

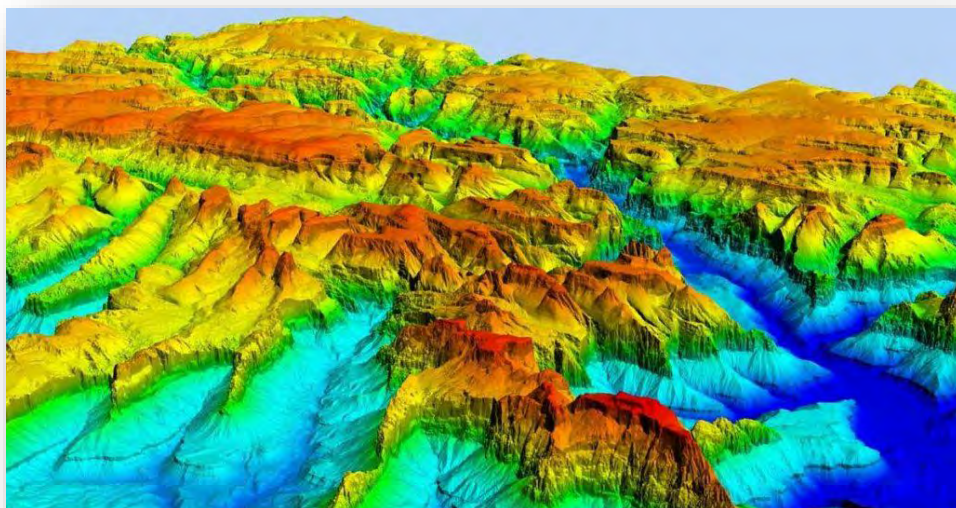


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

*Διπλωματική Εργασία*

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΩΝ**  
**ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΤΗΝ**  
**ΠΛΗΜΜΥΡΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ:**

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΛΕΚΑΝΗ ΞΗΡΙΑΣ ΑΛΜΥΡΟΥ**  
**ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ**



**ΠΙΤΣΙΟΥΓΚΑ ΒΑΣΙΛΕΙΑ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση  
του

Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

©2023 Πιτσιούγκα Βασιλεία

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής :**

|                                 |                                                                                                      |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Πρώτος Εξεταστής<br>(Επιβλέπων) | Δρ. Λάμπρος Βασιλειάδης<br>Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο<br>Θεσσαλίας |
| Δεύτερος<br>Εξεταστής           | Δρ. Νικήτας Μυλόπουλος<br>Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας               |
| Τρίτος Εξεταστής                | Δρ. Βασιλική Κατσαρδή<br>Επίκουρος Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο<br>Θεσσαλίας  |

## **Ευχαριστίες**

Με το πέρας της διπλωματικής μου εργασίας, οφείλω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση του εγχειρήματος αυτού. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Λάμπρο Βασιλειάδη, για την πολύτιμη βοήθεια του και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Τον ευχαριστώ θερμά, καθώς ήταν πάντα πρόθυμος να λύσει οποιαδήποτε απορία, ενώ η πρόθυμη συνεργασία και υποστήριξη του καθ' όλη την διάρκεια διεκπεραίωσης της διπλωματικής ήταν πολύ σημαντική. Ακόμη, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους κ. Νικήτα Μυλόπουλο και την κ. Βασιλική Κατσαρδή που δέχτηκαν να αποτελέσουν μέρος της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής. Τέλος, ευχαριστώ την αδερφή και τους γονείς μου, για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πιτσιούγκα Βασιλεία,  
Βόλος, Ιούνιος 2023

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΩΝ  
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΤΗΝ  
ΠΛΗΜΜΥΡΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ:  
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΛΕΚΑΝΗ ΞΗΡΙΑΣ ΑΛΜΥΡΟΥ  
ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ**

Πιτσιούγκα Βασιλεία

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2023

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Λάμπρος Βασιλειάδης, Επίκουρος Καθηγητής

### **Περίληψη**

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την υδρολογική προσομοίωση του ρέματος Ξεριά στο περιβάλλον του προγράμματος HEC-HMS. Αντικείμενο της περιοχής μελέτης αποτελεί η λεκάνη απορροής του ρέματος Ξεριά Αλμυρού. Για την εις βάθος μελέτη της λεκάνης απορροής, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DEM), που πάρθηκαν από διαφορετικούς δορυφόρους όπως Copernicus, Aster GDEM V3 καθώς και ESRI. Η αρχική μορφή των μοντέλων εδάφους είναι σε μορφή raster ή μωσαϊκού και αφορά ολόκληρη την Ελλάδα, οπότε και απαιτήθηκε η επεξεργασία της περιοχής μελέτης μέσω των εργαλείων του ArcGIS, για να καταστεί δυνατή η εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό υδρολογικής προσομοίωσης HEC-HMS. Η παροχή σχεδιασμού υπολογίστηκε για περίοδο επαναφοράς 100 ετών, τόσο για μέσες συνθήκες εδαφικής υγρασίας (CNII) όσο και για υγρές (CNIII). Επιπρόσθετα, για την όσο το δυνατό ρεαλιστικότερη παραγωγή αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι υπολογισμού της παραμέτρου CN, αυτής της κλασικής μεθόδου SCS-CN αλλά και μια αναλυτικότερης μεθόδου. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν της προσομοίωσης που διεξάχθηκε.

# **EFFECT OF THE GEOMORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS ON THE FLOOD DESIGN:**

## **Application in Xerias Almyrou river basin**

Pitsiougka Vasileia

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2023

Supervisor: Dr. Lampros Vasileiades, Assistant Professor

### **Abstract**

This thesis deals with the hydrologic modelling of the Xerias river basin using HEC-HMS. The object of the study area is the catchment area of the Xerias stream of Almyros. For the in-depth study of the watershed, four digital terrain models (DEM), taken from different satellites such as Copernicus, Aster GDEM V3 as well as ESRI were used. The initial format of the terrain models is in raster or mosaic format for the whole of Greece, so the study area required processing through ArcGIS tools to enable data input into the HEC-HMS hydrological simulation software. The design discharge was calculated for a return period of 100 years for both average soil moisture conditions (CNII) and wet (CNIII). In addition, in order to produce results as realistically as possible, two different methods of calculating the CN parameter were used, that of the classical SCS-CN method and a more analytical method. Finally, the results and conclusions obtained from the simulation carried out are presented.

## Πίνακας Περιεχομένων

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Πίνακας Περιεχομένων.....                                                                                              | 6  |
| Κατάλογος Πινάκων .....                                                                                                | 8  |
| Κατάλογος Σχημάτων .....                                                                                               | 9  |
| Κεφάλαιο 1ο : Εισαγωγή .....                                                                                           | 11 |
| 1.1 Γενικά.....                                                                                                        | 11 |
| 1.1.1 Υδρολογικός Κύκλος του νερού .....                                                                               | 11 |
| 1.2 Πλημμύρες.....                                                                                                     | 13 |
| 1.2.1 Πλημμύρες στον Ελληνικό χώρο.....                                                                                | 16 |
| 1.3 Εφαρμογή Θεσμικού Πλαισίου.....                                                                                    | 17 |
| 1.3.1 Εφαρμογή Οδηγίας 2000/60/ΕΚ.....                                                                                 | 17 |
| 1.3.2 Εφαρμογή Οδηγίας 2007/60/ΕΚ.....                                                                                 | 18 |
| 1.4 Σκοπός της εργασίας.....                                                                                           | 20 |
| 1.5 Τρόπος διάρθρωσης της εργασίας .....                                                                               | 21 |
| Κεφάλαιο 2ο : Περιοχή μελέτης.....                                                                                     | 22 |
| 2.1 Γενικά Στοιχεία.....                                                                                               | 22 |
| 2.2 Γεωμορφολογικά Χαρακτηριστικά.....                                                                                 | 23 |
| 2.3 Πληθυσμός.....                                                                                                     | 24 |
| 2.4 Κλιματικά - Μετεωρολογικά δεδομένα .....                                                                           | 25 |
| 2.5 Καθορισμός Ζωνών Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας .....                                                          | 26 |
| Κεφάλαιο 3ο : Ανάλυση Δεδομένων.....                                                                                   | 28 |
| 3.1 Ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα (Digital Elevation Models) .....                                                        | 28 |
| 3.2 Προ- επεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους .....                                                                   | 33 |
| 3.3 Εισαγωγή γεωαναφερμένων αρχείων εισόδου στο HEC-HMS και παραγωγή των τοπογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης..... | 37 |
| Κεφάλαιο 4ο : Μοντέλο υδρολογικής προσομοίωσης: Υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS .....                                       | 41 |
| 4.1 Μοντέλο HEC-HMS .....                                                                                              | 41 |
| 4.2 Μετασχηματισμός λεκάνης και καθορισμός προτύπων στο λογισμικό HEC-HMS .....                                        | 43 |
| 4.2.1 Μοντέλο λεκάνης απορροής (Basin Model).....                                                                      | 43 |
| 4.2.2 Πρότυπο υπολογισμού δεξαμενής κατακράτησης.....                                                                  | 44 |
| 4.2.3 Πρότυπο υπολογισμού δεξαμενής εδαφικής επιφάνειας .....                                                          | 45 |
| 4.2.4 Πρότυπο υπολογισμού απωλειών βροχής.....                                                                         | 45 |
| 4.2.5 Εκτίμηση υδρολογικών ελλειμμάτων με την μέθοδο SCS .....                                                         | 46 |
| 4.2.6 Πρότυπο υπολογισμού άμεσης απορροής .....                                                                        | 57 |

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.7 Μετασχηματισμός επιφανειακής απορροής σε πλημμυρογράφημα.....                                           | 58  |
| 4.2.8 Υπολογισμός χρόνου συγκέντρωσης κάθε υπολεκάνης και παραγωγή ΣΜΥ .....                                  | 61  |
| 4.2.9 Υπολογισμός των σχετικών μεγεθών για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti .....        | 62  |
| 4.2.10 Πρότυπο υπολογισμού βασικής απορροής .....                                                             | 65  |
| 4.2.11 Πρότυπο υπολογισμού διόδευσης πλημμύρας.....                                                           | 65  |
| 4.3 Μετεωρολογικό Μοντέλο .....                                                                               | 69  |
| Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> : Υδρολογική προσομοίωση λεκάνης απορροής Ξεριάς Αλμυρού .....                        | 71  |
| 5.1 Χάρτες Χωρικής Κατανομής Παραμέτρου CN .....                                                              | 75  |
| 5.2 Υπολογισμός όμβριων καμπυλών και εκτίμηση υετογραφημάτων σχεδιασμού .....                                 | 76  |
| 5.2.1 Εκτίμηση Υετογραφήματος Σχεδιασμού .....                                                                | 76  |
| 5.2.2 Εκτίμηση όμβριων καμπυλών Βροχομετρικών Σταθμών ΥΔ Θεσσαλίας (ΥΠΕΚΑ).....                               | 77  |
| 5.2.3 Υπολογισμός Όμβριων Καμπυλών .....                                                                      | 79  |
| 5.2.3.1 Εκτίμηση Παραμέτρων .....                                                                             | 80  |
| 5.2.3.2 Υπολογισμός Όμβριων Καμπυλών σε επίπεδο υπολεκάνης .....                                              | 85  |
| 5.2.4 Εκτίμηση Καταιγίδας Σχεδιασμού.....                                                                     | 87  |
| 5.2.4.1 Χρονική κατανομή καταιγίδας σχεδιασμού.....                                                           | 88  |
| .....                                                                                                         | 88  |
| 5.3 Διαδικασία παραγωγής Πλημμυρικών υδρογραφημάτων .....                                                     | 89  |
| 5.3.1 Διόδευση υδρογραφημάτων στο υδρογραφικό δίκτυο .....                                                    | 89  |
| 5.3.2 Στάδια υδρολογική προσομοίωσης HEC-HMS.....                                                             | 92  |
| Κεφάλαιο 6 <sup>ο</sup> : Μοντελοποίηση Υδρολογικού Συστήματος & Εισαγωγή δεδομένων εισόδου στο HEC-HMS ..... | 93  |
| 6.1 Εισαγωγή υπολογισμένων παραμέτρων στο λογισμικό .....                                                     | 95  |
| 6.1.1 Υπολογισμός Απωλειών (Loss Method): .....                                                               | 95  |
| 6.1.2 Μετασχηματισμός ύψους άμεσης απορροής σε υδρογράφημα (Transform Method).....                            | 96  |
| 6.1.3 Υπολογισμός Βασικής απορροής: .....                                                                     | 97  |
| 6.1.4 Διόδευση υδρογραφημάτων (Routing Method):.....                                                          | 97  |
| 6.2 Μετεωρολογικό Μοντέλο- Meteorologic Model.....                                                            | 98  |
| 6.3 Χρονικός έλεγχος υδρολογικής προσομοίωσης – Control Specifications.....                                   | 102 |
| Κεφάλαιο 7 <sup>ο</sup> : Αποτελέσματα Υδρολογικής προσομοίωσης .....                                         | 103 |
| 7.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υδρολογικών σεναρίων .....                                                    | 104 |

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| 7.2 Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων Υδρολογικής Προσομοίωσης ..... | 117 |
| 7.3 Προτάσεις .....                                           | 118 |
| Βιβλιογραφία .....                                            | 119 |

## Κατάλογος Πινάκων

|                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Πίνακας 1.1:</b> Αίτια Πλημυρών και συνέπειές τους (Πηγή: Sene,2012) .....                                                            | 15  |
| <b>Πίνακας 4.1:</b> Ομάδες εδαφών ανάλογα με την διαπερατότητα τους σύμφωνα με την SCS .....                                             | 49  |
| <b>Πίνακας 4.2:</b> Τύποι από τις αρχικές εδαφικές συνθήκες υγρασίας .....                                                               | 50  |
| <b>Πίνακας 4.3:</b> Τυπικές τιμές CN για προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας τύπου II (Πηγή:Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016) ..... | 51  |
| <b>Πίνακας 4.4:</b> Ταξινόμηση ικανότητας αποστράγγισης βάσει κατηγοριών κλίσης των εδαφών .....                                         | 55  |
| <b>Πίνακας 4.5:</b> Κλάσεις περατότητας, βλάστησης & αποστραγγιστικής ικανότητας ...                                                     | 55  |
| <b>Πίνακας 4.6:</b> Ταξινόμηση των τύπων λεκανών .....                                                                                   | 55  |
| <b>Πίνακας 4.7:</b> Υπολογισμός των τετμημένων στο λείο μοναδιαίο υδρογράφημα SCS (Πηγή: Κουτσογιάννης, 2011) .....                      | 60  |
| <b>Πίνακας 4.8:</b> Υπολογισμός Max Flow Length .....                                                                                    | 63  |
| <b>Πίνακας 4.9:</b> Υπολογισμός Mean Elevation .....                                                                                     | 64  |
| <b>Πίνακας 4.10:</b> Υπολογισμός Outlet Elevation.....                                                                                   | 64  |
| <b>Πίνακας 5.1:</b> Μεγέθη κλάδων υδρογραφικού δικτύου που υπολογίστηκαν.....                                                            | 73  |
| <b>Πίνακας 5.2:</b> Μεγέθη υπολεκανών λεκάνης απορροής Ξεριά.....                                                                        | 73  |
| <b>Πίνακας 5.3:</b> Χαρακτηριστικά βροχογράφων ΥΔ Θεσσαλίας (Πηγή : ΥΠΕΚΑ).....                                                          | 78  |
| <b>Πίνακας 5.4:</b> Συνιστώσες σημειακών όμβριων καμπυλών βροχογράφων περιοχής μελέτης.....                                              | 84  |
| <b>Πίνακας 5.5:</b> Υπολογισμοί διόδευσης μεθόδου Muskingum – DEM (ESRI) .....                                                           | 91  |
| <b>Πίνακας 5.6:</b> Υπολογισμοί διόδευσης μεθόδου Muskingum – DEM (ΥΠΕΚΑ).....                                                           | 91  |
| <b>Πίνακας 5.8:</b> Υπολογισμοί διόδευσης μεθόδου Muskingum – DEM (Copernicus)... ..                                                     | 92  |
| <b>Πίνακας 5.7:</b> Υπολογισμοί διόδευσης μεθόδου Muskingum – DEM (Aster GDEM V3) .....                                                  | 92  |
| <b>Πίνακας 7.1:</b> Κόμβος Εξόδου Junction 1- Μέσες Υδρολογικές Συνθήκες (Τύπου II) .....                                                | 104 |
| <b>Πίνακας 7.2:</b> Κόμβος Εξόδου Junction 1- Υγρές Υδρολογικές Συνθήκες (Τύπου III) .....                                               | 105 |
| <b>Πίνακας 7.3:</b> Κόμβος 6 (Junction 6)- Μέσες Υδρολογικές Συνθήκες (Τύπου II)....                                                     | 108 |
| <b>Πίνακας 7.4:</b> Κόμβος 6 (Junction 6)- Υγρές Υδρολογικές Συνθήκες (Τύπου III) ...                                                    | 108 |
| <b>Πίνακας 7.5:</b> Κόμβος 7 (Junction 7)- Μέσες Υδρολογικές Συνθήκες (Τύπου II)....                                                     | 109 |
| <b>Πίνακας 7.6:</b> Κόμβος 7 (Junction 7)- Υγρές Υδρολογικές Συνθήκες (Τύπου III) ...                                                    | 109 |

## Κατάλογος Σχημάτων

|                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Σχήμα 1.1:</b> Διαδικασίες μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε απορροή στο στόμιο μια δασωμένης λεκάνης.....                                                                                                        | 12 |
| <b>Σχήμα 1.2:</b> Τα κυριότερα μεγέθη σε μία πλημμύρα (Πηγή: Μαμάσης, 2012).....                                                                                                                                      | 14 |
| <b>Σχήμα 1.3 :</b> Κατανομή απωλειών ζών στην Ελλάδα, εκφρασμένη ως αριθμός συμβάντων ανά νομό για την χρονική περίοδο 1880-2010 .....                                                                                | 17 |
| <b>Σχήμα 2.1 :</b> Χάρτης έκτασης υδρολογικής λεκάνης του Αλμυρού στα δημοτικά διαμερίσματα .....                                                                                                                     | 22 |
| <b>Σχήμα 2.3:</b> Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (ΖΔΥΚΠ) στο ΥΔ Θεσσαλίας (GR08) (Πηγή: ΥΠΕΚΑ) .....                                                                                                        | 26 |
| <b>Σχήμα 2.4 :</b> Χάρτης χρήσεων γης κατά Corine 2000 στις Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμυρών (ΖΔΥΚΠ) του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (Πηγή : ΥΠΕΚΑ) .....                                                | 27 |
| <b>Σχήμα 3.1:</b> Πηγές δεδομένων μοντέλου εδάφους της ESRI.....                                                                                                                                                      | 29 |
| <b>Σχήμα 3.2:</b> Χάρτης υψομέτρων υδρολογικής λεκάνης Ξεριά .....                                                                                                                                                    | 30 |
| <b>Σχήμα 3.3:</b> Χάρτης Κλίσεων υδρολογικής λεκάνης Ξεριά.....                                                                                                                                                       | 30 |
| <b>Σχήμα 3.4:</b> Αρχική μορφή ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM) από τον δορυφόρο Copernicus .....                                                                                                                      | 31 |
| <b>Σχήμα 3.5:</b> Μορφή τελικού ψηφιακού μοντέλου εδάφους μετά την χρήση του ArcGIS .....                                                                                                                             | 31 |
| <b>Σχήμα 3.6:</b> Απεικόνιση των τεσσάρων παραγόμενων DEM της λεκάνης του Ξεριά στο ArcGIS .....                                                                                                                      | 32 |
| <b>Σχήμα 3.7 :</b> Βήματα για την προ-επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.....                                                                                                                                  | 33 |
| <b>Σχήμα 3.8:</b> Κάναβος διεύθυνσης ροής (Στάμου & Σκοπελίτη, 2009).....                                                                                                                                             | 34 |
| <b>Σχήμα 3.9 :</b> Διεύθυνση ροής στην λεκάνη απορροής του Ξεριά στο περιβάλλον του HEC-HMS (flow direction) .....                                                                                                    | 35 |
| <b>Σχήμα 3.10:</b> Κάναβος συγκεντρωτικής ροής (Στάμου και Σκοπελίτη, 2009).....                                                                                                                                      | 35 |
| <b>Σχήμα 3.11:</b> Απεικόνιση του υδατορέματος μετά την εντολή identify streams στο περιβάλλον του HEC-HMS .....                                                                                                      | 36 |
| <b>Σχήμα 3.12 :</b> Break Point Creation Tool.....                                                                                                                                                                    | 37 |
| <b>Σχήμα 4.1:</b> Basin model του Ξεριά στο περιβάλλον του HEC-HMS.....                                                                                                                                               | 43 |
| <b>Σχήμα 4.2:</b> Αποτύπωση παραμετρικής δομής ισοζυγίου νερού λεκάνης απορροής με HEC-HMS (Πηγή: Ζωγάκης,2013) .....                                                                                                 | 44 |
| <b>Σχήμα 4.3:</b> Απεικόνιση χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής χωρίς την επιλογή προτύπου υπολογισμού δεξαμενής κατακράτησης και εδαφικής επιφάνειας στο HEC-HMS.....                                              | 45 |
| <b>Σχήμα 4.4:</b> 12 μέθοδοι εκτίμησης απωλειών βροχής( Loss Methods) .....                                                                                                                                           | 46 |
| <b>Σχήμα 4.5:</b> Διαγραμματική αποτύπωση της μεθόδου SCS (Πηγή: Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος,1999 μετά από προσαρμογή). .....                                                                                         | 48 |
| <b>Σχήμα 4.6:</b> Αδιαστατοποιημένο ΣΜΥ κατά SCS .....                                                                                                                                                                | 60 |
| <b>Σχήμα 4.7 :</b> Απεικόνιση του χρόνου συγκέντρωσης, ως ο χρόνος που απαιτείται για τη διαδρομή του νερού από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης μέχρι την έξοδο (Ερευνητικό έργο «ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ», 2011-2014)..... | 61 |
| <b>Σχήμα 4.8:</b> Επιλογή μεθόδου βασικής απορροής .....                                                                                                                                                              | 65 |
| <b>Σχήμα 4.9 :</b> Precipitation Type Menu .....                                                                                                                                                                      | 70 |

|                                                                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Σχήμα 5.1 :</b> Χάρτης λεκανών απορροής που ανήκουν στην ευρύτερη περιοχή του Αλμυρού (με κίτρινο) (Πηγή : ΥΠΕΚΑ).....                                                                        | 72  |
| <b>Σχήμα 5.2:</b> Όρια υπολεκανών της λεκάνης απορροής στο περιβάλλον του HEC-HMS .....                                                                                                          | 74  |
| <b>Σχήμα 5.3:</b> Τιμές παραμέτρου CN στην λεκάνη απορροής του Ξεριά στο περιβάλλον του GIS .....                                                                                                | 75  |
| <b>Σχήμα 5.4:</b> Απεικόνιση των θέσεων βροχογράφων στο ΥΔ Θεσσαλίας.....                                                                                                                        | 79  |
| <b>Σχήμα 5.5:</b> Όμβριες καμπύλες D για από 15min έως και 48h και T 5,100 και 1000 έτη. ....                                                                                                    | 87  |
| <b>Σχήμα 5.6:</b> Υετογράφημα Καταιγίδας Σχεδιασμού Ξεριάς Αλμυρού .....                                                                                                                         | 88  |
| <b>Σχήμα 6.1:</b> Χάρτης περιοχής μελέτης ρέματος Ξεριά Αλμυρού, που δείχνει την σχηματοποίηση των κόμβων και των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και των επιμέρους υπολεκανών.(Πηγή:ΥΠΕΚΑ)..... | 94  |
| <b>Σχήμα 6.2:</b> Εισαγωγή Παραμέτρων InitAbstr, CN, Impervious.....                                                                                                                             | 95  |
| <b>Σχήμα 6.3:</b> Εισαγωγή παραμέτρου χρόνου υστέρησης (Lag Time) .....                                                                                                                          | 96  |
| <b>Σχήμα 6.4:</b> Εισαγωγή παραμέτρου βασικής απορροής (Baseflow).....                                                                                                                           | 97  |
| <b>Σχήμα 6.5:</b> Εισαγωγή παραμέτρου μεθόδου διόδευσης (Routing Method) .....                                                                                                                   | 98  |
| <b>Σχήμα 6.6:</b> Ορισμός Μετεωρολογικού Μοντέλου.....                                                                                                                                           | 99  |
| <b>Σχήμα 6.7:</b> Εισαγωγή βροχομετρικών δεδομένων - Time Series Management .....                                                                                                                | 100 |
| <b>Σχήμα 6.8:</b> Εισαγωγή βροχομετρικών δεδομένων - Time Window .....                                                                                                                           | 100 |
| <b>Σχήμα 6.9:</b> Εισαγωγή βροχομετρικών δεδομένων - Table .....                                                                                                                                 | 101 |
| <b>Σχήμα 6.10:</b> Εισαγωγή βροχομετρικών δεδομένων - Graph .....                                                                                                                                | 102 |
| <b>Σχήμα 6.11:</b> Καθορισμός χρονικού ελέγχου υδρολογικής προσομοίωσης - Control Specification Manager .....                                                                                    | 103 |
| <b>Σχήμα 7.1:</b> Κόμβος 1 - Υδρολογικές Συνθήκες Τύπου II.....                                                                                                                                  | 105 |
| <b>Σχήμα 7.2:</b> Κόμβος 1 - Υδρολογικές Συνθήκες Τύπου III .....                                                                                                                                | 106 |
| <b>Σχήμα 7.3 :</b> Συγκεντρωτικό Γράφημα κόμβου 1 για μέσες συνθήκες.....                                                                                                                        | 106 |
| <b>Σχήμα 7.3 :</b> Συγκεντρωτικό Γράφημα κόμβου 1 για υγρές συνθήκες .....                                                                                                                       | 107 |
| <b>Σχήμα 7.4:</b> Κόμβος 6 - Υδρολογικές Συνθήκες Τύπου II.....                                                                                                                                  | 110 |
| <b>Σχήμα 7.5:</b> Κόμβος 6 - Υδρολογικές Συνθήκες Τύπου III .....                                                                                                                                | 110 |
| <b>Σχήμα 7.6:</b> Κόμβος 7 - Υδρολογικές Συνθήκες Τύπου II.....                                                                                                                                  | 111 |
| <b>Σχήμα 7.7:</b> Κόμβος 7 - Υδρολογικές Συνθήκες Τύπου III .....                                                                                                                                | 111 |
| <b>Σχήμα 7.8:</b> Υετογράφημα & πλημμυρογράφημα Υπολεκάνης GR07.....                                                                                                                             | 112 |
| <b>Σχήμα 7.9:</b> Υετογράφημα & πλημμυρογράφημα Υπολεκάνης GR07 – υγρές συνθήκες .....                                                                                                           | 112 |
| <b>Σχήμα 7.10:</b> Υετογράφημα & πλημμυρογράφημα Υπολεκάνης GR08 – μέσες συνθήκες .....                                                                                                          | 113 |
| <b>Σχήμα 7.11:</b> Υετογράφημα & πλημμυρογράφημα Υπολεκάνης GR08 – υγρές συνθήκες .....                                                                                                          | 113 |
| <b>Σχήμα 7.14 :</b> Συγκεντρωτικό Γράφημα GR07 για υγρές συνθήκες.....                                                                                                                           | 114 |
| <b>Σχήμα 7.13 :</b> Συγκεντρωτικό Γράφημα GR07 για μέσες συνθήκες .....                                                                                                                          | 114 |
| <b>Σχήμα 7.16 :</b> Συγκεντρωτικό Γράφημα GR08 για υγρές συνθήκες.....                                                                                                                           | 115 |
| <b>Σχήμα 7.15 :</b> Συγκεντρωτικό Γράφημα GR08 για μέσες συνθήκες .....                                                                                                                          | 115 |
| <b>Σχήμα 7.14:</b> Κλάδος R21 – μέσες συνθήκες .....                                                                                                                                             | 116 |
| <b>Σχήμα 7.15:</b> Κλάδος R21 – υγρές συνθήκες.....                                                                                                                                              | 116 |

## Κεφάλαιο 1ο : Εισαγωγή

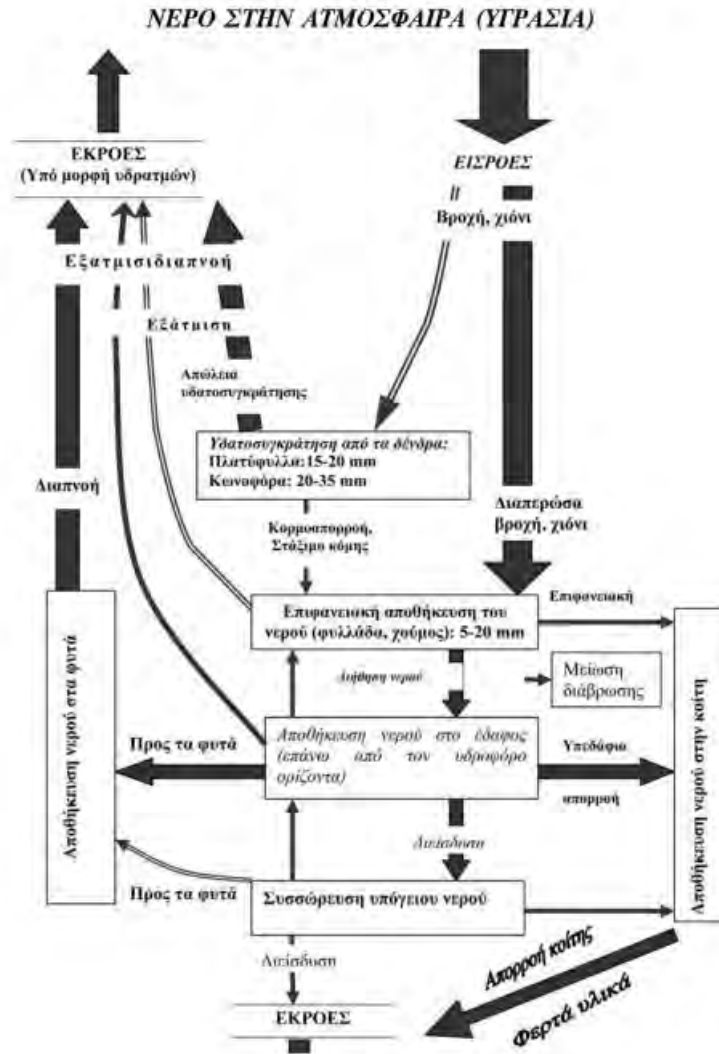
### 1.1 Γενικά

Το νερό αποτελεί κύριο συστατικό κάθε μορφής έμβιου οργανισμού και υπάρχει σε αφθονία στην γη, καθώς καλύπτει τα 2/3 της επιφάνειας της. Από την αρχή του πολιτισμού αποτελεί ένα πολύ σημαντικό αγαθό για τον άνθρωπο, κρίσιμο για την επιβίωση του αλλά και πολύ σημαντικό για την εξέλιξη του πολιτισμού του. Ο ορισμός για τον κλάδο της επιστήμης που μελετά τον νερό είναι <<Υδρολογία είναι η επιστήμη που πραγματεύεται με την κυκλοφορία, την εμφάνιση, και διανομή των υδάτων που βρίσκονται στην γη, αλλά και την αλληλεπίδραση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων τους και με το φυσικό περιβάλλον στο οποίο συμπεριλαμβάνονται και τα έμβια όντα>>. Επιπλέον, ο κλάδος της υδρολογίας που μελετά τον τρόπο κίνησης του νερού, από την στιγμή που πέφτει στο έδαφος μέσω της βροχής μέχρις ότου να οδηγηθεί στην θάλασσα, τους ποταμούς και τις λίμνες, χαρακτηρίζεται από τον όρο Τεχνική Υδρολογία.

#### 1.1.1 Υδρολογικός Κύκλος του νερού

Ο Υδρολογικός κύκλος ή κύκλος του νερού, αναφέρεται στην αέναη ανακύκλωση του νερού ανάμεσα στην ατμόσφαιρα, το έδαφος και τους ωκεανούς. Το νερό έρχεται στην γήινη επιφάνεια υπό μορφή κάποιου από τα υδατώδη κατακρημνίσματα (βροχή, χιόνι, υετός ή χαλάζι), όπου τμήμα του υφίσταται εξάτμιση κατά την διάρκεια της πτώσης και οδηγείται πίσω στην ατμόσφαιρα, ενώ η πλειονότητα του οδηγείται στην εδαφική επιφάνεια. Εκεί διηθείται στα πιο βαθιά στρώματα προκαλώντας τον εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων, ή ρέει στην επιφάνεια του εδάφους κατευθυνόμενο στις περιοχές με χαμηλότερο υψόμετρο και με αυτό τον τρόπο καταλήγει σε ποταμούς, λίμνες αλλά και τις θάλασσες.

Συγκεκριμένα στον ελλαδικό χώρο, το ελληνικό μεσογειακό κλίμα χαρακτηρίζεται από την άνιση κατανομή των υδατικών πόρων στο χώρο και στο χρόνο και την ύπαρξη πολλαπλών δασικών πυρκαγιών καθ' όλη την χρονική διάρκεια του χρόνου, δημιουργεί σημαντικά προβλήματα όπως φαινόμενα εμφάνισης πλημμυρών, ολισθήσεις, μεταφορά φερτών υλικών, διαβρώσεις κ.α. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1.



**Σχήμα 1.1:** Διαδικασίες μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε απορροή στο στόμιο μια δασωμένης λεκάνης

Οι βασικότερες υδρολογικές διεργασίες που συμβαίνουν κατά την διάρκεια του υδρολογικού κύκλου είναι αρχικά η υπόγεια απορροή (groundwater runoff), η οποία αναφέρεται στο κομμάτι των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων, όπου αφού πέσει στο έδαφος φιλτράρεται σε αυτό μέσω εδαφικών πόρων και ρωγμών. Ακόμη, η επιφανειακή απορροή (surface runoff) που αναφέρεται στο μέρος των κατακρημνισμάτων που οδηγείται στο έδαφος και συντελεί στην δημιουργία ρεμάτων και ποταμών που καταλήγουν στην θάλασσα, η κατακρήμνιση (precipitation), που είναι η διεργασία που αναφέρεται στην πτώση του νερού από τα σύννεφα με την μορφή βροχής, χιονόνερου, χιονιού ή χαλαζιού. Η διεργασία αυτή συνιστά έναν από τους κυριότερους τρόπους με τον οποίους το νερό της ατμόσφαιρας οδηγείται πίσω στην γήινη επιφάνεια.

Άλλη μία σημαντική διεργασία του υδρολογικού κύκλου αποτελεί η εξάτμιση (evaporation), μια διαδικασία μέσω της οποίας το νερό μετατρέπει την μορφή του από υγρή σε αέρια και συνιστά τον βασικότερο τρόπο βάσει του οποίου το νερό εισέρχεται ξανά στην ατμόσφαιρα και στον υδρολογικό κύκλο. Επιπλέον, η παρεμπόδιση (interception), ορίζεται ως η πορεία μέρους των βροχοπτώσεων που ανακόπτεται από την κόμη των δασών, την δασική επιφάνεια την υποβλάστηση, ή άλλες μορφές με τις οποίες καλύπτεται η λεκάνη απορροής και η κατακράτηση (depression) που αποτελεί τον περιορισμό μέρους του νερού σε τμήματα του εδάφους. Τέλος, σημαντική διεργασία αποτελεί η διήθηση (infiltration) που αντιστοιχεί στην εισχώρηση του νερού που βρίσκεται στην επιφάνεια τους εδάφους κατευθυνόμενο στα βαθύτερα στρώματα της.

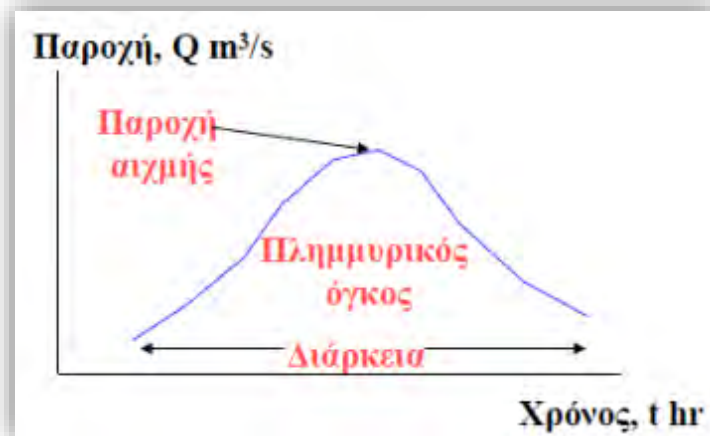
## 1.2 Πλημμύρες

Η γενικότερη έννοια μίας πλημμύρας χαρακτηρίζεται ως μια απρόσμενα μεγάλη ποσότητα νερού που δεν μπορεί να συγκρατηθεί με την βοήθεια των ρεμάτων νερού ή άλλων υδάτινων συστημάτων όπου το νερό μεταβαίνει σε πεδία, πόλεις αλλά και περιοχές, προκαλώντας μεγάλες καταστροφές. Οι πλημμύρες συνιστούν κομμάτι των υδρολογικών διεργασιών και λαμβάνουν χώρα, την χρονική στιγμή που τμήμα του υδρογραφικού δικτύου αδυνατεί να φιλτράρει και να σταματήσει τον όγκο του νερού που διατρέχει, οδηγώντας στην υπερχειλίση των οχθών. Επομένως, τα νερά αυτά εγκαθίστανται για ορισμένο χρονικό διάστημα, σε τμήματα χέρσου.

Πιο συγκεκριμένα, στις πλημμύρες περιλαμβάνονται πλημμύρες που δημιουργούνται λόγω ποταμών, ορεινών χειμάρρων και υδατορεμάτων προσωρινής ροής, υπερχειλίσεις λιμνών αλλά και πλημμύρες υπόγειων υδάτων και θάλασσας σε παραθαλάσσιους τόπους. Οι ποτάμιες ή χερσαίες πλημμύρες οφείλονται σε καταιγίδες μεγάλου μεγέθους και ισχυρές βροχοπτώσεις κατά βάση την εποχή του φθινοπώρου, ωστόσο μπορεί να προκληθούν στην περίπτωση του ραγδαίου λιώσιμου του χιονιού συνηθέστερα την περίοδο της άνοιξης και συμβάλει στην άνοδο της ποσότητας νερού των ποταμιών. Επιπρόσθετα, στην ίδια κατηγορία υπάγονται και οι πλημμύρες λόγω αστοχίας τεχνικών έργων και αυτές χωρίζονται τόσο σε πλημμύρες βραδείας εξέλιξης (πλημμύρες πεδίου) όσο και ταχείας εξέλιξης (ξαφνικές ή αιφνίδιες πλημμύρες).

Οι κύριες συντελεστές που μελετώνται σε μία πλημμύρα είναι:

- Η παροχής αιχμής αναφορικά με το επίπεδο στάθμης του ποταμού
- Ο πλημμυρικός όγκος
- Η χρονική διάρκεια της πλημμύρας



Σχήμα 1.2: Τα κυριότερα μεγέθη σε μία πλημμύρα (Πηγή: Μαμάσης, 2012)

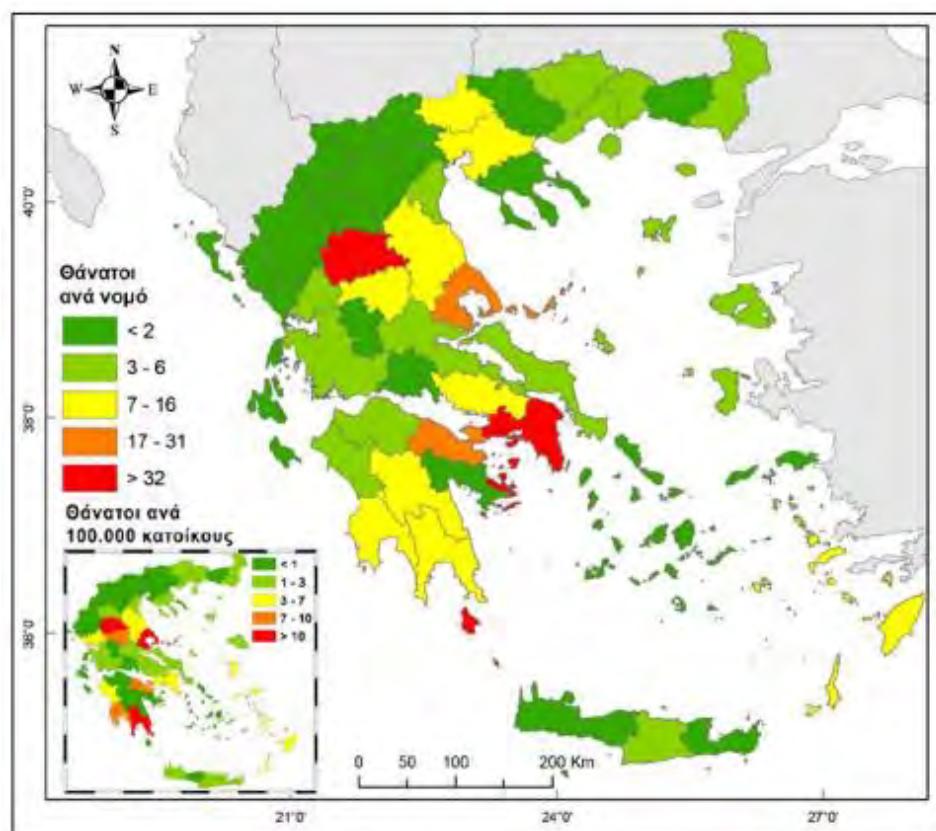
Πίνακας 1.1: Αίτια Πλημμυρών και συνέπειές τους (Πηγή: Sene,2012)

| ΤΥΠΟΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ                                           | ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΑΙΤΙΑ                                                                               | ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ποτάμιες Πλημμύρες                                        | Έντονη βροχόπτωση, βροχόπτωση μάκρας διαρκείας, λιώσιμο χιονιού, αστοχία αντυπλημμυρικών έργων | Πλημμυρικά ύδατα κατά μήκος πλημμυρικών πεδίων (στάσιμα ή ρέοντα)                                                      |
| Παράκτιες Πλημμύρες                                       | Υψηλές παλίρροιες, καταιγίδες, τσουνάμι, συνδυασμός των παραπάνω με έντονη βροχόπτωση          | Στάσιμα πλημμυρικά ύδατα κοντά στην ακτή, υποχώρηση της ακτής, υφαλμήρηση της αγροτικής γης κοντά στο παραλιακό μέτωπο |
| Πλημμύρες ορεινών χειμάρρων                               | Καταιγίδες, αστάθεια πρανών                                                                    | Λασπορροές, έντονη διάβρωση, ορμητικά πλημμυρικά ύδατα και μεταφερόμενο υλικό, δημιουργία αλλουβιακού ρυτιδίου         |
| Λιφνίδιες πλημμύρες (flashfloods) σε εφήμερους χειμάρρους | Ιδιαίτερα έντονη βροχόπτωση                                                                    | Έντονη διάβρωση, ορμητικά πλημμυρικά ύδατα πολλές φορές εμπλουτισμένα με εδαφικό υλικό, λασπορροές                     |
| Πλημμύρες που συνδέονται με το υπεδαφικό νερό             | Υψηλή στάθμη υπεδαφικού νερού, κορεσμός υδροφόρου ορίζοντα                                     | Στάσιμα πλημμυρικά ύδατα στο πλημμυρικό πεδίο                                                                          |
| Πλημμύρες λιμνών                                          | Ταχεία αύξηση των υδατικών αποθεμάτων                                                          | Στάσιμα πλημμυρικά ύδατα πέραν της ακτής                                                                               |

### 1.2.1 Πλημμύρες στον Ελληνικό χώρο

Το μεγαλύτερο μέρος των υδρολογικών λεκανών των ακτών της Μεσογείου επιδέχονται ξαφνικές πλημμύρες (flash floods), οι οποίες συνιστούν ένα από τα μείζονα καταστροφικά φαινόμενα και στην Ελληνική επικράτεια (Πηγή: Ανδρεαδάκης & Φουντούλης, 2007). Οι υδρολογικές λεκάνες διαθέτουν μικρό έως μεσαίο μέγεθος και η αποστράγγισή τους γίνεται κατά βάση από προσωρινούς χειμάρρους με πολύ μικρό ή και καθόλου νερό καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου. Ιδιαίτερα, οι πλημμύρες αυτές διακρίνονται από μικρή χρονική διάρκεια καθώς χαρακτηρίζονται από σημαντικές απορροές. Όταν παρατηρείται η ύπαρξη τέτοιων φαινομένων, συναντώνται φαινόμενα διάβρωσης και μεταφοράς εδαφικού υλικού, γεγονός που αποτελεί έναν επιπρόσθετο κίνδυνο όπως για παράδειγμα λασπορροές ή και κατολισθήσεις. Ακόμη, στην ύπαρξη ενός τέτοιου φαινομένου συμβάλει σε μεγάλο βαθμό και το ιδιαίτερο γεωτεκτονικό καθεστώς του εκάστοτε υπό μελέτη χώρου, αλλά και η ύπαρξη σημαντικού αριθμού πληθυσμών σε παραποτάμιες ή παραλιακές περιοχές λόγω της τουριστικής ανάπτυξης, όπου συχνά εμποδίζει την σωστή λειτουργία των ποτάμιων συστημάτων.

