



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ
ΡΕΜΑΤΙΑΣ ΧΑΛΑΝΔΡΙΟΥ



ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΤΖΕΜΗΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Α. ΤΣΙΧΡΙΝΤΖΗΣ

Αθήνα, Μάρτιος 2017

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των σπουδών της Σχολής των Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του καθηγητή ΕΜΠ κ. Βασίλειο Τσιχριντζή.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κο Τσιχριντζή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτή την εργασία, για την καθοδήγησή του καθόλη τη διάρκειά της και κυρίως για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Γιάννη Κούρτη, για την υποδειγματική και καθοριστική συνεργασία, όσο και για την προθυμία και υπομονή που έδειχνε κάθε φορά που χρειάστηκε τη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Θέλω να ευχαριστήσω επίσης, τον κ. Δημήτριο Αλεξάκη, Ε.ΔΙ.Π. και τον κύριο Χαρίλαο Βαγγέλη, Ε.ΔΙ.Π. , οι οποίοι με βοήθησαν με ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην αρχή της διπλωματικής εργασίας

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια και τους φίλους μου για τη συνεχή υποστήριξη και βοήθεια σε οποιοδήποτε προσωπικό μου εγχείρημα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	15
ABSTRACT	17
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	19
1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας	19
1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας	20
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	21
2.1 Βασικοί Ορισμοί	21
2.2 Κοινοτική οδηγία 2007/60 για τη διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου.....	23
2.3 Θεσμικό Πλαίσιο.....	25
2.4 Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε.....	26
2.5 Εκτίμηση επεισοδίων βροχόπτωσης μέσω όμβριων καμπύλων	61
2.6 Ανάλυση Ευαισθησίας	63
2.7 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	64
ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	67
3.1 Γενικά Στοιχεία	67
3.2 Αυτοψία στην Περιοχή Μελέτης	70
3.3 Λεκάνη απορροής ρέματος Χαλανδρίου.....	75
3.4 Γεωμορφολογική και Υδρολογική ανάλυση της λεκάνης	80
3.5 Υδραυλική ανάλυση της περιοχής μελέτης.....	99
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	109
4.1 HEC-HMS	109
4.2 HEC-RAS.....	118
4.4 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας	131
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	141
5.1 Γενικά.....	141
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα της παρούσας εργασίας	142
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	143
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	147

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Μέση υπερετήσια βροχόπτωση (mm) για την περίοδο 1960-1990 ανά υδατικό διαμέρισμα (Πηγή: ΕΤΥΜΠ).....	23
Εικόνα 2.2: Το μοναδιαίο υδρογράφημα του Snyder	40
Εικόνα 2.3: Απλή λεκάνη απορροής και η αναπαράσταση του κινηματικού κύματος.	44
Εικόνα 2.4: Διόδευση πλημμύρας σε ποτάμι (Βαφειάδης, 2005).....	47
Εικόνα 2.5: Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων.....	54
Εικόνα 2.6: Ορισμός οριακών συνθηκών	55
Εικόνα 2.7: Ρύθμιση παραμέτρων υδραυλικής προσομοίωσης	56
Εικόνα 2.8: Απεικόνιση μεγεθών εξίσωσης ενέργειας (Παπανικολάου, 2008).....	57
Εικόνα 2.9: Επιλογή μεθόδου υπολογισμού της μεταφορικότητας, K	58
Εικόνα 2.10: Υπολογισμός μεταφορικότητας K όλης της διατομής (Brunner, 2010).....	59
Εικόνα 2.11: Μέθοδοι υπολογισμού απωλειών λόγω τριβής.....	59
Εικόνα 2.12: Υπολογισμός μέσης κινητικής ενέργειας της διατομής (Brunner, 2010).....	60
Εικόνα 3.1: Όρια περιοχής μελέτης και υπολεκανών	68
Εικόνα 3.2: Ζώνες δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας για το υδατικό διαμέρισμα 06 «ΑΤΤΙΚΗ» Πηγή: (Ειδική Γραμματεία Υδάτων 2012).....	69
Εικόνα 3.3: Οδοιοπορικό στην περιοχή μελέτης	71
Εικόνα 3.4: Η ρεματιά αμέσως μετά την έξοδο από τη διασταύρωση της με την Αττική Οδό..	72
Εικόνα 3.5: Κατοικία πάνω στην όχθη του ρέματος.....	72
Εικόνα 3.6: Ο Ι.Ν. Αγίου Αθανασίου και ένας παιδότοπος δίπλα στις όχθες του ρέματος.....	73
Εικόνα 3.7: Η γέφυρα στην Οδό Πολυδρόσου	73
Εικόνα 3.8: Η γέφυρα στην οδό Δαφνίδος.....	74
Εικόνα 3.9: Πεζογέφυρα λίγο πριν το τέλος του οδοιοπορικού.....	74
Εικόνα 3.10: Υπολεκάνες απορροής περιοχής μελέτης.....	75
Εικόνα 3.11: Κλίσεις υπολεκανών	76
Εικόνα 3.12: Υψόμετρο υπολεκανών.....	76
Εικόνα 3.12: Γεωλογία της λεκάνης απορροής του ρέματος (Πηγή: ΙΓΜΕ 2003).....	78
Εικόνα 3.13: Χάρτης Χρήσεων Γης της περιοχής μελέτης.....	79
Εικόνα 3.14: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής μελέτης	81
Εικόνα 3.15: Εντολές του Terrain Preprocessing της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS.....	82
Εικόνα 3.16: Διόρθωση βυθισμάτων ψηφιακού μοντέλου εδάφους.....	83
Εικόνα 3.17: Τιμή κεντρικού φατνίου ανάλογα με τη διεύθυνση απορροής (Στάμου & Σκοπελίτη, 2013).....	84
Εικόνα 3.18: Κάναβος διευθύνσεων απορροής (Στάμου & Σκοπελίτη, 2013).....	84
Εικόνα 3.19: Κάναβος διεύθυνσης απορροής περιοχής μελέτης.....	85
Εικόνα 3.20: Κάναβος πλήθους φατνίων απορροής (Στάμου & Σκοπελίτη, 2013)	86
Εικόνα 3.21: Κάναβος πλήθος φατνίων απορροής περιοχής μελέτης	86

Εικόνα 3.22: Οριοθέτηση υπολεκανών για κάθε τμήμα υδατορεύματος σε μορφή πλέγματος	.88
Εικόνα 3.23: Οριοθέτηση υπολεκανών για κάθε τμήμα υδατορεύματος σε διανυσματική μορφή	89
Εικόνα 3.24: Υδρογραφικό δίκτυο περιοχής μελέτης σε διανυσματική μορφή	90
Εικόνα 3.25: Μενού εντολών Project Setup	91
Εικόνα 3.26: Παράθυρο ορισμού νέου project	91
Εικόνα 3.27: Παράθυρο ορισμού μήτρας δεδομένων	92
Εικόνα 3.28: Μενού εντολών επεξεργασίας της λεκάνης μελέτης (Basin Processing) και εξαγωγής χαρακτηριστικών της (Characteristics)	92
Εικόνα 3.29: Υπολεκάνες απορροής της υπό μελέτης περιοχής	93
Εικόνα 3.30: Κάναβος υπολογισμού αριθμού CN	95
Εικόνα 3.31: Παράθυρο εκτέλεσης υπολογισμού απωλειών	95
Εικόνα 3.32: Παράθυρο διόδευσης του HEC-HMS	98
Εικόνα 3.32: Βήματα διαδικασίας υδραυλικής ανάλυσης και προσομοίωσης	100
Εικόνα 3.33: Περιοχή υδραυλικής μελέτης	101
Εικόνα 3.34: Ισοϋψείς καμπύλες περιοχής μελέτης και ψηφιοποιημένη κύρια γραμμή ροής ποταμού	103
Εικόνα 3.35: Ψηφιοποίηση οχθών ποταμού στο τρισδιάστατο μοντέλο εδάφους	104
Εικόνα 3.36: Αυτόματη δημιουργία διατομών πλάτους 200m και ισοδιάστασης 100m	105
Εικόνα 3.37: Απεικόνιση διατομών τμήματος υδατορεύματος	106
Εικόνα 3.38: Ενδεικτική διατομή της κοίτης του ποταμού	106
Εικόνα 4.1: Μοντέλο λεκάνης απορροής (basin1) και επεξήγηση υδρολογικών στοιχείων	110
Εικόνα 4.2: Τα χαρακτηριστικά στοιχεία των υπολεκανών	111
Εικόνα 4.3: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=6h$ και περιόδου επαναφοράς $T=2$ ετών	112
Εικόνα 4.4: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=12h$ και περιόδου επαναφοράς $T=2$ ετών	112
Εικόνα 4.5: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=6h$ και περιόδου επαναφοράς $T=100$ ετών	113
Εικόνα 4.6: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=12h$ και περιόδου επαναφοράς $T=100$ ετών	113
Εικόνα 4.8: Δημιουργία αρχείου προσομοίωσης	115
Εικόνα 4.9: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 2 ετών	116
Εικόνα 4.10: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 2 ετών	116
Εικόνα 4.11: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 100 ετών	117
Εικόνα 4.12: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 100 ετών	117
Εικόνα 4.13: Κεντρικό μενού του προγράμματος HEC-RAS	118
Εικόνα 4.14: Περιβάλλον εισαγωγής γεωμετρικού αρχείου	119
Εικόνα 4.15: Χαρακτηριστικά διατομής και επεξεργασία των γεωμετρικών δεδομένων	119
Εικόνα 4.16: Διατομή $\Delta 12$ του Υδατορεύματος	121
Εικόνα 4.17: Διατομή $\Delta 6$ του Υδατορεύματος	121
Εικόνα 4.18: Διατομή $\Delta 3$ του Υδατορεύματος	122
Εικόνα 4.19: Η τελευταία φωτογραφία του οδηγού επιλογής συντελεστή Manning για φυσικά κανάλια των Arcement and Schneider (1989)	122

Εικόνα 4.20: Διατομή της γέφυρας Γ1	124
Εικόνα 4.21: Διατομή της γέφυρας Γ2.....	124
Εικόνα 4.22: Διατομή της γέφυρας Γ3.....	125
Εικόνα 4.23: Διατομή της γέφυρας Γ4.....	125
Εικόνα 4.24: Αποτελέσματα διατομής Δ6 για βροχόπτωση διάρκειας 12h και περιόδου αναφοράς T=2 ετών , T=50 ετών και T=100 ετών	126
Εικόνα 4.25: Μεταβολή της στάθμης στη διατομή με την αύξηση της παροχής	127
Εικόνα 4.26: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πλημμυρικής κατάκλυσης περιόδου επαναφοράς T=100 έτη.....	127
Εικόνα 4.27: Επιλογή της εντολής RAS Mapper από το κεντρικό μενού του HEC- RAS.....	128
Εικόνα 4.28: Παράθυρο εργασιών του RAS Mapper	128
Εικόνα 4.29: Επιλογή της εντολής Create Terrain Geo Tiff from XS's (channel only).....	130
Εικόνα 4.30: Όρια πλημμυρικής κατάκλυσης για περίοδο επαναφοράς T=100 έτη	130
Εικόνα 4.31: Βάθη νερού για περίοδο επαναφοράς T=100 έτη.....	131
Εικόνα 4.32: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για μείωση του αριθμού καμπύλης CN	133
Εικόνα 4.33: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για αύξηση του αριθμού καμπύλης CN	133
Εικόνα 4.34: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για μείωση του χρόνου υστέρησης (Tlag)	134
Εικόνα 4.35: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για αύξηση του χρόνου υστέρησης (Tlag)	134
Εικόνα 4.36: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για μείωση της παραμέτρου K Muskingum.....	135
Εικόνα 4.37: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για αύξηση της παραμέτρου K Muskingum.....	135
Εικόνα 4.38: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για μείωση της παραμέτρου x Muskingum	136
Εικόνα 4.39: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για αύξηση της παραμέτρου x Muskingum	136
Εικόνα 4.40: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για μείωση του συντελεστή n στον αγωγό που βρίσκεται κάτω από την Αττική Οδό	137
Εικόνα 4.41: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για αύξηση του συντελεστή n στον αγωγό που βρίσκεται κάτω από την Αττική Οδό	137
Εικόνα 4.42: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για μείωση του συντελεστή n	139
Εικόνα 4.43: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για αύξηση του συντελεστή n.....	139
Εικόνα A.1: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας d=6h και περιόδου επαναφοράς T=2 ετών	147
Εικόνα A.2: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας d=12h και περιόδου επαναφοράς T=2 ετών	147
Εικόνα A.3: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας d=6h και περιόδου επαναφοράς T=5 ετών	148
Εικόνα A.4: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας d=12h και περιόδου επαναφοράς T=5 ετών	148
Εικόνα A.5: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας d=6h και περιόδου επαναφοράς T=10 ετών	149
Εικόνα A.6: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας d=12h και περιόδου επαναφοράς T=10 ετών	149
Εικόνα A.7: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας d=6h και περιόδου επαναφοράς T=25 ετών	150
Εικόνα A.8: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας d=12h και περιόδου επαναφοράς T=25 ετών	150
Εικόνα A.9: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας d=6h και περιόδου επαναφοράς T=50 ετών	151
Εικόνα A.10: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας d=12h και περιόδου επαναφοράς T=50 ετών	151

Εικόνα A.11: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=6h$ και περιόδου επαναφοράς $T=100$ ετών	152
Εικόνα A.12: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=12h$ και περιόδου επαναφοράς $T=100$ ετών	152
Εικόνα B.1: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 2 ετών	153
Εικόνα B.2: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 2 ετών	153
Εικόνα B.3: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 2 ετών	154
Εικόνα B.4: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 2 ετών	154
Εικόνα B.5: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 5 ετών	155
Εικόνα B.6: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 5 ετών	155
Εικόνα B.7: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 5 ετών	156
Εικόνα B.8: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 5 ετών	156
Εικόνα B.9: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 10 ετών	157
Εικόνα B.10: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 10 ετών	157
Εικόνα B.11: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 10 ετών	158
Εικόνα B.12: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 100 ετών	158
Εικόνα B.13: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 25 ετών	159
Εικόνα B.14: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 25 ετών	159
Εικόνα B.15: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 25 ετών	160
Εικόνα B.16: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 25 ετών	160
Εικόνα B.17: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 50 ετών	161
Εικόνα B.18: Συνολικά αποτελέσματα του επεισοδίου βροχής 6h και περιόδου επαναφοράς 50 ετών	161
Εικόνα B.19: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 50 ετών	162
Εικόνα B.20: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 50 ετών	162

Εικόνα Β.21: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 100 ετών	163
Εικόνα Β.22: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 100 ετών	163
Εικόνα Β.23: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 100 ετών	164
Εικόνα Β.24: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 12h και περιόδου επαναφοράς 100 ετών	164
Εικόνα Γ.1: Βάθη νερού για περίοδο επαναφοράς $T=2$ έτη	165
Εικόνα Γ.2: Βάθη νερού για περίοδο επαναφοράς $T=5$ έτη	166
Εικόνα Γ.3: Βάθη νερού για περίοδο επαναφοράς $T=10$ έτη	167
Εικόνα Γ.4: Βάθη νερού για περίοδο επαναφοράς $T=25$ έτη	168
Εικόνα Γ.5: Βάθη νερού για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη	169
Εικόνα Γ.6: Βάθη νερού για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη	170

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Κατάταξη εδαφών με βάση την αρχική υγρασία εδάφους (Τσακίρης 1995).....	34
Πίνακας 2.2: Τύποι εδαφών κατά SCS ανάλογα με τη διαπερατότητά τους (Τσακίρης 1995)..	34
Πίνακας 2.3: Ο αριθμός καμπύλης απορροής CN (Curve Number) για την κάθε κατηγορία εδαφών ανάλογα με την χρήση γης (Τσακίρης 1995).....	35
Πίνακας 3.1: Μόνιμος πληθυσμός και πυκνότητα πληθυσμού (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ 2011)	67
Πίνακας 3.4: Εισαγωγή των τιμών των παραμέτρων διόδευσης Muskingum	97
Πίνακας 3.5: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αγωγού	98
Πίνακας 4.2: Εισαγωγή δεδομένων στο HEC-HMS	114
Πίνακας 4.3: Τιμές του συντελεστή n του Manning	123
Πίνακας 4.4: Τεχνικά Χαρακτηριστικά γεφυρών	124
Πίνακας 4.6: Αρχικές συνθήκες παροχής αιχμής και όγκου απορροής για βροχόπτωση περιόδου επαναφοράς T=50 έτη	132
Πίνακας 4.6: Μεταβολή Παροχής Αιχμής και Όγκου Απορροής.....	138

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία περιγράφεται η διαδικασία ανάλυσης πλημμύρας, μέσω των διαδικασιών της υδρολογικής προσομοίωσης λεκάνης απορροής ποταμού και της μετέπειτα υδραυλικής προσομοίωσης των υδατορευμάτων, με τελικό στόχο την εξαγωγή χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης.

Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε βρίσκεται στο Υδατικό Διαμέρισμα Αττικής και συγκεκριμένα στο βορειοανατολικό τμήμα του Νομού, μεταξύ των Δήμων Χαλανδρίου, Βριλησίων, Πεντέλης και Αμαρουσίου. Η περιοχή χαρακτηρίζεται κυρίως πεδινή.

Αφού, πραγματοποιήθηκε η συλλογή πρωτογενών δεδομένων, δηλαδή το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, οι χάρτες χρήσεων γης και οι τύποι εδάφους, ξεκίνησε η προεπεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων και η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων υπό μορφή χαρτών στο σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών ArcGIS, με την χρήση των αντίστοιχων εργαλειοθηκών (επεκτάσεων) HEC-GeoHMS και HEC-GeoRAS.

Ακολούθησε η υδρολογική προσομοίωση με την χρήση του λογισμικού HEC-HMS και η υδραυλική προσομοίωση με το HEC-RAS. Συγκεκριμένα, το πρώτο εφαρμόζεται για την προσομοίωση των διεργασιών βροχόπτωσης- απορροής σε λεκάνες απορροής, ενώ το δεύτερο επιτρέπει τη μονοδιάστατη ανάλυση και την προσομοίωση φυσικών υδατορευμάτων ή τεχνητών συστημάτων.

Τα προγράμματα HEC-RAS, HEC-HMS, καθώς και οι επεκτάσεις HEC-GeoHMS και HEC-GeoRAS του ArcGIS, είναι σχεδιασμένα από το Σώμα Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού και διατίθενται δωρεάν. Η υδρολογική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για 6 περιόδους αναφοράς $T=2, 5, 10, 25, 50$ και 100 έτη μέσω όμβριων καμπυλών. Τα αποτελέσματα ήταν η εξαγωγή πλημμυρογραφημάτων για κάθε υδρολογικό σενάριο, των οποίων οι παροχές αιχμής εισήχθησαν στο λογισμικό HEC-RAS για την υδραυλική προσομοίωση. Η υδραυλική προσομοίωση του υδατορεύματος διεξήχθη σε συνθήκες μόνιμης ροής έχοντας ως αποτέλεσμα τις γραμμές ενέργειας και τα πιεζομετρικά βάθη για κάθε περίοδο επαναφοράς.

Το τελικό προϊόν της υδραυλικής προσομοίωσης ήταν η των πιεζομετρικών επιφανειών, οι οποίες συγκρινόμενες με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους υπολόγισαν τα βάθη του νερού. Με τον

τρόπο αυτό, ορίστηκαν τα όρια της κατάκλυσης της πλημμύρας και πραγματοποιήθηκε η χαρτογράφηση της πλημμύρας στο πρόγραμμα HEC-RAS για κάθε υδρολογικό σενάριο.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε σχετικά μικρό πεδίο πλημμυρικών κατακλύσεων με μικρή αύξηση του εμβαδού των κατακλυζόμενων εκτάσεων με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς.

Τέλος, για την αποτίμηση της βαρύτητας των υδρολογικών παραμέτρων στη λειτουργία των μοντέλων, επιχειρήθηκε μέσω της μεθόδου διακύμανσης μιας παραμέτρου τη φορά (OAT), η ανάλυση ευαισθησίας υδρολογικών παραμέτρων του HEC-HMS και των υδραυλικών παραμέτρων του HEC-RAS και επίδρασή τους στην παροχή αιχμής της βροχόπτωσης 6 ωρών και περιόδου επαναφοράς 50 ετών.

ABSTRACT

The aim of this thesis is the flood analysis process, through the processes of hydrological river basin simulation and the hydraulic simulation of stream sections and finally the export of flood depth maps and floodplain polygon maps.

The study was accomplished through the use of the software, developed by the Hydrologic Engineering Center of the U.S. Army corps of Engineers. Specifically, the methodology takes advantage of the software HEC-HMS, which simulates the hydrologic processes of river basins and determines the design flood hydrographs in several return periods and the software HEC-RAS, which simulates open channel flow (river systems) and computes the energy gradients and piezometric levels along the river. Both packages are compatible with the well-known geographical information system ArcGIS, which can be used for further data processing and visualization for cartographical purposes.

The chosen study area is located in the northeastern part of the county of Attica, between the municipalities of Halandri, Vrilissia, Penteli and Maroussi. It's covering an area of 18,8 km² and it is divided into 5 sub-basins. For this area the collected raw data, consisted of the digital elevation data, as well as the land use and soil type maps.

Since the collection of primary data was carried out , such as digital elevation model, land use and soil type maps, started the pre-processing of raw data and the visualization of results in the form of maps in geographical information system ArcGIS using the respective toolbars (extensions) HEC-GeoHMS and HEC-GeoRAS.

After that, the hydrologic simulation was performed through the use of the HEC-HMS software. The representation of watershed hydrologic processes was based in the formulation of models of the computation of rainfall losses, direct runoff and channel flow routing. Baseflow components were omitted on purpose, as a result of their minor role in the final target of the thesis. There are many methods to compute the different models. The selection of the methods was determined by the shorage of the reliable data of the area. Specifically, the SCS method was applied for the computation of rainfall losses and the SCS Unit Hydrograph was applied for the calculation of the direct runoff. The Muskingum Routing and Kinematic Wave Methods was applied for the computation of channel flow.

The meteorologic model file consists of a rainfall computed from the rainfall intensity curves, corresponding to the return periods $T=2, 5, 10, 25, 50$ and 100 years, applied in each subbasin of the case study.

Afterwards, the hydraulic simulation was carried out through the use of HEC-RAS, which concerns 2 km of the stream of Chalandri. The river is simulated in steady flow conditions with the relevant boundary conditions. The whole procedure computation is based on the solution of the energy balance equation between river cross sections. In this study the flow was mixed (subcritical and supercritical) and the boundary conditions were applied upstream and downstream of the river. The calculations result in the determination of the piezometric depth, the mean kinetic energy and the energy gradient for every cross section.

The final product of the hydraulic and hydrologic simulation provides is the creation of floodplain maps, through the use of HEC-RAS. The software compares the grid values of digital elevation model (topographical elevations) with the corresponding values of piezometric surface (water surface elevations). If the latter is greater than the initial elevation, then the corresponding cell gets the value of the subtraction «water surface elevation – topographical elevations». The output product is a new grid surface, which depicts the water depths in the whole area of the river basin.

The results showed relatively small field flood flooded with small increase in area of flood plains by increasing the return period.

Finally, the sensitivity analysis of hydrological parameters of HEC-HMS and hydraulic parameters of the HEC-RAS was attempted in order to assess the weight of each parameter in the models operation. The method used was the variance method “one parameter at a time (OAT)”.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μεθοδολογικού πλαισίου με στόχο τη δημιουργία χαρτών πλημμύρας, μέσω της αξιοποίησης των υδρολογικών και υδραυλικών δεδομένων και ενσωμάτωση αυτών σε υπολογιστικό περιβάλλον λογισμικών επεξεργασίας υδρολογικής και γεωγραφικής πληροφορίας.

Η υδρολογική και η υδραυλική ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον ArcGIS μέσω των επεκτάσεων του HECGeoHMS και HECGeoRAS. Η υδρολογική και η υδραυλική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στα προγράμματα HEC-HMS και HEC-RAS αντίστοιχα.

Η υπό μελέτη περιοχή είναι η λεκάνη της ρεματιάς Χαλανδρίου, η οποία βρίσκεται μεταξύ των δήμων Αμαρουσίου, Βριλησίων, Πεντέλης και Χαλανδρίου.

Συνοπτικά, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Επεξεργασία της γεωγραφικής πληροφορίας σε Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους και οριοθέτηση των βασικών γεωμετρικών και τοπογραφικών στοιχείων της λεκάνης απορροής.
- Υπολογισμός της απορροής και εξαγωγή υδρογραφημάτων.
- Ανάλυση του υδατορεύματος με σκοπό τον προσδιορισμό των γεωμετρικών του στοιχείων.
- Υδραυλική προσομοίωση του υδατορεύματος σε συνθήκες μόνιμης ροής
- Αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της υδραυλικής προσομοίωσης για τη δημιουργία χαρτών πλημμύρας.

Διερεύνηση της βαρύτητας των υδρολογικών και υδραυλικών παραμέτρων μέσω ανάλυσης ευαισθησίας.

1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία, συνίσταται από πέντε κεφάλαια. Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των κεφαλαίων:

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται το αντικείμενο και η δομή της διπλωματικής εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρατίθεται το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας, όπως ο ορισμός των πλημμυρών, το πλημμυρικό καθεστώς που επικρατεί γενικότερα στην Ελλάδα και την Ευρώπη και τα βασικά στοιχεία της κοινοτικής οδηγίας και του θεσμικού πλαισίου για τη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου. Επίσης περιγράφεται αναλυτικά το θεωρητικό υπόβαθρο των προγραμμάτων, στα οποία πραγματοποιήθηκε η υδρολογική και η υδραυλική προσομοίωση. Τέλος, περιγράφεται η διαδικασία της ανάλυσης ευαισθησίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο, δίνεται μία συνοπτική περιγραφή της περιοχής μελέτης, παρατίθενται χάρτες για τις χρήσεις γης, τους τύπους των εδαφών, καθώς επίσης και για την ακριβή γεωγραφική τοποθέτηση των λεκανών απορροής. Έπειτα, πραγματοποιείται υδρολογική και υδραυλική ανάλυση της λεκάνης απορροής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρατίθενται τα αποτελέσματα της υδρολογικής και υδραυλικής προσομοίωσης των λεκανών απορροής και τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας των προγραμμάτων. Επίσης, πραγματοποιείται η σύνθεση χαρτών πλημμύρας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται η εξαγωγή των συμπερασμάτων από την χρήση των μοντέλων, καθώς και προτάσεις για μελλοντική μετεξέλιξη της εργασίας

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Βασικοί Ορισμοί

Υδατορεύματα ή υδατορέματα (μη πλεύσιμοι ποταμοί, χείμαρροι, ρέματα και ρυάκια): οι φυσικές ή διευθετημένες διαμορφώσεις της επιφάνειας του εδάφους που είναι κύριοι αποδέκτες των υδάτων της επιφανειακής απορροής και διασφαλίζουν την διόδευσή τους προς άλλους αποδέκτες σε χαμηλότερες στάθμες. Στην έννοια του υδατορεύματος δεν περιλαμβάνονται τα εγγειοβελτιωτικά έργα όπως αρδευτικές και αποστραγγιστικές τάφροι καθώς και οι πλεύσιμοι ποταμοί

Κοίτη: η φυσική ή διευθετημένη διαμόρφωση του εδάφους στην οποία ρέει μόνιμα ή περιοδικά νερό του υδατορεύματος. Δεν περιλαμβάνονται στην έννοια αυτή οι περιοχές μόνιμης ή περιοδικής κατάκλυσης των υγροτόπων.

Οχθη: η γραμμή που ενώνει τα άνω άκρα κάθε πρανούς της κοίτης (φρύδι), όπου αυτή αποτελεί διακριτό μορφολογικό στοιχείο του περιβάλλοντος χώρου του υδατορεύματος.

Λεκάνη απορροής ενός υδατορεύματος ορίζεται ως το σύνολο της τοπογραφικής επιφάνειας που αποστραγγίζεται από αυτό το υδατόρευμα και τους παραποτάμους του. Κάθε λεκάνη απορροής περιορίζεται και χωρίζεται από τις άλλες που την περιβάλλουν από τη γραμμή διαχωρισμού των νερών ή υδροκρίτη, που ακολουθεί τις κορυφογραμμές του εδαφικού ανάγλυφου

Πλημμύρα (flood): Η προσωρινή κάλυψη του εδάφους από νερό το οποίο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, δεν υφίσταται. Περιλαμβάνει πλημμύρες από:

- ποτάμια, ορεινούς χείμαρρους και υδατορεύματα εφήμερης ροής
- εκφορτίσεις πηγών
- συστήματα απορροής ομβρίων και παντοροϊκά δίκτυα ανύψωση της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές καταστροφές μεγάλων υδραυλικών έργων (θραύσεις αναχωμάτων, φραγμάτων).

Πλημμυρική επικινδυνότητα (flood hazard): Η εμφάνιση πλημμύρας σε συγκεκριμένο χώρο (ποσοτικοποιούμενη μέσω του βάθους νερού, της ταχύτητας ροής ή άλλου χαρακτηριστικού υδρολογικού ή υδραυλικού μεγέθους), που αντιστοιχεί σε δεδομένη περίοδο επαναφοράς. ☐

Πλημμυρική διακινδύνευση (flood risk): Οι δυνητικές αρνητικές συνέπειες για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται με την συγκεκριμένη πλημμύρα, στο συγκεκριμένο χώρο (Ευστρατιάδης και Μαμάσης, 2011)

Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ευρώπη

Η Ευρώπη έχει υποστεί έντονα πλημμυρικά φαινόμενα, τα οποία έχουν αποβεί καταστροφικά. Οι περιοχές της Ευρώπης που είναι οι πιο επικίνδυνες σε επεισόδια πλημμυρών είναι οι Μεσογειακές ακτές, οι παραθαλάσσιες πεδιάδες της Βόρειας Γερμανίας, η κεντρική Ιρλανδία, οι κοιλάδες του Ρήνου, του Σηκουάνα και του Λίγηρα, μερικές παραθαλάσσιες περιοχές της Πορτογαλίας, οι χαμηλές περιοχές της Ολλανδίας, του Πο στην Ιταλία, οι κοιλάδες των Άλπεων (αλπικά λιβάδια) και οι κοιλάδες του Δούναβη στη Ρουμανία, και του Δούναβη και της Τίσα στην Ουγγαρία.

Οι δύο κύριοι λόγοι για τις συνεχώς αυξανόμενες επιδράσεις των πλημμυρών στην Ευρώπη είναι οι εξής:

Ο ανθρώπινος παράγοντας, δηλαδή η ανάπτυξη των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στις πλημμυρικές ζώνες κινδύνου

Επίσης, η ακατάλληλη διαχείριση των ποταμών και των κατασκευών σε περιοχές που κινδυνεύουν από πλημμύρες.

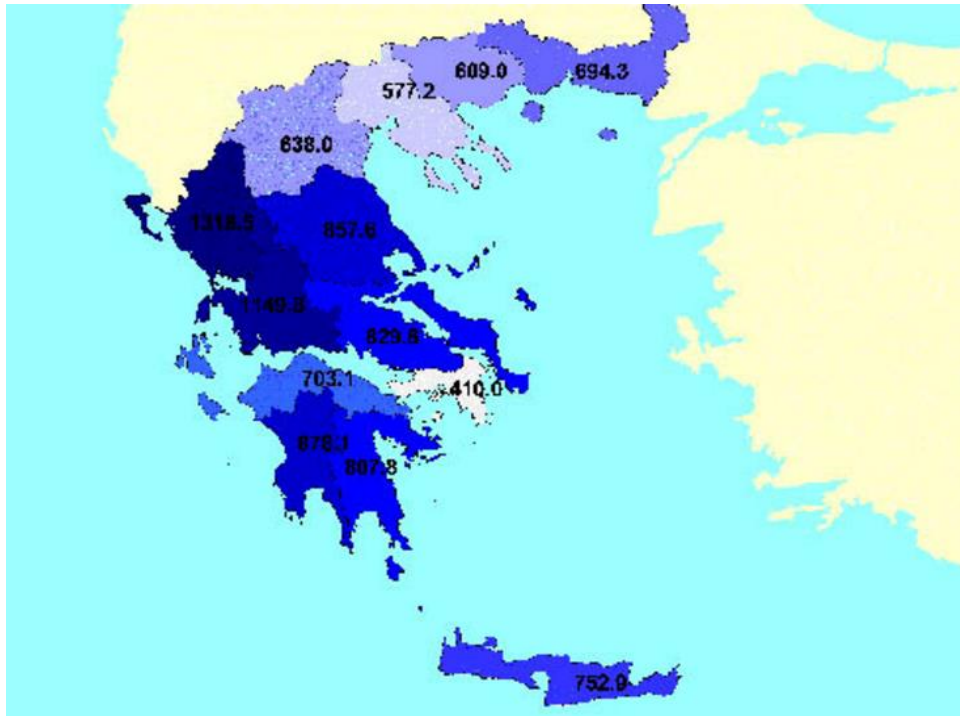
Τέλος, η εντεινόμενη απερίμωση της ηπείρου, που είναι παραδομένη στο δραστικό περιορισμό των φυσικών οικοσυστημάτων και τη μαζική κοπή δένδρων, στις πυρκαγιές και σε δραστηριότητες που βλάπτουν τη φυσικό περιβάλλον.

Η μεταβολή του κλίματος, με πιθανή την αύξηση της κλίμακας και της συχνότητας εμφάνισης καταρρακτωδών βροχών - πλημμυρών και τη δυνητική άνοδο της στάθμης της θάλασσας εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας.

Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα

Η Ελλάδα πλήττεται κατά κύριο λόγο από πλημμυρικά γεγονότα που προκύπτουν ως απόρροια της έντονης γεωγραφικής μεταβλητότητας των κλιματικών στοιχείων λόγω της συνύπαρξης ανεπτυγμένης ακτογραμμής και ορογραφίας.

Η οροσειρά της Πίνδου που διασχίζει τη χώρα από βορειοδυτικά προς νότια, παίζει σημαντικό ρόλο στις διαδικασίες βροχόπτωσης και απορροής στην Ελλάδα. Η μέση ετήσια βροχόπτωση ξεπερνάει τα 1800 mm στις ορεινές περιοχές της δυτικής Ελλάδας, ενώ στα ανατολικά διαμερίσματα της χώρας η τιμή αυτή μπορεί να "πέσει" ακόμη και στα 400 mm, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Μέση υπερετήσια βροχόπτωση (mm) για την περίοδο 1960-1990 ανά υδατικό διαμέρισμα (Πηγή: ΕΤΥΜΠ).

Η τελευταία διαπίστωση εξηγεί τις πιο συχνές περιόδους ξηρασίας στο ανατολικό μέρος της χώρας καθώς και σε πολλά νησιά του Αιγαίου, όπου τα προβλήματα ελλείψεως νερού είναι σχεδόν μόνιμα. Αυτό όμως, δεν σημαίνει ότι εξαιρετικά γεγονότα πλημμυρών είναι ιδιαίτερα σπάνια στο σχετικά ξηρό ανατολικό μέρος της Ελλάδας. Αντίθετα, λόγω του κλιματικού καθεστώτος, σε συνδυασμό με την γεωμορφολογία και την επιφανειακή βλάστηση, παρατηρούνται περισσότερες καταστροφικές πλημμύρες στην ανατολική Ελλάδα από ότι στην "υγρή" δυτική Ελλάδα.

2.2 Κοινοτική οδηγία 2007/60 για τη διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου

Στα πλαίσια κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων, η οδηγία 2007/60/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης επιβάλλει την ανάπτυξη σχεδίων διαχείρισης λεκάνης απορροής ποταμού για κάθε λεκάνης, με στόχο την επίτευξη καλής οικολογικής και χημικής κατάστασης, και τον μετριασμό των επιπτώσεων των συμβάντων πλημμύρας.

Προκειμένου να εξασφαλισθεί αποτελεσματικό μέσο ενημέρωσης καθώς και πολύτιμη βάση για τον καθορισμό των προτεραιοτήτων και τη λήψη περαιτέρω τεχνικών, οικονομικών και πολιτικών αποφάσεων σχετικά με τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, είναι απαραίτητο να προβλεφθεί η καθιέρωση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας και χαρτών κινδύνων

πλημμύρας στους οποίους να εμφανίζονται οι δυνητικές αρνητικές συνέπειες που συνδέονται με διαφορετικά σενάρια πλημμύρας καθώς και πληροφορίες σχετικά με ενδεχόμενες πηγές περιβαλλοντικής ρύπανσης, ως συνέπεια πλημμύρας. Στο πλαίσιο αυτό, τα κράτη μέλη θα πρέπει να επανεκτιμήσουν τις δραστηριότητες που έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των κινδύνων πλημμύρας.

Τα σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας θα πρέπει να εστιάζονται στην πρόληψη, στην προστασία και στην ετοιμότητα. Προκειμένου να δοθεί στους ποταμούς περισσότερος χώρος, τα εν λόγω σχέδια θα πρέπει να εξετάζουν, όπου είναι δυνατόν, τη διατήρηση ή/και αποκατάσταση πλημμυρικών περιοχών, καθώς και μέτρα πρόληψης και μείωσης των ζημιών που προκαλούνται στην υγεία των ανθρώπων, στο περιβάλλον, στην πολιτιστική κληρονομιά και στην οικονομική δραστηριότητα.

Η προκαταρκτική αυτή αξιολόγηση κινδύνου πλημμύρας, βασιζόμενη σε διαθέσιμες ή ευκόλως υπολογιζόμενες πληροφορίες, όπως καταγραφές και μελέτες για μακροπρόθεσμες εξελίξεις, ιδίως επιπτώσεις από την αλλαγή του κλίματος στην περίπτωση πλημμυρών, διεξάγεται για να αξιολογηθούν οι δυνητικοί κίνδυνοι. Στην αξιολόγηση περιλαμβάνονται τα εξής:

Χάρτες της περιοχής της λεκάνης απορροής του ποταμού στην κατάλληλη κλίμακα, οι οποίοι περιλαμβάνουν τα όρια των λεκανών και των υπολεκανών απορροής ποταμών, και εφόσον υπάρχουν, παράκτιων ζωνών, οι οποίοι περιγράφουν τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά και τη χρήση γης

Περιγραφή των πλημμυρών οι οποίες σημειώθηκαν κατά το παρελθόν και είχαν σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στις ανθρώπινες ζωές, στις οικονομικές δραστηριότητες και στο περιβάλλον, όταν υπάρχει ακόμη πιθανότητα παρόμοιων μελλοντικών συμβάντων, συμπεριλαμβανομένων της έκτασης της πλημμύρας, των οδών αποστράγγισης και της αξιολόγησης των αρνητικών επιπτώσεων που προκάλεσαν.

Αξιολόγηση των δυνητικών αρνητικών συνεπειών των μελλοντικών πλημμυρών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική δραστηριότητα, λαμβανομένων υπόψη στο μέτρο του δυνατού ζητημάτων όπως η τοπογραφία, η θέση των υδατορρευμάτων και τα γενικά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τους, συμπεριλαμβανομένων των πλημμυρικών περιοχών ως φυσικών επιφανειών κατακράτησης, η αποτελεσματικότητα των υφισταμένων τεχνητών υποδομών προστασίας από τις πλημμύρες, η θέση των κατοικημένων περιοχών και των περιοχών οικονομικής

δραστηριότητας καθώς και οι μακροπρόθεσμες εξελίξεις, συμπεριλαμβανομένων των επιδράσεων της αλλαγής του κλίματος στη συχνότητα επέλευσης των συμβάντων πλημμύρας.

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

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

Τα κράτη μέλη καταρτίζουν, σε επίπεδο περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού τους χάρτες αυτούς, στην πλέον κατάλληλη κλίμακα για τις περιοχές που προσδιορίζονται.

Για κάθε σενάριο παρατίθενται τα ακόλουθα στοιχεία:

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

Τέλος, θα πρέπει συμπεριλαμβάνονται σχέδια διαχείρισης της επικινδυνότητας της πλημμύρας, δηλαδή, θα προτείνονται μέτρα μείωσης της πιθανότητας της πλημμύρας και των συνεπειών της, θα εστιάζονται στην απαγόρευση μη αειφόρων πρακτικών ως προς τις χρήσεις γης, αποτρέποντας, για παράδειγμα, την οικοδόμηση σε περιοχές επιρρεπείς σε πλημμύρες. Τα σχέδια θα πρέπει επίσης να προβλέπουν τρόπους μείωσης των Δυνητικών επιπτώσεων.

Μία άλλη σημαντική πτυχή των σχεδίων διαχείρισης της επικινδυνότητας είναι η ανάγκη προετοιμασίας του πληθυσμού για το ενδεχόμενο της πλημμύρας.

Τέλος, οι εκτιμήσεις επικινδυνότητας για πλημμυρικά φαινόμενα θα επανεξετάζονται και θα αναπροσαρμόζονται ανάλογα με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής καθώς και την ένταση και τη συχνότητα των πλημμυρικών φαινομένων μακροπρόθεσμα.

2.3 Θεσμικό Πλαίσιο

Στην Ελλάδα, για τη σύγχρονη διαχείριση των υδάτων δημιουργήθηκε ο Νόμος 3199/03, που αποτέλεσε ουσιαστικά την προσπάθεια εφαρμογής της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60) στο Ελληνικό Δίκαιο.

Σε μεγάλο βαθμό είναι γραμμένος σύμφωνα με τους άξονες και τις επιδιώξεις της Οδηγίας του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου. Ο Νόμος αποτελείται από 5 κύρια κεφάλαια που συνίστανται κατά σειρά σε:

- Βασικές έννοιες Προστασίας και Διαχείρισης των υδάτων – Πεδίο εφαρμογής.
- Φορείς και Όργανα
- Προστασία και Διαχείριση των Υδάτων
- Χρήση των Υδάτων
- Κυρώσεις

Ο Νόμος 3199/03 αποτελεί μέχρι και σήμερα, το σημαντικότερο θεσμικό εργαλείο για την ολοκληρωμένη και βιώσιμη Προστασία και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων.

Τον Ιούνιο του 2010, υπεγράφη Κοινή Υπουργική Απόφαση για την Αξιολόγηση και Διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Η ΚΥΑ αυτή ενσωματώνει όλες τις κατευθύνσεις της Οδηγίας 2007/60/EK στο Ελληνικό Δίκαιο.

Τα τρία βασικά της κεφάλαια της ΚΥΑ διαπραγματεύονται τα εξής:

Στο Κεφάλαιο Α' -Γενικές Διατάξεις-, γίνεται μνεία, μεταξύ άλλων, σε ορισμούς σχετικά με τις πλημμύρες καθώς και στις αρμόδιες για την εφαρμογή της ΚΥΑ Αρχές.

Στο Κεφάλαιο Β' -Ειδικές Διατάξεις Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας-, τα άρθρα με τη μεγαλύτερη βαρύτητα είναι τα 4, 5, 6, όπου κατά σειρά αναφέρονται στην Προκαταρκτική Αξιολόγηση, τους Χάρτες Επικινδυνότητας και Χάρτες Κινδύνων Πλημμύρας και στα Σχέδια Διαχείρισης.

Τέλος, στο Κεφάλαιο Γ' -Τελικές Διατάξεις, αναφορά πρέπει να γίνει στο άρθρο 11, που περιλαμβάνεται το Παράρτημα, και ειδικά στην παράγραφο Α (Σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας), εδάφιο Ι (στοιχεία των πρώτων σχεδίων διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας), και ΙΙ (περιγραφή της εφαρμογής του σχεδίου).

2.4 Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε

Στη παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω προγράμματα Η/Υ στις αντίστοιχες εκδόσεις:

ArcGis 10.1: ένα σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας για εργασίες με χάρτες και άλλα γεωγραφικά στοιχεία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή και την χρήση χαρτών, για την σύνθεση γεωγραφικών δεδομένων και την διαχείριση βάσεων δεδομένων GIS, και είναι κατασκευής της εταιρείας ESRI.

HEC-GeoHMS: πρόκειται για μία επέκταση της υδρολογικής μοντελοποίησης η οποία αναπτύχθηκε ως εργαλειοθήκη γεωχωρικής υδρολογίας. Χρησιμοποιείται για την δημιουργία των στοιχείων εισαγωγής στο πρόγραμμα HEC-HMS, είναι κατασκευής του Κέντρου Τεχνικής Υδρολογίας (Hydrologic Engineering Center – HEC) του Σώματος Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού (US Army Corps of Engineers USACE).

HEC-GeoRAS: πρόκειται για μία επέκταση της υδραυλικής μοντελοποίησης η οποία αναπτύχθηκε ως εργαλειοθήκη γεωχωρικής υδραυλικής. Χρησιμοποιείται για την δημιουργία των στοιχείων εισαγωγής στο πρόγραμμα HEC-RAS, είναι κατασκευής του Κέντρου Τεχνικής Υδρολογίας (Hydrologic Engineering Center – HEC) του Σώματος Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού (US Army Corps of Engineers USACE).

HEC-HMS 3.5: πρόγραμμα υδρολογικής προσομοίωσης (Hydrology Modeling system) παραγωγής του Κέντρου Τεχνικής Υδρολογίας (Hydrologic Engineering Center – HEC) του Σώματος Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού (US Army Corps of Engineers USACE).

HEC-RAS 5.0: πρόγραμμα ποτάμιας ανάλυσης (River Analysis System) παραγωγής του Κέντρου Τεχνικής Υδρολογίας (Hydrologic Engineering Center – HEC) του Σώματος Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού (US Army Corps of Engineers USACE)

Microsoft Office 2007 (Word, Excell, Power Point) κατασκευής της εταιρείας Microsoft.

Google Earth: πρόγραμμα απεικόνισης της χωρικής πληροφορίας κατασκευής της εταιρείας Google.

2.4.1 Υδρολογικά μοντέλα και υδραυλικά μοντέλα

Ο υδραυλικός μηχανικός καλείται να δώσει απαντήσεις σε πολλά ερωτήματα, τα οποία σχετίζονται με την κίνηση του νερού και την επίδραση στις υφιστάμενες κατασκευές. Κλασικό πεδίο ενδιαφέροντος αποτελεί η επεξεργασία της συσχέτισης βροχής – απορροής, που ενδεχομένως οδηγεί στην εκδήλωση πλημμυρικών γεγονότων. Στην ιδανική περίπτωση, υπάρχοντα αρχεία με χρονοσειρές του υδρολογικού ισοζυγίου κρίνονται επαρκή για την εκπόνηση μελετών. Ωστόσο, στην πραγματικότητα, επειδή σπανίως υπάρχουν επαρκή δεδομένα γίνονται προβλέψεις και μοντελοποιήσεις, είτε για τη συμπλήρωση στοιχείων, είτε για την εκτίμηση της μελλοντικής εξέλιξης ενός φαινομένου. Σε τέτοιες περιπτώσεις δημιουργούνται μοντέλα τα οποία δίνουν πληροφορίες συσχετίζοντας κάτι γνωστό - input (πχ ένα συγκεκριμένο επεισόδιο βροχόπτωσης) με κάτι άγνωστο - output (π.χ. η απορροή που συνεπάγεται το επεισόδιο αυτό). Η έννοια του υδρολογικού μοντέλου θα μπορούσε να αποδοθεί ως ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων, οι οποίες απεικονίζουν κατά προσέγγιση το σύνολο των αλληλοσυσχετιζόμενων φαινομένων, που υπεισέρχονται στη διαδικασία μετατροπής της νετόπτωσης σε απορροή (Λουκάς και Μυλόπουλος 2005). Γενικά, η λογική της ανάπτυξης και εφαρμογής των υδρολογικών μοντέλων, ανεξαρτήτως πολυπλοκότητας, ακολουθεί τα εξής πέντε βήματα.

- Προσδιορίζονται οι παράμετροι, που θα ληφθούν υπόψη, αξιολογώντας τη σημασία και τη βαρύτητα που έχουν.

- Χρησιμοποιούνται μαθηματικές εξισώσεις περιγραφής των διαδικασιών του υδρολογικού συστήματος, οι λύσεις των οποίων θα πρέπει να βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων βάσει διαθέσιμων δεδομένων.
- Προετοιμάζονται τα δεδομένα (μετεωρολογικά και υδρολογικά καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά της υπό μελέτη υδρολογικής λεκάνης) που θα χρησιμοποιηθούν.
- Ύστερα το σύστημα πρέπει να βαθμονομείται με βάση διαθέσιμα δεδομένα πεδίου, όπως μετρηθείσες παροχές ποταμών.
- Τέλος, εκτελείται το υδρολογικό μοντέλο για την προσομοίωση της απόκρισης της υδρολογικής λεκάνης.

Ακολουθως, δίνεται μια διαγραμματική απεικόνιση της ως άνω σχολιασθείσας λογικής δόμησης ενός υδρολογικού μοντέλου, ως αλληλουχία εισαγωγής δεδομένων, επεξεργασίας και εξαγωγής αποτελεσμάτων.

Τα υδραυλικά μοντέλα ανάλογα με τη διάσταση των διανυσμάτων των υπολογιζόμενων υδραυλικών χαρακτηριστικών διακρίνονται γενικά σε μονοδιάστατης, δισδιάστατης και τρισδιάστατης ανάλυσης. Τα μονοδιάστατα μοντέλα υδραυλικής προσομοίωσης διόδευσης πλημμύρας υπολογίζουν το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατά περίπτωση για συνθήκες μόνιμης ομοιόμορφης, μόνιμης ανομοιόμορφης, ή μη μόνιμης – απότομα ή βαθμιαία - μεταβαλλόμενης ροής. Τα μοντέλα αυτά συνήθως χρησιμοποιούν την εξίσωση Manning και η επίλυση του μοντέλου αφορά τον υπολογισμό του μέσου βάθους ροής και της μέσης ταχύτητας κάθετα στην διατομή του ποταμού, η οποία κατανέμεται ομοιόμορφα στη διατομή (ή σε τμήματα αυτής) με κοινό συντελεστή τραχύτητας. Με βάση την τοπογραφία της περιοχής παράγεται ο πλημμυρικός χάρτης, με πλημμυρικές περιοχές εκείνες με χαμηλότερο υψόμετρο από εκείνο της υπολογισμένης ελεύθερης επιφάνειας του νερού. Τα δισδιάστατα μοντέλα επιχειρούν την προσομοίωση των πλημμυρικών φαινομένων στις διαστάσεις μήκους και πλάτους. Γίνεται εκτίμηση του βάθους ροής σε κάθε σημείο της περιοχής μελέτης αλλά και ο υπολογισμός της κατανομής της ταχύτητας ροής στις δύο διαστάσεις, κατά την ροή του ποταμού και εγκάρσια αυτού. Τα τρισδιάστατα μοντέλα, χρησιμοποιούνται σε πιο σύνθετες υδραυλικές εφαρμογές, όπως σε περιπτώσεις όπου η κατακόρυφη ταχύτητα είναι σημαντική – αναλύσεις υδραυλικών αλμάτων, σχεδιασμό υπερχειλιστών κ.α.. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιώντας σύνθετες υπολογιστικές σχέσεις επιτυγχάνοντας τον ακριβέστερο υπολογισμό της ροής. Μια άλλη κατηγορία μοντέλων αποτελούν τα ψευδο-δισδιάστατα μοντέλα, τα οποία επιλύουν ξεχωριστά την μονοδιάστατη εξίσωση της ορμής στην κύρια διεύθυνση της ροής αλλά και στην διεύθυνση κάθετα σε αυτήν. Με αυτόν τον τρόπο

συνδυάζουν τον σύντομο υπολογιστικό χρόνο των μοντέλων μονοδιάστατης ανάλυσης παρέχοντας επιπλέον πληροφορία στην δεύτερη διάσταση. Αυτού του είδους τα μοντέλα έχουν αποδειχτεί εξαιρετικά χρήσιμα στην προσομοίωση πλημμυρικών φαινομένων (Horritt and Bates, 2002), διότι (α) οι περιοχές που πλημμυρίζουν είναι συνήθως πολλών km², αυξάνοντας πολύ το υπολογιστικό κόστος, (β) η ορμή της ροής στην κύρια διεύθυνσή της αναμένεται να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή στην εγκάρσια, με αποτέλεσμα ο υπολογισμός της αλληλεπίδρασης των δύο διευθύνσεων να έχει μικρή βαρύτητα στην τελική κατεύθυνση του πλημμυρικού κύματος παράλληλα όμως αυξάνοντας το υπολογιστικό κόστος.

2.4.2 HEC-HMS

Το λογισμικό HEC- HMS δημιουργήθηκε από το Κέντρο Τεχνικής Υδρολογίας του Ινστιτούτου Υδατικών Πόρων που ανήκει στο Σώμα Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού και είναι σχεδιασμένο ώστε να προσομοιώνει τις υδρολογικές διαδικασίες βροχής απορροής για δενδριτικού τύπου λεκάνες απορροής. Είναι σχεδιασμένο ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε μια μεγάλη ποικιλία γεωγραφικών περιοχών για να επιλύσει το μεγάλο εύρος των προβλημάτων που προκύπτουν, όπως προβλήματα παροχής ύδατος και υδρολογίας πλημμυρών σε μικρές έως μεγάλες αστικές ή φυσικές λεκάνες απορροής. Τα υδρογραφήματα που παράγονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευθέως ή σε συνδυασμό με άλλα λογισμικά για μελέτες που περιλαμβάνουν διαθεσιμότητα νερού, αστικής αποστράγγισης, πρόγνωση πλημμυρών, επιπτώσεις μελλοντικής αστικής ανάπτυξης, σχεδιασμός υπερχειλιστή φράγματος, μείωση καταστροφών από πλημμύρες κ.ά.

Το πρόγραμμα αποτελεί ένα γενικό σύστημα μοντελοποίησης ικανό να αναπαραστήσει πολλές διαφορετικές μεταξύ τους λεκάνες. Το μοντέλο προσομοίωσης κατασκευάζεται απομονώνοντας τον υδρολογικό κύκλο σε μικρά και εύκολα διαχειρίσιμα τμήματα, ώστε ο μελετητής να μπορεί να επιλέξει ποια διαδικασία προσομοίωσης ταιριάζει καλύτερα στις απαιτήσεις και στόχους της μελέτης του (Scharffenberg and Fleming, 2010). Οι δυνατότητες προσομοίωσης του HEC- HMS περιλαμβάνουν τα εξής:

- Φυσική προσομοίωση της λεκάνης απορροής και διαχείριση των συνιστωσών της
- Μοντελοποίηση υπολεκανών (πρότυπα απωλειών, επιφανειακής και βασικής απορροής, επιφανειακής απορροής)
- Μοντελοποίηση υδατορευμάτων (μέθοδοι διόδευσης) και ταμιευτήρων (σχέσης επιφάνειας- αποθέματος, χρήση υπερχειλιστών, κ.ά)
- Προσομοίωση μετεωρολογικού μοντέλου
- Υπολογισμός υδρολογικών παραμέτρων
- Υδρολογικός σχεδιασμός

Το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS ανήκει στα προσδιοριστικά παραμετρικά μοντέλα και βασίζεται στη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος για τη μετατροπή της βροχής σε απορροή. Η αναπαράσταση των διαδικασιών βροχής-απορροής απλοποιείται και μοντελοποιείται σε περιβάλλον HEC-HMS.

Το HEC-HMS χωρίζει τον υδρολογικό κύκλο σε επιμέρους συνιστώσες και αντιμετωπίζει την καθεμία ξεχωριστά. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τα μαθηματικά μοντέλα για κάθε μια διαδικασία χωριστά και να κάνει τους δικούς του συνδυασμούς ή ακόμη και να κάνει σύγκριση μεταξύ των διαφόρων προτύπων. Φυσικά, κάθε μαθηματικό πρότυπο έχει συγκεκριμένους περιορισμούς και δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε περίπτωση. Η σωστή επιλογή επαφίεται στην κρίση του μελετητή και τους στόχους που έχει θέσει για τη μελέτη του, καθώς επίσης και στα διαθέσιμα δεδομένα.

Μαθηματικά πρότυπα υπολογισμού

Τα μαθηματικά πρότυπα που διατίθενται στο HEC-HMS χωρίζονται σε:

- Πρότυπα υπολογισμού απωλειών βροχής
- Πρότυπα υπολογισμού άμεσης απορροής
- Πρότυπα υπολογισμού βασικής απορροής
- Πρότυπα διόδευσης πλημμυρογραφήματος

2.4.2.1 Πρότυπο υπολογισμού απωλειών βροχής

Τα πρότυπα απωλειών βροχής που διαθέτει το HEC-HMS είναι τα εξής:

➤ **Μοντέλα απωλειών αρχικής απώλειας και ελλείμματος με σταθερό ρυθμό**

Σε αυτά τα μοντέλα, ο μέγιστος δυνατός ρυθμός των απωλειών της βροχόπτωσης, f_c , είναι σταθερός κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος. Έτσι, αν p_t είναι το μέσο χωρικό ύψος κατά τη διάρκεια του διαστήματος από t σε Δt , το πλεόνασμα p_{e_t} κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος είναι:

$$p_{e_t} = \begin{cases} p_t - f_c & , p_t > f_c \\ 0 & , p_t \leq f_c \end{cases} \quad (2.1)$$

Μία αρχική απώλεια, I_a , προστίθεται στο μοντέλο για να αναπαραστήσει την υδαταποθήκευση λόγω φυτοκάλυψης ή λόγω εδαφικών κοιλωμάτων. Η υδαταποθήκευση λόγω φυτοκάλυψης είναι αποτέλεσμα της απορρόφησης της κατακρήμνισης από την εδαφική κάλυψη. Η υδαταποθήκευση λόγω εδαφικών κοιλωμάτων είναι αποτέλεσμα των κοιλοτήτων

στην τοπογραφία της λεκάνης: το νερό παγιδεύεται σε αυτές και στην συνέχεια διηθεί ή εξατμίζεται. Αυτή η απώλεια συμβαίνει πριν την εμφάνιση απορροής. Μέχρι η συνολική βροχόπτωση στην διαπερατή επιφάνεια να υπερβεί τον όγκο των αρχικών απωλειών, δεν υπάρχει απορροή.

➤ **Απώλειες εκθετικού ρυθμού**

Αυτή η μέθοδος συσχετίζει τον ρυθμό απωλειών με την ένταση της βροχής και τις συσσωρευμένες απώλειες. Οι απώλειες αυτές αντιπροσωπεύουν την υγρασία του εδάφους. Οι εξισώσεις των απωλειών αυτών είναι:

$$ALOSS = (AK + DLTKR) PRCP^{ERAIN} \quad (2.2)$$

$$DLTKR = 0,2 DLTKR \left(1 - \frac{CUM}{DLTKR} \right)^2 \text{ για } CUM \leq DLTKR \quad (2.3)$$

$$AK = \frac{STRKR}{RTIOL^{0,1CUM}} \quad AK = STRKR / (RTIOL^{0,1CUM}) \quad (2.4)$$

όπου,

ALOSS: ο εν δυνάμει ρυθμός απωλειών (mm) ανά ώρα κατά την διάρκεια του χρονικού βήματος,

AK: είναι ο συντελεστής των ρυθμών απωλειών στην αρχή του χρονικού βήματος, και

DLTKR: είναι η στιγμιαία αύξηση του συντελεστή ρυθμού απωλειών κατά την διάρκεια των DLTKR ιντσών των συσσωρευμένων απωλειών, CUM. Το DLTKR είναι η ποσότητα των αρχικών συσσωρευμένων απωλειών κατά την διάρκεια των οποίων ο συντελεστής του ρυθμού απωλειών αυξάνεται. Αυτή η παράμετρος είναι συνάρτηση της αρχικής έλλειψης υγρασίας του εδάφους και εξαρτάται από την καταιγίδα.

STRKR: είναι η αρχική τιμή ενός συντελεστή απωλειών στην εκθετικώς μειούμενη καμπύλη των απωλειών βροχής. Η αρχική τιμή θεωρείται συνάρτηση της ικανότητας διήθησης.

RTIOL: ο λόγος του συντελεστή απωλειών στην εκθετική καμπύλη προς αυτόν που αντιστοιχεί σε 10 ίντσες ή χιλιοστά συσσωρευμένων απωλειών. Αυτός ο όρος είναι συνάρτηση της ικανότητας του εδάφους να απορροφά την βροχόπτωση και είναι σταθερός για ομογενής περιοχές.

ERAIN είναι ο εκθέτης της συνάρτησης των απωλειών ο οποίος αντανακλά την επιρροή της έντασης της κατακρήμνισης στις απώλειες της λεκάνης. οι τιμές του κυμαίνονται από 0 έως 1.

➤ Μοντέλο απωλειών Green and Ampt

Το μοντέλο αυτό είναι ένα εννοιολογικό μοντέλο της διήθησης και της κατακρήμνισης μιας λεκάνης απορροής, το οποίο υπολογίζει τις απώλειες της κατακρήμνισης μιας διαπερατής περιοχής σε ένα χρονικό διάστημα :

$$f_t = K \left[\frac{1 + (\Phi - \theta_i) S_f}{F_t} \right] \quad (2.5)$$

όπου,

f_t = οι απώλειες την περίοδο t ,

K = η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού,

$(\Phi - \theta_i)$ = το έλλειμμα όγκου υγρασίας,

S_f = εισαγωγή βρεχόμενου μετώπου,

F_t = αθροιστική απώλεια την στιγμή t .

Το πλεόνασμα της κατακρήμνισης στην διαπερατή περιοχή είναι η διαφορά του μέσου χωρικού ύψους και της απώλειας που υπολογίστηκε με την παραπάνω εξίσωση. Το μοντέλο περιλαμβάνει μια αρχική αφαίρεση. Αυτή η αρχική κατάσταση αναπαριστά την επιφανειακή συγκέντρωση νερού, η οποία αλλιώς δεν θα υπήρχε στο μοντέλο.

