



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Υδρολογική προσομοίωση της διευρυμένης πειραματικής λεκάνης της Ανατολικής Αττικής: ρέματα Ραφήνας και Λυκορέματος, με χρήση του μοντέλου HEC-HMS.

Αθανασία Ε. Κασσελά

Επιβλέπων: Δρ. Χ. Μακρόπουλος, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

Ευχαριστίες

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χρήστο Μακρόπουλο, Λέκτορα στον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την ανάθεση και επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την ελαστικότητα και υπομονή του.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τη Χρυσούλα Παπαθανασίου, Υποψήφια Διδάκτορα και ερευνήτρια στον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος για τη βοήθεια, τις συμβουλές και τη διαθεσιμότητά της, όποτε και αν χρειάστηκα διευκρινίσεις.

Ευχαριστώ, επίσης, τον κ. Νίκο Μαμάση, Λέκτορα στον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, για τη βοήθειά του σε καιρία ζητήματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και την Ελευθερία Σαφιολέα και τον Γιώργο Παπουτσόγλου, ερευνητές στον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, για τη διάθεση μεγάλου ποσοστού των απαιτούμενων δεδομένων για την εκπόνηση της.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Κωνσταντίνα Καγιά, συμφοιτήτρια, φίλη και πλέον Διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό για την αμέριστη βοήθεια, αλλά και συμπαράστασή της, σε πολλά στάδια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ τη Δέσποινα Αλωνιστιώτη, μεταπτυχιακή φοιτήτρια στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» του ΕΜΠ, και πλέον Διπλωματούχο, για την καλή της διάθεση και άριστη συνεργασία, και τον Αλέξανδρο Γκιόκα, Διπλωματούχο του ίδιου Μεταπτυχιακού Προγράμματος, για τη σημαντική βοήθειά του σε αρχικά στάδια της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνήθηκε και προσομοιώθηκε η υδρολογική συμπεριφορά υδρολογικής λεκάνης στην περιοχή της Ανατολικής Αττικής. Οι μεθοδολογίες που επιλέχθηκαν για την εκτίμηση των παραμέτρων σχετίζονται με τον όγκο και την ποιότητα των διαθέσιμων για κάθε περίπτωση δεδομένων, καθώς και τις ευκολίες των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Η περιοχή μελέτης επιλέχθηκε, αρχικά, λόγω της διαθεσιμότητας δεδομένων βροχόπτωσης και απορροών. Εμφανίζει επίσης ενδιαφέρον λόγω αυξανόμενης αστικοποίησης και προσφάτων γεγονότων πυρκαγιάς που έχουν επηρεάσει την επιφανειακή της απορροή.

Σε περιβάλλον Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών πραγματοποιήθηκε ο μεγαλύτερος φόρτος της επεξεργασίας των δεδομένων, ενώ σε περιβάλλον HEC-HMS, ελεύθερα διαθέσιμου λογισμικού, στήθηκε, ρυθμίστηκε και επαληθεύθηκε το προσομοίωμα της υπό μελέτη λεκάνης απορροής, το οποίο έχει ήδη χρησιμοποιηθεί και σε άλλες μελέτες. Σε περιβάλλον ΣΓΠ έγινε εκτεταμένη χρήση της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS, που διευκολύνει τη μετάβαση σε περιβάλλον HEC-HMS. Και τα δύο λογισμικά αποδείχθηκαν αξιόπιστα και εξαιρετικά χρήσιμα για την επιτάχυνση των υπολογιστικών διαδικασιών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η προσέγγιση του αποτελέσματος γίνεται, ελλείπει εδραιωμένης μεθοδολογίας, με πολλαπλές δοκιμές. Η εργασία περιλαμβάνει εκτενή αναφορά στην επιλογή παραμέτρων κατά την εφαρμογή των λογισμικών, ιδιαίτερα σε σημεία όπου τα εγχειρίδια χρήσης δεν είναι ιδιαίτεως βοηθητικά.

Για την τελική προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε, λήφθηκαν υπόψη φαινόμενα πυρκαγιάς και αστικοποίησης, και διαπιστώθηκε ότι τα αποτελέσματα του προσομοιώματος είναι λογικά.

Η εργασία πραγματοποιήθηκε υπό το πρίσμα της εκτίμησης της πλημμυρικής επικινδυνότητας της περιοχής, και προς την κατεύθυνση κατάρτισης χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας, χαρτών πλημμυρικής διακινδύνευσης και σχεδίων δράσης για την ελαχιστοποίηση των δυνητικών επιπτώσεων από πλημμυρικά φαινόμενα. Υπό την οπτική αυτή, ένα τμήμα της εργασίας αναφέρεται σε πιθανά μη κατασκευαστικά μέτρα που μπορούν να ενισχύσουν την ασφάλεια και το επίπεδο ζωής.

ABSTRACT

*Hydrologic modelling of the extended experimental basin of Eastern Attica:
streams of Rafina and Lykorema, using HEC-HMS.*

Kassela, A., 2011

Due to increasing urbanization, forest fires, and flooding events occurring to many areas surrounding the city of Athens in the region of Attica, Greece, there is an interest to acquire and/or improve the knowledge of the hydrologic behaviour of their watersheds.

This project deals with the hydrologic investigation and modelling of an extended experimental basin, upstream from the city of Rafina in Eastern Attica. The area faces increasing urbanization in a number of districts within the watershed, as well as at the city of Rafina itself, therefore bearing an increasing risk of flooding, as well as of potential flooding impacts. Nonetheless, the area of the watershed is mainly covered by vegetation and cannot be considered urban. The hydrologic and meteorological characteristics of the basin are monitored by three distinct gauges networks, run by the Center of Hydrological Information of the National Technical University of Athens, one of which includes both rain and stage gauges.

The methodology of the project is to a large extent determined by the amount of available data during the period that it was conducted, as well as the features of the software used (GIS and HEC-HMS). Well known and highly accepted methods are mainly chosen. The SCS method is criticized and, based on literature, alternatively applied.

Four scenarios, that take into account urbanization and forest fire, were formulated for the final simulation runs of the model, that were conducted with a 150-year precipitation return period. The results of the model are reasonable, even though the calibration and verification of the model were based on single precipitation incidents, due to problems of the databases at the time that the project was in progress.

The project was conducted with a clear goal to serve as a stepping stone towards the establishment of flood hazard and flood risk maps for the area, as well as the development of flood risk management plans. In that manner, a brief overview of non structural means towards the mitigation of flooding impacts is attempted.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	9
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	10
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	12
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.1. ΤΟ ΖΗΤΗΜΑ ΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	15
1.2. Η ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ 2007/60	15
1.3. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	19
1.4. ΠΟΡΕΙΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	19
1.5. ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	19
2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	23
2.1. ΒΑΣΙΚΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΕΣ	23
2.1.1. Ο υδρολογικός κύκλος	24
2.1.2. Οι έννοιες της χωρικής και της χρονικής κλίμακας στην υδρολογία	26
2.1.3. Το υδρολογικό ισοζύγιο σε επίπεδο λεκάνης απορροής	28
2.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΡΧΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	29
2.2.1. Εκτίμηση υδρολογικών ελλειμμάτων με τη μέθοδο της Soil Conservation Service (SCS)	29
2.2.2. Συνθετικό Υδρογράφημα Snyder	33
2.2.3. Πρότυπο εκθετικής μείωσης βασικής απορροής	34
2.2.4. Πρότυπο διόδευσης Muskingum	35
2.2.5. Μέθοδος Thiessen	36
2.3. Η ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ	37
2.4. ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	38
2.4.1. Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών ArcGIS	38
2.4.2. Υδρολογικό προσομοίωμα HEC-HMS	39
2.4.3. Εργαλειοθήκη HEC-GeoHMS	39
3 ΠΛΗΜΜΥΡΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ	43
3.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΓΕΝΕΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ	43
3.1.1 Η πλημμύρα μετά από πυρκαγιά	43
3.1.2 Οι πλημμύρες μέσα στον αστικό ιστό	43
3.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ	48
3.3 ΤΟ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ	50
3.3.1 Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα	50
3.3.2 Η Οδηγία 2007/60 για τις πλημμύρες	51
3.4 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΚΑΙ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ	54
3.4.1 Συνήθης διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης στην Ελλάδα, αναγκαιότητα ολοκληρωμένου σχεδιασμού και λήψης μη κατασκευαστικών μέτρων	54
3.4.2 Νέα προσέγγιση στη μελέτη και διαχείριση πλημμυρών	57
3.4.3 Μη κατασκευαστικά μέτρα διαχείρισης πλημμυρών	61
4 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	67
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	67
4.1.1 Γενικά στοιχεία	67
4.1.2 Στοιχεία για την πυρκαγιά του Αυγούστου 2009	72
4.2 ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	74
4.2.1 Πειραματική λεκάνη X-Basin	74
4.2.2 Δίκτυο ΜΕΤΕΟΝΕΤ	82
4.2.3 Πρόγραμμα FLADAR	85
4.2.4 Δίκτυο Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών	85
5 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	89

5.1.	ΣΤΗΣΙΜΟ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ GIS ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ GIS ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ HEC-GEOHMS	89
5.1.1.	Τροποποίηση της ανάλυσης του ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε περιβάλλον GIS	89
5.1.2.	Κατάρτιση «υδρολογικά διορθωμένου» ψηφιακού μοντέλου εδάφους με χρήση της επέκτασης HEC-GeoHMS	90
5.1.3.	Επιλογή “κατωφλιού” υδατορευμάτων	93
5.1.4.	Διαμόρφωση λεκάνης, υπολεκανών απορροής και υδατορευμάτων στην περιοχή μελέτης 96	
5.1.5.	Επιλογή μεθόδου υπολογισμού συντεταγμένων του κεντροειδούς των υπολεκανών.....	99
5.1.6.	Συμβουλές εφαρμογής του εγχειριδίου χρήσης της επέκτασης HEC-GeoHMS.....	100
5.1.7.	Δημιουργία αρχείων για είσοδο στο HEC-HMS	101
5.2.	ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΡΧΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ	101
5.2.1.	Επιλογή και εφαρμογή μεθόδου υπολογισμού υδρολογικών ελλειμμάτων.....	101
5.2.2.	Επιλογή και εφαρμογή προτύπου εκτίμησης άμεσης απορροής.....	110
5.2.3.	Επιλογή και εφαρμογή προτύπου εκτίμησης βασικής απορροής.....	111
5.2.4.	Επιλογή και εφαρμογή προτύπου διόδευσης πλημμύρας	112
5.3.	ΣΧΟΛΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ HEC-HMS	113
5.3.1.	Γενικές κατευθύνσεις.....	113
5.3.2.	Μοντέλο λεκάνης απορροής	114
5.3.3.	Μετεωρολογικό μοντέλο.....	115
5.3.4.	Προσδιορισμός χρονικών διαστημάτων προσομοιώσεων.....	118
5.3.5.	Εισαγωγή χρονοσειρών δεδομένων.....	119
5.3.6.	Τρέξιμο προσομοίωσης	119
5.4.	ΡΥΘΜΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	122
5.4.1.	Πορεία ρύθμισης	122
5.4.2.	Μεθοδολογία ρύθμισης.....	122
5.4.3.	Ρυθμισμένες τιμές μοντέλου προσομοίωσης.....	123
5.4.4.	Επαλήθευση μοντέλου	129
5.5.	ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ.....	132
5.5.1.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΟΜΒΡΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ..	132
5.5.2.	Η ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΤΟΥ ΑΥΓΟΥΣΤΟΥ 2009	133
5.5.3.	ΣΕΝΑΡΙΑ	133
6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	137
6.1	ΠΑΡΑΘΕΣΗ ΚΥΡΙΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	137
6.2	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	146
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ, ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ	151
7.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	151
7.2	ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	152
7.3	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	153
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	155
	ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	155
	ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	157
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	161
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	161
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.....	164
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ.....	174
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙV	175

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Τυπικές τιμές παραμέτρου CN (συνθήκες υγρασίας τύπου II)	32
Πίνακας 2.2 Κατάταξη εδαφών σύμφωνα με τη διαπερατότητά τους	33
Πίνακας 2.3 Τύποι προηγούμενων συνθηκών υγρασίας	33
Πίνακας 3.1 Εκτιμήσεις διακινδύνευσης συστημάτων διαχείρισης πλημμύρας.....	49
Πίνακας 3.2 Διακινδύνευση συστημάτων διαχείρισης πλημμύρας	49
Πίνακας 4.1 Συνοπτικά στοιχεία των σταθμών του δικτύου METEONET	83
Πίνακας 5.1 Υπολεκάνες λεκάνης απορροής μελέτης.....	97
Πίνακας 5.2 Στοιχεία υδατορευμάτων λεκάνης απορροής μελέτης	99
Πίνακας 5.3 Γενική αντιστοίχιση υδρολιθολογικών σχηματισμών και ομάδων διαπερατότητας κατά SCS	103
Πίνακας 5.4 Απόδοση ομάδας υδροπερατότητας στους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής μελέτης	103
Πίνακας 5.5 Απόδοση τιμών CN στις χρήσεις γης της περιοχής μελέτης.....	105
Πίνακας 5.6 Μέσες αρχικές τιμές τιμών CN υπολεκανών εργασίας	109
Πίνακας 5.7 Εκτίμηση αρχικών απωλειών I_a και λόγων αρχικών απωλειών I_a/S	110
Πίνακας 5.8 Αρχικές τιμές συνθετικού υδρογραφήματος Snyder	111
Πίνακας 5.9 Αρχικές τιμές προτύπου βασικής απορροής	112
Πίνακας 5.10 Αρχικές εκτιμήσεις παραμέτρων προτύπου διόδευσης	113
Πίνακας 5.11 Βάρη Thiessen I	117
Πίνακας 5.12 Βάρη Thiessen II	117
Πίνακας 5.13 Βάρη Thiessen III.....	117
Πίνακας 5.14 Ρυθμισμένες τιμές CN, αρχικών απωλειών I_a υπολεκανών και λόγων αρχικών απωλειών I_a/S	124
Πίνακας 5.15 Ρυθμισμένες τιμές μοναδιαίου υδρογραφήματος Snyder.....	125
Πίνακας 5.16 Ρυθμισμένες παράμετροι προτύπου εκθετικής μείωσης βασικής απορροής.....	125
Πίνακας 5.17 Ρυθμισμένες τιμές παραμέτρων προτύπου διόδευσης πλημμύρας.....	126
Πίνακας 5.18 Τελικές ρυθμισμένες τιμές CN υπολεκανών.....	132
Πίνακας 5.19 Τιμές παραμέτρων Σεναρίου 2	133
Πίνακας 5.20 Αλλαγές παραμέτρων Σεναρίου 3	134
Πίνακας 5.21 Αλλαγές παραμέτρων Σεναρίου 4	134
Πίνακας 6.1 Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης: στοιχεία απορροών αιχμής	143
Πίνακας 6.2 Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης: συνολικοί όγκοι απορροής (σε 1000m ³).....	143
Πίνακας 6.3 Εύλογες συγκρίσεις των αποτελεσμάτων των σεναρίων	144
Πίνακας 6.4 Ποσοστιαία σύγκριση των συνολικών πλημμυρικών όγκων των σεναρίων	145

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Συνοπτικό διάγραμμα βασικών στοιχείων και διαδικασιών κατάρτισης χαρτών σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60.....	16
Εικόνα 1.2 Συνοπτικό διάγραμμα βασικών στοιχείων και διαδικασιών κατάρτισης χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας.....	18
Εικόνα 2.1. Εντοπισμός σημείου λήξης άμεσης απορροής (σημείο Δ).....	35
Εικόνα 2.2 Εργασία σε περιβάλλον ArcGIS. Διακρίνονται οι εργαλειοθήκες των HEC-GeoHMS και HEC-GeoRAS	40
Εικόνα 3.1 Διάγραμμα βασικών στοιχείων και διαδικασιών κατάρτισης χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας και διακινδύνευσης.....	53
Εικόνα 4.1 Όρια λεκάνης και υπολεκανών μελέτης.....	67
Εικόνα 4.2 Χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας της Αττικής	68
Εικόνα 4.3 Χάρτης πολυπλοκότητας απαιτούμενης μεθοδολογίας για την εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας στην περιοχή της Αττικής.....	69
Εικόνα 4.4 Συνοπτικό διάγραμμα βασικών στοιχείων και διαδικασιών κατάρτισης χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας.....	70
Εικόνα 4.5 Χρήσεις γης Corine στην περιοχή μελέτης	71
Εικόνα 4.6 Επιφανειακές εμφανίσεις γεωλογικών σχηματισμών στην περιοχή μελέτης	72
Εικόνα 4.7 Απεικόνιση της καμένης έκτασης μετά την πυρκαγιά του Αυγούστου 2009 στα όρια της υπό μελέτη λεκάνης απορροής.....	73
Εικόνα 4.8 Διαγραμματική απεικόνιση των καμένων εκτάσεων ανά χρήση γης μετά την πυρκαγιά του Αυγούστου 2009.....	74
Εικόνα 4.9 Πειραματική λεκάνη X-Basin: διαφοροποίηση καταγεγραμμένων και διαμορφωμένων ορίων υπολεκανών.....	75
Εικόνα 4.10 Θέσεις μέτρησης υδρολογικών και υδραυλικών μεγεθών.....	77
Εικόνα 4.11 Οι σταθμοί του δικτύου METEONET	82
Εικόνα 4.12 Γενική διάταξη των αισθητήρων μέτρησης των σταθμών του δικτύου METEONET	84
Εικόνα 4.13 Βροχογράφοι σταθμών δικτύου METEONET	85
Εικόνα 5.1 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους Αττικής και καταγεγραμμένο υδρογραφικό δίκτυο.....	91
Εικόνα 5.2 Παράδειγμα υδρολογικής τροποποίησης ψηφιακού μοντέλου εδάφους με βάση το καταγεγραμμένο υδρογραφικό δίκτυο [Hellweger, 1997].....	93
Εικόνα 5.3 Σύγκριση καταγεγραμμένου και αδρού συνθετικού υδρογραφικού δικτύου	94
Εικόνα 5.4. Σύγκριση καταγεγραμμένου και λεπτομερούς συνθετικού υδρογραφικού δικτύου.....	95
Εικόνα 5.5 Καταγεγραμμένο και συνθετικό υδρογραφικό δίκτυο στη λεκάνη απορροής της μελέτης .	95
Εικόνα 5.6 Διαμόρφωση υπολεκανών λεκάνης απορροής μελέτης	97
Εικόνα 5.7 Διαδικασία συγχώνευσης υπολεκανών πυκνού συνθετικού υδρογραφικού δικτύου	98
Εικόνα 5.8 Κόμβοι εκτίμησης πλημμυρογραφημάτων λεκάνης απορροής μελέτης	99
Εικόνα 5.9 Απόδοση ομάδων υδροπερατότητας κατά SCS στην περιοχή μελέτης με βάση το γεωλογικό χάρτη της Αττικής	104
Εικόνα 5.10 Αρχικά υδατορεύματα και κόμβοι σε περιβάλλον HEC-HMS	115
Εικόνα 5.11 Πολύγωνα Thiessen για τους διαθέσιμους βροχομετρικούς σταθμούς	118
Εικόνα 5.12 Αποτέλεσμα προσομοίωσης με τις αρχικές τιμές στη θέση Λυκορέμα	120

Εικόνα 5.13 Αποτέλεσμα προσομοίωσης με τις αρχικές τιμές στην έξοδο της X-Basin	120
Εικόνα 5.14 Αποτέλεσμα προσομοίωσης με τις αρχικές τιμές στη θέση Πικέρμι	121
Εικόνα 5.15 Αποτέλεσμα προσομοίωσης με τις αρχικές τιμές στη θέση Ραφήνα.....	121
Εικόνα 5.16 Αποτέλεσμα προσομοίωσης με τις ρυθμισμένες τιμές στη θέση Λυκόρεμα.....	127
Εικόνα 5.17 Αποτέλεσμα προσομοίωσης με τις ρυθμισμένες τιμές στην έξοδο της X-Basin.....	127
Εικόνα 5.18 Αποτέλεσμα προσομοίωσης με τις ρυθμισμένες τιμές στη θέση Πικέρμι	128
Εικόνα 5.19 Αποτέλεσμα προσομοίωσης με τις ρυθμισμένες τιμές στη θέση Ραφήνα.....	128
Εικόνα 5.20 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης της 12.12.2008 στη θέση Ραφήνα	130
Εικόνα 5.21 Πλημμυρογραφήματα της 12.12.2008 στη θέση Ραφήνα	130
Εικόνα 5.22 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης της 17.11.2009 στη θέση Ραφήνα	131
Εικόνα 5.23 Πλημμυρογραφήματα της 17.11.2009 στη θέση Ραφήνα	131
Εικόνα 6.1 Αποτελέσματα συγκριτικής προσομοίωσης σεναρίων στη θέση Λυκόρεμα.....	137
Εικόνα 6.2 Αποτελέσματα συγκριτικής προσομοίωσης σεναρίων στην έξοδο της X-Basin.....	138
Εικόνα 6.3 Αποτελέσματα συγκριτικής προσομοίωσης σεναρίων στη θέση Πικέρμι.....	138
Εικόνα 6.4 Αποτελέσματα συγκριτικής προσομοίωσης σεναρίων στη θέση Ραφήνα.....	139
Εικόνα 6.5 Αποτελέσματα συγκριτικής προσομοίωσης σεναρίων αμέσως ανάντη του αστικού ιστού της Ραφήνας.....	139
Εικόνα 6.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης Σεναρίου 1	140
Εικόνα 6.7 Αποτελέσματα προσομοίωσης Σεναρίου 2	140
Εικόνα 6.8 Αποτελέσματα προσομοίωσης Σεναρίου 3	141
Εικόνα 6.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης Σεναρίου 4	141

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

h	ύψος βροχοπτώσης
h_{a0}, I_a	αρχικό ελλειμματικό ύψος βροχόπτωσης (απώλειες)
h_a	συνολικό ελλειμματικό ύψος βροχόπτωσης (απώλειες)
x	επιπλέον ελλειμματικό ύψος βροχόπτωσης (απώλειες)
S	μέγιστη (δυναμικά) κατακράτηση εδάφους
t_{a0}	χρονική στιγμή εκκίνησης επιφανειακής απορροής
h_e	ύψος ενεργού βροχοπτώσης
y	μέγιστο (δυναμικά) ύψος ενεργού βροχόπτωσης
CN	αριθμός καμπύλης απορροής
$CNII$	αριθμός καμπύλης απορροής για μέσες συνθήκες αρχικής υγρασίας εδάφους
CNI	αριθμός καμπύλης απορροής για ξηρές συνθήκες αρχικής υγρασίας εδάφους
$CNIII$	αριθμός καμπύλης απορροής για υγρές συνθήκες αρχικής υγρασίας εδάφους
t_p	χρόνος υστέρησης αιχμής
C_p	συντελεστής λεκάνης απορροής (Snyder)
C_t	συντελεστής λεκάνης απορροής (Snyder - τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά)
L_m	απόσταση θέσης υπολογισμού πλημμυρογραφήματος από υδροκρίτη λεκάνης απορροής
L_c	απόσταση θέσης υπολογισμού πλημμυρογραφήματος από κέντρο βάρους λεκάνης απορροής
Q_p	απορροή αιχμής
A	έκταση λεκάνης απορροής
Q	απορροή, βασική απορροή (πρότυπο εκθετικής μείωσης)
a	συντελεστής στείρευσης (πρότυπο εκθετικής μείωσης)
K	χρόνος διάνυσης τμήματος υδατορεύματος από το πλημμυρικό κύμα (πρότυπο Muskingum)
x	παράμετρος εξασθένισης αιχμής του πλημμυρικού κύματος (πρότυπο Muskingum)
I	παροχή εισόδου (πρότυπο Muskingum)
Δt	πεπερασμένο χρονικό διάστημα (πρότυπο Muskingum)
ΔS	διαφορά αποθηκευτικότητας τμήματος υδατορεύματος στο χρόνο Δt (πρότυπο Muskingum)
w_i	συντελεστής βαρύτητας βροχομετρικού σταθμού (μέθοδος Thiessen)
A_i	εμβαδό επιρροής βροχομετρικού σταθμού (μέθοδος Thiessen)
A	συνολικό εμβαδό λεκάνης απορροής (μέθοδος Thiessen)
i	έντασης βροχόπτωσης
t	διάρκεια βροχόπτωσης (όμβρια καμπύλη)
T	περίοδος επαναφοράς βροχόπτωσης

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1 Εισαγωγή

1.1. Το ζήτημα των πλημμυρών

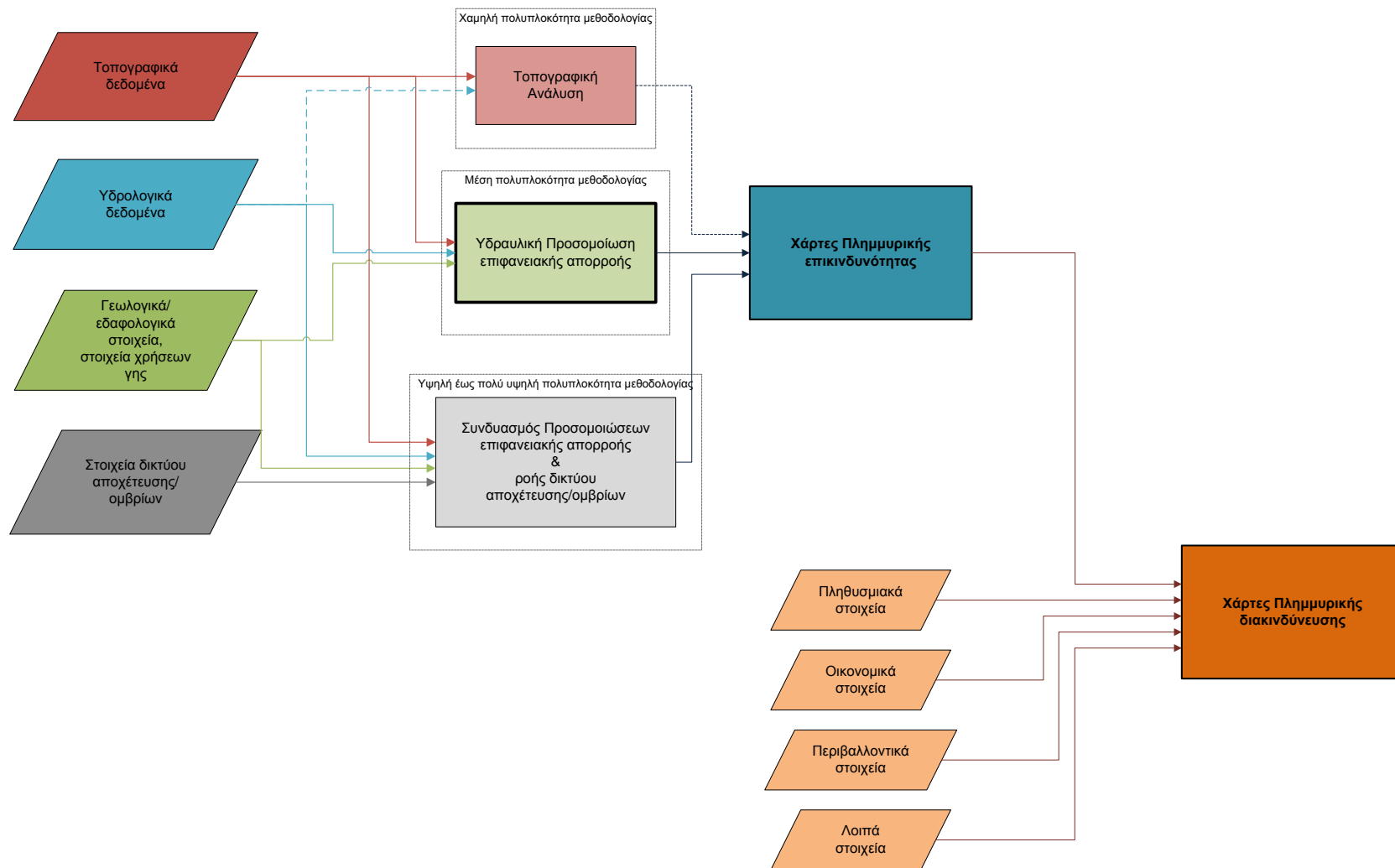
Το πρόβλημα της εκτίμησης του μεγέθους και της συχνότητας των πλημμυρών απασχόλησε τον άνθρωπο ήδη από τα αρχαία χρόνια, όταν καλούνταν να προστατευτεί από αυτές ή να τις εκμεταλλευτεί προς όφελός του με τις μικρότερες δυνατές απώλειες. Στους μεγάλους αρχαίους πολιτισμούς τα αντιπλημμυρικά έργα συνδυάστηκαν με αρδευτικά, σε συστήματα διωρύγων και αναχωμάτων. Η Μεσοποταμία και η Αίγυπτος είναι δύο μονάχα παραδείγματα τέτοιων περιοχών. Οι Σουμέριοι κατασκεύασαν εκτεταμένο σύστημα διωρύγων προστατεύοντας με αναχώματα τους οικισμούς, ενώ οι Αιγύπτιοι κατασκεύασαν επιπλέον και φράγμα, περίπου το 4000 π.Χ. [Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος, 1999].

Στο σύγχρονο κόσμο, με εφόδια την επιστημονική έρευνα και εμπειρία και την τεχνολογική πρόοδο των τελευταίων δεκαετιών, η επιστημονική κοινότητα καλείται να εκτιμήσει την (επαν)εμφάνιση πλημμυρικών επεισοδίων και τις επιπτώσεις τους με σκοπό να προστατεύσει τον άνθρωπο, τις δραστηριότητές του και το περιβάλλον, αλλά και να διαχειριστεί με βέλτιστο τρόπο τους υδατικούς πόρους.

Μελετώντας τις επιπτώσεις των πλημμυρών γίνεται σαφές ότι η παραπάνω εκτίμηση μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο τόσο σε επίπεδο πολιτείας, όσο και σε επίπεδο πολιτών (Φλώρος, 2009), ώστε να αποφευχθούν ή, κατά το δυνατόν, να ελαχιστοποιηθούν καταστροφές και, κυρίως, οι απώλειες ανθρώπινων ζώων. Δυστυχώς, πρόσφατα παραδείγματα καταστροφών από πλημμύρες στην Ελλάδα (Ρόδος, Έβρος, Τρίκαλα), την Ευρώπη (Γαλλία, Πολωνία, Ουγγαρία κ.α.) και τον κόσμο (Αυστραλία, Βραζιλία, Κένυα κ.α.) υπενθυμίζουν τη σημασία μιας συντονισμένης προσπάθειας εκτίμησης, διαχείρισης και αντιμετώπισης των πλημμυρικών φαινομένων και επιπτώσεων.

1.2. Η ανάλυση πλημμύρας στα πλαίσια της Οδηγίας 2007/60

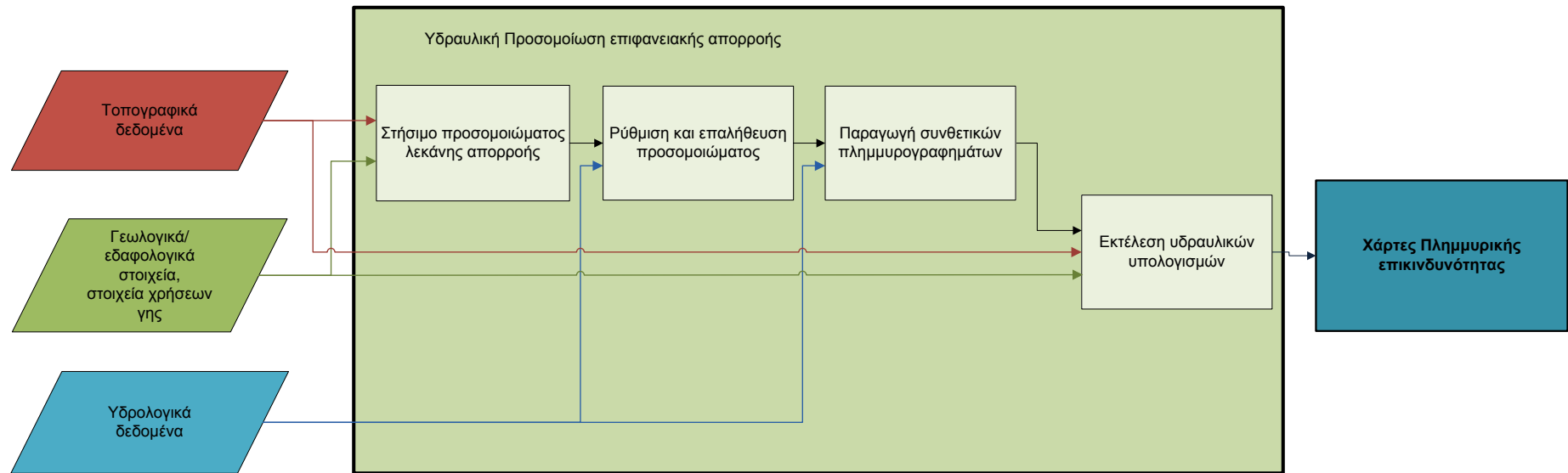
Στο παραπάνω πλαίσιο κινείται η Οδηγία 2007/60 της ΕΕ για τις πλημμύρες (βλ. και §3.3.2). Βασικός άξονας της Οδηγίας είναι η εκπόνηση χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας και πλημμυρικής διακινδύνευσης. Επιγραμματικά, οι διαδικασίες που μπορούν να ακολουθηθούν για την επίτευξη του παραπάνω στόχου συνοψίζονται στο παρακάτω διάγραμμα της Εικόνας 1.1.



Εικόνα 1.1 Συνοπτικό διάγραμμα βασικών στοιχείων και διαδικασιών κατάρτισης χαρτών σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60

Μπορεί κανείς να διακρίνει την αύξηση της πολυπλοκότητας των μεθόδων καθώς περισσότερα στοιχεία γίνονται διαθέσιμα ή συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση. Η πολυπλοκότητα της μεθόδου σχετίζεται και με τη χαρακτηριστικά της περιοχής, για παράδειγμα σε περιοχές με πολύ μεγάλες κλίσεις το τοπογραφικό ανάγλυφο, και όχι τόσο ο τύπος του εδάφους, καθορίζει την επιφανειακή απορροή. Σε μια τέτοια περίπτωση, με σχετικά απλή τοπογραφική ανάλυση μπορεί κανείς να καταρτίσει αξιόπιστους χάρτες πλημμυρικής επικινδυνότητας.

Για περιοχές χωρίς δίκτυο ομβρίων, αξιοποιώντας επιπλέον στοιχεία για την εδαφική διαμόρφωση (γεωλογικά, χρήσεις γης), και φυσικά για την υδρολογική συμπεριφορά της εκάστοτε περιοχής, είναι δυνατή η Υδραυλική Προσομοίωση της επιφανειακής της απορροής. Συνοπτικά, παρουσιάζονται τα στάδια αυτής προς την κατάρτιση χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας στο ακόλουθο διάγραμμα της Εικόνας 1.2.



Εικόνα 1.2 Συνοπτικό διάγραμμα βασικών στοιχείων και διαδικασιών κατάρτισης χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας

Στην παρούσα εργασία το βάρος δίνεται στις τρεις πρώτες διαδικασίες, δηλαδή στην υδρολογική προσομοίωση της υπό μελέτη περιοχής.

1.3. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η υδρολογική διερεύνηση και προσομοίωση της λεκάνης απορροής των ρεμάτων Ραφήνας και Λυκορέματος στην περιοχή της Ανατολικής Αττικής, με απώτερο στόχο τη διερεύνηση της πλημμυρικής της συμπεριφοράς.

1.4. Πορεία της εργασίας

Για την επίτευξη του βασικού σκοπού της εργασίας ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

- Συλλογή δεδομένων πειραματικής λεκάνης
- Επεξεργασία δεδομένων σε περιβάλλον ArcGIS
- Στήσιμο μοντέλου λεκάνης απορροής σε περιβάλλον ArcGIS και HEC-HMS
- Ρύθμιση και επαλήθευση μοντέλου
- Τρέξιμο σεναρίων με συνθετικά δεδομένα βροχόπτωσης

Παράλληλα διερευνήθηκαν μέθοδοι μη κατασκευαστικών μέτρων για την ελάττωση των κινδύνων και των καταστροφών που μπορεί να προκληθούν από πλημμύρες.

1.5. Δομή της εργασίας

Η δομή της εργασίας είναι η ακόλουθη:

- Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικά
- Κεφάλαιο 2: Βασικές έννοιες
- Κεφάλαιο 3: Βασικές έννοιες και στοιχεία για τη γένεση και τη διαχείριση πλημμύρας
- Κεφάλαιο 4: Περιοχή μελέτης

- Κεφάλαιο 5: Μεθοδολογία
- Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης
- Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα εργασίας και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Κεφάλαιο 2: Βασικές έννοιες

2 Βασικές έννοιες

2.1. Βασικά υδρολογικά και υδραυλικά φαινόμενα και έννοιες

Ως Υδρολογία ορίζεται η επιστήμη που ασχολείται με τα ύδατα της Γης, την παρουσία, την κυκλοφορία και κατανομή τους, τις φυσικές και χημικές ιδιότητές τους, και τις αλληλεπιδράσεις τους με το περιβάλλον, στο οποίο περιλαμβάνονται και τα έμβια όντα. Το γνωστικό πεδίο της Υδρολογίας καλύπτει όλη την ιστορία της παρουσίας του νερού στη Γη. [Ad Hoc Panel on Hydrology, 1962, Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος, 1999]

Σημαντική είναι η διάκριση μεταξύ της υδρολογικής επιστήμης, που έχει σαν βασικό στόχο την κατανόηση των υδρολογικών διεργασιών, φαινομένων και μηχανισμών, και της τεχνικής υδρολογίας, που έχει σαν κύριο στόχο την ποσοτική εκτίμηση και πρόγνωση των υδρολογικών μεγεθών, και αποτελεί αντικείμενο που εντάσσεται στις επιστήμες του μηχανικού [Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος, 1999].

Οι αρχαίοι Έλληνες φιλόσοφοι προσπάθησαν να προσεγγίσουν θεωρητικά τα υδρολογικά, μετεωρολογικά και υδραυλικά φαινόμενα. Ο Θαλής ο Μιλήσιος, ο επίσης Μιλήσιος Αναξίμανης, ο Κλαζομένιος, ο οποίος έζησε στην Αθήνα, και ο Αριστοτέλης είναι μερικοί από τους φιλοσόφους που διατύπωσαν θεωρίες για τον κύκλο του νερού και προσπάθησαν να τον ερμηνεύσουν. Οι Ρωμαίοι συνέχισαν αυτή την πορεία, ενώ και άλλοι αρχαίοι πολιτισμοί (Αίγυπτος, Ινδία, Κίνα κ.α.) ασχολήθηκαν με υδρολογικά θέματα, περισσότερο όμως πρακτικά και λιγότερο θεωρητικά.

Μετά το Μεσαίωνα, ο Λεονάρντο ντα Βίντσι πραγματοποίησε μετρήσεις ταχυτήτων ροής, ενώ αργότερα οι Pierre Perrault, Edmé Mariotte και Edmund Halley με μετρήσεις βροχοπτώσεων και απορροών επιδίωξαν να ποσοτικοποιήσουν τις θεωρητικές συσχετίσεις μεταξύ βροχής, εξάτμισης και απορροής. Το 18^ο αιώνα αναπτύχθηκε η κλασσική υδραυλική, με κύριους εκπροσώπους τους Bernoulli, Euler, d'Alembert, Pitot κ.ά., ενώ στις αρχές του 19^{ου} σημειώνεται σημαντική πρόοδος και στην υδρολογία (de la Méthérie, Dalton, Poiseuille κ.α.).

Από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα διατυπώνονται πλέον μαθηματικές σχέσεις στην υδραυλική (Darcy, Saint-Venant) και την υδρολογία (ορθολογική μέθοδος) και στις αρχές του 20^{ου} εισάγεται η στατιστική στη μελέτη των υδρολογικών φαινομένων. Ακολουθεί η έκδοση σημαντικών συγγραμμάτων, ενώ από τη δεκαετία του 1960, οπότε και αρχίζει να διευρύνεται η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, δίνεται νέα ώθηση στις επιστήμες του νερού με την ανάπτυξη και χρήση υπολογιστικών μοντέλων.

2.1.1. Ο υδρολογικός κύκλος

Στο κλειστό σύστημα της Γης η διακίνηση της υδάτινης μάζας πραγματοποιείται μέσω των μηχανισμών αλλαγής φάσεων του νερού. Μόλις το 0,0009% της μάζας του βρίσκεται στην αέρια φάση, το 1,76% βρίσκεται στη στερεά και το 98,2% στην υδάτινη, εκ του οποίου το 2,5% είναι γλυκό νερό και το 96,5% είναι αποθηκευμένο στους ωκεανούς.

Μέσω της διεργασίας της εξάτμισης στη θάλασσα και την ξηρά μία ποσότητα νερού περνάει στην αέρια φάση και υπό μορφή υδρατμών ανυψώνεται σε πιο κρύα στρώματα της ατμόσφαιρας. Μία άλλη ποσότητα νερού διαπνέεται από τη χλωρίδα και καταλήγει επίσης υπό μορφή υδρατμών σε ανώτερα στρώματα. Στην τεχνική υδρολογία οι δύο αυτοί μηχανισμοί συνήθως αναφέρονται από κοινού ως εξατμισοδιαπνοή και η ποσότητα νερού που αντιστοιχεί σε αυτούς αποτελεί τις υδρολογικές απώλειες. Οι υδρατμοί μεταφέρονται όχι μόνο κατακόρυφα, αλλά και οριζοντίως υπό την επίδραση ανέμων. Στα ανώτερα τμήματα ψύχονται και συμπυκνώνονται σε νέφη κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες. Όταν τα σταγονίδια ή οι κρύσταλλοι που σχηματίζονται αποκτήσουν ικανοποιητικό (κατακρημνισμό) μέγεθος, το νερό, υπό μορφή κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι, χαλάζι), επανέρχεται στην επιφάνεια της γης. Εάν δεν κατακρημνισθεί εξ αρχής σε κάποιον επιφανειακό υδάτινο αποδέκτη (ποτάμι, ταμιευτήρα, λίμνη, θάλασσα), το νερό ακολουθεί πολλαπλούς δρόμους. Κατακρατείται από τη χλωρίδα και τυχαία βυθίσματα του εδάφους δημιουργώντας λιμνάζουσες κοιλότητες, διηθείται (εισχωρεί) στο έδαφος ή απορρέει επιφανειακά.

Η ποσότητα του νερού που κατακρατείται ή διηθείται αναφέρεται ως υδρολογικό έλλειμμα. Απλοποιητικά, η έναρξη της επιφανειακής απορροής καθορίζεται από τη σχέση μεταξύ της διηθητικότητας του εδάφους και της έντασης της βροχόπτωσης. Εάν δηλαδή η δυνατότητα του εδάφους να διηθεί νερό εξαντληθεί, το επιπλέον νερό που κατακρημνίζεται (ενεργός βροχόπτωση) θα απορρεύσει επιφανειακά. Το διηθούμενο νερό συγκρατείται σε κάποιο βαθμό (που ποικίλει) από τους πόρους του εδάφους και μπορεί να τροφοδοτήσει το ριζικό σύστημα των φυτών, να παραμείνει ως εδαφική υγρασία για μεγάλο χρονικό διάστημα ή να καταλήξει σε υπόγειους υδροφορείς. Οι διεργασίες της εξατμισοδιαπνοής και της διήθησης είναι δυναμικές και πραγματοποιούνται σε πολλά στάδια του κύκλου του νερού, η εξάτμιση δε, σε μικρό ή μεγάλο βαθμό, είναι συνεχής.

Οι υπόγειοι και οι επιφανειακοί υδροφορείς επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω συστημάτων κοιλοτήτων, ρωγμών και πηγών. Έτσι, το νερό που απορρέει επιφανειακά μπορεί κατά τμήματα να καταλήξει σε κάποιον υπόγειο υδροφόρο, και αντίθετα, το νερό που απορρέει υπογείως να βγει στην επιφάνεια και να αποτελεί πλέον επιφανειακή απορροή. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι υπόγειοι υδροφορείς, εν γένει, εμφανίζουν ταχύτητες ροής και δεν είναι «στατικοί». Συνήθως αυτές είναι εξαιρετικά μικρές, γι' αυτό και συχνά παρανοούνται ως

“στατικοί” υδροφορείς. Εξαιρέση αποτελούν περιπτώσεις υπόγειων υδατορευμάτων, για παράδειγμα εντός καρστικών κοιλοτήτων, που εμφανίζουν ταχύτητες της τάξης των επιφανειακών υδατορευμάτων. Όταν γίνεται αναφορά σε υπόγεια απορροή στα πλαίσια της Τεχνικής Υδρολογίας ο όρος συνήθως περιλαμβάνει όλα τα φαινόμενα απορρόφησης και κίνησης του νερού στο έδαφος. Δεν ενδιαφέρει η πολυπλοκότητα στα φαινόμενα της κίνησης του νερού στο έδαφος, αλλά περισσότερο η ποσότητα του όγκου της βροχόπτωσης που καταλήγει να κινείται υπογείως ως αντιδιαστολή στην ποσότητα νερού που απορρέει επιφανειακά.

Το νερό που βρίσκεται σε στερεά φάση (χιόνι, χαλάζι, πάγος) υπό κατάλληλες συνθήκες επανεισάγεται στον παραπάνω κύκλο (εξάχνωση, τήξη) και, αντίστροφα, το νερό από την υγρή φάση μπορεί να περάσει στη στερεά υπό συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών και υψηλών πιέσεων. Το σύνολο των παραπάνω φυσικών φαινομένων είναι γνωστό ως υδρολογικός κύκλος (ή απλά, κύκλος του νερού) και η συνιστώσα του που πρωτίστως ενδιαφέρει την τεχνική υδρολογία είναι η επιφανειακή απορροή.

Η εξάτμιση του νερού οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ακτινοβολία του ήλιου η οποία θερμαίνει τις υδάτινες μάζες. Το 43% της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης απορροφάται κατά τη διεργασία αυτή, καθώς η λανθάνουσα θερμότητα του νερού έχει υψηλή τιμή και η απαίτηση σε ενέργεια είναι μεγάλη. Κατά δεύτερο λόγο, νερό εξατμίζεται και λόγω του ανέμου που συμπαρασύρει τους υδρατμούς που δημιουργούνται πάνω από την υδάτινη επιφάνεια, συχνά δε οι τελευταίοι μεταφέρονται κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους και καταλήγουν ξανά σε αυτήν χωρίς να συμμετέχουν σε διαδικασίες κατακρήμνισης.

Η διήθηση του νερού στο έδαφος οφείλεται στους πόρους που διαθέτουν γενικώς τα εδάφη και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που σχετίζονται με την κατάσταση, το είδος και τις ιδιότητες του εδαφικού υλικού (κοκκώδες, συνεκτικό), την παρουσία, την έκταση και τον τύπο της φυτοκάλυψης, τη διαμόρφωση του εδάφους (κλίση, παρουσία κοιλοτήτων), την ήδη υπάρχουσα υγρασία σε αυτό, τη θερμοκρασία, την ποιότητα του νερού κ.ά. Οι μηχανισμοί είναι πολύπλοκοι και διερευνώνται από άλλες επιστήμες, ενώ την τεχνική υδρολογία αφορά περισσότερο η ποσότητα που διηθείται και λιγότερο η επακριβής ερμηνεία των φαινομένων. Οι βασικότεροι παράγοντες που καθορίζουν την ποσότητα που διηθείται κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος βροχόπτωσης, αλλά και μετά το πέρας αυτού, είναι η ένταση και η διάρκεια του, καθώς και το καθεστώς βροχόπτωσης το προηγούμενο χρονικό διάστημα (βλ. και §2.2.1). Εάν το έδαφος είναι ξηρό η ποσότητα που θα διηθηθεί στο έδαφος θα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ποσότητα σε περίπτωση εδάφους που έχει ήδη δεχθεί βροχόπτωση, με αποτέλεσμα η επιφανειακή απορροή να εμφανίζεται στην πρώτη

περίπτωση μειωμένη σε σχέση με τη δεύτερη, για φαινόμενα βροχόπτωσης αντίστοιχης διάρκειας και έντασης.

2.1.2. Οι έννοιες της χωρικής και της χρονικής κλίμακας στην υδρολογία

Οι διεργασίες που συνοδεύουν τη διακίνηση και αποθήκευση του νερού στην ατμόσφαιρα και στο φλοιό της γης, και που απλοϊκά παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 2.1.1, είναι εξαιρετικά πολύπλοκες και σύνθετες. Η προσέγγιση των υδρολογικών φαινομένων σε συνεχή χώρο και χρόνο καθίσταται πρακτικά αδύνατη και πραγματοποιείται, αντί αυτού, σε προσδιορισμένα διαστήματα χώρου και χρόνου, που συνήθως αναφέρονται ως κλίμακες μελέτης. Οι βασικές επιδιώξεις κάθε έρευνας ή μελέτης καθορίζουν τις κλίμακες αυτές.

2.1.2.1. Η χωρική κλίμακα

Βασική έννοια της χωρικής κλίμακας στην υδρολογία είναι η λεκάνη απορροής, δηλαδή η επιφάνεια της οποίας τα νερά συνεισφέρουν στην απορροή μιας επιλεγμένης διατομής ενός υδατορεύματος. Θεωρητικά, για ένα υδατόρευμα μπορούν να προσδιοριστούν άπειρες λεκάνες απορροής, με βάση τη θέση της διατομής που θα επιλεγεί. Συνήθως, όμως, όταν γίνεται αναφορά στη λεκάνη απορροής ενός υδατορεύματος η διατομή βρίσκεται στην έξοδο του, δηλαδή στη θέση όπου το υδατόρευμα εκβάλλει σε κάποιον άλλο υδάτινο αποδέκτη. Τα όρια των λεκανών απορροής ονομάζονται υδροκρίτες και σχηματίζονται από τα υψηλά σημεία που καθορίζουν οριακά την κατεύθυνση ροής του νερού μεταξύ γειτονικών λεκανών (κορυφογραμμή).

Το υδρογραφικό δίκτυο, δηλαδή το σύνολο των υδατορευμάτων μιας περιοχής, καθορίζει την πορεία της απορροής σε συνήθη γεγονότα βροχοπτώσεων αλλά, σε μεγάλο βαθμό, και σε ακραία πλημμυρικά γεγονότα. Το κάθε υδατόρευμα δεν μπορεί παρά να θεωρηθεί το μικρότερο στοιχείο που είναι δυνατό να μελετηθεί ενιαίο, με εισόδους τις εισροές σε αυτό και εξόδους όπως προσδιορίζονται από τον υδρολογικό κύκλο και τις συνθήκες της περιοχής. Σε αυτή την αντίληψη στηρίζεται και η υδρολογική μελέτη σε επίπεδο λεκάνης απορροής υδατορεύματος.

Η επιλογή της διατομής του υδατορεύματος που καθορίζει τη λεκάνη απορροής είναι σημαντική και η έκταση της λεκάνης που προκύπτει εξαρτάται από το ανάγλυφο της περιοχής, από το μήκος του υδατορεύματος και από τα χαρακτηριστικά των μικρότερων υδατορευμάτων που εκβάλλουν σε αυτό. Στην απορροή ενός ποταμού μεγάλου μήκους που εκβάλλει στη θάλασσα προστίθενται οι απορροές των παραποτάμων του σε διάφορες θέσεις. Κάθε ένας από τους παραποτάμους μπορεί να θεωρηθεί υδατόρευμα με ανεξάρτητη λεκάνη

απορροής, ενώ η λεκάνη απορροής του κύριου ποταμού περιλαμβάνει όλες τις υπόλοιπες. Οι μικρότερες λεκάνες αναφέρονται συχνά ως υπολεκάνες απορροής. Η προσέγγιση μιας λεκάνης απορροής ως άθροισμα υπολεκανών είναι συνήθης και αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως ημικατανομημένη (semidistributed). Άλλοι τρόποι προσέγγισης είναι η αδιαμερίστη (lumped), δηλαδή η μελέτη της ως ενιαίο σύνολο, και η κατανομημένη (distributed), δηλαδή ο διαμερισμός της σε κύτταρα (cells) κανονικού γεωμετρικού σχήματος με διακριτές τιμές σε διάφορα υδρολογικά, εδαφολογικά και άλλα μεγέθη.

Σε έρευνες και μελέτες που αφορούν ευρύτερες περιοχές απαιτείται η θεώρηση ως ενιαίου συνόλου περισσότερων της μίας λεκανών απορροής. Η μελέτη του υδατικού δυναμικού μιας περιοχής, δηλαδή του διαθέσιμου προς αξιοποίηση νερού, είναι μία τέτοια περίπτωση. Όταν η περιοχή εμφανίζει σχετική κλιματική ομοιογένεια, η κλίμακα αναφέρεται ως περιοχική (regional). Στις μελέτες διαχείρισης υδατικών πόρων της Ελλάδας χρήσιμη είναι η υποδιαίρεση σε υδατικά διαμερίσματα που εμφανίζουν, στο εσωτερικό τους, σχετικά ομοιογενή κλιματικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά.

2.1.2.2. Η χρονική κλίμακα

Η παρακολούθηση και καταγραφή των υδρολογικών μεταβλητών σε συνεχή χρόνο δεν είναι εν γένει δυνατή, είτε λόγω της εκ φύσεως ασυνέχειας των μετρήσεων είτε λόγω δυσχερειών στον υπολογιστικό χειρισμό τους [Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος, 1999] (βλ. και §2.2). Η ακριβέστερη δυνατή κλίμακα μελέτης καθορίζεται από τη συχνότητα μέτρησης των σχετικών μεταβλητών, δεν είναι όμως πάντα η καταλληλότερη. Ανάλογα με την επιδίωξη της μελέτης, η κατάλληλη χρονική κλίμακα μπορεί να είναι μικρότερη της ώρας ή της τάξης δεκαετιών. Από ακριβέστερη σε αδρότερη κλίμακα η μετάβαση γίνεται με εξαγωγή μέσων τιμών ή αθροισμάτων, ανάλογα με τη μεταβλητή και τη χρήση για την οποία απαιτείται.

Ως υδρολογική πληροφορία μιας περιοχής αναφέρεται το σύνολο των πρωτογενών και επεξεργασμένων μετρήσεων των μεγεθών που σχετίζονται με τον υδρολογικό κύκλο. Για τη μελέτη καταιγίδων και πλημμυρικών φαινομένων η απαιτούμενη κλίμακα μέτρησης για μικρά υδατορεύματα είναι της τάξης του δεκαλέπτου ή τετάρτου της ώρας, ενώ σε μεγαλύτερα η πληροφορία μπορεί να αποδοθεί ικανοποιητικά με ωριαία κλίμακα. Εν γένει, για να είναι δυνατή η παρακολούθηση ενός πλημμυρικού γεγονότος η υδρολογική πληροφορία πρέπει να καταγράφεται ανά χρονικά διαστήματα υποπολλαπλάσια του χρόνου συγκέντρωσης της λεκάνης απορροής του υδατορεύματος. Ο χρόνος συγκέντρωσης, ή συρροής, μιας λεκάνης απορροής είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε το βρόχινο νερό να

φτάσει από το (υδραυλικά*) πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης στην έξοδό της. Γίνεται αντιληπτό ότι για ένα γεγονός βροχόπτωσης που πραγματοποιείται σε ολόκληρη την επιφάνεια της λεκάνης, με διάρκεια που υπερβαίνει το χρόνο συρροής της και σε χρόνο ίσο με το χρόνο συρροής συμβάλλει όλη η επιφάνειά της λεκάνης στην απορροή της εξόδου της. Η απορροή αυτή δεν πρέπει να συγχέεται με τη μέγιστη απορροή στη διατομή εξόδου, η οποία ανάλογα με το καθεστώς κατακράτησης, διήθησης και εξατμισοδιαπνοής στη λεκάνη μπορεί να αποκτάται σε διαφορετική χρονική στιγμή για διαφορετικά γεγονότα βροχοπτώσεων.

Η υδρολογική πληροφορία σε μηνιαία κλίμακα αποτυπώνει το υδρολογικό καθεστώς μέσα στο έτος, ενώ σε ετήσια κλίμακα τη διακύμανση μεταξύ των ετών (υπερετήσια). Οι τελευταίες επιλέγονται κατά κανόνα για προβλήματα διαχείρισης υδατικών πόρων.

2.1.3. Το υδρολογικό ισοζύγιο σε επίπεδο λεκάνης απορροής

Η εξίσωση του υδρολογικού ή υδατικού ισοζυγίου αποτελεί τη μαθηματική έκφραση του υδρολογικού κύκλου σε ένα γεωγραφικά οριοθετημένο χώρο και διακριτά χρονικά βήματα. Από τις υδρολογικές διεργασίες του κύκλου του νερού σημαντικές για την τεχνική υδρολογία και το υδρολογικό ισοζύγιο σε επίπεδο λεκάνης απορροής είναι οι διαδικασίες της κατακρήμνισης (κυρίως της βροχόπτωσης), της διήθησης/κατακράτησης και της εξατμισοδιαπνοής, που καθορίζουν το μέγεθος της (επιφανειακής) απορροής και τη χρονική διακύμανσή της. Το χρονικό βήμα που συνήθως επιλέγεται στην εφαρμογή του ισοζυγίου είναι μηνιαίο ή ετήσιο.

Η μεταβολή στην αποθηκευτικότητα μιας λεκάνης απορροής είναι η διαφορά μεταξύ της ποσότητας ύδατος που εισέρχεται σε αυτή και της ποσότητας που εξέρχεται. Είσοδο στη λεκάνη αποτελούν τα κατακρημνίσματα πάνω στη λεκάνη, οι εκροές γειτονικών λεκανών σε αυτήν και οι πηγές, ενώ έξοδο αποτελούν οι απορροές της, επιφανειακή και υπόγεια, και η εξατμισοδιαπνοή. Η διατήρηση της μάζας του νερού σε μία απλοποιημένη λεκάνη απορροής, στην οποία δεν εκβάλλουν άλλες και δεν υπάρχουν πηγές, εκφράζεται ως εξής:

$$\text{Μεταβολή αποθηκευτικότητας} = \text{Κατακρημνίσματα} - \text{Απορροές} - \text{Εξατμισοδιαπνοή},$$

και αποτελεί την εξίσωση υδατικού ισοζυγίου της.

* το υδραυλικά πιο απομακρυσμένο σημείο λεκάνης απορροής διαφοροποιείται από το γεωγραφικά πιο απομακρυσμένο. Είναι το σημείο εκείνο από το οποίο το βρόχινο νερό φτάνει, μέσω επιφανειακής απορροής, στο μεγαλύτερο χρόνο στην έξοδο της λεκάνης, και σχετίζεται με τοπογραφικά, εδαφολογικά και υδρολογικά στοιχεία της λεκάνης.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί εδώ ότι η παράλειψη των συνιστωσών των υδρολογικών ελλειμμάτων (κατακράτησης και διήθησης) στην εξίσωση υδατικού ισοζυγίου είναι συνήθως σε μεγάλη χρονική κλίμακα, για παράδειγμα ετήσια ή υπερετήσια. Αυτό συμβαίνει διότι σε μεγάλη κλίμακα τμήμα των ελλειμμάτων αυτών μετατρέπεται τελικά σε εξατμισοδιαπνοή ή απορροή. Σε μικρή χρονική κλίμακα, για παράδειγμα ωριαία ή ημερήσια, τα υδρολογικά ελλείμματα λαμβάνονται κανονικά υπόψη ως συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου.

2.2. Μέθοδοι εκτίμησης αρχικών παραμέτρων εργασίας

Στην επιστήμη της υδρολογίας, λίγα είναι τα φυσικά μεγέθη που μπορούν να μετρηθούν άμεσα. Συνήθως η βροχόπτωση και η απορροή (κατά κανόνα μέσω της στάθμης, αλλά με εύκολους υπολογισμούς, εξ' ων και θεωρούνται «άμεσες» μετρήσεις) μπορούν να καταγραφούν ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Γενικώς, η συχνότητα των μετρήσεων καθορίζεται από τη συμπεριφορά του μεγέθους που μετράται, τη φύση του γεγονότος (σύνηθες ή ακραίο), τις ανάγκες της υδρολογικής μελέτης καθώς και από τη σχέση του κόστους με την αναγκαιότητα των μετρήσεων. Για παράδειγμα, το ύψος βροχής συνήθως μετράται ανά τακτά, σταθερά χρονικά διαστήματα μικρότερα της ώρας σε αυτοματοποιημένους σταθμούς. Αντίθετα, η στάθμη ενός υδατορεύματος μπορεί να μετράται εν γένει μία φορά τη μέρα, ενώ σε περιόδους αυξημένων απορροών η συχνότητα μέτρησης να φτάνει τις λίγες ώρες προκειμένου να γίνει παρακολούθηση της πλημμυρικής απορροής.

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται οι μεθοδολογίες προσδιορισμού των μεγεθών που απαιτήθηκαν στην παρούσα εργασία. Πρόκειται για γνωστές μεθόδους που εύκολα μπορεί κανείς να αναζητήσει στη βιβλιογραφία. Για λόγους πληρότητας του τεύχους παρατίθενται εδώ, αλλά ο αναγνώστης παραπέμπεται στο κεφάλαιο 5 (Μεθοδολογία εργασίας) όπου αναλυτικά περιγράφεται ο τρόπος που εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι στην περιοχή μελέτης.

2.2.1. 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. Τόσο οι επιμέρους συνιστώσες της κατακράτησης (παρεμπόδιση από τη χλωρίδα, επιφανειακή

παγίδευση, κατακράτηση χιονοπτώσεων) όσο και η διήθηση είναι δυνατό να εκτιμηθούν μέσω σχέσεων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Η διήθηση είναι επίσης δυνατό να μετρηθεί σημειακά.

Μολοταύτα, η εκτίμηση των ελλειμμάτων στις υδρολογικές μελέτες γίνεται συνήθως συνολικά. Οι βιβλιογραφικές επιμέρους σχέσεις εμπεριέχουν αρκετές παραμέτρους για την εκτίμηση των οποίων απαιτούνται δεδομένα βροχοπτώσεων και απορροών που δεν είναι πάντοτε διαθέσιμα με επαρκή ακρίβεια. Η δε τοπική μέτρηση της διηθητικής ικανότητας του εδάφους εμπεριέχει σημαντικά σφάλματα, κυρίως ως προς την ανεπαρκή προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων. Επιπλέον, τα δεδομένα που προκύπτουν από τις μετρήσεις δεν μπορούν να επεκταθούν λόγω της ανομοιογένειας και της ανισοτροπίας των εδαφών [Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος, 1999].

Η Υπηρεσία Διατήρησης Εδαφών (Soil Conservation Service, πλέον Υπηρεσία Διατήρησης Φυσικών Πόρων – Natural Resources 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 μορφή της, 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 αυτό το σκοπό. Η ανάπτυξη της μεθόδου στηρίχθηκε σε μελέτες και παρατηρήσεις σε μικρές καλλιεργήσιμες λεκάνες και, παρόλο που οι παραδοχές της δεν στηρίζονται σε κάποια θεωρητική βάση, θεωρείται αρκετά ρεαλιστική. Είναι ευρέως διαδεδομένη κυρίως λόγω της απλότητά της και της μικρής της απαίτησης σε δεδομένα.

Στην αρχή ενός φαινομένου βροχόπτωσης και για χρόνο έως t_{a0} θεωρείται πως ολόκληρο το ύψος βροχής h_{a0} κατακρατείται ή διηθείται στο έδαφος (αρχικό έλλειμμα). Δεν παρατηρείται λοιπόν επιφανειακή απορροή στο διάστημα αυτό. Στη συνέχεια, ένα τμήμα του κατακρημνιζόμενου νερού μετατρέπεται σε υδρολογικό έλλειμμα και το υπόλοιπο αποτελεί την ενεργό βροχόπτωση h_e , δηλαδή δίνει επιφανειακή απορροή. Το μέγιστο ύψος του υδρολογικού ελλείμματος καθορίζεται από τη δυναμικά μέγιστη κατακράτηση από το έδαφος, S , ενώ το μέγιστο, δυναμικά, ύψος ενεργού βροχόπτωσης είναι $h - h_{a0}$ ($= y$), στην περίπτωση που όλο το κατακρημνιζόμενο νερό από την στιγμή t_{a0} και μετά μετατραπεί σε επιφανειακή απορροή (θεωρητικά). Η μέθοδος βασίζεται επιπλέον στην παραδοχή ότι οι λόγοι του ενεργού ύψους βροχόπτωσης, h_e , και του (επιπλέον) ελλειμματικού ύψους βροχόπτωσης $h_a - h_{a0}$ ($= x$) προς τα αντίστοιχα δυναμικά είναι ίσοι, δηλαδή:

$$\frac{h_e}{y} = \frac{x}{S} \quad \text{ή} \quad \frac{h_e}{h - h_{a0}} = \frac{h_a - h_{a0}}{S}.$$

Επειδή $h = h_e + h_a$, και λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές πριν και μετά τη χρονική στιγμή t_{a0} , προκύπτει:

$$h_e = 0 \text{ για } h < h_{a0} \text{ \& } h_e = \frac{(h - h_{a0})^2}{h - h_{a0} + S} \text{ για } h > h_{a0}.$$

Θεωρώντας, επιπλέον, ότι οι αρχικές απώλειες είναι συνάρτηση της δυνητικά μέγιστης κατακράτησης, ότι δηλαδή h_{a0} (ή I_a) = 0,2S, προσέγγιση η οποία στηρίζεται σε δεδομένα παρατηρήσεων σε μικρές αγροτικές λεκάνες στις ΗΠΑ, προκύπτει η απλοποιημένη μορφή των παραπάνω σχέσεων:

$$h_e = 0 \text{ για } h < 0,2S \text{ \& } h_e = \frac{(h - 0,2S)^2}{h + 0,8S} \text{ για } h > 0,2S.$$

Η δυνητικά μέγιστη κατακράτηση S είναι η μοναδική παράμετρος της μεθόδου και μπορεί να υπολογιστεί μέσω δεδομένων βροχόπτωσης και απορροής. Εάν λοιπόν είναι γνωστό το ύψος βροχόπτωσης h και το ενεργό ύψος βροχόπτωσης h_e , η S μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$S = 5h + 10h_e - 10\sqrt{h_e(h_e + 1,25h)}.$$

Στη συνέχεια η τιμή της μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της ενεργού βροχόπτωσης και της επιφανειακής απορροής σε υποθετικά σενάρια βροχοπτώσεων. Στην απλούστερη περίπτωση αυτό μπορεί να γίνει μέσω του αντίστοιχου υδατικού ισοζυγίου (βλ. §2.1.3).

Για τις περιπτώσεις που υπάρχει έλλειψη δεδομένων και δεν είναι δυνατή η απευθείας εκτίμηση της παραμέτρου S προτείνεται η χρήση της σχέσης:

$$S[mm] = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right),$$

όπου CN είναι ο αριθμός καμπύλης απορροής (runoff curve number). Ο τύπος του εδάφους, οι χρήσεις γης και οι συνθήκες εδαφικής υγρασίας στην αρχή του γεγονότος βροχόπτωσης που μελετάται καθορίζουν την εκτίμηση της παραμέτρου CN, η οποία προκύπτει από αντίστοιχους πίνακες που δίνονται στη βιβλιογραφία. Ενδεικτικά παρατίθενται χαρακτηριστικές τιμές της παραμέτρου CN στον Πίνακα 2.1.

Περιγραφή χρήσης 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 Ποσοστό αδιαπέρα- οικοπέδου (στρ) της επιφάνειας (%)				
≤ 0.5	65	77	85	90
1	38	61	75	83
1.5	30	57	72	81
2	25	54	70	80
4	20	51	68	79
Δρόμοι				
με οδόστρωμα και δίκτυο ομβρίων	98	98	98	98
χαλικόστρωτοι	76	85	89	91
χωματόδρομοι	72	82	87	89

Πίνακας 2.1 Τυπικές τιμές παραμέτρου CN (συνθήκες υγρασίας τύπου II)
Πηγή: Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος [1999]

Σύμφωνα με τη μέθοδο SCS, τα εδάφη κατατάσσονται σε τέσσερις ευρείες κατηγορίες σύμφωνα με τη διαπερατότητα και τη διηθητική ικανότητά τους (από αμμώδη και χαλικώδη με μεγάλους ρυθμούς διήθησης μέχρι έντονα διογκούμενες πλαστικές αργίλους με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης, βλ. Πίνακα 2.2). Ορίζονται επίσης τρεις κατηγορίες υπαρχουσών συνθηκών εδαφικής υγρασίας (ξηρές, μέσες και υγρές) σύμφωνα με το υδρολογικό καθεστώς στην υπό μελέτη λεκάνη το χρονικό διάστημα πριν το γεγονός βροχόπτωσης που μελετάται (βλ. Πίνακα 2.3). Με βάση τα παραπάνω και τις χρήσεις γης εκτιμάται η τιμή του CN είτε απευθείας, από πίνακες για μέσες συνθήκες υγρασίας, είτε μέσω αναγωγής αυτών για ξηρές ή υγρές συνθήκες με βάση τις σχέσεις $CN_I = \frac{0,42CN_{II}}{1 - 0,0058CN_{II}}$ και $CN_{III} = \frac{2,3CN_{II}}{1 + 0,0013CN_{II}}$, όπου CN_{II} η τιμή του αριθμού καμπύλης απορροής για μέσες συνθήκες υγρασίας και CN_I , CN_{III} οι τιμές για ξηρές και υγρές συνθήκες αντίστοιχα.

