



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ
ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΡΑΦΗΝΑΣ

Βασιλική Ε. Παγána

Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Μαμάσης, Λέκτορας

ΔΠΜΣ
«Επιστήμη
&
Τεχνολογία
Υδατικών
Πόρων»

Αθήνα, Μάρτιος 2012

**ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ
ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΡΑΦΗΝΑΣ**

Μεταπτυχιακή Εργασία

Βασιλική Ε. Παγána
Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός
ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων»

Αθήνα, Μάρτιος 2012

*“The river flows at its own sweet will, but the flood is bound in the two banks.
If it were not thus bound, its freedom would be wasted.”*
Vinoba Bhave, Indian Educator, 1895-1982

Ευχαριστίες

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα κ. Νίκο Μαμάση, Λέκτορα στον τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, για την ανάθεση και επίβλεψη της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, καθώς και για την υποστήριξή του και καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη, Πολιτικό Δρ. Μηχανικό καθώς και τον κ. Αντώνη Κουκουβίνο, Αγρονόμο Τοπογράφο Μηχανικό, για το ενδιαφέρον τους, τις συμβουλές και τη βοήθειά τους σε καίρια ζητήματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να εκφράσω στον υποψήφιο Διδάκτορα Παναγιώτη Δημητριάδη για την καθοδήγησή του στο 'υδραυλικό' κυρίως κομμάτι της εργασίας, αλλά και γενικότερα, για τη διαθεσιμότητά του σε οποιαδήποτε διευκρίνιση χρειάστηκε. Ακόμη ένα μεγάλο ευχαριστώ, οφείλω στην υποψήφια Διδάκτορα Χρυσούλα Παπαθανασίου για τις πληροφορίες που μου παρείχε σχετικά με την εξεταζόμενη περιοχή της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω τις συμφοιτήτριές μου, Μάγδα Τουτζιάρη και Μαρίνα Μαθιουδάκη για την καθημερινή τους συμπαράσταση και συνεργασία στο «Ελληνικό Ινστιτούτο Υδρολογίας».

Τέλος, μου είναι αδύνατο να μην ευχαριστήσω την οικογένεια μου. Η βοήθεια και η συμπαράσταση τους σε όλη τη μέχρι τώρα ζωή μου και τα εφόδια τα οποία μου έδωσαν με έκαναν ικανή να αντιμετωπίσω όσες δυσκολίες μου παρουσιάζονται. Τους ευχαριστώ για όλα.

Βασιλική Ε. Παγάνα

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	i
Περίληψη.....	ix
Extended Abstract.....	xi
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Κοινοτική οδηγία 2007/60 για τη διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου.....	3
1.2 Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ευρώπη.....	5
1.3 Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα.....	5
1.4 Υδρολογικά Μοντέλα.....	7
1.4.1 Στάδια ανάπτυξης υδρολογικών μοντέλων.....	7
1.4.2 Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων.....	8
1.5 Αντικείμενο εργασίας.....	9
1.6 Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε.....	9
1.7 Δομή της εργασίας.....	9
2. Περιοχή μελέτης.....	11
2.1 Γενικά στοιχεία.....	13
2.2 Λεκάνη απορροής Ραφήνας.....	15
2.2.1 Χαρακτηριστικά της λεκάνης μελέτης.....	15
2.2.2 Γεωλογία.....	17
2.2.3 Κάλυψη Γης.....	19
2.3 Εξοπλισμός περιοχής μελέτης.....	20
3. Υδρολογική Προσομοίωση της Λεκάνης Απορροής.....	23
3.1 Γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση της λεκάνης.....	26
3.1.1 Προεπεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους – Terrain Pre-processing.....	27
3.1.2 Επεξεργασία λεκάνης και δημιουργία αρχείου εισόδου στο HEC-HMS.....	32
3.1.3 Τελική διαδικασία για τη δημιουργία αρχείων εισόδου HMS.....	36
3.2 Πρόγραμμα HMS.....	37
3.2.1 Γενικές Κατευθύνσεις.....	37
3.2.2 Υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS.....	38
3.2.3 Πρόγραμμα HEC-HMS.....	39
3.2.3.1 Μοντέλο λεκάνης απορροής.....	39
3.2.3.2 Πρότυπο υπολογισμού απωλειών βροχής.....	40
3.2.3.3 Πρότυπο υπολογισμού άμεσης απορροής.....	45
3.2.3.4 Πρότυπο βασικής απορροής.....	50
3.2.3.5 Πρότυπο διόδευσης πλημμύρας.....	51
3.2.4 Μετεωρολογικό Μοντέλο.....	52
3.2.4.1 Εφαρμογή της μεθόδου Thiessen.....	52
3.2.5 Προσδιορισμός χρονικών διαστημάτων προσομοιώσεων.....	57
3.2.6 Τρέξιμο Προσομοίωσης – Αρχείο αποτελεσμάτων.....	57
4. Βαθμονόμηση Υδρολογικού Μοντέλου.....	61
4.1 Επεισόδιο βροχής 04/02/2011.....	63
4.1.1 Σενάριο1- Μείωση CN κατά 15%.....	63
4.1.2 Σενάριο2 - Διατήρηση των μειωμένων τιμών CN και αλλαγή του πρότυπου διόδευσης – Χρήση μεθόδου Muskingum.....	65

4.2	Επεισόδιο βροχής 24/02/2011.....	68
4.2.1	Σενάριο1- Μείωση CN κατά 15%.....	68
4.2.2	Σενάριο2- Μείωση CN κατά 15% - Muskingum.....	70
4.3	Νέα βαθμονόμηση του μοντέλου.....	71
4.3.1	Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης.....	72
4.3.1.1	Επεισόδιο βροχής 04/02/2011.....	72
4.3.1.2	Επεισόδιο βροχής 24/02/2011.....	73
4.3.2	Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....	73
4.3.2.1	Αποτελέσματα με αρχικό έλλειμμα το 20% της δυνητικής μέγιστης κατακράτησης.....	74
4.3.2.2	Αποτελέσματα με αρχικό έλλειμμα 10 mm.....	75
4.3.3	Βαθμονόμηση του παραπάνω υδρολογικού μοντέλου.....	75
4.3.3.1	Επεισόδιο βροχής 04/02/2011.....	75
4.3.3.2	Επεισόδιο βροχής 24/02/2011.....	78
5.	Υδραυλική Προσομοίωση της Λεκάνης Απορροής.....	81
5.1	Δημιουργία αρχείου γεωμετρικών δεδομένων.....	84
5.1.1	Παραγωγή ισοϋψών από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους.....	84
5.1.2	Παραγωγή θεματικών επιπέδων.....	85
5.1.2.1	Κύρια γραμμή ροής ποταμού.....	86
5.1.2.2	Όχθες.....	89
5.1.2.3	Κύριες διευθύνσεις ροής.....	89
5.1.2.4	Διατομές ποταμού.....	89
5.1.2.5	Χρήσεις γης.....	94
5.1.3	Σύνθεση θεματικών επιπέδων και εξαγωγή γεωμετρικού αρχείου.....	95
5.2	Υδραυλική προσομοίωση υδατορεύματος (HEC-RAS).....	97
5.2.1	Υδραυλική προσομοίωση σε συνθήκες μόνιμης ροής.....	97
5.2.1.1	Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων.....	97
5.2.1.2	Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων.....	101
5.2.1.3	Εξισώσεις επίλυσης στο HEC-RAS.....	104
5.2.1.4	Εκτέλεση υδραυλικών υπολογισμών.....	109
5.2.1.4.1	Αποτελέσματα.....	110
5.2.1.5	Αντιμετώπιση προβλημάτων κατά την υδραυλική προσομοίωση.....	115
5.2.1.6	Βαθμονόμηση υδραυλικού μοντέλου.....	117
5.2.2	Υδραυλική προσομοίωση σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.....	120
6.	Σύνθεση Χαρτών Πλημμύρας.....	129
6.1	Σενάριο πλημμυρικής κατάκλυσης.....	131
6.2	Σύγκριση των 2 επεισοδίων.....	136
6.3	Χάρτες Πλημμύρας.....	136
7.	Συμπεράσματα.....	143
7.1	Υδρολογική Προσομοίωση.....	145
7.2	Υδραυλική Προσομοίωση.....	145
7.3	Σύνθεση Χαρτών.....	146
7.4	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα της εργασίας.....	146
	Βιβλιογραφία.....	149

Ευρετήριο Διαγραμμμάτων

Διάγραμμα 3.1: Διάγραμμα Διαδικασίας Υδρολογικής Προσομοίωσης της Λεκάνης με HEC-HMS.....	25
Διάγραμμα 3.2: Βήματα προεπεξεργασίας Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους.....	27
Διάγραμμα 5.1: Διαδικασία Υδραυλικής Προσομοίωσης της Λεκάνης Απορροής με HEC-RAS.....	83
Διάγραμμα 5.2: Στάθμη νερού σε κάθε διατομή και για τα 2 επεισόδια βροχής.....	115
Διάγραμμα 5.3: Αποτελέσματα στάθμης νερού ανά 10 min.....	126
Διάγραμμα 5.4: Μετρημένες-Προσομοιωμένες Στάθμες.....	126
Διάγραμμα 5.5: Καμπύλη στάθμης-παροχής σε συνθήκες μόνιμης και μη μόνιμης ροής.....	127
Διάγραμμα 6.1: Σύγκριση Πλημμυρικών Εκτάσεων για τα 2 επεισόδια βροχόπτωσης.....	136

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1: Μέση υπερετήσια βροχόπτωση μηνιά υδατικό διαμέρισμα στην Ελλάδα.....	6
Εικόνα 2.1: Όρια περιοχής μελέτης και υπολεκανών.....	13
Εικόνα 2.2: Χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας στην Αττική.....	14
Εικόνα 2.3: Όρια υπολεκανών.....	15
Εικόνα 2.4: Απλοποιημένος Γεωλογικός Χάρτης της περιοχής μελέτης.....	18
Εικόνα 2.5: Θέσεις μέτρησης υδρολογικών και υδραυλικών μεγεθών.....	21
Εικόνα 3.1: Τιμή κεντρικού εικονοστοιχείου ανάλογα με τον κάρναβο διεύθυνσης απορροής..	28
Εικόνα 3.2: Κάρναβος διευθύνσεων απορροής.....	29
Εικόνα 3.3: Κάρναβος συγκεντρωτικής ροής.....	29
Εικόνα 3.4: Αποτέλεσμα της εντολής Stream Definition.....	30
Εικόνα 3.5: Αποτέλεσμα της εντολής Stream Segmentation.....	31
Εικόνα 3.6: Αποτέλεσμα της εντολής Catchment Grid Delineation.....	31
Εικόνα 3.7: Αποτέλεσμα της εντολής Catchment Polygon Processing.....	32
Εικόνα 3.8: Μήτρες δεδομένων για το ψηφιακό μοντέλο εδάφους.....	33
Εικόνα 3.9: Περιοχή Μελέτης.....	34
Εικόνα 3.10: Λεκάνη μελέτης και οι μετεωρολογικοί, fladar σταθμοί.....	35
Εικόνα 3.11: Σχηματικά η παραπάνω διαδικασία (μοντέλο λεκάνης απορροής).....	39
Εικόνα 3.12: Χάρτες χρήσεων γης και γεωλογίας.....	44
Εικόνα 3.13: Παράθυρο εκτέλεσης υπολογισμού απωλειών.....	45
Εικόνα 3.14: Απεικόνιση της παραπάνω διαδικασίας.....	49
Εικόνα 3.15: Διαδικασία εισαγωγής του προτύπου διόδευσης στο HEC-HMS.....	51
Εικόνα 3.16: Σχήμα της παραπάνω διαδικασίας.....	52
Εικόνα 3.17: Πολύγωνα Thiessen.....	53
Εικόνα 3.18: Παράδειγμα πολυγώνων Thiessen σε μία υπολεκάνη.....	54
Εικόνα 3.19: Εισαγωγή χρονοσειρών στο HEC-HMS.....	56
Εικόνα 3.20: Δημιουργία αρχείου προσομοίωσης.....	57
Εικόνα 3.21: Παρουσίαση του κόμβου της λεκάνης απορροής που θα γίνει παράθεση των αποτελεσμάτων και για τα δύο επεισόδια βροχής.....	58
Εικόνα 4.1: Πλημμυρογραφήματα προσομοίωσης – παρατηρήσεων (σενάριο 1, 04/02/2011)..	64
Εικόνα 4.2: Πλημμυρογραφήματα προσομοίωσης – παρατηρήσεων (σενάριο 2, 04/02/2011)..	67
Εικόνα 4.3: Πλημμυρογραφήματα προσομοίωσης – παρατηρήσεων (σενάριο 1, 24/02/2011)..	69
Εικόνα 4.4: Πλημμυρογραφήματα προσομοίωσης – παρατηρήσεων (σενάριο 2, 24/02/2011)..	70

Εικόνα 4.5: Παράμετροι απωλειών.....	71
Εικόνα 4.6: Πλημμυρογραφήματα προσομοίωσης και παρατήρησης και τα στοιχεία τους (04/02/2011).....	72
Εικόνα 4.7: Πλημμυρογραφήματα προσομοίωσης και παρατήρησης και τα στοιχεία τους (24/02/2011).....	73
Εικόνα 4.8: Πλημμυρογράφημα της λεκάνης W250 και τα στοιχεία αυτού.....	74
Εικόνα 4.9: Πλημμυρογράφημα της λεκάνης W250 και τα στοιχεία αυτού (αρχικό έλλειμμα 10mm).....	75
Εικόνα 4.10: Προσομοιωμένο και παρατηρημένο πλημμυρογράφημα και τα στοιχεία τους (04/02/2011).....	77
Εικόνα 4.11: Προσομοιωμένο και παρατηρημένο πλημμυρογράφημα και τα στοιχεία τους (24/02/2011).....	79
Εικόνα 5.1: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους tin.....	85
Εικόνα 5.2: Διαδικασία δημιουργίας θεματικών επιπέδων.....	86
Εικόνα 5.3: Ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο.....	87
Εικόνα 5.4: Διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών του υδρογραφικού δικτύου.....	88
Εικόνα 5.5: Ονομασία τμήματος ποταμού.....	88
Εικόνα 5.6: Κύρια γραμμή ροής και όχθες.....	89
Εικόνα 5.7: Αυτόματη δημιουργία διατομών, ορισμός πλάτους και ισοδιάστασης.....	90
Εικόνα 5.8: Διατομές με ισοδιάσταση 100 m.....	91
Εικόνα 5.9: Επιλεχθείσες διατομές.....	91
Εικόνα 5.10: Ενδεικτική διατομή του ρέματος Ραφήνα.....	92
Εικόνα 5.11: Διαδικασία υπολογισμού χαρακτηριστικών των διατομών και ερμηνεία αυτών .	93
Εικόνα 5.12: Πολύγωνα χρήσεων γης που τέμνονται από τις διατομές.....	94
Εικόνα 5.13: Σύνθεση θεματικών επιπέδων.....	95
Εικόνα 5.14: Εξαγωγή γεωμετρικού αρχείου.....	96
Εικόνα 5.15: Περιβάλλον εισαγωγής γεωμετρικού αρχείου.....	98
Εικόνα 5.16: Διαδικασία εισαγωγής γεωμετρικού αρχείου.....	98
Εικόνα 5.17: Παράθυρο με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε διατομής.....	99
Εικόνα 5.18: Ορθογωνική διατομή και τα χαρακτηριστικά της.....	100
Εικόνα 5.19: Εικόνα του ρέματος όπου υπάρχει μετρημένη διατομή.....	101
Εικόνα 5.20: Διαδικασία εισαγωγής υδρολογικών δεδομένων.....	101
Εικόνα 5.21: Ορισμός οριακών συνθηκών.....	103
Εικόνα 5.22: Κλίσεις ανάντη και κατόντη διατομής.....	103
Εικόνα 5.23: Απεικόνιση μεγεθών της εξίσωσης ενέργειας.....	104
Εικόνα 5.24: Υπολογισμός συντελεστή μεταφοράς K για όλη τη διατομή.....	106
Εικόνα 5.25: Προσδιορισμός απωλειών τριβής.....	107
Εικόνα 5.26: Υπολογισμός μέσης κινητικής ενέργειας.....	108
Εικόνα 5.27: Διαδικασία εκτέλεσης υδραυλικών υπολογισμών.....	110
Εικόνα 5.28: Διάγραμμα διατομής, WS: πιεζομετρικό φορτίο, EG: γραμμή ενέργειας, Crit: κρίσιμο βάθος.....	111
Εικόνα 5.29: Αποτελέσματα και χαρακτηριστικά διατομής.....	112
Εικόνα 5.30: Διάγραμμα διατομής, WS: πιεζομετρικό φορτίο, EG: γραμμή ενέργειας, Crit: κρίσιμο βάθος(παροχή αιχμής 137 m ³ /s).....	113
Εικόνα 5.31: Αποτελέσματα και χαρακτηριστικά διατομής(παροχή αιχμής 137 m ³ /s).....	114
Εικόνα 5.32: Διαδικασία δημιουργίας ενδιάμεσων διατομών.....	116

Εικόνα 5.33: Θέση και μορφή διατομής.....	117
Εικόνα 5.34: Υδρολογικό Αρχείο.....	118
Εικόνα 5.35: Αποτελέσματα υδραυλικής προσομοίωσης (παροχή αιχμής 79.71 m ³ /s).....	119
Εικόνα 5.36: Αποτελέσματα βαθμονόμησης.....	119
Εικόνα 5.37: Παροχή και κλίση απλοποιημένου μοντέλου.....	121
Εικόνα 5.38: Αποτελέσματα.....	122
Εικόνα 5.39: Παροχή και κλίση απλοποιημένου μοντέλου(Q=80 m ³ /s).....	122
Εικόνα 5.40: Αποτελέσματα.....	123
Εικόνα 5.41: Συμπλήρωση υδρολογικού αρχείου (unsteady flow).....	123
Εικόνα 5.42: Παράθυρο εκτέλεσης υδραυλικής προσομοίωσης.....	124
Εικόνα 5.43: Επιλογές αλλαγής πολλών παραμέτρων της υδραυλικής προσομοίωσης.....	125
Εικόνα 6.1: Εξαγωγή δεδομένων από το HEC-RAS.....	132
Εικόνα 6.2: Μετατροπή αρχείου sdf σε μορφή XML.....	132
Εικόνα 6.3: Παράθυρο του Layer Setup.....	133
Εικόνα 6.4: Παράθυρο του Import RAS Data.....	134
Εικόνα 6.5: Πιεζομετρικός χάρτης.....	134
Εικόνα 6.6: Πλημμυρικές Περιοχές.....	135
Εικόνα 6.7: Χάρτης πλημμύρας με ενδεικτικές διατομές, 04/02/2011.....	135
Εικόνα 6.8: Χάρτης πλημμύρας με ενδεικτικές διατομές, 24/02/2011.....	138

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Εμβαδά υπολεκανών.....	15
Πίνακας 3.1: Τοπογραφικά χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής.....	35
Πίνακας 3.2: Τυπικές τιμές του CN για προηγηθείσες συνθήκες υγρασίας τύπου II.....	42
Πίνακας 3.3: Ομαδοποίηση χρήσεων γης.....	43
Πίνακας 3.4: Τιμές συντελεστή CN.....	45
Πίνακας 3.5: Συντελεστές Thiessen.....	53
Πίνακας 3.6: Συντελεστές Thiessen κάθε υπολεκάνης (επεισόδιο βροχής 04/02/2011).....	54
Πίνακας 3.7: Συντελεστές Thiessen κάθε υπολεκάνης (επεισόδιο βροχής 24/02/2011).....	55
Πίνακας 4.1: Συντελεστές CN(04/02/2011).....	64
Πίνακας 4.2: Παράμετροι της μεθόδου Muskingum.....	66
Πίνακας 4.3: Συντελεστές CN (24/02/2011).....	68
Πίνακας 4.4: Συντελεστές CN (μείωση 20%).....	76
Πίνακας 4.5: Παροχές αιχμής και όγκοι απορροής για τις 04/02/2011.....	77
Πίνακας 4.6: Συντελεστές CN (μείωση 25%).....	78
Πίνακας 5.1: Συντελεστής Manning ανάλογα με τη χρήση γης.....	94
Πίνακας 6.1: Πλημμυρικές αιχμές.....	131

Ευρετήριο Χαρτών

Χάρτης 2.1: Τοπογραφικό ανάγλυφο λεκάνης απορροής Ραφήνας.....	16
Χάρτης 2.2: Κλίσεις εδάφους λεκάνης απορροής Ραφήνας.....	16
Χάρτης 2.3: Ομάδες υδροπερατότητας εδαφών.....	19
Χάρτης 2.4: Χρήσεις Γης Λεκάνης Απορροής.....	20
Χάρτης 6.1: Πιεζομετρικός χάρτης.....	137
Χάρτης 6.2: Χάρτης Πλημμυρικής Κατάκλυσης 04/02/2011.....	139

Χάρτης 6.3: Χάρτης Πλημμυρικής Κατάκλυσης 24/02/2011.....	141
---	-----

Περίληψη

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μεθοδολογικού πλαισίου για τη δημιουργία χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης, μέσω της χρήσης ειδικού λογισμικού επεξεργασίας της υδρολογικής, υδραυλικής και γεωγραφικής πληροφορίας.

Συγκεκριμένα, το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας είναι τα προγράμματα HEC-HMS 3.5, HEC-RAS 4.0 και Arc-GIS 9.3. Το HEC-HMS χρησιμοποιήθηκε για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης, το HEC-RAS για την υδραυλική προσομοίωση ροής σε ανοιχτούς αγωγούς και τελικά το Arc-GIS για την επεξεργασία κάποιων δεδομένων και την οπτικοποίηση των τελικών αποτελεσμάτων υπό μορφή χαρτών.

Η περιοχή που εξετάστηκε, είναι η λεκάνη απορροής της Ραφήνας στην Αττική με έκταση 126 km². Για την περιοχή αυτή, δόθηκαν πρωτογενή δεδομένα όπως το ψηφιακό μοντέλο εδάφους καθώς και οι χάρτες χρήσεων γης και γεωλογίας. Επίσης, έγινε συλλογή βροχομετρικών δεδομένων από εγκατεστημένους σταθμούς στην περιοχή (Hydrologic Observatory of Athens). Έτσι επιλέχθηκε το επεισόδιο βροχόπτωσης της 04/02/2011 και αυτό της 24/02/2011. Με δεδομένα όλα τα παραπάνω πραγματοποιήθηκε η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης, η οποία χωρίστηκε σε υπολεκάνες ανάλογα με τη θέση των σταθμών μέτρησης απορροών. Η υδρολογική προσομοίωση έδωσε πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού σε κάθε υπολεκάνη και για τα δύο επεισόδια που επιλέχθηκαν. Ακολούθησε βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου και συγκεκριμένα στις θέσεις όπου υπήρχαν παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα. Αυτός ήταν και ο σκοπός δημιουργίας υπολεκανών στις θέσεις όπου υπήρχαν σταθμοί μέτρησης απορροών.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η υδραυλική προσομοίωση 12 km του υδρογραφικού δικτύου, σε συνθήκες μόνιμης αλλά και μη μόνιμης ροής. Και στις δύο περιπτώσεις, το εξαγόμενο αποτέλεσμα ήταν ο υπολογισμός της πιεζομετρικής επιφάνειας για κάθε επεισόδιο βροχόπτωσης και στη συνέχεια αντιπαραβολή με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους για τον υπολογισμό του βάθους νερού.

Έτσι, με τα δεδομένα της υδρολογικής και υδραυλικής προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε η χαρτογράφηση των πολυγώνων κατάκλυσης και για τα δύο επεισόδια βροχόπτωσης και η τελική σύγκριση των κατακλυζόμενων επιφανειών.

Extended Abstract

Introduction

Floods can simply be defined as the physical phenomena, during which an initially dry land area is covered by water. Floods are normally caused by climatic changes, while their evolution depends mainly on geomorphologic factors, such as soil stability, vegetation cover, as well as the geometrical characteristics of the river basin.

Aim

The aim of this thesis, entitled as «Elaboration of flood inundation maps in Rafina basin», is the development of an integrated methodology, which combines the fields of hydrology, hydraulics, geomatics and cartography for the creation of several maps for observed runoff events.

Tools

The software, which was used for the accomplishment of this thesis, is HEC-HMS 3.5 and HEC-RAS 4.0 programs, ArcGIS 9.3 and especially Hec-GeoHMS and Hec-GeoRAS toolbars.

HEC-HMS: simulates the hydrologic processes of river basins and computes the flood hydrographs.

HEC-RAS: simulates the open channel flow (river systems) and computes the energy gradient and piezometric levels along the river.

Both of them are compatible with ArcGIS, which can be used for further data processing and visualization for cartographical purposes.

Structure of the thesis

- Chapter 1 –Introduction
 - Short analysis of the active EU directive 2007/60/EC for the assessment and management of flood risks
 - Floods in Europe and Greece

- Hydrological Models
- Aim of thesis
- Chapter 2 – Description of thesis’s area
- Chapter 3 – Hydrologic simulation of river basin
 - Data Processing through the use of Hec-GeoHMS
 - Hydrologic simulation of the 3 runoff episodes through the use of HEC-HMS
- Chapter 4 – Calibration of the hydrologic model
- Chapter 5 – Hydraulic Simulation
 - River mapping through the use of Hec-GeoRAS
 - Hydraulic open channel flow simulation in steady and unsteady flow conditions, through the use of HEC-RAS
 - Exportation of the results to Hec-GeoRAS for the digital mapping of water surface and floodplain delineation for each runoff episode
- Chapter 6 – Production of flood maps
 - Water surface maps
 - Floodplain delineation maps for 2 runoff events

Case study

The case study of the developed methodology is part of the basin of Rafina in Athens covering an area of 126 km² and it is divided into 12 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. Concerning the hydrologic data, there were rainfall measures of the HOA (Hydrologic Observatory of Athenes) stations that were installed in this area. The 2 rainfall events, which were collected, are the 04/02/2011 event and 24/02/2011 event.

Hydrologic simulation

The hydrologic simulation was completed through the use of HEC-HMS combined with Hec-GeoHMS, which is an add-in toolbox in the platform of ArcGIS.

The first step of this procedure is the creation of the basin model through the use of Hec-GeoHMS working in the environment of ArcMap.

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 storage of the reliable data of the area. So, the SCS method was applied for the computation of rainfall losses, lag and muskingum methods for the computation of flow routing and a change of the unit hydrograph of the British hydrological institute was used for the estimation of the direct runoff.

The simulation was run for the 2 rainfall events (04/02/2011, 24/02/2011). The output of this procedure is a flood hydrograph in the exit of each sub-basin as shown in figure1.

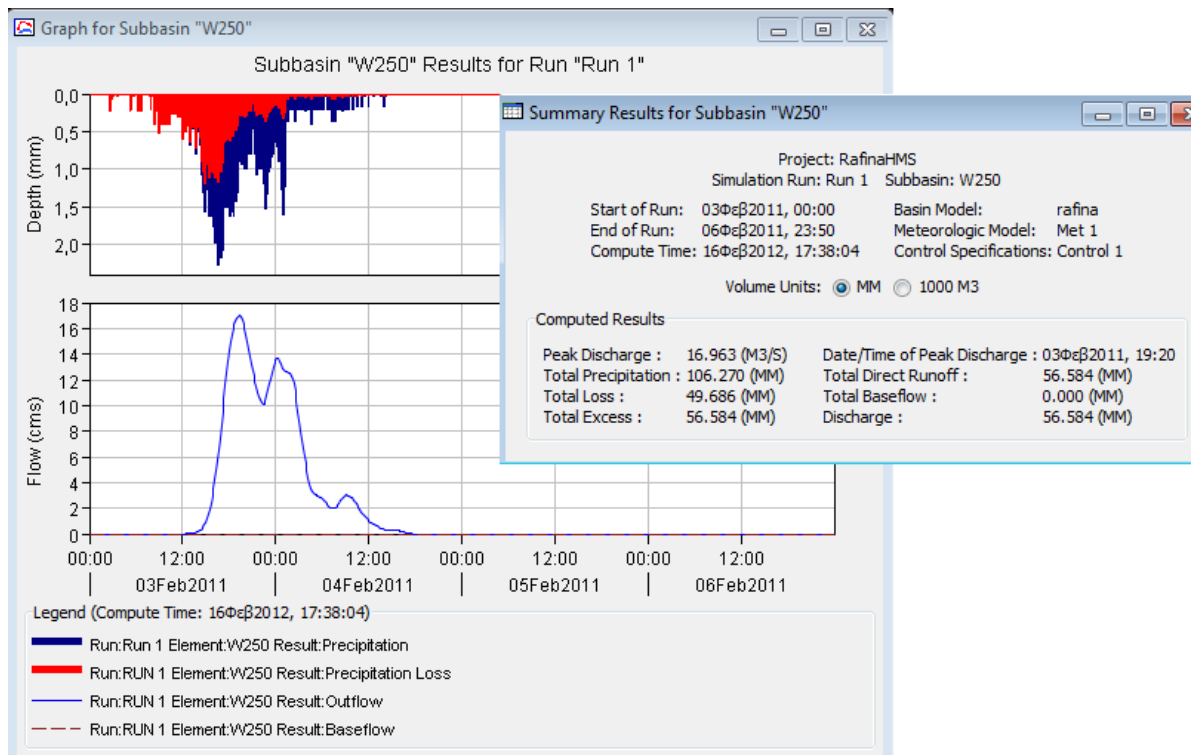


Figure 1: Rainfall hyetograph and a flood hydrograph of a sub-basin of the 04/02/2011 rainfall event.

Calibration of hydrologic model

Calibration is the process, in which the user changes the parameters of the simulation so that the simulation results approach the observed. In this thesis, the calibration was applied to the place where, Rafina station is located, which gives runoff measures. In this case the user changed the CN parameter to bring the simulation's peak discharge closer to the observed. The best results were accomplished by the reduction of CN near 20% of the initial appreciation for the 04/02/2011 event (Figure 2) and 25% for the 24/02/2011 event (Figure 3).

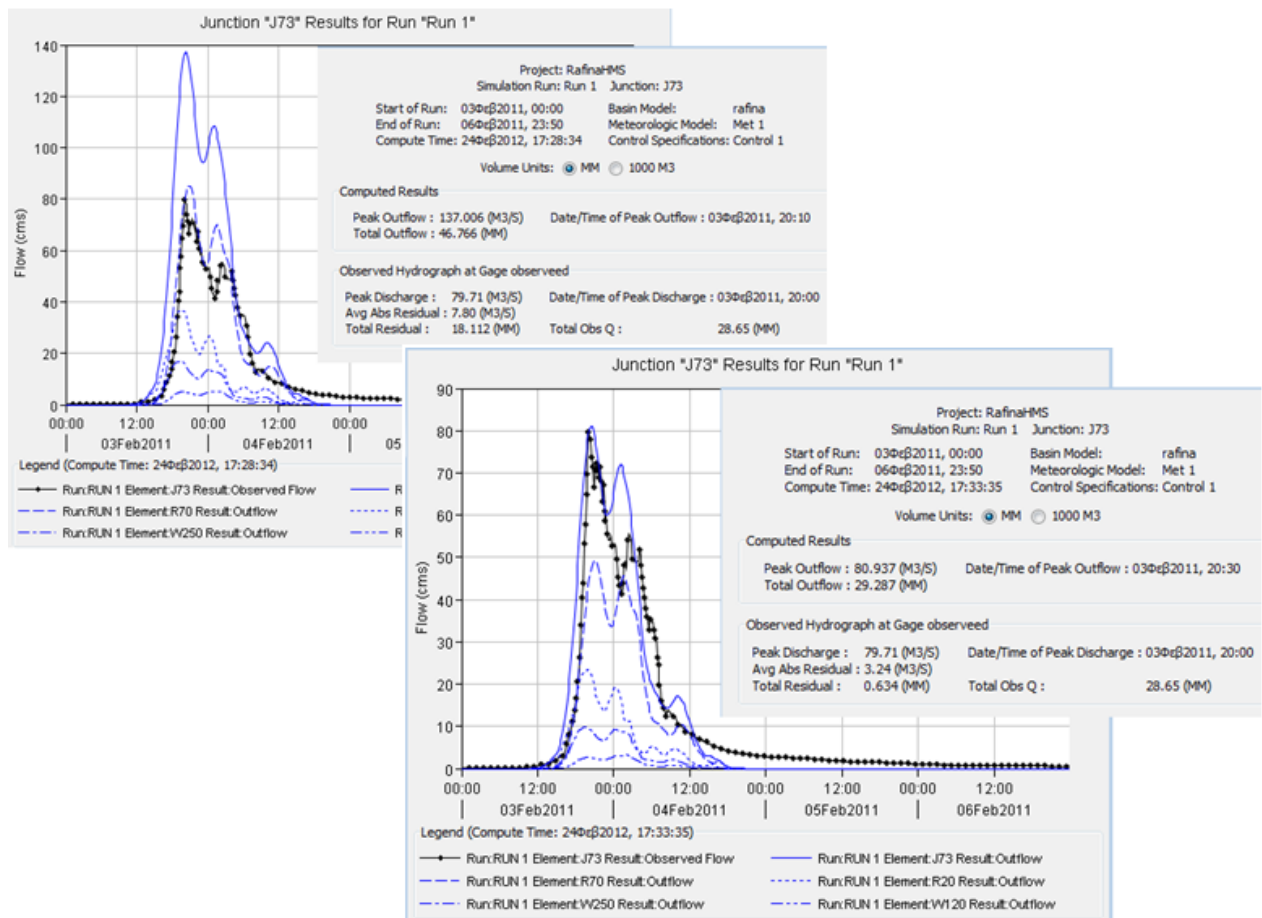


Figure 2: Flood hydrograph before and after calibration, 04/02/2011

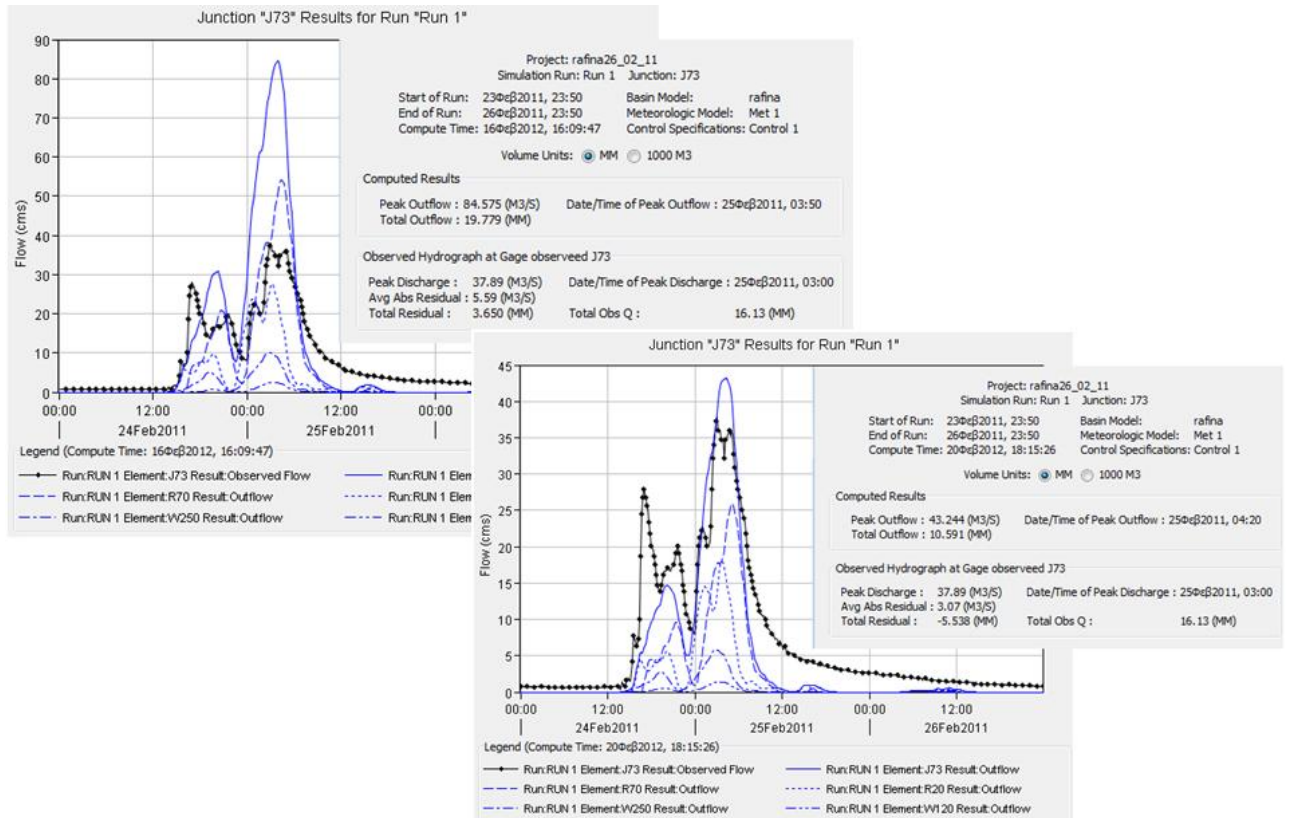


Figure 3: Flood hydrograph before and after calibration, 24/02/2011

Hydraulic Simulation

The hydraulic simulation concerns 12 km of the Rafina river. Especially, it was designed through the use of HEC-RAS combined with Hec-GeoRAS, which is an add-in toolbox in the platform of ArcGIS.

The first step of this procedure consists of the computation of the geometric characteristics of the river (stream centerline, bank length, cross sections etc). This was accomplished by the use of Hec-GeoRAS.

After this, the river was simulated in steady and unsteady flow conditions with the relevant boundary conditions.

In steady flow, 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. In the following figure (4), is shown the results of a cross section for the both events.

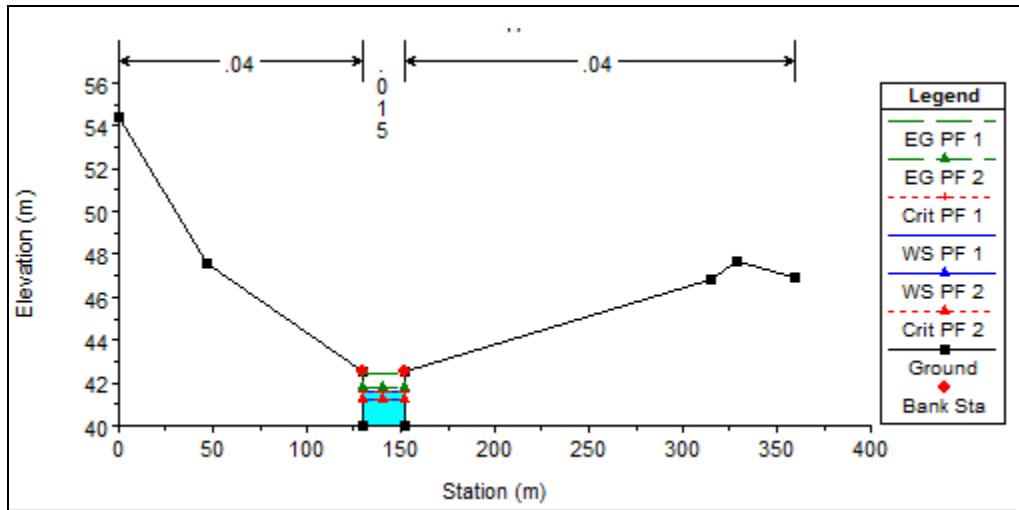


Figure 4: *Orthogonal cross section for both rainfall events*

In unsteady flow, the whole procedure computation is based on the solution of the continuity equation and the momentum equation. In this case, there are several selections to assign the boundary conditions. Definitely, a flow hydrograph was applied for upstream boundary condition and the normal depth for downstream.

Comparing the two cases of flow, unsteady flow executes results (piezometric depth, mean kinetic energy and energy gradient for every cross section) for the assigned time interval (10 min in this study) (chart 1), while in steady flow the results concern the peak discharge, while the discharge stays steady.

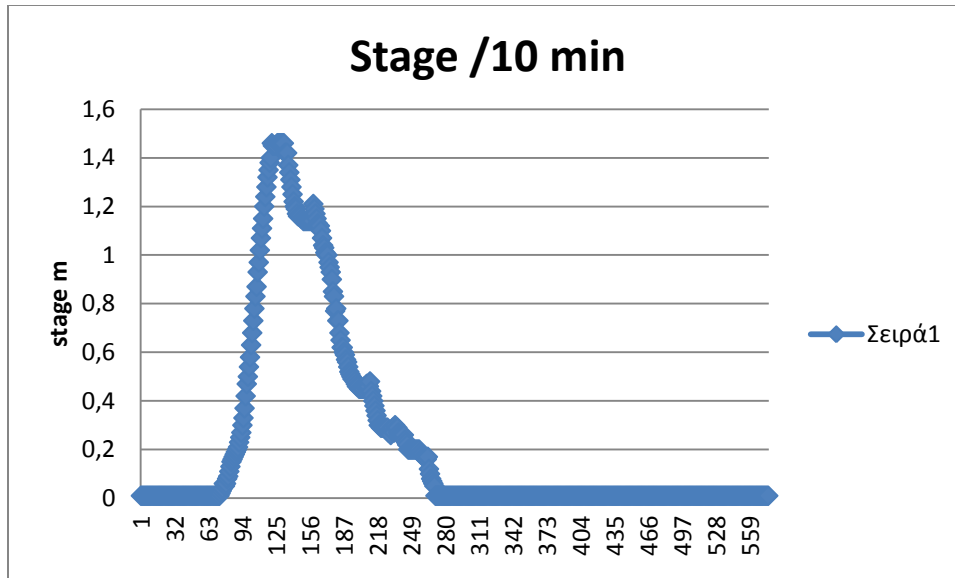


Chart 1: Stage of water for a cross section every 10 min.

Digital mapping

The hydrologic and hydraulic simulation provides all the necessary data for the creation of floodplain maps, which is implemented by the use of Hec-GeoRAS.

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 following figure, presents the floodplain of the river basin for both events, along with two «zoom in» indicative cross sections. (Figure 5, 6)

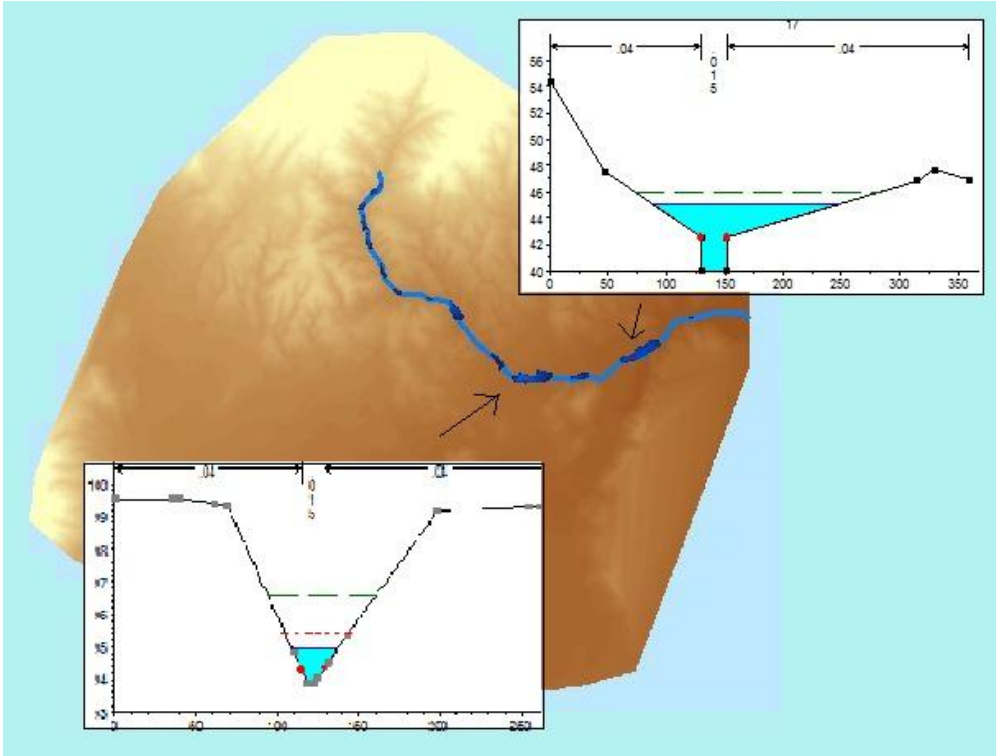


Figure 5: Floodplain delineation map, 04/02/2011

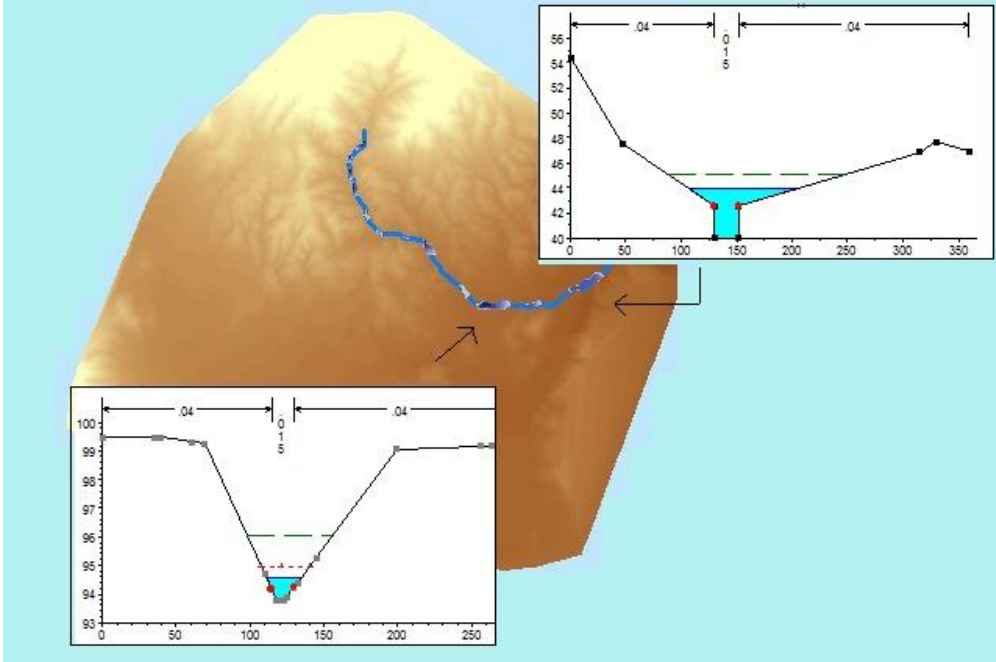
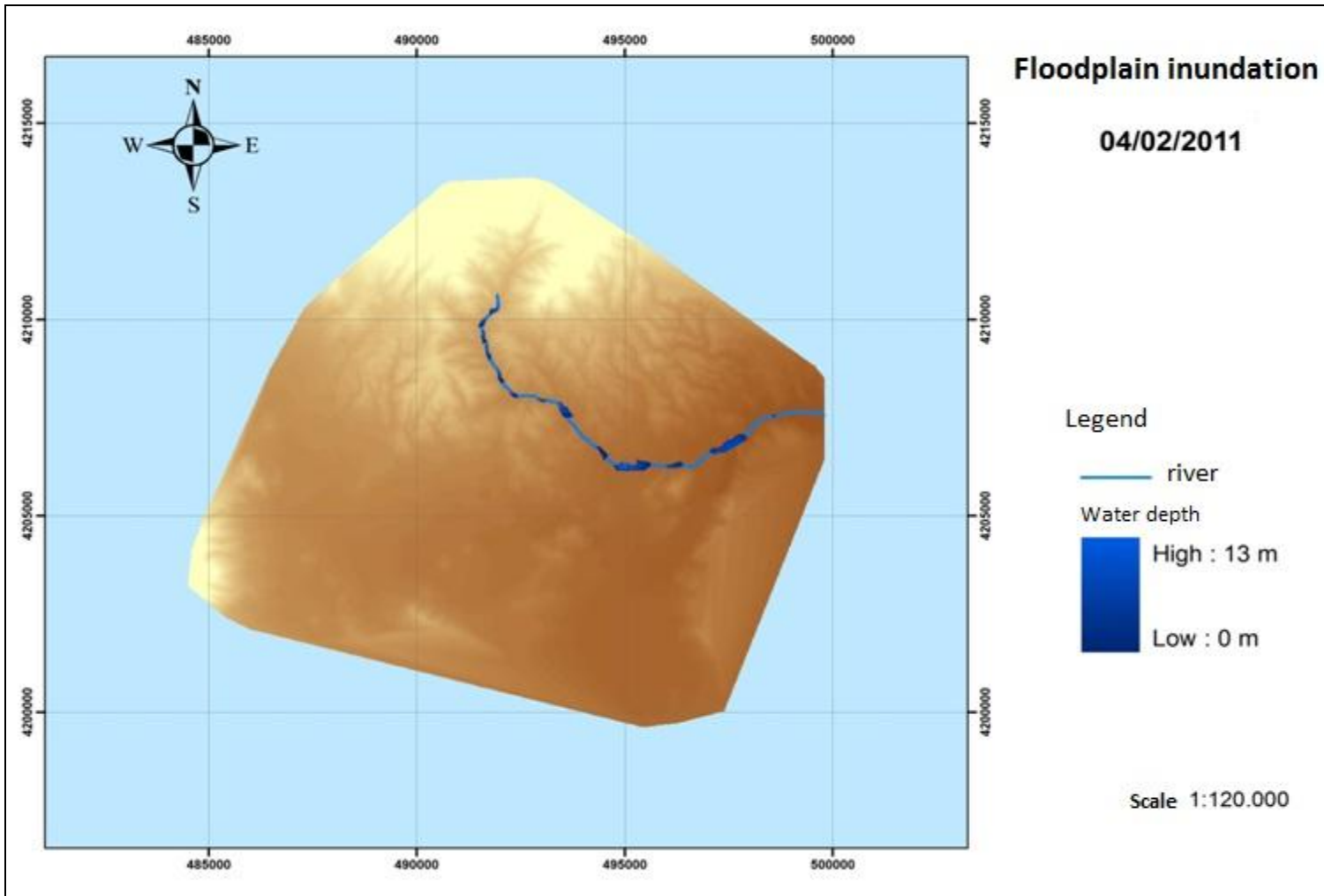


Figure 6: Floodplain delineation map, 04/02/2011

The final map is presented below:



Map 1: *Floodplain inundation map for 04/02/2011 event*

Comparison

Comparing the inundated areas between the two rainfall events, someone concludes that there is no important difference. (chart2) This can be justified by the fact that the slopes of this basin along the river are steep enough to provoke a « blow up» in the inundated areas.