Η αποψίλωση των δασών αλλά και η ανεξέλεγκτη εκμετάλλευση του φυσικού περιβάλλοντος από τους πολίτες, συμβάλει σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση των πλημμυρών και συνεπακόλουθα στις δυσάρεστες οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις τους. Η ύπαρξη πλημμυρών, εκτός από ανθρώπινες απώλειες, έχουν και πολύ έντονες οικονομικές επιπτώσεις, καθώς επηρεάζονται οι τομείς της γεωργίας, της κτηνοτροφίας, των υποδομών αλλά και των περιουσιών των πολιτών. Στην επόμενη σελίδα, απεικονίζεται ο χάρτης χωρικής κατανομής για τους θανάτους στην ελληνική επικράτεια (Πηγή: Diakakis, 2012), όπου μπορεί κανείς να διαπιστώσει πως στο Νομό Μαγνησίας έχει σημειωθεί ιδιαίτερα σημαντικός αριθμός ανθρώπινων απωλειών.



**Σχήμα 1.3 :** Κατανομή απωλειών ζωών στην Ελλάδα, εκφρασμένη ως αριθμός συμβάντων ανά νομό για την χρονική περίοδο 1880-2010

Αξίζει να αναφερθεί, πως παρατηρώντας την παραπάνω εικόνα διαπιστώνεται πως τα μεγάλα αστικά κέντρα (π.χ. Αθήνα), σημειώνουν τον μεγαλύτερο αριθμό θανάτων. Αντίθετα, παρουσιάζουν τον μικρότερο αριθμό θυμάτων οι ορεινές περιοχές της χώρας, όπως οι νομοί Δυτικής Μακεδονίας, της Ηπείρου ή της κεντρικής Πελοποννήσου.

### 1.3 Εφαρμογή Θεσμικού Πλαισίου

#### 1.3.1 Εφαρμογή Οδηγίας 2000/60/EK

Αναγνωρίζοντας την αδήριτη σημασία της προάσπισης του υδάτινου περιβάλλοντος, όπως και της ουσιαστικής επιβολής μίας βιώσιμης πολιτικής, το κοινοβούλιο της Ευρώπης και το συμβούλιο της Ε.Ε, θέσπισε την οδηγία-πλαίσιο για τα νερά 2000/60/EK, με αρχή ισχύος στις 22 Δεκεμβρίου 2000. Στόχος αυτού του πλαισίου 2000/60/EK (Water Framework Directive-WFD), αποτελεί η προστασία των υδάτινων

οικοσυστημάτων επαναπροσδιορίζοντας τον όρο «λεκάνη απορροής», θέτοντας στόχους για την αναχαίτιση της υποβάθμισης του νερού και επιτυγχάνοντας τον στόχο «καλής κατάστασης». Ακόμη, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως σκοπός της είναι η επιβολή ενός πλαισίου κοινοτικής δράσης για την προάσπιση των υδάτων, το οποίο θα στοχεύει :

- Στην αποφυγή της παραπάνω επιδείνωσης, της προστασίας αλλά και καλυτέρευση της υπάρχουσας κατάστασης των υδάτινων οικοσυστημάτων
- Στην προώθηση της βιώσιμης χρήσης του ύδατος με στόχο την μελλοντική προστασία και διατήρηση των υπαρχόντων υδατικών πόρων
- Στην διασφάλιση της σταδιακής ελάττωσης της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων

Επιπρόσθετα, πολύ σημαντικό αλλά και καινοτόμο χαρακτηριστικό της οδηγίας αποτελεί η ολοκληρωμένη διαχείριση του συνολικού όγκου των πόρων του νερού σε κλίμακα λεκάνης απορροής ποταμού.

### 1.3.2 Εφαρμογή Οδηγίας 2007/60/EK

Η Ευρωπαϊκή Ένωση θέσπισε την συμπληρωματική οδηγία 2007/60/EK., λαμβάνοντας υπόψη τις αλλαγές του τρόπου διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας που μπορεί να εμφανιστούν λόγω της κλιματικής αλλαγής, τον Οκτώβριο του 2007 (23/10/2007).

Βασικός στόχος της Οδηγίας αυτής, συνιστά η ελάττωση των απορροιών των πλημμυρών και το αντίκτυπο τους στην υγεία του ατόμου, το περιβάλλον αλλά και την οικονομία. Για την υλοποίηση του στόχου, η οδηγία προβλέπει για τα διάφορα κράτη μέλη, τρία στάδια εφαρμογής :

#### 1. Προκαταρκτικό Στάδιο

Σύμφωνα με το στάδιο αυτό, προβλέπεται η αξιολόγηση των περιοχών που αποτελούν τμήμα της υδρολογικής λεκάνης ενός ποταμού, στον ελληνικό χώρο ή είναι διασυνοριακές, έχοντας ως βασική συνθήκη, να βρίσκονται σε επικείμενο κίνδυνο πλημμύρας ή να ελλοχεύει ο κίνδυνος στο άμεσο μέλλον. Εδώ, περιλαμβάνεται η σύνθεση χαρτών ορθής κλίμακας, της περιοχής λεκάνης απορροής του υπό μελέτη ποταμού, μέρος των οποίων θα αποτελούν χρήσιμα χαρακτηριστικά τοπογραφικού

χαρακτήρα της περιοχής, χρήσεις γης καθώς και η ανάλυση παλαιότερων καταστροφικών πλημμυρών, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η μελλοντική πρόβλεψη τους και πρόληψη των πιθανών επιπτώσεων.

## **2. Χάρτες επικινδυνότητας και χάρτες κινδύνων πλημμύρας**

Οι χάρτες πλημμυρικής επικινδυνότητας αναφέρονται σε πιθανές περιοχές που ανήκουν στην κατηγορία των σεναρίων χαμηλής, μέσης και υψηλής πλημμυρικής πιθανότητας. Ακόμη, για το κάθε ένα από τα σενάρια που αναφέρθηκαν προηγουμένως, σημειώνονται: το εμβαδόν που λαμβάνει χώρο η πλημμύρα, η ταχύτητα ροής του υδατορέματος και η στάθμη του επιπέδου του νερού ή το βάθος στο οποίο ρέει ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση. Επιπρόσθετα, οι δυνητικές αρνητικές επιπτώσεις εκφρασμένες ως ο ενδεικτικός πληθυσμός, το είδος της τοπικής οικονομίας καθώς και οι τοπικές εγκαταστάσεις που δύνανται να δεχθούν κάποιο πλήγμα, αποτυπώνονται στους χάρτες κινδύνου πλημμύρας.

## **3. Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας (ΣΔΚΠ)**

Τα ΣΔΚΠ είναι βασισμένα στους χάρτες που προαναφέρθηκαν, ενώ επικεντρώνονται αρχικά στο να προληφθεί και να υπάρξει έγκαιρη προειδοποίηση (μέσω εγκατάστασης τέτοιων συστημάτων) σε περίπτωση πλημμύρας. Επιπλέον, σκοπός των σχεδίων αυτών αποτελεί η ταυτόχρονη εξασφάλιση αλλά και τήρηση των περιβαλλοντικών στόχων που περιγράφονται στην Οδηγία 2000/60/EK αλλά και η μέριμνα των αναγκών της κάθε λεκάνης απορροής.

#### 1.4 Σκοπός της εργασίας

Βασικός σκοπός της εργασίας, αποτελεί η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ρέματος Ξεριά Αλμυρού. Για την ολοκλήρωση της εργασίας, απαιτήθηκε η μοντελοποίηση των τεσσάρων διαφορετικών ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DEM), το καθένα με δύο διαφορετικές μεθόδου υπολογισμού της παραμέτρου CN, έχοντας πραγματοποιήσει τελικά οχτώ διαφορετικά μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης. Για την εξαγωγή των τοπογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής στο λογισμικό του αμερικανικού στρατού HEC-HMS, ήταν απαραίτητη προ-επεξεργασία των DEM στο λογισμικό ArcGIS.

Η διαδικασία της υδρολογικής προσομοίωσης στηρίχθηκε στην περιγραφή των συνθηκών ροής που υπάρχουν στο σύνολο του μήκους του υδατορέματος, οδηγώντας τελικά στον προσδιορισμό της παροχής σχεδιασμού και της παροχής αιχμής με επιλεγμένη περίοδο επαναφοράς τα 100 χρόνια. Επιπρόσθετα, τα βροχομετρικά δεδομένα της υπό μελέτη λεκάνης απορροής υπολογίστηκαν βάσει των όμβριων καμπυλών, όπως αυτές αποτυπώνονται στα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας του ΥΠΕΚΑ.

## 1.5 Τρόπος διάρθρωσης της εργασίας

Η διάρθρωση της διπλωματικής έχει πραγματοποιηθεί στο σύνολο επτά κεφαλαίων.

Αρχικά, το πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζει το θέμα, ενώ στη συνέχεια δίνει πληροφορίες αναφορικά με την εμφάνιση των πλημμυρών, αλλά και το νομοθετικό πλαίσιο που επιβάλλεται στην περίπτωση ύπαρξης τους. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών αλλά και τα μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης καθώς και τις εξισώσεις που περιλαμβάνουν για την εκτίμηση των κυριότερων μεγεθών.

Εν συνεχεία, το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στα μείζονα χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής, όπως είναι ο πληθυσμός, τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, αλλά και τα κλιματικά δεδομένα.

Ακόμη, το τρίτο κεφάλαιο περιγράφει την διαδικασία ανάλυσης των δεδομένων εισόδου στο πρόγραμμα, με την προ επεξεργασία του μοντέλου εδάφους αλλά και την εξαγωγή των τοπογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής.

Το τέταρτο κεφάλαιο αποτελεί μία ολοκληρωμένη ανάλυση της υδρολογικής ανάλυσης και προσομοίωσης στο περιβάλλον του λογισμικού HEC-HMS κάνοντας χρήση της μεθοδολογίας.

Το πέμπτο κεφάλαιο είναι η βήμα προς βήμα παρουσίαση της προσομοίωσης της λεκάνης απορροής του Ξεριά, όπως ο τρόπος εκτίμησης των όμβριων καμπυλών αλλά και η διαδικασία παραγωγής πλημμυρικών υδρογραφημάτων.

Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφεται η εισαγωγή των δεδομένων εισόδου στο λογισμικό.

Εν κατακλείδι, στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης καθώς και ορισμένα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από την παρούσα ανάλυση, ενώ εκφράζονται μελλοντικές προτάσεις για περαιτέρω έρευνα αναφορικά με αντικείμενο μελέτης.

## Κεφάλαιο 2ο : Περιοχή μελέτης

### 2.1 Γενικά Στοιχεία

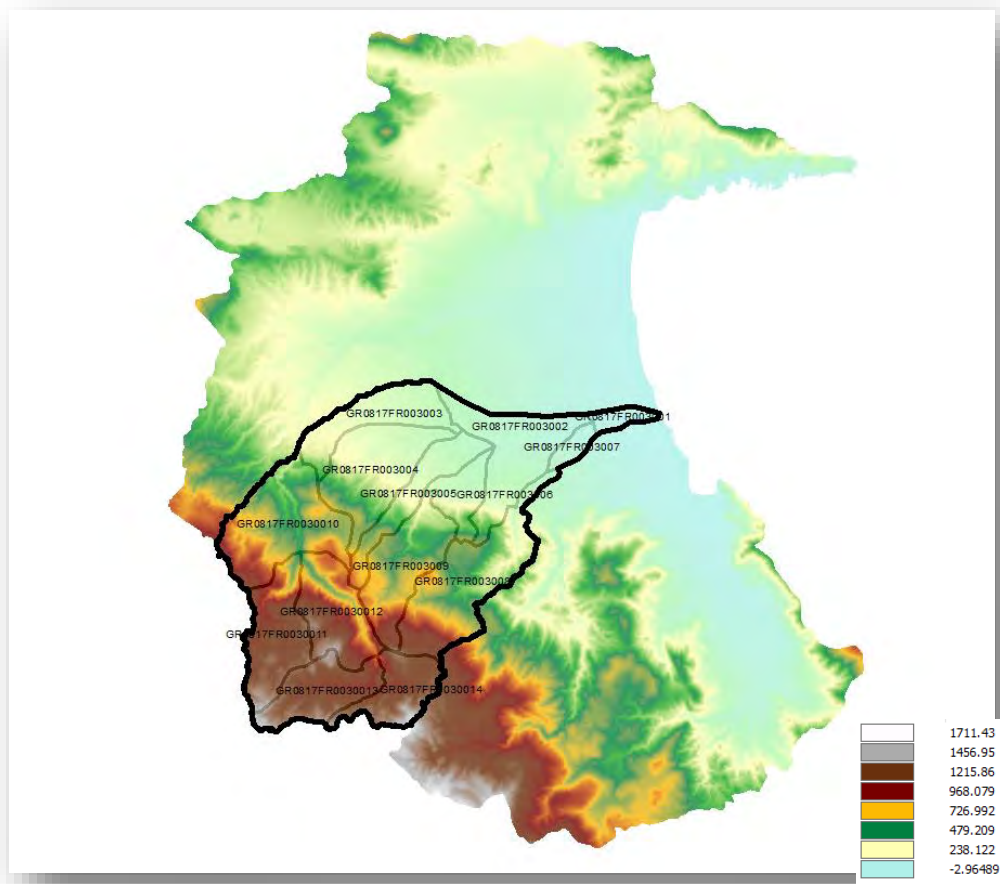
Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται τα κύρια στοιχεία της περιοχής που μελετάται, της λεκάνης απορροής του Ξεριά Αλμυρού. Η υδρολογική λεκάνη του ρέματος Ξεριά αποτελεί μία υπολεκάνη της μεγαλύτερης λεκάνης του Αλμυρού, η οποία αναπτύσσεται σε τρία δημοτικά διαμερίσματα. Αυτά είναι, ο νομός Μαγνησίας, ενώ στα νοτιοδυτικά είναι το φυσικό και διοικητικό σύνορο με τον νομό Φθιώτιδας (Σχήμα 2.1). Ακόμη, η λεκάνη απορροής του Ξεριά αποτελεί τμήμα του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (EL08), ενώ έχει έκταση 196.82 km<sup>2</sup> και μέσο υψόμετρο  $z_m = 598.6$  m.



**Σχήμα 2.1 :** Χάρτης έκτασης υδρολογικής λεκάνης του Αλμυρού στα δημοτικά διαμερίσματα

## 2.2 Γεωμορφολογικά Χαρακτηριστικά

Ο χείμαρρος Ξεριάς αρχίζει από το ύψος της Όθρυς, καταλήγοντας στον κόλπο. Η λεκάνη απορροής του Ξεριά είναι μία από τις μεγαλύτερες υπολεκάνες της λεκάνης του Αλμυρού, ενώ αναπτύσσεται στο κεντρικό τμήμα του και εξαπλώνεται νοτιοδυτικά με υψηλότερες κορυφές στον ορεινό όγκο της βόρειας Όθρυς. Συγκεκριμένα, κομμάτι του ενιαίου βυθίσματος Αλμυρού – Παγασητικού αποτελεί η λεκάνη Αλμυρού. Προς τα ανατολικά, τα 2/3 του βυθίσματος αυτού καλύπτονται από τον Παγασητικό κόλπο, ενώ το 1/3 προς τα δυτικά συνιστά την ημιορεινή ζώνη και την χαμηλού υψομετρικού ανάγλυφου χερσαία περιοχή, με υψόμετρα να ανέρχονται έως τα 200m. Γεωμορφολογικά, η λεκάνη διακρίνεται στην υπολεκάνη της Σούρπης και την υπολεκάνη της Ευξεινούπολης (Πηγή: Γαλανάκης, 1997). Μείζον χαρακτηριστικό της λεκάνης αυτής, αποτελεί η σχετική βύθιση του ανατολικού τμήματος της λεκάνης σε σύγκριση με το δυτικό, όπως φαίνεται και στο Σχήμα παρακάτω.



**Σχήμα 2.2 :** Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) της λεκάνης απορροής του Ξεριά και οι επιμέρους υπολεκάνες του

## 2.3 Πληθυσμός

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η υδρολογική λεκάνη του ρέματος Ξεριά ανήκει στην ευρύτερη λεκάνη του Αλμυρού, η οποία εξαπλώνεται σε τρία δημοτικά διαμερίσματα του νομού Μαγνησίας, με κυριότερο αυτό του Δήμου του Αλμυρού. Είναι γνωστό πως η περιοχή του Αλμυρού έχουν κατοικήσει άνθρωποι από την περίοδο της νεολιθικής εποχής και την πρώιμη περίοδο του χαλκού, ενώ η πόλη χτίστηκε στο συγκεκριμένο μέρος στο ξεκίνημα του 19ου αιώνα, έπειτα από καταστροφές που υπέστη η αρχική ομώνυμη πόλη που βρισκόταν νοτιότερα κατά την διάρκεια της τουρκοκρατίας.

Ο δήμος έχει έκταση 909.79 τετραγωνικά χιλιόμετρα και ο αριθμός των κατοίκων του ανέρχεται στους 12.987, (σύμφωνα με την απογραφή του 2011), εκ των οποίων οι 2.513 είναι αγρότες. Στην ευρύτερη περιοχή καλλιεργούνται δημητριακά, ελαιόδεντρα, βαμβάκι αλλά και καρποφόρα δέντρα, ενώ τμήμα της χρησιμοποιείται ως βοσκότοπος. Είναι γνωστό πως η πεδιάδα της Θεσσαλίας αποτελεί μέρος των μεγαλύτερων πεδινών εκτάσεων με μη επαρκής υδατικούς πόρους. Έχει επιβεβαιωθεί ότι γενικά η λεκάνη του Αλμυρού βρίσκεται υπό καθεστώς υπεράντλησης, γεγονός που οδηγεί στην σταδιακή υποβάθμιση μεγάλου μέρους της περιοχής.

## 2.4 Κλιματικά - Μετεωρολογικά δεδομένα

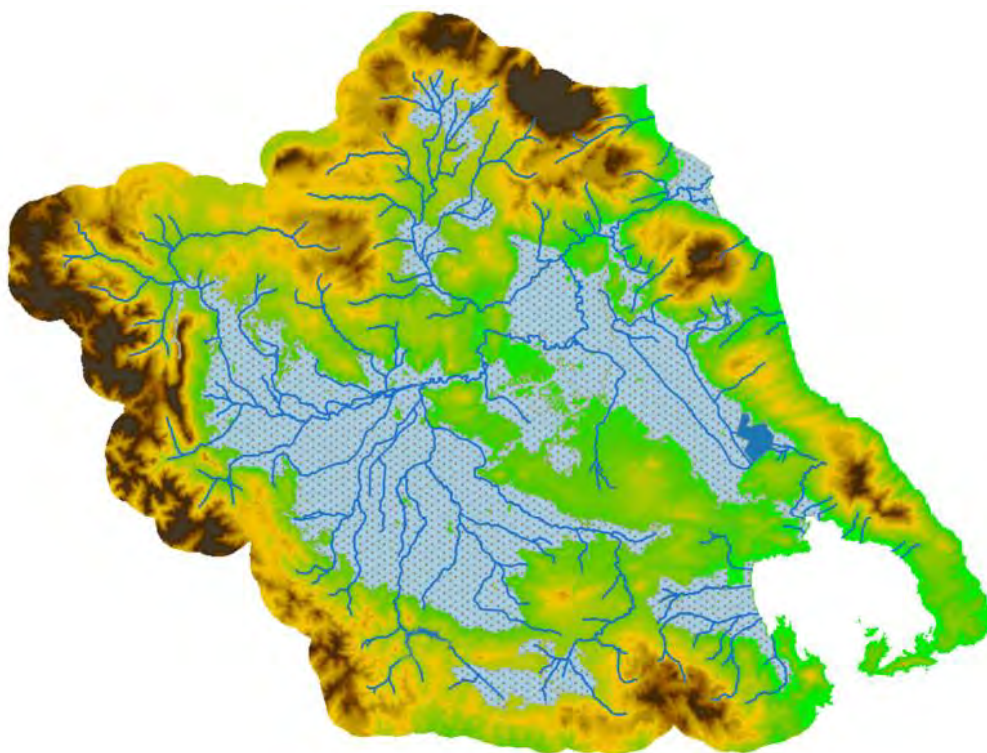
Οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το κλίμα μιας περιοχής είναι το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, η θερμοκρασία, η ηλιοφάνεια, η εξάτμιση, το ποσοστό υγρασίας και οι άνεμοι που πνέουν εκεί. Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας διαθέτει στα όρια της λεκάνης το μετεωρολογικό σταθμό της Αγχιάλου. Πιο συγκεκριμένα, ο σταθμός εντοπίζεται σε υψόμετρο 15m, με γεωγραφικές συντεταγμένες ( $22^{\circ} 48' / 39^{\circ} 15'$ ), ενώ διαθέτει μετρήσεις από την χρονική περίοδο 1956.

Γενικότερα, η υπό μελέτη περιοχή χαρακτηρίζεται από το εύκρατο κλίμα της Θεσσαλίας με ηπειρωτικές περιόδους και θερμοκρασιακές διακυμάνσεις που υπερβαίνουν σε ετήσια βάση τους  $22^{\circ}\text{C}$ . Παρατηρούνται ξηρά καλοκαίρια με τους θερμότερους μήνες τον Ιούλιο και Αύγουστο.

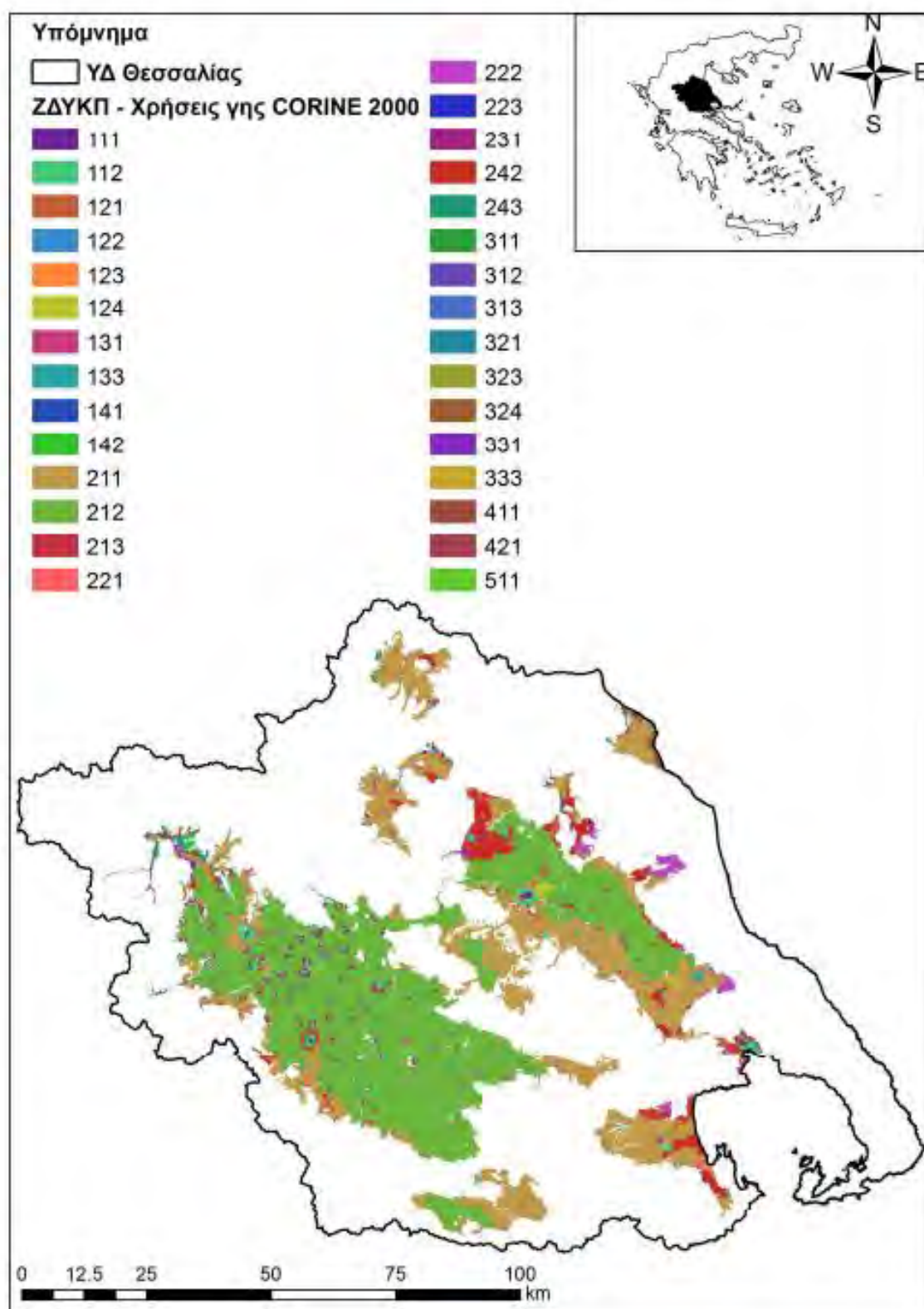
Οι βροχοπτώσεις δεν εκτιμώνται ως ιδιαίτερα υψηλές αφού είναι σχετικά κατανεμημένες στις διαφορετικές εποχές του έτους, με μέση τιμή (στο σταθμό Αγχιάλου) ημερήσιων βροχοπτώσεων τα 55.3 mm (ΥΠΕΚΑ). Η περίοδος Οκτώβριος – Μάρτιος αποτελεί την υγρότερη περίοδο του έτους. Για το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, ο μέσος όρος της ετήσιας επιφανειακής βροχόπτωσης ανέρχεται στα 678 χιλιοστά. Στα ορεινά παρατηρείται χιονόπτωση κατά τους χειμερινούς μήνες, με ύψος που ξεπερνά συχνά τα 50 cm και εντονότερη εμφάνιση από τα νότια με κατεύθυνση προς τα βόρεια και από τα ανατολικά με κατεύθυνση προς τα δυτικά. Ακόμη, οι άνεμοι που πνέουν στην περιοχή είναι απροσδιόριστης διεύθυνσης και μικρής συνήθως έντασης, με τους ανέμους από τα ανατολικά να εμφανίζουν την υψηλότερη συχνότητα.

## 2.5 Καθορισμός Ζωνών Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας

Στο γενικότερο πλαίσιο της Οδηγίας 2007/60/EK και της ΚΥΑ ΗΠ 31822/1542/Ε103/21.7.2010 πραγματοποιήθηκε προκαταρκτική αξιολόγηση για τους κινδύνους πλημμύρας στο σύνολο των Υδατικών Διαμερισμάτων της Ελλάδας. Μέσω αυτής της διαδικασίας καθορίστηκαν οι πλημμύρες ιδιαίτερης ιστορικής σημασίας, σε σχέση με τις συνέπειες τους, ενώ προσδιορίστηκαν τα όρια των ζωνών δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας (ΖΔΥΚΠ). Το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας είναι ένα από τα πιο ευάλωτα της ελληνικής επικράτειας, αφού οι ζώνες επικινδυνότητας αναπτύσσονται στο 31.2% του τόπου (4.172 από τα 13.377 km<sup>2</sup>). Το σχήμα 2.3 απεικονίζει τα όρια των ζωνών αυτών (Πηγή: ΥΠΕΚΑ)



**Σχήμα 2.3:** Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (ΖΔΥΚΠ) στο ΥΔ Θεσσαλίας (GR08) (Πηγή: ΥΠΕΚΑ)



**Σχήμα 2.4 :** Χάρτης χρήσεων γης κατά Corine 2000 στις Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμυρών (ΖΔΥΚΠ) του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (Πηγή : ΥΠΕΚΑ)

## Κεφάλαιο 3ο : Ανάλυση Δεδομένων

### 3.1 Ψηφιακά υψομετρικά μοντέλα (Digital Elevation Models)

Για την υλοποίηση της εργασίας, έγινε χρήση του προγράμματος ArcGIS 10.8.1 καθώς και του προγράμματος γεωχωρικής υδρολογικής προσομοίωσης HEC– HMS, προκειμένου να επιτευχθεί η γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση του Ξεριά. Στο πρόγραμμα αυτό είναι ενσωματωμένη προέκταση του ArcGIS, για την ευκολότερη επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Σε πρώτο στάδιο για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά ψηφιακά μοντέλα εδάφους της περιοχής σε μορφή raster από διαφορετικούς δορυφόρους Copernicus, Aster GDEM V3 καθώς και ESRI.

Η γεωμορφολογική ανάλυση ξεκίνησε στο πρόγραμμα ArcGIS 10.8.1 ώστε να γίνει η απαραίτητη επεξεργασία των ψηφιακών μοντέλων εδάφους για την μετέπειτα επεξεργασία τους στο λογισμικό υδρολογικής προσομοίωσης HEC-HMS.

Το πρώτο ψηφιακό μοντέλο εδάφους είναι το D.E.M από το ESRI Lattice European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS 89) σε ανάλυση κανάβου 10m. Το δεύτερο ψηφιακό μοντέλο εδάφους προέρχεται από τον δορυφόρο Copernicus με ανάλυση 25m ενώ το τρίτο είναι από τον Aster GDEM V3 σε ανάλυση κανάβου 30m. Το τέταρτο ψηφιακό μοντέλο εδάφους πάρθηκε από το ΥΠΕΚΑ με ανάλυση κανάβου 5 m.

Η αρχική μορφή των μοντέλων εδάφους είναι σε μορφή raster ή μωσαϊκού (Σχήμα 3.3) και αφορά ολόκληρη την Ελλάδα, οπότε και απαιτήθηκε η αποκοπή της περιοχής μελέτης μέσω των εργαλείων του ArcGIS και έτσι δημιουργήθηκαν τα τελικά ψηφιακά μοντέλα εδάφους. Εκεί, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση του ανάγλυφου με την δημιουργία χάρτη υψομέτρων (Σχήμα 3.2), ενώ έγινε η ανάλυση της πρώτης παραγώγου του υψομέτρου για την δημιουργία χάρτη κλίσεων, ο οποίος απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3.

Αναλυτικά, τα DEM που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- [D.E.M- E.S.R.I](#)

Η εταιρεία ESRI μέσω της υπηρεσίας World Elevation Terrain παρέχει ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους, το οποίο συντίθεται από πλήθος διαφορετικών πηγών, με όριο 5000 εικονοστοιχείων. Στην περίπτωση που μελετήθηκε το μοντέλο προέκυψε από το συνδυασμό των ακόλουθων πηγών:

| Source                        | Product Name              | Pixel Size |
|-------------------------------|---------------------------|------------|
| Airbus Defence and Space GmbH | Airbus_WorldDEM4Ortho_24m | 24.74m     |
| NASA, NGA, USGS               | SRTM_1_arcsec             | 30.92m     |
| N Robinson, NCEAS             | EarthEnv_DEM90            | 92.77m     |
| USGS, NASA, CGIAR             | SRTM                      | 92.77m     |
| USGS                          | GMTED_2010                | 231.92m    |
| USGS                          | GMTED_2010                | 463.83m    |
| GEBCO                         | GEBCO_2019_15arcsec       | 463.83m    |
| GEBCO                         | GEBCO_14                  | 927.66m    |
| USGS                          | GMTED_2010                | 927.66m    |

**Σχήμα 3.1:** Πηγές δεδομένων μοντέλου εδάφους της ESRI

- [Copernicus: EU-DEM](#)

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους EU-DEM, προκύπτει μέσω της σταθμισμένης προσέγγισης του μέσου όρου, συνδυάζοντας δεδομένα από τα μοντέλα ASTERGDEM\_v1 & SRTM, παρέχοντας έτσι υψομετρική πληροφορία για τριάντα τρία κράτη-μέλη της Ευρώπης αλλά και έξι συνεργαζόμενα. Σε γεωγραφικά πλάτη μεγαλύτερα των 60° μοιρών βόρεια, γίνεται χρήση υψομετρικών δεδομένων από διαθέσιμους ρωσικούς τοπογραφικούς χάρτες. Επίσης, καλύπτει μια περιοχή έκτασης 5.84km<sup>2</sup> ενώ το οριζοντιογραφικό σύστημα αναφοράς του είναι το ETRS89, με κατακόρυφη ακρίβεια +/- 7m και ανάλυση κανάβου 25m.

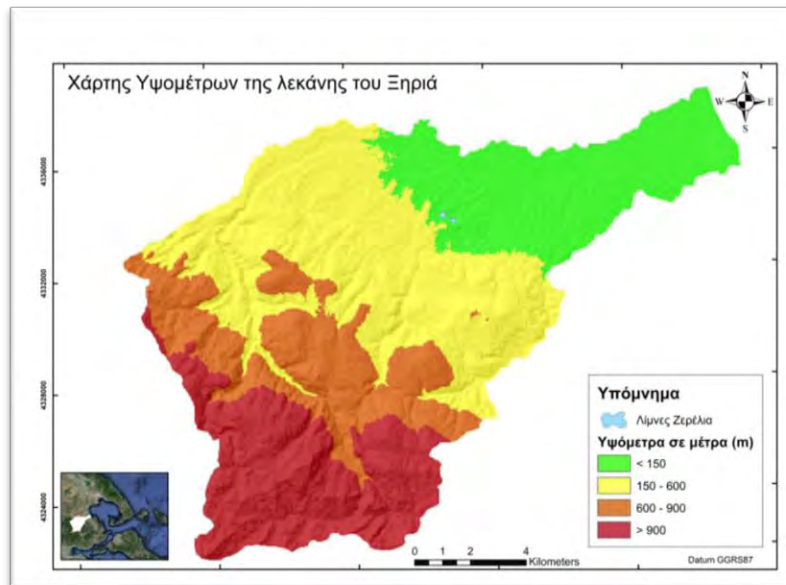
- [D.E.M – ASTER GDEM V3](#)

Ο δορυφόρος EOS AM-1 της διαστημικής αποστολής TERRA, διαθέτει το ραδιόμετρο ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), το οποίο παρέχει εικόνες υψηλής ανάλυσης (15m έως 90m), σε δεκατέσσερα διαφορετικά μήκη κύματος, από το ορατό μέχρι το υπέρυθρο. Το GDEM V3 παρέχει καλύτερη χωρική ανάλυση από τις προηγούμενες εκδόσεις του (V1 & V2), με μεγαλύτερη οριζόντια και κατακόρυφη ακρίβεια. Ακόμα, διατηρεί τη μορφή GeoTIFF και την ίδια

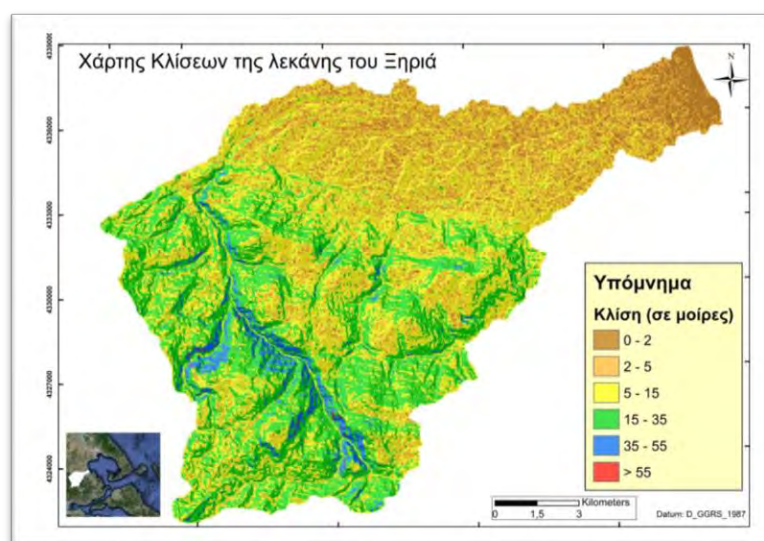
δομή πλέγματος με τα προηγούμενα, με ανάλυση 30 μέτρων και εικονοστοιχεία διαστάσεων 1 x 1 μοίρας.

- D.E.M – ΥΡΕΚΑ (DEM5)

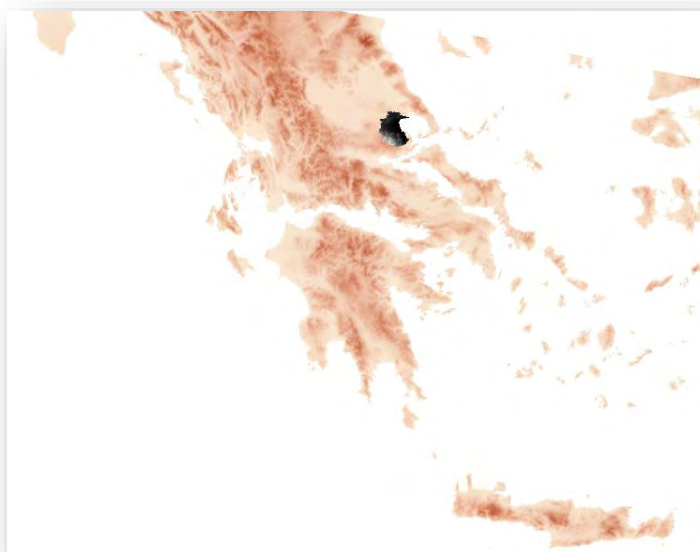
Το μοντέλο με ανάλυση 5m ανήκει στην Κτηματολόγιο Α.Ε και δημιουργήθηκε στα πλαίσια του έργου Large Scale Orthophotos, στο πλαίσιο δημιουργίας ορθοεικόνων από έγχρωμες αερογραφίες.



Σχήμα 3.2: Χάρτης υψομέτρων υδρολογικής λεκάνης Ξηριά



Σχήμα 3.3: Χάρτης Κλίσεων υδρολογικής λεκάνης Ξηριά

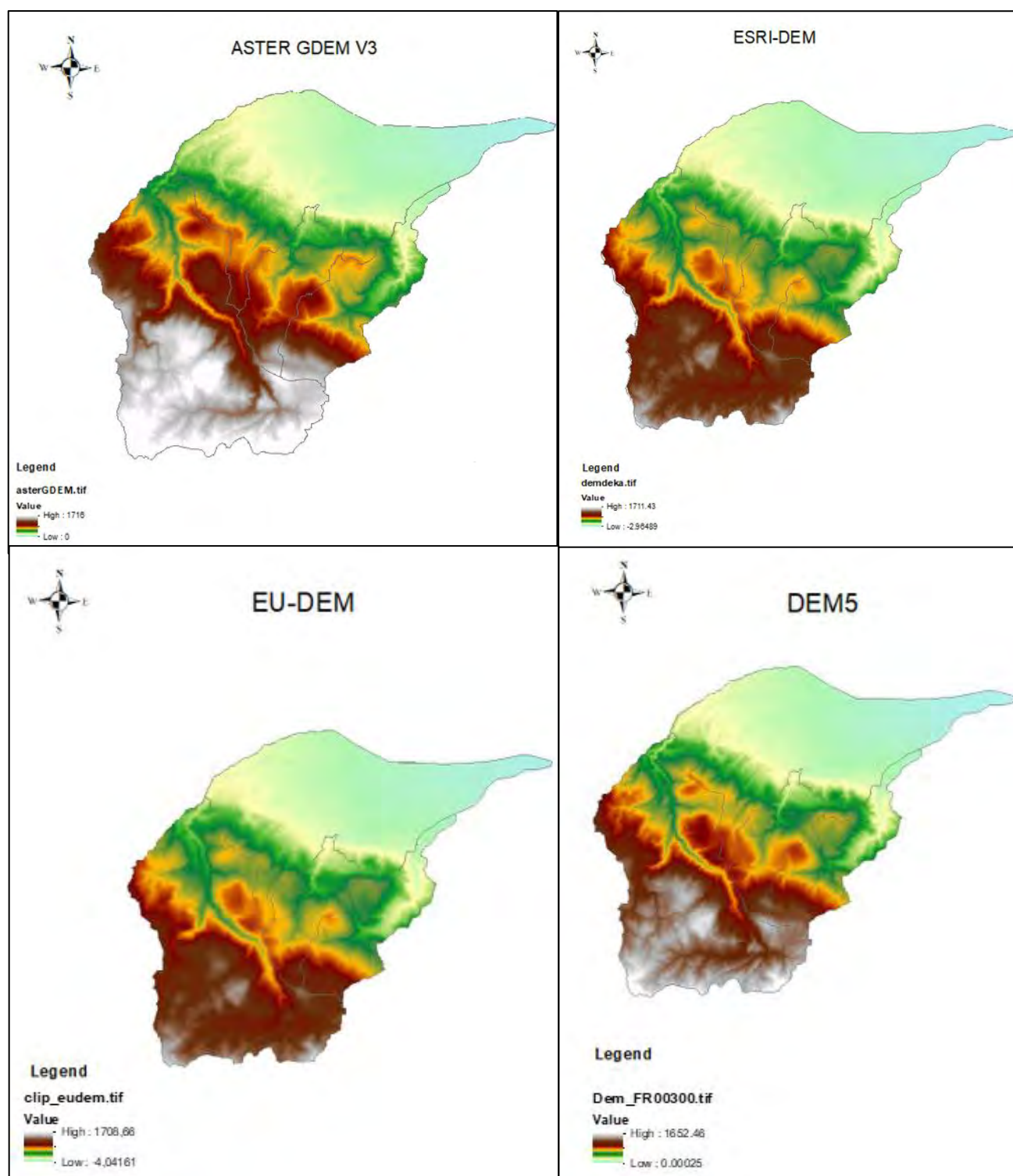


**Σχήμα 3.4:** Αρχική μορφή ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM) από τον δορυφόρο Copernicus

Κάνοντας χρήση της εργαλειοθήκης « editor » του ArcGIS, πραγματοποιήθηκε η δημιουργία ενός νέου αρχείου μορφής πολυγώνων (μάσκα), το οποίο επέβαλλε τα όρια της περιοχής μελέτης. Στην συνέχεια, χρησιμοποιώντας το εργαλείο Clip του Arc Toolbox, με επιλογή του πακέτου Data Management Tools και χρήση της εντολής Clip, βρέθηκαν τα κοινά σημεία ανάμεσα στο raster αρχείο καθώς και της μάσκας, με τελικό αποτέλεσμα το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της λεκάνης που μελετάται.