Το μοντέλο Green and Ampt απαιτεί τον ορισμό των ακόλουθων παραμέτρων:

- Αρχικές απώλειες: Είναι συνάρτηση της υγρασίας της λεκάνης στην αρχή της βροχόπτωσης. Μπορεί να εκτιμηθεί όπως η αρχική αφαίρεση σε άλλα μοντέλα απωλειών.
- Υδραυλική αγωγιμότητα: Ο παρακάτω πίνακας δίνει εκτιμήσεις αυτής της παραμέτρου σαν συνάρτηση της εδαφικής υφής (texture class), η οποία μπορεί να βρεθεί από μια έρευνα εδάφους.
- Είσοδος βρεχόμενου μετώπου: Μπορεί να εκτιμηθεί ως συνάρτηση της κατανομής του μεγέθους των πόρων, η οποία μπορεί να σχετιστεί με την εδαφική υφή (texture class).
- Έλλειμμα όγκου υγρασίας: Είναι το $(\Phi - \theta_i)$ στην εξίσωση, το πορώδες του εδάφους μείον το αρχικό περιεχόμενο νερού. Οι Rawls and Bransiek (1982) και Rawls et al. (1982) σχετίσαν το πορώδες με την εδαφική υφή. Το αρχικό εδαφικό περιεχόμενο ύδατος μπορεί να σχετίζεται με έναν αρχικό δείκτη βροχόπτωσης.

➤ **Μοντέλο συνεχούς υπολογισμού της εδαφικής υγρασίας (SMA model soil moisture accounting)**

Το μοντέλο προσομοιώνει την κίνηση του νερού από την αποθήκευση του στην βλάστηση, στην εδαφική επιφάνεια, στο προφίλ του εδάφους, και στα στρώματα του υπόγειου υδροφορέα. Με ορισμένη την κατακρήμνιση και την πιθανή εξατμισοδιαπνοή, το μοντέλο υπολογίζει την επιφανειακή απορροή, την υπόγεια ροή, τις απώλειες της εξατμισοδιαπνοής, και την βαθειά διήθηση σε όλη την έκταση της λεκάνης.

➤ **Μοντέλο απωλειών αριθμού καμπύλης SCS**

Με βάση τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα επιλέχθηκε η μέθοδος SCS για τον υπολογισμό των απωλειών βροχής. Με βάση τον γεωλογικό χάρτη και τις χρήσεις γης προσδιορίζεται ο συντελεστής CN (Curve Number) για κάθε υπολεκάνη απορροής.

Στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν μετρήσεις για τις διάφορες απώλειες, η εκτίμηση του περισσεύματος της βροχής αποτελεί ουσιαστικά δύσκολο πρόβλημα. Η υπηρεσία Soil Conservation Service των ΗΠΑ παρουσίασε μια μέθοδο υπολογισμού του ύψους περισσεύματος της βροχής από μια δεδομένη βροχή με τη βοήθεια τριών μεταβλητών: του ύψους βροχής, της αρχικής κατάστασης υγρασίας του εδάφους και του υδρολογικού σύμπλοκου εδάφους καλύμματος (SCS 1972). Η μέθοδος SCS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του περισσεύματος της βροχής ή την εκτίμηση της συνολικής άμεσης απορροής που προήλθε από βροχή συγκεκριμένης διάρκειας.

Σύμφωνα με την μέθοδο SCS έγινε η εκτίμηση ότι οι αρχικές απώλειες (συγκράτησης και εξατμησης είναι 20% των συνολικών απωλειών, δηλαδή της διαφοράς μεταξύ βροχής και περισσεύματος βροχής.

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq 0.2S \\ \frac{(h-0.2S)^2}{h+0.8S} & h > 0.2S \end{cases} \quad (2.6)$$

όπου:

h_e : το ενεργό ύψος βροχής, mm

h : το συνολικό ύψος βροχής, mm

S : δυνητικά μέγιστη κατακράτηση, mm

Οι συνολικές απώλειες εκφράζονται με μια παράμετρο, γνωστή ως αριθμός καμπύλης CN, με την εξίσωση:

$$S (mm)=254\left(\frac{100}{CN}-1\right) \quad (2.7)$$

Με βάση το συνολικό ύψος των προηγούμενων πέντε ημερών τα εδάφη διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες που χαρακτηρίζουν την αρχική κατάσταση υγρασίας του εδάφους (Πίνακας 2.1)

Πίνακας 2.1: Κατάταξη εδαφών με βάση την αρχική υγρασία εδάφους (Τσακίρης 1995)

Κατηγορία	Συνολικό ύψος βροχής 5 προηγούμενων ημερών	
	Χειμερινή περίοδος	Περίοδος Βλάστησης
I	<13	<35
II	13-28	35-53
III	>28	>53

Πίνακας 2.2: Τύποι εδαφών κατά SCS ανάλογα με τη διαπερατότητά τους (Τσακίρης 1995)

Κατηγορία	Χαρακτηριστικά
A	Εδάφη με υψηλή βασική διηθητικότητα και υψηλή διαπερατότητα. Συνήθως αμμώδη ή χαλικώδη εδάφη
B	Εδάφη με μέτρια βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα που αποτελούνται από μέσης μέχρι ελαφράς σύστασης εδάφη
C	Εδάφη με μικρή βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Περιλαμβάνουν εδάφη μέσης μέχρι βαριάς σύνθεσης
D	Εδάφη με πολύ μικρή βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Περιλαμβάνουν κυρίως αργιλώδη εδάφη, εδάφη με υψηλή στάθμη υπόγειου νερού ή αδιαπέρατο στρώμα

Πίνακας 2.3: Ο αριθμός καμπύλης απορροής CN (Curve Number) για την κάθε κατηγορία εδαφών ανάλογα με την χρήση γης (Τσακίρης 1995)

Απλοποιημένες χρήσεις γης	Curve Number			
	A	B	C	D
Αστική Δόμηση	72	82	88	91
Καλλιέργειες	62	74	82	85
Δάση Κωνοφόρων	35	58	73	80
Ποώδης και Θαμνώδης Βλάστηση-Χέρσες Περιοχές	76	85	90	93

Ένας σύνθετος αριθμός καμπύλης, για μια λεκάνη που περιλαμβάνει περισσότερες από μία χρήσεις γης ή τύπο εδάφους, μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας κάθε επιμέρους αριθμό καμπύλης με το συντελεστή βάρους που προκύπτει από το ποσοστό της επιφάνειας. Επομένως, βάση της έκτασης που καταλαμβάνει κάθε συνδυασμός ομάδας εδάφους- χρήσης γης προκύπτει η σταθμισμένη τελική τιμή της παραμέτρου CN σύμφωνα με τη παρακάτω σχέση (Feldman, 2000).

$$CN = \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{F} (CN_i) \quad (2.8)$$

όπου,

F: η συνολική έκταση της υπολεκάνης και

I: δείκτης που αναφέρεται στο συνδυασμό υδρολογικής ομάδας και χρήσης γης.

Ο αριθμός καμπύλης απορροής παίρνει τιμές από 35 (εδάφη με τη μεγαλύτερη διήθηση) μέχρι 98 (αδιαπέρατες επιφάνειες).

2.4.2.2 Πρότυπο υπολογισμού βασικής ροής

Το σχήμα ενός υδρογραφήματος που προκαλείται από μια βροχή με σχετικά μικρή διάρκεια και καλύπτει όλη την υδρολογική λεκάνη έχει κατά κανόνα μία πρότυπη μορφή. Η μορφή αυτή είναι κωδωνοειδούς σχήματος (Μιμίκου και Μπαλτάς 2003) εμφανίζει στην αρχή έναν ανοδικό κλάδο, που σημαίνει ότι κατά τη διάρκειά του η παροχή του υδατορεύματος συνεχώς αυξάνει μέχρι μια μέγιστη τιμή και κατόπιν ακολουθεί ένας καθοδικός κλάδος όπου η παροχή μειώνεται συνεχώς και μπορεί να φτάσει και στο μηδέν, εξαρτώμενη από την ύπαρξη ή όχι βασικής ροής. Η μέγιστη αιχμή, που προκαλείται από μια βροχή δεδομένης διάρκειας και εντάσεως, εμφανίζεται όταν όλα τα τμήματα της υδρολογικής λεκάνης συνεισφέρουν νερό,

όταν δηλαδή το μέρος της λεκάνης που βρίσκεται πιο κοντά στην έξοδο της εξακολουθεί να συνεισφέρει νερό όταν και το νερό από το πιο απομακρυσμένο σημείο της έχει φθάσει στην έξοδο.

Το HEC-HMS χρησιμοποιεί διάφορα πρότυπα για τον υπολογισμό της βασικής ροής, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

➤ **Σταθερή, μηνιαίως κυμαινόμενη βασική ροή**

Είναι το απλούτερο μοντέλο βασική ροής στο πρόγραμμα. Αναπαριστά την βασική ροή σαν μια σταθερή ροή που μπορεί να κυμαίνεται από μήνα σε μήνα. Η ροή αυτή ορίζεται από τον χρήστη και προστίθεται στην υπολογισμένη απορροή για κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης.

➤ **Μοντέλο εκθετικής μείωσης**

Το μοντέλο εκθετικής μείωσης έχει χρησιμοποιηθεί συχνά στο παρελθόν για να περιγράψει την αποστράγγιση από μια φυσική δεξαμενή σε μια λεκάνη (Linsley et al, 1982). Ορίζει την τιμή του Q_t , για κάθε χρονική στιγμή t , με μία αρχική τιμή σύμφωνα με την σχέση:

$$Q_t = Q_0 k^t \quad (2.9)$$

όπου,

Q_0 : η αρχική βασική ροή την στιγμή μηδεν και

k : μία σταθερά εκθετική μείωσης.

➤ **Μοντέλο γραμμικής δεξαμενής**

Το μοντέλο γραμμικής δεξαμενής χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το μοντέλο συνεχούς υπολογισμού της εδαφικής υγρασίας (SMA). Αυτό το μοντέλο βασικής ροής προσομοιώνει την αποθήκευση και την κίνηση του νερού μέσω γραμμικών δεξαμενών. Αυτό σημαίνει πως η εκροή σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης είναι μια γραμμική συνάρτηση της μέσης αποθήκευσης νερού κατά το χρονικό βήμα. Μαθηματικά, ο τρόπος που αναπαρίσταται η λεκάνη είναι ίδιος με το μοντέλο MY του Clark. Η εκροή από το πρώτο υπόγειο στρώμα της μεθόδου SMA είναι η εισροή σε μια γραμμική δεξαμενή, και η εκροή από το δεύτερο υπόγειο στρώμα είναι η εισροή σε μία άλλη. Η εκροή από δύο γραμμικές δεξαμενές συνδυάζεται για να υπολογιστεί η συνολική βασική ροή της δεξαμενής.

2.4.2.3 Πρότυπο υπολογισμού άμεσης απορροής

Η άμεση απορροή είναι φυσική συνέπεια της ενεργού βροχόπτωσης στη λεκάνη απορροής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ενεργός βροχόπτωση είναι ίση με τη συνολική βροχόπτωση μείον

τις απώλειες. Έτσι καθορίζεται ο συνολικός όγκος της άμεσης απορροής, όχι όμως και η χρονική κατανομή του. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν διάφορα μαθηματικά πρότυπα τα οποία πιο συγκεκριμένα προσδιορίζουν το χρόνο και την τιμή της παροχής αιχμής, τη διάρκεια της άμεσης απορροής και το χρόνο υστέρησης της άμεσης απορροής, που ορίζεται ως η χρονική διαφορά ανάμεσα στο κέντρο βάρους της ενεργού βροχόπτωσης και της παροχής αιχμής.

Η ανάπτυξη αυτών των μοντέλων πραγματοποιήθηκε με δύο τρόπους. Από τη μία αναπτύχθηκαν τα μοντέλα φυσικής βάσης όπως το πρότυπο του κινηματικού κύματος, τα οποία στηρίζονται στις θεμελιώδεις εξισώσεις της υδραυλικής και από την άλλη αναπτύχθηκαν τα μοντέλα που στηρίζονται στη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος (Ντοανίδης 2007). Τα πρώτα απαιτούν τη γνώση πολλών παραμέτρων, υδραυλικών και γεωλογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής, και για το λόγο αυτό είναι δύσχρηστα αφού συνήθως δεν υπάρχουν όλα τα απαραίτητα δεδομένα. Τα δεύτερα παρότι εμπεριέχουν απλουστευτικές παραδοχές και περιορισμούς, παρέχουν αρκετά καλές προσεγγίσεις και είναι πιο εύκολα στην εφαρμογή τους.

Το μοναδιαίο υδρογράφημα

Ως μοναδιαίο υδρογράφημα (ΜΥ) ορίζεται το υδρογράφημα που προκαλείται από ενεργό βροχή ύψους ίσου με τη μονάδα (στο μετρικό σύστημα ίσης με ένα εκατοστό), που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σ' όλη την έκταση της υδρολογικής λεκάνης κι έχει ομοιόμορφη ένταση. Δηλαδή, το μοναδιαίο υδρογράφημα είναι ένα υδρογράφημα απορροής που προκαλείται από ενεργό βροχή ίση με 10mm συγκεκριμένης διάρκειας (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2006).

Βασικές αρχές του μοναδιαίου υδρογραφήματος

Αρχή της επαλληλίας: το συνολικό υδρογράφημα απορροής, που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις, είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των υδρογραφημάτων απορροής των επιμέρους βροχοπτώσεων.

Αρχή της αναλογίας: Δύο ενεργές βροχές ίσης διάρκειας αλλά διαφορετικών εντάσεων, προκαλούν πλημμυρογραφήματα που έχουν την ίδια χρονική βάση και σε κάθε χρονική στιγμή ο λόγος των παροχών τους ισούται με το λόγο των εντάσεών τους.

Παραδοχές του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος

Σε μια συγκεκριμένη λεκάνη απορροής, ενεργές βροχές ίσης διάρκειας αλλά με διαφορετική ένταση, δίνουν άμεσα υδρογραφήματα με την ίδια χρονική βάση.

Σε μια δεδομένη υδρολογική λεκάνη, η άμεση απορροή που προκαλείται από μια βροχή είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες βροχοπτώσεις ή τις επόμενες.

Η κατάσταση της λεκάνης απορροής παραμένει αμετάβλητη σε σχέση με το χρόνο.

Τα μοναδιαία υδρογραφήματα που χρησιμοποιεί το HEC-HMS είναι τα εξής:

➤ **Συνθετικό Υδρογράφημα της SCS**

Σύμφωνα με μελέτες πολλών γεγονότων και υδρογραφημάτων για μέσες λεκάνες απορροής έχει επικρατήσει η άποψη Άγγλων και Αμερικανών ερευνητών ότι ο κατιών κλάδος μπορεί να λαμβάνεται ίσος με 1.67TP, όπου TP ο χρόνος υστέρησης (Τσακίρης 1995).

Με δεδομένα την παροχή αιχμής και το χρόνο συγκέντρωσης για γνωστή διάρκεια ενεργού βροχοπτώσεως, δύναται να υπολογιστεί το συνθετικό αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα για κάθε λεκάνη απορροής (Τσακίρης 1995).

Η περιοχή κάτω από το ΜΥ είναι ίση με την άμεση απορροή ισοδύναμης ενεργούς βροχής ύψους 1cm και ο χρόνος ανόδου μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του χρόνου υστέρησης T_p . Έτσι μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι:

$$q_p = \frac{CA}{T_p} \quad (2.10)$$

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p \quad (2.11)$$

όπου,

$$C = 2,08$$

A = το εμβαδόν της λεκάνης απορροής σε km^2

Για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης χρησιμοποιήθηκε ο τύπος υπολογισμού της SCS ενώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν αρκετοί εμπειρικοί τύποι υπολογισμού του χρόνου αυτού. Ο τύπος της SCS παρουσιάζεται παρακάτω:

$$t_c = \frac{L^{1.15}}{7700H^{0.38}} \quad (2.12)$$

όπου ,

t_c : χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης σε ώρες hr

L: το μήκος του κύριου υδατορεύματος σε ft

H: η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο πλέον απομακρυσμένο σημείο και στην έξοδο της λεκάνης σε ft

Επισημαίνεται ότι το t_c υπολογίζεται σε ώρες και τόσο το μήκος του ποταμού L όσο και το H δηλαδή η υψομετρική διαφορά μεταξύ του σημείου εξόδου της λεκάνης και του μέσου υψομέτρου της λεκάνης υπολογίζονται σε πόδια (ft).

➤ Μοντέλο του μοναδιαίου υδρογραφήματος του Snyder

Το 1938, ο Snyder εξέδωσε μία περιγραφή ενός παραμετρικού ΜΥ το οποίο είχε αναπτύξει για την ανάλυση λεκανών με μη μετρημένα χαρακτηριστικά στα Απαλάχια υψίπεδα στις ΗΠΑ, και εξέδωσε σχέσεις για την εκτίμηση των παραμέτρων του ΜΥ από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης. Στα προγράμματα περιλαμβάνεται μια εκδοχή του ΜΥ του Snyder.

Ο Snyder επέλεξε την υστέρηση, την ροή αιχμής και την συνολική χρονική βάση ως τα κρίσιμα χαρακτηριστικά ενός ΜΥ. Όρισε την συνέχεια ένα πρότυπο ΜΥ ως ένα του οποίου η χρονική διάρκεια της βροχόπτωσης t_r σχετίζεται με την χρονική υστέρηση της λεκάνης t_p με τον τύπο:

$$t_p = 5.5t_r \quad (2.13)$$

(χρονική υστέρηση είναι η χρονική διαφορά της αιχμής του ΜΥ και τον χρόνο που αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους του υετογραφήματος της πλεονάζουσας βροχόπτωσης) Αν η διάρκεια του επιθυμητού ΜΥ για την λεκάνη που μελετάται είναι σημαντικά διαφορετική από την επιθυμητή από αυτήν που βρέθηκε με την προηγούμενη εξίσωση, η ακόλουθη εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να οριστεί η σχέση μεταξύ της αιχμής του ΜΥ και της διάρκειας του ΜΥ.

$$t_{pR} = t_p - \frac{t_r - t_R}{4} \quad (2.14)$$

όπου,

t_r : η διάρκεια του επιθυμητού ΜΥ,

t_{pR} : η υστέρηση του επιθυμητού ΜΥ.

Για τις συνήθεις περιπτώσεις, ο Snyder ανακάλυψε ότι η υστέρηση του ΜΥ και η αιχμή ανά μονάδα πλεονάζουσας κατακρήμισης ανά μονάδα εμβαδού της λεκάνης σχετίζονται με το τύπο:

$$\frac{U_p}{A} = C \frac{C_p}{t_p} \quad (2.15)$$

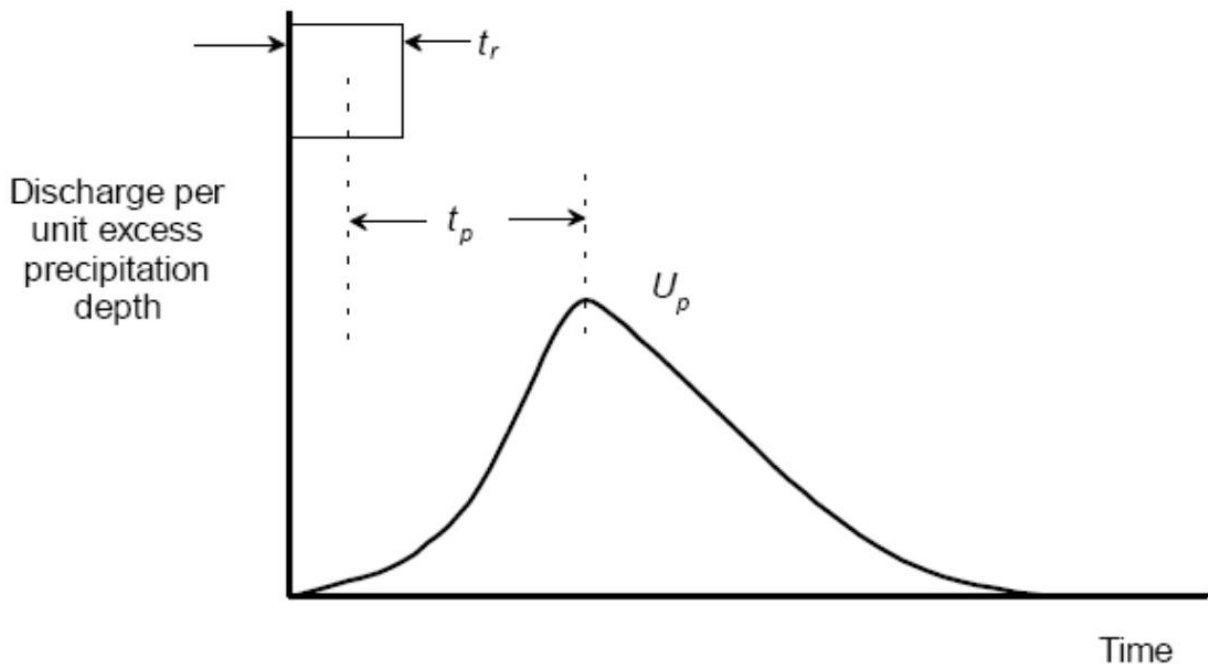
όπου,

U_p : η αιχμή του συνηθισμένου ΜΥ,

A : η στραγγιζόμενη έκταση της λεκάνης,

C_p : ο συντελεστής αιχμής του ΜΥ, και

C : η σταθερά μετατροπής (2,75 για το SI ή 640 για το βρετανικό σύστημα).



Εικόνα 2.2: Το μοναδιαίο υδρογράφημα του Snyder

Για άλλες διάρκειες η αιχμή του ΜΥ ορίζεται ως:

$$\frac{U_{pR}}{A} = C \frac{C_p}{t_p} \quad (2.16)$$

Το ΜΥ του μοντέλου του Snyder απαιτεί τον ορισμό της υστέρησης t_p , και τον συντελεστή C_p . Το πρόγραμμα θέτει το t_{pR} ίσο με το ορισμένο χρονικό βήμα και λύνει την εξίσωση (2.14) για να βρεί την υστέρηση του απαιτούμενου ΜΥ. Τελικά λύνει την εξίσωση (2.16) για να βρει την αιχμή του ΜΥ. Ο Snyder προτείνει μια σχέση με την οποία η συνολική χρονική βάση

μπορεί να οριστεί. Το HEC-HMS χρησιμοποιεί την υπολογισμένη αιχμή του ΜΥ και την χρονική στιγμή της για να βρει ένα ισοδύναμο ΜΥ με το μοντέλο του Clark. Από αυτό, καθορίζει την χρονική βάση και όλες τις τεταγμένες εκτός της αιχμής του ΜΥ.

➤ **Μοντέλο μοναδιαίου υδρογραφήματος του Clark**

Το μοντέλο του Clark παράγει ένα μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης αναπαριστώντας δύο κρίσιμες διαδικασίες του μετασχηματισμού της πλεονάζουσας βροχόπτωσης σε απορροή:

- Μετατόπιση ή κίνηση του πλεονάσματος από την πηγή της στον προορισμό της καθ' όλη την διαδρομή προς την εκροή της λεκάνης, και
- Εξασθένιση ή μείωση του μεγέθους της απορροής καθώς το πλεόνασμα αποθηκεύεται σε όλη την λεκάνη.

Η βραχυπρόθεσμη αποθήκευση του νερού σε όλη την λεκάνη, στο έδαφος, στην επιφάνεια, και στα κανάλια, παίζει έναν σημαντικό ρόλο στον μετασχηματισμό της πλεονάζουσας βροχόπτωσης σε απορροή. το μοντέλο της γραμμικής δεξαμενής είναι μια κοινή αναπαράσταση της συμπεριφοράς αυτής της αποθήκευσης. Αυτό το μοντέλο αρχίζει με την εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \quad (2.17)$$

όπου,

$\frac{dS}{dt}$: ο ρυθμός αλλαγής του νερού σε αποθήκευση στην στιγμή t,

I_t : η μέση εισροή στην υδαταποθήκευση την στιγμή t,

O_t : η εκροή από την υδαταποθήκευση την στιγμή t.

Με το μοντέλο της γραμμικής δεξαμενής, η αποθήκευση την στιγμή t σχετίζεται με την εκροή με την σχέση:

$$S_t = RO_t \quad (2.18)$$

όπου,

R : μία σταθερή παράμετρος της γραμμικής δεξαμενής.

Ο συνδυασμός και η επίλυση των εξισώσεων με χρήση της προσέγγισης πεπερασμένων διαφορών μας δίνει:

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \quad (2.19)$$

Όπου,

C_A, C_B : συντελεστές διόδευσης.

Οι συντελεστές υπολογίζονται με τους τύπους:

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0.5\Delta t} \quad (2.20)$$

$$C_B = 1 - C_A \quad (2.21)$$

Η μέση εκροή κατά την περίοδο t είναι:

$$Q_t = \frac{Q_{t-1} + Q_t}{2} \quad (2.22)$$

Στο μοντέλο του Clark, η γραμμική δεξαμενή αναπαριστά τα μεγεθυμένα αποτελέσματα όλης της αποθήκευσης της λεκάνης. Έτσι, η δεξαμενή μπορεί να θεωρηθεί πως βρίσκεται στην εκροή της δεξαμενής.

Επιπροσθέτως, το μοντέλο του Clark υπολογίζει τον χρόνο που απαιτείται το νερό να φτάσει στην εκροή της λεκάνης. Αυτό το κάνει με ένα γραμμικό μοντέλο καναλιού (Dooge 1959), όπου το νερό κατευθύνεται από απομακρυσμένα σημεία στην γραμμική δεξαμενή με καθυστέρηση, αλλά χωρίς μετατόπιση. Αυτή η καθυστέρηση αναπαρίσταται αναλυτικά με ένα ιστόγραμμα χώρου-χρόνου. Αυτό ορίζει την περιοχή της λεκάνης που συνεισφέρει στην εκροή ως συνάρτηση του χρόνου. Εάν η έκταση πολλαπλασιαστεί με το ύψος της μονάδας και διαιρεθεί με το Δt , το βήμα υπολογισμού, το αποτέλεσμα είναι η εισροή, I_t , στην γραμμική δεξαμενή.

Η επαναληπτική επίλυση των εξισώσεων (2.19) και (2.22), με ορισμένη την εισροή, δίνει τις τιμές του \bar{O}_t . Αν όμως οι τεταγμένες της εισροής στην εξίσωση (2.19) είναι εκροή από μια μονάδα πλεονάζουσας βροχόπτωσης, οι τεταγμένες της εκροής είναι στην πραγματικότητα το μοναδιαίο υδρογράφημα (U_t).

Σημείωση: επειδή η επίλυση των εξισώσεων είναι μια επαναληπτική διαδικασία που μπορεί να συνεχίζεται μέχρι το άπειρο, το HEC-HMS συνεχίζει τον υπολογισμό των συντεταγμένων του MY μέχρι ο όγκος της εκροής να ξεπεράσει τις 0,955 ίντσες ή χιλιοστά. Τότε το HEC-HMS προσαρμόζει τις τεταγμένες του MY χρησιμοποιώντας έναν κεντροβαρικό υπολογισμό για να παράγει ένα ισοδύναμο ομοιόμορφο ύψος μιας μονάδας.

➤ Μοντέλο ModClark

Το μοντέλο ModClark είναι ένα καταναμημένο παραμετρικό μοντέλο , όπου οι χωρικές διακυμάνσεις των χαρακτηριστικών και των διαδικασιών μελετώνται αναλυτικά. Σε αυτό το μοντέλο υπολογίζονται αναλυτικά οι διακυμάνσεις στον χρόνο μετακίνησης στην εκροή της λεκάνης σε όλη την έκταση της.

Οι υπολογισμοί στο μοντέλο αυτό υπολογίζουν αναλυτικά την μετατόπιση και την αποθήκευση. Η αποθήκευση υπολογίζεται με το ίδιο μοντέλο γραμμικής δεξαμενής που ενσωματώνεται στο μοντέλο Clark. Η μετατόπιση υπολογίζεται με ένα πεπλεγμένο (grid based) μοντέλο μετακίνησης – χρόνου.

Σε αυτήν την μέθοδο ένα πλέγμα τοποθετείται πάνω στην λεκάνη. Για κάθε κελί αυτού του πλέγματος, ορίζεται η απόσταση από την εκροή της λεκάνης. Ο χρόνος μετακίνησης στην εκροή είναι:

$$t_{cell} = t_c \frac{d_{cell}}{d_{max}} \quad (2.23)$$

Όπου,

t_{cell} : ο χρόνος μετακίνησης για ένα κελί,

t_c : ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης ,

d_{cell} : ο χρόνος μετακίνησης για ένα κελί στην εκροή ,και

d_{max} : η απόσταση μετακίνησης για το κελί που είναι το απομακρυσμένο από την εκροή.

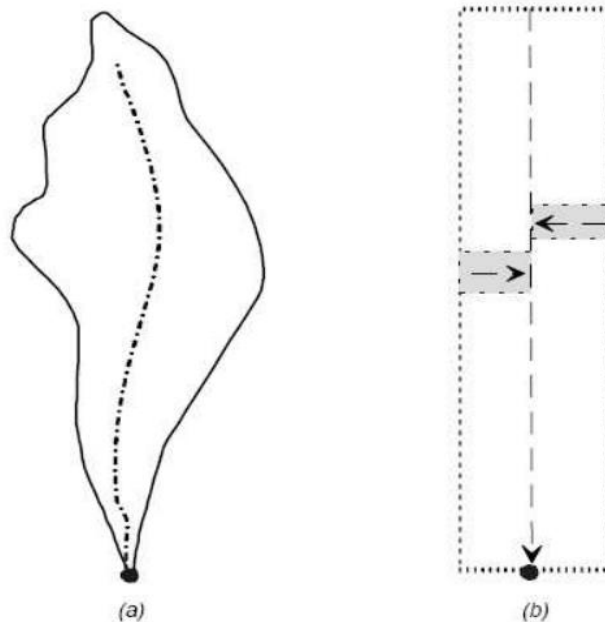
Το εμβαδόν κάθε κελιού καθορίζεται και έτσι ο όγκος της εισροής στην γραμμική δεξαμενή για κάθε χρονικό βήμα Δt υπολογίζεται βάσει της έκτασης και του πλεονάσματος της βροχόπτωσης. Το πλεόνασμα αυτό είναι η διαφορά του μέσου χωρικού ύψους στο κελί και των απωλειών σε αυτό. Στην συνέχεια οι εισροές που υπολογίστηκαν, διοδεύονται διαμέσου μιας γραμμικής δεξαμενής και υπολογίζεται το υδρογράφημα της απορροής για κάθε κελί. Το Hec-Hms συνδυάζει όλα αυτά τα υδρογραφήματα εκροής για να καθορίσει το τελικό υδρογράφημα εκροής της λεκάνης.

➤ Μοντέλο κινηματικού κύματος

Σα μία εναλλακτική λύση στα εμπειρικά μοντέλα MY , το HEC-HMS περιλαμβάνει ένα εννοιολογικό μοντέλο της απόκρισης της λεκάνης. Αυτό το μοντέλο αναπαριστά της λεκάνη ως ένα ανοιχτό κανάλι (ένα πολύ πλατύ, ανοιχτό αγωγό), με εισροή στο κανάλι ίση με το πλεόνασμα της βροχόπτωσης. Στην συνέχεια, επιλύονται οι εξισώσεις που προσομοιώνουν την

ασταθή ρηχή ροή σε ανοιχτό αγωγό για να υπολογίσει το υδρογράφημα της απορροής της λεκάνης.

Η εικόνα δείχνει μια απλή λεκάνη για την οποία η απορροή θα υπολογιστεί για σχεδιασμό, μελέτη ή βαθμονόμηση. Για την διόδευση του κινηματικού κύματος, η λεκάνη και τα κανάλια της μοντελοποιούνται εννοιολογικά όπως φαίνεται στην εικόνα. Αυτό αναπαριστά την λεκάνη ως δύο επιφάνειες πάνω στις οποίες ρέει το νερό μέχρι να φτάσει στον αγωγό. Σε διατομή το σύστημα θα έμοιαζε με ένα ανοιχτό βιβλίο, με το νερό να κυλά παράλληλα στο κείμενο της σελίδας και στην συνέχεια στον αγωγό που ακολουθεί το δέσιμο του βιβλίου. Η επιφανειακή ροή του μοντέλου του κινηματικού κύματος αναπαριστά την επιφανειακή ροή στις επίπεδες επιφάνειες. Το μοντέλο αυτό μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση της συμπεριφοράς της ροής στα κανάλια της λεκάνης.



Εικόνα 2.3: Απλή λεκάνη απορροής και η αναπαράσταση του κινηματικού κύματος.

Μοντέλο επιφανειακής απορροής. Στην καρδιά του μοντέλου της επιφανειακής ροής βρίσκονται οι θεμελιώδεις εξισώσεις την ροής σε ανοιχτό αγωγό : η εξίσωση δυναμικού και η εξίσωση συνέχειας. Η ροή στις επίπεδες επιφάνειες είναι μονοδιάστατη ροή. Σε μία διάσταση η εξίσωση του δυναμικού είναι:

$$S_f = S_o - \frac{d\eta}{dx} - \frac{V}{g} \frac{dV}{dx} - \frac{1}{g} \frac{dV}{dt} \quad (2.24)$$

όπου,

S_f : η κλίση της γραμμής δυναμικού ,

S_o : η κλίση πυθμένα,

V : η ταχύτητα,

y : το υδραυλικό ύψος ,

x : η απόσταση κατά μήκος της διαδρομής της ροής,

t : ο χρόνος ,

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας,

$\frac{V dV}{g dx}$: η σχετική επιτάχυνση,

$\frac{1}{g} \frac{dV}{dt}$: η τοπική επιτάχυνση,

$\frac{dy}{dx}$: η βαθμίδα πίεσης.

Η ενεργειακή βαθμίδα μπορεί να γραφεί:

$$Q = \frac{C R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}}{N} A \quad (2.25)$$

όπου,

Q : η παροχή,

R : η υδραυλική ακτίνα,

A : το εμβαδόν της διατομής,

N : ένας συντελεστής αντίστασης ο οποίος εξαρτάται από την κάλυψη των επιφανειών.

Για ρηχή ροή, η κλίση πυθμένα και η ενεργειακή βαθμίδα είναι περίπου ίσες και η επιρροή της επιτάχυνσης αμελητέα, έτσι η εξίσωση δυναμικού απλοποιείται σε:

$$S_f = S_o \quad (2.26)$$

Η εξίσωση (2.25) απλοποιείται σε :

$$Q = a A^m \quad (2.27)$$

όπου,

a και m είναι παράμετροι σχετιζόμενοι με την γεωμετρία της ροής και την τραχύτητα του εδάφους.

Η δεύτερη κρίσιμη εξίσωση, η μονοδιάστατη αναπαράσταση της εξίσωσης της συνέχειας είναι:

$$A \frac{dV}{dx} + VB \frac{dy}{dx} + B \frac{dy}{dt} = q \quad (2.25)$$

όπου,

B : το πλάτος της επιφάνειας του νερού,

Q : πλευρική εισροή ανά μονάδα μήκους του καναλιού,

$A \frac{dV}{dx}$: η αποθήκευση πρίσματος,

$VB \frac{dy}{dx}$: η αποθήκευση σφήνας και

$B \frac{dy}{dt}$: ο ρυθμός ανόδου.

Η πλευρική εισροή αναπαριστά την πλεονάζουσα βροχόπτωση, υπολογισμένη ως την διαφορά ανάμεσα στο μέσο χωρικό ύψος και τις απώλειες της βροχόπτωσης.

Με την κατάλληλη απλοποίηση για ρηχή ροή πάνω σε επίπεδη επιφάνεια, η εξίσωση συνεχείας γίνεται:

$$\frac{dA}{dt} + \frac{dQ}{dx} = q \quad (2.28)$$

Ο συνδυασμός των εξισώσεων (2.24) και (2.26) μας δίνει:

$$\frac{dA}{dt} + \alpha m A^{(m-1)} \frac{dA}{dx} = q \quad (2.29)$$

Η εξίσωση αυτή είναι μια προσέγγιση των εξισώσεων της κίνησης. Το πρόγραμμα αναπαριστά το στοιχείο της επιφανειακής ροής σαν ένα πλατύ ορθογώνιο αγωγό πλάτους μιας μονάδας, $\alpha = 1,486S^{1/2}/N$ και $m = 5/3$. Το N δεν είναι το n του Manning, αλλά ένας συντελεστής τραχύτητας.

2.4.2.4 Πρότυπο υπολογισμού διόδευσης πλημμύρας

Διόδευση ονομάζεται η τεχνική που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της χωροχρονικής εξέλιξης μιας πλημμύρας μέσω ενός επιφανειακού υδροφορέα (π.χ. υδατόρευμα, ταμιευτήρας, τμήμα υδρογραφικού δικτύου). Ο χωροχρονικός προσδιορισμός αυτού του πλημμυρικού κύματος καθώς αυτό μετακινείται σε ένα τμήμα ποταμού ή ταμιευτήρα είναι ένα από τα συνηθέστερα προβλήματα στην επιστήμη της υδρολογίας.

Το πρόβλημα της διόδευσης πλημμύρας έχει δύο μεθόδους επίλυσης:

Υδραυλικές μέθοδοι: οι υδραυλικές μέθοδοι χρησιμοποιούν τις εξισώσεις ασταθούς ροής σε ανοιχτούς αγωγούς (εξισώσεις Saint Venant). Η επίδραση της αποθήκευσης του ποταμού πάνω στο κύμα περιγράφεται με την εξίσωση συνέχειας και η επίδραση των ανωμαλιών και της τραχύτητας της κοίτης με την εξίσωση των ροπών.

Υδρολογικές μέθοδοι: η υδρολογική διόδευση ενέχει τις εξισώσεις συνέχειας σε γραμμική ή μη γραμμική μορφή και τις εξισώσεις ποσότητας κίνησης ως σχέσεις ανάμεσα στην αποθηκευτικότητα και την παροχή ή στάθμη σε τμήμα ποταμού ή σε ταμιευτήρα. Στην περίπτωση της διόδευσης σε ταμιευτήρα υπεισέρχεται ακόμα μια σχέση που συνδέει την παροχή εξόδου με τη στάθμη στον υπερχειλιστή. Πρόκειται γενικά για απλούστερες εξισώσεις σε σχέση με τις υδραυλικές, στις οποίες γίνονται αρκετές παραδοχές ως προς την περιγραφή των φαινομένων διόδευσης.

Όλες οι μέθοδοι διόδευσης σε ποτάμι, βασίζονται στην απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης συνέχειας:

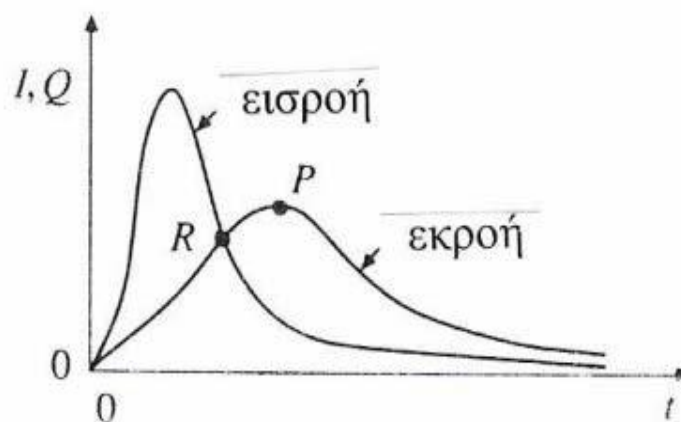
$$I - Q = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (2.30)$$

όπου:

I : η εισροή στο συγκεκριμένο τμήμα του ποταμού

Q : η εκροή από το τμήμα του ποταμού

$\Delta S / \Delta t$: η μεταβολή της αποθηκευτικότητας στο τμήμα του ποταμού



Εικόνα 2.4: Διόδευση πλημμύρας σε ποτάμι (Βαφειάδης, 2005)

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιεί το HEC-HMS είναι οι εξής:

➤ **Μοντέλο Muskingum**

Η σχέση αποθήκευσης με την εισροή και εκροή, σύμφωνα με την μέθοδο Muskingum, εκφράζεται μετά από απλοποίηση με μια γραμμική σχέση:

$$S = K[xI + (1-x)Q] \quad (2.31)$$

όπου:

K: παράμετρος η οποία εκφράζει το χρόνο που χρειάζεται το πλημμυρικό κύμα για να διανύσει το συγκεκριμένο τμήμα ποταμού και είναι περίπου ίση με τη χρονική απόσταση των αιχμών των πλημμυρογραφημάτων εισόδου και εξόδου.

x: αδιάστατη παράμετρος τη συμμετοχή της εισροής και της εκροής στην αποθηκευτικότητα του τμήματος του υδατορεύματος. Λαμβάνει τιμές από 0 έως 0.5.

Σημειώνεται ότι για την χρησιμοποίηση της μεθόδου θεωρείται ότι η ροή στο υδατόρρευμα είναι μόνιμη και ομοιόμορφη πριν την εκδήλωση της πλημμύρας εισόδου.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων K και x, συνήθως χρησιμοποιούνται υδρογραφήματα εισροής και εκροής εάν είναι διαθέσιμα. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμα τέτοια υδρογραφήματα, όπως συνέβη και στην περίπτωση της συγκεκριμένης εργασίας, γίνεται μια εκτίμηση των δύο αυτών παραμέτρων.

➤ **Μοντέλο κινηματικού κύματος**

Το μοντέλο κινηματικού κύματος βασίζεται σε μια προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών της εξίσωσης συνεχείας και μια απλοποίηση της εξίσωσης δυναμικού.

Τα δεδομένα που απαιτούνται για την χρήση της μεθόδου παρουσιάζονται παρακάτω.

- Σχήμα της τομής (τραπεζοειδής, ορθογωνική ή κυκλική).
- Βασική διάσταση (πλάτος πυθμένα του καναλιού, διάμετρος του αγωγού).
- Πλευρική κλίση του τραπεζοειδούς σχήματος.
- Μήκος του καναλιού.
- Κλίση της γραμμής ενέργειας.

- Συντελεστής του Manning, συντελεστής τραχύτητας για την ροή στο κανάλι.

Αυτές οι πληροφορίες, κατά το μεγαλύτερο μέρος τους, να αντληθούν, από χάρτες, μελέτες και αναγνώριση του πεδίου. Ο συντελεστής του Manning μπορεί να υπολογιστεί με τις συνήθεις διαδικασίες.

➤ Μοντέλο Lag

Είναι το απλούστερο από τα μοντέλα διόδευσης που περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα. Σε αυτό το μοντέλο το υδρογράφημα εκροής είναι ίδιο με το υδρογράφημα εισροής, μετατιθέμενο κατά ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Η ροή δεν εξασθενεί, και έτσι το σχήμα δεν αλλάζει. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται ευρέως, και ειδικότερα σε μελέτες αστικών αποστραγγιστικών καναλιών (Pilgrim 1993).

$$O_t = \begin{cases} I_t & t < lag \\ I_{t-lag} & t \geq lag \end{cases} \quad (2.32)$$

όπου,

O_t : η τεταγμένη του υδρογραφήματος εκροής την στιγμή t ,

I_t : η τεταγμένη του υδρογραφήματος εισροής την στιγμή t και

lag : η χρονική υστέρηση του υδρογραφήματος εισροής με αυτό της εκροής.

➤ Μοντέλο Modified Puls

Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε μια εκτίμηση πεπερασμένων διαφορών της εξίσωσης συνεχείας, ταιριασμένη με μια εμπειρική αναπαράσταση της εξίσωσης δυναμικού (Chow 1964, Henderson 1966). Η εξίσωση συνεχείας γράφεται ως:

$$\frac{dQ}{dx} + \frac{dA}{dt} = 0 \quad (2.33)$$

Εδώ γίνεται η υπόθεση πως η ύστερη εισροή είναι αμελητέα και επιτρέπει την αλλαγή του πλάτους ανάλογα με την θέση. Ενσωματώνοντας μια προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών για τις μερικές παραγώγους, η εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$\bar{I}_t - \bar{O}_t = \frac{\Delta S_t}{\Delta t} \quad (2.34)$$

όπου,

\bar{I}_t : η μέση ανάντη ροή (εισροή στο κανάλι) κατά την περίοδο Δt ,

\bar{O}_t : η μέση κατάντη ροή (εκροή από το κανάλι) κατά την διάρκεια της ίδιας περιόδου και

$\Delta S_t =$ η μεταβολή του όγκου του νερού στο κανάλι κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου.

Με την χρήση ενός σχήματος αντίστροφων διαφορών και αναπροσαρμόζοντας το αποτέλεσμα ώστε να απομονωθούν οι άγνωστες τιμές, προκύπτει η εξίσωση:

$$\left(\frac{S_t + Q_{t-1}}{\Delta t} + \frac{Q_{t-1}}{2}\right) = \left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2}\right) + \left(\frac{S_{t-1} - Q_{t-1}}{\Delta t} - \frac{Q_{t-1}}{2}\right) \quad (2.35)$$

όπου,

I_{t-1} και I_t : οι τεταγμένες του υδρογραφήματος εισροής τις στιγμές t και $t-1$,

O_t και O_{t-1} : οι τεταγμένες του υδρογραφήματος εκροής τις στιγμές t και $t-1$, και

S_t και S_{t-1} : ο όγκος του νερού τις στιγμές t και $t-1$ αντίστοιχα.

Την στιγμή t όλοι οι όροι του δεξιού σκέλους της εξίσωσης είναι γνωστοί, ενώ μένουν να βρεθούν οι όροι του αριστερού σκέλους. Έτσι, η εξίσωση έχει δύο αγνώστους, το O_t και το S_t . Για να λυθεί η εξίσωση (2.36) απαιτείται μια λειτουργική εξίσωση του αποθηκευμένου όγκου νερού με την εκροή. Στην συνέχεια, αυτή αντικαθίσταται στην εξίσωση 8 έτσι ώστε αυτή να μετατραπεί σε μια μη γραμμική εξίσωση με μόνο άγνωστο το O_t . Η εξίσωση αυτή λύνεται επαναληπτικά, χρησιμοποιώντας μια διαδικασία δοκιμής και λάθους (trial and error). (Να σημειωθεί πως την αρχική στιγμή t , πρέπει να οριστεί η εκροή της στιγμής $t-1$ ώστε να μπορεί να λυθεί επαναληπτικά η εξίσωση).

➤ Μοντέλο Muskingum-Cunge

Το μοντέλο του Muskingum, αν και είναι εύχρηστο και δημοφιλές, εμπεριέχει παραμέτρους οι οποίες δεν έχουν φυσικό νόημα και έτσι είναι δύσκολο να εκτιμηθούν. Επιπλέον, το μοντέλο αυτό βασίζεται σε υποθέσεις οι οποίες συχνά παραβιάζονται στα φυσικά κανάλια. Η προέκταση του, το μοντέλο Muskingum-Cunge, ξεπερνά αυτούς τους περιορισμούς. Το μοντέλο βασίζεται στην επίλυση της ακόλουθης μορφής της εξίσωσης συνεχείας (με δευτερεύουσα εισροή, q_l):

$$\frac{dA}{dt} + \frac{dQ}{dx} = q_l \quad (2.36)$$

και η μορφή διάχυσης της εξίσωσης δυναμικού είναι:

$$S_f = S_o - \frac{dy}{dx} \quad (2.37)$$

Ο συνδυασμός αυτών των δύο εξισώσεων, και με την χρήση μια γραμμικής προσέγγισης, δίνει την εκ μεταφοράς εξίσωση διάχυσης (Miller και Cunge, 1975):

$$\frac{dQ}{dt} + c \frac{dQ}{dx} = \mu \frac{d^2Q}{dx^2} + cq_L \quad (2.38)$$

Όπου,

C : η ταχύτητα κύματος και

μ : η υδραυλική διάχυση.

Η ταχύτητα κύματος και η υδραυλική διάχυση εκφράζονται ως:

$$c = \frac{dQ}{dA} \quad (2.39)$$

και

$$\mu = \frac{Q}{qBS_o} \quad (2.40)$$

όπου,

B: το πλάτος της επιφάνειας.

Μια προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών των μερικών παραγώγων, δίνει:

$$Q_t + C_1 I_{t-1} + C_2 I_t + C_3 O_{t-1} + C_4 (q_L \Delta x) \quad (2.41)$$

Οι συντελεστές είναι:

$$C_1 = \frac{\frac{\Delta t}{K} + 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \quad (2.42)$$

$$C_2 = \frac{\frac{\Delta t}{K} - 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \quad (2.43)$$

$$C_3 = \frac{2(1-X) - \frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \quad (2.44)$$

$$C_4 = \frac{2\frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \quad (2.45)$$

Οι παράμετροι K και X είναι (Cunge 1969, Ponce 1978):

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (2.46)$$

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{BS_o c \Delta x} \right) \quad (2.47)$$

Καθώς τα c και B αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου, οι συντελεστές C_1, C_2, C_3, C_4 θα αλλάξουν και αυτά. Το πρόγραμμα τους υπολογίζει ξανά για κάθε χρονικό και χωρικό διάστημα χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο που πρότεινε ο Ponce (1986). Η επιλογή των βημάτων αυτών είναι κρίσιμη. Η επιλογή γίνεται έτσι ώστε να διασφαλιστεί ακρίβεια και σταθερότητα. Το Δt επιλέγεται ως το ελάχιστο από τα ακόλουθα: το χρονικό βήμα του χρήστη από τις προδιαγραφές ελέγχου, τον χρόνο ταξιδιού μέσω του καναλιού και το $1/200$ του χρόνου αιχμής της εισροής με τον πιο απότομο ανοδικό κλάδο, στρογγυλοποιημένο με το κοντινότερο πολλαπλάσιο ή διαιρέτη του χρονικού βήματος του χρήστη. Αφού επιλεγεί το Δt το Δx υπολογίζεται ως:

$$\Delta x = c \Delta t \quad (2.48)$$

Και ισχύει ο ακόλουθος περιορισμός :

$$\Delta x < \frac{1}{2} \left(c \Delta t + \frac{Q_o}{BS_o c} \right) \quad (2.49)$$

όπου,

Q_o : η παροχή αναφοράς, η οποία υπολογίζεται από το υδρογράφημα εισροής ως:

$$Q_o = Q_B + \frac{1}{2} (Q_{peak} - Q_B) \quad (2.50)$$

όπου,

Q_B = η βασική ροή, και

Q_{peak} = η αιχμή εισροής.

2.4.2 HEC-RAS

Το HEC-RAS κατασκευάστηκε από το μηχανικό σώμα του Αμερικανικού Στρατού (U.S. Army Corps of Engineers). Είναι μοντέλο μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος και προσομοιώνει υδατορεύματα φυσικά ή τεχνητά, μεμονωμένα ή συστήματα. Η ανάπτυξη του έγινε σταδιακά με σκοπό να κατασκευαστεί ένα μοντέλο όπου ο ρόλος του χρήστη είναι ενεργός σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης (Ραμπιάς 2007).

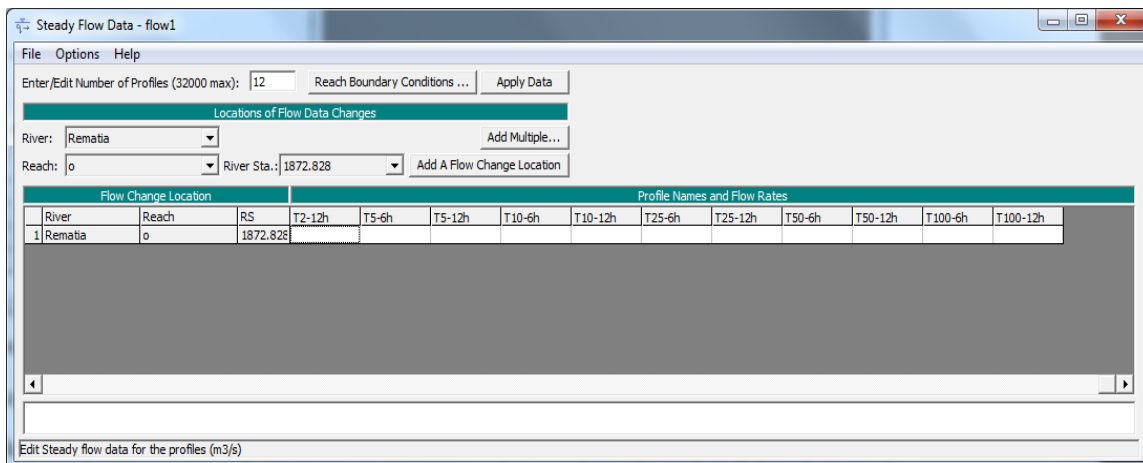
Το μοντέλο αυτό επιτρέπει τη μονοδιάστατη ανάλυση και την προσομοίωση φυσικών υδατορευμάτων ή τεχνικών συστημάτων. Πρόκειται για ένα σύνολο μοντέλων με τέσσερις συνιστώσες ανάλυσης (Brunner, 2010):

- Υπολογισμός του προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε συνθήκες μόνιμης ροής.
- Υπολογισμοί σε συνθήκες μη μόνιμης ροής
- Υπολογισμοί απόθεσης φερτών υλών
- Υπολογισμοί σχετικά με τη θερμοκρασία του νερού

Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα υπολογίζει τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού για βαθμιαίως μεταβαλλόμενη ροή, σε σύστημα υδατορευμάτων σε τεχνητά συστήματα ή σε φυσικές κοίτες υδατορευμάτων, σε συνθήκες υποκρίσιμης, υπερκρίσιμης ή και μικτής ροής. Ακόμα, μπορεί να υπολογίσει, υδραυλικά άλματα, υδραυλικές συνθήκες σε γέφυρες, υπερχειλιστές, καθώς και τη διάβρωση της κοίτης σε γέφυρες. Τα βασικά μέρη του προγράμματος αυτού, είναι το γεωμετρικό αρχείο και το υδρολογικό αρχείο που προκύπτει από την υδρολογική προσομοίωση.

Η υδραυλική προσομοίωση στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες μόνιμης ροής. Η εισαγωγή των υδρολογικών δεδομένων, όπως προέκυψαν από την υδρολογική προσομοίωση στο HEC-HMS πραγματοποιείται μέσω της εντολής Edit → Steady Flow Data, με την οποία δίνεται επιπλέον η δυνατότητα επεξεργασίας τους.

Στο παράθυρο των δεδομένων των συνθηκών μόνιμης ροής, εισάγεται αρχικά ο αριθμός των προφίλ, για καθένα από τα οποία συμπληρώνονται οι αντίστοιχες πλημμυρικές αιχμές για το κάθε υδατόρευμα. Ως προφίλ νοείται κάθε διαφορετική ανάλυση/ προσομοίωση με βάση ξεχωριστό επεισόδιο βροχόπτωσης συγκεκριμένης διάρκειας και περιόδου επαναφοράς. Τα προφίλ εδώ είναι δώδεκα για την 6ωρη και 12ωρη βροχή σχεδιασμού με περιόδους επαναφοράς 2ετών, 5 ετών, 10 ετών, 25 ετών, 50 ετών και 100 ετών όπως φαίνονται στην Εικόνα 2.5. Η μετονομασία των επιλεγμένων προφίλ επιτυγχάνεται μέσω της εντολής Edit Profile Names του μενού Options.



Εικόνα 2.5: Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων

Η ολοκλήρωση της εισαγωγής των υδρολογικών δεδομένων επιτυγχάνεται με τον ορισμό των οριακών συνθηκών του προβλήματος. Οι οριακές συνθήκες αποτελούν το σημείο έναρξης της βήμα προς βήμα ολοκλήρωσης για τον υπολογισμό των επιμέρους στοιχείων της εξίσωσης ενέργειας. Ανάλογα με το καθεστώς ροής που επικρατεί στο υδατόρευμα (υποκρίσιμη/ υπερκρίσιμη/ μικτή ροή), ορίζεται και η θέση των οριακών συνθηκών. Συνεπώς, για θεώρηση υπερκρίσιμης ροής, οι υπολογισμοί γίνονται από τα κατάντη προς ανάντη και οριακή συνθήκη ορίζεται στην πλέον ανάντη θέση. Στην περίπτωση της υποκρίσιμης ροής οι υπολογισμοί γίνονται από τα ανάντη προς κατάντη και τέλος στην περίπτωση της μικτής ροής χρειάζεται ορισμός οριακής συνθήκης και στα δύο άκρα.

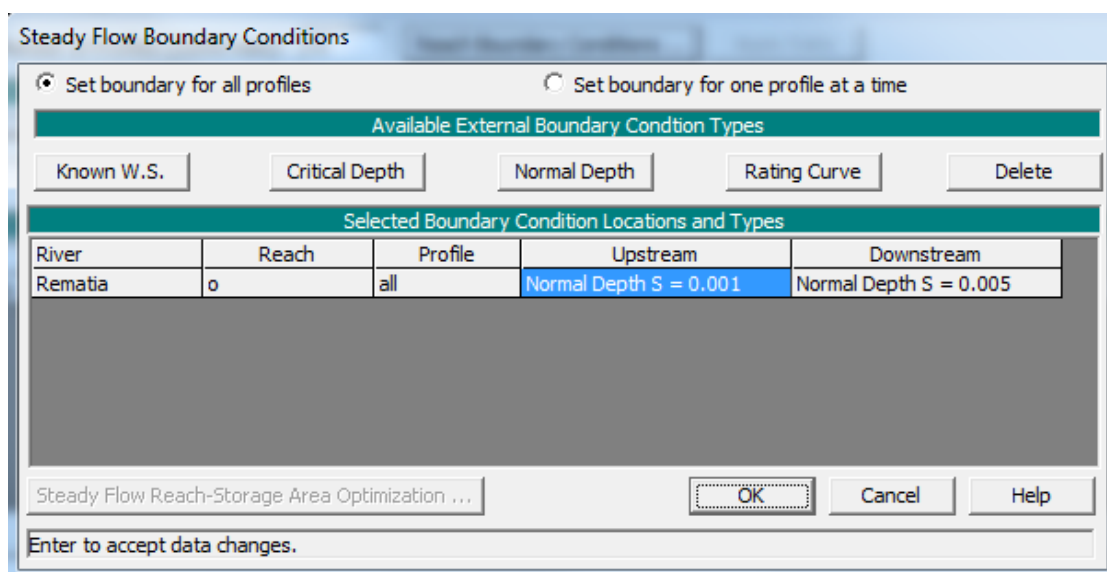
Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η μεικτή ροή, καθώς παρατηρούνται ήπιες κλίσεις εδάφους σε κάποια σημεία του υδατορεύματος και εντονότερες σε άλλα σημεία. Συνεπώς, ορίστηκαν οριακές συνθήκες και στην ανάντη θέση και στην κατάντη.

Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους οριακών συνθηκών, συγκεκριμένα (Brunner, 2010):

- Γνωστό πιεζομετρικό φορτίο (Known Water Surface Elevation): Σε αυτή την οριακή συνθήκη εισάγεται ένα γνωστό πιεζομετρικό φορτίο για κάθε προφίλ.
- Κρίσιμο βάθος (Critical Depth): Σε αυτή την εντολή δεν χρειάζεται να εισαχθεί καμία επιπλέον πληροφορία. Το πρόγραμμα υπολογίζει το κρίσιμο βάθος για κάθε προφίλ και το χρησιμοποιεί σαν οριακή συνθήκη.
- Ομοιόμορφο βάθος (Normal Depth): Σε αυτή την οριακή συνθήκη, εισάγεται η κλίση της γραμμής ενέργειας, βάση της οποίας υπολογίζεται το ομοιόμορφο βάθος με την εξίσωση Manning. Γενικά, η κλίση της γραμμής ενέργειας προσδιορίζεται κατά προσέγγιση ως η μέση κλίση της κύριας κοίτης του υδατορεύματος.

• Καμπύλη στάθμης- παροχής (Rating Curve): Η οριακή αυτή συνθήκη προϋποθέτει την εισαγωγή ζευγών τιμών στάθμης- παροχής. Από την καμπύλη αυτή το πρόγραμμα με παρεμβολή υπολογίζει το πιεζομετρικό φορτίο για την αντίστοιχη παροχή.

Στη παρούσα εργασία, λόγω έλλειψης υδρομετρικών δεδομένων, ως οριακή συνθήκη επιλέχθηκε το ομοιόμορφο βάθος, το οποίο προκύπτει από την κλίση του πυθμένα. Κατασκευάζεται λοιπόν, σε περιβάλλον ArcMap, ο κάρτα των κλίσεων εδάφους (Spatial Analyst Tools → Slope), από τον οποίο εξάγεται η κλίση στην ανάντη και στην κατάντη διατομή του κάθε ποταμού. Με αυτόν τον τρόπο, προέκυψαν οι κλίσεις που φαίνονται στην Εικόνα 2.6.



