



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΣΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΛΕΚΑΝΗ ΡΑΦΗΝΑΣ

Κοτσιφάκης Κωνσταντίνος

Επιβλέπων: Ε. Μπαλτάς,

Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

Ευχαριστίες

Είμαι ευτυχής που κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, βρέθηκα να έχω την καθοδήγηση και στήριξη πολλών αξιόλογων ανθρώπων, που ο καθένας με τον τρόπο του συνέβαλλε στην ολοκλήρωσή της. Από τη θέση αυτή αισθάνομαι, ως ελάχιστη υποχρέωση, την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά:

Τον επιβλέποντα της εργασίας, κ. Ε. Μπαλά, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την υποστήριξη και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Τα μέλη της Τριμελούς Επιτροπής Αξιολόγησης των Διπλωματικών Εργασιών, κ.κ. Ευάγγελο Μπαλά, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π., Νικόλαο Μαμάση, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. και Διονυσία Παναγούλια, Επίκουρο Καθηγήτρια Ε.Μ.Π., για τις εύστοχες και καλοπροαίρετες κριτικές τους ώστε το παρόν πόνημα να είναι αρτιότερο. Τους είμαι ευγνώμων.

Τους Ψωμά Αλέξανδρο και Μπαριάμη Γιώργο, υποψήφιους Διδάκτορες και ερευνητές στον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος για το ενδιαφέρον, τις συμβουλές και τη βοήθειά τους σε καίρια ζητήματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να εκφράσω στη φίλη μου Ελισσάβητ Φελώνη, για την καθοριστική συμβολή και συμπαράστασή της σε πολλά στάδια της εργασίας.

Επιπλέον, τους φίλους και συμφοιτητές μου από τη σχολή Πολιτικών Μηχανικών για τη μεγάλη κατανόηση και στήριξή τους το τελευταίο αυτό διάστημα εντατικής ενασχόλησής μου με την παρούσα εργασία και ολοκλήρωσης των σπουδών.

Τέλος, μου είναι αδύνατο να μη δώσω τις πιο θερμές ευχαριστίες στην οικογένειά μου για την αγάπη, την ηθική και υλική συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια και για τα εφόδια που μου έχουν προσφέρει ώστε να καταφέρνω να αντιμετωπίζω τις δυσκολίες που παρουσιάζονται. Τους ευχαριστώ πραγματικά για όλα.

Κοτσιφάκης Κωνσταντίνος,

Αθήνα, 12.09.2014

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	iii
Περίληψη.....	viii
Abstract	ix
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή.....	10
1.1 Γενικά περί πλημμυρών	10
1.1.1 Το ζήτημα της πλημμύρας	10
1.1.2 Ορισμός της πλημμύρας.....	15
1.1.3 Αίτια των πλημμυρών	16
1.1.4 Αντιπλημμυρική προστασία.....	17
1.2 Ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο για τα Νερά.....	18
1.2.1 Ιστορική Ανασκόπηση	18
1.2.2 Οδηγία 2000/60/ΕΚ.....	19
1.2.3 Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αντιπλημμυρική προστασία	20
1.3 Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα	21
1.4 Αντικείμενο της εργασίας	23
1.5 Κατάλογος λογισμικού εργασίας	23
1.6 Δομή της εργασίας	24
Κεφάλαιο 2. Περιοχή Μελέτης	26
2.1 Προσδιορισμός της υπό μελέτη περιοχής	26
2.2 Νέες συνθήκες περιοχής μελέτης.....	29
2.3 Γενικά στοιχεία	31
2.3.1 Πληθυσμιακά στοιχεία ευρύτερης περιοχής	31
2.3.2 Γεωλογία – λιθολογία λεκάνης απορροής.....	34
2.3.3 Χρήσεις - Κάλυψη γης (LU/LC).....	35
2.3.4 Πυρκαγιά Αυγούστου 2009.....	36
2.4 Δίκτυο υδρομετεωρολογικών μετρήσεων	37

2.4.1 Το δίκτυο HOA	37
2.4.2 Δίκτυο σταθμών περιοχής μελέτης	39
Κεφάλαιο 3. Γεωμορφολογική Προσομοίωση Πειραματικής Λεκάνης σε Περιβάλλον GIS .	43
3.1 Περιγραφή διαδικασίας.....	43
3.2 Προεπεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Terrain Preprocessing)	44
3.3 Υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών λεκάνης και δημιουργία αρχείων εισόδου στο HEC-HMS.....	51
Κεφάλαιο 4. Εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS.....	55
4.1 Γενικά στοιχεία για τα υδρολογικά μοντέλα.....	55
4.2 Προσομοίωση λεκάνης απορροής στο HEC - HMS	57
4.2.1 Μοντέλο λεκάνης απορροής	57
4.2.2 Μετεωρολογικό μοντέλο.....	58
4.2.3 Χρονικός καθορισμός προσομοίωσης.....	61
4.2.4 Δημιουργία και εισαγωγή χρονοσειρών δεδομένων	61
4.2.5 Προσομοίωση υδρολογικών ελλειμμάτων	62
4.2.6 Προσομοίωση άμεσης απορροής	71
<i>Προσέγγιση στα πλαίσια του HEC - HMS</i>	80
4.2.7 Προσομοίωση βασικής απορροής.....	83
Κεφάλαιο 5. Βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου	86
5.1 Αρχικές εκτιμήσεις.....	87
5.1.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	88
5.1.2 Σχολισμός επί των αρχικών αποτελεσμάτων	96
5.2 Βαθμονόμηση μοντέλου.....	98
5.2.1 Γενικά περί βαθμονόμησης	98
5.2.2 Διαδικασία βαθμονόμησης.....	99
5.2.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων βαθμονόμησης.....	101
5.2.4 Σχολιασμός επί των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης	111

5.3 Επαλήθευση μοντέλου	116
5.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων επαλήθευσης.....	117
5.3.2 Σχολιασμός επί των αποτελεσμάτων της επαλήθευσης.....	120
Κεφάλαιο 6. Διερεύνηση χρήσης μοντέλου 24ωρης πρόγνωσης βροχής για την εκτίμηση πλημμυρικής απορροής.....	122
6.1 Παρουσίαση μοντέλου πρόγνωσης	122
6.2 Προσομοίωση υδρογραφημάτων με χρήση προγνωσθείσας βροχής.....	124
6.2.1 Επιλογή και επεξεργασία δεδομένων πρόγνωσης.....	124
6.2.2 Προσομοίωση υδρογραφημάτων με χρήση προγνωσθείσας βροχής.....	127
Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα - μελλοντική έρευνα.....	129
7.1 Συμπεράσματα.....	129
7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	130
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	132

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση και προσομοίωση μεμονωμένων γεγονότων βροχής με χρήση τριών μεθόδων άμεσης απορροής (των Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων Snyder, Soil Conservation Service (SCS) και Clark) με τη βοήθεια του λογισμικού HEC – HMS, καθώς και η διερεύνηση αξιοποίησης μοντέλου 24ωρης πρόγνωσης της βροχής για την εκτίμηση της πλημμύρας.

Η περιοχή μελέτης τοποθετείται στην Ανατολική Αττική και αναφέρεται ως Πειραματική Λεκάνη Ραφήνας. Παρουσιάζει ενδιαφέρον από υδρολογική άποψη, λόγω της έντονης αστικοποίησης που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια αλλά και της διαφοροποίησης των χαρακτηριστικών αυτής, εξαιτίας των συχνών πυρκαγιών. Ακόμα, η πρόσφατη μεταφορά του υδρομετρικού σταθμού εξόδου της, οδήγησε σε μεταβολή της οριοθέτησης και του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης, με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η επικαιροποίηση της εκτίμησης των χαρακτηριστικών της, όπως έχουν προκύψει από προγενέστερες έρευνες. Τα απαιτούμενα δεδομένα μετρήσεων βροχής και απορροής λήφθηκαν από το Υδρολογικό Παρατηρητήριο Αθηνών (HOA), από το οποίο και παρακολουθείται η περιοχή.

Η γεωμορφολογική προσομοίωση της περιοχής πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), κυρίως με χρήση της εργαλειοθήκης HEC – GeoHMS. Μέσω αυτής πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και διαμορφώθηκαν τα αναγκαία δεδομένα, τα οποία και εισήχθησαν στο μοντέλο HEC – HMS. Ακολούθησε η υδρολογική προσομοίωση, με χρήση οκτώ επεισοδίων βροχής, της Πειραματικής λεκάνης, διαδικασία κατά την οποία πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση (πέντε επεισόδια) και επαλήθευση (τρία επεισόδια) του μοντέλου. Ολοκληρώνοντας αυτό το στάδιο, διαπιστώθηκε ότι οι τρεις μέθοδοι άμεσης απορροής δεν παρουσιάζουν μεταξύ τους σημαντικές αποκλίσεις.

Τέλος, διερευνήθηκε η δυνατότητα αξιοποίησης δεδομένων 24ωρης πρόγνωσης υετού για την εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής σε δύο χαρακτηριστικά επεισόδια, που σημειώθηκαν κατά την περίοδο μελέτης. Παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με βάση τα δεδομένα πρόγνωσης και μέτρησης, γεγονός που καταδεικνύει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα.

Abstract

The objective of the present study is both the investigation and simulation of eight individual rainfall events, as well as the application of three different rainfall-runoff methods: the Snyder, the Soil Conservation Service (SCS) and the Clark Unit Hydrographs, the results of which are compared. Furthermore, three 24-hour precipitation forecast events have been analyzed and simulated with the aim of assessing the corresponding flood runoff.

The study area is placed in the Eastern Athens basin, in the southern part of mount Penteli and is listed as “Experimental Basin of Rafina”. From a hydrological point of view and because of the intense urbanization that has occurred in the recent decades, this investigation was considered pretty interesting and important. Although it has been studied in the past, crucial alterations, such as forest fires and the transfer of the hydrometric station in 2010 at the basin outlet, require an update in the basin’s hydrological treatments. The Hydrological Observatory of Athens (HOA) is monitoring the area with a rain gauge and hydrometric network since 2003, from which the precipitation and runoff data used are taken.

The geomorphological simulation of the study area was held in GIS environment, mainly by using the HEC-GeoHMS Toolbox. In this part, the digital terrain model was edited, and through this process the necessary data were produced and finally introduced in the HEC-HMS model. The hydrological simulation was the following step, where five rainfall events were used in the calibration and three in the verification process. Subsequently, a comparison was made among the results of the three direct-runoff methods, which were found approximately identical.

The final stage was the estimation of runoff by using 24-hour forecasted precipitation. Two stratiform episodes were elaborated and simulated with the same model. A significant difference between the observed and the simulated, through forecast, hydrographs was noted, indicating the necessity of further research in the field of rain and flood forecasting.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

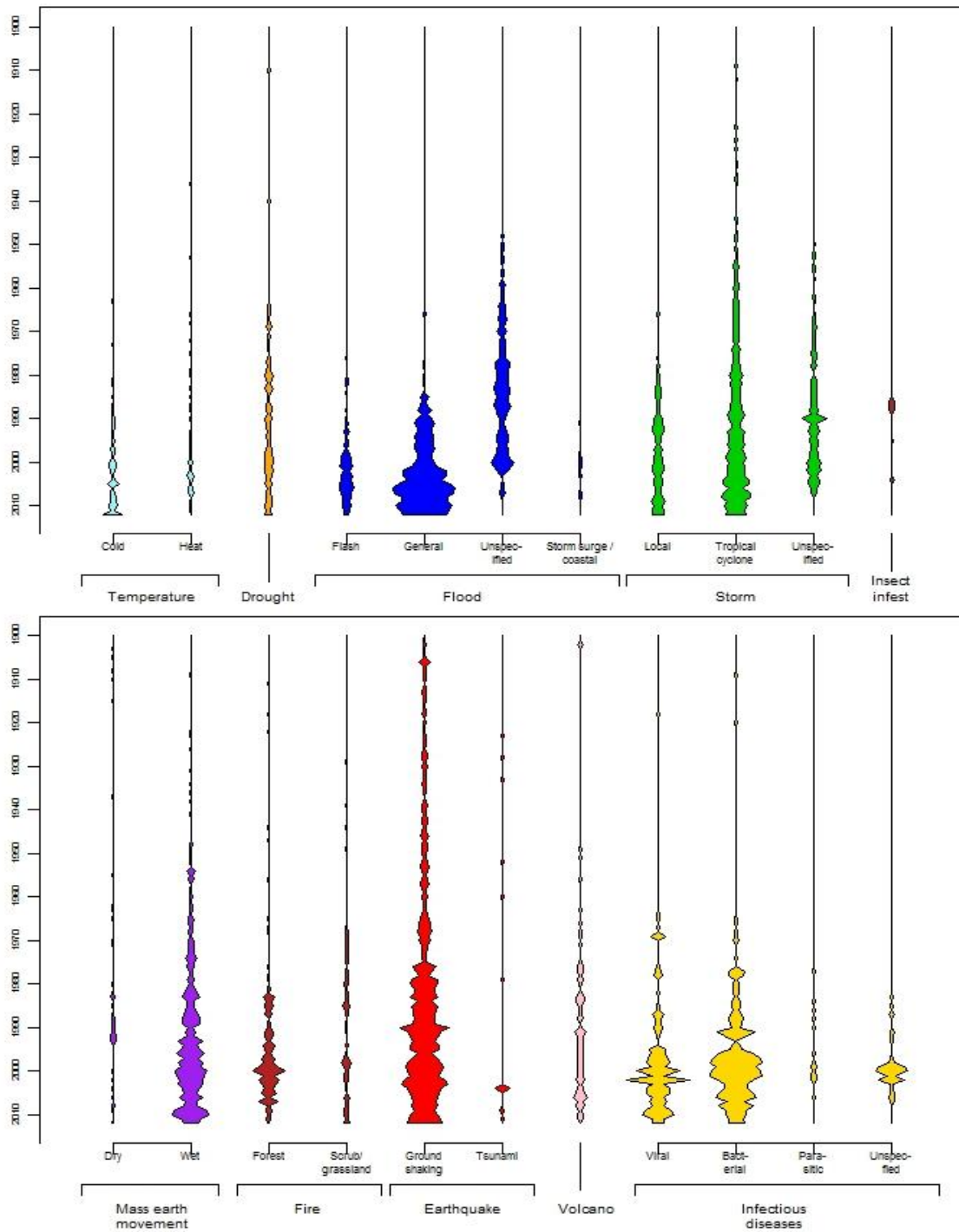
1.1 Γενικά περί πλημμυρών

1.1.1 Το ζήτημα της πλημμύρας

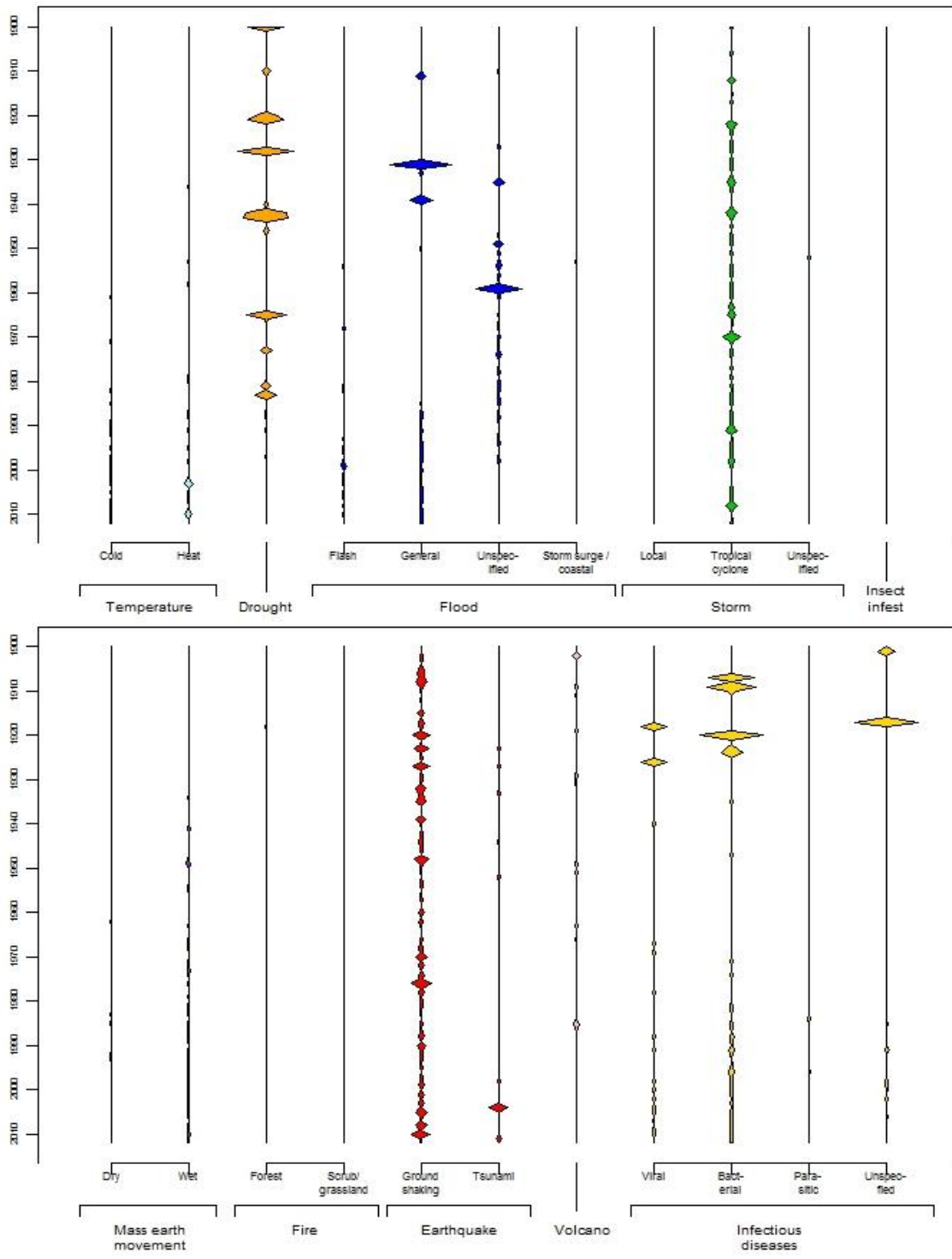
Το πρόβλημα της εκτίμησης του μεγέθους και της συχνότητας των πλημμυρών απασχόλησε τον άνθρωπο ήδη από τα αρχαία χρόνια, όταν καλούνταν να προστατευτεί από αυτές ή να τις εκμεταλλευτεί προς όφελός του με τις μικρότερες δυνατές απώλειες. Στους μεγάλους αρχαίους πολιτισμούς τα αντιπλημμυρικά έργα συνδυάστηκαν 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).

Στις μέρες μας, το ζήτημα των πλημμυρών είναι υπαρκτό και εξαιρετικά απειλητικό για τον άνθρωπο, τις δραστηριότητές του, την περιουσία του και το περιβάλλον, ενώ αναμένεται να γίνει ακόμα πιο έντονο τα ερχόμενα χρόνια, ως αποτέλεσμα και της κλιματικής αλλαγής που παρατηρείται σε παγκόσμιο επίπεδο. Από το 1990 έως το 2012, οι πλημμύρες είχαν, παγκοσμίως, επιπτώσεις σε περισσότερους από 2,5 δισεκατομμύριο ανθρώπους. Από αυτούς οι 168.000 σκοτώθηκαν και περισσότεροι από 62 εκατομμύρια έμειναν άστεγοι. Οι οικονομικές ζημιές ανήλθαν σε περισσότερα από 500 δισεκατομμύρια δολάρια [Πηγή: EM-DAT, The International Disaster Database].

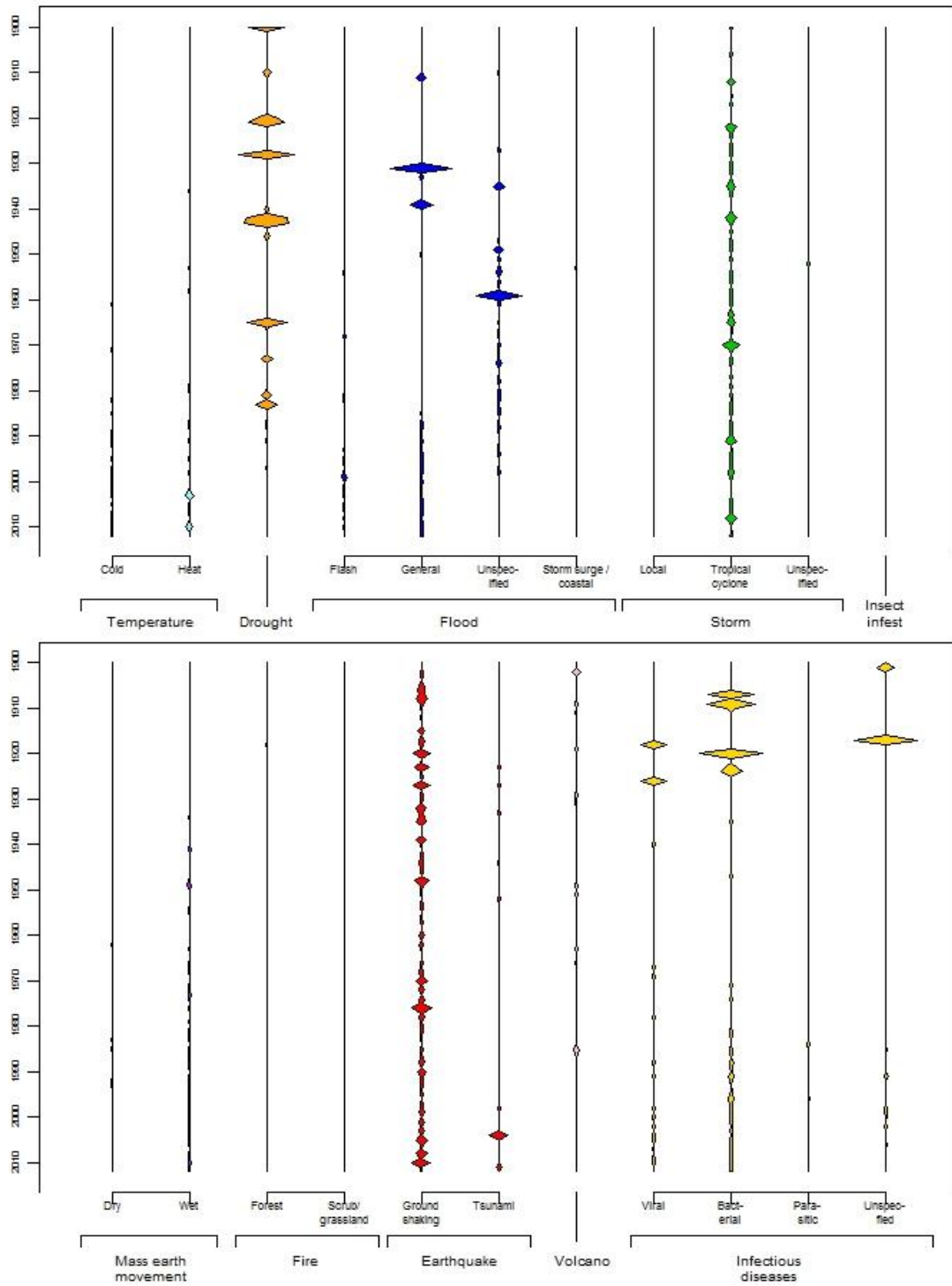
Συγκρίνοντας τον κίνδυνο καθώς και τις επιπτώσεις των πλημμυρικών φαινομένων με αυτά άλλων μορφών φυσικής καταστροφής, σε παγκόσμια κλίμακα, μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε πως οι πλημμύρες αποτελούν, αν όχι τη σημαντικότερη, μια από τις πιο σημαντικές απειλές που διατρέχει ο άνθρωπος από τη φύση. Στα διαγράμματα 1.1, 1.2, 1.3 παρουσιάζονται, για την περίοδο 1900 – 2010, τα καταγεγραμμένα συμβάντα, οι νεκροί και οι πληγέντες για κάθε εκδηλωθείσα μορφή φυσικής καταστροφής. Στο διάγραμμα 1.4 παρουσιάζεται για την περίοδο 1990 - 2012 το συνολικό κόστος των υλικών ζημιών σε δισεκατομμύρια δολάρια για κάθε μια μορφή φυσικής καταστροφής στην αντίστοιχη ήπειρο που εκδηλώθηκε.



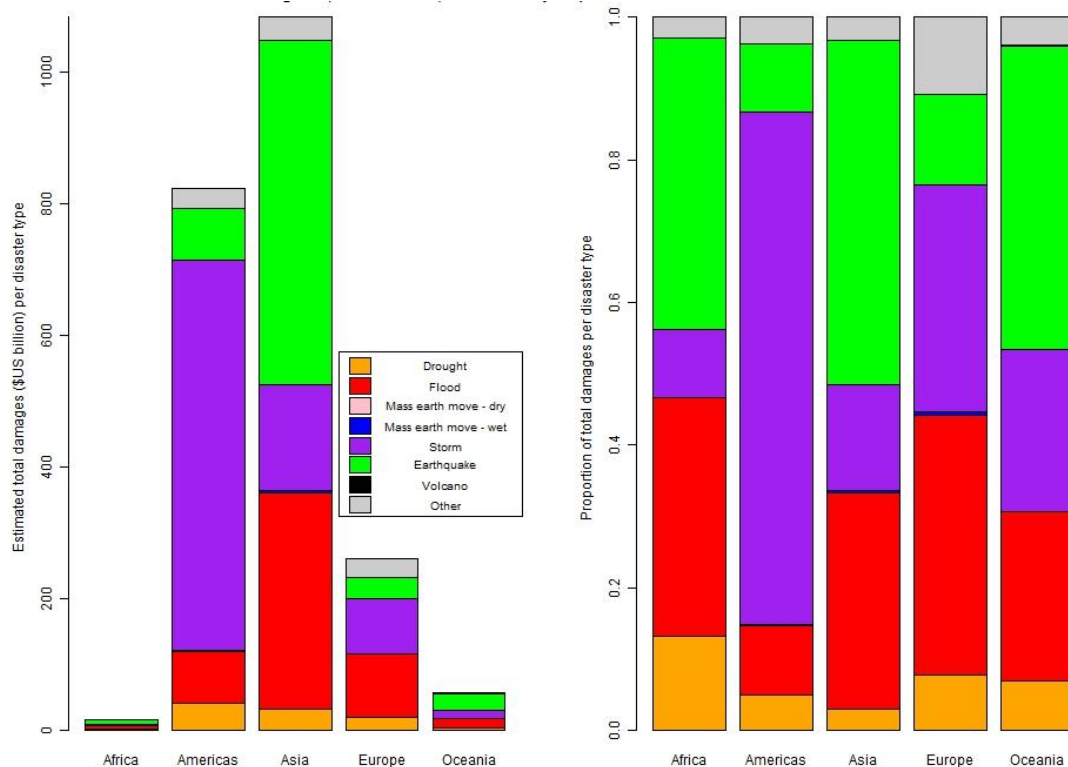
Σχήμα 1.1 Καταγεγραμμένα συμβάντα παγκοσμίως, ανά έτος και μορφή φυσικής καταστροφής, περιόδου 1990-2010 [Πηγή: www.emdat.be]



Σχήμα 1.2 Καταγεγραμμένοι αριθμοί νεκρών παγκοσμίως (στο τετράγωνο) ανά έτος και μορφή φυσικής καταστροφής, περίοδου 1900-2010 [Πηγή: www.emdat.be]



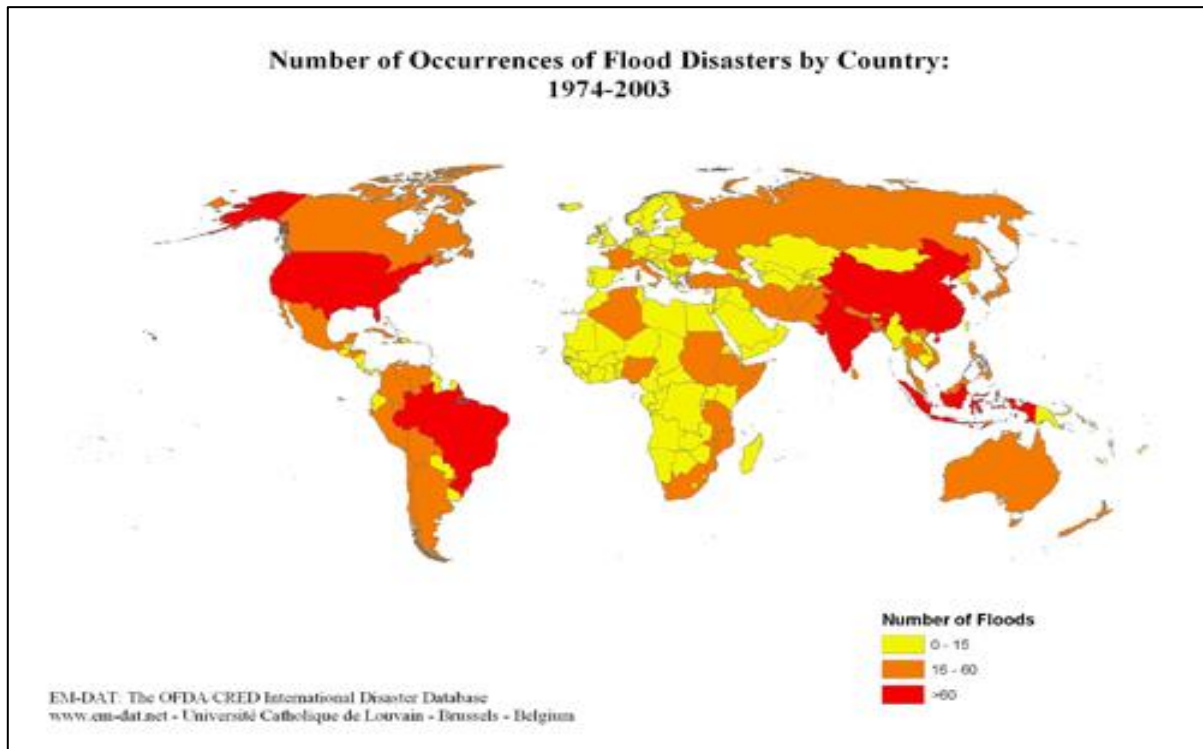
Σχήμα 1.3 Καταγεγραμμένοι αριθμοί πληγέντων παγκοσμίως, ανά έτος και μορφή φυσικής καταστροφής, περιόδου 1900-2010 [Πηγή: www.emdat.be]



EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database - www.emdat.be - Université Catholique de Louvain, Brussels - Belgium

Σχήμα 1.4 Καταγεγραμμένο συνολικό κόστος ζημιών σε δισεκατομμύρια δολάρια ανά έτος, ήπειρο και μορφή φυσικής καταστροφής, περίοδο 1900-2012 [Πηγή:www.emdat.be]

Στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζεται η παγκόσμια κατανομή των μεγάλων, καταστροφικών πλημμυρικών φαινομένων που σημειώθηκαν κατά την περίοδο μεταξύ των ετών 1974 και 2003. Παρατηρείται πως τα περισσότερα έχουν καταγραφεί σε χώρες της Ασίας (κυρίως την Κίνα και την Ινδία) και της Αμερικής (ΗΠΑ, Βραζιλία και άλλες) ενώ αντίθετα τα ακραία φαινόμενα είναι σχετικά περιορισμένα στην Αφρική και στην Ευρώπη (όπως και στη χώρα μας).



Σχήμα 1.5 Παγκόσμια κατανομή μεγάλων επεισοδίων πλημμύρας, περιόδου 1974-2003

[Πηγή: www.emdat.be]

Σήμερα, λοιπόν, με εφόδια την επιστημονική έρευνα και εμπειρία και την τεχνολογική πρόοδο των τελευταίων δεκαετιών, η επιστημονική κοινότητα καλείται να εκτιμήσει την εμφάνιση πλημμυρικών επεισοδίων και τις επιπτώσεις τους με σκοπό να προλάβει ή να μετριάσει τον κίνδυνο αυτών και να προστατεύσει τον άνθρωπο, τις δραστηριότητες του και το περιβάλλον, αλλά και να διαχειριστεί με το βέλτιστο δυνατό τρόπο τους υδατικούς πόρους.

1.1.2 Ορισμός της πλημμύρας

Με τον όρο πλημμύρα εννοούμε το φαινόμενο κατά το οποίο, λόγω της ανεπάρκειας μιας φυσικής ή τεχνητής κύριας κοίτης ενός υδατορέματος ή ποταμού να διοχετεύσει μια αυξημένη παροχή ύδατος στο φυσικό αποδέκτη του, η στάθμη του ρέοντος ύδατος ανέρχεται με αποτέλεσμα την εξάπλωση των υδάτων στις παρακείμενες περιοχές, οι οποίες υπό φυσιολογικές συνθήκες χρησιμοποιούνται για παραγωγικούς σκοπούς ή αποτελούν τον χώρο εκδήλωσης των ανθρώπινων δραστηριοτήτων (Σακκάς, 2004)

Η αυξημένη παροχή ενός υδατορέματος είναι αποτέλεσμα είτε μιας ραγδαίας τοπικής βροχής είτε της ταχείας τήξης του χιονιού είτε και των δύο αυτών παραγόντων μαζί. Η ανεπάρκεια της κύριας κοίτης του υδατορέματος οφείλεται : α) στο περιορισμένο μέγεθος της διατομής, η οποία συνήθως μειώνεται ακόμα περισσότερο με την εναπόθεση των μεταφερόμενων

στερεών υλικών από τη διάβρωση υψηλότερων περιοχών, β) στη μικρή κλίση του πυθμένα της κοίτης, η οποία μειώνεται ακόμα περισσότερο με την ανάπτυξη του φαινομένου του μαιανδρισμού σε πεδινό ρέμα και γ) στη μείωση της ταχύτητας ροής, με αύξηση του συντελεστή τραχύτητας, λόγω ανάπτυξης εμποδίων και φερτών υλικών.

Πλημμύρες επίσης συμβαίνουν όταν η στάθμη του νερού στις λίμνες, στις δεξαμενές και τα υδροφόρα στρώματα υπερβαίνει κάποιες κρίσιμες τιμές και γεμίζει νερό ο παρακείμενος χώρος ή όταν η θάλασσα «φουσκώνει» στις παράκτιες περιοχές πολύ πιο πάνω από τη μέση στάθμη της. Ο συνηθέστερος, όμως, και κυριότερος λόγος για τον οποίο συμβαίνει μια πλημμύρα είναι οι ξαφνικές, ραγδαίες βροχοπτώσεις με πολύ μεγάλη ένταση, κατά τις οποίες οι κοίτες των ποταμών – χειμάρρων ξεχειλίζουν, καθώς το έδαφος δεν είναι σε θέση να απορροφήσει τέτοιες ποσότητες νερού τόσο γρήγορα.

Για την επιστήμη της Υδρολογίας, η έννοια της πλημμύρας είναι λίγο διαφορετική και έχει να κάνει απλά με τη σχετικά μεγαλύτερη παροχή σε ένα υδατόρεμα. Σαν φυσικό φαινόμενο, η πλημμύρα είναι ένα δυναμικό, βίαιο φαινόμενο, εξαιρετικά επικίνδυνο και καταστρεπτικό, που εμφανίζεται γενικά απρόβλεπτα και που αφήνει ελάχιστα χρονικά περιθώρια για να μπορέσει να εκδηλώσει κανείς κάποια αντίδραση για την αντιμετώπισή του (Στάθης, 2004).

1.1.3 Αίτια των πλημμυρών

Τα βαθύτερα αίτια των πλημμυρών είναι φυσικά φαινόμενα (π.χ. συνισταμένες του υδρολογικού κύκλου) τα οποία δεν μπορούν να ελεγχθούν στο σύνολό τους. Το ερώτημα εάν μια συγκεκριμένη βροχόπτωση, θα προκαλέσει ζημιές λόγω πλημμύρας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ανθρώπινες παρεμβάσεις στο φυσικό περιβάλλον όπως:

- Αστικοποίηση περιοχών με κατάληψη τους φυσικού περιβάλλοντος για τις ανθρώπινες δραστηριότητες συμβάλλοντας στην αυξημένη επιφανειακή απορροή.
- Αποψίλωση των ανάντη τμημάτων της λεκάνης απορροής, (Δασικές πυρκαγιές, υλοτόμηση) μειώνοντας το φαινόμενο της κατακράτησης από τη βλάστηση και μειώνοντας αισθητά το χρόνο για την πραγματοποίηση της διήθησης.
- Η ευθυγράμμιση της ροής των ποταμών.
- Η εξάλειψη των φυσικών πεδίων κατάκλισης αφού έχουν καταληφθεί από ανθρωπογενείς δραστηριότητες οι οποίες δεν είναι προσαρμοσμένες σε γεγονότα που συμβαίνουν σπάνια ανάγοντας την από φυσικό κίνδυνο σε φυσική καταστροφή.
- Η ανεπαρκής αποστράγγιση λόγω απομείωσης διατομών από φερτές ύλες ή άλλα εμπόδια.

- Η οικοδόμηση κατασκευών και κτιρίων σε αντιπλημμυρικά πεδία.

Τα κύρια μεγέθη της πλημμύρας είναι η παροχή αιχμής και η στάθμη υδατορέματος που αντιστοιχεί σε αυτή, ο πλημμυρικός όγκος και η χρονική διάρκεια του φαινομένου (Μαμάσης, 2012).

1.1.4 Αντιπλημμυρική προστασία

Η αντιμετώπιση των πλημμυρών γίνεται με μια σειρά μέτρων που διακρίνονται σε:

- Κατασκευαστικά (έργα)
- Μη κατασκευαστικά
- Συνδυασμό κατασκευαστικών και μη

Τα κατασκευαστικά μέτρα έχουν ως κύριους στόχους την αποθήκευση του νερού και την αύξηση ικανότητας μεταφοράς του. Δεδομένου ότι οι κατασκευές είναι τρωτές στις πλημμύρες (αφού έχουν σχεδιαστεί με κάποια πιθανότητα αστοχίας) θα πρέπει να συνοδεύονται και από άλλα, μη κατασκευαστικά μέτρα.

Παραδείγματα κατασκευαστικών έργων είναι : αντιπλημμυρικοί ταμιευτήρες στα ανάντη της λεκάνης, αναχώματα και προστατευτικοί τοίχοι, λεκάνες κατάκλισης δίπλα στο ποτάμι ώστε να γίνεται ανακούφιση της πλημμυρικής αιχμής προστατεύοντας τις κατάντη περιοχές, δίκτυα ομβρίων για γρήγορη και ασφαλή αποστράγγιση τόσο της λεκάνης όσο και του αστικού τμήματος που προστατεύει. Επίσης άλλα κατασκευαστικά μέτρα αποτελούν η αύξηση παροχευτικότητας των ποταμών με καθαρισμό από φερτά υλικά διαβρώσεως όσο και από εμπόδια φυσικά ή απορρίψεις, η εκβάθυνση και διάνοιξη των διατομών, η εισαγωγή ενδεχομένως πρόσθετων διατομών παράλληλα στο ρου του ποταμού όπως και οι υπερχειλιστές στους ταμιευτήρες.

Τα κατασκευαστικά μέτρα θα πρέπει να υλοποιούνται στα πλαίσια ενός γενικότερου στρατηγικού σχεδιασμού για μια ευρύτερη περιοχή και όχι αποσπασματικά και τοπικά κάθε φορά που υπάρχει πρόβλημα, καθώς είναι σαφές πως κάθε έργο επηρεάζει τα γύρω του. Έτσι ένα έργο σε μια συγκεκριμένη θέση μπορεί να λύνει ένα τοπικό πρόβλημα, αλλά να δημιουργεί σοβαρότερο πρόβλημα σε άλλη θέση. Μετά την ολοκλήρωση κάθε έργου αντιπλημμυρικής προστασίας θα πρέπει βέβαια να συνοδεύεται και από ορθές πρακτικές λειτουργίας, διαχείρισης και συντήρησης από τον κύριο του έργου (Δημόσια Υπηρεσία, Τοπική Αυτοδιοίκηση κτλ.) ώστε να λειτουργεί στο βέλτιστο δυνατό βαθμό και σε συνδυασμό με υφιστάμενα έργα, ώστε να ικανοποιούν το σκοπό για τον οποίο

δημιουργήθηκαν: την προστασία δηλαδή των ανθρωπίνων ζώων, των υποδομών καθώς και του περιβάλλοντος (Μιμίκου, 2012).

Ως μη κατασκευαστικά μέτρα αντιπλημμυρικής προστασίας ορίζονται τα μέτρα αυτά τα οποία αφορούν τον τρόπο πρόληψης και μετρίασης εμφάνισης μεγάλων πλημμυρικών επεισοδίων, προστασίας του φυσικού περιβάλλοντος και τρόπους πρόγνωσης και οργάνωσης των μηχανισμών προστασίας σε θέματα ενημέρωσης καθώς και αποκατάστασης των βλαβών που υπέστησαν οι υποδομές.

Παραδείγματα μη κατασκευαστικών μέτρων αποτελούν η διατήρηση και επέκταση των δασών στις ορεινές περιοχές της λεκάνης απορροής, η διατήρηση των υγροτόπων και των πλημμυρικών πεδίων από ανθρώπινες παρεμβάσεις και χρήσεις ώστε οι φυσικές ζώνες να καθυστερούν τη ροή, η διατήρηση των μαιάνδρων των ποταμών και των φυσικών συνδέσεων τους με τις πλημμυρικές περιοχές. Επίσης σημαντική συνεισφορά στην αντιπλημμυρική προστασία έχουν ο έλεγχος και συντήρηση των δικτύου όμβριων υδάτων στις αστικές περιοχές, η χρήση ιστορικών πληροφοριών και ανάπτυξη συστημάτων πρόγνωσης καταιγίδων και μοντέλων βροχής απορροής και συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης του κοινού με μηχανισμούς διαρκούς ενημέρωσης. Σημαντικό σημείο προσοχής, είναι να καταστεί σαφές από τις Αρχές η εσφαλμένη αντίληψη για απόλυτη αντιπλημμυρική προστασία και να προσαρμοστούν οι χρήσεις γης εντός πλημμυρικών πεδίων στην πιθανότητα καταστροφής. Μεγάλη συνεισφορά μείωσης του κινδύνου από φυσική καταστροφή αποτελεί και η χωροθέτηση σημαντικών υποδομών εκτός επικίνδυνων περιοχών που απειλούνται από πλημμυρικό κίνδυνο (Μαμάσης, 2012).

1.2 Ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο για τα Νερά

1.2.1 Ιστορική Ανασκόπηση

Η κοινότητα εδώ και χρόνια προσπαθεί να διαμορφώσει ένα θεσμικό πλαίσιο, αναφορικά με την περιβαλλοντική νομοθεσία για την ποιότητα του νερού. Η πρώτη προσπάθεια στην κατεύθυνση αυτή οδήγησε τον Ιούνιο του 1975 στην Οδηγία 75/440/ΕΟΚ, η οποία εξελίχθηκε και συμπληρώθηκε το 1980, με την Οδηγία 80/778/ΕΟΚ. Με τις Κοινοτικές αυτές Οδηγίες, θεσπίζονταν στα πλαίσια της Ένωσης δεσμευτικοί ποιοτικοί στόχοι για το πόσιμο νερό. Περιλαμβάνονταν, ακόμη, νομοθεσία που στόχευε στην ποιοτική αναβάθμιση θαλάσσιων και υπόγειων υδάτων. Το επόμενο βήμα στην κατεύθυνση της προσπάθειας για ποιοτική αναβάθμιση των υδάτων πραγματοποιήθηκε το 1991 με την έκδοση των Οδηγιών 91/271/ΕΟΚ και 91/676/ΕΟΚ, οι οποίες αφορούσαν την αντιμετώπιση των υγρών αστικών

αποβλήτων και την προστασία των υδάτων έναντι της μόλυνσης από νιτρικά άλατα που προέρχονται από την αγροτική δραστηριότητα. Νομοπαρασκευαστικές διαδικασίες έλαβαν χώρα υπό τις προτάσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, οι οποίες είχαν σαν αποτέλεσμα τις Οδηγίες: Οδηγία 98/83/EK (αφορά τη θέρσηση ποιοτικών προτύπων για το πόσιμο νερό) και Οδηγία 96/61/EK (αφορά ολοκληρωμένη προστασία από μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις).

Η σοβαρότερη, ωστόσο, προσπάθεια για μια ουσιαστική αναθεώρηση της πολιτικής των υδάτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης ξεκίνησε στα μέσα του 1995, οπότε και έγινε αντιληπτή η ανάγκη για μια πιο σφαιρική προσέγγιση, υπό και τη συνεχώς αυξανόμενη ευαισθητοποίηση των πολιτών, αλλά και τον υπόλοιπων εμπλεκόμενων φορέων για το νερό που καταναλώνεται. Στα πλαίσια της προσπάθειας αυτής ξεκίνησε διαδικασία ανοιχτής διαβούλευσης, με τη συμμετοχή όλων των ενδιαφερόμενων πλευρών.

Το αποτέλεσμα της διαδικασίας διαβούλευσης ήταν το κοινό συμπέρασμα ότι, ενώ είχε σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην αντιμετώπιση των επιμέρους θεμάτων, η τρέχουσα πολιτική για τα ύδατα ήταν κατακερματισμένη τόσο από πλευράς στόχων, όσο και από πλευράς μέσων υλοποίησης. Όλες οι εμπλεκόμενες πλευρές συμφώνησαν σχετικά με την ανάγκη για ένα ενιαίο νομοθετικό πλαίσιο για την επίλυση όλων αυτών των προβλημάτων.

Στις 20 Οκτωβρίου 2000, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο υιοθέτησαν την Οδηγία 2000/60/EK, εγκαθιδρύοντας το πλαίσιο για την Ευρωπαϊκή Κοινότητα στο πεδίο δράσης της πολιτικής υδάτων ή εν συντομία Ευρωπαϊκή Οδηγία Πλαίσιο για τα νερά (European Commission, 2012).

1.2.2 Οδηγία 2000/60/EK

Η οδηγία 2000/60/EK συνδυάζει ποιοτικούς, οικολογικούς και ποσοτικούς στόχους για την προστασία υδάτινων οικοσυστημάτων και την καλή κατάσταση όλων των υδατικών πόρων. Θέτει ως κεντρική ιδέα την ολοκληρωμένη διαχείριση τους στη γεωγραφική κλίμακα της λεκάνης απορροής ποταμού. Επιπλέον, επαναπροσδιορίζει την έννοια της Λεκάνης Απορροής, η οποία πλέον περιλαμβάνει τα εσωτερικά επιφανειακά (ποταμοί, λίμνες), τα υπόγεια ύδατα, τα μεταβατικά (δέλτα, εκβολές ποταμών) και τα παράκτια συστήματα.

Για κάθε περιοχή Λεκάνης Απορροής Ποταμού καθορίζει, μια σειρά από απαραίτητες ενέργειες που θα πρέπει να υλοποιηθούν εντός των καθορισμένων προθεσμιών, ώστε ο βασικός στόχος της Οδηγίας, που είναι η αποτροπή της περαιτέρω υποβάθμισης όλων των υδάτων και η επίτευξη «καλής κατάστασης», να επιτευχθεί μέχρι το 2015. Η επίτευξη των

περιβαλλοντικών στόχων της Οδηγίας στηρίζεται σε οικονομικές αρχές και εργαλεία καθώς και στην εφαρμογή ολοκληρωμένων προγραμμάτων μέτρων.

Συγκεντρωτικά, θα μπορούσαμε να παραθέσουμε τα κυριότερα σημεία της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Νερά ως εξής (www.moa.gov.cy):

- Προστατεύει όλα τα ύδατα: ποταμούς, λίμνες, παράκτια και υπόγεια.
- Θέτει φιλόδοξους στόχους για να εξασφαλίσει ότι όλα τα ύδατα θα ανταποκρίνονται στην «καλή κατάσταση» έως το 2015.
- Δημιουργεί σύστημα διαχείρισης σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού.
- Απαιτεί διασυνοριακή συνεργασία μεταξύ χωρών και όλων των εμπλεκόμενων μερών (στην περίπτωση των διεθνών περιοχών λεκάνης απορροής ποταμού).
- Εξασφαλίζει ενεργό συμμετοχή όλων των φορέων, συμπεριλαμβανομένων και των μη κυβερνητικών οργανισμών και των τοπικών αρχών, στις δραστηριότητες της διαχείρισης των υδάτων.
- Εξασφαλίζει μείωση και έλεγχο της ρύπανσης από όλες τις πηγές, όπως η γεωργία, η βιομηχανική δραστηριότητα, οι αστικές περιοχές κτλ.
- Απαιτεί πολιτικές τιμολόγησης του νερού και εξασφαλίζει ότι ο ρυπαίνων πληρώνει
- Εξισορροπεί τα συμφέροντα του περιβάλλοντος με τα συμφέροντα αυτών που εξαρτώνται από αυτό.