**Σχήμα 3.5:** Μορφή τελικού ψηφιακού μοντέλου εδάφους μετά την χρήση του ArcGIS



Σχήμα 3.6: Απεικόνιση των τεσσάρων παραγόμενων DEM της λεκάνης του Ξεριά στο ArcGIS

### 3.2 Προ- επεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους

Για την επεξεργασία της λεκάνης απορροής στο περιβάλλον του HEC-HMS, απαιτείται μια αρχική επεξεργασία των χαρακτηριστικών, γεωμορφολογικής και υδρολογικής φύσεως του εδάφους, (terrain preprocessing) , έχοντας ως πρωτογενές αρχείο, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους.

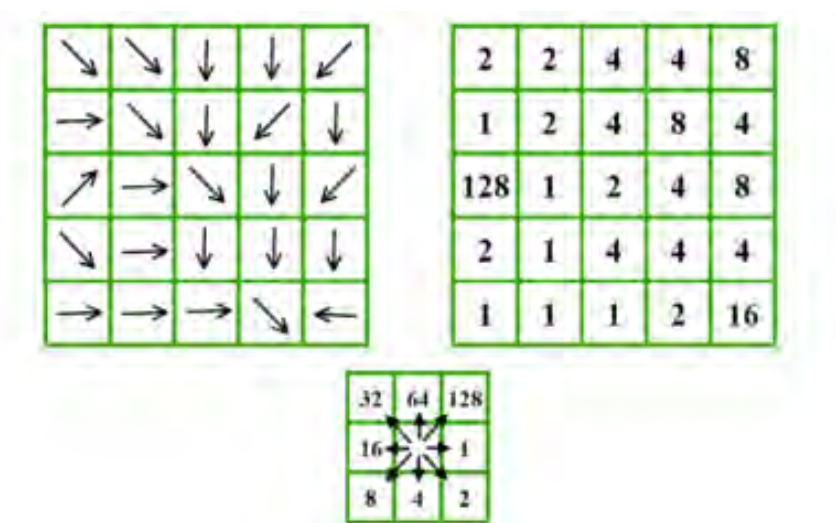
Με αυτόν τον τρόπο, θα γίνει η εξαγωγή των δεδομένων ύψιστης σημασίας για την εισαγωγή του στο HEC-HMS, που θα γίνει αργότερα.



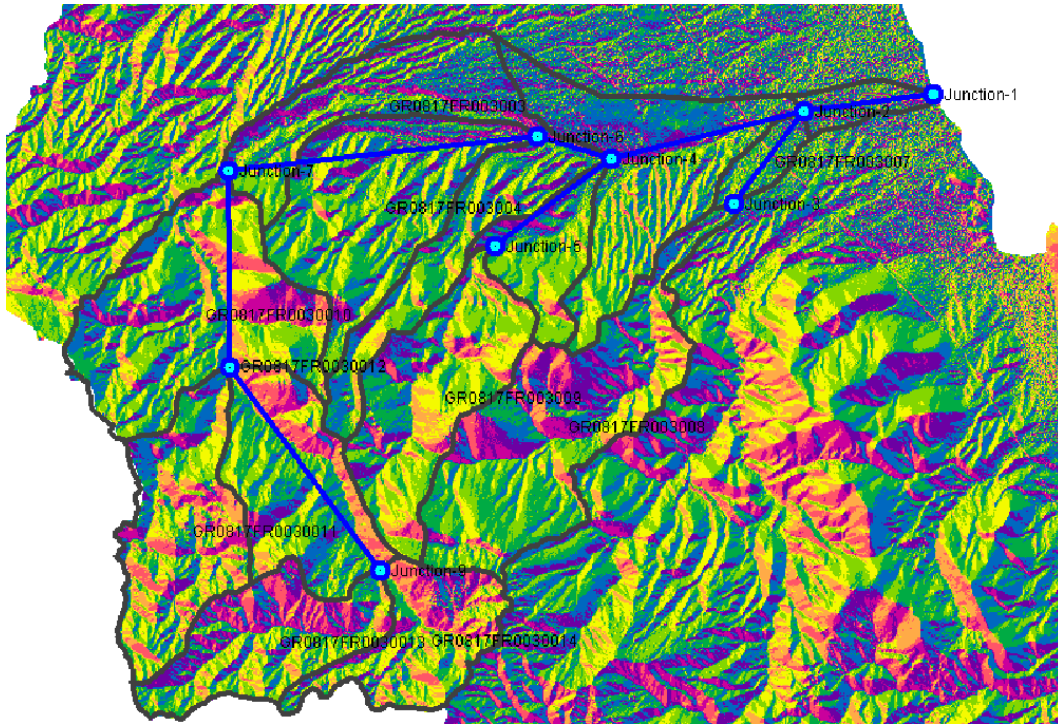
**Σχήμα 3.7 :**Βήματα για την προ-επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους

Παρακάτω παρατίθεται η επεξήγηση των εντολών που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

- **Terrain Reconditioning:** Τροποποίηση των κελιών του Ψ.Ε.Μ προσκείμενα των ρεμάτων, με στόχο την διόρθωση τυχόν λανθασμένων υψομέτρων που είχαν προκύψει κατά την υψομετρική αποτύπωση.
- **Preprocess Sinks:** Με αυτή την εντολή γίνεται διόρθωσή των βυθισμάτων, με την αύξηση του υψομέτρου των φατνίων μικρότερου υψομέτρου από το όριο που επέβαλλε ο χρήστης, ώστε να βρεθούν όλα στο ίδιο υψόμετρο.
- **Flow Direction:** Καθορισμός της κατεύθυνσης του νερού για κάθε φατνίο και εν συνεχεία παραγωγή κανάβου διεύθυνσης ροής (Σχήμα 3.8). Για κάθε φατνίο, υπάρχουν οκτώ διευθύνσεις κατά τις οποίες το νερό κινείται από το ένα φατνίο προς τα γειτονικά του. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στο σχήμα παρακάτω.

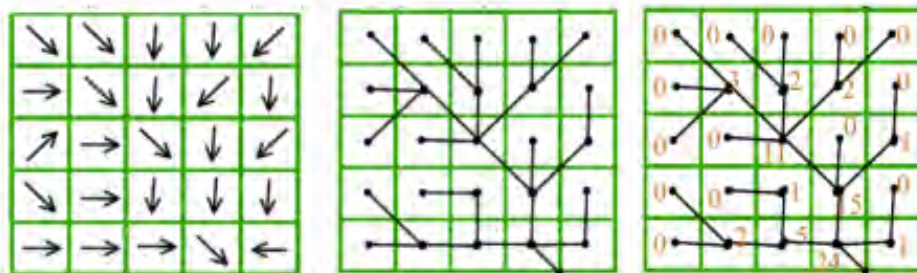


Σχήμα 3.8: Κανάβος διεύθυνσης ροής (Στάμου & Σκοπελίτη, 2009)



Σχήμα 3.9 : Διεύθυνση ροής στην λεκάνη απορροής του Ξεριά στο περιβάλλον του HEC-HMS (flow direction)

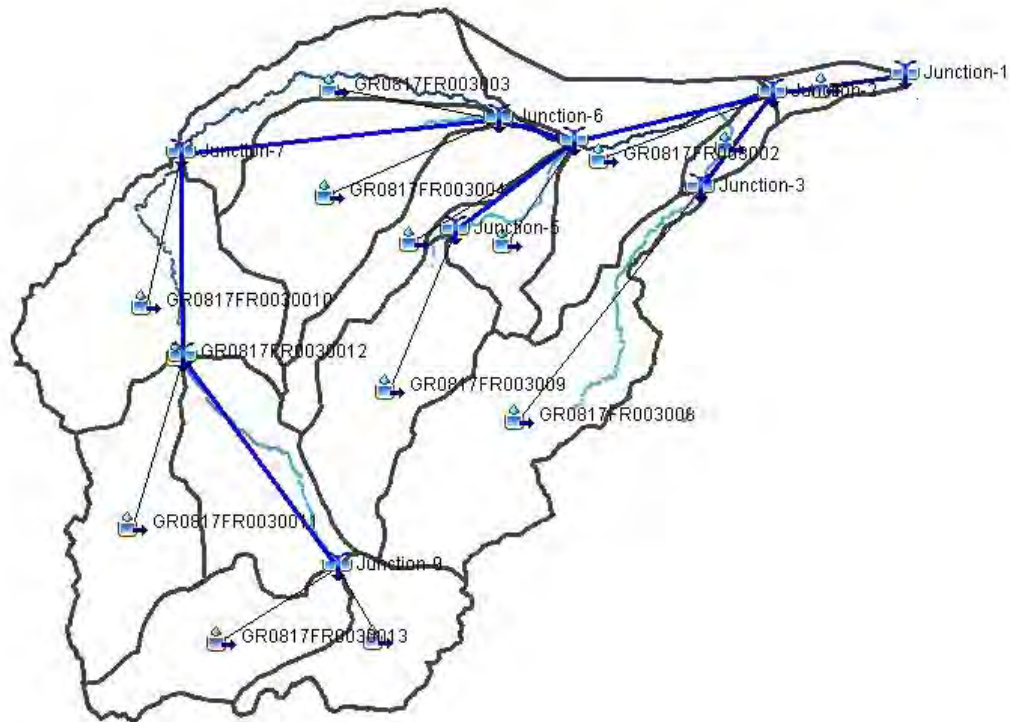
- **Flow Accumulation:** Με την χρήση αυτού του εργαλείου γίνεται η δημιουργία του κανάβου συγκεντρωτικής ροής, ο οποίος στηρίζεται στον κανάβο διεύθυνσης απορροής (Σχήμα 3.8) και ο ρόλος της είναι ο προσδιορισμός ενός μοναδικού μονοπατιού, για καθένα φαινόμενο που ακολουθείται από τις σταγόνες της βροχόπτωσης μέχρι να οδηγηθεί στον κόμβο εξόδου.



Σχήμα 3.10: Κανάβος συγκεντρωτικής ροής (Στάμου και Σκοπελίτη, 2009)

- **Identify Streams:** Ο χρήστης ορίζει ένα κατώφλι της περιοχής αποστράγγισης και τα φαινόμενα που διαθέτουν ποσότητα ροής μεγαλύτερης από αυτό το όριο αναγνωρίζονται σαν φαινόμενα του υδατορέματος. Όσο πιο μικρό το όριο

επιλογής, τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο αριθμός των επιμέρους μικρότερων υπί-  
λεκανών που θα οριοθετηθούν σε μεταγενέστερο στάδιο ανάλυσης. Το όριο που  
θεωρήθηκε στην παρούσα ανάλυση είναι το 1% της συνολικής έκτασης της  
περιοχής μελέτης, δηλαδή τα 1,9km.



**Σχήμα 3.11:** Απεικόνιση του υδατορέματος μετά την εντολή identify streams στο περιβάλλον του HEC-HMS

- **Break Points:** Με την εντολή Break Point Creation Tool, ο χρήστης δύναται να ορίσει το κόμβου εξόδου της λεκάνης απορροής. Αυτός ο κόμβος ή σημείο πρέπει να τοποθετηθεί πάνω σε κάποιο φατνίο που έχει αναγνωριστεί από το προηγούμενο βήμα (identify streams).



Σχήμα 3.12 : Break Point Creation Tool

### 3.3 Εισαγωγή γεωαναφερμένων αρχείων εισόδου στο HEC-HMS και παραγωγή των τοπογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης

Το μενού του λογισμικού HEC-HMS παρέχει την ικανότητα εισαγωγής γεωαναφερμένων στοιχείων από το ArcGIS, στοιχεία ιδιαίτερα χρήσιμα για την μοντελοποίηση της λεκάνης απορροής. Μέσω της εργαλειοθήκης GIS< Import Georeferenced Elements έγινε η εισαγωγή των απαραίτητων shapefiles για την δημιουργία του αρχείου υδρολογικής προσομοίωσης.

Αφού έγινε η εισαγωγή των γεωχωρικών δεδομένων και έγινε η επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή των τοπογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής. Πιο συγκεκριμένα, κάνοντας χρήση της καρτέλας Basin Characteristics υπολογίστηκαν τα χαρακτηριστικά τοπογραφικού χαρακτήρα τόσο των υπο-λεκανών όσο και των υδατορευμάτων που συνθέτουν την λεκάνη. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποτελούν το μήκος, η κλίση της λεκάνης απορροής, η κλίση του ποταμού καθώς και το σύνολο του μήκους του μεγαλύτερου υδατορέματος σε κάθε μία από τις μικρότερες λεκάνες που συνθέτουν την λεκάνη απορροής που μελετάται. Επιπρόσθετα, μέσω αυτής της εντολής υπολογίζονται το κέντρο βάρους και το υψόμετρο τους μεγαλύτερου υδατορέματος στην κάθε υπολεκάνη. Ταυτόχρονα πραγματοποιείται η εύρεση της απόστασης του κέντρου βάρους της κάθε μικρότερης λεκάνης προσκείμενα του υδατορέματος με το μεγαλύτερο μήκος από την έξοδό της.

Ακολουθούν τα χαρακτηριστικά των υπολεκανών, όπως αυτά υπολογίστηκαν από το λογισμικό HEC-HMS:



## 1) DEM resolution 10m (ESRI Lattice European Terrestrial Reference System)

| Subbasin        | Longest Flowpath Length (KM) | Longest Flowpath Slope (M/M) | Centroidal Flowpath Length (KM) | Centroidal Flowpath Slope (M/M) | 10-85 Flowpath Length (KM) | 10-85 Flowpath Slope (M/M) | Basin Slope (M/M) | Basin Relief (M) | Relief Ratio | Elongation Ratio | Drainage Density (KM/KM <sup>2</sup> ) |
|-----------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|------------------|--------------|------------------|----------------------------------------|
| GR0817FR003001  | 3.58436                      | 0.00717                      | 1.98039                         | 0.00492                         | 2.68827                    | 0.00584                    | 0.02662           | 24.9352          | 0.00696      | 0.51238          | 1.33405                                |
| GR0817FR003002  | 10.01586                     | 0.0391                       | 4.72454                         | 0.00847                         | 7.5119                     | 0.01876                    | 0.07198           | 580.52222        | 0.05796      | 0.49062          | 0.3333                                 |
| GR0817FR003003  | 10.67374                     | 0.02618                      | 5.12088                         | 0.01302                         | 8.00531                    | 0.01362                    | 0.08182           | 429.69643        | 0.04026      | 0.38855          | 0.75948                                |
| GR0817FR003004  | 10.16611                     | 0.06806                      | 4.4491                          | 0.01865                         | 7.62458                    | 0.06055                    | 0.15053           | 697.74687        | 0.06863      | 0.49178          | 0.1274                                 |
| GR0817FR003005  | 12.88127                     | 0.06495                      | 6.37514                         | 0.0213                          | 9.66095                    | 0.05965                    | 0.14304           | 836.76207        | 0.06496      | 0.28954          | 0.19209                                |
| GR0817FR003006  | 6.34669                      | 0.08276                      | 3.32138                         | 0.02311                         | 4.76001                    | 0.06219                    | 0.14783           | 549.02842        | 0.08651      | 0.47025          | 0.70063                                |
| GR0817FR003007  | 2.25022                      | 0.01444                      | 1.26868                         | 0.01162                         | 1.68766                    | 0.01306                    | 0.02862           | 52.80931         | 0.02347      | 0.8042           | 0.79644                                |
| GR0817FR003008  | 16.22063                     | 0.07097                      | 9.58227                         | 0.02904                         | 12.16547                   | 0.06619                    | 0.26811           | 1289.47561       | 0.0795       | 0.34943          | 0.31305                                |
| GR0817FR003009  | 10.65119                     | 0.10889                      | 4.83245                         | 0.06281                         | 7.9884                     | 0.095                      | 0.26365           | 1164.08211       | 0.10929      | 0.43573          | 0.0592                                 |
| GR0817FR0030010 | 9.89931                      | 0.0909                       | 5.53828                         | 0.02981                         | 7.42448                    | 0.06997                    | 0.32035           | 3.4E+38          | 3.43458E+34  | 0.56219          | 0.28379                                |
| GR0817FR0030011 | 10.73723                     | 0.09317                      | 6.34349                         | 0.10104                         | 8.05293                    | 0.08128                    | 0.37563           | 3.4E+38          | 3.16655E+34  | 0.41978          | 0.00107                                |
| GR0817FR0030012 | 8.51255                      | 0.09196                      | 3.47869                         | 0.04185                         | 6.38442                    | 0.05813                    | 0.46592           | 998.7077         | 0.11732      | 0.51802          | 0.48658                                |
| GR0817FR0030013 | 9.0735                       | 0.08757                      | 4.60632                         | 0.05325                         | 6.80512                    | 0.04201                    | 0.37795           | 3.4E+38          | 3.74718E+34  | 0.45137          | 0                                      |
| GR0817FR0030014 | 6.54787                      | 0.10685                      | 2.16128                         | 0.09796                         | 4.91091                    | 0.0665                     | 0.37306           | 3.4E+38          | 5.19252E+34  | 0.56355          | 0.00253                                |

## 2) DEM resolution 5m (YIIEKA)

| Subbasin        | Longest Flowpath Length (KM) | Longest Flowpath Slope (M/M) | Centroidal Flowpath Length (KM) | Centroidal Flowpath Slope (M/M) | 10-85 Flowpath Length (KM) | 10-85 Flowpath Slope (M/M) | Basin Slope (M/M) | Basin Relief (M) | Relief Ratio | Elongation Ratio | Drainage Density (KM/KM <sup>2</sup> ) |
|-----------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|------------------|--------------|------------------|----------------------------------------|
| GR0817FR003001  | 2.27727                      | 0.00705                      | 1.35634                         | 0.00507                         | 1.70795                    | 0.00596                    | 0.02375           | 87.68783         | 0.00729      | 0.50112          | 2.8286                                 |
| GR0817FR003002  | 6.63334                      | 0.05406                      | 2.89537                         | 0.00891                         | 4.975                      | 0.03202                    | 0.07732           | 1920.8047        | 0.05484      | 0.46031          | 0.53905                                |
| GR0817FR003003  | 6.76388                      | 0.01945                      | 3.28553                         | 0.01262                         | 5.07291                    | 0.01278                    | 0.08956           | 1419.09772       | 0.03974      | 0.38099          | 1.27594                                |
| GR0817FR003004  | 6.46037                      | 0.0676                       | 2.81967                         | 0.0192                          | 4.84528                    | 0.05984                    | 0.15617           | 2305.7054        | 0.06759      | 0.48086          | 0.35873                                |
| GR0817FR003005  | 7.30373                      | 0.07012                      | 3.18911                         | 0.0238                          | 5.47779                    | 0.06562                    | 0.14927           | 2704.22242       | 0.07012      | 0.3173           | 0.57084                                |
| GR0817FR003006  | 3.91923                      | 0.08418                      | 1.97455                         | 0.02574                         | 2.93942                    | 0.06314                    | 0.15028           | 1817.88958       | 0.08785      | 0.47318          | 1.05242                                |
| GR0817FR003007  | 2.35759                      | 0.01525                      | 0.96217                         | 0.01228                         | 1.76819                    | 0.0135                     | 0.03209           | 190.48474        | 0.0153       | 0.47695          | 1.73965                                |
| GR0817FR003008  | 10.44087                     | 0.06877                      | 6.26805                         | 0.02821                         | 7.83065                    | 0.0627                     | 0.27953           | 4242.06779       | 0.07695      | 0.33732          | 0.7126                                 |
| GR0817FR003009  | 6.78837                      | 0.10736                      | 3.17633                         | 0.06127                         | 5.09128                    | 0.09167                    | 0.27489           | 3856.3068        | 0.10759      | 0.42481          | 0.55868                                |
| GR0817FR0030010 | 6.58205                      | 0.05422                      | 3.51037                         | 0.02625                         | 4.93654                    | 0.0448                     | 0.34222           | 3110.25214       | 0.0895       | 0.52538          | 0.60614                                |
| GR0817FR0030011 | 6.96511                      | 0.08949                      | 4.20097                         | 0.0946                          | 5.22383                    | 0.07719                    | 0.40625           | 3542.84872       | 0.09634      | 0.4021           | 0.5266                                 |
| GR0817FR0030012 | 5.47034                      | 0.08969                      | 2.29273                         | 0.04179                         | 4.10276                    | 0.05736                    | 0.5017            | 3298.18345       | 0.11419      | 0.50089          | 0.81334                                |
| GR0817FR0030013 | 5.73941                      | 0.08713                      | 2.87318                         | 0.05224                         | 4.30455                    | 0.04892                    | 0.4177            | 2642.88955       | 0.08721      | 0.44339          | 0.50717                                |
| GR0817FR0030014 | 4.12441                      | 0.10564                      | 1.32725                         | 0.09504                         | 3.09331                    | 0.07783                    | 0.4155            | 2637.58762       | 0.12112      | 0.55593          | 0.28731                                |

## 3) DEM resolution 30m (Aster GDEM V3)

| Subbasin        | Longest Flowpath Length (KM) | Longest Flowpath Slope (M/M) | Centroidal Flowpath Length (KM) | Centroidal Flowpath Slope (M/M) | 10-85 Flowpath Length (KM) | 10-85 Flowpath Slope (M/M) | Basin Slope (M/M) | Basin Relief (M) | Relief Ratio | Elongation Ratio | Drainage Density (KM/KM <sup>2</sup> ) |
|-----------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|------------------|--------------|------------------|----------------------------------------|
| GR0817FR003001  | 2.35428                      | 0.00595                      | 1.65625                         | 0.00242                         | 1.76571                    | 0.00237                    | 0.04791           | 18               | 0.00765      | 0.78009          | 1.09965                                |
| GR0817FR003002  | 9.30055                      | 0.03855                      | 4.3067                          | 0.01012                         | 6.97541                    | 0.01726                    | 0.11987           | 578              | 0.06215      | 0.52836          | 0.32594                                |
| GR0817FR003003  | 10.9864                      | 0.03632                      | 4.69269                         | 0.01257                         | 8.2398                     | 0.01744                    | 0.12454           | 421              | 0.03832      | 0.37749          | 0.74447                                |
| GR0817FR003004  | 9.75399                      | 0.06208                      | 6.11924                         | 0.02149                         | 7.31549                    | 0.03884                    | 0.1838            | 692              | 0.07095      | 0.51256          | 0.16095                                |
| GR0817FR003005  | 13.9595                      | 0.05899                      | 6.75462                         | 0.01888                         | 10.46963                   | 0.05577                    | 0.17536           | 835              | 0.05982      | 0.26717          | 0.37806                                |
| GR0817FR003006  | 5.94726                      | 0.08777                      | 2.81083                         | 0.02277                         | 4.46045                    | 0.06485                    | 0.19233           | 539              | 0.09063      | 0.50183          | 0.6917                                 |
| GR0817FR003007  | 2.65761                      | 0.01656                      | 0.55951                         | 0.01286                         | 1.99321                    | 0.01309                    | 0.08953           | 47               | 0.01769      | 0.68092          | 0.48827                                |
| GR0817FR003008  | 16.5689                      | 0.06989                      | 9.74648                         | 0.02965                         | 12.42667                   | 0.06475                    | 0.28448           | 1282             | 0.07737      | 0.34209          | 0.39264                                |
| GR0817FR003009  | 10.54144                     | 0.1053                       | 4.70535                         | 0.06737                         | 7.90608                    | 0.09589                    | 0.28306           | 1169             | 0.1109       | 0.44026          | 0.17759                                |
| GR0817FR0030010 | 9.63716                      | 0.0924                       | 4.61107                         | 0.03177                         | 7.22787                    | 0.08325                    | 0.32579           | 922              | 0.09567      | 0.57748          | 0.25875                                |
| GR0817FR0030011 | 10.56151                     | 0.09506                      | 5.95771                         | 0.10709                         | 7.92113                    | 0.08147                    | 0.3662            | 1057             | 0.10008      | 0.42676          | 0.25052                                |
| GR0817FR0030012 | 8.48731                      | 0.09491                      | 3.29773                         | 0.04351                         | 6.36548                    | 0.07998                    | 0.47              | 1003             | 0.11818      | 0.51956          | 0.48202                                |
| GR0817FR0030013 | 9.15385                      | 0.08679                      | 4.60992                         | 0.05347                         | 6.86539                    | 0.04862                    | 0.35742           | 794              | 0.08674      | 0.4474           | 0.21589                                |
| GR0817FR0030014 | 6.77844                      | 0.1012                       | 2.17937                         | 0.09269                         | 5.08383                    | 0.06847                    | 0.36249           | 783              | 0.11551      | 0.54438          | 0.06363                                |

## 4) DEM resolution 25m (Copernicus)

| Subbasin        | Longest Flowpath Length (KM) | Longest Flowpath Slope (M/M) | Centroidal Flowpath Length (KM) | Centroidal Flowpath Slope (M/M) | 10-85 Flowpath Length (KM) | 10-85 Flowpath Slope (M/M) | Basin Slope (M/M) | Basin Relief (M) | Relief Ratio | Elongation Ratio | Drainage Density (KM/KM <sup>2</sup> ) |
|-----------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|------------------|--------------|------------------|----------------------------------------|
| GR0817FR003001  | 2.71725                      | 0.00698                      | 1.02866                         | 0.0063                          | 2.03793                    | 0.0062                     | 0.01487           | 21.51248         | 0.00792      | 0.67589          | 0.00                                   |
| GR0817FR003002  | 9.71638                      | 0.04008                      | 4.78649                         | 0.00798                         | 7.28729                    | 0.0214                     | 0.05866           | 571.3819         | 0.05881      | 0.50574          | 0                                      |
| GR0817FR003003  | 10.27423                     | 0.02752                      | 4.75187                         | 0.01379                         | 7.70567                    | 0.01462                    | 0.06504           | 420.16946        | 0.0409       | 0.40366          | 0                                      |
| GR0817FR003004  | 9.9726                       | 0.06858                      | 4.44418                         | 0.0217                          | 7.47945                    | 0.06355                    | 0.13044           | 683.86916        | 0.06857      | 0.50132          | 0                                      |
| GR0817FR003005  | 12.95324                     | 0.0631                       | 6.45888                         | 0.02021                         | 9.71493                    | 0.06064                    | 0.12224           | 820.86052        | 0.06337      | 0.28793          | 0                                      |
| GR0817FR003006  | 6.55557                      | 0.07984                      | 3.71562                         | 0.02149                         | 4.91668                    | 0.05958                    | 0.1413            | 537.89492        | 0.08205      | 0.45526          | 0                                      |
| GR0817FR003007  | 4.04935                      | 0.01349                      | 1.76798                         | 0.00923                         | 3.03702                    | 0.0133                     | 0.02516           | 55.04299         | 0.01359      | 0.44689          | 0                                      |
| GR0817FR003008  | 15.57263                     | 0.08182                      | 9.07349                         | 0.03224                         | 11.67947                   | 0.06692                    | 0.24477           | 1276.42471       | 0.08197      | 0.36398          | 0                                      |
| GR0817FR003009  | 10.33547                     | 0.11172                      | 4.67022                         | 0.06776                         | 7.7516                     | 0.09861                    | 0.23905           | 1153.09229       | 0.11157      | 0.44904          | 0                                      |
| GR0817FR0030010 | 9.51062                      | 0.08703                      | 4.70646                         | 0.046                           | 7.13297                    | 0.07217                    | 0.27849           | 909.25668        | 0.0956       | 0.58516          | 0                                      |
| GR0817FR0030011 | 10.45633                     | 0.09311                      | 6.10572                         | 0.10414                         | 7.84225                    | 0.08089                    | 0.31008           | 1038.94788       | 0.09936      | 0.43105          | 0                                      |
| GR0817FR0030012 | 8.201                        | 0.09763                      | 3.28042                         | 0.04559                         | 6.15075                    | 0.07782                    | 0.42475           | 976.47549        | 0.11907      | 0.5377           | 0                                      |
| GR0817FR0030013 | 9.07496                      | 0.08522                      | 4.70971                         | 0.05141                         | 6.80622                    | 0.04489                    | 0.30801           | 773.39569        | 0.08522      | 0.45129          | 0                                      |
| GR0817FR0030014 | 6.50765                      | 0.10264                      | 2.01458                         | 0.10055                         | 4.88074                    | 0.06556                    | 0.3006            | 771.33374        | 0.11853      | 0.56703          | 0                                      |

## Κεφάλαιο 4ο : Μοντέλο υδρολογικής προσομοίωσης: Υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS

### 4.1 Μοντέλο HEC-HMS

Αναφέρθηκε προηγουμένως ότι για την υλοποίηση των σεναρίων έγινε χρήση του λογισμικού HEC-HMS. Το Κέντρο Τεχνικής Υδρολογίας του Ινστιτούτου υδατικών πόρων του Σώματος Μηχανικών του αμερικανικού στρατού, ανέπτυξε το μοντέλο υδρολογικής ανάλυσης Hydrologic Modeling System, με στόχο την αναπαράσταση τη βροχόπτωσης – απορροής σε δενδριτικές λεκάνες απορροής.

Η δημιουργία του μοντέλου της λεκάνης απορροής πραγματοποιείται με διαχωρισμό του υδρολογικού κύκλου σε παραμέτρους και με ορισμό οριακών συνθηκών σε αυτή. Κάθε παράμετρος του υδρολογικού κύκλου, υπολογίζεται κάνοντας χρήση κάποιου μαθηματικού μοντέλου. Επιπρόσθετα, εφαρμόζεται σε πλήθος διαφορετικών γεωγραφικών περιοχών όπως σε μεγάλου μεγέθους λεκάνες, αλλά και μικρές αστικές ή ημιαστικές. Η γνώση του τρόπου επίτευξης του στόχου της υδρολογικής μελέτης, όπως και η κρίση ή η εμπειρία του εκάστοτε μελετητή, διαδραματίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην σωστή επιλογή του μοντέλου. Επιπλέον, το λογισμικό διαθέτει μια βάση δεδομένων, επιτρέπει την εισαγωγή των δεδομένων εισόδου και στη συνέχεια εξάγει τα αποτελέσματα κάνοντας χρήση διάφορων ενσωματωμένων εργαλείων. Το υδρογράφημα της λεκάνης απορροής συνιστά το αποτέλεσμα της διαδικασίας που περιγράφεται και χρησιμοποιείται σε ποικίλες εφαρμογές σχετικά με το νερό όπως για παράδειγμα μελέτες διαχείρισης υδατικών πόρων, πρόγνωσης διευθέτησης περιοχής κατάκλισης πλημμύρας, κ.α. (Πηγή: William 2010).

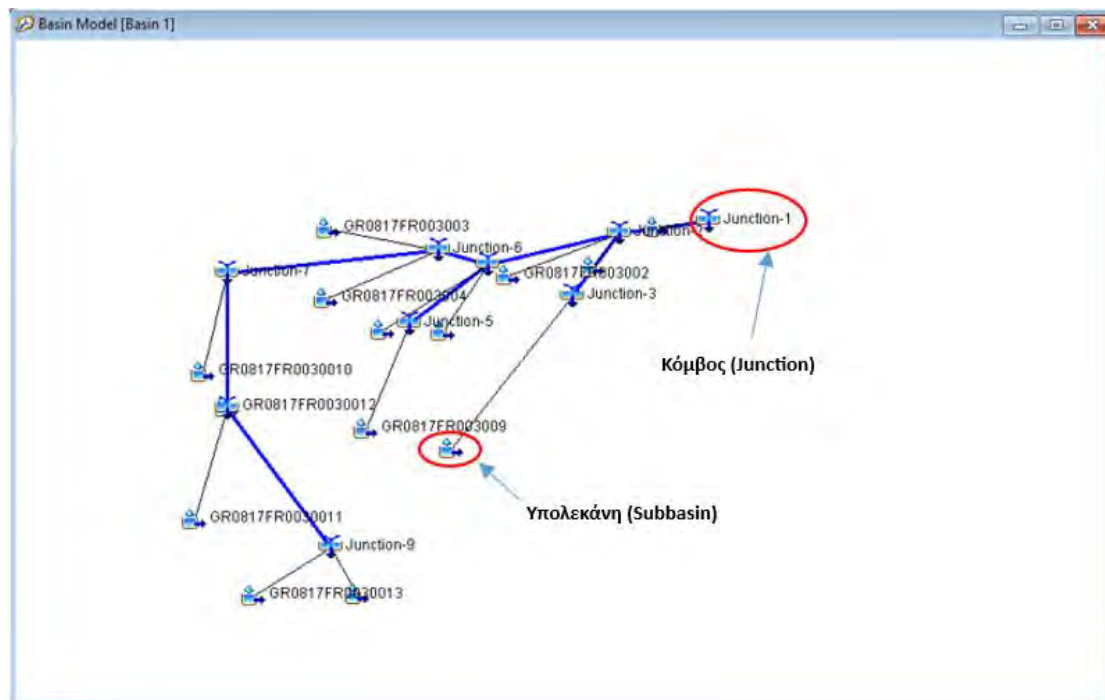
Στο λογισμικό γίνεται χρήση ορισμένων μεθόδων υπολογισμού (μαθηματικά πρότυπα) που αναλύονται εκτενώς στην συνέχεια. Αυτά είναι το πρότυπο εκτίμησης των απωλειών της βροχόπτωσης, αυτό του υπολογισμού άμεσης και βασικής απορροής και τέλος το πρότυπο διόδευσης πλημμυρογραφήματος.

Η φυσική αναπαράσταση της λεκάνης γίνεται με ένα μοντέλο λεκάνης (basin model). Για την προσομοίωση των διαδικασιών απορροής, τα υδρολογικά στοιχεία συνδέονται μέσω ενός δενδροειδούς δικτύου. Τα υδρολογικά στοιχεία αποτελούν: η υπολεκάνη (subbasin), η δεξαμενή (reservoir), το κανάλι (reach), η πηγή (source), η συμβολή (junction), και ο αποδέκτης (sink). Το μοντέλο λεκάνης απορροής που παράγεται, αποτυπώνει τα υδρολογικά στοιχεία συνδέοντας τα σε ένα δενδροειδές δίκτυο, με τη διαδικασία υπολογισμού να ξεκινά από ανάντη προς κατόντη. Στη συνέχεια ο χρήστης επιλέγει την μέθοδο υπολογισμού (μαθηματικό πρότυπο) που θα χρησιμοποιήσει για την εκτίμηση των απωλειών βροχής, της βασικής απορροής, της άμεσης απορροής, της διόδευσης πλημμύρας, ώστε να επιτύχει το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Για την επίτευξη των παραπάνω, απαιτείται μια <<προεργασία>>. Για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας, τα γεωμορφολογικά και υδρολογικά δεδομένα εισήχθησαν στο πρόγραμμα μετά την επεξεργασία τους στο περιβάλλον του ArcGIS, όπου έγινε η επεξεργασία των τεσσάρων ψηφιακών μοντέλων εδάφους (Digital Elevation Model). Ειδικότερα, δημιουργήθηκαν δύο αρχεία εισόδου. Το πρώτο αποτελεί το αρχείο χάρτη (terrain data) όπου οτικοποιούνται οι υπολεκάνες και το δεύτερο αποτελεί το μοντέλο λεκάνης απορροής (basin model), όπου περιλαμβάνονται τα υδρολογικά και δεδομένα γεωμορφολογικής φύσεως του Ξεριά. Έχοντας εισάγει τα δύο αυτά αρχεία στο HEC-HMS, δημιουργήθηκε το μετεωρολογικό μοντέλο, ενώ ρυθμίστηκαν οι απαραίτητες παράμετροι για την ολοκλήρωση του μοντέλου.

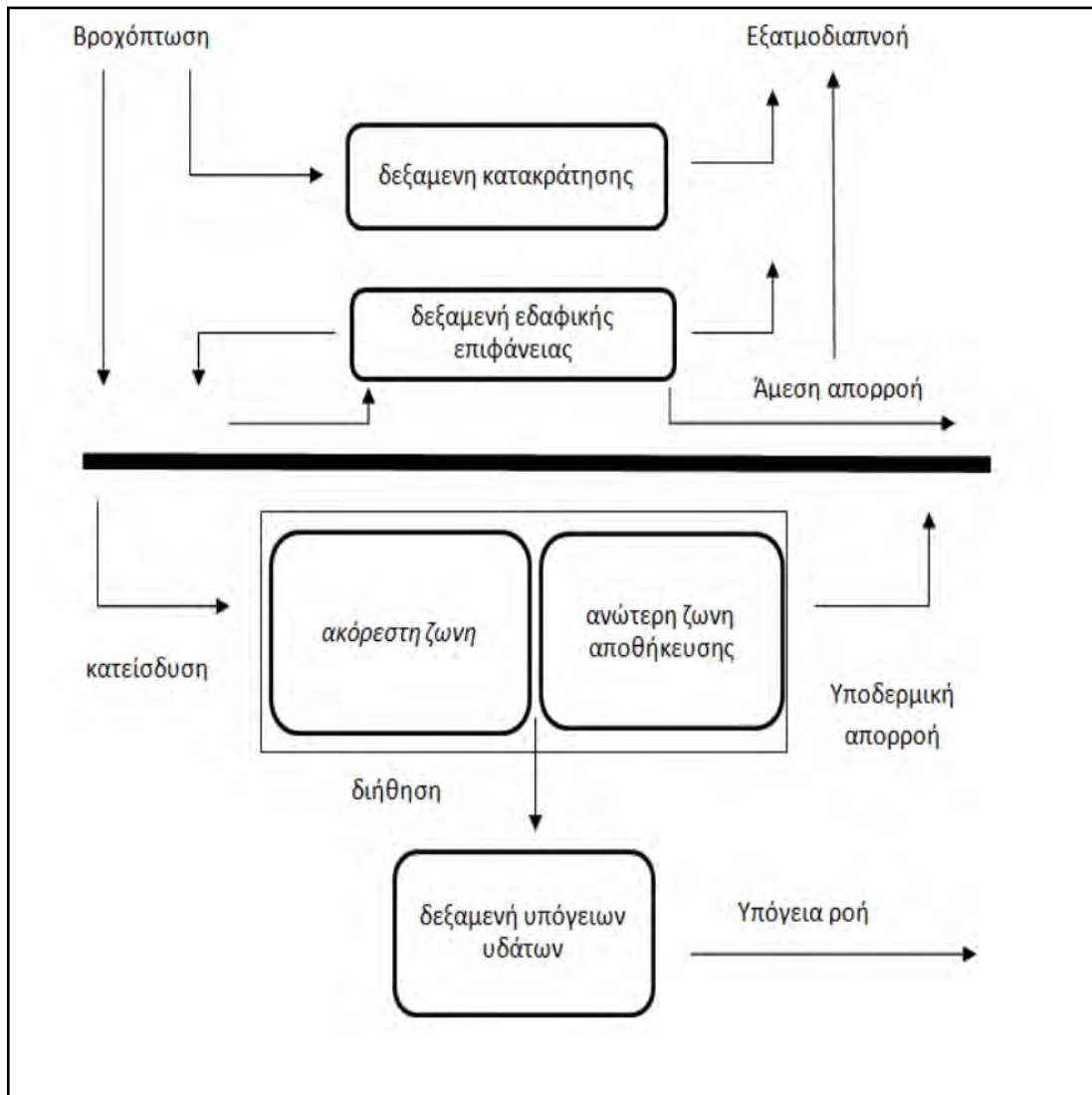
## 4.2 Μετασχηματισμός λεκάνης και καθορισμός προτύπων στο λογισμικό HEC-HMS

### 4.2.1 Μοντέλο λεκάνης απορροής (Basin Model)



Σχήμα 4.1: Basin model του Ξεριά στο περιβάλλον του HEC-HMS

Έχοντας εισάγει το μοντέλο της λεκάνης απορροής, επόμενο βήμα αποτελεί ο ορισμός των κατάλληλων προτύπων υπολογισμού της δεξαμενής κατακράτησης, της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας, των απωλειών βροχής, αλλά και άμεσης και βασικής απορροής σε κάθε μία από τις δεκατέσσερις υπολεκάνες. Ακόμα, πρέπει να γίνει διόδευση πλημμύρας για το σύνολο των τμημάτων του υδατορέματος. Παρακάτω απεικονίζεται ο τρόπος δόμησης των συνιστωσών του ισοζυγίου νερού στο HEC-HMS.



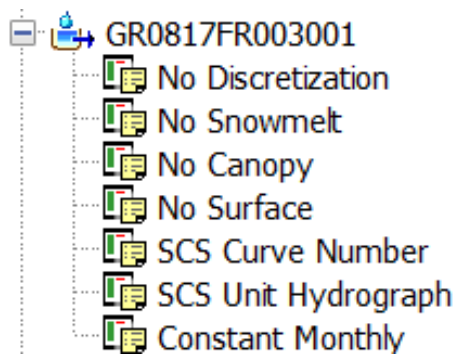
**Σχήμα 4.2:** Αποτύπωση παραμετρικής δομής ισοζυγίου νερού λεκάνης απορροής με HEC-HMS (Πηγή: Ζωγάκης, 2013)

#### 4.2.2 Πρότυπο υπολογισμού δεξαμενής κατακράτησης

Προσομοιώνοντας ένα επεισόδιο βροχής, δεν υπολογίζεται το μαθηματικό πρότυπο υπολογισμού δεξαμενής κατακράτησης καθώς περιλαμβάνεται στη μέθοδο απωλειών βροχής που επιλέχθηκε (SCS Curve Number). Επιπρόσθετα, δεν επιλέχθηκε κάποια μέθοδος κατακράτησης (No Canopy method).

#### 4.2.3 Πρότυπο υπολογισμού δεξαμενής εδαφικής επιφάνειας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για την αναπαράσταση ενός επεισοδίου βροχής, δεν υπολογίζεται το μαθηματικό πρότυπο εκτίμησης εδαφικής επιφάνειας καθώς είναι ενσωματωμένο στον υπολογισμό της μεθόδους απωλειών βροχής (SCS Curve Number), ενώ δεν έγινε επιλογή μεθόδου δεξαμενής εδαφικής επιφάνειας (No Surface method) σε όλες τις υπολεκάνες, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:

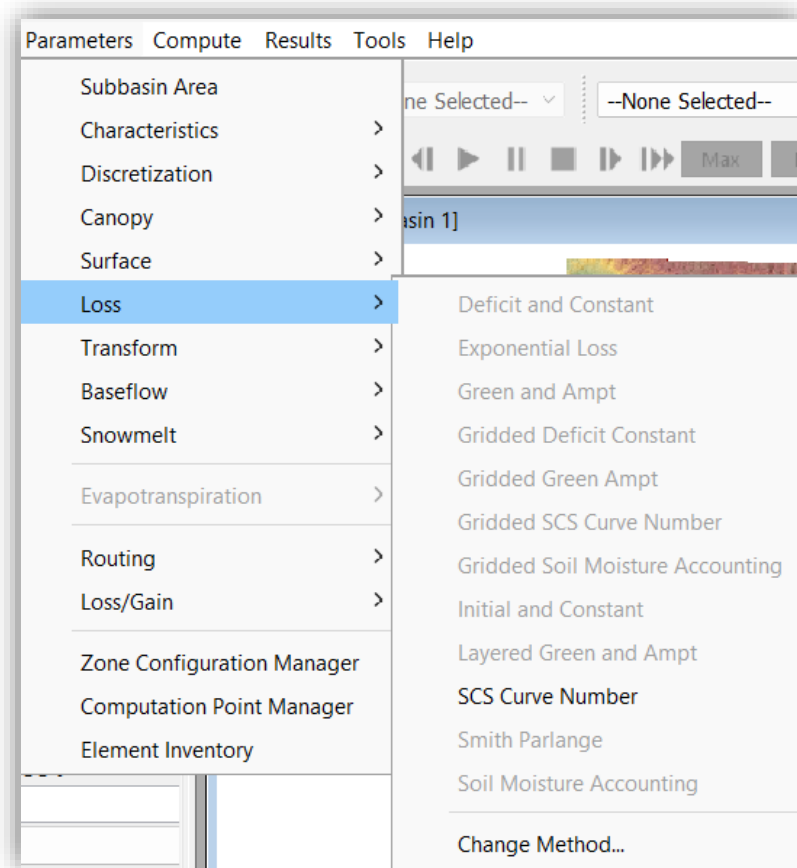


**Σχήμα 4.3:** Απεικόνιση χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής χωρίς την επιλογή προτύπου υπολογισμού δεξαμενής κατακράτησης και εδαφικής επιφάνειας στο HEC-HMS.