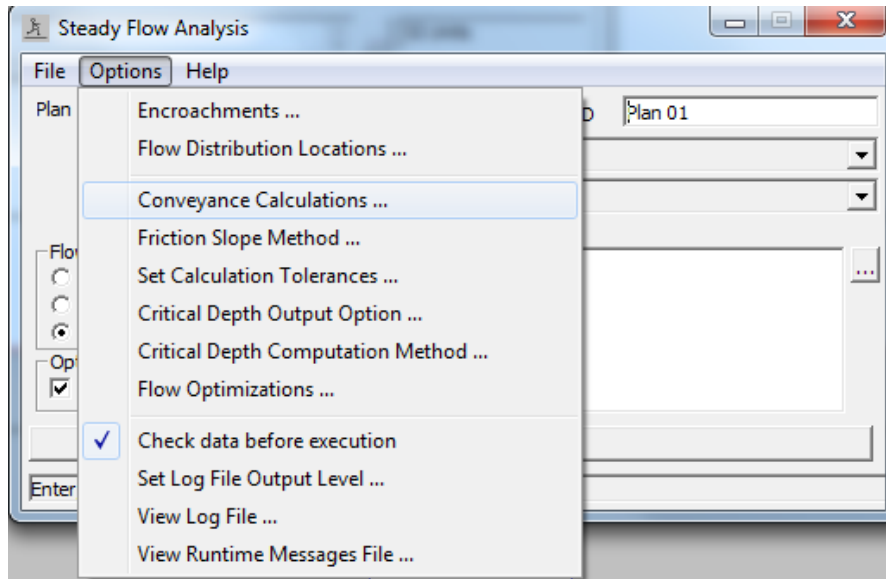
Εικόνα 2.6: Ορισμός οριακών συνθηκών

Ρύθμιση παραμέτρων για την εκτέλεση της υδραυλικής προσομοίωσης

Η εκτέλεση των υδραυλικών υπολογισμών είναι το τελευταίο βήμα για την προσομοίωση σε περιβάλλον HEC-RAS. Η διεργασία πραγματοποιείται από την εντολή Run → Steady Flow Analysis, όπου ο χρήστης καθορίζει τα ακόλουθα στοιχεία:

- Ονομασία σχεδίου (Plan ID)
- Μήτρα γεωμετρικών δεδομένων (Geometry file)
- Μήτρα υδρολογικών δεδομένων μόνιμης ροής (Steady flow file)
- Είδος ροής (mixed)

Για την ακριβέστερη προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών ροής, ρυθμίζονται κάποιες παράμετροι του μοντέλου. Οι παράμετροι αυτοί φαίνονται στην Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: Ρύθμιση παραμέτρων υδραυλικής προσομοίωσης

Επιλογή διατομών μελέτης

Η εντολή Flow distribution locations αφορά στην επιλογή διατομών για την προσομοίωση και διαίρεση της διατομής σε τρία τμήματα (κοίτη, πέραν της αριστερής και πέραν της δεξιάς όχθης) ή περαιτέρω. Στη παρούσα εργασία εφαρμόστηκε η αρχική προεπιλογή των τριών τμημάτων.

Παράμετροι επίλυσης της εξίσωσης ενέργειας

Σε συνθήκες μόνιμης ροής υπολογίζεται το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας του νερού με την επίλυση της εξίσωσης ενέργειας σε μονοδιάστατη ανάλυση. Η επίλυση πραγματοποιείται από διατομή σε διατομή διαδοχικά με επαναληπτικό αλγόριθμο, με στόχο την σύγκλιση των δύο υπολογισμένων πιεζομετρικών βαθών για την ίδια διατομή.

Η ολική ενέργεια, ως προς ένα επίπεδο αναφοράς, δίνεται από τη παρακάτω εξίσωση.

$$H - z + E - z + y + \frac{aV^2}{2g} \quad (2.51)$$

Η εξίσωση ενέργειας μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών είναι:

$$z_1 + y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} - z_2 + y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} + \Delta h \quad (2.52)$$

όπου:

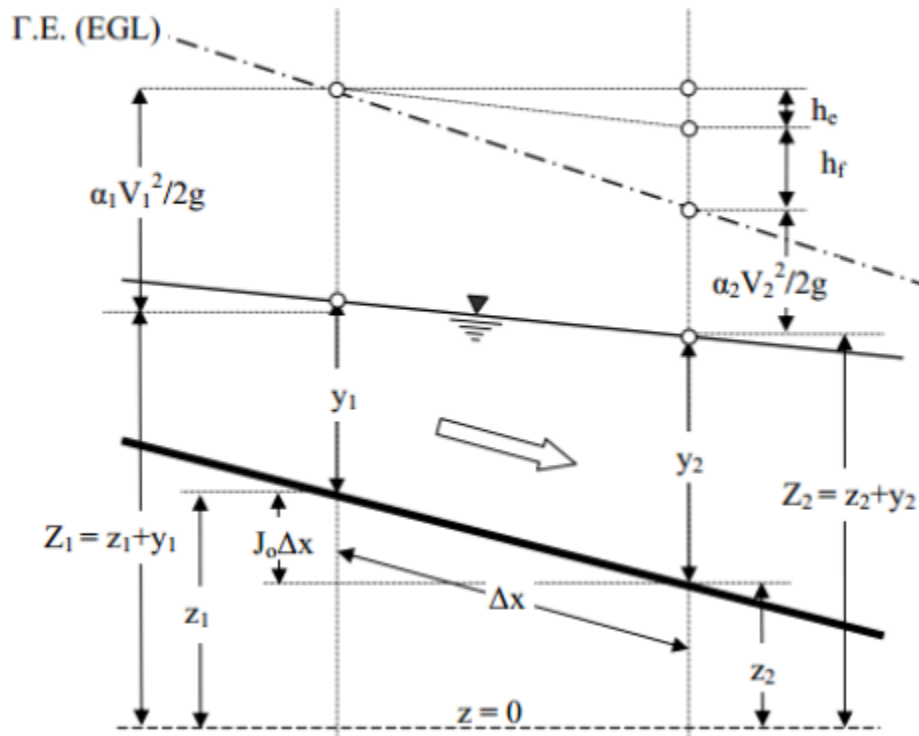
z_1, z_2 : υψόμετρα πυθμένα υδατορεύματος από επίπεδο αναφοράς

h_1, h_2 : βάθη νερού

V_1, V_2 : μέσες ταχύτητες ροής της διατομής

α_1, α_2 : συντελεστές διόρθωσης της κινητικής ενέργειας

Τα παραπάνω μεγέθη φαίνονται στην Εικόνα 2.8.



Εικόνα 2.8: Απεικόνιση μεγεθών εξίσωσης ενέργειας (Παπανικολάου, 2008)

Οι ολικές απώλειες ενέργειας περιλαμβάνουν τις τοπικές και τις γραμμικές απώλειες και δίνονται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\Delta H = L S_f + C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right| \quad (2.53)$$

όπου:

L: μέση σταθμισμένη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών

S_f : απώλειες λόγω τριβής

C: συντελεστής συστολή/ διαστολής για τις τοπικές απώλειες ενέργειας. Οι τιμές του συντελεστή είναι 0.3 για διαστολή και 0.1 για συστολή

$\left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right|$: διαφορά κινητικής ενέργειας μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών

Υπολογισμός γραμμικών απωλειών

Η μέση σταθμισμένη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών και δίνεται από τη παρακάτω σχέση.

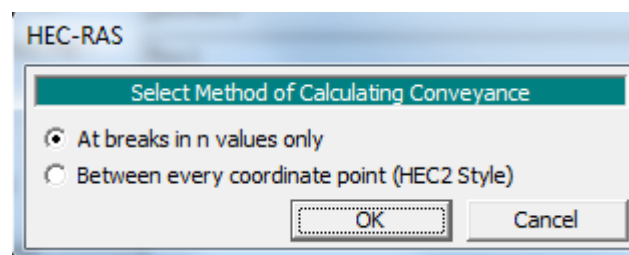
$$L = \frac{L_{lob}Q_{lob} + L_{ch}Q_{ch} + L_{rob}Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}} \quad (2.54)$$

όπου:

L_{lob} , L_{ch} , L_{rob} : αποστάσεις μεταξύ διαδοχικών διατομών κατά τη διεύθυνση της ροής για το αριστερό τμήμα, την κοίτη και το δεξί τμήμα αντίστοιχα

Q_{lob} , Q_{ch} , Q_{rob} : μέσες παροχές μεταξύ των διατομών στο αριστερό τμήμα, την κοίτη και το δεξί τμήμα αντίστοιχα

Επίσης, υπολογίζεται ο συντελεστής μεταφορικότητας K , επιλέγοντας μία από τις διαθέσιμες μεθόδους υπολογισμού του, οι οποίες φαίνονται στην Εικόνα 2.9.



Εικόνα 2.9: Επιλογή μεθόδου υπολογισμού της μεταφορικότητας, K

Τελικά, επελέγη η μέθοδος At breaks in n values only, σύμφωνα με την οποία τα δύο πλευρικά τμήματα της διατομής (πέραν της αριστερής και δεξιάς όχθης) χωρίζονται σε επιπλέον τμήματα ανάλογα με το αν αλλάζει ο συντελεστής Manning n ή όχι, έτσι ώστε κάθε τμήμα να έχει μια ενιαία τιμή n .

Ακολούθως, υπολογίζεται η τιμή K_i για κάθε τμήμα ενιαίου συντελεστή n και επιμέρους τιμές αθροίζονται για να προκύψουν οι τιμές K_{lob} για το αριστερό πλευρικό τμήμα και K_{rob} για το δεξί πλευρικό τμήμα. Το τμήμα εντός της κοίτης αντιμετωπίζεται γενικά ως ενιαίο αλλά ο χρήστης μπορεί να εισάγει περισσότερες τιμές συντελεστή τραχύτητας αν κριθεί σκόπιμο με βάση και το κριτήριο των πλευρικών κλίσεων. Ο ολικός συντελεστής K υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση.

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{\frac{2}{3}} \quad (2.55)$$

όπου:

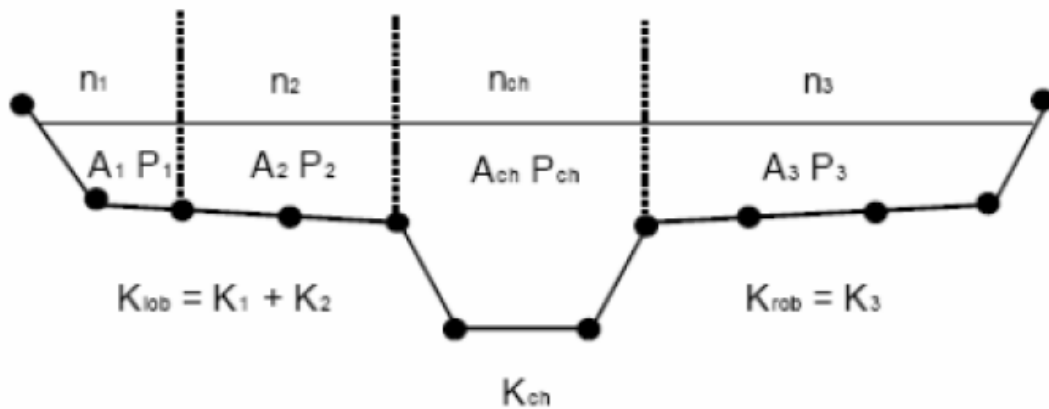
n : συντελεστής Manning

A : εμβαδό διατομής

R : υδραυλική ακτίνα

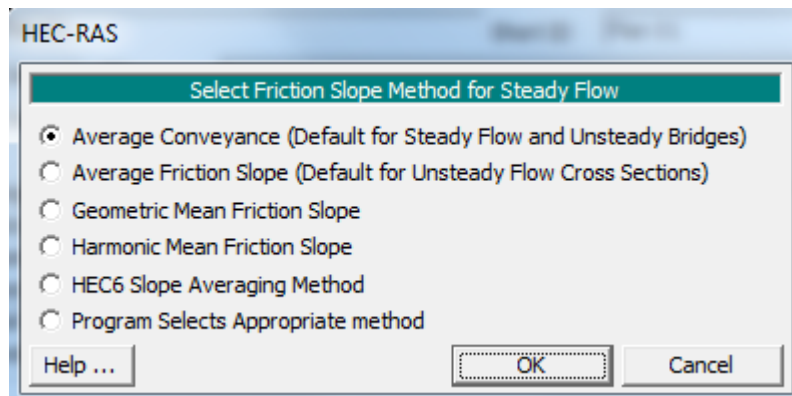
Η τελική τιμή του συντελεστή K για όλη τη διατομή δίνεται από το παρακάτω άθροισμα.

$$K=K_{lob}+K_{ch}+K_{rob} \quad (2.56)$$



Εικόνα 2.10: Υπολογισμός μεταφορικότητας K όλης της διατομής (Brunner, 2010)

Για τον υπολογισμό απωλειών λόγω τριβής δίνονται έξι επιλογές μεθόδου, οι οποίες φαίνονται στη Εικόνα 2.11.



Εικόνα 2.11: Μέθοδοι υπολογισμού απωλειών λόγω τριβής

Στη παρούσα εργασία επιλέχθηκε η μέθοδος Average Conveyance (προεπιλεγμένη μέθοδος), σύμφωνα με την οποία η μέση κλίση της γραμμής ενέργειας δίνεται από τη παρακάτω σχέση.

$$S_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (2.57)$$

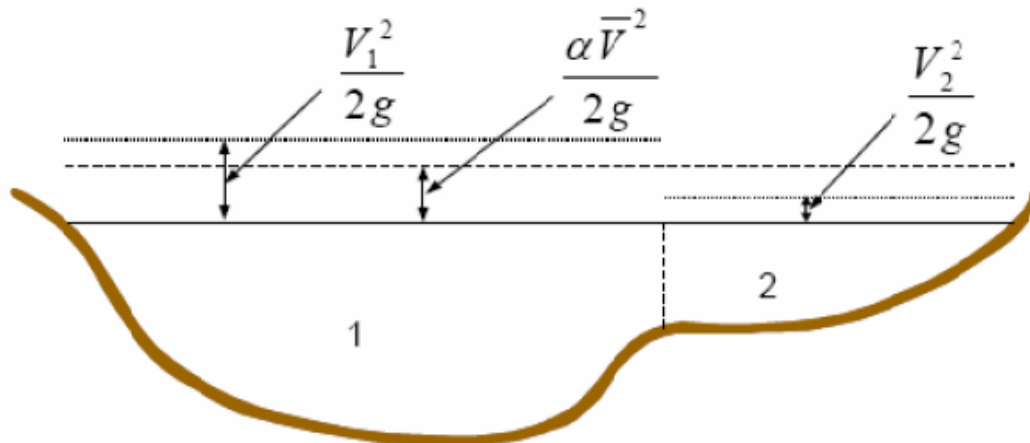
όπου:

Q_1, Q_2 : μέσες παροχές σε δύο διατομές

K_1, K_2 : συντελεστής μεταφορικότητας K για κάθε διατομή

Υπολογισμός τοπικών απωλειών

Για την εύρεση των ολικών απωλειών ενέργειας, το τελευταίο βήμα είναι ο υπολογισμός των τοπικών απωλειών ενέργειας, ήτοι η διαφορά της μέσης κινητικής ενέργειας κάθε διατομής. Για V_1 , V_2 , οι μέσες ταχύτητες διατομών, V η μέση ταχύτητα όλης της διατομής και Q_1 , Q_2 οι μέσες παροχές στις δύο διαδοχικές διατομές, ισχύει η παρακάτω σχέση σύμφωνα με την Εικόνα 2.12.



Εικόνα 2.12: Υπολογισμός μέσης κινητικής ενέργειας της διατομής (Brunner, 2010)

$$a \frac{V^2}{2g} = Q \frac{Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2} \quad (2.58)$$

Από τη παραπάνω σχέση και απλοποιώντας την επιτάχυνση της βαρύτητας προκύπτει ο διορθωτικός συντελεστής κινητικής ενέργειας a :

$$a = \frac{QV_1^2 + Q_2V_2^2}{(Q_1 + Q_2)V^2} \quad (2.59)$$

επομένως, μπορεί πλέον να υπολογιστεί η διαφορά της μέσης κινητικής ενέργειας της διατομής.

Το τελευταίο κομμάτι που πρέπει να προσδιορισθεί είναι ο συντελεστής συστολής/ διαστολής (contraction/ expansion). Το πρόγραμμα θεωρεί ότι η συστολή στη ροή συμβαίνει όταν η μέση ταχύτητα κατάντη είναι μεγαλύτερη από τη μέση ταχύτητα ανάντη, και αντίστοιχα η διαστολή, όταν η μέση ταχύτητα ανάντη είναι μεγαλύτερη από τη μέση ταχύτητα κατάντη. Για υποκρίσιμη ροή οι συντελεστές αυτοί παίρνουν τυπικές τιμές 0.1 και 0.3 αντίστοιχα, ενώ στην υπερκρίσιμη ροή οι τυπικές τιμές είναι 0.01 και 0.03 αντίστοιχα (Brunner, 2010).

Τελικά, οι τοπικές απώλειες ενέργειας υπολογίζονται μέσω της παρακάτω σχέσης.

$$h_e = C \left| \frac{a_1 V_1^2}{2g} - \frac{a_2 V_2^2}{2g} \right| \quad (2.60)$$

Έχοντας όλα τα δεδομένα υπολογίζονται οι απώλειες ενέργειας και κατ' επέκταση ξεκινούν οι υπολογισμοί στην εξίσωση ενέργειας.

Ουσιαστικά, εφαρμόζεται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος για τον προσδιορισμό του πιεζομετρικού φορτίου σε κάθε διατομή, βασιζόμενος στην εξίσωση ενέργειας και την εξίσωση απωλειών. Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα υποθέτει ένα αρχικό πιεζομετρικό φορτίο για την ανάντη διατομή, εάν πρόκειται για υποκρίσιμη ροή (και αντίστοιχα στην κατάντη διατομή για υπερκρίσιμη ροή), και βάση αυτού, υπολογίζει το συντελεστή μεταφοράς K και τη μέση ταχύτητα. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η μέση κλίση της γραμμής ενέργειας S_f και τέλος τις ολικές απώλειες ενέργειας. Με την εξίσωση ενέργειας υπολογίζει τελικά το πιεζομετρικό φορτίο της διατομής.

Η διαδικασία ολοκληρώνεται με τη σύγκριση της υπολογισμένης τιμής και της τιμής που τέθηκε αρχικά, και ελέγχεται αν συγκλίνει σε ένα επιτρεπτό όριο.

Κατά τη διάρκεια των υπολογισμών το πρόγραμμα υπολογίζει το κρίσιμο βάθος με μέθοδο που ορίζεται από την εντολή Critical Depth Computation Method και το συγκρίνει με το πιεζομετρικό βάθος στη διατομή μελέτης, συμβάλλοντας στον έλεγχο της ορθότητας των εισαχθέντων δεδομένων. Στην παρούσα εργασία, για τον υπολογισμό του κρίσιμου βάθους επελέγη η παραβολική μέθοδος, η οποία είναι η ταχύτερη και προτείνεται από τους κατασκευαστές του HEC- RAS (Brunner, 2010).

Τα αποτελέσματα του προγράμματος HEC-RAS παρατίθενται στο 4^ο κεφάλαιο.

2.5 Εκτίμηση επεισοδίων βροχόπτωσης μέσω όμβριων καμπύλων

Στην παρούσα εργασία, λόγω απουσίας δεδομένων βροχομετρίας, αποφασίστηκε η επιλογή της μεθόδου του καθορισμένου υετογραφήματος (user-specified hyetograph).

Ως αρχικό στοιχείο για την ανάλυση θα πρέπει να ληφθεί μια όμβρια καμπύλη για την περιοχή. Με λογικές παραδοχές και συσχετίσεις επελέγη η ακόλουθη όμβρια καμπύλη για την Αθήνα (Mimikou & Baltas, 1995).

$$i = 15,39T^{0,276}d^{-0,725} \quad (2.61)$$

όπου,

T: περίοδος επαναφοράς, έτη

d: διάρκεια βρόπτωσης,hr

Η αξιοποίηση της όμβριας καμπύλης οδηγεί στην κατάρτιση υετογραφήματος σχεδιασμού με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων τμηματικών υψών, όπως αναλύεται ακολούθως.

Η μέθοδος των εναλλασσόμενων τμηματικών υψών

Για τον Ελληνικό χώρο, αντί της 24ωρης βροχής επιλέγεται η 12ωρη, καθώς οι λεκάνες είναι μικρότερες και το ανάγλυφο εντονότερο (Τσακίρης 1995). Αυτά τα χαρακτηριστικά έχει και η μελετώμενη λεκάνη απορροής, επομένως επιλέγεται η 12ωρη βροχή. Αναπτύχθηκαν υετογράμματα για διάφορες περιόδους επαναφοράς και συγκεκριμένα για 2, 5, 10, 25, 50 και 100 έτη.

Σύμφωνα με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων υψών βροχής (Alternating Block Method), η βροχόπτωση διάρκειας d και περιόδου επαναφοράς T κατανέμεται ως εξής μέσα στη διάρκειά της. Από τη σχέση έντασης-διάρκειας-περιόδου επαναφοράς της μορφής της σχέσης και γνωρίζοντας ότι το ύψος βροχής ισούται με το γινόμενο της έντασης επί τη διάρκειά της, για βροχοπτώσεις της ίδιας περιόδου επαναφοράς T, προκύπτει η σχέση:

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{0.275} \quad (2.62)$$

όπου,

t₁: η χρονική στιγμή

t₂: η συνολική διάρκεια

h₁: το ύψος βροχόπτωσης τη χρονική στιγμή t₁

h₂: το συνολικό ύψος βροχόπτωσης

Με βάση τη σχέση υπολογίζονται τα ύψη βροχής κάθε επιμέρους διάρκειας (μέσα στη συνολική διάρκεια). Τα ύψη αυτά είναι αθροιστικά. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι διαφορές τους που είναι τα ύψη βροχής κάθε χρονικού διαστήματος και κατόπιν γίνεται η κατανομή τους ως εξής: Το μεγαλύτερο ύψος τοποθετείται στο κεντρικό χρονικό διάστημα, το αμέσως μικρότερο ύψος στο επόμενο χρονικό διάστημα από δεξιά, το αμέσως μικρότερο ύψος στο επόμενο χρονικό διάστημα από αριστερά και ου το καθεξής.

Για τον Ελληνικό χώρο, αντί της 24ωρης βροχής επιλέγεται η 12ωρη, καθώς οι λεκάνες είναι μικρότερες και το ανάγλυφο εντονότερο (Τσακίρης 1995). Αυτά τα χαρακτηριστικά έχει και η

μελετώμενη λεκάνη απορροής, επομένως επιλέγεται η 12ωρη και η 6ωρη βροχή. Αναπτύχθηκαν υετογράμματα για διάφορες περιόδους επαναφοράς και συγκεκριμένα για 2, 5, 10, 25, 50 και 100 έτη. Τα υετογράμματα παρουσιάζονται στο 4^ο κεφάλαιο.

2.6 Ανάλυση Ευαισθησίας

Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο θα ερευνηθεί η ανάλυση ευαισθησίας των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την υδρολογική και υδραυλική προσομοίωση. Η Ανάλυση Ευαισθησίας μελετά τις συνέπειες που υφίσταται η βέλτιστη λύση ενός γραμμικού μοντέλου, ως συνέπεια αλλαγών στις τιμές των παραμέτρων του. Μια τέτοιου είδους διαδικασία προσδίδει στο προσδιοριστικό πλαίσιο μοντελοποίησης του γραμμικού προγραμματισμού ένα είδος στοχαστικού χαρακτήρα, και για το λόγο αυτό πρέπει απαραίτητα να συνοδεύει τη λύση οποιουδήποτε προβλήματος.

Βασική μεθοδολογία

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

Ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας σε κάθε είσοδο (π.χ εύρος, κατανομές πιθανότητας).

Προσδιορισμός της μεταβλητής εξόδου - αποτελέσματος που πρόκειται να αναλυθεί.

Λειτουργία του μοντέλου αρκετές φορές χρησιμοποιώντας κάποια πειράματα σχεδιασμού που υπαγορεύονται από τη μέθοδο της επιλογής και την αβεβαιότητα των δεδομένων εισόδου.

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο, υπολογίζοντας τα μέτρα ευαισθησίας σύμφωνα με το ενδιαφέρον της ανάλυσης.

Μέθοδος “once at a time” (OAT)

Η μέθοδος ανάλυσης ευαισθησίας που ακολουθήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι μία από τις απλούστερες και είναι η προσέγγισή της μέσω διακύμανσης μιας παραμέτρου εισόδου κάθε φορά (One at a time – OAT / one factor at a time – OFAT), και παρακολούθηση της επίδρασης την οποία προκαλεί στο τελικό αποτέλεσμα.

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τη μετακίνηση μιας μεταβλητής εισόδου, εντός ορίων περιορισμού, διατηρώντας σταθερές όλες τις άλλες τιμές στην ονομαστική – αρχική τους τιμή. Επιστρέφοντας την μεταβλητή αυτή στην αρχική της τιμή, και επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία για άλλη μεταβλητή εισόδου με τον ίδιο τρόπο. Παρά την απλότητα της μεθόδου, αυτή η προσέγγιση δεν διερευνά πλήρως το πεδίο τιμών των μεταβλητών εισόδου, δεδομένου ότι δεν λαμβάνει υπόψη την ταυτόχρονη μεταβολή των μεταβλητών μειώνοντας κατά ένα βαθμό τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων. Αυτό σημαίνει ότι η μέθοδος προσέγγισης OAT/OFAT δεν μπορεί να ανιχνεύσει την παρουσία των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μεταβλητών εισόδου (Czitrom, 1999) .

2.7 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση είναι η συλλογή από επιλεγμένες δημοσιευμένες πηγές σχετικές με το θέμα της παρούσας εργασίας οι οποίες συνοδεύονται από σχολιασμό, κριτική ανάλυση των περιεχομένων και παράθεση σε ορισμένες περιπτώσεις των βασικών συμπερασμάτων κάθε έρευνας.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση συμβάλλει στην τεκμηρίωση της εργασίας και προσδίδει επιστημονικό χαρακτήρα στο περιεχόμενο της εργασίας. Στην περίπτωση που κατά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση έχουν εντοπιστεί κενά στη βιβλιογραφία που καλύπτει το συγκεκριμένο θέμα, τότε μέσω αυτής τεκμηριώνεται και η πρωτοτυπία της έρευνας και η συμβολή της στο συγκεκριμένο γνωστικό αντικείμενο.

Η παρουσίαση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας απαιτεί την ομαδοποίηση των δημοσιευμένων εργασιών σε επί μέρους θέματα, την αφαιρετική εξαγωγή κοινών χαρακτηριστικών ανά ομάδα, αλλά και των εντοπισμό των ιδιομορφιών της κάθε εργασίας.

Με βάση τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης καθορίστηκε λεπτομερέστερα το αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας, ορίστηκε ο ακριβής στόχος της και επιλέχθηκε η κατάλληλη μεθοδολογία για την επίτευξη του στόχου αυτού. Η διαδικασία καθορισμού του στόχου και της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε αποτέλεσε μία διαδικασία που επαναλήφθηκε στα διάφορα στάδια της Διπλωματικής Εργασίας, κατά την οποία ο στόχος και η μεθοδολογία εξειδικεύτηκαν και επανακαθορίστηκαν με βάση την πρόοδο των εργασιών.

Για τον λόγο αυτό, με τη χρήση ειδικών εργαλείων αναζήτησης βιβλιογραφικών αναφορών, προσδιορίζονται έρευνες σε θέματα συναφή με το αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

καθώς και μεθοδολογίες που έχουν εφαρμοστεί στην Ελλάδα και το εξωτερικό για την αντιμετώπιση του θέματος της συγκεκριμένης εργασίας.

Η αναζήτηση βιβλιογραφικών αναφορών αφορά στη χρήση κατάλληλων πηγών για τον εντοπισμό των τίτλων εργασιών, οι οποίες ήταν χρήσιμες στην εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας. Πηγές αναζήτησης βιβλιογραφίας αποτέλεσαν οι σημειώσεις και τα βιβλία των συναφών με το θέμα της Διπλωματικής Εργασίας μαθημάτων, άλλες Διπλωματικές Εργασίες και Διδακτορικές Διατριβές, βιβλία, πρακτικά συνεδρίων, άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά, καθώς και κάθε άλλο επιστημονικό έντυπο, στα οποία ήταν δυνατή η πρόσβαση είτε σε ηλεκτρονική, είτε σε έντυπη μορφή

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση αποτελείται από τρία στάδια:

Την αναζήτηση αναφορών σχετικών με την παρούσα εργασία

Την ανάκτηση και τη μελέτη των συγκεκριμένων αναφορών, και

Τέλος τη σύνθεση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

Αφού λοιπόν ανακτηθούν και μελετηθούν οι σχετικές αναφορές, ακολουθεί η σύνθεση η οποία αφορά την κριτική θεώρηση κάθε επιστημονικής εργασίας που εξετάστηκε και τη συγκριτική παρουσίαση των βασικών σημείων όλων των εργασιών που εξετάστηκαν.

Η Alonistioti D., και άλλοι, (2011) πραγματοποίησαν μία υδρολογική ανάλυση, για την περιοχή της Ανατολικής Αττικής, πριν και μετά το γεγονός μίας πυρκαγιάς, για να εκτιμηθεί η αλλαγή στην πλημμυρική διακινδύνευση. Οι πυρκαγιές αλλάζουν εντελώς τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά μιας λεκάνης απορροής, επηρεάζοντας άμεσα και έμμεσα την υδρολογική της συμπεριφορά. Επομένως, μια φωτιά σε δάσος, ακολουθούμενη από ένα γεγονός βροχόπτωσης, θα μπορούσε να προκαλέσει σημαντικές πλημμύρες στις κατάντη περιοχές.

Η δημοσίευση του Francisco C. και άλλων (1998) παρουσιάζει τα αποτελέσματα που βασίζονται στη χρήση GIS σε συνδυασμό με το υδραυλικό μοντέλο HEC-2 για τον υπολογισμό πλημμυρισμένων περιοχών, στη λεκάνη απορροής Livramento. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σύμφωνα με τη δημοσίευση ήταν ικανοποιητικά. Επομένως, η σύνδεση αυτών των μοντέλων για τη μελέτη της πλημμυρικής διακινδύνευσης είναι ένας τρόπος για να εξαχθούν πολύ χρήσιμα συμπεράσματα. Για παράδειγμα, θα μπορούσαν να εκτιμηθούν οι σχετικές καταστροφές που προκαλούνται από ένα πλημμυρικό φαινόμενο. Αυτή είναι μία πολύ χρήσιμη προσέγγιση για τη διαχείριση πλημμυρών.

Η μελέτη των Gumindoga W. και άλλων (2015) που πραγματοποιήθηκε σε ένα σύμπλεγμα υπολεκανών και υδατορευμάτων στη Ζιμπάμπουε, απέδειξε την καταλληλότητα του μοντέλου

HEC-HMS για υδρολογική προσομοίωση, καθώς προέβλεψε με ικανοποιητική ακρίβεια την ήδη μετρημένη απορροή και τη μέγιστη ροή των υπολεκανών.

Οι Knebl and others (2005) πραγματοποίησαν μία μελέτη στη λεκάνη απορροής του ποταμού San Antonio στο Texas, με σκοπό τη δημιουργία ενός πλαισίου για την μοντελοποίηση πλημμυρών περιφερειακής κλίμακας. Για τη διεκπεραίωση αυτής της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα HEC-RAS, HEC-HMS και NEXRAD για ένα παρατηρούμενο επεισόδιο βροχής το οποίο έπληξε την περιοχή το καλοκαίρι του 2002. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με δορυφορικές εικόνες και τα αποτελέσματα είχαν ικανοποιητική ακρίβεια.

Επιπλέον, οι Gül and others (2009), σε δημοσίευσή τους, χρησιμοποίησαν τα προγράμματα HEC-RAS και HEC-HMS για να προσομοιώσουν τη λεκάνη απορροής του ποταμού Bostanli, στην Τουρκία, η οποία βρισκόταν κάτω από την απειλή πλημμυρών για πολλά χρόνια. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η κατασκευή φράγματος όπως σχεδιάστηκε, θα είχε θετικό αντίκτυπο ως μέτρο ελέγχου των ενδεχόμενων πλημμυρών.

Ο Goodel (2005) πραγματοποίησε μελέτη στην οποία χρησιμοποίησε τα προγράμματα HEC-RAS και HEC-HMS ώστε να προσομοιώσει μια σχετικά μικρή και απότομη λεκάνη, ενός ανώνυμου ποταμού. Σκοπός του ήταν να μελετήσει την κατασκευή δύο φραγμάτων, το ένα όπισθεν του άλλου, τα οποία θα παρέχουν μεγάλη αποθηκευτικότητα νερού.

Οι Haghizadeh and others (2011) στη μελέτη τους χρησιμοποίησαν το υδραυλικό πρόγραμμα HEC-RAS και την επέκτασή του στο ArcGIS για την προσομοίωση της ροής στη λεκάνη απορροής του ποταμού Neka. Έχοντας τα υδρογραφήματα του ποταμού, τα οποία μελετήθηκαν κατά τις περιόδους πλημμυρών,

κατάφεραν να βαθμονομήσουν και να επαληθεύσουν το υδραυλικό μοντέλο ικανοποιητικά.

Επομένως η εφαρμογή του προγράμματος για την μοντελοποίηση του επιπέδου του νερού είχε ακριβή αποτελέσματα.

Οι Ahmad and others (2010) εξέτασαν την αναγκαιότητα για την εκτίμηση των ενδεχόμενων καταστροφών. Η μελέτη τους πραγματοποιήθηκε στην πλημμυρική ζώνη Nullah Lai, στο Πακιστάν, με τη χρήση των προγραμμάτων HEC-RAS και HEC-HMS. Η τοπογραφική αποτύπωση της περιοχής τους βοήθησε να εκτιμήσουν με ακρίβεια τις πιθανές καταστροφές μίας ενδεχόμενης πλημμυρας.

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1 Γενικά Στοιχεία

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο Υδατικό διαμέρισμα Αττικής και συγκεκριμένα, μεταξύ τεσσάρων μεγάλων δήμων της (Χαλάνδρι, Μαρούσι, Βριλήσσια, Πεντέλη). Χαρακτηρίζεται ως πεδινή και περιβάλλεται βορειοανατολικά από την Πάρνηθα, βορειοδυτικά από το Πεντελικό όρος και Νοτιοανατολικά από τον Υμηττό (Εικόνα 3.1). Τα όρη αυτά σχηματίζουν μια υδρολεκάνη δεκαεννιά περίπου τετραγωνικών χιλιομέτρων.

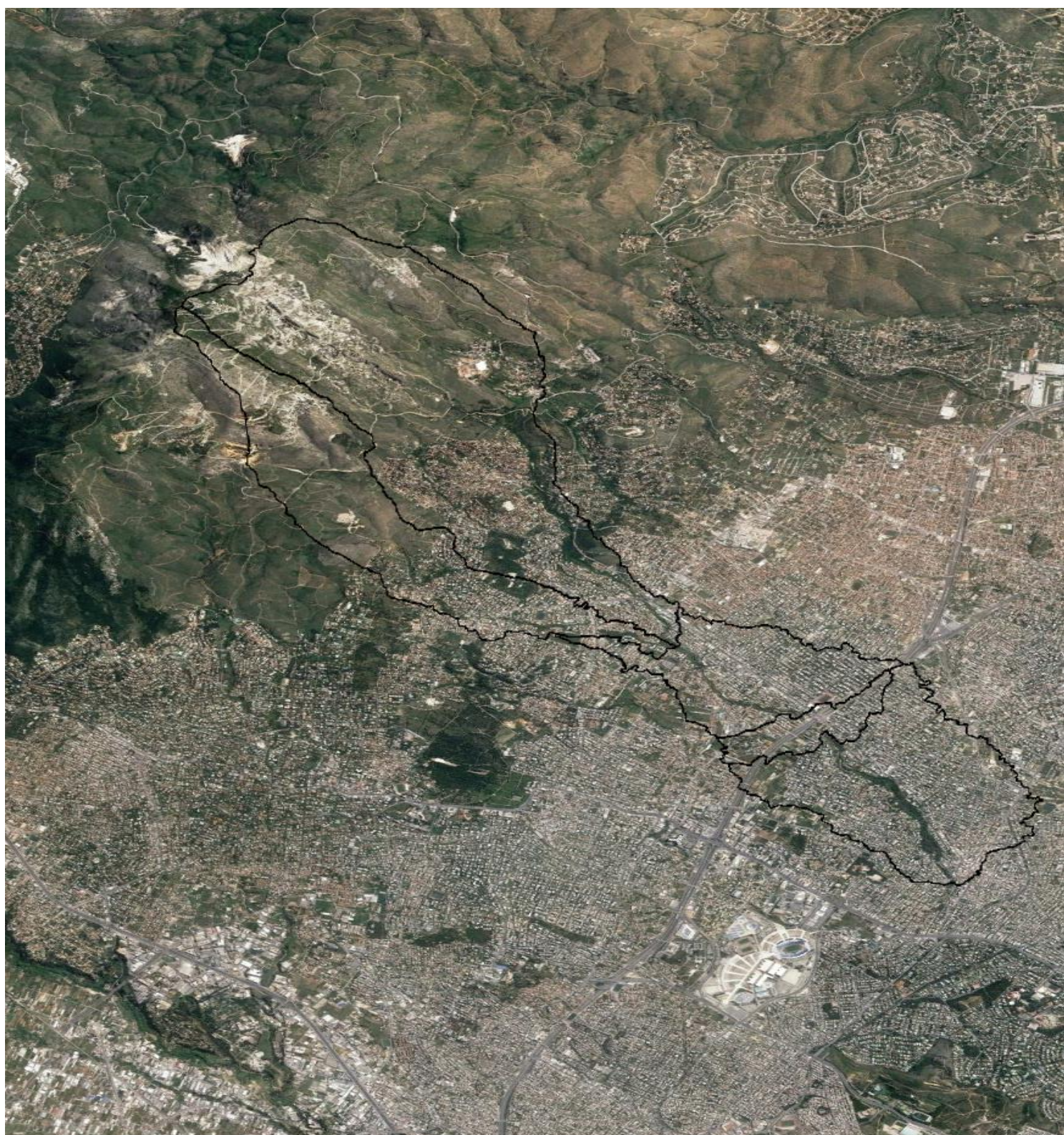
Τα τελευταία χρόνια, η περιοχή μελέτης παρουσιάζει μεγάλη αστική ανάπτυξη. Παρακάτω, παρατίθενται τα στοιχεία της τελευταίας απογραφής, των τεσσάρων αυτών μεγάλων δήμων.

Πίνακας 3.1: Μόνιμος πληθυσμός και πυκνότητα πληθυσμού (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ 2011)

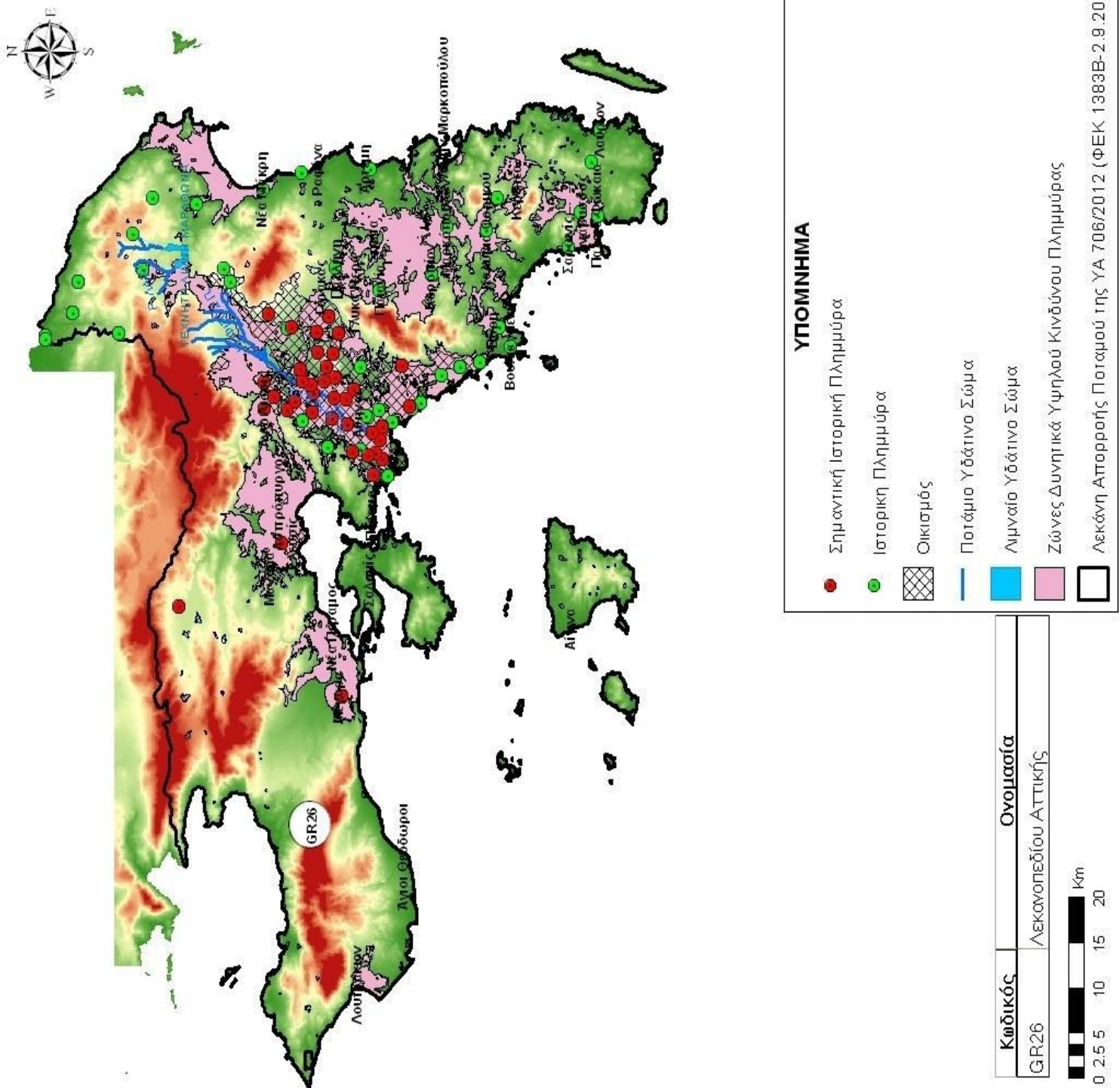
Δήμος	Μόνιμος Πληθυσμός(Κάτοικοι)	Πυκνότητα μόνιμου πληθυσμού (κάτοικοι/km ²)
Αμαρουσίου	72333	5590.71
Βριλησίων	30741	7972.25
Πεντέλης	34939	968.67
Χαλανδρίου	74192	6866.45

Η περιοχή παρουσιάζει ενδιαφέρον από άποψη πλημμυρικής διερεύνησης κυρίως λόγω του αστικού της ιστού και της πίεσης για περαιτέρω οικιστική ανάπτυξη. Η πιο πρόσφατη και σημαντική πλημμύρα πραγματοποιήθηκε το 2013 και είχε απολογισμό μία νεκρή, καταστροφές αυτοκινήτων και περιουσιών, πλημμύρες σε δρόμους και πρόσκαιρη διακοπή συγκοινωνιών τοπικά.

Στην Εικόνα 3.2, παρουσιάζονται οι ζώνες δυνητικά υψηλού κινδύνου για το υδατικό διαμέρισμα της Αττικής. Παρατηρείται ότι οι κατάντη οικισμοί της περιοχής μελέτης, βρίσκονται εντός αυτών των ζωνών.



Εικόνα 3.1: Όρια περιοχής μελέτης και υπολεκανών



Εικόνα 3.2: Ζώνες δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας για το υδατικό διαμέρισμα 06 «ΑΤΤΙΚΗ» Πηγή: (Ειδική Γραμματεία Υδάτων 2012)

3.2 Αυτοψία στην Περιοχή Μελέτης

Η πορεία που ακολουθήθηκε στο οδοιπορικό ήταν αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 3.3. Η αυτοψία στην περιοχή μελέτης ξεκινάει από το ύψος της Αττικής οδού, η οποία διασχίζει κάθετα τη ρεματιά Χαλανδρίου, και φτάνει έως την οδό Κ. Βάρναλη.

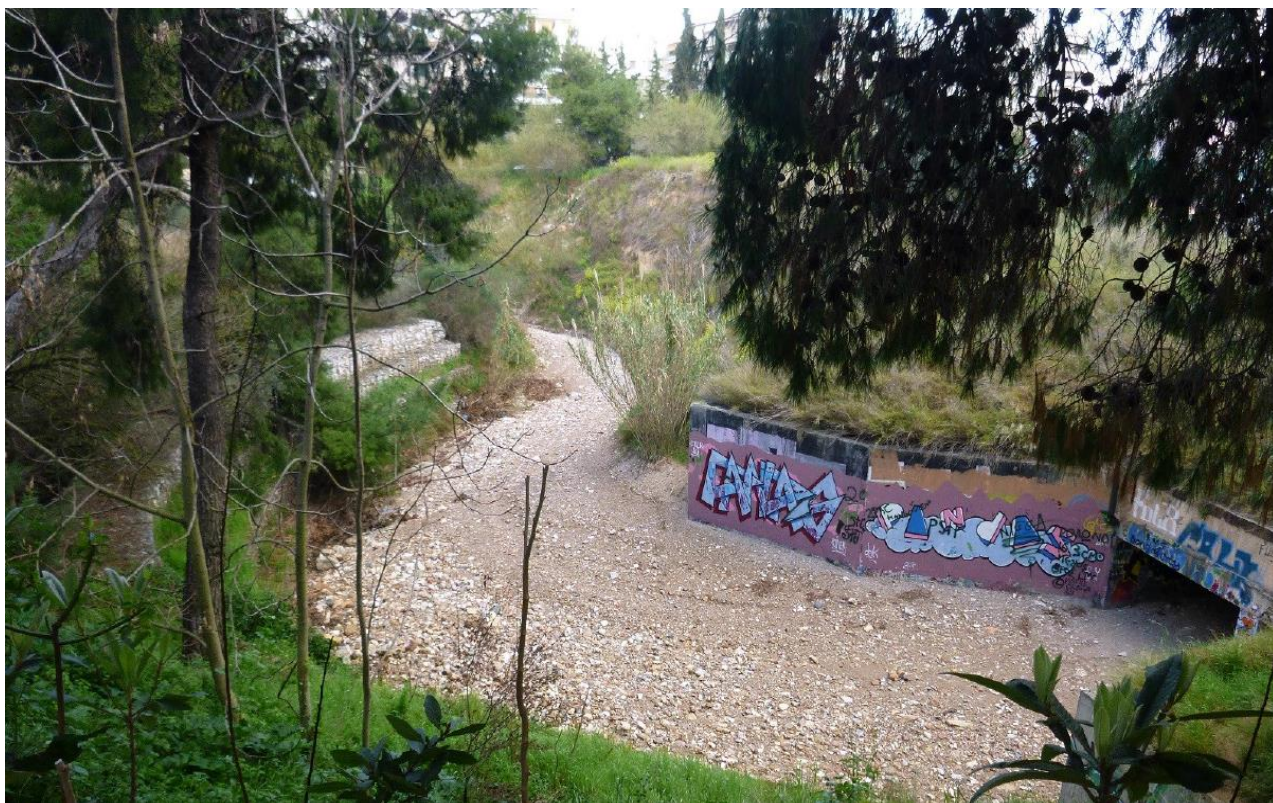
Το ρέμα εγκιβωτίζεται κάτω από την Αττική οδό σε αγωγό μήκους 315m, πλάτους 8m, ύψους 3m και κλίσης 1.1%. Τα στοιχεία του αγωγού αποκτήθηκαν από τη Διεύθυνση Λειτουργίας Συντήρησης & Εκμετάλλευσης Υποδομών με Σύμβαση Παραχώρησης.

Η έξοδος του ρέματος από τη διασταύρωση με την Αττική οδό φαίνεται στην Εικόνα 3.4.

Στο οδοιπορικό αυτό, διαπιστώθηκε ότι ταβέρνες και καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος παραμένουν ανεμπόδιστα στις εκτάσεις δίπλα στη Ρεματιά, με αποτέλεσμα την αθρόα απόθεση μπαζών και σκουπιδιών σε ορισμένα σημεία της. Κυρίως όμως πολλές καταπατημένες εκτάσεις μέσα ή δίπλα στα πρανή δεν αποδεσμεύτηκαν ποτέ από τους ιδιοκτήτες τους, τις οποίες, στην καλύτερη περίπτωση, τις έχουν μετατρέψει σε υπαίθριους χώρους στάθμευσης. Επίσης, παρατηρήθηκε η στενή σχέση του ρέματος με την πόλη και το κέντρο της όπως επίσης η ποικιλομορφία του ανάγλυφου της κοίτης. Η ρεματιά μοιάζει να ασφυκτιά και να συρρικνώνεται γιατί το Χαλάνδρι, πλέον, αποτελεί έναν υπερτοπικό πόλο και έναν πολυσύχναστο συγκοινωνιακό κόμβο.



Εικόνα 3.3: Οδοιπορικό στην περιοχή μελέτης



Εικόνα 3.4: Η ρεματιά αμέσως μετά την έξοδο από τη διασταύρωση της με την Αττική Οδό



Εικόνα 3.5: Κατοικία πάνω στην όχθη του ρέματος



Εικόνα 3.6: Ο Ι.Ν. Αγίου Αθανασίου και ένας παιδότοπος δίπλα στις όχθες του ρέματος



Εικόνα 3.7: Η γέφυρα στην Οδό Πολυδρόσου



Εικόνα 3.8: Η γέφυρα στην οδό Δαφνίδος



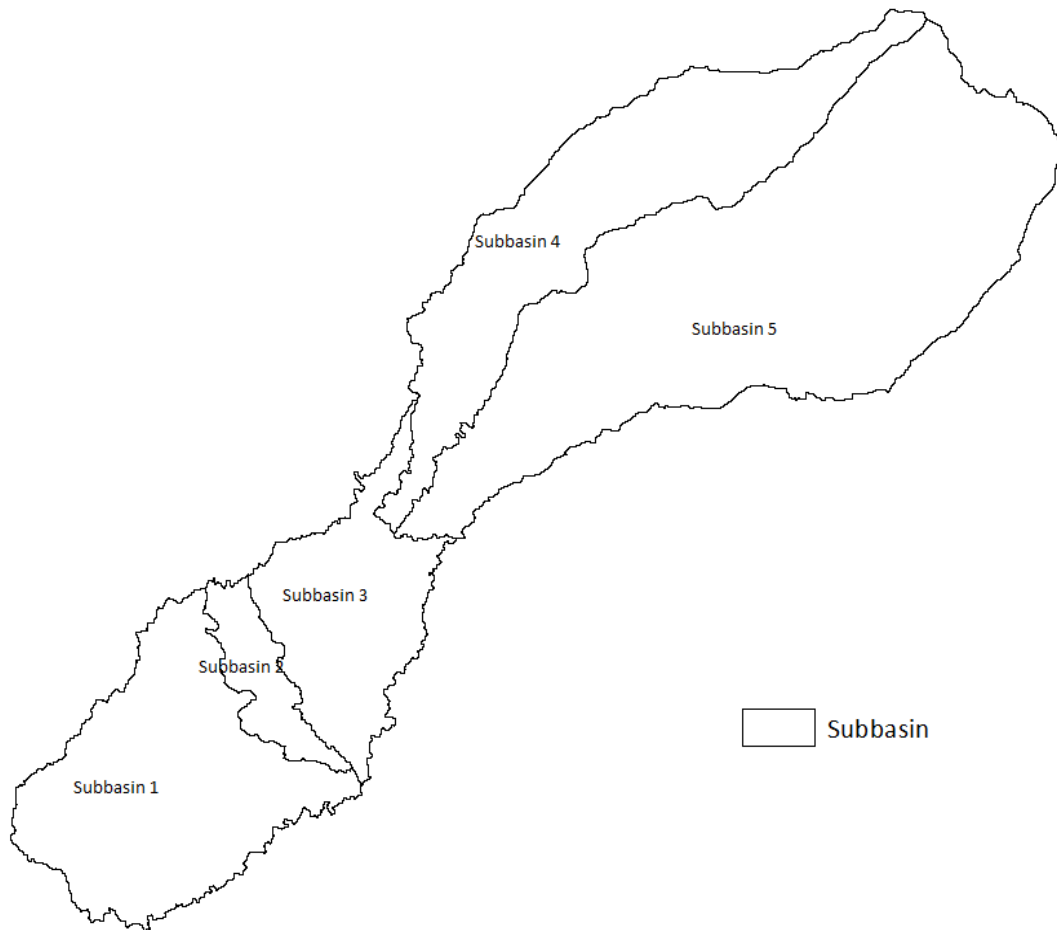
Εικόνα 3.9: Πεζογέφυρα λίγο πριν το τέλος του οδοιπορικού

3.3 Λεκάνη απορροής ρέματος Χαλανδρίου

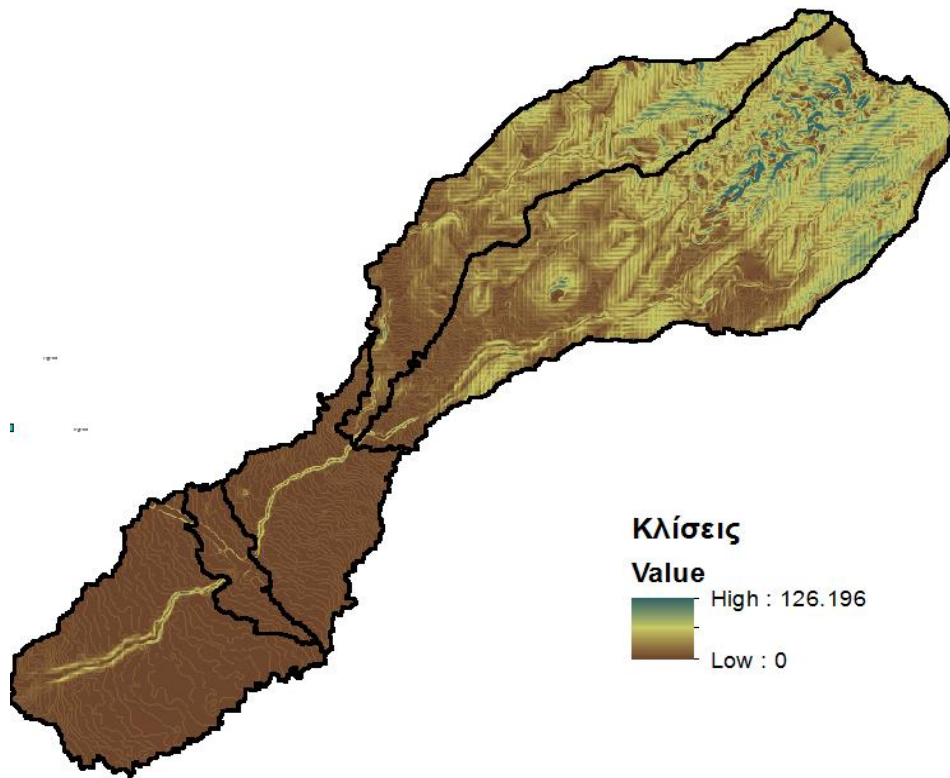
Η λεκάνη απορροής του ρέματος Χαλανδρίου έχει συνολική έκταση 18,9 Km². Η λεκάνη αυτή χωρίστηκε σε 5 υπολεκάνες, τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται παρακάτω Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά υπολεκανών

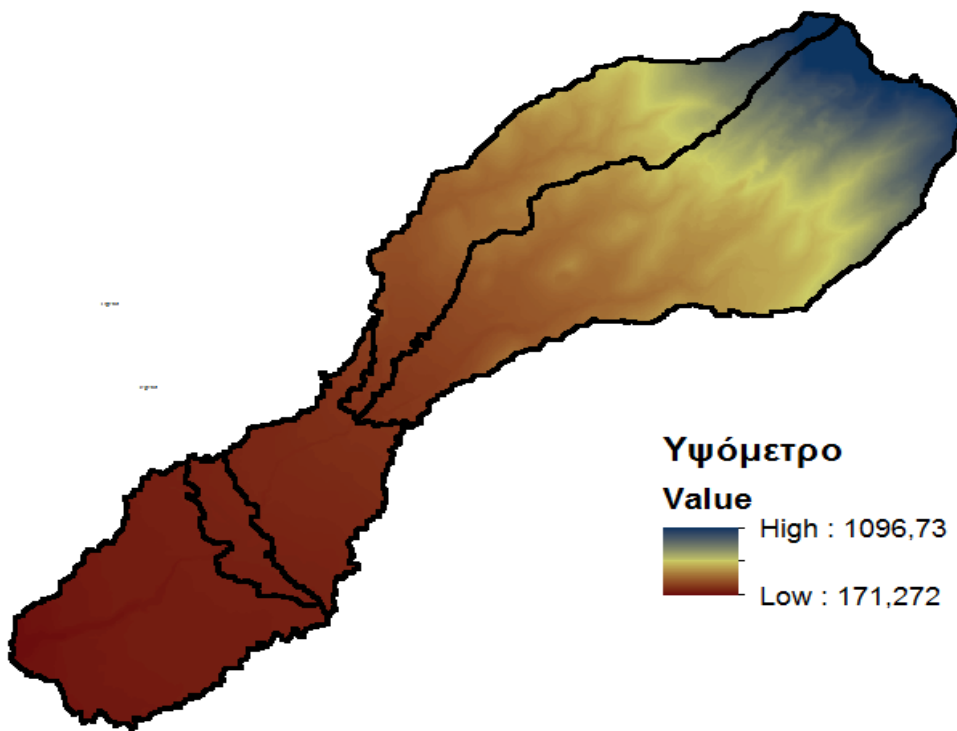
Λεκάνη	Εμβαδό (km ²)	Μέσο υψόμετρο (m)	Μέση Κλίση (%)
Υπολεκάνη 1	3.69	199.15	3.01
Υπολεκάνη 2	0.67	213.85	2.69
Υπολεκάνη 3	2.13	231.35	3.95
Υπολεκάνη 4	3.94	472.86	22.37
Υπολεκάνη 5	8.45	548.63	27.56



Εικόνα 3.10: Υπολεκάνες απορροής περιοχής μελέτης



Εικόνα 3.11: Κλίσεις υπολεκανών



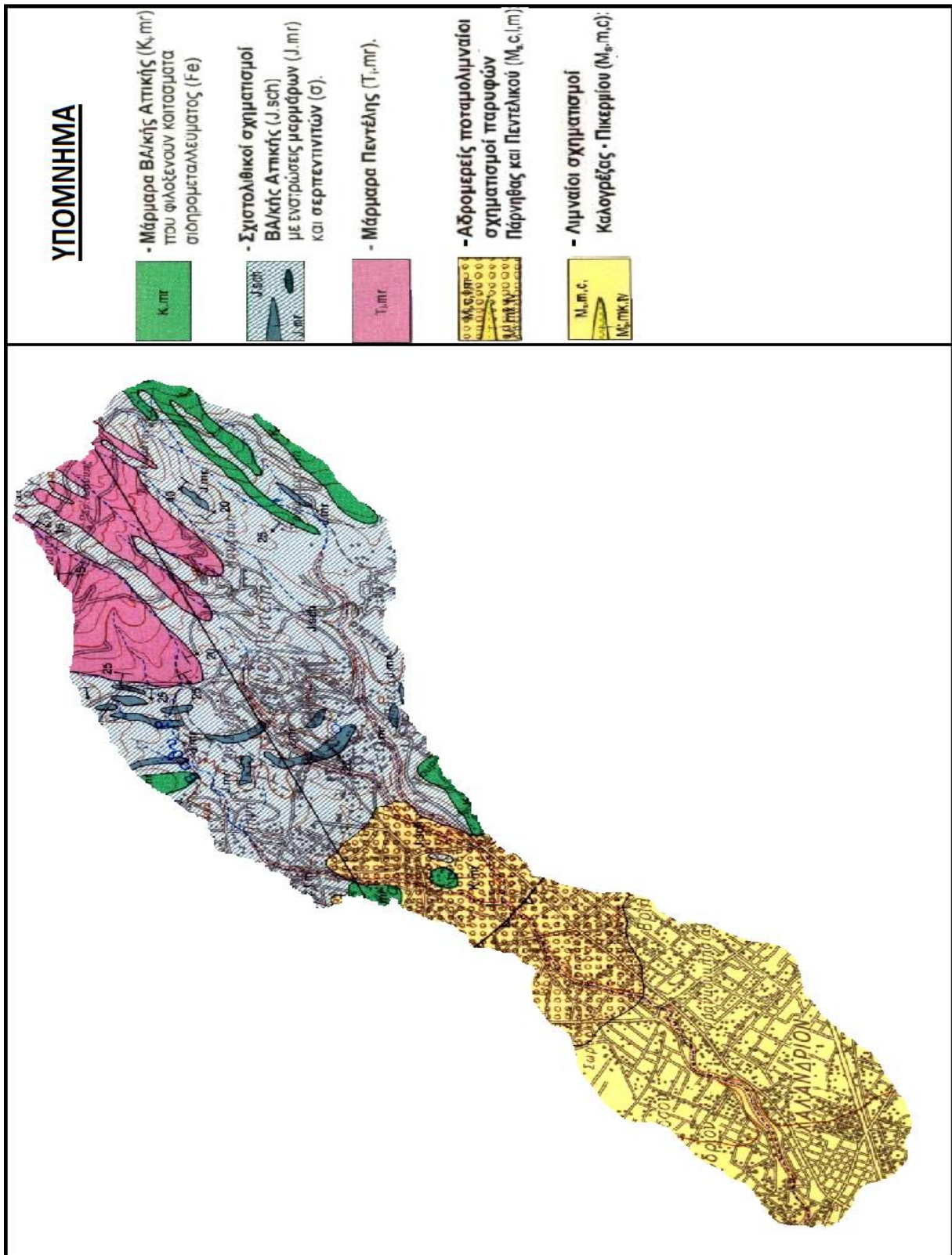
Εικόνα 3.12: Υψόμετρο υπολεκανών

3.3.1 Εδαφολογικά χαρακτηριστικά περιοχής

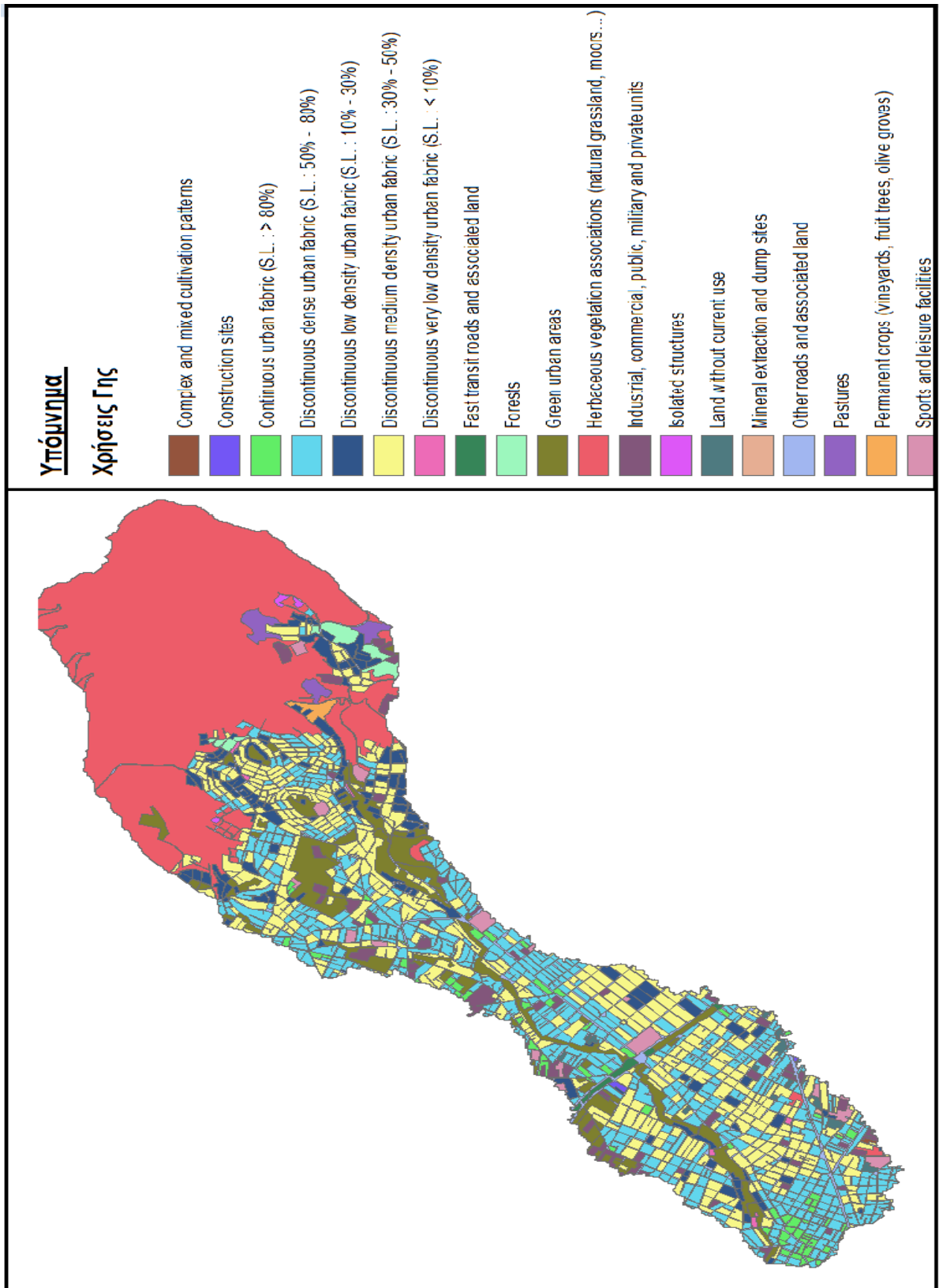
Προκειμένου να εκπονηθεί οποιαδήποτε υδρολογική μελέτη είναι απαραίτητο να είναι γνωστά τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Οι ιδιότητες των πετρωμάτων και των γεωλογικών σχηματισμών καθορίζουν τις τιμές των εξαιρετικά σημαντικών συντελεστών απορροής. Υπάρχουν εδάφη για παράδειγμα που χαρακτηρίζονται ως αδιαπέρατα, που σημαίνει ότι οι απώλειες λόγω διήθησης σε αυτά είναι σχεδόν μηδενικές. Ύστερα από αίτηση στο Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ), διατέθηκαν δεδομένα σχετικά με τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά του Φύλλου-Χάρτη Κηφισιάς, που βασίζονται σε γεωλογικούς χάρτες 1:50.000 και τα οποία στη συνέχεια τροποποιήθηκαν για τη περιγραφή μόνο της περιοχής μελέτης. Ο εδαφολογικός χάρτης παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.12.