Η Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά αποτελεί, κατά γενική ομολογία, μια τεράστια προσπάθεια, σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, για την ορθή προστασία και χρήση όλων των υδάτων, ώστε να εξασφαλιστεί η αειφόρος χρήση του νερού σε ολόκληρη την Ευρώπη.

Ωστόσο, αναφορικά με το μεγάλο ζήτημα των πλημμυρών, η μείωση του κινδύνου πλημμύρας δεν είναι ένας από τους κύριους στόχους της, ούτε λαμβάνονται επαρκώς υπόψη πιθανοί μελλοντικοί κίνδυνοι (π.χ αλλαγή του κλίματος). Για να καλυφτεί το κενό αυτό, ήρθε στις 6/11/2007 η νέα Οδηγία Πλαίσιο για την αξιολόγηση των πλημμυρών.

1.2.3 Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/EK για την αντιπλημμυρική προστασία

Ο βασικός στόχος της Οδηγίας 2007/60/EK είναι να βοηθήσει τα Κράτη Μέλη στην πρόληψη, τον περιορισμό και την αντιμετώπιση των πλημμυρών. Με την Οδηγία δημιουργείται το ευρωπαϊκό πλαίσιο για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, το οποίο επεκτείνεται και συντονίζεται στενά με την Οδηγία 2000/60/EK. Η νέα αυτή Οδηγία προβλέπει, στο πλαίσιο μιας προσέγγισης μακροπρόθεσμου σχεδιασμού, μια διαδικασία διαχείρισης του κινδύνου πλημμυρών, η οποία υλοποιείται σε τρία στάδια:

Μέχρι το τέλος του 2011 τα Κράτη Μέλη θα έπρεπε να είχαν προβεί σε προκαταρκτική εκτίμηση των κινδύνων πλημμύρας για τις λεκάνες απορροής ποταμών και να προσδιορίσουν, με τον τρόπο αυτό, τις περιοχές με σοβαρή πιθανότητα πλημμύρας.

Σε περιοχές, στις οποίες υφίστανται όντως κίνδυνοι για ζημιές από πλημμύρες, τα Κράτη Μέλη υποχρεούνται να εκπονήσουν, μέχρι το τέλος του 2013, χάρτες επικινδυνότητας και χάρτες κινδύνων πλημμύρας, στους οποίους θα αποτυπώνονται οι αρνητικές συνέπειες των πλημμυρών (σε πληθυσμό, εγκαταστάσεις, κτλ.)

Το αργότερο μέχρι το 2015, για τις περιοχές αυτές πρέπει να καταρτισθούν σχέδια διαχείρισης των κινδύνων της πλημμύρας. Τα σχέδια θα πρέπει να περιλαμβάνουν μέτρα για τη μείωση της πιθανότητας πλημμύρας και τον περιορισμό των πιθανών της επιπτώσεων. Τα σχέδια αυτά θα καλύπτουν μεν όλες τις φάσεις του κύκλου διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας, αλλά θα εστιάζονται ιδίως στην πρόληψη (όπως πρόληψη των ζημιών από πλημμύρες, με την αποφυγή κατασκευής κατοικιών και βιομηχανιών σε περιοχές που απειλούνται σήμερα ή που θα απειληθούν στο μέλλον από πλημμύρες ή προσαρμογή των μελλοντικών αναπτυξιακών προγραμμάτων στους κινδύνους πλημμύρας), την προστασία (με τη λήψη μέτρων μείωσης της πιθανότητας πλημμυρών ή/και περιορισμού των επιπτώσεων των πλημμυρών σε συγκεκριμένες τοποθεσίες, όπως π.χ. με αποκατάσταση κατακλιζόμενων περιοχών και υγροτόπων) και την ετοιμότητα (π.χ. μέσω της παροχής οδηγιών στο κοινό σχετικά με το τι πρέπει να κάνει σε περίπτωση πλημμύρας).

Τα τρία αυτά στάδια θα επαναλαμβάνονται σε εξαετείς κύκλους, ώστε να εξασφαλιστεί η συνεκτίμηση των μακροπρόθεσμων εξελίξεων, συμπεριλαμβανομένης και της κλιματικής αλλαγής. Στις περιπτώσεις διεθνών λεκανών απορροής ποταμών, για τα στάδια αυτά πρέπει να υπάρξει συντονισμός μεταξύ των εμπλεκόμενων χωρών για να μην μετατεθούν τα προβλήματα από τη μια περιοχή στην άλλη. Επίσης, θα πρέπει να εξασφαλιστεί η ενεργός συμμετοχή όλων των ενδιαφερόμενων μερών στην κατάρτιση και επικαιροποίηση των σχεδίων διαχείρισης κινδύνου πλημμυρών και τα σχέδια, οι εκτιμήσεις και οι χάρτες κινδύνου θα πρέπει να δημοσιοποιούνται (Υ.Π.Ε.Κ.Α.).

1.3 Το πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα

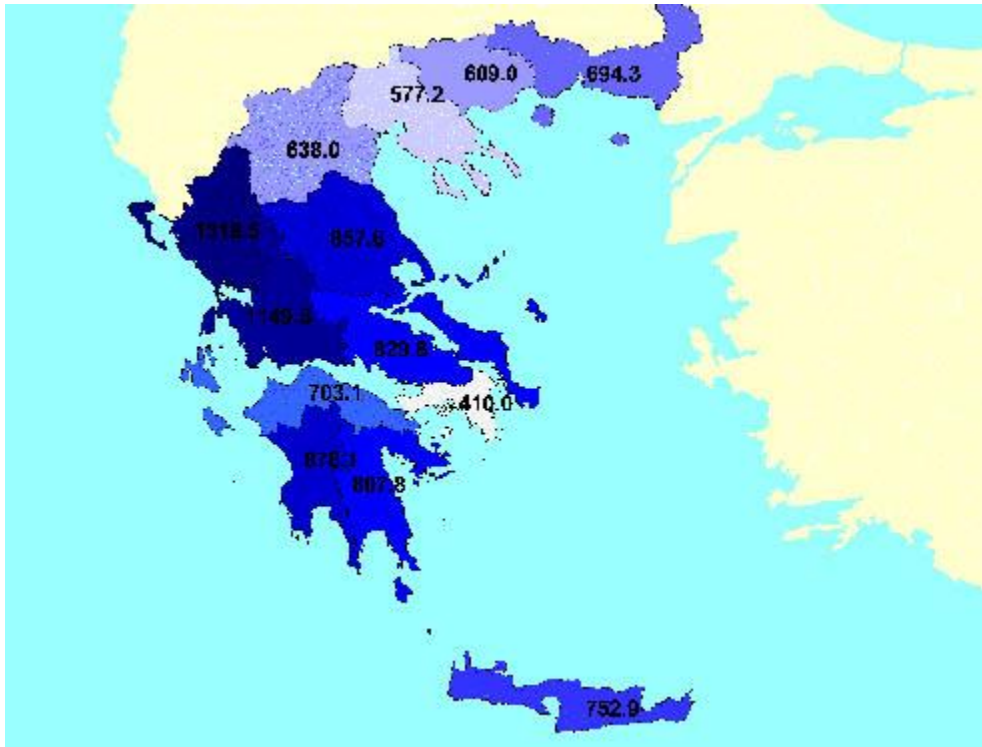
Στην Ελλάδα οι μεγάλες πλημμύρες είναι σπάνιες. Πολύ συχνά όμως παρουσιάζονται τοπικές πλημμύρες που προκαλούν μεγάλες καταστροφές και προέρχονται από μικρές λεκάνες απορροής ή τοπικά υδατορέματα, συνήθως χειμάρρους. Οι ζημιές που προκαλούνται από τις πλημμύρες αναφέρονται σε σπίτια, καταστήματα, δρόμους και τεχνικά έργα, δίκτυα

τηλεπικοινωνιών και ηλεκτρισμού, επαγγελματικά και επιβατικά αυτοκίνητα. Τέλος, οι πλέον σημαντικές, αλλά ευτυχώς λιγότερο συχνές, είναι οι απώλειες ανθρώπινων ζωών.

Δυστυχώς στην Ελλάδα δεν υπάρχει ένας ενιαίος φορέας υπεύθυνος για την καταγραφή των πλημμυρών και των καταστροφών που προκάλεσαν κατά το παρελθόν. Προκειμένου να έχουμε μια εικόνα του μεγέθους και των επιπτώσεων των πλημμυρών, χρησιμοποιήθηκε το σύνολο των πλημμυρικών γεγονότων που έχουν σημειωθεί στον ελλαδικό χώρο από το έτος 1980 μέχρι το 2002, (Μιμίκου, 2005).

Αναλυτικότερα, έχουν σημειωθεί και καταγραφεί 150 έντονα πλημμυρικά φαινόμενα στον ελλαδικό χώρο. Σε 22 περιπτώσεις υπήρξαν ανθρώπινα θύματα, 36 φορές πλημμύρισαν μεγάλοι ποταμοί (Σπερχειός, Έβρος, Πηνειός κτλ.), ενώ οι περισσότερες περιπτώσεις αφορούν τη δράση χειμαρρωδών ρεμάτων, των οποίων οι κοίτες διέρχονται από αστικές περιοχές (Στάθης, 2004).

Λόγω του έντονου αναγλύφου και ακτογραμμής του ελλαδικού χώρου, τα τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά, αλλά και τα υδρολογικά και κλιματικά παρουσιάζουν μεγάλη χωρική μεταβλητότητα. Για το λόγο αυτό, η Ελλάδα έχει χωριστεί σε 14 υδατικά διαμερίσματα, στο εσωτερικό των οποίων παρουσιάζεται σχετική ομοιογένεια. Μεγάλο ρόλο στη γεωγραφική κατανομή των επεισοδίων βροχής, παίζει η οροσειρά της Πίνδου. Η δυτική Ελλάδα παρουσιάζει αυξημένες βροχοπτώσεις σε σχέση με την ανατολική. Η μέση ετήσια βροχόπτωση υπερβαίνει τα 1800 mm σε ορεινές περιοχές της δυτικής ηπειρωτικής Ελλάδας, ενώ σε περιοχές αναλυτικά της Πίνδου, η αντίστοιχη τιμή μπορεί να «πέσει» ακόμα και στα 400 mm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.6. Η τελευταία διαπίστωση εξηγεί και τις πιο συχνές περιόδους ξηρασίας στο ανατολικό μέρος της χώρας καθώς και σε πολλά νησιά του Αιγαίου, όπου τα προβλήματα ελλείψεως νερού είναι σχεδόν μόνιμα.



Σχήμα 1.6 Μέση υπερετήσια βροχόπτωση (mm) ανά υδατικό διαμέρισμα στην Ελλάδα για την περίοδο 1960-1990 [Πηγή: ΕΤΥΜΠ]

Πρέπει, πάντως, να τονιστεί, ότι η συχνότητα εμφάνισης πλημμυρικών επεισοδίων δε σχετίζεται άμεσα με τα μέσα ετήσια ύψη βροχής, αλλά με την ένταση και τη διάρκεια των επεισοδίων βροχόπτωσης.

1.4 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η υδρολογική προσομοίωση της Πειραματικής Λεκάνης Ραφήνας με τη χρήση και σύγκριση τριών μεθόδων άμεσης απορροής: των Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων του Snyder, της Soil Conservation Service (SCS) και του Clark. Επίσης, η διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης μοντέλου 24ωρης πρόγνωσης της βροχής για την εκτίμηση των πλημμυρικών απορροών, αναφορικά με τα μεγαλύτερα επεισόδια των ετών που μελετώνται.

1.5 Κατάλογος λογισμικού εργασίας

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας περιλαμβάνει τα ακόλουθα προγράμματα Η/Υ:

- **Microsoft Office 2010** (Excel, Word, PowerPoint).

- **ArcGIS** (Geographic Information System), πρόγραμμα επεξεργασίας και διαχείρισης συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών, κατασκευής της Environmental Systems Research Institute Inc (ESRI).
- **HEC – GeoHMS** (Geospatial Hydrologic Modeling Extension), πρόσθετη επέκταση του προγράμματος ArcGIS, κατασκευής του Κέντρου Τεχνικής Υδρολογίας (Hydrologic Engineering Center – HEC) του Μηχανικού Σώματος του Αμερικάνικου Στρατού (US Army Corps of Engineering –USACE).
- **HEC – HMS** (Hydrologic Modeling System), κατασκευής του Κέντρου Τεχνικής Υδρολογίας (Hydrologic Engineering Center – HEC) του Μηχανικού Σώματος του Αμερικάνικου Στρατού (US Army Corps of Engineering –USACE).
- **HEC – DSSVue** (Data Storage System – Visual Utility Engine), κατασκευής του Κέντρου Τεχνικής Υδρολογίας (Hydrologic Engineering Center – HEC) του Μηχανικού Σώματος του Αμερικάνικου Στρατού (US Army Corps of Engineering – USACE).
- **Google Earth**, πρόγραμμα γραφικής απεικόνισης της Γης, κατασκευής Keyhole Inc. Και Google.

Τα παραπάνω αναφερόμενα προγράμματα της USACE καθώς και το Google Earth διατίθενται δωρεάν στα site των οργανισμών στο διαδίκτυο.

Οι εκδόσεις των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- Microsoft Office version 2010
- ArcGIS version 9.3
- HEC – GeoHMS version
- HEC – HMS version 3.5
- HEC – DSSVue version 2.0.1

1.6 Δομή της εργασίας

Η εργασία αποτελείται από επτά στο σύνολο κεφάλαια και ένα παράρτημα. Πέρα από το παρόν εισαγωγικό η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στα υπόλοιπα έξι ακολουθεί την εξής δομή:

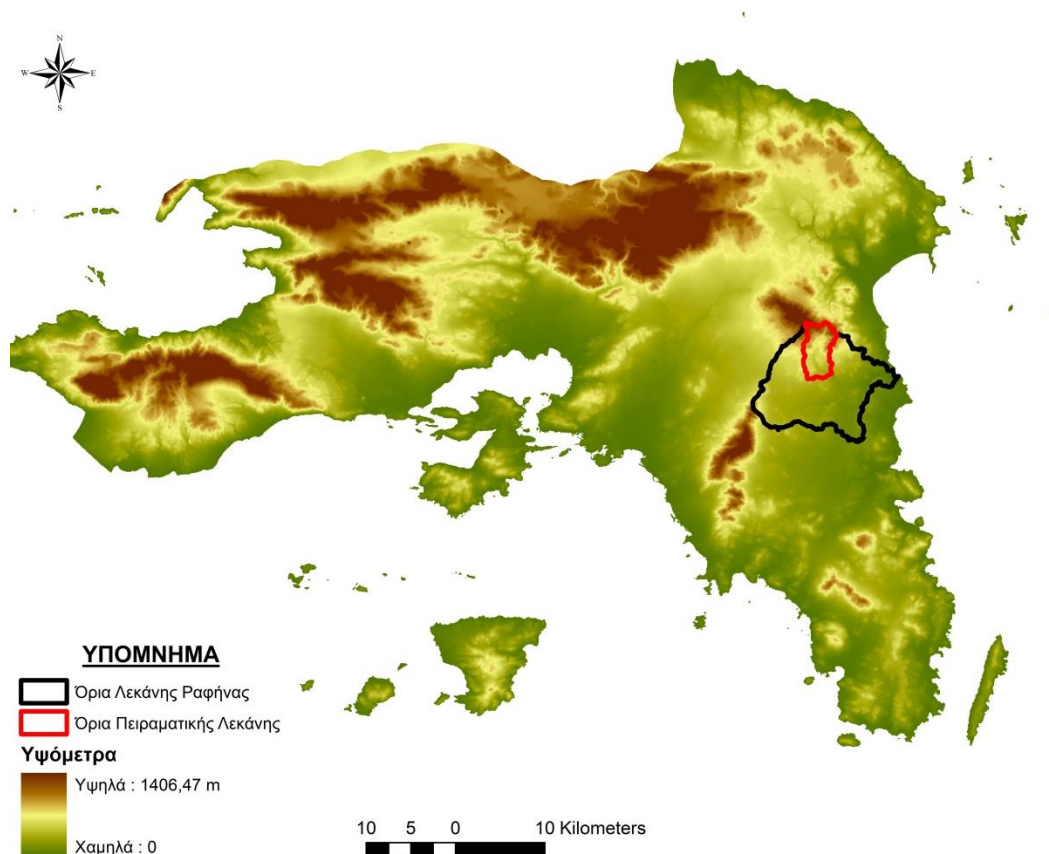
- Προσδιορισμός της περιοχής μελέτης και περιγραφή των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών αυτής

- Παρουσίαση του μετεωρολογικού και υδρομετρικού εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της εργασίας
- Επεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής και εξαγωγή γεωμορφολογικών και υδρολογικών παραμέτρων αυτής, σε περιβάλλον Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) με χρήση της εργαλειοθήκης HEC – GeoHMS
- Παρουσίαση των μοντέλων της υδρολογικής προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται και εκτίμηση των παραμέτρων τους
- Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης στο HEC – HMS
- Βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων
- Επαλήθευση υδρολογικών μοντέλων
- Διερεύνηση χρήσης μοντέλου 24ωρης πρόγνωσης, με σκοπό την εκτίμηση υδρογραφημάτων
- Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2. Περιοχή Μελέτης

2.1 Προσδιορισμός της υπό μελέτη περιοχής

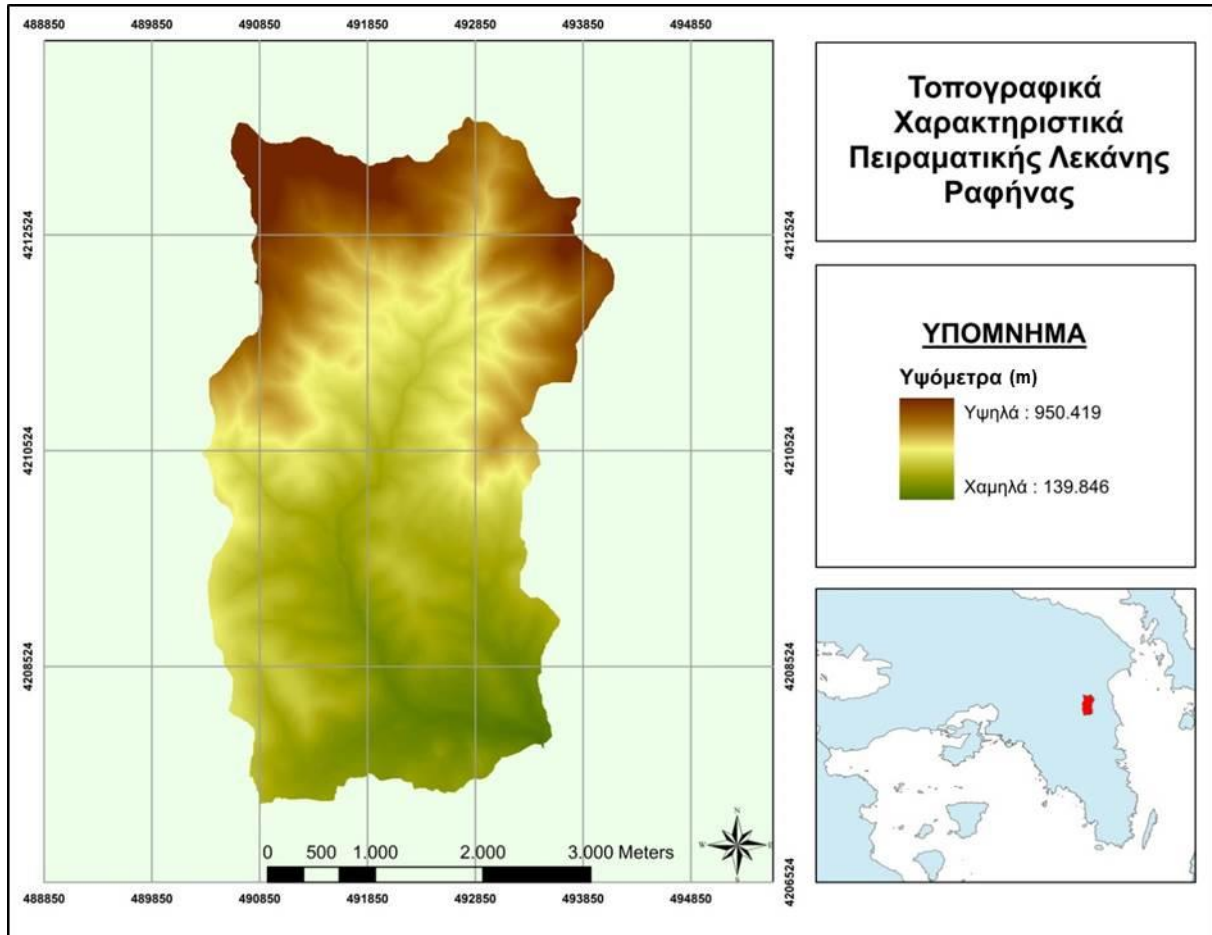
Η περιοχή μελέτης τοποθετείται στην ανατολική Αττική και αποτελεί υπολεκάνη της λεκάνης απορροής του ρέματος Ραφήνας (συνολικής έκτασης 126 km²). Η συνολική Λεκάνη Ραφήνας, οριοθετείται στα δυτικά και νοτιοδυτικά από τον Υμηττό (728 m), στα βόρεια και βορειοανατολικά από το Πεντελικό όρος (1.109 m), νότια από τους λόφους Μπούρα (300 m) και Πετροκορφή (167 m) και ανατολικά από την ακτογραμμή του Ευβοϊκού κόλπου, όπου και εκβάλλει το ρέμα Ραφήνας.



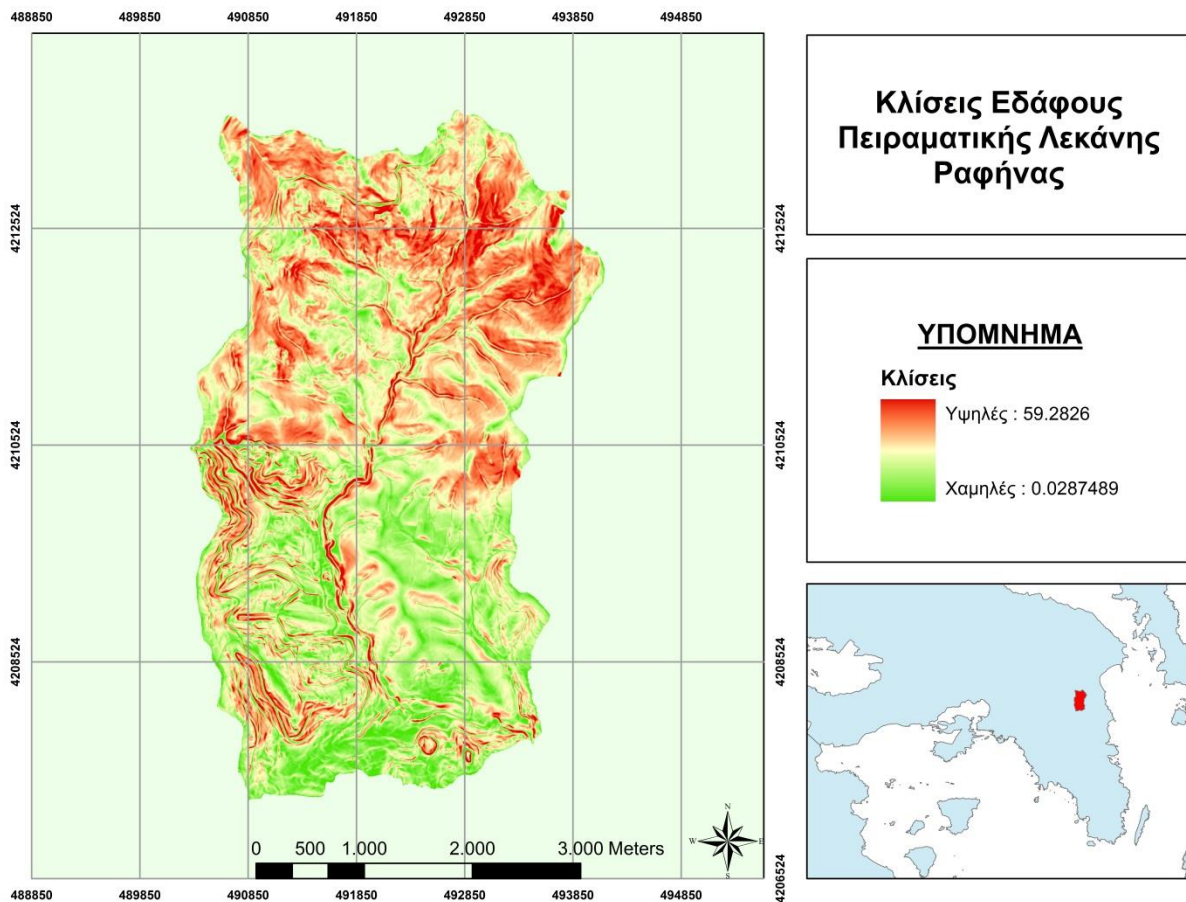
Σχήμα 2.1 Γεωγραφικός προσδιορισμός της περιοχής μελέτης

Η υπό μελέτη λεκάνη ονομάζεται «Πειραματική Λεκάνη Ραφήνας», επειδή τα τελευταία δέκα χρόνια η περιοχή αποτελεί χώρο έρευνας του Εργαστηρίου Υδρολογίας και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Βρίσκεται τις παρυφές της ανατολικής πλευράς του Πεντελικού Όρους και έχει συνολική έκταση 17,54 km². Έχει σχήμα στενόμακρο με διεύθυνση Β-Ν, μέγιστο υψόμετρο 950 m, ελάχιστο 140 m και μέσο 420 m

(Σχήμα 2.2). Άλλο χαρακτηριστικό της είναι οι σχετικά απότομες κλίσεις, οι οποίες παρατηρούνται κυρίως στο βόρειο τμήμα αυτής, με το νότιο να παρουσιάζεται ως σχετικά πιο ομαλό. Συγκεκριμένα, η μέγιστη κλίση ανέρχεται σε 59° και η ελάχιστη φτάνει έως το 0° (τελείως επίπεδο τμήμα), με τη μέση τιμή της λεκάνης να κυμαίνεται γύρω στο 17° (Σχήμα 2.3).

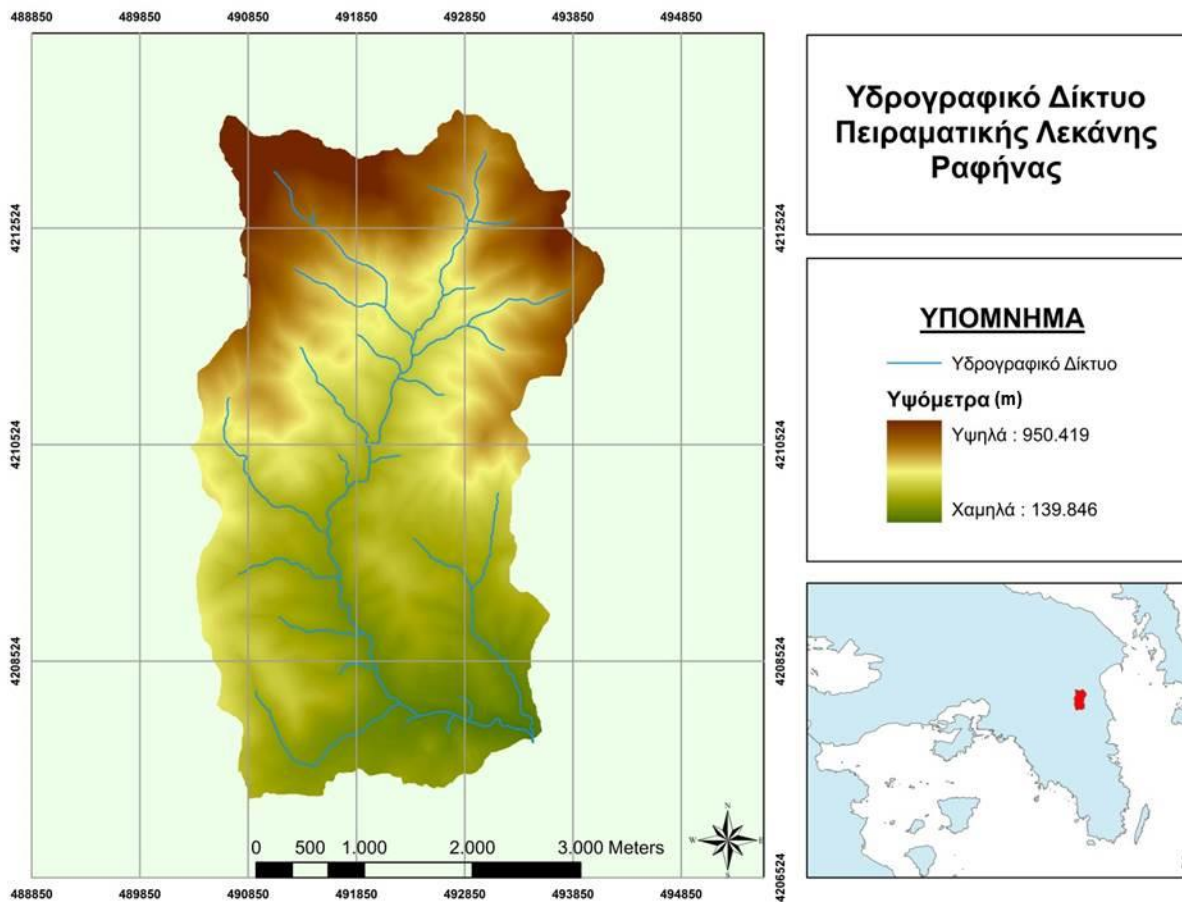


Σχήμα 2.2 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους Πειραματικής Λεκάνης



Σχήμα 2.3 Κλίσεις εδάφους Πειραματικής Λεκάνης

Το ρέμα που διατρέχει τη λεκάνη έχει γενικά χαμηλή στάθμη, ιδίως κατά τους θερινούς μήνες, οπότε και σε περιπτώσεις καύσωνα ενδέχεται να μην έχει καν ροή. Παρόλα αυτά, παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον μελέτης και συχνά δίνει «αξιόλογα» πλημμυρικά επεισόδια κυρίως λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης του οικισμού του Ντραφίου, αλλά και της αραιής φυτοκάλυψής της. Το ρέμα της Πειραματικής Λεκάνης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.4 Υδρογραφικό δίκτυο Πειραματικής Λεκάνης

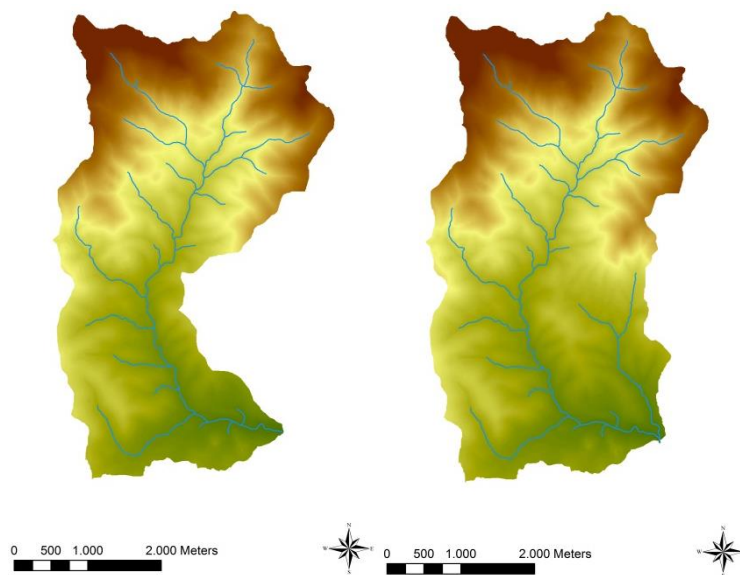
Στη νότια περιοχή της Πειραματικής Λεκάνης (στην περιοχή περί την έξοδο αυτής) βρίσκεται ο οικισμός Ντράφι, οικισμός που αναπτύσσεται ραγδαίως τα τελευταία χρόνια (όπως παρουσιάζεται και παρακάτω) και καταλαμβάνει περίπου το 20% της έκτασης της λεκάνης. Διοικητικά, το βόρειο τμήμα της ανήκει στο δήμο Πεντέλης και το νότιο στο δήμο Πικερμίου, συμπεριλαμβανομένου και του οικισμού του Ντραφίου.

2.2 Νέες συνθήκες περιοχής μελέτης

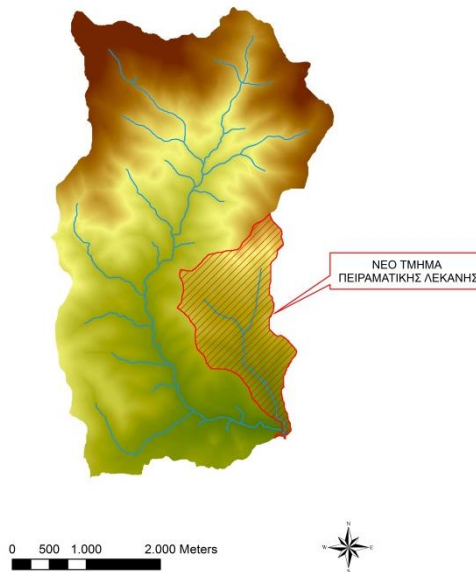
Έως τον Οκτώβριο του 2010, εντός της λεκάνης λειτουργούσαν δύο σταθμοί μέτρησης της απορροής, ο σταθμός Ντράφι (έξοδος της λεκάνης) και ο σταθμός Λυκόρεμα στο μέσον περίπου αυτής), χωρίζοντάς την πρακτικά σε Βόρεια και Νότια Πειραματική Λεκάνη. Έτσι, έρευνες που πραγματοποιούνταν σε αυτή και χρησιμοποιούσαν δεδομένα έως και το 2010, διαιρούσαν τη λεκάνη στα δύο αυτά τμήματα και αντιμετώπιζαν το καθένα ως ξεχωριστό. Ωστόσο, στις 19/10/2010 ο σταθμός Λυκόρεμα μεταφέρθηκε σε διαφορετική θέση του

Ρέματος Ραφήνας, εκτός της υπό μελέτη περιοχής. Για το λόγο αυτόν, στην παρούσα εργασία η Πειραματική Λεκάνη αντιμετωπίζεται ως ενιαία, χωρίς να γίνεται διάκριση σε Βόρειο και Νότιο τμήμα.

Επιπρόσθετα, μια δεύτερη σημαντική μεταβολή αυτής από άποψη υδρολογικής μελέτης προέκυψε από τη μετακίνηση της θεωρούμενης εξόδου της (του υδρομετρικού σταθμού «Ντράφι») σε απόσταση 119,5 m κατά μήκος του κυρίου υδατορέματος προς τα κατάντη αυτού, η οποία πραγματοποιήθηκε το Νοέμβριο του 2010. Η μεταφορά αυτή μπορεί εκ πρώτης όψεως να φαντάζει ως αμελητέα, λόγω της μικρής απόστασης, ωστόσο διαφοροποίησε αισθητά τη θεωρούμενη περιοχή μελέτης. Ο λόγος έγκειται στο γεγονός πως το υδρογραφικό της δίκτυο (και κατ' επέκταση η έκταση που απορρέει σε αυτό), δε διευρύνθηκε μόνο κατά το μήκος μεταφοράς (αποτέλεσμα όντως αμελητέο), αλλά συμπεριέλαβε και έναν νέο κόμβο (Σχήματα 2.5 και 2.6), μαζί με το τμήμα του ρέματος και την αντίστοιχη έκταση που απορρέουν σε αυτόν. Έτσι, προστέθηκε στην έκταση της θεωρούμενης λεκάνης απορροής ένας νέος κλάδος υδρογραφικού δικτύου, συνολικού μήκους 3,68 km ένα νέο τμήμα γης, έκτασης 2,34 km².



Σχήμα 2.5 Μορφή Πειραματικής Λεκάνης και υδρογραφικού δικτύου πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) της μεταφοράς του υδρομετρικού σταθμού Ντράφι



Σχήμα 2.6 Διαφοροποίηση της λεκάνης και του υδρογραφικού δικτύου λόγω της μεταφοράς του υδρομετρικού σταθμού Ντράφι

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το γεγονός αυτό ουσιαστικά όρισε τη χρονική αφετηρία των χρησιμοποιηθέντων, κατά την προσομοίωση στο μοντέλο, επεισοδίων πλημμύρας. Έτσι αυτά αναζητήθηκαν σε χρόνους μεταγενέστερους του Νοεμβρίου του 2010.

2.3 Γενικά στοιχεία

2.3.1 Πληθυσμιακά στοιχεία ευρύτερης περιοχής

Η ευρύτερη περιοχή της Λεκάνης της Ραφήνας παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον, λόγω και της αλματώδους πληθυσμιακής αύξησης που παρουσιάζει τα τελευταία χρόνια. Ειδικότερα, σύμφωνα με στοιχεία της Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας, στον οικισμό του Πικερμίου καταγράφεται αύξηση 821,56% από το 1971 έως το 2011, στη Ραφήνα 514,31% ενώ στον οικισμό Ντράφι, που είναι και του άμεσου ενδιαφέροντός μας, παρατηρείται πληθυσμιακή «έκρηξη», με ποσοστά της τάξεως του 50816,67%. Αναλυτικότερα παρατίθενται τα παρακάτω στοιχεία.

Πίνακας 2.1 Στοιχεία πληθυσμιακής εξέλιξης Κοινότητας Ραφήνας [Πηγή: ΕΣΥΕ]

Κοινότητα Ραφήνας					
Χρονολογία	Πληθυσμός (κάτοικοι)	Αύξηση πληθυσμού ανά 10ετία (κάτοικοι)	Αύξηση πληθυσμού ανά 10ετία (%)	Αύξηση πληθυσμού 40ετίας (κάτοικοι)	Αύξηση πληθυσμού 40ετίας (%)
1971	2131	-	-	10960	514,31
1981	2790	659	30,92		
1991	5051	2261	81,04		
2001	6896	1845	36,53		
2011	13091	6195	89,83		

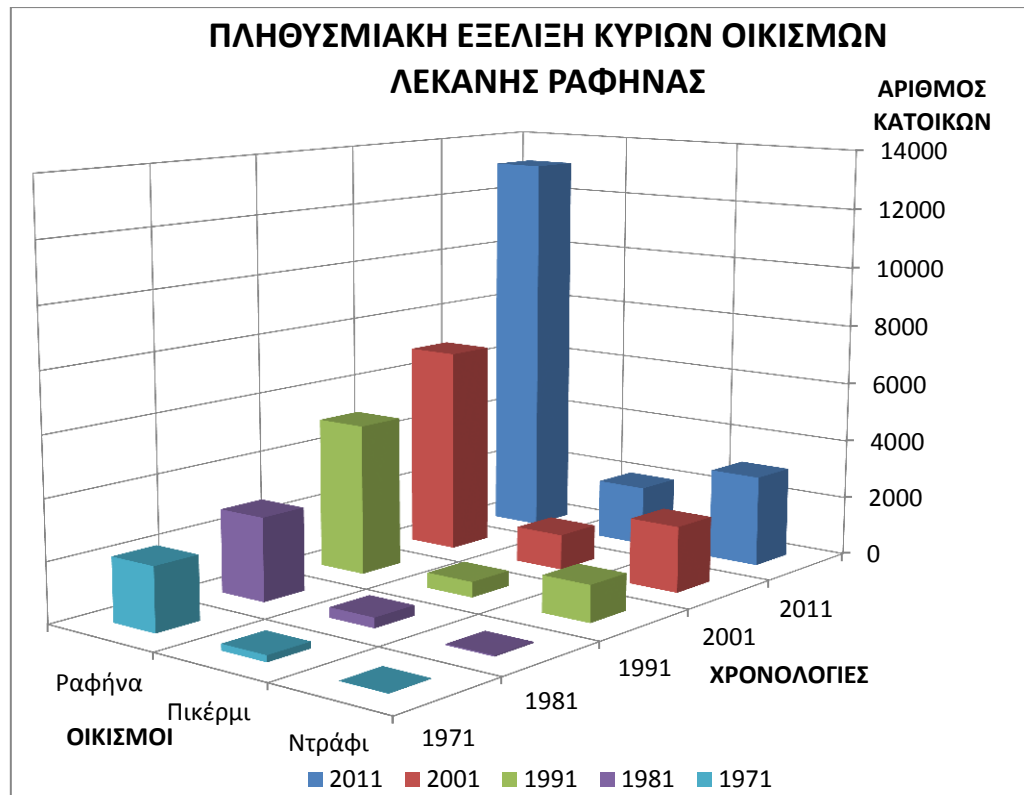
Πίνακας 2.2 Στοιχεία πληθυσμιακής εξέλιξης Κοινότητας Πικερμίου [Πηγή: ΕΣΥΕ]

Κοινότητα Πικερμίου					
Χρονολογία	Πληθυσμός (κάτοικοι)	Αύξηση πληθυσμού ανά 10ετία (κάτοικοι)	Αύξηση πληθυσμού ανά 10ετία (%)	Αύξηση πληθυσμού 40ετίας (κάτοικοι)	Αύξηση πληθυσμού 40ετίας (%)
1971	218	-	-	1791	821,56
1981	344	126	57,80		
1991	518	174	50,58		
2001	1188	670	129,34		
2011	2009	821	69,11		

Πίνακας 2.3 Στοιχεία πληθυσμιακής εξέλιξης Κοινότητας Ντραφίου [Πηγή: ΕΣΥΕ]

Κοινότητα Ντραφίου					
Χρονολογία	Πληθυσμός (κάτοικοι)	Αύξηση πληθυσμού ανά 10ετία (κάτοικοι)	Αύξηση πληθυσμού ανά 10ετία (%)	Αύξηση πληθυσμού 40ετίας (κάτοικοι)	Αύξηση πληθυσμού 40ετίας (%)
1971	6	-	-	3049	50816,67
1981	37	31	516,67		
1991	1230	1193	3224,32		
2001	2205	975	79,27		
2011	3055	850	38,55		

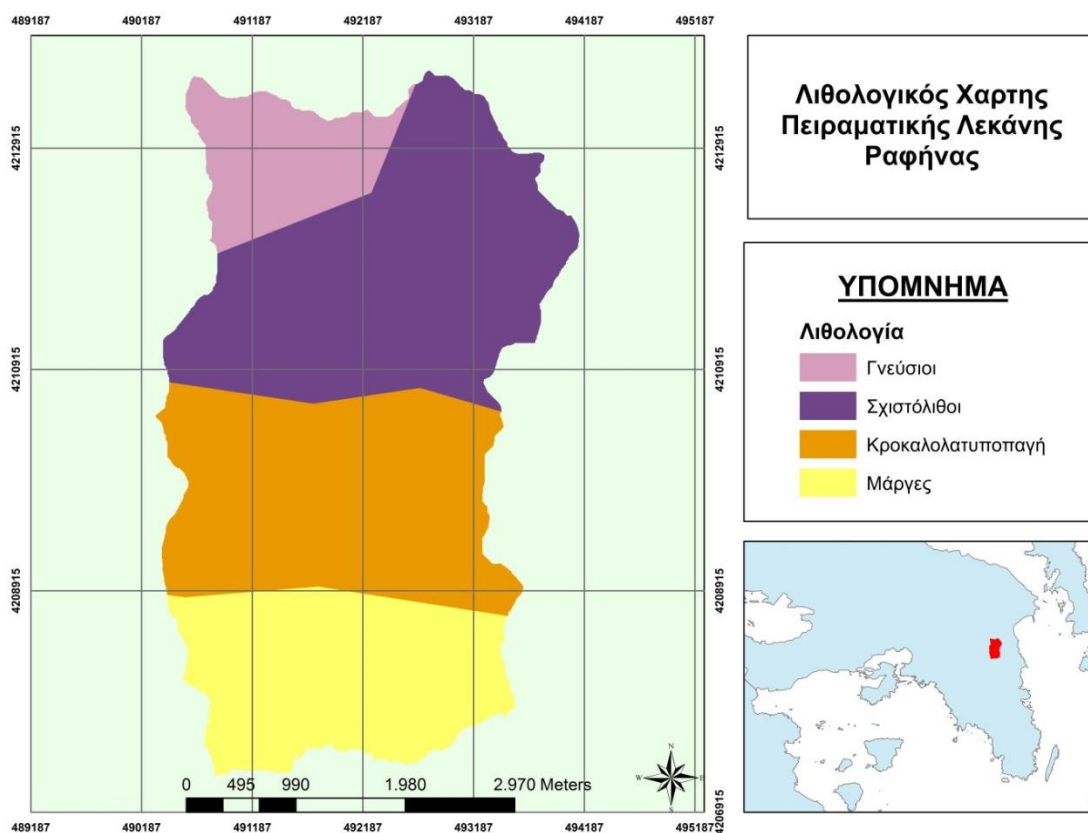
Σχηματικά, η πληθυσμιακές αυτές μεταβολές στους τρεις αυτούς οικισμούς παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα:



Σχήμα 2.7 Σχηματική απεικόνιση πληθυσμιακής εξέλιξης οικισμών Ραφήνας, Πικερμίου και Ντραφίου

2.3.2 Γεωλογία – λιθολογία λεκάνης απορροής

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8, το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης καταλαμβάνεται από σχιστολιθικούς σχηματισμούς της βορειοανατολικής Αττικής, ηλικίας Κατωτέρου–Μέσου Τριαδικού. Στα βορειοδυτικά της λεκάνης εμφανίζονται μοσχοβιτικοί έως αμφιβολιτικοί γνεύσιοι με φακοειδείς εμφανίσεις ανθρακικών σχηματισμών. Στο κεντρικό τμήμα, κύρια συναντώνται κροκαλολατυποπαγή του Άνω Μειοκαίνου, που αποτελούν αποθέσεις παλαιών αλλουβιακών κώνων και ριπιδίων. Τέλος, το νότιο τμήμα καλύπτεται από έναν επίσης ανωμειοκαινικό σχηματισμό λιμναίας φάσης, κύρια αποτελούμενο από μάργες, αμμούχους αργίλους και πηλό.

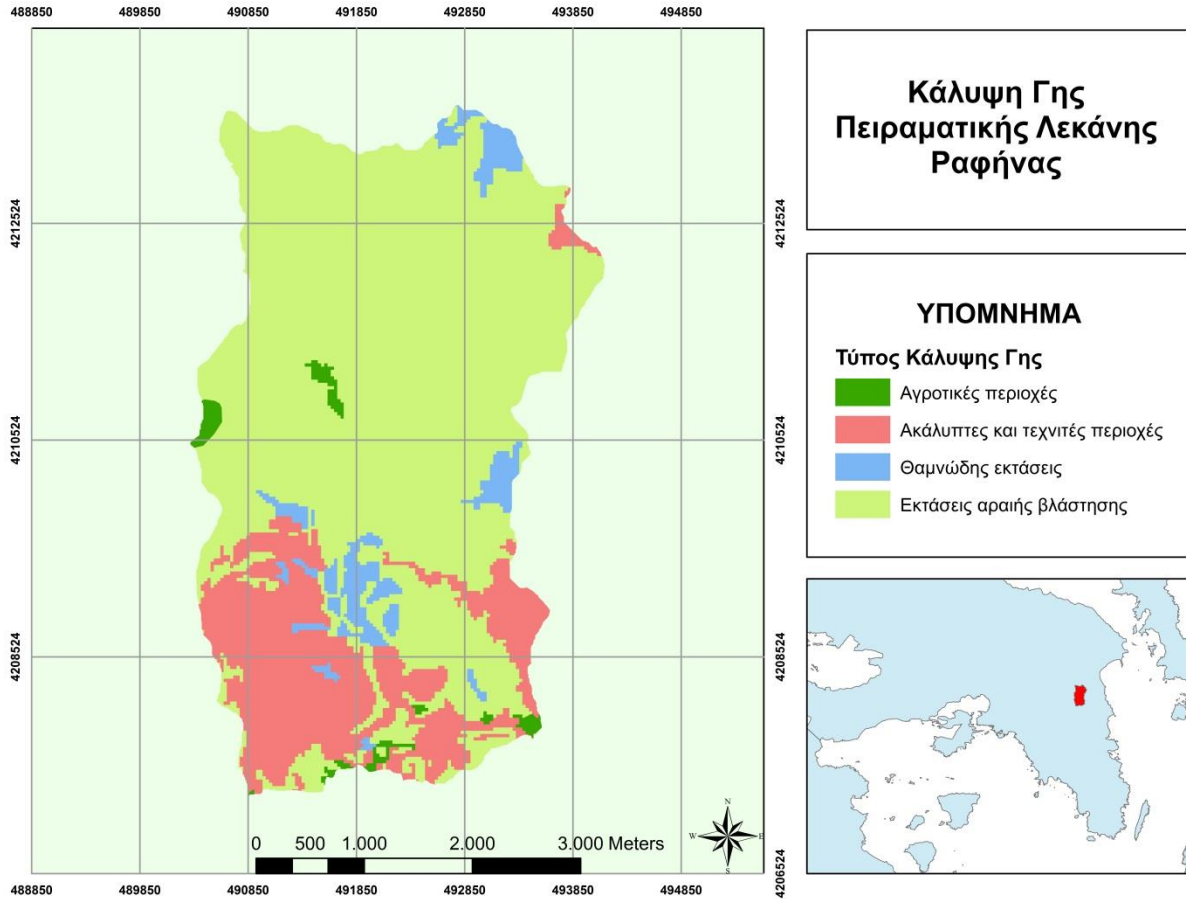


Σχήμα 2.8 Λιθολογία περιοχής μελέτης

Αξίζει να σημειωθεί πως οι σχιστολιθικοί σχηματισμοί παρότι γενικά αδιαπέρατοι, λόγω έντονης καταπόνησης εξαιτίας της τεκτονικής δραστηριότητας, παρουσιάζουν το φαινόμενο της διάβρωσης και κατ'επέκταση υψηλό δευτερογενές πορώδες, μια κατάσταση που επίσης διαπιστώνεται και στην εμφάνιση των γνευσίων.