Ακολουθούν οι ομάδες διαπερατότητας και οι κατηγορίες συνθηκών εδαφικής υγρασίας πινακοποιημένες:

Ομάδα Α	Εδάφη με μεγάλους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδη και χαλικώδη με πολύ μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου.
Ομάδα Β	Εδάφη με μέσους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδης πηλός.
Ομάδα C	Εδάφη με μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη από αργιλοπηλό, εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό.
Ομάδα D	Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη που διογκώνονται σημαντικά όταν διαβραχούν, πλαστικές άργιλοι. Στην ίδια ομάδα περιλαμβάνονται εδάφη μικρού βάθους με σχεδόν αδιαπέρατους υπο-ορίζοντες κοντά στην επιφάνεια.

Πίνακας 2.2 Κατάταξη εδαφών σύμφωνα με τη διαπερατότητά τους
Πηγή: Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος [1999]

Τύπος I	Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά, αλλά πάνω από το σημείο μαρασμού*). Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μικρότερη από 13 mm (ή 35 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
Τύπος II	Μέσες συνθήκες. Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μεταξύ 13 και 38 mm (ή μεταξύ 35 και 53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
Τύπος III	Υγρές συνθήκες (εδάφη σχεδόν κορεσμένα). Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση 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 ως εκείνη η εδαφική υγρασία που δεν επιτρέπει στα φυτά να απορροφήσουν νερό από το έδαφος	

Πίνακας 2.3 Τύποι προηγούμενων συνθηκών υγρασίας
Πηγή: Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος [1999]

2.2.2. Συνθετικό Υδρογράφημα Snyder

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Snyder είναι δυνατή η κατασκευή πλημμυρογραφήματος στην έξοδο λεκάνης απορροής, χωρίς μετρήσεις, με βάση την έκτασή της, το σχήμα της, την τοπογραφία της, τις κλίσεις του ποταμού, την πυκνότητα των υδατορευμάτων και τη δυνατότητα αποθήκευσης νερού στο υδατόρευμα. Συμπεριλαμβάνοντας τα παραπάνω χαρακτηριστικά σε εκτιμώμενες «σταθερές» της λεκάνης, κατάληξε σε απλοποιητικές σχέσεις για την εκτίμηση των στοιχείων του πλημμυρογραφήματος. Βασικά μεγέθη της μεθόδου είναι ο χρόνος υστέρησης t_p και η απορροή αιχμής Q_p τα οποία υπολογίζονται ως $t_p = 0,75 \cdot C_t \cdot (L_m \cdot L_c)^{0,3}$ [hours] και

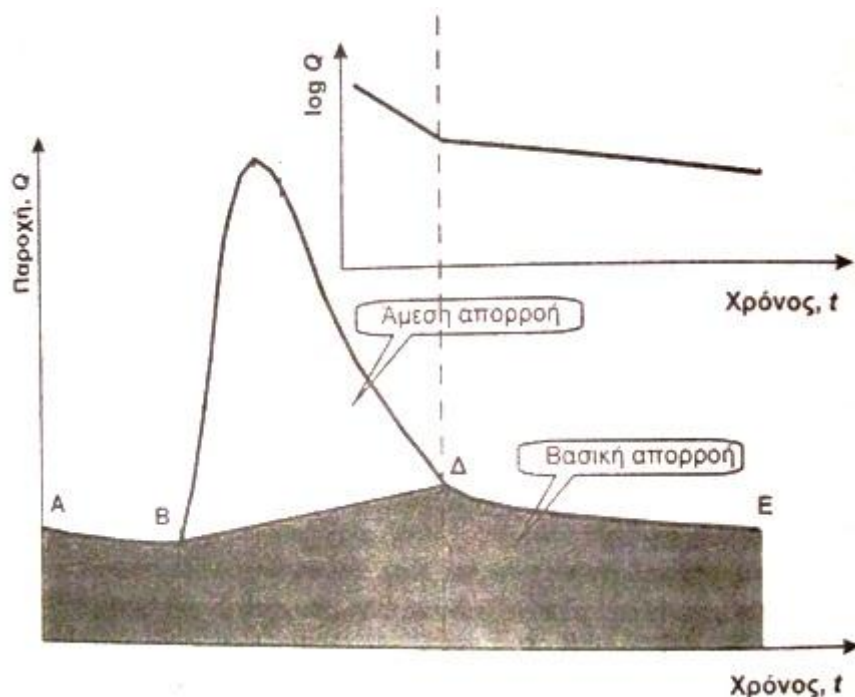
$$Q_p = 2,75 \cdot C_p \cdot \frac{A}{t_p} \text{ [m}^3\text{/sec]}, \text{ για το μετρικό σύστημα, όπου } C_t \text{ συντελεστής σχετικός με τα}$$

τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης (με τιμές μεταξύ 1,80-2,20, και τάση προς χαμηλές τιμές για υψηλές τιμές κλίσεων), L_m [km] η απόσταση της θέσης υπολογισμού του πλημμυρογραφήματος από τον υδροκρίτη, L_c [km] η απόσταση της θέσης υπολογισμού του πλημμυρογραφήματος από το κέντρο βάρους της λεκάνης, C_p συντελεστής σχετικός με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης (με τιμές μεταξύ 0,4-0,8) και A [km²] η έκταση της λεκάνης. Με βάση τα παραπάνω και τυποποιημένες σχέσεις που δεν αναφέρονται εδώ αναλυτικά, είναι δυνατός ο υπολογισμός σημείων του συνθετικού πλημμυρογραφήματος (διαδικασία αυτοματοποιημένη στο λογισμικό HEC-HMS που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία). Στη συνέχεια είναι δυνατή η ρύθμιση των παραπάνω παραμέτρων μέσω σύγκρισης με παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα.

2.2.3. Πρότυπο εκθετικής μείωσης βασικής απορροής

Για το συνυπολογισμό, με κατά το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια, της συμβολής της βασικής απορροής στα πλημμυρογραφήματα είναι θεμιτός ο διαχωρισμός της άμεσης από τη βασική απορροή ο οποίος μπορεί να επιτευχθεί μέσω της απεικόνισης της σχέσης $\ln Q-t$ για τον καθοδικό κλάδο. Το σημείο εντοπισμού αλλαγής της κλίσης είναι ενδεικτικό της διακοπής συμβολής της άμεσης απορροής στην επιφανειακή απορροή της λεκάνης απορροής (βλ. Εικόνα 2.1).

Ο κλάδος στείρευσης της βασικής απορροής περιγράφεται μαθηματικά από μία εκθετική σχέση της μορφής $Q = Q_0 \cdot e^{-(t-t_0)/a}$, όπου Q_0 η παροχή στο χρόνο t_0 και a συντελεστής με διαστάσεις χρόνου (συντελεστής στείρευσης). Απεικονίζοντας τη σχέση $\ln Q-t$ για τον κλάδο στείρευσης διαπιστώνεται γραμμική σχέση μεταξύ των μεγεθών, με την κλίση της ευθείας να ισούται με το συντελεστή στείρευσης. Το απλό αυτό πρότυπο προσεγγίζει αρκετά καλά τη συμβολή της βασικής απορροής στην επιφανειακή απορροή, αν και συχνά δεν είναι εύκολος ο προσδιορισμός του σημείου αλλαγής της κλίσης, και συνεπώς της έναρξης αποκλειστικής βασικής απορροής.



Εικόνα 2.1. Εντοπισμός σημείου λήξης άμεσης απορροής (σημείο Δ)
 [Πηγή: Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος, 1999. Επεξεργασία: Κασσελά, 2011]

2.2.4. Πρότυπο διόδευσης Muskingum

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

Η μέθοδος Muskingum είναι σχετικά απλή. Στηρίζεται στο διαχωρισμό της αποθηκευτικότητας σε πρισματική και σφηνοειδή, με σκοπό της εξαγωγή μιας αναδρομικής σχέσης για τον υπολογισμό της εκροής από ένα τμήμα του υδατορεύματος. Η συνολική αποθήκευση αποτελείται από το άθροισμα της πρισματικής και της σφηνοειδούς αποθήκευσης ως $S_{ολ} = S_{πρισμα} + S_{σφην} = K \cdot Q + K \cdot x \cdot (I - Q) = K \cdot [x \cdot I + (1 - x) \cdot Q]$. Με βάση την εξίσωση συνέχειας υπό μορφή πεπερασμένων διαφορών για τμήμα υδατορεύματος

προκύπτουν
$$\bar{I} - \bar{Q} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad \text{και}$$

$$S_{j+1} - S_j = K \cdot \{(x \cdot I_{j+1} + (1 - x) \cdot Q_{j+1}) - (x \cdot I_j + (1 - x) \cdot Q_j)\}$$
. Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να πάρουν τη μορφή $Q_{j+1} = C_0 \cdot I_{j+1} + C_1 \cdot I_j + C_2 \cdot Q_j$ όπου

$$C_0 = \frac{-Kx + 0,5\Delta t}{K - Kx + 0,5\Delta t}, \quad C_1 = \frac{Kx + 0,5\Delta t}{K - Kx + 0,5\Delta t} \quad \text{και} \quad C_2 = \frac{K - Kx + 0,5\Delta t}{K - Kx + 0,5\Delta t}. \quad \text{Η τελευταία}$$

σχέση συνδέει την παροχή εξόδου Q τη χρονική στιγμή $j+1$ με την παροχή εξόδου Q την χρονική στιγμή j , καθώς και με τις παροχές εισόδου I (εισροές) τις παραπάνω χρονικές στιγμές. Η παράμετρος K εκφράζεται σε μονάδες χρόνου και εκφράζει το χρόνο που απαιτείται ώστε το πλημμυρικό κύμα να διανύσει το τμήμα του υδατορεύματος που μελετάται. Κατά προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί ίση με τη χρονική διαφορά μεταξύ των αιχμών των πλημμυρογραφημάτων στη θέση εισόδου και στη θέση εξόδου του τμήματος τους υδατορεύματος. Η παράμετρος x είναι μέγεθος αδιάστατο, με τιμές από 0 έως 0,5 και εκφράζει την εξασθένιση του πλημμυρικού κύματος και τη μείωση της αιχμής. Για $x=0,5$ η εξασθένιση είναι μηδενική, δηλαδή το πλημμυρογράφημα δε μεταβάλλεται μεταξύ των διατομών εισόδου και εξόδου, απλώς μετατίθεται χρονικά. Εκφράζει επιπλέον και τη συμμετοχή της εισροής και της εκροής στην αποθηκευτικότητα του τμήματος του υδατορεύματος. Για $x=0$ η στάθμη στο τμήμα του υδατορεύματος καθορίζεται αποκλειστικά από την εκροή, για παράδειγμα σε περίπτωση υπερχειλιστή. Αντίστοιχα, για $x=0,5$ η εισροή και η εκροή συμβάλλουν εξίσου όπως συμβαίνει σε ομοιόμορφους αγωγούς.

Για την ευστάθεια της αριθμητικής μεθόδου Muskingum απαιτείται το βήμα Δt να επιλέγεται μεταξύ των τιμών $2Kx$ και $2K(1-x)$. Σε περίπτωση που δε διατίθενται πλημμυρογραφήματα εισόδου και εξόδου για το τμήμα του υδατορεύματος που ενδιαφέρει, είναι δυνατός ο υπολογισμός μιας μέσης ταχύτητας ροής μέσω των εξισώσεων Manning ή Chezy για μόνιμη και ομοιόμορφη ροή για μία αντιπροσωπευτική τιμή της παροχής, και στη συνέχεια η εκτίμηση των παραμέτρων.

2.2.5. Μέθοδος Thiessen

Η μέθοδος Thiessen είναι μία μέθοδος «άμεσης ολοκλήρωσης» για την εκτίμηση της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης μιας λεκάνης απορροής όταν διατίθενται για αυτήν σημειακές μετρήσεις βροχοπτώσεων. Η συνολική επιφάνεια A της λεκάνης απορροής χωρίζεται γεωμετρικά σε ζώνες επιρροής των επιμέρους βροχομετρικών σταθμών για τους οποίους υπάρχουν μετρήσεις και στη συνέχεια συνάγεται ένας συντελεστής βαρύτητας για

κάθε σταθμό με βάση τη σχέση $w_i = \frac{A_i}{A}$, όπου A_i το εμβαδό επιρροής του σταθμού και A το

συνολικό εμβαδό της λεκάνης απορροής. Οι ζώνες επιρροής καθορίζονται καθαρά γεωμετρικά, έτσι ώστε κάθε σημείο της υπολεκάνης να «ανήκει» στη ζώνη επιρροής του πλησιέστερου (σε οριζόντια προβολή) βροχομετρικού σταθμού, ανεξάρτητα από την τοπογραφική διαμόρφωση. Η κατασκευή των λεγόμενων «πολυγώνων Thiessen»

πραγματοποιείται με τη χάραξη των μεσοκαθέτων των ευθυγράμμων τμημάτων που ενώνουν τους βροχομετρικούς σταθμούς. Να σημειωθεί ότι όσο πυκνότερο είναι το δίκτυο των βροχομετρικών σταθμών και όσο μεγαλύτερη η χρονική κλίμακα της μελέτης, τόσο ακριβέστερες και πιο αξιόπιστες είναι οι εκτιμήσεις της μεθόδου.

2.3. Η αναγκαιότητα χρήσης ομοιωμάτων

Το αντικείμενο της υδρολογίας και των επιστημών της φύσης γενικότερα είναι πολύπλοκο και σε μεγάλο βαθμό αβέβαιο. Η κατανόηση των φυσικών φαινομένων και η, κατά το δυνατόν, ερμηνεία τους είναι μία πρώτη προσέγγιση στην προσπάθεια εκτίμησης, ή και πρόβλεψης ενίοτε, των φυσικών φαινομένων, η οποία όμως δεν είναι επαρκής για την ακριβή προσομοίωσή τους.

Το πρωταρχικό πρόβλημα είναι η αδυναμία ακριβούς μαθηματικής περιγραφής των πολύπλοκων φυσικών φαινομένων και διεργασιών. Ακόμα και αν για παράδειγμα, ήταν δυνατή η πλήρης αντίληψη (και τελικά η μαθηματική περιγραφή) των κατακρημνίσεων και των γενεσιουργών τους φυσικών φαινομένων, δε θα ήταν δυνατή η πλήρης μαθηματική περιγραφή, π.χ. της δίαυτης της παροχής σε ένα φυσικό ποτάμι. Μη συστηματικές, άγνωστες επιδράσεις θα έπρεπε να ληφθούν υπόψη, όπως η μεταβολή των φυσιολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής, της κοίτης του ποταμού, των συνθηκών κατακράτησης, εξατμισοδιαπνοής κ.ά., που επηρεάζουν τη σχέση κατακρήμνισης-απορροής με τυχαίο (μη συστηματικό) τρόπο [Μιμίκου, 2006].

Στην επιστήμη της Υδρολογίας η αδυναμία των εμπειρικών σχέσεων να αποδώσουν τα φυσικά φαινόμενα έγινε φανερή από την αρχή του 20^{ου} αιώνα, οπότε και άρχισε μια προσπάθεια συστηματικότερης παρακολούθησης και καταγραφής στοιχείων και μετρήσεων μέσω της ίδρυσης Υπηρεσιών και Οργανώσεων αρμοδίων για υδρολογικά ζητήματα. Η απόκτηση αξιόπιστων δεδομένων επέτρεψε τη μελέτη των φυσικών φαινομένων σε μεγαλύτερο βάθος και διευκόλυνε την προσπάθεια μαθηματικής περιγραφής των φαινομένων. Η διαθεσιμότητα περισσότερων δεδομένων διευκολύνει τον Υδρολόγο Μηχανικό, εμπεριέχει όμως και πηγές επιπλέον αβεβαιοτήτων και αποκλίσεων. Η ποιότητα και η ακρίβεια των μετρήσεων, η θέση των σταθμών μέτρησης βροχόπτωσης ή παροχής, η επεξεργασία των δεδομένων, όλα περιλαμβάνουν σφάλματα. Το μήκος του ιστορικού δείγματος και η πυκνότητα των μετρήσεων είναι επίσης προφανές ότι επηρεάζουν την όποια απόπειρα προσομοίωσης.

Γίνεται σαφές ότι η πολυπλοκότητα των φαινομένων και οι διαφοροποιήσεις στις μεθόδους μέτρησης και στις μεθοδολογίες επεξεργασίας των δεδομένων δεν επιτρέπουν ακριβή συμπεράσματα. Το μεγαλύτερο τμήμα της επεξεργασίας των υδρολογικών μετρήσεων

εξάλλου είναι στατιστικό (πιθανολογικό ή στοχαστικό), ενώ λίγες είναι οι εφαρμογές στις οποίες μία ντετερμινιστική προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή. Ακόμα και η πιθανολογική προσέγγιση σε μεγάλης κλίμακας έργα θεωρείται μικρής αξιοπιστίας και μεγάλης διακινδύνευσης, καθώς δε λαμβάνεται υπόψη η χρονική συσχέτιση και ακολουθία μεταξύ των μετρήσεων.

Για τους ανωτέρω λόγους οι επιπλέον αβεβαιότητες που προκύπτουν από την απλοποίηση των μαθηματικών εκφράσεων, την προσεγγιστική εκτίμηση παραμέτρων ή ακόμα και την παράλειψη των επιδράσεών τους δεν είναι επιθυμητές. Έχουν λοιπόν αναπτυχθεί μοντέλα τα οποία δίνουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης εξέτασης και μεταβολής πολλών παραμέτρων. Η διάδοση της χρήσης των υπολογιστών στην Υδρολογία χρονολογείται περίπου το 1960, έτος που θεωρείται και ορόσημο για τη σύγχρονη περίοδο της ιστορίας της επιστήμης [Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος, 1999]. Αξιοποιούνται πλέον οι δυνατότητες των ηλεκτρονικών υπολογιστών και οι εφαρμογές τους σε δισεπίλυτες μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν τα υδρολογικά φαινόμενα. Η επιπλέον πρόοδος της τεχνολογίας και η εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών με ισχυρές μονάδες επεξεργασίας και σημαντική μνήμη, επέτρεψε την ανάπτυξη και εξέλιξη των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών που μπορούν να αποτελέσουν την πλατφόρμα για την υδρολογική και υδραυλική μελέτη σε επίπεδο λεκάνης απορροής, και εν τέλει τη μελέτη πλημμυρών.

2.4. Εργαλεία και ομοιώματα εργασίας

2.4.1. Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών ArcGIS

Για τις ανάγκες της εργασίας, ήτοι για την απεικόνιση τοπογραφικών και εδαφολογικών δεδομένων, την επεξεργασία τους, αλλά και την κατάρτιση χαρτών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcGIS 9.2. Πρόκειται για ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών με πολλές δυνατότητες και αρχικά πολύπλοκο χειρισμό για το νέο εντελώς χρήστη. Με βάση εισαγωγικά βιβλία για την εξοικείωση με τις δυνατότητες του προγράμματος και στη συνέχεια με αναζήτηση συγκεκριμένων επιδιώξεων στο εγχειρίδιο χρήσης που είναι διαθέσιμο στο Διαδίκτυο γίνεται περισσότερο κατανοητή η λειτουργία του, αλλά και η χρησιμότητά του.

Δεν αναφέρονται αναλυτικά οι δυνατότητες του προγράμματος, οι οποίες είναι εύκολο να αναζητηθούν σε άλλες πηγές. Οι βασικές εντολές που χρησιμοποιήθηκαν, και των οποίων η χρήση δεν είναι πάντοτε σαφής, περιγράφονται αναλυτικά το αντίστοιχο υποκεφάλαιο της Μεθοδολογίας (βλ. §5.1)

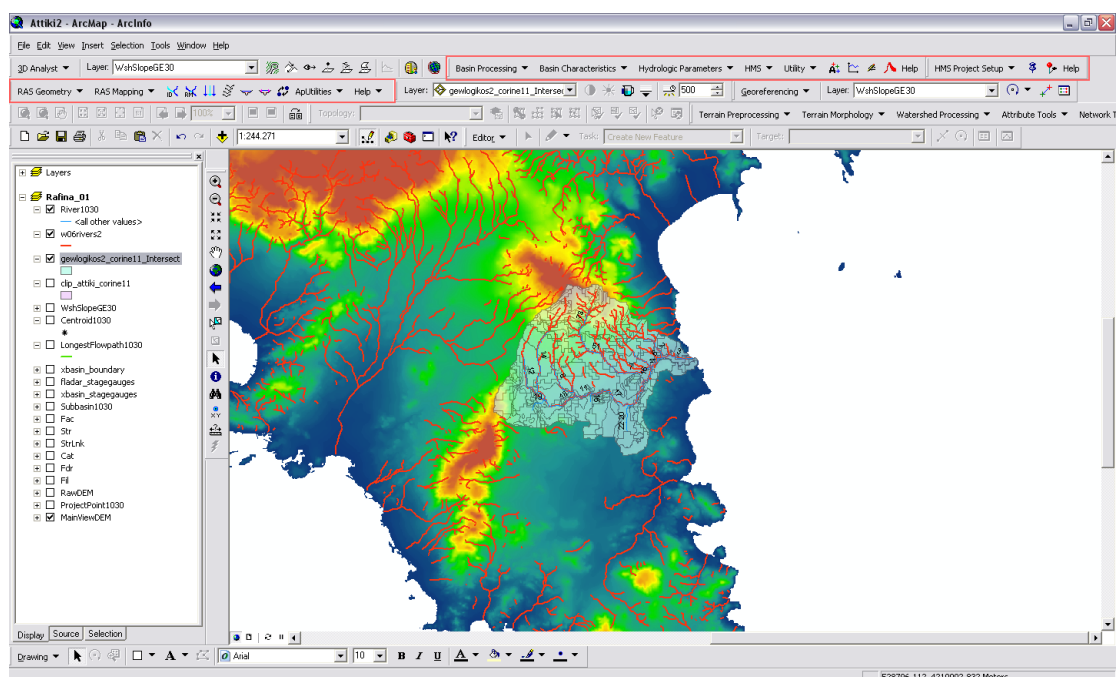
2.4.2. Υδρολογικό προσομοίωμα HEC-HMS

Το πρώτο διαδεδομένο πακέτο υδρολογικών εφαρμογών αναπτύχθηκε το 1965 από το Σώμα Μηχανικών του Στρατού των ΗΠΑ (US Army Corps of Engineers) και ονομάστηκε HEC-1, ενώ διαθέσιμο για χρήση σε προσωπικούς υπολογιστές (PC) έγινε το 1984, με κάποιες λειτουργίες να παραλείπονται λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων των τότε προσωπικών υπολογιστών. Με το HEC-1 προσδιορίζονται οι υπολεκάνες, τα υδατορεύματα και οι ταμιευτήρες της περιοχής μελέτης, τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε στοιχείου και οι μεταξύ τους σχέσεις και φυσικές διεργασίες. Εισάγοντας δεδομένα βροχοπτώσεων, πραγματικά ή υποθετικά, το τελικό προϊόν του μοντέλου αποτελείται από πλημμυρογραφήματα σε επιθυμητές θέσεις της λεκάνης απορροής που μελετάται. Το λογισμικό αναβαθμίζεται συνεχώς, ενώ οι εκδόσεις του διατίθενται ελεύθερα από την ιστοσελίδα του Σώματος Μηχανικών.

Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση HEC-HMS 3.5 του υδρολογικού μοντέλου, δηλαδή η τελευταία διαθέσιμη όταν ξεκίνησε η ουσιαστική επεξεργασία των δεδομένων στο συγκεκριμένο λογισμικό. Σε σχέση με την έκδοση 3.4, η οποία επίσης χρησιμοποιήθηκε σε αρχικά στάδια της εργασίας, η έκδοση 3.5 φαίνεται να επιδιώκει καλύτερη διεπαφή με το χρήστη με καλύτερη αναφορά λαθών (αλλά και πάλι, χωρίς κάποια κατεύθυνση για την επίλυσή τους).

2.4.3. Εργαλειοθήκη HEC-GeoHMS

Για την ευκολότερη μετάβαση από το περιβάλλον GIS στο περιβάλλον του HEC-HMS έχει αναπτυχθεί, επίσης από το Σώμα Μηχανικών του Στρατού των ΗΠΑ, η εργαλειοθήκη HEC-GeoHMS (βλ. Εικόνα 2.2). Πρόκειται για τη συγκέντρωση και οργάνωση των απαιτούμενων εντολών για την προετοιμασία των τοπογραφικών και εδαφολογικών δεδομένων (σε βαθμό που επιλέγεται από το χρήστη). Οι εντολές προϋπάρχουν στο GIS, αλλά είναι πολυπλοκότερο και συνήθως πιο χρονοβόρο να εκτελεστούν από τις εργαλειοθήκες του GIS σε σχέση με την εργαλειοθήκη HEC-GeoHMS. Αντίστοιχη εργαλειοθήκη έχει αναπτυχθεί και για το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS, το οποίο ξεφεύγει από το όρια της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 2.2 Εργασία σε περιβάλλον ArcGIS. Διακρίνονται οι εργαλειοθήκες των HEC-GeoHMS και HEC-GeoRAS

Κεφάλαιο 3: Πλημμύρα και Διαχείριση Πλημμύρας

3 Πλημμύρα και διαχείριση πλημμύρας

3.1 Μηχανισμοί γένεσης πλημμύρας

Σε περιπτώσεις έντονων ή/και παρατεταμένων γεγονότων βροχόπτωσης, ξαφνικού λιωσίματος πάγων, ανόδου της επιφάνειας της θάλασσας κ.ά., είναι δυνατή η εμφάνιση αυξημένης επιφανειακής απορροής. «Η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, δεν καλύπτεται από νερό»*, δηλαδή η πλημμύρα, είναι εν γένει ζημιογόνα για το τεχνητό περιβάλλον, μπορεί όμως να είναι ευεργετική για το φυσικό περιβάλλον και ενίοτε για τον άνθρωπο. Η αυξημένη πλημμυρική απορροή γλυκού νερού, εφόσον μπορεί να ελεγχθεί και αποθηκευθεί, αξιοποιείται μέσω του συστήματος διαχείρισης υδατικών πόρων της περιοχής (βλ. §2.2.4).

3.1.1 Η πλημμύρα μετά από πυρκαγιά

Τα γεγονότα πυρκαγιάς, ιδιαίτερα σε περιοχές που εμφανίζουν υψηλά ποσοστά δασώδους ή θαμνώδους βλάστησης, επιφέρουν μεγάλες διαφοροποιήσεις στην υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών απορροής. Η συγκράτηση του νερού από τη βλάστηση είναι πλέον μηδαμινή, ενώ λόγω της στάχτης μεταβάλλεται και η ίδια η διηθητικότητα του επιφανειακού εδαφικού στρώματος. Ο βαθμός στον οποίο η υδρολογική συμπεριφορά μεταβάλλεται μετά από ένα γεγονός φωτιάς επηρεάζεται σημαντικά, εκτός από τις προηγούμενες χρήσεις γης, και από την ένταση της πυρκαγιάς, η οποία αντικατοπτρίζεται στην παραμένουσα βλάστηση μετά το πέρας της πυρκαγιάς. Επιπλέον κίνδυνοι των πλημμυρών που ακολουθούν επεισόδια πυρκαγιάς είναι η (ορμητική) μεταφορά φερτών υλών και η (μόνιμη) διάβρωση του εδάφους. Στη βιβλιογραφία διερευνώνται διάφορες μέθοδοι για την αλλαγή των παραμέτρων μιας λεκάνης απορροής μετά από γεγονός πυρκαγιάς, με βάση την προϋπάρχουσα βλάστηση, τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και τα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς. Η έρευνα για την κατανόηση των φαινομένων και τη διερεύνηση των δυνατοτήτων προσέγγισής τους μέσω προσομοιώσεων είναι συνεχής.

3.1.2 Οι πλημμύρες μέσα στον αστικό ιστό

* Σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60 της Ευρωπαϊκής Ένωσης (βλ. §2.4.3)

Η πορεία των ομβρίων υδάτων σε μια αστική περιοχή καθορίζεται από τις υποδομές και τη διαμόρφωση των αστικών χώρων. Συνήθης πρακτική είναι η κατασκευή υπόγειων δικτύων αγωγών αποχέτευσης των ομβρίων υδάτων και η κατασκευή τεχνητών καναλιών ή η διευθέτηση φυσικών υδατορευμάτων, όπου υπάρχουν, ώστε να δημιουργηθεί ένα σύστημα συγκέντρωσης και απομάκρυνσης των ομβρίων υδάτων από τον αστικό ιστό. Το οδικό δίκτυο αποτελεί μέρος αυτού του συστήματος, τόσο σε συνήθη γεγονότα βροχοπτώσεων, μέσω ροής στα ρείθρα, όσο και σε πιο ακραία πλημμυρικά φαινόμενα οπότε και η ολοκληρωτική κατάκλυσή τους συντελεί στην προστασία των γύρω κτηρίων και δραστηριοτήτων. Αντιπλημμυρικές τάφροι αποστραγγίζουν συχνά τα ύδατα γύρω από τον ιστό ώστε να μην επιβαρύνεται το (υψηλού κόστους) δίκτυο ομβρίων, ενώ είναι δυνατή και η εκτροπή της πλημμυρικής παροχής υδατορεύματος σε περιπτώσεις που κρίνεται απαραίτητο. Συχνά τα όμβρια ύδατα καταλήγουν σε κάποιον κύριο υδάτινο αποδέκτη, όπως σε μεγάλα ποτάμια, λίμνες ή στη θάλασσα.

3.1.2.1 Δίκτυα και συστήματα αποχέτευσης ομβρίων υδάτων

Ο σχεδιασμός των αστικών συστημάτων ομβρίων υδάτων απαιτεί πολλά δεδομένα, όπως τοπογραφικά, γεωλογικά, υδρολογικά και υδραυλικά, τα οποία μπορούν να καταγράφονται, να αναζητηθούν ή και να αποκτηθούν με έρευνα πεδίου. Επιπλέον απαιτείται η συγκέντρωση οικονομικών στοιχείων και η γνώση των νόμων και των κανονισμών για να επιλεγούν κατασκευαστικά ή μη κατασκευαστικά μέτρα και συστήματα που θα ελαχιστοποιούν το κόστος και τις επιπτώσεις των πλημμυρικών φαινομένων. Τα μη κατασκευαστικά μέτρα και η αναγκαιότητά τους συζητούνται στην παράγραφο 3.4.3 ενώ κάποια στοιχεία των κατασκευαστικών μέτρων σχολιάζονται επίσης στην ευρύτερη υποενότητα 3.4.

Τα συστήματα διαχείρισης ομβρίων υδάτων αποτελούνται από φυσικά και τεχνητά υποσυστήματα. Μεγάλης κλίμακας υδραυλικά έργα διαστασιολογούνται γενικά με περιόδους επαναφοράς της τάξης των 1000 και 10000 ετών, ενώ σε συστήματα των οποίων η αστοχία μπορεί να είναι καταστροφική ο υδρολογικός σχεδιασμός γίνεται πλέον με βάση την Μέγιστη Πιθανή Πλημμύρα, όπως συζητήθηκε προηγούμενα.

Τα μικρότερης κλίμακας συστήματα μπορούν εν γένει να διαχωριστούν σε κύρια και δευτερεύοντα. Τα κύρια συστήματα περιλαμβάνουν σχετικά μικρούς ταμιευτήρες, λίμνες και μεγάλα ποτάμια. Τα 50 έτη είναι συνήθης τιμή περιόδου επαναφοράς σχεδιασμού αντιπλημμυρικών έργων στην Ελλάδα. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής τα 100 έτη αποτελούν τυπική τιμή διαστασιολόγησης των κύριων συστημάτων διαχείρισης της

πλημμύρας, ασκείται όμως κριτική στην αποτελεσματικότητα και τον τρόπο που επιλέχθηκε και γενικεύθηκε αυτή η πρακτική [Grigg, 2003].

Για τα δευτερεύοντα συστήματα, που συνήθως περιλαμβάνουν υπόγεια δίκτυα αποχέτευσης ομβρίων υδάτων, οι περίοδοι επαναφοράς κυμαίνονται μεταξύ 2-25 ετών, με συχνά προτεινόμενες τιμές τα 2 έτη για κατοικημένες περιοχές και από 5 μέχρι 25 έτη για τις εμπορικές περιοχές. Εξυπηρετούν περισσότερο την άνεση, την καθαριότητα και την ασφάλεια και λιγότερο την προστασία από φθορές ή τη διαφύλαξη της ζωής. Η υπερχειλίση των δευτερευόντων συστημάτων, όπως σχολιάζεται και παρακάτω, είναι αρκετά συχνή λόγω των μικρών περιόδων επαναφοράς που επιλέγονται, αποτρέπεται παρόλα αυτά η συνεχής παρακώλυση της αστικής ζωής από επεισόδια συνήθων βροχοπτώσεων μικρότερων περιόδων επαναφοράς.

Η διαμόρφωση των συστημάτων διαχείρισης ομβρίων υδάτων καθορίζεται κυρίως από την επιλογή της περιόδου επαναφοράς σχεδιασμού, που αποτελεί και τον κύριο παράγοντα καθορισμού του κόστους του συστήματος. Τυπικές τιμές περιόδου επαναφοράς για το σχεδιασμό ομβρίων δικτύων στην Ελλάδα είναι τα 2, 5 και 10 έτη. Στις ΗΠΑ γίνεται διαχωρισμός ανάλογα με τις χρήσεις σε κάθε περιοχή και επιλέγονται ως τυπικές τιμές τα 5 έτη για περιοχές κατοικίας, τα 10 έτη για εμπορικές περιοχές και τα 15 έτη για περιοχές υψηλής αξίας, όπου δηλαδή μια πιθανή πλημμύρα θα έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές φθορές περιουσιών [Hammer, 2001]. Είναι σημαντικό το γεγονός ότι τα δίκτυα ομβρίων σχεδιάζονται έτσι ώστε να υπερχειλίζουν. Λόγω των υψηλών πλημμυρικών παροχών αιχμής οι αγωγοί ομβρίων είναι γενικά μεγάλων διαμέτρων. Για να διατηρηθεί, λοιπόν, σχετικά χαμηλό το κόστος κατασκευής των δικτύων ο σχεδιασμός πραγματοποιείται με μικρές περιόδους επαναφοράς, δηλαδή με αποδεκτή υπερχειλίση κάθε μερικά χρόνια. Η υπερχειλίση αυτή δεν πρέπει να θεωρείται αστοχία του συστήματος, αλλά κομμάτι της λειτουργίας του με βάση την περίοδο επαναφοράς σχεδιασμού.

Στα πλαίσια της οικονομικότητας του σχεδιασμού, σε περιστατικές αραιοκατοικημένες και σχετικά ξηρές περιοχές με αρκετή βλάστηση, φαρδείς δρόμους ή/και ικανοποιητικές κλίσεις δεν προβλέπονται δίκτυα ομβρίων υδάτων. Η απορροή πραγματοποιείται μόνον επιφανειακά, στα ρείθρα των δρόμων για συνήθη γεγονότα βροχοπτώσεων και στους ίδιους τους δρόμους κατά τη διάρκεια εντονότερων φαινομένων. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε περιοχές με μεγάλη συχνότητα εμφάνισης καταιγίδων και πλημμυρών η κατασκευή υπόγειου δικτύου ομβρίων υδάτων αποδεικνύεται λιγότερο οικονομική σε σχέση με την κατασκευή διώρυγας στην επιφάνεια του εδάφους [Hammer, 2001].

Καθώς η αστικοποίηση αυξάνεται αποκτά μεγάλη σημασία η πρόβλεψη βασικών μεγάλων εγκαταστάσεων ώστε να αποτρέπονται πλημμυρικά φαινόμενα αλλά και φαινόμενα

ρύπανσης. Τα παλαιά υποδιαστασιοποιημένα δίκτυα πρέπει να αντικαθίστανται ή να αναβαθμίζονται

3.1.2.2 Κατανόηση των αυξημένων πλημμυρικών παροχών στον αστικό ιστό

Η επιφανειακή απορροή σε αστικές ζώνες είναι αυξημένη σε σχέση με την απορροή σε περισσότερο αγροτικές περιοχές. Το πλήθος και η έκταση των αδιαπέρατων επιφανειών (κτήρια, πεζοδρόμια, δρόμοι, χώροι στάθμευσης) μειώνει το ποσοστό του νερού που διηθείται, ενώ οι χαμηλοί συντελεστές τραχύτητας των επιφανειών αυτών (καθώς και των αγωγών ομβρίων, των καναλιών και των διευθετημένων ρεμάτων) αυξάνουν τις ταχύτητες ροής και ελαττώνουν το χρόνο συγκεντρώσεως της λεκάνης. Σε μια αστικοποιημένη περιοχή, λοιπόν, εμφανίζεται αυξημένος συνολικός πλημμυρικός όγκος, αυξημένη παροχή αιχμής, αυξημένες ταχύτητες ροής και ελαττωμένος χρόνος συγκεντρώσεως και χρόνος εμφάνισης της πλημμυρικής αιχμής.

Η αυξημένη επιφανειακή απορροή που οφείλεται στην αστικοποίηση και την αλλαγή χρήσεων γης που η πρώτη συνεπάγεται. Μεταβάλλονται σημαντικά το υδάτινο ισοζύγιο κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων, όσο και το αντίστοιχο ετήσιο ισοζύγιο. Το καθεστώς των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων μιας περιοχής αλλάζουν ποσοτικά αλλά και ποιοτικά όταν αναπτύσσονται σε αυτήν υποδομές και αστικές δραστηριότητες.

Είναι κατανοητό ότι οι συνθήκες αυτές, δηλαδή η αύξηση της απορροής και η μείωση του χρόνου απόκρισης της λεκάνης, ευνοούν την εμφάνιση πλημμυρών. Δεδομένο γεγονός βροχόπτωσης δίνει εντονότερη πλημμύρα όσο περισσότερο «αστικοποιημένη» είναι μια περιοχή. Η έλλειψη ανοιχτών χώρων με φυτεμένες επιφάνειες που συγκρατούν το νερό και διευκολύνουν τη διήθηση και εξάτμισή του σε μια οικιστική, για παράδειγμα, περιοχή οδηγεί στην ανάγκη πρόβλεψης συστημάτων διαχείρισης των ομβρίων υδάτων. Είναι σημαντικό η πλημμυρική απορροή να συγκεντρώνεται και να απομακρύνεται προκειμένου να αποφευχθούν παντός είδους ενοχλήσεις και καταστροφές.

3.1.2.3 Μηχανισμοί γένεσης πλημμύρας σε αστικό ιστό με υπάρχον δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων

Αγωγοί ομβρίων υδάτων (υπόνομοι), διώρυγες (κανάλια), δρόμοι, φρεάτια υδροσυλλογής, χαντάκια, ρείθρα, υδρορροές, αλλά και συσκευές ελέγχου της ροής, εσχάρες, έργα ανάσχεσης ή συγκράτησης του νερού, όλα αποτελούν τμήμα του συστήματος διαχείρισης και ελέγχου των ομβρίων υδάτων στην ευρύτερη περιοχή μιας πόλης. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει επίσης εγκαταστάσεις για τον έλεγχο της ποιότητας του

νερού πριν αυτό διατεθεί στον τελικό υδάτινο αποδέκτη. Ανάλογα με την περιοχή από την οποία απορρέει το νερό είναι δυνατό να εμφανίζει μορφές ρύπανσης, για παράδειγμα εάν κάποια κοντινή περιοχή είναι βιομηχανική. Σε τέτοια περίπτωση μικρές λεκάνες ηρεμίας ή συγκράτησης του νερού μπορούν να διευκολύνουν τον έλεγχο της ποιότητάς του και τον καθαρισμό του εάν απαιτείται.

Η απορροή γενικά ξεκινάει ως επιφανειακή ροή στους δρόμους πριν εισαχθεί στους υπόγειους σωλήνες του δικτύου ομβρίων υδάτων μέσω των φρεατίων υδροσυλλογής. Εάν τα φρεάτια υδροσυλλογής είναι περιορισμένα, τότε μόνο ένα τμήμα της πλημμυρικής απορροής θα καταλήξει στο δίκτυο, ενώ το υπόλοιπο νερό θα συνεχίσει να απορρέει επιφανειακά (κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης, αλλά και μετά από αυτήν). Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται ακόμα και εάν η παροχτευτικότητα του δικτύου είναι επαρκής, επειδή τα φρεάτια είναι περιορισμένα στον αριθμό και καθυστερείται η είσοδος των ομβρίων υδάτων στο δίκτυο παροχέτευσής τους. Μετά από κάποιο διάστημα, εάν η πλημμύρα δεν είναι πολύ μεγάλη, το νερό θα απορρέει πλέον μέσω του δικτύου.

Εάν η παροχτευτικότητα των σωλήνων του συστήματος δεν είναι επαρκής, τότε είναι δυνατό το δίκτυο να υπερχειλίσει και να απορρέει νερό προς τους δρόμους μέσω των φρεατίων, προκαλώντας επιφανειακή πλημμύρα, συνήθως σε κατάντη θέσεις. Μετά την υπερχειλίση των φρεατίων και την έξοδο των ομβρίων υδάτων στο επίπεδο του δρόμου, η ροή του νερού δεν πραγματοποιείται απαραίτητα με βάση την κλίση του δρόμου [Mark et al., 2004]. Σε περίπτωση υπερφόρτισης του δικτύου ομβρίων κατά τη διάρκεια κάποιου πλημμυρικού επεισοδίου είναι συνηθισμένη η ταυτόχρονη υπερχειλίση πολλών φρεατίων με διαφορετικές συνθήκες υπερχειλίσης σε καθένα από αυτά. Οι πολλαπλές παράμετροι που καθορίζουν τις συνθήκες αυτές, πχ θέση στο δίκτυο, γεινίαση με κόμβο/διασταύρωση αγωγών του δικτύου κ.ά, οδηγεί σε διαφοροποιημένα βάθη νερού στην περιοχή γύρω από τα φρεάτια. Αν λάβουμε επιπλέον υπόψη την πιθανότητα έμφραξης κάποιου φρεατίου ή τμήματος του δικτύου κατά τη διάρκεια του επεισοδίου, συνήθως λόγω φερτών, γίνεται κατανοητό ότι οι συνθήκες ροής μετά την υπερχειλίση του δικτύου διαφοροποιούνται έντονα, και μπορεί η ροή να γίνεται από σημεία χαμηλότερου απόλυτου υψομέτρου προς ανάντη, συνηθέστερα δε σε σχετικά επίπεδες περιοχές.

Ο χρόνος που θα παραμείνουν οι δρόμοι κατακλυσμένοι εξαρτάται από την παροχτευτική ικανότητα των φρεατίων και την παροχτευτικότητα του δικτύου ομβρίων υδάτων, αλλά και από τη διηθητική ικανότητα και την εξατμισοδιαπνοή της αστικής λεκάνης απορροής, που καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από το συντελεστή δόμησης, την ύπαρξη και έκταση ανοιχτών χώρων κ.ά.

Η αξιολόγηση των συστημάτων συνεπάγεται την αναγνώριση ότι τα συστήματα διαχείρισης ομβρίων υδάτων παρέχουν οφέλη αποχέτευσης, ελέγχου πλημμύρας και ποιότητας του νερού.

3.2 Επιπτώσεις πλημμυρών

Μπορεί να ειπωθεί ότι οι επιπτώσεις των πλημμυρικών γεγονότων εξαρτώνται από το βάθος, την ταχύτητα και την έκταση της πλημμύρας, αλλά και από την τρωτότητα/ευπάθεια του πληθυσμού και των περιουσιών του [Grigg, 1996]. Αμέσως γίνεται κατανοητό ότι οι επιπτώσεις των πλημμυρών κινούνται σε δύο άξονες: την αβεβαιότητα της φύσης και την μειωμένη ετοιμότητα του ανθρώπου.

Οι πιο σοβαρές συνέπειες της εμφάνισης των πλημμυρών σχετίζονται με την ανθρώπινη ζωή, υγεία και ασφάλεια, όπου στην τελευταία μπορούν να συμπεριληφθούν οι μεγάλες φθορές περιουσιών που μπορεί να βάλουν σε κίνδυνο τη δυνατότητα συνέχισης της ζωής με ένα αξιοπρεπές επίπεδο διαβίωσης. Οι επιπτώσεις των πλημμυρικών φαινομένων είναι κατά βάση κοινωνικοοικονομικές και η προσπάθεια ελάττωσής τους κινείται σε δύο επίπεδα: αποτροπή των φαινομένων, μέσω κατασκευής φραγμάτων, αλλαγής της κατεύθυνσης ροής υδατορευμάτων, χωροθέτηση δραστηριοτήτων εκτός των ζωνών υψηλής επικινδυνότητας και κλπ, και αποφυγή των επιπτώσεων, μέσω σωστής ενημέρωσης και προετοιμασίας του πληθυσμού, συστήματα έκτακτης ειδοποίησης κλπ. Για τη δεύτερη κατηγορία λύσεων γίνεται εκτενέστερη αναφορά στην παράγραφο 3.4.3.

Αν και γεγονότα πλημμυρών με μεγάλες περιόδους επαναφοράς μπορεί να έχουν καταστροφικά αποτελέσματα, δε θα πρέπει να αμελούνται και οι λιγότερες έντονες αλλά πιο συχνές επιπτώσεις που έχουν πλημμυρικά γεγονότα μικρών περιόδων επαναφοράς. Κίνδυνοι για την υγεία, φθορές περιουσιών, καθυστερήσεις στις μετακινήσεις και λοιπές οχλήσεις σχετίζονται συνήθως με πλημμυρικά γεγονότα περιόδων επαναφοράς της τάξης των λίγων ετών. Συνήθως, δίκτυα ομβρίων υδάτων κατασκευάζονται για την ελάττωση των παραπάνω επιπτώσεων. Λόγω των μικρών περιόδων επαναφοράς με τις οποίες σχεδιάζονται, τα δίκτυα αυτά εμφανίζουν πολλαπλές αστοχίες και συνοδεύονται από πολλούς τύπους διακινδύνευσης.

Τόσο για μεγάλα όσο και για μικρά κατασκευαστικά συστήματα διαχείρισης πλημμυρών, έχουν καταρτιστεί οι παρακάτω πίνακες, οι οποίοι, αν διαβαστούν κριτικά, μπορούν να αποτελέσουν οδηγό για την εκτίμηση πιθανών επιπτώσεων των πλημμυρών. Περιλαμβάνουν πολλές κατηγορίες αρνητικών συνεπειών, είτε αυτές συμβαίνουν σε περιβάλλον όπου έχει ληφθεί μέριμνα για την εμφάνιση τέτοιων φαινομένων, είτε όχι.

Κατηγορία διακινδύνευσης	Μέτρηση (εκτίμηση)
Υγεία και ασφάλεια	Περιλαμβάνονται κατηγορίες διακινδύνευσης όπως οι θάνατοι που προκαλούνται λόγω πλημμυρών, όπου μπορεί να χρησιμοποιηθούν εμπειρικά δεδομένα: κατά κύριο λόγο είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί η διακινδύνευση
Διακοπή/Αποτυχία λειτουργίας	Αν μια κατασκευή σχεδιαστεί για συγκεκριμένο επίπεδο επεισοδίου (πχ συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς) και αυτό ξεπεραστεί (όπως σε ένα πλημμυρικό επεισόδιο), τότε η διακινδύνευση μπορεί να εκτιμηθεί ποσοτικά. Αν η αποτυχία οφείλεται σε απροσδόκητο γεγονός (πχ κάποιο λάθος) δεν μπορεί να ποσοτικοποιηθεί.
Αποτυχία κατασκευής ή συντήρησης	Αυτού του είδους οι αποτυχίες είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν γιατί μπορεί να συμβούν με πολλούς τρόπους. Εκτίμηση καταστροφών σε κατασκευές μπορεί να ποσοτικοποιηθούν από τα στοιχεία ασφάλισής τους.
Διακοπή/Αποτυχία συστήματος ή τμήματος του συστήματος	Θα μπορούσε να γίνει εκτίμηση μέσω καταγεγραμμένων δεδομένων για τη λειτουργία και τις παρεχόμενες υπηρεσίες, αλλά πρακτικά η διακινδύνευση θα ήταν δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί
Αξιοπιστία	Θεωρητικά οι πολλές πιθανές περιοχές αξιοπιστίας θα μπορούσαν να αποτυπωθούν, αλλά η διακινδύνευση θα ήταν δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί
Οικονομικότητα	Κάποια οικονομική διακινδύνευση, όπως η επάρκεια των επιτοκίων θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί
Προβλήματα υπαλλήλων και ατυχήματα	Η ποσοτικοποίηση είναι δύσκολη, αν και μπορεί να υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία από ασφαλιστικές εταιρείες
Καταστροφή (από ανθρώπινα αίτια)	Η διακινδύνευση γίνεται πιο ορατή, αλλά είναι θα ήταν δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί
Καταστροφή (από φυσικά αίτια)	Η διακινδύνευση ορισμένων φυσικών καταστροφών όπως οι καταστροφές από σεισμό και πλημμύρα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί, όμως για άλλα επεισόδια, όπως πυρκαγιά ή κεραυνός, η ποσοτικοποίηση είναι δύσκολη

Πίνακας 3.1 Εκτιμήσεις διακινδύνευσης συστημάτων διαχείρισης πλημμύρας

Κατηγορία διακινδύνευσης	Εκδήλωση κινδύνου λόγω πλημμύρας
Υγεία, ασφάλεια, περιβάλλον	Παιδικά παιχνίδια κοντά σε εγκαταστάσεις που μπορεί να πλημμυρίσουν, σωλήνες, λίμνες κλπ
Διακοπή/Αποτυχία λειτουργίας	Μη αποτελεσματική προστασία από την πλημμύρα
Αποτυχία κατασκευής ή συντήρησης	Καταστροφή σωληνώσεων κατά την κατασκευή
Διακοπή/Αποτυχία συστήματος ή τμήματος του συστήματος	Εμφάνιση πλημμύρας λόγω φραγμένων εγκαταστάσεων και πρόκληση φθορών σε περιουσίες
Αξιοπιστία	Διοδευμένες πλημμυρικές παροχές προκαλούν φθορές σε περιουσίες
Οικονομικότητα	Οι φθορές θεωρούνται ευθύνη της UTILITY, αλλά δεν είναι δυνατή η αποπληρωμή TO PAY JUDGEMENT
Προβλήματα υπαλλήλων και ατυχήματα	Μηνύσεις υπαλλήλων για διακρίσεις
Καταστροφή (από ανθρώπινα αίτια)	Ρίψη τοξικών αποβλήτων βιομηχανιών σε συστήματα αποχέτευση ομβρίων υδάτων
Καταστροφή (από φυσικά αίτια)	Εγκαταστάσεις κατακλυσμένες από πλημμύρα

**Πίνακας 3.2 Διακινδύνευση συστημάτων διαχείρισης πλημμύρας
[Πηγή: Hammer, 2001]**

3.3 Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα και την Ευρώπη

Το υδρολογικό αλλά και το πλημμυρικό καθεστώς στην Ευρώπη είναι έντονα μεταβλητό 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 υδροηλεκτρικής ενέργειας εφόσον το διαθέσιμο υδροδυναμικό είναι αξιόλογο και η επένδυση συμφέρουσα.

3.3.1 Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα

Η Ελλάδα είναι ένας τόπος με έντονο ανάγλυφο και ανεπτυγμένη ακτογραμμή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μεταβάλλονται έντονα από περιοχή σε περιοχή τόσο τα τοπογραφικά και εδαφολογικά στοιχεία, όσο και τα υδρολογικά και κλιματικά. Όλα τα προηγούμενα διαμορφώνουν και καθορίζουν το πλημμυρικό καθεστώς της χώρας.

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. Χαρακτηριστική και καθοριστική είναι η επίδραση της οροσειράς της Πίνδου στα φαινόμενα βροχοπτώσεων στην Ελλάδα. Η δυτική Ελλάδα παρουσιάζει εμφανώς αυξημένες βροχοπτώσεις (πλήθος και συνολικό ύψος βροχής) σε σχέση με την ανατολική. Η μέση ετήσια βροχόπτωση υπερβαίνει τα 1800mm σε ορεινές περιοχές της δυτικής ηπειρωτικής Ελλάδας, ενώ σε περιοχές ανατολικά της Πίνδου η αντίστοιχη τιμή κυμαίνεται μέχρι και κοντά στα 400mm. Ενδεικτικά, το μέσο ετήσιο ύψος βροχής στο διαμέρισμα της Ηπείρου είναι 1592mm και στο διαμέρισμα της Αττικής 509mm. Τα νησιά του Αιγαίου εμφανίζουν επίσης χαμηλό μέσο ύψη 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 βροχόπτωσης μεγάλης έντασης

(ξαφνικές πλημμύρες – flash floods) που παράγονται συνήθως από χαμηλά βαρομετρικά προερχόμενα από δυτικά, νοτιοδυτικά ή βορειοδυτικά.

Για περίοδο επαναφοράς 50 έτη, το μέγιστο ύψος βροχής 24ώρου είναι 175mm στη δυτική Ελλάδα, 100mm ανατολικά της Πίνδου και 175mm στα νησιά του Αιγαίου [Μιμίκου & Φωτόπουλος, 2004]. Είναι εμφανής η μειωμένη διαφοροποίηση σε σχέση με τις υπερετήσιες μέσες τιμές που χαρακτηρίζουν μια περιοχή ως υγρή ή σχετική ξηρή. Παρατηρούνται έτσι περισσότερες καταστροφικές πλημμύρες στην ανατολική (σχετικά ξηρή) Ελλάδα σε σχέση με τη δυτική.

3.3.2 Η Οδηγία 2007/60 για τις πλημμύρες

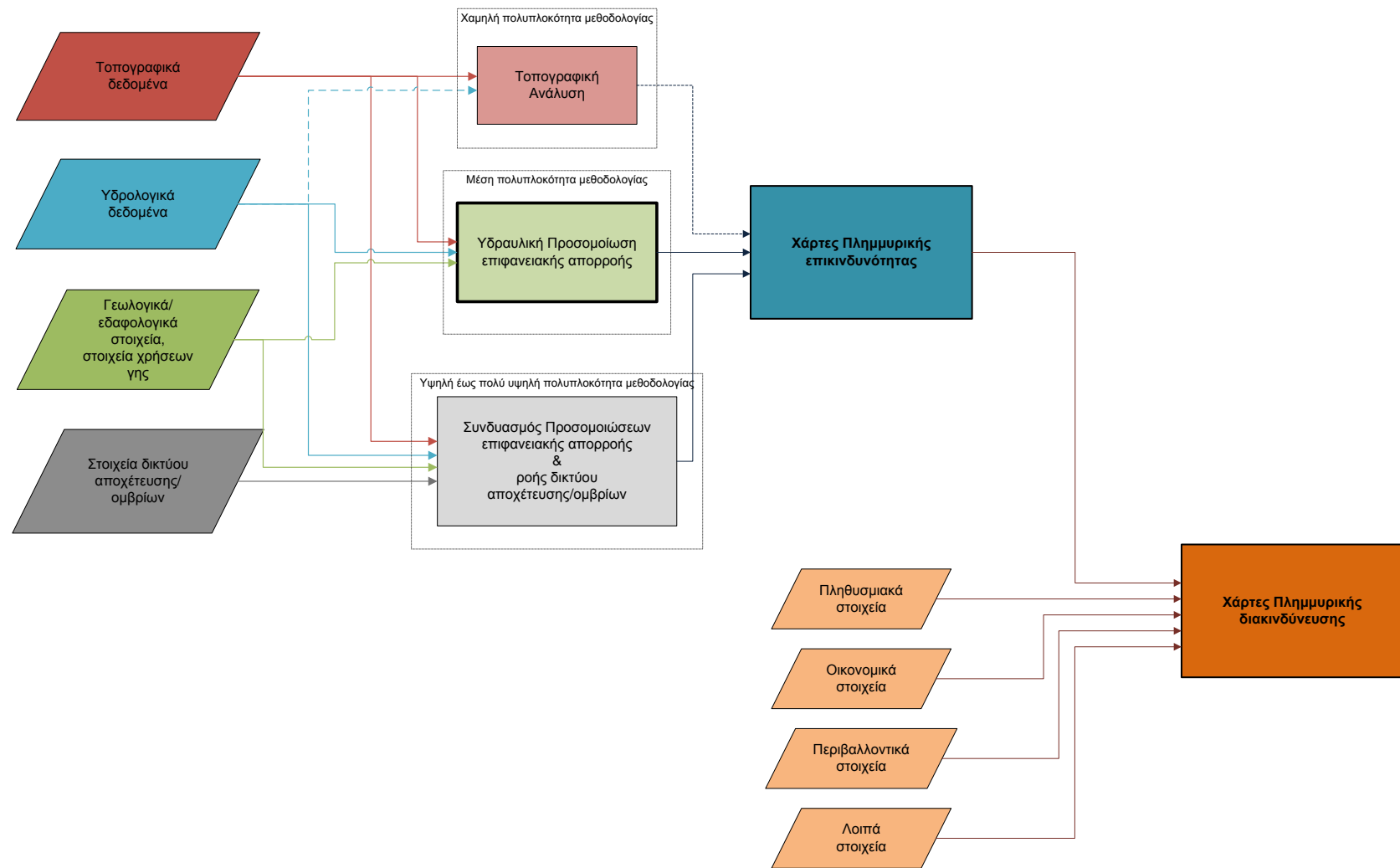
Την 23^η Οκτωβρίου 2007 ψηφίστηκε και την 27^η Νοεμβρίου τέθηκε σε ισχύ η Οδηγία 2007/60 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου «για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας». Πρόκειται για τις βασικές κατευθύνσεις προς την προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας, την κατάρτιση, εν συνεχεία, χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας και κινδύνων πλημμύρας (ή καλύτερα, «διακινδύνευσης πλημμύρας»*) και τελικά σχεδίων διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας (ή καλύτερα σχεδίων διαχείρισης «διακινδύνευσης πλημμύρας»), όπως αυτά ορίζονται και διευκρινίζονται παρακάτω, και με στόχο «τη μείωση των αρνητικών συνεπειών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες που συνδέονται με τις πλημμύρες στην Κοινότητα.

Σύμφωνα με την Οδηγία, πλημμύρα είναι «η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, δεν καλύπτεται από νερό». «Αυτό περιλαμβάνει πλημμύρες από ποτάμια, ορεινούς χείμαρρους, εφήμερα ρεύματα της Μεσογείου και πλημμύρες από τη θάλασσα σε παράκτιες περιοχές, δύναται δε να εξαιρεί πλημμύρες από συστήματα αποχέτευσης». Ορίζεται επίσης ο κίνδυνος πλημμύρας (διακινδύνευση) ως «ο συνδυασμός της πιθανότητας να λάβει χώρα πλημμύρα και των δυνητικών αρνητικών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται μ' αυτή την πλημμύρα».

* σ.σ. στο αγγλικό επίσημο κείμενο της Οδηγίας 2007/60 χρησιμοποιούνται οι όροι «flood hazard» και «flood risk» οι οποίοι στο ελληνικό επίσημο κείμενο έχουν αποδοθεί ως «επικινδυνότητα πλημμύρας» και «κίνδυνοι πλημμύρας» αντίστοιχα. Κατά την ενσωμάτωση της Οδηγίας στην ελληνική νομοθεσία η απόδοση του δεύτερου όρου θα είναι (ορθότερα) «διακινδύνευση πλημμύρας» και αποτελεί τον όρο που αποδίδει την έννοια και στην παρούσα εργασία.

Βασικές παράμετροι που τίθενται αφορούν στον τρόπο με τον οποίο πρέπει τα κράτη να εφαρμόσουν τα όσα η Οδηγία επιβάλλει. Η διαχείριση των πλημμυρών πρέπει να πραγματοποιείται στο γενικότερο πλαίσιο διαχείρισης των υδάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής όπως ορίζεται από την Οδηγία 2000/60 για το νερό (και τηρουμένων πάντοτε των όρων που έχουν τεθεί για την «καλή κατάσταση» των υδάτων), καθώς και στο πλαίσιο της συνολικής αναπτυξιακής πολιτικής σχετικά με τα ύδατα και τις χρήσεις γης κάθε κράτους μέλους. Σημαντική είναι επίσης η διάθεση/ανταλλαγή έτοιμων αξιολογήσεων, καταρτισμένων χαρτών και σχεδίων διαχείρισης μεταξύ των μελών προκειμένου να μην υπάρχει αλληλοεπικάλυψη εργασιών και να διευκολυνθεί η συνέχιση και πρόοδος της διαδικασίας, ενώ απαραίτητη κρίνεται η συνεργασία μεταξύ των μελών σε περιπτώσεις διακρατικών λεκανών απορροής ώστε να μην επιβαρύνεται κάποιο μέλος έναντι άλλου. Εφόσον οι τύποι των πλημμυρών διαφοροποιούνται σημαντικά (ποτάμια, παραθαλάσσιες περιοχές, αστικά κέντρα κλπ) είναι δυνατή μόνον η τοπική αξιολόγηση και διαχείριση τους, και ως εκ τούτου οι ακριβείς στόχοι της διαχείρισης της πλημμυρικής επικινδυνότητας καθορίζονται από καθ'αυτά τα κράτη μέλη.

Προκειμένου για την κατάρτιση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας (flood hazard maps) και κινδύνων πλημμύρας (καλύτερα: διακινδύνευσης πλημμύρας - flood risk maps), τίθενται συγκεκριμένα απαιτούμενα στοιχεία. Οι χάρτες επικινδυνότητας περιλαμβάνουν την έκταση των πλημμυρών, το βάθος ή τη στάθμη του νερού και την ταχύτητα (ή σχετική) ταχύτητα ροής αυτού. Για τον υπολογισμό των παραπάνω, διερευνώνται τρία σενάρια σε σχέση με την πιθανότητα εμφάνισης της πλημμύρας, ήτοι χαμηλής πιθανότητας ή ακραίων φαινομένων, μέσης πιθανότητας με περίοδο επαναφοράς για παράδειγμα μεγαλύτερη ή ίση των 100 ετών, και υψηλής πιθανότητας, κατά περίπτωση. Οι χάρτες πλημμυρικής διακινδύνευσης προκύπτουν από τους χάρτες πλημμυρικής επικινδυνότητας, με βάση τα παραπάνω σενάρια, και επιπλέον κοινωνικοοικονομικά κριτήρια και δεδομένα. Περιλαμβάνουν ενδεικτικό αριθμό των κατοίκων που ενδέχεται να πληγούν, τους τύπους των οικονομικών δραστηριοτήτων της περιοχής, στοιχεία για ευαίσθητες περιβαλλοντικά περιοχές, πιθανές πηγές ρύπανσης, καθώς και άλλες πληροφορίες που κατά περίπτωση μπορεί να ενδιαφέρουν το κράτος-μέλος (για παράδειγμα αυξημένα ποσοστά μεταφερόμενων ιζημάτων). Συνοπτικά παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία που απαιτούνται για την κατάρτιση των χαρτών στο διάγραμμα της Εικόνας 3.1. Για περαιτέρω πληροφορίες και λεπτομέρειες ο αναγνώστης παραπέμπεται στο πλήρες κείμενο της Οδηγίας που διατίθεται στη σελίδα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής στο Διαδίκτυο.



Εικόνα 3.1 Διάγραμμα βασικών στοιχείων και διαδικασιών κατάρτισης χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας και διακινδύνευσης

3.4 Διαχείριση πλημμύρας και πλημμυρικής διακινδύνευσης

Η διαχείριση της πλημμύρας αφορά σε δύο βασικές προσεγγίσεις, τον έλεγχο των ομβρίων υδάτων μέσω κατασκευής ταμιευτήρων και συστημάτων απομάκρυνσης και διόδουσής τους, και την αποτροπή πρόκλησης καταστροφών με έλεγχο των χρήσεων γης εντός των πλημμυρικών πεδίων και συστήματα προειδοποίησης και άμεσης απόκρισης. Οι δύο αυτές προσεγγίσεις μπορούν αδρά να διαφοροποιηθούν μεταξύ τους ως «κατασκευαστική» και «μη κατασκευαστική» προσέγγιση.

Η προσπάθεια διαχείρισης των πλημμυρών, τόσο σε επίπεδο πρόληψης όσο και σε επίπεδο έγκαιρης απόκρισης, είναι πρωτίστως σημαντική λόγω των καταστροφών που είναι δυνατό να προκληθούν από αυτές (βλ. §3.2). Δευτερευόντως, και υπό το πρίσμα της ολοκληρωμένης διαχείρισης και αξιοποίησης των περιορισμένων υδατικών πόρων, τα όμβρια ύδατα ακραίων γεγονότων θα ήταν ιδανικό να αποθηκεύονται και να εκμεταλλεύονται, εφόσον αυτό είναι οικονομικά και επιχειρησιακά συμφέρον.

Η έννοια της διαχείρισης των πλημμυρών εμπεριέχει όλο το φάσμα συλλογής της υδρολογικής και μετεωρολογικής πληροφορίας, σχεδιασμού κατασκευαστικών έργων, λήψης μη κατασκευαστικών μέτρων και πρόληψης, έγκαιρης ειδοποίησης και απόκρισης καθώς και αντιμετώπισης και ελαχιστοποίησης των συνεπειών από αυτές.

Τα συστήματα ελέγχου πλημμυρών αποσκοπούν εν γένει στην ελαχιστοποίηση των όποιων καταστροφών μέσω των παρακάτω διαδικασιών:

- αξιοποίηση μετρήσεων υδρομετεωρολογικών μεταβλητών σε πραγματικό χρόνο (επίγεια δίκτυα, μετεωρολογικά ραντάρ, δορυφόροι) καθώς και μετεωρολογικών προγνώσεων με σκοπό την ανάπτυξη συστημάτων πρόγνωσης πλημμυρών
- ενημέρωση των κοινοτήτων υψηλής διακινδύνευσης, εκπόνηση σχεδίων έκτακτης ανάγκης και ειδοποίησης του πληθυσμού σε πραγματικό χρόνο
- εκπόνηση σχεδίων λειτουργίας των αντιπλημμυρικών έργων με προτεραιότητα την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων [Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος, 1999].

3.4.1 Συνήθης διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης στην Ελλάδα, αναγκαιότητα ολοκληρωμένου σχεδιασμού και λήψης μη κατασκευαστικών μέτρων

Οι κίνδυνοι που ελλοχεύουν από την εμφάνιση πλημμυρών και έχουν παρουσιαστεί σε προηγούμενα κεφάλαια καθιστούν αναγκαία τη λήψη ορισμένων μέτρων για την προστασία των περιοχών που κινδυνεύουν από πλημμύρες καθώς και για την ανακούφιση των περιοχών που έχουν ήδη πληγεί.

Συνήθης πρακτική στην Ελλάδα είναι η κατασκευή αναχωμάτων, αντιπλημμυρικών τάφρων, λεκανών ανάσχεσης και φραγμάτων (συγκράτησης φερτών, αντιπλημμυρικής προστασίας ή πολλαπλής λειτουργίας). Τα περισσότερα έργα διευθέτησης χειμάρρων έχουν σχεδιαστεί με περιόδους επαναφοράς έως 50 έτη (εκτός από μερικές εξαιρέσεις), με αποτέλεσμα οι πλημμύρες σχεδιασμού να ξεπερνώνται συχνά. Σύμφωνα με τον Κουτσογιάννη [2010], λαμβάνοντας υπόψη ότι (χονδροειδώς) 500 οικισμοί στην Ελλάδα έχουν αρκετά υψηλή πλημμυρική διακινδύνευση, ότι ο αντιπλημμυρικός σχεδιασμός γίνεται (τυπικά) με περιόδους επαναφοράς τα 50 έτη και ότι τα πλημμυρικά επεισόδια μεταξύ των οικισμών εμφανίζουν πολύ μικρή χωρική συσχέτιση, προκύπτει ότι κατά μέσο όρο 10 πλημμυρικά επεισόδια ανά έτος θα ξεπερνούν την πλημμύρα σχεδιασμού, ενώ κατά μέσο όρο 1 πλημμυρικό επεισόδιο ανά έτος θα έχει περίοδο επαναφοράς 500 ετών*.

Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ένας ελλιπής συντονισμός του σχεδιασμού, αλλά και του προγραμματισμού και της διαχείρισης των αντιπλημμυρικών έργων. Πρόσφατο παράδειγμα είναι η κατασκευή των έργων διευθέτησης του Κηφισού στην Αττική, τα οποία κατασκευάστηκαν από ανάντη προς κατόντη προκαλώντας εκτεταμένες πλημμύρες στους Δήμους Μοσχάτου και Φαλήρου επί σειρά ετών. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μελέτες πάνω στις οποίες βασίστηκαν τα έργα ήταν της δεκαετίας του 1970. Επιπρόσθετα, ενώ είναι γενικώς αποδεκτή η ανάγκη μελέτης και διευθέτησης των απορροών σε επίπεδο, τουλάχιστον, υδατορεύματος (ως αν μη τι άλλο, το ελάχιστο ενιαίο φυσικό σύνολο/στοιχείο πορείας της απορροής), ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο επέτρεπε την οριοθέτηση των υδατορευμάτων κατά τμήματα. [Κουτσογιάννης, 2008]. Η εξέταση των πλημμυρικών φαινομένων τοπικά, και η μεταφορά τους ανάντη ή κατόντη στο υδατόρευμα, δεν αποτελεί ουσιαστική αντιμετώπιση.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι, αφενός, τα ήδη κατασκευασμένα έργα είναι ανεπαρκή και ότι δύσκολα θα βελτιωθεί η αντιπλημμυρική προστασία με επιπλέον κατασκευαστικά (διορθωτικά) μέτρα και ότι, αφετέρου, δεν υπάρχει ικανοποιητική εποπτεία ή/και συντονισμός στον αντιπλημμυρικό σχεδιασμό. Απαιτούνται άλλου είδους μέτρα και νέες αντιλήψεις για συνολικότερο σχεδιασμό και διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης.

Σημαντική είναι η κατεύθυνση της Οδηγίας 2007/60 (βλ. §. 3.3.2), προς την ολοκληρωμένη μελέτη των πλημμυρικών φαινομένων σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Ο διαχωρισμός των πλημμυρών σε χαμηλής, μέσης και υψηλής πιθανότητας, η κατάρτιση των χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας και πλημμυρικής διακινδύνευσης και τα σχέδια

* σ.σ. η εν λόγω (χονδροειδής) εκτίμηση πραγματοποιήθηκε ως μέρος παρουσίασης σε ημερίδα με σκοπό την κατάδειξη της ανεπάρκειας των κατασκευαστικών μέτρων (συχνά λόγω υψηλού κόστους), την αναγκαιότητα λήψης άλλων μέτρων, μη κατασκευαστικών, και την επιτακτικότητα διαμόρφωσης ενός μεθοδολογικού πλαισίου και συντονισμένης δράσης για την αντιμετώπιση των πλημμυρών και των επιπτώσεών τους.

διαχείρισης πλημμυρικής επικινδυνότητας προτείνονται υπό το πρίσμα συντονισμένης και συνολικής δράσης σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

Η συχνότητα εμφάνισης πλημμυρών με βάση ευρωπαϊκά στοιχεία δε φαίνεται να έχει μεταβληθεί τα τελευταία 150-200 χρόνια, οι επιπτώσεις όμως από τις πλημμύρες είναι εντονότερες [Κουτσογιάννης, 2008]. Η παρατήρηση αυτή ωθεί στο συμπέρασμα ότι η ανθρώπινη παρέμβαση και συμπεριφορά είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνη για τις αρνητικές συνέπειες των πλημμυρικών φαινομένων. Η εκτεταμένη αστικοποίηση και άναρχη οικιστική ανάπτυξη των τελευταίων δεκαετιών έχει συντελέσει στην αύξηση των αρνητικών αυτών συνεπειών. Η ατομική (ή και συλλογική ενίοτε) πρωτοβουλία χωρίς τη γνωμάτευση της επιστημονικής κοινότητας ή αρμόδιου φορέα οδήγησε σε εγκατάσταση δραστηριοτήτων σε ευάλωτες πλημμυρικά περιοχές. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι εγκαταστάσεις ανθρώπινων δραστηριοτήτων κατάντη του φράγματος του Μαραθώνα στην Αττική, καθώς και στις παρόχθιες περιοχές του Αχελούου κοντά στο φράγμα του Στράτου. Λόγω ανεκτικότητας της πολιτείας στην ανάπτυξη αυτών των δραστηριοτήτων, ή και αμέλειας, λαμβάνεται πλέον μέριμνα (διατήρηση σχετικά χαμηλής στάθμης στους ταμιευτήρες) ώστε να μην υπάρξουν αυξημένες εκροές και υπερχειλίσεις από τα φράγματα, τα οποία όμως δεν έχουν σχεδιαστεί ως αντιπλημμυρικά. Το αποτέλεσμα αυτής της ανοχής και μεμονωμένης διαχείρισης είναι μειωμένες αποδόσεις και αυξημένα κόστη για το υδροδοτικό σύστημα της ευρύτερης περιοχής της Αττικής (τμήμα του οποίου αποτελεί ο ταμιευτήρας του Μαραθώνα) καθώς και των υδροηλεκτρικών σταθμών της ΔΕΗ στο Στράτο.

Σε μικρότερη κλίμακα, η μη διατήρηση της «μνήμης» παλιότερων συμβάντων οδηγεί σε αντίστοιχα προβλήματα και κινδύνους. Προφανές παράδειγμα είναι η δόμηση σε ρέματα και χείμαρρους που δεν έχουν εμφανίσει απορροή τα τελευταία χρόνια, ή η ρίψη μπαζών και σκουπιδιών σε αυτά χωρίς πρόβλεψη εναλλακτικής διόδου των απορροών. Τα υδρογραφικά δίκτυα μέσα στις πόλεις έχουν αλλοιωθεί πλήρως, καλυμμένα συχνά από δρόμους, πλατείες ή οικήματα, ενώ τα εναπομείναντα ρέματα συνήθως δεν μπορούν να παροχετεύσουν τις πλημμυρικές παροχές. Λιγότερο εμφανές είναι το πρόβλημα που προκύπτει απ' τη δόμηση και εγκατάσταση δραστηριοτήτων κοντά σε κοίτες ποταμών. Η κοίτη διαμορφώνεται από τις συνήθεις ροές, οι οποίες έχουν μικρές περιόδους επαναφοράς (1-2 έτη). Εσφαλμένα, περιοχές κοντά στη συνήθη κοίτη θεωρούνται ασφαλείς, με αποτέλεσμα την εγκατάσταση δραστηριοτήτων και τη δόμηση κτισμάτων (ακόμα και σχολείων). Είναι εύκολα αντιληπτό ότι ακόμα και πλημμυρικά επεισόδια με μέτριες περιόδους επαναφοράς (της τάξης των 10 ετών) προκαλούν σε τέτοιες περιπτώσεις μεγάλες καταστροφές [Κουτσογιάννης, 2008].

3.4.2 Νέα προσέγγιση στη μελέτη και διαχείριση πλημμυρών

3.4.2.1 Συνολική εκτίμηση και διαχείριση διαθέσιμων υδάτινων πόρων

Παραδοσιακά τα πλημμυρικά γεγονότα αντιμετωπίζονται ως αμιγώς καταστροφικά φαινόμενα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εξ ολοκλήρου απομάκρυνση των δραστηριοτήτων από τις επιρρεπείς περιοχές, αντί της πιο ολιστικής ανάπτυξής τους μέσω κατάλληλου χωροταξικού σχεδιασμού, προγραμματισμού, πρόληψης και πλάνων έγκαιρης ειδοποίησης και έκτακτης ανάγκης.

Επιπλέον, ο αντιπλημμυρικός σχεδιασμός συχνά πραγματοποιείται με εφαρμογή μεμονωμένων λύσεων, τόσο σε επίπεδο χώρου, αγνοώντας δηλαδή τις συνθήκες σε ανάντη και κατάντη περιοχές, όσο και σε επίπεδο ευρύτερης δημόσιας πολιτικής, αγνοώντας δηλαδή τις συνολικές παραμέτρους του προβλήματος και πιθανώς ευρύτερες διαχειριστικές λύσεις. Οι συνθήκες και οι πλημμυρικές επιπτώσεις μπορούν να γίνουν δριμυιές ανάντη ή κατάντη μιας διευθετημένης περιοχής όταν ο σχεδιασμός γίνεται αποκομμένα. Χαρακτηριστικές είναι οι περιπτώσεις διακρατικών ποταμών και υδατορευμάτων. Η λήψη μέριμνας σε μία θέση προκαλεί ταχύτερη ή/και εντονότερη πλημμύρα σε άλλη. Εκτός αυτού, παραμελώντας τις επιδράσεις των πλημμυρών και των επιλεχθέντων λύσεων σε άλλες συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου και του ποτάμιου οικοσυστήματος, προκαλούνται άλλου είδους προβλήματα σε γειτονικές περιοχές και συστήματα.

Ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός (World Meteorological Organization) προτείνει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στον (αντι)πλημμυρικό σχεδιασμό, ο οποίος πλέον θεωρείται κομμάτι της αξιοποίησης των υδάτινων πόρων και όχι μονάχα αναγκαίος για την προστασία του ανθρώπου και των αγαθών του. Επιπλέον, η διακινδύνευση λόγω πλημμυρών και τα σχέδια έκτακτης ανάγκης συνδιαμορφώνονται στο πλαίσιο ενός ευρύτερου συστήματος διαχείρισης της διακινδύνευσης από φυσικά φαινόμενα.

Ο αυξανόμενος πληθυσμός και η οικονομική ανάπτυξη μεταβάλλουν τα οικοσυστήματα, το καθεστώς διαθεσιμότητας φυσικών πόρων του πλανήτη και τις ζημιές που μπορεί να προκληθούν από φυσικά φαινόμενα, σε συνήθεις ή ακραίες συνθήκες. Στην περίπτωση των πλημμυρών, ο αυξημένος πληθυσμός και η ενισχυμένη οικονομική δραστηριότητα εντός πλημμυρικών πεδίων είναι προφανές ότι αυξάνει τη διακινδύνευση. Επιπλέον προκλήσεις για τη διαχείριση πλημμύρας αποτελεί η έλλειψη καταγεγραμμένης πληροφορίας για το πλημμυρικό καθεστώς και ο σχεδιασμός υπό την αβεβαιότητα των επιλεχθέντων, κάθε φορά,

περιόδων επαναφοράς και της κλιματικής αλλαγής. Είναι επιτακτική η μέριμνα για γεγονότα κατά τα οποία ξεπερνιέται η πλημμύρα σχεδιασμού, ενώ σε κάθε περίπτωση πρέπει να ελέγχεται τόσο η ποσότητα των ομβρίων υδάτων όσο και η ποιότητά τους. Τα ποτάμια οικοσυστήματα αποτελούν ιστορικά αναπόσπαστο κομμάτι της ανθρώπινης επιβίωσης και ανάπτυξης, προσφέροντας τρεχούμενο και ανανεώσιμο νερό για ύδρευση, άρδευση και κτηνοτροφία, δυνατότητα αλιείας, προσφορά άλλων υλικών αγαθών, ψυχαγωγία καθώς και προστασία από πλημμύρες μέσω διόδευσης των πλημμυρικών κυμάτων. Η βελτιστοποίηση της κατανομής των φυσικών πόρων και χωροθέτησης των χρήσεων σε μια περιοχή είναι το ζητούμενο κάθε πλάνου δημόσιας πολιτικής, του οποίου συνιστώσα είναι και η εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων. Η διαχείριση της πλημμυρικής επικινδυνότητας πρέπει να γίνεται στα πλαίσια ενός συντονισμένου πλάνου για τη χωροθέτηση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Όταν η μελέτη επικεντρώνεται στα τελευταία, δεν μπορεί παρά τα συγκρουόμενα συμφέροντα να προσδιορίζονται χωρικά σε κάποια λεκάνη απορροής.

Η Ολοκληρωμένη Διαχείριση Πλημμύρας (Integrated Flood Management) που προτείνεται προωθεί την από κοινού σύνταξη χωροταξικών σχεδίων και σχεδίων διαχείρισης και αξιοποίησης υδατικών πόρων σε μια λεκάνη απορροής, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας των πλημμυρικών πεδίων και την ελαχιστοποίηση της διακινδύνευσης της ανθρώπινης ζωής.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων έχουν συνταχθεί κάποια επιμέρους στοιχεία και προτάσεις, τα οποία καλό είναι να λαμβάνονται υπόψη κατά τον αντιπλημμυρικό σχεδιασμό και τη διαχείριση υδατικών πόρων, ακόμα και αν οι στόχοι των ενδιαφερομένων μελών είναι διαφοροποιημένοι από τους παραπάνω. Η πολυπλοκότητα των ζητημάτων δεν επιτρέπει εύκολα το σχεδιασμό σε τόσο ευρύ επίπεδο, πρέπει όμως η προσέγγιση και η πολιτική που επιλέγεται να μην αγνοεί πλήρως τις επιπτώσεις που θα έχει σε αλληλεπιδρώμενα συστήματα.

Ενιαία Διαχείριση του Υδρολογικού Κύκλου

- Τα σχέδια διαχείρισης πλημμύρας πρέπει να περιλαμβάνουν και τη διαχείριση ξηρασίας, περιλαμβάνοντας μέτρα που μεγιστοποιούν τις θετικές πτυχές των πλημμυρών, όπως τη συγκράτηση τμήματος της πλημμυρικής απορροής για άρδευση καλλιεργήσιμων εκτάσεων.
- Η Ο.Δ.Π. αναγνωρίζει την ανάγκη διαχείρισης όλων των πλημμυρικών γεγονότων και όχι μόνο εκείνων που δεν ξεπερνούν μία τυπική περίοδο επαναφοράς πλημμύρας σχεδιασμού ή ένα τυπικό επίπεδο ελάχιστης προστασίας. Τα σχέδια διαχείρισης πλημμύρας πρέπει να λαμβάνουν υπόψη και τις πλημμύρες που ξεπερνούν την τυπική περίοδο επαναφοράς σχεδιασμού, καθώς και πρόβλεψη για τη δράση σε αυτές τις περιπτώσεις.

- Τα σχέδια διαχείρισης πλημμύρας σε αστικό ιστό πρέπει να μεριμνούν τόσο για την ποσότητα των όμβριων υδάτων, όσο και για την επίδρασή τους στην ποιότητα του νερού του συστήματος.

Ενοποίηση Χωροταξικού Σχεδιασμού και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων

- Ο χωροταξικός σχεδιασμός και η διαχείριση των υδατικών πόρων πρέπει να πραγματοποιούνται σε συνδυασμό και με κάποια κοινή βάση. Η χαρτογράφηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας και διακινδύνευσης διευκολύνει την, απαιτούμενη για αυτό το σκοπό, ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των υπεύθυνων φορέων.

- Πρέπει να αναγνωρίζεται, να κατανοείται και να λαμβάνεται υπόψη η σχέση μεταξύ ανάντη και κατάντη περιοχών, ώστε να επιλέγονται συνδυαστικές λύσεις που βελτιώνουν την απόκριση της λεκάνης απορροής.

Διαχείριση Διακινδύνευσης και Αβεβαιότητας

- Η πλημμυρική διακινδύνευση σχετίζεται με υδρολογικές αβεβαιότητες οι οποίες είναι υποδεέστερες των κοινωνικών, οικονομικών και πολιτικών αβεβαιοτήτων. Οι εντονότερες και πιο απρόβλεπτες αλλαγές προβλέπεται να προκύψουν από την αύξηση του πληθυσμού και την οικονομική δραστηριότητα.

- Η διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης περιλαμβάνει συστηματικές ενέργειες σε ένα πλαίσιο ετοιμότητας, απόκρισης και αποκατάστασης και πρέπει να αποτελεί τμήμα της Ολοκληρωμένης Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (Integrated Water Resources Management).

- Η διαχείριση της διακινδύνευσης απαιτεί αναγνώριση, εκτίμηση και ελαχιστοποίησή της ή και εξάλειψη μη αποδεκτών τύπων διακινδύνευσης μέσω κατάλληλων πολιτικών και πρακτικών.

Υιοθέτηση του Καλύτερου Συνδυασμού Στρατηγικών/Πολιτικών Δράσης

- Τα σχέδια διαχείρισης πλημμύρας πρέπει να υιοθετούν στρατηγικές που είναι ευέλικτες, ελαστικές και προσαρμόσιμες σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.

- Η Ο.Δ.Π. για να θεωρηθεί επιτυχής πρέπει να εξετάζει μία κατάσταση συνολικά, να συγκρίνει τις διαθέσιμες εναλλακτικές λύσεις και επιλέγει εκείνη τη στρατηγική, ή συνδυασμό στρατηγικών, που είναι η καταλληλότερη για τη συγκεκριμένη κατάσταση.

- Τα σχέδια διαχείρισης πλημμύρας πρέπει να περιλαμβάνουν τόσο μακροπρόθεσμες όσο και βραχυπρόθεσμες παρεμβάσεις.

Εξασφάλιση Συμμετοχικής Προσέγγισης

- Η Ο.Δ.Π. πρέπει να ενθαρρύνει τη συμμετοχή των χρηστών, των μελετητών και των φορέων χάραξης της πολιτικής σε όλα τα επίπεδα και πρέπει να είναι ανοιχτή, διαφανής, επικοινωνιακή και χωρίς αποκλεισμούς. Αυτό απαιτεί την αποκέντρωση των κέντρων λήψεων αποφάσεων και περιλαμβάνει τη δημόσια διαβούλευση και τη συμμετοχή των ενδιαφερομένων μελών στο σχεδιασμό και την υλοποίηση.
- Η Ο.Δ.Π. οφείλει να είναι συνεπής σε φυλετικές, θρησκευτικές και πολιτισμικές διαφορές.
- Είναι σημαντικό να αξιοποιούνται τα πλεονεκτήματα τόσο της συνθετικής μεθόδου (bottom-up approach) όσο και της αναλυτικής μεθόδου (top-down approach) προκειμένου να προσδιοριστεί ο κατάλληλος συνδυασμός λύσεων
- Επιτροπές ή οργανισμοί στις λεκάνες απορροής, σε επίπεδο λεκάνης απορροής ή υπολεκάνης απορροής, μπορεί να παρέχουν κατάλληλες ευκαιρίες για συζήτηση (φόρουμ) για το συντονισμό και τη συνεργασία πέρα από λειτουργικά και διοικητικά όρια

Υιοθέτηση Ολοκληρωμένης Προσέγγισης Διαχείρισης Κινδύνων

- Μια ολιστική προσέγγιση στο σχεδιασμό και τη διαχείριση έκτακτων γεγονότων είναι προτιμότερη από μία προσέγγιση με επίκεντρο μεμονωμένους κινδύνους, και η Ο.Δ.Π. πρέπει να αποτελεί τμήμα ενός ευρύτερου συστήματος διαχείρισης της διακινδύνευσης.
- Ως εκ τούτου, η Ολοκληρωμένη Προσέγγιση Διαχείρισης Κινδύνων εξασφαλίζει συνέπεια στις προσεγγίσεις των φυσικών κινδύνων σε όλα τα σχετικά εθνικά ή τοπικά σχέδια.
- Οι έγκαιρες προειδοποιήσεις και οι προγνώσεις αποτελούν σημεία κλειδιά σε μια σειρά ενεργειών που απαιτούνται για να ελαττωθούν οι κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις των φυσικών κινδύνων, συμπεριλαμβανομένων και των πλημμυρών.

3.4.2.2 Εκτίμηση επικινδυνότητας και διακινδύνευσης (σε υποθετικό χρόνο)

Η Οδηγία 2007/60 θέτει τη βάση για ένα σύστημα εκτίμησης της πλημμυρικής επικινδυνότητας και διακινδύνευσης που στηρίζεται στην κατάρτιση αντίστοιχων χαρτών. Με χρήση των μελετών αυτών είναι δυνατός ο διαχωρισμός σε ζώνες χαμηλής ή υψηλής επικινδυνότητας και τελικά η επικέντρωση του ενδιαφέροντος και του σχεδιασμού στις περισσότερο επιρρεπείς περιοχές. Εστιάζεται έτσι ο αντιπλημμυρικός σχεδιασμός εκεί όπου υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη. Πρόκειται για ένα σύστημα υποθετικού χρόνου.

3.4.3 Μη κατασκευαστικά μέτρα διαχείρισης πλημμυρών

3.4.3.1 Ατομική και κοινωνική δράση πολιτών

Η πολιτεία, οι τοπικοί φορείς αλλά και οι πολίτες πρέπει να φροντίζουν ώστε να πραγματοποιείται σχολαστικός έλεγχος στα αντιπλημμυρικά έργα ακόμα και αρκετά χρόνια μετά την κατασκευή τους και να διασφαλίζεται η λειτουργικότητα και η χρησιμότητά τους. Οι κοίτες υδατορευμάτων και (κυρίως) χειμάρρων πρέπει να ελέγχονται και να καθαρίζονται προληπτικά και τακτικά [Φλώρος, 2009]. Σε μια χώρα όπως η Ελλάδα, που χαρακτηρίζεται από απότομες καταιγίδες τόσο το χειμώνα όσο και το καλοκαίρι, η πιθανή έμφραξη κάποιου ρέματος μπορεί σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα να οδηγήσει σε καταστροφές παρακείμενων περιοχών και περιουσιών (ξαφνικές πλημμύρες – flash floods).

Εντός του αστικού χώρου είναι σημαντική η συντήρηση και ο τακτικός καθαρισμός από κλαδιά, απορρίμματα κ.ά. των φρεατίων υδροσυλλογής, των ρείθρων κατά μήκος των οδών και του δικτύου ομβρίων υδάτων από φερτά υλικά, ώστε να μην μεταβάλλονται οι χρόνοι εισόδου και συγκεντρώσεως (συρροής) σχεδιασμού και να εξασφαλίζεται η ανεμπόδιστη ροή των ομβρίων. Αποφεύγονται έτσι πλημμύρες από επεισόδια βροχόπτωσης με μικρότερες περιόδους επαναφοράς από αυτές του σχεδιασμού.

Σημαντική επίσης είναι η ενημέρωση και εκπαίδευση του κοινού, αφενός, για την κατανόηση της αβεβαιότητας των φαινομένων και των κριτηρίων επιλογής περιόδου επαναφοράς και, αφετέρου, για τη λήψη μέτρων πρόληψης σε ατομικό ή τοπικό επίπεδο και αυτοπροστασία σε περίπτωση πλημμυρών. Πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι ο αντιπλημμυρικός σχεδιασμός γίνεται με βάση οικονομικοκοινωνικά κριτήρια. Σε επίπεδο κράτους, χώρας ή/και κοινωνίας ο ισχυρός αντιπλημμυρικός σχεδιασμός μπορεί να είναι αντιοικονομικός. Περιορισμένης έκτασης καταστροφές κρίνονται αποδεκτές στα πλαίσια της βέλτιστης κατανομής των περιορισμένων πόρων. Σε κάθε περίπτωση, οι ζημιές θα πρέπει να περιορίζονται σε υλικές, γι' αυτό και είναι σημαντική η επαγρύπνηση των πολιτών. Απαιτείται ετοιμότητα, κατάλληλος σχεδιασμός των κτηρίων ώστε να διευκολύνεται η εκκένωσή τους (κυρίως των υπογείων) και ασφάλιση τους απέναντι σε καταστροφές σχετιζόμενες με πλημμύρες. Οδηγίες για το μεμονωμένο τρόπο δράσης σε περίπτωση πλημμύρας είναι διαθέσιμες από τη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας. Είναι αξιοσημείωτο όμως ότι, ενώ τα θύματα λόγω πλημμυρών είναι περισσότερα από τα θύματα λόγω σεισμών, οι οδηγίες αυτοπροστασίας σε περιπτώσεις πλημμυρών δεν είναι διαδεδομένες στη χώρα μας. Στη Γερμανία, σε περιοχές με συχνή εμφάνιση πλημμυρών, η ενημέρωση και ευαισθητοποίηση των πολιτών είναι τακτική. Αποστέλλονται ετησίως

ενημερωτικά φυλλάδια, διοργανώνονται εκθέσεις και γίνονται επισκέψεις σε πληγείσες περιοχές.

3.4.3.2 Διατήρηση της φυσιογνωμίας της περιοχής και προσαρμογή των χρήσεων γης

Η αλλοίωση της φυσιογνωμίας μιας περιοχής μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και συνεπώς το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης. Σε περίπτωση που ο χρόνος αυτός ελαττώνεται από την ανθρώπινη παρέμβαση, η πλημμυρική απορροή εμφανίζει μεγαλύτερη αιχμή και μεγαλύτερες ταχύτητες ροής με αποτέλεσμα οι καταστροφές να είναι αφενός δυσκολότερα αποτρέψιμες (λόγω μικρότερου διαθέσιμου χρόνου αντίδρασης), αφετέρου μεγαλύτερες (λόγω μεγαλύτερης αιχμής αλλά και ορμητικότητας των υδάτων). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο συντελεστής απορροής σε μια εξωαστική περιοχή μπορεί να είναι της τάξης του 25-35%, ενώ σε μια αστική περιοχή να φτάσει μέχρι και το 90-95%.

Αντίστοιχα αποτελέσματα μπορεί να έχουν οι πυρκαγιές, με επιπλέον ζήτημα την περίπτωση διάβρωσης του εδάφους. Η παρουσία σημαντικών ποσοτήτων φερτών σε περιπτώσεις πλημμυρών εντείνει τις καταστροφές, ενώ η διάβρωση και απομάκρυνση του εδαφικού υλικού δεν επιτρέπει την εκ των υστέρων (φυσικά ή βοηθούμενη) ανάκαμψη της βλάστησης. Απαιτούνται για το λόγο αυτό μελέτες και έργα συγκράτησης των εδαφών σε περιοχές που έχουν πρόσφατα καταστραφεί από πυρκαγιές. Και στην περίπτωση αυτή, πρέπει τα έργα να πραγματοποιούνται με προσοχή και όχι σπασμωδικά, με συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα και δυνατότητα απομάκρυνσης τους ή ένταξής τους στο περιβάλλον όταν η βλάστηση αποκατασταθεί.

Η διαφύλαξη της πυκνής βλάστησης ή/και των δασών, των υγροτόπων ή/και πλημμυρικών πεδίων και των μαιάνδρων των ποταμών διατηρεί το χρόνο συγκέντρωσης και την ταχύτητα της πλημμυρικής απορροής σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Επίσης, η αποφυγή εγκατάστασης σημαντικών εγκαταστάσεων στα πλημμυρικά πεδία επιτρέπει την κατάκλυσή τους όταν αυτό είναι απαραίτητο ώστε να επιτυγχάνεται διόδευση της πλημμύρας και ελάττωση της αιχμής της. Έτσι, με κατάλληλο χωροταξικό σχεδιασμό, ο διαθέσιμος για ανάσχεση της πλημμύρας όγκος ενός πλημμυρικού πεδίου μπορεί να εκτιμηθεί και αξιολογηθεί του ως τμήμα του συστήματος ελέγχου και διαχείρισής του πλημμυρικού επεισοδίου.

3.4.3.3 Συστήματα πρόγνωσης και προειδοποίησης (σε πραγματικό χρόνο)

Τα συστήματα και οι μέθοδοι πρόγνωσης (πλημμυρών και άλλων φυσικών κινδύνων) αναπτύσσονται με σκοπό την έγκαιρη προειδοποίηση, σε πραγματικό χρόνο, για την

εμφάνιση και το μέγεθος συγκεκριμένων γεγονότων (πλημμυρικών και άλλων). Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η λήψη μέτρων δράσης από φορείς, αλλά και από τους πολίτες, ώστε να εξασφαλισθούν η προστασία της ζωής και των περιουσιών, και να ελαχιστοποιηθούν οι συνέπειες.

Συστήματα πραγματικού χρόνου υπάρχουν δύο ειδών, τα συστήματα καθοδήγησης και τα συστήματα πρόγνωσης πλημμυρών [Κουτσογιάννης & Μαμάσης, 2010]. Τα συστήματα καθοδήγησης (Flood Guidance Systems) παρέχουν δύο δείκτες σχετικούς με την ποσότητα βροχής που οδηγεί ένα υδατόρεμα σε υπερχειλίση και την επιπρόσθετη ποσότητα πλημμυρικής απορροής. Τα συστήματα πρόγνωσης πλημμυρών είναι λιγότερο διαδεδομένα καθώς εμφανίζουν μεγάλες δυσκολίες στην κατασκευή τους. Στην Κολωνία με χρήση προγνώσεων βροχόπτωσης, δεδομένων σταθμημέτρων κατά μήκους του Ρήνου και κατάλληλου μοντέλου βροχής-απορροής γίνεται πρόβλεψη σε πραγματικό χρόνο της στάθμης του ποταμού για τις επόμενες 36 ώρες. Ένας πίνακας στάθμης-ενεργειών προκαθορίζει την ενδεικνυόμενη δράση σε κάθε περίπτωση. Παράλληλα, το φαινόμενο παρακολουθείται μέσω Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών στο οποίο έχουν πρόσβαση και οι πολίτες.

Με την εγκατάσταση αυτοματοποιημένων συστημάτων συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων βροχοπτώσεων και παρακολούθησης παραμέτρων βροχής-απορροής σε πραγματικό χρόνο είναι δυνατή η διαμόρφωση ενός συστήματος προειδοποίησης για τον πλημμυρικό κίνδυνο. Καταρτισμένα σχέδια έκτακτης ανάγκης σε συνδυασμό με ένα τέτοιο σύστημα ελαχιστοποιούν τις καταστροφές. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος είναι δυνατή, καθώς έχουν ήδη πραγματοποιηθεί σχετικά ερευνητικά προγράμματα με χρήση μετεωρολογικού ραντάρ για την παρακολούθηση της βροχόπτωσης [Μιμίκου & Φωτόπουλος, 2004]. Οι μεθοδολογίες χρήσης δορυφόρων που παρακολουθούν, φωτογραφίζουν και αναγνωρίζουν τύπους νεφών με σκοπό την πρόγνωση της βροχόπτωσης σε πραγματικό χρόνο συνεχώς βελτιώνονται. Σε συνδυασμό με την παρακολούθηση της κατάστασης στην επιφάνεια της Γης (κάλυψη χιονιού και πάγου, στάθμη ωκεανών, θερμοκρασία θάλασσας κ.ά.), οι δορυφόροι αποτελούν το πιο σύγχρονο εργαλείο πρόβλεψης του καιρού και της βροχόπτωσης σε πραγματικό χρόνο [Μιμίκου, 2006].

3.4.3.4 Εναλλακτικά μέτρα και μικρής κλίμακας κατασκευαστικές παρεμβάσεις

Η κατάκλυση αστικών περιοχών με σκοπό τη συγκράτηση του πλημμυρικού όγκου αντί για την πολυέξοδη προσπάθεια παροχέτευσής του εκτός πόλεως είναι μία λύση που εφαρμόζεται στο Αμβούργο. Τα κτήρια είναι κατάλληλα σχεδιασμένα ώστε να είναι στο κάτω μέρος τους στεγανά και να αποφεύγονται κατά το δυνατόν οι υλικές ζημιές. Η ανύψωση των κτηρίων ή και η κατασκευή αναχωμάτων ή τοίχων γύρω από αυτά καθιστά επίσης

δυνατή την (ελεγχόμενη) κατάκλυση σε χτισμένες περιοχές. Με παρόμοιο τρόπο, αλλά σε μικρότερη κλίμακα, είναι δυνατή η ανάσχεση της αιχμής της πλημμύρας και ο έλεγχος του ρυθμού της πλημμυρικής απορροής σε συνήθη αστικό ιστό. Η μέθοδος είναι απλή και αφορά στην συγκράτηση των ομβρίων στα οικοδομικά τετράγωνα αντί της άμεσης παροχέτευσής τους στα δίκτυα ομβρίων υδάτων ή στις περιφερειακές οδούς.

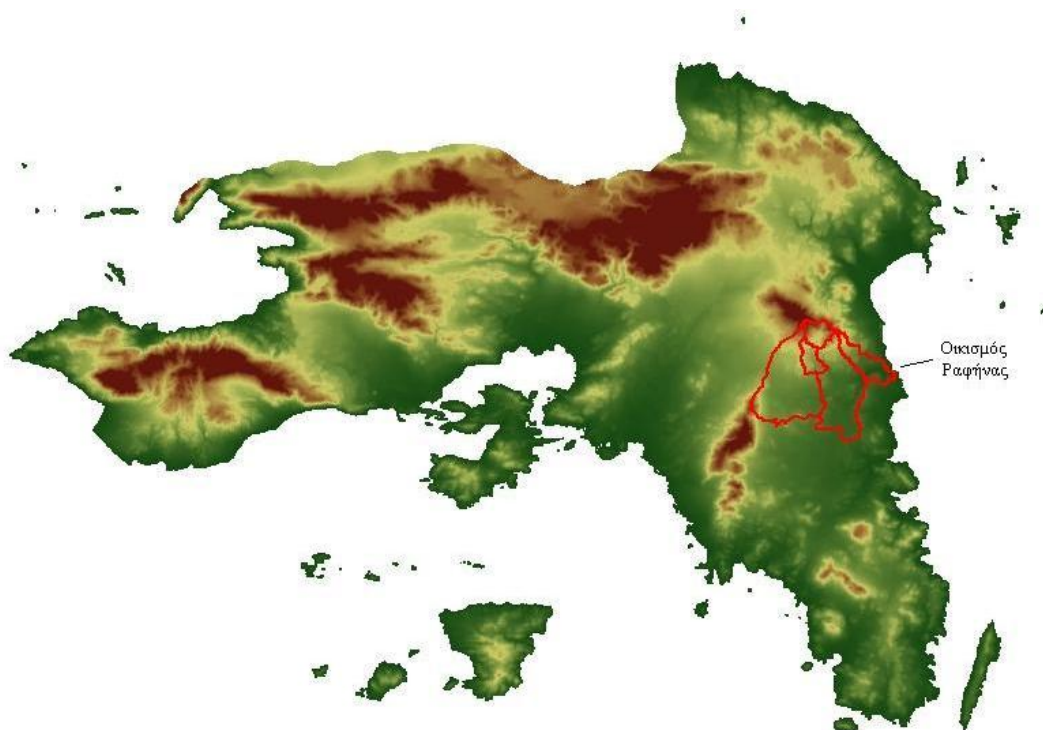
Κεφάλαιο 4: Περιοχή μελέτης

4 Περιοχή μελέτης

4.1 Περιγραφή της περιοχής μελέτης

4.1.1 Γενικά στοιχεία

Στην παρούσα εργασία μελετάται και προσομοιώνεται η λεκάνη απορροής με έξοδο στην περιοχή της Ραφήνας. Πρόκειται για μια περιοχή η οποία τα τελευταία χρόνια εμφανίζει μεγάλη αστική ανάπτυξη, τόσο στον ίδιο τον οικισμό της Ραφήνας, όσο και ανάντη οικισμούς εντός της υπολεκάνης, όπως το Ντράφι, το Πικέρμι και η Παλλήνη.

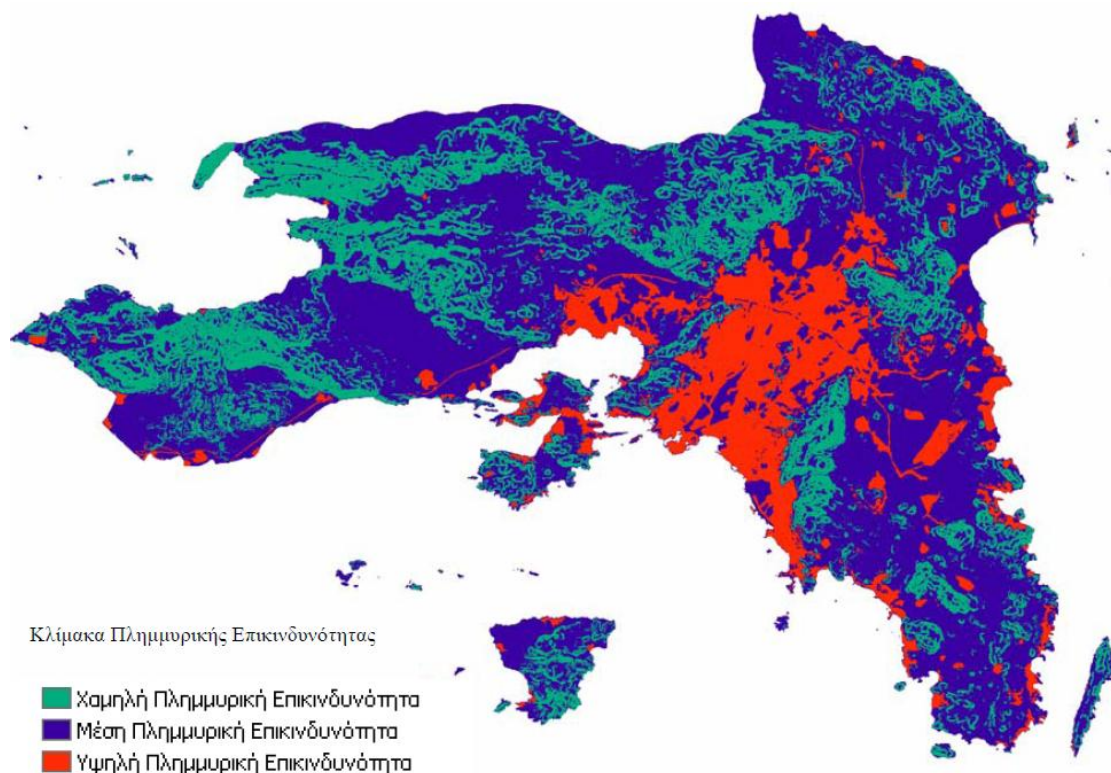


Εικόνα 4.1 Όρια λεκάνης και υπολεκανών μελέτης

Η περιοχή εμφανίζει ενδιαφέρον από άποψη πλημμυρικής διερεύνησης κυρίως λόγω του αστικού ιστού ακριβώς στην έξοδο της, στον οποίο, λόγω των πλημμυρικών γεγονότων του παρελθόντος και της πίεσης για περαιτέρω οικιστική ανάπτυξη, κατασκευάζεται ήδη επέκταση του υπάρχοντος δικτύου ομβρίων υδάτων. Η διερεύνηση της ανάγκης του δικτύου, της επάρκειας του σχεδιασμού του και της (πιθανής απόκρισής του σε πλημμυρικά γεγονότα μικρών περιόδων επαναφοράς για τα οποία έχει σχεδιαστεί, αλλά και της απόκρισής του σε σπανιότερα πλημμυρικά γεγονότα εμφανίζει ενδιαφέρον. Η παρούσα εργασία ωστόσο επικεντρώνεται στο κομμάτι της λεκάνης ανάντη του αστικού αυτού ιστού, ως ένα πρώτο

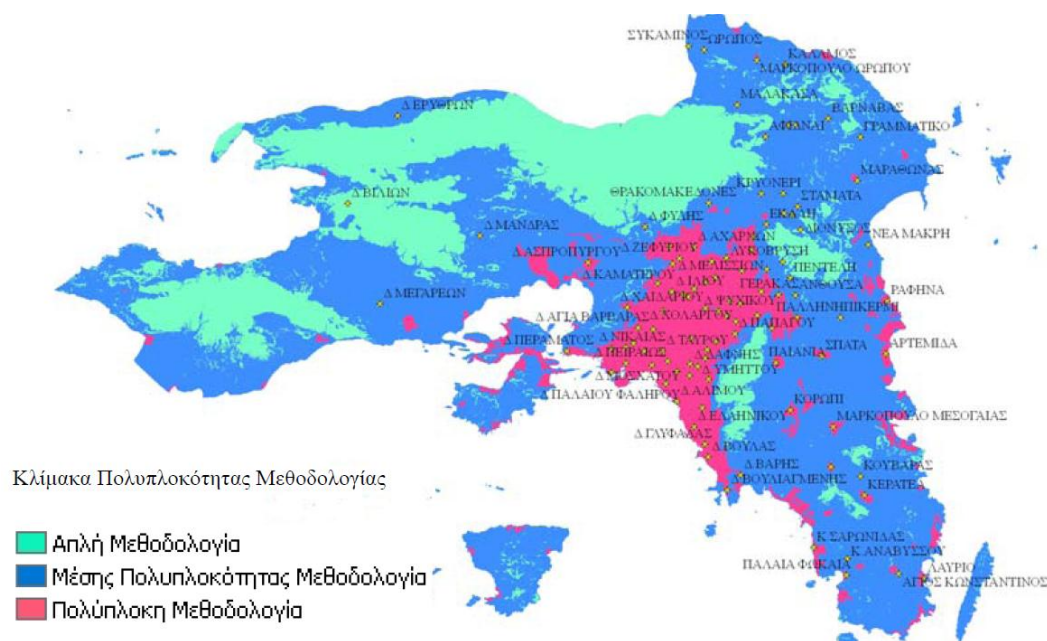
βήμα για τη διερεύνηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας στην ευρύτερη περιοχή του αστικού ιστού.

Η περιοχή χαρακτηρίζεται ως μέσης έως υψηλής πλημμυρικής επικινδυνότητας, λόγω των σχετικά ήπιων κλίσεων της, ειδικά καθώς προσεγγίζεται ο αστικός ιστός (βλ. Εικόνα 4.2).



**Εικόνα 4.2 Χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας της Αττικής
[Πηγή: Κανδηλιώτη, 2009]**

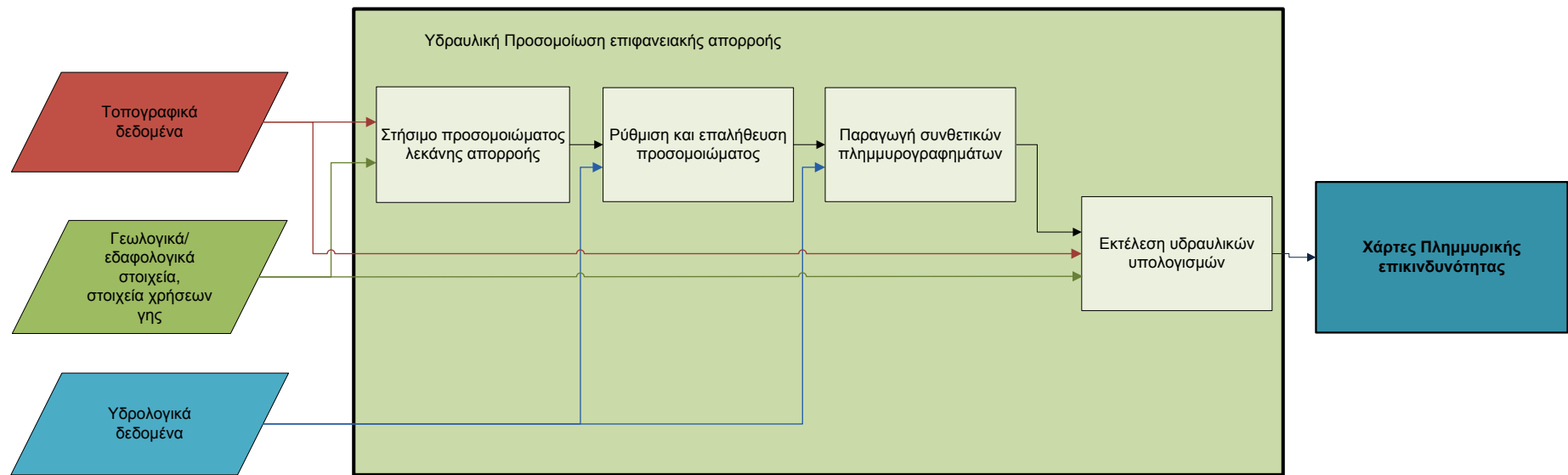
Για τη διερεύνηση της περιοχής συνιστάται η εφαρμογή μεθοδολογίας με μέση έως υψηλή πολυπλοκότητα (βλ. χάρτη Εικόνας 4.3 και διάγραμμα Εικόνας 3.1). Προκύπτει ότι για τη λεκάνη απορροής εκτός του αστικού ιστού επαρκεί η υδραυλική προσομοίωση της επιφανειακής απορροής, ενώ στα όρια του αστικού ιστού της Ραφήνας η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι πολυπλοκότερη και απαιτεί τη συμπερίληψη του δικτύου ομβρίων υδάτων.



Εικόνα 4.3 Χάρτης πολυπλοκότητας απαιτούμενης μεθοδολογίας για την εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας στην περιοχή της Αττικής [Πηγή: Κανδηλιώτη, 2009]

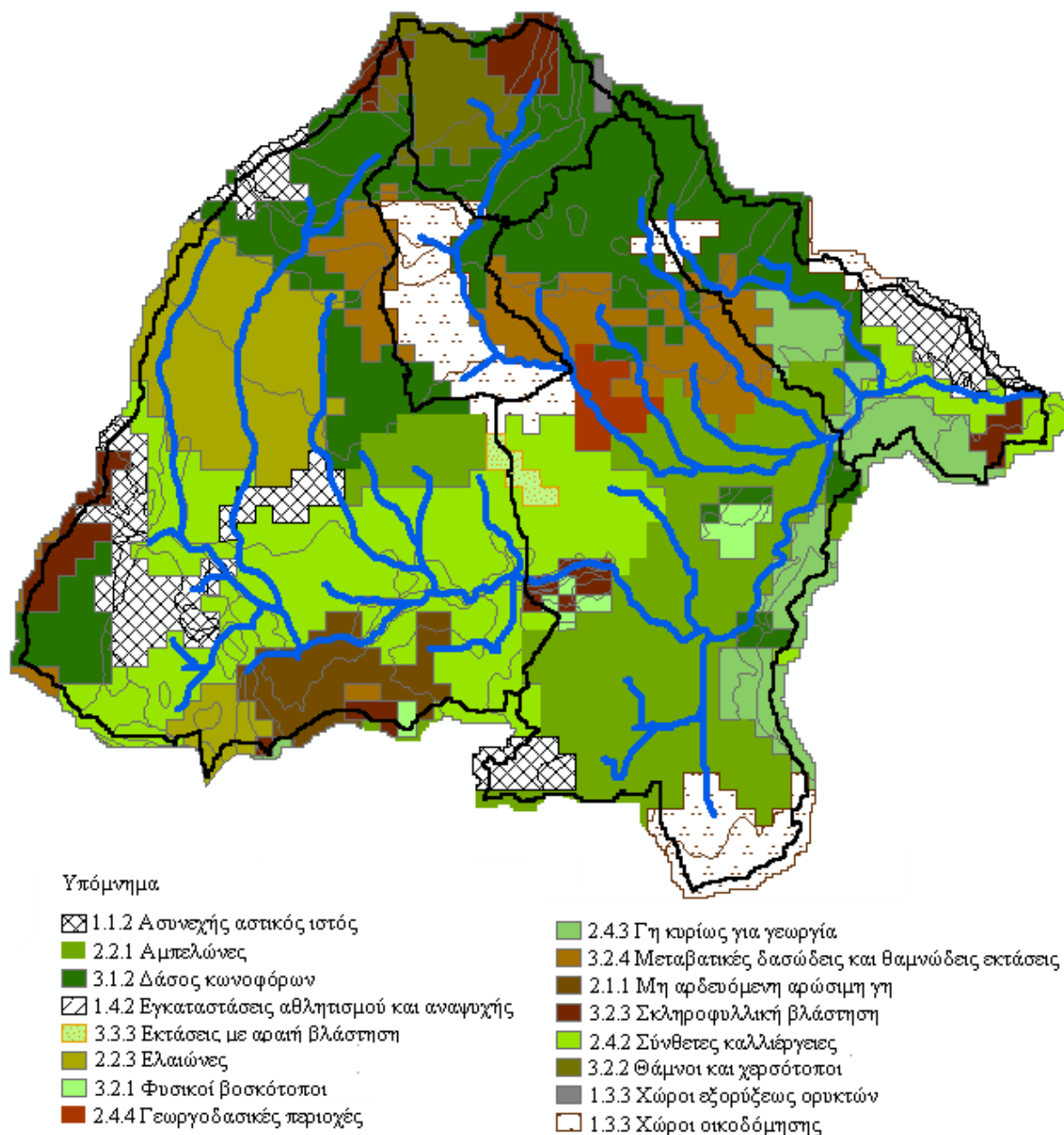
Για την πραγματοποίηση της υδραυλικής προσομοίωσης πρωτίστως απαιτείται η υδρολογική προσομοίωση της περιοχής και η εξαγωγή πλημμυρογραφημάτων σε καίριες θέσεις (βλ. διάγραμμα Εικόνας 4.4).

Η περιοχή μελέτης έχει έκταση περίπου 127 km^2 , μέσο υψόμετρο περίπου 222 m (μέγιστο υψόμετρο 905 m και ελάχιστο 0 m στην έξοδο της προς τη θάλασσα) και χαρακτηρίζεται από μία μέση κλίση περίπου $9,5\%$ (με μέγιστη κλίση περίπου 60%). Το κλίμα και οι βροχοπτώσεις της περιοχής ακολουθούν το καθεστώς της Αττικής, δηλαδή εμφανίζει ήπιους και υγρούς χειμώνες και σχετικά θερμά και ξηρά καλοκαίρια. Τα περισσότερα και εντονότερα γεγονότα βροχοπτώσεων εμφανίζονται τη χειμερινή περίοδο, ενώ ξαφνικές καταγίδες μικρής διάρκειας παρατηρούνται και το καλοκαίρι.



Εικόνα 4.4 Συνοπτικό διάγραμμα βασικών στοιχείων και διαδικασιών κατάρτισης χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας

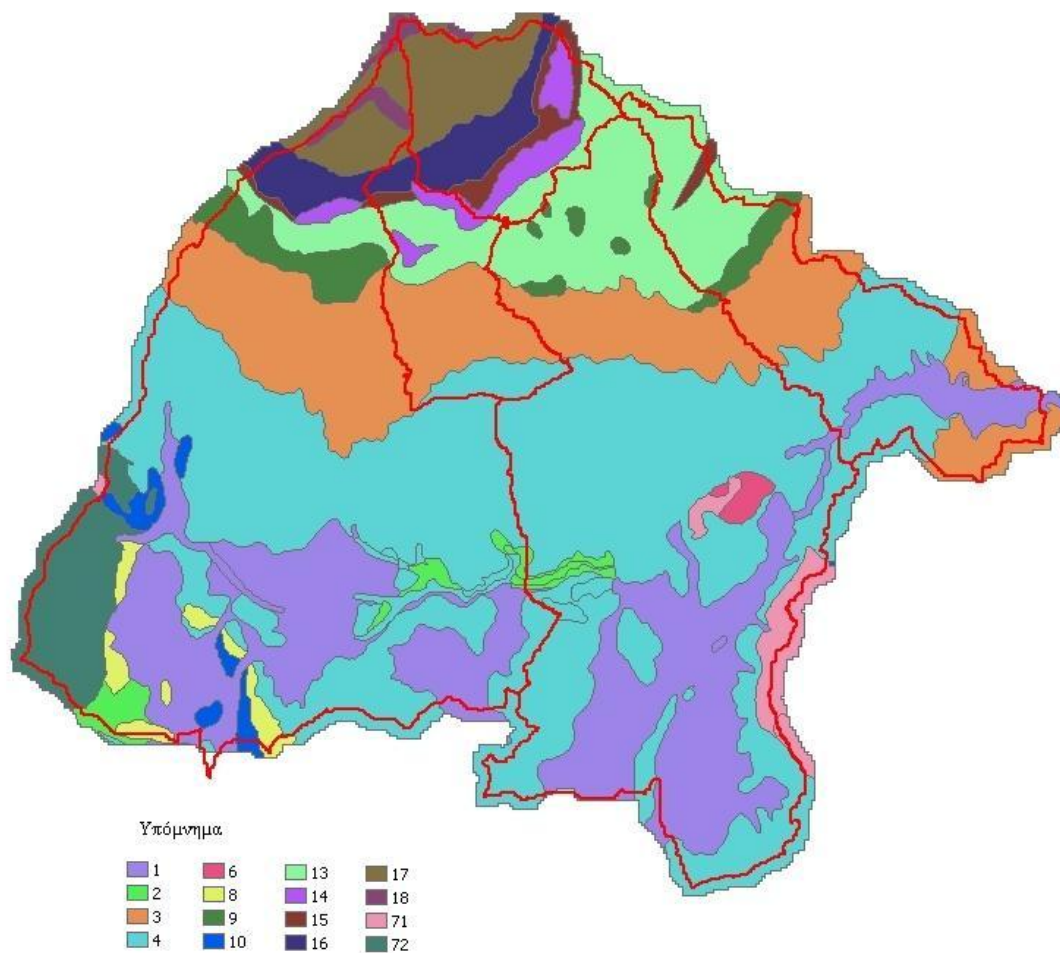
Οι ανάντη οικισμοί λαμβάνονται υπόψη μέσω των χρήσεων γης Corine για την υπολεκάνη της περιοχής μελέτης (βλ. Εικόνα 4.5). Σε αυτούς, το δίκτυο ομβρίων υδάτων λαμβάνεται υπόψη ως στοιχείο για τον καθορισμό των συντελεστών επιφανειακής απορροής ανάλογα με τη μέθοδο που εφαρμόζεται. Δεν απαιτείται δηλαδή επακριβής γνώση του δικτύου ομβρίων υδάτων, αλλά η κατανόηση των μηχανισμών λειτουργίας του είναι σημαντική ώστε να λαμβάνεται υπόψη στο βαθμό που είναι, ή όχι, αναγκαίο.



Εικόνα 4.5 Χρήσεις γης Corine στην περιοχή μελέτης

Ως προς τη γεωλογία στην περιοχή απαντώνται εναλλαγές μαρμάρων, ασβεστολίθων και σχιστολίθων στο βόρειο τμήμα της, με τοπικές εμφανίσεις γνεύσιων και ηφαιστειακού τόφου,

ενώ στο κεντρικό και νότιο τμήμα της επικρατούν άργιλοι, πηλίτες, μάργες, κροκαλοπαγή και λατυποπαγή. Ποτάμιες αποθέσεις εμφανίζονται στις θέσεις κοιτών υδατορευμάτων, ενώ στο νότιο τμήμα παρατηρούνται τοπικές εμφανίσεις ψαμιτών, χαλαζιτών, οφιολίθων και πυριτολίθων. Αναλυτικά η γεωλογία της περιοχής απεικονίζεται στο χάρτη της Εικόνας 4.6.

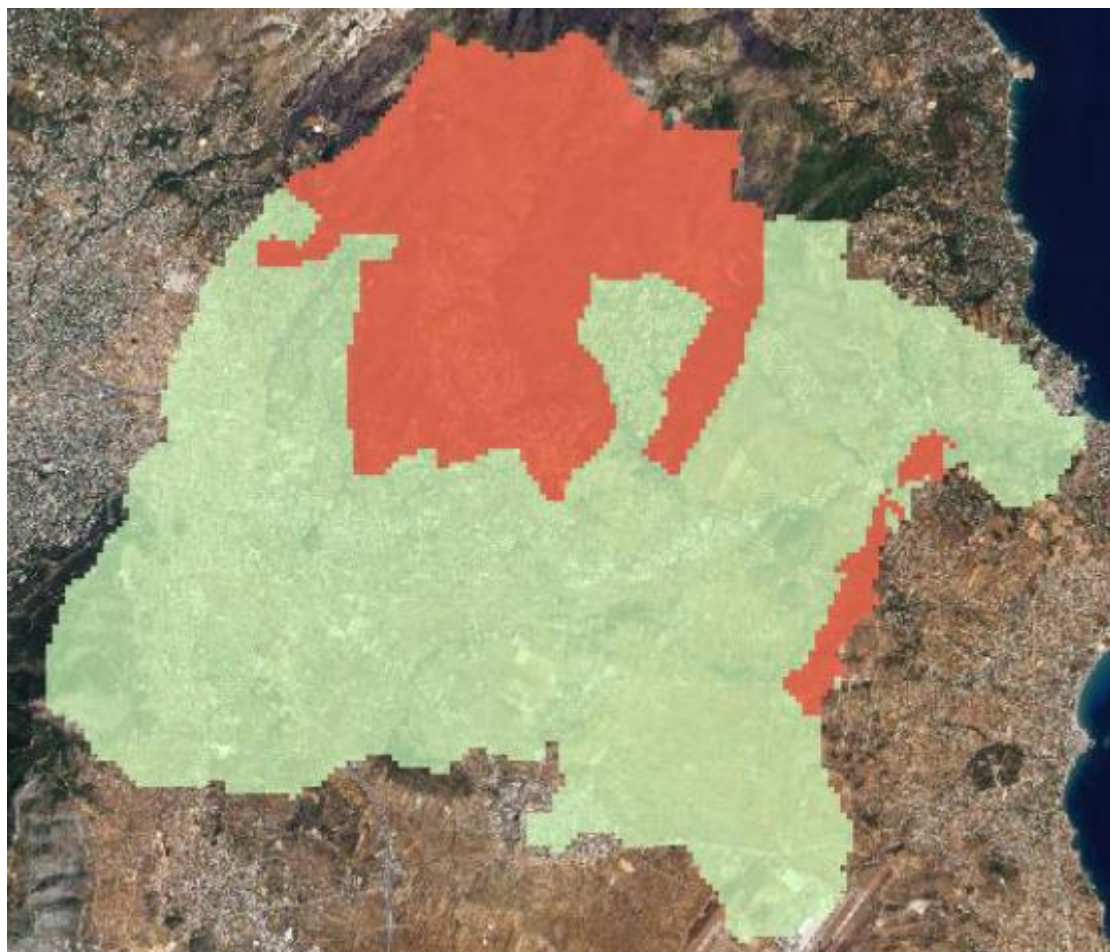


Εικόνα 4.6 Επιφανειακές εμφανίσεις γεωλογικών σχηματισμών στην περιοχή μελέτης *

4.1.2 Στοιχεία για την πυρκαγιά του Αυγούστου 2009

Τον Αύγουστο του 2009 εκδηλώθηκε πυρκαγιά στην περιοχή της Ανατολικής Αττικής και συγκεκριμένα στην περιοχή του Γραμματικού, η οποία επεκτάθηκε στις γύρω περιοχές, από το Μαραθώνα μέχρι περίπου το Πικέρμι και την Παλλήνη. Τα όρια της καμένης περιοχής εντός της λεκάνης απορροής που μελετά η εργασία απεικονίζονται στο χάρτη της Εικόνας 4.7.

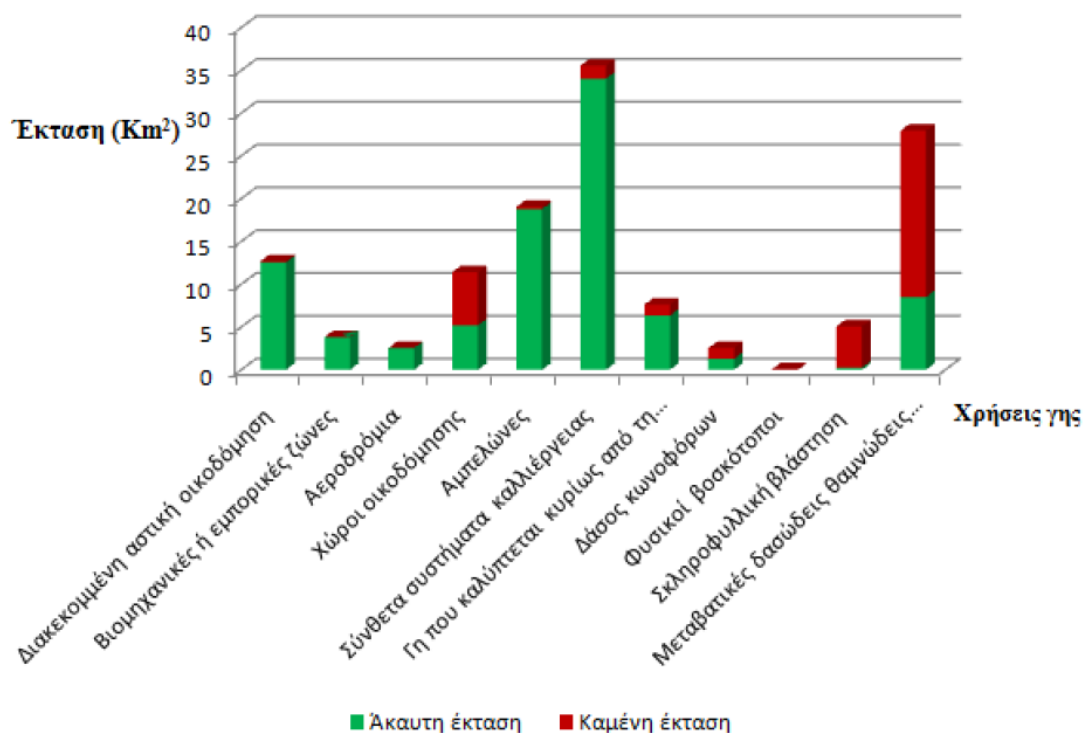
* για την επεξήγηση των κωδικών του Υπομνήματος βλ. Παράρτημα ΙΙΙ. Οι κωδικοί 71 και 72 αποτελούν λεπτομέρεια του κωδικού 7.



■ Καμμένη έκταση

Εικόνα 4.7 Απεικόνιση της καμμένης έκτασης μετά την πυρκαγιά του Αυγούστου 2009 στα όρια της υπό μελέτη λεκάνης απορροής
[Πηγή: Αλωνιστιώτη, 2011]

Η καμμένη έκταση αποτελεί περίπου το 28% της λεκάνης, δηλαδή 35.000 στρέμματα [Αλωνιστιώτη, 2011]. Ποσοστιαία, η πυρκαγιά επηρέασε περισσότερο τις δασικές εκτάσεις και λιγότερο τις περιοχές καλλιεργειών, όπως ξεκάθαρα διαφαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 4.8.



Εικόνα 4.8 Διαγραμματική απεικόνιση των καμένων εκτάσεων ανά χρήση γης μετά την πυρκαγιά του Αυγούστου 2009 [Πηγή: Αλωνιστιώτη, 2011]

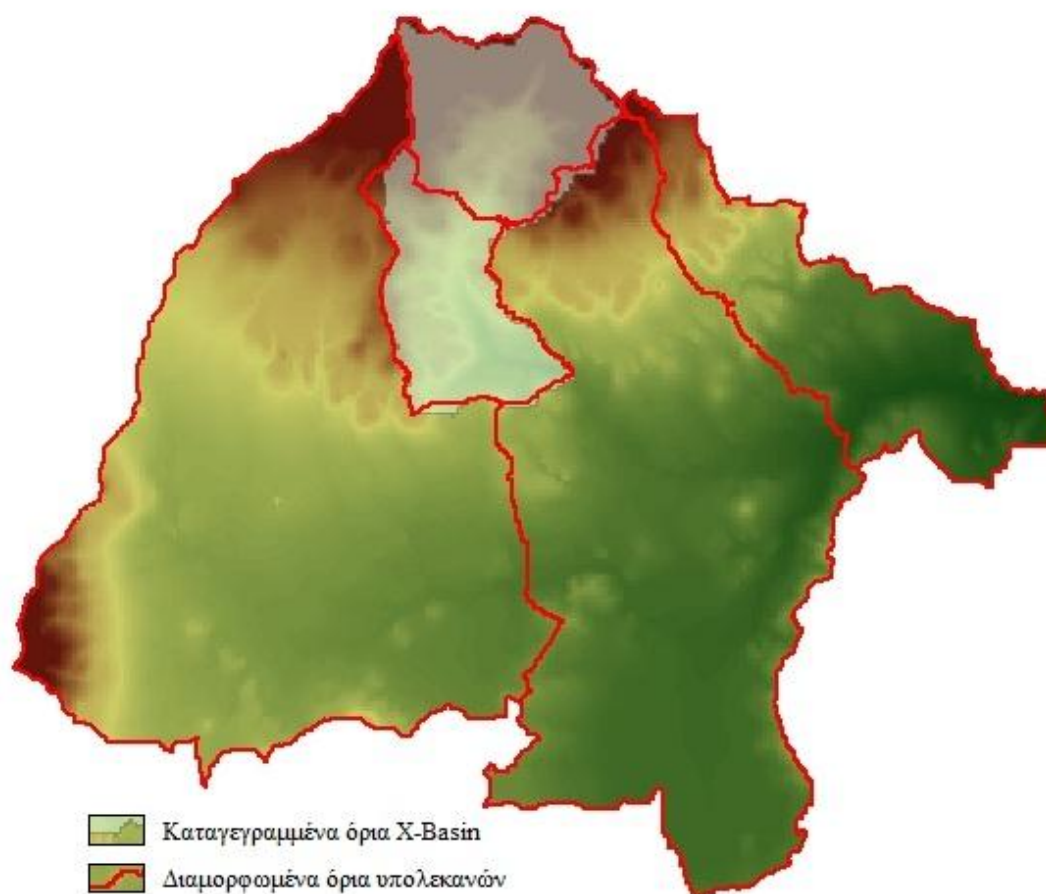
4.2 Διαθέσιμα υδρολογικά και υδραυλικά δεδομένα

Μεγάλο τμήμα της λεκάνης απορροής που μελετά η εργασία παρακολουθείται από τρία ανεξάρτητα μεταξύ τους δίκτυα που έχει εγκαταστήσει και συντηρεί η ομάδα CHI (Center of Hydrological Information) του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, το δίκτυο παρακολούθησης της Πειραματικής Λεκάνης X-Basin, το δίκτυο METEONET και το δίκτυο του προγράμματος FLADAR. Τα περισσότερα δεδομένα βροχοπτώσεων και απορροών που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της εργασίας διατέθηκαν από το Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων στα πλαίσια του οποίου δραστηριοποιείται η παραπάνω ομάδα. Επιπλέον δεδομένα παραχωρήθηκαν από το Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Το Εργαστήριο διατηρεί ανεξάρτητο δίκτυο καταγραφής δεδομένων στην ίδια περιοχή με σκοπό τη μελέτη της υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης απορροής.

4.2.1 Πειραματική λεκάνη X-Basin

Η πειραματική λεκάνη βρίσκεται στην Ανατολική Αττική, ανάντη περίπου της περιοχής της Ραφήνας (βλ. Εικόνα 4.9). Έχει σχήμα στενόμακρο με διεύθυνση B-N, έκταση 15,28km²

και μέσο υψόμετρο 430m (ελάχιστο υψόμετρο 146m και μέγιστο 950m). Καλύπτει το άνω και κεντρικό κομμάτι της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 4.9 Πειραματική λεκάνη X-Basin: διαφοροποίηση καταγεγραμμένων και διαμορφωμένων ορίων υπολεκανών

Το βόρειο τμήμα της εμφανίζει μεγάλες κλίσεις, αραιή θαμνοκάλυψη και βραχώδεις εκτάσεις. Επικρατούν κυρίως μάρμαρα και σχιστολιθικοί σχηματισμοί. Η έκταση αυτή υπάγεται στο Δήμο Πεντέλης και παλαιότερα ήταν δασώδης. Το νότιο τμήμα της λεκάνης χαρακτηρίζεται από ηπιότερες κλίσεις και μικρό ποσοστό βλάστησης, κυρίως κοντά στην έξοδο της λεκάνης. Η περιοχή καλύπτεται από συνεκτικούς κροκαλοπαγείς μαργαϊκούς σχηματισμούς, υπάγεται στο Δήμο Πικερμίου και είναι αραιοκατοικημένη (οικισμός Ντράφι).

Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται στην Πειραματική Λεκάνη είναι υδρολογικού ενδιαφέροντος. Αναλυτικά, εκτελούνται:

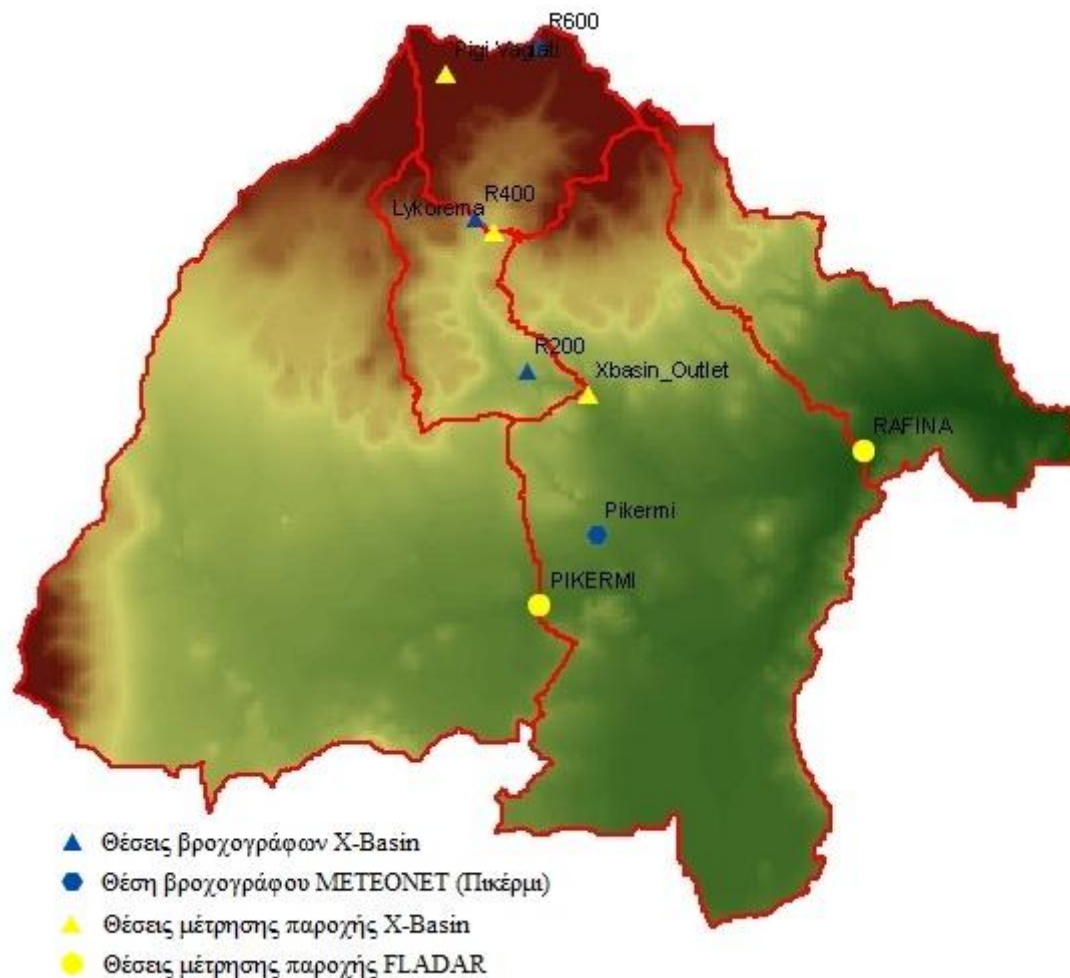
- μετρήσεις στάθμης του υδατορεύματος
- υδρομετρήσεις
- μετρήσεις βροχόπτωσης
- μετρήσεις διηθητικής ικανότητας και υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους

- πιεζομετρήσεις σε γεωτρήσεις, και
- ανάλυση ποιοτικών παραμέτρων νερού από την έξοδο της λεκάνης.

Σκοπός της παρακολούθησης των μεγεθών είναι η μελέτη των φυσικών μεταβλητών και διεργασιών του κύκλου του νερού. Έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία, τα συλλεγόμενα στοιχεία πεδίου χρησιμοποιούνται, συνήθως, σε μεταπτυχιακές εργασίες και διδακτορικές διατριβές.

Η Λεκάνη παρακολουθείται μέσω δύο εγκατεστημένων υδρομετρικών σταθμών, έναν στην έξοδο και έναν στο κέντρο βάρους της λεκάνης, καθώς και από ένα βροχομετρικό δίκτυο υψηλής πυκνότητας. Ο εγκατεστημένος στην έξοδο υδρομετρικός σταθμός περιλαμβάνει σταθμήμετρο, σταθμηγράφο για τη συνεχή καταγραφή της στάθμης και όργανα καταγραφής της θερμοκρασίας του νερού και του αέρα. Για τη μέτρηση της παροχής στην έξοδο της λεκάνης χρησιμοποιείται μιλίσκος, με τη μέθοδο της υδροβασίας. Ο υδρομετρικός σταθμός στο κέντρο βάρους της λεκάνης αποτελείται από σταθμηγράφο και υπερχειλιστή, ο οποίος έχει κατασκευαστεί από τον Τομέα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Το βροχομετρικό δίκτυο περιλαμβάνει τρεις βροχογράφους, κατάλληλα διατεταγμένους ώστε να δίνουν πλήρη εικόνα της βροχόπτωσης σε όλη την έκταση της λεκάνης. Η συχνότητα καταγραφής των μετρούμενων μεγεθών από όλα τα όργανα είναι δέκα λεπτά.

Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης της διηθητικής ικανότητας και υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους, της στάθμης του υπόγειου νερού σε υδροληπτικά έργα, καθώς και ανάλυσης βασικών ποιοτικών παραμέτρων του νερού μέσω της Κινητής Εργαστηριακής Μονάδας που διαθέτει εξοπλισμό για πραγματοποίηση των παραπάνω. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά οι θέσεις μέτρησης υδρολογικών μεγεθών της X-Basin (βλ. και Εικόνα 4.10).



Εικόνα 4.10 Θέσεις μέτρησης υδρολογικών και υδραυλικών μεγεθών

4.2.1.1 Διάβαση Μπάλας – βροχογράφος R600

Στη θέση αυτή, σε υψόμετρο 630m και συντεταγμένες 4213340.5 και 492704.71875 γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος αντίστοιχα, είναι εγκατεστημένος ο βροχογράφος R600, με συχνότητα καταγραφής της βροχόπτωσης τα δέκα λεπτά. Η λειτουργία του άρχισε στις 05/12/2003, ενώ τα (προηγούμενως) διαθέσιμα στο Διαδίκτυο δεδομένα μέσω ημερησίων τιμών βροχόπτωσης υπολογίζονται για το διάστημα 08:00-08:00.

Πρόκειται για το βορειότερο άκρο της πειραματικής λεκάνης. Οι μορφολογικές κλίσεις είναι μεγάλες και οι γεωλογικοί σχηματισμοί, όπως έχει αναφερθεί, βραχώδεις, κυρίως δε μάρμαρα και σχιστόλιθοι.

Μέσω του βροχογράφου R600, ο οποίος είναι κατάλληλα σχεδιασμένος ώστε να μειώνεται η αντίσταση του αέρα και η τύρβη, προσδιορίζεται η ένταση της βροχόπτωσης. Ο σχεδιασμός του επιτρέπει την τοποθέτηση και εγκατάσταση του με ασφάλεια σε εκτεθειμένα στον άνεμο σημεία. Η μέτρηση της βροχόπτωσης πραγματοποιείται με βάση την αξιόπιστη

μέθοδο του εκτεθειμένου δοχείου. Η συλλογή της κατακρήμνισης γίνεται με χωνί και στη συνέχεια εισέρχεται σε ένα από τα δύο δοχεία που βρίσκονται στο κάθε άκρο ενός μικρού βραχίονα που ισορροπεί. Όταν το ένα δοχείο γεμίσει ο βραχίονας αυτός κινείται, αδειάζοντας το πρώτο δοχείο και τοποθετώντας το δεύτερο δοχείο κάτω από το χωνί. Η επανάληψη αυτής της διαδικασίας είναι ατέρμονη, με κάθε αλλαγή δοχείων να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη ποσότητα βροχής. Κατά την κίνηση του βραχίονα μαγνήτης περνάει πάνω από έναν διακόπτη, προκαλώντας επαφή για κάποια χιλιοστά του δευτερολέπτου και καταγράφοντας τις εναλλαγές των δοχείων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο βροχογράφος λόγω βανδαλισμού και συντήρησης υπήρξε εκτός λειτουργίας για περίπου 2 εβδομάδες (2003, 2005), ενώ το 2005 αντικαταστάθηκε από άλλο όργανο. Συγκεκριμένα, από 12/12/2003 ως 19/12/2003 ο βροχογράφος ήταν εκτός λειτουργίας λόγω βανδαλισμού και συντήρησης, από 17/06/2005 ως 27/07/2005 ήταν εκτός λειτουργίας λόγω συντήρησης, ενώ στις 27/07/2005 αντικαταστάθηκε από ένα νέο τύπο βροχογράφου παραπλήσιας ακρίβειας με τον προηγούμενο. Επιπλέον, διαπιστώθηκε πως δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα (τουλάχιστον) για το φθινόπωρο του 2009. Ο βροχογράφος είχε καεί σε πυρκαγιά πριν από αυτές τις ημερομηνίες.

4.2.1.2 Αγ. Νικόλαος - βροχογράφος R400

Στη θέση αυτή, σε υψόμετρο 383m και συντεταγμένες 4210619 και 491697.1875 γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος αντίστοιχα είναι εγκατεστημένος ο βροχογράφος R400, με συχνότητα καταγραφής της βροχόπτωσης επίσης τα δέκα λεπτά. Η λειτουργία του άρχισε στις 10/10/2003, ενώ τα (προηγούμενος) διαθέσιμα στο Διαδίκτυο δεδομένα μέσω ημερησίων τιμών βροχόπτωσης υπολογίζονται για το διάστημα 08:00-08:00.

Η θέση αυτή βρίσκεται κοντά στο κέντρο βάρους της λεκάνης. Και εδώ επικρατούν μεγάλες μορφολογικές κλίσεις και βραχώδεις γεωλογικοί σχηματισμοί, όπως σχιστόλιθοι και μάρμαρα.

Ως ανωτέρω (βροχογράφος R600), ο βροχογράφος R400 είναι κατάλληλα σχεδιασμένος ώστε να μειώνεται η αντίσταση του αέρα και η τύρβη και μέσω των μετρήσεων του προσδιορίζεται η ένταση της βροχόπτωσης. Ο σχεδιασμός του επιτρέπει την τοποθέτηση και εγκατάσταση του με ασφάλεια σε εκτεθειμένα στον άνεμο σημεία. Η μέτρηση της βροχόπτωσης πραγματοποιείται με βάση την αξιόπιστη μέθοδο του εκτεθειμένου δοχείου. Η συλλογή της κατακρήμνισης γίνεται με χωνί και στη συνέχεια εισέρχεται σε ένα από τα δύο δοχεία που βρίσκονται στο κάθε άκρο ενός μικρού βραχίονα που ισορροπεί. Όταν το ένα δοχείο γεμίσει ο βραχίονας αυτός κινείται, αδειάζοντας το πρώτο δοχείο και τοποθετώντας το δεύτερο δοχείο κάτω από το χωνί. Η επανάληψη αυτής της διαδικασίας είναι ατέρμονη, με κάθε αλλαγή δοχείων να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη ποσότητα βροχής. Με τον ίδιο ακριβώς

τρόπο με τον R600, κατά την κίνηση του βραχίονα μαγνήτης περνάει πάνω από έναν διακόπτη, προκαλώντας επαφή για κάποια χιλιοστά του δευτερολέπτου και καταγράφοντας τις εναλλαγές των δοχείων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο βροχογράφος μέχρι το 2005, οπότε και υπήρξε εκτός λειτουργίας για περίπου 2 μήνες λόγω βανδαλισμού και συντήρησης, βρισκόταν σε διαφορετική θέση (Γεωγραφικό πλάτος: 4210748.95, Γεωγραφικό μήκος: 491554.49), σε υψόμετρο 396m. Συγκεκριμένα, από 15/04/2005 ως 17/06/2005 ήταν εκτός λειτουργίας και στις 17/06/2005 μεταφέρθηκε στη νέα (σημερινή) του θέση, 190m προς τα νοτιοανατολικά. Τα δεδομένα του R400 για το διάστημα στο οποίο εστιάζει η εργασία είναι τα πληρέστερα.

4.2.1.3 Ντράφι – βροχογράφος R200

Στη θέση αυτή, σε υψόμετρο 203m, και συντεταγμένες 4208256 και 492504.75 γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος αντίστοιχα είναι εγκατεστημένος ο βροχογράφος R200, με συχνότητα καταγραφής της βροχόπτωσης τα δέκα λεπτά. Η λειτουργία του άρχισε στις 11/12/2003, ενώ τα διαθέσιμα στο Διαδίκτυο δεδομένα μέσω ημερησίων τιμών βροχόπτωσης υπολογίζονται για το διάστημα 08:00-08:00.

Η θέση αυτή βρίσκεται στο νότιο τμήμα της λεκάνης. Οι κλίσεις εδώ είναι ηπιότερες και γεωλογικά οι επικρατέστεροι σχηματισμοί είναι κροκαλοπαγείς.

Ο βροχογράφος R200, όπως οι R600 και R400, είναι κατάλληλα σχεδιασμένος ώστε να μειώνεται η αντίσταση του αέρα και η τύρβη, ενώ μέσω των μετρήσεων του προσδιορίζεται η ένταση της βροχόπτωσης. Ο σχεδιασμός του επιτρέπει την τοποθέτηση και εγκατάσταση του με ασφάλεια σε εκτεθειμένα στον άνεμο σημεία. Η μέτρηση της βροχόπτωσης πραγματοποιείται με βάση την αξιόπιστη μέθοδο του εκτεθειμένου δοχείου. Η συλλογή της κατακρήμνισης γίνεται με χωνί και στη συνέχεια εισέρχεται σε ένα από τα δύο δοχεία που βρίσκονται στο κάθε άκρο ενός μικρού βραχίονα που ισορροπεί. Όταν το ένα δοχείο γεμίσει ο βραχίονας αυτός κινείται, αδειάζοντας το πρώτο δοχείο και τοποθετώντας το δεύτερο δοχείο κάτω από το χωνί. Όμοια με ανωτέρω, η επανάληψη αυτής της διαδικασίας είναι ατέρμονη, με κάθε αλλαγή δοχείων να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη ποσότητα βροχής, ενώ κατά την κίνηση του βραχίονα μαγνήτης περνάει πάνω από έναν διακόπτη, προκαλώντας επαφή για κάποια χιλιοστά του δευτερολέπτου και καταγράφοντας τις εναλλαγές των δοχείων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο βροχογράφος μέχρι το 2005, βρισκόταν σε διαφορετική θέση (EGSA87: Γεωγραφικό πλάτος: 4208585.14, Γεωγραφικό μήκος: 492089.362), σε υψόμετρο 220m, ενώ νωρίτερα το ίδιο έτος υπήρξε εκτός λειτουργίας για περίπου 1 εβδομάδα λόγω βανδαλισμού και συντήρησης. Συγκεκριμένα, από 24/03/2005 ως 04/04/2005 ήταν εκτός λειτουργίας και στις 13/07/2005 μεταφέρθηκε στη νέα (σημερινή) του θέση, 500m προς τα

νοτιοανατολικά. Επιπλέον, μετά το καλοκαίρι του 2009 δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις από τον εν λόγω βροχογράφο. Είναι πλέον ανενεργός, καθότι κατεστραμμένος. Δεν έχει αντικατασταθεί μέχρι σήμερα διότι γίνονται σκέψεις για τοποθέτηση νέου βροχογράφου σε άλλη θέση, χρησιμότερη ίσως για τις υδρολογικές μελέτες που γίνονται στην ευρύτερη περιοχή.

4.2.1.4 Εμβαδά πολυγώνων Thiessen

Για λόγους πληρότητας περιλαμβάνονται στην υποενότητα αυτή τα εμβαδά των πολυγώνων Thiessen όπως καταγράφονται επίσημα από την ομάδα CHI και είναι τα εξής: (ισχύουν από τις 13/07/2005 ως και τουλάχιστον το χειμώνα του υδρολογικού έτους 2009-2010 οπότε και καταγράφηκαν οι παρούσες πληροφορίες). Βροχογράφος R200: 4083485 m², Βροχογράφος R400: 6749860 m², Βροχογράφος R600: 4349455 m². Το συνολικό εμβαδό της λεκάνης είναι: 15.182.800 m². Πριν τις 13/07/2005, λόγω μικρής μετατόπισης των βροχομετρικών σταθμών, τα ακριβή εμβαδά των πολυγώνων Thiessen ήταν τα εξής: R200: 4773600 m², R400: 6131200 m², R600: 4278000 m².

Στα πλαίσια της εργασίας τα όρια της πειραματικής λεκάνης προέκυψαν ελαφρώς διαφοροποιημένα από τα καταγεγραμμένα όρια από το Εργαστήριο, γεγονός που οφείλεται στη μεθοδολογία του HEC-GeoHMS για το σχηματισμό των υδατορευμάτων και των υδροκριτών (βλ.Εικόνα 4.9). Εξ ου και τα παραπάνω στοιχεία δεν αξιοποιήθηκαν άμεσα. Υπολογίσθηκαν εξ αρχής νέα βάρη Thiessen για κάθε υπολεκάνη της εργασίας (βλ. §5.3.3.1).

4.2.1.5 Λυκόρεμα – μέτρηση στάθμης υδατορεύματος

Στην τοποθεσία αυτή, με γεωγραφικό πλάτος 4210420.5 και γεωγραφικός μήκος 491973.25 είναι εγκατεστημένος υδρομετρικός σταθμός για τις ανάγκες καταγραφής της παροχής του Λυκορέματος. Συγκεκριμένα, πρόκειται για υπερχειλιστή που κατασκευάστηκε από το Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών και συνοδεύεται από σταθμίμετρο και σταθμηγράφο για τη συνεχή καταγραφή (ανά 10 λεπτά) της στάθμης του νερού πάνω από τη στέψη του υπερχειλιστή. Οι τιμές που λαμβάνονται από τον σταθμηγράφο υφίστανται διόρθωση θέσης (ο μηδενισμός του σταθμηγράφου δε συμπίπτει με τη στέψη του υπερχειλιστή), ενώ η συσκευή είναι τύπου Troll. Το όργανο λειτουργεί από τις 11/01/2005, ενώ δε λειτούργησε για λόγους συντήρησης από τις 11/09/2005 08:00 μέχρι τις 23/09/2005 12:20.

4.2.1.6 Έξοδος λεκάνης X-Basin – πολλαπλές μετρήσεις

Ο εγκατεστημένος εξοπλισμός του υδρομετρικού σταθμού στην έξοδο της Πειραματικής Λεκάνης X-Basin (με γεωγραφικό πλάτος 4207866.5 και γεωγραφικό μήκος 493432.84375) αποτελείται από σταθμηγράφο, σταδία και όργανα καταγραφής της θερμοκρασίας του νερού και του αέρα. Συνολικά μετρώνται η στάθμη του ύδατος στο υδατόρευμα, η ταχύτητα ροής του καθώς και το εμβαδό της ολικής διατομής, επιτρέποντας τον σχετικά ακριβή προσδιορισμό της παροχής χωρίς περιττές υποθέσεις, καθώς και ποιοτικές παράμετροι του νερού. Οι τιμές του σταθμηγράφου, ο οποίος είναι τύπου Geokon, υφίστανται και σε αυτή την περίπτωση διόρθωση θέσης (κυρίως λόγω του γεγονότος ότι ο μηδενισμός του σταθμηγράφου και ο μηδενισμός του σταθμημέτρου δεν συμπίπτουν). Το όργανο είναι εγκατεστημένο στην έξοδο της πειραματικής λεκάνης απορροής και καταγράφει τη στάθμη του νερού ανά δέκα λεπτά από τις 17/1/2003 με μία εκτεταμένη διακοπή μεταξύ 20/5/2003 και 10/10/2003. Επίσης, για λόγους συντήρησης, δεν υπάρχουν καταγραφές για τα διαστήματα από 13/10/2003 04:20 ως 13/10/2003 11:10, από 14/06/2004 10:50 ως 16/06/2004 19:20 και από 07/09/2005 09:00 ως 07/09/2005 15:20. Να σημειωθεί εδώ ότι οι τιμές που διατίθενται στον ερευνητή μέσω της ιστοσελίδας του Εργαστηρίου είναι οι διορθωμένες.

Για τον προσδιορισμό της απορροής χρησιμοποιούνται πρωτίστως οι μετρήσεις μιλίσκου σε διάφορες θέσεις της διατομής του υδατορεύματος. Σε συνδυασμό με τη μέτρηση του βάθους ροής σε τμήματα της ίδιας διατομής, η ταχύτητα ροής αξιοποιείται για την εκτίμηση της παροχής στη θέση της εξόδου της Πειραματικής Λεκάνης X-Basin. Διαθέσιμα δεδομένα υδρομετρήσεων υπάρχουν από τις 22/01/2003, ενώ η διατομή του υδατορεύματος μετριέται περιοδικά και όχι με τη συχνότητα των άλλων μεγεθών. Σε περιπτώσεις πλημμυρών κρίνεται απαραίτητος ο επαναπροσδιορισμός της σχέσης στάθμης-παροχής, αφού είναι συνήθης η αλλαγή της διατομής σε τέτοια φαινόμενα. Διαθέσιμα δεδομένα για τη διατομή υπάρχουν από τις 21/01/2003.

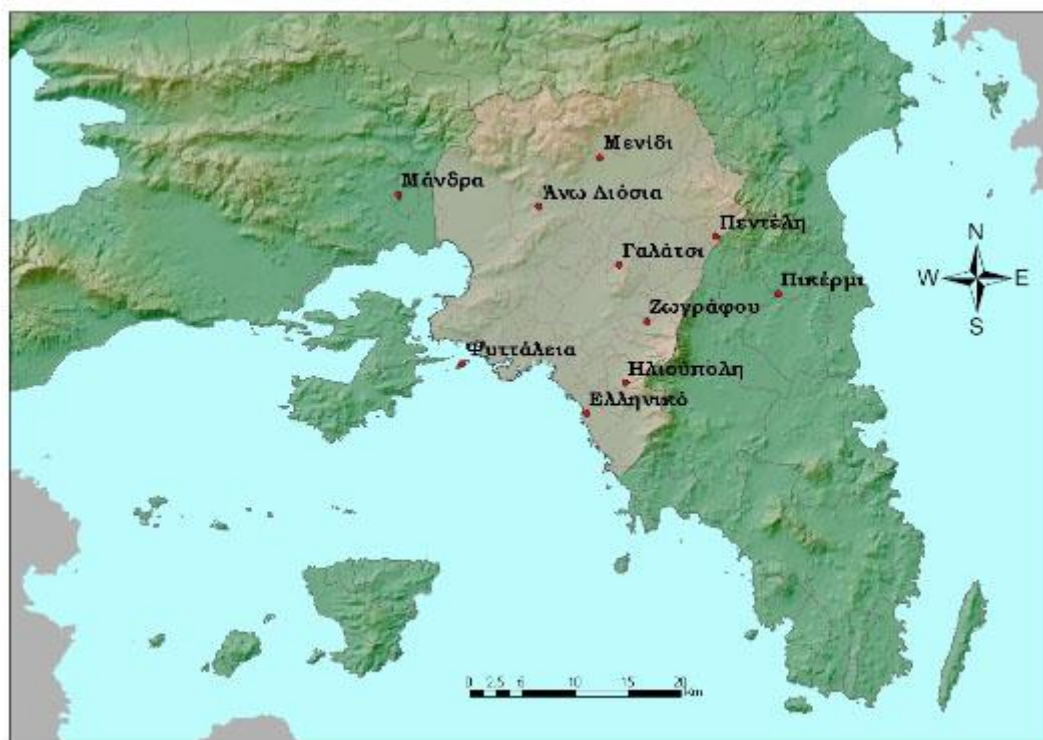
Οι ποιοτικές παράμετροι του νερού που καταμετρώνται αφορούν στο ασβέστιο, το μαγνήσιο, τα νιτρικά, τα νιτρώδη, τα φωσφορικά, την αμμωνία και τα χλωριόντα, και μετρώνται περιοδικά. Συστηματικά, δείγματα νερού στην έξοδο της λεκάνης λαμβάνονται από τις 17/06/2005. Μετρώνται επίσης περιοδικά (κάθε μήνα) φυσικοχημικές παράμετροι του νερού (pH, αγωγιμότητα, αλατότητα, θερμοκρασία). Η θερμοκρασία διορθώνεται με βάση τη θερμοκρασία βαθμονόμησης του οργάνου και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος για επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας των δεδομένων.

4.2.1.7 Πηγή Βαγιάτη – μέτρηση παροχής

Σε υψόμετρο 690 μέτρων και συντεταγμένες 4212893 και 491230.4375 γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος αντίστοιχα, υπάρχει επιφανειακή εμφάνιση πηγής. Η πηγή έχει δημιουργηθεί στην επαφή μεταξύ των στρωμάτων μαρμάρων και των υποκείμενων αδιαπέρατων σχιστολιθικών σχηματισμών που χαρακτηρίζουν την περιοχή. Περιοδικά (κάθε μήνα) μετρώνται τόσο η παροχή της πηγής, όσο και φυσικοχημικές παράμετροι του ύδατος. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν την 30/07/2004.

4.2.2 Δίκτυο METEONET

Στα πλαίσια των ερευνητικών προγραμμάτων του Εργαστηρίου Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων έχει αναπτυχθεί το δίκτυο τηλεμετρικών υδρομετεωρολογικών σταθμών METEONET στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας (βλ. Εικόνα 4.10). Πρόκειται για 10 σταθμούς οι οποίοι λειτουργούν περίπου από το 2005 δίνουν στοιχεία για μία έκταση περίπου 687 km² (βλ. Πίνακα 4.1).



Εικόνα 4.11 Οι σταθμοί του δικτύου METEONET
[Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων ΕΜΠ]

Α/Α	Θέση	Έναρξη λειτουργίας	Υψόμετρο	Συντεταγμένες (ΕΓΣΑ '87)	
			(m)	Latitude (m)	Longitude (m)
1	Ζωγράφου	05-08-2005	181	481137,0	4203010,6
2	Μενίδι	25-02-2005	210	476525,5	4217394,2
3	Ψυττάλεια	25-02-2005	20	463569,2	4199167,6
4	Ελληνικό	25-02-2005	6	475537,3	4194336,4
5	Ηλιούπολη	20-05-2005	206	478845,12	4196491,25
6	Μάνδρα	06-07-2005	258	461612,23	4219259,46
7	Γαλάτσι	15-06-2005	176	478560,86	4208815,54
8	Πεντέλη	08-11-2005	729	487886,13	4215140,08
9	Πικέρμι	21-12-2005	133	493588,36	4205655,86
10	Ανω Λιόσια	21-02-2006	184	470969,29	4213921,93

**Πίνακας 4.1 Συνοπτικά στοιχεία των σταθμών του δικτύου ΜΕΤΕΟΝΕΤ
[Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων ΕΜΠ]**

Οι θέσεις των σταθμών έχουν επιλεγεί ώστε τα υψόμετρα να είναι αντιπροσωπευτικά της βροχόπτωσης και οι σταθμοί να είναι εύκολα προσβάσιμοι και ασφαλείς. Έχουν επίσης ληφθεί υπόψη τα κριτήρια και οι προδιαγραφές του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (World Meteorological Organization, WMO) για την τοπογραφική χωροθέτηση των σταθμών. Σε κάθε σταθμό μετρώνται ανά δεκάλεπτο η βροχόπτωση, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, ανεμολογικά στοιχεία και η ηλιακή ακτινοβολία, ενώ συγκεντρώνονται και στοιχεία για τη διάρκεια της ηλιοφάνειας (βλ. Εικόνα 4.11). Οι τιμές των μετρήσεων υφίστανται αυτόματη επεξεργασία και αποστέλλονται στην κεντρική μονάδα συλλογής των δεδομένων.



Εικόνα 4.12 Γενική διάταξη των αισθητήρων μέτρησης των σταθμών του δικτύου METEONET

Υπόμνημα Εικόνας 4.2:

- [1] Ανεμόμετρο και ανεμοδείκτης
- [2] Πυρηλιόμετρο
- [3] Πυρανόμετρο
- [4] Φωτοβολταϊκό στοιχείο
- [5] Θερμογράφος
- [6] Πυρακτινόμετρο
- [7] Καταγραφέας δεδομένων (data logger)
- [8] Εφεδρικός βροχογράφος
- [9] Πρωτεύων βροχογράφος

Για την εξασφάλιση σχετικά μεγάλης ακρίβειας και συνέχειας στις μετρήσεις βροχοπτώσεων, κάθε σταθμός του δικτύου έχει εγκατεστημένους δύο διαφορετικών τύπων βροχογράφους (βλ. Εικόνα 4.12). Περισσότερες λεπτομέρειες για τη λειτουργία των εν λόγω συσκευών παραλείπεται. Αξίζει να σημειωθεί όμως ότι χαρακτηρίζονται από σφάλμα στις μετρήσεις μικρότερο του 5% και ότι η επιφάνεια συλλογής είναι αρκετή ώστε να καταγράφονται και πολύ ασθενείς βροχοπτώσεις (κατώφλι 0,2mm και 0,1mm).



Εικόνα 4.13 Βροχογράφοι σταθμών δικτύου METEONET

4.2.2.1 Σταθμός Πικερμίου

Από τους σταθμούς του δικτύου METEONET μόνο ο σταθμός του Πικερμίου, ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας της περιοχής, έχει ληφθεί υπόψη στη διαμόρφωση της βροχοπτώσης της υπό μελέτη λεκάνης απορροής (βλ. Εικόνα 4.10).

4.2.3 Πρόγραμμα FLADAR

Το πρόγραμμα FLADAR είναι ένα τετραετές πρόγραμμα που πραγματοποιείται από την ομάδα CHI του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος με βασικό στόχο την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου στην περιοχή της Ανατολικής Αττικής, την οποία μελετά και η παρούσα εργασία. Στο πρόγραμμα αυτό τα δεδομένα βροχοπτώσεων προέρχονται από ραντάρ και αξιοποιούνται έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία και έλεγχο με βάση τα βροχομετρικά δεδομένα του δικτύου METEONET. Στα πλαίσια του προγράμματος FLADAR έχουν εγκατασταθεί και καταγράφουν μετρήσεις από το 2008 επιπλέον σταθμοί μέτρησης της απορροής, οι οποίοι καλύπτουν το ρέμα της Ραφήνας. Δεδομένα απορροών από τους σταθμούς Πικερμίου και Ραφήνας διατέθηκαν για της ανάγκες της παρούσας εργασίας (βλ. Εικόνα 4.10).

4.2.4 Δίκτυο Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών

Στην περιοχή της Πειραματικής Λεκάνης X-Basin είναι εγκατεστημένο δίκτυο μετρήσεων υδρολογικού ενδιαφέροντος από το Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Δεδομένα και από αυτό το δίκτυο διατέθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, κυρίως στη θέση του Λυκορέματος.

Κεφάλαιο 5: Μεθοδολογία

5 Μεθοδολογία

Στην παράγραφο 2.4 αναφέρονται επιγραμματικά τα χαρακτηριστικά των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία. Δεν έγινε λεπτομερής αναφορά στη μεθοδολογία των λογισμικών, καθώς αναγράφεται σαφώς στα πολλαπλά στα εγχειρίδια χρήσης τους, καθώς και στις ιστοσελίδες των σχεδιαστών, όπου διατίθεται βοηθητικό υλικό για την αποδοτικότερη και ορθότερη χρήση.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται ο τρόπος που επιλέχθηκαν οι διάφορες παράμετροι, οι παραδοχές που πραγματοποιήθηκαν σε διάφορα στάδια της εφαρμογής των προγραμμάτων, καθώς και άλλες μεθοδολογίες υπολογισμού οι οποίες ξεφεύγουν από την απλή εφαρμογή των εγχειριδίων χρήσης. Δε γίνεται αναλυτική παρουσίαση των σταδίων εφαρμογής της εργασίας, αλλά μία επιλογή των σημείων εκείνων τα οποία αποτέλεσαν κέντρο συζήτησης και αιτίες εκτεταμένης αναζήτησης υλικού στο Διαδίκτυο προκειμένου να προσδιοριστούν οι βέλτιστοι τρόποι για τη συνέχιση της εργασίας.

Παρουσιάζονται επίσης τα γεγονότα βροχόπτωσης που επιλέχθηκαν για την εφαρμογή της εργασίας, τα βασικά χαρακτηριστικά τους και τα κριτήρια επιλογής τους. Ο βασικός άξονας της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία συνοπτικά απεικονίζεται στο (κοινό) διάγραμμα των Εικόνων 1.2 του Κεφαλαίου της Εισαγωγής και 4.4 του Κεφαλαίου 4 σχετικά με την Περιοχής Μελέτης, στο οποίο ο αναγνώστης παραπέμπεται για την κατανόηση της δομής και των επιδιώξεων της εργασίας.

5.1. Στήσιμο μοντέλου λεκάνης απορροής σε περιβάλλον GIS με χρήση εργαλείων GIS και της επέκτασης HEC-GeoHMS

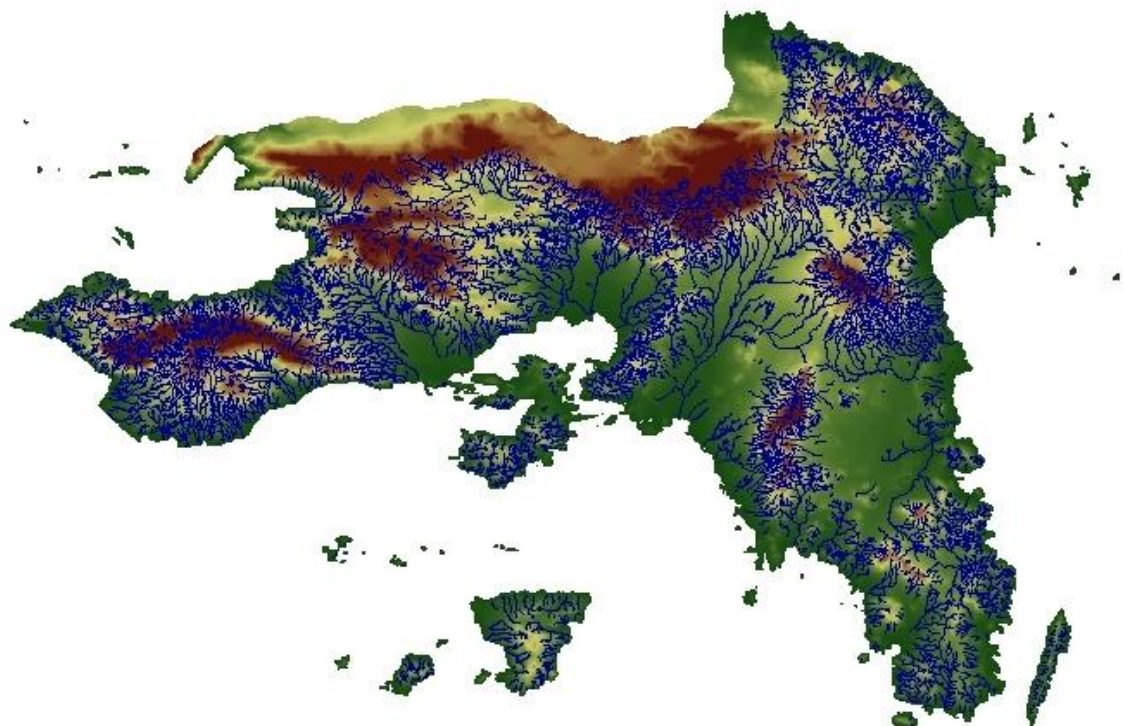
Σε περιβάλλον GIS και μέσω της επέκτασης HEC-GeoHMS στήνεται το (υδρολογικό) μοντέλο της λεκάνης απορροής της εργασίας, το οποίο στη συνέχεια εισάγεται σε περιβάλλον HEC-HMS για περαιτέρω επεξεργασία. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και τα καταγεγραμμένα υδατορεύματα είναι αρκετά για τη διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής σε περιβάλλον GIS. Επιπλέον εδαφικά δεδομένα και δεδομένα χρήσεων γης αξιοποιούνται για τον υπολογισμό των υδρολογικών ελλειμμάτων. Τα περισσότερα από τα παραπάνω δεδομένα διατέθηκαν από το Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ. Όπου η πηγή δεδομένων διαφοροποιείται, αναφέρεται ξεκάθαρα στο κείμενο της παρούσας εργασίας ή ως υποσημείωση σε αυτό.

5.1.1. Τροποποίηση της ανάλυσης του ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε περιβάλλον GIS

Το σχετικά αδρό αρχικό ψηφιακό μοντέλο εδάφους με κανάβο 50m (50x50) δε διευκολύνει τη συσχέτιση με το λεπτομερές και πυκνό υδρογραφικό δικτύο που έχει καταγραφεί σε προηγούμενες μελέτες και το οποίο χρησιμοποιείται στην εργασία. Για το λόγο αυτό παράγεται στο GIS νέο ψηφιακό μοντέλο εδάφους με κανάβο 5m (5x5) χωρίς να αλλοιώνεται η πληροφορία ή η ακρίβεια του. Μέσω της εντολής Resample διαμορφώνεται ένα νέο αρχείο στο οποίο τα υψομετρικά δεδομένα των θέσεων είναι πανομοιότυπα, το μικρότερο όμως μέγεθος των κελιών επιτρέπει την «υδρολογική διόρθωση» του ψηφιακού μοντέλου εδάφους με μεγαλύτερη ακρίβεια. Είναι εύκολα κατανοητό ότι το νέο αρχείο είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το αρχικό και ότι οι νέοι χρόνοι επεξεργασίας εξαιρετικά αυξημένοι. Για το λόγο όπου οι διαδικασίες ήταν επαναληπτικές ή δοκιμαστικές με σκοπό τη σύγκριση των επιμέρους αποτελεσμάτων, άλλοτε χρησιμοποιήθηκε το αδρό και άλλοτε το λεπτομερές ψηφιακό μοντέλο. Να σημειωθεί εδώ ότι, παρόλο που σε διάφορα σημεία της εργασίας πιθανώς αναφέρονται παράμετροι και για τους δύο κανάβους του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, εν τέλει, το ψηφιακό μοντέλο που επιλέχθηκε για την ολοκλήρωση της εργασίας είναι το 5x5.

5.1.2. Κατάρτιση «υδρολογικά διορθωμένου» ψηφιακού μοντέλου εδάφους με χρήση της επέκτασης HEC-GeoHMS

Με εισόδους το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και τα καταγεγραμμένα υδατορεύματα στη λεκάνη απορροής διαμορφώνεται το υδρολογικά τροποποιημένο («υδρολογικά διορθωμένο» – hydrologically corrected) ψηφιακό μοντέλο εδάφους (βλ. Εικόνα 5.1). Μέσω των εντολών της επέκτασης HEC-GeoHMS καταρτίζεται ένα «νέο» ψηφιακό μοντέλο εδάφους προσαρμοσμένο στα υδατορεύματα τα οποία έχουν προκύψει από προγενέστερες μελέτες. Στόχος είναι τα υδατορεύματα που στηρίζονται σε τοπογραφικά δεδομένα (διεύθυνση και μέγεθος κλίσεων, συσσώρευση ροής κλπ) και προκύπτουν κατά την εφαρμογή των προγραμμάτων να είναι κατά το δυνατόν όμοια ή παρόμοια με τα καταγεγραμμένα.



Εικόνα 5.1 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους Αττικής και καταγεγραμμένο υδρογραφικό δίκτυο

Η τροποποίηση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους πραγματοποιείται μέσω της επέκτασης HEC-GeoHMS με μεθοδολογία διαφορετική από το «κάψιμο» (burning) των υδατορευμάτων που αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο τροποποίησης του ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε περιβάλλον Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών. Θέτοντας τρεις παραμέτρους επιλέγεται το μέγεθος της κατάπτωσης του υψομέτρου στις θέσεις των ποταμών καθώς και ο τρόπος που θα πραγματοποιηθεί η κατάπτωση αυτή (βλ. Εικόνα 5.2).

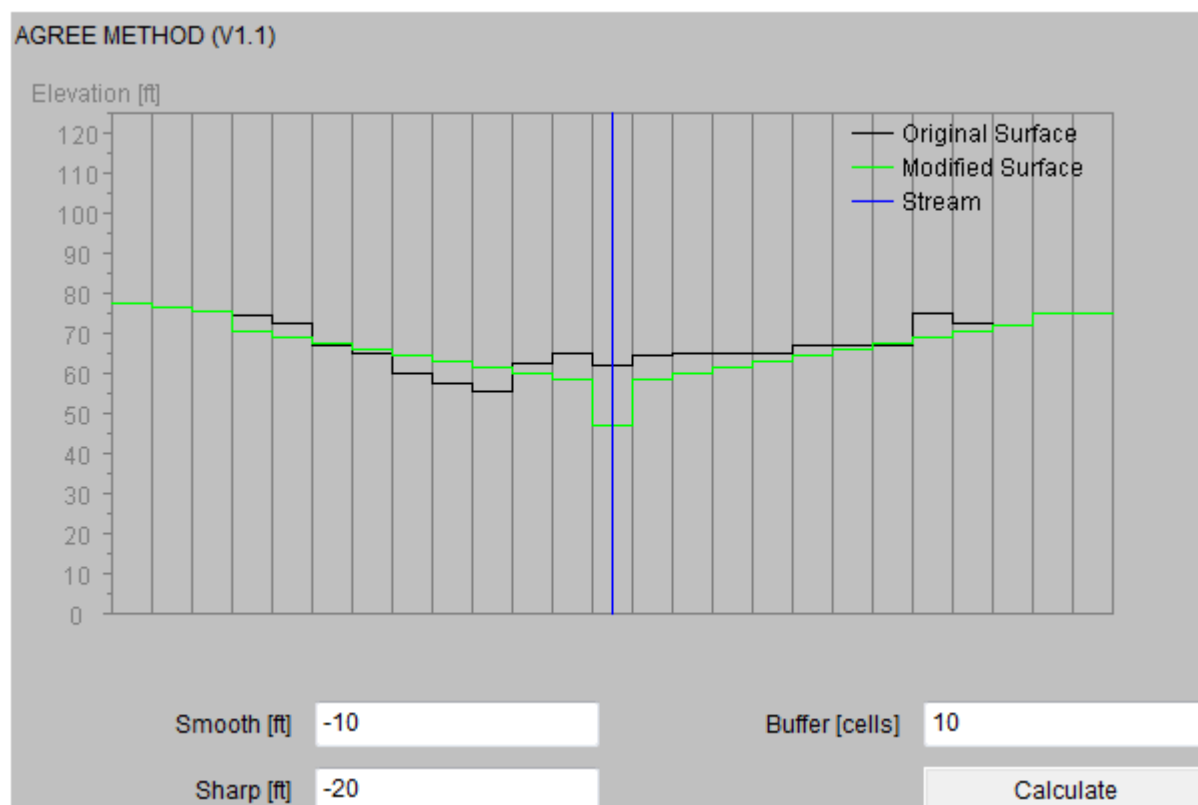
- Η πρώτη παράμετρος (buffer cells) αφορά στον αριθμό των κελιών του ψηφιακού μοντέλου εδάφους τα οποία θα επηρεαστούν από τη διαδικασία. Η τιμή της καθορίζεται από το σφάλμα μεταξύ του ψηφιακού μοντέλου και των καταγεγραμμένων υδατορευμάτων. Για τον υπολογισμό του σφάλματος έγινε εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου από το αρχικό ψηφιακό μοντέλο εδάφους (50x50) και εποπτική σύγκριση αυτού με το καταγεγραμμένο υδρογραφικό δίκτυο σε διάφορες θέσεις. Η μέγιστη απόσταση μεταξύ των δύο δικτύων βρέθηκε περίπου ίση με 100m, με συνηθέστερες αποκλίσεις της τάξης των 50m, 60m και 70m. Κρίθηκε πως οι τιμές αυτές δικαιολογούνται από το αρκετά απότομο ανάγλυφο στην περιοχή μελέτης και πως η έκταση που επηρεάζεται από την κατάπτωση, δεξιά και αριστερά της κοίτης του υδατορεύματος, δε θα πρέπει να υπερβαίνει τα 50-100m συνολικά. Η τιμή που τελικά επιλέχθηκε είναι 2 κελιά για ανάλυση 50x50, με τροποποίηση των υψομέτρων για απόσταση περίπου 75m σε κάθε πλευρά, και 15 κελιά για ανάλυση 5x5, με επίδραση περίπου

70m δεξιά και αριστερά [σημείωση: η παράμετρος buffer cells περιλαμβάνει και το ίδιο το κελί όπου απαντάται η κοίτη του υδατορεύματος, δηλαδή, επιλέγοντας την τιμή 15 επηρεάζονται 14 κελιά δεξιά του υδατορεύματος, το κελί της κοίτης και 14 κελιά αριστερά αυτού].

- Η δεύτερη παράμετρος αφορά το μέγεθος της κατάπτωσης της κοίτης που θα ισοκατανεμηθεί στα παραπάνω κελιά (smooth drop). Διαπιστώθηκε από την παραπάνω σύγκριση ότι οι υψομετρικές διαφορές μεταξύ του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και των καταγεγραμμένων υδατορευμάτων είναι της τάξης των 1-2m, προσεγγίζοντας κατά θέσεις τα 4-5m σε περιοχές μεγάλων κλίσεων. Επελέγη η ομαλή κατάπτωση της κοίτης κατά 4m ώστε να αποφευχθούν οι μεγάλες αποκλίσεις χωρίς να αλλοιωθεί σημαντικά το ψηφιακό μοντέλο στις θέσεις μικρών κλίσεων.

- Η τελευταία παράμετρος επιτρέπει τον ορισμό επιπλέον κατάπτωσης του υψομέτρου του κελιού όπου απαντάται η κοίτη του υδατορεύματος (sharp drop). Αποτελεί μία επιπλέον εγγύηση ότι θα διατηρηθεί η πληροφορία των καταγεγραμμένων υδατορευμάτων, αλλά η μηδενική τιμή δεν είναι απαγορευτική. Η σύσταση για μελέτες δύο διαστάσεων (2-D) είναι η τιμή αυτή να είναι εξαιρετικά μεγάλη (της τάξης των 1000ft). Λόγω της υδραυλικής μελέτης που προτείνεται ως συνέχεια της παρούσας εργασίας και του σχετικά αδρού ψηφιακού μοντέλου εδάφους κρίθηκε ότι, να μεν η τιμή αυτή δε θα πρέπει να είναι μηδενική, αλλά ούτε και να απέχει σημαντικά από την πραγματική τάξη μεγέθους κατάπτωσης της κοίτης των υδατορευμάτων στην περιοχή. Επελέγη με βάση τα παραπάνω τιμή ίση με 2m.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι οι αρχικές τιμές του προγράμματος έχουν διαμορφωθεί για την πραγματικότητα των υδρογραφικών δικτύων στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, όπου και καταρτίστηκαν τα προγράμματα HEC. Το τοπογραφικό με τις εξαιρετικά απότομες (σχεδόν κατακόρυφες) όχθες των μεγάλων ποταμών των ΗΠΑ είναι εμφανώς διαφοροποιημένο από το αντίστοιχο ελλαδικό. Η επιλογή των παραμέτρων, λοιπόν, δε θα πρέπει να περιορίζεται στην υιοθέτηση των αρχικών τιμών του προγράμματος, αλλά να πραγματοποιείται με προσοχή και πάντοτε με γνώμονα τις τοπικές γεωλογικές και ορογραφικές συνθήκες.

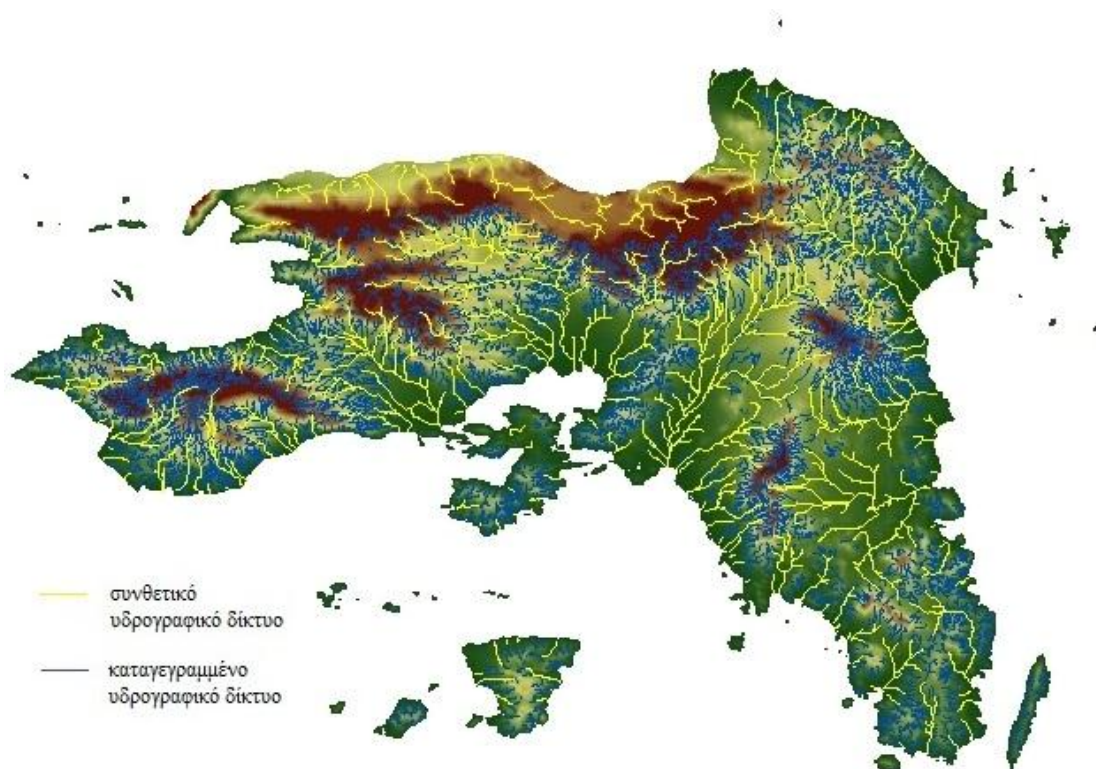


Εικόνα 5.2 Παράδειγμα υδρολογικής τροποποίησης ψηφιακού μοντέλου εδάφους με βάση το καταγεγραμμένο υδρογραφικό δίκτυο [Hellweger, 1997]

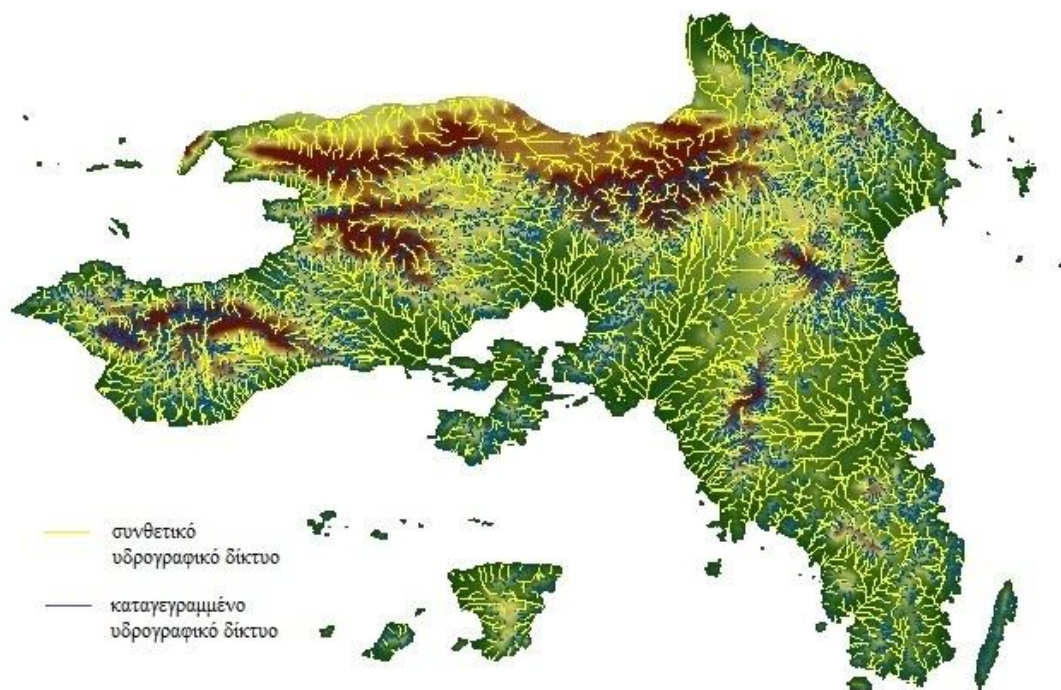
5.1.3. Επιλογή “κατωφλιού” υδατορευμάτων

Για την τελική διαμόρφωση του δικτύου των υδατορευμάτων σε μια περιοχή απαιτείται η επιλογή “κατωφλιού” υδατορευμάτων (stream threshold). Το “κατώφλι” αποτελεί το όριο εκκίνησης ενός υδατορεύματος, και μπορεί να εκφραστεί είτε σε αριθμό κελιών του ψηφιακού μοντέλου εδάφους των οποίων η απορροή καταλήγει στο κελί “εκκίνησης υδατορεύματος” ή σε έκταση τμήματος λεκάνης απορροής που καταλήγει στο κελί “εκκίνησης υδατορεύματος”. Στην παρούσα εργασία το δίκτυο των υδατορευμάτων της περιοχής μελέτης πάρθηκε έτοιμο. Στηρίζεται σε προηγούμενες μελέτες των ερευνητικών προγραμμάτων του Τομέα Υδάτινων Πόρων και Περιβάλλοντος και αεροφωτογραφίες της περιοχής. Το καταγεγραμμένο υδρογραφικό δίκτυο είναι πολύ πυκνό στην βόρεια και κεντρική περιοχή της λεκάνης μελέτης, και σχεδόν απόν στη νότια. Έγινε προσπάθεια να προσεγγιστεί το βόρειο και κεντρικό κομμάτι, χωρίς να δημιουργηθεί μεγάλο πλήθος πλασματικών υδατορευμάτων στο νότιο (βλ. Εικόνες 5.3, 5.4). Έπειτα από πολλαπλές και χρονοβόρες δοκιμές επιλέχθηκε κατώφλι ίσο με 40000 κελιά (για ψηφιακό μοντέλο εδάφους 5x5), που αντιστοιχεί σε έκταση περίπου ίση με 1km² (βλ. Εικόνα 5.6). Το κατώφλι μπορεί να καθοριστεί είτε στο αρχικό ψηφιακό μοντέλο εδάφους, είτε, σε μεταγενέστερο στάδιο, στο

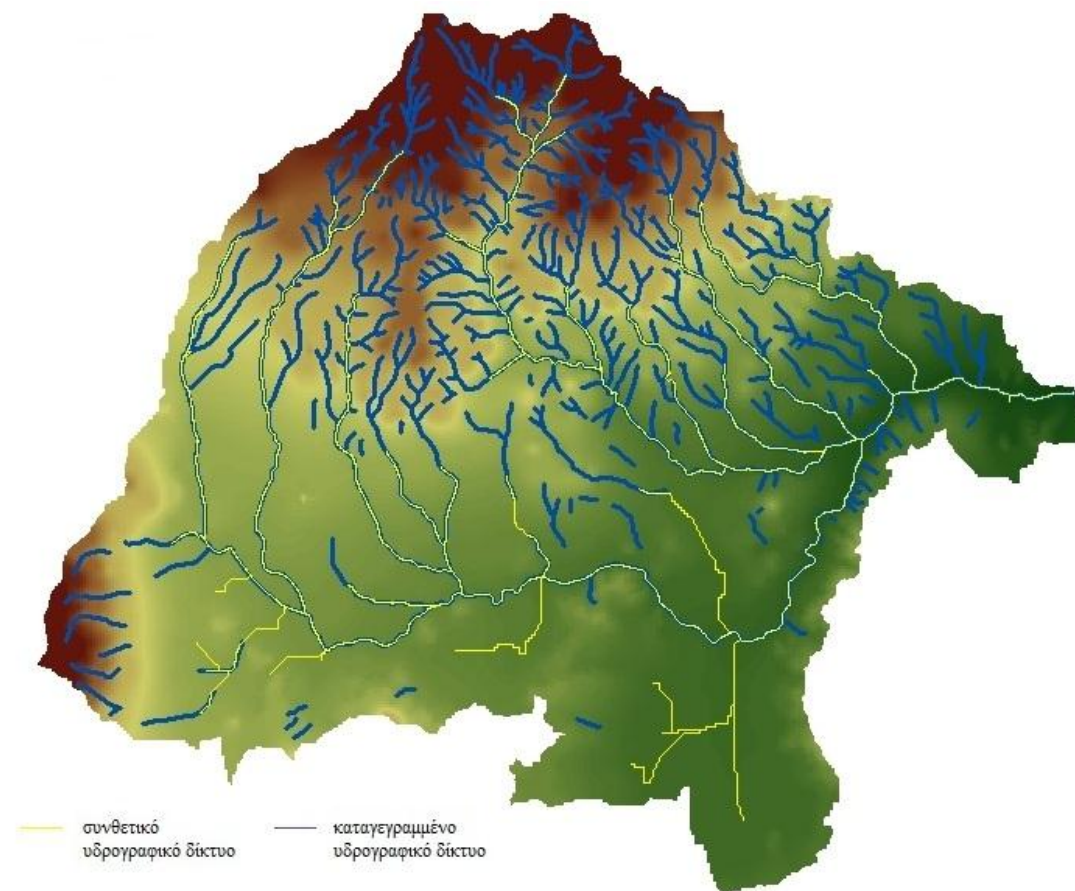
τμήμα του ψηφιακού μοντέλου εδάφους που αντιστοιχεί στην περιοχή μελέτης. Λόγω των εξαιρετικά αυξημένων υπολογιστικών χρόνων της δημιουργίας του υδρογραφικού δικτύου (μερικές ώρες) είναι προτιμότερο το κατώφλι να καθορίζεται κατά τη δημιουργία του αρχείου-project του HEC-GeoHMS, ώστε η διαδικασία να περιορίζεται στο τμήμα του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής μελέτης. Ας σημειωθεί εδώ ότι σε περιβάλλον HEC-HMS είναι δυνατή η εκ των υστέρων διόρθωση του υδρογραφικού δικτύου, το οποίο πλέον παίζει ρόλο περισσότερο εποπτικό και λιγότερο ουσιαστικό (τα στοιχεία τους αξιοποιούνται για την κατάρτιση των συνδέσμων-links του μοντέλου).



Εικόνα 5.3 Σύγκριση καταγεγραμμένου και αδρού συνθετικού υδρογραφικού δικτύου



Εικόνα 5.4. Σύγκριση καταγεγραμμένου και λεπτομερούς συνθετικού υδρογραφικού δικτύου

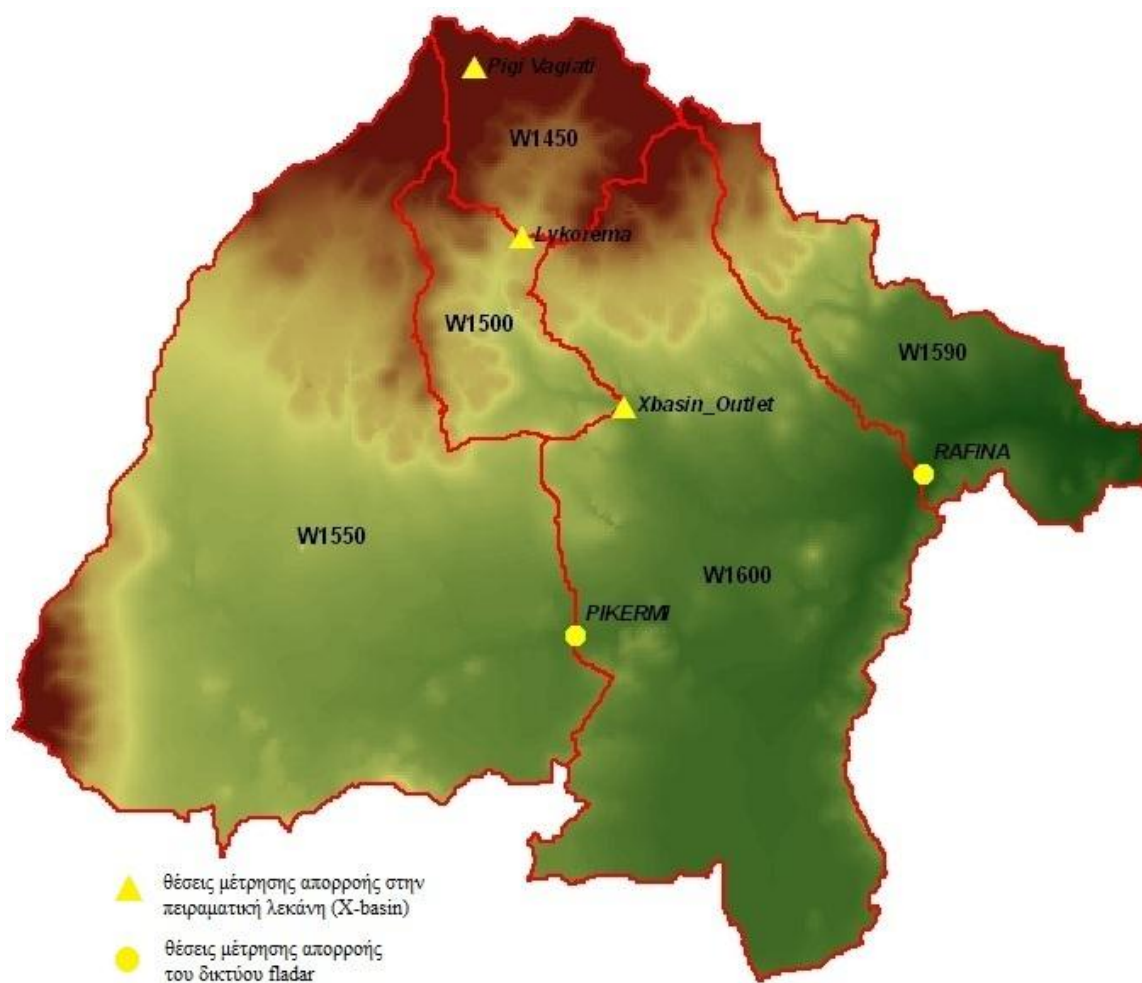


Εικόνα 5.5 Καταγεγραμμένο και συνθετικό υδρογραφικό δίκτυο στη λεκάνη απορροής της μελέτης

5.1.4. Διαμόρφωση λεκάνης, υπολεκανών απορροής και υδατορευμάτων στην περιοχή μελέτης

Η λεκάνη απορροής μελέτης προκύπτει εύκολα ακολουθώντας τις οδηγίες των εγχειριδίων χρήσης. Για να εξασφαλιστεί ο κατά τον δυνατόν σωστότερος και ακριβέστερος προσδιορισμός της λεκάνης το ψηφιακό μοντέλο εδάφους καλό θα είναι να έχει διαμορφωθεί και ελαφρώς εκτός των ορίων της ευρύτερης λεκάνης απορροής [Mark et al., 2004]. Αυτό είναι απαραίτητο για να μην χάνεται η πληροφορία κατεύθυνσης της ροής στα κελιά που βρίσκονται “οριακά” εκτός της λεκάνης, δηλαδή στις θέσεις του υδροκρίτη στο σύνορο της λεκάνης. Εν προκειμένω, το αρχικό ψηφιακό μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιήθηκε είναι πολύ ευρύτερο σε έκταση από την περιοχή μελέτη, με αποτέλεσμα η πληροφορία αυτή να μην έχει χαθεί. Διατηρείται αυτόματα κατά την εφαρμογή των εντολών της εργαλειοθήκης ArcHydro και της εργαλειοθήκης του HEC-GeoHMS.

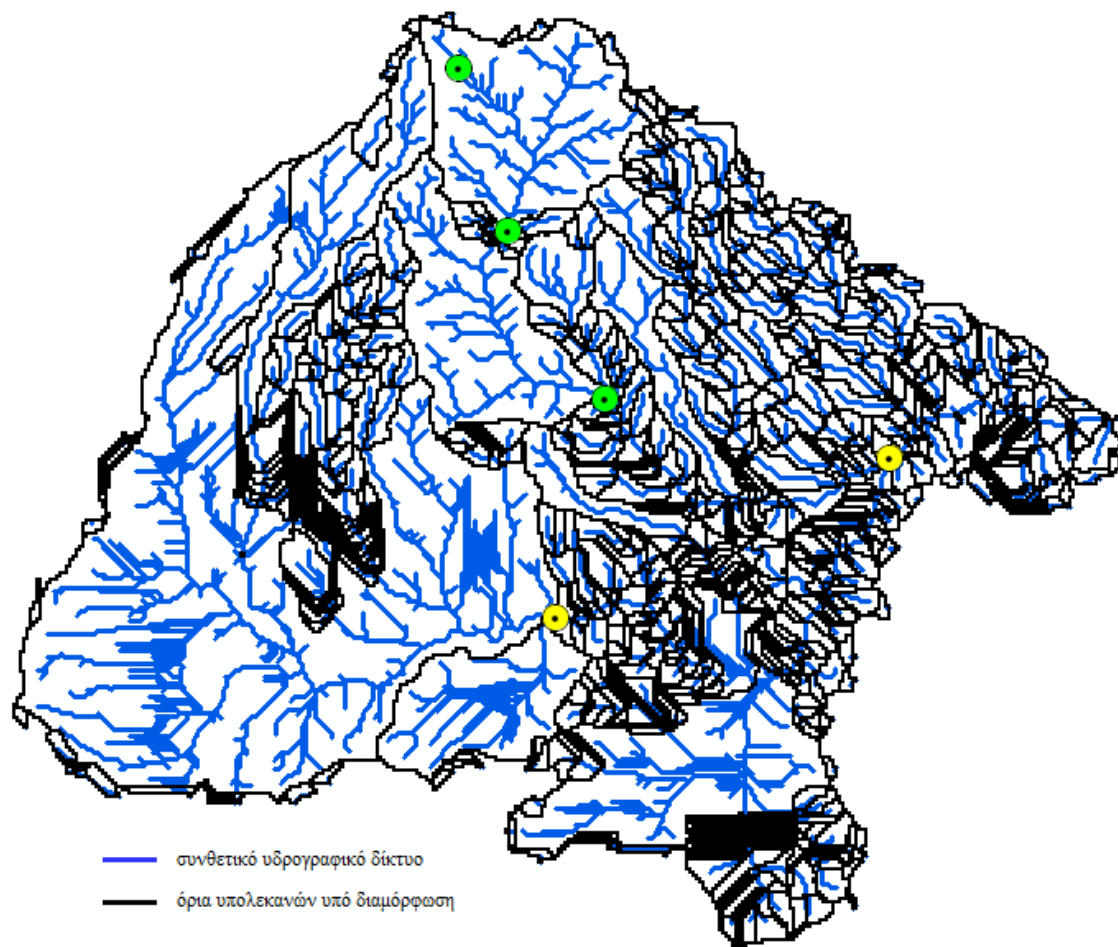
Οι θέσεις εξόδου των υπολεκανών διαμορφώθηκαν με βάση τις θέσεις μέτρησης απορροών (βλ. Εικόνα 5.6 και Πίνακα 5.1). Το πλήθος των υπολεκανών που δημιουργείται αυτόματα από την εφαρμογή των εντολών του HEC-GeoHMS ενοποιείται και επαναδιαχωρίζεται στις θέσεις αυτές. Επιπλέον δημιουργείται μία υπολεκάνη με τελική έξοδο στη θάλασσα στην περιοχή της Ραφήνας, για την οποία δεν υπάρχουν μετρήσεις. Οι θέσεις αυτές μεταβιβάζονται αυτόματα σε περιβάλλον HEC-HMS, όπου αποτελούν “κόμβους” και θέσεις υπολογισμού πλημμυρογραφημάτων. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι οι υπολεκάνες που προκύπτουν αυτόματα κατά την εφαρμογή των εγχειριδίων χρήσης διαμορφώνονται με κάθε συμβολή υδατορευμάτων να θεωρείται έξοδος υπολεκάνης. Με λίγα λόγια μικρό “κατώφλι” υδατορευμάτων που οδηγεί σε λεπτομερές υδρογραφικό δίκτυο, οδηγεί και σε έναν εξαιρετικά μεγάλο αριθμό υπολεκανών, χωρίς ουσιαστική φυσική σημασία, οι οποίες πρέπει στη συνέχεια να ενοποιηθούν/συγχωνευθούν μέσω μιας χρονοβόρας χειρονακτικής διαδικασίας (βλ. Εικόνα 5.7).