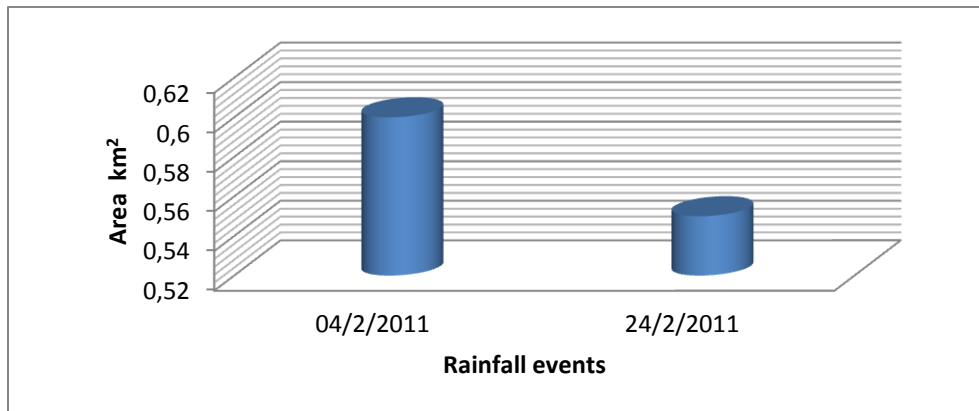


Chart 2: *Comparison of the floodplain inundation for the two rainfall events.*

Evaluation of the study

A recommendation for the continuation of the thesis could be the incorporation of the cost factor for the estimation of the financial damage per land use, as occurred after a flood event. This procedure, results in the production of flood hazard maps, which – along with the floodplain delineation maps – provide a strong operational tool for the elaboration of integrated flood management plans in the direction of prevention or minimization of the adverse flood effects.

Another recommendation is to apply all the models that HEC-HMS offers for the computation of losses, direct runoff, baseflow and flow routing. After all these, someone can compare the results and choose the best one.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή



1.1 Κοινοτική οδηγία 2007/60 για τη διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου

Βασικοί Ορισμοί

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

- Ποτάμια, ορεινούς χείμαρους και υδατορεύματα εφήμερης ροής
- Εκφορτίσεις πηγών
- Συστήματα απορροής ομβρίων και παντοροϊκά δίκτυα
- Ανύψωση της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές
- Καταστροφές μεγάλων υδραυλικών έργων

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 (Ευστρατιάδης και Μαμάσης, 2011).

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

Η οδηγία 2007/60 για τη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου αποτελεί ένα συμπλήρωμα στην κοινοτική νομοθεσία για την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων και καλύπτει κάθε τύπο πλημμύρας.

Σκοπός της οδηγίας, είναι να θεσπιστεί ένα πλαίσιο για την εκτίμηση και τη διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης με στόχο τη μείωση των αρνητικών συνεπειών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες. Τα μέτρα για τη μείωση των κινδύνων θα πρέπει να εξετάζονται σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

Βασικά σημεία της οδηγίας, είναι η προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας, χαρτογράφηση σε όλες τις περιοχές που υπάρχει σημαντικός κίνδυνος

πλημμύρας, συντονισμός για κοινές λεκάνες απορροής ποταμών και εκπόνηση σχεδίων διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας με ευρεία συμμετοχική διαδικασία.

Η εφαρμογή της οδηγίας θα γίνει σε τρία στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η προκαταρκτική μελέτη κατά την οποία τα κράτη μέλη διεξάγουν προκαταρκτική αξιολόγηση κινδύνων πλημμύρας. Κατά το στάδιο αυτό περιλαμβάνονται τα εξής:

- Χάρτες της περιοχής σε κατάλληλη κλίμακα, που απεικονίζουν τα όρια των λεκανών (ή παράκτιων ζωνών), τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά τους και τις χρήσεις γης.
- Περιγραφικά δεδομένα πλημμυρών που σημειώθηκαν κατά το παρελθόν και είχαν σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στις ανθρώπινες ζωές, στις οικονομικές δραστηριότητες και στο περιβάλλον, εφόσον υπάρχει ακόμα πιθανότητα παρόμοιων μελλοντικών συμβάντων.
- Αξιολόγηση δυνητικών αρνητικών συνεπειών μελλοντικών πλημμυρών, με βάση στοιχεία όπως η τοπογραφία, η θέση και τα όρια των υδατορευμάτων, τα υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τους, η αποτελεσματικότητα των υφιστάμενων αντιπλημμυρικών έργων, η θέση των κατοικημένων περιοχών και των περιοχών οικονομικής δραστηριότητας καθώς και οι μακροπρόθεσμες δυνητικές εξελίξεις.

Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την εκπόνηση χαρτών πλημμυρικού κινδύνου (χάρτες επικινδυνότητας και χάρτες διακινδύνευσης) μέχρι το 2013. Στους χάρτες αυτούς θα προσδιορίζονται ζώνες υψηλής, μεσαίας και χαμηλής επικινδυνότητας, συμπεριλαμβανομένων περιοχών, όπου η εμφάνιση πλημμύρας μπορεί να θεωρηθεί ακραίο φαινόμενο. Επίσης, οι χάρτες αυτοί θα πρέπει να περιλαμβάνουν στοιχεία σχετικά με την έκταση της πλημμύρας, το χρόνο παραμονής των υδάτων σε χαρακτηριστικές θέσεις, τα βάθη ροής ή την απόλυτη στάθμη νερού στις θέσεις αυτές καθώς και την ταχύτητα ροής ή τη σχετική ροή των υδάτων, εφόσον κρίνεται αναγκαίο.

Τέλος στο τρίτο στάδιο, τα κράτη μέλη θα εκπονήσουν υποχρεωτικά σχέδια διαχείρισης της επικινδυνότητας μέχρι το 2015. Τα σχέδια αυτά θα περιλαμβάνουν μέτρα μείωσης της πιθανότητας πλημμύρας και των συνεπειών της, θα εστιάζονται δε στην απαγόρευση

μη αιφόρων 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 αναλόγως των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής καθώς και της έντασης και της συχνότητας των πλημμυρικών φαινομένων μακροπρόθεσμα.

1.2 Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ευρώπη

Το υδρολογικό αλλά και το πλημμυρικό καθεστώς στην Ευρώπη είναι ποικίλο λόγω της μεταβλητότητας του ανάγλυφου και του κλίματος μεταξύ των περιοχών. Έντονες πλημμύρες έχουν παρατηρηθεί τόσο σε κατοικημένες περιοχές, όσο και σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις με αποτέλεσμα τη μελέτη και κατασκευή εκτεταμένων αντιπλημμυρικών έργων. Τα έργα αυτά περιλαμβάνουν αναχώματα, τάφρους και φράγματα που συγκεντρώνουν και κατευθύνουν τα όμβρια ύδατα. Στην περίπτωση κατασκευής μεγάλων φραγμάτων η λειτουργία τους είναι συνήθως πολλαπλή και όχι πρωτίστως αντιπλημμυρική. Οι ανάγκες για άρδευση, ύδρευση και αντιπλημμυρική προστασία συνδυάζονται συχνά με την παραγωγή της υδροηλεκτρικής ενέργειας εφόσον το διαθέσιμο υδροδυναμικό είναι αξιόλογο και η επένδυση συμφέρουσα.

1.3 Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα

Η Ελλάδα είναι ένας τόπος με έντονο ανάγλυφο και ακτογραμμή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τόσο τα τοπογραφικά και εδαφολογικά της χαρακτηριστικά, όσο και τα υδρολογικά και κλιματικά να μεταβάλλονται.

Λόγω του πολυσχιδούς ανάγλυφου της Ελλάδας και των διαφόρων μεγεθών και χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής που σχηματίζονται σε αυτήν, η χώρα έχει διαιρεθεί σε 14 υδατικά διαμερίσματα στο εσωτερικό των οποίων παρουσιάζεται σχετική ομοιογένεια, κλιματική, υδρολογική και φυσική. Μεγάλο ρόλο παίζει η επίδραση της οροσειράς της Πίνδου στα φαινόμενα βροχοπτώσεων στην Ελλάδα. Η δυτική Ελλάδα

παρουσιάζει αυξημένες βροχοπτώσεις σε σχέση με την ανατολική. Η μέση ετήσια βροχόπτωση υπερβαίνει τα 1800 mm σε ορεινές περιοχές της δυτικής ηπειρωτικής Ελλάδας, ενώ σε περιοχές δυτικά της Πίνδου η αντίστοιχη τιμή κυμαίνεται μέχρι και κοντά στα 400 mm. Τα νησιά του Αιγαίου εμφανίζουν επίσης χαμηλό μέσο ύψος βροχής.

Η συχνότητα εμφάνισης πλημμυρικών επεισοδίων δε σχετίζεται με τα μέσα ετήσια ύψη βροχόπτωσης, αλλά με την ένταση και τη διάρκεια των βροχοπτώσεων. Στην Ελλάδα μάλιστα, οι πλημμύρες συχνά οφείλονται σε επεισόδια βροχής, μεγάλης έντασης που παράγονται συνήθως από χαμηλά βαρομετρικά προερχόμενα από δυτικά, νοτιοδυτικά ή βορειοδυτικά.

Στην παρακάτω εικόνα παρατίθενται οι μέσες υπερετήσιες βροχοπτώσεις ανά υδατικό διαμέρισμα στην Ελλάδα για το διάστημα 1960-1990.



Εικόνα 1.1: Μέση υπερετήσια βροχόπτωση mm ανά υδατικό διαμέρισμα στην Ελλάδα (Πηγή: <http://ndbhmi.chi.civil.ntua.gr> ETYMΠ)

1.4 Υδρολογικά Μοντέλα

Ο όρος υδρολογικό μοντέλο αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών, που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που είναι πρακτικά αδύνατον να μετρηθούν στο πεδίο. Τα μοντέλα αυτά περιγράφουν (Ευστρατιάδης, 2008):

- Μεμονωμένα γεγονότα, όπως ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας, όπου η αναπαράσταση του γεγονότος γίνεται μέσω εμπειρικών, συνήθως, προσεγγίσεων (π.χ. ορθολογική μέθοδος, μοναδιαίο υδρογράφημα), στις οποίες αγνοούνται οι διεργασίες του υδρολογικού κύκλου που δεν ενδιαφέρουν στη μελέτη, όπως η εξάτμιση και η διήθηση.
- Τη διαχρονική εξέλιξη του ισοζυγίου των υδατικών πόρων μιας πεπερασμένης χωρικής ενότητας, όπου η διαδικασία διέπεται, εν μέρει από κάποιο φυσικό υπόβαθρο και χρησιμοποιούνται εργαλεία προσομοίωσης, μέσω των οποίων αναπαρίστανται οι κύριες τουλάχιστον, διεργασίες που επηρεάζουν τον κύκλο του νερού.

1.4.1 Στάδια ανάπτυξης υδρολογικών μοντέλων

Η ανάπτυξη ενός υδρολογικού μοντέλου περιλαμβάνει τα εξής στάδια (Ευστρατιάδης, 2008):

1. Επιλογή διεργασιών για προσομοίωση (perceptual model)
2. Διατύπωση μαθηματικών εξισώσεων (conceptual model)
3. Κωδικοποίηση υπολογιστικής διαδικασίας (procedural model)
4. Υπολογισμός παραμέτρων (model calibration)
5. Αποτίμηση συνέπειας και ακρίβειας – Επαλήθευση (model validation)

Σε αρκετές περιπτώσεις, οι απαιτήσεις των δύο πρώτων βημάτων, που συνιστούν τη μαθηματική δομή του μοντέλου, καλύπτονται από κάποιον υφιστάμενο κώδικα (βήμα 3). Ωστόσο, είναι συνηθισμένο να επιβάλλεται η εκ του μηδενός ανάπτυξη της δομής του

μοντέλου, δεδομένου ότι τα κριτήρια επιλογής διαφέρουν, ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες.

Η επιλογή του μοντέλου εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες (Ευστρατιάδης, 2008):

1. Το σκοπό της μελέτης
2. Την εμπειρία του μελετητή
3. Τα διαθέσιμα δεδομένα

Η ποσότητα αλλά και η ποιότητα των διαθέσιμων στοιχείων αποτελεί, συχνά, τον κύριο περιοριστικό παράγοντα σε μια μελέτη, καθώς η επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας, η οποία θεωρητικά εξασφαλίζεται από τη χρήση αναλυτικότερων σχημάτων προσομοίωσης, προσκρούει στην ανεπάρκεια υδρολογικών μετρήσεων και άλλων δεδομένων, που είναι απαραίτητα για την κατάστρωση και σχηματοποίηση του μοντέλου.

1.4.2 Κατηγορίες Υδρολογικών Μοντέλων

Τα υδρολογικά μοντέλα χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με:

- Το πεδίο εφαρμογής
 - Λεκάνη απορροής
 - Υδροφορέας
 - Συνδυασμένη προσομοίωση επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών
- Τη χωρική κλίμακα
 - Αδιαμέριστη ή Συγκεντρωτική
 - Ημι-κατανεμημένη
 - Ημι-αδιαμέριστη
 - Κατανεμημένη
- Τη μαθηματική δομή
 - Μοντέλα φυσικής βάσης
 - Εννοιολογικά
 - Στατιστικά-Στοχαστικά

- « Μαύρου Κουτιού»
- Χρονική Διακριτότητα
 - Μεγάλη κλίμακα
 - Μικρή κλίμακα

1.5 Αντικείμενο της εργασίας

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

1.6 Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας είναι τα προγράμματα HEC-HMS και HEC-RAS, τα οποία κατασκευάστηκαν από το μηχανικό σώμα του Αμερικανικού Στρατού. Τα προγράμματα αυτά υπάρχουν ελεύθερα στο διαδίκτυο και έτσι κάθε ενδιαφερόμενος μπορεί να τα χρησιμοποιήσει. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι εκδόσεις HEC-HMS 3.5 και HEC-RAS 4.0. Επίσης και τα δύο αυτά προγράμματα συνδέονται με το πρόγραμμα διαχείρισης συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών ArcGIS 9.3 της ESRI.

1.7 Δομή της εργασίας

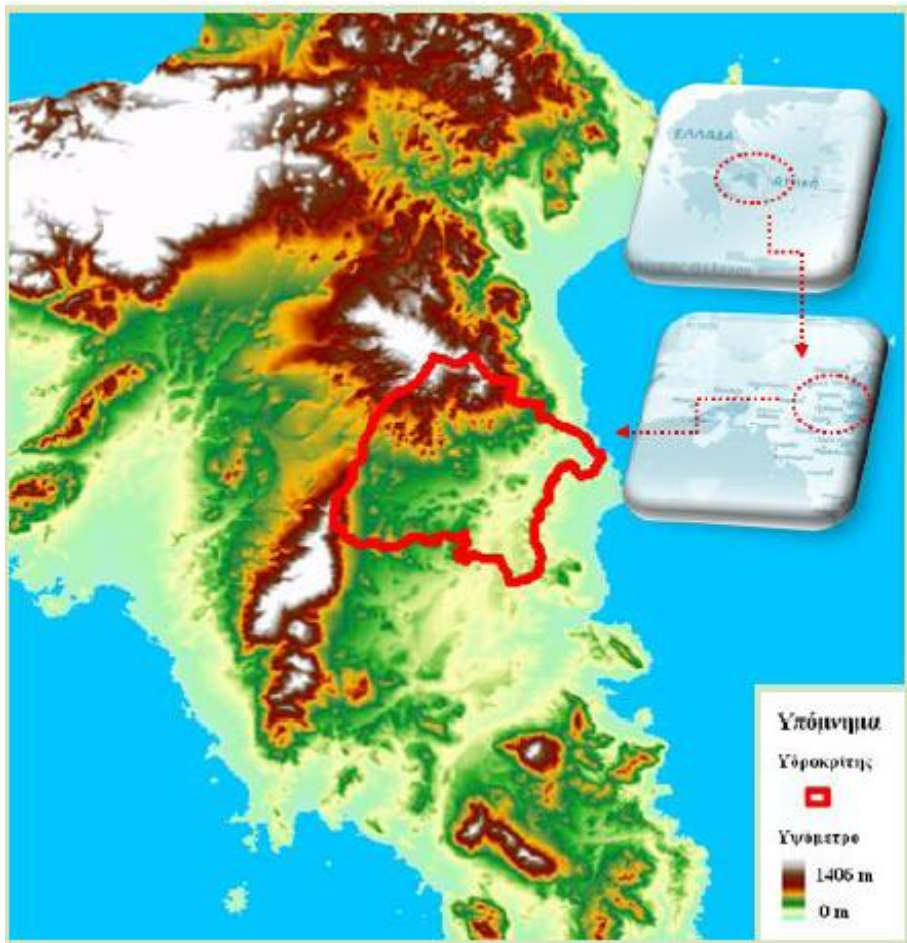
Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε στην παρούσα εργασία για τη διεξαγωγή χαρτών πλημμύρας είναι η λεκάνη απορροής της Ραφήνας με έκταση 126 km². Συνοπτικά, η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στα ακόλουθα κεφάλαια διαρθρώνεται ως εξής:

- ✓ Επεξεργασία της γεωγραφικής πληροφορίας σε δεδομένο ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης – Ανάλυση σε περιβάλλον ArcGIS 9.3 και χρήση της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS.
- ✓ Υπολογισμός υδρολογικής απόκρισης κάθε υπολεκάνης και διεξαγωγή υδρογραφημάτων σε κάθε μία – Ανάλυση σε περιβάλλον HEC-HMS 3.5.

- ✓ Βαθμονόμηση υδρολογικού μοντέλου με τη χρήση παρατηρήσεων του σταθμού Ραφήνα - Ανάλυση σε περιβάλλον HEC-HMS 3.5.
- ✓ Επιλογή τμήματος του υδρογραφικού δικτύου και υπολογισμός γεωμετρικών στοιχείων – Ανάλυση σε περιβάλλον ArcGIS 9.3 και χρήση της εργαλειοθήκης HEC-GeoRAS.
- ✓ Υδραυλική μονοδιάστατη προσομοίωση του επιλεχθέντος τμήματος του υδρογραφικού δικτύου σε συνθήκες μόνιμης και μη μόνιμης ροής – Ανάλυση σε περιβάλλον HEC-RAS 4.0.
- ✓ Χρήση των αποτελεσμάτων της υδραυλικής προσομοίωσης και δημιουργία χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης – Ανάλυση σε περιβάλλον ArcGIS 9.3 και χρήση της εργαλειοθήκης HEC-GeoRAS.

Κεφάλαιο 2

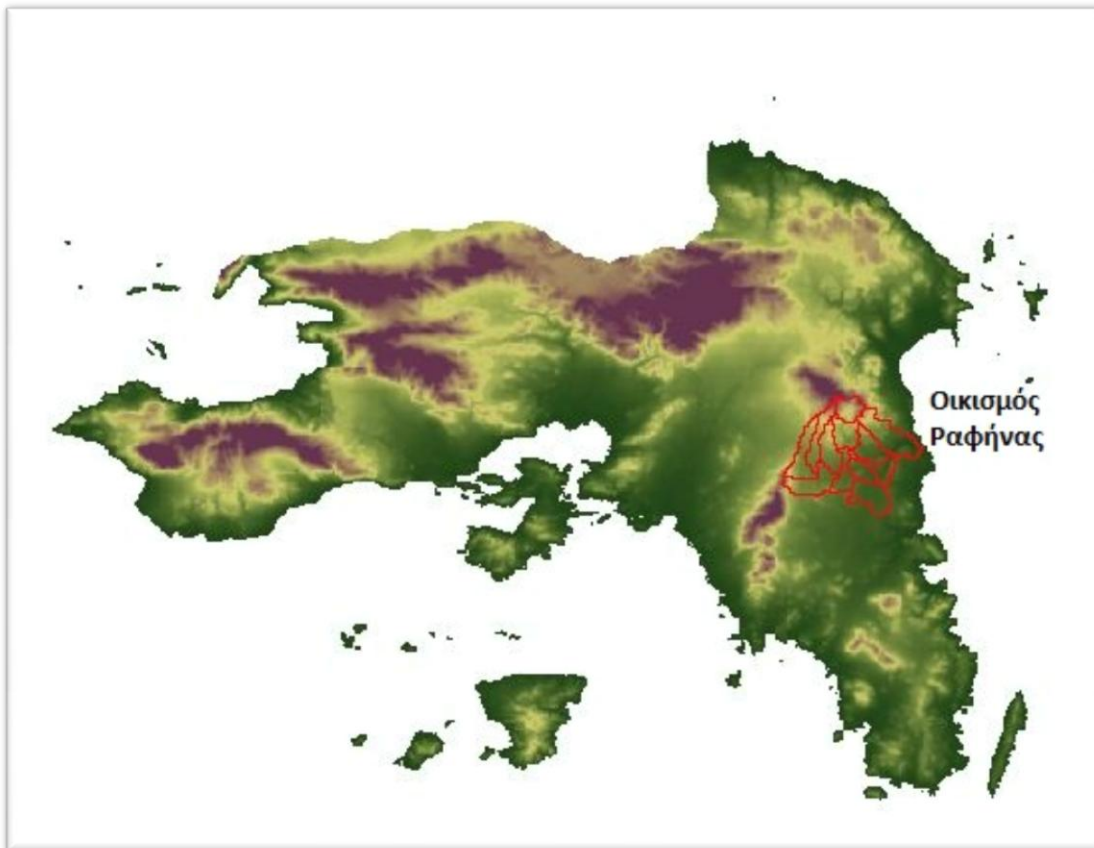
Περιοχή Μελέτης



2. Περιοχή Μελέτης

2.1 Γενικά στοιχεία

Στην παρούσα εργασία μελετάται και προσομοιώνεται η λεκάνη απορροής με έξοδο την περιοχή της Ραφήνας. Πρόκειται για μια περιοχή που παρουσιάζει μεγάλη αστική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, τόσο στον οικισμό της Ραφήνας, όσο και στους ανάντη οικισμούς εντός της υπολεκάνης, όπως το Ντράφι, το Πικέρμι και η Παλλήνη. Ειδικότερα, στον οικισμό του Πικερμίου παρατηρείται μία αύξηση 419.36% από το 1971 έως το 2007, ενώ για το Ντράφι και τη Ραφήνα έχει παρατηρηθεί αύξηση 79.27% και 38.30% αντίστοιχα (Parathanasiou et al., 2011).

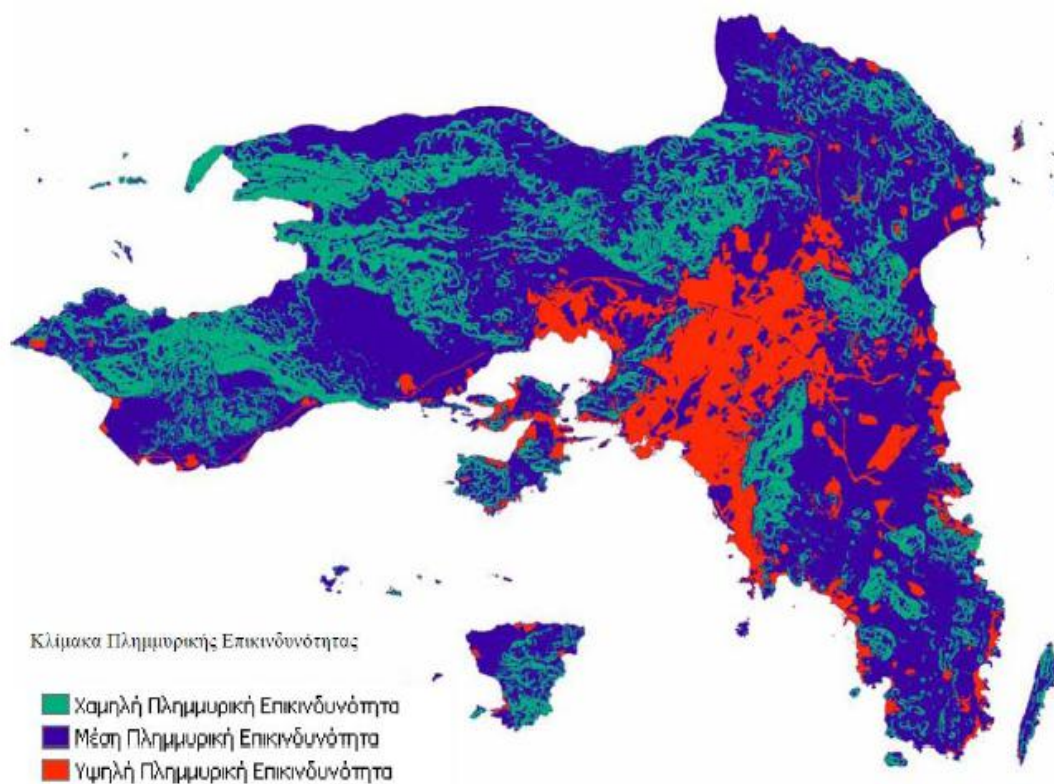


Εικόνα 2.1: Όρια περιοχής μελέτης και υπολεκανών

Η περιοχή παρουσιάζει ενδιαφέρον από άποψη πλημμυρικής διερεύνησης κυρίως λόγω του αστικού ιστού ακριβώς στην έξοδό της, στον οποίο λόγω των πλημμυρικών γεγονότων του παρελθόντος και της πίεσης για περαιτέρω οικιστική ανάπτυξη,

κατασκευάζεται ήδη επέκταση του υπάρχοντος δικτύου όμβριων υδάτων. Για το λόγο αυτό, η μελέτη της επάρκειας σχεδιασμού του δικτύου και της απόκρισής του σε πλημμυρικά γεγονότα μικρής περιόδου επαναφοράς για τα οποία έχει σχεδιαστεί, αλλά και τις απόκρισής του σε σπανιότερα πλημμυρικά γεγονότα εμφανίζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Η περιοχή χαρακτηρίζεται ως μέσης έως υψηλής επικινδυνότητας, λόγω των σχετικά ήπιων κλίσεων της, ειδικά καθώς προσεγγίζεται ο αστικός ιστός.



Εικόνα 2.2: Χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας στην Αττική (Πηγή: Κασσελά, 2011)

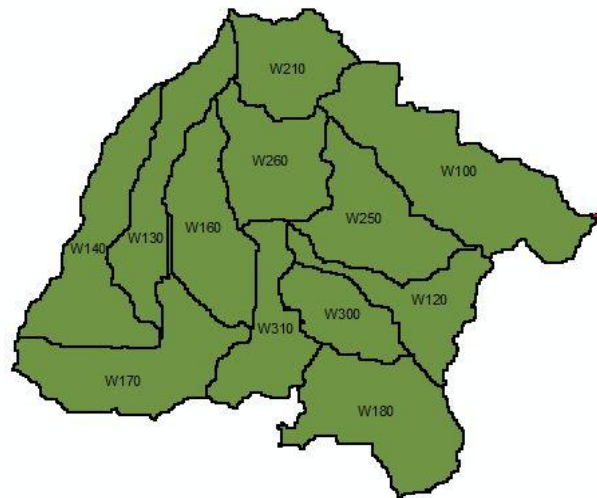
2.2 Λεκάνη Απορροής Ραφήνας

2.2.1 Χαρακτηριστικά της λεκάνης μελέτης

Η λεκάνη απορροής στην περιοχή της Ραφήνας, που μελετάται στην παρούσα εργασία έχει έκταση 126 km^2 . Η λεκάνη αυτή χωρίστηκε σε 12 υπολεκάνες για τη μελέτη της. Το εμβαδό της καθεμίας φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

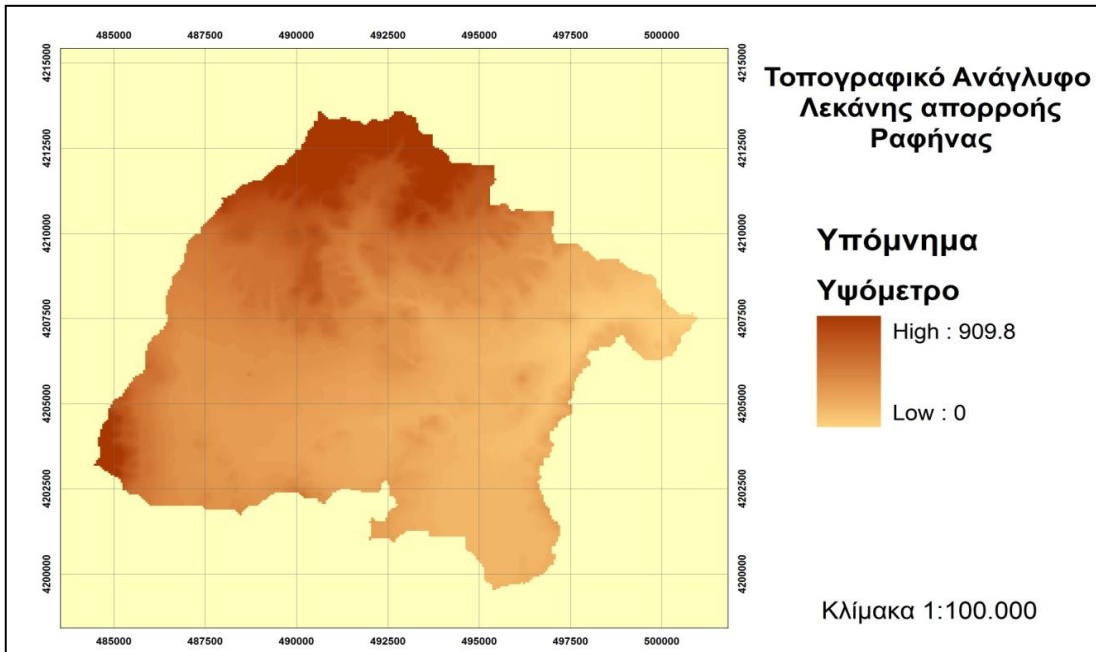
Πίνακας 2.1: Εμβαδά υπολεκανών

Υπολεκάνη	Εμβαδόν (km^2)
W100	18,4
W250	10,5
W120	7,9
W130	9,6
W140	12,4
W300	6
W160	10,2
W170	12,9
W180	12,9
W260	7,9
W310	9,4
W210	7,8

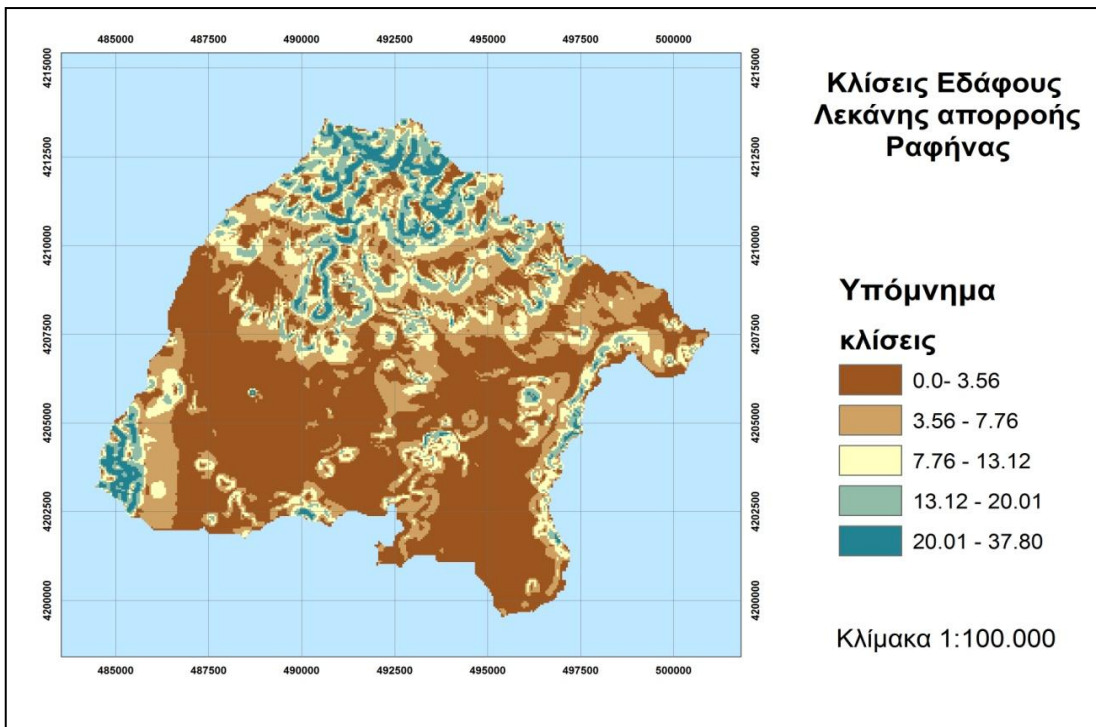


Εικόνα 2.3: Όρια υπολεκανών

Η λεκάνη απορροής του ρέματος Ραφήνα οριοθετείται στα βόρεια και βορειοανατολικά από το Πεντελικό όρος (905 m), στα δυτικά και νοτιοδυτικά από τον Υμηττό (728 m) και στα νότια από λόφους μικρού υψομέτρου, Μπούρα (300 m) και Πετροκορφή (167 m). Το μέσο υψόμετρο της περιοχής είναι περίπου 227 m, με μέγιστο υψόμετρο 909 m και ελάχιστο 0 m. (χάρτης 2.1). Επίσης, η κλίση του εδάφους κυμαίνεται από 0% - 37,8%, με μέση κλίση 7,5% (χάρτης 2.2).



Χάρτης 2.1: Τοπογραφικό ανάγλυφο λεκάνης απορροής Ραφήνας

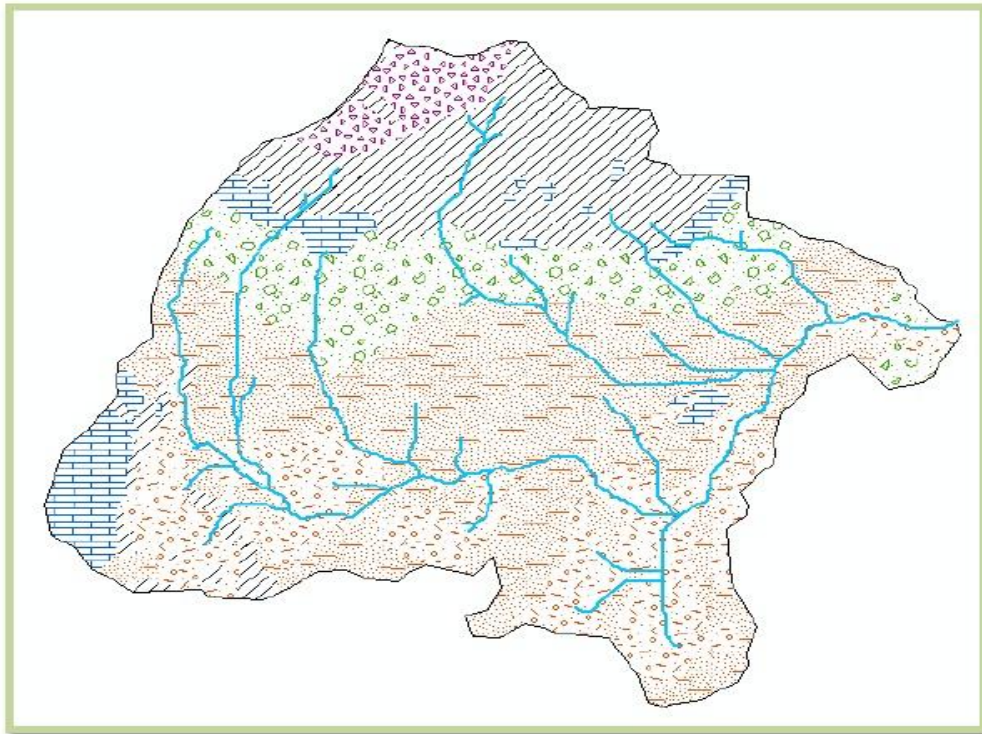


Χάρτης 2.2: Κλίσεις εδάφους λεκάνης απορροής Ραφήνας




2.2.2. Γεωλογία

Η λεκάνη απορροής της Ραφήνας δομείται από τους σχηματισμούς της αυτόχθονης ενότητας Αλμυροποτάμου – Αττικής και ένα σημαντικό τμήμα της καταλαμβάνεται από Άνω – Μειοκαινικές αποθέσεις (εικόνα 2.4). Συγκεκριμένα στο βόρειο τμήμα αναπτύσσονται οι σχιστολιθικοί σχηματισμοί της βορειοανατολικής Αττικής ηλικίας Κατωτέρου-Μέσου Τριαδικού και οι γνεύσιοι, που ανήκουν στην αυτόχθονη ενότητα Αλμυροποτάμου Αττικής καθώς και μικρές εμφανίσεις μαρμάρων της ίδιας ενότητας. Νοτιότερα στις παρυφές του Πεντελικού όρους, αναπτύσσονται Άνω-Μειοκαινικά κροκαλολατυποπαγή που αποτελούν αποθέσεις παλαιών αλλουβιακών κώνων και ριπιδίων. Δυτικά στην περιοχή του Υμηττού υπάρχει μια εμφάνιση μαρμάρων. Τέλος κατά τις θέσεις εκατέρωθεν της κύριας κοίτης του Μεγάλου Ρέματος, αναπτύσσονται ολοκαινικές αλλουβιακές αποθέσεις (Καρύμπαλης, 2005).




Επισημαίνεται ότι οι σχιστολιθικοί σχηματισμοί στην περιοχή της λεκάνης έχουν υποστεί έντονη τεκτονική καταπόνηση και ρωγμάτωση με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν αυξημένη υδατοπερατότητα. Τεκτονικά καταπονημένο και καρστικοποιημένο παρουσιάζεται και το ενδιάμεσο μάρμαρο όπου πιθανότατα τροφοδοτείται από την επιφάνεια μέσω ζωνών διάρρηξης των σχιστόλιθων (Σούλης, 2009).



Υπόμνημα

-  Ποταμοχεμάρριες αποθέσεις (Ολόκαινο)
-  Κροκαλοατυποπαγείς σχηματισμοί (Αν. Μειόκαινο)
-  Λιμναίοι σχηματισμοί - μάργες, αμιούχοι άργιλοι, πηλός, κ.α - (Αν.Μειόκαινο)

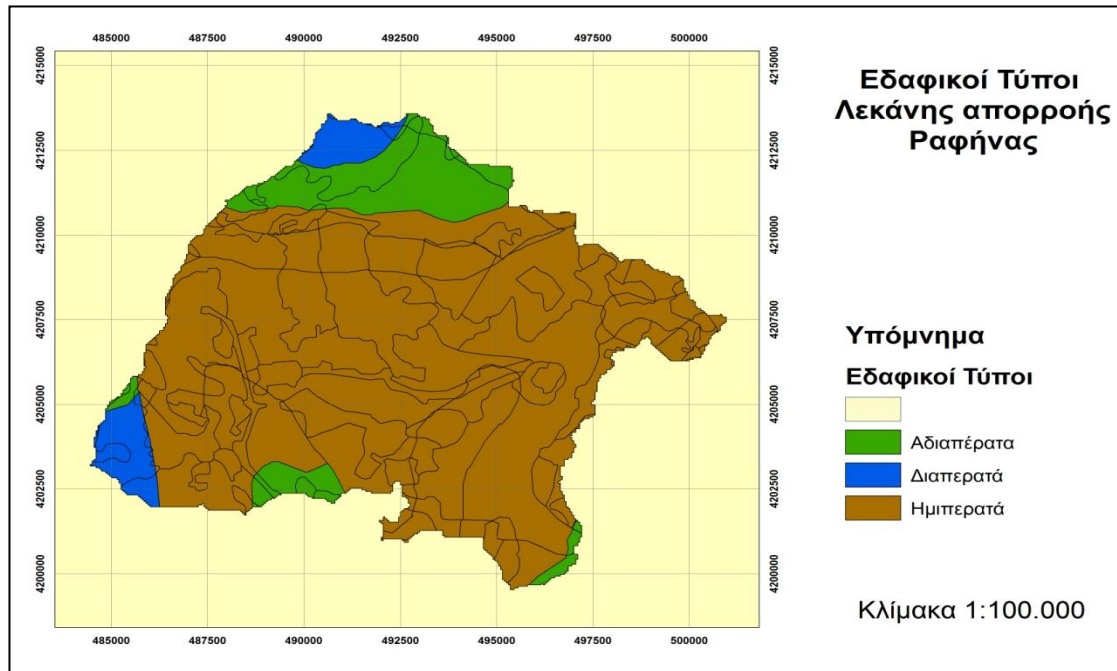
Αυτόχθονη Ενότητα Αλμυροπόταμου Αττικής

-  Μάρμαρα ΒορειοΑνατολικής Αττικής (Μεσοζωϊκό – Μ. Ηώκαινο)
-  Μοσχοβιτικοί-αμφιβολιτικοί γνεύσιοι
-  Σχιστολιθικοί σχηματισμοί ΒορειοΑνατολικής Αττικής (Κ. – Μ. Τριαδικό)

Εικόνα 2.4: Απλοποιημένος Γεωλογικός Χάρτης της περιοχής μελέτης (Αλωνιστιώτη, 2011)

Πηγή: Πρωτογενής Χάρτης (ΙΓΜΕ, Παπαδέας)

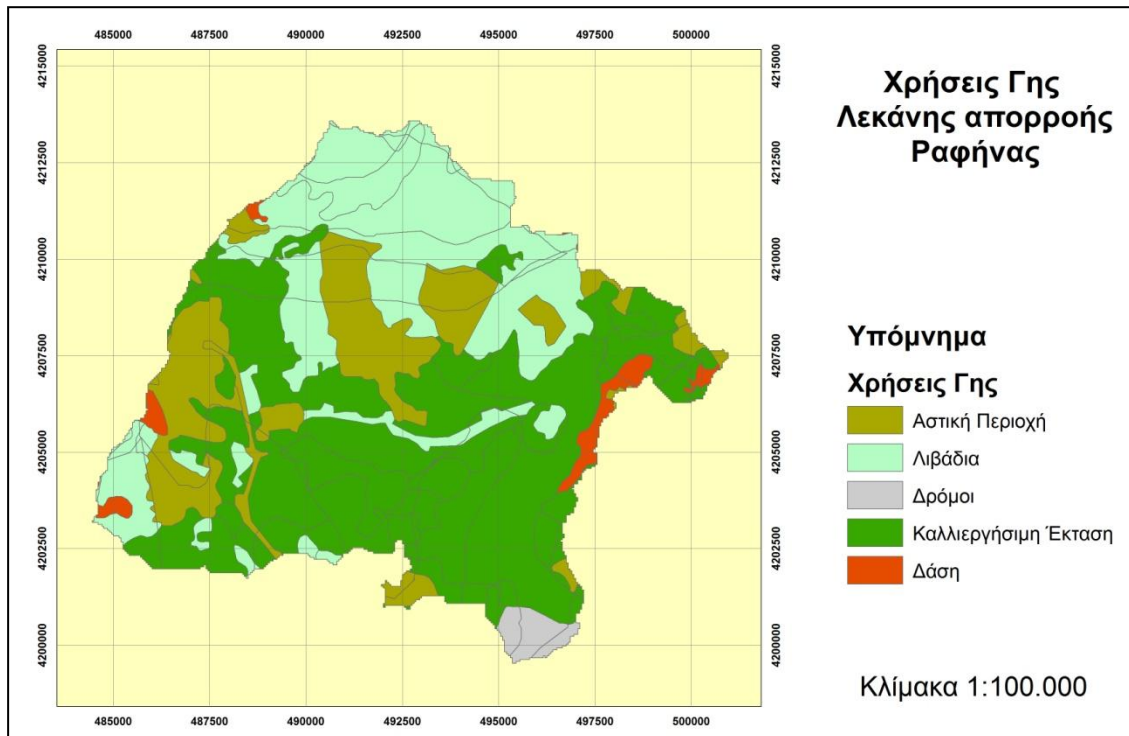
Σύμφωνα με τον παραπάνω χάρτη διαμορφώθηκαν οι τιμές της υδροπερατότητας των εδαφών στην περιοχή μελέτης.



Χάρτης 2.3: Ομάδες υδροπερατότητας εδαφών

2.2.3 Κάλυψη Γης

Το είδος της κάλυψης της λεκάνης έχει ιδιαίτερη επίδραση στην υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης. Έγινε ομαδοποίηση των χρήσεων γης σε 5 κατηγορίες: αστική περιοχή, λιβάδια, δρόμοι, καλλιεργήσιμη έκταση και λιβάδια. Σχεδόν το 50% της έκτασης καλύπτεται από την καλλιεργήσιμη έκταση (χάρτης 2.4).



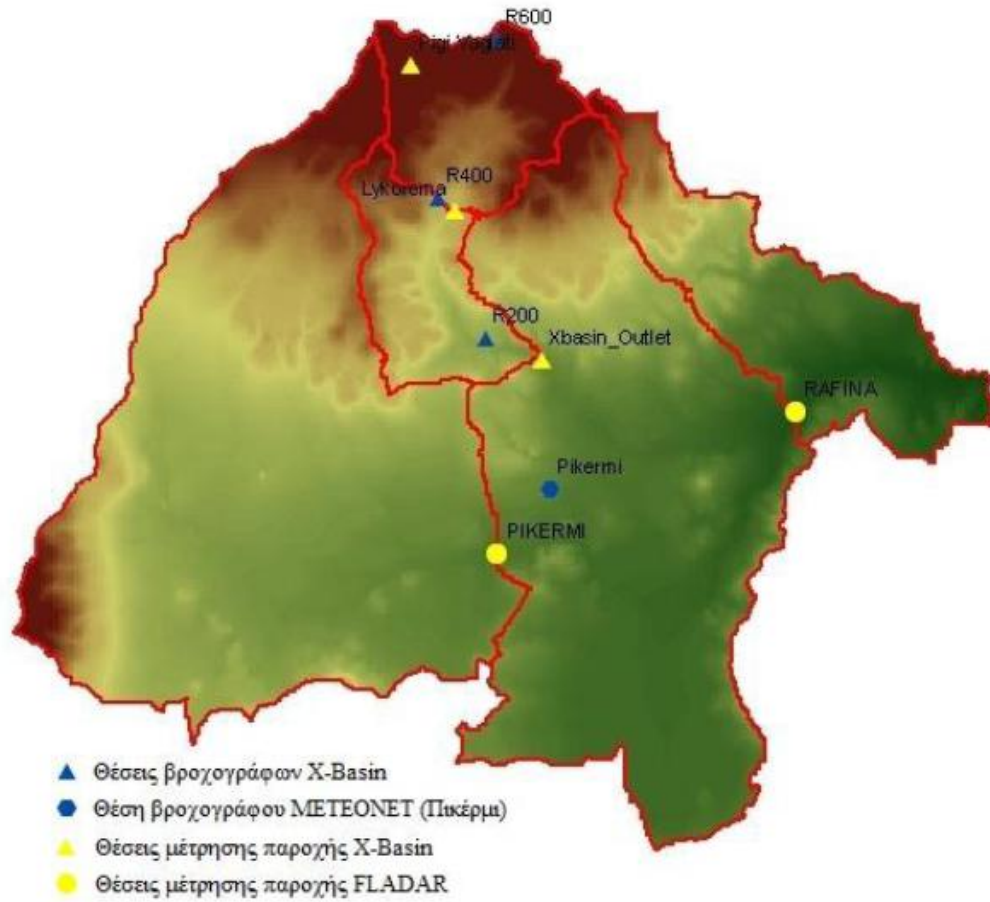
Χάρτης 2.4: Χρήσεις Γης Λεκάνης Απορροής

2.3 Εξοπλισμός Περιοχής Μελέτης

Στην περιοχή μελέτης έχει τοποθετηθεί από το Εργαστήριο Υδρολογίας και Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ ένα εκτεταμένο δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών. Οι σταθμοί αυτοί του δικτύου διαθέτουν τον κατάλληλο εξοπλισμό για τη μέτρηση όλων των μετεωρολογικών παραμέτρων.

Επίσης στα πλαίσια του προγράμματος FLADAR από το Εργαστήριο Υδρολογίας και Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ, για την πληρέστερη καταγραφή των απορροών στην περιοχή μελέτης εγκαταστάθηκαν από το 2008 δύο σταθμηγράφοι κατόπιν της πειραματικής λεκάνης στις θέσεις Πικέρμι και Ραφήνα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν χρονοσειρές απορροής από το σταθμηγράφο στη θέση Ραφήνα.

