



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

**ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΕΜΑΤΟΣ ΡΑΠΕΝΤΩΣΑΣ
ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ HEC-RAS**

Διπλωματική εργασία
Παναγιώτης Παλημέρης

Επιβλέπων Καθηγητής
Γ. Τσακίρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

**ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΕΜΑΤΟΣ ΡΑΠΕΝΤΩΣΑΣ
ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ HEC-RAS**

Διπλωματική εργασία
Παναγιώτης Παλημέρης

Τριμελής Επιτροπή:

Α. Μαντόγλου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Ι. Ναλμπάντης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Γ. Τσακίρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας κλείνει ο μεγάλος κύκλος της πανεπιστημιακής μου εκπαίδευσης στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Ένας κύκλος που συνοδεύτηκε με πολλές στιγμές που θα μνημονεύω για πάντα.

Η κεντρική ιδέα της εργασίας αφορά την διερεύνηση της επιρροής της τραχύτητας σε δισδιάστατη προσομοίωση πλημμυρικών γεγονότων. Ένα θέμα με μεγάλο ερευνητικό και πρακτικό ενδιαφέρον, και στο οποίο χαίρομαι που κατάφερα να συμβάλλω, έστω και σε μικρό βαθμό.

Θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γ. Τσακίρη για την ανάθεση του θέματος, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την καθοδήγηση και τις συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον κ. Χ. Βαγγέλη για τις συμβουλές του τόσο στο επιστημονικό αντικείμενο όσο και στο διαδικαστικό κομμάτι, τον Β. Μπέλλο για το διάστημα που συνεργαστήκαμε και τη βοήθεια του, καθώς και όλο το προσωπικό του εργαστηρίου.

Πολλές ευχαριστίες θέλω να δώσω στην οικογένεια μου για τη στήριξη και την υπομονή που έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια της φοιτητικής μου ζωής, και τους φίλους μου εντός και εκτός σχολής. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω ξεχωριστά την Σύλβια για τη βοήθεια και την στήριξη που μου παρείχε, καθώς και τον Παύλο, τον Γιώργο, τον Δημήτρη και τον Κλεάνθη.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω όλους όσους αγωνιστήκαμε μαζί στις μάχες του φοιτητικού κινήματος υπερασπιζόμενοι ένα καλύτερο δημόσιο ζωντανό και δημοκρατικό Πανεπιστήμιο, και επιζητώντας ένα καλύτερο μέλλον για τη γενιά μας. Ο κύκλος της φοιτητικής εποχής κλείνει όπως άρχισε, με την ελπίδα για τις ομορφότερες μέρες που δεν έχουν έρθει ακόμα.

Σε όσους με δίδαξαν ήθος και πολιτισμό...

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επιρροής της τραχύτητας των καλύψεων γης σε προσομοίωση δισδιάστατης ροής ποταμού, μέσω του προγράμματος HEC-RAS 5.0.1. Η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη της Ραπεντώσας στην Ανατολική Αττική. Βασικό δεδομένο εισόδου αποτέλεσε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους υπό μορφή ακανόνιστων τριγώνων (Triangulated irregular network, TIN). Κύρια διαφοροποίηση μεταξύ των σεναρίων που προσομοιώνονται είναι το αρχείο των χρήσεων γης, το οποίο χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου στο λογισμικό. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ ενός λεπτομερούς αρχείου (προϊόν ψηφιοποίησης) με εκατοντάδες πολύγωνα και ενός αδρομερούς αρχείου λίγων πολυγώνων του Corine Land Cover 2000.

Το λογισμικό του HEC-RAS 5.0.1. παρέχει τη δυνατότητα της δισδιάστατης ανάλυσης ροής ανοικτών αγωγών, και στην εργασία αυτή επιχειρείται η εφαρμογή της για την περιοχή ενδιαφέροντος.

Τα δεδομένα των αρχείων χρήσεων γης που εισάγονται, περιέχουν και τις τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning n για κάθε πολύγωνο, ανάλογα με τη χρήση γης στην οποία έχει κατηγοριοποιηθεί. Η διαφοροποίηση στο πλήθος των πολυγώνων και στις τιμές του συντελεστή είναι σημαντική.

Η παρούσα εργασία καλείται να εντοπίσει τη διαφοροποίηση στα τελικά δεδομένα των βαθών ροής και των ταχυτήτων ροής, όπως αυτά προκύπτουν από τη δισδιάστατη προσομοίωση συγκεκριμένων σεναρίων πλημμυρικών γεγονότων για περιόδους επαναφοράς $T=25$, $T=50$ και $T=100$ χρόνων.

Τα δεδομένα εξόδου είναι αρχεία υπό μορφή raster που περιέχουν την πληροφορία για τις τιμές των βαθών και των ταχυτήτων σε κάθε φατνίο της περιοχής μελέτης. Κατόπιν επεξεργασίας αυτών σε περιβάλλον ArcGIS προκύπτουν και οι τελικοί παράγωγοι χάρτες.

Η σύγκριση των τελικών αποτελεσμάτων και των παράγωγων χαρτών, όπως αυτοί προκύπτουν μετά την εφαρμογή του HEC-RAS, γίνεται με τη χρήση του δείκτη επίδοσης μοντέλων Nash-Sutcliffe.

Τα παραγόμενα αποτελέσματα αποτελούν δείκτη σχετικά με την αποδοτικότητα ενός αδρομερούς μοντέλου καλύψεων γης σε προσομοιώσεις δισδιάστατης ροής, ενώ παρέχουν και πληροφορίες σχετικές με την τρωτότητα και την επικινδυνότητα της περιοχής ενδιαφέροντος σε εν δυνάμει μελλοντικές πλημμύρες.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν, αποτελούν αντικείμενο περαιτέρω ακαδημαϊκής έρευνας και μελέτης σε προσομοιώσεις με διαφορετικά δεδομένα και χαρακτηριστικά.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to investigate the importance of land-cover roughness, through a two-dimensional river flow simulation, using HEC-RAS 5.0.1. The main difference between the two simulated scenarios, is the land-cover file which is used as import data. An extremely detailed map (digitization product) containing hundreds of polygons is being compared to a Corine Land Cover 2000 map of the same area. The area of interest is Rapentosa (East Attica district, Greece). The ground data used (DTM - digital terrain model) are the same in both simulations.

The HEC-RAS 5.0.1. software provides the capability of two-dimensional open channel flow simulation, which is conducted for this thesis' area of interest (AOI). The land-cover data imported for every scenario, contain the values of Manning's n roughness coefficient for every polygon, depending on the land-use class they are categorized. However, there is a significant difference between the total number of the polygons in each file, and the Manning's n values.

The present thesis searches the differences in the final results of flow depth and flow velocity data. The particular data are derived by the flow simulation of three flood scenarios, one for every flood return period of T=25, T=50 and T=100 years respectively.

The output raster data contain the information of the flow depth and flow velocity values for every pixel of the AOI. These data are processed in ArcGIS environment, in order to make the final map products.

The comparison of the final results and the map products of the HEC-RAS simulation is made by using the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient.

The final results of this thesis show the efficiency of a less detailed land-cover map data layer used in two-dimensional flood simulations. They also provide information about the flood vulnerability and risk of the particular AOI in eventual future flood scenarios.

The key findings of this diploma thesis have the potential to be part of future academic research in other areas with different characteristics.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	11
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	13
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	15
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	17
1.1. Αντικείμενο εργασίας	17
1.2. Διάρθρωση εργασίας	17
2. ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ	19
2.1. Εισαγωγικά	19
2.2. Επιφανειακή απορροή	23
2.3. Κίνδυνος πλημμύρας –Διαχείριση κινδύνου πλημμυρών	23
3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	27
3.1. Συντελεστής τραχύτητας	27
3.2. Υδρολογικός Σχεδιασμός.....	29
3.2.1. Τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα.....	30
3.2.2. Υετόγραμμα σχεδιασμού.....	31
3.2.3. Υδρογράφημα σχεδιασμού	31
3.3. Γεγονός πλημμύρας Νοεμβρίου 2005	33
3.4. Υδραυλικός σχεδιασμός.....	33
3.4.1. Ροή ανοιχτών αγωγών	34
3.4.2. Κινηματικά κριτήρια	34
3.4.3. Εξισώσεις μη-μόνιμης ροής	34
4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	39
4.1. Συνοπτική παρουσίαση.....	39
4.2. Υδρογραφικά - Κλιματικά στοιχεία	40
4.3. Χρήσεις γης	40
5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	47
5.1. Λογισμικά εφαρμογής	47
5.1.1. ArcGIS 10.1.....	47
5.1.2. HEC-RAS 5.0.1	47
5.2. Υπόβαθρο λειτουργίας HEC-RAS	48
5.3. Υπολογιστικό χρονικό βήμα.....	50
5.4. Προεπεξεργασία δεδομένων.....	51

5.5.	Εφαρμογή της υδραυλικής προσομοίωσης.....	54
5.5.1.	Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων.....	54
5.5.2.	Εισαγωγή - Επεξεργασία δεδομένων ροής.....	57
5.5.3.	Καθορισμός οριακών συνθηκών ροής.....	57
5.5.4.	Καθορισμός χρονικού βήματος	58
5.6.	Επεξεργασία παραγόμενων χαρτών.....	59
6.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΓΚΡΙΣΗ	61
6.1.	Εξαγωγή αποτελεσμάτων	61
6.1.1.	Συντελεστής Nash-Sutcliffe	61
6.2.	Παράγωγοι χάρτες βαθών.....	62
6.2.1.	Σενάριο περιόδου επαναφοράς 25 έτη	62
6.2.2.	Σενάριο περιόδου επαναφοράς 50 έτη	64
6.2.3.	Σενάριο περιόδου επαναφοράς 100 έτη	66
6.2.4.	Ανάλυση αποτελεσμάτων βαθών ροής.....	68
6.3.	Παράγωγοι χάρτες ταχυτήτων ροής	70
6.2.5.	Σενάριο περιόδου επαναφοράς 25 έτη	70
6.2.6.	Σενάριο περιόδου επαναφοράς 50 έτη	72
6.2.7.	Σενάριο περιόδου επαναφοράς 100 έτη	74
6.3.1.	Ανάλυση αποτελεσμάτων μέγιστων ταχυτήτων ροής.....	75
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	77
7.1.	Βάθη ροής.....	77
7.2.	Μέγιστες ταχύτητες ροής.....	78
7.3.	Γενικό συμπέρασμα αποδοτικότητας αδρομερούς μοντέλου.....	79
7.4.	Μελλοντική έρευνα	79
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	81
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	85

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

<i>Εικόνα 2.1.</i> Πλημμύρα σε ημιαστικό περιβάλλον (Πηγή: http://bilder.bild.de/fotos/ueberschwemmter-ort-simbach-49077874/Bild/1.bild.jpg).....	21
<i>Εικόνα 2.2.</i> Πλημμύρα σε έξω-αστικό περιβάλλον (Πηγή: http://www.thepaper.gr/wp-content/uploads/2014/11/italia-240x160.jpg)	22
<i>Εικόνα 2.3.</i> Πλημμύρα σε αστικό περιβάλλον (Πηγή: https://es.sott.net/topic/10-Inundaciones?page=5).....	22
<i>Εικόνα 3.1.</i> Υδρογραφήματα σχεδιασμού για διάφορες περιόδους επαναφοράς	32
<i>Εικόνα 4.1.</i> Κλίσεις της περιοχής μελέτης.....	39
<i>Εικόνα 4.2.</i> Υπόμνημα Χρήσεων γης κατά Corine Land Cover 2000.....	44
<i>Εικόνα 5.1.</i> Κελιά δισδιάστατου πλέγματος HEC-RAS 5.0.1.	49
<i>Εικόνα 5.2.</i> Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους περιοχής μελέτης	52
<i>Εικόνα 5.3.</i> Χάρτης χρήσεων γης βασικού μοντέλου	53
<i>Εικόνα 5.4.</i> Χάρτης χρήσεων γης κατά Corine Land Cover 2000	53
<i>Εικόνα 5.5.</i> Επιλογή διαστάσεων κελιών πλέγματος.....	55
<i>Εικόνα 5.6.</i> Εικόνα δισδιάστατου πλέγματος κελιών	56
<i>Εικόνα 6.1.</i> Χάρτης βαθών βασικού μοντέλου για $T=25$ χρόνια	62
<i>Εικόνα 6.2.</i> Χάρτης βαθών εξεταζόμενου μοντέλου για $T=25$ χρόνια	63
<i>Εικόνα 6.3.</i> Χάρτης βαθών βασικού μοντέλου για $T=50$ χρόνια	64
<i>Εικόνα 6.4.</i> Χάρτης βαθών εξεταζόμενου μοντέλου για $T=50$ χρόνια	65
<i>Εικόνα 6.5.</i> Χάρτης βαθών βασικού μοντέλου για $T=100$ χρόνια	66
<i>Εικόνα 6.6.</i> Χάρτης βαθών εξεταζόμενου μοντέλου για $T=100$ χρόνια	67
<i>Εικόνα 6.7.</i> Τιμές του συντελεστή E για τους χάρτες των βαθών ροής για διάφορες περιόδους επαναφοράς T	69
<i>Εικόνα 6.8.</i> Χάρτης μέγιστων ταχυτήτων ροής βασικού μοντέλου για $T=25$ χρόνια.....	71
<i>Εικόνα 6.9.</i> Χάρτης μέγιστων ταχυτήτων ροής εξεταζόμενου μοντέλου για $T=25$ χρόνια.....	71
<i>Εικόνα 6.10.</i> Χάρτης μέγιστων ταχυτήτων ροής βασικού μοντέλου για $T=50$ χρόνια.....	72
<i>Εικόνα 6.11.</i> Χάρτης μέγιστων ταχυτήτων ροής εξεταζόμενου μοντέλου για $T=50$ χρόνια.....	73
<i>Εικόνα 6.12.</i> Χάρτης μέγιστων ταχυτήτων ροής βασικού μοντέλου για $T=100$ χρόνια.....	74
<i>Εικόνα 6.13.</i> Χάρτης μέγιστων ταχυτήτων ροής εξεταζόμενου μοντέλου για $T=100$ χρόνια.....	74
<i>Εικόνα 6.14.</i> Τιμές του συντελεστή E για τους χάρτες των μέγιστων ταχυτήτων ροής για διάφορες περιόδους επαναφοράς T	76

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

<i>Πίνακας 4.1. Τιμές συντελεστή τραχύτητας ανά χρήση γης.....</i>	<i>42</i>
<i>Πίνακας 4.2. Τιμές συντελεστή τραχύτητας ανά είδος και ποσότητα βλάστησης.....</i>	<i>43</i>
<i>Πίνακας 4.3. Τιμές συντελεστή τραχύτητας ανά χρήση γης πολυγώνων Corine Land Cover 2000</i>	<i>45</i>
<i>Πίνακας 5.1.Επιλογή εξισώσεων επίλυσης ανά τύπο ροής</i>	<i>50</i>

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Αντικείμενο εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με σκοπό τη διερεύνηση της κρισιμότητας της τραχύτητας του εδάφους στην προσομοίωση δισδιάστατης ροής για την περιοχή της Ραπεντώσας στην Ανατολική Αττική, με χρήση του λογισμικού HEC-RAS. Ο συντελεστής τραχύτητας Manning ορίστηκε ως ο κρίσιμος συντελεστής που αποτυπώνει ορθότερα τις διαφοροποιήσεις της τραχύτητας στις καλύψεις γης.

Η διαφοροποίηση στις δύο εφαρμογές είναι τόσο ποσοτική, όσο και ποιοτική. Τα δύο αρχεία καλύψεων-χρήσεων γης που αφορούν την ίδια περιοχή έχουν πολύ μεγάλη διαφορά στην ποσότητα των καταγεγραμμένων δεδομένων, όσο και στην λεπτομέρεια της πληροφορίας που παρέχουν. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίστηκε πως η όποια απόκλιση στα παραγόμενα αποτελέσματα θα έχει ιδιαίτερη σημασία.

Για την διερεύνηση μεταξύ των διαφορών αυτών, απαραίτητη ήταν η εφαρμογή στο λογισμικό HEC-RAS 5.0.1. που παρέχει τη δυνατότητα για προσομοίωση δισδιάστατης ροής ανοικτών αγωγών. Τα δύο διαφορετικά αρχεία καλύψεων γης (Land Cover) αποτέλεσαν δεδομένα εισόδου για την περιοχή μελέτης και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν τα βάθη και οι ταχύτητες ροής, καθώς και η έκταση του πλημμυρικού πεδίου που επηρεάστηκε στα σενάρια.

Η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με την σημασία της λεπτομέρειας των γεωμετρικών δεδομένων, και ειδικά με τις τιμές του συντελεστή τραχύτητας σε πολύγωνα χρήσεων γης, είναι πολύ χρήσιμη για πρακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς. Τα σενάρια που εφαρμόστηκαν για την περιοχή μελέτης και η απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων, προσφέρουν σημαντικές παρατηρήσεις, ειδικότερα στον τομέα της αντιπλημμυρικής προστασίας.

1.2. Διάρθρωση εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε οκτώ κεφάλαια. Μια συνοπτική περιγραφή τους ακολουθεί παρακάτω.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική ανασκόπηση του αντικειμένου, του σκοπού και της διάρθρωσης της εργασίας με αναφορά στα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται εισαγωγικά κάποια στοιχεία περί πλημμυρών και οι επιπτώσεις των πλημμυρικών γεγονότων στην κοινωνική και οικονομική ζωή του τόπου. Επιχειρείται μία κατηγοριοποίηση των αιτίων της εκάστοτε πλημμύρας, με αναφορά σε πρόσφατα φαινόμενα, και εισάγεται η έννοια της επιφανειακής απορροής, της περιόδου επαναφοράς και της παροχής σχεδιασμού. Επίσης, παρουσιάζονται τρόποι ορθότερης διαχείρισης των φαινομένων αυτών με έμφαση στις προληπτικές ενέργειες και τον σχεδιασμό.

Στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας, γίνεται εκτενής αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο του υπολογισμού του συντελεστή τραχύτητας Manning n . Παραθέτονται στοιχεία σχετικά με την επιστημονική έρευνα που έχει γίνει ως τώρα στο συγκεκριμένο τομέα, καθώς και οι μέθοδοι για την επιλογή της τιμής του συντελεστή. Στο ίδιο κεφάλαιο, και στα πλαίσια του υδρολογικού σχεδιασμού, εισάγονται και αναλύονται τα βασικά στοιχεία του μοναδιαίου υδρογραφήματος, του υετογράμματος και του υδρογραφήματος σχεδιασμού με τις μαθηματικές εξισώσεις και τους ορισμούς των μεγεθών, που τα διέπουν. Στο υποκεφάλαιο του υδραυλικού σχεδιασμού, γίνεται αναφορά στη μη-μόνιμη ροή των ανοικτών αγωγών και τις διαφοροποιήσεις αυτής με βάση ορισμένα κινηματικά κριτήρια. Επίσης, παρουσιάζονται και αναλύονται οι εξισώσεις Saint-Venant, τις οποίες επιλύει το λογισμικό HEC-RAS κατά την προσομοίωση του συγκεκριμένου πλημμυρικού γεγονότος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται παρουσίαση της περιοχής μελέτης της εργασίας. Παραθέτονται φυσιογραφικά, κλιματολογικά και υδρογραφικά στοιχεία της περιοχής με χάρτες του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και των αντίστοιχων καλύψεων-χρήσεων γης για κάθε υποπεριοχή.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται λεπτομερής περιγραφή της διαδικασίας της εφαρμογής του λογισμικού HEC-RAS, με ανάλυση των βημάτων που ακολουθούνται για την προσομοίωση του πλημμυρικού γεγονότος και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Παρουσιάζονται επίσης τα στοιχεία του θεωρητικού υπόβαθρου του προγράμματος, καθώς και η συσχέτιση της περιοχής μελέτης και των δεδομένων της ροής. Συνοπτική αναφορά γίνεται στην επεξεργασία των δεδομένων εισόδου και των παράγωγων χαρτών στο πρόγραμμα ArcGIS.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του γεγονότος σε μορφή χαρτών, και γίνεται σύγκριση μεταξύ τους με χρήση του δείκτη επίδοσης κατά Nash-Sutcliffe.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων και αναλύεται η σημασία αυτών για περαιτέρω μελλοντική μελέτη και εφαρμογή.

2. ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ

2.1. Εισαγωγικά

Η υπερχειλίση ποταμών είναι ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν πολλές χώρες. Έντονες βροχοπτώσεις στις λεκάνες απορροής των ποταμών μπορεί να συσσωρεύσουν μεγάλες ποσότητες νερού που ρέουν μέσω του συστήματος του ποταμού παράγοντας μια ταχεία ανύψωση της στάθμης του νερού του ποταμού και προκαλώντας ισχυρά ρεύματα και κυματική δραστηριότητα. Όταν ο ρυθμός ροής υπερβαίνει την ικανή χωρητικότητα του ποταμού, το νερό υπερχειλίζει τις όχθες του προς το περιβάλλον έδαφος προκαλώντας ζημιές σε αναχώματα, ιδιοκτησίες και κινδύνους για το περιβάλλον.

Αυτό μπορεί να είναι καταστροφικό για τη ζωή των ανθρώπων αλλά και του οικοσυστήματος, ενώ παράλληλα δημιουργεί και προβλήματα δημόσιας υγιεινής, από πιθανή υπερχειλίση των υπονόμων. Όλες οι υποδομές, συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτρικής ενέργειας, γραμμές, τηλεφωνικά καλώδια, δίκτυα λυμάτων, νερού και αποχέτευσης μπορούν να υποστούν εκτεταμένες ζημιές. Γενικά, πιθανές πλημμύρες έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν τις κοινωνικές υποδομές, να απειλήσουν τον πληθυσμό και να δημιουργήσουν κοινωνικά προβλήματα.

Οι φυσικές καταστροφές και οι οικονομικές επιπτώσεις τους αυξάνονται σε όλο τον κόσμο με ανησυχητικό ρυθμό. Οι άνθρωποι και το περιβάλλον υποφέρουν όλο και περισσότερο από τους φυσικούς κινδύνους. Οι αλλαγές στη σύγχρονη κοινωνία, όπως η πληθυσμιακή αύξηση, η αστικοποίηση, η εκβιομηχάνιση, η αποψίλωση των δασών, η επέκταση των κατοικημένων περιοχών, η αυξημένη κινητικότητα του εργατικού δυναμικού και η ολοένα αυξανόμενη γήρανση του πληθυσμού κάνουν τις κοινωνίες περισσότερο ευάλωτες σε κάθε είδους φυσικές καταστροφές.

Ο αριθμός των ανθρώπων που πλήττονται από φυσικές καταστροφές ανήλθε σε 147 εκατ. κατά μέσο όρο ετησίως κατά τη διάρκεια του 1981-1990 και αυξήθηκε σε 211 εκατ. ετησίως κατά την επόμενη δεκαετία (1991-2000). Οι πλημμύρες ήταν υπεύθυνες για τα δύο τρίτα αυτών που επηρεάζονται και προκάλεσαν πάνω από το ένα τρίτο της συνολικής εκτιμώμενης οικονομικής ζημιάς (Pilon, 2003).

Ως «πλημμύρα» ορίζεται η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους, το οποίο υπό φυσιολογικές συνθήκες, δεν καλύπτεται από νερό, σύμφωνα με τον ορισμό που δίνεται από την Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου (Κεφάλαιο I, άρθρο 2).

Οι πλημμύρες μπορεί να διαχωριστούν σε διάφορους τύπους. Η διαφοροποίηση μπορεί να βασίζεται τόσο στην έκταση της περιοχής που λαμβάνει χώρα το γεγονός, όσο και στη διάρκεια της ενεργούς βροχόπτωσης που την προκαλεί. Αυτά είναι τα δύο χαρακτηριστικά που καθορίζουν τη χωρική και χρονική κλίμακα των πλημμυρικών φαινομένων. Κατά συνέπεια προκύπτουν δύο κύριες κατηγορίες, οι εκτεταμένες μεγάλης διάρκειας και οι τοπικές αιφνίδιες πλημμύρες.

Οι πλημμύρες συνήθως κατατάσσονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: τις πλημμύρες ποταμών,

τις στιγμιαίες-αστραπιαίες πλημμύρες (flash-floods) και τις παράκτιες πλημμύρες λόγω μετεωρολογικών παλιρροιών. Κατά καιρούς εμφανίζονται και άλλοι λιγότερο κοινοί τύποι πλημμυρών, όπως οι πλημμύρες από αστοχία στην κατασκευή φραγμάτων, κατάρρευση φραγμάτων και αναχωμάτων, ή πλημμύρες από λασποροές.

Οι πλημμύρες προκαλούνται συνήθως:

1) Από την υπερχειλίση ποταμού (river flood) όταν η χωρητικότητα του φυσικού ή ανθρωπογενούς συστήματος αποστράγγισης δεν επαρκεί για να παροχετεύσει τον όγκο του νερού που παράγεται από τη βροχόπτωση ή όταν δεν υπάρχουν τα απαραίτητα αντιπλημμυρικά έργα. Οι πλημμύρες από υπερχειλίση ποταμού διαφέρουν σημαντικά ως προς το μέγεθος και τη διάρκειά τους. Στην περίπτωση μεγάλων ποταμών, όπως ο Δούναβης, ο Ρήνος και ο Έλβας, οι πλημμύρες μπορεί να εμφανιστούν σε αρκετό χρονικό διάστημα μετά τη βροχόπτωση και να διαρκέσουν ημέρες, εβδομάδες ή ακόμη και μήνες (CEC, 2004).