3.3.2 Χρήσεις γης

Οι χρήσεις γης της περιοχής αποτελούν επίσης σημαντικά δεδομένα για τον καθορισμό του συντελεστή απορροής κατά τη μέθοδο SCS, η οποία θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν δημιουργήθηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος Corine που εποπτεύεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση για το σύνολο της Ελλάδας και περιλαμβάνουν δεδομένα κάλυψης γης με πιο πρόσφατα αυτά του 2000. Ο χάρτης χρήσεων γης της περιοχής ενδιαφέροντος φαίνεται στην Εικόνα 3.13.



Εικόνα 3.12: Γεωλογία της λεκάνης απορροής του ρέματος (Πηγή: ΙΓΜΕ 2003)



Εικόνα 3.13: Χάρτης Χρήσεων Γης της περιοχής μελέτης

3.4 Γεωμορφολογική και Υδρολογική ανάλυση της λεκάνης

Η γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση της λεκάνης πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον GIS, με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης του HEC-GeoHMS. Το HEC-GeoHMS αποτελεί μια προέκταση του ArcMap και διατίθεται ελεύθερα μέσω της ιστοσελίδας του Κέντρου Τεχνικής Υδρολογίας του Ινστιτούτου Υδατικών Πόρων που ανήκει στο Σώμα Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>).

Με τη βοήθεια αυτού, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να οπτικοποιεί τη χωρική πληροφορία, να καταγράφει τα χαρακτηριστικά της λεκάνης, να οριοθετεί τις λεκάνες και τα ρέματα και κατ' επέκταση να παράγει τα απαραίτητα αρχεία εισόδου που απαιτούνται για την εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS.

Τα αρχεία εισόδου στο HEC-GeoHMS είναι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, ο υδρογεωλογικός χάρτης, ο χάρτης χρήσεων γης καθώς και άλλα αρχεία χωρικών δεδομένων σε διανυσματική μορφή, όπως αυτό του υδρογραφικού δικτύου.

Με τη διαδικασία η οποία θα αναλυθεί στα επόμενα της εργασίας, παράγονται δύο αρχεία, τα οποία αποτελούν τα αρχεία εισόδου στο πρόγραμμα HEC-HMS. Συγκεκριμένα εξάγονται τα εξής:

- Αρχείο χάρτη (background map), στον οποίο οπτικοποιούνται οι υπολεκάνες απορροής και τα υδατορεύματα της περιοχής μελέτης
- Αρχείο του μοντέλου της λεκάνης απορροής (basin model), το οποίο περιέχει τα υδρολογικά και γεωμορφολογικά στοιχεία της λεκάνης

Τα υπόλοιπα αρχεία που απαιτούνται για τη λειτουργία του HEC-HMS είναι το μετεωρολογικό μοντέλο, τα παρατηρούμενα πλημμυρογραφήματα και κάποιες παράμετροι για την εφαρμογή των μαθηματικών προτύπων του προγράμματος.

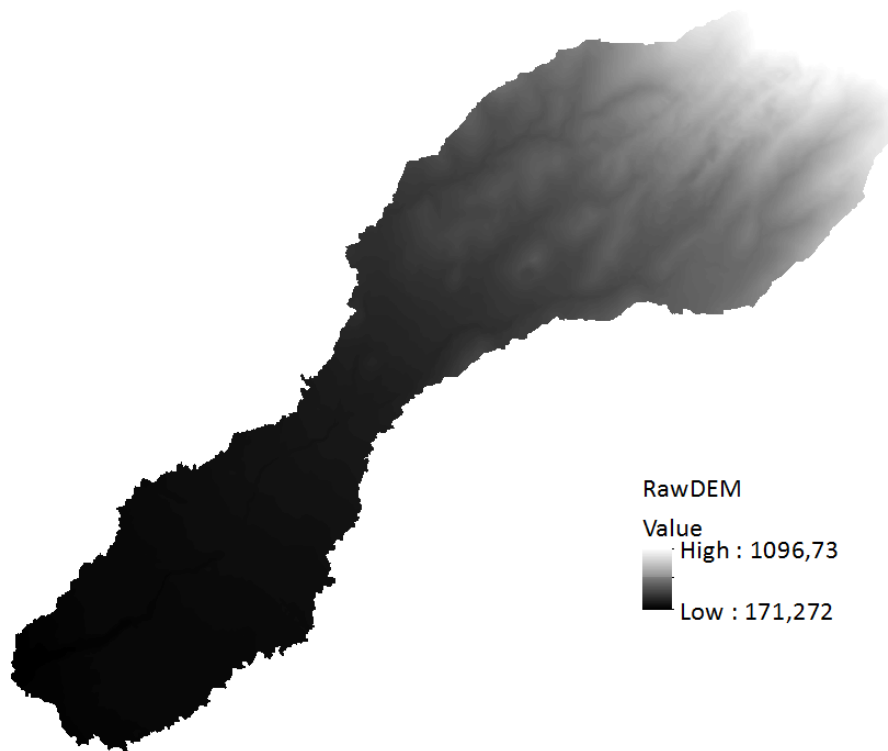
Τα βασικά βήματα που ακολουθούνται στο HEC-GeoHMS είναι:

1. Η προεπεξεργασία του μοντέλου εδάφους (Terrain Preprocessing)
2. Ο ορισμός της υπολεκάνης μελέτης (project) που θα εισαχθεί στο HEC-HMS (HMS Project Setup)
3. Η επεξεργασία της λεκάνης απορροής (Basin Processing)
4. Ο υπολογισμός και προσδιορισμός των υδρολογικών και γεωμορφολογικών δεδομένων (Stream and Watershed Characteristics)

5. Τέλος, η προετοιμασία του αρχείου λεκάνης απορροής για εισαγωγή στο υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS (HEC-HMS Model Files).

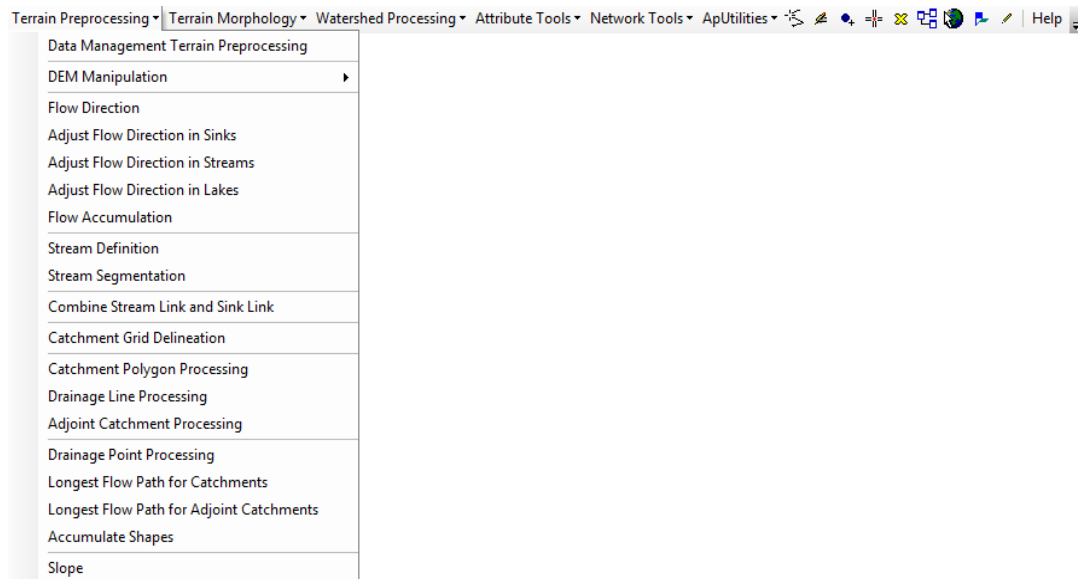
3.4.1 Προεπεξεργασία του μοντέλου εδάφους (Terrain Preprocessing)

Προκειμένου να ξεκινήσει η επεξεργασία στο HEC-GeoHMS, απαιτείται η προεπεξεργασία των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής μελέτης. Στη παρούσα εργασία, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιήθηκε έχει διάσταση κανάβου 5m x 5m και διατέθηκε από την Κτηματολόγιο Α.Ε.



Εικόνα 3.14: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής μελέτης

Η διαδικασία της προεπεξεργασίας του μοντέλου εδάφους επιτυγχάνεται μέσω των επιλογών της εντολής Terrain Preprocessing που φαίνονται στην Εικόνα 3.15.

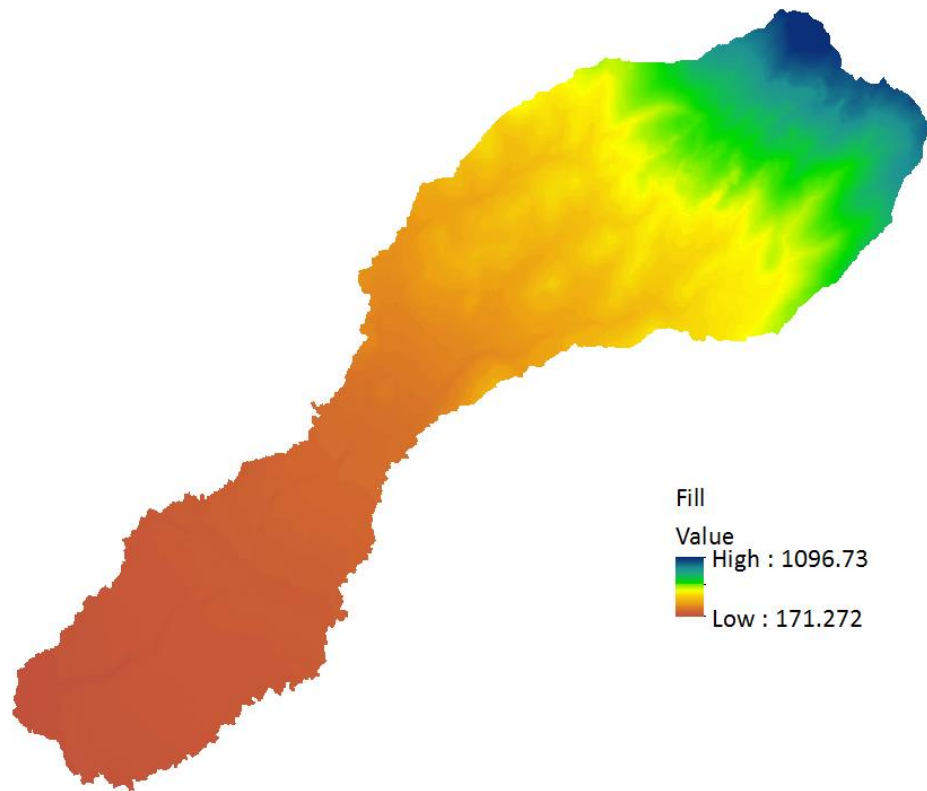


Εικόνα 3.15: Εντολές του *Terrain Preprocessing* της εργαλειοθήκης *HEC-GeoHMS*

Στη συνέχεια περιγράφονται οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία προεπεξεργασίας του εδάφους.

Fill Sinks

Κατά τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους προκύπτουν ψευδή βυθίσματα στο ανάγλυφο. Ως βύθισμα, θεωρείται ένα ή περισσότερα φατνία, γύρω από τα οποία υπάρχουν φατνία με υψηλότερο υψόμετρο. Τα βυθίσματα αυτά διορθώνονται ώστε να μην απομονώνουν τμήματα της λεκάνης που δημιουργούν προβλήματα στη μετέπειτα διαδικασία εξαγωγής του υδρογραφικού δικτύου (Στάμου & Σκοπελίτη, 2013).



Εικόνα 3.16: Διόρθωση βυθισμάτων ψηφιακού μοντέλου εδάφους

Flow direction

Στη συνέχεια, δημιουργείται ο κানাβος διεύθυνσης απορροής. Εφαρμόζεται στον κানাβο υψομέτρου και υπολογίζει για κάθε φατνίο προς τα πού θα κατευθυνθεί η ροή. Η βασική αρχή του κανάβου απορροής είναι ότι η απορροή ξεκινά από κάθε φατνίο του ψηφιακού μοντέλου εδάφους προς ένα και μόνο φατνίο από τα 8 γειτονικά του, ανάλογα με τη διεύθυνση της μέγιστης κλίσης. Η κλίση μεταξύ δύο γειτονικών φατνίων υπολογίζεται ως η διαφορά των υψομέτρων τους διαιρεμένη με το 1, αν το εν λόγω φατνίο βρίσκεται οριζόντια ή κάθετα του αρχικού, ή διαιρεμένη με το 1/2 αν βρίσκεται διαγώνια. Ανάλογα με τη διεύθυνση της απορροής, κάθε φατνίο παίρνει μια τιμή όπως φαίνεται στην ακόλουθη Εικόνα 3.17 (Στάμου& Σκοπελίτη,2013).

32	64	128
16		1
8	4	2

1= ανατολικά, 2= νοτιοανατολικά
 4= νότια, 8= νοτιοδυτικά
 16=δυτικά, 32= βορειοδυτικά
 64= βόρεια, 128= βορειοανατολικά

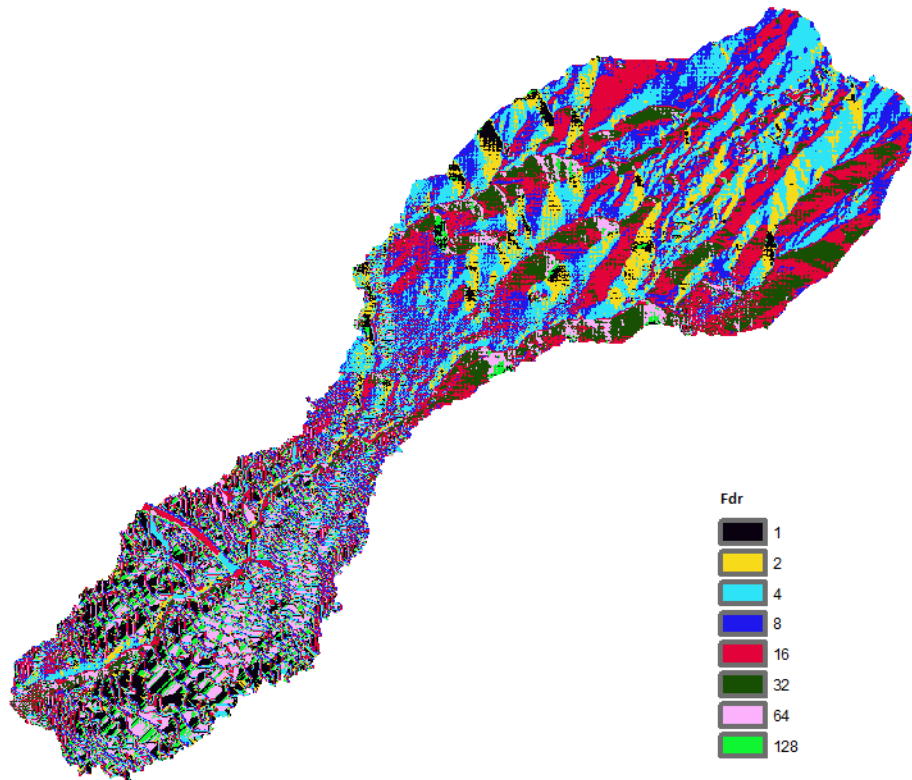
Εικόνα 3.17: Τιμή κεντρικού φατνίου ανάλογα με τη διεύθυνση απορροής (Στάμου & Σκοπελίτη, 2013)

Έτσι, σύμφωνα με την παραπάνω κωδικοποίηση της διεύθυνσης απορροής, προκύπτει τελικά ο κánaβος διεύθυνσης απορροής, όπως φαίνεται παρακάτω.

↘	↘	↓	↓	↙
→	↘	↓	↙	↓
↗	→	↘	↓	↙
↘	→	↓	↓	↓
→	→	→	↘	←

2	2	4	4	8
1	2	4	8	4
128	1	2	4	8
2	1	4	4	4
1	1	1	2	16

Εικόνα 3.18: Κánaβος διευθύνσεων απορροής (Στάμου & Σκοπελίτη, 2013)

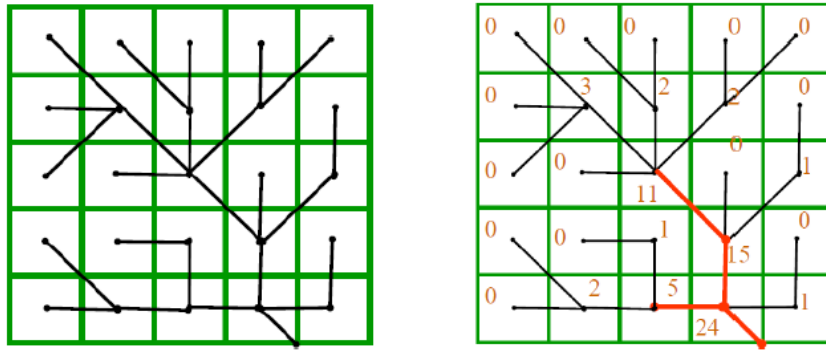


Εικόνα 3.19: Κανάβος διεύθυνσης απορροής περιοχής μελέτης

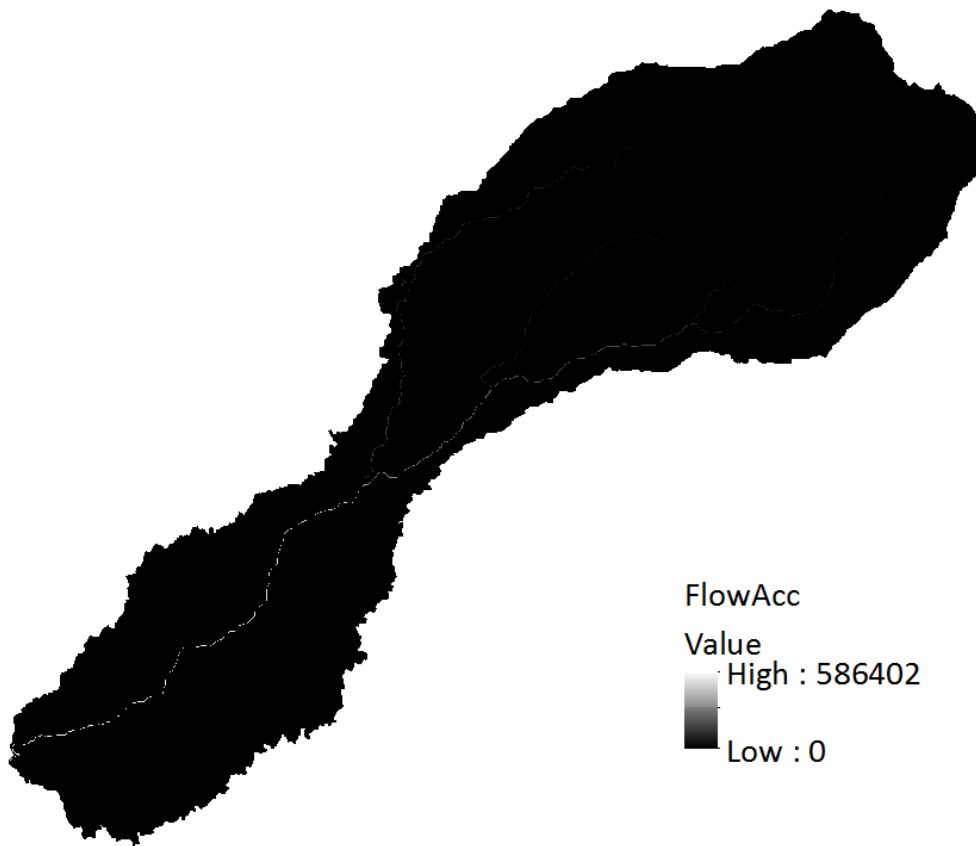
Flow accumulation

Βασιζόμενοι στο κανάβο διεύθυνσης απορροής που δημιουργήθηκε προηγουμένως, ακολουθεί ο προσδιορισμός του κανάβου της συγκεντρωτικής ροής του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Η συγκεντρωτική ροή κάθε φατνίου του κανάβου ισούται με το άθροισμα των γειτονικών φατνίων που απορρέουν σε αυτό. Τα φατνία με τις μηδενικές τιμές αντιστοιχούν στις κορυφογραμμές ενώ αυτά με υψηλές τιμές αντιστοιχούν στις μισγάγγειες (Στάμου & Σκοπελίτη, 2013).

Επομένως, καθορίζεται ο αριθμός των ανάντη φατνίων που αποστραγγίζονται σε ένα συγκεκριμένο φατνίο. Το εμβαδόν της ανάντη περιοχής αποστράγγισης μπορεί να υπολογιστεί εύκολα με τον πολλαπλασιασμό της τιμής συσσώρευσης του συγκεκριμένου κατάντη κελιού με το εμβαδόν του κελιού.



Εικόνα 3.20: Κάναβος πλήθους φατνίων απορροής (Στάμου & Σκοπελίτη, 2013)



Εικόνα 3.21: Κάναβος πλήθος φατνίων απορροής περιοχής μελέτης

Stream definition

Με την εντολή αυτή δημιουργείται ένας κάναβος υδατορευμάτων έχοντας ως εισαγόμενο κάναβο εκείνον της συγκεντρωτικής απορροής και ορίζοντας ένα κατώφλι (threshold). Το κατώφλι είναι μια ελάχιστη τιμή οριοθέτησης ποταμού που επιλέγεται από το χρήστη. Ουσιαστικά, επιλέγονται τα κελιά που έχουν συσσώρευση ροής μεγαλύτερη από το οριζόμενο κατώφλι. Στον πίνακα εισαγωγής των δεδομένων, εμφανίζεται μια προεπιλεγμένη τιμή για το κατώτατο όριο οριοθέτησης του ποταμού, η οποία αποτελεί το 1% της μέγιστης

συσσωρευμένης ροής. Ωστόσο, οποιαδήποτε τιμή κατωφλίου μπορεί να επιλεγεί. Μικρή τιμή κατωφλίου οδηγεί σε πυκνότερο υδρογραφικό δίκτυο και σε περισσότερες οριοθετημένες λεκάνες (Fleming & Doan, 2013).

Τα κριτήρια επιλογής της τιμής του κατωφλίου είναι:

- Να προκύπτουν αρκετές λεκάνες από αυτές που μας ενδιαφέρουν
- Να εμφανίζονται τα ποτάμια που διακρίνονται σε χάρτες κλίμακας 1:500.000

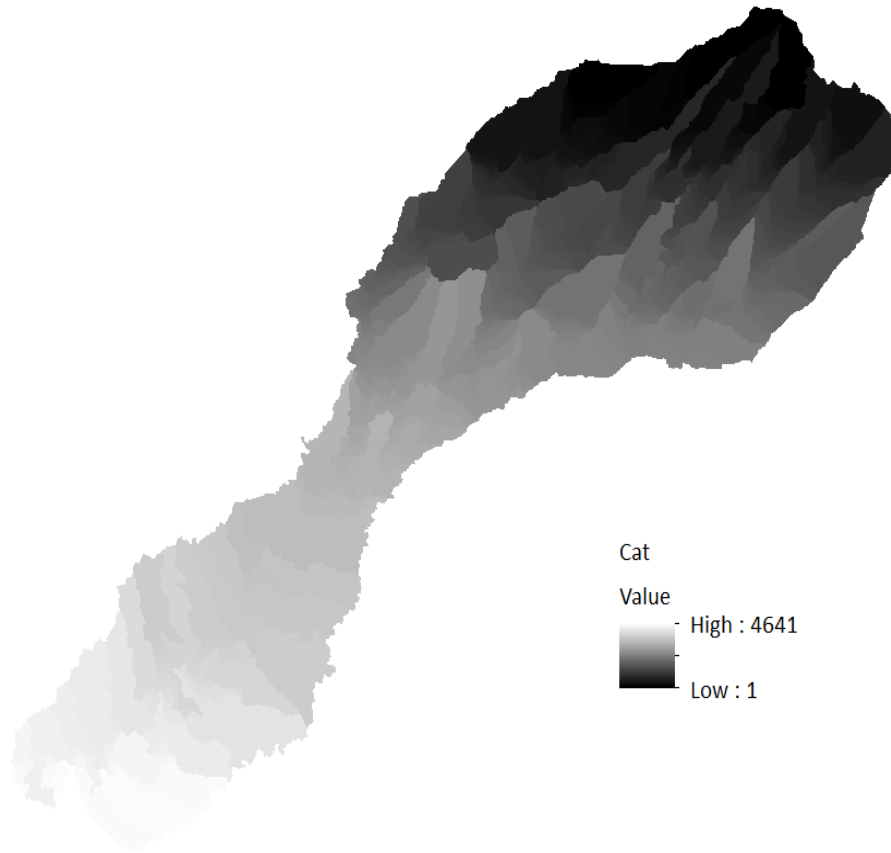
Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκαν αρκετές δοκιμές για τον προσδιορισμό του κατωφλίου, προκειμένου να εμφανίζεται, όσο το δυνατό, όλο το υδρογραφικό δίκτυο. Επομένως, ως εμβασμό προσδιορισμού ποταμού επιλέχθηκε η τιμή $0,147\text{km}^2$, η οποία τιμή αντιστοιχεί σε 5864 ελάχιστο αριθμό φατνίων που προσδιορίζουν ένα ποτάμι.

Stream segmentation

Με τη χρήση της συγκεκριμένης εντολής, γίνεται ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου με μια μέθοδο αρίθμησης της σύνδεσης των τμημάτων από τα οποία αποτελείται το υδρογραφικό δίκτυο. Με την ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου εντοπίζονται και ταξινομούνται οι τύποι των ροών ανάλογα με τον αριθμό των παραποτάμων. Υπάρχουν δύο μέθοδοι ιεράρχησης του υδρογραφικού δικτύου, η μέθοδος Strahler και η μέθοδος Shreve. Στα πλαίσια της εργασίας επιλέχθηκε η μέθοδος Strahler.

Catchment grid delineation

Η εντολή αυτή δημιουργεί υπολεκάνες για κάθε τμήμα του υδρογραφικού δικτύου.



Εικόνα 3.22: Οριοθέτηση υπολεκανών για κάθε τμήμα υδατορεύματος σε μορφή πλέγματος

Όπως αναφέρθηκε, λόγω της επιλογής μικρής τιμής καταφλίου, δημιουργήθηκε πυκνότερο υδρογραφικό δίκτυο και κατ' επέκταση περισσότερες οριοθετημένες υπολεκάνες.

Catchment polygon processing

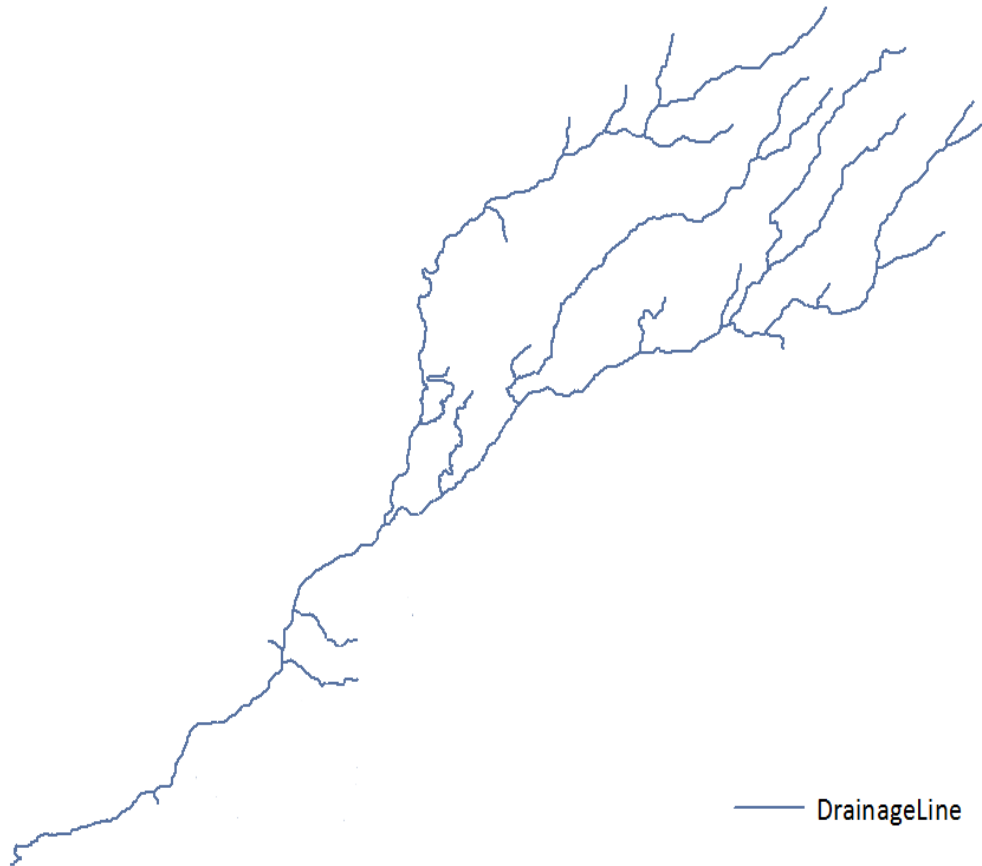
Με αυτή την εντολή, οι υπολεκάνες που παρήχθησαν στο προηγούμενο βήμα μετατρέπονται σε διανυσματική μορφή.



Εικόνα 3.23: Οριοθέτηση υπολεκανών για κάθε τμήμα υδατορεύματος σε διανυσματική μορφή

Drainage line processing

Η εντολή αυτή μετατρέπει το υδρογραφικό δίκτυο από μορφή κανάβου (grid) σε διανυσματική μορφή.



Εικόνα 3.24: Υδρογραφικό δίκτυο περιοχής μελέτης σε διανυσματική μορφή

Adjoint catchment processing

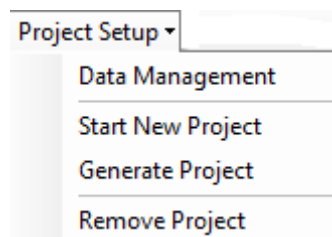
Σε αυτό το βήμα αθροίζονται οι ανάντη υπολεκάνες σε κάθε συμβολή του υδατορέματος. Ωστόσο, το βήμα αυτό δεν έχει κάποια υδρολογική σημασία.

Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων προεπεξεργασίας του μοντέλου εδάφους ακολουθεί η προετοιμασία των αρχείων εισόδου στο πρόγραμμα HEC-HMS, για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης της μελέτης.

3.4.2 Επεξεργασία λεκάνης και δημιουργία αρχείων εισόδου στο HEC-HMS

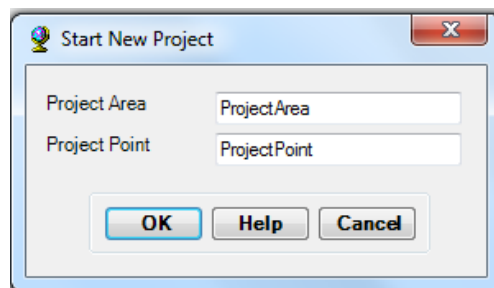
Μετά την ολοκλήρωση της υδρολογικής ανάλυσης ολόκληρης της περιοχής, ορίζονται οι υπολεκάνες μελέτης προσδιορίζοντας ένα σημείο εξόδου για κάθε λεκάνη. Η κάθε λεκάνη μελέτης καλύπτει την περιοχή ανάντη του σημείου εξόδου της.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία η περιοχή χωρίστηκε σε 5 υπολεκάνες απορροής. Για την εκτέλεση της παραπάνω διαδικασίας χρησιμοποιείται το μενού HMS Project Setup της εργαλειοθήκης του HEC-GeoHMS, το οποίο χρησιμοποιείται για να εξάγει αρχεία εισόδου για το HEC-HMS, που θα χρησιμοποιηθούν στη μοντελοποίηση της βροχής σε απορροή.

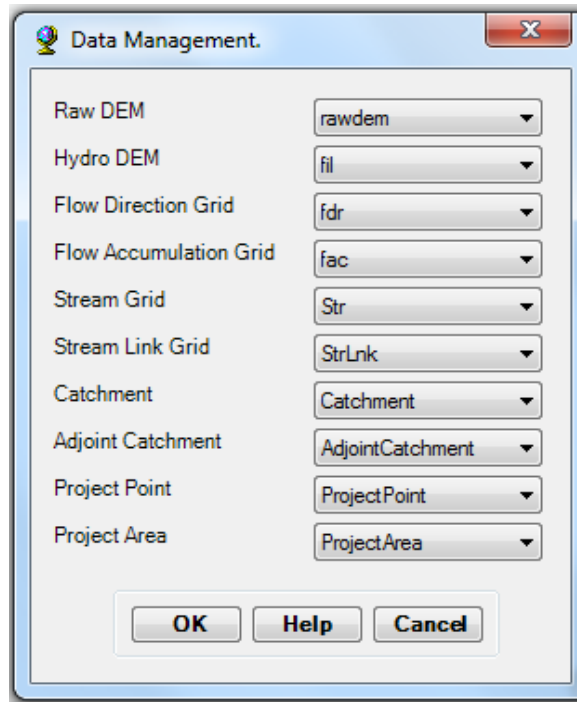


Εικόνα 3.25: Μενού εντολών Project Setup


Μέσω της εντολής Start New Project του HMS Project setup, ορίζεται ένα όνομα για τη μελέτη καθώς και οι μήτρες δεδομένων για το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, το υδρογραφικό δίκτυο, τον κλάδο συγκεντρωτικής ροής κλπ, με βάση τα αρχεία που δημιουργήθηκαν σε προηγούμενα βήματα.



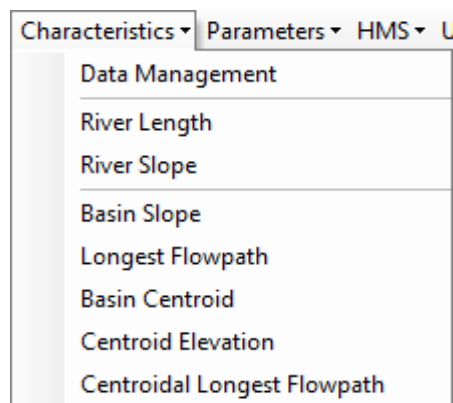
Εικόνα 3.26: Παράθυρο ορισμού νέου project



Εικόνα 3.27: Παράθυρο ορισμού μήτρας δεδομένων

Ως σημείο εξόδου (Project point) επιλέγεται με το εργαλείο το επιθυμητό σημείο εξόδου της κάθε λεκάνης και εν συνεχεία μέσω της εντολής Generate project παράγεται η περιοχή μελέτης ανάντη του σημείου αυτού. Έπειτα, πραγματοποιείται η δημιουργία υπολεκανών στα σημεία όπου κρίνεται αναγκαίο, λόγω απότομων αλλαγών υψομέτρων και κλίσεων. Η ενέργεια αυτή έγινε με τη χρήση του εργαλείου  της εργαλειοθήκης του HEC-GeoHMS. Τελικά το σχήμα της περιοχής με τον ακριβή αριθμό των υπολεκανών, φαίνεται στην Εικόνα 3.29.

Έπειτα, ακολουθεί η εξαγωγή χρήσιμων τοπογραφικών χαρακτηριστικών των υπολεκανών με την εντολή Basin Characteristics του μενού του HEC-GeoHMS.

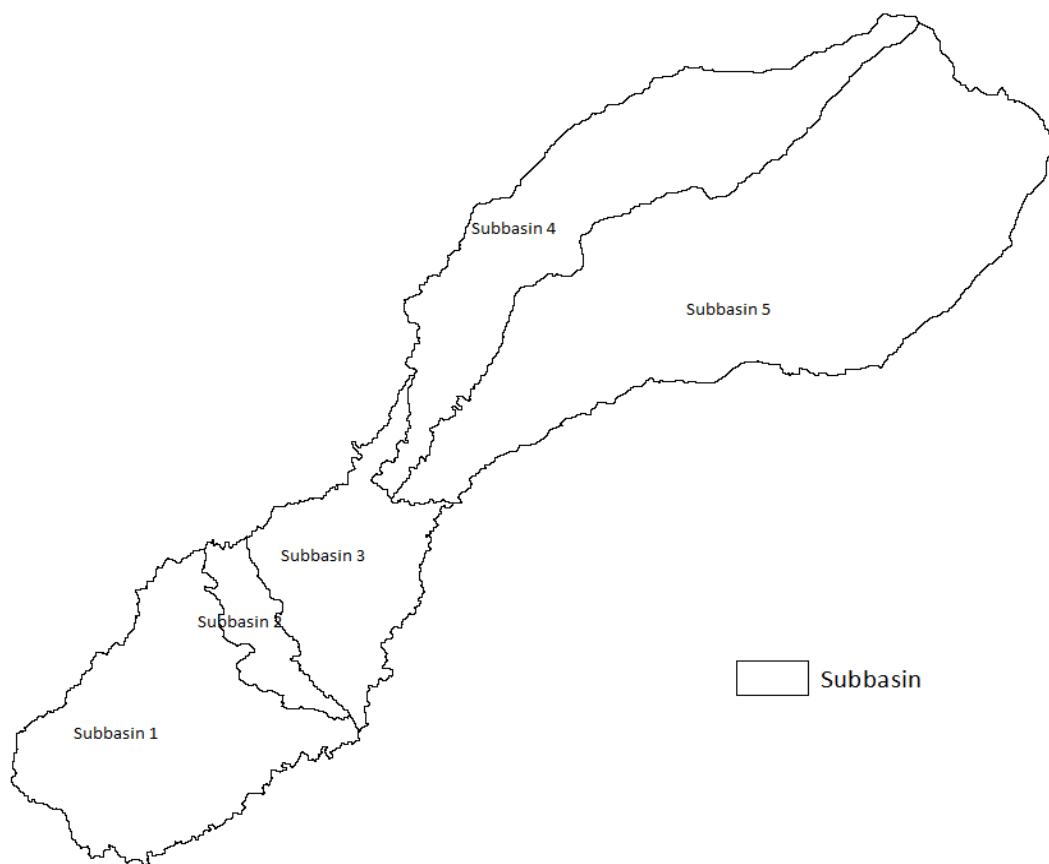


Εικόνα 3.28: Μενού εντολών επεξεργασίας της λεκάνης μελέτης (Basin Processing) και εξαγωγής χαρακτηριστικών της (Characteristics)

Τα χαρακτηριστικά αυτά υπολογίζονται από το μενού Characteristics και είναι:

- Το μήκος των τμημάτων του ποταμού (river length)
- Η κλίση του ποταμού (river slope)
- Οι κλίσεις των υπολεκανών (basin slope)
- Το κέντρο βάρους κάθε υπολεκάνης (basin centroid)
- Το μέγιστο μήκος της υδάτινης διαδρομής της υπολεκάνης μέχρι την έξοδο (longest flowpath)
- Το μήκος της υδάτινης διαδρομής από το κέντρο βάρους της λεκάνης μέχρι την έξοδό της (centroidal flowpath), τα οποία θα αποτελέσουν δεδομένα εισόδου στην υδρολογική προσομοίωση με σκοπό την διαμόρφωση των υδρολογικών παραμέτρων.

Ακολουθεί ο υπολογισμός διαφόρων υδρολογικών παραμέτρων με τη βοήθεια του μενού Parameters. Αρχικά, δίνεται η δυνατότητα επιλογής των μεθόδων που θα χρησιμοποιηθούν στο HEC-HMS (Select HMS Processes). Συγκεκριμένα, τα πρότυπα για τον υπολογισμό των απωλειών βροχής, της άμεσης απορροής, της βασικής ροής και της διόδευσης του πλημμυρογραφήματος. Στη παρούσα εργασία επιλέχθηκαν οι παρακάτω μέθοδοι υπολογισμού της κάθε παραμέτρου.



Εικόνα 3.29: Υπολεκάνες απορροής της υπό μελέτης περιοχής

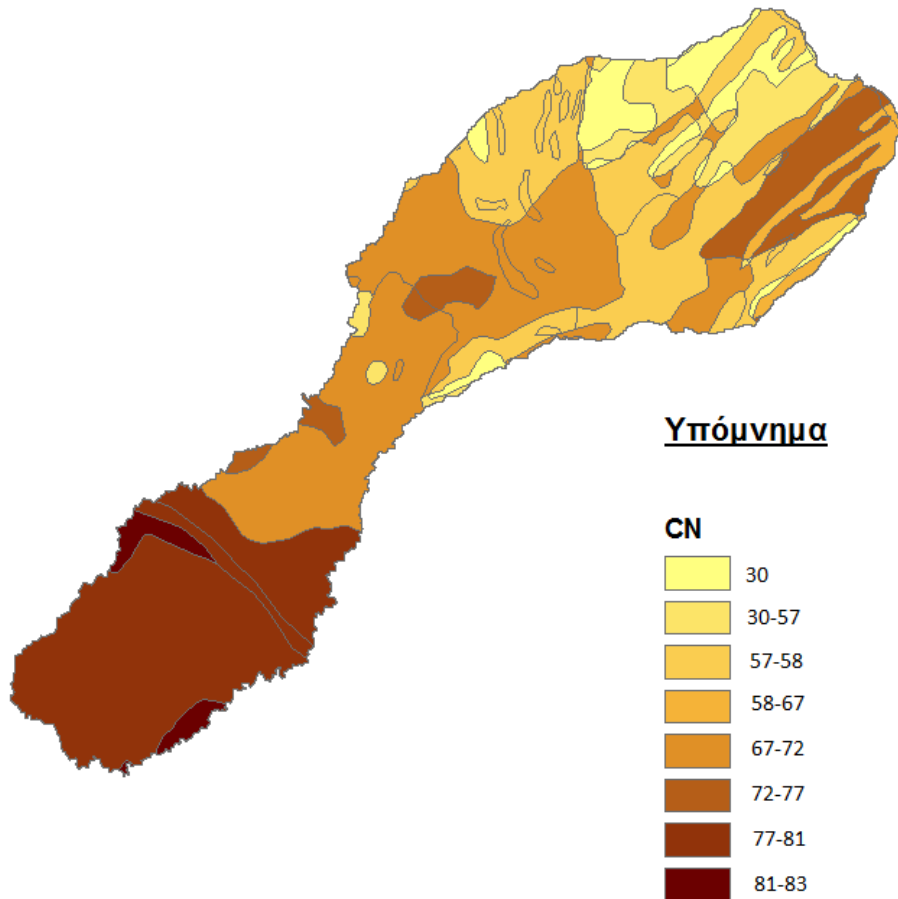
➤ Πρότυπο απωλειών βροχής:

Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε το μοντέλο απωλειών αριθμού καμπύλης SCS, το οποίο περιγράφηκε αναλυτικά στο 2^ο κεφάλαιο.

Για τον υπολογισμό των απωλειών βροχής με τη μέθοδο SCS απαιτείται ο υπολογισμός του αριθμού CN, όπως αναλύθηκε στο 2^ο κεφάλαιο. Η διαδικασία για τον υπολογισμό του αριθμού CN για κάθε υπολεκάνη βασίζεται στη χρήση συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας και συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα.

- Εισαγωγή του χάρτη με τα όρια των υπολεκανών απορροής (Εικόνα 3.28), για τις οποίες θα υπολογιστεί ο αριθμός CN
- Εισαγωγή χαρτών με υδρολιθολογικούς τύπους εδαφών και χρήσεις γης (Εικόνες 3.12 και 3.13)
- Επικάλυψη των 2 χαρτών για την εξαγωγή ενός συγχωνευμένου χάρτη, που περιέχει τα χαρακτηριστικά και των 2 (εντολή intersect στην εργαλειοθήκη arctoolbox του arcmap)
- Δημιουργία πίνακα αναφοράς με τις τιμές CN για συνδυασμούς εδαφών και χρήσεων γης(προετοιμασία σε excel και εισαγωγή σε ArcMap)
- Δημιουργία GRID με τον αριθμό CN για κάθε κελί (από το μενού utility του project view του HEC-GeoHMS – εντολή Generate CN grid
- Υπολογισμός μέσου όρου CN για κάθε υπολεκάνη με την εισαγωγή του μαθηματικού τύπου για τον σταθμισμένο μέσο όρο (από το μενού spatial analyst του ArcMap – εντολή Map Algebra).

Στην Εικόνα 3.30 παρατίθεται ο τελικός κάρναβος με τις τιμές CN για όλη τη λεκάνη, ενώ στο παράρτημα της εργασίας παρουσιάζονται τα ενδιάμεσα προϊόντα με την «τομή» των χαρτών χρήσης γης και τύπων εδάφους και την κατάρτιση πινάκων τιμών CN για τους επιμέρους συνδυασμούς.



Εικόνα 3.30: Κάναβος υπολογισμού αριθμού CN

Ο χρήστης λοιπόν μεταβαίνει στο παράθυρο εργασίας (βλ. Εικόνα 3.29) και τοποθετεί τον αριθμό CN της λεκάνης. Στο πεδίο initial abstraction, ο χρήστης θέτει τιμή για το αρχικό έλλειμμα. Αν αυτό αγνοηθεί τότε το πρόγραμμα θεωρεί ότι το αρχικό έλλειμμα ισούται με το 20% της δυνητικής μέγιστης κατακράτησης, κάτι στο οποίο βασίζεται άλλωστε και η κύρια σχέση για τον υπολογισμό του ενεργού ύψους βροχής.

Field	Value
Basin Name	Basin 1
Element Name	W1270
Initial Abstraction (MM)	
*Curve Number	75,431
*Impervious (%)	65,31

Εικόνα 3.31: Παράθυρο εκτέλεσης υπολογισμού απωλειών

➤ **Πρότυπο άμεσης απορροής:**

Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το Συνθετικό Υδρογράφημα της Soil Conservation Service (SCS), το οποίο περιγράφηκε στο 2^ο κεφάλαιο.

3.4.2.1 Επιλεγθέντα μαθηματικά πρότυπα

➤ Πρότυπο βασικής ροής

Στην παρούσα εργασία, λόγω της έλλειψης δεδομένων για την προσομοίωση της βασικής ροής αλλά και λόγω της μικρής επιρροής στον τελικό στόχο της εργασίας αποφασίστηκε η μη ενσωμάτωση της βασικής ροής στο υδρολογικό μοντέλο.

➤ Πρότυπο διόδευσης πλημμυρογραφήματος:

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι διόδευσης. Η απλοποιημένη μέθοδος Muskingum και η μέθοδος του κινηματικού κύματος, οι οποίες περιγράφηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο Muskingum

Για κάθε τμήμα υδατορεύματος, οι τιμές των παραμέτρων διόδευσης ορίζονται όπως αναλύεται παρακάτω.

Το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος HEC-HMS προτείνει τον λόγο του μήκους του υδατορεύματος προς τη ταχύτητα του κύματος ως μια καλή προσέγγιση της παραμέτρου K. Ο υπολογισμός του μήκους του υδατορεύματος προκύπτει μέσω του προγράμματος GIS, ενώ η αρχική ταχύτητα ροής θεωρήθηκε ίση με 1m/s. Το χρονικό βήμα της προσομοίωσης είναι 5min. Παρακάτω φαίνεται η εξίσωση υπολογισμού του K.

$$K = \frac{L}{3600V} \quad (3.1)$$

όπου:

K: παράμετρος, h

L: μέγιστο μήκος υδατορεύματος, m

V: μέση ταχύτητα ροής, m/s

Επίσης, πρέπει να ορισθεί ο αριθμός των τμημάτων του υδατορεύματος. Σε πολύ μεγάλα μήκη ποταμού, το υδατόρευμα υποδιαιρείται σε επιπλέον τμήματα ίσου μήκους, ώστε ο χρόνος ροής σε αυτά να ικανοποιούν την παρακάτω συνθήκη (Yuan & Qaiser, 2011):

$$2K < \Delta t < K \quad (3.2)$$

όπου:

K: παράμετρος, min

Δt : χρονικό βήμα προσομοίωσης, min

Το πλήθος των υπορεμάτων προκύπτει εφαρμόζοντας τη παρακάτω σχέση (Yuan & Qaiser, 2011):

$$n = \text{int}\left[2x \left(\frac{L}{\frac{60V}{\Delta t}}\right)\right] + 1 \quad (2.34)$$

όπου:

x: παράμετρος μεθόδου διόδευσης

L: μήκος υδατορεύματος από την έξοδο μιας λεκάνης μέχρι την επόμενη, m

V: ταχύτητα ροής, 1m/s

Στον Πίνακα 3.4 φαίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα.

Πίνακας 3.4: Εισαγωγή των τιμών των παραμέτρων διόδευσης Muskingum

Υδατορεύματα	Μήκος (m)	Υπορεύματα	K
Υπολεκάνη 1	2777.393	4	0.77
Υπολεκάνη 2	328.54	1	0.09
Υπολεκάνη 3	1681.26	3	0.46
Υπολεκάνη 4	2466.12	4	0.69
Υπολεκάνη 5	3747.78	5	1.04

Μέθοδος Κινηματικού κύματος

Χρησιμοποιήθηκε στο τμήμα της Ρεματιάς το οποίο είναι διευθετημένο υπογείως, λόγω της κατασκευής της Αττικής οδού. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αγωγού διατέθηκαν από τη Διεύθυνση Λειτουργίας Συντήρησης & Εκμετάλλευσης Υποδομών με Σύμβαση Παραχώρησης και παρατίθενται στον πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Αγωγού

Μήκος Αγωγού	315m
Πλάτος Αγωγού	8m
Ύψος Αγωγού	3m
Κλίση Αγωγού	1.1%

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αγωγού εισάγονται στο παράθυρο διόδευσης του HEC-HMS όπως φαίνεται στη Εικόνα 3.32 και έπειτα εκτελείται η διαδικασία διόδευσης.

Εικόνα 3.32: Παράθυρο διόδευσης του HEC-HMS

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία επιλογής των κατάλληλων μαθηματικών προτύπων, δίνονται ονόματα στα υδατορεύματα και στις υπολεκάνες, ξεκινώντας από τα ανάντη στα κατάντη με το μενού River Auto Name και Basin Auto Name.

Το τελευταίο βήμα αποτελεί η τελική επεξεργασία των αρχείων εισόδου πριν την εισαγωγή τους στο HEC-HMS. Αυτό επιτυγχάνεται με μια σειρά εντολών στο μενού HMS, οι οποίες περιγράφονται παρακάτω:

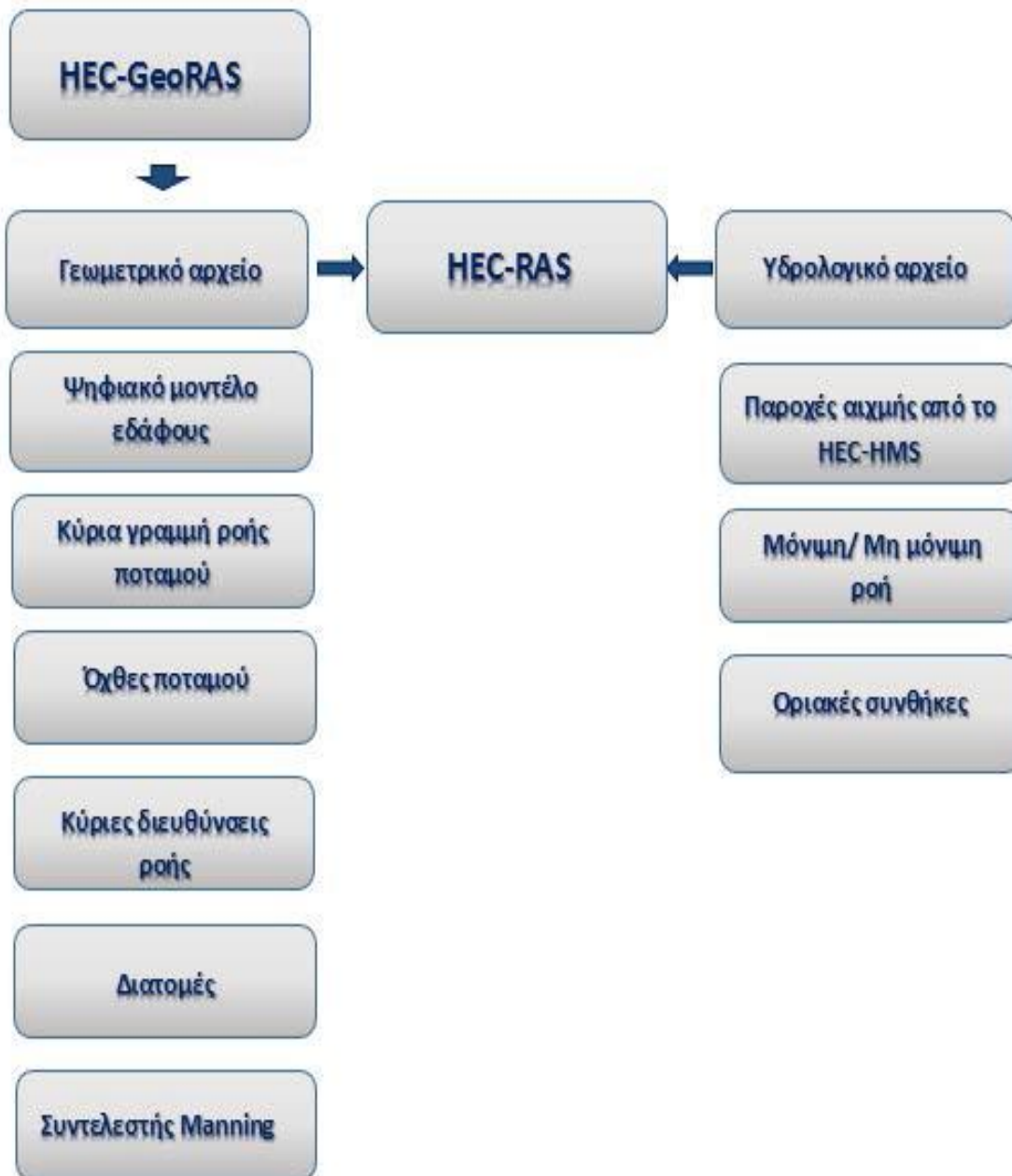
- Map to HMS Units - αντιστοιχία των μονάδων των δεδομένων σε μονάδες συμβατές με το HEC-HMS
- Check Data - ελέγχει την ορθότητα των δεδομένων
- HMS Schematic - Δημιουργία ενός απλού υδρογραφικού δικτύου και έλεγχος της σύνδεσης των κόμβων και των συνδέσμων
- HMS Legend - αναπαράσταση των βασικών στοιχείων (υπολεκάνες, σύνδεσμοι, σημείο εξόδου, κλπ)

- Add Coordinates - εξαγωγή συντεταγμένων στα στοιχεία κόμβων και συνδέσμων
 - Prepare Data for model export - αποθήκευση των δεδομένων υπολεκανών και υδατορευμάτων σε πίνακες ιδιοτήτων για την εξαγωγή του μοντέλου λεκάνης (basin model) στο HEC-HMS
 - Background shape file - εξαγωγή χάρτη συμβατού σε περιβάλλον HEC-HMS
 - Basin Model File - εξαγωγή του μοντέλου λεκάνης με τα υδρολογικά στοιχεία, τη συνδεσιμότητα τους και τις απαραίτητες γεωγραφικές πληροφορίες
 - Create HEC-HMS Project - Δημιουργία ενός Project έτοιμου για επεξεργασία στο HEC-HMS
- Να σημειωθεί ότι υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας και μετεωρολογικού μοντέλου (Met Model File) στο HEC- GeoHMS. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία τα μετεωρολογικά μοντέλα δημιουργήθηκαν κατευθείαν στο HEC-HMS.

Η εισαγωγή των υπολεκανών στο HEC-HMS και η προσομοίωση τους, παρουσιάζονται αναλυτικά στο τέταρτο κεφάλαιο, στο οποίο εμφανίζονται συγκεντρωτικά όλα τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής.

3.5 Υδραυλική ανάλυση της περιοχής μελέτης

Αρχικά, δημιουργείται ένα γεωμετρικό υπόβαθρο στο λογισμικό HEC-GeoRAS, το οποίο αποτελεί μια επέκταση του ArcGIS 10.1. Το λογισμικό αυτό, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει ένα αρχείο απαραίτητων γεωμετρικών δεδομένων (κοίτη ποταμού, όχθες, κ.α.) προτού τα εισάγει για τελική επεξεργασία στο HEC-RAS. Εφόσον ολοκληρωθεί η επεξεργασία στο HEC-GeoRAS και εξαχθεί το γεωμετρικό αρχείο, ακολουθούν οι υδρολογικές πληροφορίες (παροχές σχεδιασμού, συνθήκες μόνιμης ροής) όπως αυτές προέκυψαν από την υδρολογική προσομοίωση. Ακολουθεί η Εικόνα 3.32 στην οποία παρουσιάζεται η πορεία των εργασιών για την υδραυλική προσομοίωση.



Εικόνα 3.32: Βήματα διαδικασίας υδραυλικής ανάλυσης και προσομοίωσης

Η υδραυλική προσομοίωση πραγματοποιείται για το τμήμα του ρέματος που εμφανίζεται στην Εικόνα 3.33. Το τμήμα αυτό ξεκινάει κατάντη της Αττικής Οδού και φτάνει ως το κέντρο του Χαλανδρίου.