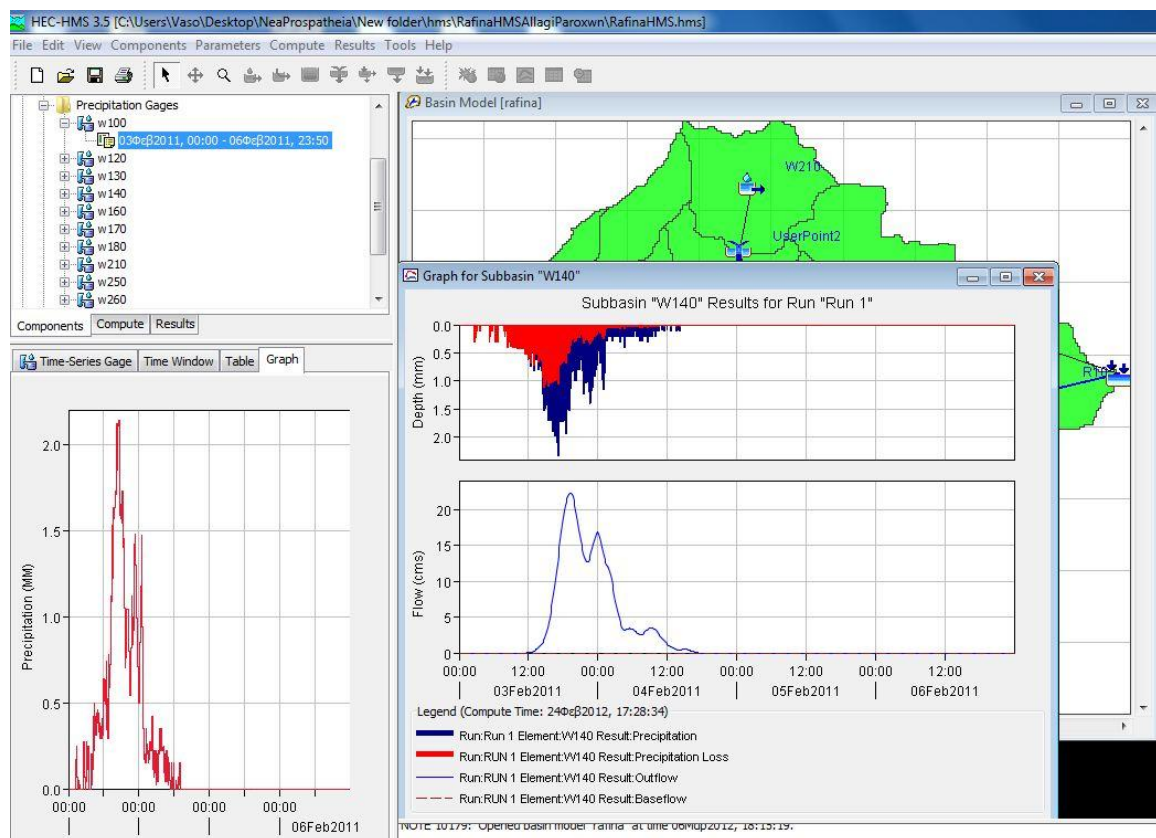
Οι θέσεις των σταθμών φαίνονται στην παρακάτω εικόνα (2.5):



Εικόνα 2.5: Θέσεις μέτρησης υδρολογικών και υδραυλικών μεγεθών

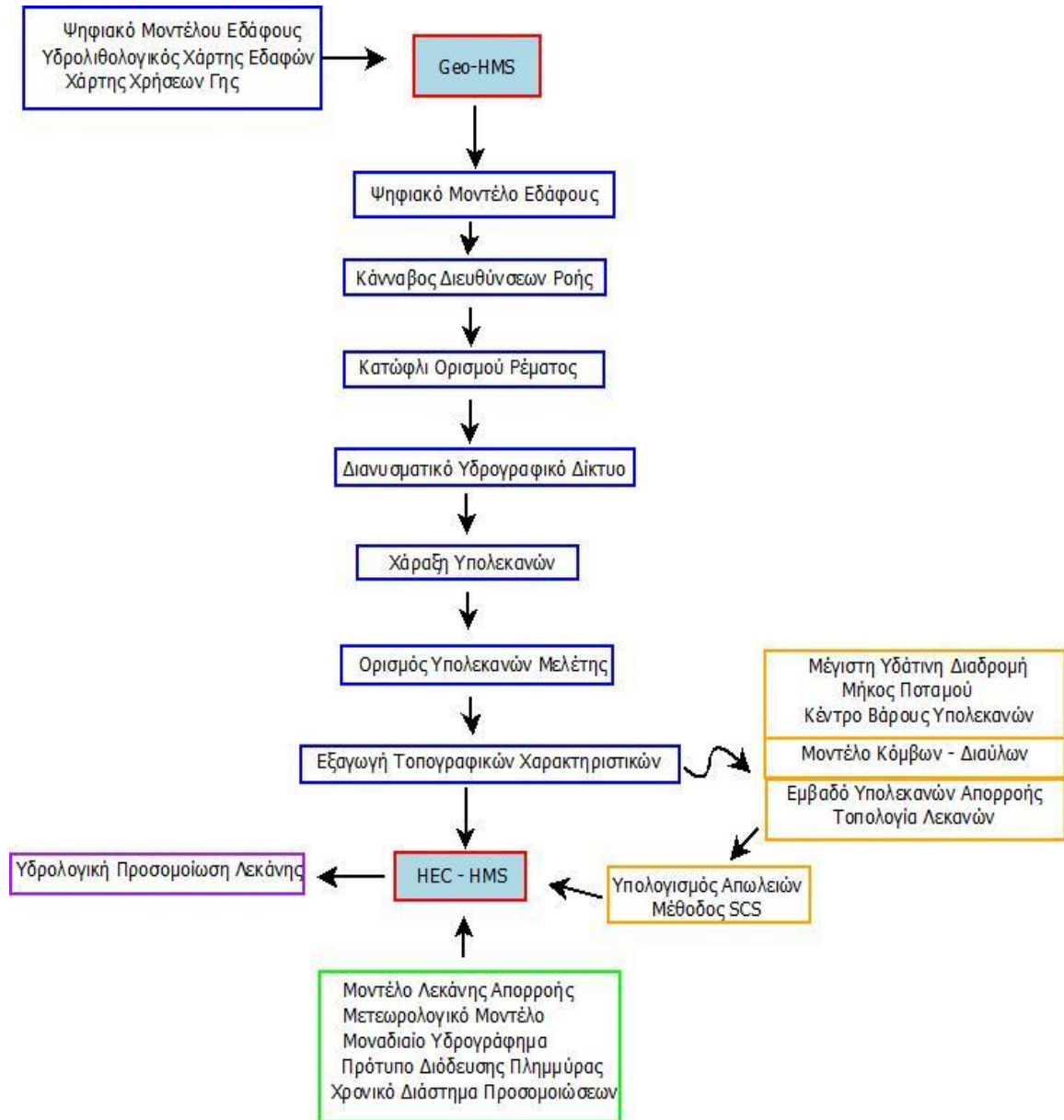
Κεφάλαιο 3

Υδρολογική Προσομοίωση της Λεκάνης Απορροής



3. Υδρολογική Προσομοίωση της λεκάνης απορροής

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής με τη χρήση του προγράμματος HEC-HMS.



Διάγραμμα 3.1: Διάγραμμα Διαδικασίας Υδρολογικής Προσομοίωσης της Λεκάνης με HEC-HMS

3.1 Γεωμορφολογική και Υδρολογική Ανάλυση της Λεκάνης

Η γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση της λεκάνης έγινε στο περιβάλλον του ArcMap και πιο συγκεκριμένα σε αυτό του GIS, με τη βοήθεια του HEC-GeoHMS.

Το HEC-GeoHMS αποτελεί μια επέκταση του ArcMap και της εργαλειοθήκης ArcHydro. Με τη βοήθεια αυτού, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να οπτικοποιεί τη χωρική πληροφορία, να καταγράφει χαρακτηριστικά της λεκάνης, να οριοθετεί τις λεκάνες και τα ρέματα και κατ' επέκταση να παράγει τα απαραίτητα αρχεία εισόδου που απαιτούνται στα διάφορα υδρολογικά μοντέλα (HEC-HMS στην παρούσα εργασία).

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

Με μια διαδικασία η οποία θα αναλυθεί στην πορεία της εργασίας, παράγονται δύο αρχεία, τα οποία είναι τα αρχεία εισόδου στο πρόγραμμα HEC-HMS. Πιο συγκεκριμένα εξάγονται:

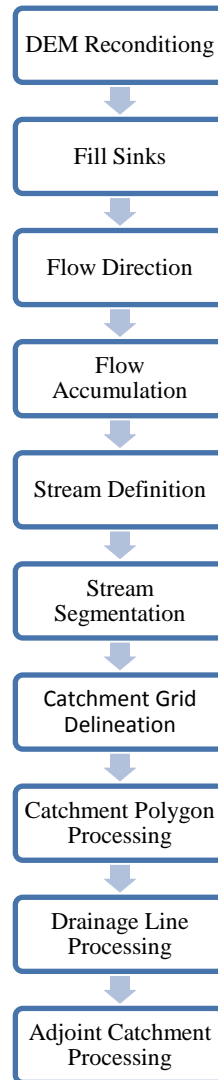
- Αρχείο χάρτη (background map) → οπτικοποίηση των υπολεκανών απορροής και των υδατορευμάτων στην περιοχή μελέτης.
- Αρχείο του μοντέλου της λεκάνης απορροής (basin model) → υδρολογικά και γεωμορφολογικά στοιχεία λεκάνης.

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.

3.1.1 Προεπεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους- Terrain Preprocessing

Στο στάδιο αυτό, μέσω των επιλογών του Terrain Preprocessing γίνεται η επεξεργασία των υδρολογικών και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών του μοντέλου εδάφους. Για την έναρξη της διαδικασίας αυτής χρειάζεται ένα πρωτογενές ψηφιακό μοντέλο εδάφους.

Παρακάτω παρατίθενται τα βήματα της διαδικασίας:



Διάγραμμα 3.2: Βήματα προεπεξεργασίας Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους

Πηγή: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/>

Αναλυτικότερα οι εντολές:

Εντολή DEM Reconditioning

Ανακατατάσσει τα κελιά του καννάβου του ψηφιακού μοντέλου εδάφους κατά μήκος των ρεμάτων, για να διορθώσει τυχόν λανθασμένα υψόμετρα που προκύπτουν κατά την υψομετρική αποτύπωση.

Εντολή Fill Sinks

Διορθώνει τα βυθίσματα (ένα ή περισσότερα φατνία γύρω από το οποίο όλα τα φατνία έχουν υψηλότερο υψόμετρο) που προκύπτουν κατά τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

Εντολή Flow Direction

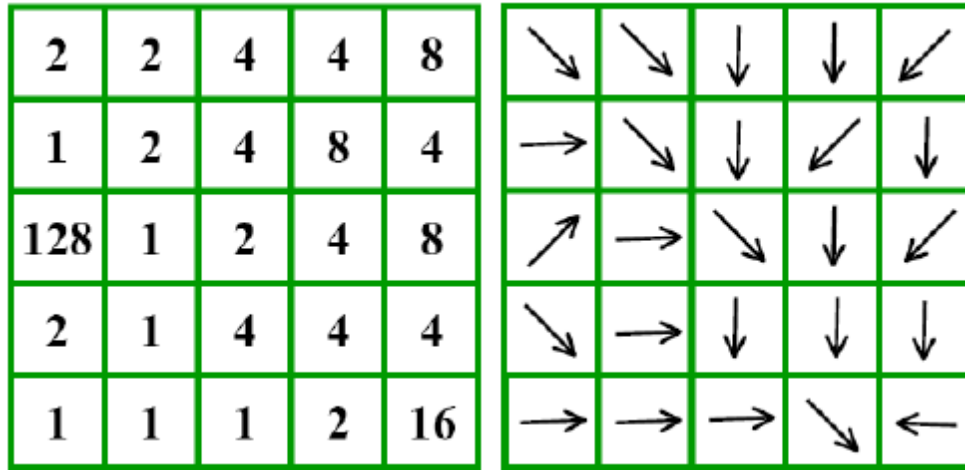
Δημιουργείται κάνναβος διεύθυνσης απορροής. Η βασική αρχή του καννάβου είναι ότι η απορροή υπάρχει από κάθε εικονοστοιχείο του ψηφιακού μοντέλου εδάφους προς ένα μόνο από τα 8 γειτονικά εικονοστοιχεία με βάση τη μεγαλύτερη κλίση. Ανάλογα με τη διεύθυνση απορροής το εικονοστοιχείο παίρνει μια τιμή όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.

1=ανατολικά 16=δυτικά 64=βόρεια 4=νότια



Εικόνα 3.1: Τιμή κεντρικού εικονοστοιχείου ανάλογα με τον κάνναβο διεύθυνσης απορροής(Στάμου-Σκοπελίτη, 2009)

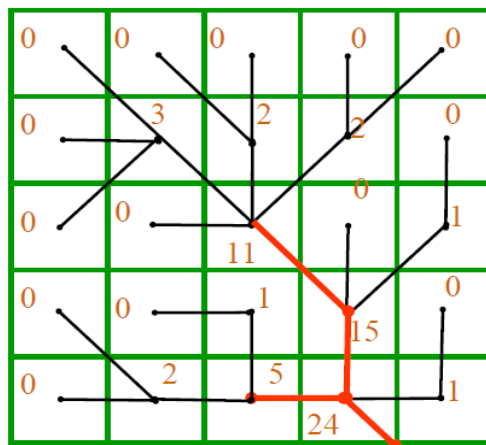
Τελικά, ο εξαγόμενος κάρναβος διευθύνσεων απορροής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3.2: Κάρναβος διευθύνσεων απορροής (Στάμου-Σκοπελίτη, 2009).

Εντολή Flow Accumulation

Προκύπτει ο κάρναβος συγκεντρωτικής ροής. Η συγκεντρωτική ροή για κάθε φατνίο του κάρναβου, ισούται με το άθροισμα των φατνίων που απορρέουν σε αυτό από τα γειτονικά φατνία.



Εικόνα 3.3: Κάρναβος συγκεντρωτικής ροής (Στάμου-Σκοπελίτη, 2009)

Εντολή Stream Definition

Η εντολή αυτή έχει ως εξαγόμενο προϊόν το δίκτυο ροής. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγει τα κελιά που έχουν συγκεντρωτική ροή μεγαλύτερη από μια ελάχιστη τιμή, που ο ίδιος ο χρήστης έχει θέσει.

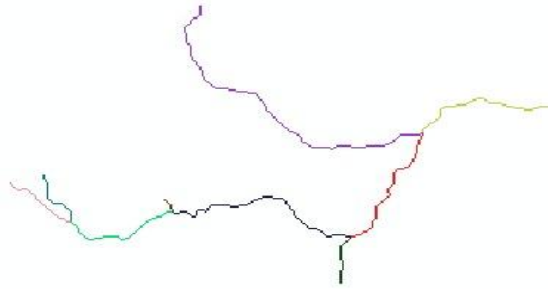


Εικόνα 3.4: Αποτέλεσμα της εντολής *Stream Definition*

Εντολή Stream Segmentation

Διαιρεί το υδατόρευμα σε μικρότερα κομμάτια, ανάλογα με την κατηγοριοποίηση του υδρογραφικού δικτύου (Μέθοδοι Strahler και Shreve).

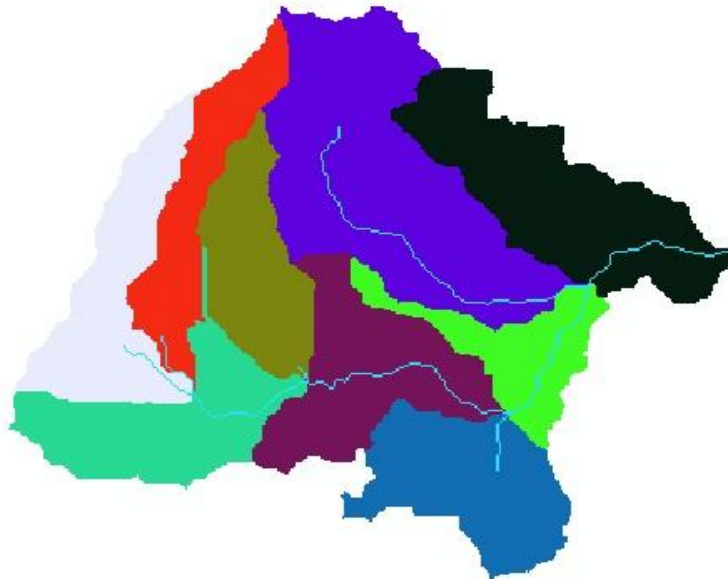
Μετά την εντολή αυτή, προκύπτει το παρακάτω υδρογραφικό δίκτυο.



Εικόνα 3.5: Αποτέλεσμα της εντολής *Stream Segmentation*

Εντολή Catchment Grid Delineation

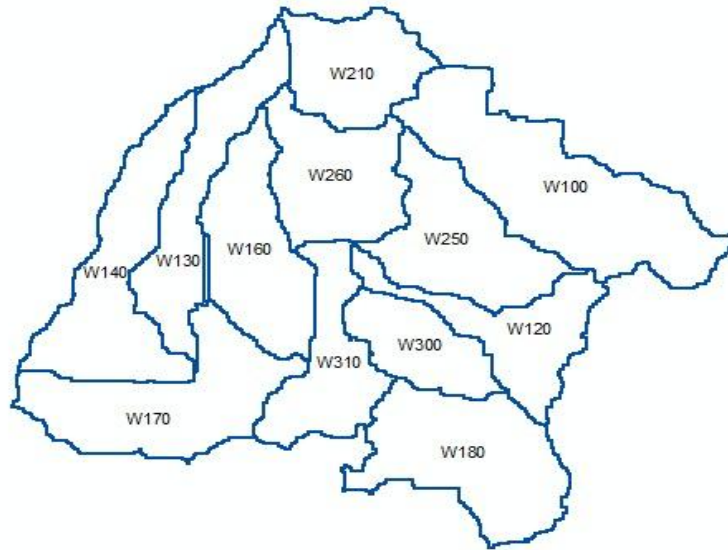
Στο βήμα αυτό δημιουργούνται οι υπολεκάνες για κάθε τμήμα του υδατορεύματος.



Εικόνα 3.6: Αποτέλεσμα της εντολής *Catchment Grid Delineation*

Εντολή Catchment Polygon Processing

Μετατρέπει τις υπολεκάνες από μορφή grid σε διανυσματική μορφή.



Εικόνα 3.7: Αποτέλεσμα της εντολής *Catchment Polygon Processing*

Εντολή Drainage Line Processing

Μετατρέπει το υδρογραφικό δίκτυο από μορφή grid σε διανυσματική μορφή.

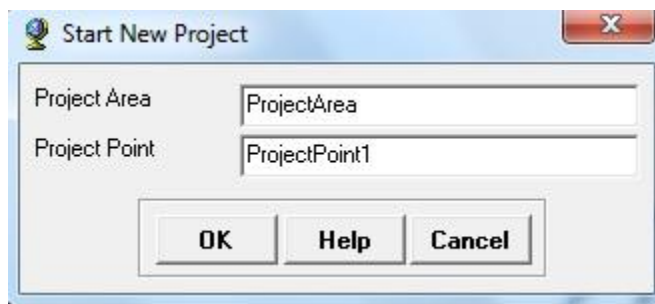
Εντολή Adjoint Catchment Processing

Ενώνει τις ανάντη υπολεκάνες σε κάθε συμβολή του ποταμού.

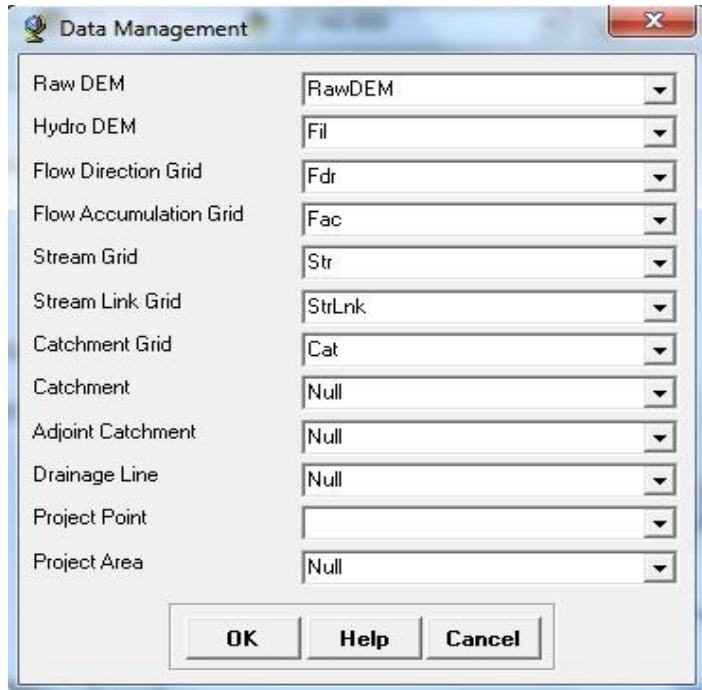
3.1.2. Επεξεργασία λεκάνης και δημιουργία αρχείων εισόδου στο HEC-HMS

Για τη δημιουργία των αρχείων εισόδου, γίνεται χρήση του μενού HMS Project Setup, της εργαλειοθήκης του Geo-HMS.


Η διαδικασία ξεκινάει με τη εντολή <<start new project>>

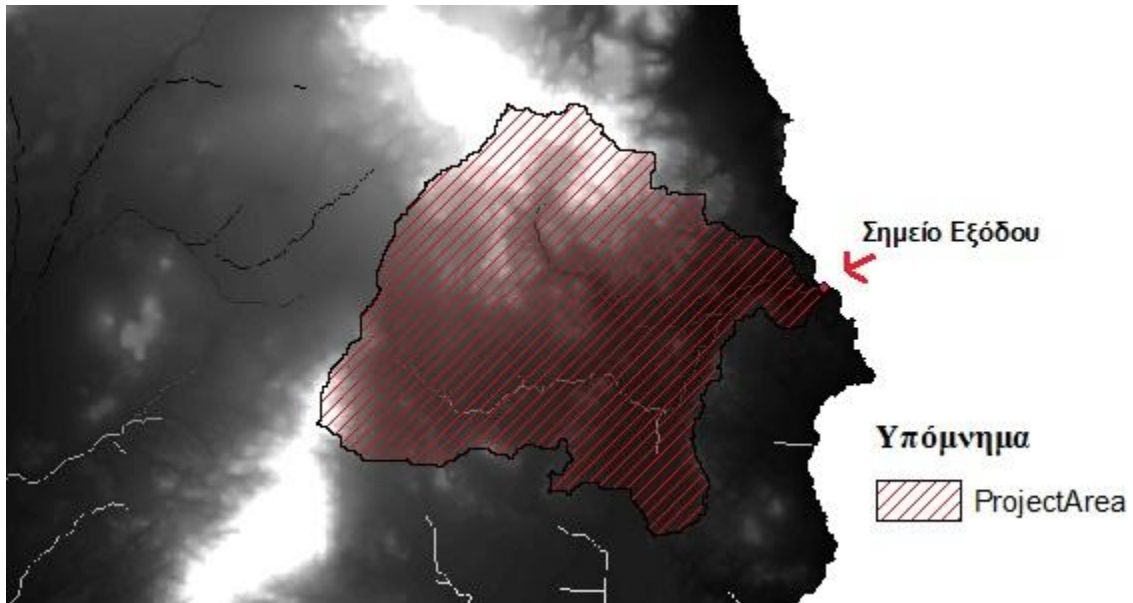


Στη συνέχεια, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (3.8), ορίζουμε τις μήτρες δεδομένων για το ψηφιακό μοντέλο εδάφους.



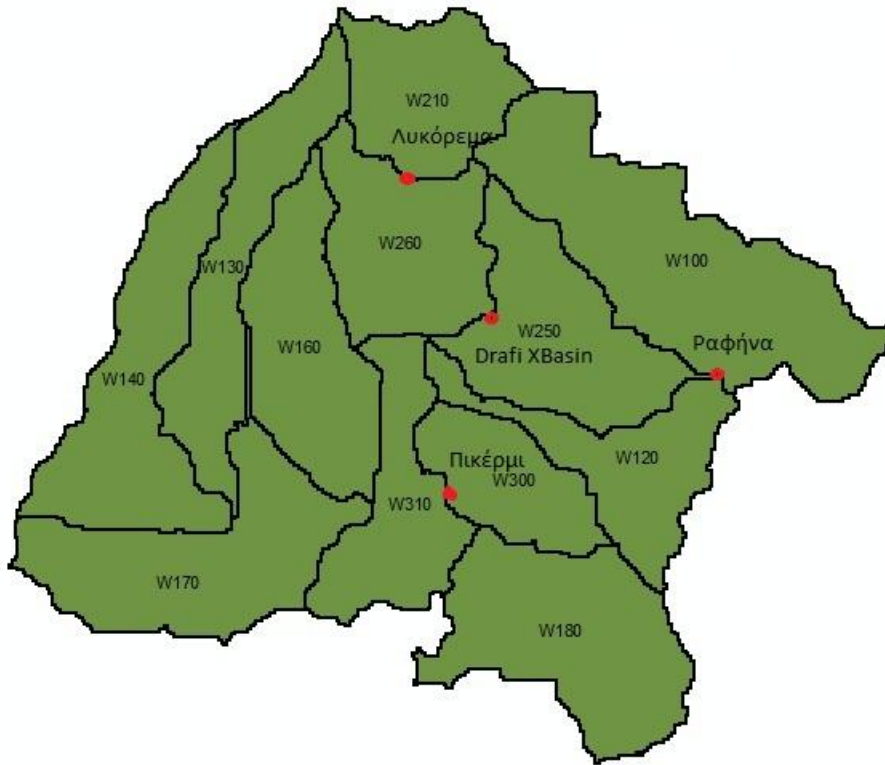
Εικόνα 3.8: Μήτρες δεδομένων για το ψηφιακό μοντέλο εδάφους.

Επόμενο βήμα είναι ο ορισμός του σημείου εξόδου, πατώντας το εργαλείο . Έπειτα, μέσω της εντολής Generate Project προκύπτει η περιοχή μελέτης που φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (εικόνα 3.9).



Εικόνα 3.9: Περιοχή Μελέτης

Έπειτα, πραγματοποιήθηκε η δημιουργία υπολεκάνων στα σημεία όπου υπάρχουν σταθμοί μέτρησης απορροών. Η ενέργεια αυτή έγινε με τη χρήση του εργαλείου της εργαλειοθήκης του Geo-HMS. Με τον τρόπο αυτό, έχοντας μετρήσεις σε κάποιες εξόδους λεκανών, μπορεί να γίνει έλεγχος των αποτελεσμάτων που θα εξαχθούν από το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS. Τελικά, το σχήμα της περιοχής με τον ακριβή αριθμό των υπολεκάνων, φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (3.10):



Εικόνα 3.10: Λεκάνη μελέτης και οι μετεωρολογικοί, *fladar* σταθμοί

Εξαγωγή τοπογραφικών χαρακτηριστικών «Basin Characteristics»

Από το μενού εντολών «Basin Characteristics» της εργαλειοθήκης Geo-HMS, γίνεται ο υπολογισμός διάφορων τοπογραφικών χαρακτηριστικών του υδρογραφικού δικτύου και της λεκάνης. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται το μήκος και η μέση κλίση του ποταμού, το μέγιστο μήκος της υδάτινης διαδρομής μιας λεκάνης μέχρι την έξοδό της, το κέντρο βάρους κάθε υπολεκάνης απορροής καθώς και το μέγιστο μήκος της υδάτινης διαδρομής από το κέντρο βάρους της υπολεκάνης μέχρι την έξοδό της. Στον παρακάτω πίνακα (3.1) παρατίθενται οι τιμές ορισμένων χαρακτηριστικών.

Πίνακας 3.1: Τοπογραφικά χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής

Μέγεθος	Τιμή
Εμβαδό λεκάνης απορροής	126,32 km ²
Μήκος ποταμού	33,06 km
Μέγιστο μήκος υδάτινης διαδρομής στη λεκάνη απορροής	33,68 km
Μέγιστο μήκος υδάτινης διαδρομής (κέντρο βάρους-έξοδος λεκάνης)	20,37 km

3.1.3. Τελική διαδικασία για τη δημιουργία αρχείων εισόδου HMS

Στη φάση αυτή, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τα πρότυπα για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης μέσω του μενού Hydrologic Parameters >> Select HMS Processes. Βέβαια, υπάρχει η δυνατότητα τα πρότυπα αυτά να αλλάξουν κατά την επεξεργασία στο πρόγραμμα HEC-HMS ή και να εισαχθούν κατευθείαν εκεί, όπως έγινε και στην παρούσα εργασία.

Τέλος, για τη δημιουργία των αρχείων εισόδου ακολουθούνται τα επόμενα βήματα:

Μενού HMS

- Map to HMS units: Μετατροπή των δεδομένων σε μονάδες συμβατές στο HMS
- Check Data: Έλεγχος ορθότητας δεδομένων
- HMS Schematic: Αποτύπωση απλού υδρολογικού δικτύου και τη συνδεσιμότητα των κόμβων και των διαύλων
- HMS Legend: Αποτύπωση κόμβων και διαύλων με εικονίδια
- Add Coordinates: Προσθήκη συντεταγμένων στους κόμβους και τους διαύλους
- Prepare Data For Model Export: Συγκρότηση του μοντέλου λεκάνης
- Background Shape File – Basin File: Εξαγωγή χάρτη συμβατό στο περιβάλλον HMS
- Create HEC-HMS Project: Δημιουργία τελικού αρχείου δεδομένων εισόδου στο HMS

3.2 Πρόγραμμα HEC-HMS

3.2.1 Γενικές Κατευθύνσεις

Από την εμπειρία που αποκτήθηκε μέσω αυτής της εργασίας, φαίνεται ότι τα εγχειρίδια χρήσης είναι καλά γραμμένα, χωρίς όμως να περιλαμβάνουν λεπτομέρειες οι οποίες μπορούν να καθυστερήσουν αρκετά την πορεία της προσομοίωσης. Επίσης, ο πιθανός χρήστης θα πρέπει να γνωρίζει πως τυχόν λάθη που κωδικοποιημένα δίνει το πρόγραμμα δεν μπορούν να αναζητηθούν ή να προσδιοριστούν με μεγάλη ακρίβεια. Για παράδειγμα, οι αναφορές των λαθών στο ειδικό παράθυρο που διαθέτει το πρόγραμμα δεν είναι τόσο αναλυτικές, με αποτέλεσμα ο χρήστης να μην ξέρει πώς να ερμηνεύσει και να αντιμετωπίσει τα λάθη που εμφανίζονται. Διαδικτυακοί τόποι ορισμένες φορές κρίνονται βοηθητικοί.

Ένα άλλο πρόβλημα που εμφανίστηκε, ήταν στην εισαγωγή των χρονοσειρών. Πιο συγκεκριμένα υπήρχε πρόβλημα συμβατότητας τελείας και κόμματος ως διαχωριστικό για τα δεκαδικά. Το πρόβλημα αυτό, παρά τις προσπάθειες επίλυσής του μέσω των ρυθμίσεων του προγράμματος (program settings) παρέμεινε. Η λύση δόθηκε κάνοντας αντικατάσταση της τελείας με κόμμα στο λογισμικό φύλλο του excel και στη συνέχεια με «copy – paste» των τιμών, έγινε η εισαγωγή των χρονοσειρών στο περιβάλλον του προγράμματος.

Ένα τελευταίο πρόβλημα και ίσως ιδιαίτερα σημαντικό, είναι η μη συμβατότητα του συστήματος με κάποια λειτουργικά συστήματα. Ειδικότερα, δουλεύοντας σε λειτουργικό σύστημα «Vista», τα αποτελέσματα που προέκυπταν από την προσομοίωση ήταν αρνητικά. Μετά από λεπτομερή έλεγχο όλων των δεδομένων που εισήχθησαν, δε βρέθηκε κάποιο λάθος. Επόμενο βήμα, ήταν η εγκατάσταση του λογισμικού σε άλλο υπολογιστή που είχε λειτουργικό σύστημα «Windows XP» και πραγματοποιήθηκε τρέξιμο του ίδιου «project». Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν ικανοποιητικά, χωρίς αρνητικές τιμές. Συμπέρασμα όλων αυτών, είναι η μη συμβατότητα του HEC-HMS με το λειτουργικό σύστημα «Vista». Τελικά, για την προσομοίωση των υπόλοιπων επεισοδίων βροχής, πραγματοποιήθηκε φορμάτ στον υπολογιστή εκτέλεσης του

προγράμματος με σκοπό να γίνει εγκατάσταση του λειτουργικού συστήματος «Windows 7» και τα αποτελέσματα που διεξάχθηκαν, ήταν ομαλά.

3.2.2 Υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS

Το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS είναι ένα εννοιολογικό μοντέλο, το οποίο σχεδιάστηκε από το σώμα μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού. Είναι σχεδιασμένο για την προσομοίωση των διαδικασιών βροχής – απορροής σε λεκάνες απορροής δενδριτικού τύπου και εφαρμόζεται τόσο σε μεγάλες αγροτικές λεκάνες όσο και σε μικρές αστικές ή ημιαστικές.

Τα υδρογραφήματα που παράγονται από τη χρήση του μοντέλου αυτού χρησιμοποιούνται σε μελέτες διαθεσιμότητας νερού, πρόγνωσης πλημμυρών, διευθέτησης περιοχής κατάκλυσης πλημμύρας, σχεδιασμού υπερχειλιστών κ.α. (William, 2010).

Το HEC-HMS χωρίζει τον υδρολογικό κύκλο σε επιμέρους συνιστώσες και κάθε μία από αυτές αναπαρίσταται από ένα μαθηματικό μοντέλο. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να έχει αρκετές επιλογές για την προσομοίωση της κάθε συνιστώσας. Η υιοθέτηση της πιο κατάλληλης, είναι απόρροια της γνώσης του φυσικού συστήματος των στόχων της υδρολογικής μελέτης, καθώς και της κρίσης και της εμπειρίας του μελετητή (Παναγόπουλος, 2011).

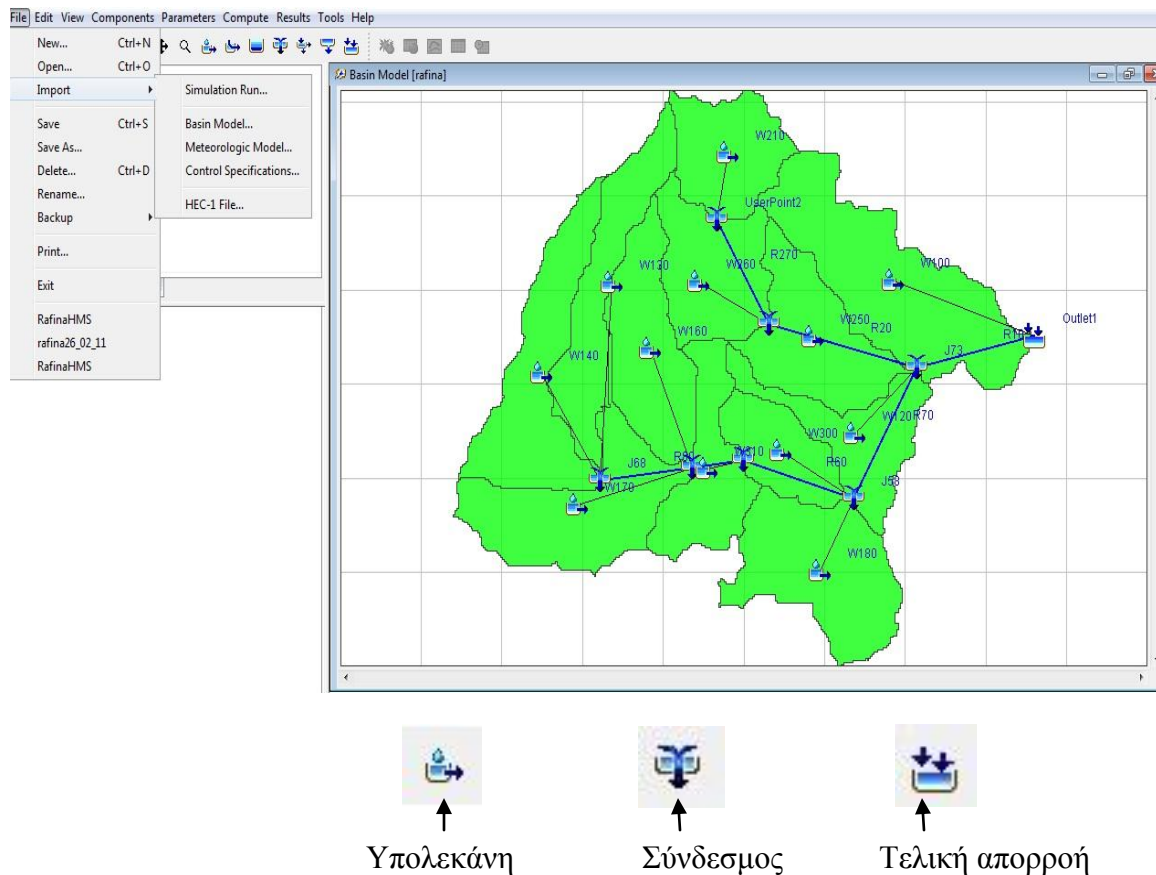
Τα μαθηματικά πρότυπα που διατίθενται στο HEC-HMS κατ' αντιστοιχία με τις διαδικασίες που περιγράφει χωρίζονται σε:

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

3.2.3 Περιβάλλον HEC-HMS

3.2.3.1 Μοντέλο λεκάνης απορροής

Στο στάδιο αυτό, γίνεται αρχικά η εισαγωγή του μοντέλου της λεκάνης απορροής (basin model) που είχε ετοιμαστεί στο περιβάλλον του GIS με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης Geo-HMS. Αναλυτικότερα HEC-HMS>>File>> Import Basin Model.



Εικόνα 3.11: Σχηματικά η παραπάνω διαδικασία (μοντέλο λεκάνης απορροής)

Επόμενη ενέργεια, είναι να επιλεγθούν τα κατάλληλα πρότυπα υπολογισμού απωλειών βροχής, άμεσης απορροής και διόδευσης πλημμύρας. Πρέπει να σημειωθεί, ότι πρότυπο βασικής ροής δεν επιλέχθηκε, καθώς δεν υπήρχαν επαρκή στοιχεία, με αποτέλεσμα να μην είναι αξιόπιστη η εισαγωγή του στο υδρολογικό μοντέλο.

3.2.3.2 Πρότυπο υπολογισμού απωλειών βροχής

Εκτίμηση υδρολογικών ελλειμμάτων με τη μέθοδο της Soil Conservation Service (SCS)

Η κατακράτηση του νερού και η διήθησή του στο έδαφος είναι δύο διαφορετικοί μηχανισμοί γένεσης υδρολογικών ελλειμμάτων που μπορούν να εκτιμηθούν χωριστά. Μολαταύτα, η εκτίμηση των ελλειμμάτων στις υδρολογικές μελέτες, γίνεται συνήθως συνολικά.

Η Υπηρεσία Διατήρησης Εδαφών (Soil Conservation Service) του Υπουργείου Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής ανέπτυξε το 1972 την αναφερόμενη ως, μέθοδο SCS για τη συνολική εκτίμηση των υδρολογικών απωλειών χρησιμοποιώντας, στην τελική της μορφή, μία μόνο παράμετρο. Η παράμετρος αυτή σχετίζεται με τον τύπο του εδάφους, τις χρήσεις γης και τις υπάρχουσες συνθήκες εδαφικής υγρασίας και μπορεί να εκτιμηθεί είτε με χρήση δεδομένων βροχόπτωσης και απορροής, είτε μέσω πινάκων που έχουν καταρτιστεί για το σκοπό αυτό.

Δόμηση και μαθηματικές εξισώσεις του μοντέλου

Η μέθοδος SCS στηρίζεται στις εξής παραδοχές:

- Σε ένα αρχικό χρονικό διάστημα t_0 , όλη η πραγματική βροχόπτωση ύψους h_0 , μετατρέπεται εξ' ολοκλήρου σε έλλειμμα, χωρίς να δίνει καθόλου ενεργή βροχόπτωση. Μετά το χρονικό διάστημα t_0 το μέγιστο ενεργό ύψος βροχόπτωσης h_e δεν μπορεί να υπερβεί το δυνητικό μέγεθος ($y = h - h_0$), όπου h το ολικό ακαθάριστο ύψος βροχής.
- Το επιπλέον, πέρα του αρχικού h_0 , ελλειμματικό ύψος που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μία βροχόπτωση με μεγάλο ολικό ύψος h , δεν μπορεί να ξεπεράσει μια μέγιστη τιμή S , γνωστή ως δυνητικά μέγιστη κατακράτηση.

Τελικά, η μέθοδος υπολογίζει το ενεργό ύψος βροχής με την ακόλουθη σχέση, στην περίπτωση που υπάρχουν μετρήσεις απορροής (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2003):

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq 0.2S \\ \frac{(h-0.2S)^2}{h+0.8S} & h > 0.2S \end{cases} \quad (3.1)$$

Σε περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμα τα παραπάνω, δηλαδή δεν υπάρχουν δεδομένα για την απορροή, ακολουθείται μια εμπειρική μεθοδολογία εκτίμησης τη S . Συγκεκριμένα, η παράμετρος S συνδέεται με μια άλλη χαρακτηριστική παράμετρο τη CN , οποία είναι γνωστή ως αριθμός καμπύλης απορροής. Οι δύο αυτές παράμετροι συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$S \text{ (mm)} = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (3.2)$$

Η παράμετρος CN παίρνει τιμές από 0 έως 100 και επηρεάζεται από τις συνθήκες εδάφους και χρήσεις γης της λεκάνης απορροής, καθώς και τις προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας.

Η μέθοδος SCS κατατάσσει τα εδάφη ανάλογα με τη διαπερατότητά τους στις ακόλουθες ομάδες (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

Ομάδα Α	Εδάφη με μεγάλους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδη και χαλικώδη με πολύ μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου.
Ομάδα Β	Εδάφη με μέσους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδης πηλός.
Ομάδα C	Εδάφη με μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη από αργυροπηλό, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό, εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου.
Ομάδα D	Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη που διογκώνονται σημαντικά όταν διαβραχούν, πλαστικές άργιλοι.

Επίσης, ορίζει τρεις τύπους προηγούμενων συνθηκών υγρασίας. Παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999; Μιμίκου και Μπαλλάς, 2003).

Τύπος Ι	Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά αλλά πάνω από το σημείο μαρασμού*). Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχή των προηγούμενων 5 ημερών είναι μικρότερη από 13 mm (ή 35 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
Τύπος ΙΙ	Μέσες συνθήκες. Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχή των προηγούμενων 5 ημερών είναι μεταξύ 13 mm και 38 mm (ή 53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
Τύπος ΙΙΙ	Υγρές συνθήκες (εδάφη σχεδόν κορεσμένα). Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχή των προηγούμενων 5 ημερών είναι μεγαλύτερη από 38 mm (ή μεγαλύτερη από 53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

*Το σημείο μαρασμού ορίζεται εκείνη η εδαφική υγρασία που δεν επιτρέπει στα φυτά να απορροφήσουν νερό από το έδαφος.

Για συνθήκες υγρασίας τύπου ΙΙ, η SCS δίνει πίνακα με τις τιμές του CN για κάθε ομάδα εδαφών και για διάφορες χρήσεις γης.

Πίνακας 3.2: Τυπικές τιμές του CN για προηγηθείσες συνθήκες υγρασίας τύπου ΙΙ. (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999; Μιμίκου και Μπαλτάς, 2003)

Περιγραφή χρήση γης	Υδρολογικός τύπος εδάφους				
	A	B	C	D	
Καλλιεργημένες εκτάσεις	62 - 72	71 - 81	78 - 88	81 - 91	
Λιβάδια, βοσκότοποι	30 - 68	58 - 79	71 - 86	78 - 89	
Δάση	25 - 45	55 - 66	70 - 77	77 - 83	
Ανοιχτοί χώροι, πάρκα, νεκροταφεία κτλ.					
με κάλυψη από πράσινο > 75%	39	61	74	80	
με κάλυψη από πράσινο 50 – 75 %	49	69	79	84	
Εμπορικές περιοχές	89	92	94	95	
Βιομηχανικές περιοχές (72 % αδιαπέρατες)	81	88	91	93	
Οικιστικές περιοχές					
Μέσο μέγεθος οικοπέδου (στρ)	Ποσοστό διαπερατής επιφάνειας %				
≤ 0,5	65	77	85	90	92
1	38	61	75	83	87
1.5	30	57	72	81	86
2	25	54	70	80	85
4	20	51	68	79	84
Δρόμοι					
με οδόστρωμα και δίκτυο ομβρίων	98	98	98	98	
χαλικόστρωτοι	76	85	89	91	
χωματόδρομοι	72	82	87	89	

Για λόγους απλότητας, οι χρήσεις γης στην παρούσα εργασία κατηγοριοποιήθηκαν σε 5 ομάδες. Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.3: Ομαδοποίηση χρήσεων γης

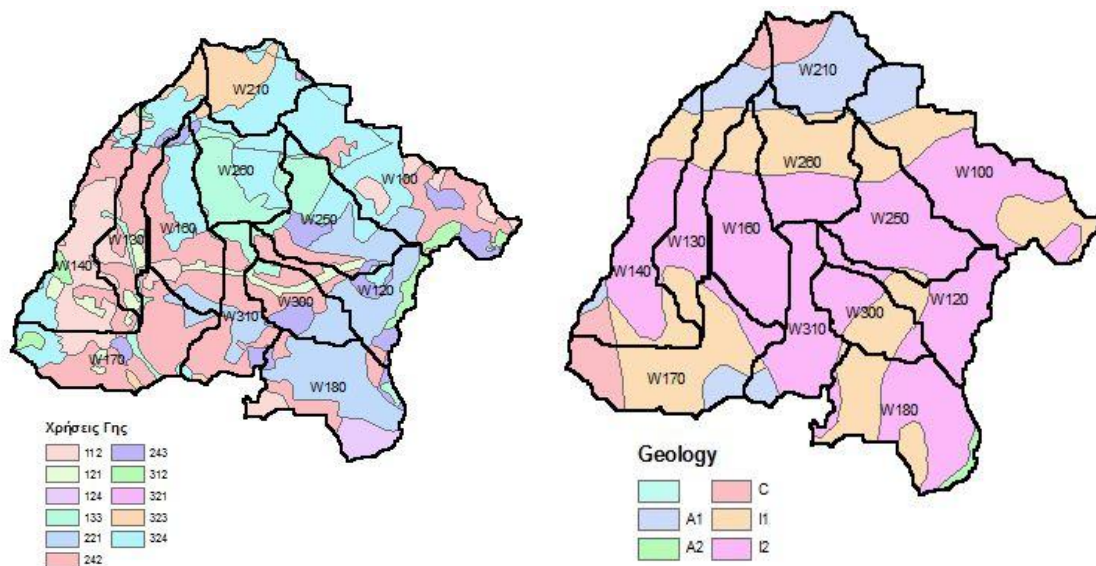
Τύπος	Περιγραφή εδάφους
1	καλλιεργημένες εκτάσεις
2	λιβάδια
3	δάση
4	αστικές περιοχές
5	δρόμοι

Κάθε λεκάνη όμως, δεν απαρτίζεται μόνο από ένα τύπο εδάφους και μία χρήσης γης και έτσι ο μέσος αριθμός καμπύλης απορροής υπολογίζεται από τη σχέση: $CN_{\text{μέσο}} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i}$
 Ο αριθμός καμπύλης παίρνει τιμές από 35 (εδάφη με τη μεγαλύτερη διήθηση) μέχρι 98 (αδιαπέρατες επιφάνειες).

Εκτίμηση CN για κάθε υπολεκάνη απορροής

Ο υπολογισμός του αριθμού CN γίνεται με τη βοήθεια του GIS. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα ακόλουθα:

1. Εισαγωγή του χάρτη με τις υπολεκάνες
2. Εισαγωγή χάρτη χρήσεων γης και γεωλογικού χάρτη



Εικόνα 3.12: Χάρτες χρήσεων γης και γεωλογίας

3. Ένωση του χάρτη χρήσεων γης και του γεωλογικού χάρτη, με τη βοήθεια της εντολής του Arcmap >> Arctoolbox >> intersect. Έτσι, στον πίνακα (attribute table) του ενωμένου χάρτη εισάγεται ένα νέο πεδίο (field) που θα περιέχει τις τιμές του CN όπως προκύπτουν από τους παραπάνω πίνακες.
4. Εκτέλεση της εντολής Clip (Arcmap >> Arctoolbox >> Clip). Με τον τρόπο αυτό, γίνεται απομόνωση των γεωλογικών χαρακτηριστικών καθώς και των χρήσεων γης για κάθε υπολεκάνη.
5. Εκτέλεση της εντολής Dissolve (Arcmap >> Arctoolbox >> Dissolve), κατά την οποία γίνεται ένωση των πεδίων που θα επιλεγθούν (field CN στην περίπτωση αυτή) με τις ίδιες τιμές.
6. Τέλος, με τη χρήση του Field Calculator γίνεται ο υπολογισμός της τελικής τιμής του CN με τη χρήση του ακόλουθου τύπου(3.3):

$$CN_{\text{τελικό}} = CN \times \frac{A_i}{\sum A_i} \quad (3.3)$$

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας με τις τελικές τιμές του CN για κάθε υπολεκάνη:

Πίνακας 3.4: Τιμές συντελεστή CN

Υπολεκάνες	CN
W100	78
W250	79
W120	78
W130	78
W140	77
W300	79
W160	78
W170	75
W180	82
W210	76
W260	79
W310	81

Έχοντας καταλήξει στις παραπάνω τιμές, επόμενο βήμα είναι να γίνει η εισαγωγή τους στο HEC-HMS. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

- HEC-HMS >> Parameters >> Loss >> SCS Curve Number

Basin Name: rafina	
Element Name: W140	
Initial Abstraction (MM)	<input type="text"/>
*Curve Number:	77
*Impervious (%)	5.5

Εικόνα 3.13: Παράθυρο εκτέλεσης υπολογισμού απωλειών

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να επισημανθεί πως για τον τελικό υπολογισμό των απωλειών, είναι απαραίτητη η συμπλήρωση δύο ακόμα πεδίων (Initial Abstraction, Impervious (%)). Στην παρούσα εργασία το πεδίο Initial Abstraction δε συμπληρώνεται από το χρήστη. Στην περίπτωση αυτή, το πρόγραμμα θεωρεί ότι το αρχικό έλλειμμα ισούται με το 20% της δυναμικής μέγιστης κατακράτησης, κάτι στο οποίο βασίζεται και η σχέση για τον υπολογισμό του ενεργού ύψους βροχής. Όσο αναφορά το πεδίο Impervious, γίνεται ο υπολογισμός του χρησιμοποιώντας στοιχεία του γεωλογικού χάρτη της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής αυτός προκύπτει, διαιρώντας τη συνολική επιφάνεια που καλύπτουν τα αδιαπέρατα πετρώματα, με τη συνολική έκταση της κάθε υπολεκάνης.

3.2.3.3 Πρότυπο υπολογισμού άμεσης απορροής

Η άμεση απορροή είναι φυσική συνέπεια της ενεργού βροχόπτωσης στη λεκάνη απορροής. Η ενεργός βροχόπτωση ισούται με τη συνολική βροχόπτωση μείον τις απώλειες. Έτσι, μπορεί να προσδιοριστεί ο όγκος της άμεσης απορροής, όχι όμως και η χρονική του κατανομή. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκαν κάποια πρότυπα που να προσδιορίζουν το χρόνο, την τιμή της παροχής αιχμής, το χρόνο υστέρησης και τη διάρκεια της άμεσης απορροής.

Υπάρχουν δύο ειδών μοντέλα. Τα μοντέλα φυσικής βάσης όπως το πρότυπο κινηματικού κύματος, τα οποία στηρίζονται σε εξισώσεις υδραυλικής και τα μοντέλα που στηρίζονται στη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος (Ντοανίδης, 2007).

Το μοναδιαίο υδρογράφημα

Ως μοναδιαίο υδρογράφημα (ΜΥ) ορίζεται το υδρογράφημα της άμεσης απορροής που προέρχεται από καθαρή βροχόπτωση διάρκειας t_r και μοναδιαίου ύψους $h_r = 10\text{mm}$ ομοιόμορφα κατανεμημένου πάνω σε όλη την έκταση της λεκάνης (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2003).

Με βάση τον ορισμό του ΜΥ, τα χαρακτηριστικά αυτού έχουν ως εξής:

- Το ΜΥ αντιπροσωπεύει όλα τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (σχήμα, μέγεθος, κλίση και έδαφος) αλλά και της βροχόπτωσης που το προκάλεσε (τύπος, ένταση, διάρκεια).
- Εφόσον τα χαρακτηριστικά της λεκάνης δεν μεταβάλλονται από βροχόπτωση σε βροχόπτωση, τότε τα υδρογραφήματα που προέρχονται από βροχοπτώσεις όμοιας διάρκειας και τύπου, θεωρούνται ότι έχουν όμοιο σχήμα και χρονική βάση.

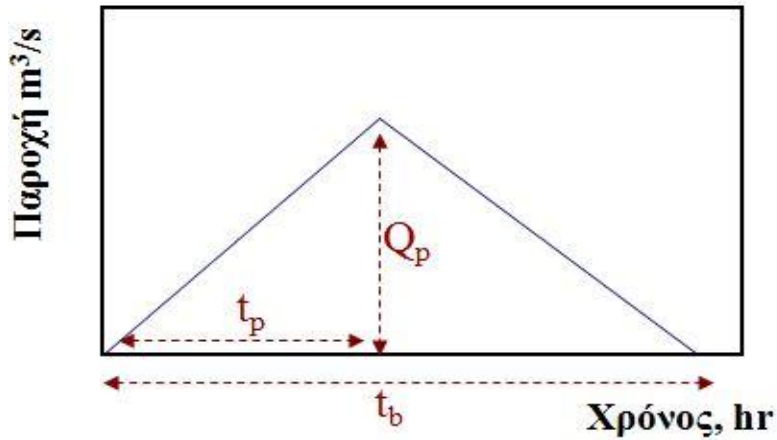
Αρχές του μοναδιαίου υδρογραφήματος

- 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 εντάσεων τους.

Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος – Μέθοδος Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας.

Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα – Μέθοδος Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας

Η μέθοδος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας



$$t_p = \frac{46,6 \times L^{0,14}}{S_{0,1L-0,85L}^{0,38} \times (1 + URBAN)^{1,99} \times RMSD^{0,4}} \quad (3.4)$$

$$t_b = 2,52 \times t_p \quad (3.5)$$

$$Q_p = \frac{2,2 * A}{t_p} \quad (3.6)$$

t_p : χρόνος ανόδου σε hr

t_b : χρόνος βάσης σε hr

Q_p : παροχή αιχμής σε m^3/s

L : μήκος κύριας μισγάγκειας σε km

$S_{0,1*L-0,85*L}$: η μέση κλίση υδατορεύματος μεταξύ των σημείων 10% και 85% του μήκους του σε m/km

URBAN: αναλογία αστικών περιοχών στη λεκάνη απορροής

RMS: παράμετρος μεγέθους βροχοπτώσεων σε mm

A: έκταση λεκάνης απορροής

Πηγή: (Μαμάσης, Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά Έργα, 2011)

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι για τον τελικό υπολογισμό των ΜΥ της κάθε υπολεκάνης, χρησιμοποιήθηκε μια παραλλαγή της μεθόδου του Βρετανικού Ινστιτούτου, καθώς η μέθοδος αυτή υπολογίζει ΜΥ για διάρκεια βροχής **1hr**, ενώ στην παρούσα εργασία χρονικό βήμα του υετογράμματος είναι **10 min**. Έτσι, για το χρόνο ανόδου έγινε χρήση του παρακάτω τύπου:

$$t_p = 0,6 \times t_c + \frac{d}{2} \quad (3.7)$$

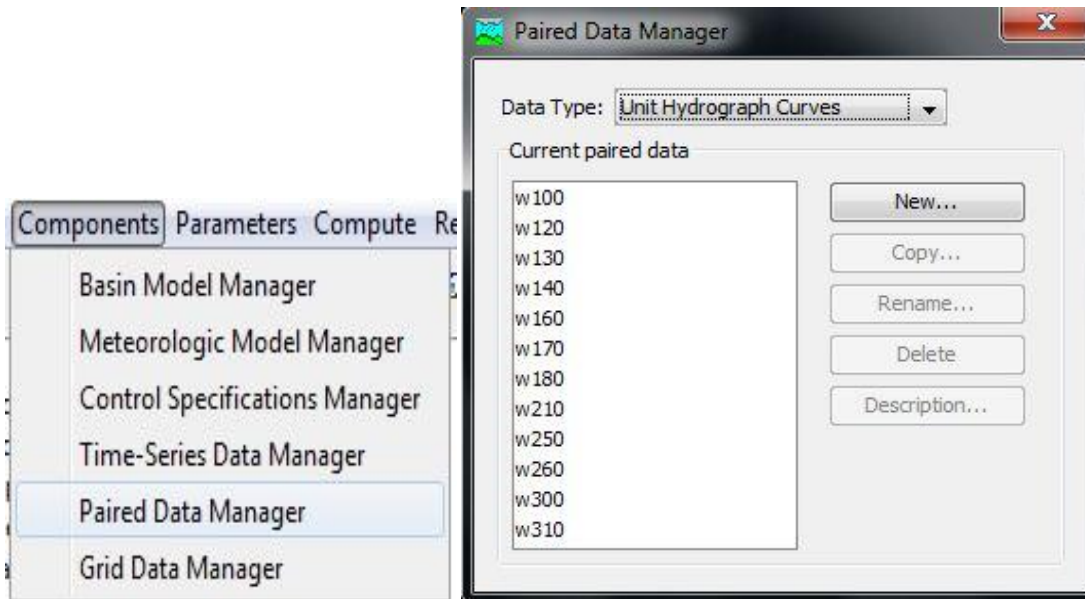
όπου d = χρονικό βήμα και $t_c = \frac{4 * A^{1/2} + 1,5L}{0,8 * \Delta H^{0,5}}$ (3.8)

Ο χρόνος βάσης και η παροχή αιχμής υπολογίζονται σύμφωνα με τους παραπάνω τύπους του Βρετανικού Ινστιτούτου.

Εισαγωγή ΜΥ στο μοντέλο HEC-HMS

Η διαδικασία έχει ως εξής:

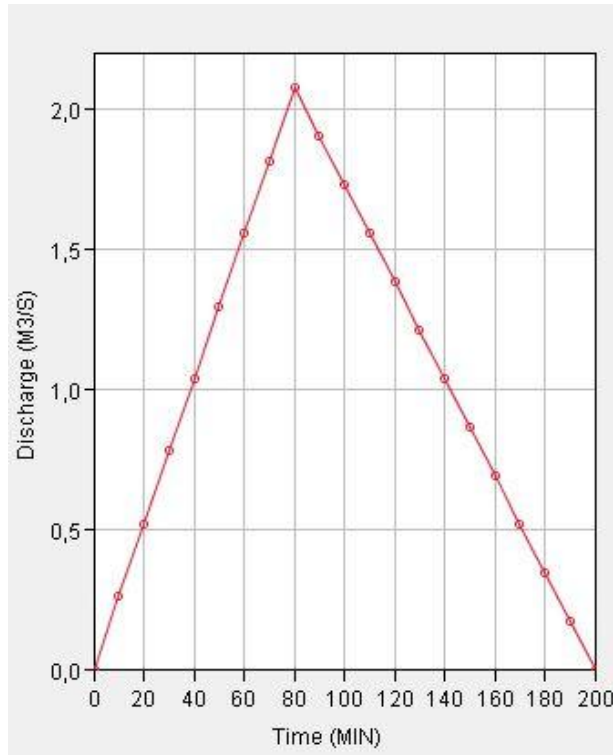
HEC-HMS → Components → Paired Data Manager → Unit Hydrograph Curves



Εικόνα 3.14: Απεικόνιση της παραπάνω διαδικασίας

Ενδεικτικά παρουσιάζεται το ΜΥ μιας υπολεκάνης.

Λεκάνη W140



Min	ΜΥ(m^3 / s)
0	0
10	0.25901
20	0.518021
30	0.777031
40	1.036042
50	1.295052
60	1.554063
70	1.813073
80	2.072083
90	1.89941
100	1.726736
110	1.554063
120	1.381389
130	1.208715
140	1.036042
150	0.863368
160	0.690694
170	0.518021
180	0.345347
190	0.172674
200	0

Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι λόγω μεγάλης διαφοράς όγκου που προέκυπτε ανάμεσα στο παρατηρούμενο πλημμυρογράφημα και σε αυτό που προέκυπτε από την προσομοίωση του μοντέλου, έγινε κάποια αλλαγή στις τιμές των μοναδιαίων υδρογραφημάτων από το χρήστη, ώστε οι τιμές των αποτελεσμάτων να είναι πιο κοντά στις παρατηρούμενες. Αυτό, ίσως να οφείλεται σε κάποιο αλγόριθμο που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα και ο χρήστης δε γνωρίζει.

3.2.3.4 Πρότυπο Βασικής Απορροής

Στην παρούσα εργασία λόγω έλλειψης δεδομένων για την προσομοίωση της βασικής ροής, αλλά λαμβάνοντας υπόψη και τη μικρή της επιρροή στον τελικό στόχο της εργασίας, αποφασίστηκε η μη ενσωμάτωση της βασικής ροής στο υδρολογικό μοντέλο.

3.2.3.5 Πρότυπο διόδευσης πλημμύρας (Routing)

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη διόδευση πλημμύρας είναι η Lag Routing. Έγινε η υπόθεση ότι η μέση ταχύτητα ροής του νερού είναι ίση με 1.2 m/s. Το μήκος που διανύει το νερό από την έξοδο της μίας λεκάνης μέχρι την επόμενη είναι περίπου 4 km. Άρα, γίνεται εκτίμηση του lag time ίση με 30 min.

Διαδικασία στο περιβάλλον του HEC-HMS

HEC-HMS >> Parameters >> Routing >>Lag

The screenshot shows the HEC-HMS software interface. The 'Parameters' tab is selected, and the 'Routing' option is highlighted in the left-hand menu. A sub-menu is open, showing various routing methods. The 'Lag' method is selected, and a table displays the 'Reach' and 'Lag Time (MIN)' for several methods.

Method	Reach	Lag Time (MIN)
Kinematic Wave		
Lag		
Modified Puls	R80	30
Muskingum	R320	30
Muskingum-Cunge	R60	30
Straddle Stagger	R70	60
Change Method...	R270	30
	R20	60
	R10	30

Εικόνα 3.15: Διαδικασία εισαγωγής του προτύπου διόδευσης στο HEC-HMS

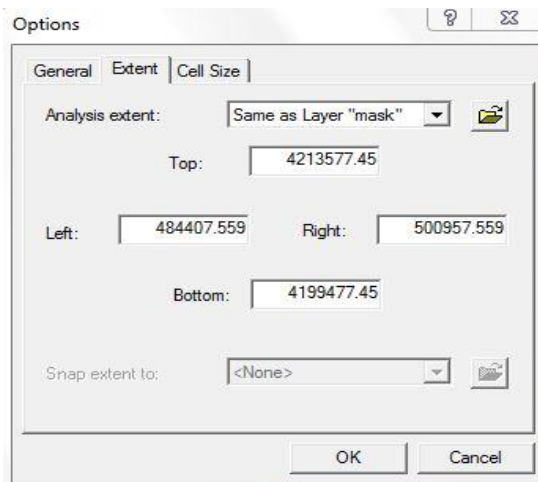
3.2.4 Μετεωρολογικό Μοντέλο (Meteorologic Model Manager)

Στο μετεωρολογικό μοντέλο προσδιορίζονται οι βροχομετρικοί σταθμοί που θα ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό της μέσης βροχόπτωσης για κάθε υπολεκάνη και η μέθοδος με την οποία θα γίνει ο υπολογισμός της βροχόπτωσης. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η μέθοδος βαρών Thiessen. Από τα δεδομένα του Υδρολογικού Παρατηρητηρίου Αθηνών (Hydrological Observatory of Athens) επιλέχθηκαν δύο επεισόδια βροχής, αυτό της 04/02/2011 και αυτό της 24/02/2011. Έτσι, έχουμε τη δημιουργία δύο μετεωρολογικών μοντέλων, ένα για κάθε επεισόδιο βροχής.

3.2.4.1 Εφαρμογή της μεθόδου Thiessen

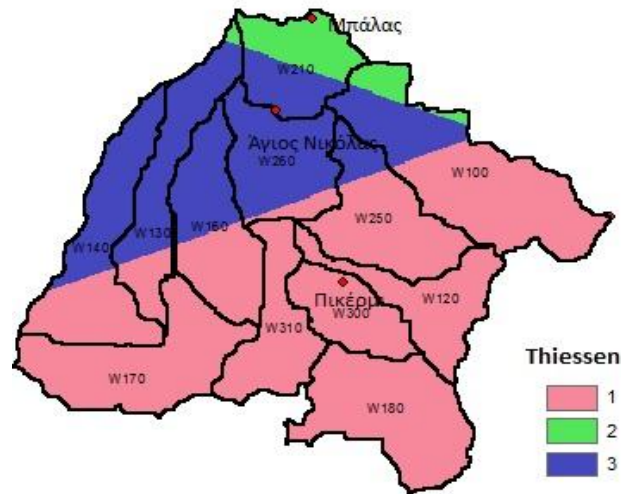
Η κατάρτιση πολυγώνων Thiessen έγινε σε περιβάλλον GIS. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε είναι σχετικά απλή. Εισάγονται τα σημεία με τις θέσεις των βροχομετρικών σταθμών στο περιβάλλον του GIS. Έπειτα, έγιναν τα εξής βήματα:

- Spatial Analyst >> Options και γίνεται συμπλήρωση όλων των καρτελών με την επιλογή 'as layer mask'. Σκοπός της εντολής αυτής, είναι η επέκταση των πολυγώνων Thiessen σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής.



Εικόνα 3.16: Σχήμα της παραπάνω διαδικασίας

- Spatial Analyst >> Distance >> Allocation. Έτσι εξάγονται τα πολύγωνα Thiessen.



Εικόνα 3.17: Πολύγωνα Thiessen

- Υπολογισμός συντελεστών Thiessen

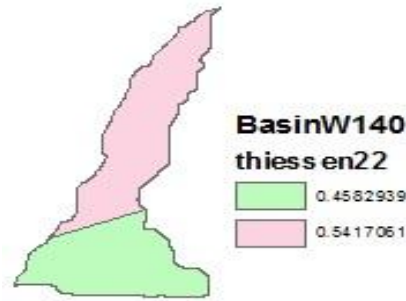
Από τον πίνακα (attribute table) των πολυγώνων Thiessen υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός των ψηφίδων (Field Count >> statistics >> sum). Έπειτα, διαιρώντας το αριθμό των ψηφίδων κάθε πολυγώνου με το συνολικό, προκύπτει ο συντελεστής Thiessen για κάθε πολύγωνο. Για έλεγχο ορθότητας των υπολογισμών, υπολογίζεται το άθροισμα των συντελεστών, το οποίο θα πρέπει να είναι ίσο με τη μονάδα. Οι τιμές των συντελεστών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.5: Συντελεστές Thiessen

Μετεωρολογικοί Σταθμοί	Συντελεστές Thiessen
Μπάλας	0,05
Άγιος Νικόλαος	0,297
Πικέρι	0,653

- Υπολογισμός συντελεστών Thiessen κάθε υπολεκάνης

Αρχικά γίνεται η ‘κοπή’ των πολυγώνων Thiessen στα όρια των υπολεκάνων, με τη βοήθεια της εντολής intersect της εργαλειοθήκης Analysis Tools.



Εικόνα 3.18: Παράδειγμα πολυγώνων Thiessen σε μία υπολεκάνη

Στο νέο shapfile που δημιουργείται υπολογίζονται τα εμβαδά των επιμέρους πολυγώνων. Έτσι, έχοντας το συνολικό εμβαδό της υπολεκάνης και τα εμβαδά των επιμέρους πολυγώνων εξάγονται οι συντελεστές Thiessen για κάθε υπολεκάνη.

Αναλυτικά οι συντελεστές που υπολογίστηκαν για το επεισόδιο βροχής 04/02/2011, όπου υπήρχαν μετρήσεις και από τους τρεις σταθμούς παρατίθενται παρακάτω (πίνακας 3.6).

Πίνακας 3.6: Συντελεστές Thiessen κάθε υπολεκάνης (επεισόδιο βροχής 04/02/2011)

Υπολεκάνη	Μπάλας	Άγιος Νικόλαος	Πικέρμι
W100	0,255	0,103	0,646
W250	0,165	-	0,835
W120	-	-	0,653
W130	0,757	0,026	0,217
W140	0,542	-	0,458
W300	-	-	0,653
W160	0,492	-	0,508
W170	-	-	0,653
W180	-	-	0,653
W210	-	0,540	0,460
W260	0,879	-	0,121
W310	-	-	0,653

Για το επεισόδιο βροχής 24/02/2011 υπολογίστηκαν άλλοι συντελεστές Thiessen για κάθε υπολεκάνη γιατί υπήρχαν μετρήσεις βροχών μόνο από τους δύο σταθμούς, Άγιο Νικόλαο και Πικέρμι. Οι τιμές αυτών παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (3.7).

Πίνακας 3.7: Συντελεστές Thiessen κάθε υπολεκάνης (επεισόδιο βροχής 24/02/2011)

Υπολεκάνη	Άγιος Νικόλαος	Πικέρμι
W100	0,352	0,648
W250	0,165	0,835
W120	-	0,653
W130	0,782	0,218
W140	0,542	0,458
W300	-	0,653
W160	0,492	0,508
W170	-	0,653
W180	-	0,653
W210	0,347	-
W260	0,121	0,879
W310	-	0,653

Τελικά, με τη χρήση των παραπάνω βαρών (συντελεστές Thiessen) επιτεύχθηκε η μετατροπή των σημειακών βροχοπτώσεων σε επιφανειακές και έτσι έγινε δυνατή η εισαγωγή τους στο μετεωρολογικό μοντέλο.

Ειδικότερα, στο περιβάλλον του HEC-HMS η εισαγωγή τους γίνεται ως εξής:

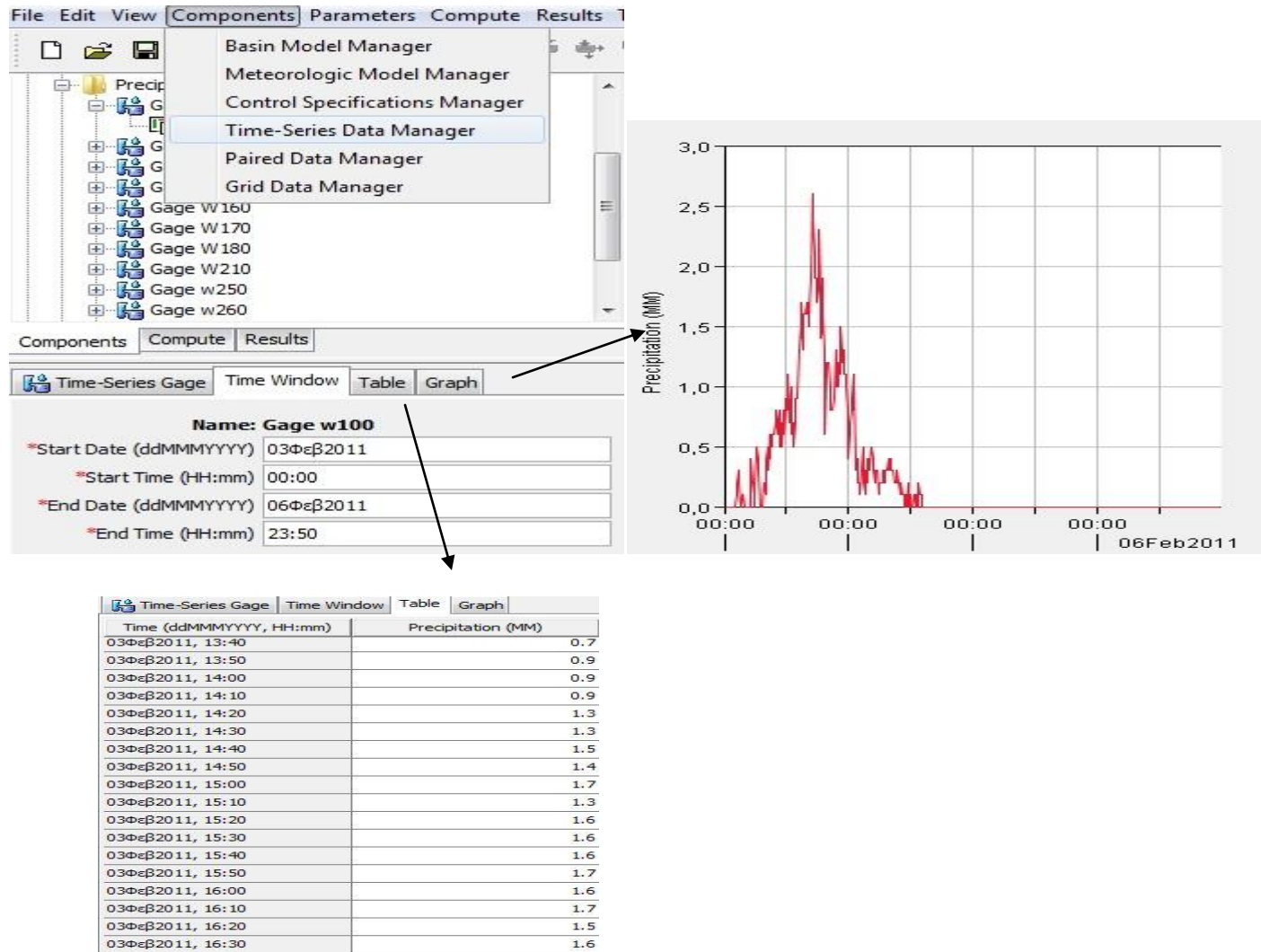
- ✓ Εισαγωγή νέου μετεωρολογικού μοντέλου, όπου γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων. Στο σημείο αυτό γίνεται και ο καθορισμός του τύπου των δεδομένων.

HEC-HMS >> Components >> Meteorologic Model Manager

- ✓ Δημιουργία αρχείων που δέχεται τα δεδομένα σε μορφή χρονοσειράς. Το δεδομένο εισόδου είναι το υετόγραμμα.

HEC-HMS >> Components >> Time series data

- Time Window → Καθορισμός επεισοδίου βροχόπτωσης (π.χ. 24hr με βήμα 10min)
- Table → Εισαγωγή της χρονοσειράς
- Graph → Διάγραμμα της χρονοσειράς – Υετόγραμμα
- Time series gage → Εισαγωγή δεδομένων χρονοσειράς είτε χειροκίνητα, είτε μέσω αρχείου dss. (στην παρούσα εργασία έγινε χειροκίνητα).



Εικόνα 3.19: Εισαγωγή χρονοσειρών στο HEC-HMS

3.2.5 Προσδιορισμός χρονικών διαστημάτων προσομοιώσεων (Control Specifications Components)

Στο μενού << Control Specifications >> ορίζεται το χρονικό διάστημα για το οποίο το μοντέλο θα εκτελέσει την προσομοίωση. Στην παρούσα εργασία, το χρονικό αυτό διάστημα είναι τρεις μέρες. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στη σύμβαση γραφής των ημερομηνιών.

Πιο ειδικά, η ενεργοποίηση της εντολής αυτής γίνεται από το μενού Components >> Control Specifications Manager και προκύπτει το ‘παράθυρο’(εικόνα 3.20), όπου εισάγεται το χρονικό διάστημα προσομοίωσης.



The screenshot shows a dialog box titled 'Control Specifications'. It contains the following fields:

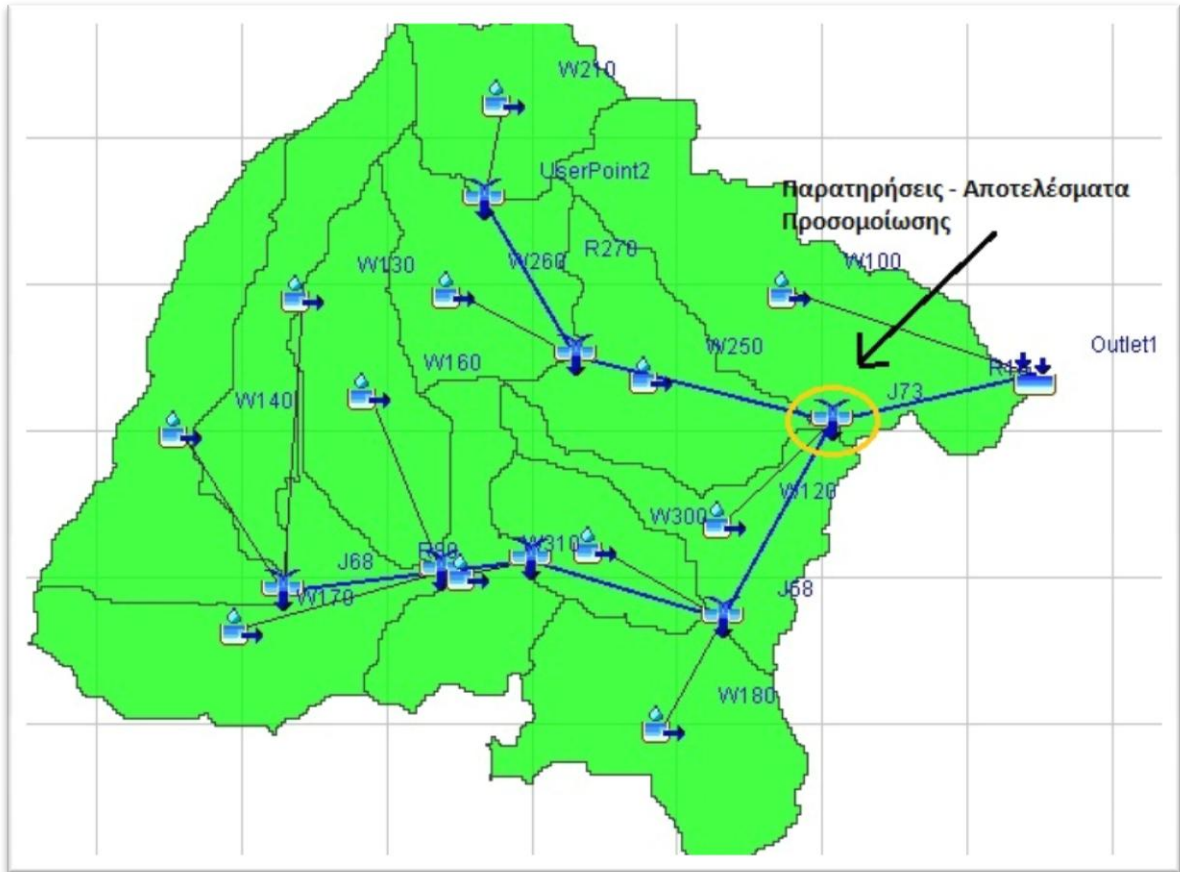
- Name:** Control 1
- Description:** Rafina Basin
- *Start Date (ddMMMYYYY):** 03Feb2011
- *Start Time (HH:mm):** 00:00
- *End Date (ddMMMYYYY):** 06Feb2011
- *End Time (HH:mm):** 23:50
- Time Interval:** 10 Minutes (dropdown menu)

Εικόνα 3.20: Δημιουργία αρχείου προσομοίωσης

3.2.6 Τρέξιμο προσομοίωσης – Αρχείο Αποτελεσμάτων

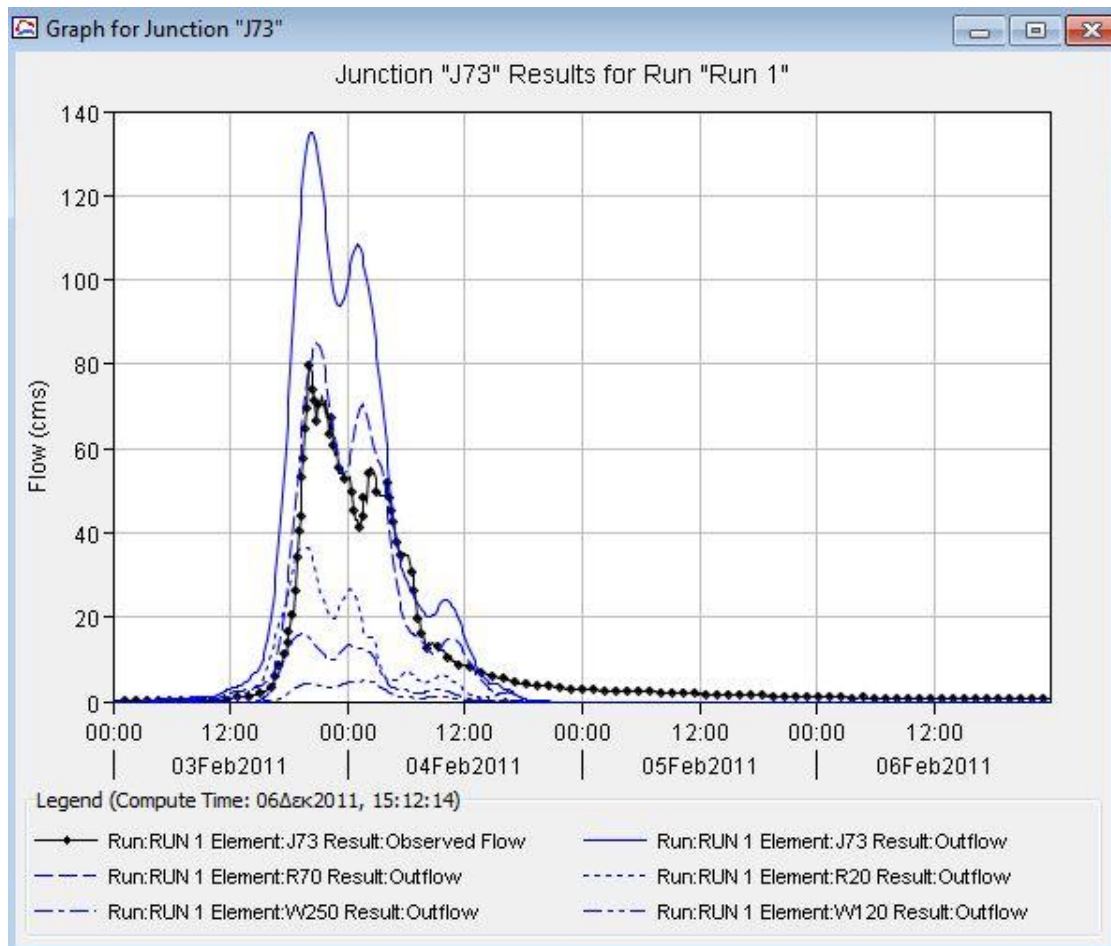
Αφού έχουν ετοιμαστεί όλα τα αρχεία εισόδου στο HEC-HMS, το πρόγραμμα είναι έτοιμο να ξεκινήσει την προσομοίωση και να εξάγει τα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα που δίνει είναι υδρογραφήματα της λεκάνης, διαγράμματα και πίνακες βροχόπτωσης, απωλειών, άμεσης απορροής.

Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα στο σημείο J73 και για τα δύο επεισόδια βροχής. Στο σημείο αυτό βρίσκεται και ο σταθμηγράφος (θέση Ραφήνα) με αποτέλεσμα να έχουμε μετρήσεις απορροών.



Εικόνα 3.21 : Παρουσίαση του κόμβου της λεκάνης απορροής που θα γίνει παράθεση των αποτελεσμάτων και για τα δύο επεισόδια βροχής.

Επεισόδιο βροχής **04/02/2011**, σημείο **J73**, όπου υπάρχει ο σταθμός Ραφήνα (fladar) που δίνει μετρήσεις παροχής (flow measurement). Με τον τρόπο αυτό, γίνεται εφικτός κάποιος έλεγχος των αποτελεσμάτων.



Πλημμυρογράφημα προσομοίωσης και παρατηρούμενο στη θέση όπου υπάρχει ο σταθμός Ραφήνας, που δίνει μετρήσεις αποροής.

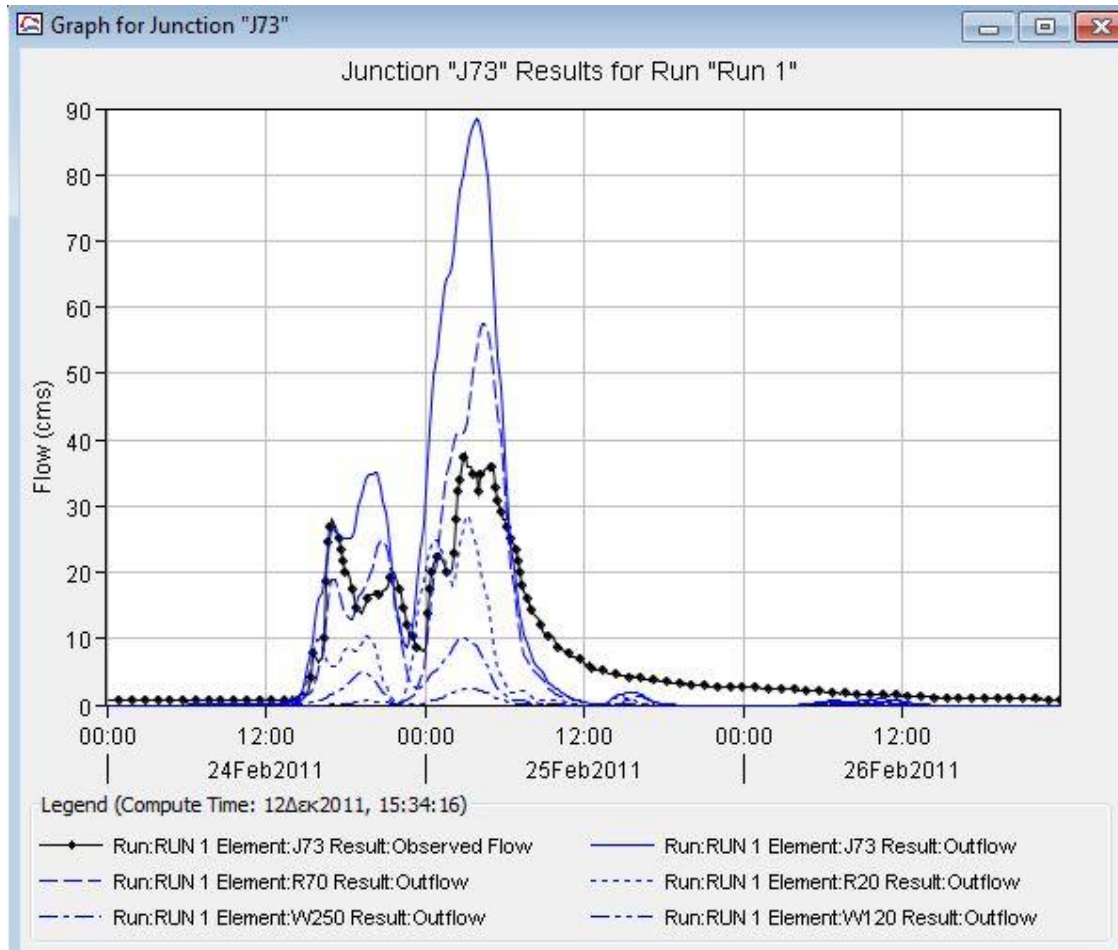
Όγκος προσομοίωσης = 30197210 m^3

Όγκος παρατηρούμενου = 18542916 m^3

Παρατηρώντας τους παραπάνω όγκους, γίνεται φανερό ότι τα αποτελέσματα του προκύπτουν από το 'τρέξιμο' του μοντέλου είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα πραγματικά. Προκύπτει μια διαφορά της τάξης του 38%. Η διαφορά αυτή, οφείλεται ίσως στη μη σωστή εκτίμηση των παραμέτρων καθώς επίσης υπάρχει το ενδεχόμενο ο

σταθμός να δίνει υπερεκτιμημένες μετρήσεις παροχών, αφού η σχέση υπολογισμού της καμπύλης στάθμης - παροχής δεν είναι γνωστή.

Επεισόδιο βροχής **24/02/2011**, σημείο **J73**, όπου υπάρχει ο σταθμός Ραφήνα (fladar) που δίνει μετρήσεις παροχής (flow measurement).



Πλημμυρογράφημα προσομοίωσης και παρατηρούμενο στη θέση όπου υπάρχει ο σταθμός Ραφήνας, που δίνει μετρήσεις αποροής.

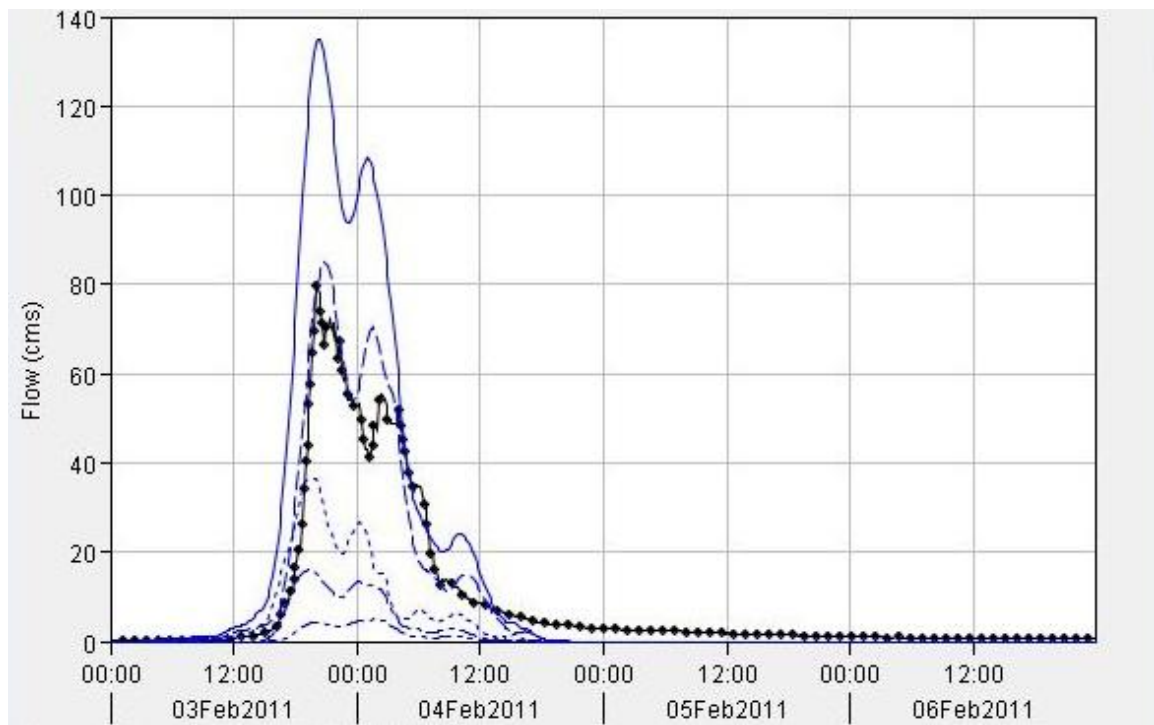
Όγκος προσομοίωσης = 12581388 m^3

Όγκος παρατηρούμενου = 10439640 m^3

Όμοια με την περίπτωση του επεισοδίου βροχής 04/02/2011, παρουσιάζεται διαφορά στους όγκους απορροής. Στην περίπτωση αυτή, οι όγκοι διαφέρουν κατά ένα ποσοστό 17%. Γενικά, οι λόγοι που μπορούν να οδηγήσουν στο αποτέλεσμα αυτό είναι ίδιοι με τους παραπάνω.

Κεφάλαιο 4

Βαθμονόμηση Υδρολογικού Μοντέλου



4. Βαθμονόμηση του μοντέλου (Calibration)

Η ρύθμιση του μοντέλου, δηλαδή η αλλαγή των παραμέτρων, έχει ως σκοπό την επίτευξη επιθυμητών αποτελεσμάτων. Αποτελέσματα που να τείνουν πιο κοντά σε αυτά που έχουν παρατηρηθεί. Το πρόγραμμα HEC-HMS προσφέρει εργαλεία αυτοματοποιημένης ρύθμισης του μοντέλου (εντολή trial). Με βάση αλγορίθμους βελτιστοποίησης και αντικειμενικές συναρτήσεις υπολογισμού σφαλμάτων, η επιλογή των οποίων γίνεται από το χρήστη, έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει αυτόματα τις παραμέτρους μέσω επαναληπτικών διαδικασιών. Οι τιμές των παραμέτρων που έδινε δεν ήταν ικανοποιητικές και έτσι πραγματοποιήθηκαν διάφορα σενάρια αλλαγής των παραμέτρων χειροκίνητα.

4.1 Επεισόδιο Βροχής 04/02/2011

Αλλαγή των τιμών της παραμέτρου CN

Όπως γίνεται φανερό από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (§3.2.6, αποτελέσματα προσομοίωσης), ο όγκος απορροής που προκύπτει από την προσομοίωση είναι μεγαλύτερος από αυτόν των παρατηρήσεων. Έτσι, για να γίνει μείωση της απορροής, θα πρέπει να αυξηθεί η διαπερατότητα του εδάφους, πράγμα που συνεπάγεται μείωση των τιμών CN. Δοκιμάστηκαν σενάρια μείωσης των τιμών CN κατά 50%, 20% και 15%. Από αυτά έγινε δεκτό το σενάριο μείωσης των τιμών κατά 15%, καθώς οι όγκοι απορροής και οι παροχές αιχμής έφτασαν σχετικά κοντά. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα αναλυτικά.

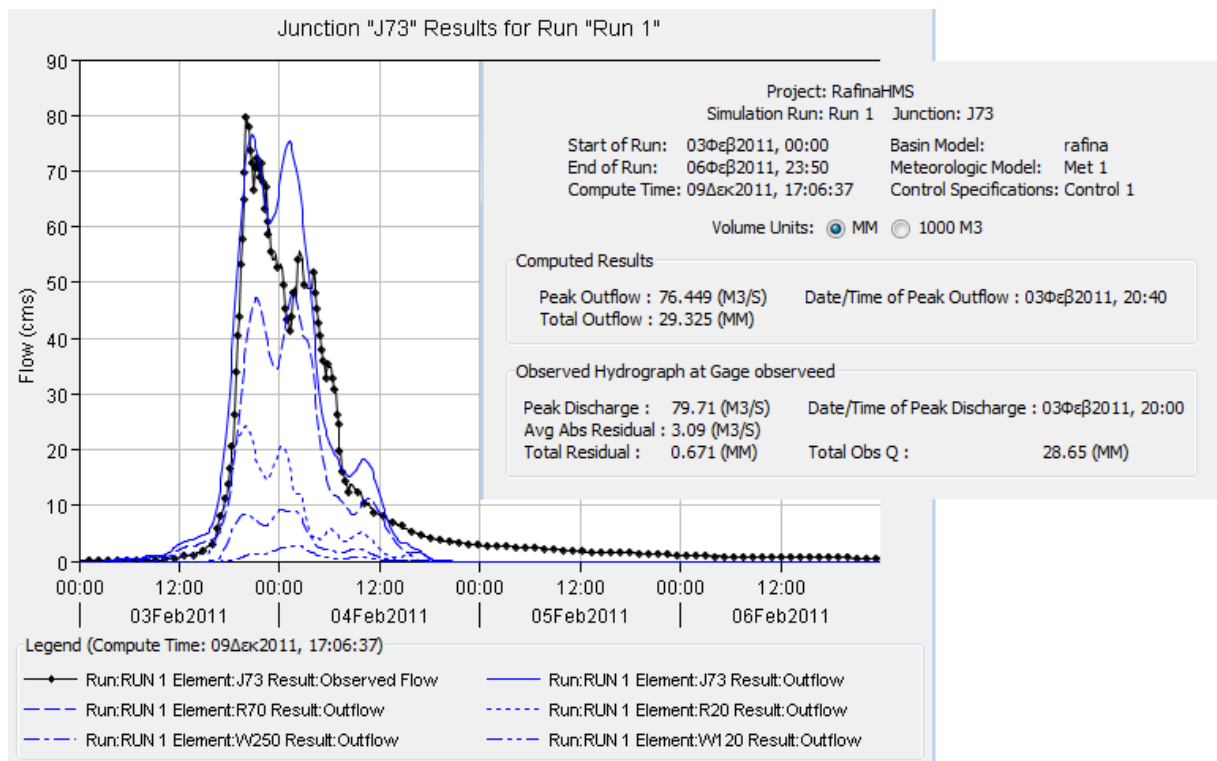
4.1.1 Σενάριο 1 - Μείωση CN κατά 15%

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι μειωμένες τιμές του συντελεστή CN για κάθε υπολεκάνη.

Πίνακας 4.1: Συντελεστές CN(04/02/2011)

Λεκάνη	CN
W140	65
W130	66
W170	64
W160	66
W310	69
W180	70
W300	67
W260	67
W210	65
W250	67
W120	66
W100	66

Με τις παραπάνω τιμές CN προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:



Εικόνα 4.1: Πλημμυρογραφήματα προσομοίωσης – παρατηρήσεων (σενάριο 1, 04/02/2011)

Όγκος προσομοίωσης = 18977670 m^3

Όγκος παρατηρούμενου = $18544824 m^3$

Με την μείωση των τιμών CN, οι όγκοι νερού που απορρέουν, πλησιάζουν αρκετά. Παρατηρείται μια διαφορά της τάξης του 2%, άρα τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά.

4.1.2 Σενάριο 2 - Διατήρηση των μειωμένων τιμών CN (πίνακας 4.1) και αλλαγή του πρότυπου διόδευσης – Χρήση μεθόδου Muskingum.

Μέθοδος Muskingum

Με τη μέθοδο Muskingum μπορεί να υπολογιστεί διόδευση πλημμυρογραφήματος σε τμήμα υδατορεύματος. Πρόκειται για υδρολογική μέθοδο, σε αντίθεση με τις υδραυλικές οι οποίες χρησιμοποιούν εξισώσεις ασταθούς ροής σε ανοιχτούς αγωγούς. Οι υδρολογικές μέθοδοι βασίζονται στις εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης και στις σχέσεις μεταξύ αποθηκευτικότητας και παροχής ή της στάθμης σε τμήμα του υδατορεύματος που ενδιαφέρει.

Η ‘υδρολογική’ διόδευση πλημμύρας διαμέσου τμήματος ποταμού – μέθοδος Muskingum χρησιμοποιεί την απλοποιημένη εξίσωση συνέχειας σε ένα τμήμα ποταμού (McCarthy 1938):

$$I - Q = \frac{ds}{dt} \quad (4.1)$$

Όπου:

I : εισροή στο τμήμα του ποταμού

Q : εκροή

S : αποθήκευση στο τμήμα του ποταμού

t : χρόνος.

Συνεπώς, η διαφορά μεταξύ εισροής και εκροής σε διάστημα dt είναι ίση με τη μεταβολή της αποθήκευσης στο τμήμα για το αντίστοιχο διάστημα dt .

Η σχέση αποθήκευσης με την εισροή και εκροή μετά από απλοποίηση σε μια γραμμική σχέση:

$$S = K[xI + (1-x)Q] \quad (4.2)$$

Έτσι, για την εφαρμογή της μεθόδου αρκεί να γίνει ο προσδιορισμός των εξής παραμέτρων:

- X: βάρος συμμετοχής της εισροής στην αποθήκευση του τμήματος, με τιμές από 0 έως 1.
Στην ελληνική βιβλιογραφία προτείνεται $X = 0,2$ (Νουτσόπουλος, 2007)
- K (hr): μέσος χρόνος διαδρομής του πλημμυρικού κύματος μεταξύ δύο διατομών
- Δχ: αριθμός υπό-υδατορευμάτων

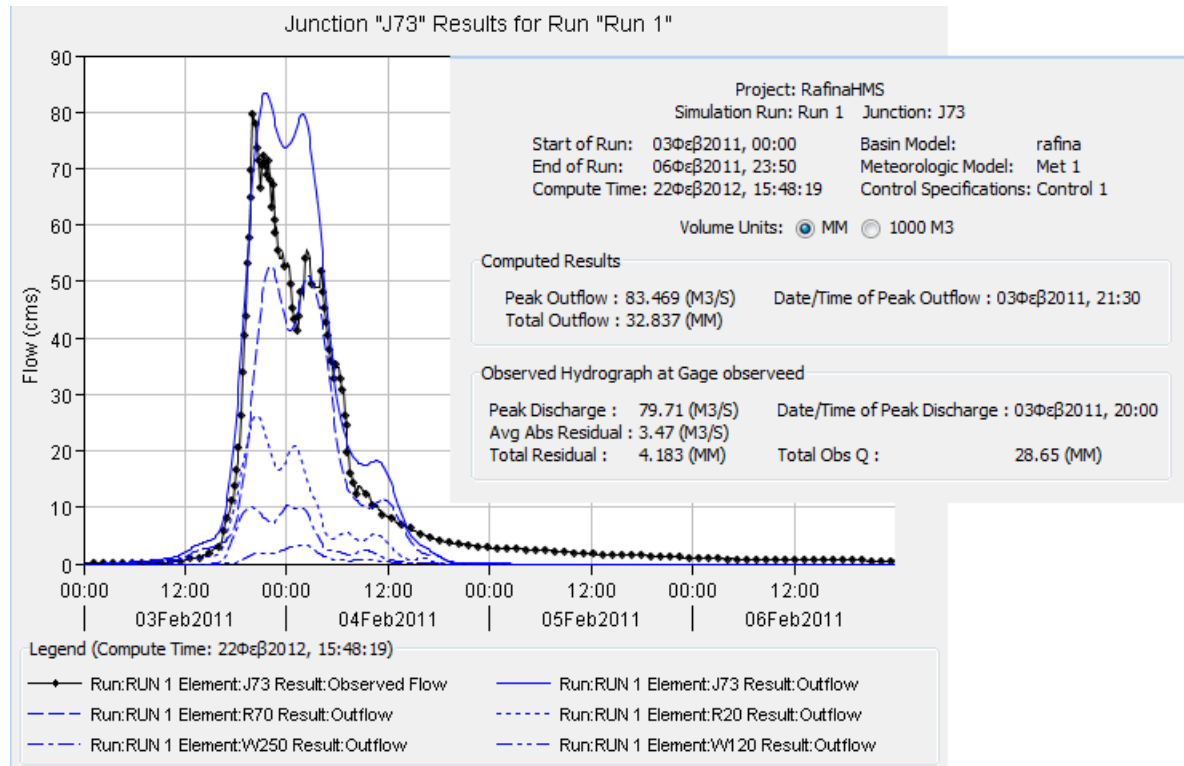
Ακολουθεί πίνακας όπου αναγράφονται οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων.

Πίνακας 4.2: Παράμετροι της μεθόδου Muskingum

	K (hr)	Muskingum X	Subreaches
R80	0,8	0,2	5
R320	0,5	0,2	3
R60	0,9	0,2	5
R70	0,9	0,2	5
R270	1	0,2	6
R20	1,2	0,2	7
R10	0,9	0,2	5

Πρέπει να σημειωθεί πως για τον υπολογισμό της παραμέτρου K, γίνεται εκτίμηση ότι η ταχύτητα ροής είναι ίση με 1.2 m/s. Επίσης για την εύρεση του αριθμού των υπο-υδατορευμάτων, εκτιμήθηκε χρονικό βήμα $\Delta t = 10 \text{ min}$.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση του HEC-HMS είναι τα ακόλουθα:



Εικόνα 4.2: Πλημμυρογραφήματα προσομοίωσης – παρατηρήσεων (σενάριο 2, 04/02/2011)

Όγκος προσομοίωσης = 22892322 m^3

Όγκος παρατηρούμενου = 18544824 m^3

Παρατηρώντας το διάγραμμα, γίνεται φανερό ότι η τιμή αιχμής που προκύπτει από την προσομοίωση είναι πολύ κοντά με αυτή των παρατηρήσεων. Προκύπτει μια διαφορά της τάξης του 18%.

Συμπέρασμα

Λαμβάνοντας υπόψη και τα δύο σενάρια, τα καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν με το συνδυασμό << μείωση CN κατά 15% - Lag Routing >>.

4.2 Επεισόδιο Βροχής 24/02/2011

Στο επεισόδιο αυτό βροχής, δοκιμάστηκε αρχικά το σενάριο μείωσης των τιμών CN κατά 20% και έπειτα μείωση αυτών κατά 15%. Τα αποτελέσματα της δεύτερης δοκιμής ήταν ικανοποιητικά και έτσι στη συνέχεια κρατώντας τις μειωμένες αυτές τιμές του CN, έγινε προσπάθεια αλλαγής της μεθόδου διόδευσης από Lag Routing σε Muskingum.

Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά τα σενάρια που έδωσαν αποδεκτά αποτελέσματα.

4.2.1 Σενάριο 1 - Μείωση CN 15%

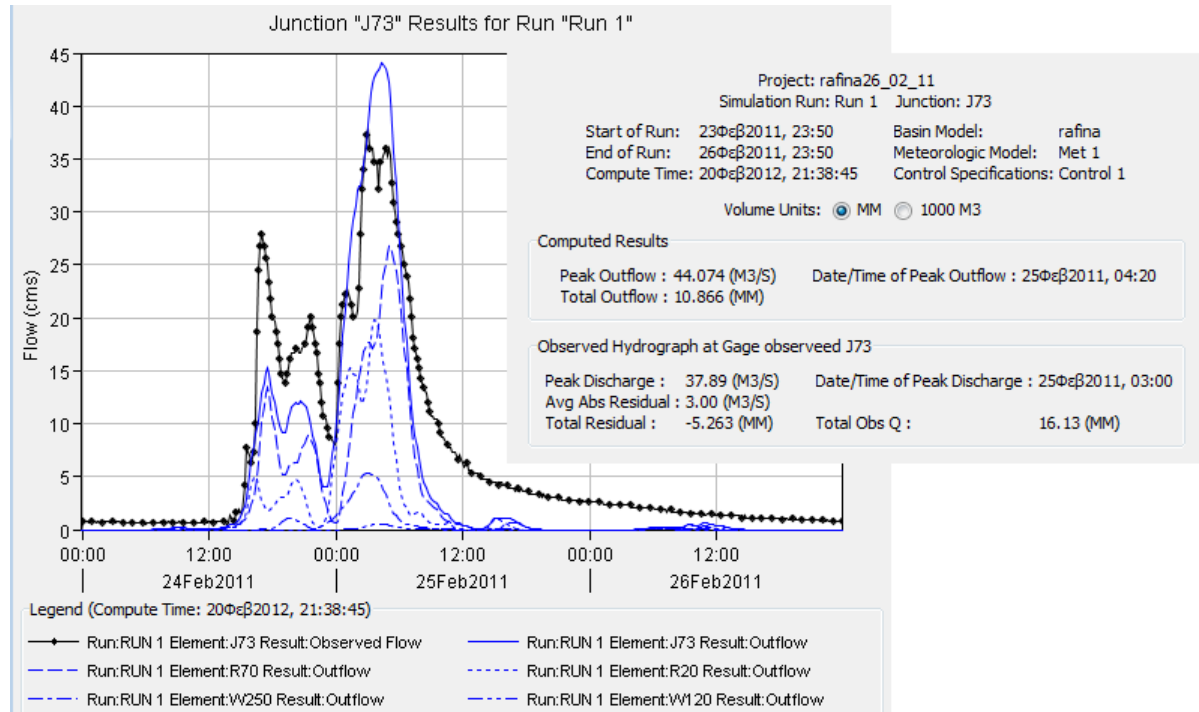
Στο επεισόδιο αυτό βροχής, ο όγκος απορροής της προσομοίωσης συγκλίνει πιο πολύ στον παρατηρούμενο μειώνοντας τις τιμές του CN κατά 15%.

Οι μειωμένες τιμές του CN παρατίθενται στη συνέχεια.

Πίνακας 4.3: Συντελεστές CN (24/02/2011)

Λεκάνη	CN
W140	65
W130	66
W170	64
W160	66
W310	69
W180	70
W300	67
W260	67
W210	65
W250	67
W120	66
W100	66

Τα πλημμυρογραφήματα που προκύπτουν από την προσομοίωση του HEC-HMS φαίνονται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 4.3: Πλημμυρογραφήματα προσομοίωσης – παρατηρήσεων (σενάριο 1, 24/02/2011)

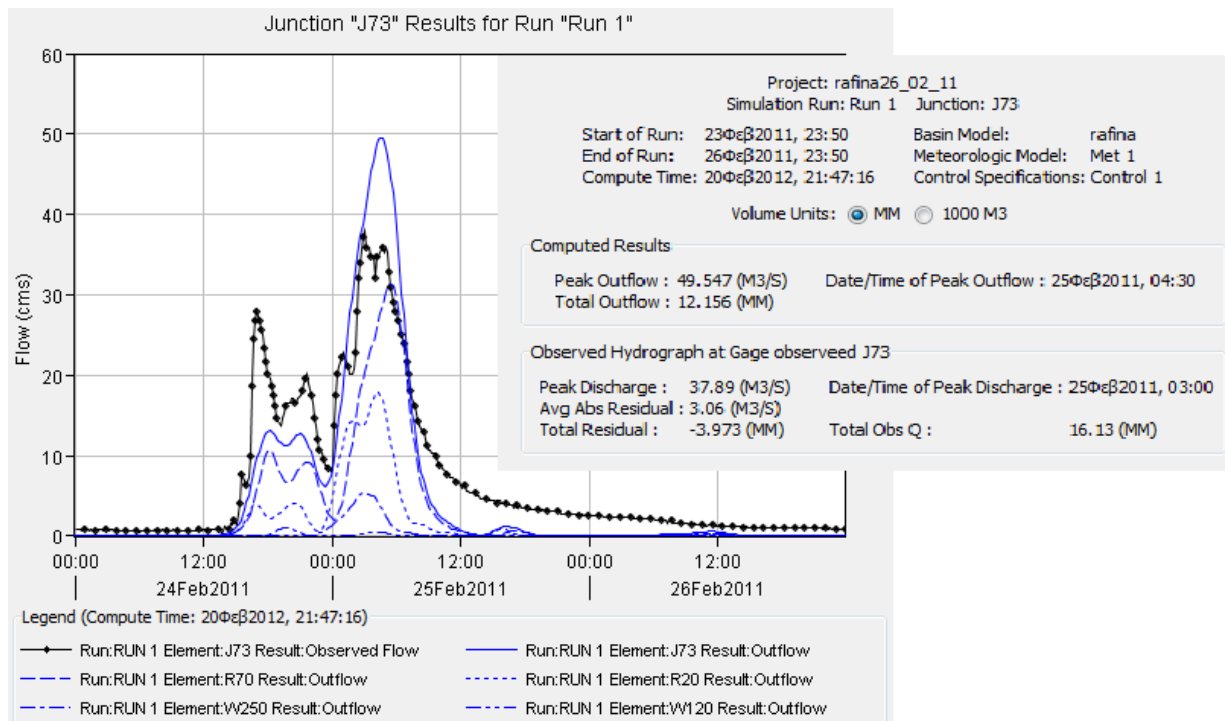
Όγκος προσομοίωσης = $7031966 m^3$

Όγκος παρατηρούμενου = $10439640 m^3$

Παρατηρείται μια διαφορά της τάξης του 30%. Αξίζει να σημειωθεί, πως παρά τη μείωση των συντελεστών CN, δεν γίνεται καλύτερη σύγκλιση στους όγκους απορροής, αλλά επιτυγχάνεται καλύτερη ταύτιση των παροχών αιχμής.

4.2.2 Σενάριο 2 - Μείωση CN κατά 15% - Muskingum

Στο σενάριο αυτό, γίνεται διατήρηση των μειωμένων τιμών CN (πίνακας 4.3) και χρήση της μεθόδου Muskingum για τη διόδευση της πλημμύρας. Οι τιμές των παραμέτρων που απαιτούνται για την εφαρμογή της μεθόδου Muskingum είναι όμοιες με αυτές του προηγούμενου επεισοδίου βροχής (πίνακας 4.2). Έτσι παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το ‘ρυθμισμένο’ μοντέλο.



Εικόνα 4.4: Πλημμυρογραφήματα προσομοίωσης – παρατηρήσεων (σενάριο 2, 24/02/2011)

Όγκος προσομοίωσης = $7866958 m^3$

Όγκος παρατηρούμενου = $10439640 m^3$

Στην περίπτωση αυτή η διαφορά των όγκων απορροής είναι μικρότερη της τάξης του 24%.

Συμπέρασμα

Λαμβάνοντας υπόψη και τα 2 σενάρια, καλύτερα αποδεκτά αποτελέσματα δίνει ο συνδυασμός <<μείωση CN κατά 10% - Μέθοδος Muskingum>>.

4.3 Νέα βαθμονόμηση του μοντέλου

Στο κεφάλαιο 3 για τον υπολογισμό των απωλειών δόθηκε η παράμετρος CN και το ποσοστό αδιαπερατότητας. Το πεδίο του αρχικού ελλείμματος δε συμπληρώθηκε και το πρόγραμμα θεώρησε ότι ισούται με το 20% της δυναμικής μέγιστης κατακράτησης.

Έτσι, στο σενάριο αυτό για τη διεξαγωγή πιο ορθών αποτελεσμάτων, έγινε μια εύλογη υπόθεση πως το αρχικό έλλειμμα ισούται με 10 mm και ότι δεν υπάρχει ποσοστό αδιαπερατότητας.

Subbasin	Initial Abstraction (MM)	Curve Number	Impervious (%)
W140	10	77	0.0
W130	10	78	0.0
W170	10	75	0.0
W160	10	78	0.0
W310	10	81	0.0
W180	10	82	0.0
W300	10	79	0.0
W260	10	79	0.0
W210	10	76	0.0
W250	10	79	0.0
W120	10	78	0.0
W100	10	78	0.0

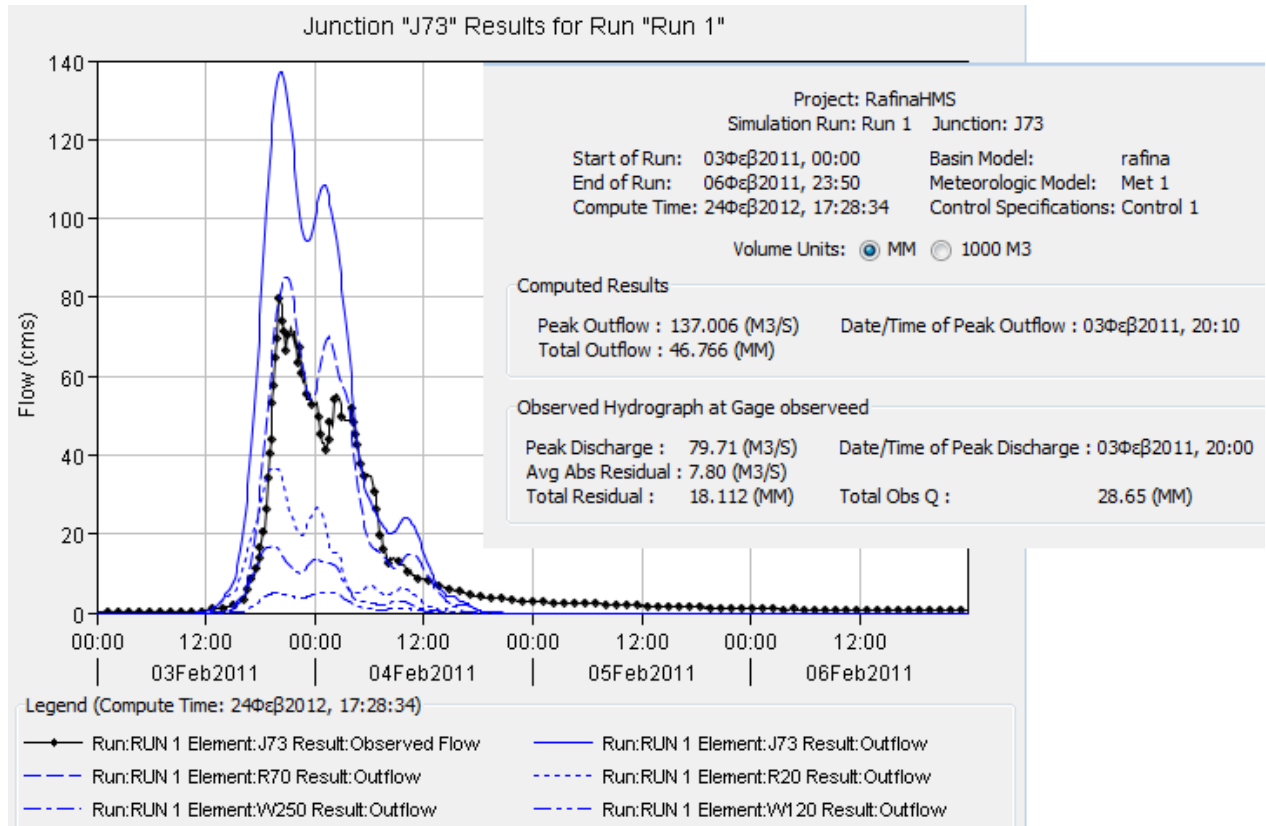
Εικόνα 4.5: Παράμετροι απωλειών.

Έτσι, έγινε εκ νέου υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής και έπειτα ακολούθησε η βαθμονόμηση αυτού.

4.3.1 Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης

4.3.1.1 Επεισόδιο βροχής 04/02/2011

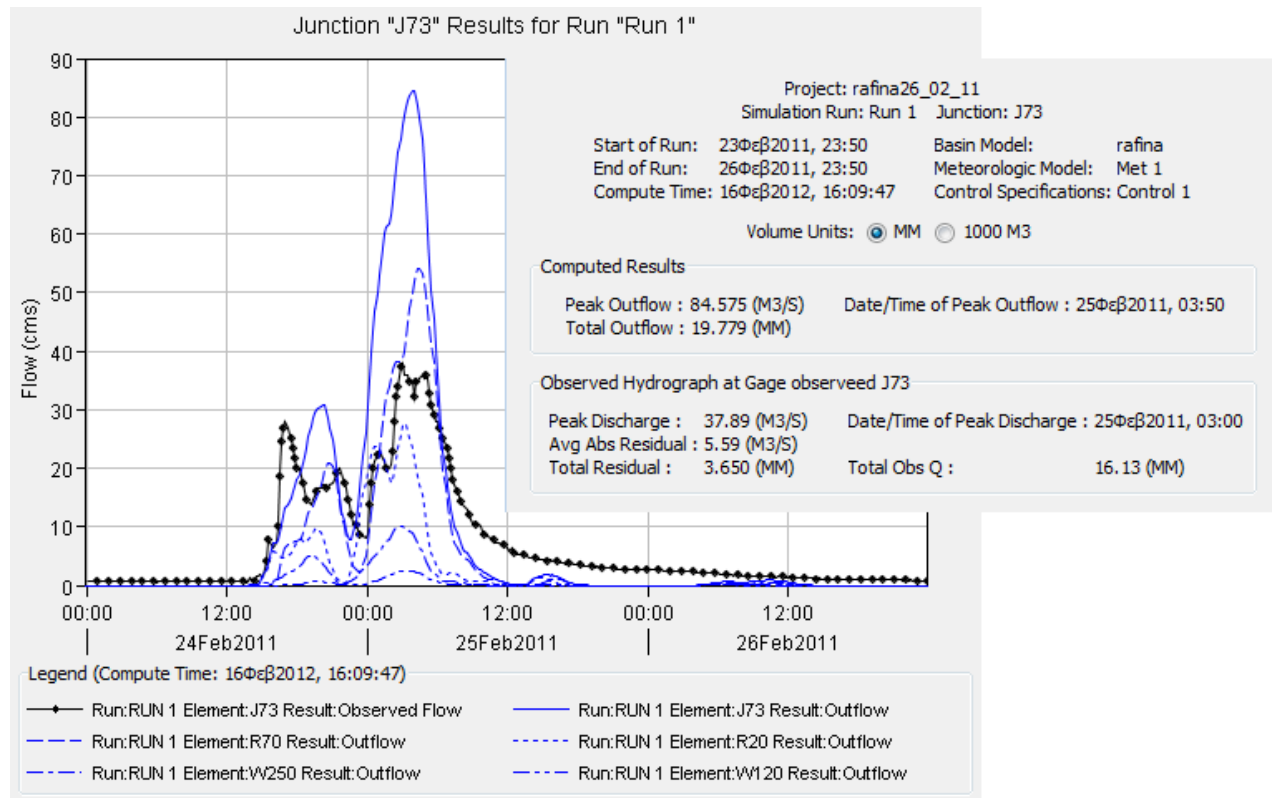
Ακολουθεί παράθεση των αποτελεσμάτων στο σημείο J73 όπου υπάρχει ο σταθμός Ραφήνα. Στο σημείο αυτό έπειτα γίνεται και η βαθμονόμηση του μοντέλου.



Εικόνα 4.6: Πλημμυρογράφηματα προσομοίωσης και παρατήρησης και τα στοιχεία τους.(04/02/2011)

4.3.1.2 Επεισόδιο βροχής 24/02/2011

Ομοίως τα αποτελέσματα που ακολουθούν αφορούν τη θέση J73.



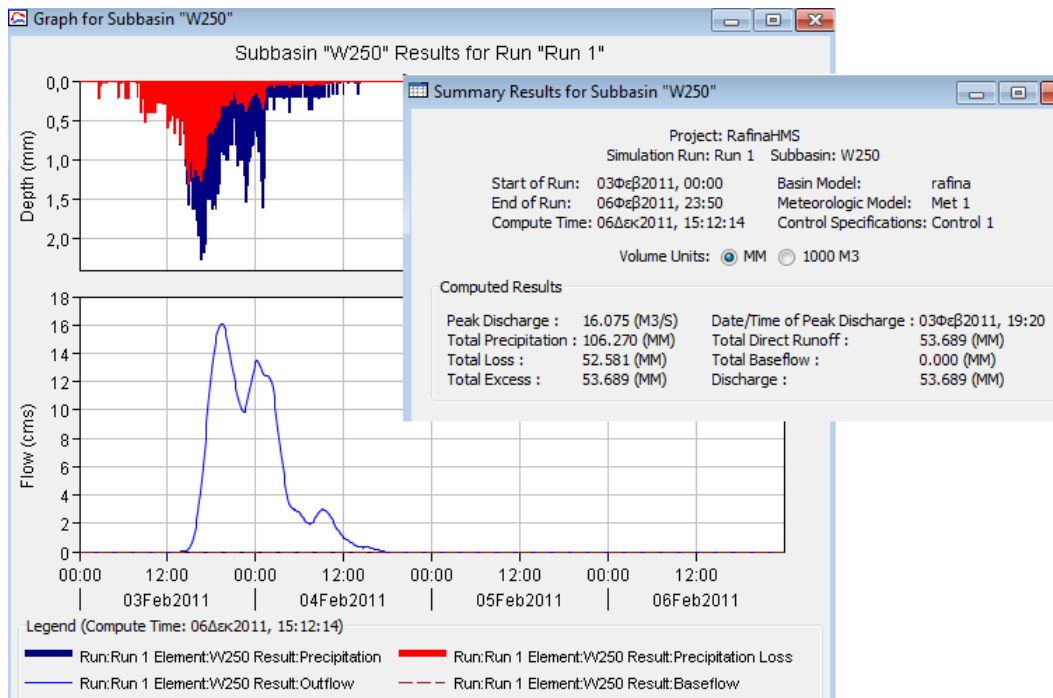
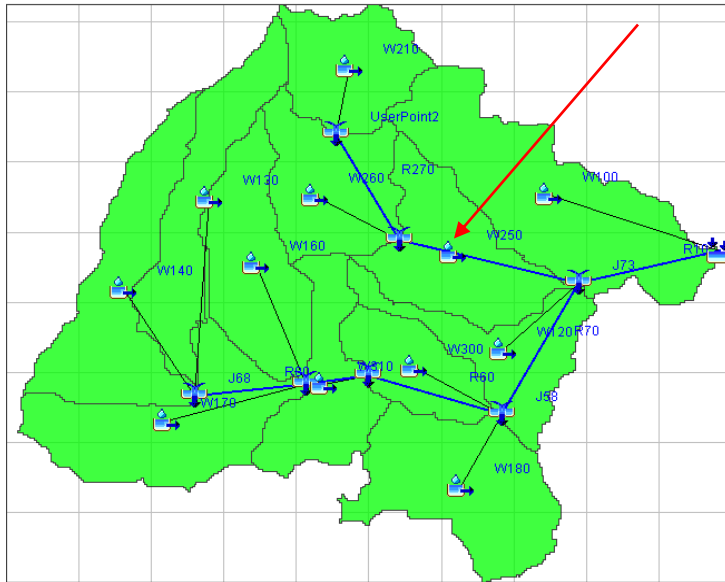
Εικόνα 4.7: Πλημμυρογράφηματα προσομοίωσης και παρατήρησης και τα στοιχεία τους (24/02/2011)

4.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια, γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων μιας τυχαίας λεκάνης, πριν τον ορισμό του αρχικού ελλείμματος και μετά από αυτό, ώστε να γίνει και μια σύγκριση των αποτελεσμάτων.

4.3.2.1 Αποτελέσματα με αρτικό έλλειμμα το 20% της δυνητικής μέγιστης κατακράτησης

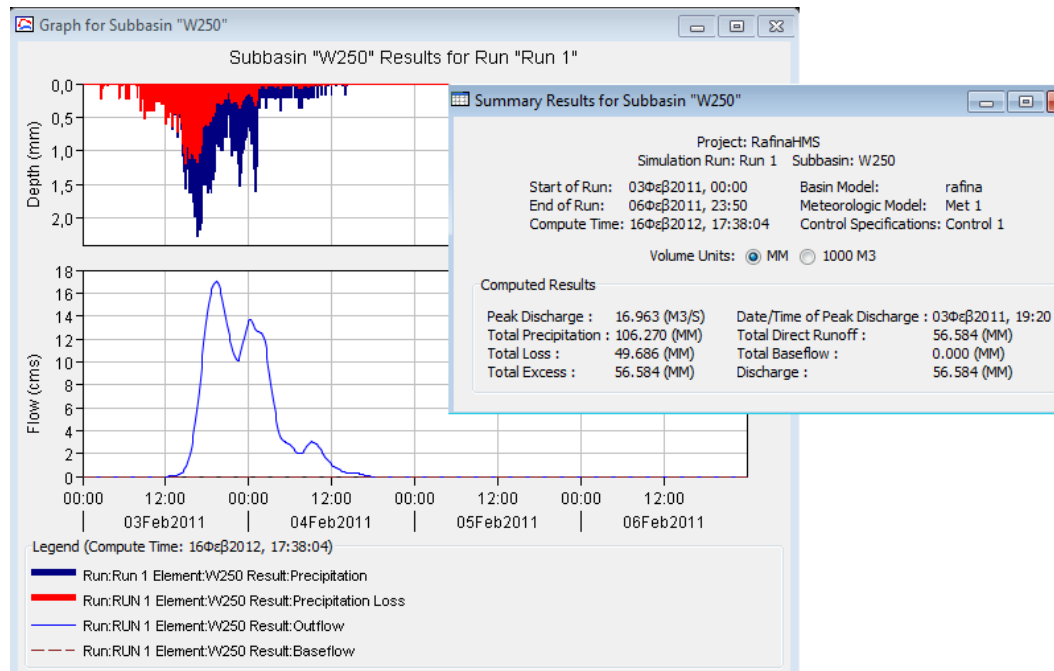
Λεκάνη W250



Εικόνα 4.8: Πλημμυρογράφημα της λεκάνης W250 και τα στοιχεία αυτού.

4.3.2 Αποτελέσματα με αρχικό έλλειμμα 10 mm

Λεκάνη W250



Εικόνα 4.9: Πλημμυρογράφημα της λεκάνης W250 και τα στοιχεία αυτού (αρχικό έλλειμμα 10mm).

Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα, γίνεται αντιληπτό ότι εισάγοντας αρχικό έλλειμμα 10 mm, οι απώλειες μειώνονται άρα η καθαρή βροχόπτωση αυξάνεται, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η παροχή αιχμής.

4.3.3 Βαθμονόμηση του παραπάνω υδρολογικού μοντέλου

Η βαθμονόμηση του μοντέλου γίνεται ως προς το συντελεστή CN και έχει ως σκοπό να επιτευχθούν αποτελέσματα κοντά σε αυτά που έχουν παρατηρηθεί.

4.3.3.1 Επεισόδιο βροχής 04/02/2011

Καθώς ο όγκος προσομοίωσης είναι μεγαλύτερος από αυτόν που προκύπτει από το παρατηρούμενο πλημμυρογράφημα, δηλαδή

$$\text{όγκος προσομοίωσης} = 30264970 \text{ m}^3/\text{s}$$

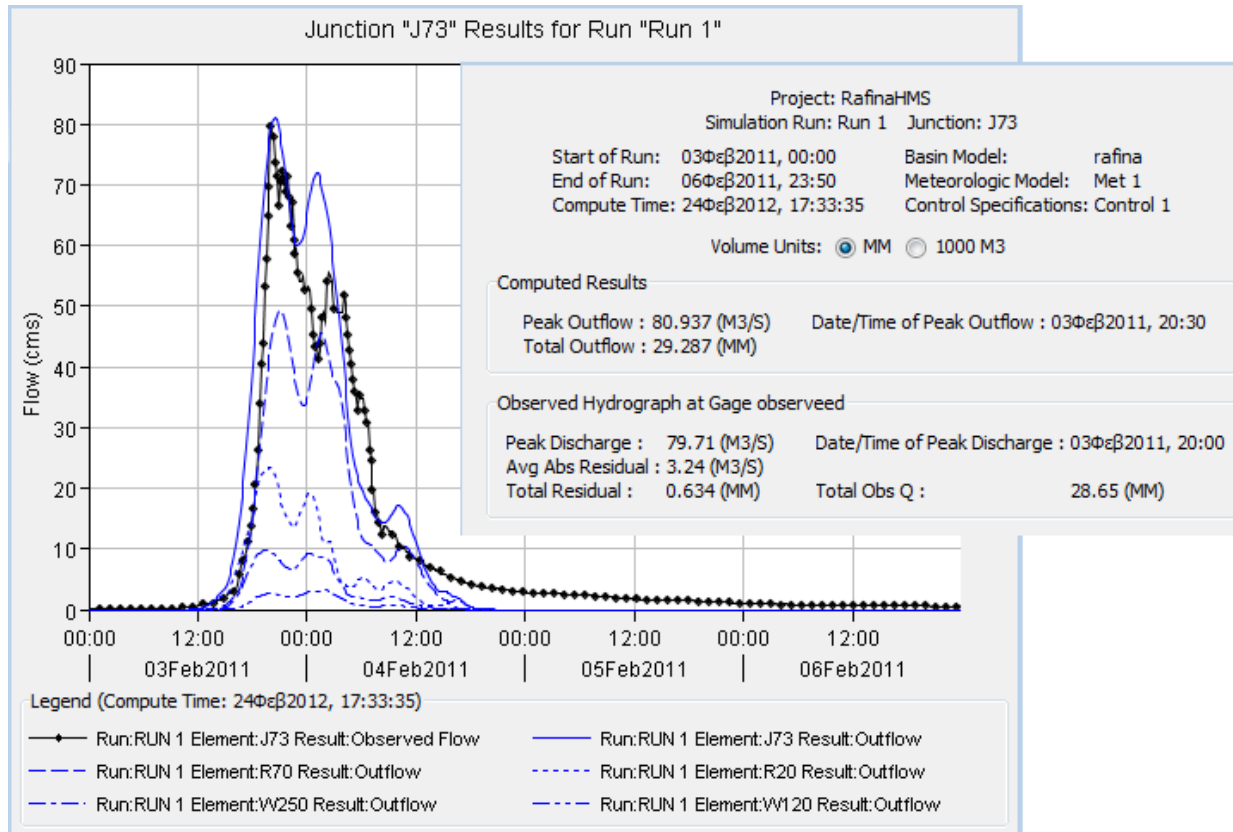
$$\text{όγκος παρατηρούμενου} = 8967838 \text{ m}^3/\text{s}$$

δοκιμάστηκαν μόνο σενάρια στα οποία οι τιμές του συντελεστή CN μειώνονται. Πιο συγκεκριμένα έγινε δοκιμή του σεναρίου μείωσης κατά 10%, 15% και 20%, όπου και σταμάτησαν οι δοκιμές καθώς επετεύχθησαν επιθυμητά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα του τελευταίου σεναρίου, όπου γίνεται μείωση των συντελεστών CN στο 20% παρατίθενται στη συνέχεια.

Πίνακας 4.4: Συντελεστές CN (μείωση 20%)

Λεκάνη	CN
W140	59
W130	60
W170	58
W160	60
W310	62
W180	63
W300	61
W260	61
W210	59
W250	61
W120	60
W100	60

Το πλημμυρογράφημα που προκύπτει σε σύγκριση με το παρατηρούμενο φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (4.10):



Εικόνα 4.10: Προσομοιωμένο και παρατηρούμενο πλημμυρογράφημα και τα στοιχεία τους (04/02/2011).

Όπως γίνεται φανερό, μετά τη μείωση των συντελεστών επιτυγχάνεται σύγκλιση στις παροχές αιχμής καθώς και στους όγκους που απορρέουν (διαφορά 2%) όπως φαίνονται και στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.5: Παροχές αιχμής και όγκοι απορροής για τις 04/02/2011

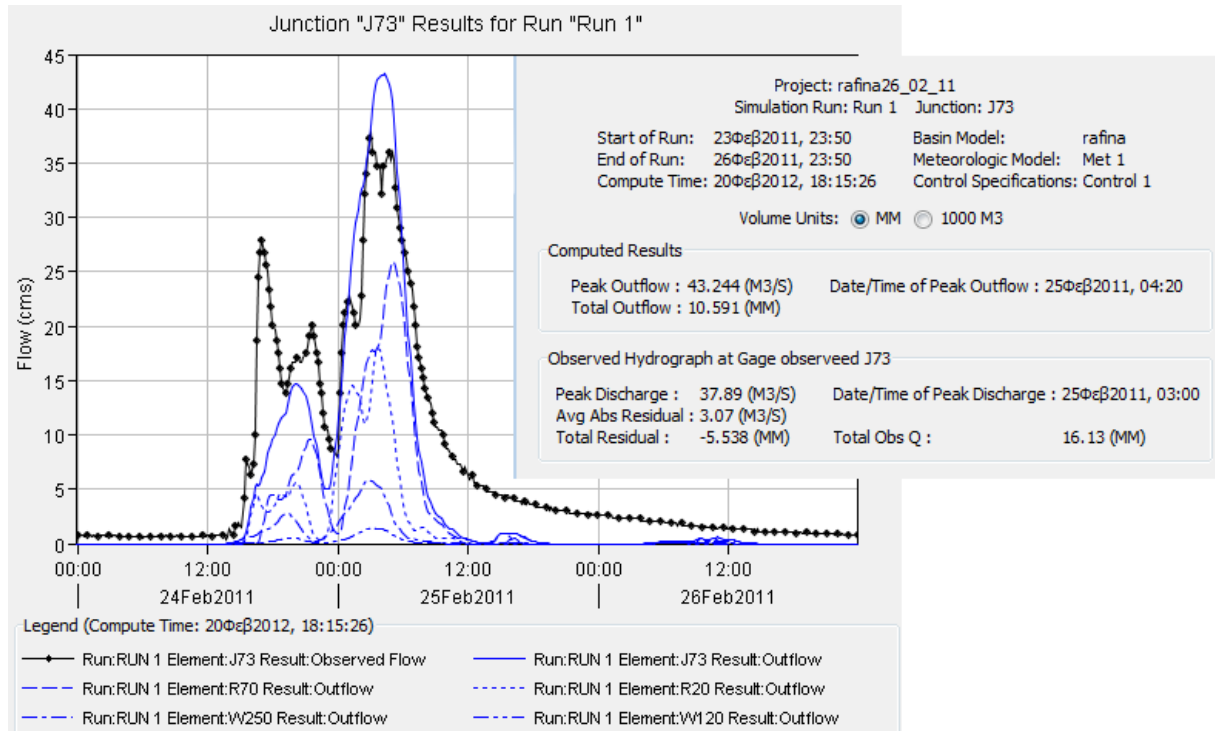
	Παροχή Αιχμής (m ³ /s)	Όγκος Απορροής (m ³)
Παρατηρούμενο	80.9	18544824
Προσομοιωμένο	79.71	18953658

4.3.3.2 Επεισόδιο βροχής 24/02/2011

Όμοια με το παραπάνω επεισόδιο βροχής, δοκιμάστηκαν και σε αυτό διάφορα σενάρια μείωσης των τιμών του συντελεστή CN. Ειδικότερα το σενάριο που έδωσε τα πιο επιθυμητά αποτελέσματα είναι αυτό της μείωσης των τιμών κατά 25%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Πίνακας 4.6: Συντελεστές CN (μείωση 25%)

Λεκάνη	CN
W140	58
W130	59
W170	56
W160	59
W310	61
W180	62
W300	59
W260	59
W210	57
W250	59
W120	59
W100	59



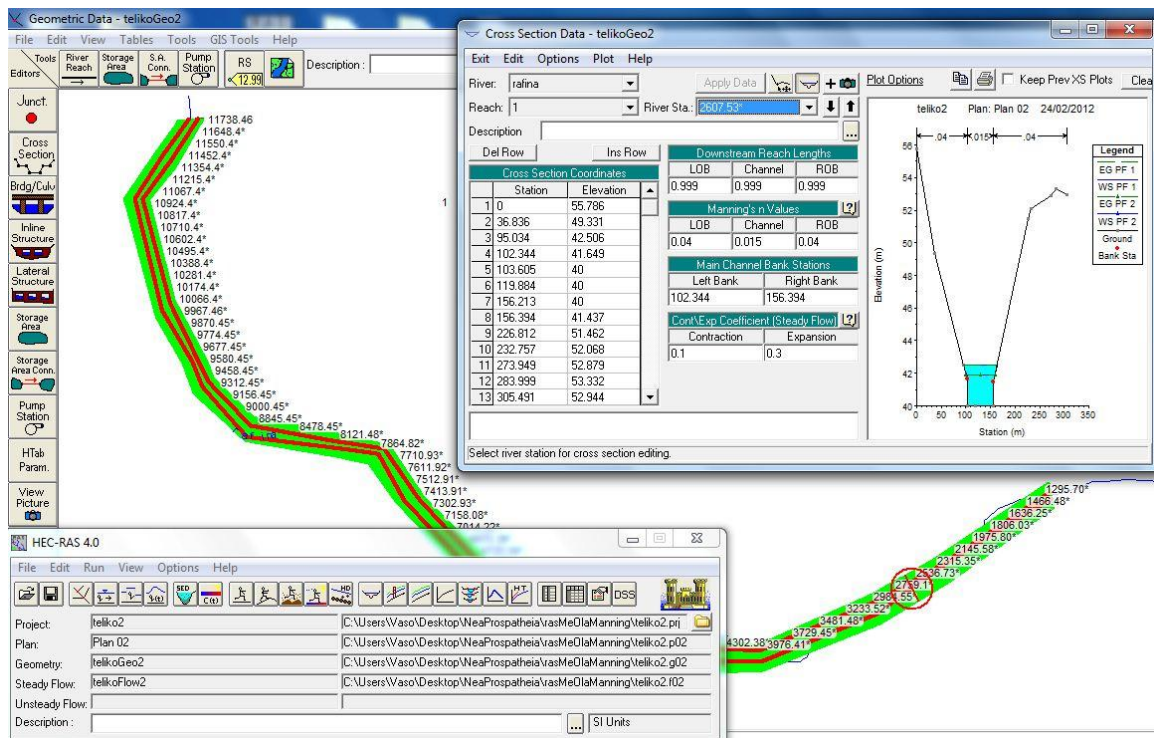
Εικόνα 4.11: Προσομοιωμένο και παρατηρούμενο πλημμυρογράφημα και τα στοιχεία τους (24/02/2011).

Όμοια με το παραπάνω επεισόδιο, επιτυγχάνεται σχετική σύγκλιση στις παροχές αιχμές και μια διαφορά στους όγκους απορροής της τάξης του 30%.

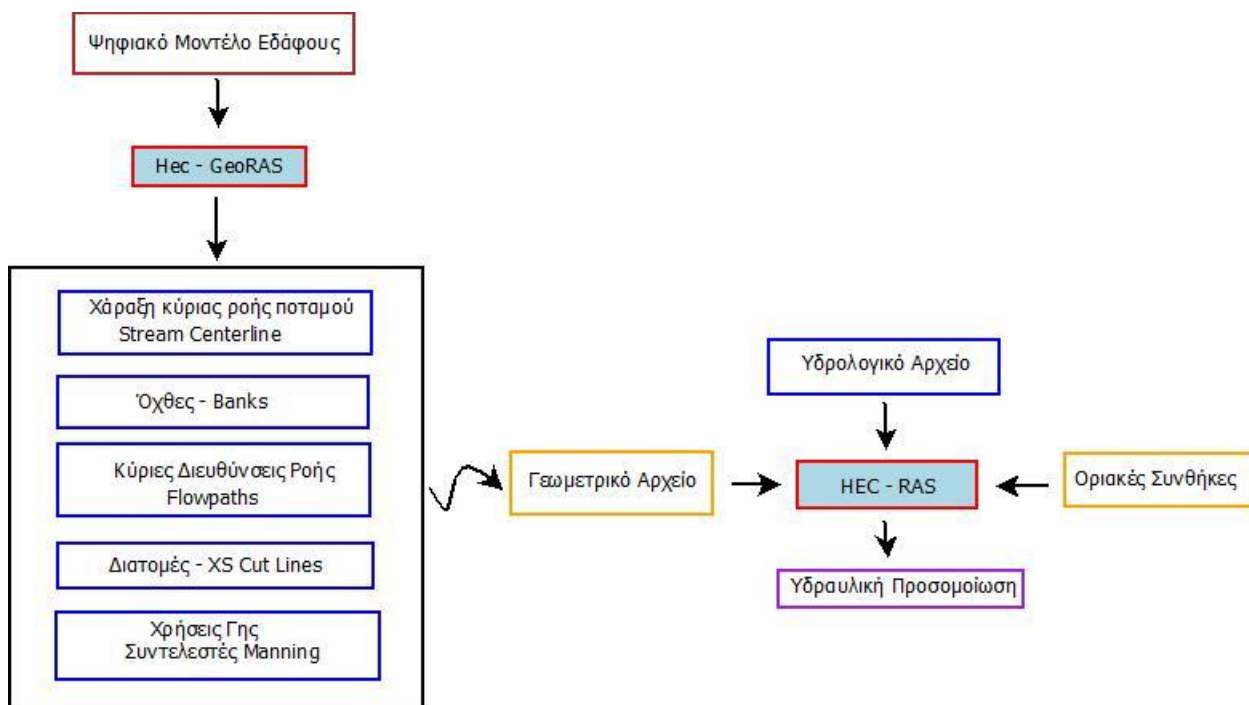
Κεφάλαιο 5

Υδραυλική Προσομοίωση Λεκάνης

Απορροής Ραφήςνας



Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υδραυλική προσομοίωση της λεκάνης απορροής φαίνεται συνοπτικά στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 5.1: Διαδικασία Υδραυλικής Προσομοίωσης της Λεκάνης Απορροής με HEC-RAS

5.1. Δημιουργία Αρχείου Γεωμετρικών Δεδομένων

Η δημιουργία του αρχείου των γεωμετρικών δεδομένων είναι απαραίτητο για τη λειτουργία του προγράμματος HEC-RAS. Η προετοιμασία του αρχείου γίνεται στο περιβάλλον του ArcMap και πιο συγκεκριμένα σε αυτό του GIS με τη χρήση μιας ειδικής εργαλειοθήκης Hec-GeoRAS. Το Hec-GeoRAS αποτελεί μια επέκταση της εργαλειοθήκης ArcHydro. Μέσω της εργαλειοθήκης αυτής γίνεται η επεξεργασία γεωμετρικών δεδομένων που προέρχονται από Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (DTM). Τέλος εκτός από τη δημιουργία γεωμετρικών δεδομένων, χρησιμοποιείται και για τη χωρική επεξεργασία των δεδομένων εξόδου.

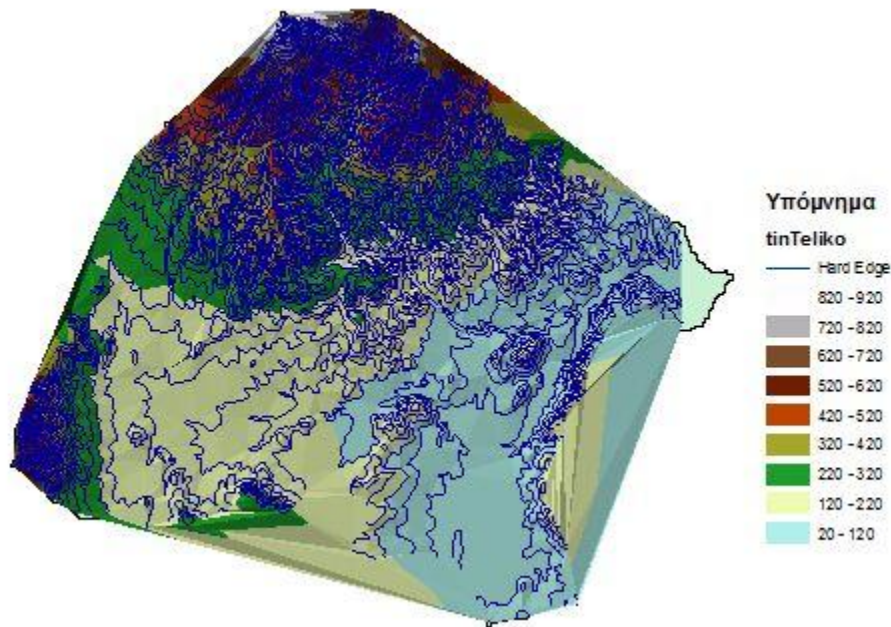
Τα βήματα που ακολουθούνται για τη δημιουργία του γεωμετρικού αρχείου είναι τα ακόλουθα:

1. Παραγωγή ισοϋψών από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (δημιουργία αρχείου tin)
2. Δημιουργία θεματικών επιπέδων (RAS Layers)
 - Κύρια γραμμή ροής – Stream Centerline (υποχρεωτικό)
 - Όχθες - Banks (προαιρετικό)
 - Κύριες διευθύνσεις ροής – Flow Paths Centerline (προαιρετικό)
 - Διατομές - XS Cut Lines (υποχρεωτικό)
 - Κατασκευές – Brigdes/Culverts (προαιρετικό)
 - Περιοχές ανενεργούς ροής – Ineffective Flow Areas (προαιρετικό)
 - Χρήσεις Γης – Landuse Areas (προαιρετικό)
 - Αναχώματα – (προαιρετικό)
 - Περιοχές αποθήκευσης νερού (προαιρετικό)
3. Σύνθεση θεματικών επιπέδων και εξαγωγή γεωμετρικού αρχείου

5.1.1 Παραγωγή ισοϋψών από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους

Στο στάδιο αυτό έγινε προσπάθεια παραγωγής ισοϋψών καμπυλών στο περιβάλλον του GIS μέσω του πακέτου εντολών του Spatial Analyst. Πιο συγκεκριμένα Spatial Analyst >> Surface Analysis >> Contour. Λόγω όμως της χαμηλής ανάλυσης του ψηφιακού

μοντέλου εδάφους οι παραχθείσες ισοϋψείς δεν ήταν ικανοποιητικές (προέκυψαν κάποιες ισοϋψείς που τέμνονταν). Έτσι για την τελική δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε μορφή tin, δόθηκαν ισοϋψείς με ισοδιάσταση 20 m και υψόμετρα εδάφους.



Εικόνα 5.1: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους tin

5.1.2 Παραγωγή θεματικών επιπέδων

Στο βήμα αυτό δημιουργούνται όλα τα θεματικά επίπεδα που περιέχουν όλες τις απαραίτητες γεωμετρικές πληροφορίες για το ποτάμι αλλά και την ευρύτερη περιοχή μελέτης.

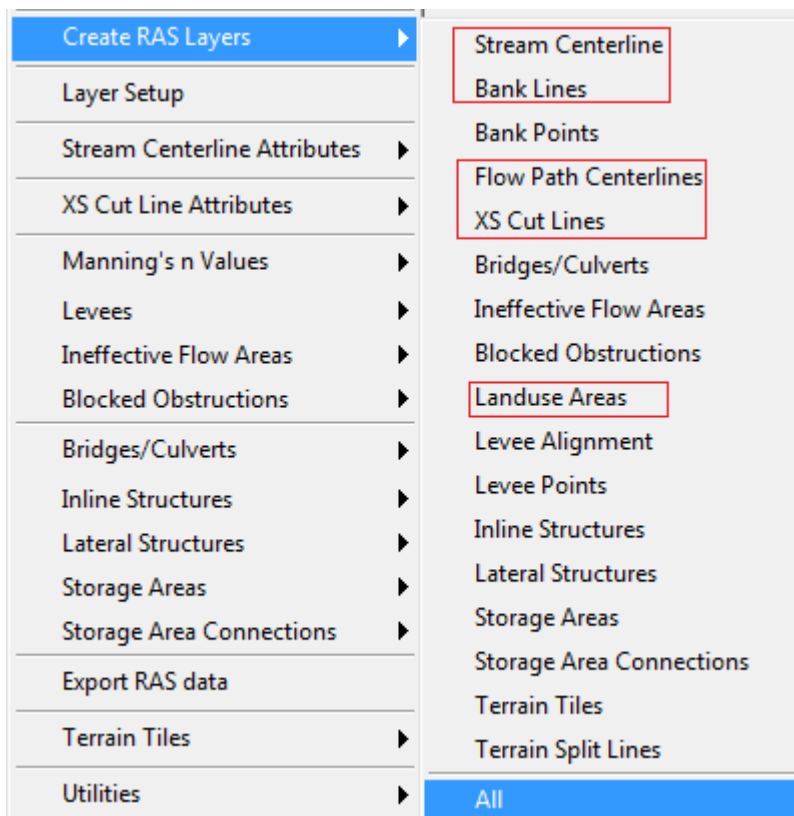
Έτσι με την επιλογή RAS-Geometry >> Create Ras Layers δημιουργείται μια κενή βάση για κάθε θεματικό επίπεδο.

Τα θεματικά επίπεδα που δημιουργήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι τα παρακάτω:

- ✓ Κύρια γραμμή ροής
- ✓ Όχθες
- ✓ Κύριες διευθύνσεις ροής
- ✓ Διατομές ποταμού

✓ Χρήσεις γης

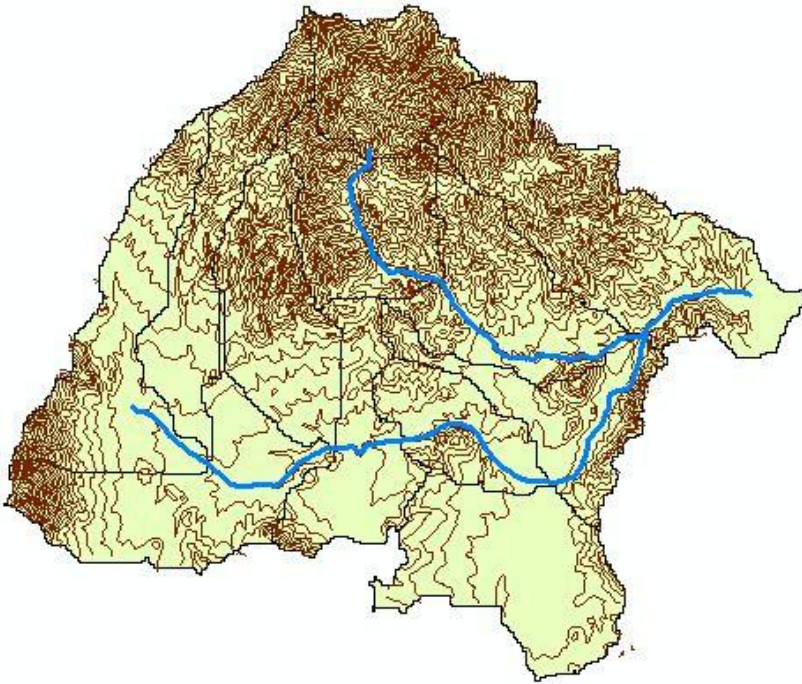
Εικονικά η παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται ακολούθως:



Εικόνα 5.2: Διαδικασία δημιουργίας θεματικών επιπέδων

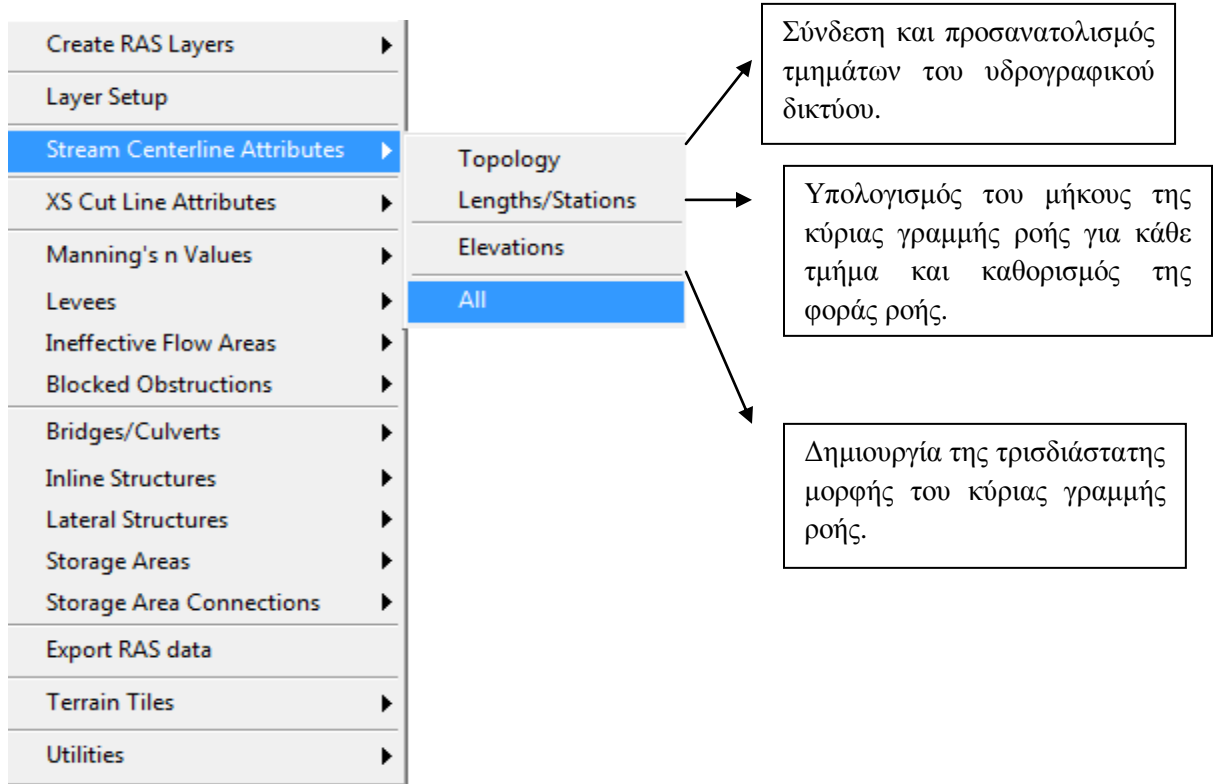
5.1.2.1 Κύρια γραμμή ροής ποταμού

Το θεματικό αυτό επίπεδο προκύπτει μετά από ψηφιοποίηση του υδρογραφικού δικτύου που παράγεται από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Η ψηφιοποίηση γίνεται κατά τη φορά της ροής.



