

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ  
ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ  
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΧΕΙΜΑΡΡΟ ΞΗΡΙΑ , Ν. ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ

υπό

ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΥ ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2018

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 Δρ. Αθανάσιος Λουκάς  
(Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Νικήτας Μυλόπουλος  
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Λάμπρος Βασιλειάδης  
Μέλος ΕΔΙΠ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του προγράμματος σπουδών του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Με την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας κλείνει ο μεγάλος κύκλος της πανεπιστημιακής μου εκπαίδευσης, ένας κύκλος που συνοδεύτηκε με πολλές στιγμές που θα μνημονεύω για πάντα.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, τον κ. Λουκά Αθανάσιο, καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου στην ανάθεση και επίβλεψη της παρούσας εργασίας.

Στην συνέχεια, θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Παπαϊωάννου Γεώργιο, υποψήφιο διδάκτορα του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για τον χρόνο και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε πάνω στα λογισμικά HEC-RAS της U.S. Army Corps of Engineers και ArcGIS της ESRI. Αξιοσημείωτη είναι η συνεισφορά του όσον αφορά το κομμάτι της παραχώρησης των απαραίτητων για δεδομένων, από προϋπάρχον ερευνητικό έργο του ίδιου πάνω στην ίδια περιοχή μελέτης. Η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας στηρίχθηκε κυρίως στην πολύτιμη συνεισφορά του..

Επιπροσθέτως, ευχαριστώ θερμά τον κ. Ασαρίδη Παναγιώτη, φίλο και συναδέλφο Πολιτικό Μηχανικό, για τις πολύτιμες συμβουλές του σχετικά με την εκτέλεση των προσομοιώσεων στο λογισμικό του HEC-RAS.

Τέλος, ευχαριστώ θερμότατα τους κ. Συκά Νικόλαο-Γεώργιο, Κοινωνικό Ανθρωπολόγο, και τους Αλεξόπουλο Κωνσταντίνο και Σπαντιδάκη Μιχαήλ, συναδέλφους Πολιτικούς Μηχανικούς, για την παραχώρηση κατάλληλου τεχνικού εξοπλισμού για την εκτέλεση κομματιού του ερευνητικού έργου της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ευάγγελος Βασιλόπουλος

# ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

## ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΧΕΙΜΑΡΡΟ ΞΗΡΙΑ , Ν. ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ

Ευάγγελος Βασιλόπουλος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2018

Επιβλέπων Καθηγητής: Αθανάσιος Λουκάς, Καθηγητής Υδρολογίας και Υδατικών Πόρων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

### **Περίληψη**

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει μια διαδικασία εκτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου που προέρχεται από τον χείμαρρο Ξηριά Βόλου, καθώς και των αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται σε αυτή την διαδικασία. Σκοπός είναι να εντοπιστούν πιθανές περιοχές πλημμυρικής κατάκλυσης και να γίνει εκτίμηση των αβεβαιοτήτων που προκύπτουν στην χαρτογράφηση πλημμυρών λόγω της μεταβλητότητας των περιόδων επαναφοράς, των υγρασιακών συνθηκών και του συντελεστή τραχύτητας. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εκτελείται η υδραυλική προσομοίωση του ποταμού Ξηριά καθώς και της λεκάνης απορροής του, από τη θέση της οδικής γέφυρας της Λεωφόρου Λαρίσης έως τις εκβολές του ποταμού, με χρήση του προγράμματος υδραυλικής ανάλυσης ποταμών HEC-RAS. Το σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών ArcGIS χρησιμοποιήθηκε για την περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων της υδραυλικής προσομοίωσης και την οπτικοποίηση τους σε μορφή χαρτών.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία περιγράφεται συνοπτικά στα παρακάτω βήματα:

- Συλλογή και επεξεργασία αρχικών δεδομένων. Ως αρχικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, ο γεωλογικός χάρτης, ο χάρτης χρήσεων γης, η υδρολογική πληροφορία κλπ.
- Υδραυλική προσομοίωση της λεκάνης απορροής για την εκτίμηση των πλημμυρών σχεδιασμού για συνδυασμούς των πιο κάτω περιπτώσεων:
  - ❖ τρεις διαφορετικές περιόδους επαναφοράς.
  - ❖ τρεις διαφορετικούς συντελεστές τραχύτητας.
  - ❖ τρία διαφορετικά σενάρια υδρογραφημάτων.
- Σύνθεση χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης.
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε είναι σύνθεση των ανάντη λεκανών απορροής του ποταμού-χειμάρρου Ξηριά. Ως αρχικά δεδομένα για την περιοχή μελέτης, αποκτήθηκαν το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, ο χάρτης χρήσεων γης σύμφωνα με την πανευρωπαϊκή βάση δεδομένων Corine 2000, με βάση των οποίων επιλέχθηκαν οι συντελεστές τραχύτητας και κατάλληλα πλημμυρογραφήματα από παλαιότερες μελέτες στην περιοχή. Το μοντέλο που δημιουργείται αποτελείται από τέσσερις κόμβους και τρεις κλάδους υδατορεύματος. Η εκτέλεση του μοντέλου ολοκληρώνεται για συνδυαστικά σενάρια των τριών περιόδων επαναφοράς  $T=50$ -έτη,  $T=100$ -έτη,  $T=1000$ -έτη, των τριών διαφορετικών συντελεστών τραχύτητας και των τριών διαφορετικών συνθηκών εργασίας. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας είναι οι πλημμυρικοί χάρτες, όπου η σύνθεσή τους γίνεται εφικτή με την επεξεργασία τους μέσω του ArcGIS, έτσι όπως προέκυψαν από το προηγούμενο στάδιο. Τέλος, υπολογίζονται οι εκτάσεις που κατακλύζονται από το κάθε πλημμυρικό σενάριο, καθώς και το ύψος που φτάνει το επίπεδο του νερού σε κάθε περίπτωση. Επίσης γίνεται και εκτίμηση των ταχυτήτων ροής, για τα συνολικά 27 διαφορετικά σενάρια που προκύπτουν.

Εν κατακλείδι, επιτυγχάνεται η χαρτογράφηση κινδύνου πλημμύρας και η διερεύνηση της απόκρισης το υδραυλικού μοντέλου στην μεταβολή των αρχικών παραμέτρων. Ως εκ τούτου η παρούσα μελέτη αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο στην εκτίμηση και διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου που μπορεί να προκύψει από τον χειμάρρο Ξηριά.

**Λέξεις-κλειδιά:** Ξηριάς, Πλημμύρες, Οδηγία 2007/60/ΕΚ, Υδραυλική προσομοίωση, Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας, Μη μόνιμη ροή, Πλημμυρογράφημα, Επιφάνεια κατάκλυσης, Συνθήκες υγρασίας, Συντελεστής τραχύτητας, Περίοδος Επαναφοράς

## Abstract

The present research presents a process of estimation of flood hazard that comes from Xirias stream in Volos, as well as the uncertainty that supersedes the whole process. The main target is to identify possible flood areas and to estimate the uncertainty introduced in flood zone mapping due to the variability of different return periods, moisture conditions and roughness coefficient. The present research deals with hydraulic simulation of torrent Xirias and his drainage basin, from the starting position of the bridge of Larisis Avenue, until the river mouth, using the HEC-RAS software. The geographical information system ArcGIS was used for the additional processing of results of hydraulic simulation and the visualization of them.

The process that was followed is being described in the following steps:

- Collection and processing of initial data. As initial data were used the digital elevation model, geological map, land use's map, hydrological data and other.
- Hydraulic simulation of drainage basin for the estimation of the flood that is going to be used for design, combining the following factors for creating several alternative scenarios:
  - ❖ Three different Return Periods
  - ❖ Three different Manning's Roughness Coefficients
  - ❖ Three different scenarios of hydrographs
- Development of flood hazard maps
- Evaluation of the results

The study area that had been chosen is a combination of the upstream drainage subbasins of torrent Xirias. As initial data for study area had been chosen the digital elevation model, land cover map according to database of Corine 2000 from which estimated the various



roughness coefficients and the properly chosen hydrographs from older researches. Hydraulic model consists of four junctions and three reaches. The execution of hydraulic model takes place for the combination of the three different return periods, the three different roughness coefficients and the three different conditions of moisture. The result of this process is the flood maps, which are created through ArcGIS. Finally, the various areas that are covered from water in every alternative scenario are calculated. It is also calculated the water elevation as well as the flow velocity for the twenty-seven different scenarios.

In conclusion, the mapping of flood hazard becomes feasible as well as the investigation of response of hydraulic model to the variability of initial parameters. As a result, the present research can be considered as a useful tool for the estimation and control of flood hazard that may come from Xirias stream.

**Key words:** Xirias, Flood, Directive 2007/60/EC, Hydraulic simulation, Flood hazard maps, unsteady flow, Floodplain area, Moisture conditions, Roughness coefficient, return period.

Αφιερωμένο στους δικούς μου ανθρώπους...

# Περιεχόμενα

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....  | <b>4</b>  |
| <b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....   | <b>5</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | <b>8</b>  |
| <b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....  | <b>11</b> |
| <b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b> .....                                     | <b>15</b> |
| <b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....                                      | <b>19</b> |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....                                   | <b>21</b> |
| 1.1. ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....                                | 21        |
| 1.2. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....                                 | 23        |
| 1.3. ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....                                   | 24        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</b> .....                   | <b>25</b> |
| 2.1.ΟΙ ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ ΩΣ ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗ.....                          | 25        |
| 2.2. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ .....      | 26        |
| 2.3. ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ .....                           | 27        |
| 2.4. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΑΙΦΝΙΔΙΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ-FLASH FLOOD.....          | 29        |
| 2.5. Η ΟΔΗΓΙΑ 2007 / 60 / ΕΚ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΈΝΩΣΗΣ .....            | 31        |
| 2.5.1. Γεγονότα που οδήγησαν στη δημιουργία της οδηγίας.....        | 31        |
| 2.5.2. Περιεχόμενο της οδηγίας .....                                | 31        |
| 2.5.3. Χρονοδιάγραμμα της Οδηγίας.....                              | 34        |
| 2.5.4. Υφιστάμενη κατάσταση της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ στην Ελλάδα..... | 36        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΤΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HEC-RAS</b> .....               | <b>37</b> |
| 3.1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....                                  | 37        |
| 3.2. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HEC-RAS .....                                       | 38        |
| 3.3. ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ HEC-RAS .....                             | 39        |
| 3.3.1. Γενική περιγραφή της διαδικασίας λειτουργίας.....            | 39        |
| 3.3.2. Εξισώσεις Αβαθών Υδάτων (Shallow Water Equations).....       | 43        |
| 3.3.3. Υδραυλικές εξισώσεις .....                                   | 44        |
| 3.3.4. Αριθμητικές μέθοδοι .....                                    | 50        |
| 3.3.5. Υπολογιστικό χρονικό βήμα-Σταθερότητα του μοντέλου .....     | 52        |
| 3.4. ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΟΥ HEC-RAS ΜΕ ΤΟ ARCGIS.....                          | 54        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ</b> .....                            | <b>56</b> |
| 4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....  | 56        |
| 4.2. Η ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΒΟΛΟΥ .....                             | 56        |
| 4.3. ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ .....                                      | 56        |

|   |            |
|---|------------|
| 4.4. ΞΗΡΙΑΣ: ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ-ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ.....   | 59         |
| 4.5. ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ .....  | 62         |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....</b>   | <b>64</b>  |
| 5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....  | 64         |
| 5.2. ΕΠΙΠΕΔΑ ΕΔΑΦΟΥΣ.....   | 64         |
| 5.3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....  | 68         |
| 5.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ .....   | 70         |
| 5.4.1. Η μέθοδος <i>SCS Runoff Curve Number</i> της <i>Soil Conservation Service</i> .....      | 70         |
| 5.4.2. Διαμόρφωση του υδρολογικού μοντέλου .....  | 74         |
| 5.4.3. Αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης στο ρέμα <i>Ξηριάς Βόλου</i> .....             | 78         |
| 5.5. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΡΟΗΣ.....  | 81         |
| 5.5.1. Ανάντη οριακή συνθήκη – Υδρογράφημα ( <i>Flow Hydrograph</i> ) .....                     | 81         |
| 5.5.2. Κατάντη οριακή συνθήκη - Ομοιόμορφο βάθος ( <i>Normal Depth</i> ) .....                  | 82         |
| 5.6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑ ΜΑΝΝΙΝΓ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ                                |            |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΣΤΟ <b>HEC-RAS</b> .....  | 83         |
| 5.6.1. Διαδικασία εκχώρησης τιμών συντελεστή τραχύτητας στο περιβάλλον του <b>HEC RAS</b> ..... | 83         |
| 5.6.2. Εκτίμηση συντελεστή τραχύτητας για περιοχές εκτός του κυρίου υδατορεύματος .....         | 85         |
| 5.6.3. Εκτίμηση συντελεστή τραχύτητας για περιοχές εντός του κυρίου υδατορεύματος .....         | 86         |
| 5.7. ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ .....  | 91         |
| 5.8. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ .....                                       | 93         |
| 5.9. ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ .....   | 94         |
| 5.10. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΧΑΡΤΩΝ .....  | 96         |
| 5.11. ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΑ ΣΕΝΑΡΙΑ.....  | 97         |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....</b>   | <b>100</b> |
| 6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....  | 100        |
| 6.2. ΧΑΡΤΕΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΓΙΑ ΠΕΡΙΟΔΟ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ $T=50$ -ΕΤΗ                        | 100        |
| 6.3. ΧΑΡΤΕΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΓΙΑ ΠΕΡΙΟΔΟ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ $T=100$ ΕΤΗ .....                  | 107        |
| 6.4. ΧΑΡΤΕΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΓΙΑ ΠΕΡΙΟΔΟ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ $T=1000$ -ΕΤΗ .....                | 113        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....</b>   | <b>120</b> |
| 7.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....  | 120        |
| <b>7.2. ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....</b>  | <b>127</b> |
| 7.3. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....  | 130        |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>   | <b>132</b> |
| <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....</b>  | <b>140</b> |
| <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β .....</b>  | <b>147</b> |



Αφιερωμένο στους δικούς μου ανθρώπους...

## Κατάλογος σχημάτων

|  |    |
|--|----|
| Σχήμα 1- 1: Χάρτης με πολιτισμούς που αναπτύχθηκαν παραπλήσια σε ποταμούς ....   | 22 |
| Σχήμα 1- 2: Παράδειγμα νελομέτρου.....   | 22 |
| Σχήμα 2- 1: Εξέλιξη αστραπιαίας πλημμύρας αρχικά (αριστερά) και μετά από 15 λεπτά (δεξιά) (Guidance on flash flood management, 2007) ..... | 31 |
| Σχήμα 3- 1: Δομή ενός υδραυλικού μοντέλου (Διακάκης, 2012).....  | 38 |
| Σχήμα 3- 2: Κελιά δισδιάστατου πλέγματος HEC-RAS 5.0.1 (Παλημέρης, 2017).....  | 41 |
| Σχήμα 3- 3: Παράθυρο διαλόγου στο HEC-RAS.....   | 42 |
| Σχήμα 3- 4: Ρύθμιση υπολογιστικών παραμέτρων και ορίων ανοχής σφάλματος.....   | 42 |
| Σχήμα 3- 5: Προφίλ τυχαίας επιφάνειας και συνάρτηση αυτής σε σχέση με την στάθμη νερού H.....  | 45 |
| Σχήμα 3- 6: Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρου στάθμης, εκφρασμένο ως συνάρτηση βήματος(Stelling, 2012) .....                                       | 46 |
| Σχήμα 3- 7: Τραχύ και τετραγωνικό πλέγμα(coarse grid).....   | 46 |
| Σχήμα 3- 8: Απλό και τραχύ πλαίσιο σε τμήμα ποταμού(Stelling, 2012).....   | 47 |
| Σχήμα 3- 9:Σύνθεση κελιών πλέγματος με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (Brunner, 2016). .....  | 50 |
| Σχήμα 3- 10: Σύνθεση κελιών πλέγματος με τη μέθοδο πεπερασμένων όγκων (Brunner, 2016).....   | 51 |
| Σχήμα 4- 1: Γραφική κατανομή μέσης, μέσης μέγιστης και μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας, Βόλος 1956-2002 (Τσαγκας,2014) .....                  | 57 |
| Σχήμα 4- 2: Αριθμητική κατανομή μέσης, μέσης μέγιστης και μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας, Βόλος 1956-2002 (Τσαγκας,2014) .....               | 57 |
| Σχήμα 4- 3: Γραφική απεικόνιση του μέσου μηνιαίου ύψους κατακρημνισμάτων και συνολικές μέρες βροχής, Βόλος 1956-2002 (Τσαγκας,2014) .....  | 58 |
| Σχήμα 4- 4: Αριθμητική έκφραση του μέσου μηνιαίου ύψους κατακρημνισμάτων και συνολικές μέρες βροχής, Βόλος 1956-2002 (Τσαγκας,2014) .....  | 58 |
| Σχήμα 4-5: Λεκάνη απορροής Ξηριά (Ραφαίοπου, 2017).....  | 60 |
| Σχήμα 4- 6: Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκάνης απορροής Ξηριά .....   | 60 |
| Σχήμα 4- 7: Παράδειγμα αποτύπωσης τεχνικού έργου γέφυρας.....  | 61 |
| Σχήμα 4- 8: Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής μελέτης. (Μούκος- .....   | 62 |
| Σχήμα 4- 9: Χάρτης χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής του Ξηριά (Ραφαίοπου, 2017).....  | 63 |
| Σχήμα 5- 1: Επίπεδο εδάφους στο περιβάλλον RAS-Mapper για το κομμάτι J4-J2.....  | 66 |
| Σχήμα 5- 2: Επίπεδο εδάφους στο περιβάλλον RAS-Mapper για το κομμάτι J2-J1.....  | 67 |
| Σχήμα 5- 3: Επίπεδο εδάφους στο περιβάλλον RAS-Mapper για το κομμάτι J3-J2.....  | 67 |

|  |     |
|--|-----|
| Σχήμα 5- 4: Εικόνα δισδιάστατου πλέγματος κελιών .....   | 68  |
| Σχήμα 5- 5: Χρήση της εντολής 2D Area Breakline-Βήμα 1 .....   | 69  |
| Σχήμα 5- 6: Χρήση της εντολής 2D Area Breakline-Βήμα 2 .....   | 70  |
| Σχήμα 5- 7: Χωρική απεικόνιση ανηγμένης παραμέτρου κλίμακας λ' (www.floods.ypeka.gr, 2018) .....   | 76  |
| Σχήμα 5- 8: Χωρική απεικόνιση ανηγμένης παραμέτρου κλίμακας ψ' (www.floods.ypeka.gr, 2018) .....   | 77  |
| Σχήμα 5- 9: Χάρτης περιοχής μελέτης, όπου απεικονίζεται η σχηματοποίηση των κόμβων και κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και των υπολεκανών.( Μούκος-Παρασκευάς, 2013) .....   | 79  |
| Σχήμα 5- 10: Παράδειγμα υδρογραφήματος για την περιοχή J2J1 .....  | 82  |
| Σχήμα 5- 11: Εντολή Map Layers→ Add new Land Cover Layer .....   | 84  |
| Σχήμα 5- 12: Παράθυρο διαλόγου Land Cover Layer .....  | 85  |
| Σχήμα 5- 13:Άξονες σωματιδίων που λαμβάνονται υπόψιν στην διαδικασία μέτρησης σωματιδίων Wolman .....  | 88  |
| Σχήμα 5- 14: Εμπειρική κατανομή των τιμών(Διάμεσος, άνω 75% των τιμών, κάτω 25% των τιμών) .....   | 90  |
| Σχήμα 5- 15: Παράδειγμα επιπέδου με εκχωρημένες τις τιμές του συντελεστή τραχύτητας για κάθε περιοχή ανάλογα την εκάστοτε χρήση γης(Χωρική διαφοροποίηση) .....  | 91  |
| Σχήμα 5- 16: Παράθυρο διαλόγου Unsteady Flow Analysis .....  | 94  |
|  |     |
| Σχήμα 6- 1: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με χαμηλές συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=50 ετών (T50_hgLOW_nLOW) ..... | 102 |
| Σχήμα 6- 2: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με χαμηλές συνθήκες υγρασίας και μέσο συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=50 ετών (T50_hgLOW_nAVG).....    | 103 |
| Σχήμα 6- 3: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με χαμηλές συνθήκες υγρασίας και υψηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=50 ετών (T50_hgLOW_nUP) .....   | 103 |
| Σχήμα 6- 4: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με μέσες συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=50 ετών (T50_hgAVG_nLOW).....    | 104 |
| Σχήμα 6- 5: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με μέσες συνθήκες υγρασίας και μέσο συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=50 ετών (T50_hgAVG_nAVG) .....     | 104 |
| Σχήμα 6- 6: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με μέσες συνθήκες υγρασίας και υψηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=50 ετών (T50_hgAVG_nUP).....      | 105 |
| Σχήμα 6- 7: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με υψηλές συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=50 ετών (T50_hgUP_nLOW) .....   | 105 |





|  |     |
|--|-----|
| Σχήμα 6- 22: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με μέσες συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=1000 ετών (T1000_hgAVG_nLOW)..... | 116 |
| Σχήμα 6- 23: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με μέσες συνθήκες υγρασίας και μέσο συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=1000 ετών (T1000_hgAVG_nAVG).....   | 117 |
| Σχήμα 6- 24: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με μέσες συνθήκες υγρασίας και υψηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=1000 ετών (T1000_hgAVG_nUP).....   | 117 |
| Σχήμα 6- 25: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με υψηλές συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=1000 ετών (T1000_hgUP_nLOW)..... | 118 |
| Σχήμα 6- 26: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με υψηλές συνθήκες υγρασίας και μέσο συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=1000 ετών (T1000_hgUP_nAVG).....   | 118 |
| Σχήμα 6- 27: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με υψηλές συνθήκες υγρασίας και υψηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=1000 ετών (T1000_hgUP_nUP).....   | 119 |
| Σχήμα 7- 1: Ευαισθησία περιόδου επαναφοράς.....  | 121 |
| Σχήμα 7- 2: Ευαισθησία ως προς τον συντελεστή τραχύτητας.....  | 123 |
| Σχήμα 7- 3: Ευαισθησία ως προς τις συνθήκες υγρασίας.....  | 125 |
| Σχήμα A- 1: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς T=50 έτη για τον κόμβο εισόδου J2.....  | 142 |
| Σχήμα A- 2: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς T=100 έτη για τον κόμβο εισόδου J2.....   | 143 |
| Σχήμα A- 3: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς T=1000 έτη για τον κόμβο εισόδου J2.....  | 143 |
| Σχήμα A- 4: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς T=50 έτη για τον κόμβο εισόδου J3.....  | 144 |
| Σχήμα A- 5: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς T=100 έτη για τον κόμβο εισόδου J3.....   | 144 |
| Σχήμα A- 6: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς T=1000 έτη για τον κόμβο εισόδου J3.....  | 145 |
| Σχήμα A- 7: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς T=50 έτη για τον κόμβο εισόδου J4.....  | 145 |
| Σχήμα A- 8: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς T=100 έτη για τον κόμβο εισόδου J4.....   | 146 |
| Σχήμα A- 9: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς T=1000 έτη για τον κόμβο εισόδου J4.....  | 146 |

## Κατάλογος πινάκων

|   |     |
|---|-----|
| Πίνακας 2- 1: Περιγραφή τύπων πλημμύρας (Eleuterio, 2012).....  | 25  |
| Πίνακας 2- 2: Παράγοντες που επηρεάζουν την μορφή της πλημμύρας( Messner et al, 2006).....  | 27  |
| Πίνακας 2- 3: Κύρια πλημμυρικά γεγονότα ανά την Ευρώπη (Sanders et al,2005) .....   | 28  |
| Πίνακας 2- 4: Οικονομική ζημία που προήλθε από μεγάλα πλημμυρικά γεγονότα τα τελευταία 25 χρόνια (www.worldatlas.com).....  | 29  |
| Πίνακας 2- 5: Χρονοδιάγραμμα της Οδηγίας 2007 / 60 / ΕΚ.....  | 35  |
| <br>  |     |
| Πίνακας 3- 1: Αντιστοίχιση τύπου ροής με κατάλληλη μέθοδο διόδευσης.....  | 43  |
| Πίνακας 3- 2: Τιμές της εμπειρικής σταθεράς D.....  | 49  |
| <br>  |     |
| Πίνακας 5- 1: Αντιπροσωπευτικές τιμές αριθμού καμπύλης απορροής (CN) κατά SCS για αγροτικές, ημιαστικές και αστικές περιοχές και για προηγούμενες συνθήκες υγρασίας τύπου II .....              | 73  |
| Πίνακας 5- 2: Κατηγορίες με βάση την υγρασία εδάφους (SCS, 1972) .....  | 74  |
| Πίνακας 5- 3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης της περιοχής μελέτης. ....  | 80  |
| Πίνακας 5- 4: Τιμές Normal Depth ανά περιοχή.....   | 82  |
| Πίνακας 5- 5: Κλίση της επιφάνειας του νερού σε κάθε κλάδο του υδατορεύματος.....   | 87  |
| Πίνακας 5- 6: Αποτελέσματα της κατηγοριοποίησης της διαμέτρου των υλικών και σωματιδίων του υδατορεύματος του Ξηριά χωρισμένα κατά τις προκαθορισμένες κλάσεις.....                             | 88  |
| Πίνακας 5- 7: Τιμές που αποδίδουν οι εμπειρικές εξισώσεις 3,10,11,12,13,14,15,16,17 του πίνακα Α-2 της διεθνούς βιβλιογραφίας για τον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας n κατά Manning ..... | 89  |
| Πίνακας 5- 8: εκτιμήσεις για την διάμεσο, του άνω 75% των τιμών και του κάτω 25% των τιμών για τον εκάστοτε κλάδο του ποταμού. ....   | 90  |
| Πίνακας 5- 9: Σύνθεση των 27 διαφορετικών σεναρίων.....   | 99  |
| <br>  |     |
| Πίνακας 6- 1 : Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς T=50-έτη .....   | 102 |
| Πίνακας 6- 2 : Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς T=100-έτη .....  | 108 |
| Πίνακας 6- 3: Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς T=1000-έτη .....  | 114 |
| <br>  |     |
| Πίνακας 7- 1: Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας σε km <sup>2</sup> . Διαφοροποίηση ως προς την περίοδο επαναφοράς.....   | 127 |

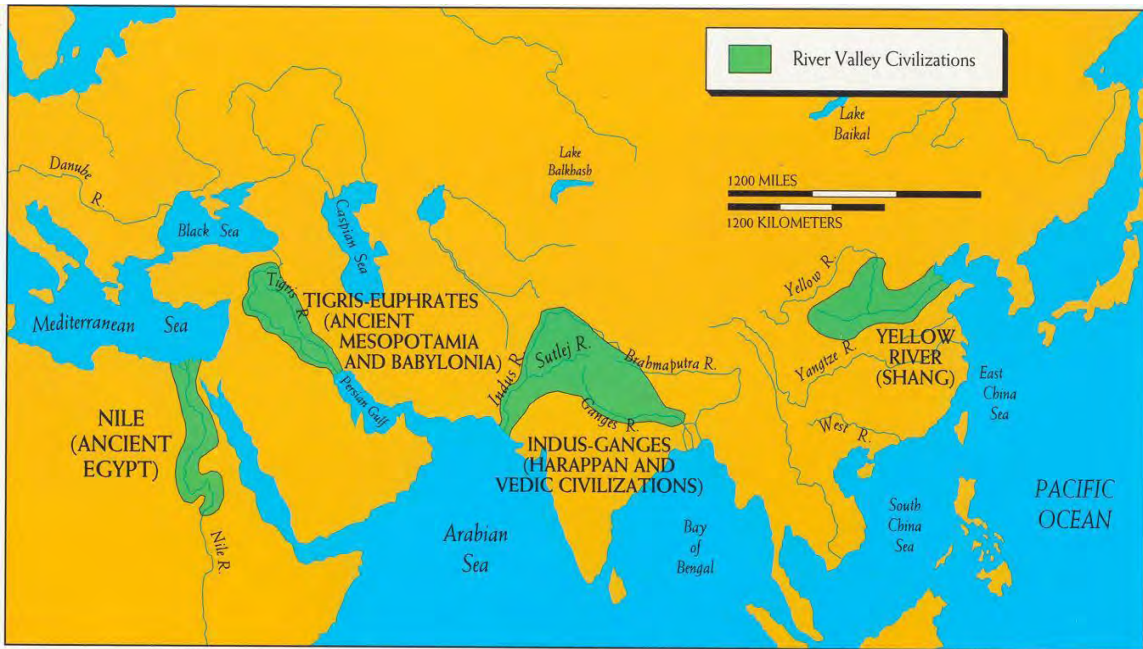
|   |     |
|---|-----|
| Πίνακας 7- 2: Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας σε $km^2$ . Διαφοροποίηση ως προς τον συντελεστή τραχύτητας .....                    | 128 |
| Πίνακας 7- 3: Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας σε $km^2$ . Διαφοροποίηση ως προς την υγρασιακή κατάσταση .....                      | 128 |
| Πίνακας A- 1: Κατηγοριοποίηση χρήσεων γης σύμφωνα με Corine 2000.....   | 141 |
| Πίνακας A- 2: Εμπειρικές εξισώσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας για τον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας $n$ κατά Manning ..... | 142 |
| Πίνακας B- 1: Αναλογία επιφανειών κατάκλυσης σε $km^2$ με βάθη νερού σε $m$ .....   | 148 |
| Πίνακας B- 2: Αναλογία επιφανειών κατάκλυσης σε $km^2$ με ταχύτητες ροής σε $m/sec$ .....   | 149 |
| Πίνακας B- 3: Σύγκριση χωρικής κατανομής μέγιστου βάθους για χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n_{LOW}$ .....                         | 150 |
| Πίνακας B- 4: Σύγκριση χωρικής κατανομής μέγιστου βάθους για μέσο συντελεστή τραχύτητας $n_{AVG}$ .....                           | 151 |
| Πίνακας B- 5: Σύγκριση χωρικής κατανομής μέγιστου βάθους για υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n_{UP}$ .....                           | 152 |
| Πίνακας B- 6: Σύγκριση χωρικής κατανομής ταχυτήτων ροής για χαμηλό συντελεστή τραχύτητας $n_{LOW}$ .....                          | 153 |
| Πίνακας B- 7: Σύγκριση χωρικής κατανομής ταχυτήτων ροής για μέσο συντελεστή τραχύτητας $n_{AVG}$ .....                            | 154 |
| Πίνακας B- 8: Σύγκριση χωρικής κατανομής ταχυτήτων ροής για υψηλό συντελεστή τραχύτητας $n_{UP}$ .....                            | 155 |
| Πίνακας B- 9: Ρυθμίσεις για τον κλάδο J2J1 .....  | 156 |
| Πίνακας B- 10: Ρυθμίσεις για τον κλάδο J3J2 .....   | 157 |
| Πίνακας B- 11: Ρυθμίσεις για τον κλάδο J3J2 .....   | 158 |

# Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

## 1.1. Σύντομη ιστορική αναδρομή

Η δυναμική κίνηση των υδάτινων σωμάτων νερού έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη της ανθρώπινης ιστορίας. Οι πρώτοι μη νομαδικοί πολιτισμοί εγκαταστάθηκαν σε παραποτάμιες περιοχές και η ζωή τους ήταν άρρηκτα συνδεδεμένη με την εκμετάλλευση των υδατικών πόρων και την διαχείριση των κινδύνων που αυτοί εγκυμονούσαν. Σπουδαίοι πολιτισμοί αναπτύχθηκαν παραπλήσια μεγάλων ποταμών όπως ο Τίγρης, ο Ευφράτης, ο Ινδός, ο Νείλος, ο Κίτρινος Ποταμός, οι οποίοι έμαθαν να ζουν και να πεθαίνουν με τα οφέλη και τα προβλήματα που τους παρείχαν αυτά τα μεγάλα υδάτινα σώματα, καθώς και να προβλέπουν και να διαχειρίζονται τους κινδύνους που προέκυπταν από τις πλημμύρες των ποταμών αυτών.

Χαρακτηριστικός για το πως επηρέαζαν τις αρχαίες κοινωνίες τα έντονα πλημμυρικά φαινόμενα είναι ο μύθος του Κατακλυσμού που συναντάται σε πολλούς πολιτισμούς και αρχαίες θρησκείες όπως στην Βίβλο με την κιβωτό του Νώε, η Ινδουιστική ιστορία του Μανού, στην ελληνική μυθολογία με τον κατακλυσμό του Δευκαλίωνα και στην ιστορία του Ουτναπιστίμ στο μυθικό έπος του Γκιλγκαμές.



Σχήμα 1- 1: Χάρτης με πολιτισμούς που αναπτύχθηκαν παραπλήσια σε ποταμούς

Ένα επιπρόσθετο παράδειγμα αποτελεί η χρήση των νελομέτρων από τους αρχαίους Αιγύπτιους, τα οποία τους χρησίμευαν για να προβλέπουν και να ελέγχουν τους κινδύνους των πλημμυρικών γεγονότων του υδρολογικού κύκλου του Νείλου.



Σχήμα 1- 2: Παράδειγμα νελομέτρου

Τέλος, ένα άλλο στοιχείο που δείχνει τη σημασία των ποταμών για τον άνθρωπο είναι η λατρεία τους ως θεούς από αρκετούς αρχαίους πολιτισμούς, αποδίδοντας έτσι τα οφέλη που έπαιρναν από τον ποταμό ως εύνοια του θεού ποταμού και τις καταστροφικές πλημμύρες ως οργή. Χαρακτηριστικά αναφέρονται ονόματα ποταμών θεών από τον ελλαδικό χώρο όπως: Ο Ίναχος, ο Ασωπός, ο Κηφισός, ο Πηνειός, ο Αλφειός, ο Ιλισός, ενώ ο μεγαλύτερος ποτάμιος θεός ήταν ο Αχελώος.

## 1.2. Αντικείμενο της εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η υδραυλική προσομοίωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού σε τμήμα φυσικού υδατορεύματος, εντός αστικής περιοχής, επικεντρωμένο στην περίπτωση της αιφνίδιας πλημμύρας. Πραγματοποιείται επιπροσθέτως η εξαγωγή χαρτών πλημμυρικής κατάκλισης για διάφορους συνδυασμούς σεναρίων, εκτιμώντας έτσι την επίπτωση της αβεβαιότητας που προκύπτει από την μεταβλητότητα των αρχικών παραμέτρων. Τα στοιχεία που μεταβάλλονται και συνδυάζονται για να δημιουργηθούν τα διάφορα σενάρια, 27 συνολικά είναι τα εξής :

### α) Περίοδος Επαναφοράς

- $T=50$ -έτη
- $T=100$ -έτη
- $T=1000$ -έτη

### β) Συντελεστής τραχύτητας $n$

- Χαμηλός συντελεστής τραχύτητας  $n$
- Μεσαίος συντελεστής τραχύτητας  $n$
- Υψηλός συντελεστής τραχύτητας  $n$

### γ) Πλημμυρογράφημα ανάλογα με τις συνθήκες εδαφικής υγρασίας σύμφωνα με τη μέθοδο SCS

- Πλημμυρογράφημα για ξηρές συνθήκες εδαφικής υγρασίας

- Πλημμυρογράφημα για μέσες συνθήκες εδαφικής υγρασίας
- Πλημμυρογράφημα για υγρές συνθήκες εδαφικής υγρασίας

Η περιοχή που επιλέχτηκε είναι το κατάντη τμήμα της λεκάνη απορροής του ποταμού Ξηριά στην περιοχή του Βόλου, η οποία χωρίστηκε σε τρία τμήματα για ακριβέστερη ανάλυση. Ως εκ τούτου, τελικά προέκυψαν 27 σενάρια. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε στο υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS, όπως επίσης και η διαδικασία της προσομοίωσης, ενώ τα αποτελέσματα εισήχθησαν στο περιβάλλον ArcGIS, από όπου εξήχθησαν οι τελικοί χάρτες βάθους νερού και ταχυτήτων, καθώς επίσης υπολογίστηκε η έκταση της κατακλυζομένης επιφάνειας.

### **1.3. Διάρθρωση της εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει οργανωθεί σε 7 κεφάλαια. Το κεφάλαιο 1 πραγματοποιεί μια σύντομη ιστορική αναδρομή, εξετάζοντας τον τρόπο που έχει αλληλοεπιδράσει η πλημμύρα ως φαινόμενο με τον ανθρώπινο παράγοντα ανά τους αιώνες. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση όσον αφορά τις πλημμύρες και τις κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες αυτών, καθώς και της Οδηγίας 2007/60/EK. Στο κεφάλαιο 3 γίνεται προσπάθεια προσέγγισης των μοντέλων υδραυλικής προσομοίωσης ροής καθώς και της διαδικασίας επίλυσης των εξισώσεων που εκφράζουν τις αρχές διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας, όπως αυτές αναπτύσσονται και επιλύονται στο υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης, τα ειδικά χαρακτηριστικά της, καθώς και σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την μορφολογία του εδάφους και το κλίμα της. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την υδραυλική προσομοίωση μη μόνιμης ροής σε διδιάστατο υδραυλικό μοντέλο του HEC-RAS. Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για τρεις περιόδους επαναφοράς  $T=50$ -έτη,  $T=100$ -έτη,  $T=1000$ -έτη, για συνθήκες υγρασίας ευμενείς, μέσες, δυσμενείς, για τρία σενάρια συντελεστών τραχύτητας, χαμηλό, μέσο και υψηλό και όλα αυτά και για τις τρεις υποπεριοχές που έχει χωριστεί η περιοχή μελέτης, δηλαδή δημιουργούνται συνολικά 27 διαφορετικά πλημμυρικά σενάρια. Τέλος, στο κεφάλαιο 7 γίνεται σχολιασμός σχετικά με τα αποτελέσματα και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν.



## Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1.Οι πλημμύρες ως φυσική καταστροφή

Η πλημμύρα ως φαινόμενο χαρακτηρίζεται από την παρουσία νερού σε σημεία που υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν θα έπρεπε να υπάρχει. Αυτό ως γενική ιδέα εφαρμόζεται σε όλα τα είδη πλημμύρας, μερικά εκ των οποίων μπορούμε να τα δούμε στον παρακάτω πίνακα.

| <b>Τύπος Πλημμύρας</b>                           | <b>Περιγραφή του πλημμυρικού φαινομένου</b>   |
|--|---|
| Απλές πλημμύρες προκαλούμενες από ποτάμια σώματα | Η ροή του ποταμού αρχίζει με αργό σχετικά ρυθμό να καλύπτει την κοίτη του ποταμού και καλύπτει την γύρω περιοχή σε σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα.   |
| Πλημμύρα προερχόμενη από τα υπόγεια ύδατα.       | Σε περιόδους που το χώμα είναι πλήρως κορεσμένο από τον υπόγειο υδροφόρο, τα υπόγεια ύδατα βγαίνουν στην επιφάνεια και την πλημμυρίζουν.  |
| Ξαφνικές πλημμύρες σε χειμαρρώδεις ποταμούς.     | Προέρχονται κυρίως από ξαφνικές καταιγίδες μεγάλης έντασης. Το νερό ξεπερνά την χωρητικότητα της κοίτης και δημιουργεί ξαφνικές πλημμύρες, οι οποίες αρκετές φορές έχουν και μεγάλες ταχύτητες. |
| Τεχνολογικές πλημμύρες                           | Είναι πλημμύρες που δημιουργούνται από ατυχήματα σε υδραυλικές κατασκευές, όπως φράγματα. Για παράδειγμα μια ρωγμή σε ένα φράγμα μπορεί να δημιουργήσει μεγάλη πλημμύρα κατάντη του φράγματος.  |
| Παραθαλάσσιες πλημμύρες                          | Το επίπεδο της θάλασσας ανεβαίνει εξαιτίας ακραίων καιρικών φαινομένων πλημμυρίζοντας παραθαλάσσιες περιοχές πχ τσουνάμι, καταιγίδες.   |

Πίνακας 2- 1: Περιγραφή τύπων πλημμύρας (Eleuterio, 2012)

## 2.2. Επιπτώσεις και συνέπειες των πλημμυρικών φαινομένων

Τα πλημμυρικά φαινόμενα επιδρούν με διαφορετικούς τρόπους στα γειτνιάζοντα με αυτά στοιχεία. Υπάρχουν περιπτώσεις που γίνονται αντιληπτά από τους ανθρώπους και άλλες όχι. Οι καταστροφικές συνέπειες των πλημμυρικών φαινομένων έχουν τόσο φυσικές όσο και κοινωνικοοικονομικές συνέπειες. Ωστόσο μπορεί να έχουν και θετικές συνέπειες όπως η λίπανση πεδινών εκτάσεων που δεν βρίσκονται σε αστικές ζώνες. Ας μην ξεχνάμε όμως πως οι πλημμύρες είναι ο νούμερο ένα παράγοντας φυσικών καταστροφών παγκοσμίως.

Τα υλικά στοιχεία που εκτίθενται σε πλημμυρικά φαινόμενα επιβαρύνονται με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

- Φυσικές διεργασίες(πχ η δυναμική καταπόνηση που προκαλεί η πλημμύρα σε ένα δομικό στοιχείο)
- Χημικές διεργασίες(πχ διάβρωση του εδάφους)
- Βιολογικές διεργασίες(πχ μούχλα)

Στο πλαίσιο της πλημμυρικής ανάλυσης, διάφορα χαρακτηριστικά της πλημμύρας παίζουν ρόλο στο πόσο καταστροφική είναι. Επίσης ρόλο στο πόσο καταστροφική για μια περιοχή είναι μια πλημμύρα παίζει και το είδος της περιοχής και των οικονομικών στοιχείων που βρίσκονται στην περιοχή. Αρκεί να αναλογιστεί κάποιος τον αντίκτυπο που θα έχει μια μεγάλη πλημμύρα στο Λος Άντζελες και η ίδια πλημμύρα στις αραιοκατοικημένες στέπες της Ρωσίας, τόσο σε επίπεδο ανθρωπίνων απωλειών, όσο και επίπεδο υλικών καταστροφών.

Ακολούθως παρατίθεται πίνακας με τους παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό επιρροής μιας πλημμύρας σε μια περιοχή.

| <b>Χαρακτηριστικά Πλημμύρας</b> | <b>Συσχέτιση</b>   |
|---------------------------------|--|
| Έκταση                          | Καθορίζει ποια στοιχεία επηρεάζονται   |
| Βάθος                           | Παίζει ίσως τον μεγαλύτερο ρόλο στις συνολικές επιπτώσεις της πλημμύρας  |
| Διάρκεια                        | Ιδιαίτερη σημασία για τις επιπτώσεις στον αστικό ιστό  |
| Ταχύτητα                        | Μόνο οι μεγάλες ταχύτητες δημιουργούν σοβαρά προβλήματα. Εξαιρετικά σημαντικό σε ξαφνικές πλημμύρες εντός αστικού ιστού. |
| Ρυθμός Ανόδου                   | Μειώνει το χρονικό περιθώριο για προειδοποιήσεις και εκκενώσεις περιοχών   |
| Χρονική Στιγμή Συμβάντος        | Πολύ σημαντικό για τις αγροτικές καλλιέργειες  |
| Μόλυνση                         | Αν τα νερά είναι μολυσμένα, οι επιπτώσεις του πλημμυρικού φαινομένου θα είναι τεράστιες                                  |
| Θαλασσινό /Γλυκό Νερό           | Το θαλασσινό νερό επιβαρύνει περαιτέρω την κατάσταση.  |

Πίνακας 2- 2: Παράγοντες που επηρεάζουν την μορφή της πλημμύρας( Messner et al, 2006)

### **2.3. Κοινωνικοοικονομικές συνέπειες**

Ο αριθμός των ανθρώπινων απωλειών και η ποσότητα των υλικών καταστροφών αποτελούν ένα μεγάλο κοινωνικό αλλά και οικονομικό πρόβλημα σε όλες τις ανθρώπινες κοινωνίες, διαχρονικά. Πρόσφατες σχετικά πλημμύρες ανά τον κόσμο επιβεβαιώνουν αυτό το γεγονός.

Το επίπεδο των απωλειών είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με το περιβάλλον στο οποίο λαμβάνει χώρα το πλημμυρικό φαινόμενο, καθώς και με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε πλημμύρας. Για να γίνει αντιληπτό πως το πρόβλημα είναι υπαρκτό και σύγχρονο

παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας, με μερικές από τις μεγαλύτερες πλημμύρες στην ευρωπαϊκή ιστορία:

| Date       | Country   | Type     | Economic loss | Insured loss | Casualties |
|------------|---|----------|---------------|--------------|------------|
| 1362       | Germany, Denmark  | Coastal  | -             | -            | 100,000    |
| 1421 (Nov) | Netherlands   | Coastal  | -             | -            | 10,000     |
| 1570       | Netherlands, Belgium  | Coastal  | -             | -            | > 10,000   |
| 1717       | Germany, Netherlands  | Coastal  | -             | -            | 11,500     |
| 1755       | Portugal, Spain   | Tsunami  | -             | -            | 10,000     |
| 1910       | France  | Riverine | 8.5bn         | -            | -          |
| 1928 (Jan) | United Kingdom  | Coastal  | -             | -            | 14         |
| 1947       | United Kingdom  | Riverine | 450m          | -            | 0          |
| 1953       | United Kingdom, Netherlands   | Coastal  | 18bn          | -            | 1,932      |
| 1962       | Netherlands, Germany, Denmark   | Coastal  | 4bn           | -            | 350        |
| 1966       | Italy   | Riverine | 10bn          | -            | 39         |
| 1983       | Spain   | Riverine | 2bn           | -            | 40         |
| 1993       | Germany, Netherlands, Belgium, France, Luxembourg                               | Riverine | 1.4bn         | 620m         | 14         |
| 1994       | Italy   | Riverine | 11bn          | 581m         | 64         |
| 1995       | Germany, Netherlands, Belgium, France, Luxembourg                               | Riverine | 2.7bn         | 581m         | 28         |
| 1997       | Poland, Czech Republic  | Riverine | 3.8bn         | 581m         | 100        |
| 1998       | United Kingdom  | Riverine | -             | 215m         | 5          |
| 1998       | Slovakia, Czech Republic  | Riverine | -             | -            | 63         |
| 2000       | United Kingdom  | Riverine | -             | 715m         | -          |
| 2002       | Austria, the Czech Republic and Germany   | Riverine | 15bn          | 2.25bn       | 110        |
| 2005       | Romania, Switzeland, Austria and Germany  | Riverine | 2.3bn         | 1.25bn       | 42         |
| 2010       | Poland, Austria, Czech Republic, Germany, Hungary, Slovakia, Serbia and Ukraine | Riverine | > 3bn         | -            | 34         |

Πίνακας 2- 3: Κύρια πλημμυρικά γεγονότα ανά την Ευρώπη (Sanders et al,2005)

Από την άλλη, οι οικονομικές επιπτώσεις στις αστικές περιοχές είναι ιδιαίτερα μεγάλες λόγω των οικονομικών στοιχείων και της αξίας τους που είναι συγκεντρωμένα σε αυτές. Γενικά, η πλειοψηφία των ζημιών σε κτίρια και στα περιεχόμενα αυτών αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό των οικονομικών συνεπειών των πλημμυρών. Επίσης τα οδικά δίκτυα υποφέρουν από σοβαρές ζημιές κατά τη διάρκεια ενός πλημμυρικού γεγονότος, αυξάνοντας κατακόρυφα τις οικονομικές συνέπειες. Αξίζει λοιπόν να παρουσιαστεί και το οικονομικό κόστος κάποιων εκ των μεγαλύτερων πλημμυρών που έχουν συμβεί παγκοσμίως:

| Περιοχή     | Ημερομηνία       | Οικονομική ζημία(σε<br>δισεκατομμύρια δολάρια<br>ΗΠΑ) |
|-------------|------------------|---|
| Ταϊλάνδη    | 5/8/2011         | 40.0  |
| Κίνα        | 01/07/1998       | 30.0  |
| Κίνα        | 29/05/2010       | 18.0  |
| Ινδία       | Σεπτέμβριος,2014 | 16.0  |
| Νότια Κορέα | 01/08/1995       | 15.0  |
| Γερμανία    | 28/05/2013       | 12.9  |
| Κίνα        | 30/06/1996       | 12.6  |
| Η.Π.Α.      | 24/06/1993       | 12.0  |
| Γερμανία    | 11/08/2002       | 11.6  |
| Η.Π.Α.      | 09/06/2008       | 10.0  |

Πίνακας 2- 4: Οικονομική ζημία που προήλθε από μεγάλα πλημμυρικά γεγονότα τα τελευταία 25 χρόνια (www.worldatlas.com)

Βλέπουμε χαρακτηριστικά, πως και το οικονομικό κόστος των πλημμυρών είναι πολύ μεγάλο και σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνει να αποτελεί ένα πολύ μεγάλο ποσοστό του ΑΕΠ, ειδικά για τις αναπτυσσόμενες χώρες. Επομένως μια μεγάλη πλημμύρα μπορεί να καταστρέψει και οικονομικά μια χώρα. Συμπερασματικά λοιπόν, η πρόγνωση και η σωστή αντιμετώπιση ενός έντονου πλημμυρικού φαινομένου μπορεί να σώσει και αρκετές ζωές και τεράστια χρηματικά ποσά και κατ' επέκταση να εξασφαλίσει την ευημερία ή την καταστροφή μιας ολόκληρης χώρας.

#### **2.4. Το φαινόμενο της αιφνίδιας πλημμύρας-flash flood**

Οι αιφνίδιες πλημμύρες είναι ορμητικές πλημμύρες που συμβαίνουν ξαφνικά, 6-12 ώρες ή λιγότερο μετά από την αντίστοιχη βροχόπτωση. Συμβαίνουν μετά από μικρή ή και καθόλου προειδοποίηση και διαρκούν για μικρό χρονικό διάστημα. Προκύπτουν από την απότομη και γρήγορη αύξηση της στάθμης του νερού, η οποία συνοδεύεται συνήθως από

υψηλές ταχύτητες(Βοζινάκη, 2014). Στην περιοχή της Μεσογείου οι αιφνίδιες (ή ξαφνικές) πλημμύρες είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος πλημμυρών καθώς ευνοείται ιδιαίτερα από τη γεωμορφολογία, τη γεωλογία και τις κλιματικές παραμέτρους (Παπανικολάου και Διακάκης, 2011).

Η αιφνίδια πλημμύρα μπορεί να προκληθεί από έντονη βροχόπτωση, κυρίως όταν πραγματοποιείται σε κορεσμένο έδαφος. Σε αυτές τις συνθήκες το περίσσειμα βροχής απορρέει από την επιφάνεια και συσσωρεύεται στα ρεύματα και τους ποταμούς με έναν πολύ επιταχυνόμενο ρυθμό. Οι δυνατές βροχές, που συνοδεύονται πολύ συχνά από σύννεφα, καλύπτουν μικρές περιοχές και είναι μικρής διάρκειας (από μερικά λεπτά έως μερικές ώρες), αλλά πολύ έντονες όπως 100 mm σε διάστημα μίας ώρας ή και περισσότερο(Παπαστεφανάκης, 2009). Μια άλλη αιτία αιφνίδιας πλημμύρας, ιδιαίτερα στις ορεινές περιοχές, μπορεί να είναι το τήξη του χιονιού σε συνδυασμό με βροχόπτωση. Μετά από έντονη χιονόπτωση τον χειμώνα, η ξαφνική αύξηση της θερμοκρασίας και η βροχόπτωση στην περίοδο χειμώνα / άνοιξη μπορεί να επιταχύνει την συμβολή της βροχόπτωσης στην δημιουργία πλημμύρας. Η αστραπιαία πλημμύρα μπορεί να είναι το αποτέλεσμα μίας αστοχίας ενός φράγματος, ενός αντιπλημμυρικού αναχώματος ή άλλης υδραυλικής υποδομής. Σε πολύ απότομο έδαφος ή όπου τα γεωλογικά στρώματα έχουν ασταθή δομή, οι πλημμύρες μπορούν να καταλήξουν σε ροές με μπάζα και ροές με υπερβολική συγκέντρωση ιζημάτων.

Οι αιφνίδιες πλημμύρες εμφανίζονται σε μικρό χρονικό διάστημα και έχουν σαν αποτέλεσμα ταχεία ύψωση νερού, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες καταστροφές σε κατασκευές, όπως κτίρια, γέφυρες κλπ., να παρασύρει αυτοκίνητα, να ξεριζώσει δέντρα κ.α. Η επιφανειακή απορροή που προκαλείται είναι πολύ σημαντική για το χρόνο διάρκειας της πλημμύρας και αποτελεί σοβαρή απειλή για την κατασκευαστική ακεραιότητα των κτιρίων και των υποδομών. Εξαιτίας του μικρού χρόνου για προειδοποίηση, προετοιμασία και εκκένωση, οι απώλειες ανθρώπινων ζωών είναι συχνή και ουσιαστική συνέπεια τους. Η δύναμη του νερού μπορεί να είναι τόσο μεγάλη ώστε να απομακρύνει ογκόλιθους, να ξεριζώσει δέντρα και να καταστρέψει γέφυρες και κτήρια που θα βρεθούν στο πέρασμά του. Για παράδειγμα ένα ισχυρό ρεύμα νερού μόνο 60 cm σε βάθος μπορεί να προκαλέσει το θάνατο σε επιβάτες αυτοκινήτων (Παπαστεφανάκης, 2009).



Σχήμα 2- 1: Εξέλιξη αστραπιαίας πλημμύρας αρχικά (αριστερά) και μετά από 15 λεπτά (δεξιά) (Guidance on flash flood management, 2007)

## **2.5. Η οδηγία 2007 / 60 / ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης**

### **2.5.1. Γεγονότα που οδήγησαν στη δημιουργία της οδηγίας**

Μεταξύ του 1998 και του 2009 η Ευρώπη βίωσε πάνω από 213 μεγάλα πλημμυρικά γεγονότα, συμπεριλαμβανομένων των καταστροφικών γεγονότων κατά μήκος του Δούναβη και του Έλβα ποταμού κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού του 2002, που προκάλεσαν πάνω από 1000 θανάτους, την μετεγκατάσταση 500.000 ατόμων και οικονομικές ζημιές που άγγιζαν τα 50 δισεκατομμύρια ευρώ. Περαιτέρω πλημμύρες κατά το 2005 ενίσχυσαν την ανάγκη για την ανάληψη στοχευμένων ενεργειών, αφού έγινε πλέον ξεκάθαρο πως:

- οι πλημμύρες μπορεί να προκαλέσουν θανάτους, μετακινήσεις πληθυσμών και ζημιές στο περιβάλλον, να θέσουν σοβαρά σε κίνδυνο την οικονομική ανάπτυξη και να υπονομεύσουν τις οικονομικές δραστηριότητες
- οι πλημμύρες είναι φυσικά φαινόμενα τα οποία είναι αδύνατο να προληφθούν
- ορισμένες ανθρώπινες δραστηριότητες και η αλλαγή του κλίματος συμβάλλουν στην αύξηση της πιθανότητας επέλευσης φαινομένων πλημμύρας, με αντίστοιχη αύξηση των αρνητικών τους επιπτώσεων

### **2.5.2. Περιεχόμενο της οδηγίας**

Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο εξέδωσε στις 23 Οκτωβρίου του 2007, την Οδηγία 2007 / 60 / ΕΚ για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας και τέθηκε σε ισχύ στις 26 Νοεμβρίου του 2007. Η οδηγία αυτή συμπληρώνει την οδηγία πλαισίου για τα νερά 2000/60/ΕΚ, όσον αφορά στη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου.

Η οδηγία απαιτούσε τα κράτη μέλη να πραγματοποιήσουν αρχικά μια προκαταρκτική μελέτη η οποία έπρεπε να ολοκληρωθεί ως το 2011 για να εντοπιστούν και να ταυτοποιηθούν οι περιοχές των λεκανών απορροής ποταμών, καθώς και τις αντίστοιχες παραθαλάσσιες περιοχές, όσον αφορά την παράμετρο του πλημμυρικού κινδύνου. Για τις πιο κρίσιμες περιοχές απαιτήθηκε να σχεδιαστούν χάρτες επικινδυνότητας ως το τέλος του 2013 και να καταρτισθούν τα σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας, εστιασμένα στην πρόληψη και στην προστασία έως το 2015. Η οδηγία απαιτεί εφαρμογή τόσο στις περιοχές της ενδοχώρας, όσο και στις παραθαλάσσιες περιοχές.

Η εφαρμογή της οδηγίας θα γίνει σε τρία στάδια.

- (α) Διεξαγωγή Προκαταρκτικής Αξιολόγησης Κινδύνου Πλημμύρας για κάθε Περιοχή Λεκάνης Απορροής Ποταμού(ΠΛΑΠ)
- (β) Κατάρτιση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας και χαρτών κινδύνων πλημμύρας σε επίπεδο Περιοχής Λεκάνης Απορροής Ποταμού για τις ανωτέρω περιοχές( άρθρο 6 της Οδηγίας)
- (γ) Κατάρτιση Σχεδίων Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας για τις περιοχές που υπάρχουν δυνητικοί σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας ή είναι πιθανόν να σημειωθεί πλημμύρα

Επομένως τα κράτη μέλη καταρτίζουν, σε επίπεδο περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας και χάρτες κινδύνων πλημμύρας, στην πλέον κατάλληλη κλίμακα για τις περιοχές, στις οποίες τα κράτη μέλη συμπεραίνουν ότι υπάρχουν δυνητικοί σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας ή ότι είναι πιθανόν να σημειωθεί πλημμύρα.

Οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας καλύπτουν τις γεωγραφικές περιοχές που θα μπορούσαν να πλημμυρήσουν σύμφωνα με τα ακόλουθα σενάρια:



- πλημμύρες χαμηλής πιθανότητας ή σενάρια ακραίων φαινομένων,
- πλημμύρες μέσης πιθανότητας (με πιθανή περίοδο επαναφοράς  $\geq 100$  χρόνια),
- πλημμύρες υψηλής πιθανότητας, ανάλογα με την περίπτωση.

Για κάθε ένα από τα παραπάνω σενάρια παρατίθενται τα ακόλουθα στοιχεία:

- η έκταση της πλημμύρας,
- το βάθος νερού ή η στάθμη νερού ανάλογα με την περίπτωση,
- ανάλογα με την περίπτωση, η ταχύτητα ροής ή η σχετική ροή των υδάτων.

Οι χάρτες κινδύνου πλημμύρας περιγράφουν τις δυνητικές αρνητικές συνέπειες που συνδέονται με τις πλημμύρες υπό τις συνθήκες των σεναρίων της παραγράφου 3 και εκφράζονται ως εξής (Παράγραφος 5):

- ενδεικτικός αριθμός κατοίκων που ενδέχεται να πληγούν
- τύπος οικονομικής δραστηριότητας στην περιοχή που ενδέχεται να πληγεί
- εγκαταστάσεις οι οποίες ενδέχεται να προκαλέσουν τυχαία ρύπανση σε περίπτωση πλημμύρας και προστατευόμενες περιοχές
- άλλες πληροφορίες που το κράτος μέλος θεωρεί χρήσιμες, όπως η επισήμανση των περιοχών όπου υπάρχει το ενδεχόμενο πλημμυρών με αυξημένο ποσοστό μεταφερόμενων ιζημάτων και πλημμυρών που παρασύρουν υπολείμματα και πληροφορίες για πιθανές άλλες σημαντικές πηγές ρύπανσης.

Όσον αφορά το τελικό στάδιο της οδηγίας, δηλαδή την Κατάρτιση Σχεδίων Διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας σύμφωνα με το Κεφάλαιο IV (Άρθρο 7), έχει ως στόχο την κατάρτιση συντονισμένων σχεδίων διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας από τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, βάσει των χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας. Στόχος των σχεδίων θα είναι μείωση των δυνητικών αρνητικών συνεπειών που οι πλημμύρες έχουν για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική δραστηριότητα (Παράγραφος 2).

Τα σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας λαμβάνουν υπόψη συναφείς παραμέτρους, όπως το κόστος και τα οφέλη, την έκταση και τις οδούς αποστράγγισης

της πλημμύρας, τις ζώνες με δυνατότητα συγκράτησης των πλημμυρών, τη διαχείριση του εδάφους και των υδάτων, τον χωροταξικό σχεδιασμό και τις χρήσεις γης, τις ανάγκες προστασίας και διατήρησης της φύσης και ειδικά των προστατευόμενων περιοχών και τη διαφύλαξη της ναυσιπλοΐας και των λιμενικών υποδομών.

Επιπροσθέτως λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε λεκάνης απορροής και καλύπτουν όλες τις πτυχές της διαχείρισης, συμπεριλαμβανομένων της πρόγνωσης πλημμυρών και των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης, με έμφαση στην πρόληψη, την προστασία και την ετοιμότητα. Τα σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας μπορούν επίσης να περιλαμβάνουν την προώθηση βιώσιμων πρακτικών χρήσης γης, τη βελτίωση της ανάλυσης της πλημμυρικής απορροής καθώς και την ελεγχόμενη κατάκλυση ορισμένων περιοχών σε περίπτωση πλημμύρας. (Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, 23/10/2007)

### 2.5.3. Χρονοδιάγραμμα της Οδηγίας

Τέλος, στην Οδηγία 2007/60/ΕΚ αναφέρονται σαφείς και συγκεκριμένες προθεσμίες για κάθε μία από τις διαδικασίες που καθορίζει. Το χρονοδιάγραμμα παρουσιάζεται στον κάτωθι πίνακα:

| Άρθρο    | Περιγραφή της διαδικασίας                                | Ημερομηνία |
|----------|--|------------|
| Άρθρο 18 | Υιοθέτησης της Οδηγίας                                   | 26/11/2007 |
| Άρθρο 17 | Προσαρμογή της νομοθεσίας των Κρατών Μελών με την Οδηγία | 23/11/2009 |
| Άρθρο 3  | Διοικητικές ρυθμίσεις και μέτρα                          | 26/5/2010  |

|                 |  |            |
|-----------------|--|------------|
| Άρθρο 13        | Προθεσμία ολοκλήρωσης μεταβατικών μέτρων   | 31/12/2010 |
| Άρθρα 4, 5 & 10 | Ολοκλήρωση Προκαταρκτικής Αξιολόγησης Πλημμυρικού Κινδύνου(και δημοσιοποίησή τους στο κοινό)   | 22/12/2011 |
| Άρθρα 6 & 10    | Ολοκλήρωση Χαρτών Επικινδυνότητας και Χαρτών Κινδύνων Πλημμύρας(και δημοσιοποίησή τους στο κοινό)  | 22/12/2013 |
| Άρθρα 7 & 10    | Έκδοση Σχεδίων Διαχείρισης των Κινδύνων της Πλημμύρας  | 22/12/2015 |
| Άρθρο 9         | Ενημέρωση του κοινού και διαβούλευση   | 22/12/2015 |
| Άρθρα 14 & 10   | Επανεξέταση και επικαιροποίηση Προκαταρκτικής Αξιολόγησης Πλημμυρικού Κινδύνου-πιθανή επίδραση των κλιματικών αλλαγών στη συχνότητα πλημμυρών.       | 22/12/2018 |
| Άρθρα 14 & 10   | Επανεξέταση και επικαιροποίηση Χαρτών Επικινδυνότητας και Χαρτών Κινδύνων Πλημμύρας -πιθανή επίδραση των κλιματικών αλλαγών στη συχνότητα πλημμυρών. | 22/12/2019 |
| Άρθρα 14,7 & 10 | Επανεξέταση και επικαιροποίηση Σχεδίων Διαχείρισης των Κινδύνων της Πλημμύρας-πιθανή επίδραση των κλιματικών αλλαγών στη συχνότητα πλημμυρών.        | 22/12/2021 |

Πίνακας 2- 5: Χρονοδιάγραμμα της Οδηγίας 2007 / 60 / ΕΚ

#### **2.5.4. Υφιστάμενη κατάσταση της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ στην Ελλάδα**

Σύμφωνα με την σχετική σελίδα του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας [www.floods.yreka.gr](http://www.floods.yreka.gr) σε σχέση με την Οδηγία αυτή την στιγμή έχουν ολοκληρωθεί οι ακόλουθες δράσεις:

- Η Έκθεση Προκαταρκτικής Αξιολόγησης Κινδύνων Πλημμύρας (23-03-2012)
- Ο Προσδιορισμός των Ζωνών Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας της Έκθεσης Προκαταρκτικής Αξιολόγησης Κινδύνων Πλημμύρας (22-11-2012).
- Σε εξέλιξη βρίσκεται το έργο «Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Λεκάνης Απορροής π. Έβρου - Εφαρμογή της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ»
- Έχουν προκηρυχθεί από την Ειδική Γραμματεία Υδάτων πέντε μελέτες σε επίπεδο Υδατικού Διαμερίσματος, οι οποίες καλύπτουν το σύνολο της χώρας. Οι διαγωνισμοί για την ανάθεση των μελετών έχουν ολοκληρωθεί και βρίσκεται σε εξέλιξη η διαδικασία αξιολόγησης των τεχνικών και οικονομικών προσφορών.

Μελλοντικές δράσεις και μελέτες:

Ολοκλήρωση Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Λεκανών Απορροής Ποταμών στο σύνολο των δεκατεσσάρων ελληνικών Υδατικών Διαμερισμάτων.

## Κεφάλαιο 3. Το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS

### 3.1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η έννοια του υδραυλικού μοντέλου θα μπορούσε να αποδοθεί ως ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν τις υδρογεωλογικές διεργασίες που συμμετέχουν στη διαδικασία μετασχηματισμού των κατακρημνισμάτων σε απορροή. Τα μοντέλα αυτά εστιάζουν στην ποσοτική εκτίμηση υδραυλικών μεταβλητών είτε στο επίπεδο ενός μεμονωμένου γεγονότος, είτε στην εξέλιξη του ισοζυγίου των υδατικών πόρων μιας οντότητας, όπως για παράδειγμα μια λεκάνη απορροής.

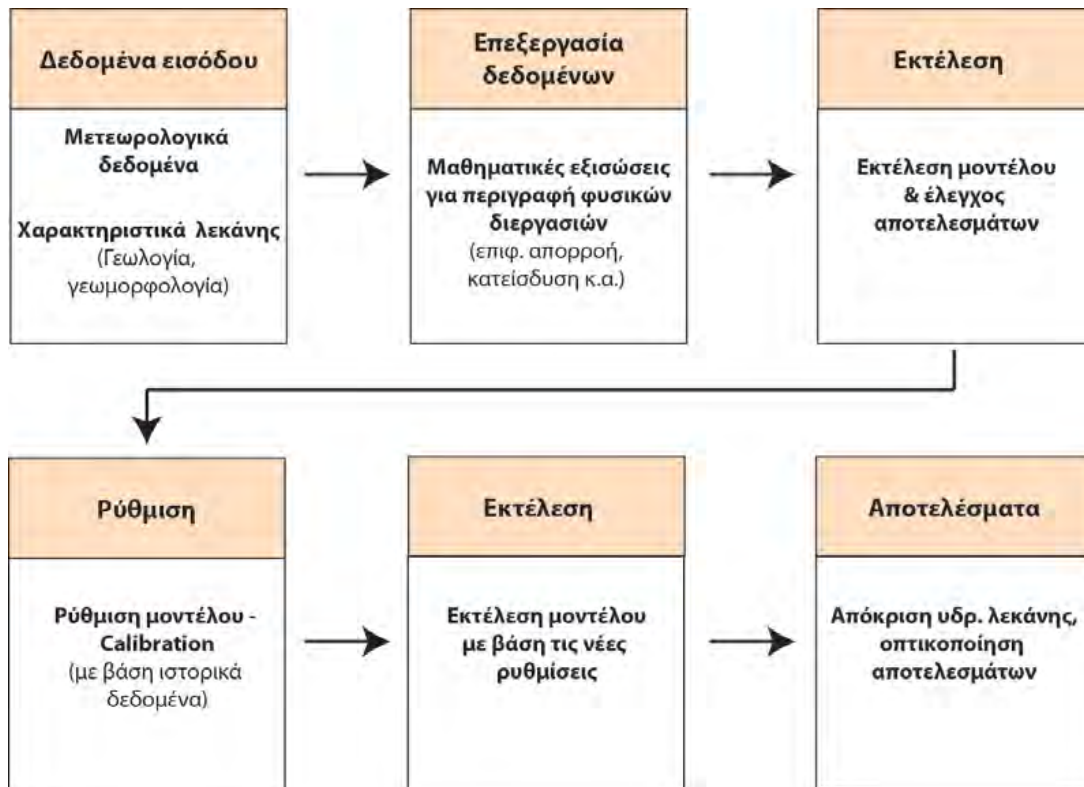
Στον τομέα του πλημμυρικού κινδύνου, η χρήση υδραυλικών μοντέλων αναλύει την υδραυλική λειτουργία των λεκανών. Η ανάπτυξη και η εφαρμογή των υδραυλικών μοντέλων ξεκινά από τον προσδιορισμό των παραμέτρων που εμπλέκονται και τη συλλογή των σχετικών δεδομένων.

Η πρώτη απόπειρα προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου αποδίδεται στον Thornthwaite (1948), που ανέπτυξε ένα μονοπαραμετρικό σύστημα μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου για την εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής υδρολογικών λεκανών. Αργότερα, οι Thornthwaite and Mather (1955) παρουσίασαν μια τροποποιημένη εκδοχή του, η οποία αποτέλεσε τη βάση όλων των μεταγενέστερων συστημάτων υδραυλικής μοντελοποίησης. Η εκτεταμένη χρήση των τελευταίων ξεκίνησε από τη δεκαετία του 1960, και εντατικοποιήθηκε καθώς ακολούθησε ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών εργαλείων (υπολογιστικών συστημάτων κλπ.). Έτσι έχουν αναπτυχθεί πλέον μοντέλα που αναφέρονται σε πλημμυρικά γεγονότα με πολύ μικρότερη χρονική βάση (ωριαία, ημερήσια) από ότι τα παλιότερα μοντέλα. Γενικά, όσο μικρότερη είναι η χρονική βάση για το εξεταζόμενο συμβάν τόσο πιο περίπλοκο και πολυπαραμετρικό απαιτείται να είναι το μοντέλο. Παραδείγματα σύγχρονων μοντέλων προσομοίωσης συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου είναι τα HEC-HMS, SWAT, WBUDG καθώς και άλλα.

Πολύ συχνά η πολυπλοκότητα των αλγορίθμων αυτών των μοντέλων είναι τέτοια, ώστε χρησιμοποιούνται γραφικές μέθοδοι για την εισαγωγή δεδομένων και για την

οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Σε αυτό σημαντικό ρόλο έχει διαδραματίσει η ανάπτυξη του GIS στο περιβάλλον του οποίου ενσωματώνονται πολύ συχνά τέτοια μοντέλα.

Γενικά, η δομή ενός υδραυλικού μοντέλου για τη προσομοίωση της απορροής μπορεί να περιγραφεί από το ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 3- 1: Δομή ενός υδραυλικού μοντέλου (Διακάκης, 2012)

### 3.2. Το μοντέλο HEC-RAS

Το HEC-RAS είναι μοντέλο υδραυλικής προσομοίωσης ροής, το οποίο προσομοιώνει τεχνητά ή φυσικά υδατορεύματα. Αναπτύχθηκε από το σώμα των μηχανικών των αμερικάνικων ενόπλων δυνάμεων. Το μοντέλο μπορεί να πραγματοποιήσει υπολογισμούς τόσο για συνθήκες μόνιμης όσο και μη μόνιμης ροής. Η γενική φιλοσοφία της ανάπτυξης της προσομοίωσης περιλαμβάνει την ακριβή αναπαράσταση του υποβάθρου (η οποία μπορεί να εισάγεται από λογισμικό GIS), τον προσδιορισμό των συνθηκών ροής, την εκτέλεση της προσομοίωσης και την γραφική παρουσίαση των

αποτελεσμάτων σε περιβάλλον GIS. Το μοντέλο έχει δυνατότητα να προσομοιώσει την στάθμη του νερού και τις ιδιότητες του, αλλά και την μεταφορά και απόθεση ιζημάτων.

Τα βασικά μέρη της πλατφόρμας είναι: το γραφικό περιβάλλον επικοινωνίας (GUI) με τον χρήστη, ο πυρήνας υδραυλικών αναλύσεων καθώς και δυνατότητες αποθήκευσης, διαχείρισης και επεξεργασίας δεδομένων εισόδου και εξόδου. Τα κύρια είδη αναλύσεων τα οποία παρέχονται από την πλατφόρμα είναι τα εξής:

1. Υπολογισμός του προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε συνθήκες μόνιμης ροής.
2. Υπολογισμοί σε συνθήκες μη μόνιμης ροής.
3. Υπολογισμοί απόθεσης φερτών υλών.
4. Υπολογισμοί σχετικά με τη ποιότητα του νερού

Η νέα έκδοση 5.0.1 του HEC-RAS (2016) είναι η πρώτη της σειράς που δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες για ανάλυση δισδιάστατης ροής, ειδικά για περιπτώσεις μη-μόνιμης ροής σε ανοικτούς αγωγούς και κατακλυζόμενες εκτάσεις. Αυτό έχει φέρει ορισμένες διαφοροποιήσεις σε σχέση με παλαιότερες εκδόσεις, και ειδικότερα στο θεωρητικό υπόβαθρο των υπολογισμών που εκτελούνται σε κάθε προσομοίωση.

### **3.3. Υπόβαθρο λειτουργίας HEC-RAS**

#### **3.3.1. Γενική περιγραφή της διαδικασίας λειτουργίας**

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη μη-μόνιμη ανομοιόμορφη ροή είναι οι Εξισώσεις Saint-Venant ή Εξισώσεις Αβαθών Υδάτων (Shallow Water Equations). Αυτές προκύπτουν από τις εξισώσεις Συνέχειας και Navier-Stokes, με ολοκλήρωση κατά βάθος. Οι Εξισώσεις Συνέχειας και Navier-Stokes περιγράφουν τη ροή με βάση την αρχή διατήρησης της μάζας και την αρχή διατήρησης της ορμής, όπως εκφράζονται από το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα. Για την ολοκλήρωση, γίνονται οι εξής παραδοχές:

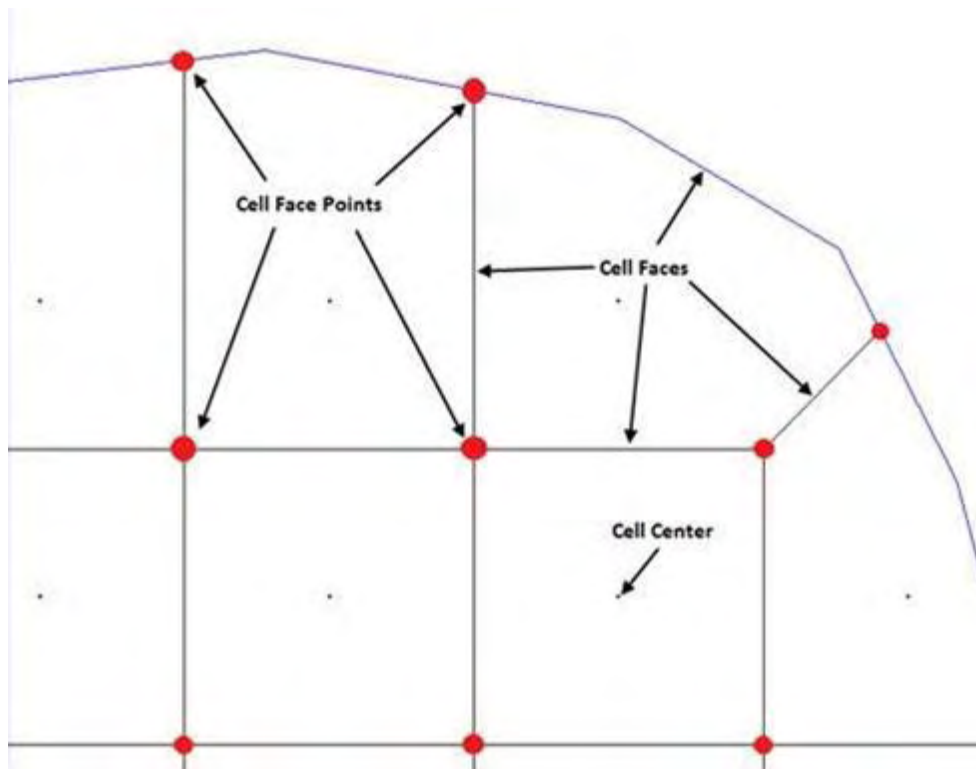
- Το νερό είναι ασυμπίεστο και ομογενές, και η πυκνότητά του παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη του χρόνου για όλο το πεδίο ροής.

- Θεωρείται πως η μεταβολή της ταχύτητας στην κατακόρυφη διεύθυνση είναι αμελητέα και άρα η μέση ταχύτητα αναλύεται σε δύο συνιστώσες κατά μήκος και εγκάρσια της ροής
- Η κατανομή των πιέσεων σε οποιοδήποτε κατακόρυφο επίπεδο είναι υδροστατική.
- Υπάρχει πολύ μικρή κλίση στον πυθμένα του αγωγού, και άρα η διαφορά στο βάθος ροής θεωρείται αμελητέα, είτε αυτό προσδιορίζεται κατακόρυφα, είτε κάθετα στον πυθμένα.
- Το πεδίο ροής είναι αμετάβλητο.
- Οι εισροές και οι εκροές είναι μηδενικές.
- Οι δυνάμεις ροής, είτε είναι εσωτερικές, είτε εξωτερικές, υπολογίζονται από ημιεμπειρικές εξισώσεις όπως σε συνθήκες ομοιόμορφης ροής.

Αρχικά, το λογισμικό υλοποιεί μια προεπεξεργασία του δισδιάστατου πλέγματος κελιών που δημιουργείται στο ψηφιακό μοντέλο που έχει εισαχθεί. Με αυτή την προεπεξεργασία δίνονται τιμές στους πίνακες υδραυλικών ιδιοτήτων που δημιουργούνται για κάθε κελί, και για κάθε πρόσωπο κελιού. Το κάθε πρόσωπο κελιού (cell face) λειτουργεί επί της ουσίας ως μια λεπτομερής διατομή.

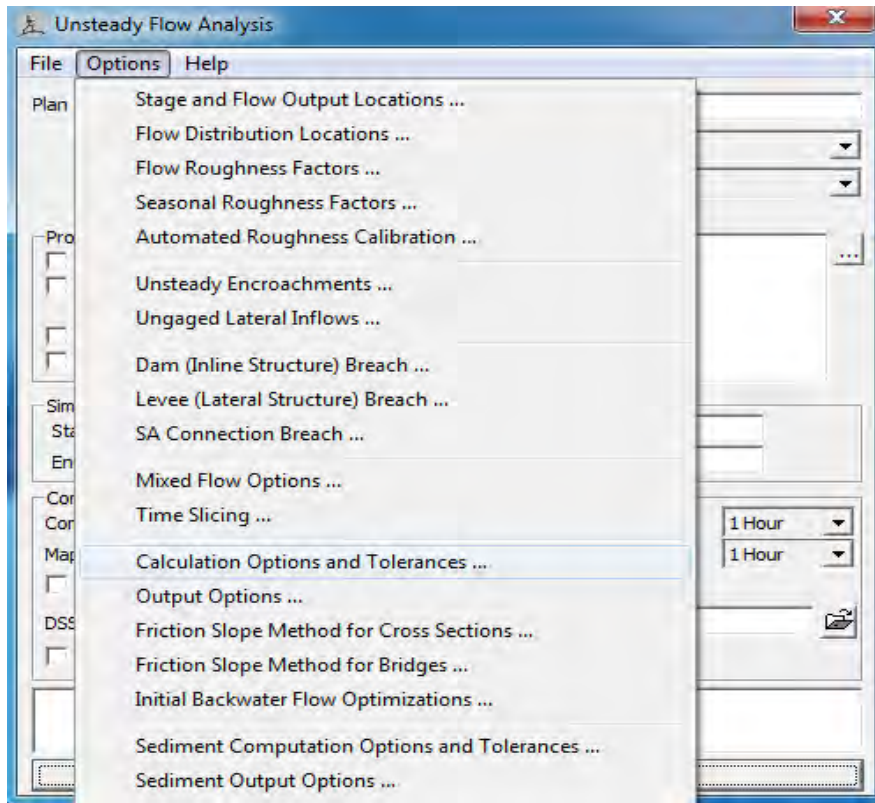
Μέσω αυτών ελέγχεται η ροή. Το κέντρο του κάθε κελιού είναι το σημείο στο οποίο υπολογίζεται η στάθμη της υδάτινης επιφάνειας, η τιμή της οποίας εκχωρείται για όλο το κελί. Στην εικόνα η οποία παρατίθεται στη συνέχεια, αναπαρίσταται η διάρθρωση των κελιών του πλέγματος. Γίνονται διακριτά τα κέντρα (cell center), οι πλευρές (cell faces) και τα σημεία των γωνιών (cell face points).



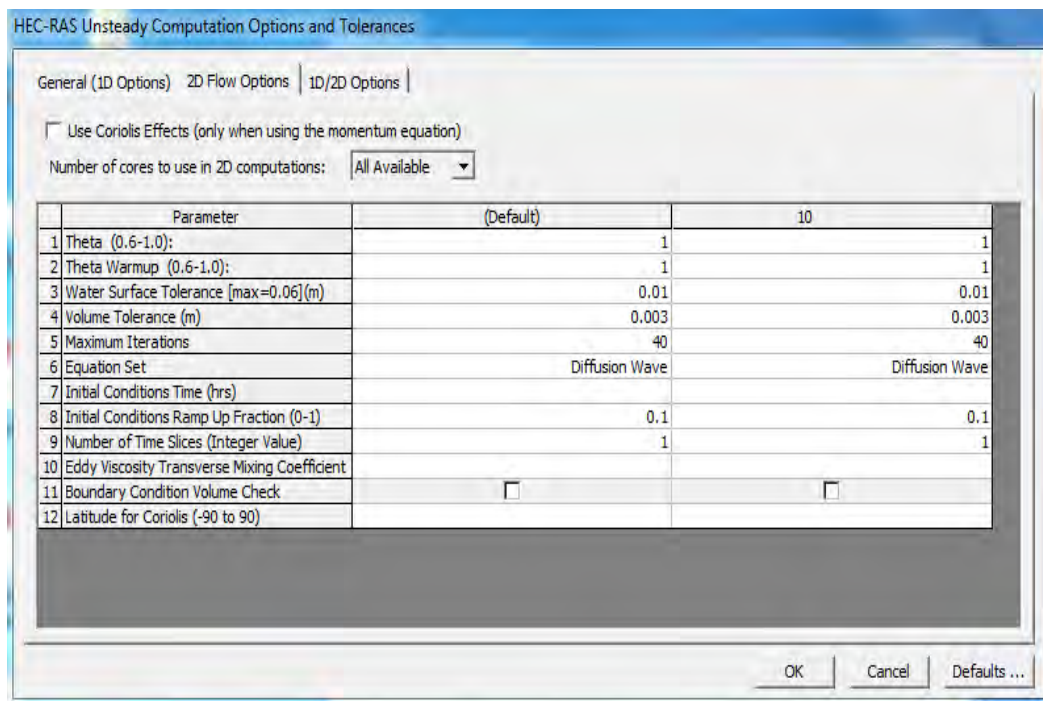


Σχήμα 3- 2: Κελιά διδιάστατου πλέγματος HEC-RAS 5.0.1 (Παλημέρης, 2017)

Το πρόγραμμα πραγματοποιεί τους υπολογισμούς μέσω ενός αλγορίθμου που επιλύει το σύνολο των εξισώσεων Saint Venant της προσομοίωσης. Η επιλογή των εξισώσεων Saint Venant είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ποιότητα των αποτελεσμάτων που θα παραχθούν. Η επιλογή του συνόλου εξισώσεων κύματος διάχυσης (Diffusion Wave Equations) συνίσταται σε προσομοίωση μόνιμης ροής ανοικτού αγωγού. Οι δημιουργοί του HEC-RAS παροτρύνουν τον μελετητή να κάνει χρήση της πλήρους εξίσωσης αβαθών υδάτων (Saint Venant) όταν πρόκειται για διδιάστατη ανάλυση μη μόνιμης ροής. Η επιλογή του συνόλου των εξισώσεων επίλυσης ("Diffusion Wave" ή "Full Momentum"), γίνεται στο παράθυρο εργασίας "Unsteady Flow Calculations and Tolerances", πριν την έναρξη της προσομοίωσης του κάθε σχεδίου (plan).



Σχήμα 3- 3: Παράθυρο διαλόγου στο HEC-RAS



Σχήμα 3- 4: Ρύθμιση υπολογιστικών παραμέτρων και ορίων ανοχής σφάλματος

Στο ίδιο παράθυρο εργασίας γίνονται και οι επιλογές διάφορων άλλων παραμέτρων (αριθμός επαναλήψεων, τιμή ανοχής σφάλματος) με σημασία στην εφαρμογή της προσομοίωσης. Είναι λοιπόν προφανές πως η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου από τις μεθόδους διόδευσης εξαρτάται από τον τύπο της ροής στο υδατόρευμα. (Αθανασίου, 2005)

| Μέθοδος                 | Τύπος ροής             |
|-------------------------|------------------------|
| Πλήρης δυναμική εξίσωση | Μη μόνιμη ανομοιόμορφη |
| Κύμα διαχύσεως          | Μόνιμη ανομοιόμορφη    |
| Κινηματικό κύμα         | Μόνιμη ομοιόμορφη      |

Πίνακας 3- 1: Αντιστοίχιση τύπου ροής με κατάλληλη μέθοδο διόδευσης

### 3.3.2. Εξισώσεις Αβαθών Υδάτων (Shallow Water Equations)

Οι εξισώσεις Navier-Stokes μπορούν να περιγράψουν την κίνηση ενός υγρού στις τρεις διαστάσεις. Στην πλημμυρική προσομοίωση γίνονται περαιτέρω απλοποιήσεις. Μια απλοποιημένη ομάδα εξισώσεων είναι οι Εξισώσεις Αβαθών Υδάτων (Shallow Water Equations). Με τις παραδοχές της ασυμπίεστης ροής, της ομοιόμορφης πυκνότητας και της υδροστατικής πίεσης που προαναφέρθηκαν, γίνεται η υπόθεση ότι η κλίμακα του κάθετου μήκους είναι πολύ μικρότερη της αντίστοιχης οριζόντιας κλίμακας. Αυτό έχει ως συνέπεια η κάθετη ταχύτητα να είναι μικρή και η πίεση υδροστατική και οδηγούμαστε σε διαφορεικές μορφές των Εξισώσεων Αβαθών Υδάτων (ΑΥ), που περιγράφονται στην πορεία.

Σε μερικές αβαθείς ροές η κλίση της βαροτροπικής πίεσης και η κλίση του πυθμένα είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν τα μέγιστα τις εξισώσεις που αφορούν την ορμή. Η εξίσωση της ορμής οπότε μπορεί να γραφθεί ως η δισδιάστατη μορφή της Εξίσωσης Διάχυσης Κύματος. Συνδυάζοντας αυτή την εξίσωση με την Εξίσωση Διατήρησης Μάζας δημιουργείται μια καινούρια ομάδα εξισώσεων η οποία περιγράφεται ως η Προσέγγιση των Εξισώσεων Αβαθών Υδάτων με την Εξίσωση Διάχυσης Κύματος (ΔΚΑΥ).

Τέλος, γίνεται η παραδοχή πως το ύψος της επιφάνειας του πυθμένα δίνονται από το  $z(x,y)$ , το βάθος νερού δίνεται από το  $h(x,y,t)$  και το ύψος της στάθμης του νερού είναι  $H(x,y,t)=z(x,y)+h(x,y,t)$

### 3.3.3. Υδραυλικές εξισώσεις

#### Διατήρηση μάζας

Υποθέτοντας πως η ροή είναι ασυμπίεστη η εξίσωση της διατήρησης μάζας είναι η εξής:

$$\frac{dH}{dt} + \frac{d(hu)}{dx} + \frac{d(hv)}{dy} + q = 0 \quad \text{Εξίσωση 3.1.}$$

Όπου  $t$  χρόνος,  $H$  η στάθμη της επιφάνειας του νερού,  $h$  το βάθος του νερού,  $u$  και  $v$  οι συνιστώσες της ταχύτητας κατά  $X$  και  $Y$  αντίστοιχα και  $q$  ένας συντελεστής που αφορά το βάθος ροής.

Ολοκληρώνοντας την πιο πάνω σχέση πάνω σε μια οριζόντια επιφάνεια και χρησιμοποιώντας το θεώρημα απόκλισης του Gauss η σχέση παίρνει την μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega + \iint_S V ndS + Q = 0 \quad \text{Εξίσωση 3.2.}$$

Το  $\Omega$  συμβολίζει τον όγκο που καταλαμβάνει το υγρό στις τρεις διαστάσεις, το  $S$  δίνει τις οριακές συνθήκες, το  $Q$  συμβολίζει την οποιαδήποτε μεταβολή στη ροή και  $t$  είναι ο χρόνος.

Ο πρώτος όρος της προηγούμενης εξίσωσης αναπαριστά τον όγκο  $\Omega$  μιας πολυγωνικής πεπερασμένης περιοχής. Αν υποθέσουμε ότι μπορεί να περιγράψει την στάθμη του νερού  $H$ , τότε μπορεί να διακριτοποιηθεί ως εξής:

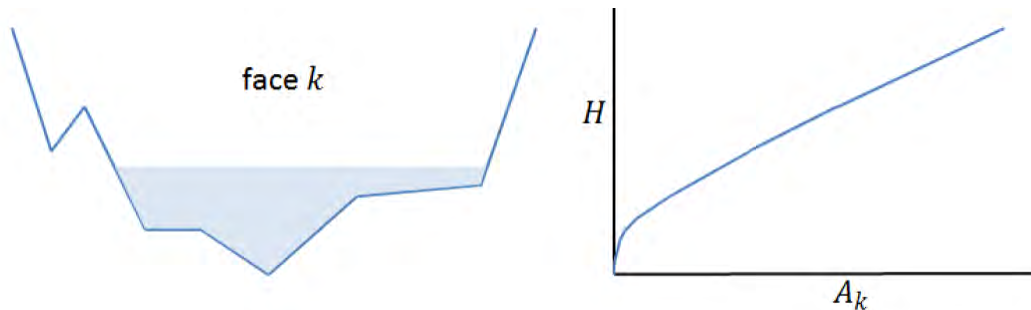
$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega = \frac{\Omega(H^{n+1}) - \Omega(H^n)}{\Delta t} \quad \text{Εξίσωση 3.3.}$$

Ενώ ο δεύτερος όρος διακριτοποιείται ως εξής:

$$\iint_S V \, n \, dS = \sum_k V_k * n_k * A_k \quad \text{Εξίσωση 3.4.}$$

Όπου  $V_k$ ,  $n_k$ , η μέση ταχύτητα και το μοναδιαίο κανονικό διάνυσμα στην επιφάνεια  $k$  ενός τυχαίου κελιού αντίστοιχα, και  $A_k$  είναι το εμβαδόν της επιφάνειας  $k$ .

Στην παρακάτω εικόνα, το αριστερό κομμάτι παρουσιάζει το προφίλ μιας τυχαίας επιφάνειας και το δεξιό κομμάτι δείχνει την αντίστοιχη συνάρτηση για προφίλ επιφάνειας  $A_k$  σε συνάρτηση με την στάθμη της επιφάνειας του νερού  $H$ .



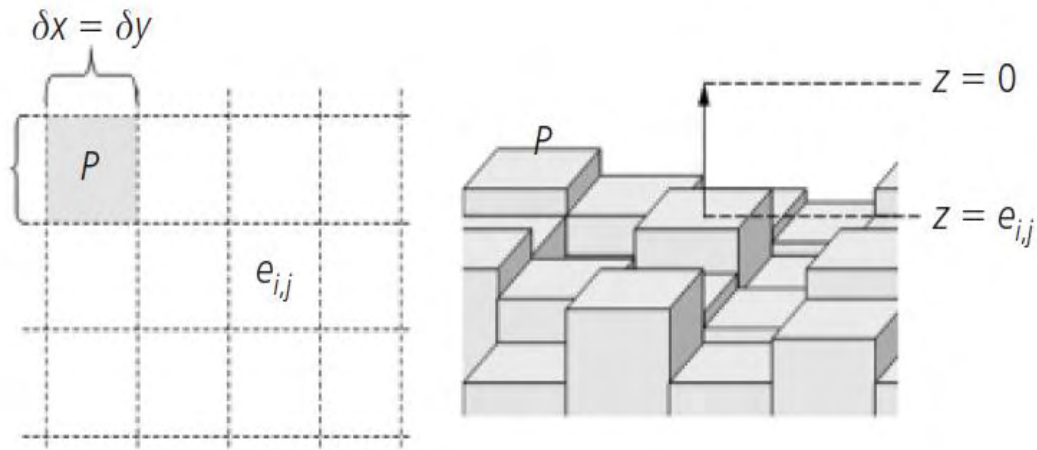
Σχήμα 3- 5: Προφίλ τυχαίας επιφάνειας και συνάρτηση αυτής σε σχέση με την στάθμη νερού  $H$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 3.3. και 3.4. στην 3.2. δημιουργείται η ακόλουθη μορφή της εξίσωσης διατήρησης της μάζας

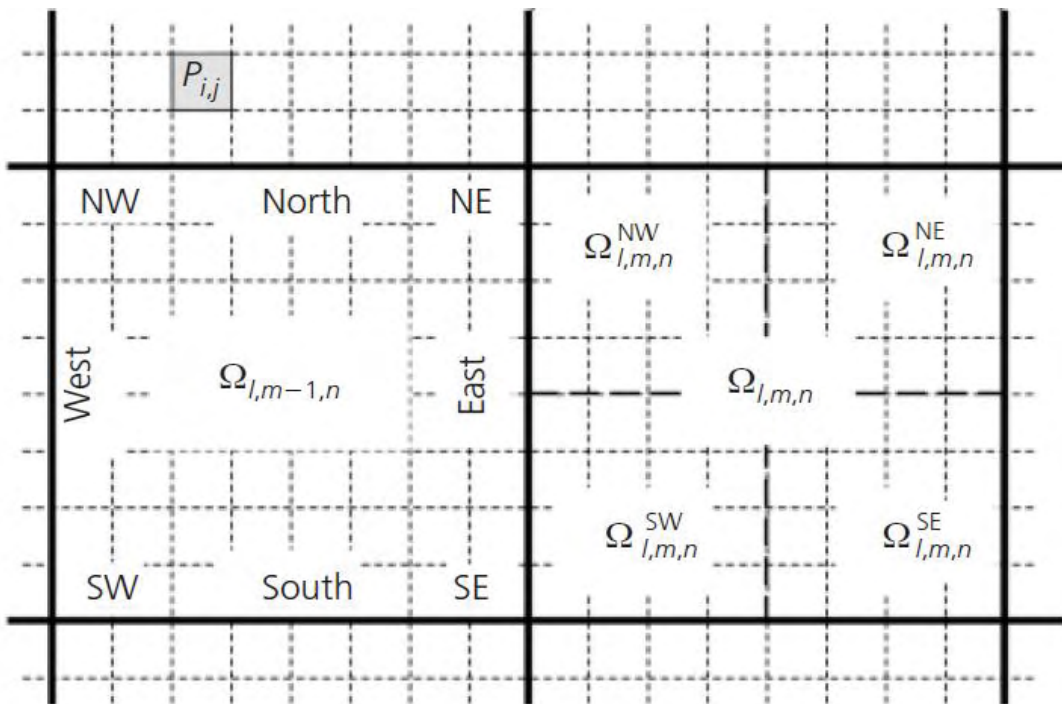
$$\frac{\Omega(H^{n+1}) - \Omega(H^n)}{\Delta t} = \sum_k V_k * n_k * A_k \quad \text{Εξίσωση 3.4.}$$

Αξίζει εδώ να σημειωθεί πως για την χρήση των παραπάνω εξισώσεων έχει γίνει η χρήση του βαθυμετρικού υποπλέγματος. Αυτό συνίσταται στην χρήση δύο πλεγμάτων με διαφορετική ανάλυση το καθένα. Το ένα πλέγμα περιέχει τις τιμές του πυθμένα δοσμένες σε ένα καρτεσιανό πλέγμα (fine grid) ή σε ένα ψηφιακό μοντέλου εδάφους. (Σχήμα 3-5) Σε ένα άλλο πλέγμα (Σχήμα 3-6), πιο τραχύ και τετραγωνικής μορφής (coarse grid),

περιέχονται πληροφορίες για τα επίπεδα του νερού και τις ταχύτητες. Ο συνδυασμός των δύο πλεγμάτων και των πληροφοριών που μας δίνουν οι πιο πάνω υδραυλικές εξισώσεις βοηθά στο να γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί.

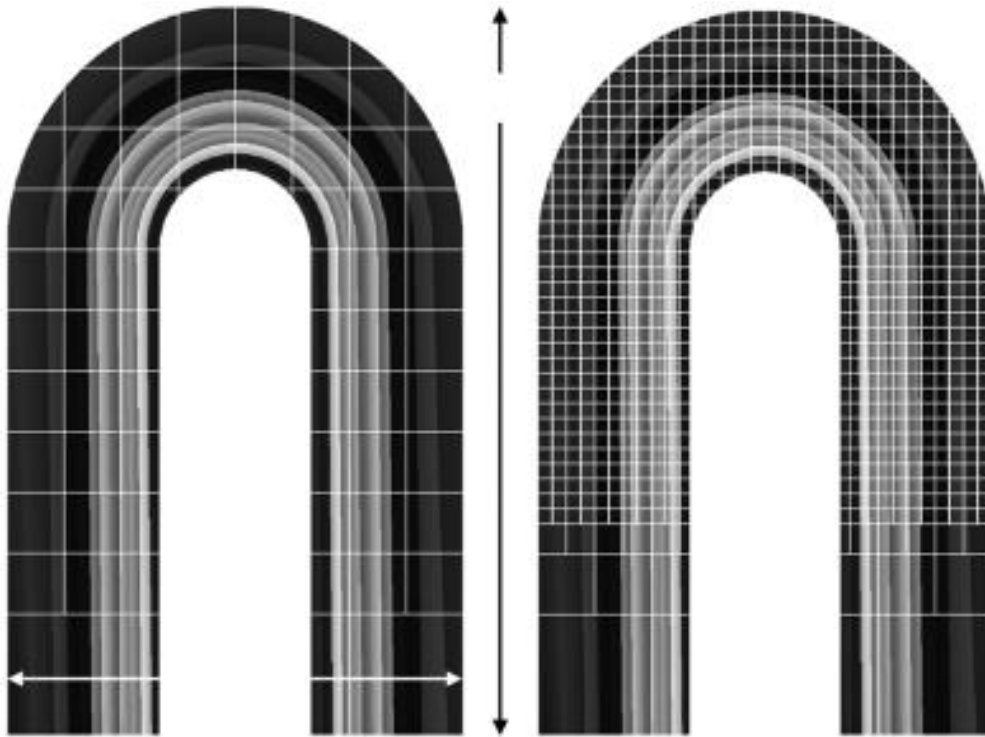


Σχήμα 3- 6: Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρου στάθμης, εκφρασμένο ως συνάρτηση βήματος(Stelling, 2012)



Σχήμα 3- 7: Τραχύ και τετραγωνικό πλέγμα(coarse grid)

Η μέθοδος που περιγράφεται εδώ βασίζεται σε πολύχρονες έρευνες. Με χρήση υποπλεγμάτων ή μη, με δομημένα ή ημιδομημένα πλέγματα έχει δοκιμαστεί σε πάρα πολλές εφαρμογές, τόσο θεωρητικές όσο και πρακτικές. Ας αναφερθούν χαρακτηριστικά οι δουλειές των Brunner et al (2016) , Kramer and Stelling (2008), Kernkamp et al. (2011). Παρακάτω ακολουθεί ένα παράδειγμα ενός τμήματος ποταμού με απλό πλέγμα και του ίδιου τμήματος με τραχύ και τετραγωνικό πλέγμα.



Σχήμα 3- 8: Απλό και τραχύ πλαίσιο σε τμήμα ποταμού(Stelling, 2012)

### Διατήρηση της ορμής

Γενικά η κάθετη ταχύτητα είναι πολύ μικρότερη της οριζόντιας. Επίσης έχει γίνει η παραδοχή πως η πίεση είναι σχεδόν υδροστατική. Επομένως η εξίσωση της διατήρησης της ορμής παίρνει την μορφή:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + V_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v = 0 \quad \text{Εξίσωση 3.5.a}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + V_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u = 0 \quad \text{Εξίσωση 3.5.b}$$

όπου  $u$  και  $v$  οι ταχύτητες κατά  $X$  και  $Y$  αντίστοιχα,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $V_t$  είναι ο συντελεστής του τυρβώδους ιξώδους (eddy viscosity) στην οριζόντια κατεύθυνση,  $c_f$  είναι ο συντελεστής κλίσης πυθμένας,  $R$  είναι η υδραυλική ακτίνα και  $f$  είναι η παράμετρος του φαινομένου Coriolis.

Το αριστερό τμήμα αντιπροσωπεύει τους επιταχυντικούς όρους της ορμής, ενώ το δεξιό τμήμα αντιπροσωπεύει τις εσωτερικές και εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στο υγρό. Εφαρμόζοντας διαστατική ανάλυση προκύπτει ότι όταν το βάθος νερού είναι πολύ μικρό η κλίση του πυθμένα αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την εξίσωση.

### Βαρυτικές δυνάμεις

Οι βαρυτικές δυνάμεις υπεισέρχονται στην εξίσωση με τον όρο  $g$ . Ο όρος  $g$  επηρεάζεται ελαφρώς από το γεωγραφικό πλάτος εξαιτίας της περιστροφής της Γης και αποδίδεται από την κάτωθι εξίσωση:

$$g = g_0 \left( \frac{1 + k \sin^2 \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \right) \quad \text{Εξίσωση 3.6.}$$

όπου  $\varphi$  είναι το γεωγραφικό πλάτος,  $g_0 = 9.7803267715 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$  είναι η βαρυτική επιτάχυνση στον ισημερινό,  $k = 0.0019318514$  είναι μια βαρυτική σταθερά και  $e = 0.0066943800$  είναι η εκκεντρότητα της Γης, υψωμένη στο τετράγωνο.

### Επιτάχυνση

Οι όροι που αφορούν την επιτάχυνση είναι αυτοί στο αριστερό κομμάτι των εξισώσεων.

### Τυρβώδες Ιξώδες

Η παράμετρος του ιξώδους παραμετροποιείται ως εξής:



$$V_t = Dh\sqrt{gRS}$$

Εξίσωση 3.7.

όπου D είναι μια αδιάστατη εμπειρική σταθερά, R η υδραυλική ακτίνα, S η κλίση της ενεργειακής γραμμής που δίνεται από την εξίσωση του Chezy και g η βαρυτική επιτάχυνση.

| <b>D</b>  | <b>Βαθμός Ανάμειξης</b> | <b>Γεωμετρία και επιφάνεια</b>             |
|-----------|-------------------------|--|
| 0.11-0.26 | Μικρός                  | Ευθύ κανάλι, ομαλή επιφάνεια               |
| 0.30-0.77 | Μεσαίος                 | Μικρές δίνες, μέτριας τραχύτητας επιφάνεια |
| 2.0-5.0   | Μεγάλος                 | Μεγάλες δίνες, τραχιά επιφάνεια            |

Πίνακας 3- 2: Τιμές της εμπειρικής σταθεράς D

#### Κλίση Πυθμένα

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Chezy, η κλίση του πυθμένα δίνεται από την σχέση:

$$C_f = \frac{g |V|}{C^2 R}$$

Εξίσωση 3.8.

Όπου g η βαρυτική επιτάχυνση,  $|V|$  είναι το μέγεθος του διανύσματος της ταχύτητας, C είναι η σταθερά του Chezy και R η υδραυλική ακτίνα.

#### Φαινόμενο Coriolis

Ο τελευταίος όρος της εξίσωσης διατήρησης ορμής αφορά το φαινόμενο Coriolis. Ο κάθετος όρος αμελείται εξαιτίας των υποθέσεων που έχουμε κάνει. Άρα η οριζόντια δύναμη που γίνεται αισθητή από οποιοδήποτε σωματίδιο στην στροφική κίνηση δίνεται από τον τύπο:

$$f=2\omega\sin\varphi$$

Εξίσωση 3.9.

όπου  $\omega=0.00007292115855306587 \text{ sec}^{-1}$  και  $\varphi$  το γεωγραφικό πλάτος.

Έως τώρα εξετάσαμε την εξίσωση της ορμής όσον αφορά το κομμάτι των υδραυλικών εξισώσεων. Από εδώ και πέρα θα δούμε την διατύπωση και την αριθμητική επίλυση της λύσης.

### 3.3.4. Αριθμητικές μέθοδοι

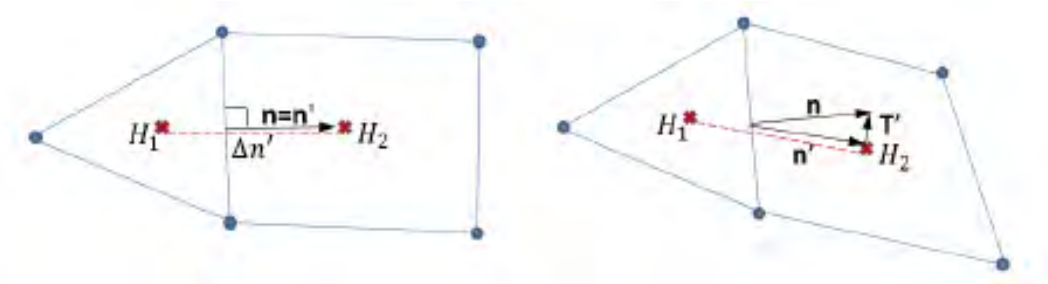
Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται μια υβριδική μέθοδος διακριτοποίησης συνδυάζοντας ουσιαστικά τις μεθόδους πεπερασμένων όγκων και πεπερασμένων διαφορών για να εκμεταλλευτεί την ορθογωνικότητα των πλαισίων.

#### Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών

Όταν η κατεύθυνση της υδραυλικής κλίσης είναι κάθετη ως προς την όψη του κελιού, όπως εμφανίζεται και στο Σχήμα 9, τότε το HEC-RAS χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για την εύρεση της κλίσης της συνάρτησης επιφάνειας, όπως παρουσιάζεται και στην εξίσωση 3.1 παρακάτω.

$$\nabla H = \frac{H_2 - H_1}{\Delta L} \pi r^2 \quad \text{Εξίσωση 3.10.}$$

Σε αυτήν την περίπτωση, τα κελιά έχουν ορθογωνική μορφή,  $H_2$  και  $H_1$  είναι τα υψόμετρα επιφανειών των κελιών 2 και 1 αντίστοιχα και  $\Delta L$  είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των κελιών 2 και 1.



Σχήμα 3- 9:Σύνθεση κελιών πλέγματος με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (Brunner, 2016).

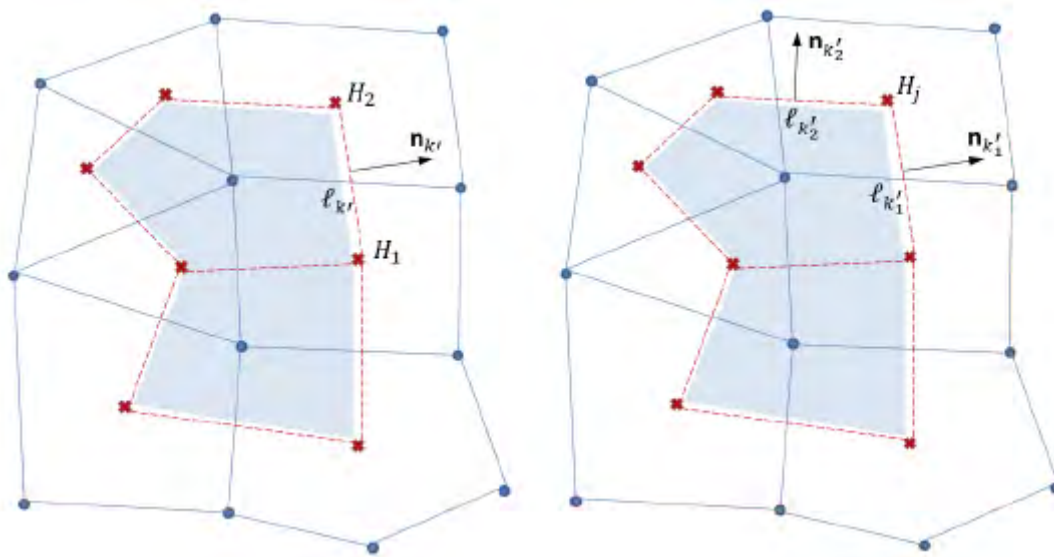
Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιείται στην αριθμητική επίλυση των Εξισώσεων Αβαθών Υδάτων (Ασαρίδης,2017)

### Μέθοδος των Πεπερασμένων Όγκων

Όταν η κατεύθυνση της υδραυλικής κλίσης δεν είναι κάθετη στην όψη του κελιού, όπως φαίνεται και στο σχήμα 10, τότε το HEC-RAS χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου. Εφαρμόζοντας το θεώρημα απόκλισης του Gauss μπορώ να πάρω την εξίσωση:

$$\nabla H \approx \frac{\oint H n dL}{A'} \quad \text{Εξίσωση 3.11.}$$

όπου L είναι το όριο του κελιού στην περιοχή που συμπίπτουν τα 2 πλέγματα, και A' είναι η περιοχή που συμπίπτουν τα 2 πλέγματα, δηλαδή η σκιασμένη γαλάζια περιοχή.



Σχήμα 3- 10: Σύνθεση κελιών πλέγματος με τη μέθοδο πεπερασμένων όγκων (Brunner, 2016).

Η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων χρησιμοποιείται στην αριθμητική επίλυση της Προσέγγιση των Εξισώσεων Αβαθών Υδάτων με την Εξίσωση Διάχυσης Κύματος.

### 3.3.5. Υπολογιστικό χρονικό βήμα-Σταθερότητα του μοντέλου

Ο τύπος βάσει των οποίων επιλέγεται το υπολογιστικό χρονικό βήμα  $\Delta t$ , είναι η συνθήκη Courant, και η τιμή που επιλέγεται πρέπει να ικανοποιεί την κάτωθι συνθήκη:

$$Cr = V_w \left( \frac{\Delta t}{\Delta x} \right) \leq 1, \quad \text{Εξίσωση 3.12.}$$

και άρα

$$\Delta t \leq \left( \frac{\Delta x}{V_w} \right) \quad \text{Εξίσωση 3.13.}$$

Όπου:

$\Delta x$ : η απόσταση μεταξύ των διατομών (m),

$V_w$ : η ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος (m/s).

Η ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος γενικά υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V_w = \frac{dQ}{dA} \quad \text{Εξίσωση 3.14.}$$

Όπου:

Q: η παροχή ( $m^3/s$ ),

A: η συνολική έκταση της περιοχής ( $m^2$ ).

Ο υπολογισμός της ταχύτητας του πλημμυρικού κύματος μπορεί να γίνει προσεγγιστικά, όπως σημειώνεται και στο εγχειρίδιο του προγράμματος όταν πολλαπλασιαστεί με έναν κατάλληλο αριθμό. Για φυσικούς αγωγούς λοιπόν, προκύπτει ως:

$$V_w = 1.5V \quad \text{Εξίσωση 3.15.}$$

όπου V η μέση ταχύτητα (m/s).

Πρακτικά, η τιμή του χρονικού βήματος μπορεί να επιλεγεί προσεγγιστικά και ως μία τιμή η οποία να ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\Delta t \leq \frac{Tr}{20} \quad \text{Εξίσωση 3.16.}$$

όπου Tr ο χρόνος από την αρχή του γεγονότος μέχρι τον χρόνο της παροχής αιχμής στο υδρογράφημα.

Επίσης, ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιώ πρέπει να εξετάζονται και οι παραπάνω συνθήκες για την ευστάθεια της ανάλυσης. Με την Προσέγγιση των Εξισώσεων Αβαθών Υδάτων με την Εξίσωση Διάχυσης Κύματος πρέπει να ελέγχεται η συνθήκη:

$$\frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2-4\theta} \quad \text{Εξίσωση 3.17.}$$

όπου  $\theta$  η χρονική στιγμή στο βήμα  $n+\theta$ , για το οποίο χρονικό βήμα υπολογίζεται με επαναληπτικό τρόπο η σχέση  $H = (1 - \theta)H_j^n + \theta H_j^{n+1}$  για το επίπεδο στάθμης του νερού  $H$ . Αξίζει να σημειωθεί πως για  $\frac{1}{2} < \theta \leq 1$  δεν απαιτείται έλεγχος της προηγούμενης συνθήκης. Με την μέθοδο των Εξισώσεων Αβαθών Υδάτων πρέπει να ελέγχεται η συνθήκη:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{2v} \quad \text{Εξίσωση 3.18.}$$

Η συνολική διαδικασία επίλυσης που εφαρμόζεται από το λογισμικό HEC-RAS 5.0.1. περιέχει μια επαναληπτική διαδικασία και αναλύεται στα εξής βήματα:

1. Εισαγωγή και προεπεξεργασία των δεδομένων εδάφους. Υπολογισμός των γεωμετρικών και βαθυμετρικών δεδομένων στα κελιά του δισδιάστατου πλέγματος.
2. Αρχή της διαδικασίας επίλυσης, με απόδοση των αρχικών τιμών  $H_0$  και  $u_0$  για τη χρονική στιγμή του υπολογιστικού βήματος  $n=0$ .

3. Καθορίζονται οι οριακές συνθήκες (εισάγεται η παροχή) για το επόμενο χρονικό βήμα  $n+1$  (2 sec στην παρούσα εργασία).
  4. Ορίζεται  $H_{n+1}=H_n$  για το ύψος της στάθμης της υδάτινης επιφάνειας κάθε κελιού, και  $u_{n+1}=u_n$  για την ταχύτητα ροής. Ο υπολογισμός του βάθους ροής γίνεται στο κέντρο του κελιού, ενώ της ταχύτητας στις πλευρές του κάθε κελιού.
  5. Υπολογίζονται ορισμένες παράμετροι σχετικές με το κινηματικό ιξώδες, οι οποίες παραμένουν σταθερές στη διάρκεια του υπολογιστικού χρόνου. Στην παρούσα εργασία, το συγκεκριμένο βήμα ουσιαστικά παραλείπεται, καθώς οι συγκεκριμένες παράμετροι έχουν αγνοηθεί.
  6. Υπολογίζεται ο “κατά-θ” μέσος όρος της στάθμης της υδάτινης επιφάνειας σε κάθε κελί,  $H=(1-\theta)H_{jn}+\theta H_j$   
 $n+1$ . Η τιμή του  $\theta$  έχει προκαθοριστεί ως  $\theta=1$ .
  7. Δημιουργείται το σύστημα εξισώσεων, όπως αναφέρθηκαν ανωτέρω.
  8. Επιλύονται οι εξισώσεις με τις δεδομένες οριακές συνθήκες και αποδίδουν μια τιμή για το  $H_{n+1}$ .
  9. Υπολογίζεται η ταχύτητα  $V_{n+1}$  σε κάθε κελί.
  10. Εάν η διαφορά μεταξύ των δύο τελευταίων υπολογισμένων τιμών του βάθους σε κάθε κελί είναι μεγαλύτερη από μια προκαθορισμένη τιμή ανοχής (tolerance) και δεν έχει γίνει ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων, επιστροφή στο βήμα 6. Σε άλλη περίπτωση συνεχίζεται η διαδικασία.
  11. Η υπολογισμένη τιμή γίνεται αποδεκτή.
  12. Αυξάνεται το υπολογιστικό βήμα  $n$ . Επιστροφή στο βήμα 3. Αν δεν υπάρχουν άλλα υπολογιστικά χρονικά βήματα του γεγονότος, η διαδικασία ολοκληρώνεται.
- Η τιμή του συντελεστή  $\theta$  ( $\cos\theta$ ), ορίστηκε ως  $\theta=1$ , λόγω της παραδοχής περί υδροστατικής πίεσης. Η παραδοχή αυτή εφαρμόζεται μόνο σε κανάλια με κλίση μικρότερη ή ίση με 1:10. Το  $\cos\theta$  σε τέτοιες περιπτώσεις ισούται με  $0,995\leq\cos\theta\leq 1$ . Ο Chow (1959) ορίζει πως επειδή η κλίση σε φυσικά κανάλια είναι συνήθως πολύ μικρότερη από 1:10, η κατά  $\cos\theta$  διόρθωση για το βάθος μπορεί να πάρει την τιμή της μονάδας ( $\theta=1$ )(Brunner, 2016).

### 3.4. Σύνδεση του HEC-RAS με το ArcGIS

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Geographical Information System, G.I.S.) αντιπροσωπεύουν ένα ισχυρό σύνολο εργαλείων για τη συλλογή, αποθήκευση, μετασχηματισμό και απεικόνιση χωρικών στοιχείων. Η εφαρμογή των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών στην Υδρολογία είναι πολύ διαδεδομένη, γιατί η χρήση τους δίνει μεγάλο πλεονέκτημα τόσο από την άποψη ακρίβειας, όσο και από την άποψη της ταχείας και γρήγορης επεξεργασίας.

Με δεδομένο το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, τα G.I.S. μπορούν να χρησιμεύσουν στη δημιουργία χαρτών με τις λεκάνες απορροής και το υδρογραφικό δίκτυο και να δώσουν πολύτιμες πληροφορίες, ως προς τη κλίση, τον προσανατολισμό του εδάφους, τη ροή, τη συγκέντρωση του νερού, τη μορφή και το χαρακτηρισμό του υδρογραφικού δικτύου κ.λπ.

Το λογισμικό ArcGIS της εταιρείας ESRI παρέχει την υποδομή για την κατασκευή χαρτών και την διαχείριση γεωγραφικών πληροφοριών. Περιλαμβάνει ένα πακέτο ανεξάρτητων λογισμικών: το ArcCatalog, το ArcGlobe, το ArcMap, το ArcHydro κ.α.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε η χρήση του προγράμματος ArcMap, με στόχο την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και την ορθή παρουσίαση τους. Οι χάρτες βάθους νερού και των ταχυτήτων παρήχθησαν σε αυτό το πρόγραμμα και συγκεκριμένα η έκδοση ArcMap 10.2.2. Το ArcMap, όπως υποδηλώνει και το όνομά του, αφορά σε εφαρμογές που σχετίζονται με χάρτες (Map). Ειδικότερα, το ArcMap παρέχει τη δυνατότητα να δημιουργηθούν χάρτες από επίπεδα χωρικής πληροφορίας, να αναλυθούν χωρικές σχέσεις και να επιλεγούν μέσα από αναζητήσεις, τόσο χωρικά όσο και μη χωρικά στοιχεία. Επιπλέον, μπορούν να σχεδιαστούν και να δημιουργηθούν διαφορετικές απεικονίσεις ενός χάρτη, αλλάζοντας χρώματα και συμβολισμούς. Συγκεκριμένα, λοιπόν, το ArcMap αποτελεί την κεντρική εφαρμογή για την εισαγωγή, διαχείριση, ανάλυση και παρουσίαση των χωρικών δεδομένων.

## **Κεφάλαιο 4. Περιοχή μελέτης**

### **4.1. Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναλυτική περιγραφή της περιοχής μελέτης. Η περιοχή μελέτης επιλέχθηκε η λεκάνη απορροής του χειμάρρου Ξηριά, της αστικής περιοχής του πολεοδομικού συγκροτήματος Βόλου-Νέας Ιώνιας, του νομού Μαγνησίας. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στα γεωγραφικά, πληθυσμιακά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής. Ακόμη, αναλύεται το κλίμα της περιοχής και παρουσιάζονται χάρτες χρήσεων γης

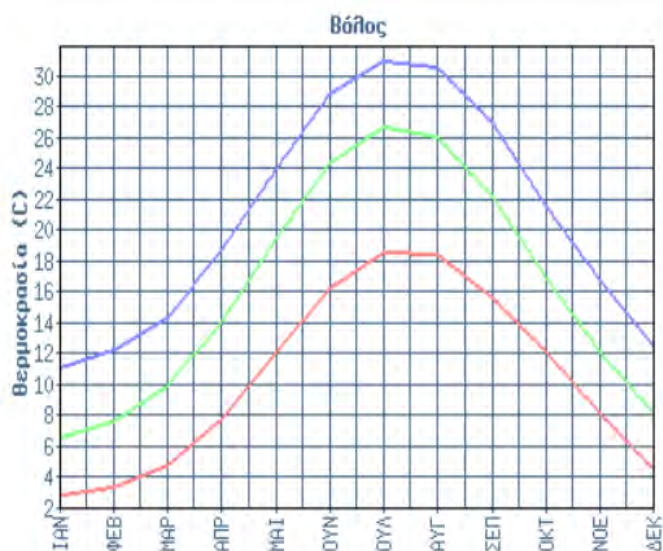
### **4.2. Η ευρύτερη περιοχή του Βόλου**

Η πόλη του Βόλου αποτελεί την πρωτεύουσα του Νομού Μαγνησίας και ως πολεοδομικό συγκρότημα ανήκει στα 7 μεγαλύτερα της Ελλάδας με πληθυσμό που ξεπερνά τις 120.000 κατοίκους(125.248 κάτοικοι, ΕΛΣΤΑΤ 2011). Το πολεοδομικό συγκρότημα Βόλου-Νέας Ιωνίας βρίσκεται στον Παγασητικό Κόλπο, κάτω από τον ορεινό όγκο του Πηλίου σε νοτιοδυτική κατεύθυνση, σε μικρή απόσταση από τον κύριο οδικό άξονα της χώρας, σε απόσταση 330 χλμ. από την πρωτεύουσα Αθήνα και 214 χλμ. από τη Θεσσαλονίκη, τα 2 μεγαλύτερα ελληνικά αστικά κέντρα. Η πόλη του Βόλου χαρακτηρίζεται από έντονες αστικές λειτουργίες, σημαντική παρουσία της βιομηχανίας της μεταποίησης και του τουρισμού, αλλά και από ένα αξιοσημείωτο αριθμό νέων ανθρώπων εξαιτίας της ύπαρξης των τμημάτων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

### **4.3. Κλιματικές συνθήκες**

Το κλίμα της περιοχής του Βόλου έχει τα χαρακτηριστικά του μεσογειακού κλίματος των παραθαλάσσιων περιοχών της Θεσσαλίας με ετήσιες διαφορές μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας άνω των 20 βαθμών Κελσίου. Παρακάτω ακολουθούν διαγράμματα τα οποία περιγράφουν την θερμοκρασία και την βροχόπτωση.



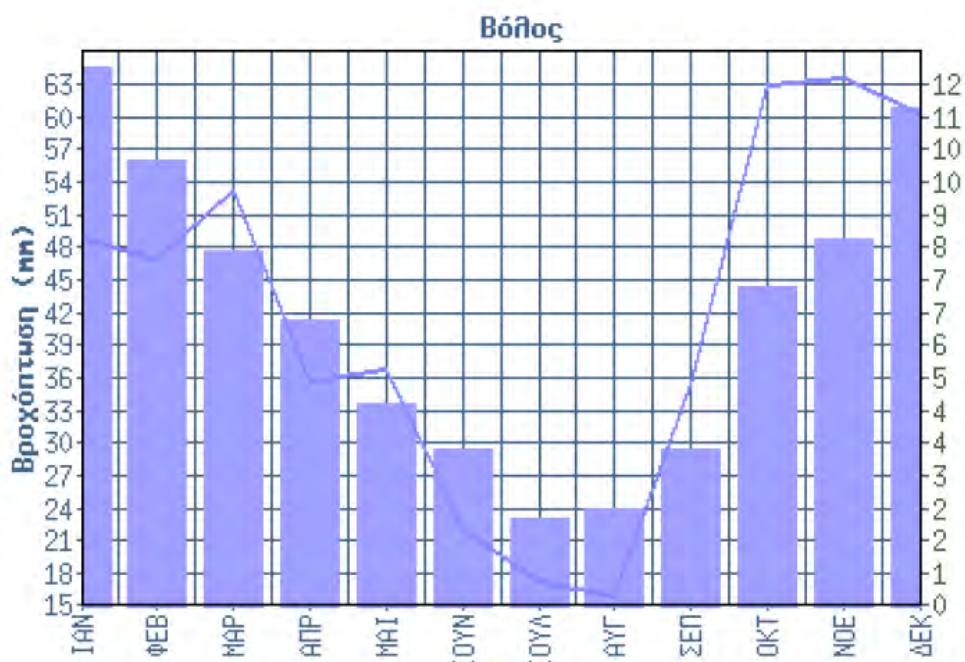


- ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ
- ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ
- ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Σχήμα 4- 1: Γραφική κατανομή μέσης, μέσης μέγιστης και μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας, Βόλος 1956-2002 (Τσαγκας,2014)

|                                   |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 1ο Εξάμηνο                        | ΙΑΝ  | ΦΕΒ  | ΜΑΡ  | ΑΠΡ  | ΜΑΙ  | ΙΟΥΝ |
| Ελάχιστη Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία | 2.8  | 3.4  | 4.8  | 7.7  | 12.1 | 16.3 |
| Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία          | 6.6  | 7.6  | 9.9  | 14.1 | 19.5 | 24.5 |
| Μέγιστη Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία  | 11.1 | 12.3 | 14.3 | 18.8 | 24.0 | 29.0 |
| 2ο Εξάμηνο                        | ΙΟΥΛ | ΑΥΓ  | ΣΕΠ  | ΟΚΤ  | ΝΟΕ  | ΔΕΚ  |
| Ελάχιστη Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία | 18.6 | 18.5 | 15.7 | 12.1 | 8.2  | 4.5  |
| Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία          | 26.8 | 26.1 | 22.2 | 16.9 | 12.1 | 8.2  |
| Μέγιστη Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία  | 31.0 | 30.7 | 27.0 | 21.6 | 16.8 | 12.6 |

Σχήμα 4- 2: Αριθμητική κατανομή μέσης, μέσης μέγιστης και μέσης ελάχιστης θερμοκρασίας, Βόλος 1956-2002 (Τσαγκας,2014)



Σχήμα 4- 3: Γραφική απεικόνιση του μέσου μηνιαίου ύψους κατακρημνισμάτων και συνολικές μέρες βροχής, Βόλος 1956-2002 (Τσάγκας,2014)

|                         |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 1ο Εξάμηνο              | ΙΑΝ  | ΦΕΒ  | ΜΑΡ  | ΑΠΡ  | ΜΑΙ  | ΙΟΥΝ |
| Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση | 49.0 | 46.9 | 53.3 | 35.8 | 36.8 | 22.1 |
| Συνολικές Μέρες Βροχής  | 12.3 | 10.2 | 8.1  | 6.5  | 4.6  | 3.6  |
| 2ο Εξάμηνο              | ΙΟΥΛ | ΑΥΓ  | ΣΕΠ  | ΟΚΤ  | ΝΟΕ  | ΔΕΚ  |
| Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση | 17.4 | 15.9 | 35.6 | 63.1 | 63.6 | 60.5 |
| Συνολικές Μέρες Βροχής  | 2.0  | 2.2  | 3.6  | 7.3  | 8.4  | 11.4 |

Σχήμα 4- 4: Αριθμητική έκφραση του μέσου μηνιαίου ύψους κατακρημνισμάτων και συνολικές μέρες βροχής, Βόλος 1956-2002 (Τσάγκας,2014)

Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 16 ως 17°C. Το ετήσιο θερμομετρικό εύρος ξεπερνά τους 22°C. Οι πιο θερμοί μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος και οι πιο ψυχροί ο Ιανουάριος, ο Φεβρουάριος και ο Δεκέμβριος. Οι παγετοί είναι συχνό και εμφανίζονται κατά την χειμερινή περίοδο. Το μέσο ετήσιο ύψος κατακρημνισμάτων στο Βόλο, και κατ' επέκταση στον χειμάρρο Ξηριά, ανέρχεται σε 499,7mm. Ο ξηρότερος μήνας είναι ο Αύγουστος (15,9mm) ενώ αυτός με το μεγαλύτερο ύψος βροχών είναι ο Νοέμβριος (63,6mm)

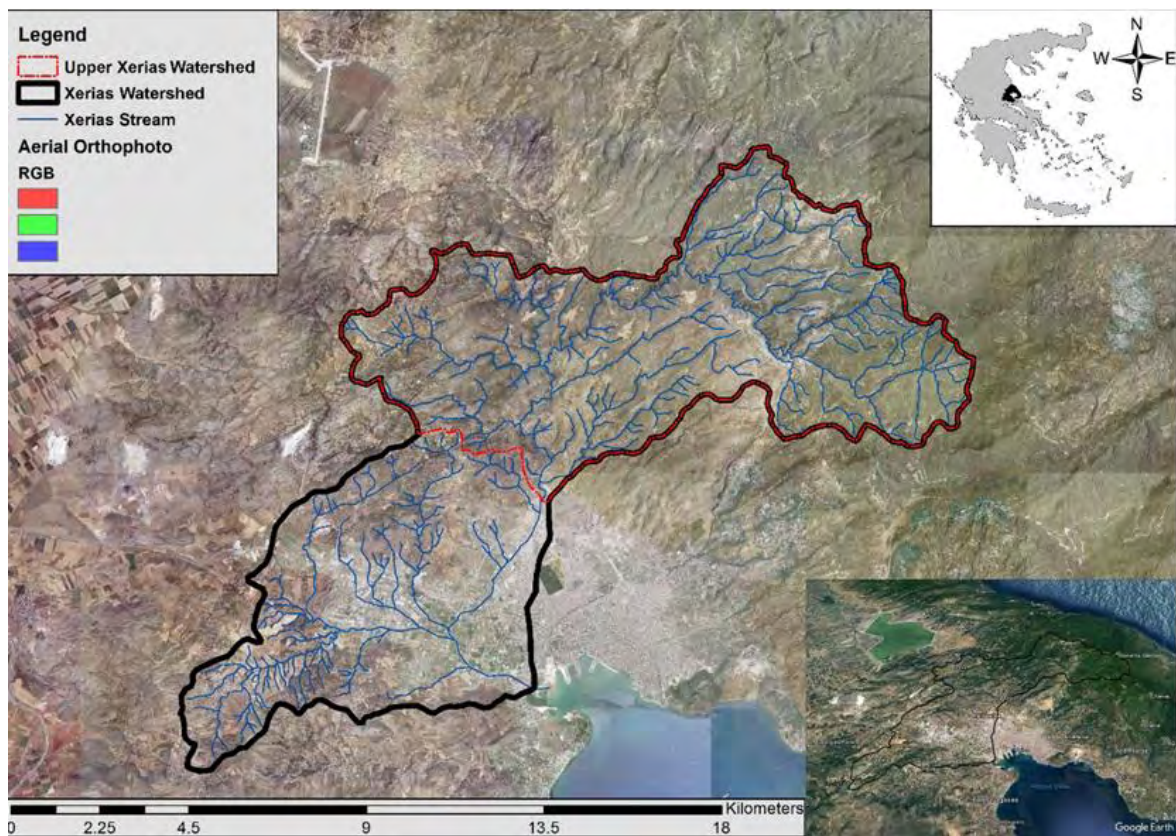
#### **4.4. Ξηριάς: Γεωμορφολογία-Γεωγραφία**

Ο Ξηριάς είναι ποταμός στο δήμο του Βόλου. Η ευρύτερη περιοχή μελέτης διαθέτει ένα πυκνό υδρογραφικό δίκτυο, ένα μεγάλο τμήμα του οποίου αποστραγγίζει μέρος της νοτιοδυτικής πλευράς του Πηλίου και εκβάλλει στον Παγασητικό Κόλπο. Η ονομασία Ξηριάς ,που είναι μια συνηθισμένη για διάφορα ποτάμια και χειμάρρους ανά τον ελλαδικό χώρο, προκύπτει από το γεγονός ότι το ποτάμι έχει νερό μόνον μετά από νεροποντή και τους χειμερινούς μήνες όταν έχουν προηγηθεί χιονοπτώσεις.

Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης, είναι κυρίως χειμαρρώδους ροής. Πιο συγκεκριμένα τα κύρια ρέματα είναι εποχιακής ροής, τροφοδοτούμενα εν μέρει και από πηγές της ορεινής ζώνης, ενώ οι μικρότεροι κλάδοι είναι περιστασιακής ροής και ενεργοποιούνται μόνο μετά από εκδήλωση βροχοπτώσεων

Το μεγαλύτερο μήκος του υδατορεύματος βρίσκεται κυρίως σε περιοχές οι οποίες χαρακτηρίζονται από άναρχη δόμηση και κάποια σχετική παρουσία γεωργικών καλλιεργειών. Ωστόσο διασταυρώνεται με τον αστικό ιστό σε ένα τμήμα του στα βορειοδυτικά του δήμου Ν. Ιώνιας καθώς και στο σημείο που εκβάλλει στην οδική γέφυρα της Λ. Αθηνών. Ουσιαστικά ο Ξηριάς αποτελεί το φυσικό όριο της όποιας οικιστικής ανάπτυξης μπορεί να έχει το αστικό συγκρότημα του Βόλου.

Η κατάντη λεκάνη απορροής του χειμάρρου Ξηριά στην οποία εκτελείται η υδραυλική προσομοίωση περιλαμβάνει τέσσερις κόμβους και τρεις κλάδους υδρογραφικού δικτύου.



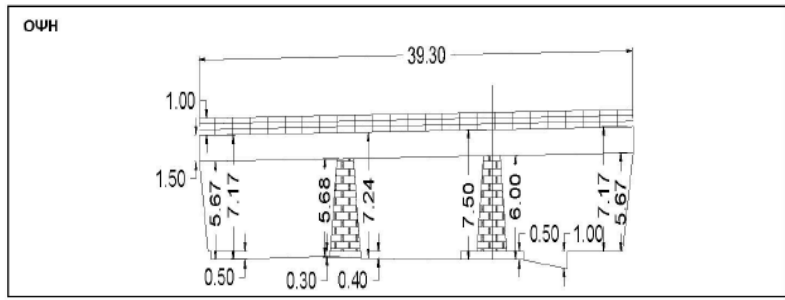
Σχήμα 4-5: Λεκάνη απορροής Ξηριά (Ραφαίοπου, 2017)

| Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκάνης απορροής Ξηριάς Βόλου |        |                                     |       |
|---|--------|-------------------------------------|-------|
| Έκταση (km <sup>2</sup> )                           | 116.81 | Υψόμετρο εξόδου (m)                 | 0.0   |
| Αδιαπέρατη επιφάνεια (%)                            | 0.00   | Χρόνος συγκέντρωσης (h)             | 5.09  |
| Μέγιστο μήκος ροής (km)                             | 29.75  | Διάρκεια βροχόπτωσης σχεδιασμού (h) | 24.00 |
| Μέσο υψόμετρο (m)                                   | 465.4  | Χρονικό βήμα (h)                    | 0.25  |

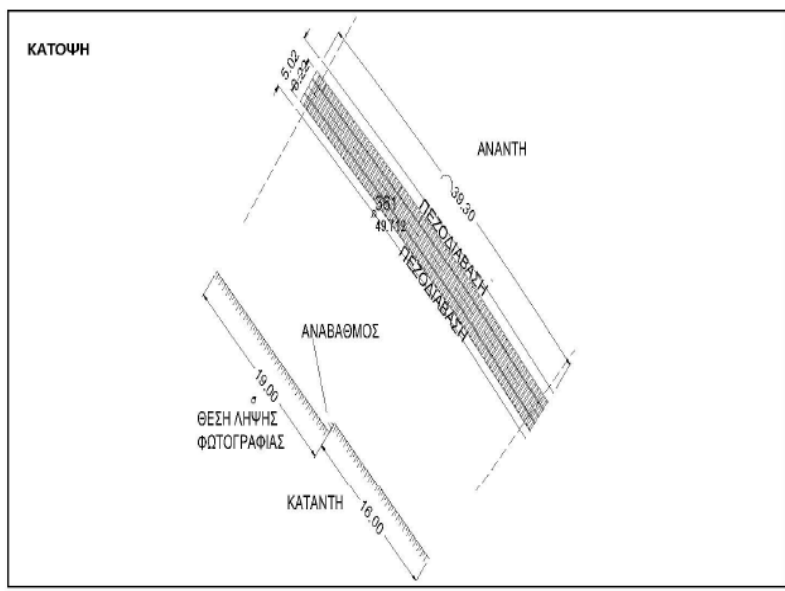
Σχήμα 4- 6: Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκάνης απορροής Ξηριά

Η συνολική λεκάνη απορροής του χειμάρρου Ξηριά έχει έκταση 116,81 km<sup>2</sup> με σημαντικότερο συμβάλλοντα χειμάρρο τον Σεσκουλιώτη. Η περιοχή μελέτης αποτελείται από το κατώτερο τμήμα του ποταμού και συγκεκριμένα τα τελευταία 4,350 km, από την οδική γέφυρα Λεωφόρου Λαρίσης ως τις εκβολές του ποταμού. Στο κομμάτι αυτό κατά μήκος του υδατορεύματος συναντώνται 9 γέφυρες ή οχετοί, οι οποίες για λόγους ακριβείας έχουν ψηφιοποιηθεί και συμπεριληφθεί στην υδραυλική προσομοίωση.

|                                  |             |         |  |
|----------------------------------|-------------|---------|--|
| ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΡΓΟ                     |             | ΓΕΦΥΡΕΣ |  |
| ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ: ΓΕΦΥΡΑ (BR)           |             |         |  |
| ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΡΓΟΥ: BR_46             |             |         |  |
| ΠΕΡΙΟΧΗ: GR08_ΒΟΛΟΣ              |             |         |  |
| ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑ: ΞΗΡΙΑΣ               |             |         |  |
| ΗΜ/ΝΙΑ ΑΠΟΤ.: 16/02/2016         |             |         |  |
| ΟΜΑΔΑ ΑΠΟΤ.: ΧΡΗΣΤΟΣ ΣΑΛΟΓΙΑΝΝΟΣ |             |         |  |
| ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ     |             | ΣΗΜΕΙΟ  |  |
| X                                | 407289,914  | 361     |  |
| Y                                | 4360132,898 |         |  |
| Z                                | 49,712      |         |  |



|   |  |
|---|--|
| ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ                   |  |
| ΤΥΠΟΣ                                     |  |
| ΥΛΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ                          | ΧΑΛΥΒΑΣ και ΠΕΤΡΑ                      |
| ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (ΜκΠ)                          |  |
| ΚΑΘΑΡΟ ΠΛΑΤΟΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ/ΩΝ               | ΑΝΑΝΤΗ:<br>ΚΑΤΑΝΤΗ:                    |
| ΥΨΟΜ. ΠΥΘΜ. ΚΟΙΤΗΣ:                       |  |
| ΥΨΟΜ. ΔΙΑΦΟΡΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ / ΑΡΧΗ ΓΕΦΥΡΑΣ |  |
| ΤΥΠΟΣ ΡΟΗΣ                                | ΣΤΑΘΕΡΗ / ΜΗ ΣΤΑΘΕΡΗ                   |
| ΣΤΑΘΜΗ ΝΕΡΟΥ                              |  |
| ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ                            |  |
| ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ                            |  |
| ΥΠΑΡΞΗ ΕΜΠΟΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΡΟΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ:       | ΝΑΙ / ΟΧΙ                              |
| ΤΥΠΟΣ ΟΔΟΣΤ/ΤΟΣ:                          | ΠΛΑΤΟΣ ΟΔΟΣΤ/ΤΟΣ:                      |
| ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΑ ΟΔΟΣ/ΤΟΣ:                   | ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΟΔΟΣ/ΤΟΣ:                     |
| ΥΨΟΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΩΝ:                      | 1,00 m                                 |
| ΠΑΧΟΣ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ:                      |  |
| ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ:                              | P2160096, P2160097, P2160098, P2160099 |



Σχήμα 4- 7: Παράδειγμα αποτύπωσης τεχνικού έργου γέφυρας

Επίσης έχουν συμπεριληφθεί σκυροδετημένες περιοχές πυθμένα κοντά στις γέφυρες, καθώς και κάποιοι αναβαθμοί στο ύψος της οδικής γέφυρας Λ. Λαρίσης. Στα πρηνή του υδατορεύματος παρατηρείται μέτριας έντασης βλάστηση από τη θέση Γέφυρα Λ. Λαρίσης έως τη θέση της συμβολής με τον Σεσκουλιώτη, ενώ υπάρχει αραιή έως καθόλου βλάστηση από τη θέση της συμβολής με τον Σεσκουλιώτη έως την εκβολή του ποταμού. Άλλωστε σε αυτό το κομμάτι του χειμάρρου η κοίτη είναι πλήρως διευθετημένη. Στην θέση 1.455 km, από την αρχή της υδραυλικής προσομοίωσης, ο Ξηριάς διασταυρώνεται με τον χείμαρρο Σεσκουλιώτη, όπως έχει προαναφερθεί. Για την ακριβέστερη προσομοίωση συμπεριλήφθηκε η συμβολή του ποταμού Ξηριά με τον χείμαρρο Σεσκουλιώτη.



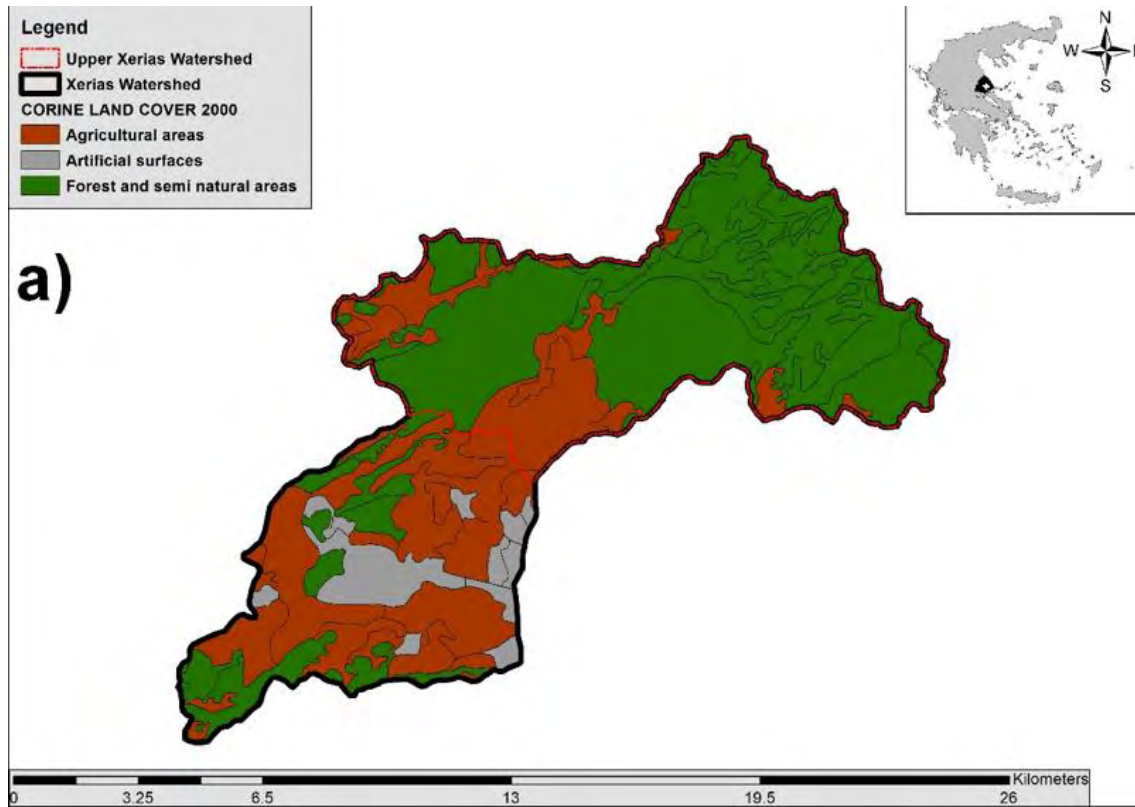
Σχήμα 4- 8: Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής μελέτης. (Μούκος-Παρασκευάς,2013)

#### 4.5. Χρήσεις γης

Γενικά, οι χρήσεις γης εντός της περιοχής μελέτης κατανέμονται ως εξής: το μεγαλύτερο ποσοστό, 57%, αφορά δάση και φυσικές περιοχές, το 36 % καταλαμβάνεται από γεωργικές εκτάσεις το υπόλοιπο 7% κατανέμεται σε αδιαπέρατες επιφάνειες και γυμνά εδάφη, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-9.

Στην διαδικασία της προσομοίωσης αποδίδονται συντελεστές τραχύτητας για τις διάφορες χρήσεις γης, με σκοπό να αναπτυχθεί ένα ψηφιακό υπόβαθρο το οποίο εισάγεται στο HEC-RAS. Η κατηγοριοποίηση των χρήσεων γης έγινε σύμφωνα με στοιχεία του προγράμματος Corine 2000 της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Το κύριο υδατόρευμα χωρίστηκε σε τρεις κλάδους, όπου για κάθε περιοχή κάθε κλάδου αποδόθηκε διαφορετικός συντελεστής τραχύτητας. Ακόμη, τα οικιστικά τετράγωνα, οι διάφοροι κηπίσκοι, οι γεωργικές εκτάσεις, οι περιοχές με δίκτυα μεταφορών που καλύπτουν μέρος

της περιοχής μελέτης, προσομοιώθηκαν λαμβάνοντας ξεχωριστή τιμή συντελεστή τραχύτητας. Η διαδικασία επιλογής κατάλληλου συντελεστή τραχύτητας ανάλογα με το υφιστάμενο σενάριο περιγράφεται στο κεφάλαιο 5.6 πιο αναλυτικά.



Σχήμα 4- 9: Χάρτης χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής του Ξηριά (Ραφαίοπου, 2017)

## **Κεφάλαιο 5. Προετοιμασία της Προσομοίωσης**

### **5.1. Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία υδραυλικής προσομοίωσης. Αναλυτικότερα τα βήματα που συνθέτουν τη διαδικασία υδραυλικής προσομοίωσης συνοψίζονται ως εξής:

1. Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων
2. Ρύθμιση παραμέτρων και οριακών συνθηκών
- 3.εκτέλεση υδραυλικών υπολογισμών στο HEC-RAS
4. Εξαγωγή αποτελεσμάτων στο HEC-GeoRAS
5. Σύνθεση χαρτών ταχυτήτων
6. Σύνθεση χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης

### **5.2. Επίπεδα εδάφους**

Ως αρχικό δεδομένο, για την υδραυλική προσομοίωση του ποταμού, διατίθεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM). Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους αναπαρίσταται υπό μορφή δικτύου ακανόνιστων τριγώνων (Triangulated Irregular Networks-TINs), το οποίο σχηματίζεται από χαρακτηριστικά σημεία της επιφάνειας του εδάφους (π.χ. κορυφογραμμές, σημεία αλλαγής της κλίσης), τα οποία αποθηκεύονται ως ένα σύνολο από συντεταγμένες X,Y, Z. Σε αυτό εκτελείται μια διαδικασία προεπεξεργασίας από το ίδιο το πρόγραμμα, ώστε να δοθούν τιμές και να συμπληρωθούν οι πίνακες για τις υδραυλικές ιδιότητες της κλίσης σε κάθε σημείο (διαφορά υψομετρικής πληροφορίας). Έτσι, μειώνεται ο υπολογιστικός χρόνος στα επόμενα στάδια της εφαρμογής, ειδικά στα στάδια της δημιουργίας του δισδιάστατου πλέγματος και της εξαγωγής των αποτελεσμάτων.

Σε πολλές περιπτώσεις, το βάθος του υδατορεύματος δεν αποδίδεται σωστά από τα υψομετρικά δεδομένα του εδάφους. Για το λόγο αυτό το HEC-RAS παρέχει τη



δυνατότητα στον χρήστη να μορφοποιήσει τη βαθυμετρία του υδατορεύματος τροποποιώντας τα παρακάτω γεωμετρικά δεδομένα των διάφορων επιπέδων(layers):

#### Κύρια γραμμή ποταμού ροής (Stream centerline)

Έχοντας ως δεδομένο το υφιστάμενο υδρογραφικό δίκτυο του μοντέλου εδάφους πρέπει να χαραχθεί η κύρια γραμμή του υδατορεύματος. Η ψηφιοποίηση γίνεται κατά την φορά της ροής. Η διαδικασία της χάραξης απαιτεί αρκετή ακρίβεια και ως εκ τούτου αποτελεί αρκετές δοκιμές.

#### Κύριες Όχθες(Bank Lines)

Οι όχθες του ποταμού είναι δύο πολυγωνικές γραμμές εκατέρωθεν της κύριας κοίτης του ποταμού. Είναι ένα προαιρετικό, αν και χρήσιμο βήμα για την μετέπειτα πορεία της προσομοίωσης

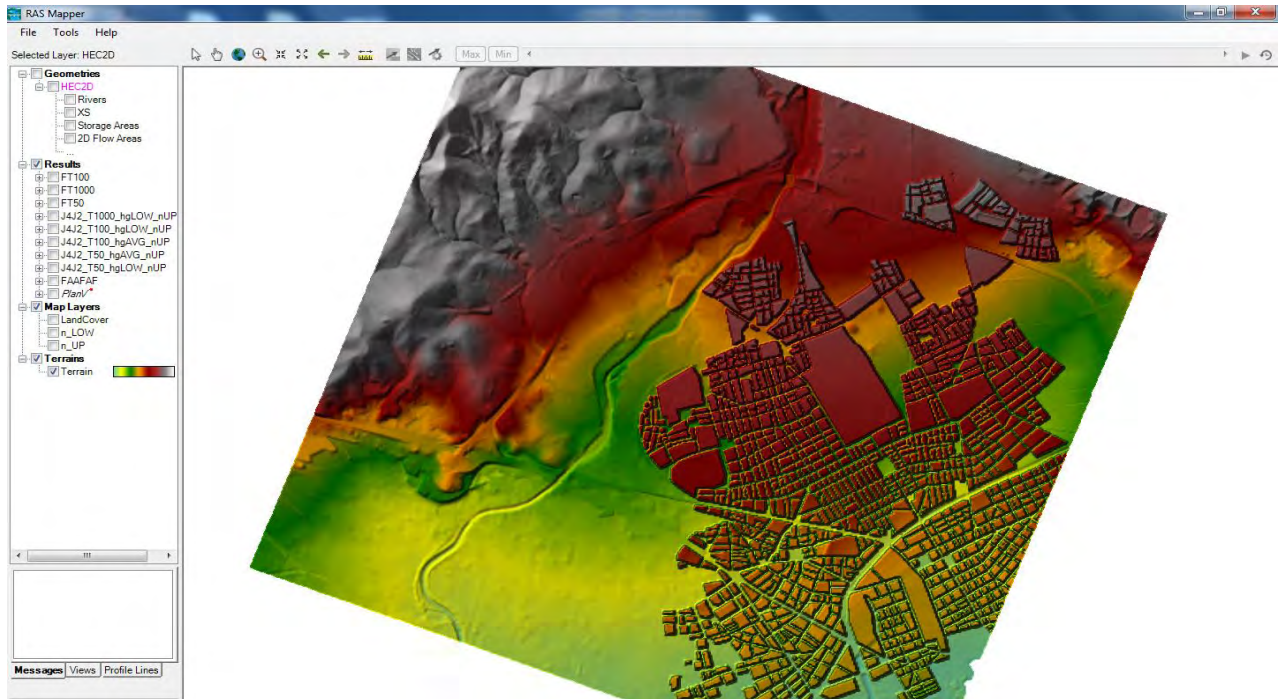
#### Διατομές (cross section lines)

Το επίπεδο αυτό(layer) αφορά την κατασκευή των διατομών σε κατάλληλες θέσεις που αντιπροσωπεύουν καλύτερα την ιδιαίτερη μορφολογία του υδατορεύματος. Οι διατομές αυτές σχεδιάζονται κάθετα στη ροή του ποταμού, από την αριστερή προς της δεξιά όχθη, ξεκινώντας από τα ανάντη του ποταμού.

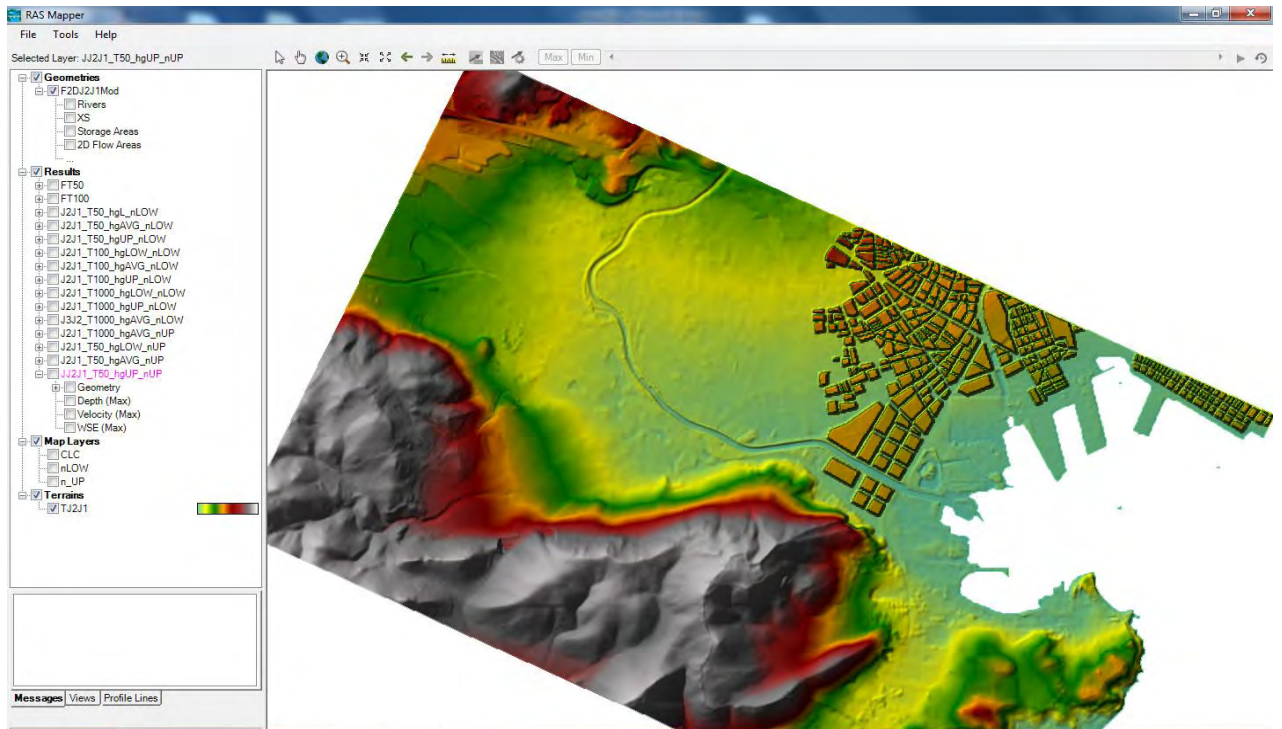
Στην παρούσα εργασία το μοντέλο του εδάφους και η βαθυμετρία του υδατορεύματος αποδόθηκαν από το εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων, του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το επίπεδο εδάφους παρουσιάζεται στα επόμενα σχήματα. Αξίζει να σημειωθεί εκ νέου, πως για λόγους ακριβέστερης προσομοίωσης η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε τρεις περιοχές.

Ο διαχωρισμός των περιοχών έγινε ως εξής : Η πρώτη ξεκινά από τον ύψος της γέφυρας στη Λεωφόρο Λαρίσης έως τη συμβολή του Ξηριά με τον Σεσκουλιώτη(κομμάτι J4-J2). Το δεύτερο κομμάτι αφορά το κομμάτι του Σεσκουλιώτη έως την εκβολή( κομμάτι J3-J2), ενώ το τρίτο κομμάτι είναι από την θέση της συμβολής του Ξηριά με τον Σεσκουλιώτη έως την εκβολή( κομμάτι J2-J1). Ας τονιστεί εδώ πως για το τμήμα που αφορά τον Σεσκουλιώτη έως την εκβολή (κομμάτι J3-J2), η υδραυλική προσομοίωση

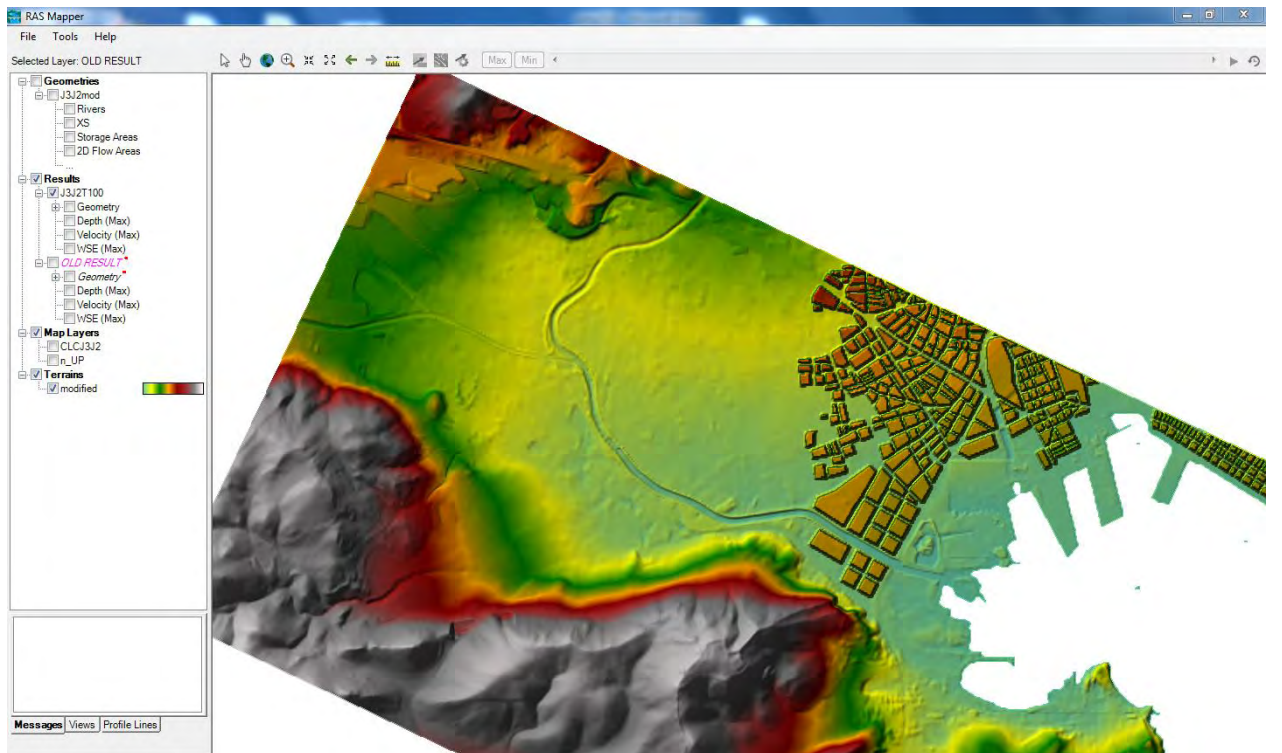
γίνεται μόνο για το κομμάτι της πλημμύρας που αφορά το κομμάτι του Σεσκουλιώτη, παρόλο που χρησιμοποιείται το μοντέλο εδάφους έως την εκβολή και όχι μόνο ως το σημείο της συμβολής Ξηριά-Σεσκουλιώτη. Τα μοντέλα εδάφους της κάθε περιοχής παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα 5- 1: Επίπεδο εδάφους στο περιβάλλον RAS-Mapper για το κομμάτι J4-J2



Σχήμα 5- 2: Επίπεδο εδάφους στο περιβάλλον RAS-Mapper για το κομμάτι J2-J1

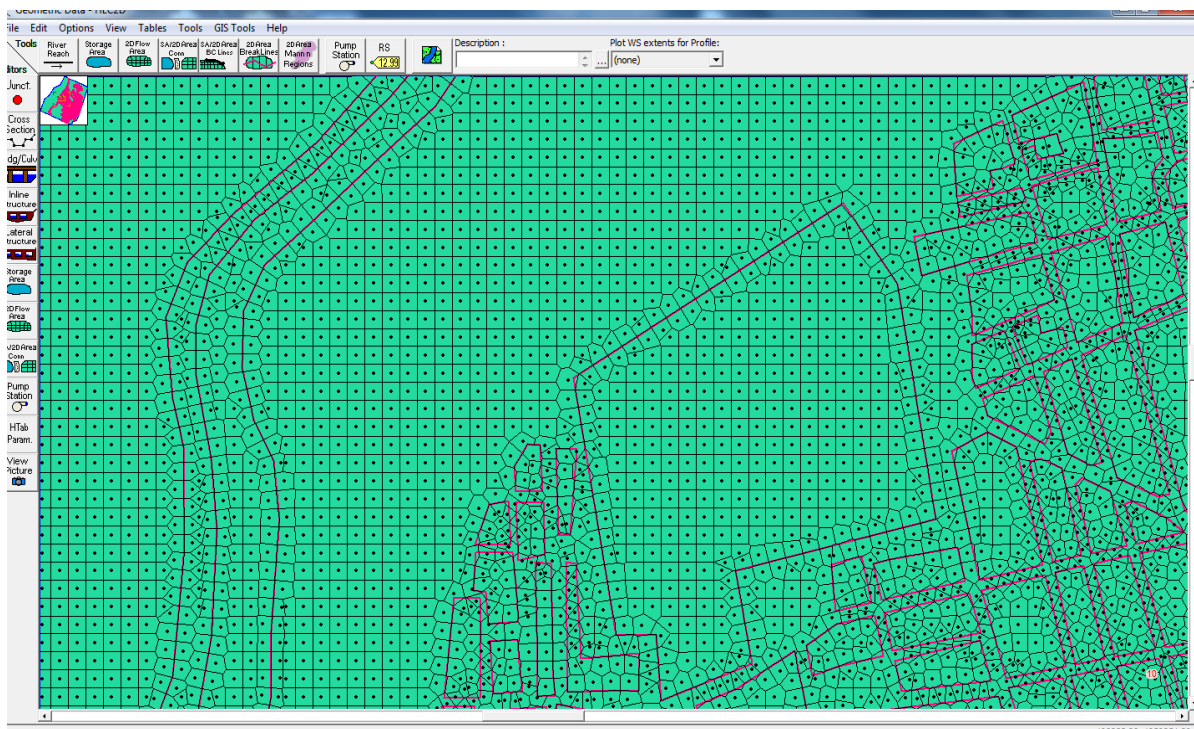


Σχήμα 5- 3: Επίπεδο εδάφους στο περιβάλλον RAS-Mapper για το κομμάτι J3-J2

### 5.3. Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων

Στην επεξεργασία των γεωμετρικών δεδομένων ορίζεται η δισδιάστατη περιοχή ροής (2D flow area), η οποία και ταυτίζεται με την περιοχή ενδιαφέροντος του εκάστοτε χάρτη. Με επεξεργασία της δισδιάστατης περιοχής δημιουργείται το πλέγμα κελιών (mesh). Το κάθε κελί έχει διαστάσεις  $\Delta X$  και  $\Delta Y$  που ορίζονται από την επιλογή “Generate Computational Points”.

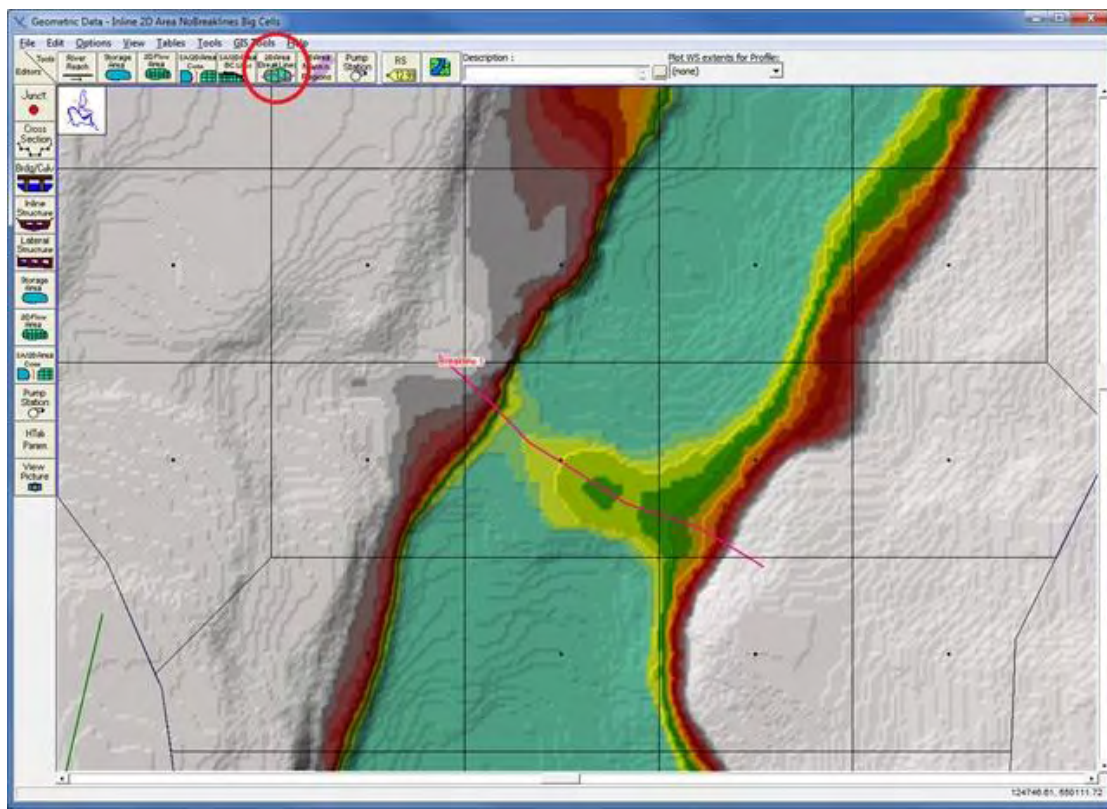
Σε περίπτωση που είναι αναγκαίες διορθωτικές κινήσεις στα όρια της δισδιάστατης περιοχής ροής πρέπει να γίνουν παράλληλα με τις απαραίτητες διαμορφώσεις των κελιών που επηρεάστηκαν, και κατόπιν να επαναληφθεί η διαδικασία δημιουργίας του πλέγματος. Το τελικό αρχείο της δισδιάστατης περιοχής ροής εξάγεται σε μορφή αρχείων χρήσεων γης (shapefile). Το τελικό αρχείο του πλέγματος της δισδιάστατης περιοχής ροής είναι της μορφής που εμφανίζεται στο Σχήμα 5-3.



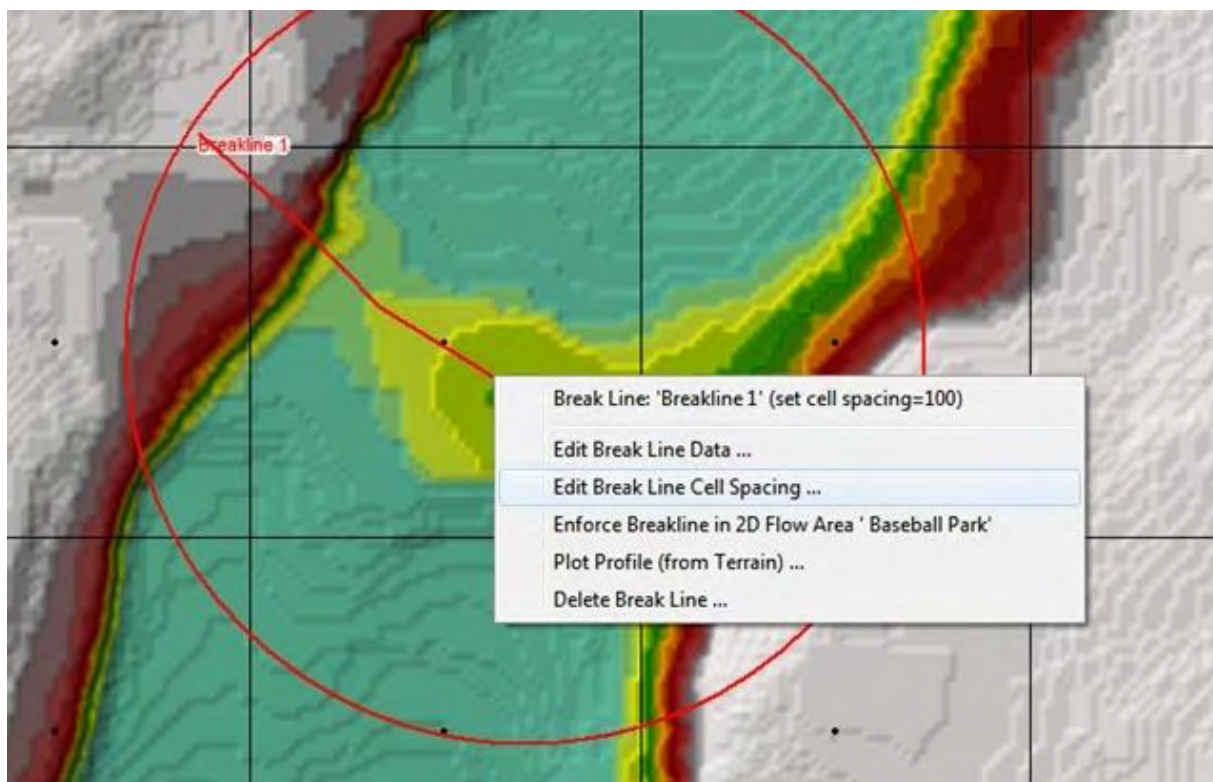
Σχήμα 5- 4: Εικόνα δισδιάστατου πλέγματος κελιών

Χρησιμοποιώντας την εντολή 2D Area Breaklines, γίνεται περαιτέρω επεξεργασία κάποιων κελιών που παρουσιάζουν κάποιο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό, όπως απότομη

αλλαγή κλίσης ή μεγάλη διαφορά ταχύτητας. Στην παρούσα μελέτη, όλα τα οικιστικά τετράγωνα καθώς και η γεωμετρία του υδατορεύματος, δηλαδή η κεντρική κοίτη και οι όχθες του ποταμού, αποδόθηκαν με τη χρήση της εντολής 2D Area Breaklines. Τέλος, με την χρήση της εντολής SA/2D Area BC Lines ορίζονται χωρικά οι οριακές συνθήκες εισροής και εκροής. Στην περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας, το υδατόρευμα απαρτίζεται από πλήθος γεφυρών. Η απόδοση των γεφυρών έγινε θεωρώντας μία παραδοχή, αυτή της χρήσης της εντολής 2D Flow Area Connections. Γενικά, μια κατασκευή μπορεί να σχεδιασθεί με την εντολή 2D Area Breaklines. Στο παρακάτω σχήμα έχει σχεδιασθεί μια απλή γραμμή. Το πλέγμα της δισδιάστατης περιοχής ροής χρειάζεται να επαναυπολογιστεί, μια διαδικασία που γίνεται αυτόματα από τον Geometric Data Editor.



Σχήμα 5- 5: Χρήση της εντολής 2D Area Breakline-Βήμα 1



Σχήμα 5- 6: Χρήση της εντολής 2D Area Breakline-Βήμα 2

Αφού γίνει αυτό, με την εντολή SA/2D Area Connection μπορεί να συνδεθεί η κατασκευή που σχεδιάσαμε με την δισδιάστατη περιοχή ροής. Στην περίπτωση των γεφυρών, αποτυπώνονται με την μορφή οχετού(culvert), υπολογίζοντας το συνολικό όγκο που μπορεί να διοχετευτεί μέσω αυτών. Η υδραυλική κατασκευή, στην προκειμένη περίπτωση η γέφυρα, τοποθετείται ενδιάμεσα δύο περιοχών δισδιάστατου πλέγματος και με τον τρόπο που διατυπώθηκε νωρίτερα γίνεται η υδραυλική σύνδεση της κατασκευής με την δισδιάστατη περιοχή ροής.

## 5.4. Υπολογισμός υδρογραφημάτων εισόδου

### 5.4.1. Η μέθοδος SCS Runoff Curve Number της Soil Conservation Service

Ο καθορισμός της παροχής σχεδιασμού είναι ιδιαίτερα σημαντικός στην υδραυλική ανάλυση. Στη βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί διάφορες εμπειρικές υδρολογικές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εκτίμηση της παροχής σχεδιασμού ενός

υδραυλικού έργου. Ωστόσο, καθεμία από τις μεθόδους αυτές πρέπει να εφαρμόζεται με ιδιαίτερη προσοχή, ώστε τα αποτελέσματα που προκύπτουν να είναι αξιόπιστα.

Στην παρούσα εργασία τα υδρογραφήματα εισροής που χρησιμοποιήθηκαν ως οριακές συνθήκες στην προσομοίωση προέκυψαν σύμφωνα με τη μέθοδο SCS Runoff Curve Number που ανέπτυξε η Soil Conservation Service. Αυτή αφορά τη διαδικασία διαχωρισμού του ολικού ύψους βροχόπτωσης, όπως αντιπροσωπεύεται από το αντίστοιχο υετόγραμμα καταγίδας σχεδιασμού, σε αρχικές απώλειες  $I_a$  και ενεργό βροχόπτωση  $P_e$ .

Οι αρχικές απώλειες αντιπροσωπεύουν όλες τις απώλειες που λαμβάνουν χώρα πριν την έναρξη της επιφανειακής απορροής. Στη μέθοδο της SCS γίνεται η εκτίμηση ότι οι αρχικές απώλειες (συγκράτησης και εξάτμισης) είναι το 20% των συνολικών απωλειών, δηλαδή της διαφοράς μεταξύ βροχής  $P$  και περισσεύματος βροχής  $P_e$ . Επομένως, σύμφωνα με την εμπειρική αυτή σχέση προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$I_a = 0.2 S \quad \text{Εξίσωση 5.1.}$$

$$h_R = \frac{(h_r - 0.2S)^2}{(h_r + 0.8S)} \quad \text{Εξίσωση 5.2.}$$

Και αν  $h_r < 0.2S$  τότε  $h_R = 0$

Οι συνολικές απώλειες παραμετροποιούνται με τον συντελεστή μέγιστης πιθανής κατακράτησης του εδάφους  $S$ , ο οποίος εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Εξίσωση 5.3.}$$

Μια παράμετρος που χρησιμοποιείται στην εκτίμηση της μέγιστης πιθανής κατακράτησης ( $S$ ) του εδάφους στην περιοχή ενδιαφέροντος είναι ο αριθμός καμπύλης (Curve Number-CN). Η τιμή του εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως τον τύπο εδάφους, τη χρήση γης, την φυτοκάλυψη και την αρχική κατάσταση υγρασίας του εδάφους. Θεωρητικά η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 1 και 100, πρακτικά παίρνει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 30 έως 98. Γενικά, οι μεγάλες τιμές του CN

χρησιμοποιούνται για αδιαπέρατες επιφάνειες. Ο υπολογισμός του γίνεται με βάση πίνακες που εξέδωσε η Soil Conservation Service.

Η SCS έχει καταρτίσει πίνακες με τις τιμές CN σε συνάρτηση με:

- Τον τύπο εδάφους
- Τη χρήση γης
- Την υδρολογική κατάσταση της λεκάνης απορροής
- Της αρχικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας

Οι κατηγορίες εδαφών από υδρολογική άποψη είναι:

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

Για τις συνθήκες υγρασίας τύπου II, η SCS δίνει αναλυτικούς πίνακες με τιμές του CN για κάθε υδρολογική ομάδα εδαφών και για διάφορες χρήσεις γης όπως φαίνεται στον πίνακα 5.2. Οι συνθήκες υγρασίας II και οι αντίστοιχες τιμές του CN θεωρούνται αντιπροσωπευτικές του 50% των πλημμυρικών επεισοδίων. Η τιμή που αντιστοιχεί σε μέσες συνθήκες υγρασίας (τύπου II) ανάγεται στις άλλες δύο τυπικές συνθήκες αρχικής εδαφικής υγρασίας (ξηρές, τύπου I, και υγρές, τύπου III), σύμφωνα με τις εμπειρικές σχέσεις:

$$CNI = \frac{4.2 CNII}{10 - 0.058 CNII} \quad \text{Εξίσωση 5.4.}$$

$$CNIII = \frac{23 CNII}{10 + 0.13 CNII} \quad \text{Εξίσωση 5.5.}$$



| 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 < 75%             |                                       | 49                        | 69    | 79    | 84    |
| Εμπορικές περιοχές                      |                                       | 89                        | 92    | 94    | 95    |
| Βιομηχανικές περιοχές (72% αδιαπέρατες) |                                       | 81                        | 88    | 91    | 93    |
| Οικιστικές περιοχές                     |                                       |                           |       |       |       |
| Μέσο μέγεθος<br>οικοπέδου (στρ.)        | Ποσοστό αδιαπέρατης<br>επιφάνειας (%) |                           |       |       |       |
| ≤ 0.5                                   | 65                                    | 77                        | 85    | 90    | 92    |
| 1.0                                     | 38                                    | 61                        | 75    | 83    | 87    |
| 1.5                                     | 30                                    | 57                        | 72    | 81    | 86    |
| 2.0                                     | 25                                    | 54                        | 70    | 80    | 85    |
| 4.0                                     | 20                                    | 51                        | 68    | 79    | 84    |
| Δρόμοι                                  |                                       |                           |       |       |       |
| με οδόστρωμα και αγωγούς ομβρίων        |                                       | 98                        | 98    | 98    | 98    |
| χαλικόστρωτοι                           |                                       | 76                        | 85    | 89    | 91    |
| χωματόδρομοι                            |                                       | 72                        | 82    | 87    | 89    |

Πίνακας 5- 1: Αντιπροσωπευτικές τιμές αριθμού καμπύλης απορροής (CN) κατά SCS για αγροτικές, ημιαστικές και αστικές περιοχές και για προηγούμενες συνθήκες υγρασίας τύπου II

Ακόμη, η SCS θεωρεί τρεις καταστάσεις προηγούμενης κατάστασης υγρασίας του εδάφους: τύπου I (ξηρές), τύπου II (μέσες) και τύπου III (υγρές). Αυτές ορίζονται με βάση κάποια όρια αθροιστικής βροχόπτωσης των προηγούμενων πέντε ημερών, ως εξής:

- Τύπος I: Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά, αλλά πάνω από το σημείο μαρασμού), που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση προηγούμενων 5 ημερών μικρότερη των 13 mm (ή μικρότερη των 35 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

- Τύπος II: Μέσες συνθήκες, που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών μεταξύ 13 και 38 mm (ή 35-53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
- Τύπος III: Υγρές συνθήκες (εδάφη σχεδόν κορεσμένα), που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών μεγαλύτερη των 38 mm (ή μεγαλύτερη των 53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

| Κατηγορία | Συνολικό ύψος βροχής των προηγούμενων 5 ημερών |                    |
|-----------|--|--------------------|
|           | Χειμερινή περίοδος                             | Περίοδος βλάστησης |
| CNI       | <13  | <35                |
| CNII      | 13÷28  | 35÷53              |
| CNIII     | >28  | >53                |

Πίνακας 5- 2: Κατηγορίες με βάση την υγρασία εδάφους (SCS, 1972)

Θα πρέπει ακόμη να επισημανθεί ότι πρόσφατες πιθανοτικές αναλύσεις των καταστάσεων εδαφικής υγρασίας στην Ελλάδα καταδεικνύουν ότι οι υποθέσεις της SCS, ότι δηλαδή οι ξηρές συνθήκες έχουν 90%, οι μέσες συνθήκες έχουν 50%, και οι υγρές συνθήκες έχουν 10% πιθανότητα υπέρβασης, σε καμία περίπτωση δεν είναι αντιπροσωπευτικές του υδροκλιματικού καθεστώτος της χώρας (Ποντικός, 2014).

#### 5.4.2. Διαμόρφωση του υδρολογικού μοντέλου

Η διαμόρφωση του υδρολογικού μοντέλου έγινε σε περιβάλλον HEC-HMS. Για τη διαμόρφωση του μοντέλου υδρολογικής προσομοίωσης της υπολεκάνης στο περιβάλλον του HEC-HMS υπολογίζονται τα εξής μεγέθη:

- ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης κατά Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta z}}$$

Εξίσωση 5.6.

όπου ο  $t_c$  χρόνος συγκέντρωσης,  $A$  η επιφάνεια της λεκάνης,  $L$  το μήκος της μεγαλύτερης διαδρομής νερού στη λεκάνη και  $\Delta z$  η υψομετρική διαφορά του μέσου υψομέτρου της λεκάνης από το υψόμετρο του κόμβου εξόδου της.

- οι παράμετροι CNI και CNIII για συνθήκες υγρασίας τύπου I και III, μέσω των εξισώσεων 5.4. και 5.5. αντίστοιχα
- οι τιμές της μέγιστης δυναμικής κατακράτησης,  $S$ , για τις τρεις συνθήκες υγρασίας, μέσω της εξίσωσης 5.3.
- οι τιμές του ύψους αρχικών ελλειμμάτων,  $h_{a0}$ , για τις τρεις συνθήκες υγρασίας, που στη μελέτη γενικά λαμβάνονται ίσες με το 20% της αντίστοιχης μέγιστης δυναμικής κατακράτησης, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.
- η ένταση βροχής για διάρκεια  $D$  και περιόδους επαναφοράς  $T = 50, 100$  και  $1000$  έτη, που εκτιμάται μέσω της εξίσωσης όμβριας καμπύλης 5.7. και αναφέρεται σε «μέσες» συνθήκες.

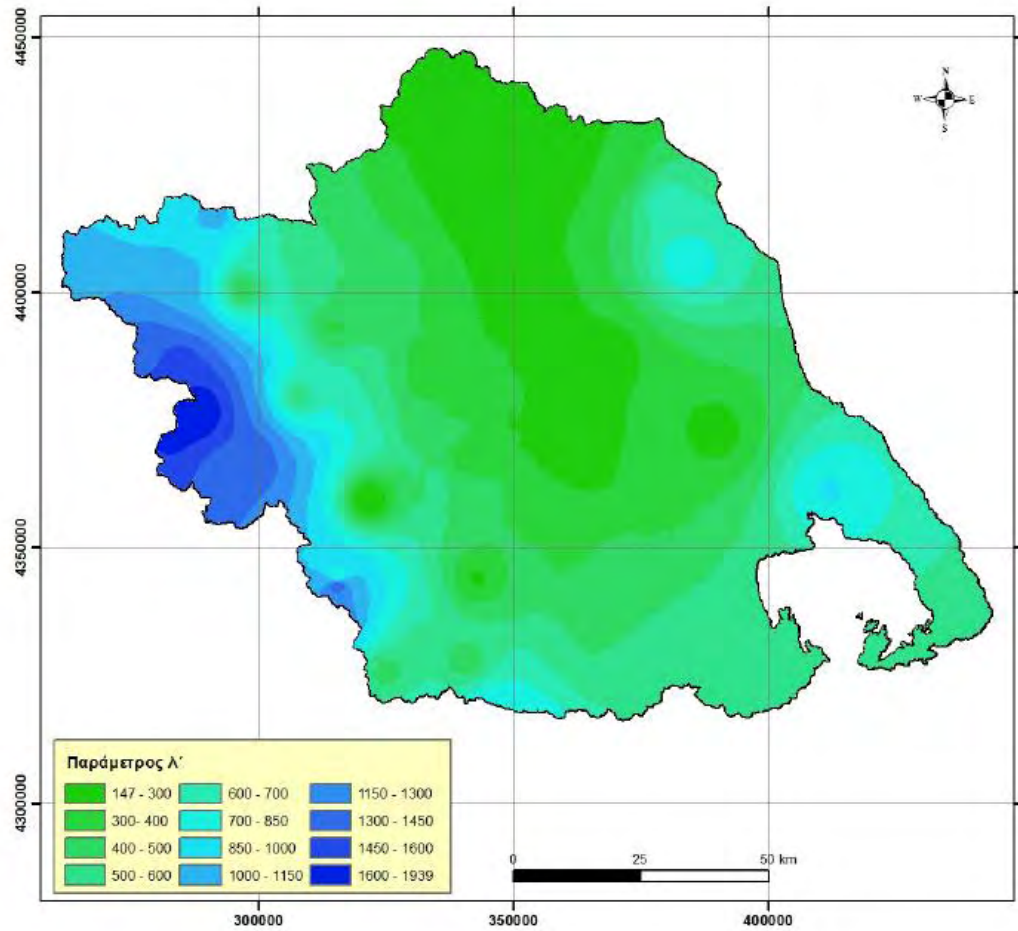
$$i(d,T) = \frac{\lambda'(T_k - \psi')}{(1 + d/\theta)^\eta}$$

Εξίσωση 5.7.

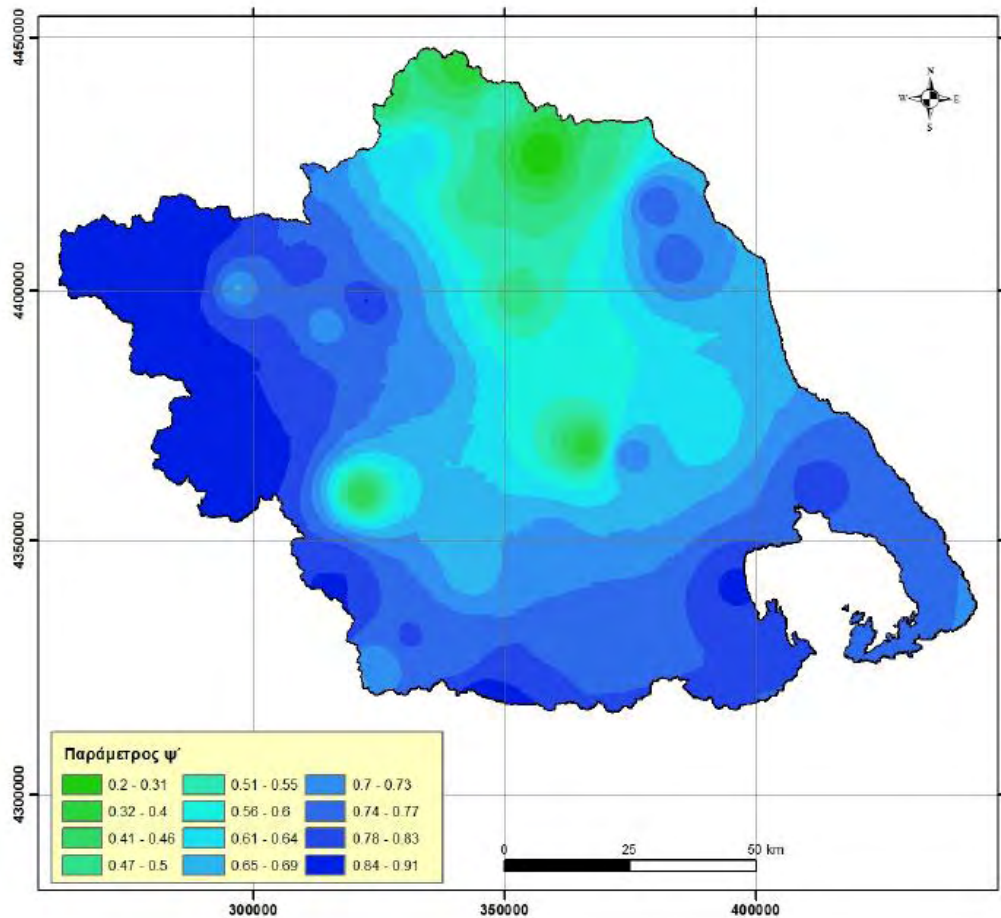
όπου η εκτίμηση των 5 αντιπροσωπευτικών παραμέτρων γίνεται ως εξής:

- ❖ Οι παράμετροι  $\theta$  και  $\eta$  παίρνουν γενικά σταθερές τιμές, οι οποίες σύμφωνα με την σχετική μελέτη του Υπουργείου Ενέργειας και Περιβάλλοντος που βρίσκεται αναρτημένη στον ιστότοπο [www.floods.ypeka.gr](http://www.floods.ypeka.gr) είναι  $\theta = 0.042$  και  $\eta = 0.639$ .
- ❖ Η παράμετρος  $k$  λαμβάνεται για την περιοχή μελέτης  $k=0.09$

- ❖ Για τις παραμέτρους  $\lambda'$  και  $\psi'$  εφαρμόζεται η μέση τιμή όλων των φατνίων που βρίσκονται εντός των ορίων της περιοχής μελέτης, όπως φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα.



Σχήμα 5- 7: Χωρική απεικόνιση ανηγμένης παραμέτρου κλίμακας  $\lambda'$   
([www.floods.ypeka.gr](http://www.floods.ypeka.gr), 2018)



Σχήμα 5- 8: Χωρική απεικόνιση ανηγμένης παραμέτρου κλίμακας  $\psi'$   
(www.floods.ypeka.gr, 2018)

- οι «ευμενείς» και «δυσμενείς» εντάσεις βροχής διάρκειας  $D$ , για περιόδους επαναφοράς  $T = 50, 100$  και  $1000$  έτη, οι οποίες εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας τα αδιαστατοποιημένα όρια εμπιστοσύνης,  $X_L$  και  $X_U$  της αντίστοιχης περιόδου επαναφοράς επί την ένταση βροχής της αντίστοιχης περιόδου επαναφοράς.
- η χαρακτηριστική ένταση βροχής για διάρκεια  $D$  και περίοδο επαναφοράς  $T = 5$  έτη, μέσω της εξίσωσης της όμβριας καμπύλης 5.7., που χρησιμοποιείται στις αναγωγές του χρόνου συγκέντρωσης  $t_c$ .
- οι ανηγμένοι χρόνοι συγκέντρωσης, με βάση τον χρόνο συγκέντρωσης κατά Giandotti, την ένταση βροχής «αναφοράς» για  $T = 5$  έτη, και τις εντάσεις βροχής

που προκύπτουν συνδυάζοντας τις τρεις υδρολογικές συνθήκες (ευμενείς, μέσες, δυσμενείς) και τις τρεις περιόδους επαναφοράς ( $T = 50, 100$  και  $1000$  έτη).

- οι χρόνοι υστέρησης,  $t_L$ , της υπολεκάνης, που εκτιμώνται ως το 60% του αντίστοιχου χρόνου συγκέντρωσης  $t_c$ .
- οι χρόνοι ανόδου,  $t_p$ , των συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων των εννέα υδρολογικών σεναρίων, που εκτιμώνται με βάση τον ανηγμένο χρόνο συγκέντρωσης του αντίστοιχου σεναρίου και τη διάρκεια βροχής, σύμφωνα με την εξίσωση 5.8.:

$$t_p = t_L + \frac{D}{2} \quad \text{Εξίσωση 5.8.}$$

Όπου  $D$  η διάρκεια της βροχόπτωσης και  $t_L$  ο χρόνος υστέρησης.

- οι χρόνοι βάσης,  $t_b$ , των συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων, που λαμβάνονται ως το πενταπλάσιο των αντίστοιχων χρόνων ανόδου  $t_p$ .
- οι παροχές αιχμής,  $Q_p$ , των συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων των εννέα υδρολογικών σεναρίων, που εκτιμώνται με βάση τον χρόνο ανόδου του αντίστοιχου σεναρίου και την έκταση της υπολεκάνης, σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q_p = \frac{2.08 A}{t_p} \quad \text{Εξίσωση 5.9.}$$

Όπου  $A$  η έκταση της λεκάνης και  $t_p$  ο χρόνος ανόδου.

### 5.4.3. Αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης στο ρέμα Ξηριάς Βόλου

Το μοντέλο υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης απορροής του ρέματος Ξηριάς Βόλου περιλαμβάνει 10 υπολεκάνες, 7 κόμβους και 6 κλάδους του υδρογραφικού δικτύου. Η σχηματοποίηση του υδρολογικού συστήματος απεικονίζεται στον χάρτη της Σχήματος 5-9.



Σχήμα 5- 9: Χάρτης περιοχής μελέτης, όπου απεικονίζεται η σχηματοποίηση των κόμβων και κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και των υπολεκανών.( Μούκος- Παρασκευάς, 2013)

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της λεκάνης είναι:

Έκταση  $A = 116.81 \text{ km}^2$

Μέσο υψόμετρο  $z_m = 465.4 \text{ m}$

Υψόμετρο κόμβου εξόδου  $z_k = 0.0 \text{ m}$

Μέγιστο μήκος ροής  $L_{max} = 29.75 \text{ km}$

Χρόνος συγκέντρωσης  $t_c = 5.09 \text{ h}$

Για την υδρολογική προσομοίωση επιλέγεται διάρκεια βροχής  $D = 24 \text{ h}$  και χρονικό βήμα  $\Delta t = 15 \text{ min}$ .

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της συνολικής λεκάνης απορροής δίνονται στον Πίνακα 5-3.

| Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκάνης απορροής Ξηριάς Βόλου         |                   |                                     |                    |
|---|-------------------|-------------------------------------|--------------------|
| Έκταση (km <sup>2</sup> )                                   | 116.81            | Υψόμετρο εξόδου (m)                 | 0.0                |
| Αδιαπέρατη επιφάνεια (%)                                    | 0.00              | Χρόνος συγκέντρωσης (h)             | 5.09               |
| Μέγιστο μήκος ροής (km)                                     | 29.75             | Διάρκεια βροχόπτωσης σχεδιασμού (h) | 24.00              |
| Μέσο υψόμετρο (m)   | 465.4             | Χρονικό βήμα (h)                    | 0.25               |
| Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης λεκάνης |                   |                                     |                    |
|   | Ευμενείς συνθήκες | Μέσες συνθήκες                      | Δυσμενείς συνθήκες |
| Ολικό ύψος επιφανειακής βροχής (mm)                         |                   |                                     |                    |
| T = 50  | 162.6             | 189.3                               | 213.1              |
| T = 100   | 177.9             | 215.5                               | 251.7              |
| T = 1000  | 222.9             | 315.2                               | 431.3              |
| Ολικό ύψος πλημμυρικής απορροής (mm)                        |                   |                                     |                    |
| T = 50  | 20.7              | 79.7                                | 146.9              |
| T = 100   | 26.3              | 99.4                                | 182.9              |
| T = 1000  | 45.9              | 181.0                               | 355.8              |
| Συντελεστής απορροής  |                   |                                     |                    |
| T = 50  | 0.127             | 0.421                               | 0.689              |
| T = 100   | 0.148             | 0.461                               | 0.727              |
| T = 1000  | 0.206             | 0.574                               | 0.825              |
| Πλημμυρική παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)                |                   |                                     |                    |
| T = 50  | 79.5              | 412.0                               | 818.2              |
| T = 100   | 106.0             | 540.6                               | 1061.1             |
| T = 1000  | 354.1             | 1262.6                              | 2284.6             |
| Πλημμυρικός όγκος (hm <sup>3</sup> )                        |                   |                                     |                    |
| T = 50  | 2.419             | 9.304                               | 17.161             |
| T = 100   | 3.071             | 11.607                              | 21.366             |
| T = 1000  | 5.357             | 21.147                              | 41.558             |
| Συνολική παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)                  |                   |                                     |                    |
| T = 50  | 81.8              | 414.2                               | 820.4              |
| T = 100   | 108.4             | 543.1                               | 1063.6             |
| T = 1000  | 357.4             | 1265.9                              | 2287.9             |
| Συνολικός όγκος υδρογραφήματος (hm <sup>3</sup> )           |                   |                                     |                    |
| T = 50  | 3.859             | 10.744                              | 18.602             |
| T = 100   | 4.663             | 13.199                              | 22.958             |
| T = 1000  | 7.479             | 23.270                              | 43.681             |

Πίνακας 5- 3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης της περιοχής μελέτης.

Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκαν και οι τρεις κατηγορίες αρχικών συνθηκών υγρασίας για τις περιόδους επαναφοράς T=50-έτη, T=100-έτη και T=1000-έτη. Με αυτό τον τρόπο ελέγχθηκε η ευαισθησία του μοντέλου για τις διάφορες συνθήκες υγρασίας, ευμενείς, μέσες και δυσμενείς. Στα σχήματα A-1 έως A-9 του Παραρτήματος A παρουσιάζονται τα υδρογραφήματα εισροής που χρησιμοποιήθηκαν στην υδραυλική προσομοίωση.



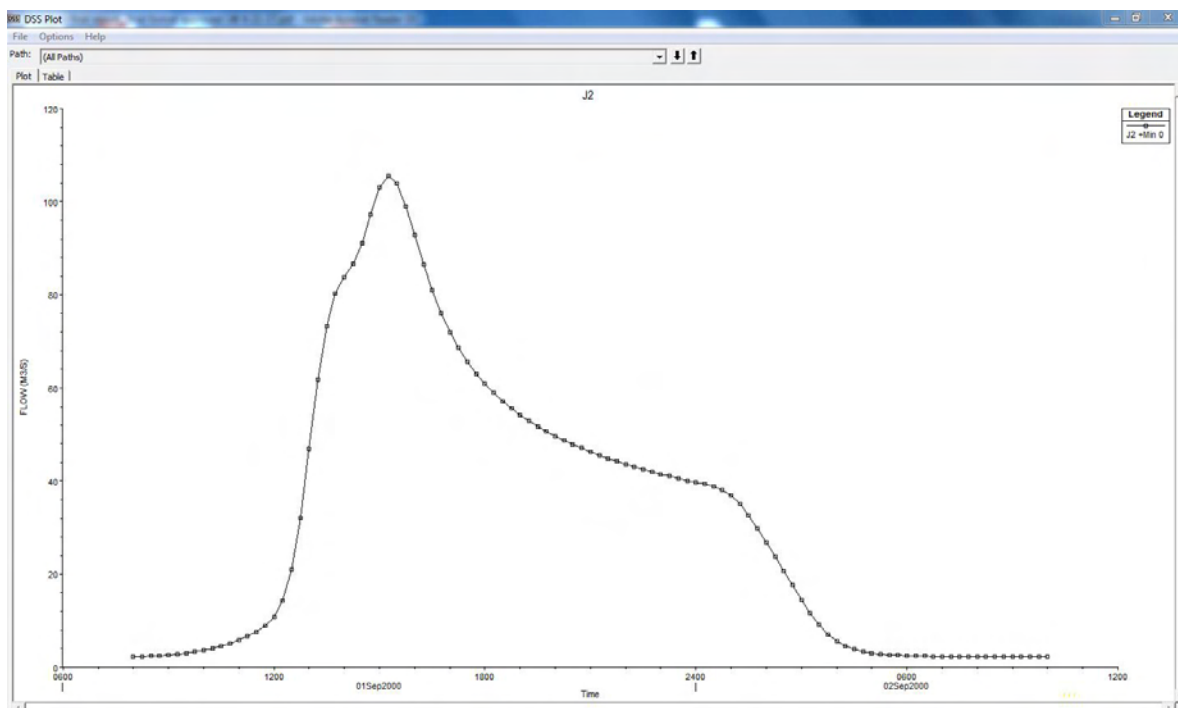
## **5.5. Καθορισμός οριακών συνθηκών ροής**

Για την εφαρμογή της προσομοίωσης του πλημμυρικού γεγονότος, απαιτείται να γίνει ο καθορισμός των οριακών συνθηκών (boundary conditions) στα ανάντη και τα κατόντη του υδατορεύματος. Οι επιλογές που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της υδραυλικής προσομοίωσης του κάθε σεναρίου για μη-μόνιμη ροή είναι οι εξής:

- Ανάντη οριακή συνθήκη – Υδρογράφημα (Flow Hydrograph)
- Κατόντη οριακή συνθήκη - Ομοιόμορφο βάθος (Normal Depth)

### **5.5.1.Ανάντη οριακή συνθήκη – Υδρογράφημα (Flow Hydrograph)**

Ως ανάντη οριακή συνθήκη (upstream boundary condition) ορίστηκε το υδρογράφημα σχεδιασμού (flow hydrograph) για κάθε μία από τις τρεις περιόδους επαναφοράς. Το HEC-RAS επιτρέπει το υδρογράφημα σχεδιασμού να οριστεί και ως ανάντη και ως κατόντη οριακή συνθήκη. Ωστόσο αποτελεί κοινή πρακτική να ορίζεται ως οριακή συνθήκη της ανάντη περιοχής. Η εισαγωγή του υδρογραφήματος έγινε μέσω HEC-DSS file, τα οποία αποδόθηκαν από το εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων, του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας., ενώ η διαδικασία υπολογισμού αυτών των υδρογραφημάτων περιεγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.4.



Σχήμα 5- 10: Παράδειγμα υδρογραφήματος για την περιοχή J2J1

### 5.5.2. Κατάντη οριακή συνθήκη - Ομοιόμορφο βάθος (Normal Depth)

Στην οριακή συνθήκη του ομοιόμορφου βάθους (Normal Depth), εισάγει ο χρήστης το ομοιόμορφο βάθος για κάθε σενάριο μέσω υπολογισμού των κλίσεων κατάντη. Αν δεν είναι γνωστές, μπορεί να θέσει προσεγγιστικά μια τιμή βασιζόμενος στην κλίση της υδάτινης επιφάνειας ή την κλίση του πυθμένα του καναλιού. Η τιμή που ορίστηκε διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Οι τιμές που αποδόθηκαν σε κάθε περιοχή παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

| Περιοχή | Normal Depth |
|---------|--------------|
| J2J1    | 0.0019       |
| J3J2    | 0.006        |
| J4J2    | 0.014        |

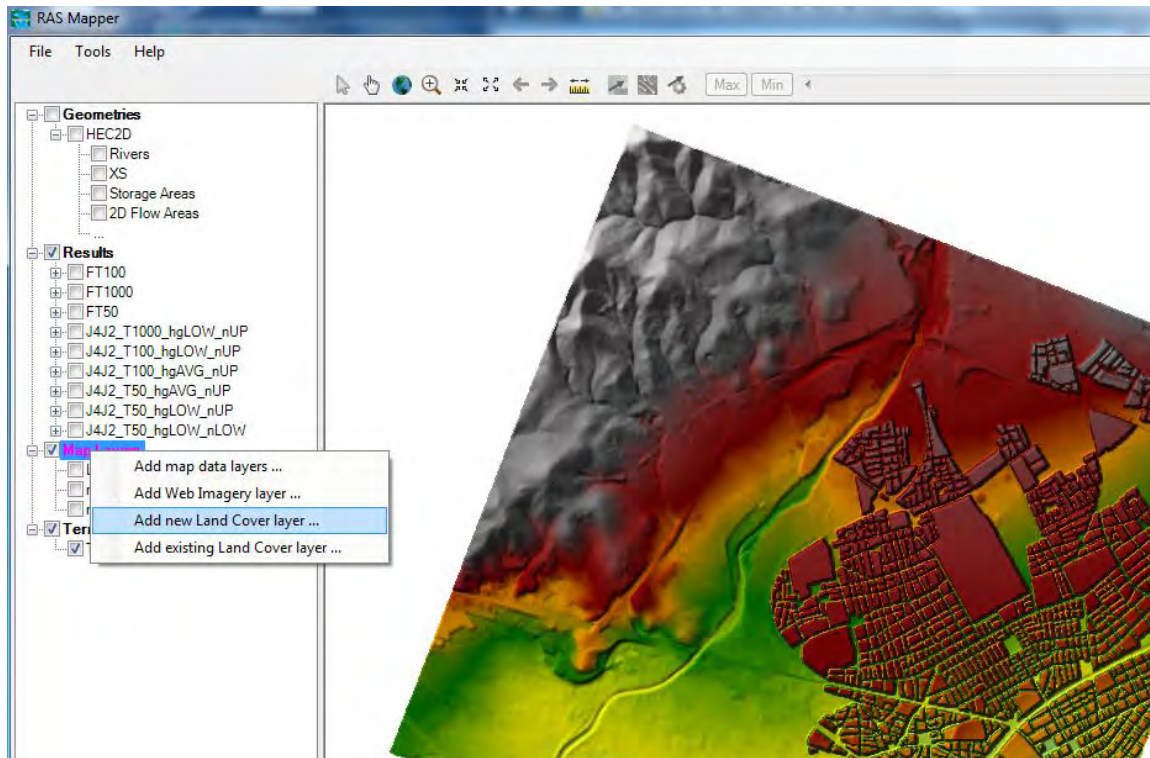
Πίνακας 5- 4: Τιμές Normal Depth ανά περιοχή

## **5.6. Εκτίμηση συντελεστή τραχύτητας κατά Manning και μεθοδολογία εισαγωγής του στο HEC-RAS**

### **5.6.1. Διαδικασία εκχώρησης τιμών συντελεστή τραχύτητας στο περιβάλλον του HEC RAS**

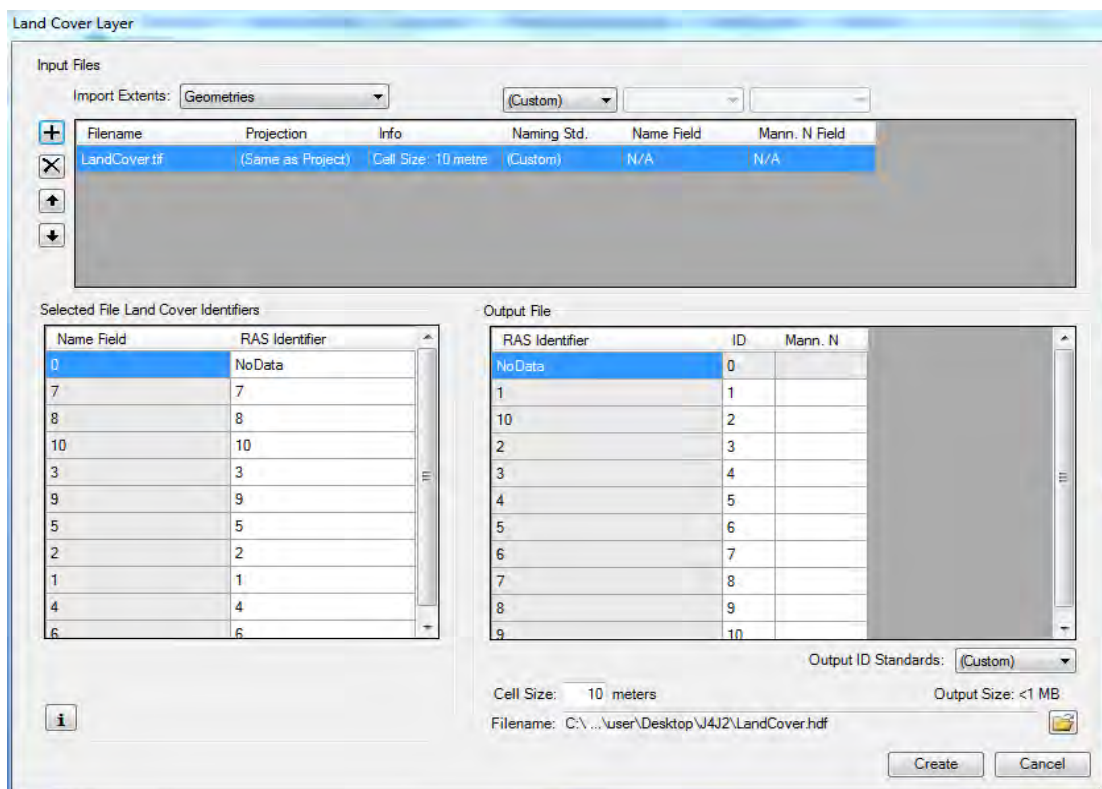
Το HEC-RAS χρησιμοποιεί την εξίσωση Manning για να υπολογίσει τις απώλειες λόγω τριβής πάνω στην επιφάνεια του εδάφους. Η συσχέτιση των τιμών των συντελεστών τραχύτητας με το δισδιάστατο πλέγμα γίνεται με την δημιουργία αρχείων χρήσεων γης στο περιβάλλον ArcGIS και την εισαγωγή τους στο περιβάλλον RAS Mapper του λογισμικού. Για καθεμία από τις τρεις περιοχές, ορίζονται τρία διαφορετικά πλέγματα, με το κάθε ένα από αυτά να αντιπροσωπεύει ένα διαφορετικό σενάριο. Για να γίνει πιο κατανοητή η όλη διαδικασία ας δούμε το παράδειγμα που αφορά την υποπεριοχή από την συμβολή Ξηριά-Σεσκουλιώτη έως την εκβολή(J2-J1).

Αρχικά λοιπόν με την εντολή Map Layers→ Add new Land Cover Layer εισάγεται κατάλληλο αρχείο που δόθηκε κατασκευασμένο από το εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων, του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας ως αρχείο βάσης.



Σχήμα 5- 11: Εντολή Map Layers→ Add new Land Cover Layer

Ακολούθως, στο παράθυρο Land Cover Layer δίνονται σε κάθε περιοχή η κατάλληλη τιμή τραχύτητας, συμπληρώνοντας κατάλληλα τις στήλες Name Field, RAS Identifier, Mann N. Η διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning περιγράφεται ακολούθως.



Σχήμα 5- 12: Παράθυρο διαλόγου Land Cover Layer

### 5.6.2. Εκτίμηση συντελεστή τραχύτητας για περιοχές εκτός του κυρίου υδατορεύματος

Για την εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας στις διάφορες περιοχές εκτός του κυρίου υδατορεύματος λήφθηκαν υπόψιν οι διάφορες χρήσεις γη. Έτσι σε κάθε περιοχή εκχωρήθηκαν κατάλληλες τιμές από τον πίνακα A-1 του παραρτήματος Α, αρχικά για την περίπτωση του μέσου συντελεστή τραχύτητας (στήλη AVG n) με την τεχνική που αναφέρθηκε στην υποενότητα 5.6.1.

Στην παρούσα εργασία, όπως έχουμε προαναφέρει, η υδραυλική προσομοίωση εκτελέστηκε για τρία σενάρια συντελεστών τραχύτητας. Σενάριο χαμηλού συντελεστή τραχύτητας n\_LOW, μέσου n\_AVG και υψηλού n\_UP. Επομένως έχοντας εκχωρήσει κατάλληλες τιμές συντελεστή τραχύτητας σε κάθε περιοχή για σενάριο μέσου συντελεστή τραχύτητας, δημιουργούνται δύο νέα Map Layers. Ένα για το σενάριο χαμηλού συντελεστή τραχύτητας (n\_LOW), για το οποίο οι τιμές λαμβάνονται από την στήλη MIN n του πίνακα A-1 ανάλογα με τις χρήσεις γης και ένα για το σενάριο του

υψηλού συντελεστή τραχύτητας ( $n_{UP}$ ) που οι τιμές λαμβάνονται από την στήλη MAX  $n$  του πίνακα A-1 του παραρτήματος A, πάντα λαμβάνοντας υπόψιν τις διάφορες χρήσεις γης.

### **5.6.3. Εκτίμηση συντελεστή τραχύτητας για περιοχές εντός του κυρίου υδατορεύματος**

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας για τα εντός της κοίτης τμήματα του ποταμού. Με χρήση των εξισώσεων 3,10,11,12,13,14,15,16,17 του πίνακα A-2 του παραρτήματος A υπολογίζω την τιμή για το σενάριο του μέσου συντελεστή τραχύτητας, για το κάθε εντός κοίτη τμήμα των τριών κλάδων του υδατορεύματος. Αξίζει εδώ να αναφερθούν τα εξής:

- Ο κλάδος J4J2 έχει προσομοιωθεί εκχωρώντας μια ενιαία τιμή συντελεστή τραχύτητας σε όλο το μήκος του για το εντός κοίτης κομμάτι του υδατορεύματος. Το ίδιο ισχύει και για τον κλάδο J3J2, δηλαδή το κομμάτι του Σεσκουλιώτη.
- Ο κλάδος J2J1 περιέχει τρία εντός κοίτη κομμάτια τα οποία έχουν το καθένα διαφορετικό συντελεστή τραχύτητας. Το κατώτερο κομμάτι που βρίσκεται στην εκβολή, καθώς και το μεσαίο τμήμα αποτελούνται από πλήρως διευθετημένες κοίτες, με αποτέλεσμα οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας εκεί να είναι σταθερές ως προς την μεταβλητότητα των σεναρίων του συντελεστή τραχύτητας. Το άνω κομμάτι που βρίσκεται στην συμβολή Ξηριά-Σεσκουλιώτη, προσομοιώνεται όπως οι κοίτες των κλάδων J4J2 και J3J2.
- Για τα εντός κοίτης κομμάτια του κλάδου J2J1 του Ξηριά που είναι πλήρως διευθετημένα και έχουν σταθερές τιμές συντελεστή τραχύτητας, οι τιμές που έχουν εκτιμηθεί είναι  $n=0.013$  για το κατώτερο τμήμα και  $n=0.022$  για το μεσαίο τμήμα.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι εξισώσεις που επιλέχθηκαν βασίζονται πάνω σε κάποιες σταθερές:

Sw: την κλίση της επιφάνειας του νερού

$D_{16}, D_{50}, D_{65}, D_{75}, D_{84}, D_{90}$ : κλάσεις διαμέτρων σωματιδίων εντός της ποτάμιας κοίτης

Η κλίση της επιφάνειας του νερού σε κάθε κλάδο του υδατορεύματος παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα:

|      | Sw          |
|------|-------------|
| J2J1 | 0.003140738 |
| J3J2 | 0.010137071 |
| J4J2 | 0.009973525 |

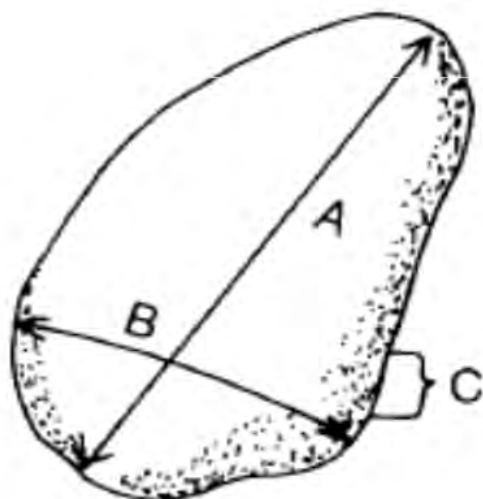
Πίνακας 5- 5: Κλίση της επιφάνειας του νερού σε κάθε κλάδο του υδατορεύματος

#### Εκτίμηση διαμέτρων σωματιδίων και υλικών εντός της κοίτης του χειμάρρου Ξηριά με την μέθοδο Wolman

Η κατάσταση του πυθμένα ενός υδατορεύματος όσον αφορά τα φερτά υλικά και σωματίδια που μπορεί να περιέχει (χαλίκια, άμμος, λάσπη), επηρεάζει τον τύπο του υδατορεύματος, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του και την τραχύτητα του. Επομένως σε μια υδραυλική προσομοίωση αποτελεί σημαντικό κομμάτι η εκτίμηση αυτών των υλικών και σωματιδίων για την ορθότερη εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας και την ελαχιστοποίηση αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στην όλη διαδικασία. Μια συνηθισμένη διαδικασία για την έμμεση εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας σε υδατορεύματα για τα οποία έχουμε ελλιπή στοιχεία είναι η αξιολόγηση του μεγέθους και του τύπου του πυθμένα και των περιοχών που βρίσκονται στις όχθες του υδατορεύματος (Coon, 1998).

Αυτό πραγματοποιείται με την χρήση εμπειρικών ή ημιεμπειρικών εξισώσεων στις οποίες το μέγεθος των μεταφερόμενων σωματιδίων αποτελεί την κρίσιμη παράμετρο. Ωστόσο αυτή η τεχνική μπορεί να οδηγήσει σε εκτιμήσεις τιμών που απέχουν από την πραγματικότητα. Για αυτό θεωρείται πιο αξιόπιστη μεθοδολογία η εφαρμογή τεχνικών δειγματοληψίας υλικών από την επιφάνεια του υδατορεύματος κατά την ξηρή περίοδο, εφόσον αυτό είναι εφικτό. (Papaioannou, 2017).

Για την εκτίμηση της διαμέτρου των σωματιδίων ακολουθείται η διαδικασία μέτρησης σωματιδίων Wolman (Wolman pebble count process). Σε αυτή την διαδικασία μετρείται κάθε σωματίδιο ως προς τρεις άξονες, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



- (A) Long axis
- (B) Intermediate axis
- (C) Short axis

The intermediate axis is the pebble's diameter.

Σχήμα 5- 13: Άξονες σωματιδίων που λαμβάνονται υπόψιν στην διαδικασία μέτρησης σωματιδίων Wolman

Τα σωματίδια κατηγοριοποιούνται σε σταθερές κλάσεις, οι οποίες βασίζονται στη διάμετρο των σωματιδίων. Στο χείμαρρο του Ξηριά την όλη διαδικασία εκτέλεσε ο κύριος Παπαϊωάννου Γεώργιος. Ακολουθώντας μεθοδολογία συλλογής επιτόπου δειγμάτων με τυχαίο τρόπο, συλλέγοντας συνολικά 958 δείγματα, δημιουργήθηκε ο ακόλουθος πίνακας.

|     | (mm)     | (m)      |
|-----|----------|----------|
| D16 | 38.85869 | 0.038859 |
| D50 | 84.83133 | 0.084831 |
| D65 | 127.62   | 0.12762  |
| D75 | 188.3896 | 0.18839  |
| D84 | 285.8146 | 0.285815 |
| D90 | 400.125  | 0.400125 |

Πίνακας 5- 6: Αποτελέσματα της κατηγοριοποίησης της διαμέτρου των υλικών και σωματιδίων του υδατορεύματος του Ξηριά χωρισμένα κατά τις προκαθορισμένες κλάσεις



Στον πιο πάνω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κατηγοριοποίησης της διαμέτρου των υλικών και σωματιδίων του υδατορεύματος του Ξηριά χωρισμένα κατά τις προκαθορισμένες κλάσεις  $D_{16}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{65}$ ,  $D_{75}$ ,  $D_{84}$ ,  $D_{90}$ .

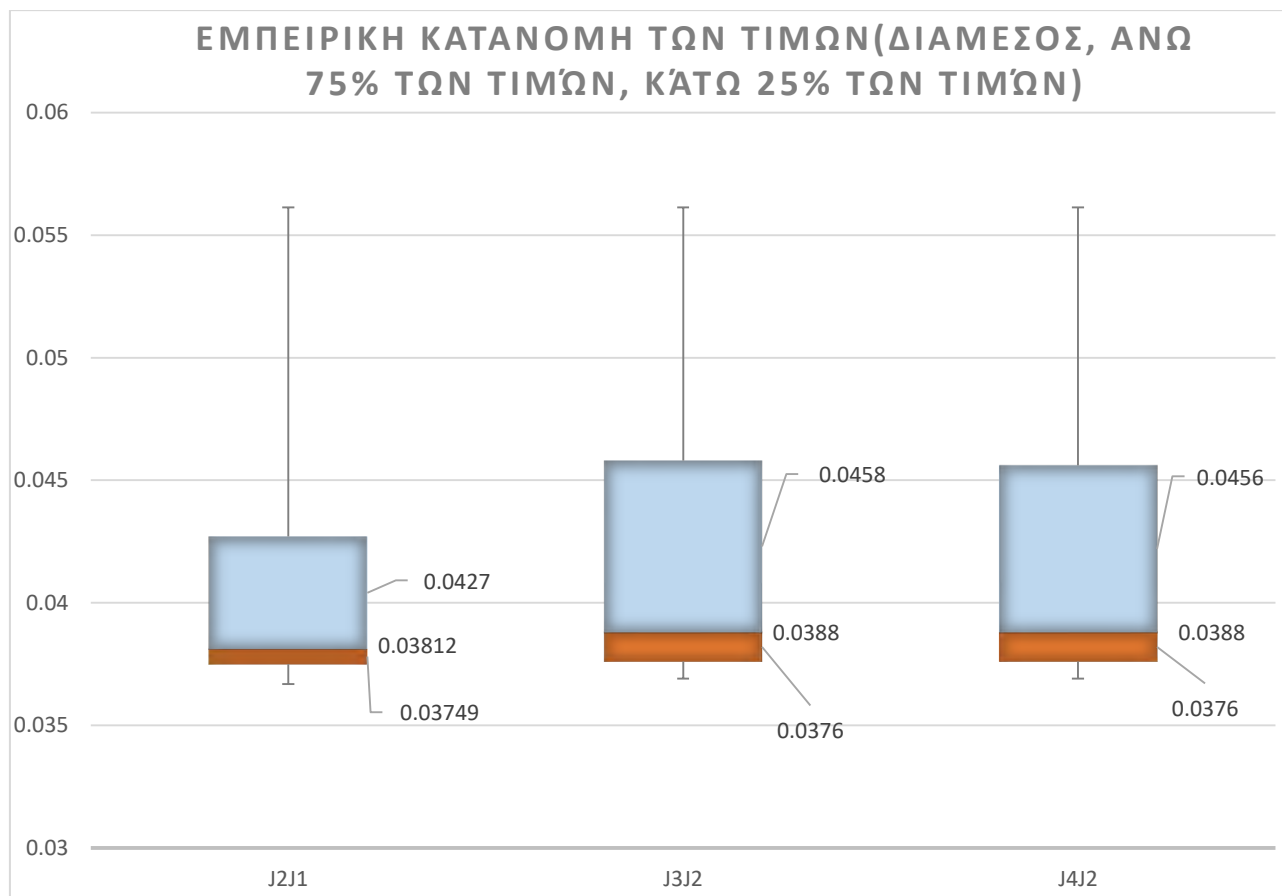
Οι τιμές που αποδίδουν οι πιο πάνω εξισώσεις (εξισώσεις 3,10,11,12,13,14,15,16,17 του πίνακα A-2) για κάθε κλάδο του ποταμού, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον ακόλουθο πίνακα:

| Εξίσωση | J2J1     | J3J2     | J4J2     |
|---------|----------|----------|----------|
| 3       | 0,03669  | 0,0458   | 0,0456   |
| 10      | 0,03749  | 0,03749  | 0,03749  |
| 11      | 0,056139 | 0,056139 | 0,056139 |
| 12      | 0,05364  | 0,04613  | 0,046    |
| 13      | 0,03812  | 0,03812  | 0,03812  |
| 14      | 0,0388   | 0,0388   | 0,0388   |
| 15      | 0,0427   | 0,0427   | 0,0427   |
| 16      | 0,0369   | 0,0369   | 0,0369   |
| 17      | 0,0376   | 0,0376   | 0,0376   |

Πίνακας 5- 7: Τιμές που αποδίδουν οι εμπειρικές εξισώσεις 3,10,11,12,13,14,15,16,17 του πίνακα A-2 της διεθνούς βιβλιογραφίας για τον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας  $n$  κατά Manning

Από τις τιμές των πιο πάνω εξισώσεων υπολογίζω την διάμεσο τιμή (MEDIAN), η οποία εκχωρείται και ως τελική τιμή του συντελεστή τραχύτητας για το μέσο σενάριο συντελεστή τραχύτητας  $n_{AVG}$ , για το εντός κοίτης κομμάτι του εκάστοτε κλάδου.

Έχοντας ως δεδομένη τη διάμεσο τιμή από τις πιο πάνω εξισώσεις, η οποία λαμβάνεται ως τιμή για το μέσο σενάριο  $n_{AVG}$ , υπολογίζεται το κάτω όριο 25% της διαμέσου της εμπειρικής κατανομής, το οποίο είναι η τιμή του σεναρίου  $n_{LOW}$  και το άνω όριο του 75% της διαμέσου της εμπειρικής κατανομής  $n_{UP}$  για τα εντός κοίτης ποταμού κομμάτια. Η κατανομή των τιμών παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα:

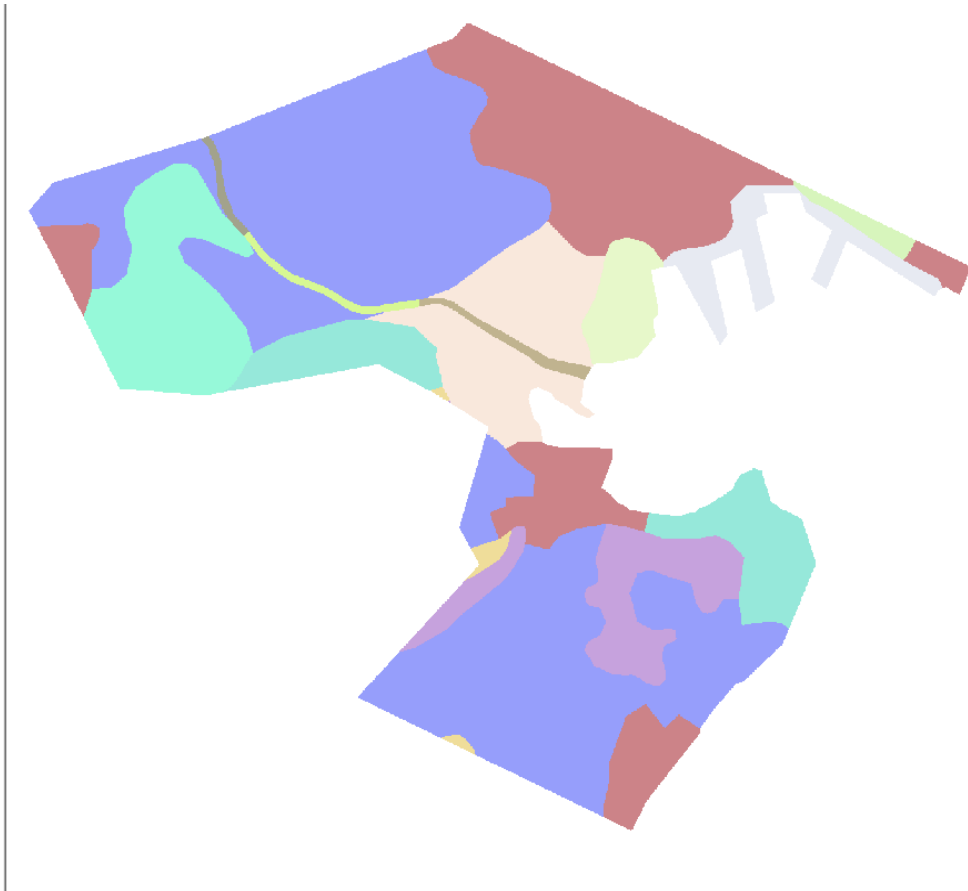


Σχήμα 5- 14: Εμπειρική κατανομή των τιμών(Διάμεσος, άνω 75% των τιμών, κάτω 25% των τιμών)

Οι εκτιμήσεις για την διάμεσο, του άνω 75% των τιμών και του κάτω 25% των τιμών για τον εκάστοτε κλάδο του ποταμού παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον ακόλουθο πίνακα:

|        | J2J1    | J3J2   | J4J2   |
|--------|---------|--------|--------|
| Q1     | 0,03749 | 0,0376 | 0,0376 |
| MEDIAN | 0,03812 | 0,0388 | 0,0388 |
| Q3     | 0,0427  | 0,0458 | 0,0456 |

Πίνακας 5- 8: εκτιμήσεις για την διάμεσο, του άνω 75% των τιμών και του κάτω 25% των τιμών για τον εκάστοτε κλάδο του ποταμού.



Σχήμα 5- 15: Παράδειγμα επιπέδου με εκχωρημένες τις τιμές του συντελεστή τραχύτητας για κάθε περιοχή ανάλογα την εκάστοτε χρήση γης(Χωρική διαφοροποίηση)

### 5.7. Περίοδος επαναφοράς

Τα σενάρια που θα επιλυθούν μέσω του HEC-RAS θα έχουν διαφοροποίηση και ως προς την περίοδο επαναφοράς. Επιλέχθηκαν να ελεγχθούν τρία διαφορετικά σενάρια περιόδων επαναφοράς, σε ακολουθία με τις κατευθύνσεις που δίνει η Οδηγία 2007/60/EK, που είναι οι περιπτώσεις των  $T=50$ -ετών,  $T=100$ -ετών και  $T=1000$ -ετών.

Η περίοδος επαναφοράς  $T$  αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα σε έτη που χρειάζεται κατά μέσο όρο να παρέλθει, ώστε η μέση ένταση βροχής  $I$  διάρκειας  $t$  να υπερβεί την

τιμή  $i$ . Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τη θεωρία των πιθανοτήτων, η συνάρτηση κατανομής της τυχαίας μεταβλητής  $I$ , ορίζεται:

$$F_I(i) = P(I < i) \quad \text{Εξίσωση 5.6.}$$

όπου με  $P(I < i)$  συμβολίζεται η πιθανότητα να μην πραγματοποιηθεί η υπέρβαση της τιμής κατά τη διάρκεια ενός υδρολογικού ή ημερολογιακού έτους.

Η πιθανότητα υπέρβασης της τιμής κατά τη διάρκεια ενός έτους είναι:

$$F_{1I}(i) = 1 - F_I(i) = P(I > i) \quad \text{Εξίσωση 5.7.}$$

Η περίοδος επαναφοράς είναι το αντίστροφο της πιθανότητας υπέρβασης, δηλαδή:

$$T = \frac{1}{F_{1I}(i)} = \frac{1}{P(I > i)} \quad \text{Εξίσωση 5.8.}$$

Σημειώνεται ότι το μέγεθος της περιόδου επαναφοράς είναι απλά και μόνο ένα στατιστικό μέγεθος. Έτσι, δεν σημαίνει ότι η υπέρβαση της βροχόπτωσης σχεδιασμού θα γίνει μόνο μια φορά στα  $T$  χρόνια, αλλά μπορεί να συμβαίνει και κάθε χρόνο καθώς η αντίστοιχη πιθανότητα είναι  $1/T$ .

Η περίοδος επαναφοράς της βροχόπτωσης σχεδιασμού δεν είναι ίση με την περίοδο επαναφοράς της πλημμύρας σχεδιασμού (π.χ. πλημμυρική αιχμή) κυρίως λόγω της επίδρασης των υδρολογικών απωλειών (κατακράτηση, διήθηση κ.λπ.), που είναι διαφορετικές σε καθένα επεισόδιο. Γενικά, είναι προτιμότερη η διευθέτηση της περιόδου επαναφοράς της βροχόπτωσης σχεδιασμού από τον απευθείας υπολογισμό της περιόδου επαναφοράς της πλημμυρικής αιχμής δεδομένου ότι τα δεδομένα βροχόπτωσης αποτελούν στατιστικό δείγμα με μεγαλύτερη χρονική διάρκεια και πληρότητα καταγραφών ακόμη και στην περίπτωση, που υπάρχει θέση μέτρησης των παροχών στο υδατόρευμα.

Γενικά η περίπτωση της  $T=50$ -έτη αντιστοιχεί σε πλημμύρες υψηλής πιθανότητας υπέρβασης, ενώ το σενάριο για  $T=1000$ -έτη αποτελεί ακραία περίπτωση και αντιστοιχεί

σε σπάνια πλημμυρικά φαινόμενα. Τέλος η εξεταζόμενη περίπτωση της περιόδου επαναφοράς  $T=100$ -έτη αντιστοιχεί σε πλημμύρα μέσης πιθανότητας υπέρβασης.

## **5.8. Προσομοίωση Υδατορευμάτων σε Αστικό Περιβάλλον**

Η προσομοίωση ενός πλημμυρικού γεγονότος σε αστικό περιβάλλον είναι μία από τις πιο σημαντικές προκλήσεις, αφενός διότι η πολυπλοκότητα του αστικού ιστού γεννάει μία σειρά από τεχνικές δυσκολίες στην προσομοίωση, αφετέρου διότι η διακινδύνευση (risk) στο αστικό περιβάλλον είναι πολύ υψηλή σε σχέση με την ύπαιθρο, εφόσον ο πληθυσμός αλλά και η οικονομική δραστηριότητα μίας κοινωνίας είναι συγκεντρωμένη στις πόλεις (Tsakiris, 2013).

Το κύριο πρόβλημα που προκύπτει είναι η προσομοίωση των κτιρίων εντός του αστικού ιστού, η ύπαρξη των οποίων δημιουργεί ασυνέχειες στη ροή σε τοπικό επίπεδο, επηρεάζοντας έτσι την διαδρομή, το βάθος και την ταχύτητα ροής του νερού. Οι κύριοι τρόποι αναπαράστασης των κτιρίων είναι οι εξής όπως αναφέρουν οι Bellos και Tsakiris (2015):

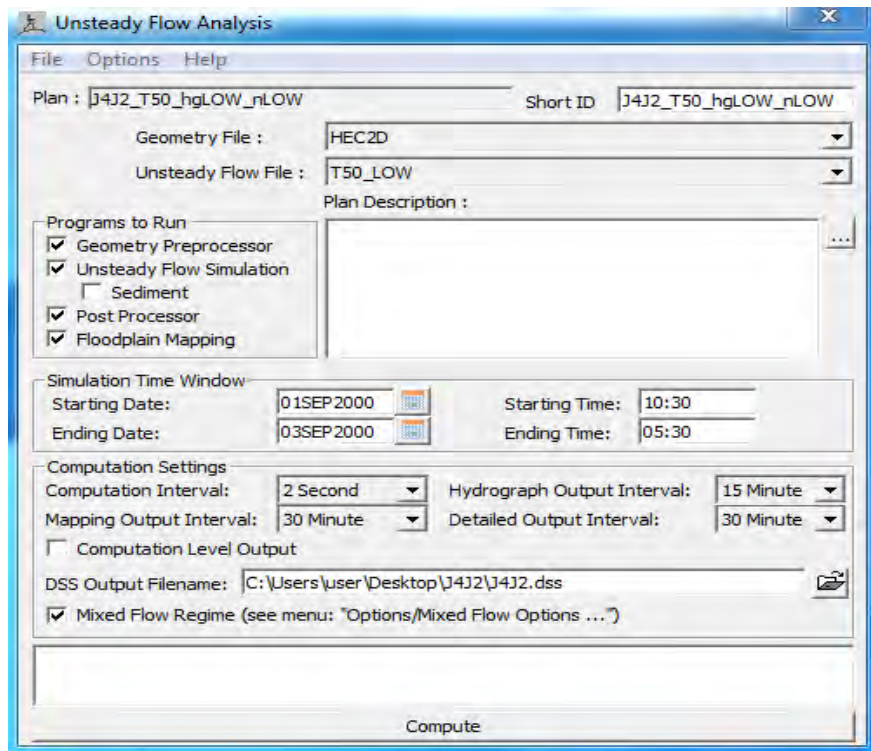
- Το κάθε κελί του υπολογιστικού πλέγματος που βρίσκεται στα όρια του κάθε κτιρίου ή κατασκευής ορίζεται στο αριθμητικό μοντέλο ως στερεό όριο ή όριο ανάκλασης. Η συνιστώσα της ροής στην κάθετη διεύθυνση λαμβάνει μηδενική τιμή πάνω στο κελί που αποτελεί το όριο του κτιρίου, με αποτέλεσμα γύρω από το κτίριο να δημιουργείται ένα φράγμα.
- στο κάθε κελί του υπολογιστικού πλέγματος που βρίσκεται εντός των ορίων του εκάστοτε κτιρίου αυξάνεται τοπικά το υψόμετρο του εδάφους. Αυτό επιτυγχάνεται με την αύξηση των κλίσεων του πυθμένα.
- στο κάθε κελί του υπολογιστικού πλέγματος που βρίσκεται εντός των ορίων του εκάστοτε κτιρίου αυξάνονται τοπικά η τραχύτητα, μέσω του συντελεστή τραχύτητας Manning  $n$ , όπου υπάρχουν κτίρια ή άλλες κατασκευές.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται η δεύτερη μέθοδος. Με αυτή την μέθοδο κάθε κτίριο θεωρείται ως αδιαπέρατο όριο και έτσι δεν λαμβάνεται υπόψιν η εισροή του νερού στα χαμηλά επίπεδα των κατασκευών, φαινόμενο που δεν αντιπροσωπεύει την πραγματική κατάσταση. Ωστόσο δεν εισάγει καμία νέα παράμετρο, άρα και αβεβαιότητα, κάτι που είναι πολύ σημαντικό στην μεθοδολογία της παρούσας εργασίας, καθώς υπάρχουν σημαντικές αβεβαιότητες που έχουν εισαχθεί από άλλες παραμέτρους.

## 5.9. Οργάνωση της υδραυλικής προσομοίωσης

Η οργάνωση της υδραυλικής προσομοίωσης και η ρύθμιση των παραμέτρων της και των ορίων ανοχής πραγματοποιείται στο παράθυρο Unsteady Flow Analysis.

Σε αυτό το παράθυρο, που φαίνεται στο σχήμα 6-1, δημιουργείται κάθε φορά ένα διαφορετικό πλάνο, επιλέγοντας κάθε φορά το κατάλληλο υδρογράφημα (Unsteady Flow File) και το κατάλληλο γεωγραφικό υπόβαθρο (Geometry File), ο συνδυασμός των οποίων κάθε φορά μας δημιουργεί ένα διαφορετικό πλημμυρικό σενάριο.



Σχήμα 5- 16: Παράθυρο διαλόγου Unsteady Flow Analysis

Ακολούθως , ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τα προγράμματα ως προς εκτέλεση που επιθυμεί. Η λίστα των εντολών εμπεριέχει τα εξής προγράμματα:

Επιπλέον, ο χρήστης επιλέγει το χρονικό διάστημα του πλημμυρικού γεγονότος στο οποίο επιθυμεί να γίνει η προσομοίωση. Στην παρούσα εργασία, για κάθε υποπεριοχή χρησιμοποιήθηκε διαφορετικός χρόνος προσομοίωσης. Ωστόσο όλα τα σενάρια άρχισαν την προσομοίωση για γεγονός πλημμύρας που ξεκινά στις 1/9/2000. Οι ρυθμίσεις για κάθε περιοχή ξεχωριστά φαίνονται στα σχήματα B-12 έως B-14 του παραρτήματος B. Τέλος, ρυθμίζονται τα χρονικά βήματα της προσομοίωσης:

- Computation Interval
- Mapping Output Interval
- Hydrograph Output Interval
- Detailed Output Interval

Σημαντική παράμετρος που παίζει ρόλο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων καθώς και τη σταθερότητα του μοντέλου είναι το υπολογιστικό χρονικό βήμα  $\Delta t$  (Computational Time Step). Η τιμή του βήματος αποτυπώνει τη συχνότητα με την οποία πραγματοποιούνται οι απαιτούμενοι υπολογισμοί σε κάθε κελί, σε σχέση με τον χρόνο προσομοίωσης του γεγονότος . Η τιμή αυτή ορίζεται από τον χρήστη. Το πρόγραμμα δίνει μια πληθώρα επιλογών για το δεδομένο αυτό, δεν επιτρέπει όμως στο χρήστη να εισάγει κάποια τιμή που πιθανά να έχει υπολογίσει ο ίδιος, αν αυτή δεν συμπίπτει με τις default τιμές του HEC-RAS. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε χρονικό βήμα 2 δευτερολέπτων, καθώς ικανοποιήθηκαν οι συνθήκες. Επιλογή διαφορετικού χρονικού βήματος θα οδηγούσε σε αστάθεια του μοντέλου και προβλήματα στην εξαγωγή ορθών αποτελεσμάτων. Επιλογή μικρότερου βήματος θα αύξανε τον υπολογιστικό χρόνο της προσομοίωσης των σεναρίων. Η επιλογή του βήματος ως  $n=2$  sec, σημαίνει πως οι επιλύσεις των εξισώσεων στα κελιά του δισδιάστατου πλέγματος πραγματοποιούνται κάθε δύο δευτερόλεπτα για τις συνολικές ώρες του γεγονότος. Προκύπτει λοιπόν, πως οι επιλύσεις εκτελούνται συνολικά χιλιάδες φορές για κάθε κελί, ώστε να δοθούν τιμές στα βάθη και τις ταχύτητες ροής. Για παράδειγμα, στην περιοχή από την συμβολή Ξηριά-Σεσκουλιώτη έως την εκβολή(J2J1), η ανάλυση θα πραγματοποιηθεί για  $N=26$  ώρες. Άρα οι επιλύσεις για κάθε κελί θα γίνουν  $26*60*(60/2)=46800$  φορές.

Η εντολή Mapping Output Interval ορίζει το χρονικό βήμα στο οποίο θα εξάγονται οι μεταβλητές υπολογισμού στους χάρτες.

### **5.10. Επεξεργασία παραγόμενων χαρτών**

Τα παράγωγα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο HEC-RAS είναι αρχεία μορφής Raster. Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων αυτών και η παραγωγή των τελικών χαρτών έγινε στο ArcGIS μετά από την εισαγωγή των αρχείων με τις τιμές των βαθών και των ταχυτήτων ροής. Εκτός του τομέα της οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων με τη δημιουργία των χαρτών, το ArcGIS χρησιμοποιήθηκε για μια σειρά υπολογιστικών αριθμητικών πράξεων στα αρχεία αυτά. Στους παραγόμενους χάρτες παρατίθεται υπόμνημα με το εύρος των τιμών για τα βάθη ή τις ταχύτητες ροής, καθώς και του υψομέτρου της περιοχής. Η δυνατότητα για τη δημιουργία αντίστοιχης λεπτομέρειας χάρτη δεν υπάρχει στο HEC-RAS.

Οι μεταβολές στα βάθη και τις ταχύτητες ροής σε κάθε χάρτη αποτυπώνονται μέσω της διακύμανσης της χρωματικής κλίμακας. Αυτό έγινε με επιλογή κατάλληλου χρωματικού υπόβαθρου για κάθε περίπτωση, ώστε να είναι και ξεκάθαρο οπτικά με το υπόβαθρο του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

- Η χωρική κατανομή του μέγιστου βάθους νερού. Η διαβάθμιση βάθους γίνεται με μπλε χρώμα σε 5 επίπεδα: <0.2 m, 0.2- 0.5 m, 0.5-1.0 m, 1.0 – 2.0 m και > 2.0m
- Η χωρική κατανομή της μέγιστης ταχύτητας ροής. Η διαβάθμιση ταχύτητας γίνεται με κόκκινο χρώμα σε 4 επίπεδα: <1m/sec, 1-2m/sec, 2-5 m/sec και >5m/sec

Στους χάρτες των βαθών, επιλέχθηκε η διακύμανση του μπλε χρώματος, με τις μικρές τιμές να αποδίδονται με ανοιχτό και λιγότερο έντονο γαλάζιο χρώμα σε αντίθεση με τις μεγαλύτερες τιμές που αποτυπώθηκαν πιο έντονες-σκούρες μπλε.



Στους χάρτες των μέγιστων ταχυτήτων επιλέχθηκε η διακύμανση του κόκκινου χρώματος, με τις μικρότερες τιμές να αποτυπώνονται με ανοιχτό κόκκινο και τις μεγαλύτερες με σκούρο κόκκινο.

### **5.11. Εξετάζόμενα Σενάρια**

Κάνοντας μια ανακεφαλαίωση του παρόντος κεφαλαίου, για μια πλήρη έρευνα σε ποταμούς και χειμάρρους απαιτείται η ανάλυση των ακόλουθων σεναρίων

- πλημμύρες υψηλής πιθανότητας υπέρβασης, που θεωρείται ότι αντιστοιχούν σε περίοδο επαναφοράς 50-έτη
- πλημμύρες μέσης πιθανότητας υπέρβασης, που θεωρείται ότι αντιστοιχούν σε περίοδο επαναφοράς 100-έτη
- πλημμύρες χαμηλής πιθανότητας υπέρβασης, που θεωρείται ότι αντιστοιχούν σε περίοδο επαναφοράς 1 000-έτη.

Επιπλέον, για κάθε περίοδο επαναφοράς εξετάζονται τρία σενάρια, που αναφέρονται σε ευνοϊκές, μέσες και δυσμενείς υγρασιακές συνθήκες. Στην πράξη, τα σενάρια αυτά λαμβάνουν υπόψη το εύρος αβεβαιότητας στις εκτιμήσεις της βροχόπτωσης σχεδιασμού, αλλά και στις υποθέσεις που γίνονται σχετικά με τις συνθήκες αρχικής υγρασίας του εδάφους.

Από τους συνδυασμούς των τριών υγρασιακών συνθηκών με τις τρεις περιόδους επαναφοράς προκύπτουν, τελικά  $3 \times 3 = 9$  σενάρια. Εισάγοντας και τις υποθέσεις για τον συντελεστή τραχύτητας(χαμηλός, μέσος, υψηλός) προκύπτουν τελικά  $9 \times 3 = 27$  σενάρια για καθεμία από τις τρεις υποπεριοχές. Με δεδομένο πως για ακριβέστερη ανάλυση δημιουργήθηκαν 27 σενάρια για κάθε περιοχή, και έχοντας τρεις περιοχές, τα «τρεξίματα» τα οποία επίλυσε το HEC-RAS φτάνουν συνολικά τα 81.

Ωστόσο από τους εξαγόμενους χάρτες κάθε «τρεξίματος» συνδυάζονται τα όμοια «τρεξίματα» κάθε επιμέρους περιοχής για να δημιουργηθεί ο πλημμυρικός χάρτης για το σύνολο της περιοχής.

Για παράδειγμα, συνδυάζοντας τους χάρτες για χαμηλό υδρογράφημα, χαμηλού συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=50-έτη για την περιοχή J2J1 με τους αντίστοιχους χάρτες των τμημάτων J4J2 και J3J2, δημιουργούνται οι χάρτες βάθους και ταχυτήτων για το σύνολο της περιοχής μελέτης, όσον αφορά την περίπτωση του συνδυασμού για χαμηλό υδρογράφημα, χαμηλού συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=50-έτη. Φυσικά η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τα 27 διαφορετικά σενάρια. Όπως προαναφέρθηκε, η ένωση και η εξαγωγή των τελικών χαρτών πραγματοποιείται στο περιβάλλον του ArcGIS.

Τα 27 σενάρια που επιλύονται και για τα οποία εξάγονται οι κατάλληλο χάρτες παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

| <u>ΠΕΡΙΟΔΟΣ</u><br><u>ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ</u> | <u>ΣΥΝΘΗΚΕΣ</u><br><u>ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ</u> | <u>ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ</u><br><u>ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ</u> |
|--------------------------------------|--|---|
| <b>T=50</b>                          | hg_LOW                                   | n_LOW                                   |
|                                      |  | n_AVG                                   |
|                                      |  | n_UP                                    |
|                                      | hg_AVG                                   | n_LOW                                   |
|                                      |  | n_AVG                                   |
|                                      |  | n_UP                                    |
|                                      | hg_UP                                    | n_LOW                                   |
|                                      |  | n_AVG                                   |
|                                      |  | n_UP                                    |
| <b>T=100</b>                         | hg_LOW                                   | n_LOW                                   |
|                                      |  | n_AVG                                   |
|                                      |  | n_UP                                    |
|                                      | hg_AVG                                   | n_LOW                                   |
|                                      |  | n_AVG                                   |
|                                      |  | n_UP                                    |

|               |        |       |
|---------------|--------|-------|
|               |        | n_LOW |
|               | hg_UP  | n_AVG |
|               |        | n_UP  |
| <b>T=1000</b> | hg_LOW | n_LOW |
|               |        | n_AVG |
|               |        | n_UP  |
|               | hg_AVG | n_LOW |
|               |        | n_AVG |
|               |        | n_UP  |
|               | hg_UP  | n_LOW |
|               |        | n_AVG |
|               |        | n_UP  |

Πίνακας 5- 9: Σύνθεση των 27 διαφορετικών σεναρίων

## **Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα προσομοίωσης**

### **6.1. Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης. Ειδικότερα, αποδίδονται χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας για τα είκοσι επτά διαφορετικά σενάρια . Επίσης, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων, σε κάθε περίοδο επαναφοράς, όσον αφορά τους συντελεστές τραχύτητας και τις συνθήκες υγρασίας που επιλέχθηκαν. Για κάθε ένα από τα είκοσι επτά σενάρια που προέκυψαν παρατίθενται στοιχεία για την έκταση της πλημμύρας, το βάθος νερού και την ταχύτητα ροής.

### **6.2. Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς**

#### **T=50-έτη**

Τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης δείχνουν πως όλοι οι κλάδοι του ρέματος Ξηριά Βόλου εμφανίζουν πλημμυρικά φαινόμενα για περίοδο επαναφοράς T=50-έτη.

Πιο συγκεκριμένα, για δυσμενέστερες συνθήκες υγρασίας διαπιστώνεται αύξηση της επιφάνεια κατάκλυσης της πλημμύρας όπως είναι και λογικό, αφού αυτά τα σενάρια προκύπτουν από υδρογραφήματα με υψηλότερη πλημμυρική αιχμή. Αντίστροφα, για τα σενάρια χαμηλών υγρασιακών συνθηκών η κατακλυζόμενη επιφάνεια είναι σχετικά μικρότερη. Επιπλέον, παρατηρείται ότι για χαμηλές συνθήκες υγρασίας και για τα τρία σενάρια συντελεστών τραχύτητας ο χείμαρρος πλημμυρίζει μόνο εντός της κοίτης, εξαιρουμένης της ευρύτερης περιοχής της συμβολής Σεσκουλιώτη-Ξηριά, όπου η κατακλυζόμενη επιφάνεια επεκτείνεται εκτός της κοίτης.

Επίσης, στα σενάρια υψηλών συνθηκών υγρασίας η εικόνα είναι πιο δυσμενής καθώς εμφανίζονται μεγαλύτερα βάθη ροής και η πλημμύρα έχει μεγαλύτερη έκταση με

αποτέλεσμα να επηρεάζεται τμήμα της παραλιακής περιοχής και να πλήττεται μέρος του πολεοδομικού συγκροτήματος του Δήμου Βόλου.

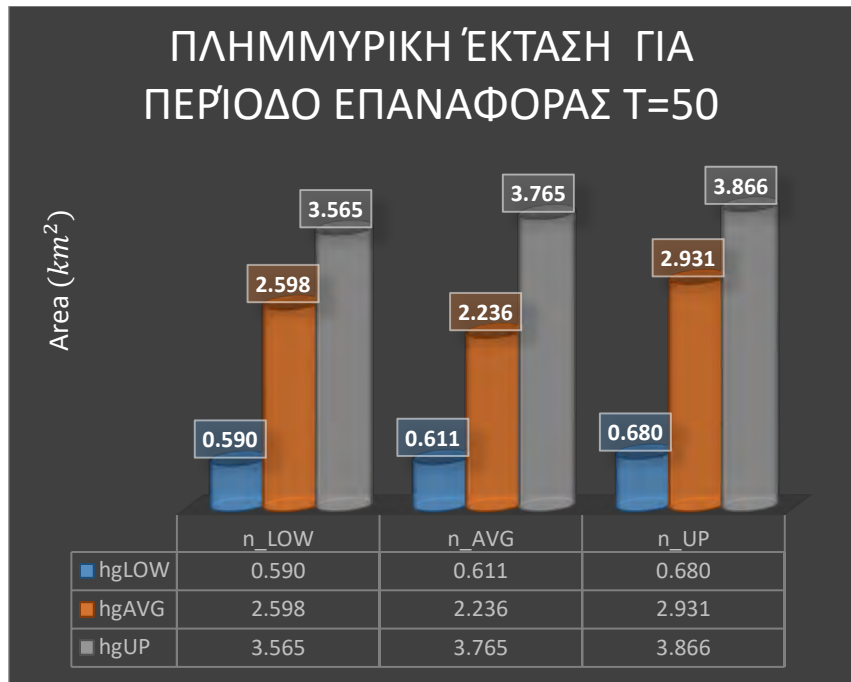
Όσον αφορά την διαφοροποίηση μεταξύ των σεναρίων όσον αφορά την επίπτωση του συντελεστή τραχύτητας, προκύπτει πως όσο πιο υψηλός είναι ο συντελεστής τραχύτητας, τόσο πιο μικρές είναι οι ταχύτητες. Επίσης παρατηρείται μια μικρή μείωση του βάθους ροής.

Η μεγαλύτερη επιφάνεια κατάκλυσης προκύπτει για υψηλές συνθήκες υγρασίας και υψηλό συντελεστή τραχύτητας και είναι  $3,866 \text{ km}^2$ , ενώ η μικρότερη προκύπτει για συνδυασμό χαμηλών συνθηκών υγρασίας και χαμηλού συντελεστή τραχύτητας και είναι  $0,590 \text{ km}^2$ .

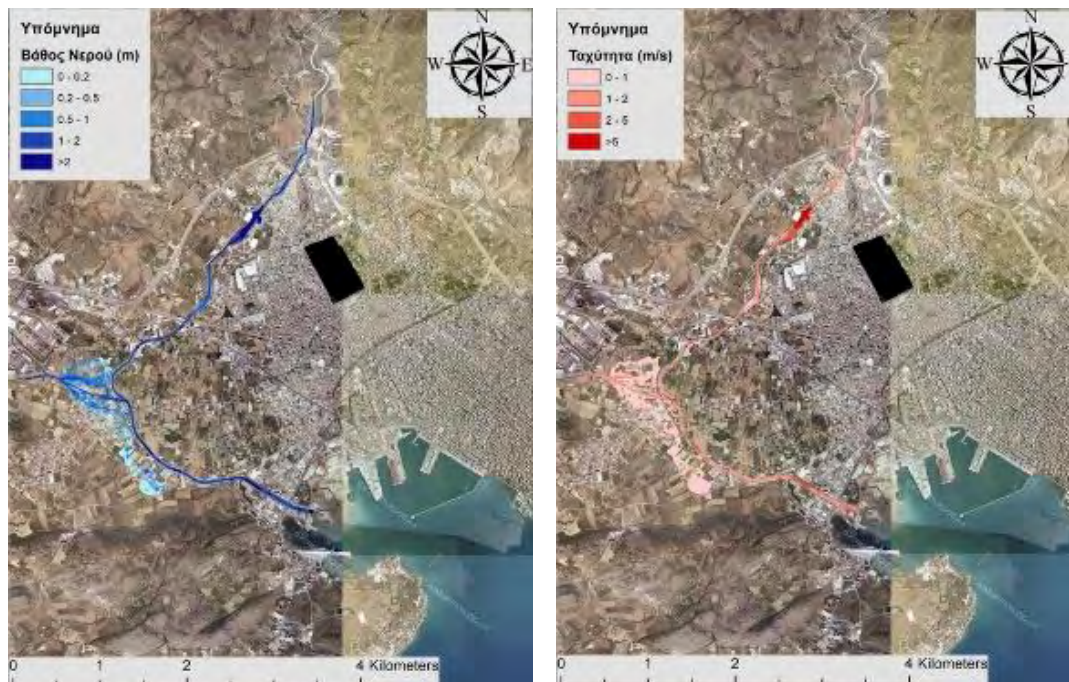
Τα μέγιστα βάθη νερού γενικά έχουν μεγαλύτερες τιμές στην κοίτη του ποταμού. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω αστάθειας του μοντέλου παρατηρούνται πολύ μεγάλες τιμές μεγίστων βαθών νερού σε μερικά σημεία της κλίμακας των μερικών εκατοντάδων τετραγωνικών μέτρων στο μέσο του άνω βορειοδυτικού κλάδου του υδατορεύματος.

Στον Πίνακα 6-1 παρουσιάζονται οι τιμές της έκτασης της πλημμύρας σε  $\text{km}^2$  για τα 9 σενάρια με περίοδο επαναφοράς  $T=50$ -έτη. Στα Σχήματα 6-1 έως 6-9 παρουσιάζονται οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας όσον αφορά την χωρική κατανομή του μέγιστου βάθους νερού και της μέγιστης ταχύτητας ροής.

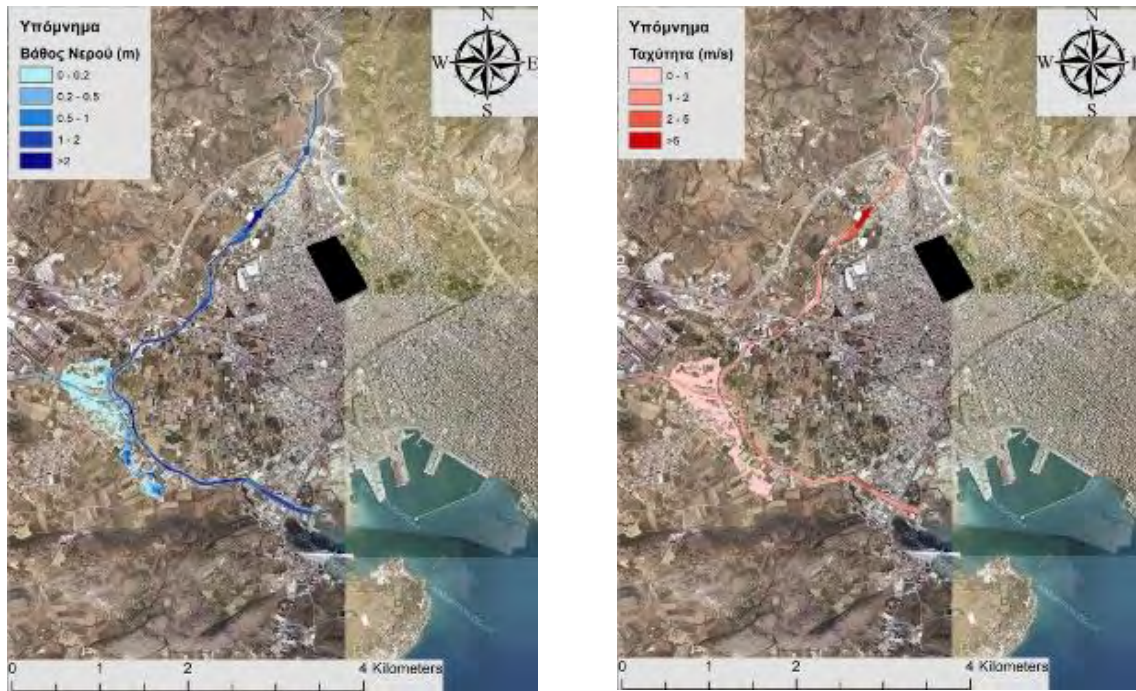
Επίσης παρατηρείται ιδιομορφία στα σενάρια με μέσες συνθήκες υγρασίας, αφού τα σενάρια με τον χαμηλό συντελεστή τραχύτητας κατακλύζουν μεγαλύτερη επιφάνεια από τον μέσο συντελεστή τραχύτητας.



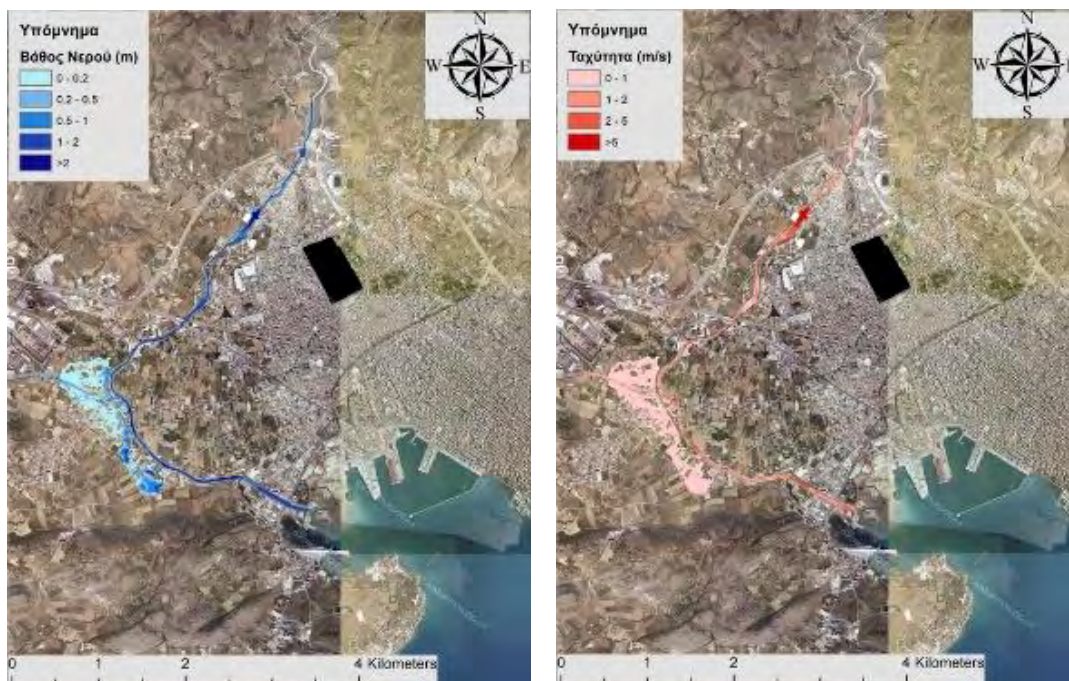
Πίνακας 6- 1 : Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς T=50-έτη



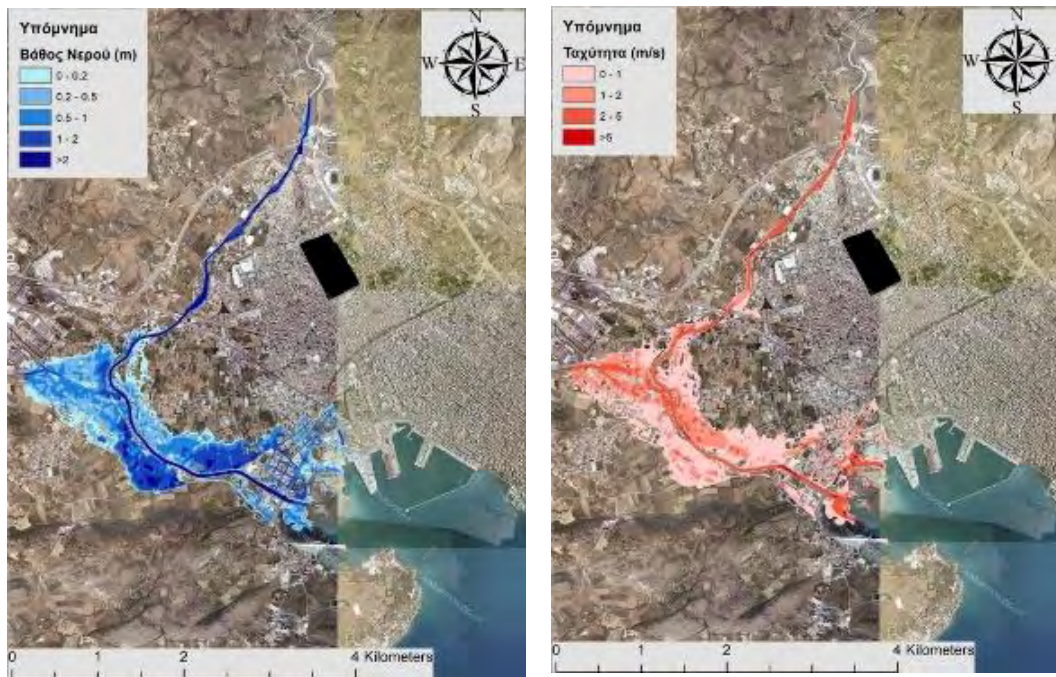
Σχήμα 6- 1: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με χαμηλές συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=50 ετών (T50\_hgLOW\_nLOW)



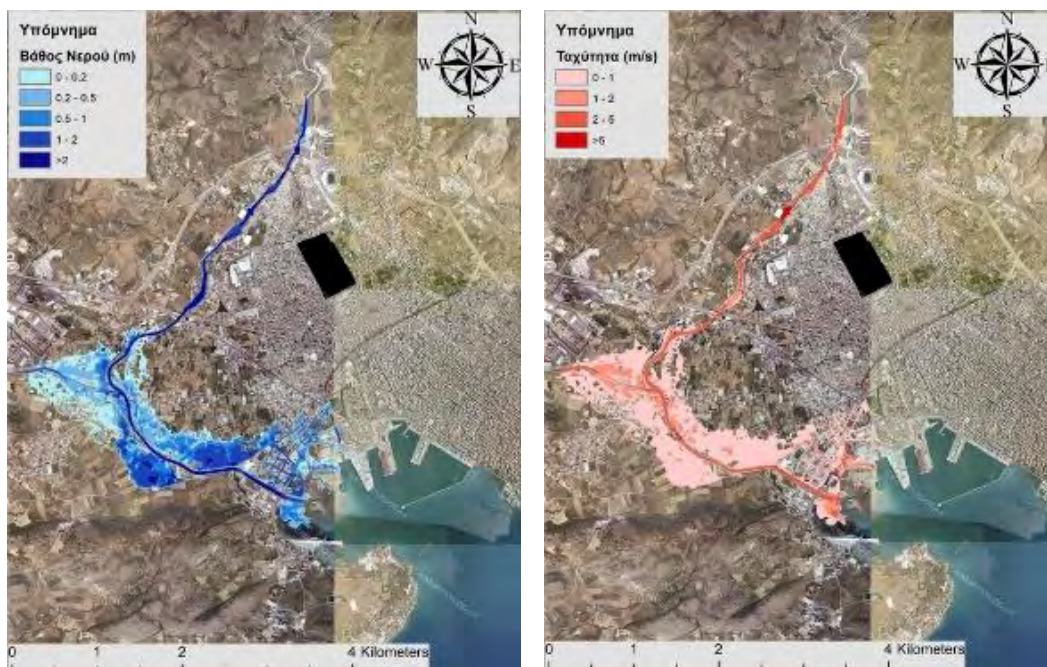
Σχήμα 6- 2: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με χαμηλές συνθήκες υγρασίας και μέσο συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=50$  ετών ( $T50\_hgLOW\_nAVG$ )



Σχήμα 6- 3: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με χαμηλές συνθήκες υγρασίας και υψηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=50$  ετών ( $T50\_hgLOW\_nUP$ )

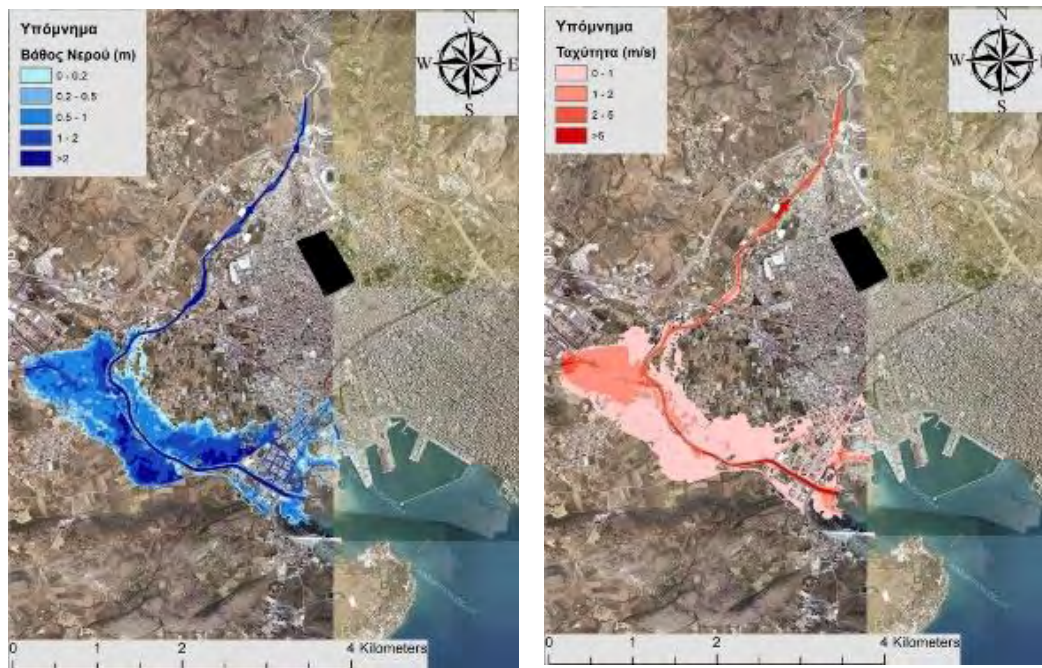


Σχήμα 6- 4: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με μέσες συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=50 ετών (T50\_hgAVG\_nLOW)

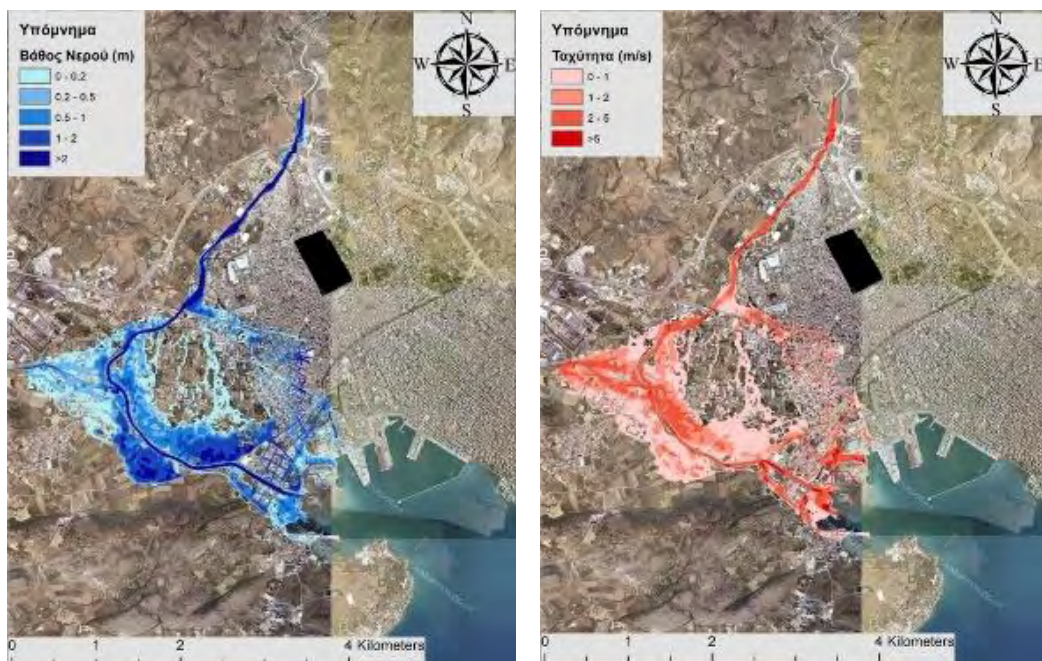


Σχήμα 6- 5: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με μέσες συνθήκες υγρασίας και μέσο συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=50 ετών (T50\_hgAVG\_nAVG)

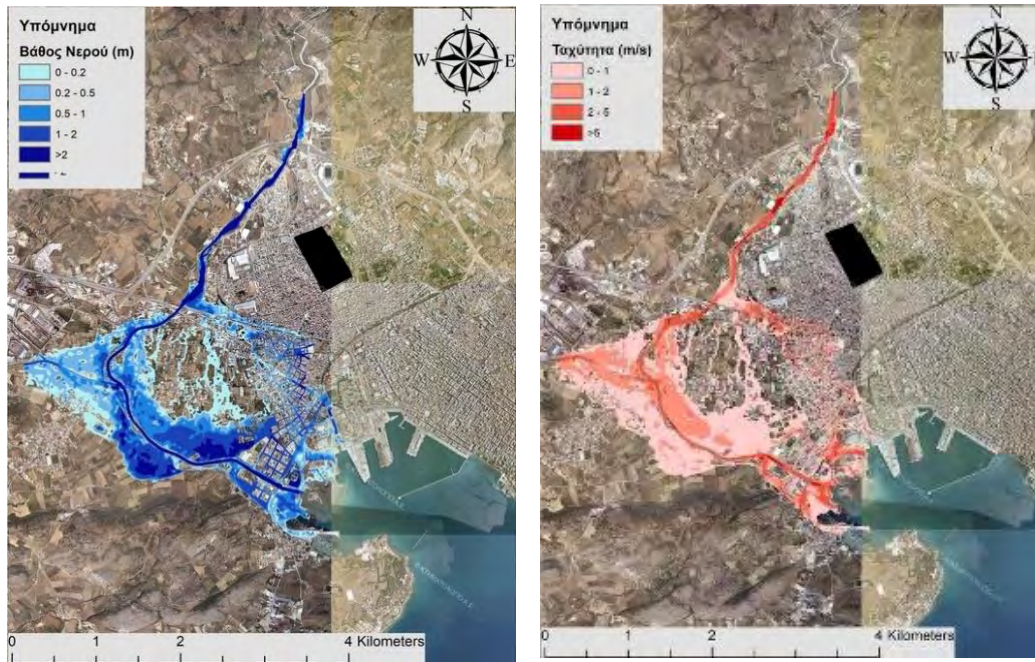




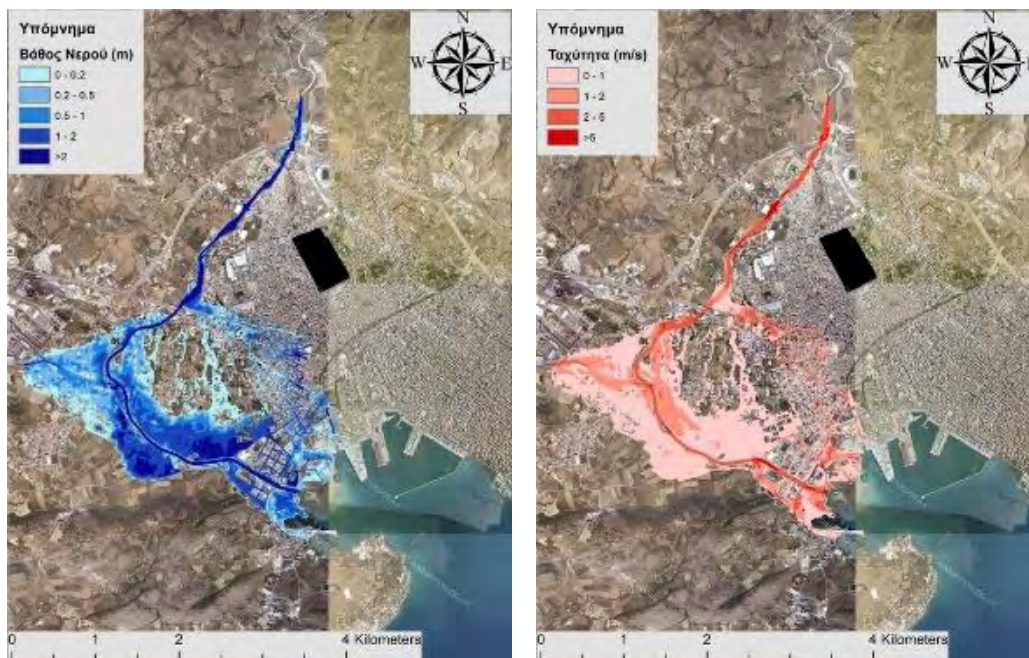
Σχήμα 6- 6: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με μέσες συνθήκες υγρασίας και υψηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=50$  ετών (T50\_hgAVG\_nUP)



Σχήμα 6- 7: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με υψηλές συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=50$  ετών (T50\_hgUP\_nLOW)



Σχήμα 6- 8: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με υψηλές συνθήκες υγρασίας και μέσο συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=50$  ετών ( $T50\_hgUP\_nAVG$ )



Σχήμα 6- 9: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με υψηλές συνθήκες υγρασίας και υψηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=50$  ετών ( $T50\_hgUP\_nUP$ )

### **6.3. Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς**

#### **T=100 έτη**

Τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης δείχνουν πως όλοι οι κλάδοι του ρέματος Ξηριά Βόλου εμφανίζουν πλημμυρικά φαινόμενα για περίοδο επαναφοράς T=100-έτη.

Όπως και για T=50-έτη, παρατηρείται πως για δυσμενέστερες συνθήκες υγρασίας αυξάνεται η επιφάνεια κατάκλυσης της πλημμύρας και αντίστροφα. Επιπλέον, παρατηρείται ότι για χαμηλές συνθήκες υγρασίας και για τα τρία σενάρια συντελεστών τραχύτητας ο χείμαρρος πλημμυρίζει μόνο εντός της κοίτης, εξαιρουμένης της ευρύτερης περιοχής της συμβολής Σεσκουλιώτη-Ξηριά, όπου η κατακλυζόμενη επιφάνεια επεκτείνεται εκτός της κοίτης. Ωστόσο για T=100-έτη παρουσιάζεται μικρή αύξηση αυτής της επιφάνειας σε σχέση με τα σενάρια των T=50-ετών. Επίσης, στα σενάρια υψηλών συνθηκών υγρασίας η εικόνα είναι πιο δυσμενής καθώς εμφανίζονται μεγαλύτερα βάθη ροής και η πλημμύρα έχει μεγαλύτερη έκταση με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η ζώνη του Λιμανιού με σχετικά υψηλά βάθη νερού και υψηλές ταχύτητες και να πλήττεται μεγάλο ποσοστό του πολεοδομικού συγκροτήματος του Δήμου Βόλου.

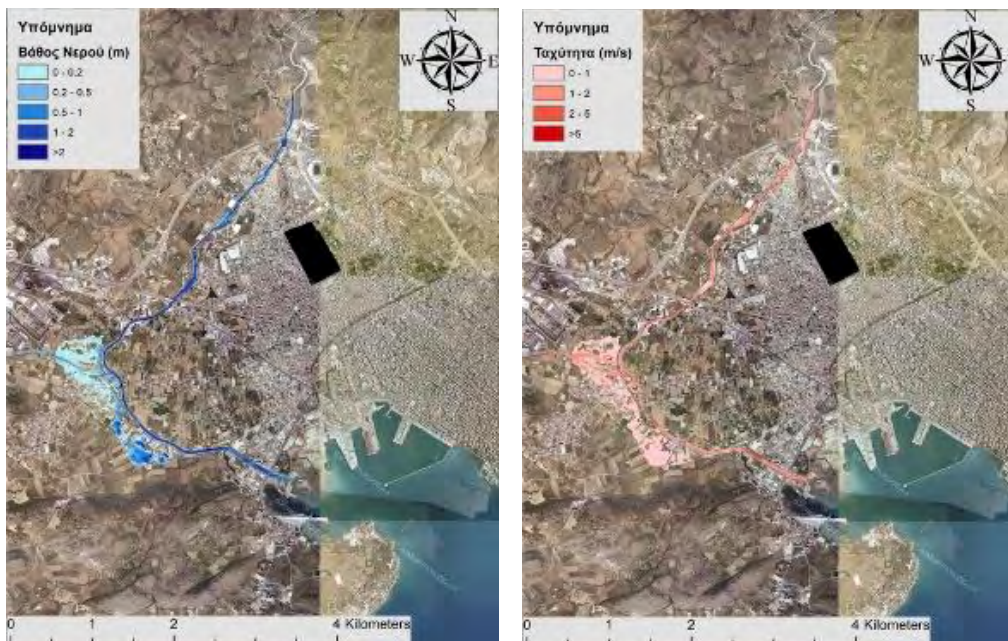
Όσον αφορά την επίπτωση του συντελεστή τραχύτητας, προκύπτει όπως και πριν πως όσο πιο υψηλός είναι ο συντελεστής τραχύτητας, τόσο πιο μικρές είναι οι ταχύτητες. Επίσης παρατηρείται μια μικρή μείωση του βάθους ροής.

Η μεγαλύτερη επιφάνεια κατάκλυσης προκύπτει για υψηλές συνθήκες υγρασίας και υψηλό συντελεστή τραχύτητας και είναι  $4,736 \text{ km}^2$ , ενώ η μικρότερη προκύπτει για συνδυασμό χαμηλών συνθηκών υγρασίας και χαμηλού συντελεστή τραχύτητας και είναι  $0,661 \text{ km}^2$ .

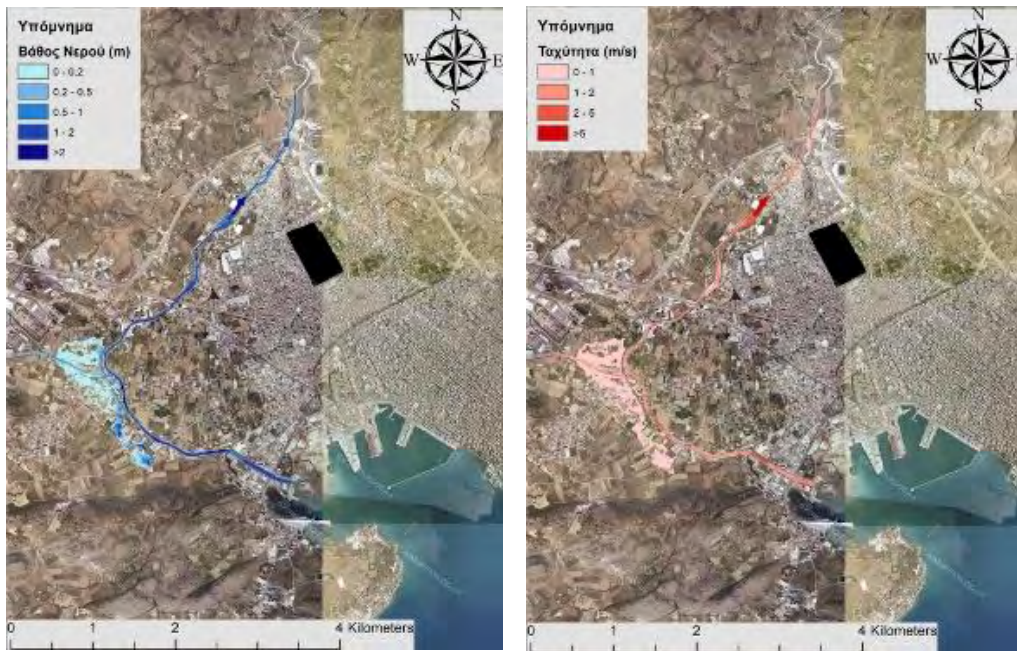
Στον Πίνακα 6-2 παρουσιάζονται οι τιμές της έκτασης της πλημμύρας σε  $\text{km}^2$  για τα 9 σενάρια με περίοδο επαναφοράς T=100-έτη. Στα Σχήματα 6-10 έως 6-18 παρουσιάζονται οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας όσον αφορά την χωρική κατανομή του μέγιστου βάθους νερού και της μέγιστης ταχύτητας ροής.



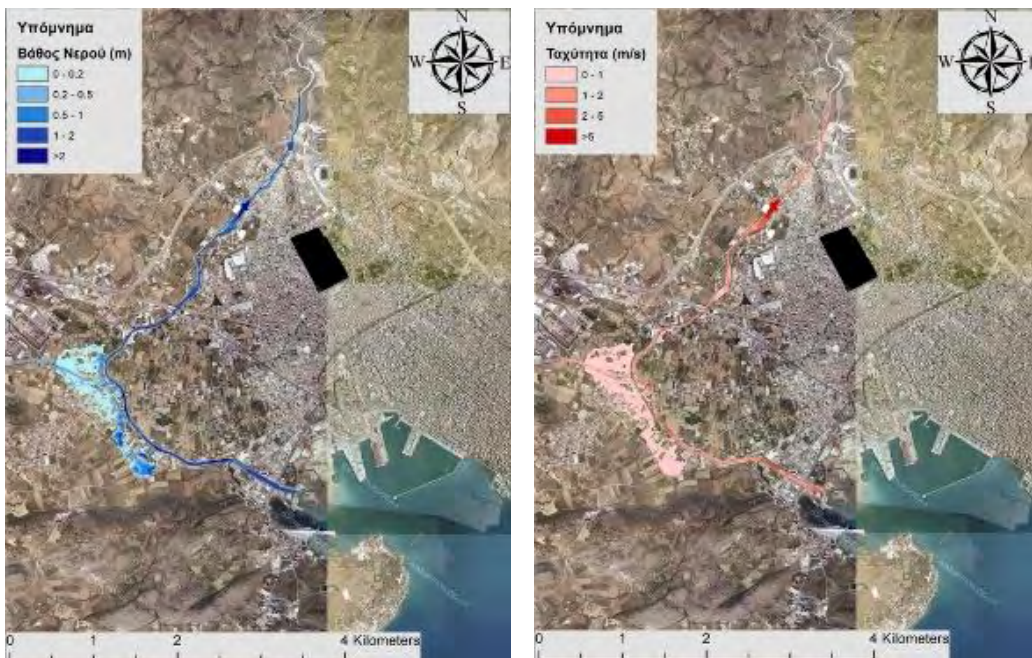
Πίνακας 6- 2 : Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς T=100-έτη



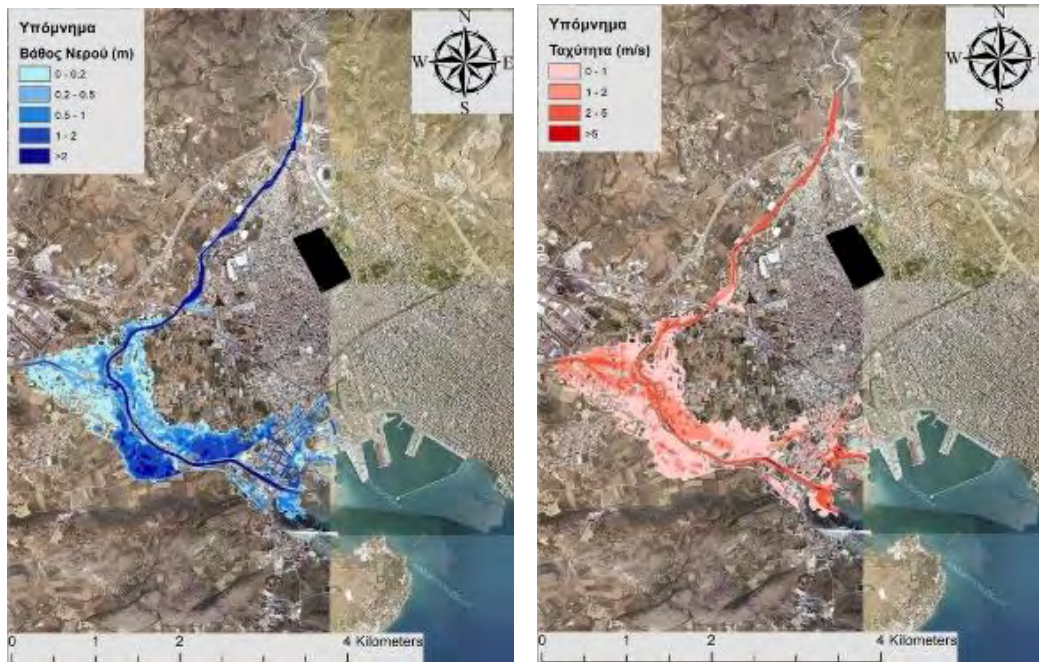
Σχήμα 6- 10: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με χαμηλές συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς T=100 ετών (T100\_hgLOW\_nLOW)



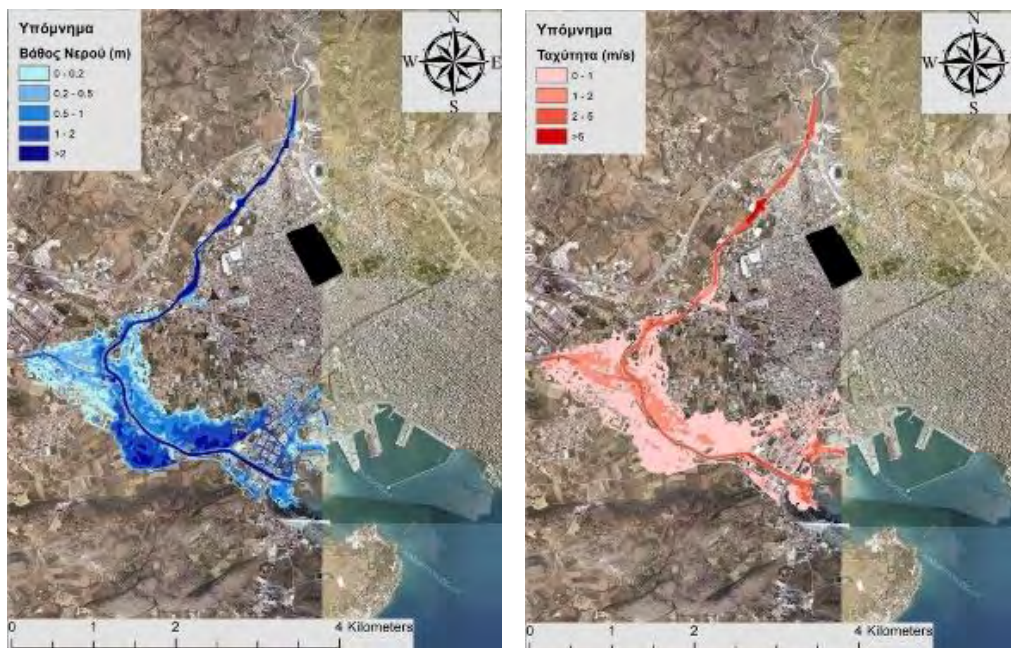
Σχήμα 6- 11: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με χαμηλές συνθήκες υγρασίας και μέσο συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=100$  ετών (T100\_hgLOW\_nAVG)



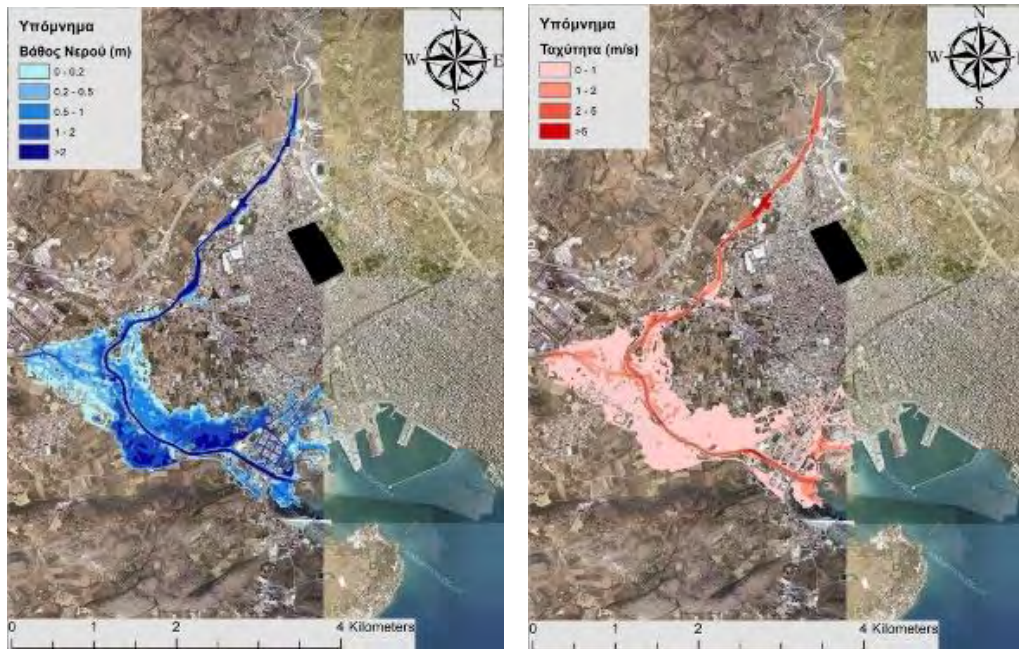
Σχήμα 6- 12: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με χαμηλές συνθήκες υγρασίας και υψηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=100$  ετών (T100\_hgLOW\_nUP)



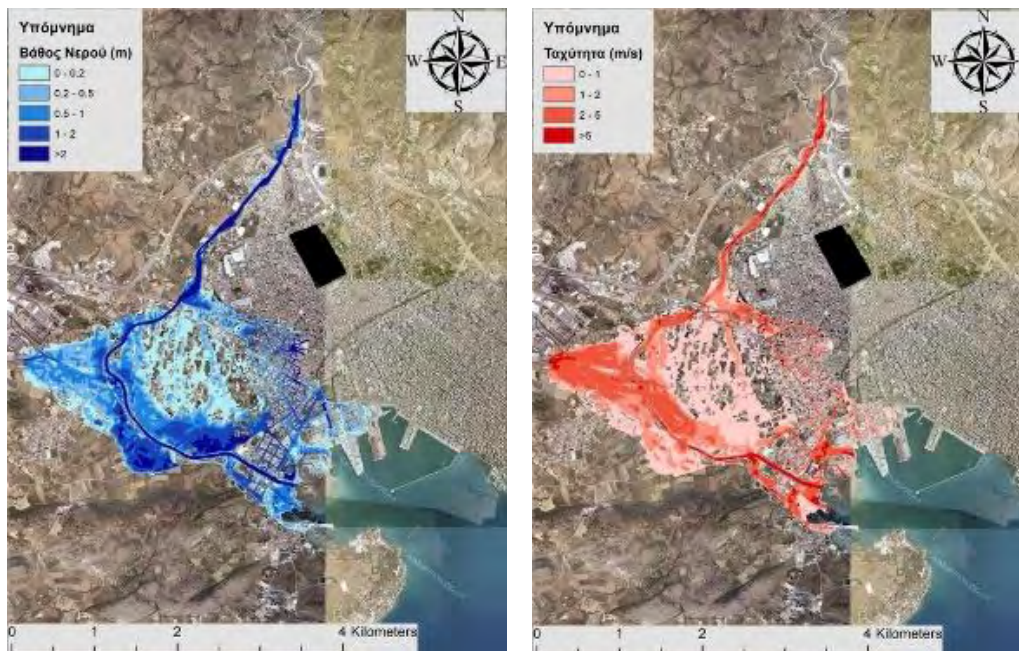
Σχήμα 6- 13: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με μέσες συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=100$  ετών (T100\_hgAVG\_nLOW)



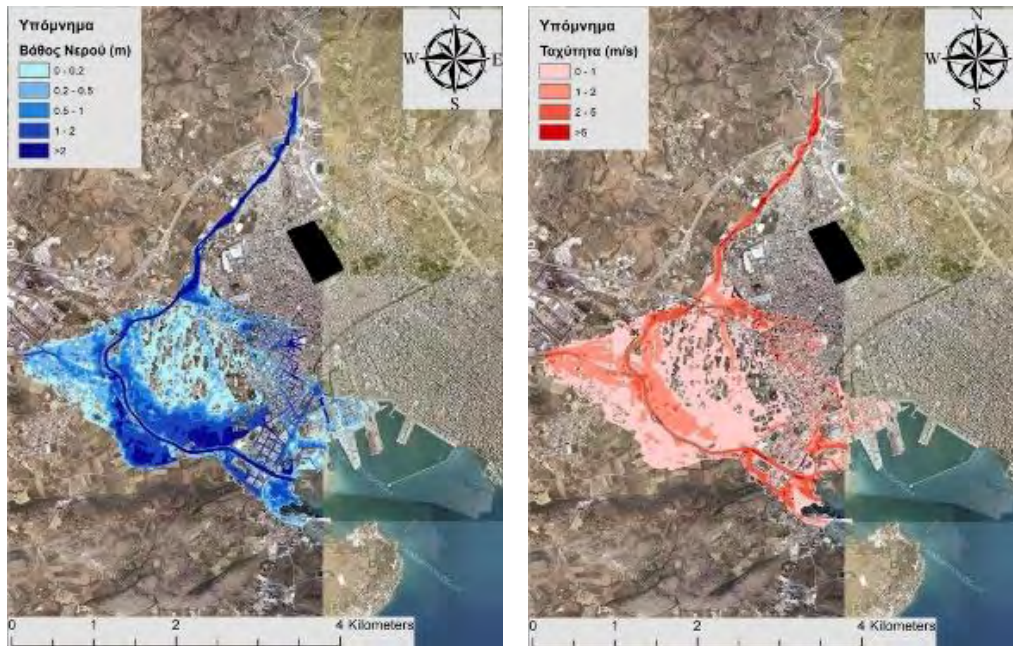
Σχήμα 6- 14: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με μέσες συνθήκες υγρασίας και μέσο συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=100$  ετών (T100\_hgAVG\_nAVG)



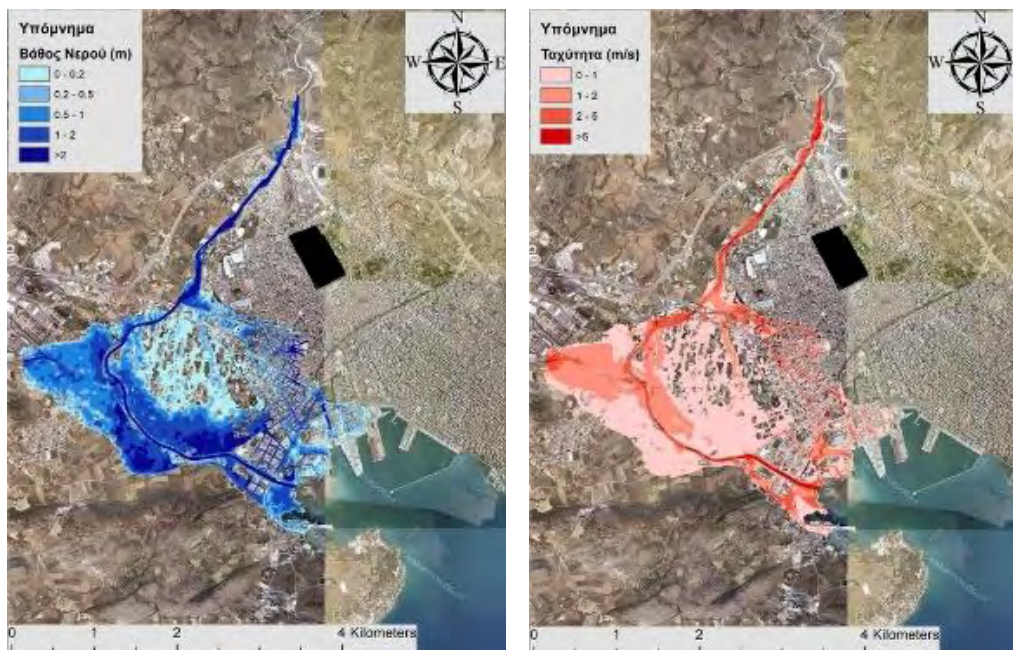
Σχήμα 6- 15: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με μέσες συνθήκες υγρασίας και υψηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=100$  ετών (T100\_hgAVG\_nUP)



Σχήμα 6- 16: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με υψηλές συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=100$  ετών (T100\_hgUP\_nLOW)



Σχήμα 6- 17: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με υψηλές συνθήκες υγρασίας και μέσο συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=100$  ετών (T100\_hgUP\_nAVG)



Σχήμα 6- 18: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με υψηλές συνθήκες υγρασίας και υψηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=100$  ετών (T100\_hgUP\_nUP)



#### **6.4. Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς**

##### **T=1000-έτη**

Τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης δείχνουν πως όλοι οι κλάδοι του ρέματος Ξηριά Βόλου εμφανίζουν πλημμυρικά φαινόμενα για περίοδο επαναφοράς T=1000-έτη.

Για δυσμενέστερες συνθήκες υγρασίας διαπιστώνεται αύξηση της επιφάνεια κατάκλυσης της πλημμύρας αφού αυτά τα σενάρια προκύπτουν από υδρογραφήματα με υψηλότερη πλημμυρική αιχμή. Αντίστροφα, για τα σενάρια χαμηλών υγρασιακών συνθηκών η κατακλυζόμενη επιφάνεια είναι σχετικά μικρότερη. Αντίθετα με τις προηγούμενες περιπτώσεις, σε αυτή την ο χειμάρρος πλημμυρίζει και εκτός της κοίτης, για όλες τις υγρασιακές συνθήκες, κυρίως στους κατώτερους κλάδους του χειμάρρου.

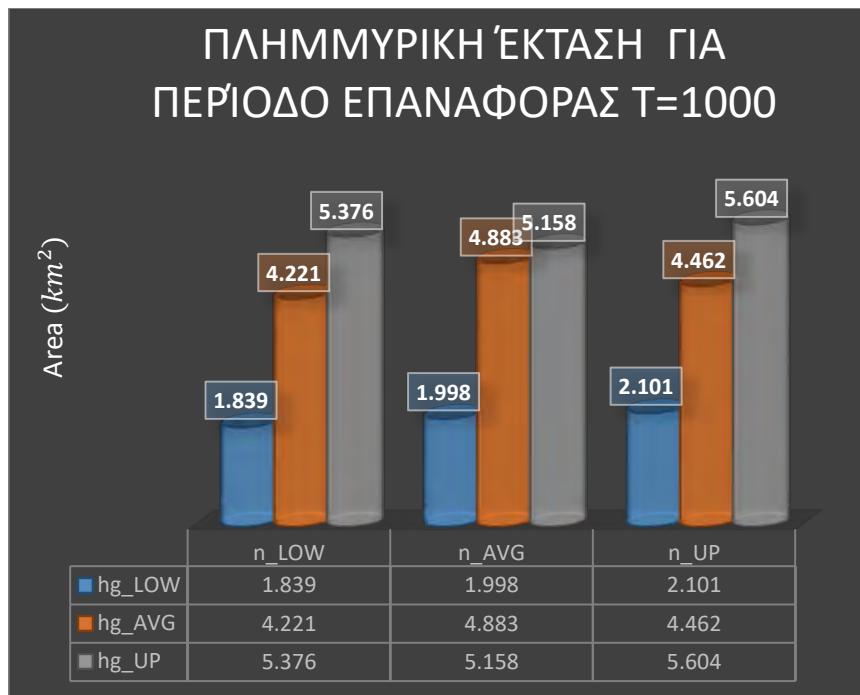
Επίσης, όσο πιο δυσμενείς γίνονται οι υγρασιακές συνθήκες τόσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση στα βάθη ροής και η πλημμύρα έχει μεγαλύτερη. Η περιοχή που φαίνεται να επηρεάζεται περισσότερο είναι ο κατώτερος κλάδος του χειμάρρου που οδηγεί στην εκβολή στην θάλασσα, αφού εμφανίζει μεγάλα βάθη και εκτός της ποτάμιας κοίτης και μάλιστα σε μεγάλη έκταση.

Η μεγαλύτερη επιφάνεια κατάκλυσης προκύπτει για υψηλές συνθήκες υγρασίας και υψηλό συντελεστή τραχύτητας και είναι  $5,604 \text{ km}^2$ , ενώ η μικρότερη προκύπτει για συνδυασμό χαμηλών συνθηκών υγρασίας και χαμηλού συντελεστή τραχύτητας και είναι  $1,839 \text{ km}^2$ .

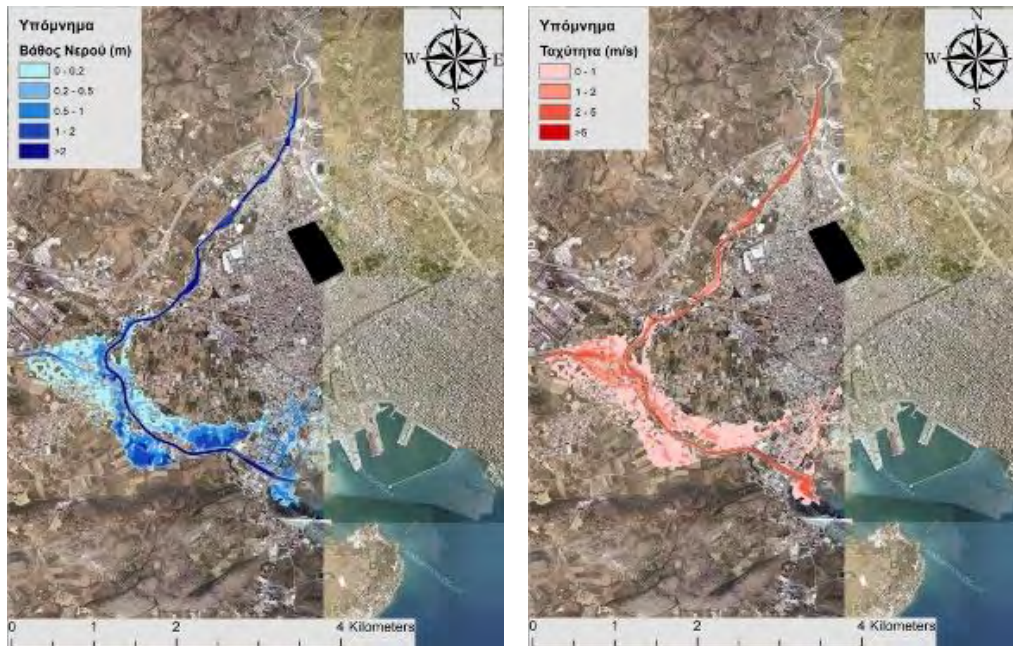
Στον Πίνακα 6-3 παρουσιάζονται οι τιμές της έκτασης της πλημμύρας σε  $\text{km}^2$  για τα 9 σενάρια με περίοδο επαναφοράς T=1000-έτη. Στα Σχήματα 6-19 έως 6-27 παρουσιάζονται οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας όσον αφορά την χωρική κατανομή του μέγιστου βάθους νερού και της μέγιστης ταχύτητας ροής.

Επίσης παρατηρείται ιδιομορφία στα σενάρια με μέσες συνθήκες υγρασίας, αφού τα σενάρια με τον μέσο συντελεστή τραχύτητας κατακλύζουν μεγαλύτερη επιφάνεια από τον υψηλό συντελεστή τραχύτητας, ωστόσο η κατανομή στα βάθη ροής και στις ταχύτητες είναι σχετικά πιο ευμενής αν το συγκρίνουμε με το σενάριο υψηλού

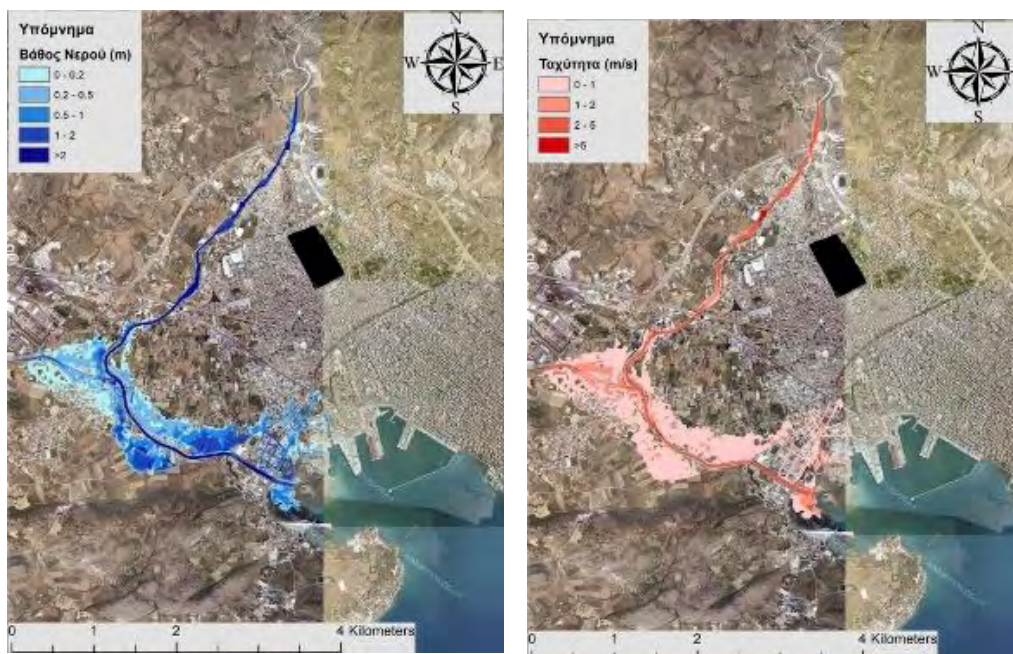
συντελεστή τραχύτητας και μέσων συνθηκών υγρασίας. Δηλαδή μπορεί να πλημμυρίζει μεγαλύτερη έκταση, αυτό γίνεται όμως με πιο ομαλό και λιγότερο καταστροφικό τρόπο.



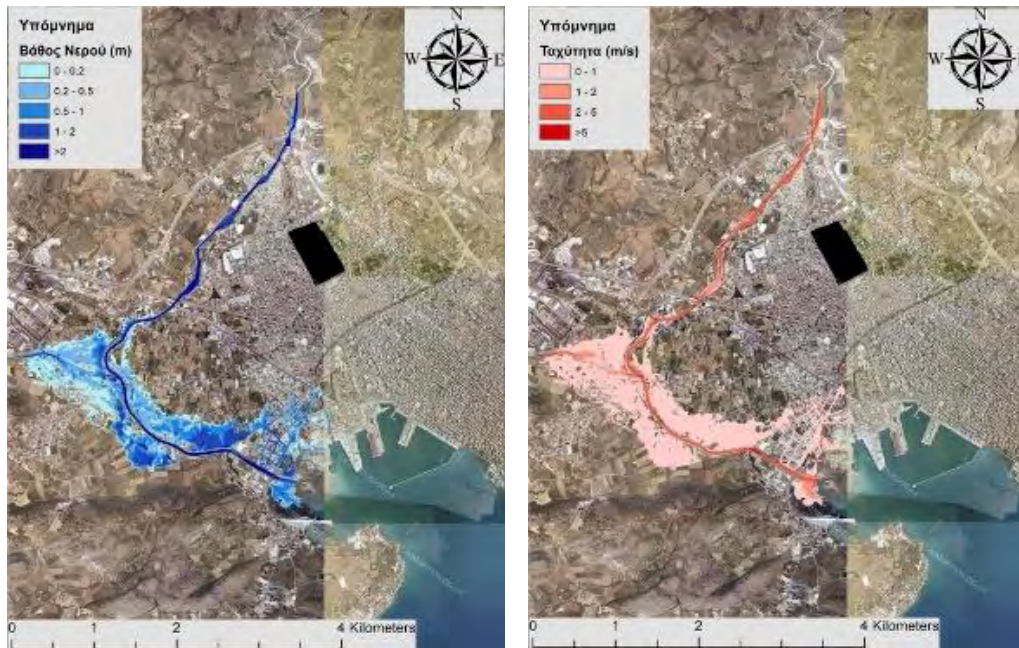
Πίνακας 6- 3: Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας για περίοδο επαναφοράς T=1000-έτη



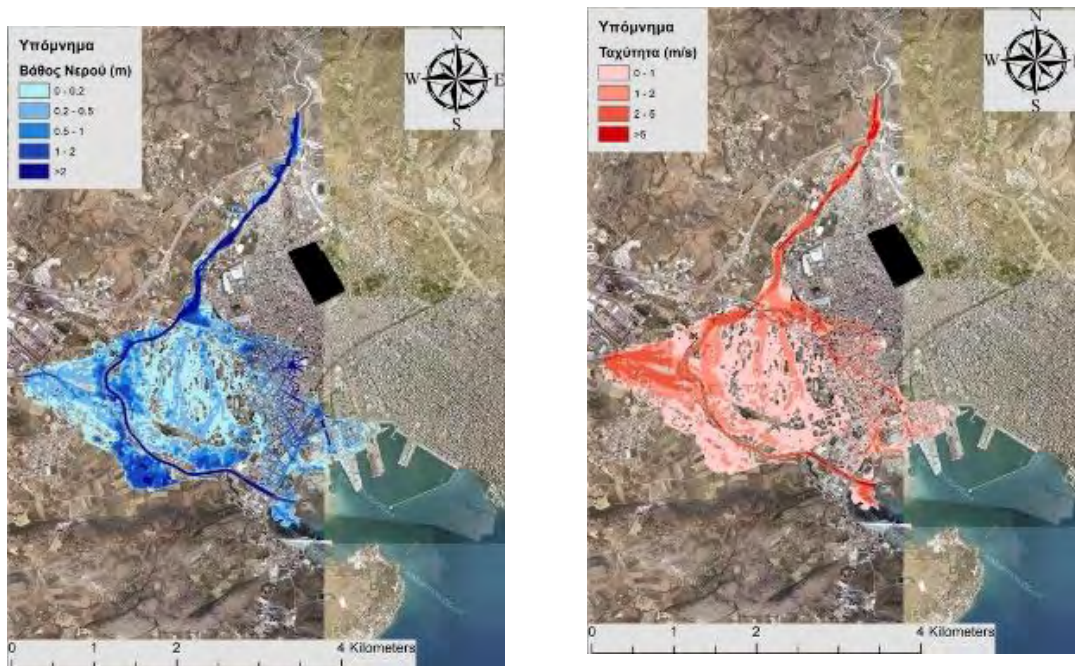
Σχήμα 6- 19: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με χαμηλές συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=1000$  ετών (T1000\_hgLOW\_nLOW)



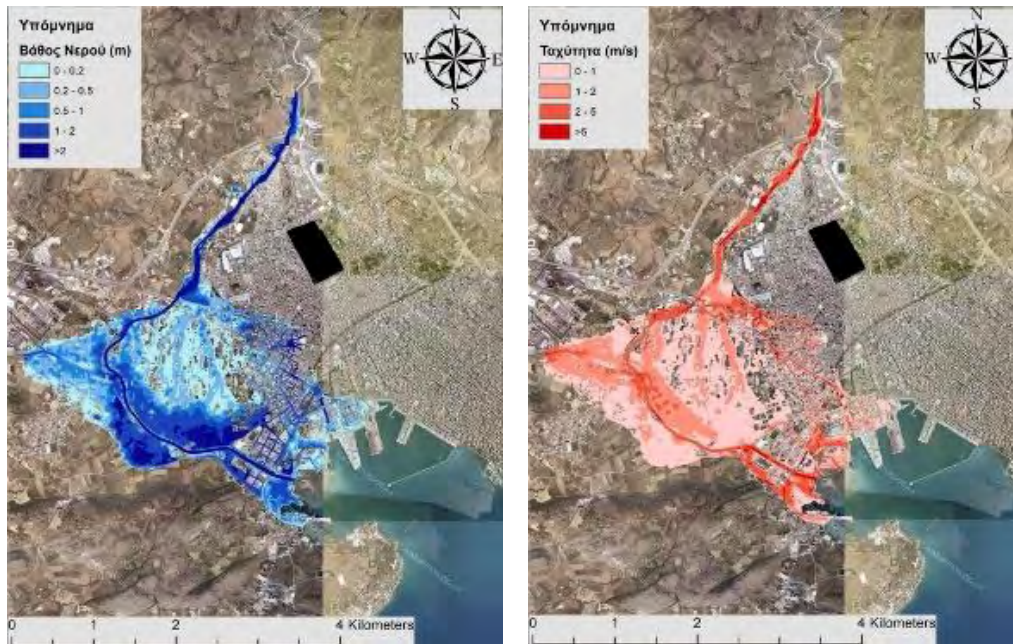
Σχήμα 6- 20: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με χαμηλές συνθήκες υγρασίας και μέσο συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=1000$  ετών (T1000\_hgLOW\_nAVG)



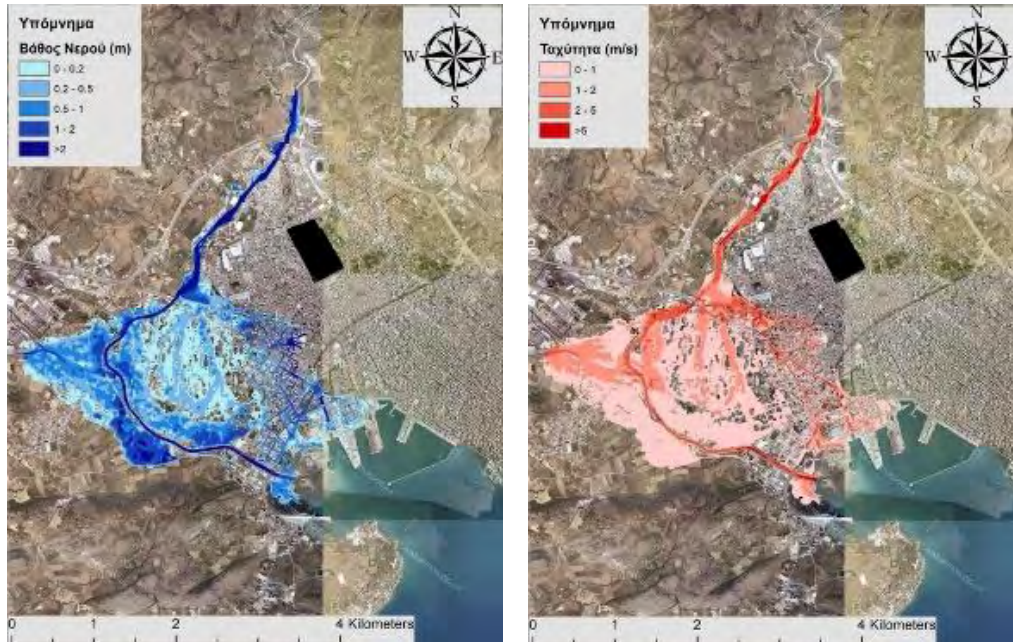
Σχήμα 6- 21: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με χαμηλές συνθήκες υγρασίας και υψηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=1000$  ετών (T1000\_hgLOW\_nUP)



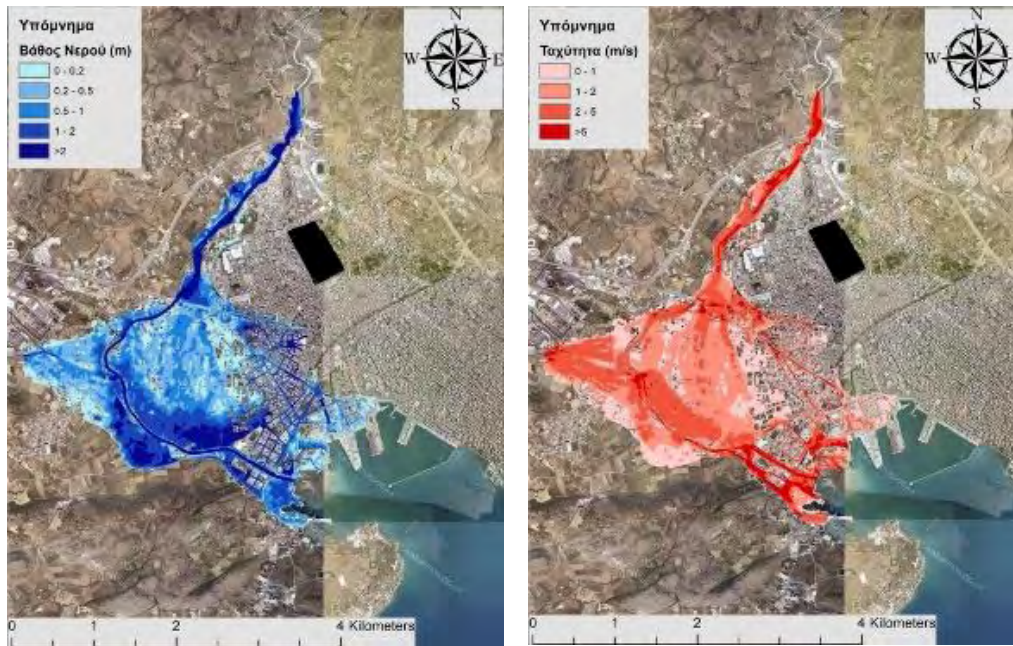
Σχήμα 6- 22: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με μέσες συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=1000$  ετών (T1000\_hgAVG\_nLOW)



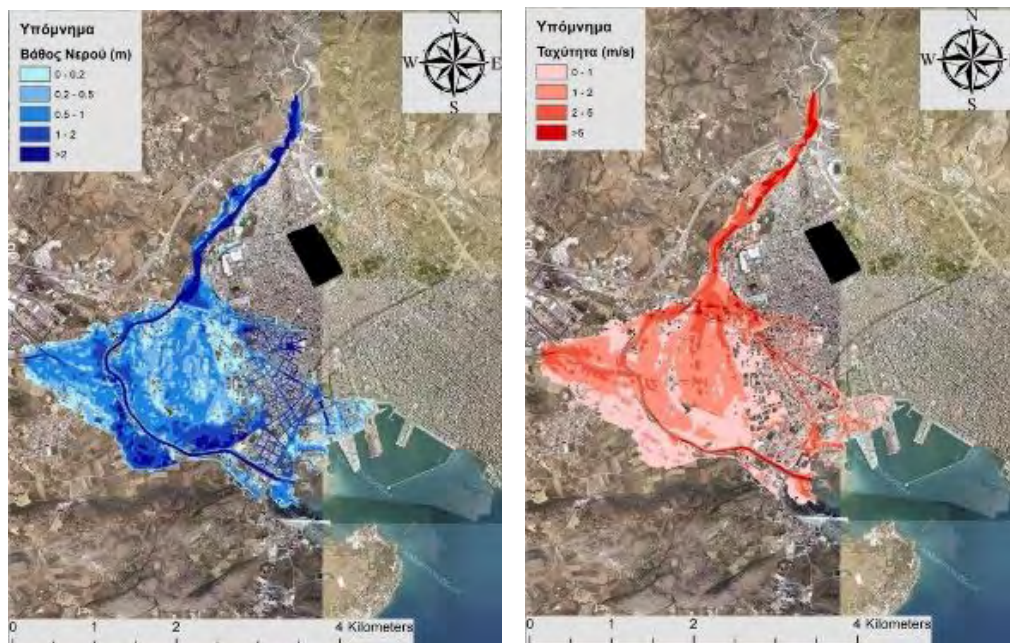
Σχήμα 6- 23: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με μέσες συνθήκες υγρασίας και μέσο συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=1000$  ετών (T1000\_hgAVG\_nAVG)



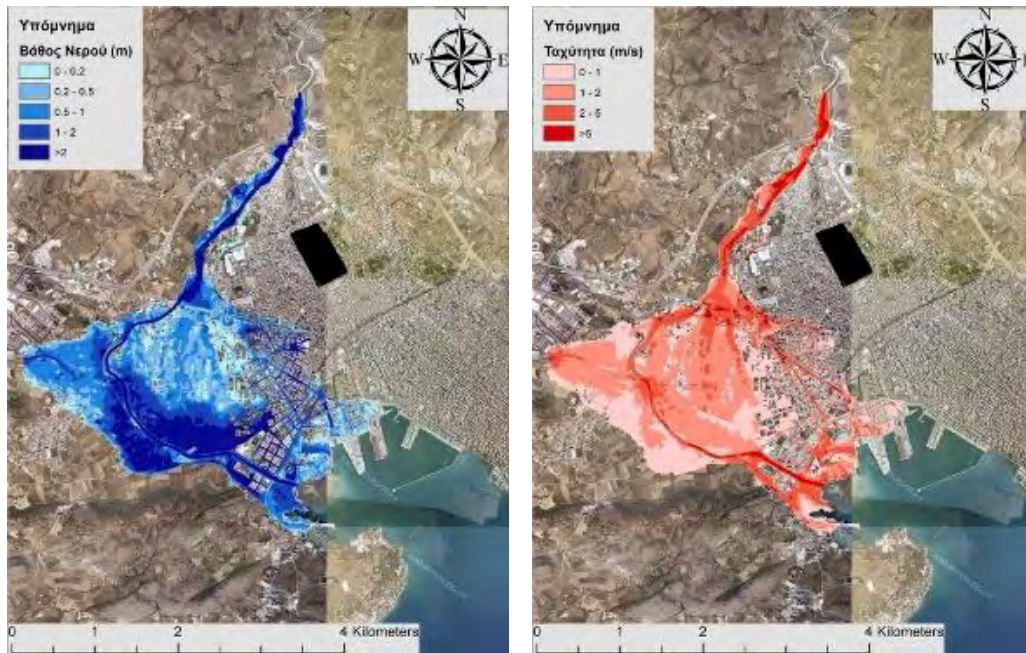
Σχήμα 6- 24: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με μέσες συνθήκες υγρασίας και υψηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=1000$  ετών (T1000\_hgAVG\_nUP)



Σχήμα 6- 25: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με υψηλές συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=1000$  ετών (T1000\_hgUP\_nLOW)



Σχήμα 6- 26: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με υψηλές συνθήκες υγρασίας και μέσο συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=1000$  ετών (T1000\_hgUP\_nAVG)



Σχήμα 6- 27: Σχηματική απεικόνιση έκτασης βάθους και ταχυτήτων ροής πλημμύρας του ρ. Ξηριάς Βόλου με υψηλές συνθήκες υγρασίας και υψηλό συντελεστή τραχύτητας για περίοδο επαναφοράς  $T=1000$  ετών (T1000\_hgUP\_nUP)

## Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα-Σχόλια-Συζήτηση

### 7.1. Συμπεράσματα

Η υδραυλική προσομοίωση έγινε με βάση τη μεθοδολογία για τις αστικές περιοχές και τα αποτελέσματα της διόδευσης της πλημμύρας για περιόδους επαναφοράς  $T=50$ -έτη ,  $T=100$ -έτη και  $T=1000$ -έτη. Σαφώς, υπόψιν ελήφθησαν οι κατευθυντήριες γραμμές που θέτει η Οδηγία 2007/60 της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας.

#### Περίοδος Επαναφοράς

Ένα πρώτο γενικό συμπέρασμα είναι πως η έκταση πλημμύρας αυξάνεται ανάλογα με την περίοδο επαναφοράς. Παρατηρείται σε όλα τα σενάρια συνθηκών υγρασίας και για τις τρεις περιόδους επαναφοράς.

Για περίοδο επαναφοράς  $T=50$ -έτη το εύρος της κατακλυζομένης επιφάνειας είναι μεταξύ 0,59 και 3,86  $km^2$ . Η διάμεσος τιμή της κατακλυζομένης επιφάνειας για τα 9 σενάρια που αφορούν την εξεταζόμενη περίοδο επαναφοράς είναι 2,598  $km^2$ .

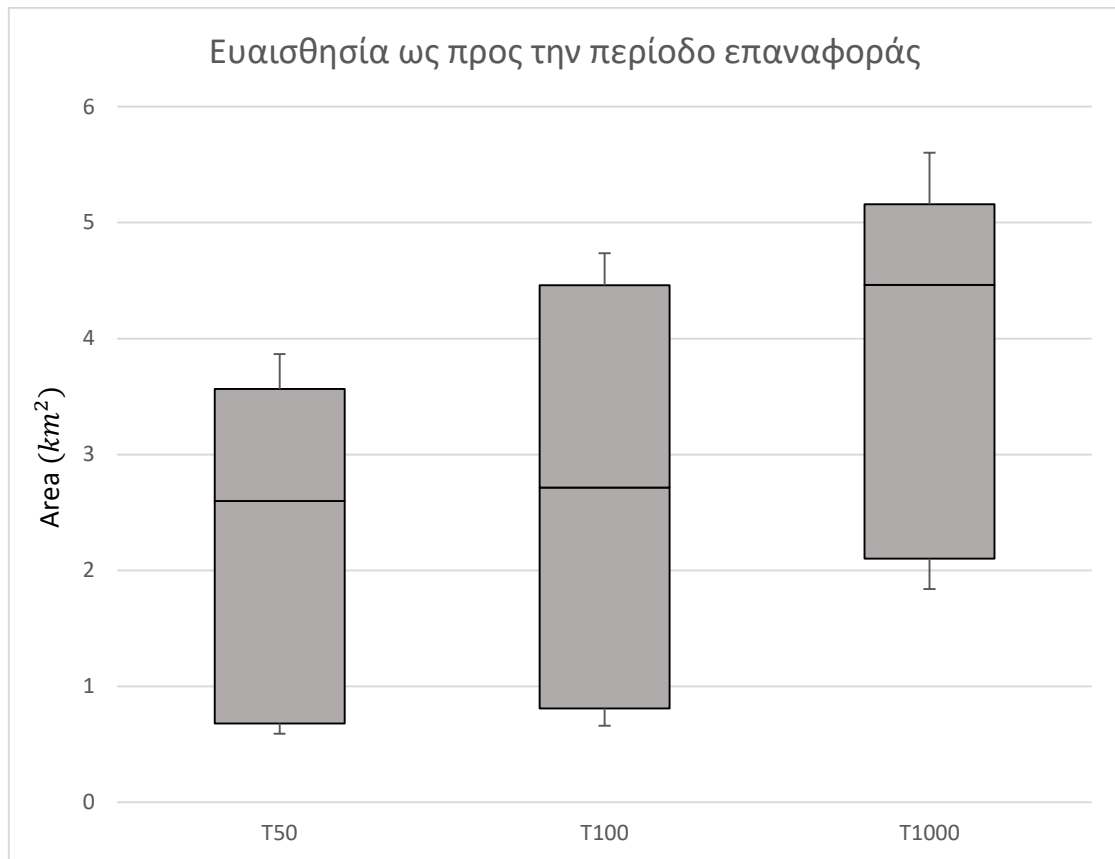
Για περίοδο επαναφοράς  $T=100$ -έτη το εύρος της κατακλυζομένης επιφάνειας είναι μεταξύ 0,661 και 4,736  $km^2$ . Η διάμεσος τιμή της κατακλυζομένης επιφάνειας για τα 9 σενάρια που αφορούν την εξεταζόμενη περίοδο επαναφοράς είναι 2,716  $km^2$ .

Για περίοδο επαναφοράς  $T=1000$ -έτη το εύρος της κατακλυζομένης επιφάνειας είναι μεταξύ 1,839 και 5,604  $km^2$ . Η διάμεσος τιμή της κατακλυζομένης επιφάνειας για τα 9 σενάρια που αφορούν την εξεταζόμενη περίοδο επαναφοράς είναι 4.462  $km^2$ .

Με βάση αυτά τα δεδομένα εξάγεται το συμπέρασμα πως για  $T=50$ -έτη και για  $T=100$ -έτη η κατακλυζόμενη έκταση παρουσιάζει μικρές αυξομειώσεις. Συγκεκριμένα παρατηρείται μια μικρή αύξηση στην περίπτωση των σεναρίων για  $T=100$ -έτη. Όσον



αφορά την  $T=1000$ -έτη εμφανίζεται αλματώδης αύξηση της κατακλυζομένης έκτασης σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, αύξηση που ξεπερνά τα επίπεδα του 50%.



Σχήμα 7- 1: Ευαισθησία περιόδου επαναφοράς

Όσον αφορά την κατανομή του βάθους ροής, για  $T=50$ -έτη εμφανίζονται πιο μικρά βάθη ροής της τάξης των 0-0,2 m και κυρίως εντός της ποτάμιας κοίτης, οπότε δεν υπάρχουν ιδιαίτερα προβλήματα. Η ίδια εικόνα παρατηρείται σαν μοτίβο και στα σενάρια των  $T=100$ -ετών. Τέλος στην περίπτωση των  $T=1000$ -ετών υπάρχει κάπως δυσμενέστερη κατανομή των βαθών ροής. Ωστόσο το ουσιώδες συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως η διαφοροποίηση των περιόδων επαναφοράς δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερη τάση και επίπτωση στην κατανομή των βαθών ροής.

Παρόμοια εικόνα παρατηρείται και στις ταχύτητες ροής, καθώς δεν υπάρχει κάποια ουσιώδη συσχέτιση μεταξύ της αλλαγής της περιόδου επαναφοράς και της κατανομής των ταχυτήτων ροής.

### Συντελεστής τραχύτητας

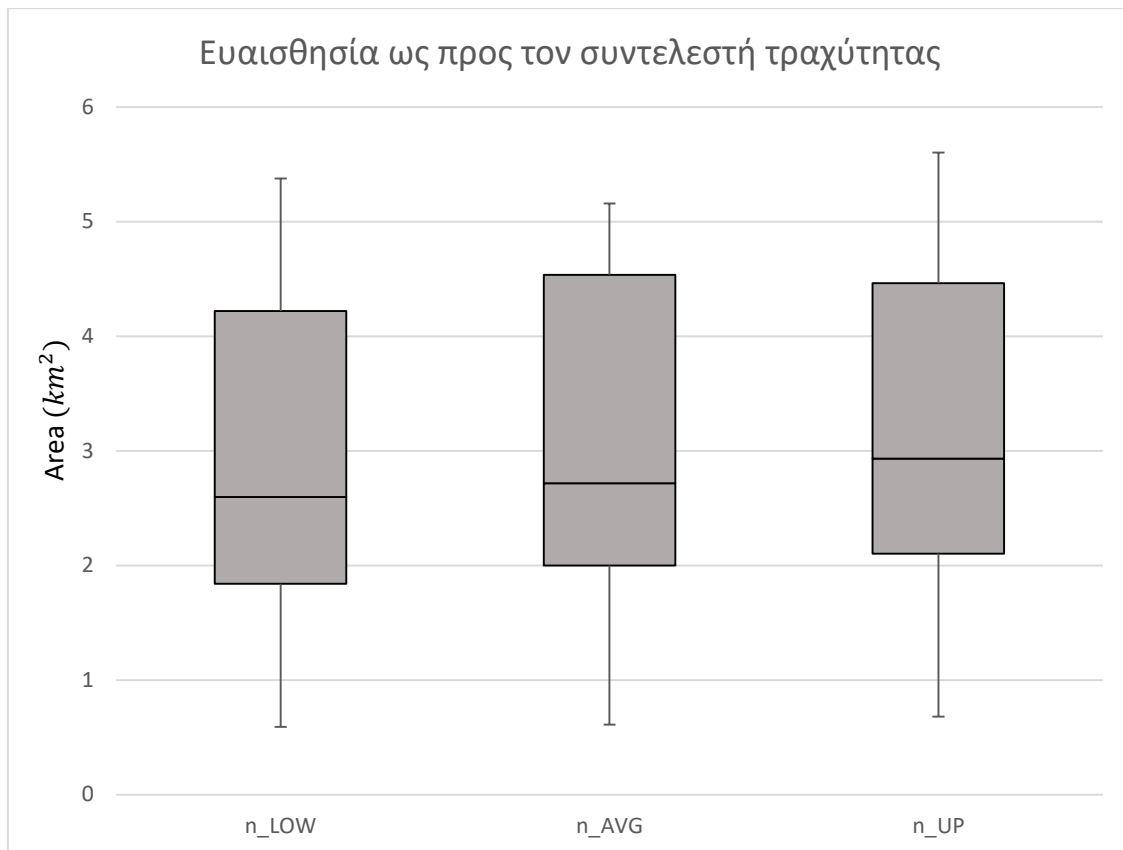
Η επόμενη παράμετρος που εξετάζεται είναι οι συντελεστές τραχύτητας Manning n. Οι χαμηλές τιμές των συντελεστών τραχύτητας Manning n αποδίδουν χαμηλότερα βάθη και υψηλότερες ταχύτητες, Αυτή η κατάσταση είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε τμήματα του υδατορεύματος με έντονες τοπικά κατά μήκος κλίσεις, όπου οι ταχύτητες είναι ήδη υψηλές, επειδή σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να εμφανιστούν τοπικά φαινόμενα flash flood.

Για χαμηλό συντελεστή τραχύτητας το εύρος της κατακλυζομένης επιφάνειας είναι μεταξύ 0,59 και 5,73 km<sup>2</sup>. Η διάμεσος τιμή της κατακλυζομένης επιφάνειας για τα 9 σενάρια που αφορούν την εξεταζόμενη περίοδο επαναφοράς είναι 2,598 km<sup>2</sup>.

Για μέσο συντελεστή τραχύτητας το εύρος της κατακλυζομένης επιφάνειας είναι μεταξύ 0,611 και 5,158 km<sup>2</sup>. Η διάμεσος τιμή της κατακλυζομένης επιφάνειας για τα 9 σενάρια που αφορούν την εξεταζόμενη περίοδο επαναφοράς είναι 2,716 km<sup>2</sup>.

Για υψηλό συντελεστή τραχύτητας το εύρος της κατακλυζομένης επιφάνειας είναι μεταξύ 0,68 και 5,604 km<sup>2</sup>. Η διάμεσος τιμή της κατακλυζομένης επιφάνειας για τα 9 σενάρια που αφορούν την εξεταζόμενη περίοδο επαναφοράς είναι 2,931 km<sup>2</sup>.

Με βάση αυτά τα δεδομένα εξάγεται το συμπέρασμα πως το εύρος της διακύμανσης και η κατακλυζόμενη επιφάνεια δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις όσον αφορά στις διαφορετικές περιπτώσεις του συντελεστή τραχύτητας. Ωστόσο παρατηρείται ότι για τις μέσες συνθήκες συντελεστή τραχύτητας παρουσιάζεται το μικρότερο εύρος διακύμανσης της κατακλυζομένης επιφάνειας, δηλαδή μεσοσταθμικά ο μεσαίος συντελεστής τραχύτητας δίνει ελαφρώς μικρότερες εναλλαγές στην κατακλυζόμενη έκταση από τις άλλες δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 7- 2: Ευαισθησία ως προς τον συντελεστή τραχύτητας

Όσον αφορά την κατανομή του βάθους ροής δεν παρουσιάζει κάποια ισχυρή διαφοροποιητική τάση όσον αφορά τα διάφορα σενάρια του συντελεστή τραχύτητας. Ωστόσο ο συντελεστής τραχύτητας επηρεάζει δυσμενώς τις ταχύτητες ροής, όπως είναι και λογικό. Στα σενάρια χαμηλού συντελεστή τραχύτητας εμφανίζονται μεγαλύτερες ταχύτητες ροής που σταδιακά μειώνονται όσο προχωράμε στα σενάρια μέσου και υψηλού συντελεστή τραχύτητας. Έτσι, όσον αφορά το κομμάτι των ταχυτήτων ροής, εμφανίζονται δυσμενείς περιπτώσεις όταν συνδυάζονται περιπτώσεις χαμηλού συντελεστή τραχύτητας και υψηλών υγρασιακών συνθηκών. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του σεναρίου με περίοδο επαναφοράς  $T=1000$ -έτη με υψηλές συνθήκες υγρασίας και χαμηλό συντελεστή τραχύτητας εμφανίζονται σε πολλές περιοχές εντός του αστικού ιστού υψηλές ταχύτητες οι οποίες μπορεί να δημιουργήσουν φαινόμενα τύπου flash flood, τα οποία σε συνδυασμό την χωρική τους κατανομή να προκαλέσουν σοβαρές υλικές και οικονομικές ζημιές, ακόμα και απώλειες ζωής.

### Συνθήκες υγρασίας

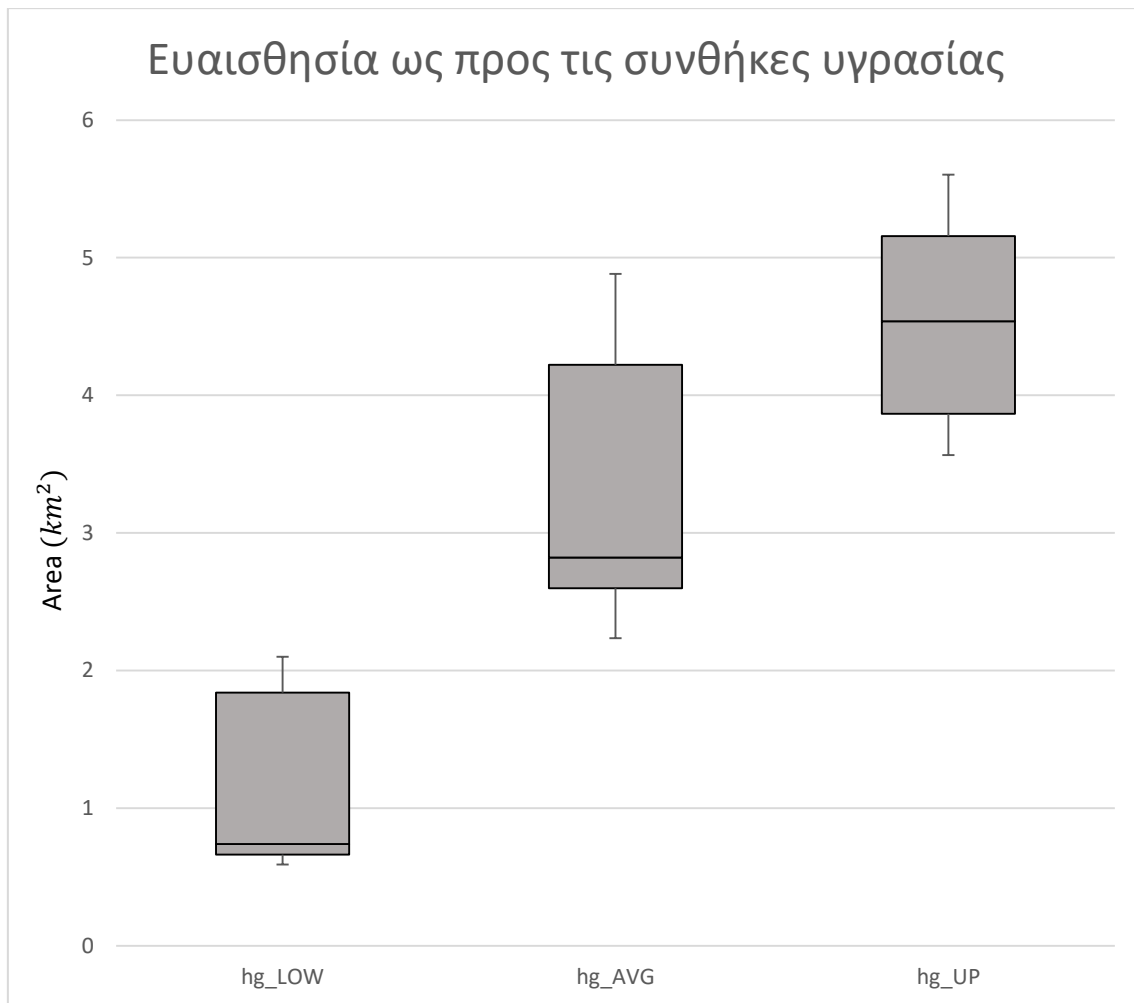
Οι υγρασιακές συνθήκες αποτελούν την επόμενη εξεταζόμενη παράμετρο. Διαπιστώθηκε ότι η υψηλή παροχή αιχμής αποδίδει μεγαλύτερες επιφάνειες κατάκλυσης της πλημμύρας και αντίστροφα η χαμηλή παροχή αιχμής αποδίδει μικρότερες επιφάνειες κατάκλυσης. Παρατηρείται σε όλα τα σενάρια συνθηκών υγρασίας και για τις τρεις περιόδους επαναφοράς.

Για χαμηλές συνθήκες υγρασίας το εύρος της κατακλυζομένης επιφάνειας είναι μεταξύ 0,59 και 2,101  $km^2$ . Η διάμεσος τιμή της κατακλυζομένης επιφάνειας για τα 9 σενάρια που αφορούν την εξεταζόμενη περίοδο επαναφοράς είναι 0,740  $km^2$ .

Για μέσες συνθήκες υγρασίας το εύρος της κατακλυζομένης επιφάνειας είναι μεταξύ 2,598 και 4,462  $km^2$ . Η διάμεσος τιμή της κατακλυζομένης επιφάνειας για τα 9 σενάρια που αφορούν την εξεταζόμενη περίοδο επαναφοράς είναι 2,822  $km^2$ .

Για υψηλές συνθήκες υγρασίας το εύρος της κατακλυζομένης επιφάνειας είναι μεταξύ 3,565 και 5,604  $km^2$ . Η διάμεσος τιμή της κατακλυζομένης επιφάνειας για τα 9 σενάρια που αφορούν την εξεταζόμενη περίοδο επαναφοράς είναι 4,537  $km^2$ .

Όπως γίνεται ξεκάθαρο λοιπόν οι υγρασιακές συνθήκες είναι ο πιο καθοριστικός παράγοντας για την κατακλυζόμενη έκταση, καθώς και το εύρος της κατακλυζομένης έκτασης όσο και η διάμεσος τιμή μεταβάλλεται ραγδαία όταν μεταβάλλονται οι υγρασιακές συνθήκες. Για παράδειγμα όταν οι υγρασιακές συνθήκες μεταβληθούν από χαμηλές σε μέσες παρατηρείται μια αύξηση της κατακλυζομένης έκτασης που ξεπερνά το 100%, σε ορισμένες περιπτώσεις δε αυτή η αύξηση είναι πολύ μεγαλύτερη. Όταν οι υγρασιακές συνθήκες μεταβληθούν από μέσες σε υψηλές πάλι η αύξηση της κατακλυζομένης έκτασης είναι της τάξης του 100%.



Σχήμα 7- 3: Ευαισθησία ως προς τις συνθήκες υγρασίας

Εξετάζοντας τις επιπτώσεις της αλλαγής υγρασιακής κατάστασης στα βάθη ροής, υπάρχει μια τάση για μεγαλύτερα βάθη ροής όσο η υγρασιακή κατάσταση γίνεται δυσμενέστερη και αντίστροφα, χωρίς αυτό όμως να είναι πολύ ισχυρό. Αυτή η τάση εμφανίζεται πιο ισχυρή αν από χαμηλές συνθήκες υγρασίας γίνει αλλαγή σε μέσες ή υψηλές συνθήκες υγρασίας, ενώ αν από μέσες συνθήκες υγρασίας γίνει αλλαγή σε υψηλές, αυτή η τάση είναι πιο ασθενής

Όσον αφορά τις ταχύτητες ροής έχουμε την ίδια γενική εικόνα με μια μικρή διαφοροποίηση: η τάση είναι πιο ισχυρή στην μεταβολή από χαμηλές σε μέσες συνθήκες υγρασίας και πιο ασθενής στην μεταβολή από μέσες σε υψηλές

Συνοπτικά λοιπόν προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1) Προκύπτει μια σαφής συσχέτιση μεταξύ του βάθους ροής και της ταχύτητας ροής. Ο γενικός κανόνας που περιγράφει αυτή την σχέση είναι πως αν αυξηθούν οι ταχύτητες ροής τότε μικραίνουν τα βάθη ροής και αντίστροφα, χωρίς αυτό να σημαίνει πως δεν εντοπίζονται και εξαιρέσεις.

2) Ο κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει την επιφάνεια κατάκλυσης είναι οι συνθήκες υγρασιακής κατάστασης, δηλαδή ουσιαστικά το πλημμυρογράφημα εισροής. Όσο μεγαλύτερη η πλημμυρική αιχμή τόσο μεγαλύτερη είναι και η κατακλυζόμενη επιφάνεια.

3) Το προηγούμενο συμπέρασμα δεν σημαίνει πως η επιφάνεια κατάκλυσης δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό και από την περίοδο επαναφοράς. Μια μεγάλη περίοδος επαναφοράς σημαίνει πρακτικά μεγαλύτερη αιχμή πλημμυρογραφήματος, δηλαδή μεγαλύτερος όγκος νερού που πρέπει να διοδευτεί, οδηγώντας έτσι αύξηση της πλημμυριζομένης έκτασης.

4) Ο κρίσιμος παράγοντας που ελέγχει τις ταχύτητες ροής είναι ο συντελεστής τραχύτητας. Μικρός συντελεστής τραχύτητας σημαίνει μεγάλες ταχύτητες ροής και αντίστροφα.

Τέλος αξίζει να αναφερθεί πως τα σχήματα 7-1, 7-2, 7-3 εξήχθησαν με τη μέθοδο Box Whisker Plot, σύμφωνα με την οποία αποδίδεται η διακύμανση της επιφάνειας κατάκλυσης και η διάμεσος τιμή για κάθε περίπτωση. Έτσι προκύπτει μια οπτική απεικόνιση ανάλυσης της ευαισθησίας του υδραυλικού μοντέλου σε σχέση με τις παραμέτρους που εξετάστηκαν: περίοδο επαναφοράς, συνθήκες υγρασίας και συντελεστή τραχύτητας.

Στο παράρτημα Β της παρούσας εργασίας υπάρχουν επιπλέον πίνακες που αφορούν την αναλυτική αποτύπωση της κατανομής των βαθών και ταχυτήτων ροής (Πίνακες Β-1 και Β-2). Επίσης υπάρχουν πίνακες που δίνουν μια γρήγορη εικόνα για την μεταβολή της πλημμυριζομένης έκτασης όσον αφορά την εναλλαγή των σεναρίων περιόδου επαναφοράς και υγρασιακών συνθηκών (Πίνακες Β-3 έως Β-8).

## 7.2. Σχόλια-Συζήτηση

Όπως φαίνεται και από τους συγκεντρωτικούς πίνακες που ακολουθούν παρατηρούνται τα εξής:

Ως προς της περίοδο επαναφοράς, η κατακλυζόμενη έκταση παρουσιάζει μεγάλες διαφοροποιήσεις. Όσο μεγαλύτερη είναι η περίοδος επαναφοράς μιας πλημμύρας, δηλαδή όσο πιο σπάνια είναι αυτή η πλημμύρα, τόσο πιο δυσμενής είναι όσον αφορά την πλημμυριζόμενη έκταση, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα:

| <u>ΠΕΡΙΟΔΟΣ</u><br><u>ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ</u> | <u>ΣΥΝΘΗΚΕΣ</u><br><u>ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ</u> | <u>n_LOW</u> | <u>n_AVG</u> | <u>n_UP</u> |
|--------------------------------------|--|--------------|--------------|-------------|
| <b>T=50</b>                          | hg_LOW                                   | 0.590        | 0.611        | 0.680       |
|                                      | hg_AVG                                   | 2.598        | 2.236        | 2.931       |
|                                      | hg_UP                                    | 3.565        | 3.765        | 3.866       |
| <b>T=100</b>                         | hg_LOW                                   | 0.661        | 0.740        | 0.809       |
|                                      | hg_AVG                                   | 2.507        | 2.716        | 2.822       |
|                                      | hg_UP                                    | 4.459        | 4.537        | 4.736       |
| <b>T=1000</b>                        | hg_LOW                                   | 1.839        | 1.998        | 2.101       |
|                                      | hg_AVG                                   | 4.221        | 4.883        | 4.462       |
|                                      | hg_UP                                    | 5.376        | 5.158        | 5.604       |

Πίνακας 7- 1: Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας σε km<sup>2</sup>. Διαφοροποίηση ως προς την περίοδο επαναφοράς

Ως προς την μεταβλητότητα του συντελεστή τραχύτητας η κατακλυζόμενη έκταση δεν εμφανίζει ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις. Όπως προαναφέρθηκε, ο συντελεστής τραχύτητας επηρεάζει κυρίως τις ταχύτητες ροής.

| <u>ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ</u><br><u>ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ</u> | <u>ΠΕΡΙΟΔΟΣ</u><br><u>ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ</u> | <b>hg_LOW</b> | <b>hg_AVG</b> | <b>hg_UP</b> |
|---|--------------------------------------|---------------|---------------|--------------|
| <b>n_LOW</b>                            | T = 50                               | 0.590         | 2.598         | 3.565        |
|   | T = 100                              | 0.661         | 2.507         | 4.459        |
|   | T = 1000                             | 1.839         | 4.221         | 5.376        |
| <b>n_AVG</b>                            | T = 50                               | 0.611         | 2.236         | 3.765        |
|   | T = 100                              | 0.740         | 2.716         | 4.537        |
|   | T = 1000                             | 1.998         | 4.883         | 5.158        |
| <b>n_UP</b>                             | T = 50                               | 0.680         | 2.931         | 3.866        |
|   | T = 100                              | 0.809         | 2.822         | 4.736        |
|   | T = 1000                             | 2.101         | 4.462         | 5.604        |

Πίνακας 7- 2: Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας σε km<sup>2</sup>. Διαφοροποίηση ως προς τον συντελεστή τραχύτητας

Ωστόσο, εξετάζοντας τις υγρασιακές συνθήκες, βλέπουμε από τον ακόλουθο συγκεντρωτικό πίνακα πως η κατακλυζόμενη έκταση επηρεάζει αρκετά περισσότερο, σε σχέση με τις προηγούμενες παραμέτρους, την επιφάνεια κατάκλυσης. Όσο πιο δυσμενείς είναι οι υγρασιακές συνθήκες, τόσο μεγαλύτερη είναι η έκταση που επηρεάζεται από ένα πλημμυρικό φαινόμενο.

| <u>ΣΥΝΘΗΚΕΣ</u><br><u>ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ</u> | <u>ΠΕΡΙΟΔΟΣ</u><br><u>ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ</u> | <b>n_LOW</b> | <b>n_AVG</b> | <b>n_UP</b> |
|--|--------------------------------------|--------------|--------------|-------------|
| <b>hg_LOW</b>                            | T=50                                 | 0.590        | 0.611        | 0.680       |
|  | T=100                                | 0.661        | 0.740        | 0.809       |
|  | T=1000                               | 1.839        | 1.998        | 2.101       |
| <b>hg_AVG</b>                            | T=50                                 | 2.598        | 2.236        | 2.931       |
|  | T=100                                | 2.507        | 2.716        | 2.822       |
|  | T=1000                               | 4.221        | 4.883        | 4.462       |
| <b>hg_UP</b>                             | T=50                                 | 3.565        | 3.765        | 3.866       |
|  | T=100                                | 4.459        | 4.537        | 4.736       |
|  | T=1000                               | 5.376        | 5.158        | 5.604       |

Πίνακας 7- 3: Επιφάνεια κατάκλυσης πλημμύρας σε km<sup>2</sup>. Διαφοροποίηση ως προς την υγρασιακή κατάσταση



Κάνοντας μια σύνοψη των παραπάνω δεδομένων, βλέπουμε ότι οι αβεβαιότητες που προκύπτουν από την διαφοροποίηση στις συνθήκες υγρασίας μπορεί να αποβούν καθοριστικές για ένα πλημμυρικό φαινόμενο. Οι υγρασιακές συνθήκες καθορίζουν το εύρος των πιθανών επιπτώσεων της πλημμύρας και ποιες περιοχές επηρεάζονται. Επομένως είναι καθοριστικές για τον έλεγχο της πλημμυρικής τρωτότητας μιας περιοχής, και για την όρθη αξιολόγηση των κινδύνων που μπορούν να προκύψουν. Έτσι, οι υγρασιακές συνθήκες, λόγω της μεταβλητότητας που προσδίδουν στα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένες εκτιμήσεις, εφόσον δεν εκτιμηθεί σωστά η δυνητική επίπτωσή τους.

Ωστόσο δεν πρέπει να αμελούμε και τις αβεβαιότητες που προκύπτουν και από τις άλλες δύο παραμέτρους. Όσον αφορά τον συντελεστή τραχύτητας, παρόλο που δεν υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στην κατακλυζόμενη έκταση, μεταβάλλονται σημαντικά οι ταχύτητες ροής, Επομένως μεταβλητότητα του συντελεστή τραχύτητας ουσιαστικά δημιουργεί μεγάλες αβεβαιότητες ως προς το μέγεθος των επιπτώσεων των πλημμυρών, καθώς μεταβάλλεται η τυχαιότητα με την οποία εμφανίζονται. Παρόμοιο συμπέρασμα καταγράφεται και για την περίοδο επαναφοράς. Από την στιγμή που κάθε πλημμύρα μπορεί να εκδηλωθεί με τυχαίο τρόπο ως προς την πιθανότητα εμφάνισης της, η παράμετρος της περιόδου επαναφοράς μπορεί να δημιουργήσει τρομερές αβεβαιότητες ως προς τον χρόνο εκδήλωσης ενός επικίνδυνου φαινομένου πλημμύρας.

Συμπερασματικά, η μεταβολή των συνθηκών υγρασίας δημιουργεί έντονες αβεβαιότητες ως προς την εκτίμηση της πλημμυρικής έκτασης και τρωτότητας της περιοχής μελέτης. Αβεβαιότητες ως προς το μέγεθος των επιπτώσεων δημιουργεί ο συντελεστής τραχύτητας, μέσω των διαφοροποιήσεων που προκύπτουν στις ταχύτητες ροής, που αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για την εκτίμηση των ζημιών σε ένα επεισόδιο αιφνίδιας πλημμύρας. Τέλος, η περίοδος επαναφοράς επηρεάζει το χρονικό σημείο εμφάνισης των πλημμυρών, με αποτέλεσμα να εισάγει επιπλέον αβεβαιότητες ως προς το μέγεθος και την διαχείριση μιας πλημμύρας.

Επιπροσθέτως, αξιοσημείωτες είναι οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

1) Τα αποτελέσματα μας δείχνουν τις αβεβαιότητες που υπεισέρχονται στην διερεύνηση των διάφορων πλημμυρικών φαινομένων και στην διαχείριση των κινδύνων που

προκύπτουν από αυτές σε αστικές ή ημιαστικές λεκάνες. Για την εκτίμηση των πλημμυρογραφημάτων για παράδειγμα, που προκύπτει από βροχομετρικά δεδομένα υδρογραφικού δικτύου, πρέπει να γίνει έλεγχος για την ορθότητα αυτών, πράγμα δύσκολο καθώς γενικά στην Ελλάδα δεν καταγράφονται με συστηματικό τρόπο. Επίσης όσον αφορά τον συντελεστή τραχύτητας, για την εισαγωγή του στην υδραυλική προσομοίωση έχει ακολουθηθεί μια διαδικασία εκτίμησης, πράγμα που μπορεί να κρύβει μεγάλες αβεβαιότητες.

2) Γενικά, για την πραγματοποίηση μιας ολοκληρωμένης έρευνας εντοπίζονται κάποια προβλήματα. Ένα από αυτά είναι οι υψηλές απαιτήσεις σε δεδομένα. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την υδραυλική προσομοίωση (συντελεστές τριβής, ακριβείς διαστάσεις υδατορεύματος ) ενέχει ιδιαίτερες δυσκολίες.

3) Επίσης αξίζει να αναφερθεί πως η εξάρτηση της ρεαλιστικότητας της προσομοίωσης από την ακρίβεια του ψηφιακού μοντέλου εισάγει επιπλέον αβεβαιότητες στο μοντέλο. Για να περιορισθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα χρειάζεται ιδιαίτερη εμπειρία σε τοπογραφικές αποτυπώσεις και διαχείρισης δεδομένων σε Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.

4) Κατά την υδραυλική προσομοίωση αντιμετωπίστηκαν κάποια αρνητικά ζητήματα. Το κυριότερο ήταν ο μεγάλος υπολογιστικός χρόνος επίλυσης των μοντέλων. Αυτό προκλήθηκε από την επιλογή πολύ μικρού υπολογιστικού βήματος( $t=2 \text{ sec}$ ) που όμως ήταν απαραίτητη για την αριθμητική ευστάθεια του συστήματος.

### **7.3. Μελλοντική έρευνα**

Στην παρούσα εργασία έγινε διερεύνηση της κατακλυζομένης έκτασης που μπορεί να δώσουν διάφορα πλημμυρικά σενάρια για τον χείμαρρο Ξηριά Βόλου. Αν μη τι άλλο, ο Ξηριάς είναι ένα ποτάμιο σώμα παραπλήσια στον αστικό ιστό του Βόλου το οποίο εγκυμονεί αρκετούς κινδύνους. Για αυτό τον λόγο απαιτείται αντιπλημμυρική θωράκιση σε ολόκληρο τον ποταμό και όχι σε ένα τμήμα του και μόνο. Αντικείμενο λοιπόν μιας μελλοντικής έρευνας που απαιτείται να γίνει είναι η ολοκληρωμένη

αντιπλημμυρική θωράκιση της ευρύτερης περιοχής με τη μελέτη λήψης συγκεκριμένων δομικών και μη-δομικών έργων.

Επιπροσθέτως, μπορεί να πραγματοποιηθεί μελλοντικά μια υδραυλική ανάλυση του μοντέλου με κάποιες διαφοροποιήσεις στις παραμέτρους. Για παράδειγμα θα μπορούσε να γίνει η υδραυλική ανάλυση του μοντέλου χρησιμοποιώντας διαφορετική μέθοδο για την προσομοίωση της αστικής περιοχής. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η τρίτη μέθοδος που αναφέρεται στην ενότητα 5.8., όπου στο κάθε κελί του υπολογιστικού πλέγματος που βρίσκεται εντός των ορίων του εκάστοτε κτιρίου αυξάνονται τοπικά η τραχύτητα, μέσω του συντελεστή τραχύτητας Manning  $n$  και να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων.

Μια ακόμη πρόταση είναι η διερεύνηση για ποιον συνδυασμό βάθους νερού και ταχύτητας ροής ανά κελί δημιουργείται μια κρίσιμη και επικίνδυνη κατάσταση και η απεικόνιση αυτών των ιδιαίτερα επικίνδυνων σημείων σε ένα χάρτη. Με αυτό τον τρόπο θα γίνει ακριβής προσδιορισμός των πιο επικίνδυνων σημείων, έτσι ώστε σε αυτά τα σημεία να γίνεται αρκετά καλή συντήρηση και καθαρισμός οχετών, φρεατίων και δρόμων στις παραπλήσιες περιοχές του αστικού ιστού ώστε να περιορίζονται οι αρνητικές συνέπειες, σε συνεργασία με τις δημοτικές αρχές. Επίσης έτσι θα γίνει πιο εύκολα αντιληπτό ποια κτίρια μπορεί να επηρεαστούν και να γίνει σωστή προετοιμασία και ασφάλιση τους για το απευκταίο σενάριο ενός μεγάλου πλημμυρικού γεγονότος.

## Βιβλιογραφία

### ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ

ΑΝ.Ε.ΒΟ Α.Ε., 2014, Σχέδιο δράσης αειφόρου ενέργειας Δήμου Βόλου, Σύμφωνο των Δημάρχων υπέρ της Τοπικής Βιώσιμης Ενέργειας, Βόλος.

Ασαρίδης, Π., 2017, Δισδιάστατη ανάλυση πλημμύρας αστικής περιοχής. Εφαρμογή στο χείμαρρο Κραυσίδα Βόλου, Ν. Μαγνησίας, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Βόλος.

Βοζινάκη, Α., 2014, Ένα Ολοκληρωμένο Σύστημα Εκτίμησης της Επικινδυνότητας και των Επιπτώσεων Πλημμυρικών Φαινομένων, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Υγειονομική και Περιβαλλοντική Μηχανική», Χανιά.

Γκιοκάς, Α., 2009, Κατάρτιση μεθοδολογικού πλαισίου για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Αθήνα.

Διακάκης, Μ., 2012, Εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας με τη χρήση μοντέλων προσομοίωσης, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Αθήνα.

Δόικος, Κ., 2015, Προσομοίωση της ροής του ποταμού Στρυμόνα και διερεύνηση των πλημμυρών της άνοιξης του 2015, Μεταπτυχιακή Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών: Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Θεσσαλονίκη.

Δρόσου, Α., 2015, Κατάρτιση πλημμυρικών χαρτών στον Άραχθο ποταμό, Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Ε.Κ., 2000. Οδηγία 2000/60 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων, 22.12.2000, Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων.

Ε.Κ., 2007. Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2007 για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, 6.11.2007, Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Καυκαλά, Ε., 2014, Διερεύνηση, με χρήση νέων τεχνολογιών, των μεταβολών της δασικής κάλυψης περιοχών της ΒΔ Ελλάδας και πιθανές συνέπειες τους στις υποδομές των περιοχών αυτών, Μεταπτυχιακή εργασία, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Θετικές Επιστήμες στη Γεωπονία», Αθήνα.

Κουγιουμτζίδου, Κ., 2011. Εφαρμογή της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ, για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, στο Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ «Οικολογική ποιότητα και διαχείριση υδάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής», Θεσσαλονίκη.

Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος., 1999. Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3, ΕΜΠ, Αθήνα.

Λουκάς, Α., Σχεδιασμός και διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου σε αστικές περιοχές, Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Πόρων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σημειώσεις Μαθήματος

Λώλος, Θ., 2015, Μελέτη στρατηγικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων για την αναθεώρηση και επέκταση του γενικού πολεοδομικού σχεδίου (Γ.Π.Σ.) του πολεοδομικού συγκροτήματος Βόλου, Διεύθυνση Υπηρεσίας Δόμησης Βόλου, Τμήμα Πολεοδομικού Σχεδιασμού, Βόλος.

Μαμάσης, Ν., 2007. Διαχείριση Πλημμυρικού Κινδύνου, Σημειώσεις μαθήματος Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά Έργα, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα.

Μαμάσης, Ν., 2009. Πλημμύρες – Εκτίμηση Πλημμυρικών Παροχών, Σημειώσεις μαθήματος Υδρομετεωρολογίας, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα

Μπουρλής Ε., 2009, Χάρτες Κινδύνων Πλημμύρας Σύμφωνα με την Οδηγία 2007 / 60 της Ε.Ε. – Εφαρμογή στον Πηνειό Ποταμό, Διπλωματική Εργασία Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, “Επιστήμη και Τεχνολογία Υδάτινων Πόρων”, Αθήνα

Μούκος, Α., Παρασκευάς, Ι., 2013, Υδρολογική και υδραυλική προσομοίωση και σύνθεση χαρτών πλημμύρας, με χρήση των προγραμμάτων HEC-HMS, HEC-RAS και ΓΣΠ. Εφαρμογή στο χείμαρρο Ξηριά, Ν. Μαγνησίας, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Βόλος.

Παλημέρης, Π., 2017, Δισδιάστατη προσομοίωση ρέματος Ραπεντώσας με τη χρήση του λογισμικού HEC-RAS, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα.

Παπανικολάου, Δ., Διακάκης, Μ., 2011. Μεταβολές στην ένταση και την κατανομή των φυσικών καταστροφών, 2011. Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, Τράπεζα της Ελλάδος.

Παπαστεφανάκης, Ν., 2009, Στοχαστική ανάλυση του πλημμυρικού γεγονότος της 17ης Οκτωβρίου 2006 στην υδρολογική λεκάνη της Αλμυρίδας, Μεταπτυχιακή Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής, Χανιά.

Πασπάλης, Ι., 2003. Γεωμορφομετρικά Χαρακτηριστικά των Υδρολογικών Λεκανών της Ελλάδας. Διπλωματική Εργασία. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Ποντικός, Σ., Πιθανοτική διερεύνηση καταστάσεων εδαφικής υγρασίας στην Ελληνική επικράτεια για χρήση τους στον υδρολογικό σχεδιασμό, Διπλωματική εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Νοέμβριος 2014.

Σκιας, Σ., 2016, Ολοκληρωμένη Διαχείριση Πλημμυρών, Σημειώσεις Μαθήματος,

Σωτηροπούλου, Κ., 2012, Κατάρτιση πλημμυρικών χαρτών σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60/ΕΕ. Εφαρμογή στη λεκάνη του Σπερχειού, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Αθήνα.

Τζιβάνη, Ε., Συγκριτική διερεύνηση πλημμυρογραφημάτων σχεδιασμού από συνθετικές βροχοπτώσεις σε μικρές λεκάνες απορροής χωρίς υδρομετρήσεις, Μεταπτυχιακή εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών: Γεωπληροφορική, Θεσσαλονίκη

Τουτζιάρη Μ., 2012, Υλοποίηση Μεθοδολογικού Πλαισίου για την Κατάρτιση Χαρτών Πλημμύρας- Εφαρμογή στον Σαρανταπόταμο Ελευσίνας, Διπλωματική Εργασία Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, “Επιστήμη και Τεχνολογία Υδάτινων Πόρων”, Αθήνα.

Τσάγκας, Κ., 2014, Υπολογισμός του ηλιακού δυναμικού στον Βόλο με μετεωρολογικό μοντέλο, Πτυχιακή εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής, Θεσσαλονίκη.

Υ.Π.Ε.Κ.Α., 2017. Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας, των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας, Ειδική Γραμματεία Υδάτων.

## ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

Abdulaziz, A., 2017. Application of Two-Dimensional Hydraulic Modeling in Riverine Systems Using HEC-RAS, Master Thesis, University of Dayton, Ohio.

Bellos V. and Tsakiris G. (2015). Comparing various methods of building representation for 2D flood modelling in built-up areas. *Water Resources Management*

Boglis A, Evelpidou N., Vassilopoulos A., Lekkas D.F., Gournellos T., Fountoulis I., 2009, Urban flood modeling in Karlovassi Area – Samos Island, Greece. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Environmental Science and Technology*, Chania, Crete.

Brunner, G., 2016. HEC-RAS, River Analysis System 2D Modeling User's Manual, Version 5.0, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic engineering center.

Brunner, G., Piper, S., Marston, L., Warner, J., Wolfe, B., 2016. HEC-RAS, River Analysis System Application Guide, Version 5.0, US Army Corps of Engineers, Hydrologic, Engineering Center.

Brunner, G., 2016. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual, Version 5.0, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

Burnash, R.J.C., Ferral R.L., McQuire R.A., 1973, A Generalized Streamflow Simulation System. In: *Conceptual Modeling for Digital Computers*. U.S. National Weather Service.

Chow, V.T., 1959, *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company

Christofidis, A., 2008, Development of a GIS-based rainfall-runoff model. PhD Thesis. Department of Water Resources and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, National Technical University of Athens

Coon, W., 1998, Estimation of roughness coefficients for natural stream channels with vegetated banks, Denver, U.S. Geological Survey

Diakakis M., Andreadakis E., Fountoulis G., 2011, Flash flood event of Potamoula, Greece. Hydrology, geomorphic effects and damage characteristics. In: Lambrakis N,



Stournaras G, Katsanou K (Eds) *Advances in the Research of Aquatic Environment*, Springer.

Eleuterio, J., 2012, *Flood risk analysis: impact of uncertainty in hazard modeling and vulnerability assessments on damage estimations*, Phd Thesis, Water Science and Environmental Economics, Augustine Cournot Doctoral School, University of Strasbourg, Strasbourg.

Genoves A., Campins J., Jansa A., 2006, *Intense storms in the Mediterranean: A first description from the ERA-40 perspective*. *Advances in Geosciences*.

*Guidance on flash flood management*, Associated Programme on Flood Management December 2007.

Kernkamp H.W.J., van Dam A., Stelling G.S. and de Goede E.D., 2011, *Efficient scheme for the shallow water equations on unstructured grids with application to the Continental Shelf*.

Kramer S.C. and Stelling G.S., 2008, *A conservative unstructured scheme for rapidly varied flows*. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*.

Messner, F., Penning-Rowsell, E., Green, C., Meyer, V., Tunstall, S., and van der Veen, A., 2006: *Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods*, FLOODsite Project Deliverable D9.1, Contract No: GOCE-CT-2004-505420.

Moukalled, F., Mangani, L., and Darwish, M., 2016. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics, An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab®*, Springer.

Papaoiannou G., Loukas A., Aronica G.T., 2017, *Sensitivity analysis of a probabilistic flood inundation mapping framework for ungauged catchments*, European Water 60, European Water Publications

Papaioannou, G., 2017, Flood Hazard and Risk Modelling Framework for Ungauged Streams and Watersheds, Phd Dissertation submitted for the Degree of Philosophy at the Department of Civil Engineering, University of Thessaly, Department of Civil Engineering, Volos.

Plitsi, D., 2016, Evaluation of 1-D and 2-D hydraulic numerical models for flood risk assessment, Master Thesis, M.Sc. Management of Hydrometeorological Hazards – HYDROHASARDS, Volos.

Sanyal, J., 2013, Flood Prediction and Mitigation in Data-Sparse Environments, Durham thesis, Durham University, Durham.

Sharkey, J. K., 2014, Investigating Instabilities with HEC-RAS Unsteady Flow Modeling for Regulated Rivers at Low Flow Stages. Master's Thesis, University of Tennessee, Tennessee

Stathis, D., Extreme rainfall-events and flood-genesis in Greece.

Stelling, G., 2012, Quadtree flood simulations with sub-grid digital elevation models, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Delft University of Technology, Delft.

Theoulakis, K., 2010, Production of flood hazard and flood risk maps based on the EU Directive 2007/60, Postgraduate Thesis, National Technical University of Athens, Faculty of Civil Engineering, Department of Water Resources and Environmental Engineering, Athens.

Tsakiris, G. (2013). Flood risk assessment: Concepts, Modelling, Applications. Natural Hazards and Earth System Sciences

## ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΗ

1. <https://dep.wv.gov/WWE/getinvolved/sos/Pages/SOPpebble.aspx>

2. [www.floods.ypeka.gr](http://www.floods.ypeka.gr)
3. [http://ec.europa.eu/environment/water/flood\\_risk/](http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/)
4. <https://seeingthewoods.org/2013/06/05/danube-floods-present-and-past-exploring-historic-precedents-through-the-arcadia-project/>
5. <http://www.scholastic.com/browse/article.jsp?id=3754082>
6. [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S231803312016000100152&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S231803312016000100152&script=sci_arttext&tlng=en)
7. <https://www.worldatlas.com/articles/the-most-catastrophic-floods-in-the-world-and-their-costly-impact.html>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

| 1ο επίπεδο                         | 2ο επίπεδο   | 3ο επίπεδο  | MIN n                          | AVG n | MAX n  |
|------------------------------------|--|---|--------------------------------|-------|--------|
| 1. ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ             | 1.1 ΑΣΤΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ  | 1.1.1 Συνεχής αστικός ιστός   | 0.0065                         | 0.013 | 0.0195 |
|                                    |  | 1.1.2 Ασυνεχής αστικός ιστός  |                                |       |        |
|                                    | 1.2 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ-ΕΜΠΟΡΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ            | 1.2.1 Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες  | 0.0065                         | 0.013 | 0.0195 |
|                                    |  | 1.2.2 Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα  |                                |       |        |
|                                    |  | 1.2.3 Ζώνες λιμένων   |                                |       |        |
|                                    |  | 1.2.4 Αεροδρόμια  |                                |       |        |
|                                    | 1.3 ΟΡΥΧΕΙΑ, ΧΩΡΟΙ ΑΠΟΡΡΙΨΕΩΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΧΩΡΟΙ ΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗΣ | 1.3.1 Χώροι εξορύξεως ορυκτών   | 0.0065                         | 0.013 | 0.0195 |
|                                    |  | 1.3.2 Χώροι απορρίψεως απορριμμάτων   |                                |       |        |
|                                    |  | 1.3.3 Χώροι οικοδόμησης   |                                |       |        |
|                                    | 1.4 ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΜΗ ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΠΡΑΣΙΝΟΥ                         | 1.4.1 Περιοχές αστικού πρασίνου   | 0.0125                         | 0.025 | 0.0375 |
|                                    |  | 1.4.2 Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής   |                                |       |        |
|                                    | 2. ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ  | 2.1 ΑΡΩΣΙΜΗ ΓΗ  | 2.1.1 Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη | 0.015 | 0.03   |
| 2.1.2 Μόνιμα αρδευόμενη γη         |  |   |                                |       |        |
| 2.1.3 Ορυζώνες                     |  |   |                                |       |        |
| 2.2 ΜΟΝΙΜΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ           |  | 2.2.1 Αμπελώνες   | 0.04                           | 0.08  | 0.12   |
|                                    |  | 2.2.2 Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς                                     |                                |       |        |
|                                    |  | 2.2.3 Ελαιώνες  |                                |       |        |
| 2.3 ΛΙΒΑΔΙΑ                        |  | 2.3.1 Λιβάδια   | 0.0175                         | 0.035 | 0.0525 |
| 2.4 ΕΤΕΡΟΓΕΝΕΙΣ ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ |  | 2.4.1 Ετήσιες καλλιέργειες που σχετίζονται με μόνιμες καλλιέργειες                          | 0.02                           | 0.04  | 0.06   |
|                                    |  | 2.4.2 Σύνθετες καλλιέργειες   | 0.02                           | 0.04  | 0.06   |
|                                    |  | 2.4.3 Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης | 0.025                          | 0.05  | 0.075  |
|                                    |  | 2.4.4 Γεωργο-δασικές περιοχές   | 0.03                           | 0.06  | 0.09   |
| 3. ΔΑΣΗ ΚΑΙ ΗΜΙΦΥΣΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ    |  | 3.1 ΔΑΣΗ  | 3.1.1 Δάσος πλατύφυλλων        | 0.05  | 0.1    |
|                                    | 3.1.2 Δάσος κωνοφόρων  |   |                                |       |        |
|                                    | 3.1.3 Μικτό δάσος  |   |                                |       |        |
|                                    | 3.2 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΘΑΜΝΩΔΟΥΣ Η/ΚΑΙ ΠΟΩΔΟΥΣ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ                 | 3.2.1 Φυσικοί βοσκότοποι  | 0.02                           | 0.04  | 0.06   |
|                                    |  | 3.2.2 Θάμνοι και χερσότοποι   | 0.025                          | 0.05  | 0.075  |
|                                    |  | 3.2.3 Σκληροφυλλική βλάστηση  | 0.025                          | 0.05  | 0.075  |
|                                    |  | 3.2.4 Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις   | 0.03                           | 0.06  | 0.09   |
|                                    | 3.3 ΑΝΟΙΧΤΟΙ ΧΩΡΟΙ ΜΕ ΛΙΓΗ Ή ΚΑΘΟΛΟΥ ΒΛΑΣΤΗΣΗ                    | 3.3.1 Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές  | 0.0125                         | 0.025 | 0.0375 |
|                                    |  | 3.3.2 Απογυμνωμένοι βράχοι  | 0.0175                         | 0.035 | 0.0525 |
|                                    |  | 3.3.3 Εκτάσεις με αραιή βλάστηση  | 0.0135                         | 0.027 | 0.0405 |
|                                    |  | 3.3.4 Αποτεφρωμένες εκτάσεις  | 0.0125                         | 0.025 | 0.0375 |
|                                    |  | 3.3.5 Παγετώνες και αέριο χιόνι   | 0.005                          | 0.01  | 0.015  |
| 4. ΥΓΡΟΤΟΠΟΙ                       | 4.1 ΥΓΡΟΤΟΠΟΙ ΕΝΔΟΧΩΡΑΣ  | 4.1.1 Βάλτοι στην ενδοχώρα  | 0.02                           | 0.04  | 0.06   |
|                                    |  | 4.1.2 Τυρφώνες  |                                |       |        |

|                               |                                     |  |       |      |       |
|-------------------------------|-------------------------------------|--|-------|------|-------|
|                               | <b>4.2 ΠΑΡΑΘΑΛΑΣΣΙΟΙ ΤΥΓΡΟΤΟΠΟΙ</b> | <b>4.2.1</b> Παραθαλάσσιοι βάλτοι<br><b>4.2.2</b> Αλυκές<br><b>4.2.3</b> Ζώνες που καλύπτονται από παλιρροιακά ύδατα | 0.02  | 0.04 | 0.06  |
| <b>5. ΥΔΑΤΙΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ</b> | <b>5.1 ΧΕΡΣΑΙΑ ΥΔΑΤΑ</b>            | <b>5.1.1</b> Υδατορρέυματα<br><b>5.1.2</b> Επιφάνειες στάσιμου ύδατος  | 0.025 | 0.05 | 0.075 |
|                               | <b>5.2 ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΥΔΑΤΑ</b>           | <b>5.2.1</b> Παράκτιες λιμνοθάλασσες<br><b>5.2.2</b> Εκβολές ποταμών<br><b>5.2.3</b> Θάλασσες και ωκεανοί            | 0.035 | 0.07 | 0.105 |

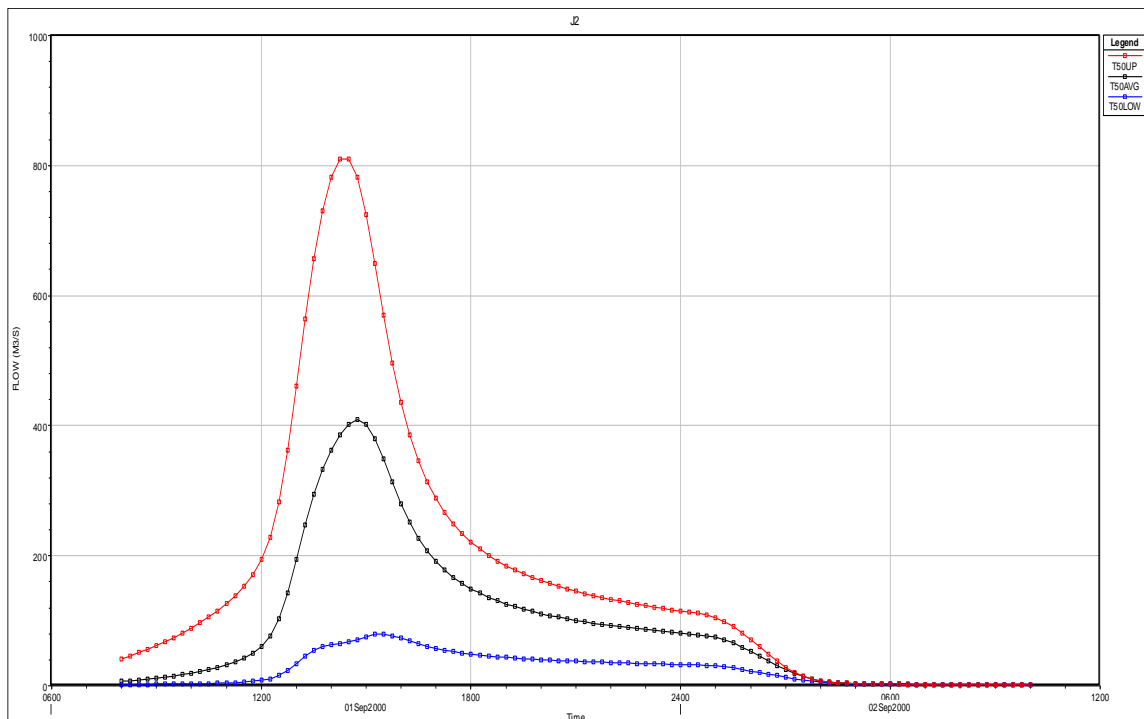
Πίνακας Α- 1: Κατηγοριοποίηση χρήσεων γης σύμφωνα με Corine 2000

| A/A | Equation  | Roughness (n)<br>Coefficient Value | Source                     |
|-----|---|------------------------------------|----------------------------|
| 1   | $n = \frac{1}{(2.1 + 2.3x + 6\ln(10.8vR))}$   |                                    | Gwinn and Ree, 1980        |
| 2   | $n = \frac{0.1129R^{1/6}}{1.16 + 2\log\left(\frac{R}{D_{84}}\right)}$   |                                    | Marcus et al., 1992        |
| 3   | $n = 0.0326 + 1.3041S_W$  |                                    | Loukas and Quick, 1996     |
| 4   | $n = 0.322S_f^{0.38}R^{-0.16}$  |                                    | Romero et al., 2010        |
| 5   | $n = \left[0.183 + \ln\left(\frac{1.762S_f^{0.1581}}{Fr^{0.2631}}\right)\right] \left(\frac{D_{84}^{0.167}}{\sqrt{g}}\right)$ |                                    | Romero et al., 2010        |
| 6   | $n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m$  |                                    | Jarret, 1985               |
| 7   | $n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m$  |                                    | Jarret, 1985               |
| 8   | $n = 0.121(S_W)^{0.38}(R)^{0.08}$   |                                    | Chang, 2012                |
| 9   | Base scenario estimated using guidelines of Chow (1952)<br>Extreme case scenario using guidelines of Chow (1952)              |                                    | Chow, 1956                 |
| 10  | $n = 0.104(S_W)^{0.177}$  |                                    | Chang, 2012                |
| 11  | $n = \frac{D_{90}^{1/6}}{15.29}$  |                                    | Ho and Huang, 1992         |
| 12  | $n = \frac{D_{90}^{1/6}}{16}$   |                                    | Ho and Huang, 1992         |
| 13  | $n = 0.0593D_{50}^{0.179}$  |                                    | Javan et al., 1992         |
| 14  | $n = 0.0561D_{65}^{0.179}$  |                                    | Javan et al., 1992         |
| 15  | $n = 0.0495D_{90}^{0.16}$   |                                    | Javan et al., 1992         |
| 16  | $n = 0.0431D_{90}^{1/6}$  |                                    | McKay and Fischenich, 2011 |
| 17  | $n = 0.0439D_{90}^{1/6}$  |                                    | McKay and Fischenich, 2011 |

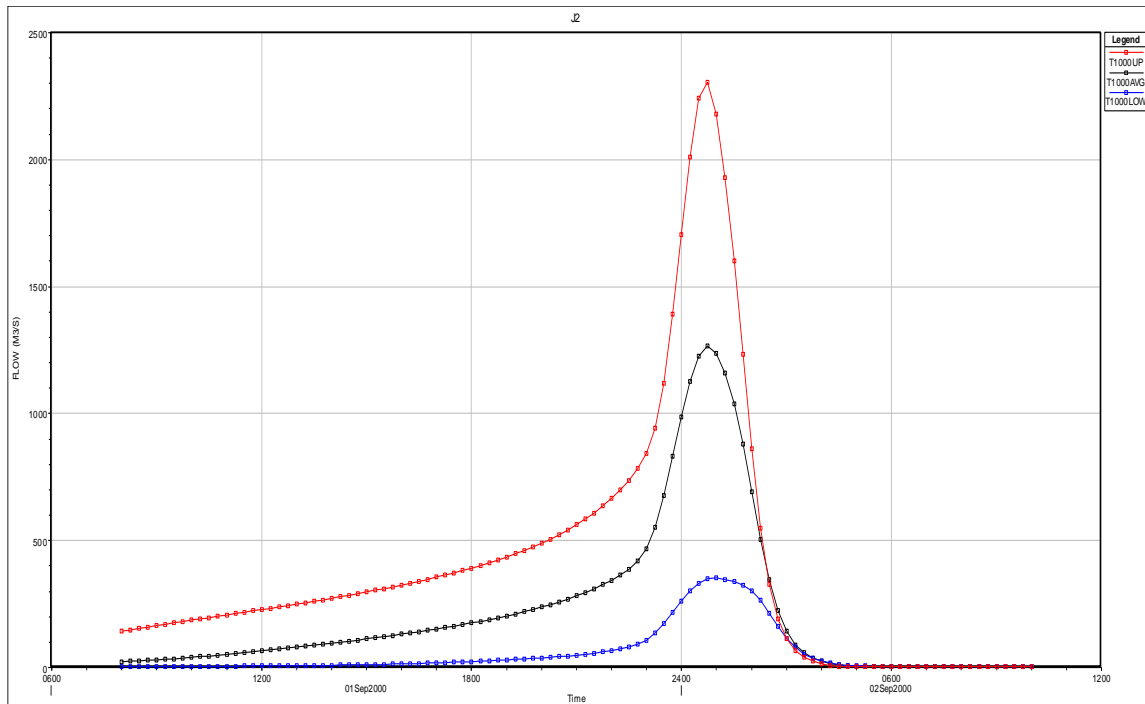
|    |  |                              |
|----|--|------------------------------|
| 18 | $n = \left[ 0.183 + \ln \left( \frac{1.7462 S_f^{0.1581}}{Fr^{0.2631}} \right) \right] \frac{(D_{84})^{1/6}}{\sqrt{g}}$  | Ugarte and Madrid-Aris, 1994 |
| 19 | $n = \left[ 0.183 + \ln \left( \frac{1.3014 S_f^{0.0785} \left( \frac{R}{D_{84}} \right)^{0.0211}}{Fr^{0.1705}} \right) \right] \frac{(D_{84})^{1/6}}{\sqrt{g}}$ | Ugarte and Madrid-Aris, 1994 |
| 20 | $n = \left[ 0.219 + \ln \left( \frac{1.3259 S_f^{0.0932} \left( \frac{R}{D_{50}} \right)^{0.026}}{Fr^{0.2054}} \right) \right] \frac{(D_{50})^{1/6}}{\sqrt{g}}$  | Ugarte and Madrid-Aris, 1994 |
| 21 | Optimum value according to calibration process   |                              |

$n$  = Manning's  $n$  roughness coefficient ( $m^3/s$ ),  $x$  = retardance class,  $v$  = velocity ( $m/s$ ),  $R$  = hydraulic radius ( $m$ ),  $D_i$  = characteristic size of bed material which is larger than  $i\%$  of particles ( $m$ ),  $Sw$  = water surface slope ( $m/m$ ),  $S_f$  = energy slope ( $m/m$ ),  $Fr$  = Froude number,  $r$  = acceleration due to gravity ( $m/s^2$ ).

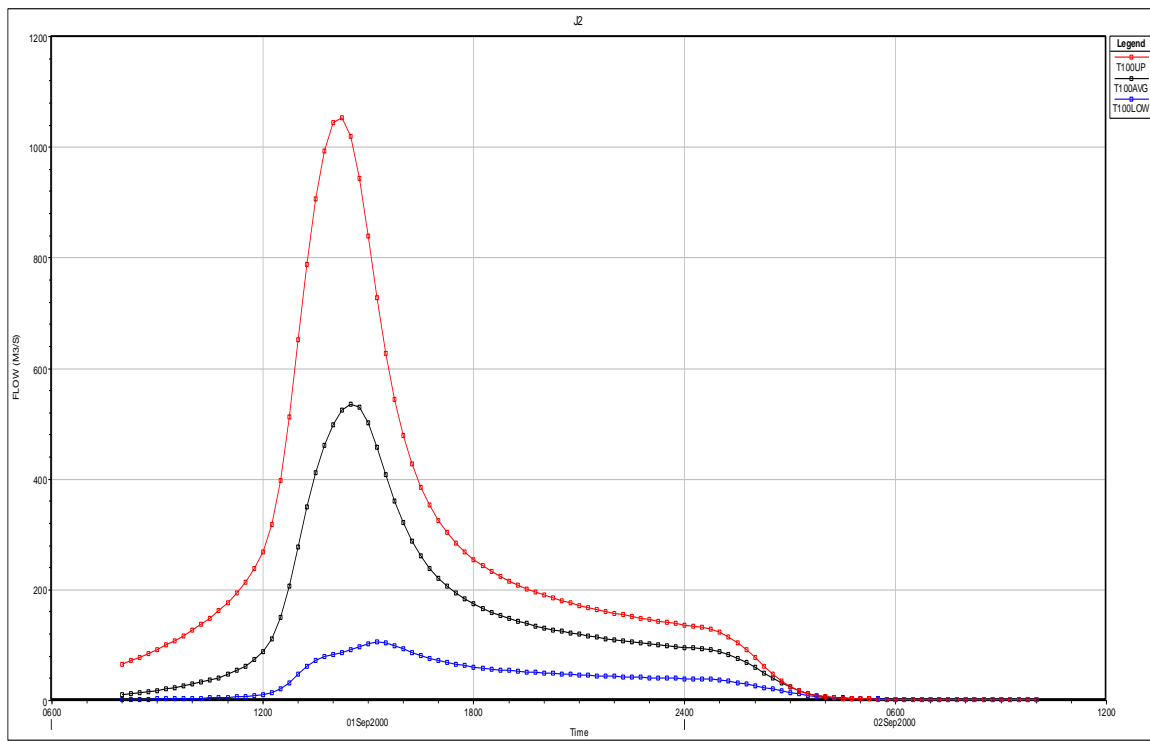
Πίνακας Α- 2: Εμπειρικές εξισώσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας για τον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας  $n$  κατά Manning



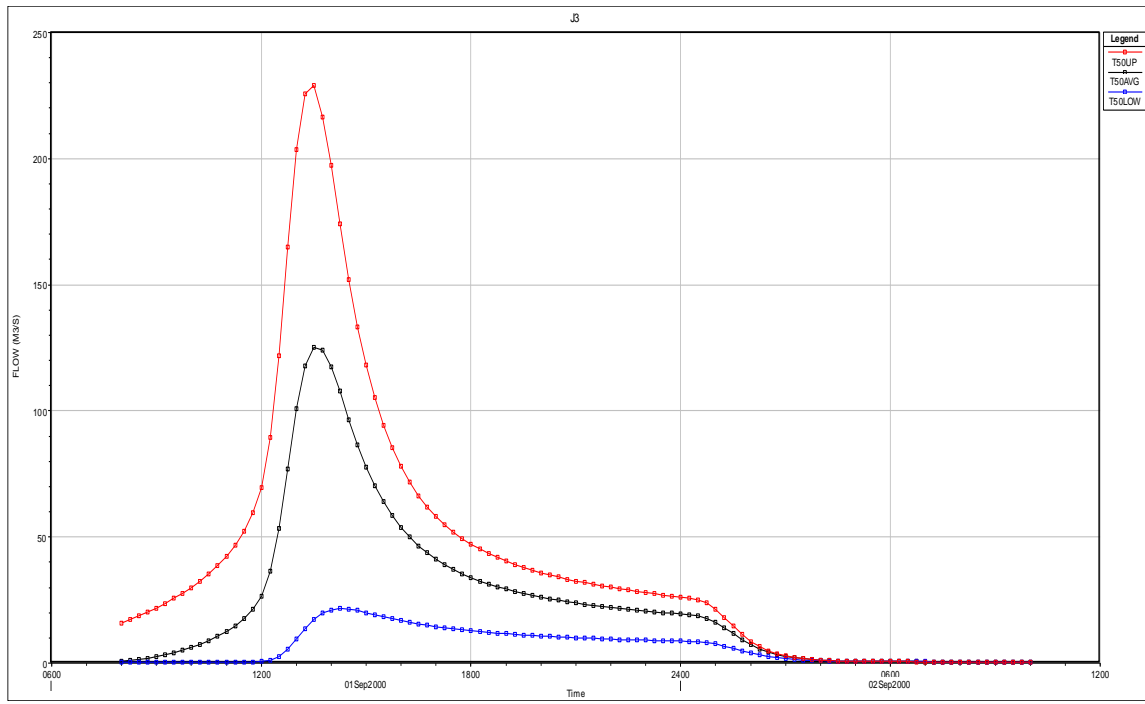
Σχήμα Α- 1: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς  $T=50$  έτη για τον κόμβο εισόδου J2



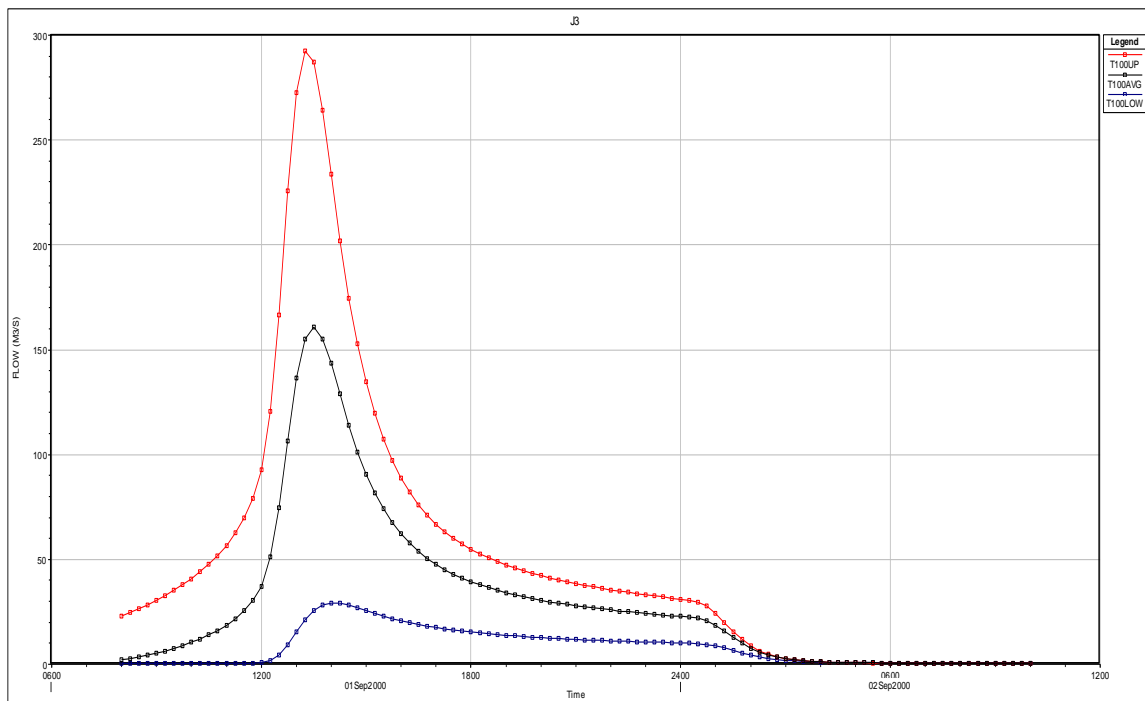
Σχήμα Α- 2: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς  $T=100$  έτη για τον κόμβο εισόδου J2



Σχήμα Α- 3: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς  $T=1000$  έτη για τον κόμβο εισόδου J2

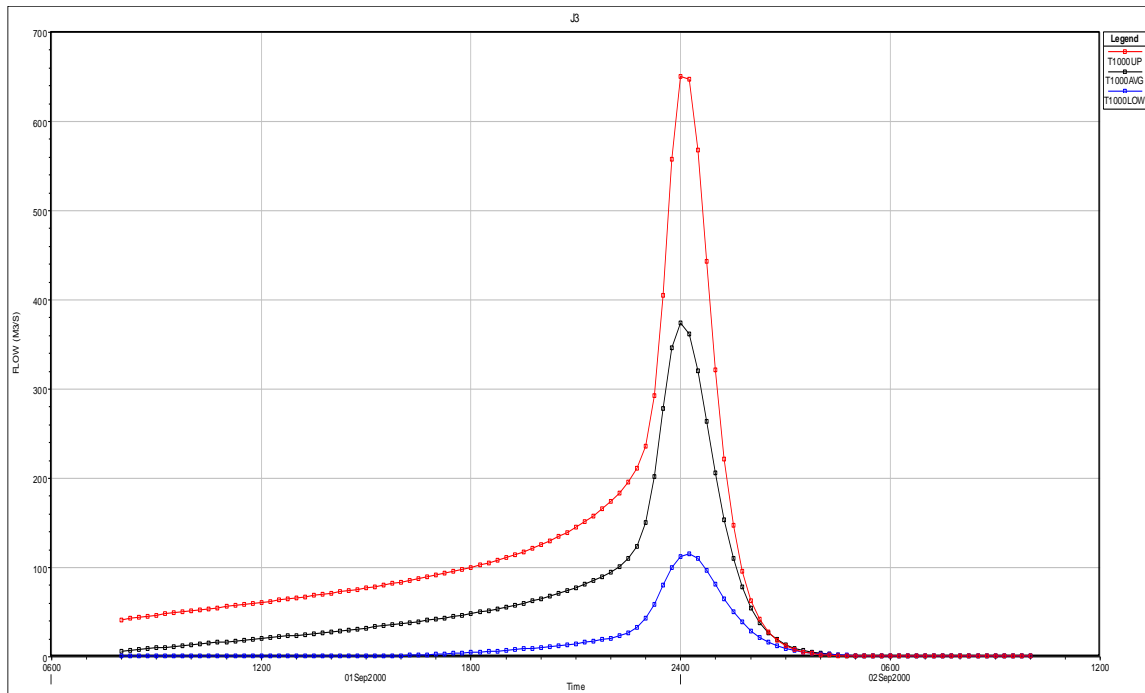


Σχήμα Α- 4: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς  $T=50$  έτη για τον κόμβο εισόδου J3

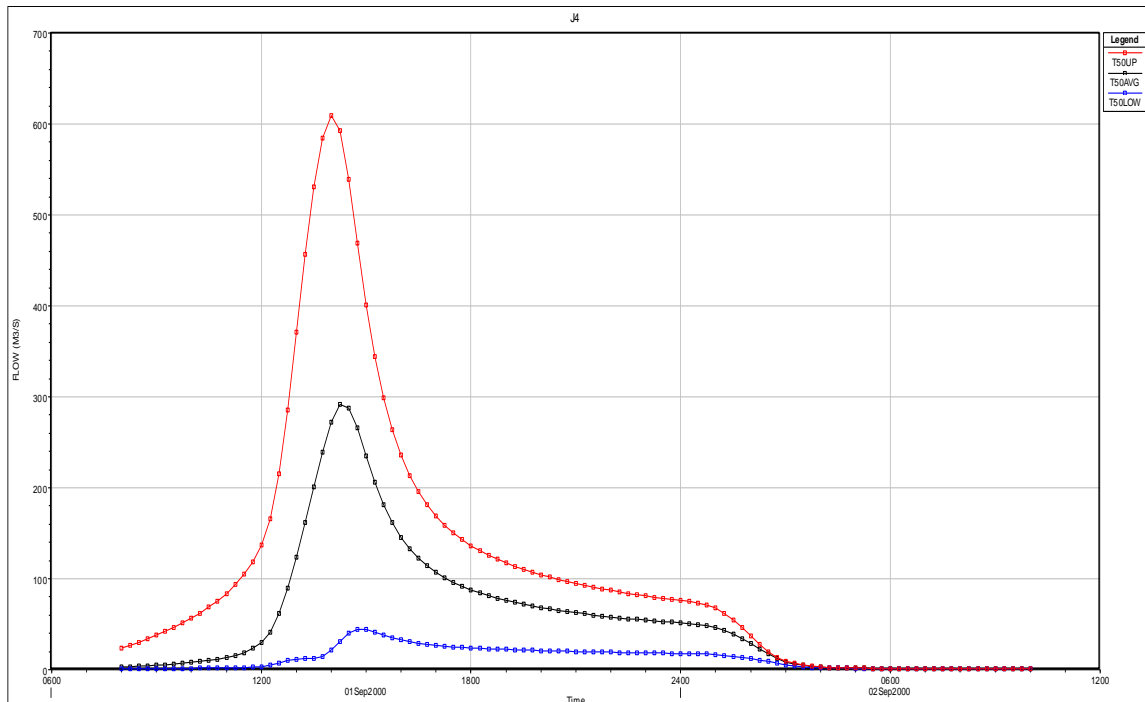


Σχήμα Α- 5: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς  $T=100$  έτη για τον κόμβο εισόδου J3

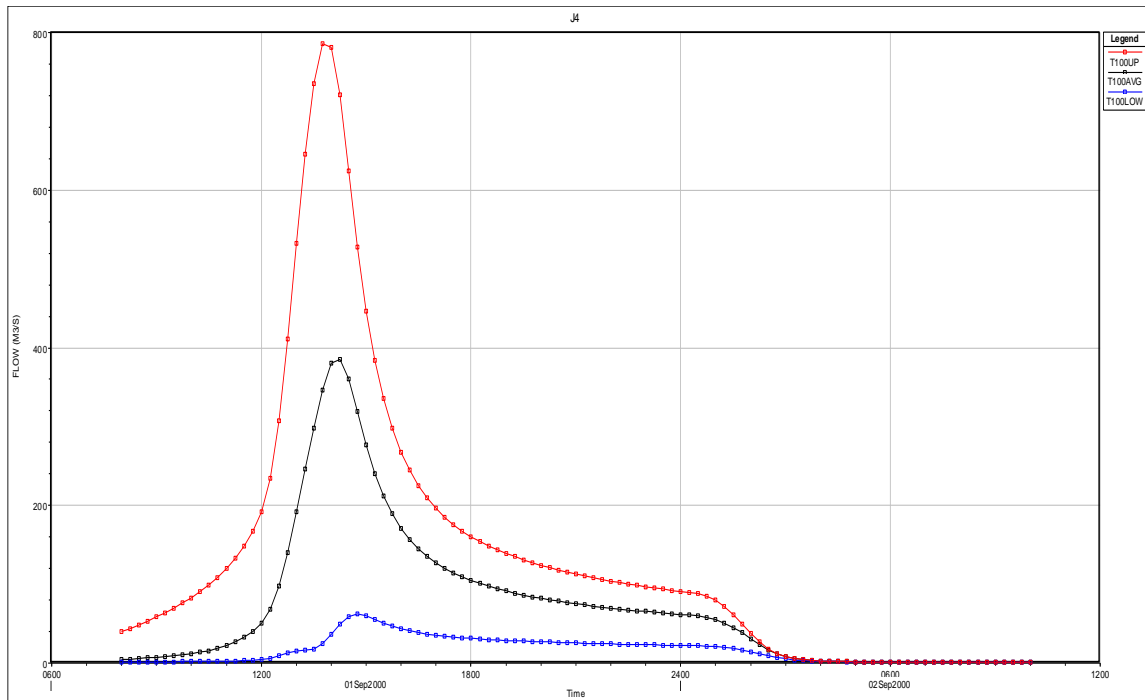




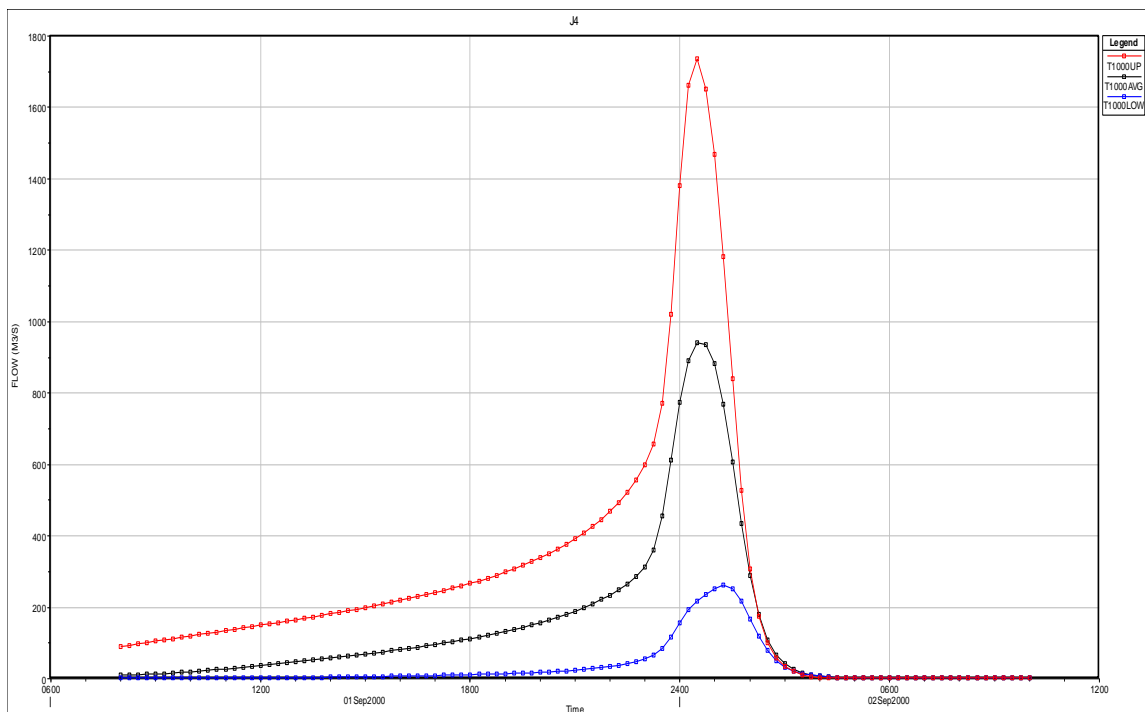
Σχήμα Α- 6: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς  $T=1000$  έτη για τον κόμβο εισόδου J3



Σχήμα Α- 7: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς  $T=50$  έτη για τον κόμβο εισόδου J4



Σχήμα Α- 8: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς  $T=100$  έτη για τον κόμβο εισόδου J4



Σχήμα Α- 9: Υδρογράφημα εισροής για περίοδο επαναφοράς  $T=1000$  έτη για τον κόμβο εισόδου J4

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

|                            |                            | n_LOW  |         |         |         |        |
|----------------------------|----------------------------|--------|---------|---------|---------|--------|
| <u>ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ</u> | ΣΥΝΘΗΚΕΣ<br>ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ | 0-0.2  | 0.2-0.5 | 0.5-1.0 | 1.0-2.0 | >2     |
| <b>T=50</b>                | hg_LOW                     | 0.1010 | 0.1127  | 0.1321  | 0.1712  | 0.0734 |
|                            | hg_AVG                     | 0.4517 | 0.6756  | 0.6663  | 0.5377  | 0.2676 |
|                            | hg_UP                      | 0.9997 | 0.7574  | 0.7240  | 0.6894  | 0.3955 |
| <b>T=100</b>               | hg_LOW                     | 0.2678 | 0.1079  | 0.1190  | 0.1451  | 0.0221 |
|                            | hg_AVG                     | 0.6661 | 0.5937  | 0.4816  | 0.4832  | 0.2827 |
|                            | hg_UP                      | 1.1905 | 0.9885  | 0.9654  | 0.8398  | 0.4755 |
| <b>T=1000</b>              | hg_LOW                     | 0.6007 | 0.4520  | 0.3559  | 0.2442  | 0.1869 |
|                            | hg_AVG                     | 1.3627 | 1.2631  | 0.7208  | 0.5295  | 0.3451 |
|                            | hg_UP                      | 0.7998 | 1.3516  | 1.2314  | 1.2065  | 0.7874 |
|                            |                            | n_AVG  |         |         |         |        |
| <u>ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ</u> | ΣΥΝΘΗΚΕΣ<br>ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ | 0-0.2  | 0.2-0.5 | 0.5-1.0 | 1.0-2.0 | >2     |
| <b>T=50</b>                | hg_LOW                     | 0.2619 | 0.0873  | 0.0865  | 0.1409  | 0.0353 |
|                            | hg_AVG                     | 0.5614 | 0.5253  | 0.4791  | 0.4450  | 0.2256 |
|                            | hg_UP                      | 0.9072 | 0.8000  | 0.7648  | 0.8157  | 0.4782 |
| <b>T=100</b>               | hg_LOW                     | 0.3003 | 0.1310  | 0.1108  | 0.1450  | 0.0534 |
|                            | hg_AVG                     | 0.6099 | 0.5982  | 0.6089  | 0.5613  | 0.3386 |
|                            | hg_UP                      | 1.1798 | 0.9901  | 0.8105  | 0.9887  | 0.5680 |
| <b>T=1000</b>              | hg_LOW                     | 0.5236 | 0.5297  | 0.4278  | 0.3206  | 0.1965 |
|                            | hg_AVG                     | 1.1156 | 1.1618  | 0.8817  | 1.0783  | 0.6457 |
|                            | hg_UP                      | 0.7223 | 1.2647  | 1.6276  | 0.9849  | 0.5586 |
|                            |                            | n_UP   |         |         |         |        |
| <u>ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ</u> | ΣΥΝΘΗΚΕΣ<br>ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ | 0-0.2  | 0.2-0.5 | 0.5-1.0 | 1.0-2.0 | >2     |
| <b>T=50</b>                | hg_LOW                     | 0.2793 | 0.1154  | 0.1082  | 0.1454  | 0.0325 |
|                            | hg_AVG                     | 0.3213 | 0.4537  | 0.9521  | 0.8008  | 0.4034 |
|                            | hg_UP                      | 0.8432 | 0.8065  | 0.7708  | 0.9256  | 0.5209 |

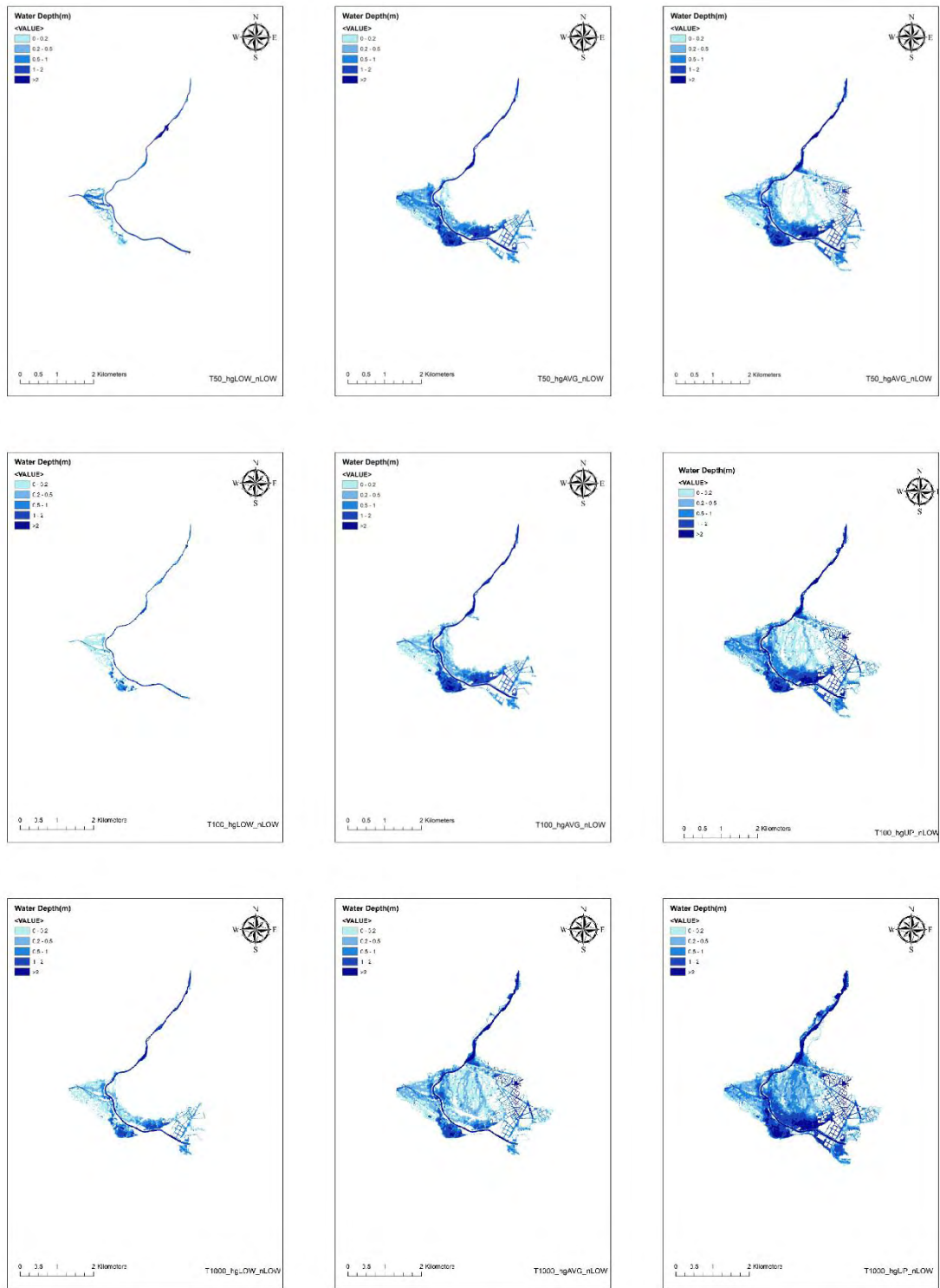
|               |        |        |        |        |        |        |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>T=100</b>  | hg_LOW | 0.3018 | 0.1715 | 0.1320 | 0.1515 | 0.0525 |
|               | hg_AVG | 0.5627 | 0.6309 | 0.6583 | 0.5987 | 0.3720 |
|               | hg_UP  | 1.0111 | 0.8083 | 1.0548 | 1.2103 | 0.6519 |
| <b>T=1000</b> | hg_LOW | 0.5136 | 0.5751 | 0.4900 | 0.3298 | 0.1927 |
|               | hg_AVG | 1.1499 | 1.2561 | 1.0381 | 0.6378 | 0.3804 |
|               | hg_UP  | 0.6032 | 1.1448 | 1.3559 | 1.2149 | 1.2861 |

Πίνακας Β- 1: Αναλογία επιφανειών κατάκλυσης σε km<sup>2</sup> με βάθη νερού σε m

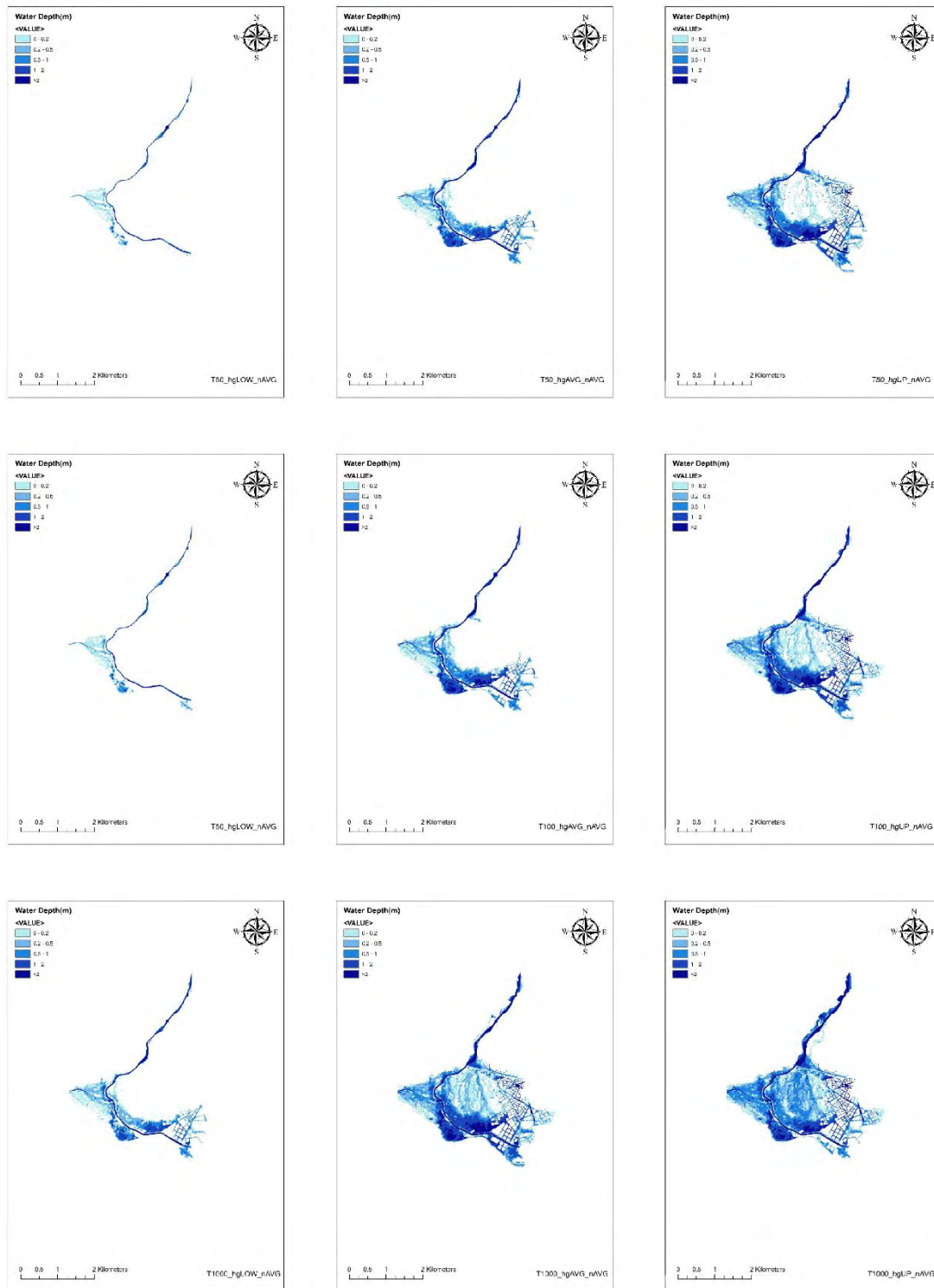
|                   |                       | <b>n_LOW</b> |         |         |         |
|-------------------|-----------------------|--------------|---------|---------|---------|
| <u>ΠΕΡΙΟΔΟΣ</u>   | <u>ΣΥΝΘΗΚΕΣ</u>       |              |         |         |         |
| <u>ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ</u> | <u>ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ</u> | 0-1.0        | 1.0-2.0 | 2.0-5.0 | >5      |
| <b>T=50</b>       | hg_LOW                | 0.3458       | 0.1712  | 0.0566  | 0.0176  |
|                   | hg_AVG                | 1.3362       | 0.6625  | 0.4791  | 0.0295  |
|                   | hg_UP                 | 1.7404       | 0.9070  | 0.8399  | 0.0786  |
| <b>T=100</b>      | hg_LOW                | 0.4036       | 0.2068  | 0.0506  | 0.0009  |
|                   | hg_AVG                | 1.3362       | 0.6625  | 0.4791  | 0.0295  |
|                   | hg_UP                 | 1.9514       | 1.0804  | 1.2459  | 0.1821  |
| <b>T=1000</b>     | hg_LOW                | 1.1246       | 0.4003  | 0.3057  | 0.2442  |
|                   | hg_AVG                | 2.2003       | 1.1340  | 0.7913  | 0.0955  |
|                   | hg_UP                 | 1.2950       | 1.8081  | 1.8306  | 0.4430  |
|                   |                       | <b>n_AVG</b> |         |         |         |
| <u>ΠΕΡΙΟΔΟΣ</u>   | <u>ΣΥΝΘΗΚΕΣ</u>       |              |         |         |         |
| <u>ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ</u> | <u>ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ</u> | 0-0.2        | 0.2-0.5 | 0.5-1.0 | 1.0-2.0 |
| <b>T=50</b>       | hg_LOW                | 0.3913       | 0.1504  | 0.0542  | 0.0161  |
|                   | hg_AVG                | 1.6063       | 0.3571  | 0.2565  | 0.0166  |
|                   | hg_UP                 | 2.1871       | 0.9945  | 0.5355  | 0.0488  |
| <b>T=100</b>      | hg_LOW                | 0.4998       | 0.1522  | 0.0747  | 0.0138  |
|                   | hg_AVG                | 1.7943       | 0.5729  | 0.3146  | 0.0351  |
|                   | hg_UP                 | 2.5182       | 1.2390  | 0.7020  | 0.0781  |
|                   | hg_LOW                | 1.4655       | 0.2842  | 0.2356  | 0.0128  |

|                                      |                            |             |         |         |        |
|--------------------------------------|----------------------------|-------------|---------|---------|--------|
| <b>T=1000</b>                        | hg_AVG                     | 2.4488      | 1.4875  | 0.8173  | 0.1128 |
|                                      | hg_UP                      | 1.9579      | 1.9379  | 1.0285  | 0.2339 |
|                                      |                            | <b>n_UP</b> |         |         |        |
| <u>ΠΕΡΙΟΔΟΣ</u><br><u>ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ</u> | ΣΥΝΘΗΚΕΣ<br>ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ | 0-1.0       | 1.0-2.0 | 2.0-5.0 | >5     |
| <b>T=50</b>                          | hg_LOW                     | 0.4660      | 0.1504  | 0.0495  | 0.0144 |
|                                      | hg_AVG                     | 1.8942      | 0.7038  | 0.2623  | 0.0702 |
|                                      | hg_UP                      | 2.5131      | 0.8459  | 0.4532  | 0.0541 |
|                                      |                            |             |         |         |        |
| <b>T=100</b>                         | hg_LOW                     | 0.5850      | 0.1504  | 0.0620  | 0.0114 |
|                                      | hg_AVG                     | 2.1410      | 0.3724  | 0.2690  | 0.0396 |
|                                      | hg_UP                      | 2.6757      | 1.3440  | 0.6117  | 0.1043 |
|                                      |                            |             |         |         |        |
| <b>T=1000</b>                        | hg_LOW                     | 1.6845      | 0.5751  | 0.4900  | 0.3298 |
|                                      | hg_AVG                     | 2.7617      | 1.0717  | 0.5330  | 0.0952 |
|                                      | hg_UP                      | 1.8637      | 2.3392  | 1.1463  | 0.2550 |

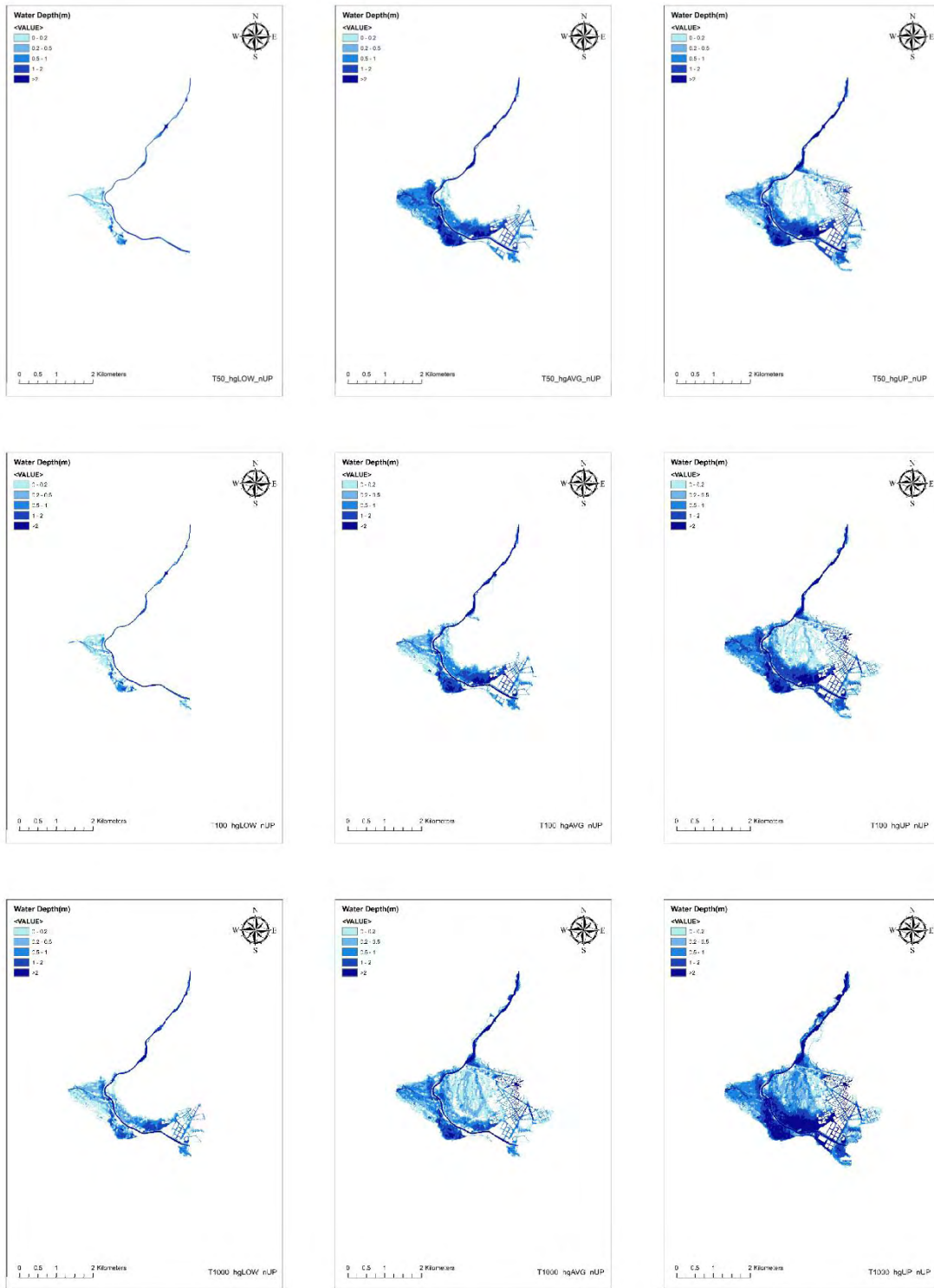
Πίνακας Β- 2: Αναλογία επιφανειών κατάκλυσης σε km<sup>2</sup> με ταχύτητες ροής σε m/sec



Πίνακας Β- 3: Σύγκριση χωρικής κατανομής μέγιστου βάθους για χαμηλό συντελεστή τραχύτητας  $n_{LOW}$

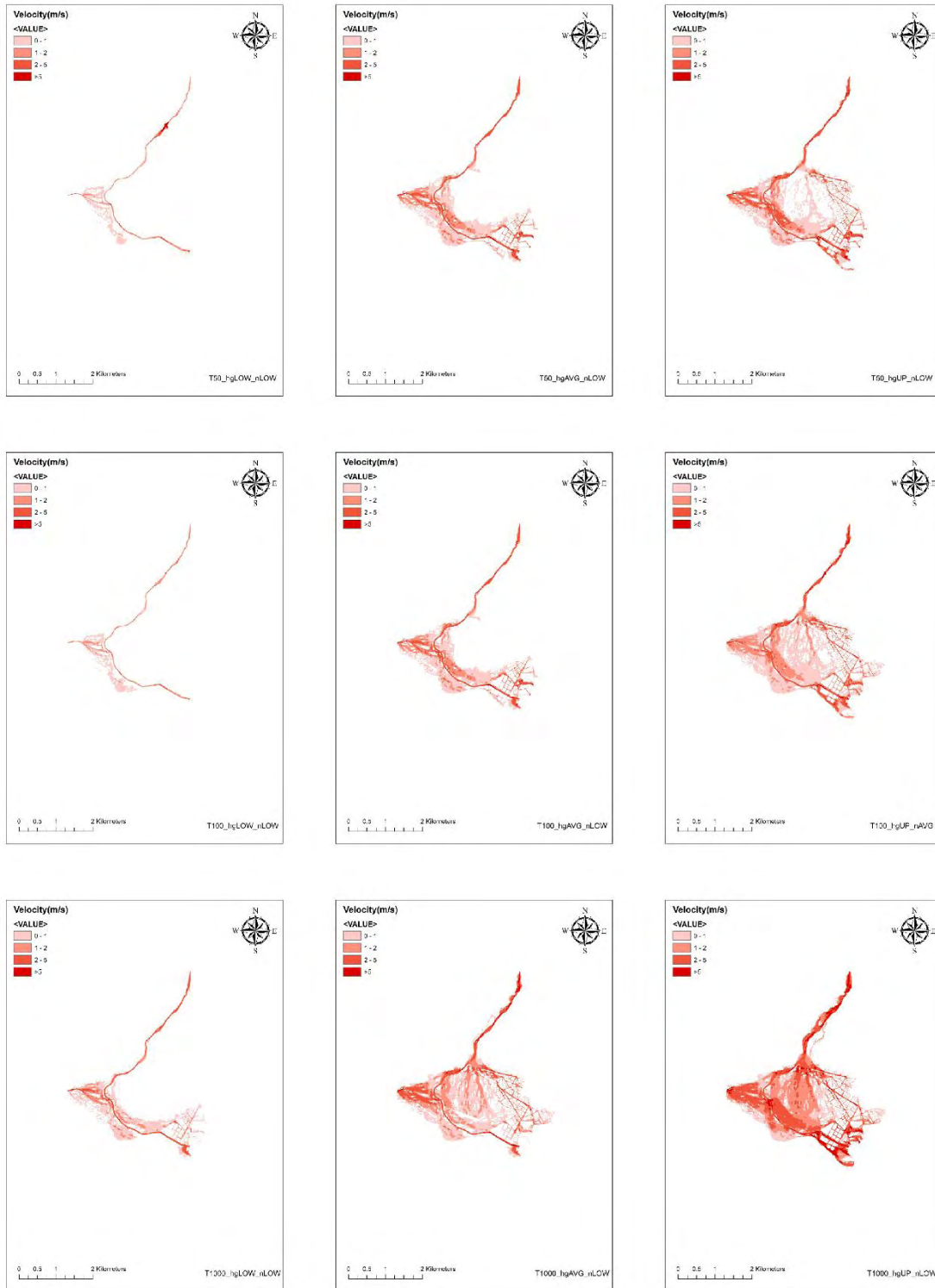


Πίνακας Β- 4: Σύγκριση χωρικής κατανομής μέγιστου βάθους για μέσο συντελεστή τραχύτητας  $n_{AVG}$

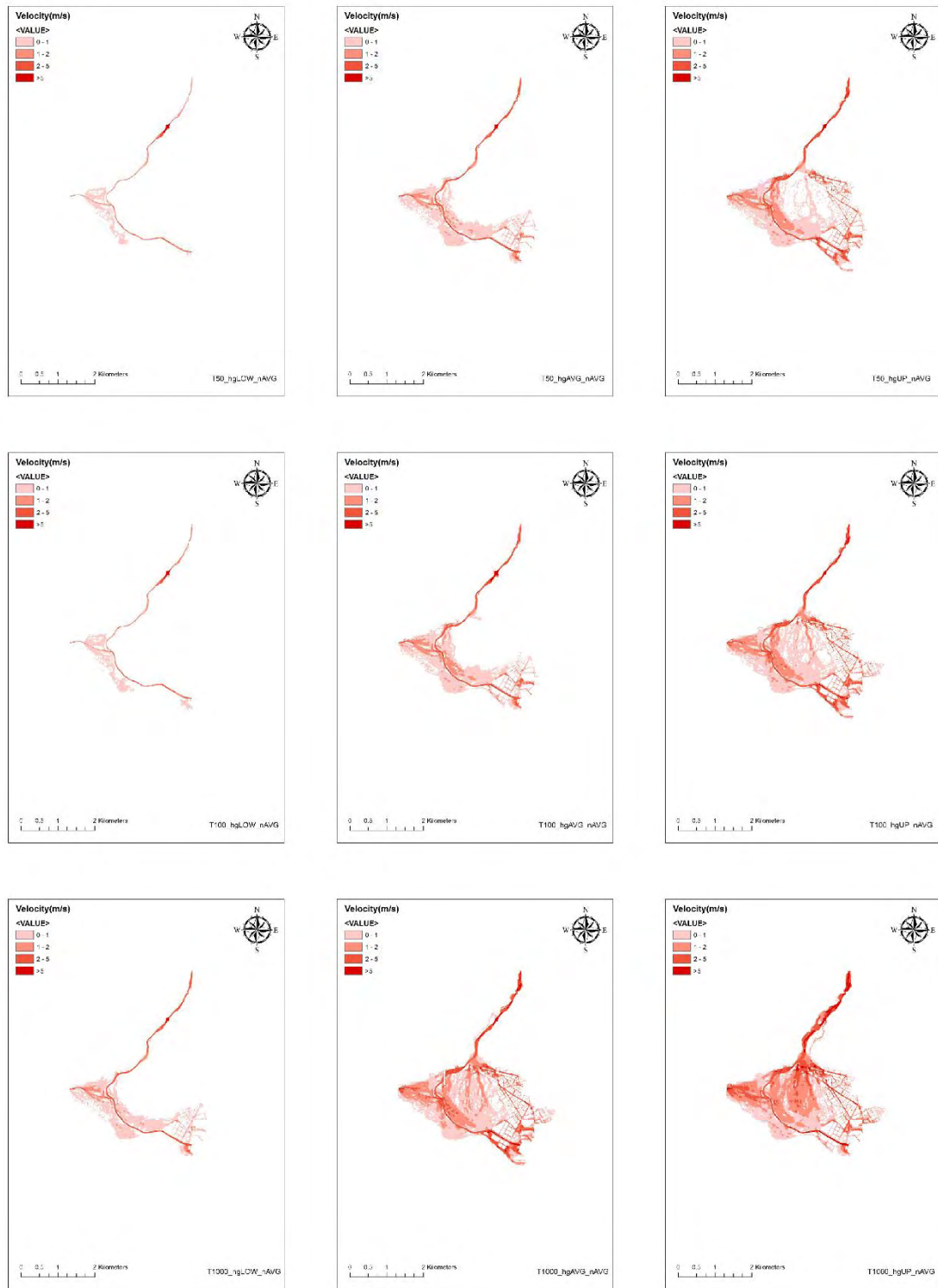


Πίνακας Β- 5: Σύγκριση χωρικής κατανομής μέγιστου βάθους για υψηλό συντελεστή τραχύτητας  $n_{UP}$

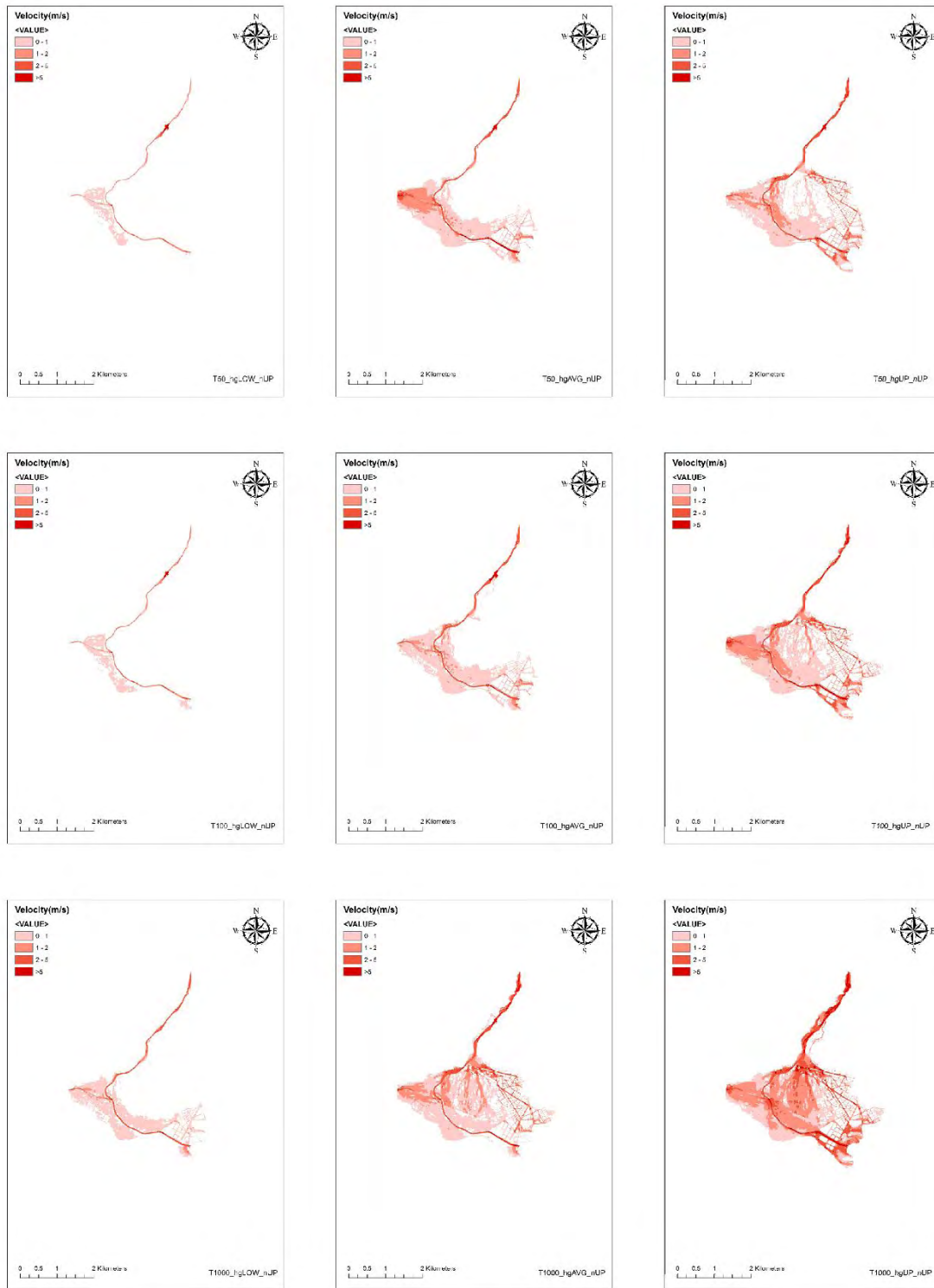




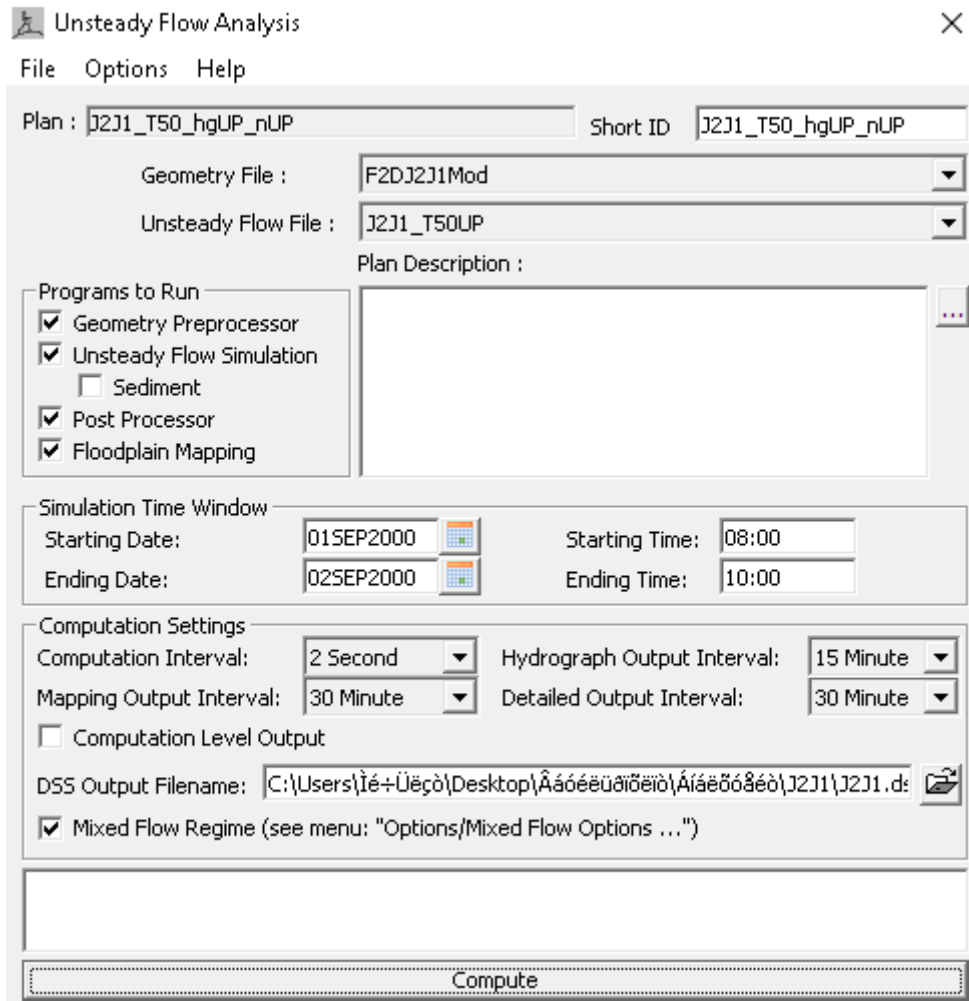
Πίνακας Β- 6: Σύγκριση χωρικής κατανομής ταχυτήτων ροής για χαμηλό συντελεστή τραχύτητας  $n_{LOW}$



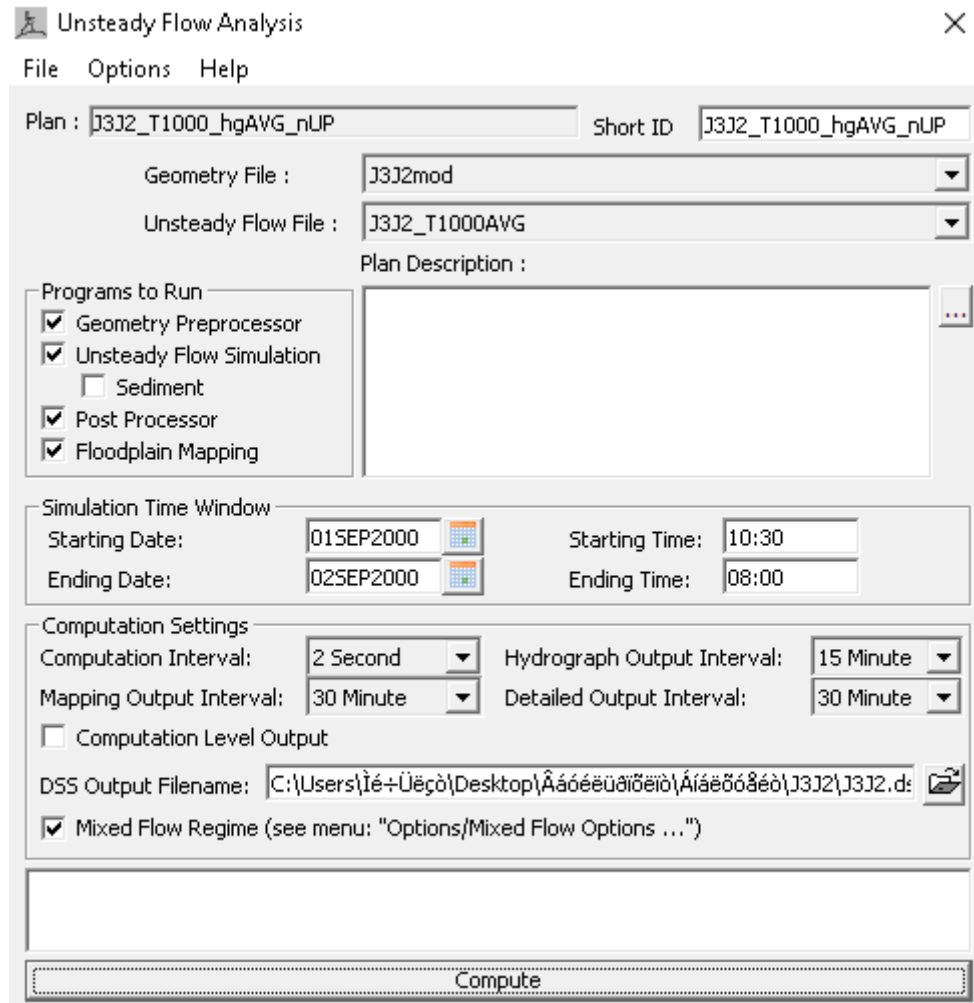
Πίνακας B- 7: Σύγκριση χωρικής κατανομής ταχυτήτων ροής για μέσο συντελεστή τραχύτητας  $n_{AVG}$



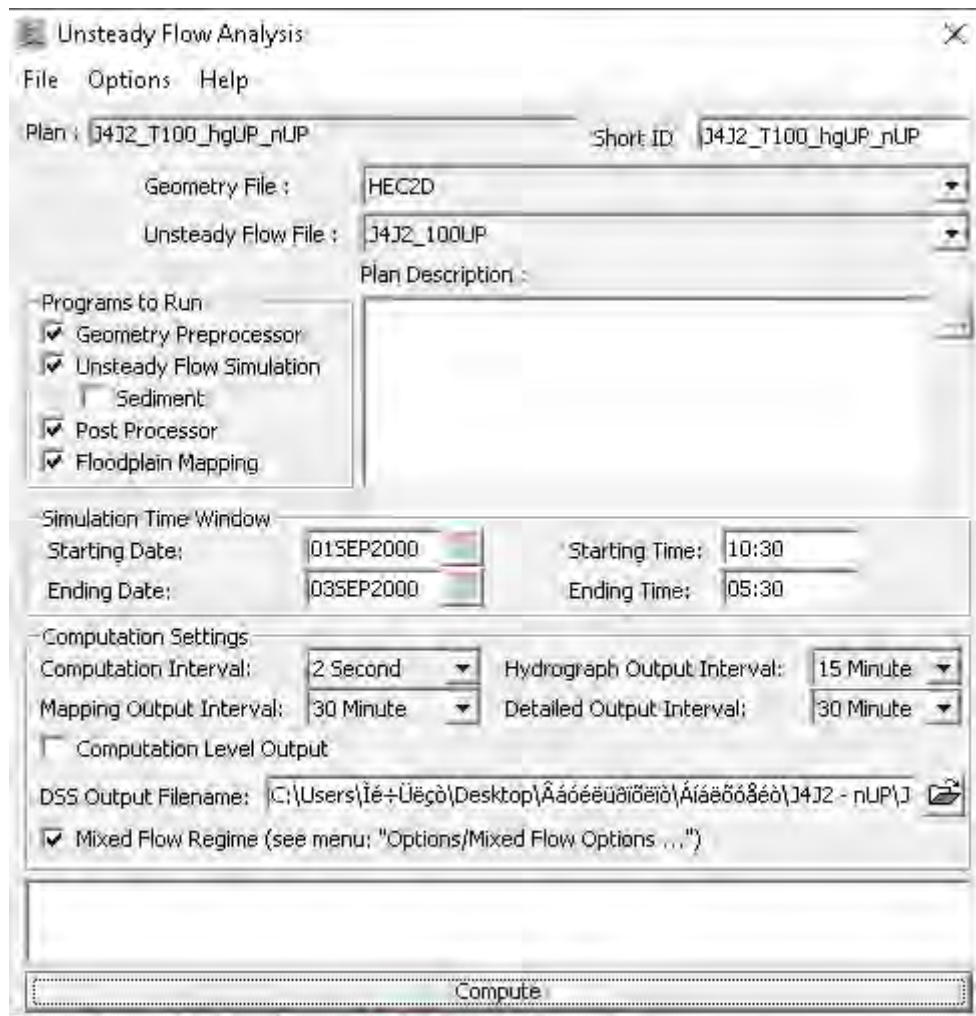
Πίνακας Β- 8: Σύγκριση χωρικής κατανομής ταχυτήτων ροής για υψηλό συντελεστή τραχύτητας  $n_{UP}$



Πίνακας Β- 9: Ρυθμίσεις για τον κλάδο J2J1



Πίνακας Β- 10: Ρυθμίσεις για τον κλάδο J3J2



Πίνακας Β- 11: Ρυθμίσεις για τον κλάδο J3J2