικές διαχείρισης Περιβάλλοντος, Καταστροφών και Κρίσεων», Τεύχος 5, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα, Νοέμβριος 2017.
- Μαρκόπουλος-Σαρίκας, Γ., *Μαθηματική προσομοίωση της πλημμύρας στη Μάνδρα με χρήση του μοντέλου TELEMAC*, Διπλωματική Εργασία, 106 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Νοέμβριος 2018.
- Μιμίκου, Μ. Α., και Ε. Α. Μπαλτάς, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 5, 395 σελίδες, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2012.
- Μιχαηλίδη, Ε., *Διερεύνηση προσομοίωσης πλημμύρας για το σχεδιασμό σε λεκάνες χειμαρρικής διαίτας - Εφαρμογή στη λεκάνη του Σαρανταπόταμου*, Διπλωματική εργασία, 140 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2013.
- Πέππας, Ι., και Ι. Καραβοκύρης, *Αντιπλημμυρική προστασία Θριασίου πεδίου*, Ημερίδα «Αντιπλημμυρική προστασία Αττικής», ΤΕΕ, Αθήνα, 2 Νοεμβρίου 2004, (Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στην διεύθυνση: http://library.tee.gr/digital/m2022/m2022_peppas.pdf).
- ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ των λεκανών απορροής του υδατικού διαμερίσματος Αττικής, Ειδική Γραμματεία Υδάτων, Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, Ιούλιος 2017.
- Τεύχος μελέτης υδρολογίας για την «ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΤΗΝ ΘΕΣΗ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ (Χ.Θ 3+413.79)» στα πλαίσια κατασκευής του έργου «ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΧΑΡΑΞΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΠΛΑΤΥΝΣΗ ΤΗΣ Π.Ε.Ο. ΑΘΗΝΩΝ – ΘΗΒΩΝ ΣΤΟ ΤΜΗΜΑ ΜΑΝΔΡΑ – ΟΙΝΟΗ (ΑΠΟ Χ.Θ. 0+000 ΕΩΣ Χ.Θ. 5+085.61) ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΘΟΡΩΝ ΤΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ Π.Ε.Ο. ΣΤΟ ΤΜΗΜΑ ΑΠΟ ΝΕΑ ΖΩΗ ΜΑΝΔΡΑΣ ΕΩΣ ΑΓΙΑ ΣΩΤΗΡΑ», Μελετητής: HYDROMENT ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε, Νοέμβριος 2018.

- Τεύχος υδραυλικής μελέτης «ΜΕΛΕΤΗ ΕΚΤΡΟΠΗΣ ΧΕΙΜΑΡΡΟΥ ΑΓ. ΔΙΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΚΑΙ ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΗΣ ΧΕΙΜΑΡΡΟΥ ΣΟΥΡΕΣ ΘΡΙΑΣΙΟΥ ΠΕΔΙΟΥ», Μελετητής: ΕΤΜΕ - ΠΕΠΠΑΣ και ΣΥΝ/ΤΕΣ Ε.Ε, ΚΑΪΜΑΚΗ ΣΤΥΛΙΑΝΗ-ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ, ΚΟΝΤΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ, ΡΟΙΚΟΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε, ΜΑΣΤΑΘΗΣ ΗΛΙΑΣ, Ιούλιος 2014.
- Ata, Riadh, TELEMAC-2D User Manual, version v7p3, EDF R&D, March 16, 2018.
- Canadian Hydraulic Centre, Blue Kenue Reference Manual, National Research Council, Ottawa, Ontario, Canada, 2011.
- Chow, V. T., D. R. Maidment, and L. W. Mays, *Applied Hydrology*, 572 pages, McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, 1988.
- Galland, J-C., N. Goutal, and J-M Hervouet, TELEMAC: A new numerical model for solving shallow water equations, *Advances in Water Resources*, 14 (3), 138-148, 1991.
- Koutsoyiannis, D., and G. Baloutsos, Analysis of a long record of annual maximum rainfall in Athens, Greece, and design rainfall inferences, *Natural Hazards*, 22(1), 31-51, 2000.
- Koutsoyiannis, D., D. Kozonis, and A. Manetas, A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships, *Journal of Hydrology*, 206(1-2), 118-135, 1998.
- Michailidi, E. M., S. Antoniadis, A. Koukouvinos, B. Bacchi, and A. Efstratiadis, Timing the time of concentration: shedding light in a paradox, *Hydrological Sciences Journal*, 63(5), 721-740, 2018.
- Ntigkakis, C., *Reverse analysis and uncertainty assessment of major flood events under limited data availability: The case of Western Attica, November 2017*, Diploma thesis, 111 pages, Department of Water Resources and Environmental Engineering – National Technical University of Athens, Athens, October 2018.
- Risva, K., *Development of a distributed hydrological software application employing novel velocity-based techniques*, MSc Thesis, 157 pages, Department of Water Resources and Environmental Engineering - National Technical University of Athens, Athens, November 2018.
- Snyder, F. F., Synthetic unit-graphs, *EOS Transactions, American Geophysical Union*, 19(1), 447-454, 1938.
- Soil Conservation Service, *National Engineering Handbook*, section 4, Hydrology, U.S Dept. of Agriculture, U.S Government Printing Office, Washington, D.C., 1972.
- Stamou, A.I., The Disastrous Flash Flood of Mandra in Attica-Greece and now What? , *Civil Engineering Research Journal*, 6(1):555677, 2018.
- Sutcliffe, J.V., *Methods of Flood Estimation, A Guide to Flood Studies Report, Report No 49*, Institute of Hydrology, UK, 1978.
- U.K. National Environmental Research Council (UK-NERC), Flood Studies Report, Institute of Hydrology, Wallingford, 1975.
- U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, *Design of Arch Dams*, U.S. Government Printing Office, Denver, CO, 1977.