Εικόνα 5.6 Διαμόρφωση υπολεκανών λεκάνης απορροής μελέτης

Κωδικός υπολεκάνης	Όνομα υπολεκάνης	Έκταση υπολεκάνης (km ²)
W1450	Βόρεια πειραματική (xbasin)	8,0
W1500	Νότια πειραματική (xbasin)	7,1
W1550	Δυτική (έξοδος στο Πικέρμι)	53,6
W1590	Ανατολική (έξοδος στη θάλασσα)	14,1
W1600	Κεντρική (έξοδος ανάντη Ραφήνας)	44,6

Πίνακας 5.1 Υπολεκάνες λεκάνης απορροής μελέτης

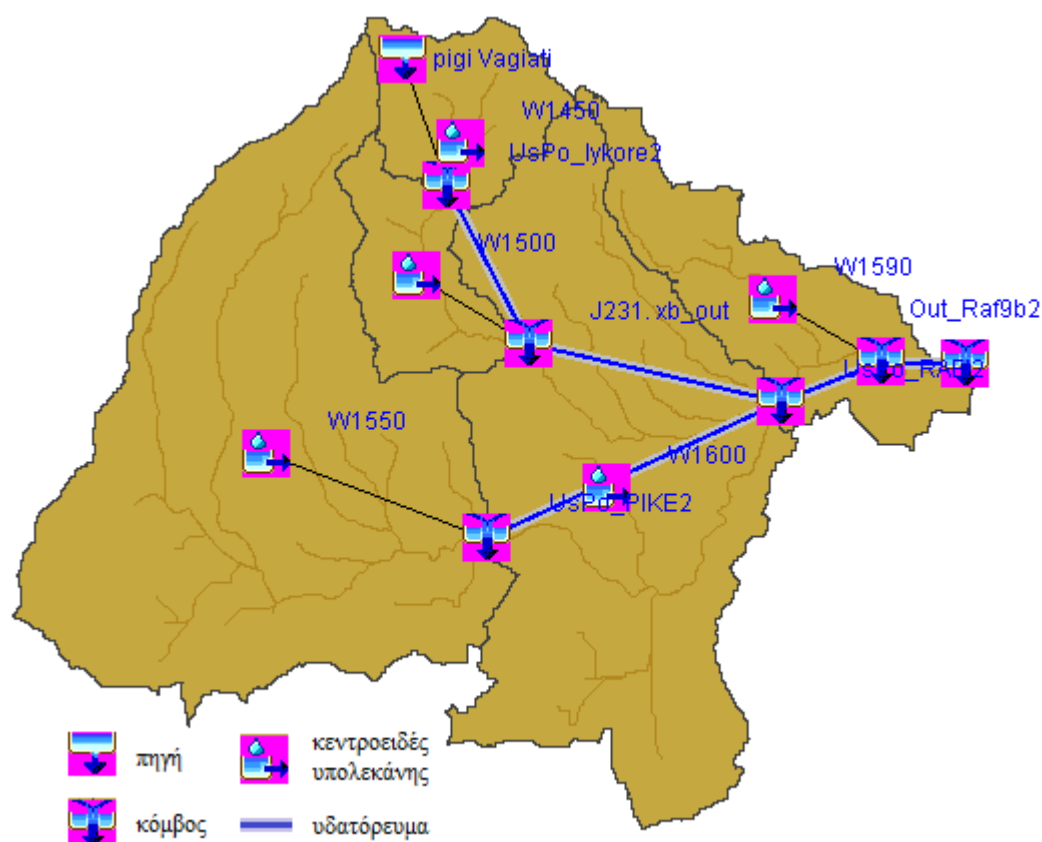


Εικόνα 5.7 Διαδικασία συγχώνευσης υπολεκανών πυκνού συνθετικού υδρογραφικού δικτύου

Εκτός από την ενοποίηση των υπολεκανών, στο περιβάλλον του HEC-GeoHMS είναι δυνατή και η ενοποίηση ή ο διαχωρισμός των υδατορευμάτων, με κριτήριο τις επιθυμητές θέσεις υπολογισμού πλημμυρογραφημάτων στη συνέχεια. Έτσι, εάν κατά μήκος κάποιου υδατορεύματος υπάρχει ενδιαφέρον για τη μορφή του πλημμυρογραφήματος όχι μόνο στην έξοδο της υπολεκάνης αλλά και σε ενδιάμεσες θέσεις, είναι δυνατός ο “τεμαχισμός” των υδατορευμάτων. Στην παρούσα εργασία, λόγω του ενδιαφέροντος για εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου και τη συνέχιση της εργασίας για τον υπολογισμό της πλημμυρικής διακινδύνευσης, εκτός των εξόδων των υπολεκανών επιλέχθηκε μία ακόμη θέση υπολογισμού πλημμυρογραφημάτων. Η θέση αυτή προσδιορίζεται ως το σημείο εκείνο του υδατορεύματος της ανατολικής υπολεκάνης που βρίσκεται ακριβώς ανάντη από τον αστικό ιστό της Ραφήνας με βάση τις χρήσεις γης Corine. Προτείνεται ως κατάλληλη θέση για την εκτίμηση του πλημμυρικού όγκου που καταλήγει στον αστικό ιστό. Τα κύρια χαρακτηριστικά των υδατορευμάτων καταγράφονται στον παρακάτω Πίνακα 5.2 (βλ. και Εικόνα 5.8).

Υπολεκάνη υδατορεύματος	Υδατό-ρευμα	Περιγραφή θέσης	Μήκος (km)	Κλίση
W1500 – ν. xbasin	R90	Λυκορέμα – Έξοδος xbasin	4,2	0,03
W1600 – κεντρική	R330	Έξοδος xbasin – Ραφήνα fladar	5,9	0,02
W1600 – κεντρική	R540	Πικέρμι fladar – Ραφήνα fladar	8,9	0,008
W1590 - ανατολική	R270	Ραφήνα fladar – Αστικός ιστός	2,3	0,007
W1590 - ανατολική	R240	Αστικός ιστός – Θάλασσα	2,0	0,005

Πίνακας 5.2 Στοιχεία υδατορευμάτων λεκάνης απορροής μελέτης



Εικόνα 5.8 Κόμβοι εκτίμησης πλημμυρογραφημάτων λεκάνης απορροής μελέτης

5.1.5. Επιλογή μεθόδου υπολογισμού συντεταγμένων του κεντροειδούς των υπολεκανών

Η θέση του κεντροειδούς (centroid), η οποία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση παραμέτρων του μοντέλου σε περιβάλλον HEC-HMS, έγινε με τη μέθοδο του κέντρου βάρους. Άλλες εναλλακτικές είναι η μέθοδος της μέγιστης υδάτινης διαδρομής και η μέθοδος της “μισής έκτασης της λεκάνης”, οι οποίες θεωρήθηκε ότι δεν αποδίδουν ορθά τη θέση του

κεντροειδούς για τις μικρές και σχετικά ομοιόμορφες από άποψη διαστάσεων μήκους-πλάτους υπολεκάνες του μοντέλου.

5.1.6. Συμβουλές εφαρμογής του εγχειριδίου χρήσης της επέκτασης HEC-GeoHMS

Η επακριβής εφαρμογή των σταδίων του εγχειριδίου χρήσης και των υπολοίπων επεξηγηματικών αρχείων για την εκκίνηση συγκεκριμένης μελέτης (project) σε περιβάλλον GIS με χρήση της επέκτασης HEC-GeoHMS εξασφαλίζει σε μεγάλο βαθμό την επιτυχημένη διαμόρφωση των αρχείων που χρειάζονται για την περαιτέρω πρόοδο της εργασίας σε περιβάλλον HEC-HMS. Κατά την εφαρμογή αυτή, όμως, τα διαθέσιμα γεωγραφικά δεδομένα δε θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως “ορθά” και έτοιμα για εισαγωγή στο πρόγραμμα (input) δεδομένα. Πρέπει να ελέγχονται τόσο ως προς τη συνέπειά τους με το γεωγραφικό σύστημα στο οποίο εφαρμόζεται η εργασία, όσο και ως προς τη συνέπειά τους με άλλα γεωγραφικά στοιχεία με τα οποία συσχετίζονται. Για παράδειγμα, στην παρούσα εργασία, αν και έγινε κάθε δυνατή προσπάθεια ώστε οι πληροφορίες που συγκεντρώνονταν από διαφορετικές πηγές σε διαφοροποιημένα γεωγραφικά συστήματα να προσαρμοστούν ώστε να είναι συνεπείς μεταξύ τους, διαπιστώθηκε ότι οι θέσεις μέτρησης απορροών απέκλιναν από τον ρου των υδατορευμάτων. Απαιτήθηκε λοιπόν διόρθωση των αντίστοιχων shapefiles ώστε οι θέσεις μετρήσεων να βρίσκονται στις κοίτες των υδατορευμάτων. Διαπιστώθηκε, επίσης, ότι μία από τις θέσεις μέτρησης απορροής, λόγω της γειννιάσής της με συμβολή δύο μεγάλων υδατορευμάτων, εμφανιζόταν ως σταθμός μέτρησης στο άλλο υδατόρευμα, και όχι σε αυτό στο οποίο είναι εγκατεστημένος. Τέτοιες λεπτομέρειες, οι οποίες μπορεί να αμεληθούν εκ παραδρομής εάν ακολουθηθούν “τυπικά” τα βήματα του εγχειριδίου χρήσης μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές αποκλίσεις της εκτίμησης της συμπεριφοράς της λεκάνης απορροής από το διαμορφωμένο μοντέλο προσομοίωσης.

Αν και η περιγραφή των βημάτων στο εγχειρίδιο χρήσης είναι εξαιρετικά ακριβής, ιδιαίτερα δε σε συνδυασμό με το παράδειγμα που περιλαμβάνεται, υπάρχει μία θέση όπου η εφαρμογή των οδηγιών δεν αρκεί για τη συνέχιση της εφαρμογής των βημάτων. Συγκεκριμένα, δεν υπάρχει περιγραφή της δημιουργίας του αρχείου των κλίσεων στην έκταση της λεκάνης, ενώ αποτελεί προαπαιτούμενη ενέργεια για τον υπολογισμό των μέσων κλίσεων των υπολεκάνων (εντολή Basin Slope στο υπομενού Basin Characteristics της εργαλειοθήκης του HEC-GeoHMS). Για να γίνει δυνατή η εφαρμογή της εντολής, θα πρέπει ο χρήστης να υπολογίσει τις κλίσεις της λεκάνης μέσω της εντολής Slope στο υπομενού Surface της εργαλειοθήκης Spatial Analyst του GIS, με δεδομένο εισαγωγής το αρχείο «Fil» ή «Hydro DEM», δηλαδή το υδρολογικά τροποποιημένο ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Το αρχείο που προκύπτει χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως είσοδος για την εντολή Basin Slope.

5.1.7. Δημιουργία αρχείων για είσοδο στο HEC-HMS

Εάν σκοπός της μελέτης είναι η δημιουργία αρχείων σε περιβάλλον HEC-HMS που θα επαναχρησιμοποιηθούν και θα πρέπει να είναι εύκολα “μετακινήσιμα”, τα αρχεία “είσοδου” που δημιουργούνται μέσω των εντολών του HEC-GeoHMS πρέπει να αντιγραφούν πριν εκπονηθεί η νέα μελέτη στο HEC-HMS. Η αρχική θέση των αρχείων είναι σε υποφακέλους του GIS. Για να είναι διαθέσιμα σε άλλους χρήστες με ευκολία, πρέπει να αντιγραφούν σε νέο φάκελο όπου θα δημιουργηθούν τα νέα αρχεία του HEC-HMS. Με τον τρόπο αυτό αρκεί η μετακίνηση ενός μόνο φακέλου, ο οποίος περιέχει όλα τα απαραίτητα αρχεία για να τρέξει το μοντέλο σε άλλους υπολογιστές με εγκατεστημένο μόνο το πρόγραμμα HEC-HMS.

5.2. Επιλογή μεθόδων υπολογισμού υδρολογικών παραμέτρων και εκτίμηση αρχικών τιμών

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται οι μέθοδοι υπολογισμού που επιλέχθηκαν για κάθε υδρολογική διαδικασία που περιλαμβάνεται στο πρόγραμμα HEC-HMS, καθώς και οι μεθοδολογίες υπολογισμού των αρχικών τιμών των μεθόδων για κάθε υπολεκάνη και υδατόρευμα.

5.2.1. Επιλογή και εφαρμογή μεθόδου υπολογισμού υδρολογικών ελλειμμάτων

Για τον υπολογισμό των υδρολογικών ελλειμμάτων, δηλαδή της κατακράτησης και της διήθησης, και εν τέλει του ενεργού όγκου της βροχοπτώσης, επιλέχθηκε η μέθοδος της Soil Conversation Service (βλ. §2.2.1) με κριτήριο τη μικρή απαιτήσή της σε δεδομένα (τύποι εδαφών και χρήσεις γης). Παρακάτω περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ώστε από γεωλογικά δεδομένα και τις χρήσεις γης κατά Corine να εκτιμηθούν οι παράμετροι των υπολεκανών για τη συγκεκριμένη μέθοδο.

Η κατάρτιση χαρτών υδρολογικών ελλειμμάτων θα καθιστούσαν δυνατό τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής σε κάθε θέση. Καθώς όμως η τιμή των υδρολογικών ελλειμμάτων καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το εκάστοτε επεισόδιο βροχοπτώσης, οι παραπάνω χάρτες δεν είναι δυνατό να καταρτιστούν σε γενική μορφή. Αντί αυτού, καταρτίζονται χάρτες των αριθμών καμπύλης απορροής (CN), συνήθως για μέσες συνθήκες υγρασίας (II), οι οποίοι εισάγονται στο HEC-GeoHMS σε περιβάλλον GIS ή απευθείας στο

HEC-HMS και ενσωματώνονται στο υδρολογικό μοντέλο. Η περαιτέρω επεξεργασία για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής πραγματοποιείται εντός του HEC-HMS.

Για την κατάρτιση των χαρτών των CN χρησιμοποιήθηκαν γεωλογικός χάρτης της Αττικής^{*1} (σε μορφή εικόνας), υδρολιθολογικός χάρτης της Ελλάδας^{*2} και χάρτης χρήσεων γης Corine για την Αττική (σε μορφή shapefile) σε περιβάλλον GIS ως ακολούθως. Η υδροπερατότητα του εδάφους σε συνδυασμό με τη χρήση γης καθορίζουν την τιμή του CN σε κάθε θέση.

5.2.1.1. Κατάταξη εδαφών σε ομάδες υδροπερατότητας

Με βάση το γεωλογικό χάρτη της Αττικής δημιουργήθηκε polygon shapefile με τα όρια των γεωλογικών σχηματισμών στην περιοχή μελέτης. Στη συνέχεια, με βάση την περιγραφή των σχηματισμών του γεωλογικού χάρτη και το περιγραφικό υπόμνημα του υδρολιθολογικού χάρτη της Ελλάδας, οι επιφανειακές εμφανίσεις κατατάχθηκαν σε υδρολιθολογικές ομάδες, καθώς και σε 4 κατηγορίες με βάση την υδροπερατότητά τους. Οι πληροφορίες αυτές εισήχθησαν στη συνέχεια στον πίνακα ιδιοτήτων (attribute table) του αντίστοιχου shapefile.

Οι υδρολιθολογικές κατηγορίες του Σχεδίου Προγράμματος Διαχείρισης των Υδατικών πόρων της χώρας (1996) μπορούν να καταταγούν, με βάση το περιγραφικό υπόμνημα του αντίστοιχου υδρολιθολογικού χάρτη, στις εξής ομάδες εδαφών που αναγράφονται στον Πίνακα 5.3 (βλ. και Πίνακα 2.1):

^{*1} χρησιμοποιήθηκαν πρωτίστως γεωλογικοί χάρτες που διατέθηκαν από το Εργαστήριο και δευτερευόντως χάρτης για την περιοχή των Μεσογείων του κ. Νίκου Κατσιαβριά.

^{*2} συντάχθηκε το 1996 στα πλαίσια του Σχεδίου Προγράμματος Διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας από τη Διεύθυνση Υδατικού Δυναμικού του Υπουργείου Ανάπτυξης

Κατηγορία υδρολιθολογικής ταξινόμησης	Γενική περιγραφή υδρολιθολογικής κατηγορίας/ομάδας	Κατάταξη εδαφών (SCS)
A1	Φλύσχης	D (τοπικά B,C)
A2	Μεταμορφωμένα πετρώματα	D (τοπικά A-C)
A3	Πλουτώνια και ηφαιστειακά πετρώματα	C,D (τοπικά B)
I1	Κοκκώδεις προσχωματικές αποθέσεις	καθορίζεται τοπικά
I2	Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις	B,C
I3	Κοκκώδεις μολαστικές αποθέσεις	C
C	Ασβεστόλιθοι - μάρμαρα μέτριας έως υψηλής περατότητας	A,B
C1	Ασβεστόλιθοι - μάρμαρα κυμαινόμενης περατότητας	καθορίζεται τοπικά
C1'	Τριαδικά ασβεστολιθικά λατυποπαγή	B,C

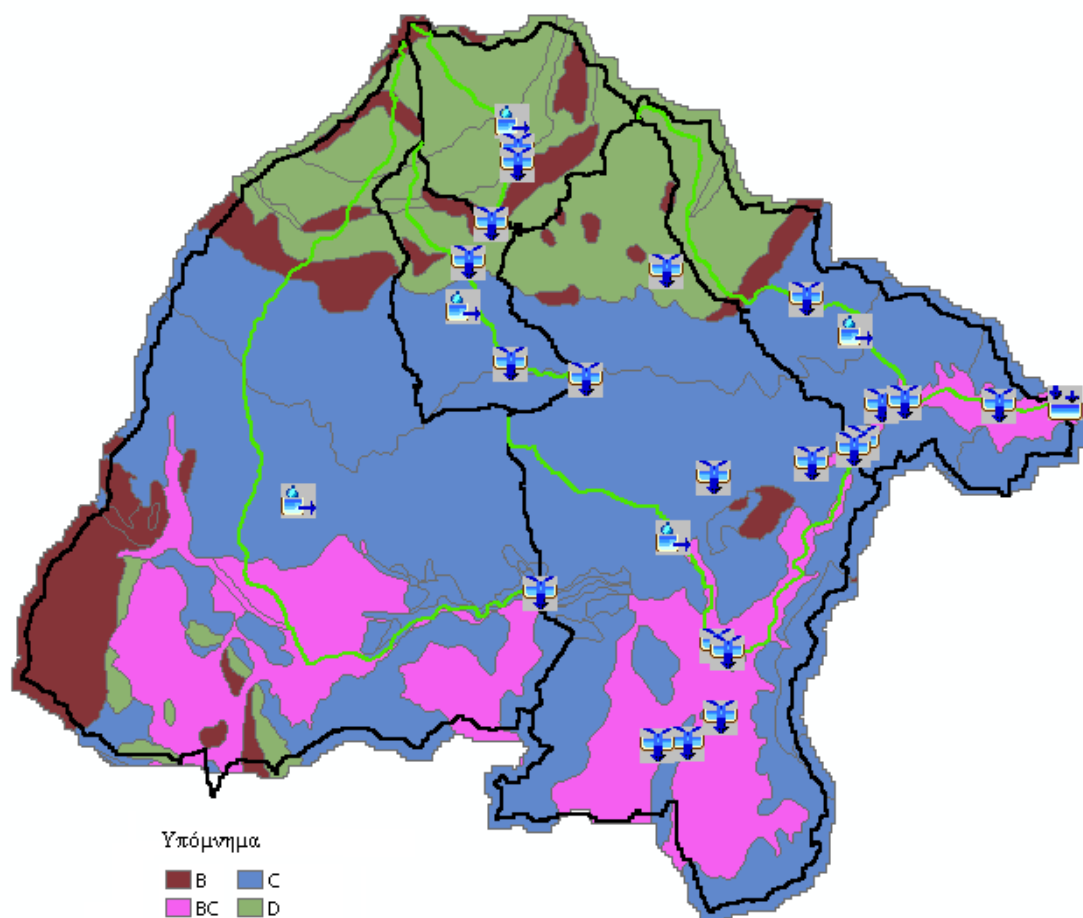
Πίνακας 5.3 Γενική αντιστοίχιση υδρολιθολογικών σχηματισμών και ομάδων διαπερατότητας κατά SCS

Προκειμένου για τους σχηματισμούς που εμφανίζονται στη λεκάνη απορροής της μελέτης, η κατάταξη παρατίθεται στον Πίνακα 5.4 και η αντιστοίχιση που προκύπτει φαίνεται στο χάρτη της Εικόνας 5.9. Οι κωδικοί των γεωλογικών σχηματισμών αντιστοιχούν στο υπόμνημα του γεωλογικού χάρτη της Αττικής (βλ. Παράρτημα ΙΙΙ).

Κωδικός γεωλογικού σχηματισμού	Κατηγορία υδρολιθολογικής ταξινόμησης	Απόδοση ομάδας υδροπερατότητας μεθόδου SCS
1	I1	B έως C
2	I1	C
3	I2	C
4	I2	C
6	C1	B
71	A2	C
72	C1	B
8	A2	D
9	C	B
10	C	B
13	A2	D [*A]
14	C1	A,B [*A]
15	A3	D
16	A1	D
17	A2	D
18	C1	B

Πίνακας 5.4 Απόδοση ομάδας υδροπερατότητας στους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής μελέτης*

* βλ. §5.2.1.4



Εικόνα 5.9 Απόδοση ομάδων υδροπερατότητας κατά SCS στην περιοχή μελέτης με βάση το γεωλογικό χάρτη της Αττικής

Με βάση τα παραπάνω ο υπολογισμός των τιμών CN προκύπτει από την ομάδα υδροπερατότητας σε συνδυασμό με τη χρήση γης σε κάθε θέση. Για να γίνει η απόδοση των τιμών συνδυάζονται τα shapefiles των γεωλογικών σχηματισμών και των χρήσεων γης Corine σε ένα νέο αρχείο polygon, του οποίου κάθε στοιχείο χαρακτηρίζεται από ένα τύπο γεωλογικού σχηματισμού και μία χρήση γης.

5.2.1.2. Εκτίμηση τιμών CN για χρήσεις γης κατά Corine

Ο υπολογισμός των τιμών CN για κάθε (εξειδικευμένη) χρήση γης στην περιοχή μελέτης προκύπτει από το συνδυασμό τιμών για απλούστερες χρήσεις γης ανά τύπο εδάφους οι οποίοι δίνονται σε αντίστοιχους πίνακες από τους Mockus et al. [2004]^α, Κουτσογιάννη, Ξανθόπουλο [1999]^β και Chow et al. [1988]^γ. Οι πίνακες των Mockus et al. διαμορφώθηκαν πρώτη φορά το 1964 στα πλαίσια της ανάπτυξης της μεθόδου της SCS και σε αυτούς στηρίζονται οι γενικευμένοι πίνακες των Κουτσογιάννη, Ξανθόπουλου και Chow et al. Οι επιλογές των τιμών CN που χρησιμοποιούνται παρακάτω έγιναν κατά προτεραιότητα από

τους πίνακες των Mockus et al. Όπου αυτό δεν ήταν δυνατό επιλέχθηκαν τιμές από τους Κουτσογιάννη, Ξανθόπουλο ως ελληνική βιβλιογραφία και τελευταίως από τους Chow et al. Προκειμένου για τη διατήρηση της ορθής τάξης μεγέθους των αριθμών CN, όπου οι παραδοχές ήταν εκτεταμένες, έγινε έλεγχος με τις ακραίες γενικευμένες τιμές των Κουτσογιάννη, Ξανθόπουλου και προσαρμογή σε αυτές.

Οι τιμές του CN για τις διάφορες χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.5.

Χρήση γης Corine		Αριθμός CN (II) ανά ομάδα υδροπερατότητας εδάφους			
Κωδικός	Περιγραφή	A	B	C	D
1.1.2	Ασυνεχής αστικός ιστός	72	82	88	91
1.3.1	Χώροι εξορύξεως ορυκτών	78	86	90	91
1.3.3	Χώροι οικοδόμησης	57	72	81	86
1.4.2	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	80	87	91	93
2.1.1	Μη αρδευόμενη αρώσιμη γη	72	81	88	90
2.2.1	Αμπελώνες	67	78	85	89
2.2.3	Ελαιώνες	49	67	78	83
2.4.2	Σύνθετες καλλιέργειες	67	76	83	86
2.4.3	Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης	62	74	82	85
2.4.4	Γεωργοδασικές περιοχές	51	68	78	83
3.1.2	Δάσος κωνοφόρων	35	58	73	80
3.2.1	Φυσικοί βοσκότοποι	49	69	79	84
3.2.2	Θάμνοι και χερσότοποι	30	55	70	77
3.2.3	Σκληροφυλλική βλάστηση	33	55	70	77
3.2.4	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	41	62	74	80
3.3.3	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	76	85	90	93

Πίνακας 5.5 Απόδοση τιμών CN στις χρήσεις γης της περιοχής μελέτης

Οι τιμές προέκυψαν ως εξής:

- 1.1.2 – Ασυνεχής αστικός ιστός: η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από οικισμούς έντονα δομημένους στο εμπορικό και διοικητικό κέντρο τους, οι οποίοι εμφανίζονται εξαιρετικά αραιοκατοικημένοι όσο η απόσταση από το κέντρο τους αυξάνει. Οι εκτάσεις που εμφανίζονται ως ασυνεχής αστικός ιστός στο χάρτη χρήσεων γης περιλαμβάνουν μία σχετικά μικρή περιοχή γύρω από τα κέντρα των οικισμών. Εκτιμάται ότι, εν προκειμένω, ο ασυνεχής αστικός ιστός μπορεί να θεωρηθεί κατά 70% αστικός ιστός και 30% έδαφος (γαίες).

Εκτιμάται επίσης ότι ο αστικός ιστός της περιοχής αποτελείται κατά 75% από κατοικίες και 25% από δρόμους. Τα μέσα μεγέθη των οικοπέδων εντός του αστικού ιστού (κοντά στο 1 στρέμμα) οδηγούν στη θεώρηση αδιαπέρατης επιφάνειας 38% για τον αστικό ιστό [^β].

Η εδαφική περιοχή δεν είναι εντελώς γυμνή από βλάστηση. Θεωρείται ότι αποτελείται από γαίες με κάποια φυτική κάλυψη η οποία όμως δεν προσφέρει εκτεταμένη συγκράτηση της επιφανειακής απορροής (Fallow, CR, Poor condition) [^α].

- 1.3.1 – Χώροι εξορύξεως ορυκτών: θεωρούνται κατά 50% βιομηχανική περιοχή [^β] και κατά 50% γαίες με εκτεταμένη συγκράτηση επιφανειακής απορροής λόγω της κατακράτησης νερού σε τυχαίες κοιλότητες εντός των λατομείων (Fallow, CR, Good condition) [^α].

- 1.3.3 – Χώροι οικοδόμησης: θεωρούνται αντίστοιχοι με οικιστική περιοχή αδιαπέρατης επιφάνειας 30% [^β].

- 1.4.2 – Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής: εκτιμάται ότι το 50% της έκτασης καταλαμβάνεται από γήπεδα αδιαπερατότητας αντίστοιχης με εκείνη των δρόμων και το υπόλοιπο 50% θεωρείται αντίστοιχο με οικιστική περιοχή μικρών οικοπέδων (μικρότερων του μισού στρέμματος) και ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας περίπου 65% [^β]. Η τελευταία θεώρηση στηρίζεται στο γεγονός ότι σε περιοχές της Αττικής μακριά από την πρωτεύουσα, όπου οι αδόμητες εκτάσεις γύρω από τους οικισμούς είναι εκτεταμένες, η συνήθης αντίληψη των χώρων αναψυχής είναι ανοιχτοί πλακοστρωμένοι χώροι όπου μπορούν να πραγματοποιηθούν ποικίλες πολιτιστικές και πολιτισμικές εκδηλώσεις.

- 2.1.1 – Μη αρδευόμενη αρώσιμη γη: αντιστοιχεί σε γαίες με μεγάλη συγκράτηση επιφανειακής απορροής (Fallow, CR, Good condition) [^α]. Επειδή οι τιμές που προκύπτουν για τις κατηγορίες εδαφών Α και Β είναι μεγαλύτερες από τις μέγιστες που αντιστοιχούν σε καλλιεργημένες εκτάσεις, γίνεται προσαρμογή στις δευτερες [^β].

- 2.2.1 – Αμπελώνες: αντιστοιχούν σε καλλιέργειες που πραγματοποιούνται σε ευθεία σειρά. Η συγκράτηση επιφανειακής απορροής είναι σχετικά μεγάλη (Row crops, SR, Good condition) [^α].

- 2.2.3 – Ελαιώνες: θεωρείται κατά 50% δάσος το οποίο διαφυλάσσεται από τη βόσκηση και κατά 50% φυσική χλόη με λιγότερη από τη μισή έκτασή της καλυμμένη. Η εκτίμηση βασίζεται στην προτεινόμενη εκτίμηση για δενδροφυτεία [^α].

- 2.4.2 – Σύνθετες καλλιέργειες: τίθενται οι κεντρικές τιμές για τις καλλιεργημένες εκτάσεις [^β].

- 2.4.3 – Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης: εκτιμάται ότι η εν λόγω χρήση γης ισοδυναμεί με περίπου 75% καλλιεργούμενες εκτάσεις και 25% φυσική βλάστηση. Για να αποφευχθεί η υποεκτίμηση της

επιφανειακής απορροής θεωρείται τελικά η ισοδυναμία με 80% καλλιεργούμενες εκτάσεις και 20% φυσική βλάστηση.

Οι αριθμοί CN για καλλιεργούμενες εκτάσεις χωρίς περαιτέρω προσδιορισμό του τύπου τους επιλέγονται ως μέση όροι των αντίστοιχων ακραίων τιμών για κάθε τύπο εδάφους. Οι αριθμοί CN για φυσική βλάστηση χωρίς περαιτέρω προσδιορισμό του τύπου της εκτιμώνται ως 50% λιβάδια/βοσκότοποι και 50% δάση, για τις οποίες κατηγορίες οι τιμές προκύπτουν ως μέση όροι των αντίστοιχων ακραίων τιμών για κάθε τύπο εδάφους [^β].

- 2.4.4 – Γεωργοδασικές περιοχές: θεωρείται κατά 50% καλλιεργήσιμη έκταση και κατά 50% δασική περιοχή. Οι επιμέρους τιμές προκύπτουν ως μέση όροι των αντίστοιχων ακραίων τιμών για κάθε τύπο εδάφους [^β].

- 3.1.2 – Δάσος κωνοφόρων: θεωρείται ότι η κατάσταση του δάσους είναι μέση, δηλαδή ούτε ευνοεί ούτε παρεμποδίζει την επιφανειακή απορροή (Pinyon – fair condition) [^α]. Για εδάφη με μεγάλους ρυθμούς διήθησης (τύπος εδάφους A) δεν έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες και δεν δίνεται τιμή από τους Mockus et al. Επιλέγεται ο μέσος όρος των αντίστοιχων ακραίων τιμών για δάσος χωρίς περαιτέρω προσδιορισμό του τύπου του [^β].

- 3.2.1 – Φυσικοί βοσκότοποι: θεωρείται ότι η κατάστασή τους είναι μέση, δηλαδή ούτε ευνοούν ούτε παρεμποδίζουν την επιφανειακή απορροή (grassland – fair condition) [^α].

- 3.2.2 – Θάμνοι και χερσότοποι: θεωρείται αρχικά καλή κατάσταση για τις περιοχές αυτές, δηλαδή κάλυψη μεγαλύτερη του 75% (Brush – good condition) [^α]. Λόγω των χαμηλών αριθμών CN που αντιστοιχούν σε αυτή την περίπτωση και οι οποίοι αντιστοιχούν στην πραγματικότητα της βλάστησης στις ΗΠΑ, οι τιμές διορθώνονται και επιλέγονται οι ελάχιστες τιμές των Κουτσογιάννη – Ξανθόπουλου [^β] για δασώδεις περιοχές, με τη θεώρηση ότι οι εκτιμήσεις αυτές είναι πιο κοντά στην ελλαδική πραγματικότητα.

- 3.2.3 – Σκληροφυλλική βλάστηση: θεωρείται κατά 50% θαμνώδης έκταση (Brush – good condition) [^α] και κατά 50% δασώδης [^β]. Οι τιμές για τα δάση προκύπτουν ως μέση όροι των αντίστοιχων ακραίων τιμών για κάθε τύπο εδάφους. Η τιμή για τύπο εδάφους B προσαρμόζεται στην ελάχιστη τιμή για δασώδη έκταση [^β].

- 3.2.4 – Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις: θεωρούνται κατά 50% θαμνώδεις (Brush – good condition) [^α] και κατά 50% καλυμμένες από λιβάδια και βοσκότοπους [^β]. Οι επιμέρους τιμές για το δεύτερο τύπο χρήσης γης προκύπτουν ως μέση όροι των αντίστοιχων ακραίων τιμών για κάθε τύπο εδάφους.

- 3.3.3 – Εκτάσεις με αραιή βλάστηση: αντιστοιχούν σε εκτάσεις που αποτελούνται από γαίες με μικρή συγκράτηση της επιφανειακής απορροής λόγω παρουσίας βλάστησης (Fallow, CR, Poor condition) [^α].

Όπου οι επιφανειακοί σχηματισμοί εκτιμώνται ως μέσης έως μικρής διηθητικότητας (B έως C) η τιμή του αριθμού CN προκύπτει ως μέσος όρος των αντίστοιχων τιμών του Πίνακα 5.5

για μέση και μικρή και διηθητικότητα (B και C). Επίσης, όπου οι αριθμοί CN προέκυψαν με δεκαδικά ψηφία στρογγυλοποιήθηκαν στον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό, εκτός από τις περιπτώσεις που θεωρήθηκε ότι οι εκτεταμένες παραδοχές εμπεριέχουν σημαντικό σφάλμα. Στην τελευταία περίπτωση η στρογγυλοποίηση πραγματοποιήθηκε στον αμέσως μεγαλύτερο ακέραιο αριθμό για να αποφευχθεί η υποεκτίμηση της επιφανειακής απορροής.

5.2.1.3. Απόδοση CN σε κάθε θέση και εκτίμηση μέσω τιμών CN στις υπολεκάνες

Για την απόδοση αριθμού CN σε κάθε θέση της περιοχής μελέτης είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός νέου χάρτη που να περιλαμβάνει τόσο τις εδαφικές ιδιότητες όσο και τις χρήσεις γης. Για το λόγο αυτό, «κόβεται» αρχικά το shapefile χρήσεων γης Corine στα όρια της λεκάνης της περιοχής μελέτης (εντολή Clip) και στη συνέχεια ενοποιείται με το shapefile των γεωλογικών σχηματισμών (εντολή Intersect). Κάθε πολύγωνο του νέου αυτού αρχείου περιέχει τις πληροφορίες και τις ιδιότητες των επιμέρους αρχείων.

Ο πίνακας ιδιοτήτων (attribute table) του ενοποιημένου αρχείου εισάγεται σε φύλλο Excel όπου συνδυάζονται οι ομάδες υδροπερατότητας και οι χρήσεις γης και με κατάλληλο απλό αλγόριθμο αποδίδονται οι αριθμοί CN σε κάθε θέση ή, καλύτερα, σε κάθε πολύγωνο (polygon) του αρχείου. Δημιουργείται στη συνέχεια νέο πεδίο (field) στον πίνακα ιδιοτήτων το οποίο περιλαμβάνει αυτές τις τιμές.

Επειδή η περιοχή μελέτης είναι πειραματική και στοιχεία ή και αρχεία της παρούσας εργασίας πιθανώς θα χρησιμοποιηθούν και μελλοντικά, έγινε κάθε δυνατή προσπάθεια ώστε οι πίνακες ιδιοτήτων των αντίστοιχων αρχείων να είναι ξεκάθαροι. Για την παροχή αυτής της διευκόλυνσης έχουν προστεθεί στοιχεία διευκρινιστικά σχετικά με τους γεωλογικούς σχηματισμούς στα metadata του αρχείου των γεωλογικών σχηματισμών, καθώς και επιπλέον διευκρινιστικά πεδία στο αρχείο χρήσεων γης. Οι επιπλέον αυτές ιδιότητες έχουν μεταφερθεί στο τελικό αρχείο απόδοσης CN.

Όπως περιγράφεται ανωτέρω η απόδοση των τιμών CN πραγματοποιήθηκε ανά πολύγωνο με βάση τις πληροφορίες που ήταν διαθέσιμες και τα πεδία που δημιουργήθηκαν για αυτό το σκοπό στα αντίστοιχα polygon shapefiles. Η αξιοποίηση όμως των τιμών σε αυτή τη μορφή (πεδίο σε αρχείο polygon shapefile) δεν είναι απλή σε περιβάλλον HEC-GeoHMS και HEC-HMS. Αντίθετα, εάν η ίδια πληροφορία αποδοθεί σε κάθε κελί της περιοχής μελέτης εξάγονται εύκολα οι μέσοι όροι των CN για κάθε υπολεκάνη σε περιβάλλον GIS μέσω των εντολών του HEC-GeoHMS και στη συνέχεια μεταφέρονται αυτόματα σε περιβάλλον HEC-HMS. Για το λόγο αυτό η πληροφορία των τιμών CN μετατρέπεται από πεδίο ενός shapefile σε πληροφορία raster αρχείου (εντολή Feature to Raster). Για να μεταφερθεί η πληροφορία

από το GIS στο HEC-HMS εισάγεται το αντίστοιχο raster αρχείο στον κατάλογο δεδομένων Data Management του μενού Hydrologic Parameters του HEC-GeoHMS (Curve Number Grid) και ακολουθούνται οι εντολές όπως περιγράφονται στο εγχειρίδιο χρήσης του HEC-GeoHMS. Δημιουργείται αυτόματα πεδίο με τις μέσες τιμές των CN στο αρχείο των υπολεκανών.

5.2.1.4. Διόρθωση τιμών CN

Σε μεταγενέστερο στάδιο της εργασίας διαπιστώθηκε ότι πολλές από τις αρχικές εκτιμήσεις των αριθμών CN υπερεκτιμώνται με βάση την παραπάνω μεθοδολογία. Βασικότερος λόγος κρίθηκε ότι είναι η αβεβαιότητα ως προς τα χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών για την εκτίμηση των οποίων χρησιμοποιήθηκαν σχετικά αδροί γεωλογικοί χάρτες, και όχι εδαφολογικοί, λόγω αδυναμίας εύρεσης αξιόπιστων γεωλογικών χαρτών με μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά και εδαφολογικών χαρτών για την περιοχή σε οποιαδήποτε κλίμακα.

Προκειμένου για την πειραματική λεκάνη X-Basin διαπιστώθηκε ότι οι γεωλογικοί χάρτες που χρησιμοποιήθηκαν δεν αποδίδουν την τοπική συμπεριφορά των μεταμορφωμένων σχηματισμών. Συγκεκριμένα, η καρστικοποίηση των μαρμάρων και των ασβεστολίθων της περιοχής είναι τόσο έντονη, που η κατηγοροποίηση των αντίστοιχων πετρωμάτων αποκλίνει σημαντικά από τις “τυπικές” τιμές που διαμορφώθηκαν στον Πίνακα 5.4. Έτσι, τα πετρώματα 13 (μάρμαρα) και 14 (σχιστόλιθοι με εναλλαγές ασβεστολίθων και μαρμάρων) εμφανίζουν συμπεριφορά αντίστοιχη με εδάφη της ομάδας υδροπερατότητας A, δηλαδή μεγάλους ρυθμούς διήθησης. Οι τιμές που προκύπτουν με αυτή τη θεώρηση είναι πιο συνεπείς με δημοσιευμένες τιμές για την περιοχή [Soulis et al., 2009, Baltas et al., 2007]. Η διαδικασία εκτίμησης μέσης τιμής για τις πειραματικές υπολεκάνες της X-Basin δεν επαναλήφθηκε. Αποδόθηκαν οι διορθωμένες αρχικές τιμές κατ’ εκτίμησης και στη συνέχεια επαναπροσδιορίστηκαν μέσω της ρύθμισης του μοντέλου (βλ. §5.4).

Κωδικός υπολεκάνης	Όνομα υπολεκάνης	Αρχική εκτίμηση μέσης τιμής CN
W1450	Βόρεια πειραματική (xbasin)	75 [40]*
W1500	Νότια πειραματική (xbasin)	79 [44]*
W1550	Δυτική (έξοδος στο Πικέρμι)	79
W1590	Ανατολική (έξοδος στη θάλασσα)	80
W1600	Κεντρική (έξοδος ανάντη Ραφήνας)	80

Πίνακας 5.6 Μέσες αρχικές τιμές τιμών CN υπολεκανών εργασίας

* Βλ. § 5.2.1.4

5.2.1.5. Εκτίμηση αρχικών απωλειών

Με βάση τη μεθοδολογία της SCS (Soil Conservation Service) οι αρχικές απώλειες υπολογίζονται ως $I_a=0,2 \cdot S$ (βλ. §2.2.1). Στην παρούσα εργασία δεν ακολουθήθηκε η παραπάνω σύμβαση. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία έχει προταθεί η αντικατάσταση του λόγου I_a/S από 0,2 σε 0,05 μετά από εκτενείς μελέτες σε λεκάνες απορροής των ΗΠΑ [Wooward et al., 2003]. Η συγκεκριμένη πρόταση έχει συμπεριληφθεί και στα επίσημα αρχεία περιγραφής μεθοδολογιών στην ιστοσελίδα της Υπηρεσίας Διατήρησης Φυσικών Πόρων (Natural Resources Conservation Service – NRCS, πρώην SCS). Επιπλέον, για την περιοχή της πειραματικής λεκάνης έχει εκτιμηθεί ότι ο παραπάνω λόγος I_a/S προσεγγίζεται καλύτερα από την τιμή 0,014 [Baltas et al., 2007]. Με βάση τα παραπάνω, οι αρχικές απώλειες στις υπολεκάνες διαμορφώνονται ως εξής:

Υπολεκάνη	Αρχικές απώλειες I_a (mm)	Λόγος I_a/S
W1450 – β. xbasin	5,3	0,014
W1500 – ν. xbasin	4,5	0,014
W1550 – δυτική	3,3	0,050
W1590 - ανατολική	3,2	0,050
W1600 – κεντρική	3,2	0,050

Πίνακας 5.7 Εκτίμηση αρχικών απωλειών I_a και λόγων αρχικών απωλειών I_a/S

Ας σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι η έκταση των αδιαπέρατων επιφανειών σε όλες τις υπολεκάνες θεωρείται “μηδενική”. Η σύμβαση αυτή υιοθετείται εντός του HEC-HMS διότι η ύπαρξη αδιαπέρατων επιφανειών έχει ληφθεί υπόψη κατά την εκτίμηση των αριθμών CN και δε θα πρέπει να επανεισαχθεί στις παραμέτρους της μεθόδου υπολογισμού υδρολογικών απωλειών.

5.2.2. Επιλογή και εφαρμογή προτύπου εκτίμησης άμεσης απορροής

Για την εκτίμηση της άμεσης απορροής επιλέχθηκε το συνθετικό υδρογράφημα Snyder με κριτήριο τα διαθέσιμα δεδομένα. Λόγω της μελέτης σε επίπεδο επεισοδίου κρίθηκε ότι πολυπλοκότερες μέθοδοι δεν είναι κατάλληλες, ενώ η επάρκεια δεδομένων σε επίπεδο επεισοδίου (βροχοπτώσεις και απορροές) επαρκούν για τις εκτιμήσεις των παραμέτρων της μεθόδου.

Οι αρχικές τιμές των παραμέτρων υπολογίστηκαν με βάση τις σχέσεις της §2.2.2 και τη σχέση μεταξύ των μέσων κλίσεων των υπολεκάνων. Οι παράμετροι που εισάγονται στο πρόγραμμα είναι ο συντελεστής αιχμής (C_p) και ο χρόνος επιβράδυνσης της αιχμής (standard lag - t_p). Όλες οι τιμές που υπολογίστηκαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα, όπου C_t συντελεστής σχετικός με τα τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και Q_p η απορροή αιχμής.

Κωδικός υπολεκάνης	Όνομα υπολεκάνης	Μέση κλίση %	C_t	C_p	t_p (hours)	Q_p (m ³ /sec)
W1450	Βόρεια πειραματική (xbasin)	35,0	1,85	0,8	2,68	6,55
W1500	Νότια πειραματική (xbasin)	20,1	1,9	0,75	3,28	4,50
W1550	Δυτική (έξοδος στο Πικέρμι)	8,5	2,1	0,6	6,93	12,75
W1590	Ανατολική (έξοδος στη θάλασσα)	17,4	1,95	0,7	4,83	5,63
W1600	Κεντρική (έξοδος ανάντη Ραφήνας)	12,5	2	0,65	5,72	13,92

Πίνακας 5.8 Αρχικές τιμές συνθετικού υδρογραφήματος Snyder

5.2.3. Επιλογή και εφαρμογή προτύπου εκτίμησης βασικής απορροής

Η εκτίμηση της βασικής απορροής πραγματοποιήθηκε με βάση το πρότυπο εκθετικής μείωσης (recession). Η επιλογή έγινε με βάση τη μικρή απαίτησή της μεθόδου σε δεδομένα. Με χρήση δεδομένων απορροής είναι δυνατή η εκτίμηση της αρχικής βασικής απορροής καθώς και του συντελεστή εκθετικής μείωσης όπως περιγράφεται στη βιβλιογραφία (γραφική απεικόνιση των λογαρίθμων του καθοδικού κλάδου και εντοπισμός του σημείου αλλαγής της κλίσης του διαγράμματος). Η σταθερά εκθετικής μείωσης εκτιμήθηκε αρχικά με βάση τους κύριους γεωλογικούς σχηματισμούς κάθε λεκάνης. Η πρώτη αυτή εκτίμηση είναι αρκετά αδρή και μικρής σημασίας, εφόσον η σταθερά εκθετική προσομοίωσης ουσιαστικά προσδιορίζεται στη συνέχεια μέσω της ρύθμισης του προσομοιώματος. Ως μέθοδος προσδιορισμού της θέσης τερματισμού του καθοδικού κλάδου του πλημμυρογραφήματος επιλέχθηκε αρχικά ο λόγος της απορροής προς την αιχμή, αλλά κατά τη ρύθμιση του

μοντέλου αυτό διαφοροποιήθηκε (βλ. § 5.4). Οι αρχικές τιμές της μεθόδου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Κωδικός υπολεκάνης	Όνομα υπολεκάνης	Αρχική απορροή (m ³ /sec)	Σταθερά εκθετικής μείωσης	Λόγος απορροής προς αιχμή
W1450	Βόρεια πειραματική (xbasin)	0,009	0,8	0,26
W1500	Νότια πειραματική (xbasin)	0,039	0,5	0,1
W1550	Δυτική (έξοδος στο Πικέρμι)	0,103	0,5	0,3
W1590	Ανατολική (έξοδος στη θάλασσα)	0,668	0,5	0,3
W1600	Κεντρική (έξοδος ανάντη Ραφήνας)	0,668	0,5	0,3

Πίνακας 5.9 Αρχικές τιμές προτύπου βασικής απορροής

5.2.4. Επιλογή και εφαρμογή προτύπου διόδευσης πλημμύρας

Μεταξύ των διαθέσιμων προτύπων διόδευσης πλημμύρας του προγράμματος HEC-HMS επιλέχθηκε η μέθοδος Muskingum (βλ. § 2.2.4), της οποίας οι αρχικές παράμετροι προσδιορίζονται με σχετική απλότητα και στη συνέχεια προσαρμόζονται στο προσομοίωμα μέσω της διαδικασίας της ρύθμισης. Ο Wilson [1990] προτείνει για την παράμετρο X την τιμή 0,25 ως μέση για φυσικά υδατορεύματα. Στην ελληνική βιβλιογραφία αναφέρεται το εύρος τιμών $0,1 < X < 0,4$ ως κανόνας για τα ποτάμια, ενώ η τιμή $X=0,2$ προτείνεται ως συνήθης [Νουτσόπουλος κ.ά., 2007]. Η τιμή $X=0,2$ υιοθετήθηκε ως αρχική τιμή για όλες τις υπολεκάνες της εργασίας.

Η παράμετρος K , δηλαδή ο μέσος χρόνος διαδρομής του πλημμυρικού κύματος μεταξύ δύο διατομών, προσδιορίστηκε με βάση το χρόνο των παρατηρημένων αιχμών στις θέσεις για τις οποίες υπήρχαν μετρήσεις απορροών. Προέκυψαν έτσι οι χρόνοι για τα υδατορεύματα R90, R330 και R540. Στα υπόλοιπα υδατορεύματα ο χρόνος K προσδιορίστηκε κατ' εκτίμησιν, με βάση τις παραπάνω τιμές και τις διαφοροποιήσεις στα μήκη των υδατορευμάτων και τις αντίστοιχες κλίσεις. Ταυτόχρονα επιλέχθηκε ενιαίο βήμα Δt για τη μέθοδο, ίσο με 10', από το οποίο προέκυψε για κάθε υδατόρευμα ο αριθμός υπο-υδατορευμάτων Δx που συνδυαστικά

εξασφαλίζουν την ευστάθεια της μεθόδου. Οι εκτιμημένες αρχικές τιμές της μεθόδου συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Υδατόρευμα	Μήκος (km)	Κλίση	K (hours)	Δx
R90 : Λυκορέμα – Έξοδος xbasin	4,2	0,03	1,5	9
R330 : Έξοδος xbasin – Ραφήνα fladar	5,9	0,02	1	6
R540 : Πικέρμι fladar – Ραφήνα fladar	8,9	0,008	2,5	15
R270 : Ραφήνα fladar – Αστικός ιστός	2,3	0,007	0,7	4
R240 : Αστικός ιστός – Θάλασσα	2,0	0,005	0,8	5

Πίνακας 5.10 Αρχικές εκτιμήσεις παραμέτρων προτύπου διόδευσης

5.3. Σχόλια για την εισαγωγή δεδομένων και την πραγματοποίηση προσομοίωσης σε περιβάλλον HEC-HMS

Στην παρούσα υποενότητα αναφέρονται επιγραμματικά τα σημεία στα οποία πρέπει να δοθεί προσοχή κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα HEC-HMS και κατά την εφαρμογή/τρέξιμό του.

5.3.1. 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 μπορεί να καθυστερήσουν αρκετά την πορεία της προσομοίωσης. Επιπλέον, ο πιθανός χρήστης θα πρέπει να γνωρίζει ότι τυχόν λάθη που κωδικοποιημένα δίνει το πρόγραμμα δεν μπορούν να αναζητηθούν ή να προσδιοριστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι, ενώ από την έκδοση HEC-HMS 3.4 στην έκδοση HEC-HMS 3.5 οι αναφορές λαθών είναι πιο αναλυτικές, υπάρχει σημαντική πιθανότητα ο χρήστης να μην ξέρει πώς να αντιμετωπίσει ή να ερμηνεύσει λάθη που εμφανίζονται. Διαδικτυακοί τόποι ορισμένες φορές κρίνονται βοηθητικοί. Σε άλλες περιπτώσεις όμως φαίνεται πως η μόνη λύση για να προχωρήσει η προσομοίωση είναι είτε η αναφορά λαθών να αγνοηθεί, εάν αυτό είναι δυνατόν, είτε ο χρήστης να ξεκινήσει εκ νέου από προηγούμενο στάδιο.

Αξιοσημείωτο είναι ότι στο τελικό στάδιο της εργασίας το πρόγραμμα σταμάτησε να τρέχει και να δίνει αποτελέσματα, αναφέροντας μήνυμα λάθους σχετικό με τη διαθέσιμη μνήμη για αποθήκευση. Εγκαθιστώντας το λογισμικό σε άλλο υπολογιστή, το μήνυμα λάθους συνέχισε να εμφανίζεται, δίνοντας, ενίοτε, μία ή δύο προσομοιώσεις πριν την εμφάνιση του μηνύματος

αυτού. Συμπεράθηκε ότι, μάλλον, η δημιουργία «αντιγράφου» της μελέτης-project με την επιλογή «αποθήκευση ως...» δεν δημιουργεί δύο ανεξάρτητες μεταξύ τους υπομελέτες, αλλά δύο υπομελέτες που μοιράζονται ένα αρχείο αποθήκευσης. Φαίνεται πως το αρχείο αυτό δημιουργείται κατά την αρχική δημιουργία της μελέτης-project σε περιβάλλον HEC-HMS. Θα πρέπει λοιπόν ο χρήστης να είναι επιφυλακτικός· εφόσον ο όγκος δουλειάς του είναι μεγάλος καλό είναι σε σημεία «σταθμούς» της συνολικής μελέτης του (για παράδειγμα αφού ρυθμιστεί το μοντέλο) να μη δημιουργεί απλώς αντίγραφα, αλλά νέα αρχεία, πάνω στα οποία θα προσθέσει στη συνέχεια δεδομένα βροχοπτώσεων, απορροών κλπ για να τρέξει πιθανά σενάρια. Σε αντίθετη περίπτωση κινδυνεύει να βρεθεί με ένα μοντέλο «πλήρες» δεδομένων, το οποίο δεν πραγματοποιεί προσομοιώσεις. Στην περίπτωση αυτή, επιπροσθέτως της δημιουργίας νέας μελέτης, που μοιάζει αναπόφευκτη, και η εισαγωγή των δεδομένων στο μοντέλο πρέπει να επαναληφθεί. Να σημειωθεί εδώ ότι στην παρούσα εργασία έγιναν εκτεταμένες προσομοιώσεις τόσο για την κατανόηση του μοντέλου, όσο και για τη ρύθμιση και την επαλήθευση του. Το πλήθος των προσομοιώσεων δε συνάδει με τον όγκο της εργασίας που παρουσιάζεται στο τεύχος αυτό, ούτε, πιθανώς, και με τις πραγματικές ανάγκες της εργασίας. Παρόλα αυτά, η δημιουργία νέων μελετών-projects είναι ένας ασφαλής τρόπος για να μη βρεθεί ο χρήστης προ εκπλήξεων.

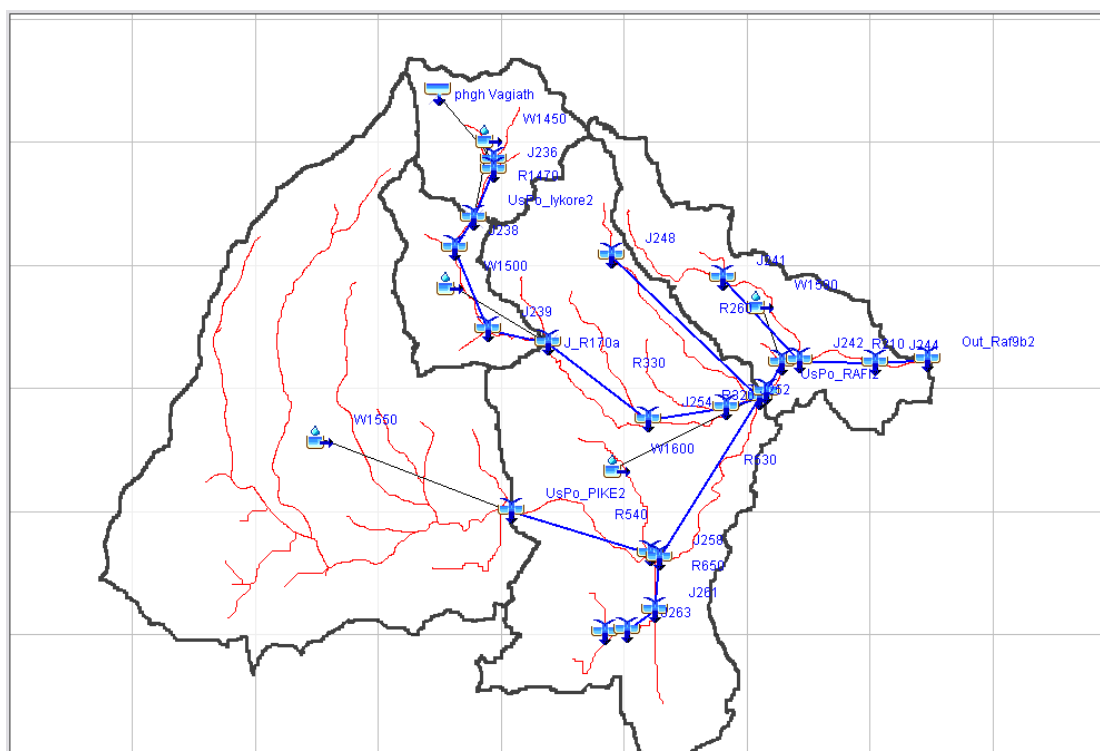
5.3.2. Μοντέλο λεκάνης απορροής

Στο μοντέλο λεκάνης απορροής (basin model) εισάγονται όλα τα επεξεργασμένα στοιχεία των υπολεκανών και των υδατορευμάτων. Δίνεται επίσης η δυνατότητα, εάν υπάρχουν θέσεις οι οποίες εμφανίζουν συνεχή απορροή μέσα στο χρόνο, να εισαχθεί η χρονοσειρά της απορροής αυτής και να είναι οπτικά διαθέσιμη στα τελικά πλημμυρογραφήματα που παράγει το πρόγραμμα. Εισάγονται επίσης στοιχεία πηγών και συνδέονται οι θέσεις μετρήσεων απορροών με τις χρονοσειρές δεδομένων απορροών.

Προσοχή πρέπει να δοθεί κατά την εκκίνηση του προγράμματος και την αρχική εισαγωγή των αρχείων από το HEC-GeoHMS στο HEC-HMS ώστε να αποκατασταθούν τυχόν απούσες συνδέσεις μεταξύ των υδατορευμάτων (links) και των σημείων-κόμβων (junctions). Πρέπει να ελεγχούν όλες οι συνδέσεις μεταξύ των ανάντη και κατόντη στοιχείων της λεκάνης απορροής. Επιπλέον, πρέπει με κριτικό μάτι να επιλεγεί εάν τα διαθέσιμα υδατορεύματα και σημεία ελέγχου επαρκούν ή περιτεύουν. Πρέπει να επιλεγεί ο κατάλληλος αριθμός και θέση για κάθε υδρολογικό στοιχείο ώστε να αντιπροσωπεύεται η συμπεριφορά της λεκάνης απορροής χωρίς περιττό υπολογιστικό φόρτο.

Στην παρούσα εργασία, λόγω της εκτενούς ενασχόλησης με την αρχική επεξεργασία σε περιβάλλον GIS ο αριθμός των υδατορευμάτων και σημείων-κόμβων ήταν μεγαλύτερος από

τον απαιτούμενο (βλ. Εικόνα 5.9). Διαγράφηκαν αρκετά υδατορεύματα και προσαρμόστηκαν τα σημεία-κόμβοι ώστε να αντιπροσωπεύουν τις θέσεις μετρήσεων απορροών στις οποίες μπορεί να γίνει ρύθμιση και επαλήθευση του μοντέλου. Επιπλέον, προστέθηκε ένα σημείο-κόμβος χωρίς μετρήσεις, ανάντη του αστικού ιστού της Ραφήνας για εκτίμηση του πλημμυρικού όγκου που καταλήγει στον αστικό ιστό.



Εικόνα 5.10 Αρχικά υδατορεύματα και κόμβοι σε περιβάλλον HEC-HMS

5.3.3. Μετεωρολογικό μοντέλο

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. Δημιουργήθηκαν αρχικά δύο σύνολα βαρών Thiessen, ένα για την περίοδο πριν το περιστατικό φωτιάς του Αυγούστου 2009 και ένα για την περίοδο μετά το εν λόγω περιστατικό. Η κίνηση αυτή ήταν αναγκαία, διότι μετά τον Αύγουστο 2009 δεν υπάρχουν δεδομένα βροχόπτωσης στη θέση του βροχογράφου R200 (Ντράφι). Σε μεταγενέστερο στάδιο κρίθηκε αναγκαίο, για λόγους εκτίμησης του ρυθμισμένου μοντέλου και των τροποποιημένων τιμών λόγω πυρκαγιάς να γίνουν προσομοιώσεις και σε γεγονότα βροχόπτωσης που δεν εμπίπτουν στα παραπάνω δύο σύνολα βαρών Thiessen. Έτσι,

δημιουργήθηκε επιπλέον μετεωρολογικό μοντέλο για δεδομένα βροχοπτώσεων μόνο από τους σταθμούς στη θέση Πικερμίου και του βροχογράφου R600 (Διάβαση Μπάλας). Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων δεν παρουσιάζονται αναλυτικά, συνετέλεσαν όμως στην αποδοχή των παραμέτρων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία και ενίσχυσαν, κατά το δυνατόν, την εγκυρότητα του μοντέλου.

Πρέπει να δοθεί προσοχή στο γεγονός ότι, κάθε φορά που δημιουργείται ένα νέο μοντέλο λεκάνης απορροής, πρέπει να συνδεθεί με κάποιο από τα διαθέσιμα μετεωρολογικά μοντέλα που έχει δημιουργήσει ο χρήστης. Μόνο όταν οι υπολεκάνες του μοντέλου λεκάνης απορροής συμπεριληφθούν σε κάποιο μετεωρολογικό μοντέλο είναι δυνατό να τρέξει η προσομοίωση.

5.3.3.1. Εφαρμογή μεθόδου Thiessen

Η κατάρτιση πολυγώνων Thiessen έγινε σε περιβάλλον GIS και τα δεδομένα εισήχθησαν χειροκίνητα στο πρόγραμμα HEC-HMS. Είναι δυνατή και η αυτόματη μεταφορά των δεδομένων μέσω των εργαλείων του HEC-GeoHMS, κρίθηκε όμως ότι ήταν απλούστερος και λιγότερο χρονοβόρος ο προσδιορισμός των βαρών εκτός της εργαλειοθήκης του HEC-GeoHMS.

Η μεθοδολογία για την κατάρτιση των πολυγώνων Thiessen είναι σχετικά απλή. Εισάγονται τα σημεία με τις θέσεις των βροχομετρικών σταθμών σε περιβάλλον GIS και δημιουργούνται τα πολύγωνα με την εντολή Create Thiessen Polygons του υπομενού Proximity της εργαλειοθήκης Analysis Tools. Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό των εμβαδών, απαιτείται να “κοπούν” τα πολύγωνα στα όρια των υπολεκανών απορροής (εντολή Intersect της εργαλειοθήκης Analysis Tools). Στο νέο shapefile που δημιουργείται υπολογίζονται τα εμβαδά των επιμέρους πολυγώνων. Ο υπολογισμός αυτός είναι κάπως πολυπλοκότερος και χρειάζονται προσεκτικά βήματα εντός του GIS για να πραγματοποιηθεί. Απαιτείται πρώτα η δημιουργία νέου τομέα (field) στο αρχείο που έχει δημιουργηθεί. Ο τομέας πρέπει να ονομαστεί “Area” (εμβαδόν), με τύπο “double” και χωρίς να προσδιοριστούν τα στοιχεία Precision και Scale (τα παραπάνω αφορούν τη δομή που θα έχει η πληροφορία μέσα στα αντίστοιχα κελιά του τομέα και πρέπει να μείνουν κενά κατά τη δημιουργία του). Στη συνέχεια, στον πίνακα ιδιοτήτων (attribute table), με δεξί κλικ στον τομέα “Area” εμφανίζεται ένα υπομενού, στο οποίο πρέπει να επιλεγεί η εντολή “Calculate Geometry” (υπολογισμός γεωμετρικών ιδιοτήτων). Ακολουθώντας απλές οδηγίες και την επιθυμητή μονάδα μέτρησης ο τομέας “Area” συμπληρώνεται αυτόματα. Η μεθοδολογία περιγράφεται εδώ αναλυτικά, διότι δοκιμάστηκαν και άλλοι τρόποι υπολογισμού, μετά από έρευνα στο Διαδίκτυο, οι οποίοι εν τέλει δεν οδήγησαν στον επιτυχημένο υπολογισμό των αντίστοιχων εμβαδών. Μετά τον υπολογισμό αυτό, εύκολα προκύπτουν με τη βοήθεια

υπολογιστικού φύλλου Excel τα βάρη Thiessen για κάθε βροχομετρικό σταθμό, τα οποία συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες, με διαθέσιμα ή όχι δεδομένα από το βροχογράφο R200 (Ντράφι) και ο βροχογράφο R600 (Διάβαση Μπάλας). Αν και προσομοίωση για την τελευταία περίπτωση δεν περιλαμβάνεται στην εργασία, παρατίθενται οι τιμές των βαρών για μεγαλύτερη πληρότητα και μελλοντική χρήση.

Υπολεκάνη	Βροχ. R200 (Ντράφι)	Βροχ. R400 (Αγ.Νικόλαος)	Βροχ. R600 (Διάβαση Μπάλας)	Βροχ. Πικέρμι
W1450 – β. xbasin	-	0,443	0,557	-
W1500 – ν. xbasin	0,548	0,452	-	-
W1550 – δυτική	0,350	0,214	0,005	0,431
W1590 - ανατολική	0,320	0,024	0,086	0,570
W1600 – κεντρική	0,178	0,060	0,017	0,745

Πίνακας 5.11 Βάρη Thiessen I

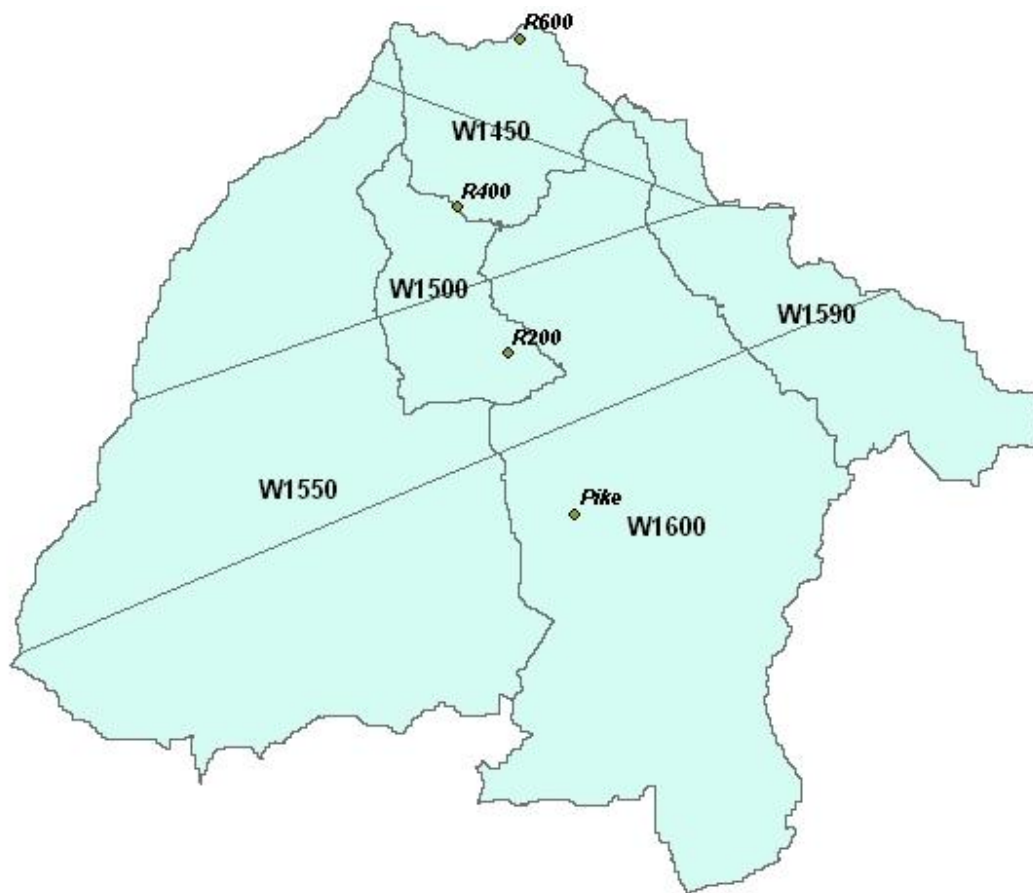
Υπολεκάνη	Βροχ. R200 (Ντράφι)	Βροχ. R400 (Αγ.Νικόλαος)	Βροχ. R600 (Διάβαση Μπάλας)	Βροχ. Πικέρμι
W1450 – β. xbasin		0,443	0,557	-
W1500 – ν. xbasin		0,865	-	0,135
W1550 – δυτική		0,36	0,005	0,635
W1590 - ανατολική		0,165	0,107	0,728
W1600 – κεντρική		0,142	0,017	0,841

Πίνακας 5.12 Βάρη Thiessen II

Υπολεκάνη	Βροχ. R200 (Ντράφι)	Βροχ. R400 (Αγ.Νικόλαος)	Βροχ. R600 (Διάβαση Μπάλας)	Βροχ. Πικέρμι
W1450 – β. xbasin		1		-
W1500 – ν. xbasin		0,865		0,135
W1550 – δυτική		0,365		0,635
W1590 - ανατολική		0,273		0,727
W1600 – κεντρική		0,159		0,841

Πίνακας 5.13 Βάρη Thiessen III

Να σημειωθεί εδώ ότι σύμφωνα με τη γενική μεθοδολογία υπολογισμού των πολυγώνων Thiessen το ανάγλυφο της λεκάνης αγνοείται και ο υπολογισμός είναι καθαρά γεωμετρικός. Με βάση το παραπάνω, για την λεκάνη απορροής της μελέτης θα έπρεπε να ληφθεί υπόψη ένας ακόμη βροχομετρικός σταθμός του δικτύου Meteonet με θέση στην πρειοχή του Ζωγράφου. Κρίθηκε όμως ότι ο σημαντικός ορεινός όγκος του Υμηττού που παρεμβάλλεται μεταξύ του εν λόγω σταθμού και της περιοχής μελέτης επηρεάζει σημαντικά το καθεστώς βροχοπτώσεων και εν τέλει τα δεδομένα βροχοπτώσεων του συγκεκριμένου σταθμού δεν λήφθηκαν υπόψη (βλ. Εικόνα 5).



Εικόνα 5.11 Πολύγωνα Thiessen για τους διαθέσιμους βροχομετρικούς σταθμούς

5.3.4. Προσδιορισμός χρονικών διαστημάτων προσομοιώσεων

Στο μενού “Control Specifications” προσδιορίζονται τα χρονικά διαστήματα για τα οποία είναι επιθυμητό το τρέξιμο του μοντέλου. Απαιτείται προσοχή στη σύμβαση εισαγωγής των ημερομηνιών. Κατά τα άλλα είναι εξαιρετικά απλοϊκή η χρήση της συγκεκριμένης ενότητας του προγράμματος. Εάν δεν δημιουργηθούν σαφή χρονικά διαστήματα, το πρόγραμμα δεν μπορεί να τρέξει την προσομοίωση.