ΤΙΤΛΟΣ

Χαρακτηριστικές Διατομές
της Περιοχής Μελέτης

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- Γέφυρες
- Διατομές
- Όχθες
- Υδατόρευμα

0.150.075 0 0.15 Kilometers

Εικόνα 3.33: Περιοχή υδραυλικής μελέτης

3.5.1 Δημιουργία αρχείων Γεωμετρικών Δεδομένων

Το αρχείο γεωμετρικών δεδομένων περιλαμβάνει την οριζοντιογραφία της περιοχής μελέτης, τη μηκοτομή του τμήματος του ποταμού που έχει επιλεγεί και έναν αριθμό διατομών σε καθορισμένες θέσεις. Τα βήματα που συνθέτουν τη διαδικασία συνοψίζονται ως εξής:

- Παραγωγή ισοϋψών από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους
- Δημιουργία θεματικών επιπέδων
- Κύρια ροή ποταμού (Stream Centerline)
- Όχθες (Banks)
- Κύριες διευθύνσεις ροής (Flowpaths)
- Διατομές (XS Cut Lines)

- Γέφυρες/ υπόγειοι οχετοί (Bridges/culverts)
- Αναχώματα (Levees)
- Περιοχές ανενεργού ροής (Ineffective flow areas)
- Περιοχές αποθήκευσης νερού (Floodplain storage areas)
- Χρήσεις γης- Εξαγωγή συντελεστών Manning (Land Use)
- Σύνθεση θεματικών επιπέδων και εξαγωγή γεωμετρικού αρχείου

3.5.1.1 Παραγωγή ισοϋψών από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους


Οι ισοϋψείς καμπύλες παράγονται από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους μέσω της εντολής Contour της εργαλειοθήκης Spatial Analyst. Οι ισοϋψείς που δημιουργήθηκαν είχαν ισοδιάσταση 2m και χρησίμευσαν στην καλύτερη εποπτεία των υψομετρικών διαφορών της περιοχής μελέτης για την ακριβέστερη χάραξη της κοίτης του ποταμού.

3.5.1.2 Δημιουργία θεματικών επιπέδων (RAS Layers)

Τα RAS Layers είναι τα θεματικά επίπεδα τα οποία περιέχουν πληροφορίες και δεδομένα για τη γεωμετρία των υδατορευμάτων της περιοχής μελέτης. Τα θεματικά αυτά επίπεδα δημιουργούνται μέσω του μενού RAS Geometry και με την εντολή Create RAS Layers. Στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκαν τα παρακάτω θεματικά επίπεδα, τα οποία θεωρήθηκαν απαραίτητα για την μετέπειτα υδραυλική προσομοίωση.

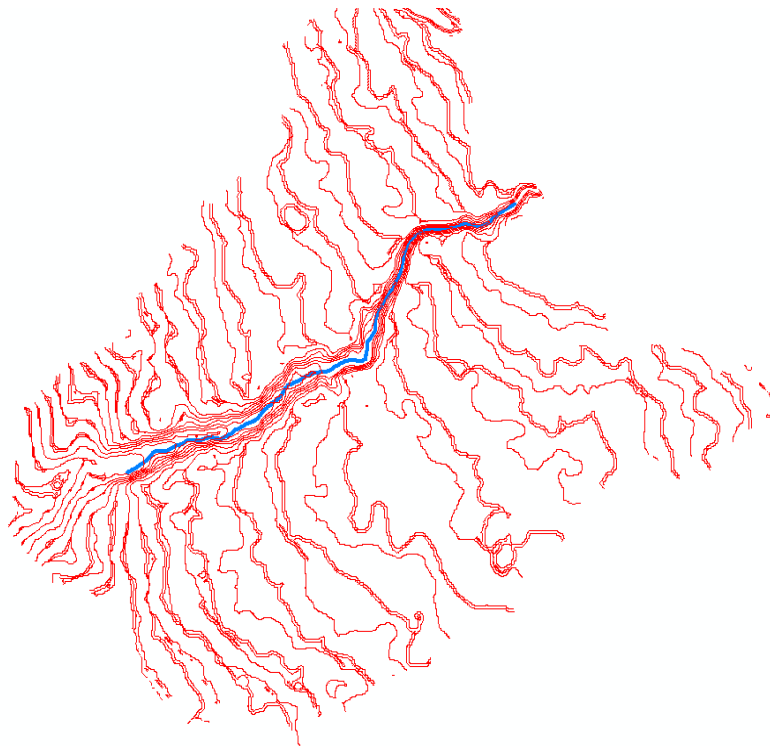
- Κύρια γραμμή ροής ποταμού
- Όχθες ποταμού
- Κύριες διευθύνσεις ροής
- Διατομές ποταμού
- Χρήσεις γης

3.5.1.3 Χάραξη κύριας γραμμής ροής ποταμού (Stream Centerline)

Με βάση το παραχθέν υδρογραφικό δίκτυο του μοντέλου εδάφους, κατά την υδρολογική ανάλυση που προηγήθηκε, ψηφιοποιείται η κύρια γραμμή ροής του υδατορεύματος που ενδιαφέρει. Η ψηφιοποίηση γίνεται κατά τη φορά της ροής, από τα ανάντη στα κατόντη. Αφού ψηφιοποιηθεί η κύρια γραμμή ροής, θα πρέπει στη συνέχεια να ονομαστεί, με τη βοήθεια του εργαλείου «river reach Id» . Το παράθυρο που εμφανίζεται επιτρέπει την εισαγωγή του ονόματος του ποταμού και του αντίστοιχου τμήματός του.

Στη συνέχεια υπολογίζονται και ελέγχονται τα χαρακτηριστικά του ποταμού, με την εκτέλεση της εντολής RAS Geometry →Stream Centerline Attribute →All.

- Topology: ελέγχει τη σύνδεση και τον προσανατολισμό των τμημάτων του υδρογραφικού δικτύου που έχει σχηματιστεί
- Lengths/ Stations: υπολογίζει τα μήκη της κύριας γραμμής ροής για κάθε τμήμα και καθορίζει τη φορά της ροής
- Elevations: μετατρέπει τη δισδιάστατη γραμμή ροής σε τρισδιάστατη χρησιμοποιώντας το ψηφιακό μοντέλο εδάφους



Εικόνα 3.34: Ισοϋψείς καμπύλες περιοχής μελέτης και ψηφιοποιημένη κύρια γραμμή ροής ποταμού

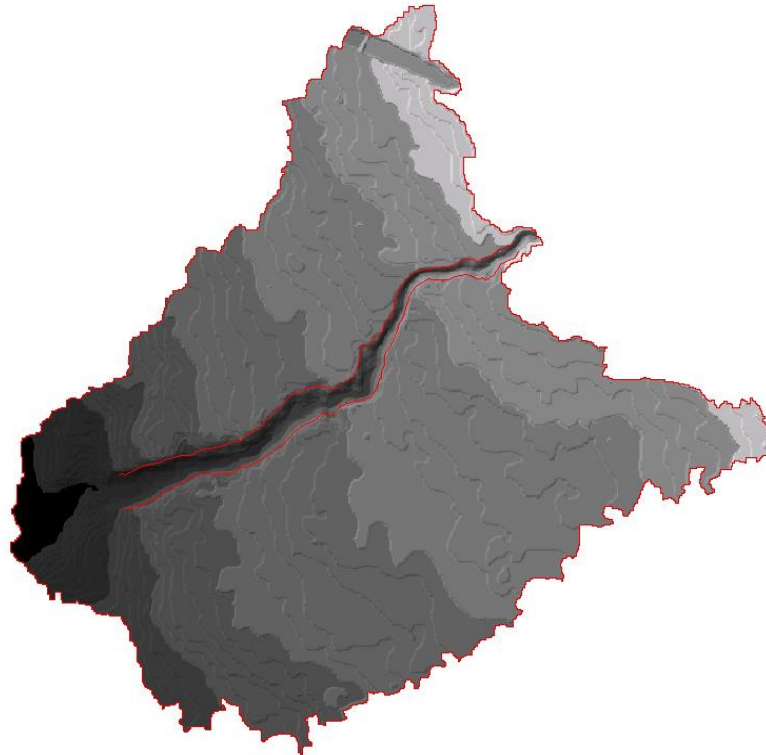
3.5.1.4 Κύριες όχθες (Bank Lines)

Οι όχθες του ποταμού είναι δύο πολυγωνικές γραμμές εκατέρωθεν της κύριας γραμμής του, οι οποίες διαχωρίζουν τη ροή εντός και εκτός της κοίτης του ποταμού. Αν και προαιρετική, η δημιουργία αυτού του επιπέδου διευκολύνει τον μετέπειτα ορισμό των οχθών στο HEC-RAS.

Οι κανόνες στους οποίους θεμελιώνεται η κατασκευή αυτών των γραμμών είναι οι ακόλουθοι:

- Ακριβώς δύο τέτοιες γραμμές πρέπει να τέμνουν την κάθε διατομή

- Ο προσανατολισμός τους δεν έχει σημασία
- Οι γραμμές μπορεί να είναι συνεχείς ή διακοπτόμενες
- Για την ακριβή ψηφιοποίηση των οχθών είναι χρήσιμη και η αξιοποίηση ενός τρισδιάστατου μοντέλου εδάφους.



Εικόνα 3.35: Ψηφιοποίηση οχθών ποταμού στο τρισδιάστατο μοντέλο εδάφους

3.5.1.5 Κύριες διευθύνσεις ροής (Flow paths)

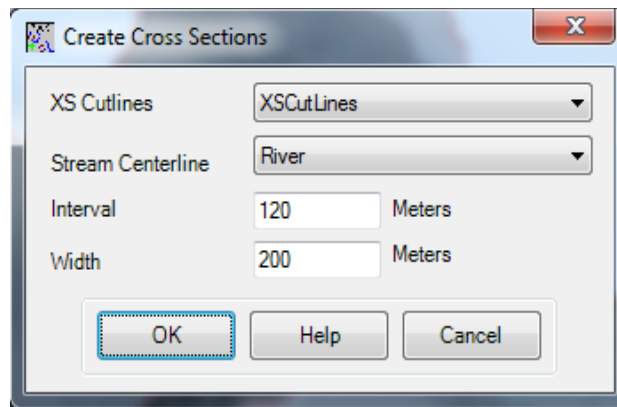
Οι κύριες διευθύνσεις ροής αποτελούν ένα προαιρετικό θεματικό επίπεδο, ωστόσο είναι απαραίτητο για τη συμπλήρωση της απόστασης κάθε διατομής από την κατάντη, όπως θα προκύψει στο επόμενο βήμα. Το αντίστοιχο θεματικό επίπεδο δημιουργείται από το μενού Geometry με την εντολή Flow path Centerlines.

Οι κύριες διευθύνσεις ροής δημιουργούνται αυτόματα κατά τη διεύθυνση ροής από τα ανάντη στα κατάντη. Εφόσον έχει δημιουργηθεί το θεματικό επίπεδο, η κύρια διεύθυνση ροής του ποταμού ουσιαστικά προκύπτει από την αντιγραφή της κύριας γραμμής ροής που δημιουργήθηκε παραπάνω. Στη συνέχεια δημιουργούνται δύο ακόμα γραμμές αριστερά και δεξιά της κύριας διεύθυνσης της ροής, οι οποίες οριοθετούν τον ποταμό. Τέλος, γίνεται ο καθορισμός του είδους των τριών αυτών γραμμών με τη χρήση του εργαλείου ως αριστερή, κεντρική και δεξιά κοίτη.

3.5.1.6 Διατομές (Cross-sectional cut lines)

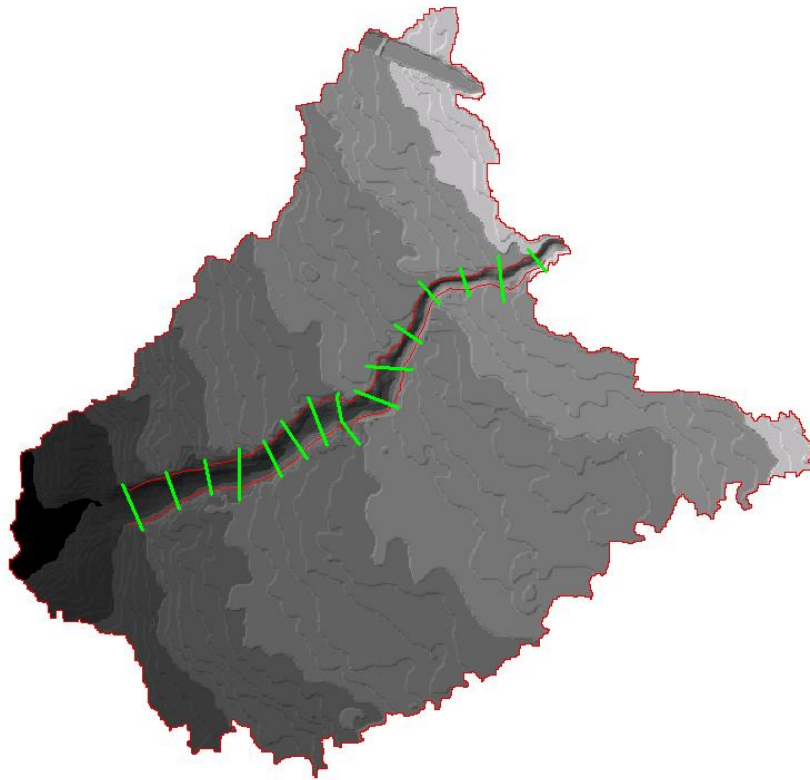
Το θεματικό αυτό επίπεδο αφορά στην κατασκευή διατομών σε αντιπροσωπευτικές θέσεις του ποταμού. Οι διατομές αυτές πρέπει πάντα να σχεδιάζονται κάθετα στη ροή του ποταμού, από αριστερά προς τα δεξιά κοιτώντας προς τα κατάντη και να καλύπτουν όλη την περιοχή κατάκλυσης.

Η κατασκευή του θεματικού αυτού επιπέδου γίνεται μέσω του μενού RAS Geometry και με την εντολή XS Cut Lines. Η σχεδίαση των διατομών γίνεται μία προς μία χειροκίνητα με τη χρήση του εργαλείου Edit. Εναλλακτικά, οι διατομές μπορούν να κατασκευαστούν αυτόματα όλες μαζί με εφαρμογή του εργαλείου (Construct Cut Lines). Με αυτή την εντολή, ο χρήστης καθορίζει την απόσταση μεταξύ των διατομών καθώς και το πλάτος αυτών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.36.




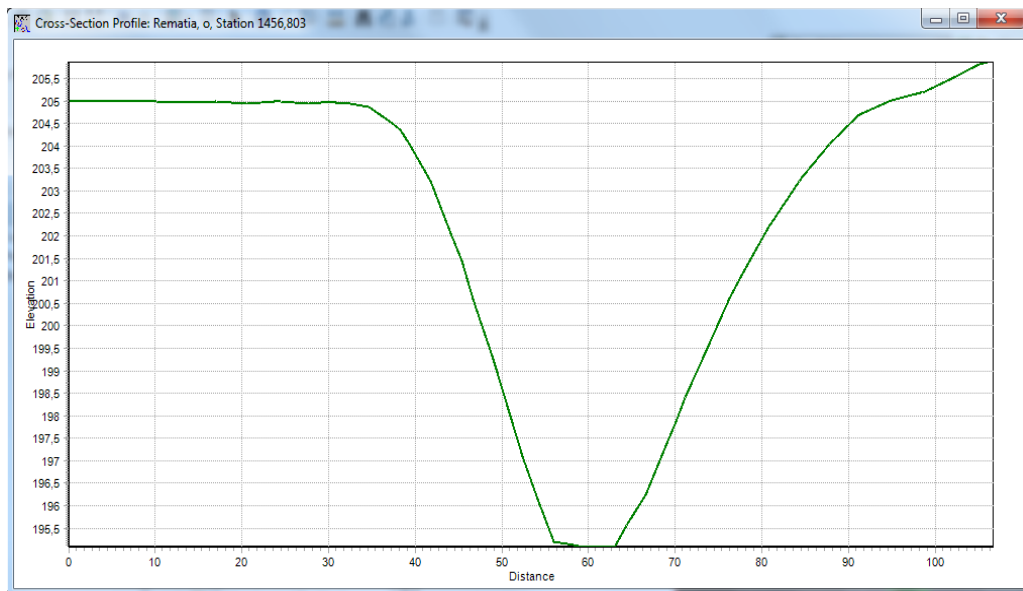
Εικόνα 3.36: Αυτόματη δημιουργία διατομών πλάτους 200m και ισοδιάστασης 100m

Η εκτέλεση της εντολής συνεπάγεται τη δημιουργία διατομών σε καθορισμένη απόσταση και με καθορισμένο πλάτος. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει περίπτωση σύμπτωσης δύο ή περισσότερων διατομών. Σε αυτή τη περίπτωση τροποποιούνται ή σβήνονται μέσω της εργαλειοθήκης editor.



Εικόνα 3.37: Απεικόνιση διατομών τμήματος υδατορεύματος

Η επισκόπηση της εκάστοτε διατομής γίνεται με το εργαλείο «XS Plot»  . Με αυτό το εργαλείο κρίνεται αν η διατομή πρέπει να επεκταθεί σε υψηλότερα υψόμετρα, ώστε να αποτυπώσει το πλήρες πλημμυρικό πεδίο σε αυτή τη θέση.



Εικόνα 3.38: Ενδεικτική διατομή της κοίτης του ποταμού

Τέλος, γίνεται ο υπολογισμός κάποιων χαρακτηριστικών στον πίνακα ιδιοτήτων του θεματικού επιπέδου XS Cut Lines, τα οποία απαιτούνται κατά την εισαγωγή τους στο

πρόγραμμα HEC-RAS. Συγκεκριμένα, με τη χρήση της εντολής XS Cut Line Attributes □ All υπολογίζονται τα εξής:

- River/ Reach Names: χρησιμοποιεί στοιχεία από τον πίνακα ιδιοτήτων της κεντρικής γραμμής ροής και τα προσθέτει στον πίνακα ιδιοτήτων των διατομών
- Stationing: υπολογίζει την απόσταση κάθε διατομής από τα κατάντη του ποταμού
- Bank Stations: υπολογίζει την απόσταση κάθε διατομής από τη δεξιά και την αριστερή όχθη αντίστοιχα
- Downstream Reach Lengths: καθορίζει την απόσταση κάθε διατομής από την επόμενη κατάντη διατομή, λαμβάνοντας υπόψη τις κύριες διευθύνσεις ροής
- Elevations: υπολογίζει το υψόμετρο από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και μετατρέπει τις δισδιάστατες διατομές σε τρισδιάστατες

3.5.1.7 Σύνθεση θεματικών επιπέδων και εξαγωγή στο HEC-RAS

Το τελικό βήμα για την παραγωγή του γεωμετρικού αρχείου εισόδου του προγράμματος HEC-RAS είναι η σύνθεση των δημιουργημένων θεματικών επιπέδων και του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Η σύνθεση γίνεται μέσω της εντολής RAS Geometry → Layer setup και η εξαγωγή του αρχείου γίνεται μέσω της εντολής RAS Geometry → Extract GIS data.

Η εισαγωγή των θεματικών αυτών επιπέδων και του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, παρουσιάζονται αναλυτικά στο τέταρτο κεφάλαιο, στο οποίο εμφανίζονται συγκεντρωτικά όλα τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 HEC-HMS

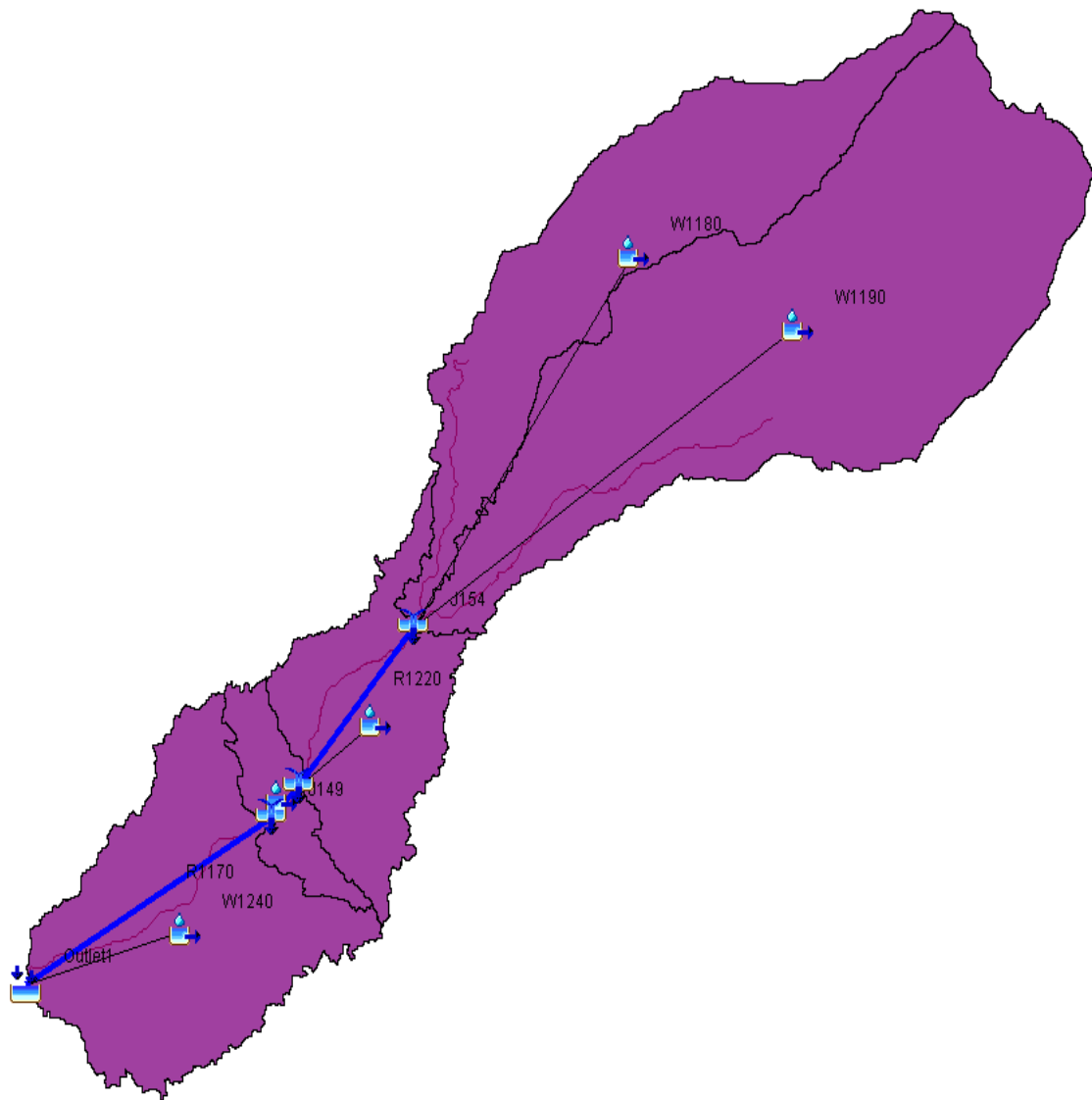
Σκοπός του συγκεκριμένου τμήματος της εργασίας είναι η ανάλυση της υδρολογικής απόκρισης της κάθε λεκάνης μελέτης για συγκεκριμένα επεισόδια βροχής. Η επεξεργασία γίνεται σε περιβάλλον HEC-HMS





4.1.1 Μοντέλο λεκάνης απορροής (Basin Model Component)

Μέσω των βημάτων του HEC-GeoHMS δημιουργήθηκε το αρχείο μοντελοποίησης της λεκάνης απορροής, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3. Το αρχείο εισάγεται στο HEC-HMS με την εντολή Import Basin model και στην οθόνη του χρήστη εμφανίζεται μια απλοποιημένη δομή της λεκάνης, ως ένα σύστημα κόμβων και διαύλων, που συνδέουν διάφορα υδρολογικά στοιχεία.

Ο χρήστης μπορεί επίσης να παραθέσει και τους χάρτες υποβάθρου της λεκάνης και του ποταμού μέσω της εντολής View Background maps, ώστε να έχει μια εποπτική εικόνα, όπου εκεί φορτώνονται οι δύο χάρτες (σε μορφή .shp), που δημιουργήθηκαν από το HEC-GeoHMS (Εικόνα 4.1).

Για κάθε υπολεκάνη δίνονται στοιχεία για την έκτασή της, το τμήμα ρέματος με το οποίο συνδέεται κατάντη και τα μαθηματικά πρότυπα που επιλέγονται, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.2.



-  Υπολεκάνη (Sub-basin)
-  Σύνδεσμος (junction)): Το υδρολογικό αυτό στοιχείο χρησιμεύει για να συνδυάσει τις ροές των υπόλοιπων στοιχείων στα ανάντη.
-  Έξοδος λεκάνης
-  Δημιουργία σύνδεσης μεταξύ κόμβων

Εικόνα 4.1: Μοντέλο λεκάνης απορροής (basin1) και επεξήγηση υδρολογικών στοιχείων

Subbasin | Loss | Transform | Options

Basin Name: Basin 1
Element Name: W1270

Description:

Downstream: J146

*Area (KM2) 2,1332

Latitude Degrees:

Latitude Minutes:

Latitude Seconds:

Longitude Degrees:

Longitude Minutes:

Longitude Seconds:

Canopy Method: --None--

Surface Method: --None--

Loss Method: SCS Curve Number

Transform Method: SCS Unit Hydrograph

Baseflow Method: --None--

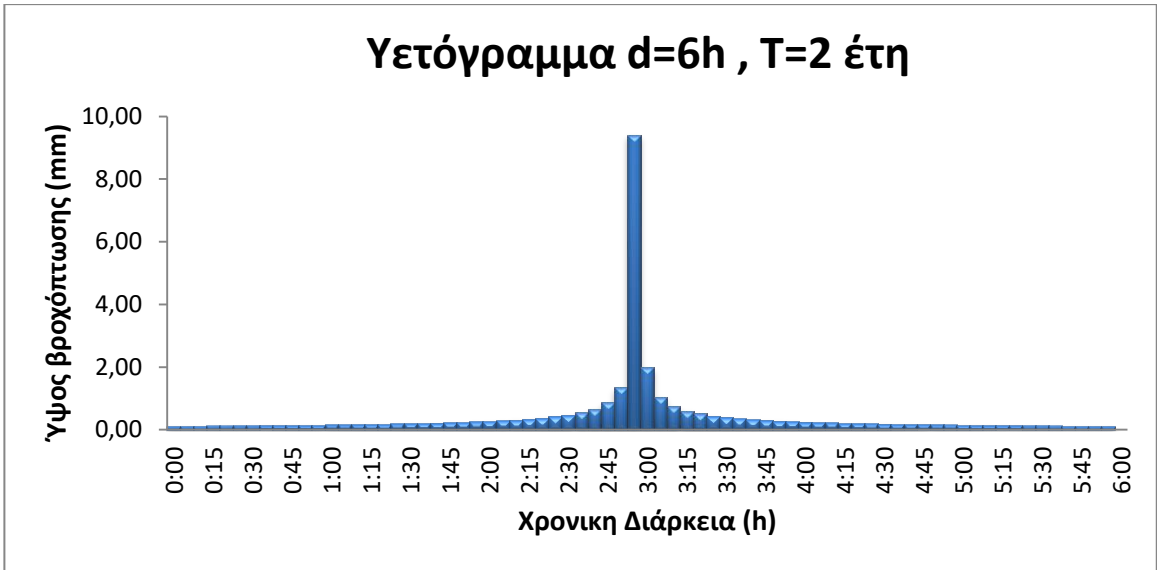
Εικόνα 4.2: Τα χαρακτηριστικά στοιχεία των υπολεκανών

4.1.2 Μετεωρολογικό Μοντέλο (Meteorologic Model Component)

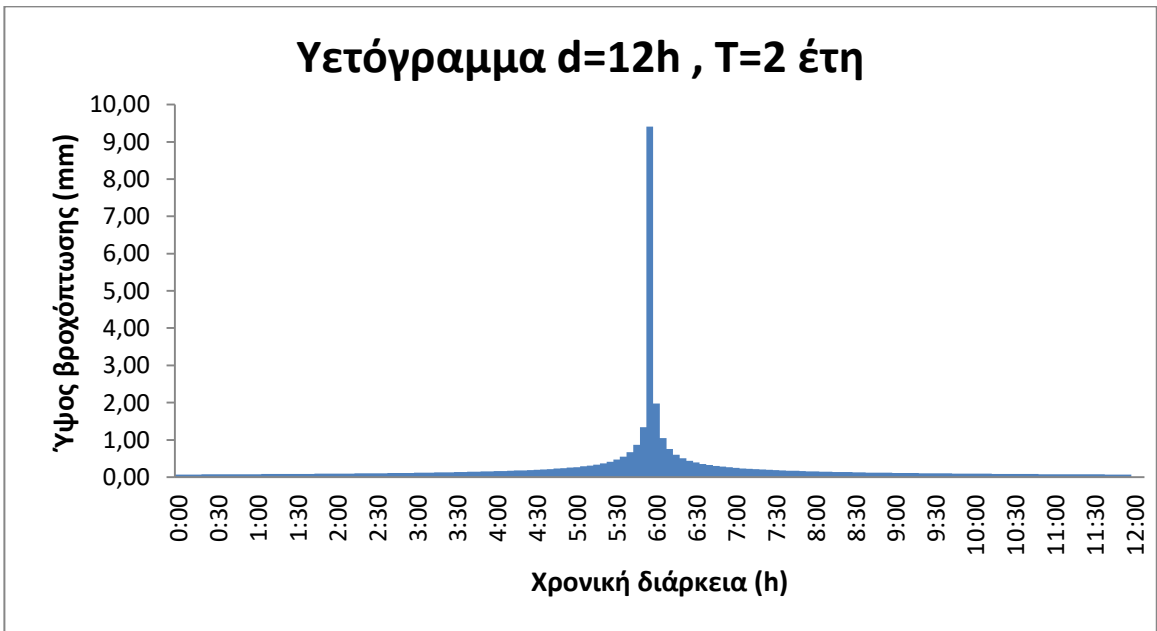
Η κατάρτιση του μετεωρολογικού μοντέλου αφορά στην εισαγωγή των στοιχείων της μετεωρολογικής πληροφορίας, που ενσωματώνει τις απαραίτητες οριακές συνθήκες για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Η μετεωρολογική αυτή πληροφορία εισάγεται είτε μέσω παρατηρημένων βροχογραφημάτων είτε μέσω καθορισμού υποθετικών επεισοδίων βροχής με συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς. Στην ιδανική περίπτωση διεξάγεται υδρολογική μελέτη στην περιοχή, καταρτίζονται όμβριες καμπύλες και εκτελείται υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης με ρύθμιση (calibration) με βάση τα παρατηρημένα βροχογραφήματα.

4.1.3 Υετογράμματα σχεδιασμού της λεκάνης

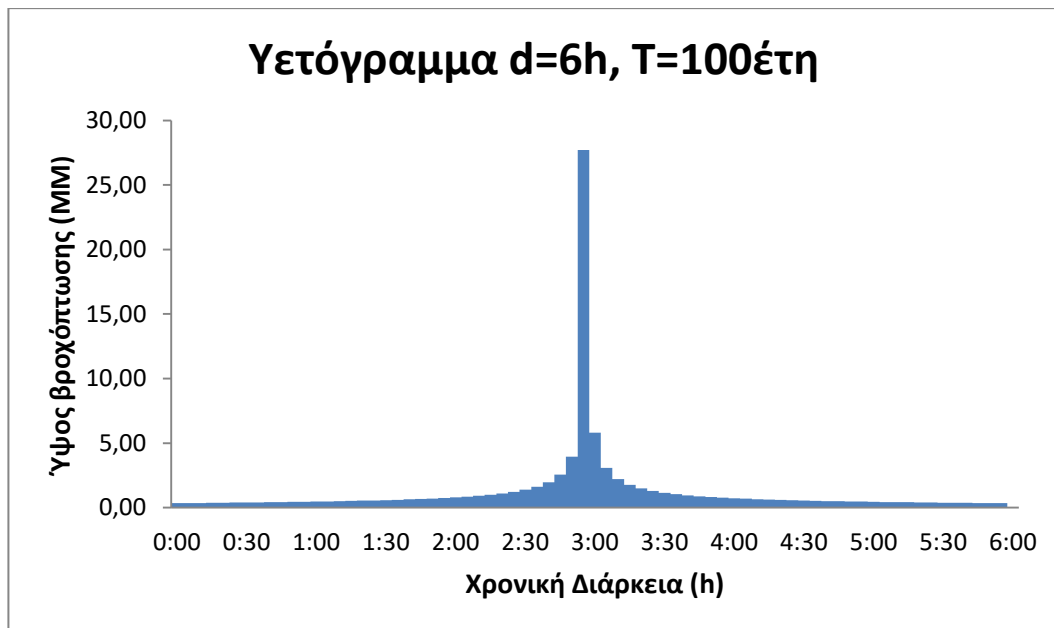
Ακολούθως παρουσιάζονται τα υετογράμματα διάρκειας $d=6h$ και $d=12h$ με περίοδο επαναφοράς $T=2$ έτη και $T=100$ έτη για ολόκληρη τη λεκάνη συνολικού εμβαδού $A=18.887km^2$, τα οποία υπολογίστηκαν με τον τρόπο που περιγράφηκε στο 2^ο Κεφάλαιο.



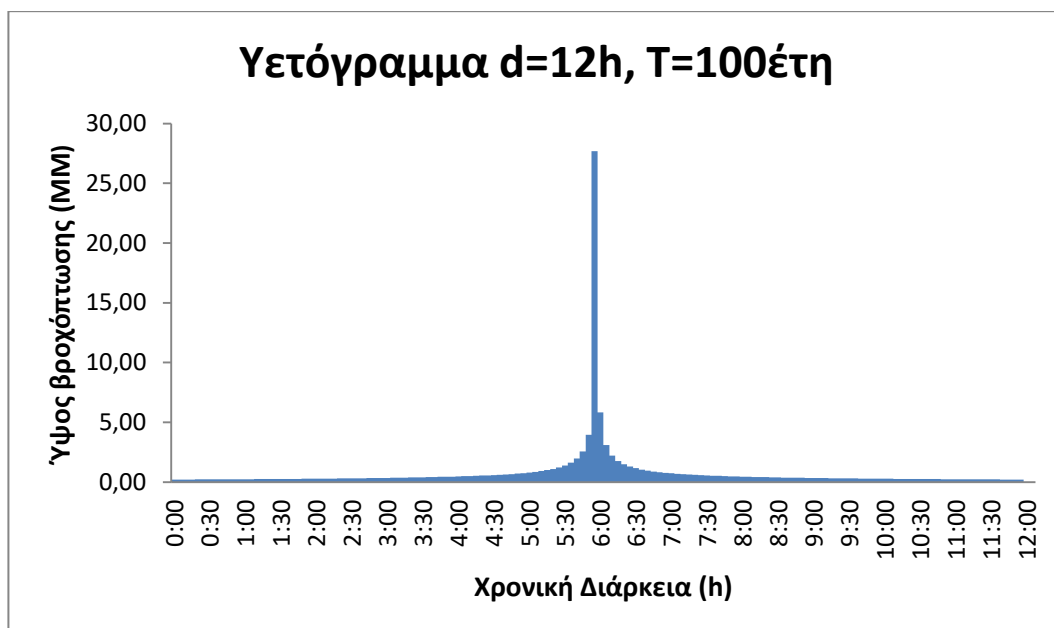
Εικόνα 4.3: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=6h$ και περιόδου επαναφοράς $T=2$ ετών



Εικόνα 4.4: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=12h$ και περιόδου επαναφοράς $T=2$ ετών



Εικόνα 4.5: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=6h$ και περιόδου επαναφοράς $T=100$ ετών



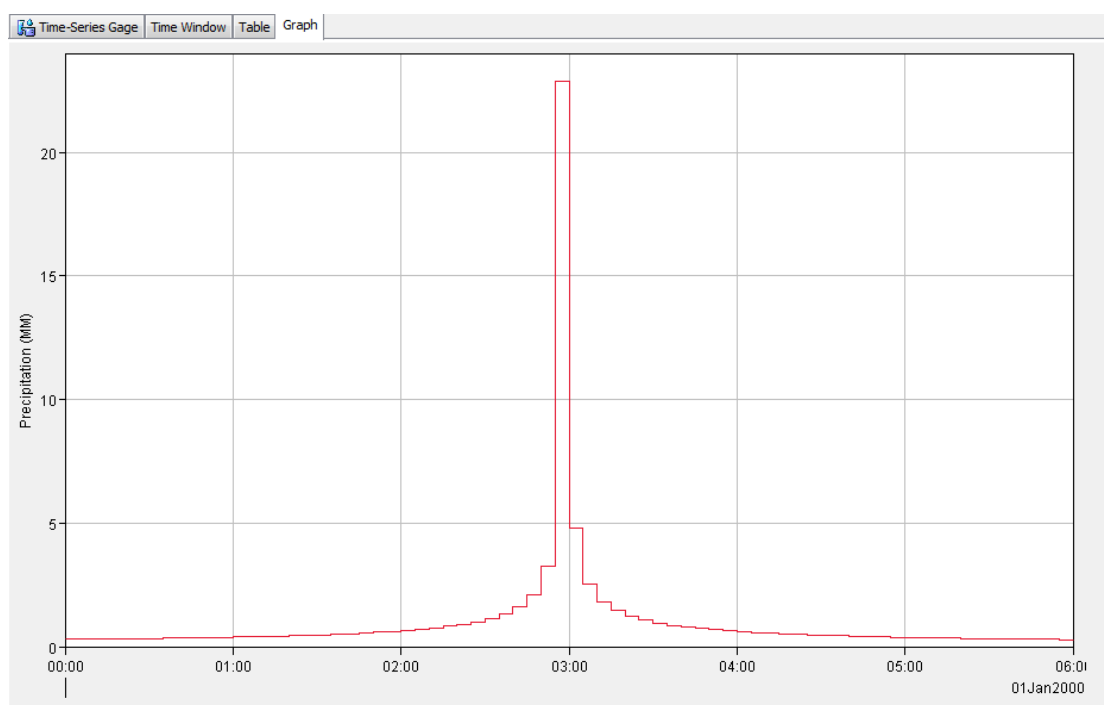
Εικόνα 4.6: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=12h$ και περιόδου επαναφοράς $T=100$ ετών

Ο μελετητής καλείται λοιπόν, αφού καταρτίσει τα υετογραφήματα σχεδιασμού της λεκάνης, να ενσωματώσει τα δεδομένα στο HEC-HMS. Η διαδικασία συνοψίζεται στα βήματα του Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Εισαγωγή δεδομένων στο HEC-HMS

Εντολή	Παρατηρήσεις
Components->> Meteorologic model manager	Δημιουργία νέου μετεωρολογικού αρχείου που θα δεχθεί τα δεδομένα. Στη φάση αυτή ο χρήστης καθορίζει και τον τύπο των δεδομένων (πχ αθροιστικό υετογράφημα)
Components-> Time series data manager	Δημιουργία αρχείου που θα δεχθεί δεδομένα σε μορφή χρονοσειράς (αν το δεδομένο εισόδου είναι ένα υετογράφημα)
Time window	Καθορισμός επεισοδίου βροχόπτωσης (π.χ. 24 h με βήμα 5 mins)
Time series gage	Εισαγωγή δεδομένων χρονοσειράς είτε χειροκίνητα είτε μέσω αρχείου .dss που έχει δημιουργηθεί σε άλλο πρόγραμμα (π.χ. Excel)

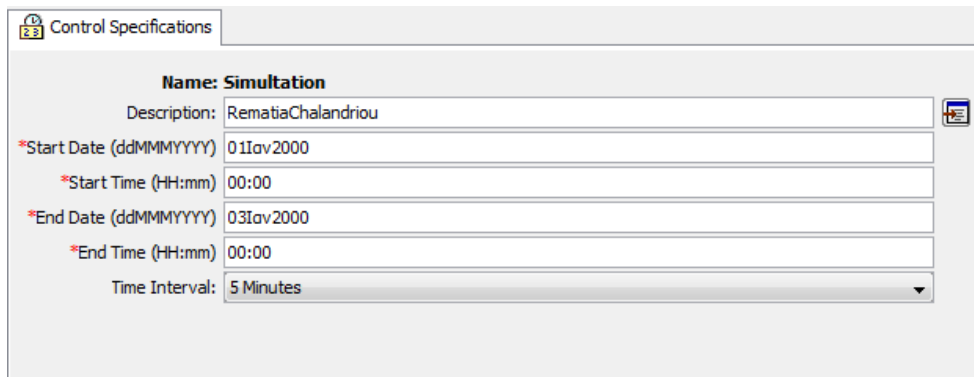
Ενδεικτικά, παρουσιάζεται το υετόγραμμα με περίοδο επαναφοράς 50 έτη και διάρκεια 6h στο πρόγραμμα HEC-HMS, αφού εισαχθούν τα δεδομένα στο νέο μετεωρολογικό μοντέλο.



Εικόνα 4.7: Απεικόνιση του υετογράμματος με περίοδο επαναφοράς 50 έτη και διάρκεια 6h στο πρόγραμμα HEC-HMS - Τμηματικά ύψη ανά πεντάλεπτο

4.1.4 Αρχείο Προσομοιώσεων (Control Specifications Component)

Στην τελευταία φάση πριν την εκτέλεση των υπολογισμών, το HEC-HMS ζητά από το χρήστη να δημιουργήσει ένα αρχείο προσομοίωσης, στο οποίο καθορίζεται η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης καθώς και τα δεδομένα εισόδου, που δημιουργήθηκαν σε προηγούμενα βήματα. Η ενεργοποίηση της εντολής γίνεται μέσω του μενού component → control specifications manager.



Control Specifications	
Name:	Simulation
Description:	RematiaChalandriou
*Start Date (ddMMYY):	01Jan2000
*Start Time (HH:mm):	00:00
*End Date (ddMMYY):	03Jan2000
*End Time (HH:mm):	00:00
Time Interval:	5 Minutes

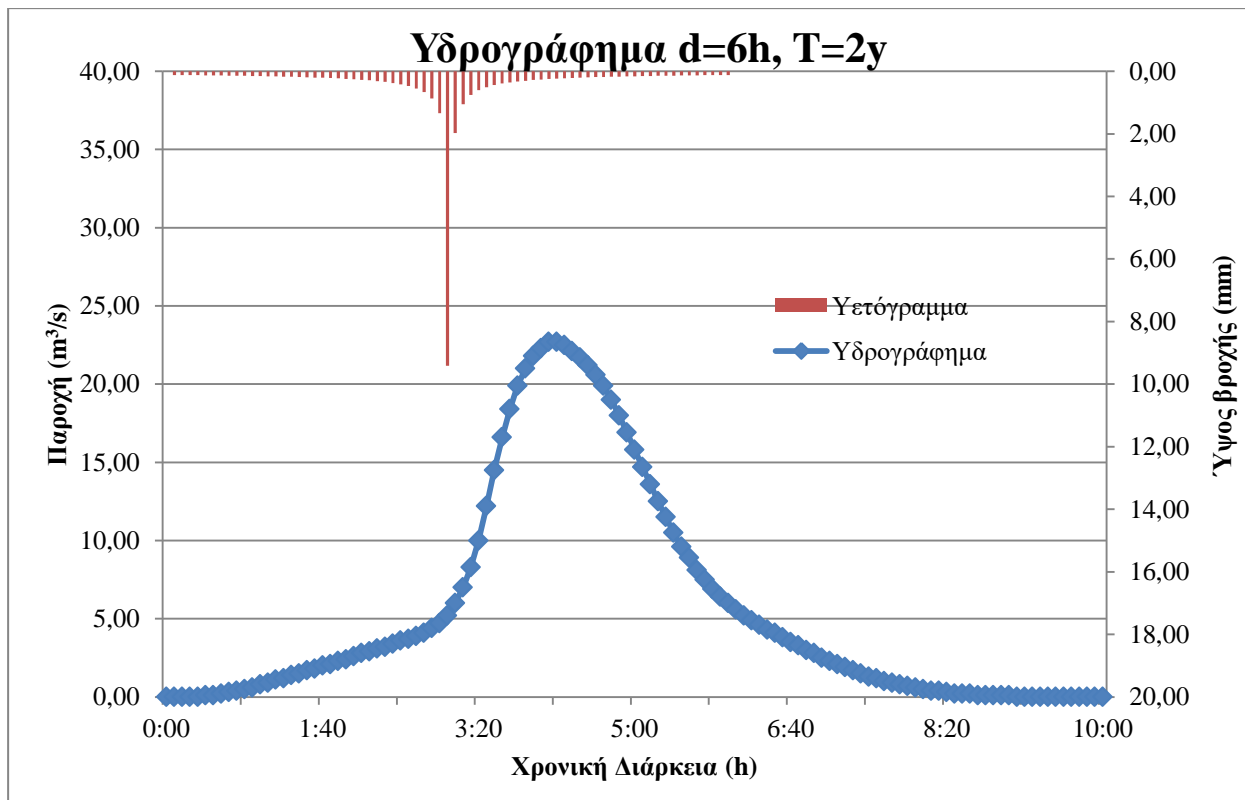
Εικόνα 4.8: Δημιουργία αρχείου προσομοίωσης

4.1.5 Αρχείο Αποτελεσμάτων

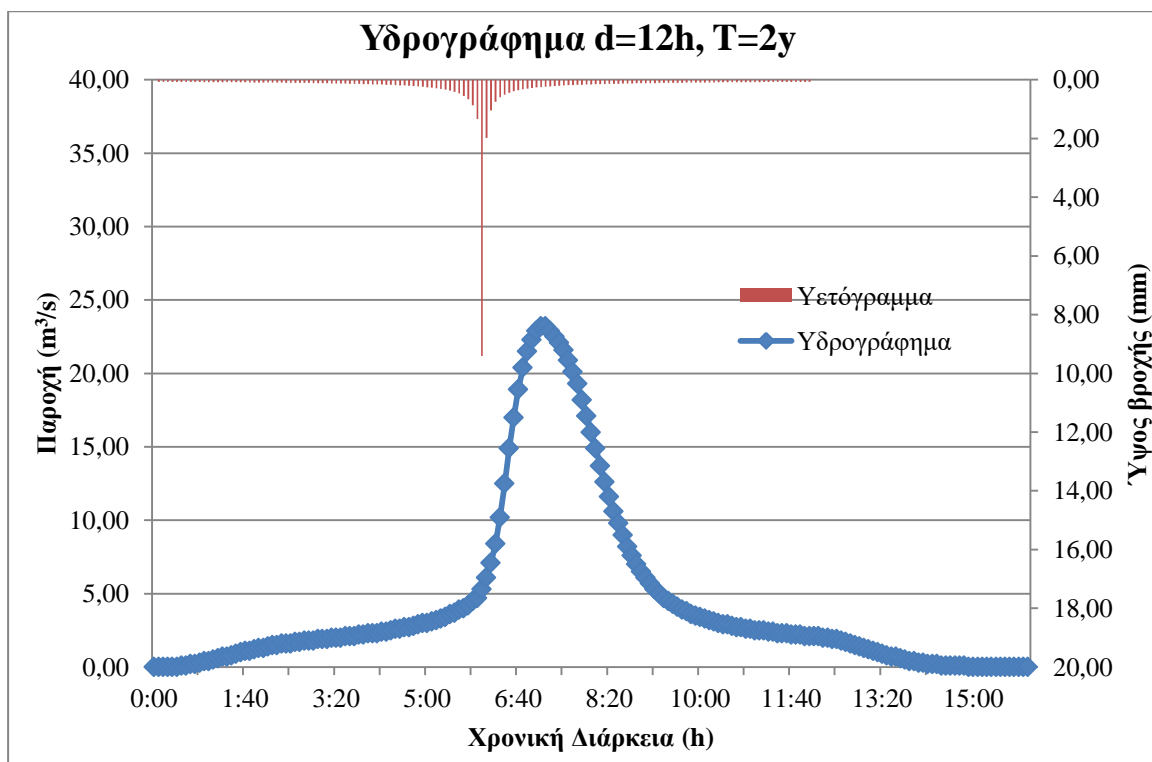
Αφού έχουν ετοιμαστεί όλα τα αρχεία εισόδου στο HEC-HMS, το πρόγραμμα είναι έτοιμο να ξεκινήσει τη προσομοίωση και να εξάγει τα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν το υδρογράφημα της κάθε λεκάνης, διαγράμματα και πίνακες βροχόπτωσης, απωλειών και άμεσης απορροής.

Ο υπολογισμός αυτών καθίσταται εφικτός, αρχικά μέσω της δημιουργίας ενός αρχείου υπολογισμών που θα εκτελέσει το πρόγραμμα, όπου ορίζεται το μοντέλο λεκάνης απορροής και το μετεωρολογικό μοντέλο που θα ληφθεί υπόψη κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εντολής Compute Simulation Run Manager.

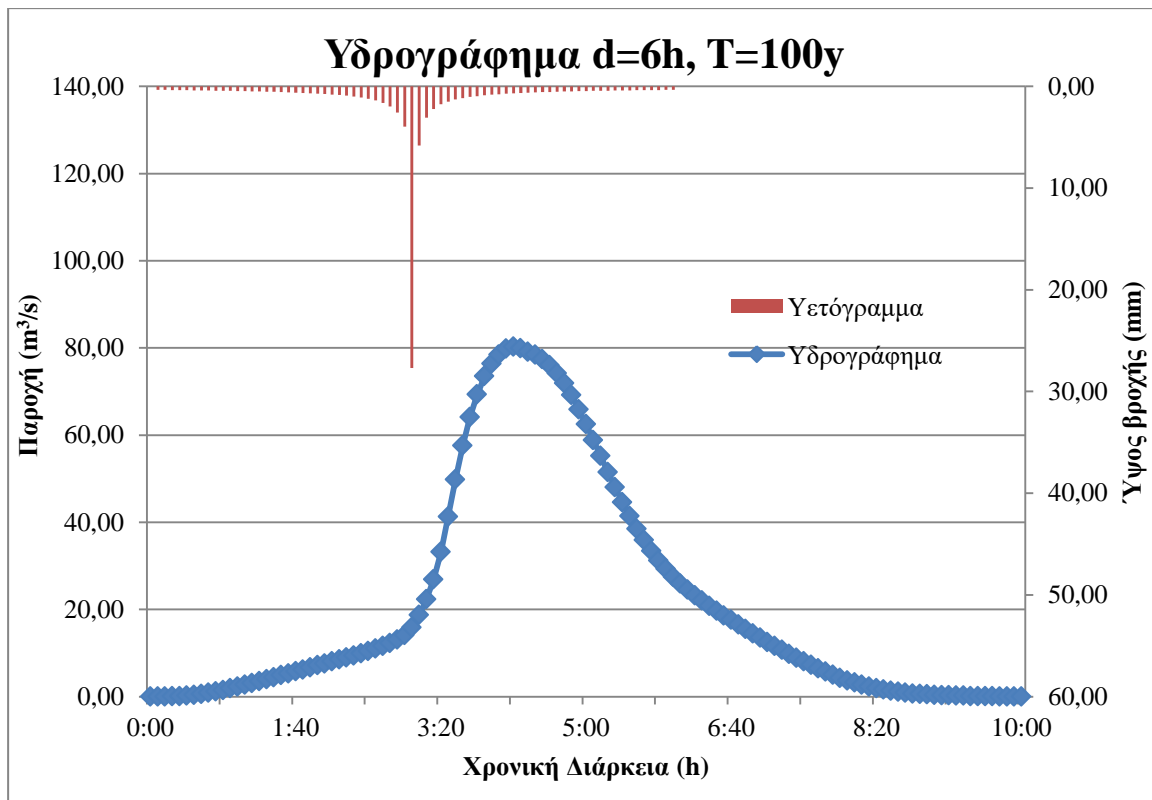
Στη συνέχεια, με την εντολή Compute/ Select Run, εκτελείται η προσομοίωση. Ενδεικτικά παρατίθενται τα υδρογραφήματα της λεκάνης απορροής για περίοδο επαναφοράς $T=2$ ετών και $T=100$ ετών και χρονικής διάρκειας 6h και d=12h. Τα αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης των λεκανών μελέτης παρουσιάζονται αναλυτικά στο παράρτημα.



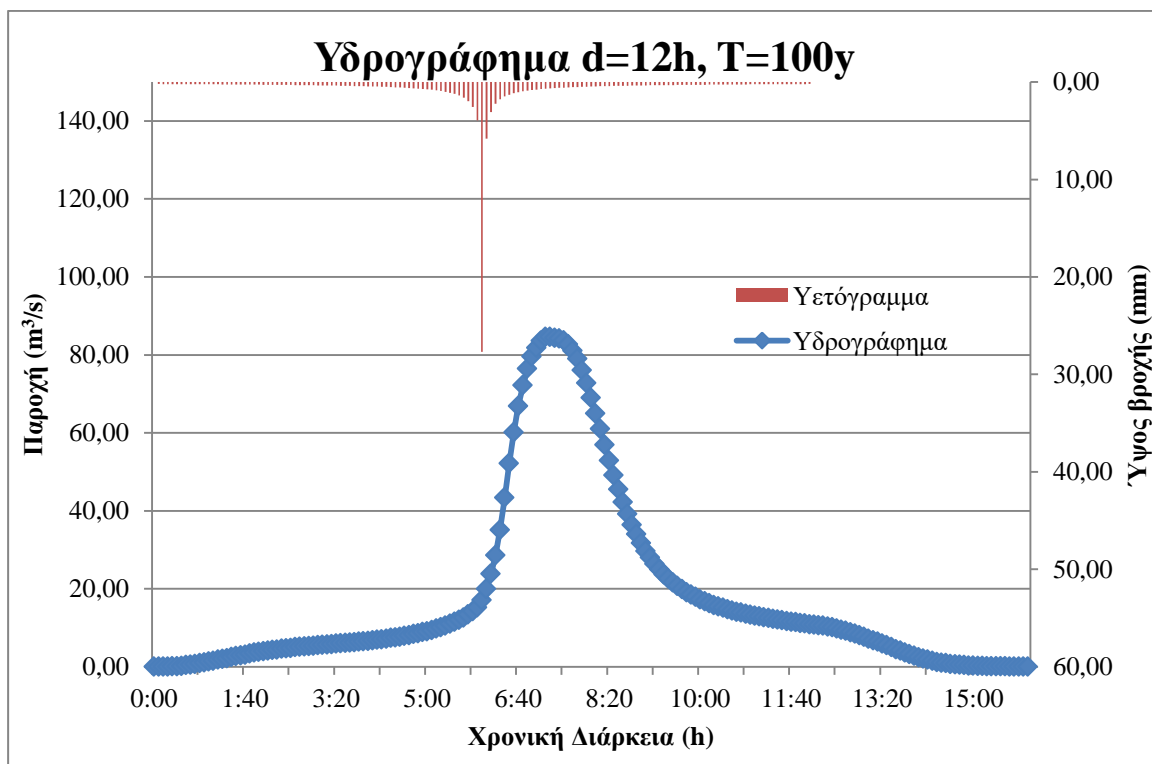
Εικόνα 4.9: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 2 ετών



Εικόνα 4.10: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 2 ετών



Εικόνα 4.11: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 100 ετών



Εικόνα 4.12: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 100 ετών

4.2 HEC-RAS

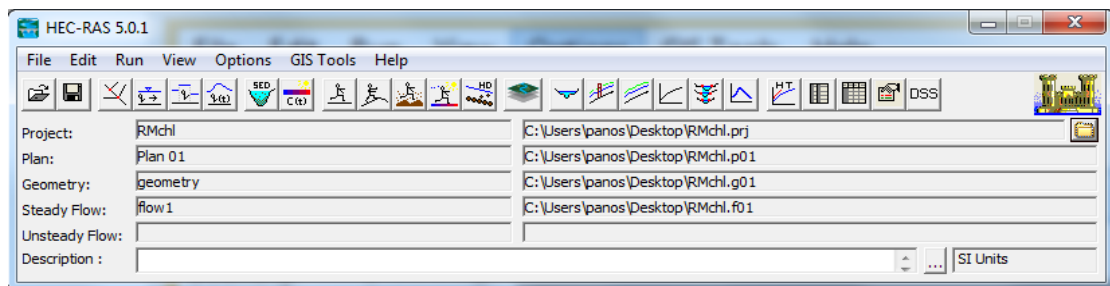
Η υδραυλική προσομοίωση επιτυγχάνεται με τη χρήση του προγράμματος HEC-RAS, το οποίο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αποτελεί ένα υδραυλικό μοντέλο με το οποίο μπορεί να υπολογιστεί το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας του ποταμού σε συνθήκες μόνιμης και μη μόνιμης ροής, αλλά και οι αποθέσεις φερτών υλών.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας γίνεται υδραυλική προσομοίωση των τμημάτων των ποταμών σε συνθήκες μόνιμης ροής. Η διαδικασία η οποία ακολουθείται είναι η εξής:

- Ορισμός νέου project
- Εισαγωγή των γεωμετρικών δεδομένων
- Εισαγωγή των υδρολογικών δεδομένων
- Εκτέλεση των υδραυλικών υπολογισμών
- Σύνθεση χαρτών κατάκλυσης

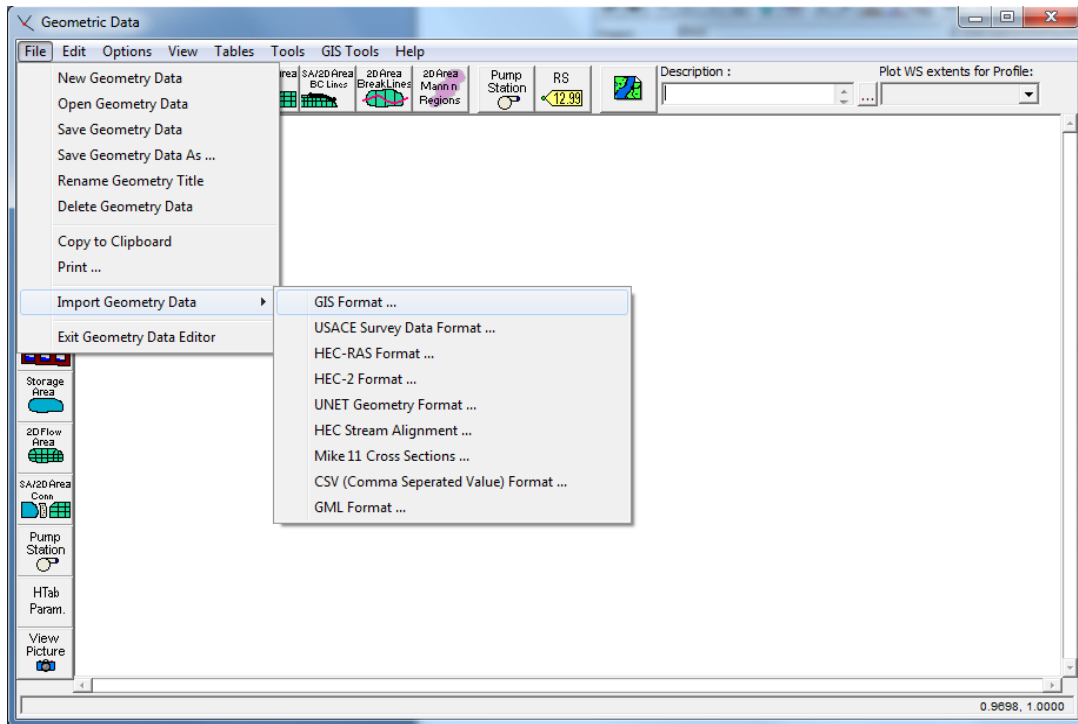
4.2.1 Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων

Αρχικά, δημιουργείται ένα νέο project με της εντολές File → New Project και κατόπιν από τις κεντρικές επιλογές του προγράμματος Options → Unit System γίνεται η επιλογή των μονάδων μέτρησης στο μετρικό σύστημα (S.I), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.13.



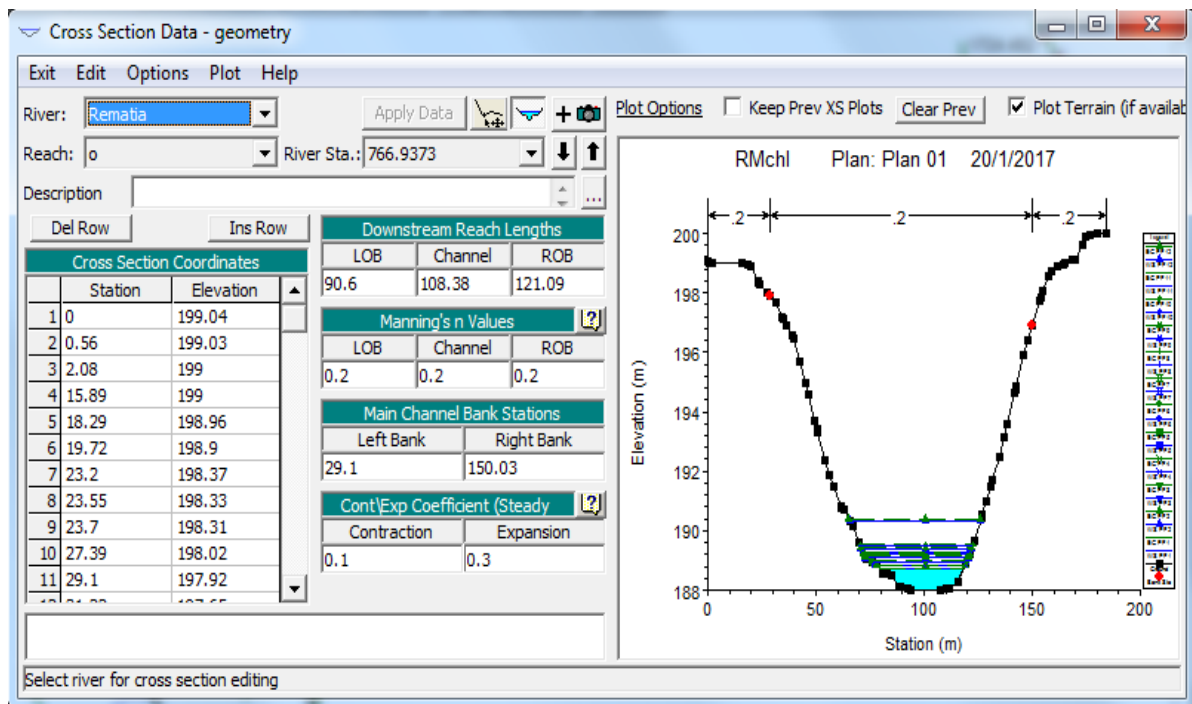
Εικόνα 4.13: Κεντρικό μενού του προγράμματος HEC-RAS

Η εισαγωγή του γεωμετρικού αρχείου, που παρήχθη από το HEC-GeoRAS γίνεται μέσω του κεντρικού μενού του HEC-RAS με την εντολή File → Geometric Data και στη συνέχεια από το παράθυρο των γεωμετρικών δεδομένων χρησιμοποιείται η εντολή File → Import Geometry Data → GIS Format, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.14.