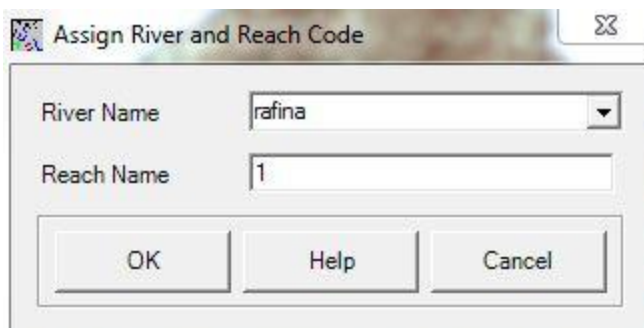
Εικόνα 5.3: Ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο

Αφού έχει ψηφιοποιηθεί το υδρογραφικό δίκτυο, υπολογίζονται κάποια από τα χαρακτηριστικά του ποταμιού. Αναλυτικότερα, η διαδικασία φαίνεται στη επόμενη εικόνα (5.4):



Εικόνα 5.4: Διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών του υδρογραφικού δικτύου

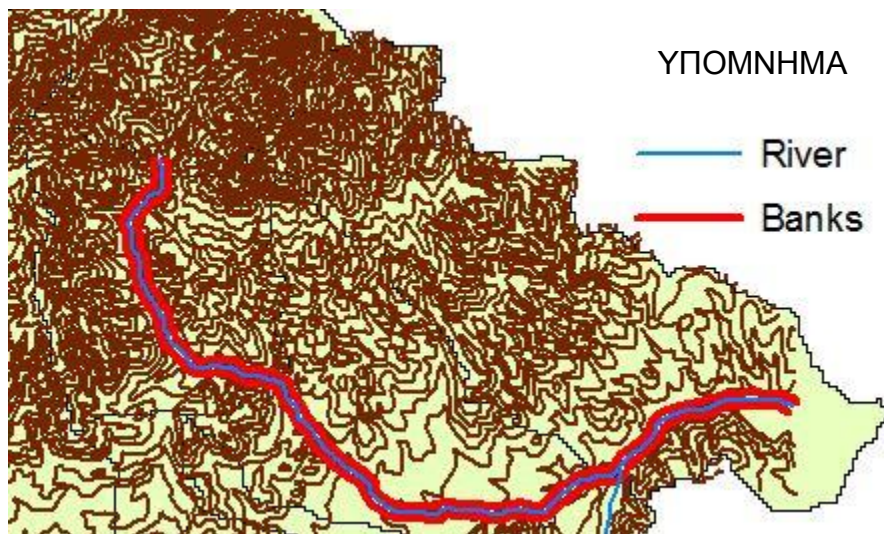
Τέλος, με τη χρήση του εργαλείου  (River Reach id) επιτυγχάνεται η ονομασία της κύριας γραμμής ροής.



Εικόνα 5.5: Ονομασία τμήματος ποταμού

5.1.2.2 Όχθες

Οι όχθες είναι δύο πολυγωνικές γραμμές οι οποίες προκύπτουν μετά από ψηφιοποίηση εκατέρωθεν της κύριας γραμμής ροής. Η ψηφιοποίηση τους μπορεί να γίνει και τμηματικά και προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Ο προσανατολισμός τους δεν έχει καμιά σημασία. Θα πρέπει όμως να τέμνουν κάθε διατομή. Το θεματικό αυτό επίπεδο είναι προαιρετικό. Στην περίπτωση όμως που δεν πραγματοποιηθεί, η δημιουργία τους πρέπει να γίνει στο περιβάλλον του προγράμματος HEC-RAS. Στην παρούσα εργασία, οι όχθες δημιουργήθηκαν στο περιβάλλον του GIS.



Εικόνα 5.6: Κύρια γραμμή ροής και όχθες

5.1.2.3 Κύριες διευθύνσεις ροής


Στην παρούσα εργασία το θεματικό αυτό επίπεδο δημιουργήθηκε εκτελώντας τις εξής εντολές: RASGeometry >> Create RAS Layers >> Flow Path CenterLine. Με τον τρόπο αυτό, υπολογίζεται η κατάντη απόσταση μεταξύ των διατομών και των όχθων.

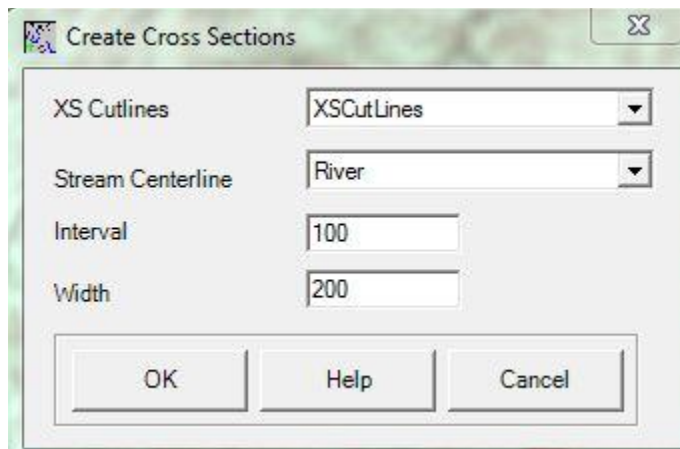
5.1.2.4 Διατομές ποταμού

Στο θεματικό αυτό επίπεδο δημιουργούνται οι διατομές του ποταμού. Οι διατομές μπορούν να σχεδιαστούν χειροκίνητα τηρώντας όμως κάποιες προϋποθέσεις. Να σχεδιάζονται κάθετα στη ροή του ποταμού και με φορά από αριστερά προς τα δεξιά κοιτώντας προς τα κατάντη και να καλύπτουν όλη την περιοχή κατάκλισης. Άλλος

τρόπος δημιουργίας των διατομών είναι αυτόματα μέσω μιας εντολής της εργαλειοθήκης του Hec-GeoRAS. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο αυτόματος τρόπος κατασκευής των διατομών. Στη συνέχεια ακολουθεί αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε.

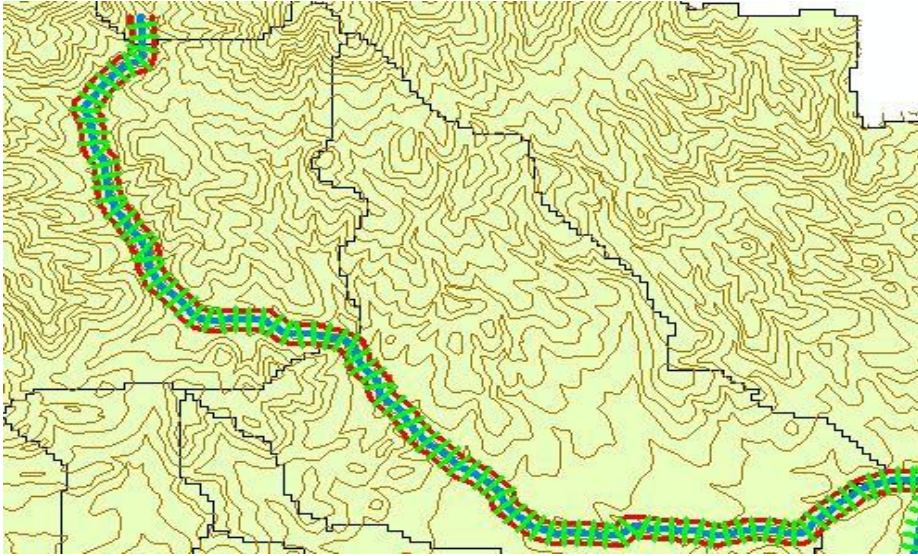
Αρχικά, δημιουργήθηκε το θεματικό επίπεδο XS Cut Lines ακολουθώντας τις εντολές Ras Geometry >> Create Ras Layers >> XS Cut Lines .

Έπειτα, χρησιμοποιώντας το εργαλείο  γίνεται ο ορισμός του πλάτους των διατομών καθώς επίσης και το μήκος του βήματος - ισοδιάσταση που θα κατασκευαστούν οι διατομές. Τα πλάτος των διατομών ορίστηκε 200 m ενώ το βήμα 100 m.



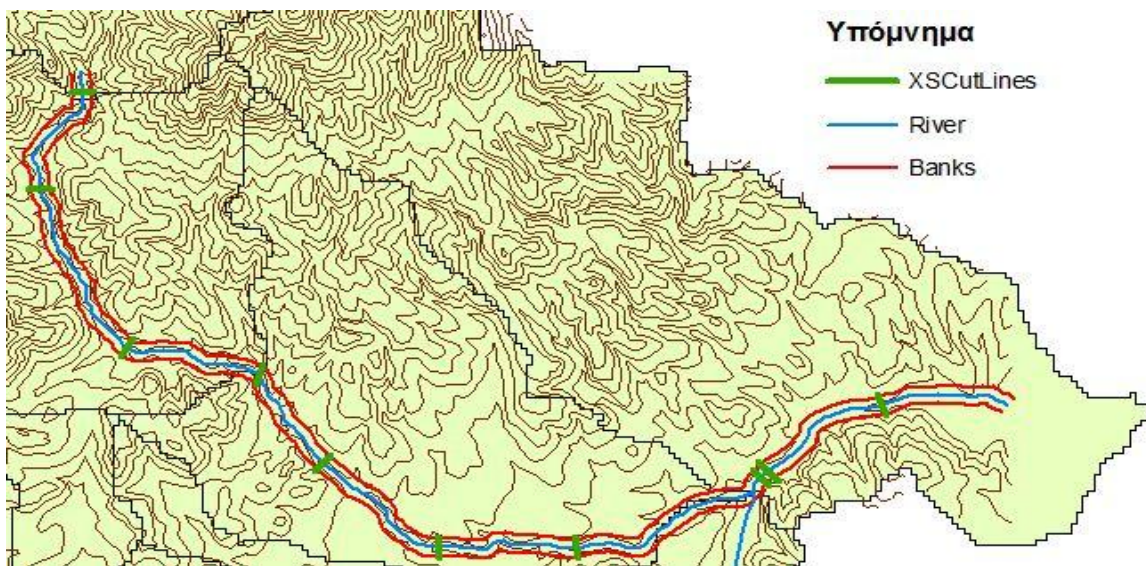
Εικόνα 5.7: Αυτόματη δημιουργία διατομών, ορισμός πλάτους και ισοδιάστασης

Μετά την εκτέλεση της παραπάνω εντολής προέκυψε η ακόλουθη εικόνα (5.8).




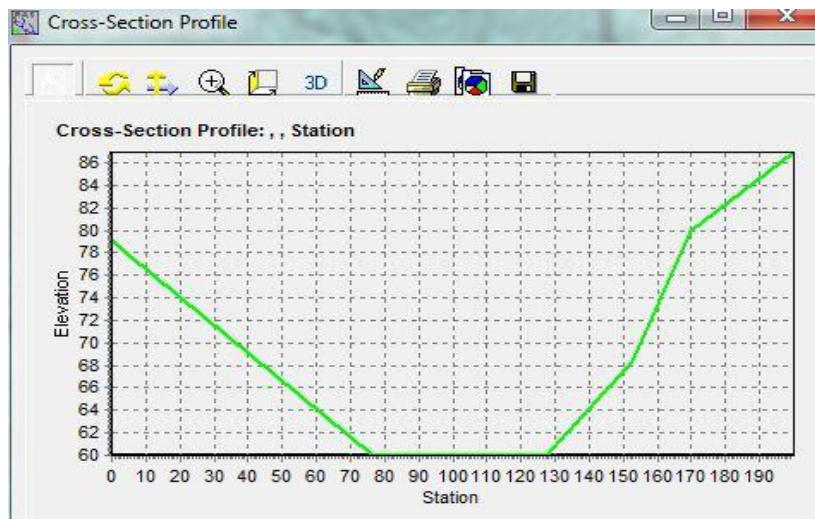
Εικόνα 5.8: Διατομές με ισοδιάσταση 100 m

Η μελέτη όμως όλων των παραπάνω διατομών δεν είναι απαραίτητη. Έτσι, έγινε επιλογή των διατομών που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, όπως αυτές που βρίσκονται στις θέσεις όπου υπάρχουν σταθμοί μέτρησης παροχών – στάθμης. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει κάποιος έλεγχος των αποτελεσμάτων που θα διεξαχθούν από τη μετέπειτα διαδικασία, που θα πραγματοποιηθεί στο πρόγραμμα HEC-RAS. Τελικώς, επιλέχθηκαν και μελετήθηκαν 10 διατομές, που φαίνονται και στην ακόλουθη εικόνα.



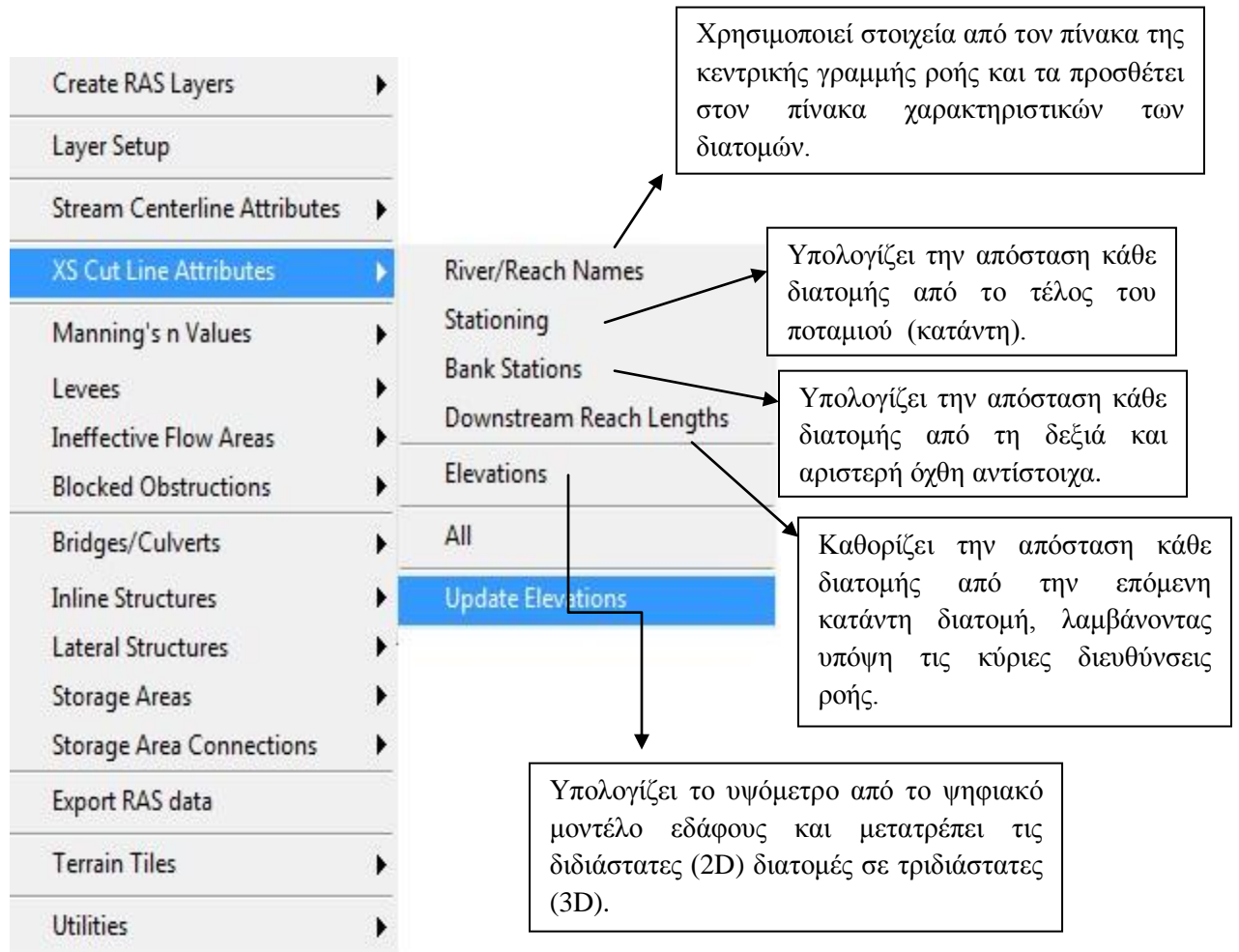
Εικόνα 5.9: Επιλεγθείσες διατομές

Επιπρόσθετα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα χρησιμοποιώντας το εργαλείο  (XS Plot) να κάνει επισκόπηση της κάθε διατομής.



Εικόνα 5.10: Ενδεικτική διατομή του ρέματος Ραφήνα

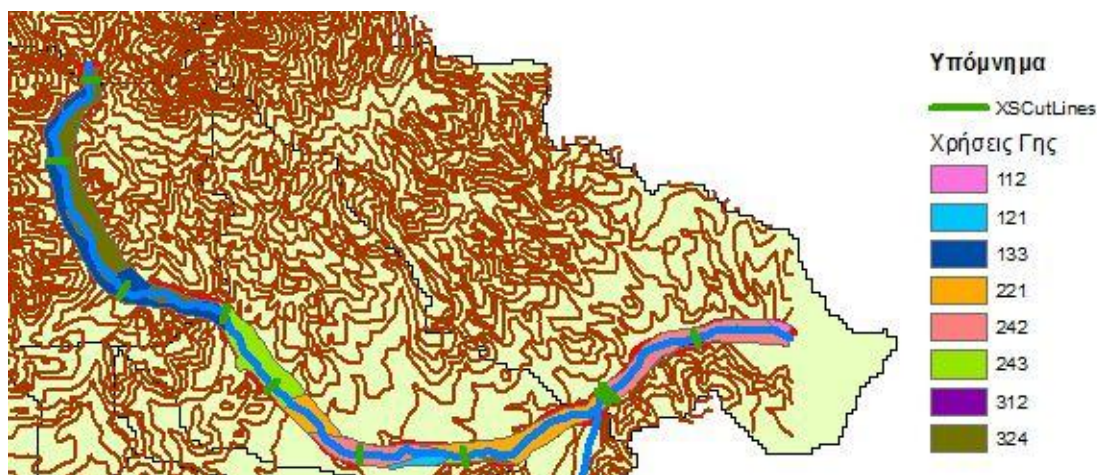
Τέλος, γίνεται ο υπολογισμός κάποιων χαρακτηριστικών στον πίνακα του θεματικού επιπέδου XS Cut Lines που είναι απαραίτητα κατά την εισαγωγή τους στο πρόγραμμα HEC-RAS. Αναλυτικά η διαδικασία φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (5.11):



Εικόνα 5.11: Διαδικασία υπολογισμού χαρακτηριστικών των διατομών και ερμηνεία αυτών

5.1.2.5 Χρήσεις Γης

Ακολουθώντας τη διαδικασία που έχει προαναφερθεί, δηλαδή RAS Geometry >> Create Ras Layers >> Landuse Areas, δημιουργείται το θεματικό επίπεδο των χρήσεων γης. Σε αυτό εισάγεται ο χάρτης χρήσεων γης και με την εντολή clip απομονώνονται μόνο τα πολύγωνα χρήσεων γης που τέμνονται από τις σχεδιασθείσες διατομές.



Εικόνα 5.12: Πολύγωνα χρήσεων γης που τέμνονται από τις διατομές

Η δημιουργία του θεματικού αυτού επιπέδου βοηθάει στον προσδιορισμό του συντελεστή Manning για κάθε διατομή. Ανάλογα λοιπόν με το πολύγωνο της χρήσης γης εκτιμάται η αντίστοιχη τιμή n του Manning με τη βοήθεια πινάκων.

Πίνακας 5.1: Συντελεστής Manning ανάλογα με τη χρήση γης.

LUCode	N_Value	Description
122	0.015	Gravel and stones
243	0.035	Agriculture, significant natural vegetation
211	0.04	Non-irrigated arable land
242	0.045	Complex cultivation patterns
324	0.03	Transitional woodland – shrub
331	0.025	Beaches, dunes, sand
311	0.04	Broad-leaved forest
321	0.042	Natural grasslands
312	0.045	Coniferous forest
131	0.02	Mineral extraction sites
133	0.02	Construction sites
323	0.045	Sclerophyllous vegetation

Έτσι, αποδίδοντας τιμές n σε κάθε πολύγωνο ανάλογα με τη χρήση γης (πίνακας 5.1), καταρτίζεται πίνακας μέσω της εντολής RAS Geometry >> Manning's N Values >> Create LU Manning Table. Έπειτα, εξάγονται οι τιμές που αφορούν κάθε διατομή σε νέο πίνακα μέσω της εντολής RAS Geometry >> Manning's N Values >> Extract N Values. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά μήκος μιας διατομής υπάρχει περίπτωση να έχουμε διαφορετικούς συντελεστές Manning λόγω των διαφορετικών χρήσεων γης κατά μήκος αυτών.

5.1.3 Σύνθεση θεματικών επιπέδων και εξαγωγή γεωμετρικού αρχείου

Για την τελική παραγωγή του γεωμετρικού αρχείου που θα εισαχθεί στο πρόγραμμα HEC-RAS, είναι απαραίτητη η σύνθεση όλων των θεματικών επιπέδων που έχουν δημιουργηθεί και του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Αυτό πραγματοποιείται από τις εντολές RAS Geometry >> Layer Setup (Εικόνα 5.13).



Εικόνα 5.13: Σύνθεση θεματικών επιπέδων

Τέλος, η εξαγωγή του γεωμετρικού αρχείου γίνεται μέσω της εντολής RAS Geometry >> Export Ras Data (Εικόνα 5.14).



Εικόνα 5.14: Εξαγωγή γεωμετρικού αρχείου

5.2 Υδραυλική Προσομοίωση Υδατορεύματος (HEC-RAS)

Μοντέλο 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 ανάπτυξή του έγινε σταδιακά με σκοπό να κατασκευαστεί ένα μοντέλο όπου ο ρόλος του χρήστη είναι ενεργός σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης (Ραμπιάς, 2007).

Πρόκειται για ένα πολυχρηστικό εργαλείο για τη μονοδιάστατη ανάλυση και προσομοίωση φυσικών υδατορευμάτων. Αφορά ένα σύνολο μοντέλων με 4 συνιστώσες ανάλυσης (Bruner 2008a):

- 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

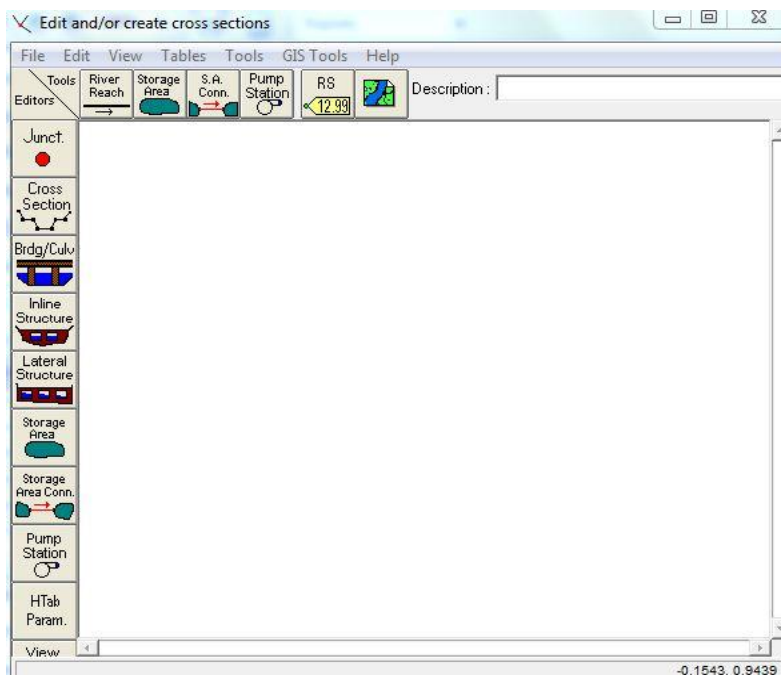
Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο έχει τη δυνατότητα υπολογισμού της στάθμης του νερού για βαθμιαίως μεταβαλλόμενη ροή σε δίκτυο τεχνητών αγωγών, σε σύστημα υδατορευμάτων με τεχνικά έργα ή φυσικές κοίτες σε συνθήκες υποκρίσιμης και υπερκρίσιμης ροής.

5.2.1 Υδραυλική προσομοίωση σε συνθήκες μόνιμης ροής

5.2.1.1 Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων

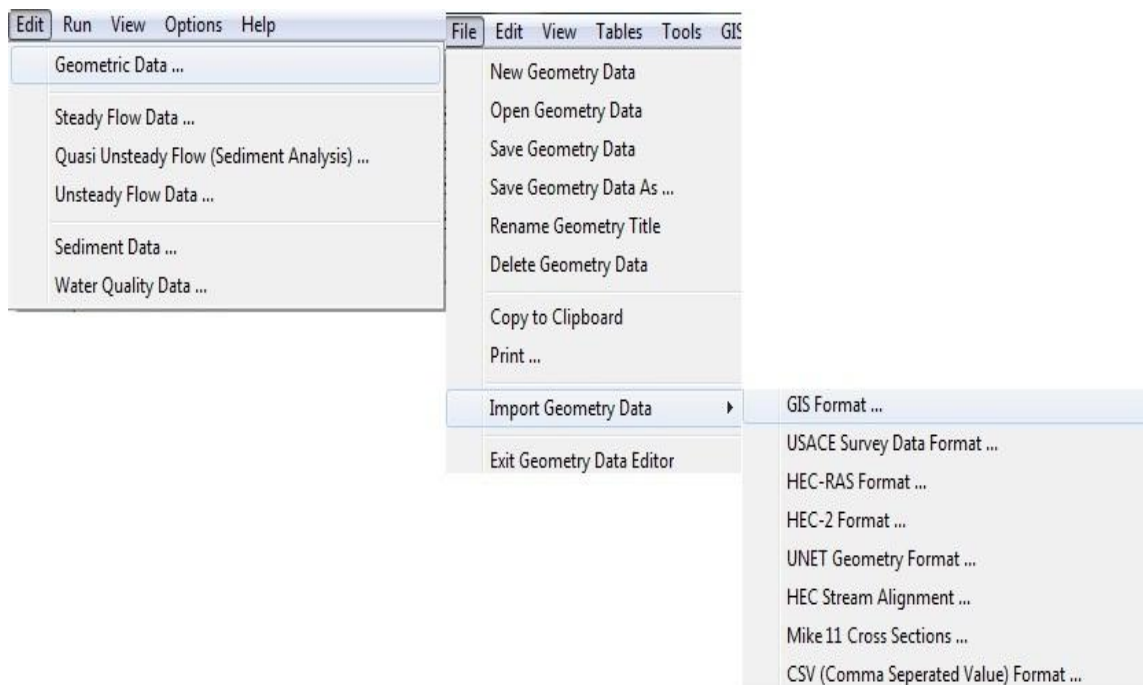
Η εισαγωγή των γεωμετρικών δεδομένων γίνεται εκτελώντας τις εξής εντολές:

- Edit >> Geometric data



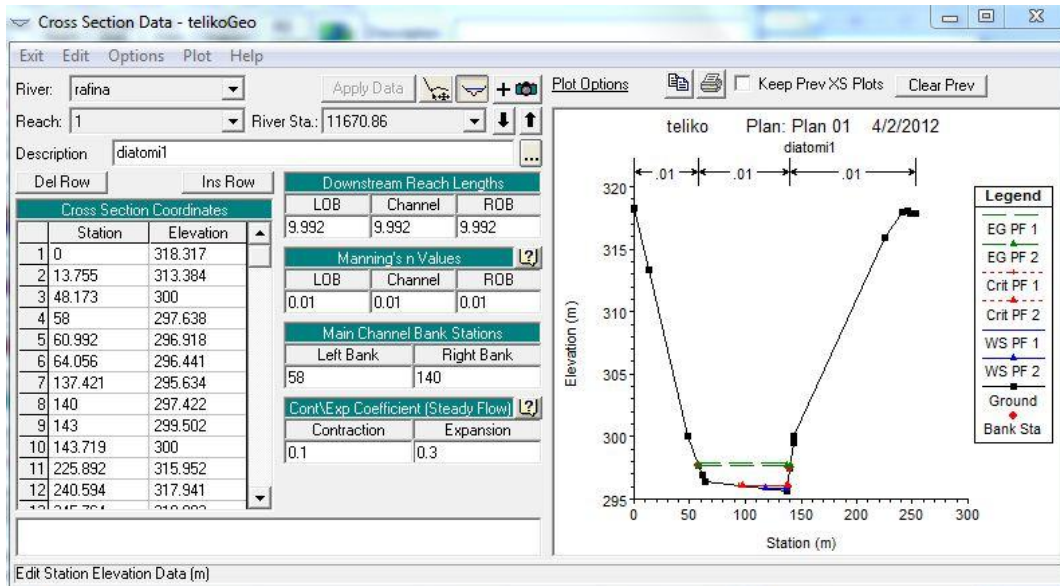
Εικόνα 5.15: Περιβάλλον εισαγωγής γεωμετρικού αρχείου

- File >> Import Geometry Data >> GIS Format



Εικόνα 5.16: Διαδικασία εισαγωγής γεωμετρικού αρχείου

Έπειτα, χρησιμοποιώντας την εντολή cross section εμφανίζεται μια καρτέλα όπου παρουσιάζονται όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής. Με τον τρόπο αυτό, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να διορθώσει ή να συμπληρώσει εκ νέου κάποια από αυτά.



Εικόνα 5.17: Παράθυρο με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε διατομής.

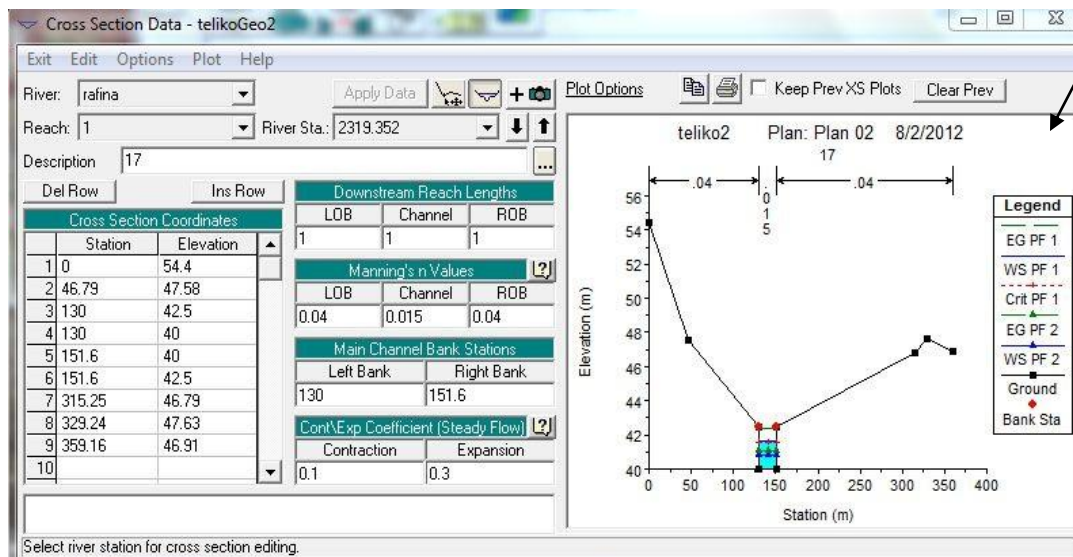
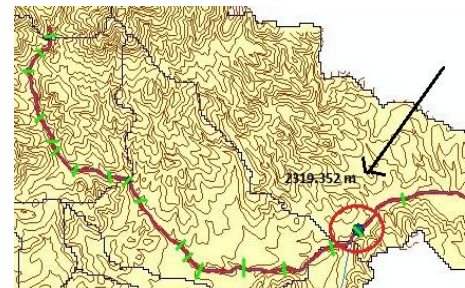
Αναλυτικότερα, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αναγράφονται είναι τα ακόλουθα:

- Όνομα και τμήμα του ποταμού που ανήκει η διατομή (River, Reach)
- Κωδικός αριθμός της διατομής (River Sta)
- Πίνακας με όλα τα σημεία της διατομής (Cross Section Coordinates)
- Αποστάσεις της δεξιάς και της αριστερής όχθης από το αριστερό άκρο της διατομής (Main Channel Bank Stations)
- Απόσταση κάθε διατομής από την επόμενη κατάντη διατομή, λαμβάνοντας υπόψη τις κύριες διευθύνσεις ροής. (Downstream Reach Lengths)
- Τιμές του συντελεστή Manning
Οι τιμές που ορίστηκαν στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν με βάση τις χρήσεις γης.
- Συντελεστές συστολής και διαστολής

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί πως οι συντελεστές διαστολής - συστολής (contraction – expansion) χρησιμοποιούνται για να εξισορροπήσουν την απώλεια ενέργειας της ροής του νερού κατά τη μετάβασή του από τη μία διατομή στην επόμενη.

Οι τιμές που παίρνουν οι συντελεστές αυτοί βρίσκονται εξ' ορισμού στο πρόγραμμα. Συγκεκριμένα contraction = 0.1 και expansion = 0.3.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί πως στη θέση 2319.352 m από την αρχή του ρέματος, υπάρχει σταθμός μέτρησης παροχών (σταθμός Ραφήνα) και μέτρηση πραγματικής διατομής. Συγκεκριμένα, στο σημείο αυτό η διατομή είναι ορθογωνική με πλάτος 21.6 m και ύψος 2.5 m. Έτσι, στο σημείο αυτό έγινε επέμβαση στα γεωμετρικά στοιχεία και κατασκευάστηκε μια διατομή όμοια με την πραγματική.



Εικόνα 5.18: Ορθογωνική διατομή και τα χαρακτηριστικά της.

Επιπρόσθετα, ακολουθεί μια εικόνα (5.15) όπου βρίσκεται η μετρημένη διατομή και η οποία επιβεβαιώνει την επιλογή του συντελεστή Manning στη διατομή αυτή. Πιο συγκεκριμένα είναι 0.015 στο κεντρικό κανάλι και 0.04 στις όχθες όπου υπάρχει βλάστηση.

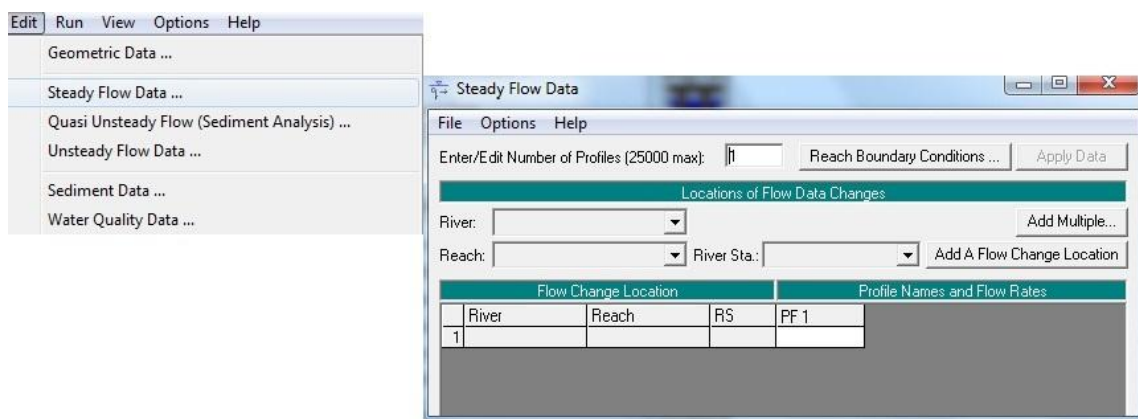


Εικόνα 5.19: Εικόνα του ρέματος όπου υπάρχει μετρημένη διατομή.

5.2.1.2 Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων

Για την εισαγωγή των υδρολογικών δεδομένων επιλέχθηκαν συνθήκες μόνιμης ροής. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

Edit >> Steady Flow Data



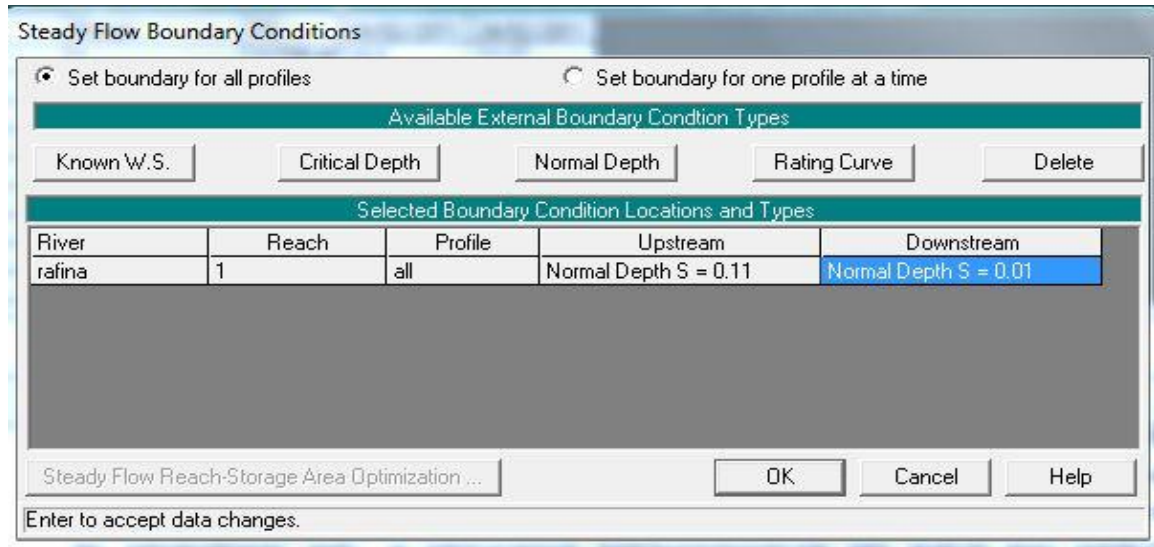
Εικόνα 5.20: Διαδικασία εισαγωγής υδρολογικών δεδομένων

Έπειτα, ο χρήστης πρέπει να ορίσει τον αριθμό των προφίλ, δηλαδή των διαφορετικών αναλύσεων για κάθε ξεχωριστό επεισόδιο βροχόπτωσης συγκεκριμένης διάρκειας. Στην παρούσα εργασία ο αριθμός των προφίλ είναι δύο, ένα για το επεισόδιο βροχής της 04/02/2011 και ένα για το επεισόδιο της 24/02/2011. Για τα προφίλ αυτά που δημιουργήθηκαν, εισάγονται οι αντίστοιχες πλημμυρικές αιχμές, όπως αυτές προέκυψαν από την υδρολογική ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος HEC-HMS (κεφάλαιο 3). Επίσης, με μια σειρά εντολών Options >> Edit Profiles names δίνεται η δυνατότητα μετονομασίας του προφίλ.

Σε επόμενο στάδιο, ο χρήστης καλείται να προσδιορίσει τις οριακές συνθήκες (Reach Boundary Conditions). Οι οριακές συνθήκες αποτελούν ουσιαστικά το σημείο έναρξης για τον υπολογισμό των επιμέρους στοιχείων της εξίσωσης ενέργειας (5.1). Η θέση όπου ορίζονται οι οριακές συνθήκες εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος. Στην περίπτωση της υποκρίσιμης ροής, οι υπολογισμοί γίνονται από ανάντη προς κατάντη και έτσι η οριακή συνθήκη ορίζεται στην πλέον κατάντη θέση. Αντίστοιχα στην περίπτωση της υπερκρίσιμης ροής, οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται από κατάντη προς ανάντη και η οριακή συνθήκη ορίζεται πλέον στην ανάντη θέση. Τέλος, στην περίπτωση της μικτής ροής, επιβάλλεται να οριστούν συνθήκες και στα δύο άκρα (ανάντη και κατάντη).

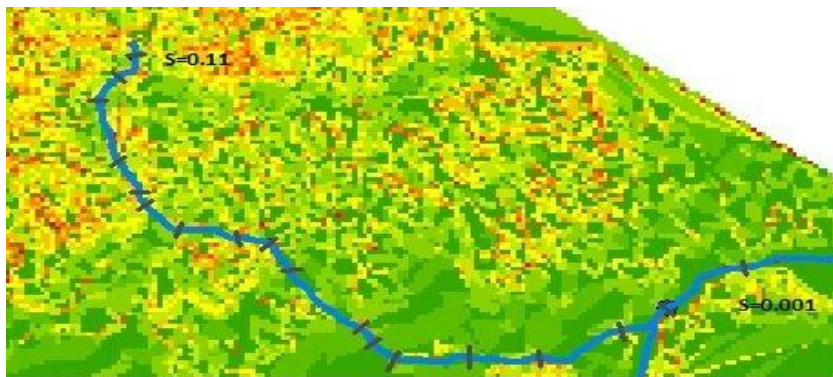
Επιπλέον, ο χρήστης έχει διάφορες επιλογές για να ορίσει τις οριακές συνθήκες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά:

- Known Water Surface Elevation (Γνωστό πιεζομετρικό φορτίο): Εισαγωγή πιεζομετρικού φορτίου για κάθε προφίλ.
- Critical Depth (Κρίσιμο Βάθος): Στην περίπτωση αυτή, το πρόγραμμα υπολογίζει από μόνο του το κρίσιμο βάθος και το χρησιμοποιεί σαν οριακή συνθήκη.
- Normal Depth (Ομοιόμορφο Βάθος): Εισάγεται η κλίση της γραμμής ενέργειας, για να υπολογιστεί το ομοιόμορφο βάθος για κάθε προφίλ (Bruner, 2008b).
- Rating Curve (Καμπύλη στάθμης παροχής): Με την επιλογή αυτή εμφανίζεται ένα παράθυρο, όπου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει ζεύγη τιμών στάθμης - παροχής. Έτσι με την καμπύλη αυτή το πρόγραμμα μπορεί να υπολογίσει με παρεμβολή το πιεζομετρικό φορτίο για κάθε προφίλ.



Εικόνα 5.21: Ορισμός οριακών συνθηκών

Τελικά, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε μικτή ροή καθώς οι κλίσεις του εδάφους ανάντη είναι πολύ έντονες της τάξης του 10%, ενώ κατόντη σχετικά ήπιες της τάξης του 0.1%. Έτσι, έγινε ορισμός των οριακών συνθηκών και στα δύο άκρα, χρησιμοποιώντας την επιλογή Normal Depth, καθώς δεν υπήρχαν επαρκή δεδομένα για τις υπόλοιπες επιλογές. Οι κλίσεις ορίστηκαν με τη βοήθεια του Arcmap. Ειδικότερα, με τη χρήση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους δημιουργήθηκε ο κάνναβος κλίσεων εκτελώντας τις ακόλουθες εντολές: Spatial analyst >> slope. Έτσι, προέκυψε πως στην ανάντη διατομή έχουμε κλίση $S = 0.11$ και στην κατόντη $S = 0.001$. Αυτές είναι και οι οριακές συνθήκες που εισήχθησαν (εικόνα 5.22).



Εικόνα 5.22: Κλίσεις ανάντη και κατόντη διατομής.

5.2.1.3 Εξισώσεις επίλυσης στο HEC-RAS

Υπολογίζει την ελεύθερη επιφάνεια του νερού από διατομή σε διατομή επιλύοντας την εξίσωση ενέργειας σε μονοδιάστατη ανάλυση.

Εξίσωση ενέργειας

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (5.1)$$

Όπου:

Z_1, Z_2 : υψόμετρα

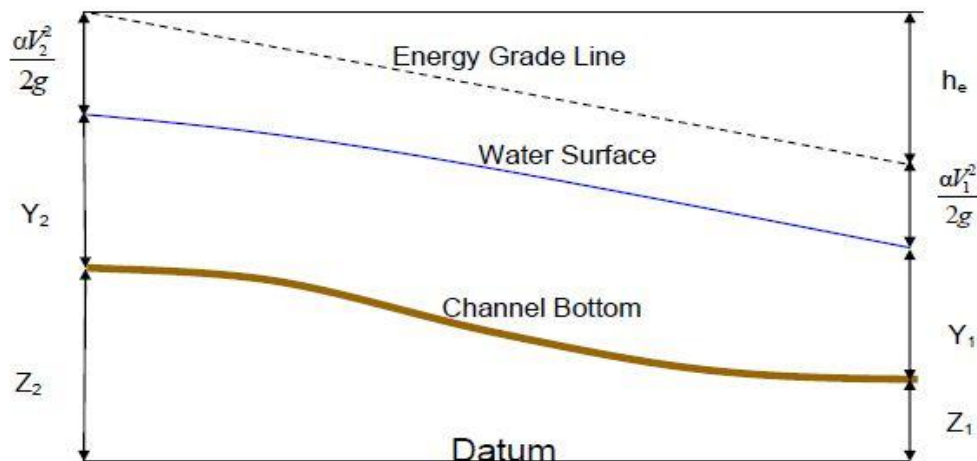
Y_1, Y_2 : βάθη νερού

a_1, a_2 : συντελεστές συνόρθωσης κινητικής ενέργειας ταχύτητας

V_1, V_2 : μέσες ταχύτητες διατομών

g : επιτάχυνση βαρύτητας

h_e : ολικές απώλειες ενέργειας (γραμμικές και τοπικές)



Εικόνα 5.23: Απεικόνιση μεγεθών της εξίσωσης ενέργειας (Bruner, 2008b)

Το ολικό ύψος των απωλειών συνίσταται στο ύψος των γραμμικών και τοπικών απωλειών με τη χρήση της ακόλουθης σχέσης:

$$h_e = L\overline{S_f} + c \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (5.2)$$

Όπου:

L : μέση σταθμισμένη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών

$\overline{S_f}$: απώλειες τριβής

C : συντελεστής συστολής/διαστολής (οι τιμές τους υπάρχουν εξ' ορισμού στο πρόγραμμα)

$\left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right|$: διαφορά κινητικής ενέργειας μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών

Γραμμικές απώλειες

Για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών, υπολογίζεται αρχικά η μέση σταθμισμένη απόσταση (ως προς τις παροχές) μεταξύ των διαδοχικών διατομών χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$L = \frac{L_{lob} Q_{lob} + L_{ch} Q_{ch} + L_{rob} Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}} \quad (5.3)$$

όπου:

L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} : αποστάσεις μεταξύ των διατομών κατά μήκος των διευθύνσεων ροής για το αριστερό τμήμα, την κοίτη και το δεξί τμήμα αντίστοιχα

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

Προσδιορισμός συντελεστή μεταφοράς K

Ο προσδιορισμός του συντελεστή αυτού υπολογίζεται για κάθε διατομή ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία. Από το παράθυρο Run >> Steady Flow Data γίνεται η επιλογή της εντολής «options» και έπειτα της εντολής «Conveyance calculation». Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε τελικώς η μέθοδος «At breaks in n values only». Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή τα δύο πλευρικά τμήματα της διατομής (πέραν της δεξιάς και αριστερής

όχθης) χωρίζονται σε επιμέρους τμήματα ανάλογα με το αν αλλάζει ο συντελεστής Manning n ή όχι. Σκοπός της μεθόδου είναι κάθε τμήμα να έχει μια ενιαία τιμή n .

$$\text{Έπειτα υπολογίζεται η τιμή } K = \frac{1,486}{n} AR^{2/3} \quad (5.4)$$

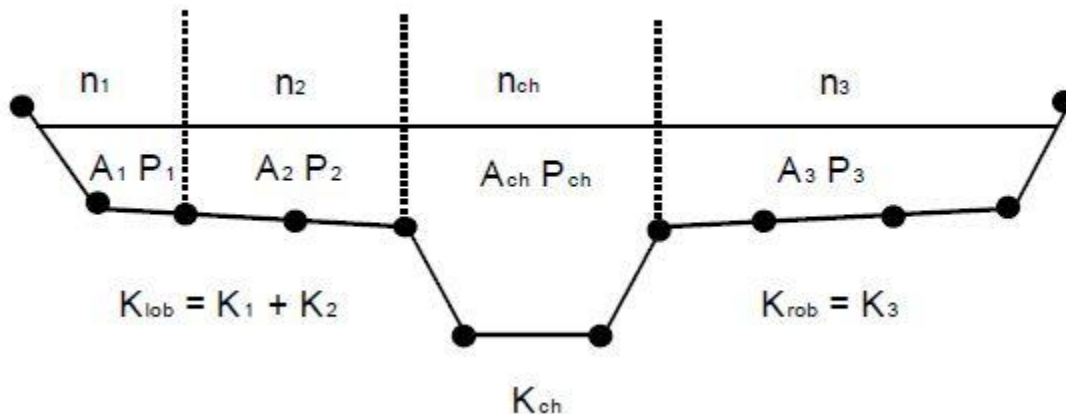
όπου

A: εμβαδό διατομής

R: βρεχόμενη περίμετρος

για κάθε τμήμα ενιαίου συντελεστή n και οι επιμέρους τιμές αθροίζονται, ώστε να προκύψουν τελικά οι τιμές K_{lob} για το αριστερό πλευρικό τμήμα της διατομής και K_{rob} για το δεξί πλευρικό τμήμα. (Εικόνα 5.24). Το τμήμα εντός της κοίτης αντιμετωπίζεται γενικά ως ενιαίο, αλλά ο χρήστης μπορεί να εισάγει και περισσότερους συντελεστές τραχύτητας αν αυτό κρίνεται αναγκαίο (Ραδαίος, 2006).

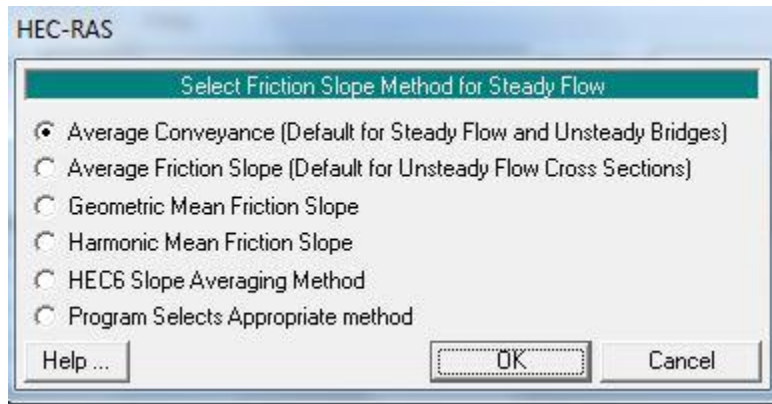
Τελικά, ο τελικός συντελεστής μεταφοράς, προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους. Δηλαδή $K = K_{lob} + K_{ch} + K_{rob}$ (5.5)



Εικόνα 5.24: Υπολογισμός συντελεστή μεταφοράς K για όλη τη διατομή

Απώλειες τριβής

Οι απώλειες τριβής υπολογίζονται μέσω της εντολής «Friction Slope Method for Steady Flow». Το παράθυρο που εμφανίζεται δίνει τη δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε 6 μεθόδους. Από αυτές επιλέχθηκε η «Conveyance Average», η τιμή της οποίας προσδιορίζεται εξ' ορισμού του προγράμματος (Default for Steady Flow) (Εικόνα 5.25).



Εικόνα 5.25: Προσδιορισμός απωλειών τριβής

Σύμφωνα με την παραπάνω μέθοδο η μέση κλίση της γραμμής ενέργειας δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\overline{S_f} = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (5.6)$$

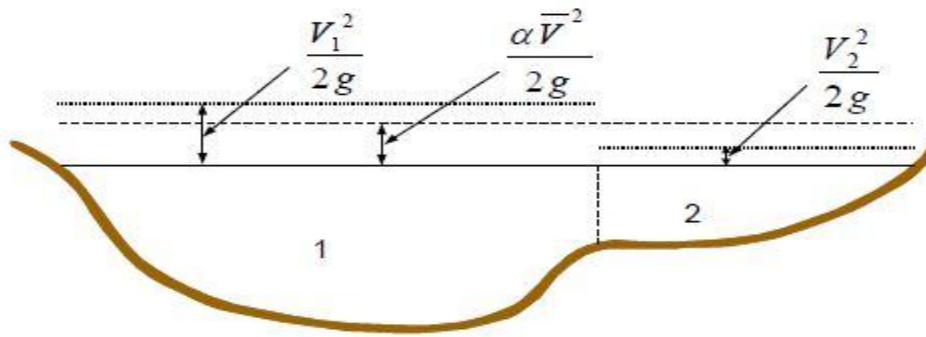
όπου

Q_1, Q_2 : μέσες παροχές σε δύο διαδοχικές παροχές

K_1, K_2 : συντελεστής K για κάθε διατομή

Τοπικές απώλειες

Για τον τελικό υπολογισμό των ολικών απωλειών θα πρέπει να προσδιοριστούν και οι τοπικές απώλειες. Εκτός από το συντελεστή συστολής/διαστολής, η τιμή του οποίου υπάρχει εξ' ορισμού στο πρόγραμμα, απομένει ο υπολογισμός της μέσης κινητικής ενέργειας της κάθε διατομής. Ο υπολογισμός της γίνεται με βάση το παρακάτω σχήμα (Εικόνα 5.26) και τη σχέση (5.7).



Εικόνα 5.26: Υπολογισμός μέσης κινητικής ενέργειας

$$a \frac{V^2}{2g} = \frac{Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2} \quad (5.7)$$

όπου

V_1, V_2 : Ταχύτητα στο δεξί και αριστερό άκρο της διατομής

Q_1, Q_2 : Παροχές στο δεξί και αριστερό άκρο της διατομής

V : Μέση ταχύτητα όλης της διατομής

Με βάση την παραπάνω σχέση προκύπτει η ακόλουθη (5.8) μέσω της οποίας προσδιορίζεται το a που είναι ο συντελεστής συνόρθωσης της κινητικής ενέργειας για κάθε διατομή.

$$a = \frac{Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2}{(Q_1 + Q_2) V^2} \quad (5.8)$$

Έτσι, έχοντας υπολογίσει το συντελεστή συνόρθωσης της κινητικής ενέργειας καθώς και τις μέσες κινητικές ενέργειες κάθε διατομής γίνεται ο υπολογισμός των μέσων απωλειών ενέργειας με την ακόλουθη εξίσωση:

$$h_e = c \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (5.9)$$

όπου

c : συντελεστής συστολής /διαστολής για τις τοπικές απώλειες

a_1, a_2 : συντελεστές συστολής διαστολής για 2 διαδοχικές διατομές

V_1, V_2 : ταχύτητες 2 διαδοχικών διατομών

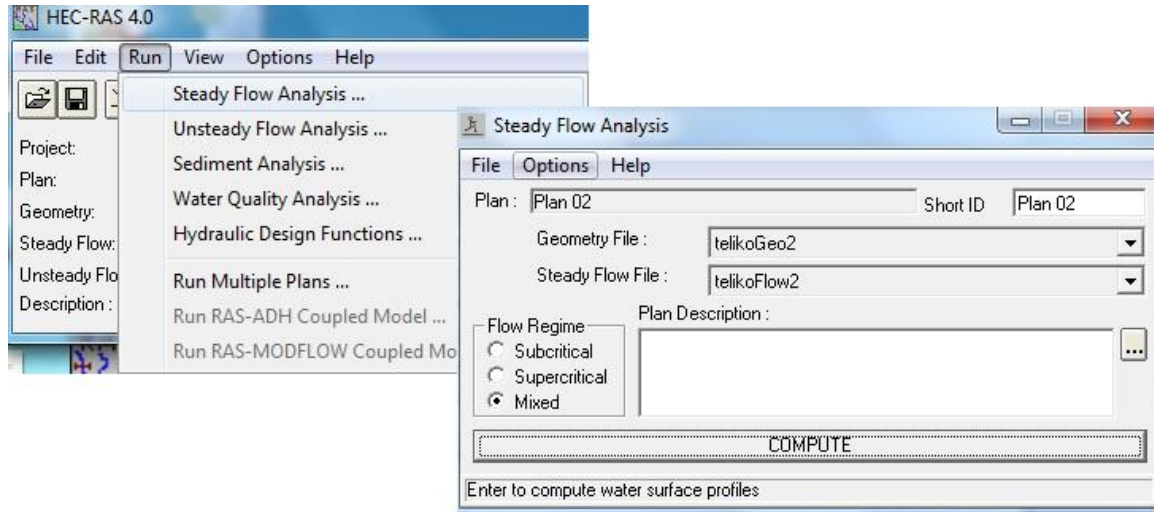
Για την ολοκλήρωση της επαναληπτικής προσομοίωσης του αλγορίθμου, θα πρέπει να προσδιοριστεί αν το καθεστώς ροής είναι υποκρίσιμο ή υπερκρίσιμο ή ακόμα και μικτό. Στην παρούσα εργασία η ροή θεωρήθηκε μικτή και έτσι καθορίστηκαν οριακές συνθήκες και στα δύο άκρα.

Τέλος, κατά τη διάρκεια των υπολογισμών το πρόγραμμα υπολογίζει το κρίσιμο βάθος με τη μέθοδο «Parabolic Method» από την επιλογή Options >> Select Method of Computing Critical Depth, η οποία προτείνεται από τους κατασκευαστές του HEC-RAS (Bruner, 2008b), και το συγκρίνει με το πιεζομετρικό βάθος στη διατομή μελέτης, συμβάλλοντας έτσι στην ορθότητα των αποτελεσμάτων.

5.2.1.4 Εκτέλεση υδραυλικών υπολογισμών

Η εκτέλεση υδραυλικών υπολογισμών με σκοπό τη διεξαγωγή αποτελεσμάτων είναι το τελευταίο βήμα για την ολοκλήρωση της υδραυλικής προσομοίωσης. Η διεργασία γίνεται από την εντολή Run >> Steady Flow. Στο παράθυρο που εμφανίζεται, ο χρήστης καθορίζει τα εξής στοιχεία:

- ✓ Ονομασία σχεδίου (Plan Id)
- ✓ Μήτρα γεωμετρικών δεδομένων (Geometry file)
- ✓ Μήτρα υδρολογικών δεδομένων μόνιμης ροής (Flow file)
- ✓ Είδος ροής (mixed στην παρούσα εργασία όπως έχει προαναφερθεί)



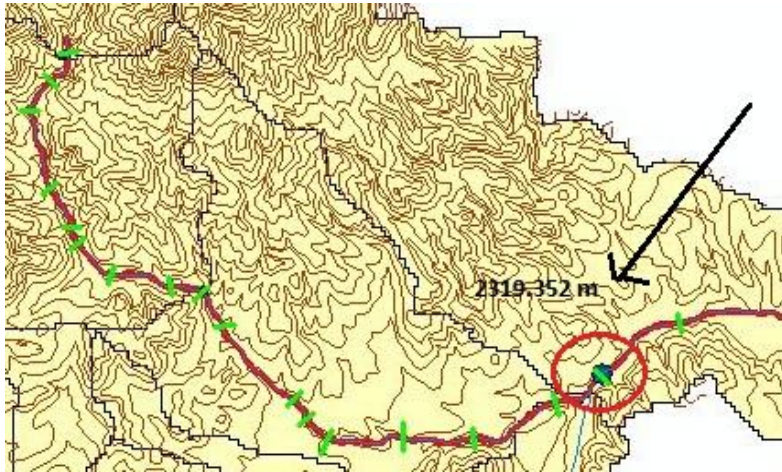
Εικόνα 5.27: Διαδικασία εκτέλεσης υδραυλικών υπολογισμών.

5.2.1.4.1 Αποτελέσματα

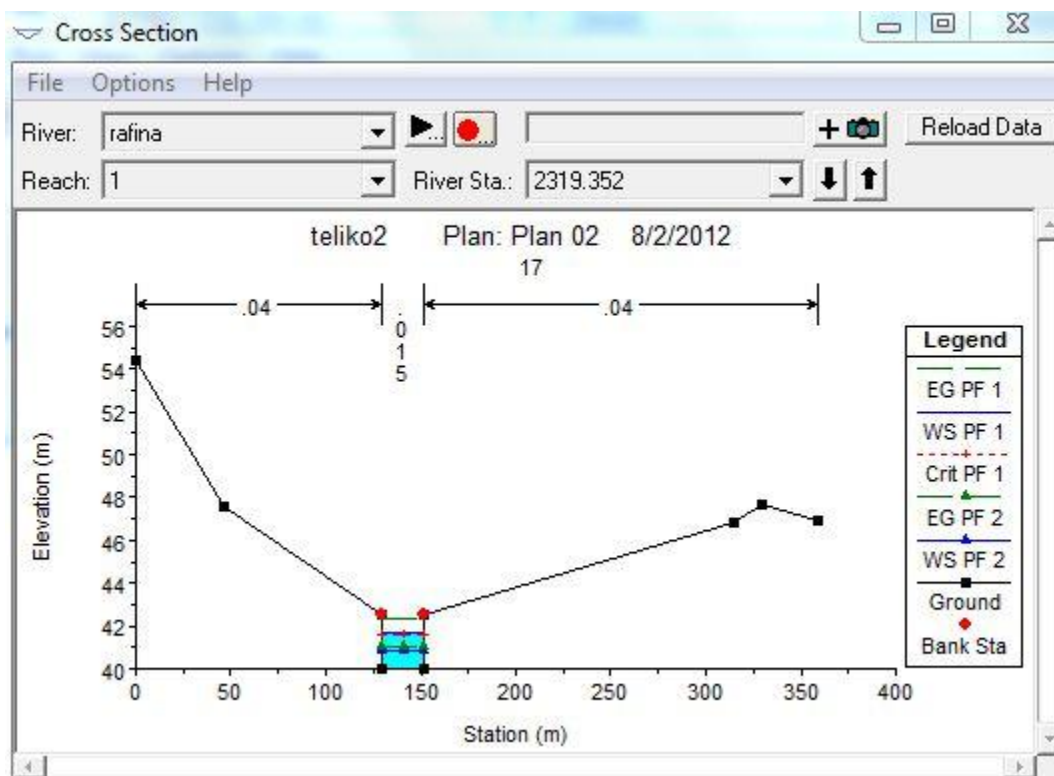
Στη συνέχεια, θα παρατεθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την υδραυλική προσομοίωση. Καθώς οι διατομές που εξετάστηκαν είναι αρκετές, θα γίνει παράθεση μιας μόνο διατομής που παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς βρίσκεται σε θέση όπου υπάρχει σταθμός μέτρησης απορροής και έτσι μπορεί να γίνει κάποιος έλεγχος των αποτελεσμάτων. Η διατομή αυτή αφορά το επεισόδιο βροχής της 04/02/2011.

Συγκεκριμένα, γίνεται λόγος για τη διατομή που βρίσκεται 2319.352 m από την αρχή του ρέματος.

Αποτελέσματα σεναρίου με παροχή αιχμής $134 \text{ m}^3/\text{s}$



Αναλυτικότερα, το HEC-RAS μετά το 'τρέξιμο' της προσομοίωσης δίνει διαγράμματα των διατομών καθώς και ειδικούς πίνακες όπου αναγράφονται όλα τα στοιχεία.



Εικόνα 5.28: Διάγραμμα διατομής, WS: πιεζομετρικό φορτίο, EG: γραμμή ενέργειας, Crit: κρίσιμο βάθος.

Ακολουθεί ο πίνακας όπου αναγράφονται όλα τα χαρακτηριστικά και αποτελέσματα της κάθε διατομής.

Plan: Plan 02 rafina 1 RS: 2319.352 Profile: PF 1

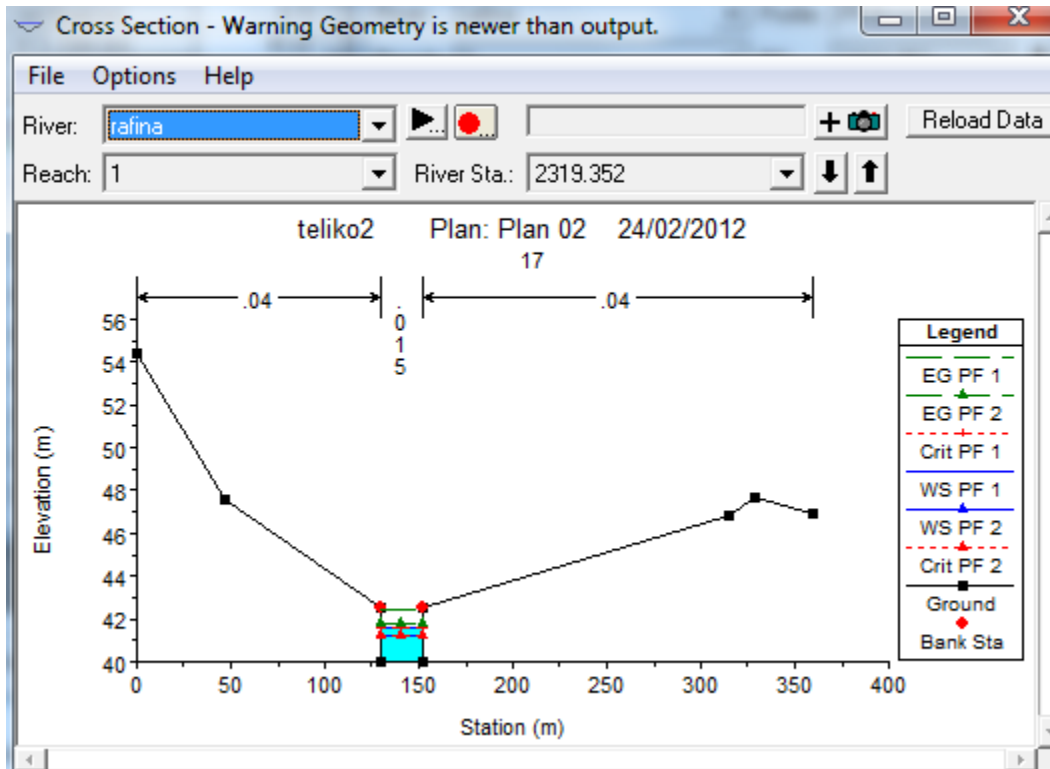
		Element	Left OB	Channel	Right OB
E.G. Elev (m)	42.38				
Vel Head (m)	0.72	Wt. n-Val.		0.015	
W.S. Elev (m)	41.67	Reach Len. (m)	1.00	1.00	1.00
Crit W.S. (m)	41.59	Flow Area (m2)		35.97	
E.G. Slope (m/m)	0.001944	Area (m2)		35.97	
Q Total (m3/s)	134.96	Flow (m3/s)		134.96	
Top Width (m)	21.60	Top Width (m)		21.60	
Vel Total (m/s)	3.75	Avg. Vel. (m/s)		3.75	
Max Chl Dpth (m)	1.67	Hydr. Depth (m)		1.67	
Conv. Total (m3/s)	3061.3	Conv. (m3/s)		3061.3	
Length Wtd. (m)	1.00	Wetted Per. (m)		24.93	
Min Ch El (m)	40.00	Shear (N/m2)		27.50	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)		103.18	
Frctn Loss (m)	0.00	Cum Volume (1000 m3)		13.64	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		38.52	

Errors, Warnings and Notes

Select River Station

Εικόνα 5.29: Αποτελέσματα και χαρακτηριστικά διατομής

Αποτελέσματα σεναρίου με παροχή αιχμής $137 \text{ m}^3/\text{s}$



Εικόνα 5.30: Διάγραμμα διατομής, WS: πιεζομετρικό φορτίο, EG: γραμμή ενέργειας, Crit: κρίσιμο βάθος (παροχή αιχμής $137 \text{ m}^3/\text{s}$).

Plan: Plan 02 rafina 1 RS: 2319.352 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	42.40	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.80	Wt. n-Val.		0.015	
W.S. Elev (m)	41.60	Reach Len. (m)	1.00	1.00	1.00
Crit W.S. (m)	41.60	Flow Area (m ²)		34.54	
E.G. Slope (m/m)	0.002276	Area (m ²)		34.54	
Q Total (m ³ /s)	137.00	Flow (m ³ /s)		137.00	
Top Width (m)	21.60	Top Width (m)		21.60	
Vel Total (m/s)	3.97	Avg. Vel. (m/s)		3.97	
Max Chl Dpth (m)	1.60	Hydr. Depth (m)		1.60	
Conv. Total (m ³ /s)	2872.0	Conv. (m ³ /s)		2872.0	
Length Wtd. (m)	1.00	Wetted Per. (m)		24.80	
Min Ch El (m)	40.00	Shear (N/m ²)		31.08	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)		123.28	
Frctn Loss (m)	0.00	Cum Volume (1000 m ³)		13.94	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m ²)		39.25	

Εικόνα 5.31: Αποτελέσματα και χαρακτηριστικά διατομής(παροχή αιχμής 137 m³/s).

Επίσης, για τον έλεγχο ύπαρξης υποκρίσιμης ή υπερκρίσιμης ροής, στη διατομή αυτή, έγινε ο υπολογισμός του αριθμού Froude, που δίνεται από την ακόλουθη σχέση (5.10) (Κατσαρέλης, 2010):

$$Froude = \frac{V}{\sqrt{g \frac{A}{B}}} \quad (5.10)$$

όπου

A: εμβαδό διατομής,

B: βρεχόμενη περίμετρος,

g: επιτάχυνση της βαρύτητας

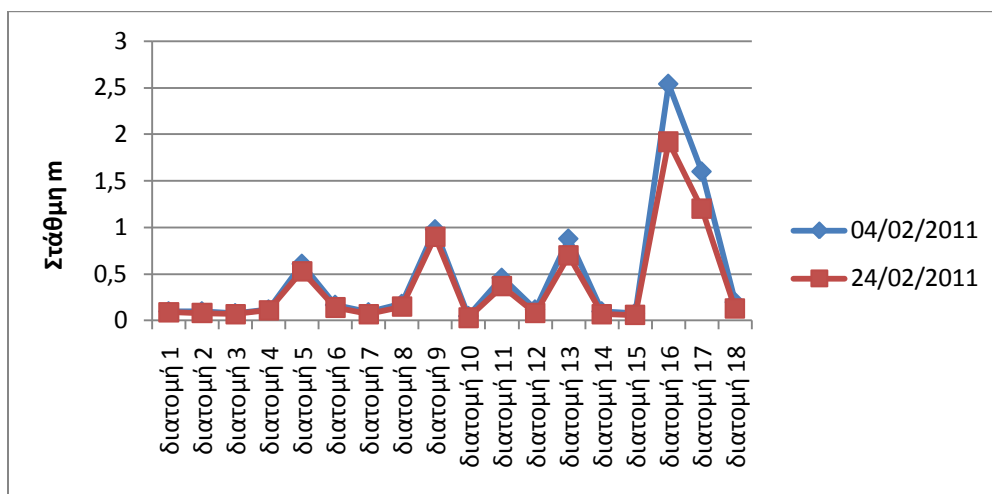
Έτσι, εάν $Froude < 1$ η ροή είναι υποκρίσιμη, κι εάν $Froude > 1$ η ροή είναι υπερκρίσιμη (Κατσαρέλης, 2010)

Στην πρώτη περίπτωση με

- ✓ ταχύτητα 3.75 m/s
- ✓ πλάτος διατομής 21.6 m
- ✓ βάθος νερού 1.67m

υπολογίστηκε ο αριθμός Froude = 1.1, πράγμα που επαληθεύει ότι η ροή είναι υπερκρίσιμη. Όμοια προκύπτει και στη δεύτερη περίπτωση.

Τέλος, παρατίθεται ένα διάγραμμα (5.2) όπου απεικονίζεται η στάθμη του νερού σε κάθε διατομή και για τα δύο επεισόδια βροχόπτωσης.



Διάγραμμα 5.2: Στάθμη νερού σε κάθε διατομή και για τα 2 επεισόδια βροχής.

5.2.1.5 Αντιμετώπιση προβλημάτων κατά την υδραυλική προσομοίωση

Μετά την εκτέλεση της εντολής Run που σημαίνει την έναρξη της προσομοίωσης και τη διεξαγωγή αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητο να γίνει έλεγχος των αποτελεσμάτων αυτών. Για το λόγο αυτό το πρόγραμμα HEC-RAS εμφανίζει διάφορες προειδοποιήσεις (warnings), οι οποίες βοηθούν το χρήστη να ψάξει και να ελέγξει τα δεδομένα με στόχο τη διεξαγωγή αποτελεσμάτων χωρίς λάθη.

Οι ειδοποιήσεις που παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία, καθώς και ο τρόπος επίλυσης τους παρουσιάζονται παρακάτω.

Warning1

The energy equation could not be balanced within the specified number of iterations. The program used critical depth for the water surface and continued on with calculations.

Warning2

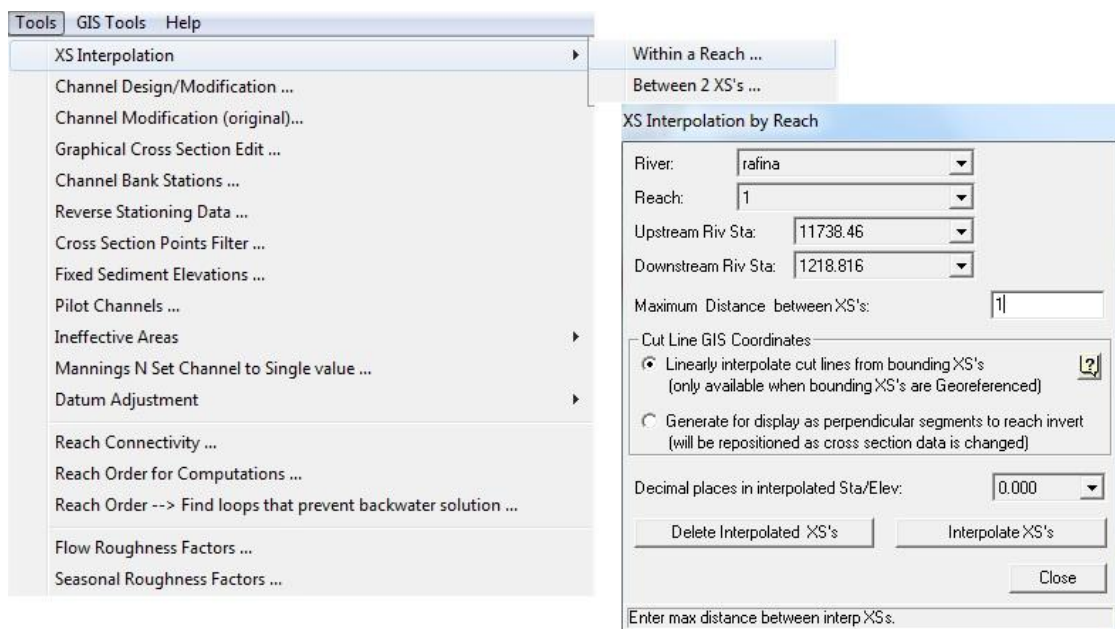
The velocity head has changed more than 0.15 m. This may indicate the need for additional cross sections.

Warning3

The energy loss was greater than 0.13 m between the current and previous cross section. This may indicate the need for additional cross sections.

Αντιμετώπιση

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προειδοποιήσεων, έγινε αρχικά πύκνωση των διατομών με τη βοήθεια της γραμμικής παρεμβολής. Συγκεκριμένα, στο περιβάλλον του HEC-RAS, στο παράθυρο των γεωμετρικών δεδομένων γίνεται εκτέλεση της εντολής interpolation. Η απόσταση που ορίστηκε για τη δημιουργία των διατομών είναι το 1 m.

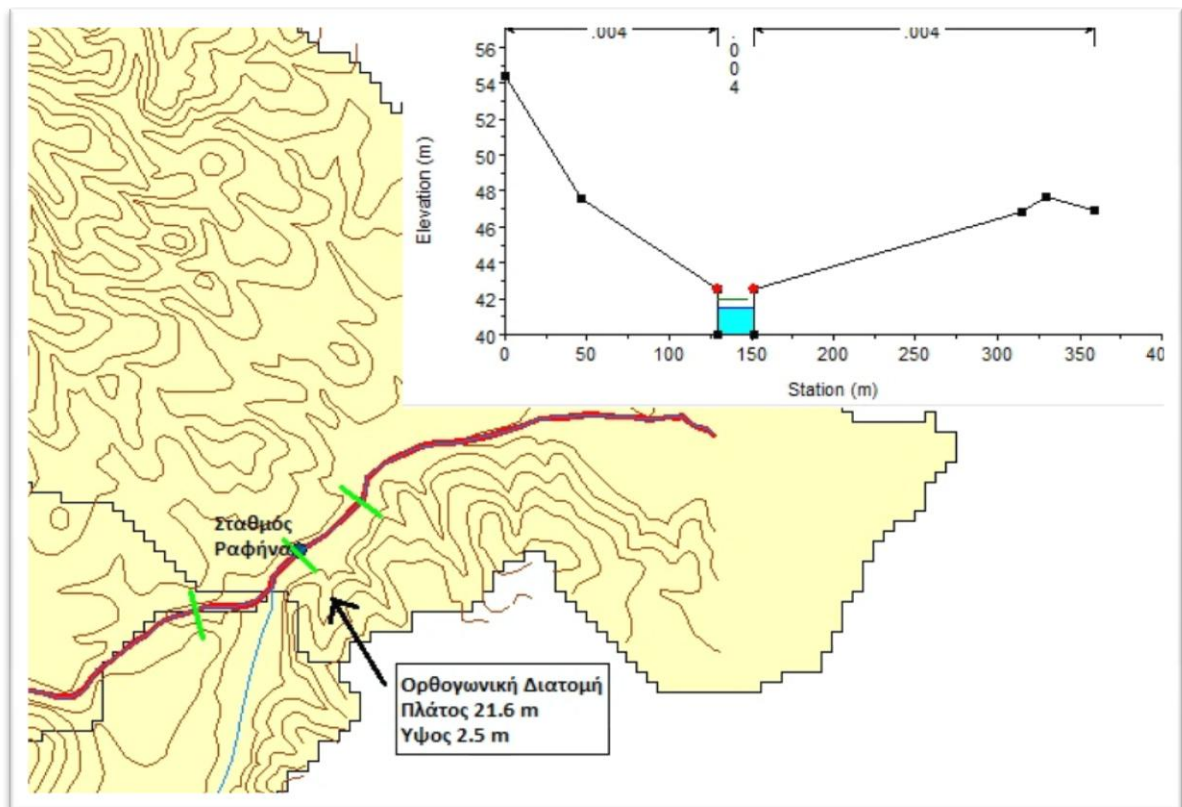


Εικόνα 5.32: Διαδικασία δημιουργίας ενδιάμεσων διατομών

Έπειτα, για να γίνει εξισορρόπηση της εξίσωσης ενέργειας στις διατομές όπου υπήρχε πρόβλημα λόγω της απότομης αλλαγής της παροχής, έγινε μια βαθμιαία αύξηση στις τιμές των παροχών, στις διατομές που δημιουργήθηκαν με παρεμβολή.

5.2.1.6 Βαθμονόμηση Υδραυλικού μοντέλου

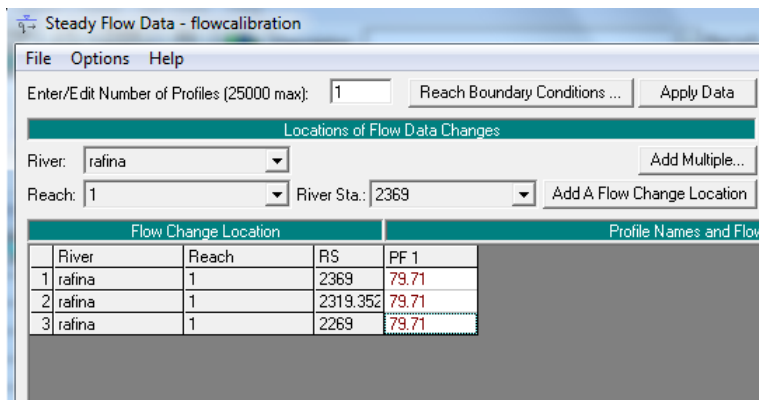
Η βαθμονόμηση του μοντέλου, έχει σαν σκοπό τη διεξαγωγή τιμών παραμέτρων, οι οποίες θα δίνουν αποτελέσματα που θα τείνουν σε αυτά που έχουν παρατηρηθεί. Έχοντας δεδομένα του Υδρολογικού Παρατηρητηρίου Αθηνών (Hydrological Observatory of Athens), έγινε η επιλογή της παροχής και της στάθμης που έχουν παρατηρηθεί για το συγκεκριμένο επεισόδιο βροχής και τη θέση που φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 5.33: Θέση και μορφή διατομής

Στη συνέχεια, από τη χρονοσειρά παροχών και μετρήσεων στάθμης που αφορά το επεισόδιο βροχής της 04/02/2011, έγινε αντιστοίχιση της τιμής της μέγιστης παροχής και της αντίστοιχης στάθμης. Πιο συγκεκριμένα, η στάθμη νερού που έχει παρατηρηθεί στο σημείο αυτό είναι 1.5 m και αντιστοιχεί σε μια πλημμυρική αιχμή $Q=79.71 \text{ m}^3 / \text{s}$.

Έτσι, με δεδομένη παροχή $Q=79.71 \text{ m}^3 / \text{s}$ έγινε βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου μειώνοντας τις τιμές του CN κατά 20% (κεφάλαιο 4, §4.3.3.1). Με τον τρόπο αυτό, υπολογίστηκε η παροχή αιχμής σε κάθε υπολεκάνη. Έτσι, έχοντας όλα τα στοιχεία έγινε δημιουργία νέου υδρολογικού αρχείου στο περιβάλλον του HEC-RAS και πραγματοποιήθηκε νέα υδραυλική προσομοίωση.



Εικόνα 5.34: Υδρολογικό Αρχείο

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν, δείχνουν πως η παροχή $Q=79.71 \text{ m}^3 / \text{s}$ δίνει στάθμη νερού 1.12 m (Εικόνα 5.35).

Plan: Plan 02 rafina 1 RS: 2319.352 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	41.69	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.57	Wt. n-Val.		0.015	
W.S. Elev (m)	41.12	Reach Len. (m)	1.00	1.00	1.00
Crit W.S. (m)	41.12	Flow Area (m2)		24.26	
E.G. Slope (m/m)	0.002447	Area (m2)		24.26	
Q Total (m3/s)	80.90	Flow (m3/s)		80.90	
Top Width (m)	21.60	Top Width (m)		21.60	
Vel Total (m/s)	3.34	Avg. Vel. (m/s)		3.34	
Max Chl Dpth (m)	1.12	Hydr. Depth (m)		1.12	
Conv. Total (m3/s)	1635.6	Conv. (m3/s)		1635.6	
Length Wtd. (m)	1.00	Wetted Per. (m)		23.85	
Min Ch El (m)	40.00	Shear (N/m2)		24.40	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)		81.40	
Frctn Loss (m)	0.00	Cum Volume (1000 m3)		11.48	
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)		39.15	

Εικόνα 5.35: Αποτελέσματα υδραυλικής προσομοίωσης (παροχή αιχμής $79.71 \text{ m}^3/\text{s}$)

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα, προκύπτει ότι η στάθμη του νερού της υδραυλικής προσομοίωσης είναι μικρότερη από την αντίστοιχη που έχει παρατηρηθεί για την ίδια παροχή. Για το λόγο, αυτό γίνεται βαθμονόμηση του παραπάνω υδραυλικού μοντέλου ως προς το συντελεστή Manning.

Τελικά, η τιμή του συντελεστή Manning που οδηγεί στα επιθυμητά αποτελέσματα είναι $n=0.07$ (Εικόνα 5.36).

Plan: Plan 02 rafina 1 RS: 2319.352 Profile: PF 1					
E.G. Elev (m)	41.84	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.30	Wt. n-Val.		0.070	
W.S. Elev (m)	41.53	Reach Len. (m)	1.00	1.00	1.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)		33.11	
E.G. Slope (m/m)	0.019758	Area (m2)		33.11	
Q Total (m3/s)	80.90	Flow (m3/s)		80.90	
Top Width (m)	21.60	Top Width (m)		21.60	
Vel Total (m/s)	2.44	Avg. Vel. (m/s)		2.44	
Max Chl Dpth (m)	1.53	Hydr. Depth (m)		1.53	
Conv. Total (m3/s)	575.5	Conv. (m3/s)		575.5	
Length Wtd. (m)	1.00	Wetted Per. (m)		24.67	
Min Ch El (m)	40.00	Shear (N/m2)		260.08	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)		635.50	
Frctn Loss (m)	0.02	Cum Volume (1000 m3)	0.00	27.94	0.00
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)	0.02	40.20	0.01

Downstream Reach Lengths		
LOB	Channel	ROB
1	1	1

Manning's n Values		
LOB	Channel	ROB
0.04	0.07	0.04

Main Channel Bank Stations	
Left Bank	Right Bank
130	151.6

Cont'Exp Coefficient (Steady Flow)	
Contraction	Expansion
0.1	0.3

Εικόνα 5.36: Αποτελέσματα βαθμονόμησης

Συμπέρασμα

Η τιμή του συντελεστή Manning που δίνει αυτά τα αποτελέσματα, είναι αρκετά μεγάλη και δεν αντιπροσωπεύει τις χρήσεις γης που έχουν παρατηρηθεί (εικόνα 5.14). Επίσης, με δεδομένο το γεγονός ότι οι υπεύθυνοι του τομέα Υδατικών Πόρων δήλωσαν ότι υπάρχει πιθανότητα σφάλματος στις μετρήσεις του σταθμού, έγινε δεκτό ότι η παροχή που δίνει στάθμη 1.5 m είναι όσο υπολογίστηκε από το υδρολογικό μοντέλο $Q=137 \text{ m}^3/\text{s}$ και η τιμή του συντελεστή Manning 0.015.

5.2.2 Υδραυλική προσομοίωση σε συνθήκες μη μόνιμης ροής

Μη μόνιμη είναι η ροή στην οποία το βάθος ροής μεταβάλλεται με το χρόνο. Η βασική υπολογιστική διαδικασία βασίζεται στην επίλυση της εξίσωσης της συνέχειας και της αρχής διατήρησης της ορμής (εξισώσεις Saint-Venant) (Bruner, 2008b).

Εξίσωση της συνέχειας

$$\frac{\partial Ar}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_i = 0 \quad (5.11)$$

Αρχή διατήρησης της ορμής

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f\right) = 0 \quad (5.12)$$

Όπου

x : κατά μήκος απόσταση του χείμαρρου από την αρχή (m)

t : χρόνος (sec)

z : βάθος ροής (m)

Q : παροχή του χείμαρρου (m^3/s)

S_f : κλίση της γραμμής ενέργειας

g : επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s^2)

Για την υδραυλική προσομοίωση σε συνθήκες μη μόνιμης ροής, έγινε η δημιουργία ενός απλοποιημένου μοντέλου με τρεις διατομές στην περιοχή όπου υπάρχει σταθμηγράφος, ώστε να γίνει έλεγχος των αποτελεσμάτων. Η απλοποίηση αυτή έγινε για το λόγο, ότι στο σημείο όπου υπάρχει ο σταθμός υπάρχει συμβολή κι άλλου κλάδου του υδρογραφικού δικτύου, γεγονός που εξηγεί την αυξημένη παροχή αιχμής. Έτσι, εάν γινόταν η προσομοίωση για το σύνολο των διατομών η οριακή συνθήκη που ορίζεται ανάντη δε θα επαρκούσε.

Όμως, για την υδραυλική προσομοίωση του απλοποιημένου αυτού μοντέλου, κρίθηκε απαραίτητο, η δημιουργία ενός μοντέλου με ομοιόμορφη ροή ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να είναι ανάλογα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ολικού μοντέλου (με όλες τις διατομές). Με τον τρόπο αυτό, γίνεται μια μακροσκοπική εξέταση του φαινομένου.

Αναλυτικότερα, έγινε η υδραυλική προσομοίωση του απλοποιημένου μοντέλου σε συνθήκες μόνιμης ροής, με διάφορες αλλαγές της ενεργειακής κλίσης, μέχρι να επιτευχθεί ομοιόμορφη ροή. Δηλαδή, και οι τρεις διατομές με παροχή $137 \text{ m}^3/\text{s}$ και συντελεστή Manning 0.015 να δίνουν βάθος 1.5 m περίπου.

Η κλίση που έκανε εφικτά όλα τα παραπάνω είναι 0.3%. Τα αποτελέσματα φαίνονται ακολούθως.

	River	Reach	RS	PF 1
1	rafina	1	2369	137

River	Reach	Profile	Upstream	Downstream
rafina	1	all	Normal Depth S = 0.003	Normal Depth S = 0.003

Εικόνα 5.37: Παροχή και κλίση απλοποιημένου μοντέλου

River:	rafina	Profile:	PF 1
Reach	1	RS:	2319.352
Plan: Plan 01			
Plan: Plan 01 rafina 1 RS: 2319.352 Profile: PF 1			
E.G. Elev (m)	42.40	Element	Left OB
Vel Head (m)	0.84	Wt. n-Val.	Channel
W.S. Elev (m)	41.56	Reach Len. (m)	Right OB
Crit W.S. (m)	41.60	Flow Area (m ²)	1.00
E.G. Slope (m/m)	0.002440	Area (m ²)	1.00
Q Total (m ³ /s)	137.00	Flow (m ³ /s)	33.79
Top Width (m)	21.60	Top Width (m)	33.79
Vel Total (m/s)	4.05	Avg. Vel. (m/s)	137.00
Max Chl Dpth (m)	1.56	Hydr. Depth (m)	21.60
Conv. Total (m ³ /s)	2773.5	Conv. (m ³ /s)	4.05
Length Wtd. (m)	1.00	Wetted Per. (m)	1.56
Min Ch El (m)	40.00	Shear (N/m ²)	2773.5
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	24.73
Frctn Loss (m)	0.00	Cum Volume (1000 m ³)	32.69
C & F Loss (m)	0.00	Cum S&D (1000 m ²)	132.57
			1.70
			1.08

Εικόνα 5.38: Αποτελέσματα

Επίσης, έγινε επαλήθευση της κλίσης που επιλέχθηκε, προσομοιώνοντας μία ακόμα φορά το απλοποιημένο μοντέλο με την παρατηρούμενη παροχή 80 m³/s περίπου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν (Εικόνα 5.40) είναι όμοια με τα αντίστοιχα της προσομοίωσης του ολικού μοντέλου (Εικόνα 5.35).

	River	Reach	RS	PF 1
	1 rafina	1	2369	80

River	Reach	Profile	Upstream	Downstream
rafina	1	all	Normal Depth S = 0.003	Normal Depth S = 0.003

Εικόνα 5.39: Παροχή και κλίση απλοποιημένου μοντέλου($Q=80 \text{ m}^3/\text{s}$)

River:	rafina	Profile:	PF 1
Reach	1	RS:	2319.352
Plan: Plan 01			
Plan: Plan 01 rafina 1 RS: 2319.352 Profile: PF 1			
E.G. Elev (m)	41.68	Element	Left OB
Vel Head (m)	0.58	Wt. n-Val.	0.015
W.S. Elev (m)	41.09	Reach Len. (m)	1.00
Crit W.S. (m)	41.11	Flow Area (m ²)	23.61
E.G. Slope (m/m)	0.002607	Area (m ²)	23.61
Q Total (m ³ /s)	80.00	Flow (m ³ /s)	80.00
Top Width (m)	21.60	Top Width (m)	21.60
Vel Total (m/s)	3.39	Avg. Vel. (m/s)	3.39
Max Chl Dpth (m)	1.09	Hydr. Depth (m)	1.09
Conv. Total (m ³ /s)	1566.7	Conv. (m ³ /s)	1566.7
Length Wtd. (m)	1.00	Wetted Per. (m)	23.79
Min Ch El (m)	40.00	Shear (N/m ²)	25.38
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	85.99
Frctn Loss (m)	0.00	Cum Volume (1000 m ³)	1.19
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m ²)	1.08

Εικόνα 5.40: Αποτελέσματα

Έτσι κάνοντας δεκτή την παραπάνω κλίση, γίνεται χρήση αυτής ως οριακή συνθήκη της προσομοίωσης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.

Η διαδικασία της προσομοίωσης παρουσιάζεται παρακάτω:

- Εισαγωγή γεωμετρικού αρχείου με τις τρεις διατομές και διατήρηση του συντελεστή Manning 0.015 για το κεντρικό κανάλι και 0.04 για τις πλαγιές.
- Συμπλήρωση υδρολογικού αρχείου

Edit >> Unsteady Flow data

Boundary Conditions | Initial Conditions | Apply Data

Select Location for Boundary Condition

River: rafina

Reach: 1 River Sta.: 2369 Add a Boundary Condition Location

Boundary Condition Types

Stage Hydrograph	Flow Hydrograph	Stage/Flow Hydr.	Rating Curve
Normal Depth	Lateral Inflow Hydr.	Uniform Lateral Inflow	Groundwater Interflow
T.S. Gate Openings	Elev Controlled Gates	Navigation Dams	IB Stage/Flow
Rules			

River	Reach	RS	Boundary Condition Type	
1	rafina	1	2369	Flow Hydrograph
2	rafina	1	2269	Normal Depth

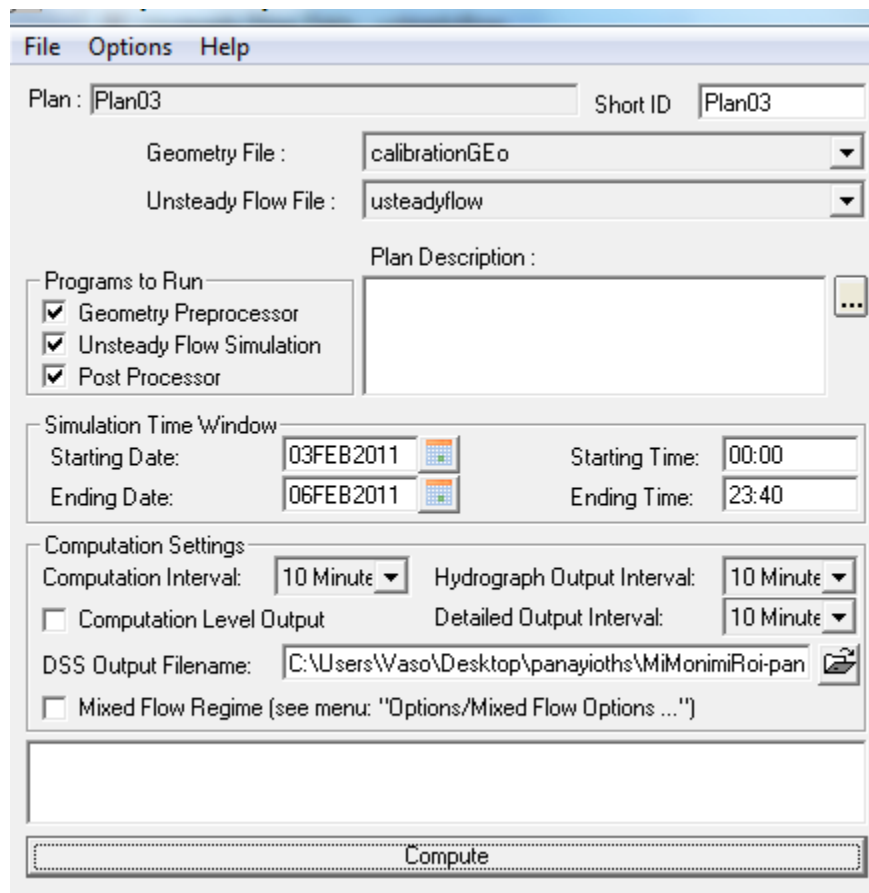
Εικόνα 5.41: Συμπλήρωση υδρολογικού αρχείου (unsteady flow)

Στο παράθυρο που εμφανίζεται, γίνεται η συμπλήρωση των οριακών συνθηκών. Συγκεκριμένα, η οριακή συνθήκη που ορίστηκε στη διατομή ανάντη, είναι το υδρογράφημα που προέκυψε από την υδρολογική προσομοίωση και στην κατάντη διατομή εισάγεται σαν οριακή συνθήκη η κλίση 0.3%.

- Εκτέλεση υδραυλικής προσομοίωσης

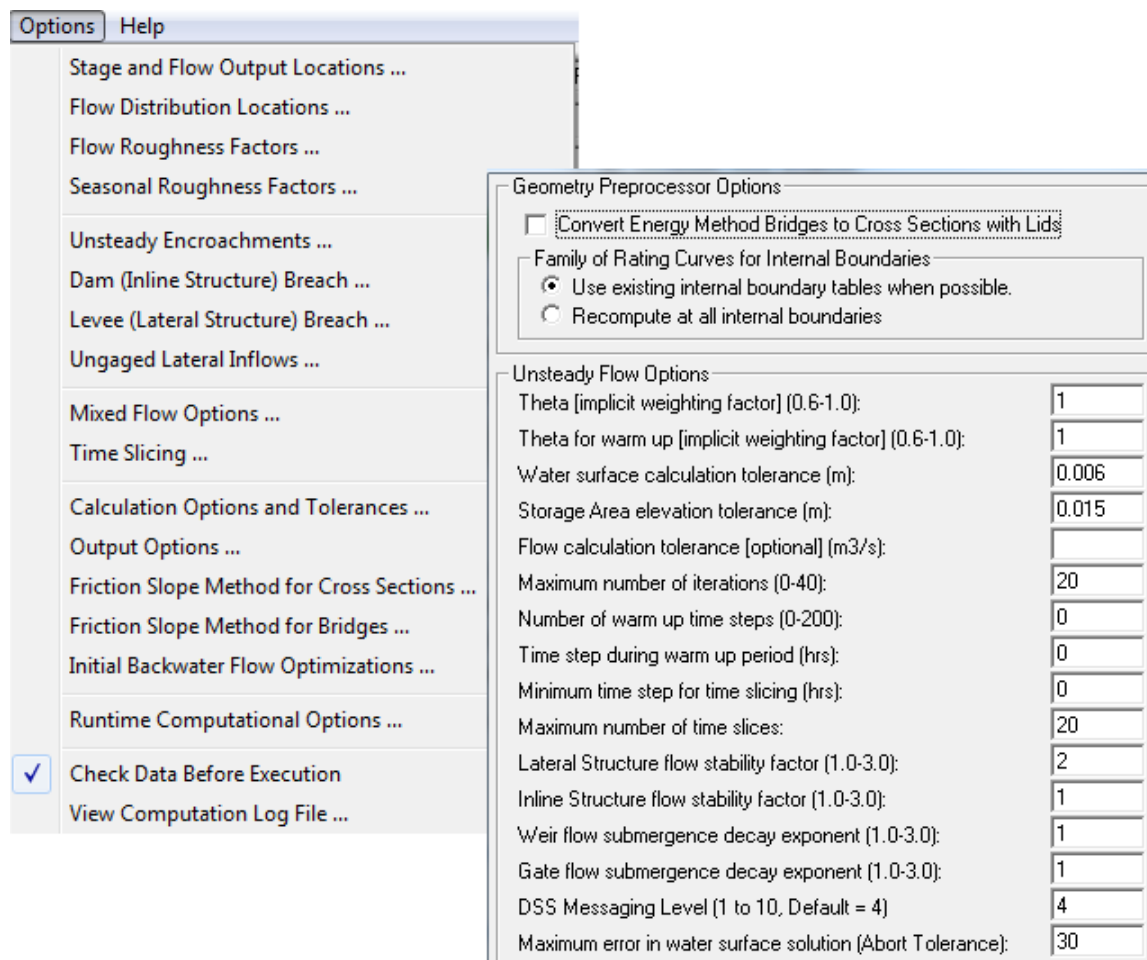
Run >> Unsteady flow

Όπου γίνεται η συμπλήρωση του χρονικού διαστήματος που θα γίνει η προσομοίωση καθώς και του χρονικού βήματος διεξαγωγής των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 5.42: Παράθυρο εκτέλεσης υδραυλικής προσομοίωσης

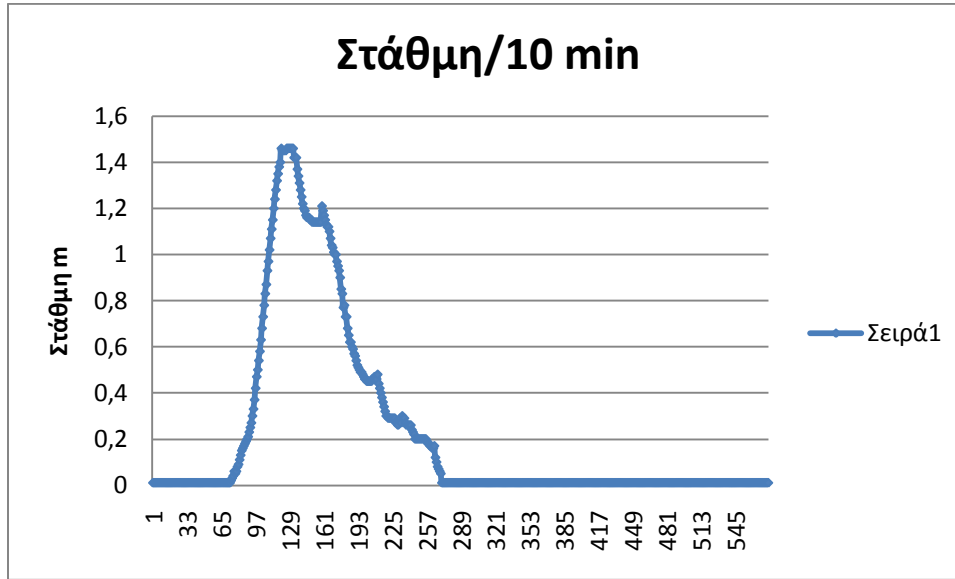
Επίσης, υπάρχουν διάφορες επιλογές για τη ρύθμιση πολλών παραμέτρων της υδραυλικής προσομοίωσης (Εικόνα 5.43). Στην παρούσα εργασία δεν έγινε κάποια αλλαγή, αλλά διατηρήθηκαν οι τιμές που προτείνονται από το πρόγραμμα.



Εικόνα 5.43: Επιλογές αλλαγής πολλών παραμέτρων της υδραυλικής προσομοίωσης

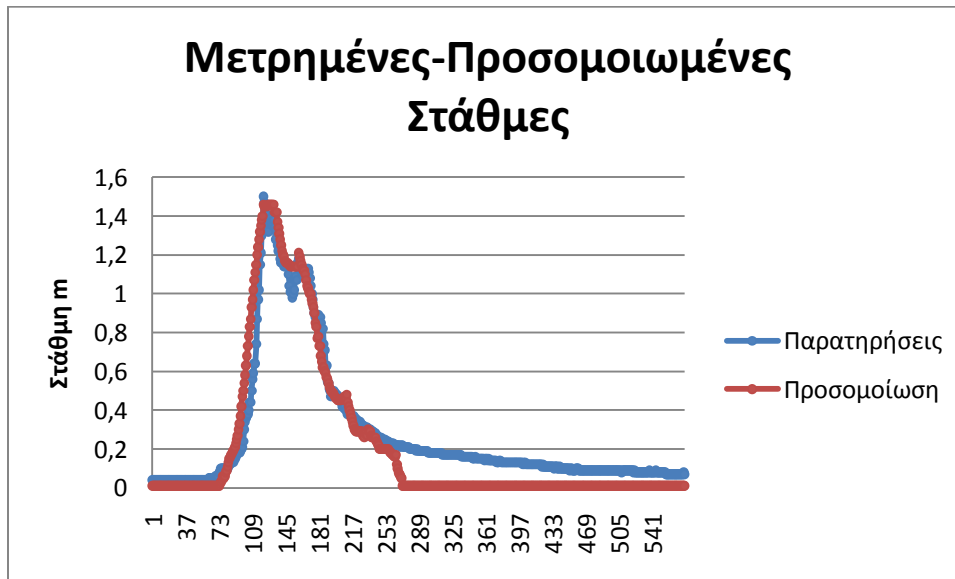
Αποτελέσματα

Το χρονικό βήμα διεξαγωγής των αποτελεσμάτων είναι 10 min. Έτσι, οι στάθμες νερού που προέκυψαν φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα, όπου γίνεται φανερό ότι η μέγιστη στάθμη φτάνει το 1.5 m.



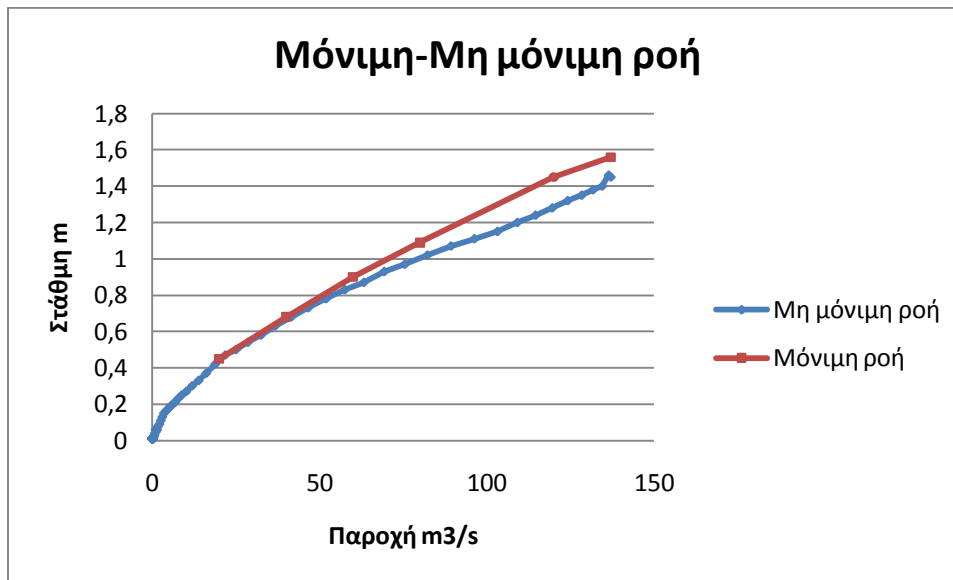
Διάγραμμα 5.3: Αποτελέσματα στάθμης νερού ανά 10 min.

Στη συνέχεια, ακολουθεί ένα διάγραμμα όπου γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων και των μετρήσεων στάθμης του σταθμού Ραφήνας. Τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης σχεδόν ταυτίζονται με τις αντίστοιχες μετρημένες.



Διάγραμμα 5.4: Μετρημένες-Προσομοιωμένες Στάθμες.

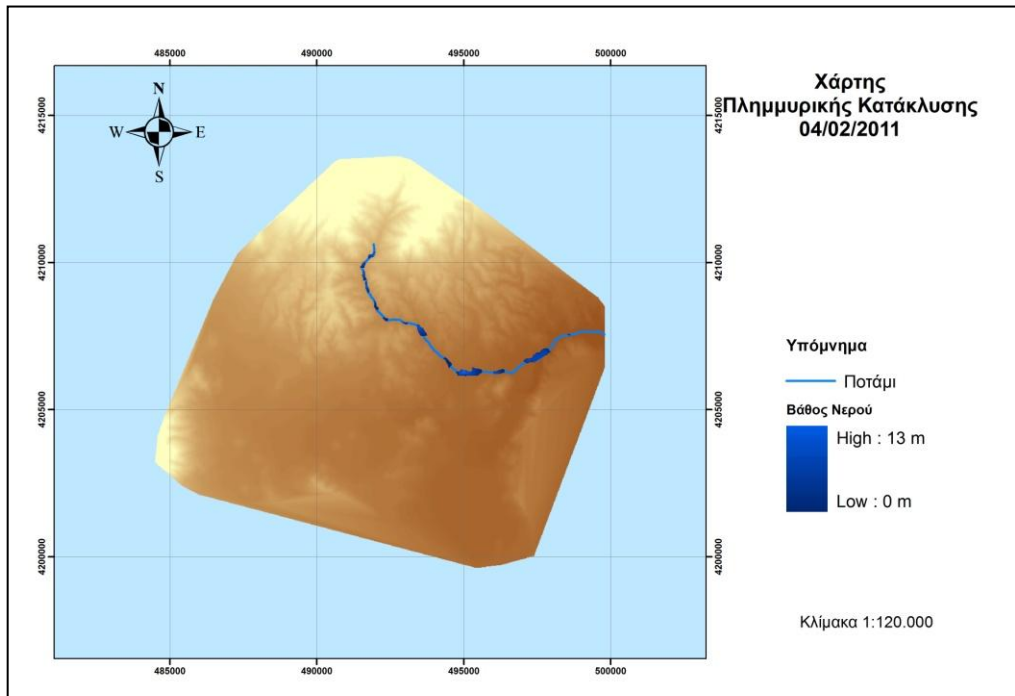
Τέλος, έγινε ο υπολογισμός της καμπύλης στάθμης παροχής σε συνθήκες μόνιμης και μη μόνιμης ροής (Διάγραμμα 5.5). Με τον τρόπο αυτό, γίνεται φανερό ότι τα αποτελέσματα σε συνθήκες μόνιμης και μη μόνιμης ροής δεν ταυτίζονται, κάτι που αποδεικνύει την ορθότητα των συνθηκών που χρησιμοποιήθηκαν στο απλοποιημένο μοντέλο για τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων.



Διάγραμμα 5.5: Καμπύλη στάθμης-παροχής σε συνθήκες μόνιμης και μη μόνιμης ροής

Κεφάλαιο 6

Σύνθεση χαρτών Πλημμύρας



6.1 Σενάριο πλημμυρικής κατάκλυσης

Τελικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η δημιουργία πλημμυρικών χαρτών. Τα συγκεκριμένα επεισόδια όμως βροχόπτωσης που επιλέχθηκαν δε οδήγησαν σε αποτελέσματα πλημμύρας. Για το λόγο αυτό, έγινε η δημιουργία ενός υποθετικού σεναρίου, κατά το οποίο προκύπτουν περιοχές πλημμυρικής κατάκλυσης. Έτσι έγινε εφικτό να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο μεθοδολογίας για την τελική δημιουργία χαρτών πλημμύρας.

Ειδικότερα στο σενάριο αυτό, έγινε αύξηση των τιμών των παροχών στο πενταπλάσιο, γεγονός που αντιστοιχεί σε μια περίοδο επαναφοράς $T = 100$ έτη. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παροχές που προέκυψαν από το πρόγραμμα HEC-HMS, αλλά και οι νέες αυξημένες παροχές.

Πίνακας 6.1: Πλημμυρικές αιχμές

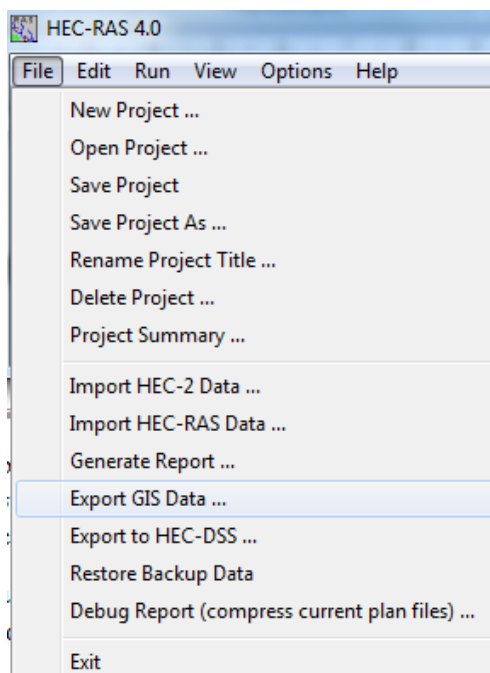
	4/2/2011	24/2/2011	4/2/2011	24/2/2011
	Q(m ³ / s)		5*Q(m ³ / s)	
διατομή1	16.89	13.38	84.45	66.9
διατομή2	20.27	15.32	101.35	76.6
διατομή3	20.27	15.32	101.35	76.6
διατομή4	20.27	15.32	101.35	76.6
διατομή5	20.27	15.32	101.35	76.6
διατομή6	20.27	15.32	101.35	76.6
διατομή7	36.68	28.68	183.4	143.4
διατομή8	16.9	10.5	84.5	52.5
διατομή9	16.9	10.5	84.5	52.5
διατομή10	16.9	10.5	84.5	52.5
διατομή11	16.9	10.5	84.5	52.5
διατομή12	16.9	10.5	84.5	52.5
διατομή13	16.9	10.5	84.5	52.5
διατομή14	137	89.29	685	446.45
διατομή15	31.86	20.47	159.3	102.35

Με τη χρήση των παραπάνω παροχών, έγινε η δημιουργία ενός νέου υδρολογικού αρχείου στο πρόγραμμα HEC-RAS και με τη χρήση του ίδιου γεωμετρικού αρχείου, έγινε η διεξαγωγή των νέων αποτελεσμάτων.


Τα δεδομένα αυτά εισήχθησαν στο περιβάλλον του Arcmap με τελικό σκοπό τη δημιουργία πλημμυρικών χαρτών.

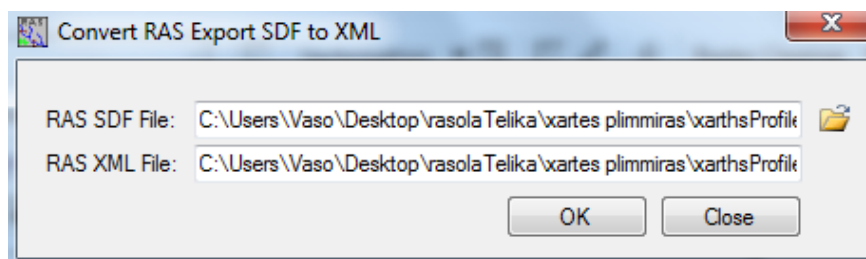
Η διαδικασία αναλυτικότερα παρατίθεται στη συνέχεια:

- HEC-RAS >> File >> Export GIS Data
Το αρχείο που εξάγεται έχει μορφή sdf.



Εικόνα 6.1: Εξαγωγή δεδομένων από το HEC-RAS

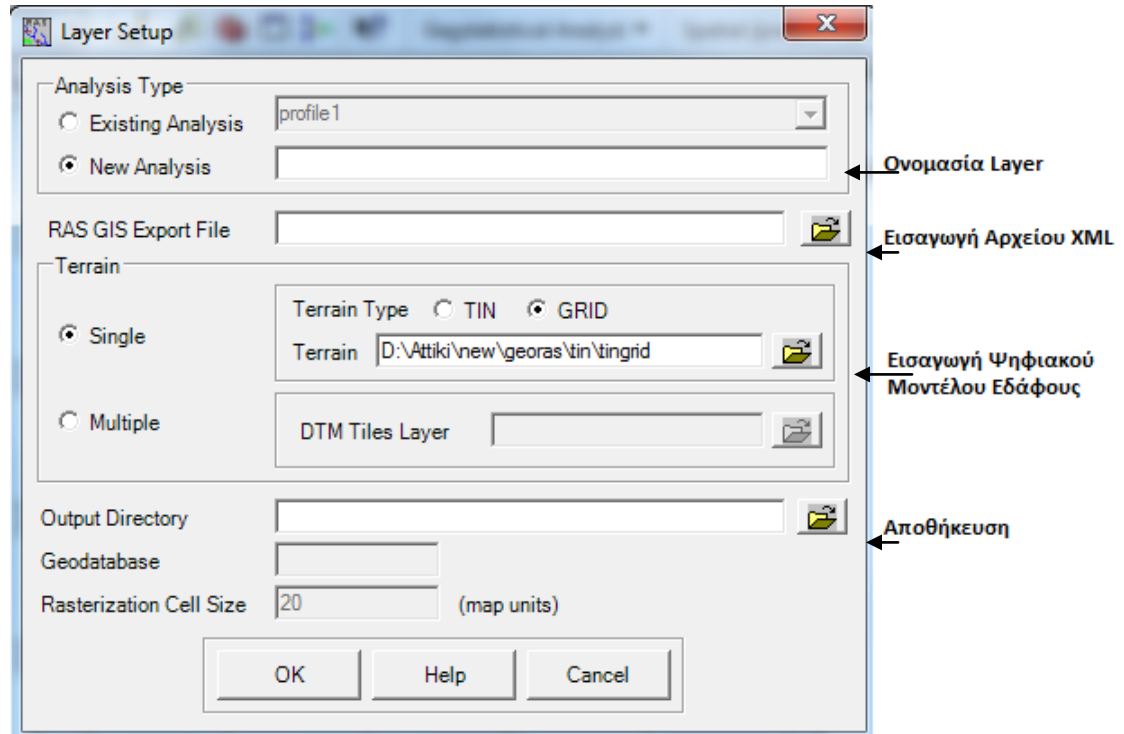
- ArcMap >> Χρήση εργαλείου  για μετατροπή του αρχείου sdf σε μορφή XML



Εικόνα 6.2: Μετατροπή αρχείου sdf σε μορφή XML

- Εργαλειοθήκη Geo-RAS >> RAS Mapping >> Layer Setup

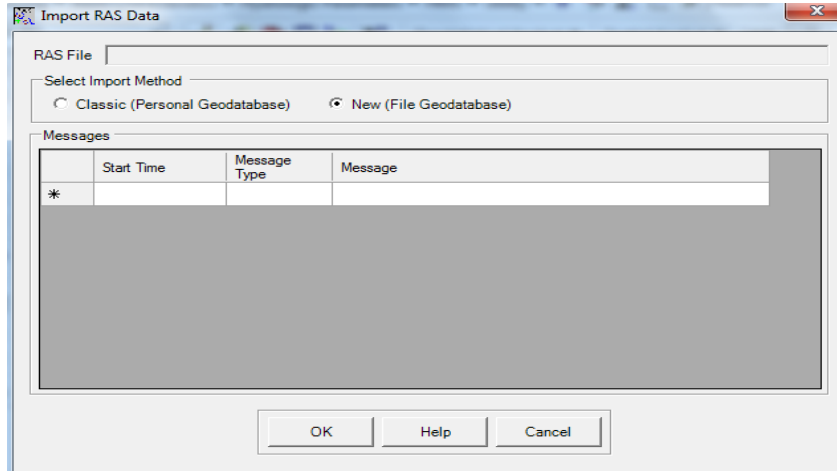
Στο στάδιο αυτό, η εισαγωγή των υδραυλικών δεδομένων συνοδεύεται από τη συσχέτιση με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, όπου έγιναν και οι αρχικοί υπολογισμοί.



Εικόνα 6.3: Παράθυρο του Layer Setup

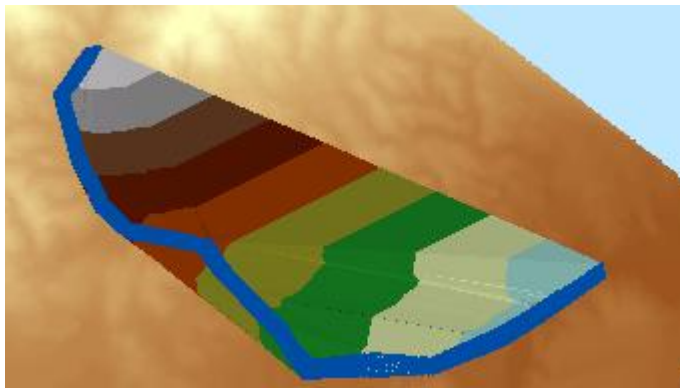
- RAS Mapping >> Import Ras Data

Με τη διαδικασία αυτή, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους εισάγεται στο χάρτη και ταυτόχρονα δημιουργείται ένα αντίγραφο αυτού σε μορφή raster. Επίσης δημιουργούνται άλλα δύο θεματικά επίπεδα, ένα για τις διατομές και ένα για τα όρια κατάκλυσης.



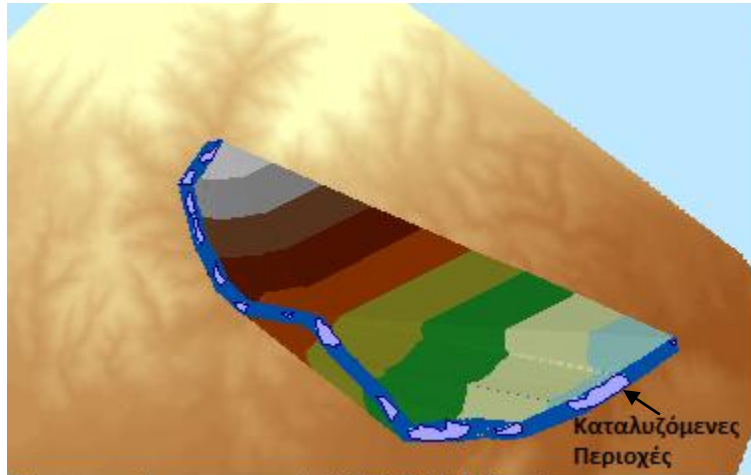
Εικόνα 6.4: Παράθυρο του Import RAS Data

- RAS Mapping >> Inundation Mapping >> Water Surface Generation
Δημιουργία Πιεζομετρικών Επιφανειών για τα δύο επεισόδια βροχόπτωσης.



Εικόνα 6.5: Πιεζομετρικός χάρτης

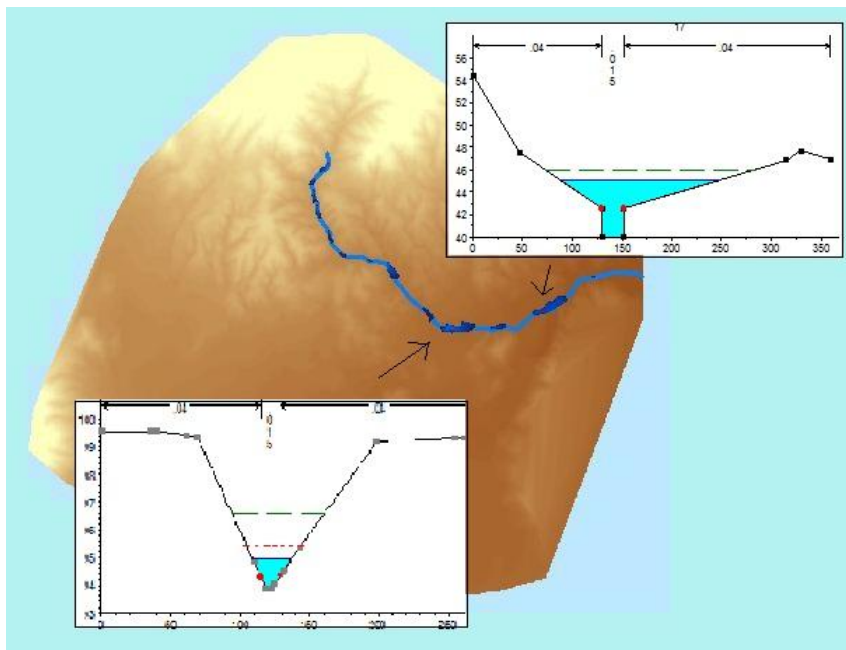
- RAS Mapping >> Inundation Mapping >> Floodplain Delineation Using Raster
Στο στάδιο αυτό το ψηφιακό μοντέλο εδάφους συγκρίνεται με το ψηφιακό μοντέλο της πιεζομετρικής επιφάνειας. Στα σημεία όπου, το υψόμετρο της πιεζομετρικής επιφάνειας είναι μεγαλύτερο από αυτό του εδάφους, υπολογίζεται η διαφορά των δύο υψομέτρων, η οποία αντιπροσωπεύει το βάθος νερού στην αντίστοιχη θέση.



Εικόνα 6.6: Πλημμυρικές Περιοχές

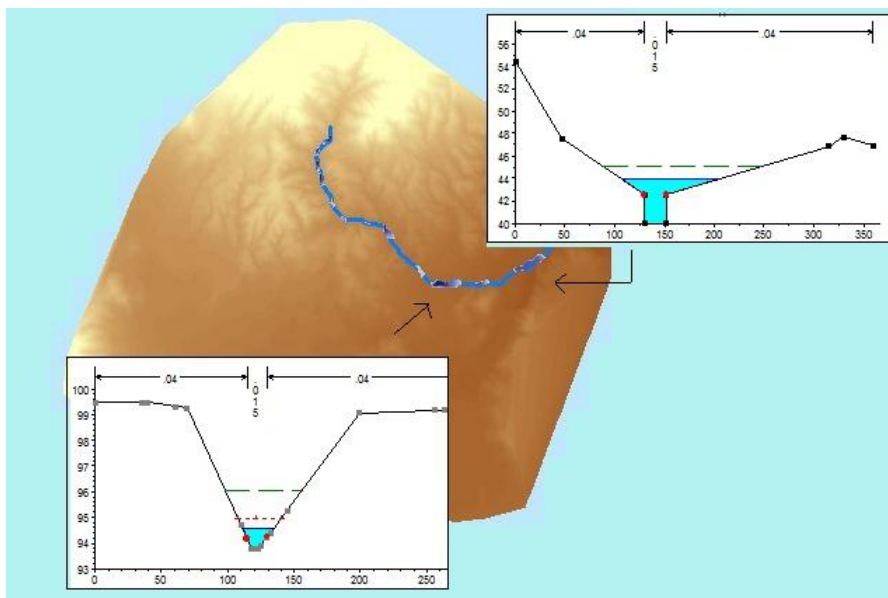
Οι πλημμυρικά κατακλυζόμενες περιοχές φαίνονται στις ακόλουθες εικόνες με κάποιες ενδεικτικές διατομές:

Επεισόδιο 04/02/2011



Εικόνα 6.7: Χάρτης πλημμύρας με ενδεικτικές διατομές, 04/02/2011

Επεισόδιο 24/02/2011



Εικόνα 6.8: Χάρτης πλημμύρας με ενδεικτικές διατομές, 24/02/2011

6.2 Σύγκριση των δύο επεισοδίων

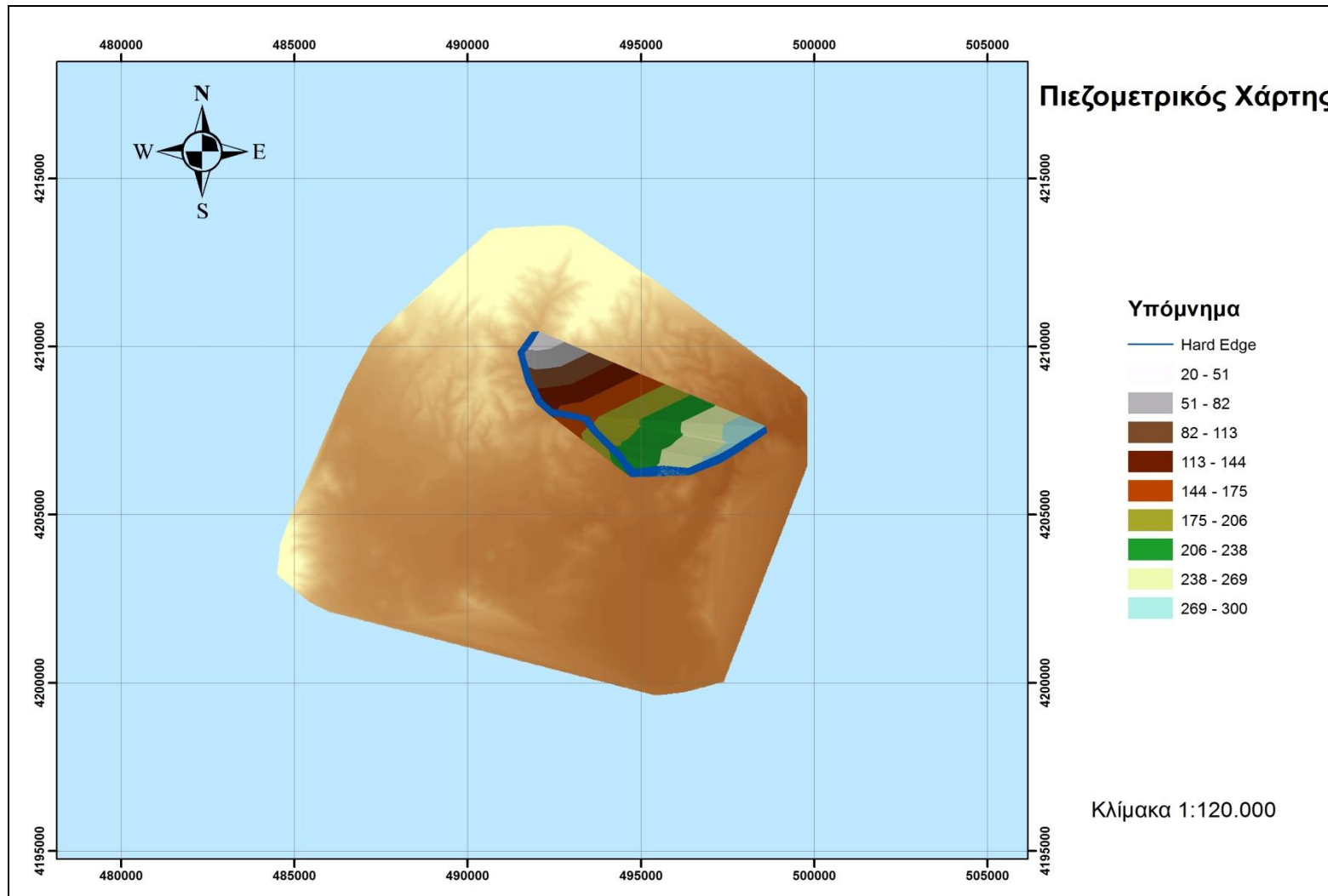
Το εμβαδό των περιοχών που πλημμυρίζουν δε διαφέρουν πολύ, πράγμα που εξηγείται και από τις έντονες κλίσεις του εδάφους. Τα αποτελέσματα φαίνονται και στο ακόλουθο διάγραμμα.



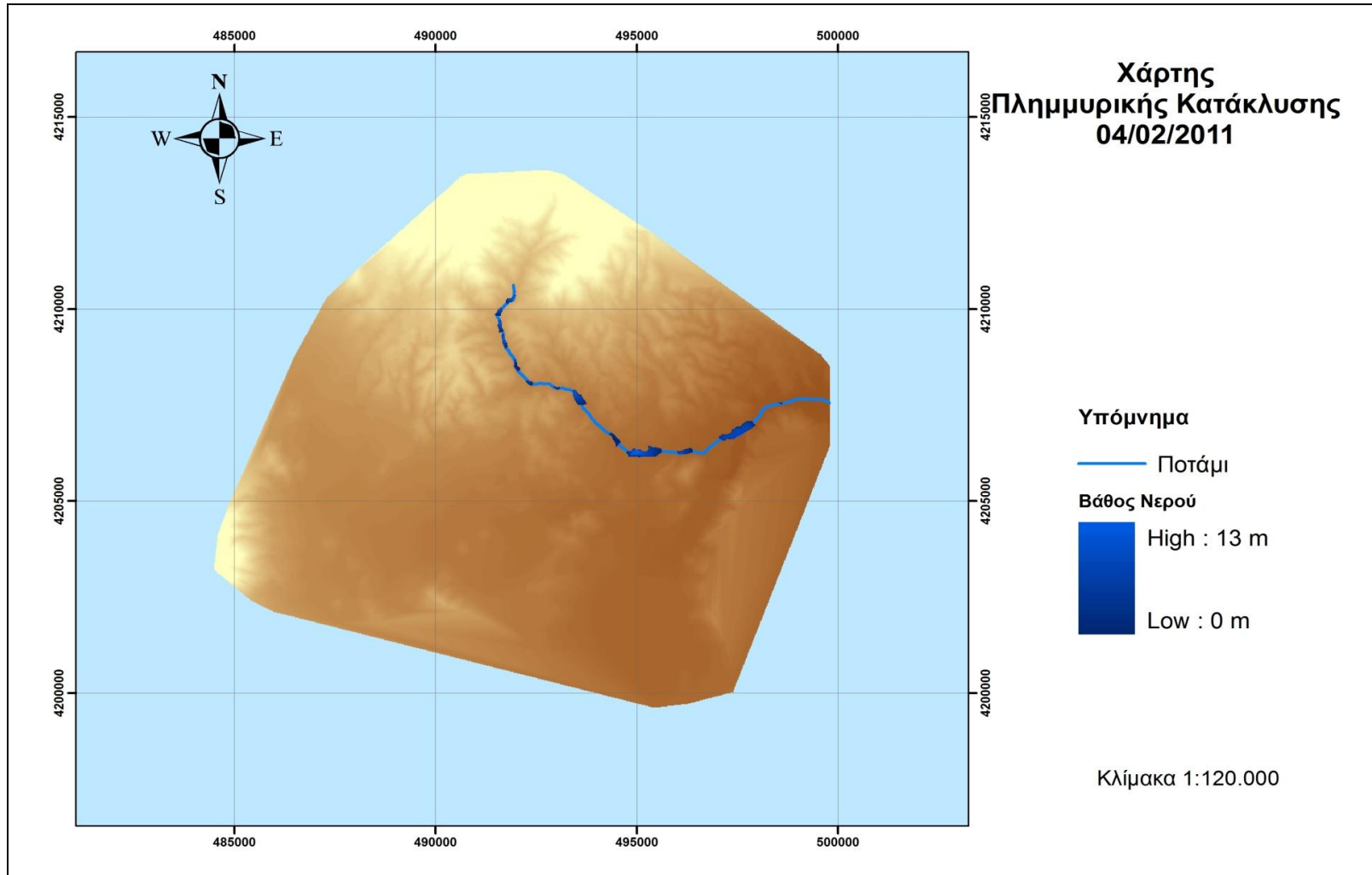
Διάγραμμα 6.1: Σύγκριση Πλημμυρικών Εκτάσεων για τα 2 επεισόδια βροχόπτωσης

6.3 Χάρτες Πλημμύρας

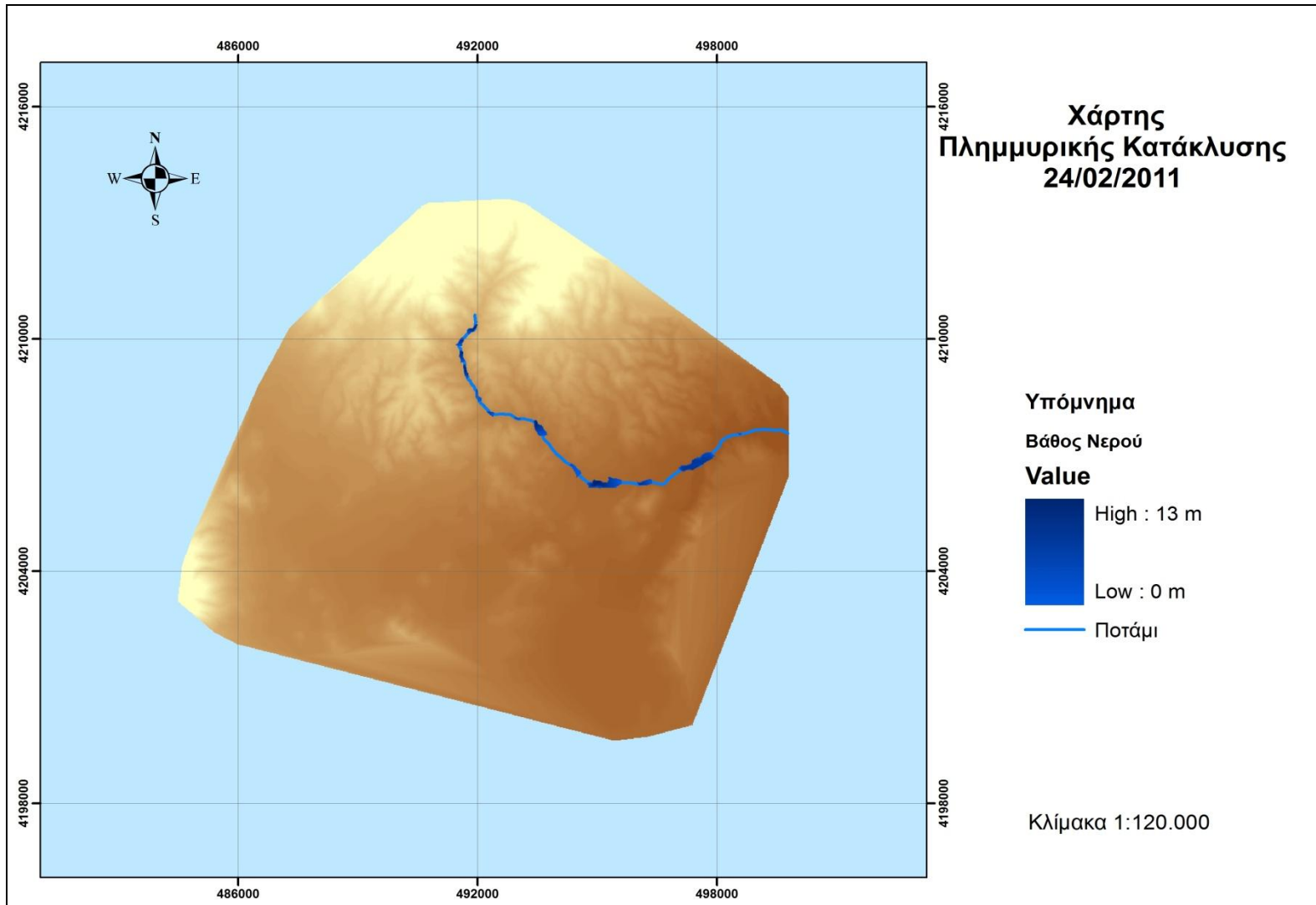
Παρακάτω παρατίθενται οι πιεζομετρικοί χάρτες και οι χάρτες όπου απεικονίζονται οι πλημμυρικά κατακλυζόμενες περιοχές.



Χάρτης 6.1: Πιεζομετρικός χάρτης



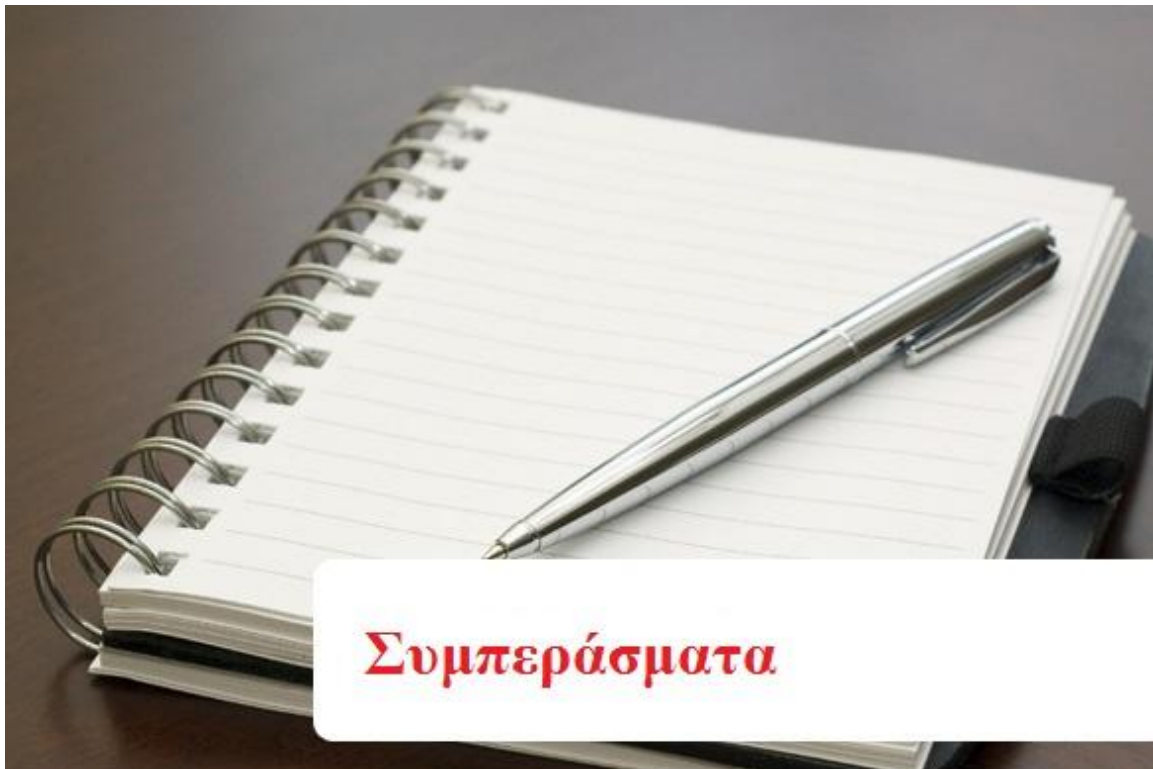
Χάρτης 6.2: Χάρτης Πλημμυρικής Κατάκλυσης 04/02/2011



Χάρτης 6.3: Χάρτης Πλημμυρικής Κατάκλυσης 24/02/2011

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα



Συμπεράσματα

7. Συμπεράσματα

7.1 Υδρολογική Προσομοίωση

Η υδρολογική προσομοίωση έγινε σε περιβάλλον HEC-HMS με εξαγόμενο αποτέλεσμα πλημμυρογράφημα σχεδιασμού στην έξοδο κάθε υπολεκάνης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίασαν τα αποτελέσματα στη θέση όπου υπάρχει ο σταθμός Ραφήνα. Συγκεκριμένα, ο σταθμός έδινε μέτρηση παροχής αιχμής $80 \text{ m}^3/\text{s}$ για το επεισόδιο βροχόπτωσης 04/02/2011, ενώ αυτή της υδρολογικής προσομοίωσης $137 \text{ m}^3/\text{s}$. Αντίστοιχα για το επεισόδιο βροχόπτωσης 24/02/2011, η παρατηρούμενη παροχή αιχμής ήταν $40 \text{ m}^3/\text{s}$, ενώ η τιμή της προσομοίωσης ήταν $84 \text{ m}^3/\text{s}$. Εξαιτίας αυτής της διαφοράς έγινε βαθμονόμηση του μοντέλου ως προς τον συντελεστή CN, ο οποίος είχε εκτιμηθεί σύμφωνα με τις χρήσεις γης και τη γεωλογία της περιοχής. Έτσι, για να επιτευχθεί ταύτιση των αιχμών, έγινε μείωση των τιμών κατά 20% στο πρώτο επεισόδιο και 25% στο δεύτερο αντίστοιχα.

7.2 Υδραυλική Προσομοίωση

Η υδραυλική προσομοίωση έγινε σε περιβάλλον HEC-RAS, με εξαγόμενο αποτέλεσμα την πιεζομετρική επιφάνεια για κάθε επεισόδιο βροχόπτωσης. Και στην υδραυλική προσομοίωση δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στο σημείο όπου υπήρχαν μετρήσεις στάθμης ώστε να γίνει έλεγχος των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, μετρήσεις στάθμης υπήρχαν μόνο για το επεισόδιο της 04/02/2011, για το οποίο παρατηρήθηκε στάθμη νερού 1.5 m με παροχή αιχμής $80 \text{ m}^3/\text{s}$. Από την υδραυλική προσομοίωση προέκυψε στάθμη νερού 1.6 m με παροχή $137 \text{ m}^3/\text{s}$ και συντελεστή Manning 0.015 όπως είχε εκτιμηθεί από τις χρήσεις γης. Με απόκλιση 10 m περίπου εξάγεται η παρατηρούμενη στάθμη 1.5 m. Από τη βαθμονόμηση του υδραυλικού μοντέλου με παροχή $80 \text{ m}^3/\text{s}$ προκύπτει ότι ο συντελεστής Manning θα πρέπει να έχει τιμή 0.07 ώστε να επιτευχθεί η στάθμη των 1.5 m. Έτσι λαμβάνοντας υπόψη και τα σχόλια των υπεύθυνων του τομέα για ενδεχόμενο λάθος στις μετρήσεις απορροής, έγινε δεκτός ο συντελεστής Manning 0.015 (σύμφωνος με τις χρήσεις γης) και η παροχή $137 \text{ m}^3/\text{s}$ που προέκυψε από την υδρολογική προσομοίωση. Όλα τα παραπάνω αφορούσαν τη μόνιμη ροή. Σχετικά με τη μη μόνιμη ροή, έγινε η δημιουργία ενός απλοποιημένου μοντέλου, ώστε να εξεταστεί το φαινόμενο

μακροσκοπικά. Τελικά, έγινε εξαγωγή αποτελεσμάτων για κάθε χρονικό βήμα (10 min) και σύγκριση αυτών με τα αντίστοιχα παρατηρημένα. Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν ήταν σχετικά μικρές.

7.3 Σύνθεση Χαρτών

Με την ολοκλήρωση της υδρολογικής και υδραυλικής προσομοίωσης έγινε η σύνθεση των πλημμυρικών χαρτών. Ειδικότερα, προσδιορίστηκαν οι κατακλυζόμενες περιοχές καθώς και το εμβαδό αυτών. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι και στα δύο επεισόδια βροχόπτωσης παρατηρείται ίδια πλημμυρική έκταση παρά τις διαφορές που υπήρχαν στις παροχές αιχμής.

7.4 Γενικό Συμπέρασμα

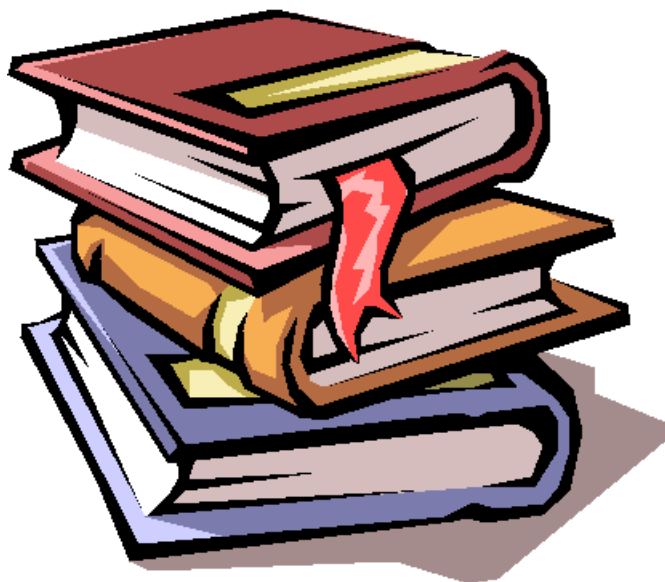
Η υδρολογική και υδραυλική προσομοίωση της λεκάνης απορροής της Ραφήνας έγιναν με τη χρήση των μοντέλων HEC-HMS και HEC-RAS αντίστοιχα όπως έχει προαναφερθεί. Τα μοντέλα αυτά αποτελούν ελεύθερο λογισμικό και κάθε χρήστης έχει τη δυνατότητα να τα χρησιμοποιήσει χωρίς κάποιο κόστος. Συμπέρασμα λοιπόν, όλης της διαδικασίας που περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, είναι πως τα μοντέλα αυτά, 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 περιέχουν πολλές λεπτομέρειες με αποτέλεσμα, ο χρήστης να αναγκάζεται να αναζητεί πληροφορίες σε άλλους διαδικτυακούς τόπους.

7.5 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα της παρούσας εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η υδρολογική προσομοίωση βασίστηκε στην επιλογή διάφορων προτύπων για την ολοκλήρωσή της. Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα HEC-HMS δίνει διάφορες επιλογές για τον υπολογισμό του προτύπου απωλειών, της άμεσης απορροής και του τρόπου διόδευσης. Η επιλογή των προτύπων, που χρησιμοποιήθηκαν, έγινε με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα. Έτσι, μία πρόταση για περαιτέρω μελέτη, είναι η διερεύνηση και εφαρμογή όλων των μεθόδων που διαθέτει το πρόγραμμα και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Επίσης, μία ακόμα πρόταση μετεξέλιξης αυτής της εργασίας, είναι η συσχέτιση του χάρτη πλημμύρας που δημιουργήθηκε, με το χάρτη των χρήσεων γης της περιοχής. Στόχος αυτής της συσχέτισης είναι η εκτίμηση του αναμενόμενου κόστους ζημιών και η εξαγωγή χαρτών διακινδύνευσης. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή, η κατάρτιση ενός επιχειρησιακού σχεδίου διαχείρισης του πλημμυρικού κινδύνου και εφαρμογή κατάλληλων μέτρων για την ελαχιστοποίηση και την πρόληψη των δυσμενών συνεπειών ενός πλημμυρικού επεισοδίου.

Βιβλιογραφία



Ελληνική Βιβλιογραφία

Αλωνιτσιώτη, Δ., 2011. *Διερεύνηση της επίδρασης των δασικών πυρκαγιών στην υδρολογική απόκριση λεκανών απορροής της ανατολικής Αττικής*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων.

Γκικόκας, Α., 2009. *Κατάρτιση μεθοδολογικού πλαισίου για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας, Εφαρμογή στον νομό Αρκαδίας*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων.

ΕΚ (2007), ΟΔΗΓΙΑ 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας.

Ευστρατιάδης, Α. και Μαμάσης, Ν. 2011. Σημειώσεις μαθήματος *Διαχείριση Υδατικών Πόρων*, ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων.

Ευστρατιάδης, Α., 2008. *Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων*, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ.

Καρύμπαλης, Ε., Γάκη-Παπαναστασίου, Κ., και Μαρακιάν Χ., 2005. *Συμβολή των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών του υδρογραφικού δικτύου του Μεγάλου Ρέματος Ραφήνας και οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στην εκδήλωση πλημμυρών*, Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τόμος XXXVIII.

Κασελά, Α., 2011. *Υδρολογική προσομοίωση της διευρυμένης πειραματικής λεκάνης της Ανατολικής Αττικής: ρέματα Ραφήνας και Λυκορέματος, με χρήση του μοντέλου HEC-HMS*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος.

Κατσαρέλης, Γ., 2010. Σημειώσεις μαθήματος *Εφαρμοσμένη Υδραυλική*, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ.

Κουτσογιάννης, Δ. και Ξανθόπουλος, Θ., 1999. *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 297 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

- Μαμάσης, Ν., 2011. Σημειώσεις μαθήματος *Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα*, ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων.
- Μιμίκου, Μ. και Μπαλτάς, Ε., 2003. *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 297 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Νουτσόπουλος, Γ., Χριστοδούλου, Γ., Παπαθανασιάδης, Τ., 2007. *Υδραυλική ανοιχτών αγωγών*, Έκδοση 1^η, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Ντοανίδης, Λ., 2007. *Συγκριτική εφαρμογή του υδρολογικού ομοιώματος HEC-HMS σε ενιαία και ημικατανεμημένη μορφή στη λεκάνη του ποταμού Καλαμά*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων.
- Παναγόπουλος, Γ., 2011. Σημειώσεις μαθήματος *Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα*, ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων.
- Ραδαίος, Α., 2006. *Διερεύνηση του πλημμυρικού καθεστώτος του ποταμού Πηνειού και πλημμυρικές κατακλύσεις για διάφορες περιόδους επαναφοράς*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος.
- Ράμπιας, Ε., 2007. *Υδραυλική προσομοίωση ποταμού Αλιάκμονα με χρήση του μοντέλου HEC-RAS*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων.
- Σούλης, Κ., Δέρκας, Ν. και Βαλιάωτζας, Ι.Δ., 2007. *Παρουσίαση πειραματικής λεκάνης απορροής στον χείμαρρο Λυκόρεμα του όρους Πεντέλη*, Πρακτικά 5^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, Λάρισα: 18-20 Οκτωβρίου.
- Στάμου, Α. και Σκοπελίτη, Α., 2009. Παρουσίαση στο μάθημα *Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών στους Υδατικούς Πόρους*, ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων.

Ξένη Βιβλιογραφία

Alonistioti, D., Papathanasiou, C., Kasella, A., Makropoulos, C., Mimikou, M., 2011. *Assessing the impact of forest fires on the hydrological response of urban catchments: the case of the Eastern Attica region.*

Bedient, P. and Huber, W., 1992. *Hydrology and floodplain analysis*, Addison-Wesley, New York, NY.

Bruner, G., 2008a. *HEC-RAS, river analysis system user's manual*, US Army corps of Engineers, Hydrologic engineering center.

Bruner, G., 2008b. *HEC-RAS, river analysis system hydraulic reference manual*, US Army corps of Engineers, Hydrologic engineering center.

Cameron, T., Ackerman, P.E., 2011. *HEC-GeoRAS, GIS tools for support of HEC-RAS using ArcGIS.*

Fleming, M., Doan, J., 2010. *HEC-GeoHMS, Geospatial Hydrologic Modeling Extension, version 5.0.*

McCarthy, GT., 1938. *The unit Hydrograph and flood routing*, Unpublished paper, Conference of North Atlantic Division, US Army corps of Engineers, New London., CT. US Engineering Office, Providence RI.

William, A., Fleming, M., 2010. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual.*

Διαδικτυακοί Τόποι

<http://hoa.ntua.gr/>

<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=252&language=el-GR>

http://www.fsl.orst.edu/geowater/FX3/help/8_Hydraulic_Reference/Mannings_n_Tables.htm

http://ec.europa.eu/atoz_en.htm

<http://ndbhmi.chi.civil.ntua.gr/el/index.html>