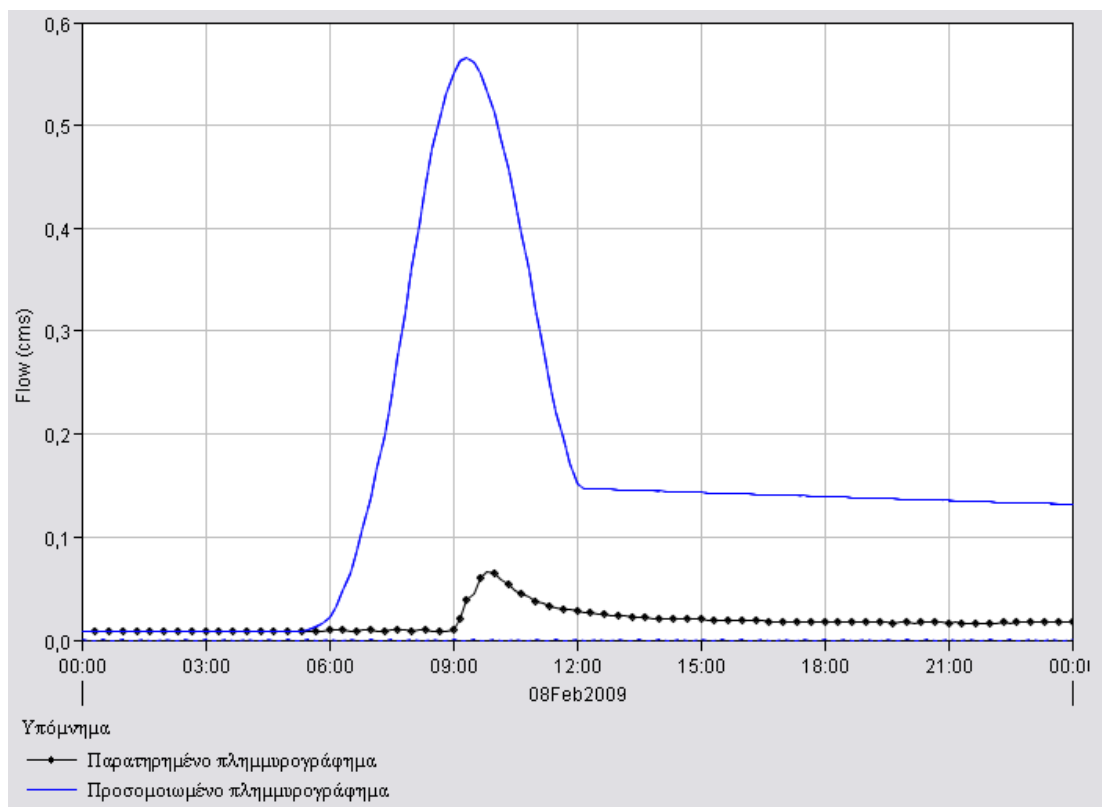
5.3.5. Εισαγωγή χρονοσειρών δεδομένων

Τα δεδομένα βροχοπτώσεων και παρατηρημένων απορροών εισάγονται στο υπομενού των δεδομένων χρονοσειρών (“Time-Series Data”). Γίνεται διαχωρισμός μεταξύ μετρητών βροχόπτωσης και μετρητών απορροών για λόγους δομής του προγράμματος. Η εισαγωγή είναι πολύ απλή, γίνεται χειροκίνητα ή αυτόματα μέσω κατάλληλων αρχείων. Στην παρούσα εργασία η εισαγωγή έγινε χειροκίνητα, με αντιγραφή των δεδομένων από αρχεία .txt και υπολογιστικά φύλλα Excel. Προσοχή απαιτείται ώστε τα δεδομένα που εισάγονται να ακολουθούν τη σύμβαση υποδιαστολής του HEC-HMS, η οποία προσδιορίζεται από το χρήστη μέσω των γενικών ρυθμίσεων του προγράμματος.

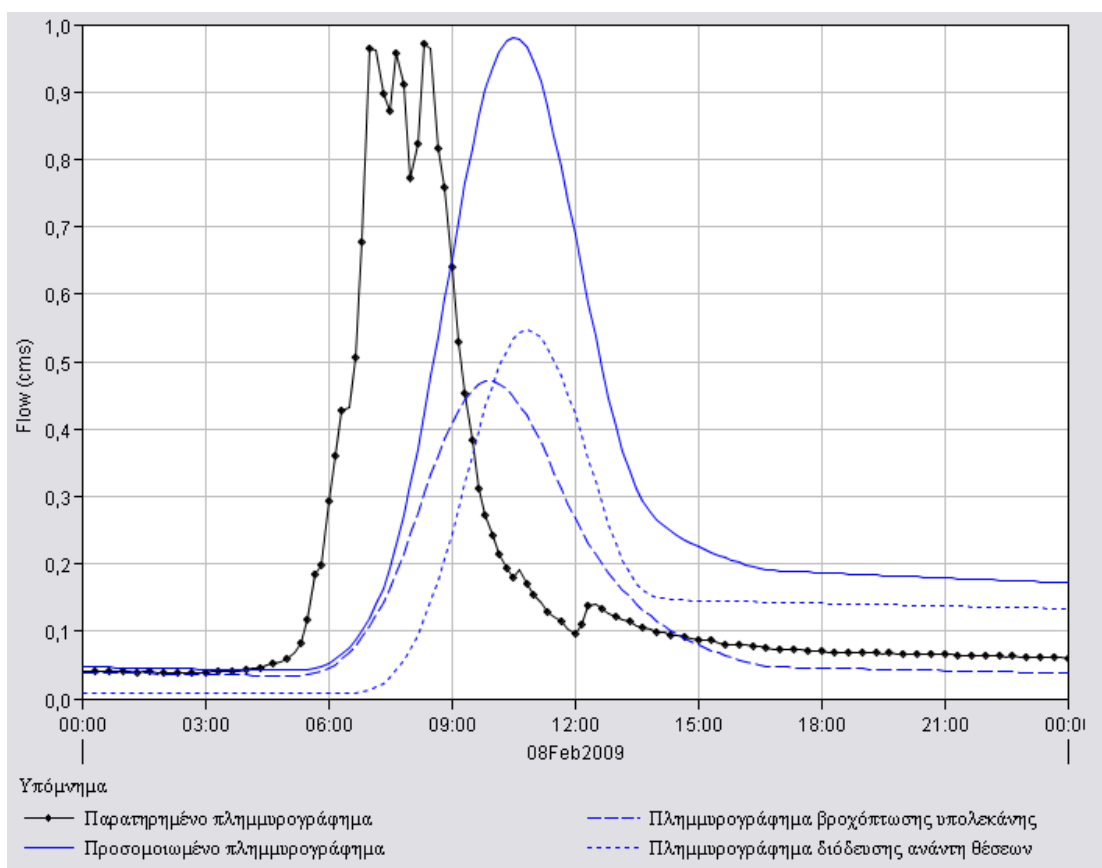
5.3.6. Τρέξιμο προσομοίωσης

Η προσομοίωση πραγματοποιείται, επίσης, με πολύ απλό τρόπο. Αρκεί η επιλογή του συνδυασμού στοιχείων που επιθυμεί ο χρήστης. Να σημειωθεί ότι οι προσομοιώσεις έχουν μικρό υπολογιστικό χρόνο (της τάξης των 1-2 λεπτών), αλλά η γενική ταχύτητα απόκρισης του προγράμματος μπορεί να μειωθεί εάν στο ίδιο αρχείο-μελέτη (project) υπάρχουν πολλές διαθέσιμες διαφοροποιημένες προσομοιώσεις (simulation runs). Εάν η μελέτη είναι πολύπλοκη, είναι προτιμότερο να δημιουργούνται διαφοροποιημένα αρχεία-projects τα οποία ο χρήστης να χειρίζεται ξεχωριστά, παρά ένα εκτενές αρχείο-project με μεγάλο πλήθος από προσομοιώσεις.

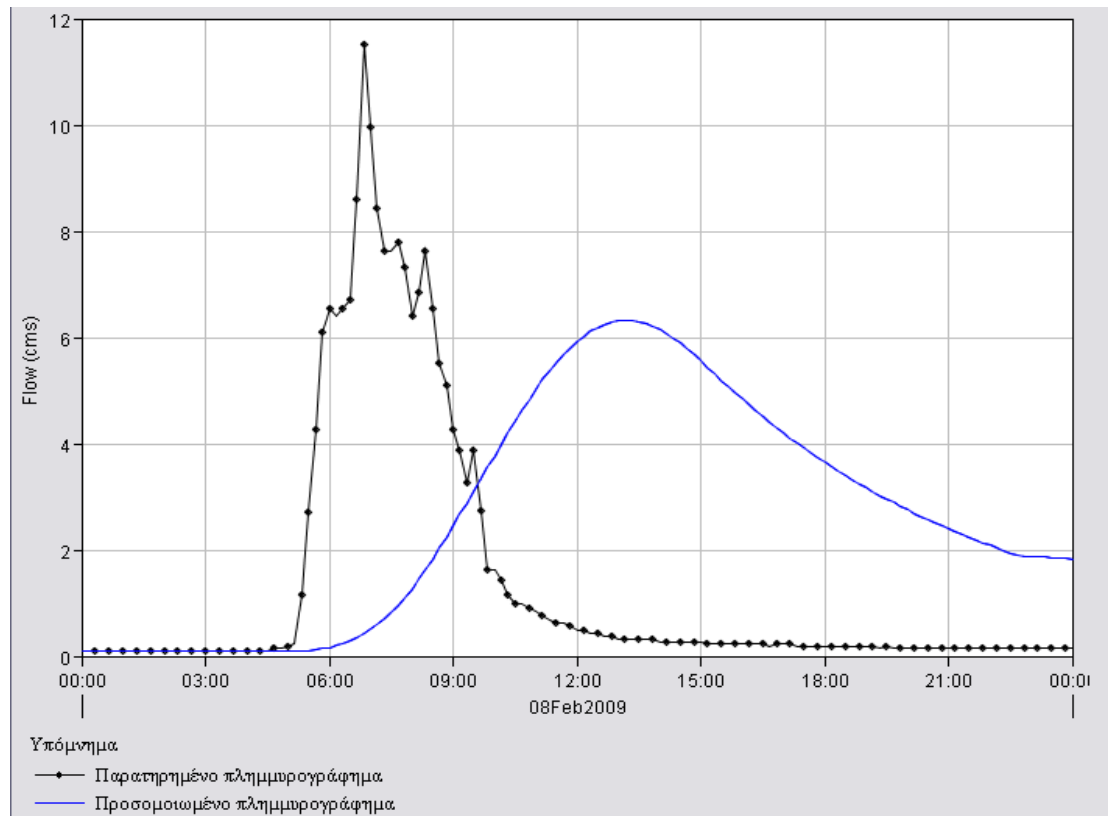
Μετά την εισαγωγή των αρχικών τιμών των παραμέτρων του μοντέλου λεκάνης απορροής όπως περιγράφεται στα προηγούμενα κεφάλαια και στο εγχειρίδιο χρήσης του HEC-HMS πραγματοποιήθηκε το πρώτο τρέξιμο της προσομοίωσης με το γεγονός βροχόπτωσης της 08.02.2009. Όπως ήταν αναμενόμενο τα συνθετικά πλημμυρογραφήματα αποκλίνουν σημαντικά από τα παρατηρημένα. Για λόγους σύγκρισης με το ρυθμισμένο μοντέλο παρατίθενται παρακάτω τα αποτελέσματα της πρώτης αυτής προσομοίωσης (βλ. Εικόνες 5.12-5.15). Ας σημειωθεί, για την καλύτερη κατανόηση των διαγραμμάτων, ότι το τελικό πλημμυρογράφημα στις θέσεις υπολογισμού του προκύπτει ως άθροισμα του πλημμυρογραφήματος λόγω της βροχόπτωσης στην αμέσως ανάντη υπολεκάνη και των διόδευμένων πλημμυρογραφημάτων στις ανάντη θέσεις υπολογισμού. Γίνεται σαφές ότι το μοντέλο πριν τη ρύθμιση, παρά την προσεκτική εκτίμηση των αρχικών παραμέτρων εισαγωγής, δεν έχει καμία αξιοπιστία. Είναι συζητήσιμο και αμφισβητήσιμο το αν άξιζε η εκτεταμένη ενασχόληση με την εκτίμηση των αρχικών παραμέτρων.



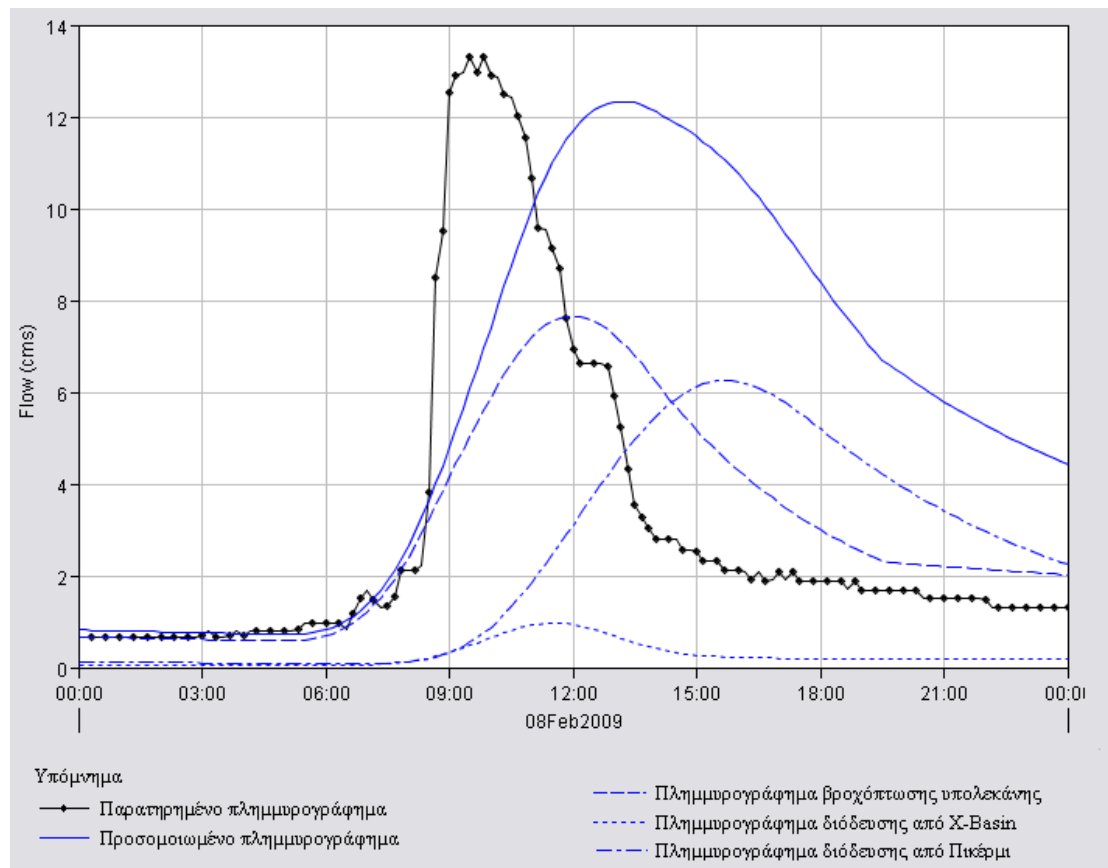
Εικόνα 5.12 Αποτέλεσμα προσομοίωσης με τις αρχικές τιμές στη θέση Λυκόρεμα



Εικόνα 5.13 Αποτέλεσμα προσομοίωσης με τις αρχικές τιμές στην έξοδο της X-Basin



Εικόνα 5.14 Αποτέλεσμα προσομοίωσης με τις αρχικές τιμές στη θέση Πικέρμι



Εικόνα 5.15 Αποτέλεσμα προσομοίωσης με τις αρχικές τιμές στη θέση Ραφήνα

5.4. Ρύθμιση και επαλήθευση μοντέλου εργασίας

Η ρύθμιση του προσομοιώματος πραγματοποιήθηκε με βάση το γεγονός βροχόπτωσης της 08.02.2009 και επαληθεύθηκε με το γεγονότα βροχόπτωσης της 17.11.2009 και της 12.12.2008. Τα τρία γεγονότα εμφανίζουν παρόμοια διάρκεια και ένταση. Συγκεκριμένα, έχουν ένταση 4,5mm/h, 4mm/h και 4,4mm/h αντίστοιχα, ενώ διάρκεια 5,5h, 5,5h και (με μικρές διακοπές) 6,5h αντίστοιχα. Να σημειωθεί εδώ, ότι για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας και την επιλογή γεγονότων, επεισόδια με διακοπή της βροχόπτωσης μεγαλύτερη των 4 ωρών θεωρήθηκαν διαφοροποιημένα, στηριζόμενοι στη δημοσίευση των Baltas et al. [2007] για την περιοχή μελέτης.

5.4.1. Πορεία ρύθμισης

Η ρύθμιση πραγματοποιήθηκε με υδρολογική σειρά από ανάντη προς κατόντη. Πρώτα ρυθμίστηκαν οι παράμετροι της βόρειας πειραματικής υπολεκάνης (W1450) με βάση τα στοιχεία απορροών στη θέση του Λυκορέματος. Στη συνέχεια ρυθμίστηκαν, ταυτόχρονα, οι παράμετροι της νότιας πειραματικής υπολεκάνης (W1500) και του υδατορεύματός της (R90), από τη θέση του Λυκορέματος μέχρι την έξοδο της πειραματικής λεκάνης, με τα στοιχεία απορροών στην έξοδο της πειραματικής λεκάνης. Με την ίδια λογική ρυθμίστηκαν οι παράμετροι της δυτικής υπολεκάνης (W1550) και στη συνέχεια οι παράμετροι της κεντρικής υπολεκάνης (W1600) ταυτόχρονα με τις παραμέτρους των δύο υδατορευμάτων της (R330 από της έξοδο της πειραματικής λεκάνης μέχρι το σταθμό της Ραφήνας και R540 από το σταθμό του Πικερμίου μέχρι το σταθμό της Ραφήνας).

Η ρύθμιση και η επαλήθευση σε κάθε θέση πραγματοποιήθηκαν παράλληλα, ώστε να εξασφαλίζεται κάθε φορά ικανοποιητική ρύθμιση του μοντέλου στις ανάντη θέσεις και προχωρώντας προς τα κατόντη οι ήδη ρυθμισμένες παράμετροι να παραμένουν σταθερές.

5.4.2. Μεθοδολογία ρύθμισης

Το πρόγραμμα HEC-HMS προσφέρει εργαλεία αυτοματοποιημένης ρύθμισης του υδρολογικού μοντέλου. Με βάση αλγορίθμους βελτιστοποίησης και αντικειμενικές συναρτήσεις υπολογισμού σφαλμάτων, η επιλογή των οποίων γίνεται από το χρήστη, έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει αυτόματα τι παραμέτρους μέσω επαναληπτικών χρονοβόρων διαδικασιών.

Αρχικά, έγινε προσπάθεια αξιοποίησης της δυνατότητας αυτής που προσφέρει το πρόγραμμα. Διαπιστώθηκε όμως ότι καμία από τις προσφερόμενες αντικειμενικές συναρτήσεις βελτιστοποίησης δεν έδινε ικανοποιητικά τελικά αποτελέσματα. Μετά από εκτεταμένες δοκιμές συνδυασμού των αποτελεσμάτων διαφορετικών αντικειμενικών συναρτήσεων βγήκε το συμπέρασμα ότι ο χρόνος που απαιτείται για αυτές τις δοκιμές, λόγω του υψηλού χρόνου πραγματοποίησης κάθε μίας (από μισή έως και μιάμιση ώρα), δεν συνάδει με το τελικό αποτέλεσμα της ρύθμισης. Λόγω των μη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων αυτής της μεθόδου, η ρύθμιση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε εν τέλει χειροκίνητα, με δοκιμές. Σε ορισμένες περιπτώσεις ξαναχρησιμοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι του προγράμματος, ενδεικτικά, ως μια «πρόταση» για τη γενική κατεύθυνση αλλαγής των παραμέτρων.

Η χειροκίνητη ρύθμιση με δοκιμές πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια κάποια λογικής, όπου αυτό ήταν δυνατό. Αρχικά έγινε προσπάθεια να διαπιστωθούν ποιοτικά οι μεταβολές που προκαλεί κάθε μία από τις παραμέτρους στο πλημμυρογράφημα. Στη συνέχεια με δοκιμές μεταβολής διαφόρων συνδυασμών παραμέτρων, η ρύθμιση πραγματοποιήθηκε με μοναδικά κριτήρια την οπτική προσέγγιση του παρατηρημένου πλημμυρογραφήματος, τη θέση και την τιμή της αιχμής και την τιμή του πλημμυρικού όγκου. Στις ανάντη θέσεις προτεραιότητα ήταν η προσέγγιση της τιμής του πλημμυρικού όγκου, με τη λογική ότι η αιχμή θα διοδευθεί προς τα κατάντη και ως εκ τούτου δεν είναι σημαντικό να προσεγγισθεί. Σε περισσότερο κατάντη θέση έγινε προσπάθεια να προσεγγισθούν εξίσου ο πλημμυρικός όγκος και η θέση και η τιμή της αιχμής. Σε ορισμένες θέσεις, προκειμένου να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος, η οπτική προσέγγιση του πλημμυρογραφήματος αμελήθηκε. Σε θέσεις, επίσης, όπου δεν ήταν δυνατή η ικανοποιητική προσέγγιση ούτε του όγκου ούτε της αιχμής, επιλέχθηκε η προσέγγιση του όγκου, ακόμα και εάν πρόκειται για κατάντη θέσεις. Η λογική αυτής της απόφασης σχετίζεται με το γεγονός ότι η περιοχή της Ραφήνας διαθέτει ήδη ένα δίκτυο διαχείρισης ομβρίων υδάτων και ένα ρέμα διοχέτευσής τους τα οποία, από κοινού, πραγματοποιούν κάποια διόδευση της αιχμής. Έτσι θεωρήθηκε κρισιμότερο να προσεγγισθεί ο όγκος που πρέπει να διοδευθεί, και όχι η στιγμιαία αιχμή της πλημμύρας.

5.4.3. Ρυθμισμένες τιμές μοντέλου προσομοίωσης

Στο υποκεφάλαιο αυτό καταγράφονται οι ρυθμισμένες τιμές του μοντέλου. Αναφέρονται αναλυτικά ώστε να αποτελέσουν οδηγό αλλά και αντικείμενο κριτικής σε περαιτέρω μελέτες για την ίδια περιοχή.

5.4.3.1. Παράμετροι μεθόδου εκτίμησης υδρολογικών ελλειμμάτων

Κατά τη ρύθμιση του μοντέλου τροποποιήθηκαν τόσο οι τιμές των αριθμών CN, όσο και οι τιμές των αρχικών απολειών, με αποτέλεσμα να μεταβληθούν και οι λόγοι S/I_a για κάθε υπολεκάνη. Οι ρυθμισμένες τιμές αναγράφονται στους πίνακες που ακολουθούν. Να σημειωθεί ότι για τη ρύθμιση των τιμών της ανατολικής λεκάνης (W1590) δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα απορροών. Η μεταβολή των αρχικών παραμέτρων έγινε κατ' εκτίμησιν, με γνώμονα τις μεταβολές και τις ρυθμισμένες τιμές των υπόλοιπων υπολεκανών της εργασίας.

Υπολεκάνη	Ρυθμισμένη μέση τιμή CN	Ρυθμισμένη αρχικών απολειών I_a	Λόγος I_a/S μετά τη ρύθμιση
W1450 – β. xbasin	35	17,4	0,037
W1500 – ν. xbasin	45	3	0,010
W1550 – δυτική	60	5	0,030
W1590 - ανατολική	50	5	0,020
W1600 – κεντρική	50	5	0,020

Πίνακας 5.14 Ρυθμισμένες τιμές CN, αρχικών απολειών I_a υπολεκανών και λόγων αρχικών απολειών I_a/S

Οι λόγοι I_a/S διαφοροποιούνται από τις αρχικές εκτιμήσεις είναι όμως συνεπείς με τη βιβλιογραφία. Σύμφωνα με τους Baltas et al. [2007], οι οποίοι εξέτασαν το λόγο I_a/S για 28 γεγονότα βροχόπτωσης στην περιοχή, προέκυψε ότι η ελάχιστη τιμή του λόγου ήταν 0,004 και η μέγιστη 0,054. Διαπίστωσαν επίσης ότι ο λόγος στη βόρεια πειραματική λεκάνη ήταν μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο στη νότια, παρατήρηση η οποία επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της ρύθμισης του μοντέλου προσομοίωσης της παρούσας εργασίας.

5.4.3.2. Παράμετροι προτύπου εκτίμησης άμεσης απορροής

Οι ρυθμισμένες τιμές του συντελεστή αιχμής δεν αποκλίνουν ιδιαίτερα από τις αρχικώς υπολογισμένες τιμές. Αντίθετα, ο χρόνος υστέρησης εμφανίζει σημαντικές διαφοροποιήσεις. Ο τρόπος υπολογισμού των αρχικών τιμών, όπως περιγράφεται σε προηγούμενα κεφάλαια, στηρίχθηκε στις χρονικές διαφορές των παρατηρημένων αιχμών μεταξύ των θέσεων μέτρησης απορροής. Στη συνέχεια, μέσω συγκριτικών εκτιμήσεων των κλίσεων και των διαστάσεων των λεκανών προσεγγίστηκαν οι αρχικές τιμές των παραμέτρων. Οι μεγάλες

αποκλίσεις μεταξύ αρχικών και ρυθμισμένων τιμών οφείλεται στο γεγονός ότι, εν τέλει, οι αιχμές σε κατάντη θέσεις (για παράδειγμα στο σταθμό του δικτύου fladar στη Ραφήνα) δεν οφείλονται στη διόδευση της αιχμής από ανάντη θέση, αλλά στην συγκέντρωση απορροή από την ίδια την υπολεκάνη που έχει έξοδο στην κατάντη αυτή θέση. Οι απορροές στις ανάντη θέσεις είναι μικρές με αποτέλεσμα να μην καθορίζουν τη θέση της αιχμής, παρά μόνο να συμβάλλουν, και μάλιστα λίγο, στο συνολικό πλημμυρικό όγκο. Οι ρυθμισμένες τιμές διαμορφώθηκαν ως ακολούθως.

Υπολεκάνη	C_p	t_p (hours)
W1450 – β. xbasin	0,5	2,4
W1500 – ν. xbasin	0,7	0,7
W1550 – δυτική	0,9	1,47
W1590 - ανατολική	0,7	3,2
W1600 – κεντρική	0,65	3,8

Πίνακας 5.15 Ρυθμισμένες τιμές μοναδιαίου υδρογραφήματος Snyder

5.4.3.3. Παράμετροι προτύπου εκτίμησης βασικής απορροής

Κατά τη ρύθμιση των παραμέτρων της μεθόδου εκθετικής μείωσης μεταβλήθηκαν τόσο τιμές των αρχικών εκτιμήσεων, όσο και η μέθοδος προσδιορισμού του τερματισμού της βασικής απορροής για ορισμένες υπολεκάνες. Με τον τρόπο αυτό προσεγγίστηκαν καλύτερα τα παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα. Οι ρυθμισμένες τιμές συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Υπολεκάνη	Αρχική απορροή (m^3/sec)	Σταθερά εκθετικής μείωσης	Τερματισμός βασικής απορροής	
			Τρόπος	Τιμή
W1450 – β. xbasin	0,009	0,8	Κατώφλι απορροής (m^3/sec)	0,009
W1500 – ν. xbasin	0,039	0,8	Κατώφλι απορροής (m^3/sec)	0,039
W1550 – δυτική	0,103	0,06	Λόγος απορροής προς αιχμή	0,03
W1590 – ανατολική	0,668	0,5	Λόγος απορροής προς αιχμή	0,3
W1600 – κεντρική	0,668	0,5	Λόγος απορροής προς αιχμή	0,3

Πίνακας 5.16 Ρυθμισμένες παράμετροι προτύπου εκθετικής μείωσης βασικής απορροής

5.4.3.4. Παράμετροι προτύπου διόδευσης πλημμύρας

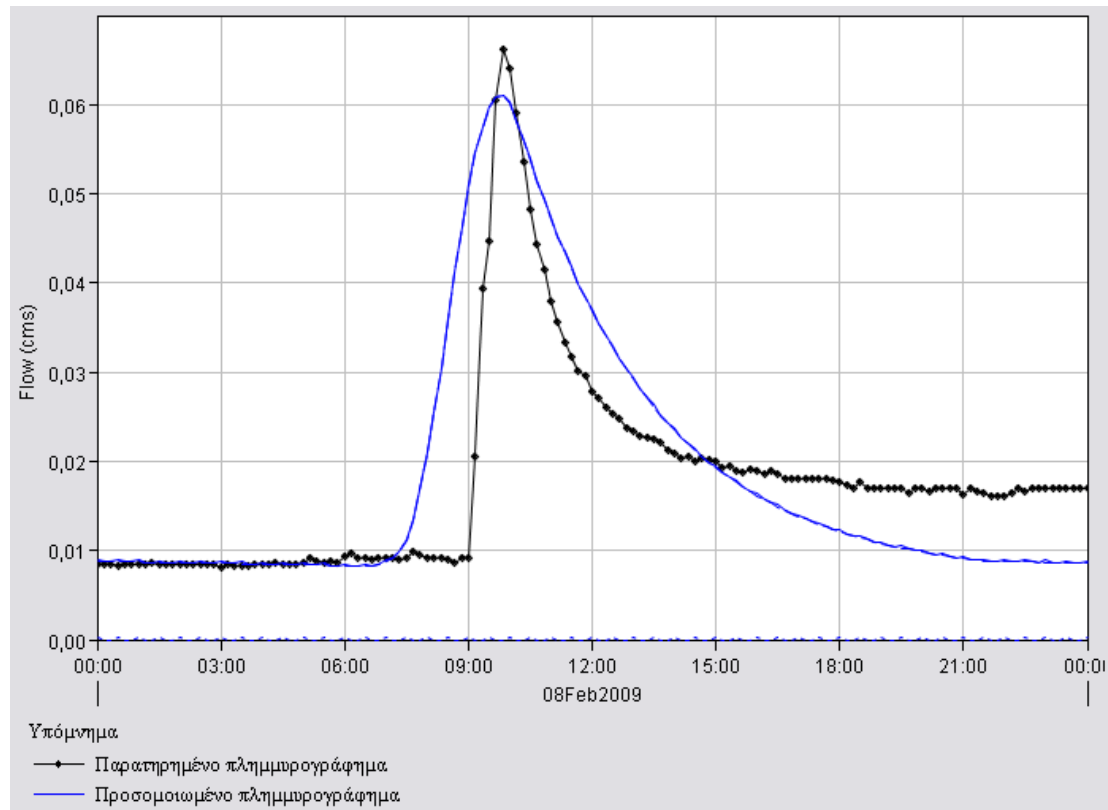
Όπως παραπάνω, και εδώ, οι σχετιζόμενες με το χρόνο παράμετροι εμφανίζουν αρκετά μεγάλες μεταβολές. Διαπιστώθηκε επίσης ότι τα υδατορεύματα της περιοχής εμφανίζουν λιγότερο έντονη διόδευση σε σχέση με τις τυπικές τυπικές για φυσικά υδατορεύματα που περιγράφονται στη βιβλιογραφία. Προς την ίδια κατεύθυνση διορθώθηκαν και οι τιμές για τα υδατορεύματα της ανατολικής λεκάνης για την οποία δεν υπάρχουν μετρήσεις.

Υδατόρευμα	K (hours)	X	Δx
R90 : Λυκόρεμα – Έξοδος xbasin	0,3	0,3	2
R330 : Έξοδος xbasin – Ραφήνα fladar	2	0,2	6
R540 : Πικέριμι fladar – Ραφήνα fladar	2,2	0,35	15
R270 : Ραφήνα fladar – Αστικός ιστός	0,6	0,25	4
R240 : Αστικός ιστός – Θάλασσα	0,7	0,25	5

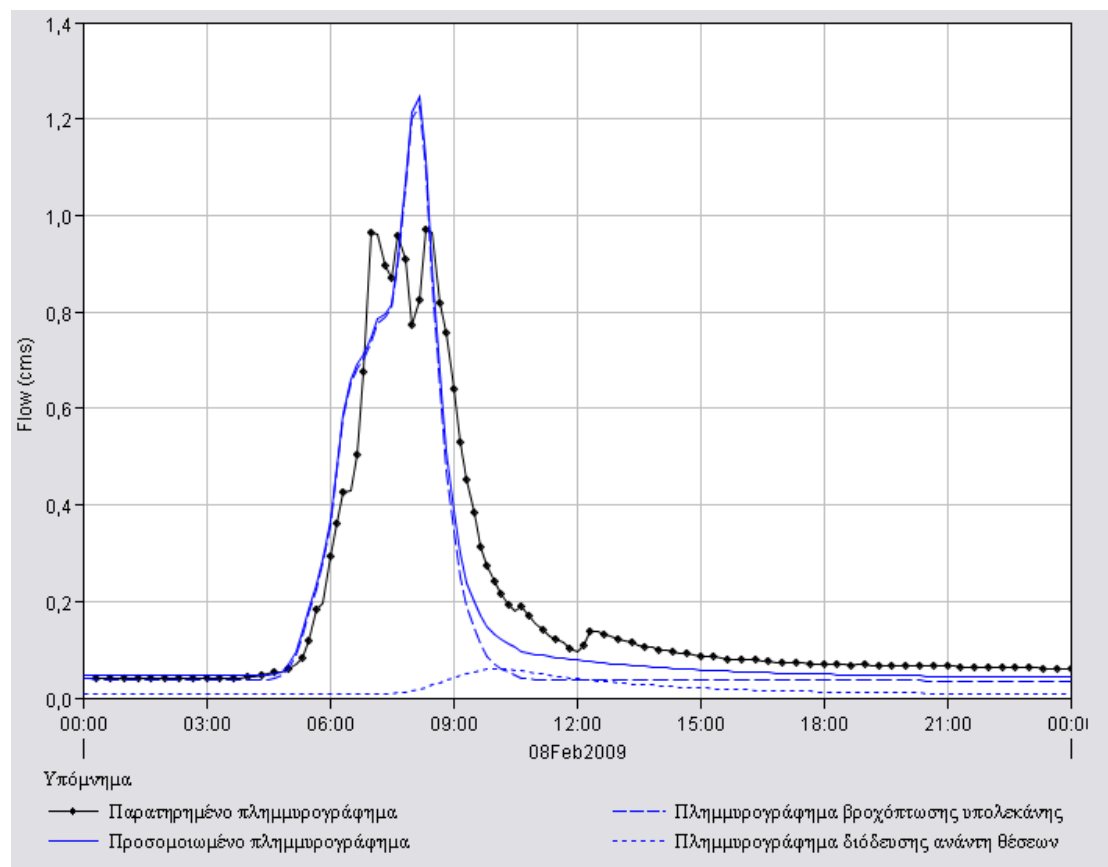
Πίνακας 5.17 Ρυθμισμένες τιμές παραμέτρων προτύπου διόδευσης πλημμύρας

5.4.3.5. Πλημμυρογραφήματα και αποτελέσματα ρυθμισμένου μοντέλου στις θέσεις μέτρησης απορροών

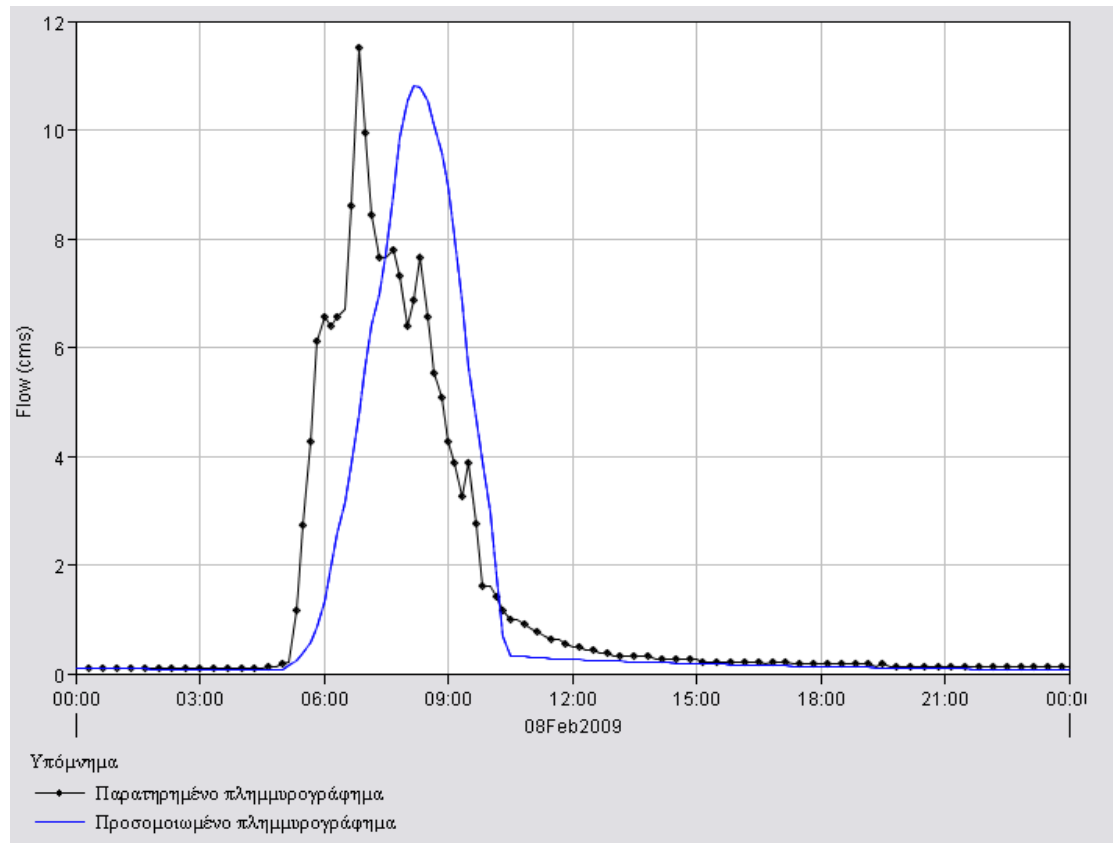
Παρατίθενται εδώ τα παρατηρημένα και τα προσομοιωμένα πλημμυρογραφήματα της 08.02.2009 για το ρυθμισμένο μοντέλο (βλ. Εικόνες 5.16-5.19). Τα αριθμητικά αποτελέσματα των εν λόγω προσομοιώσεων διατίθενται στο Παράρτημα Ι. (Σημείωση: τα αποτελέσματα δίνονται στην αγγλική γλώσσα· για το λόγο αυτό παρατίθεται στο ίδιο παράρτημα και απόδοση των ορολογιών στα ελληνικά.



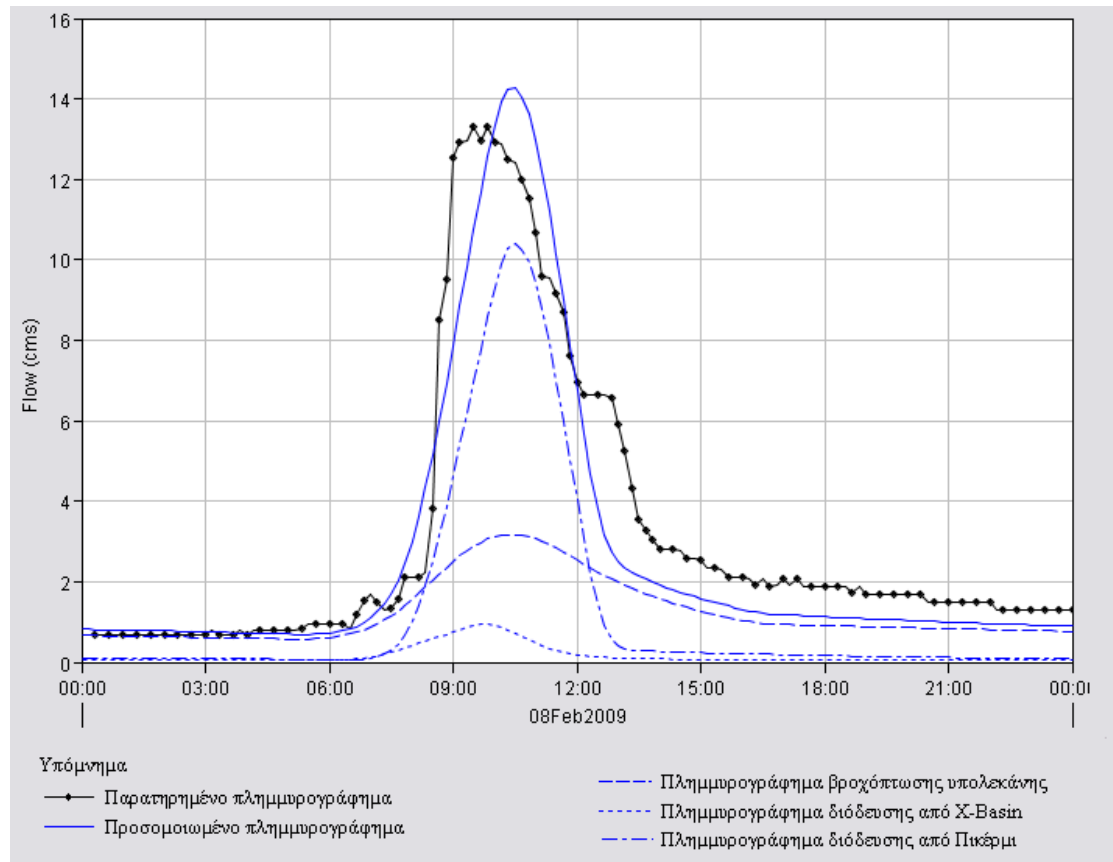
Εικόνα 5.16 Αποτέλεσμα προσομοίωσης με τις ρυθμισμένες τιμές στη θέση Λυκόρεμα



Εικόνα 5.17 Αποτέλεσμα προσομοίωσης με τις ρυθμισμένες τιμές στην έξοδο της X-Basin



Εικόνα 5.18 Αποτέλεσμα προσομοίωσης με τις ρυθμισμένες τιμές στη θέση Πικέρμι

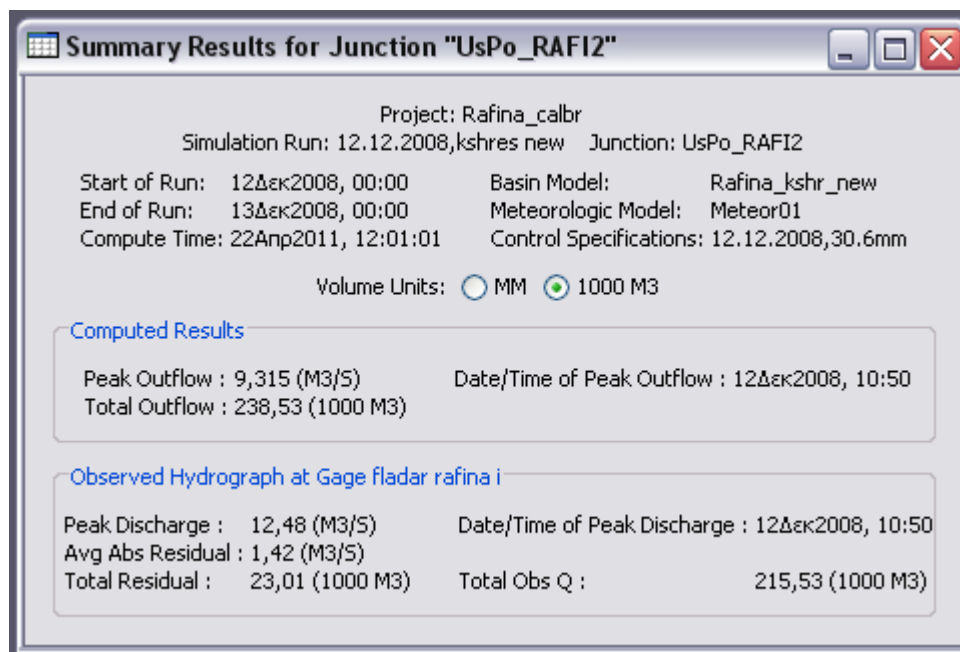


Εικόνα 5.19 Αποτέλεσμα προσομοίωσης με τις ρυθμισμένες τιμές στη θέση Ραφήνα

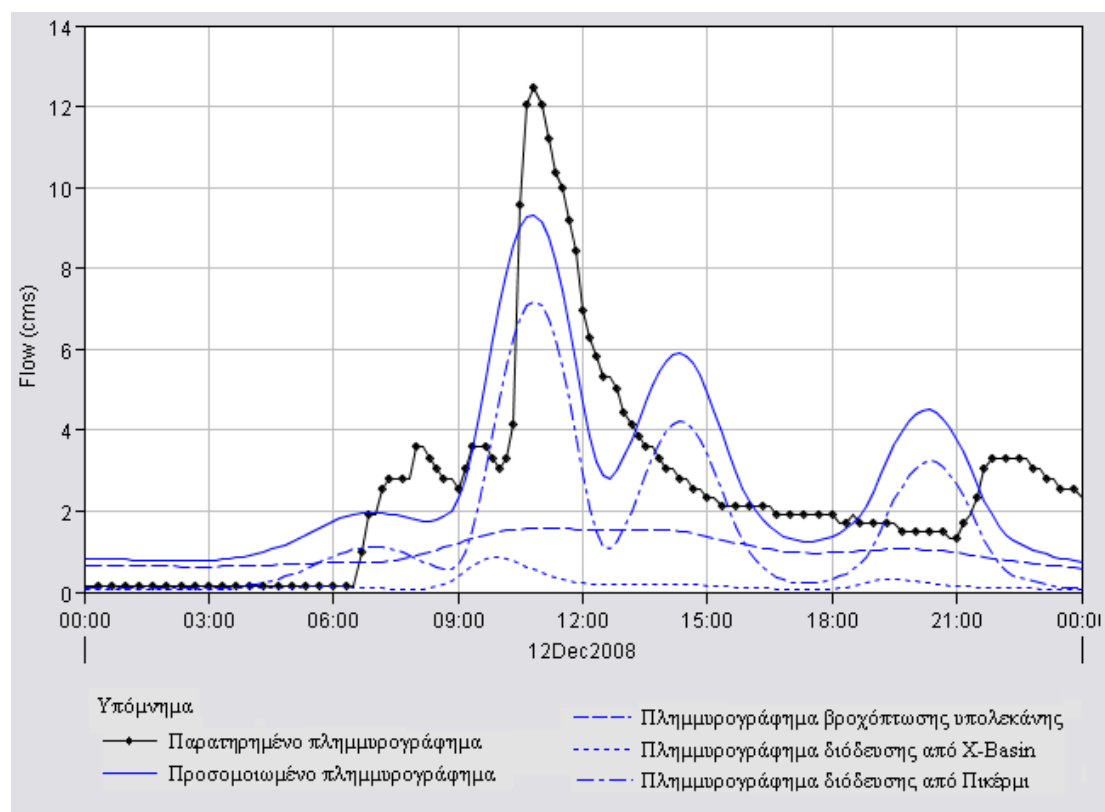
5.4.4. Επαλήθευση μοντέλου

Η επαλήθευση του μοντέλου έγινε με δύο γεγονότα βροχόπτωσης, τα οποία πραγματοποιήθηκαν στις 12.12.2008 και στις 17.11.2009. Κατά την επαλήθευση παρατηρήθηκε ότι τα πλημμυρογραφήματα του ρυθμισμένου μοντέλου απέκλιναν σημαντικά από τα αντίστοιχα παρατηρημένα για αυτές τις θέσεις και αναζητήθηκαν τα αίτια αυτού του αποτελέσματος. Αφού διαπιστώθηκε ότι δεν υπήρχε λάθος στα δεδομένα (πχ εκ παραδρομής εισαγωγή λανθασμένης χρονοσειράς βροχοπτώσεων ή απορροών στο μοντέλο), διερευνήθηκε το ενδεχόμενο διαφορετικών αρχικών συνθηκών για τα γεγονότα βροχόπτωσης. Πράγματι, διαπιστώθηκε ότι μεταβάλλοντας μόνο τους συντελεστές CN από μέσες συνθήκες αρχικής υγρασίας εδάφους σε ξηρές συνθήκες αρχικής υγρασίας τα συνθετικά πλημμυρογραφήματα προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα παρατηρημένα, ακόμα και σε επίπεδο μεμονωμένων γεγονότων. Η παρατήρηση αυτή είναι συνεπής με την υδρολογική συμπεριφορά πολλών λεκανών απορροής του ελλαδικού χώρου, οι οποίες δέχονται το μεγαλύτερο πλήθος βροχοπτώσεων τους κατά το χρονικό διάστημα Οκτωβρίου-Μαρτίου. Στη λεκάνη απορροής της περιοχής μελέτης η συμπεριφορά είναι αντίστοιχη. Σαν αποτέλεσμα, οι συνθήκες υγρασίας επηρεάζουν σημαντικά τη ρύθμιση και κατά συνέπεια την απόδοση του μοντέλου. Κρίθηκε ο απαραίτητος ο διαχωρισμός του μοντέλου σε δύο μοντέλα λεκάνης απορροής, ένα για μέσες συνθήκες υγρασίας που βασίζεται στο αρχικό γεγονός ρύθμισης της 08.02.2009 και ένα για ξηρές συνθήκες υγρασίας που βασίζεται στα γεγονότα της 12.12.2008 και της 17.11.2009 (βλ. Πίνακα 5.18). Η σχετικά καλή ρύθμιση του μοντέλου διαφαίνεται από το γεγονός ότι με μόνη την αλλαγή των αρχικών συνθηκών και κρατώντας σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους τα παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα προσεγγίζονται σχετικά καλά.

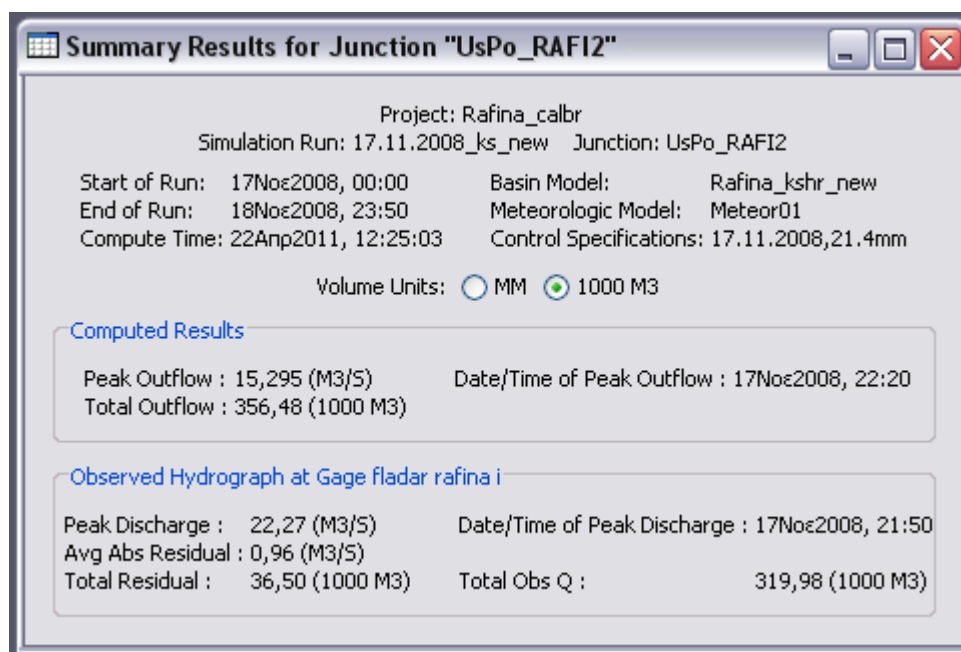
Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι η λεκάνη απορροής της μελέτης, ειδικά στο τμήμα της Πειραματικής Λεκάνης X-Basin, εμφανίζεται ιδιαίτερα χαμηλές απορροές οι οποίες δεν ευνοούν τη ρύθμιση των παραμέτρων καθώς τα ποσοστιαία λάθη, για μικρές αποκλίσεις των τιμών της στάθμης και της απορροής, εμφανίζονται αυξημένα. Έχει κατά καιρούς συζητηθεί η μεταφορά των σταθμών μέτρησης σε άλλες θέσεις. Παρόλα αυτά το μοντέλο της παρούσας εργασίας προσεγγίζει αρκετά καλά την υδρολογική συμπεριφορά της υπό μελέτη λεκάνης. Παρατίθενται τα αριθμητικά αποτελέσματα και πλημμυρογραφήματα για τα γεγονότα των 12.12.2008 και 17.11.2009 στη θέση Ραφήνα (Εικόνες 5.20 - 5.23).



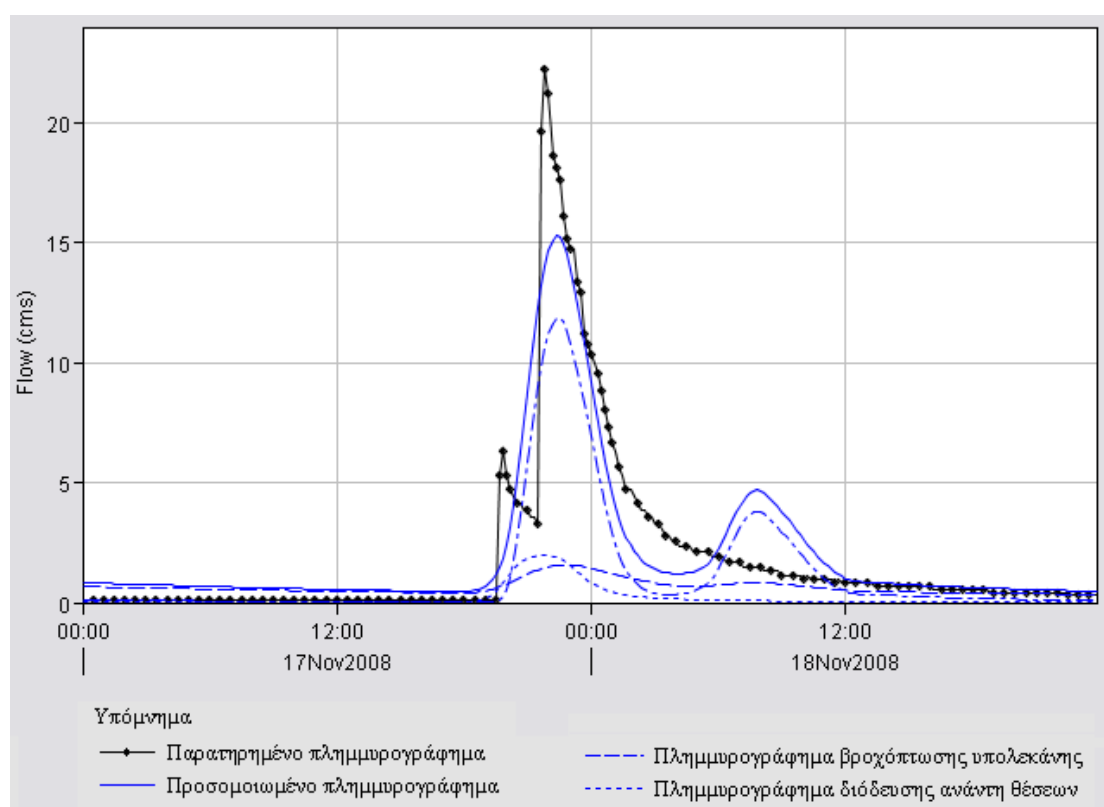
Εικόνα 5.20 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης της 12.12.2008 στη θέση Ραφήνα



Εικόνα 5.21 Πλημμυρογραφήματα της 12.12.2008 στη θέση Ραφήνα



Εικόνα 5.22 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης της 17.11.2009 στη θέση Ραφήνα



Εικόνα 5.23 Πλημμυρογραφήματα της 17.11.2009 στη θέση Ραφήνα

Κωδικός υπολεκάνης	Όνομα υπολεκάνης	Ρυθμισμένη μέση τιμή CN	
		Ξηρές συνθήκες	Μέσες συνθήκες
W1450	Βόρεια πειραματική (xbasin)	18	35
W1500	Νότια πειραματική (xbasin)	33	45
W1550	Δυτική (έξοδος στο Πικέρμι)	50	60
W1590	Ανατολική (έξοδος στη θάλασσα)	30	50
W1600	Κεντρική (έξοδος ανάντη Ραφήνας)	30	50

Πίνακας 5.18 Τελικές ρυθμισμένες τιμές CN υπολεκανών

Στην πραγματικότητα, η ρύθμιση και η επαλήθευση του μοντέλου, όπως ήδη αναφέρθηκε, ήταν δύο διαδικασίες παράλληλες. Ρυθμίζοντας το μοντέλο από τις ανάντη προς τις κατάντη θέσεις διαθέσιμων παρατηρημένων δεδομένων απορροών, η μετάβαση στην επόμενη κάθε φορά θέση έγινε μόνο όταν το ρυθμισμένο μοντέλο έδινε αποδεκτά αποτελέσματα και για τα τρία επιλεγμένα γεγονότα βροχόπτωσης.

5.5. Διαμόρφωση σεναρίων

Σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60 για την πλημμύρα απαιτείται η διερεύνηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας και διακινδύνευσης για περιόδους επαναφοράς τριών κατηγοριών πιθανότητας: χαμηλής (ή ακραίων φαινομένων), μέσης (περιόδου επαναφοράς ≥ 100 ετών) και υψηλής, ανάλογα με την περίπτωση. Στην παρούσα εργασία επιλέγεται η διερεύνηση της υδρολογικής συμπεριφοράς της υπό μελέτη λεκάνης απορροής για μια μέση τιμή της περιόδου επαναφοράς.

5.5.1. Υπολογισμός βροχόπτωσης με βάση όμβρια καμπύλη για την περιοχή μελέτης

Για τον υπολογισμό της βροχόπτωσης επιλέγεται περίοδος επαναφοράς $T=150$ έτη και χρησιμοποιείται η ακόλουθη όμβρια καμπύλη, η οποία έχει διαμορφωθεί για την περιοχή της Ραφήνας (Γραφείο Μαχαίρα, 1983): $i = 14,37 \cdot t^{-0,537} \cdot T^{0,306}$, όπου i [mm/h] η ένταση της βροχόπτωσης, t [ώρες-hours] η διάρκεια και T [έτη] η περίοδος επαναφοράς. Να σημειωθεί ότι η περίοδος επαναφοράς πλημμύρας είναι εν γένει μικρότερη από την περίοδο επαναφοράς της βροχόπτωσης/καταιγίδας. Ως διάρκεια πλημμύρας επιλέγονται οι 6 ώρες, διάρκεια παρόμοια με τα γεγονότα βροχόπτωσης με τα οποία ρυθμίστηκε και επαληθεύθηκε το μοντέλο. Προκύπτει ένταση βροχόπτωσης $i = 25,4 \text{ mm/h}$.

5.5.2. Η πυρκαγιά του Αυγούστου 2009

Στα σενάρια που διαμορφώνονται για την παρούσα εργασία σημαντικό ρόλο παίζει η πυρκαγιά του Αυγούστου 2009 και η έκταση που κάηκε. Στα πλαίσια της εργασίας δεν διερευνήθηκαν εκτεταμένα οι συνέπειες της πυρκαγιάς στην υδρολογική συμπεριφορά της περιοχής (βλ. §3.1.1 και §4.1.2). Υιοθετήθηκαν οι τιμές της Αλωνιστιώτη [2011] για την περιοχή μελέτης. Έπειτα από εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση και εφαρμογή του παραπάνω ρυθμισμένου μοντέλου HEC-HMS, η Αλωνιστιώτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι αλλάζοντας τις τιμές των αριθμών καμπύλης απορροής CN, των αρχικών απωλειών I_a και του χρόνου επιβράδυνσης της αιχμής ($standard\ lag - t_p$) μπορούν να προσεγγιστούν ικανοποιητικά παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα. Οι τιμές αυτές διαμορφώθηκαν, μεταξύ άλλων, και συγκεκριμένα για την πυρκαγιά του 2009. Οι τελευταίες αναγράφονται στον Πίνακα 5.19.

Κωδικός υπολεκάνης	Όνομα υπολεκάνης	CN	I_a (mm)	t_p (hours)
W1450	Βόρεια πειραματική (xbasin)	83	1,92	1,44
W1500	Νότια πειραματική (xbasin)	78	0,72	0,42
W1550	Δυτική (έξοδος στο Πικέρμι)	64	4,29	1,38
W1590	Ανατολική (έξοδος στη θάλασσα)	50	3,18	4,23
W1600	Κεντρική (έξοδος ανάντη Ραφήνας)	56	3,99	3,55

Πίνακας 5.19 Τιμές παραμέτρων Σεναρίου 2

5.5.3. Σενάρια

– 1^ο Σενάριο: Πλήρης αναγέννηση του καμένου δάσους. Ισοδυναμεί με την κατάσταση της περιοχής πριν την πυρκαγιά.

– 2^ο Σενάριο: Μηδενική αναγέννηση του καμένου δάσους. Ισοδυναμεί με την κατάσταση της περιοχής μετά την πυρκαγιά.

– 3^ο Σενάριο: Πλήρης αναγέννηση του δάσους και αστικοποίηση σε τρεις υπολεκάνες. Οι παραδοχές που έγιναν για τη διαμόρφωση των νέων παραμέτρων καταγράφονται στον Πίνακα 5.20. Οι λοιπές παράμετροι είναι όμοιες με το Σενάριο 1. Πρόκειται για εκτιμήσεις με βάση κυρίως την έκταση των οικισμών σε σχέση με τη συνολικά έκταση των υπολεκανών στις οποίες περιλαμβάνονται. Να σημειωθεί ότι δεν συμπεριλήφθηκε πιθανή επιπλέον

αστικοποίηση του οικισμού της Ραφήνας καθώς στην παρούσα εργασία οι υπολογισμοί των πλημμυρογραφημάτων γίνονται ανάντη του οικισμού.

– 4^ο Σενάριο: Μηδενική αναγέννηση του δάσους και αστικοποίηση σε τρεις υπολεκάνες. Οι παραδοχές που έγιναν για τη διαμόρφωση των νέων παραμέτρων καταγράφονται στον Πίνακα 5.21. Οι λοιπές παράμετροι είναι όμοιες με το Σενάριο 2.

Κωδικός υπολεκάνης	Κύριος αστικός ιστός	Αδιαπέρατη επιφάνεια %	Χρόνος t_p (hours)
W1450	-		
W1500	Ντράφι	20	0,5 (μείωση 30%)
W1550	Γλυκά Νερά, Παλλήνη	10	1,3 (μείωση 10%)
W1590	Ραφήνα		
W1600	Πικέρμι	10	3,4 (μείωση 10%)

Πίνακας 5.20 Αλλαγές παραμέτρων Σεναρίου 3

Κωδικός υπολεκάνης	Κύριος αστικός ιστός	Αδιαπέρατη επιφάνεια %	Χρόνος t_p (hours)
W1450	-		
W1500	Ντράφι	20	0,3 (μείωση 30%)
W1550	Γλυκά Νερά, Παλλήνη	10	1,2 (μείωση 10%)
W1590	Ραφήνα		
W1600	Πικέρμι	10	3,2 (μείωση 10%)

Πίνακας 5.21 Αλλαγές παραμέτρων Σεναρίου 4

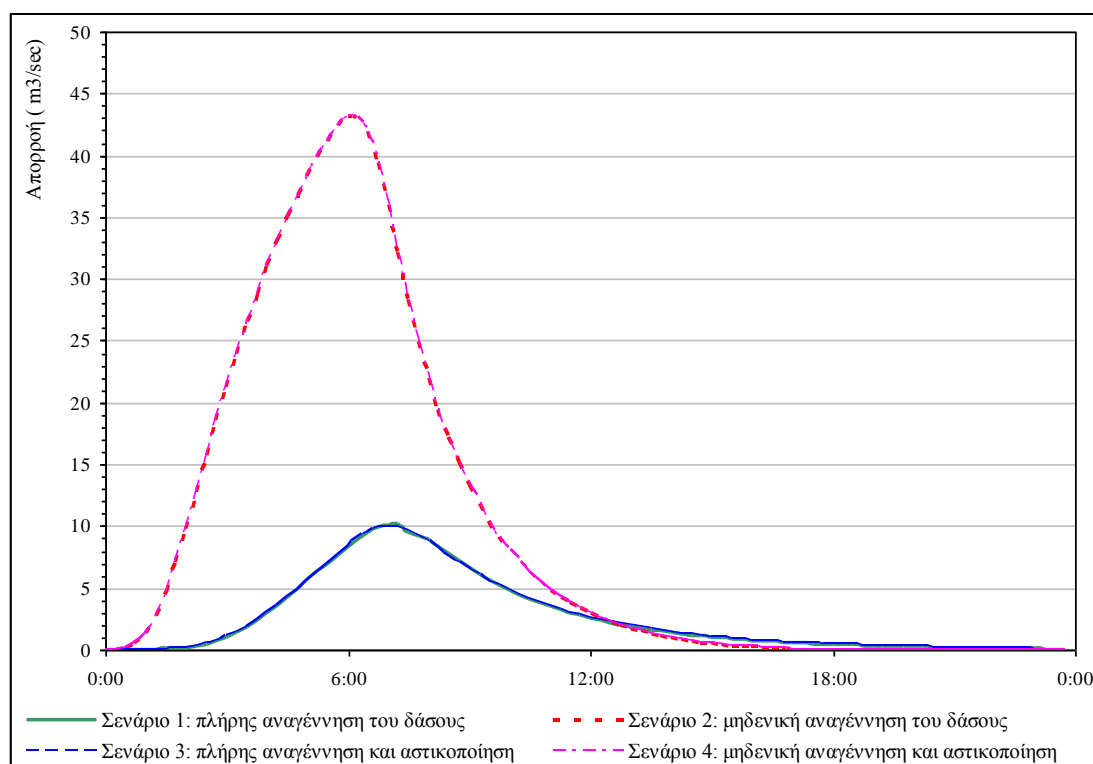
Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα προσομοίωσης

6 Αποτελέσματα προσομοίωσης

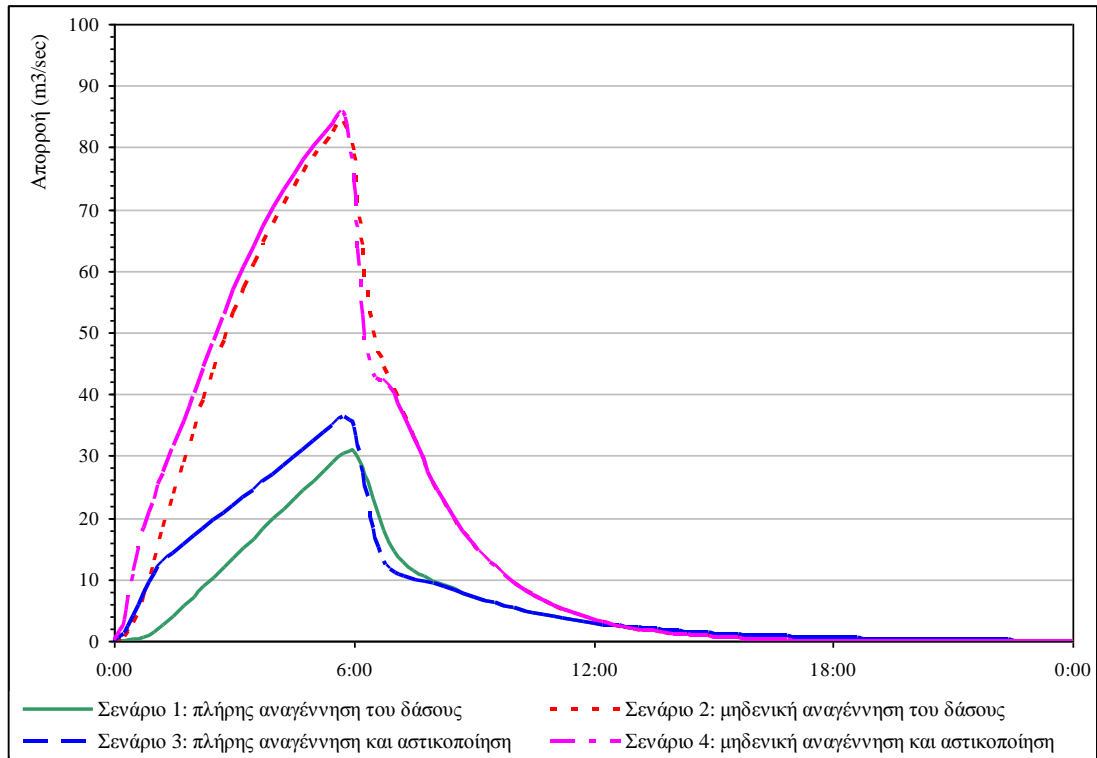
Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με χρήση του λογισμικού HEC-HMS. Το μοντέλο στήθηκε, ρυθμίστηκε και επαληθεύθηκε με τις διαδικασίες που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 5, ενώ οι παρακάτω προσομοιώσεις στηρίζονται σε σενάρια που διαμορφώθηκαν στο ίδιο κεφάλαιο.