Εικόνα 4.14: Περιβάλλον εισαγωγής γεωμετρικού αρχείου

Τα χαρακτηριστικά της κάθε διατομής και η επεξεργασία τους πραγματοποιείται με την εφαρμογή της εντολής Edit Cross Section.



Εικόνα 4.15: Χαρακτηριστικά διατομής και επεξεργασία των γεωμετρικών δεδομένων

Στο παράθυρο της Εικόνας 4.15 ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί τα ακόλουθα στοιχεία:

- River/Reach: Όνομα/ τμήμα ποταμού στο οποίο ανήκει η διατομή
- River Station: Ο κωδικός αριθμός της διατομής, ο οποίος δείχνει την απόσταση της διατομής από το αρχικό κατάντη τμήμα του ποταμού
- Cross Section Coordinates: Πίνακας που περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά σημεία της διατομής. Συγκεκριμένα, την απόστασή τους από το αριστερό άκρο της διατομής με τα αντίστοιχα υψόμετά τους.
- Downstream Reach Lengths: η απόσταση της κάθε διατομής από την κατάντη της
- Manning's n values: Οι τιμές του συντελεστή manning για την αριστερή και δεξιά όχθη και την κύρια κοίτη του ποταμού. Στη παρούσα διπλωματική η επιλογή και εισαγωγή αυτών των συντελεστών έγινε χειροκίνητα. Η διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.
- Main Channel Bank Stations: Οι αποστάσεις της αριστερής και δεξιάς όχθης από το αριστερό άκρο της διατομής.
- Cont/ Exp Coefficients: Οι συντελεστές συστολής/ διαστολής για τον μετέπειτα υπολογισμό των τοπικών απωλειών. Οι τιμές είναι προκαθορισμένες από το πρόγραμμα για τη μόνιμη ροή.

4.2.1.1 Ορισμός συντελεστών Manning

Για κάθε διατομή πρέπει να οριστεί μια τιμή n του συντελεστή Manning για τις όχθες και την κοίτη του ρέματος.

Όχθες

Ο συντελεστής n για τις όχθες της ρεματιάς, ορίστηκε σύμφωνα με τον οδηγό επιλογής συντελεστή Manning για φυσικά κανάλια των Arcement and Schneider (1989).

Ο οδηγός αυτός παρουσιάζει φωτογραφίες οχθών, διάφορων ποταμών, διαφορετικής πυκνότητας βλάστησης, με υπολογισμένους συντελεστές n για κάθε περίπτωση. Συγκρίνοντας την κατάσταση στις διατομές της περιοχής μελέτης με την κατάσταση που απεικονίζεται στις φωτογραφίες του οδηγού, διαπιστώθηκε ότι οι όχθες της ρεματιάς κατατάσσονται στην τελευταία περίπτωση του οδηγού, αυτή με την πυκνότερη βλάστηση. Ο συντελεστής Manning για αυτή την περίπτωση θεωρείται ίσος με 0,2.

Παρακάτω, παρατίθενται οι συγκρινόμενες φωτογραφίες για την εξαγωγή συμπερασμάτων.



Εικόνα 4.16: Διατομή Δ12 του Υδατορεύματος



Εικόνα 4.17: Διατομή Δ6 του Υδατορεύματος



Εικόνα 4.18: Διατομή Δ3 του Υδατορεύματος



Εικόνα 4.19: Η τελευταία φωτογραφία του οδηγού επιλογής συντελεστή Manning για φυσικά κανάλια των Arcement and Schneider (1989).

Κοίτη

Ο συντελεστής n για την κοίτη ορίστηκε με τη βοήθεια του πίνακα του Chow (Πίνακας 4.3) για φυσικά υδατορεύματα πλάτους μικρότερου των 100 μέτρων.

Πίνακας 4.3: Τιμές του συντελεστή n του Manning

Type of channel and description	Roughness Coefficient n		
	Minimum	Normal	Maximum
Natural Streams Minor streams (top width at flood stage <100 ft)			
1. Clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0,025	0,030	0,033
2. Same as above, but more stones and weeds	0,030	0,035	0,040
3. Clean, winding, some pools and shoals	0,033	0,040	0,045
4. Same as above, but some weeds and stones	0,035	0,045	0,050
5. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0,040	0,048	0,055
6. Same as 4, but more stones	0,045	0,048	0,055
7. Sluggish reaches, weedy, deep pools	0,050	0,070	0,080
8. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stand of timber and underbrush	0,075	0,100	0,150

Σύμφωνα με τον Chow, ο συντελεστής n στην κοίτη των εικόνων 4.16, 4.17 και 4.18 είναι ίσος με 0.035, διότι πρόκειται για κοίτη με πέτρες και μικρή βλάστηση.

Με τον ίδιο τρόπο ορίστηκαν οι συντελεστές και στα υπόλοιπα τμήματα της κοίτης.

4.2.1.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά γεφυρών

Προτού γίνει η υδραυλική προσομοίωση, πρέπει να εισαχθούν στο πρόγραμμα HEC-RAS τα τεχνικά χαρακτηριστικά των τεσσάρων γεφυρών που υπάρχουν στη ρεματιά Χαλανδρίου.

Η εισαγωγή των χαρακτηριστικών τους πραγματοποιείται μέσω της εντολής edit geometric data → Edit and/or create bridges and culverts → options → add a bridge and/or a culvert.

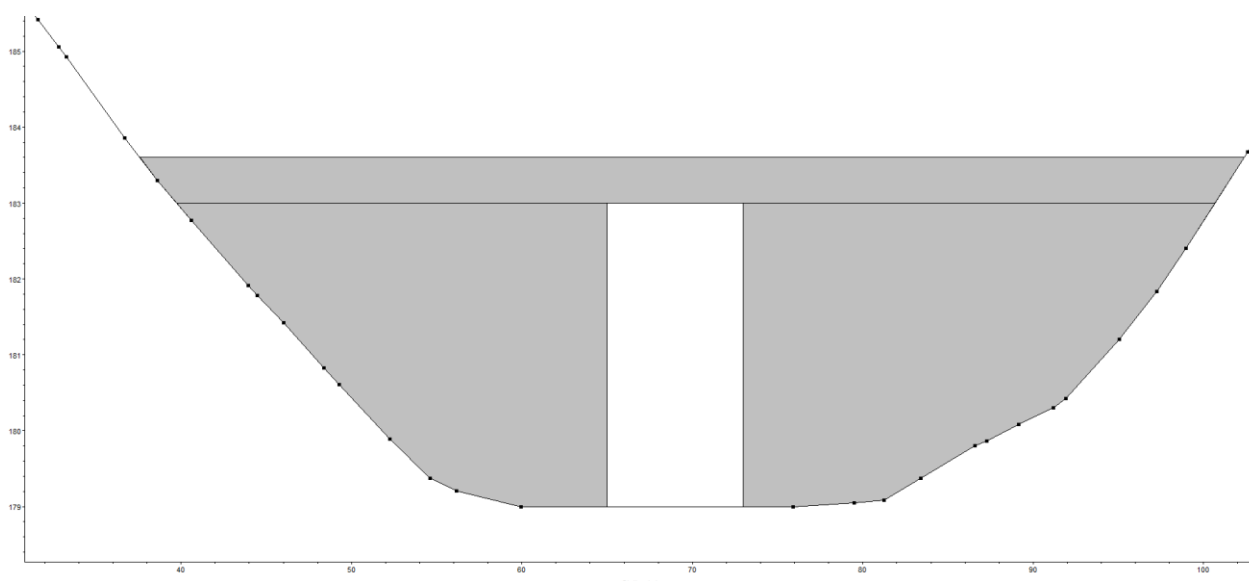
Τα χαρακτηριστικά αυτών των γεφυρών μετρήθηκαν με επιτόπιες μετρήσεις.

Στον Πίνακα 4.4, παρουσιάζονται οι μετρήσεις και οι διατομές των γεφυρών, όπως κατασκευάστηκαν στο HEC-RAS.

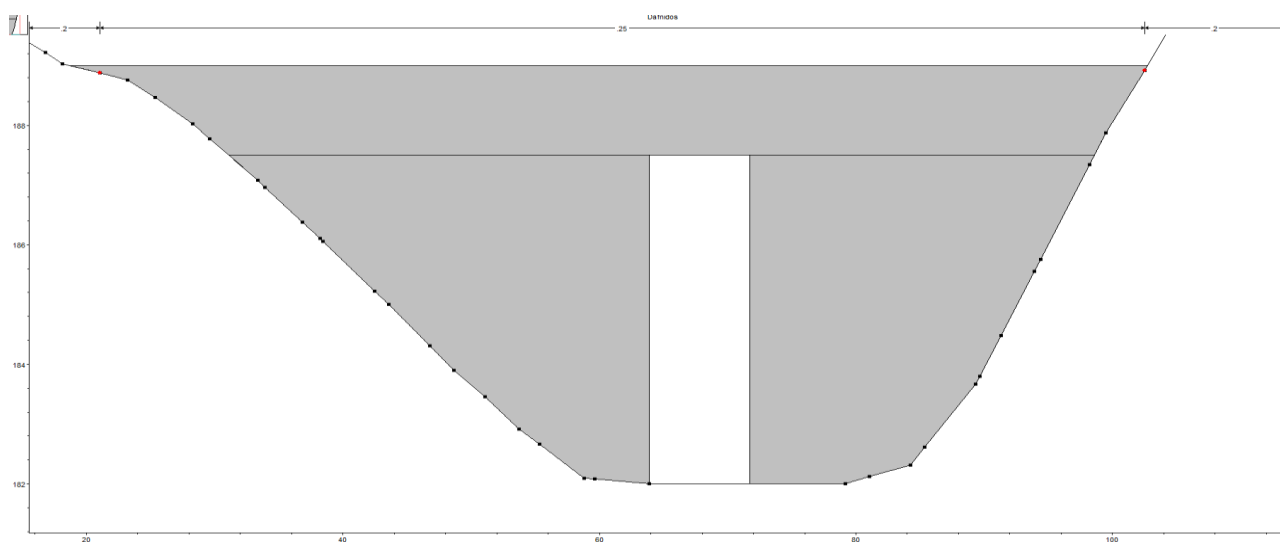
Η θέση κάθε γέφυρας φαίνεται στην Εικόνα 3.33.

Πίνακας 4.4: Τεχνικά Χαρακτηριστικά γεφυρών

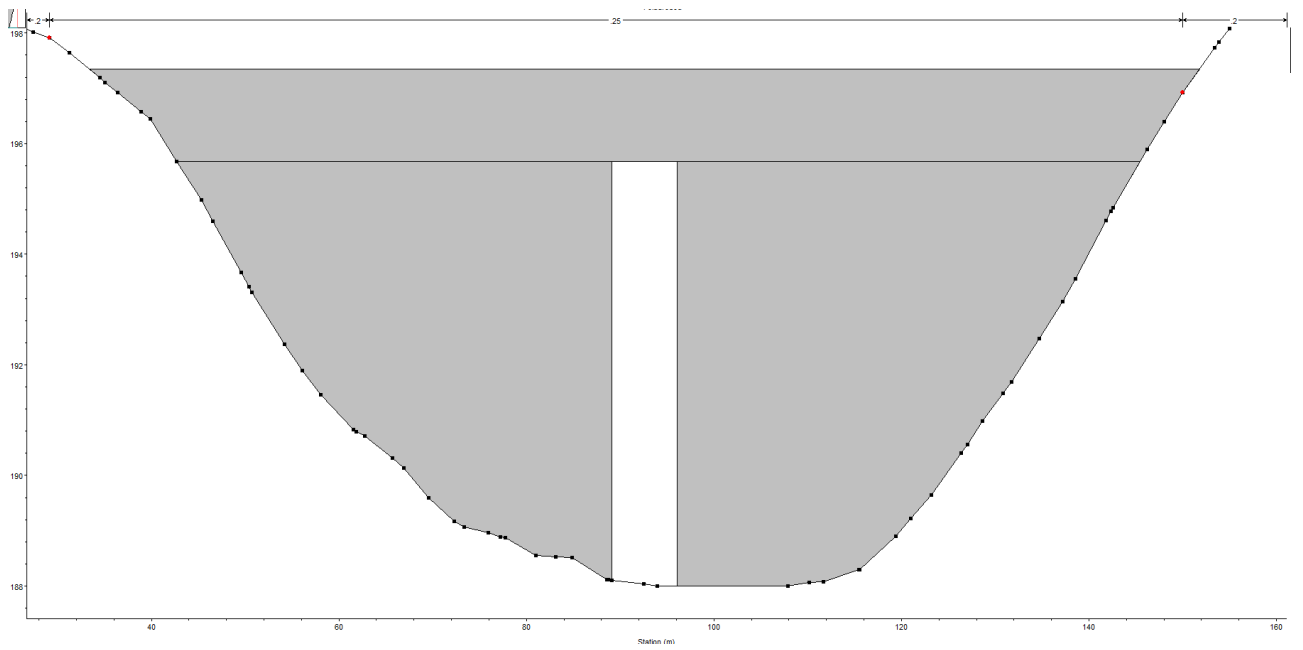
Γέφυρα	Χαρακτηριστικά Διατομής(m)			
	Ύψος	Πλάτος Ανοίγματος	Πλάτος γέφυρας	Πάχος γέφυρας
Γ1	3,5	6,5	2,0	1,0
Γ2	5,3	7,7	9,2	1,5
Γ3	7,0	6,5	8,0	1,5
Γ4	3,5	6,3	2,0	1,0



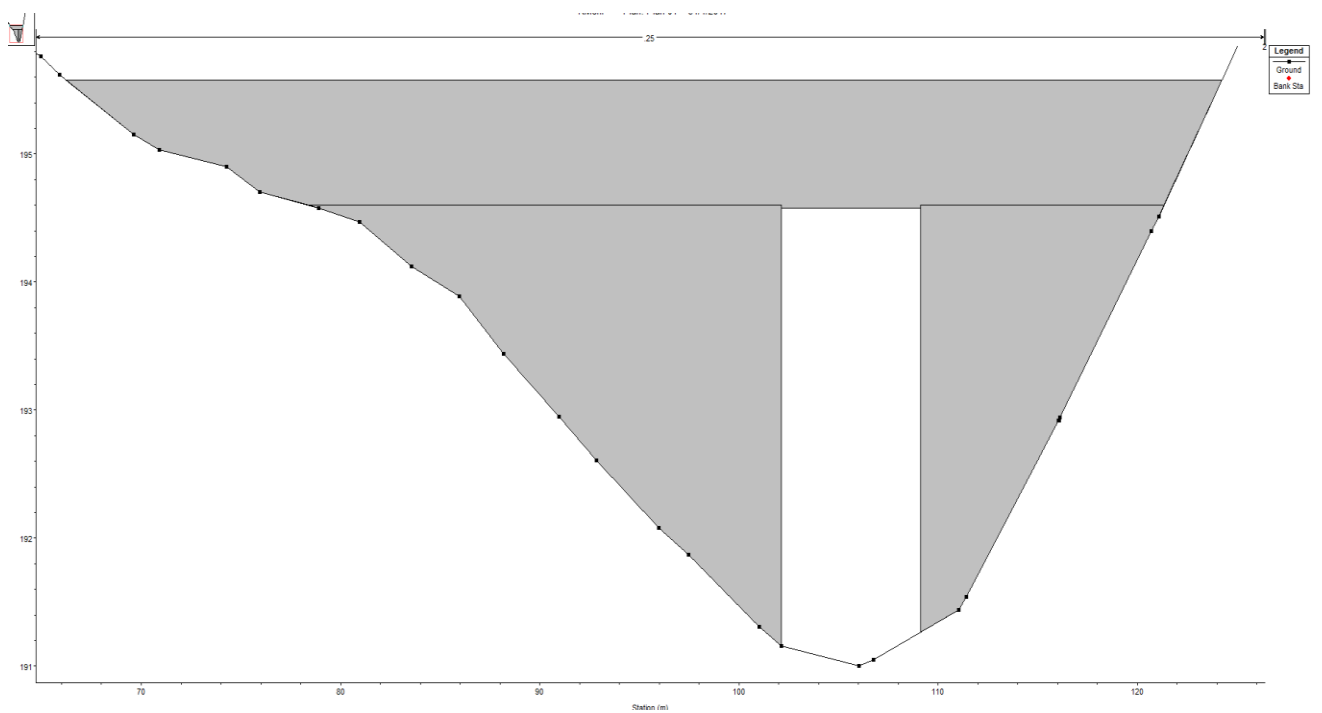
Εικόνα 4.20: Διατομή της γέφυρας Γ1



Εικόνα 4.21: Διατομή της γέφυρας Γ2



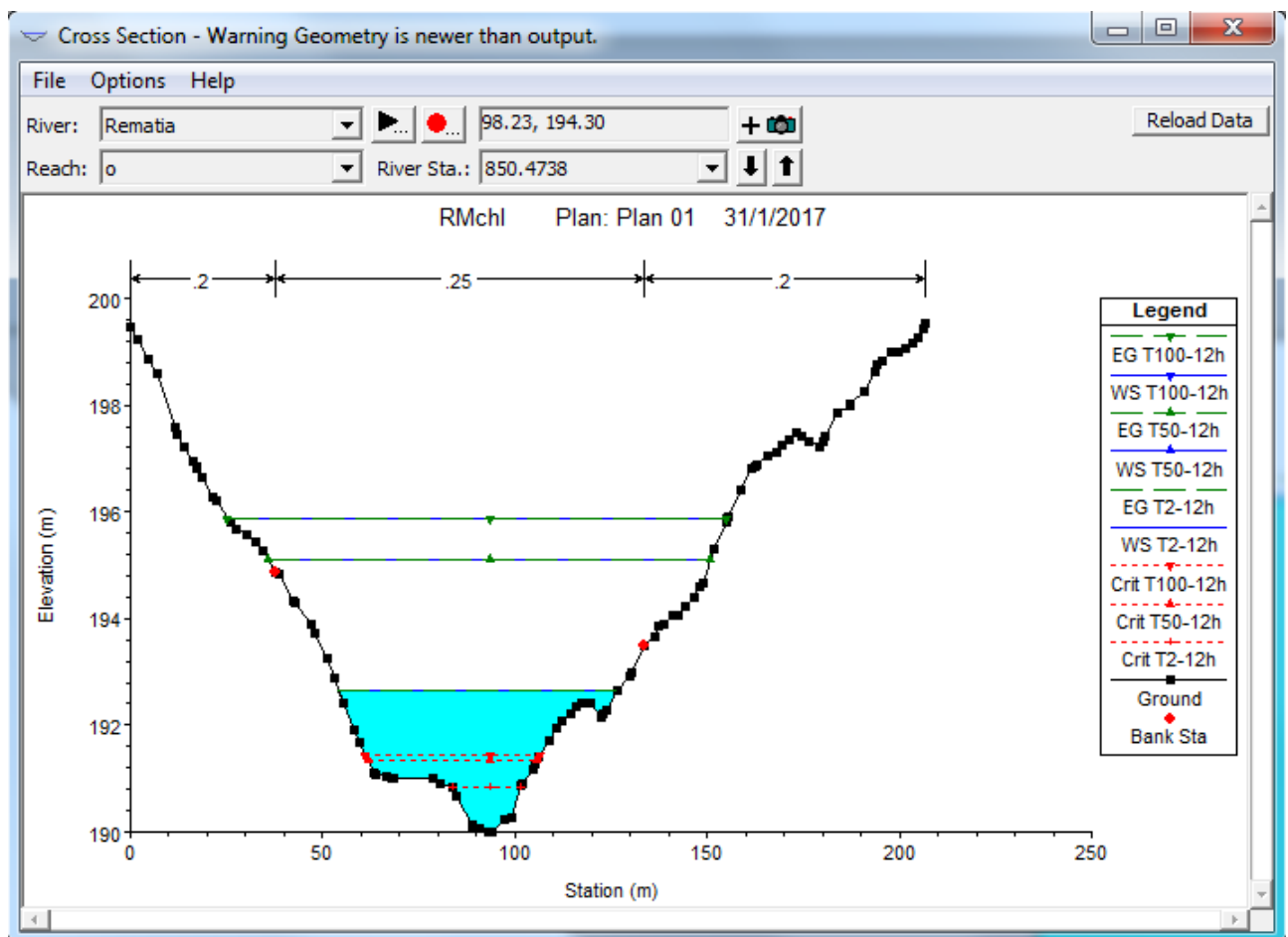
Εικόνα 4.22: Διατομή της γέφυρας Γ3



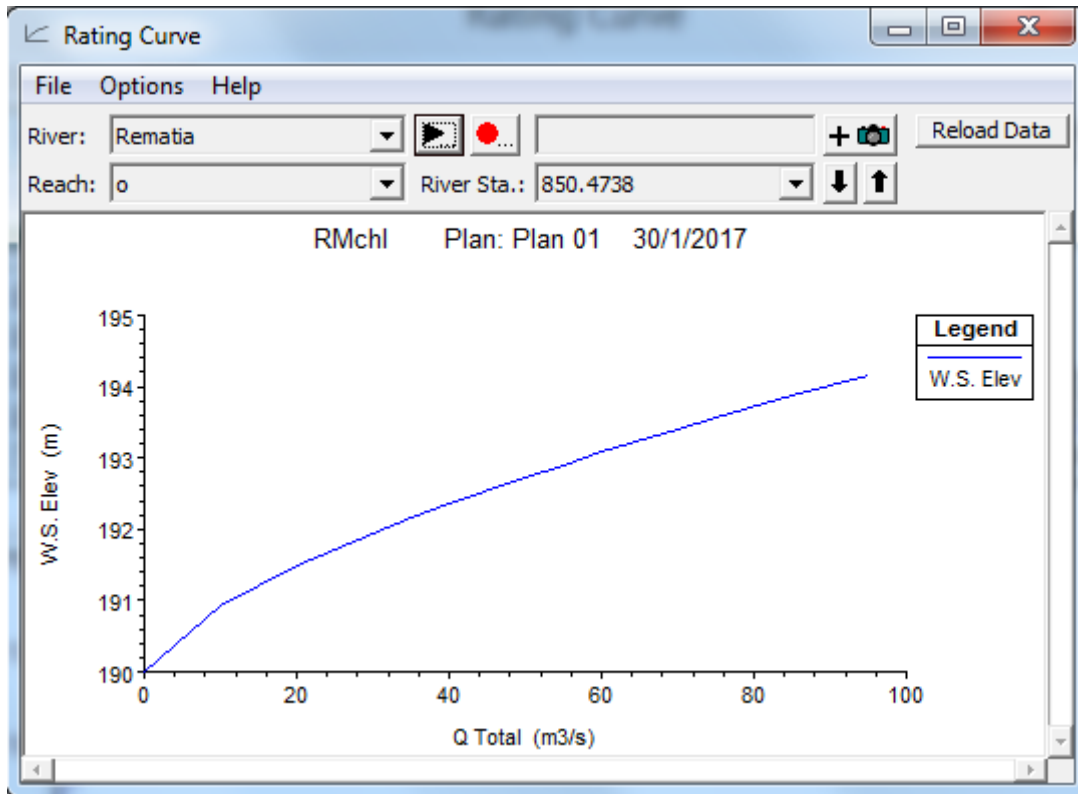
Εικόνα 4.23: Διατομή της γέφυρας Γ4

4.2.2 Επισκόπηση αποτελεσμάτων υδραυλικής προσομοίωσης

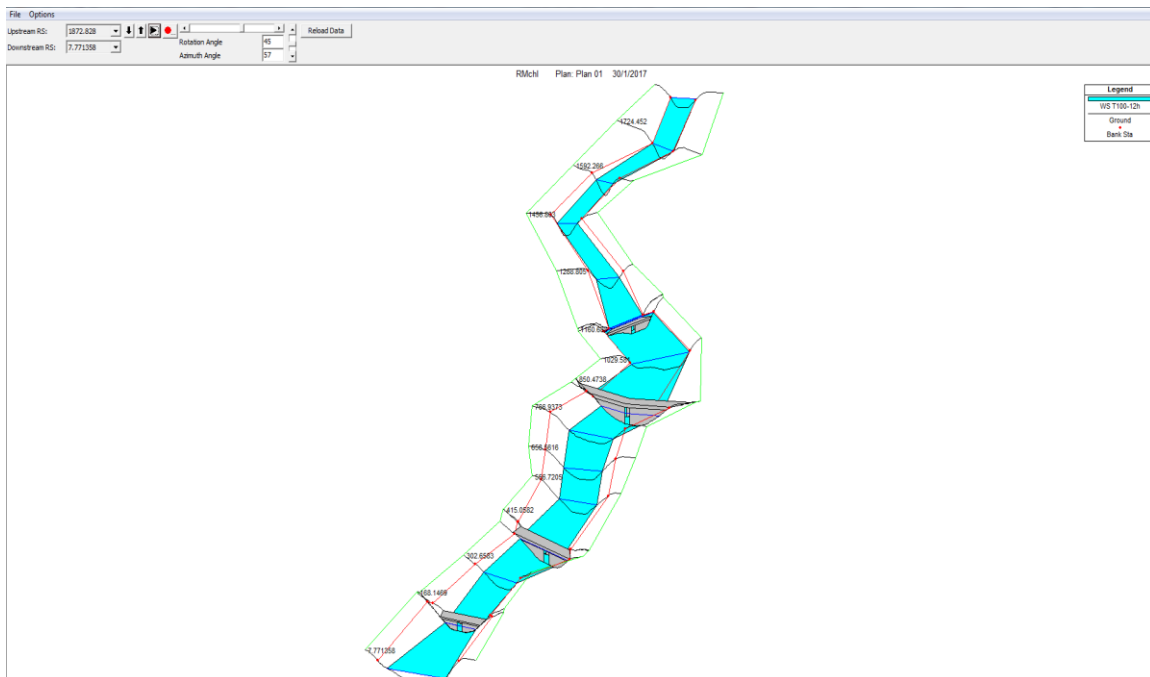
Το HEC-RAS δίνει τη δυνατότητα επισκόπησης των αποτελεσμάτων σε μορφή διαγραμμάτων και πινάκων για όλες τις διατομές και την μηκοτομή του ποταμού. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης σε μια διατομή ενός ποταμού για περιόδους επαναφοράς $T=2$ έτη, $T=50$ έτη και $T=100$ έτη (Εικόνα 4.24). Επίσης, δίνεται και η μεταβολή της στάθμης στην διατομή με την αύξηση της πλημμυρικής παροχής (Εικόνα 4.25). Τέλος, δίνεται και μια τρισδιάστατη απεικόνιση της πλημμυρικής κατάκλυσης σε όλο το τμήμα του συγκεκριμένου ποταμού για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς $T=100$ έτη (Εικόνα 4.26).



Εικόνα 4.24: Αποτελέσματα διατομής Δ6 για βροχόπτωση διάρκειας 12h και περίοδο αναφοράς $T=2$ ετών, $T=50$ ετών και $T=100$ ετών



Εικόνα 4.25: Μεταβολή της στάθμης στη διατομή με την αύξηση της παροχής

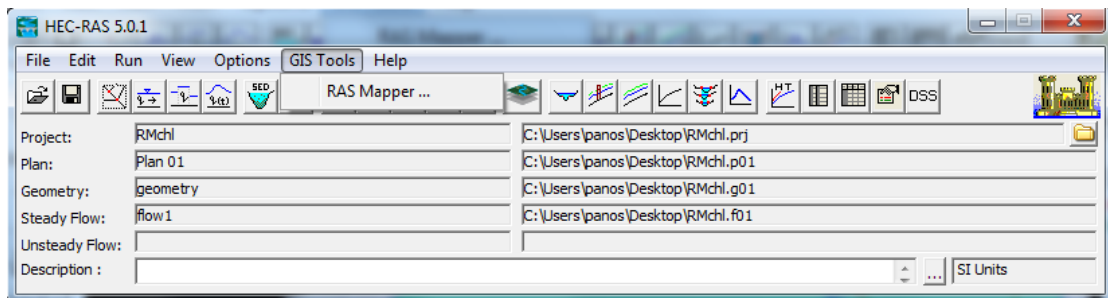


Εικόνα 4.26: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πλημμυρικής κατάκλυσης περιόδου επαναφοράς $T=100$ έτη

4.2.3 Σύνθεση Χαρτών Πλημμύρας

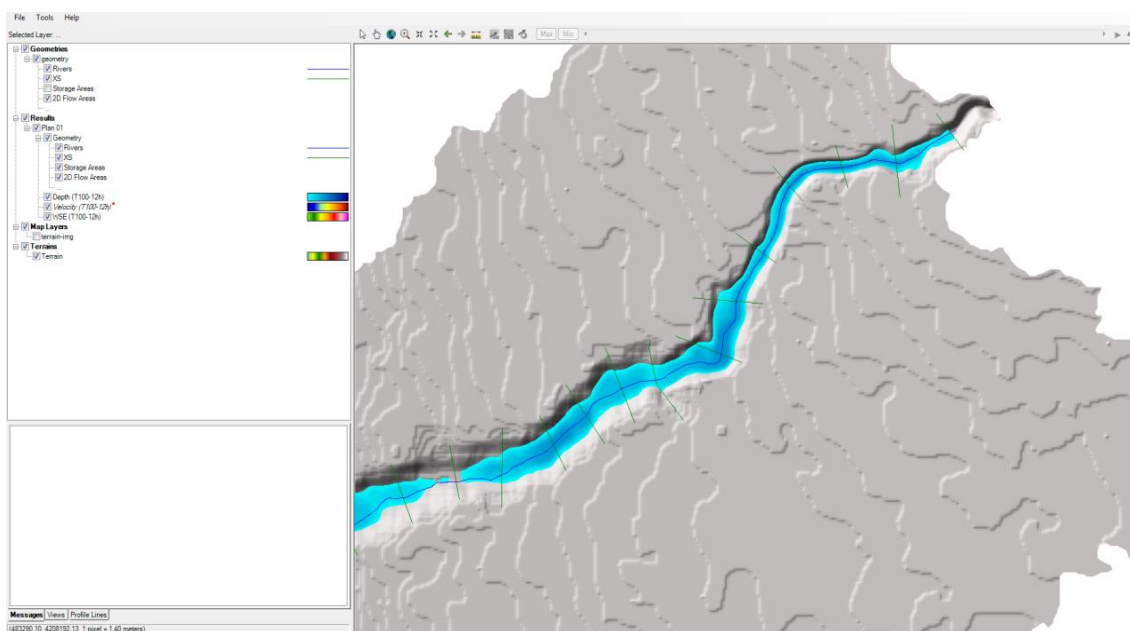
Στο τελευταίο βήμα της υδραυλικής προσομοίωσης των ποταμών συνθέτονται οι χάρτες πλημμύρας. Αυτοί χρησιμεύουν στη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του πλημμυρικού γεγονότος για την περιοχή μελέτης, δίνουν πληροφορίες για την πιεζομετρική επιφάνεια του ποταμού, τα όρια της κατάκλισης και τα βάθη του νερού σε αυτή.

Η παραγωγή χαρτών πλημμύρας πραγματοποιήθηκε στο HEC-RAS μέσω της εντολής GIS Tools → RAS Mapper του κεντρικού μενού του προγράμματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.27.



Εικόνα 4.27: Επιλογή της εντολής RAS Mapper από το κεντρικό μενού του HEC- RAS

Το παράθυρο εργασιών του RAS Mapper, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.28, αποτελείται από ένα παράθυρο (Layer Window), το οποίο παρέχει τη λίστα των επιθεμάτων που θα απεικονιστούν στο χάρτη. Τα βασικά επιθέματα που εισάγονται είναι εκείνα του ποταμού των διατομών και του εδάφους, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.



Εικόνα 4.28: Παράθυρο εργασιών του RAS Mapper

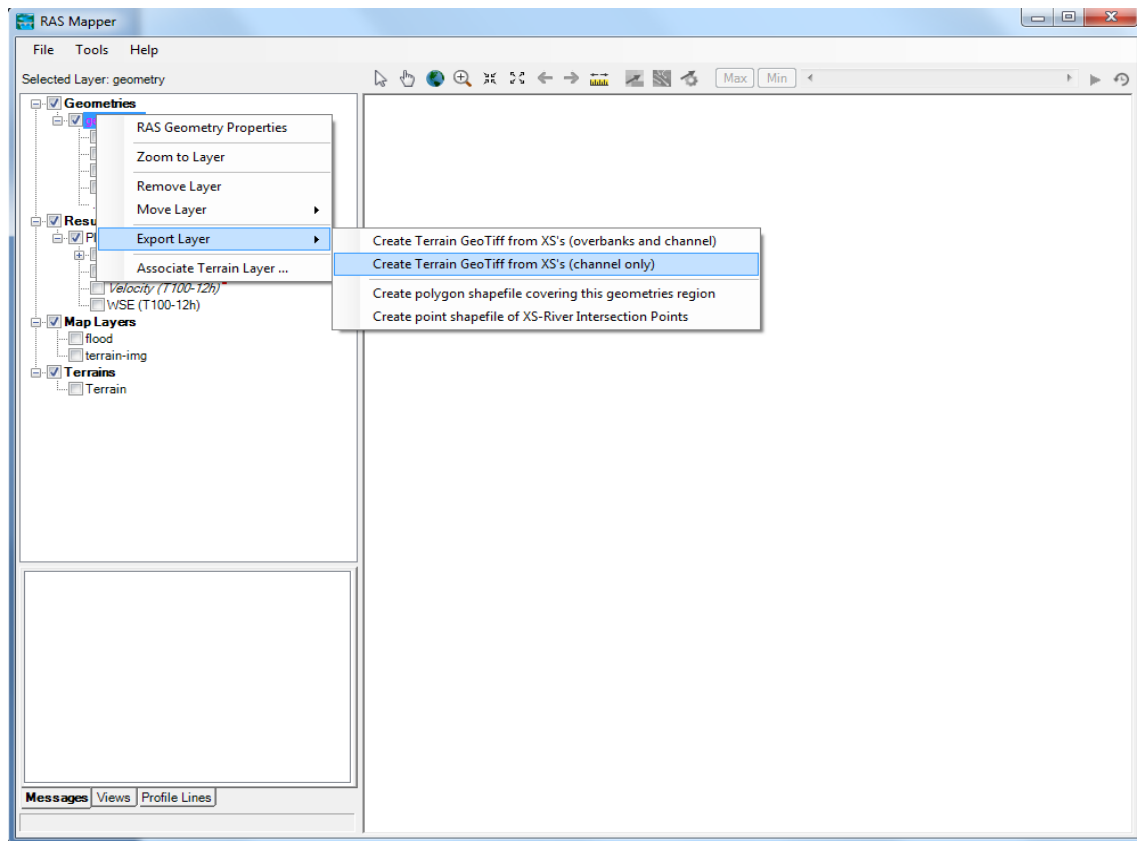
Η βασική παραδοχή της χρήσης των γεωχωρικών δεδομένων στο υδραυλικό μοντέλο είναι ότι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του πλημμυρικού πεδίου της περιοχής μελέτης. Προκειμένου να απεικονισθεί στο RAS Mapper, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους πρέπει να είναι σε μορφή .flt.

Οι χάρτες πλημμυρικής κατάκλυσης απεικονίζουν το πλημμυρικό πεδίο, για μια συγκεκριμένη πλημμύρα σχεδιασμού, με ακριβή όρια. Επίσης, δίνουν πληροφορίες για το βάθος του νερού σε όλο το πλημμυρικό πεδίο.

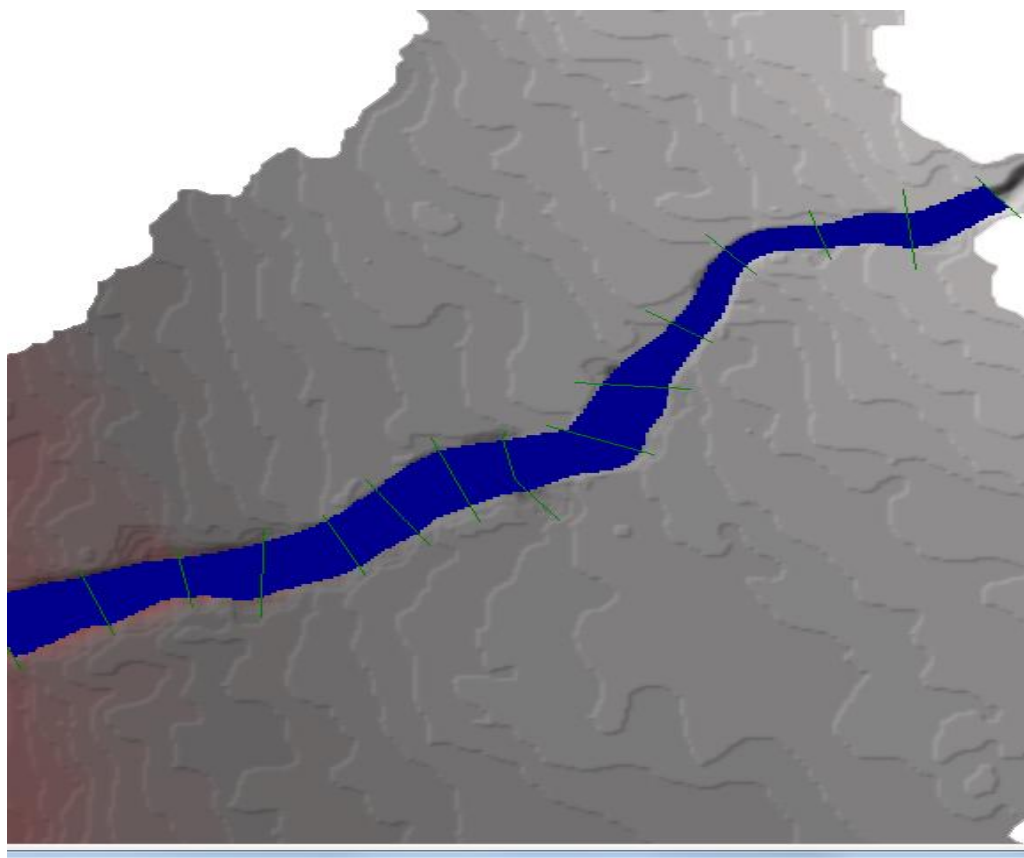
Η σύνθεση των χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης υλοποιείται με τον συνδυασμό της πιεζομετρικής επιφάνειας με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Με τον τρόπο αυτό, υπολογίζονται τα ακριβή όρια της κατάκλυσης και τα βάθη του νερού στο πλημμυρικό πεδίο, υπολογίζοντας τη διαφορά των υψομέτρων μεταξύ του πιεζομετρικού φορτίου και του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Η εφαρμογή αυτής της διαδικασίας γίνεται επιλέγοντας για κάθε πλημμυρικό επεισόδιο που προέκυψε από την υδραυλική προσομοίωση τη δημιουργία Water Surface Elevation.

Ο χάρτης πλημμυρικής κατάκλυσης δημιουργείται πατώντας δεξί κλικ στην εντολή Geometries → Export Layer → Create Terrain Geo Tiff from XS's (channel only), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.29.

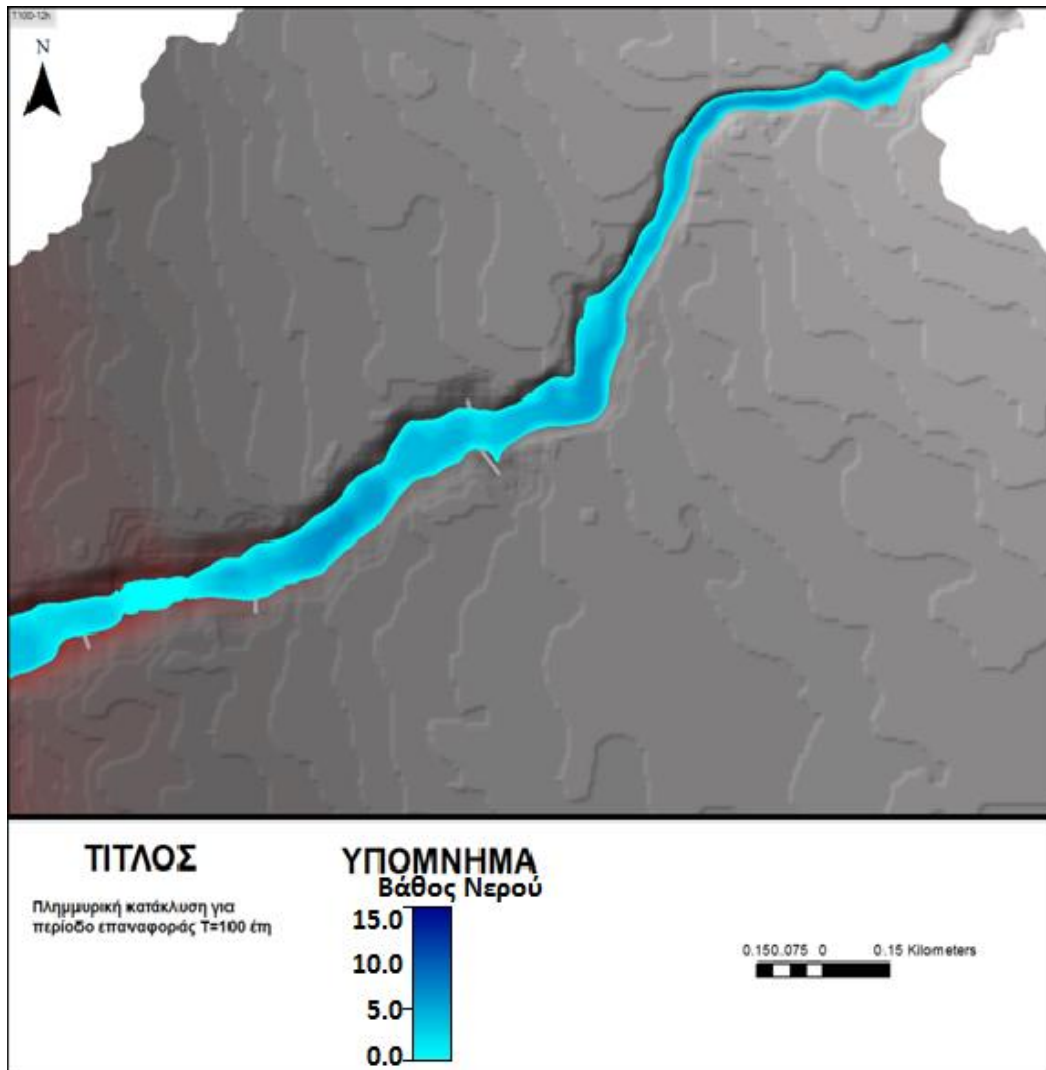
Συνεπώς, δημιουργούνται δύο αρχεία. Το ένα περιέχει τα όρια της πλημμυρικής κατάκλυσης σε μορφή πολυγώνου και το άλλο περιέχει τα βάθη του νερού, όπως παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.30 και 4.31.



Εικόνα 4.29: Επιλογή της εντολής *Create Terrain Geo Tiff from XS's (channel only)*



Εικόνα 4.30: Όρια πλημμυρικής κατάκλυσης για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη



Εικόνα 4.31: Βάθη νερού για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη

Στις Εικόνες 4.30 και 4.31 απεικονίζονται τα πλημμυρικά πεδία και τα αντίστοιχα βάθη νερού για πλημμύρες που προέρχονται από περιόδους επαναφοράς $T=100$ έτη.

Στο παράρτημα παρουσιάζονται αναλυτικά οι πλημμυρικοί χάρτες για κάθε προφίλ.

4.4 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

Η μέθοδος ανάλυσης ευαισθησίας που ακολουθήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η μέθοδος One at a time – OAT / one factor at a time – OFAT.

4.4.1 Ανάλυσης ευαισθησίας στο HEC_HMS

Οι μεταβλητές εισόδου οι οποίες εξετάστηκαν στο HEC-HMS είναι:

- Η αύξηση/μείωση του αριθμού καμπύλης (CN) (Εικόνα 4.32 και 4.33).
- Η αύξηση/μείωση του χρόνου υστέρησης στο υδρογράφημα εξόδου (T_{lag}) (Εικόνα 4.34 και 4.35).
- Η αύξηση/μείωση της παραμέτρου K στη διόδευση του πλημμυρικού κύματος κατά Muskingum (Εικόνα 4.36 και 4.37).
- Η αύξηση/μείωση της παραμέτρου x στη διόδευση του πλημμυρικού κύματος κατά Muskingum (Εικόνα 4.38 και 4.39).
- Η αύξηση/μείωση του συντελεστή n στη διόδευση του πλημμυρικού κύματος κατά Kinematic Wave (Εικόνα 4.40 και 4.41).

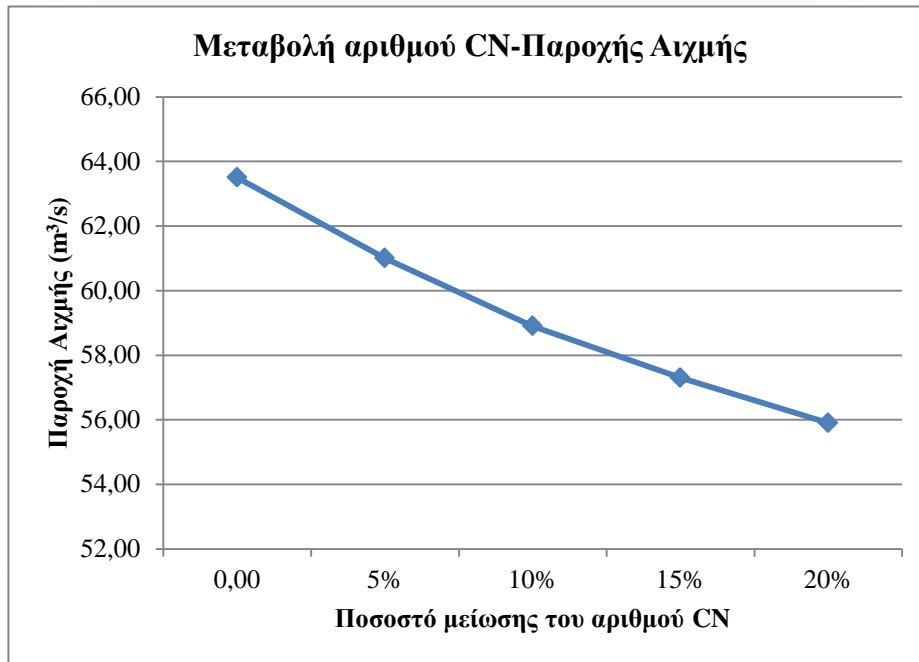
Η μέθοδος εφαρμόστηκε για τη μέθοδο υπολογισμού απορροής κατά SCS στα σημεία εξόδου της λεκάνης της περιοχής μελέτης με κριτήριο την παροχή αιχμής, για βροχόπτωση διάρκειας 6 ωρών και περιόδου επαναφοράς 50 ετών. Οι αρχικές συνθήκες φαίνονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6: Αρχικές συνθήκες παροχής αιχμής και όγκου απορροής για βροχόπτωση περιόδου επαναφοράς T=50 έτη

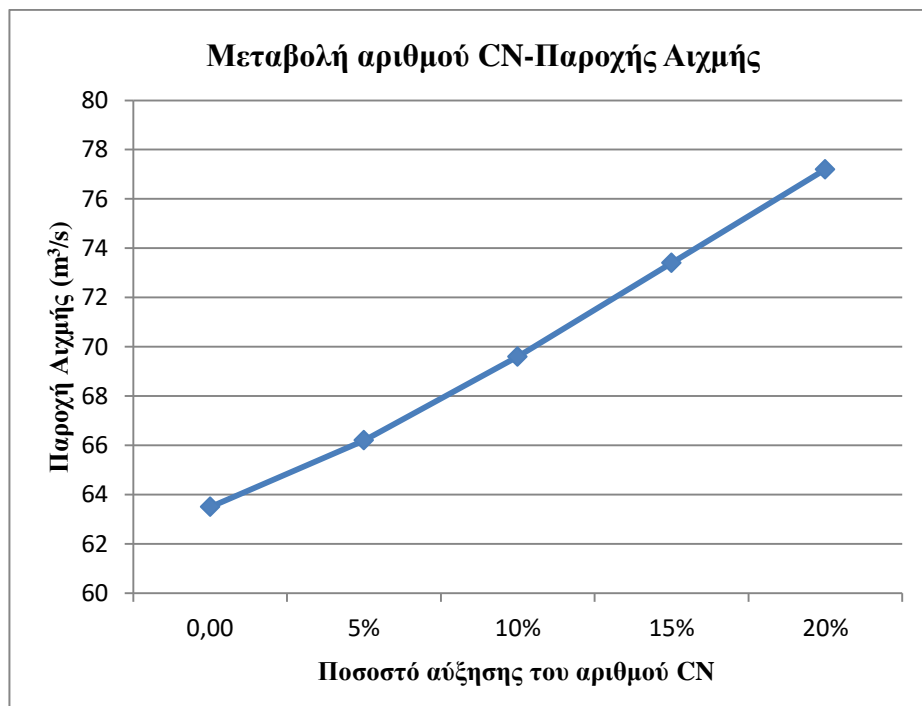
	Αρχικές Συνθήκες
Παροχή Αιχμής (m^3/s)	63,5
Όγκος απορροής (m^3)	31,16

4.4.1.1 Μεταβολή αριθμού καμπύλης (CN)

Η αρχική τιμή του αριθμού καμπύλης CN των υπολεκανών ήταν 70,35.



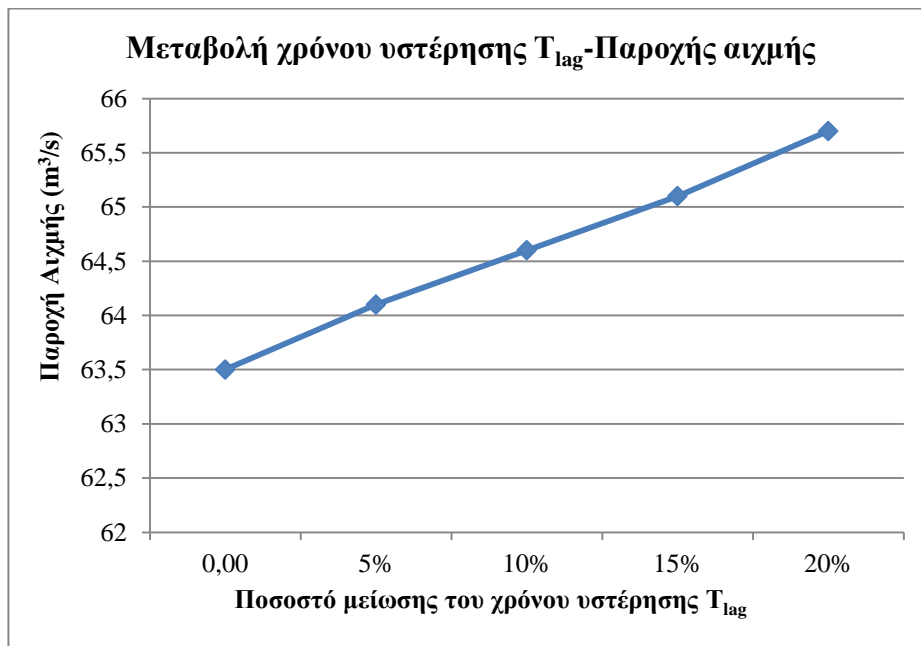
Εικόνα 4.32: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για μείωση του αριθμού καμπύλης CN



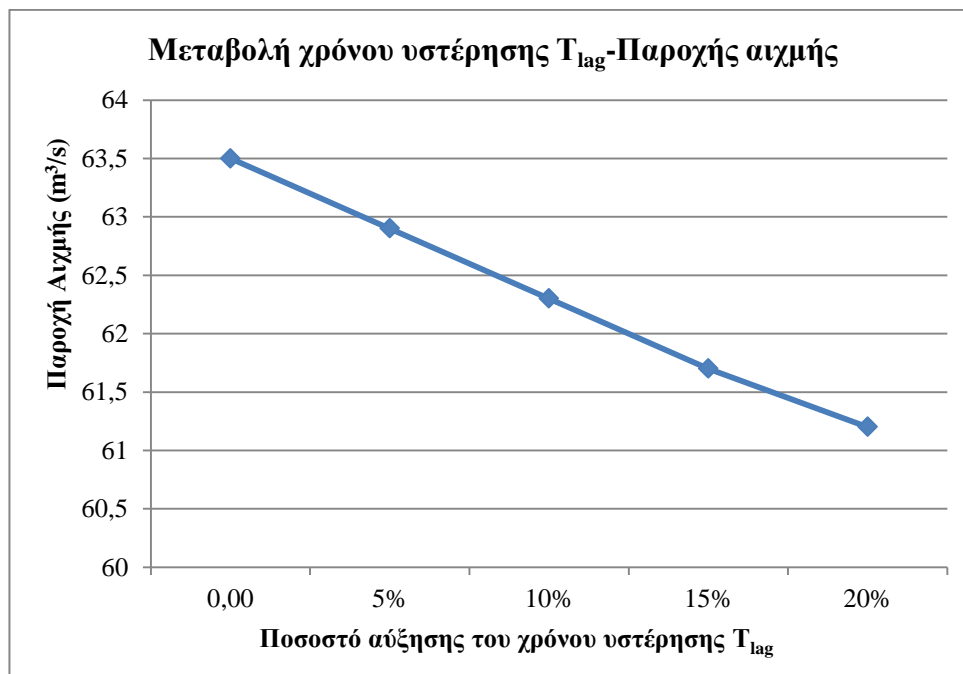
Εικόνα 4.33: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για αύξηση του αριθμού καμπύλης CN

4.4.1.2 Μεταβολή χρόνου υστέρησης στο υδρογράφημα εξόδου (T_{lag})

Η αρχική τιμή του χρόνου υστέρησης T_{lag} ήταν 29,8min.



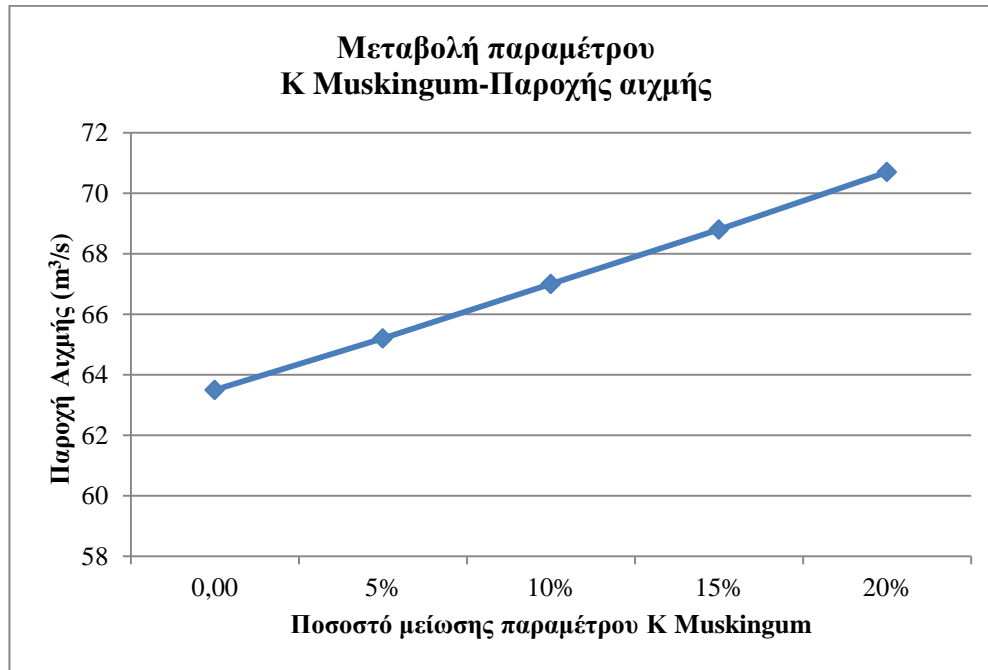
Εικόνα 4.34: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για μείωση του χρόνου υστέρησης (T_{lag})



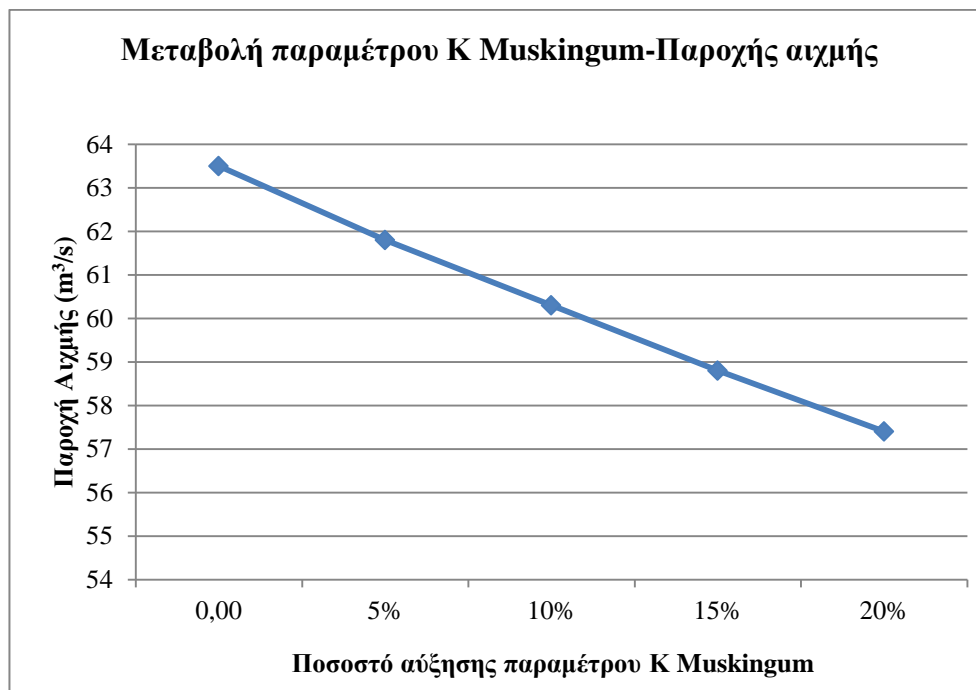
Εικόνα 4.35: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για αύξηση του χρόνου υστέρησης (T_{lag})

4.4.1.3 Μεταβολή της παραμέτρου K στη διόδευση του πλημμυρικού κύματος κατά Muskingum

Οι αρχικές τιμές της παραμέτρου K στη διόδευση του πλημμυρικού κύματος κατά Muskingum ήταν 0,46min και 0,77min.