#### 4.2.4 Πρότυπο υπολογισμού απωλειών βροχής

Η διαφορά μεταξύ της ποσότητας των κατακρημνίσεων και της ποσότητας της απορροής αποτελεί τον ορισμό των απωλειών της βροχής. Ο λόγος που υπάρχουν απώλειες στην βροχόπτωση είναι η εξατμισοδιαπνοή των φυτών στην περίπτωση που τα επεισόδια βροχόπτωσης μελετώνται σε χρονική κλίμακα ενός έτους ή μεγαλύτερης χρονικής περιόδου. Συγκεκριμένα, στην μελέτη ενός μεμονωμένου επεισοδίου βροχής (μικρότερη κλίμακα), οι απώλειες αυτές δεν λαμβάνονται υπόψη. Εδώ, τόσο η ποσότητα του νερού που διηθείται όσο και η ποσότητα που περιορίζεται σε εδαφικά τμήματα συνιστούν τις απώλειες βροχής του συγκεκριμένου επεισοδίου βροχής.

Το λογισμικό HEC-HMS διαθέτει δώδεκα μεθόδους για τον υπολογισμό των απωλειών βροχής (Σχήμα 4.4):



Σχήμα 4.4: 12 μέθοδοι εκτίμησης απωλειών βροχής( Loss Methods)

#### 4.2.5 Εκτίμηση υδρολογικών ελλειμμάτων με την μέθοδο SCS

Η μέθοδος SCS-CN αποτελεί το πρότυπο υπολογισμού απωλειών βροχής στην παρούσα εργασία, μία μέθοδος που δημιουργήθηκε από την Soil Conservation Service (1972). Η Υπηρεσία διατήρησης εδαφών του υπουργείου γεωργίας των ΗΠΑ δημιούργησε την μέθοδο αυτή για τον υπολογισμό των υδρολογικών ελλειμμάτων κάνοντας χρήση μιας μόνο συνιστώσας, τον αριθμό CN.

Ο αριθμός αυτός έχει άμεση σύνδεση με τον εδαφικό τύπο, τις συνθήκες υγρασίας του, την διαπερατότητα του, αλλά και τις χρήσεις γης. Ο αριθμός CN υπολογίζεται είτε κάνοντας χρήση δεδομένων βροχής και απορροής, είτε αντλώντας στοιχεία ειδικών πινάκων.

Η μέθοδος SCS είναι μία από τις πιο γνωστές μεθόδους σε παγκόσμια κλίμακα και εκφράζει την χρονική εξέλιξη των ελλειμμάτων, εφαρμόζοντας μια απλή εννοιολογική διαδικασία, η οποία στηρίζεται στις εξής παραδοχές:

- Σε μια χρονική περίοδο  $t_{a0}$ , το σύνολο της βροχόπτωσης  $h_{a0}$  μετασχηματίζεται σε έλλειμμα. Το αρχικό αυτό έλλειμμα, παράγει μηδενική ενεργό βροχόπτωση. Έτσι, αφότου παρέλθει το χρονικό διάστημα  $t_{a0}$ , το μέγιστο ενεργό ύψος βροχής  $h_e$ , δεν μπορεί να ξεπεράσει το δυνητικό μέγεθος ( $y = h - h_{a0}$ ), όπου  $h$  το ολικό ακαθάριστο ύψος βροχής.
- Το επιπλέον, πέρα του αρχικού  $h_{a0}$ , ελλειμματικό ύψος που μπορεί να γίνει σε μία βροχόπτωση με μεγάλο ολικό ύψος  $h$ , δεν μπορεί να υπερβεί μία μέγιστη τιμή  $S$ , η οποία ονομάζεται δυνητικά μέγιστη κατακράτηση (potential maximum retention).
- Σε κάθε χρονική στιγμή  $t > t_{a0}$ , οι λόγοι του ενεργού (καθαρού) ύψους βροχής  $h_e$  και του ελλειμματικού μείνουν το αρχικό έλλειμμα ( $h - h_{a0}$ ), προς τα αντίστοιχα δυνητικά μεγέθη ( $h - h_{a0}$  και  $S$  αντίστοιχα), είναι ίσοι.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, προκύπτει η εμπειρική σχέση (Εξ. 2.1):

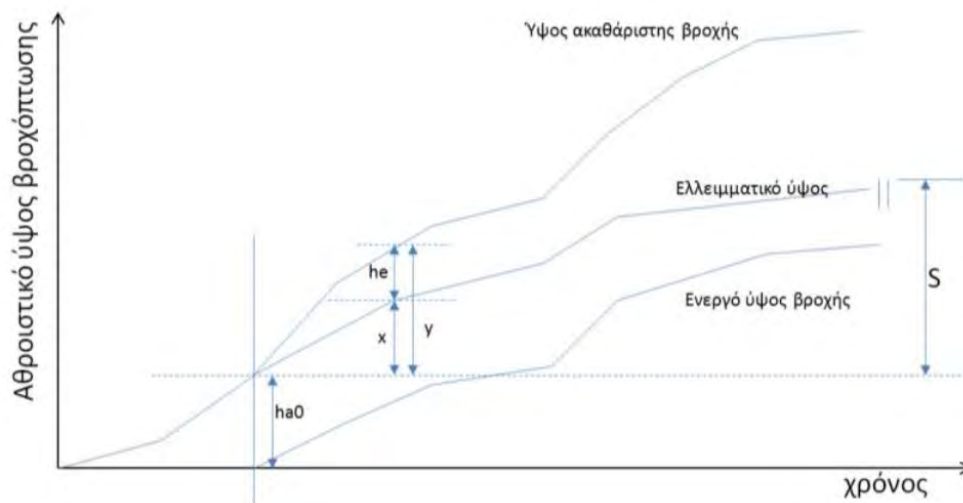
$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq h_{a0} \\ \frac{(h - h_{a0})^2}{h - h_{a0} + S} & h > h_{a0} \end{cases} \quad (2.1)$$

Η σχέση (2.1) βρίσκει εφαρμογή τόσο για το τελικό ύψος βροχής της καταιγίδας όσο και για ενδιάμεσες τιμές του, προκύπτοντας έτσι η χρονική εξέλιξη του φαινομένου. Ακόμη, από παλιότερες αναλύσεις προκύπτει μια ακόμα παραδοχή, η οποία αναφέρει πως το πρωταρχικό έλλειμμα  $h_{a0}$  ισούται με το 20% της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης  $S$ . Η τιμή αυτή του ποσοστού, απορρέει από την τιμή του μέσου όρου του 50% των μετρήσεων πεδίου, κυρίως από μετρήσεις διήθησης σε μικρές αγροτικές λεκάνες των ΗΠΑ. Επιπρόσθετα, η πλήρης διακύμανση του εύρους των ποσοστών απωλειών που παρατηρήθηκαν, κυμαίνεται από 9.5 έως 38% (Πηγή: Ponce & Hawkins, 1996). Στην παρούσα μελέτη, σύμφωνα με τις προδιαγραφές, εφαρμόστηκε

το τυπικό ποσοστό ύψους 20%. Υποθέτοντας ότι  $h_{a0} = 0.2S$ , η εξίσωση (2.1) αποτυπώνεται αποκλειστικά σε συνάρτηση με την μέγιστη δυνητική κατακράτηση  $S$ , όπως δείχνει η Εξ. (2.2)

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq 0.2 S \\ \frac{(h - 0.2 S)^2}{h + 0.8 S} & h > 0.2 S \end{cases} \quad (2.2)$$

Λύνοντας την σχέση αυτή συμπεραίνεται πως το τελικό ύψος των υδρολογικών απωλειών μπορεί να φτάσει ασυμπτωτικά για πολύ μεγάλη βροχόπτωση, την τιμή  $1.2S$  (Πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 2016).



**Σχήμα 4.5:** Διαγραμματική αποτύπωση της μεθόδου SCS (Πηγή: Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999 μετά από προσαρμογή).

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, η τιμή της μεταβλητής  $S$  υπολογίζεται με βάση την εμπειρία, σε συνάρτηση με την τιμή του αριθμού καμπύλης απορροής (runoff curve number CN) της λεκάνης, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2.3):

$$S(mm) = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Η συνιστώσα CN συμπυκνώνει τα δεδομένα φυσιογραφικού χαρακτήρα της λεκάνης σε μία τιμή και επηρεάζεται σημαντικά από τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά, τις χρήσεις γης, και τις προηγούμενες συνθήκες εδαφική υγρασίας της λεκάνης απορροής. Επίσης, οι τιμές της ανέρχονται από 0 έως 100 και υπολογίζεται, σύμφωνα με τις προβλεπόμενες τεχνικές προδιαγραφές του έργου.

Τα εδάφη κατατάσσονται σύμφωνα με την SCS σε τέσσερις ομάδες, ανάλογα με την διαπερατότητα τους:

**Πίνακας 4.1:** Ομάδες εδαφών ανάλογα με την διαπερατότητα τους σύμφωνα με την SCS

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

Ακόμη, οι τιμές CN διακρίνονται και κατ' αναλογία με τις συνθήκες εδαφικής υγρασίας που υπάρχουν, οι οποίες δίνονται παρακάτω :

**Πίνακας 4.2:** Τύποι από τις αρχικές εδαφικές συνθήκες υγρασίας

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Τύπος I</b>   | Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά, αλλά πάνω από το σημείο μααρασμού). Οι συνθήκες αυτές αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μικρότερη από 13mm (ή μικρότερη των 35mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης). |
| <b>Τύπος II</b>  | Μέσες συνθήκες, οι οποίες αντιστοιχούν στην περίπτωση όπου η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μεταξύ 13mm και 38mm (ή μεταξύ 35 και 53mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).                                                      |
| <b>Τύπος III</b> | Υγρές συνθήκες(εδάφη σχεδόν κορεσμένα). Τα εδάφη αυτά, αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων πέντε ημερών μεγαλύτερη των 38mm (ή μεγαλύτερη από 53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).                                   |

Στην παρούσα εργασία, έχουν επιλεγεί σε πρώτη φάση μέσες συνθήκες, ενώ στη συνέχεια μελετάται και η περίπτωση των δυσμενών συνθηκών.

Ακολουθεί ο παρακάτω πίνακας που έχει δοθεί από την SCS, για συνθήκες υγρασίας τύπου II, με τις τιμές της CN για όλες τις ομάδες εδαφών και για διαφορετικές χρήσεις γης.

| Περιγραφή χρήσης γης                    |                                    | Υδρολογικός τύπος εδάφους |         |         |         |
|-----------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|
|                                         |                                    | A                         | B       | C       | D       |
| Καλλιεργημένες εκτάσεις                 |                                    | 62 - 72                   | 71 - 81 | 78 - 88 | 81 - 91 |
| Λιβάδια, βοσκότοποι                     |                                    | 30 - 68                   | 58 - 79 | 71 - 86 | 78 - 89 |
| Δάση                                    |                                    | 25 - 45                   | 55 - 66 | 70 - 77 | 77 - 83 |
| Ανοιχτοί χώροι, πάρκα, νεκροταφεία κτλ. |                                    |                           |         |         |         |
| με κάλυψη από πράσινο > 75%             |                                    | 39                        | 61      | 74      | 80      |
| με κάλυψη από πράσινο 50- 75%           |                                    | 49                        | 69      | 79      | 84      |
| Εμπορικές περιοχές                      |                                    | 89                        | 92      | 94      | 95      |
| Βιομηχανικές περιοχές (72% αδιαπέρατες) |                                    | 81                        | 88      | 91      | 93      |
| Οικιστικές περιοχές                     |                                    |                           |         |         |         |
| Μέσο μέγεθος οικοπέδου (στρ)            | Ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας (%) |                           |         |         |         |
| ≤ 0.5                                   | 65                                 | 77                        | 85      | 90      | 92      |
| 1                                       | 38                                 | 61                        | 75      | 83      | 87      |
| 1.5                                     | 30                                 | 57                        | 72      | 81      | 86      |
| 2                                       | 25                                 | 54                        | 70      | 80      | 85      |
| 4                                       | 20                                 | 51                        | 68      | 79      | 84      |
| Δρόμοι                                  |                                    |                           |         |         |         |
| με οδόστρωμα και δίκτυο ομβρίων         |                                    | 98                        | 98      | 98      | 98      |
| χαλικόστρωτοι                           |                                    | 76                        | 85      | 89      | 91      |
| χωματόδρομοι                            |                                    | 72                        | 82      | 87      | 89      |

**Πίνακας 4.3:** Τυπικές τιμές CN για προηγηθείσες συνθήκες εδαφικής υγρασίας τύπου II (Πηγή:Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 2016)

Θεωρώντας το υετογράφημα σχεδιασμού για συγκεκριμένο διάστημα επαναφοράς και υδρολογική συνθήκη, εφαρμόζεται η μέθοδος SCS-CN σε κλίμακα υπολεκάνης. Θεωρώντας  $h_{a0} = 0.2S$ , το μόνο στοιχείο που γνωρίζουμε αποτελεί η τιμή της συνιστώσας αριθμού καμπύλης απορροής της υπολεκάνης. Για υδρολογικές συνθήκες τύπου II, η συνιστώσα αυτή υπολογίζεται ως η μέση τιμή των κατανεμημένων CN, που μπορεί να αντιπροσωπεύσει το σύνολο των στοιχείων φυσιογραφικού χαρακτήρα της υπολεκάνης. Σημειώνεται πως με τον διαχωρισμό της ολόκληρης λεκάνης απορροής σε μικρότερου μεγέθους λεκάνες, επιτυγχάνεται σε ικανοποιητικό βαθμό η ομοιογένεια των στοιχείων φυσιογραφικό χαρακτήρα τους. Έτσι, επιτυγχάνεται η ορθότερη αντιπροσώπευση της μέσης τιμής του CN. Άρα, έχοντας δεδομένη τη μέση τιμή του CN, υπολογίζεται με χρήση της (2.3), η τιμή της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης της υπολεκάνης, που ανήκει στο μέσο υδρολογικό σενάριο. Η διαδικασία υπολογισμού των απωλειών νερού και διάσπασης της ενεργού από την ολική βροχόπτωση πραγματοποιείται στο περιβάλλον του HEC-HMS.

Στην παρούσα εργασία, ο υπολογισμός του CN γίνεται με την βοήθεια του ArcGIS. Πιο συγκεκριμένα, δόθηκε ένα αρχείο shapefile (.shp) που περιέχει τις τιμές του CN στην ευρύτερη περιοχή του Αλμυρού. Το αρχείο αυτό μετατράπηκε σε raster, μέσω της εντολής Feature to Raster. Έπειτα μέσω της εντολής Zonal Statistics, υπολογίστηκε μία τιμή CN ανά υπολεκάνη. Για συνθήκες τύπου δύο, ο αριθμός CN υπολογίζεται ως η μέση τιμή των κατανεμημένων CN, τιμή που αντιπροσωπεύει τα στοιχεία φυσιογραφικού χαρακτήρα της υπολεκάνης.

Ωστόσο, θα πρέπει να αναφερθεί πως αυτή η μέθοδος παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα. Αρχικά, δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση της κλίσης, καθώς οι τιμές αναφοράς CN που παρέχονται στους τυποποιημένους πίνακες SCS προσδιορίστηκαν κυρίως από μικρές γεωργικές λεκάνες απορροής με ήπιες κλίσεις, θεωρώντας ότι ο μετασχηματισμός βροχόπτωσης-απορροής επηρεάζεται μόνο από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και της κάλυψης γης. Όμως, στη γενική περίπτωση, τα χαρακτηριστικά του ανάγλυφου επηρεάζουν επίσης σε μεγάλο βαθμό την υδρολογική απόκριση μιας λεκάνης απορροής. Οι απότομες κλίσεις προκαλούν μείωση των αρχικών απολήψεων, μείωση της διήθησης και μείωση του χρόνου υποχώρησης της χερσαίας ροής, όπου κατά ακολουθία οδηγεί σε μεγαλύτερη τιμή επιφανειακής απορροής.

Επιπλέον, η ταξινόμηση των εδαφικών τύπων δεν καλύπτει επαρκώς όλο το φάσμα των χαρακτηριστικών διαπερατότητας των γεωλογικών σχηματισμών που κυριαρχούν σε διάφορες περιοχές παγκοσμίως. Για παράδειγμα, ορισμένες λεκάνες απορροής της Μεσογείου βρίσκονται σε εξαιρετικά διαπερατά εδάφη (π.χ. ασβεστόλιθος, δολομίτης), με αποτέλεσμα πολύ χαμηλούς ρυθμούς απορροής. Σύμφωνα με την τυπική ταξινόμηση από την SCS, αυτά θα πρέπει να ταξινομηθούν στην ομάδα Α, που αντιπροσωπεύει τύπους εδαφών με άμμο, αργιλώδη άμμο ή αμμώδη ιλύ. Η αναφερόμενη εμπειρία από τη χρήση της τυπικής προσέγγισης για την εκτίμηση των πλημμυρών σε τέτοιες λεκάνες δείχνει ότι οι σχετικές τιμές CN ήταν αρκετά υπερεκτιμημένες, αφού στην πραγματικότητα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν πολύ χαμηλότερες τιμές, περίπου 30-40, για να αντιπροσωπεύουν τις σημαντικές απώλειες διήθησης.

Για το λόγο αυτό, υπολογίστηκε και μια δεύτερη τιμή του CN κάνοντας χρήση μιας αναλυτικής μεθόδου. Σύμφωνα με αυτή, η προτεινόμενη ταξινόμηση βασίζεται στην κατηγοριοποίηση τριών (αντί για δύο) φυσιογραφικών χαρακτηριστικών, καθένα από τα οποία περιλαμβάνει πέντε κλάσεις, δηλαδή την υδατοπερατότητα (υδραυλική αγωγιμότητα) του εδάφους και των γεωλογικών στρωμάτων κοντά στην επιφάνεια, τη χρήση/ κάλυψη γης και την ικανότητα αποστράγγισης (Πίνακας 4.5). Τα γεωγραφικά δεδομένα εισόδου για την παραγωγή των σχετικών θεματικών στρωμάτων στις αγροτικές περιοχές μπορεί να περιλαμβάνουν υδρολιθολογικούς ή εδαφολογικούς χάρτες, χάρτες χρήσεων/ κάλυψης γης, χάρτες κλίσεων εδάφους και κάθε άλλη σχετική πληροφορία. Στις αστικές ή προαστιακές περιοχές, πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των κτιρίων μπορούν επίσης να φιλοξενηθούν όπως και κάθε άλλο σχετικό αστικό χαρακτηριστικό.

Οι ταξινομήσεις διαπερατότητας στις αγροτικές περιοχές λαμβάνουν υπόψη τις ιδιότητες μηχανικής φύσεως του εδάφους και της ακόρεστης ζώνης, που διαμορφώνουν σε μεγάλο βαθμό τους μηχανισμούς διήθησης. Χρησιμοποιώντας υδρολιθολογικούς ή εδαφολογικούς χάρτες και βασιζόμενοι στον κύριο τύπο εδάφους που διαθέτει ο γεωλογικός σχηματισμός και οι δομές (για αστικές ή προαστιακές περιοχές), η κατηγορία διαπερατότητας περιγράφεται αρχικά ως πολύ υψηλή, υψηλή, μέτρια, χαμηλή ή πολύ χαμηλή (Στις αστικές περιοχές, η αντίστοιχη ταξινόμηση καθορίζεται από την πυκνότητα των δομών, των κτιριακών χαρακτηριστικών και της ανάπτυξης υπαίθριων χώρων. Στη συνέχεια, αποδίδεται μια κατάταξη από 1-5, όπου ο δείκτης ένα

αναφέρεται σε υποστρώματα πολύ υψηλής διαπερατότητας και πέντε σε υποστρώματα πολύ χαμηλής διαπερατότητας (π.χ. πυκνά πετρώματα). Τέλος, οι οικιστικές περιοχές κυμαίνονται από τις κατηγορίες 3-5, ανάλογα με την πυκνότητα δόμησης.

Οι κατηγορίες βλάστησης διαμορφώνονται με βάση τα εδαφικά χαρακτηριστικά που συνδέονται με την εδαφική τραχύτητα, τους μηχανισμούς κατακράτησης, και την ικανότητα διήθησης, π.χ. λόγω της ανάπτυξης της ριζικής ζώνης. Έτσι, αποδίδεται μια κατάταξη από 1-5, όπου ο δείκτης ένα αναφέρεται σε πυκνή κατηγορία βλάστησης (π.χ. αείφυλλα δάση) και πέντε σε γυμνό έδαφος. Συνιστάται, οι περιοχές που έχουν καεί, να υπάγονται σε μία κατάταξη σε σχέση με την αρχική τους κατάσταση όπως για παράδειγμα, ένα καμένο δάσος κωνοφόρων οφείλει να κατατάσσεται σε μέτρια κατηγορία βλάστησης, αποδίδοντας έτσι βαθμό δύο αντί για ένα.

Η ικανότητα αποστράγγισης της περιοχής ενδιαφέροντος επηρεάζεται άμεσα από τα χαρακτηριστικά γεωμορφολογικής φύσεως (τοπογραφία, κλίση), την ανάπτυξη του ποτάμιου δικτύου και περίπτωση ύπαρξης συστημάτων ρύθμισης της απορροής σε όλη την περιοχή ενδιαφέροντος (π.χ. εγγειοβελτιωτικά έργα, δομές κατακράτησης, δίκτυα αποχέτευσης). Η κλάση της ικανότητας αποστράγγισης περιγράφεται αρχικά ως αμελητέα, χαμηλή, μέτρια, υψηλή και πολύ υψηλή και αποδίδεται μια κατάταξη από 1-5. Ελλείψει άλλων πληροφοριών, οι εν λόγω κατατάξεις μπορούν να αποδοθούν αποκλειστικά βάσει των πέντε κατηγοριών κλίσης του εδάφους, δεδομένου ότι πρόκειται για μια ιδιότητα που ανακτάται εύκολα μέσω της τυπικής επεξεργασίας DEM. Ο βαθμός ένα αποδίδεται σε πρακτικά οριζόντιες περιοχές, ενώ ο βαθμός πέντε αποδίδεται σε κλίσεις άνω του 30%.

Η σχετική κατηγοριοποίηση περιγράφεται στους ακόλουθους πίνακες:

**Πίνακας 4.4:** Ταξινόμηση ικανότητας αποστράγγισης βάσει κατηγοριών κλίσης των εδαφών

| Κλάση αποστραγγιστικής ικανότητας | Μέση κλίση εδάφους | Λοιπά χαρακτηριστικά                                                                                      |
|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Αμελητέα                          | 0%                 | Ανεπαρκές σύστημα αποστράγγισης, συχνές και εκτενείς κατακλύσεις, μη διαμορφωμένο υδρογραφικό δίκτυο      |
| Χαμηλή                            | 1-2%               | Σημαντικές επιφανειακές ταπεινώσεις, περιστασιακές κατακλύσεις, όχι καλά διαμορφωμένο υδρογραφικό δίκτυο  |
| Μέτρια                            | 2-10%              | Μικρές επιφανειακές ταπεινώσεις, σπάνιες κατακλύσεις, αβαθείς, μικροί διάδρομοι αποστράγγισης             |
| Υψηλή                             | 10-30%             | Αμελητέες ταπεινώσεις εδάφους, πολύ καλά διαμορφωμένο υδρογραφικό δίκτυο, ύπαρξη αποστραγγιστικού δικτύου |
| Πολύ υψηλή                        | 30%                | Ορεινό ανάγλυφο                                                                                           |

**Πίνακας 4.5:** Κλάσεις περατότητας, βλάστησης & αποστραγγιστικής ικανότητας

| Κλάση περατότητας | i <sub>PERM</sub> | Κλάση βλάστησης | i <sub>VERM</sub> | Κλάση αποστραγγιστικής ικανότητας | i <sub>SLOPE</sub> |
|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Πολύ υψηλή        | 1                 | Πυκνή           | 1                 | Αμελητέα                          | 1                  |
| Υψηλή             | 2                 | Μεσαία          | 2                 | Χαμηλή                            | 2                  |
| Μέτρια            | 3                 | Χαμηλή          | 3                 | Μέτρια                            | 3                  |
| Χαμηλή            | 4                 | Αραιή           | 4                 | Υψηλή                             | 4                  |
| Πολύ χαμηλή       | 5                 | Μηδενική        | 5                 | Πολύ υψηλή                        | 5                  |

**Πίνακας 4.6:** Ταξινόμηση των τύπων λεκανών

| α(%) | Τύπος λεκάνης                                                             |
|------|---------------------------------------------------------------------------|
| 5    | Αστικές λεκάνες, λεκάνες με σημαντική κλίση, εδάφη χαμηλής διηθητικότητας |
| 10   | Μη αστικές λεκάνες μέτριας υδατοπερατότητας και βλάστησης                 |
| 20   | Αγροτικές και δασικές λεκάνες, λεκάνες με σημαντικά έργα ανάσχεσης        |

Λαμβάνοντας υπόψη τις ανωτέρω ταξινομήσεις, για τη συγκεκριμένη περιοχή αποδίδονται οι κυρίαρχες κατηγορίες διαπερατότητας, χρήσης/κάλυψης γης και αποστραγγιστικής ικανότητας, καθώς και οι αντίστοιχοι δείκτες iPERM, iVEG και iSLOPE, που κυμαίνονται από 1-5. Με βάση αυτές τις χαρακτηριστικές τιμές, χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη εμπειρική σχέση, για την εκτίμηση της αντιπροσωπευτικής τιμής του CN:

$$CN_{II,2} = 10 + 9i_{PERM} + 6i_{VERM} + 3i_{SLOPE} \quad (2.4)$$

Η ελάχιστη τιμή CN είναι 28 και επιλέγεται στην ακραία περίπτωση λεκανών με ιδιαίτερα υψηλή περατότητα ( $i_{PERM} = 1$ ), πλούσια βλάστηση ( $i_{VEG} = 1$ ) και δευτερεύουσας αποστραγγιστικής ικανότητας ( $i_{SLOPE} = 1$ ). Για την κατηγορία των σωμάτων νερού (ποτάμια, χείμαρροι, λίμνες, κτλ.), η συνιστώσα CN είναι με βάση τον ορισμό ίση με 100.

Σε επόμενη φάση αφού υπολογίστηκαν δύο διαφορετικές τιμές  $CN_{II}$ , υπολογίστηκαν και δύο διαφορετικές τιμές  $CN_{III}$ , οι οποίες αντιστοιχούν στο δυσμενές σενάριο με υγρές συνθήκες υγρασίας, μέσω του τύπου :

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.4036 - 0.0059CN_{II}} \quad (2.5)$$

Η ακόλουθη διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τα τέσσερα διαφορετικά ψηφιακά μοντέλα εδάφους (DEM).

#### 4.2.6 Πρότυπο υπολογισμού άμεσης απορροής

Σε μια λεκάνη απορροής, φυσική συνέπεια της ενεργού βροχόπτωσης αποτελεί η άμεση απορροή. Ως άμεση απορροή, ορίζεται αυτή που εισρέει στα επιφανειακά υδατορέματα την στιγμή αμέσως μετά του επεισοδίου βροχής, ενώ συνιστάται από την επιφανειακή απορροή και τμήμα της υπεδάφιας. Επιπρόσθετα, η ενεργός βροχόπτωση ορίζεται ως η συνολική βροχόπτωση μείον τις απώλειες. Προκειμένου το νερό να φθάσει σε κάθε σημείο της λεκάνης απαιτείται ορισμένος χρόνος. Ο χρόνος αυτός χαρακτηρίζεται ως χρόνος υστέρησης.

Ακόμη, το σύνολο της ενεργούς βροχόπτωσης ισούται με αυτόν της άμεσης απορροής. Όπως γίνεται κατανοητό, μπορεί να υπολογιστεί εύκολα, όμως όχι η κατανομή της αιχμής της πλημμύρας στον χρόνο. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε απαραίτητη η ανάπτυξη ποικίλων μεθόδων καθορισμού του χρόνου, της τιμής της παροχής αιχμής, του χρόνου υστέρησης και της διάρκειας της άμεσης απορροής.

Η χρονική και χωρική μετατροπή της απορροής σε πλημμυρική παροχή στο σημείο εξόδου της λεκάνης, επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας την μέθοδο Μοναδιαίου Υδρογραφήματος.

Ο όρος του μοναδιαίου υδρογραφήματος (MYΓ, UH) εισάχθηκε στην υδρολογική ανάλυση για πρώτη φορά από τον Sherman (1932).

Κύριες παραδοχές του Μ.Υ αποτελούν:

- a. Σε καθορισμένη υδρολογική λεκάνη, επεισόδια βροχής που διαθέτουν ίση χρονική διάρκεια και παράγουν απορροή, παράγουν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με σχετικά παρόμοια χρονική βάση ανεξάρτητα με την ένταση της βροχόπτωσης.
- b. Σε καθορισμένη υδρολογική λεκάνη, η άμεση απορροή που προκαλείται από μια συγκεκριμένο επεισόδιο βροχής, δεν εξαρτάται από τις βροχές του παρελθόντος ή αυτές του μέλλοντος.
- c. Η κατάσταση της υδρολογικής λεκάνης δεν μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου.

Ακόμη, οι δύο κυριότερες αρχές που διέπουν τη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι αυτές της αναλογίας και της επαλληλίας. Η πρώτη αρχή αναφέρει πως δύο ενεργές βροχές που έχουν ίση διάρκεια αλλά διαφορετικού μεγέθους ένταση παράγουν υδρογραφήματα που διαθέτουν ίδια χρονική βάση αλλά με τεταγμένες σε κάθε χρονική στιγμή που έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με το λόγο των εντάσεων. Η δεύτερη αρχή, αυτή της επαλληλίας, αναφέρει πως το ολικό υδρογράφημα που παράγεται από επιμέρους επεισόδια βροχοπτώσεων αποτελεί το υδρογράφημα με τεταγμένες ίσες του αθροίσματος των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων.

Τα μείζονα συνθετικά Μοναδιαία Υδρογραφήματα που βασίζονται στην μέθοδο του συνθετικού ΜΥΓ είναι αυτά των:

- ✓ SCS
- ✓ Snyder
- ✓ Sierra Nevada
- ✓ Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας
- ✓ Clark

#### 4.2.7 Μετασχηματισμός επιφανειακής απορροής σε πλημμυρογράφημα

Στην περίπτωση του Ξεριά επιλέχθηκε η μέθοδος του συνθετικού ΜΥΓ της SCS (SCS Unit Hydrograph).

Το συνολικό χρονικό διάστημα της βροχόπτωσης σχεδιασμού αποτελεί την τιμή  $D$ , κατά τη διάρκεια του οποίου παράγονται  $N = D/\Delta t$  υδρογραφήματα, το συνολικό χρονικό άθροισμα των οποίων δίνει το πλήρες υδρογράφημα στο σημείο εξόδου της υπολεκάνης. Αξίζει να τονιστεί πως το ΜΥ αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό μέγεθος για κάθε επιμέρους μικρότερη υπολεκάνη, για την θεώρηση που εφαρμόζεται, το λείο συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS, που ονομάζεται Standard PRF 484. Στον πίνακα 4.7 παρατηρείται πως οι τιμές των τεταγμένων του ΜΥ δίνονται σε αδιαστατοποιημένη μορφή, ενώ η γραφική αναπαράσταση του αδιαστατοποιημένου ΣΜΥ, φαίνεται στο σχήμα 4.5. Το ΣΜΥ θεωρείται ιδανικό για λεκάνες μικρής κλίμακας.

Βασική παράμετρος στην οποία στηρίζεται αυτή η μέθοδος, αποτελεί ο χρόνος υστέρησης (lag time) . Ο χρόνος  $t_L$ , αποτελεί την απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους του ΜΥ, συνολικού χρονικού διαστήματος  $D$ , από το κέντρο βάρους της βροχής που ανήκει στην χρονική στιγμή  $t = D/2$ .

Με δεδομένο πως το lag time έχει την δυνατότητα να υπολογιστεί σε συνάρτηση με τον χρόνο συγκέντρωσης  $t_c$  κάνοντας χρήση της εξίσωσης  $t_L = 0.6 t_c$  , και θεωρώντας πως υπάρχει χρονική ταύτιση του κέντρου βάρους του ΜΥ με την αιχμή, ο χρόνος ανόδου  $t_p$  μπορεί να εκτιμηθεί ως συνάρτηση της διάρκειας βροχής  $D$  και του χρόνου συγκέντρωσης  $t_c$  :

$$t_p = t_L + D/2 = 0.6t_c + D/2 \quad (2.6)$$

Επίσης, το ΜΥ διαθέτει χρόνο βάσης  $t_b = 5t_p$  και η παροχή αιχμής του υπολογίζεται μέσω της:

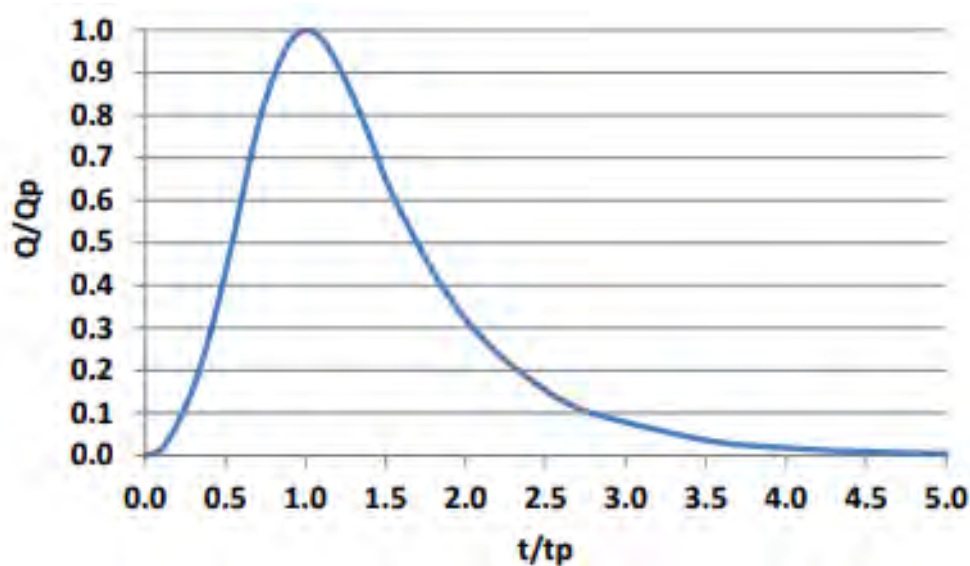
$$Q_p = 2.08 A / t_p \quad (2.7)$$

Στην παραπάνω μαθηματική σχέση το  $A$  αντιπροσωπεύει την έκταση της υπολεκάνης ( $\text{km}^2$ ) και το  $t_p$  τον χρόνο ανόδου. Κάνοντας χρήση της εξίσωσης συνέχειας, προκύπτει η σχέση αυτή, λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι ο όγκος του ΜΥ πρέπει να ισούται με τον όγκο της αντίστοιχης μοναδιαίας βροχόπτωσης, δηλαδή  $V_0 = h_0 A$ , με  $h_0 = 10 \text{ mm}$ .

Επομένως, με δεδομένο χρόνο συγκέντρωσης  $t_c$  της μικρότερης υπολεκάνης, εκτιμάται κάνοντας χρήση της σχέσης (2.6) ο χρόνος ανόδου  $t_p$  και χρησιμοποιώντας την σχέση (2.7) υπολογίζεται η τιμή της παροχής αιχμής. Άρα, εκτιμάται σε πλήρη βαθμό το συνθετικό ΜΥ της υπολεκάνης, κάνοντας χρήση των στοιχείων του λείου μοναδιαίου υδρογραφήματος ( Πίνακας 1). Στη περίπτωση του Ξεριά που μελετάται, η παραγωγή του συνθετικού ΜΥ πραγματοποιείται στο λογισμικό HEC-HMS, εισάγοντας ως μόνη πληροφορία τον χρόνο υστέρησης  $t_L$ .

**Πίνακας 4.7:** Υπολογισμός των τετμημένων στο λείο μοναδιαίο υδρογράφημα SCS (Πηγή: Κουτσογιάννης, 2011)

| Χρόνος, $t / t_p$ | Παροχή $Q / Q_p$ | Χρόνος, $t / t_p$ | Παροχή $Q / Q_p$ | Χρόνος, $t / t_p$ | Παροχή $Q / Q_p$ |
|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| 0.0               | 0.000            | 0.9               | 0.970            | 2.0               | 0.320            |
| 0.1               | 0.015            | 1.0               | 1.000            | 2.2               | 0.240            |
| 0.2               | 0.075            | 1.1               | 0.980            | 2.4               | 0.180            |
| 0.3               | 0.160            | 1.2               | 0.920            | 2.6               | 0.130            |
| 0.4               | 0.280            | 1.3               | 0.840            | 2.8               | 0.098            |
| 0.5               | 0.430            | 1.4               | 0.750            | 3.5               | 0.036            |
| 0.6               | 0.600            | 1.5               | 0.650            | 4.0               | 0.018            |
| 0.7               | 0.770            | 1.6               | 0.570            | 4.5               | 0.009            |
| 0.8               | 0.890            | 1.8               | 0.430            | 5.0               | 0.004            |



**Σχήμα 4.6:** Αδιαστατοποιημένο ΣΜΥ κατά SCS

#### 4.2.8 Υπολογισμός χρόνου συγκέντρωσης κάθε υπολεκάνης και παραγωγή ΣΜΥ

Μία ακόμη χαρακτηριστική παράμετρος της λεκάνης αποτελεί ο χρόνος συγκέντρωσης  $t_c$ . Αναφέρεται στον χρόνο που χρειάζεται για να οδηγηθεί το νερό που ρέει στην επιφάνεια του εδάφους από το υδραυλικά πιο μακρινό μέρος της λεκάνης μέχρι το σημείο εξόδου. Λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου, στην πράξη εφαρμόζονται κατά βάση εμπειρικές σχέσεις που έχουν προκύψει από παλιότερες αναλύσεις, όπου ο χρόνος συγκέντρωσης υπολογίζεται συναρτήσει χαρακτηριστικών γεωμετρικών μεγεθών της λεκάνης. Συγκεκριμένα, η σχέση του Giandotti δημιουργήθηκε αναλύοντας δεδομένα 12 λεκανών, έχοντας εύρος μεγεθών της τάξης των 170 έως 70 000 km<sup>2</sup>, ενώ πρόκειται για την πιο διαδεδομένη προσέγγιση στην ελληνική πρακτική.

Ο χρόνος συγκέντρωσης επηρεάζεται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες όπως η κλίση του εδάφους, το σχήμα και η έκταση της περιοχής, το μήκος και η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου, αλλά και χαρακτηριστικά σχετικά με την τραχύτητα του εδάφους.



**Σχήμα 4.7 :** Απεικόνιση του χρόνου συγκέντρωσης, ως ο χρόνος που απαιτείται για τη διαδρομή του νερού από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης μέχρι την έξοδο (Ερευνητικό έργο «ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ», 2011-2014).

Η εξίσωση υπολογισμού του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti είναι :

$$t_c = \frac{4 \times A^{0.5} + 1,5 \times L}{0,8 \times \Delta H^{0.5}} \quad (2.8)$$

Οι μεταβλητές που παρουσιάζονται, είναι:

$T_c$  (hr.) = χρόνος συγκέντρωσης

$A$  (km<sup>2</sup>) = έκταση υδρολογικής λεκάνης

$L$  (Km) = μήκος κύριου υδατορέματος

$\Delta H$  (m) = διαφορά μέσου υψόμετρου λεκάνης από το υψόμετρο εξόδου

Θεωρώντας δεδομένο πως η τιμή της ταχύτητας ροής των υδάτων, τόσο επιφανειακά όσο και σε όλο το μήκος του υδρογραφικού δικτύου, δεν είναι σταθερή αλλά γίνεται μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η παροχή, αντίστοιχα ο χρόνος συγκέντρωσης γίνεται μικρότερος. Ανακεφαλαιώνοντας, η μέθοδος Giandotti σε σύγκριση με άλλες γνωστές μεθόδους π.χ. Kirprich, δίνει μεγαλύτερους χρόνους συγκέντρωσης (Daniil et al., 2005).

#### 4.2.9 Υπολογισμός των σχετικών μεγεθών για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti

Για τον υπολογισμό του μέγιστου μήκους ροής υδατορέματος  $L$ :

Με την βοήθεια των εργαλείων κατά την επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους προέκυψε το υδρογραφικό δίκτυο σε διανυσματική μορφή για την λεκάνης απορροής του Ξεριά. Το μήκος του κύριου υδατορέματος υπολογίστηκε κάνοντας χρήση της εντολής Measure του ArcMap.

Εκτίμηση μέσου υψόμετρου (mean elevation):

Η τιμή του μέσου υψόμετρου της κάθε υπολεκάνης προέκυψε από την επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Όμως, το πρωταρχικό στοιχείο αποτελεί το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της συνολικής έκτασης της λεκάνης. Για την παραγωγή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της κάθε υπολεκάνης αθροίζεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της συνολικής περιοχής με το raster αρχείο κάθε επιμέρους μικρότερης

λεκάνης. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται από τον μετασχηματισμό του διανυσματικού αρχείου της κάθε υπολεκάνης σε raster μορφή κάνοντας χρήση των εντολών Spatial Analyst, επιλογή ετολής Convert και τέλος επιλογή εντολής Feature to Raster. Έπειτα, με χρήση του D.E.M κάθε λεκάνης κάνοντας χρήση της εντολής Spatial Analyst > Zonal Statistics βρέθηκε η τιμή του μέσου υψομέτρου κάθε λεκάνης (mean elevation).

Εκτίμηση υψομέτρου εξόδου λεκάνης (Outlet elevation):

Ο υπολογισμός του υψομέτρου στην έξοδο κάθε λεκάνης, έγινε με χρήση της εντολής Identify κάνοντας αριστερό κλικ στο φαντίο που αντιστοιχεί στο σημείο εξόδου εμφανίστηκε ένα παράθυρο διαλόγου, το οποίο περιέχει την τιμή του φαντίου-σημείου εξόδου της κάθε υπολεκάνης.