6.1 Παράθεση κύριων αποτελεσμάτων προσομοίωσης

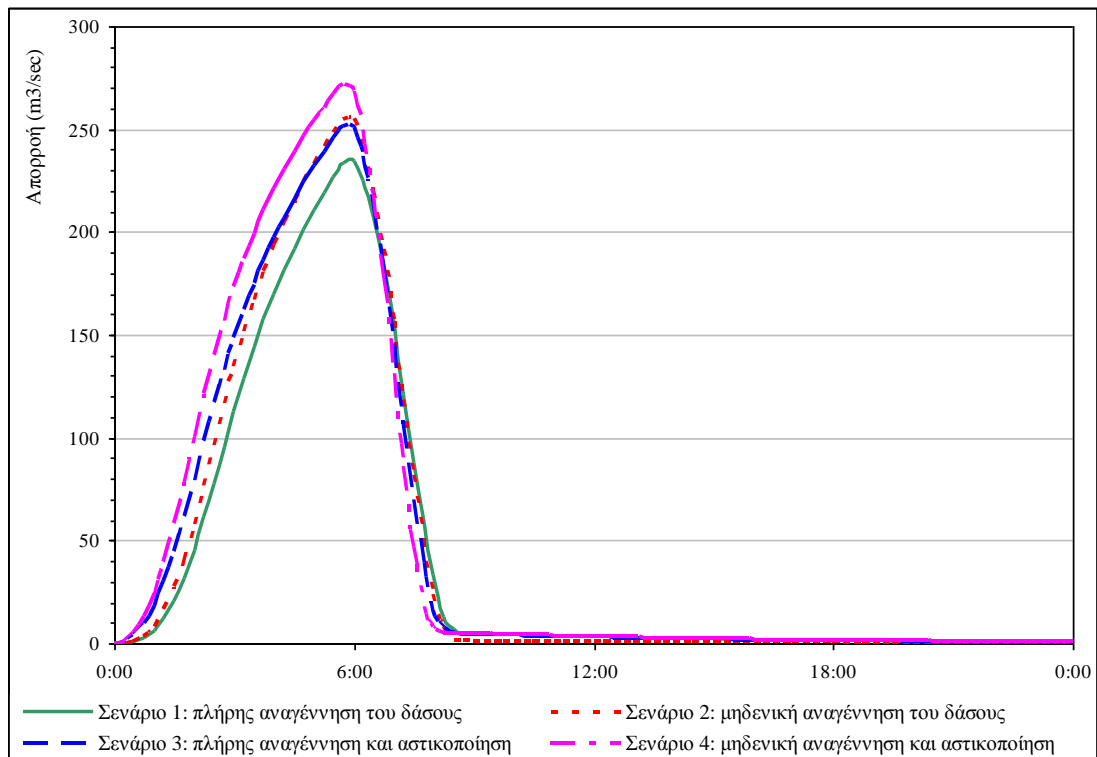
Παρατίθενται με υδρολογική σειρά τα προσομοιωμένα πλημμυρογραφήματα για τα τέσσερα διαμορφωμένα σενάρια (βλ. Εικόνες 6.1-6.5). Η θέση ανάντη του αστικού ιστού της Ραφήνας εμφανίζεται για πρώτη φορά εδώ. Πρόκειται για θέση χωρίς μετρήσεις, η οποία έχει επιλεγεί ως θέση υπολογισμού πλημμυρογραφημάτων στο μοντέλο που στήθηκε επειδή βρίσκεται ακριβώς ανάντη του αστικού ιστού της Ραφήνας.



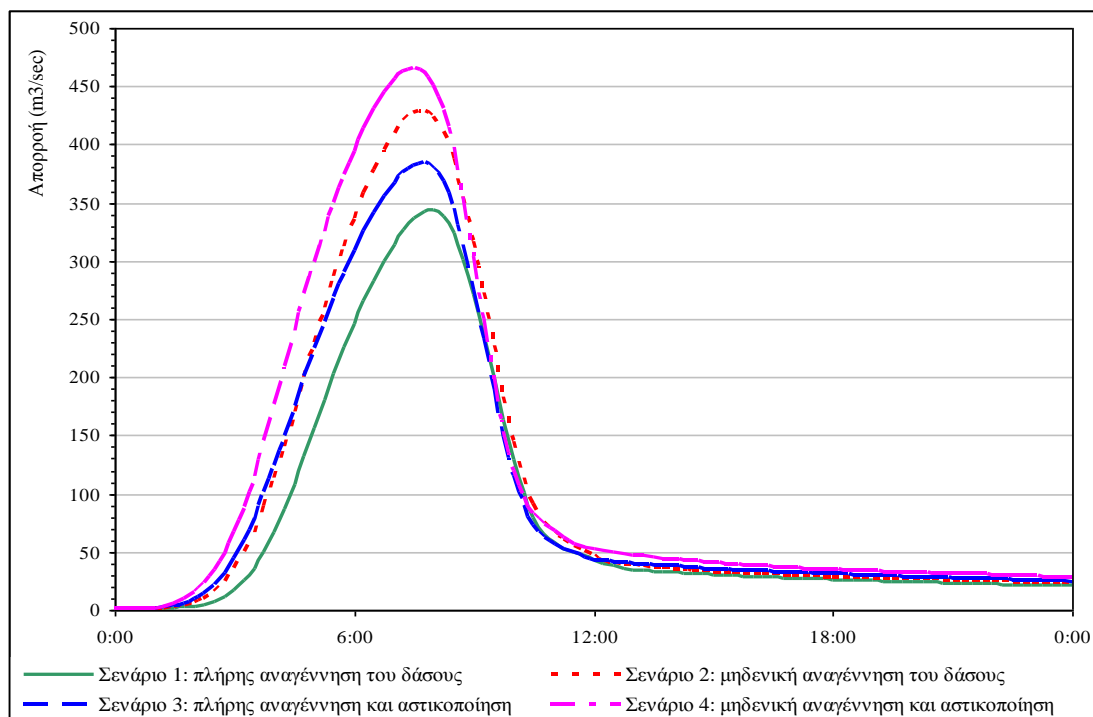
Εικόνα 6.1 Αποτελέσματα συγκριτικής προσομοίωσης σεναρίων στη θέση Λυκορέμα



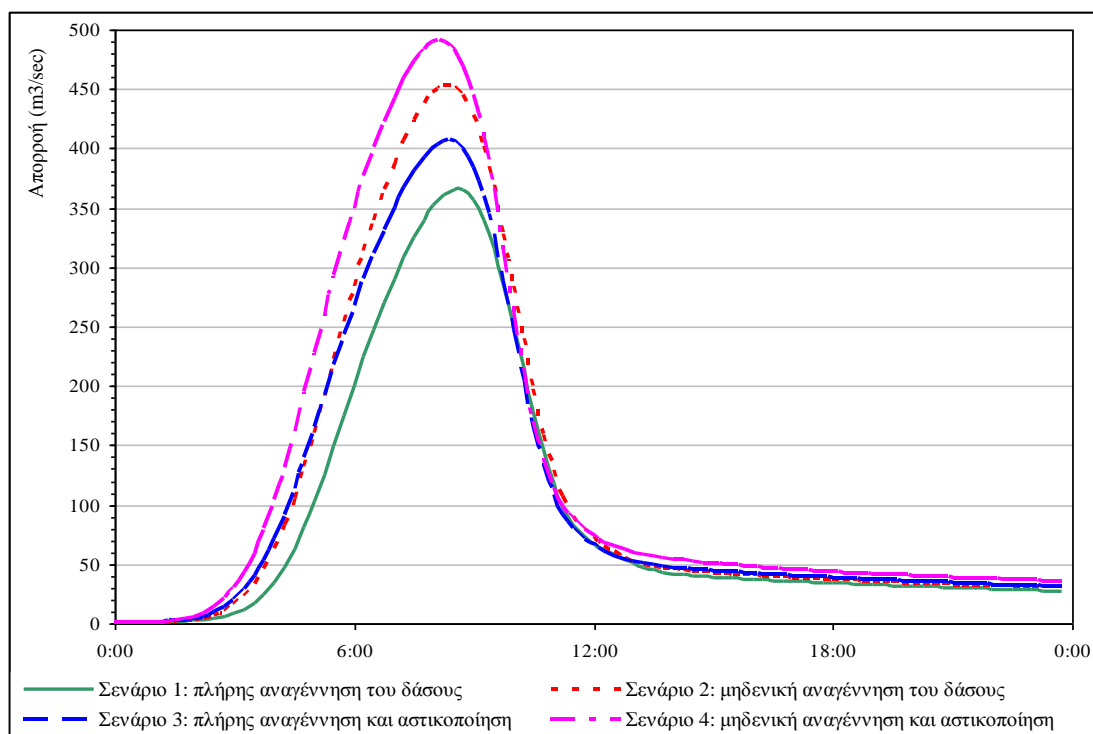
Εικόνα 6.2 Αποτελέσματα συγκριτικής προσομοίωσης σεναρίων στην έξοδο της X-Basin



Εικόνα 6.3 Αποτελέσματα συγκριτικής προσομοίωσης σεναρίων στη θέση Πικέριμι

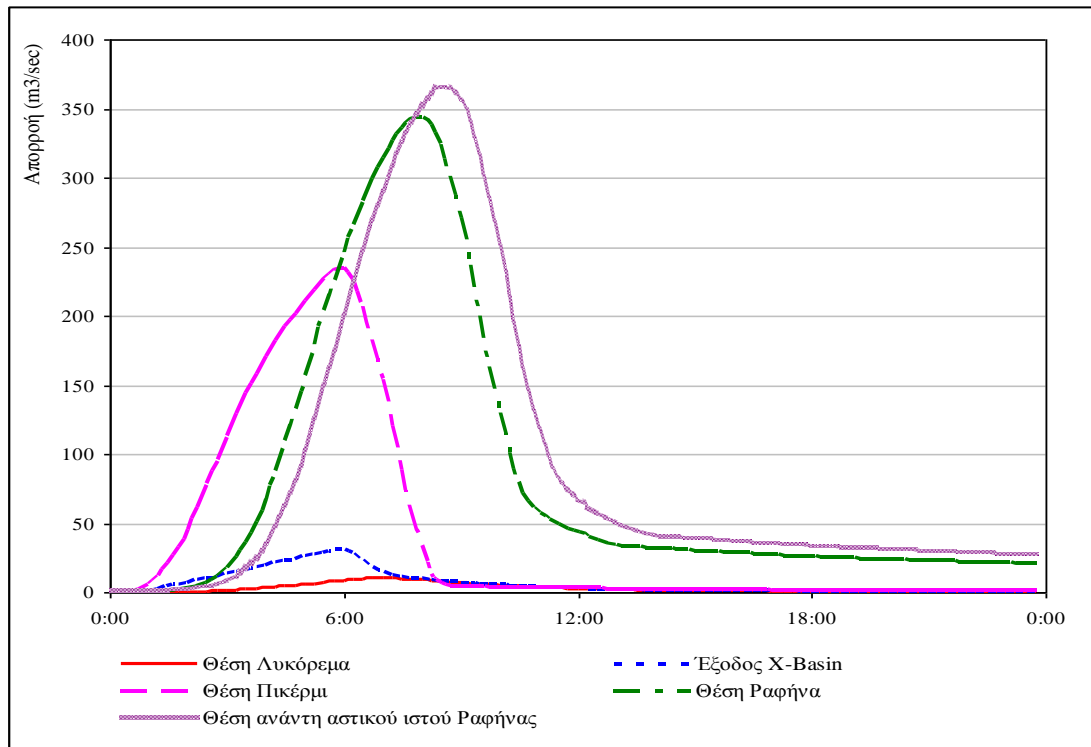


Εικόνα 6.4 Αποτελέσματα συγκριτικής προσομοίωσης σεναρίων στη θέση Ραφήνα

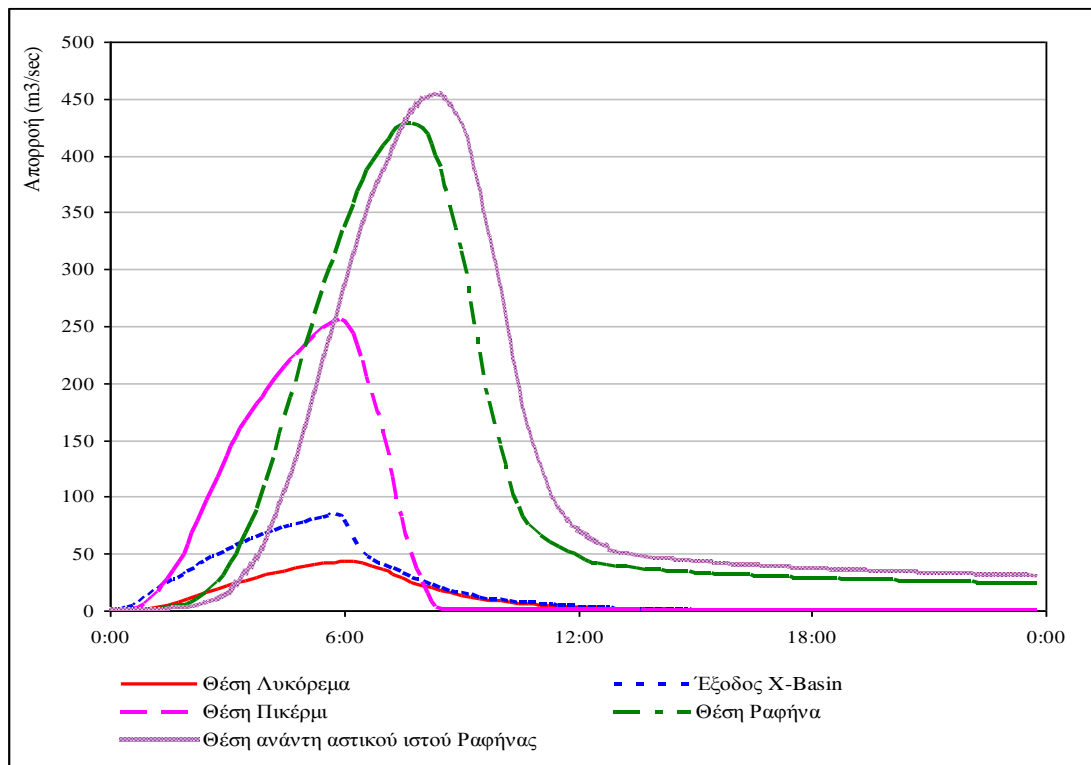


Εικόνα 6.5 Αποτελέσματα συγκριτικής προσομοίωσης σεναρίων αμέσως ανάντη του αστικού ιστού της Ραφήνας

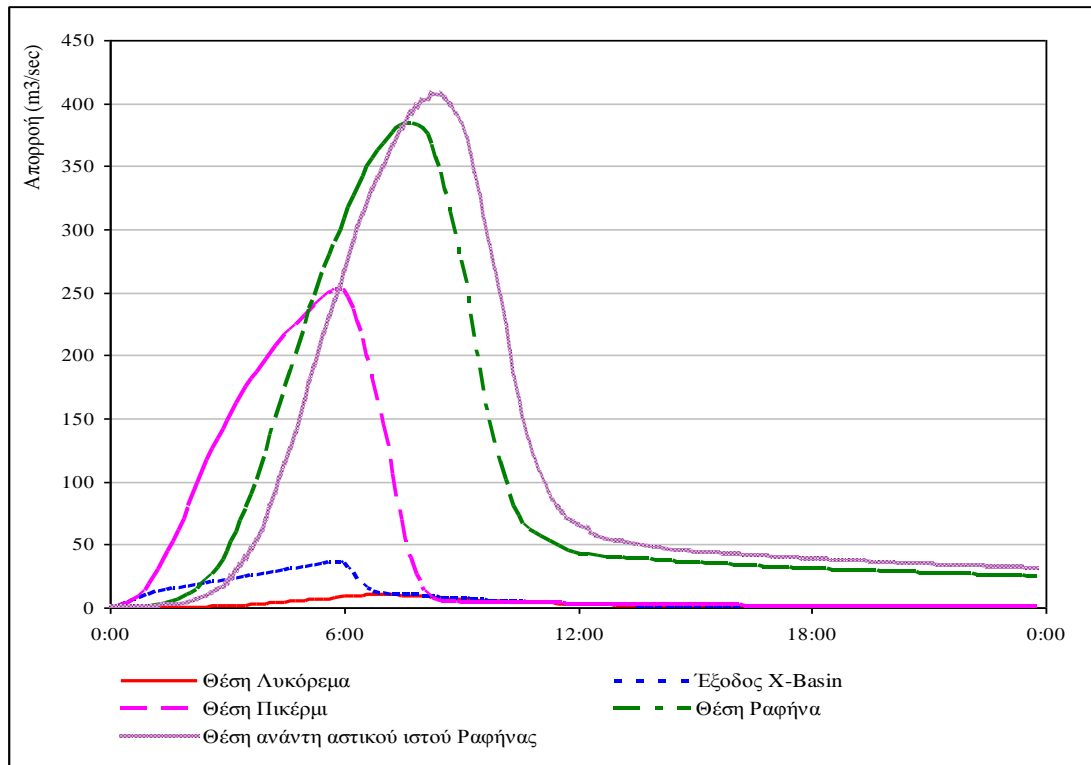
Παρατίθενται επίσης τα πλημμυρογραφήματα όλων των θέσεων για κάθε σενάριο (βλ. Εικόνες 6.6-6.9).



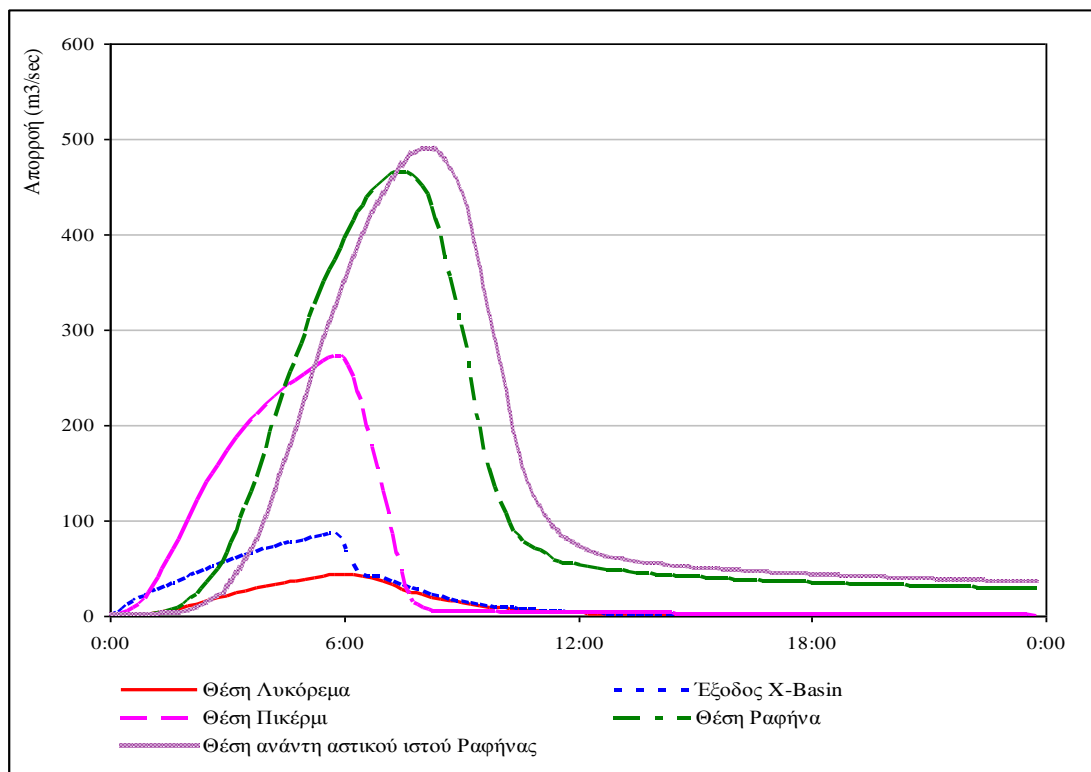
Εικόνα 6.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης Σεναρίου 1



Εικόνα 6.7 Αποτελέσματα προσομοίωσης Σεναρίου 2



Εικόνα 6.8 Αποτελέσματα προσομοίωσης Σεναρίου 3



Εικόνα 6.9 Αποτελέσματα προσομοίωσης Σεναρίου 4

Ακολουθούν συνοπτικοί πίνακες με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (βλ. Πίνακες 6.1, 6.2) καθώς και με σύγκριση μεταξύ των σεναρίων (βλ. Πίνακες 6.3, 6.4). Αναλυτικότερα αποτελέσματα παρατίθενται στο Παράρτημα II.

	Σενάριο 1		Σενάριο 2		Σενάριο 3		Σενάριο 4	
Θέση υπολογισμού πλημμυρογραφήματος	Απορροή αιχμής (m3/sec)	Χρόνος εμφάνισης της αιχμής (hours)	Απορροή αιχμής (m3/sec)	Χρόνος εμφάνισης της αιχμής (hours)	Απορροή αιχμής (m3/sec)	Χρόνος εμφάνισης της αιχμής (hours)	Απορροή αιχμής (m3/sec)	Χρόνος εμφάνισης της αιχμής (hours)
Θέση Λυκόρεμα	9,981	7	43,169	6	9,981	7	43,169	6
Έξοδος X-Basin	30,794	6	84,115	5,75	36,336	5,75	85,532	5,75
Θέση Πικέρμι	234,671	6	254,847	5,75	251,684	5,75	272,129	5,75
Θέση Ραφήνα	343,746	8	428,399	7,75	384,355	7,75	465,202	7,5
Θέση ανάντη αστικού ιστού	365,467	8,5	452,843	8,25	406,005	8,25	489,685	8,25

Πίνακας 6.1 Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης: στοιχεία απορροών αιχμής

Θέση υπολογισμού πλημμυρογραφήματος	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Θέση Λυκόρεμα	221,91	848,58	221,91	848,58
Έξοδος X-Basin	543,57	1535,75	684,84	1603,9
Θέση Πικέρμι	3606,35	3856,51	4055,48	4389,64
Θέση Ραφήνα	8277,86	10356,01	9818,67	11868,41
Θέση ανάντη αστικού ιστού	9492,02	11664,93	11027,62	13172,24

Πίνακας 6.2 Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης: συνολικοί όγκοι απορροής (σε 1000m3)

	απορροή αιχμής (m3/sec)	χρόνος αιχμής (hours)	απορροή αιχμής (m3/sec)	χρόνος αιχμής (hours)	απορροή αιχμής (m3/sec)	χρόνος αιχμής (hours)
	Ποσοστιαία σύγκριση σεναρίων 2-1		Ποσοστιαία σύγκριση σεναρίων 3-1		Ποσοστιαία σύγκριση σεναρίων 4-1	
Θέση Λυκόρεμα	332,51	-14,29	0,00	0,00	332,51	-14,29
Έξοδος X-Basin	173,15	-4,17	18,00	-4,17	177,76	-4,17
Θέση Πικέρμι	8,60	-4,17	7,25	-4,17	15,96	-4,17
Θέση Ραφήνα	24,63	-3,13	11,81	-3,13	35,33	-6,25
Θέση ανάντη αστικού ιστού	23,91	-2,94	11,09	-2,94	33,99	-2,94
	Ποσοστιαία σύγκριση σεναρίων 2-3				Ποσοστιαία σύγκριση σεναρίων 4-2	
Θέση Λυκόρεμα	332,51	-14,29			0,00	0,00
Έξοδος X-Basin	131,49	0,00			1,68	0,00
Θέση Πικέρμι	1,26	0,00			6,78	0,00
Θέση Ραφήνα	11,46	0,00			8,59	-3,23
Θέση ανάντη αστικού ιστού	11,54	0,00			8,14	0,00
					Ποσοστιαία σύγκριση σεναρίων 4-3	
Θέση Λυκόρεμα					332,51	-14,29
Έξοδος X-Basin					135,39	0,00
Θέση Πικέρμι					8,12	0,00
Θέση Ραφήνα					21,03	-3,23
Θέση ανάντη αστικού ιστού					20,61	0,00
			Απόλυτη σύγκριση σεναρίων 3-1		Απόλυτη σύγκριση σεναρίων 4-2	
Θέση Λυκόρεμα			0	0	0	0
Έξοδος X-Basin			5,542	-0,25	1,417	0
Θέση Πικέρμι			17,013	-0,25	17,282	0
Θέση Ραφήνα			40,609	-0,25	36,803	-0,25
Θέση ανάντη αστικού ιστού			40,538	-0,25	36,842	0

Πίνακας 6.3 Εύλογες συγκρίσεις των αποτελεσμάτων των σεναρίων

		Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Σενάριο 1	Θέση Λυκόρεμα				
	Έξοδος X-Basin				
	Θέση Πικέρμι				
	Θέση Ραφήνα				
	Θέση ανάντη αστικού ιστού				
Σενάριο 2	Θέση Λυκόρεμα	282,40			
	Έξοδος X-Basin	182,53			
	Θέση Πικέρμι	6,94			
	Θέση Ραφήνα	25,10			
	Θέση ανάντη αστικού ιστού	22,89			
Σενάριο 3	Θέση Λυκόρεμα	0,00	-282,40		
	Έξοδος X-Basin	25,99	-124,25		
	Θέση Πικέρμι	12,45	4,91		
	Θέση Ραφήνα	18,61	-5,47		
	Θέση ανάντη αστικού ιστού	16,18	-5,78		
Σενάριο 4	Θέση Λυκόρεμα	282,40	-282,40	-282,40	
	Έξοδος X-Basin	195,07	-124,25	-134,20	
	Θέση Πικέρμι	21,72	4,91	-8,24	
	Θέση Ραφήνα	43,38	-5,47	-20,88	
	Θέση ανάντη αστικού ιστού	38,77	-5,78	-19,45	

Πίνακας 6.4 Ποσοστιαία σύγκριση των συνολικών πλημμυρικών όγκων των σεναρίων

6.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Η διαφοροποίηση στις πλημμυρικές αιχμές και τους πλημμυρικούς όγκους μεταξύ αναγεννημένου και καμένου δάσους είναι η πρώτη παρατήρηση που μπορεί να κάνει κανείς με μια απλή ματιά στα διαγράμματα που παρατίθενται.

Η πλημμυρική αιχμή σε περίπτωση μηδενικής αναγέννησης του δάσους είναι υπερτριπλάσια της αντίστοιχης πλημμυρικής αιχμής στη θέση του Λυκορέματος για αναγεννημένο δάσος (αύξηση κατά 330%), ενώ η ποσοστιαία αύξηση μειώνεται καθώς η απόσταση από την καμένη έκταση αυξάνεται (173% στην έξοδο της X-Basin, 25% στη θέση Ραφήνα, 24% ανάντη του αστικού ιστού και μόλις 9% στη θέση Πικέρμι, λόγω της μικρής επίδρασης της φωτιάς στη Δυτική υπολεκάνη). Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρείται και στους χρόνους εμφάνισης της αιχμής. Σε περίπτωση μηδενικής αναγέννησης του δάσους η αιχμή της πλημμύρας εμφανίζεται συντομότερα από την αιχμή σε περίπτωση αναγεννημένου δάσους, με ακραία τιμή τη μείωση του χρόνου κατά 14% στη θέση του Λυκορέματος, και μειούμενες ποσοστιαίες μειώσεις στις υπόλοιπες θέσεις (4% στην έξοδο της X-Basin και τη θέση Πικέρμι, και 3% στη θέση Ραφήνα και στη θέση ανάντη του αστικού της ιστού).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των σεναρίων 1 και 3, παρατηρείται ότι η αστικοποίηση που λήφθηκε υπόψη σε τρεις υπολεκάνες επηρεάζει όλες τις κατάντη θέσεις με σχέση που σχετίζεται άμεσα με το βαθμό της αστικοποίησης. Έτσι, στην έξοδο της πειραματικής λεκάνης X-Basin η αύξηση της πλημμυρικής αιχμής είναι περίπου 18%, ενώ στις θέσεις Ραφήνα και στη θέση ανάντη του οικισμού της 12% και 11% αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη τη μικρή απορροή του υδατορέματος του Λυκορέματος σε σχέση με το υδατόρεμα της Ραφήνας, μπορεί να συμπεραθεί ότι η αστικοποίηση της δυτικής και της κεντρικής λεκάνης καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τις τελευταίες δύο ποσοστιαίες αυξήσεις. Παράλληλα, η μείωση του χρόνου εμφάνισης της αιχμής είναι αντίστοιχη με τη μείωση στην περίπτωση μηδενικής αναγέννησης του δάσους, με εξαίρεση τη θέση του Λυκορέματος, στην οποία δεν εμφανίζεται καμία αλλαγή, εφόσον δε θεωρήθηκε αστικοποίηση στο βόρειο τμήμα της πειραματικής λεκάνης X-Basin.

Οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις, όπως και ήταν αναμενόμενο, εμφανίζονται μεταξύ του σεναρίου πλήρους αναγέννησης του δάσους και του σεναρίου μηδενικής αναγέννησης με παράλληλη αύξηση του αστικού ιστού. Στις βόρειες ανάντη θέσεις, λόγω της μεγάλης, ποσοστιαία, καμένης έκτασης οι ποσοστιαίες μεταβολές των χαρακτηριστικών της αιχμής καθορίζονται κυρίως από τη μηδενική αναγέννηση του δάσους, και σε πολύ μικρό βαθμό από την αστικοποίηση (έξοδος πειραματικής λεκάνης X-Basin). Αξιόλογη είναι η παρατήρηση ότι τα ποσοστά αύξησης της πλημμυρικής αιχμής από το σενάριο της πλήρους αναγέννησης του δάσους στο σενάριο της μηδενικής αναγέννησης με κάποιο βαθμό αστικοποίησης είναι της

ίδιας τάξης μεγέθους με το άθροισμα των επιμέρους ποσοστιαίων αυξήσεων (μηδενικής αναγέννησης και πλήρους αναγέννησης με αστικοποίηση, δηλαδή σύγκριση σεναρίων 1 με 2 και 1 με 3). Σημαντική είναι επίσης η παρατήρηση ότι δε συμβαίνει το ίδιο με τους χρόνους εμφάνισης της αιχμής οι οποίοι φαίνεται να παραμένουν σχετικά σταθεροί μεταξύ των σεναρίων 2, 3 και 4. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στους μικρούς χρόνους απορροών των υπολεκανών και στις στρογγυλοποιήσεις του προγράμματος. Μικρότερο βήμα προσομοίωσης θα έδινε ίσως διαφορετικά αποτελέσματα, μεγαλύτερη ακρίβειας αλλά μεγαλύτερης αβεβαιότητας. Δε θα πρέπει να θεωρηθεί ότι επιλογή μικρού βήματος στην προσομοίωση βελτιώνει τα αποτελέσματα της. Το μοντέλο στήθηκε με βήμα 10 λεπτών και με, ούτως ή άλλως, αρκετά μεγάλη αβεβαιότητα εφόσον η ρύθμιση και επαλήθευσή του στηρίχθηκαν σε μεμονωμένα γεγονότα βροχοπτώσεων. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε ότι βήμα μικρότερο των 15 λεπτών πιθανώς δώσει διαστρεβλωμένα αποτελέσματα.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των σεναρίων 2 και 4 διαπιστώνεται ότι οι χρόνοι εμφάνισης της αιχμής παραμένουν περίπου σταθεροί (βλέπε και σχόλιο ανωτέρω), ενώ οι αιχμές είναι μεγαλύτερες ποσοστιαία στην περίπτωση της αστικοποίησης στις θέσεις εξόδου της X-Basin, Πικέρμι, Ραφήνα και ανάντη του αστικού ιστού της κατά 2%, 7%, 8.5% και 8% αντίστοιχα.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαφοροποίηση μεταξύ των συγκρίσεων των σεναρίων 1 και 3 και των σεναρίων 1 και 4. Σε περίπτωση αναγεννημένου δάσους, η ποσοστιαία αύξηση της πλημμυρικής αιχμής λόγω αστικοποίησης είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με την περίπτωση μη αναγεννημένου δάσους, γεγονός απονεμόμενο αν ληφθεί υπόψη ότι οι τιμές των απορροών αιχμής στη δεύτερη περίπτωση είναι σαφώς μεγαλύτερες. Η ίδια τάση παρατηρείται και στις απόλυτες διαφορές, ήτοι σε περίπτωση αναγεννημένου δάσους που αστικοποιείται η αύξηση της αιχμής είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αύξηση σε περίπτωση μη αναγεννημένου δάσους. Με παρόμοια λογική, στη δεύτερη περίπτωση οι απορροές είναι ούτως ή άλλως αυξημένες λόγω της καμένης έκτασης. Η αστικοποίηση επιβαρύνει μεν την επιφανειακή απορροή, αλλά σε μικρότερο βαθμό από ότι επιβαρύνει την απορροή η δημιουργία αδιαπέρατων επιφανειών σε μία πρωτίστως δασική έκταση.

Συνεχίζοντας τη σύγκριση μεταξύ αστικοποίησης σε αναγεννημένο και μη αναγεννημένο δάσος, είναι σαφές ότι στη δεύτερη περίπτωση η απορροές εμφανίζονται αυξημένες (κατά 8% μέχρι 330% ανάλογα με τη γειτνίαση της θέσης στην καμένη περιοχή). Οι χρόνοι εμφάνισης της αιχμής φαίνεται να είναι μειωμένοι μόνο σε περίπτωση άμεσης γειτνίασης με την καμένη περιοχή. Ο αναγνώστης παραπέμπεται στον παραπάνω σχολιασμό της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Αναμένεται γενικώς οι χρόνοι να είναι μικρότεροι στην περίπτωση μηδενικής αναγέννησης για τον ίδιο βαθμό αστικοποίησης, είναι πιθανό όμως αυτό να μην

είναι υπολογίσιμο με ακρίβεια λόγω των χαρακτηριστικών της υπό μελέτη λεκάνης και του τρόπου ανάπτυξης του μοντέλου.

Ως προς τις διαφοροποιήσεις των πλημμυρικών όγκων μεταξύ των σεναρίων, παρατηρούνται αντίστοιχου επιπέδου αυξήσεις μεταξύ των σεναρίων μηδενικής και πλήρους αναγέννησης, αναλόγως και με το αν αυτά περιλαμβάνουν αστικοποίηση ή όχι. Όπως και στις περιπτώσεις των απορροών αιχμής, οι διαφοροποιήσεις των πλημμυρικών αιχμών σχετίζονται άμεσα με τη θέση υπολογισμού της απορροής και το καθεστώς καμένης ή/και αστικοποιημένης έκτασης στις ανάντη λεκάνες. Έτσι, για παράδειγμα, στην έξοδο της X-Basin η πλημμυρική απορροή καθορίζεται πρωτίστως από την καμένη έκταση και δευτερευόντως από την αστικοποίηση στη νότια υπολεκάνη της. Αξιόλογη είναι και στην περίπτωση της σύγκρισης των πλημμυρικών όγκων η παρατήρηση ότι τα ποσοστά αύξησης από το σενάριο της πλήρους αναγέννησης του δάσους στο σενάριο της μηδενικής αναγέννησης με κάποιο βαθμό αστικοποίησης είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το άθροισμα των επιμέρους ποσοστιαίων αυξήσεων (μηδενικής αναγέννησης και πλήρους αναγέννησης με αστικοποίηση, δηλαδή σύγκριση σεναρίων 1 με 2 και 1 με 3).

***Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα εργασίας,
συζήτηση και
προτάσεις για περαιτέρω έρευνα***

7 Συμπεράσματα εργασίας, συζήτηση και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

7.1 Συμπεράσματα

Επιμέρους συμπεράσματα για την εφαρμογή των μεθοδολογιών και για το βέλτιστο τρόπο χειρισμού των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν στην εν λόγω εργασία είναι διάχυτες στο κείμενο και δε θα γίνει ιδιαίτερη μνεία εδώ. Ως αξιόλογα συνοπτικά συμπεράσματα αναγνωρίστηκαν τα ακόλουθα:

➤ Η χρήση γεωλογικού χάρτη για την εκτίμηση της εδαφολογικής κατάστασης και της υδροπερατότητας του εδάφους μιας περιοχής είναι ανεπαρκής.

Πετρώματα τα οποία μπορεί να εμφανίζουν τοπικά παραμόρφωση ή κατακερματισμό δεν αποδίδονται με επαρκή ακρίβεια στους συνήθεις γεωλογικούς χάρτες. Η διαδικασία εκτίμησης των συντελεστών CN στην παρούσα εργασία ήταν ιδιαίτερος χρονοβόρα, καθώς δε βρέθηκε στη βιβλιογραφία συστηματική μεθοδολογία για την εκτίμησή τους, παρά μόνο έτοιμες τιμές σε μεμονωμένες εργασίες χωρίς περιγραφή των μεθοδολογιών προσδιορισμού των τιμών αυτών. Τελικά, μετά τη ρύθμιση του μοντέλου, προέκυψαν για όλες τις υπολεκάνες τιμές με πολύ μεγάλες αποκλίσεις από τις αρχικά υπολογισμένες. Επιβεβαιώνοντας βιβλιογραφικά ότι για, τουλάχιστον, δύο από τις υπολεκάνες οι τιμές του ρυθμισμένου μοντέλου είναι αυτές που προσεγγίζουν περισσότερο την υδρολογική συμπεριφορά τους, φαίνεται πως ο γεωλογικός χάρτης που χρησιμοποιήθηκε δεν ήταν αξιόπιστος για μελέτη τέτοιας ακρίβειας. Λόγω της μη διαθεσιμότητας εδαφολογικών χαρτών, τρεις μοιάζουν οι λύσεις για έρευνα με ικανοποιητική ακρίβεια: κατάρτιση χαρτών λεπτομερέστερης κλίμακας (γεωλογικών επιφανειακών εμφανίσεων ή εδαφολογικών), επιτόπια εξέταση της περιοχής ή/και βιβλιογραφική έρευνα για την περιοχή μελέτης. Ο πρώτος τρόπος είναι φυσικά ο πιο αξιόπιστος, αλλά και ο δυσκολότερα εφαρμόσιμος. Συνδυασμός των τελευταίων με τη ρύθμιση του προσομοιώματος είναι ίσως η βέλτιστη λύση για μια μελέτη με εύλογη χρονική διάρκεια.

➤ Οι αρχικές/προεπιλεγμένες τιμές (default values) που αυτόματα προτείνουν τα λογισμικά πρέπει να υιοθετούνται ή να απορρίπτονται κριτικά.

Οι τιμές αυτές μπορεί να είναι εύλογες για τις πρωταρχικές, μόνο, χρήσεις του λογισμικού ή για το περιβάλλον στο οποίο προτάθηκαν. Για παράδειγμα, η επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους μπορεί να διαφοροποιείται ανάμεσα σε μια αμιγώς υδρολογική μελέτη ή μια μελέτη η οποία θα ακολουθηθεί από υδραυλική μελέτη κατακλύσεων γύρω από τα υδατορεύματα. Στην πρώτη περίπτωση μπορεί να γίνει δεκτή η θεώρηση πολύ μεγάλου

βάθους των υδατορευμάτων, με το σκεπτικό ότι, εν γένει, ένα μονοδιάστατο μοντέλο δεν μπορεί να προσομοιώσει πλευρική κατάκλυση, περιορισμός που λαμβάνεται υπόψη ως οριακή συνθήκη και για τις επιλεγόμενες κατά τη μελέτη περιόδους επαναφοράς των βροχοπτώσεων. Αντίθετα, εάν υπάρχει ενδιαφέρον για την κατάκλυση γύρω από το υδατόρευμα, είναι σαφές ότι η διαμόρφωση του εδάφους γύρω από την κοίτη των υδατορευμάτων κατά την επεξεργασία των τοπογραφικών δεδομένων πρέπει να γίνει εύλογα και, κατά το δυνατό, συμβατά με την πραγματικότητα. Επιπλέον, οι προεπιλεγμένες τιμές διαμορφώνονται κατά κανόνα στο περιβάλλον στο οποίο δημιουργείται το ίδιο το λογισμικό. Εν προκειμένω, για το HEC-HMS του Σώματος Μηχανικών του Στρατού των ΗΠΑ μπορεί, αν μη τι άλλο, να υποθεθεί ότι οι αρχικές τιμές έχουν διαμορφωθεί είτε από το τοπικό υδρολογικό καθεστώς κάποιας πολιτείας, ή ένα μέσο υδρολογικό καθεστώς για τη χώρα.

7.2 Συζήτηση

➤ Ρύθμιση και επαλήθευση του μοντέλου: στην παρούσα εργασία, η ρύθμιση και η επαλήθευση του μοντέλου έγινε με τρία μεμονωμένα γεγονότα βροχοπτώσεων, παρόμοιας διάρκειας και έντασης. Η επιλογή αυτή δεν ήταν αρχικώς η επιθυμητή, αλλά λόγω προβλημάτων στις βάσεις δεδομένων βροχοπτώσεων και απορροών κατά την εκπόνηση της εργασίας δεν ήταν δυνατή η εξαγωγή μακρών παρατηρημένων χρονοσειρών για την εκτίμηση στατιστικών χαρακτηριστικών της βροχόπτωσης και της απορροής. Έτσι, τα γεγονότα βροχόπτωσης που επιλέχθηκαν δεν ήταν δυνατόν να ελεγχθούν για την περίοδο επαναφοράς τους με βάση στατιστική επεξεργασία.

➤ Η εξαγωγή πλημμυρογραφημάτων με διάφορες περιόδους επαναφοράς και διαμορφούμενα σενάρια είναι ένα σημαντικό βήμα προς την ανάλυση της πλημμυρικής συμπεριφοράς μιας περιοχής και των κινδύνων που ελλοχεύει. Η κατάρτιση χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας και διακινδύνευσης μπορούν εποπτικά να δώσουν ένα μέτρο αυτής της συμπεριφοράς και των πιθανών επιπτώσεών της. Πρέπει ο αναλυτής να έχει υπόψη του ότι οι πλημμυρικές μελέτες δεν αποτελούν αυτοσκοπό, αλλά ένα μέσο για τη διαφύλαξη της ζωής και του περιβάλλοντος. Στην κατεύθυνση αυτή, οι καταρτισμένοι χάρτες πρέπει να συνοδεύονται από πλάνα διαχείρισης των πλημμυρικών απορροών, αλλά και των συνεπειών τους. Σε ακραίες περιπτώσεις κατασκευαστικές λύσεις μπορεί να κριθούν απαραίτητες, συχνά υπό το πρίσμα της διαχείρισης των πλημμυρών ως τμήμα της συνολικής διαχείρισης των υδάτων, και όχι ως φυσική καταστροφή. Οι κατασκευαστικές αυτές λύσεις, όμως, δε θα πρέπει να αποτελούν προτεραιότητα, ακόμα και αν η γνώση στους αντίστοιχους κατασκευαστικούς τομείς είναι εδραιωμένη. Πριν από οποιαδήποτε παρέμβαση θα πρέπει να

εξετάζονται και άλλες πιθανές λύσεις, πιο ήπιες ως προς την παρεμβατικότητα τους στο χώρο, με πιθανώς χαμηλότερο οικονομικό κόστος ή/και ευρύτερη εφαρμοσιμότητα.

Συχνά, η αφέλεια και η έλλειψη οργάνωσης παίζουν καθοριστικό ρόλο στην αποφυγή και ελάττωση των αρνητικών συνεπειών των πλημμυρών. Τίθεται λοιπόν το ζήτημα: θα μπορούσε αυξημένη οργάνωση και ενημέρωση γύρω από τα θέματα των πλημμυρών να ελαχιστοποιήσει τις συνέπειές τους; Οργανωμένο κράτος και ενημερωμένοι, ευαισθητοποιημένοι και ενεργοί πολίτες μπορούν σε μεγάλο βαθμό να αποτρέψουν κάποιες από τις συνέπειες των πλημμυρών, ή, τουλάχιστον, να τις ελαττώσουν.

7.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

➤ Για την κατάρτιση χαρτών πλημμυρικών επικινδυνότητας και διακινδύνευσης στην περιοχή, τα ακόλουθα βήματα μπορούν να ακολουθηθούν:

– Εκτέλεση υδραυλικών υπολογισμών και κατάρτιση χαρτών κατάκλυσης εκτάσεων, βαθών ροής και ταχυτήτων ροής. Πιθανώς θα χρειαστούν λεπτομερέστερα στοιχεία για την τοπογραφία της περιοχής για να αποδοθούν με σχετική ακρίβεια οι διατομές της κοίτης των υδατορευμάτων.

➤ Συγκεκριμένα για τον αστικό ιστό της Ραφήνας: έχουν ήδη αποκτηθεί από το Δήμο Ραφήνας τα σχέδια του δικτύου ομβρίων υδάτων σε έντυπη μορφή. Με την απόκτηση και λεπτομερέστερων τοπογραφικών στοιχείων θα είναι δυνατή η από κοινού υδραυλική προσομοίωση του συστήματος και η εξαγωγή συμπερασμάτων για τα βάθη και τις ροές κατάκλυσης εντός του αστικού ιστού.

– Συλλογή πληθυσμιακών, οικονομικών, περιβαλλοντικών και λοιπών στοιχείων για την εκτίμηση των επιπτώσεων πλημμυρικών επεισοδίων στην περιοχή. Ιστορικά δεδομένα μπορούν επίσης να αποτελέσουν ένδειξη για μελλοντικά προβλήματα, πάντοτε με παράλληλη διερεύνηση και των (πρόσκαιρων) συνθηκών την περίοδο που εμφανίστηκε η κάθε πλημμύρα και τις διαφοροποιήσεις στην υποδομή αλλά και στην ετοιμότητα της τοπικής κοινωνίας. Μαρτυρίες από εργαζόμενους στο Δήμο Ραφήνας αλλά και τον τοπικό πληθυσμό θα δώσουν μεγαλύτερη αξιοπιστία στα δεδομένα και θα ενισχύσουν την κατανόηση των γεγονότων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Ελληνική βιβλιογραφία

1. Αλωνιστιώτη, Δ., 2011. Διερεύνηση της επίδρασης των δασικών πυρκαγιών στην υδρολογική απόκριση λεκανών απορροής της Ανατολικής Αττικής. Μεταπτυχιακή Εργασία, Διεπιστημονικό-Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
2. Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, Υπουργείο Προστασίας του Πολίτη [<http://www.gscp.gr>]
3. Γκιόκας, Α., 2009. Κατάρτιση μεθοδολογικού πλαισίου για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας, Εφαρμογή στο Νομό Αρκαδίας, Μεταπτυχιακή Εργασία, Διεπιστημονικό-Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
4. Γκριτζώνας, Κ., 2006. Σχεδιασμός δεξαμενών ανάσχεσης πλημμυρών, Εφαρμογή στην περιοχή Άνω Βριλήσσια, Μεταπτυχιακή Εργασία, Διεπιστημονικό-Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
5. Γραφείο Μαχαίρα, 1983. Προμελέτη Διευθέτησης Ρέματος Ραφήνας, ΥΠΕΧΩΔΕ/Δ3.
6. Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2009-2010*. Πειραματική λεκάνη X-Basin [<http://xbasin.chi.civil.ntua.gr/xbasin/?versionChecked=true>], Δίκτυο METEONET [<http://meteonet.chi.civil.ntua.gr>], Δίκτυο Fladar [fladar.org/el], Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
7. Καββαδάς, Μ., 2007. Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
8. Καββαδάς, Μ., 2005. Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
9. Κανδηλιώτη, Γ., 2009. Εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας στο υδατικό διαμέρισμα της Αττικής, Μεταπτυχιακή Εργασία, Διεπιστημονικό-Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
10. Κοκολάκης Γ., Σπηλιώτης Ι., 1999. Εισαγωγή στη θεωρία πιθανοτήτων και στατιστική, Έκδοση 3^η, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
11. Κοντογιάννης, Κ., Μαΐστρος, Γ., Σταφυλοπάτης, Α.-Γ., 2007. Προγραμματιστικές Τεχνικές – Διαφάνειες μαθήματος, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

* Οι ιστοσελίδες του Εργαστηρίου δεν είναι πλέον διαθέσιμες, και έχουν αντικατασταθεί από τον αγγλόφωνο (προς το παρόν) ιστότοπο του Hydrological Observatory of Athens (βλ. ξενόγλωσση βιβλιογραφία).

12. Κουτσογιάννης, Δ., Μαμάσης, Ν., 2010. Στρατηγική αντιμετώπισης πλημμυρών: Σύγχρονο τεχνολογικό πλαίσιο, Ημερίδα με θέμα «Ολοκληρωμένος σχεδιασμός αντιπλημμυρικής προστασίας: η πρόκληση για το μέλλον», Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος, Αθήνα
13. Κουτσογιάννης, Δ., 2008. Ο αντιπλημμυρικός σχεδιασμός στην Ελλάδα – Αξιοποίηση της επιστημονικής γνώσης, Ημερίδα με θέμα «Ο ρόλος της επιστήμης στην πορεία ανασυγκρότησης των πυρόπληκτων περιοχών», ΤΕΕ – Περιφερειακό Τμήμα Πελοποννήσου, Καλαμάτα
14. Κουτσογιάννης, Δ., 2007. Σημειώσεις στοχαστικών μεθόδων στους υδατικούς πόρους, Έκδοση 3, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
15. Κουτσογιάννης, Δ., 1999. Σχεδιασμός αστικών δικτύων αποχέτευσης, Έκδοση 3.1, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
16. Κουτσογιάννης, Δ., Ξανθόπουλος, Θ., 1999. Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
17. Κουτσογιάννης, Δ., 1996. Στατιστική υδρολογία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
18. Κουτσόπουλος, Κ., Ανδρουλακάκης, Ν., 2003. Εφαρμογές Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών με χρήση του λογισμικού ArcGIS, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα
19. Κρικοχωρίτη, Π., 2005. Εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου HECHMS για εκτίμηση πλημμυρών με χρήση του Σ.Γ.Π. HEC-GeoHMS στη λεκάνη του Άνω Αράχθου, Μεταπτυχιακή Εργασία, Διεπιστημονικό-Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
20. Μαμάσης, Ν., 2008 και 2009. Υδατικό Περιβάλλον και Ανάπτυξη - Διαφάνειες μαθήματος, Διεπιστημονικό-Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: «Περιβάλλον και Ανάπτυξη», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
21. Μιμίκου, Μ.Α., 2006. Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, 3^η έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα
22. Μιμίκου, Μ.Α., Μπαλάς, Ε.Α., 2006. Τεχνική Υδρολογία, 4^η έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα
23. Μιμίκου, Μ., Φωτόπουλος, Φ., 2004. Σημειώσεις στο Μεταπτυχιακό Μάθημα Υδατικό Περιβάλλον και Ανάπτυξη, Διεπιστημονικό-Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: «Περιβάλλον και Ανάπτυξη», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
24. Νουτσόπουλος, Γ., Χριστοδούλου, Γ., Παπαθανασιάδης, Τ., 2007. Υδραυλική ανοιχτών αγωγών, Έκδοση 1^η, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
25. Ντίτορα, Α., 2010. Διερεύνηση περιοχής Ιεράπετρας – Κρήτης, Μεταπτυχιακή Εργασία, Διεπιστημονικό-Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

26. Ντοανίδης, Α.Ι., 2007. Συγκριτική εφαρμογή του υδρολογικού ομοιώματος HEC-HMS σε ενιαία και ημικαταμεμημένη μορφή, στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Καλαμά, Μεταπτυχιακή Εργασία, Διεπιστημονικό-Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
27. Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για τη θέσπιση κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων.
28. Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, 2007. [http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/index.htm]
29. Φλώρος, Ι., 2009. Δημιουργία βάσης δεδομένων και καταγραφή πλημμυρικών γεγονότων, Μεταπτυχιακή Εργασία, Διεπιστημονικό-Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

1. Baltas, E.A., Dervos, N.A., Mimikou, M.A., 2007. Research on the initial abstraction-storage ratio and its effect on hydrograph simulation at a watershed in Greece, *Hydrology and Earth System Sciences*, Volume 11, Issue 6, 26 November 2007, Pages 1825–1829.
2. Bourget, P. G., 2002. Collective capacity: regional information sharing in support of floodplain management, *Water International*, 27: 1, 27 — 37
3. Bureau of Rural Sciences of the Australian Government, 2010. Recession Analysis, Key Features of the Managing Connected Water Resources Project, Australian Government Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, Canberra.
4. Chadwick, A., Morfett, J., 1998. *Hydraulics in civil and environmental engineering*, 3rd edition, E & FN Spon, London.
5. Chow, V.T., 1959. *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill, International Editions.
6. Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.M., 1988. *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, International Editions.
7. ESRI, 2010. *Arc Hydro Tools, Tutorial, Version 1.4*, California.
8. ESRI, 2008-2009. *ArcGIS 9.2 Desktop Help* [<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/>]
9. Feldman, A.D., 2000. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical reference*, Hydrologic Engineering Center, Institute for Water Resources, US Army Corps of Engineers, California.
10. Fleming, M.J., 2010, 2009. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Quick start guide, Versions 3.4, 3.5*, Hydrologic Engineering Center, Institute for Water Resources, US Army Corps of Engineers, California.

11. Fleming, M.J., Doan, J.H., 2009. HEC-GeoHMS – Geospatial hydrologic modeling extension, User’s manual, Version 4.2, Hydrologic Engineering Center, Institute for Water Resources, US Army Corps of Engineers, California.
12. Ford, D., Pingel, N., DeVries, J.J., 2008, 2002. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Applications Guide, Hydrologic Engineering Center, Institute for Water Resources, US Army Corps of Engineers, California.
13. Geological Society of Greece, 2010. Bulletin - Proceedings of the 12th International Congress in Patras.
14. Ghosh, S.N., 1997. Flood control and drainage engineering, A.A. Balkema Publishers, Brookfield, VT.
15. Grigg, N.S., 2003. Water, wastewater, and stormwater infrastructure management, Lewis Publishers, Florida, pp 20-22, 42-49.
16. Grigg, N.S., 2002. Water, sewer, and stormwater systems and services, Lewis Publishers, Florida, pp 42-49.
17. Grigg, N.S., 1996. Water resources management – Principles, regulations, and cases, McGraw-Hill, New York.
18. Hamburg Flood Prevention and Mitigation Committee, Hamburg Township. [<http://www.hamburg.mi.us/>]
19. Hammer, M.J. & Hammer, M.J.Jr, 2001. Water and wastewater technology, 4th edition, Prentice Hall, New Jersey., pp. 120-121, 332-333.
20. Hellweger, F., 1997. AGREE-DEM surface reconditioning system, Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin, <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/GISHYDRO/ferdi/research/agree/agree.html>
21. Hydrologic Engineering Center (HEC), 1998. HEC-1 Flood Hydrograph Package User’s Manual, Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, California.
22. Hydrological Observatory of Athens, National Technical University of Athens, 2011. [hoa.ntua.gr]
23. Kounis, G.D., Kounis, K.G., 2010. Infiltration, effective porosity, transmissibility and critical yield of water wells in the carbonate fissured aquifers of Attica – a contribution to the regional and managerial hydrogeology, Geological Society of Greece, 12th International Congress, Patras.
24. Lim, K.J., Engel, B.A., Muthukrishnan, S., Harbor, J., 2006. Effects of initial abstraction and urbanization on estimated runoff using CN technology, Journal of the American Water Resources Association, Volume 42, Issue 3, June 2006, Pages 629-643.
25. Marshall, D.C.W., and Bayliss, A.C., 1994. Report No. 124, Flood estimation for small catchments, Institute of Hydrology, Natural Environment Research Council, Oxfordshire, UK
26. Mockus V. et al., 2004. National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology, Chapter 9 - Hydrologic soil-cover complexes, National Resources Conservation Service (NRCS), United States Department of Agriculture.

27. Newson, M., 1994. Hydrology and the river environment, Clarendon Press, Oxford.
28. Papathanasiou, C., Safiolea, E., Makropoulos, C., Mimikou, M., 2009. The FLADAR project and its contribution to the implementation of the EU Flood Directive 2007/60, Proceedings for the 11th International Conference on Environmental Science and Technology, Chania, Crete, Greece.
29. Ole Mark, Sutat Weesakul, Chusit Apirumanekul, Surajate Boonya Aroonnet, Slobodan Djordjevic, 2004. Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding, Journal of Hydrology, Volume 299, Issues 3-4, Urban Hydrology, 1 December 2004, Pages 284-299.
30. Raju, B. S. N., 1995. Water supply and wastewater engineering, Tata McGraw Hill, New Delhi, pp 261-265, 266-270.
31. Scharffenberg, W.A, Fleming, M.J., 2010, 2009. Hydrologic Modelling System HEC-HMS, User's manual, Versions 3.5, 3.4, Hydrologic Engineering Center, Institute for Water Resources, US Army Corps of Engineers, California.
32. Shaw, E.M., 1994. Hydrology in practice, Third Edition, Chapman & Hall, London, New York, Tokyo, Victoria, Madras.
33. Soulis, K.X., Valiantzas, J.D., Dercas, N., Londra, P.A., 2009. Analysis of the runoff generation mechanism for the investigation of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed, Hydrology and Earth System Sciences, Volume 6, Issue 1, 16 January 2009, Pages 373-400.
34. Tufts University, Tufts Open Courseware [<http://ocw.tufts.edu/>]
35. Ward, R.C., Robinson, M., 2000. Principles of Hydrology, 4th edition, McGraw-Hill, London
36. Wilson, E.M., 1990. Engineering Hydrology, 4th Edition, Macmillan Press LTD, London.
37. Wilson, E.M., 1975. Engineering Hydrology, The Macmillan Press LTD, London and Basingstoke. (Μετάφραση στ ελληνικά, Βασιλόπουλος, Η., 1977. Υδρολογία, Εκδόσεις Γκιούρδας)
38. Woodward, D.E., Hawkins, R.H., Jiang, R., Hjelmfelt, A.T.Jr., Van Mullem, J.A., Quan, Q.D., 2003. Runoff Curve Number method: Examination of the Initial Abstraction Ratio, World Water & Environmental Congress 2003 and Related Symposia, Conference Proceeding Paper.
39. World Meteorological Organization, Associated Programme on Flood Management. [<http://www.apfm.info/>]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Παρατίθενται τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων της 08.02.2009 από το ρυθμισμένο μοντέλο της εργασίας. Προηγείται απόδοση στα ελληνικά κρίσιμων αγγλικών όρων που περιλαμβάνονται στην αναφορά αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που πραγματοποιούνται με λογισμικό HEC-HMS.

Simulation run: Πρόκειται για τον τίτλο της προσομοίωσης. Στην παρούσα εργασία ο τίτλος συνήθως ταυτίζεται με την ημερομηνία της βροχόπτωσης και είναι σε κάθε περίπτωση εύκολα κατανοητός.

Computed Results: Αποτελέσματα υπολογισμών μοντέλου

Peak Outflow: (Υπολογισμένη) απορροή αιχμής

Total Outflow: Συνολικός (υπολογισμένος) όγκος απορροής

Date/Time of Peak Outflow: Ημερομηνία και χρόνος εμφάνισης της (υπολογισμένης) απορροής αιχμής

Observed Hydrograph at Gage [...]: Παρατηρημένο πλημμυρογράφημα στη θέση μέτρησης απορροής [...]

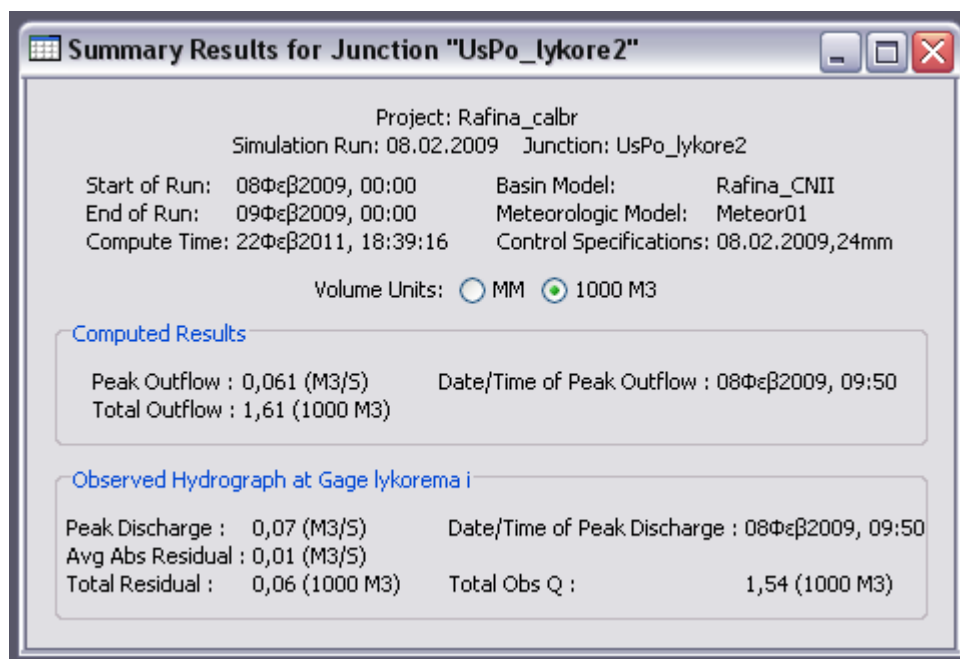
Peak Discharge: (Παρατηρημένη) απορροή αιχμής

Avg Abs Residual: Μέση απόλυτη απόκλιση μεταξύ της υπολογισμένης και της παρατηρημένης απορροής αιχμής

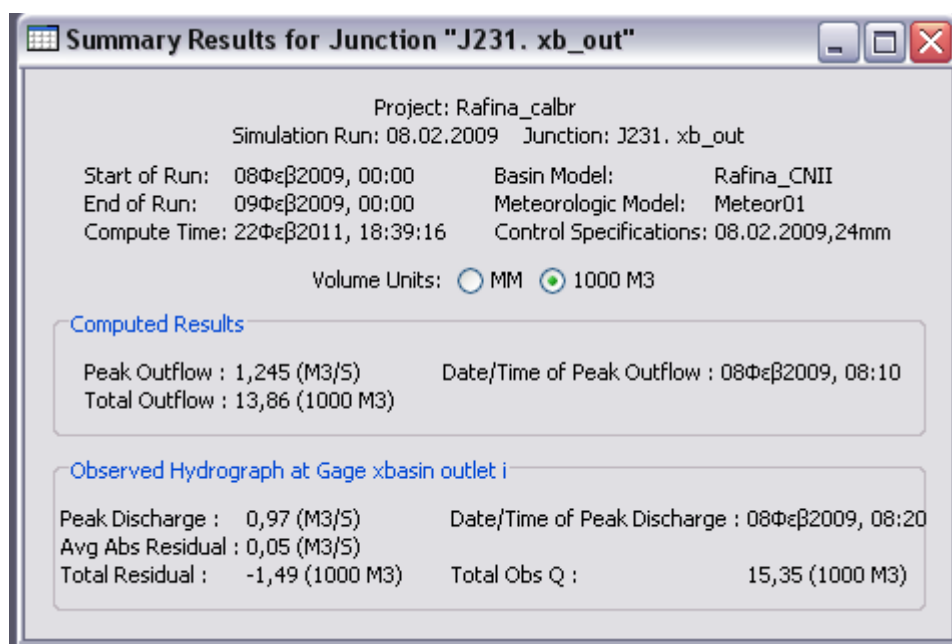
Total Residual: Απόκλιση μεταξύ του υπολογισμένου και του παρατηρημένου συνολικού όγκου απορροής

Date/Time of Peak Discharge: Ημερομηνία και χρόνος εμφάνισης της (παρατηρημένης) απορροής αιχμής

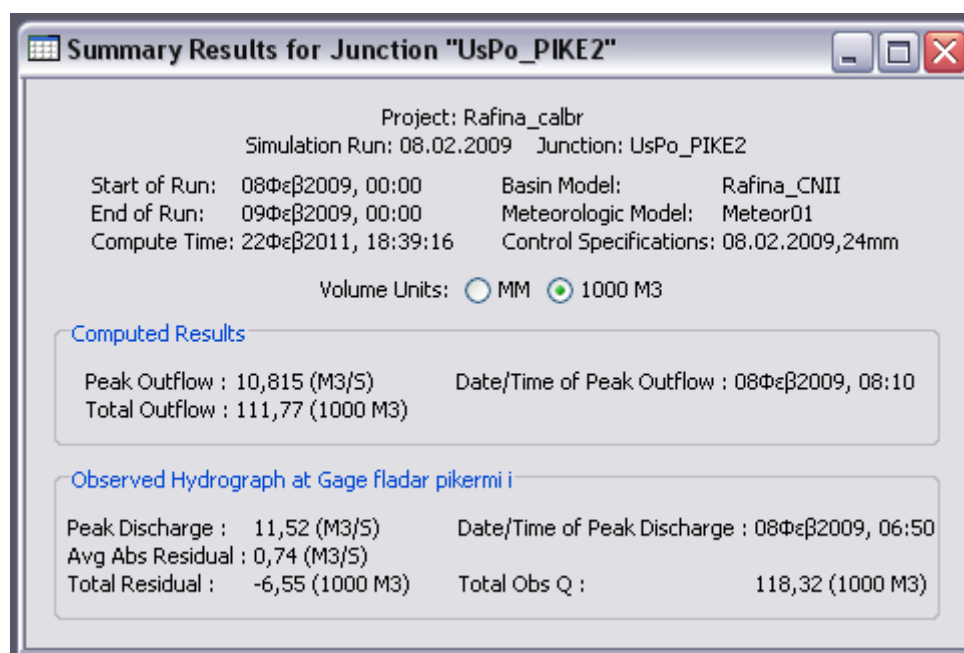
Total Obs Q: Συνολικός παρατηρημένος όγκος απορροής



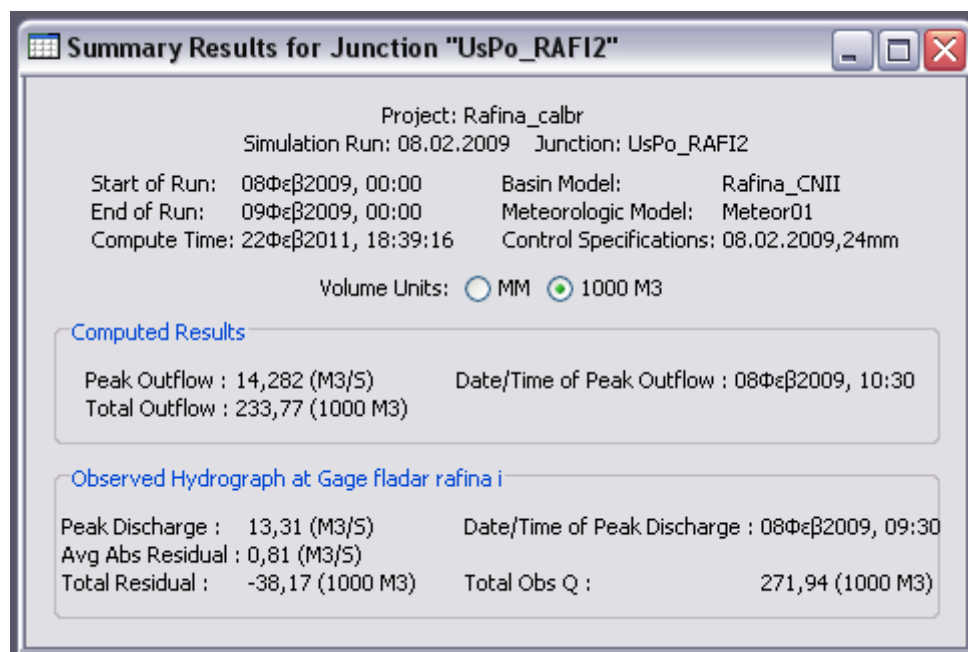
Εικόνα Π. 1 Αριθμητικά αποτελέσματα ρυθμισμένου μοντέλου στη θέση Λυκορέμα



Εικόνα Π. 2 Αριθμητικά αποτελέσματα ρυθμισμένου μοντέλου στην έξοδο της X-Basin



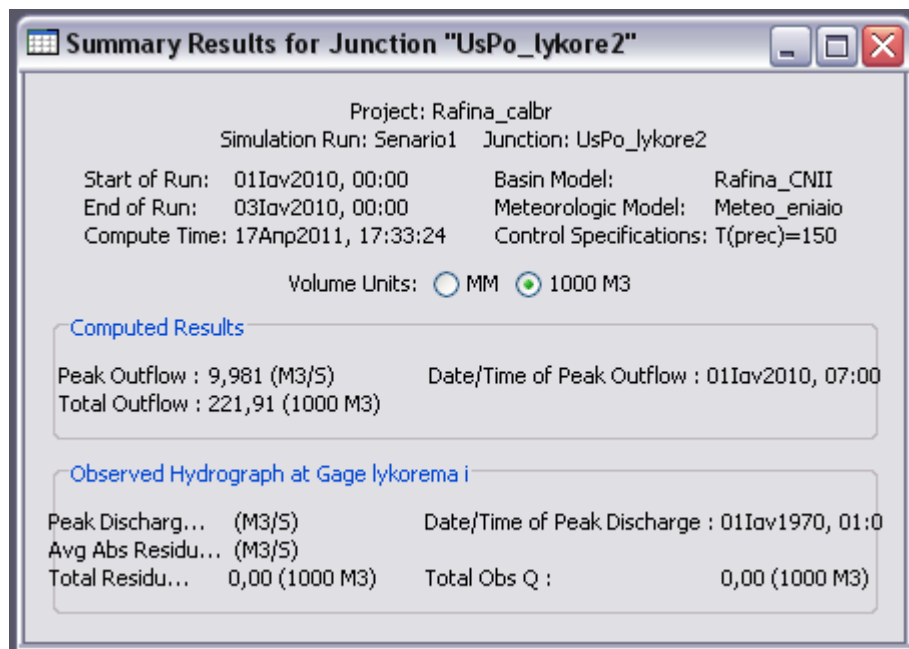
Εικόνα Π. 3 Αριθμητικά αποτελέσματα ρυθμισμένου μοντέλου στη θέση Πικέρμι



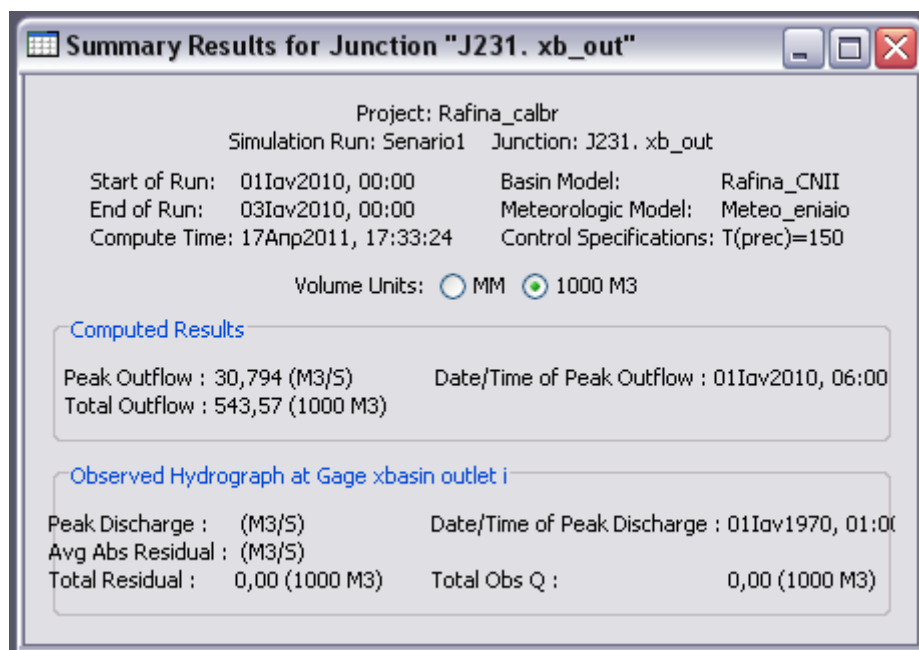
Εικόνα Π. 4 Αριθμητικά αποτελέσματα ρυθμισμένου μοντέλου στη θέση Ραφήνα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

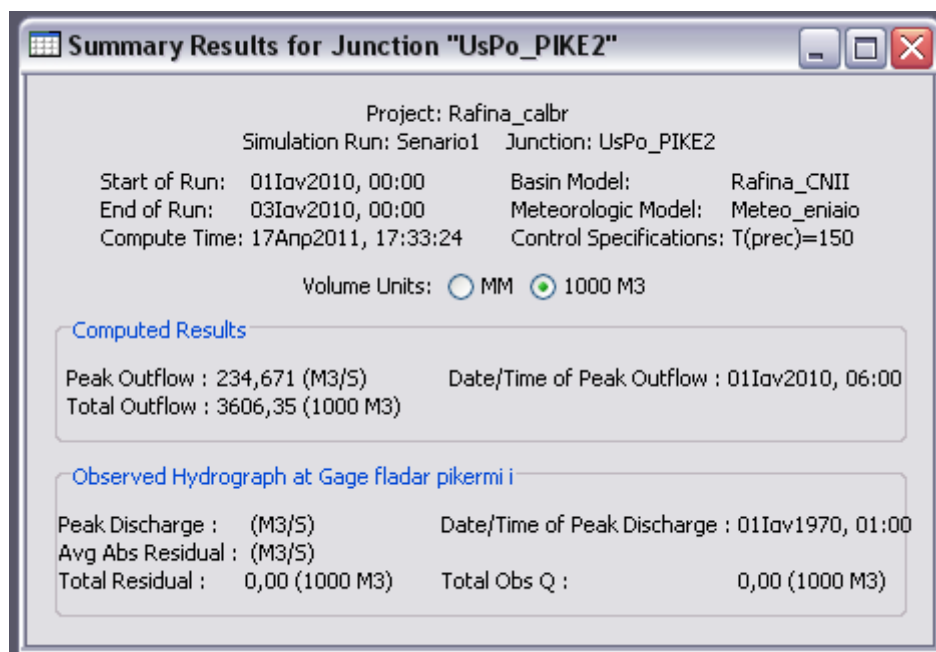
Παρατίθενται αναλυτικότερα τα αποτελέσματα των τελικών προσομοιώσεων της εργασίας.



