



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Επίδραση των αλλαγών χρήσης γης στην εκτίμηση της πλημμυρικής  
κατάκλυσης: Η περίπτωση της λεκάνης απορροής ποταμού εισροής  
της Λίμνης Παραλιμνίου στην Κύπρο

---

Διπλωματική Εργασία



Σοφοκλέους Χριστόδουλος

Επιβλέπων: Ναλμπάντης Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα Οκτώβριος, 2016





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Επίδραση των αλλαγών χρήσης γης στην  
εκτίμηση της πλημμυρικής κατάκλυσης: Η  
περίπτωση της λεκάνης απορροής ποταμού  
εισροής της Λίμνης Παραλιμνίου στην Κύπρο

---

Διπλωματική Εργασία

Σοφοκλέους Χριστόδουλος

Επιβλέπων Καθηγητής  
Ναλμπάντης Ιωάννης,  
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα  
Οκτώβριος, 2016



## Ευχαριστίες

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Επίδραση των αλλαγών χρήσης γης στην εκτίμηση της πλημμυρικής κατάκλυσης: Η περίπτωση της λεκάνης απορροής ποταμού εισροής της Λίμνης Παραλιμνίου στην Κύπρο», εκπονήθηκε στα πλαίσια των προπτυχιακών σπουδών μου και μου ανατέθηκε από τον κ. Ναλμπάντη Ιωάννη, επίκουρο καθηγητή στον τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης.

Με την αποπεράτωση της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ναλμπάντη Ι. για το χρόνο του και την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε σε όλα τα στάδια της εργασίας. Ακόμη, είμαι ευγνώμων στον κ. Αριστείδου Κ. του Τμήματος Αναπτύξεως Υδάτων για την βοήθεια του. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Τμήμα Πολεοδομίας και Οικήσεως, το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης και την Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου για τα δεδομένα που μου παρείχαν. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δέσπω Γεωργίου καθώς και την οικογένεια μου για την συμπαράσταση τους, κατά την διάρκεια της φοίτησης μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.



## Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

<b>Ευχαριστίες</b>	<b>i</b>
<b>Περίληψη</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Κατάλογος συμβόλων</b>	<b>ix</b>
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος.....	1
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....	2
<b>2 Διαχείριση Πλημμυρικής Διακινδύνευσης</b>	<b>3</b>
2.1 Γενικά στοιχεία.....	3
2.2 Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/EK για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας.....	4
2.3 Κίνδυνος πλημμύρας και πλημμυρική διακινδύνευση.....	7
<b>3 Περιοχή Μελέτης</b>	<b>9</b>
3.1 Γενικά.....	9
3.2 Λεκάνη απορροής ποταμού εισροής Λίμνης Παραλιμνίου.....	11
3.2.1 Χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής.....	11
3.2.2 Γεωλογία.....	14
3.2.3 Χρήσεις γης.....	16
3.3 Βροχομετρικοί σταθμοί.....	17
<b>4 Μεθοδολογία Εκτίμησης Πλημμύρας</b>	<b>19</b>
4.1 Γενικά.....	19
4.2 Ανάλυση όμβριων καμπύλων.....	19
4.3 Απώλειες βροχόπτωσης.....	20
4.3.1 Μοντέλο αρχικών και σταθερών απωλειών (Initial and Constant Loss Model).....	20
4.3.2 Μοντέλο ελλείμματος και σταθερών απωλειών (Deficit and Constant Loss Model).....	20
4.3.3 Μοντέλο Green and Ampt.....	20
4.3.4 Μοντέλο αριθμού καμπύλης CN της μεθόδου SCS (SCS Curve Number Loss Method).....	21
4.4 Διόδευση πλημμύρας διαμέσου υδατορέματος.....	24
4.4.1 Διόδευση πλημμύρας με τη μέθοδο Muskingum.....	25
4.5 Μοναδιαίο υδρογράφημα.....	26

4.5.1	Γενικά.....	26
4.5.2	Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα με βάση τη μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας .....	27
4.6	Υδραυλική προσομοίωση πλημμύρας .....	28
<b>5</b>	<b>Υδρολογική Προσομοίωση Λεκάνης Απορροής Παραλιμνίου</b>	<b>33</b>
5.1	Γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση της λεκάνης.....	34
5.1.1	Προετοιμασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.....	34
5.1.2	Προετοιμασία δεδομένων για είσοδο στο HEC-HMS .....	36
5.2	Το πρόγραμμα HEC-HMS.....	39
5.2.1	Υδρολογικό μοντέλο –γενικές κατευθύνσεις .....	39
5.2.2	Μοντέλο λεκάνης απορροής .....	40
5.2.3	Μετεωρολογικό μοντέλο.....	46
5.2.4	Αρχείο προσομοιώσεων (Control Specifications Component) .....	49
5.3	Τρέξιμο προσομοίωσης και αποτελέσματα .....	49
5.3.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων .....	52
<b>6</b>	<b>Υδραυλική Προσομοίωση στη Λεκάνη Απορροής Παραλιμνίου</b>	<b>59</b>
6.1	Δημιουργία αρχείου γεωμετρικών δεδομένων .....	59
6.1.1	Παραγωγή ισοϋψών καμπυλών από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους .....	60
6.1.2	Παραγωγή θεματικών επιπέδων.....	61
6.1.3	Σύνθεση θεματικών επιπέδων και εξαγωγή στο HEC-RAS .....	68
6.2	Υδραυλική προσομοίωση υδατορεύματος (HEC-RAS).....	69
6.2.1	Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων .....	69
6.2.2	Προσδιορισμός συντελεστή τραχύτητας Manning $n$ .....	71
6.2.3	Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων .....	75
6.2.4	Ρύθμιση παραμέτρων και εκτέλεση υδραυλικών υπολογισμών .....	77
6.2.5	Εξαγωγή αποτελεσμάτων από το HEC-RAS .....	79
6.2.6	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και σύνθεση χαρτών .....	79
<b>7</b>	<b>Σύνοψη – Συμπεράσματα – Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα</b>	<b>91</b>
	<b>Αναφορές</b>	<b>95</b>
	Στην ελληνική γλώσσα .....	95
	Ξενόγλωσσες .....	95
	Διαδικτυακοί τόποι .....	96
	<b>Παράρτημα Α: Πίνακες</b>	<b>97</b>
	<b>Παράρτημα Β: Σχήματα</b>	<b>103</b>



## Περίληψη

---

Το 2007 θεσπίστηκε η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/EK για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Με άξονα την οδηγία αυτή, έγινε η συγκεκριμένη εργασία με θέμα την επίδραση των αλλαγών χρήσεων γης στην εκτίμηση της πλημμυρικής κατάκλυσης και ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε η λεκάνη απορροής Ποταμού εισροής Λίμνης Παραλιμνίου. Στο μεθοδολογικό πλαίσιο της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι SCS για τον υπολογισμό των απωλειών βροχόπτωσης και Muskingum για τη διόδευση διαμέσου του ποταμού. Επίσης, λήφθηκε υπόψη ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning. Οι προσομοιώσεις έγιναν με την βοήθεια των λογισμικών HEC-HMS και HEC-RAS, για τις περιπτώσεις παλιών και νέων χρήσεων γης της περιοχής. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, παρατηρήθηκε αύξηση στον όγκο της τελικής απορροής κατά 44.7%, και της πλημμυρικής έκτασης κατά 19.2% από τις παλιές στις νέες χρήσεις γης. Συμπεραίνεται ότι η αλλαγή στις χρήσεις γης λόγω αστικοποίησης και κοινωνικής ανάπτυξης έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της πλημμυρικής κατάκλυσης. Τέλος, δημιουργήθηκαν χάρτες πλημμυρικής κατάκλυσης για τις περιπτώσεις χρήσης γης που εξετάστηκαν.



## Abstract

---

In 2007 the European Directive 2007/60/EC on the management of flood risks, was established. With this directive as a guideline, the given work was fulfilled with the aim to study “the effect of land use change in the assessment of inundated area due to flooding. The Drainage Catchment of Paralimni Lake River was chosen as the test basin. At the methodological level, the SCS method was used for calculating the hydrological losses and was combined with the Muskingum method for river routing. Also the Manning’s roughness coefficient was taken into account. The simulations performed with the aid of software packages known as HEC-HMS and HEC-RAS, while both cases with the old and new land uses in the area were investigated. By observing the simulation results, an increase in flood volume by 44.7% and the inundated area by 19.2% was noted, when passing from the old to new land uses. Therefore, we can conclude that the change in land use (due to urbanization and social development) has the effect of increasing the inundation area. Finally floodplain maps were created for the studied cases of land uses.



## Κατάλογος συμβόλων

$f_t$	Απώλειες κατά την περίοδο $t$
$K$	Υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού
$(\varphi-\theta_i)$	Έλλειμμα όγκου υγρασίας
$S_f$	Προσρόφηση υγρού μετώπου
$F_t$	Αθροιστική απώλεια στο χρόνο $t$
$h_R$	Ύψος περισσέυματος βροχής (ή ύψος άμεσης απορροής)
$h_r$	Ύψος βροχόπτωσης
$S$	Μέγιστο θεωρητικό ύψος απωλειών
CN	Αριθμός καμπύλης απορροής
$I$	Εισροή στο τμήμα ποταμού
$Q$	Εκροή
$S$	Η αποθήκευση στο τμήμα ποταμού
$t$	Χρόνος
$K$	Είναι σταθερά που προσεγγίζεται από το μέσο χρόνο διαδρομής της αιχμής διαμέσου του τμήματος
$x$	Βάρος συμμετοχής της εισροής στην αποθήκευση του τμήματος
$t_p$	Χρόνος ανόδου
$t_b$	Χρόνος βάσης
$Q_p$	Παροχή αιχμής
$L$	Μήκος κύριας μισγάγκειας
$S_{0.1L-0.85L}$	Η μέση κλίση υδατορεύματος μεταξύ των σημείων 10% και 85% του μήκους
URBAN	Αναλογία αστικών περιοχών στη λεκάνη απορροής
RMS	Παράμετρος μεγέθους βροχόπτωσης
$A$	Έκταση λεκάνης απορροής
$t_c$	Χρόνος συγκέντρωσης
$d$	Χρονικό βήμα
$\Delta H$	Υψομετρική διαφορά με το ελάχιστο υψόμετρο στην έξοδο της λεκάνης και του μέσου υψόμετρου της λεκάνης
$t_L$	Χρόνος υστέρησης
$L$	Ανάπτυγμα της μέγιστης διαδρομής
$I_m$	Μέση κλίση της λεκάνης
$V$	Ταχύτητα ροής του νερού
$n$	Αριθμός παραπόταμων
$Z_1, Z_2$	Υψόμετρα
$Y_1, Y_2$	Βάθη νερού
$\alpha_1, \alpha_2$	Συντελεστές συνόρθωσης κινητικής ενέργειας ταχύτητας
$V_1, V_2$	Μέσες ταχύτητες διατομών
$g$	Επιτάχυνση βαρύτητας
$h_e$	Ολικές απώλειες ενέργειας (γραμμικές και τοπικές)
$L$	Μέση σταθμισμένη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών

$\bar{S}_f$	Απώλειες λόγω τριβής
$C$	Συντελεστής συστολής/διαστολής για τις τοπικές απώλειες ενέργεια
$\left  \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right $	Διαφορά κινητικής ενέργειας μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών
$L_{lob}, L_{ch}, L_{rob}$	Αποστάσεις μεταξύ διατομών κατά μήκος των διευθύνσεων ροής για το αριστερό τμήμα, την κοίτη και το δεξί τμήμα, αντίστοιχα
$\bar{Q}_{lob}, \bar{Q}_{ch}, \bar{Q}_{rob}$	Μέσες παροχές μεταξύ διατομών στο αριστερό τμήμα, την κοίτη και το δεξί τμήμα, αντίστοιχα
$n$	Συντελεστής τραχύτητας κατά Manning
$P$	Βρεχόμενη περίμετρος
$R$	Υδραυλική ακτίνα διατομής
$K$	Συντελεστής στην Εξίσωση 4.10 για την μέθοδο Muskingum

# 1 Εισαγωγή

---

## 1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος

Η αύξηση του πληθυσμού και η αυξανόμενη αστικοποίηση κάνουν την κοινωνία πιο εξαρτώμενη από το νερό. Ωστόσο, κάπως παράδοξα, η αντίληψη των ανθρώπων για τα προβλήματα που συνδέονται με το νερό, γενικά μειώνεται με την πρόοδο της κοινωνικής ανάπτυξης. Πράγματι, αυτές τις μέρες υπάρχουν πολλά άτομα που δεν χρειάζεται να εξασφαλίσουν προσωπικά νερό και δεν υπολογίζουν τους κινδύνους που σχετίζονται με αυτό, έτσι ώστε η κοινωνική επαφή τους με τα φυσικά συστήματα νερού να χάνεται. Ως εκ τούτου, η υδρολογική κοινότητα χρειάζεται όλο και περισσότερο να συνηγορεί υπέρ της αειφόρου ανάπτυξης, με την περαιτέρω εξέλιξη της διαχείρισης και γνώσης των υδατικών πόρων στο μέλλον.

Οι μεταβαλλόμενες συνθήκες εξαναγκάζουν τις κοινωνίες να προσαρμοστούν (για παράδειγμα, μαζική μετακίνηση πληθυσμού λόγω φυσικών καταστροφών, αστικοποίησης και πολέμων όπως συνέβη πρόσφατα στην Συρία). Η προσαρμογή μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: με την κινητοποίηση (αξιοποίηση) περισσότερου νερού ή με τη διαχείριση της ζήτησης νερού. Και οι δύο επιλογές απαιτούν προβλέψεις, βασισμένες στη βαθύτερη γνώση των υδρολογικών αλλαγών και των εξελίξεων τους μακροπρόθεσμα, με σκοπό το σχεδιασμό αποτελεσματικών και βιώσιμων λύσεων. Ειδικότερα, από τεχνική άποψη, τα φαινόμενα που συνδέονται με τον κύκλο του νερού (για παράδειγμα, πλημμύρες, ξηρασίες, η διαθεσιμότητα γλυκού νερού, κυκλοφορία, διανομή και ποιότητα του νερού) πρέπει να προσομοιώνονται και να προβλέπονται όσο πιο αξιόπιστα γίνεται σε συστήματα τα οποία επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από οποιαδήποτε αλλαγή, είτε ανθρωπογενής είναι αυτή, είτε φυσική.

Με επίκεντρο την υδρολογία για την κοινωνία και τις αλλαγές που σχετίζονται με αυτή, η IAHS (International Association of Hydrological Sciences) ονόμασε την επόμενη επιστημονική δεκαετία 2013-2020 “Panta Rhei”, ρήση η οποία αποτελεί και κεντρική ιδέα της. Ο στόχος που θέτει αυτή η ιδέα, είναι η βελτίωση της ικανότητας να γίνονται προβλέψεις της δυναμικής των υδατικών πόρων, για τη στήριξη της βιώσιμης ανάπτυξης της κοινωνίας σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον.

Από την γενικότερη ιδέα της IAHS γίνεται εστίαση στις επιζήμιες πλημμύρες, δηλαδή πλημμύρες που έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο κοινωνικό σύστημα, το φυσικό σύστημα ή το δομημένο περιβάλλον. Οι πλημμύρες από καιρό είχαν αναγνωριστεί ως ένας από τους πιο επιβλαβείς και δαπανηρούς φυσικούς κινδύνους, καθώς αποτελούν τη δεύτερη πιο συχνή καταστροφή, μετά τις πυρκαγιές. Γίνεται όλο και περισσότερο αποδεκτό ότι τέτοια γεγονότα μπορούν να γίνουν πιο συχνά και σοβαρά στο μέλλον, ως αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής και της ανόδου της στάθμης της θάλασσας, μαζί με τις αλλαγές στις χρήσεις γης και την αστική ανάπτυξη. Ωστόσο, το να καθοριστούν οι ακριβείς συνέπειες αυτών των αλλαγών εξακολουθεί να είναι δύσκολο στην πράξη.

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, ως βάση για τις αποφάσεις διαχείρισης της πλημμύρας χρησιμοποιείται η έννοια του κινδύνου, όπου ο κίνδυνος υποδηλώνει ένα πιθανό φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει ζημία. Έτσι, παρά την αδυναμία πρόβλεψης των φυσικών φαινομένων που προκαλούν τις πλημμύρες, τα προβλήματα, οι ζημιές και οι καταστροφές

που προκαλούν οι πλημμύρες μπορούν να περιοριστούν προβλέποντας τους κινδύνους της πλημμύρας.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να υπολογιστεί το μέγεθος και η έκταση της πλημμύρας με βάση το επεισόδιο βροχόπτωσης του 1988 στον Ποταμό Παραλιμνίου. Με άλλα λόγια, στην εργασία αυτή θα γίνει προσδιορισμός της έκτασης η οποία πρόκειται να πλημμυρίσει για το συγκεκριμένο επεισόδιο βροχόπτωσης, σε δύο περιπτώσεις. Μία για τις υφιστάμενες χρήσεις γης που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης και μία για τις χρήσεις γης που υπήρχαν την περίοδο 1983-2003. Τέλος, θα γίνει προσπάθεια να δειχθεί το πώς οι σημαντικές αλλαγές στις χρήσεις γης σε μια περιοχή, μπορούν να επηρεάσουν το μέγεθος της πλημμύρας και, συνεπακόλουθα, τους κινδύνους της.

## **1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας**

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε επτά κεφάλαια. Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο είναι η εισαγωγή, η οποία θα εισάγει τον αναγνώστη στο θέμα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά, σε γενικά στοιχεία για τις πλημμύρες, στην Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/EK για την διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας και στους κινδύνους πλημμύρας και την πλημμυρική διακινδύνευση.

Στη συνέχεια, στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης. Αναφέρονται στοιχεία σχετικά με τον τρόπο που έγινε η επιλογή της περιοχής, και άλλα γενικά στοιχεία για την ευρύτερη περιοχή. Ακόμη, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του Ποταμού εισροής Λίμνης Παραλιμνίου όπως το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, οι τύποι εδαφών, οι χρήσεις γης, καθώς και οι βροχομετρικοί σταθμοί της περιοχής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναλύεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της πλημμύρας. Από υδρολογική άποψη, έγινε καθορισμός της βροχόπτωσης σχεδιασμού (ανάλυση όμβριων καμπύλων), υπολογισμός των απωλειών βροχόπτωσης, κατασκευή του μοναδιαίου υδρογραφήματος και διόδευση της πλημμύρας διαμέσου του υδατορεύματος.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης. Σε πρώτο στάδιο, γίνεται επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων και προετοιμασία τους για εισαγωγή στο πρόγραμμα HEC-HMS. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθοδολογίας μέσω προγράμματος HEC-HMS, καθώς και τα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, αναλύονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του επεισοδίου πλημμύρας στις 15/2/1988, για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις χρήσεων γης.

Ακολούθως, στο έκτο κεφάλαιο γίνεται η υδραυλική προσομοίωση της λεκάνης και η εξαγωγή αποτελεσμάτων. Σαν αποτέλεσμα, συντάσσονται οι χάρτες πλημμυρικής κατάκλυσης και συγκρίνεται η επιρροή της αλλαγής των χρήσεων γης στην έκταση της πλημμύρας.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται μία σύνοψη της εργασίας και παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα που προέκυψαν.

Τέλος παρατίθενται τα παραρτήματα για τη μελέτη που έγινε. Το Παράρτημα Α περιλαμβάνει τους πίνακες και το Παράρτημα Β περιλαμβάνει τα σχήματα.



## 2 Διαχείριση Πλημμυρικής Διακινδύνευσης

---

### 2.1 Γενικά στοιχεία

Η πλημμύρα ορίζεται ως η κατάσταση κατά την οποία στεγνές περιοχές, καλύπτονται από ποσότητες νερού για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Αυτό μπορεί να συμβαίνει λόγω τοπικής βροχόπτωσης, υπερχείλισης ποταμού, εισροής της θάλασσας σε παραθαλάσσιες περιοχές ή θραύσης φράγματος. Οι πλημμύρες είναι φυσικά φαινόμενα, αφού ως επί το πλείστον προέρχονται από μετεωρολογικές καταστάσεις, όμως συμβαίνουν όταν η χωρητικότητα του συστήματος αποστράγγισης δεν μπορεί να αφομοιώσει τον όγκο του νερού που παράγεται. Φυσικά, τα φαινόμενα που προκαλούν τις πλημμύρες δεν είναι κάτω από τον ανθρώπινο έλεγχο, αλλά οι γεωλογικές, γεωμορφολογικές και εδαφολογικές συνθήκες της λεκάνης απορροής υφίσταται δυνατόν να τροποποιηθούν (Μαμάσης, 2007).

Οι πλημμύρες ήταν και είναι ένας υπαρκτός κίνδυνος που αποτελούσε απειλή για πολλές περιοχές. Ο πλημμυρικός κίνδυνος είναι ο συνδυασμός της πιθανότητας εμφάνισης του φυσικού φαινομένου και της επίδρασης που θα έχει στην ανθρώπινη κοινωνία. Οι ζημιές που θα προκληθούν λόγω πλημμύρας από μια βροχόπτωση εξαρτώνται από τρεις βασικούς παράγοντες, οι οποίοι είναι: η παρουσία αντιπλημμυρικών έργων, η αλλοίωση του φυσικού περιβάλλοντος που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του πλημμυρικού όγκου και τη μείωση του χρόνου συγκέντρωσης των νερών και, τέλος, η ένταση της ανθρώπινης δραστηριότητας σε περιοχές που αποτελούν πιθανά πεδία πλημμύρων. Έτσι, σχεδιάζονται προστατευτικά μέτρα για να παρέχουν προστασία σε ένα επίπεδο πλημμύρας. Αυτό επιλέγεται σύμφωνα με το κόστος, την επιθυμία της κοινωνίας, την πιθανόν ζημιά, την επίδραση στο περιβάλλον και άλλους παράγοντες. Όμως, η προστασία από τις πλημμύρες δεν είναι ποτέ εντελώς επαρκής.

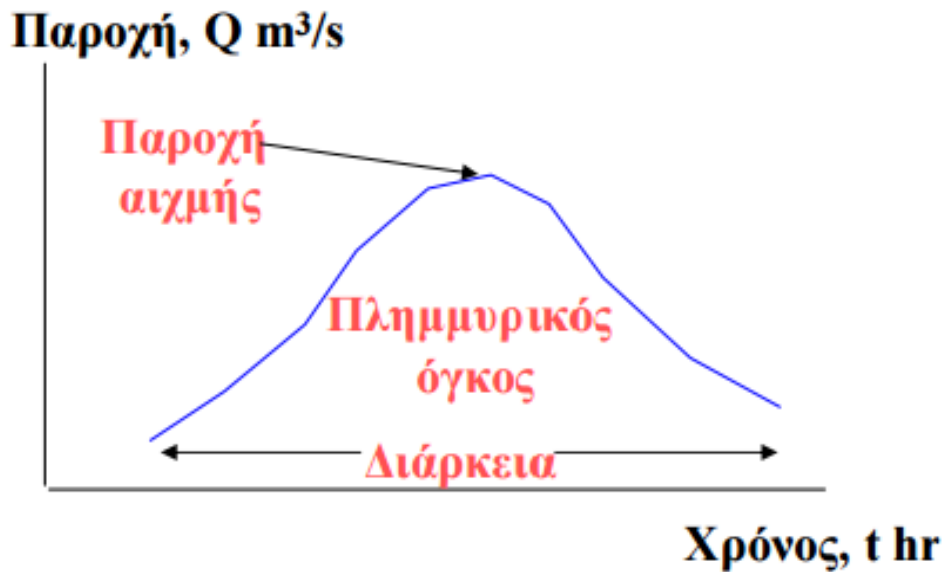
Τα μέτρα που λαμβάνονται για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού διακρίνονται ανάλογα με: την κατασκευή ή όχι τεχνικών έργων, το αν προστατεύουν ή όχι συγκεκριμένες κατασκευές ή μεγαλύτερες περιοχές και, τέλος, το αν έχουν σκοπό να μεταβάλλουν, να μειώσουν την ευπάθεια και να μειώσουν την επίδραση της πλημμύρας.

Οι κυριότερες ίσως αιτίες των πλημμύρων είναι τα φυσικά φαινόμενα, όπως η βροχόπτωση και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας που είναι στην ουσία απρόβλεπτα. Εντούτοις, το κατά πόσο μια βροχόπτωση θα προκαλέσει δεδομένες ζημιές λόγω πλημμύρας εξαρτάται ως επί το πλείστον, από ανθρώπινους παράγοντες όπως: την αστικοποίηση, την αποδάσωση τμημάτων την λεκάνης απορροής, την ευθυγράμμιση της ροής των ποταμών, την ανεπαρκή αποστράγγιση, την εξάλειψη των φυσικών πεδίων κατάκλισης και την οικοδόμηση κτιρίων ή κατασκευών σε επικίνδυνα σημεία κατάκλισης (Μαμάσης, 2007).

Τα τρία σημαντικότερα μεγέθη της πλημμύρας είναι:

- ✓ Η παροχή αιχμής
- ✓ Ο πλημμυρικός όγκος και
- ✓ Η χρονική διάρκεια

που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Κύρια μεγέθη της πλημμύρας (Αντωνίου, 2013).

Επιπρόσθετα, τα μεγέθη των πλημμύρων συνδέονται άρρηκτα με τα χαρακτηριστικά πρώτον της βροχόπτωσης, δηλαδή την ένταση, το συνολικό ύψος και την διάρκεια, δεύτερον της λεκάνης απορροής, δηλαδή την έκταση, το συντελεστή απορροής και το χρόνο συγκέντρωσης και τρίτον των υδατορευμάτων, τη διατομή, την κλίση, την ταχύτητα και τις κατάντη στάθμες τους. Ακόμη, οι επιπτώσεις των πλημμύρων είναι πιθανόν να αποβούν καταστροφικές για τον άνθρωπο και το φυσικό περιβάλλον. Μπορούν να προκαλέσουν καταστροφικές ζημιές σε κατασκευές όπως κτίρια, δρόμους κ.λ.π..

Επίσης, το περιβάλλον μπορεί να πληγεί όταν: κατακλύζονται εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, πλήττονται εργοστάσια όπου υπάρχουν μεγάλες ποσότητες τοξικών χημικών προϊόντων και, τέλος, όταν καταστρέφονται υγρότοποι με αποτέλεσμα την μείωση της βιοποικιλότητας (Μαμάσης, 2007).

## 2.2 Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/ΕΚ για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας

Τα τελευταία χρόνια η Ευρώπη έχει υποστεί δοκιμασίες που αφορούν στις καταστροφικές πλημμύρες, οι οποίες θέτουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές και έχουν σοβαρότατες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, τις υποδομές και τις περιουσίες. Η Ευρωπαϊκή Ένωση με τη σειρά της, έκρινε αναγκαία τη θέσπιση κοινοτικής νομοθεσίας για τη διαχείριση του κινδύνου πλημμύρας. Έτσι, τον Οκτώβριο του 2007 προχώρησε στην έκδοση της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ που προνοεί για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας (Tsakiris et al., 2009). Η Κυπριακή Δημοκρατία όντας Κράτος Μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχει ήδη μεταφέρει τις πρόνοιες της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ στο Κυπριακό δίκαιο με τους εναρμονιστικούς περί Αξιολόγησης, Διαχείρισης και Αντιμετώπισης των Κινδύνων Πλημμύρας Νόμους του 2010 και 2012. Από τα προαναφερθέντα, σκοπός της Οδηγίας και φυσικά της αντίστοιχης εναρμονιστικής Κυπριακής νομοθεσίας είναι η θέσπιση πλαισίου για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας με απώτερο σκοπό τη μείωση των αρνητικών συνεπειών των πλημμυρών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες της Κοινότητας (Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων, 2016).

Με βάση τη νομοθεσία, ο όρος “πλημμύρα” αναφέρεται στην προσωρινή κάλυψη του εδάφους από νερό, το οποίο, κάτω από φυσιολογικές συνθήκες, δεν καλύπτεται από νερό και συμπεριλαμβάνει πλημμύρες από ποτάμια και χειμάρρους, καθώς και πλημμύρες από τη θάλασσα. Ο “κίνδυνος πλημμύρας” εκφράζεται από το συνδυασμό της πιθανότητας της πλημμύρας και των πιθανών αρνητικών συνεπειών της.

### **Τα 3 στάδια εφαρμογής του νόμου:**

#### Στάδιο 1 εφαρμογής του νόμου

Το στάδιο αυτό προνοούσε όπως το αργότερο μέχρι το Δεκέμβριο του 2011: (α) η μελέτη Προκαταρκτικής Αξιολόγησης των Κινδύνων Πλημμύρας (ΠΑΚΠ) στη χώρα θα ήταν έτοιμη. Η ΠΑΚΠ αφορά τους πιθανούς κινδύνους πλημμύρας και βασίζεται σε πληροφορίες σχετικές με ιστορικές πλημμύρες, την πιθανότητα μελλοντικών πλημμυρών και των προβλεπόμενων επιπτώσεων τους, και (β) με βάση τα αποτελέσματα της ΠΑΚΠ καθοριστούν οι «Περιοχές Δυνητικού Σοβαρού Κινδύνου Πλημμύρας» («Περιοχές Πλημμύρας»), δηλαδή οι περιοχές στις οποίες υπάρχουν, ή ενδέχεται να υπάρξουν, πιθανοί σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας. Σύμφωνα με το νόμο, οι «Περιοχές Πλημμύρας» θα έπρεπε να επανεξεταστούν και ανάλογα να επικαιροποιηθούν το αργότερο μέχρι το Δεκέμβριο του 2018. Στη συνέχεια, κάθε 6 χρόνια οι «Περιοχές Πλημμύρας» πρέπει να επανεξετάζονται και ανάλογα να επικαιροποιούνται.

#### Στάδιο 2 εφαρμογής του νόμου

Το στάδιο 2 προνοούσε όπως το αργότερο μέχρι το Δεκέμβριο του 2013, οι Χάρτες Επικινδυνότητας Πλημμύρας και οι Χάρτες Κινδύνων Πλημμύρας για τις «Περιοχές Πλημμύρας» να είναι έτοιμοι. Οι Χάρτες Επικινδυνότητας Πλημμύρας παρουσιάζουν για κάθε μία από τις «Περιοχές Πλημμύρας» την έκταση που θα μπορούσε να καλυφθεί από νερό για 3 διαφορετικά σενάρια πλημμυρισμού:

- 1) από πλημμύρα με χαμηλή πιθανότητα να συμβεί π.χ. με πιθανότητα να συμβεί 1 φορά στα 500 χρόνια,
- 2) από πλημμύρα μέσης πιθανότητας, δηλαδή με πιθανότητα π.χ. να συμβεί 1 φορά στα 100 χρόνια,
- 3) από πλημμύρα με υψηλή πιθανότητα, π.χ. με πιθανότητα να συμβεί 1 φορά στα 20 χρόνια

Για κάθε ένα από τα τρία σενάρια, επιπρόσθετα της έκτασης πλημμυρισμού, οι Χάρτες Επικινδυνότητας Πλημμύρας παρουσιάζουν το βάθος του νερού στις «Περιοχές Πλημμύρας». Σημειώνεται ότι, παρόλο που η πιθανότητα να συμβεί μια πλημμύρα περιγράφεται σε σχέση με αριθμό ετών, αυτή η πλημμύρα έχει τη συγκεκριμένη πιθανότητα να συμβεί σε οποιοδήποτε έτος. Με άλλα λόγια, η πλημμύρα με πιθανότητα να συμβεί 1 φορά στα 500 χρόνια έχει πιθανότητα 1 στα 500, δηλαδή πιθανότητα 0.2%, να συμβεί σε οποιοδήποτε έτος. Οι Χάρτες Κινδύνου Πλημμύρας αφορούν τις πιθανές αρνητικές συνέπειες στις «Περιοχές Πλημμύρας» για κάθε ένα από τα τρία σενάρια πλημμυρών (χαμηλής πιθανότητας, μέσης πιθανότητας και υψηλής πιθανότητας) και παρουσιάζουν πληροφορίες σχετικά με:

- i. τον πιθανό αριθμό κατοίκων που μπορεί να πληγούν,
- ii. τον τύπο οικονομικής/πολιτιστικής/αρχαιολογικής σημασίας δραστηριότητας στην περιοχή που μπορεί να πληγεί,
- iii. εγκαταστάσεις οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν τυχαία ρύπανση σε περίπτωση πλημμύρας, και
- iv. άλλες πιθανές σημαντικές πηγές ρύπανσης.

Σύμφωνα με το νόμο, ο κύκλος επανεξέτασης και επικαιροποίησης των χαρτών πρέπει να επαναλαμβάνεται κάθε 6 χρόνια.

### Στάδιο 3 εφαρμογής του νόμου

Το 3ο στάδιο εφαρμογής προνοούσε όπως, το αργότερο μέχρι το Δεκέμβρη του 2015, καταρτιστούν Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας (ΣΔΚΠ) για τις «Περιοχές Πλημμύρας». Σύμφωνα με το νόμο, κάθε Κράτος Μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης συμπεριλαμβανομένης και της Κύπρου, οφείλει να θέσει κατάλληλους στόχους για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας στις περιοχές που έχουν αναγνωρισθεί ως «Περιοχές Πλημμύρας» εστιάζοντας στη μείωση των δυνητικών αρνητικών συνεπειών των πλημμυρών και τη μείωση της πιθανότητας για πλημμύρες και να καταρτίσει Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας για αυτές τις περιοχές. Τα σχέδια διαχείρισης που προνοούν για την πρόληψη, την προστασία και την ετοιμότητα για την αντιμετώπιση των συνεπειών των πλημμυρών περιλαμβάνουν μέτρα για την επίτευξη αυτών των στόχων και ετοιμάζονται λαμβάνοντας υπόψη όλες τις συναφείς πτυχές, όπως το κόστος και τα οφέλη, την έκταση της πλημμύρας, τη χρήση της γης, καθώς και τη διαφύλαξη της φύσης. Με βάση τις διατάξεις του νόμου, τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας πρέπει να επανεξεταστούν και ανάλογα να επικαιροποιηθούν το αργότερο μέχρι το Δεκέμβρη του 2021, και στη συνέχεια να επανεξετάζονται και να επικαιροποιούνται ανάλογα κάθε 6 χρόνια. Σύμφωνα με το νόμο, η πιθανή επίδραση των κλιματικών αλλαγών στη συχνότητα και την ένταση των φαινομένων πλημμύρας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε όλες τις επανεξετάσεις των τριών πιο πάνω σταδίων εφαρμογής του νόμου.

### **Ενημέρωση του Κοινού – Διαβουλεύσεις και Ενημέρωση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής**

Ο νόμος επιπρόσθετα προνοεί όπως οι Προκαταρκτικές Αξιολογήσεις Κινδύνων Πλημμύρας, οι Χάρτες Επικινδυνότητας Πλημμύρας, οι Χάρτες Κινδύνων Πλημμύρας και τα Σχέδια Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας είναι διαθέσιμα στο κοινό και υποβάλλονται στη διάθεση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για αξιολόγηση τους. Κατά δε την κατάρτιση των Σχεδίων Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας (ΣΔΚΠ) πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη οι απόψεις των επηρεαζόμενων τοπικών αρχών και να γίνονται διαβουλεύσεις με κάθε εμπλεκόμενη κρατική υπηρεσία, οργανισμό δημόσιου δικαίου και με κάθε επηρεαζόμενη κοινωνική ομάδα. Σημειώνεται ότι η πρόοδος υλοποίησης των μέτρων που περιλαμβάνονται στο Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας παρακολουθείται και αξιολογείται από την Ε.Ε.

### **Οφέλη από τη εφαρμογή του νόμου στην Κύπρο**

Υπενθυμίζεται, πολύ πιθανόν αχρείαστα, ότι η κύρια αιτία πλημμυρισμού είναι οι ακραίες έντονες βροχοπτώσεις οι οποίες, ως φυσικά φαινόμενα, δεν μπορούν να προβλεφθούν. Για αυτό το λόγο, η μόνη προστασία από τις αρνητικές συνέπειες των πλημμυρών είναι η πρόληψη και η ετοιμότητα αντιμετώπισης τους μέσω σωστής διαχείρισης του κινδύνου. Ο περί Αξιολόγησης, Διαχείρισης και Αντιμετώπισης των Κινδύνων Πλημμύρας Νόμος, στα πλαίσια μιας προσέγγισης μακροπρόθεσμου σχεδιασμού και προωθώντας τη συνεργασία όλων των ενδιαφερόμενων, θέτει τις βάσεις για καλύτερη πρόληψη και ψηλότερο επίπεδο ετοιμότητας της χώρας μας για αντιμετώπιση των πλημμυρών, καθώς και τις βάσεις για τον περιορισμό και την αποτελεσματικότερη αντιμετώπισή τους (Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων, 2016 και European Council, 2007).

### 2.3 Κίνδυνος πλημμύρας και πλημμυρική διακινδύνευση

Σε δεδομένη περίοδο επαναφοράς, για κάθε σενάριο πλημμύρας, προκύπτει μια επιφάνεια που κατακλύζεται και αυτό συνεπάγεται με ένα ύψος ζημιών που εξαρτάται από τις οικονομικές δραστηριότητες, τη δόμηση, τις χρήσεις γης και άλλα. Έτσι, για διαφορετικά σενάρια θα προκύψουν διαφορετικά βάθη νερού και ύψη ζημιών.

Κατά την Οδηγία 2007/60 για τις πλημμύρες, οι χάρτες με τα βάθη κατάκλυσης αποτελούν τους χάρτες κινδύνου και οι χάρτες που καταγράφουν το ύψος το ζημιών αποτελούν αυτούς της διακινδύνευσης. Για να εκτιμηθεί ο πλημμυρικός κίνδυνος είναι απαραίτητη η προσομοίωση της πλημμύρας στο πραγματικό ανάγλυφο της περιοχής που διερευνάται για κάθε σενάριο περιόδου επαναφοράς που μελετάται.

Επομένως, χρησιμοποιούνται αριθμητικά κυρίως μοντέλα μιας ή και δυο διαστάσεων. Στις μέρες μας είναι διαθέσιμα πολλά μοντέλα, τα περισσότερα από τα οποία είτε διατίθενται ελεύθερα ή είναι εμπορικά πακέτα, με διαφορετική ακρίβεια και πολυπλοκότητα. Ένα από τα πιο γνωστά μοντέλα προσομοίωσης της πλημμύρας είναι και το HEC-RAS που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Ορισμένα από τα μοντέλα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί, μαζί με τα βασικά χαρακτηριστικά τους (Τσακίρης, 2013).

Πίνακας 2.1: Μοντέλα προσομοίωσης της πλημμύρας (Τσακίρης, 2013).

Μοντέλο	Διαστάσεις	Εξισώσεις
HEC-RAS	1	Μονοδιάστατες Saint-Venant
MIKE-11	1	Μονοδιάστατες Saint-Venant
FLDWAV	1	Μονοδιάστατες Saint-Venant
Infoworks-1D	1	Μονοδιάστατες Saint-Venant
LISFLOOD	2	Μονοδιάστατες Saint-Venant με κελιά αποθήκευσης
JFLOW	2	Μονοδιάστατες Saint-Venant με κελιά αποθήκευσης
MIKE-21	2	Saint-Venant 2 Διαστάσεων
CCHE2D	2	Saint-Venant 2 Διαστάσεων
TELEMAC-2D	2	Saint-Venant 2 Διαστάσεων
ISIS-2D	2	Saint-Venant 2 Διαστάσεων
SOBEK	2	Saint-Venant 2 Διαστάσεων
TUFLOW	2	Saint-Venant 2 Διαστάσεων
River FLO-2D	2	Saint-Venant 2 Διαστάσεων
Infoworks-2D	2	Saint-Venant 2 Διαστάσεων
FLOW-R2D	2	Saint-Venant 2 Διαστάσεων

Με την χρήση των μοντέλων αυτών εξασφαλίζεται η αποτύπωση της κατάστασης, καταγράφοντας τις βασικές παραμέτρους της πλημμύρας σε κάθε στοιχείο του καννάβου του ψηφιακού υποβάθρου, όπως βάθος νερού, ταχύτητα ροής. Από αυτές τις στιγμιαίες αποτυπώσεις (snapshots) στο σύνολο των στοιχείων μπορεί να επιλεγούν οι ακραίες τιμές, π.χ. μέγιστο βάθος και να γίνει η αποτύπωση τους σε χάρτες ως περιβάλλουσες. Οι χάρτες αυτοί, έχουν τη δυνατότητα να υποδείξουν την μέγιστη έκταση κατάκλυσης, τα μέγιστα βάθη

ή τις μέγιστες ταχύτητες ροής, αποτιμώντας τον πλημμυρικό κίνδυνο για το αντίστοιχο σενάριο περιόδου επαναφοράς. Ιδιαίτερη είναι επίσης η χρησιμότητα των χαρτών αυτών για την εκτίμηση των αντίστοιχων ζημιών, δηλαδή της πλημμυρικής διακινδύνευσης (Τσακίρης, 2013).

## 3 Περιοχή Μελέτης

---

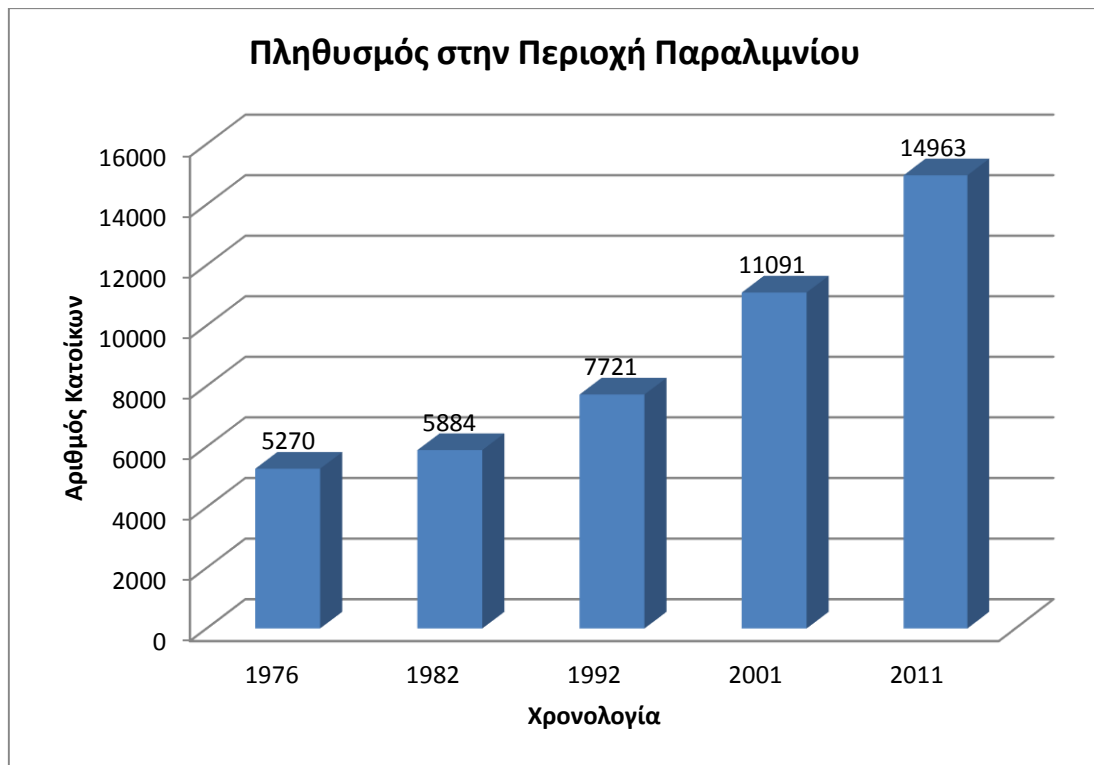
### 3.1 Γενικά

Η Κύπρος αποτελεί το μεγαλύτερο νησί της ανατολικής Μεσογείου και βρίσκεται στο βόρειο-ανατολικό τμήμα αυτής. Η συνολική έκταση του νησιού, συμπεριλαμβανομένων όλων των υδάτινων επιφανειών ανέρχεται στα 9251 km<sup>2</sup> και το μήκος της ακτογραμμής του υπολογίζεται στα 648 km. Σύμφωνα με την απογραφή του 2011, ο συνολικός πληθυσμός του νησιού είναι 838.897 κάτοικοι (Στατιστική Υπηρεσία της Κυπριακής Δημοκρατίας, 2016).

Για διοικητικούς σκοπούς, η Κύπρος διαιρείται σε έξι επαρχίες, αυτές της Λάρνακας, της Αμμοχώστου, της Κερύνειας, της Λεμεσού, της Πάφου και της Λευκωσίας, εκ των οποίων η τελευταία περιλαμβάνει την πρωτεύουσα του νησιού. Στην παρούσα εργασία, περιοχή μελέτης αποτέλεσε το Παραλίμι, το οποίο υπάγεται στην ελεύθερη επαρχία Αμμοχώστου και είναι η μεγαλύτερη κοινότητα αυτής. Το Παραλίμι βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο της Κύπρου. Αποτελεί το μεγαλύτερο δήμο της επαρχίας που συστάθηκε το 1986. Επονομάστηκε από τη Λίμνη η οποία συγκαταλέγεται στους προστατευόμενους βιότοπους του Δικτύου NATURA 2000 (Δήμος Παραλιμνίου, 2016). Το Παραλίμι έχει περισσότερο τη μορφή ενός περί αστικού οικισμού, δηλαδή κωμόπολης, παρά παραδοσιακού οικισμού, αστικού συγκροτήματος ή πόλης. Είναι ο συνδυασμός ενός έντονα αναπτυγμένου τουριστικού θέρετρου στα νοτιοανατολικά, τον Πρωταρά και των διάσπαρτων περιοχών ανάπτυξης στην ευρύτερα παράκτια περιοχή. Η μετεξέλιξη αυτή, από αγροτικό οικισμό σε σημαντικό τουριστικό προορισμό προέκυψε μετά το 1974 και δημιούργησε πληθώρα προβλημάτων.

Το Παραλίμι, μέχρι το 1974, ήταν οικισμός γεωργών και ψαράδων, με ορισμένες μεμονωμένες τουριστικές αναπτύξεις, λόγω της Αμμοχώστου. Με την Τούρκικη εισβολή και το διαχωρισμό του νησιού, δημιουργήθηκαν προβλήματα που είχαν ως αποτέλεσμα την απώλεια αναπτυγμένων τουριστικών θέρετρων. Έτσι, η πολιτική της τότε Κυβέρνησης για ανάκαμψη, συνέδραμαν στη ριζική και ραγδαία μεταβολή του Παραλιμνίου και το έκαναν ένα από τους δημοφιλέστερους τουριστικούς προορισμούς στην ανατολική Μεσόγειο. Επομένως, επηρεάστηκε η κατανομή του εργατικού δυναμικού προς όφελος του τριτογενούς τομέα, ο οποίος, μέχρι και σήμερα, αποτελεί βασική απασχόληση στο Παραλίμι.

Υπήρξε επίσης, αυξητική πληθυσμιακή τάση που ήταν και αυτή αποτέλεσμα της πρώτης περιόδου μετά τα γεγονότα του 1974, και οφείλεται στην επανεγκατάσταση σημαντικού αριθμού προσφύγων από την πόλη και επαρχία Αμμοχώστου. Παρόμοια τάση, παρατηρήθηκε και για την περίοδο μετά το 1976, με αύξηση του πληθυσμού από 5884 άτομα το 1982 σε 7721 άτομα το 1992. Το ίδιο ισχύει και για την περίοδο 1992–2001, με αύξηση του πληθυσμού από 7721 σε 11091 άτομα (Σχήμα 3.1). Οι πληθυσμιακές εξελίξεις είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη για την πολεοδομική οργάνωση μιας αστικοποιημένης περιοχής. Η σημασία της παραμέτρου αυτής αποτελεί θεμέλιο του Τοπικού Σχεδίου (π.χ. ανάγκες σε εκπαιδευτικά ιδρύματα, κύριο οδικό δίκτυο, μέτρα ενθάρρυνσης ή αποθάρρυνσης τάσεων κατανομής του πληθυσμού), αφού οι πρόνοιες του σχεδίου εδράζονται σε προγνώσεις και παραδοχές που έχουν να κάνουν με τα πληθυσμιακά μεγέθη και χαρακτηριστικά και τη γεωγραφική κατανομή του (Τμήμα Πολεοδομίας και Οικήσεως, 2016).



Σχήμα 3.1: Πληθυσμός στην Περιοχή Παραλιμνίου (Στατιστική Υπηρεσία της Κυπριακής Δημοκρατίας, 2016).