Με αυτό τον τρόπο, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

| Basin ID        | Max Flow Length |          |          |          |
|-----------------|-----------------|----------|----------|----------|
|                 | DEM (10m)       | DEM (5m) | DEM (30) | DEM(25)  |
| GR0817FR003001  | 3.58436         | 2.27727  | 2.35428  | 2.71725  |
| GR0817FR003002  | 10.01586        | 6.63334  | 9.30055  | 9.71638  |
| GR0817FR003003  | 10.67374        | 6.76388  | 10.9864  | 10.27423 |
| GR0817FR003004  | 10.16611        | 6.46037  | 9.75399  | 9.9726   |
| GR0817FR003005  | 12.88127        | 7.30373  | 13.9595  | 12.95324 |
| GR0817FR003006  | 6.34669         | 3.91923  | 5.94726  | 6.55557  |
| GR0817FR003007  | 2.25022         | 2.35759  | 2.65761  | 4.04935  |
| GR0817FR003008  | 16.22063        | 10.44087 | 16.5689  | 15.57263 |
| GR0817FR003009  | 10.65119        | 6.78837  | 10.54144 | 10.33547 |
| GR0817FR0030010 | 9.89931         | 6.58205  | 9.63716  | 9.51062  |
| GR0817FR0030011 | 10.73723        | 6.96511  | 10.56151 | 10.45633 |
| GR0817FR0030012 | 8.51255         | 5.47034  | 8.48731  | 8.201    |
| GR0817FR0030013 | 9.0735          | 5.73941  | 9.15385  | 9.07496  |
| GR0817FR0030014 | 6.54787         | 4.12441  | 6.77844  | 6.50765  |

**Πίνακας 4.8:** Υπολογισμός Max Flow Length

| Basin ID        | Mean Elevation |           |            |             |
|-----------------|----------------|-----------|------------|-------------|
|                 | DEM (10m)      | DEM (5m)  | DEM (30)   | DEM(25)     |
| GR0817FR003001  | 14.401139      | 14.52547  | 9.579839   | 14.666646   |
| GR0817FR003002  | 112.281593     | 112.17869 | 104.941549 | 110.969889  |
| GR0817FR003003  | 193.880675     | 193.97508 | 186.249184 | 193.269535  |
| GR0817FR003004  | 298.000313     | 298.17521 | 291.838459 | 296.04647   |
| GR0817FR003005  | 314.746031     | 314.93192 | 307.430102 | 312.729497  |
| GR0817FR003006  | 211.425348     | 211.51023 | 203.783881 | 208.898742  |
| GR0817FR003007  | 46.768569      | 46.992075 | 38.23818   | 46.320576   |
| GR0817FR003008  | 560.830605     | 561.05713 | 554.498869 | 558.900331  |
| GR0817FR003009  | 612.916687     | 612.69323 | 604.9388   | 609.475542  |
| GR0817FR0030010 | 645.632563     | 648.8975  | 642.414062 | 646.892794  |
| GR0817FR0030011 | 1118.431806    | 1119.734  | 1111.35597 | 1116.673896 |
| GR0817FR0030012 | 959.33589      | 959.34575 | 951.985014 | 956.221721  |
| GR0817FR0030013 | 1218.019553    | 1218.6546 | 1212.73939 | 1216.718301 |
| GR0817FR0030014 | 1237.754452    | 1236.3427 | 1230.13568 | 1233.955881 |

Πίνακας 4.9: Υπολογισμός Mean Elevation

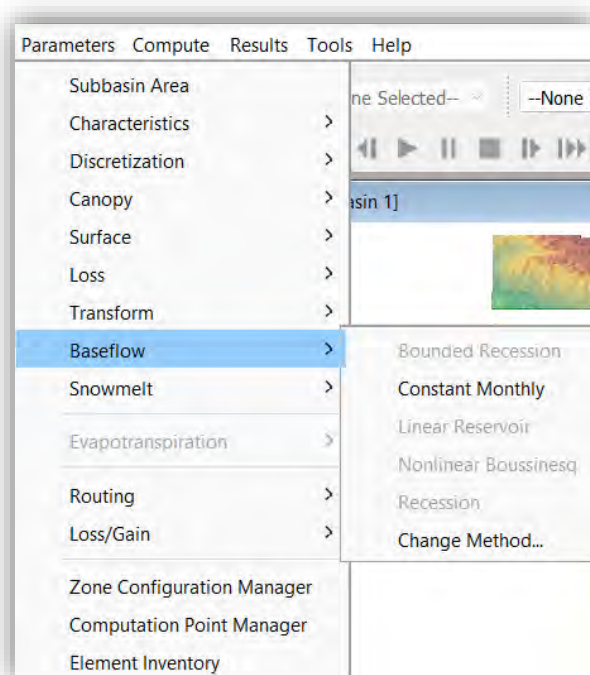
| Basin ID        | Outlet Elevation |          |          |            |
|-----------------|------------------|----------|----------|------------|
|                 | DEM (10m)        | DEM (5m) | DEM (30) | DEM(25)    |
| GR0817FR003001  | 0.000            | 0.000    | 9        | 0.000      |
| GR0817FR003002  | 23.260           | 20.80    | 13       | 25.77891   |
| GR0817FR003003  | 97.558           | 95.708   | 84       | 98.589203  |
| GR0817FR003004  | 97.558           | 95.708   | 84       | 98.589203  |
| GR0817FR003005  | 71.856           | 69.913   | 67       | 73.621445  |
| GR0817FR003006  | 71.856           | 69.913   | 67       | 73.621445  |
| GR0817FR003007  | 23.260           | 20.800   | 13       | 25.77891   |
| GR0817FR003008  | 70.025           | 68.470   | 64       | 70.367325  |
| GR0817FR003009  | 159.382          | 159.632  | 150      | 155.813171 |
| GR0817FR0030010 | 254.832          | 256.339  | 265      | 272.392517 |
| GR0817FR0030011 | 458.684          | 449.488  | 437      | 461.629089 |
| GR0817FR0030012 | 458.684          | 449.488  | 437      | 461.629089 |
| GR0817FR0030013 | 837.329          | 836.893  | 837      | 858.748901 |
| GR0817FR0030014 | 837.329          | 836.893  | 837      | 858.748901 |

Πίνακας 4.10: Υπολογισμός Outlet Elevation

#### 4.2.10 Πρότυπο υπολογισμού βασικής απορροής

Η βασική ή αλλιώς μόνιμη ροή των υδατορεμάτων σχηματίζεται από την βασική απορροή, η οποία περιέχει μέρος της υπεδάφιας και της υπόγειας ροής. Η ποσότητα του νερού που έχει απορροφηθεί από το έδαφος, γίνεται κομμάτι των υπόγειων υδάτων. Όσο διαρκεί το επεισόδιο βροχής, μέρος της που έχει διεισδύσει προς τα κάτω επιστρέφει ή κατευθείαν από κάτω ή κοντά στο υδατόρεμα στο έδαφος.

Στο HEC-HMS η βασική απορροή μπορεί να προσομοιωθεί με τις πέντε μεθόδους που φαίνονται παρακάτω:



**Σχήμα 4.8:** Επιλογή μεθόδου βασικής απορροής

Στην περίπτωση του Ξεριά, επιλέχθηκε η μέθοδος Constant Monthly. Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, θεωρείται μία σταθερά ορισμένη τιμή της απορροής για κάθε μήνα όλου του έτους.

#### 4.2.11 Πρότυπο υπολογισμού διόδευσης πλημμύρας

Το φαινόμενο που ονομάζεται διόδευση (routing), παρατηρείται στην περίπτωση που δεν υπάρχουν πλευρικές εισροές κατά μήκος ενός υδατορέματος, και επομένως ένα υδρογράφημα (πλημμυρικό κύμα) που εισάγεται ανάντη, θα εμφανιστεί στα κατάντη έχοντας χρονική υστέρηση, ελαττωμένη αιχμή και μεγαλύτερη χρονική διασπορά.

Οι υδρολογικές μέθοδοι αποτελούν την απλούστερη κατηγορία αριθμητικών τεχνικών, δεν επιλύουν την ολοκληρωμένη εξέλιξη στο χρόνο και στο χώρο του φαινομένου αλλά επιτυγχάνουν τον έλεγχο της στάθμης και της παροχής σε δύο σημεία της λεκάνης, την είσοδο και έξοδο του υδατορέματος (ανάληψη & κατάνη). Στο τμήμα του αγωγού που εντοπίζεται ενδιάμεσα των δύο σημείων, η εξίσωση ποσότητας κίνησης αντικαθίσταται από μια συνάρτηση απόκρισης κλειστού τύπου (Πηγή:Κουτσογιάννης,2011). Πιο συγκεκριμένα, αντί να εφαρμοστεί η εξίσωση της ορμής, βρίσκει εφαρμογή μια σχέση που εκφράζει τον όγκο που έχει αποθηκευτεί συναρτήσει ορισμένων συνιστωσών, οι οποίες εισέρχονται στην εξίσωση συνέχειας:

$$S(t) = \varphi[I(t), O(t)] \quad (2.9)$$

όπου:

$I(t)$  : η εισροή της διατομής στην είσοδο του υδατορέματος

$O(t)$ : η εισροή της διατομής στην έξοδο του υδατορέματος

Στην παρούσα εργασία, για την διόδευση των πλημμυρικών παροχών όλων των υδατορεμάτων, επιλέχθηκε η μέθοδος **Muskingum**. Αυτή η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή σε υδατορέματα ήπιων κλίσεων (<1%), ενώ υπάγεται στην κατηγορία των μεθόδων διάχυσης κύματος. Θεωρώντας πως  $L$  είναι το σύνολο του μήκους του υδατορέματος και  $z_a$ ,  $z_k$  οι τιμές των υψομέτρων των κόμβων ανάληψη και κατάνη αντίστοιχα, η τιμή της κλίσης υπολογίζεται από την:

$$J = \frac{z_a - z_k}{L} \quad (2.10)$$

Σημειώνεται ότι η παραπάνω σχέση (2.10) εκτιμά γενικά την μέση κλίση του υδατορέματος, όμως για τον σίγουρο κι ασφαλές υπολογισμό της οποίας απαιτείται η λήψη διατομών και σε ενδιάμεσες θέσεις.

Στη μέθοδο **Muskingum**, η εξίσωση συνέχειας, περιγράφεται στην Εξ. (2.11):

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = I(t) - O(t) \quad (2.11)$$

Όπου:

$S(t)$  : η ποσότητα του νερού που έχει αποθηκευτεί μεταξύ της διατομής εισόδου και εξόδου

$I(t)$  : το δεδομένο υδρογράφημα εισροής

$O(t)$  : υδρογράφημα εκροής που ζητείται

Η αριθμητική προσέγγιση της (2.11) στο χρονικό διάστημα  $\Delta t = [t, t - 1]$  αναλύεται, ως εξής:

$$\frac{S_t - S_{t-1}}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t-1}}{2} - \frac{O_t + O_{t-1}}{2} \quad (2.12)$$

Αν τα μεγέθη που ζητούνται  $S_t, O_t$  μεταφερθούν στα αριστερά προκύπτει η (2.13):

$$\left( \frac{S_t}{\Delta t} + \frac{O_t}{2} \right) = \left( \frac{I_t + I_{t-1}}{2} \right) + \left( \frac{S_{t-1}}{\Delta t} - \frac{O_{t-1}}{2} \right) \quad (2.13)$$

Για να λυθεί αυτή η σχέση χρειάζεται ο προσδιορισμός μιας ακόμη σχέσης που φέρνει σε σύνδεση την εκροή  $O(t)$  και την αποθήκευση  $S(t)$ . Η μέθοδος Muskingum, κάνει χρήση της εμπειρικής σχέσης, της Εξ.(2.14):

$$S(t) = K[\theta I(t) + (1 - \theta)O(t)] \quad (2.14)$$

Οι μεταβλητές είναι:

$\theta$  = αδιάστατη συνιστώσα (συντελεστής βάρους)

$K$  = η χρονική συνιστώσα που εκφράζει την τιμή του μέσου χρόνου διαδρομής από την είσοδο μέχρι την έξοδο του υδατορέματος

Από τον συνδυασμό των σχέσεων (2.13) & (2.14), έχουμε την αναδρομική εξίσωση:

$$O_t = c_0 I_t + c_1 I_{t-1} + c_2 O_{t-1} \quad (2.15)$$

όπου οι  $C_0, C_1, C_2$  αποτελούν τους συντελεστές βάρους που υπολογίστηκαν από τις Εξ.(2.16-2.18):

$$C_0 = \frac{-2K\theta + \Delta t}{2K(1-\theta) + \Delta t} \quad (2.16)$$

$$C_1 = \frac{2K\theta + \Delta t}{2K(1-\theta) + \Delta t} \quad (2.17)$$

$$C_2 = \frac{2K(1-\theta) - \Delta t}{2K(1-\theta) + \Delta t} \quad (2.18)$$

Οι συντελεστές βάρους  $C_0, C_1, C_2$  ικανοποιούν την εξίσωση  $C_0 + C_1 + C_2 = 1$ .

Από την στιγμή που το υδρογράφημα εισόδου είναι γνωστό, είναι δεδομένες η τρέχουσα και προηγούμενη τιμή της εισροής  $I_t$  και  $I_{(t-1)}$ . Επιπλέον, είναι γνωστή και η εκροή  $O_{(t-1)}$  που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα. Επομένως, μπορεί να επιτευχθεί η βήμα προς βήμα εκτίμηση της επίκαιρης εκροής  $O_t$ . Προκειμένου να επιλυθεί η σχέση Εξ.(2.14), επιβάλλεται η εύρεση των μεταβλητών  $K$ ,  $\theta$  και  $\Delta t$ .

Υπάρχει πλήρης ταύτιση ανάμεσα στο βήμα υπολογισμού  $\Delta t$  και το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, το οποίο επηρεάζεται άμεσα από τον χρόνο συγκέντρωσης της μικρότερης υπολεκάνης. Ακόμη, οι μεταβλητές  $K$  και  $\theta$  επηρεάζονται σημαντικά από τις εξής παραμέτρους:

- Διατομή υδατορέματος
- Μήκος υδατορέματος
- Κλίση πυθμένα
- Συντελεστής απωλειών

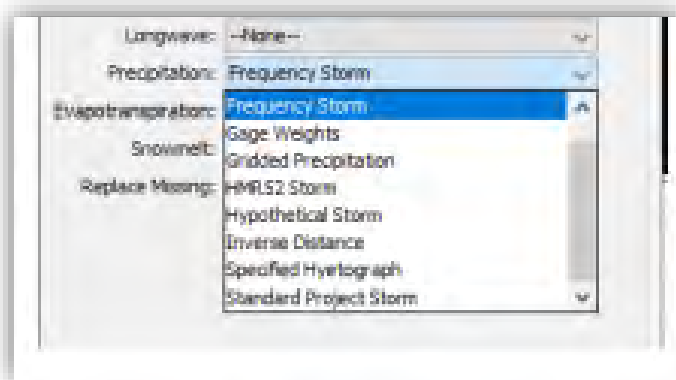
Γενικότερα, για καθορισμένο μήκος  $L$ , με την μείωση της κλίσης ο χρόνος  $K$  γίνεται μεγαλύτερος, ενώ, σε αντίθεση, η τιμή της μεταβλητής  $\theta$  γίνεται μικρότερη. Για υδατορέματα εξαιρετικά ήπιας κλίσης με πλευρική υπερχείλιση, η παράμετρος  $\theta$  τείνει στο μηδέν, άρα και η ροή προσμοιάζει την λειτουργία ενός γραμμικού ταμιευτήρα. Αντίθετα, στην περίπτωση καλώς διαμορφωμένων διατομών με σχετικά μεγάλες κλίσεις, η μεταβλητή  $\theta$  προσεγγίζει την θεωρητικά μεγαλύτερη τιμή 0.50. Στην εφαρμογή της μεθόδου Muskingum, επιλέγεται  $\theta=0.20$ , αντίστοιχη για φυσικούς αγωγούς. Αναφορικά με την χρονική συνιστώσα  $K$ , γνωρίζοντας πως εκφράζει την τιμή ενός μέσου χρόνου διαδρομής της εισόδου μέχρι την έξοδο του υδατορέματος, υπολογίζεται βάσει  $t_c$  της λεκάνης όπως και τις κλίσεις των υδατορεμάτων.

### 4.3 Μετεωρολογικό Μοντέλο

Για την προετοιμασία ενός μετεωρολογικού μοντέλου απαιτείται η εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων σε συνδυασμό με τις αναγκαίες οριακές συνθήκες. Έχοντας δεδομένα ή από υετογραφήματα που έχουν παρατηρηθεί ή από την επιβολή υποθετικών επεισοδίων βροχής με επιλεγμένο χρόνο επαναφοράς, παράγονται αυτά που θα χρησιμοποιηθούν στην υδρολογική προσομοίωση. Για τον υπολογισμό αποτελεσμάτων μεγαλύτερης ακρίβειας, αυτά θα μπορούσαν να παραχθούν διεξάγοντας μια μελέτη υδρολογικής φύσεως στην περιοχή, δημιουργώντας όμβριες καμπύλες, εκτελώντας την υδρολογική προσομοίωση, έχοντας ρυθμίσει αντίστοιχες συνιστώσες, βασισμένες στα παρατηρημένα υετογραφήματα.

Ακόμη, σε αυτό το στάδιο επιλέγονται οι μετεωρολογικοί σταθμοί ενδιαφέροντος για την εκτίμηση της τιμής μέσης βροχόπτωσης σε κάθε διακριτοποιημένη υπολεκάνη αλλά και ο τρόπος υπολογισμού της βροχόπτωσης.

Το λογισμικό HEC-HMS διαθέτει τις εξής μεθόδους εκτίμησης βροχόπτωσης, όπως φαίνονται παρακάτω:



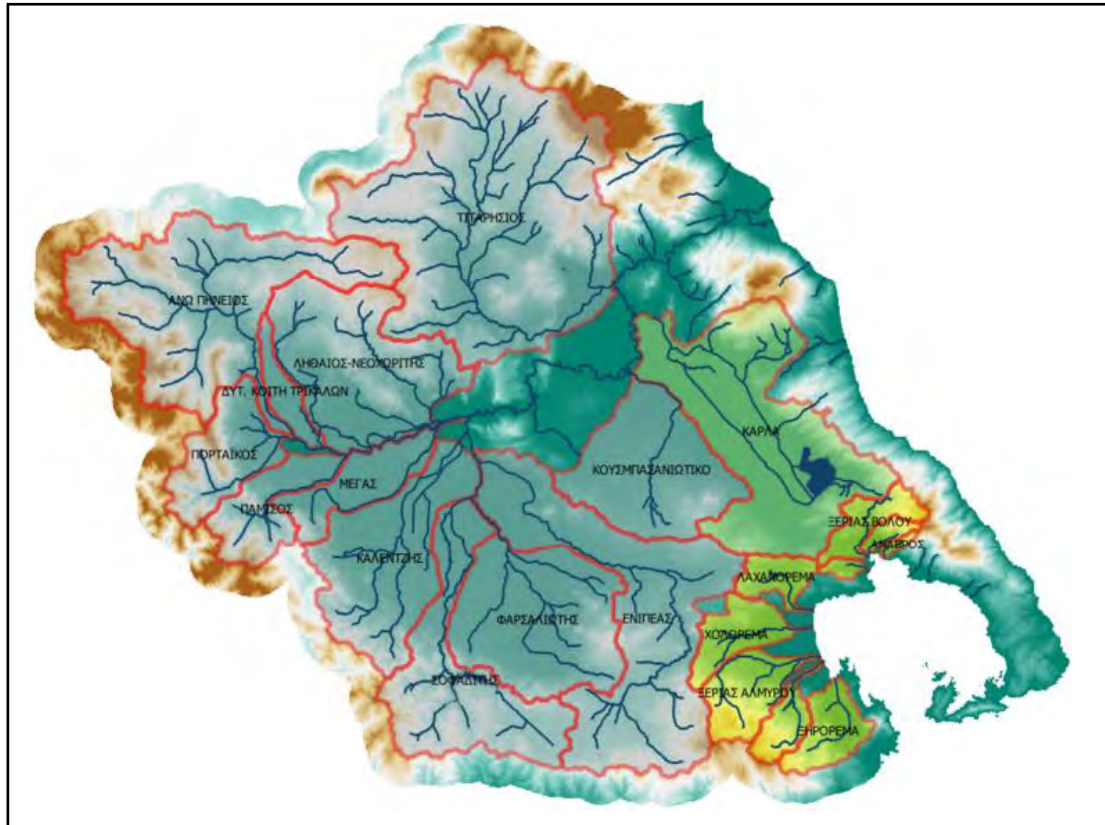
Σχήμα 4.9 : Precipitation Type Menu

Για την μελέτη της λεκάνης του Ξεριά, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Καθορισμένου Υετογραφήματος (Specified Hyetograph). Η μέθοδος αυτή, δίνει την δυνατότητα καθορισμού μιας ακριβούς χρονοσειράς που θα χρησιμοποιηθεί για το υετογράφημα κάθε υπολεκάνης. Επιπρόσθετα, η μέθοδος αυτή αποτελεί πολύ χρήσιμο εργαλείο στην περίπτωση που τα δεδομένα βροχόπτωσης εισάγονται στο πρόγραμμα, καθώς έχουν υποβληθεί εξωτερική επεξεργασία εκτός προγράμματος.

## Κεφάλαιο 5° : Υδρολογική προσομοίωση λεκάνης απορροής Ξεριάς Αλμυρού

Στην υδρολογική προσομοίωση και ανάλυση της λεκάνης απορροής του Ξεριά, που αποτελεί μέρος της ευρύτερης λεκάνης του Αλμυρού, αποτυπώνεται η εκτίμηση της παροχής σχεδιασμού περιόδου επαναφοράς 100 χρόνια και παρουσιάζεται εκτενώς η σειρά των βημάτων που είναι απαραίτητα, για την παραγωγή ενός πλημμυρογραφήματος. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, πραγματοποιήθηκε ο καθορισμός του υδρογραφικού δικτύου αλλά και των υπολεκανών του δικτύου και χρησιμοποιήθηκε η τυπική προσέγγιση ενός επεισοδίου πλημμυρικής φύσεως μέσω του λογισμικού HEC-HMS.

Επιβάλλεται ο διαχωρισμός της λεκάνης σε επιμέρους λεκάνες μικρότερου μεγέθους. Η τυπική προσέγγιση επεισοδίου πλημμύρας (event-based) της μεθόδου SCS-CN, εφαρμόζεται για κάθε μία από αυτές, για την μετατροπή της βροχής σε επιφανειακή απορροή, κάνοντας χρήση της θεωρίας μοναδιαίου υδρογραφήματος, για τη διόδευση του όγκου απορροής μέχρι την έξοδο κάθε λεκάνης. Έπειτα, το σύνολο των πλημμυρογραφημάτων όλων των επιμέρους μικρότερων λεκανών διοδεύονται μέχρι την έξοδο της λεκάνης, μέσω του υδρογραφικού δικτύου (Papaioannou et al., 2018). Έτσι, πραγματοποιείται η δημιουργία των πλημμυρογραφημάτων στο σύνολο των κόμβων του δικτύου.



**Σχήμα 5.1 :** Χάρτης λεκανών απορροής που ανήκουν στην ευρύτερη περιοχή του Αλμυρού (με κίτρινο) (Πηγή : ΥΠΕΚΑ)

Η περιοχή που μελετάται και για την οποία θα γίνει η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής ανήκει στο νομό Θεσσαλίας και περιλαμβάνει την περιοχή της λεκάνης απορροής του ρέματος Ξεριάς Αλμυρού. Επιπρόσθετα, το μοντέλο που δημιουργήθηκε για την μοντελοποίηση αυτής της λεκάνης αποτελείται από 14 μικρότερες λεκάνες, 9 κόμβους και 8 κλάδους του υδρογραφικού δικτύου. Ακόμη, τα συγκεκριμένα γεωμετρικά μεγέθη κλάδων και των μικρότερων λεκανών που προέκυψαν δίνονται στους Πίνακα 5.1, ενώ τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του συνόλου της λεκάνης περιγράφονται στον πίνακα 5.2.

| Κωδικός | Υπολεκάνη       | Ανάντη | Κατάντη | Μήκος (km) | Μέση κλίση |
|---------|-----------------|--------|---------|------------|------------|
| R21     | GR0817FR005001  | J2     | J1      | 3.486      | 0.0066     |
| R42     | GR0817FR005002  | J4     | J2      | 5.190      | 0.0093     |
| R76     | GR0817FR005003  | J7     | J6      | 10.413     | 0.0151     |
| R64     | GR0817FR005005  | J6     | J4      | 2.132      | 0.0119     |
| R54     | GR0817FR005006  | J5     | J4      | 4.128      | 0.0211     |
| R32     | GR0817FR005007  | J3     | J2      | 3.123      | 0.0146     |
| R87     | GR0817FR0050010 | J8     | J7      | 7.323      | 0.0280     |
| R98     | GR0817FR0050012 | J9     | J8      | 7.474      | 0.0507     |

Πίνακας 5.1: Μεγέθη κλάδων υδρογραφικού δικτύου που υπολογίστηκαν

| Κωδικός         | Λεκάνη απορροής | Κλάδος | Κόμβος<br>Εξόδου | Έκταση<br>(km <sup>2</sup> ) | Μέσο<br>Υψόμετρο | Υψόμετρο<br>εξόδου (m) | Μέγιστο<br>μήκος ροής |
|-----------------|-----------------|--------|------------------|------------------------------|------------------|------------------------|-----------------------|
| GR0817FR003001  | GR0817FR00042   | R21    | J1               | 2.649                        | 14.547           | 0.0                    | 3.64                  |
| GR0817FR003002  | GR0817FR00042   | R42    | J2               | 18.965                       | 112.319          | 25.7                   | 10.36                 |
| GR0817FR003003  | GR0817FR00042   | R76    | J6               | 13.509                       | 194.055          | 99.0                   | 10.82                 |
| GR0817FR003004  | GR0817FR00042   |        | J6               | 19.631                       | 298.425          | 99.0                   | 10.43                 |
| GR0817FR003005  | GR0817FR00042   | R64    | J4               | 10.925                       | 315.179          | 73.0                   | 11.72                 |
| GR0817FR003006  | GR0817FR00042   | R54    | J4               | 6.996                        | 211.767          | 73.0                   | 6.38                  |
| GR0817FR003007  | GR0817FR00042   | R32    | J2               | 2.572                        | 47.050           | 25.7                   | 3.12                  |
| GR0817FR003008  | GR0817FR00113   |        | J3               | 25.232                       | 561.372          | 70.3                   | 16.85                 |
| GR0817FR003009  | GR0817FR00111   |        | J5               | 16.917                       | 613.003          | 159.8                  | 10.92                 |
| GR0817FR0030010 | GR0817FR00115   | R87    | J7               | 24.326                       | 649.158          | 257.8                  | 10.54                 |
| GR0817FR0030011 | GR0817FR00115   |        | J8               | 15.956                       | 1119.927         | 453.4                  | 11.32                 |
| GR0817FR0030012 | GR0817FR00115   | R98    | J8               | 15.272                       | 959.683          | 453.4                  | 8.67                  |
| GR0817FR0030013 | GR0817FR00115   |        | J9               | 13.173                       | 1218.887         | 845.5                  | 9.2                   |
| GR0817FR0030014 | GR0817FR00115   |        | J9               | 10.694                       | 1236.561         | 845.5                  | 6.49                  |

Πίνακας 5.2: Μεγέθη υπολεκανών λεκάνης απορροής Ξεριά

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα δεδομένα των πληροφοριών του υδρογραφικού δικτύου ενσωματώθηκαν στο μοντέλο με στόχο την ακριβή αναπαράσταση της ροής σε περιοχές με χαμηλή τιμή κλίσης, τον ορθό υπολογισμό της χάραξης των υπολεκανών αλλά και την εκτίμηση των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής.

Αρχικά εισάγεται το μοντέλο που υπολογίστηκε στο περιβάλλον του ArcGIS. Παρακάτω απεικονίζεται η περιοχή που αντιπροσωπεύει την λεκάνη του ρέματος Ξεριά με το ΨΜΕ, τα όρια των αντίστοιχων διακριτοποιημένων υπολεκανών που σχηματίστηκαν και το κύριο υδρογραφικό δίκτυο. Ο Πίνακας 5.2 παραθέτει τον κωδικό, το όνομα υπολεκάνης καθώς και τα χαρακτηριστικά γεωμορφολογικής φύσεως των παραγόμενων υπολεκανών.



Σχήμα 5.2: Όρια υπολεκανών της λεκάνης απορροής στο περιβάλλον του HEC-HMS

Τα εικονίδια παρακάτω απεικονίζουν :



Junction



Subbasin

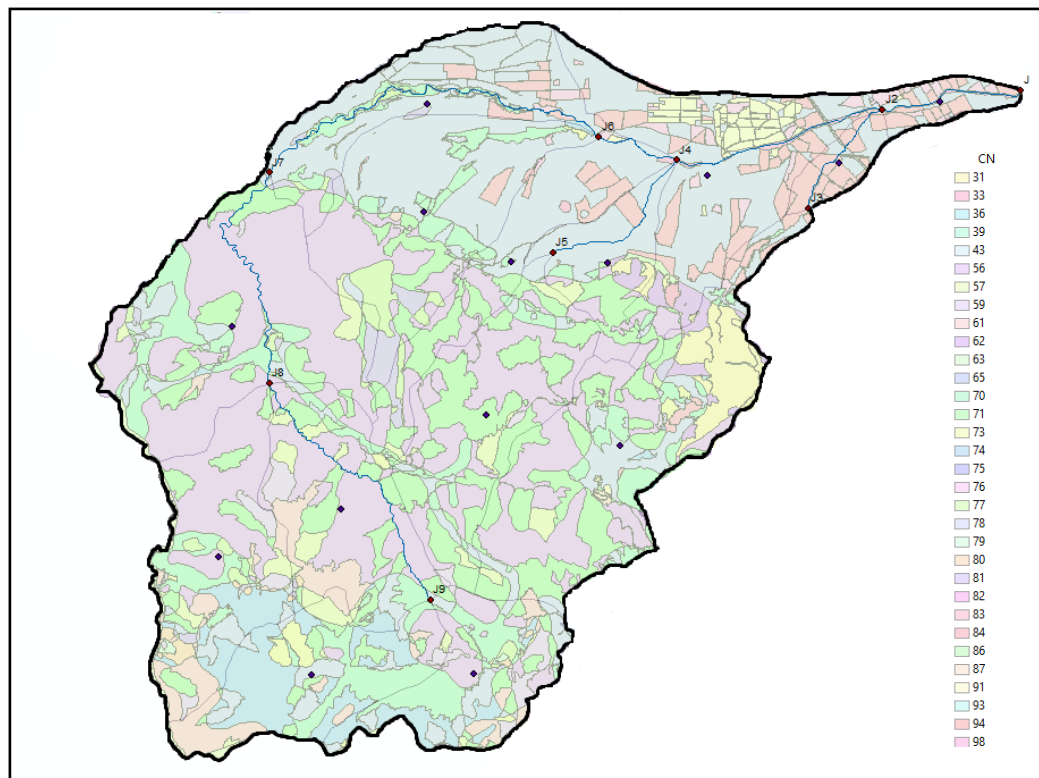


Sink

### 5.1 Χάρτες Χωρικής Κατανομής Παραμέτρου CN

Μία από τις βασικότερες παραμέτρους της λεκάνης απορροής, αποτελεί η τιμή του αριθμού καμπύλης απορροής (runoff curve number, CN), που περιγράφηκε εκτενώς στην παράγραφο 4.2.5.

Στην παρούσα εργασία απαιτείται για την εκτίμηση της μέγιστης δυνητικής κατακράτησης και η εκτίμηση του αριθμού αυτού για μέσες συνθήκες υγρασίας, η οποία πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο φατνίου (grid cell), για τα οποία δημιουργήθηκαν διάφορες κλάσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3 παρακάτω :



Σχήμα 5.3: Τιμές παραμέτρου CN στην λεκάνη απορροής του Ξεριά στο περιβάλλον του GIS

## 5.2 Υπολογισμός όμβριων καμπυλών και εκτίμηση υετογραφημάτων σχεδιασμού

### 5.2.1 Εκτίμηση Υετογραφήματος Σχεδιασμού

Σε προηγούμενο κεφάλαιο κατέστη σαφές πως ήταν αναγκαίος ο υπολογισμός της καταιγίδας σχεδιασμού ή αλλιώς υετογραφήματος, με καθορισμένο χρόνο επαναφοράς. Αυτή στηρίζεται στο αν υπάρχουν ή όχι όμβριες καμπύλες στην λεκάνη ενδιαφέροντος. Οι όμβριες καμπύλες αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο της Υδρολογίας, που μπορούν να υπολογίζουν μεγέθη που χρειάζονται στον αντιπλημμυρικό σχεδιασμό έργων καθώς και στην ανάλυση ακραίων υδρολογικών συμβάντων.

Ακόμη, από την επεξεργασία καταγραφών των βροχογράφων προκύπτουν οι χρονοσειρές μεγίστων, καθώς και των ημερήσιων δεδομένων που λαμβάνουν τα βροχόμετρα. Η διαδικασία κατάρτισης όμβριων καμπυλών που προκύπτουν από δεδομένα μετρήσεων επεισοδίων βροχής, τις οποίες παράγουν οι βροχογράφοι, διακρίνεται σε δύο στάδια:

- Σε αρχικό στάδιο πραγματοποιείται η δημιουργία χρονοσειρών ετήσιας κλίμακας μεγίστων μέσων εντάσεων  $I_j$  για ένα φάσμα διαρκειών συνάθροισης όπως  $d_j = \{5 \text{ λεπτά}, 10 \text{ λεπτά}, 15 \text{ λεπτά}, 30 \text{ λεπτά}, 1 \text{ ώρα}, 2 \text{ ώρες}, 6 \text{ ώρες}, 12 \text{ ώρες}, 24 \text{ ώρες}, 48 \text{ ώρες}\}$  από τα στοιχεία της χρονοσειράς υπολογισμού της βροχής.
- Σε επόμενο βήμα γίνεται χρήση των δειγμάτων  $I_j$  που υπολογίστηκαν για την κατάρτιση των όμβριων καμπυλών.

Αναζητώντας στον ιστότοπο του ΥΠΕΚΑ, στα αναρτημένα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας, βρέθηκαν οι ζητούμενες καμπύλες του Ξεριά, που υπάγεται στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας (GR08). Οι σταθμοί αναφοράς στους οποίους ανήκουν οι βροχογράφοι για την μελέτη και ανάλυση της παροχής σχεδιασμού κάνοντας χρήση των όμβριων καμπυλών, επιλέχθηκε έχοντας υπόψη ορισμένες απαιτήσεις χωρικής πυκνότητας, χρονικού μήκους και ποιότητας δεδομένων και συγκεκριμένης υψομετρικής κάλυψης.

Για την υδρολογική προσομοίωση του Ξεριά και τον υπολογισμό της πλημμύρας σχεδιασμού  $T=100$  χρόνια, εκτιμήθηκε πως αυτή ισούται με την περίοδο επαναφοράς μίας ακραίας τυπικής καταιγίδας ίδιας  $T$ . Για κάθε υπολεκάνη επιλέχθηκε ίδια διάρκεια καταιγίδας με σταθερή τιμή και ίση με 48 ώρες.

### 5.2.2 Εκτίμηση όμβριων καμπυλών Βροχομετρικών Σταθμών ΥΔ Θεσσαλίας (ΥΠΕΚΑ)

Βάσει των σχεδίων διαχείρισης κινδύνων Πλημμύρας του ΥΠΕΚΑ διαμορφώθηκαν οι εξισώσεις όμβριων καμπυλών στα σημεία των μετεωρολογικών σταθμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (EL08). Άμεσος στόχος ήταν η εύρεση της τιμής της βροχής σχεδιασμού στις διαφορετικές περιπτώσεις που μελετήθηκαν στα Σχέδια του ΥΠΕΚΑ, οι οποίες είναι το σενάριο υψηλής πιθανότητας εμφάνισης ( $T=50$  χρόνια), μετά το σενάριο μέσης πιθανότητας εμφάνισης ( $T=100$  χρόνια) και τέλος το σενάριο χαμηλής πιθανότητας εμφάνισης ( $T=1000$  χρόνια).

Για αυτή την διπλωματική εργασία, πάρθηκαν όμβριες καμπύλες από 15 μετεωρολογικούς σταθμούς, στους οποίους υπάρχουν βροχογράφοι. Οι 15 βροχογράφοι είναι ιδιοκτησία των ακόλουθων υπηρεσιών:

- ✓ 5 σταθμοί του ΥΠΕΚΑ
- ✓ 7 σταθμοί της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού
- ✓ 3 σταθμοί της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας

Καθένας από τους σταθμούς με βροχογράφο διαθέτει και βροχόμετρο, με εξαίρεση τον Μεταξά που υπάγεται στο ΥΔ της Δυτικής Μακεδονίας.

Στο Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των σταθμών, τα δείγματα των οποίων καλύπτουν από 12 έως 74 χρόνια. Στην εικόνα του Σχήματος 5.4 απεικονίζονται τα σημεία των θέσεων των σταθμών. Αξίζει να σημειωθεί, πως τα βροχόμετρα παρουσιάζουν ικανοποιητική γεωγραφική κάλυψη καθώς υπερβαίνουν σε πλήθος την ελάχιστη συμβατική απαίτηση ανά Υδατικό Διαμέρισμα.

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά βροχογράφων ΥΔ Θεσσαλίας (Πηγή : ΥΠΕΚΑ)

| A/A | ΟΝΟΜΑΣΙΑ       | X (m)   | Y (m)     | Z (m) | ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ | ΦΟΡΕΑΣ | ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ |
|-----|----------------|---------|-----------|-------|--------------------|--------|----------------------|
| 1   | Αγχίαλος       | 396 203 | 4 341 105 | 42    | WD08               | ΕΜΥ    | 1988-1994, 2007-2010 |
| 2   | Αργιθέα*       | 288 679 | 4 358 079 | 980   | WD04               | ΔΕΗ    | 1959-1995, 1999-2012 |
| 3   | Βροντερό       | 286 305 | 4 375 195 | 853   | WD08               | ΔΕΗ    | 1990-2009            |
| 4   | Δρακότρυπα     | 293 185 | 4 365 363 | 680   | WD08               | ΔΕΗ    | 1985-2000            |
| 5   | Ελασσώνα       | 344 494 | 4 417 838 | 314   | WD08               | ΥΠΕΚΑ  | 1960-1998            |
| 6   | Καρδίτσα       | 321 757 | 4 359 103 | 103   | WD08               | ΥΠΕΚΑ  | 1959-2000            |
| 7   | Καρπερό*       | 296 204 | 4 424 125 | 504   | WD09               | ΔΕΗ    | 1962-2012            |
| 8   | Λάρισα         | 368 210 | 4 387 785 | 73    | WD08               | ΕΜΥ    | 1972-1986, 1995-2009 |
| 9   | Λουτοπηγή      | 331 211 | 4 331 131 | 730   | WD08               | ΥΠΕΚΑ  | 1970-1986, 1992-2002 |
| 10  | Μεγάλη Κερασιά | 285 604 | 4 402 599 | 500   | WD08               | ΥΠΕΚΑ  | 1970-1980, 1986-2009 |
| 11  | Μεταξάς*       | 326 848 | 4 438 892 | 1076  | WD09               | ΔΕΗ    | 1964-1995            |
| 12  | Παλαιοχώρι     | 278 037 | 4 388 000 | 1050  | WD08               | ΔΕΗ    | 1962-1983            |
| 13  | Πυλωροί*       | 299 746 | 4 439 832 | 715   | WD09               | ΔΕΗ    | 1962-1994            |
| 14  | Σκοπιά         | 367 299 | 4 334 140 | 450   | WD08               | ΥΠΕΚΑ  | 1971-1988, 1994-1996 |
| 15  | Τρίκαλα        | 307 901 | 4 379 795 | 149   | WD08               | ΕΜΥ    | 1995-2009            |



Σχήμα 5.4: Απεικόνιση των θέσεων βροχογράφων στο ΥΔ Θεσσαλίας

### 5.2.3 Υπολογισμός Όμβριων Καμπυλών

Προκειμένου να εκτιμηθεί η περίοδος επαναφοράς, γίνεται η εφαρμογή της γενικής συναρτησιακής σχέσης όμβριων καμπυλών (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 2016):

$$i = \alpha(T) / b(d) \quad (3.1)$$

όπου :

$i$  = μέγιστη ένταση βροχής διάρκειας  $d$  για περίοδο επαναφοράς  $T$

$\alpha(T)$  = κατάλληλη συνάρτηση της  $T$

$b(d)$  = κατάλληλη συνάρτηση διάρκειας

Η συνάρτηση  $b(d)$  είναι της ακόλουθης, εμπειρικά διαπιστωμένης, γενικής μορφής:

$$b(d) = (1+d / \theta)^\eta \quad (3.2)$$

όπου:

$\theta, \eta$  = παράμετροι που ζητούνται, με  $\theta \geq 0$  (σε μονάδες χρόνου) και  $0 < \eta < 1$ .

Υστερα από αρκετές απλοποιήσεις και χρήσεις εμπειρικών σχέσεων, δίνεται η μορφή των όμβριων καμπυλών, όπως φαίνεται στην (3.3):

$$i(d, T) = \frac{\lambda' (T^k - \psi')}{(1+d/\theta)^\eta} \quad (3.3)$$

### 5.2.3.1 Εκτίμηση Παραμέτρων

Ο υπολογισμός των μεταβλητών  $\lambda$ ,  $\psi$ ,  $k$ ,  $\theta$ ,  $\eta$  είναι απαραίτητη προκειμένου να υπολογιστούν οι όμβριες καμπύλες. Στηρίχθηκε σε προηγούμενη μέθοδο και εφαρμογή της Οδηγίας 2007/60/EK. Με τον τρόπο αυτό, διαμορφώθηκαν εξισώσεις όμβριων καμπυλών, σε κάθε μία από τις θέσεις των βροχομετρικών σταθμών για το κάθε υδατικό διαμέρισμα. Η μέθοδος αυτή υπολογίζει τις ζητούμενες συνιστώσες σε δύο στάδια.

Αρχικά, στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται ο υπολογισμός των συνιστωσών της συνάρτησης  $b(d)$  ( $\theta$  και  $\eta$ ) και στο επόμενο αυτοί της  $a(T)$ , δηλαδή των  $\lambda$ ,  $\psi$  και  $k$  της κατανομής GEV.

Από την σχέση (3.1) προκύπτει ότι η τυχαία μεταβλητή  $Y = I b(d)$  έχει συνάρτηση κατανομής, η οποία είναι ανεξάρτητη της διάρκειας  $d$ . Η διάρκεια  $d$  καθορίζεται σε πλήρες βαθμό από την συνάρτηση  $a(T)$ . Επομένως, οι συνιστώσες  $\eta$  και  $\theta$  πρέπει να εκτιμηθούν με τρόπο τέτοιο ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη ανεξαρτησίας  $Y$  από την διάρκεια. Επιπρόσθετα, υποθέτοντας ότι οι τιμές των  $\theta, \eta$  είναι γνωστές, τότε μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές  $y_{jl} = i_{jl} b(d_j)$ , όπου  $j=1, \dots, k$  και  $l=1$ . Αν ενοποιηθούν όλα τα δείγματα των τιμών  $y_{jl}$  τότε δημιουργείται ένα συνολικό δείγμα μεγέθους :

$$m = \sum_{j=1}^k n_j \quad (3.4)$$

Αν το δείγμα αυτό καταταχθεί σε φθίνουσα σειρά, επιτρέπεται η αντιστοιχία ανάμεσα σε αύξοντες αριθμούς ή βαθμούς (ranks)  $r_{jl}$  σε όλες τις  $m$  τιμές  $y_{jl}$ . Άρα, επανερχόμενοι στα πρωταρχικά δείγματα των ξεχωριστών διαρκειών εκτιμάται για κάθε διάρκεια  $d_j$  ο μέσος βαθμός:

$$\bar{r}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{l=1}^k r_{jl} \quad (3.5)$$

Ακόμη, αν όλα τα επιμέρους δείγματα διαθέτουν την ίδια κατανομή τότε  $\bar{r}_j$  θα πρέπει να είναι πολύ κοντά στην τιμή  $\bar{r} = (m + 1) / 2$ , διαφορετικά οι τιμές  $\bar{r}_j$  θα διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαία την χρήση της στατιστικής παραμέτρου Kruskal-Wallis (Hirsch et al., 1993, σ. 17.25), η οποία συνδυάζει τους μέσους βαθμούς από όλα τα επιμέρους δείγματα:

$$h = \frac{6}{\bar{r} (2\bar{r} - 1)} \sum_{j=1}^k n_j (\bar{r}_j - \bar{r})^2 \quad (3.6)$$

Συνεπώς, το πρόβλημα του προσδιορισμού των παραμέτρων  $\theta$  και η μπορεί να αναχθεί στην ελαχιστοποίηση της στατιστικής παραμέτρου  $h$ . Η βελτιστοποίηση καθίσταται δυνατή μόνο με αριθμητικές μεθόδους. Είναι σκόπιμο να υπογραμμιστεί ότι αν τα επιμέρους δείγματα είναι ανεξάρτητα, τότε η στατιστική συνάρτηση  $H$ , της οποίας η σημειακή εκτίμηση είναι η παραπάνω τιμή  $h$ , ακολουθεί κατανομή  $\chi^2$  με  $k - 1$  βαθμούς ελευθερίας. Εδώ, είναι δυνατός ο έλεγχος της υπόθεσης  $H = 0$ , που εκφράζει την υπόθεση ότι όλα τα δείγματα προέρχονται από τον ίδιο πληθυσμό.