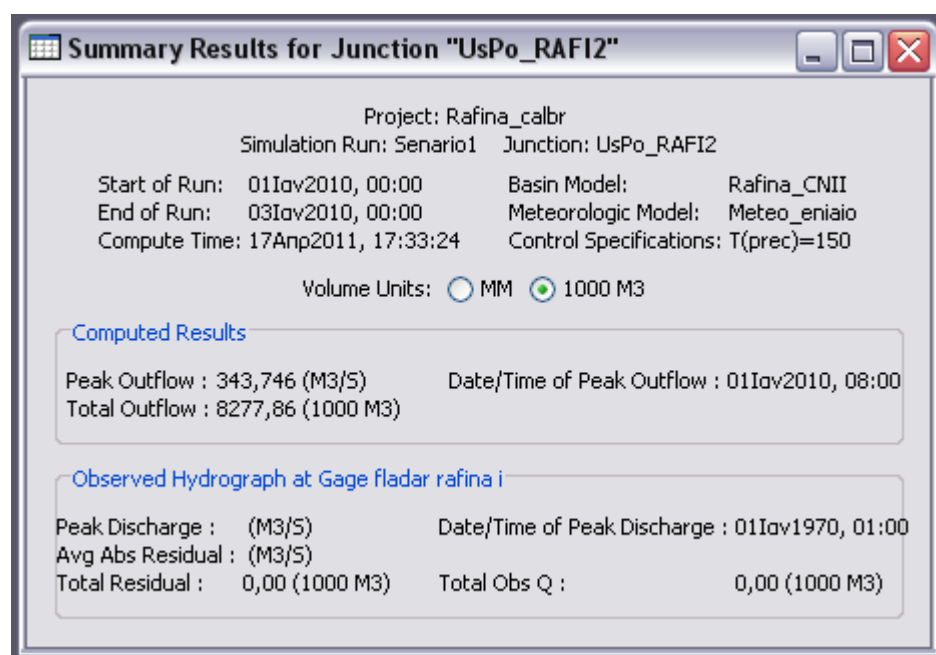
Εικόνα Π. 5 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στη θέση Λυκόρεμα με βάση το Σενάριο 1



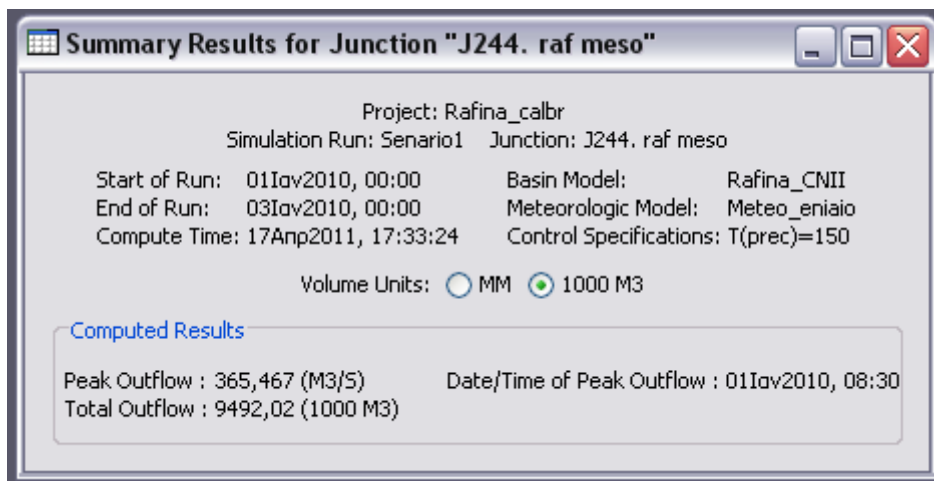
Εικόνα Π. 6 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στην έξοδο της X-Basin με βάση το Σενάριο 1



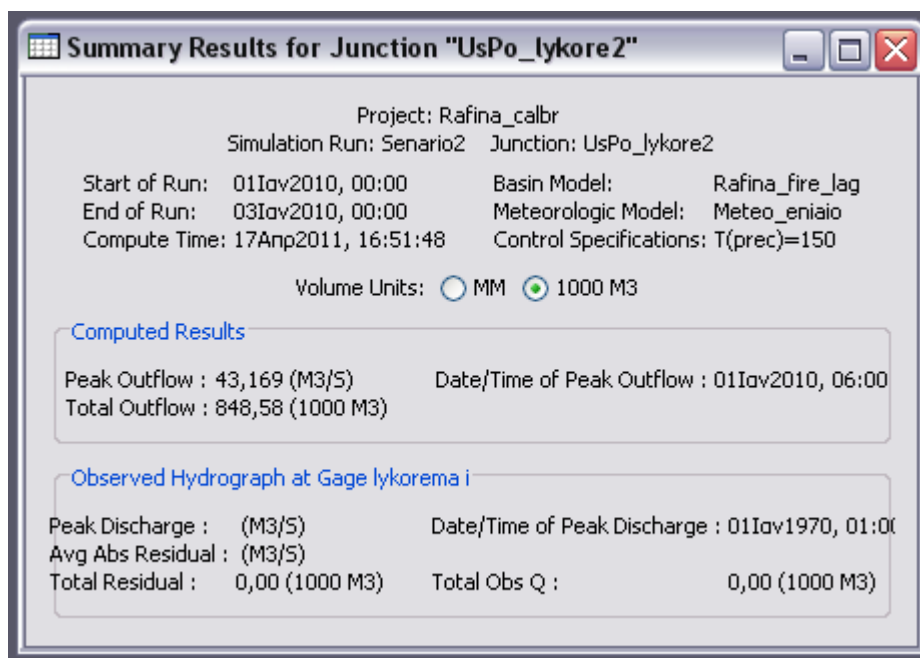
Εικόνα Π. 7 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στη θέση Πικέρμι με βάση το Σενάριο 1



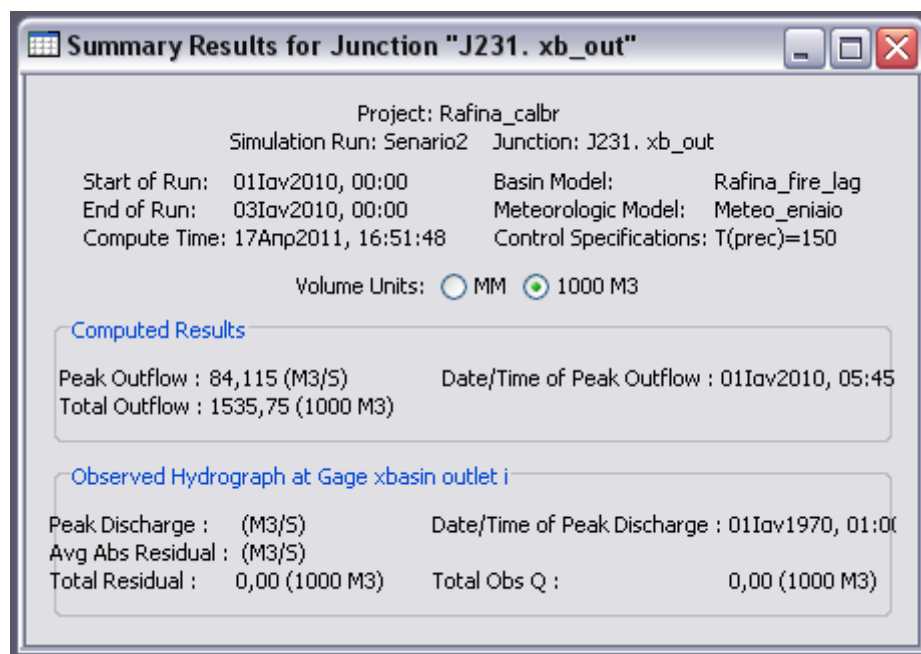
Εικόνα Π. 8 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στη θέση Ραφήνα με βάση το Σενάριο 1



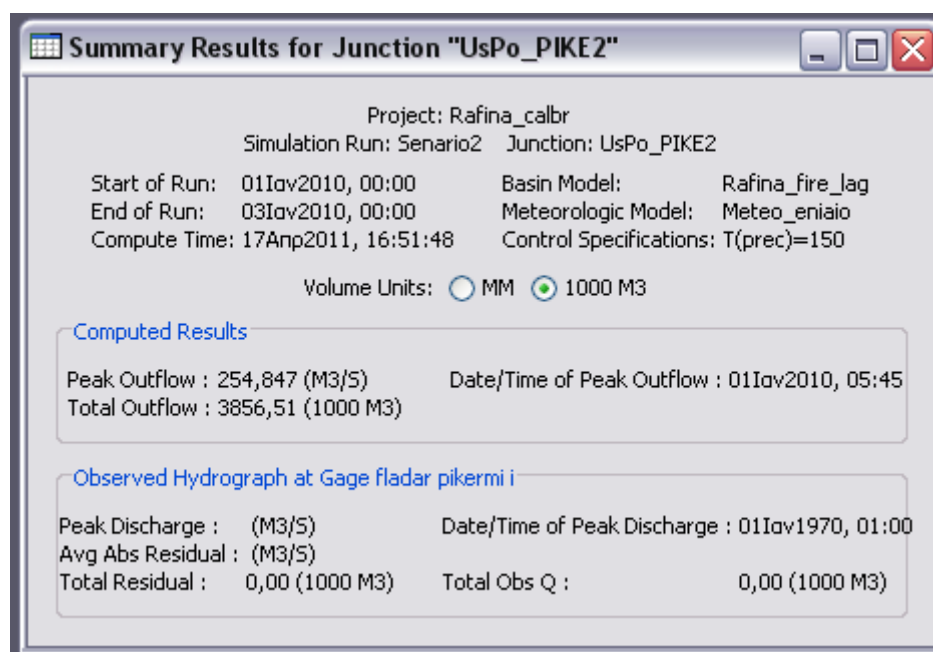
Εικόνα Π. 9 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στη θέση ανάντη του αστικού ιστού της Ραφήνας με βάση το Σενάριο 1



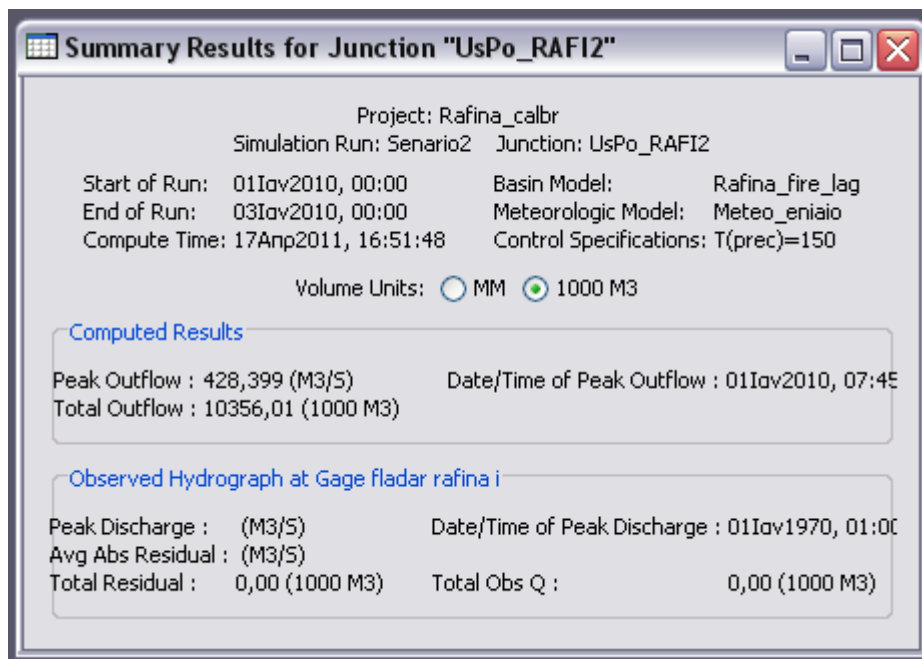
Εικόνα Π. 10 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στη θέση Λυκορέμα με βάση το Σενάριο 2



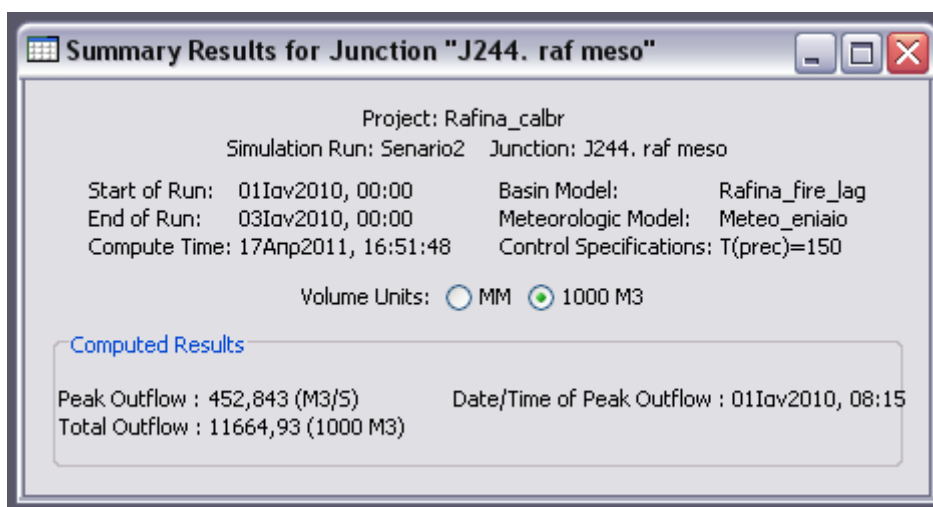
Εικόνα Π. 11 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στην έξοδο της X-Basin με βάση το Σενάριο 2



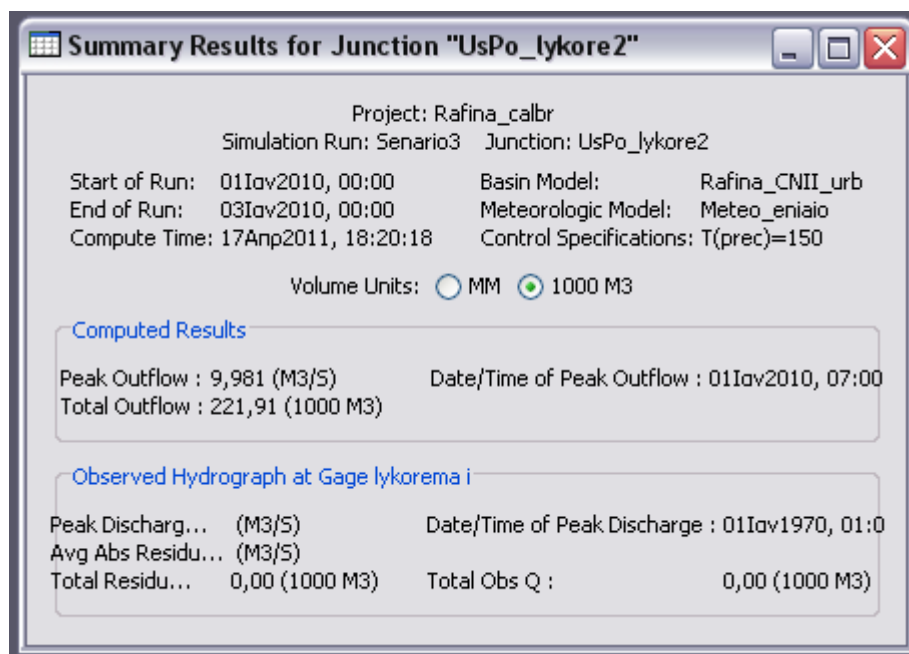
Εικόνα Π. 12 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στη θέση Πικέρμι με βάση το Σενάριο 2



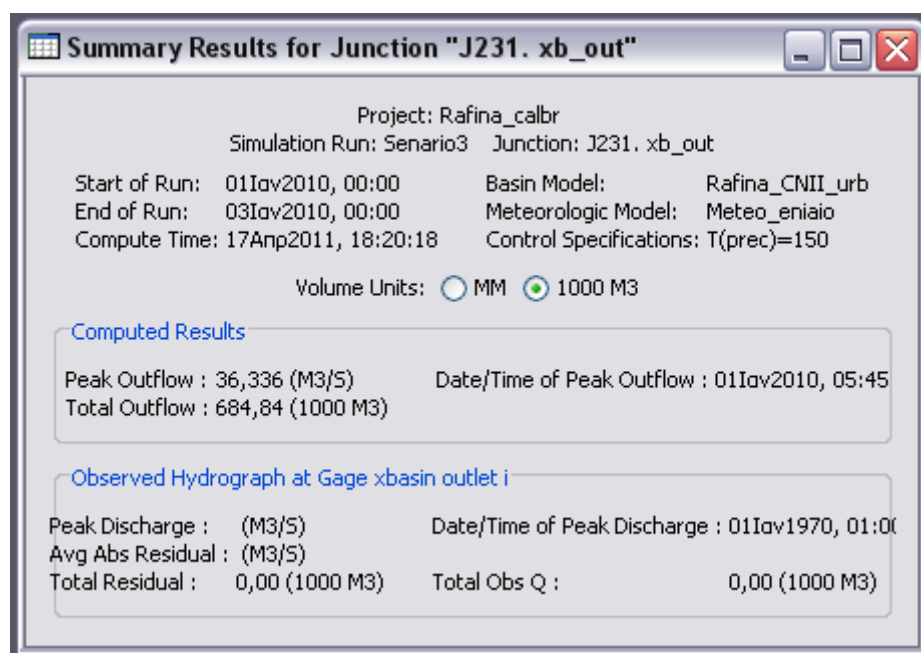
Εικόνα Π. 13 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στη θέση Ραφήνα με βάση το Σενάριο 2



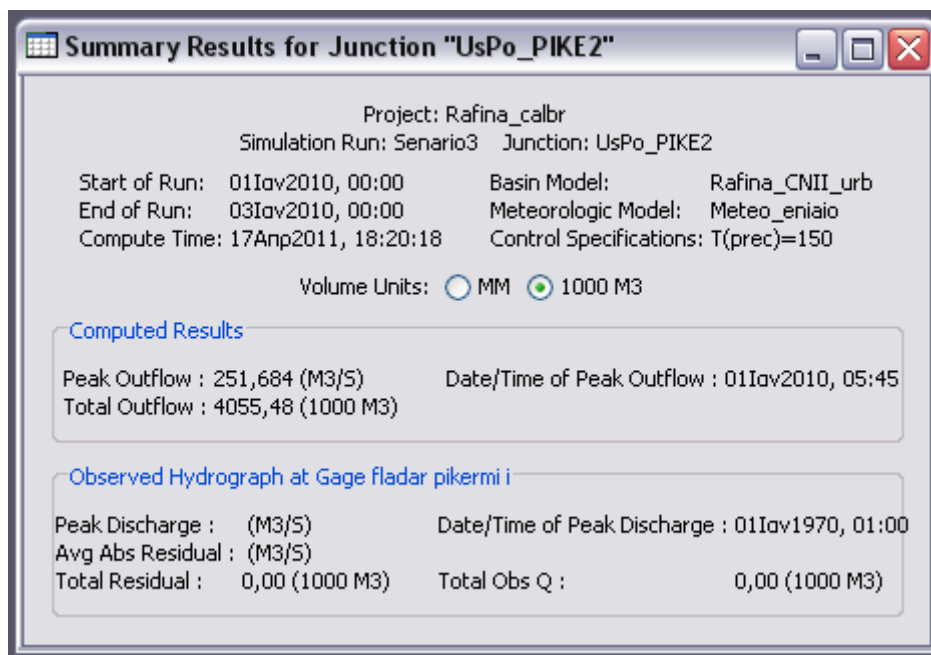
Εικόνα Π. 14 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στη θέση ανάντη του αστικού ιστού της Ραφήνας με βάση το Σενάριο 2



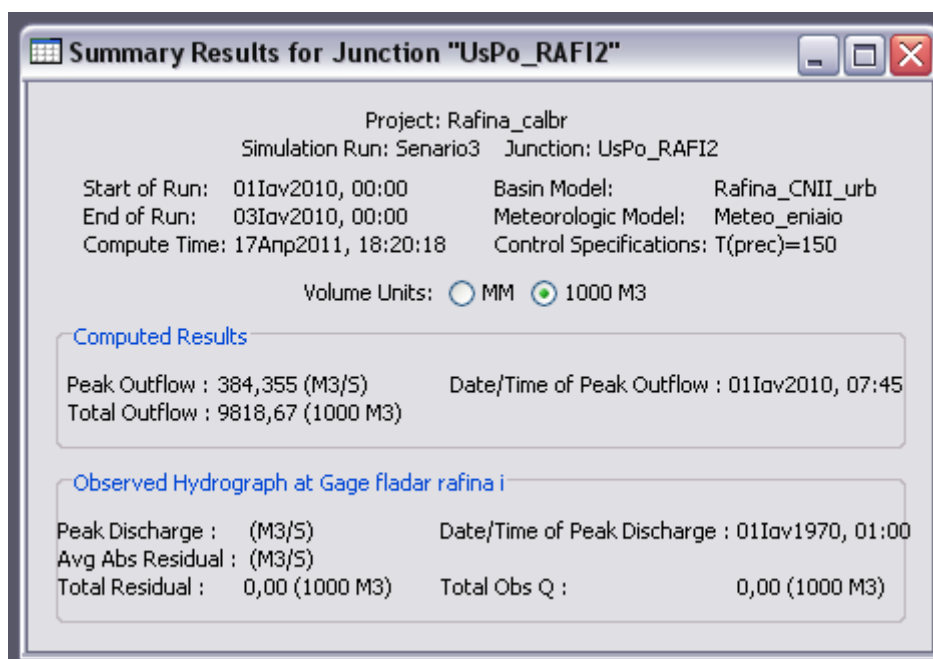
Εικόνα Π. 15 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στη θέση Λυκορέμα με βάση το Σενάριο 3



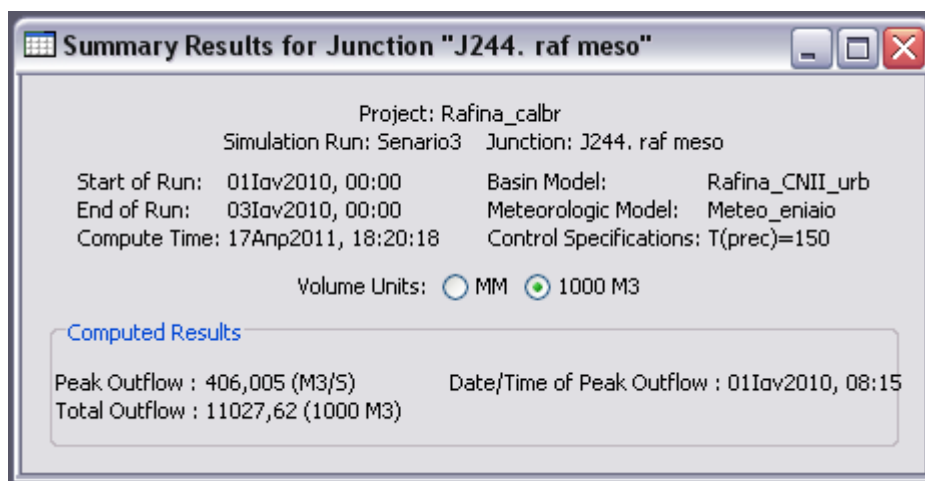
Εικόνα Π. 16 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στην έξοδο της X-Basin με βάση το Σενάριο 3



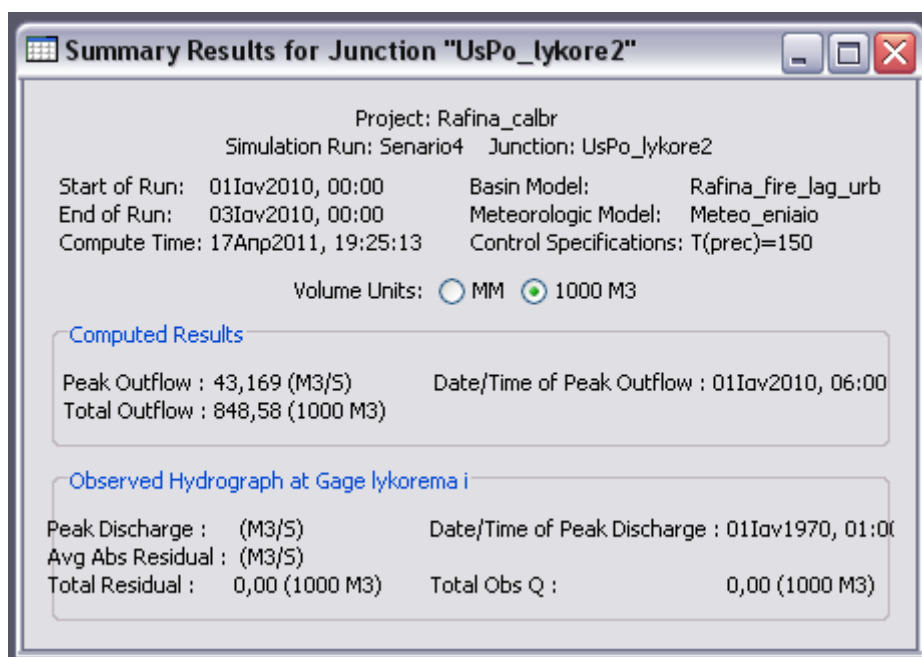
Εικόνα Π. 17 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στη θέση Πικέρμι με βάση το Σενάριο 3



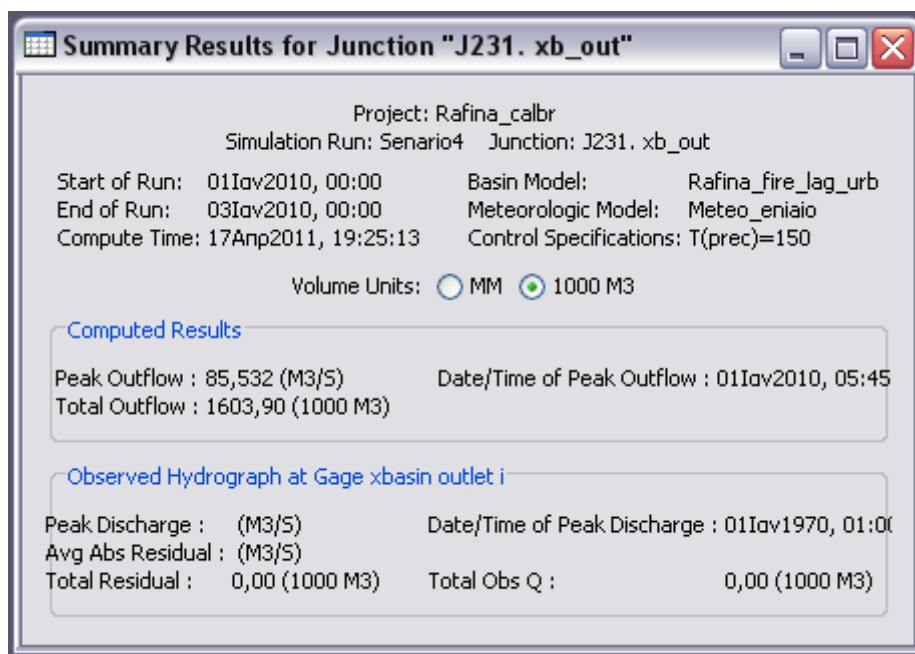
Εικόνα Π. 18 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στη θέση Ραφήνα με βάση το Σενάριο 3



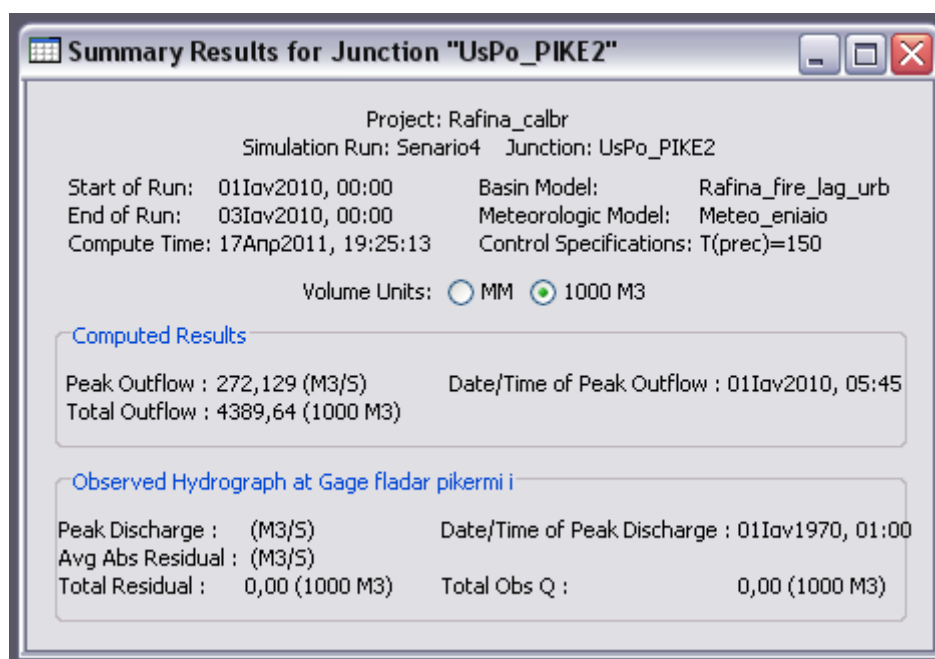
Εικόνα Π. 19 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στη θέση ανάντη του αστικού ιστού της Ραφήνας με βάση το Σενάριο 3



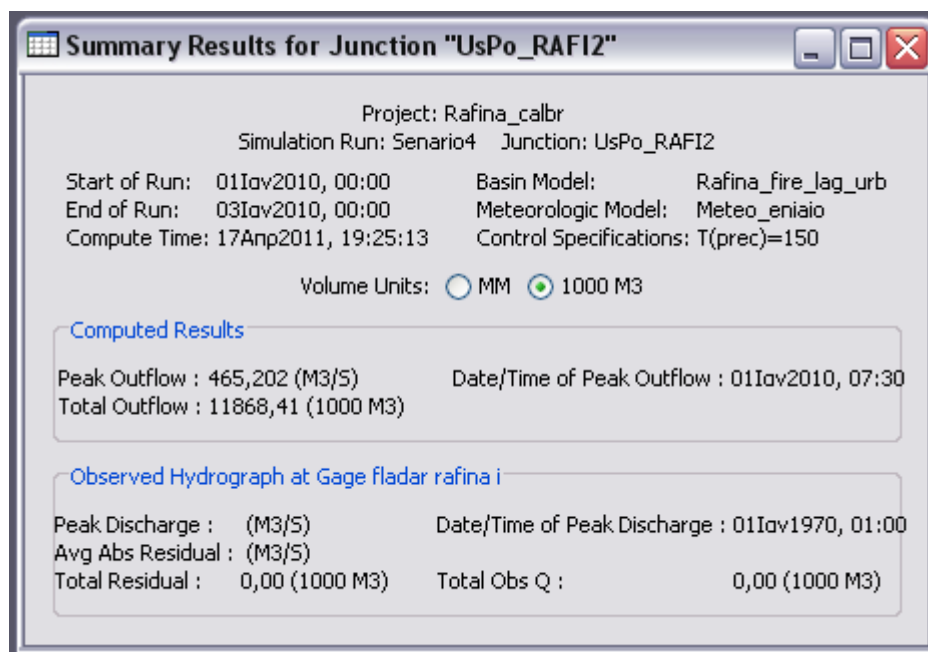
Εικόνα Π. 20 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στη θέση Λυκόρεμα με βάση το Σενάριο 4



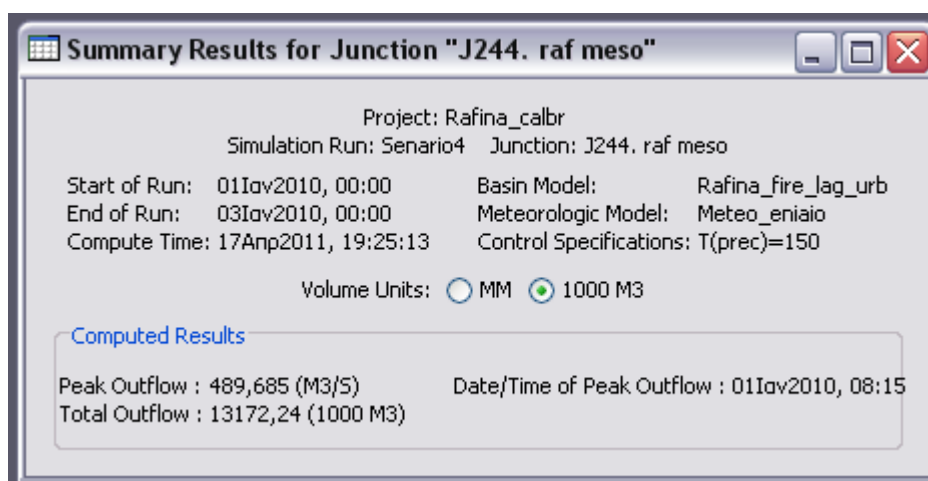
Εικόνα Π. 21 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στην έξοδο της X-Basin με βάση το Σενάριο 4



Εικόνα Π. 22 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στη θέση Πικέρμι με βάση το Σενάριο 4



Εικόνα Π. 23 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στη θέση Ραφήνα με βάση το Σενάριο 4



Εικόνα Π. 24 Αριθμητικά αποτελέσματα προσομοίωσης στη θέση ανάντη του αστικού ιστού της Ραφήνας με βάση το Σενάριο 4

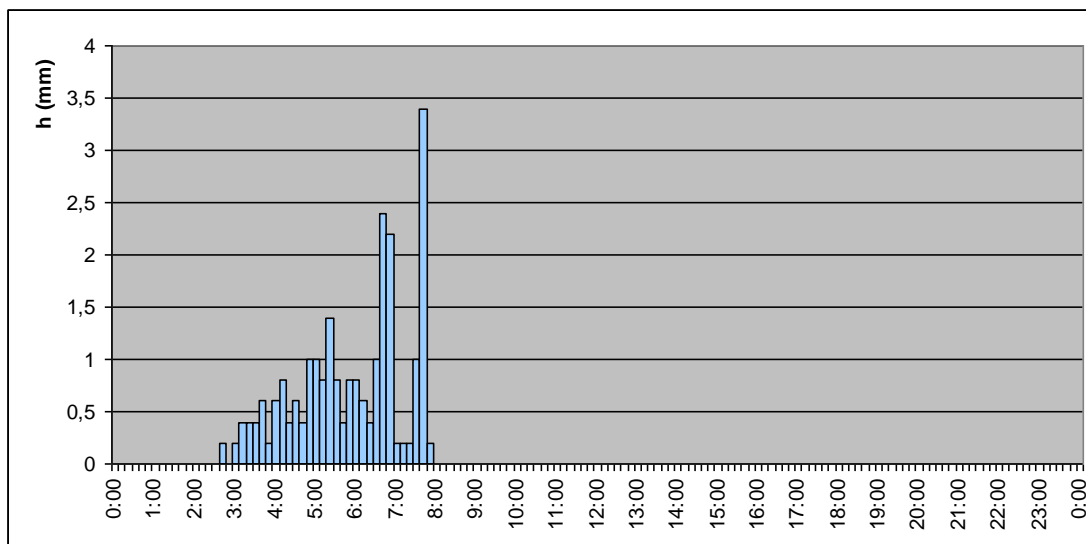
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

Παρατίθεται η αντιστοίχιση των κωδικών των γεωλογικών σχηματισμών και της περιγραφής αυτών που χρησιμοποιούνται στον Πίνακα 5.4.

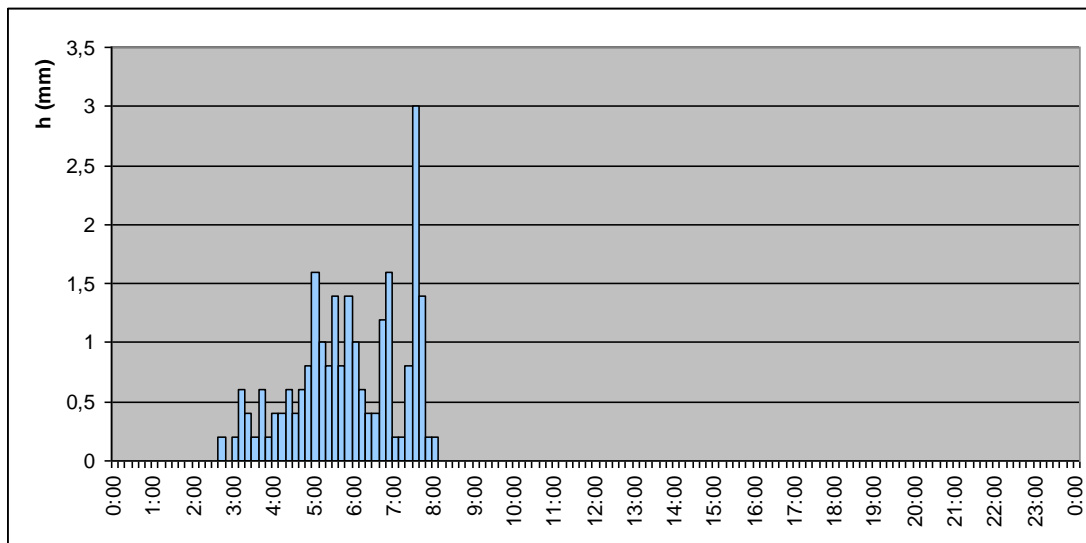
1	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ ΟΛΟΚΑΙΝΟ (αδιαίρετο) Ερυθρά άργιλα – πηλites, άμμοι, κροκαλοπαγή, λατυποπαγή προσχώσεις, κώνιοι κορημάτων κ.α. Χερσαίες και παράκτιες αποθέσεις.
2	ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ (αδιαίρετο) Αργιλοπηλites, ψαμίτες, κροκαλοπαγή, λατυποπαγή κώνιοι κορημάτων, προσχωματικές ποταμοχερσαίες αποθέσεις, κ.α.
3	ΝΕΟΓΕΝΕΣ ΠΛΕΙΟΚΑΙΝΟ (αδιαίρετο) Αργιλοπηλites, ψαμίτες, κροκαλοπαγή, λατυποπαγή κώνιοι κορημάτων, ποταμοχερσαίες και θαλάσσιες αποθέσεις.
4	ΑΝΩΤΕΡΟ ΜΕΙΟΚΑΙΝΟ (αδιαίρετο) Άργιλα, μάρμαρα, πηλites, ψαμίτες, κροκαλολατυποπαγή, ογκάλιθοι, μαργαίκοι-τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι, λιγνιτικές αποθέσεις, κώνιοι κορημάτων, απολιθώματα σπονδυλιτών (Πικερμική πανίδα), ποταμοχερσαίες και λιμναίες αποθέσεις.
5	ΠΕΛΑΓΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΠΕΛΑΓΟΝΙΚΗ ΖΩΝΗ ΦΛΥΣΧΗΣ (Μαιστρήγιο - Παλαιόκαινο) Μεταψαμίτες, πηλites, άργιλα, στη βάση με εναλλαγές λατυποπαγών ασβεστόλιθων, τυριτόλιθων, μαργαίων και σπιντολιθίων (Αθηνάϊκοι σχιστόλιθοι). Τοπικό πάχος > 250 μ.
6	ΑΝΩΤΕΡΟ ΚΡΗΤΙΔΙΚΟ (Κενομάνιο - Καμπάνιο) Ασβεστόλιθοι – μάρμαρα τοπικά με τυριτόλιθους. Στη βάση τους τοπικά, κροκαλοπαγή, λατερίτες, βωξίτες και Fe – Ni μεταλλεύματα. Τοπικό πάχος 20 έως 350 μ.
7	ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΚΡΗΤΙΔΙΚΟ – ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ Ψαμίτες, χαλαζίτες, άργιλα με μικρά σώματα οφιδίτων, και τυριτόλιθων κλαστικής προέλευσης, Σχιστόλιθοι Καισαριανής (2) - Σχιστοαμμιμική διάπλαση (Sh2), τοπικό πάχος σειράς 0 έως 250 μ. και Ασβεστόλιθοι, δοκομίτες – μάρμαρα, αργιλοπηλτικοί ψαμμικοί σχιστόλιθοι με οφιδίτους και τυριτόλιθοι Σχιστόλιθοι Καισαριανής (1) - Σχιστοαμμιμοκερατολιθική διάπλαση (sh1) με οφιδίτους. Τοπικό πάχος έως 250μ.
8	Οφιολιθικά πετρώματα
9	ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ – ΤΡΙΑΔΙΚΟ Ασβεστόλιθοι, δοκομίτες – μάρμαρα. Τοπικό πάχος 5 έως 150 μ.
10	ΤΡΙΑΔΙΚΟ Δοκομίτες μάρμαρα (Πιρναρής). Τοπικό πάχος έως 100 μ.
11	ΚΑΤΩ ΤΡΙΑΔΙΚΟ / ΠΕΡΜΙΟ (αδιαίρετο) Ενστρώσεις ασβεστόλιθων – μαρμάρων και σχιστόλιθων με σώματα υπερβασικών και βασικών εκρηξιγενών (βασάλτες οφιδίθοι και κροκαλοπαγή). Τοπικό πάχος έως 50μ.
12	ΠΕΡΜΙΟ Μέλας ασβεστόλιθοι – μάρμαρα. Τοπικό πάχος έως 30 μ.
13	ΠΕΡΜΙΟ / ΑΝΩ ΛΙΘΑΝΘΡΑΚΟΦΟΡΟ (αδιαίρετο) Άργιλικό, ψαμμικό μαρμαρυγικό, χαλαζικό κ.α. σχιστόλιθοι με ενστρώσεις ασβεστόλιθων-μαρμάρων και κοίτες βασικών εκρηξιγενών (ανθεσίτες). Τοπικό πάχος έως 200 μ.
14	ΑΝΩ - ΜΕΣΟ ΛΙΘΑΝΘΡΑΚΟΦΟΡΟ Ασβεστόλιθοι – μάρμαρα (Ανώτερο μάρμαρο Λαυρίου). Πάχος έως 300 μ.
15	ΜΕΣΟ – ΚΑΤΩ ΛΙΘΑΝΘΡΑΚΟΦΟΡΟ Ηφαιστειακός τόφος (μετατόφος – μεταοφίτης) ξενιστής μεταλλοφορίας μικτών θαούχων Pb, Zn, Ag, Cu, κ.α. ορυκτών. Τοπικό πάχος έως 200 μ. α) κλαστικά ιζημάτα μέσου λιθανθρακοφόρου
16	Τεφροκίονα, τεφρόμαυρα σχιστόλιθοι., πάχος ~ 400 μ.
17	ΠΡΟΛΙΘΑΝΘΡΑΚΟΦΟΡΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ (ΔΕΒΟΝΙΟ;) Μοσχοβτικοί - αμφιβολτικοί και άλλης ορυκτολογικής σύστασης γνεύσοι. Πάχος ~ 400 μ.
18	Κατώτερο μάρμαρο (Πεντέλη – Λαύριο). Πάχος ~ 500 μ.
19	ΟΞΙΝΑ ΕΚΡΗΞΙΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ Μαγματικά πετρώματα Τοναλίτης Πλάκας και Δογανίου Κερατέας

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV

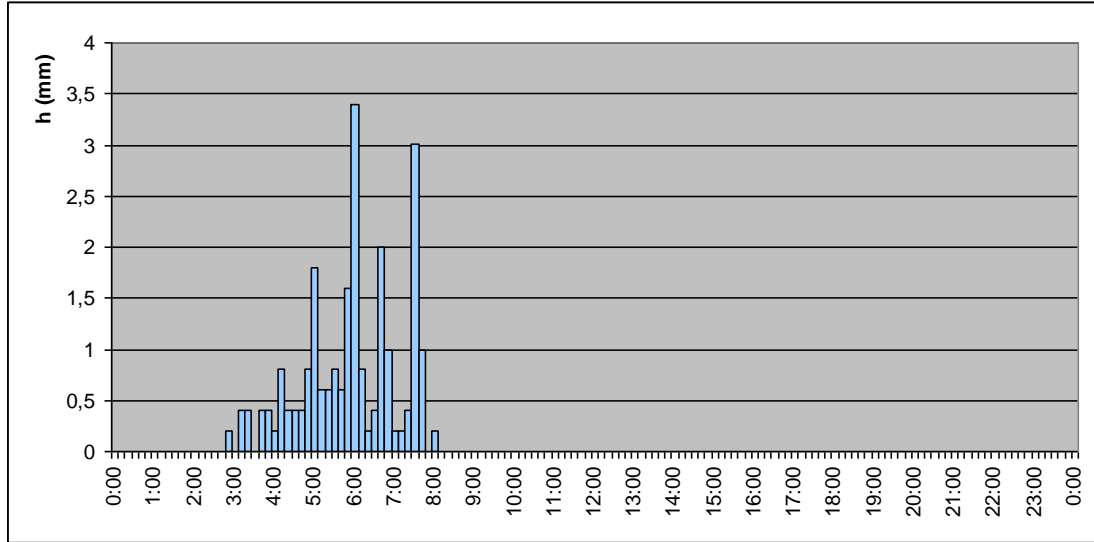
Βροχογραφήματα για τα γεγονότα βροχόπτωσης των 08.02.2009, 12.12.2008, 17.11.2009 και συνθετικό βροχογράφημα σεναρίων.



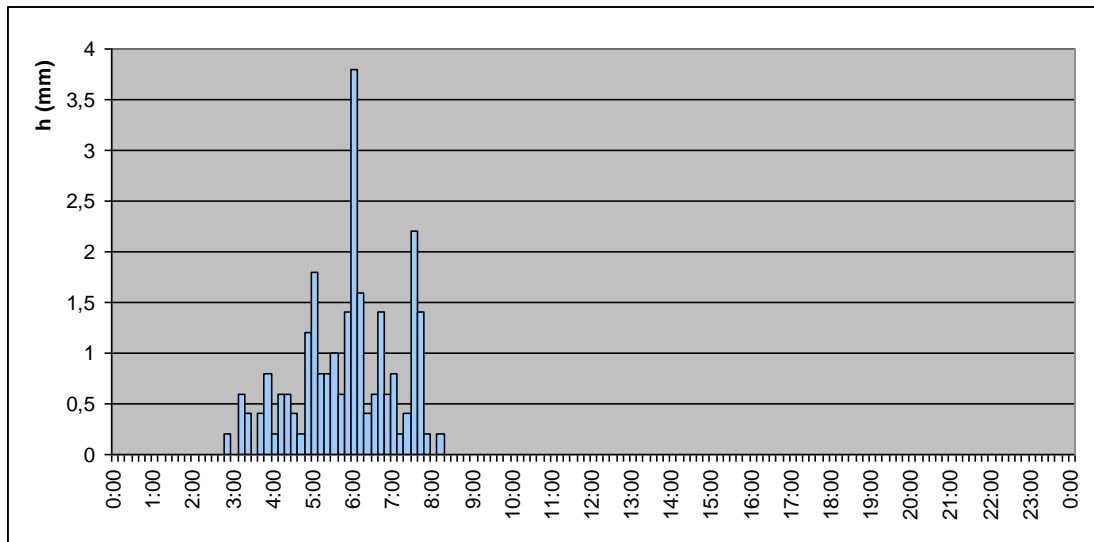
Εικόνα Π. 25 Υετογράφημα της 08.02.2009 στη θέση Πικέρμι του ΜΕΤΕΟΝΕΤ



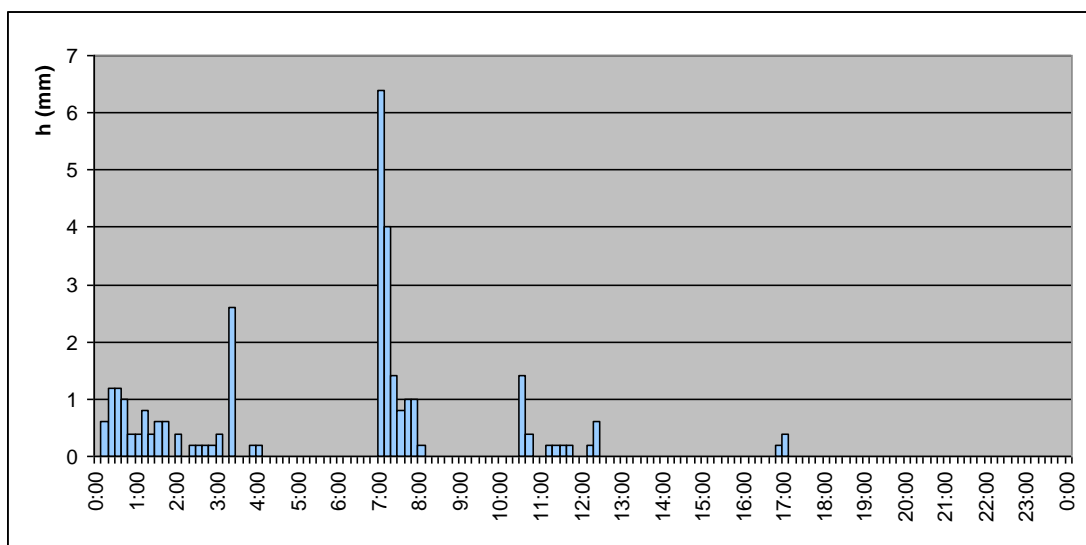
Εικόνα Π. 26 Υετογράφημα της 08.02.2009 του βροχογράφου R200



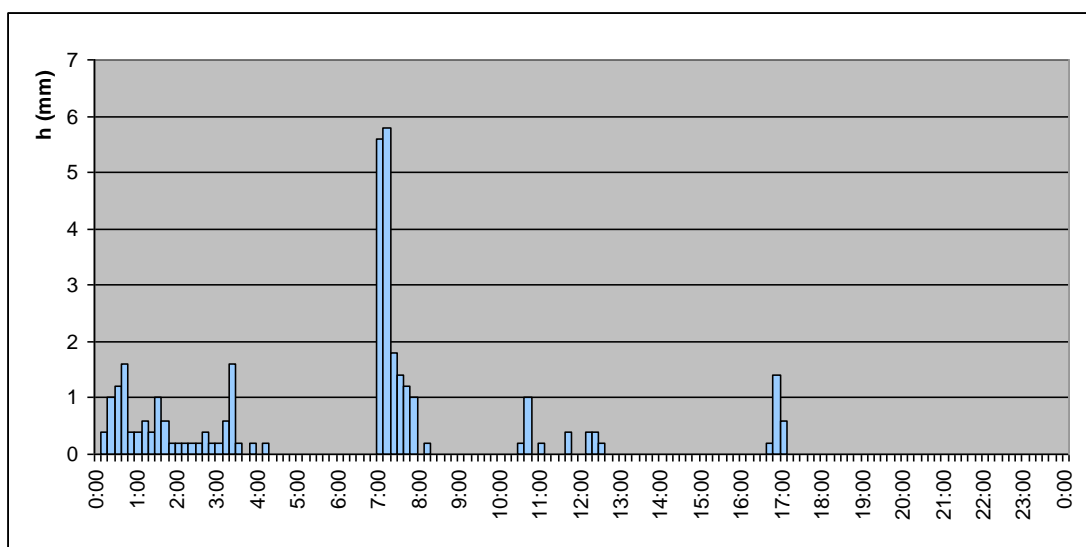
Εικόνα Π. 27 Υετογράφημα της 08.02.2009 του βροχογράφου R400



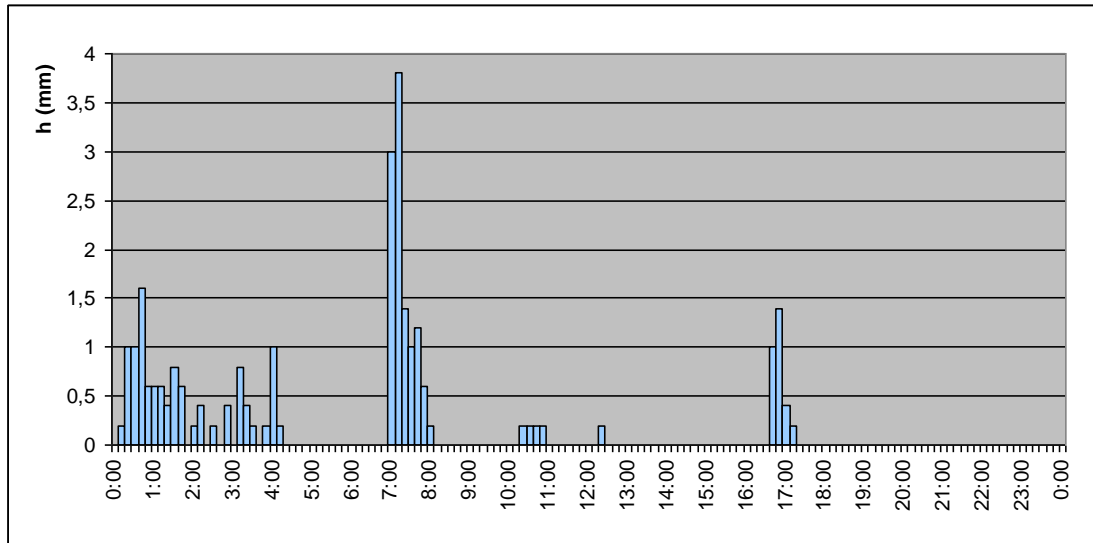
Εικόνα Π. 28 Υετογράφημα της 08.02.2009 του βροχογράφου R600



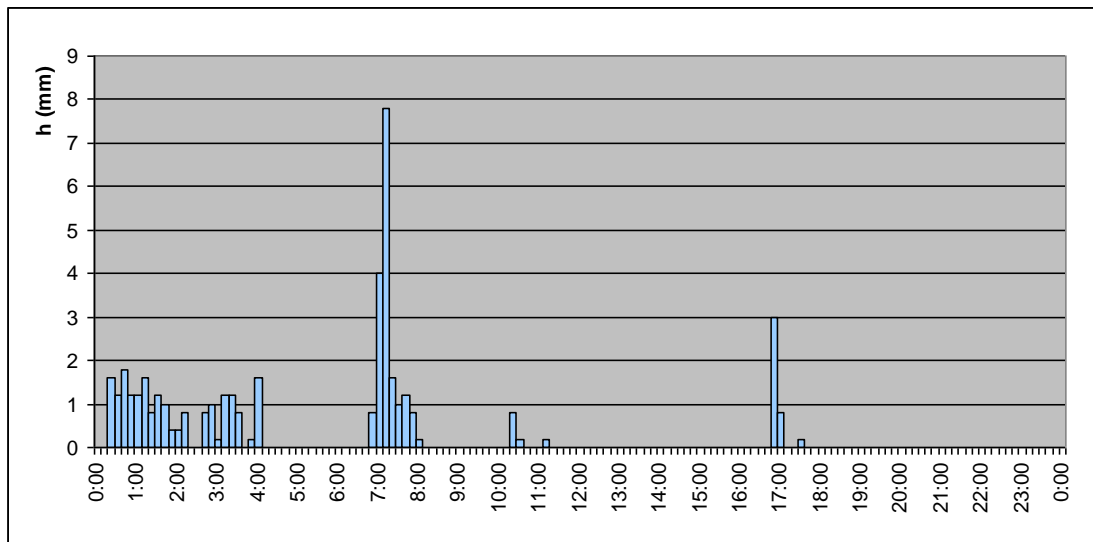
Εικόνα Π. 29 Υετογράφημα της 12.12.2008 του βροχογράφου στη θέση Πικέρμι του METEONET



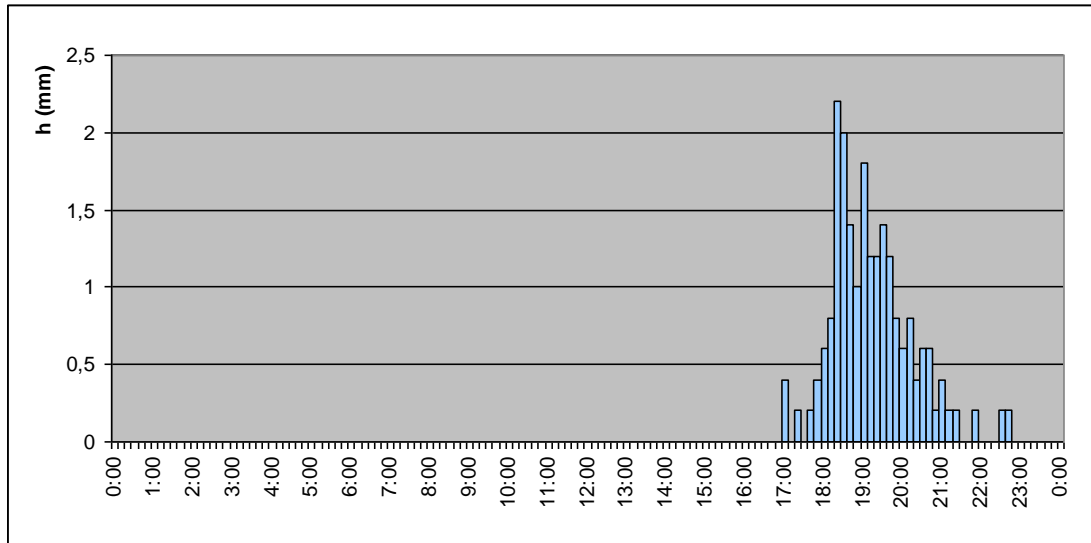
Εικόνα Π. 30 Υετογράφημα της 12.12.2008 του βροχογράφου R200



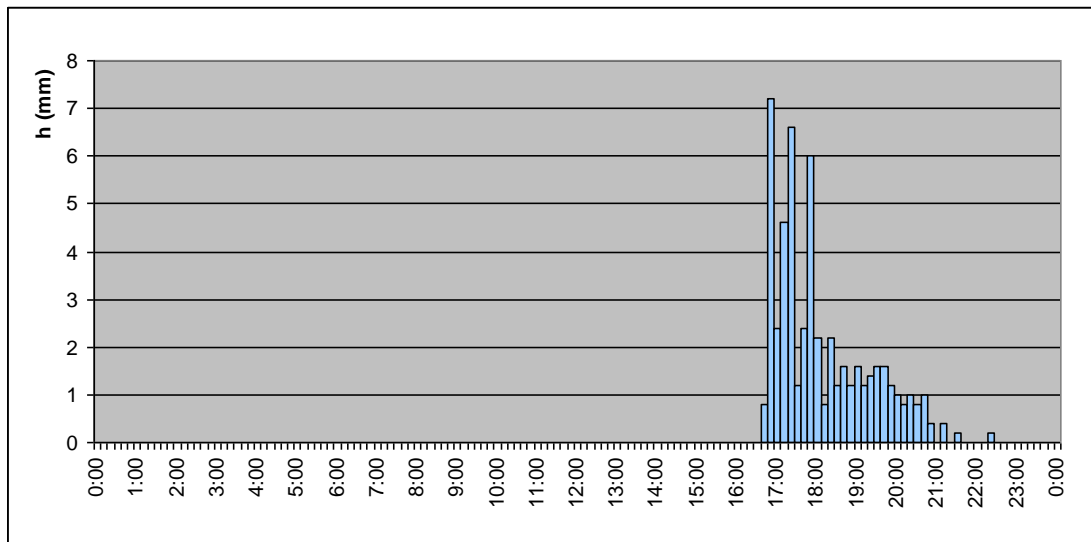
Εικόνα Π. 31 Υετογράφημα της 12.12.2008 του βροχογράφου R400



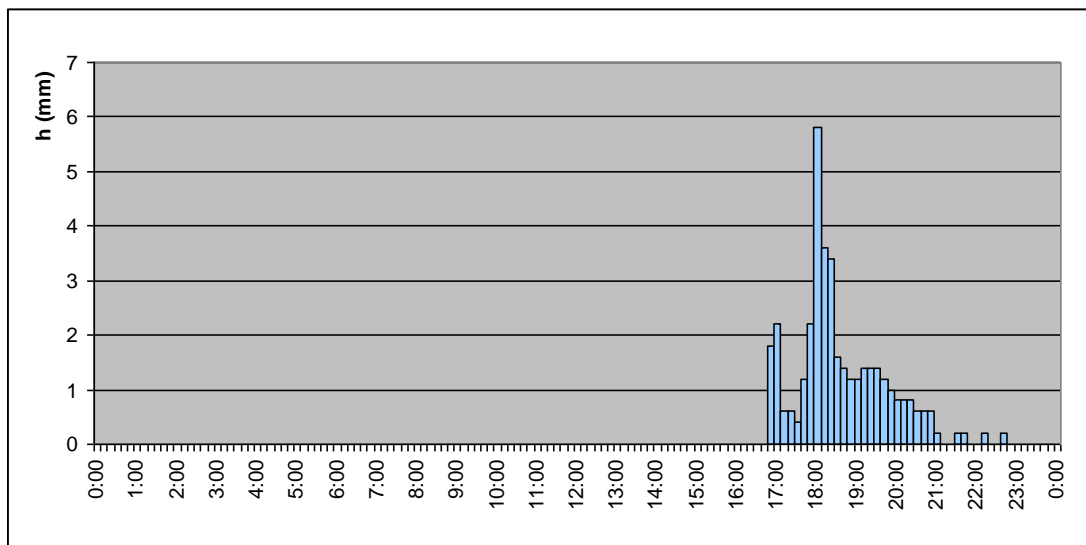
Εικόνα Π. 32 Υετογράφημα της 12.12.2008 του βροχογράφου R600



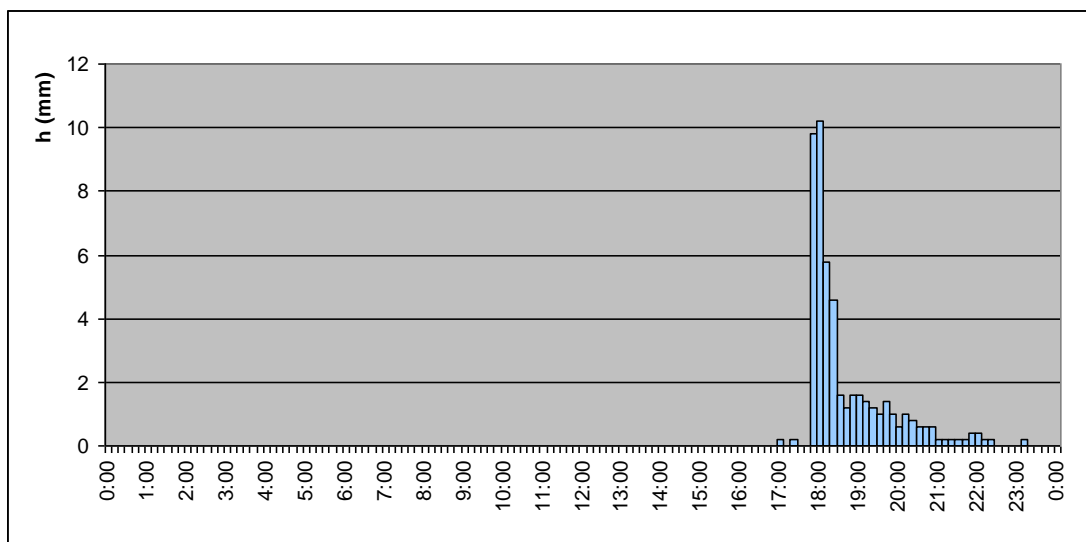
Εικόνα Π. 33 Υετογράφημα της 17.11.2009 του βροχογράφου στη θέση Πικέρμι του METEONET



Εικόνα Π. 34 Υετογράφημα της 17.11.2009 του βροχογράφου R200



Εικόνα Π. 35 Υετογράφημα της 17.11.2009 του βροχογράφου R400



Εικόνα Π. 36 Υετογράφημα της 17.11.2009 του βροχογράφου R600