2.3.3 Χρήσεις - Κάλυψη γης (LU/LC)

Με βάση διαθέσιμα δορυφορικά δεδομένα (LandSAT 2007) καταρτίστηκε, για την Πειραματική Λεκάνη, ο παρακάτω χάρτης με τις χρήσεις γης που συναντώνται.



Σχήμα 2.9 Εμφάνιση διαφόρων τύπων κάλυψης γης Πειραματικής Λεκάνης

Με αριθμούς, οι τύποι αυτοί κάλυψης γης παρουσιάζονται ως εξής:

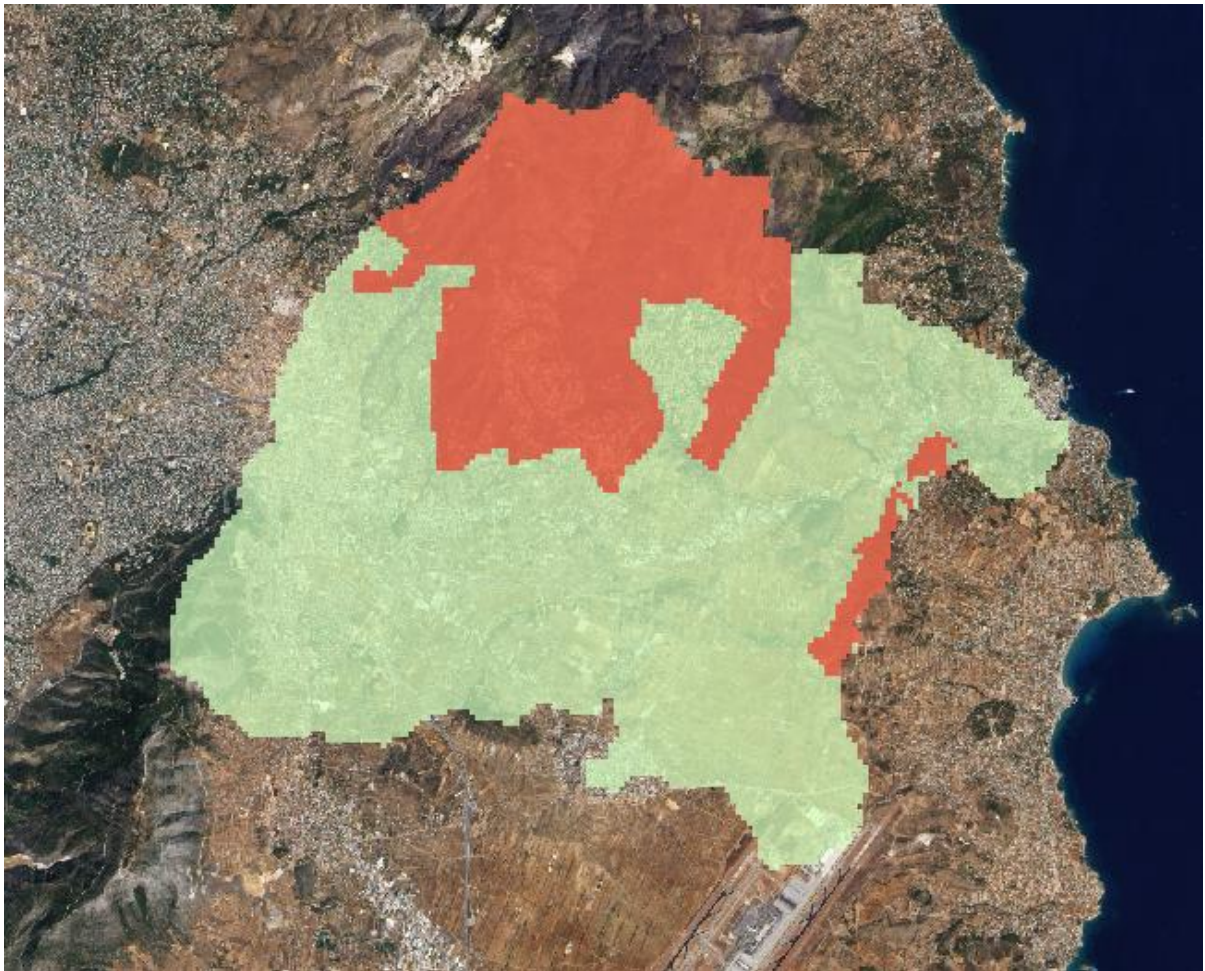
Πίνακας 2.4 Ποσοτική εμφάνιση τύπων κάλυψης γης Πειραματικής Λεκάνης

Τύπος κάλυψης γης	Εμβαδόν (km ²)	Ποσοστό επί της συνολικής έκτασης (%)
Αγροτικές εκτάσεις	0,24	1,37
Ακάλυπτες και τεχνητές περιοχές	3,57	20,36
Θαμνώδεις εκτάσεις	0,90	5,11
Εκτάσεις αραιής βλάστησης	12,83	73,16

2.3.4 Πυρκαγιά Αυγούστου 2009

Το βράδυ της 21^{ης} Αυγούστου, στην περιοχή του Γραμματικού, ξεκίνησε μεγάλη πυρκαγιά η οποία έπληξε την περιοχή της Ανατολικής Αττικής, καίγοντας συνολικά 210.000 στρέμματα, κυρίως πευκοδάσους. Από το Γραμματικό, η φωτιά επεκτάθηκε στις γύρω περιοχές, από το Μαραθώνα μέχρι περίπου το Πικέρμι και την Παλλήνη.

Η φωτιά έπληξε ένα πολύ μεγάλο μέρος της Λεκάνης του ρέματος της Ραφήνας, έκταση που υπολογίζεται στο 28% περίπου αυτής, δηλαδή 35.000 στρέμματα (Αλωνιστιώτη, 2011).



Σχήμα 2.10 Έκταση που επλήγη από την πυρκαγιά του Αυγούστου του 2009 (με κόκκινο χρώμα), στα όρια της λεκάνης απορροής του ρέματος Ραφήνας [Πηγή: Αλωνιστιώτη, 2011]

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.10, η Πειραματική Λεκάνη επηρεάστηκε στο σύνολό της από την πυρκαγιά. Το γεγονός αυτό συνυπολογίστηκε κατά την πορεία εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, κρίθηκε επιβεβλημένο, κατά την ρύθμιση του μοντέλου, να συμπεριληφθούν μόνο επεισόδια τα οποία είναι μεταγενέστερα του γεγονότος

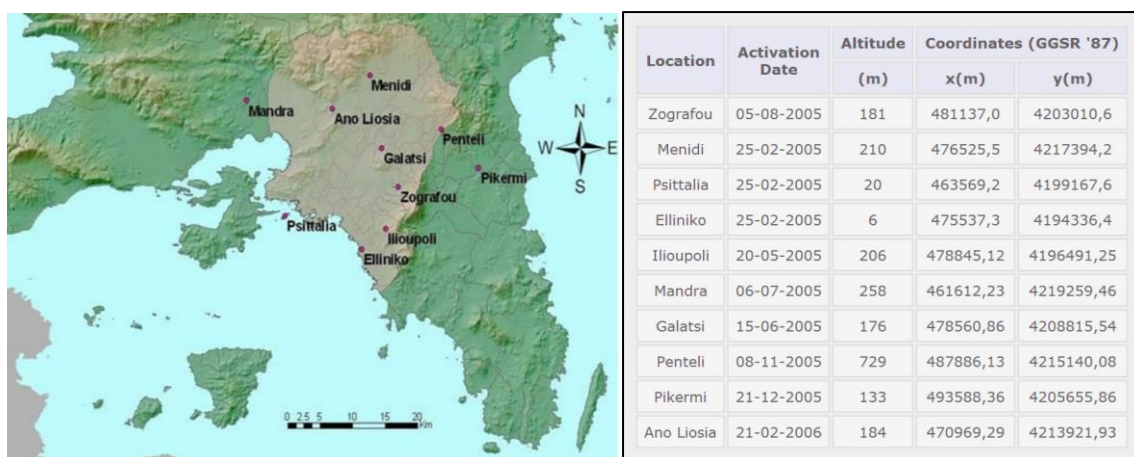
της πυρκαγιάς. Αυτό συνέβη καθότι, όπως είναι φυσικό, μετά από ένα μεγάλο συμβάν πυρκαγιάς, όπως το προκείμενο, επέρχεται μεταβολή σε χαρακτηριστικές υδρολογικές, και όχι μόνο, παραμέτρους της λεκάνης. Οπότε, αν λαμβάνονταν κατά τους υπολογισμούς και επεισόδια βροχής πριν από τον Αύγουστο του 2009, θα οδηγούμασταν σε λανθασμένα συμπεράσματα και οι τιμές των παραμέτρων που θα υπολογίζονταν δε θα ήταν συμβατές με τις παρούσες, επικρατούσες συνθήκες της περιοχής.

Συγκεντρωτικά, λοιπόν, κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης συνυπολογίστηκαν οι δύο περιορισμοί ως προς το χρονικό σημείο της αρχής: αυτοί της πυρκαγιάς (Αύγουστος 2009) και της μετακίνησης του σταθμού Ντράφι (Νοέμβριος 2010). Ως αφετηρία, έτσι, επιλέχθηκε το τέλος του 2010, περίοδος που πληρεί και τα δύο κριτήρια που τέθηκαν.

2.4 Δίκτυο υδρομετεωρολογικών μετρήσεων

2.4.1 Το δίκτυο ΗΟΑ

Στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών (687 km²), έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν από το 2005, 10 πλήρως αυτόματοι τηλεμετρικοί υδρομετεωρολογικοί σταθμοί, στα πλαίσια του δικτύου METEONET. Το δίκτυο αναπτύχθηκε από μέλη του Εργαστηρίου Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Το METEONET εξελίχθηκε στο σημερινό Υδρολογικό Παρατηρητήριο Αθηνών (Hydrological Observatory of Athens – HOA).

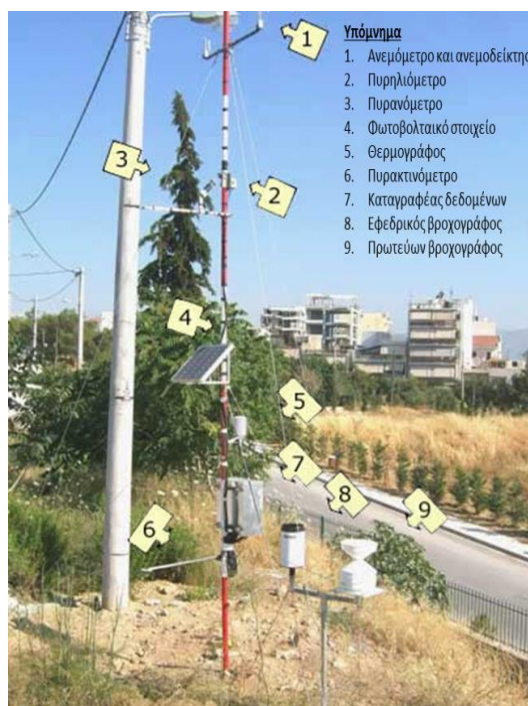


Σχήμα 2.11 Σταθμοί του δικτύου ΗΟΑ και συνοπτικά στοιχεία αυτών [Πηγή:

www.hoa.ntua.gr]

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 τους χωροθέτηση.

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. Οι τιμές των μετρήσεων υφίστανται αυτόματη επεξεργασία και αποστέλλονται στην κεντρική μονάδα συλλογής των δεδομένων.



Σχήμα 2.12 Γενική διάταξη αισθητήρων σταθμών μέτρησης δικτύου ΗΟΑ [Πηγή: www.hoa.ntua.gr]

Για την εξασφάλιση σχετικά μεγάλης ακρίβειας και συνέχειας των μετρήσεων, κάθε σταθμός έχει εγκατεστημένους δύο, διαφορετικού τύπου βροχογράφους, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα καταγραφής μέχρι και πολύ μικρού ύψους βροχοπτώσεις (της τάξης των 0,1 και 0,2 mm).



Σχήμα 2.13 Βροχογράφοι δικτύου ΗΟΑ [Πηγή: www.hoa.ntua.gr]

2.4.2 Δίκτυο σταθμών περιοχής μελέτης

Αναφορικά με την Πειραματική Λεκάνη, αυτή παρακολουθείται από ένα εγκατεστημένο δίκτυο 2 βροχογράφων (R400 και R600) και ενός υδρομετρικού σταθμού στην έξοδο (Ντράφι). Και οι τρεις σταθμοί έχουν χρονικό βήμα καταγραφής 10 λεπτών.

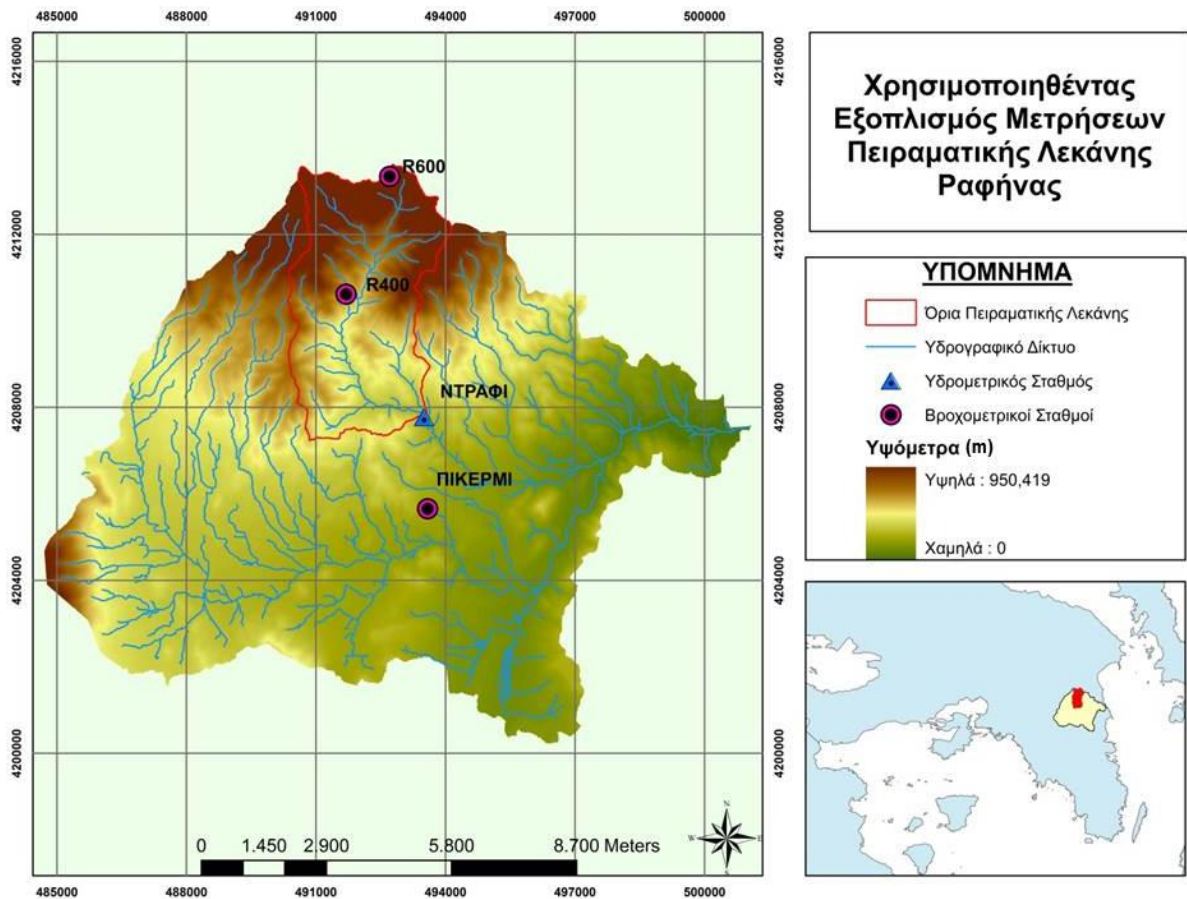
Ο βροχογράφος R400 (Άγιος Νικόλαος), βρίσκεται εγκατεστημένος σε θέση με υψόμετρο 383m και σε συντεταγμένες (σε ΕΓΣΑ '87) 4210619 και 491697,1875 γεωγραφικό πλάτος και μήκος αντίστοιχα, στο μέσον, περίπου, της λεκάνης. Η λειτουργία του ξεκίνησε στις 10/10/2003 και δουλεύει μέχρι σήμερα, με μία μόνο διακοπή λειτουργίας, για διάστημα 2 μηνών περίπου, στο διάστημα 15/04/2005 – 17/06/2005, οπότε και προέκυψε η ανάγκη συντήρησής του, εξαιτίας βανδαλισμού που υπέστη.

Ο R600 (Πεντέλη - Διάβαση Μπάλας), βρίσκεται εγκατεστημένος σε θέση με υψόμετρο 630 m και συντεταγμένες (σε ΕΓΣΑ '87) 4213340,5 και 492704,719 γεωγραφικό πλάτος και μήκος αντίστοιχα, στο βορειοανατολικό τμήμα της λεκάνης. Η λειτουργία του ξεκίνησε στις 10/12/2003 και δουλεύει μέχρι σήμερα. Υπήρξε εκτός λειτουργίας το διάστημα 12/12/2003 – 19/12/2003, οπότε προέκυψε η ανάγκη συντήρησης λόγω βανδαλισμού, και το διάστημα 17/06/2005 – 27/06/2005 για λόγους συντήρησης, οπότε και αντικαταστάθηκε από νέο βροχογράφο, παραπλήσιων χαρακτηριστικών με το παλιό.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ελήφθησαν δεδομένα καταγραφής επεισοδίων βροχής και από το βροχομετρικό σταθμό **Πικέρμι** ο οποίος, αν και είναι εγκατεστημένος εκτός των ορίων της Πειραματικής Λεκάνης, με την εφαρμογή της μεθόδου βαρών Thiessen (αναλυτικά παρουσιάζεται παρακάτω) για την επιφανειακή ολοκλήρωση της βροχής, η οποία

ακολουθήθηκε, επηρεάζει με κάποιο «βάρος». Ο σταθμός βρίσκεται σε θέση νότια της λεκάνης, σε υψόμετρο 133 m, με συντεταγμένες πλάτους και μήκους 493583,15 και 4205666,35 αντίστοιχα (σε ΕΓΣΑ '87). Η λειτουργία του ξεκίνησε στις 21/12/2005 και δουλεύει μέχρι σήμερα αδιάλειπτα.

Ο υδρομετρικός σταθμός **Ντράφι**, στην έξοδο της λεκάνης, βρίσκεται σήμερα σε θέση με συντεταγμένες (σε ΕΓΣΑ '87) 493481,45 και 4207768,76 γεωγραφικό πλάτος και μήκος αντίστοιχα και ο εξοπλισμός που διαθέτει αποτελείται από σταθμηγράφο, σταδία και όργανα καταγραφής της θερμοκρασίας του νερού και του αέρα. Στο σταθμό, λαμβάνονται μετρήσεις στάθμης, ταχυτήτων ροής, εμβαδού της διατομής του ρέματος (μιας και αυτή μεταβάλλεται με το χρόνο, λόγω της εναπόθεσης φερτών που παρασύρει το ρέμα) καθώς και ποιοτικές παράμετροι του νερού. Για τον υπολογισμό των απορροών χρησιμοποιείται η εξίσωση Manning. Ο σταθμός, στη σημερινή του θέση, βρίσκεται από τις 10/12/2010. Από τις 17/01/2003, που ξεκίνησε η λειτουργία του, έως τις 12/11/2010, βρισκόταν σε θέση με συντεταγμένες (σε ΕΓΣΑ '87) 493442,65 και 4207862,66 γεωγραφικό πλάτος και μήκος αντίστοιχα (σε 100 περίπου μέτρα απόσταση από τη σημερινή του θέση προς τα ανάντη), ενώ για το διάστημα του ενός μηνός που διήρκησε η μεταφορά του δε διατίθενται μετρήσεις. Ακόμα, για λόγους συντήρησης, καταγραφές δεν πραγματοποιήθηκαν στις 13/10/2003 στο διάστημα 04:20 – 11:10, στις (14-16)/06/2004 και στις 07/09/2005 στο διάστημα 09:00 – 15:20.



Σχήμα 2.14 Εξοπλισμός μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη

Οι ποιοτικές παράμετροι του νερού που μετρώνται στο σταθμό Ντράφι, αφορούν το ασβέστιο, το μαγνήσιο, τα νιτρικά, τα νιτρώδη, τα φωσφορικά, την αμμωνία και τα χλωριόντα και τα δείγματα λαμβάνονται περιοδικά. Μετρήσεις διεξάγονται, επίσης, σε μηνιαία βάση για τον προσδιορισμό φυσικοχημικών παραμέτρων (pH, αγωγιμότητα, αλατότητα και θερμοκρασία). Η συστηματική λήψη δειγμάτων νερού στην έξοδο της λεκάνης ξεκίνησε από τις 17/06/2005.



Σχήμα 2.15 Παλαιά θέση (έως τον Οκτώβριο του 2010) του υδρομετρικού σταθμού Ντράφι
[Πηγή: www.hoa.ntua.gr]

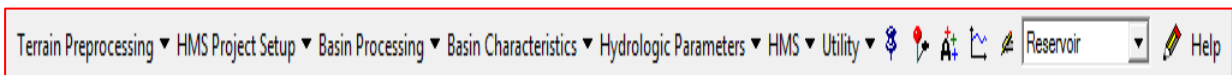
Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως στη θέση Ντράφι λειτουργούσε μέχρι το 2009 και βροχομετρικός σταθμός (R200), ο οποίος καταστράφηκε στη μεγάλη πυρκαγιά του 2009 και δεν αντικαταστάθηκε, ενώ στη θέση Λυκόρεμα (στο μέσον περίπου της λεκάνης, κατά μήκος του κυρίου υδατορέματος) λειτουργούσε έως το 2010 και δεύτερος υδρομετρικός σταθμός, ο οποίος μεταφέρθηκε σε κατάντη θέση του ρέματος εκτός της Πειραματικής Λεκάνης. Στην παρούσα εργασία δεν έγινε χρήση δεδομένων από τους δύο αυτούς σταθμούς.

Κεφάλαιο 3. Γεωμορφολογική Προσομοίωση Πειραματικής Λεκάνης σε Περιβάλλον GIS

3.1 Περιγραφή διαδικασίας

Το πρώτο βήμα που πρέπει να πραγματοποιηθεί, πριν την εισαγωγή των δεδομένων στο μοντέλο HEC-HMS και της εκτέλεσης αυτού, είναι να καθοριστούν και να υπολογιστούν τα γεωμορφολογικά και υδρολογικά στοιχεία της λεκάνης απορροής.

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε περιβάλλον GIS και με τη χρήση της ειδικής «εργαλειοθήκης», επέκτασης του προγράμματος που παρέχεται από την ιστοσελίδα της USACE (US Army Corps of Engineers), «HEC-GeoHMS». Το λογισμικό GIS που χρησιμοποιήθηκε, είναι το ArcGIS 9.3 και η προσομοίωση έγινε στο περιβάλλον του ArcMap.



Σχήμα 3.1 Εργαλειοθήκη HEC - GeoHMS

Τα αρχεία εισόδου που απαιτούνται ώστε να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση με το HEC-GeoHMS είναι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, ο υδρολιθολογικός χάρτης εδαφών και ο χάρτης χρήσεων γης. Τα δύο τελευταία συνδυάζονται, μέσω της εργαλειοθήκης, ώστε να εξαχθεί το αρχείο, μορφής raster, με την εκτίμηση των CN ανά κελί αυτού (η διαδικασία παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω).

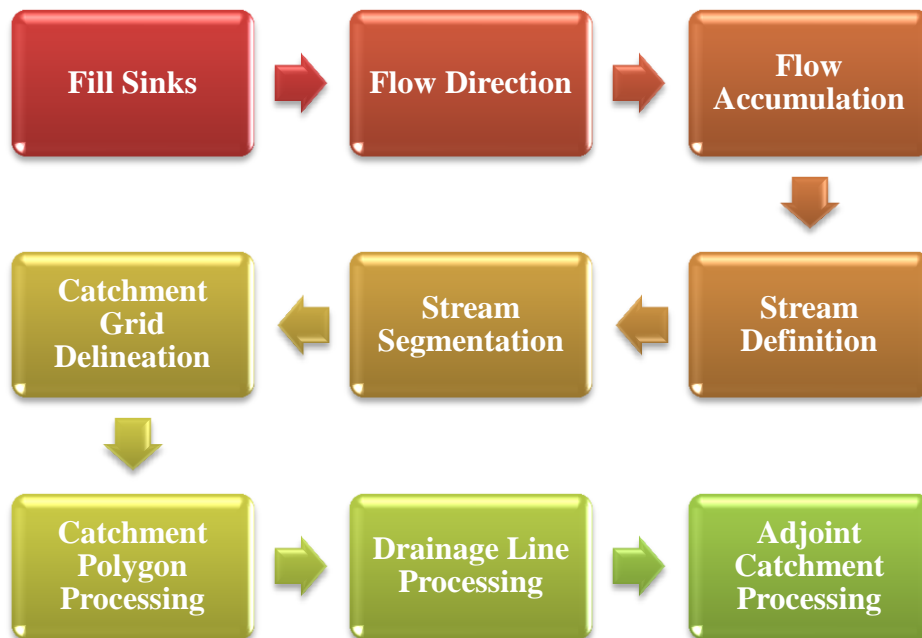
Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιήθηκε (Σχήμα 1.2) διαθέτει μέγεθος κελιού 5x5 m, δηλαδή ανάλυση ιδιαίτερα υψηλή, γεγονός που κατέστησε δυνατή την ανάλυση με ιδιαίτερα μεγάλη ακρίβεια (και με μεγάλους χρόνους επεξεργασίας ωστόσο).

Με τη διαδικασία που περιγράφεται στην πορεία, παράγονται δύο αρχεία, που χρησιμοποιούνται μετέπειτα σαν εισόδου στο πρόγραμμα HEC-HMS. Πιο συγκεκριμένα εξάγονται:

- Αρχείο του μοντέλου της λεκάνης απορροής (basin model) → υδρολογικά και γεωμορφολογικά στοιχεία της λεκάνης
- Αρχείο χάρτη (background map) → οπτικοποίηση της λεκάνης απορροής και του υδατορέματος αυτής

3.2 Προεπεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Terrain Preprocessing)

Στο στάδιο αυτό γίνεται η προεπεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου του εδάφους, σε μια διαδικασία που οδηγεί στην ψηφιακή οριοθέτηση της λεκάνης και του ρέματος που τη διατρέχει. Η διαδικασία που ακολουθείται, σχηματικά μπορεί να αποτυπωθεί ως εξής:

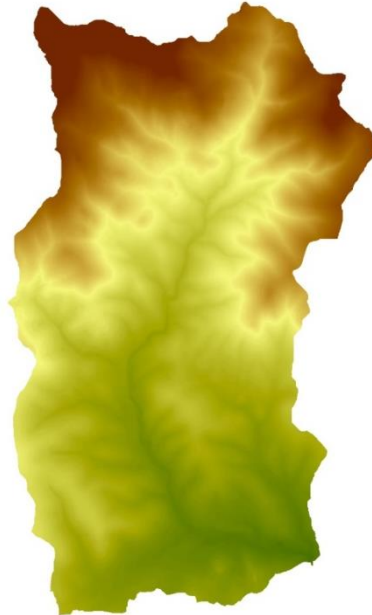


Σχήμα 3.2 Βήματα προεπεξεργασίας ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Terrain Preprocessing)

Αναλυτικότερα οι εντολές:

Fill Sinks

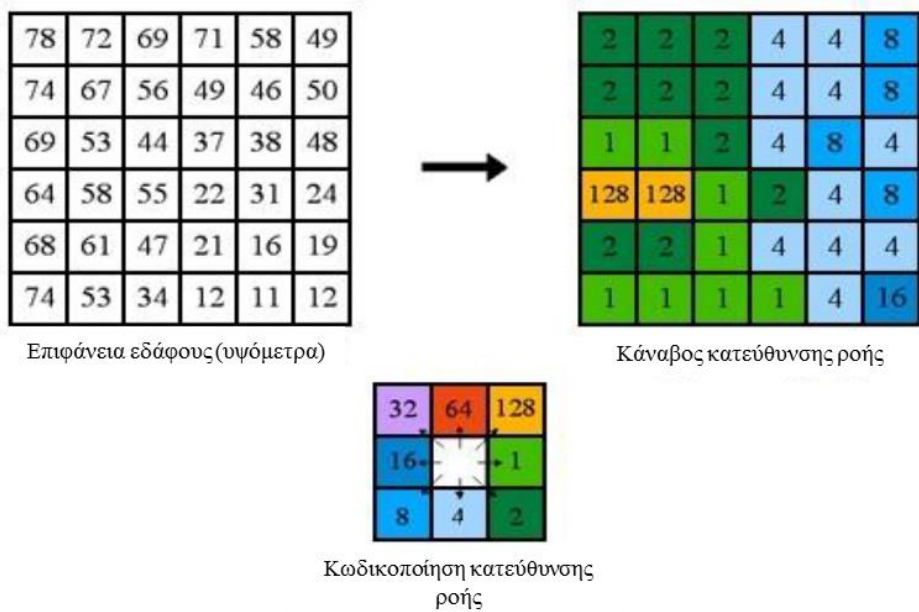
Διορθώνει τα τοπικά βυθίσματα του ψηφιακού μοντέλου του εδάφους σε ένα ή περισσότερα κελιά του, που είναι αναντίστοιχα με τα περιβάλλοντα, αυξάνοντας το υψόμετρό τους.



Σχήμα 3.3 Διορθωμένο ψηφιακό μοντέλο εδάφους

Flow Direction

Μέσω της εντολής αυτής παράγεται ένα αρχείο σε μορφή raster, το οποίο υπολογίζει, για κάθε κελί του αρχείου που χρησιμοποιήθηκε σαν εισόδου (και αυτό μορφής raster), την κατεύθυνση της ροής προς το γειτονικό του. Υπάρχουν 8 κατευθύνσεις στις οποίες μπορεί να κινηθεί η ροή και η επιλεγείσα καθορίζεται ανάλογα με την υψηλότερη κλίση. Η προσέγγιση αυτή αναφέρεται ως «μοντέλο ροής 8 κατευθύνσεων» (D8) και ακολουθεί τη θεωρία που παρουσιάστηκε από τους Jenson και Domingue (1988). Η κωδικοποίηση της προσέγγισης παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 2.



Σχήμα 3.4 Διαδικασία υπολογισμού κανάβου διευθύνσεων [Πηγή: Μπαριάμης, 2013]

Ο κάθε αριθμός αντιστοιχεί σε μία κατεύθυνση, με το σχήμα αυτό να προσομοιάζει πρακτικά μία πυξίδα, με τις αντίστοιχες κατευθύνσεις αυτής. Έτσι προκύπτει η αντιστοιχία: B=64, N=4, A=1 και Δ=16.

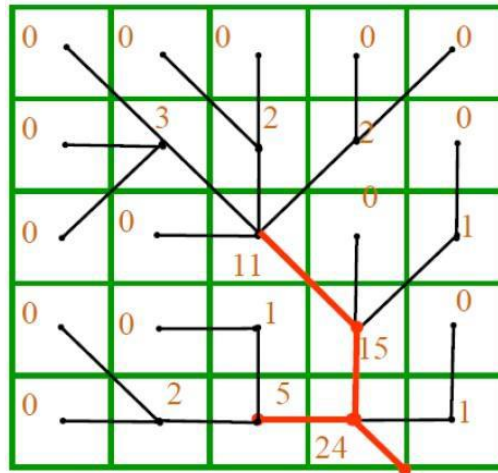
Το αρχείο τύπου raster που παρήχθησε μέσω της εντολής αυτής είναι το ακόλουθο (Σχήμα 5):



Σχήμα 3.5 Κάναβος κατεύθυνσης ροής

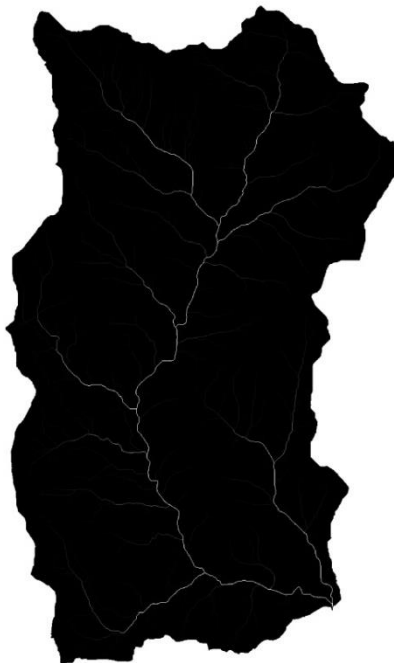
Flow Accumulation

Στο βήμα αυτό προσδιορίζεται ο αριθμός των ανάντη κελιών που απορρέουν σε ένα συγκεκριμένο κελί. Η ανάντη περιοχή που απορρέει στο εν λόγω κελί μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας την υπολογισμένη τιμή της συγκέντρωσης ροής με το εμβαδόν του κελιού (Σχήμα 11).



Σχήμα 3.6 Κάναβος συγκεντρωτικής απορροής [Πηγή: Στάμου και Σκοπελίτη, 2009]

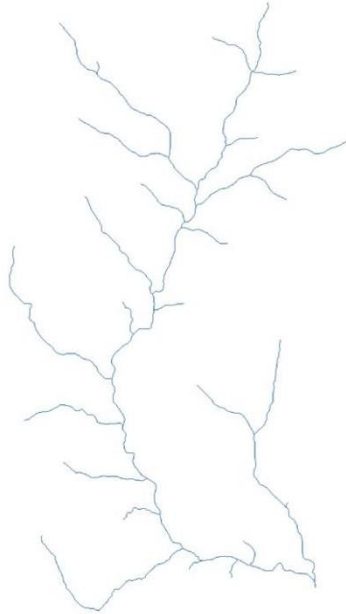
Το ψηφιακό αρχείο raster που προκύπτει φαίνεται στην Εικόνα 2.



Σχήμα 3.7 Κάναβος συγκεντρωτικής απορροής

Stream Definition

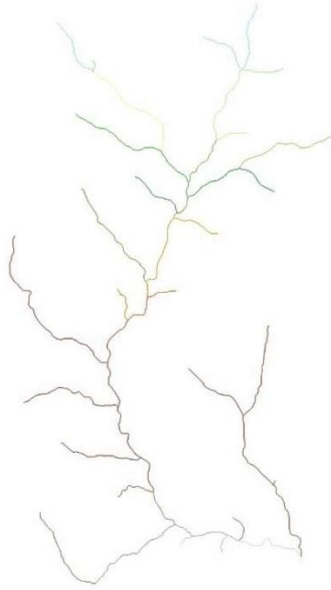
Το βήμα αυτό έχει σαν εξαγόμενο προϊόν το δίκτυο ροής της λεκάνης. Συγκεκριμένα, επιλέγει τα κελιά που έχουν συγκεντρωτική ροή (υπολογισμένη από το προηγούμενο βήμα) μεγαλύτερη από μια ελάχιστη τιμή που ο χρήστης έχει επιλέξει, και τα καθιστά «κελιά του υδατορέματος».



Σχήμα 3.8 Υπολογισμένο σε καναβική μορφή υδατόρεμα

Stream Segmentation

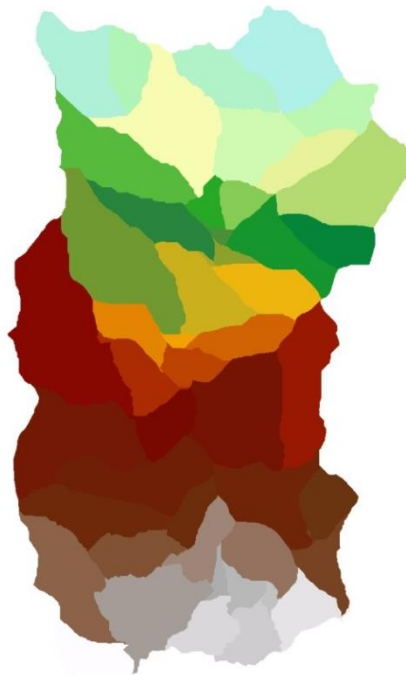
Στο βήμα αυτό διαχωρίζεται το δίκτυο υδατορέματος σε τμήματα. Τμήματα του υδατορέματος, ή σύνδεσμοι (links), είναι τα κομμάτια εκείνα που συνδέουν δύο κόμβους (junctions), ένα κόμβο με την έξοδο της λεκάνης ή ένα κόμβο με τμήματα της απορροής.



Σχήμα 3.9 Διαχωρισμένο σε τμήματα, καναβικής μορφής υδατόρεμα

Catchment Grid Delineation

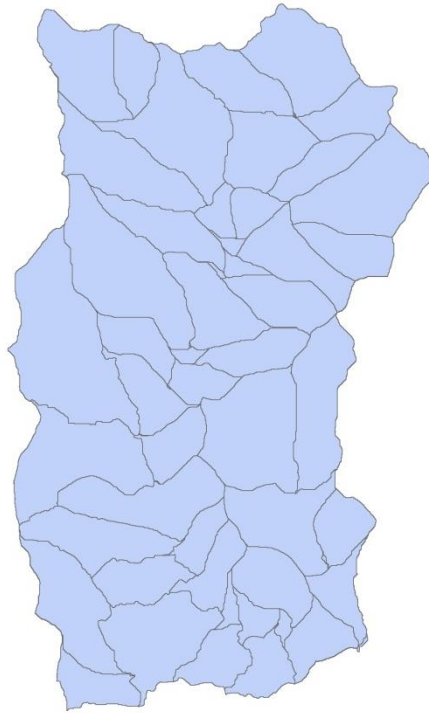
Στο βήμα αυτό καθορίζονται οι υπολεκάνες για κάθε τμήμα του υδατορέματος και διαμορφώνεται το αντίστοιχο αρχείο μορφής raster.



Σχήμα 3.10 Διαμορφωμένες υπολεκάνες σε καναβική μορφή

Catchment Polygon Processing

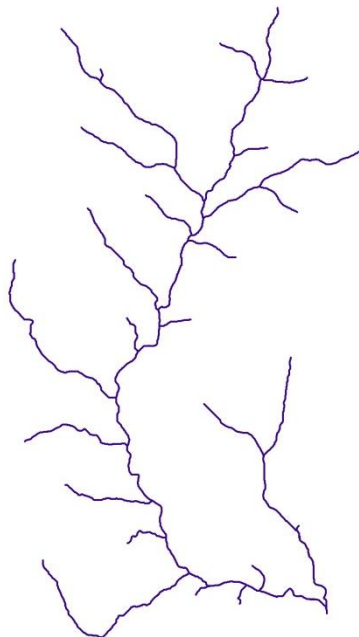
Η εντολή μετατρέπει το grid του προηγούμενου βήματος σε διανυσματική μορφή (vector).



Σχήμα 3.11 Διαμορφωμένες υπολεκάνες σε διανυσματική μορφή

Drainage Line Processing

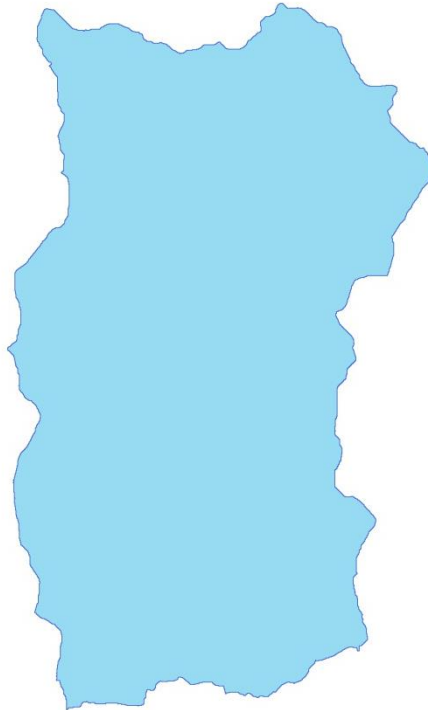
Μετατρέπει το υδρογραφικό δίκτυο από μορφή grid σε διανυσματική (vector).



Σχήμα 3.12 Διαμορφωμένο υδατόρεμα σε διανυσματική μορφή

Adjoint Catchment Processing

Συναθροίζει τις ανάντη υπολεκάνες σε κάθε διακλάδωση του υδατορέματος.

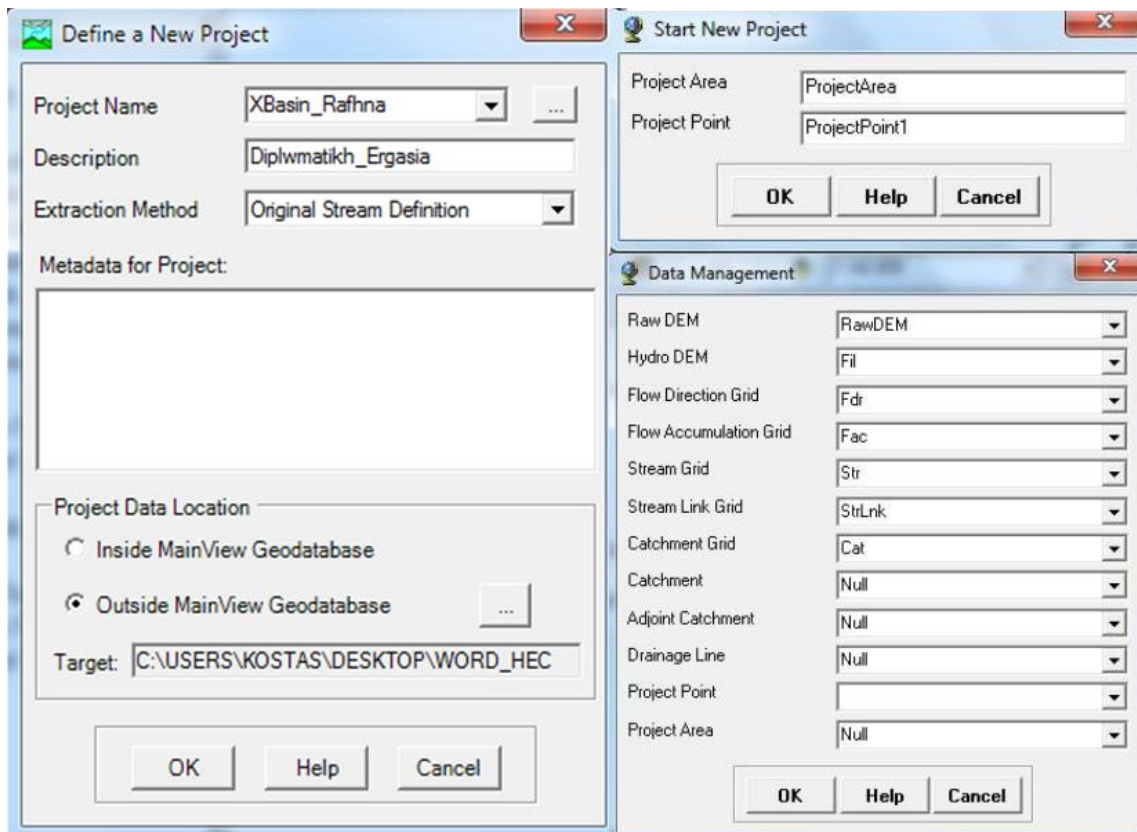


Σχήμα 3.13 Συνολική διαμορφωμένη λεκάνη


3.3 Υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών λεκάνης και δημιουργία αρχείων εισόδου στο HEC-HMS

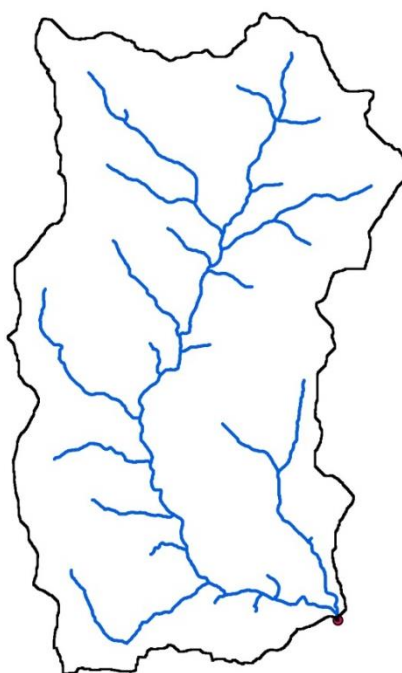
Έχοντας δημιουργήσει τα απαιτούμενα για τη συνέχεια αρχεία, μέσω των εντολών του μενού Terrain Preprocessing, το επόμενο βήμα για τη διαμόρφωση των τελικών αρχείων που θα εισαχθούν στο HEC-HMS, πραγματοποιείται από το μενού του HEC-GeoHMS, «HMS Project Setup».

Αρχικά, μέσω της εντολής «Start New Project» ορίζεται η ονοματολογία της περιοχής μελέτης και καθορίζονται τα «μητρικά αρχεία» για το μοντέλο εδάφους (τα διαμορφωμένα στο προηγούμενο βήμα).



Σχήμα 3.14 Διαδικασία "Start New Project"

Στη συνέχεια, με χρήση του εργαλείου  ορίζεται η έξοδος της λεκάνης απορροής (Ντράφι) και με την εντολή «Generate New Project» οριοθετείται η συνολική έκταση που απορρέει σε αυτήν (Πειραματική Λεκάνη). Έπειτα και από τη συγχώνευση των υπολεκανών που καταρτίζουν την κύρια λεκάνη (που έχουν διαμορφωθεί κατά τη διαδικασία της προεπεξεργασίας) (Basin Processing - Basin Merge) τα τελικά αρχεία (λεκάνης απορροής και υδρογραφικού δικτύου) που παράγονται φαίνονται στο Σχήμα 5:



Σχήμα 3.15 Τελικώς διαμορφωμένη λεκάνη και υδρογραφικό δίκτυο που τη διαρρέει

Στη συνέχεια ακολουθεί ο υπολογισμός διαφόρων χαρακτηριστικών, τοπογραφικής κυρίως φύσεως, παραμέτρων της λεκάνης και του ρέματος αυτής. Η γνώση των παραμέτρων αυτών είναι αναγκαία για το μετέπειτα «τρέξιμο» του μοντέλου, καθώς υπεισέρχονται στους υπολογισμούς των υδρογραφημάτων, με βάση και τις τρεις ακολουθούμενες μεθόδους (Snyder, SCS, Clark). Τα αναγκαία εργαλεία για τους υπολογισμούς αυτούς παρέχονται από τις εντολές του μενού Basin Characteristics.

Στην παρούσα εργασία, κάποιες από τις τιμές που εξήχθησαν, είναι οι εξής:

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκάνης απορροής και υδατορέματος

Μέγεθος	Τιμή
Μήκος κυρίου κλάδου υδατορέματος (km)	8,055
Έκταση λεκάνης απορροής (km ²)	17,54
Μέγιστο μήκος υδάτινης διαδρομής (km)	9,066
Απόσταση προβολής κεντροειδούς λεκάνης στο υδατόρεμα από την έξοδο της λεκάνης, κατά μήκος του υδατορέματος (km)	4,6
Μέση κλίση λεκάνης (°)	16,97
Μέση κλίση ρέματος (°)	5

Για τη δημιουργία των τελικών αρχείων εισόδου στο HEC-HMS ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα στο μενού «HMS»:

- Map to HMS units: Μετατροπή των δεδομένων σε μονάδες συμβατές με το HMS
- Check Data: Έλεγχος ορθότητας δεδομένων
- HMS Schematic: Αποτύπωση υδρολογικού δικτύου και των συνδέσεων κόμβων και διαύλων, με σχήματα του GIS
- HMS Legend: Αποτύπωση υδρολογικού δικτύου και των συνδέσεων κόμβων και διαύλων, με σχήματα του HMS
- Add Coordinates: Προσθήκη συντεταγμένων στους κόμβους και τους διαύλους
- Prepare Data For Model Export: Συγκρότηση του μοντέλου λεκάνης σε μορφή αναγνώσιμη από το HMS
- Background Shape File – Basin File: Συγκρότηση χάρτη συμβατού στο περιβάλλον του HMS
- Create HEC-HMS Project: Δημιουργία τελικού αρχείου δεδομένων εισόδου στο HMS

Κεφάλαιο 4. Εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS

4.1 Γενικά στοιχεία για τα υδρολογικά μοντέλα

Ορισμός Υδρολογικού μοντέλου

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

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

Τα μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης, αναπαριστούν τις σημειακές φυσικές διεργασίες που χρησιμοποιούνται σε συνεχή χρόνο, και άρα περιγράφονται από συστήματα διαφορικών εξισώσεων, μέσω αναδρομικών μαθηματικών σχέσεων, καθορισμένης χωρικής και χρονικής δραστηριότητας.

Στάδια ανάπτυξης υδρολογικών μοντέλων

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

- Επιλογή διεργασιών για προσομοίωση (perceptual model)
- Διατύπωση μαθηματικών εξισώσεων (conceptual model)
- Κωδικοποίηση υπολογιστικής διαδικασίας (procedural model)
- Υπολογισμός παραμέτρων (model calibration)
- Αποτίμηση συνέπειας και ακρίβειας – Επαλήθευση (model validation)

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

- Το σκοπό της μελέτης
- Την εμπειρία του μελετητή

- Τα διαθέσιμα δεδομένα

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

Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

Η κατηγοριοποίηση των μοντέλων μπορεί να γίνει ανάλογα με :

- Το πεδίο εφαρμογής τους
 - Λεκάνη απορροής
 - Υδροφορέας
 - Συνδυασμένη προσομοίωση των δύο
- Τη χωρική τους κλίμακα
 - Αδιαμέριστη ή συγκεντρωτική (lumped)
 - Ημι – κατανεμημένη (semi – distributed)
 - Ημι – αδιαμέριστη (semi – lumped)
 - Κατανεμημένη (distributed)
- Τη μαθηματική τους δομή
 - Μοντέλα φυσικής βάσης
 - Εννοιολογικά
 - Στατιστικά – Στοχαστικά
 - «Μαύρου Κουτιού»
- Τη χρονική τους διακριτότητα
 - Μεγάλης κλίμακας
 - Μικρής κλίμακας

Το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS

Το λογισμικό HEC – HMS (Hydrologic Modeling System) δημιουργήθηκε από το Κέντρο Τεχνικής Υδρολογίας του Ινστιτούτου Υδατικών Πόρων, που ανήκει στο Σώμα Μηχανικού του Αμερικάνικου Στρατού, το 1992. Η αρχική του ονομασία ήταν HEC – 1 και αργότερα μετεξελίχτηκε στο σημερινό HEC – HMS. Το HEC – HMS προσφέρει όλες, σχεδόν, τις δυνατότητες προσομοίωσης του HEC – 1, έχοντάς τις συγχρόνως εξελίξει και διευρύνει, με

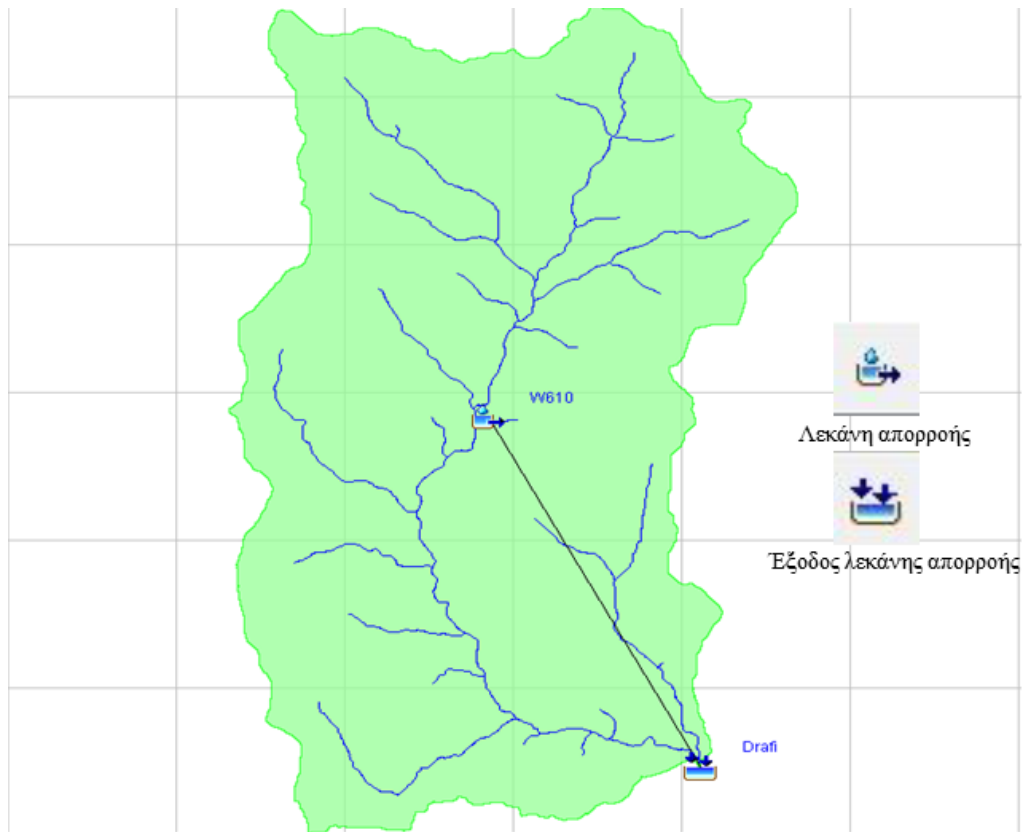
χρήση πιο σύνθετων μεθόδων αριθμητικής ανάλυσης που εκμεταλλεύονται τους ασύγκριτα πιο γρήγορους επεξεργαστές H/Y που είναι διαθέσιμοι σήμερα. Επιπρόσθετα, περιλαμβάνει αριθμό εφαρμογών που δε συμπεριλαμβάνονταν στο λογισμικό του HEC – 1, όπως είναι, μεταξύ άλλων, η συνεχόμενη προσομοίωση (continues simulation) και η δυνατότητα χωρικής υδρολογικής προσομοίωσης με χρήση καναβικού συστήματος (grid cell surface hydrology). Ακόμα, προσφέρει τη δυνατότητα γραφικής απεικόνισης των υπό μελέτη στοιχείων (λεκάνη, ποτάμι, κτλ) γεγονός που το καθιστά πιο φιλικό προς το χρήστη.

Το μοντέλο HEC – HMS είναι σχεδιασμένο ώστε να μπορεί να προσομοιώσει τις συνολικές υδρολογικές διεργασίες ενός δενδρικού τύπου συστήματος λεκανών απορροής. Περιλαμβάνει μια σειρά παραδοσιακών μεθόδων υδρολογικής ανάλυσης, όπως μεθόδους υπολογισμού επιφανειακής διείσδυσης, μοναδιαία υδρογραφήματα, μεθόδους διόδευσης και υπολογισμού της βασικής απορροής. Επιπλέον δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης διεργασιών όπως είναι η εξατμισοδιαπνοή, το λιώσιμο του χιονιού και η επιφανειακή υγρασία. Ιδιαίτερη καινοτομία του αποτελεί η μοντελοποίηση της λεκάνης απορροής στη χωρική κλίμακα του καναβικού στοιχείου. Ο χρήστης μπορεί να μελετήσει την περιοχή μελέτης με χρήση κανάβου, αριθμού κελιών που ορίζονται από τον ίδιο (ανάλογα και με τα δεδομένα που διαθέτει) και να προσομοιώσει τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα ανά κελί. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα πολύτιμη σε περιπτώσεις χρήσης, για παράδειγμα, δεδομένων βροχής «καναβικής μορφής» (gridded precipitation), που προέρχονται από δορυφόρο ή ραντάρ. Εργαλεία, τέλος, παρέχονται για την προσομοίωση μετεωρολογικού μοντέλου, υπολογισμού (βελτιστοποίηση) υδρολογικών παραμέτρων, μοντελοποίηση διάβρωσης και κίνησης ιζημάτων και εκτίμησης της ποιότητας του νερού.

4.2 Προσομοίωση λεκάνης απορροής στο HEC - HMS

4.2.1 Μοντέλο λεκάνης απορροής

Αποτελεί το πρώτο βήμα της προσομοίωσης της λεκάνης απορροής στο περιβάλλον του HEC – HMS. Κατ' αυτό, εισάγεται το μοντέλο της λεκάνης (basin model), καθώς και οι χάρτες για την οπτικοποίηση των στοιχείων αυτής (background maps - basin, river) που έχουν καταρτισθεί στο περιβάλλον του GIS με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης Geo-HMS



Σχήμα 4.1 Μοντέλο λεκάνης απορροής στο HEC-HMS

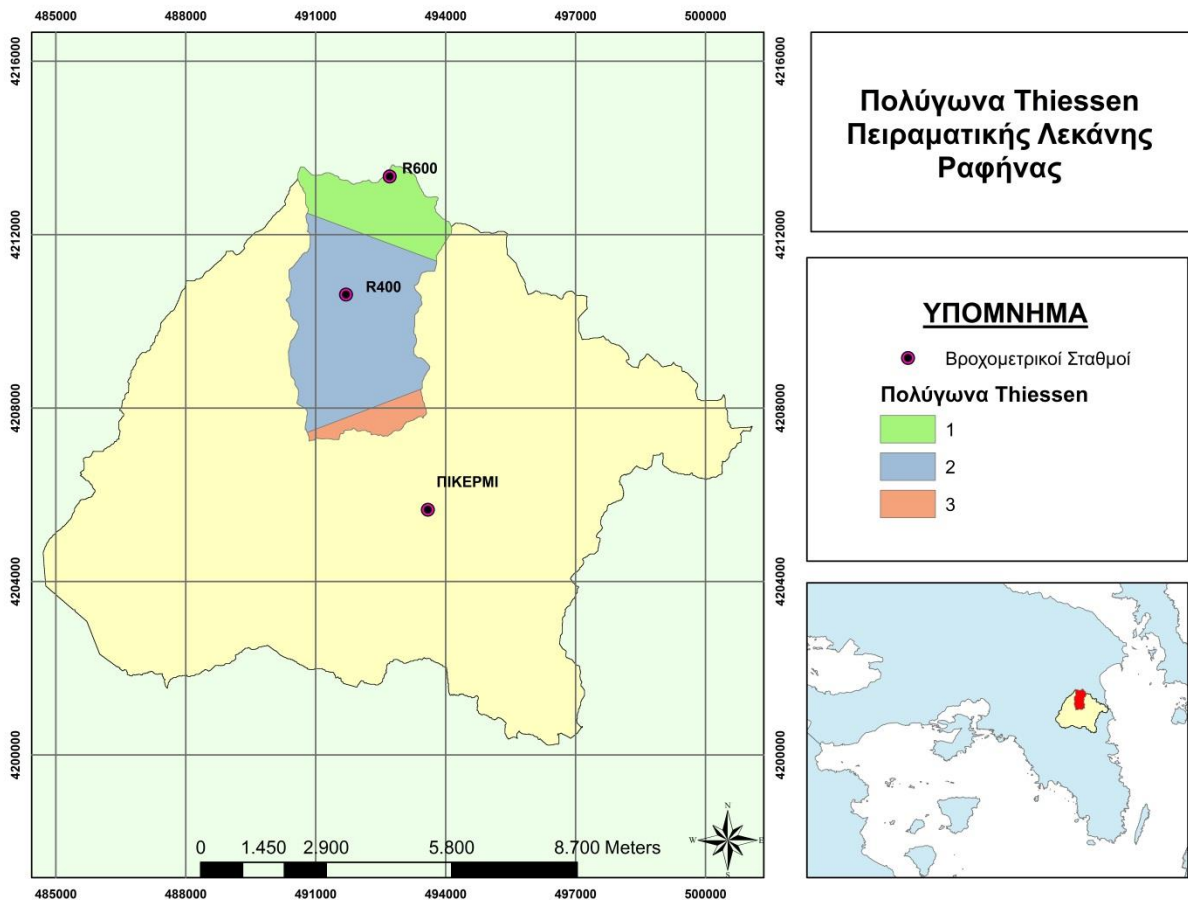
4.2.2 Μετεωρολογικό μοντέλο

Περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο εισάγεται η μετεωρολογική πληροφορία στο πρόγραμμα και τον τρόπο με την οποία αυτή αποδίδεται χωρικά στην περιοχή μελέτης. Ο χρήστης καλείται να εισάγει τις συνοριακές συνθήκες για τον τύπο του μοντέλου που έχει επιλέξει να χρησιμοποιήσει, ώστε με βάση αυτές να εξαχθεί το τελικό, επιφανειακό μέγεθος της βροχής. Στην παρούσα εργασία σαν μετεωρολογικό μοντέλο επιλέχθηκε η μέθοδος βαρών Thiessen. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε αναπτύσσεται αναλυτικά παρακάτω.

Μέθοδος βαρών Thiessen

Η κατάρτιση των πολυγώνων κατά Thiessen πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον GIS. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η εντολή «Create Thiessen Polygons», (Analysis Tools – Proximity - Create Thiessen Polygons). Τα σημεία μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των πολυγώνων ήταν οι σταθμοί R400 (Άγιος Νικόλαος), R600 (Διάβαση Μπάλας) και Πικέρμι. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας (ύστερα και από τη χρήση της εντολής

Clip, ούτως ώστε να αποκοπούν τα πολύγωνα στα όρια της Πειραματικής Λεκάνης) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2:



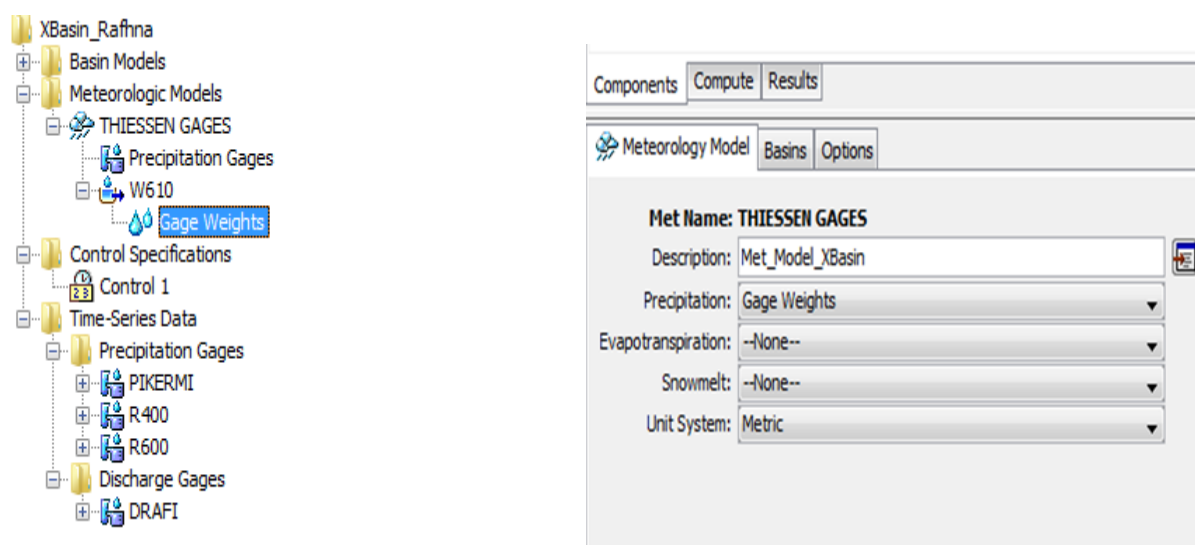
Σχήμα 4.2 Εφαρμογή μεθόδου Thiessen στην Πειραματική Λεκάνη

Ποσοτικοποιώντας τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου Thiessen, προκύπτουν οι συντελεστές (βάρη) αυτής:

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδου Thiessen στη λεκάνη απορροής

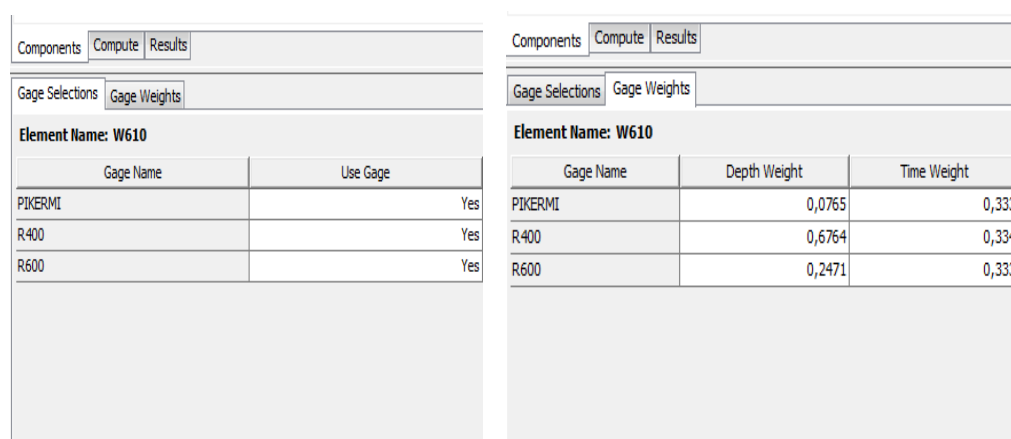
Βάρη κατά Thiessen			
Βροχομετρικοί σταθμοί	Εμβαδόν επιρροής (Km²)	Ποσοστό επιρροής (%)	Συντελεστής Thiessen
R400	11,864	67,636	0,676
R600	4,334	24,711	0,247
Πικέρμι	1,342	7,653	0,077

Ακολούθως, τα δεδομένα υπολογισμού εισάγονται στο HEC – HMS. Συγκεκριμένα, καθορίζεται πρώτα το χρησιμοποιηθέν μετεωρολογικό μοντέλο της λεκάνης (Components – Meteorological Manager – New) και στις παρατιθέμενες επιλογές ορίζεται η μέθοδος βαρών (Gage Weights).



Σχήμα 4.3 Διαδικασία δημιουργίας μετεωρολογικού μοντέλου στο HEC-HMS

Στη συνέχεια προσδιορίζονται οι χρησιμοποιηθέντες σταθμοί για τη λεκάνη και τοποθετούνται τα βάρη με τα οποία ο καθένας λαμβάνεται υπόψη κατά την υπολογιστική διαδικασία.

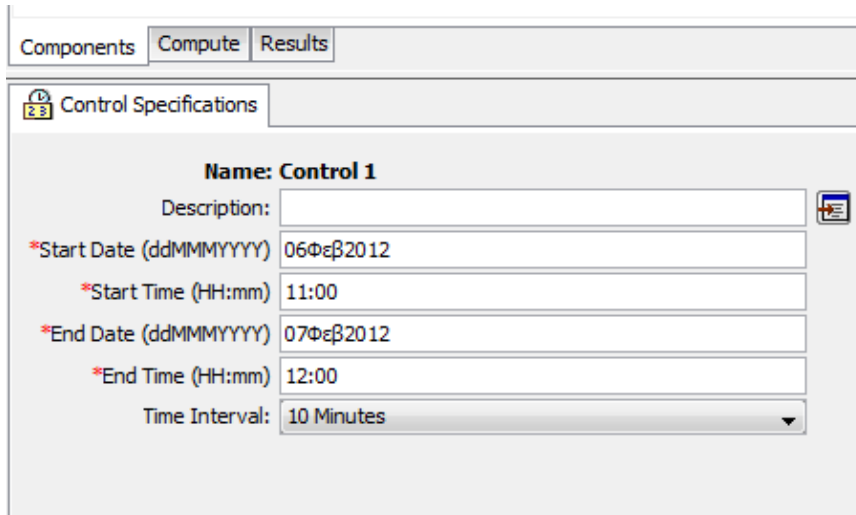


Σχήμα 4.4 Εισαγωγή δεδομένων μεθόδου Thiessen στο HEC-HMS

Έτσι, έχει οριστεί πλήρως το μετεωρολογικό μοντέλο της λεκάνης.

4.2.3 Χρονικός καθορισμός προσομοίωσης

Βασικό στοιχείο για την προσομοίωση, αποτελεί ο καθορισμός της χρονικής διάρκειας αυτής. Έτσι, για το «τρέξιμο» του κάθε ξεχωριστού επεισοδίου ορίζεται το αντίστοιχο διάστημα προσομοίωσης και το χρονικό βήμα που ακολουθείται κατ' αυτήν, δημιουργώντας έτσι έναν καινούργιο «έλεγχο» (Components – Control Specification Manager – New).



Control Specifications	
Name:	Control 1
Description:	
*Start Date (ddMMYYYY)	06Φεβ2012
*Start Time (HH:mm)	11:00
*End Date (ddMMYYYY)	07Φεβ2012
*End Time (HH:mm)	12:00
Time Interval:	10 Minutes

Σχήμα 4.5 Εισαγωγή χρονικών στοιχείων προσομοίωσης στο HEC-HMS

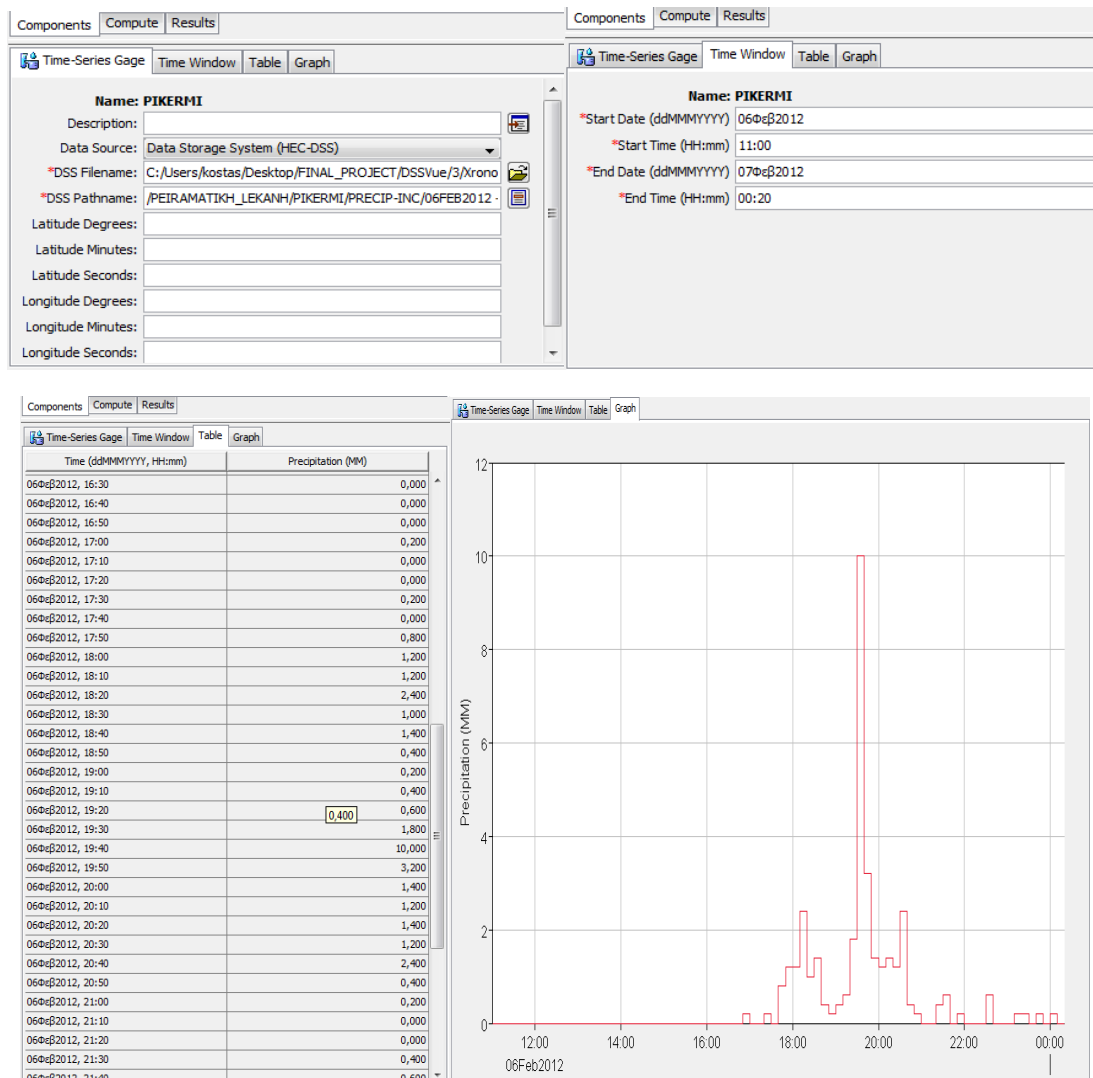
4.2.4 Δημιουργία και εισαγωγή χρονοσειρών δεδομένων

Η δημιουργία των χρονοσειρών δεδομένων για τους χρησιμοποιηθέντες σταθμούς, πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του προγράμματος DSS – Vue (Data Storage System – Visual Utility Engine), δημιουργίας του Κέντρου Τεχνικής Υδρολογίας του Ινστιτούτου Υδατικών Πόρων, που ανήκει στο Σώμα Μηχανικού του Αμερικάνικου Στρατού.

Το DSS – Vue είναι λογισμικό, συμβατό με το HEC – HMS, που παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να δει, να τροποποιήσει, να διαχειριστεί και να προβάλει σε γραφικούς άξονες διαφόρων τύπων χρονοσειρές, υδρολογικού περιεχομένου. Διαθέτει πάνω από 50 μαθηματικές συναρτήσεις, με τις οποίες ο χρήστης μπορεί να διαχειριστεί τις χρονοσειρές και παρέχει δυνατότητα διασύνδεσης με το HMS, ώστε τα δεδομένα που απαιτούνται για προσομοιώσεις να χρησιμοποιούνται ευχερώς, δημιουργώντας απλώς, στο περιβάλλον του HMS, «σύνδεση» με το επιθυμητό αρχείο στο DSS – Vue. Τέλος, οι προσομοιωμένες χρονοσειρές στο HMS (προσομοιωμένες απορροές, απώλειες, ενεργός βροχόπτωση κτλ.) αποθηκεύονται αυτόματα σε αρχεία του DSS – Vue, τα οποία είναι διαθέσιμα στο χρήστη.

Οι χρονοσειρές που αποθηκεύτηκαν στο DSS – Vue (και αργότερα εισήχθησαν στο HMS) είναι αυτές των δεδομένων βροχοπτώσεων των σταθμών R400, R600 και Πικέρμι, καθώς και

των παρατηρημένων απορροών στο σταθμό Ντράφι, για τα επεισόδια που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση. Τα δεδομένα περάστηκαν χειροκίνητα στο πρόγραμμα και από εκεί «φορτώθηκαν» στο HMS.



Σχήμα 4.6 Διαδικασία εισαγωγής δεδομένων χρονοσειρών

4.2.5 Προσομοίωση υδρολογικών ελλειμμάτων

Η Soil Conservation Service (SCS) έχει αναπτύξει μία ευρέως διαδεδομένη μέθοδο, που χρησιμοποιεί τον αριθμό καμπύλης CN για τον υπολογισμό της απορροής. Σε αυτήν ενσωματώνονται οι επιδράσεις της χρήσης και εκμετάλλευσης της γης. Η διαδικασία αναπτύχθηκε εμπειρικά από μελέτες σε μικρές καλλιεργήσιμες λεκάνες. Αν και η διαδικασία της SCS δε σχεδιάστηκε για να υπολογίζει άμεσα τη διήθηση, στην ουσία ενσωματώνει μια εκτίμησή της.

Η μέθοδος υπολογίζει το ενεργό ύψος βροχής, δηλαδή την ποσότητα βροχής που απορρέει επιφανειακά, σύμφωνα με τη σχέση:

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq 0.2S \\ \frac{(h-0.2S)^2}{h+0.8S} & h \geq 0.2S \end{cases} \quad (1)$$

Όπου h_e = το ενεργό ύψος βροχής

h = το συνολικό ύψος βροχής

Το S είναι μια παράμετρος που συνδέεται με τον αριθμό καμπύλης CN σύμφωνα με τη σχέση:

$$S \text{ (mm)} = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (2)$$

Η διαδικασία κατά SCS περιλαμβάνει την επιλογή μιας καταγίδας και τον υπολογισμό της άμεσης απορροής με τη χρήση καμπυλών που δημιουργήθηκαν από μελέτες πεδίου, σχετικά με το ποσό της παρατηρημένης απορροής σε διάφορους εδαφικούς συνδυασμούς. Ένας αριθμός καμπύλης CN (κυμαίνεται από 0 έως 100) εξάγεται από πίνακες, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και την υδρολογική κατάσταση. Τα εδάφη κατατάσσονται στην κατηγορία A, B, C ή D ανάλογα με τα ακόλουθα κριτήρια:

Πίνακας 4.2 Διαπερατότητα εδαφών κατά SCS [Πηγή: Μιμίκου και Μπαλτάς 2006]

Κατηγορία A	Εδάφη με υψηλούς ρυθμούς διήθησης ακόμα και αν διαβραχούν διεξοδικά (πολύ χαμηλό δυναμικό απορροής). Συνήθως περιέχουν πλήρως στραγγιζόμενες άμμους ή χαλίκια.
Κατηγορία B	Εδάφη με μέτριους ρυθμούς διήθησης, όπως για παράδειγμα αμμώδης πηλός.
Κατηγορία C	Εδάφη με χαμηλούς ρυθμούς διήθησης, όπως είναι τα εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου.
Κατηγορία D	Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης (πολύ υψηλό δυναμικό απορροής). Συνήθως περιλαμβάνουν αργιλώδη εδάφη με υψηλή πιθανότητα διόγκωσης ή ρηχά εδάφη πάνω σε σχεδόν αδιαπέρατο υλικό.

Ένας σύνθετος αριθμός καμπύλης (CN), για μια λεκάνη που περιλαμβάνει περισσότερες από μία χρήσεις γης ή τύπο εδάφους, μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας κάθε επιμέρους αριθμό καμπύλης με το συντελεστή βάρους που προκύπτει από το ποσοστό της επιφάνειας.

Οι αριθμοί καμπύλης διαχωρίζονται και ανάλογα με τις υπάρχουσες συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Τέτοιες συνθήκες υγρασίας είναι (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006):

Πίνακας 4.3 Κατάσταση εδαφικής υγρασίας κατά SCS [Πηγή: Μιμίκου και Μπαλτάς 2006]

Κατάσταση I	Η κατάσταση κατά την οποία τα εδάφη είναι στεγνά, αλλά όχι στο σημείο μόνιμης μάρανσης και όταν λαμβάνει χώρα ικανή άροση ή καλλιέργεια.
Κατάσταση II	Η μέση περίπτωση για ετήσιες πλημμύρες, δηλαδή ένας μέσος όρος των συνθηκών που προηγήθηκαν της μέγιστης ετήσιας πλημμύρας σε αρκετές λεκάνες απορροής.
Κατάσταση III	Αν έντονη βροχόπτωση ή ελαφρά βροχόπτωση και χαμηλές θερμοκρασίες έχουν συμβεί τις τελευταίες 5 ημέρες πριν τη δεδομένη καταιγίδα και το έδαφος είναι σχεδόν κορεσμένο.

Το υδρολογικό σύμπλοκο εδάφους – χρήσης γης κατηγοριοποιείται και αποδίδεται σε κάθε συνδυασμό ένας ξεχωριστός αριθμός καμπύλης (ή ένα εύρος τιμών). Μέσα από μια τέτοια διαδικασία, για συνθήκες υγρασίας τύπου II, έχει προκύψει ο Πίνακας 4.4 (Mockus et al, 2004).

Πίνακας 4.4 Ενδεικτικοί αριθμοί καμπύλης (CN) για υδρολογική κατάσταση II

Χρήση Γης	Κατηγορία Εδάφους			
	A	B	C	D
Καλλιεργούμενες εκτάσεις: προστατευόμενες	72	81	88	91
Καλλιεργούμενες εκτάσεις: μη προστατευόμενες	62	71	78	81
Βοσκότοποι (μέτρια υδρολογική κατάσταση)	49	69	79	84
Βοσκότοποι (φτωχή υδρολογική κατάσταση)	68	79	86	89
Δάση (φτωχή υδρολογική κατάσταση) καθόλου κάλυψη	45	66	77	83
Δάση (καλή υδρολογική κατάσταση) καλή κάλυψη	25	55	70	77
Ανοιχτοί χώροι : πάρκα , γκαζόν, γήπεδο γκολφ (καλή κατάσταση , >75% κάλυψη από πράσινο)	39	61	74	80
Ανοιχτοί χώροι : πάρκα , γκαζόν, γήπεδο γκολφ (μέτρια κατάσταση , κάλυψη από πράσινο μεταξύ 50-75%)	49	69	79	84
Εμπορικές περιοχές (85% αδιαπέρατο έδαφος)	89	92	94	95
Βιομηχανικές περιοχές (72% αδιαπέρατο έδαφος)	81	88	91	93
Περιοχές Κατοικίας (μέσο % αδιαπέρατου εδάφους)				
65%	77	85	90	92
38%	61	75	83	87
30%	57	72	81	86
25%	54	70	80	85
20%	51	68	79	84
Δρόμοι (χώμα)	72	82	87	89
Δρόμοι (σκληρή επιφάνεια)	74	84	90	92
Δρόμοι (χαλίκι)	76	85	89	91
Δρόμοι (οδόστρωμα και δίκτυο ομβρίων)	98	98	98	98

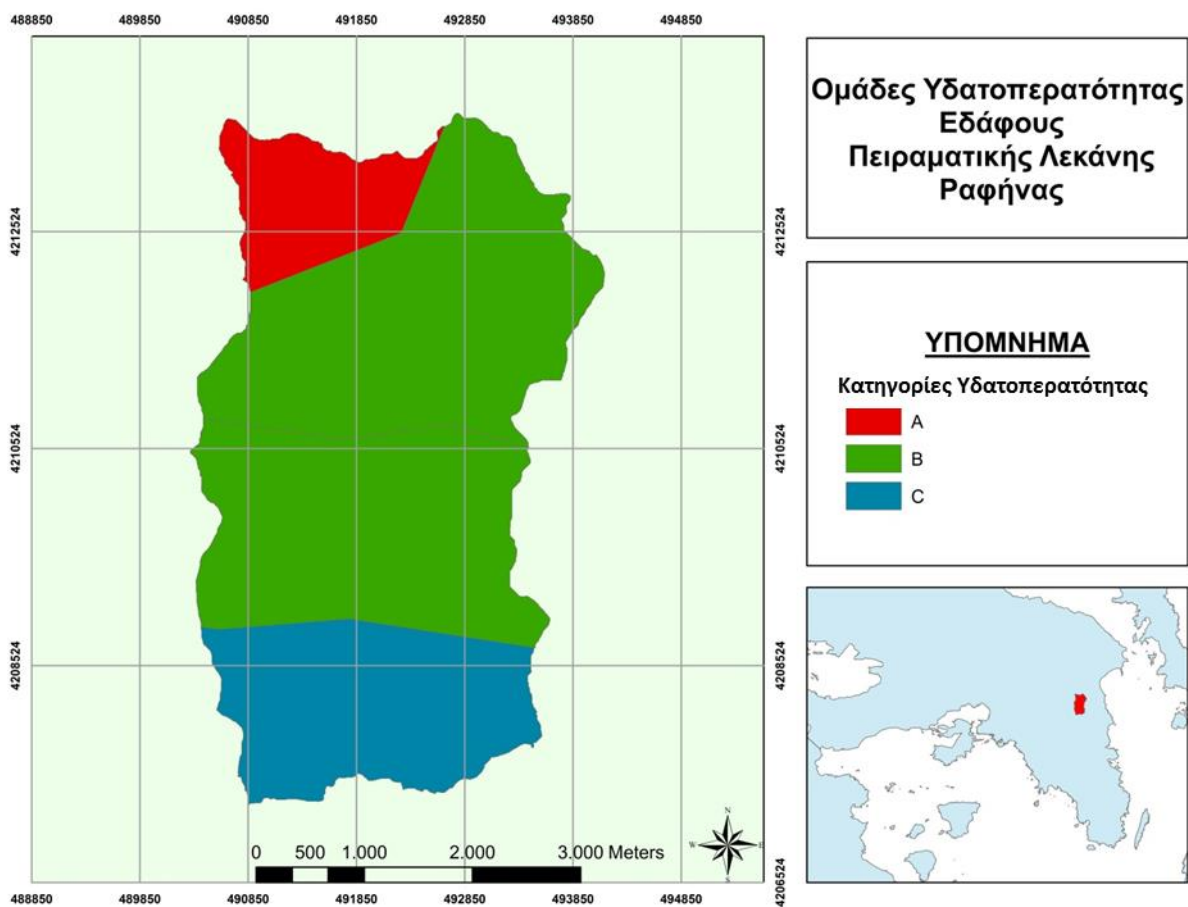
Εφαρμογή της μεθόδου SCS στην περιοχή μελέτης

Για τον υπολογισμό του αριθμού καμπύλης της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο «Generate CN Grid» του HEC – GeoHMS. Μέσω αυτού συνδυάζονται τα δεδομένα των γεωλογικών σχηματισμών και των χρήσεων γης που συναντώνται και δημιουργείται ένα

αρχείο, μορφής raster, το οποίο σε κάθε κελί του περιέχει τον αντίστοιχο, υπολογισμένο αριθμό καμπύλης.

Δημιουργία καναβικού αρχείου αριθμών καμπύλης

Με βάση τα χαρακτηριστικά των συναντώμενων γεωλογικών σχηματισμών (όπως παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο της εργασίας) μπορεί να εξαχθεί μία πρώτη, χονδροειδής έστω, εκτίμηση της κατάταξης αυτών σε υδρολιθολογική κατηγορία ως εξής (Σχήμα 4.7):



Σχήμα 4.7 Εμφανιζόμενες ομάδες υδατοπερατότητας στην Πειραματική Λεκάνη

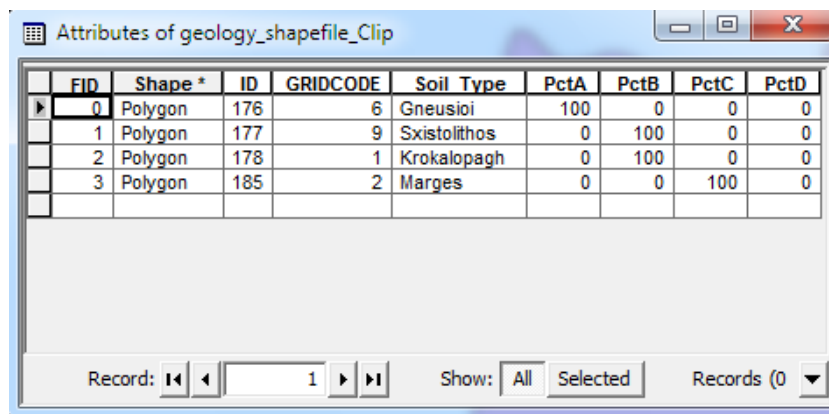
Η κατάταξη αυτή είναι πολύ γενική, καθώς κάθε έδαφος τοποθετείται σε μία μόνο συγκεκριμένη κατηγορία, χωρίς να αποδίδονται οι τοπικές διαφοροποιήσεις που μπορεί να εμφανίζονται (σε κάποια περιοχή ο σχιστόλιθος μπορεί να χαρακτηρίζεται, για παράδειγμα, καλύτερα από τη Β κατηγορία ενώ σε κάποια άλλη από τη C). Αυτή είναι μία παραδοχή στην οποία καταλήγουμε αναγκαστικά, απόντων περισσότερο ακριβών στοιχείων για την περιοχή μελέτης. Το ζήτημα αυτό, ωστόσο, κρίνεται ως ήσσονος σημασίας, στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, καθώς η εξαγωγή του αριθμού καμπύλης μέσω αυτής της

διαδικασίας χρησιμοποιείται μόνο ως προεκτίμηση, ενώ ακριβέστερα υπολογίζεται κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

Για να δημιουργηθεί το «CN Grid» απαιτείται πρώτα η επεξεργασία και διαμόρφωση των πινάκων χαρακτηριστικών (Attribute Tables) των αρχείων (shapefiles) των γεωλογικών σχηματισμών και χρήσεων γης της Πειραματικής Λεκάνης, σε κατάλληλη, πρότυπη μορφή.

Συγκεκριμένα, απαιτείται να δημιουργηθούν 4 νέες στήλες στον πίνακα χαρακτηριστικών του αρχείου των γεωλογικών σχηματισμών, με ονομασίες «PctA» «PctB» «PctC» και «PctD». Στο κάθε κελί αναγράφεται το ποσοστό του σχηματισμού που κατατάσσεται στην αντίστοιχη κατηγορία υδατοπερατότητας. Στην περίπτωση μας έγινε η υπόθεση πως η κατάταξη του κάθε σχηματισμού είναι καθολική (100% στην εκάστοτε κατηγορία).

Πίνακας 4.5 Ποσοστιαία κατάταξη εδαφών σε κατηγορίες υδατοπερατότητας κατά SCS



FID	Shape *	ID	GRIDCODE	Soil Type	PctA	PctB	PctC	PctD
0	Polygon	176	6	Gneusioi	100	0	0	0
1	Polygon	177	9	Sxistolithos	0	100	0	0
2	Polygon	178	1	Krokalo pagh	0	100	0	0
3	Polygon	185	2	Marges	0	0	100	0

Ακολούθως, στον πίνακα χαρακτηριστικών του αρχείου χρήσεων γης (LandSAT 2007) δημιουργείται μία νέα στήλη, με το όνομα «Landuse» στην οποία, σε κάθε μορφή χρήσης γης αποδίδεται ένας ξεχωριστός αριθμός (Πίνακας 4.6).

Πίνακας 4.6 Απόδοση αριθμού «Landuse» σε κάθε μορφή χρήσης γης

FID	Shape *	OBJECTID	Classname	Cat 07	Elev Zone	Shape Area	Landuse
0	Polygon	1	Agricultural areas	5	1	51439,953965	1
1	Polygon	2	Agricultural areas	5	2	189018,649372	1
2	Polygon	3	Bare land and artificial surfaces	6	1	292033,032498	2
3	Polygon	4	Bare land and artificial surfaces	6	2	3279729,1694	2
4	Polygon	9	Shrubs	2	1	2278,812464	3
5	Polygon	10	Shrubs	2	2	893608,527535	3
6	Polygon	11	Sparsely vegetated areas	4	1	344533,325125	4
7	Polygon	12	Sparsely vegetated areas	4	2	12173166,9509	4
8	Polygon	13	Sparsely vegetated areas	4	3	314466,578726	4

Τα δύο αυτά επεξεργασμένα αρχεία (εδαφικοί σχηματισμοί και χρήσεις γης) συνενώνονται (Analysis Tools – Overlay – Union) προς διαμόρφωση ενός νέου shapefile που ομαδοποιεί τις χρήσεις γης με την αντίστοιχη κατηγορία εδάφους στην οποία εμφανίζονται. Στον πίνακα χαρακτηριστικών του αρχείου αυτού φαίνονται οι συνδυαστικές ιδιότητες.

Πίνακας 4.7 Ομαδοποίηση γεωλογικών σχηματισμών - χρήσεων γης

FID	Shape *	FID geolog	ID	GRIDCODE	Soil Type	PctA	PctB	PctC	PctD	FID LC LAN	OBJECTID	Classname	Cat 07	Elev Zone	Landuse	Area m2
0	Polygon	0	176	6	Gneusioi	100	0	0	0	5	10	Shrubs	2	2	3	5113,0681
1	Polygon	0	176	6	Gneusioi	100	0	0	0	7	12	Sparsely vegetated areas	4	2	4	1477333,5
2	Polygon	0	176	6	Gneusioi	100	0	0	0	8	13	Sparsely vegetated areas	4	3	4	314466,57
3	Polygon	1	177	9	Sxistolithos	0	100	0	0	1	2	Agricultural areas	5	2	1	81488,705
4	Polygon	1	177	9	Sxistolithos	0	100	0	0	3	4	Bare land and artificial surfaces	6	2	2	79978,237
5	Polygon	1	177	9	Sxistolithos	0	100	0	0	5	10	Shrubs	2	2	3	227974,43
6	Polygon	1	177	9	Sxistolithos	0	100	0	0	7	12	Sparsely vegetated areas	4	2	4	5985910,9
7	Polygon	2	178	1	Krokalo pagh	0	100	0	0	1	2	Agricultural areas	5	2	1	50423,489
8	Polygon	2	178	1	Krokalo pagh	0	100	0	0	3	4	Bare land and artificial surfaces	6	2	2	1082849,6
9	Polygon	2	178	1	Krokalo pagh	0	100	0	0	5	10	Shrubs	2	2	3	489741,38
10	Polygon	2	178	1	Krokalo pagh	0	100	0	0	7	12	Sparsely vegetated areas	4	2	4	3735474,0
11	Polygon	3	185	2	Marges	0	0	100	0	0	1	Agricultural areas	5	1	1	51439,953
12	Polygon	3	185	2	Marges	0	0	100	0	1	2	Agricultural areas	5	2	1	57106,455
13	Polygon	3	185	2	Marges	0	0	100	0	2	3	Bare land and artificial surfaces	6	1	2	292033,03
14	Polygon	3	185	2	Marges	0	0	100	0	3	4	Bare land and artificial surfaces	6	2	2	2116901,3
15	Polygon	3	185	2	Marges	0	0	100	0	4	9	Shrubs	2	1	3	2278,8124
16	Polygon	3	185	2	Marges	0	0	100	0	5	10	Shrubs	2	2	3	170779,63
17	Polygon	3	185	2	Marges	0	0	100	0	6	11	Sparsely vegetated areas	4	1	4	344533,32
18	Polygon	3	185	2	Marges	0	0	100	0	7	12	Sparsely vegetated areas	4	2	4	974448,34

Το επόμενο βήμα που πραγματοποιείται είναι η δημιουργία ενός νέου πίνακα, ο οποίος θα περιέχει τον αποδιδόμενο, για κάθε χρήση γης και κατηγορία υδατοπερατότητας, αριθμό καμπύλης. Οι αριθμοί καμπύλης, για την περιοχή μελέτης, λαμβάνονται από τον Πίνακα 4.8, για συνθήκες υγρασίας κατάστασης II, ο οποίος έχει διαμορφωθεί με βάση τον πίνακα κατά Mockus et al.

Πίνακας 4.8 Εκτίμηση αριθμού καμπύλης (CN) για τις κατηγορίες χρήσεων γης που εμφανίζονται στην Πειραματική Λεκάνη [Πηγή: Κασσελά, 2011]

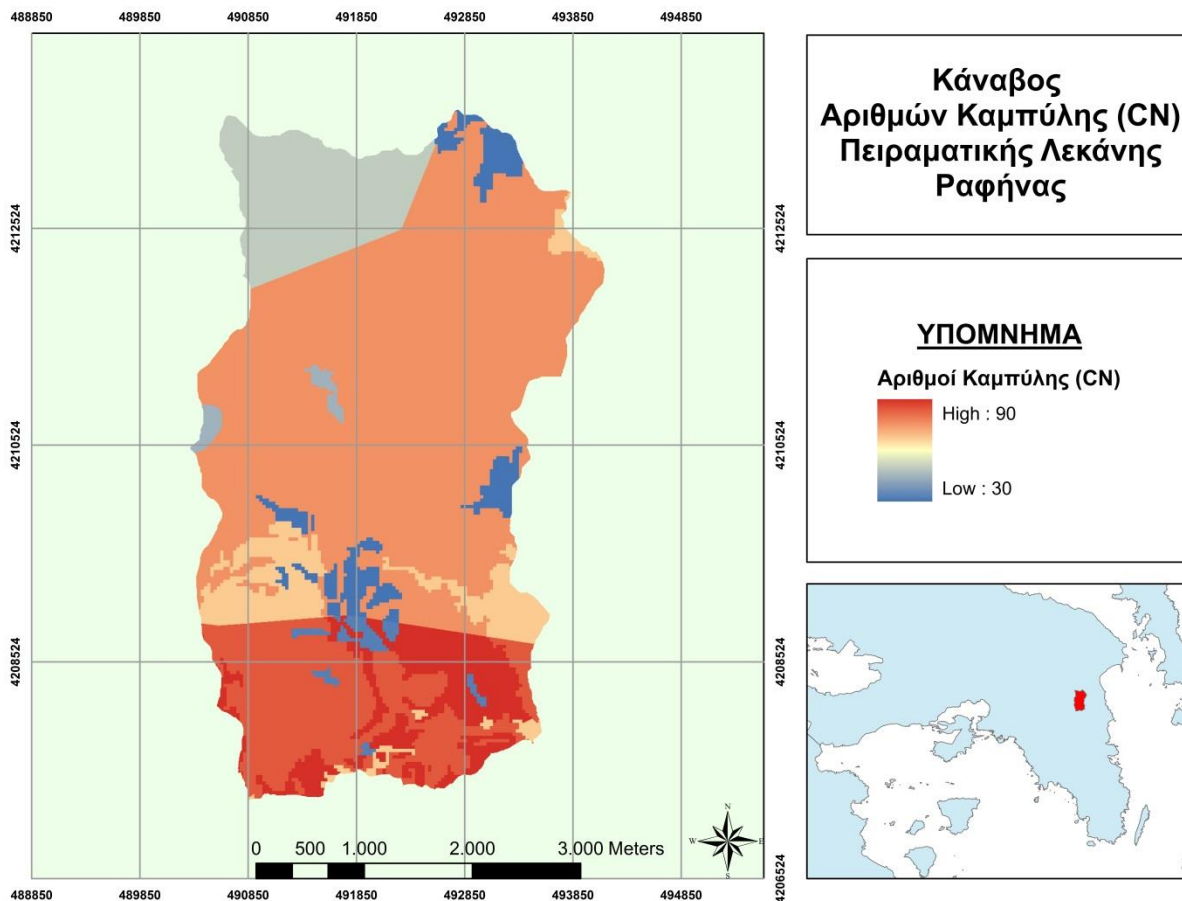
Χρήση Γης			CN (II)			
Κωδικός Corine (CLC)	Περιγραφή	Κατηγορία στο χάρτη κάλυψης γης (GIS)	A	B	C	D
112	Ασυνεχής Αστικός Ιστός	Bare & Artificial Land	72	82	88	91
243	Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης	Agricultural Areas	62	74	82	85
322	Θάμνοι και χερσότοποι	Shrubs	30	55	70	77
333	Περιοχή αραιής βλάστησης	Sparsely vegetated areas	76	85	90	93

Ο πίνακας αυτός διαμορφώνεται, σε κατάλληλη μορφή, στο Excel και εισάγεται στο GIS με την ονομασία «CN Lookup Table». Σε αυτόν απαιτείται να περιέχονται οι στήλες «LUValue», «A», «B», «C» και «D» οι οποίες και συμπληρώνονται από το χρήστη. Στην περίπτωση μας προκύπτει ως εξής:

Πίνακας 4.9 Διαμόρφωση "CNLookup Table"

OBJECTID	LUValue	A	B	C	D
1	1	62	74	82	85
2	2	72	82	88	91
3	3	30	55	70	77
4	4	76	85	90	93

Συνδυάζοντας, τέλος, τα διαμορφωμένα αυτά αρχεία μέσω της εντολής «Generate CN Grid» δημιουργείται ο Χάρτης 5 με την παρουσίαση των αριθμών καμπύλης της Πειραματικής Λεκάνης ανά περιοχή:



Σχήμα 4.8 Εμφανιζόμενοι αριθμοί καμπύλης Πειραματικής Λεκάνης

Ο μέσος CN – ο οποίος και εισάγεται τελικά στο HMS – υπολογίζεται μέσω της εργαλειοθήκης HEC – GeoHMS (Hydrologic Parametrs – Subbasin Parameters from Raster) – με εντολή ανάλογη του zonal statistics - και η τιμή του ανέρχεται σε $83,16 \approx 83$.

Υπολογισμός αρχικών απωλειών I_a

Με βάση τη μεθοδολογία της SCS, οι αρχικές απώλειες υπολογίζονται ως $I_a = 0,2S$ (βλ §5.11). Ωστόσο, στη βιβλιογραφία έχει προταθεί η αντικατάσταση του λόγου I_a/S (ή λ) με τιμές από 0,05 έως 0,2 (Wooward et al, 2003), πρόταση η οποία έχει συμπεριληφθεί και στα επίσημα αρχεία περιγραφής μεθοδολογιών στην ιστοσελίδα της Υπηρεσίας Διατήρησης Φυσικών Πόρων (Natural Resource Conservation Service – NRCS, πρώην SCS).

Στην περιοχή της Πειραματικής Λεκάνης, ειδικότερα, ύστερα από ανάλυση 18 ξεχωριστών επεισοδίων βροχής βρέθηκε ότι ο λόγος I_a/S δεν παραμένει σταθερός, αλλά μεταβάλλεται ανά επεισόδιο και ότι η τιμή που τον χαρακτηρίζει καλύτερα είναι $I_a/S = 0.014$. (Baltas et al, 2007). Σε αυτό το συμπέρασμα στηρίχθηκε η διαδικασία, μετέπειτα, της βαθμονόμησης του υδρολογικού μοντέλου για την προσομοίωση των απωλειών της λεκάνης. Κατά τη διαδικασία

αυτή (όπως αναπτύσσεται παρακάτω) επιδιώχθηκε να βελτιστοποιηθεί ο λόγος ανά επεισόδιο, με βάση πάντα την καλύτερη προσαρμογή του προσομοιωμένου πλημμυρογραφήματος στο παρατηρημένο, και να εξαχθεί η μέση τιμή αυτού από την ανάλυση.

Στο αρχικό αυτό, ωστόσο, στάδιο της προεκτίμησης των απωλειών, λήφθηκε υπόψη η επίσημη σχέση κατά SCS (με βάση την κλασσική μεθοδολογία), που ορίζει την τιμή $I_a/S = 0,2$. Έτσι, με βάση όλα τα παραπάνω έχουμε σαν αρχική εκτίμηση:

Πίνακας 4.10 Αρχική εκτίμηση παραμέτρων μοντέλου απωλειών SCS

Μοντέλο απωλειών κατά SCS	
CN	83
S (mm)	52,024
I_a/S	0,2
I_a (mm)	10,405

4.2.6 Προσομοίωση άμεσης απορροής

Η προσομοίωση της άμεσης απορροής στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε με χρήση τριών διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού μοναδιαίου υδρογραφήματος. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα MYΓ κατά Snyder, SCS και κατά Clark. Η εφαρμογή των μεθόδων αυτών αναλύεται παρακάτω, αφού γίνει πρώτα μια επιγραμματική αναφορά στο θεωρητικό πλαίσιο τους.

Θα πρέπει, ωστόσο, να επισημανθεί στο σημείο αυτό το γεγονός πως οι μέθοδοι αυτές έχουν εξαχθεί από μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε λεκάνες απορροής με τελείως διαφορετικά γεωμορφολογικά και φυσικά χαρακτηριστικά, από αυτές που συναντώνται στο ελλαδικό χώρο γενικότερα – και κατ' επέκταση στην περιοχή μελέτης μας. Για το λόγο αυτό, η εκτίμηση των διαφόρων παραμέτρων τους μέσω των εξισώσεων που τις συνοδεύουν, κρίνεται ως επισφαλής για μελέτες όπως η δική μας (πράγμα το οποίο διαπιστώνεται και παρακάτω). Κρίνεται επιτακτική η βαθμονόμηση των μεταβλητών αυτών, προτού χρησιμοποιηθεί η αντίστοιχη μέθοδος.

Το μοναδιαίο υδρογράφημα.

Η διαδικασία εκτίμησης τόσο της πλημμυρικής αιχμής όσο και της εν γένει κατανομής της πλημμύρας που προκαλείται από μια βροχή, μπορεί να βασιστεί στο μοναδιαίο υδρογράφημα, που πρώτα εισήχθηκε στην υδρολογική ανάλυση από τον Sherman (1932). Κατά τον Sherman, μοναδιαίο υδρογράφημα είναι το υδρογράφημα που προκαλείται από ενεργό βροχή ύψους ίσου με τη μονάδα (στο μετρικό σύστημα ίσης με ένα cm), που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σ' όλη την έκταση της υδρολογικής λεκάνης και έχει ομοιόμορφη ένταση. Δηλαδή, το μοναδιαίο υδρογράφημα είναι το υδρογράφημα απορροής που προκαλείται από ενεργό βροχή ίση με 10 mm συγκεκριμένης διάρκειας.

Η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

- Σε μια συγκεκριμένη υδρολογική λεκάνη, βροχές ίσης διάρκειας που προκαλούν απορροή, δίνουν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με την ίδια περίπου χρονική βάση, ανεξάρτητα από την ένταση της βροχής.
- Σε μια δεδομένη υδρολογική λεκάνη, η άμεση απορροή που προκαλείται από μια συγκεκριμένη βροχή είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες βροχές ή τις επόμενες.
- Η κατάσταση της υδρολογικής λεκάνης παραμένει αμετάβλητη σε σχέση με το χρόνο.

Όπως γίνεται ευκόλως αντιληπτό, οι παραπάνω συνθήκες μόνο κατά προσέγγιση ικανοποιούνται απ' τις φυσικές υδρολογικές λεκάνες.

Υπάρχουν δύο βασικές αρχές που διέπουν το μοναδιαίο υδρογράφημα και προκύπτουν άμεσα από τον ορισμό αυτού. Αυτές είναι:

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

Μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder

Η πιο γνωστή μέθοδος κατασκευής συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος, είναι η μέθοδος Snyder, η οποία προέκυψε από αναλύσεις μεγάλου αριθμού βροχοπτώσεων στην περιοχή των Απαλλαχίων, στη Βόρεια Αμερική.

Η μέθοδος αυτή προσδιορίζει το χρόνο υστέρησης t_p , την αιχμή Q_p , το χρόνο βάσης T , καθώς και τα πλάτη του ΜΥΓ W_{50} και W_{75} σε χρόνο που αντιστοιχεί στο 50% και 75% της αιχμής (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006).

Οι εξισώσεις που διέπουν το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα του Snyder είναι:

$$t_p = 0,75C_t(L_{ca}L)^{0,3} \quad (\text{hr}) \quad (1)$$

$$Q_p = C_p \frac{2,75A}{t_p} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (2)$$

$$T = 3 + 3\left(\frac{t_p}{24}\right) \quad (\text{days}) \quad (3)$$

Όπου:

L_{ca} = η απόσταση του σταθμού μέτρησης παροχής στην έξοδο της λεκάνης από το κέντρο βάρους της λεκάνης κατά μήκος της κοίτης του κύριου υδατορέματος έως το πλησιέστερο σημείο του κέντρου βάρους (km)

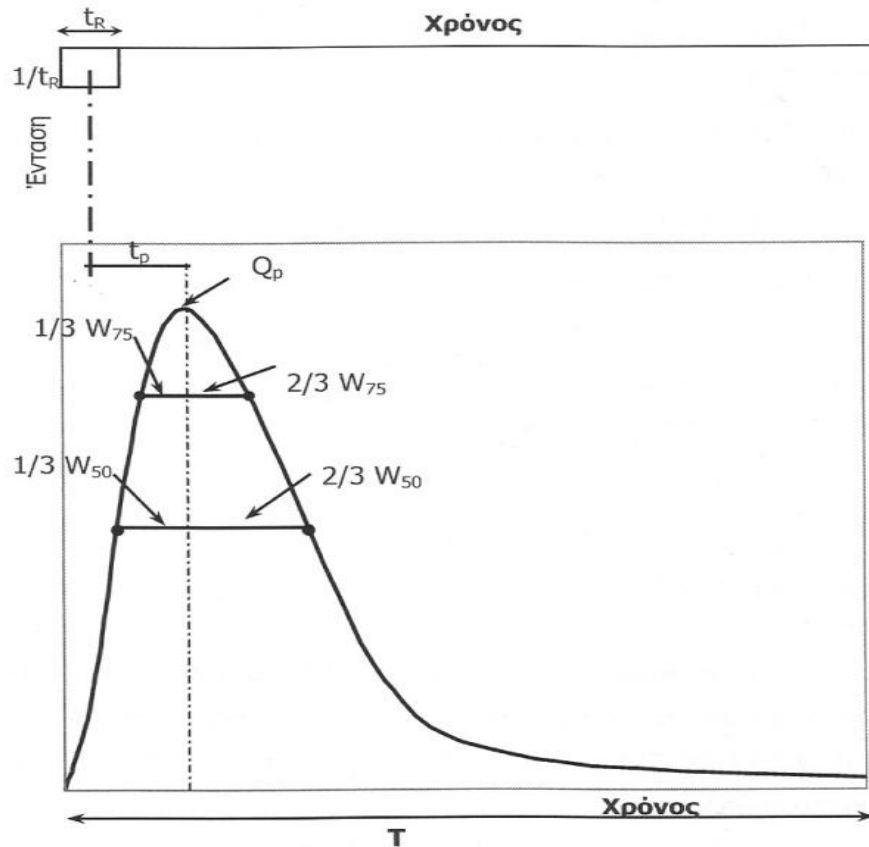
L = η απόσταση του σταθμού μέτρησης παροχής ως τον υδροκρίτη, που μετρείται κατά μήκος του κύριου υδατορέματος (km)

C_t = αδιάστατος συντελεστής που αντιπροσωπεύει τα τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης με εύρος τιμών από 1,8 έως 2,2. Για τιμές μεγάλων κλίσεων η τιμή του C_t τείνει προς τη χαμηλότερη τιμή.

C_p = αδιάστατος συντελεστής που εξαρτάται από τις μονάδες και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης με εύρος τιμών από 0,56 έως 0,69.

A = η έκταση της λεκάνης (km^2)

T = η χρονική βάση του υδρογραφήματος. Ως ελάχιστη τιμή από την εξίσωση δίδονται οι 3 ημέρες



Σχήμα 4.9 Το μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder

Ο χρόνος υστέρησης μετράται από το κέντρο βάρους της ενεργού βροχόπτωσης μέχρι την αιχμή του πλημμυρογραφήματος. Η διάρκεια ενεργού βροχόπτωσης t_R , συνδέεται με τη χρονική υστέρηση μέσω της σχέσης:

$$t_R = \frac{t_p}{5,5} \quad (4)$$

Αν το ζητούμενο ΜΥΓ έχει διάρκεια t_R' μεγαλύτερη της t_R , τότε ο χρόνος υστέρησης διορθώνεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$t'_p = t_p + \frac{t'_R - t_R}{4} \quad (5)$$

Η διορθωμένη αυτή τιμή του χρόνου υστέρησης πρέπει να αντικατασταθεί στις αρχικές σχέσεις και να υπολογιστούν οι διορθωμένες τιμές των Q'_p και T' .

Τα πλάτη του ΜΥΓ στο 50% και 75% της αιχμής, W_{50} ΚΑΙ W_{75} , δίνονται από τις σχέσεις:

$$W_{50} = \frac{830}{q_p^{1,1}} \quad (6)$$

$$W_{75} = \frac{470}{q_p^{1,1}} \quad (7)$$

Όπου $q_p = Q_p/A$ η παροχή αιχμής ανηγμένη στην επιφάνεια της λεκάνης A (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006)

Εκτίμηση παραμέτρων Snyder και εισαγωγή τους στο HEC - HMS

Κάνοντας μια προεκτίμηση των τιμών των συντελεστών C_t και C_p του μοντέλου Snyder και χρησιμοποιώντας τις τιμές των υπολογισμένων (στο GIS) τοπογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης, καταλήγουμε στα εξής:

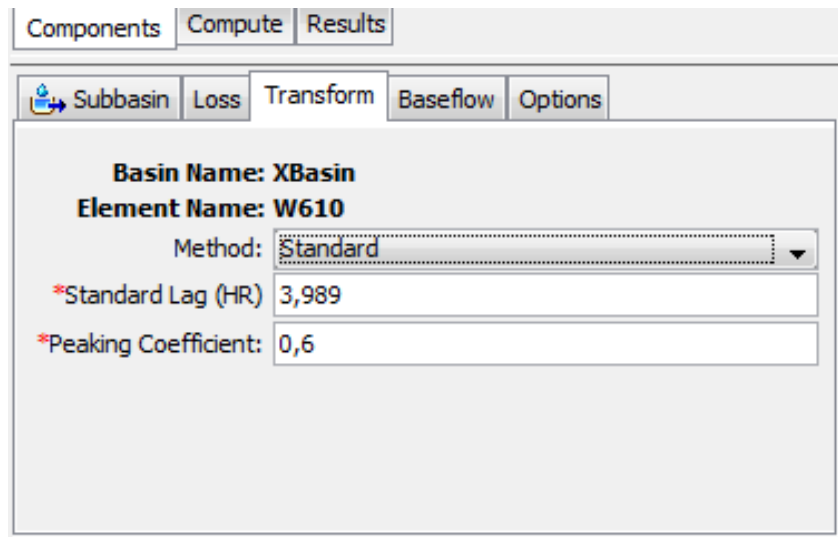
Πίνακας 4.11 Αρχική εκτίμηση παραμέτρων μοντέλου άμεσης απορροής κατά Snyder

Μοντέλο άμεσης απορροής κατά Snyder	
Παράμετροι	Τιμές
C_t	1,8
C_p	0,6
L (km)	8,055
L_{CA} (km)	4,595
t_p (hr)	3,989

Εύκολα γίνεται αντιληπτό πως ο υπολογισμένος χρόνος υστέρησης της λεκάνης είναι αφύσικα υψηλός (λαμβάνοντας υπόψη και αποτελέσματα παλαιότερων μελετών στην Πειραματική λεκάνη). Η διαπίστωση αυτή επαληθεύεται και αργότερα κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

Πάραυτα, οι προεκτιμώμενες αυτές τιμές εισάγονται στο HMS, για να διαπιστωθεί και ο βαθμός αναντιστοιχίας.

Έτσι, μέσω της διαδικασίας Parameters – Transform – Change Method και επιλογή του « Snyder Transform Method – Standard» ορίζεται η χρησιμοποιούμενη μέθοδος και ακολούθως εισάγονται και οι τιμές.



Σχήμα 4.10 Εισαγωγή παραμέτρων μεθόδου Snyder στο HEC-HMS

Μοναδιαίο υδρογράφημα κατά SCS

Το αδιάστατο υδρογράφημα της SCS είναι ένα συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα στο οποίο η απορροή εκφράζεται από το λόγο της παροχής q προς την παροχή αιχμής q_p και ο χρόνος από το λόγο του χρόνου t προς το χρόνο του κλάδου ανύψωσης του μοναδιαίου υδρογραφήματος, T_p . Με δεδομένα την απορροή αιχμής και το χρόνο υστέρησης για τη διάρκεια της ενεργού βροχόπτωσης, το μοναδιαίο υδρογράφημα μπορεί να εκτιμηθεί από το συνθετικό αδιάστατο υδρογράφημα για μια δεδομένη λεκάνη απορροής. Οι τιμές των q_p και T_p μπορούν να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο μοντέλο ενός τριγωνικού μοναδιαίου υδρογραφήματος.

Από επισκόπηση ενός μεγάλου αριθμού υδρογραφημάτων, η the Soil Conservation Service προτείνει ότι ο χρόνος του καθοδικού κλάδου μπορεί να προσεγγιστεί ως $1.67T_p$. Καθώς η επιφάνεια κάτω από το μοναδιαίο υδρογράφημα θα πρέπει να ισούται με επιφανειακή απορροή ίση με 1cm, μπορεί να δειχθεί ότι:

$$q_p = 2.08 \frac{A}{t_p} \quad (8)$$

Όπου A είναι η επιφάνεια απορροής σε km^2 .

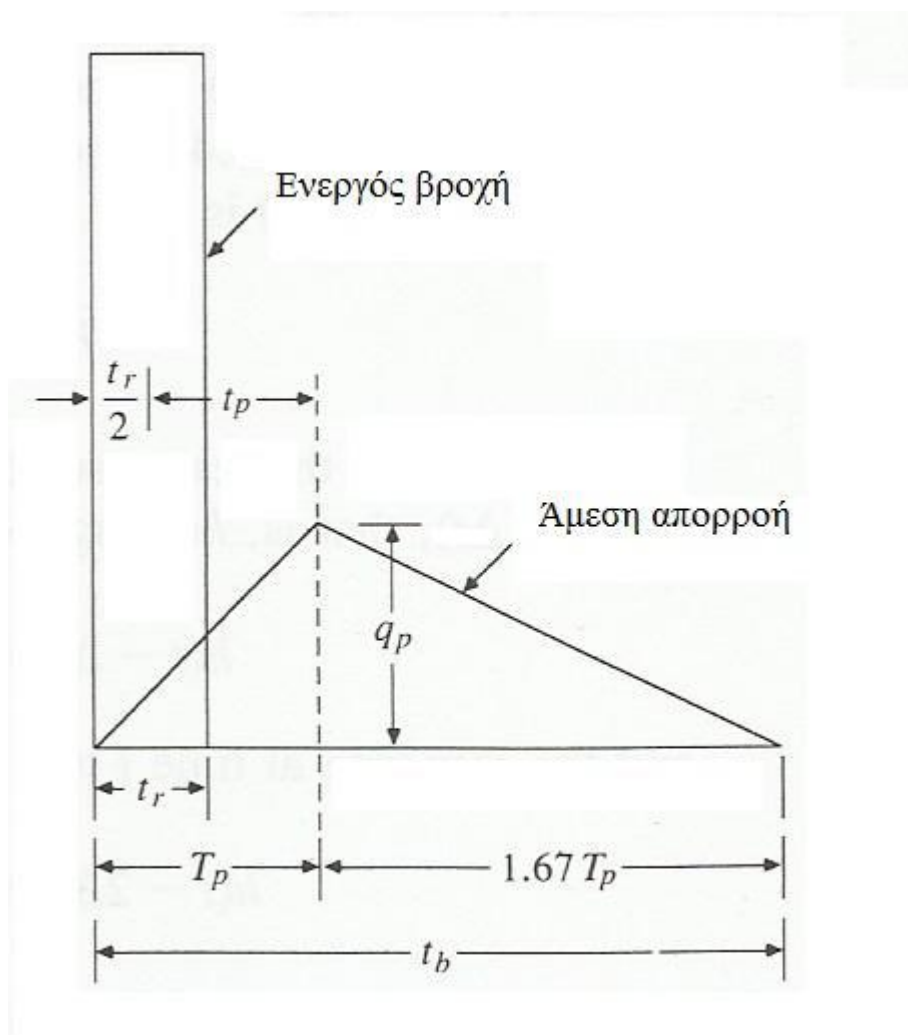
Επιπρόσθετα, μελέτη μοναδιαίων υδρογραφημάτων πολλών, μεγάλων και μικρών αγροτικών λεκανών απορροής, κατέδειξε ότι ο χρόνος υστέρησης μιας λεκάνης απορροής μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση:

$$t_p = 0.6t_c \quad (9)$$

Όπου t_c είναι ο χρόνος συγκέντρωσης στη λεκάνη απορροής.

Ο χρόνος ανύψωσης T_p μπορεί να εκφραστεί σε όρους υστέρησης t_r και διάρκειας της ενεργού βροχόπτωσης t_p :

$$t_p = \frac{t_r}{2} + t_p \quad (10)$$



Σχήμα 4.11 Το μοναδιαίο υδρογράφημα κατά SCS

Εκτίμηση παραμέτρων SCS και εισαγωγή τους στο HEC – HMS

Για τον υπολογισμό του χρόνου υστέρησης της λεκάνης, σύμφωνα με τη μέθοδο της SCS, απαιτείται πρώτα ο υπολογισμός του χρόνου συγκέντρωσης αυτής. Αυτός υπολογίζεται με χρήση της σχέσης της Soil Conservation Service (SCS), σύμφωνα με την οποία:

$$t_c = \frac{L^{1,15}}{7700H^{0,38}} \quad (11)$$

όπου : t_c = ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης (hr)

L = το μήκος του κυρίου υδατορέματος (ft)

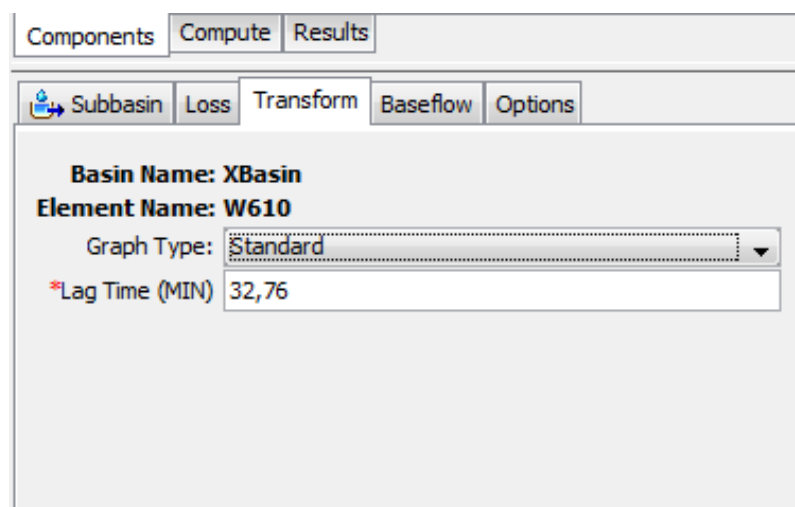
H = η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο πλέον απομακρυσμένο σημείο και στην έξοδο της λεκάνης (ft)

Έτσι, καταλήγουμε στα εξής:

Πίνακας 4.12 Αρχική εκτίμηση παραμέτρων μοντέλου άμεσης απορροής κατά SCS

Μοντέλο άμεσης απορροής κατά SCS	
Παράμετροι	Τιμές
L (ft)	26427,165
H (ft)	1831,083
t_c (hr)	0,91
t_p (min)	32,76

Ο χρόνος υστέρησης χρησιμοποιείται σαν είσοδος στο μοντέλο, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα:



Σχήμα 4.12 Εισαγωγή παραμέτρων μεθόδου SCS στο HEC-HMS

Μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Clark

Το μοντέλο του Clark παράγει ένα μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης, προσομοιώνοντας δύο κρίσιμες διαδικασίες του μετασχηματισμού της ενεργού βροχόπτωσης σε απορροή:

Κίνηση του πλεονάσματος της βροχόπτωσης από το σημείο που έπεσε προς την εκροή της λεκάνης

Εξασθένιση του μεγέθους της απορροής, καθώς το πλεόνασμα αποθηκεύεται κατά μήκος της λεκάνης

Η βραχυπρόθεσμη αποθήκευση του νερού κατά μήκος της διαδρομής που διανύει στη λεκάνη - στο έδαφος, την επιφάνεια και στα κανάλια αυτής - παίζει σημαντικό ρόλο στο μετασχηματισμό της ενεργούς βροχόπτωσης σε απορροή. Το μοντέλο της γραμμικής δεξαμενής είναι μια αναπαράσταση της συμπεριφοράς αυτής της αποθήκευσης.

Το μοντέλο ξεκινάει με την εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \quad (12)$$

όπου d_s/d_t είναι ο ρυθμός της υδατοαποθήκευσης τη στιγμή t , I_t η μέση εισροή στην υδατοαποθήκευση τη στιγμή t και O_t η εκροή από την υδατοαποθήκευση τη στιγμή t .

Με το μοντέλο της γραμμικής δεξαμενής, η αποθήκευσης τη χρονική στιγμή t σχετίζεται με την εκροή, μέσω της σχέσης:

$$S_t = RO_t \quad (13)$$

όπου R είναι μια σταθερή παράμετρος της γραμμικής δεξαμενής.

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

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \quad (14)$$

όπου C_A , C_B είναι οι συντελεστές διόδευσης. Οι συντελεστές αυτοί υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$C_A = \frac{\Delta_t}{R + 0,5\Delta_t} \quad (15)$$

$$C_B = 1 - C_A \quad (16)$$

Η μέση εκροή κατά την περίοδο t είναι:

$$\overline{O}_t = \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \quad (17)$$

Με τη χρήση του μοντέλου Clark, η γραμμική δεξαμενή ουσιαστικά αναπαριστά την επίδραση του συνόλου της αποθηκευτικής δυνατότητας της λεκάνης. Για το λόγο αυτό, μπορεί να θεωρηθεί πως βρίσκεται στην έξοδο της λεκάνης απορροής.

Επιπροσθέτως το μοντέλο Clark υπολογίζει το χρόνο που απαιτείται ώστε το νερό να φτάσει στην εκροή της λεκάνης. Αυτό το κάνει με ένα «γραμμικό μοντέλο καναλιού» (linear channel model), με βάση το οποίο το νερό «διοδεύεται» από απομακρυσμένα σημεία στην έξοδο με καθυστέρηση, αλλά χωρίς εξασθένηση. Αυτή η καθυστέρηση μπορεί να αναπαρασταθεί αναλυτικά με ένα, όπως ονομάζεται, «ιστόγραμμα χρόνου – χώρου» (time – area curve). Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται η έκταση της λεκάνης που συνεισφέρει στην απορροή της εξόδου, σε σχέση με το χρόνο. Εάν η έκταση πολλαπλασιαστεί με ύψος νερού ίσο με τη μονάδα και διαιρεθεί με το Δ_t , το βήμα υπολογισμού, το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι η εισροή, I_t στη γραμμική δεξαμενή.

Η επαναληπτική επίλυση των εξισώσεων 18 και 21, με ορισμένη την εισροή, δίνει τις τιμές του \overline{O}_t . Αν, όμως, οι τεταγμένες της εισροής στην εξίσωση 18 είναι εκροή από μια μονάδα ενεργούς βροχόπτωσης, οι τεταγμένες της εκροής είναι στην πραγματικότητα το μοναδιαίο υδρογράφημα (U_t).

Προσέγγιση στα πλαίσια του HEC - HMS

Το Κέντρο Τεχνικής Υδρολογίας του Σώματος Μηχανικού του Αμερικάνικου Στρατού (U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering), έπειτα από μακρόχρονη εμπειρία στη χρήση της μεθόδου Clark, κατέληξε στην υιοθέτηση μιας προσεγγιστικής μεθόδου εφαρμογής της και εξαγωγής του μοναδιαίου υδρογραφήματος.

Σύμφωνα λοιπόν με την προσέγγιση αυτή, η εφαρμογή του μοντέλου απαιτεί:

- Τις ιδιότητες του ιστογράμματος χώρου – χρόνου
- Το συντελεστή αποθηκευτικότητας R

Η χωρο – χρονική κατανομή, σύμφωνα με το HEC, για τις περισσότερες λεκάνες μπορεί να αναπαρασταθεί ικανοποιητικά με χρήση μιας ομαλής συνάρτησης, προσαρμοσμένης στην κατανομή αυτή. Αυτή η απλοποιημένη σχέση χώρου – χρόνου είναι:

$$\frac{A_t}{A} = \begin{cases} 1,414 \left(\frac{t}{t_c}\right)^{1,5}, & t \leq \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1,414 \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^{1,5}, & t \geq \frac{t_c}{2} \end{cases} \quad (18)$$

όπου A_t είναι η έκταση της λεκάνης που συνεισφέρει στην απορροή τη στιγμή t , A είναι η συνολική έκταση της λεκάνης και t_c ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης.

Για την εφαρμογή της εξίσωσης, μόνο η παράμετρος t_c , ο χρόνος συγκέντρωσης, είναι απαραίτητος. Αυτός μπορεί να υπολογιστεί με βαθμονόμηση ή με τις διαδικασίες που αναπτύχθηκαν στη μέθοδο MYG κατά SCS.

Ο συντελεστής αποθήκευτικότητας της λεκάνης, R (storage coefficient), είναι ένας δείκτης της χρονικής αποθήκευσης της ενεργού βροχόπτωσης στη λεκάνη, καθώς αυτή κινείται προς την έξοδο (απορρέει δηλαδή). Ο προσδιορισμός του πραγματοποιείται με βαθμονόμηση. Το R είναι σε μονάδες χρόνου, ωστόσο έχει μόνο σχετικό ποιοτικό νόημα, με τη φυσική έννοια. Ο Clark (1945) υπέδειξε πως το R μπορεί να υπολογιστεί ως η ροή, στο σημείο καμπής του καθοδικού κλάδου του υδρογραφήματος, διαιρεμένη με τη χρονική παράγωγο αυτής (HEC – HMS Technical Reference Manual, 2000).

Εκτίμηση των παραμέτρων Clark και εισαγωγή τους στο HEC – HMS

Για τον προσδιορισμό της παραμέτρου R της μεθόδου του MYG κατά Clark, συναντώνται στη βιβλιογραφία αρκετές εμπειρικές σχέσεις. Πολλές μελέτες έχουν επιδιώξει το συσχετισμό της παραμέτρου με φυσικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής και των ποταμών που τις διαρρέουν (Graf and others, 1982 – Melching and Marquardt, 1996 – Straub et al, 2000 κτλ). Άλλες έχουν εστιάσει στον προσδιορισμό της μέσω συσχέτισής της με μεγέθη παρατηρημένων υδρογραφημάτων από προηγούμενα επεισόδια βροχόπτωσης (Sabol, 1988 – Wilson, 1990).

Στον ελλαδικό χώρο, υπάρχει απουσία σχετικών μελετών για τον προσδιορισμό σχέσεων εκτίμησης της παραμέτρου. Απόπειρα που έγινε, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, για χρήση σχέσεων βασισμένων σε χαρακτηριστικά τοπογραφικά μεγέθη της λεκάνης και του ποταμού αυτής (Graf and others, 1982 – Straub, 2000) έδωσαν αποτελέσματα εξωπραγματικά για τα δεδομένα της περιοχής μελέτης.

Για το λόγο αυτό, ο αρχικός υπολογισμός πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μια εκτίμηση για το λόγο $R/(R + t_c)$ (λόγος ο οποίος εν γένει θεωρείται χαρακτηριστικός περιοχής και χρησιμοποιείται σαν δείκτης κατά τη χρήση του μοντέλου Clark) σε εύλογη τιμή. Συγκεκριμένα, η τιμή που εκτιμήθηκε είναι το 0,3, ενώ η τιμή του χρόνου συγκέντρωσης ελήφθη από τη μέθοδο της SCS. Έτσι υπολογίστηκαν:

Πίνακας 4.13 Αρχική εκτίμηση παραμέτρων μοντέλου άμεσης απορροής κατά Clark

Μοντέλο άμεσης απορροής κατά Clark	
Παράμετροι	Τιμές
L (ft)	26427,165
H (ft)	1831,083
t_c (hr)	0,91
R (hr)	0,39
$R/(R + t_c)$	0,3

Οι τιμές του χρόνου συγκέντρωσης και του συντελεστή αποθηκευτικότητας εισήχθησαν στο HMS ως προσδιοριστικοί παράμετροι της μεθόδου.

The screenshot shows the HEC-HMS software interface. At the top, there are tabs for 'Components', 'Compute', and 'Results'. Below these, there are sub-tabs for 'Subbasin', 'Loss', 'Transform', 'Baseflow', and 'Options'. The 'Subbasin' tab is active, showing the following information:

- Basin Name:** XBasin
- Element Name:** W610
- *Time of Concentration (HR):** 0,91
- *Storage Coefficient (HR):** 0,39

Σχήμα 4.13 Εισαγωγή παραμέτρων μεθόδου Clark στο HEC-HMS

4.2.7 Προσομοίωση βασικής απορροής

Η εκτίμηση της βασικής απορροής πραγματοποιήθηκε με βάση το μοντέλο της εκθετικής μείωσης (Exponential Recession Model). Η επιλογή αυτή έγινε λόγω κυρίως της μικρής απαίτησης της μεθόδου σε δεδομένα, μιας και στην περιοχή απουσιάζουν σχετικές με τη βασική απορροή μετρήσεις και μελέτες.

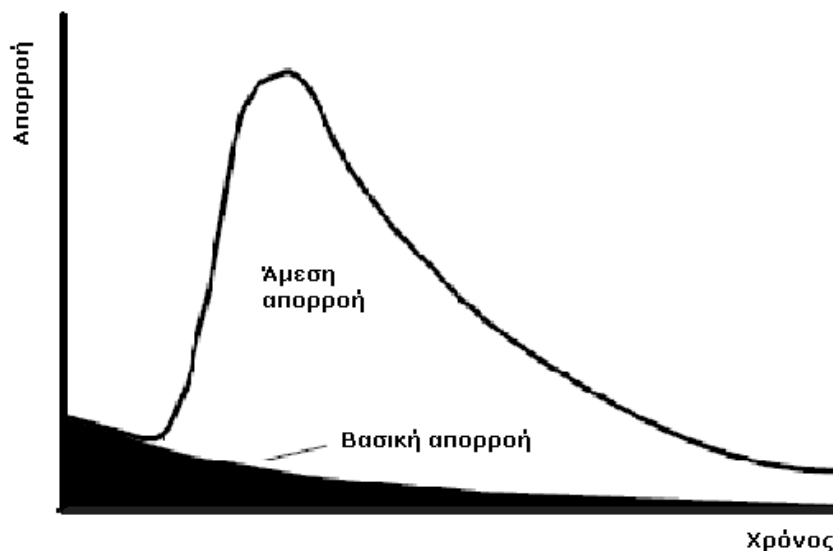
Μοντέλο εκθετικής μείωσης

Το μοντέλο εκθετικής μείωσης (Exponential Recession Model) έχει χρησιμοποιηθεί συχνά στο παρελθόν για να προσομοιώσει την παροχέτευση μιας λεκάνης από μια φυσική δεξαμενή (Linsley et al, 1982). Προσδιορίζει τη σχέση μεταξύ της Q_t , για κάθε χρονική στιγμή t , και της αρχικής τιμής της απορροής, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$Q_t = Q_0 k^t \quad (19)$$

Όπου Q_0 είναι η αρχική βασική ροή τη στιγμή μηδέν και k είναι μια σταθερά εκθετικής μείωσης.

Παράδειγμα βασικής απορροής υπολογισμένης με τη μέθοδο αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

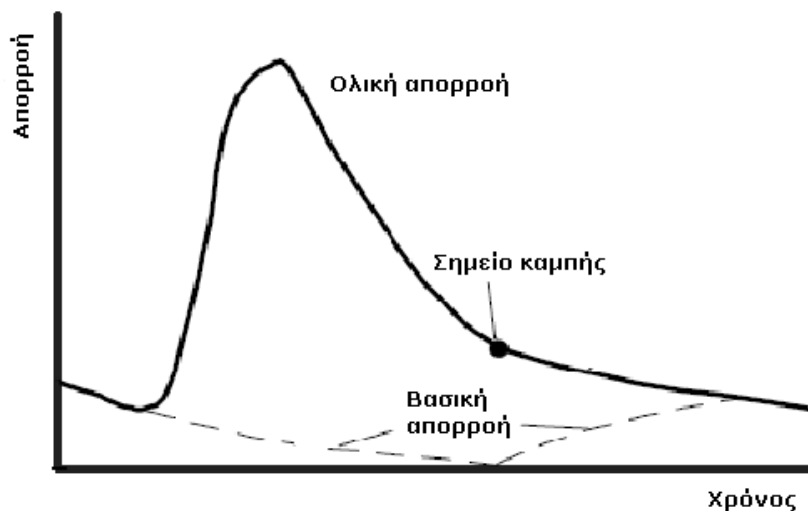


Σχήμα 4.14 Διαχωρισμός υδρογραφήματος σε άμεση και βασική απορροή – μείωση εκθετικά της αρχικής βασικής απορροής [Πηγή: Καψάλης, 2009]

Η σκιασμένη περιοχή αναπαριστά τη βασική απορροή: η συνεισφορά της μειώνεται εκθετικά από την αρχική της τιμή. Η συνολική απορροή είναι το άθροισμα της βασικής και της άμεσης απορροής.

Ο συντελεστής εκθετικής μείωσης k , ορίζεται ως ο λόγος της βασικής απορροής τη χρονική στιγμή t προς τη βασική απορροή μία μέρα πριν. Η αρχική τιμή Q_0 είναι η αρχική συνθήκη του μοντέλου. Μπορεί να οριστεί ως ρυθμός απορροής (m^3/s ή cfs) ή ως απορροή ανά μονάδα επιφάνειας ($m^3/s/km^2$ ή $cfs/sq\ mi$).

Το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην αρχή της προσομοίωσης ενός επεισοδίου βροχόπτωσης, όσο και στο τέλος αυτού, καθώς η υστερημένη υπόγεια ροή φτάνει στα κανάλια της λεκάνης, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 4.15 Μοντέλο βασικής απορροής με το πρότυπο εκθετικής μείωσης [Πηγή: Καψάλης, 2009]

Εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου εκθετικής μείωσης και εισαγωγή τους στο HEC – HMS

Οι τιμές που απαιτούνται ως εισόδου στο HEC – HMS είναι αυτές της αρχικής απορροής (initial discharge), της σταθεράς εκθετικής μείωσης (recession constant) καθώς και του λόγου της απορροής προς την αιχμή (ratio to peak). Αξίζει να σημειωθεί η μικρή συνεισφορά της βασικής απορροής στους πλημμυρικούς όγκους, ως συνιστώσα της απορροής.

Η πρώτη αδρή (απόντων λοιπών στοιχείων) εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου φαίνεται στον Πίνακα 4.14:

Πίνακας 4.14 Αρχική εκτίμηση παραμέτρων μοντέλου βασικής απορροής

Μοντέλο βασικής απορροής	
Παράμετροι	Τιμές
Αρχική Βασική Απορροή (m ³ /s)	0,09
Σταθερά εκθετικής Μείωσης	0,5
Λόγος Απορροής προς Αιχμή	0,05

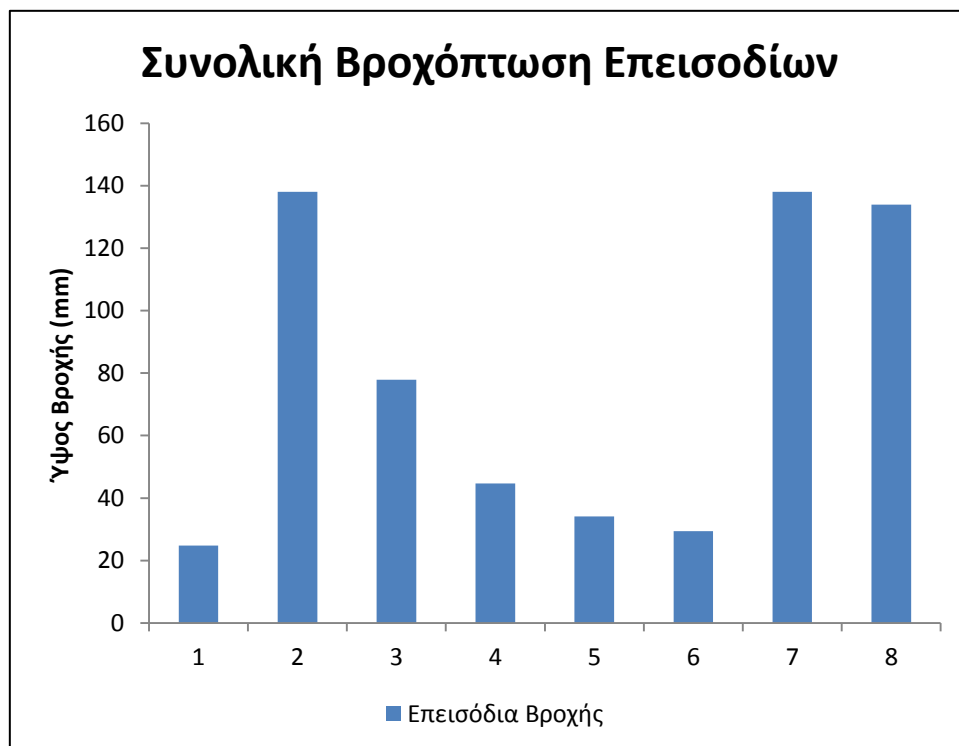
The screenshot shows the 'Baseflow' configuration window in HEC-HMS. The window title is 'Basin Name: XBasin' and 'Element Name: W610'. The 'Initial Type' is set to 'Discharge'. The '*Initial Discharge (M3/S)' is 0,09. The '*Recession Constant' is 0,5. The 'Threshold Type' is set to 'Ratio To Peak'. The '*Ratio' is 0,05. The interface includes tabs for 'Components', 'Compute', and 'Results' at the top, and sub-tabs for 'Subbasin', 'Loss', 'Transform', 'Baseflow', and 'Options' below.

Σχήμα 4.16 Εισαγωγή παραμέτρων μοντέλου βασικής απορροής στο HEC-HMS

Κεφάλαιο 5. Βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου

Για την πραγματοποίηση της διαδικασίας βαθμονόμησης – επαλήθευσης (Calibration – Validation) του υδρολογικού μοντέλου της Πειραματικής λεκάνης, έγινε χρήση συνολικά 8 μεγάλων επεισοδίων βροχόπτωσης. Τα 5 χρησιμοποιήθηκαν κατά τη βαθμονόμηση και τα 3 κατά την επαλήθευση.

Το διάστημα στο οποίο αναζητήθηκαν και επιλέχθηκαν τα επεισόδια είναι μεταξύ των ετών 2010 – 2013. Συγκεκριμένα, ως χρονική αφετηρία καθορίστηκε ο Νοέμβριος του 2010, μήνας κατά τον οποίο ο σταθμός Ντράφι μετακινήθηκε στην παρούσα του θέση (και κατ' επέκταση διαμορφώθηκε η Πειραματική Λεκάνη στη σημερινή της μορφή) αλλά και περίοδος μεταγενέστερη της μεγάλης πυρκαγιάς που έπληξε την περιοχή μελέτης (Αύγουστος 2009). Κατά τη διαδικασία επιλογής, αποκλείστηκαν επεισόδια μη συνεχόμενα, που περιλάμβαναν κλάδους βροχής με σημαντική χρονική παύση μεταξύ τους. Τα συνολικά ύψη βροχής των επεισοδίων, ανηγμένα επιφανειακά μέσω της μεθόδου Thiessen παρουσιάζονται στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 5.1). Επισημαίνεται πως τα επεισόδια κατατάσσονται, για λόγους ευκολίας, με χρήση αύξοντα αριθμού ανάλογα με τη χρονική σειρά που έλαβαν χώρα.



Σχήμα 5.1 Συνολικά ύψη βροχής χρησιμοποιηθέντων επεισοδίων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα επιλεγμένα αυτά επεισόδια βροχής και πραγματοποιείται η υδρολογική προσομοίωση στο HEC – HMS, με βάση τις αρχικώς εκτιμώμενες, από το Κεφάλαιο 4, τιμές των διαφόρων παραμέτρων. Ακολουθεί η βελτιστοποίηση του μοντέλου για καθένα γεγονός, με την εξαγωγή των μέσων τιμών των παραμέτρων (Calibration) και τέλος πραγματοποιείται η επαλήθευση.

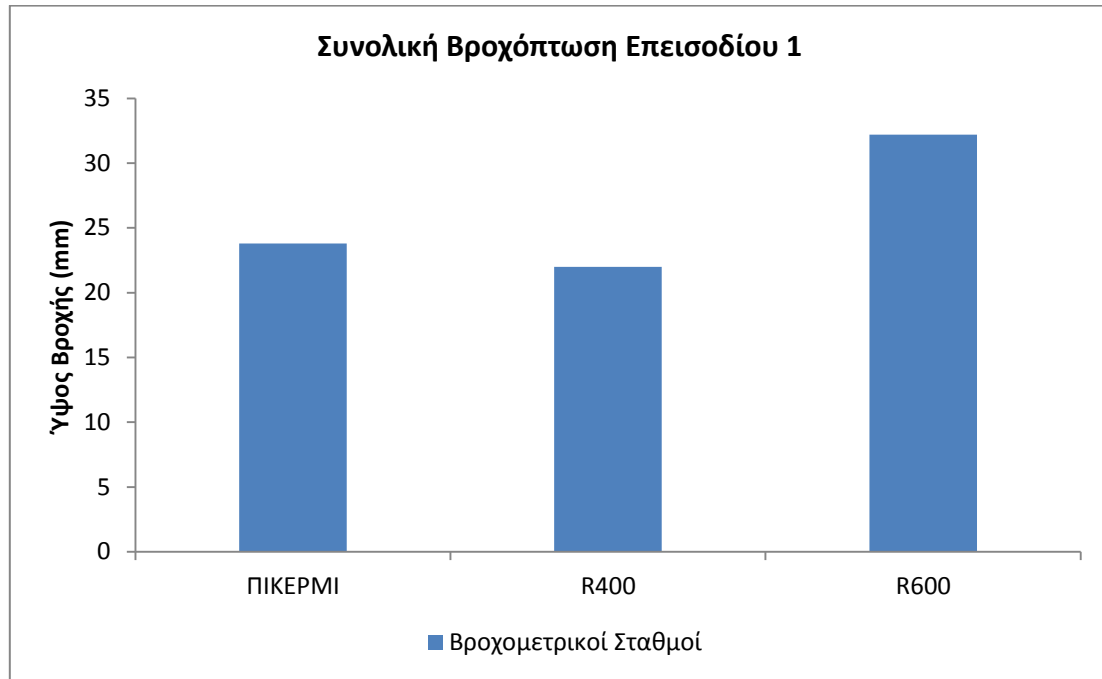
Πρέπει να αναφερθεί πως όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται με χρήση και των τριών προαναφερθέντων μεθόδων άμεσης απορροής (Snyder, SCS, Clark), τα εξαγόμενα εκ των οποίων διαγράμματα παρουσιάζονται σε κοινούς άξονες (για λόγους καλύτερης εποπτείας και σύγκρισής τους), για κάθε διαφορετική προσομοίωση.

5.1 Αρχικές εκτιμήσεις

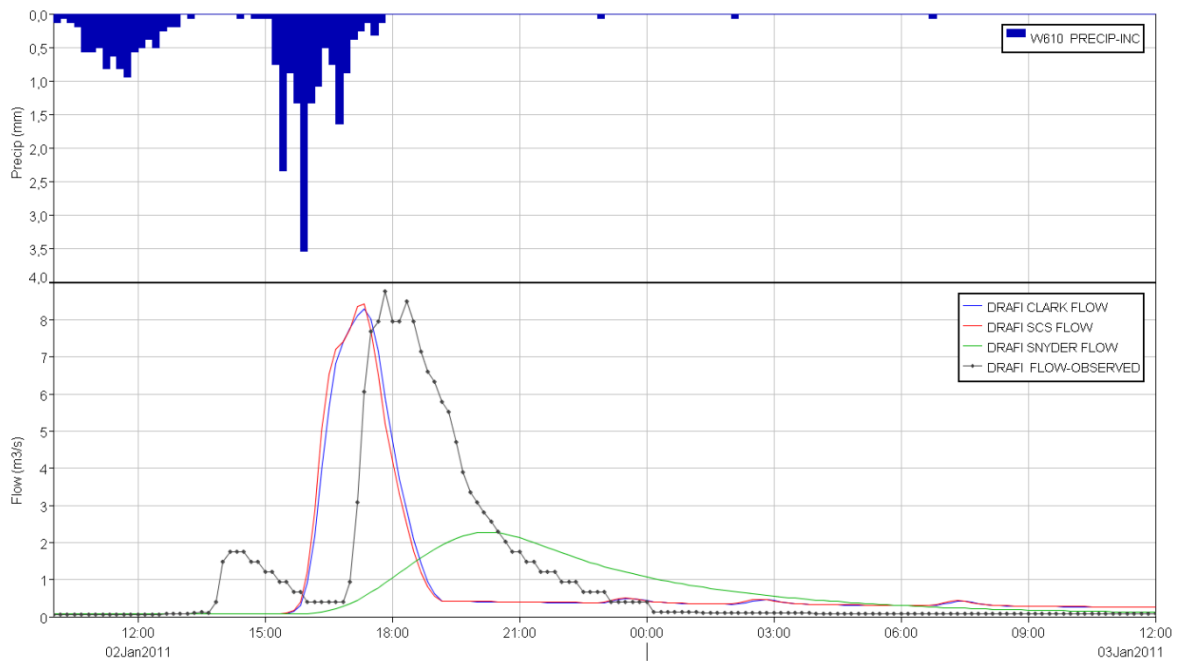
Στην παράγραφο αυτή πραγματοποιείται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά το αρχικό στάδιο της προεκτίμησης για τα υπό μελέτη οκτώ επεισόδια. Για κάθε επεισόδιο καταγράφεται το συνολικό ύψος βροχής σε καθένα από τους τρεις βροχομετρικούς σταθμούς που λήφθηκαν υπόψη για την ανάλυση. Στη συνέχεια απεικονίζονται τα αντίστοιχα υδρογραφήματα για τις τρεις μεθόδους Snyder, SCS και Clark με πράσινη, κόκκινη και μπλε καμπύλη, αντιστοίχως.

5.1.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

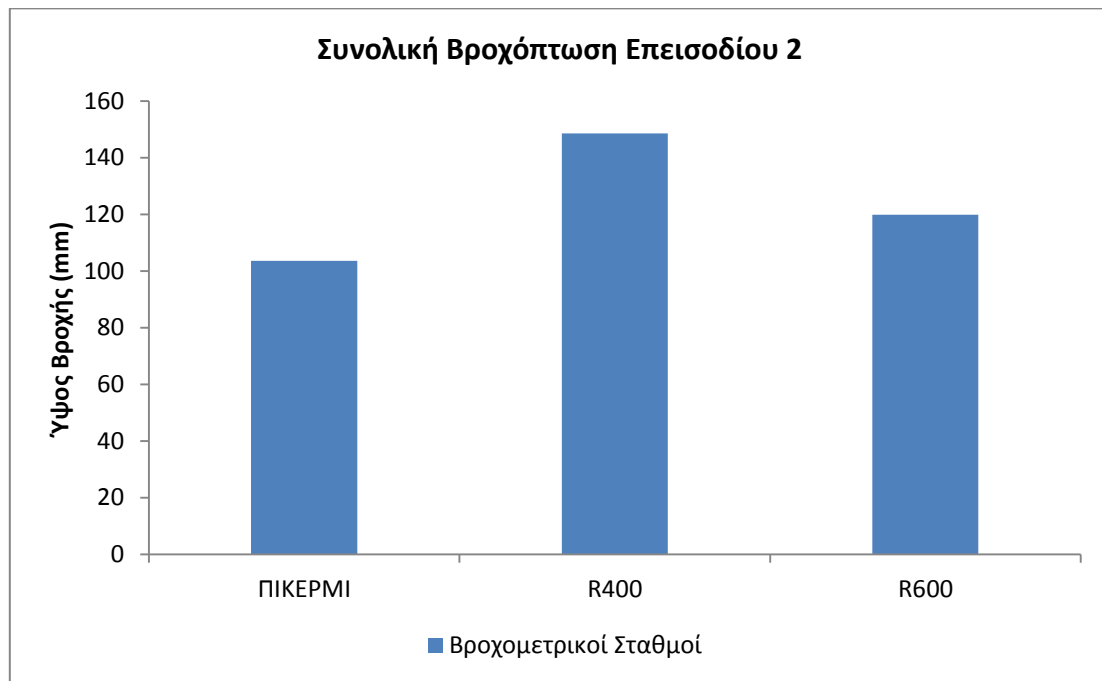
Επεισόδιο 1 – 02/01/2011



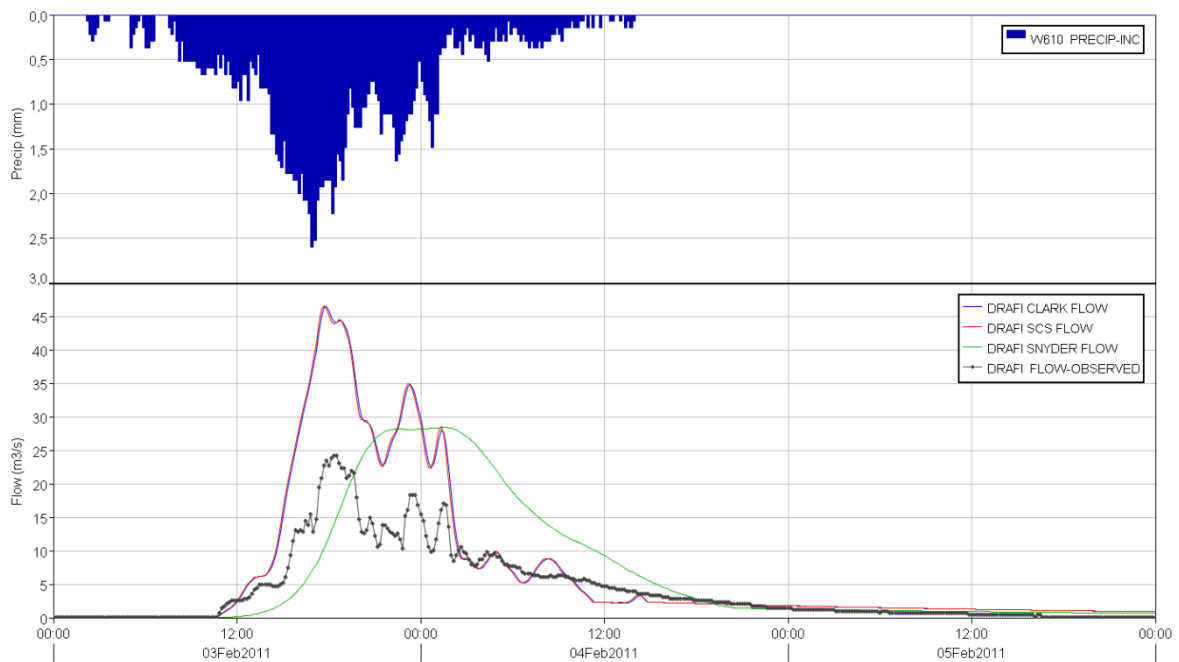
Σχήμα 5.2 Καταγεγραμμένα συνολικά ύψη βροχής, ανά βροχογράφο, επεισοδίου 1



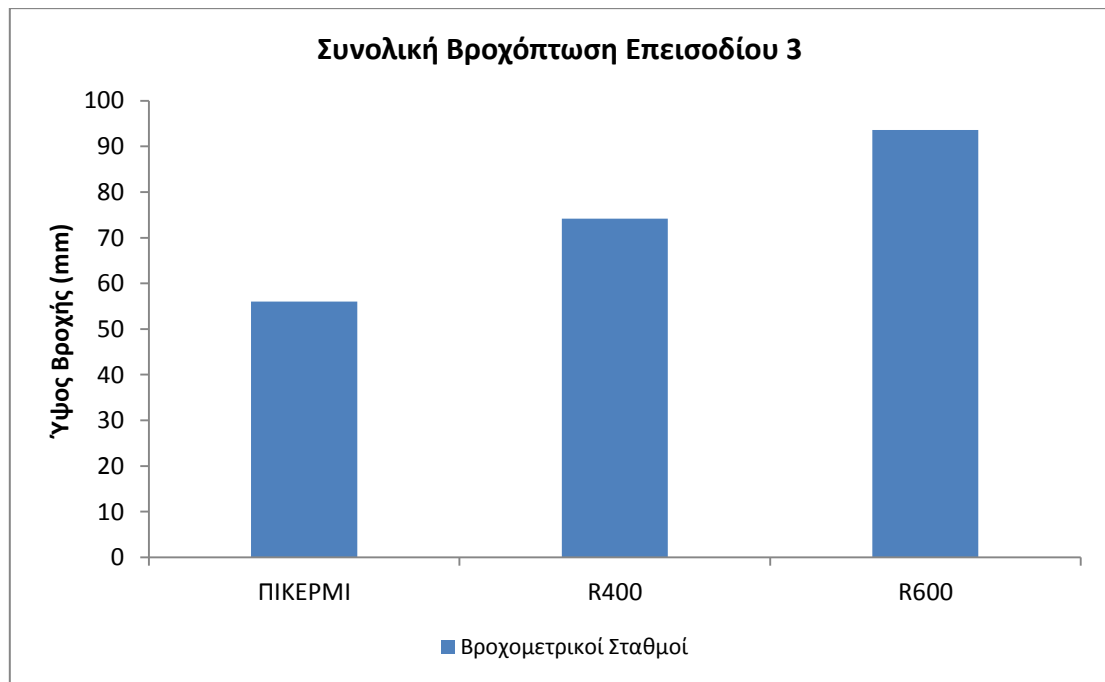
Σχήμα 5.3 Υδρογραφήματα εξόδου επεισοδίου 1



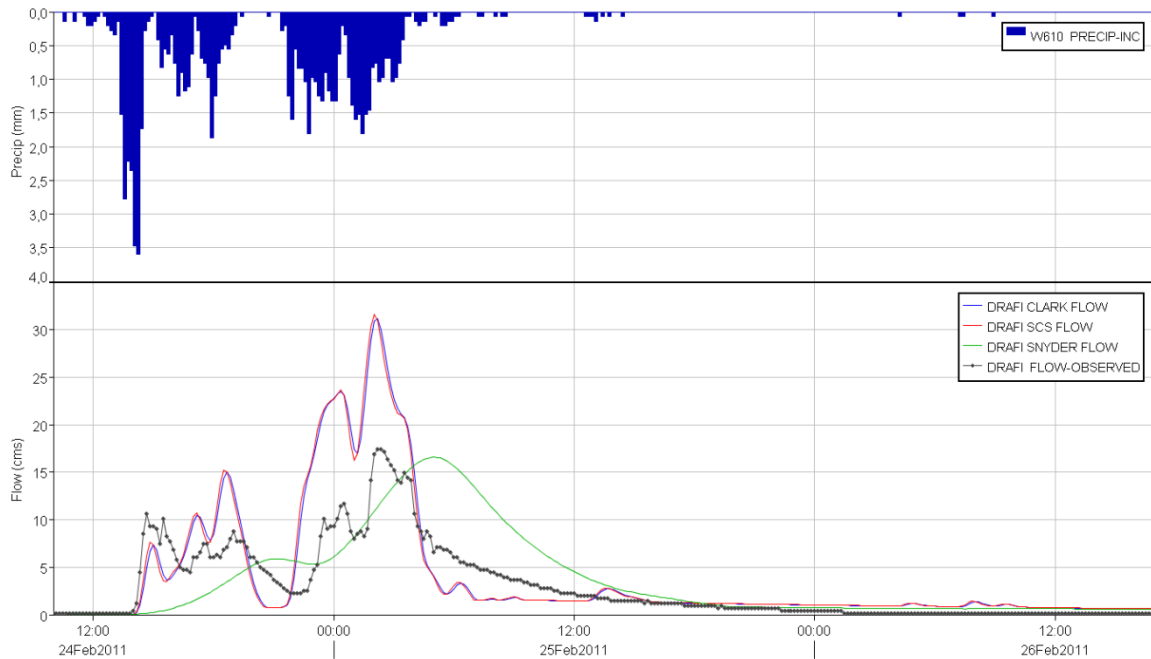
Σχήμα 5.4 Καταγεγραμμένα συνολικά ύψη βροχής, ανά βροχογράφο, επεισοδίου 2



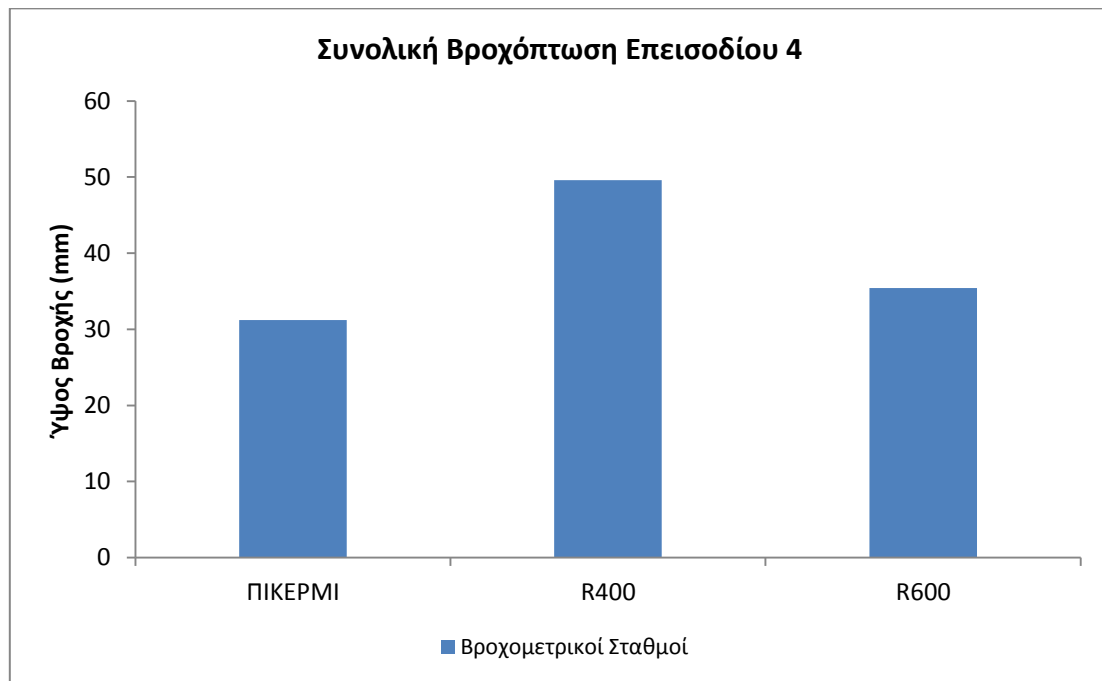
Σχήμα 5.5 Υδρογραφήματα εξόδου επεισοδίου 2



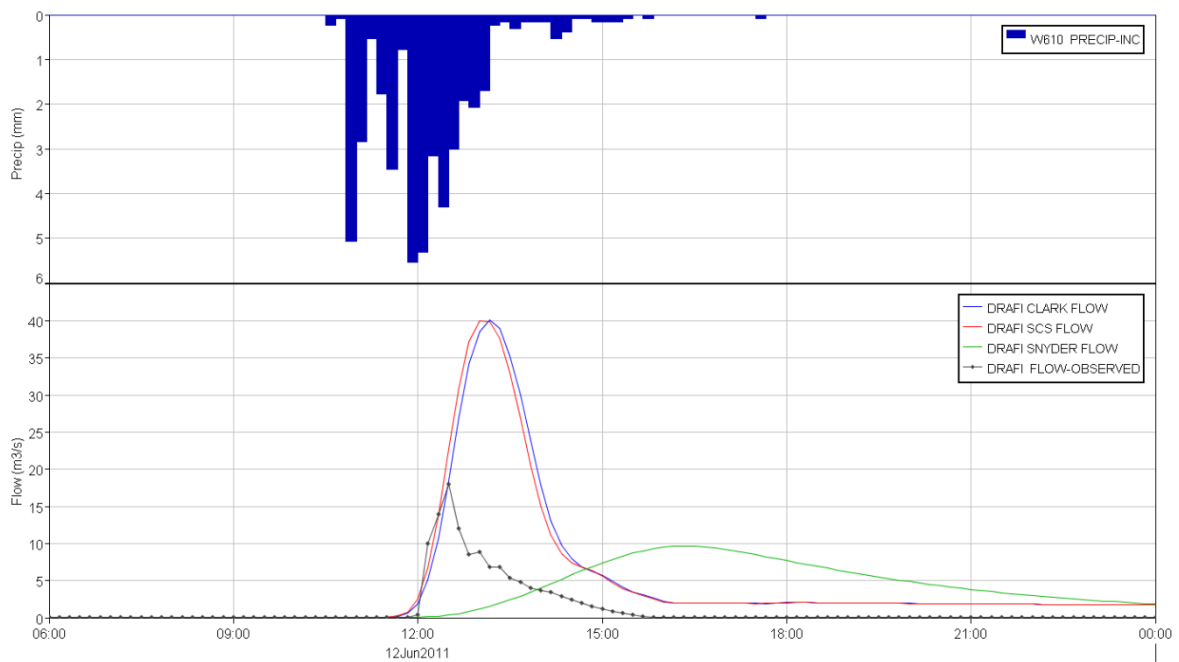
Σχήμα 5.6 Καταγεγραμμένα συνολικά ύψη βροχής, ανά βροχογράφο, επεισοδίου 3



Σχήμα 5.7 Υδρογραφήματα εξόδου επεισοδίου 3

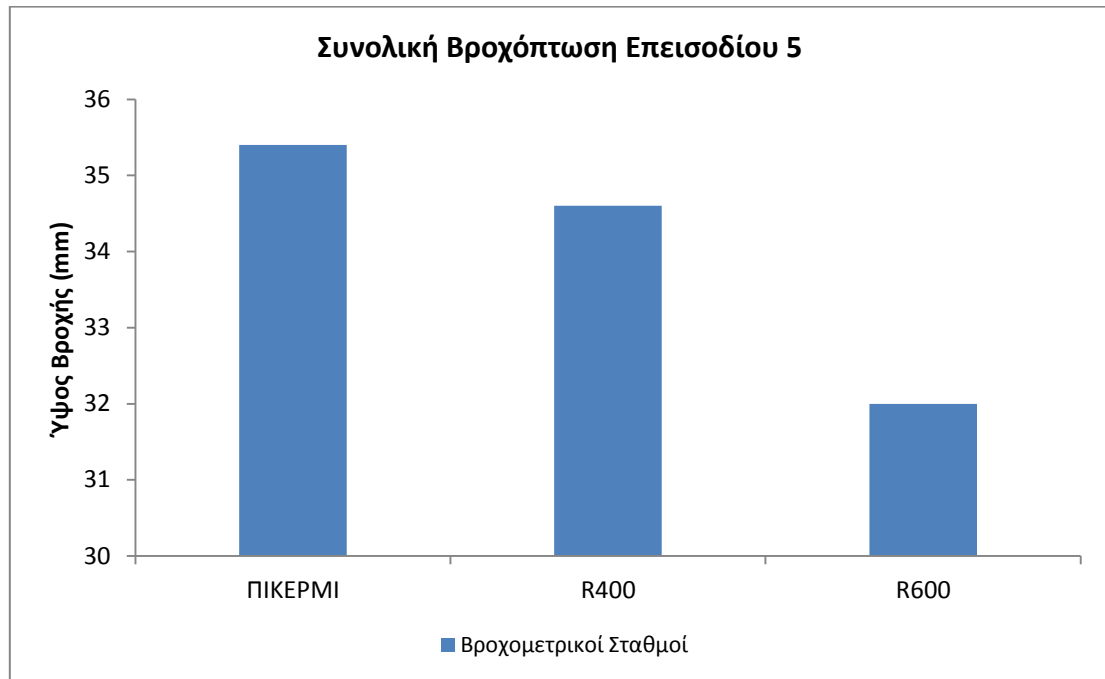


Σχήμα 5.8 Καταγεγραμμένα συνολικά ύψη βροχής, ανά βροχογράφο, επεισοδίου 4

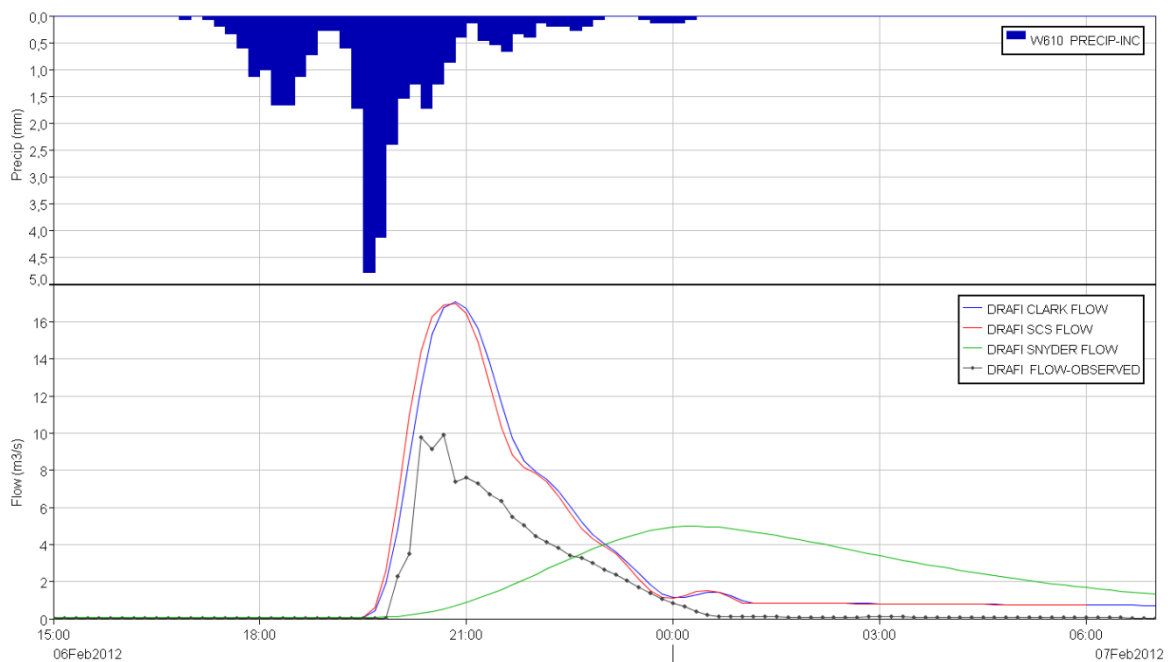


Σχήμα 5.9 Υδρογραφήματα εξόδου επεισοδίου 4

Επεισόδιο 5 – (06-07)/02/2012

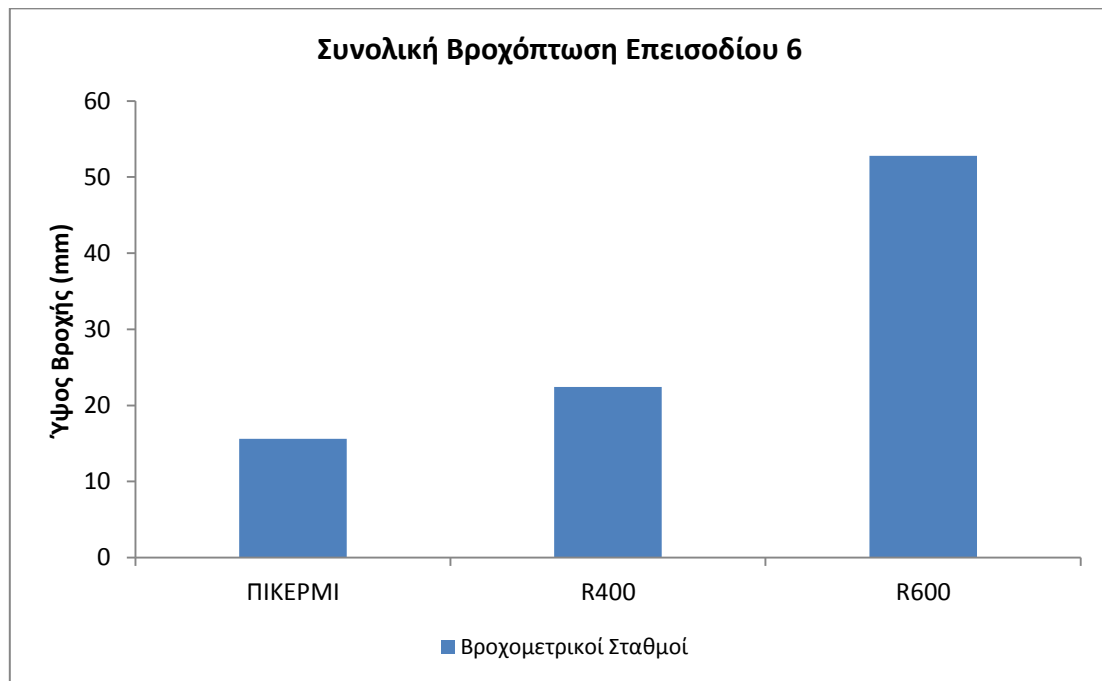


Σχήμα 5.10 Καταγεγραμμένα συνολικά ύψη βροχής, ανά βροχογράφο, επεισοδίου 5

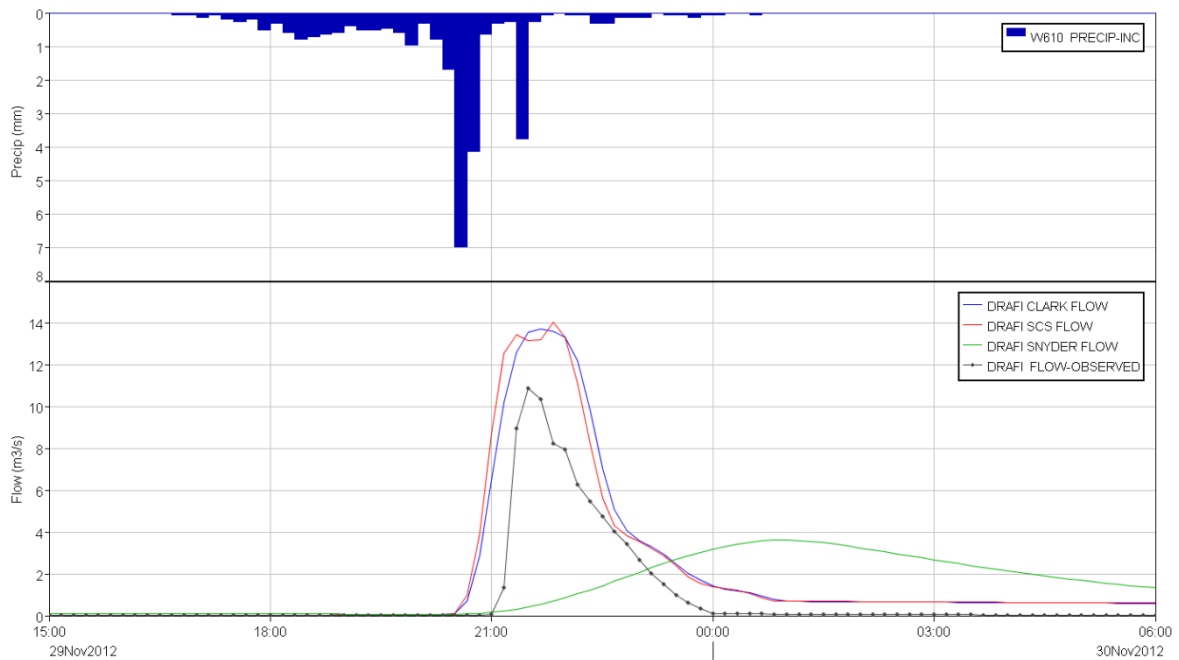


Σχήμα 5.11 Υδρογραφήματα εξόδου επεισοδίου 5

Επεισόδιο 6 – (29-30)/11/2012

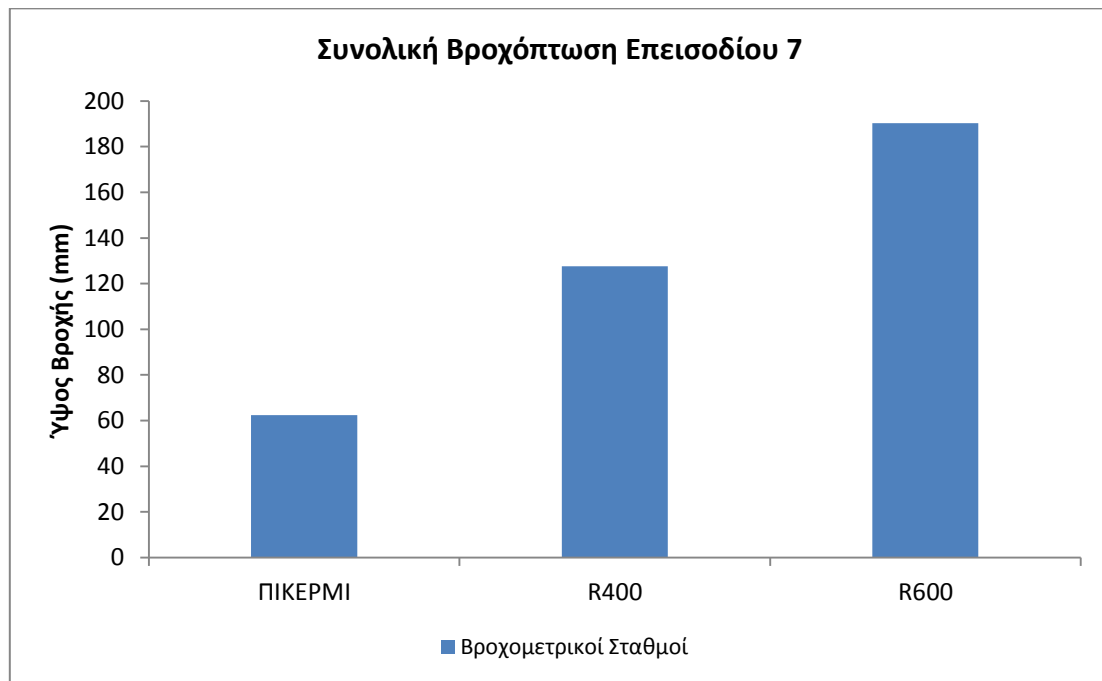


Σχήμα 5.12 Καταγεγραμμένα συνολικά ύψη βροχής, ανά βροχογράφο, επεισοδίου 6

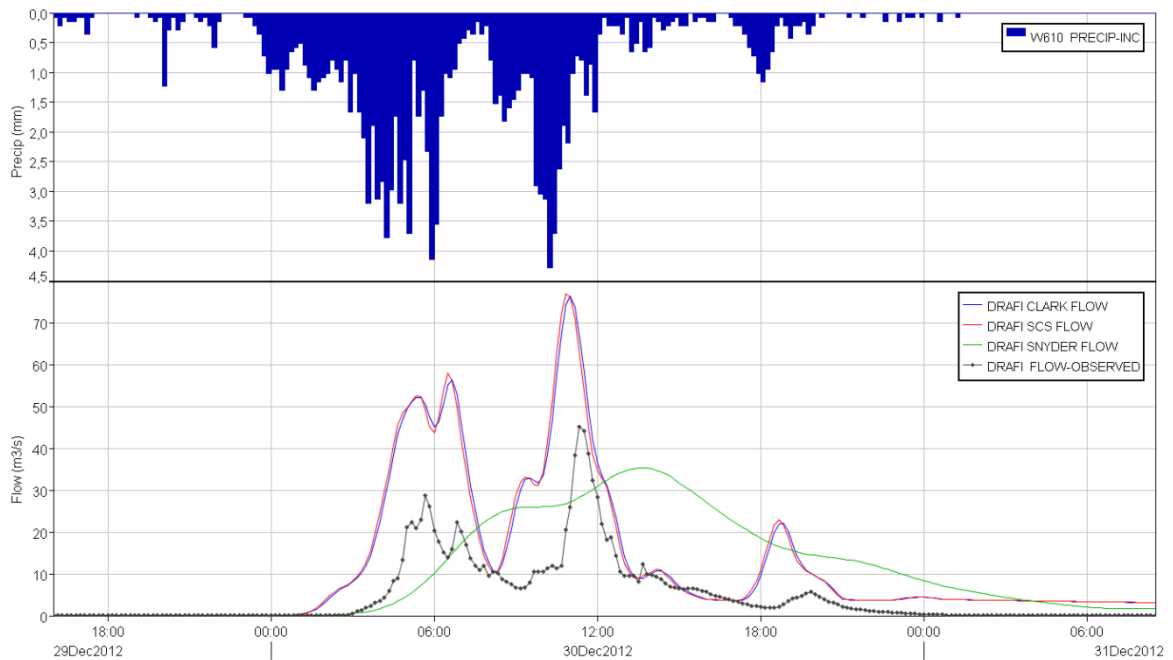


Σχήμα 5.13 Υδρογραφήματα εξόδου επεισοδίου 6

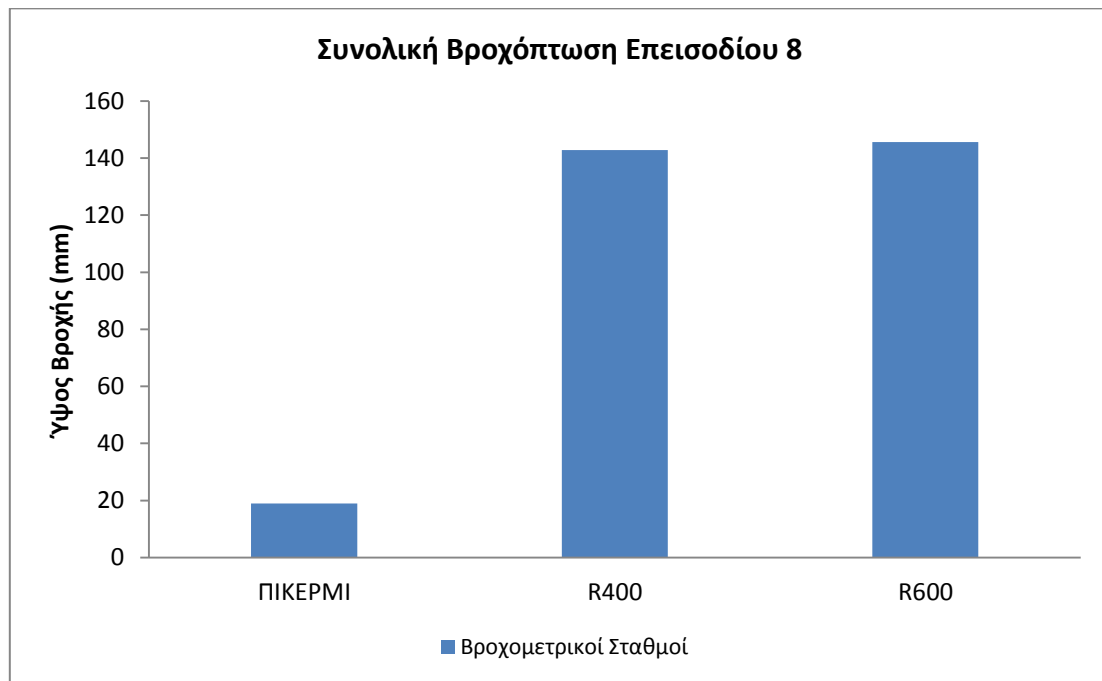
Επεισόδιο 7 – (29-31)/12/2012



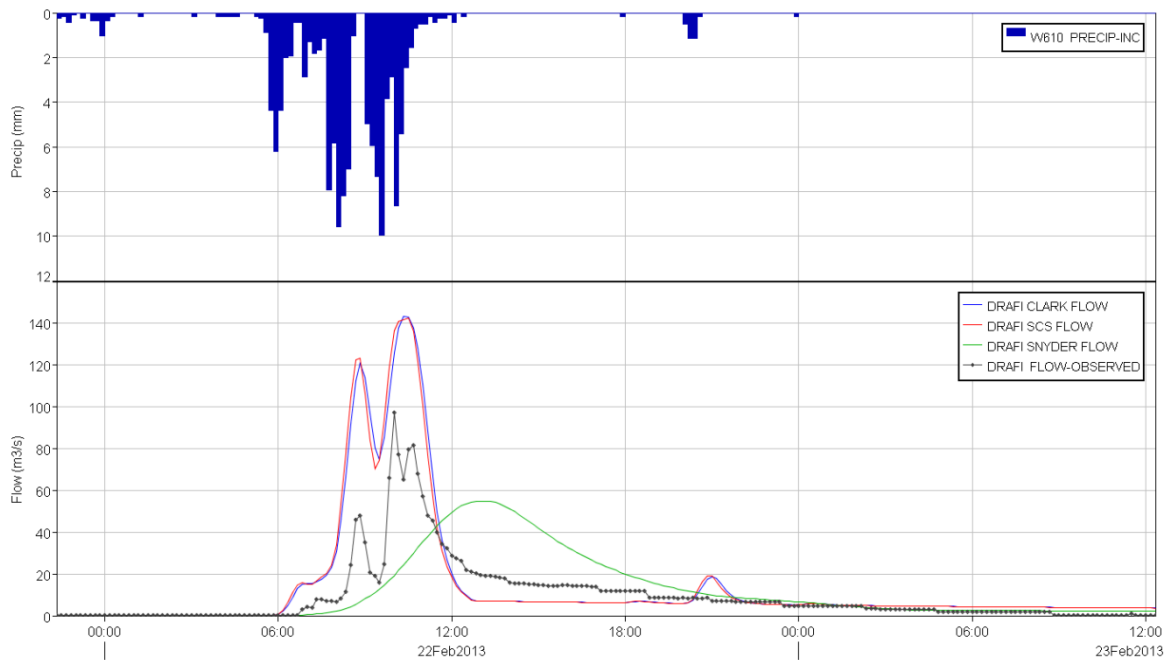
Σχήμα 5.14 Καταγεγραμμένα συνολικά ύψη βροχής, ανά βροχογράφο, επεισοδίου 7



Σχήμα 5.15 Υδρογραφήματα εξόδου επεισοδίου 7



Σχήμα 5.16 Καταγεγραμμένα συνολικά ύψη βροχής, ανά βροχογράφο, επεισοδίου 8



Σχήμα 5.17 Υδρογραφήματα εξόδου επεισοδίου 8

5.1.2 Σχολισμός επί των αρχικών αποτελεσμάτων

Συγκρίνοντας τις παρατηρημένες με τις προσομοιωμένες καμπύλες απορροής, γίνονται αντιληπτά τα μεγάλα σφάλματα που ενέχει η προεκτίμηση των παραμέτρων που έλαβε χώρα. Οι παράμετροι της χρησιμοποιηθείσας μεθόδου εκτίμησης απωλειών (αρχικές απώλειες και αριθμός καμπύλης), όπως αυτές εξήχθησαν μέσω της χρήσης χαρτών κάλυψης γης και γεωλογικών σχηματισμών, απέχουν πολύ από την πραγματικότητα. Οι προσομοιωμένες καμπύλες βρίσκονται σε όλα τα επεισόδια (πλην του πρώτου) αρκετά ψηλότερα από τις παρατηρημένες, δίνοντας μεγάλες υπερεκτιμήσεις στους πλημμυρικούς όγκους και στις αιχμές. Εξάιρεση, βέβαια, αποτελεί η υπολογισμένη με τη μέθοδο Snyder καμπύλη, στην οποία ωστόσο, το μεγάλο σφάλμα που παρατηρείται στη θεώρηση του χρόνου υστέρησης (το προσομοιωμένο πλημμυρογράφημα είναι σε όλα τα επεισόδια υστερημένο σε σχέση με την παρατηρημένο ενώ είναι και πολύ πιο «ανοιχτό», από άποψη μορφής) δεν επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με τις απώλειες. Καταλήγουμε, λοιπόν, πως η εκτιμώμενη τιμή του 83 για τον αριθμό καμπύλης είναι μάλλον ιδιαίτερα υψηλή, ενώ μένει να ελεγχθούν και οι αρχικές απώλειες, οι οποίες υπολογίστηκαν μέσω της εκτίμησης του λόγου I_a/S ως 0,2.

Αναφορικά με τα αίτια του σφάλματος, αυτό μπορεί να αποδοθεί πιθανότατα στους αδρούς γεωλογικούς χάρτες που χρησιμοποιήθηκαν και στην αδυναμία αυτών να αποδώσουν λεπτομερώς τις γεωλογικές εμφανίσεις και συνθήκες της περιοχής. Το γεγονός αυτό και σε συνδυασμό με την απουσία στοιχείων σχετικών με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των εδαφών της περιοχής μελέτης, οδήγησε σε αρκετά επισφαλή εκτίμηση των ομάδων υδατοπερατότητας και κατ' επέκταση και των αριθμών καμπύλης (CN). Από την άλλη, τα στοιχεία χρήσεων γης, μιας και είναι αρκετά πρόσφατα (του 2007), μπορούν να θεωρηθούν ως αξιόπιστα.

Συγκρίνοντας τις μορφές των τριών καμπυλών προσομοίωσης, παρατηρείται πως υπάρχει μεγάλη σύγκλιση (αν όχι ταύτιση) των υπολογισμένων με τη χρήση των μοναδιαίων υδρογραφημάτων κατά SCS και κατά Clark, σε όλα τα επεισόδια. Η παρατήρηση αυτή, αποτελεί ένδειξη πως η συσχέτιση μεταξύ των χρόνων συγκέντρωσης και υστέρησης της λεκάνης που χρησιμοποιήθηκε ($t_p = 0,6t_c$)¹, όπως αυτή έχει προκύψει ύστερα από μελέτες της Soil Conservation Service, είναι επιτυχής. Επιπρόσθετα, η ικανοποιητική, σχετικά,

¹ Υπενθυμίζεται πως στο μοναδιαίο υδρογράφημα κατά SCS λαμβάνεται σαν παράμετρος εκτίμησης ο χρόνος υστέρησης της λεκάνης, ο οποίος, σύμφωνα με τη μεθοδολογία της SCS, εκτιμάται ως το 60% του χρόνου συγκέντρωσης. Αντίθετα, στη μέθοδο Clark λαμβάνεται ο χρόνος συγκέντρωσης. Έτσι, η σχετική θέση των δύο καμπυλών αποτελεί κριτήριο επιτυχίας της εκτίμησης αυτής.

προσομοίωση της χρονικής κατανομής των παρατηρημένων πλημμυρικών επεισοδίων μέσω των καμπυλών αυτών φανερώνει και τη μάλλον επίσης ρεαλιστική εκτίμηση των χρονικών παραμέτρων τους (από άποψη μεγέθους). Οι παρατηρήσεις αυτές βέβαια, προκύπτουν από τις χρονικές συσχετίσεις των καμπυλών και μόνο. Μιας και οι παράμετροι του χρόνου υπεισέρχονται και στα μεγέθη της απορροής, κρίθηκε σκόπιμη η εξαγωγή πιο ασφαλών συμπερασμάτων ύστερα και από τις διαδικασίες της βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου. Στο στάδιο αυτό παρατίθενται μόνο γενικές επισημάνσεις.

Αναφορικά, τώρα, με την προκύπτουσα μέσω της μεθόδου Snyder καμπύλη, αυτή δεν προσεγγίζει ούτε ελάχιστα ικανοποιητικά τα παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα, ενώ είναι και σε πλήρη αναντιστοιχία με τις υπόλοιπες δύο μεθόδους. Τα αίτια αυτών των αποκλίσεων, πέρα από την προαναφερθείσα αποτυχία του μοντέλου απωλειών, πρέπει να αναζητηθούν κυρίως στον τρόπο υπολογισμού του χρόνου υστέρησης. Πράγματι, η τιμή $t_p = 3,989 \text{ hr}$ είναι αφύσικα υψηλή για τα δεδομένα της λεκάνης, αλλά και σε σύγκριση με την αντίστοιχη τιμή του χρόνου υστέρησης που υπολογίστηκε με τη μεθοδολογία κατά SCS ($t_p = 32,76 \text{ min} \cong 0,55 \text{ hr}$). Δεν πρέπει να ξεχνάμε, στο σημείο αυτό, πως οι χρησιμοποιηθείσες σχέσεις έχουν εξαχθεί από μελέτες σε λεκάνες απορροής με τελείως διαφορετικά μορφολογικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά από τη δικιά μας, πράγμα το οποίο μπορεί να οδηγήσει -όπως συμβαίνει στην προκείμενη περίπτωση- σε μεγάλες αποκλίσεις.

Η βασική απορροή, τέλος, είναι ένα μέγεθος με έντονη μεταβλητότητα ανά περίοδο του έτους, αλλά ορισμένες φορές ακόμα και ανά ημέρα. Στην περίπτωση του ρέματος της Πειραματικής Λεκάνης δε, υπάρχουν ημέρες κατά το θέρος (όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω) οπότε λαμβάνει χώρα ακόμα και μηδενισμός της ροής. Για το λόγο αυτό, δεν αναμένεται και στα οκτώ προσομοιωμένα επεισόδια οι χρησιμοποιηθείσες παράμετροι να παραμένουν σταθερές. Παρά ταύτα, σαν τάξη μεγέθους, οι αρχικές εκτιμήσεις μπορούν να χαρακτηριστούν ως εύστοχες. Αυτό ουσιαστικά είναι και το ζητούμενο από το συνυπολογισμό της βασικής απορροής στην κατάρτιση του συνολικού μοντέλου της περιοχής και όχι ο επακριβής και καθολικός υπολογισμός της, που είναι αδύνατος.

Λαμβάνοντας, λοιπόν, όλες αυτές τις παρατηρήσεις υπόψη, μπορούμε να προχωρήσουμε στη διαδικασία της βαθμονόμησης του μοντέλου, όπου και θα μπορούν να εξαχθούν πιο στέρεα και αξιόπιστα συμπεράσματα.

5.2 Βαθμονόμηση μοντέλου

5.2.1 Γενικά περί βαθμονόμησης

Ο όρος βαθμονόμηση προέρχεται από τις στατιστικές επιστήμες και υποδηλώνει μια συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου, έτσι ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του να προσεγγίζουν όσο το δυνατό περισσότερο τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές (Μαμάσης, 2009).

Για τον έλεγχο της προσαρμογής αυτής και την ποσοτικοποίηση των αποκλίσεων που παρατηρούνται μεταξύ παρατηρημένων και προσομοιωμένων υδρογραφημάτων, στην παρούσα εργασία υιοθετήθηκε η χρήση τεσσάρων κριτηρίων αποτελεσματικότητας της βαθμονόμησης. Με τον τρόπο αυτό, τα κύρια μεγέθη τα οποία ενδιαφέρουν καθίστανται άμεσα και με αντικειμενικό τρόπο συγκρίσιμα, ενώ παράλληλα παρέχεται η δυνατότητα για πιο ασφαλή και στοχευμένα συμπεράσματα επί των αποτελεσμάτων.

Τα κριτήρια αυτά είναι τα εξής:

Δείκτης Nash – Sutcliffe (Efficiency Index - E_f)

Ο δείκτης αυτός ελέγχει τη συνολική προσαρμογή της καμπύλης προσομοίωσης σε αυτή της παρατηρημένης, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορές αυτών στα διάφορα σημεία, καθ' όλο το μήκος τους. Ορίζεται ως:

$$E_f = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (20)$$

όπου:

x_i = η παρατηρημένη χρονοσειρά απορροής

\bar{x} = η μέση τιμή της

y_i = η προσομοιωμένη χρονοσειρά απορροής στον υπό εξέταση χρονικό ορίζοντα ελέγχου

Ο συντελεστής προσδιορισμού λαμβάνει τιμές από $-\infty$ έως 1. Αν $E_f = 1$ υπάρχει απόλυτη ταύτιση της παρατηρημένης με την προσομοιωμένη χρονοσειρά. Εφόσον $E_f < 0$ η προσαρμογή του μοντέλου θεωρείται πολύ κακή, καθώς η προσομοιωμένη χρονοσειρά είναι χειρότερη εκτιμήτρια σε σχέση με τη μέση παρατηρημένη \bar{x} (Μαμάσης, 2009).

Δείκτης PEV (percent error in volume)

Ορίζεται ως το επί τοις εκατό σφάλμα του συνολικού όγκου.

$$PEV = 100 \left| \frac{V_O - V_M}{V_O} \right| \quad (21)$$

Όπου: V_O και V_M είναι οι συνολικοί όγκοι του παρατηρημένου και προσομοιωμένου υδρογραφήματος αντίστοιχα.

Δείκτης PEPF (percent error in peak flow)

Ορίζεται ως το επί τοις εκατό σφάλμα της παροχής αιχμής, χωρίς να περιλαμβάνει κάποια χρονική συσχέτιση μεταξύ της παρατηρημένης και της προσομοιωμένης αιχμής.

$$PEPF = 100 \left| \frac{Q_{O(PEAK)} - Q_{M(PEAK)}}{Q_{O(PEAK)}} \right| \quad (22)$$

Όπου: $Q_{O(PEAK)}$ και $Q_{M(PEAK)}$ είναι οι παροχές αιχμής του παρατηρημένου και του προσομοιωμένου υδρογραφήματος αντίστοιχα.

Διαφορά ΔT_{PF}

Ορίζεται ως η απόλυτη χρονική διαφορά, εκφρασμένη σε λεπτά (min), μεταξύ της παρατηρημένης και προσομοιωμένης παροχής αιχμής.

5.2.2 Διαδικασία βαθμονόμησης

Η μέθοδος βαθμονόμησης που ακολουθήθηκε είναι, κατά βάση, αυτή της εμπειρικής βαθμονόμησης. Η μέθοδος αυτή, δεν αποτελεί μια αυστηρή συστηματική διαδικασία και βασίζεται στη διερεύνηση εναλλακτικών συνδυασμών παραμέτρων, που επιλέγει, σύμφωνα με την εμπειρία του ο χρήστης (Μαμάσης, 2009). Η υιοθέτησή της βασίστηκε στην αξιοποίηση της συγκεντρωμένης εμπειρίας από παρελθούσες έρευνες και μελέτες που έχουν εκπονηθεί στη συγκεκριμένη περιοχή.

Για κάθε επεισόδιο ξεχωριστά,, πραγματοποιήθηκε ρύθμιση όλων των παραμέτρων των χρησιμοποιηθέντων μεθόδων προσομοίωσης (απώλειες, άμεση και βασική απορροή) με σκοπό το εξαγόμενο υδρογράφημα να προσεγγίζει με τη μικρότερη δυνατή απόκλιση το παρατηρημένο.

Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στη βαθμονόμηση του μοντέλου απωλειών κατά SCS. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στηρίχθηκε στα ευρήματα της μελέτης των Baltas et al, (2007), που πραγματοποιήθηκε στην Πειραματική Λεκάνη, σύμφωνα με τα οποία ο λόγος I_a/S δεν παραμένει σταθερός ανά επεισόδιο, αλλά μεταβάλλεται. Έτσι, κατά τη ρύθμιση θεωρήθηκε καθορισμένη η συσχέτιση των παραμέτρων I_a και CN (οι οποίες επί τοις ουσίας συγκροτούν το λόγο, όπως φαίνεται από τις σχέσεις που παρατίθενται στο κεφάλαιο 4) αλλά

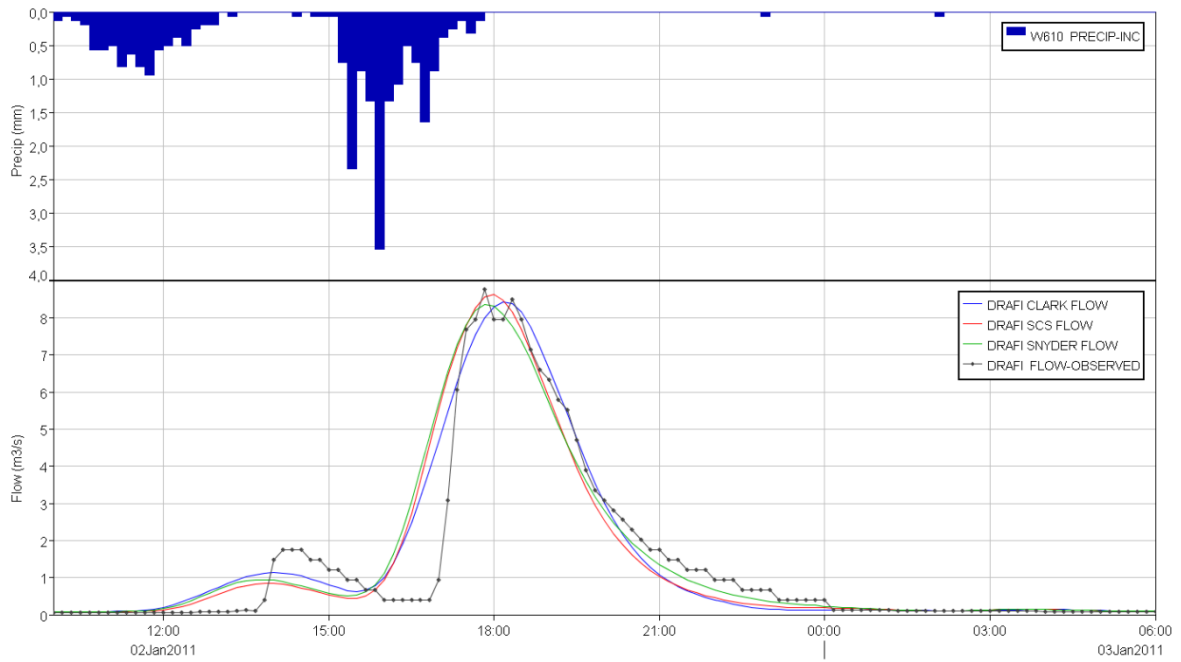
επιδιώχθηκε η βελτιστοποίηση αυτών μέσω δοκιμαστικής χρήσης διαφόρων συνδυασμών τους. Λαμβάνοντας εν τέλει τις μέσες προκύπτουσες τιμές, καθορίστηκε και ο χαρακτηριστικός λόγος, I_a/S , της περιοχής μελέτης.

Η προσαρμογή των υδρογραφημάτων αξιολογούνταν για κάθε διαφορετική εκτέλεση του μοντέλου με βάσει τους ως άνω περιγραφέντες «δείκτες» σφαλμάτων, και αναλόγως των τιμών τους συνεχιζόταν ή σταματούσε η διαδικασία ρύθμισης. Ως καθοριστικότερος εξ αυτών, κρίθηκε ο δείκτης Nash – Sutcliffe (E_f), μιας και είναι ο μόνος που λαμβάνει υπόψη τη συνολική, ανά σημείο των καμπυλών, συσχέτιση. Προκύπτουσες τιμές αυτού μεγαλύτερες ή ίσες του 0,7 θεωρούνταν, κατά την προσομοίωση, ως αρκούντως ικανοποιητικές. Δεύτερο σε σειρά καθοριστικό κριτήριο επιτυχίας της ρύθμιση αποτέλεσε η ταύτιση των αιχμών, τόσο ποσοτική όσο και χρονική, η οποία συνάδει με την ελαχιστοποίηση του δείκτη PEPF και της διαφοράς ΔT_{PF} . Τέλος, στη σύγκλιση των όγκων δόθηκε το μικρότερο, συγκριτικά με τα υπόλοιπα, βάρος, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει πως δεν επιδιώχθηκε η κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση της διαφορά αυτών (μέσω της ελαχιστοποίησης του δείκτη PEV).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης των μοντέλων για καθένα από τα πέντε επιλεγμένα επεισόδια βροχής, τα οποία και αναλύονται στο τέλος της παραγράφου. Στο παράρτημα I παρατίθενται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των προσομοιωμένων και παρατηρημένων υδρογραφημάτων (όγκος, αιχμή και χρόνος αιχμής) για κάθε επεισόδιο της βαθμονόμησης.

5.2.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων βαθμονόμησης

Επεισόδιο 1 – 02/01/2011



Σχήμα 5.18 Βαθμονομημένα υδρογραφήματα εξόδου - επεισόδιο 1

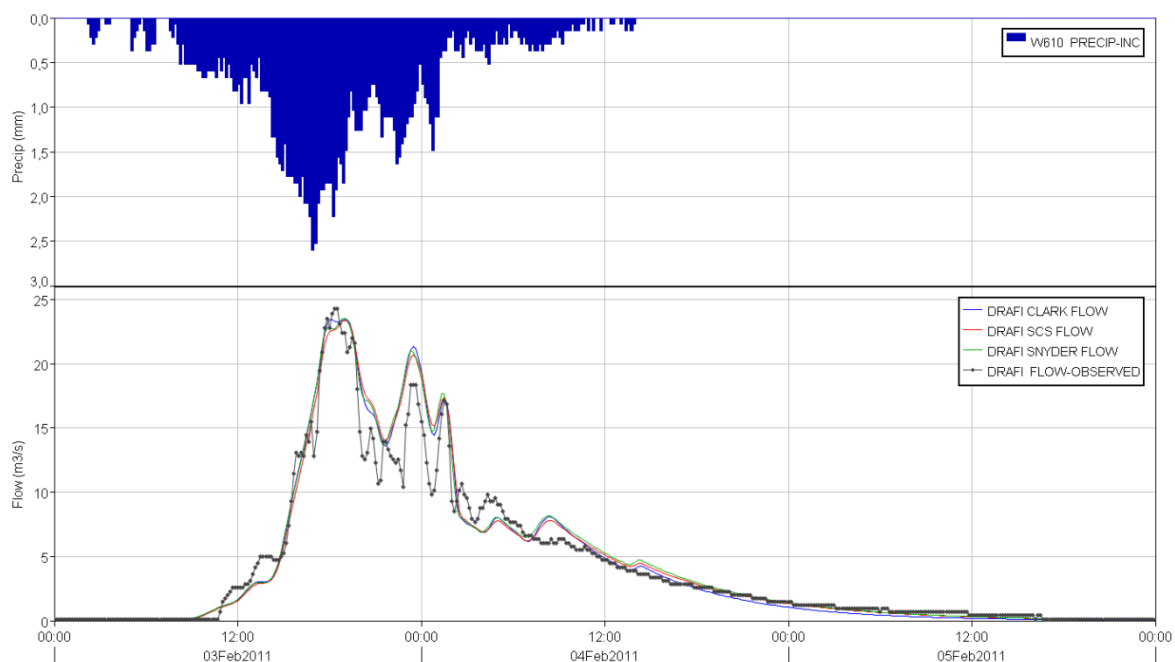
Πίνακας 5.1 Κριτήρια αποτελεσματικότητας βαθμονόμησης - επεισόδιο 1

Μέθοδος απορροής	E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
Snyder	0,86	8,1	4,11	0
SCS	0,86	3,52	1,59	10
Clark	0,91	6,8	3,88	20

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα βαθμονόμησης – επεισόδιο 1

Απώλειες		Άμεση Απορροή		Βασική Απορροή		
SNYDER						
I_a (mm)	CN	Standard Lag (hr)	C_p	Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
2	79	1,7	0,69	0,09	0,9	0,01
SCS						
I_a (mm)	CN	Lag Time (min)		Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
3	79	98		0,09	0,9	0,01
CLARK						
I_a (mm)	CN	Time of Concentration (hr)	R (hr)	Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
2	77	2,7	0,9	0,09	0,9	0,01

Επεισόδιο 2 – (03-04)/02/2011



Σχήμα 5.19 Βαθμονομημένα υδρογραφήματα εξόδου - επεισόδιο 2

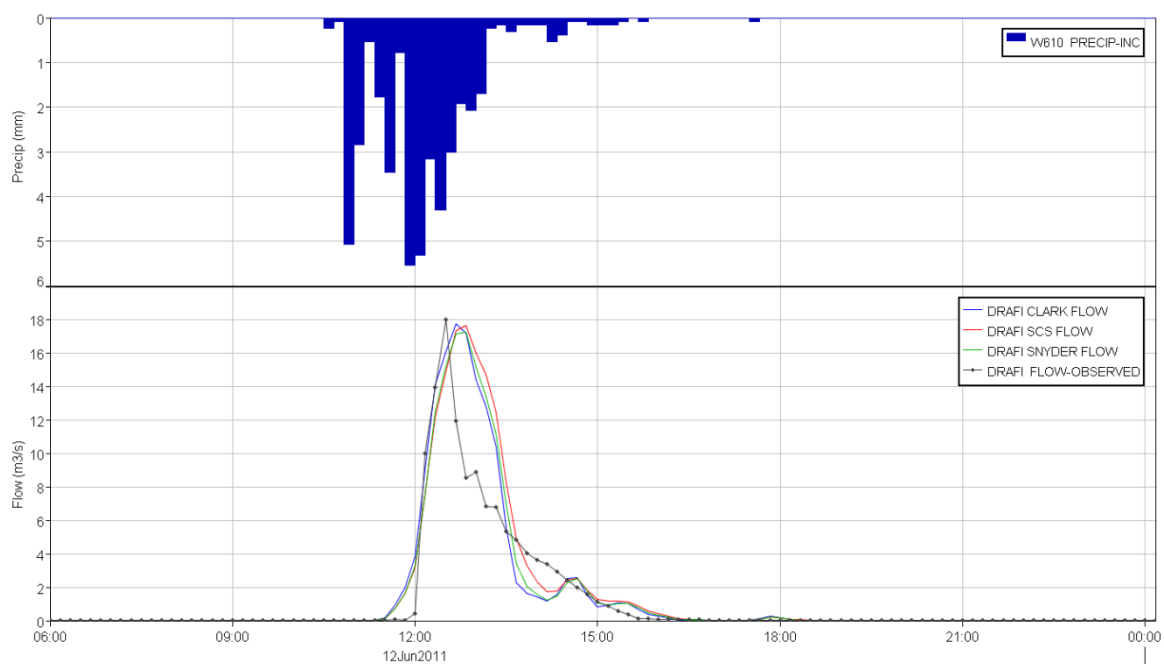
Πίνακας 5.3 Κριτήρια αποτελεσματικότητας βαθμονόμησης - επεισόδιο 2

Μέθοδος απορροής	E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
Snyder	0,95	6,81	3	40
SCS	0,95	5,02	3,58	40
Clark	0,95	3,4	3,38	20

Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα βαθμονόμησης – επεισόδιο 2

Απώλειες		Άμεση Απορροή		Βασική Απορροή		
SNYDER						
I_a (mm)	CN	Standard Lag (hr)	C_p	Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
3	54	0,7	0,69	0,07	0,05	0,35
SCS						
I_a (mm)	CN	Lag Time (min)		Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
3	54	48		0,07	0,05	0,35
CLARK						
I_a (mm)	CN	Time of Concentration (hr)	R (hr)	Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
3	54	1,3	0,27	0,07	0,05	0,35

Επεισόδιο 4 – 12/06/2011



Σχήμα 5.20 Βαθμονομημένα υδρογραφήματα εξόδου - επεισόδιο 4

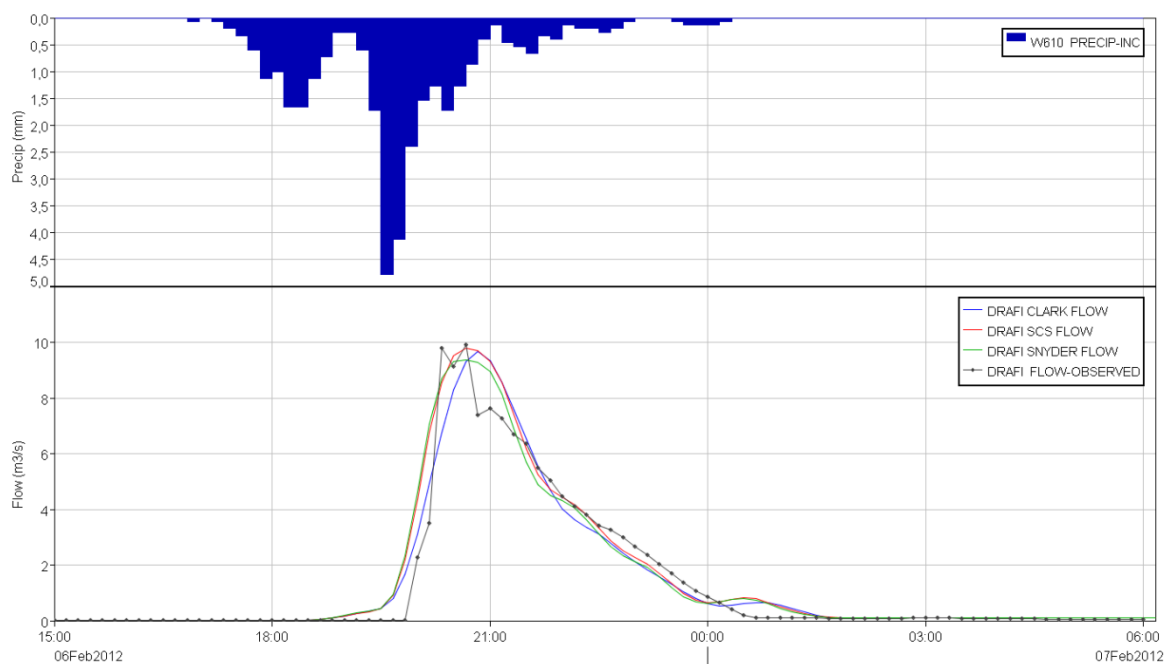
Πίνακας 5.5 Κριτήρια αποτελεσματικότητας βαθμονόμησης - επεισόδιο 4

Μέθοδος απορροής	R	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
Snyder	0,76	19,59	3,94	20
SCS	0,71	28,46	1,83	20
Clark	0,78	19,73	1,28	10

Πίνακας 5.6 Αποτελέσματα βαθμονόμησης – επεισόδιο 4

Απώλειες		Άμεση Απορροή		Βασική Απορροή		
SNYDER						
I_a (mm)	CN	Standard Lag (hr)	C_p	Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
8	52	0,3	0,69	0,01	0,05	0,001
SCS						
I_a (mm)	CN	Lag Time (min)		Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
8	54	18		0,01	0,05	0,001
CLARK						
I_a (mm)	CN	Time of Concentration (hr)	R (hr)	Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
8	52	0,4	0,1	0,01	0,05	0,001

Επεισόδιο 5 – (06-07)/02/2012



Σχήμα 5.21 Βαθμονομημένα υδρογραφήματα εξόδου - επεισόδιο 5

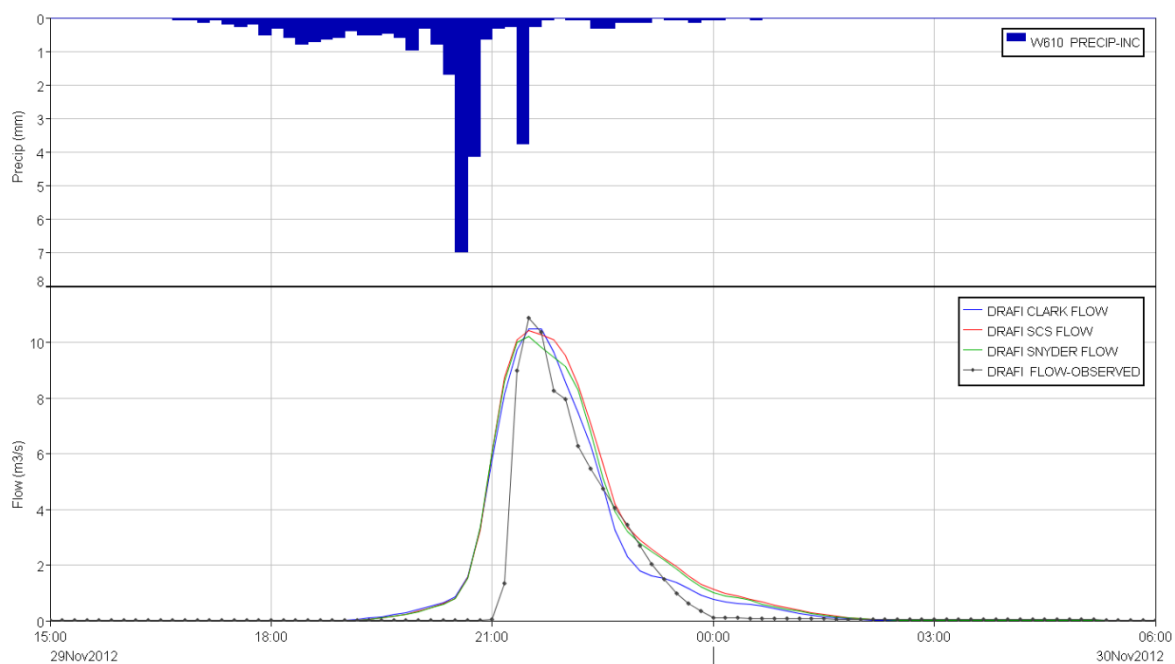
Πίνακας 5.7 Κριτήρια αποτελεσματικότητας βαθμονόμησης - επεισόδιο 5

Μέθοδος απορροής	E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
Snyder	0,94	8,95	5,24	0
SCS	0,94	12,87	1,41	0
Clark	0,95	5,03	2,22	10

Πίνακας 5.8 Αποτελέσματα βαθμονόμησης – επεισόδιο 5

Απώλειες		Άμεση Απορροή		Βασική Απορροή		
SNYDER						
I_a (mm)	CN	Standard Lag (hr)	C_p	Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
6	62	0,6	0,69	0,02	0,9	0,01
SCS						
I_a (mm)	CN	Lag Time (min)		Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
6	63	38		0,02	0,9	0,01
CLARK						
I_a (mm)	CN	Time of Concentration (hr)	R (hr)	Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
6	60	1,2	0,3	0,02	0,9	0,01

Επεισόδιο 6 – (29-30)/11/2012



Σχήμα 5.22 Βαθμονομημένα υδρογραφήματα εξόδου - επεισόδιο 6

Πίνακας 5.9 Κριτήρια αποτελεσματικότητας βαθμονόμησης - επεισόδιο 6

Μέθοδος απορροής	E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
Snyder	0,76	41,99	6,24	0
SCS	0,75	47,26	4,32	0
Clark	0,8	31,66	3,58	0

Πίνακας 5.10 Αποτελέσματα βαθμονόμησης – επεισόδιο 6

Απώλειες		Άμεση Απορροή		Βασική Απορροή		
SNYDER						
I_a (mm)	CN	Standard Lag (hr)	C_p	Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
4	65	0,7	0,69	0,01	0,1	0,001
SCS						
I_a (mm)	CN	Lag Time (min)		Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
4	66	43		0,01	0,1	0,001
CLARK						
I_a (mm)	CN	Time of Concentration (hr)	R (hr)	Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
4	62	1,1	0,3	0,01	0,1	0,001

Μέσες τιμές αποτελεσμάτων βαθμονόμησης

Πίνακας 5.11 Μέσες τιμές επί των κριτηρίων αποτελεσματικότητας κατά τη φάση της βαθμονόμησης

Μέθοδος απορροής	E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
Snyder	0,85	17,1	4,51	12
SCS	0,84	19,4	2,55	14
Clark	0,88	13,33	2,87	12

Πίνακας 5.12 Μέσες τιμές βαθμονομημένων παραμέτρων μεθόδων προσομοίωσης

Απώλειες		Άμεση Απορροή		Βασική Απορροή		
SNYDER						
I_a (mm)	CN	Standard Lag (hr)	C_p	Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
4,6	62	0,8	0,69	0,04	0,4	0,08
SCS						
I_a (mm)	CN	Lag Time (min)		Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
4,8	63	49		0,04	0,4	0,08
CLARK						
I_a (mm)	CN	Time of Concentration (hr)	R (hr)	Initial Discharge (m^3/s)	Recession Constant	Ratio to Peak
4,6	61	1,34	0,37	0,04	0,4	0,08

5.2.4 Σχολιασμός επί των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης

Αξιολόγηση αποτελεσματικότητας βαθμονόμησης

Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης, επετεύχθη σε ικανοποιητικό βαθμό η προσαρμογή των προσομοιωμένων καμπυλών στις παρατηρημένες και για τις τρεις μεθόδους εκτίμησης της άμεσης απορροής.

Συγκεκριμένα ο δείκτης Nash – Sutchliffe (E_f) είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερος του 0,7 (τιμή που θεωρείται ως οριακά ικανοποιητική), με ακραίες τιμές το 0,71 (καμπύλη κατά SCS στο επεισόδιο 4) και το 0,95 (και οι τρεις καμπύλες στο επεισόδιο 2 καθώς και η προσομοιωμένη κατά Clark στο επεισόδιο 5). Οι μέσες τιμές αυτού που προέκυψαν από τη θεώρηση όλων των επεισοδίων (0,85, 0,84 και 0,88 με τις μεθόδους κατά Snyder, SCS και Clark αντίστοιχα) κρίνονται ως ιδιαίτερα καλές.

Η προσομοίωση των αιχμών και του χρόνου που αυτές λαμβάνουν χώρα, αποτελεί ίσως τη σημαντικότερη επιτυχία κατά τη βαθμονόμηση, γεγονός ιδιαίτερα ενθαρρυντικό, μιας και, ως γνωστόν, η αιχμή ενός πλημμυρικού επεισοδίου αποτελεί το κρισιμότερο μέγεθος, αλλά και αυτό που λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό της αντιπλημμυρικής προστασίας. Η μέση επί τοις εκατό απόκλιση (μέση τιμή κριτηρίου PEPF) είναι χαμηλότερη και στις τρεις μεθόδους του 5%, με μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή το 6,24% (μέθοδος Snyder στο επεισόδιο 6). Η μέση απόλυτη χρονική απόκλιση είναι κάτω των 15 min και για τις τρεις καμπύλες, με τη μέγιστη παρατηρούμενη στα επεισόδια τιμή να φτάνει τα 40 min (επεισόδιο 2). Στην περίπτωση αυτή, ωστόσο, αν συγκριθούν (εποπτικά μέσω των διαγραμμάτων) τα κέντρα βάρους των προσομοιωμένων, κλάδων των πλημμυρογραφημάτων στους οποίους εμφανίζεται η αιχμή με αυτόν του παρατηρημένου, θα διαπιστωθεί πως η τιμή αυτή κρίνει μάλλον αυστηρά τη χρονική προσέγγιση.

Τέλος, η μόνη, συγκριτικά με τα υπόλοιπα κριτήρια, αστοχία κατά τη βαθμονόμηση παρατηρείται στις προκύπτουσες τιμές του δείκτη PEV (επί τοις εκατό διαφοροποίηση των όγκων). Αν και εκφρασμένη σε απόλυτη τιμή (καθότι αυτό ενδιαφέρει κατά την αξιολόγηση), εύκολα διαπιστώνει κανείς πως το σφάλμα σε όλα τα επεισόδια μεταφράζεται σε υπερεκτίμηση κατά την προσομοίωση. Τιμές του δείκτη μέχρι και 10%, που εμφανίζονται στα τρία από τα πέντε επεισόδια (1,2 και 5), κρίνονται ως αποδεκτές. Στα επεισόδια, ωστόσο, 4 και 6 οι μέγιστες αποκλίσεις αγγίζουν το 28,46% και 47,26% αντίστοιχα (και οι δύο εμφανίζονται κατά τη χρήση της μεθόδου SCS), τιμές ιδιαίτερα υψηλές οι οποίες και ωθούν προς τα άνω τις τελικές, μέσες υπολογισμένες. Κατά την προσομοίωση των δύο αυτών επεισοδίων εμφανίζονται και οι χαμηλότερες συσχετίσεις με βάση το δείκτη E_f . Παρότι έγινε εκτεταμένη προσπάθεια για επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων αναφορικά με τους όγκους, διαπιστώθηκε πως αυτό ήταν αδύνατο χωρίς να επιδεινωθεί η συσχέτιση των πλημμυρικών αιχμών ή ο δείκτης E_f . Έτσι, στα πλαίσια της πολυπαραμετρικής αυτής διαδικασίας βελτιστοποίησης, η παρούσα προσέγγιση θεωρείται ως η βέλτιστη δυνατή, λαμβάνοντας βεβαίως υπόψη και τη σειρά σπουδαιότητας των χρησιμοποιούμενων κριτηρίων αποτελεσματικότητας, όπως αυτή έχει καθοριστεί στην αντίστοιχη παράγραφο.

Αναζητώντας τα αίτια της μη τόσο καλής απόκρισης του μοντέλου στα δύο αυτά επεισόδια, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως αυτά συνδέονται με τη χρονική κατανομή με την οποία εκδηλώθηκε η βροχόπτωση. Εν αντιθέσει με τα υπόλοιπα, παρατηρείται πως ο κύριος όγκος νερού έπεσε συγκεντρωμένος σε μικρό χρονικό διάστημα, χωρίς η ένταση να αυξάνεται σταδιακά έως την αιχμή της βροχής, αλλά ραγδαία, τρόπος με τον οποίο και

μειώθηκε. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε πολύ απότομο ανοδικό και καθοδικό κλάδο των παρατηρημένων υδρογραφημάτων, με τα προσομοιωμένα να αδυνατούν να τους προσεγγίσουν. Παρότι τα σημεία καμπής αυτών (αιχμές) σχεδόν ταυτίστηκαν, οι διαφοροποιήσεις στους δύο κλάδους οδήγησαν και στις αντίστοιχες χαμηλές συγκλίσεις των δεικτών PEV και E_f . Η διαπίστωση αυτή, βέβαια, για να θεμελιωθεί και να γενικευτεί (αν όντως συστηματικά παρατηρείται), απαιτεί έρευνα με αρκετά μεγαλύτερο των δύο, δείγμα επεισοδίων βροχόπτωσης αντίστοιχης μορφής.

Συνολικά, λοιπόν, και λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως η διαδικασία της βαθμονόμησης ήταν επιτυχής, με εξαίρεση, ίσως την παρατηρηθείσα τάση για υπερεκτίμηση των όγκων. Η συνολική αξιολόγηση, ωστόσο, προκύπτει από την επαλήθευση του μοντέλου, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω.

Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων Snyder, SCS και Clark κατά τη βαθμονόμηση

Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης του μοντέλου, παρατηρείται πως οι καμπύλες που έχουν προκύψει από τη χρήση των τριών διαφορετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων για την προσομοίωση της άμεσης απορροής, παρουσιάζουν πολύ μεγάλη σύγκληση καθόλα τα επεισόδια. Δε θα ήταν υπερβολικό να θεωρηθεί η σύγκληση αυτή ακόμα και ταύτιση, σε ορισμένες περιπτώσεις.

Καμία από τις τρεις μεθόδους δεν φαίνεται ως συστηματικά ακριβέστερη, με τις τιμές των χρησιμοποιηθέντων κριτηρίων αποτελεσματικότητας (E_f , PEV, PEPF, ΔT_{PF}) να λαμβάνουν παραπλήσιες, και σε ορισμένες περιπτώσεις σχεδόν ίδιες, τιμές κατά τις προσομοιώσεις. Ακόμα και στις περιπτώσεις των δύο σχετικά ιδιόμορφων εξετασθέντων επεισοδίων βροχόπτωσης (όπως αναλύθηκαν στην παραπάνω παράγραφο) καμία από τις τρεις δεν μπορεί να θεωρηθεί πως ενδείκνυται για να προσομοιώσει τα παρατηρημένα υδρογραφήματα καλύτερα. Μπορεί να παρατηρηθεί πως κατά το επεισόδιο 6 η μέθοδος Clark δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα (Πίνακας 5.9), τόσο κατά τη συνολική προσέγγιση ($E_f = 0,8$ έναντι $E_f = 0,76$ και $E_f = 0,75$ που δίνουν οι Snyder και SCS αντίστοιχα) όσο και κατά την προσέγγιση των όγκων (PEV = 31,66% έναντι PEV = 41,95% και PEV = 47,26% κατά Snyder και SCS αντίστοιχα), ωστόσο η ίδια καλύτερη συμπεριφορά δεν εμφανίζεται και κατά το επεισόδιο 4 (Πίνακας 5.5) όπου οι διαφορές, ιδίως με τη μέθοδο Snyder, είναι αμελητέες ($E_f = 0,78$ και PEV = 19,73% κατά Clark, $E_f = 0,76$ και PEV = 19,59% κατά Snyder και $E_f = 0,71$ και PEV = 28,46% SCS).

Συγκρίνοντας, τέλος, και τις μέσες τιμές των τεσσάρων κριτηρίων για τις τρεις μεθόδους, όπως αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.11, διαπιστώνεται πως οι προσεγγίσεις με τη

μέθοδο Clark δίνουν συνολικά σχετικά καλύτερα αποτελέσματα τόσο ως προς το δείκτη Nash – Sutchliffe όσο και ως προς το δείκτη PEV, ενώ αναφορικά με τις αιχμές (μεγέθη και χρόνοι εκδήλωσης) τα αποτελέσματα είναι αρκετά παραπλήσια. Η διαφοροποίηση αυτή, ωστόσο, είναι τόσο μικρή (διαφορά 0,03 στο δείκτη E_f και 3,77% στο δείκτη PEV συγκριτικά με τη δεύτερη σε σειρά, μέθοδο Snyder) που δεν επιτρέπει τη εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Ακόμα, λόγω και της εμπειρικής μεθόδου βαθμονόμησης που υιοθετήθηκε, οι αποκλίσεις τέτοιας τάξης μεγέθους μπορεί να οφείλονται πιθανότατα και σε σφάλματα που προκύπτουν από τη μεθοδολογία που ακολουθεί ο χρήστης, αλλά και της εμπειρίας αυτού (όπως δηλώνει και το όνομα της μεθόδου).

Συμπερασματικά, λοιπόν, μπορούμε να καταλήξουμε πως και τα τρία μοναδιαία υδρογραφήματα παρουσιάζουν εξαιρετικά παραπλήσια συμπεριφορά στην εκτίμηση της άμεσης απορροής και δεν μπορεί με βεβαιότητα να θεωρηθεί κάποιο ως ακριβέστερο. Τα συμπεράσματα αυτά επιβεβαιώνεται και μετέπειτα, κατά την επαλήθευση του μοντέλου, οπότε και μπορεί να γενικευτεί.

Σχολιασμός τελικών παραμέτρων βαθμονόμησης

Συγκρίνοντας στα πλαίσια κάθε επεισοδίου τις παραμέτρους του μοντέλου απωλειών (αρχικές απώλειες και αριθμούς καμπύλης), ανά χρησιμοποιούμενη μέθοδο άμεσης απορροής, παρατηρείται πως αυτά κινούνται στα ίδια επίπεδα, με τις όποιες διαφοροποιήσεις, να είναι μικρές και αναμενόμενο να υπάρχουν, σε αυτήν την τάξη μεγέθους.

Συγκεντρωτικά, οι μέσες τιμές των παραμέτρων αυτών, καθώς και των χαρακτηριστικών λόγων αρχικών απωλειών (I_a/S) που προκύπτουν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.13 Βαθμονομημένες παράμετροι μοντέλου απωλειών SCS

Καμπύλη	Αρχικές Απώλειες (mm)	Αριθμός καμπύλης (CN)	Λόγος αρχικών απωλειών (I_a/S)
Snyder	4,6	62	0,029
SCS	4,8	63	0,032
Clark	4,6	61	0,028

Οι τιμές του αριθμού καμπύλης, αν εξεταστούν απομονωμένα από αυτές των αντίστοιχων αρχικών απωλειών ανά επεισόδιο, διαπιστώνεται πως παρουσιάζουν μεγάλο εύρος (52 στο επεισόδιο 4 και 79 στο επεισόδιο 1 είναι οι ακραίες τιμές με τη χρήση της μεθόδου Snyder)

γύρω από τη μέση τιμή. Η μεγάλη διακύμανση αυτή επισημαίνεται και στη βιβλιογραφία (Ponce and Hawkins, 1996). Η εμπειρία έχει δείξει πως ένα τέτοιο εύρος διαφορετικών αριθμών καμπύλης είναι δυνατό να εμφανίζεται για μία συγκεκριμένη λεκάνη (Hjelmfelt, 1991). Οι Ponce και Hawkins (1996) αποδίδουν αυτό το γεγονός στη χωρική και χρονική μεταβλητότητα που παρουσιάζει η βροχόπτωση στα πλαίσια της λεκάνης ανά επεισόδιο, στην ελεγχόμενη ακρίβεια μετρήσεων της βροχής και της απορροής καθώς και στη διαφορετική ποσότητα υγρασίας του εδάφους που ενυπάρχει ανά επεισόδιο, αποτέλεσμα των προγενέστερων αυτού συνθηκών. Το τελευταίο κριτήριο αποτελεί τη γνωστή κατάσταση υγρασίας του εδάφους (όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 4).

Αναφορικά με την τιμή του λόγου Ia/S , αυτή μπορεί να προσδιοριστεί για την περιοχή ως 0,03 περίπου, λαμβάνοντας υπόψη τις αντίστοιχες προκύπτουσες τιμές από κάθε μέθοδο. Η τιμή αυτή είναι κατά πολύ μικρότερη από αυτή του 0,2 που θεωρήθηκε κατά την αρχική προσομοίωση και η οποία αποτέλεσε υπόδειξη της SCS κατά τη διατύπωση της μεθόδου. Ανήκει, όμως, στην τάξη μεγέθους του 0,01, όπως έχει βρεθεί ότι προσομοιάζεται καλύτερα κατά Mishra and Sing (2004). Επίσης, είναι αρκετά παραπλήσια με την υπολογισμένη κατά τους Baltas et al (2007) τιμή του 0,014 για την Πειραματική Λεκάνη, αν και ελαφρώς διαφοροποιημένη. Το γεγονός αυτό πιθανότατα μπορεί να αποδοθεί στις διαφορετικές επικρατούσες συνθήκες στη λεκάνη (λόγω της πυρκαγιάς του 2009 και της αλλαγής θέσης του σταθμού Ντράφι) όπως παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 (§ 2.2).

Ο χρόνος υστέρησης (t_p) υπολογίζεται σε 48 min (0,8 hr) με χρήση της μεθόδου Snyder και σε 49 min με την SCS. Η διαφορά αυτή θεωρείται αμελητέα. Από την άλλη, κατά την Clark ο χρόνος συγκέντρωσης (t_c) ανέρχεται στη 1,34 hr. Διαπιστώνεται πως η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη είναι $t_p \approx 0,6 t_c$, γεγονός που επιβεβαιώνει και την αντίστοιχη παρατήρηση κατά τις αρχικές εκτιμήσεις (§5.1.2). Έτσι, η σχέση που προτείνεται κατά SCS για τη συσχέτιση των δύο μεγεθών του χρόνου (§ 4.2.6) επιβεβαιώνεται για την Πειραματική Λεκάνη.

Αναφορικά με τη μέθοδο Clark, η τιμή του δείκτη αποθηκευτικότητας ανέρχεται σε 0,37 hr. Έτσι, ο χαρακτηριστικός λόγος $R/(R+t_c)$ υπολογίζεται για τη λεκάνη ως 0,216, τιμή που συνάδει, σαν τάξη μεγέθους, με αποτελέσματα αντίστοιχων μελετών σε άλλες περιοχές. Ενδεικτικά, κατά τους Graf et al (1982) οι τιμές για τον αντίστοιχο λόγο σε λεκάνες απορροής του Ιλλινόις των ΗΠΑ κυμαίνονται στο διάστημα 0,2 - 0,7.

Τέλος, ως προς τη βασική απορροή, το εύρος τιμών των υπολογισμένων παραμέτρων στα διάφορα επεισόδια είναι ιδιαίτερα μεγάλο, γεγονός που οφείλεται στην έντονη χρονική μεταβλητότητα του μεγέθους σε εποχικό επίπεδο.

5.3 Επαλήθευση μοντέλου

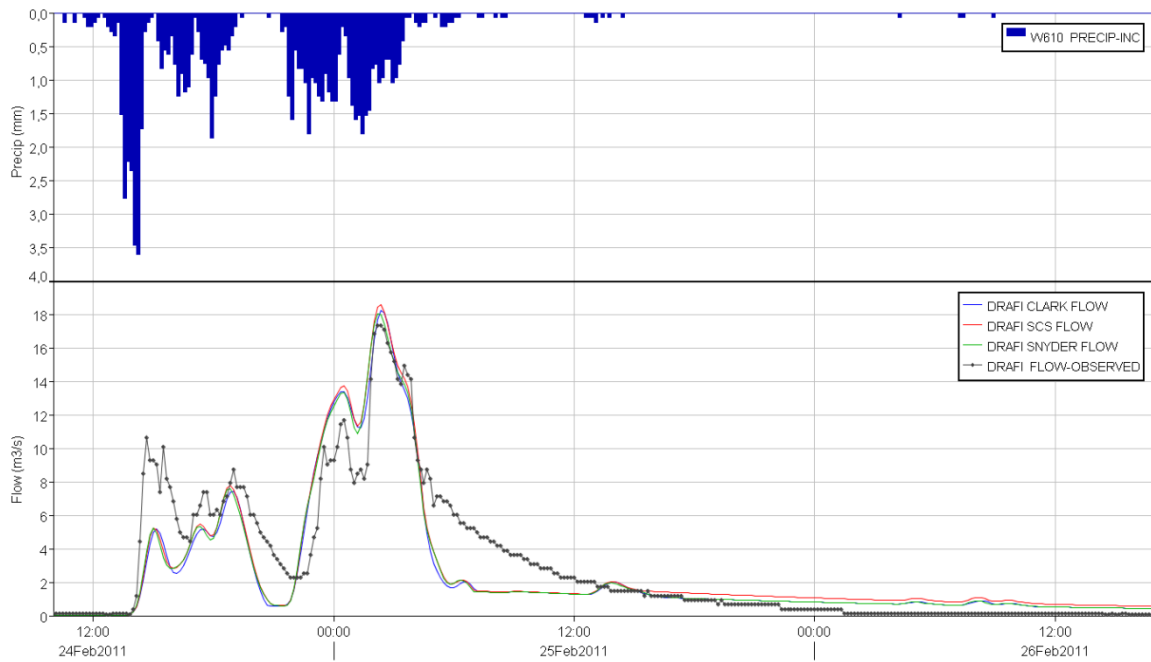
Ως επαλήθευση ορίζεται η διαδικασία αξιολόγησης των μαθηματικών υδρολογικών μοντέλων, ώστε να διαπιστωθεί αν αποτελούν αντιπροσωπευτικές αναπαραστάσεις του φυσικού συστήματος που προσομοιώνουν. Συνήθως, η επαλήθευση ενός υδρολογικού μοντέλου γίνεται για το βέλτιστο σύνολο παραμέτρων που έχει προκύψει από τη βαθμονόμηση, ελέγχοντας το ίδιο το κριτήριο προσαρμογής για μια άλλη χρονική περίοδο, για την οποία επίσης διατίθενται μετρημένες φορτίσεις και αποκρίσεις της λεκάνης. Για να έχει νόημα μια τέτοια προσέγγιση θα πρέπει τα χαρακτηριστικά του συστήματος να έχουν διατηρηθεί αμετάβλητα για το σύνολο της περιόδου ελέγχου του μοντέλου (περίοδος βαθμονόμησης και επαλήθευσης μαζί). Διαφορετικά οι παράμετροι θα πρέπει να θεωρηθούν διαχρονικά μεταβαλλόμενες, περιορίζοντας δραστικά την επιχειρησιακή χρησιμότητα του υδρολογικού μοντέλου (Μαμάσης, 2012).

Για την τριετία στην οποία ανήκουν τα προσομοιωμένα επεισόδια, θεωρήθηκε πως τα χαρακτηριστικά του συστήματος παραμένουν σχετικά αμετάβλητα. Η θεώρηση αυτή βασίζεται στο γεγονός, αφενός μεν της μικρής χρονικά περιόδου προσομοίωσης, αφετέρου δε της μη ύπαρξης κάποιου καταλυτικού γεγονότος στο διάστημα αυτό (πυρκαγιά, μεγάλη πλημμύρα κτλ) το οποίο θα μετέβαλε άρδην τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Παρόλα αυτά, δεν παραγνωρίζεται η επίδραση της κίνησης των φερτών στο ρέμα η οποία σίγουρα, σε κάποιο βαθμό έχει οδηγήσει σε μεταβολές αναφορικά με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και την παροχευτικότητα αυτού.

Κατά τη διαδικασία της επαλήθευσης, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου οι μέσες τιμές των παραμέτρων όπως αυτές υπολογίστηκαν κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης (πίνακας 5). Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια κριτήρια ελέγχου της αποτελεσματικότητας: οι δείκτες R, PEV, PEPF και η διαφορά ΔT_{PF} .

5.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων επαλήθευσης

Επεισόδιο 3 – (24-26)/02/2011

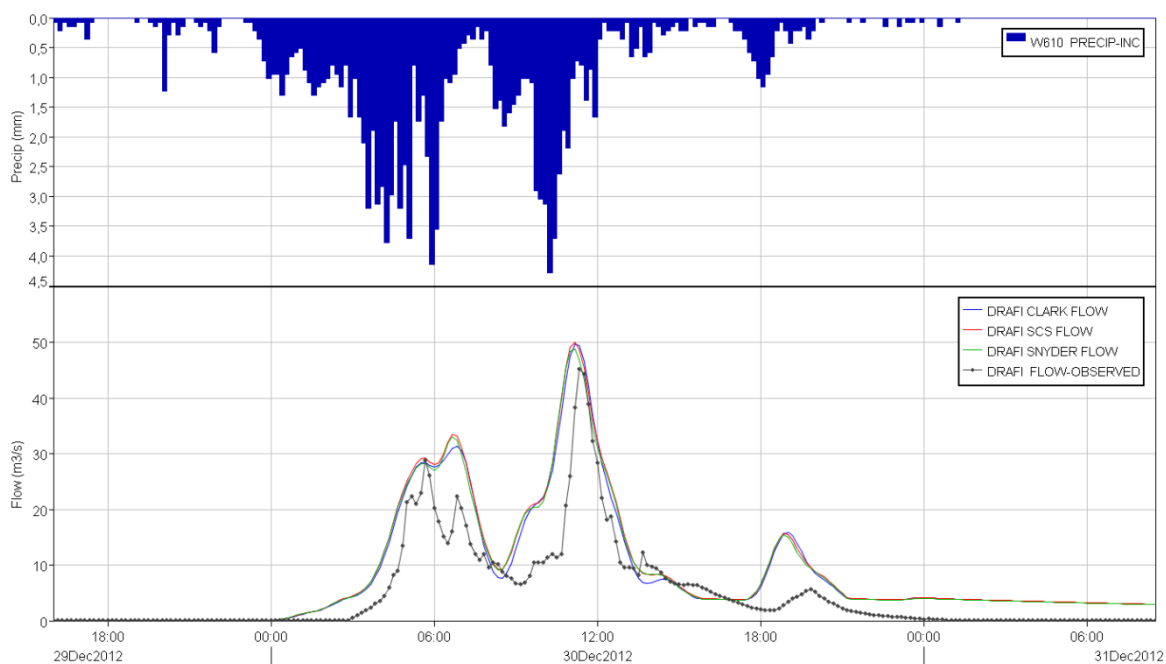


Σχήμα 5.23 Υδρογραφήματα εξόδου κατά τη φάση επαλήθευσης - επεισόδιο 3

Πίνακας 5.14 Κριτήρια αποτελεσματικότητας – επεισόδιο 3

Μέθοδος απορροής	E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
Snyder	0,79	12,05	3,91	0
SCS	0,79	6,64	7,13	10
Clark	0,79	12,88	5	10

Επεισόδιο 7 - (29-31)/12/2012

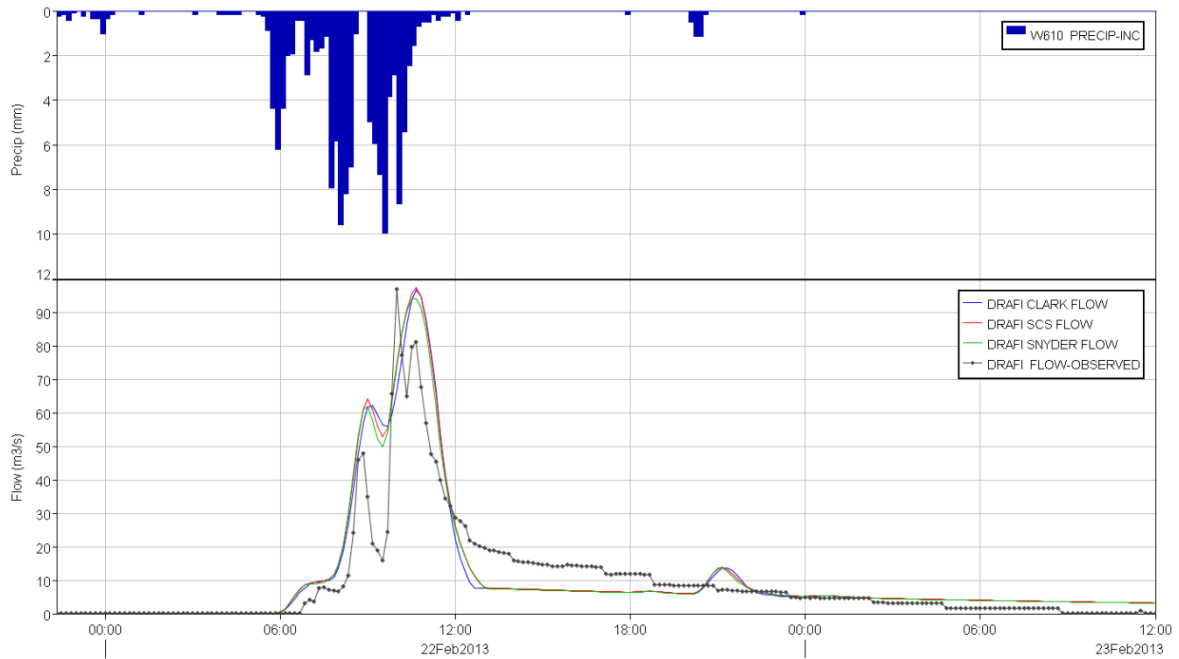


Σχήμα 5.24 Υδρογραφήματα εξόδου κατά τη φάση επαλήθευσης - επεισόδιο 7

Πίνακας 5.15 Κριτήρια αποτελεσματικότητας – επεισόδιο 7

Μέθοδος απορροής	E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
Snyder	0,53	71,38	8,03	10
SCS	0,5	75,14	10,68	10
Clark	0,57	69,08	10,04	10

Επεισόδιο 8 – (21-22)/02/2013



Σχήμα 5.25 Υδρογραφήματα εξόδου κατά τη φάση επαλήθευσης - επεισόδιο 8

Πίνακας 5.16 Κριτήρια αποτελεσματικότητας – επεισόδιο 8

Μέθοδος απορροής	E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
Snyder	0,78	14,98	2,67	40
SCS	0,74	17,81	0,6	40
Clark	0,73	14,03	0,13	40

Μέσες τιμές κριτηρίων αποτελεσματικότητας κατά την επαλήθευση

Πίνακας 5.17 Μέσες τιμές κριτηρίων αποτελεσματικότητας κατά τη φάση της επαλήθευσης

Μέθοδος απορροής	E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
Snyder	0,7	32,8	4,87	16,7
SCS	0,68	33,2	6,14	20
Clark	0,7	32	5,06	20

5.3.2 Σχολιασμός επί των αποτελεσμάτων της επαλήθευσης

Αξιολόγηση αποτελεσμάτων επαλήθευσης

Τα αποτελέσματα της επαλήθευσης κρίνονται ως ικανοποιητικά στα δύο από τα τρία επεισόδια. Η σχετικά μεγαλύτερη απόκλιση που παρατηρείται κατά την προσομοίωση των πλημμυρικών όγκων βρίσκεται σε λογικά επίπεδα, και με δεδομένη την καλή συνολική συσχέτιση (δείκτης E_f) καθώς και αυτή των αιχμών (δείκτης PEPF), αξιολογείται ως δευτερεύουσας σημασίας. Αντιθέτως, ως μη επιτυχής μπορεί να θεωρηθεί η προσομοίωση του επεισοδίου 7: (29-31)/12/2012. Σε αυτό, όλοι οι δείκτες αποτελεσματικότητας φανερώνουν χαμηλή προσέγγιση, ακόμα και σε σχέση με την αιχμή (απόκλιση και με τις τρεις μεθόδους γύρω στο 10%), μέγεθος το οποίο καθ' όλες τις εκτελέσεις του μοντέλου παρουσίαζε εξαιρετικές συγκλίσεις. Ακόμη, είναι το μοναδικό επεισόδιο, τόσο κατά τη βαθμονόμηση, όσο και κατά την επαλήθευση, κατά το οποίο ο δείκτης Nash - Sutchliffe βρίσκεται κάτω από τη θεωρούμενη ως οριακή τιμή του 0,7. Τα σφάλματα αυτά, βέβαια, θα πρέπει να αξιολογηθούν και με βάση τις δυσκολίες προσομοίωσης που παρουσιάζει το συγκεκριμένο επεισόδιο βροχής. Πράγματι, παρότι δεν πρόκειται για το πλέον σφοδρό σίγουρα είναι αυτό με την πλέον περίπλοκη κατανομή στο χρόνο.

Συνολικά, μπορεί να θεωρηθεί πως το μοντέλο είναι σε θέση να προσομοιώσει σε ικανοποιητικό βαθμό τις υδρολογικές συνθήκες, σε σχέση με τις εκτιμώμενες παροχές, που επικρατούν στην Πειραματική Λεκάνη. Μειονέκτημα, ωστόσο, αποτελούν οι αποκλίσεις κατά την εκτίμηση των πλημμυρικών όγκων, οι οποίες παρατηρούνται καθ' όλα τα επεισόδια της επαλήθευσης.

Συνολική συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων Snyder, SCS και Clark

Κατά το στάδιο της βαθμονόμησης του μοντέλου φάνηκε να έχουν επιτευχθεί σχετικά καλύτερα αποτελέσματα με τη μέθοδο Clark. Ωστόσο, λόγω των μικρών διαφορών της με τις υπόλοιπες, η παρατήρηση αυτή δεν ήταν δυνατόν να θεωρηθεί ως βάσιμο συμπέρασμα. Συν τοις άλλοις, θα έπρεπε να συνοδευτεί με αντίστοιχα αποτελέσματα και κατά την επαλήθευση του μοντέλου, διαδικασία η οποία ουσιαστικά αποτελεί και το συνολικό κριτήριο απόδοσης. Σε αυτό το πλαίσιο, δε φαίνεται κάποια σαφής, αλλά και συστηματική διαφοροποίηση των μεθόδων. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτές, αναφορικά με τα χρησιμοποιούμενα κριτήρια, βρίσκονται παντού στην ίδια τάξη μεγέθους.

Συμπερασματικά, λοιπόν, μπορεί να ειπωθεί πως και τα τρία μοναδιαία υδρογραφήματα, δύναται να προσομοιώσουν αρκετά ικανοποιητικά το μέγεθος της άμεσης απορροής, με

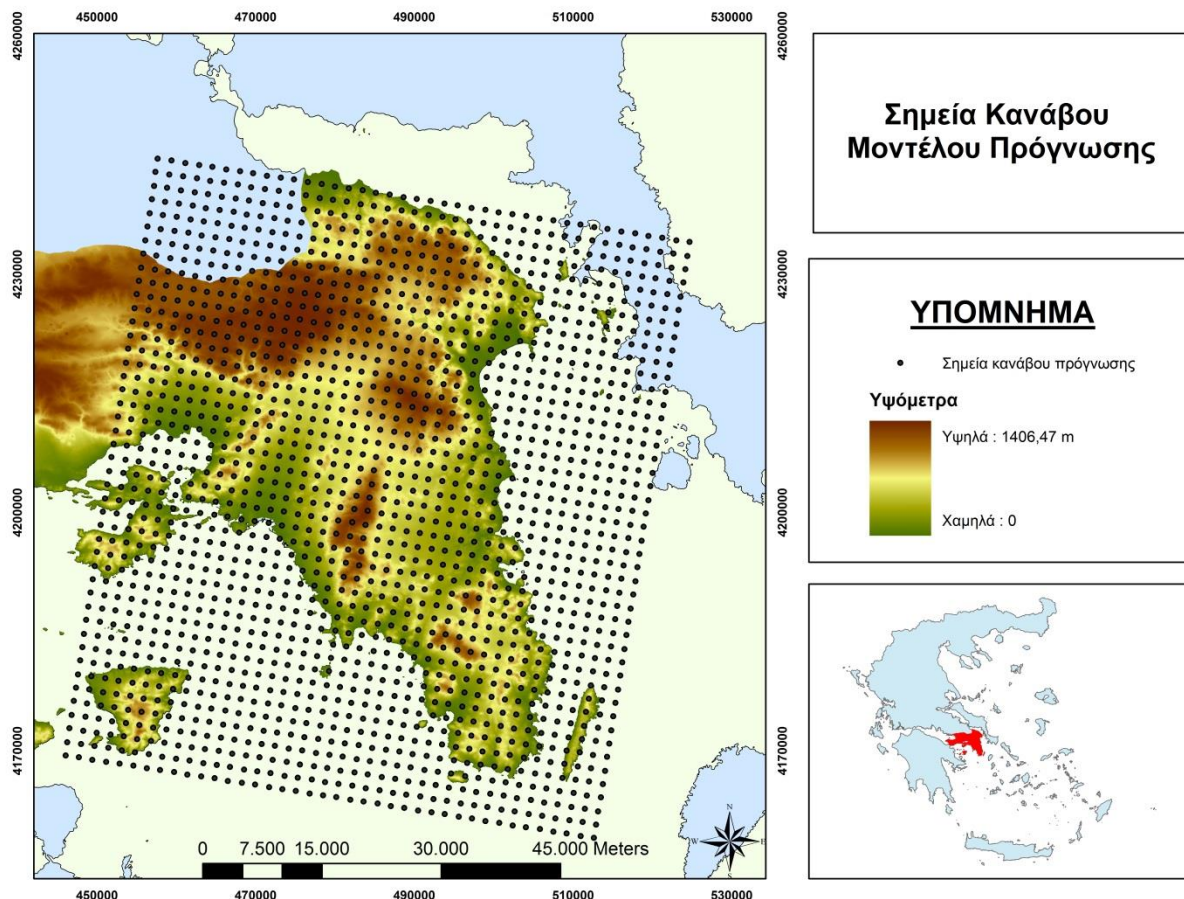
παραπλήσια αποτελέσματα. Αναγκαία προϋπόθεση, ωστόσο, αποτελεί η αποτελεσματική βαθμονόμησή τους, η οποία δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να αντικατασταθεί από τις εμπειρικές σχέσεις που συναντώνται στη βιβλιογραφία.

Κεφάλαιο 6. Διερεύνηση χρήσης μοντέλου 24ωρης πρόγνωσης βροχής για την εκτίμηση πλημμυρικής απορροής

6.1 Παρουσίαση μοντέλου πρόγνωσης

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε δημιουργήθηκε το 2001 από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (NOA), στα πλαίσια της προσπάθειας παροχής υψηλής χωρικής ανάλυσης δεδομένων προγνωσθείσας βροχής. Διαμορφώθηκε με βάση το πέμπτης-γενιάς «Pennsylvania State University – National Center for Atmospheric Research Mesoscale Model (MM5)» στο οποίο προσαρμόστηκαν οι διάφορες γεωμορφολογικές και μετεωρολογικές φύσεως παράμετροι που συναντώνται στην περιοχή της Αττικής από τους Kotroni and Lagouvardos (2004). Το μοντέλο χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα από το Αστεροσκοπείο Αθηνών, σε συνδυασμό και με άλλα, για την εξαγωγή της πρόγνωσης του καιρού στην Αττική. Πέρα από τη βροχή, προσομοιώνει την εκτιμώμενη επιφανειακή θερμοκρασία καθώς και τη διεύθυνση και ταχύτητα του ανέμου.

Η πρόγνωση της βροχής παράγεται ανά 24 ώρες, με δίωρο χρονικό βήμα. Προσφέρεται σε χωρική ανάλυση $2 \times 2 \text{ km}^2$, με τα σημεία που οριοθετούν την περιοχή που καλύπτεται, να βρίσκονται σε συντεταγμένες Α(457647,67, 4244583,39), Β(524698,52, 4234081,06), Γ(512653,96, 4159049,87) και Δ(446057,38, 4169421,99), στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ'87. Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζονται οι συντεταγμένες (X, Y) για τις οποίες και παρέχεται η πληροφορία της προγνωσθείσας βροχής.



Σχήμα 6.1 Χωρική κάλυψη μοντέλου πρόγνωσης

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, το συγκεκριμένο μοντέλο κρίθηκε ως κατάλληλο για τη διερεύνηση της δυνατότητας προσομοίωσης των πλημμυρογραφημάτων, με βάση την εκτιμώμενη βροχόπτωση. Ο λόγος έγκειται στην ιδιαίτερα υψηλή χωρική ανάλυση που προσφέρει, γεγονός το οποίο, στα πλαίσια της μικρής έκτασης της υπό μελέτη περιοχής, δύναται να προσομοιώσει τις ιδιαίτερες, τοπικές συνθήκες που επικρατούν. Τα επεισόδια που επιλέχθηκαν για την προσομοίωση, είναι εκείνα τα οποία προκάλεσαν τα ισχυρότερα συμβάντα πλημμύρας στην υπό μελέτη περίοδο (2010-2013). Συγκεκριμένα, πρόκειται για το επεισόδιο 2 που έλαβε χώρα το διάστημα (02-03)/02/2011, το επεισόδιο 7 στις (29-31)/12/2012 και τέλος το σφοδρότερο και πλέον καταστροφικό επεισόδιο 8 στις (21-22)/02/2013². Αναλυτικά, παρουσιάζεται παρακάτω η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, στα πλαίσια της διερεύνησης.

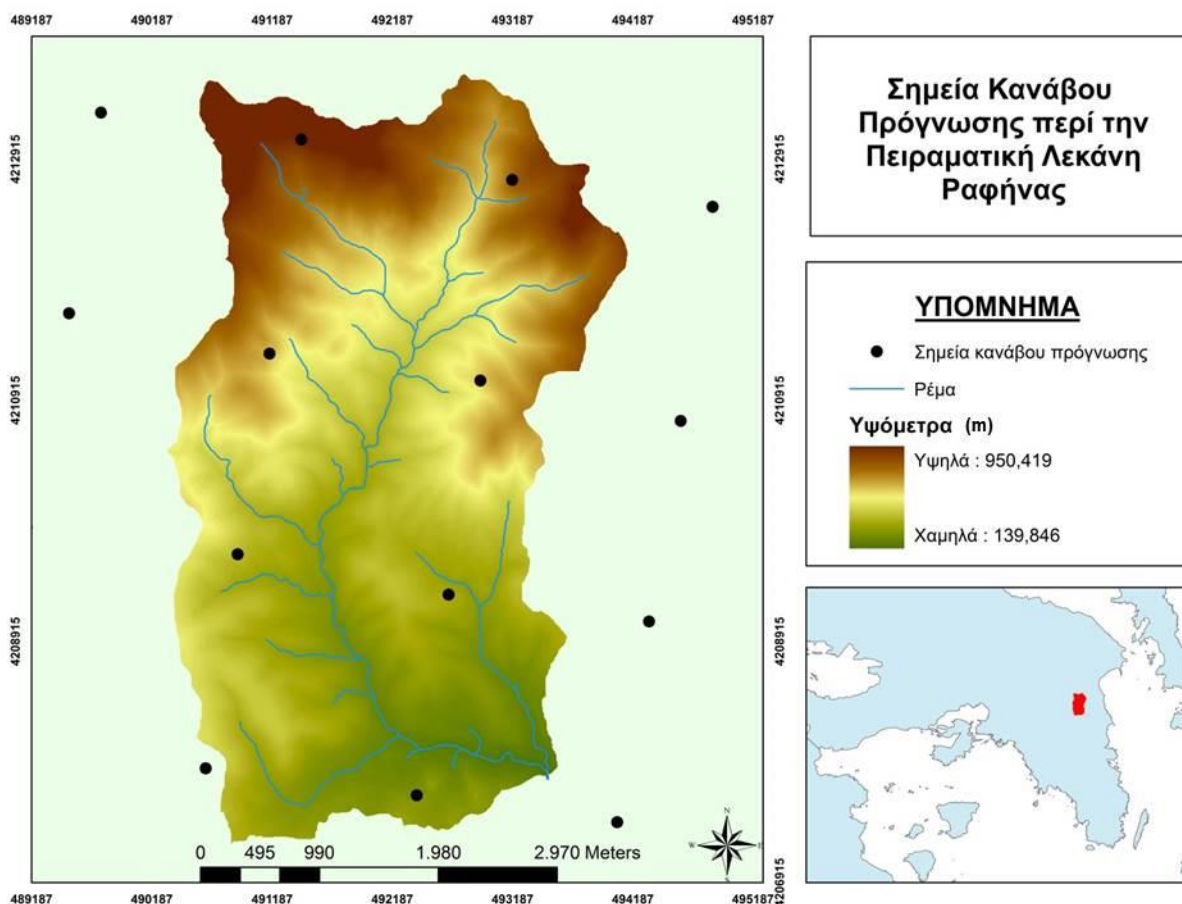
² Οι αριθμοί που χρησιμοποιούνται ως προσδιοριστικοί για τα επεισόδια έχουν καθοριστεί στο Κεφάλαιο 5. Η αντιστοιχία αυτή ακολουθείται και κατά το παρόν κεφάλαιο.

6.2 Προσομοίωση υδρογραφημάτων με χρήση προγνωσθείσας βροχής

6.2.1 Επιλογή και επεξεργασία δεδομένων πρόγνωσης

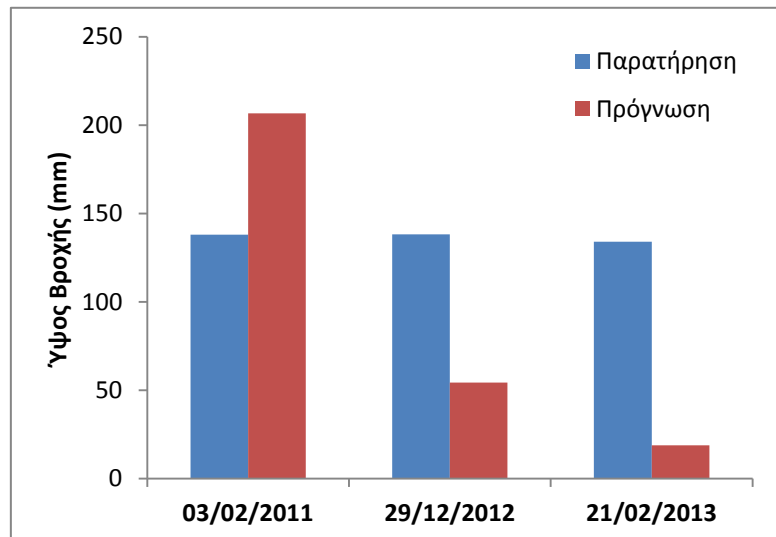
Το πρώτο βήμα κατά την επεξεργασία των δεδομένων πρόγνωσης, ήταν η μετατροπή των συντεταγμένων των στοιχείων του κανάβου στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87, καθώς πρωτογενώς βρίσκονταν στο γεωγραφικό σύστημα WGS '84. Λόγω του μεγάλου αριθμού των απαιτούμενων μετατροπών, χρησιμοποιήθηκε ένα ειδικά, για το λόγο αυτό, διαμορφωμένο «φύλλο» του προγράμματος Microsoft Excel, δημιουργίας της ερευνητικής ομάδας «Itia». Το excel αυτό παρέχεται ελεύθερα στο διαδίκτυο.

Έπειτα και από τη διαμόρφωση του τελικού κανάβου πρόγνωσης, ακολούθησε η επιλογή των χρονοσειρών των δεδομένων για τα υπό μελέτη επεισόδια και απομονώθηκαν τα σημεία της παρεχόμενης πληροφορίας που τοποθετούνται εντός την Πειραματικής Λεκάνης. Λόγω του ιδιαίτερα πυκνού κανάβου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2, για την επιφανειακή ολοκλήρωση της προγνωσθείσας βροχής επιλέχθηκε η μέθοδος του αριθμητικού μέσου.



Σχήμα 6.2 Σημεία κανάβου πρόγνωσης περί την Πειραματική Λεκάνη

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των τριών επιλεχθέντων επεισοδίων 2,7 και 8, ενώ κρίθηκε σκόπιμη και η σύγκριση του ολικού ύψους μεταξύ προγνωσθείσας και μετρηθείσας βροχής, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3 Μετρημένο και προγνωσμένο ύψος βροχής επεισοδίων

Παρότι το μέγεθος του συνολικό ύψος βροχής από μόνο του δεν είναι σε θέση να προσδιορίσει την έκταση και τη σφοδρότητα του αντίστοιχου πλημμυρικού επεισοδίου - καθότι πρέπει να συνδυάζεται με γνώση της διάρκειας και κατανομής αυτού στο χρόνο -, το ως άνω διάγραμμα είναι ιδιαίτερα ενδεικτικό για την επιτυχία του μοντέλου σε σχέση με τα τρία εξετασθέντα επεισόδια. Με βάση αυτό μπορούν να εξαχθούν κάποια πρώτα συμπεράσματα.

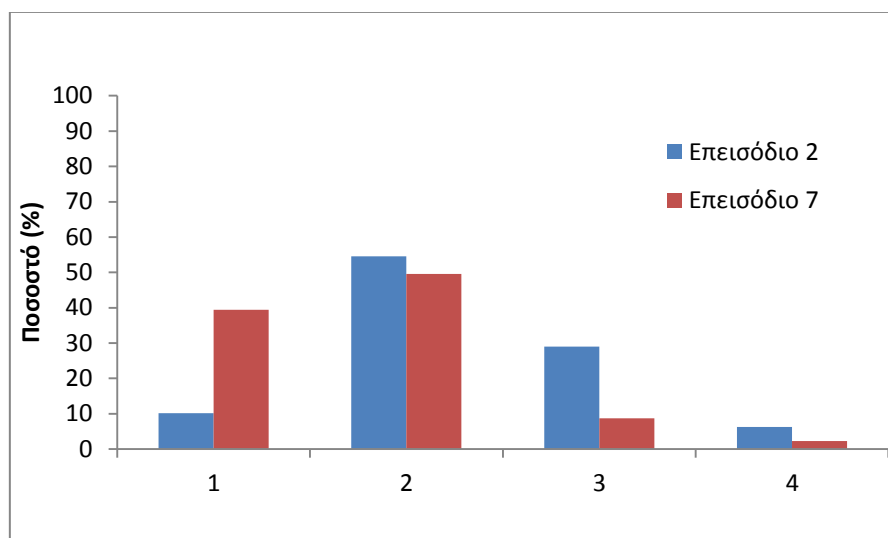
Συγκεκριμένα, παρατηρείται πως και στα τρία συμβάντα, η διαφοροποίηση της πρόγνωσης σε σχέση με το πραγματικό συνολικό ύψος της βροχόπτωσης είναι ιδιαίτερα υψηλή. Ενδεικτικά στο επεισόδιο 2: (02-03)/02/2011, μεταφράζεται σε υπερεκτίμηση της τάξης του 49,72%, στο 7: (29-31)/12/2012 σε υποεκτίμηση 60,72%, και στο επεισόδιο 8: (21-22)/02/2013 επίσης σε υποεκτίμηση κατά 86%, απόκλιση που αποτελεί και τη μεγαλύτερη μεταξύ των τριών.

Στο επεισόδιο 8, η μεγάλη αστοχία του μοντέλου συνδέεται άμεσα με τη μορφή που εκδηλώθηκε το επεισόδιο, που προκύπτει από το μηχανισμό γένεσής του. Όπως διαπιστώνεται ύστερα και από περαιτέρω έρευνα, το επεισόδιο εξελίσσεται σε μεταγωγικού τύπου κατακρήμνιση / convective precipitation, καθώς η κρίσιμη ένταση βροχόπτωσης για την διάκριση του τύπου, υπερβαίνει την τιμή των 11,31 mm/6h, τυπική τιμή για την περιοχή μελέτης κατά τους Feloni et al. (2014). Για τον συγκεκριμένο τύπο βροχόπτωσης, είναι επιβεβαιωμένο ότι το μοντέλο πρόγνωσης δε δίνει, εν γένει, ικανοποιητικά αποτελέσματα,

σύμφωνα και με τους Kotroni and Lagouvardos (2004). Ως εκ τούτου, αν και κρίνεται ως το σημαντικότερο και κρισιμότερο από άποψη διερεύνησης (λόγω των μεγάλων επιπτώσεων που το συνόδευσαν), επιλέγεται να μη χρησιμοποιηθεί, ακριβώς εξαιτίας της διαφαινόμενης αποτυχίας προσομοίωσής του. Έτσι, καταλήγουμε στην περαιτέρω διερεύνηση και προσομοίωση των επεισοδίων πρόγνωσης 2 και 7, ώστε να διαπιστωθεί και ο βαθμός της εκτιμώμενης συσχέτισης των πλημμυρογραφημάτων με βάση την πρόγνωση, με τα παρατηρημένα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η πληροφορία της πρόγνωσης παρέχεται σε δίωρο χρονικό βήμα. Το γεγονός αυτό, καθιστά την αυτούσια χρήση των δεδομένων της απαγορευτική για τη μελέτη της Πειραματικής Λεκάνης, μιας και ο χρόνος συγκέντρωσης, όπως υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 5, ανέρχεται περίπου στα 49 λεπτά της ώρας. Έτσι δημιουργείται η ανάγκη χρονικού επιμερισμού της βροχής και σαν βήμα επιλέγονται τα 10 λεπτά.

Για τον συγκεκριμένο επιμερισμό, απαιτείται να πραγματοποιηθεί μία εύλογη παραδοχή. Κατόπιν διερεύνησης, επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η κατανομή ενός πρότυπου επεισοδίου (Επεισόδιο 7: (29-31)/12/2012), το οποίο (i) συνδέεται με τη δυσμενέστερη πλημμύρα (από άποψη αιχμής) για την περίοδο μελέτης και (ii) παρουσιάζει κοινή κατανομή (2^{ου} τετάρτου) με τα υπό εξέταση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Επιπρόσθετα, (iii) το επεισόδιο αυτό ανήκει στο στρωματόμορφο τύπο καταγίδας (stratiform), ο οποίος χαρακτηρίζεται από μικρότερη σχετικά, ένταση, μεγάλη διάρκεια και έκταση και αποτελεί την πλέον συνήθη μορφή κατακρήμνισης. Για τους λόγους αυτούς, το συγκεκριμένο επεισόδιο μπορεί να θεωρηθεί ως το δυσμενέστερο, αλλά συνάμα και αντιπροσωπευτικό, ως ένα βαθμό, της περιοχής.



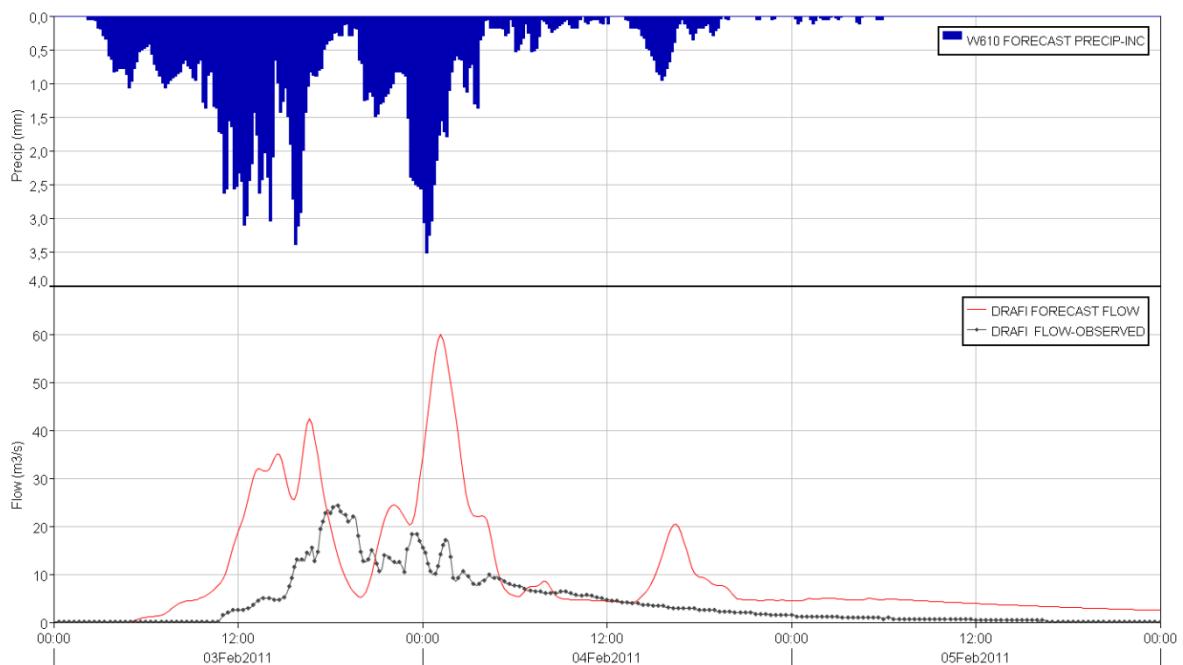
Σχήμα 6.4 Κατανομές τετάρτου παρατηρημένων επεισοδίων βροχόπτωσης

Η κατανομή προσαρμόζεται στη συνολική χρονική διάρκεια και ολικό ύψος βροχής, όπως αυτά παρέχονται από την πρόγνωση

6.2.2 Προσομοίωση υδρογραφήματων με χρήση προγνωσθείσας βροχής

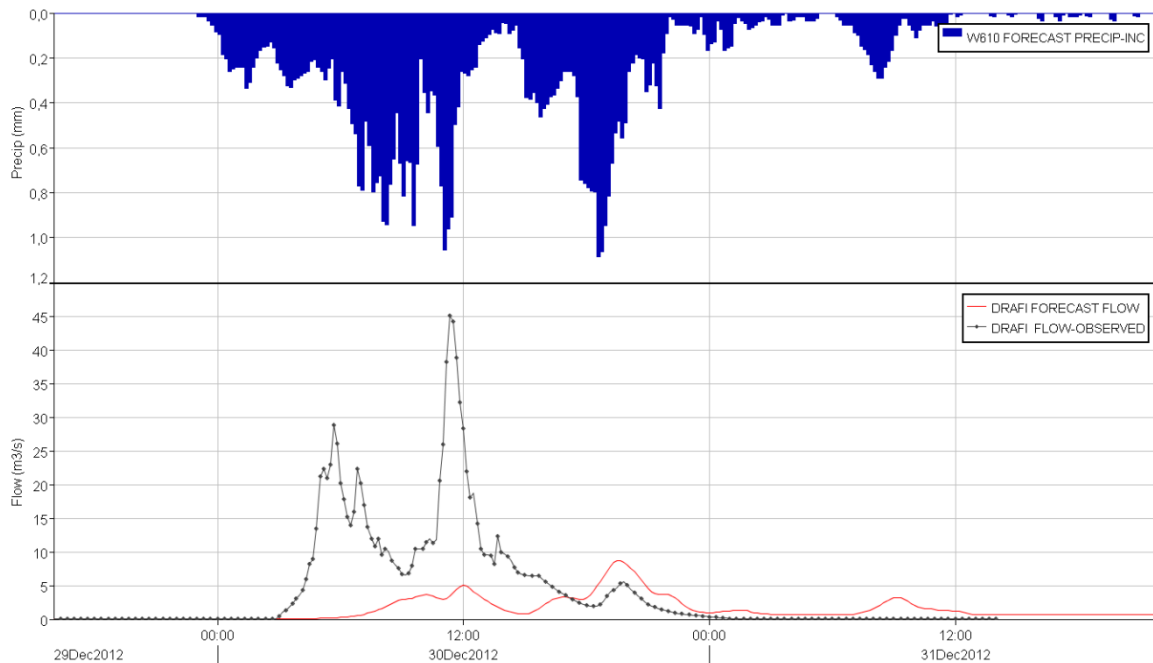
Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας επιμερισμού της προγνωσθείσας βροχής, τα δεδομένα εισήχθησαν στο HEC – HMS. Για την προσομοίωση των απωλειών επιλέχθηκε η μέθοδος κατά SCS, για την άμεση απορροή το μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder (μιας και όπως φάνηκε στο Κεφάλαιο 5 δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις έναντι των άλλων δύο) και για τη βασική απορροή το μοντέλο εκθετικής μείωσης. Οι παράμετροι αυτών εισήχθησαν, όπως έχουν προκύψει κατά τη βαθμονόμηση.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήμα 6.5 και Σχήμα 6.6)



Σχήμα 6.5 Προσομοίωση υδρογραφήματος εξόδου από προγνωσθείσα βροχή - επεισόδιο 2

Το επεισόδιο 7: (29-31)/12/2012 επισημαίνεται πως κατά την πρόγνωση παρουσιάζοταν υστερημένο κατά τρεις ώρες, σε σχέση με το παρατηρημένο. Έτσι μετατοπίστηκε στην ίδια ώρα αρχής, για λόγους σύγκρισης και μεγαλύτερης εποπτείας επί των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 6.6 Προσομοίωση υδρογραφήματος εξόδου από προγνωσθείσα βροχή - επεισόδιο 7

Όπως διαπιστώνεται από τα Σχήματα 6.5 και 6.6, οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται μεταξύ των προγνωσθέντων και των παρατηρημένων πλημμυρογραφημάτων είναι πολύ μεγάλες, γεγονός αναμενόμενο, ωστόσο, ήδη από την εξέταση των υψών βροχής που προηγήθηκε. Οι αποκλίσεις εξετάζονται σε σχέση με τις μετρημένες και προσομοιωμένες πλημμυρικές αιχμές, μέγεθος το οποίο αποτελεί το ζητούμενο κατά τη διερεύνηση χρήση του μοντέλου πρόγνωσης.

Στο πλαίσιο αυτό, διαπιστώνεται πως ο συγκεκριμένος στόχος δεν μπορεί να επιτευχθεί με χρήση του εν λόγω, 24ωρου χρονικού ορίζοντα, μοντέλου πρόγνωσης. Οι διαφορές στις αιχμές που καταγράφονται κατά τις προσομοιώσεις είναι της τάξης του +146,64% και -80,62% στα επεισόδια 2 και 7 αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την αβεβαιότητα που ενυπάρχει στην κατάρτιση πρόγνωσης χρονικού ορίζοντα 24ώρου και την ανάγκη στροφής προς την κατεύθυνση διερεύνησης μοντέλων βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης της βροχόπτωσης (now-casting), ώστε να καταστεί δυνατή η έγκαιρη προειδοποίηση και λήψη μέτρων σε περιπτώσεις ακραίων γεγονότων πλημμύρας.

Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα - μελλοντική έρευνα

7.1 Συμπεράσματα

Κατά την αρχική εκτίμηση

Κατά τις αρχικές εκτιμήσεις διαπιστώθηκε πως η χρήση γεωλογικού χάρτη της περιοχής για την εκτίμηση των ομάδων υδατοπερατότητας είναι ανεπαρκής. Οι χάρτες αυτοί δεν είναι σε θέση να αποδώσουν τις τοπικές συνθήκες των πετρωμάτων που εμφανίζονται, οδηγώντας έτσι σε αδρές εκτιμήσεις των χαρακτηριστικών τους και κατ' επέκταση και των αριθμών καμπύλη. Επίσης, η εφαρμογή των βιβλιογραφικά συνιστώμενων εμπειρικών σχέσεων για τον υπολογισμό των χρησιμοποιηθέντων μοναδιαίων υδρογραφημάτων, οδηγεί σε αποτελέσματα που απέχουν από την πραγματικότητα. Το συμπέρασμα αυτό διαπιστώνεται πιο έντονα κατά την εφαρμογή της μεθόδου Snyder. Οι σχέσεις αυτές έχουν εξαχθεί από έρευνες σε λεκάνες με χαρακτηριστικά κατά πολύ διαφορετικά από τα συναντώμενα στην περιοχή μελέτης (πολύ μεγαλύτερες εκτάσεις, πιο απότομες κλίσεις, μεγαλύτερες διατομές υδατορέματος κτλ) και έτσι πρέπει να αντιμετωπίζονται κριτικά.

Κατά τη βαθμονόμηση

Κατά τη βαθμονόμηση διαπιστώθηκε πως και οι τρεις χρησιμοποιηθείσες μέθοδοι άμεσης απορροής έδιναν αποτελέσματα εξαιρετικά παραπλήσια μεταξύ τους, χωρίς να μπορέσει κάποια να θεωρηθεί ως συστηματικά ακριβέστερη ή το αντίθετο. Επίσης, έγινε σαφές πως η θεώρηση της λεκάνης ως ενιαίας και η μελέτη με βάση μέσες τιμές αυτής ενέχει κινδύνους, που προκύπτουν από το μεγάλο εύρος των τιμών των παραμέτρων που προκύπτουν κατά τη βαθμονόμηση. Για το λόγο αυτό επισημαίνεται η ανάγκη χρήσης αρκούντως μεγάλου δείγματος επεισοδίων ώστε να μειωθεί το σφάλμα κατά τον υπολογισμό των μέσων όρων. Αναφορικά με τις τιμές των εκτιμηθέντων μεγεθών, διαπιστώνεται πως ο λόγος I_a/S προσεγγίζεται καλύτερα στην Πειραματική Λεκάνη από την τιμή 0,03, η οποία απέχει τάξη μεγέθους από την επί δεκαετίες προτεινόμενη από την SCS, τιμή 0,2. Ο λόγος $R/(R+t_c)$, χαρακτηριστικός περιοχής, που λαμβάνει υπόψη το συντελεστή αποθηκευτικότητας κατά Clark υπολογίζεται ως 0,216. Τέλος, η σχέση που προτείνει η SCS για την εμπειρική εκτίμηση του χρόνου υστέρησης της λεκάνης (ως το 60% του χρόνου συγκέντρωσης) επιβεβαιώνεται, γεγονός που προκύπτει από τα αντίστοιχα μεγέθη, όπως υπολογίστηκαν κατά τις μεθόδους άμεσης απορροής SCS (ή Snyder) και Clark αντίστοιχα.

Κατά την επαλήθευση

Κατά την επαλήθευση διαπιστώθηκε πως το μοντέλο προσομοιάζει σε ικανοποιητικό βαθμό τις υδρολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην Πειραματική Λεκάνη. Η μεγαλύτερη επιτυχία παρουσιάζεται στην προσέγγιση των πλημμυρικών αιχμών, που θεωρείται και το κρισιμότερο μέγεθος. Το κομμάτι στο οποίο παρατηρούνται αξιόλογα σφάλματα, είναι αυτό της εκτίμησης των όγκων, γεγονός που απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση. Μεταξύ των τριών επεισοδίων που εξετάστηκαν, στο 7: (29-31)/12/2012 διαπιστώθηκαν οι μεγαλύτερες αποκλίσεις (τόσο στη συνολική συσχέτιση των καμπυλών όσο και επιμέρους στις αιχμές και στους όγκους) μεταξύ προσομοιωμένων και παρατηρημένων υδρογραφημάτων, γεγονός που σχετίζεται, ωστόσο, με την ιδιαίτερα πολύπλοκη εξέλιξη της καταιγίδας από την οποία προκλήθηκε. Τέλος, όπως κατά τη βαθμονόμηση, έτσι και κατά την επαλήθευση δε διαπιστώθηκαν αξιόλογες διαφοροποιήσεις μεταξύ των τριών μεθόδων άμεσης απορροής.

Για τη χρήση του μοντέλου πρόγνωσης

Η διερεύνηση βάση χρήσης 24ωρης προγνωσθείσας βροχής για την προσομοίωση των παρατηρημένων υδρογραφημάτων οδήγησε σε ανεπιτυχή αποτελέσματα. Ζητούμενο της διαδικασίας ήταν η διαπίστωση της συσχέτισης μεταξύ, κυρίως, των αιχμών, η οποία και αποδείχτηκε πως και στις δύο περιπτώσεις ήταν πολύ χαμηλή. Έτσι, έγινε φανερό πως τα αποτελέσματα της 24ωρης πρόγνωσης εμπεριέχουν πολλές αβεβαιότητες, γεγονός που τα καθιστά ως μη αξιόπιστα για την εκτίμηση πιθανής επερχόμενης πλημμύρας.

7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα εργασία, η υδρολογική προσομοίωση βασίστηκε στη χρήση συγκεκριμένων μεθόδων. Έτσι προτείνεται να διερευνηθούν και εναλλακτικοί τρόποι επιφανειακής ολοκλήρωσης της βροχής, προσομοίωσης των απωλειών και της άμεσης απορροής, μέσα από το σύνολο των επιλογών που παρέχει το HEC – HMS.

Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στη μέθοδο προσομοίωσης «ModClark» που παρέχεται σαν επιλογή στο χρήστη και η οποία δύναται να επιτύχει πολύ ακριβέστερη προσομοίωση. Η βασική διαφορά της μεθόδου αυτής από τις υπόλοιπες, είναι η μελέτη της λεκάνης στα πλαίσια ενός μοντέλου καναβικού συστήματος (grid-based), το οποίο δημιουργείται στο GIS και εισάγεται στο HEC–HMS. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να ληφθεί υπόψη η χωρική μεταβλητότητα των διαφόρων φαινομένων που υπεισέρχονται κατά τη μοντελοποίηση, μιας και ανάγεται ουσιαστικά η μελέτη από το σύνολο της λεκάνης, στο πλαίσιο του κελιού.

Επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η προσομοίωση της λεκάνης με χρήση κάποιου διαφορετικού, του HEC – HMS, μοντέλου και η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Ως παραδείγματα πιθανών εναλλακτικών μοντέλων θα μπορούσαν να αναφερθούν τα AWBM, ARNO, GR2M, TOPMODEL και άλλα πολλά, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως σε χώρες του εξωτερικού.

Πεδίο προς διερεύνηση, ακόμα, αποτελεί η κατάρτιση εμπειρικών σχέσεων προσδιορισμού των παραμέτρων των μοναδιαίων υδρογραφημάτων, με βάση τα χαρακτηριστικά των λεκανών που συναντώνται στον ελλαδικό χώρο. Η πρόταση αυτή διατυπώνεται, μιας και έγινε φανερή, στην παρούσα εργασία, η αδυναμία των υφιστάμενων σχέσεων να προσεγγίσουν ικανοποιητικά τα χαρακτηριστικά υδρολογικά μεγέθη της υπό μελέτη περιοχής.

Τέλος, αναφορικά με την προσομοίωση που βασίζεται σε δεδομένα πρόγνωσης υετού, προτείνεται η διερεύνηση αξιοποίησης κάποιου διαφορετικού, βραχυπρόθεσμου μοντέλου, στο πλαίσιο της προσπάθειας διαμόρφωσης συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης ακραίων πλημμυρικών φαινομένων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

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

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

ΕΚ (2000), ΟΔΗΓΙΑ 2000/60/ΕΚ για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων.

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

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

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

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

Καυάλης, Π., 2009. *Προσομοίωση της ανάντη λεκάνης του ποταμού Πηνειού και ανάλυση ευαισθησίας με χρήση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS*, Διπλωματική Εργασία Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος.

Κουλίκας, Σ., 2009. *Συγκριτική ανάλυση και αξιολόγηση των προγραμμάτων HEC-1 και HEC-HMS*, Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή-Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος.

Κουργιαλάς, Ν., 2010. *Ολοκληρωμένη Διαχείριση – Πρόβλεψη & Αντιμετώπιση Πλημμυρικών Φαινομένων σε σύνθετες γεωμορφολογικά περιοχές με χρήση μαθηματικών μοντέλων και GIS*, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής

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

Κουτσόπουλος, Κ., Ανδρουλάκης, Ν., 2005. *Εφαρμογές του λογισμικού ArcGIS 9x με απλά λόγια*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2005.

Μαμάσης, Ν., 2009. Διαφάνειες μαθήματος *Προχωρημένη Υδρολογία*, ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων

Μαμάσης, Ν., 2011. Σημειώσεις μαθήματος *Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα*, ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων.

Μιμίκου, Μ.Α., Μπαλάς, Ε.Α., 2006. *Τεχνική Υδρολογία*, 4^η έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2006.

Μιμίκου. Μ.Α., 2006. *Τεχνολογία Υδατικών Πόρων*, 3^η έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2006

Μιμίκου, Μ.Α., 2012. Σημειώσεις μαθήματος *Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά έργα*, ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων.

Μπαριάμης, Γ, 2013. *Ανάλυση Ευαισθησίας παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS και εφαρμογή στη λεκάνη του Ρέματος Ραφήνας*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων.

Παγάνα, Β., 2012. *Κατάρτιση χαρτών πλημμύρας στην περιοχή της Ραφήνας*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων.

Σακκάς, Ι.Γ., 2004. *Τεχνική Υδρολογία* Τόμος Ι, Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων, 2^η έκδοση, Εκδόσεις Αιβάζη, Θεσσαλονίκη.

Στάθης, Δ., 2004. *Ακραία γεγονότα βροχής και πλημμυρογένεση στην Ελλάδα*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων.

Στάμου, Λ. και Σκοπελίτη, Α., 2009. Παρουσίαση στο μάθημα *Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών στους Υδατικούς Πόρους*, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009

Ξένη Βιβλιογραφία

Ahmad, M.M., Ghumman, A.R., Ahmad, S., 2009. *Estimation of Clark's instantaneous unit hydrograph parameters and development of direct surface runoff hydrograph*, Water Resource Manager DOI 10.1007/s11269-008-9388-8.

Baltas, E.A., Dervos, N.A. and Mimikou, M.A., 2007. Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio *in an experimental watershed in Greece*, European Geosciences Union.

Chow, V.T., Maidment, D.R, Mays, L.W., 1988. *Applied Hydrology*, McGraw-Hill International Editions.

Feloni, E., Nastos, P., Baltas, E., and Matsangouras, I., 2014. *Classification of stratiform and convective precipitation over Athens area, Greece*. 14th EMS / 10th ECAC

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

Graf, J.B., Garklavs, G., and Oberg, K.A., 1982a, *Time of concentration and storage coefficient values for Illinois streams*: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 82-13, 35 p.

Hjelmfelt, Allen T., Jr, 1991. *Investigation of Curve Number Procedure*. J. Hydraul. Eng., 117(6), 725–737.

Jenson, S.K. and Domingue, J. O., 1988, *Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis*, TGS Technology, Inc., EROS Data Center, Sioux Falls, SD 57198

Kotroni, V., Lagouvardos, K., 2004. *Evaluation of MM5 High-Resolution Real-Time Forecasts over the urban area of Athens, Greece*, Journal of Applied Meteorology

Melching, C., Marquard, J., 1996. *Equations for estimating synthetic unit hydrograph parameter values for small catchments in Lake Country*, USGS, Rep. 96-474, 49p

Mishra, S. K., Jain, M.K., and Singh, V.P., 2004: *Evaluation of the SCS-CN-based model incorporating antecedent moisture*, J. Water Resources Management, December 2004, Volume 18, Issue 6, pp 567-589.

Mockus, V., 2004. *Hydrologic Soil – Cover Complexes*, National Engineering Handbook Part 630 Hydrology, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.

Ponce, V. M. and Hawkins, R. H., *Runoff curve number: has it reached maturity?*, J. Hydrol. Eng., American Society of Civil Engineers, 1(1), 11-19, 1996.

Sabol, G.V., 1988. *Clark unit hydrograph and R-parameter estimation*. J Hydraulic Engg, ASCE,114(1):103–111

Straub, T., Melching, C., Kocher, K., 2000. *Equations for estimating Clark unit-hydrograph parameters for small rural watersheds in Illinois*, Water Resour Manage 21:1127-1143.

USACE, 2000. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual*.

Wilson, E.M., 1990. *Engineering Hydrol*. Macmillan, London, pp 149–152

Woodward, D.E., Hawkins, R.H., Jiang, R., Hjelmfelt, A.T. Jr., Van Mullem., J.A. and Quan, Q.D., 2003. *Runoff Curve Number method: examination of the Initial Abstraction Ratio*, American Society of Civil Engineers.

Διαδικτυακοί Τόποι

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

<http://www.ypeka.gr>

<http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE>

<http://www.moa.gov.cy>

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

<http://www.emdat.be>

<http://www.itia.ntua.gr>

<http://cirrus.meteo.noa.gr>