Επίσης, ο έλεγχος αυτός είναι μη παραμετρικός με την έννοια ότι υιοθετεί καμιά υπόθεση σχετικά με την κατανομή που ακολουθεί η μεταβλητή  $Y$ . Όμως, στην περίπτωση της μελέτης, τα επιμέρους δείγματα που αναφέρονται σε διαφορετικές διάρκειες δεν είναι ανεξάρτητα, αλλά αντιθέτως, ισχυρώς συσχετισμένα. Επομένως, δεν είναι γνωστή η κατανομή της  $H$  και δεν είναι δυνατός ο στατιστικός έλεγχος.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στο αρχικό στάδιο υπολογίστηκαν οι συνιστώσες της συνάρτησης  $b(d)$ , ενώ στο επόμενο αυτές της  $a(T)$ , δηλαδή  $\lambda$ ,  $\psi$  και  $\kappa$  της κατανομής ΓΑΤ.Ο γραμμικός συνδυασμός από τις τιμές των διατεταγμένων στατιστικών χαρακτηριστικών που αναμένονται, ορίζεται ως L-ροπές. Κύριο πλεονέκτημα τους αποτελεί το γεγονός πως οι δειγματικές εκτιμήσεις τους ως γραμμικοί συνδυασμοί του διατεταγμένου δείγματος, δεν ανάγονται οι παρατηρήσεις του δείγματος σε τετραγωνικές ή κυβικές δυνάμεις, γεγονός που παρατηρείται στην κλασική μέθοδο υπολογισμού ροπών. Η παραπάνω μέθοδος εκφράζεται από τις σχέσεις παρακάτω:

$$\kappa = 7.8 c - 1.43 c^2 \quad (3.7)$$

$$\lambda = \frac{\kappa \lambda_2}{\Gamma(1 - \kappa) (2^\kappa - 1)} \quad (3.8)$$

$$\psi = \frac{\lambda_1}{\lambda} = \frac{\Gamma(1 - \kappa) - 1}{\kappa} \quad (3.9)$$

Όπου  $\Gamma()$  η συνάρτηση γάμα:

$$(3.10)$$

$$c := \frac{\ln 2}{\ln 3} - \frac{2 \lambda_2}{\lambda_3 + 3 \lambda_2}$$

$\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  και  $\lambda_3$  αποτελούν τις τρεις πρωταρχικές L ροπές της κατανομής. Αμερόληπτες εκτιμήσεις των τριών αυτών κατανομών περιγράφονται από τις εξισώσεις (βλ. Stedinger et al., 1993):

$$\hat{\lambda}_1 = b_0 \quad (3.11)$$

$$\hat{\lambda}_2 = 2 b_1 - b_0 \quad (3.12)$$

$$\hat{\lambda}_3 = 6 b_2 - 6 b_1 + b_0 \quad (3.13)$$

Όπου:

$b_0$ ,  $b_1$  και  $b_2$  οι υπολογισμοί των πιθανοτικά σταθμισμένων ροπών και υπολογίζονται:

$$b_0 = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{(j)} \quad (3.14)$$

$$b_1 = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^{n-1} (n-j) x_{(j)} \quad (3.15)$$

$$b_2 = \frac{1}{n(n-1)(n-2)} \sum_{j=1}^{n-2} (n-j)(n-j-1) x_{(j)} \quad (3.16)$$

Όπου:

$n$  αποτελεί το μέγεθος του δείγματος και  $x_{(j)}$  ( $j = 1, \dots, n$ ) αντιστοιχεί στη τιμή του δείγματος που έχει σειρά  $j$  στο καταταγμένο σε φθίνουσα σειρά δείγμα.

Μόνο στις θέσεις των 15 βροχογράφων της υπό μελέτη περιοχής μπορεί να βρει εφαρμογή η παραπάνω μεθοδολογία παραγωγής των όμβριων καμπυλών, στις περιπτώσεις όπου είναι διαθέσιμα δείγματα μέγιστων εντάσεων βροχής σε πολλές διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Σε κάθε σταθμό, υπολογίστηκαν οι συνιστώσες της όμβριας καμπύλης, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4. Επιπλέον, επισημαίνεται πως οι όμβριες καμπύλες που υπολογίστηκαν με τέτοιο τρόπο είναι σημειακές, αφού όλες οι συνιστώσες τους υπολογίστηκαν από τα δεδομένα του κάθε μεμονωμένου σταθμού.

**Πίνακας 5.4:** Συνιστώσες σημειακών όμβριων καμπυλών βροχογράφων περιοχής μελέτης

| Σταθμός    | θ     | η     | ψ     | λ      | κ     | ψ'    | λ'       | KW    |
|------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|----------|-------|
| Μεταξάς    | 0.081 | 0.702 | 2.749 | 32.293 | 0.147 | 0.596 | 219.816  | 1.576 |
| Αγγιάλος   | 0.180 | 0.760 | 1.780 | 32.315 | 0.127 | 0.775 | 255.276  | 0.525 |
| Αργιθέα    | 0.401 | 0.573 | 3.854 | 9.544  | 0.093 | 0.641 | 102.542  | 6.704 |
| Δρακότρυπα | 0.101 | 0.491 | 3.845 | 11.633 | 0.103 | 0.604 | 112.940  | 7.144 |
| Ελασσόνα   | 0.205 | 0.742 | 2.589 | 22.103 | 0.206 | 0.466 | 107.088  | 1.757 |
| Καρδίτσα   | 0.754 | 0.691 | 2.964 | 7.586  | 0.180 | 0.466 | 42.103   | 5.257 |
| Καρπερό    | 0.623 | 0.767 | 2.539 | 10.057 | 0.139 | 0.647 | 72.328   | 4.367 |
| Λάρισα     | 0.119 | 0.794 | 2.106 | 44.375 | 0.176 | 0.629 | 251.648  | 1.482 |
| Λουτοπηγή  | 0.160 | 0.616 | 2.536 | 19.270 | 0.142 | 0.639 | 135.338  | 1.295 |
| Μ. Κερασιά | 0.647 | 0.684 | 2.865 | 8.737  | 0.034 | 0.902 | 254.931  | 9.310 |
| Παλαιοχώρι | 0.019 | 0.415 | 3.669 | 17.022 | 0.076 | 0.720 | 222.729  | 0.114 |
| Πυλώροι    | 0.045 | 0.704 | 3.165 | 38.471 | 0.078 | 0.752 | 490.547  | 2.723 |
| Σκοπιά     | 0.010 | 0.567 | 2.810 | 58.316 | 0.151 | 0.575 | 385.282  | 2.273 |
| Τρίκαλα    | 0.270 | 0.858 | 2.047 | 34.392 | 0.016 | 0.966 | 2089.756 | 3.077 |
| Βροντερό   | 1.900 | 0.648 | 2.998 | 5.701  | 0.080 | 0.760 | 71.307   | 2.345 |

### 5.2.3.2 Υπολογισμός Όμβριων Καμπυλών σε επίπεδο υπολεκάνης

Τα όρια εμπιστοσύνης μπορούν να εκφραστούν ως δύο συνεχείς συναρτήσεις που γίνεται να αποτυπωθούν στο χαρτί κατανομής ως δύο καμπύλες που περικλείουν την καμπύλη μιας συνάρτησης κατανομής. Οι καμπύλες αυτές αποτελούν έκφραση του εύρους αβεβαιότητας της εκτίμησης της τυχαίας μεταβλητής που περιγράφει η κατανομή.

Με τον τρόπο αυτό, γνωρίζοντας τον βαθμό εμπιστοσύνης, τα όρια υπολογίζονται κατά βάση από το μέγεθος του δείγματος δείγματος βάσει του οποίου έγινε ο υπολογισμός των συνιστωσών της κατανομής και από τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος. Επιπρόσθετα, το εύρος της αβεβαιότητας αυξάνεται, όσο πιο ακραία γίνεται η πιθανότητα υπέρβασης ή, ισοδύναμα, όσο μεγαλώνει η περίοδος επαναφοράς της τιμής της τυχαίας μεταβλητής που ζητείται. Οι εκτιμήσεις των εντάσεων βροχής χαρακτηρίζονται από μεγάλη αβεβαιότητα, διότι οι συνιστώσες των όμβριων καμπυλών υπολογίζονται από δείγματα συγκεκριμένου μήκους. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε κάθε σταθμό, η σχέση έντασης-διάρκειας (χρονικής κλίμακας)-περιόδου επαναφοράς (όμβρια καμπύλη) εκφράζεται από την σχέση:

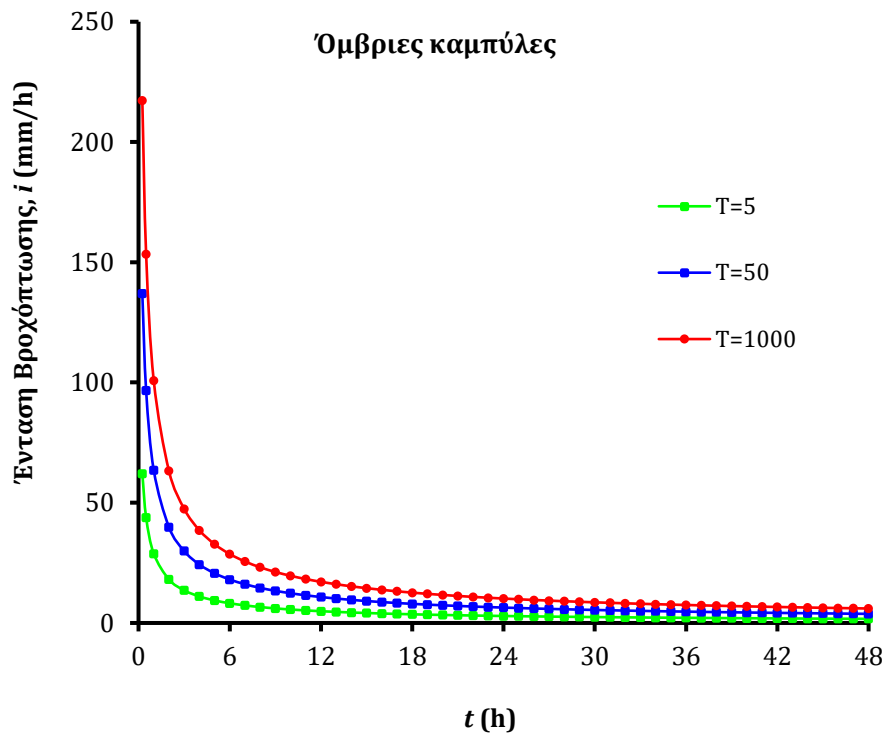
$$i(d, T) = \frac{\lambda' (T^k - \psi')}{(1 + d/\theta)^n} \quad (3.17)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις συνιστώσες που υπολογίστηκαν παραπάνω (3.19), οι πρώτες δύο υπολογίστηκαν, βασισμένες στο δείγμα μέγιστων εντάσεων βροχής του ιδίου σταθμού, ενώ αντίθετα οι υπόλοιπες παράμετροι υπολογίστηκαν βασισμένες σε πολλαπλά δείγματα περισσότερων βροχομετρικών σταθμών.

Στον Πίνακα παρακάτω δίνονται οι τιμές των παραμέτρων όμβριων καμπυλών σε επίπεδο υπολεκάνης:

| ΚΩΔΙΚΟΣ | ΕΚΤΑΣΗ | ΟΝΟΜΑ    | X          | Y            | Z  | $\kappa$ | $\lambda'$ | $\psi'$ | $\theta$ | $\eta$ |
|---------|--------|----------|------------|--------------|----|----------|------------|---------|----------|--------|
| GR08    | 196    | Αγχιάλος | 396<br>203 | 4 341<br>105 | 42 | 0.127    | 255.276    | 0.755   | 0.18     | 0.76   |

Ενδεικτικά, το Σχήμα 5.5 παρακάτω παρουσιάζει τις όμβριες καμπύλες για την υδρολογική λεκάνη του Ξεριά, με χρονικές διάρκειες από 15λεπτά έως και 48 ώρες αλλά και  $T = 5, 100$  και 1000 έτη.



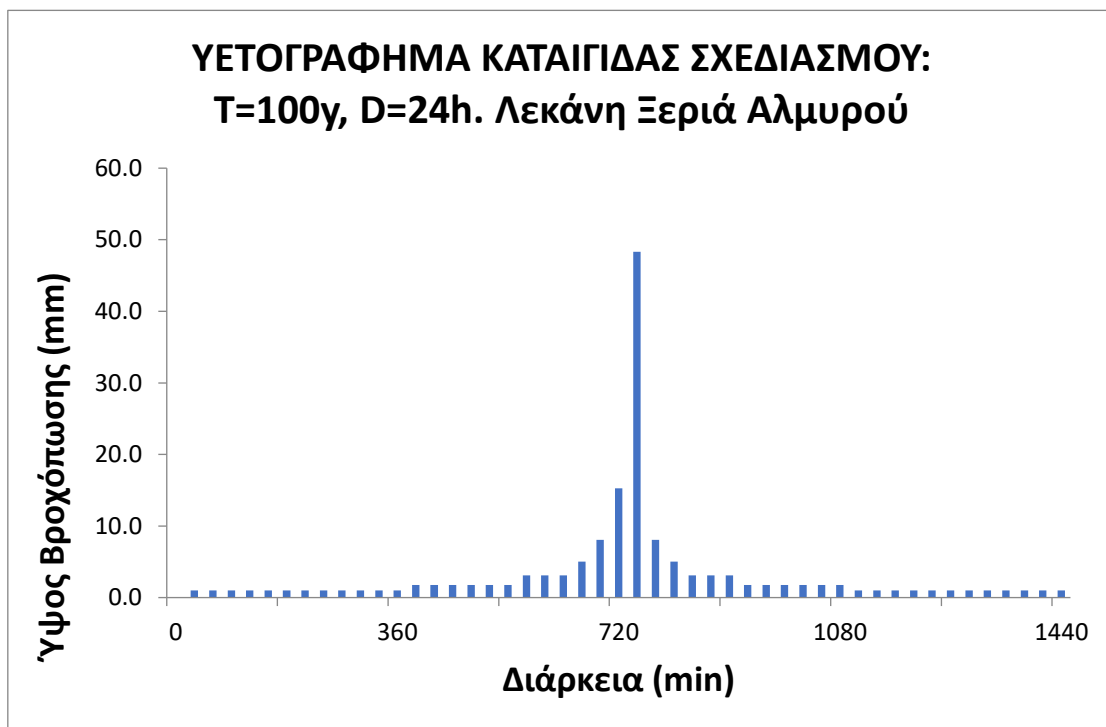
Σχήμα 5.5: Όμβριες καμπύλες D για από 15min έως και 48h και  $T = 5, 100$  και 1000 έτη.

#### 5.2.4 Εκτίμηση Καταιγίδας Σχεδιασμού

Για την εκτίμηση της καταιγίδας σχεδιασμού στην παρούσα διπλωματική εργασία, θεωρήθηκε πως η περίοδος επαναφοράς αντιστοιχεί σε αυτή μιας τυπικής καταιγίδας περιόδου επαναφοράς 100 ετών. Για κάθε υπολεκάνη, η διάρκεια της καταιγίδας ορίστηκε ίση με 48 ώρες. Αυτό έγινε καθώς είναι γνωστό, πως οι καταιγίδες σχεδιασμού των επιμέρους υπο-λεκανών πρέπει να έχουν μεγαλύτερη χρονική διάρκεια ( $\approx$  διπλάσια) από αυτή του χρόνου συγκέντρωσης όλης της λεκάνης του Ξεριά. Ακόμη, για τη παραγωγή του υετογραφήματος σχεδιασμού έγινε η χρήση των όμβριων καμπυλών που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

#### 5.2.4.1 Χρονική κατανομή καταιγίδας σχεδιασμού

Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε τυπική καταιγίδα σταθερής διάρκειας 24h για την υπολεκάνη της περιοχής μελέτης. Για την ορθή απεικόνιση του υετογραφήματος καταιγίδας σχεδιασμού, απαιτείται υποπολλαπλάσιο χρονικό βήμα από τους χρόνους συγκέντρωσης των μικρότερων λεκανών. Εδώ, επιλέχθηκε σταθερό χρονικό βήμα υπολογισμού, με τιμή  $\Delta t = 30 \text{ min}$ . Ακόμη, για κάθε μικρότερη λεκάνη, το μέσο ύψος βροχής εκτιμήθηκε από μια ολοκληρωμένη χρονοσειρά διάρκειας εικοσιτεσσάρων ωρών, με επιλεγμένο χρονικό βήμα 30 λεπτών. Ως υετογράφημα εισόδου για το HEC-HMS, πάρθηκε η χρονικά κατανεμημένη βροχόπτωση, προκειμένου να επιτευχθεί η παραγωγή των πλημμυρογραφημάτων. Ενδεικτικά, το Σχήμα 5.6 παρουσιάζει το υετογράφημα σχεδιασμού της λεκάνης απορροής του Ξεριά, για  $T=100\text{έτη}$  και διάρκεια επεισοδίου βροχής  $D=24$  ώρες.



Σχήμα 5.6: Υετογράφημα Καταιγίδας Σχεδιασμού Ξεριάς Αλμυρού

### 5.3 Διαδικασία παραγωγής Πλημμυρικών υδρογραφημάτων

Σχετικά με την υπολογιστική διαδικασία παραγωγής πλημμυρικών υδρογραφημάτων, γνωρίζουμε ότι προκειμένου να υπολογιστεί η πλημμυρική απορροή θα πρέπει να επιτευχθεί η ημικατανομημένη διακριτοποίηση της λεκάνης, όπου αυτή θα χωριστεί σε μικρότερες. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε μικρότερη λεκάνη γίνεται χρήση της τυπικής μεθόδου προσέγγισης του επεισοδίου πλημμύρας (event-based), η οποία στηρίζεται στην SCS-CN. Σε αυτή την προσέγγιση, η βροχόπτωση μετατρέπεται σε επιφανειακή απορροή, ενώ συνδυάζοντας την προσέγγιση που έχουμε από το μοναδιαίο υδρογράφημα, επιτυγχάνεται η διόδευση της απορροής μέχρι το σημείο εξόδου της υδρολογικής λεκάνης. Το επόμενο βήμα αποτελεί η εφαρμογή απλουστευμένων υδρολογικών προσεγγίσεων καθώς και η διόδευση των πλημμυρογραφημάτων του συνόλου των μικρότερων επιμέρους λεκανών, μέσω του υδρογραφικού δικτύου έως και το σημείο εξόδου της λεκάνης.

#### 5.3.1 Διόδευση υδρογραφημάτων στο υδρογραφικό δίκτυο

Στην περίπτωση του Ξεριά Αλμυρού, για την όσο το δυνατό πιο έγκυρη πρόβλεψη της εξέλιξης μια πλημμύρας στο χώρο και στο χρόνο, για έναν επιφανειακό φορέα χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της διόδευσης πλημμύρας. Συγκεκριμένα, η μέθοδος διόδευσης που έχει επιλεγεί ονομάζεται μέθοδος Muskingum, και βρίσκει ευρέα χρήση για υδατορέματα μικρών κλίσεων, χαρακτηριστικό της περίπτωσης που εξετάζεται.

Η ελάττωση της κλίσης του πυθμένα, γνωρίζοντας το μήκος του υδατορέματος, συνεπάγεται πως η παράμετρος  $K$  αυξάνεται και η μεταβλητή  $\theta$  ελαττώνεται. Η τιμή της μεταβλητής αυτής είναι κοντά στο μηδέν στην περίπτωση υδατορεμάτων μικρής κλίσεως και πλευρικής υπερχείλισης. Αντιθέτως, σε υδατορέματα μεγάλων κλίσεων ισχύει:  $\theta \approx \theta_{\text{θεωρητικό,max}} = 0.5$ . Συνήθως στις περισσότερες αναλύσεις επιλέγεται η τιμή  $\theta=0.20$  για την μέθοδο διόδευσης Muskingum, τιμή αντίστοιχη για φυσικούς αγωγούς. Αναφορικά με την χρονική συνιστώσα  $K$ , υπολογίζεται με την βοήθεια της εξίσωσης του Manning όπως φαίνεται στην Εξ.(4.1):

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} i_f^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

Η τιμή της υδραυλικής ακτίνας  $R$  είναι περίπου ίση το μέσο βάθος  $D$ , για πλατύ και αβαθή ορθογωνικό αγωγό ή δηλαδή  $R \approx D$ . Επιπρόσθετα, σε συνθήκες όπου η ροή είναι μόνιμη και ομοιόμορφη ισχύει:

$$i_f = i_0 \quad (4.2)$$

δηλαδή, η τιμή της κλίσης της γραμμής ενέργειας ( $i_f$ ) είναι ίση με την τιμή της κλίσης του πυθμένα του υδατορέματος ( $i_0$ ). Συνεπώς, για ορισμένο μήκος διαδρομής  $L$ , ισχύει  $K = L/V$ , τιμή αυτή που λαμβάνεται στην περίπτωση πλημμυρικών επεισοδίων περιόδου επαναφοράς 50 ετών. Γνωρίζουμε ότι η ταχύτητας ροή μεγαλώνει, και επομένως ο χρόνος ροής γίνεται μικρότερος, γεγονός που οφείλεται στην αυξημένη παροχή για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα επαναφοράς, η τιμή της συνιστώσας  $K_{50}$  μικραίνει, για την περίοδο των 100 ετών σύμφωνα με τον τύπο:

$$K_{100} = K_{50} \times 0.85 \quad (4.3)$$

Επιβάλλεται η κατάλληλη επιλογή του χρονικού βήματος (ιδανικά  $K = \Delta t$ ), έτσι ώστε να μην εμφανίζονται αρνητικές εκροές. Στην περίπτωση εκείνη που ο μέσος χρόνος διαδρομής του πλημμυρικού κύματος από την είσοδο της λεκάνης απορροής στην έξοδο δεν ταυτίζεται με το χρονικό βήμα της υδρολογικής προσομοίωσης, τότε εφαρμόζεται η (4.2):

$$2K\theta \leq \Delta t \leq 2K(1-\theta) \quad (4.4)$$

Στον Πίνακες που ακολουθούν αναλύονται εκτενώς οι υπολογισμοί που απαιτήθηκαν για τη διόδευση του υδρογραφικού δικτύου με χρήση της μεθόδου Muskingum, για τα τέσσερα DEM που δημιουργήθηκαν. Οι Πίνακες περιλαμβάνουν αρχικά το μήκος του κάθε υδατορέματος όπως και την μέση κλίση του πυθμένα του. Ακόμη, εκτιμήθηκε ο συντελεστής τραχύτητας /συντελεστής Manning ( $n$ ) αλλά και η υδραυλική ακτίνα ( $R$ ), η οποία για αβαθή και ορθογωνικό αγωγό ισούται με το μέσο βάθος ροής ( $D$ ). Επιπρόσθετα, υπολογίστηκε η ταχύτητα ροής για περίοδο επαναφοράς 50 ετών ( $V_{50}$ ), ο μέσος χρόνος διαδρομής της αιχμής της πλημμύρας διαμέσου του υπό μελέτη τμήματος (travelling time) για περίοδο επαναφοράς 50 ετών, δηλαδή ο χρόνος για τη ροή του νερού από την διατομή εισόδου έως την διατομή εξόδου ( $K_{50}$ ). Επιπλέον,

βρέθηκε ο μέσος χρόνος διαδρομής της αιχμής της πλημμύρας διαμέσου του υπό μελέτη τμήματος για περίοδο επαναφοράς 100 ετών ( $K_{100}$ ), η ταχύτητα ροής για περίοδο επαναφοράς 100 ετών ( $V_{100}$ ) και τέλος η παράμετρος  $X$ , που αποτελεί την έκφραση του βάρους συμμετοχής της εισροής στην αποθήκευση του τμήματος του ποταμού (επιλέχθηκε η τιμή  $X = 0.2$ ). Η διαδικασία αυτή, πραγματοποιήθηκε και για τα τέσσερα μοντέλα εδάφους που μελετήθηκαν.

**Πίνακας 5.5:** Υπολογισμοί διόδευσης μεθόδου Muskingum – DEM (ESRI)

| DEM (ESRI) |            |            |             |           |           |             |                     |             |              |
|------------|------------|------------|-------------|-----------|-----------|-------------|---------------------|-------------|--------------|
| Κωδικός    | Μήκος (km) | Μέση Κλίση | Manning's n | R = D (m) | V50 (m/s) | K50 (hr)    | K100 (=0.85*K50,hr) | V100 (m/s)  | Παράμετρος X |
| R21        | 3.485755   | 0.00662    | 0.03        | 2         | 4.3052106 | 0.809659573 | 0.688210637         | 5.064953681 | 0.2          |
| R42        | 5.190479   | 0.00925    | 0.03        | 2         | 5.0890448 | 1.019931871 | 0.86694209          | 5.987111548 | 0.2          |
| R76        | 10.41332   | 0.01511    | 0.03        | 2         | 6.5042562 | 1.601000582 | 1.360850495         | 7.652066146 | 0.2          |
| R64        | 2.131553   | 0.01186    | 0.03        | 2         | 5.7624577 | 0.36990345  | 0.314417933         | 6.779362049 | 0.2          |
| R54        | 4.128016   | 0.02105    | 0.03        | 2         | 7.6769986 | 0.537712228 | 0.457055394         | 9.031763012 | 0.2          |
| R32        | 3.122706   | 0.01463    | 0.03        | 2         | 6.400112  | 0.487914276 | 0.414727135         | 7.529543496 | 0.2          |
| R87        | 7.322806   | 0.02796    | 0.03        | 2         | 8.8477734 | 0.827643934 | 0.703497344         | 10.4091452  | 0.2          |
| R98        | 7.473914   | 0.05066    | 0.03        | 2         | 11.909623 | 0.627552544 | 0.533419662         | 14.01132078 | 0.2          |

**Πίνακας 5.6:** Υπολογισμοί διόδευσης μεθόδου Muskingum – DEM (ΥΠΕΚΑ)

| DEM (ΥΠΕΚΑ) |            |            |             |           |           |             |                     |             |              |
|-------------|------------|------------|-------------|-----------|-----------|-------------|---------------------|-------------|--------------|
| Κωδικός     | Μήκος (km) | Μέση Κλίση | Manning's n | R = D (m) | V50 (m/s) | K50 (hr)    | K100 (=0.85*K50,hr) | V100 (m/s)  | Παράμετρος X |
| R21         | 3.485755   | 0.00573    | 0.03        | 2         | 4.0053707 | 0.870270253 | 0.739729715         | 4.712200861 | 0.2          |
| R42         | 5.190479   | 0.00933    | 0.03        | 2         | 5.1110041 | 1.015549759 | 0.863217295         | 6.012946022 | 0.2          |
| R76         | 10.41332   | 0.0146     | 0.03        | 2         | 6.3935466 | 1.628723243 | 1.384414756         | 7.521819564 | 0.2          |
| R64         | 2.131553   | 0.01242    | 0.03        | 2         | 5.8969332 | 0.36146806  | 0.307247851         | 6.937568452 | 0.2          |
| R54         | 4.128016   | 0.02181    | 0.03        | 2         | 7.8143569 | 0.52826049  | 0.449021417         | 9.193361043 | 0.2          |
| R32         | 3.122706   | 0.01505    | 0.03        | 2         | 6.4913296 | 0.481057997 | 0.408899297         | 7.636858315 | 0.2          |
| R87         | 7.322806   | 0.02754    | 0.03        | 2         | 8.7810687 | 0.833931064 | 0.708841404         | 10.33066911 | 0.2          |
| R98         | 7.473914   | 0.05183    | 0.03        | 2         | 12.046365 | 0.620428991 | 0.527364642         | 14.17219397 | 0.2          |

**Πίνακας 5.7:** Υπολογισμοί διόδευσης μεθόδου Muskingum – DEM (Aster GDEM V3)

| DEM (Aster GDEM V3) |            |            |             |           |           |             |                     |             |              |
|---------------------|------------|------------|-------------|-----------|-----------|-------------|---------------------|-------------|--------------|
| Κωδικός             | Μήκος (km) | Μέση Κλίση | Manning's n | R = D (m) | V50 (m/s) | K50 (hr)    | K100 (=0.85*K50,hr) | V100 (m/s)  | Παράμετρος Χ |
| R21                 | 3.485755   | 0.00115    | 0.03        | 2         | 1.7943796 | 1.942596177 | 1.651206751         | 2.111034853 | 0.2          |
| R42                 | 5.190479   | 0.0104     | 0.03        | 2         | 5.396126  | 0.961889889 | 0.817606406         | 6.348383482 | 0.2          |
| R76                 | 10.41332   | 0.01738    | 0.03        | 2         | 6.9757402 | 1.492790408 | 1.268871847         | 8.206753129 | 0.2          |
| R64                 | 2.131553   | 0.00798    | 0.03        | 2         | 4.7267959 | 0.450950924 | 0.383308285         | 5.560936412 | 0.2          |
| R54                 | 4.128016   | 0.01986    | 0.03        | 2         | 7.4568435 | 0.553587584 | 0.470549446         | 8.772757113 | 0.2          |
| R32                 | 3.122706   | 0.01569    | 0.03        | 2         | 6.6279142 | 0.471144599 | 0.400472909         | 7.797546174 | 0.2          |
| R87                 | 7.322806   | 0.02349    | 0.03        | 2         | 8.1097397 | 0.902964365 | 0.76751971          | 9.540870294 | 0.2          |
| R98                 | 7.473914   | 0.05352    | 0.03        | 2         | 12.241185 | 0.610554779 | 0.518971562         | 14.40139412 | 0.2          |

**Πίνακας 5.8:** Υπολογισμοί διόδευσης μεθόδου Muskingum – DEM (Copernicus)

| DEM (Copernicus) |            |            |             |           |           |             |                     |             |              |
|------------------|------------|------------|-------------|-----------|-----------|-------------|---------------------|-------------|--------------|
| Κωδικός          | Μήκος (km) | Μέση Κλίση | Manning's n | R = D (m) | V50 (m/s) | K50 (hr)    | K100 (=0.85*K50,hr) | V100 (m/s)  | Παράμετρος Χ |
| R21              | 3.485755   | 0.00723    | 0.03        | 2         | 4.4991923 | 0.774751278 | 0.658538586         | 5.293167436 | 0.2          |
| R42              | 5.190479   | 0.00919    | 0.03        | 2         | 5.072513  | 1.023255938 | 0.869767547         | 5.967662298 | 0.2          |
| R76              | 10.41332   | 0.01673    | 0.03        | 2         | 6.8440532 | 1.521513295 | 1.2932863           | 8.051827346 | 0.2          |
| R64              | 2.131553   | 0.01161    | 0.03        | 2         | 5.7014001 | 0.373864834 | 0.317785109         | 6.707529528 | 0.2          |
| R54              | 4.128016   | 0.01977    | 0.03        | 2         | 7.4399282 | 0.554846216 | 0.471619283         | 8.752856693 | 0.2          |
| R32              | 3.122706   | 0.01432    | 0.03        | 2         | 6.3319419 | 0.493167195 | 0.419192115         | 7.449343357 | 0.2          |
| R87              | 7.322806   | 0.02584    | 0.03        | 2         | 8.5057314 | 0.860926082 | 0.73178717          | 10.00674281 | 0.2          |
| R98              | 7.473914   | 0.05313    | 0.03        | 2         | 12.196503 | 0.612791566 | 0.520872831         | 14.34882673 | 0.2          |

### 5.3.2 Στάδια υδρολογική προσομοίωσης HEC-HMS

Η υδρολογική προσομοίωση του Ξεριά Αλμυρού πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό HEC-HMS. Το πρώτο βήμα που ακολουθήθηκε ήταν η δημιουργία νέας εργασίας (Project), ενώ στην συνέχεια ακολούθησε η εισαγωγή ή σε ορισμένες περιπτώσεις (και) δημιουργία γεωμετρικών δεδομένων. Έπειτα ακολούθησε η εισαγωγή των υπολογισμένων παραμέτρων ροής, ο καθορισμός των οριακών συνθηκών των υπό μελέτη σεναρίων, η πραγματοποίηση υδραυλικών υπολογισμών και τέλος παράχθηκαν τα αποτελέσματα τόσο με τη μορφή πινάκων όσο και διαγραμμάτων.

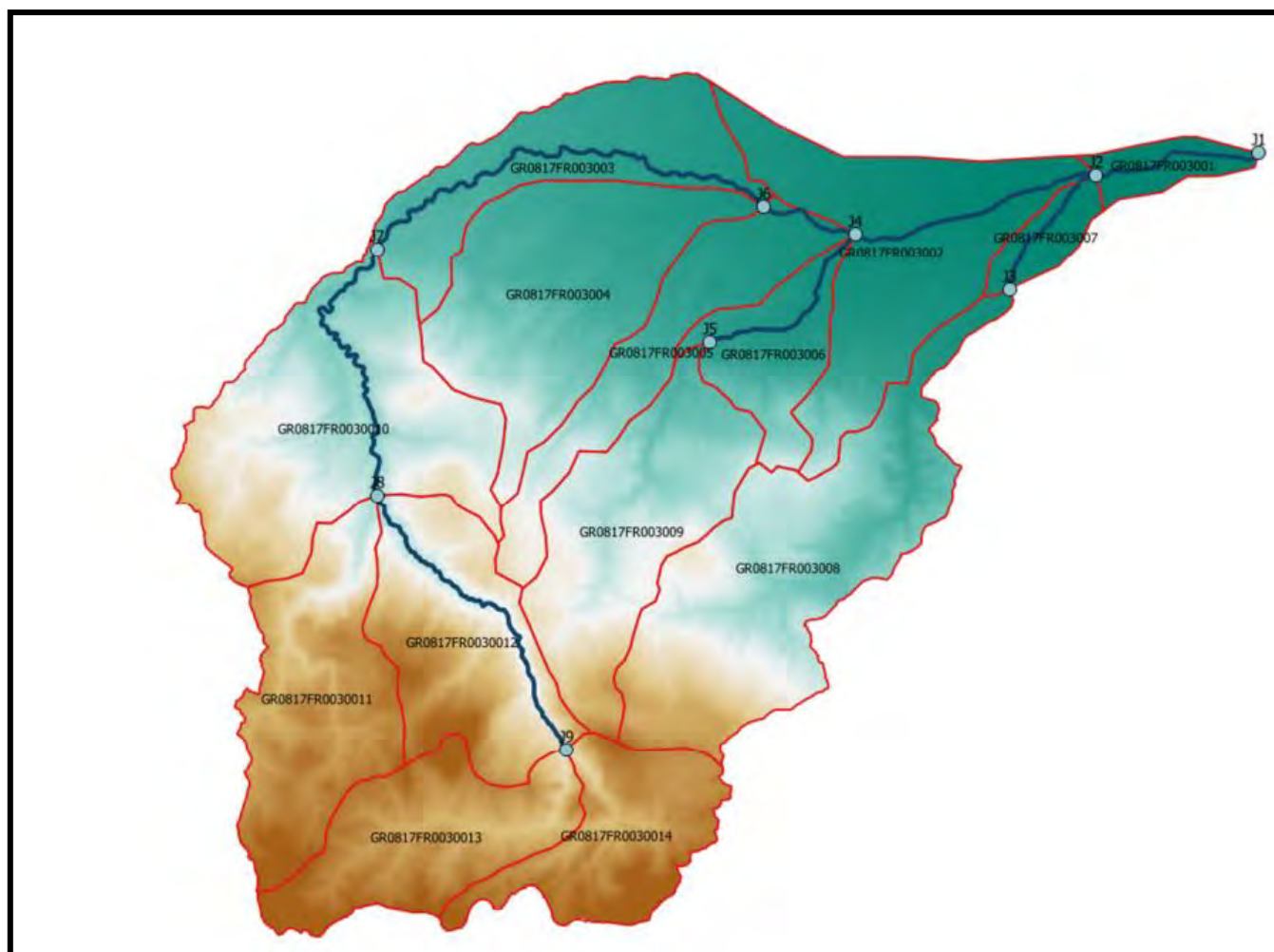
## Κεφάλαιο 6ο: Μοντελοποίηση Υδρολογικού Συστήματος & Εισαγωγή δεδομένων εισόδου στο HEC-HMS

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η περιοχή μελέτης που χρησιμοποιείται ως βάση της υδρολογικής προσομοίωσης, περιλαμβάνει το τμήμα της λεκάνης απορροής του ρέματος Ξεριάς Αλμυρού. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε και ανήκει στην λεκάνη του ρέματος Ξεριάς Αλμυρού αποτελείται από 14 υπολεκάνες, 9 κόμβους και 8 κλάδους του υδρογραφικού δικτύου. Το μοντέλο αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της λεκάνης του Ξεριά είναι:

- Έκταση  $A = 196.82 \text{ km}^2$
- Μέσο υψόμετρο  $z_m = 598.6$  μέτρα
- Υψόμετρο κόμβου εξόδου  $z_k = 0$  μέτρα
- Μέγιστο μήκος ροής  $L_{\max} = 42.61 \text{ km}$
- Χρόνος συγκέντρωσης  $t_c = 6.13 \text{ hrs.}$

Για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του Ξεριά επιλέχθηκε διάρκεια βροχής  $D = 48 \text{ h}$  και χρονικό βήμα  $\Delta t = 30 \text{ min.}$



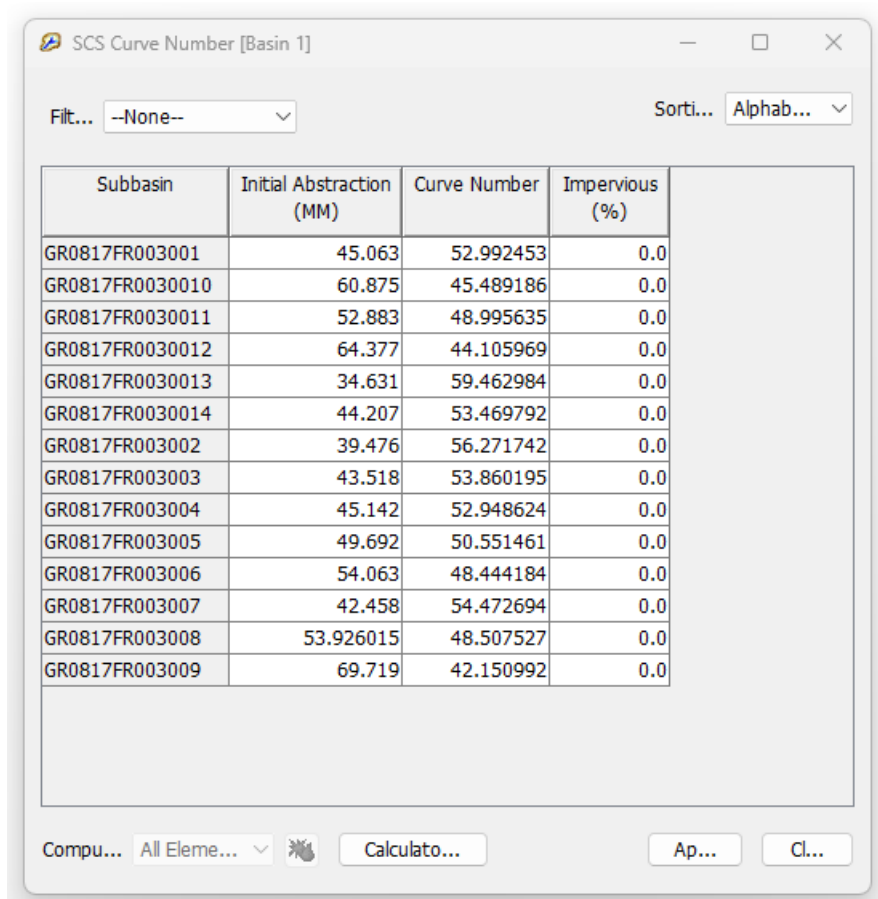
**Σχήμα 6.1:** Χάρτης περιοχής μελέτης ρέματος Ξεριά Αλμυρού, που δείχνει την σχηματοποίηση των κόμβων και των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και των επιμέρους υπολεκανών.(Πηγή:ΥΠΕΚΑ)

## 6.1 Εισαγωγή υπολογισμένων παραμέτρων στο λογισμικό

Ακολουθεί η συνοπτική περιγραφή των βημάτων εισαγωγής των υπολογισμένων παραμέτρων στο HEC-HMS:

### 6.1.1 Υπολογισμός Απωλειών (Loss Method):

Για τον υπολογισμό των υδρολογικών απωλειών επιλέχθηκε η μέθοδος SCS Curve Number. Σε αυτό το βήμα εισήχθησαν οι παράμετροι Initial Abstraction, Impervious αλλά και ο αριθμός καμπύλης απορροής CN μέσω του μενού Parameters < Loss < SCS Curve Number, όπως περιγράφεται στο Σχήμα 6.2:

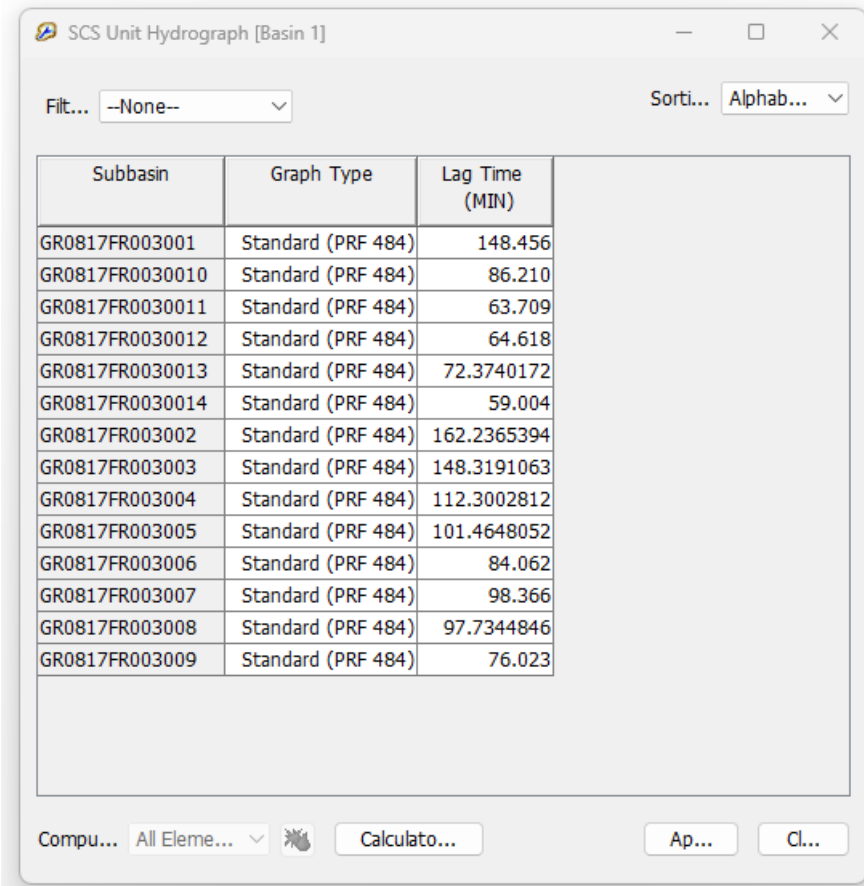


| Subbasin        | Initial Abstraction (MM) | Curve Number | Impervious (%) |
|-----------------|--------------------------|--------------|----------------|
| GR0817FR003001  | 45.063                   | 52.992453    | 0.0            |
| GR0817FR0030010 | 60.875                   | 45.489186    | 0.0            |
| GR0817FR0030011 | 52.883                   | 48.995635    | 0.0            |
| GR0817FR0030012 | 64.377                   | 44.105969    | 0.0            |
| GR0817FR0030013 | 34.631                   | 59.462984    | 0.0            |
| GR0817FR0030014 | 44.207                   | 53.469792    | 0.0            |
| GR0817FR003002  | 39.476                   | 56.271742    | 0.0            |
| GR0817FR003003  | 43.518                   | 53.860195    | 0.0            |
| GR0817FR003004  | 45.142                   | 52.948624    | 0.0            |
| GR0817FR003005  | 49.692                   | 50.551461    | 0.0            |
| GR0817FR003006  | 54.063                   | 48.444184    | 0.0            |
| GR0817FR003007  | 42.458                   | 54.472694    | 0.0            |
| GR0817FR003008  | 53.926015                | 48.507527    | 0.0            |
| GR0817FR003009  | 69.719                   | 42.150992    | 0.0            |

Σχήμα 6.2: Εισαγωγή Παραμέτρων InitAbstr, CN, Impervious

### 6.1.2 Μετασχηματισμός ύψους άμεσης απορροής σε υδρογράφημα (Transform Method)

Για τον μετασχηματισμό του ύψους τη άμεσης απορροής σε υδρογράφημα επιλέχθηκε η μέθοδος SCS Unit Hydrograph. Εδώ, εισήχθη η παράμετρος του χρόνου υστέρησης Lag Time μέσω της καρτέλας Parameters, μετά Transform και τέλος επιλέγοντας SCS Unit Hydrograph, όπως φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 6.3):



| Subbasin        | Graph Type         | Lag Time (MIN) |
|-----------------|--------------------|----------------|
| GR0817FR003001  | Standard (PRF 484) | 148.456        |
| GR0817FR0030010 | Standard (PRF 484) | 86.210         |
| GR0817FR0030011 | Standard (PRF 484) | 63.709         |
| GR0817FR0030012 | Standard (PRF 484) | 64.618         |
| GR0817FR0030013 | Standard (PRF 484) | 72.3740172     |
| GR0817FR0030014 | Standard (PRF 484) | 59.004         |
| GR0817FR003002  | Standard (PRF 484) | 162.2365394    |
| GR0817FR003003  | Standard (PRF 484) | 148.3191063    |
| GR0817FR003004  | Standard (PRF 484) | 112.3002812    |
| GR0817FR003005  | Standard (PRF 484) | 101.4648052    |
| GR0817FR003006  | Standard (PRF 484) | 84.062         |
| GR0817FR003007  | Standard (PRF 484) | 98.366         |
| GR0817FR003008  | Standard (PRF 484) | 97.7344846     |
| GR0817FR003009  | Standard (PRF 484) | 76.023         |

Σχήμα 6.3: Εισαγωγή παραμέτρου χρόνου υστέρησης (Lag Time)

### 6.1.3 Υπολογισμός Βασικής απορροής:

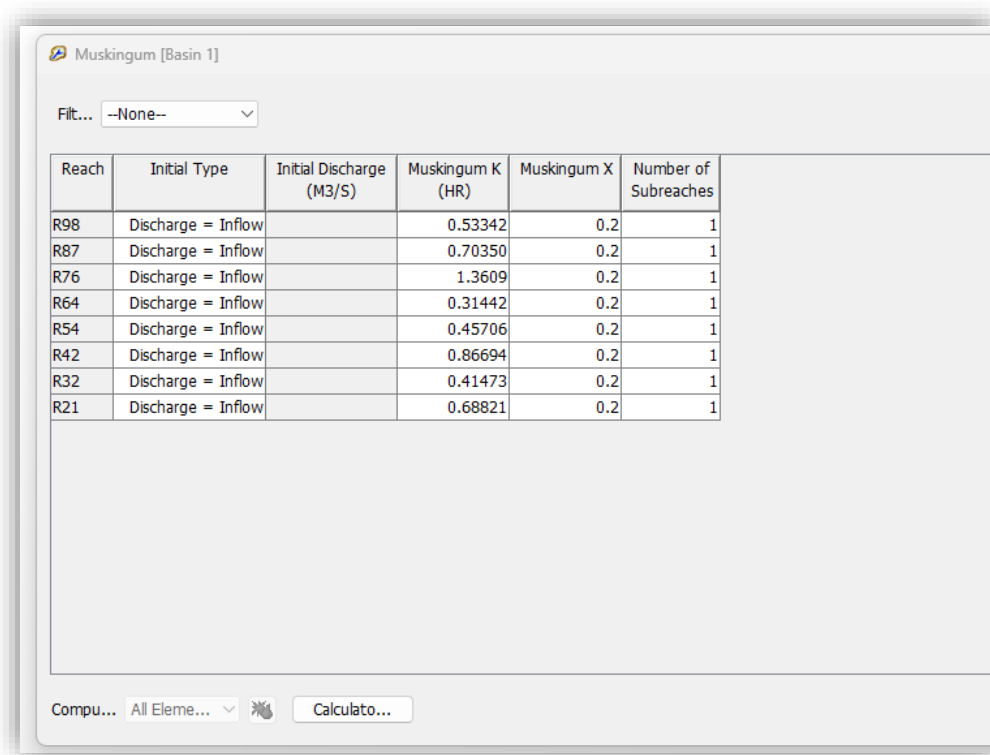
Όπως προαναφέρθηκε, η μέθοδος υπολογισμού βασικής απορροής που επιλέχθηκε είναι η Constant Monthly. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, θεωρείται μια σταθερή τιμή απορροής, η οποία παραμένει ίδια σε κάθε μήνα του έτους. Για το λόγο αυτό, εισήχθησαν οι ίδιες τιμές σε κάθε μήνα, μέσω του μενού Parameters < Baseflow < Constant Monthly, όπως φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 6.4):

| Subbasin        | January Baseflow (M3/S) | February Baseflow (M3/S) | March Baseflow (M3/S) | April Baseflow (M3/S) | May Baseflow (M3/S) | June Baseflow (M3/S) | July Baseflow (M3/S) | August Baseflow (M3/S) | September Baseflow (M3/S) | October Baseflow (M3/S) | November Baseflow (M3/S) | December Baseflow (M3/S) |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| GR0817FR003001  | 0.053                   | 0.053                    | 0.053                 | 0.053                 | 0.053               | 0.053                | 0.053                | 0.053                  | 0.053                     | 0.053                   | 0.053                    | 0.053                    |
| GR0817FR0030010 | 0.487                   | 0.487                    | 0.487                 | 0.487                 | 0.487               | 0.487                | 0.487                | 0.487                  | 0.487                     | 0.487                   | 0.487                    | 0.487                    |
| GR0817FR0030011 | 0.319                   | 0.319                    | 0.319                 | 0.319                 | 0.319               | 0.319                | 0.319                | 0.319                  | 0.319                     | 0.319                   | 0.319                    | 0.319                    |
| GR0817FR0030012 | 0.305                   | 0.305                    | 0.305                 | 0.305                 | 0.305               | 0.305                | 0.305                | 0.305                  | 0.305                     | 0.305                   | 0.305                    | 0.305                    |
| GR0817FR0030013 | 0.263                   | 0.263                    | 0.263                 | 0.263                 | 0.263               | 0.263                | 0.263                | 0.263                  | 0.263                     | 0.263                   | 0.263                    | 0.263                    |
| GR0817FR0030014 | 0.214                   | 0.214                    | 0.214                 | 0.214                 | 0.214               | 0.214                | 0.214                | 0.214                  | 0.214                     | 0.214                   | 0.214                    | 0.214                    |
| GR0817FR003002  | 0.379                   | 0.379                    | 0.379                 | 0.379                 | 0.379               | 0.379                | 0.379                | 0.379                  | 0.379                     | 0.379                   | 0.379                    | 0.379                    |
| GR0817FR003003  | 0.270                   | 0.270                    | 0.270                 | 0.270                 | 0.270               | 0.270                | 0.270                | 0.270                  | 0.270                     | 0.270                   | 0.270                    | 0.270                    |
| GR0817FR003004  | 0.393                   | 0.393                    | 0.393                 | 0.393                 | 0.393               | 0.393                | 0.393                | 0.393                  | 0.393                     | 0.393                   | 0.393                    | 0.393                    |
| GR0817FR003005  | 0.218                   | 0.218                    | 0.218                 | 0.218                 | 0.218               | 0.218                | 0.218                | 0.218                  | 0.218                     | 0.218                   | 0.218                    | 0.218                    |
| GR0817FR003006  | 0.140                   | 0.140                    | 0.140                 | 0.140                 | 0.140               | 0.140                | 0.140                | 0.140                  | 0.140                     | 0.140                   | 0.140                    | 0.140                    |
| GR0817FR003007  | 0.051                   | 0.051                    | 0.051                 | 0.051                 | 0.051               | 0.051                | 0.051                | 0.051                  | 0.051                     | 0.051                   | 0.051                    | 0.051                    |
| GR0817FR003008  | 0.505                   | 0.505                    | 0.505                 | 0.505                 | 0.505               | 0.505                | 0.505                | 0.505                  | 0.505                     | 0.505                   | 0.505                    | 0.505                    |
| GR0817FR003009  | 0.338                   | 0.338                    | 0.338                 | 0.338                 | 0.338               | 0.338                | 0.338                | 0.338                  | 0.338                     | 0.338                   | 0.338                    | 0.338                    |

Σχήμα 6.4: Εισαγωγή παραμέτρου βασικής απορροής (Baseflow)

### 6.1.4 Διόδευση υδρογραφημάτων (Routing Method):

Η μέθοδος διόδευσης που επιλέχθηκε είναι η μέθοδος Muskingum. Επομένως, εισήχθησαν οι παράμετροι K & X , μέσω του μενού Parameters < Routing < Muskingum, όπως φαίνεται το Σχήμα 6.5:



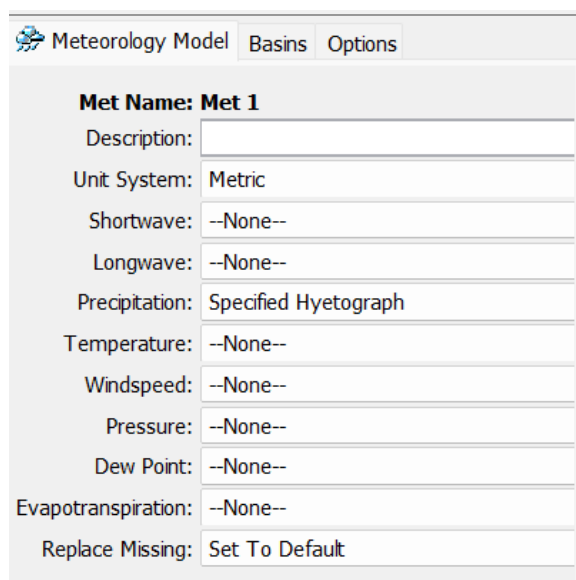
| Reach | Initial Type       | Initial Discharge (M3/S) | Muskingum K (HR) | Muskingum X | Number of Subreaches |
|-------|--------------------|--------------------------|------------------|-------------|----------------------|
| R98   | Discharge = Inflow |                          | 0.53342          | 0.2         | 1                    |
| R87   | Discharge = Inflow |                          | 0.70350          | 0.2         | 1                    |
| R76   | Discharge = Inflow |                          | 1.3609           | 0.2         | 1                    |
| R64   | Discharge = Inflow |                          | 0.31442          | 0.2         | 1                    |
| R54   | Discharge = Inflow |                          | 0.45706          | 0.2         | 1                    |
| R42   | Discharge = Inflow |                          | 0.86694          | 0.2         | 1                    |
| R32   | Discharge = Inflow |                          | 0.41473          | 0.2         | 1                    |
| R21   | Discharge = Inflow |                          | 0.68821          | 0.2         | 1                    |

Σχήμα 6.5: Εισαγωγή παραμέτρου μεθόδου διόδου (Routing Method)

## 6.2 Μετεωρολογικό Μοντέλο- Meteorologic Model

Αφού έχει εισαχθεί το μοντέλο της λεκάνης απορροής επόμενο βήμα είναι η δημιουργία ενός μετεωρολογικού μοντέλου στο λογισμικό. Τα μετεωρολογικά μοντέλα (Meteorologic Models) αποτελούν απαραίτητα δεδομένα για την δημιουργία ενός project στο HEC-HMS. Το νερό μπορεί να εισέλθει στο σύστημα με δύο τρόπους: μέσω ενός υδρολογικού στοιχείου που παράγει την ροή (όπως ένα στοιχείο πηγής) ή μέσω της ατμόσφαιρας. Ένα μετεωρολογικό μοντέλο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε αριθμό υπολεκανών, ανεξαρτήτως σε ποιο μοντέλο λεκάνης (basin model) και αν αυτές ανήκουν. Ακόμη, περιέχει πλήθος μοντέλων για την αναπαράσταση ατμοσφαιρικών διεργασιών.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, σε αυτό το βήμα, για την εκτίμηση της βροχόπτωσης επιλέχθηκε η μέθοδος του καθορισμένου Υετογραφήματος (Specified Hyetograph), ενώ στο κελί Replace missing επιλέχθηκε η επιλογή Set to Default. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να ορίσει καθορισμένη χρονοσειρά, η οποία θα χρησιμοποιηθεί ως υετογράφημα στις επιμέρους λεκάνες. Το επεισόδιο που επιλέχθηκε στην προσομοίωση είναι 01/01/2000.

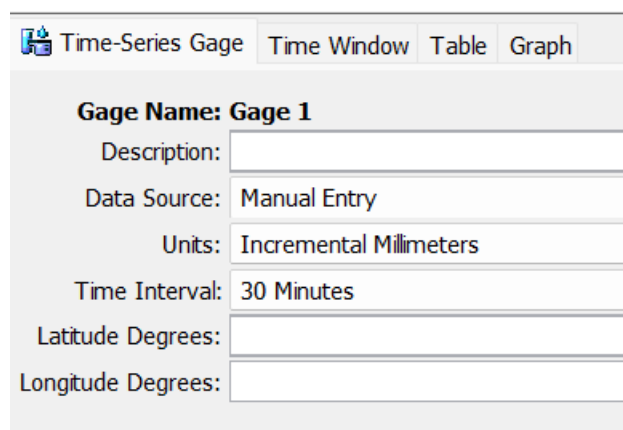


| Meteorology Model Options |                      |
|---------------------------|----------------------|
| <b>Met Name:</b>          | Met 1                |
| Description:              |                      |
| Unit System:              | Metric               |
| Shortwave:                | --None--             |
| Longwave:                 | --None--             |
| Precipitation:            | Specified Hyetograph |
| Temperature:              | --None--             |
| Windspeed:                | --None--             |
| Pressure:                 | --None--             |
| Dew Point:                | --None--             |
| Evapotranspiration:       | --None--             |
| Replace Missing:          | Set To Default       |

Σχήμα 6.6: Ορισμός Μετεωρολογικού Μοντέλου

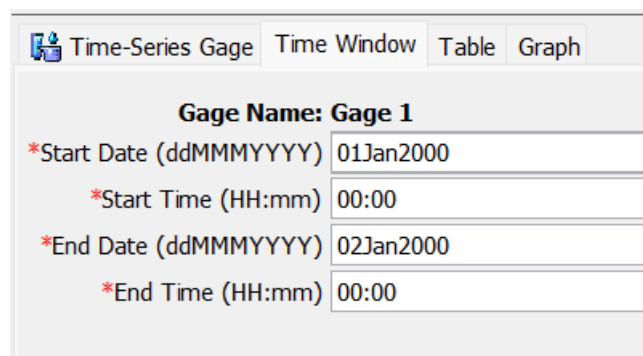
Εν συνεχεία, εισήχθησαν τα δεδομένα υπό μορφή χρονοσειράς μέσω του μενού HEC-HMS, με επιλογή Components, Time Series Management και τέλος New (Σχήμα 6.7)

- **Χρονοσειρά (Time Series Gage):** Τα δεδομένα της χρονοσειράς εισήχθησαν χειροκίνητα (Manual Entry)
- **Χρονικό παράθυρο (Time window):** Επιλογή χρονικών ορίων επεισοδίου βροχόπτωσης. Ορίστηκαν 24 ώρες, με χρονικό βήμα 30 λεπτά.
- **Πίνακας (Table):** Εισάγεται η χρονοσειρά
- **Γράφημα (Graph):** Παρουσίαση διαγράμματος υετογραφήματος



| Time-Series Gage         |                         |
|--------------------------|-------------------------|
| <b>Gage Name: Gage 1</b> |                         |
| Description:             |                         |
| Data Source:             | Manual Entry            |
| Units:                   | Incremental Millimeters |
| Time Interval:           | 30 Minutes              |
| Latitude Degrees:        |                         |
| Longitude Degrees:       |                         |

Σχήμα 6.7: Εισαγωγή βροχομετρικών δεδομένων - Time Series Management

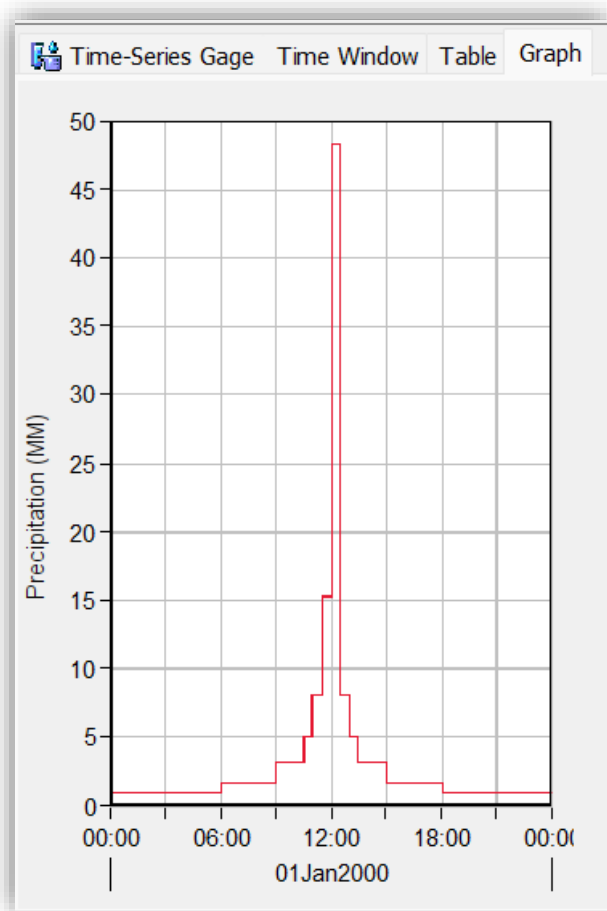


| Time-Series Gage         |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>Gage Name: Gage 1</b> |           |
| *Start Date (ddMMMYYYY)  | 01Jan2000 |
| *Start Time (HH:mm)      | 00:00     |
| *End Date (ddMMMYYYY)    | 02Jan2000 |
| *End Time (HH:mm)        | 00:00     |

Σχήμα 6.8: Εισαγωγή βροχομετρικών δεδομένων - Time Window

| Time (ddMMMYYYY, ...) | Precipitation (MM) |
|-----------------------|--------------------|
| 01Jan2000, 00:00      |                    |
| 01Jan2000, 00:30      | 1.0121             |
| 01Jan2000, 01:00      | 1.0121             |
| 01Jan2000, 01:30      | 1.0121             |
| 01Jan2000, 02:00      | 1.0121             |
| 01Jan2000, 02:30      | 1.0121             |
| 01Jan2000, 03:00      | 1.0121             |
| 01Jan2000, 03:30      | 1.0121             |
| 01Jan2000, 04:00      | 1.0121             |
| 01Jan2000, 04:30      | 1.0121             |
| 01Jan2000, 05:00      | 1.0121             |
| 01Jan2000, 05:30      | 1.0121             |
| 01Jan2000, 06:00      | 1.0121             |
| 01Jan2000, 06:30      | 1.7542             |
| 01Jan2000, 07:00      | 1.7542             |
| 01Jan2000, 07:30      | 1.7542             |
| 01Jan2000, 08:00      | 1.7542             |
| 01Jan2000, 08:30      | 1.7542             |
| 01Jan2000, 09:00      | 1.7542             |
| 01Jan2000, 09:30      | 3.0983             |
| 01Jan2000, 10:00      | 3.0983             |
| 01Jan2000, 10:30      | 3.0983             |
| 01Jan2000, 11:00      | 5.0177             |
| 01Jan2000, 11:30      | 8.0869             |
| 01Jan2000, 12:00      | 15.2500            |
| 01Jan2000, 12:30      | 48.3280            |
| 01Jan2000, 13:00      | 8.0869             |
| 01Jan2000, 13:30      | 5.0177             |
| 01Jan2000, 14:00      | 3.0983             |
| 01Jan2000, 14:30      | 3.0983             |
| 01Jan2000, 15:00      | 3.0983             |
| 01Jan2000, 15:30      | 1.7542             |

Σχήμα 6.9: Εισαγωγή βροχομετρικών δεδομένων - Table



Σχήμα 6.10: Εισαγωγή βροχομετρικών δεδομένων - Graph

### 6.3 Χρονικός έλεγχος υδρολογικής προσομοίωσης – Control Specifications

Μέσω της εργαλειοθήκης Components – Control Specification Manager – New, καθορίστηκαν τα χρονικά όρια της υδρολογικής προσομοίωσης του μοντέλου στο HEC-HMS. Στόχος του βήματος αυτού είναι ο έλεγχος αρχής και τέλους της προσομοίωσης αλλά και του χρονικού βήματος που θα χρησιμοποιηθεί. Εδώ τα χρονικά όρια ορίστηκαν σε 48hr. με χρονικό βήμα 30min.

| Control Specifications  |                  |
|-------------------------|------------------|
| <b>Name:</b>            | <b>Control 1</b> |
| Description:            |                  |
| *Start Date (ddMMMYYYY) | 01Jan2000        |
| *Start Time (HH:mm)     | 00:00            |
| *End Date (ddMMMYYYY)   | 03Jan2000        |
| *End Time (HH:mm)       | 00:00            |
| Time Interval:          | 30 Minutes       |

**Σχήμα 6.11:** Καθορισμός χρονικού ελέγχου υδρολογικής προσομοίωσης - Control Specification Manager

## Κεφάλαιο 7ο : Αποτελέσματα Υδρολογικής προσομοίωσης

Αξίζει να αναφερθεί πως η προσομοίωση της υδρολογικής συμπεριφοράς του τρόπου συνδυασμού των φυσικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής και μετεωρολογικών δεδομένων της ορίζεται ως υδρολογική προσομοίωση.

Στο υδρολογικό λογισμικό HEC-HMS, περιλαμβάνεται ο συνδυασμός ενός μετεωρολογικού μοντέλου (Meteorologic model) με ένα μοντέλο λεκάνης (basin model), αλλά και με μια χρονική ρύθμιση των χαρακτηριστικών προσομοίωσης (control specifications). Τέλος, τα δεδομένα που προκύπτουν αποτελούνται από γραφήματα (graphs) αλλά και συγκεντρωτικούς πίνακες (summary tables). Οι πίνακες αυτοί περιλαμβάνουν και πίνακες χρονοσειρών (time – series tables) ,οι οποίοι περιγράφουν τις απορροές που υπολογίζονται για κάθε υδρολογικό στοιχείο (Hydrologic element) της υπό μελέτη λεκάνης. Η διαδικασία που αυτή, όπως περιγράφεται σε αυτή την παράγραφο, χαρακτηρίζεται ως τρέξιμο της προσομοίωσης (simulation run).

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο, το μοντέλο υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης απορροής του Ξεριά Αλμυρού, συνιστάται από (14) δεκατέσσερις υπολεκάνες, (9) εννέα κόμβους και (8) οκτώ κλάδους του υδρογραφικού δικτύου. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε εκτιμώντας ένα υποθετικό χρονικό πλαίσιο από 01/01/2000 και ώρα 00:00 έως και 03/01/2000 και ώρα 00:00, με χρονικό βήμα 30min.

### 7.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υδρολογικών σεναρίων

Αναφορικά τόσο με το μέσο όσο και το δυσμενές σενάριο (υδρολογικές συνθήκες υγρασίας τύπου II & III), οι Πίνακες 7.1 & 7.2 περιλαμβάνουν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης για τα τέσσερα μοντέλα εδάφους (DEM) που μελετήθηκαν για το κόμβο εξόδου, ανάντη της λεκάνης απορροής. Εν συνεχεία, στα διαγράμματα που ακολουθούν δίνονται τα πλήρη αποτελέσματα για το δύο σενάρια, μέσο και δυσμενές, σχετικά με τις τιμές των πλημμυρικών παροχών αιχμής που υπολογίστηκαν.

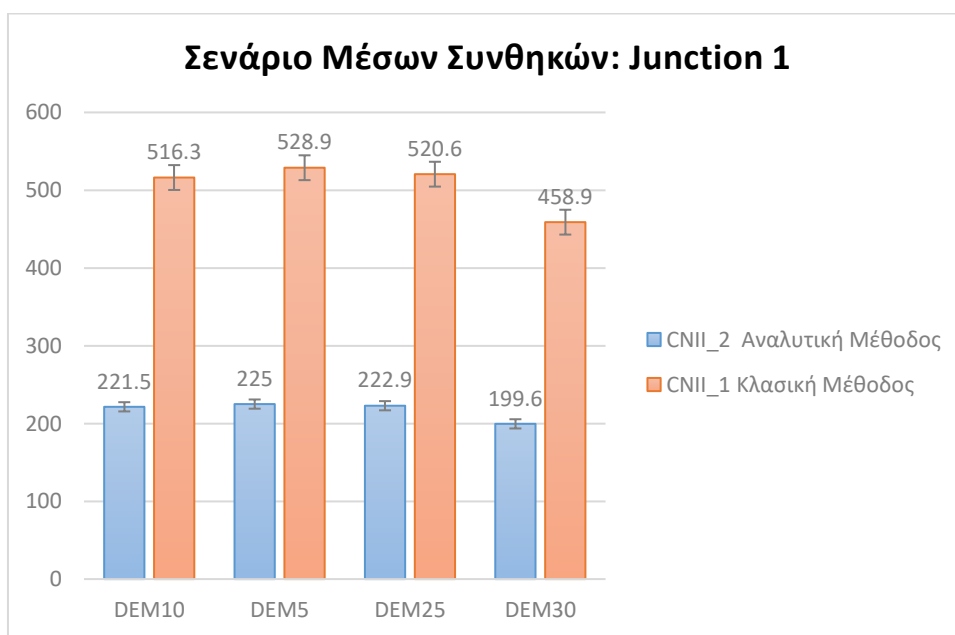
**Πίνακας 7.1:** Κόμβος Εξόδου Junction 1- Μέσες Υδρολογικές Συνθήκες (Τύπου II)

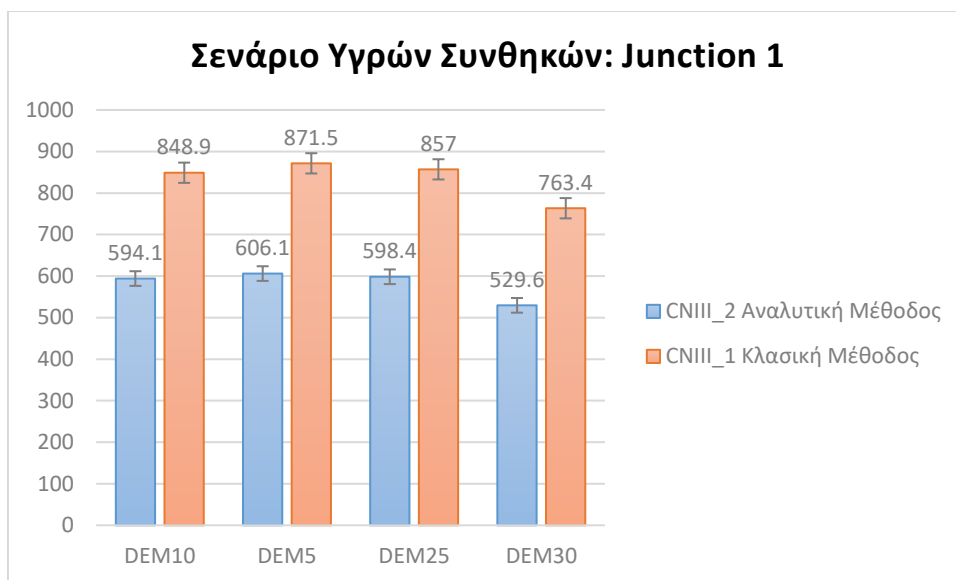
| Junction 1- Μέσες Συνθήκες |                        |                   |
|----------------------------|------------------------|-------------------|
| Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους    | Μέθοδοι Υπολογισμού CN |                   |
|                            | Κλασική Μέθοδος        | Αναλυτική Μέθοδος |
| DEM10                      | 516.3                  | 221.5             |
| DEM5                       | 528.9                  | 225               |
| DEM25<br>(eudem)           | 520.6                  | 222.9             |
| DEM30<br>(astergdem)       | 458.9                  | 199.6             |

**Πίνακας 7.2:** Κόμβος Εξόδου Junction 1- Υγρές Υδρολογικές Συνθήκες (Τύπου ΙΙΙ)

| <b>Junction 1- Υγρές Συνθήκες</b>      |                               |                          |
|----------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| <b>Ψηφιακά<br/>Μοντέλα<br/>Εδάφους</b> | <b>Μέθοδοι Υπολογισμού CN</b> |                          |
|                                        | <b>Κλασική Μέθοδος</b>        | <b>Αναλυτική Μέθοδος</b> |
| <b>DEM10</b>                           | 848.9                         | 594.1                    |
| <b>DEM5</b>                            | 871.5                         | 606.1                    |
| <b>DEM25<br/>(eudem)</b>               | 857                           | 598.4                    |
| <b>DEM30<br/>(astergdem)</b>           | 763.4                         | 529.6                    |

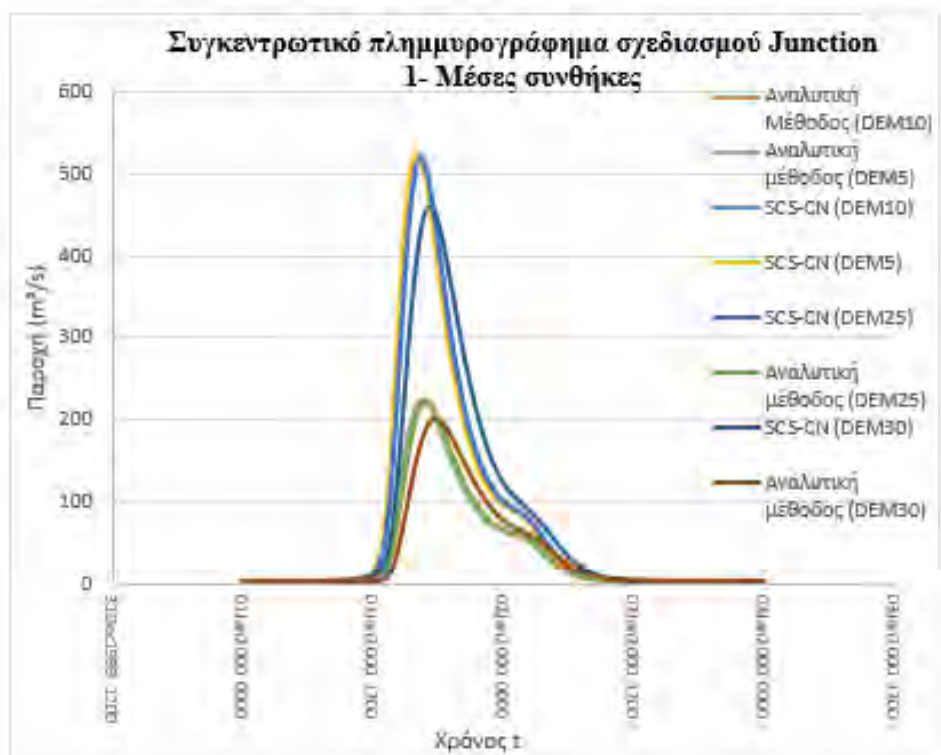
Ακολουθούν τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων του κόμβου εξόδου της λεκάνης απορροής τόσο για τις μέσες όσο και τις υγρές συνθήκες υγρασίας σε συνδυασμό με τις δύο διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού του CN, δηλαδή της κλασικής αλλά και της αναλυτικής μεθόδου.

**Σχήμα 7.1:** Κόμβος 1 - Υδρολογικές Συνθήκες Τύπου ΙΙ



**Σχήμα 7.2:** Κόμβος 1 - Υδρολογικές Συνθήκες Τύπου III

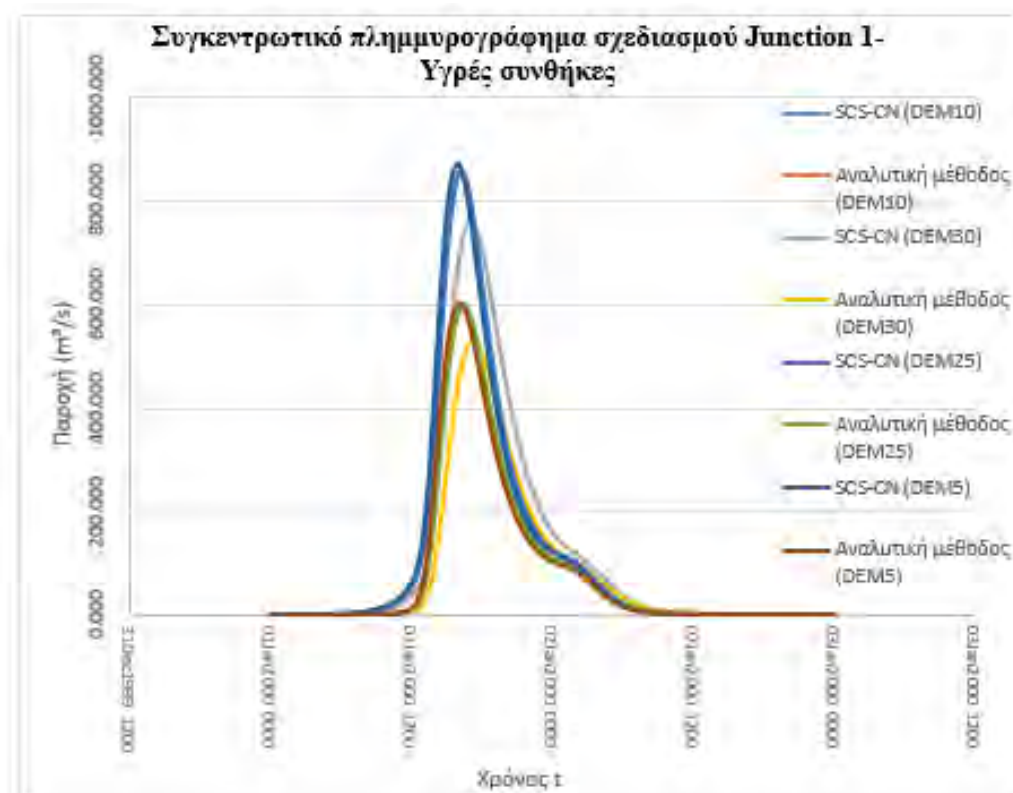
Το συγκεντρωτικό γράφημα για τον Κόμβο εξόδου (Junction 1) που ακολουθεί, απεικονίζει όλα τα υδρογραφήματα που παρήχθησαν από τα τέσσερα μοντέλα εδάφους με τις δύο διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού του CN για το καθένα, δηλαδή συνολικά οκτώ υδρογραφήματα για τον κόμβο 1.



**Σχήμα 7.3 :** Συγκεντρωτικό Γράφημα κόμβου 1 για μέσες συνθήκες

Όπως παρατηρείται ο τύπος του DEM δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τα υδρολογικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, κάτι που δεν ισχύει για το CN. Ωστόσο, αναφορικά με την χρονική κατανομή των υδρογραφημάτων, πράγματι ο χρόνος στον οποίο παρουσιάζεται η μέγιστη παροχή επηρεάζεται, καθώς στην περίπτωση εφαρμογής της αναλυτικής μεθόδου, η ώρα εμφάνισης της μέγιστης πλημμυρικής αιχμής εμφανίζεται κατά μέσο όρο με καθυστέρηση μισής περίπου ώρας σε όλα τα μοντέλα που μελετήθηκαν.

Ακολουθεί το συγκεντρωτικό γράφημα του κόμβου 1 για τις υγρές συνθήκες.



**Σχήμα 7.3 :** Συγκεντρωτικό Γράφημα κόμβου 1 για υγρές συνθήκες

Κατά αντιστοιχία, οι Πίνακες 7.3, 7.4, 7.5 & 7.6 περιλαμβάνουν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης για τα τέσσερα μοντέλα εδάφους (DEM) που μελετήθηκαν αυτή τη φορά για τους κόμβους 6,7, οι οποίοι συναντώνται κατάντη της λεκάνης απορροής. Επιπλέον, μέσω των διαγραμμάτων που ακολουθούν δίνεται μια πλήρης περιγραφή των αποτελεσμάτων τόσο για το μέσο όσο και για το δυσμενές υδρολογικό σενάριο.

**Πίνακας 7.3:** Κόμβος 6 (Junction 6)- Μέσες Υδρολογικές Συνθήκες (Τύπου II)

| Junction 6- Μέσες Συνθήκες |                        |                   |
|----------------------------|------------------------|-------------------|
| Ψηφιακά Μοντέλα<br>Εδάφους | Μέθοδοι Υπολογισμού CN |                   |
|                            | Κλασική Μέθοδος        | Αναλυτική Μέθοδος |
| DEM10                      | 348.8                  | 152.5             |
| DEM5                       | 356.4                  | 155.4             |
| DEM25 (eudem)              | 351.2                  | 153.3             |
| DEM30<br>(astergdem)       | 351                    | 153               |

**Πίνακας 7.4:** Κόμβος 6 (Junction 6)- Υγρές Υδρολογικές Συνθήκες (Τύπου III)

| Junction 6- Υγρές Συνθήκες |                        |                   |
|----------------------------|------------------------|-------------------|
| Ψηφιακά Μοντέλα<br>Εδάφους | Μέθοδοι Υπολογισμού CN |                   |
|                            | Κλασική Μέθοδος        | Αναλυτική Μέθοδος |
| DEM10                      | 586                    | 412.6             |
| DEM5                       | 598.7                  | 422               |
| DEM25 (eudem)              | 589.6                  | 415.5             |
| DEM30<br>(astergdem)       | 588.7                  | 415.2             |

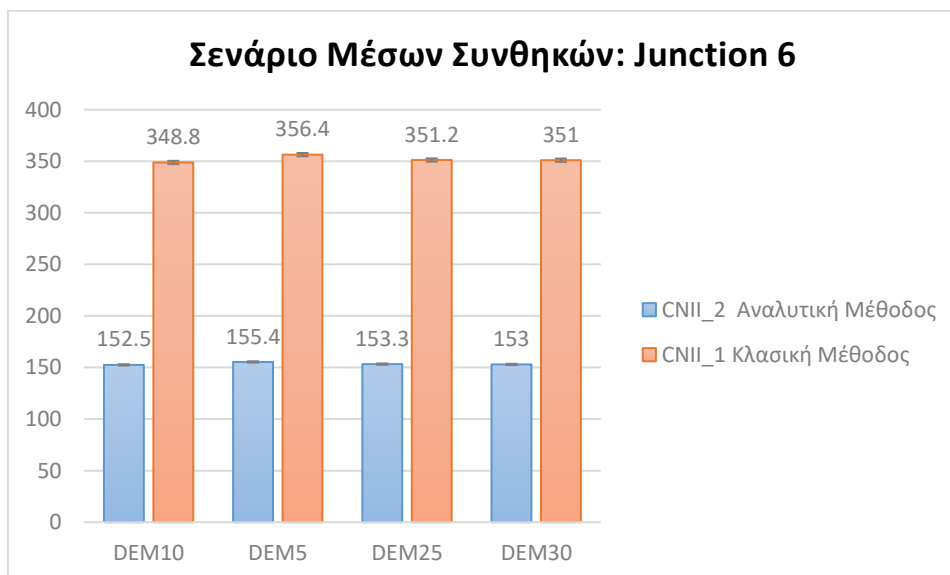
**Πίνακας 7.5:** Κόμβος 7 (Junction 7)- Μέσες Υδρολογικές Συνθήκες (Τύπου II)

| <b>Junction 7- Μέσες Συνθήκες</b> |                               |                          |
|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| <b>Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους</b>    | <b>Μέθοδοι Υπολογισμού CN</b> |                          |
|                                   | <b>Κλασική Μέθοδος</b>        | <b>Αναλυτική Μέθοδος</b> |
| <b>DEM10</b>                      | 279.7                         | 129.6                    |
| <b>DEM5</b>                       | 303.7                         | 133.7                    |
| <b>DEM25 (eudem)</b>              | 277.4                         | 127.9                    |
| <b>DEM30 (astergdem)</b>          | 276.8                         | 127.4                    |

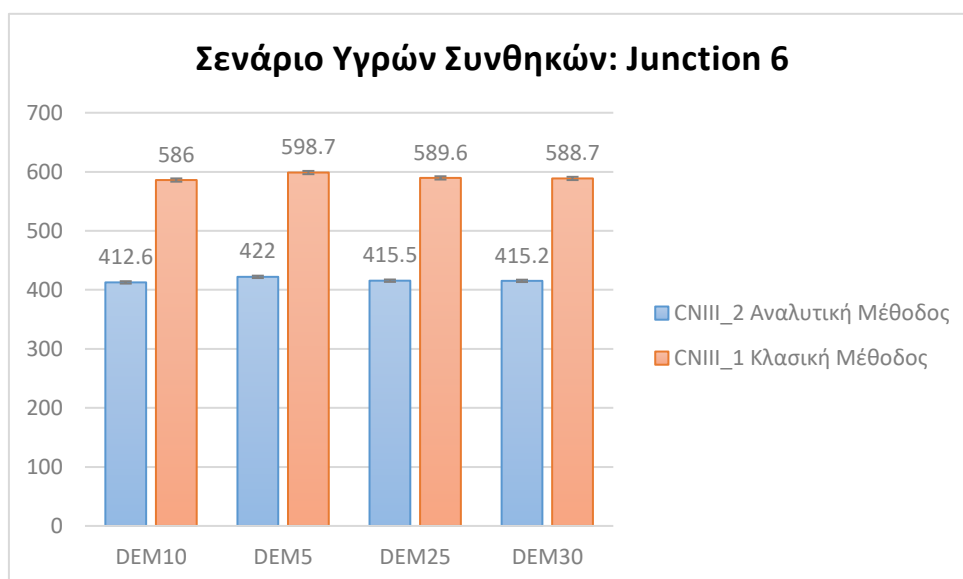
**Πίνακας 7.6:** Κόμβος 7 (Junction 7)- Υγρές Υδρολογικές Συνθήκες (Τύπου III)

| <b>Junction 7- Υγρές Συνθήκες</b> |                               |                          |
|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| <b>Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους</b>    | <b>Μέθοδοι Υπολογισμού CN</b> |                          |
|                                   | <b>Κλασική Μέθοδος</b>        | <b>Αναλυτική Μέθοδος</b> |
| <b>DEM10</b>                      | 510.3                         | 362.5                    |
| <b>DEM5</b>                       | 541.6                         | 391.4                    |
| <b>DEM25 (eudem)</b>              | 504.4                         | 357.5                    |
| <b>DEM30 (astergdem)</b>          | 501.7                         | 355.2                    |

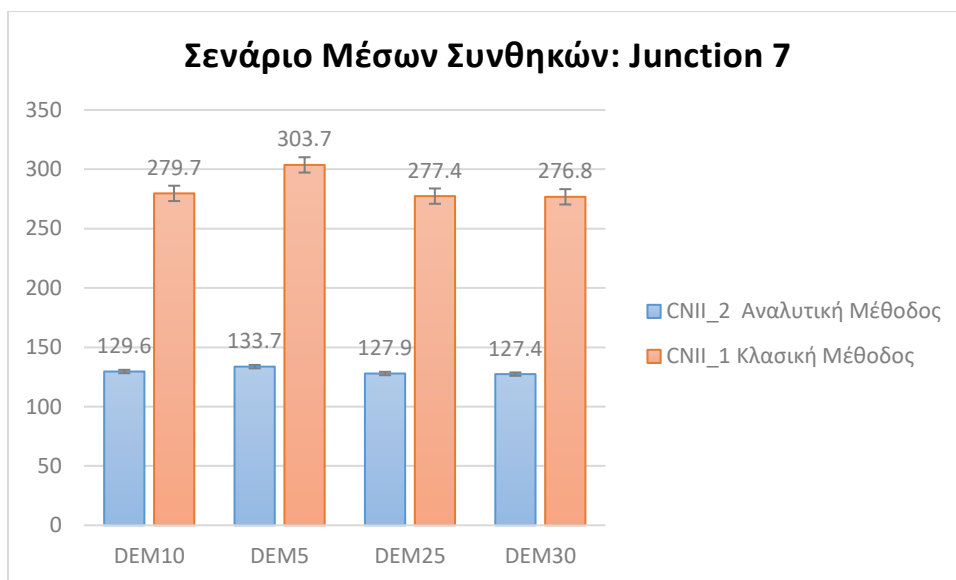
Ακολουθούν τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων των κόμβων 6 και 7 κατάντη της λεκάνης απορροής τόσο για τις μέσες όσο και τις υγρές συνθήκες υγρασίας σε συνδυασμό με τις δύο διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού του CN, δηλαδή της κλασικής όπως και της αναλυτικής μεθόδου.



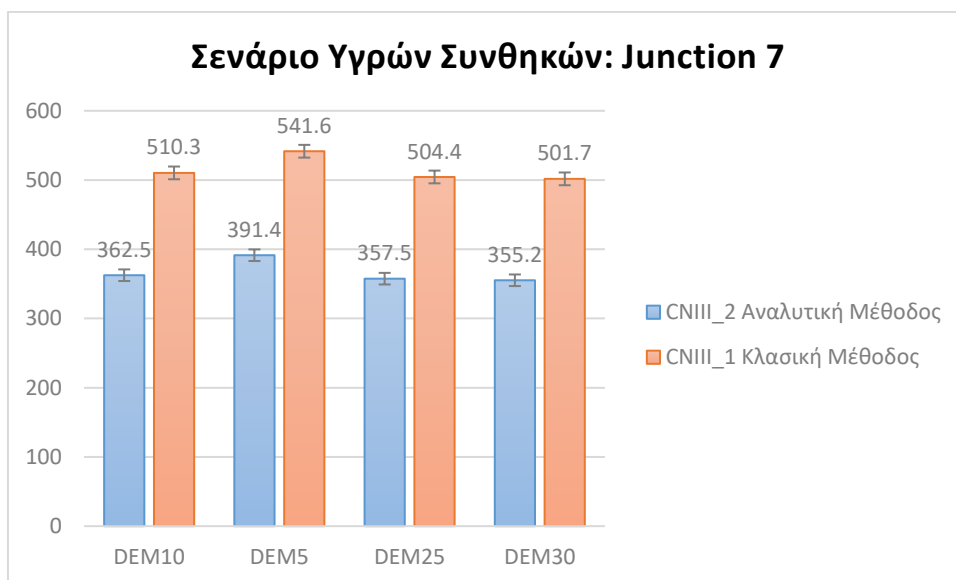
**Σχήμα 7.4:** Κόμβος 6 - Υδρολογικές Συνθήκες Τύπου II



**Σχήμα 7.5:** Κόμβος 6 - Υδρολογικές Συνθήκες Τύπου III

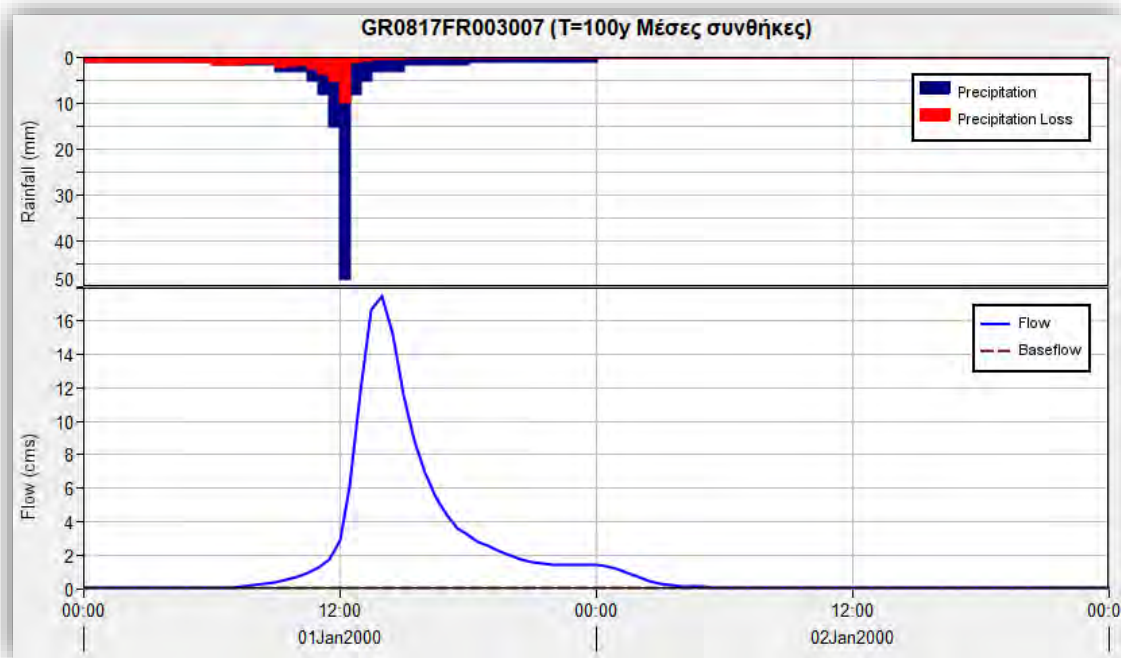


**Σχήμα 7.6:** Κόμβος 7 - Υδρολογικές Συνθήκες Τύπου II

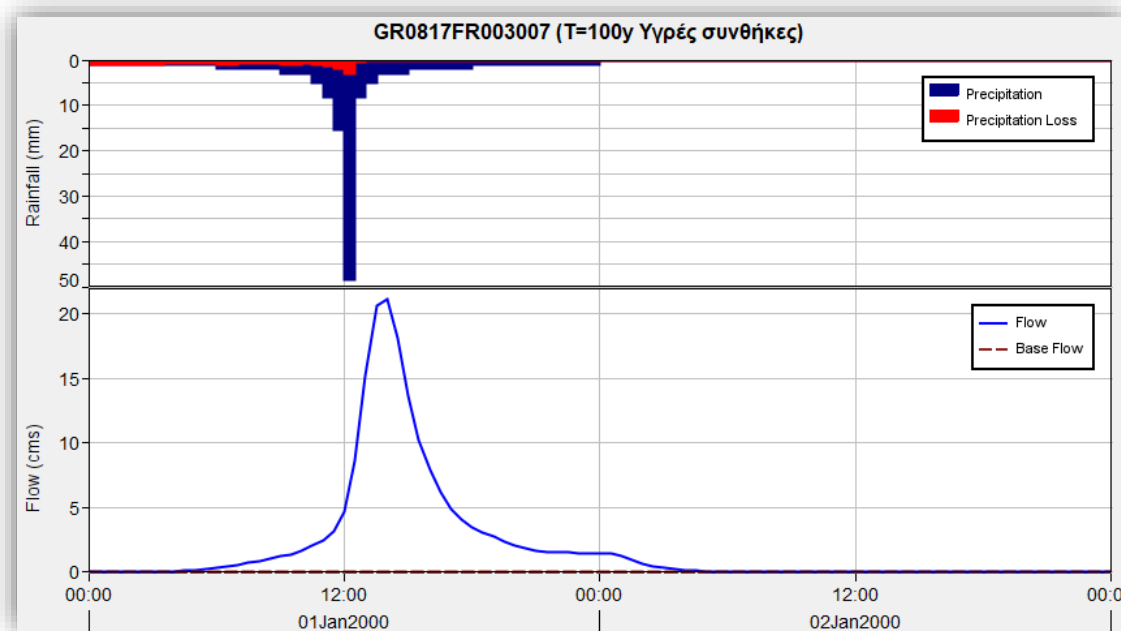


**Σχήμα 7.7:** Κόμβος 7 - Υδρολογικές Συνθήκες Τύπου III

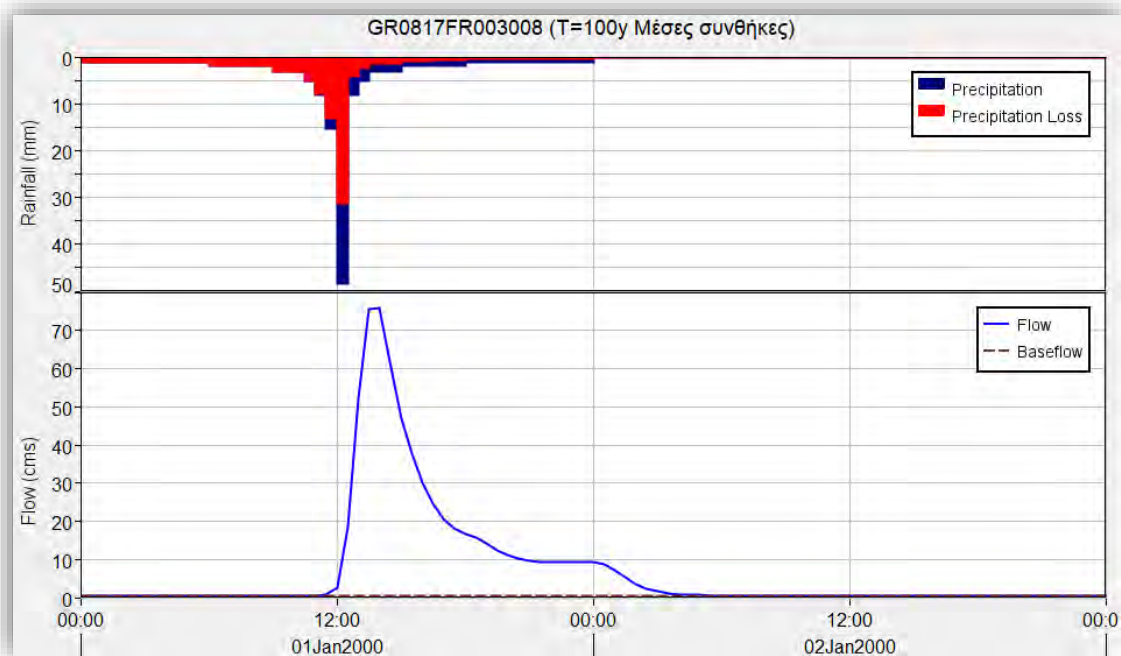
Στην συνέχεια ενδεικτικά δίνονται τα γραφήματα που προέκυψαν για τις υδρολογικές λεκάνες GR07 & GR08, όπως αυτά παρήχθησαν στο HEC-HMS. Οι λεκάνες αυτές επιλέχθηκαν καθώς στην περίπτωση της υπολεκάνης επτά ο αριθμός CN μεταβάλλεται σημαντικά με την αλλαγή της μεθόδου, ενώ η οκτώ έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς διαθέτει την μεγαλύτερη έκταση αποστράγγισης. Ακόμη, δίνεται το συγκεντρωτικό γράφημα, αποτέλεσμα όλων των μοντέλων DEM για την υπολεκάνη GR07 & GR08 .



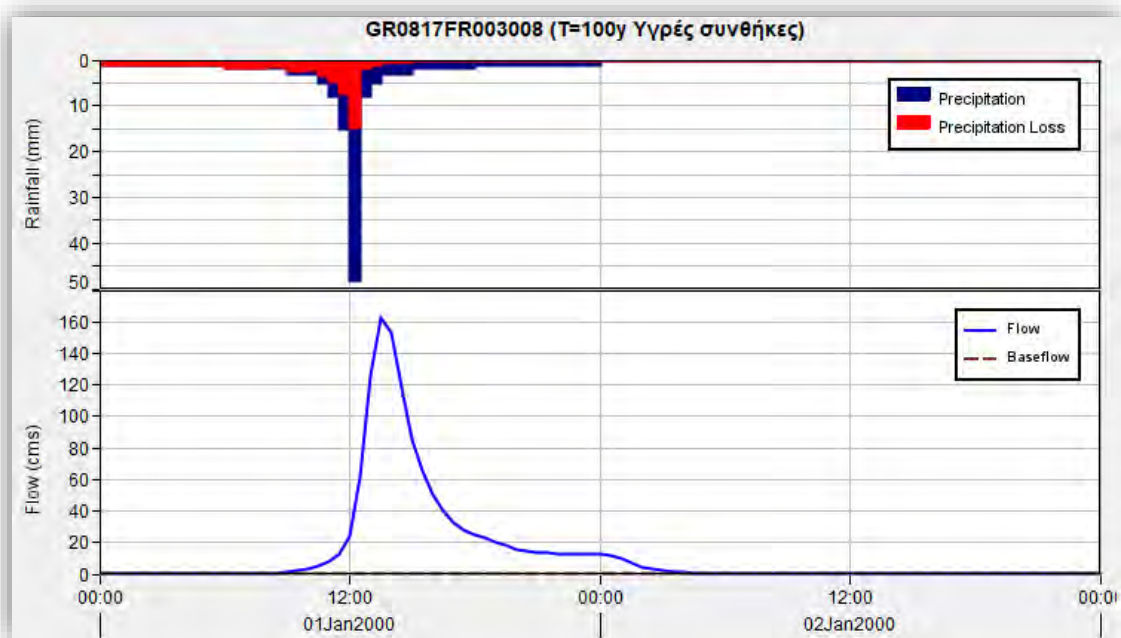
Σχήμα 7.8: Υετογράφημα & πλημμυρογράφημα Υπολεκάνης GR07



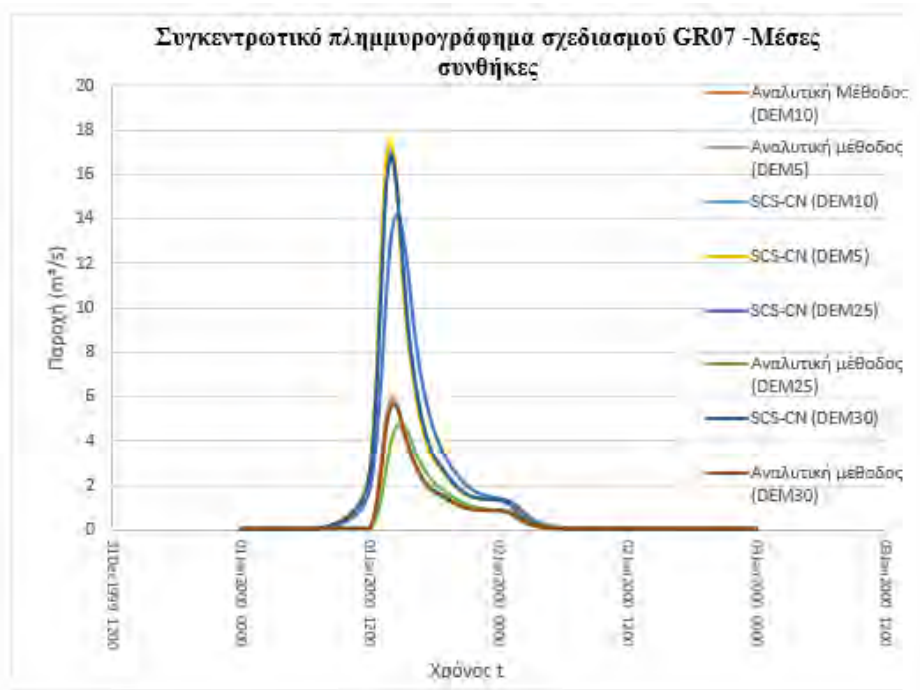
Σχήμα 7.9: Υετογράφημα & πλημμυρογράφημα Υπολεκάνης GR07 – υγρές συνθήκες



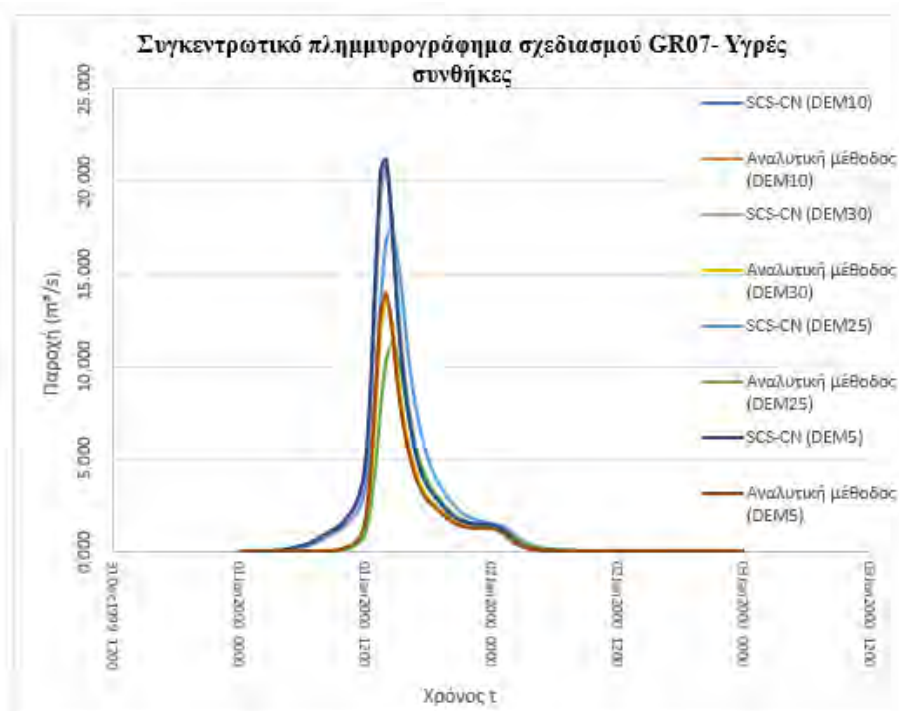
Σχήμα 7.10: Υετογράφημα & πλημμυρογράφημα Υπολεκάνης GR08 – μέσες συνθήκες



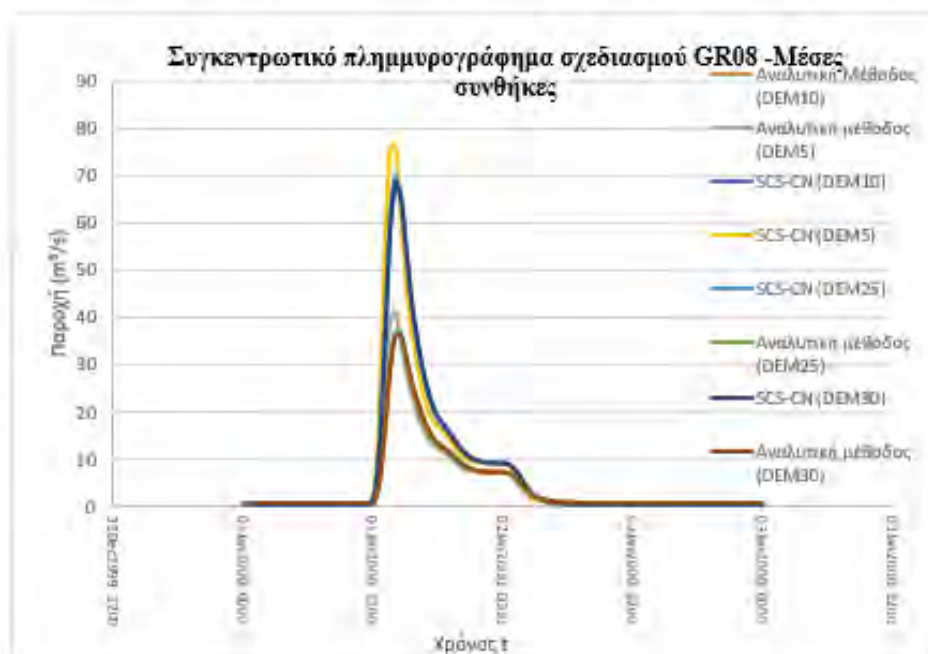
Σχήμα 7.11: Υετογράφημα & πλημμυρογράφημα Υπολεκάνης GR08 – υγρές συνθήκες



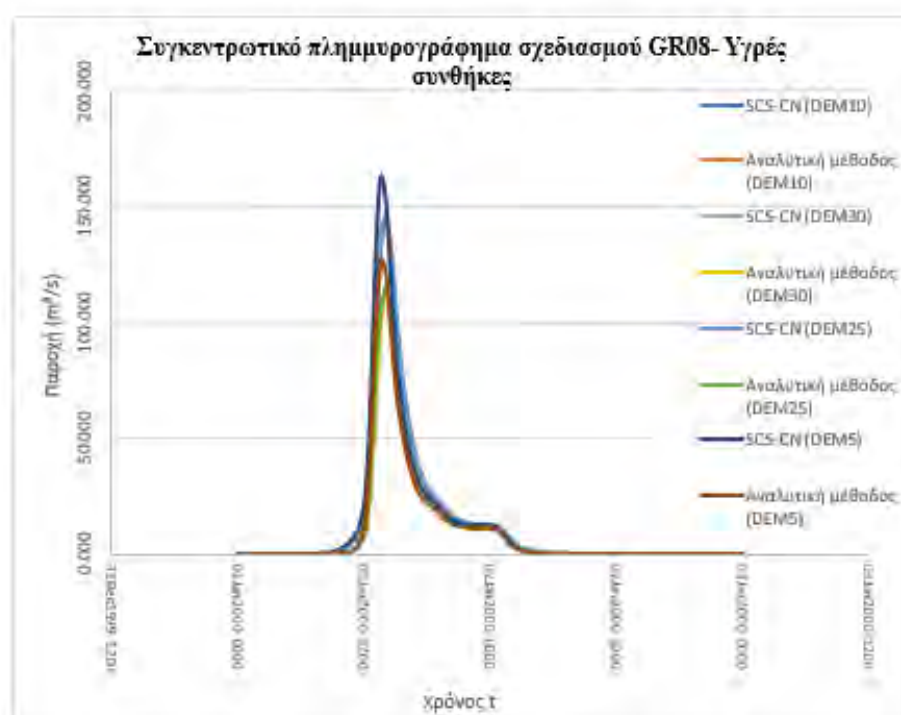
Σχήμα 7.13 : Συγκεντρωτικό Γράφημα GR07 για μέσες συνθήκες



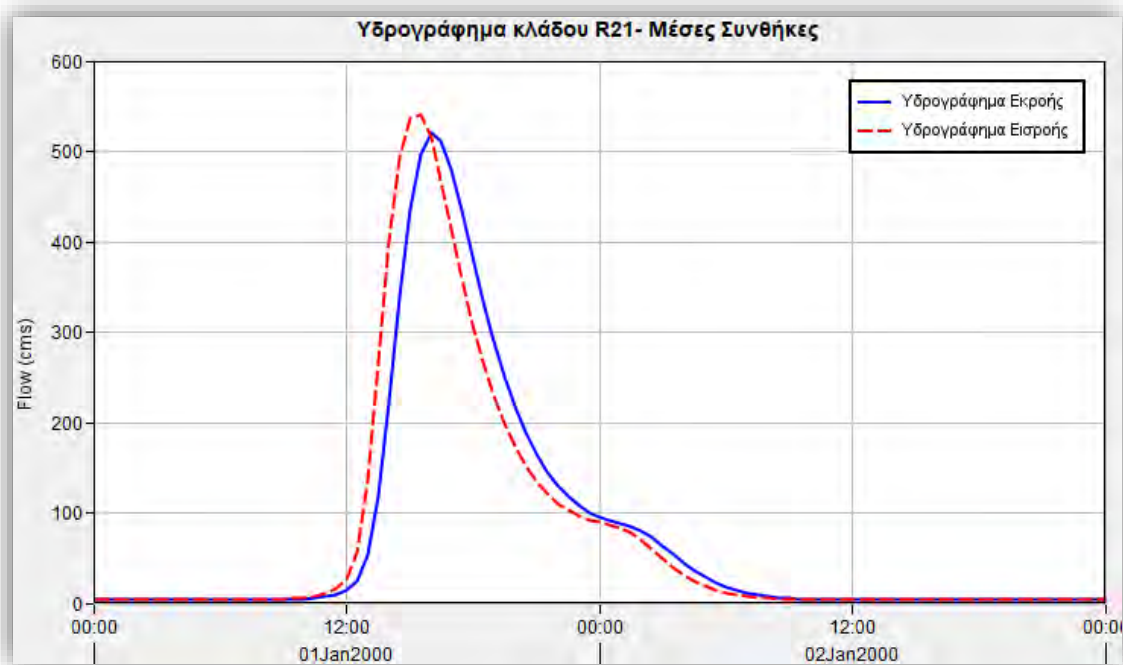
Σχήμα 7.14 : Συγκεντρωτικό Γράφημα GR07 για υγρές συνθήκες



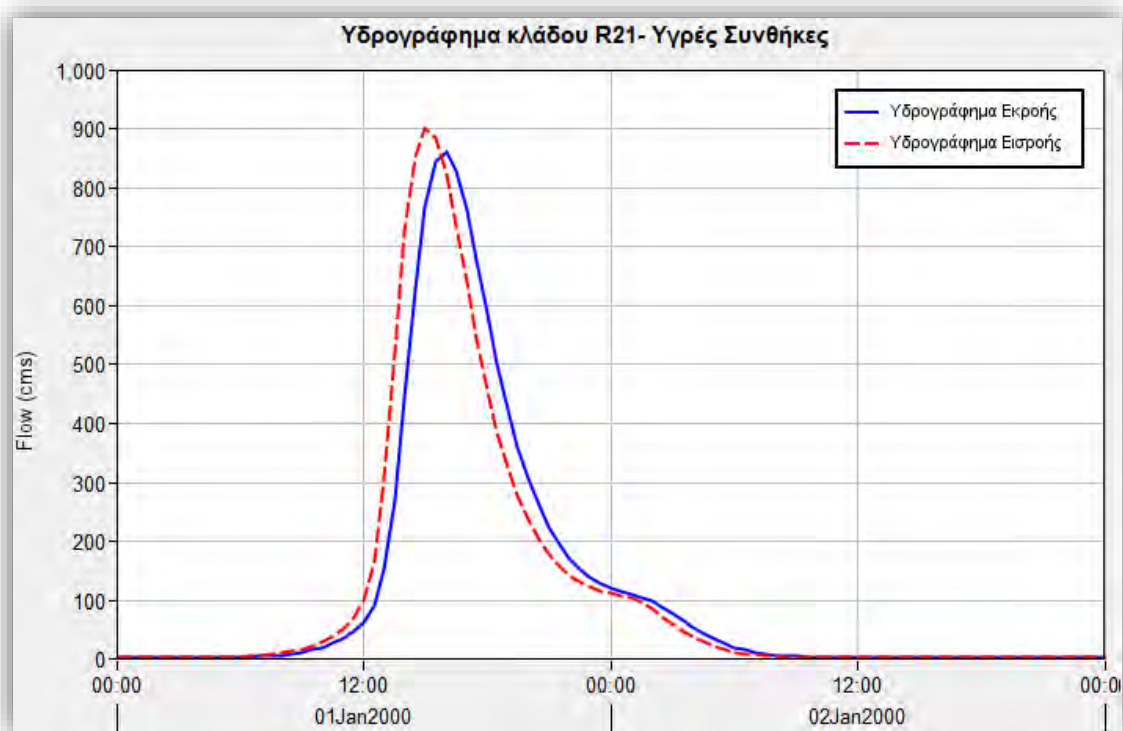
Σχήμα 7.15 : Συγκεντρωτικό Γράφημα GR08 για μέσες συνθήκες



Σχήμα 7.16 : Συγκεντρωτικό Γράφημα GR08 για υγρές συνθήκες



Σχήμα 7.14: Κλάδος R21 – μέσες συνθήκες



Σχήμα 7.15: Κλάδος R21 – υγρές συνθήκες

## 7.2 Παρατηρήσεις Αποτελεσμάτων Υδρολογικής Προσομοίωσης

Αυτή η διπλωματική εργασία στοχεύει στην υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του Ξεριά Αλμυρού έχοντας ως κύριο γνώμονα την εκτίμηση της μεγαλύτερης ακρίβειας των υδρολογικών δεδομένων, κάνοντας χρήση τεσσάρων διαφορετικών ψηφιακών μοντέλων εδάφους αλλά και δύο διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού της παραμέτρου CN. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε για την επίτευξη όσο το δυνατό πιο ρεαλιστικών αποτελεσμάτων.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, σε πρώτο στάδιο τα δεδομένα ψηφιοποιήθηκαν στο λογισμικό ArcGIS και η υδρολογική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του λογισμικού HEC-HMS, όπου τελικό αποτέλεσμα ήταν η εξαγωγή πλυμυρογραφημάτων στην έξοδο της λεκάνης. Η έκταση της υπό μελέτη λεκάνης ανέρχεται στα 196.82 km<sup>2</sup> και για την μελέτη της στο περιβάλλον του HEC-HMS, κρίθηκε αναγκαίος ο διαχωρισμός της σε δεκατέσσερις μικρότερες υπολεκάνες. Η περίοδος επαναφοράς ήταν τα 100 έτη, ενώ θα πρέπει να επισημανθεί πως για την ουσιαστική κατανόηση των αλλαγών των υδατορεμάτων οφείλονται να ελέγχονται τόσο οι μέσες (CNII) όσο και οι δυσμενείς συνθήκες εδαφικής υγρασίας (CNIII). Η εκτίμηση των παραμέτρων για την υλοποίηση της υδρολογικής προσομοίωσης έγινε εμπειρικά, κάνοντας χρήση πινάκων και εξισώσεων τόσο της εγχώριας αλλά και της ξένης βιβλιογραφίας.

Για την ακρίβεια των δεδομένων πάρθηκαν ως γνώμονας σύγκρισης, τα δεδομένα του υδρογραφικού δικτύου, όπως αυτά υπολογίστηκαν στα Σχέδια Διαχείρισης Κίνδυνων Πλημμύρας του ΥΠΕΚΑ. Αναφορικά με τον κατάντη κλάδο του δικτύου, για τον κόμβο εξόδου της λεκάνης (Junction 1) υπολογίστηκε από το ΥΠΕΚΑ, συνολική παροχή αιχμής (για τα 100 έτη) 568,98 m<sup>3</sup> /s, για τις μέσες συνθήκες και 1224.38 m<sup>3</sup> /s για τις δυσμενείς. Όπως ήταν αναμενόμενο, η πιο ρεαλιστική τιμή παρατηρήθηκε από την επεξεργασία του DEM με ανάλυση καννάβου 5x5 m, αυτή δηλαδή με την μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ μεγαλύτερη απόκλιση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους με ανάλυση 30m. Επιπλέον, για τις δυσμενείς συνθήκες (τύπου III), παρατηρήθηκε μεγάλη απόκλιση στις τιμές, γεγονός που αποδεικνύει την αδυναμία του λογισμικού να παράγει ρεαλιστικές τιμές κάτω από διαφορετικές συνθήκες υγρασίας, καθώς επηρεάζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό η παράμετρος CN.

Συγκριτικά με τις δύο διαφορετικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της παραμέτρου CN (SCS-CN και αναλυτική) ,οι τιμές ανάμεσα της δεύτερης μεθόδου βρέθηκαν πράγματι χαμηλότερες από αυτές της SCS-CN όπως αναμενόταν, ενώ ο λόγος των τιμών τους ανέρχεται περίπου στα 2.3 μεγαλύτερος για τις μέσες συνθήκες υγρασίας και 1.43 μεγαλύτερος για τις υγρές. Αντίστοιχες τιμές βρέθηκαν για τους κόμβους 6 & 7. Συμπερασματικά, η χρήση των διαφορετικών ψηφιακών μοντέλων εδάφους επηρεάζει το εύρος των τιμών σε ποσοστό της τάξης του 2%. Η μοντελοποίηση και εν συνεχεία υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης του Ξεριά Αλμυρού στο περιβάλλον του HEC-HMS παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τις μέσες συνθήκες υγρασίας, όχι όμως για τις υγρές, αφού το ύψος της απόκλισης των τιμών (της μεθόδου SCS) ανέρχεται κοντά στο 30% και για τα τέσσερα μοντέλα εδάφους.

### 7.3 Προτάσεις

- Αρχικά, προτείνεται να επαναληφθεί το σύνολο των διαδικασιών της υδρολογικής προσομοίωσης με μεγαλύτερα χρονικά όρια των αρχικών δεδομένων, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη βαθμονόμηση τους αλλά και η όσο το δυνατό μεγαλύτερη επαλήθευση των αποτελεσμάτων των μοντέλων.
- Σύγκριση των αποτελεσμάτων με παλαιότερες μελέτης για την ανάδειξη της μεθόδου με την πιο ρεαλιστική προσέγγιση.
- Επιπρόσθετα, συστήνεται η χρήση του λογισμικού HEC-RAS για τον υπολογισμό του όγκου των φερτών υλικών, τα οποία ως γνωστό συνιστούν κομμάτι των απορροών και παροχών των έντονων επεισοδίων βροχόπτωσης.
- Ιδιαίτερα χρήσιμη θα αποτελούσε η τοπογραφική αποτύπωση του συνόλου του μήκους του ρέματος του Ξεριά, ώστε να μην απαιτείται η χρονοβόρα διαδικασία της ψηφιοποίησης.
- Παράλληλα, συνιστάται η προσομοίωση του μοντέλου για διαφορετικές περιόδους επαναφοράς.

## Βιβλιογραφία

- [1] ΑΠΟΦΑΣΕΙΣ υπ' αριθμ. Ε.Γ.: οικ. 897: Έγκριση της 1ης Αναθεώρησης του Σχεδίου Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας και της αντίστοιχης Στρατηγικής Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων. ΦΕΚ 4682, Τεύχος Β', 29/12/2017, 2017.
- [2] ΑΠΟΦΑΣΗ υπ' αριθμ. ΥΠΕΝ / ΓρΕΓΥ/ 41377 / 329: Έγκριση του Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Λεκανών Απορροής ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (ΕΛ08) και της αντίστοιχης Στρατηγικής Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων. ΦΕΚ 2685, Τεύχος Β', 6/7/2018, 2018.
- [3] Γαιτανόπουλος Α. (2014). Εφαρμογή Γεωορφολογική μελέτη της υδρολογικής λεκάνης του ρέματος Ξηριά και των λιμνών Ζερέλια με τη χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS) και δορυφορικών δεδομένων. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- [4] Γαλανάκης, Δ., (1997). Νεοκτονική Δομή και Στρωματογραφία των Νεογενών – Τεταρτογενών ιζημάτων της λεκάνης του Αλμυρού – Παγασητικού, Πηλίου, Διαύλου Ώρεωβ – Τρικεριού και Μαλακού, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη
- [5] Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2016). Εφαρμογή Οδηγίας 2007/60/ΕΚ -Κατάρτιση όμβριων καμπύλων σε επίπεδο χώρας. Αθήνα.
- [6] Ευρωπαϊκή Ένωση. (2007, Οκτώβριος 23). Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 23ης Οκτωβρίου 2007 , για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης(L 288/27).
- [7] Ευστρατιάδης , Α., Κουτσογιάννης , Δ., Μάμασης, Ν., Δημητριάδης, Π., & Μαχαιράς, Α. (2012). Βιβλιογραφική επισκόπηση υδρολογίας πλημμυρών και συναφών εργαλείων, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων. Ανάδοχοι: ΕΤΜΕ: Πέππας & Συν/τες Ε.Ε., Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών.
- [8] Ζωγάκης, Χ. Π. (2013). Σύγκριση μοντέλων γεγονότος και συνεχούς προσομοίωσης για την εκτίμηση πλημμυρικών μεγεθών. Εφαρμογή στη λεκάνη του Νέδοντα(Μεταπτυχιακή εργασία). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [9] Κοζάνης, Σ., Ευστρατιάδης, Α., & Χριστοφίδης, Α. (2010). Θεωρητική τεκμηρίωση για το λογισμικό Υδρογνώμων -Έκδοση 4. Αθήνα.
- [10] Κοινή Υπουργική απόφαση οικ.140055/2017. (2017). Ελληνική Δημοκρατία: Εφημερίς της Κυβερνήσεως (ΦΕΚ 428/Β/15-2-2017).
- [11] Κουτσογιάννης, Δ. Στατιστική Υδρολογία, Έκδοση 4, 312 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997.

- [12] Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος. Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 4, 431 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2016.
- [13] Μαθιουδάκη Μ. (2012). Διερεύνηση παραμέτρων υδρολογικού σχεδιασμού με χρήση συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων μέσω ανάλυσης χαρακτηριστικών επεισοδίων πλημμύρας στην πειραματική λεκάνη λυκορέματος Ραφήνας (Μεταπτυχιακή Εργασία).Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [14] Μιμίκου, Μ. & Μπαλταζ, Ε., (2006). Τεχνική Υδρολογία. 4<sup>η</sup> Έκδοση επιμ. Αθήνα: Παπασωτηρίου.
- [15] Μπαλούτσος , Α. Οικονόμου & Καούκης.Ο κίνδυνος πλημμύρας σε λεκάνες απορροής μετά από πυρκαγιά.Ανάλυση του προβλήματος και άμεσα μέτρα μείωσης των επιπτώσεων.Αθήνα
- [16] Μπενέκου Π. Κ. (2014). Εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS στην ορεινή πειραματική λεκάνη Βαρετάδας Αμφιλοχίας (Μεταπτυχιακή Εργασία).Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,Αθήνα.
- [17] Μεντζάφου Α.Α (2004). Υδρολογικό καθεστώς λεκάνης Αλμυρού Βόλου (Μεταπτυχιακή Εργασία).Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,Αθήνα.
- [18] Στάμου, Λ., Σκοπελίτη, Α., (2009). Παρουσίαση στη μάθημα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών στους Υδατικούς Πόρους, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [19] ΥΠΕΚΑ. (2017). Σχέδιο διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας των Λεκανών απορροής ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας-Στάδιο II,1η Φάση - Παραδοτέο 12:Προσχέδιο διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας
- [20] ΥΠΕΚΑ-Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2012). Εφαρμογή Οδηγίας 2007/60/ΕΚ- Προκαταρκτική Αξιολόγηση κινδύνων πλημμύρας.
- [21] ΥΠΕΚΑ-Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2016). Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας-Στάδιο I,2η Φάση -Παραδοτέο 4:Πλημμυρικά Υδρογραφήματα.
- [22] ΥΠΕΚΑ-Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2016). Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας-Στάδιο I,2η Φάση -Παραδοτέο 4:Πλημμυρικά Υδρογραφήματα.
- [23] ΥΠΕΚΑ-Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2017). 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών- Αναλυτικό κείμενο Τεκμηρίωσης,Επικαιροποίηση του Μητρώου Προστατευμένων περιοχών.
- [24] ΥΠΕΚΑ-Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2017). Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας-

Στάδιο Ι,3η Φάση -Παραδοτέο 6:Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας-Μη Τεχνική Έκθεση.

- [25] ΥΠΕΚΑ-Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (n.d.). Σχέδιο διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας των Λεκανών απορροής ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας.
- [26] Υπουργική Απόφαση. (2017, Φεβρουάριος 15). ΥΠΕΝ. Κοινή Υπουργική Απόφαση Αριθμ. οικ. 140055/2017-Τεχνικές προδιαγραφές σύνταξης του περιεχομένου του φακέλου οριοθέτησης κατ' εφαρμογή της παραγράφου 5 του άρθρου 2 του ν. 4258/2014 - Διευκρινίσεις για την εφαρμογή της διαδικασίας οριοθέτησης. Εφημερίδα της Κυβερνήσεως (ΦΕΚ 428/Β/15-2-2017).
- [27] Chow, V.T., D.R. Maidment, and L.W. Mays. Applied Hydrology, McGraw-Hill, 1988.
- [28] Diakakis, M., Mavroulis, S., & Deligiannakis, G. (2012). Floods in Greece, a statistical and spatial approach. Natural hazards, 62(2), pp. 485-500.
- [29] Savvidou, E.; Efstratiadis, A.; Koussis, A.D.; Koukouvinos, A.; Skarlatos, D. The curve number concept as a driver for delineating hydrological response units. Water 2018, 10, 194.
- [30] Giandotti, M. Previsione empirica delle piene in base alle precipitazioni meteoriche, alle caratteristiche fisiche e morfologiche dei bacini: Applicazione del metodo ad alcuni bacini dell' appennino ligure. Pubbl. 2 del Servizio Idrografico pp. 3-5, 1940.
- [31] Grimaldi, S., A. Petroseli, F. Tauro, and M. Porfiri, Time of concentration: A paradox in modern hydrology. Hydrological Sciences Journal, 57(2), 217–228, 2012
- [32] Hosking, J.R.M. L-Moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological), 105–124, 1990.
- [33] Koussis, A. D. An assessment review of the hydraulics of storage flood routing 70 years after the presentation of the Muskingum method. Hydrological Sciences Journal, 54(1), 43–61, 2009.
- [34] Loukas, A., L. Vasiliades, N.R. Dalezios, and C. Domenikiotis. Rainfall-frequency mapping for Greece. Physics and Chemistry of the Earth-Part B: Hydrology, Oceans & Atmosphere, 26(9), 669-674, 2001.
- [35] Papaioannou, G., Efstratiadis, A., Vasiliades, L., Loukas, A., Papalexiou, S., Koukouvinos, A., Tsoukalas, I., Kossieris, P. An operational method for Flood Directive implementation in ungauged urban areas. Hydrology, 5, 24, <https://doi.org/10.3390/hydrology5020024>, 2018.
- [36] Papaioannou, G., Loukas, A., Vasiliades, L. Flood risk management methodology for lakes and adjacent areas: The Lake Pamvotida paradigm. Proceedings, 7(1), 21, <https://doi.org/10.3390/ECWS-3-05825>, 2019.

- [37] Papaioannou G, Vasiliades L, Loukas A, Alamanos A, Efstratiadis A, Koukouvinos A, Tsoukalas I, Kossieris P. A flood inundation modeling approach for urban and rural areas in lake and large-scale river basins. *Water*, 13(9), 1264. <https://doi.org/10.3390/w13091264>, 2021.
- [38] Ponce V.M., and R.H. Hawkins. Runoff Curve Number: has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11–19, 1996.
- [39] Sankarasubramanian, A., and K. Srinivasan. Investigation and comparison of sampling properties of L-moments and conventional moments. *Journal of Hydrology*, 218(1-2), 13–34, 1999.
- [40] Soil Conservation Service (SCS), National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology (NEH-4), U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 1972.
- [41] Stamatatou, N., Vasiliades, L., Loukas, A. The effect of sample size on bivariate rainfall frequency analysis of extreme precipitation. *Proceedings*, 7(1), 19, <https://doi.org/10.3390/ECWS-3-05815>, 2019.
- [42] U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Design of Arch Dams, U.S. Government Printing Office, Denver, CO, 1977.
- [43] USACE. Hydrologic modeling system HEC-HMS: Technical reference manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA., 2000a.
- [44] USACE. Hydrologic modeling system HEC-HMS: User's manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 2000b.

#### Διαδίκτυακοί Ιστότοποι

<https://geodata.gov.gr/dataset?groups=inland-waters>  
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstr/hydrologic-modeling-with-hec-hms-2022-86907777.html>  
<https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1?tab=download>  
<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=58a541efc59545e6b7137f961d7de883>