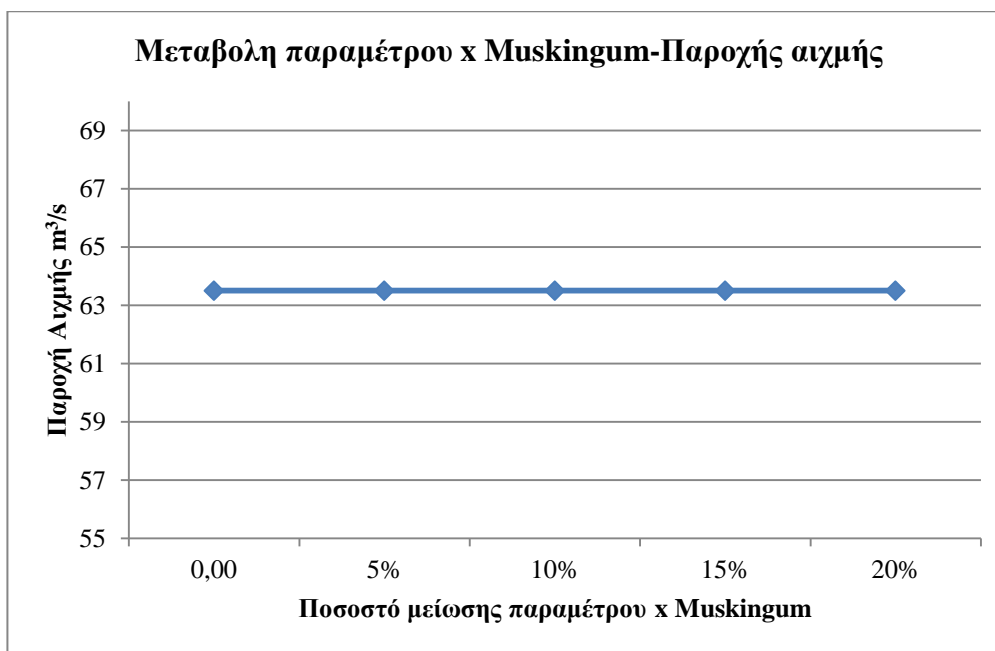
Εικόνα 4.36: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για μείωση της παραμέτρου K Muskingum



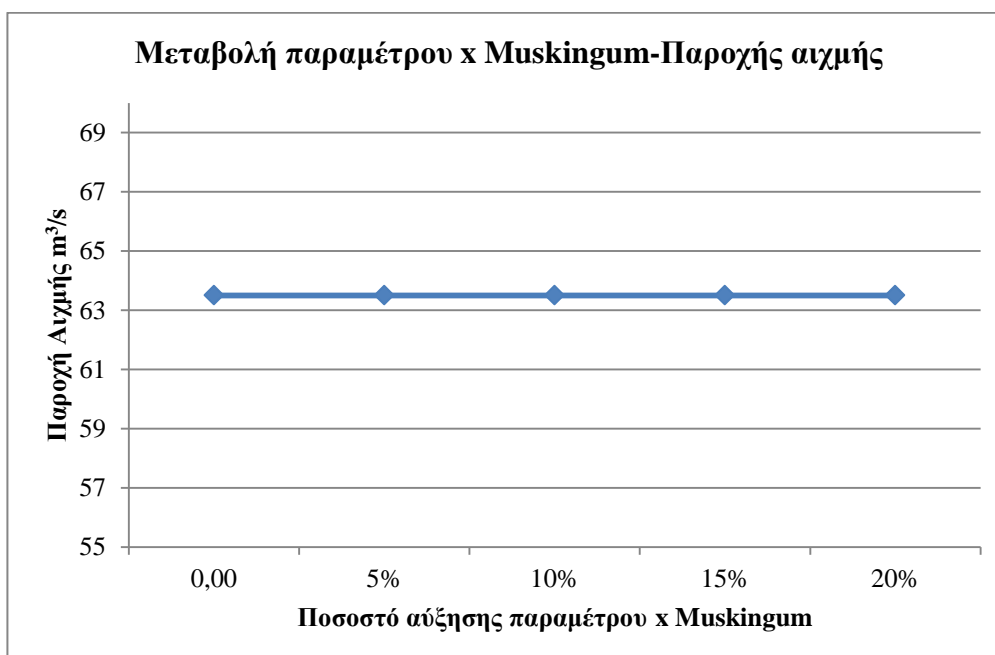
Εικόνα 4.37: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για αύξηση της παραμέτρου K Muskingum

4.4.1.4 Μεταβολή της παραμέτρου x στη διόδευση του πλημμυρικού κύματος κατά Muskingum

Η παράμετρος x στη διόδευση του πλημμυρικού κύματος κατά Muskingum για κάθε υδατόρευμα ήταν 0,2.



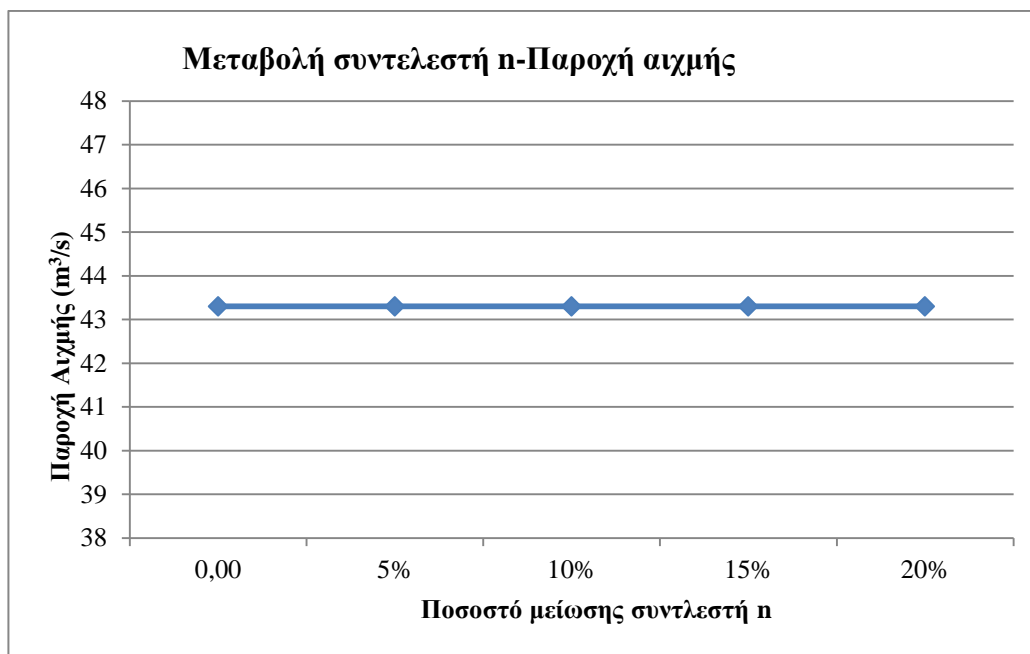
Εικόνα 4.38: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για μείωση της παραμέτρου x Muskingum



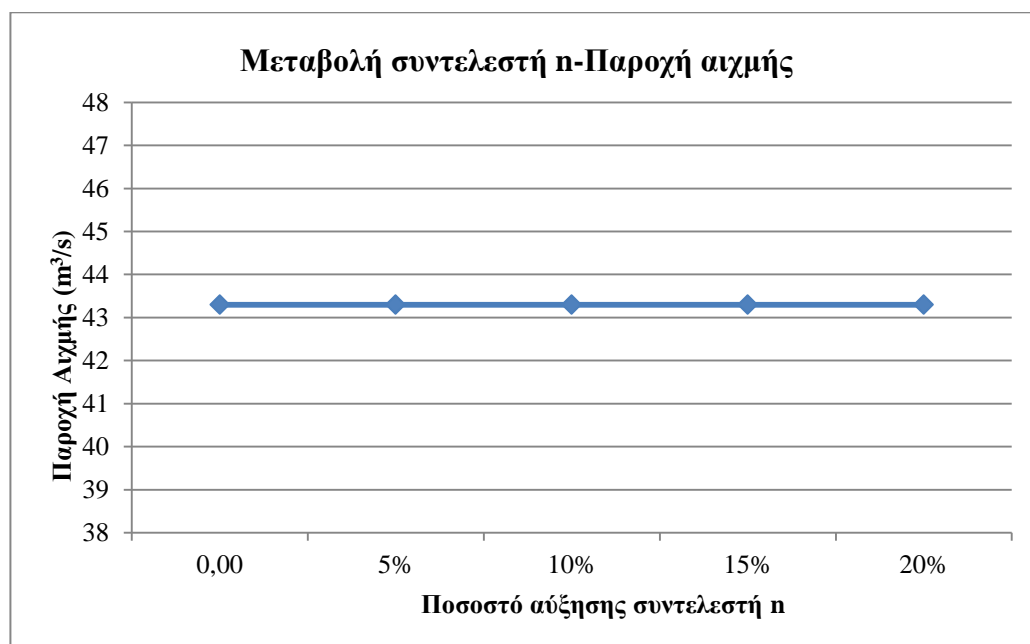
Εικόνα 4.39: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για αύξηση της παραμέτρου x Muskingum

4.4.1.5 Μεταβολή του συντελεστή n στη διόδευση του πλημμυρικού κύματος κατά Kinematic Wave

Ο συντελεστής n στη διόδευση του πλημμυρικού κύματος κατά Kinematic Wave ήταν 0,011



Εικόνα 4.40: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για μείωση του συντελεστή n στον αγωγό που βρίσκεται κάτω από την Αττική Οδό



Εικόνα 4.41: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για αύξηση του συντελεστή n στον αγωγό που βρίσκεται κάτω από την Αττική Οδό

4.4.1.6 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Πίνακας 4.6: Μεταβολή Παροχής Αιχμής και Όγκου Απορροής

Παράμετροι	Παροχή Αιχμής(m ³ /s)	Όγκος απορροής(MM)	Παροχή Αιχμής(m ³ /s)	Όγκος απορροής(MM)
Μεταβολή παραμέτρων	20%	20%	-20%	-20%
CN	77.2	39.87	55.9	26.3
T_{lag}	61.2	31.16	65.7	31.17
x	63.5	31.16	63.5	31.16
K	57.4	31.16	70.7	31.16
n	43.3	22.79	43.3	22.79

Από τον Πίνακα 4.5 συμπεραίνεται ότι ιδιαίτερα ευαίσθητες παράμετροι είναι ο αριθμός καμπύλης CN, ο χρόνος υστέρησης T_{lag} και η παράμετρος K του Muskingum, διότι εμφανίζουν μέγιστες μεταβολές στην παροχή αιχμής 22%, 3% και 11%, αντίστοιχα. Οπότε θα πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στον υπολογισμό τους.

Αντίθετα η παράμετρος x του Muskingum και ο συντελεστής n του κινηματικού κύματος, δεν είναι παράμετροι που παρουσιάζουν μεγάλη βαρύτητα στην εξαγωγή του αποτελέσματος.

4.4.2 Ανάλυσης ευαισθησίας στο HEC-RAS

Οι μεταβλητές εισόδου οι οποίες εξετάστηκαν στο HEC-HMS είναι οι συντελεστές Manning των όχθων και της κοίτης με κριτήριο το μέγιστο βάθος σε μία τυχαία διατομή του προσομοιωμένου υδατορεύματος.

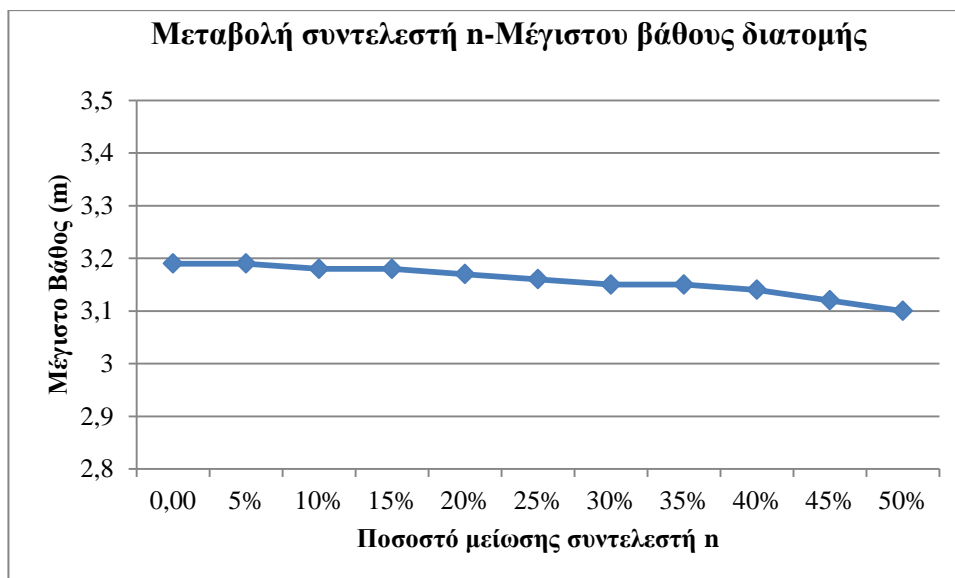
4.4.2.1 Μεταβολή του συντελεστή n

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε για επεισόδιο βροχόπτωσης 6 ωρών και περιόδου επαναφοράς 50 ετών.

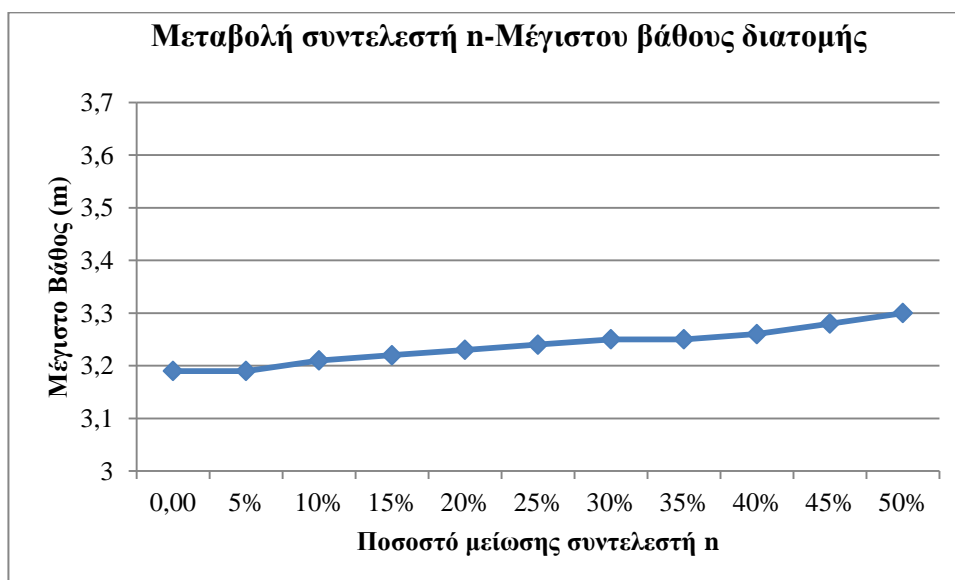
Οι αρχικές τιμές των συντελεστών n ήταν 0,2 για τις όχθες και 0,35 για την κοίτη.

Το αρχικό μέγιστο βάθος της διατομής ήταν 3.19m.

Οι μεταβολές του μέγιστου βάθους φαίνονται στις Εικόνες 4.42 και 4.43.



Εικόνα 4.42: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για μείωση του συντελεστή n



Εικόνα 4.43: Ανάλυση ευαισθησίας παροχής αιχμής για αύξηση του συντελεστή n

Παρατηρείται λοιπόν ότι:

- για μείωση του συντελεστή n του Manning κατά 50%, το μέγιστο βάθος μειώνεται κατά 9cm.
- για αύξηση του συντελεστή n του Manning κατά 50%, το μέγιστο βάθος αυξάνεται κατά 10cm.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Γενικά

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η κατάρτιση ενός τυποποιημένου μεθοδολογικού πλαισίου για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας, μέσω της αξιοποίησης υπολογιστικών λογισμικών επεξεργασίας γεωγραφικής, υδρολογικής και υδραυλικής πληροφορίας.

Ως περιοχή μελέτης, επιλέχθηκε η λεκάνη απορροής της ρεματιάς Χαλανδρίου. Η μεθοδολογία διαχωρίστηκε στην υδρολογική και στην υδραυλική προσομοίωση. Ακολούθως, αναφέρονται μερικά σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τη μεθοδολογία αλλά και τη χρήση των λογισμικών.

Η υδρολογική προσομοίωση σχεδιάστηκε και εκτελέστηκε σε περιβάλλον HEC- HMS με τη συμβολή της επέκτασης HEC-GeoHMS του συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών ArcGIS. Η προσομοίωση έγινε σε ενιαίο μοντέλο (μια ενιαία λεκάνη) για 12 υετογραφήματα σχεδιασμού, τα οποία προέκυψαν με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων τμηματικών υψών από τις όμβριες καμπύλες της περιοχής. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ήταν τα πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού της λεκάνης από τα οποία προέκυψαν οι αντίστοιχες παροχές αιχμής.

Η υδραυλική προσομοίωση 2 περίπου km του τμήματος της ρεματιάς Χαλανδρίου σχεδιάστηκε με τη συμβολή της επέκτασης HEC-GeoRAS του συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών ArcGIS. Εκεί, εισήχθησαν όλα τα γεωμετρικά στοιχεία του ποταμού (μηκοτομή κοίτης, διατομές, όχθες, χρήσεις γης κλπ) έγινε υδραυλική προσομοίωση σε συνθήκες μόνιμης ροής για σταθερή παροχή αιχμής.

Το HEC-RAS προσφέρει πλήρη ανάλυση των αποτελεσμάτων καθώς και αναφορά για τυχόν λάθη στην εισαγωγή των υδρολογικών δεδομένων. Μάλιστα, παρατίθενται και πιθανές αιτίες της πρόκλησης σφαλμάτων καθοδηγώντας το χρήστη στην επιλογή ορθολογικότερων ρυθμίσεων (πχ μεταβολή καθεστώτος ροής από «υποκρίσιμη» σε «υπερκρίσιμη») ή/και προσθήκη νέων δεδομένων (πχ νέες διατομές). Τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης είναι ο υπολογισμός των πιεζομετρικών βαθών σε κάθε διατομή και εν συνεχεία ο υπολογισμός των πολυγώνων

πλημμυρικής κατάκλυσης, όπου το πιεζομετρικό υψόμετρο υπερβαίνει το αντίστοιχο υψόμετρο εδάφους.

Έχοντας ολοκληρώσει την υδρολογική και υδραυλική προσομοίωση για τη λεκάνη και για τον ποταμό μελέτης αντίστοιχα, ο μελετητής έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει χάρτες με το εύρος των πλημμυρικών κατακλύσεων ανά περίοδο επαναφοράς. Η χαρτοσύνθεση έγινε σε περιβάλλον HEC-RAS.

Γενικά, τα μοντέλα αυτά αποτελούν ελεύθερο λογισμικό και κάθε χρήστης έχει την δυνατότητα να τα χρησιμοποιήσει χωρίς κάποιο κόστος. Από τις διαδικασίες που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, είναι πως αυτά τα μοντέλα, δίνουν αξιόλογα αποτελέσματα και αξίζει να χρησιμοποιηθούν. Επίσης, τα ειδικά εγχειρίδια χρήσης που τα συνοδεύουν είναι αρκετά καλογραμμένα. Ένα μειονέκτημα που θα πρέπει να αναφερθεί, είναι ότι δεν υπάρχουν πολλές λεπτομέρειες με αποτέλεσμα, ο χρήστης να ψάχνει τη λύση σε διάφορους διαδικτυακούς τόπους.

Τέλος, η περιοχή μελέτης δεν αντιμετωπίζει έντονες αρνητικές συνέπειες από φαινόμενα πλημμυρικής κατάκλυσης για τα υδρολογικά σενάρια που ερευνήθηκαν.

Πιθανά προβλήματα θα αντιμετωπίσουν τα αυθαίρετα κτίσματα, τα οποία βρίσκονται πάνω στις όχθες του ρέματος

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα της παρούσας εργασίας

Οι πλημμύρες αποτελούν αναμφίβολα ένα από τα σοβαρότερα και πιο επίκαιρα προβλήματα φυσικών καταστροφών. Η σημασία της εκτίμησης των πλημμυρικών κατακλύσεων μιας περιοχής είναι μεγάλη, ιδίως αν αυτή «φιλοξενεί» ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως αστική ανάπτυξη, γεωργία, κτηνοτροφία κλπ.

Συνεπώς, λογικό επόμενο βήμα μετεξέλιξης της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να είναι η σύγκριση των συνεπειών μιας πλημμυρικής κατάκλυσης, στην ίδια περιοχή μελέτης, πριν και μετά από ένα επεισόδιο φωτιάς.

Θα μπορούσαν επίσης, να πραγματοποιηθούν μετρήσεις βροχής-απορροής με στόχο τη βαθμονόμηση των μοντέλων.

Μία άλλη πρόταση για περαιτέρω μελέτη είναι η διερεύνηση και η εφαρμογή όλων των μεθόδων που περιέχει το HEC-HMS και η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Τέλος, θα είχε ενδιαφέροντα αποτελέσματα η εισαγωγή των υδρολογικών αποτελεσμάτων και των χρήσεων γης σε ψηφιακή μορφή στο HEC-RAS 2D, ώστε να υπολογιστούν με ακρίβεια οι συνέπειες της εκάστοτε πλημμυρικής κατάκλυσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

Βαφειάδης Μ., *Διοδεύσεις*, Σημειώσεις Διόδευσης, ΤΥΤΠ, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 2005

Ε.Κ., Οδηγία 2000/60 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου κι του Συμβουλίου της 23^{ης}

Οκτωβρίου 2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων, Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, L327:1-72, 2000

Ε.Κ., Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23^{ης}

Οκτωβρίου 2007 για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης της 6.11.2007: L 288: 27 – 34, 2007

Ειδική Γραμματεία Υδάτων, Εφαρμογή οδηγίας 2007/60/ΕΚ για την προκαταρκτική αξιολόγηση κινδύνων πλημμύρας, Αθήνα, 2012

Ειδική Γραμματεία Υδάτων. «Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας.» *Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας*. 2012.

- ΚΥΑ με αρ. ΗΠ 31822/1542/Ε103 (ΦΕΚ 1108 Β /21-7-2010), Καθορισμός προτύπων ποιότητας περιβάλλοντος σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της Οδηγίας 2008/105/ΕΚ, 2010
- Μιμίκου Μ. και Μπαλτάς Ε., *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 4η , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2006
- Παπανικολάου Π., *Ανοικτοί Αγωγοί*, Σημειώσεις μαθήματος Υδραυλική- Ανοικτοί Αγωγοί, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, 2008
- Ράμπιας, Ε., *Υδραυλική Προσομοίωση Αλιάκμονα με χρήση του μοντέλου HEC-RAS*, Αθήνα: ΔΠΜΣ "Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων", Μεταπτυχιακή Εργασία, 2007
- Σκοπελίτη Α., Στάμου Λ., *Υδρολογική ανάλυση ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε περιβάλλον ΓΣΠ*, Εκπαιδευτικές σημειώσεις, ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ, Αθήνα, 2013
- Τσακίρης, Γ. *Υδατικοί Πόροι 1, Τεχνική Υδρολογία & Εισαγωγή στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων*. Αθήνα: Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών Ε.Μ.Π., 1995.

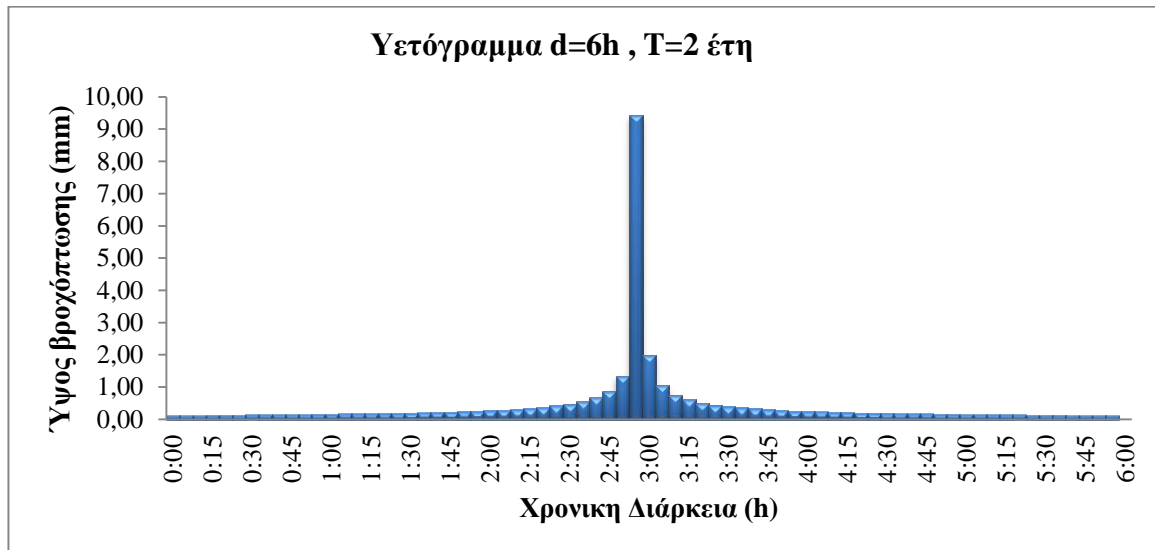
Ξένη Βιβλιογραφία

- Alonistioti D. ,Papathanasiou C., Kasella A., Makropoulos C., Mimikou, M., *Assessing the impact of forest fires on the hydrological response of urban catchments: the case of the eastern attica region*, National Technical University of Athens, 2011
- Bruner G., *HEC-RAS River Analysis System User's Manual*, Version 4.1, U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC), 2010
- Bureau of Reclamation, *Design of Small Dams*, A Water Resources Technical Publication, Third Edition, 1987
- Chow, V. T. *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, 1959.
- Feldman A., *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC, USA, 2000
- Fleming J.M., Doan H.J., *HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension*, Version 10.1, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC, USA, 2013
- Goodell C.R., *Dam Break Modeling for Tandem Reservoirs — A Case Study Using HEC-RAS and HEC-HMS*, World Water and Environmental Resources Congress, 2005
- Gül G. O., Harmancıoğlu N., Gül A., *A combined hydrologic and hydraulic modeling*

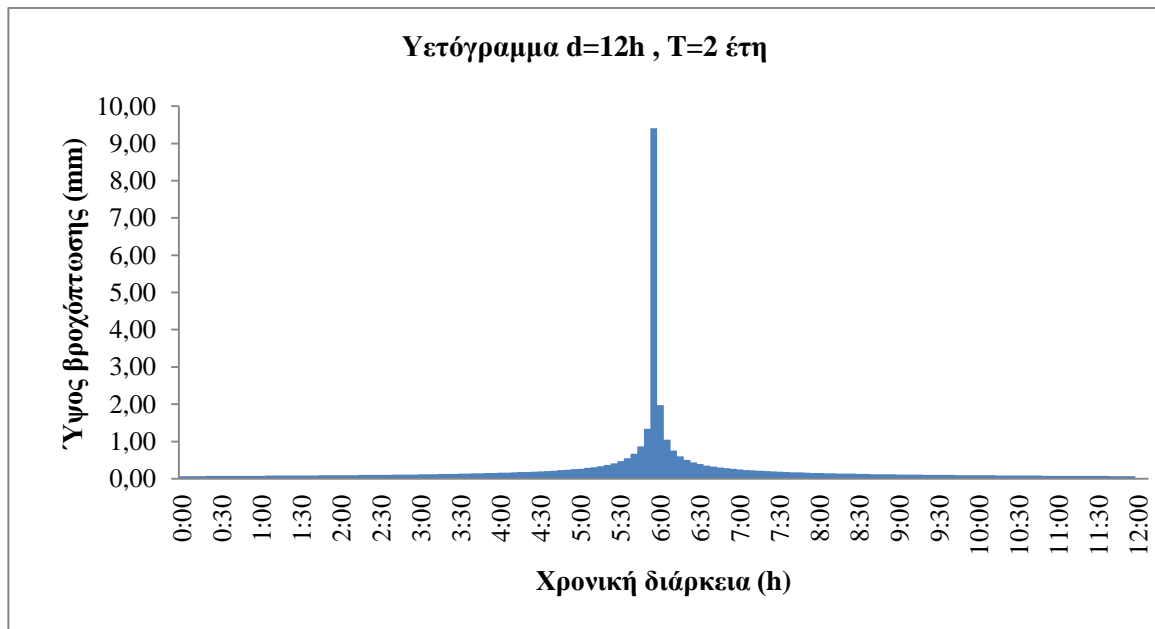
- approach for testing efficiency of structural flood control measures*, Natural Hazards, 2010
- Gumindoga W, Rwasoka D. T., Nhapi I., Dube T., *Ungauged runoff simulation in Upper Manyame Catchment, Zimbabwe: Application of the HEC-HMS model*, University of Zimbabwe, Dept of Civil Engineering, 2015
- Haghizadeh A., Shui L. T., Mirzaei M., Memarian H., *Incorporation of GIS Based Program into Hydraulic Model for Water Level Modeling on River Basin*, Journal of Water Resource and Protection, 2012
- Kirpich, L. *Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds*. 10(6): Civ.Eng., 1940.
- Knebl M. R., Yang Z. L., Hutchisonb K., Maidment D.R., *Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event*
- Linsley R. K. *Hydrology for Engineers*, 1982, Department of Geological Sciences, University of Texas at Austin, 2004
- Ponce V.M., Lohani A. K., Scheyhing C., *Analytical Verification of Muskingum-Cunge routing*, 1996
- Yan Huan, *Appropriate modeling for integrated flood risk assessment*, Dissertation, China, 2005
- Yuan Y. & Qaiser K., *Floodplain modeling in the Kansas River Basin using Hydrologic Engineering Center (HEC) Models: Impacts of Urbanization and Wetlands for Mitigation*, U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Environmental Sciences Division, Las Vegas, 2011
- Horrit M.S. & Bates P.D. *Evaluation of 1D and 2D Numerical Models for Predicting River Flood Inundation*, Journal of Hydrology, 2002

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

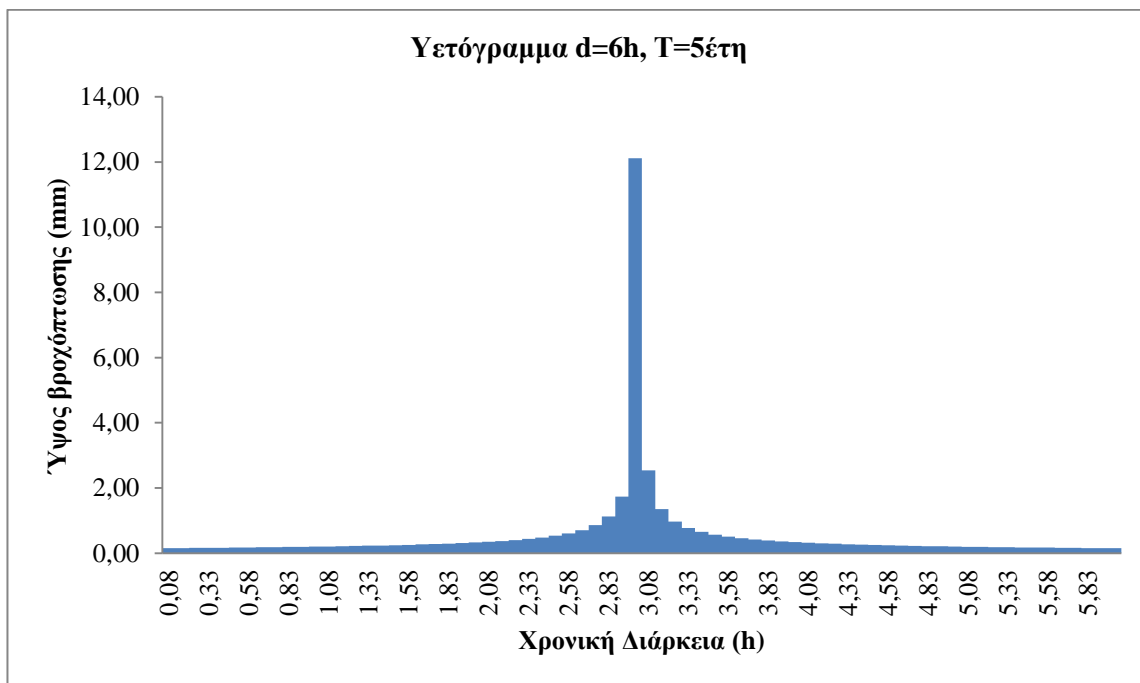
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α' – ΥΕΤΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ



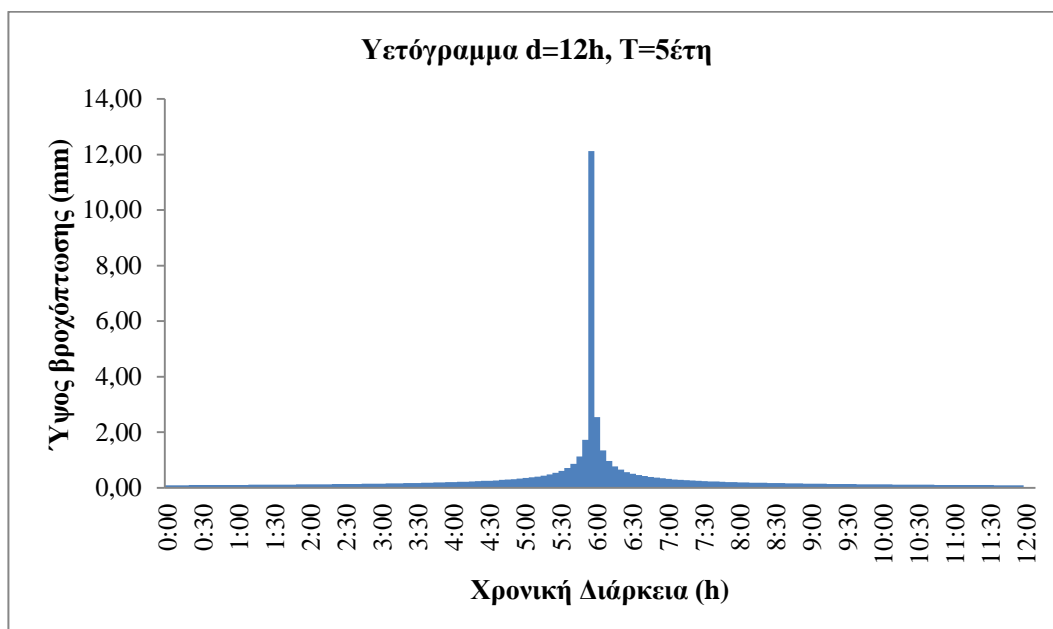
Εικόνα Α.1: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=6h$ και περιόδου επαναφοράς $T=2$ ετών



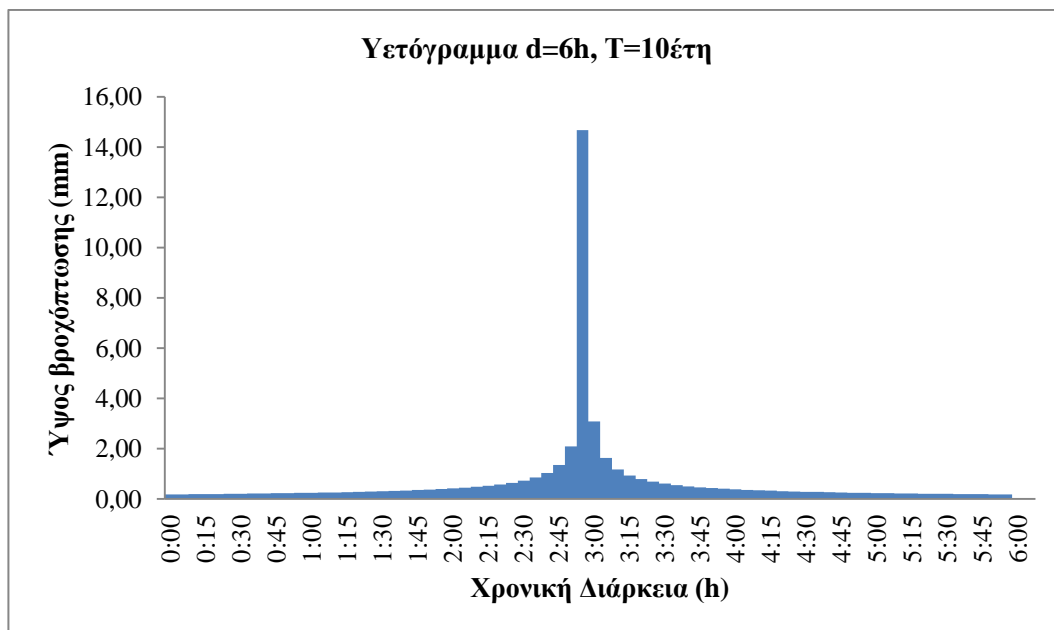
Εικόνα Α.2: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=12h$ και περιόδου επαναφοράς $T=2$ ετών



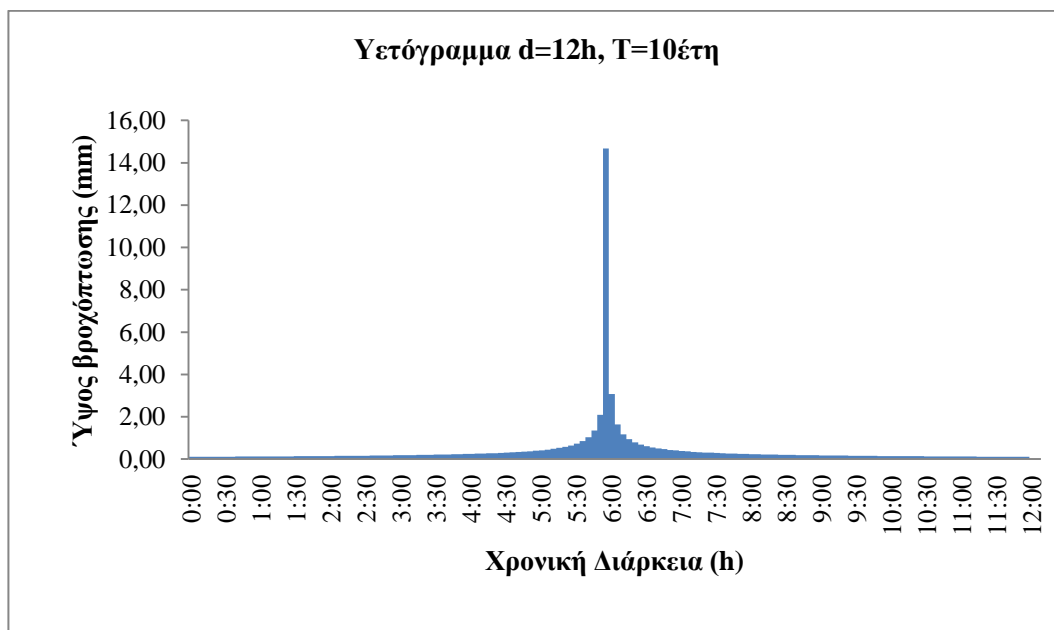
Εικόνα Α.3: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=6h$ και περιόδου επαναφοράς $T=5$ ετών



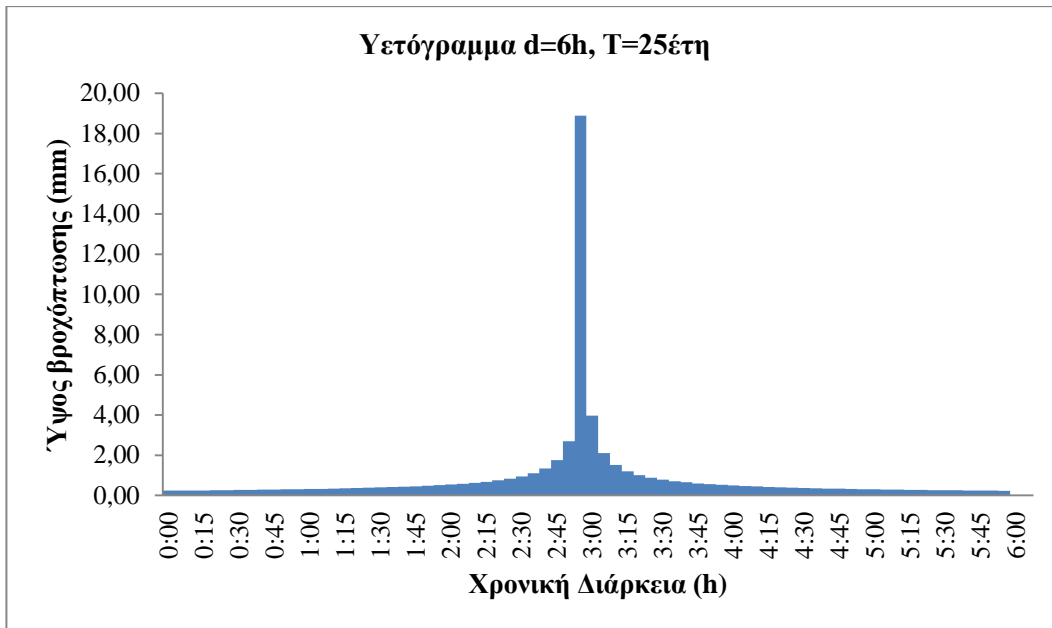
Εικόνα Α.4: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=12h$ και περιόδου επαναφοράς $T=5$ ετών



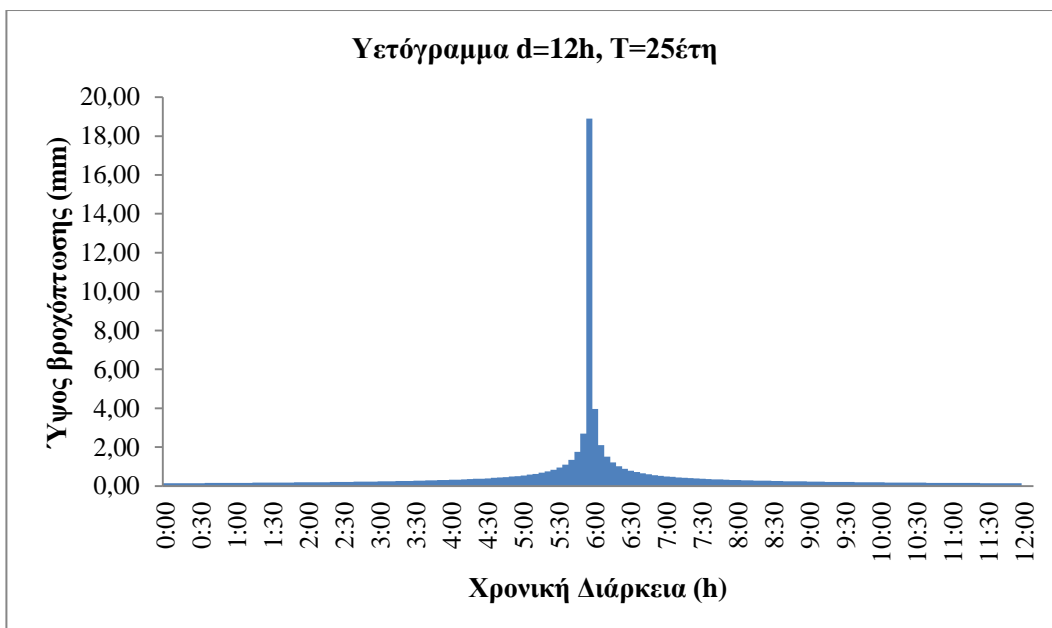
Εικόνα Α.5: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=6h$ και περιόδου επαναφοράς $T=10$ ετών



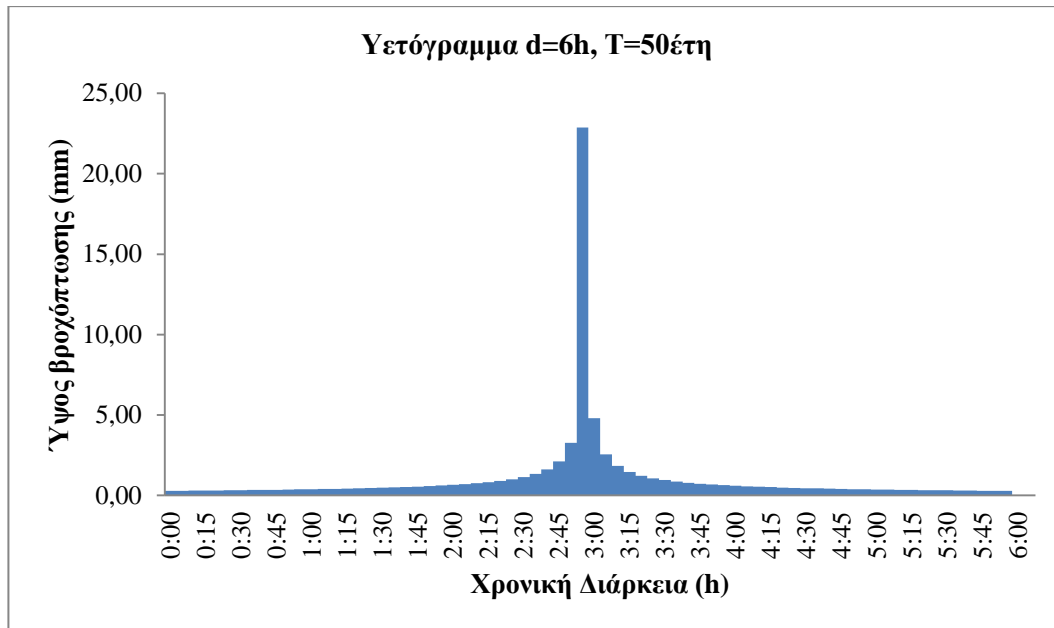
Εικόνα Α.6: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=12h$ και περιόδου επαναφοράς $T=10$ ετών



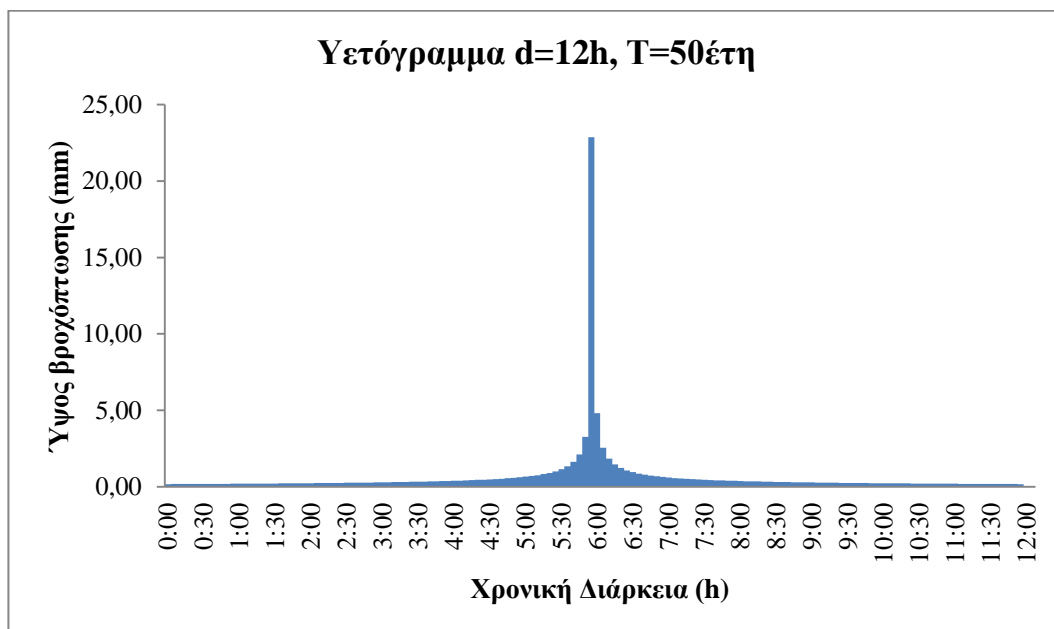
Εικόνα Α.7: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=6h$ και περιόδου επαναφοράς $T=25$ ετών



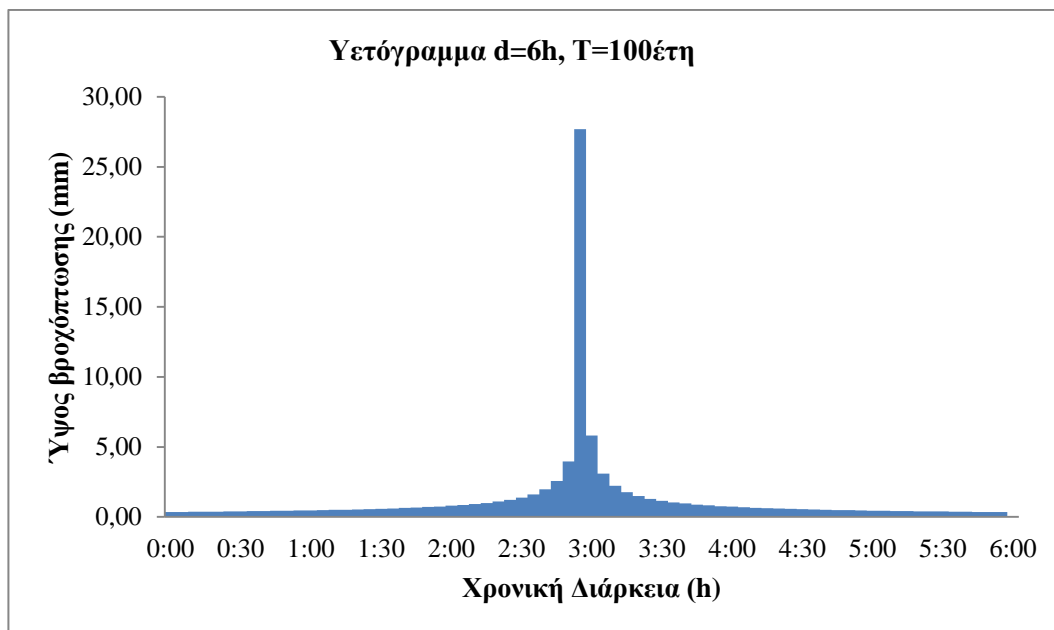
Εικόνα Α.8: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=12h$ και περιόδου επαναφοράς $T=25$ ετών



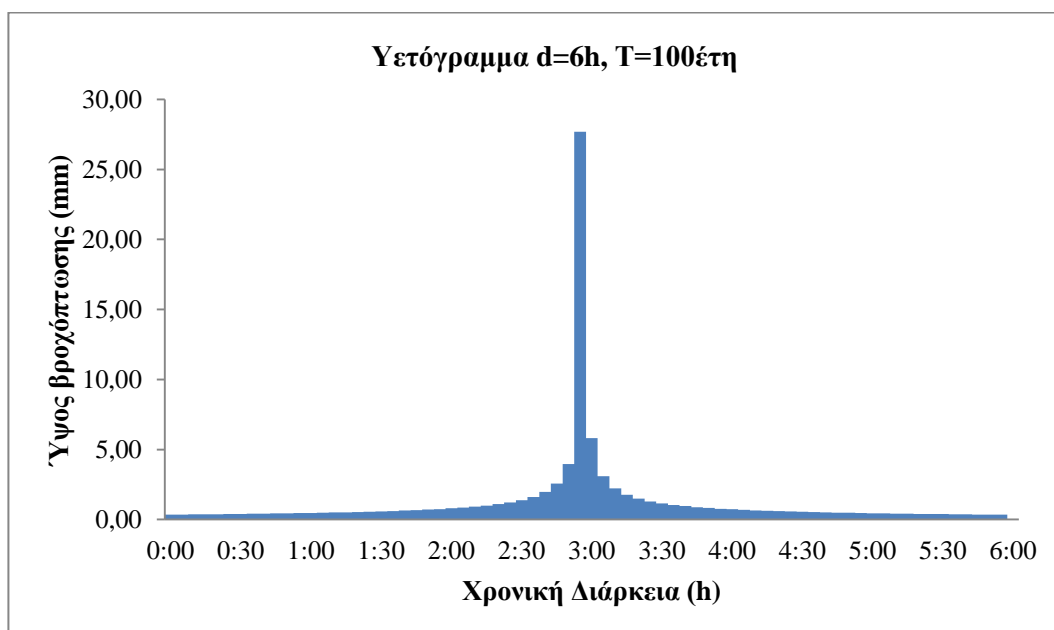
Εικόνα Α.9: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=6h$ και περιόδου επαναφοράς $T=50$ ετών



Εικόνα Α.10: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=12h$ και περιόδου επαναφοράς $T=50$ ετών

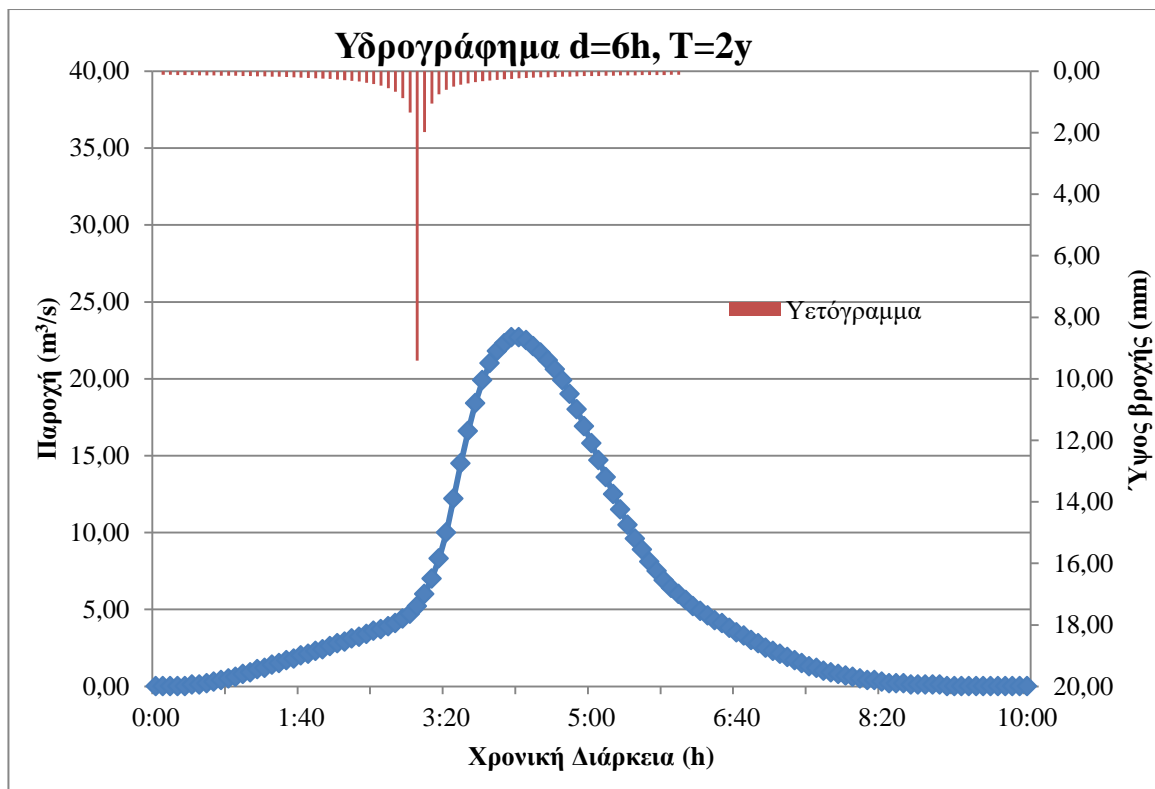


Εικόνα Α.11: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=6h$ και περιόδου επαναφοράς $T=100$ ετών



Εικόνα Α.12: Υετόγραμμα χρονικής διάρκειας $d=12h$ και περιόδου επαναφοράς $T=100$ ετών

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β' - ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ



Εικόνα Β.1: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 2 ετών

Global Summary Results for Run "2y-6h"

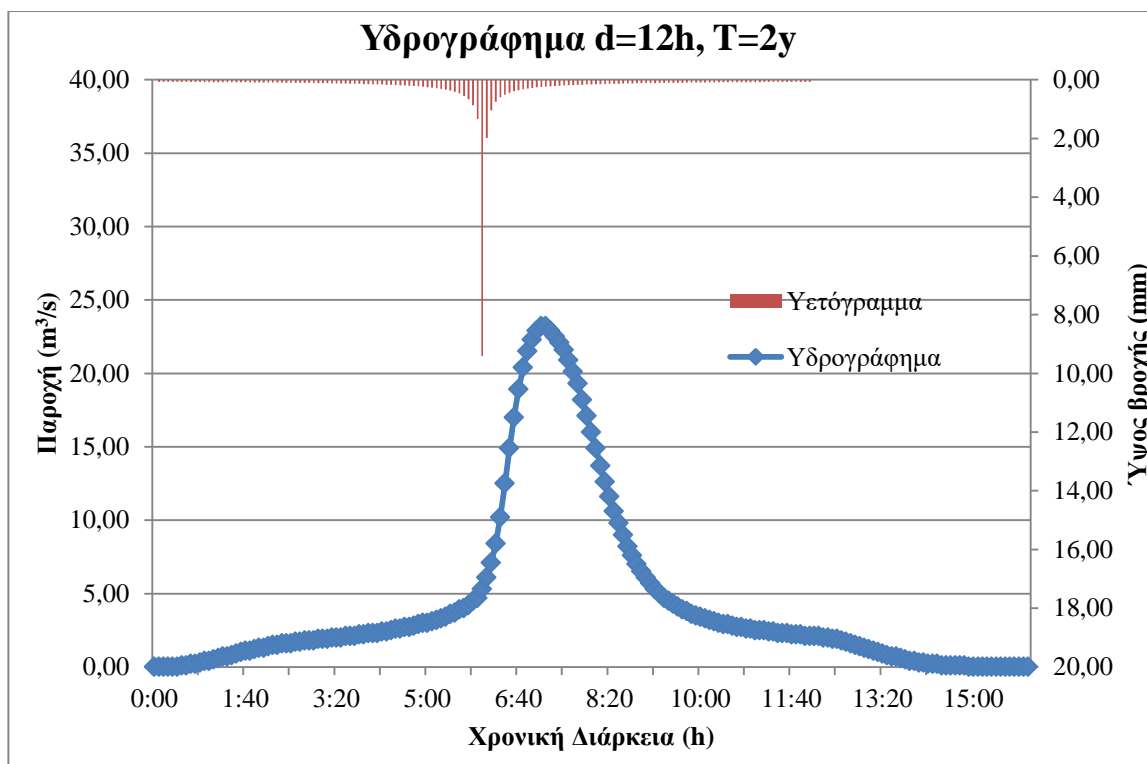
Project: Project 1 Simulation Run: 2y-6h

Start of Run: 01Jan2000, 00:00 Basin Model: Basin 1
 End of Run: 01Jan2000, 12:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 31Jan2017, 07:06:22 Control Specifications: 6h

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
W1270	2,13320	9,1	01Jan2000, 03:30	20,60
W1260	0,66920	6,8	01Jan2000, 03:05	19,63
W1240	3,69200	11,6	01Jan2000, 03:50	21,45
W1190	8,45275	8,1	01Jan2000, 03:35	5,26
W1180	3,94030	4,5	01Jan2000, 03:30	5,38
Outlet1	18,88745	22,7	01Jan2000, 04:10	10,69
J146	14,52625	15,6	01Jan2000, 03:45	7,55
R1250	14,52625	15,6	01Jan2000, 03:45	7,55
J149	15,19545	16,2	01Jan2000, 03:45	8,08
R1220	12,39305	10,9	01Jan2000, 04:00	5,30
J154	12,39305	12,4	01Jan2000, 03:30	5,30
R1170	15,19545	14,9	01Jan2000, 04:30	8,08

Εικόνα Β.2: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 2 ετών



Εικόνα Β.3: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 2 ετών

Global Summary Results for Run "2y-12h"

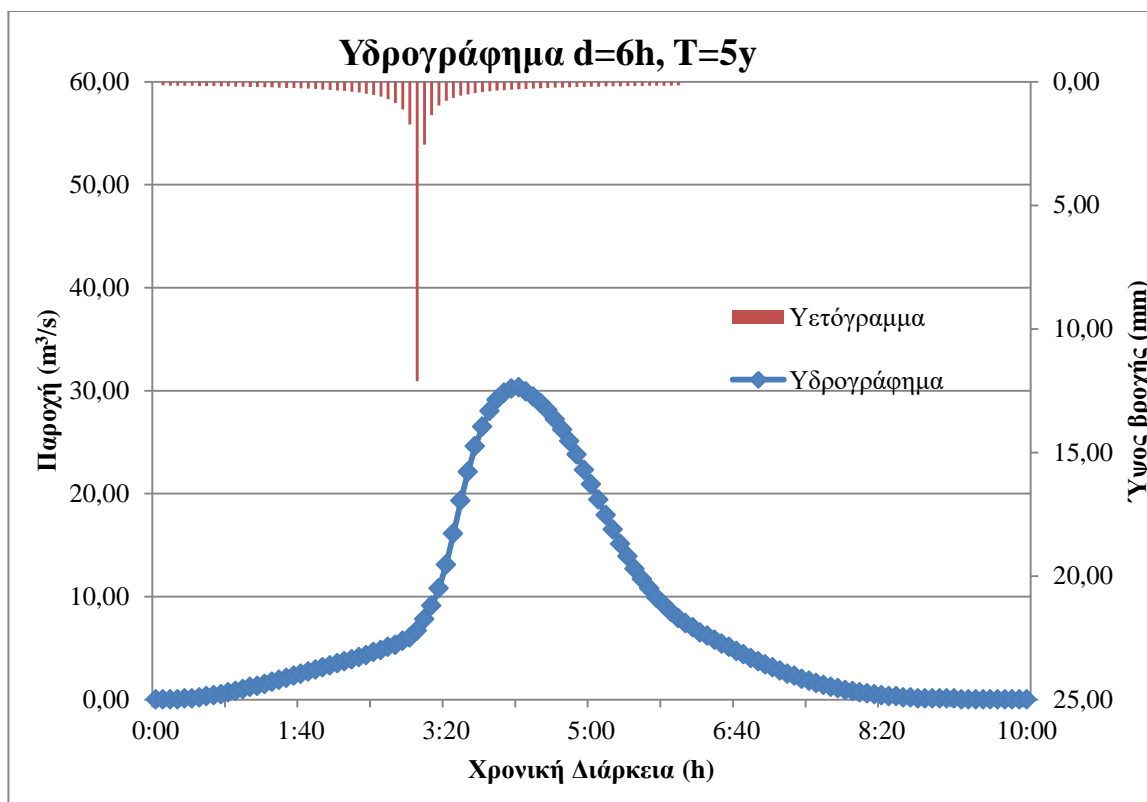
Project: Project 1 Simulation Run: 2y-12h

Start of Run: 01Jan2000, 00:00 Basin Model: Basin 1
 End of Run: 02Jan2000, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 31Jan2017, 07:03:50 Control Specifications: 12h

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
W1270	2,13320	9,2	01Jan2000, 06:30	25,46
W1260	0,66920	7,1	01Jan2000, 06:05	24,57
W1240	3,69200	11,9	01Jan2000, 06:50	26,65
W1190	8,45275	8,1	01Jan2000, 06:35	6,36
W1180	3,94030	4,5	01Jan2000, 06:30	6,51
Outlet1	18,88745	23,2	01Jan2000, 07:10	13,16
J146	14,52625	15,8	01Jan2000, 06:45	9,21
R1250	14,52625	15,8	01Jan2000, 06:45	9,21
J149	15,19545	16,4	01Jan2000, 06:45	9,88
R1220	12,39305	10,9	01Jan2000, 07:00	6,41
J154	12,39305	12,4	01Jan2000, 06:30	6,41
R1170	15,19545	15,1	01Jan2000, 07:30	9,88