Οι πλημμύρες των ποταμών είναι το αποτέλεσμα έντονης και/ ή παρατεταμένης βροχής για αρκετές ημέρες ή ακόμα και εβδομάδες, σε μεγάλες περιοχές. Προκαλούνται συνήθως από τον συνδυασμό παραγόντων σε μια περιοχή, όπως είναι οι καιρικές και εδαφικές συνθήκες, τα μέτρα για την προστασία από τις πλημμύρες, τις χρήσεις γης κ.α. Η εποχή του έτους που εκδηλώνονται μπορεί να διαφοροποιεί επίσης τη συμβολή των διαφόρων παραμέτρων. Στην Ευρώπη, το καλοκαίρι ή το φθινόπωρο συνήθως προκαλούνται από τοπικά υψηλές βροχοπτώσεις. Μετά από μερικές ημέρες ή/και εβδομάδες το έδαφος καθίσταται κορεσμένο και μειώνεται η ικανότητα διήθησης του νερού με αποτέλεσμα την αύξηση της επιφανειακής απορροής. Το χειμώνα ή την άνοιξη προκαλούνται από μεγάλης κλίμακας βροχοπτώσεις που συνήθως συνοδεύονται και από το λιώσιμο του χιονιού και των πάγων και επίσης από την ύπαρξη πάγου στο έδαφος που μειώνει την διήθηση του νερού στο έδαφος (Barredo, 2007).

2) Από πολύ εντατική τοπική βροχόπτωση (στιγμιαίες ή αστραπιαίες πλημμύρες - flash flood) που μπορεί να προκαλέσουν εκτεταμένες καταστροφές, ιδίως όταν συμβαίνουν ταυτόχρονα με άλλα φυσικά φαινόμενα, όπως κατολισθήσεις εδάφους ή μεταφορά λάσπης. Οι στιγμιαίες πλημμύρες, οι οποίες είναι αρκετά συχνές στις Μεσογειακές χώρες και τις ορεινές περιοχές, είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες καθώς συμβαίνουν ξαφνικά και με ελάχιστη προειδοποίηση.

Προκαλούνται από ιδιαίτερα έντονη βροχόπτωση σε μικρή περιοχή μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα, συνήθως σε λιγότερο από 6 ώρες, προκαλώντας την απότομη αύξηση της στάθμης του νερού και την απότομη πτώση της. Συνήθως συνοδεύονται από βίαιους χείμαρρους που μετά την έντονη βροχόπτωση σαρώνουν τα πάντα (CEC, 2004). Είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες διότι εκδηλώνονται σε λίγα δευτερόλεπτα έως μερικές ώρες και το κύριο χαρακτηριστικό είναι η εξαιρετικά απότομη έναρξή τους. Οι παράγοντες που συμβάλλουν στις πλημμύρες αυτές είναι η ένταση της βροχής, η διάρκεια, οι συνθήκες του εδάφους, η τοπογραφία και οι κλίσεις της λεκάνης απορροής. Συχνότερα συμβαίνουν σε ορεινές ή λοφώδεις περιοχές με απότομη τοπογραφία. Εντούτοις μπορεί να συμβούν και σε επίπεδες περιοχές όταν οι κλίσεις είναι ιδιαίτερα μικρές και δεν διευκολύνουν την άμεση απορροή του νερού, με αποτέλεσμα αυτό να συσσωρεύεται στα χαμηλότερα σημεία τους.

Οι χρήσεις γης, οι οποίες και αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των ευάλωτων περιουσιακών στοιχείων της παρούσας κατάστασης κάθε περιοχής, επιδρούν στη σημαντική διαφορά της

οικονομικής και κοινωνικής ζημιάς του πλημμυρικού γεγονότος.

Οι αστικές περιοχές είναι ιδιαίτερα ευάλωτες στις στιγμιαίες πλημμύρες, καθώς οι αδιαπέραστες δομημένες επιφάνειες τους διευκολύνουν τις μεγάλες ταχύτητες απορροής.

Το βάθος ροής είναι η πιο σημαντική παράμετρος σε κάθε γεγονός και ταυτόχρονα το πιο εύκολο να παρατηρηθεί και να ποσοτικοποιηθεί και, ως εκ τούτου παίζει σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση των απωλειών λόγω των πλημμυρών.

Μια άλλη πολύ σημαντική παράμετρος σε περίπτωση πλημμύρας είναι η χρονική (διάρκεια γεγονότος) καθώς και ο χρόνος μεταξύ της πρώτης προειδοποίησης και του πραγματικού γεγονότος της πλημμύρας. Εάν το χρονικό διάστημα αυτό είναι σύντομο, αποτελεί ένα βασικό λόγο για τον οποίο οι στιγμιαίες πλημμύρες είναι μια σημαντική απειλή για τη ζωή και την περιουσία. (Genovese, 2006)

Δραματικά παραδείγματα στιγμιαίων πλημμυρών καταγράφηκαν στην Ισπανία (Biescas) το 1996 όταν βροχόπτωση ύψους 160 mm καταγράφηκε μέσα σε μία ώρα και προκλήθηκε πλημμύρα με 87 ανθρώπινα θύματα. Πιο πρόσφατα, στις 15 Ιουνίου 2010, 25 άνθρωποι σκοτώθηκαν στο διαμέρισμα Var στη Γαλλία όταν 300 mm βροχής έπεσαν σε 12 ώρες. Τον Οκτώβριο του 2015, στη γαλλική Ριβιέρα, 17 άνθρωποι σκοτώθηκαν με τη βροχόπτωση να ανέρχεται σε 180 mm σε διάρκεια λιγότερη από 24 ώρες. Η πρόβλεψη των στιγμιαίων πλημμυρών είναι το πιο δύσκολο πρόβλημα από υδρολογικής και μετεωρολογικής άποψης (EEA, 2011). Στις **Εικόνες 1, 2 & 3** παρουσιάζονται χαρακτηριστικές επιπτώσεις των εν λόγω πλημμυρών σε αστικό, ημιαστικό και έξω-αστικό περιβάλλον, αντίστοιχα.



Εικόνα 2.1. Πλημμύρα σε ημιαστικό περιβάλλον (Πηγή:

<http://bilder.bild.de/fotos/ueberschwemmter-ort-simbach-49077874/Bild/1.bild.jpg>)



Εικόνα 2.2. Πλημμύρα σε έξω-αστικό περιβάλλον (Πηγή: <http://www.thepaper.gr/wp-content/uploads/2014/11/italia-240x160.jpg>)



Εικόνα 2.3. Πλημμύρα σε αστικό περιβάλλον (Πηγή: <https://es.sott.net/topic/10-Inundaciones?page=5>)

3) Στις παράκτιες περιοχές, πλημμύρες μπορεί να προκληθούν από την άνοδο της στάθμης του νερού, λόγω των δυνάμεων του ανέμου και της ατμοσφαιρικής πίεσης ενός τυφώνα ή μιας έντονης καταιγίδας. Η μετεωρολογική παλίρροια τόσο κοντά στις ακτές όσο και στην ανοικτή θάλασσα είναι ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας πρόκλησης πλημμυρικών συμβάντων στις παράκτιες περιοχές και μάλιστα η επικινδυνότητα έχει αυξηθεί λόγω της παράκτιας διάβρωσης. Όταν οι θαλάσσιες καταιγίδες συμπίπτουν με ανύψωση της στάθμης του νερού στις εκβολές ποταμών τότε είναι πιθανό να προκληθούν εκτεταμένες ζημιές (CEC, 2004).

Η κατασκευή αντιπλημμυρικών έργων είναι δυνατόν να έχει έμμεσο αντίκτυπο στις ανάντη και κατάντη περιοχές των ποταμών και να αυξήσει τον κίνδυνο πλημμύρας. Η κατασκευή έργων για την ταχύτερη δυνατή παροχέτευση των υδάτων από το ανάντη τμήμα του ποταμού σε μια περιοχή συνεπάγεται ότι το νερό θα φθάνει ταχύτερα στους κατάντη γείτονές της. Κατά συνέπεια, είναι επιτακτικό η προστασία από τις πλημμύρες να αντιμετωπίζεται με συνδυασμένο και συντονισμένο τρόπο σε όλο το μήκος του ποταμού (CEC, 2004).

Σε ορισμένες περιοχές, όπως στις μεσογειακές περιοχές, οι πλημμύρες, οι οποίες προκαλούν την διάβρωση των εδαφών, μαζί με τις πυρκαγιές των δασών και την υποβάθμιση των εδαφών οδηγούν στην ερημοποίηση τους. Εκτιμάται ότι περισσότερο από το ένα τρίτο της Ισπανίας, ειδικότερα στο νότιο και ανατολικό τμήμα, ανήκει στις περιοχές υψηλού κινδύνου (ΕΕΑ, 2003).

2.2. Επιφανειακή απορροή

Η κοίτη ή ο ρους ενός συνεχούς ή ασυνεχούς ρεύματος είναι η περιοχή που καλύπτεται από τα ύδατα στην συνήθη μέγιστη στάθμη τους. Οι ζώνες εμφανίσεως πλημμυρών είναι αυτές που οριοθετούνται από το θεωρητικό επίπεδο στο οποίο θα φτάσουν τα νερά σε περίπτωση πλημμύρας ανάλογα με την περίοδο «επανεμφάνισης» 100, 50 ή 25 χρόνια. Οι ζώνες αυτές δεν επηρεάζουν τον χαρακτήρα των εδαφών (δημόσιες ή ιδιωτικές) αλλά οι αρχές μπορούν να θέτουν περιορισμούς στη χρήση τους έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ζωή των ανθρώπων και τα αγαθά.

Όταν εμφανιστεί η πλημμύρα των 100 ή 50 ετών :

- ο ποταμός θα καλύψει την έκταση που αντιστοιχεί στο ενδεχόμενο αυτό,
- οι πλημμύρες αυτές θα εκδηλωθούν με κάθε βεβαιότητα στο αντίστοιχο διάστημα και
- οποιαδήποτε από αυτές μπορεί να εμφανιστεί ανά πάσα στιγμή.

Βασικότερη υδρολογική μεταβλητή είναι η επιφανειακή απορροή, ως έκφραση της κινητικής και δυναμικής συμπεριφοράς του νερού στην επιφάνεια του εδάφους. Η μελέτη των ακραίων τιμών της είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την διαστασιολόγηση και την ασφάλεια ενός υδραυλικού ή αντιπλημμυρικού έργου, προκειμένου ο σχεδιασμός του να ανταποκρίνεται σε δυσμενείς συνθήκες. Προς αποφυγή των δυνητικών επιπτώσεων μιας πιθανής αστοχίας του έργου και υπό μια στατιστική σκοπιά, εισάγεται η έννοια της παροχής σχεδιασμού, δηλαδή μιας πλημμύρας σχεδιασμού συγκεκριμένης περιόδου επαναφοράς T , όπου η υπέρβαση της οδηγεί σε αστοχία του έργου. Ουσιαστικά, η αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης και εξασφάλισης της ασφάλειας, οδηγεί στην υιοθέτηση ενός ανεκτού επιπέδου διακινδύνευσης, που εκφράζεται με όρους πιθανότητας. Επομένως, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην παροχή αιχμής ή παροχή σχεδιασμού, που παράγεται κατά την διάρκεια εξέλιξης ενός πλημμυρικού επεισοδίου, βάσει μιας καταιγίδας σχεδιασμού. Η εκτίμηση αυτής της πλημμυρικής παροχής συνιστά τον υδρολογικό σχεδιασμό, του οποίου έπεται η υδραυλική ανάλυση που μελετά τα χαρακτηριστικά της ροής κατά μήκος ενός αγωγού ή δικτύου αγωγών και, σε ειδικές περιπτώσεις, ενός πλημμυρικού πεδίου που κατακλύζεται εκατέρωθεν του.

2.3. Κίνδυνος πλημμύρας – Διαχείριση κινδύνου πλημμυρών

Ο κίνδυνος πλημμύρας είναι ο συνδυασμός της πιθανότητας να λάβει χώρα πλημμύρα και των δυνητικών αρνητικών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται μ' αυτή την πλημμύρα (Οδηγία 2007/60/ΕΚ).

Ο πλημμυρικός κίνδυνος είναι το αποτέλεσμα κοινωνικών και υδρομετεωρολογικών

παραμέτρων. Οι πλημμύρες είναι φυσικά φαινόμενα τα οποία συνδέονται με τη φυσιολογική λειτουργία των ποτάμιων και των παράκτιων συστημάτων. Θα πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ των κανονικών (ετήσιων) πλημμυρικών συμβάντων που συνήθως προκαλούν μικρή έως μηδενική βλάβη και των ακραίων συμβάντων που έχουν σοβαρές επιπτώσεις. Δεν θεωρούνται όλες οι πλημμύρες καταστροφικές, καθώς πολλά γεγονότα συμβαίνουν σε μη κατοικημένες περιοχές και χωρίς επιπτώσεις. Ορισμένες πλημμύρες μπορεί να έχουν ακόμη και θετικές επιπτώσεις για την λεκάνη του ποταμού, συμβάλλοντας στην τροφοδοσία των υπόγειων νερών και στην γονιμότητα του εδάφους.

Οι καταστροφικές πλημμύρες είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των υδρολογικών πλημμυρών και του κοινωνικού συστήματος. Το τελευταίο περιλαμβάνει μια σειρά υποσυστήματα που καθορίζουν το βαθμό της αλληλεπίδρασης, όπως τις πολιτικές μείωσης των επιπτώσεων, τον αριθμό των ανθρώπων και των αγαθών που είναι εκτεθειμένα στον κίνδυνο πλημμύρας, τον παράγοντα της φτώχειας. Η αύξηση των ζημιών από τις πλημμύρες τα τελευταία χρόνια φαίνεται να συνδέεται κυρίως με κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες. (EEA, 2011).

Σε γενικές γραμμές, οι καταστροφές συμβαίνουν όταν συνυπάρχει ο κίνδυνος (hazard) με την τρωτότητα (vulnerability). Η πιθανότητα να προκληθεί καταστροφή σε μια περιοχή εξαρτάται κυρίως από τους τρόπους αντιμετώπισης των τοπικών κοινωνιών, τις ενέργειες που γίνονται στον άξονα της μείωσης της τρωτότητας και της ετοιμότητας μηχανισμών να ανταποκριθούν σε τυχούσα έκτακτη ανάγκη. Εδώ και αρκετά χρόνια, αυτοί οι τομείς έχουν μείνει πίσω με αποτέλεσμα την αύξηση της τρωτότητας της κοινωνίας, της οικονομίας και των οικοσυστημάτων. Αυτή η κοινωνικο-οικονομική-οικολογική τρωτότητα στους κινδύνους πρόκειται, πιθανότατα, να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια, κυρίως λόγω των συνεχιζόμενων κοινωνικο-οικονομικών εξελίξεων που περιλαμβάνουν την φτώχεια, την αύξηση του πληθυσμού, την αστικοποίηση, την υποβάθμιση του περιβάλλοντος και άλλων παραγόντων, όπως η κλιματική αλλαγή (EEA, 2011).

Με βάση τις τελευταίες προβλέψεις για την αλλαγή του κλίματος στις επόμενες δεκαετίες (Dankers και Feyen, 2008) είναι πολύ πιθανό να προκληθεί επιπλέον αύξηση των ζημιών των πλημμυρών στην Ευρώπη.

Οι ζημιές που θα προκληθούν λόγω πλημμύρας εξαρτώνται από:

- την ένταση των φυσικών φαινομένων
- την παρουσία αντιπλημμυρικών έργων
- την αλλοίωση του φυσικού περιβάλλοντος
- την ετοιμότητα των μηχανισμών
- την ένταση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στο πεδίο πλημμυρών (Μαμάσης, 2011)

Η διαχείριση του κινδύνου πλημμυρών αποσκοπεί στη μείωση της πιθανότητας ή/και των επιπτώσεων των πλημμυρών. Έχει αποδειχθεί ότι η πλέον αποτελεσματική προσέγγιση συνίσταται στην ανάπτυξη προγραμμάτων διαχείρισης του κινδύνου πλημμυρών που περιλαμβάνουν τα εξής στοιχεία:

- Πρόληψη: η πρόληψη των ζημιών που προκαλούνται από τις πλημμύρες, συνίσταται

στην αποφυγή ανέγερσης κατοικιών και βιομηχανιών σε περιοχές ευαίσθητες στην εμφάνιση πλημμύρας, προσαρμόζοντας τις μελλοντικές εξελίξεις στον κίνδυνο πλημμυρών και προωθώντας την ορθή χρήση του εδάφους και τις ορθές γεωργικές και δασοπονικές πρακτικές.

- Προστασία: η λήψη μέτρων, διαρθρωτικών και μη, για να μειωθεί η πιθανότητα πλημμύρας και/ οι επιπτώσεις τους σε συγκεκριμένες περιοχές.
- Ετοιμότητα: η ενημέρωση του πληθυσμού για τους κινδύνους πλημμυρών και για τον τρόπο αντίδρασης σε περίπτωση πλημμύρας.
- Αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης: η κατάρτιση σχεδίων για την αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση πλημμύρας.
- Αποκατάσταση και εξαγωγή συμπερασμάτων: η επιστροφή σε κανονικές συνθήκες το ταχύτερο δυνατόν και η μείωση τόσο των κοινωνικών όσο και των οικονομικών επιπτώσεων στον πληγέντα πληθυσμό (CEC, 2004).

3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

3.1. Συντελεστής τραχύτητας

Η μελέτη των υδραυλικών ιδιοτήτων των πλημμυρικών κυμάτων βοηθά να αναπτυχθεί η κατανόηση των παραγόντων που ελέγχουν την συμπεριφορά του νερού. Πολλοί διαφορετικοί παράγοντες ελέγχουν τη ροή του νερού, όπως είναι η ταχύτητα ροής, η τοπογραφία της περιοχής, η επιφάνεια διατομής των ορίων του νερού, η περίμετρος του διαβρεχόμενου οριακού στρώματος και ο συντελεστής τραχύτητας.

Ο συντελεστής τραχύτητας “ n ” αντιπροσωπεύει την υδραυλική τραχύτητα και είναι γνωστός ως συντελεστής Manning της τραχύτητας ή Manning “ n ”. Η υδραυλική τραχύτητα αναπτύσσει αντίσταση στη ροή του νερού μέσω της δημιουργίας μιας δύναμης επιβράδυνσης.

Ο προσδιορισμός του συντελεστή τραχύτητας είναι ένα σημαντικό βήμα στη διαδικασία υδροδυναμικής μοντελοποίησης. Η απόκτηση αξιόπιστων εκτιμήσεων της τραχύτητας ήταν πάντα ένα δύσκολο έργο συχνά στηριζόμενη στην εμπειρία και την υποκειμενική κρίση. Πολλές τεχνικές που έχουν εφαρμοστεί για τον προσδιορισμό του συντελεστή τραχύτητας με μερικές να εξαρτώνται από εφαρμοσμένες μετρήσεις πεδίου των παραμέτρων ροής, άλλες που βασίζονται στη μελέτη του συντελεστή σε μοντέλα υδροδυναμικής κλίμακας ή ακόμα και σύγκριση με τοπία που θεωρείται ήδη «γνωστός» ο συντελεστής Manning n .

Οι περισσότερες από τις μεθόδους απαιτούν τη συλλογή πληροφοριών από την προκείμενη τοποθεσία σχετικά με την τοπογραφία, την υφή (χαρακτηριστικά εδάφους) και την κάλυψη βλάστησης (French, 1994). Το έργο αυτό είναι ένα κρίσιμο μέρος στην προσπάθεια για τον καθορισμό του συντελεστή τραχύτητας και η συλλογή αξιόπιστων πληροφοριών μπορεί να διαρκέσει πολύ χρόνο.

Τηλεπισκοπικές τεχνικές (είτε με αεροφωτογράφιση είτε με δορυφορικές εικόνες) μπορούν να μας παρέχουν αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με την επιφάνεια της Γης. Αυτές μπορεί να είναι χρήσιμες για κάποια εμβαδομετρική μέτρηση και ερμηνεία, καθώς και για προσδιορισμούς υψών. Έτσι, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα δυναμικό εργαλείο για την παροχή βοήθειας στον καθορισμό τιμών του συντελεστή Manning n .

Μια σημαντική παράμετρος σε όλα τα μοντέλα πλημμυρικών προσομοιώσεων είναι ο συντελεστής τραχύτητας Manning που συνδυάζει έναν παράγοντα αντίστασης ροής και λειτουργίας της εδαφοκάλυψης σε πλημμυρισμένες περιοχές (De Roo et al, 1999).

Ο Kay (1998) αναφέρει ότι ο συντελεστής Manning n εξαρτάται από το πρωτογενές υλικό του καναλιού και την υφή της βλάστησης σε αυτό. Το γεγονός αυτό επιφέρει δυσκολίες στην εκτίμηση της ακριβούς τιμής του συντελεστή με οποιοδήποτε βαθμό ακρίβειας. Επιπλέον, η τιμή του n δεν είναι σταθερή με το χρόνο στο ίδιο κανάλι λόγω της αύξησης των άγριων χόρτων και μεταβολής των συνθηκών ροής κατά τη διάρκεια του χρόνου.

Αυτός ο ειδικός παράγοντας είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, διότι λεπτομερείς και πραγματικές πληροφορίες κάλυψης της γης δεν είναι συνήθως διαθέσιμες. Επιπλέον, για την

εκτίμηση των ζημιών που προκλήθηκαν από πλημμύρες, ένας χάρτης με την έκταση των πλημμυρών και ένας χάρτης πλημμυρικού βάθους πρέπει να συνδυαστούν με ένα λεπτομερή χάρτη για την κάλυψη γης. Μια ακριβής πρόωρη αξιολόγηση υλικών ζημιών και μοντελοποίηση των πλημμυρών απαιτούν σωστή αναγνώριση για αντικείμενα, γεωργική χρήση γης και υποδομές που εντοπίστηκαν σε ένα χάρτη κάλυψης γης. Οι τομείς που είναι περισσότερο ευάλωτοι σε ζημιά από πλημμύρες είναι κυρίως αστικά τοπία. Τα αστικά τοπία αποτελούνται από διάφορα υλικά (τσιμέντο, άσφαλτο, μέταλλο, πλαστικό, γυαλί, βότσαλα, νερό, γρασίδι, θάμνους, δέντρα και το έδαφος) που έχουν διευθετηθεί από τους ανθρώπους με πολύπλοκους τρόπους για να οικοδομηθούν σπίτια, συστήματα μεταφορών, επιχειρήσεις, εμπορικά κτίρια, πάρκα, παιδικές χαρές και διάφορες άλλες υποδομές για ανθρώπινες δραστηριότητες.

Οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας n , μπορεί να αποδίδονται για τις συνθήκες που επικρατούν κατά το χρόνο ενός συγκεκριμένου γεγονότος ροής, για μέσες συνθήκες σε μια περιοχή ή για αναμενόμενες συνθήκες κατά τη στιγμή ενός μελλοντικού γεγονότος.

Οι τιμές της τραχύτητας στις πλημμυρικές περιοχές εκατέρωθεν του καναλιού, συνήθως είναι αρκετά διαφορετικές από τις τιμές στην κοίτη του ρέματος. Ως εκ τούτου, οι τιμές τραχύτητας για πεδιάδες θα πρέπει να καθορίζονται ανεξάρτητα από τις αντίστοιχες για ποταμούς. Όπως στον υπολογισμό της τραχύτητας του καναλιού, μια βασική τιμή (n_b) έχει ανατεθεί στην κοιλάδα του ποταμού, και κατόπιν γίνονται προσαρμογές και υπολογισμοί για διάφορους άλλους παράγοντες ώστε να προσδιοριστεί η τελική τιμή του συντελεστή n για την περιοχή. Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η εποχιακή διακύμανση των συντελεστών τραχύτητας. Οι πλημμύρες συχνά συμβαίνουν κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όταν υπάρχει λιγότερη βλάστηση. Έτσι, οι έρευνες πεδίου, συμπεριλαμβανομένων και φωτογραφιών που λαμβάνονται για τους σκοπούς αυτούς, ίσως χρειάζεται να διαρκούν και να συλλέγονται δεδομένα μέχρι την άνοιξη όταν και η ανάπτυξη της βλάστησης είναι πιο πυκνή. Έτσι είναι πιθανό ότι μπορεί να χρειαστεί ένας μεταβλητός συντελεστής τραχύτητας να λαμβάνεται υπόψη για τις εποχιακές αλλαγές.

Κατά την ανάπτυξη της δυνατότητας να ανατίθενται τιμές του συντελεστή τραχύτητας n , πρέπει να στηρίζεται στις τιμές n οι οποίες έχουν ήδη επαληθευτεί. Μια επαληθευμένη τιμή είναι αυτή που έχει υπολογιστεί μέσα από δεδομένα όπως η γεωμετρία γνωστής διατομής και οι υπάρχουσες τιμές της παροχής.

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του συντελεστή τραχύτητας n για κανάλια-ποταμούς είναι:

- ο τύπος και το μέγεθος των υλικών που συνθέτουν την κοίτη και τις όχθες του καναλιού
- το σχήμα του καναλιού.

Ο Cowan (1956) ανέπτυξε μια διαδικασία για την εκτίμηση των επιδράσεων αυτών των παραγόντων για τον προσδιορισμό της τιμής του συντελεστή n για έναν ανοικτό αγωγό. Η τιμή του n μπορεί να υπολογιστεί με τον τύπο:

$$n=(n_b+n_1+n_2+n_3+n_4)m \quad (1)$$

Όπου:

n_b = Μια βασική τιμή n για ευθύ, ομοιόμορφο, λείο αγωγό με φυσικά υλικά,

n_1 = Συντελεστής διόρθωσης για την επίδραση επιφανειακών ανωμαλιών

n_2 = Τιμή για τις διακυμάνσεις στο μέγεθος και το σχήμα της διατομής του καναλιού

n_3 = Τιμή για αντικείμενα και εμπόδια

n_4 = Τιμή για βλάστηση και συνθήκες ροής

m = Συντελεστής διόρθωσης λόγω του ελικοειδούς σχήματος του αγωγού

3.2. Υδρολογικός Σχεδιασμός

Ο κοντινότερος μετεωρολογικός σταθμός βρίσκεται στην Πεντέλη, στις εγκαταστάσεις του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και παρέχει τα στοιχεία βάση των οποίων υπολογίζεται η καμπύλη έντασης-διάρκειας-συχρότητας που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση βροχόπτωσης-απορροής. Αυτή η σχέση είναι η ακόλουθη:

$$I = 33,8 * T^{0,175} * t^{-0,5} \quad (2)$$

Όπου:

I η ένταση της βροχόπτωσης (mm/h),

T η περίοδος επαναφοράς (yr),

t η διάρκεια της βροχόπτωσης (h).

Η περιοχή ενδιαφέροντος εντός της λεκάνης ορίστηκε μέσω μιας προσέγγισης που βασίζεται στην ανάλυση πιθανοτήτων. Έτσι, συνδυάζοντας ιστορικά-αρχαιακά δεδομένα και πληροφορίες για τις παρελθούσες πλημμύρες προέκυψε μια σχέση μεταξύ πιθανότητας γεγονότος και μεγέθους αυτού. Η συγκεκριμένη προσέγγιση θεωρείται η καταλληλότερη όταν πρόκειται να σχεδιαστεί-χαρτογραφηθεί η περιοχή ενδιαφέροντος στην οποία η πιθανότητα απώλειας ανθρώπινων ζωών από το γεγονός είναι αμελητέα (βάσει ιστορικού πλημμυρών της περιοχής). Η περιοχή μελέτης αποτελεί μία τέτοια περίπτωση.

Από στατιστική άποψη, είναι πιθανό για κάθε περίοδο επαναφοράς, το αντίστοιχο γεγονός να συμβεί παραπάνω από μία φορές, καθώς επίσης και να συμβεί ακόμη πιο ακραίο γεγονός από αυτό βάσει του οποίου γίνεται ο σχεδιασμός. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια, χρειάζεται να υπάρχουν όσο δυνατόν περισσότερα καταγεγραμμένα δεδομένα σχετικά με τη ροή του ρέματος. Δυστυχώς στη συγκεκριμένη περίπτωση, υπήρχε μια σχετική έλλειψη για τα στοιχεία της παροχής, και λόγω αυτού, η ερευνητική ομάδα του DISMA (Tsakiris, 2007) επέλεξε την εμπειρική μέθοδο της πιθανοτικής προσέγγισης, παρά το ότι έτσι γίνεται έμμεσα η παραδοχή πως τα μελλοντικά πλημμυρικά γεγονότα δύνανται να “προβλεφθούν” μέσω της ανάλυσης των αντιστοιχών παρελθοντικών.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε όσον αφορά το θεωρητικό μέρος των υδρολογικών υπολογισμών χωρίζεται σε τρία βήματα. Αυτά είναι το τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα, το

υετόγραμμα σχεδιασμού και το υδρογράφημα σχεδιασμού για τρία σενάρια πλημμυρών με περιόδους επαναφοράς $T=25$, $T=50$ και $T=100$ χρόνια.

3.2.1. Τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα

Η παραγωγή του τριγωνικού μοναδιαίου υδρογραφήματος βασίζεται αποκλειστικά στα χαρακτηριστικά της λεκάνης και είναι σύνθετης μορφής. Χρησιμοποιείται ευρέως, ειδικά σε λεκάνες μικρότερες των 500 km^2 και όταν τα υδρογραφικά δεδομένα μας είναι ανεπαρκή ή ασαφή. Είναι διάρκειας μίας ώρας και είναι τριγωνικής μορφής. Υπολογίζονται οι μεταβλητές του χρόνου αιχμής, του χρόνου βάσης και της παροχής αιχμής μέσω των ακόλουθων τύπων.

$$T_p = \frac{46.6 \cdot (L^{0.14})}{S^{0.38} \cdot (1 + \text{URBAN})^{1.99} \cdot \text{RSM}D^{0.4}} \quad (3)$$

Όπου:

L : το μήκος του καναλιού (km),

S : η μέση κλίση του ποταμού (m/km) μεταξύ του 10% και του 85% του μήκους του, μετρώντας από τα ανάντη. Υπολογίζεται από τον τύπο: $S = \frac{Z_{85} - Z_{10}}{0.75L}$, όπου Z_{85} και Z_{10} είναι τα υψόμετρα στις τοποθεσίες στο 85% και στο 10% του μήκους του ρέματος αντίστοιχα.

Η παράμετρος URBAN είναι το ποσοστό της οικιστικής ανάπτυξης στο εσωτερικό της υπό μελέτη λεκάνης. Αυτό ορίστηκε εμπειρικά σε 2% χωρίς να ληφθεί υπόψη πιθανή μελλοντική αλλαγή στις χρήσεις γης και περαιτέρω αστικοποίηση.

Η παράμετρος $\text{RSM}D$ είναι παράμετρος έντασης βροχόπτωσης και πιο συγκεκριμένα αποτελεί την τιμή για το μέγιστο ύψος απορροής σε γεγονός διάρκειας 24h και περιόδου επαναφοράς 5 χρόνων.

Χρόνος βάσης $T_b = 2.52T_p$,

Παροχή αιχμής $Q_p = 5.6 \frac{A}{T_b}$,

A : η έκταση της λεκάνης (km^2).

Με δεδομένο ότι το μοναδιαίο υδρογράφημα είναι τριγωνικής μορφής, οι συντεταγμένες κατά y προσδιορίζονται από τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{QU_1}{Q_p} = \frac{t_1}{t_p} \quad (4)$$

Όπου:

QU_1 : η παροχή στη χρονική στιγμή $i=1$ (m^3/s),

Q_p : η παροχής αιχμής (m^3/s),

t_1 : η χρονική στιγμή $i=1$ του γεγονότος (h),
 t_p : η χρονική στιγμή αιχμής του γεγονότος (h).

3.2.2. Υετόγραμμα σχεδιασμού

Το υετόγραμμα σχεδιασμού προσδιορίζεται υπολογίζοντας τις διαφορές του καθαρού βάθους απορροής ΔH σε κάθε χρονικό βήμα dt και με βάση την καμπύλη έντασης-διάρκειας-συχνότητας η οποία, όπως αναγράφηκε και ανωτέρω, είναι της μορφής:

$$i = 33,8 * T^{0,175} * t^{-0,5} \quad (5)$$

Όπου:

i : η ένταση της βροχής (mm/h)
 T : η περίοδος επαναφοράς (yr)
 t : η διάρκεια της βροχόπτωσης (h)

Για τον υπολογισμό των συνολικών υψών απορροής, εφαρμόζεται η εξίσωση:

$$h_{R(i)} = \frac{(h_{r(i)} - 0.2S_{\max})^2}{h_{r(i)} + 0.8S_{\max}} \quad (6)$$

Κατόπιν εφαρμόζεται η μέθοδος SCS (USDA, SCS 1972) για να προκύψουν τα καθαρά ύψη απορροής, μέσω μιας διαδικασίας στην οποία λαμβάνεται υπόψη η παράμετρος S_{\max} που αντιστοιχεί στην απώλεια του νερού λόγω διήθησης στο έδαφος της λεκάνης, και προκύπτει από τον τύπο:

$$S_{\max} = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (7)$$

όπου CN : ο αριθμός καμπύλης που εξαρτάται από το είδος του εδάφους και την κάλυψη γης της περιοχής που εξετάζουμε.

Η κατανομή του συνολικού ύψους της βροχόπτωσης στο υετόγραμμα υπολογίζεται με βάση τη μέθοδο του χειρότερου συνδυασμού (USBR, 1977).

3.2.3. Υδρογράφημα σχεδιασμού

Το υδρογράφημα σχεδιασμού παράγεται με τη σύνθεση του τριγωνικού μοναδιαίου υδρογραφήματος και του υετογράμματος σχεδιασμού με βάση τις αρχές της αναλογίας και της επαλληλίας.

Οι συντεταγμένες y του υδρογραφήματος σχεδιασμού προκύπτουν από την κάτωθι εξίσωση:

$$Q_i = \sum_{j=m}^n QU_{(j+1-i)} \frac{\Delta h_{R2(i)}}{10} \quad (8)$$

Όπου:

$Q_j(\text{m}^3/\text{s})$: η παροχή σε χρόνο t_j ,

$QU_{(j+1-i)}$: οι συντεταγμένες y του τριγωνικού μοναδιαίου υδρογραφήματος,

$\Delta h_{R2(i)}$: οι συντεταγμένες y του υετογράμματος σχεδιασμού.

Και $j=1,2,\dots,(N_u+N_h-1)$.

Αναλυτικά, οι τιμές N_u και N_h προκύπτουν από τις παρακάτω σχέσεις:

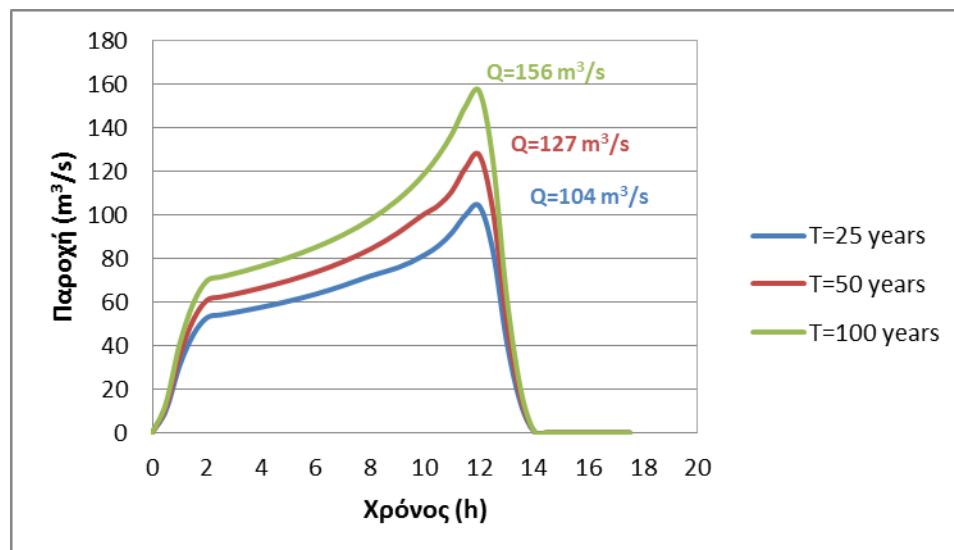
Για το N_u , ο αριθμός των συντεταγμένων y του τριγωνικού μοναδιαίου υδρογραφήματος που ισούνται με:

$$N_u = \frac{T_b}{\Delta t} - 1 \quad (9)$$

Για το N_h : ο αριθμός των χρονικών διαστημάτων του υετογράμματος που ισούνται με:

$$N_h = \frac{t_h}{\Delta t} \quad (10)$$

Οι τρεις παροχές σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία, ορίστηκαν από την ομάδα του DISMA (Tsakiris, 2007) για περιόδους επαναφοράς 25, 50 και 100 χρόνια αντίστοιχα, βάση των υδρογραφημάτων σχεδιασμού που απεικονίζονται στην **Εικόνα 3.1**.



Εικόνα 3.1. Υδρογραφήματα σχεδιασμού για διάφορες περιόδους επαναφοράς

Το χρονικό βήμα των υδρογραφημάτων σχεδιασμού ήταν 30 λεπτά. Κρίνεται σκόπιμο τα παραγόμενα δεδομένα μετά την προσομοίωση στο HEC-RAS 5.0.1 να αποδίδουν τα βάθη

ροής και τις ταχύτητες ανά 30 λεπτά κατά τη διάρκεια του πλημμυρικού γεγονότος. Οι πίνακες των υδρογραφημάτων σχεδιασμού παρατίθενται στο Παράρτημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας (βλ. Παράρτημα, σελ.84).

3.3. Γεγονός πλημμύρας Νοεμβρίου 2005

Το πεδινό τμήμα της Λεκάνης Βρανά κυρίως ανάντη της Μαραθώνιας διαδρομής είναι μια γεωργική έκταση με μονάδες θερμοκηπίων και αγρών, και διάσπαρτα σπίτια. Χαρακτηριστικό του τμήματος αυτού είναι ότι έχει ανεπαρκέστατο υδρογραφικό δίκτυο με πολλές ανθρώπινες επεμβάσεις (τοίχοι, μπαζώματα κλπ). Συνεπώς το πεδινό αυτό τμήμα έχει μεγάλο πρόβλημα στην αποστράγγιση του. Στο συγκεκριμένο γεγονός από το πεδινό τμήμα και μόνο προέκυψαν παροχές αιχμής της τάξης των $14 \text{ m}^3/\text{s}$ που μαζί με τα $5 - 6 \text{ m}^3/\text{s}$ έφτασαν περί τα $18 \text{ m}^3/\text{s}$, που βέβαια δεν μπορούν να διοδευτούν ούτε από το ανεπαρκέστατο υδρογραφικό δίκτυο ούτε τελικά από τον κλειστό αγωγό που οδηγεί τα πλημμυρικά νερά από τη θέση «Πατητήρια» στη θάλασσα. Αν δεν υπήρχε το φράγμα οι παροχές αιχμής στην έξοδο της λεκάνης θα έφταναν σε μέγεθος μεγαλύτερο των $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Είναι λοιπόν εμφανές ότι το φράγμα λειτούργησε ευεργετικά χωρίς βέβαια να αποτρέψει την πλημμύρα που λόγω της αδυναμίας διόδευσής της προς τη θάλασσα και του ιδιαίτερα μεγάλου της όγκου κάλυψε μεγάλες εκτάσεις και δημιούργησε μεγάλες ζημιές κυρίως στην γεωργική παραγωγή (Κέντρο εκτίμησης φυσικών κινδύνων και προληπτικού σχεδιασμού, 2005).

Με βάση την Όμβρια Καμπύλη της ευρύτερης περιοχής φαίνεται ότι:

α) το συνολικό γεγονός (όγκος πλημμύρας) είναι ένα ακραίο γεγονός με περίοδο επαναφοράς πάνω από 50 χρόνια. Ο όγκος της πλημμύρας εισροής στον ταμιευτήρα ήταν $2,22 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Ο όγκος πλημμύρας που έφυγε από το φράγμα ήταν περί τα $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

β) από πλευράς μέγιστης έντασης (μικρών διαρκειών) (παροχή αιχμής της πλημμύρας) το γεγονός δεν ήταν ιδιαίτερα μεγάλο με εκτιμώμενη περίοδο επαναφοράς περί τα 15 έτη. Συνεπώς το γεγονός αυτό δημιούργησε μεγάλο συνολικό όγκο πλημμύρας αλλά χωρίς ιδιαίτερα μεγάλες εντάσεις.

Για τις ανάγκες της εργασίας, η περιοχή μελέτης στην οποία επικεντρώθηκε η εφαρμογή του λογισμικού και των υδραυλικών υπολογισμών είναι στην πεδινή ζώνη της λεκάνης και συγκεκριμένα σε μια ζώνη πλάτους 2 χιλιομέτρων εκατέρωθεν της κοίτης του ρέματος Βρανά μέχρι τις εκβολές του στη θάλασσα. Αυτή κρίνεται και η πιο επίφοβη και ευάλωτη περιοχή για πιθανές πλημμύρες. Οι περιοχές που εκτείνονται πλησίον της ορισθείσας πλημμυρικής περιοχής είναι λιγότερο ευάλωτες και θα αποτελούσαν αντικείμενο μελέτης για ακόμη πιο σπάνια πλημμυρικά γεγονότα.

3.4. Υδραυλικός σχεδιασμός

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθεί το είδος της ροής που εξετάζεται στην εργασία και οι εξισώσεις που τη διέπουν.

3.4.1. Ροή ανοικτών αγωγών

Η ροή σε ελεύθερη επιφάνεια εμφανίζεται τόσο σε φυσικούς όσο και σε τεχνητούς αγωγούς. Ο χώρος που ορίζει τη ροή είναι τα όρια του αγωγού και η ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Έτσι έχουμε τη λεγόμενη «ροή ανοικτών αγωγών». Παραδείγματα φυσικών ανοικτών αγωγών είναι οι χείμαρροι και τα ποτάμια. Τεχνητούς ανοικτούς αγωγούς αποτελούν οι τάφροι, οι διάφυγες και άλλες ανθρώπινες κατασκευές.

Η γεωμετρία της ροής δεν εξαρτάται απόλυτα από τη γεωμετρία του αγωγού, όπως στην περίπτωση κλειστών υπό πίεση αγωγών, αλλά από τη θέση της ελεύθερης επιφάνειας. Η θέση της ελεύθερης επιφάνειας και κατ' επέκταση το εμβαδό της υγρής διατομής είναι το μέγεθος εκείνο που είναι κρίσιμο να καθοριστεί με σχετική ακρίβεια προκειμένου να είναι δυνατή η επίλυση προβλημάτων ροής σε ανοικτούς αγωγούς υπό συνθήκες πλημμύρας (Μόσχου, 2014).

3.4.2. Κινηματικά κριτήρια

Η ροή κατατάσσεται ανάλογα με κάποια κριτήρια που αφορούν την μεταβολή του βάθους και της ταχύτητας ροής. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να είναι σε σχέση με τον χρόνο και τον χώρο. Πιο συγκεκριμένα, η ροή αναλύεται σε:

- Μόνιμη ροή, όταν το βάθος ροής y και η ταχύτητα V δεν μεταβάλλονται με το χρόνο και άρα όλες οι χρονικές παράγωγοι των ταχυτήτων ροής στις εξισώσεις ροής είναι ίσες με μηδέν.
- Μη-μόνιμη ροή, όταν εμφανίζεται μεταβολή των μεγεθών του βάθους ροής y και της ταχύτητας V .

Η διάκριση της ροής σε σχέση με τη χωρική μεταβολή του βάθους ροής είναι η εξής:

- Ομοιόμορφη ροή, όταν το βάθος ροής παραμένει σταθερό σε κάθε διατομή κατά μήκος του αγωγού για μια χρονική στιγμή. Αυτό σημαίνει προφανώς και την ύπαρξη σταθερής γεωμετρίας του αγωγού.
- Ανομοιόμορφη ροή, όταν το βάθος ροής δεν είναι σταθερό κατά μήκος του αγωγού για μια δεδομένη χρονική στιγμή.

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη μη-μόνιμη ανομοιόμορφη ροή σε φυσικό ανοικτό αγωγό. Η ροή είναι βαθμιαία μεταβαλλόμενη, κάτι που σημαίνει πως η μεταβολή του βάθους στις διατομές σε σχέση με το μήκος του αγωγού είναι μικρή, και άρα οι γραμμές ροής μπορούν προσεγγιστικά να θεωρηθούν παράλληλες. Κύριο χαρακτηριστικό της μη μόνιμης ροής είναι η μεταφορά μάζας κατά τη διάδοση των κυματισμών στην ελεύθερη επιφάνεια. Σε αντίθεση με τη μη μόνιμη ροή σε κλειστούς αγωγούς το νερό θεωρείται ασυμπίεστο και οι μεταβολές πιέσεων εκφράζονται ως μεταβολές στάθμης (Νουτσόπουλος κ.α. 2007, Παπανικολάου 2012).

3.4.3. Εξισώσεις μη-μόνιμης ροής

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.

Εξίσωση του Manning:

Για την παροχή:

$$Q = \left(\frac{1}{n}\right) A R^{2/3} S^{1/2}, \quad (11)$$

και για την ταχύτητα:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (12)$$

Όπου:

R : η υδραυλική ακτίνα (m),

S : η κλίση της γραμμής ενέργειας (m/m),

n : ο συντελεστής τραχύτητας Manning (s/m^{1/3}).

Εξίσωση του Chezy:

Το 1775 ο Γάλλος Μηχανικός Chezy πρότεινε ότι η ταχύτητα u στους ανοικτούς αγωγούς με ροή υπό ομοιόμορφες συνθήκες να δίνεται από την εξίσωση:

$$u = CR^{1/2} S_0^{1/2} \quad (13)$$

όπου S_0 : η κλίση του ανοικτού αγωγού ή ενεργειακή κλίση ή κλίση του πυθμένα του αγωγού.

Από την εξίσωση Manning προκύπτει πως ο συντελεστής Chezy C δίνεται από τον τύπο:

$$C = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n} \quad (14)$$

Εξισώσεις Saint Venant

Η εξίσωση συνέχειας είναι η πρώτη απαιτούμενη εξίσωση που επιλύεται από το λογισμικό κατά τους υπολογισμούς. Αυτή είναι η εξής:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (15)$$

Όπου:

H : το ύψος υδάτινης επιφάνειας (m)

t : ο χρόνος (s)

u : η ταχύτητα στη διάσταση x (m/s)

v : η ταχύτητα στη διάσταση y (m/s)

q : η εισροή ανά μονάδα μήκους του ποταμού ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)

Οι εξισώσεις διατήρησης ορμής που επιλύονται από το λογισμικό, προκύπτουν από το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα. Εκφράζονται ως εξής:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (16)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f v \quad (17)$$

Όπου:

u και v : οι ταχύτητες ροής στις καρτεσιανές διευθύνσεις x και y (m/s),

g : επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2),

v_t : ο συντελεστής ιξώδους,

c_f : ο συντελεστής τραχύτητας πυθμένα,

f : η παράμετρος Coriolis.

Στο αριστερό τμήμα της εξίσωσης περιέχονται οι όροι της επιτάχυνσης, ενώ στο δεξί τμήμα αναπαρίστανται οι όροι των εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν στο ρευστό.

Οι παράμετροι σχετικά με το ιξώδες του ρευστού και το φαινόμενο Coriolis δεν υπολογίζονται, καθώς οι όροι αυτοί αγνοούνται λόγω της αμελητέας επιρροής τους στο τελικό αποτέλεσμα σε εργασίες πλημμυρικής προσομοίωσης (Alcrudo, 2004).

Άρα οι εξισώσεις διατήρησης ορμής για τις δύο διαστάσεις της ταχύτητας αναλύονται αντίστοιχα ως:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - c_f u \quad (18)$$

και

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - c_f v \quad (19)$$

Γίνεται αντιληπτό πως το κρίσιμο μέγεθος που επηρεάζει τα αποτελέσματα στο δεξί τμήμα των εξισώσεων, είναι η παράμετρος της αντίστασης στη ροή λόγω της τριβής του εδάφους.

Ο συντελεστή τριβής εδάφους προκύπτει από τις εξισώσεις του Chezy και του Manning, όπως αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο, και περιγράφεται από την σχέση που ακολουθεί:

$$c_f = \frac{n g V}{R^{\frac{4}{3}}} \quad (20)$$

Όπου:

n : ο συντελεστής τραχύτητας Manning ($s/m^{1/3}$)

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2),

V : η ταχύτητα (m/s),

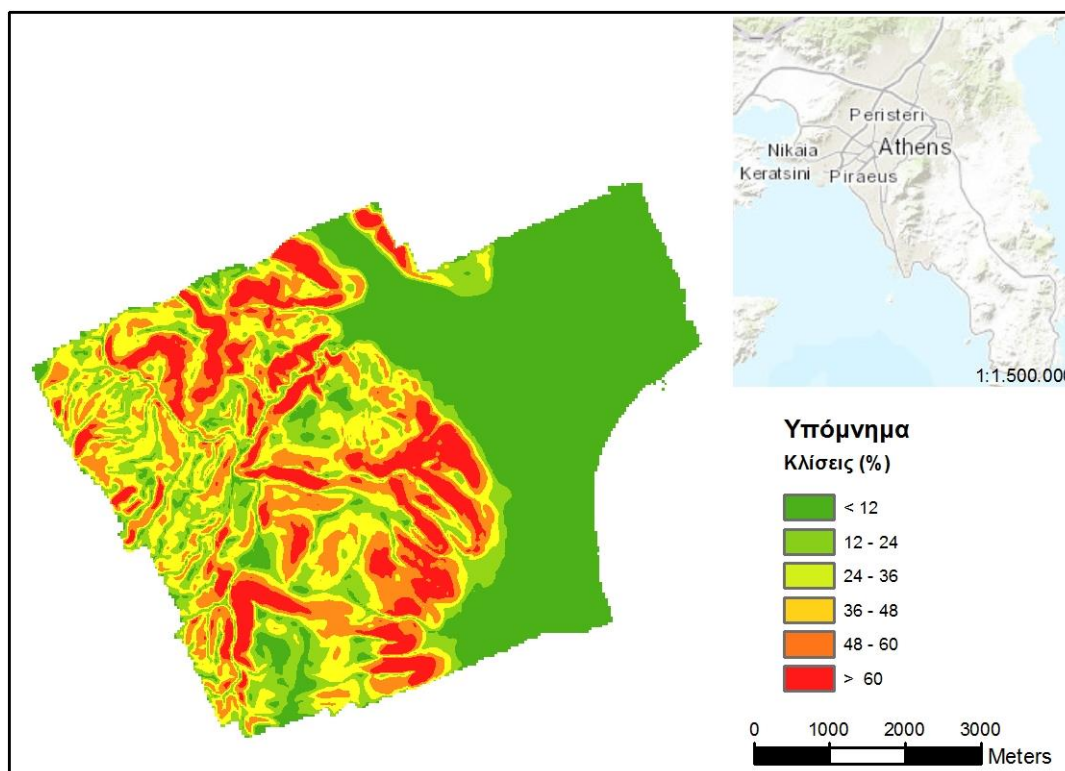
R : η υδραυλική ακτίνα (m).

4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1. Συνοπτική παρουσίαση

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η λεκάνη απορροής της Ραπεντώσας, η οποία χωροθετείται μεταξύ των δήμων Διονύσου και Μαραθώνα, στο βορειοανατολικό τμήμα του νομού Αττικής και είναι έκτασης 35 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Οι τιμές των κλίσεων κυμαίνονται από χαμηλές σε μέτριες και προοδευτικά σε υψηλές με μια γενικότερη τάση αύξησης προς τα βόρεια της λεκάνης. Από φυσιογραφική άποψη λοιπόν, διαιρείται σε τρεις υποπεριοχές.

- Περιοχή χαμηλών κλίσεων: Όλο το παράκτιο τμήμα της λεκάνης νοτιοδυτικά του δάσους του Σχοινιά μέχρι τον οικισμό της Νέας Μάκρης και την πεδιάδα του Μαραθώνα. Ανατολικά ορίζεται από τον όρμο του Μαραθώνα.
- Περιοχή μέτριων κλίσεων: Τα υψώματα του Στρατή, ευρισκόμενα στα όρια του οικισμού του Μαραθώνα καθώς και η περιοχή βορειοδυτικά προς τα υψώματα στο Κοτρώι.
- Περιοχή υψηλών κλίσεων: Το Αγριλίκι, η Ραπεντώσα και η έκταση δυτικά προς το βουνό της Πεντέλης.



Εικόνα 4.1. Κλίσεις της περιοχής μελέτης

Από μορφολογικής άποψης, η περιοχή μελέτης χωρίζεται σε δύο ζώνες. Η πρώτη είναι πεδινή

και αποτελείται από τον καλλιεργήσιμο κάμπο του Μαραθώνα, τον οικισμό και όλη την παράκτια ζώνη ως τον Σχοινιά και τη Νέα Μάρκη. Εκεί βρίσκεται ένα δίκτυο καναλιών που κατασκευάστηκαν το 1923 για αρδευτικούς σκοπούς. Η δεύτερη ζώνη είναι ημιορεινή-ορεινή και περιλαμβάνει πολλά υψώματα, μεταξύ των οποίων η Ραπεντώσα, το Αγγιλίκι, η Πετρωτή, το Διονυσοβούνι κ.α. Στους πρόποδες τους ξεχωρίζει η Μακάρια πηγή, το νερό της οποίας διευθετείται μέσω ενός καναλιού και καταλήγει στη θάλασσα ακολουθώντας κατεύθυνση παράλληλα του αεροδρομίου. Η κορυφή Σπιθάρι βρίσκεται στα 234 μέτρα υψόμετρο.

Γεωγραφικά η λεκάνη της Ραπεντώσας εκτείνεται από τον καλλικρατικό δήμο Διόνυσου ως και τον δήμο του Μαραθώνα.

Η δασική έκταση στην περιοχή της λεκάνης απορροής κάλυπτε πάνω από το 60% της συνολικής έκτασης μέχρι τις πυρκαγιές του 1995 και του 1998, κατόπιν των οποίων το ποσοστό αυτό συρρικνώθηκε στο 10% περίπου, με τελευταία την μεγάλη δασική πυρκαγιά του 2009 που μείωσε τη δασική κάλυψη ακόμα περισσότερο.

4.2. Υδρογραφικά - Κλιματικά στοιχεία

Συνοπτικά, κάποια από τα υδρογραφικά στοιχεία της λεκάνης της Ραπεντώσας:

- Συνολική έκταση λεκάνης: 35 km²
- Έκταση λεκάνης ανάντη του υδατοφράγματος: 23.4 km²
- Συνολικό μήκος ρέματος Ραπεντώσας: 10173 m
- Συνολικό μήκος υδρογραφικού δικτύου: 89503 m

Το κλίμα της περιοχής είναι εύκρατο μεσογειακό με ξηρά και ζεστά καλοκαίρια και βροχοπτώσεις τον χειμώνα. Η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι μεταξύ 16.5 και 19 βαθμών Κελσίου, και η μέση υγρασία κυμαίνεται μεταξύ 59% και 64%. Ηλιοφάνεια επικρατεί 2920 ώρες το χρόνο προσεγγιστικά. Οι χιονοπτώσεις αν και όχι ιδιαίτερα συχνές, προξενούν μεγάλα προβλήματα κυρίως στο οδικό δίκτυο με αποτέλεσμα τον αποκλεισμό δρόμων. Το ύψος του χιονιού έχει φτάσει στα 2 μέτρα κατά το πρόσφατο παρελθόν. Οι μακρές και ξηρές περίοδοι δεν ευνοούν την ανάπτυξη καλλιεργειών λαχανικών. Οι άνεμοι είναι ψυχροί βόρειοι και κατά το καλοκαίρι μεταβάλλονται βορειοανατολικοί. Από τα μέσα του Ιουλίου ως και το τέλος Οκτωβρίου, οι άνεμοι εξασθενούν αλλά είναι πιο συχνοί. Αυτές οι συνθήκες σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες ευνοούν τον κίνδυνο πυρκαγιών. Η σχετική ημερήσια υγρασία είναι 67% με χαμηλότερες τιμές τον Ιούλιο στο 57% και υψηλότερες τον Φεβρουάριο στο 75%.

4.3. Χρήσεις γης

Η περιοχή εφαρμογής για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου και της διακινδύνευσης είναι η λεκάνη απορροής της Ραπεντώσας, της οποίας το κύριο ρέμα (Ρέμα Βρανά) εκβάλλει στον όρμο του Μαραθώνα. Η λεκάνη απορροής έχει έκταση 35 km² και ιστορικά έχουν παρατηρηθεί πλημμύρες στο πεδινό τμήμα με τελευταία την πλημμύρα του Νοεμβρίου 2005. Πρόσφατα έχει κατασκευαστεί στην ορεινή ζώνη της λεκάνης ένα φράγμα αντιπλημμυρικής προστασίας για την παροδική συγκράτηση των νερών της πλημμύρας. Η εκτίμηση του κινδύνου και της διακινδύνευσης έγινε στο πλαίσιο του προγράμματος "DISMA with emphasis

on cultural sites" του Κέντρου Εκτίμησης Φυσικών Κινδύνων και Προληπτικού Σχεδιασμού του ΕΜΠ που ολοκληρώθηκε το 2007. Για την εκτίμηση της έκτασης κατάκλυσης αλλά και των βαθών του νερού στα διάφορα σημεία της λεκάνης, με βάση σενάρια ραγδαίων βροχών διάφορων περιόδων επαναφοράς, χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακά υποβάθρα υψηλής ανάλυσης που προέκυψαν από έγχρωμες αεροφωτογραφίες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) που λήφθηκαν τον Σεπτέμβριο του 2005 με κλίμακα 1:15000. Ο κάρναβος των σημείων του ψηφιακού υποβάθρου έχει πυκνότητα 25 m. Για την παραγωγή του ψηφιακού υποβάθρου χρησιμοποιήθηκαν 14 αεροφωτογραφίες σε τρεις επικαλυπτόμενες λωρίδες. Με φωτοερμηνεία διακρίθηκαν οκτώ κατηγορίες χρήσης γης:

1. Δομημένες περιοχές
2. Θερμοκήπια
3. Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας
4. Δενδρώδεις καλλιέργειες - Δενδροφυτεύσεις
5. Δασικές περιοχές
6. Ακάλυπτες εκτάσεις – βραχώδεις εκτάσεις
7. Μη δομημένες περιοχές

Οι δασικές περιοχές υποδιαιρούνται σε τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με την πυκνότητα και το ύψος της βλάστησης που διαθέτουν. Πιο συγκεκριμένα, αυτές είναι οι:

- δάσος με πυκνή χαμηλή βλάστηση
- δάσος με πυκνή υψηλή βλάστηση
- δάσος με αραιή χαμηλή βλάστηση
- δάσος με αραιή υψηλή βλάστηση

Η διαφοροποίηση μεταξύ των δασικών εκτάσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς αλλάζουν οι τιμές του συντελεστή Manning οι οποίες τους αντιστοιχούνται. Ειδικά όταν προσομοιώνεται πλημμυρικό γεγονός σε μια περιοχή όπως η εξεταζόμενη, όπου τα δάση αποτελούν ποσοστιαία πολύ μεγάλο μέρος της.

Σημαντικό είναι να σημειωθεί πως σε ορισμένες κατηγορίες χρήσεων γης, οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας n που δόθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι διαφορετικές από αυτές που είχαν δοθεί από την ερευνητική ομάδα του DISMA.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η κατηγορία των θερμοκηπίων (greenhouses). Σύμφωνα με το Corine Land Cover 2012 (πρόγραμμα Copernicus, 2015) τα θερμοκήπια ανάγονται στην κατηγορία της μη αρδεύσιμης αρόσιμης γης, με αντιστοίχιση συντελεστή τραχύτητας $n=0.035$.

Οι τιμές του συντελεστή που δίνονται σε κάθε διαφορετική χρήση γης είναι αποτέλεσμα παραπομπών σε βιβλιογραφία όπως των Chow (1959), Cowan (1956) και Yan Huang (2005), όπως παρουσιάζονται παρακάτω. Στην παρούσα εργασία οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας n για κάθε μία χρήση γης δίνονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1. Τιμές συντελεστή τραχύτητας ανά χρήση γης

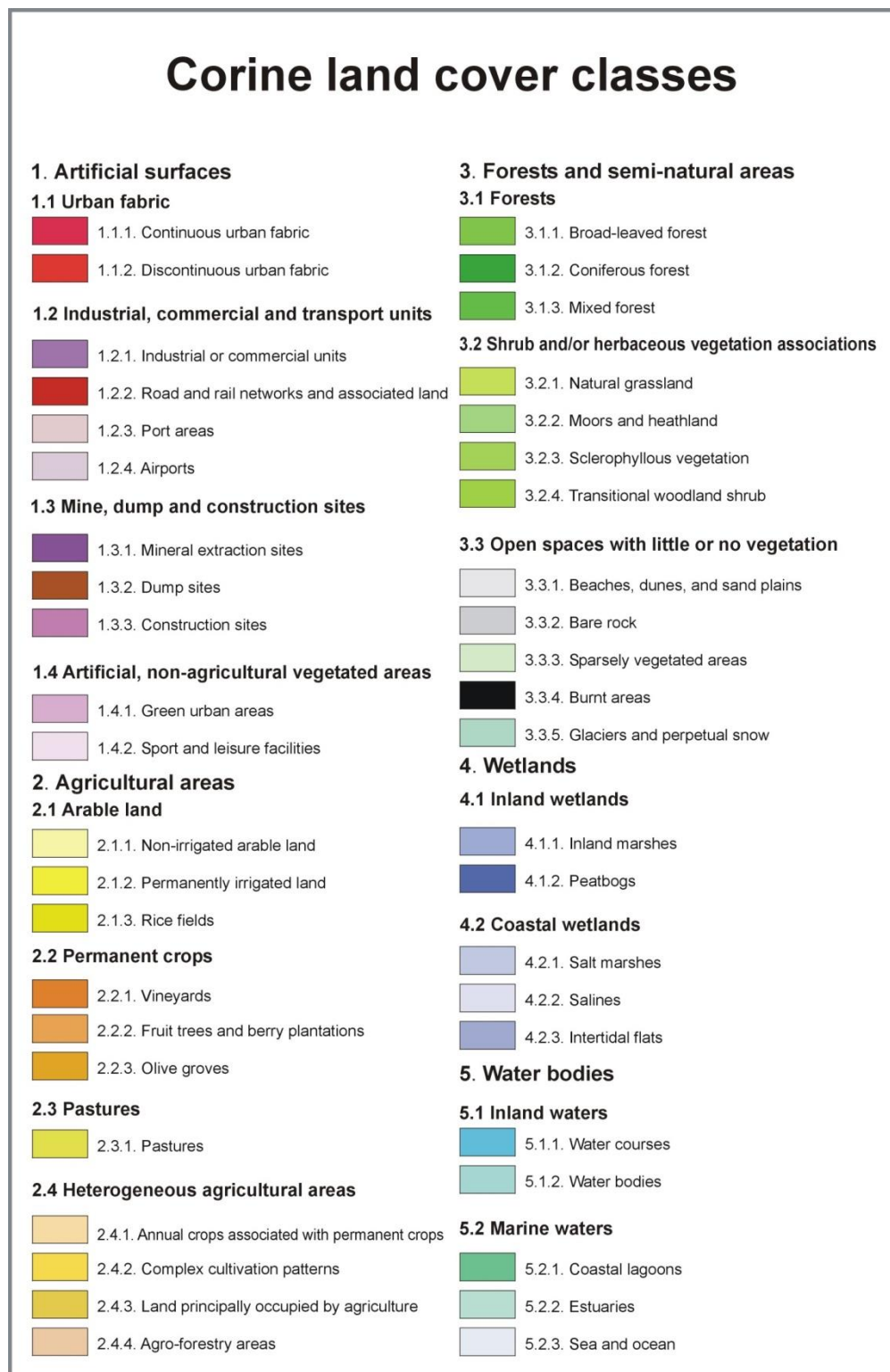
Περιγραφή	Συντελεστής Manning “n” (s/m ^{1/3})
Άγονο βραχώδες έδαφος	0.03
Θερμοκήπια	0.035
Συμπλέγματα καλλιεργειών	0.05
Δομημένες περιοχές	0.25
Υδάτινο ρεύμα	0.035
Δενδροφυτεύσεις	0.04
Μη δομημένες περιοχές	0.03
Δάσος με πυκνή χαμηλή βλάστηση	0.07
Δάσος με πυκνή υψηλή βλάστηση	0.1
Δάσος με αραιή χαμηλή βλάστηση	0.06
Δάσος με αραιή υψηλή βλάστηση	0.07

Οι τιμές για τις δασικές περιοχές αντιστοιχήθηκαν κατόπιν βιβλιογραφικής ανασκόπησης στον κάτωθι πίνακα 4.2. όπως προήλθε από το Natural Channel Design, Appendix C – Manning's Roughness του Brisbane City Council. Ο πίνακας αυτός αποτελεί και την ενδεδειγμένη έρευνα όσον αφορά τη διακύμανση στις αποδιδόμενες τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning n για πλημμυρικά πεδία, λόγω της πυκνότητας και του είδους βλάστησης.

Πίνακας 4.2. Τιμές συντελεστή τραχύτητας ανά είδος και ποσότητα βλάστησης

Συντελεστής Manning n (s/m ^{1/3})	Είδος - Ποσότητα βλάστησης
0.03	Χαμηλό γρασίδι (με το βάθος του νερού να υπερβαίνει το ύψος του γρασιδιού)
0.04	Χαμηλό γρασίδι με βάθους νερού να υπερβαίνει το ύψος του χόρτου σε ελαφρώς ανώμαλη επιφάνεια της γης. Δέντρα στα 10 μέτρα απόσταση. Περιοχή εύκολη για υλοτομία.
0.05	Μακρύ γρασίδι σε ακανόνιστη (ανώμαλη) επιφάνεια με λίγα δέντρα. Ακανόνιστο έδαφος που θα μπορούσε να κάνει δύσκολη την κοπή των χόρτων.Εναλλακτικά, δέντρα σε απόσταση 8 μέτρων σε επίπεδη, επιφάνεια, δεν υπάρχουν θάμνοι, δεν υπάρχουν χαμηλά κλαδιά.
0.06	Μακρύ γρασίδι, δέντρα σε απόσταση 6 μέτρων, λίγοι θάμνοι. Η βλάστηση είναι εύκολο να περπατηθεί.
0.07	Δέντρα σε 5 μέτρα απόσταση, δεν υπάρχουν χαμηλά κλαδιά, λίγοι θάμνοι, ορισμένες δύσβατες περιοχές.
0.08	Δέντρα σε απόσταση 4 μέτρων, μερικά χαμηλά κλαδιά, λίγοι θάμνοι, σχετικά δύσβατες περιοχές.
0.10	Δέντρα σε απόσταση 2 μέτρων, χαμηλά κλαδιά, θάμνοι σε τακτικά διαστήματα, δεν υπάρχουν αμπέλια. Η συγκόμωση ενδεχομένως επισκιάζει αγριόχορτα, δύσβατη περιοχή.
0.12	Δέντρα σε 1,5 μέτρο απόσταση με ορισμένα χαμηλά κλαδιά, λίγοι θάμνοι.
0.15	Δέντρα και θάμνοι σε 1 μέτρο απόσταση, λίγα αμπέλια, χαμηλά κλαδιά, πεσμένα δέντρα, δύσκολη και αργή για να περπατηθεί. Εναλλακτικά, συνεχόμενη χαμηλή άγρια βλάστηση με αραιά φύλλα και χωρίς αμπέλια.
0.20	Δέντρα και θάμνοι σε 1 μέτρο απόσταση συν παχύ κάλυμμα αμπέλου στο επίπεδο πλημμύρας, πεσμένα δέντρα. Εξαιρετικά δύσβατη περιοχή. Εναλλακτικά, συνεχής κάλυψη με υγιείς θάμνους και άγρια βλάστηση από το επίπεδο του εδάφους μέχρι πάνω από το επίπεδο της πλημμύρας.

Η κατηγοριοποίηση των καλύψεων και χρήσεων γης στο Corine Land Cover 2000, παρατίθεται παρακάτω στην *Εικόνα 4.2*.



Εικόνα 4.2. Υπόμνημα Χρήσεων γης κατά Corine Land Cover 2000

Οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning n για τις χρήσεις γης του χάρτη του Corine Land Cover 2000 επιλέχθηκαν κατόπιν βιβλιογραφικής ανασκόπησης σε πίνακες αντιστοιχισμένων συντελεστών. Μεγαλύτερη βάση δόθηκε στον πίνακα του Chow (1959), όπως τροποποιήθηκε από Thomsen and Hjalmarson (1991), καθώς και σε πιο σύγχρονες μελέτες (Huang, 2005), (Kaizer et al, 2011), (Pestana et al, 2013). Τα πολύγωνα χρήσεων γης ήταν λιγότερα και οι τιμές του συντελεστή παρατίθενται παρακάτω, στον **Πίνακα 4.3**.

Πίνακας 4.3. Τιμές συντελεστή τραχύτητας ανά χρήση γης πολυγώνων Corine Land Cover 2000

Κατηγορία χρήσεων γης	Συντελεστής τραχύτητας Manning n
2.4.2. Συμπλέγματα καλλιεργειών	0.05
3.2.4. Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	0.07
3.2.3. Σκληροφυλλική βλάστηση	0.08
1.3.1. Χώροι εξόρυξης ορυκτών	0.1

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στην εφαρμογή των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν για την υδρολογική ανάλυση και την υδραυλική προσομοίωση της ροής του ποταμού Βρανά. Θα αναλυθούν τα βήματα που ακολουθήθηκαν από την κατάρτιση των χαρτών χρήσεων γης μέχρι την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των παράγωγων χαρτών (βάθους πλημμύρας και ταχύτητας ροής). Βασικό λογισμικό στην υλοποίηση της εργασίας ήταν το HEC-RAS.

5.1. Λογισμικά εφαρμογής

5.1.1. ArcGIS 10.1

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. . Κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας δεδομένων, επιλέχθηκε η χρήση του προγράμματος ArcMap, με στόχο την οπτικοποίηση των προϊόντων και την ορθή παρουσίαση τους. Οι χάρτες των καλύψεων-χρήσεων γης παρήχθησαν σε αυτό το πρόγραμμα.

Το ArcMap 10.1 της ESRI χρησιμοποιήθηκε επίσης για τη διαμόρφωση των γεωμετρικών δεδομένων που απαιτείται για την υδραυλική προσομοίωση από το υπολογιστικό πακέτο HEC-RAS 5.0.1. το οποίο είναι δισδιάστατο (2d).

5.1.2. HEC-RAS 5.0.1

Το πακέτο HEC-RAS, αναπτύχθηκε από το U.S. Army Corps of Engineers (Σώμα Μηχανικού του Αμερικανικού Στρατού), για την εκτέλεση υδραυλικών υπολογισμών σε μόνιμες και μη-μόνιμες ροές ποταμών. Μια πρώιμη εκδοχή του HEC-RAS είναι το πακέτο HEC-2 το οποίο περιοριζόταν στην ανάλυση μονοδιάστατης μόνιμης ροής. Η πρώτη έκδοση του HECRAS (version 1.0) κυκλοφόρησε το 1995 και βασικοί δημιουργοί του ήταν οι Mr. Mark και R. Jensen. Είναι σχεδιασμένο για διαδραστική χρήση καθώς και για χρήση σε επίπεδο δικτύου υπολογιστών. Είναι ένα ελεύθερο πακέτο λογισμικού, από τα πλέον διαδεδομένα στις υδραυλικές μελέτες και τις πλημμυρικές προσομοιώσεις.

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) μόνιμη ροή επιφανειακών υδάτων, (2) μη μόνιμη ροή επιφανειακών υδάτων, (3) προσομοίωση μεταφοράς φερτών με μεταβαλλόμενα όρια, και (4) ανάλυση ποιότητας νερού. Πέραν αυτών η πλατφόρμα περιέχει επιπλέον λειτουργίες που ενεργοποιούνται μετά την επίλυση και υπολογισμό του προφίλ επιφανειακών υδάτων (Δρόσου, 2015).

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, μόνο για περιπτώσεις μη-μόνιμης ροής σε ανοικτούς αγωγούς και πλημμυρικά πεδία. Αυτό έχει φέρει ορισμένες διαφοροποιήσεις σε σχέση με παλαιότερες εκδόσεις, και ειδικότερα στο θεωρητικό υπόβαθρο των υπολογισμών που εκτελούνται σε κάθε προσομοίωση, όπως αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

5.2. Υπόβαθρο λειτουργίας HEC-RAS

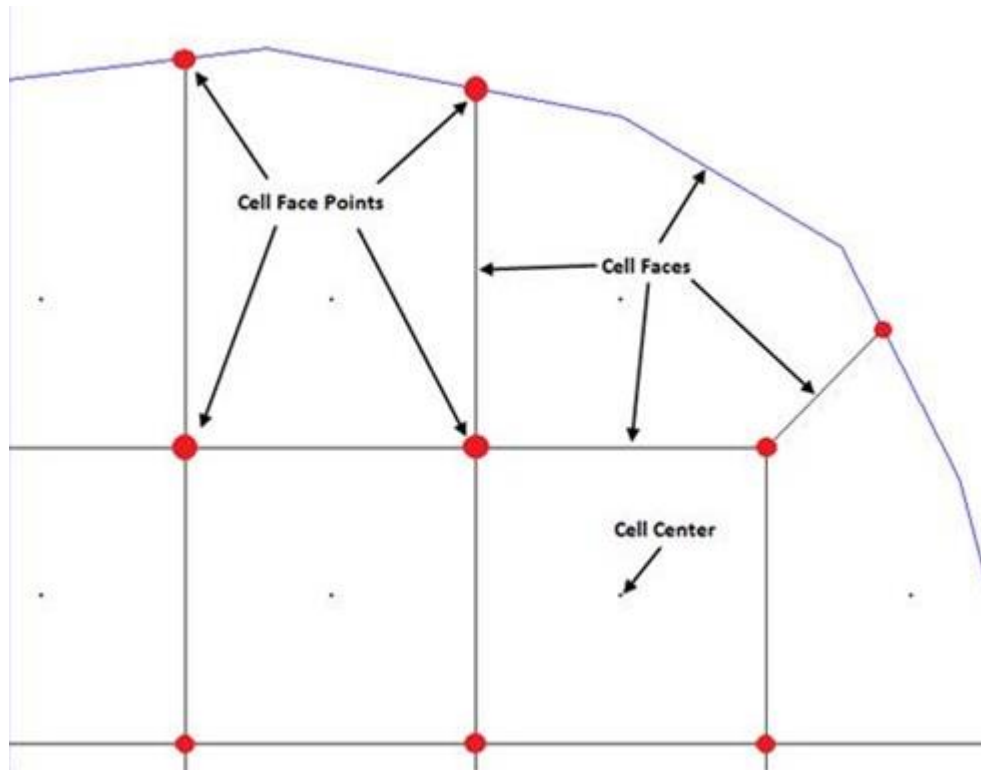
Η ανάλυση της δισδιάστατης ροής γίνεται με επίλυση των εξισώσεων Saint-Venant (shallow water equations) όπως αναφέρθηκαν ανωτέρω, με δεδομένες τις παρακάτω παραδοχές:

- Η ροή είναι ασυμπίεστη
- Η πυκνότητα του νερού είναι αμετάβλητη
- Η πίεση είναι υδροστατική

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 5.1** 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).



Εικόνα 5.1. Κελιά δισδιάστατου πλέγματος HEC-RAS 5.0.1.

Το πρόγραμμα πραγματοποιεί τους υπολογισμούς μέσω ενός αλγορίθμου που δημιουργήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων, ο οποίος 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 δισδιάστατη 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).

Στο ίδιο παράθυρο εργασίας γίνονται και οι επιλογές διάφορων άλλων παραμέτρων (αριθμός επαναλήψεων, τιμή ανοχής σφάλματος) με σημασία στην εφαρμογή της προσομοίωσης, όπως θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο

Είναι λοιπόν προφανές πως η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου από τις μεθόδους διοδεύσεως εξαρτάται από τον τύπο της ροής στο υδατόρευμα (Αθανασίου, 2005).

Πίνακας 5.1. Επιλογή εξισώσεων επίλυσης ανά τύπο ροής

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

5.3. Υπολογιστικό χρονικό βήμα

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

$$C_r = V_w \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right) \leq 1, \quad (21)$$

και άρα,

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{V_w},$$

Όπου:

Δx : 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:

$$V_w = \frac{dQ}{dA}, \quad (22)$$

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 (HEC-RAS 5.0 User's Manual, 8-73) όταν πολλαπλασιαστεί με έναν κατάλληλο αριθμό. Για φυσικούς αγωγούς λοιπόν, προκύπτει ως:

$$V_w = 1.5V \quad (23)$$

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:

$$\Delta t \leq \left(\frac{T_r}{20} \right)$$

Όπου:

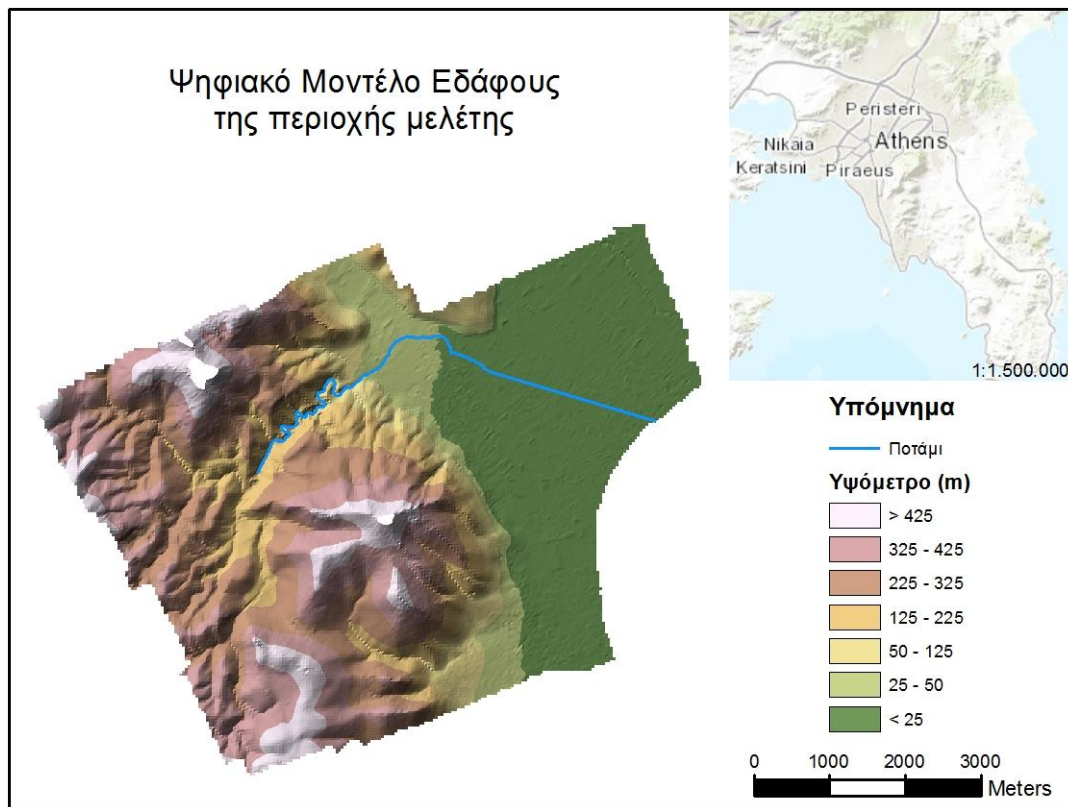
T_r : ο χρόνος από την αρχή του γεγονότος μέχρι τον χρόνο της παροχής αιχμής στο υδρογράφημα.

5.4. Προεπεξεργασία δεδομένων

Η επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής μελέτης, όπως αυτό λήφθηκε από το Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ, έγινε στο ArcGIS 10.1.

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.

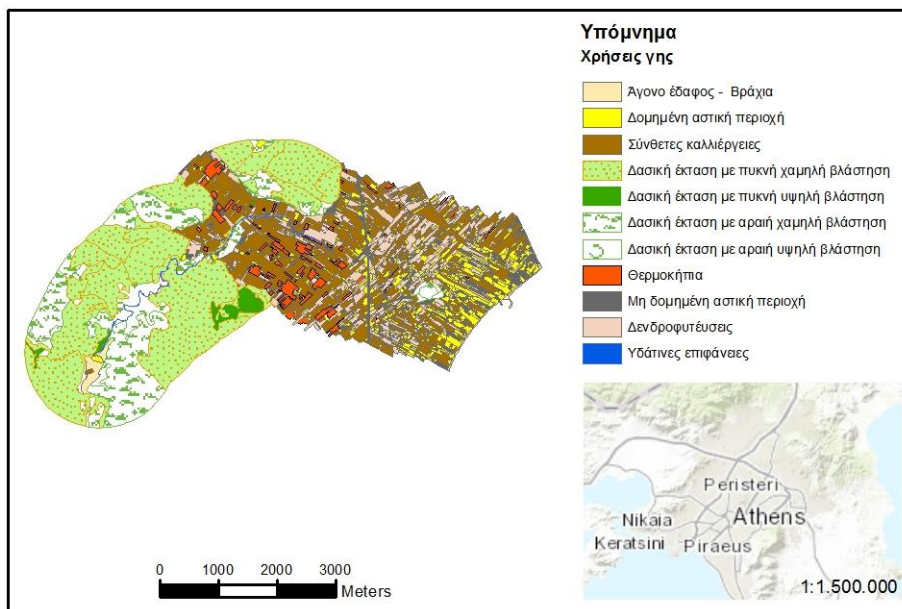
Αρχική προϋπόθεση είναι η προεπεξεργασία που γίνεται στο DTM μέσω της οποίας διορθώνεται η υψομετρική πληροφορία για να μην υπάρχουν βυθίσματα τα οποία συμβάλλουν στη δημιουργία ασύνδετων υδάτινων σωμάτων. Με την πλήρωση των βυθισμάτων δημιουργείται το σωστό υπόβαθρο για την παραγωγή του καννάβου διεύθυνσης ροής (flow direction) και του καννάβου συσσώρευσης ροής (flow accumulation). Αυτοί οι κάρναβοι αποτελούν αναγκαία δεδομένα εισόδου προκειμένου να καθοριστεί το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης. Στην κύρια μισγάγγεια της περιοχής έγινε ο σχεδιασμός των διατομών και η οριοθέτηση της πλημμυρικής κοίτης. Στην **Εικόνα 5.2**, παρουσιάζεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής, και το ρέμα της Ραπεντώσας.



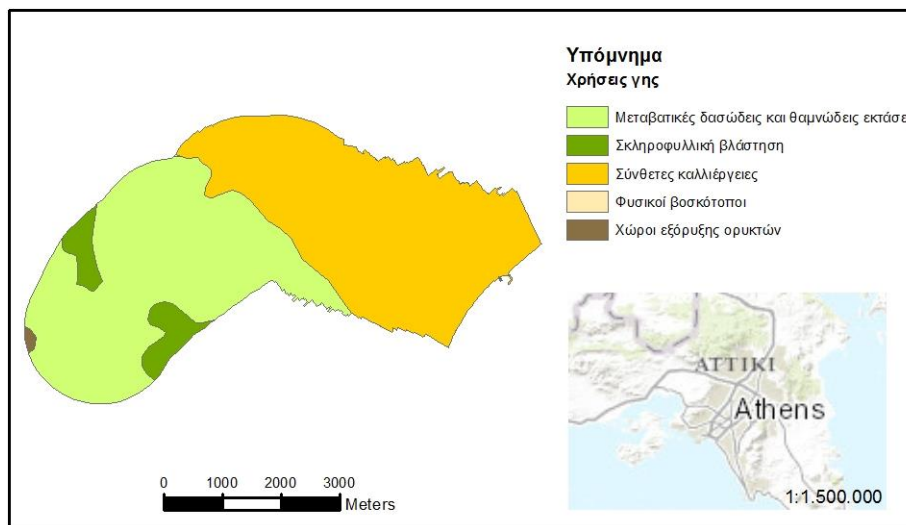
Εικόνα 5.2. Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους περιοχής μελέτης

Στο περιβάλλον του ArcGIS έγινε επεξεργασία δύο διαφορετικών χαρτών χρήσεων γης, οι οποίοι αποτέλεσαν το καθοριστικό δεδομένο εισόδου για την πραγματοποίηση της υδραυλικής προσομοίωσης. Ο ένας είναι ο λεπτομερής χάρτης 2072 πολυγώνων, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, που προέκυψε ύστερα από εργασίες ψηφιοποίησης της ερευνητικής ομάδας στα πλαίσια του "DISMA with emphasis on cultural sites" (Tsakiris, 2007). Η ψηφιοποίηση των χρήσεων γης έγινε από ομάδα ειδικών φωτοερμηνευτών σε φωτομωσαϊκό της περιοχής μελέτης. Από τη φωτοερμηνευτική διαδικασία διακρίθηκαν εντέλει 2072 πολύγωνα, το καθένα από τα οποία έχει αντιστοιχηθεί σε μια κατηγορία χρήσης γης. Το τελικό προϊόν είναι ένας σύνθετος λεπτομερής χάρτης της περιοχής ενδιαφέροντος σε κλίμακα 1:5000.

Ο δεύτερος χάρτης χρήσεων γης που χρησιμοποιήθηκε προς σύγκριση με τον αρχικό για μελέτη της επίδρασης της τραχύτητας, προέρχεται από τη βάση του Corine Land Cover 2000 για τη συγκεκριμένη περιοχή. Το εν λόγω προϊόν είναι πολύ πιο αδρομερές. Χαρακτηριστικό της διαφοράς μεταξύ τους είναι πως ο χάρτης του Corine Land Cover για την περιοχή μελέτης περιέχει μόλις πέντε πολύγωνα χρήσεων γης όπως φαίνεται και παρακάτω στις **Εικόνες 5.3 & 5.4**.



Εικόνα 5.3. Χάρτης χρήσεων γης βασικού μοντέλου



Εικόνα 5.4. Χάρτης χρήσεων γης κατά Corine Land Cover 2000

Οι δύο αυτοί χάρτες είναι γεωαναφερμένοι στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς του ψηφιακού μοντέλου, ώστε να συμπίπτουν τα όρια τους. Σε διαφορετική περίπτωση, κάθε απόκλιση (έστω και οριακή) θα καθιστούσε αδύνατη την εφαρμογή στο HEC-RAS 5.0.1. Το σύστημα αναφοράς στην συγκεκριμένη περίπτωση ήταν το ΕΓΣΑ'87.

Το στάδιο της προεπεξεργασίας που συντελείται στο HEC-RAS είναι σχετικά πολύπλοκο και αναφέρεται σε επόμενη παράγραφο, καθώς οι ενέργειες αυτές γίνονται μετά την είσοδο των δεδομένων εδάφους στο πρόγραμμα.

5.5. Εφαρμογή της υδραυλικής προσομοίωσης

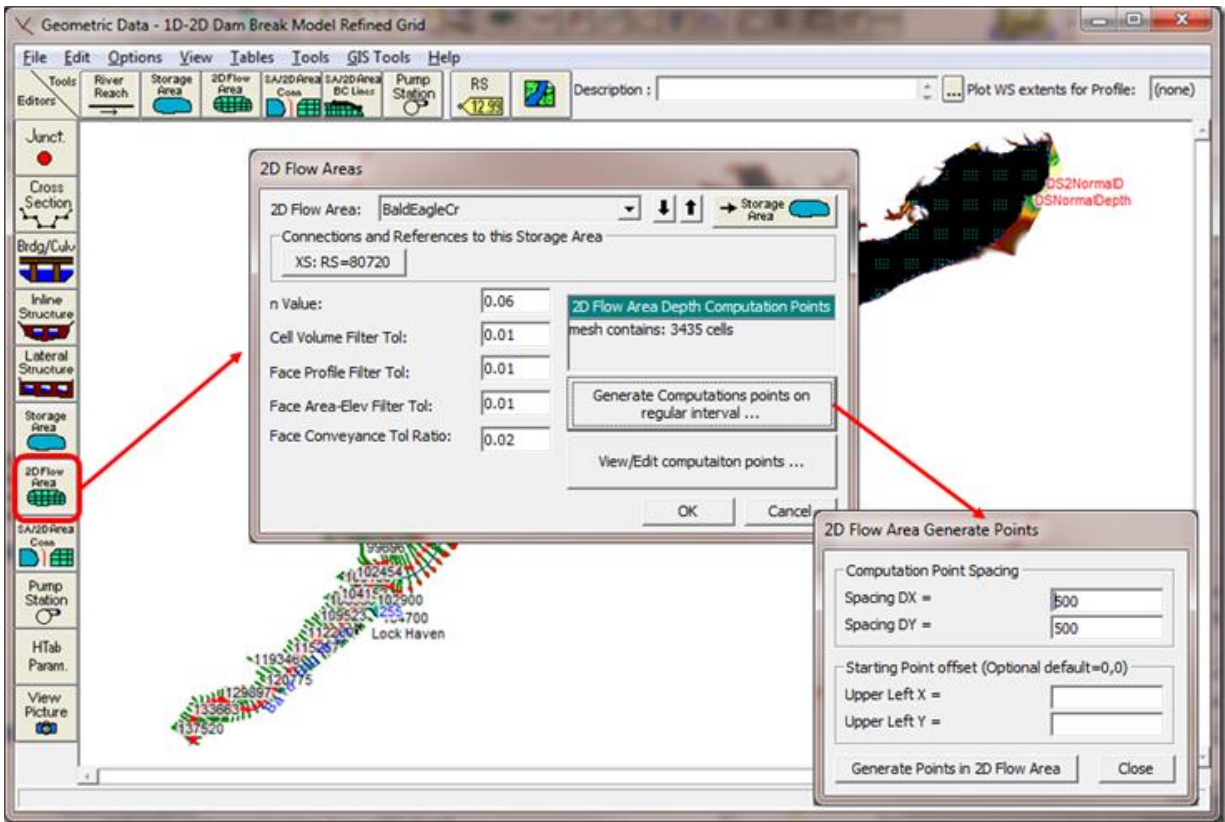
5.5.1. Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων

Ως αρχικό δεδομένο, για την υδραυλική προσομοίωση του ποταμού, διατίθεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DTM). Σε αυτό γίνονται ορισμένες προεπεξεργασίες αυτόματα 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.

Μέσω της εργαλειοθήκης HEC-GeoRAS εισάγονται τα γεωμετρικά δεδομένα της κοίτης του ποταμού (river center), των ορίων διαδρομής ροής (flowpaths), των διατομών (XSCutlines) και το αρχείο Land Cover με την ψηφιοποίηση των χρήσεων γης που εδράζονται στην περιοχή μας.

Με την έναρξη του προγράμματος του HEC-RAS ορίζεται ένα νέο σχέδιο (plan) για την κάθε μία προσομοίωση. Για το Land Cover του ψηφιοποιημένου λεπτομερούς χάρτη (βασικό μοντέλο) θα εφαρμοστούν τρία σχέδια, ένα για κάθε παροχή σχεδιασμού από τις τρεις διαφορετικές περιόδους επαναφοράς για τις οποίες έχουν προκύψει αποτελέσματα.

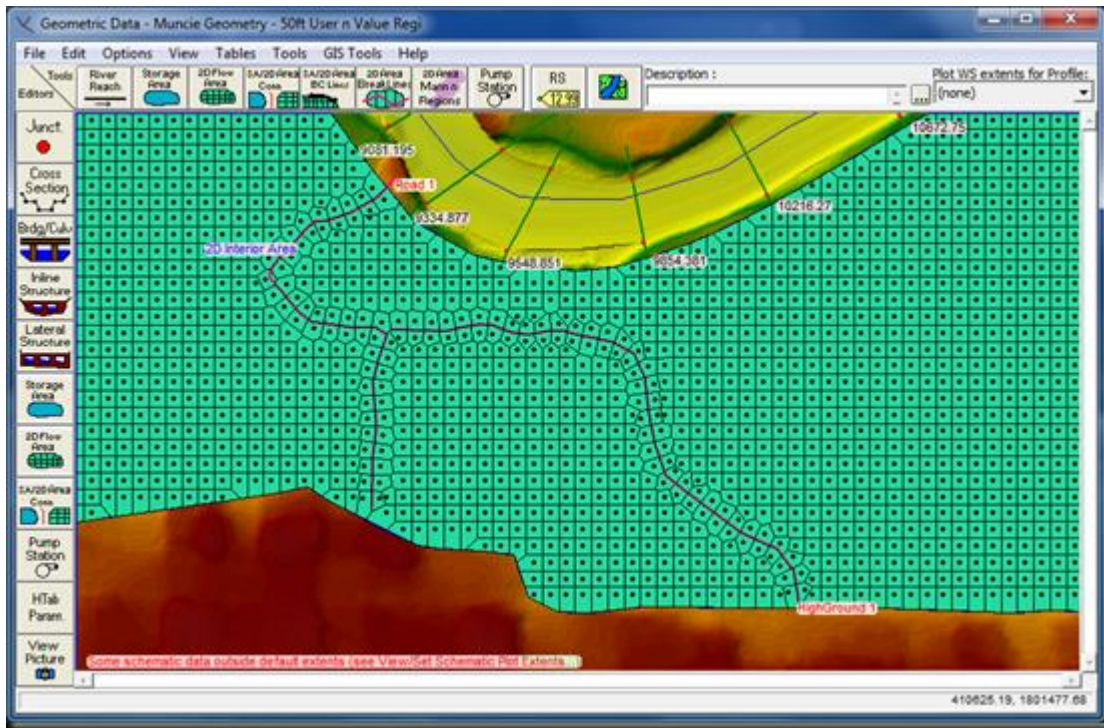
Στην επεξεργασία των γεωμετρικών δεδομένων ορίζεται η δισδιάστατη περιοχή ροής (2d flow area), η οποία και ταυτίζεται με την περιοχή ενδιαφέροντος του εκάστοτε χάρτη. Με επεξεργασία της δισδιάστατης περιοχής δημιουργείται το πλέγμα κελιών (mesh). Το κάθε κελί έχει διαστάσεις ΔΧ και ΔΥ που ορίζονται από την επιλογή “Generate Computational Points”, όπως αποτυπώνεται και στο στιγμιότυπο της **Εικόνας 5.5**.



Εικόνα 5.5. Επιλογή διαστάσεων κελιών πλέγματος.

Σε περίπτωση που είναι αναγκαίες διορθωτικές κινήσεις στα όρια της διδιάστατης περιοχής ροής (2d flow area), 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 διδιάστατης περιοχής ροής (2d flow area) εξάγεται σε μορφή shapfile και μέσω του εργαλείου Clip του Toolbox του ArcGIS οριοθετούνται οι χρήσεις γης της περιοχής ενδιαφέροντος.

Το τελικό αρχείο του πλέγματος της διδιάστατης περιοχής ροής είναι της μορφής που εμφανίζεται στην **Εικόνα 5.6**.



Εικόνα 5.6. Εικόνα δισδιάστατου πλέγματος κελιών

Κατά την εισαγωγή του αρχείου χρήσεων γης "Land Cover" ως layer στο RasMapper του HEC-RAS (Tools-New Land Cover-Entire Input File), αναγνωρίζονται οι διαφορετικές καλύψεις γης και δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει την τιμή του συντελεστή Manning n για κάθε πολύγωνο. Εκεί αντιστοιχούνται οι τιμές όπως επιλέχθηκαν βάσει βιβλιογραφίας και έρευνας (**Πίνακες 4.1 & 4.3**).

Το αρχείο των καλύψεων γης "Land Cover" πρέπει να συσχετιστεί με το αρχείο εδάφους "Terrain", το οποίο αποτελεί το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, μέσω της επιλογής "Associated Layers" του RAS Geometry Properties, και κατόπιν να συνεχιστεί η διαδικασία της επεξεργασίας των γεωμετρικών δεδομένων (Edit Geometry Data). Στο τμήμα αυτό επιβεβαιώνονται οι τιμές του συντελεστή Manning " n " για τα πολύγωνα της κάθε υποπεριοχής.

Η έκδοση 5.0.1 του HEC-RAS κινείται σε διαφορετική λογική από τις προηγούμενες, καθώς δίνει μεγάλη βάση στην δισδιάστατη επεξεργασία της πλημμυρικής περιοχής. Έτσι, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως πλέον είναι δυνατό να ορίζει ο χρήστης τις διάφορες υποπεριοχές και να καταχωρήσει τις τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning n . Η επιλογή αυτή δίνεται μέσω της επεξεργασίας δισδιάστατων περιοχών "Edit 2d Manning Region". Σε κάθε υποπεριοχή που ορίζεται με αυτόν τον τρόπο, αυτόματα της δίνεται ένα όνομα και μία τιμή συντελεστή, η οποία αντικαθιστά την βασική τιμή "Default Manning's N". Η τιμή αυτή έχει δοθεί αυθαίρετα από το ίδιο το πρόγραμμα HEC-RAS σαν τιμή βάσης, ώστε να μπορεί να γίνει η εφαρμογή του κάθε σχεδίου (plan). Η επιλογή αυτή συνίσταται για πιο αδρομερείς χάρτες κάλυψης γης, καθώς μπορεί έτσι ο χρήστης να παρακάμψει την διαδικασία εισαγωγής αρχείων (shapefiles) από το ArcGIS. Προφανώς, όταν ο χάρτης είναι λεπτομερής, όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση, η διαδικασία αυτή είναι πρακτικά αδύνατη και αχρείαστη λόγω του

μεγάλου χρόνου εργασίας που απαιτείται.

Στην επεξεργασία των γεωμετρικών δεδομένων (Geometry Data Editor) ορίζονται επίσης τα ανάντη και κατάντη όρια του υδατορέματος (Upper - Lower Boundaries Condition Lines) με μία κάθετη γραμμή στην αρχή και τις εκβολές του υδατορέματος. Σε αυτές τις γραμμές δίνεται και το αντίστοιχο όνομα (UpstreamBCLine – DownstreamBCLine). Αυτές οι γραμμές πρέπει να είναι οριακά εντός της δισδιάστατης περιοχής ροής που έχει δημιουργηθεί σε προηγούμενο στάδιο.

5.5.2. Εισαγωγή - Επεξεργασία δεδομένων ροής

Οι επιλογές για το, από κινηματικής άποψης, είδος ροής του καναλιού που δίνει το HEC-RAS είναι η μόνιμη και η μη-μόνιμη ροή. Στην παρούσα εργασία έγινε η επιλογή της μη-μόνιμης ροής, καθώς αυτή δεν παραμένει σταθερή. Η ταχύτητα και το βάθος ροής δεν παραμένουν σταθερά κατά μήκος του υδατορέματος.

5.5.3. 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 κατάντη του υδατορέματος. 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)

Ως ανάντη οριακή συνθήκη (upstream boundary condition) ορίστηκε το υδρογράφημα σχεδιασμού (design flood hydrograph) για κάθε μία από τις τρεις περιόδους επαναφοράς. Ορίστηκε χρονικό βήμα μισής ώρας για τα δεδομένα ροής. Ως χρόνος προσομοίωσης (fixed start time) ορίστηκε η ημερομηνία του πλημμυρικού γεγονότος της 22 Νοεμβρίου 2005. Η εισαγωγή του υδρογραφήματος έγινε χειροκίνητα αντιγράφοντας τον πίνακα από το Microsoft Excel και όχι μέσω HEC-DSS file.

Ένα υδρογράφημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οριακή συνθήκη και κατάντη του ποταμού, αλλά είναι πολύ σπάνιο και δεν συνηθίζεται.

- Κατάντη οριακή συνθήκη - Ομοιόμορφο βάθος (Normal Depth)

Στην οριακή συνθήκη του ομοιόμορφου βάθους, εισάγει ο χρήστης το ομοιόμορφο βάθος για κάθε σενάριο μέσω υπολογισμού των κλίσεων κατάντη. Αν δεν είναι γνωστές, μπορεί να θέσει προσεγγιστικά μια τιμή βασισμένος στην κλίση της υδάτινης επιφάνειας ή την κλίση του πυθμένα του καναλιού. Η τιμή που ορίστηκε στην παρούσα εργασία είναι 0.5% ($S = 0.005$). Η ίδια τιμή ομοιόμορφου βάθους είχε δοθεί και στις εργασίες του project "DISMA with emphasis on cultural sites" (Tsakiris, 2007), και επιβεβαιώθηκε μέσω υπολογισμού των κλίσεων των γειτονικών φατνίων κατάντη στο ArcGIS.

5.5.4. Καθορισμός χρονικού βήματος

Σημαντική παράμετρος που παίζει ρόλο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων καθώς και τη σταθερότητα του μοντέλου είναι το υπολογιστικό χρονικό βήμα Δt (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 και όχι τον πραγματικό.

Η τιμή αυτή ορίζεται από τον χρήστη, αφού γίνουν κάποιοι απαραίτητοι υπολογισμοί, όπως περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. 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. Για παράδειγμα, η τιμή των 13 min δεν είναι κάποια από αυτές τις επιλογές και άρα ο χρήστης θα έπρεπε να εισάγει την κοντινότερη σε αυτή (15 min). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε χρονικό βήμα ενός λεπτού (1 min), καθώς ικανοποιήθηκαν οι συνθήκες. Επιλογή μεγαλύτερου 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 σε μη-ανεκτά επίπεδα.

Η τιμή αυτή εισήχθηκε πριν την αρχή της προσομοίωσης, στο παράθυρο της επεξεργασίας των δεδομένων της μη-μόνιμης ροής (Edit Unsteady Flow Data).

Στην παρούσα εργασία, η επιλογή του βήματος ως $n=1$ min, σημαίνει πως οι επιλύσεις των εξισώσεων στα κελιά του δισδιάστατου πλέγματος πραγματοποιούνται κάθε ένα λεπτό για τις 17,5 συνολικά ώρες του γεγονότος. Προκύπτει λοιπόν, πως οι επιλύσεις εκτελούνται συνολικά $N=17,5*60=1050$ φορές για κάθε κελί, ώστε να δοθούν τιμές στα βάθη και τις ταχύτητες ροής.

Ακολουθεί η διαδικασία της δισδιάστατης προσομοίωσης, με τον υπολογισμό του συστήματος εξισώσεων όπως αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3.

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 $n+1$ (1 min 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 στα “πρόσωπα” του κάθε κελιού (πλευρές).
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, $H=(1-\theta)H_j^n+\theta H_j^{n+1}$. Η τιμή του θ 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 θ ($\cos\theta$), 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 ($\theta=1$).

Ο αριθμός των επαναλήψεων που πραγματοποιούνται καθώς και η τιμή ανοχής του σφάλματος είναι επιλογή του χρήστη, και ρυθμίζονται στο παράθυρο “Unsteady Flow Calculations and Tolerances”, πριν την έναρξη της προσομοίωσης των σεναρίων. Στην παρούσα εργασία ο αριθμός των επαναλήψεων ορίστηκε ως $N=20$.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως στο βήμα 10, σε περίπτωση που μετά το πέρας των επαναλήψεων, η διόρθωση των τιμών του βάθους συνεχίζει να υπερβαίνει την τιμή ανοχής, το λογισμικό αποδίδει ως τελική αποδεκτή τιμή αυτή που παρήγαγε τη μικρότερη διαφορά (αποθηκεύονται όλες οι τιμές κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας για αυτό το λόγο).

Κατόπιν της ολοκλήρωσης της συγκεκριμένης διαδικασίας, έχουν αποδοθεί οι βέλτιστες προσομοιωμένες τιμές βάθους ροής και ταχύτητας ροής στα φατνία του δισδιάστατου πλέγματος.

5.6. 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 μέσω του κατάλληλου εργαλείου "Raster Calculator". Με αυτό το εργαλείο γίνονται δυνατοί όλοι οι πολύπλοκοι υπολογισμοί που απαιτούνται για την σύγκριση των αποτελεσμάτων.

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.

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-σκύρες μπλε.

Στους χάρτες των μέγιστων ταχυτήτων επιλέχθηκε η εναλλαγή κίτρινου-κόκκινου χρώματος, με τις μικρότερες τιμές να αποτυπώνονται με ανοιχτό κίτρινο, και τις μεγαλύτερες με σκούρο κόκκινο.

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΓΚΡΙΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται οι παράγωγοι χάρτες που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για κάθε σενάριο. Οι χάρτες αποδίδουν γραφικά τα βάθη καθώς και τις ταχύτητες ροής στην περιοχή ενδιαφέροντος.

6.1. Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Η σύγκριση των δύο χαρτών με τα βάθη ροής της περιοχής μελέτης για κάθε περίοδο επαναφοράς γίνεται έχοντας σαν βασικό χάρτη αυτόν της εφαρμογής στο λεπτομερές Land Cover της ψηφιοποίησης. Η επιλογή αυτή γίνεται για λόγους έμφασης στη λεπτομέρεια που παρέχει ο συγκεκριμένος χάρτης χρήσεων γης. Ως ζητούμενο άλλωστε, είναι η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας του αδρομερούς μοντέλου χρήσεων γης. Είναι συχνές οι περιπτώσεις που δεν έχει γίνει η απαραίτητη έρευνα στον τομέα της κατηγοριοποίησης των καλύψεων γης της εκάστοτε περιοχής ενδιαφέροντος, και άρα το εξεταζόμενο μοντέλο πρέπει να είναι αυτό με τη λιγότερη δυνατή λεπτομέρεια.

Η εξαγωγή των αρχείων των παράγωγων χαρτών από το HEC-RAS 5.0.1. σε μορφή Raster και η εισαγωγή τους στο ArcGIS δίνει τη δυνατότητα για επεξεργασία των παραμέτρων του κάθε κελιού, με κατάλληλη χρήση του εργαλείου Raster Calculator.

6.1.1. Συντελεστής Nash-Sutcliffe

Ο δείκτης που επιλέχθηκε για τη σύγκριση των δύο προσομοιώσεων και την ανάλυση της διακύμανσης των αποτελεσμάτων, είναι μια εφαρμογή του συντελεστή Nash-Sutcliffe για σύγκριση μοντέλων. Είναι της μορφής:

$$E=1 - \frac{\sum(y_i - y_i')^2}{\sum(y_i - y_m)^2} \quad (24)$$

Όπου:

y_i : η τιμή του βάθους ροής σε κάθε κελί της εικόνας Raster για την εφαρμογή του Corine LandCover,

y_i' : η τιμή του βάθους ροής σε κάθε κελί της εικόνας Raster για την εφαρμογή του ψηφιοποιημένου LandCover,

y_m : η μέση τιμή του βάθους ροής για την εικόνα Raster του Corine LandCover.

Ο συντελεστής Nash – Sutcliffe αποτελεί τον βασικό παράγοντα στον οποίο στηρίζεται η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επάρκεια του αδρομερούς μοντέλου σε σχέση με το λεπτομερές. Η βέλτιστη τιμή που μπορεί να πάρει αυτός ο συντελεστής είναι η μονάδα, κάτι που θα σήμαινε την επί της ουσίας ταύτιση των δύο εφαρμογών. Σε κάθε περίπτωση, μπορεί να λάβει και αρνητικές τιμές, γεγονός που θα αναδεικνύει την μεγάλη απόκλιση μεταξύ των δύο αποτελεσμάτων και πιθανά σφάλματα στη μεθοδολογία της προσομοίωσης. Το μέγεθος αυτής της απόκλισης εξαρτάται από την ακριβή τιμή του. Σε περίπτωση πιθανής μηδενικής τιμής του συντελεστή, συμπεραίνεται πως το υπό εξέταση μοντέλο παρέχει την ίδια

αποτελεσματικότητα και ασφάλεια συμπερασμάτων με τη μέση τιμή των βαθών ροής του βασικού αρχείου.

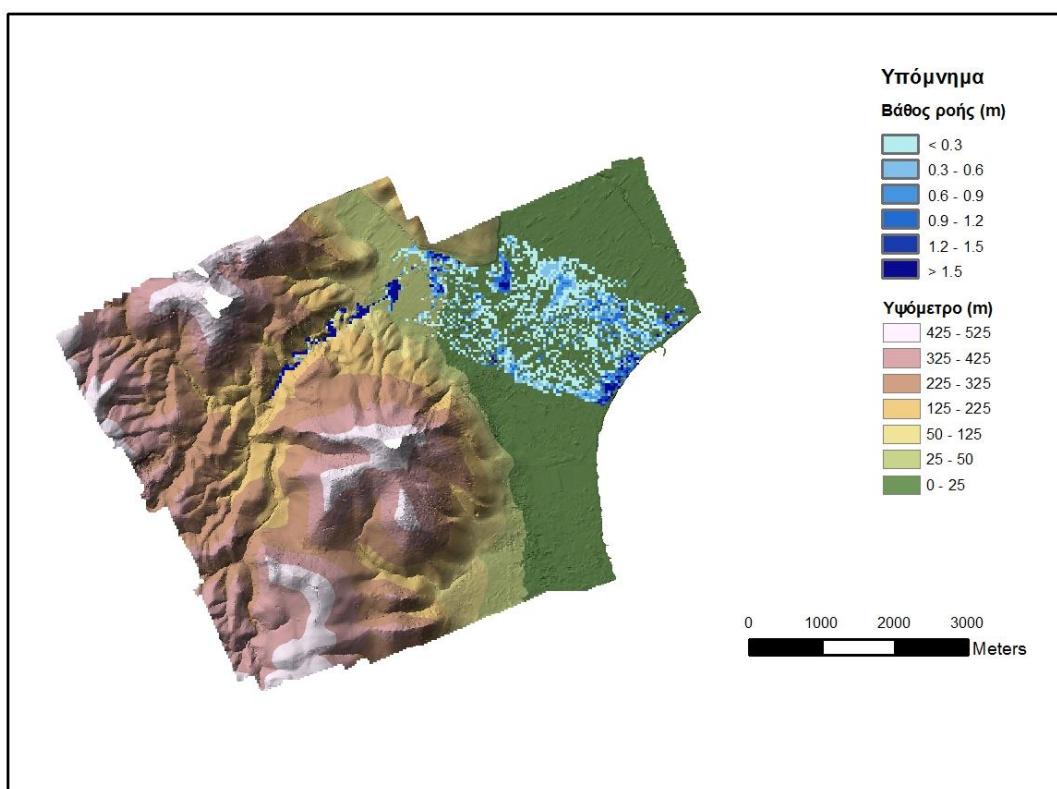
Οι υπολογισμοί γίνονται ώστε να συγκριθούν οι τιμές για κάθε σενάριο ξεχωριστά. Στις επόμενες παραγράφους ακολουθούν οι παράγωγοι χάρτες και οι εικόνες raster όπως προέκυψαν για κάθε περίοδο επαναφοράς. Επίσης καταγράφονται και οι τιμές του συντελεστή E όπως υπολογίστηκαν.

6.2. Παράγωγοι χάρτες βαθών

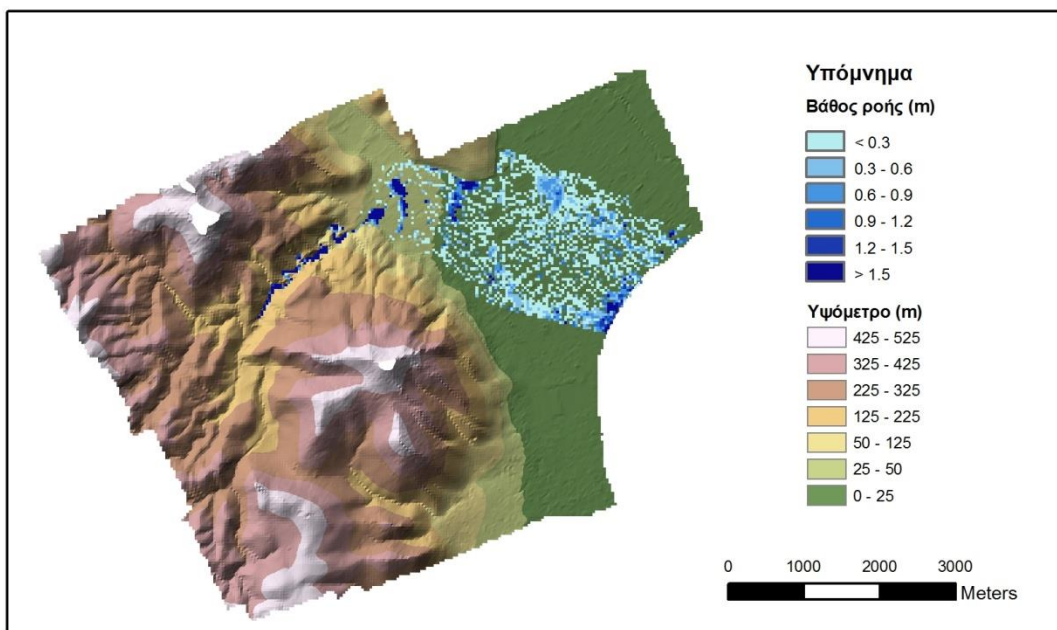
Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε μορφή χαρτών, όπως προέκυψαν από την επεξεργασία των αρχείων εξόδου στο ArcGIS.

6.2.1. Σενάριο περιόδου επαναφοράς 25 έτη

Στις *Εικόνες 6.1 & 6.2*, παρουσιάζονται οι παράγωγοι χάρτες με τα βάθη ροής της προσομοίωσης του σεναρίου για περίοδο επαναφοράς 25 ετών.



Εικόνα 6.1. Χάρτης βαθών βασικού μοντέλου για $T=25$ χρόνια



Εικόνα 6.2. Χάρτης βαθών εξεταζόμενου μοντέλου για $T=25$ χρόνια

Κατόπιν υπολογισμών σε περιβάλλον ArcGIS, όπως προαναφέρθηκε, ο δείκτης επίδοσης κατά Nash-Sutcliffe προσδιορίστηκε ως:

$$E = 0.569 ,$$

για τα βάθη ροής του στιγμιότυπου της 22:00, στο σενάριο της περιόδου επαναφοράς των 25 χρόνων.

- Μέσο βάθος ροής βασικού μοντέλου $y_{m25} = 0,648$ m
- Μέσο βάθος ροής εξεταζόμενου μοντέλου $y'_{m25} = 0,606$ m
- Σύνολο πλημμυρισμένων φατνίων βασικού μοντέλου: 2207
- Σύνολο πλημμυρισμένων φατνίων εξεταζόμενου μοντέλου: 2317

Η τιμή του συντελεστή επίδοσης E κρίνεται σχετικά ικανοποιητική, καθώς είναι θετική και μεγαλύτερη από 0,5. Αυτό σημαίνει πως το εξεταζόμενο αδρομερές μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διδιάστατη προσομοίωση πλημμυρικών γεγονότων, αποδίδοντας αποτελέσματα χωρίς έντονες διαφοροποιήσεις με αυτά του λεπτομερούς μοντέλου.

Στη σύγκριση μεταξύ των χαρτών του σεναρίου της περιόδου επαναφοράς $T=25$ χρόνια, διακρίνονται ορισμένες διαφοροποιήσεις μεταξύ τους.

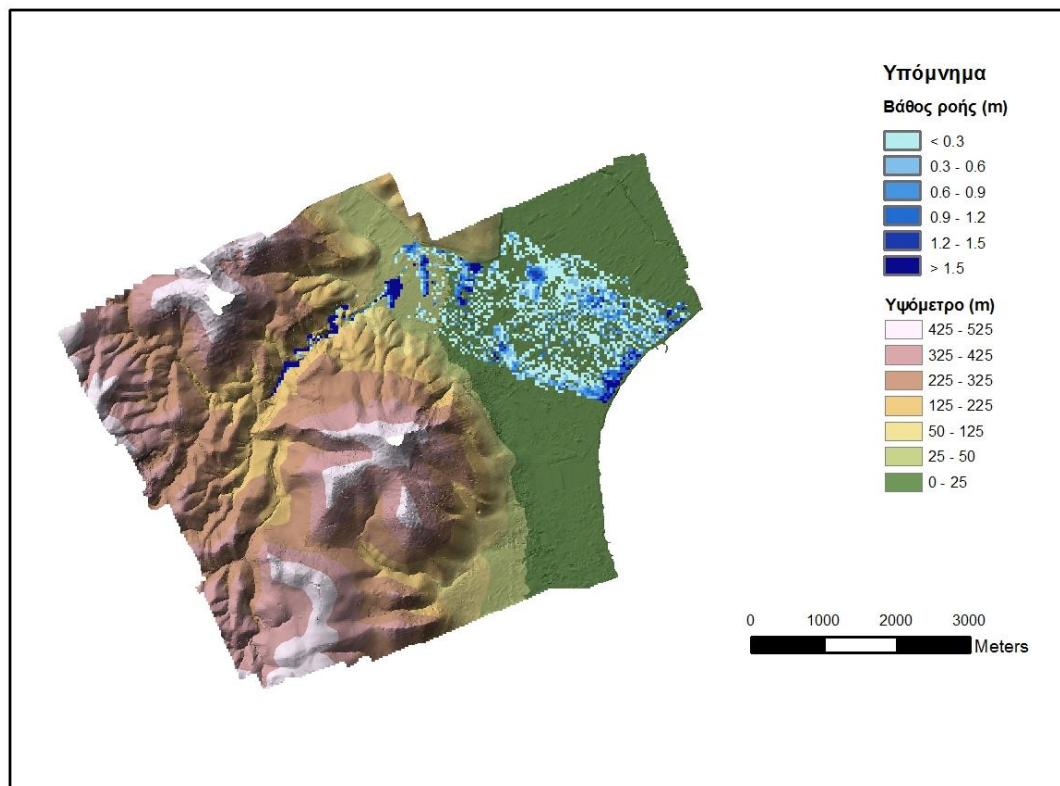
Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους χάρτες των βαθών ροής του σεναρίου της περιόδου επαναφοράς των 25 χρόνων, δείχνουν πως η συνολική έκταση των πλημμυρισμένων φατνίων είναι σχετικά ίση και στα δύο μοντέλα. Το εξεταζόμενο μοντέλο εμφανίζει λίγα περισσότερα φατνία που περιέχουν πληροφορία για το βάθος, άρα και συνολικά μεγαλύτερη έκταση πλημμύρας. Η διαφορά είναι συνολικά 110 φατνία (4,7%).

Η μέση τιμή των βαθών ροής στις δύο προσομοιώσεις έχει μια διαφορά περίπου 4 cm, ομοίως κι αυτή μικρή ποσοστιαία (6,2%). Τα βάθη ροής στο βασικό μοντέλο έχουν ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές.

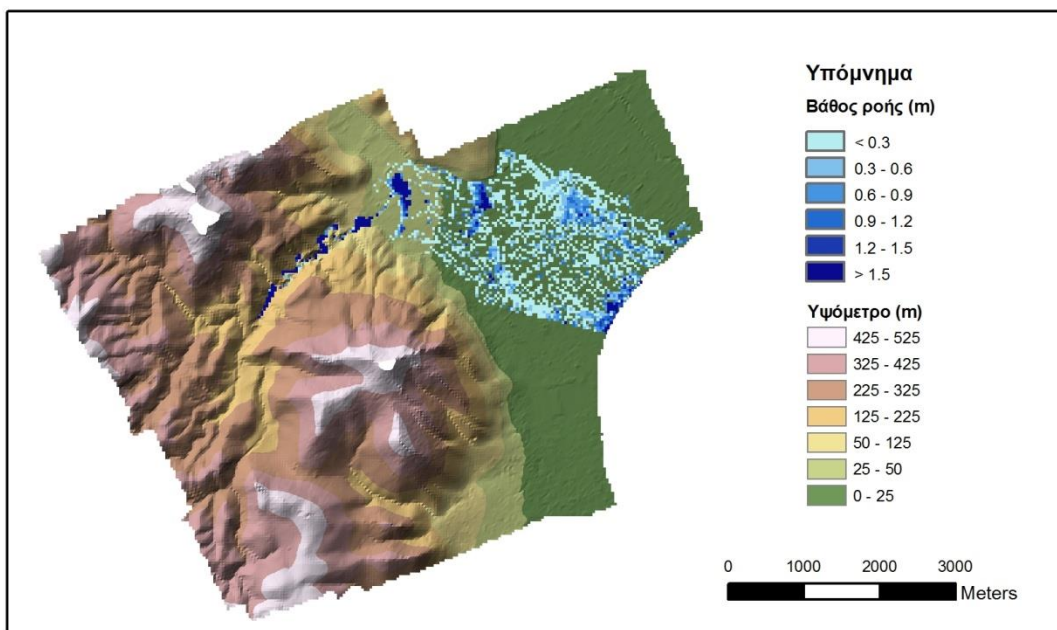
Αυτό σημαίνει πως το εξεταζόμενο αδρομερές αρχείο των καλύψεων-χρήσεων γης, ενώ δίνει ως αποτέλεσμα ελαφρώς μεγαλύτερη πλημμυρισμένη έκταση, ταυτόχρονα έχει μικρότερη μέση τιμή στα βάθη ροής των πλημμυρισμένων φατνίων.

6.2.2. Σενάριο περιόδου επαναφοράς 50 έτη

Στις *Εικόνες 6.3. & 6.4.* παρουσιάζονται οι παράγωγοι χάρτες με τα βάθη ροής της προσομοίωσης του σεναρίου της περιόδου επαναφοράς των 50 ετών.



Εικόνα 6.3. Χάρτης βαθών βασικού μοντέλου για T=50 χρόνια



Εικόνα 6.4. Χάρτης βαθών εξεταζόμενου μοντέλου για $T=50$ χρόνια

Κατόπιν υπολογισμών σε περιβάλλον ArcGIS, όπως προαναφέρθηκε, ο δείκτης επίδοσης κατά Nash-Sutcliffe προσδιορίστηκε ως:

$$E = 0,769 ,$$

για τα βάθη ροής του στιγμιότυπου της 22:00, στο σενάριο της περιόδου επαναφοράς των 50 χρόνων.

- Μέσο βάθος ροής βασικού μοντέλου: $y_{m50} = 0,671$ m
- Μέσο βάθος ροής εξεταζόμενου μοντέλου: $y'_{m50} = 0,619$ m
- Σύνολο πλημμυρισμένων φατνίων βασικού μοντέλου: 2284
- Σύνολο πλημμυρισμένων φατνίων εξεταζόμενου μοντέλου: 2363

Η τιμή του δείκτη επίδοσης Nash-Sutcliffe E κρίνεται αρκετά ικανοποιητική, καθώς είναι θετική και μεγαλύτερη από 0,7. Είναι αυξημένη κατά 0,2 από την αντίστοιχη τιμή του E για το σενάριο των 25 χρόνων.

Στα επιμέρους συμπεράσματα της προσομοίωσης των $T = 50$ χρόνων, ακολουθείται η ίδια λογική όπως φάνηκε και από τα αποτελέσματα της προηγούμενης προσομοίωσης των 25 χρόνων.

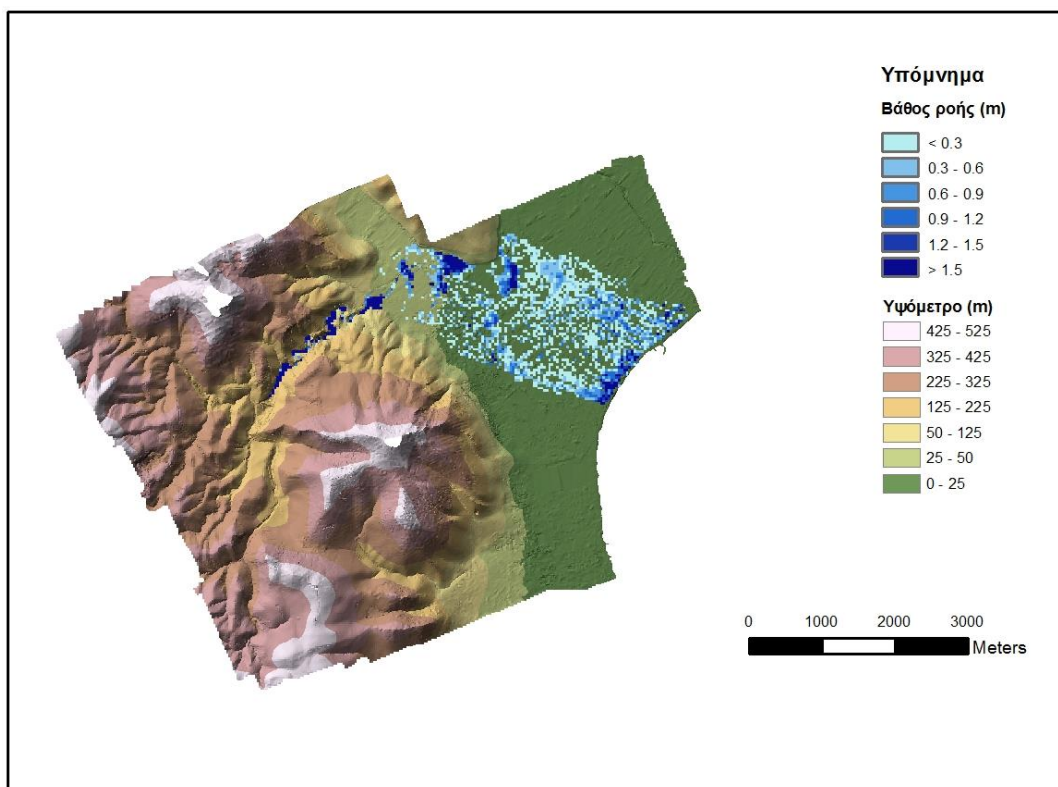
Η συνολική πλημμυρισμένη περιοχή είναι ελαφρώς μεγαλύτερη στο εξεταζόμενο μοντέλο, ενώ η μέση τιμή των βαθών ροής είναι μικρότερη συγκριτικά με το βασικό μοντέλο. Η διαφορά στον αριθμό των πλημμυρισμένων φατνίων είναι συνολικά 84 φατνία, μειωμένη και σε απόλυτο αριθμό και ποσοστιαία (3,6%) από την αντίστοιχη της προσομοίωσης των 25 χρόνων. Αντίθετα, η διαφορά στη μέση τιμή των βαθών ροής των δύο προσομοιώσεων αυξάνεται

ελάχιστα τόσο σε απόλυτο αριθμό στα 5,2cm όσο και ποσοστιαία (7,7%).

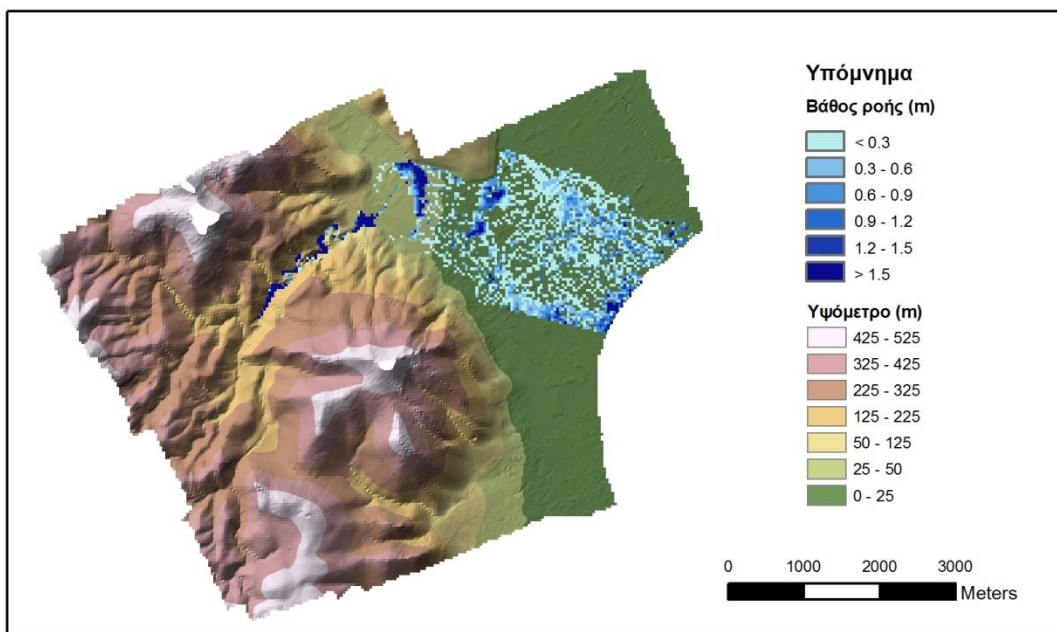
Γενικά, όπως είναι και λογικό, η πλημμυρισμένη έκταση στα σενάρια της $T=50$ είναι μεγαλύτερη από τα αντίστοιχα της $T=25$. Το ίδιο συμβαίνει και με τις τιμές των βαθών ροής στα φατνία που εμπεριέχουν σχετική πληροφορία.

6.2.3. Σενάριο περιόδου επαναφοράς 100 έτη

Στις *Εικόνες 6.5 & 6.6* παρουσιάζονται οι παράγωγοι χάρτες με τα βάθη ροής της προσομοίωσης του σεναρίου της περιόδου επαναφοράς των 100 ετών.



Εικόνα 6.5. Χάρτης βαθών βασικού μοντέλου για $T=100$ χρόνια



Εικόνα 6.6. Χάρτης βαθών εξεταζόμενου μοντέλου για $T=100$ χρόνια

Κατόπιν υπολογισμών σε περιβάλλον ArcGIS, όπως προαναφέρθηκε, ο δείκτης επίδοσης κατά Nash-Sutcliffe προσδιορίστηκε ως:

$$E = 0,837 ,$$

για τα βάθη ροής του στιγμιότυπου της 22:00, στο σενάριο της περιόδου επαναφοράς των 100 χρόνων.

- Μέσο βάθος ροής βασικού μοντέλου $y_{m100} = 0,738$ m
- Μέσο βάθος ροής εξεταζόμενου μοντέλου $y'_{m100} = 0,663$ m
- Σύνολο πλημμυρισμένων φατνίων βασικού μοντέλου: 2366
- Σύνολο πλημμυρισμένων φατνίων εξεταζόμενου μοντέλου: 2511

Η τιμή του δείκτη επίδοσης E κρίνεται αρκετά ικανοποιητική, καθώς είναι θετική και μεγαλύτερη από 0,8. Είναι η μεγαλύτερη τιμή που συναντάται στα τρία εξεταζόμενα μοντέλα. Αυτό σημαίνει πως το εξεταζόμενο μοντέλο της μεγαλύτερης περιόδου επαναφοράς ($T=100$ χρόνια) απέδωσε αποτελέσματα που προσεγγίζουν σημαντικά το βασικό μοντέλο του λεπτομερούς αρχείου.

Η σύγκριση μεταξύ των δύο προσομοιώσεων του συγκεκριμένου σεναρίου, αποφέρει αντίστοιχα συμπεράσματα με τις προηγούμενες των 25 και 50 χρόνων.

Η συνολική πλημμυρισμένη έκταση παραμένει μεγαλύτερη στο αδρομερές εξεταζόμενο μοντέλο έναντι του βασικού. Το αντίθετο παρατηρείται στις μέσες τιμές των βαθών ροής της περιοχής αυτής.

Στα αποτελέσματα σχετικά με τη συνολική πλημμυρισμένη έκταση εμφανίζεται η λογική τάση

της αύξησης αυτής και στα δύο μοντέλα όσο αυξάνεται η παροχή. Ο συνολικός αριθμός των πλημμυρισμένων φατνίων είναι 2511 για το εξεταζόμενο μοντέλο, αριθμός μεγαλύτερος κατά 145 από το σύνολο του βασικού μοντέλου.

Όσον αφορά τα μέσα βάθη ροής, το εξεταζόμενο αδρομερές μοντέλο αποδίδει πάλι μικρότερες τιμές κατά 7,5 cm, ποσοστιαία 10% σε σύγκριση με το βασικό.

6.2.4. Ανάλυση αποτελεσμάτων βαθών ροής

Σαν γενική παρατήρηση και στα τρία ζεύγη χαρτών, φαίνεται πως οι μεγαλύτερες τιμές των βαθών ροής εμφανίζονται στις ορεινές και ημιορεινές περιοχές ανάντη του υδατορέματος, όπου και οι κλίσεις είναι μεγαλύτερες. Στα πεδινά κατάντη ως και την θάλασσα όπου η έκταση είναι φυσικά πολύ μεγαλύτερη, οι τιμές είναι αισθητά μικρότερες.

Η συνολική έκταση της πλημμυρισμένης περιοχής καλύπτει πολύ μεγάλο τμήμα της περιοχής ενδιαφέροντος. Οι περιοχές που παραμένουν ανεπηρέαστες στο πεδινό τμήμα είναι κατά κύριο λόγο πολύγωνα εντός του οικιστικού δικτύου, και ανήκουν στις κατηγορίες των δομημένων περιοχών και των καλλιεργειών, στις οποίες ο συντελεστής τραχύτητας n είναι μεγαλύτερος.

Το σενάριο της περιόδου επαναφοράς για $T=25$ χρόνια έχει λιγότερα πλημμυρισμένα φατνία όπως προκύπτει στο raster αρχείο εξόδου, και είναι και εμφανές οπτικά στους παράγωγους χάρτες. Διαφοροποίηση υπάρχει και μεταξύ του ζεύγους χαρτών για την ίδια T , γεγονός που τονίζει τη σημασία του συντελεστή τραχύτητας Manning n , αλλά και τις διαφορές μεταξύ λεπτομερούς-αδρομερούς αρχείου καλύψεων γης. Στα σενάρια των μεγαλύτερων περιόδων επαναφοράς, η τιμή του συντελεστή Nash-Sutcliffe είναι αυξημένη με αυτή την τάση να είναι αισθητή, όπως φαίνεται διαγραμματικά και παρακάτω στην **Εικόνα 6.7**.



Εικόνα 6.7. Τιμές του συντελεστή E για τους χάρτες των βαθών ροής για διάφορες περιόδους επαναφοράς T

Το εύρημα των αποτελεσμάτων που αξίζει να αναλυθεί περισσότερο είναι η τάση που εμφανίζουν οι χάρτες με μεγαλύτερη συνολική πλημμυρισμένη έκταση, να έχουν παράλληλα μικρότερες μέσες τιμές βάθους ροής.

Αυτό εξηγείται από τη διαφορά στη λεπτομέρεια των καλύψεων γης σε ορισμένες ημιορεινές περιοχές ανάντη του ρέματος Βρανά, στις οποίες εντοπίζονται και έντονες εναλλαγές στην κλίση. Αυτές εμφανίζονται πλημμυρισμένες στο εξεταζόμενο αδρομερές μοντέλο, σε αντίθεση με το βασικό, στο οποίο η ψηφιοποίηση των χρήσεων γης έχει δώσει περισσότερα πολύγωνα με αυξημένους συντελεστές τραχύτητας, καθώς πρόκειται κατά κύριο λόγο για δασικές εκτάσεις. Αυτό αποτυπώνεται και οπτικά στους παράγωγους χάρτες.

Η διαφοροποίηση που προκύπτει στις μέσες τιμές των βαθών ροής εμφανίζεται με αυξανόμενη τάση στα σενάρια των τριών περιόδων επαναφοράς, όσο αυξάνεται η παροχή αιχμής. Στα πεδινά τμήματα κατάντη εντοπίζεται η μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των αποτελεσμάτων, η οποία εξηγεί και την τελική διαφορά στη μέση τιμή. Πολλά πολύγωνα χρήσεων γης κατάντη που ανήκουν στις κατηγορίες των θερμοκηπίων, των μη δομημένων περιοχών ή των δενδροφυτεύσεων έχουν μικρότερο συντελεστή τραχύτητας σε σχέση με τον αντίστοιχο του αδρομερούς μοντέλου. Αυτό αποδίδει και τις μεγαλύτερες τιμές βάθους ροής σε πολλά φατνία της βασικής προσομοίωσης.

Αναλύοντας τα παραγόμενα αποτελέσματα, είναι εμφανές πως οι διαφοροποιήσεις τόσο στις τελικές τιμές των βαθών ροής, όσο και στις συνολικές πλημμυρισμένες εκτάσεις οφείλονται αποκλειστικά στη διαφορά της λεπτομέρειας μεταξύ των αρχείων Land Cover του βασικού και του εξεταζόμενου μοντέλου.

6.3. Παράγωγοι χάρτες ταχυτήτων ροής

Η ίδια ακριβώς μεθοδολογία ακολουθήθηκε για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξάγονται για τις τιμές της ταχύτητας ροής σε κάθε σενάριο.

Στην εφαρμογή για την σύγκριση των ταχυτήτων, επιλέχθηκε προς σύγκριση η τιμή των μέγιστων ταχυτήτων (Max Velocity) των φατνίων κάθε πλάνου, και όχι κάποιου στιγμιότυπου του πλημμυρικού γεγονότος. Τα τρία σενάρια που συγκρίνονται παραμένουν τα ίδια.

Ο συντελεστής E είναι της μορφής:

$$E = 1 - \frac{\sum(V_i - V'_i)^2}{\sum(V_i - V_m)^2} \quad (25)$$

Όπου:

V_i : η τιμή της μέγιστης ταχύτητας V σε κάθε κελί i της Raster εικόνας, όπως προέκυψε για την εφαρμογή του εξεταζόμενου μοντέλου (Corine Land Cover 2000),

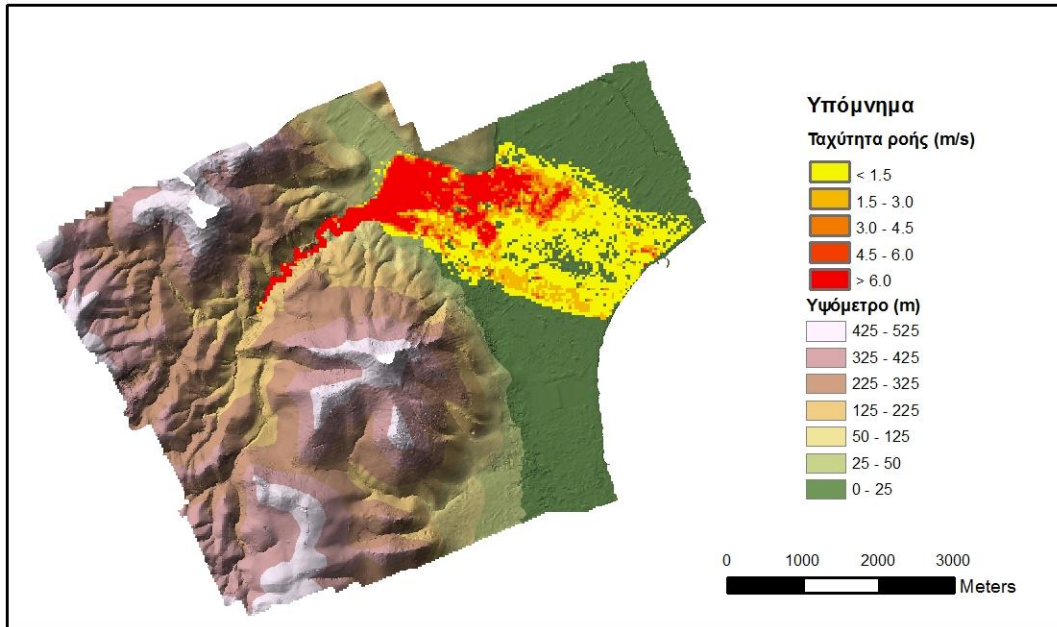
V'_i : η τιμή της μέγιστης ταχύτητας V σε κάθε κελί i της Raster εικόνας, όπως προέκυψε για την εφαρμογή του βασικού μοντέλου Land Cover της ψηφιοποίησης,

V_m : η μέση τιμή της μέγιστης ταχύτητας V για το Raster αρχείο της εφαρμογής του εξεταζόμενου μοντέλου (Corine Land Cover 2000).

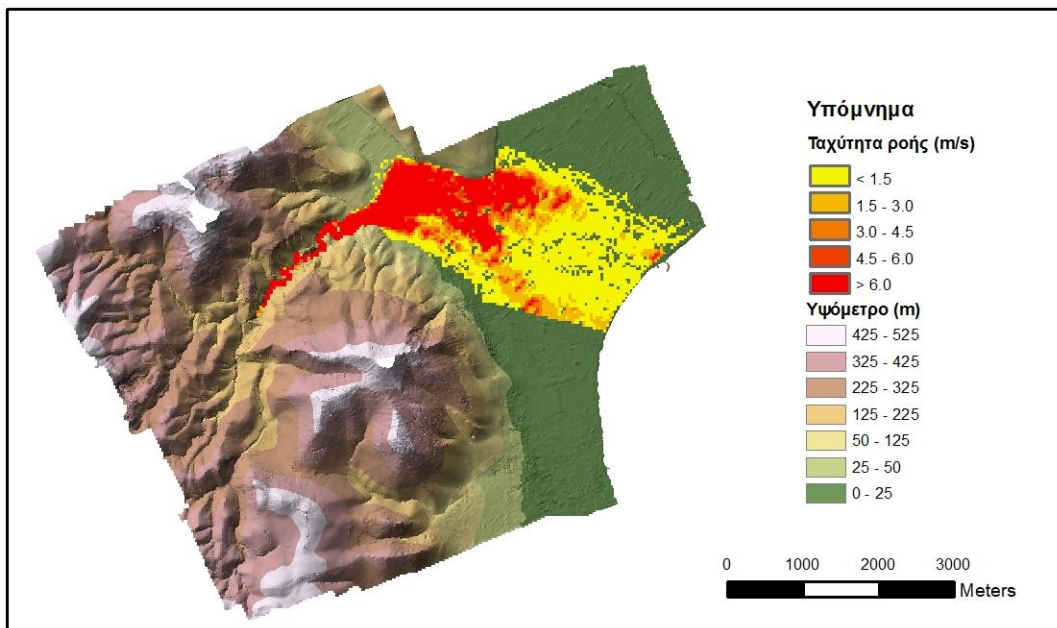
Στις επόμενες παραγράφους παρατίθενται οι χάρτες των μέγιστων ταχυτήτων, όπως παρήχθησαν από την εφαρμογή των προσομοιώσεων στο HEC-RAS και την μετέπειτα επεξεργασία τους στο ArcGIS, καθώς και οι τιμές του δείκτη επίδοσης E, όπως προσδιορίστηκε για κάθε εφαρμογή και σενάριο ξεχωριστά.

6.2.5. Σενάριο περιόδου επαναφοράς 25 έτη

Στις **Εικόνες 6.8 & 6.9** παρουσιάζονται οι παράγωγοι χάρτες με τις μέγιστες ταχύτητες ροής της προσομοίωσης του σεναρίου της περιόδου επαναφοράς των 25 ετών.



Εικόνα 6.8. Χάρτης μέγιστων ταχυτήτων ροής βασικού μοντέλου για $T=25$ χρόνια



Εικόνα 6.9. Χάρτης μέγιστων ταχυτήτων ροής εξεταζόμενου μοντέλου για $T=25$ χρόνια

Κατόπιν υπολογισμών σε περιβάλλον ArcGIS, όπως προαναφέρθηκε, ο συντελεστής Nash-Sutcliffe προσδιορίστηκε ως:

$$E = 0,8,$$

για τις τιμές των μέγιστων ταχυτήτων ροής που εμφανίζονται στο σενάριο της περιόδου

επαναφοράς για $T = 25$ χρόνια.

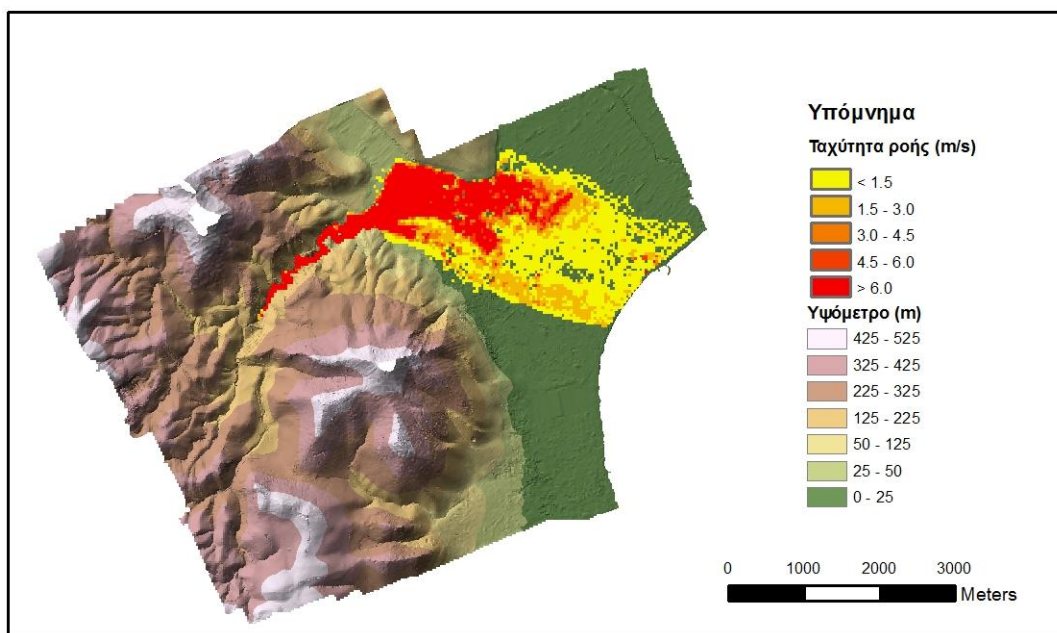
Η τιμή του δείκτη Nash-Sutcliffe κρίνεται αρκετά ικανοποιητική, καθώς είναι θετική και οριακά μεγαλύτερη από 0,8. Αυτό δείχνει πως το εξεταζόμενο μοντέλο προσεγγίζει τα αποτελέσματα του βασικού, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προσομοιώσεις χωρίς μεγάλες αποκλίσεις στα εξαγόμενα συμπεράσματα.

Οι μόνες διαφοροποιήσεις που συναντώνται στη σύγκριση των προσομοιώσεων αυτού του σεναρίου φαίνονται και οπτικά με τις χρωματικές διαβαθμίσεις στους δύο παράγωγους χάρτες. Το εξεταζόμενο μοντέλο εμφανίζει οριακά μεγαλύτερες μέγιστες ταχύτητες ροής σε περισσότερα φατνία στα κατάντη, παρ'ολ'αυτά δεν αποτυπώνεται κάποια έντονη μεταβολή.

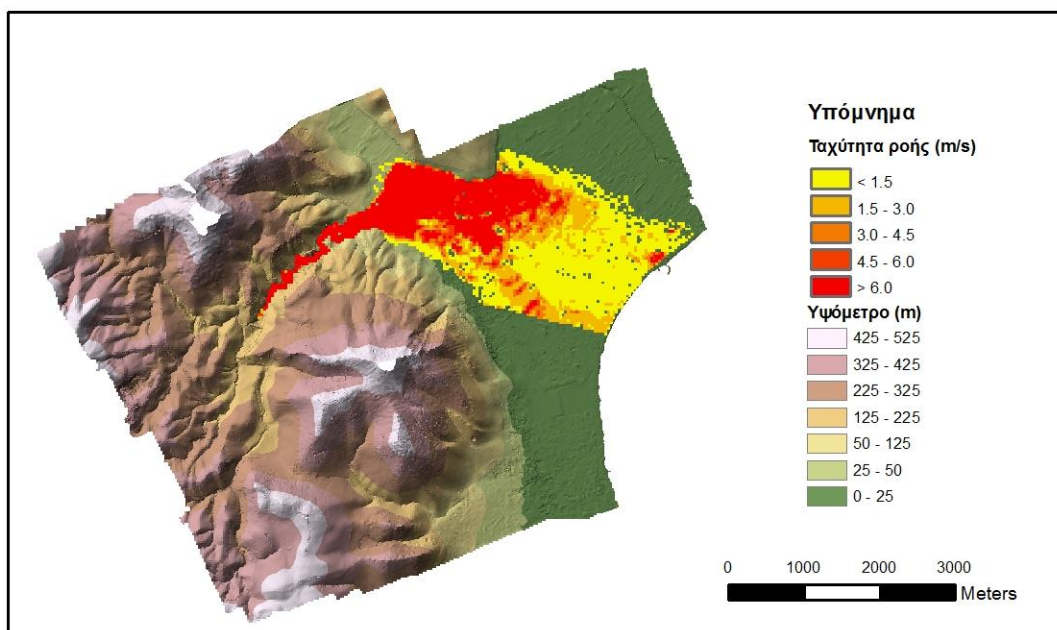
Το κίτρινο χρώμα χρησιμοποιείται για τις πολύ μικρές ταχύτητες ροής. Να αναφερθεί πως σε πολλά πεδινά και εντός οικιστικού δικτύου φατνία η τιμή της ταχύτητας προσεγγίζει το μηδέν (0) και στους δύο χάρτες.

6.2.6. Σενάριο περιόδου επαναφοράς 50 έτη

Στις *Εικόνες 6.10 & 6.11* παρουσιάζονται οι παράγωγοι χάρτες με τα βάθη ροής της προσομοίωσης του σεναρίου της περιόδου επαναφοράς των 50 ετών.



Εικόνα 6.10. Χάρτης μέγιστων ταχυτήτων ροής βασικού μοντέλου για $T=50$ χρόνια



Εικόνα 6.11. Χάρτης μέγιστων ταχυτήτων ροής εξεταζόμενου μοντέλου για $T=50$ χρόνια

Κατόπιν υπολογισμών σε περιβάλλον ArcGIS, όπως προαναφέρθηκε, ο δείκτης επίδοσης κατά Nash-Sutcliffe προσδιορίστηκε ως:

$$E = 0,838 ,$$

για τις τιμές των μέγιστων ταχυτήτων ροής που εμφανίζονται στο σενάριο της περιόδου επαναφοράς $T = 50$ χρόνια.

Η τιμή που λαμβάνει ο δείκτης Nash-Sutcliffe στο συγκεκριμένο σενάριο κρίνεται πολύ ικανοποιητική, ενώ είναι η μεγαλύτερη που έχει καταγραφεί μέχρι τώρα στα εξεταζόμενα μοντέλα που προσομοιώθηκαν.

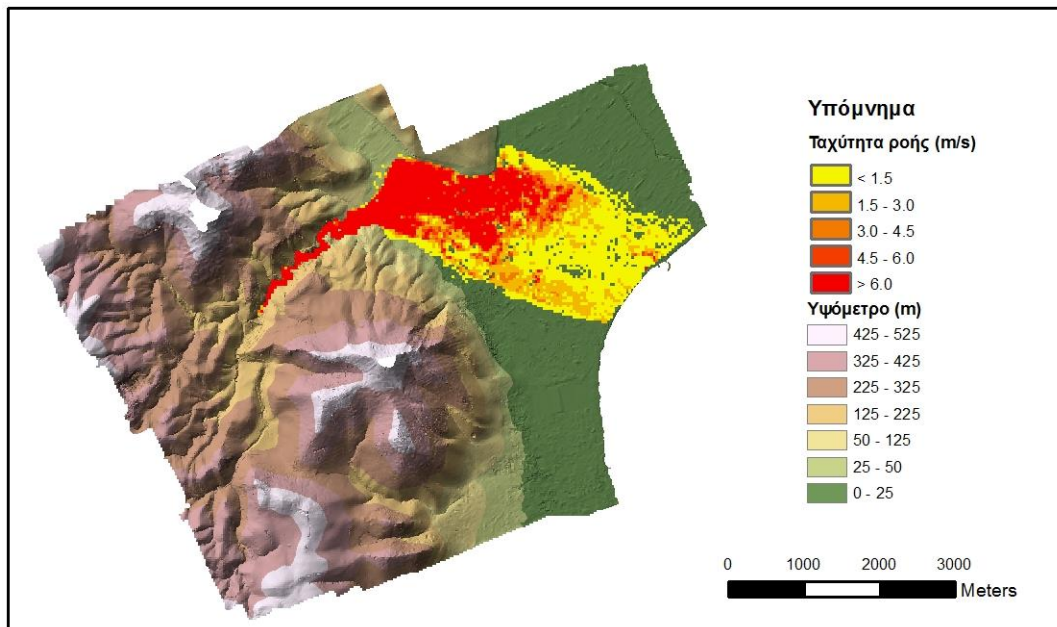
Ομοίως με την προηγούμενη προσομοίωση των μέγιστων ταχυτήτων ροής της περιόδου επαναφοράς των $T=25$ χρόνων, τα αποτελέσματα δεν εμφανίζουν ιδιαίτερες αποκλίσεις μεταξύ των δύο μοντέλων.

Παραμένει η διαφοροποίηση στα πεδινά φατνία κατάντη του ρέματος, στα οποία το εξεταζόμενο μοντέλο εμφανίζει οριακά μεγαλύτερες τιμές. Αυτά αποτυπώνονται οπτικά σε πιο έντονο κόκκινο χρώμα.

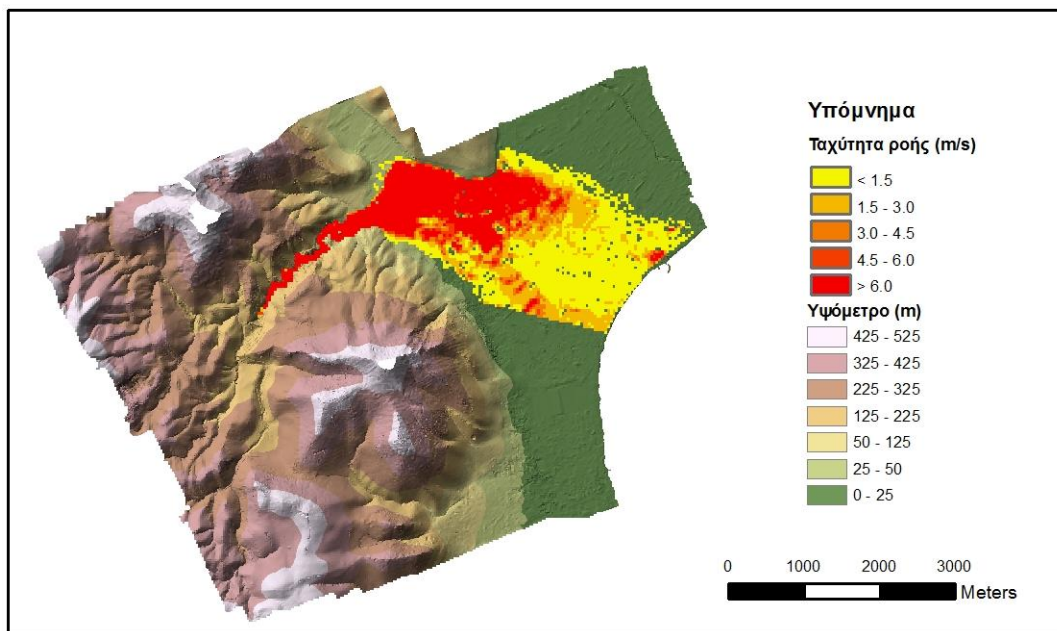
Όπως και στο σενάριο των $T=25$ χρόνων, η ταχύτητα ροής σε πολλά πεδινά και οικιστικά τμήματα της περιοχής ενδιαφέροντος προσεγγίζει το μηδέν (0).

6.2.7. Σενάριο περιόδου επαναφοράς 100 έτη

Στις **Εικόνες 6.12 & 6.13** παρουσιάζονται οι παράγωγοι χάρτες με τις μέγιστες ταχύτητες ροής της προσομοίωσης του σεναρίου της περιόδου επαναφοράς των 100 ετών.



Εικόνα 6.12. Χάρτης μέγιστων ταχυτήτων ροής βασικού μοντέλου για $T=100$ χρόνια



Εικόνα 6.13. Χάρτης μέγιστων ταχυτήτων ροής εξεταζόμενου μοντέλου για $T=100$ χρόνια

Κατόπιν υπολογισμών σε περιβάλλον ArcGIS, όπως προαναφέρθηκε, ο συντελεστής κατά Nash-Sutcliffe προσδιορίστηκε ως:

$$E = 0,837,$$

για τις τιμές των μέγιστων ταχυτήτων ροής που εμφανίζονται στο σενάριο της περιόδου επαναφοράς $T = 100$ χρόνια.

Η τιμή του δείκτη επίδοσης κατά Nash-Sutcliffe E παραμένει στα επίπεδα της προηγούμενης σύγκρισης, άνω του 0,8, και άρα κρίνεται πολύ ικανοποιητική.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα όπως αποτυπώνονται οπτικά στους παράγωγους χάρτες των εικόνων 6.11 και 6.12, φαίνεται πως ακολουθείται η ίδια λογική με τις συγκρίσεις των προσομοιώσεων για τα 25 και τα 50 χρόνια.

Ως μοναδική διαφοροποίηση παραμένει η απόκλιση μεταξύ των τιμών σε κάποια πεδινά φατνία εντός ή πέριξ του οικιστικού δικτύου.

Ακόμη και στο σενάριο της περιόδου επαναφοράς των 100 χρόνων, όπου εισάγεται η μεγαλύτερη παροχή αιχμής, πολλά φατνία στα κατάντη του ρέματος εμφανίζουν τελικές τιμές μέγιστης ταχύτητας να προσεγγίζουν το μηδέν (0).

6.3.1. Ανάλυση αποτελεσμάτων μέγιστων ταχυτήτων ροής

Αναλύοντας τα τελικά αποτελέσματα όσον αφορά τις μέγιστες ταχύτητες ροής, είναι ξεκάθαρο και οπτικά πως οι μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται και σε αυτή την περίπτωση στα ορεινά και ημιορεινά ανάντη του υδατορέματος (περιοχή υψηλών κλίσεων). Αντίθετα, στα κατάντη πεδινά (περιοχή χαμηλών κλίσεων) οι ταχύτητες μειώνονται κατά πολύ, ενώ σε ορισμένα φατνία προσεγγίζουν το μηδέν. Αυτή η τάση καταγράφεται και στα τρία ζεύγη χαρτών, όπως αυτά προέκυψαν για κάθε περίοδο επαναφοράς T .

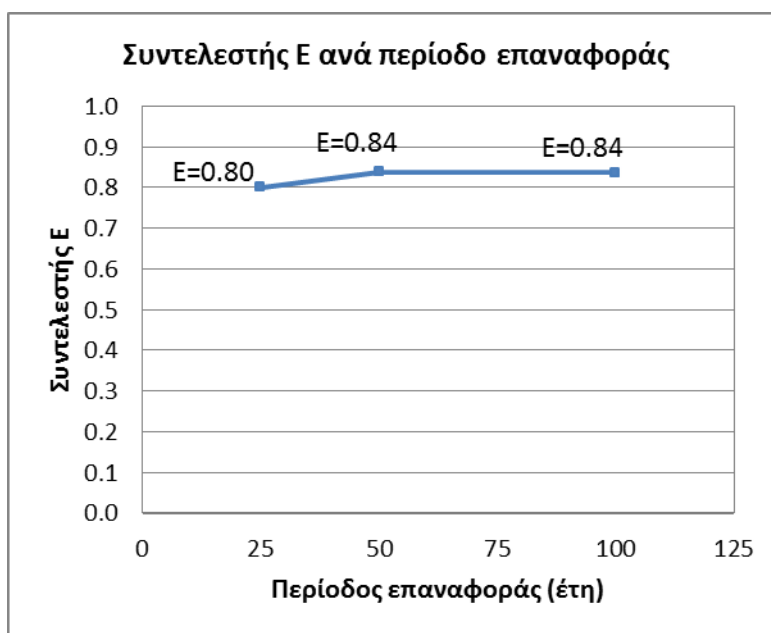
Γενικά, και τα δύο μοντέλα αποδείχθηκαν ευάλωτα στην εμφάνιση ακραίων τιμών, ειδικά στις ορεινές ανάντη περιοχές. Αυτό οφείλεται κατά βάση στα δεδομένα εδάφους (DTM) και στην ανάλυση-ακρίβεια τους

Η διαφοροποίηση μεταξύ των αποτελεσμάτων έγκειται κυρίως στις τιμές της ταχύτητας, ειδικά στο τμήμα της περιοχής που είναι έντονη η εναλλαγή στην κλίση του εδάφους και στα πεδινά. Το πρώτο αυτό τμήμα συμπίπτει με το τμήμα των έντονων εναλλαγών και στις χρήσεις γης, καθώς εμφανίζεται η ανθρώπινη δραστηριότητα με πολύγωνα καλλιεργειών, θερμοκηπίων και δομημένων περιοχών. Οι μέγιστες ταχύτητες σε αυτές τις περιοχές έχουν αισθητά μεγαλύτερες τιμές στα σενάρια των περιόδων επαναφοράς 50 και 100 χρόνων.

Μεταξύ του κάθε ζεύγους χαρτών για την ίδια περίοδο επαναφοράς T δεν προκύπτουν έντονες διαφοροποιήσεις, κάτι που φαίνεται και οπτικά. Στα αποτελέσματα του εξεταζόμενου μοντέλου (Corine Land Cover 2000) εμφανίζονται ορισμένες μεγαλύτερες τιμές των μέγιστων

ταχυτήτων σε πεδινές περιοχές κατάντη, αλλά η τάση αυτή είναι οριακά ανεπαίσθητη. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το αποτέλεσμα του συντελεστή E για κάθε εξεταζόμενο μοντέλο, αλλά και από τη διαφορά μεταξύ των μέσων τιμών κάθε προσομοίωσης.

Η διαφορετική προσέγγιση που ακολουθήθηκε στην εξαγωγή αποτελεσμάτων για τις ταχύτητες ροής, φαίνεται πως αποτυπώνεται και στις τιμές του δείκτη επίδοσης μοντέλων κατά Nash-Sutcliffe E . Η επιλογή να εξεταστούν οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας, και όχι ένα στιγμιότυπο κατά τη διάρκεια του γεγονότος, απέδωσε και μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή E σε όλα τα σενάρια που προσομοιώθηκαν. Οι τρεις τιμές που προέκυψαν είναι θετικές, μεγαλύτερες από 0,8 και κοντινές μεταξύ τους όπως αποτυπώνεται διαγραμματικά και παρακάτω στο **Εικόνα 6.14**.



Εικόνα 6.14. Τιμές του συντελεστή E για τους χάρτες των μέγιστων ταχυτήτων ροής για διάφορες περιόδους επαναφοράς T

Σε όλα τα σενάρια των προσομοιώσεων των μέγιστων ταχυτήτων, τα εξεταζόμενα μοντέλα αποδίδουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο των συμπερασμάτων που εξάγονται από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, γίνεται μια διάκριση μεταξύ των χαρτών των βαθών και των αντίστοιχων των ταχυτήτων ροής.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως τα πολύγωνα κάλυψης γης και οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning n σε αυτά, είναι επί της ουσίας το μοναδικό δεδομένο εισόδου που μεταβάλλεται. Ως γενικό συμπέρασμα λοιπόν, αρχικά πρέπει να αναφερθεί η σημασία του συντελεστή αυτού όπως φαίνεται στα αποτελέσματα που προκύπτουν, καθώς όλες οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των παράγωγων χαρτών οφείλονται στην ευρύτητα των τιμών του n όπως εισάγονται στο βασικό αρχείο Land-Cover, σε αντίθεση με το εξεταζόμενο.

Επίσης, ως γενικό συμπέρασμα μετά την εφαρμογή όλων των πλάνων των προσομοιώσεων δισδιάστατης ροής, πρέπει να αναφερθεί ο υπολογιστικός χρόνος των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

Ο υπολογιστικός χρόνος στο ArcGIS ήταν ελάχιστος, όπως και η διαδικασία της επεξεργασίας και παραγωγής των τελικών χαρτών.

Ο υπολογιστικός χρόνος στο HEC-RAS κρίνεται πολύ ικανοποιητικός. Συγκεκριμένα, η δισδιάστατη προσομοίωση για κάθε σχέδιο (plan) κυμάνθηκε από 12 έως 16 λεπτά. Ελάχιστος χρόνος απαιτήθηκε και για τη δημιουργία του δισδιάστατου πλέγματος παρά τη μεγάλη έκταση.

Σημαντικό ως προς τις καλές χρονικά επιδόσεις του HEC-RAS είναι η επιλογή του σωστού χρονικού υπολογιστικού βήματος, καθώς και τα δεδομένα εδάφους που χρησιμοποιήθηκαν. Σε περίπτωση ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους καλύτερης ανάλυσης, οι υπολογιστικοί χρόνοι θα είχαν αυξηθεί, όχι όμως σε μη-ικανοποιητικό επίπεδο.

7.1. Βάθη ροής

Στα αποτελέσματα όπως εμφανίζονται στους παράγωγους χάρτες των βαθών, ο συντελεστής επίδοσης E παρουσιάζει την πιο χαμηλή τιμή του για το σενάριο της περιόδου επαναφοράς των 25 χρόνων ($E = 0.569$).

Η τιμή του συντελεστή E είναι ο δείκτης, βάσει του οποίου αναλύεται η αποδοτικότητα του εξεταζόμενου μοντέλου.

Ως συμπέρασμα προκύπτει πως στη μικρότερη περίοδο επαναφοράς παρατηρείται η μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο προσομοιώσεων. Στα σενάρια των $T=50$ και $T=100$ χρόνια, οι αποκλίσεις μεταξύ των μοντέλων είναι μικρότερες.

Η χρήση ενός αδρομερούς αρχείου καλύψεων-χρήσεων γης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προσομοιώσεις δισδιάστατης ροής και πλημμυρικά γεγονότα, με τα αποτελέσματα που θα παράγει να έχουν μικρή απόκλιση από αυτά των λεπτομερέστερων χαρτών, ειδικά σε περιπτώσεις σεναρίων μεγάλων περιόδων επαναφοράς.

Η εξήγηση αυτού του φαινομένου, προκύπτει από το γεγονός πως στις μεγαλύτερες περιόδους επαναφοράς, οι τιμές των βαθών είναι μεγαλύτερες στην περιοχή ενδιαφέροντος, όπως επίσης και η συνολική έκταση που επηρεάζεται από τις πλημμυρικές ροές. Αυτό σημαίνει αυτόματα και περισσότερα "πλημμυρισμένα" φατνία Raster τα οποία εμπεριέχουν πληροφορία για το βάθος ροής (τιμή βάθους ροής $y > 0$). Η αύξηση του συνόλου των συγκρινόμενων τιμών βαθών (Σy_i) που εισέρχονται στον μαθηματικό τύπο για τον υπολογισμό του συντελεστή E λειτουργεί θετικά, αυξάνοντας την τελική τιμή του. Καθίσταται έτσι το μοντέλο λιγότερο ευάλωτο σε πιθανά σφάλματα του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, καθώς και αστάθειες κατά την εφαρμογή του HEC-RAS, όπως ακραίες τιμές.

Ένα ειδικότερο συμπέρασμα που προκύπτει αναλύοντας τα αποτελέσματα, είναι πως η διαφορά στην έκταση της πλημμυρισμένης περιοχής, συνεπάγεται μικρές σχετικά τιμές βάθους ροής για όσα φατνία επηρεάζονται μόνο στα σενάρια των μεγαλύτερων περιόδων επαναφοράς. Συγκεκριμένα, τα πλημμυρισμένα φατνία του σεναρίου της $T=100$ χρόνια είναι 10% περισσότερα από την προσομοίωση για $T=25$ χρόνια. Οι τιμές του βάθους ροής στις περιοχές αυτές είναι στην συντριπτική τους πλειονότητα χαμηλές ($< 0,3m$), άρα και οι διαφορές μεταξύ των τιμών του εξεταζόμενου μοντέλου με το βασικό ($y_i - y_i'$) είναι ελάχιστες.

Τα αποτελέσματα των συντελεστών είναι επαρκώς ικανοποιητικά όσον αφορά τα εξεταζόμενα βάθη ροής. Συνεπώς, η χρήση ενός αδρομερούς αρχείου καλύψεων γης μπορεί να γίνει χωρίς ιδιαίτερες συνέπειες στο παραγόμενο αποτέλεσμα του εξεταζόμενου μοντέλου, ειδικά όταν η μελέτη γίνεται για πλημμυρικά φαινόμενα μεγάλων περιόδων επαναφοράς με μεγαλύτερες παροχές και η εξεταζόμενη περιοχή ενδιαφέροντος είναι μεγάλη σε έκταση και χαμηλών κλίσεων.

7.2. Μέγιστες ταχύτητες ροής

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων στους χάρτες των μέγιστων ταχυτήτων, έρχονται συμπληρωματικά σε αυτά που αναφέρθηκαν ανωτέρω για τα βάθη ροής.

Συγκεκριμένα, είναι ξεκάθαρο πως η επιλογή να αναλυθούν οι μέγιστες ταχύτητες κάθε σεναρίου παρήγαγε μεγαλύτερο πλήθος αποτελεσμάτων, ακόμα και για την περίοδο επαναφοράς των 25 χρόνων. Αυτό απέδωσε στην αύξηση της τιμής του δείκτη επίδοσης μοντέλων κατά Nash-Sutcliffe για κάθε εξεταζόμενο μοντέλο. Για τον ίδιο λόγο, εμφανίστηκαν επίσης πολλές περισσότερες ακραίες τιμές.

Οι τιμές του συντελεστή E είναι παρόμοιες και για τα τρία ζεύγη των παράγωγων χαρτών. Από αυτό το στοιχείο, ένα ειδικότερο συμπέρασμα που εξάγεται, είναι πως η αποδοτικότητα του εξεταζόμενου μοντέλου ανά περίπτωση, δεν επηρεάζεται αρνητικά από τις μεγάλες τιμές των ταχυτήτων στα φατνία. Αυτό ισχύει, καθώς οι τιμές στα αντίστοιχα φατνία μεταξύ του βασικού και του εξεταζόμενου μοντέλου δεν έχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις, ανεξάρτητα της παροχής και της περιόδου επαναφοράς. Τα δύο μοντέλα των διαφορετικών χρήσεων γης συμπεριφέρονται αναλόγως στην προσομοίωση της δισδιάστατης ροής και στα τρία σενάρια.

Οι προσομοιώσεις δισδιάστατης ροής που πραγματοποιήθηκαν, θα παρείχαν αρτιότερα

αποτελέσματα με δεδομένα εδάφους καλύτερης ανάλυσης.

7.3. Γενικό συμπέρασμα αποδοτικότητας αδρομερούς μοντέλου

Η χρήση ενός αδρομερούς αρχείου καλύψεων γης, αποφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε πολύ μεγάλο βαθμό. Κρίνεται αποδοτική, ειδικά στο πεδίο της ανάλυσης των μέγιστων ταχυτήτων ροής, με την σημαντική προϋπόθεση να έχει γίνει ορθή επιλογή του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning n .

Σε περιπτώσεις μη ύπαρξης λεπτομερούς χάρτη καλύψεων και χρήσεων γης, ο ερευνητής έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει ένα αδρομερέστερο αρχείο. Η προσομοίωση πλημμυρικών γεγονότων μπορεί να γίνει και με λιγότερα στοιχεία σχετικά με την εδαφοκάλυψη, παρέχοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα, ειδικά σε σενάρια περιόδων επαναφοράς με μεγάλες παροχές σχεδιασμού.

Η διαπίστωση αυτή λαμβάνει υπόψη προφανώς τη μοναδικότητα της περιοχής μελέτης και των γενικότερων χαρακτηριστικών αυτής, καθώς επίσης και τα στοιχεία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και της εδαφοκάλυψης. Παρ'όλα αυτά, η διαφορά στην ποσοτική και ποιοτική λεπτομέρεια μεταξύ των δύο συγκρινόμενων μοντέλων είναι πολύ μεγάλη, και άρα οι τελικές τιμές του συντελεστή επίδοσης Nash-Sutcliffe που προκύπτουν κρίνονται επαρκέστατες και ενθαρρυντικές.

7.4. Μελλοντική έρευνα

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η διερεύνηση της αποδοτικότητας του συγκεκριμένου μοντέλου στην περιοχή της Ραπεντώσας στην Ανατολική Αττική, και η κατάρτιση πλημμυρικών χαρτών με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Σε κάθε περίπτωση, η εφαρμογή των συγκεκριμένων σεναρίων στην περιοχή μελέτης της διπλωματικής εργασίας δεν είναι επαρκής συνθήκη για την παραγωγή ολοκληρωμένων συμπερασμάτων σε ένα τέτοιο θέμα. Κάτι τέτοιο χρήζει εκτενέστερης επιστημονικής μελέτης και έρευνας μελλοντικά, με εφαρμογή και σε άλλες λεκάνες απορροής και περιοχές ενδιαφέροντος με διαφορετικά χαρακτηριστικά, για διάφορα σενάρια περιόδων επαναφοράς.

Οι διαφορές ενός μοντέλου δεν περιορίζονται μόνο στα χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής μελέτης, αλλά και σε διάφορα άλλα στοιχεία που επηρεάζουν το τελικό προϊόν της προσομοίωσης. Τέτοια στοιχεία είναι, για παράδειγμα, τα δεδομένα ροής και η ένταση του εξεταζόμενου φαινομένου, καθώς και η ποιότητα των δεδομένων εδάφους, τα οποία και αποτελούν αντικείμενο μελλοντικής μελέτης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

Δρόσου Αθ. (2015), Κατάρτιση πλημμυρικών χαρτών στον Άραχθο ποταμό, Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Ειδική Γραμματεία Υδάτων, ΥΠΕΚΑ (2012), Προκαταρκτική Αξιολόγηση Κινδύνων Πλημμύρας, Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/ΕΚ, κεφ. Ι, άρθρο 2.

Κέντρο εκτίμησης φυσικών κινδύνων και προληπτικού σχεδιασμού (2006), Για τις πλημμύρες στο Μαραθώνα Αττικής 22 – 25 Νοεμβρίου 2005, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Μαμάσης Ν. (2012), Πλημμύρες - Εκτίμηση πλημμυρικών αιχμών, Διδακτικές Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Νουτσόπουλος Γ. και Χριστοδούλου Γ. (1996), "Μαθήματα Μηχανικής Ρευστών", Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

Οικονόμου Αθ. (2013), Διερεύνηση λειτουργίας λογισμικών υδραυλικής προσομοίωσης στην εξέλιξη πλημμυρικής κατάκλισης, Εφαρμογή στην πεδιάδα της Θεσσαλίας. Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Παπανικολάου Π. (2012), Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση και αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια, Διδακτικές Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Τερζίδης, Γ. (1997), Εφαρμοσμένη Υδραυλική, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Τσακίρης Γ. (1995), Υδατικοί Πόροι 1: Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

Ξενόγλωσση

Alcrudo F. (2004), A state of the art review on mathematical modelling of flood propagation, IMPACT project, pp 4:6.

Barredo J.I. (2007), Major flood disasters in Europe: 1950–2005, Natural Hazards Vol.42, Issue 1, pp 125:148

Brisbane City Council (2003), "Natural Channel Design Guidelines", Appendix C, pp 138:140.

Chow, V.T. (1959), Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Company, pp 98:114.

Commission of the European Communities (2004), Flood risk management - Flood prevention, protection and mitigation, Brussels, pp 2:3.

Copernicus Program (2015), Corine Land Cover 2012 V.2, European Commission, pp 10(15).

Cowan, W.L. (1956), Estimating Hydraulic Roughness Coefficients, Agricultural Engineering, Vol. 37, pp 473:475.

Dankers R. , Feyen L. (2008), Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high-resolution climate simulation, Journal of Geophysical Research Atmospheres vol.113, issue D19.

European Environment Agency (2011), Annual report of 2010, Publications Office of the European Union, pp 25.

European Environment Agency (2003), State of the environment report No.3, Europe's environment: the third assessment, pp 169:171.

French, R. H., (1994), Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Company.

Genovese E. (2006), A methodological approach to land use-based flood damage assessment in urban areas: Prague case study, IES-JRC European Commission, pp 20.

Kaiser G. , Scheele L. , Kortenhaus A. , Løvholt F. , Romer H., Leschka S. (2011), The influence of land cover roughness on the results of high resolution tsunami inundation modeling, Natural Hazards and Earth System Sciences 11, pp 2521-2540.

Mockus V. McKeever V. Owen W. Rallison R., U.S.D.A. Soil Conservation Service (1972), National Engineering Handbook, Section 4, pp 21.2:21.8.

Pestana R. , Matias M. , Canelas R. , Araújo A. , Roque D. , Van Zeller E. , Trigo-Teixeira A. , Ferreira, R. , Oliveira, R. , Heleno, S. (2013), Calibration of 2D hydraulic inundation models in the floodplain region of the lower Tagus river, ESA Living Planet Symposium, Proceedings of the 2013 conference at Edinburgh, United Kingdom, ESA SP-722. 2-13, p.90

Pilon P.J. (2003), Guidelines for reducing flood losses, report, UN DESA (Department of Economic and Social Affairs), WMO (World Meteorological Organization), Geneva.

Smith M.J., Asal F.F.F., Priestnall G. (2003), The use of photogrammetry and lidar for landscape roughness estimation in hydrodynamic studies, ISPRS , XXXB, part B3, pp.714-719.

Thomsen B.W., Hjalmarson H.W. (1991), Estimated Manning's Roughness Coefficients for Stream Channels and Flood Plains in Maricopa County, Report to the Flood Control District of Maricopa County.

Tsakiris G. (2007), DISMA - Disaster Management GIS with emphasis on cultural sites - Technical Report Volume I.

Tsakiris G. (2007), DISMA - Disaster Management GIS with emphasis on cultural sites - Technical Report Volume II.

US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center

(2016), HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual Version 5.0.

US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center
(2016), HEC-RAS River Analysis System User's Manual Version 5.0.

U.S. Department of the Interior - Bureau of Reclamation (1977), Design of Small Dams, Water Resources Technical Publication, Revised Reprint.

Yan Huang (2005), Appropriate modeling for integrated flood risk assessment, University of Twente, Netherlands.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Υδρογραφήματα Σχεδιασμού για τα σενάρια των περιόδων επαναφοράς που προσομοιώθηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας.

➤ T = 25 χρόνια

t (hrs)	Q (m ³ /s)
0	0
0,5	10,16
1	30,66
1,5	44,87
2	52,68
2,5	53,97
3	55,07
3,5	56,25
4	57,5
4,5	58,84
5	60,29
5,5	61,85
6	63,54
6,5	65,39
7	67,41
7,5	69,64
8	71,84
8,5	73,69
9	75,63
9,5	78,22
10	81,58
10,5	85,68
11	91,81
11,5	99,92
12	103,82
12,5	82,74
13	41,5
13,5	13,82
14	0,5
14,5	0
15	0
15,5	0
16	0
16,5	0
17	0
17,5	0

➤ T = 50 χρόνια

t (hrs)	Q (m ³ /s)
0	0
0,5	11,68
1	35,26
1,5	51,62
2	60,62
2,5	62,16
3	63,47
3,5	64,87
4	66,37
4,5	67,98
5	69,72
5,5	71,6
6	73,65
6,5	75,89
7	78,36
7,5	81,09
8	84,15
8,5	87,59
9	91,5
9,5	96,02
10	100,43
10,5	104,25
11	110,89
11,5	121,61
12	127,19
12,5	101,06
13	50,6
13,5	16,63
14	0,61
14,5	0
15	0
15,5	0
16	0
16,5	0
17	0
17,5	0

➤ T = 100 χρόνια

t (hrs)	Q (m ³ /s)
0	0
0,5	13,39
1	40,43
1,5	59,2
2	69,55
2,5	71,35
3	72,9
3,5	74,56
4	76,34
4,5	78,26
5	80,33
5,5	82,57
6	85,03
6,5	87,72
7	90,7
7,5	94,01
8	97,72
8,5	101,93
9	106,76
9,5	112,38
10	119,05
10,5	127,12
11	137,17
11,5	149,88
12	156,42
12,5	123,8
13	62,13
13,5	20,37
14	0,74
14,5	0
15	0
15,5	0
16	0
16,5	0
17	0
17,5	0