Συμπερασματικά, η απασχόληση στη γεωργία και κτηνοτροφία θα μειώνεται σταδιακά, ενώ η μεταποίηση, το εμπόριο και οι υπηρεσίες θα αποτελούν τους κύριους τομείς δραστηριότητας, για να εξασφαλιστεί η σταθερή κοινωνικό-οικονομική εξέλιξη του Παραλιμνίου. Παράλληλα, η τοπική οικονομία προσφέρει θέσεις εργασίας για το εργατικό δυναμικό, τόσο της περιοχής Παραλιμνίου όσο και για σημαντικό μέρος της επαρχίας. Καταληκτικά, σημαντικός αριθμός εργαζομένων θα συνεχίσει να μετακινείται καθημερινά προς την περιοχή (Τοπικό Σχέδιο Παραλιμνίου, 2009).

Επιπρόσθετα, οι πρόνοιες του Τοπικού Σχεδίου έχουν ως απώτερο σκοπό τη διατήρηση ευκαιριών απασχόλησης τοπικά και τον περιορισμό της συχνότητας και αριθμού των μετακινήσεων εργαζομένων από άλλες 35 περιοχές, με πρόνοια για επαρκείς και κατάλληλες εγκαταστάσεις για μόνιμη διαμονή. Ο τομέας των ξενοδοχείων και εστιατορίων απασχολεί σχεδόν τριπλάσιο αριθμό ατόμων από ότι οι ισχυροί τομείς εμπορίου και υπηρεσιών και παρουσιάζει περίπου 300% αύξηση από την προηγούμενη δεκαετία σε σχέση με τους άλλους δύο τομείς, των οποίων η αύξηση υπήρξε περίπου 200% (Τοπικό Σχέδιο Παραλιμνίου, 2009). Το Παραλίμνι είναι ένα δυναμικό κέντρο τουρισμού. Περίπου το 60% των επικερδώς απασχολούμενων και το 27% των κατοίκων, αποτελούν εργαζόμενους της τουριστικής βιομηχανίας στο Παραλίμνι, ενώ η παγκύπρια αναλογία βρίσκεται γύρω στο 6%. Όμως, ο υψηλός αριθμός εργαζομένων στον τουρισμό καθιστά το Παραλίμνι ευάλωτο σε εξωγενείς κρίσεις που είναι δυνατό να επηρεάσουν αρνητικά την τουριστική βιομηχανία του τόπου.

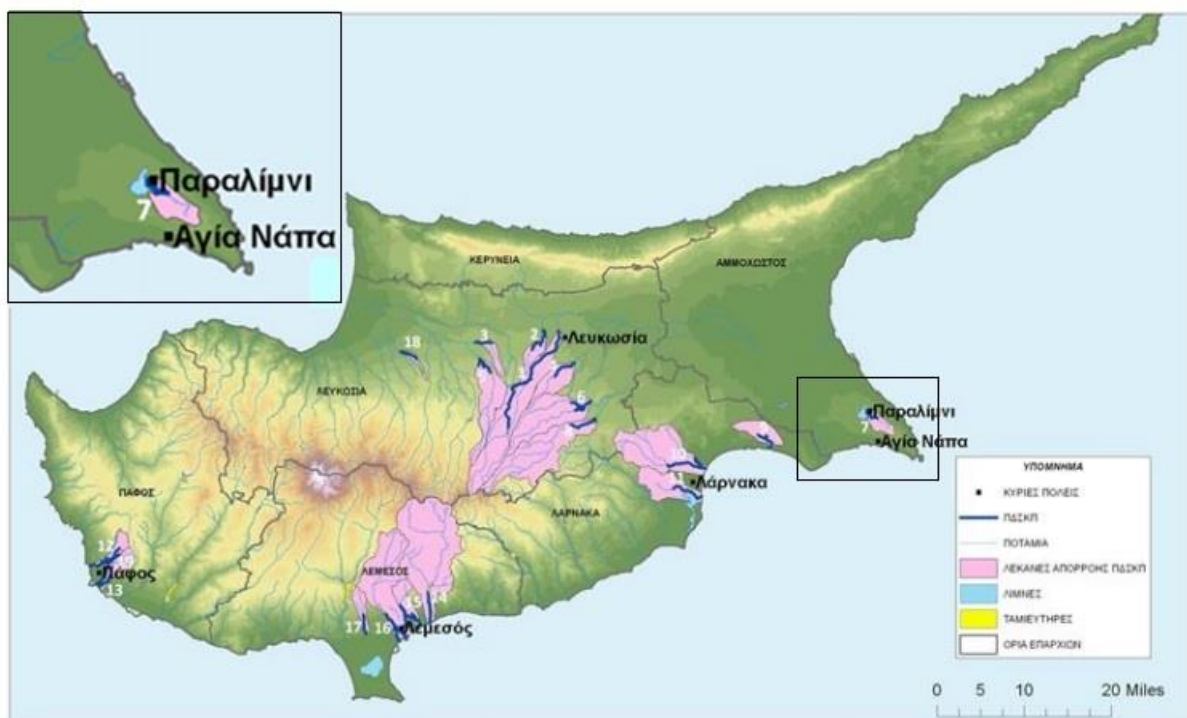
Εν κατακλείδι, η ανάπτυξη της περιοχής του Παραλιμνίου συνδέεται άρρηκτα και με τα δεδομένα της περιφέρειας στην οποία ανήκει. Στη μικροκλίμακα της Επαρχίας διαφαίνεται, σαφέστερα από οποιαδήποτε άλλη περιοχή της Κύπρου, ο ανταγωνισμός μεταξύ γεωργίας και τουρισμού, που έχει ως αποτέλεσμα τον γεωγραφικό διαχωρισμό των δύο αυτών τομέων, της πρώτης στην ενδοχώρα και της δεύτερης στην παραλιακή περιοχή. Παράλληλα, από τη μια



παρατηρείται η διεύρυνση τουριστικών χρήσεων στην ενδοχώρα και παρουσία υπηρεσιών που στηρίζουν την τοπική οικονομία και από την άλλη, μεγάλο ποσοστό εντατικής γεωργίας (π.χ., θερμοκήπια), βρίσκονται εντός των Τουριστικών Ζωνών, και πιο συγκεκριμένα στο βόρειο τμήμα της περιοχής (Τοπικό Σχέδιο Παραλιμνίου, 2009).

### 3.2 Λεκάνη απορροής ποταμού εισροής Λίμνης Παραλιμνίου

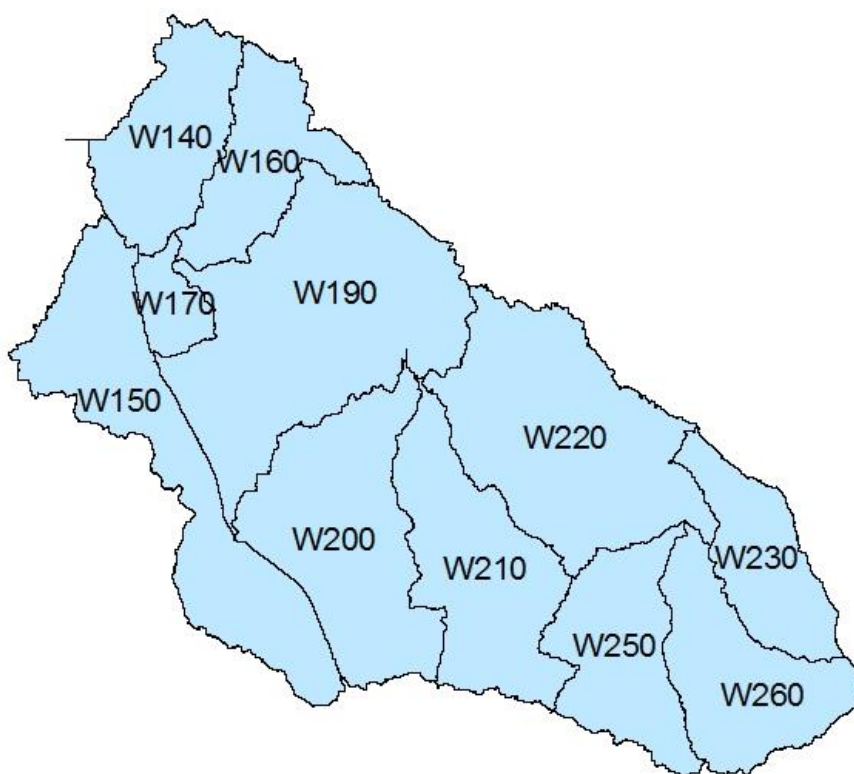
Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η λεκάνη απορροής του Ποταμού εισροής Λίμνης Παραλιμνίου με βάση δύο κριτήρια. Πρώτο κριτήριο επιλογής που τέθηκε, είναι η περιοχή που θα επιλεγεί να θεωρείται περιοχή σημαντικού δυνητικού κινδύνου πλημμύρας με βάση το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων της Κύπρου. Δεύτερο και εξίσου σημαντικό κριτήριο επιλογής είναι η περιοχή μελέτης να έχει υποστεί μεγάλες αλλαγές στις χρήσεις γης. Έτσι, αφού η περιοχή πληροί τα παραπάνω κριτήρια και με την υπόδειξη του επιβλέποντα καθηγητή επιλέχθηκε προς μελέτη η συγκεκριμένη λεκάνη απορροής.



Σχήμα 3.2: Χάρτης περιοχών δυνητικού κινδύνου πλημμύρας στην Κύπρο (Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων, 2016).

#### 3.2.1 Χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής

Η λεκάνη απορροής που μελετάται καταλαμβάνει σχεδόν το σύνολο του Δήμου Παραλιμνίου σε έκταση, με συνολική επιφάνεια ίση με 11,54 km<sup>2</sup>. Για τους σκοπούς της μελέτης, στη συνέχεια η λεκάνη υποδιαιρέθηκε σε 11 επιμέρους υπολεκάνες. Το σχήμα και το εμβαδόν κάθε υπολεκάνης που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 και Σχήμα 3.3.

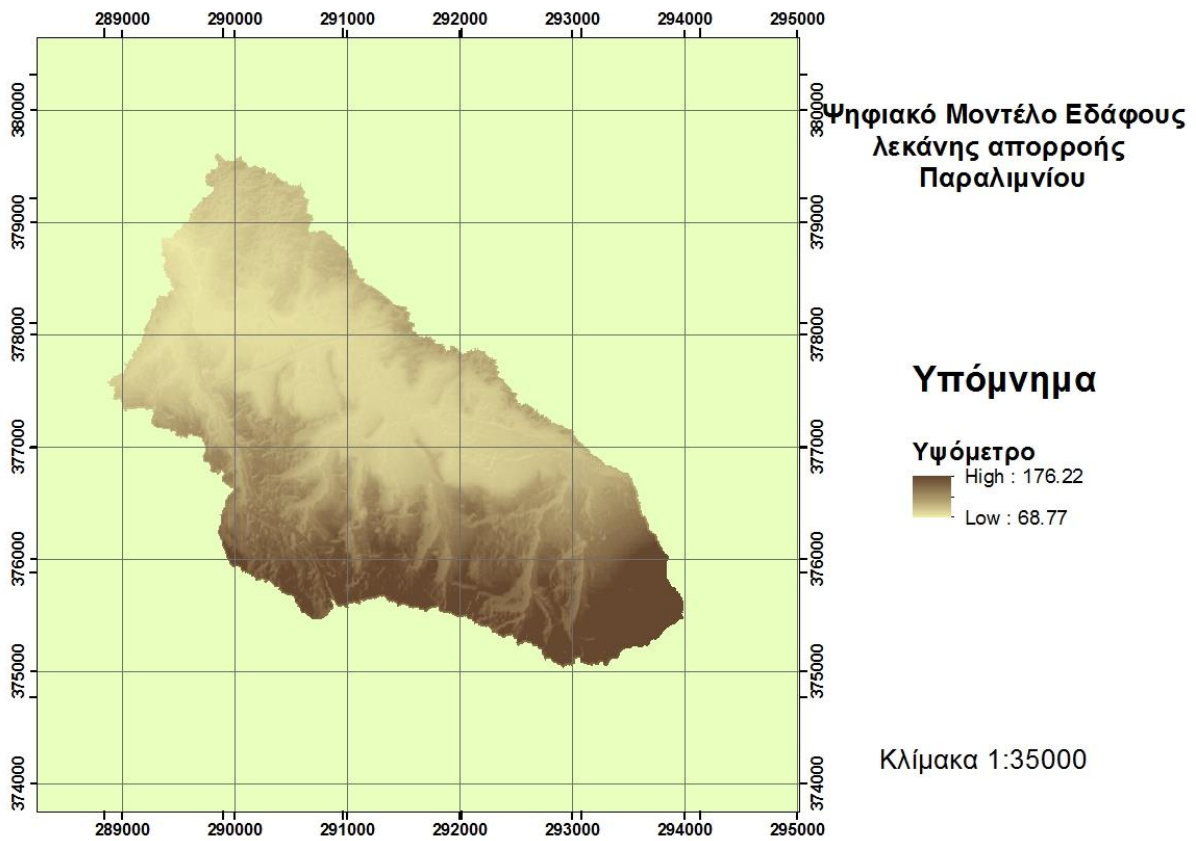


Σχήμα 3.3: Λεκάνη απορροής Ποταμού Εισροής Λίμνης Παραλιμνίου και υπολεκάνες.

Πίνακας 3.1: Εμβαδά υπολεκανών της λεκάνης απορροής Ποταμού Εισροής Λίμνης Παραλιμνίου.

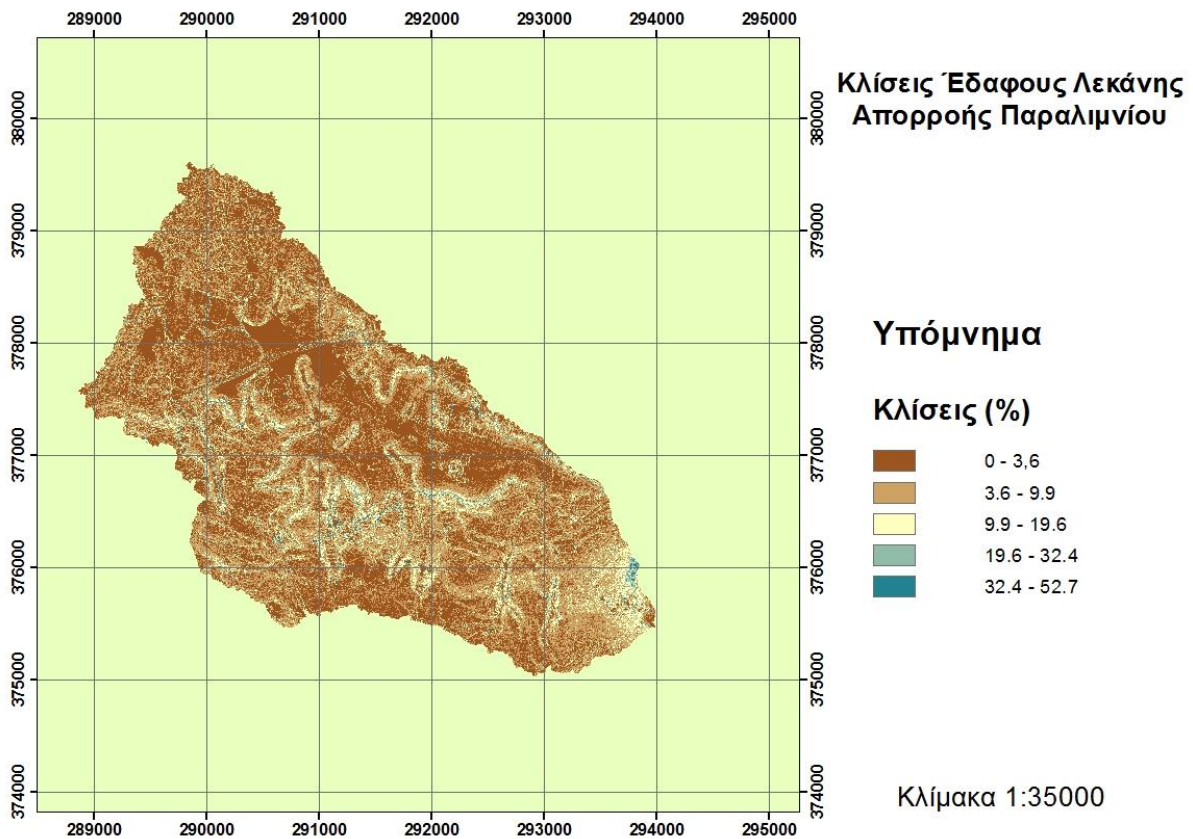
Υπολεκάνη	Εμβαδόν (km <sup>2</sup> )
W140	0.77
W150	1.46
W160	0.68
W170	0.22
W190	2.04
W200	1.32
W210	1.11
W220	1.64
W230	0.63
W250	0.80
W260	0.88

Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται ο χάρτης του ψηφιακού μοντέλου εδάφους που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη (Σχήμα 3.4). Το μέγιστο υψόμετρο που παρουσιάζεται στην περιοχή της λεκάνης απορροής είναι 176 m και το ελάχιστο είναι 69 m.



Σχήμα 3.4: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της λεκάνης απορροής.

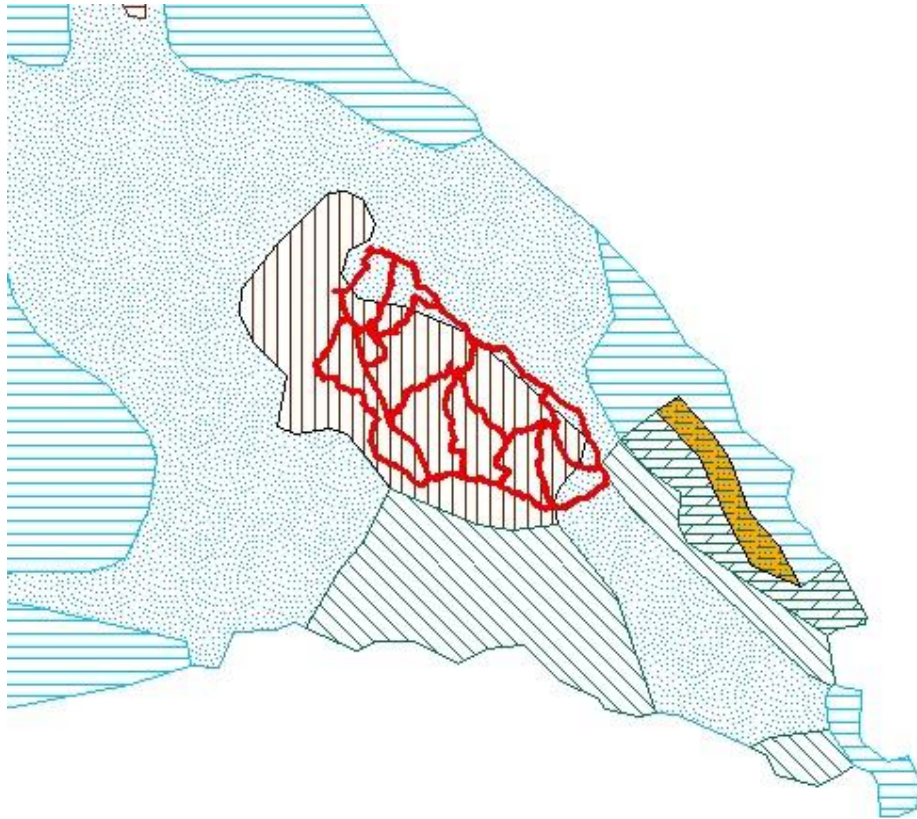
Ακόμη, στο Σχήμα 3.5 εμφανίζονται οι κλίσεις του εδάφους στη λεκάνη απορροής της περιοχής.



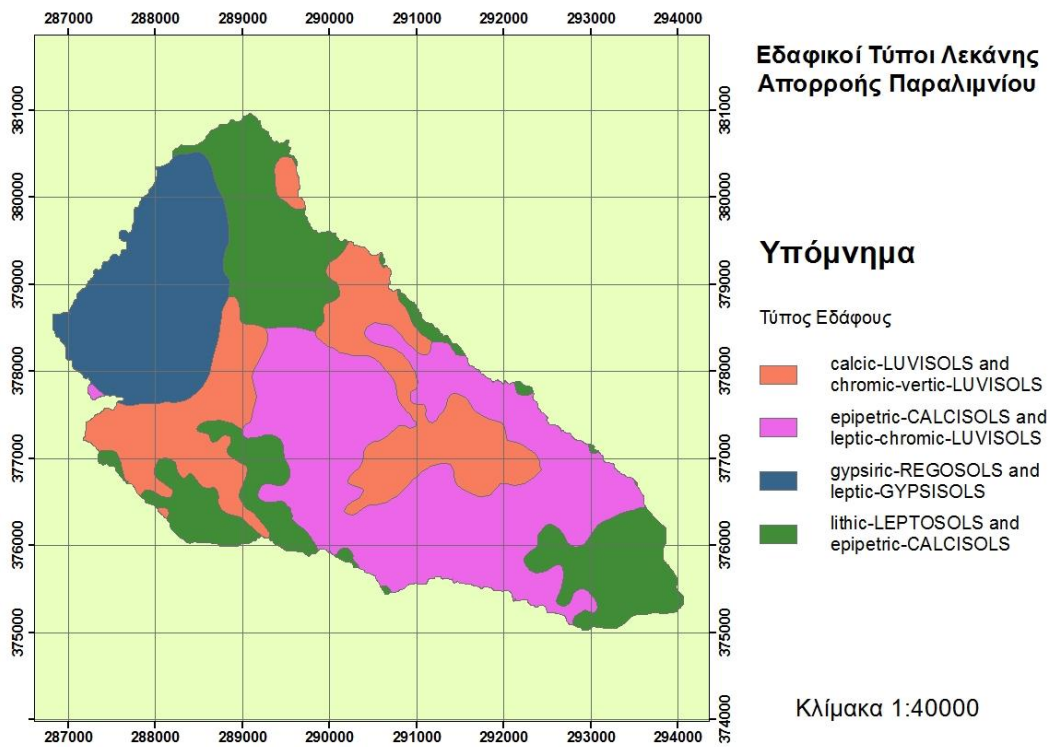
Σχήμα 3.5: Χάρτης κλίσεων της λεκάνης απορροής επί τοις εκατό.

### 3.2.2 Γεωλογία

Όσον αφορά τη γεωλογία της περιοχής, παραχωρήθηκε από το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, ο υδρολιθολογικός χάρτης (Σχήμα 3.6) και γεωλογικός χάρτης (Σχήμα 3.7) της περιοχής σε μορφή shape file συμβατά με το λογισμικό ArcMap. Στον υδρολιθολογικό χάρτη με κόκκινο χρώμα είναι η περιοχή μελέτης με τις υπολεκάνες. Επίσης, με κάθετη διαγράμμιση στην περιοχή μελέτης είναι τα πυριγενή πετρώματα (σύνθετη μαμόνια, συμπεριλαμβανομένου σερπεντίνη), τα οποία έχουν μικρή διαπερατότητα. Η υπόλοιπη περιοχή καλύπτεται με στρώματα μειόκαινου ψαμμίτη, αμμώδη μάργες και ασβεστολιθικού ψαμμίτη, τα οποία έχουν μέτρια διαπερατότητα. Ο γεωλογικός χάρτης είναι χωρισμένος ανάλογα με το τύπο εδάφους, όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενο στάδιο, στο Κεφάλαιο 4.



Σχήμα 3.6: Υδρολιθολογικός Χάρτης της ευρύτερης περιοχής σε κλίμακα 1:125000.



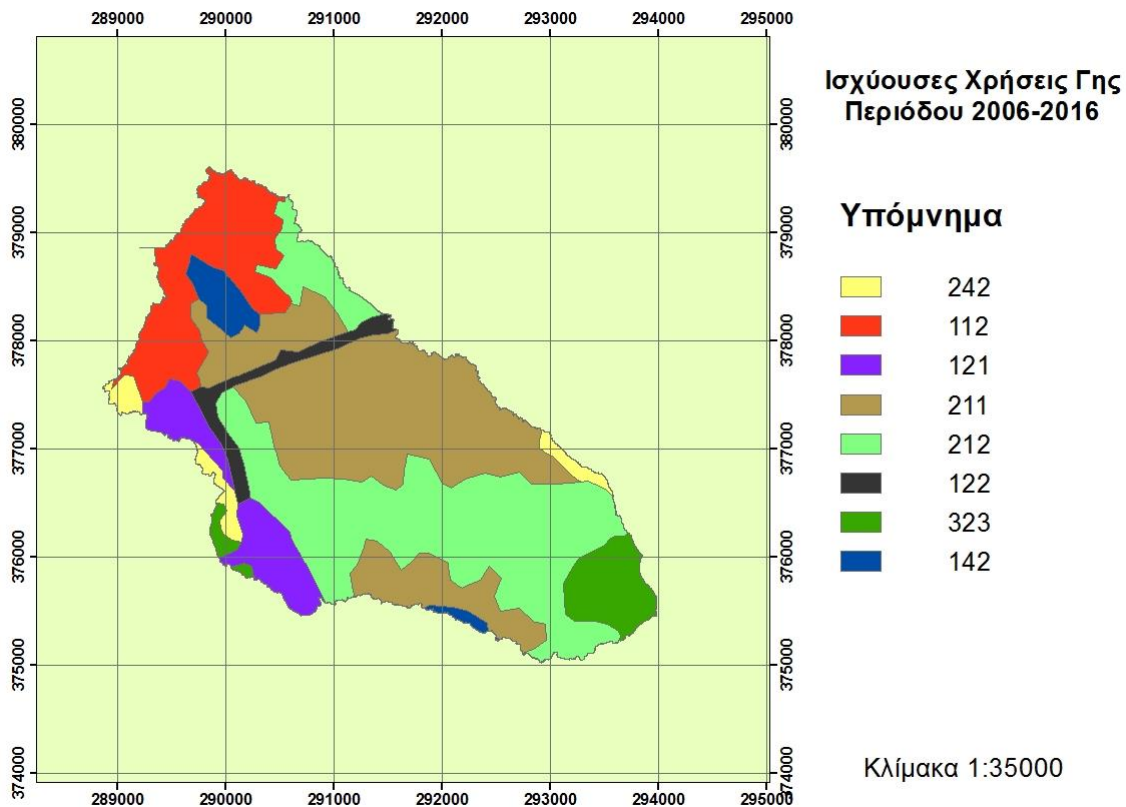
Σχήμα 3.7: Εδαφικοί τύποι Λεκάνης Ποταμού Εισροής Λίμνης Παραλιμνίου.



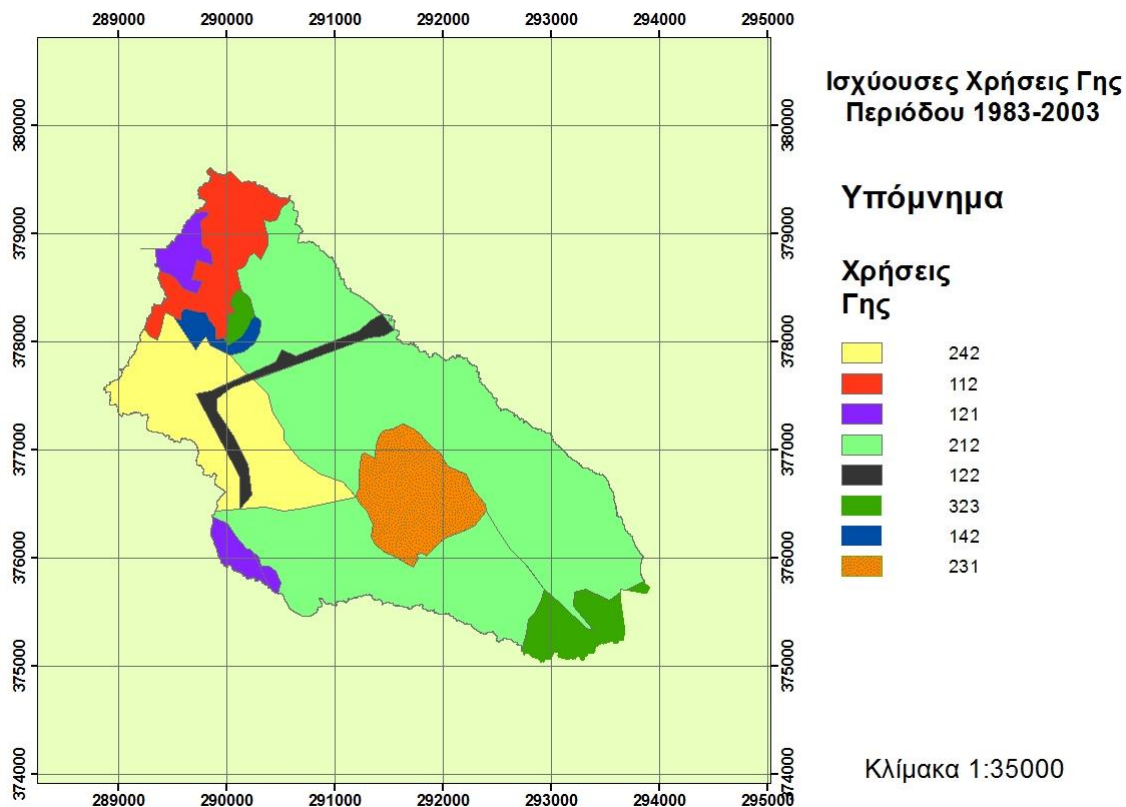
### 3.2.3 Χρήσεις γης

Το CORINE (Coordination of Information on the Environment) είναι ένα ευρωπαϊκό πρόγραμμα που ξεκίνησε το 1985, από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, με στόχο τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με το περιβάλλον σε ορισμένα θέματα προτεραιότητας για την Ευρωπαϊκή Ένωση (αέρας, νερό, έδαφος, κάλυψη γης, βιότοποι, διάβρωση των ακτών κ.λπ.). Από το 1994, ο Ευρωπαϊκός οργανισμός Περιβάλλοντος (ΕΕΑ) ενσωμάτωσε το CORINE στο πρόγραμμα εργασιών του. Ο ΕΕΑ έχει την ευθύνη για την παροχή αντικειμενικά, έγκαιρης και έγκυρης πληροφόρησης σχετικά με το περιβάλλον της Ευρώπης.

Για την σύνταξη θεματικών επιπέδων χρήσεων γης, ζητήθηκαν και παραχωρήθηκαν από το Τμήμα Πολεοδομίας και Οικήσεως Κύπρου οι χάρτες χρήσεων γης, σε έντυπη μορφή με την ρυαξινόμηση του προαναφερθέντος τμήματος και τύπου CORINE. Συγκεκριμένα αυτό έγινε για τις παλαιές χρήσεις γης (από το 1983 μέχρι το 2003), οπότε δεν υπήρχε το CORINE για την περιοχή του Παραλιμνίου, ενώ για τις νέες (από το 2006 μέχρι σήμερα) υπήρχαν και οι δύο τύποι. Η ψηφιοποίησή τους έγινε μέσω του προγράμματος ArcMap και έγινε αντιστοίχιση των χρήσεων γης με βάση την κατηγοριοποίηση του CORINE. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι χρήσεις γης όπως προέκυψαν από την ψηφιοποίηση.



Σχήμα 3.8: Χάρτης χρήσεων γης 2006-2016.



Σχήμα 3.9: Χάρτης χρήσεων γης 1983-2003.

Ανάλυση υπομνήματος χρήσεων γης με βάση τον αριθμό:

- 242. Πολύπλοκο πρότυπο καλλιέργειας με διάσπαρτα σπίτια
- 112. Ασυνεχής αστικός ιστός
- 121. Βιομηχανικές ή εμπορικές μονάδες
- 211. Μη αρδευόμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις
- 212. Μόνιμα αρδευόμενες εκτάσεις
- 122. Δρόμοι και σιδηροδρομικά δίκτυα και συναφής κάλυψη
- 323. Σκληροφυλλική βλάστηση
- 142. Αθλητικές και ψυχαγωγικές εγκαταστάσεις (γήπεδο Παραλιμνίου)
- 231. Βοσκότοποι

### 3.3 Βροχομετρικοί σταθμοί

Στην Κύπρο, όπως και σε άλλες χώρες, το δίκτυο των βροχογράφων και των αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών είναι σχετικά αραιό, ενώ το δίκτυο των βροχομετρικών σταθμών με απλό βροχόμετρο είναι αρκετά πυκνό. Αρμόδια αρχή για την λειτουργία όλων των σταθμών παγκύπρια και την μέτρηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων είναι η Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου, η οποία παρέχει τα δεδομένα για την συγκεκριμένη μελέτη. Συγκεκριμένα, δόθηκαν οι σταθμοί Παραλιμνίου (889, βροχόμετρο και βροχογράφος), Σωτήρας (888, βροχόμετρο) και Αγίας Νάπας (895, βροχόμετρο). Οι

συντεταγμένες και η τοποθεσία τους στο χάρτη παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2 και στο Σχήμα 3.10 αντίστοιχα.

Πίνακας 3.2: Γεωγραφικές συντεταγμένες βροχομετρικών σταθμών.

Σταθμός	Γεωγραφικό Πλάτος	Γεωγραφικό Μήκος
Παραλίμνι, 889	35°04'00''	33°58'00''
Σωτήρα, 888	35°02'00''	33°57'00''
Αγία Νάπα, 895	35°00'00''	34°00'00''



Σχήμα 3.10: Θέσεις βροχομετρικών σταθμών στο Google Earth. Με κίτρινη γραμμή φαίνεται η λεκάνη απορροής μελέτης και οι υπολεκάνες αυτής.



## 4 Μεθοδολογία Εκτίμησης Πλημμύρας

---

### 4.1 Γενικά

Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας που ακολουθεί γίνεται με την θεώρηση ότι στην παρούσα μελέτη θα χρησιμοποιηθούν τα λογισμικά HEC-HMS, HEC-RAS, καθώς και οι πρόσθετες εργαλειοθήκες HEC-GeoHMS, HEC-GeoRAS στο λογισμικό ArcGIS.

### 4.2 Ανάλυση όμβριων καμπύλων

Σε όλα τα προβλήματα αντιπλημμυρικού σχεδιασμού είναι άμεση η χρησιμότητα των όμβριων καμπύλων. Ουσιαστικά, πρόκειται για απλές αναλυτικές ή γραφικές εκφράσεις της μέγιστης έντασης βροχής  $i$  συναρτήσει της διάρκειας  $t$  και της περιόδου επαναφοράς  $T$ . Σχετικά με τη φύση των μεταβλητών αυτών διευκρινίζεται ότι:

1. Η διάρκεια βροχής  $t$  δεν αντιπροσωπεύει κάποια πραγματική ολική διάρκεια ισχυρής καταιγίδας, αλλά είναι μια δεδομένη διάρκεια που καθορίζει τη χρονική κλίμακα παρατήρησης του φαινομένου.
2. Η ένταση βροχής  $i$  δεν αναφέρεται σε συγκεκριμένη καταιγίδα, αλλά θεωρείται ως η πραγματοποίηση μιας τυχαίας μεταβλητής  $I$  που αντιπροσωπεύει τον πληθυσμό των ισχυρών βροχοπτώσεων, για τη συγκεκριμένη διάρκεια παρατήρησης  $t$ . Συνδέεται με το ύψος βροχής της διάρκειας  $t$  με τη σχέση:

$$i = \frac{h}{t} \quad (4.1)$$

και, κατά συνέπεια, αντιπροσωπεύει την μέση ένταση βροχής και όχι τη στιγμιαία ένταση.

3. Η περίοδος επαναφοράς  $T$  αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα σε έτη που χρειάζεται κατά μέσο όρο να παρέλθει ώστε η μέση ένταση βροχής  $I$  σε δεδομένη διάρκεια να υπερβεί την τιμή  $i$ .

Στην παρούσα μελέτη δεν έγινε η κατάρτιση της όμβριας καμπύλης, αλλά αυτή δόθηκε έτοιμη για την περιοχή κάθε βροχομετρικού σταθμού που χρησιμοποιήθηκε (Πασιαρδής, 2012), (Παράρτημα Β). Η εξίσωση της όμβριας καμπύλης που ακολουθεί την κατανομή Γενική Ακραίων Τιμών (GEV-MAX), είναι της μορφής

$$i(t, T) = \frac{\lambda * \psi + \frac{\lambda}{\kappa} * \left[ \left( \ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{-\kappa} - 1 \right]}{(t + \theta)^\eta} \quad (4.2)$$

όπου  $\kappa$ ,  $\lambda$  και  $\psi$  είναι οι παράμετροι σχήματος, κλίμακας και θέσης αντίστοιχα. Οι παράμετροι  $\theta$  και  $\eta$  έχουν σχέση με τη διάρκεια βροχής και οι τιμές που δόθηκαν για αυτές είναι

- Παραλίμνι  $\theta = 0.115$  και  $\eta = 0.802$
- Σωτήρα  $\theta = 0.113$  και  $\eta = 0.814$

- Αγία Νάπα  $\theta = 0.113$  και  $\eta = 0.814$ .

Χρησιμοποιήθηκε όμβρια καμπύλη κατανομής GEV παρά η κατανομή Gumbel διότι όπως έδειξαν πρόσφατες μελέτες, η δεύτερη οδηγεί σε υποεκτίμηση των εντάσεων βροχής για μεγάλες περιόδους επαναφοράς. Αντίθετα, η GEV φαίνεται να είναι πιο κατάλληλη (Πασιαρδής, 2012), (Koutsoyiannis & Baloutsos, 2000).

Θέλοντας, λοιπόν να έχουμε μια ακριβή εκτίμηση για την περίοδο επαναφοράς του επεισοδίου βροχόπτωσης που χρησιμοποιήθηκε (της 15/2/1988) ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Από τα πεντάλεπτα βροχής που δόθηκαν από την Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου υπολογίστηκε η μέγιστη ένταση για κάθε σταθμό ξεχωριστά και στην συνέχεια με την χρήση της σχέσης 4.2 υπολογίστηκε η περίοδος επαναφοράς που αντιστοιχεί. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Περίοδος επαναφοράς με βάση την αιχμή της πλημμύρας.

Σταθμός	Μέγιστο ύψος (mm)	Μέγιστη ένταση (mm/h)	Χρονικό βήμα (min)	Περίοδος επαναφοράς σε έτη (T)
Παραλίμνι	22.9	274.8	5	51
Σωτήρα	27.9	334.8	5	36
Αγία Νάπα	28.3	339.6	5	87

### 4.3 Απώλειες βροχόπτωσης

#### 4.3.1 Μοντέλο αρχικών και σταθερών απωλειών (Initial and Constant Loss Model)

Θεωρείται ότι όλες οι βροχοπτώσεις χάνονται έως ότου το ύψος βροχόπτωσης υπερβεί το ύψος αρχικών απωλειών. Εφόσον ικανοποιηθεί η συνθήκη αυτή, ο μέγιστος δυνατός ρυθμός απωλειών λαμβάνεται σταθερός για την διάρκεια της βροχής. Για την μέθοδο αυτή πρέπει να καθοριστούν οι αρχικές απώλειες (μονάδες βάθους) και ο σταθερός ρυθμός απωλειών (μονάδες βάθους ανά ώρα) (US Army Corps of Engineers, 1994).

#### 4.3.2 Μοντέλο ελλείμματος και σταθερών απωλειών (Deficit and Constant Loss Model)

Παρόμοια με το μοντέλο Initial and Constant Loss, σε αυτό το μοντέλο λαμβάνεται υπόψη το έλλειμμα εδαφικής υγρασίας. Είναι ένα συνεχές μοντέλο και απαιτείται να εκτιμάται συνεχώς ο ρυθμός εξάτμισης και βαθιάς διήθησης.

#### 4.3.3 Μοντέλο Green and Ampt

Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει το ίδιο απλό μοντέλο εδάφους και αρχικές συνθήκες, όπως αυτά της εξίσωσης του Richards: Ομοιόμορφο προφίλ εδάφους άπειρης έκτασης και σταθερή αρχική περιεκτικότητα σε νερό. Καθώς η περιεκτικότητα νερού στην επιφάνεια του εδάφους αυξάνεται, η μέθοδος μοντελοποιεί την κίνηση διείσδυσης του νερού προσεγγίζοντας το μέτωπο ης υδάτινης επιφάνειας με μετατόπιση τύπου εμβόλου. Το μοντέλο προσομοιώνει τη φυσική διαδικασία και υπολογίζει τις απώλειες σε ένα χρονικό διάστημα με την σχέση 4.3.

$$f_t = K \left[ \frac{1 + (\varphi - \theta_t) s_f}{F_t} \right] \quad (4.3)$$

Όπου,  $f_t$ : Απώλειες κατά την περίοδο  $t$

$K$ : Υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού

$(\varphi-\theta)$ : Έλλειμμα όγκου υγρασίας

$S_f$ : Προσρόφηση υγρού μετώπου

$F_t$ : Αθροιστική απώλεια στο χρόνο  $t$

Το μοντέλο Green and Ampt απαιτεί να προσδιοριστούν οι παράμετροι αρχικών απωλειών, υδραυλικής αγωγιμότητας, προσρόφησης υγρού μετώπου και ελλείμματος όγκου υγρασίας, όπου ο  $\varphi$  αντιστοιχεί στο πορώδες του εδάφους, ενώ ο  $\theta$  παίρνει τιμή 0 όταν το έδαφος είναι αρχικά κορεσμένο και τιμή  $\varphi$  όταν είναι τελείως ξηρό. Η τελευταία παράμετρος συνδέεται με δείκτη προηγούμενης βροχόπτωσης (API).

#### 4.3.4 Μοντέλο αριθμού καμπύλης CN της μεθόδου SCS (SCS Curve Number Loss Method)

Το μοντέλο της SCS (υπηρεσία Soil Conservation Service των ΗΠΑ) είναι μια μέθοδος η οποία υπολογίζει το ύψος περισσεύματος βροχής από μια δεδομένη βροχή με βάση τρεις μεταβλητές: το ύψος βροχής, την αρχική κατάσταση υγρασίας του εδάφους και το υδρολογικό σύμπλοκο εδάφους-καλύμματος (SCS, 1972). Η μέθοδος της SCS χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του περισσεύματος βροχής ή την εκτίμηση της συνολικής άμεσης απορροής η οποία προήλθε από βροχή συγκεκριμένης διάρκειας (π.χ. βροχή 24ώρου).

Οι αρχικές απώλειες (συγκράτησης και εξάτμισης) όπως προβλέπεται με την μέθοδο SCS είναι 20% των συνολικών απωλειών ( $S$ ), δηλαδή της διαφοράς μεταξύ ύψους βροχής ( $h_r$ ) και ύψους περισσεύματος βροχής ( $h_R$ ), (Τσακίρης, 2013).

Σύμφωνα με την μέθοδο:

$$h_R = \frac{(h_r - 0.2S)^2}{(h_r + 0.8S)} \quad \text{για } h_r > 0,2S \quad (4.4)$$

$$h_R = 0 \quad \text{για } h_r < 0,2S \quad (4.5)$$

Όπου,  $h_R$ : Ύψος περισσεύματος βροχής (ή άμεση απορροή)

$h_r$ : Το ύψος βροχόπτωσης

$S$ : Το μέγιστο θεωρητικό ύψος απωλειών

Το μέγιστο ύψος απωλειών ( $S$ ) μπορεί να εκφραστεί με τη χρήση της παραμέτρου CN με την εξίσωση 4.6

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4.6)$$

Η παράμετρος CN επηρεάζεται από τις συνθήκες εδάφους και χρήσης γης, καθώς και προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας για την λεκάνη απορροής. Οι τιμές που λαμβάνει η παράμετρος CN είναι από 0 μέχρι 100.

Αρχικά, η μέθοδος SCS ορίζει τους τρεις τύπους εδαφικής υγρασίας, με βάση το συνολικό ύψος βροχής των προηγούμενων 5 ημερών, όπως εμφανίζεται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Κατηγορίες με βάση την υγρασία του εδάφους (SCS, 1972).

Κατηγορία (AMC)	Περιγραφή
I	Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά αλλά πάνω από το σημείο μαράνσεως). Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των τελευταίων 5 ημερών είναι μικρότερη από 13 mm (ή 35 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
II	Μέσες συνθήκες. Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μεταξύ 13 και 38 mm (ή μεταξύ 35 και 53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
III	Υγρές συνθήκες (εδάφη σχεδόν κορεσμένα). Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μεγαλύτερη από 38 mm (ή μεγαλύτερη από 53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Κατόπιν, τα εδάφη κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις ομάδες ανάλογα με τη βασική διηθητικότητα και τη διαπερατότητά τους, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.3.

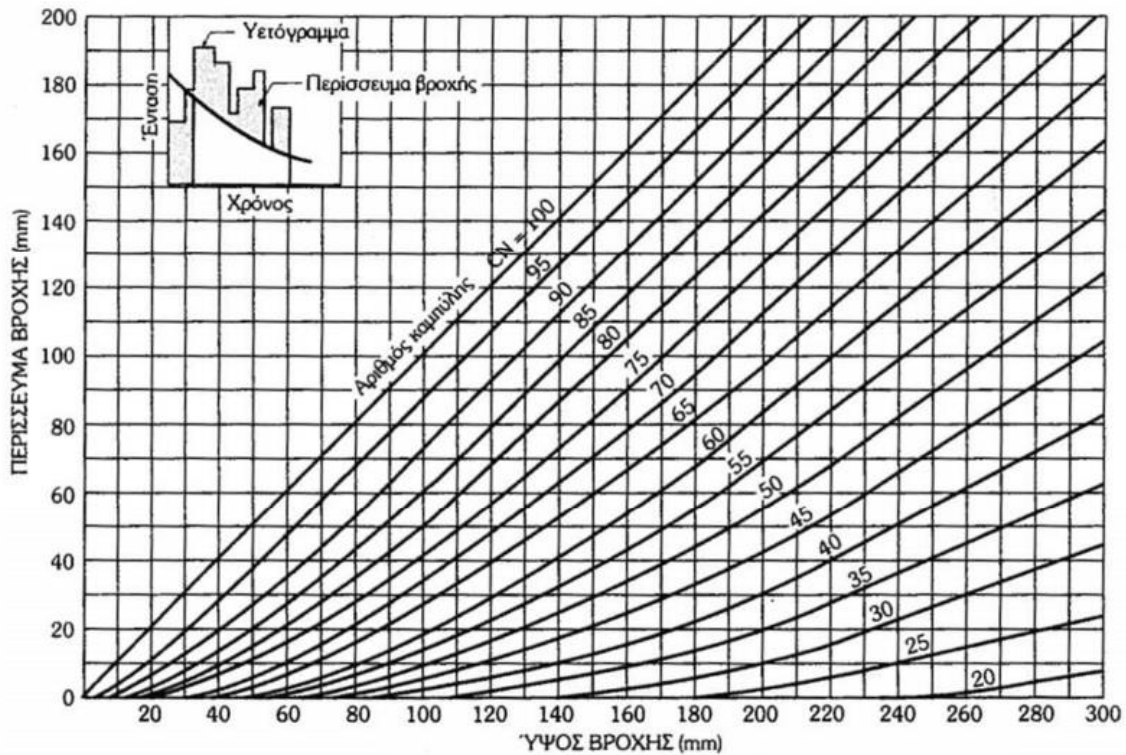
Πίνακας 4.3: Κατηγορίες εδαφών από υδρολογική άποψη.

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

Καταλήγοντας, η SCS πινακοποίησε τους αριθμούς CN που αντιπροσωπεύουν κάθε τύπο εδαφών από υδρολογική άποψη, την κατηγορία φυτοκάλυψης και τις χρήσεις γης. Ωστόσο λόγω του ότι οι κατηγορίες χρήσεων γης και φυτοκάλυψης δεν ήταν αρκετά αντιπροσωπευτικές για τις Μεσογειακές συνθήκες, προτείνονται οι τιμές CN που έδωσε ο Wanielista το 1978, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4 για συνθήκες εδαφικής υγρασίας τύπου II. Το περίσσειμα βροχής,  $h_R$ , προκύπτει από το ύψος βροχής,  $h_r$ , και με γνωστό τον αριθμό καμπύλης CN από το Σχήμα 4.1 (Τσακίρης, 2013).

Πίνακας 4.4: Αριθμός καμπύλης απορροής CN, για προηγούμενες συνθήκες υγρασίας (AMC) τύπου II.

Χρήσης Γης	Υδρολογικός τύπος εδάφους					
	A	B	C	D		
Καλλιεργημένες εκτάσεις						
• Χωρίς έργα συντήρησης	72	81	88	91		
• Με έργα συντήρησης	62	71	78	81		
Ορεινοί βοσκότοποι						
• Κακή κατάσταση	68	79	86	89		
• Καλή κατάσταση	39	61	74	80		
Λιβαδικές εκτάσεις						
• Καλή κατάσταση	30	58	71	78		
Δασικές εκτάσεις						
• Αραιή συστάδα	45	66	77	83		
• Πυκνή συστάδα	25	55	70	77		
Ελεύθερες εκτάσεις, γήπεδα γκολφ, πάρκα						
• Καλή κατάσταση, κάλυψη με γρασίδι στο 75% της έκτασης	39	61	74	80		
• Μέτρια κατάσταση, κάλυψη με γρασίδι στο 50% της έκτασης	49	69	79	84		
Εμπορικές περιοχές (85% αδιαπέρατες)	89	92	94	95		
Βιομηχανικές περιοχές (72% αδιαπέρατες)	81	88	91	93		
Οικιστικές περιοχές						
Μέσο μέγεθος οικοπέδου (m <sup>2</sup> )		Ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας				
<500		65	77	85	90	92
1000		40	61	75	83	87
1500		30	57	72	81	86
2000		25	54	70	80	85
4000		20	51	68	79	84
Χώροι παρκινγκ, στέγες, κ.λ.π.	98	98	98	98		
Δρόμοι						
• Με οδόστρωμα και αγωγούς ομβρίων	98	98	98	98		
• Χαλικόστρωτοι	76	85	89	91		
• Χωματόδρομοι	72	82	87	89		
Αστικές συνθήκες						
• Γυμνό έδαφος	77	86	91	94		
• Κήποι ή θάμνοι	72	81	88	91		
• Μεγάλη κάλυψη με πράσινο (>75% της διαπερατής περιοχής)	39	61	74	80		
• Μέτρια κάλυψη πρασίνου (50-75% της διαπερατής περιοχής)	49	69	79	84		
• Μικρή κάλυψη πρασίνου (<50% της διαπερατής περιοχής)	68	79	86	89		
• Άλση	36	60	73	79		



Σχήμα 4.1: Υπολογισμός του περισσέυματος βροχής με τη μέθοδο SCS.

Ο υπολογισμός των άλλων δύο τύπων (AMC I, AMC III) γίνεται αναγωγή του CN με βάση τις σχέσεις 4.7 και 4.8.

$$CN_I = \frac{0.42CN_{II}}{1 - 0.0058CN_{II}} \quad (4.7)$$

$$CN_{III} = \frac{2.3CN_{II}}{1 + 0.0013CN_{II}} \quad (4.8)$$

Από τα διαθέσιμα δεδομένα διαπιστώνεται ότι δεν είναι δυνατή η χρήση των δύο από τα παραπάνω μοντέλων, διότι απαιτούν παραμέτρους που δεν είναι εύκολα διαθέσιμες. Το μοντέλο ελλείμματος και σταθερών απωλειών απαιτεί τον υπολογισμό της εξάτμισης και της βαθιάς διήθησης, και το μοντέλο Green and Ampt απαιτεί τον υπολογισμό του δείκτη προηγούμενης κατακρήμνισης, για τον οποίο απαιτείται να ληφθούν υπόψη οι προηγούμενες βροχοπτώσεις και η εξάτμιση. Από τα άλλα δύο μοντέλα στην παρούσα μελέτη θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο της SCS, κυρίως διότι η μέθοδος που χρησιμοποιεί έχει ευρύτατη αποδοχή και χρήση παγκοσμίως από τους υδρολόγους και υδραυλικούς μηχανικούς και, επί πλέον, είναι εύκολη στην εφαρμογή καθόσον εξαρτάται από μία παράμετρο.

#### 4.4 Διόδευση πλημμύρας διαμέσου υδατορέματος

Διόδευση πλημμύρας ονομάζεται η τεχνική που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της χωροχρονικής εξέλιξης μια πλημμύρας μέσω ενός επιφανειακού υδροφορέα (π.χ. υδατόρευμα, ταμειωτήρας, τμήμα υδρογραφικού δικτύου). Γενικότερα, η διόδευση αναφέρεται στην επίδραση των χαρακτηριστικών ενός υδρογραφικού συστήματος στο σχήμα και την χρονική εξέλιξη μιας πλημμύρας.

Η τεχνική της διόδευσης χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας. Η διαδικασία σχεδιασμού που συνήθως ακολουθείται είναι με δοκιμές. Δηλαδή δίνονται αρχικά μεγέθη σχεδιασμού με αποτέλεσμα τα χαρακτηριστικά του επιφανειακού υδροφορέα (π.χ. ταμιευτήρα) να είναι γνωστά. Ακολουθεί η διόδευση της πλημμύρας μελέτης (της πλημμύρας με την κατάλληλη περίοδο επαναφοράς για το συγκεκριμένο έργο) και τέλος ελέγχονται τα χαρακτηριστικά της πλημμύρας εκροής σε σχέση με την ικανότητα του υδατορεύματος στην κατάντη θέση που μας ενδιαφέρει. Στην περίπτωση που η μέγιστη παροχή εκροής (αιχμή του υδρογραφήματος εκροής) είναι μεγαλύτερη της διοχετευτικής ικανότητας του ρεύματος στη θέση αυτή, δοκιμάζονται άλλα χαρακτηριστικά του υπό σχεδιασμό επιφανειακού υδροφορέα.

Η τεχνική της διόδευσης χρησιμοποιείται και στην πρόβλεψη και τον έλεγχο της πλημμύρας σε πραγματικό χρόνο (Real Time) και φθάνει και μέχρι τα συστήματα προειδοποίησης για την μείωση των δυσμενών επιπτώσεων από την πλημμύρα. Στην περίπτωση του πραγματικού χρόνου προβλέπουμε την εξέλιξη της πλημμύρας εκροής στη θέση που μας ενδιαφέρει για τις αμέσως επόμενες ώρες.

Επίσης, η τεχνική της διόδευσης αποτελεί σημαντικό τμήμα των μοντέλων μετασχηματισμού των βροχοπτώσεων σε απορροές στην περίπτωση έλλειψης στοιχείων απορροής. Τέλος, χρησιμοποιείται για τη μεταφορά πληροφοριών απορροής από τη θέση ενός υδρομετρικού σταθμού στη θέση που μας ενδιαφέρει.

Οι χρησιμοποιούμενες μεθοδολογίες διόδευσης είναι δύο:

- η Υδρολογική, και
- η Υδραυλική.

Η Υδρολογική βασίζει την πρόβλεψη εξέλιξης της πλημμύρας στην εξίσωση της συνέχειας και σε μια συνάρτηση της χωρητικότητας του συστήματος. Αν ο φορέας διαμέσου του οποίου γίνεται η διόδευση είναι ταμιευτήρας, απαιτείται επιπλέον και μια συνάρτηση που συνδέει την παροχή εκροής με την αποθήκευση του φορέα. Αντίθετα η υδραυλική μέθοδος χρησιμοποιεί εξισώσεις ασταθούς ροής σε ανοικτούς αγωγούς (Εξισώσεις Saint Venant) και στοιχεία που σπάνια είναι γνωστά. Έτσι γίνονται παραδοχές για την απλοποίηση και την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων. Ωστόσο, οι παραδοχές που γίνονται ανατρέπουν σε κάποιο βαθμό την ακρίβεια και την αξιοπιστία των μεθόδων αυτών.

Το λογισμικό HEC-HMS διαθέτει αρκετές μεθόδους (Κινηματικού κύματος, Muskingum-Cunge, Modified Puls, Lag κ.α.), μεταξύ των οποίων και η μέθοδος Muskingum η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη.

#### 4.4.1 Διόδευση πλημμύρας με τη μέθοδο Muskingum

Η μέθοδος Muskingum για την υδρολογική διόδευση πλημμύρας σε ένα τμήμα ποταμού, χρησιμοποιεί την απλοποιημένη εξίσωση συνέχειας.

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \quad (4.9)$$

Όπου:  $I$ : Η εισροή στο τμήμα ποταμού

$Q$ : Η εκροή

$S$ : Η αποθήκευση στο τμήμα ποταμού

$t$ : Ο χρόνος

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, η διαφορά μεταξύ εισροής και εκροής σε διάστημα  $dt$  είναι ίση με τη μεταβολή της αποθήκευσης στο τμήμα για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα.

Απλοποιημένα, εκφράζεται η αποθήκευση εκφράζεται με βάση την εισροή και την εκροή με μια γραμμική σχέση:

$$S = K[xI + (1 - x)Q] \quad (4.10)$$

όπου:  $K$ : Είναι σταθερά που προσεγγίζεται από το μέσο χρόνο διαδρομής της αιχμής.

διαμέσου του τμήματος σε μονάδες χρόνου.

$x$ : Βάρος συμμετοχής της εισροής στην αποθήκευση του τμήματος, παίρνει τιμές από 0 ως 1

Η σχέση 4.10, μετά από μετασχηματισμό σε πεπερασμένες διαφορές για το διάστημα  $\Delta t$ , μετατρέπεται σε:

$$S_{i+1} - S_i = K[x(I_{i+1} - I_i) + (1 - x)(Q_{i+1} - Q_i)] \quad (4.11)$$

έτσι η εξίσωση που δίνει την εκροή στο επόμενο χρονικό βήμα είναι:

$$Q_{i+1} = C_0 I_{i+1} + C_1 I_i + C_2 Q_i \quad (4.12)$$

όπου:

$$C_0 = \frac{-Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad (4.13)$$

$$C_1 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad (4.14)$$

$$C_2 = \frac{K - Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad (4.15)$$

Για την εφαρμογή της μεθόδου θεωρείται ότι η ροή στο υδατόρευμα είναι μόνιμη και ομοιόμορφη πριν την εκδήλωση της πλημμύρας εισόδου. Επιπλέον, για τον προσδιορισμό των παραμέτρων  $K$  και  $x$  χρησιμοποιούνται υδρογραφήματα εισροής και εκροής, εάν είναι διαθέσιμα. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν τέτοια υδρογραφήματα διαθέσιμα, γίνεται μια εκτίμηση των παραμέτρων με τρόπο που θα αναφερθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

## 4.5 Μοναδιαίο υδρογράφημα

### 4.5.1 Γενικά

Ως Μοναδιαίο Υδρογράφημα μιας βροχής διάρκειας περισσέυματος  $t_R$  ομοιόμορφα κατανομημένης σε μια λεκάνη απορροής ονομάζεται το αντίστοιχο υδρογράφημα της άμεσης απορροής που προήλθε από περίσσειμα βροχής  $h_R = 1$  cm. Το Μοναδιαίο Υδρογράφημα (ΜΥΓ) είναι ουσιαστικά ένα μοντέλο που περιλαμβάνει όλα τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και αναφέρεται στην συγκεκριμένη διάρκεια περισσέυματος βροχής. Για κάθε δηλαδή διάρκεια περισσέυματος υπάρχει και ένα διαφορετικό μοναδιαίο υδρογράφημα, το οποίο αποτελεί τη



βάση για τον υπολογισμό του υδρογραφήματος άμεσης απορροής από οποιοδήποτε ύψος περισεύματος της ίδιας διάρκειας. Αυτός είναι και ο λόγος που ονομάζεται μοναδιαίο.

Η χρησιμότητα του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι μεγάλη γιατί το ΜΥΓ μπορεί να μετασχηματίσει, κάτω από ορισμένες παραδοχές, οποιοδήποτε περίσσειμα ραγδαίας βροχής διαφορετικής έστω διάρκειας σε υδρογράφημα της άμεσης απορροής

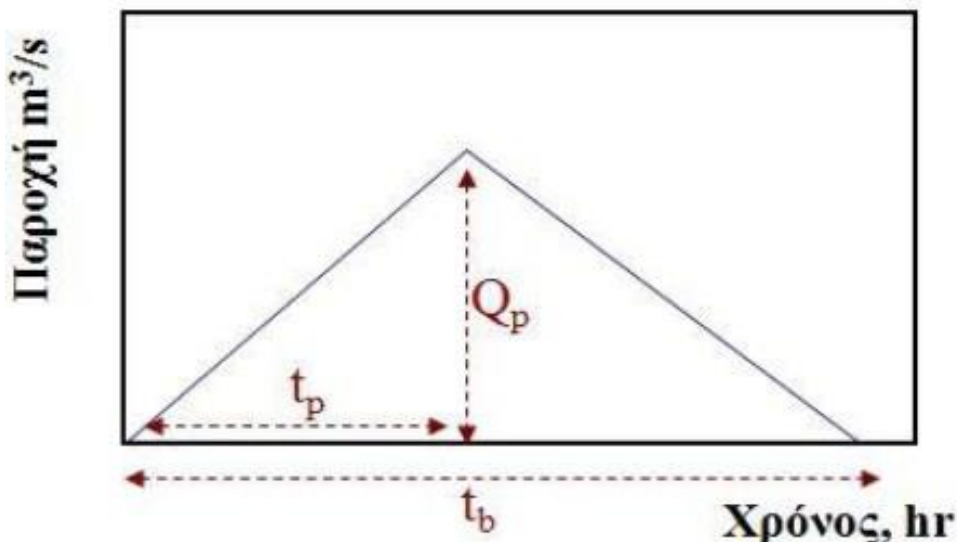
Η μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος στηρίζεται στις ακόλουθες αρχές:

- Αρχή της Αναλογίας. Σύμφωνα με την αρχή αυτή, δύο γεγονότα με περίσσειμα βροχόπτωσης της ίδιας διάρκειας αλλά με διαφορετικές εντάσεις περισεύματος βροχόπτωσης δημιουργούν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με την ίδια χρονική βάση, αλλά με τεταγμένες σε κάθε χρονική στιγμή που έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με το λόγο των εντάσεων. Για εντάσεις με λόγο  $k$  μεταξύ τους αλλά της ίδιας διάρκειας προκύπτουν υδρογραφήματα άμεσης απορροής (ΥΑΑ) με τεταγμένες που έχουν λόγο  $k$  και την ίδια χρονική βάση  $T$ .
- Αρχή της επαλληλίας. Σύμφωνα με την αρχή επαλληλίας το συνολικό ΥΑΑ που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των ΥΑΑ των επιμέρους βροχοπτώσεων.

Στην παρούσα μελέτη έγινε χρήση του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος – Μέθοδος Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας, το οποίο παρουσιάζεται αναλυτικά πιο κάτω

#### 4.5.2 Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα με βάση τη μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας

Η μέθοδος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας δίνει τριγωνικό συνθετικό ΜΥΓ, όπως φαίει στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Συνθετικό μοναδιαίο τριγωνικό υδρογράφημα

Οι εξισώσεις που ορίζουν το εν λόγω μοναδιαίο υδρογράφημα είναι:

$$t_p = \frac{46.6 \times L^{0.14}}{S_{0.1L-0.85L}^{0.38} \times (1 - URBAN)^{1.99} \times RMSD^{0.4}} \quad (4.16)$$

$$t_b = 2.52 \times t_p \quad (4.17)$$

$$Q_p = \frac{2.2 \times A}{t_b} \quad (4.18)$$

Όπου:  $t_p$ : Χρόνος ανόδου σε h

$t_b$ : Χρόνος βάσης σε h

$Q_p$ : Παροχή αιχμής σε  $m^3/s$

$L$ : Μήκος κύριας μισγάγκειας σε km

$S_{0.1L-0.85L}$ : Η μέση κλίση υδατορεύματος μεταξύ των σημείων 10% και 85% του μήκους σε m/km

URBAN: Αναλογία αστικών περιοχών στη λεκάνη απορροής

RMS: Παράμετρος μεγέθους βροχόπτωσης σε mm

$A$ : Έκταση λεκάνης απορροής

Πηγή: (Παγιάνα, 2012).

Καθώς η μέθοδος του Βρετανικού Ινστιτούτου υπολογίζει ΜΥ για διάρκεια βροχής 1 h, στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε μια παραλλαγή της μεθόδου, αφού ως χρονικό βήμα υετογράμματος ορίστηκαν τα 5 min.

$$t_p = 0.6 \times t_c + \frac{d}{2} \quad (4.19)$$

$$t_c = \frac{4 \times A^{1/2} + 1.5 \times L}{0.8 \times \Delta H^{1/2}} \quad (4.20)$$

Όπου:  $t_c$ : Χρόνος συγκέντρωσης

$d$ : Χρονικό βήμα

$\Delta H$ : Υψομετρική διαφορά με το ελάχιστο υψόμετρο στην έξοδο της λεκάνης και του μέσου υψομέτρου της λεκάνης.

## 4.6 Υδραυλική προσομοίωση πλημμύρας

Ο υπολογισμός της υδραυλικής προσομοίωσης έγινε σε περιβάλλον HEC-RAS και σε συνθήκες μόνιμης ροής.

Το HEC-RAS είναι μοντέλο μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος, το οποίο δημιουργήθηκε από το Σώμα του Μηχανικού του Αμερικανικού Στρατού (U.S. Army Corps of Engineers). Ο σκοπός του είναι η προσομοίωση φυσικών ή τεχνικών υδατορευμάτων, είτε μεμονωμένων, είτε ως συστημάτων, όπου ο ρόλος του χρήστη είναι ενεργός σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης (Brunner & CEIWR-HEC, 2010).

Αφορά ένα πολυχρηστικό εργαλείο μονοδιάστατης ανάλυσης και προσομοίωσης φυσικών υδατορευμάτων, το οποίο αποτελείται από τέσσερις συνιστώσες ανάλυσης (Brunner & CEIWR-HEC, 2010):

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

Πιο συγκεκριμένα, το HEC-RAS υπολογίζει τη στάθμη του νερού για βαθμιαίως μεταβαλλόμενη ροή σε δίκτυο τεχνητών αγωγών, σε σύστημα υδατορευμάτων με τεχνητά έργα ή φυσικές κοίτες υπό συνθήκες υποκρίσιμης ή υπερκρίσιμης ροής.

Για την υλοποίηση της προσομοίωσης το λογισμικό χρησιμοποιεί την εξίσωση της ενέργειας σε μονοδιάστατη ανάλυση (Σχήμα 4.3) και υπολογίζει την ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Η επίλυση πραγματοποιείται με επαναληπτικό αλγόριθμο, από διατομή σε διατομή και έχει ως στόχο τη καλύτερη σύγκλιση μεταξύ δύο βαθών ροής για την ίδια διατομή (Brunner G. W., 2010)

Η εξίσωση ενέργειας παρουσιάζεται πιο κάτω:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (4.21)$$

Όπου:  $Z_1, Z_2$ : Ψύόμετρα

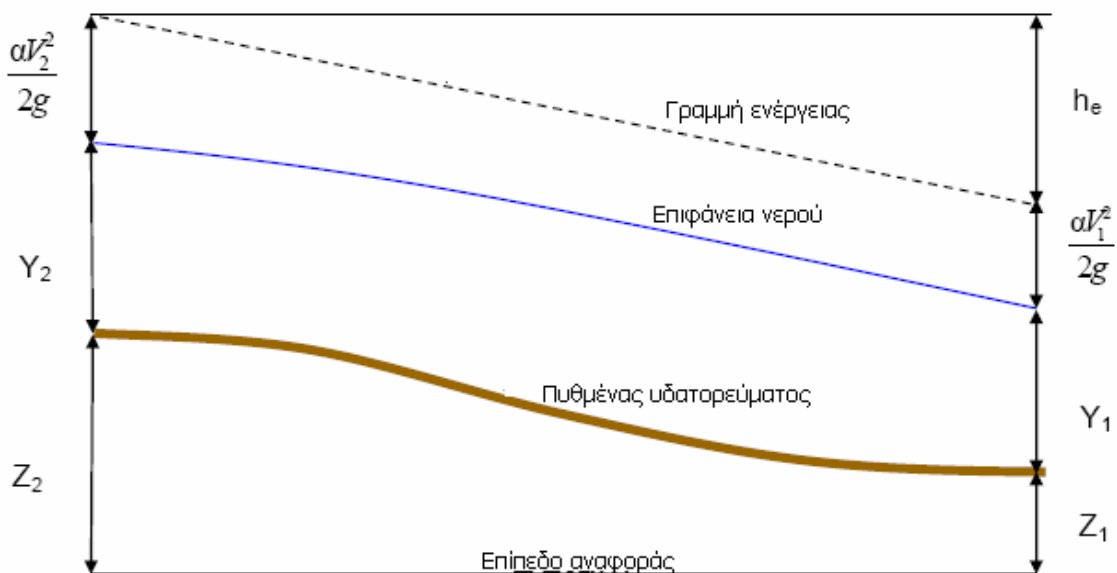
$Y_1, Y_2$ : Βάθη ροής

$a_1, a_2$ : Συντελεστές συνόρθωσης κινητικής ενέργειας ταχύτητας

$V_1, V_2$ : Μέσες ταχύτητες διατομών

$g$ : Επιτάχυνση βαρύτητας

$h_e$ : Ολικές απώλειες ενέργειας (γραμμικές και τοπικές)



Σχήμα 4.3: Απεικόνιση μεγεθών της εξίσωσης ενέργειας (Brunner G. W., 2010).

Το ολικό ύψος των απωλειών ενέργειας είναι το άθροισμα του ύψους των γραμμικών και του ύψους των τοπικών απωλειών, με τη χρήση της ακόλουθης εξίσωσης

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (4.22)$$

Όπου:  $L$ : Μέση σταθμισμένη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών

$\bar{S}_f$ : Απώλειες λόγω τριβής

$C$ : Συντελεστής συστολής/διαστολής για τις τοπικές απώλειες ενέργειας (0.1 για συστολή και 0.3 για διαστολή)

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

#### Γραμμικές Απώλειες

Για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών, αρχικά υπολογίζεται η μέση σταθμισμένη απόσταση, ως προς της παροχές, μεταξύ των διαδοχικών διατομών, όπως φαίνεται στην Εξίσωση 4.23.

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (4.23)$$

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

$\bar{Q}_{lob}, \bar{Q}_{ch}, \bar{Q}_{rob}$ : Μέσες παροχές μεταξύ διατομών στο αριστερό τμήμα, την κοίτη και το δεξί τμήμα, αντίστοιχα

Ο συντελεστής μεταφοράς  $K$  υπολογίζεται για κάθε διατομή. Έπειτα, για κάθε τμήμα ενιαίου συντελεστή Manning  $n$  υπολογίζεται η τιμή  $K_i$  και αθροίζονται οι επιμέρους τιμές για να διαμορφωθούν οι τιμές  $K_{lob}$  για το αριστερό τμήμα και  $K_{rob}$  για το δεξί τμήμα (Σχήμα 4.4). Ο συντελεστής Manning  $n$  στο τμήμα εντός της κοίτης αντιμετωπίζεται ως ενιαίος. Ο συντελεστής  $K$  υπολογίζεται με βάση την Εξίσωση 4.24.

Ο συνολικός συντελεστής  $K$  προκύπτει από το άθροισμα  $K_{lob} + K_{ch} + K_{rob}$ , για όλο το μήκος της διατομής.

$$K = \frac{1.486}{n} A * R^{2/3} \quad (4.24)$$

Όπου:  $n$ : Συντελεστής Manning

$A$ : Εμβαδό διατομής

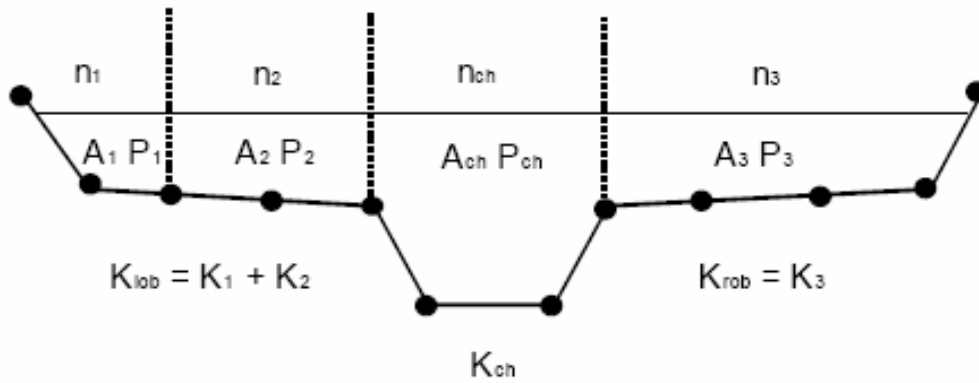
$P$ : Βρεχόμενη περίμετρος

$R$ : Υδραυλική ακτίνα διατομής ( $A/P$ )

$K_{lob}$ : Συντελεστής  $K$  στο αριστερό πλευρικό τμήμα

$K_{ch}$ : Συντελεστής  $K$  στην κοίτη

$K_{rob}$ : Συντελεστής  $K$  στο δεξί πλευρικό τμήμα



Σχήμα 4.4: Μέθοδος υπολογισμού συντελεστή  $K$ .

Ο συντελεστής τραχύτητας Manning's  $n$  ορίστηκε με βάση τους πίνακες "Table 5-6. Values of the Roughness Coefficient  $n$ " (Παράρτημα Α), όπως περιγράφεται στο Open Channel Hydraulics, Ven Te Chow, Reprint of the 1959 Edition στις σελίδες 110 με 113

Η μέση κλίση της γραμμής ενέργειας προσδιορίζεται με βάση την Εξίσωση 4.25.

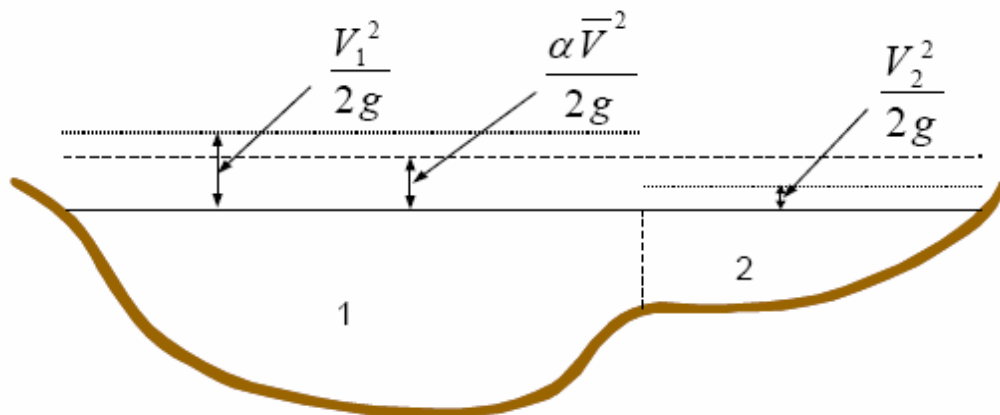
$$\bar{S}_f = \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (4.25)$$

Όπου:  $Q_1, Q_2$ : Μέσες παροχές σε 2 διαδοχικές διατομές

$K_1, K_2$ : Συντελεστής  $K$  για κάθε διατομή

#### Τοπικές απώλειες ενέργειας

Για τον υπολογισμό των συνολικών απωλειών θα πρέπει να υπολογιστούν και οι τοπικές απώλειες. Εκτός του συντελεστή συστολής/διαστολής είναι απαραίτητος και ο υπολογισμός της μέσης κινητικής ενέργειας κάθε διατομής με βάση το Σχήμα 4.5 και την Εξίσωση 4.26.



Σχήμα 4.5: Υπολογισμός μέσης κινητικής ενέργειας διατομής (Brunner G. W., 2010).

$$\alpha \frac{\bar{V}^2}{2g} = \frac{Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2} \quad (4.26)$$

Όπου:  $V_1, V_2$ : Ταχύτητα στο αριστερό και δεξί αντίστοιχα τμήμα της διατομής

$Q_1, Q_2$ : Παροχή στο αριστερό και δεξί αντίστοιχα τμήμα της διατομής

$\bar{V}$ : Η μέση ταχύτητα της διατομής

Απλοποιώντας την Εξίσωση 4.26 και λύνοντας ως προς το συντελεστή συνόρθωσης της κινητικής ενέργειας  $\alpha$ , προκύπτει η πιο κάτω σχέση.

$$\alpha = \frac{Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2}{(Q_1 + Q_2) V^2} \quad (4.27)$$

Τέλος, αφού υπολογίστηκαν οι συντελεστές συνόρθωσης και οι μέσες κινητικές ενέργειες κάθε διατομής, υπολογίζονται οι τοπικές απώλειες από τη σχέση

$$C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (4.28)$$

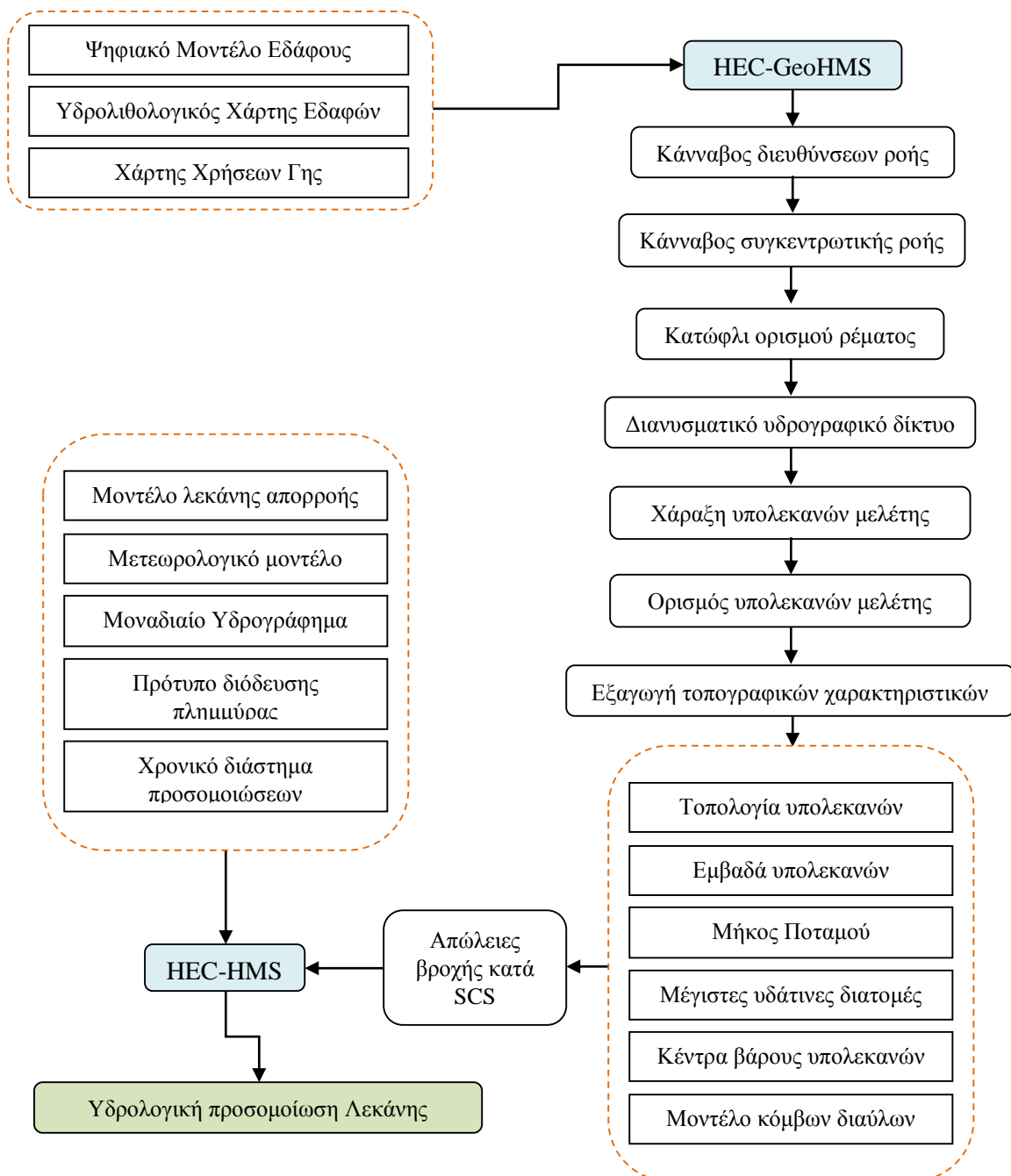
Όπου:  $C$ : Συντελεστής συστολής/διαστολής για τις τοπικές απώλειες ενέργειας (0.1 για συστολή και 0.3 για διαστολή)

$V_1, V_2$ : Ταχύτητες δύο διαδοχικών διατομών

$a_1, a_2$ : Συντελεστές συστολής/διαστολής δύο διαδοχικών διατομών

## 5 Υδρολογική Προσομοίωση Λεκάνης Απορροής Παραλιμνίου

Η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του Ποταμού Εισροής της Λίμνης Παραλιμνίου υλοποιήθηκε με την βοήθεια του προγράμματος HEC-HMS, και η διαδικασία που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται σχηματικά στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.1: Διαδικασία υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης απορροής με το λογισμικό HEC-HMS

## 5.1 Γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση της λεκάνης

Η ανάλυση της λεκάνης απορροής μελέτης ως προς τα γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά της πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού ArcGIS με την βοήθεια της εργαλειοθήκης ArcHydro και της επέκτασης HEC-GeoHMS.

Με σκοπό την διευκόλυνση των υδρολόγων μηχανικών με περιορισμένη εμπειρία σε συστήματα γεωγραφικής πληροφορίας αναπτύχθηκε η επέκταση HEC-GeoHMS. Το γεωχωρικό αυτό εργαλείο παρέχει την δυνατότητα στον χρήστη να οπτικοποιεί τη χωρική πληροφορία, να καταγράφει χαρακτηριστικά της λεκάνης, να οριοθετεί τις υπολεκάνες και τα ρέματα, να δημιουργεί αρχεία εισόδου σε υδρολογικά μοντέλα και να βοηθά στην προετοιμασία αναφορών (Fleming & Doan, 2009).

Τα απαραίτητα αρχεία εισόδου για την λειτουργία του HEC-GeoHMS είναι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής, οι ψηφιοποιημένοι χάρτες χρήσεων γης και υδρολιθολογικοί χάρτες, καθώς και επιπρόσθετα βοηθητικά αρχεία όπως για παράδειγμα το υδρογραφικό δίκτυο. Μέσω των υπολογιστικών διαδικασιών του προγράμματος και της ανάλυση των προαναφερθέντων χωρικών δεδομένων θα χαραχθούν οι υπολεκάνες απορροής, το υδρογραφικό δίκτυο και θα προσδιοριστούν τα υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τους.

Αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης των υπολογισμών στο HEC-GeoHMS, είναι η δημιουργία δύο αρχείων εισόδου συμβατά στη χρήση για το λογισμικό HEC-HMS. Συγκεκριμένα, εξάγονται τα εξής αρχεία:

1. Αρχείο χάρτη (background map file), στο οποίο οπτικοποιούνται οι υπολεκάνες και τα υδατορεύματα στην περιοχή μελέτης.
2. Αρχείο του μοντέλου της λεκάνης απορροής (basin model file), στο οποίο περιέχονται τα υδρολογικά και γεωμορφολογικά στοιχεία της λεκάνης.

Για την σωστή λειτουργία του λογισμικού HEC-HMS απαιτείται η εισαγωγή του μετεωρολογικού μοντέλου, τα παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα και ορισμένες παράμετροι για την εφαρμογή των μαθηματικών προτύπων του προγράμματος.

### 5.1.1 Προετοιμασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους

Πρωταρχικό βήμα για την δημιουργία του υδρολογικού μοντέλου είναι η προεπεξεργασία του εδάφους. Σε αυτό το στάδιο, εισάγεται το μοντέλο εδάφους της λεκάνης απορροής Παραλιμνίου, για τον υπολογισμό επιπλέον χαρακτηριστικών του εδάφους, που περιγράφουν το μοτίβο αποστράγγισης της λεκάνης απορροής και επιτρέπουν την οριοθέτηση της ροής και των υπολεκάνων.

Παρακάτω παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1 αναλυτικά οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν μέσω της εργαλειοθήκης ArcHydro:



Πίνακας 5.1: Εντολές προεπεξεργασίας του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Fleming & Doan, 2009).

Εντολή	Δεδομένα εισόδου
DEM Reconditioning	Ψηφιακό μοντέλο εδάφους, ρεύμα
Fill Sinks	Διορθωμένο ψηφιακό μοντέλο εδάφους
Flow Direction	Επιδιορθωμένο ψηφιακό μοντέλο εδάφους
Flow Accumulation	Πλέγμα κατεύθυνσης απορροής
Stream Definition	Πλέγμα συγκεντρωτικής ροής
Stream Segmentation	Πλέγμα ροής ποταμού, Πλέγμα κατεύθυνσης απορροής
Catchment Grid Delineation	Πλέγμα κατεύθυνσης απορροής, Πλέγμα σύνδεσης ρεμάτων
Catchment Polygon Processing	Πλέγμα λεκανών απορροής
Drainage Line Processing	Πλέγμα σύνδεσης ρεμάτων, Πλέγμα κατεύθυνσης ροής
Adjoint Catchment Processing	Γραμμή αποστράγγισης, Λεκάνη απορροής

### Εντολή DEM Reconditioning

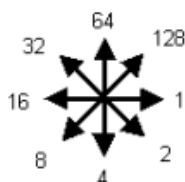
Η συγκεκριμένη εντολή έχει την δυνατότητα να ανακατατάσσει τα κελιά του καννάβου στο αρχικό ΨΜΕ κατά μήκος των ρευμάτων, με σκοπό την δημιουργία ενός ευδιάκριτου και σαφούς προφίλ ρευμάτων. Είναι απαραίτητη η λειτουργία αυτής της εντολής, κυρίως λόγω των ελλিপών υψομετρικών δεδομένων κατά μήκος των ρευμάτων στην αποτύπωση του αρχικού ΨΜΕ.

### Εντολή Fill Sinks

Σε ένα πλέγμα κελιών όπως στην περίπτωση μας το ΨΜΕ, συχνά υπάρχουν ψευδή βυθίσματα. Για παράδειγμα, ένα κελί μπορεί να περιβάλλεται από άλλα κελιά με ψηλότερο υψόμετρο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το νερό να παγιδευτεί στο συγκεκριμένο κελί και να μην ρέει όπως και θα έπρεπε. Η λειτουργία λοιπόν της εντολής Fill Sinks τροποποιεί την τιμή του υψόμετρου στα προβληματικά κελιά για να εξαλείψει το πρόβλημα της ροής σε αυτά.

### Εντολή Flow Direction

Η εντολή αυτή λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου το επιδιορθωμένο ψηφιακό μοντέλο εδάφους και υπολογίζει την διεύθυνση ροής του δημιουργώντας τον κάνναβο κατεύθυνσης απορροής. Οι τιμές στα κελιά του καννάβου απορροής υποδεικνύουν την φορά της πιο απότομης καθόδου από το κάθε κελί.



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

Σχήμα 5.2 : Τιμή του κεντρικού εικονοστοιχείου ανάλογα με την διεύθυνση ροής (Fleming & Doan, 2009).

### Εντολή Flow Accumulation

Στο βήμα αυτό δημιουργείται ο κάνναβος συγκεντρωτικής ροής καθορίζοντας τον αριθμό των ανάντη κελιών που αποστραγγίζονται σε ένα συγκεκριμένο κελί. Η συγκεντρωτική ροή για

κάθε κελί του καννάβου ισούται με το άθροισμα των γειτονικών φατνίων που απορρέουν σε αυτό.

### **Εντολή Stream Definition**

Βασιζόμενη στον κάνναβο συγκεντρωτικής ροής και σε μια τιμή κατώφλι καθορισμένη από τον χρήστη η εντολή αυτή υπολογίζει το δίκτυο ροής. Τα κελιά που παρουσιάζουν μεγαλύτερη συσσώρευση ροής από την τιμή κατώφλι επιλέγονται για να προσδιοριστεί το δίκτυο ροής. Το πρόγραμμα από μόνο του θέτει προκαθορισμένη ελάχιστη τιμή ίση με το 1% της μεγαλύτερης περιοχής αποστράγγισης σε ολόκληρη τη λεκάνη απορροής. Ωστόσο, οποιαδήποτε άλλη τιμή-κατώφλι μπορεί να επιλεγεί. Όσο πιο μικρό είναι το κατώφλι, τόσο πιο πυκνό θα είναι το υδρογραφικό δίκτυο με αποτέλεσμα να δημιουργούνται περισσότερες υπολεκάνες.

### **Εντολή Stream Segmentation**

Η εντολή αυτή δημιουργεί ένα πλέγμα με τη τμηματοποίηση του υδρογραφικού δικτύου διαιρώντας το υδατόρευμα σε μικρότερα κομμάτια.

### **Εντολή Catchment Grid Delineation**

Στο στάδιο αυτό δημιουργούνται οι υπολεκάνες για κάθε τμήμα του υδατορεύματος. Το αποτέλεσμα είναι οι διαχωρισμένες υπολεκάνες σε μορφή καννάβου.

### **Εντολή Catchment Polygon Processing**

Η χρήση της εντολής αυτής είναι να μετατρέψει τον κάνναβο που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο στάδιο σε διανυσματική μορφή (από raster σε vector).

### **Εντολή Drainage Line Processing**

Όμοια με την προηγούμενη εντολή, χωρίς κάποια υδρολογική σημασία, ο κάνναβος του υδρογραφικού δικτύου μετατρέπεται σε διανυσματική μορφή (από raster σε vector).

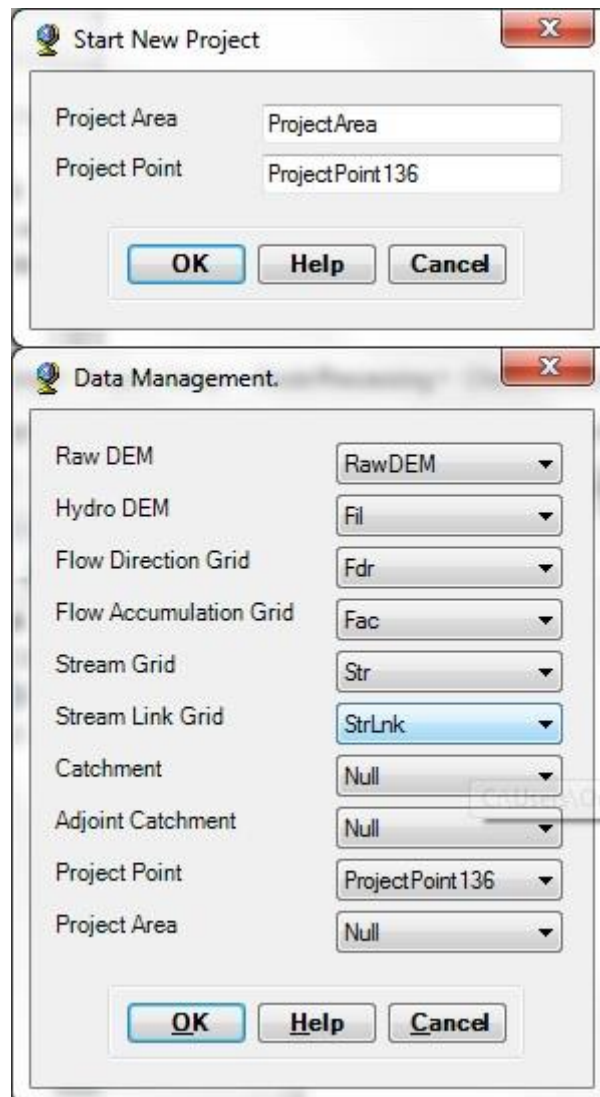
### **Εντολή Adjoint Catchment Processing**

Η εντολή αυτή σε κάθε συμβολή του ποταμού, αθροίζει τις ανάντη υπολεκάνες. Η λειτουργία της εντολής είναι πάλι καθαρά υπολογιστικής σημασίας, αφού σκοπό έχει να επιταχύνει την διαδικασία οριοθέτησης σημείων.

## **5.1.2 Προετοιμασία δεδομένων για είσοδο στο HEC-HMS**

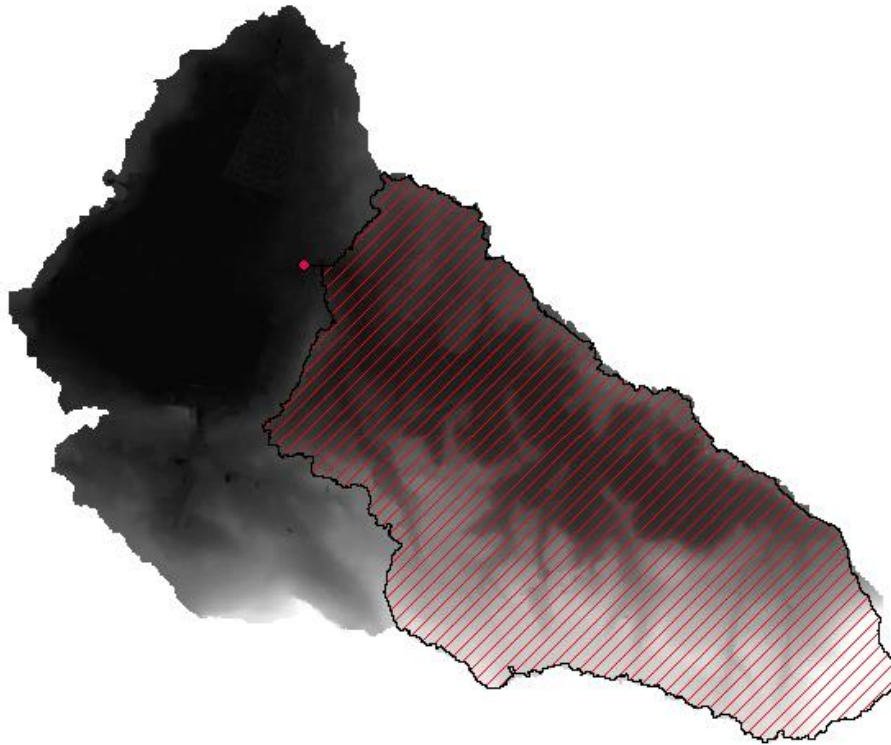
Χρησιμοποιώντας τα ίδια χωρικά δεδομένα ο χρήστης έχει την δυνατότητα να κατασκευάσει διαφορετικά μοντέλα λεκανών απορροής, έτοιμα για την εισαγωγή τους στο λογισμικό HEC-HMS. Το μενού ρύθμισης της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS παρέχει τα κατάλληλα εργαλεία για τον προσδιορισμό της εξόδου της λεκάνης απορροής, καθώς και την οριοθέτηση αυτής, στοιχεία απαραίτητα για την διαχείριση πολλαπλών λεκανών απορροής (Fleming & Doan, 2009).

Ξεκινώντας μια νέα εργασία μέσω της εντολής «Start New Project», ονομάζουμε το αρχείο μελέτης και ορίζουμε τις μήτρες δεδομένων (Σχήμα 5.3) χρησιμοποιώντας τα αρχεία που δημιουργήθηκαν προηγουμένως στο υποκεφάλαιο 5.1.1.



Σχήμα 5.3: Δημιουργία νέου Project.

Στο επόμενο βήμα καθορίζονται, μέσω του εργαλείου «Project Point», το σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής. Ως σημείο επιλέχθηκε το σημείο εκβολής του ποταμού στην Λίμνη Παραλιμνίου. Έπειτα, παράγεται η περιοχή μελέτης (λεκάνη απορροής ποταμού εισροής Λίμνης Παραλιμνίου) με την εντολή «Generate Project». Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της διαδικασίας, όπου με κόκκινη διαγράμμιση απεικονίζεται η τελική περιοχή μελέτης.



Σχήμα 5.4: Περιοχή Μελέτης.

### Εξαγωγή μορφομετρικών χαρακτηριστικών περιοχής μελέτης

Η εξαγωγή μορφομετρικά χαρακτηριστικών των ρευμάτων και των υπολεκανών, υλοποιείται από το μενού εντολών «Basin Characteristics» του HEC-GeoHMS. Πιο συγκεκριμένα υπολογίζεται το μήκος και η μέση κλίση του ποταμού, η κλίση της λεκάνης και υπολεκάνων απορροής, το μέγιστο μήκος υδάτινης διαδρομής κάθε λεκάνης μέχρι την έξοδο της και, τέλος, το κέντρο βάρους καθώς και το μέγιστο μήκος υδάτινης διαδρομής από το κέντρο βάρους κάθε υπολεκάνης. Τα χαρακτηριστικά αυτά μεγέθη για την περιοχή Ποταμός εισροής Λίμνης Παραλιμνίου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.2: Μορφομετρικά χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης.

Χαρακτηριστικό μέγεθος	Τιμή
Εμβαδό λεκάνης απορροής	11.536 km <sup>2</sup>
Μήκος ποταμού	5.884 km
Μέγιστο μήκος υδάτινης διαδρομής στη λεκάνη απορροής	9.237 km

### Επιλογή πρότυπων υπολογισμού υδρολογικών παραμέτρων και δημιουργία αρχείων εισόδου HEC-HMS

Αφότου έχουν εξαχθεί τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά του ποταμού και των υπολεκανών, συνέχεια έχει ο καθορισμός των προτύπων για την εκτέλεση της υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης. Τα πρότυπα που πρόκειται να καθοριστούν για τον υπολογισμό των απωλειών βροχής, της άμεσης απορροής, του χρόνου υστέρησης και της διόδευσης του πλημμυρογραφήματος, μπορούν να υπολογιστούν για το μέσο όρο κάθε υπολεκάνης αυτόματα από το πρόγραμμα εισάγοντας τα ανάλογα δεδομένα μέσω του μενού «Hydrologic

Parameters». Εντούτοις, υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού και εισαγωγής των δεδομένων χειροκίνητα, σε μετέπειτα στάδιο στο πρόγραμμα HEC-HMS, όπως έχει γίνει και στην παρούσα μελέτη.

Τέλος, για να γίνουν συμβατά στο HEC-HMS τα μέχρι στιγμής δεδομένα που υπολογίστηκαν, ακολουθήθηκαν τα βήματα με την σειρά που αναγράφονται στον πιο κάτω πίνακα.

Πίνακας 5.3: Βήματα για δημιουργία υπόβαθρου στο HEC-HMS (Fleming & Doan, 2009).

Εντολή μενού HMS	Λειτουργία
Map to HMS Units	Μετατροπή μορφομετρικών χαρακτηριστικών λεκάνης και ποταμού σε σύστημα μονάδων SI, συμβατό με μονάδες HMS
HMS Check Data	Έλεγχος συνοχής και ορθότητας δεδομένων
HMS Schematic	Δημιουργία απλοποιημένου υδρολογικού δικτύου, αποτυπώνοντας την συνδεσιμότητα των κόμβων (nodes) και των διαύλων (link)
HMS Legend	Αναπαράσταση με εικονίδια των στοιχείων κόμβων και διαύλων
Add Coordinates	Ενσωμάτωση συντεταγμένων στα στοιχεία των κόμβων και διαύλων
Prepare Data for Model Export	Εξαγωγή των υδρολογικών παραμέτρων και την δομή των δεδομένων για το μοντέλο της λεκάνης
Background Map File	Εξαγωγή χάρτη συμβατού στο HEC-HMS
HMS Project Setup	Δημιουργία τελικού αρχείου δεδομένων εισόδου για το HEC-HMS

## 5.2 Το πρόγραμμα HEC-HMS

### 5.2.1 Υδρολογικό μοντέλο –γενικές κατευθύνσεις

Σκοπός αυτού του τμήματος της εργασίας είναι η ανάλυση της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης μελέτης για συγκεκριμένο επεισόδιο βροχής. Η επεξεργασία γίνεται στο περιβάλλον του HEC-HMS και ακολουθεί τα βήματα, τα οποία παρουσιάστηκαν στο διάγραμμα του Σχήματος 5.1 πιο πάνω.

Το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS είναι μέλος των προσδιοριστικών παραμετρικών μοντέλων και είναι βασισμένο στη θεωρία του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος για τη μετατροπή της βροχής σε απορροή (Scharffenberg & Fleming, 2010).

Το πρόγραμμα αυτό (Hydrologic Modeling System, HMS) σχεδιάστηκε από το σώμα μηχανικών του Αμερικανικού στρατού με σκοπό την προσομοίωση των διαδικασιών βροχόπτωσης-απορροής σε λεκάνες με δένδροειδή μορφή. Εφαρμόζεται επίσης σε μεγάλες λεκάνες απορροής της υπαίθρου, αλλά και σε μικρές αστικές και ημιαστικές λεκάνες. Τα υδρογραφήματα που παράγονται χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση των υδατικών συστημάτων, αφού η χρησιμότητά τους είναι σαφής σε περιπτώσεις όπως: μελέτες διαθεσιμότητας υδατικών πόρων, αποστραγγιστικά έργα, μελέτες πρόγνωσης πλημμυρών, σχεδιασμό υπερχειλιστών φραγμάτων κ.α..

Επιπρόσθετα, το μοντέλο της λεκάνης κατασκευάζεται διαχωρίζοντας τον υδρολογικό κύκλο σε επιμέρους συνιστώσες τις οποίες το HEC-HMS αντιμετωπίζει ξεχωριστά. Έτσι, δίνεται η ευκαιρία στο χρήστη να επιλέξει τα κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα για κάθε μία διαδικασία χωριστά, να κάνει τους δικούς του συνδυασμούς, ή ακόμη και να κάνει σύγκριση μεταξύ των διάφορων προτύπων. Όμως, κάθε μαθηματικό μοντέλο έχει συγκεκριμένους περιορισμούς, καθιστώντας το αδύνατο να μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε περίπτωση, καθώς οι συνθήκες ποικίλουν. Η σωστή επιλογή εξαρτάται αποκλειστικά από την κρίση του μελετητή και τους στόχους που έχει θέσει για τη μελέτη του, καθώς επίσης και στην γνώση του περί της λεκάνης απορροής (αριθμό των διαθέσιμων δεδομένων), (Scharffenberg & Fleming, 2010).

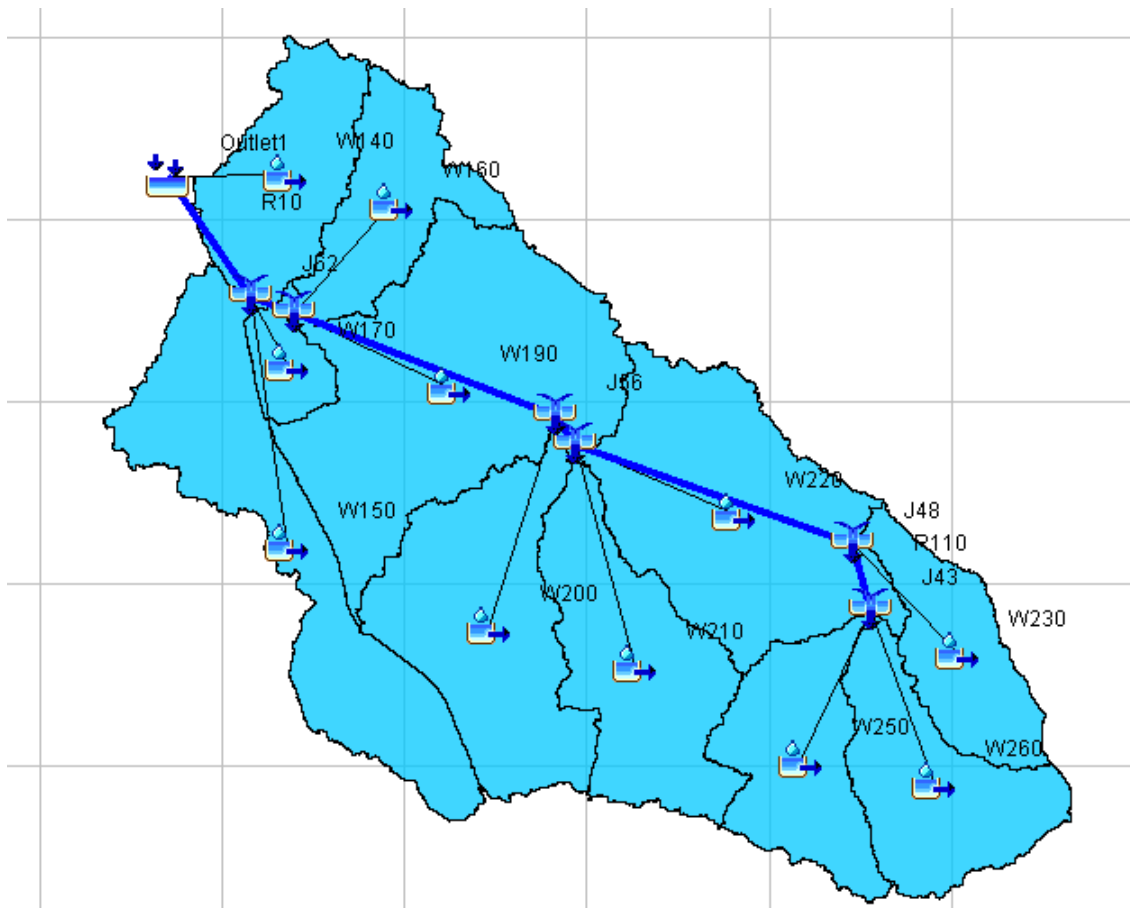
Τα μαθηματικά πρότυπα που διατίθενται στο HEC-HMS – σε σχέση με τις διαδικασίες που εκτελούν διακρίνονται σε (Feldman, 2000):

1. Πρότυπα υπολογισμού απωλειών βροχής
2. Πρότυπα υπολογισμού άμεσης απορροής
3. Πρότυπα υπολογισμού βασικής απορροής
4. Πρότυπα διόδευσης πλημμυρογραφήματος




Χρησιμοποιώντας λοιπόν το συγκεκριμένο λογισμικό έγιναν δύο προσεγγίσεις, για το επεισόδιο βροχόπτωσης της 15/2/1988 στην περιοχή του Ποταμού εισροής Λίμνης Παραλιμνίου. Η πρώτη προσέγγιση, στην οποία λήφθηκαν υπόψη οι χρήσεις γης που επικρατούσαν για την εποχή του συμβάντος βροχόπτωσης και η δεύτερη στην οποία λήφθηκαν υπόψη οι σημερινές χρήσεις γης για το ίδιο επεισόδιο, έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί σύγκριση των τελικών παροχών, για να διαπιστωθεί η επίδραση των διαφορετικών χρήσεων γης.

### **5.2.2 Μοντέλο λεκάνης απορροής**

Έχοντας ετοιμάσει το αρχείο μοντελοποίησης της λεκάνης απορροής με την διαδικασία που παρουσιάστηκε στον Πίνακα 5.3, σειρά έχει η εισαγωγή του στο λογισμικό HEC-HMS. Το αρχείο εισάγεται με την εντολή Import → Basin Model και στην επιφάνεια εργασίας του χρήστη προβάλλεται μια απλοποιημένη δομή της λεκάνης (Σχήμα 5.5), ένα σύστημα κόμβων και διαύλων που συνδέουν διάφορα υδρολογικά στοιχεία). Σε αυτό το στάδιο, εισάγεται και ο χάρτης υπόβαθρου με την εντολή View → Background Maps, έτσι ώστε να υπάρχει μια εποπτική εικόνα.



Σχήμα 5.5: Μοντέλο λεκάνης απορροής.

Όπου με το εικονίδιο  συμβολίζεται η υπολεκάνη (Sub-basin), με το εικονίδιο  ο σύνδεσμος (Junction) και με το εικονίδιο  το τμήμα υδατορεύματος.

Τέλος, για να ολοκληρωθεί το μοντέλο της λεκάνης πρέπει να επιλεγθούν τα κατάλληλα πρότυπα για τον υπολογισμό των απωλειών βροχής, άμεσης απορροής και διόδευσης πλημμύρας. Σημειώνεται ότι το πρότυπο βασικής ροής δεν επιλέχθηκε, καθώς δεν υπήρχαν επαρκή δεδομένα για να είναι αξιόπιστη εισαγωγή του στο μοντέλο.

#### **Υπολογισμός απωλειών βροχόπτωσης με τη μέθοδο SCS**

Επόμενο στάδιο για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής είναι ο καθορισμός των απωλειών βροχής στο μοντέλο της λεκάνης. Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί είναι η SCS. Η παράμετρος, CN της μεθόδου θα προσδιορισθεί με χρήση των σχετικών πινάκων TR-55 της SCS και πιο συγκεκριμένα τον πίνακα 4.2, όπως προτάθηκε από τον Wanielista (1978). Διευκρινίζεται ότι ο τύπος εδαφικής υγρασίας της λεκάνης απορροής του Ποταμού εισροής της Λίμνης Παραλιμνίου, λαμβάνεται ο Τύπος I (AMC I), ο οποίος αντιστοιχεί καλύτερα για τις ξηρές συνθήκες της περιοχής και στην βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών (Τσακίρης, 2013).

Για κάθε υπολεκάνη, θα εκτιμηθεί ξεχωριστά ο CN. Όμως, επειδή κάθε λεκάνη δεν απαρτίζεται από μία μόνο χρήση γης και τύπο εδάφους, ο σταθμισμένος μέσος αριθμός καμπύλης (CN) απορροής θα προσδιοριστεί από την εξής σχέση:

$$CN_{avg} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \quad (5.1)$$

Επίσης η διαδικασία για την εκτίμηση του αριθμού CN βασίζεται στις δυνατότητες των συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας ArcGIS. Αναλυτικότερα, πιο κάτω παρουσιάζεται βήμα προς βήμα η εκτίμηση της συγκεκριμένης παραμέτρου.

1. Εισαγωγή του χάρτη με τα όρια των υπολεκανών της περιοχής μελέτης, για τις οποίες θα γίνει η εκτίμηση της παραμέτρου CN .
2. Εισαγωγή των χαρτών με τις χρήσεις γης και υδρολιθολογικούς τύπους εδαφών. Σημειώνεται ότι στις ιδιότητες του ψηφιοποιημένου χάρτη χρήσεων γης προστέθηκε μια στήλη με την κατηγοριοποίηση κατά SCS. Παράλληλα, στις ιδιότητες του υδρολιθολογικού χάρτη προστέθηκαν οι στήλες με το τύπο εδάφους από υδρολογική σημασία.
3. Επικάλυψη του χάρτη χρήσεων γης και του υδρολιθολογικού με χρήση της εντολής *intersect* από την εργαλειοθήκη του ArcMap. Αποτέλεσμα είναι ένας χάρτης που αποτελεί την ένωση των παραπάνω και περιέχει τα χαρακτηριστικά και των δύο (κατηγοριοποίηση SCS και τύπο εδάφους A B C D).
4. Δημιουργία πίνακα αναφοράς (CNLookUp) με τις τιμές CN για συνδυασμούς εδαφών και χρήσεων γης. Ο πίνακας δημιουργήθηκε με την εντολή *Create Table* της εργαλειοθήκης *Management Tools*.
5. Δημιουργία GRID με τον αριθμό CN για κάθε κελί. Η επέκταση HEC-GeoHMS διευκολύνει την δημιουργία με την έτοιμη εντολή *Utility* → *Generate CN Grid*. Το πρόγραμμα ταυτίζει τις τιμές του CN στον πίνακα που δημιουργήθηκε (βήμα 4) με τον ενοποιημένο χάρτη «χρήσεων γης – υδρολιθολογικό».
6. Τελευταίο βήμα είναι ο υπολογισμός του μέσου όρου του CN για κάθε υπολεκάνη, εισάγοντας τον μαθηματικό τύπο για τον σταθμισμένο μέσο όρο (εντολή *Map Algebra*). Εναλλακτικά, μέσω της εντολής *Subbasin Parameters from Raster*, της επέκτασης HEC-GeoHMS, ο χρήστης μπορεί να κάνει ακριβώς την ίδια δουλειά αυτοματοποιημένα.

Η διαδικασία εφαρμόστηκε δύο φορές ξεχωριστά, μία για τις χρήσεις γης που επικρατούσαν από το 1983 μέχρι το 2003, και μία για τις χρήσεις από το 2006 μέχρι σήμερα. Στον Πίνακα 5.4 αναφέρονται αναλυτικά οι τιμές του αριθμού καμπύλης CN, όπως προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία για κάθε υπολεκάνη και στις δύο περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα των προηγθέντων βημάτων παρατίθενται στο Παράρτημα Β.



Πίνακας 5.4: Τιμές παραμέτρου CN ανά υπολεκάνη για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε.

Υπολεκάνη	Περίπτωση 1 <sup>η</sup> : χρήσεις γης 1983-2003	Περίπτωση 2 <sup>η</sup> : χρήσεις γης 2006-2016
	CN	CN
W140	70.78	68.23
W150	56.04	75.82
W160	61.09	70.35
W170	52.92	70.46
W190	58.56	68.86
W200	55.82	65.17
W210	56.93	64.84
W220	55.96	66.07
W230	41.82	44.23
W250	44.52	57.85
W260	30.62	37.24

Στο σημείο αυτό ο χρήστης μεταβαίνει στο παράθυρο εργασίας του HEC-HMS (Σχήμα 5.6) και τοποθετεί τους υπολογισμένους αριθμούς CN σε κάθε υπολεκάνη. Για τον τελικό υπολογισμό των απωλειών, θα πρέπει να συμπληρωθούν ακόμη δύο πεδία. Το πεδίο Initial Abstraction θέτει την τιμή για το αρχικό έλλειμμα. Στην περίπτωση όμως που μένει κενό το πεδίο, τότε το πρόγραμμα θεωρεί ότι το αρχικό έλλειμμα ισούται με το 20% της δυνητικής μέγιστης κατακράτησης, στο οποίο άλλωστε βασίζεται και η κύρια σχέση για τον υπολογισμό του ενεργού ύψους βροχής. Όσον αφορά το πεδίο Impervious, αυτό είναι το ποσοστό επί τοις εκατό, της αδιαπέρατης επιφάνειας για κάθε υπολεκάνη. Ο υπολογισμός του συντελεστή αδιαπερατότητας γίνεται με την βοήθεια του υδρολιθολογικού χάρτη, διαιρώντας την συνολική επιφάνεια που καλύπτουν τα αδιαπέραστα εδάφη με την συνολική έκταση της λεκάνης.

The screenshot shows a software window with four tabs: 'Subbasin', 'Loss', 'Transform', and 'Options'. The 'Loss' tab is active. The window title is 'Basin Name: AMCI 1983' and 'Element Name: W250'. Below this, there are three input fields: 'Initial Abstraction (MM)' (empty), '\*Curve Number: 44.52', and '\*Impervious (%) 0.0'.

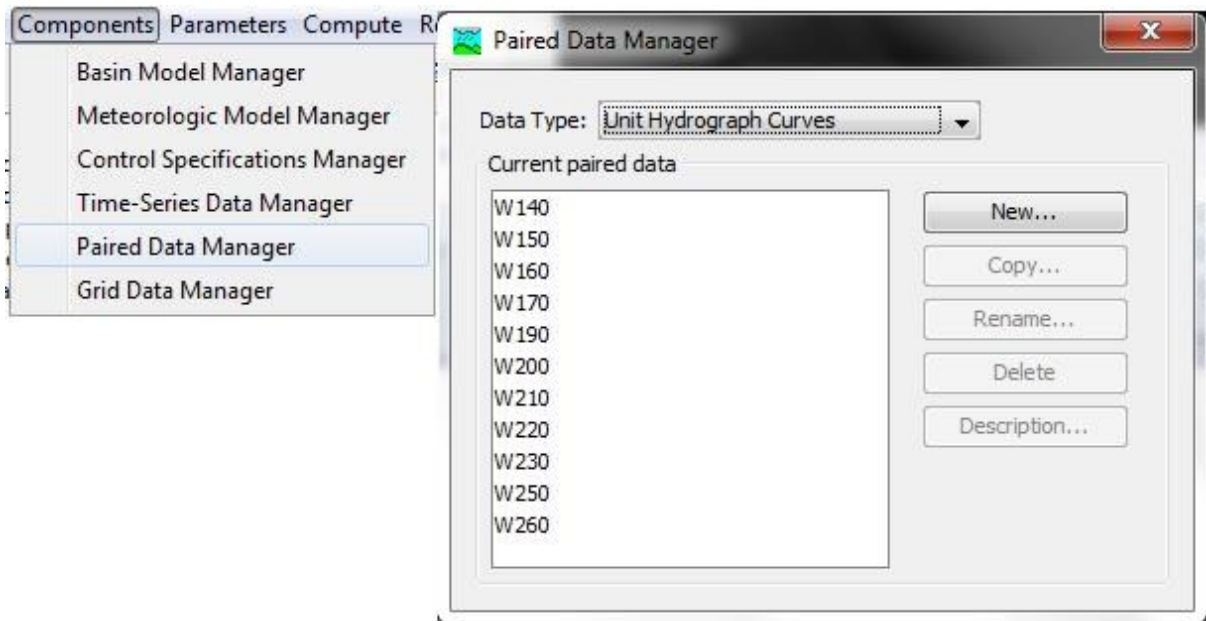
Σχήμα 5.6: Παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων απωλειών.

### Υπολογισμός άμεσης απορροής – Εισαγωγή ΜΥΓ στο μοντέλο HMS

Για τον προσδιορισμό του όγκου της άμεσης απορροής έγινε η χρήση του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος με την μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4. Όλοι οι υπολογισμοί για τη δημιουργία μοναδιαίου

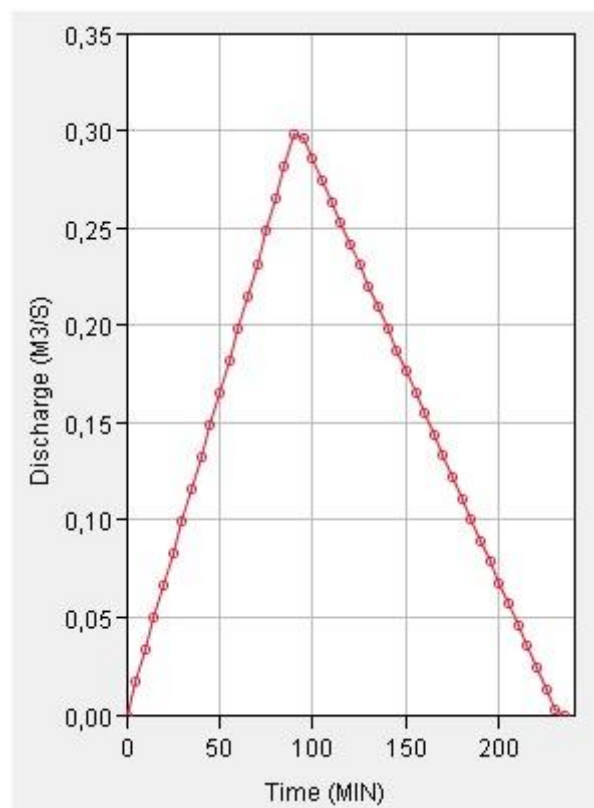
υδρογραφήματος για κάθε υπολεκάνη, έγιναν σε υπολογιστικό φύλλο excel (βλ παραρτήματα Α και Β).

Η διαδικασία εισαγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος στο πρόγραμμα HEC-HMS έγινε μέσω των εντολών Components → Components → Unit Hydrograph Curves (Σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.7: Απεικόνιση της διαδικασίας εισαγωγής του ΜΥΓ.

Ενδεικτικά πιο κάτω δίνεται το ΜΥΓ της υπολεκάνης W170.



Σχήμα 5.8: ΜΥΓ υπολεκάνης W170.

## Χρόνος υστέρησης λεκανών απορροής – Lag Time

Το επόμενο σημαντικό χαρακτηριστικό που πρέπει να εισαχθεί στο πρόγραμμα HEC-HMS, είναι ο χρόνος υστέρησης ( $t_L$ ). Ως χρόνος υστέρησης θεωρείται η χρονική απόσταση από το κέντρο μάζας του υετογράμματος μέχρι την αιχμή του υδρογραφήματος. Για μικρές λεκάνες απορροής (π.χ. 8 km<sup>2</sup> ή μικρότερες) η υπηρεσία NRCS (πρώην SCS) προτείνει την ακόλουθη εξίσωση (Τσακίρης, 2013):

$$t_L = \frac{L^{0.8}(2540 - 22.86 CN)^{0.7}}{1410 CN^{0.7} I_m^{0.5}} \quad (5.2)$$

όπου:  $t_L$ : Ο χρόνος υστέρησης (h)

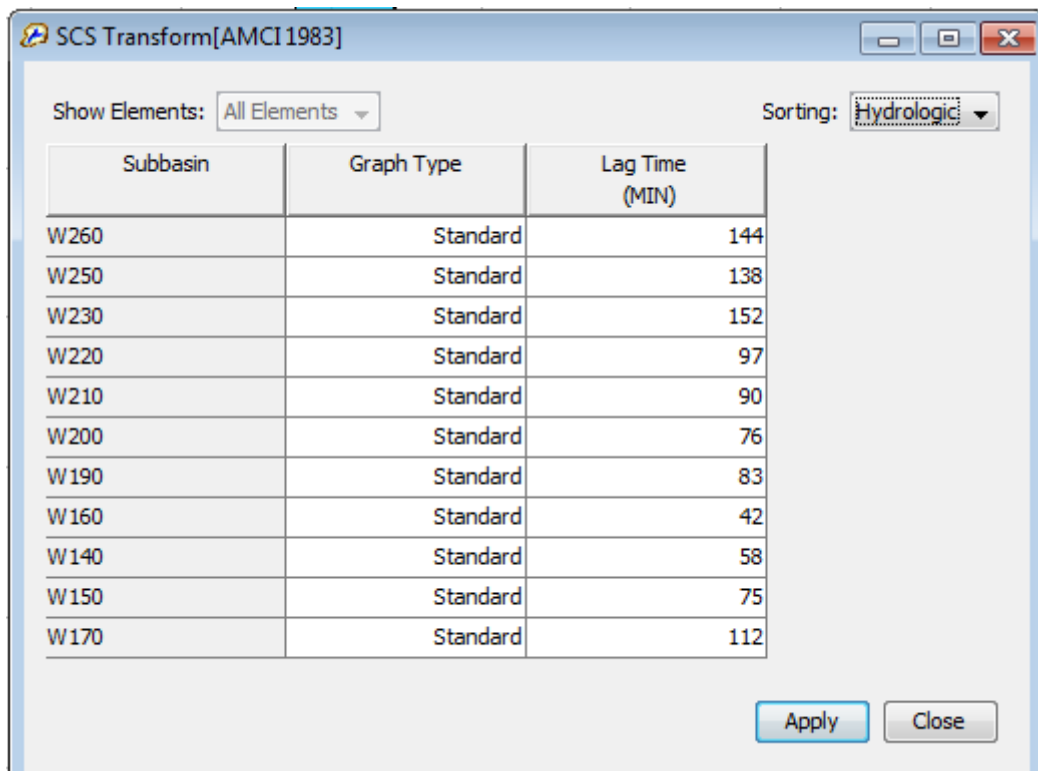
CN: Ο αριθμός καμπύλης

$L$ : Το ανάπτυγμα της μέγιστης διαδρομής (m)

$I_m$ : Η μέση κλίση της λεκάνης σε ποσοστό

Η μέση κλίση της λεκάνης σε ποσοστό υπολογίστηκε με τη χρήση του ArcMap και ειδικότερα με την εντολή Terrain Processing → Slope, της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS. Επίσης, έγινε μετατροπή του χρόνου υστέρησης από ώρες σε λεπτά καθώς στο πρόγραμμα πρέπει να εισαχθεί σε λεπτά.

Τέλος, η εισαγωγή του χρόνου υστέρησης (Lag Time) στο HEC-HMS έγινε μέσω της εντολής Parameters → Transform → SCS Unit Hydrograph. Οι χρόνοι υστέρησης κάθε υπολεκάνης παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Subbasin	Graph Type	Lag Time (MIN)
W260	Standard	144
W250	Standard	138
W230	Standard	152
W220	Standard	97
W210	Standard	90
W200	Standard	76
W190	Standard	83
W160	Standard	42
W140	Standard	58
W150	Standard	75
W170	Standard	112

Σχήμα 5.9: Χρόνος υστέρησης (Lag Time).

## Εύρεση παραμέτρων Muskingum για την διόδευση μέσω υδατορεύματος

Στο Κεφάλαιο 4 εξηγήθηκε αναλυτικά η μέθοδος Muskingum για την διόδευση πλημμύρας μέσω υδατορεύματος, και θα γίνει εφαρμογή της έτσι ώστε να υπολογιστούν οι παράμετροι της μεθόδου για τον Ποταμό εισροής Λίμνης Παραλιμνίου. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις του λογισμικού HEC-HMS, πρέπει να υπολογιστούν και να δοθούν οι δύο παράμετροι της μεθόδου Muskingum  $K$  και  $x$ , καθώς και ο αριθμός των παραπόταμων της ανάντη εισόδου του κάθε τμήματος του ποταμού (Maidment & Djokic, 2000).

Όταν δεν υπάρχουν επαρκείς μετρήσεις για την εκτίμηση των παραμέτρων της μεθόδου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εμπειρικές σχέσεις. Από την εξίσωση 5.3 (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999), εκτιμάται η παράμετρος  $K$  διαιρώντας το μήκος από την είσοδο μέχρι την έξοδο του τμήματος ποταμού ( $L$ ) προς την ταχύτητα ροής του νερού ( $V$ ).

$$K = \frac{L}{V} \quad (5.3)$$

Για την εύρεση του αριθμού παραπόταμων ( $n$ ) χρησιμοποιήθηκε η Εξίσωση 5.4

$$n = \text{int} \left( 2x \frac{L/60V}{\Delta t} \right) + 1 \quad (5.4)$$

Στην περίπτωση της παρούσας μελέτης, λόγω έλλειψης στοιχείων, εφαρμόστηκε η σχέση 5.4. Ακόμα για την παράμετρο  $x$ , δόθηκε η τιμή που επιλέγεται συνήθως για την Ελλάδα και την Κύπρο και είναι ίση με 0.2. Επίσης, για ταχύτητα νερού δόθηκε αυθαίρετα η τιμή 1.0 m/s. Έτσι οι εκτιμημένες παράμετροι Muskingum που υπολογίστηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5. Η υπολογιστική διαδικασία παρατίθεται στο Παράρτημα Α.

Πίνακας 5.5: Παράμετροι της μεθόδου Muskingum.

Τμήμα ποταμού	Muskingum $K$ (h)	Muskingum $x$	Αριθμός παραπόταμων
R110	0.101	0.2	1
R80	0.433	0.2	3
R50	0.054	0.2	1
R40	0.412	0.2	3
R30	0.068	0.2	1
R10	0.214	0.2	2

### 5.2.3 Μετεωρολογικό μοντέλο

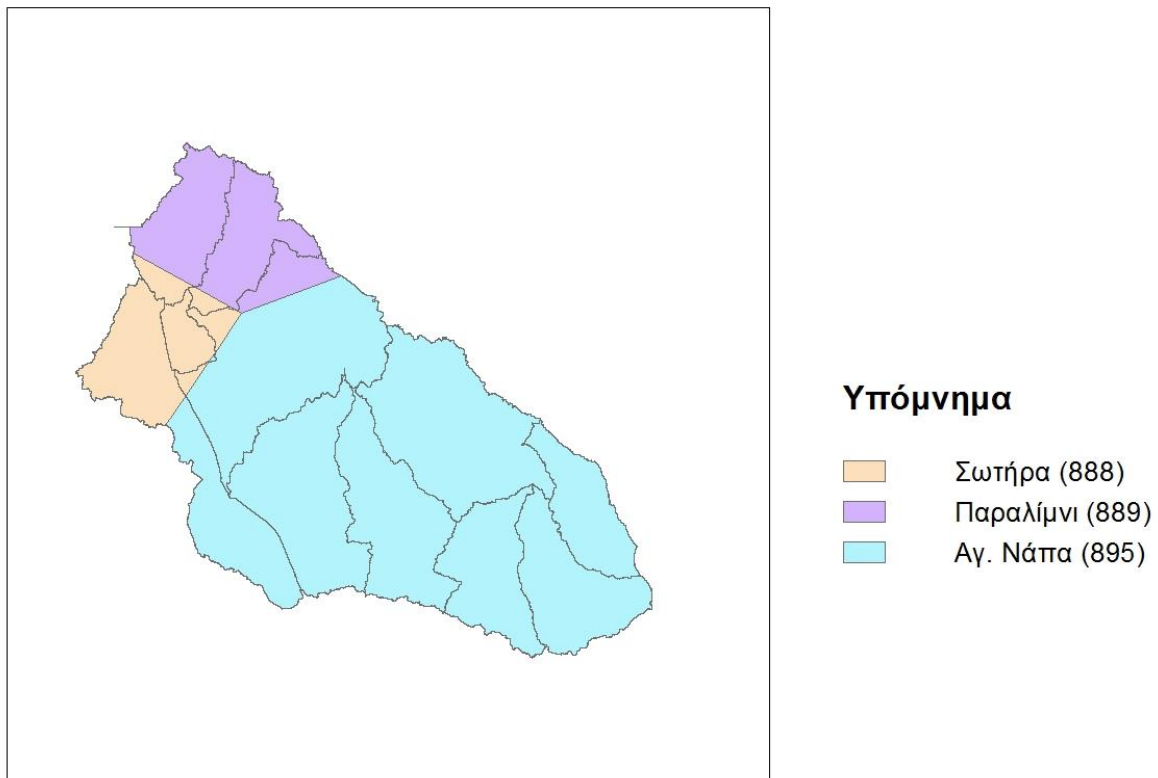
Στο μετεωρολογικό μοντέλο καθορίζονται οι βροχομετρικοί σταθμοί που θα συμπεριληφθούν στον υπολογισμό της μέσης βροχόπτωσης κάθε υπολεκάνης, καθώς και η μέθοδος με την οποία θα προσδιοριστεί η βροχόπτωση. Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen. Από την Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου δόθηκαν δεδομένα βροχόπτωσης ανά 5 λεπτά για το επεισόδιο που σημειώθηκε στις 15 Φεβρουαρίου το 1988, μαζί με τις συντεταγμένες των βροχομετρικών σταθμών Αγίας Νάπας (αρ. 895), Παραλιμνίου (αρ. 889) και Σωτήρας (αρ. 888). Σημειώνεται ότι το επεισόδιο αυτό χρησιμοποιήθηκε και στα δύο μοντέλα λεκάνης (με παλαιές και νέες χρήσεις γης), έτσι ώστε να υπάρχει μια ισοβαρής σύγκριση.

#### Εφαρμογή της μεθόδου Thiessen

Για τον υπολογισμό της επιφανειακής βροχόπτωσης για κάθε υπολεκάνη, θα ληφθούν υπόψη τα πολύγωνα Thiessen, όπως προκύπτουν από τις θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών. Η

επίδραση κάθε σταθμού, σταθμίζεται ανάλογα με το ποσοστό της επιφάνειας που καλύπτει το πολύγωνο του εκάστοτε σταθμού στην λεκάνη.

Η κατάρτιση των πολυγώνων Thiessen έγινε με την χρήση του ArcGIS. Αρχικά, εισάγονται τα σημεία με τις συντεταγμένες των τριών βροχομετρικών σταθμών στο περιβάλλον του GIS. Ο διαχωρισμός των πολυγώνων γίνεται εύκολα με το εργαλείο που προσφέρεται Analysis toolbox → Proximity → Create Thiessen Polygons. Έπειτα, γίνεται τομή και αποκοπή των πολυγώνων με τις λεκάνες της περιοχής μελέτης που μας ενδιαφέρει με την εντολή Clip. Το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας φαίνεται στο Σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.10: Πολύγωνα επιρροής Thiessen μετεωρολογικών σταθμών περιοχής.

Έτσι, ο συντελεστής βαρών της μεθόδου Thiessen υπολογίζεται διαιρώντας τα επιμέρους εμβαδά των πολυγώνων Thiessen που σχηματίζονται σε κάθε υπολεκάνη με το συνολικό εμβαδό της κάθε υπολεκάνης.

Αναλυτικά, παρατίθενται παρακάτω (Πίνακας 5.6) οι συντελεστές Thiessen, για το επεισόδιο βροχής της 15/02/1988 όπου λήφθηκαν μετρήσεις και από τους τρεις βροχομετρικούς σταθμούς.

Πίνακας 5.6: Συντελεστές Thiessen κάθε υπολεκάνης και κάθε βροχομετρικό σταθμό.

Υπολεκάνη	Παραλίμνι	Αγ. Νάπα	Σωτήρα
W140	0.865	0	0.135
W150	0	0.530	0.470
W160	0.932	0	0.068
W170	0	0.010	0.989
W190	0.124	0.819	0.057
W200	0	1	0
W210	0	1	0
W220	0	1	0
W230	0	1	0
W250	0	1	0
W260	0	1	0

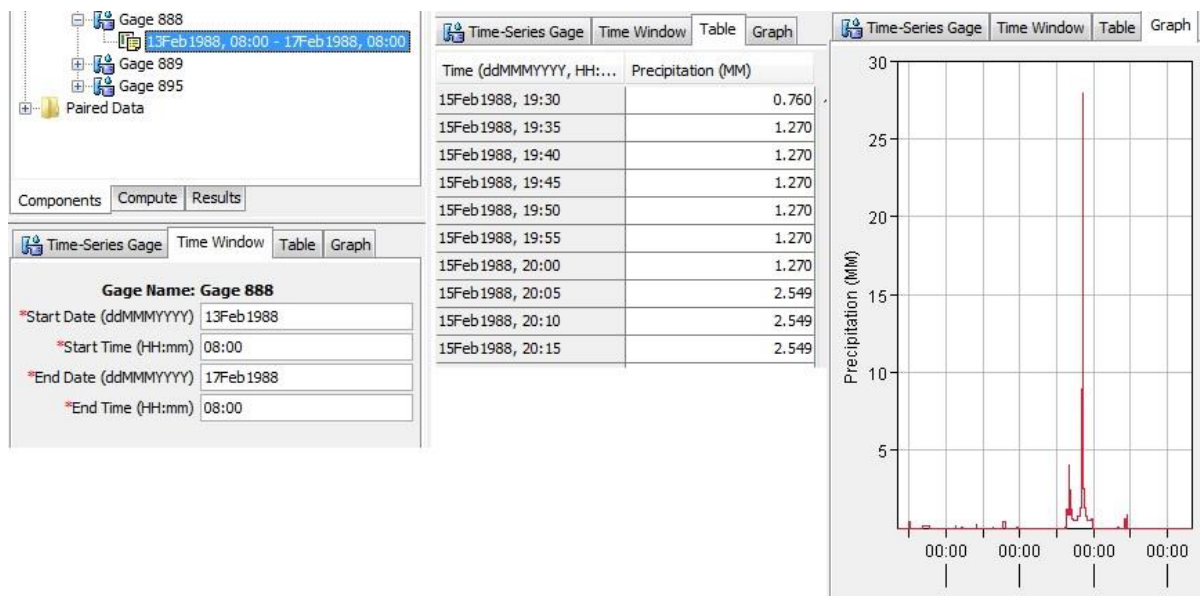
Τελικά, οι σημειακές βροχοπτώσεις μετατρέπονται σε επιφανειακές με την χρήση των βαρών. Το πρόγραμμα HEC-HMS έχει ενσωματωμένη την διαδικασία μετατροπής και το μόνο που απομένει είναι η εισαγωγή των δεδομένων (βροχοπτώσεις ανά σταθμό και τα βάρη ανά υπολεκάνη) στο μετεωρολογικό μοντέλο. Η διαδικασία εισαγωγής τους ακολουθεί ως εξής (Σχήμα 5.11):

- Δημιουργία νέου μετεωρολογικού μοντέλου, όπου γίνεται η εισαγωγή των συντελεστών Thiessen. Επιλέχθηκε ο τύπος δεδομένων να είναι Gage Weights.

HEC-HMS → Components → Meteorologic Model Manager

- Δημιουργία αρχείου εισόδου νετογράμματος. Καθορίζεται το χρονικό βήμα του επεισοδίου (σε αυτή την περίπτωση 5'), και έπειτα εισάγεται η χρονοσειρά είτε χειροκίνητα, είτε μέσω αρχείου dss (στην παρούσα μελέτη έγινε χειροκίνητα).

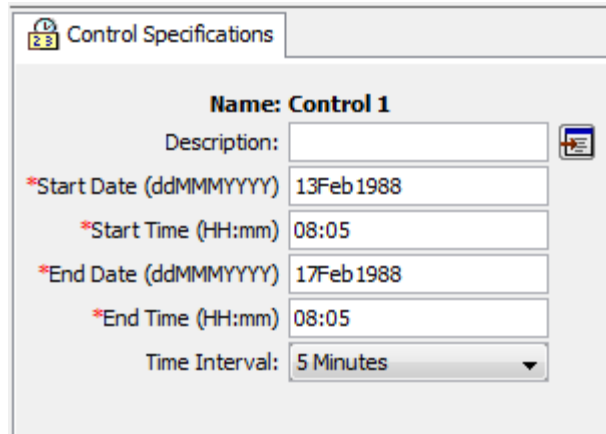
HEC-HMS → Components → Time Series Data Manager



Σχήμα 5.11: Εισαγωγή βροχομετρικών δεδομένων στο HEC-HMS.

#### 5.2.4 Αρχείο προσομοιώσεων (Control Specifications Component)

Στην τελική φάση, πριν εκτελεστούν οι υπολογισμοί, το πρόγραμμα HEC-HMS ζητά από τον χρήστη τη δημιουργία ενός αρχείου προσομοίωσης στο οποίο καθορίζεται η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης καθώς και το χρονικό βήμα. Στην παρούσα μελέτη, το χρονικό αυτό διάστημα είναι τέσσερις μέρες. Το αρχείο ελέγχου προσομοιώσεων δημιουργείται μέσω του μενού εντολών Components → Control Specifications Manager (Σχήμα 5.12).



Control Specifications	
Name: Control 1	
Description:	<input type="text"/>
*Start Date (ddMMMYYYY)	13Feb1988
*Start Time (HH:mm)	08:05
*End Date (ddMMMYYYY)	17Feb1988
*End Time (HH:mm)	08:05
Time Interval:	5 Minutes

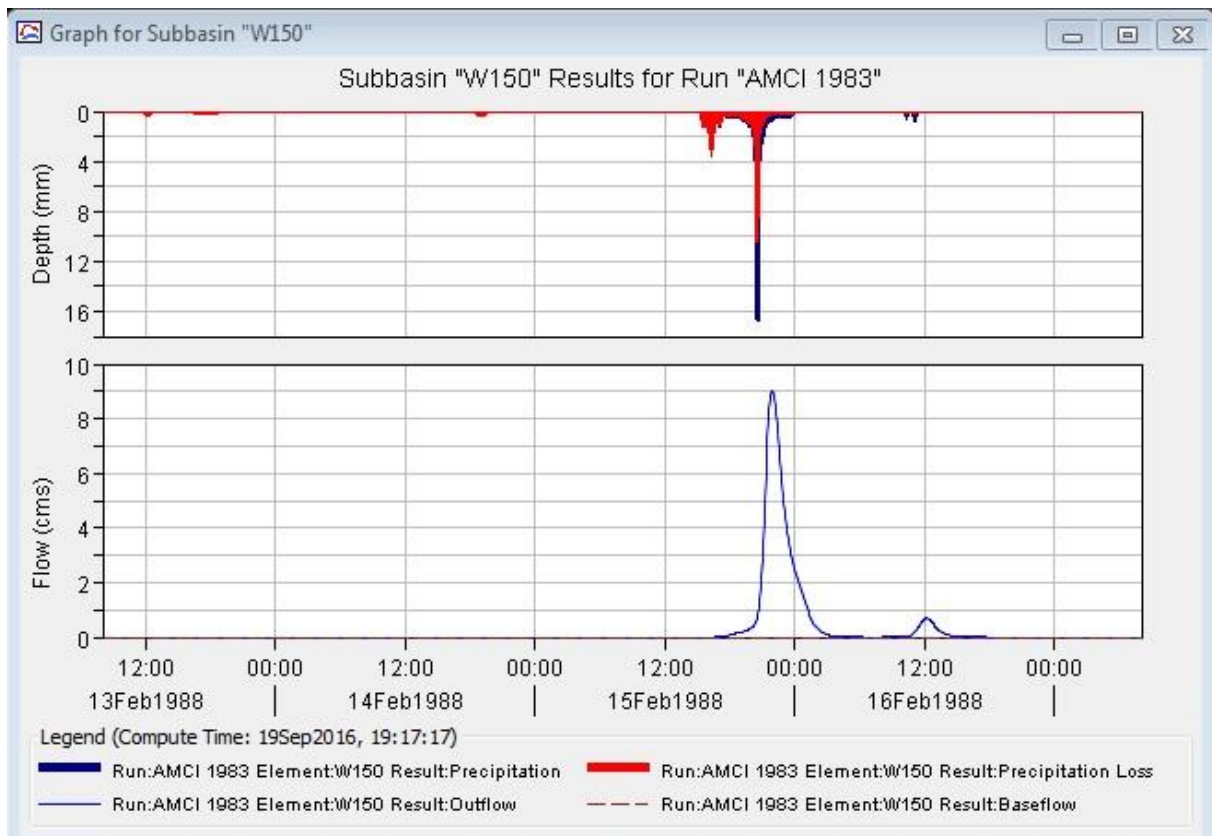
Σχήμα 5.12: Αρχείο προσομοίωσης.

#### 5.3 Τρέξιμο προσομοίωσης και αποτελέσματα

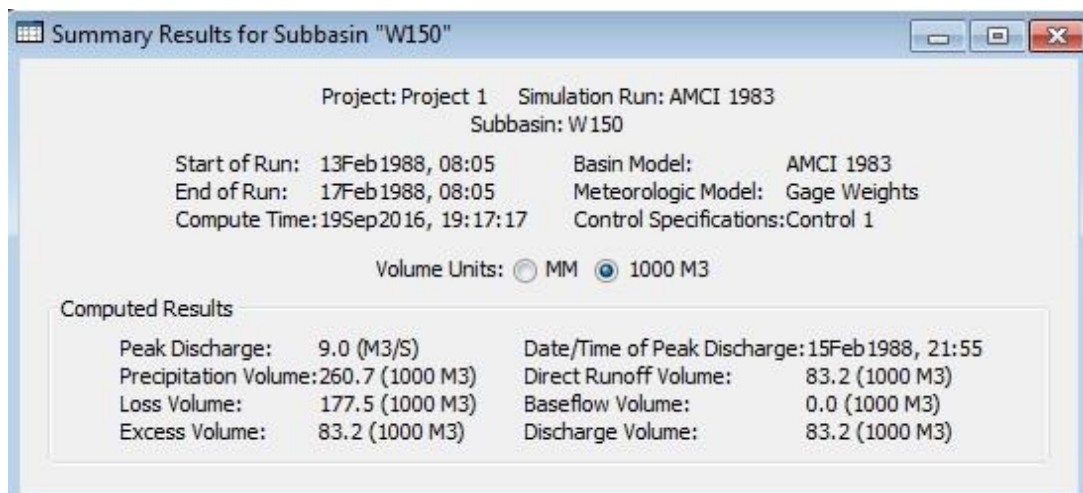
Αφότου έγινε η εισαγωγή δεδομένων στο HEC-HMS όπως περιγράφηκε προηγουμένως, το πρόγραμμα είναι έτοιμο για να τρέξει τις προσομοιώσεις και να εξάγει τα αποτελέσματα. Σαν αποτελέσματα το πρόγραμμα επιστρέφει ένα συνοπτικό πίνακα για όλα τα στοιχεία της λεκάνης, καθώς και ξεχωριστά για κάθε στοιχείο, τα υδρογραφήματα, διαγράμματα και πίνακες βροχόπτωσης, απωλειών και άμεσης απορροής.

Προχωρώντας στα αποτελέσματα των υδρολογικών προσομοιώσεων, παρουσιάζεται πρώτα ενδεικτικά το διάγραμμα (Σχήμα 5.13) και ο συνοπτικός πίνακας (Σχήμα 5.14) για την υπολεκάνη W150 (προσομοίωση AMCI 1983, πρώτη περίπτωση χρήσεων γης), όπως εξάγονται από το λογισμικό HEC-HMS.





Σχήμα 5.13: Διαγραμματικά αποτελέσματα λεκάνης W150 (HEC-HMS).



Σχήμα 5.14: Πίνακας αποτελεσμάτων λεκάνης W150 (HEC-HMS).

Από το Σχήμα 5.13, στο πάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η βροχόπτωση που δέχεται η υπολεκάνη W150 με μπλε χρώμα και τις απώλειες που δημιουργούνται με κόκκινο χρώμα, όπως υπολογίστηκαν με την μέθοδο SCS. Στο κάτω διάγραμμα φαίνεται η απορροή που έχει η συγκεκριμένη υπολεκάνη. Παράλληλα, στο Σχήμα 5.14 που αφορά και πάλι την υπολεκάνη W150, καταγράφεται σε μονάδες όγκου (1000 m<sup>3</sup>) η συνολική βροχόπτωση (Precipitation Volume), οι απώλειες (Loss Volume) και η τελική απορροή (Excess Volume) που προκύπτει από την διαφορά των δυο προαναφερθέντων. Καταγράφεται ακόμη και η παροχή αιχμής (Peak Discharge) μαζί με την χρονική στιγμή που επιτυγχάνεται σε m<sup>3</sup>/s.



Πίνακας 5.7: Σύγκριση αποτελεσμάτων HMS για τις δύο προσομοιώσεις.

Στοιχείο	Μέγεθος	Χρήσεις γης 1983-2003	Χρήσεις γης 2006-2016	Ποσοστιαία διαφορά (%)
W260	Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	0.3	1	+233.3
W260	Συνολική Βροχόπτωση (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	157.8	157.8	-
W260	Απώλειες (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	152.2	143.2	-5.9
W260	Τελική απορροή (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	5.6	14.7	+162.5
W250	Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	1.7	4.4	+158.8
W250	Συνολική Βροχόπτωση (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	142.8	142.8	-
W250	Απώλειες (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	118.2	93.7	-20.7
W250	Τελική απορροή (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	24.6	49.1	+99.6
W230	Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	1.0	1.2	+20.0
W230	Συνολική Βροχόπτωση (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	112.3	112.3	-
W230	Απώλειες (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	96.4	93.3	-3.2
W230	Τελική απορροή (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	11.59	19.0	+63.9
W220	Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	8.4	14.4	+71.4
W220	Συνολική Βροχόπτωση (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	292.3	292.3	-
W220	Απώλειες (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	199.4	157.8	-20.9
W220	Τελική απορροή (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	92.9	134.5	+44.8
W210	Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	6.3	9.6	+52.4
W210	Συνολική Βροχόπτωση (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	198.0	198.0	-
W210	Απώλειες (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	132.5	110.4	-16.7
W210	Τελική απορροή (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	65.5	87.6	+33.7
W200	Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	8.1	13.4	+65.4
W200	Συνολική Βροχόπτωση (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	235.5	235.5	-
W200	Απώλειες (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	161.1	130.2	-19.18
W200	Τελική απορροή (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	74.4	105.3	+41.5
W190	Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	7.5	13.1	+74.7
W190	Συνολική Βροχόπτωση (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	364.1	364.1	-
W190	Απώλειες (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	235.4	181.5	-22.9
W190	Τελική απορροή (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	128.7	182.6	+41.9
W170	Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	0.9	2.2	+144.4
W170	Συνολική Βροχόπτωση (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	38.6	38.6	-
W170	Απώλειες (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	27.9	18.3	-34.4
W170	Τελική απορροή (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	10.7	20.3	+89.7
W160	Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	3.9	5.5	+41.0
W160	Συνολική Βροχόπτωση (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	120.9	120.9	-
W160	Απώλειες (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	73.9	57.6	-22.1
W160	Τελική απορροή (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	47.0	63.3	+34.7

Πίνακας 5.7: Σύγκριση αποτελεσμάτων HMS για τις δύο προσομοιώσεις (Συνέχεια).

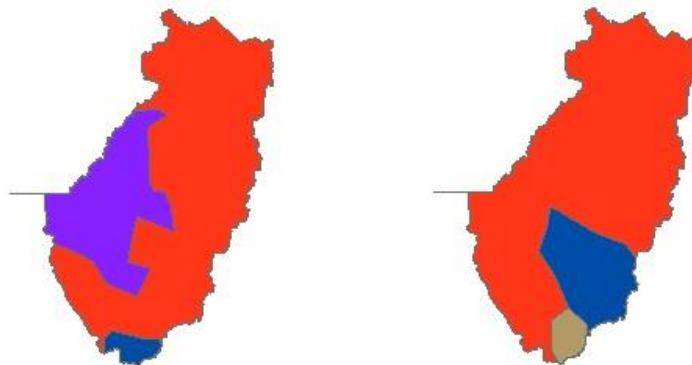
Στοιχείο	Μέγεθος	Χρήσεις γης 1983-2003	Χρήσεις γης 2006-2016	Ποσοστιαία διαφορά (%)
W150	Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	9.0	21.9	+143.3
W150	Συνολική Βροχόπτωση (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	260.7	260.7	-
W150	Απώλειες (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	177.5	105.5	-40.6
W150	Τελική απορροή (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	83.2	155.2	+86.5
W140	Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	4.4	4	-9.1
W140	Συνολική Βροχόπτωση (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	137.6	137.6	-
W140	Απώλειες (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	64.6	69.9	+8.2
W140	Τελική απορροή (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	73.0	67.7	-7.3
ΛΙΜΝΗ	Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	38.9	62.0	+59.4
ΛΙΜΝΗ	Συνολική απορροή (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	621.5	899.3	+44.7

### 5.3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στο σημείο αυτό θα συγκριθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο λογισμικό HEC-HMS ξεχωριστά για κάθε υπολεκάνη, σχολιάζοντας παράλληλα, τις αλλαγές στις χρήσεις γης και, συνεπακόλουθα, στην παράμετρο CN. Ξεκινώντας από κατάντη και καταλήγοντας στις ανάντη υπολεκάνες του ποταμού εισροής, με την εξής σειρά αναλύονται τα αποτελέσματα.

#### Υπολεκάνη W140:

Ενώ στα αριστερά μας διακρίνεται να υπήρχαν βιομηχανικές/εμπορικές μονάδες (μωβ) στην περιοχή και ελάχιστο τμήμα αθλητικών εγκαταστάσεων (μπλε), σήμερα η περιοχή διαμορφώνεται κυρίως από ασυνεχή αστικό ιστό (κόκκινο) με επέκταση των αθλητικών εγκαταστάσεων. Ο αριθμός CN μειώνεται ελάχιστα από 70.78 σε 68.23 και έχει ως αποτέλεσμα η τελική απορροή (ως όγκος) να μειώνεται κατά 7.3%.

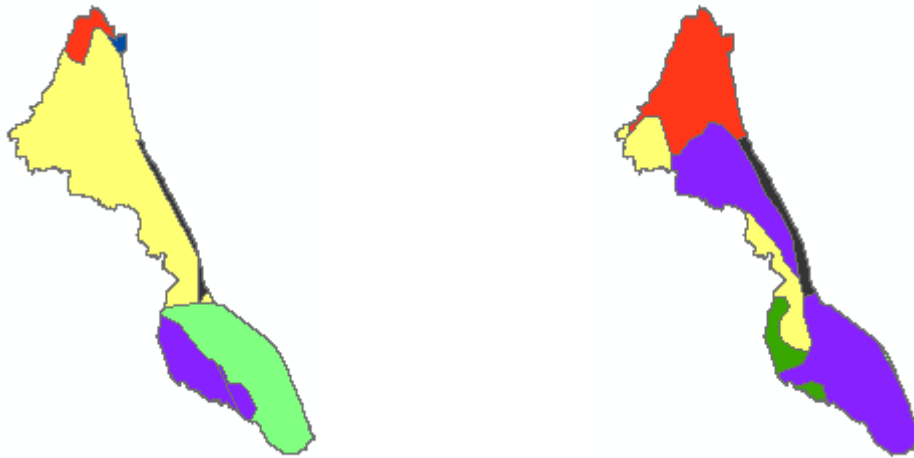


Σχήμα 5.15: Αριστερά χρήσεις γης 1983-2003. Δεξιά χρήσεις γης 2006-2016. (Μωβ χρώμα εμπορικές μονάδες, κόκκινο αστικός ιστός, μπλε αθλητικές εγκαταστάσεις).

#### Υπολεκάνη W150:

Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούνται πολύ μεγάλες αλλαγές στις χρήσεις γης. Παλαιότερα κυριαρχούσε η μόνιμα αρδευόμενη έκταση (πράσινο ανοιχτό) μαζί με ένα πρότυπο καλλιέργειας με διάσπαρτα σπίτια (κίτρινο) και ελάχιστη εμπορική (μωβ) και οικιστική

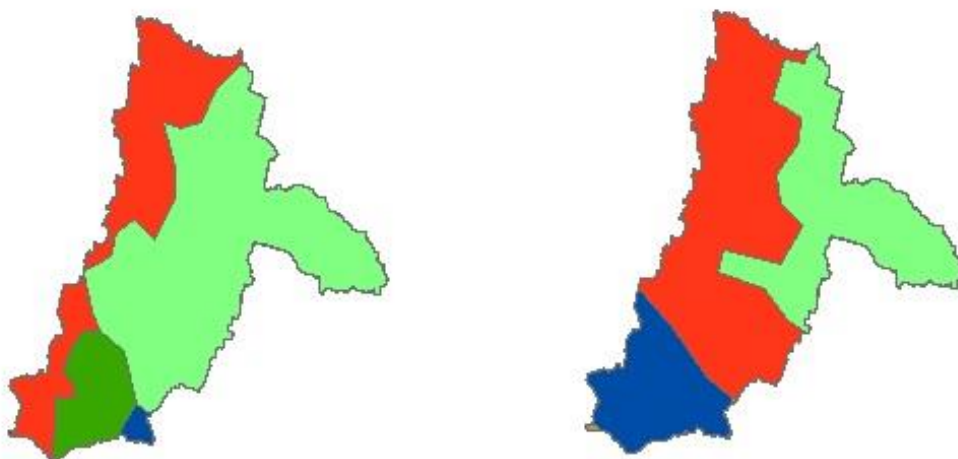
(κόκκινο) ζώνη. Ωστόσο, σήμερα ο αστικός ιστός έχει επεκταθεί όπως και η εμπορική-βιομηχανική περιοχή αφήνοντας ελάχιστη καλλιεργήσιμη έκταση. Έτσι, ο CN από 56.04 που ήταν, γίνεται 75.82 και η τελική απορροή από την υπολεκάνη αυξάνεται κατά 86.5%.



Σχήμα 5.16: Αριστερά χρήσεις γης 1983-2003. Δεξιά χρήσεις γης 2006-2016. (Μωβ χρώμα εμπορικές μονάδες, κόκκινο αστικός ιστός, πράσινο ανοιχτό μόνιμα αρδευόμενη γη, κίτρινο πρότυπο καλλιέργειας με διάσπαρτα σπίτια, πράσινο σκούρο σκληροφυλλική βλάστηση).

#### **Υπολεκάνη W160:**

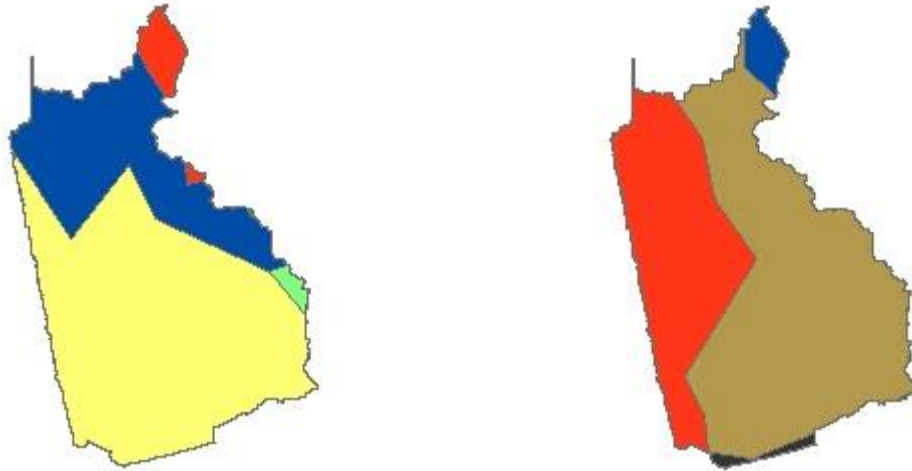
Στο Σχήμα 5.17 Αριστερά στις παλαιές χρήσεις υπήρχε ένα μεγάλο μέρος μόνιμα αρδευόμενης γης κοντά σε αστικό ιστό, ένα μέρος σκληροφυλλικής βλάστησης (πράσινο σκούρο) και ένα μικρό μέρος αθλητικών εγκαταστάσεων (μπλε). Σήμερα, έχει γίνει επέκταση και αναδιαμόρφωση των αθλητικών εγκαταστάσεων (γήπεδο Παραλιμνίου) και ταυτόχρονα του αστικού ιστού ο οποίος έχει καταλάβει μεγάλη έκταση από τις πρώην αρδευόμενες περιοχές. Παρατηρείται αύξηση κατά 34.7% της τελικής απορροής στην υπολεκάνη αφού η ανάπτυξη του αστικού ιστού είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθεί ο CN από 61.09 σε 70.35.



Σχήμα 5.17: Αριστερά χρήσεις γης 1983-2003. Δεξιά χρήσεις γης 2006-2016. (Κόκκινο χρώμα αστικός ιστός, πράσινο ανοιχτό μόνιμα αρδευόμενη γη, πράσινο σκούρο σκληροφυλλική βλάστηση, μπλε αθλητικές εγκαταστάσεις).

### Υπολεκάνη W170:

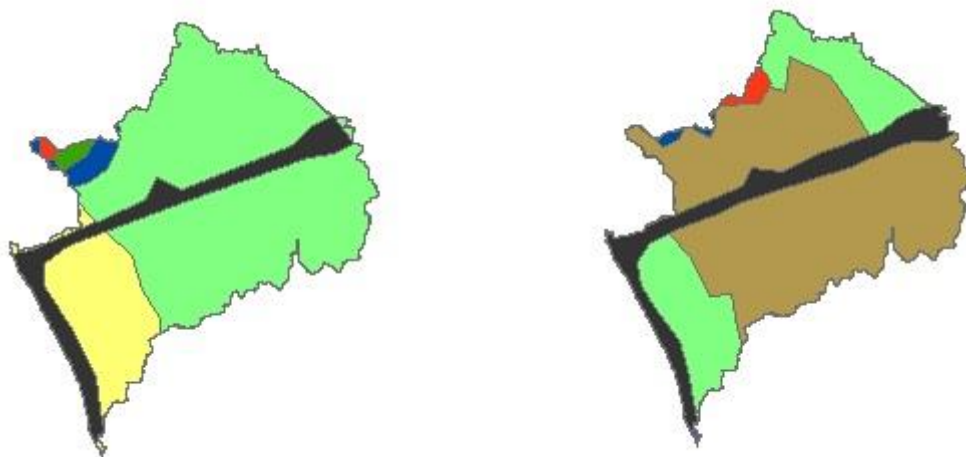
Στην περιοχή της υπολεκάνης W170 παρατηρείται ριζική αλλαγή. Ο αστικός ιστός αυξήθηκε, οι αθλητικές εγκαταστάσεις μετακινήθηκαν και οι υπόλοιπες περιοχές μετατράπηκαν σε μη αρδευόμενες εκτάσεις (καφέ). Ο CN άλλαξε από 52.92 σε 70.46 και η τελική απορροή αυξήθηκε κατά 89.7%.



Σχήμα 5.18: Αριστερά χρήσεις γης 1983-2003. Δεξιά χρήσεις γης 2006-2016. (Κόκκινο αστικός ιστός, μπλε αθλητικές εγκαταστάσεις, καφέ μη αρδευόμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις, κίτρινο πρότυπο καλλιέργειας με διάσπαρτα σπίτια).

### Υπολεκάνη W190:

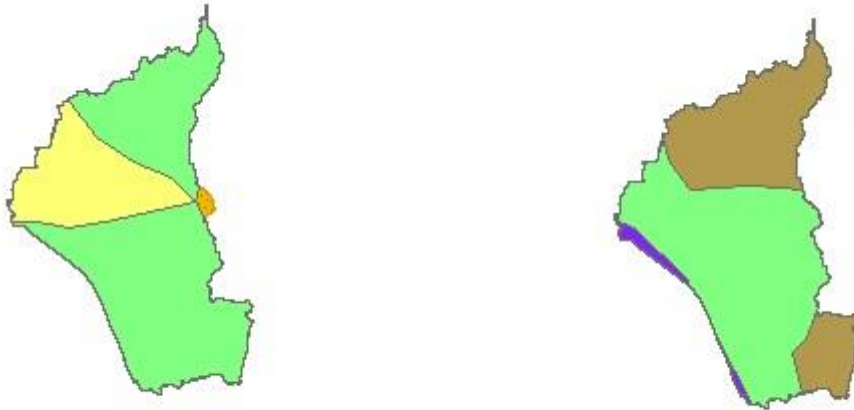
Στα όρια της υπολεκάνης W190 συμπεριλαμβάνεται ο κύριος οδικός άξονας του Παραλιμνίου με τρεις κυκλικούς κόμβους όπως ήταν παλιά, χωρίς μεγάλες αλλαγές. Παράλληλα, όμως, εκτάσεις οι οποίες ήταν μόνιμα αρδευόμενες μετατράπηκαν σε μη αρδευόμενες εκτάσεις. Και σε αυτή την περίπτωση ο CN αλλάζει από 58.56 σε 68.86 και η τελική απορροή της λεκάνης αυξάνεται κατά 41.9%.



Σχήμα 5.19: Αριστερά χρήσεις γης 1983-2003. Δεξιά χρήσεις γης 2006-2016. (Πράσινο ανοιχτό χρώμα μόνιμα αρδευόμενες εκτάσεις, μαύρο οδικά δίκτυα, καφέ μη αρδευόμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις, κίτρινο πρότυπο καλλιέργειας με διάσπαρτα σπίτια).

### Υπολεκάνη W200:

Παλαιότερα, στη λεκάνη αυτή επικρατούσε ένα πρότυπο καλλιέργειας μαζί με μόνιμα αρδευόμενες εκτάσεις. Τώρα, ένα μικρό μέρος της εμπίπτει στην εμπορική-βιομηχανική χρήση, ενώ αρκετή έκταση κατατάσσεται στις μη αρδευόμενες εκτάσεις. Από τις αλλαγές ο CN μεταβάλλεται από 55.82 σε 65.17 και η τελική απορροή της λεκάνης αυξάνεται κατά 41.5%.



Σχήμα 5.20: Αριστερά χρήσεις γης 1983-2003. Δεξιά χρήσεις γης 2006-2016. . (Πράσινο ανοιχτό χρώμα μόνιμα αρδευόμενες εκτάσεις, καφέ μη αρδευόμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις, μωβ εμπορική/βιομηχανική περιοχή, κίτρινο πρότυπο καλλιέργειας με διάσπαρτα σπίτια).

### Υπολεκάνη W210:

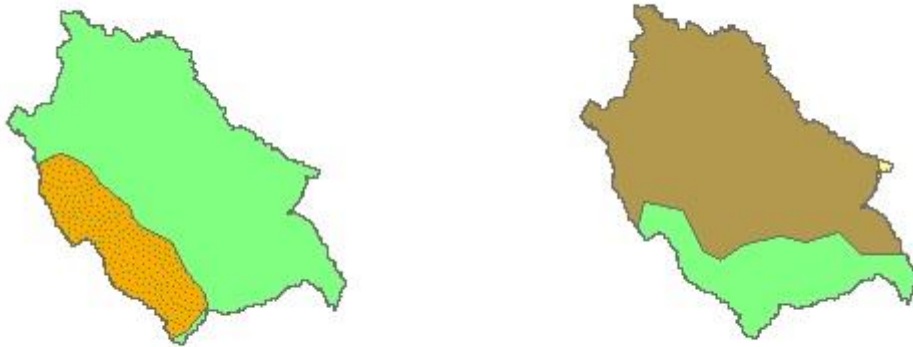
Εδώ, για τις χρήσεις γης του 1983-2003, στην περιοχή της λεκάνης υπήρχαν βοσκότοποι (πορτοκαλί με κουκκίδες) και μόνιμα αρδευόμενη γη. Στις νέες χρήσεις οι βοσκότοποι δεν υπάρχουν, αλλά εμφανίζεται ένα μικρό μέρος αθλητικών εγκαταστάσεων – ψυχαγωγίας και μη αρδευόμενη γη. Έτσι, ο CN αλλάζει από 56.93 σε 64.84 και η τελική απορροή αυξάνεται κατά 33.7%.



Σχήμα 5.21: Αριστερά χρήσεις γης 1983-2003. Δεξιά χρήσεις γης 2006-2016. (Πράσινο ανοιχτό χρώμα μόνιμα αρδευόμενες εκτάσεις, καφέ μη αρδευόμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις, πορτοκαλί με κουκκίδες βοσκότοποι).

### Υπολεκάνη W220:

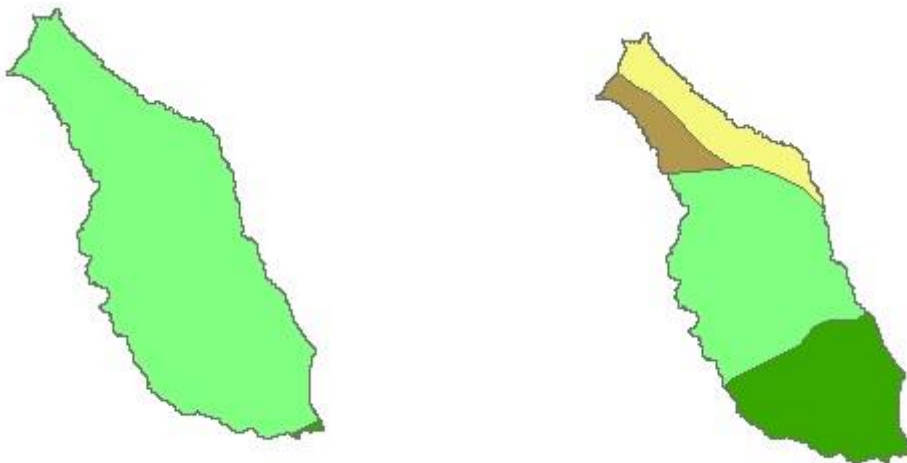
Παρόμοια με την προηγούμενη υπολεκάνη, και εδώ η υπολεκάνη είχε χρήσεις μόνιμα αρδευόμενης γης και βοσκοτόπους, ενώ, σήμερα, έχει χρήσεις μόνιμα αρδευόμενης καλλιεργήσιμης γης και μη αρδευόμενης γης. Ο CN αλλάζει από 55.96 σε 66.07 και η τελική απορροή αυξάνεται κατά 44.8%.



Σχήμα 5.22: Αριστερά χρήσεις γης 1983-2003. Δεξιά χρήσεις γης 2006-2016. (Πράσινο ανοιχτό χρώμα μόνιμα αρδευόμενες εκτάσεις, καφέ μη αρδευόμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις, πορτοκαλί με κουκίδες βοσκότοποι).

### Υπολεκάνη W230:

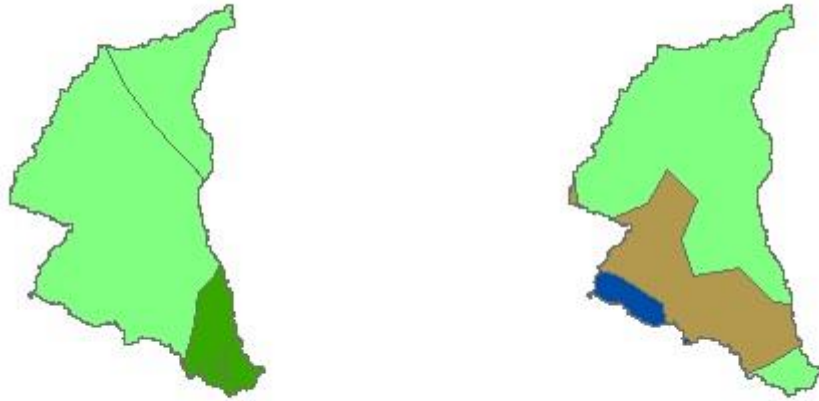
Στην περίπτωση της υπολεκάνης αυτής, παλιά επικρατούσε ως επί το πλείστον μόνιμα αρδευόμενη έκταση. Με τις νέες χρήσεις γης στην περιοχή, έχει προστεθεί ένα μέρος σκληροφυλλικής βλάστησης, μη αρδεύσιμη γη και πρότυπο καλλιέργειας με διάσπαρτα σπίτια. Ο CN αυξάνεται ελάχιστα από 41.82 σε 44.23 και η τελική απορροή αυξάνεται κατά 39%.



Σχήμα 5.23: Αριστερά χρήσεις γης 1983-2003. Δεξιά χρήσεις γης 2006-2016. (Πράσινο ανοιχτό χρώμα μόνιμα αρδευόμενες εκτάσεις, καφέ μη αρδευόμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις, κίτρινο πρότυπο καλλιέργειας με διάσπαρτα σπίτια).

### Υπολεκάνη W250:

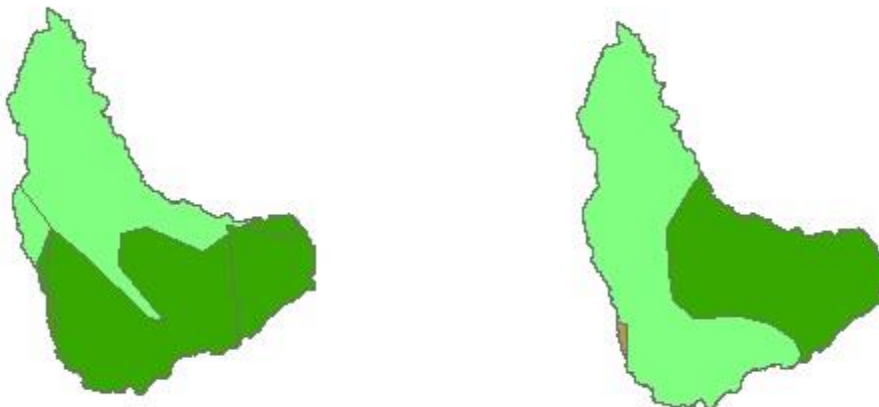
Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, οι χρήσεις γης που επικρατούσαν στην λεκάνη ήταν κυρίως μόνιμα αρδευόμενη γη και ένα κομμάτι σκληροφυλλικής βλάστησης. Δεξιά βλέπουμε ότι οι νέες χρήσεις που επικρατούν στην υπολεκάνη είναι μόνιμα αρδευόμενη γη, μη αρδευόμενες εκτάσεις και αθλητικές εγκαταστάσεις – ψυχαγωγία. Η αλλαγή του CN από 44.52 σε 57.85 έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τελικής απορροής της λεκάνης κατά 99.6%.



Σχήμα 5.24: Αριστερά χρήσεις γης 1983-2003. Δεξιά χρήσεις γης 2006-2016. (Πράσινο ανοιχτό χρώμα μόνιμα αρδευόμενες εκτάσεις, καφέ μη αρδευόμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις, πράσινο σκούρο σκληροφυλλική βλάστηση, μπλε αθλητικές εγκαταστάσεις).

### Υπολεκάνη W260:

Στην υπολεκάνη W260, για την περίοδο 1983-2003 η χρήση γης που επικρατούσε στην περιοχή ήταν η σκληροφυλλική βλάστηση μαζί με μόνιμα αρδευόμενη γη. Δεν άλλαξε ιδιαίτερα η χρήση για την περίοδο 2006-2016, αφού μειώθηκε ελάχιστα η έκταση της σκληροφυλλικής βλάστησης. Ο αριθμός καμπύλης CN αυξήθηκε από 30.62 σε 37.24 και η τελική απορροή στην λεκάνη αυξήθηκε κατά 162.5%. Η αύξηση μπορεί να φαίνεται τεράστια σε ποσοστό, αλλά δεν είναι τόσο μεγάλη σε όγκο νερού όσο άλλες.



Σχήμα 5.25: Αριστερά χρήσεις γης 1983-2003. Δεξιά χρήσεις γης 2006-2016. (Πράσινο ανοιχτό χρώμα μόνιμα αρδευόμενες εκτάσεις, πράσινο σκούρο σκληροφυλλική βλάστηση).

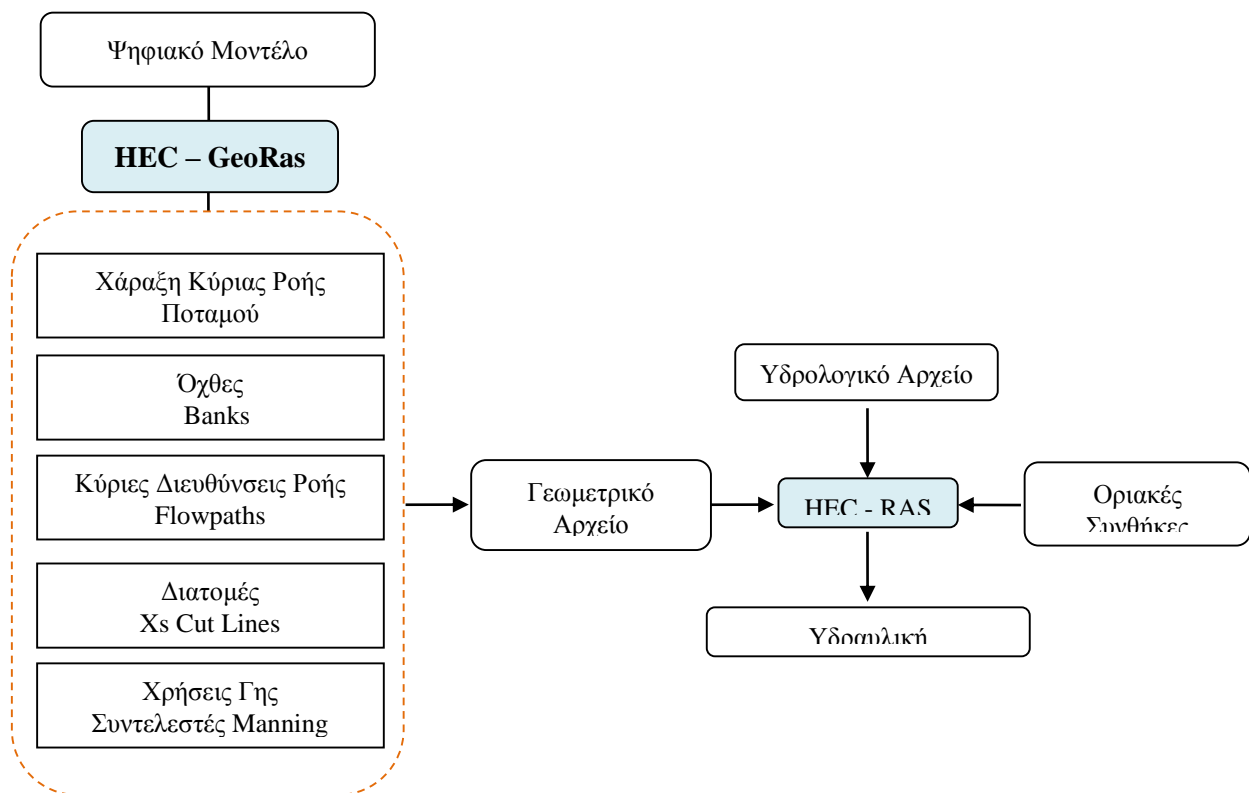


Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από τις δύο προσομοιώσεις που έγιναν, παρατηρούμε ότι η αλλαγή στις χρήσεις γης και συνεπακόλουθα στον αριθμό καμπύλης CN της SCS, επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό το μέγεθος της πλημμύρας. Δηλαδή, στις περιοχές που υπήρξε αλλαγή στις χρήσεις γης από το 1983 μέχρι σήμερα (2016), έχει αυξηθεί αισθητά ο αριθμός CN. Μόνο στην περιοχή της εξόδου του ποταμού, στην υπολεκάνη W140, ο αριθμός CN έχει μειωθεί για τις χρήσεις γης 2006-2016 σε σύγκριση με τις χρήσεις γης του 1983-2003. Σχεδόν σε όλες τις υπολεκάνες, οι απώλειες βροχόπτωσης έχουν μειωθεί με αποτέλεσμα το υπέδαφος να κατακρατεί όλο και λιγότερο όγκο νερού και, έτσι, παρατηρείται αύξηση στην τελική απορροή. Σε μερικές περιπτώσεις, η τελική απορροή σχεδόν διπλασιάζεται. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της υπολεκάνης W250 παρατηρείται αύξηση της τελικής απορροής, από 24.6 σε 49.1 (σε  $10^3 \text{ m}^3$ ), ή, σε ποσοστό, 99.6%. Οι πιο μεγάλες ποσοστιαίες αυξομειώσεις που σημειώθηκαν είναι: Στην παροχή αιχμής +233.3% στην υπολεκάνη W260, στην τελική απορροή +162.5% στην υπολεκάνη W260, και στις απώλειες -40.6% στην υπολεκάνη W150.



## 6 Υδραυλική Προσομοίωση στη Λεκάνη Απορροής Παραλιμνίου

Για την υδραυλική προσομοίωση της λεκάνης απορροής, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1 η διαδικασία που ακολουθήθηκε.



Σχήμα 6.1: Διαδικασία Υδραυλικής Προσομοίωσης της Λεκάνης Απορροής με το λογισμικό HEC-RAS.

### 6.1 Δημιουργία αρχείου γεωμετρικών δεδομένων

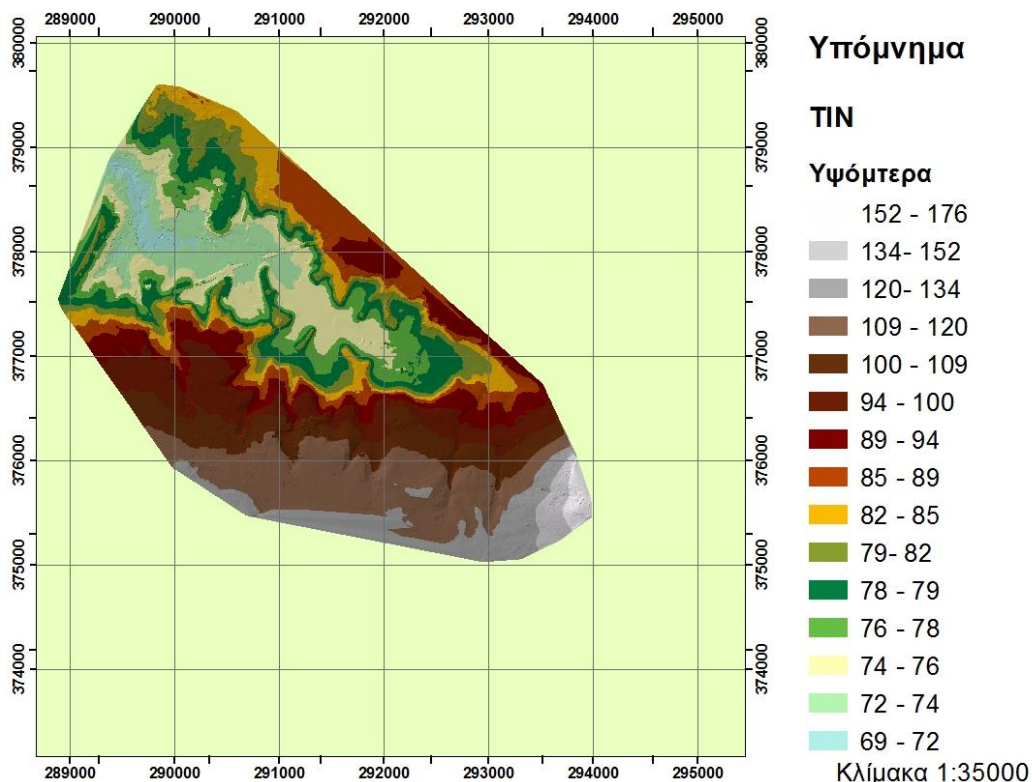
Αναπόσπαστο κομμάτι της εργασίας είναι η δημιουργία αρχείου γεωμετρικών δεδομένων, αφού είναι απαραίτητο για τη λειτουργία του προγράμματος HEC-RAS. Το αρχείο προετοιμάστηκε στο ArcMap, με τη χρήση μιας ειδικής εργαλειοθήκης με την επωνυμία HEC-GeoRAS, που αποτελεί μια επέκταση της εργαλειοθήκης ArcHydro. Επιπρόσθετα, μέσω της εργαλειοθήκης καθίσταται δυνατή η επεξεργασία γεωμετρικών δεδομένων που προέρχονται από ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DTM). Καταληκτικά, χρησιμοποιείται τόσο για τη λειτουργία γεωμετρικών δεδομένων όσο και για τη χωρική επεξεργασία δεδομένων εξόδου.

Για τη δημιουργία του γεωμετρικού αρχείου πρέπει να πραγματοποιηθούν τα ακόλουθα βήματα:

1. Παραγωγή ισοϋψών καμπυλών από το ΨΜΕ (δημιουργία αρχείου tin)
2. Δημιουργία θεματικών επιπέδων
  - ✓ Κύρια γραμμή ροής – Stream Centerline (υποχρεωτικό)
  - ✓ Όχθες – Banks (προαιρετικό)
  - ✓ Κύριες διευθύνσεις ροής – Flow Paths Centerline (προαιρετικό)
  - ✓ Διατομές – XS Cut Lines (υποχρεωτικό)
  - ✓ Κατασκευές – Bridges/Culverts (προαιρετικό)
  - ✓ Περιοχές ανενεργού ροής – Ineffective Flow Areas (προαιρετικό)
  - ✓ Χρήσεις γης – Landuse Areas (προαιρετικό)
  - ✓ Αναχώματα – Lateral Structures (προαιρετικό)
  - ✓ Περιοχές αποθήκευσης νερού – Storage Areas (προαιρετικό)
3. Σύνθεση θεματικών επιπέδων και εξαγωγή γεωμετρικού αρχείου

### 6.1.1 Παραγωγή ισοϋψών καμπυλών από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους

Σε πρώτο βήμα έγινε παραγωγή ισοϋψών καμπυλών μέσω του πακέτου εντολών Spatial Analyst, που προσφέρονται στο περιβάλλον του GIS. Συγκεκριμενοποιώντας, δημιουργήθηκαν ισοϋψείς με ισοδιάσταση 1 m από την εντολή, Spatial Analyst → Surface Analysis → Contour. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους σε μορφή tin έγινε μέσω της εντολής 3D Analyst Tools → Conversion → From Raster → Raster to Tin, όπως παρουσιάζεται στην Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2: Tin από τις ισοϋψείς με ισοδιάσταση 1 m.

### 6.1.2 Παραγωγή θεματικών επιπέδων

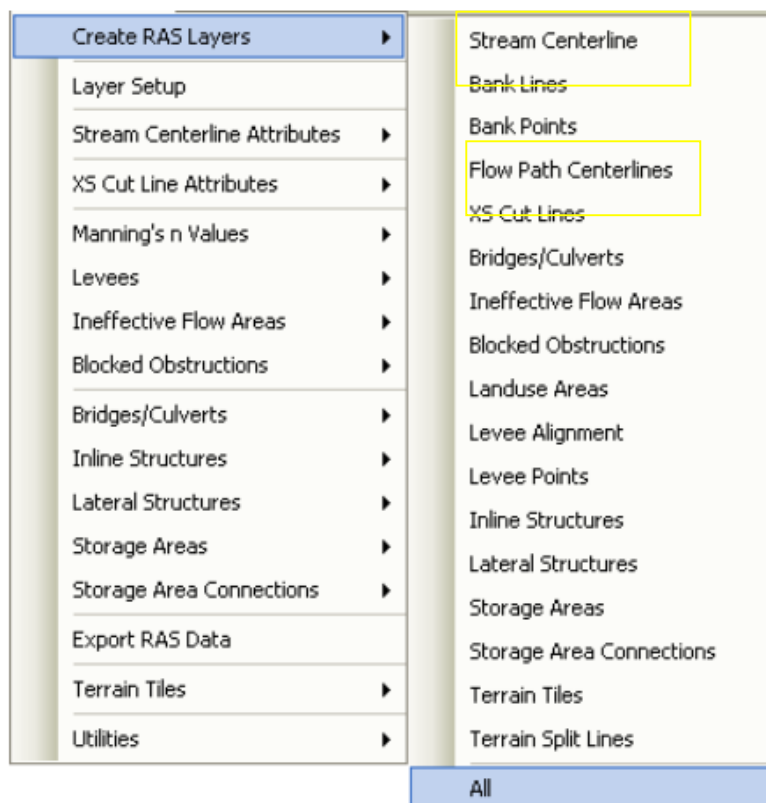
Στο στάδιο αυτό δημιουργούνται τα RAS Layers, τα οποία είναι θεματικά επίπεδα που περιλαμβάνουν όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες για την γεωμετρία του ποταμού και της περιοχής μελέτης.

Μέσω της επιλογής RAS Geometry → Create RAS Layers, δημιουργούνται κενά θεματικά επίπεδα, στα οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί επεξεργασία μέσω του εργαλείου Edit tool.

Τα θεματικά επίπεδα τα οποία δημιουργήθηκαν στην παρούσα μελέτη εμφανίζονται πιο κάτω:

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

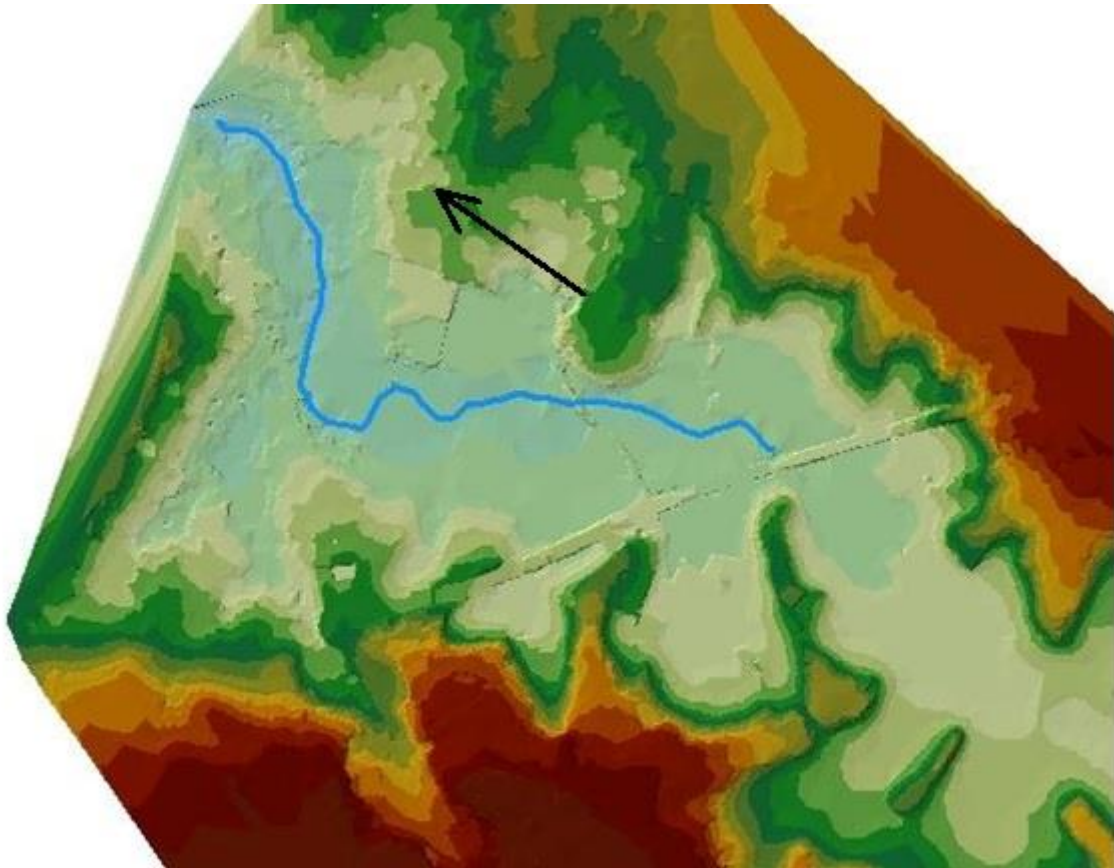
Πιο κάτω, παρατίθεται η διαδικασία δημιουργίας των θεματικών επιπέδων:



Σχήμα 6.3: Διαδικασία δημιουργίας θεματικών επιπέδων.

#### Κύρια γραμμή ροής ποταμού – Stream Centerline

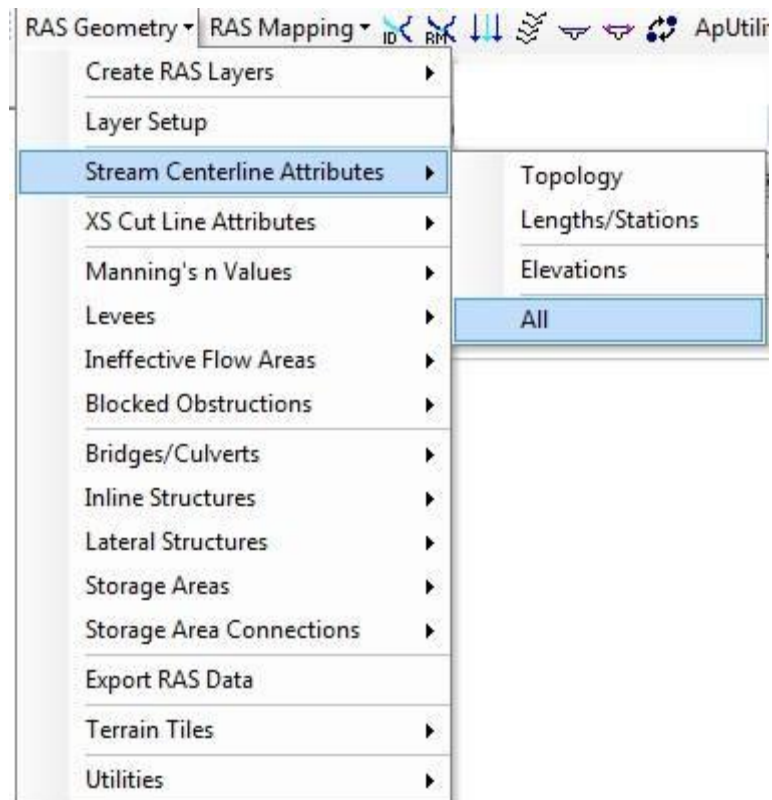
Το θεματικό επίπεδο της κύριας γραμμής ροής του ποταμού δημιουργείται με τη ψηφιοποίηση του υδρογραφικού δικτύου, το οποίο παράγεται από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Η ψηφιοποίηση πραγματοποιείται κατά τη φορά ροής του ποταμού.




Σχήμα 6.4: Ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο και φορά.

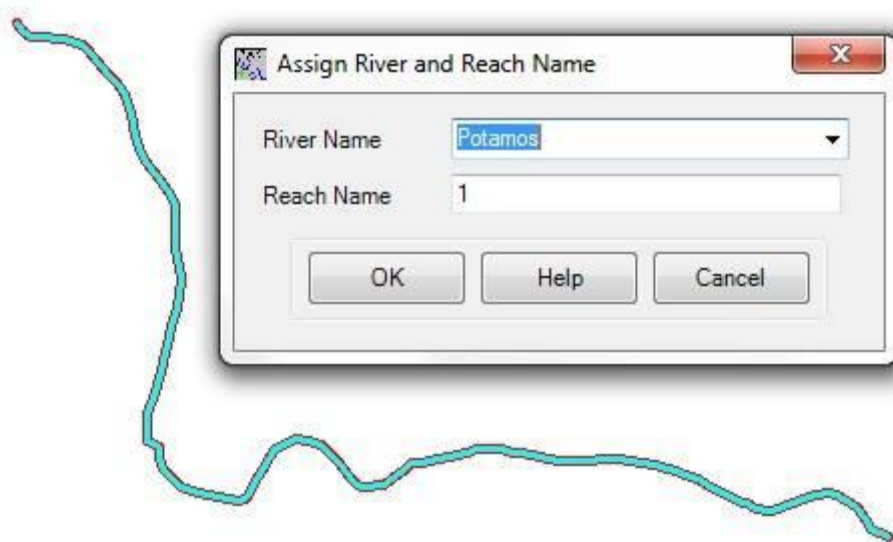
Μετά την ψηφιοποίηση της κύριας γραμμής ροής, υπολογίζονται μερικά κύρια χαρακτηριστικά του ποταμού, μέσω της εντολής RAS Geometry → Stream Centerline Attribute → All (Σχήμα 6.5) :

- ✓ Topology: Ελέγχει τη σύνδεση και των προσανατολισμό των τμημάτων του υδρογραφικού δικτύου
- ✓ Lengths/Stations: Υπολογίζει το μήκος της κύριας γραμμής ροής του ποταμού και καθορίζει τη φορά ροής
- ✓ Elevations: Δημιουργεί την τρισδιάστατη γραμμή ροής



Σχήμα 6.5: Διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών υδρογραφικού δικτύου.

Επίσης, καθορίζεται το όνομα της κύριας γραμμής ροής του ποταμού μέσω του εργαλείου River Reach Id , όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6.

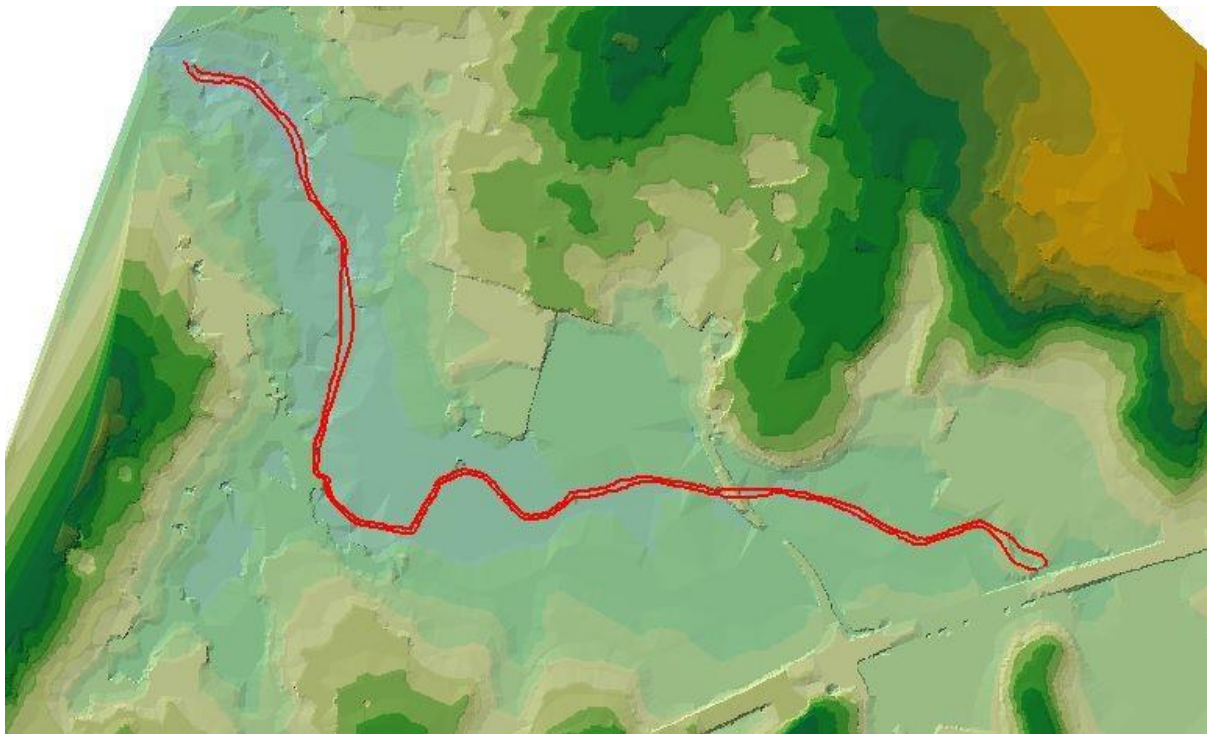


Σχήμα 6.6: Ονομασία τμήματος ποταμού.



### **Όχθες ποταμού – Bank Lines**

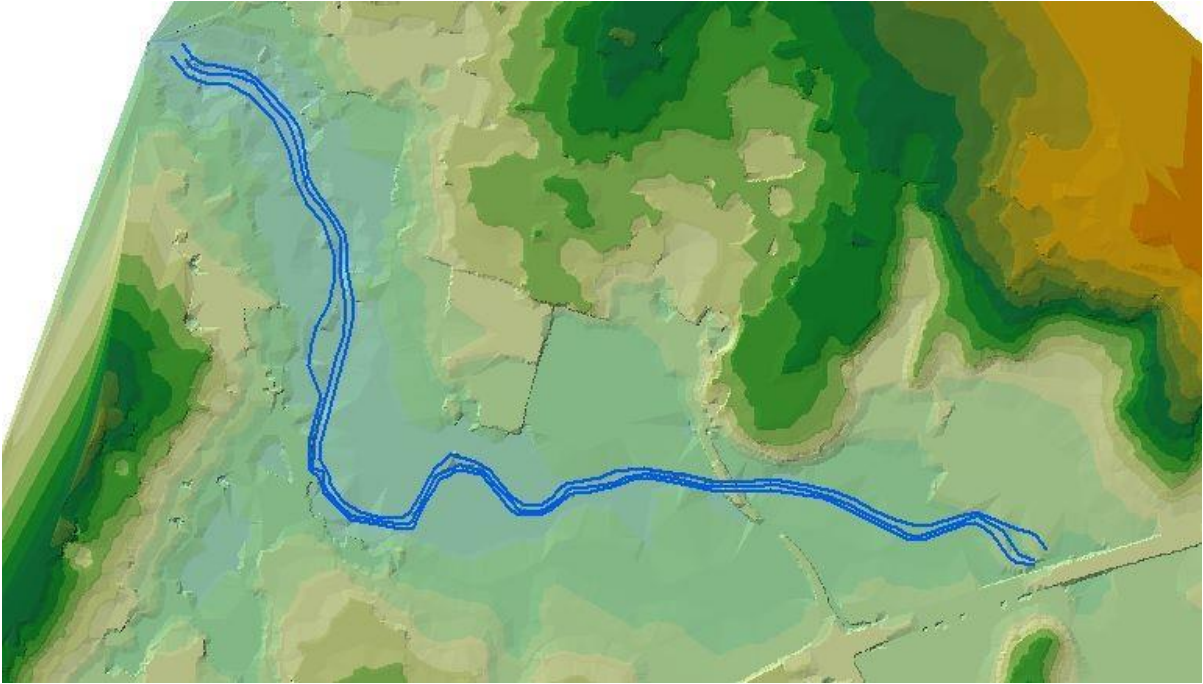
Οι όχθες του ποταμού είναι δύο γραμμές οι οποίες δημιουργούνται δεξιά και αριστερά της κύριας γραμμής ροής του ποταμού, για να διαχωρίζουν τη ροή εντός και εκτός της κοίτης του ποταμού (Σχήμα 6.7). Η δημιουργία του συγκεκριμένου επιπέδου είναι προαιρετική, δημιουργήθηκε ωστόσο για τη διευκόλυνση του χρήστη ούτως ώστε να μην χρειαστεί να ορίσει τις όχθες στο HEC-RAS. Οι γραμμές αυτές μπορεί να διακόπτονται ή να είναι συνεχείς. Η φορά ψηφιοποίησής τους δεν έχει σημασία, αλλά θα πρέπει οι δύο γραμμές να τέμνουν κάθε διατομή.




Σχήμα 6.7: Όχθες ποταμού.

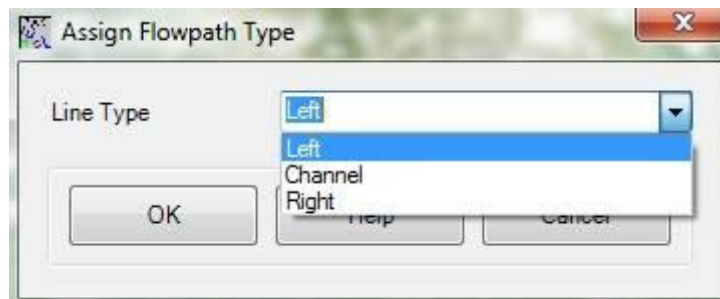
### **Κύριες διευθύνσεις ροής – Flow Path Centerline**

Οι κύριες διευθύνσεις ροής περιέχουν τρεις τύπους γραμμών: την κεντρική, την αριστερή και τη δεξιά. Οι γραμμές αυτές χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του μήκους του κατάντη υδατορεύματος από τις διατομές, ανάμεσα στην κύρια γραμμή του υδατορεύματος και των οχθών.



Σχήμα 6.8: Κύριες διευθύνσεις ροής.

Για την δημιουργία του συγκεκριμένου επιπέδου, ψηφιοποιήθηκε πρώτα η αριστερή γραμμή και, αργότερα, η δεξιά γραμμή. Η σειρά και η φορά ψηφιοποίησης είναι πολύ σημαντική για την σωστή λειτουργία του HEC-RAS (αναγνωρίζει την σωστή διεύθυνση ροής). Τέλος, με τη χρήση του εργαλείου Assign Line Type , καθορίστηκαν ο τύπος και τα ονόματα των κύριων διευθύνσεων ροής, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.9.

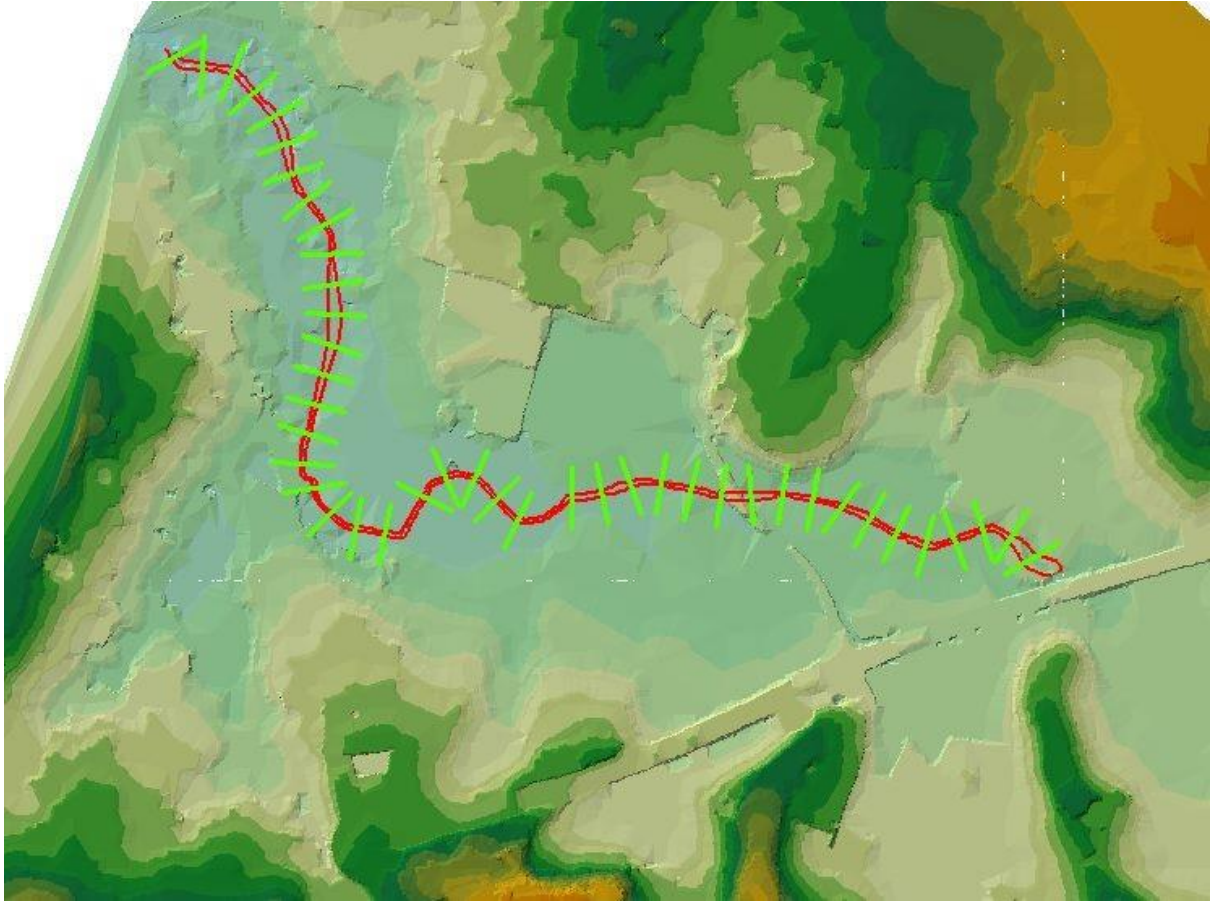


Σχήμα 6.9: Καθορισμός διεύθυνσης ροής.

### Διατομές ποταμού

Στο συγκεκριμένο θεματικό επίπεδο, δημιουργούνται οι διατομές σε όλη την έκταση της κύριας γραμμής ροής του ποταμού. Για την σωστή δημιουργία των διατομών από το χρήστη, θα πρέπει να ψηφιοποιούνται κάθετα στην ροή του ποταμού και με φορά από τα αριστερά προς τα δεξιά κοιτώντας προς τα κατάντη.

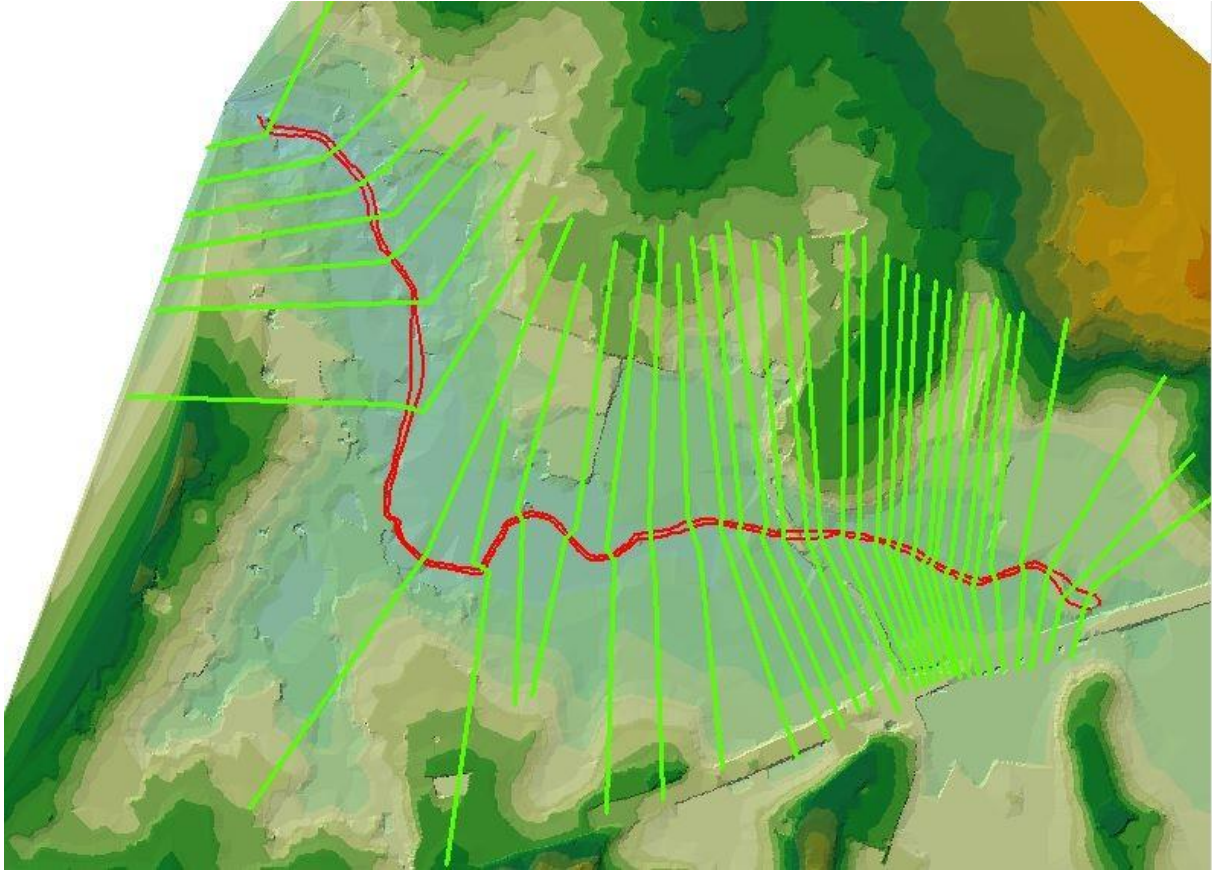
Οι διατομές μπορούν επίσης, να δημιουργηθούν αυτόματα μέσω της εντολής Construct Cut Lines. Αρχικά, οι διατομές δομηθήκαν αυτόματα από το πρόγραμμα. Με την εντολή αυτή ο χρήστης επιλέγει την απόσταση μεταξύ των διατομών και το μήκος τους. Τα αποτελέσματα της αυτοματοποιημένης διαδικασίας φαίνονται πιο κάτω.




Σχήμα 6.10: Διατομές από αυτοματοποιημένη διαδικασία.

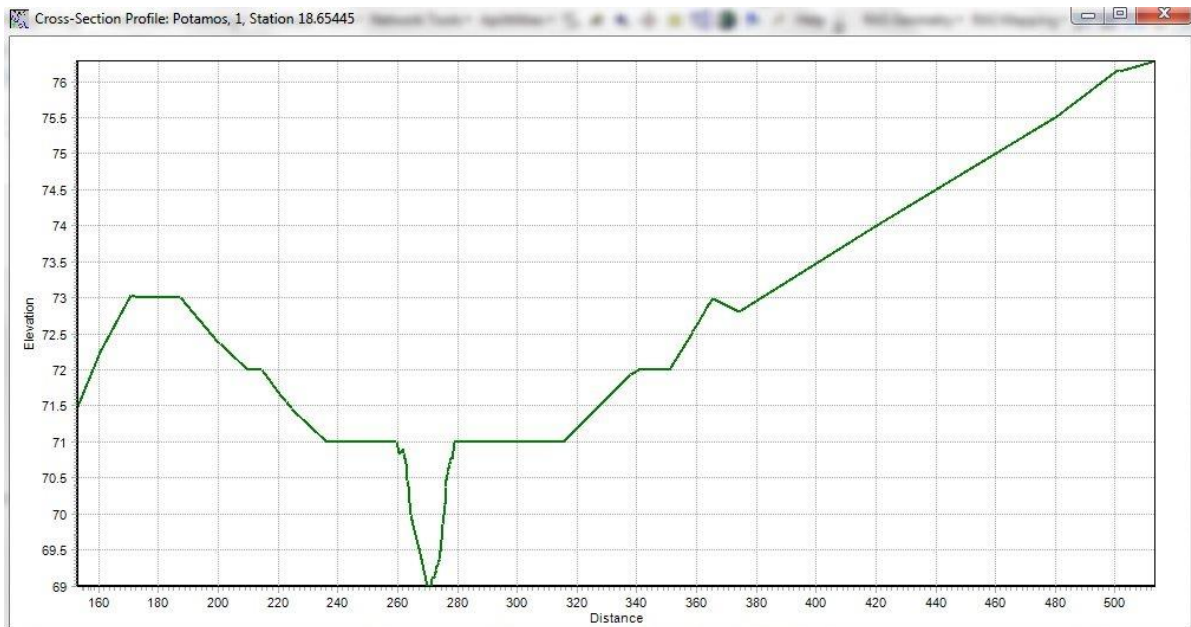
Παρ' όλα αυτά, όπως αποδείχτηκε με το πέρας της υδραυλικής προσομοίωσης, οι διατομές ήταν αρκετά μικρές σε μήκος για να καλύψουν τα όρια της πλημμύρας σε όλη την έκτασή της. Για τον λόγο αυτό, οι διατομές έγιναν χειροκίνητα και επεκτάθηκαν ώστε να καλύπτουν σίγουρα την πλημμυρισμένη έκταση (Σχήμα 6.11).





Σχήμα 6.11: Τελικές διατομές (χειροκίνητη ψηφιοποίηση).

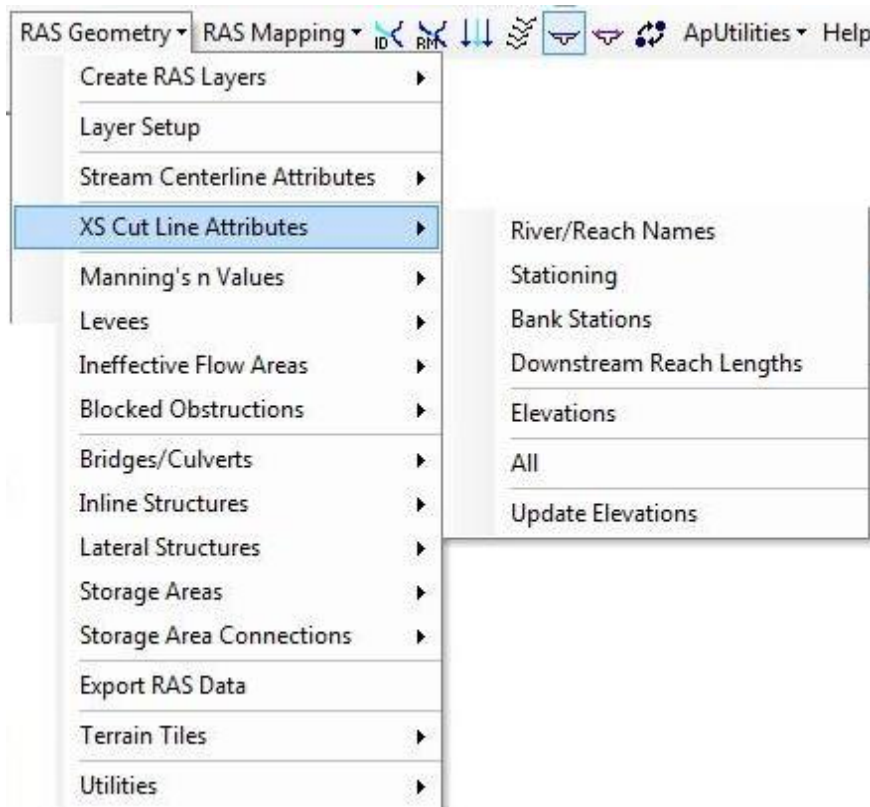
Με την χρήση του εργαλείου Xs Plot , μπορεί να γίνει επισκόπηση της γεωμετρίας των διατομών. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται η κατάντη διατομή στην έξοδο του ποταμού.



Σχήμα 6.12: Γεωμετρία διατομής (έξοδος ποταμού).

Επιπλέον, μέσω της εντολής RAS Geometry → XS Cut Line Attributes → All (Σχήμα 6.13) υπολογίζονται κάποια χαρακτηριστικά των διατομών τα οποία είναι απαραίτητα για την λειτουργία του λογισμικού HEC-RAS:

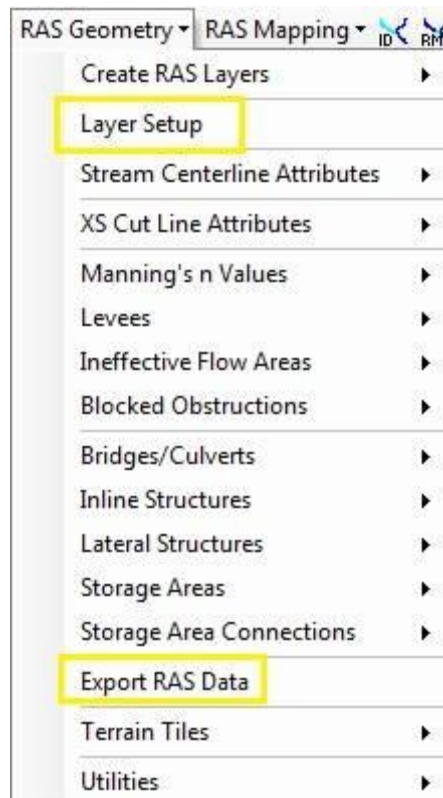
- ✓ River/Reach Names: Αντιγράφει τα χαρακτηριστικά της κύριας γραμμής ροής στο θεματικό επίπεδο των διατομών
- ✓ Stationing: Υπολογίζει την απόσταση από κάθε διατομή προς το κατάντη άκρο του ποταμού
- ✓ Bank Stations: Υπολογίζει την απόσταση από την δεξιά και αριστερή όχθη κάθε διατομής
- ✓ Downstream Reach Lengths: Υπολογίζει με βάση τις κύριες γραμμές ροής, την απόσταση κάθε διατομής από την επόμενη κατάντη διατομή
- ✓ Elevation: Μετατρέπει τις διδιάστατες διατομές σε τρισδιάστατες με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους



Σχήμα 6.13: Διαδικασία υπολογισμού χαρακτηριστικών των διατομών.

### 6.1.3 Σύνθεση θεματικών επιπέδων και εξαγωγή στο HEC-RAS

Η σύνθεση των θεματικών επιπέδων και του ψηφιακού μοντέλου εδάφους που δημιουργήθηκαν, ήταν το τελικό βήμα για την παραγωγή του γεωμετρικού αρχείου εισόδου του προγράμματος HEC-RAS. Αυτό γίνεται μέσω της ακόλουθης εντολής RAS Geometry → Layer Setup και η εξαγωγή του μέσω της εντολής RAS Geometry → Extract GIS data (Σχήμα 6.14).



Σχήμα 6.14: Διαδικασία σύνθεσης και εξαγωγής θεματικών επιπέδων HEC-RAS.

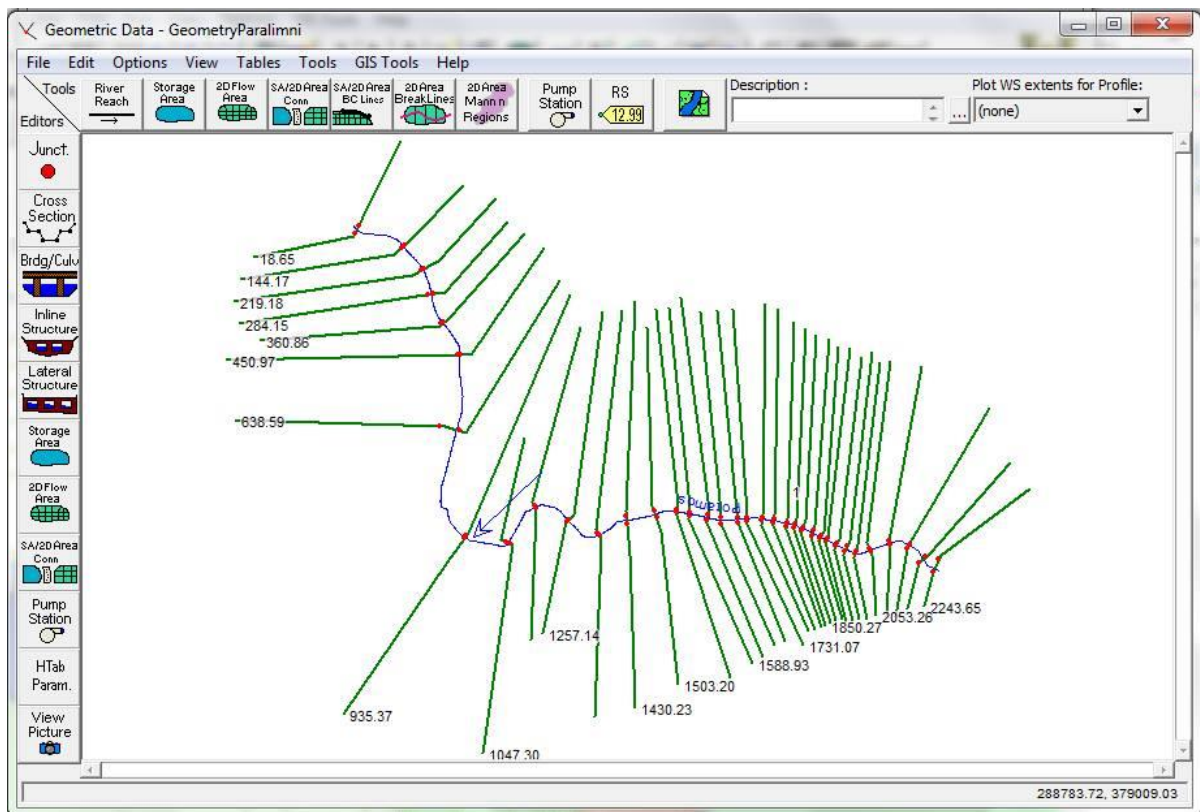
## 6.2 Υδραυλική προσομοίωση υδατορεύματος (HEC-RAS)

Στην παρούσα μελέτη έγινε υδραυλική προσομοίωση υδατορεύματος σε συνθήκες μόνιμης ροής, παραδοχή που γίνεται συχνά (π.χ. Nalbantis, I., and Lymperopoulos, 2012). Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την υδραυλική προσομοίωση είναι:

- ✓ Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων
- ✓ Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων
- ✓ Ρύθμιση παραμέτρων και εκτέλεση υδραυλικών υπολογισμών
- ✓ Επισκόπηση και εξαγωγή αποτελεσμάτων
- ✓ Σύνθεση πιεζομετρικών χαρτών
- ✓ Σύνθεση χαρτών πλημμυρικής κατάκλισης

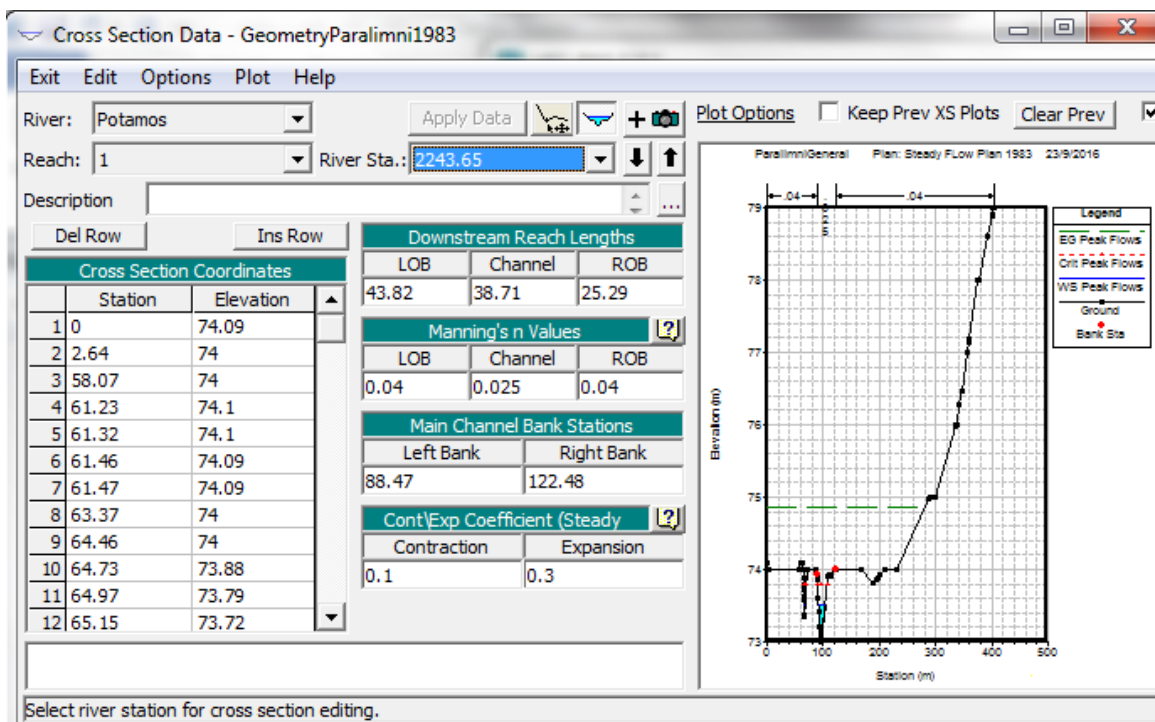
### 6.2.1 Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων

Η εισαγωγή των γεωμετρικών δεδομένων που δημιουργήθηκαν στο HEC-GeoRAS γίνεται μέσω της εντολής File → Import Geometry Data → GIS Format, όπως εμφανίζεται στην εικόνα (Σχήμα 6.15).



Σχήμα 6.15: Γεωμετρικό αρχείο.

Με την χρήση της εντολής cross section στην καρτέλα που εμφανίζεται, ο χρήστης μπορεί να δει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κάθε διατομής (Σχήμα 6.16). Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα επεξεργασίας και συμπλήρωσης επιπρόσθετων γεωμετρικών χαρακτηριστικών.



Σχήμα 6.16: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομής.



Τα γεωμετρικά στοιχεία τα οποία παρουσιάζονται στο παράθυρο της εντολής Cross Section είναι τα ακόλουθα:

- ✓ River/Reach: Όνομα και τμήμα του ποταμού στο οποίο ανήκει η διατομή
- ✓ River Sta: Κωδικός αριθμός της διατομής
- ✓ Cross Section Coordinates: Πίνακας με όλα τα στοιχεία της διατομής
- ✓ Downstream Reach Lengths: Αποστάσεις δυο διαδοχικών διατομών κατά μήκος των κύριων διευθύνσεων ροής
- ✓ Main Channel Bank Stations: Αποστάσεις της αριστερής και της δεξιάς όχθης από το αριστερό άκρο της διατομής
- ✓ Manning's n Values: Τιμές του συντελεστή Manning
- ✓ Cont/Exp Coefficients: Συντελεστές συστολής και διαστολής

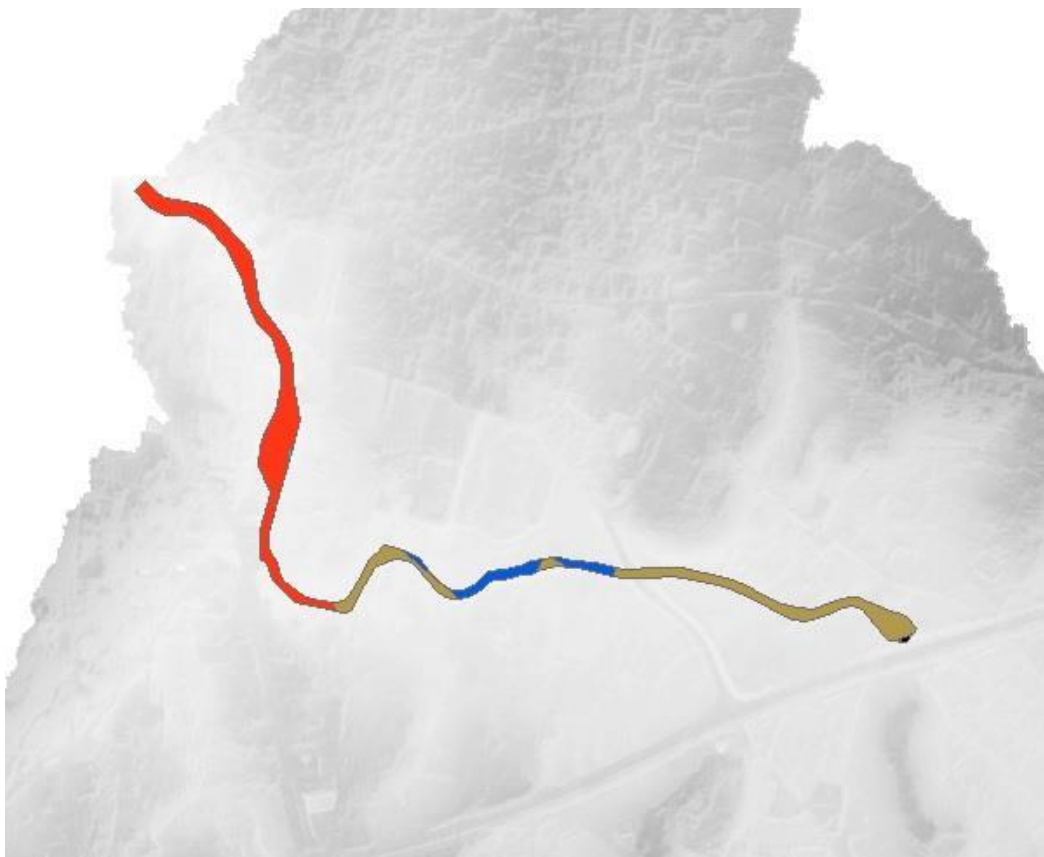
Οι συντελεστές συστολής και διαστολής (contraction – expansion) χρησιμοποιούνται για να υπολογίζουν την απώλεια ενέργειας της ροής του νερού από μια διατομή στην επόμενη κατάντη διατομή. Οι προεπιλεγμένες από το πρόγραμμα τιμές των συντελεστών συστολής και διαστολής είναι 0.1 και 0.3, αντίστοιχα.

### **6.2.2 Προσδιορισμός συντελεστή τραχύτητας Manning $n$**

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό που πρέπει να προσδιοριστεί για την υδραυλική προσομοίωση, είναι ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning  $n$  στις όχθες και στην κοίτη του ποταμού σε κάθε διατομή. Σε αρχικό στάδιο, οριοθετήθηκε η περιοχή ενδιαφέροντος (όρια ποταμού) σε περιβάλλον GIS. Δημιουργήθηκε ένα πολύγωνο με τα όρια του ποταμού και στην συνέχεια μέσω της εντολής Intersect αποκόπηκαν οι χρήσεις για την περιοχή ενδιαφέροντος. Η διαδικασία έγινε δύο φορές, μια για τις χρήσεις γης 1983 – 2003 (Σχήμα 6.17) και μία για τις χρήσεις γης 2006-2016 (Σχήμα 6.18).



Σχήμα 6.17: Πολύγωνα χρήσεων γης στα όρια των οχθών του ποταμού (1983-2003).



Σχήμα 6.18: Πολύγωνα χρήσεων γης στα όρια των οχθών του ποταμού (2006-2016).

Με την δημιουργία των θεματικών πολυγώνων υπολογίστηκε ο συντελεστής Manning  $n$  σε κάθε διατομή. Η εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας  $n$ , έγινε με βάση τους πίνακες του Chow, 1959 όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4. Έπειτα, έγινε η εισαγωγή του συντελεστή Manning στο λογισμικό HEC-RAS. Από το παράθυρο του γεωμετρικού αρχείου (Geometry data) συμπληρώθηκε χειροκίνητα ο πίνακας με τις τιμές  $n$  μέσω της εντολής Tables → Manning's  $n$  or  $k$  values. Πιο κάτω παραθέτονται οι συμπληρωμένοι πίνακες για τις διαφορετικές περιόδους χρήσεων γης (πίνακες 6.1 και 6.2).

Πίνακας 6.1: Συντελεστής Manning ( $n$ ) στις διατομές – Περίοδος 1983-2003.

Διατομή	Αριστερή όχθη ( $n$ )	Κεντρικό κανάλι ( $n$ )	Δεξιά όχθη ( $n$ )
2243.65	0.04	0.025	0.04
2204.94	0.04	0.025	0.04
2155.75	0.04	0.025	0.04
2104.49	0.04	0.025	0.04
2053.26	0.04	0.025	0.04
2015.13	0.04	0.025	0.04
1989.82	0.04	0.025	0.04
1964.90	0.04	0.025	0.04
1937.17	0.04	0.025	0.04
1921.65	0.04	0.025	0.04
1898.23	0.04	0.025	0.04
1871.14	0.04	0.025	0.04
1850.27	0.04	0.025	0.04
1830.95	0.04	0.025	0.04
1797.29	0.04	0.025	0.04
1769.46	0.04	0.025	0.04
1731.07	0.04	0.025	0.04
1708.34	0.04	0.025	0.04
1667.54	0.04	0.025	0.04
1633.77	0.05	0.025	0.05
1588.93	0.05	0.025	0.05
1557.34	0.05	0.025	0.05
1503.20	0.06	0.025	0.06
1430.23	0.06	0.025	0.06
1351.28	0.06	0.025	0.06
1257.14	0.025	0.025	0.025
1160.58	0.05	0.025	0.05
1047.30	0.05	0.025	0.05
935.37	0.05	0.025	0.05
638.59	0.025	0.017	0.025
450.97	0.025	0.017	0.025
360.86	0.025	0.017	0.025
284.15	0.025	0.025	0.025
219.18	0.025	0.025	0.025
144.17	0.025	0.025	0.025
18.65	0.025	0.025	0.025

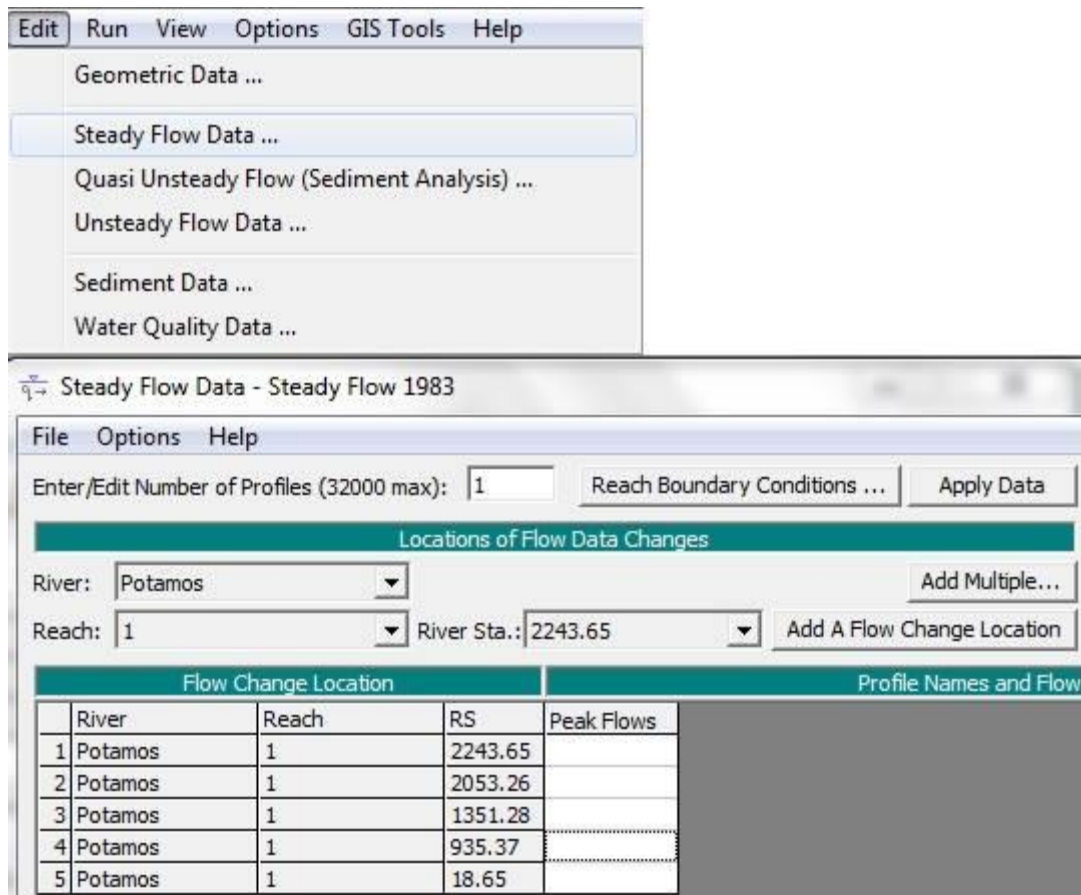
Πίνακας 6.2: Συντελεστής Manning (*n*) στις διατομές – Περίοδος 2006-2016

Διατομή	Αριστερή όχθη ( <i>n</i> )	Κεντρικό κανάλι ( <i>n</i> )	Δεξιά όχθη ( <i>n</i> )
2243.65	0.03	0.025	0.03
2204.94	0.03	0.025	0.03
2155.75	0.03	0.025	0.03
2104.49	0.03	0.025	0.03
2053.26	0.03	0.025	0.03
2015.13	0.03	0.025	0.03
1989.82	0.03	0.025	0.03
1964.90	0.03	0.025	0.03
1937.17	0.03	0.025	0.03
1921.65	0.03	0.025	0.03
1898.23	0.03	0.025	0.03
1871.14	0.03	0.025	0.03
1850.27	0.03	0.025	0.03
1830.95	0.03	0.025	0.03
1797.29	0.03	0.025	0.03
1769.46	0.03	0.025	0.03
1731.07	0.03	0.025	0.03
1708.34	0.03	0.025	0.03
1667.54	0.03	0.025	0.03
1633.77	0.05	0.025	0.05
1588.93	0.05	0.025	0.05
1557.34	0.05	0.025	0.05
1503.20	0.03	0.025	0.05
1430.23	0.05	0.025	0.05
1351.28	0.05	0.025	0.05
1257.14	0.03	0.025	0.05
1160.58	0.03	0.025	0.03
1047.30	0.03	0.025	0.03
935.37	0.025	0.025	0.025
638.59	0.025	0.017	0.03
450.97	0.025	0.017	0.05
360.86	0.025	0.017	0.05
284.15	0.025	0.025	0.025
219.18	0.025	0.025	0.025
144.17	0.025	0.025	0.025
18.65	0.025	0.025	0.025



### 6.2.3 Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων

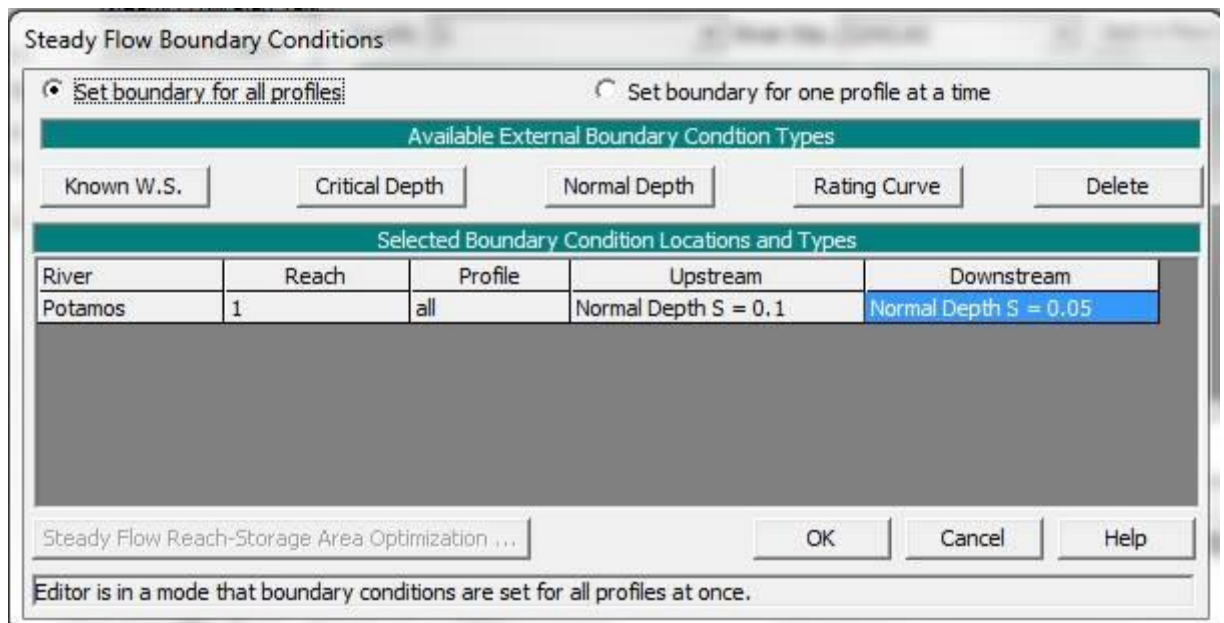
Για συνθήκες μόνιμης ροής, τα υδρολογικά δεδομένα εισάγονται μέσω της εντολής Edit →Steady Flow Data, όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 6.19.



Σχήμα 6.19: Διαδικασία εισαγωγής υδρολογικών δεδομένων.

Επιπλέον, πρέπει να οριστεί ο αριθμός των προφίλ από το χρήστη. Στην παρούσα μελέτη, ο αριθμός των προφίλ είναι δυο, ένα για τις χρήσεις γης 1983-2003 και ένα για τις χρήσεις γης 2006-2016. Τέλος, εισάγονται οι πλημμυρικές αιχμές για τα προφίλ, οι οποίες υπολογίστηκαν στην υδρολογική ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος HEC-HMS.

Για να ολοκληρωθεί η εισαγωγή των υδρολογικών δεδομένων, πρέπει να γίνει ορισμός των οριακών συνθηκών (Reach Boundary Conditions). Οι οριακές συνθήκες αποτελούν το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό των επιμέρους στοιχείων της εξίσωσης ενέργειας (Εξίσωση 6.1) και εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος σε ποια θέση θα οριστούν. Επίσης, σε περίπτωση μικτής ροής χρειάζεται ορισμός οριακής συνθήκης και στα δύο άκρα (Σχήμα 6.20).



Σχήμα 6.20: Ορισμός οριακών συνθηκών.

Επιπρόσθετα, το πρόγραμμα δίνει διάφορες επιλογές στο χρήστη για να ορίζει τις οριακές συνθήκες, οι οποίες παρουσιάζονται πιο κάτω:

- ✓ Known Water Surface Elevation (Γνωστό πιεζομετρικό φορτίο): Ο χρήστης εισάγει το πιεζομετρικό φορτίο για κάθε προφίλ,
- ✓ Critical Depth (Κρίσιμο Βάθος): Με την επιλογή αυτή το πρόγραμμα υπολογίζει το κρίσιμο βάθος κάθε προφίλ και το λαμβάνει ως οριακή συνθήκη,
- ✓ Normal Depth (Ομοιόμορφο βάθος): Εισάγεται η κλίση της γραμμής ενέργειας, για να υπολογιστεί το ομοιόμορφο βάθος (Brunner G. W., 2010)
- ✓ Rating Curve (Καμπύλη στάθμης – παροχής): Επιλέγοντας αυτή την οριακή συνθήκη εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο, όπου εισάγονται ζεύγη τιμών στάθμης – παροχής. Έτσι, από την καμπύλη που δημιουργείται το πρόγραμμα υπολογίζει το πιεζομετρικό φορτίο με παρεμβολή

Στην παρούσα μελέτη τελικά, επιλέχθηκε μικτή ροή λόγω του ότι οι κλίσεις του εδάφους ανάντη είναι της τάξης του 10%, ενώ κατάντη είναι πιο ήπιες της τάξης του 5%. Άρα, ορίστηκαν οριακές συνθήκες στα δύο άκρα (ανάντη και κατάντη), με τη χρήση της επιλογής Normal Depth, αφού για τις υπόλοιπες επιλογές δεν υπήρχαν επαρκή δεδομένα. Μέσω του ArcMap και με τη χρήση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, από την εντολή Spatial Analyst → Slope δημιουργήθηκαν οι κλίσεις της λεκάνης απορροής. Με το εργαλείο Identify επιλέχθηκαν σημεία κοντά στην ανάντη και κατάντη διατομή και προσδιορίστηκε η κλίση του ποταμού στα σημεία αυτά. Στο Σχήμα 6.21 παρουσιάζονται οι κλίσεις στην ανάντη και κατάντη διατομή, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως οριακές συνθήκες για την υδραυλική προσομοίωση.

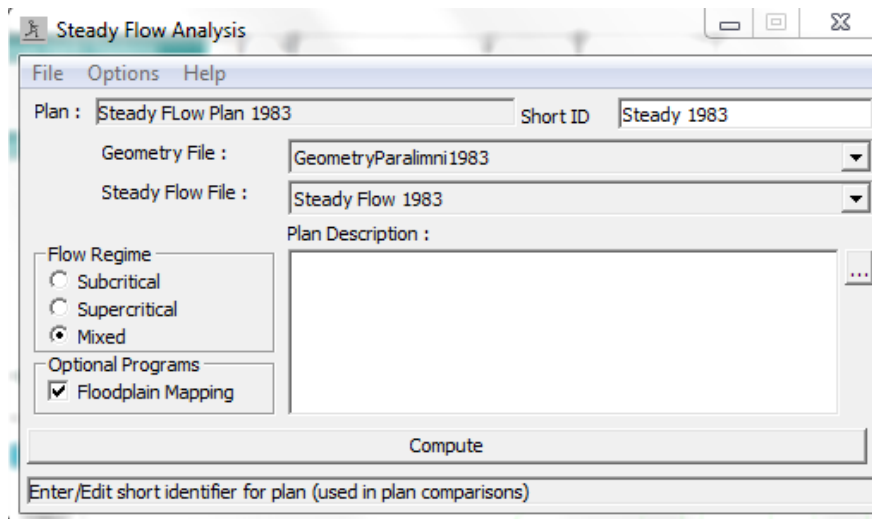


Σχήμα 6.21:Κλίσεις ανάντη και κατάντη διατομής.

#### 6.2.4 Ρύθμιση παραμέτρων και εκτέλεση υδραυλικών υπολογισμών

Το τελευταίο βήμα για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης στο περιβάλλον το HEC-RAS είναι η εκτέλεση των υδραυλικών υπολογισμών. Η διαδικασία εκτελείται μέσω της εντολής Run → Steady Flow Analysis (Σχήμα 6.22), όπου καθορίζονται τα πιο κάτω στοιχεία:

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



Σχήμα 6.22: Τρέξιμο υδραυλικής προσομοίωσης.

Για την ορθή προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών ροής, ρυθμίζονται κάποιες παράμετροι του μοντέλου.

#### **Επιλογή διατομών μελέτης**

Η εντολή Flow Distribution Location σχετίζεται με τη διαίρεση των διατομών σε τρία τμήματα, της κοίτης, πέραν της αριστερής και πέραν την δεξιάς όχθης ή σε περισσότερα τμήματα. Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε η επιλογή των τριών τμημάτων και εκτελείται από το Options → Flow Distribution Locations.

#### **Γραμμικές απώλειες – Εξίσωση ενέργειας**

Με βάση την μεθοδολογία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.6 το πρόγραμμα υλοποιεί την προσομοίωση, επιλύοντας την εξίσωση ενέργειας. Πραγματοποιείται ο υπολογισμός του συντελεστή μεταφοράς  $K$  για κάθε διατομή, με τη χρήση της εντολής Options → Conveyance calculations. Κατόπιν, επιλέγεται η μέθοδος At breaks in  $n$  values only, έτσι ώστε τα πλευρικά τμήματα της διατομής (πέραν της αριστερής και πέραν της δεξιάς όχθης) να διαχωριστούν σε επιπλέον τμήματα, σύμφωνα με το αν αλλάζει ο συντελεστής Manning ή όχι, ούτως ώστε κάθε τμήμα να έχει μια ενιαία τιμή  $n$ .

Οι απώλειες λόγω τριβής υπολογίζονται μέσω της εντολής Options → Friction slope methods, όπου μέσω από 6 επιλογές που διαθέτει το πρόγραμμα, επιλέχθηκε η μέθοδος του μέσου όρου (Average conveyance), η οποία είναι η προεπιλεγμένη τιμή του προγράμματος για ομοιόμορφη ροή.

Για τον τελικό προσδιορισμό της επαναληπτικής προσομοίωσης, θα πρέπει να καθοριστεί αν το καθεστώς ροής είναι υπερκρίσιμο, υποκρίσιμο ή μικτό. Στην παρούσα εργασία η ροή θεωρήθηκε μικτή και έτσι προσδιορίστηκαν οριακές συνθήκες και στα δύο άκρα.

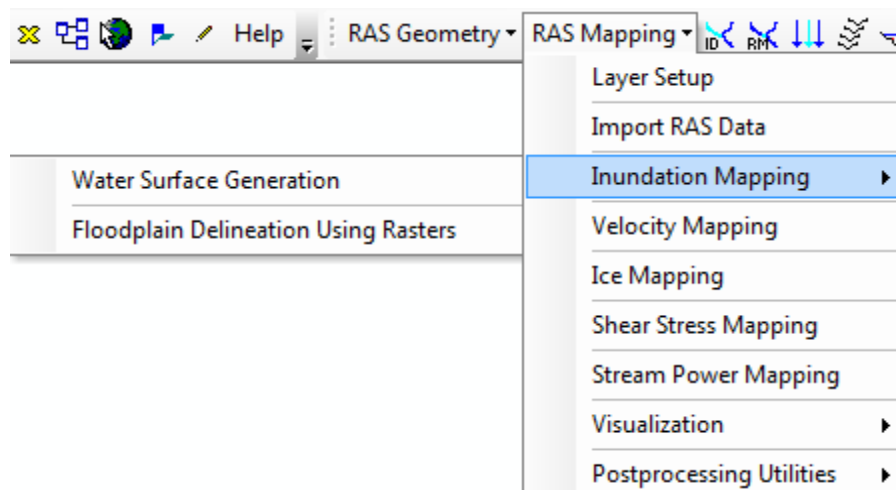
Τελειώνοντας, το πρόγραμμα κατά την διάρκεια των υπολογισμών, υπολογίζει το κρίσιμο βάθος και το συγκρίνει με το βάθος ροής στη διατομή μελέτη, συντελώντας στον έλεγχο της ορθότητας των αποτελεσμάτων, μέσω της εντολής Options → Critical Depth Computation Method. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η παραβολική μέθοδος (Parabolic Method) για τον υπολογισμό του κρίσιμου βάθους, η οποία προτείνεται από τους κατασκευαστές του HEC-RAS (Brunner G. W., 2010).

### 6.2.5 Εξαγωγή αποτελεσμάτων από το HEC-RAS

Μετά την ολοκλήρωση των υδραυλικών υπολογισμών γίνεται η εξαγωγή των δεδομένων σε περιβάλλον GIS με σκοπό τη δημιουργία χαρτών με τα βάθη ροής και τις πλυμμηρικές εκτάσεις. Καταρχάς, γίνεται εξαγωγή δεδομένων από την εντολή File → Export GIS Data για την δημιουργία αρχείου συμβατό με GIS.

Μετάπειτα, γίνεται η εισαγωγή των αποτελεσμάτων στο ArcMap μέσω της εργαλειοθήκης HEC-GeoRAS. Στο μενού RAS Mapping επιλέγεται η εντολή Layer Setup και καθορίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη του χάρτη και των υδραυλικών δεδομένων.

Με την ολοκλήρωση της εισαγωγής δεδομένων στο ArcMap δημιουργούνται δύο νέα θεματικά επίπεδα, ένα για τις διατομές και ένα για τα όρια των κατακλύσεων. Στη συνέχεια, με την εντολή RAS Mapping → Inundation Mapping → Water Surface Generation συνθέτονται οι πιεζομετρικές επιφάνειες για τις δύο περιπτώσεις προσομοίωσης. Τελικά, από τις πιεζομετρικές επιφάνειες που έχουν παραχθεί σε συνδυασμό με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους υπολογίζεται το ακριβές όριο των κατακλύσεων και τα βάθη του νερού για όλο τη πλημμυρική έκταση. Γίνεται σύγκριση του ψηφιακού μοντέλου με την πιεζομετρική επιφάνεια και στα σημεία όπου το υψόμετρο της δεύτερης ξεπερνά το πρώτο υπολογίζεται η διαφορά ως το αντίστοιχο βάθος νερού. Η διαδικασία γίνεται από την εντολή RAS Mapping → Inundation Mapping → Floodplain delineation (Σχήμα 6.26).



Σχήμα 6.23: Διαδικασία παραγωγής θεματικών επιπέδων.

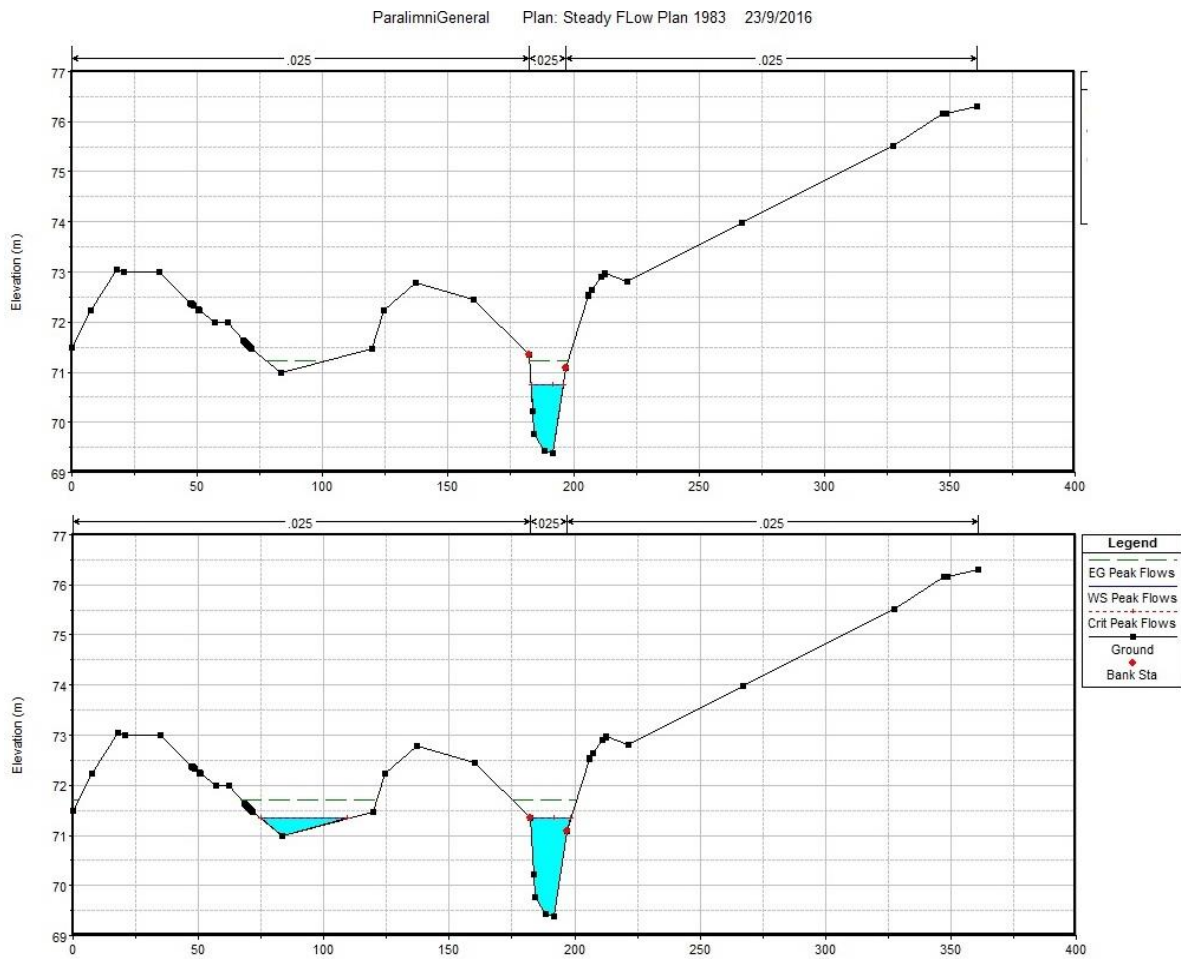
### 6.2.6 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και σύνθεση χαρτών

Στο σημείο αυτό θα παρατεθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την υδραυλική προσομοίωση. Λόγω ότι οι διατομές που εξετάστηκαν είναι πάρα πολλές, θα γίνει παράθεση μερικών από αυτές. Οι διατομές που θα παρουσιαστούν ενδεικτικά είναι η 18.65 και η 1989.82. Η προσομοίωση έγινε και για τις δύο περιπτώσεις χρήσεων γης και για την κάθε μια ξεχωριστά χρησιμοποιήθηκε ξεχωριστό γεωμετρικό αρχείο με τους διαφορετικούς συντελεστές Manning, καθώς και οι παροχές όπως προέκυψαν από το HEC-HMS.

Από το κυρίως μενού του λογισμικού HEC-RAS υπάρχει πληθώρα δυνατοτήτων για να δούμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Έτσι μέσω των εντολών View → Cross Sections και View → Detailed Output Tables παρουσιάζονται οι διατομές και ο αναλυτικός πίνακας για την κάθε διατομή. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από τις δύο προσομοιώσεις.



### Διατομή 18.65 (κατάντη διατομή ποταμού):



Σχήμα 6.24: Διατομή προσομοίωσης 18.65 (παλιές χρήσεις πάνω διατομή, νέες κάτω διατομή).

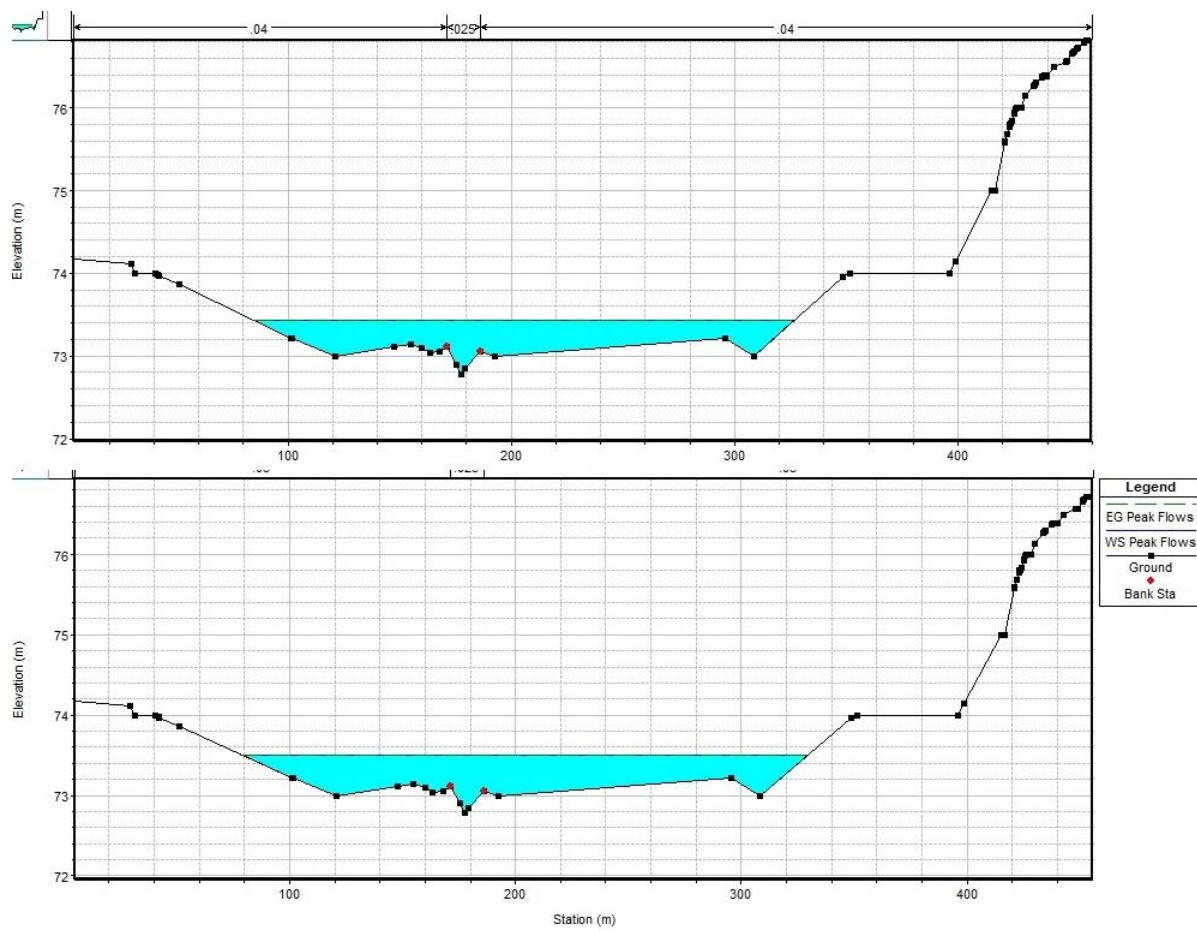
River:	Potamos	Profile:	Peak Flows
Reach	1	RS:	18.65
Plan: Steady 1983 Potamos 1 RS: 18.65 Profile: Peak Flows			
E.G. Elev (m)	71.23	Element	Left OB
Vel Head (m)	0.50	Wt. n-Val.	Channel
W.S. Elev (m)	70.74	Reach Len. (m)	Right OB
Crit W.S. (m)	70.74	Flow Area (m2)	
E.G. Slope (m/m)	0.006657	Area (m2)	12.48
Q Total (m3/s)	38.90	Flow (m3/s)	38.90
Top Width (m)	12.76	Top Width (m)	12.76
Vel Total (m/s)	3.12	Avg. Vel. (m/s)	3.12
Max Chl Dpth (m)	1.36	Hydr. Depth (m)	0.98
Conv. Total (m3/s)	476.8	Conv. (m3/s)	476.8
Length Wtd. (m)		Wetted Per. (m)	13.37
Min Ch El (m)	69.38	Shear (N/m2)	60.94
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	189.95
Frctn Loss (m)		Cum Volume (1000 m3)	
C & E Loss (m)		Cum SA (1000 m2)	

River:	Potamos	Profile:	Peak Flows
Reach	1	RS:	18.65
Plan: steady 2006 Potamos 1 RS: 18.65 Profile: Peak Flows			
E.G. Elev (m)	71.71	Element	Left OB
Vel Head (m)	0.37	Wt. n-Val.	Channel
W.S. Elev (m)	71.34	Reach Len. (m)	Right OB
Crit W.S. (m)	71.34	Flow Area (m2)	
E.G. Slope (m/m)	0.003252	Area (m2)	5.80
Q Total (m3/s)	62.00	Flow (m3/s)	4.03
Top Width (m)	50.55	Top Width (m)	34.44
Vel Total (m/s)	2.31	Avg. Vel. (m/s)	0.70
Max Chl Dpth (m)	1.96	Hydr. Depth (m)	0.17
Conv. Total (m3/s)	1087.1	Conv. (m3/s)	70.7
Length Wtd. (m)		Wetted Per. (m)	34.45
Min Ch El (m)	69.38	Shear (N/m2)	5.37
Alpha	1.35	Stream Power (N/m s)	3.73
Frctn Loss (m)		Cum Volume (1000 m3)	
C & E Loss (m)		Cum SA (1000 m2)	

Σχήμα 6.25: Αναλυτικοί πίνακες διατομής 18.65 (προσομοίωση με παλιές χρήσεις πάνω, νέες κάτω).

## Διατομή 1989.82



Σχήμα 6.26: Διατομή προσομοίωσης 1989.82 (παλιές χρήσεις πάνω διατομή, νέες κάτω διατομή).



Plan: Steady 1983 Potamos 1 RS: 1989.82 Profile: Peak Flows					
E.G. Elev (m)	73.43	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.01	Wt. n-Val.	0.040	0.025	0.040
W.S. Elev (m)	73.42	Reach Len. (m)	24.80	24.93	25.38
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	25.59	7.34	43.75
E.G. Slope (m/m)	0.000567	Area (m2)	25.59	7.34	43.75
Q Total (m3/s)	23.10	Flow (m3/s)	6.76	4.34	12.00
Top Width (m)	241.41	Top Width (m)	86.49	14.96	139.96
Vel Total (m/s)	0.30	Avg. Vel. (m/s)	0.26	0.59	0.27
Max Chl Dpth (m)	0.64	Hydr. Depth (m)	0.30	0.49	0.31
Conv. Total (m3/s)	970.2	Conv. (m3/s)	284.0	182.3	503.8
Length Wtd. (m)	25.13	Wetted Per. (m)	86.49	14.97	139.96
Min Ch El (m)	72.78	Shear (N/m2)	1.64	2.72	1.74
Alpha	1.38	Stream Power (N/m s)	0.43	1.61	0.48
Frctn Loss (m)	0.01	Cum Volume (1000 m3)	68.72	26.90	55.07
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)	168.03	26.67	154.34

Plan: steady 2006 Potamos 1 RS: 1989.82 Profile: Peak Flows					
E.G. Elev (m)	73.51	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.01	Wt. n-Val.	0.030	0.025	0.030
W.S. Elev (m)	73.50	Reach Len. (m)	24.80	24.93	25.38
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	32.18	8.44	54.19
E.G. Slope (m/m)	0.000508	Area (m2)	32.18	8.44	54.19
Q Total (m3/s)	38.50	Flow (m3/s)	11.99	5.19	21.32
Top Width (m)	250.18	Top Width (m)	92.18	14.96	143.04
Vel Total (m/s)	0.41	Avg. Vel. (m/s)	0.37	0.62	0.39
Max Chl Dpth (m)	0.72	Hydr. Depth (m)	0.35	0.56	0.38
Conv. Total (m3/s)	1708.0	Conv. (m3/s)	531.8	230.3	945.8
Length Wtd. (m)	25.14	Wetted Per. (m)	92.19	14.97	143.04
Min Ch El (m)	72.78	Shear (N/m2)	1.74	2.81	1.89
Alpha	1.09	Stream Power (N/m s)	0.65	1.73	0.74
Frctn Loss (m)	0.01	Cum Volume (1000 m3)	98.71	32.69	83.79
C & E Loss (m)	0.00	Cum SA (1000 m2)	205.70	27.15	199.32

Σχήμα 6.27: Αναλυτικοί πίνακες διατομής 1989.82 (προσομοίωση με παλιές χρήσεις πάνω, νέες κάτω).

Από τα σχήματα 6.27 και 6.29, φαίνεται η αύξηση του πιεζομετρικού φορτίου και της γραμμής ενέργειας συγκρίνοντας τη προσομοίωση των παλιών και νέων χρήσεων. Συνεπακόλουθα, αυξάνεται και η στάθμη του νερού. Στους αναλυτικούς πίνακες (σχήματα 6.28 και 6.30) καταγράφεται επίσης το κρίσιμο βάθος (Crit W.S), το μέγιστο πλάτος της κατακλυζόμενης επιφάνειας (Top Width), τη μέση ταχύτητα ροής στη διατομή (Vel Total) και το μέγιστο βάθος κύριας διατομής.

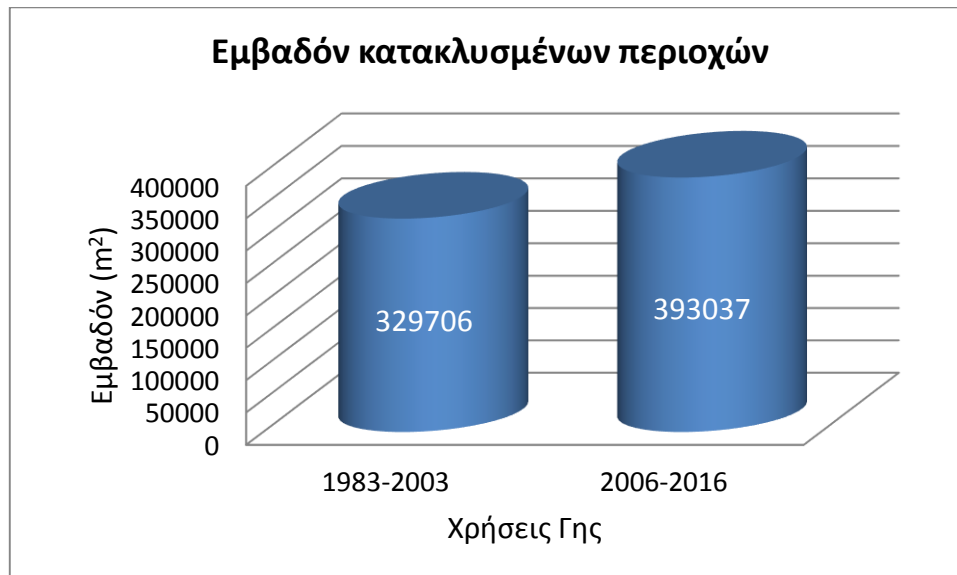
Εξετάζοντας όλες τις διατομές στην περιοχή μελέτης και για τις δύο περιπτώσεις, η μέγιστη ταχύτητα παρατηρείται στη διατομή 2243.65 με τιμή 5.01 m/s για παλιές χρήσεις γης και 4.25 m/s για τις νέες. Επιπλέον, το μέγιστο βάθος ροής εμφανίζεται στη διατομή 144.17 με τιμές 2,24 m για τις παλιές χρήσεις και 2.69 m για τις νέες. Η ταχύτητα μειώνεται από τις παλιές στις νέες χρήσεις, ωστόσο αυτό συμβαίνει διότι το πλάτος της διατομής αυξάνεται (διαπιστώνεται βλέποντας το μέγιστο βάθος ροής και το μέγιστο πλάτος της περιβρεχόμενης επιφάνειας). Όσο για το βάθος ροής αυξάνεται, εφόσον ο αριθμός *CN* έχει αυξηθεί και ο συντελεστής τραχύτητας *n* μειώνεται λόγω αλλαγής χρήσεων γης. Έτσι το υπέδαφος δεν

απορροφά τις ίδιες ποσότητες νερού με παλαιότερα και οι απώλειες ενέργειας είναι μικρότερες, άρα η γραμμή ενέργειας ανυψώνεται.

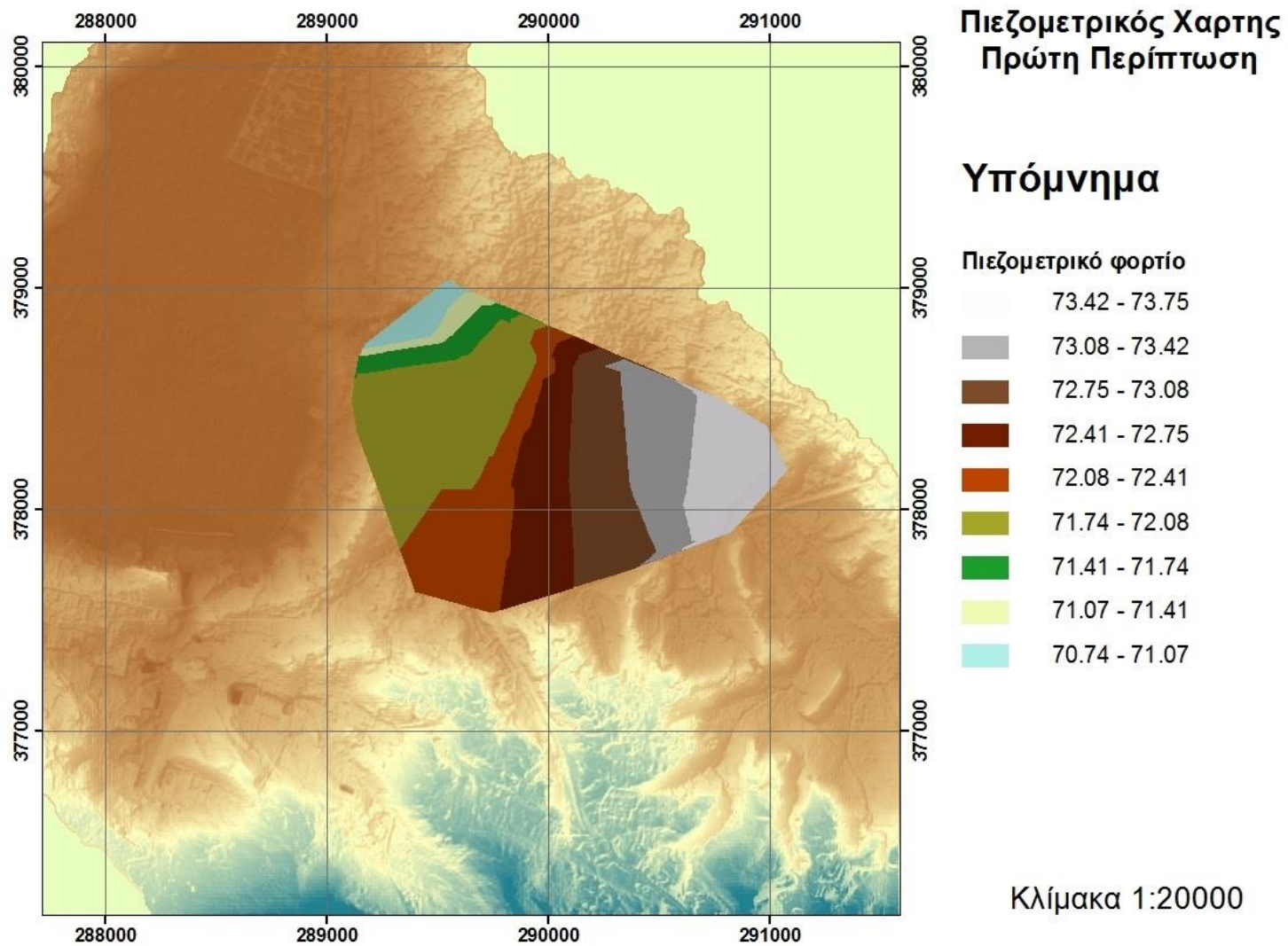
### **Πιεζομετρικοί και πλημμυρικοί χάρτες**

Στο σημείο αυτό παρατίθενται οι χάρτες που δημιουργήθηκαν όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο στάδιο της παρούσας μελέτης. Συγκεκριμένα, έγιναν δύο χάρτες για τα πιεζομετρικά φορτία (σχήματα 6.32 και 6.33) και δύο χάρτες πλημμυρικής κατάκλυσης (σχήματα 6.34 και 6.35), για τις δύο προσομοιώσεις διαφορετικών χρήσεων γης.

Μελετώντας τους χάρτες και τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης είναι εφικτό να υπολογιστούν τα εμβαδά της κατακλυζόμενης επιφάνειας και η μέγιστη απόσταση της από το ποταμό. Συγκρίνοντας τα δύο εμβαδά παρατηρείται 63331 m<sup>2</sup> διαφορά στην επιφάνεια της πλημμύρας (Σχήμα 6.31). Επιπρόσθετα, το μέγιστο πλάτος της πλημμυρικής κατάκλυσης στην πρώτη περίπτωση είναι 238.9 m αριστερά της διατομής 1797.29 και στη δεύτερη είναι 259.98 m και πάλι αριστερά, της διατομής 1588.93. Ενώ η μεγαλύτερη εγκάρσια διαφορά πλάτους πλημμυρισμένης έκτασης ανέρχεται στα 133.19 m και εμφανίζεται στην διατομή 360.86.

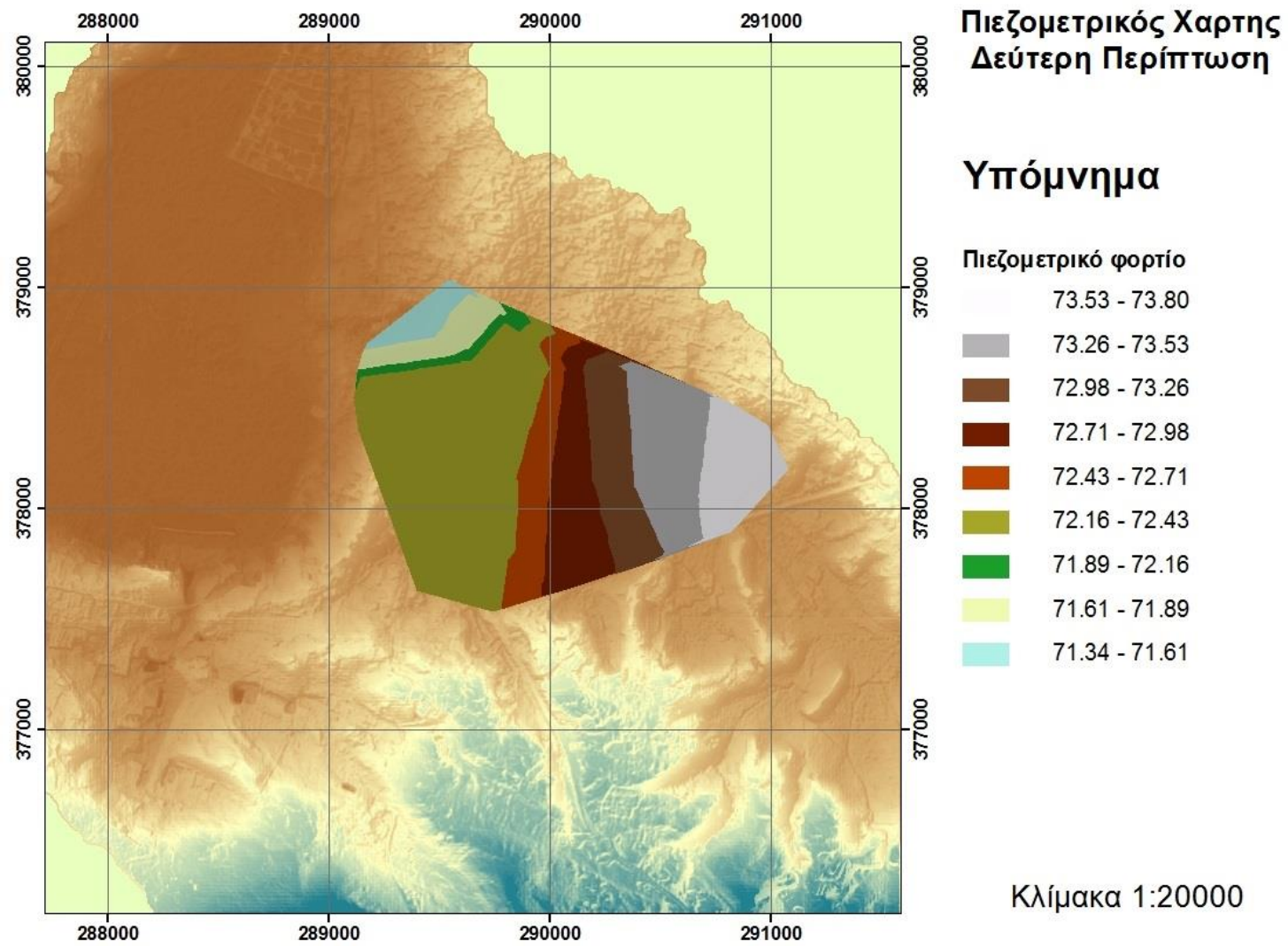


Σχήμα 6.28: Εμβαδόν κατακλυσμένων περιοχών.

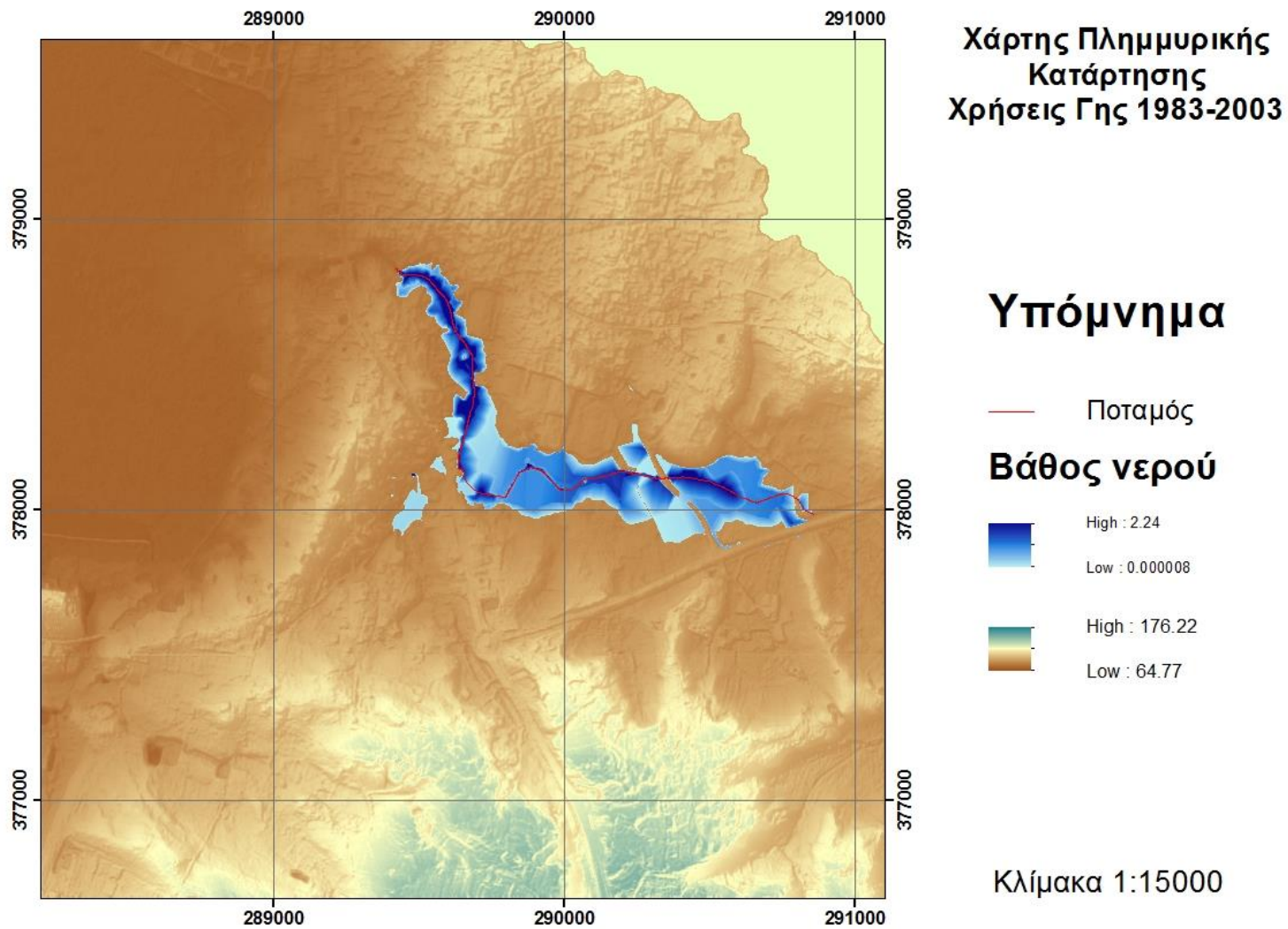


Σχήμα 6.29: Πιεζομετρικός χάρτης, χρήσεις γης 1983-2003.

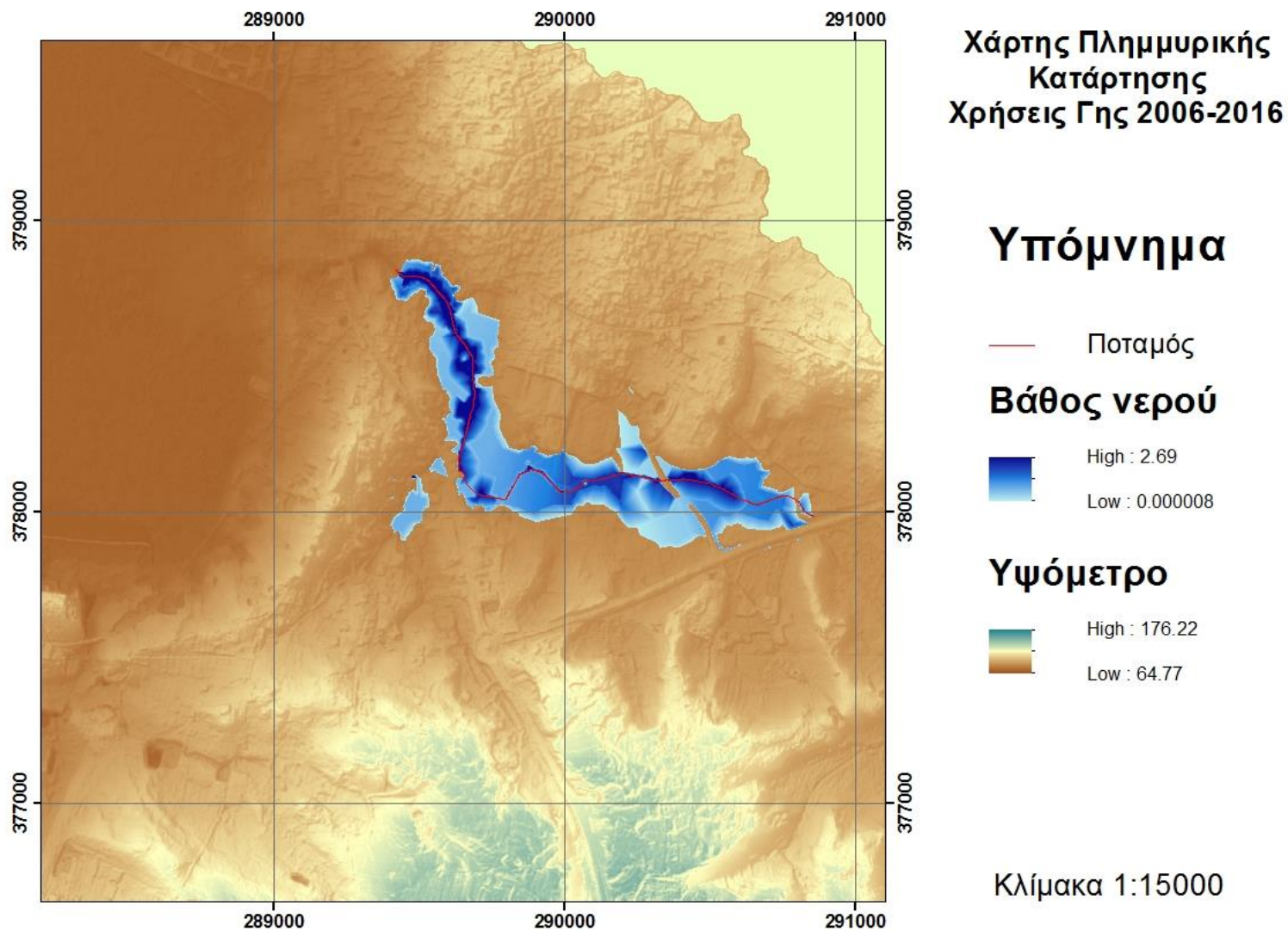




Σχήμα 6.30: Πιεζομετρικός χάρτης, χρήσεις γης 2006-2016.

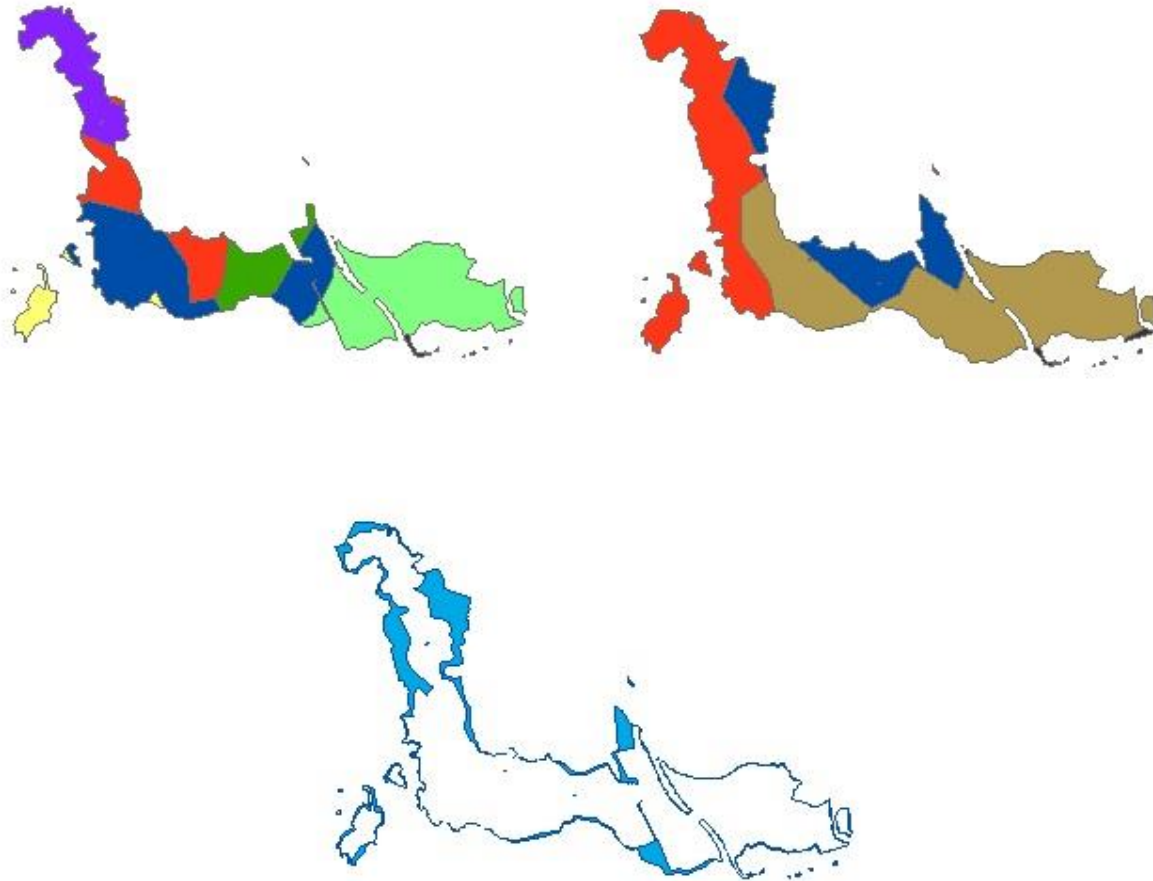


Σχήμα 6.31: Πλημμυρικός χάρτης, χρήσεις γης 1983-2003.



Σχήμα 6.32: Πλημμυρικός χάρτης, χρήσεις γης 2006-2016.

Τέλος, από τα πλημμυρικά πολύγωνα που δημιουργήθηκαν και μέσω της δυνατότητας επεξεργασίας του ArcMap, συγκρίνονται στο Σχήμα 6.36. Πάνω αριστερά είναι η κατακλυζόμενη επιφάνεια της πρώτης περίπτωσης μαζί με τις χρήσεις γης 1983-2003. Πάνω δεξιά είναι η κατακλυζόμενη επιφάνεια της δεύτερης προσομοίωσης 2006-2016. Στο κάτω πολύγωνο με γαλάζιο χρώμα παρουσιάζεται η διαφορά της πλημμυρικής έκτασης τους, όπου με άσπρο χρώμα μέσα είναι η έκταση της πρώτης περίπτωσης.



Σχήμα 6.33: Πολύγωνα πλημμυρικής κατάκλυσης σε κλίμακα 1:20,000.





## 7 Σύνοψη – Συμπεράσματα – Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

---

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης των αλλαγών χρήσεων γης στα χαρακτηριστικά της έκτασης που κατακλύζεται λόγω μιας πλημμύρας. Για την υλοποίηση του σκοπού αυτού, αξιοποιήθηκαν υπολογιστικά λογισμικά επεξεργασίας υδρολογικής, υδραυλικής και γεωγραφικής πληροφορίας.

Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε η λεκάνη απορροής του Ποταμού εισροής της Λίμνης Παραλιμνίου στην Κύπρο με έκταση περίπου 21 km<sup>2</sup>. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα βροχόπτωσης σε πεντάλεπτα χρονικό βήμα από γνωστό επεισόδιο ισχυρής βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης. Το επεισόδιο συνέβη στις 15/2/1988 και τότε είχε πλημμυρίσει η υπό μελέτη περιοχή καθόσον, μάλιστα, πρόκειται για το μεγαλύτερο σε ένταση επεισόδιο τα τελευταία 30 χρόνια. Ακόμη, για την περιοχή λήφθηκαν υπόψη οι χρήσεις γης που επικρατούσαν από το 1983 μέχρι το 2003 και από το 2006 μέχρι το 2016 σύμφωνα με το Τμήμα Πολεοδομίας και Οικήσεως.

Το μεθοδολογικό πλαίσιο διαχωρίστηκε σε δύο τμήματα, το υδρολογικό και το υδραυλικό. Τα στάδια και η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε παρουσιάστηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 4, ενώ στο τέλος των κεφαλαίων 5 και 6 παρατέθηκαν τα αποτελέσματα κάθε προσομοίωσης καθώς και οι τελικοί πλημμυρικοί χάρτες.

Όσον αφορά την υδρολογική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό HEC-HMS. Τα πρότυπα που επιλέχθηκαν περιορίστηκαν με βάση τα διαθέσιμα από το πρόγραμμα πρότυπα, αλλά κυρίως από την έλλειψη κατάλληλων δεδομένων. Για τον υπολογισμό των απωλειών βροχόπτωσης επιλέχθηκε το πρότυπο SCS, αφού ως δεδομένα απαιτεί μόνον το χάρτη χρήσεων γης και τον υδρολιθολογικό χάρτη. Ως πρότυπο άμεσης απορροής επιλέχθηκε το Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας και ως πρότυπο διόδευσης πλημμύρας διαμέσου υδατορεύματος η μέθοδος Muskingum. Η επιλογή της τελευταίας αυτής μεθόδου έγινε λόγω του ότι η χρήση της απαιτούσε μορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης που εύκολα προέκυψαν από τις υπολογιστικές διαδικασίες.

Η υδρολογική προσομοίωση εφαρμόστηκε και για τις δύο περιπτώσεις χρήσεων γης και από αυτή προέκυψαν τα πλημμυρικά υδρογραφήματα. Από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι σε όλες, εκτός από μια, τις υπολεκάνες που υπέστησαν αλλαγή στις χρήσεις γης αυξήθηκε η παροχή αιχμής. Παράλληλα η συνολική απορροή στην έξοδο της λεκάνης αυξήθηκε κατά ποσοστό 44.7%.

Όσον αφορά την υδραυλική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό HEC-RAS. Εδώ παρατηρείται το γνωστό πρόβλημα με την πιστή αποτύπωση της κοίτης του ποταμού. Το πρόβλημα οφείλεται στην αδυναμία αποτύπωσης του ανάγλυφου, αφού η ανάλυση του διατιθέμενου Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους φθάνει μέχρι το ένα μέτρο. Για να γίνει πιο σωστή και καλή αποτύπωση της κοίτης θα πρέπει να γίνουν μετρήσεις επιτόπου από τοπογραφικό συνεργείο. Ωστόσο, στα πλαίσια της παρούσας μελέτης αυτό δεν ήταν δυνατόν και γι' αυτό έγιναν αναγκαστικά, παραδοχές για τα υψόμετρα. Με βάση τα γεωμετρικά στοιχεία του ποταμού (όπως μηκοτομή, διατομές, χρήσεις γης, συντελεστής Manning, όχθες) έγινε προσομοίωση σε συνθήκες μόνιμης ροής λαμβάνοντας ως παροχή την παροχή αιχμής που

υπολογίστηκε από την υδρολογική προσομοίωση. Από την εφαρμογή της υδραυλικής προσομοίωσης και για τις δύο περιπτώσεις, παρήχθησαν τα πολύγωνα πλημμυρικής κατάκλυσης και οι κατανομές του πιεζομετρικού φορτίου.

Έχοντας ολοκληρώσει και τις δύο προσομοιώσεις υδρολογική και υδραυλική για τις περιπτώσεις διαφορετικών χρήσεων γης στην λεκάνη απορροής, έγινε η παραγωγή χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης για την κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

Η σύγκριση της κατακλυζόμενης περιοχής από τις δύο περιπτώσεις επιτρέπει το συμπέρασμα ότι η έκταση και το πλάτος της πλημμυρικής κατάκλυσης στην περιοχή μελέτης επηρεάστηκε σε σημαντικό βαθμό από την αλλαγή στις χρήσεις γης, ειδικά σε εκτάσεις με ήπια κλίση ανάγλυφου. Το εμβαδόν πλημμυρικής έκτασης από τις παλιές στις νέες χρήσεις γης αυξάνεται κατά ποσοστό 19.2%, ενώ το πλάτος (ή εγκάρσιο μήκος) τη κατάκλυσης κατά μήκος του ποταμού διαφέρει μέχρι και 133 m. Ακόμη, το ύψος του νερού από την κοίτη του ποταμού αυξάνεται κατά 45 cm στη δεύτερη, την πιο πρόσφατη περίοδο. Τα πιο πάνω συμπεράσματα επιβεβαιώνονται και από τις παραμέτρους CN και συντελεστή τραχύτητας  $n$  των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς με την αλλαγή στη χρήση γης αλλάζει και η τιμή των παραμέτρων αυτών. Έτσι, η αύξηση του CN οδηγεί σε μεγαλύτερο όγκο άμεσης απορροής, ενώ η αύξηση της υδραυλικής τραχύτητας αυξάνει την ταχύτητα ροής και, συνεπώς μειώνει το βάθος ροής και την συνεπακόλουθη έκταση της κατακλυζόμενης ζώνης.

Από την παρούσα μελέτη προέκυψε ότι η αστικοποίηση και η κοινωνική ανάπτυξη επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στις χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης οι οποίες επηρεάζουν την απόκριση μιας λεκάνης απορροής σε επεισόδια ισχυρής βροχόπτωσης. Συνεπώς, οι πλημμύρες θα έχουν μεγαλύτερες επιπτώσεις. Τα αναμενόμενα κόστη από τις ζημιές που θα προκαλέσουν θα είναι πολύ μεγαλύτερα, διότι η έκταση της πλημμύρας αυξάνεται.

Οι πλημμύρες λοιπόν, αποτελούν αναμφίβολα ένα από τους πιο επιβλαβείς και δαπανηρούς φυσικούς κινδύνους, προκαλώντας μεγάλες καταστροφές. Η σημασία εκτίμησης του κινδύνου πλημμυρικής κατάκλυσης είναι συνεπώς μεγάλη. Εδώ τονίζεται η συμβολή του μηχανικού στην μελέτη, την αξιολόγηση και την πρόβλεψη των πλημμύρων και πιο συγκεκριμένα των πλημμυρικών κινδύνων και καταστροφών. Όπως έχει επισημάνει και ο Pielke (2000), *“Η σχέση ανάμεσα σε υδρολογικές και καταστροφικές πλημμύρες είναι ελάχιστη, ακόμη και αν γνωρίζουμε πολλά για τις υδρολογικές πλημμύρες σε μια περιοχή, λίγα μπορεί να γνωρίζουμε για τις καταστροφικές πλημμύρες. Η καταστροφικές πλημμύρες προκύπτουν από συνδυασμό φυσικών και κοινωνικών διεργασιών”*.

Παρόλα αυτά οι χάρτες επικινδυνότητας, αν και μπορεί να θεωρούνται ως ένας καλός δείκτης για την πρόβλεψη του κινδύνου πλημμύρας, δεν αποτελούν από μόνοι τους απόλυτη μέθοδο για προστασία. Περαιτέρω δράσεις και μέτρα μπορούν να εφαρμοστούν σε συνδυασμό με τους χάρτες αυτούς για την καλύτερη αντιμετώπιση των επιπτώσεων πλημμύρας. Μερικά παραδείγματα κατασκευαστικών μέτρων είναι η κατασκευή αντιπλημμυρικών ταμιευτήρων στα ανάντη των λεκανών, αναχώματα και προστατευτικοί τοίχοι, δίκτυα ομβρίων, αύξησης της παροχευτικότητας των ποταμών με καθαρισμό και εκβάθυνση των διατομών και άλλα πολλά. Εξίσου σημαντικοί μη κατασκευαστικοί τρόποι αντιμετώπισης είναι η διατήρηση και η επέκταση των δασών στις περιοχές των λεκανών, προσαρμογή των χρήσεων γης στις επικίνδυνες περιοχές και στις όχθες των ποταμών με κατάλληλες νομοθεσίες, θέσπιση νομοθεσιών για πρόληψη αντιπλημμυρικής προστασίας σε νέα κτήρια, συστήματα προειδοποίησης του κοινού και κυρίως σωστή ενημέρωση από έμπιστους και έγκυρους οργανισμούς προς το κοινό για τους κινδύνους και αναίρεση της αντίληψης για απόλυτη προστασία.

Τέλος, προτείνεται για μελλοντική έρευνα η ακριβής αποτύπωση της κοίτης των ρεμάτων καθώς και των πεδίων πλημμυρών και όλων των επιφανειών, αδιαπέρατων και μη, στην λεκάνη απορροής, συμπεριλαμβανομένων όλων των εμποδίων στη ροή όπως είναι κτίρια, φράκτες και επιχώματα οδών. Ακόμη, είναι σκόπιμη η καταγραφή, σε ενιαία βάση δεδομένων, όλων των δεδομένων που είναι απαραίτητα για την εκτίμηση της πλημμυρικής ζημιάς. Τα παραπάνω θα επιτρέψουν μια πιο αξιόπιστη εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου και της πλημμυρικής διακινδυνευσης στην περιοχή που μελετήθηκε.



## Αναφορές

---

### Στην ελληνική γλώσσα

- Αντωνίου, Θ. (2013). *Η επίδραση των κοιλοτήτων του εδάφους στην εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου σε οδικά δίκτυα*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κουτσογιάννης, Δ., & Ξανθόπουλος, Θ. (1999). *ΤΕΧΝΙΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ* Έκδοση 3. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μαμάσης, Ν. (2007). *Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά Έργα*. Αθήνα, Ελλάδα.
- Τμήμα Πολεοδομίας και Οικήσεως, (2009). *Τοπικό Σχέδιο Παραλιμνίου*. Λευκωσία: Κυπριακή Δημοκρατία.
- Παγάνα, Β. Ε. (2012). *ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΡΑΦΗΝΑΣ*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Πασιαρδής, Σ. (2012). *ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ, Αρ. 18*. Λευκωσία: Κυπριακή Δημοκρατία.
- Πασιαρδής, Σ. (2009). *ΣΕΙΡΑ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΗΜΕΙΩΜΑΤΩΝ Αρ. 15*. Λευκωσία: Κυπριακή Δημοκρατία.
- Τσακίρης, Γ. (2013). *Υδατικοί Πόροι: I. Τεχνική Υδρολογία & Εισαγωγή στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων*. Αθήνα: Συμμετρία.

### Ξενόγλωσσες

- Brown, J., & Damery, S. (2002). *Managing flood risk in the UK: towards an integration of social and technical perspectives*. Transactions OF THE INSTITUTE OF BRITISH GEOGRAPHERS, 412-426.
- Brunner, G. W. (2010). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.
- Brunner, G. W., & CEIWR-HEC. (2010). *HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 4.1*. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.
- Chow, V. T. (1959). *The Table of Manning's Roughness Coefficient*. In V. T. Chow, *Open Channel Hydraulics* (pp. 108-113). McGRAH-HILL BOOK COMPANY.
- US Army Corps of Engineers. (1994). *Flood - Runoff Analysis*. Washigton: Engineer Manual.
- European Council. (2007). *EU Directive of the European Parliament and of the European Council on the assessment and management of flood risks*. 2007/60/EU.
- Feldman, A. D. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.
- Fleming, M. J., & Doan, J. H. (2009). *HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension*. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.

- Koutsoyiannis, D., & Baloutsos, G. (2000). *Analysis of long record of annual maximum rainfall in Athens, Greece, and design rainfall references*. *Natural Hazards*, 31-51.
- Maidment, D., & Djokic, D. D. (2000). *Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems*. California: ESRI.
- Merz, B., Hall, J., Disse, M., & Scumann, A. (2010). *Fluvial flood risk management in a changing world*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 509-527.
- Montanari, A. et al. (2013). *"Panta Rhei-Everythnid Flows": Change in hydrology and society - The IAHS Scientific Decade 2013-2022*. *Hydrological Sciences Journal*, 1256-1275.
- Nalbantis, I., and Lymperopoulos, S., Assessment of flood frequency after forest fires in small ungauged basins based on uncertain measurements, *Hydrological Sciences Journal*, 57(1), 52-72, 2012.
- Scharffenberg, W. A., & Fleming, M. J. (2010). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual*. Washington: US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.
- SCS, S. C. (1972). In *National Engineering Handbook Section 4*. Washington D.C
- Tsakiris, G., I. Nalbantis, and A. Pistrika, Critical technical issues on the EU Flood Directive, *European Water*, 25/26, 39-51, 2009..

### **Διαδικτυακοί τόποι**

- Δήμος Παραλιμνίου. (2016). Ανάκτηση 8 28, 2016, από <http://www.paralimni.org.cy/>
- Στατιστική Υπηρεσία της Κυπριακής Δημοκρατίας. (2016). Ανάκτηση 8 28, 2016, από <http://www.mof.gov.cy/mof/cystat/statistics.nsf>
- Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων. (2016). Ανάκτηση 09 2, 2016, από <http://www.moa.gov.cy/moa/wdd>
- Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης. (2016). Ανάκτηση 7 15, 2016, από [http://www.moa.gov.cy/moa/gsd/gsd.nsf/dmlindex\\_gr/dmlindex\\_gr?OpenDocument](http://www.moa.gov.cy/moa/gsd/gsd.nsf/dmlindex_gr/dmlindex_gr?OpenDocument)
- Τμήμα Πολεοδομίας και Οικήσεως. (2016). Ανάκτηση 8 29, 2016, από <http://www.moi.gov.cy/moi/tph/tph.nsf>

## Παράρτημα Α: Πίνακες

Πίνακας Α.1: Υπολογισμοί παραμέτρων Muskingum

Ποταμός	Μήκος Ποταμού (m)	Ταχύτητα νερού (m/s)	Παράμετρος X	Χρόνος διαδρομής (h)	Αριθμός παραπόταμων
R110	362.927	1.0	0.2	0.10	1
R80	1557.711	1.0	0.2	0.43	3
R50	194.989	1.0	0.2	0.05	1
R40	1482.458	1.0	0.2	0.41	2
R30	244.035	1.0	0.2	0.07	1
R10	771.438	1.0	0.2	0.21	2

Πίνακας Α.2: Υπολογισμός ΜΥΓ

Υπολεκάνη	Εμβαδόν (km <sup>2</sup> )	Μήκος (km)	Μέσο υψόμετρο (m)	Ελάχιστο υψόμετρο (m)	Υψομετρική διαφορά (m)
W140	0.770	1.278	76.4	68.6	7.7
W150	1.459	1.656	93.4	69.9	23.5
W160	0.677	1.391	78.4	70.8	7.6
W170	0.216	0.697	74.6	70.6	4.0
W190	2.038	0.851	79.7	70.6	9.1
W200	1.319	1.495	97.7	74.3	23.4
W210	1.109	1.821	100.2	74.7	25.5
W220	1.636	1.196	82.3	74.5	7.8
W230	0.629	1.509	102.5	79.8	22.7
W250	0.799	1.184	111.6	86.0	25.6
W260	0.884	1.120	122.9	86.0	36.9
	t <sub>c</sub>	t <sub>p</sub>	Q <sub>p</sub>	t <sub>b</sub>	
W140	4.372	2.665	0.636	6.715	
W150	5.473	3.325	0.966	8.380	
W160	4.235	2.583	0.576	6.509	
W170	2.509	1.547	0.307	3.898	
W190	6.240	3.786	1.184	9.540	
W200	5.182	3.145	0.922	7.826	
W210	4.887	2.974	0.820	7.495	
W220	5.918	3.593	1.002	9.054	
W230	3.765	2.301	0.601	5.798	
W250	4.016	2.451	0.718	6.177	
W260	4.137	2.524	0.770	6.360	

TABLE 5-6. VALUES OF THE ROUGHNESS COEFFICIENT  $n$   
(Boldface figures are values generally recommended in design)

Type of channel and description	Minimum	Normal	Maximum
<b>A. CLOSED CONDUITS FLOWING PARTLY FULL</b>			
<b>A-1. Metal</b>			
a. Brass, smooth	0.009	<b>0.010</b>	0.013
b. Steel			
1. Lockbar and welded	0.010	0.012	0.014
2. Riveted and spiral	0.013	0.016	0.017
c. Cast iron			
1. Coated	0.010	0.013	0.014
2. Uncoated	0.011	0.014	0.016
d. Wrought iron			
1. Black	0.012	0.014	0.015
2. Galvanized	0.013	0.016	0.017
e. Corrugated metal			
1. Subdrain	0.017	0.019	0.021
2. Storm drain	0.021	<b>0.024</b>	0.030
<b>A-2. Nonmetal</b>			
a. Lucite	0.008	0.009	0.010
b. Glass	0.009	<b>0.010</b>	0.013
c. Cement			
1. Neat, surface	0.010	0.011	0.013
2. Mortar	0.011	0.013	0.015
d. Concrete			
1. Culvert, straight and free of debris	0.010	0.011	0.013
2. Culvert with bends, connections, and some debris	0.011	<b>0.013</b>	0.014
3. Finished	0.011	0.012	0.014
4. Sewer with manholes, inlet, etc., straight	0.013	0.015	0.017
5. Unfinished, steel form	0.012	0.013	0.014
6. Unfinished, smooth wood form	0.012	<b>0.014</b>	0.016
7. Unfinished, rough wood form	0.015	0.017	0.020
e. Wood			
1. Stave	0.010	0.012	0.014
2. Laminated, treated	0.015	0.017	0.020
f. Clay			
1. Common drainage tile	0.011	<b>0.013</b>	0.017
2. Vitrified sewer	0.011	0.014	0.017
3. Vitrified sewer with manholes, inlet, etc.	0.013	0.015	0.017
4. Vitrified subdrain with open joint	0.014	<b>0.016</b>	0.018
g. Brickwork			
1. Glazed	0.011	0.013	0.015
2. Lined with cement mortar	0.012	0.015	0.017
h. Sanitary sewers coated with sewage slimes, with bends and connections	0.012	0.013	0.016
i. Paved invert, sewer, smooth bottom	0.016	0.019	0.020
j. Rubble masonry, cemented	0.018	0.025	0.030



TABLE 5-6. VALUES OF THE ROUGHNESS COEFFICIENT  $n$  (continued)

Type of channel and description	Minimum	Normal	Maximum
<b>B. LINED OR BUILT-UP CHANNELS</b>			
B-1. Metal			
a. Smooth steel surface			
1. Unpainted	0.011	<b>0.012</b>	0.014
2. Painted	0.012	0.013	0.017
b. Corrugated	0.021	0.025	0.030
B-2. Nonmetal			
a. Cement			
1. Neat, surface	0.010	0.011	0.013
2. Mortar	0.011	0.013	0.015
b. Wood			
1. Planed, untreated	0.010	0.012	0.014
2. Planed, creosoted	0.011	0.012	0.015
3. Unplaned	0.011	0.013	0.015
4. Plank with battens	0.012	0.015	0.018
5. Lined with roofing paper	0.010	0.014	0.017
c. Concrete			
1. Trowel finish	0.011	<b>0.013</b>	0.015
2. Float finish	0.013	0.015	0.016
3. Finished, with gravel on bottom	0.015	0.017	0.020
4. Unfinished	0.014	0.017	0.020
5. Gunite, good section	0.016	0.019	0.023
6. Gunite, wavy section	0.018	0.022	0.025
7. On good excavated rock	0.017	0.020	
8. On irregular excavated rock	0.022	0.027	
d. Concrete bottom float finished with sides of			
1. Dressed stone in mortar	0.015	0.017	0.020
2. Random stone in mortar	0.017	0.020	0.024
3. Cement rubble masonry, plastered	0.016	0.020	0.024
4. Cement rubble masonry	0.020	0.025	0.030
5. Dry rubble or riprap	0.020	0.030	0.035
e. Gravel bottom with sides of			
1. Formed concrete	0.017	0.020	0.025
2. Random stone in mortar	0.020	0.023	0.026
3. Dry rubble or riprap	0.023	0.033	0.036
f. Brick			
1. Glazed	0.011	<b>0.013</b>	0.015
2. In cement mortar	0.012	<b>0.015</b>	0.018
g. Masonry			
1. Cemented rubble	0.017	0.025	0.030
2. Dry rubble	0.023	0.032	0.035
h. Dressed ashlar	0.013	0.015	0.017
i. Asphalt			
1. Smooth	0.013	0.013	
2. Rough	0.016	0.016	
j. Vegetal lining	0.030	.....	0.500

TABLE 5-6. VALUES OF THE ROUGHNESS COEFFICIENT  $n$  (continued)

Type of channel and description	Minimum	Normal	Maximum
<b>C. EXCAVATED OR DREDGED</b>			
<i>a.</i> Earth, straight and uniform			
1. Clean, recently completed	0.016	0.018	0.020
2. Clean, after weathering	0.018	0.022	0.025
3. Gravel, uniform section, clean	0.022	0.025	0.030
4. With short grass, few weeds	0.022	0.027	0.033
<i>b.</i> Earth, winding and sluggish			
1. No vegetation	0.023	0.025	0.030
2. Grass, some weeds	0.025	0.030	0.033
3. Dense weeds or aquatic plants in deep channels	0.030	0.035	0.040
4. Earth bottom and rubble sides	0.028	0.030	0.035
5. Stony bottom and weedy banks	0.025	0.035	0.040
6. Cobble bottom and clean sides	0.030	0.040	0.050
<i>c.</i> Dragline-excavated or dredged			
1. No vegetation	0.025	0.028	0.033
2. Light brush on banks	0.035	0.050	0.060
<i>d.</i> Rock cuts			
1. Smooth and uniform	0.025	0.035	0.040
2. Jagged and irregular	0.035	0.040	0.050
<i>e.</i> Channels not maintained, weeds and brush uncut			
1. Dense weeds, high as flow depth	0.050	0.080	0.120
2. Clean bottom, brush on sides	0.040	0.050	0.080
3. Same, highest stage of flow	0.045	0.070	0.110
4. Dense brush, high stage	0.080	0.100	0.140
<b>D. NATURAL STREAMS</b>			
D-1. Minor streams (top width at flood stage <100 ft)			
<i>a.</i> Streams on plain			
1. Clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
2. Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
3. Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
4. Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
5. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
6. Same as 4, but more stones	0.045	0.050	0.060
7. Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
8. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stand of timber and underbrush	0.075	0.100	0.150

TABLE 5-6. VALUES OF THE ROUGHNESS COEFFICIENT  $n$  (continued)

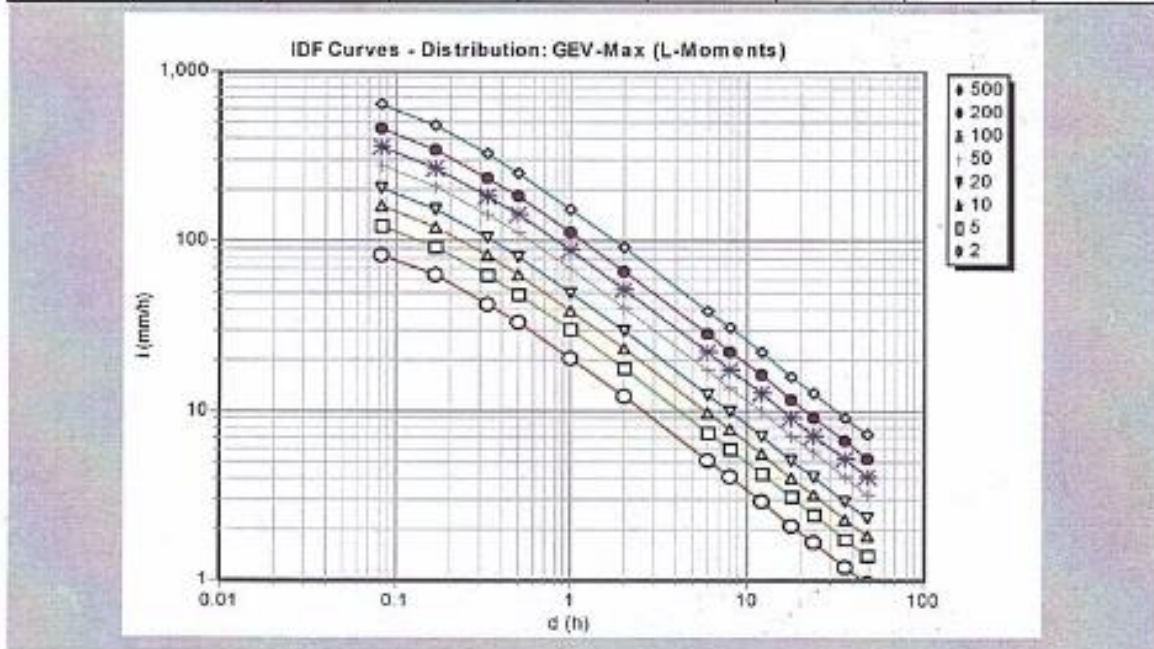
Type of channel and description	Minimum	Normal	Maximum
b. Mountain streams, no vegetation in channel, banks usually steep, trees and brush along banks submerged at high stages			
1. Bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
2. Bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070
D-2. Flood plains			
a. Pasture, no brush			
1. Short grass	0.025	0.030	0.035
2. High grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. No crop	0.020	0.030	0.040
2. Mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. Mature field crops	0.030	0.040	0.050
c. Brush			
1. Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. Light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. Light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. Medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. Medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d. Trees			
1. Dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200
2. Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
3. Same as above, but with heavy growth of sprouts	0.050	0.060	0.080
4. Heavy stand of timber, a few down trees, little undergrowth, flood stage below branches	0.080	0.100	0.120
5. Same as above, but with flood stage reaching branches	0.100	0.120	0.160
D-3. Major streams (top width at flood stage >100 ft). The $n$ value is less than that for minor streams of similar description, because banks offer less effective resistance.			
a. Regular section with no boulders or brush	0.025	.....	0.060
b. Irregular and rough section	0.035	.....	0.100



## Παράρτημα Β: Σχήματα

Κατανομή Γενική Ακραίων Τιμών, ΓΑΤ- Μ ( GEV-MAX ) ( L - ροπές )

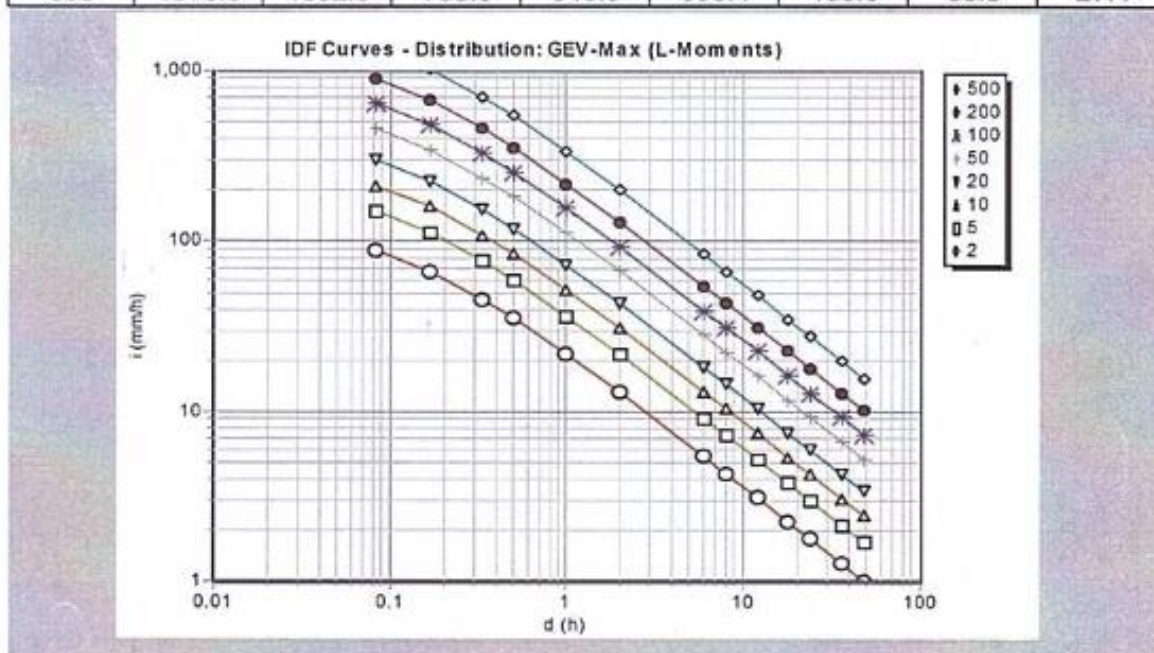
T (έτη) Περίοδος Επανα- φοράς	Σταθμός : ΑΓΙΑ ΝΑΠΑ (ΑΣΤ. ΣΤ.)							
	$\eta = 0.814$				$\theta = 0.113$			
	5 min.	10 min.	20 min.	30 min.	1 hrs.	2 hrs.	6 hrs.	24 hrs.
2	83.4	62.5	42.7	33.0	20.3	12.1	5.1	1.7
5	122.9	92.2	63.0	48.7	29.9	17.8	7.5	2.5
10	159.2	119.4	81.6	63.0	38.8	23.0	9.7	3.2
20	204.4	153.2	104.7	80.9	49.8	29.5	12.4	4.1
50	282.6	211.9	144.8	111.9	68.8	40.9	17.2	5.6
100	360.5	270.3	184.7	142.7	87.8	52.1	21.9	7.2
200	459.6	344.6	235.5	181.9	112.0	66.4	28.0	9.2
500	633.6	475.0	324.7	250.8	154.3	91.6	38.6	12.6



Σχήμα Β.1: Όμβρια καμπύλη περιοχής Αγία Νάπα (Πασιαρδής, 2009).

Κατανομή Γενική Ακραίων Τιμών, ΓΑΤ- Μ ( GEV-MAX ) ( L - ροπές )

T (έτη) Περίοδος Επανα- φοράς	Σταθμός : ΣΩΤΗΡΑ (ΑΜΜΟΧΩΣΤΟΥ)							
	$\eta = 0.814$				$\theta = 0.113$			
	5 min.	10 min.	20 min.	30 min.	1 hrs.	2 hrs.	6 hrs.	24 hrs.
2	88.8	66.6	45.5	35.2	21.6	12.8	5.4	1.8
5	149.8	112.3	76.8	59.3	36.5	21.7	9.1	3.0
10	212.5	159.3	108.9	84.1	51.8	30.7	12.9	4.2
20	297.7	223.2	152.6	117.8	72.5	43.0	18.1	5.9
50	461.5	346.0	236.5	182.7	112.4	66.7	28.1	9.2
100	641.7	481.1	328.8	254.0	156.3	92.8	39.1	12.8
200	891.6	668.5	456.9	352.9	217.2	128.9	54.3	17.8
500	1376.8	1032.3	705.6	545.0	335.4	199.0	83.8	27.4

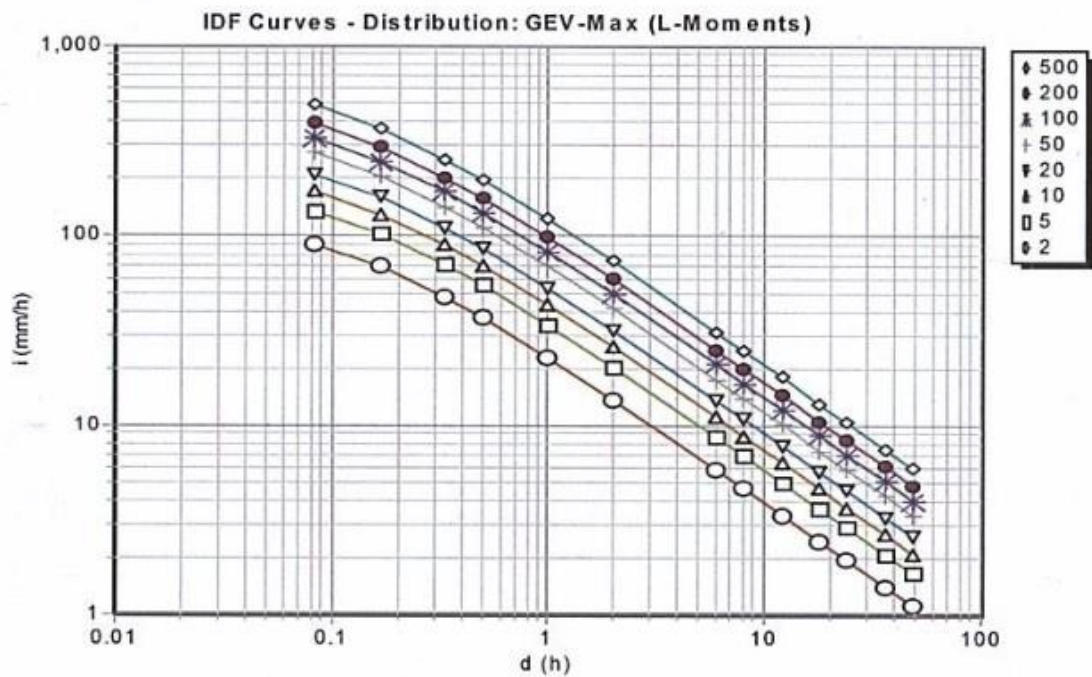


Σχήμα Β.2: Όμβρια καμπύλη περιοχής Σωτήρα (Πασιαρδής, 2009).

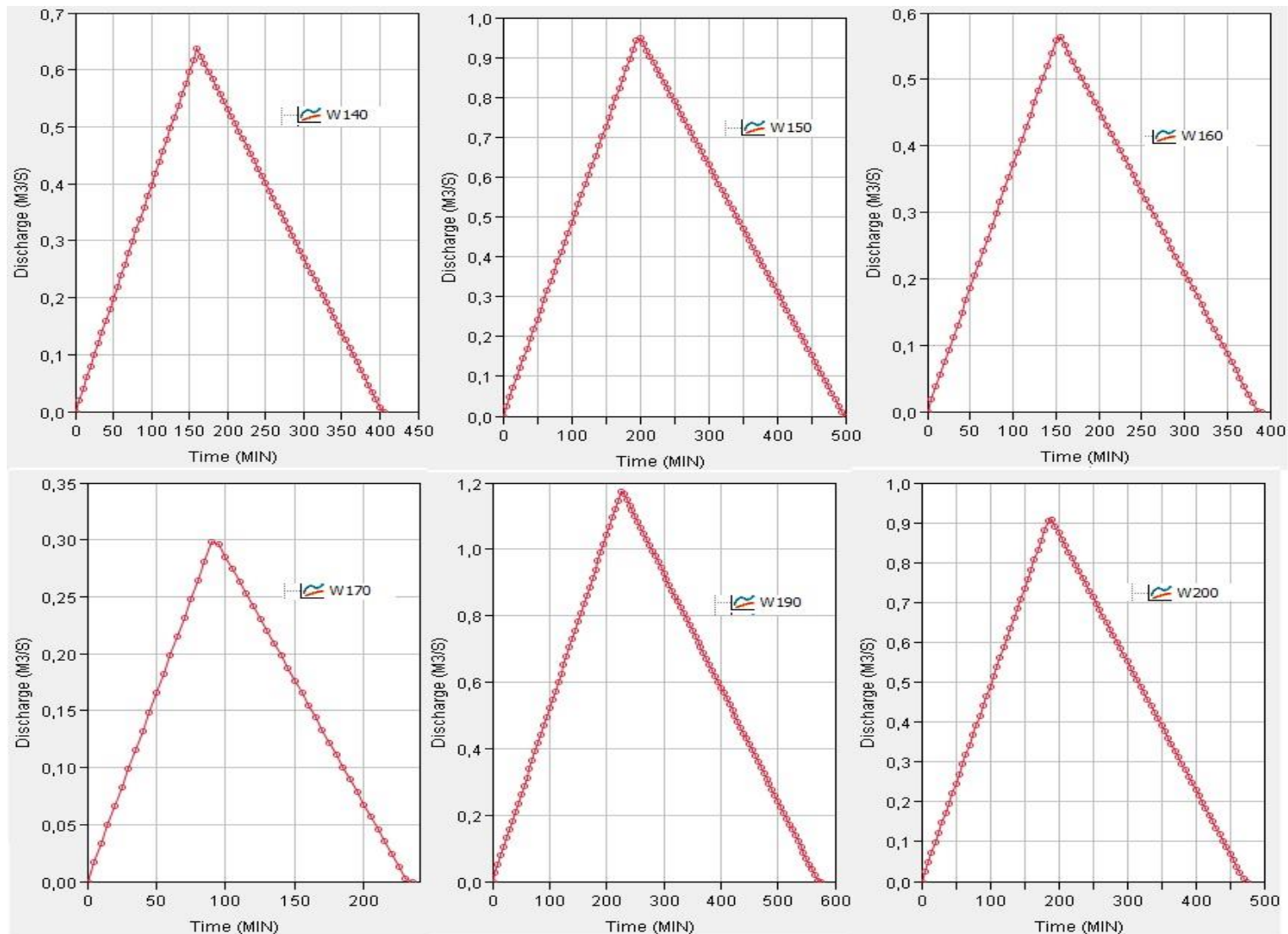


Κατανομή Γενική Ακραίων Τιμών, ΓΑΤ- Μ ( GEV-MAX ) ( L - ροπές )

T (έτη) Περίοδος Επανα- φοράς	Σταθμός : ΠΑΡΑΛΙΜΝΙ (ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΟ)							Αρ. Σταθ. : 889
	η = 0.802			θ = 0.115				
	5 min.	10 min.	20 min.	30 min.	1 hrs.	2 hrs.	6 hrs.	24 hrs.
2	90.9	68.6	47.2	36.7	22.8	13.6	5.8	1.9
5	135.8	102.5	70.6	54.8	34.0	20.4	8.7	2.9
10	171.8	129.7	89.3	69.3	43.0	25.8	11.0	3.7
20	211.9	159.9	110.2	85.5	53.1	31.8	13.6	4.5
50	273.4	206.4	142.2	110.3	68.5	41.0	17.5	5.8
100	327.8	247.4	170.4	132.3	82.1	49.1	21.0	7.0
200	390.2	294.6	202.9	157.5	97.7	58.5	25.0	8.3
500	487.4	367.9	253.5	196.7	122.1	73.1	31.2	10.4

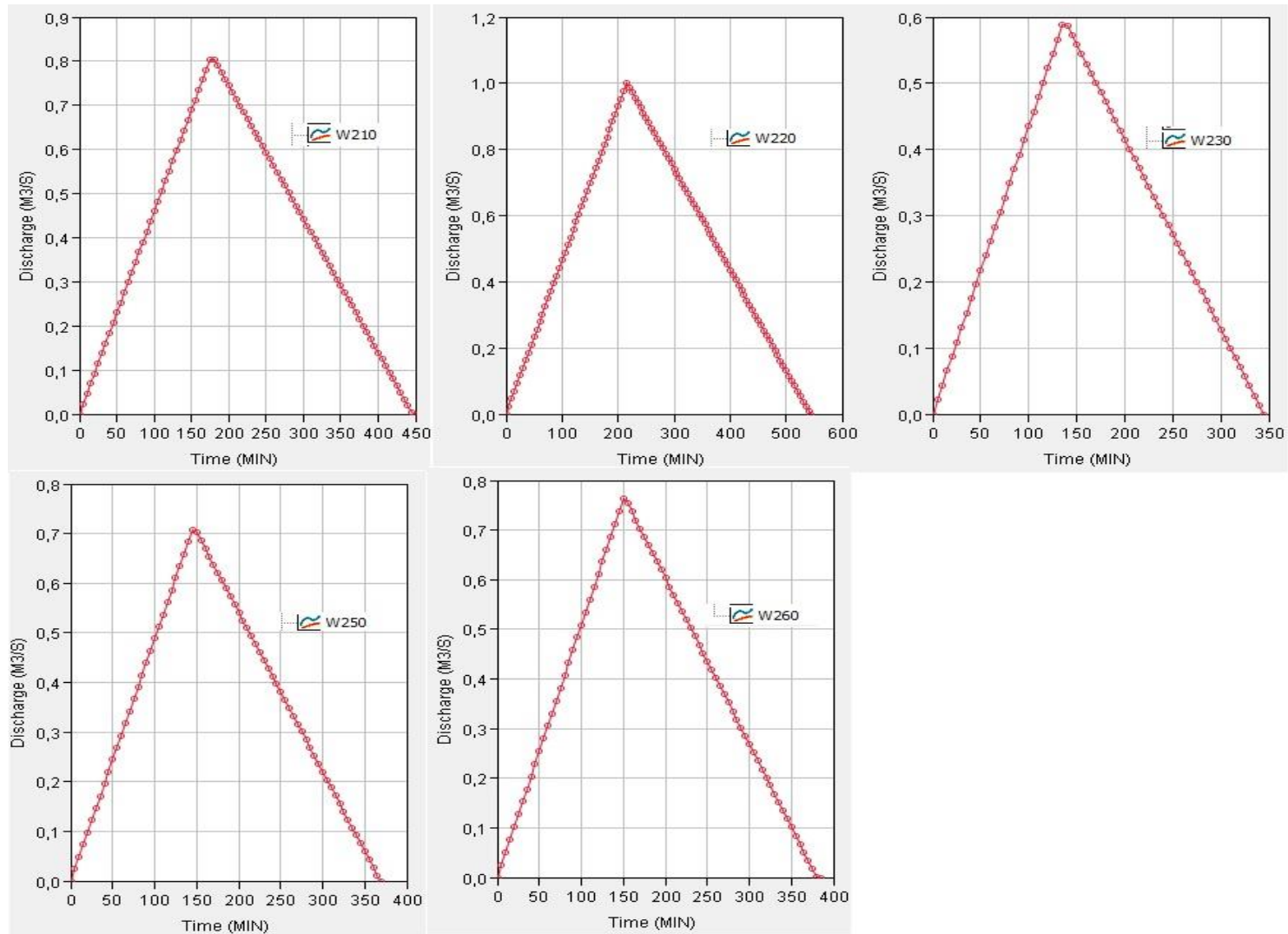


Σχήμα Β.3: Όμβρια καμπύλη περιοχής Παραλίμνι (Πασιαρδής, 2012).

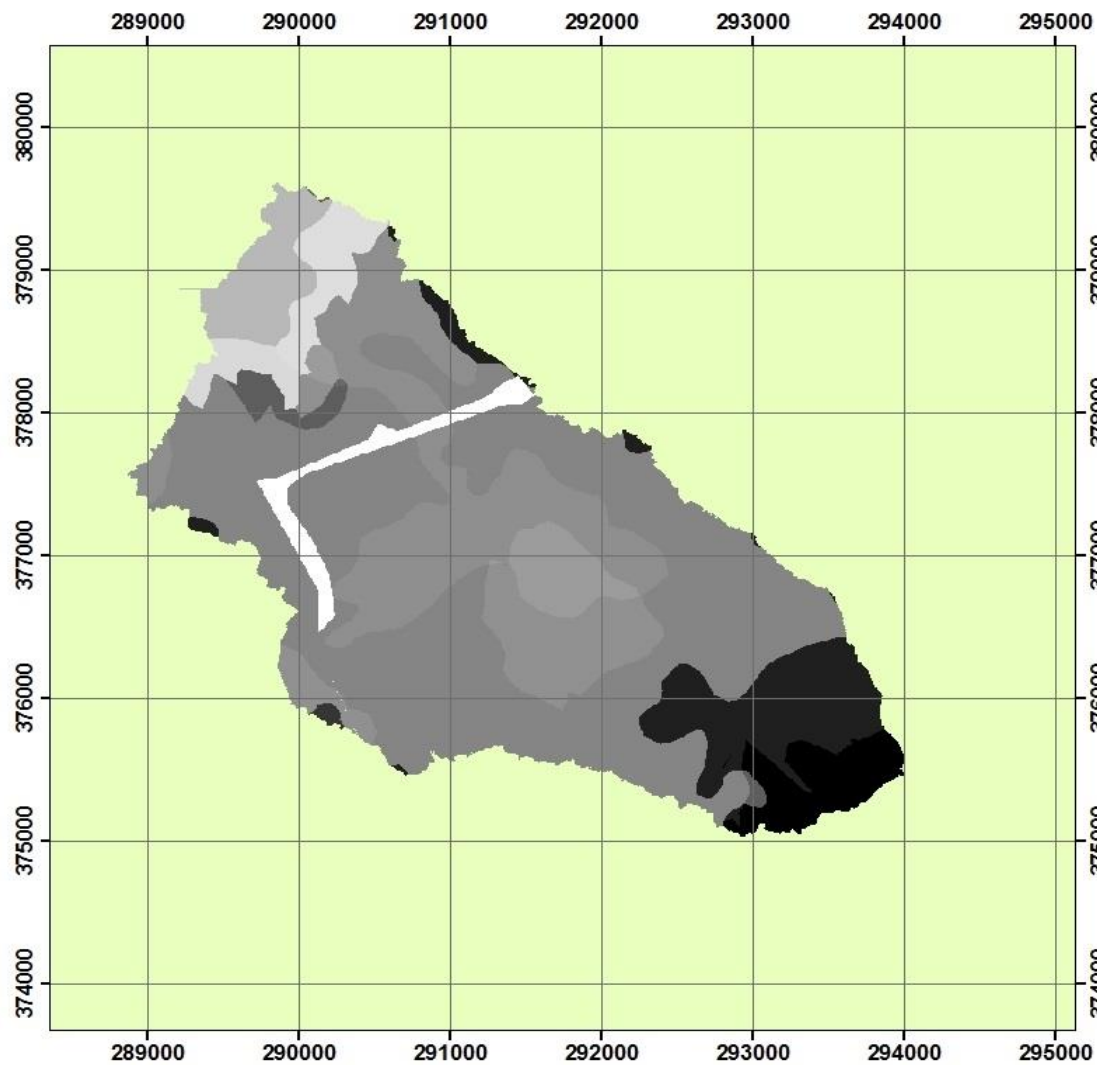


Σχήμα Β.4: ΜΥΓ υπολεκάνων W150-W200.





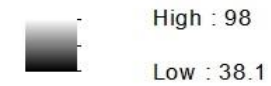
Σχήμα Β.5: ΜΥΓ υπολεκάνων W210-W260.



**Κάναβος CN**  
**Χρήσεις γης 1983-2003**

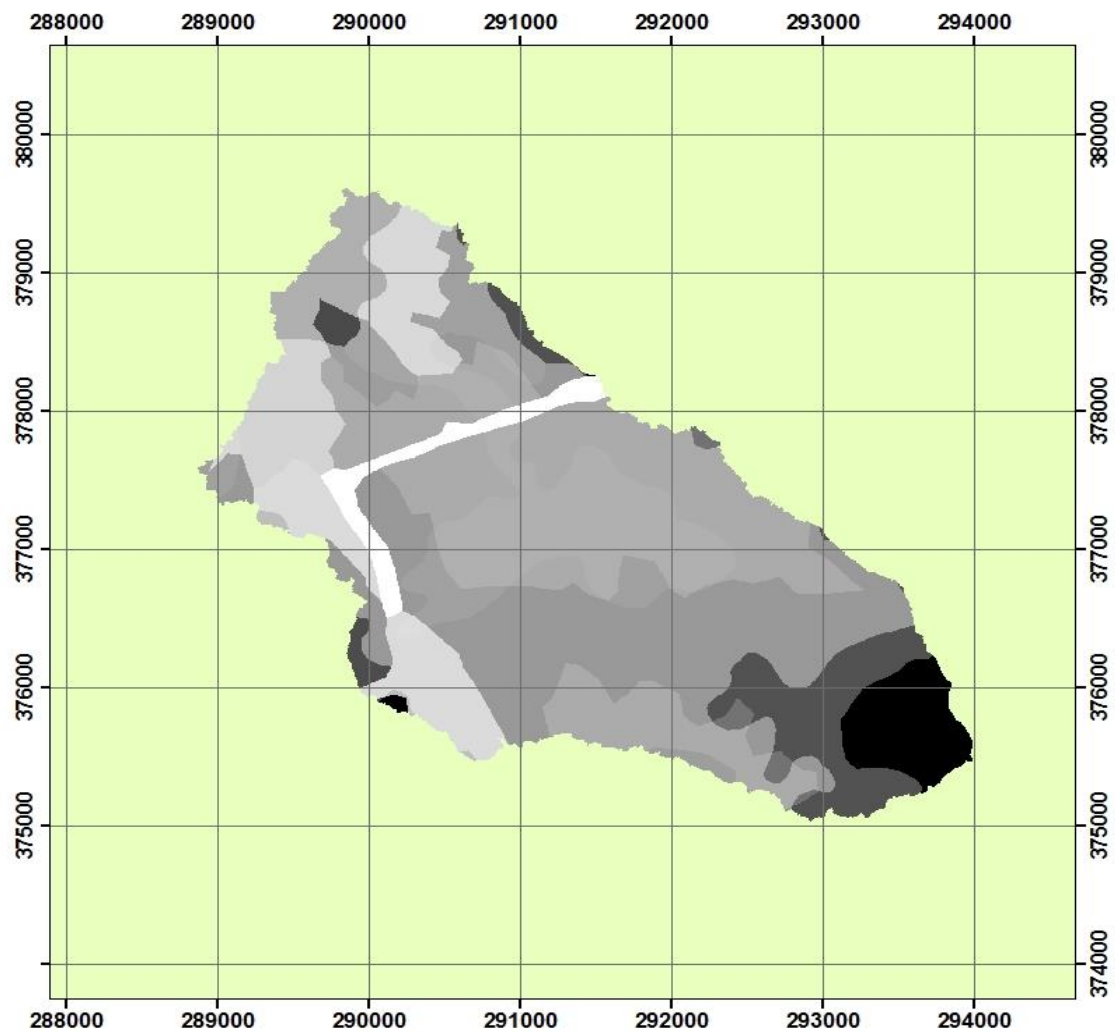
**Υπόμνημα**

**CN Grid**



Κλίμακα 1:35000

Σχήμα Β.6: Κάναβος CN.



**Κάνναβος CN**  
**Χρήσεις γης 2006-2016**

## Υπόμνημα

### CN Grid



Κλίμακα 1:35000

Σχήμα Β.7: Κάνναβος CN.