Εικόνα Β.4: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 2 ετών



Εικόνα Β.5: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 5 ετών

Global Summary Results for Run "5y-6h"

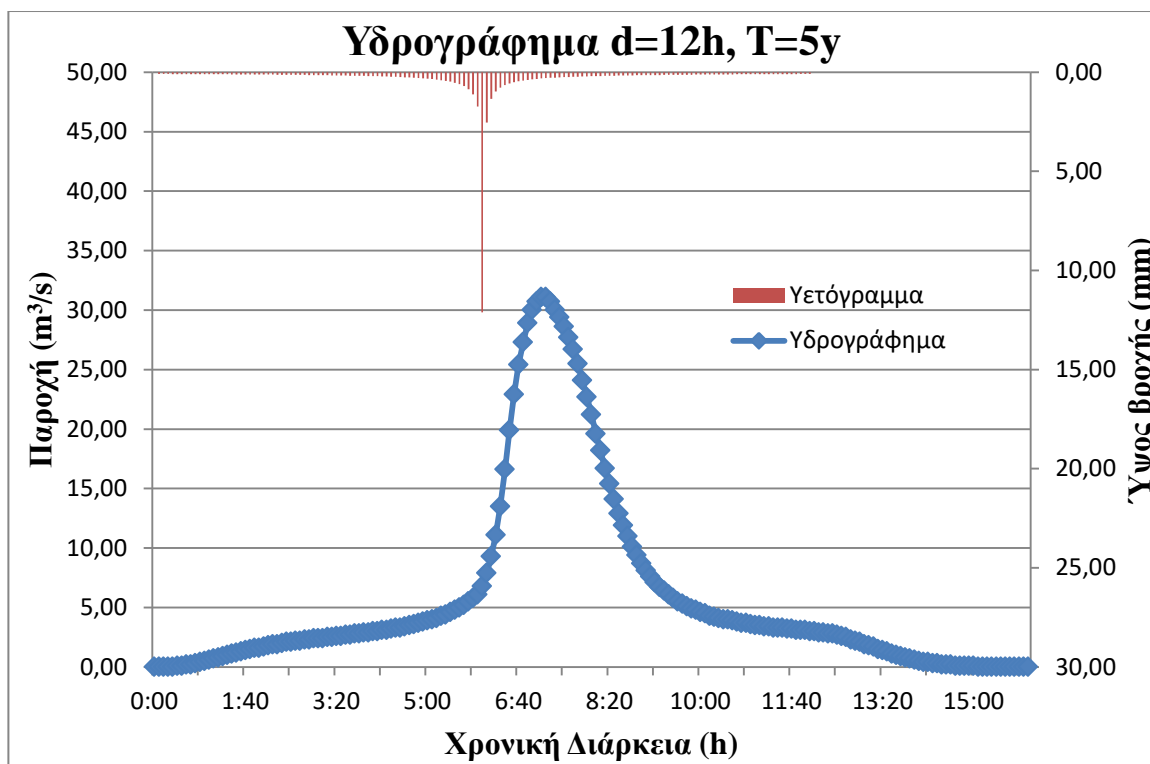
Project: Project 1 Simulation Run: 5y-6h

Start of Run: 01Jan2000, 00:00 Basin Model: Basin 1
 End of Run: 01Jan2000, 12:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 31Jan2017, 07:01:30 Control Specifications: 6h

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
W1270	2,13320	12,0	01Jan2000, 03:30	27,37
W1260	0,66920	9,3	01Jan2000, 03:05	26,52
W1240	3,69200	15,6	01Jan2000, 03:50	28,69
W1190	8,45275	10,5	01Jan2000, 03:35	6,78
W1180	3,94030	5,7	01Jan2000, 03:30	6,98
Outlet1	18,88745	30,3	01Jan2000, 04:10	14,13
J146	14,52625	20,5	01Jan2000, 03:45	9,86
R1250	14,52625	20,4	01Jan2000, 03:45	9,86
J149	15,19545	21,3	01Jan2000, 03:45	10,59
R1220	12,39305	14,0	01Jan2000, 04:00	6,85
J154	12,39305	16,0	01Jan2000, 03:30	6,85
R1170	15,19545	19,5	01Jan2000, 04:30	10,59

Εικόνα Β.6: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 5 ετών



Εικόνα Β.7: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 5 ετών

Global Summary Results for Run "5y-12h"

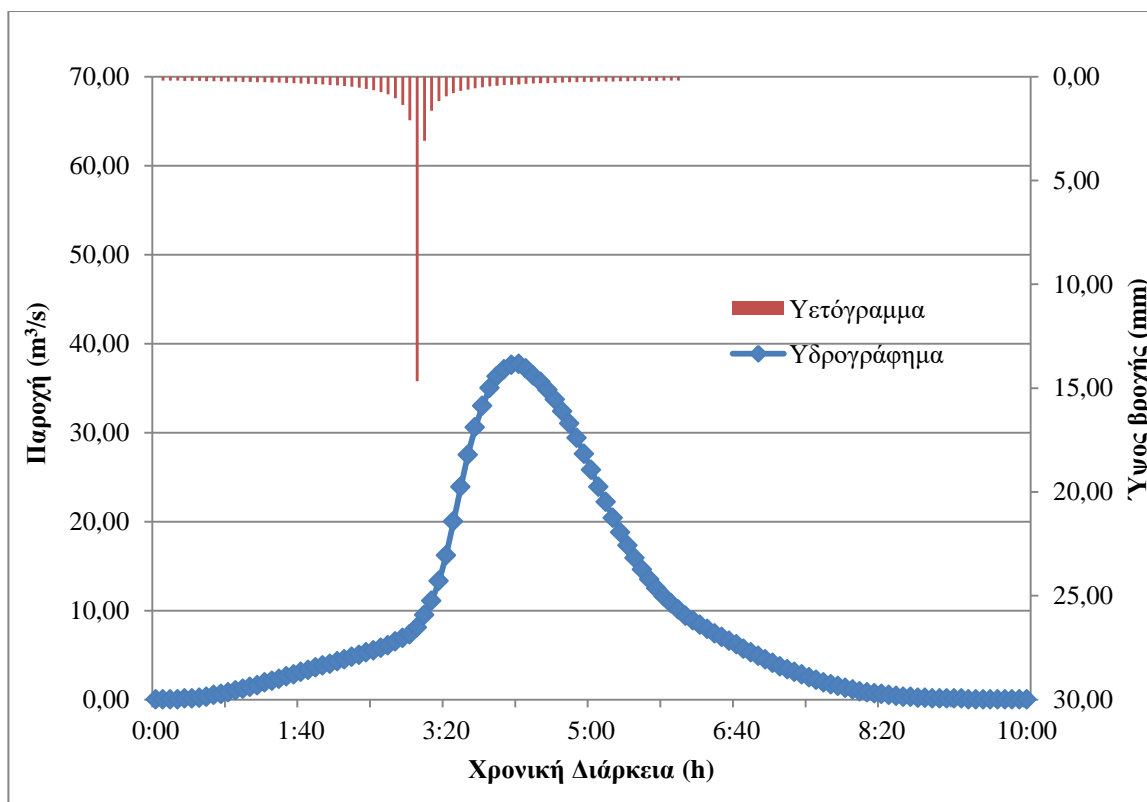
Project: Project 1 Simulation Run: 5y-12h

Start of Run: 01Jan2000, 00:00 Basin Model: Basin 1
 End of Run: 02Jan2000, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 31Jan2017, 06:59:29 Control Specifications: 12h

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
W1270	2,13320	12,4	01Jan2000, 06:30	33,98
W1260	0,66920	9,8	01Jan2000, 06:05	33,28
W1240	3,69200	16,2	01Jan2000, 06:50	35,71
W1190	8,45275	10,5	01Jan2000, 06:35	8,31
W1180	3,94030	5,7	01Jan2000, 06:30	8,95
Outlet1	18,88745	31,1	01Jan2000, 07:10	17,58
J146	14,52625	20,7	01Jan2000, 06:45	12,25
R1250	14,52625	20,7	01Jan2000, 06:45	12,25
J149	15,19545	21,6	01Jan2000, 06:45	13,18
R1220	12,39305	14,0	01Jan2000, 07:00	8,51
J154	12,39305	16,0	01Jan2000, 06:30	8,51
R1170	15,19545	19,8	01Jan2000, 07:30	13,18

Εικόνα Β.8: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 5 ετών



Εικόνα Β.9: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 10 ετών

Global Summary Results for Run "10y-6h"

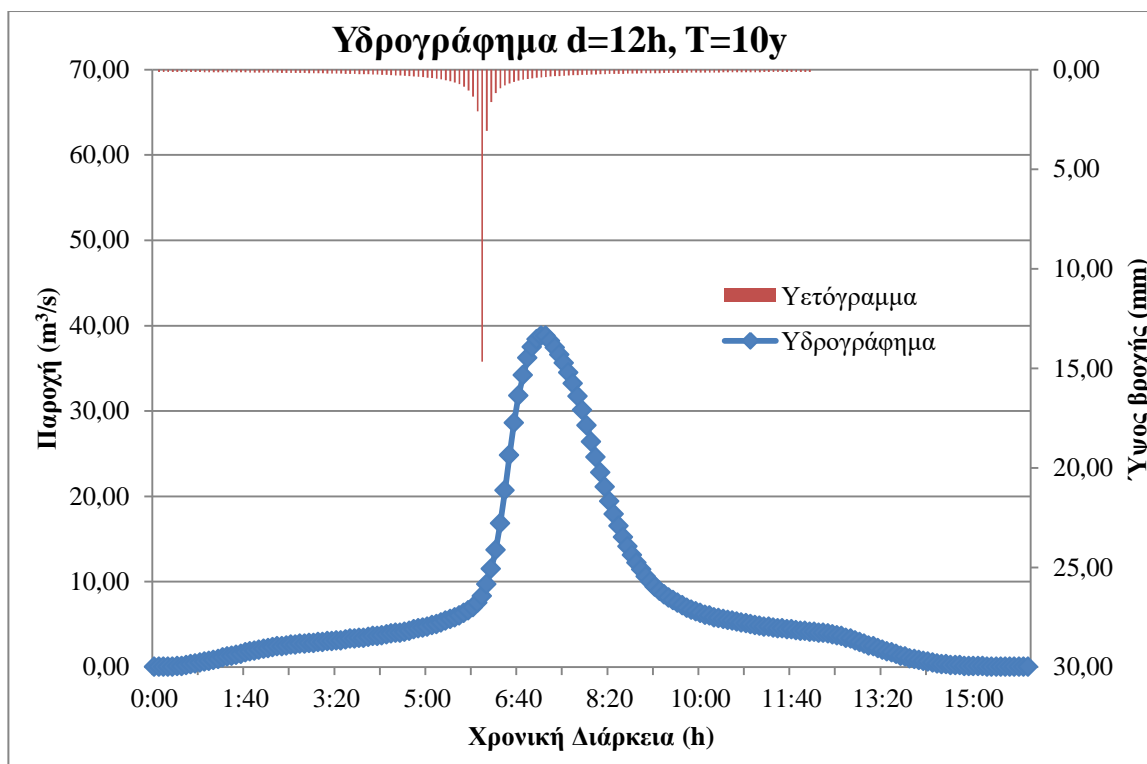
Project: Project 1 Simulation Run: 10y-6h

Start of Run: 01Jan2000, 00:00 Basin Model: Basin 1
 End of Run: 01Jan2000, 12:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 31Jan2017, 06:57:02 Control Specifications: 6h

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
W1270	2,13320	15,0	01Jan2000, 03:30	34,01
W1260	0,66920	11,8	01Jan2000, 03:05	33,32
W1240	3,69200	19,5	01Jan2000, 03:50	35,75
W1190	8,45275	12,7	01Jan2000, 03:35	8,32
W1180	3,94030	7,0	01Jan2000, 03:30	8,96
Outlet1	18,88745	37,7	01Jan2000, 04:10	17,60
J146	14,52625	25,1	01Jan2000, 03:45	12,26
R1250	14,52625	25,1	01Jan2000, 03:45	12,27
J149	15,19545	26,1	01Jan2000, 03:45	13,19
R1220	12,39305	17,0	01Jan2000, 04:00	8,52
J154	12,39305	19,4	01Jan2000, 03:30	8,52
R1170	15,19545	24,0	01Jan2000, 04:30	13,19

Εικόνα Β.10: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 10 ετών



Εικόνα Β.11: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 10 ετών

Global Summary Results for Run "10y-12h"

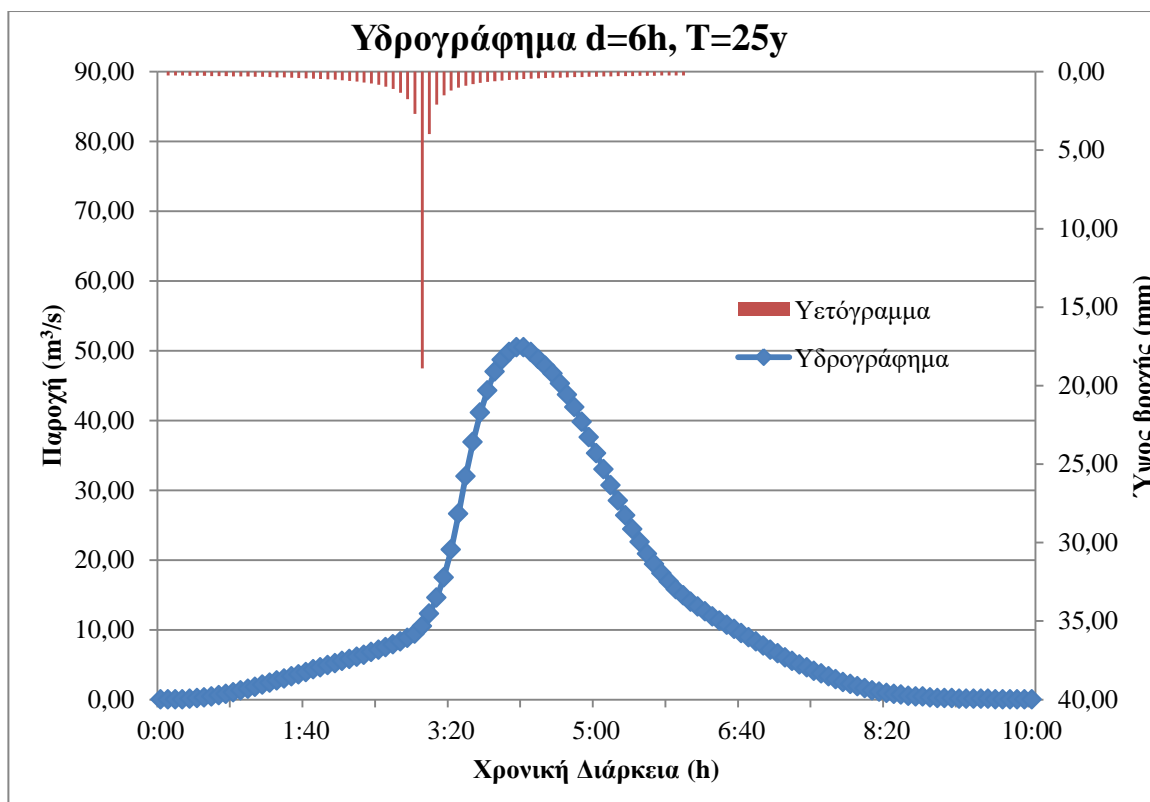
Project: Project 1 Simulation Run: 10y-12h

Start of Run: 01Jan2000, 00:00 Basin Model: Basin 1
 End of Run: 02Jan2000, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 31Jan2017, 06:55:13 Control Specifications: 12h

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
W1270	2,13320	15,6	01Jan2000, 06:30	42,31
W1260	0,66920	12,5	01Jan2000, 06:05	41,82
W1240	3,69200	20,3	01Jan2000, 06:50	44,51
W1190	8,45275	12,7	01Jan2000, 06:35	10,78
W1180	3,94030	7,1	01Jan2000, 06:30	12,02
Outlet1	18,88745	38,8	01Jan2000, 07:05	22,30
J146	14,52625	25,6	01Jan2000, 06:45	15,75
R1250	14,52625	25,6	01Jan2000, 06:45	15,75
J149	15,19545	26,6	01Jan2000, 06:45	16,90
R1220	12,39305	17,2	01Jan2000, 07:00	11,18
J154	12,39305	19,6	01Jan2000, 06:30	11,18
R1170	15,19545	24,5	01Jan2000, 07:30	16,90

Εικόνα Β.12: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 100 ετών



Εικόνα Β.13: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 25 ετών

Global Summary Results for Run "25y-6h"

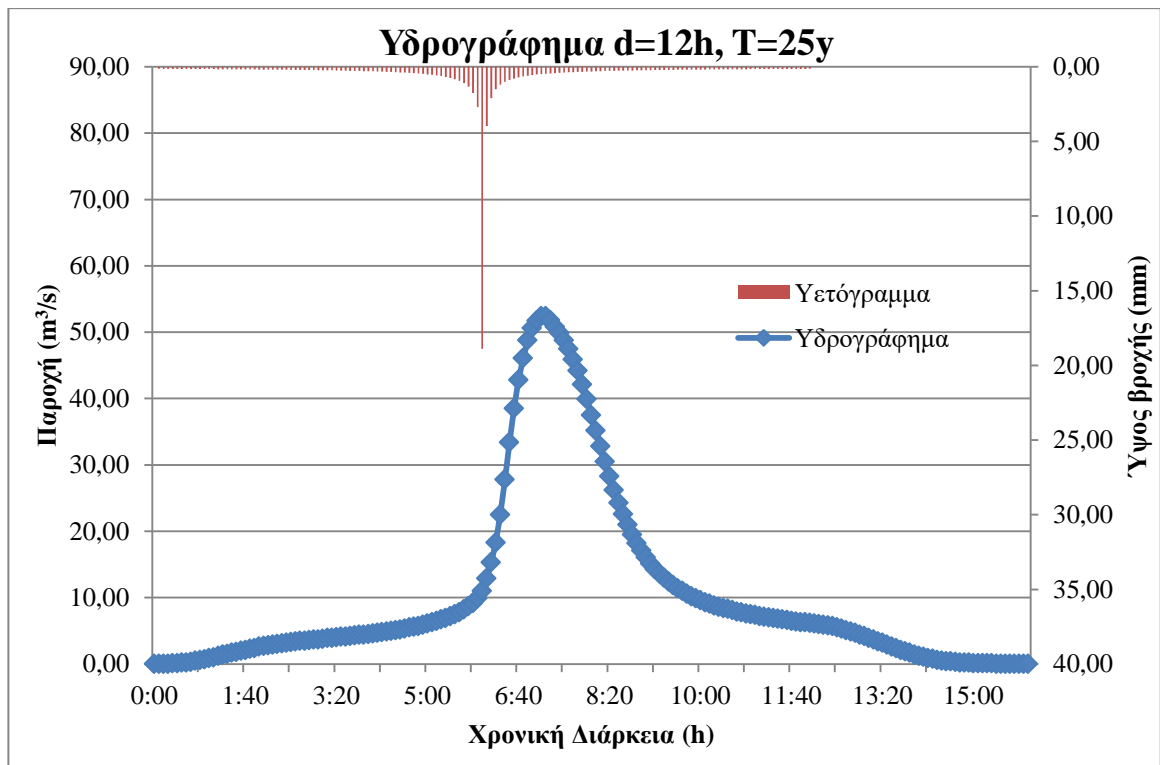
Project: Project 1 Simulation Run: 25y-6h

Start of Run: 01Jan2000, 00:00 Basin Model: Basin 1
 End of Run: 01Jan2000, 12:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 31Jan2017, 06:53:01 Control Specifications: 6h

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
W1270	2,13320	20,3	01Jan2000, 03:30	45,48
W1260	0,66920	16,2	01Jan2000, 03:05	45,07
W1240	3,69200	26,3	01Jan2000, 03:50	47,85
W1190	8,45275	16,6	01Jan2000, 03:35	11,87
W1180	3,94030	9,7	01Jan2000, 03:30	13,34
Outlet1	18,88745	50,5	01Jan2000, 04:10	24,18
J146	14,52625	33,5	01Jan2000, 03:45	17,21
R1250	14,52625	33,5	01Jan2000, 03:45	17,21
J149	15,19545	34,9	01Jan2000, 03:45	18,44
R1220	12,39305	22,9	01Jan2000, 04:00	12,34
J154	12,39305	25,9	01Jan2000, 03:35	12,34
R1170	15,19545	32,2	01Jan2000, 04:30	18,44

Εικόνα Β.14: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 25 ετών



Εικόνα Β.15: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 25 ετών

Global Summary Results for Run "25y-12h"

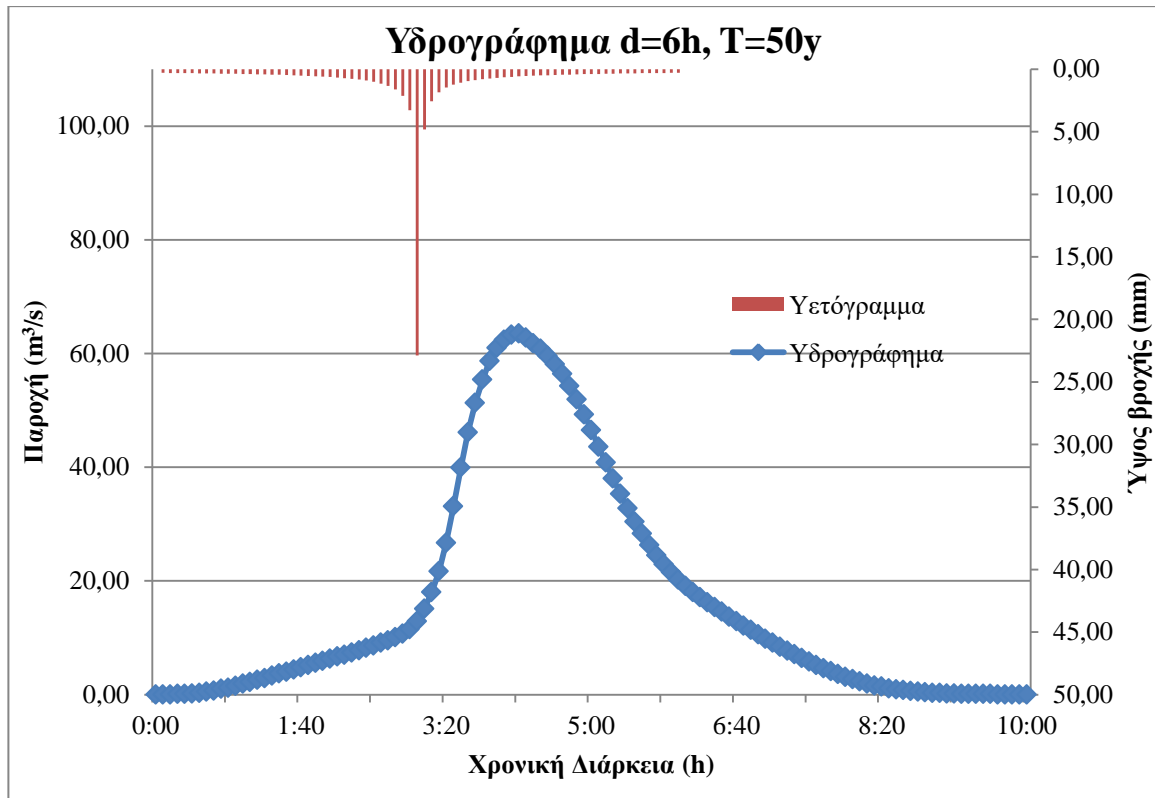
Project: Project 1 Simulation Run: 25y-12h

Start of Run: 01Jan2000, 00:00 Basin Model: Basin 1
 End of Run: 02Jan2000, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 31Jan2017, 06:51:01 Control Specifications: 12h

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
W1270	2,13320	21,1	01Jan2000, 06:30	56,63
W1260	0,66920	17,1	01Jan2000, 06:05	56,49
W1240	3,69200	27,4	01Jan2000, 06:50	59,53
W1190	8,45275	17,6	01Jan2000, 06:35	16,25
W1180	3,94030	10,8	01Jan2000, 06:30	18,52
Outlet1	18,88745	52,4	01Jan2000, 07:10	31,17
J146	14,52625	35,2	01Jan2000, 06:50	22,80
R1250	14,52625	35,2	01Jan2000, 06:50	22,80
J149	15,19545	36,6	01Jan2000, 06:45	24,28
R1220	12,39305	24,8	01Jan2000, 07:00	16,97
J154	12,39305	28,1	01Jan2000, 06:35	16,97
R1170	15,19545	33,9	01Jan2000, 07:35	24,28

Εικόνα Β.16: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 25 ετών



Εικόνα Β.17: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 50 ετών

Global Summary Results for Run "50y-6h"

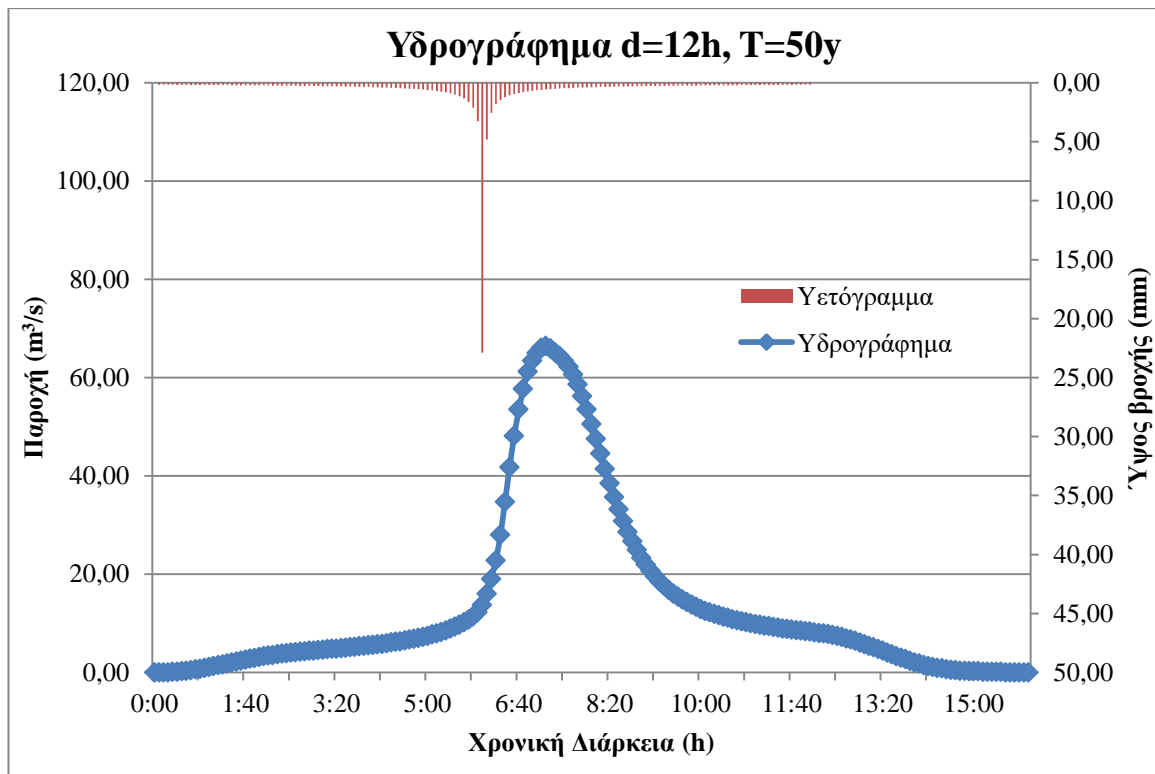
Project: Project 1 Simulation Run: 50y-6h

Start of Run: 01Jan2000, 00:00 Basin Model: Basin 1
 End of Run: 01Jan2000, 12:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 31Jan2017, 06:48:23 Control Specifications: 6h

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
W1270	2,13320	25,5	01Jan2000, 03:30	56,62
W1260	0,66920	20,6	01Jan2000, 03:05	56,48
W1240	3,69200	33,0	01Jan2000, 03:50	59,52
W1190	8,45275	21,9	01Jan2000, 03:35	16,25
W1180	3,94030	13,5	01Jan2000, 03:30	18,51
Outlet1	18,88745	63,5	01Jan2000, 04:10	31,16
J146	14,52625	43,3	01Jan2000, 03:50	22,79
R1250	14,52625	43,3	01Jan2000, 03:50	22,79
J149	15,19545	44,9	01Jan2000, 03:50	24,28
R1220	12,39305	30,9	01Jan2000, 04:00	16,97
J154	12,39305	35,0	01Jan2000, 03:35	16,97
R1170	15,19545	41,7	01Jan2000, 04:35	24,28

Εικόνα Β.18: Συνολικά αποτελέσματα του επεισοδίου βροχής 6h και περιόδου επαναφοράς 50 ετών



Εικόνα Β.19: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 50 ετών

Global Summary Results for Run "50y-12h"

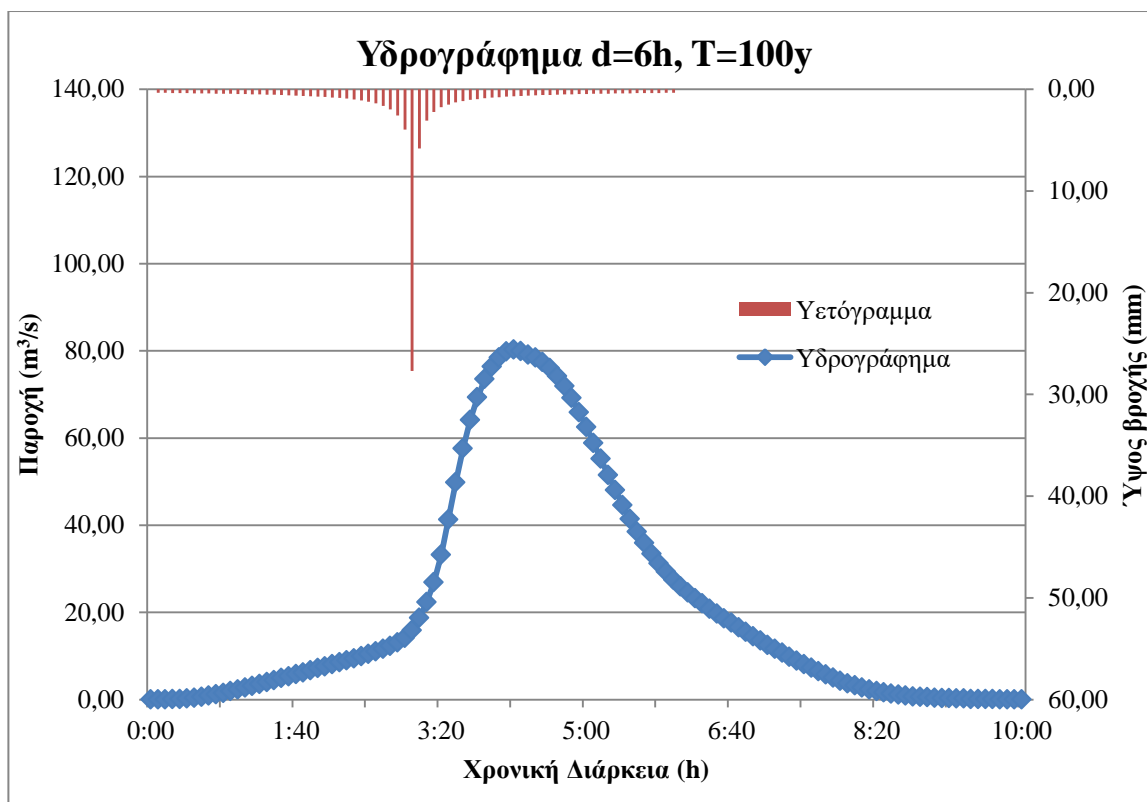
Project: Project 1 Simulation Run: 50y-12h

Start of Run: 01Jan2000, 00:00 Basin Model: Basin 1
 End of Run: 02Jan2000, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 31Jan2017, 06:46:04 Control Specifications: 12h

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
W1270	2,13320	26,5	01Jan2000, 06:30	70,49
W1260	0,66920	21,5	01Jan2000, 06:05	70,65
W1240	3,69200	34,3	01Jan2000, 06:50	73,95
W1190	8,45275	24,7	01Jan2000, 06:40	22,67
W1180	3,94030	15,7	01Jan2000, 06:30	25,90
Outlet1	18,88745	66,4	01Jan2000, 07:10	40,47
J146	14,52625	47,5	01Jan2000, 06:55	30,57
R1250	14,52625	47,5	01Jan2000, 06:55	30,57
J149	15,19545	49,0	01Jan2000, 06:55	32,34
R1220	12,39305	35,1	01Jan2000, 07:05	23,70
J154	12,39305	39,9	01Jan2000, 06:35	23,70
R1170	15,19545	45,3	01Jan2000, 07:35	32,34

Εικόνα Β.20: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 50 ετών



Εικόνα Β.21: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 100 ετών

Global Summary Results for Run "100y-6h"

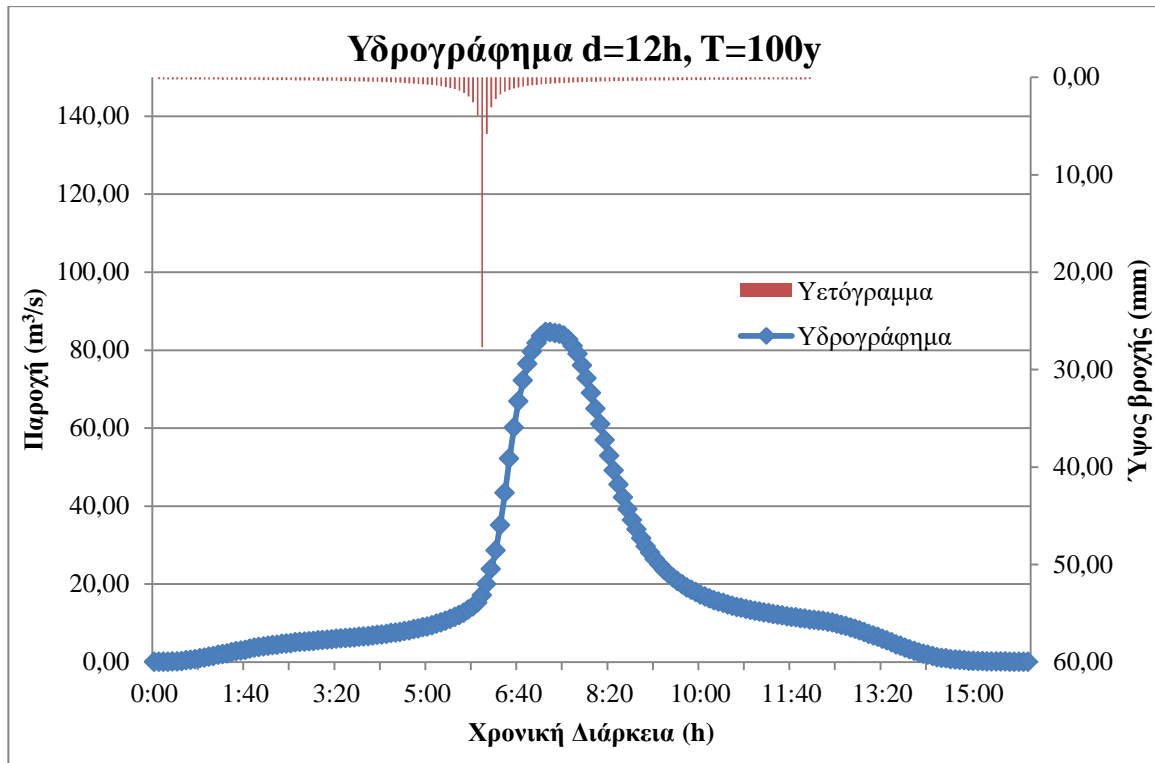
Project: Project 1 Simulation Run: 100y-6h

Start of Run: 01Jan2000, 00:00 Basin Model: Basin 1
 End of Run: 01Jan2000, 12:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 31Jan2017, 06:43:00 Control Specifications: 6h

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
W1270	2,13320	32,0	01Jan2000, 03:30	70,56
W1260	0,66920	26,0	01Jan2000, 03:05	70,72
W1240	3,69200	41,3	01Jan2000, 03:50	74,01
W1190	8,45275	30,8	01Jan2000, 03:40	22,70
W1180	3,94030	19,4	01Jan2000, 03:30	25,93
Outlet1	18,88745	80,3	01Jan2000, 04:10	40,51
J146	14,52625	58,6	01Jan2000, 03:55	30,61
R1250	14,52625	58,5	01Jan2000, 03:55	30,61
J149	15,19545	60,4	01Jan2000, 03:55	32,37
R1220	12,39305	43,8	01Jan2000, 04:05	23,73
J154	12,39305	49,6	01Jan2000, 03:35	23,73
R1170	15,19545	55,6	01Jan2000, 04:35	32,37

Εικόνα Β.22: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 6 h και περιόδου επαναφοράς 100 ετών



Εικόνα Β.23: Υδρογράφημα λεκάνης για επεισόδιο βροχής 12 h και περιόδου επαναφοράς 100 ετών

Global Summary Results for Run "100y-12h"

Project: Project 1 Simulation Run: 100y-12h

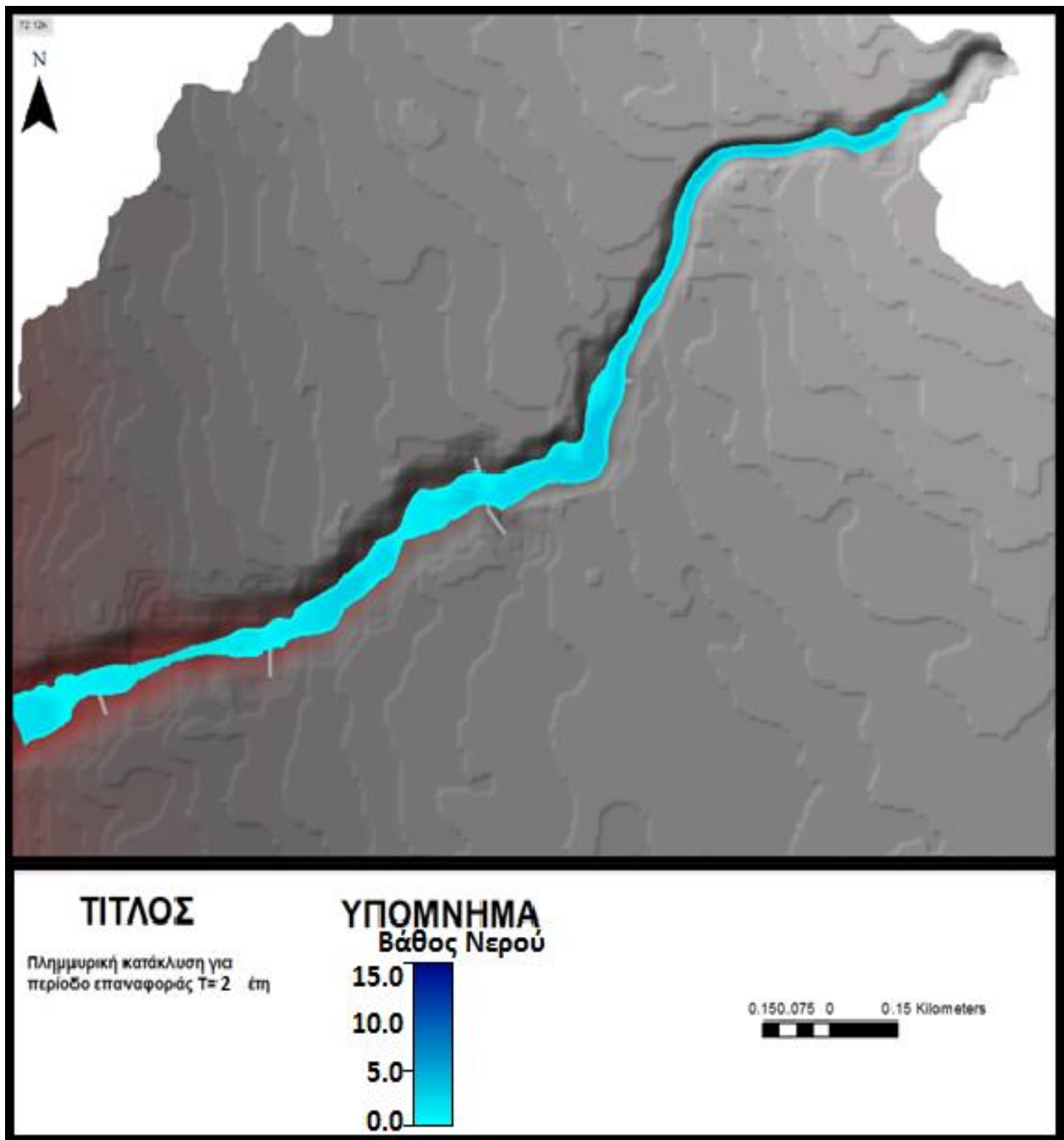
Start of Run: 01Jan2000, 00:00 Basin Model: Basin 1
 End of Run: 02Jan2000, 00:00 Meteorologic Model: Met 1
 Compute Time: 31Jan2017, 06:35:21 Control Specifications: 12h

Show Elements: All Elements Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Hydrologic

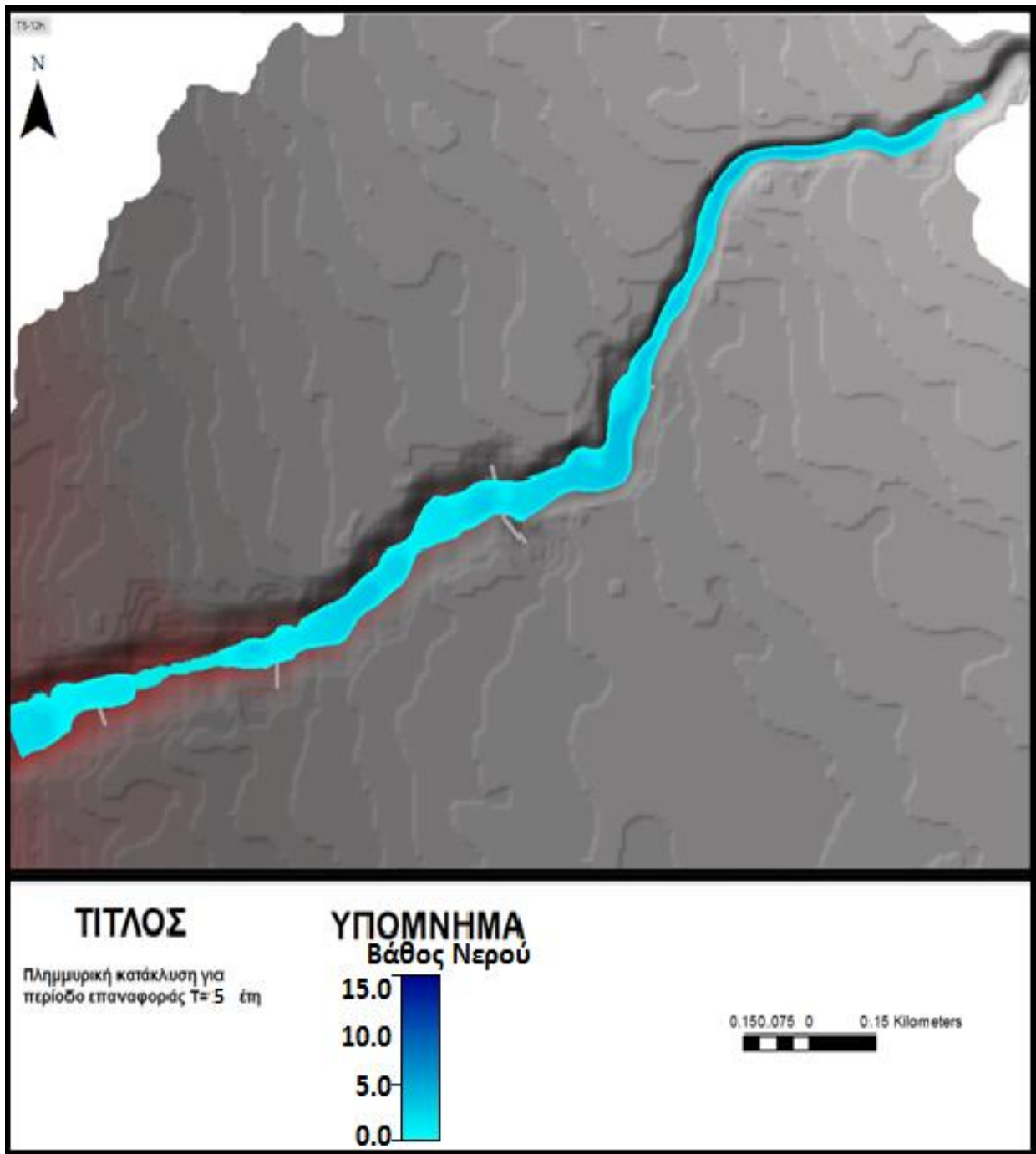
Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
W1270	2,13320	33,3	01Jan2000, 06:30	87,77
W1260	0,66920	27,1	01Jan2000, 06:05	88,27
W1240	3,69200	42,8	01Jan2000, 06:50	91,80
W1190	8,45275	36,1	01Jan2000, 06:40	31,86
W1180	3,94030	23,1	01Jan2000, 06:30	36,24
Outlet1	18,88745	84,6	01Jan2000, 07:15	52,81
J146	14,52625	66,2	01Jan2000, 06:55	41,26
R1250	14,52625	66,1	01Jan2000, 06:55	41,26
J149	15,19545	68,0	01Jan2000, 06:55	43,33
R1220	12,39305	51,3	01Jan2000, 07:05	33,25
J154	12,39305	58,3	01Jan2000, 06:35	33,25
R1170	15,19545	62,0	01Jan2000, 07:40	43,33

Εικόνα Β.24: Συνολικά αποτελέσματα για επεισόδιο βροχής 12h και περιόδου επαναφοράς 100 ετών

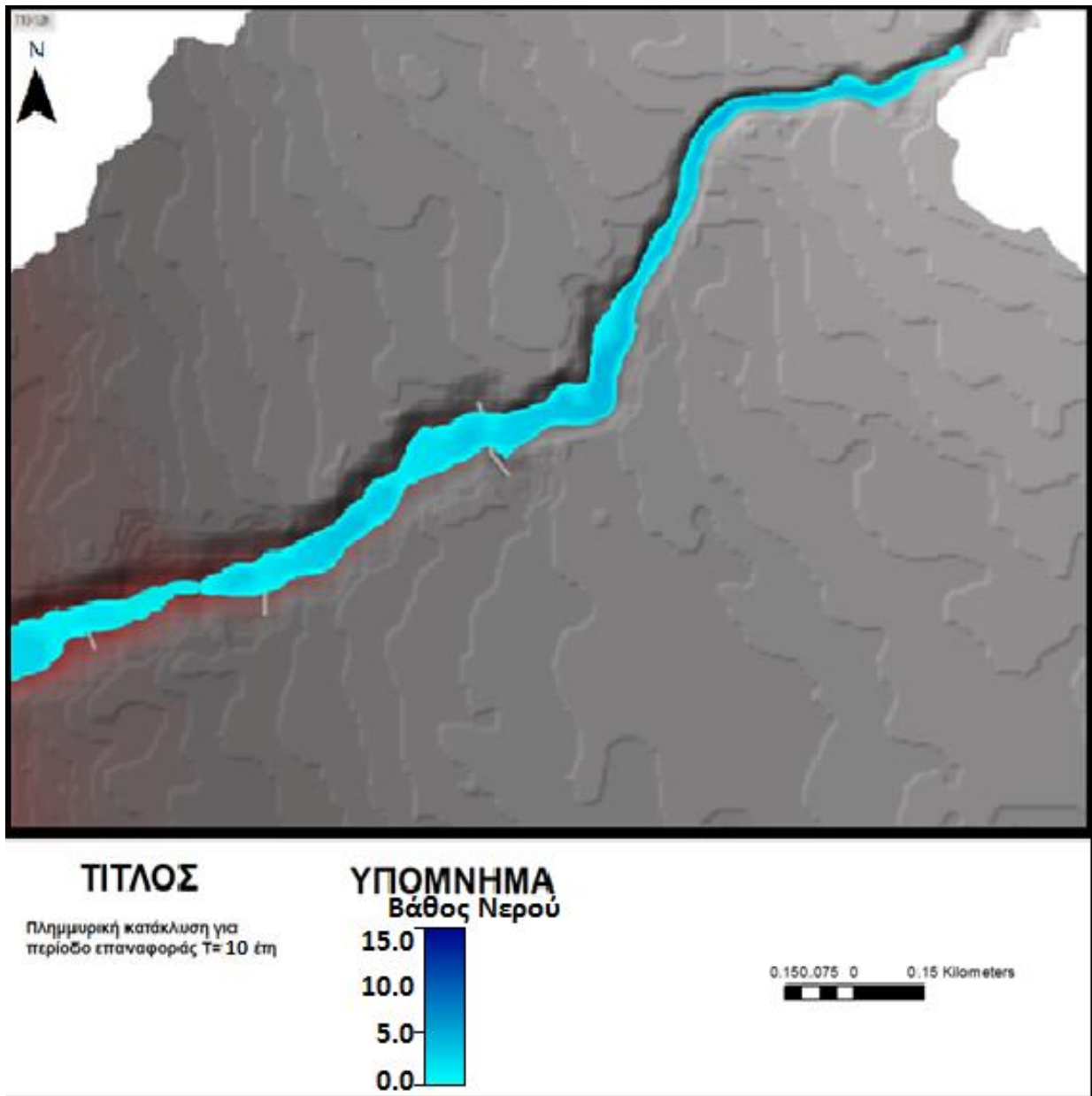
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ' - ΧΑΡΤΕΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ



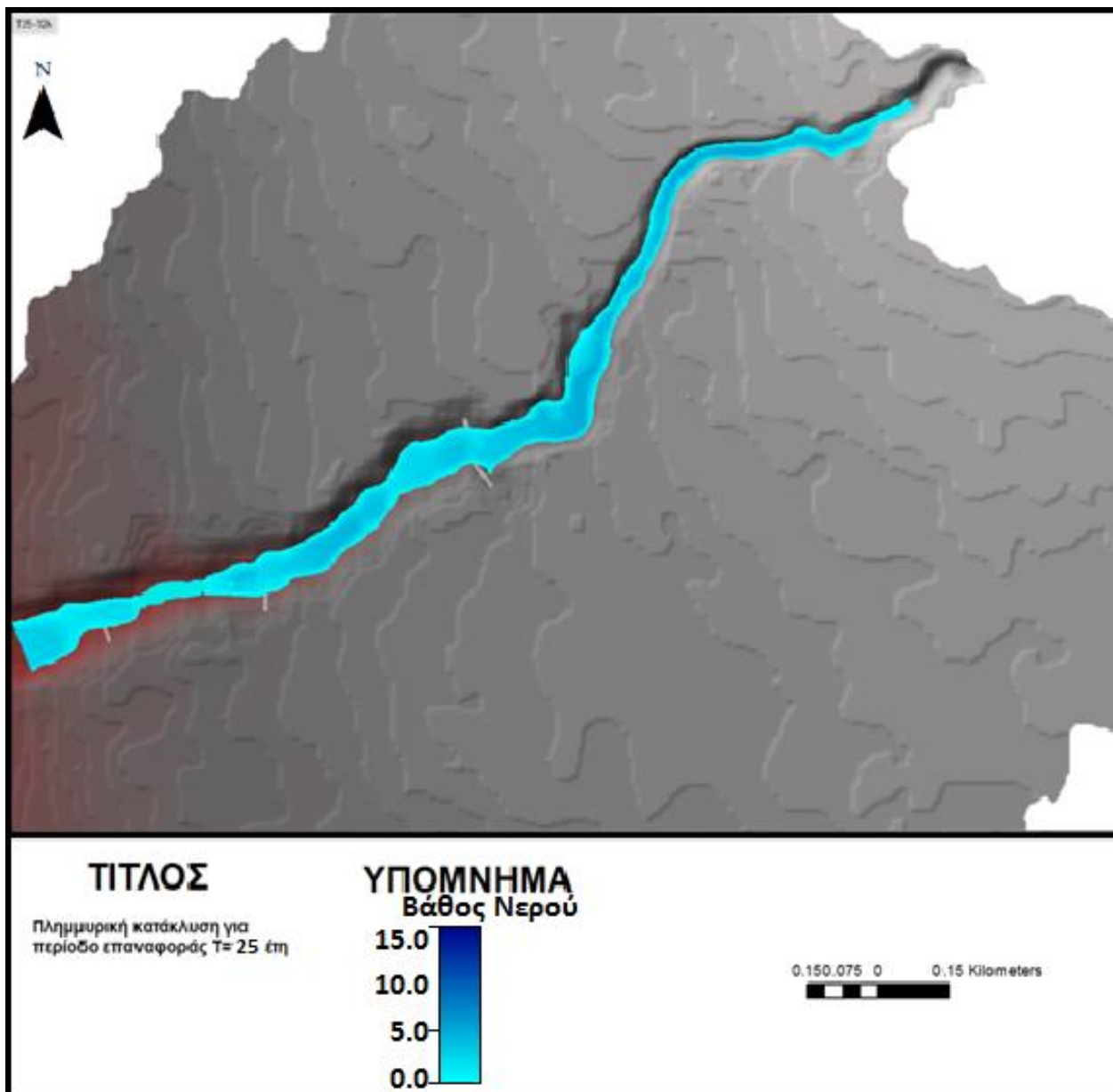
Εικόνα Γ.1: Βάθη νερού για περίοδο επαναφοράς $T=2$ έτη



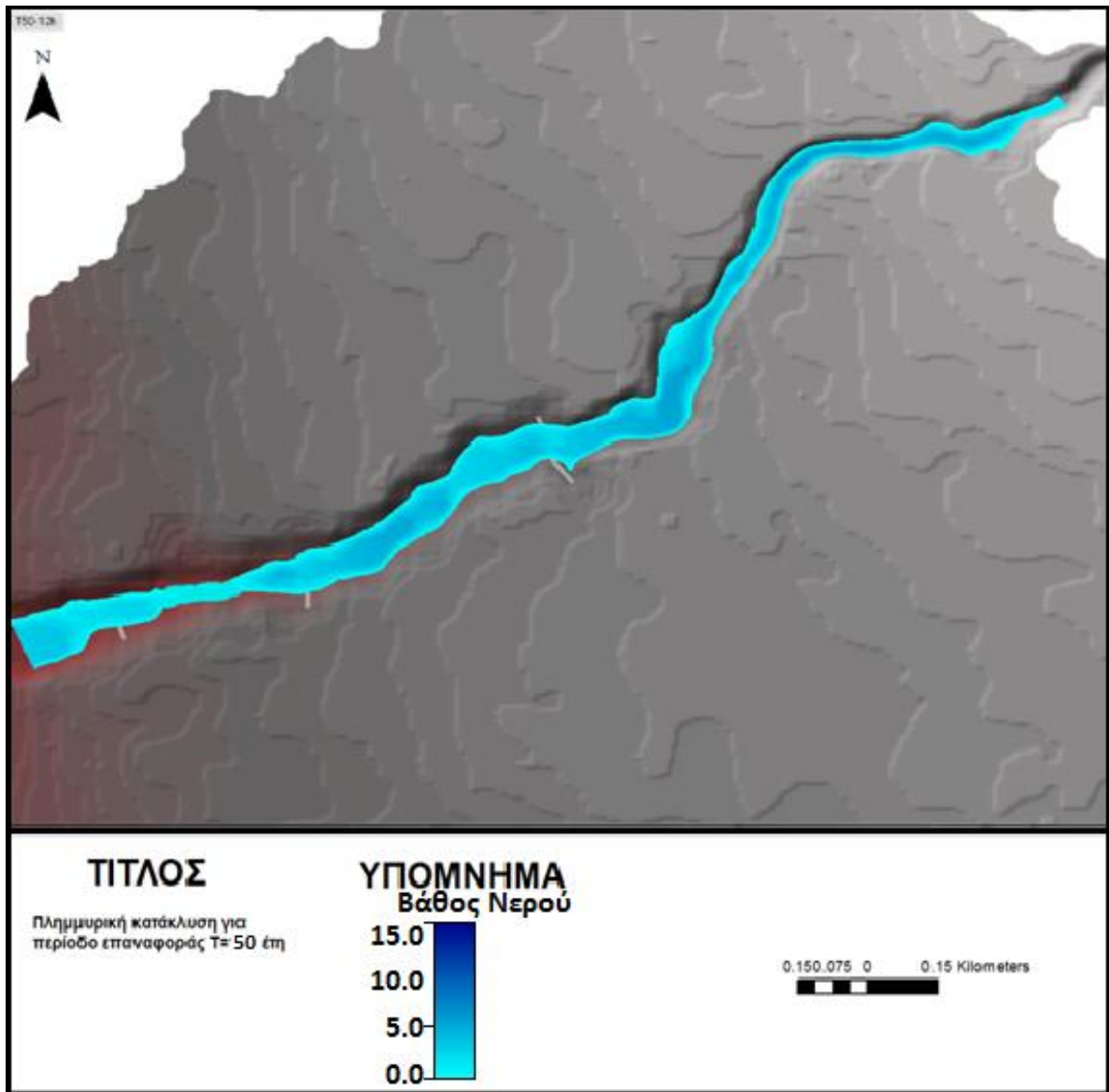
Εικόνα Γ.2: Βάθη νερού για περίοδο επαναφοράς $T=5$ έτη



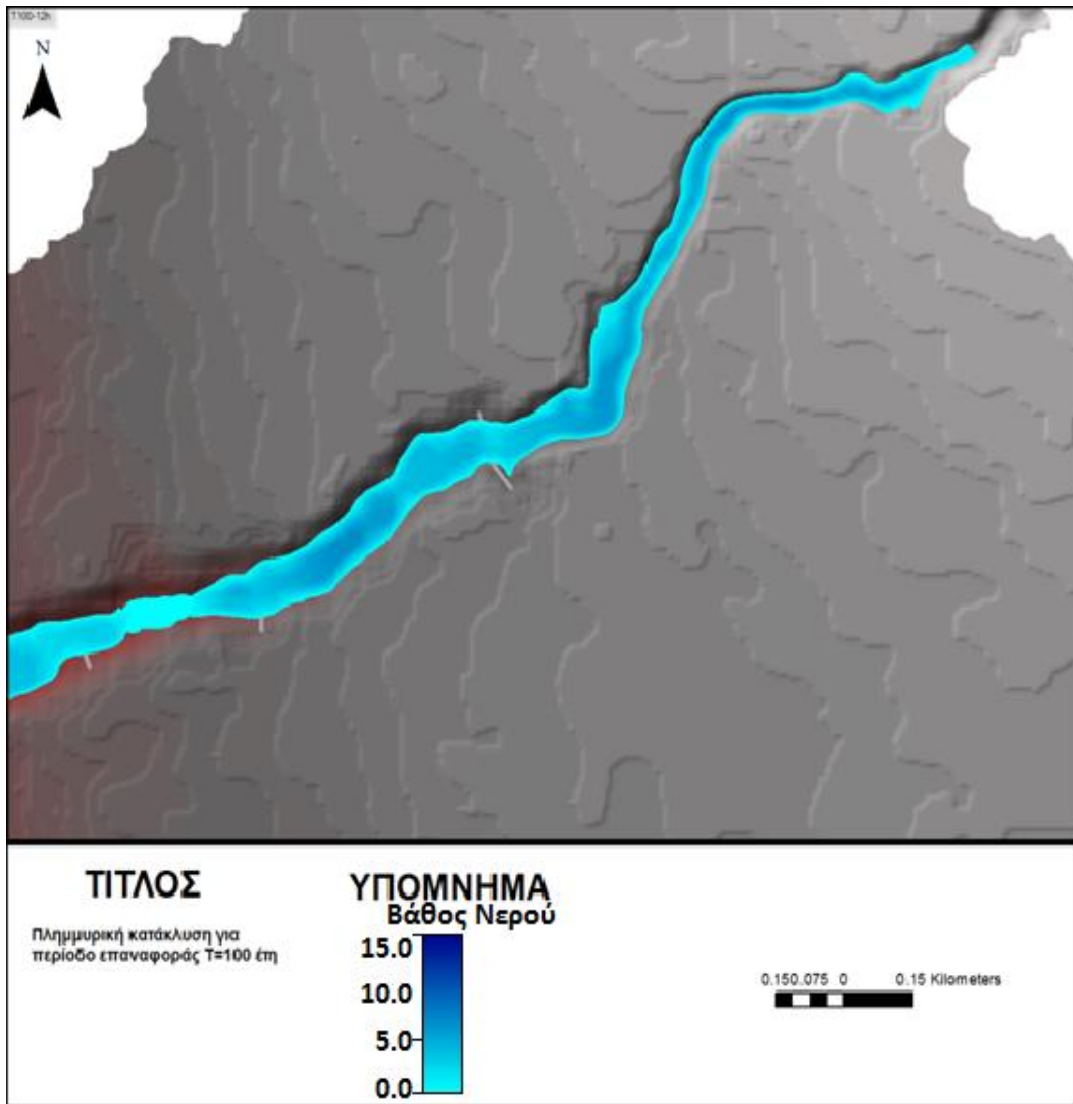
Εικόνα Γ.3: Βάθη νερού για περίοδο επαναφοράς $T=10$ έτη



Εικόνα Γ.4: Βάθη νερού για περίοδο επαναφοράς $T=25$ έτη



Εικόνα Γ.5: Βάθη νερού για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη



Εικόνα Γ.6: Βάθη νερού για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη