



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ  
ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ  
ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ  
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΔΙΑΔΑ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

*Αθανάσιος Οικονόμου*

**ΕΠΙΣΤΗΜΗ  
&  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ**

**Αθήνα, Ιούνιος 2013**

**Επιβλέπων: Επικ. Καθηγητής Ν. Μαμάσης**



---

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ  
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ  
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΔΙΑΔΑ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

---

*Μεταπτυχιακή Εργασία*

**Αθανάσιος Οικονόμου**

Αγρ. Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

e-mail: a-economou@hotmail.com

ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων»

Αθήνα, Ιούνιος 2013



---

## Ευχαριστίες

---

Τελειώνοντας αυτή την εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ν. Μαμάση, για την αποδοχή της επίβλεψης της μεταπτυχιακής μου εργασίας και της ανάθεσης του συγκεκριμένου αντικειμένου. Κυρίως όμως, για την συνολική και καθοριστική συμβολή του στην εκπαιδευτική μου διαδικασία των δύο τελευταίων ετών.

Ιδιαίτερος ευχαριστώ τον Υποψήφιο Διδάκτορα, κ. Παναγιώτη Δημητριάδη για την συνεχή υποστήριξη και καθοδήγηση σε όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον κ. Αντώνη Κουκουβίνο, Αγρ.Τοπογράφο Μηχανικό για το συνεχές ενδιαφέρον και τη συνολική του συμμετοχή, καθώς και τον κ. Αριστοτέλη Τέγο, Πολιτικό Μηχανικό ΕΜΠ, Msc. Eng., Υπ. Δρ. ΕΜΠ, για την πρόταση εφαρμογής του μοντέλου FLO-2D, τις διευκρινίσεις και την υποστήριξη του.

Τέλος, ευχαριστώ όλους εκείνους, που στήριξαν και ενίσχυσαν την προσπάθειά μου, σε αυτό το τελικό στάδιο ολοκλήρωσης του μεταπτυχιακού προγράμματος.



---

# Περιεχόμενα

---

Ευχαριστίες .....	iii
Περίληψη.....	xiii
Extended Abstract .....	xv
1. Εισαγωγή .....	1
1.1 Αντικείμενο Μελέτης – Μεθοδολογία & Τεχνικές Έρευνας .....	1
1.2 Πλημμύρες.....	2
1.2.1 Οι Πλημμύρες στην Ελλάδα .....	2
1.2.2 Θεσμικό πλαίσιο .....	3
1.3 Διάρθρωση εργασίας .....	4
2. Περιγραφή Περιοχής Μελέτης .....	5
2.1 Το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας .....	5
2.1.1 Δυτική Λεκάνη Θεσσαλίας.....	8
2.1.1.1 Περιοχή Μελέτης.....	10
3. Περιγραφή Υδραυλικών Μοντέλων .....	13
3.1 Θεωρητικό πλαίσιο.....	14
3.1.1 Ροή με ελεύθερη επιφάνεια.....	14
3.1.2 Διόδευση Πλημμυρών .....	17
3.2 Θεωρητικό πλαίσιο υπολογισμών της ροής στο HEC RAS.....	18
3.2.1 Μόνιμη ροή.....	18
3.3 Θεωρητικό πλαίσιο υπολογισμών της ροής στο LISFLOOD-FP .....	25
3.4 Θεωρητικό πλαίσιο Υπολογισμών της ροής στο FLO-2D.....	28
4. Εφαρμογή Μοντέλων στη Λεκάνη Πηνειού.....	31
4.1 Υδραυλική προσομοίωση περιοχής μελέτης .....	31
4.1.1 Γεωμετρικά δεδομένα περιοχής μελέτης .....	31
4.1.2 Συνθήκες Ροής .....	34

4.1.3	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων .....	34
4.1.4	Υδραυλικό Μοντέλο HEC-RAS .....	35
4.1.5	Υδραυλικό Μοντέλο LISFLOOD-FP .....	38
4.1.6	Υδραυλικό Μοντέλο FLO-2D .....	40
4.2	Προσομοίωση Πλημμύρας .....	44
4.2.1	Σύγκριση μοντέλων με κοινή παροχή.....	44
4.2.2	Διερεύνηση αποτυπώματος πραγματικής πλημμύρας (Ψ.Μ.Ε. 50 m x 50 m) .....	49
4.2.3	Διερεύνηση αποτυπώματος πραγματικής πλημμύρας (Ψ.Μ.Ε. 5 m x 5 m) .....	51
5.	Εφαρμογή Μοντέλων σε Πρότυπες Τοπογραφίες .....	53
5.1	Μεταβολή κλίσης καναλιού ( $S_c$ ) και πλημμυρικών πεδίων ( $S_{fp}$ ) .....	54
5.2	Μεταβολή εισερχόμενης παροχής ( $Q$ ) .....	55
5.3	Μεταβολή συντελεστή τραχύτητας ( $n$ ) σε κανάλι και πλημμυρικά πεδία .....	56
5.4	Μεταβολή μεγέθους κυττάρου κανάβου επιφάνειας ( $c$ ) .....	58
6.	Σχολιασμός – Συμπεράσματα .....	61
	Αναφορές.....	65
	Βιβλιογραφία.....	67



---

## Ευρετήριο Εικόνων

---

<i>Εικόνα 2.1:</i> Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας ( <a href="http://www.geodata.gov.gr">www.geodata.gov.gr</a> - επεξεργασμένα στοιχεία).....	5
<i>Εικόνα 2.2:</i> Λεκάνες Απορροής Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας ( <a href="http://www.geodata.gov.gr">www.geodata.gov.gr</a> - επεξεργασμένα στοιχεία). ....	6
<i>Εικόνα 2.3:</i> Γεωτεκτονικές Ζώνες Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας ( <a href="http://www.geodata.gov.gr">www.geodata.gov.gr</a> - <a href="http://www.geo.auth.gr/museum/MuseumGeol_Paleont_files/page0005.htm">www.geo.auth.gr/museum/MuseumGeol_Paleont_files/page0005.htm</a> - επεξεργασμένα στοιχεία). ....	7
<i>Εικόνα 2.4:</i> Κλίσεις εδάφους Δυτικής λεκάνης Θεσσαλίας.....	8
<i>Εικόνα 2.5:</i> Περιοχή μελέτης ( <a href="http://www.anavasi.gr">www.anavasi.gr</a> ).....	10
<i>Εικόνα 2.6:</i> Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2012).....	11
<i>Εικόνα 3.1:</i> Χαρακτηριστικά μεγέθη της ροής σε αγωγό με ελεύθερη επιφάνεια (Παπανικολάου, 2012). ....	15
<i>Εικόνα 3.2:</i> Εισροή και εκροή σε όγκο ελέγχου (Πρίνος, 2009). ....	15
<i>Εικόνα 3.3:</i> Παράσταση των όρων της εξίσωσης ενέργειας (Brunner, 2010). ....	19
<i>Εικόνα 3.4:</i> Υποδιαίρεση της διατομής για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς (Brunner, 2010). ....	21
<i>Εικόνα 3.5:</i> Υπολογισμός Μέσης Κινητικής Ενέργειας σε διατομή (Brunner, 2010).....	22
<i>Εικόνα 3.6:</i> Παράσταση των όρων της εξίσωσης διατήρησης της ορμής (Brunner, 2010).....	24
<i>Εικόνα 3.8:</i> Υδραυλικό μοντέλο LISFLOOD-FP (πηγή: <a href="http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood">http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood</a> ).....	25
<i>Εικόνα 3.9:</i> Φατνία πλημμυρικού πεδίου, ροή μεταξύ αυτών (Πηγή: <a href="http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood">http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood</a> ).....	27
<i>Εικόνα 3.10:</i> Υπολογισμός ταχύτητας ροής σε κάθε κύτταρο του κανάβου (Loomis & Riano, 2011).....	28
<i>Εικόνα 4.1:</i> Ψ.Μ.Ε. της περιοχής μελέτης. ....	31
<i>Εικόνα 4.2:</i> Μηκοτομές τμήματος π.Πηνειού από το αρχικό και επεξεργασμένο Ψ.Μ.Ε.....	32

<i>Εικόνα 4.3:</i> Ζώνες corine 2000 στην περιοχή μελέτης (Πηγή: <a href="http://www.geodata.gov.gr">www.geodata.gov.gr</a> ). .....	33
<i>Εικόνα 4.4:</i> Δορυφορική εικόνα περιοχής μελέτης. Δορυφόρος Landsat 7 (bands RGB 321). Σημειώνεται η ροή του π. Πηνειού (Πηγή: <a href="http://landsatlook.usgs.gov">landsatlook.usgs.gov</a> ). .....	34
<i>Εικόνα 4.5:</i> Πλημμύρα της 28/01/2003 όπως καταγράφηκε από το δορυφόρο Landsat 7, bands RGB 742 (Πηγή: <a href="https://landsat.usgs.gov">https://landsat.usgs.gov</a> ) .....	35
<i>Εικόνα 4.6:</i> Περιοχή μελέτης με τον ποταμό Πηνειό, τις χαρακτηριστικές διατομές και τα αναχώματα.....	36
<i>Εικόνα 4.7:</i> Καρτέλα γεωμετρικού αρχείου μοντέλου HEC-RAS (υπό μελέτη υδατόρευμα και διατομές) .....	37
<i>Εικόνα 4.8:</i> καρτέλα διατομής μοντέλου HEC-RAS με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτής .....	37
<i>Εικόνα 4.9:</i> Δεδομένα εισόδου υδραυλικού μοντέλου LISFLOOD-FP.....	40
<i>Εικόνα 4.10:</i> Υλοποίηση παρεμβολής για τον υψομετρικό προσδιορισμό κάθε κυττάρου του κανάβου (Loomis & Riano, 2011) .....	41
<i>Εικόνα 4.11:</i> Δεδομένα εισόδου υδραυλικού μοντέλου FLO-2D.....	42
<i>Εικόνα 4.12:</i> Αποτέλεσμα προσομοίωσης για παροχή 800 m <sup>3</sup> /s και κοινό συντελεστή τραχύτητας σε πεδιάδα και κανάλι.....	45
<i>Εικόνα 4.13:</i> Μεταβολή πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή του συν/τή τραχύτητας (LISFLOOD-FP). .....	46
<i>Εικόνα 4.14:</i> Μεταβολή πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή του συν/τή τραχύτητας (HEC-RAS). .....	47
<i>Εικόνα 4.15:</i> Μεταβολή πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή του συν/τή τραχύτητας (FLO-2D). .....	47
<i>Εικόνα 4.16:</i> Βέλτιστη προσαρμογή του μοντέλου LISFLOOD-FP στην πραγματική πλημμύρα. ....	50
<i>Εικόνα 4.17:</i> Βέλτιστη προσαρμογή του μοντέλου HEC-RAS στην πραγματική πλημμύρα. ....	50
<i>Εικόνα 4.18:</i> Βέλτιστη προσαρμογή του μοντέλου FLO-2D στην πραγματική πλημμύρα. ....	50
<i>Εικόνα 4.19:</i> Βέλτιστη προσαρμογή των μοντέλων στην πραγματική πλημμύρα (κάναβος 5 m x 5 m). .....	51
<i>Εικόνα 4.20:</i> Κλίσεις γης περιοχής μελέτης και αποτύπωμα πλημμύρας.....	52
<i>Εικόνα 5.1:</i> Γεωμετρία πρότυπων τοπογραφιών.....	53

---

## Ευρετήριο Πινάκων

---

<i>Πίνακας 2.1:</i> Χαρακτηριστικά υπολεκανών Δυτικής Λεκάνης Απορροής Πηνειού (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006). .....	9
<i>Πίνακας 4.1:</i> Συντελεστής τραχύτητας συναρτήσει της χρήσης γης. ....	33
<i>Πίνακας 4.2:</i> Μεταβολή βάθους ροής στο σημείο εξόδου. ....	46
<i>Πίνακας 5.1:</i> Βάθος ροής στο σημείο εκροής με μεταβολή της κλίσης καναλιού και πλημμυρικών πεδίων. ....	54
<i>Πίνακας 5.2:</i> Επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή της κλίσης καναλιού και πλημμυρικών πεδίων. ....	54
<i>Πίνακας 5.3:</i> Βάθος ροής στο σημείο εκροής και επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης για εξαιρετικά μικρές κλίσεις σε κανάλι και πλημμυρικά πεδία .....	55
<i>Πίνακας 5.4:</i> Βάθος ροής στο σημείο εκροής με μεταβολή της εισερχόμενης παροχής. ....	55
<i>Πίνακας 5.5:</i> Επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή της εισερχόμενης παροχής. ....	56
<i>Πίνακας 5.6:</i> Βάθος ροής στο σημείο εκροής και επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας με χρήση του μοντέλου LISFLOOD-FP. ....	57
<i>Πίνακας 5.7:</i> Βάθος ροής στο σημείο εκροής και επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας με χρήση του μοντέλου HEC-RAS. ....	57
<i>Πίνακας 5.8:</i> Βάθος ροής στο σημείο εκροής και επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας με χρήση του μοντέλου FLO-2D. ....	58
<i>Πίνακας 5.9:</i> Βάθος ροής στο σημείο εκροής με μεταβολή του μεγέθους του κυττάρου του κανάβου της επιφάνειας. ....	59
<i>Πίνακας 5.10:</i> Επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή του μεγέθους του κυττάρου του κανάβου της επιφάνειας. ....	59



---

## Ευρετήριο Διαγραμμάτων

---

<i>Διάγραμμα 3.1: Μεταβολή πλημμυρικού κύματος.....</i>	<i>17</i>
<i>Διάγραμμα 3.2: Μεταβολή της ενέργειας συναρτήσει της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού.....</i>	<i>23</i>
<i>Διάγραμμα 4.1: Κλίσεις πυθμένα καναλιού βάσει του κανάβου, πριν την επεξεργασία. ....</i>	<i>43</i>
<i>Διάγραμμα 4.2: Κλίσεις πυθμένα καναλιού μετά την επεξεργασία. ....</i>	<i>43</i>
<i>Διάγραμμα 4.3: Επιφάνεια πλημμύρας συναρτήσει του συν/τη τραχύτητας. ....</i>	<i>48</i>
<i>Διάγραμμα 4.4: Βάθος ροής στο σημείο εξόδου συναρτήσει του συν/τη τραχύτητας. ....</i>	<i>49</i>



---

## Περίληψη

---

Η Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2007/60/EK) για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, ορίζει μια πλημμύρα ως τη προσωρινή κάλυψη εδάφους από νερό το οποίο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, δεν καλύπτεται από νερό. Η αστική ανάπτυξη και οι ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η γεωργία, η βιομηχανία και ο τουρισμός, συμβάλουν στην αύξηση της πιθανότητας των αρνητικών επιπτώσεων των πλημμυρών. Η μελέτη της υδραυλικής συμπεριφοράς των ποταμών κρίνεται σημαντική στη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας.

Διερευνάται η συμπεριφορά τριών υδραυλικών μοντέλων διαφορετικού θεωρητικού υποβάθρου ανάλυσης: το μονοδιάστατο HEC-RAS και τα ψευδο-διδιάστατα LISFLOOD-FP και FLO-2D. Αυτά ελέγχονται και συγκρίνονται μεταξύ τους μέσω της εφαρμογής τους σε απλοποιημένες τοπογραφίες, όπου μεταβάλλεται η παροχή εισόδου, η κλίση εγκάρσιας και διαμήκους διατομής, η τραχύτητα και το μέγεθος του κυττάρου του κανάβου των μοντέλων. Επίσης, τα τρία αυτά μοντέλα εφαρμόζονται σε ένα πραγματικό πλημμυρικό επεισόδιο στην περιοχή της λεκάνης απορροής του π. Πηνειού στη δυτική πεδιάδα της Θεσσαλίας και βαθμονομούνται μέσω της αποτύπωσης ενός πραγματικού πλημμυρικού επεισοδίου, όπως καταγράφηκε μέσω δορυφόρου στην συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Οι παράμετροι εξόδου που μελετώνται είναι η έκταση της πλημμυρικής κατάκλυσης και το βάθος ροής στο σημείο εξόδου (έναντι της ταχύτητας ροής εξόδου). Επιπλέον πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας ώστε να προσδιοριστεί πως επηρεάζεται κάθε προσομοίωση από τη μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας τόσο στο κανάλι, όσο και στα πλημμυρικά πεδία.





---

# Extended Abstract<sup>1</sup>

---

## 1. Introduction

The 2007/60/EC Directive implementation by European Member States requires flood hazard and flood risk maps for low, medium (likely return period  $\geq 100$  years) and high flood probability. In this context, hydraulic models can be used to simulate flood events and map the resulting flooded areas. Particularly in this study, three models are used: 1D HEC-RAS and quasi-2D LISFLOOD-FP and FLO-2D. These are investigated in terms of input discharge, transverse and longitudinal topographic slope, roughness coefficient and model cell size. They are also compared to each other, based on applications using simplified topographies and scenarios and so leading to conclusions about their particularities and performance. Moreover, they are applied to a study area located at Thessaly, in central Greece (Figure 1) that is extended to a length of 40 km, from the Ali Efenti (upstream) to Amygdalia (downstream) locations at the western basin of Penios river. The area of the basin is over 6300 km<sup>2</sup>, with an average annual rainfall of 779 mm.

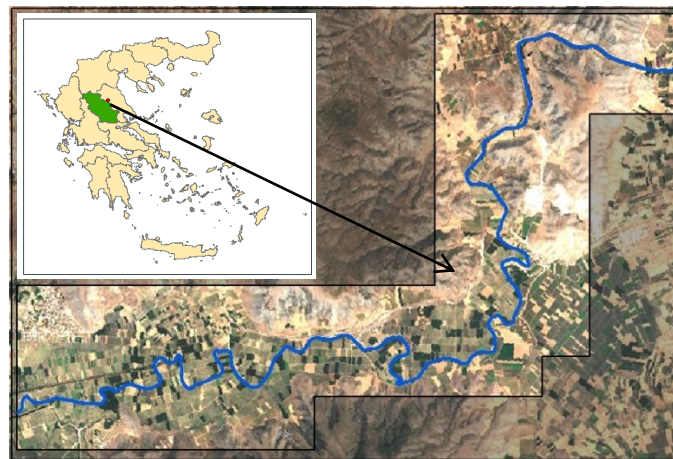


Figure 1: Study area topography (<http://landsatlook.usgs.gov>)

All three models are calibrated based on a recorded Landsat image flood event (figure 3), on 28/1/2003. The overall flood event occurred on 21<sup>st</sup> and 28<sup>th</sup> January 2003. The calibration parameters are the river and floodplain Manning's coefficients as well as the river discharge.

---

<sup>1</sup> Μέρος του παρόντος κειμένου δημοσιεύτηκε υπό μορφή poster στα πλαίσια του European Geosciences Union General Assembly 2013

## 2. Elevation and satellite data

Elevation data are critical for hydraulic simulation. A  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  Digital Elevation Model (DEM) with a 2 m vertical accuracy is available (Figure 2). To increase the accuracy of the DEM, editing of the raw dataset is necessary. This is accomplished in a way that the main river line coincides with the edge of the slope change and the deepest line of flow. Due to the size of the study area and the cell size limitations imposed by one of the models, a coarser DEM is produced with  $50\text{ m} \times 50\text{ m}$  analysis. Still, the original finer analysis of  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  is used to compare the other two models.

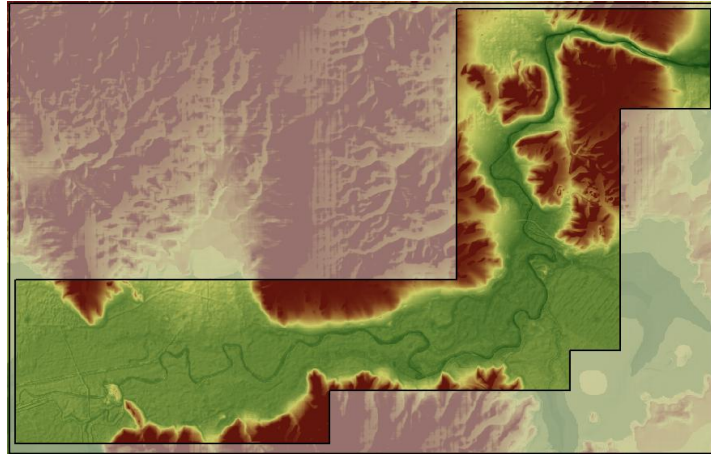


Figure 2: Study area DEM.

The extent of the flood is estimated with a semi-automated methodology in order to distinguish stagnant water from soil, using an averaged image of the infrared channel 5 of the Landsat ETM+ system (<http://landsat.usgs.gov>). Note that the resolution of the image is 30 m (on the soil).

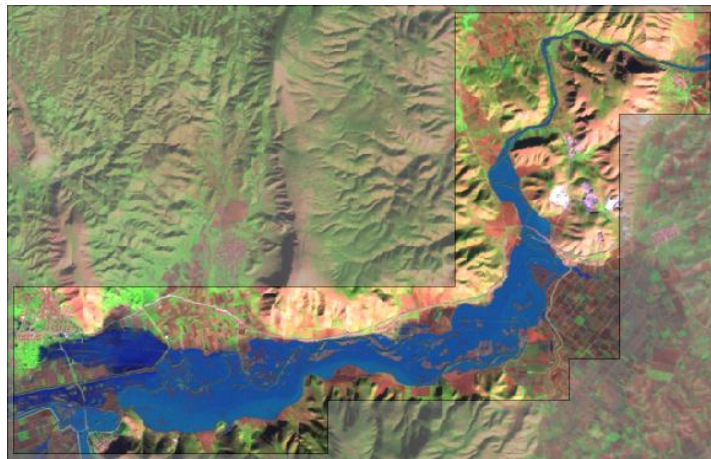


Figure 3: Landsat-7 satellite image -flooded area (<http://landsatlook.usgs.gov>).

### 3. Hydraulic Models

#### HEC-RAS

HEC-RAS (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>) is a freeware 1D hydraulic model, which estimates the flow characteristics (e.g. free surface elevation, mean velocity) in a cross section, under steady and non-steady flow conditions. It solves the 1D dynamic wave equation using an implicit finite difference method. The required input data are the geometry of the cross section, the Manning coefficient along the cross section, the inflow discharge and hydraulic boundary conditions (Bruner, 2010). It is noted that, based on research experience, it provides adequate results in cases of steep and narrow channels but it deviates from reality in cases of floodplains with small gradients. Also, it experiences difficulties with unsteady flow conditions.

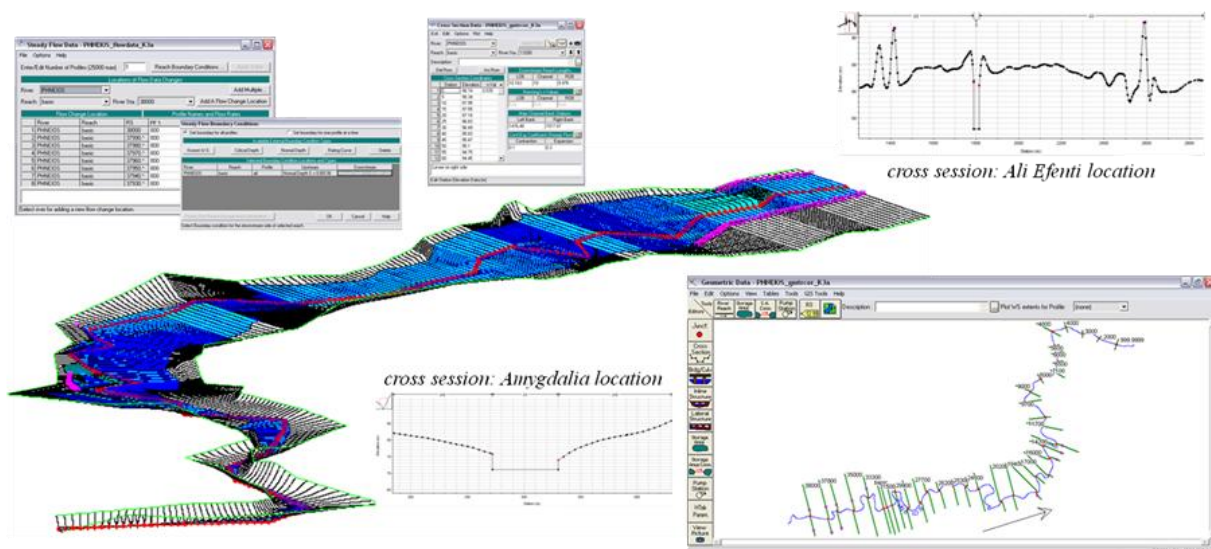


Figure 4: HEC-RAS freeware environment.

#### LISFLOOD-FP

LISFLOOD-FP (<http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood>) is a freeware quasi-2D hydraulic model, which estimates only the flow depth across the grid elements, under steady and non-steady flow conditions. It uses the Manning equation along the river and the 1D kinematic wave equation for lateral flow expansion. The required initial data are a DEM, the river location and its mean depth and width (the model assumes a rectangular cross section), the inflow discharge and some simple hydraulic boundary conditions (Bates et al., 2005). It is noted that, based on research experience, it provides adequate results for large basins with narrow as well as steep rivers, with up to  $10^6$  grid cells and is convenient for applying probabilistic approaches based on multiple runs.

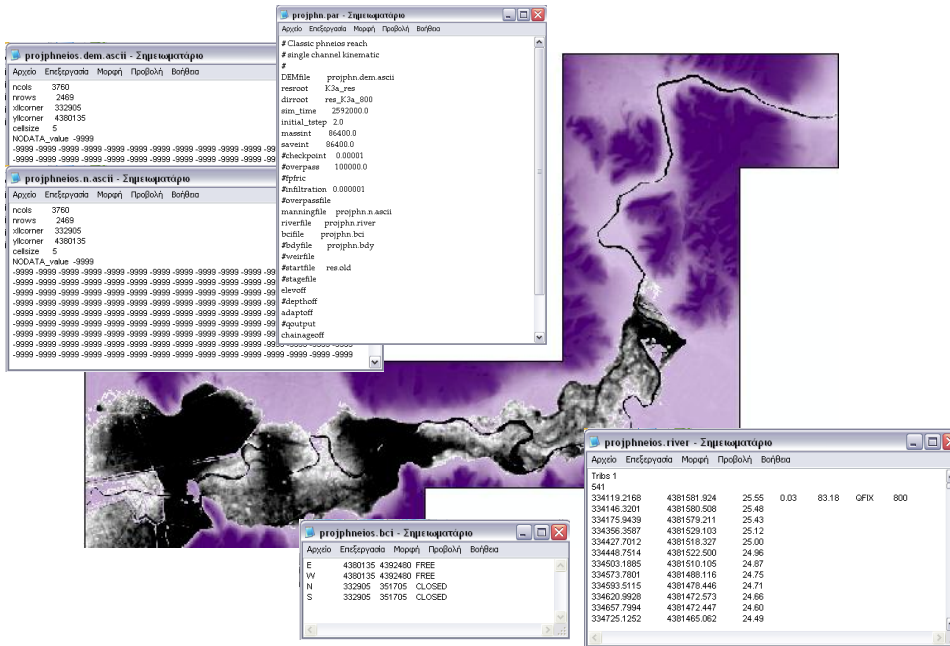


Figure 5: Lisflood-FP freeware environment.

### FLO-2D

FLO-2D (<http://www.flo-2d.com/>) is a freeware quasi-2D hydraulic model, which estimates the maximum flow depth across the grid elements, under steady and non-steady flow conditions. It uses the 1D dynamic wave equation for the main and lateral flow direction. It is noted that, based on research experience, it provides adequate results for any type of topography but it experiences difficulties when it comes to small grid size. In this study, the input data are the DEM, the inflow discharge and some simple hydraulic boundary conditions. It is noted that channel modeling is left out and the river is considered and modeled as part of the floodplain.

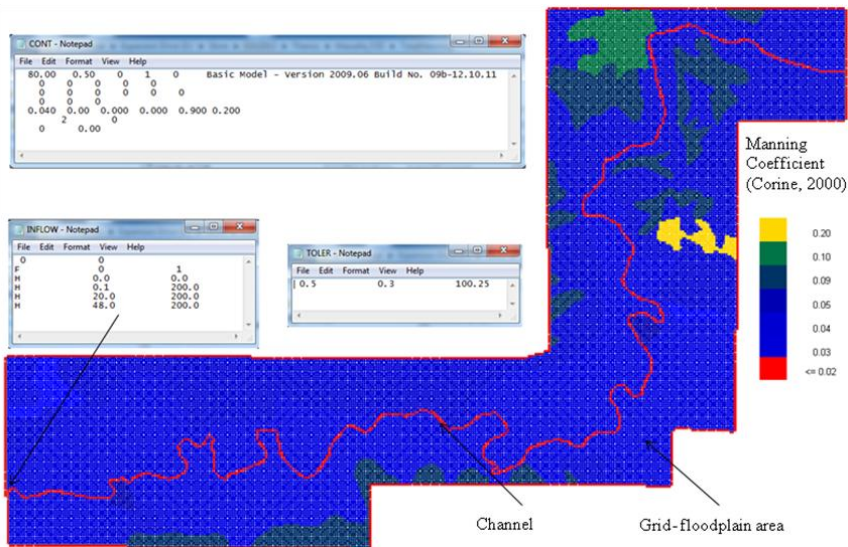


Figure 6: FLO-2D freeware environment.



#### 4. Model comparison (valley of Penios)

##### Common scenario

For a direct model comparison the chosen scenario includes a  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  steady flow discharge and a unique roughness coefficient in both channel and floodplain equal to  $0.03 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ . As it can be observed in figure 7, flood inundation is more extended in the case of LISFLOOD-FP and FLO-2D simulations than in the HEC-RAS one. Also, it can be seen that in HEC-RAS simulation, flood does not cover entirely the upstream small basin (shown within the red circle). This is due to HEC-RAS prevention of multiple flow directions within a single cross section.

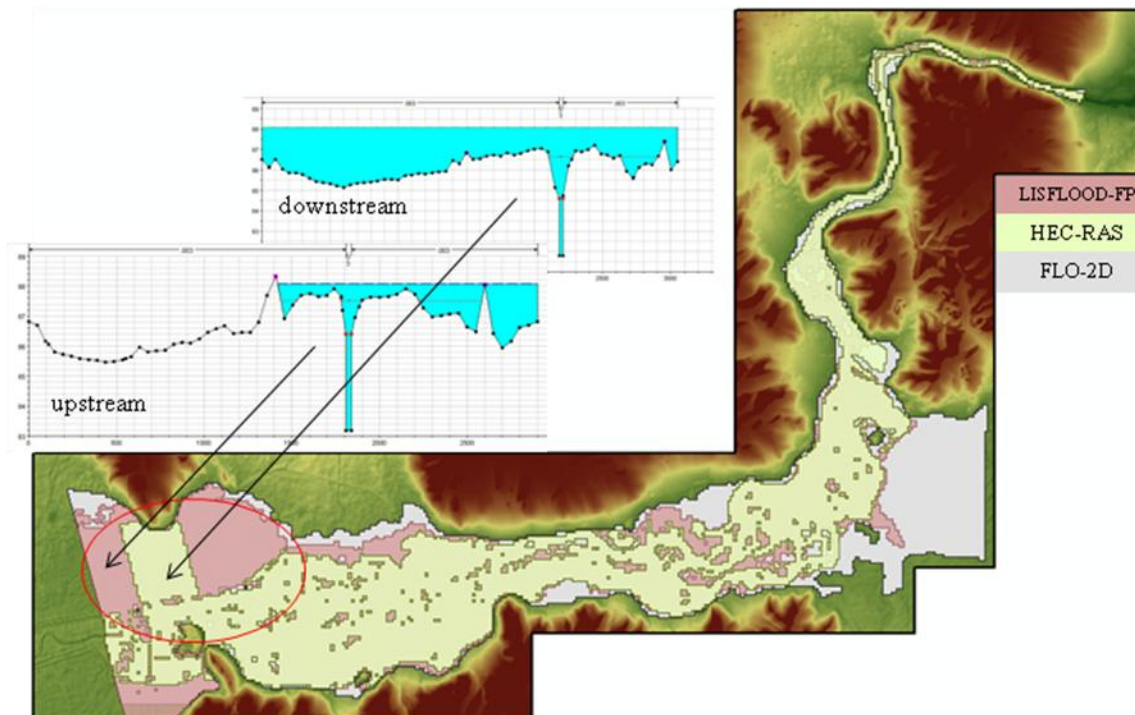


Figure 7: Flooded area (Oikonomou et al, 2013)

In order to introduce a probabilistic view of the flood mapping in terms of the roughness coefficient, necessary when simulating floods (e.g. di Baldassare et al. 2010), a sensitivity analysis is made based on the channel and floodplains Manning's coefficients. Three values of the coefficient are tested, the dominant value in the study area of  $0.03 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$  (typical for permanently irrigated land) and two extreme (and unrealistic) values of  $0.3$  and  $0.003 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$  (one order of magnitude lower and greater); and the water depth at the river's outflow location (table 1 and figures 7, 8, 9 and 10).

It can be observed that the models are very sensitive concerning the channel's roughness coefficient opposing to the floodplains' one. Also, it can be seen that the FLO-2D results are very different than in the other models probably due to the absence of the channel simulation.

Table 1: Water depth at the outflow point (Oikonomou et al., 2013).

water depth (m)			floodplain $n$ ( $m^{-1/3}s$ )		
			0.003	0.03	0.3
LISFLOOD-FP	channel $n$ ( $m^{-1/3}s$ )	0.003	2.23	2.23	2.23
		0.03	5.65	5.78	6.36
		0.3	6.90	7.17	8.31
HEC-RAS		0.003	1.64	1.64	1.62
		0.03	6.05	7.9	8.83
		0.3	6.79	11.29	19.47
FLO-2D		0.003	11	10.11	5.74
		0.03	9.41	10.12	6.39
		0.3	11.37	11.57	10.17

From the figures below, it can be noted that in the simulations of LISFLOOD-FP and FLO-2D the resulted floodplains are more uniformly distributed in contrast to the HEC-RAS ones, which evaluates the flood routing from cross-section to cross-section, creating in certain cases abnormal discontinuities.

Moreover, it can be seen that the flow has spread more in the FLO-2D simulation rather than in the other two models showing also the lack of sensitivity for the Manning coefficient in the channel as well as in the floodplain areas.

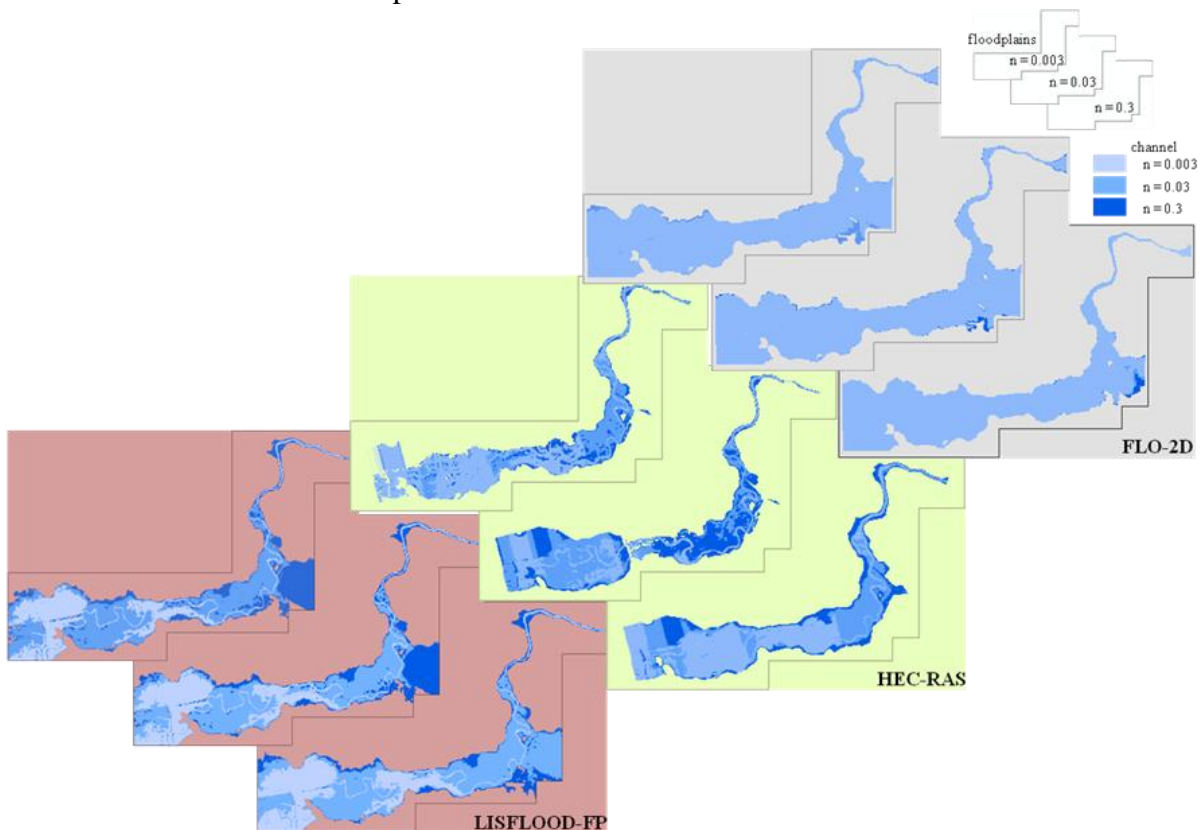


Figure 8: Compare models changing the roughness coefficient (Oikonomou et al., 2013)

The FLO-2D simulations are accomplished without separately modelling the channel but rather by applying a different Manning coefficient to the river grid cells.

The figures below, demonstrate the change in flooded area and water depth at the river outflow point with the channel's and floodplain's Manning coefficient. One can observe that, as mentioned before, the FLO-2D is not much sensitive to the roughness coefficient change, probably due to the absence of channel representation. Moreover, HEC-RAS curves underestimate in general the flooded area. Also, they exhibit a large sensitivity to the channel's and floodplain's roughness coefficients. Finally, LISFLOOD-FP curves exhibit a large sensitivity to the channel's roughness coefficient and a small sensitivity to the floodplain's one. Note that each simulation lasts approximately 3 h for the LISFLOOD-FP, 2 h for the FLO-2D and 10 min for the HEC-RAS.

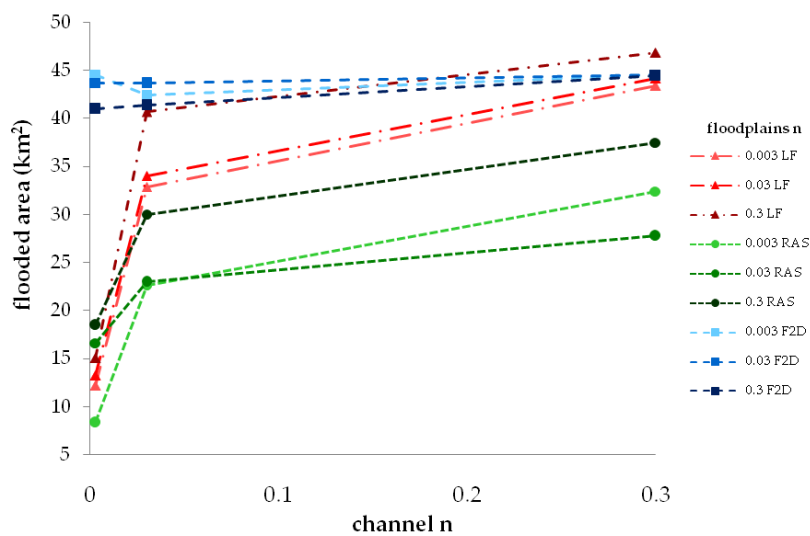


Figure 9: Flooded area (Oikonomou et al., 2013).

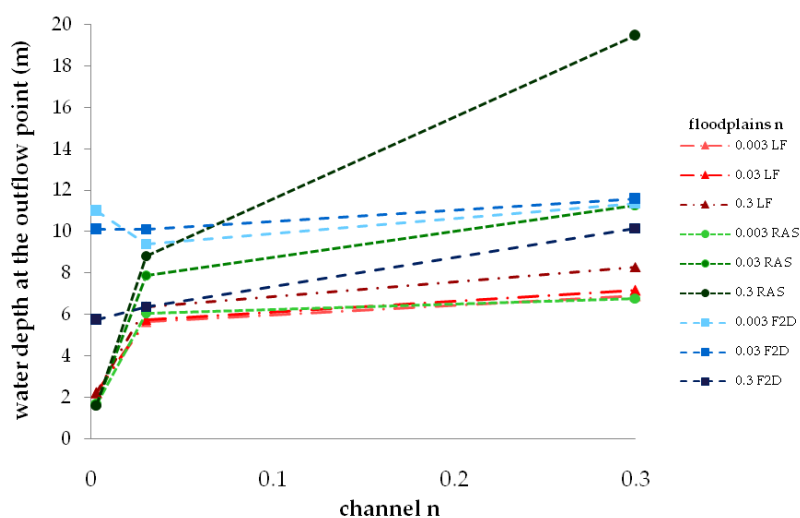


Figure 10: Water depth at the outflow point (Oikonomou et al., 2013).

**Estimating the ‘ideal’ steady flow (50 m × 50 m DEM)**

In this section, the ‘ideal’ steady flow is estimated based on the minimization of an evaluation coefficient (as described in equation 1) which compares the satellite observed footprint of the flooded area with the simulated one. The roughness coefficients are now based on the land cover of the study area as documented in the EU Corine project in 2000 (Yan Huang, 2005). Again, the topographic data of the study area are derived from the 50 m × 50 m DTM.

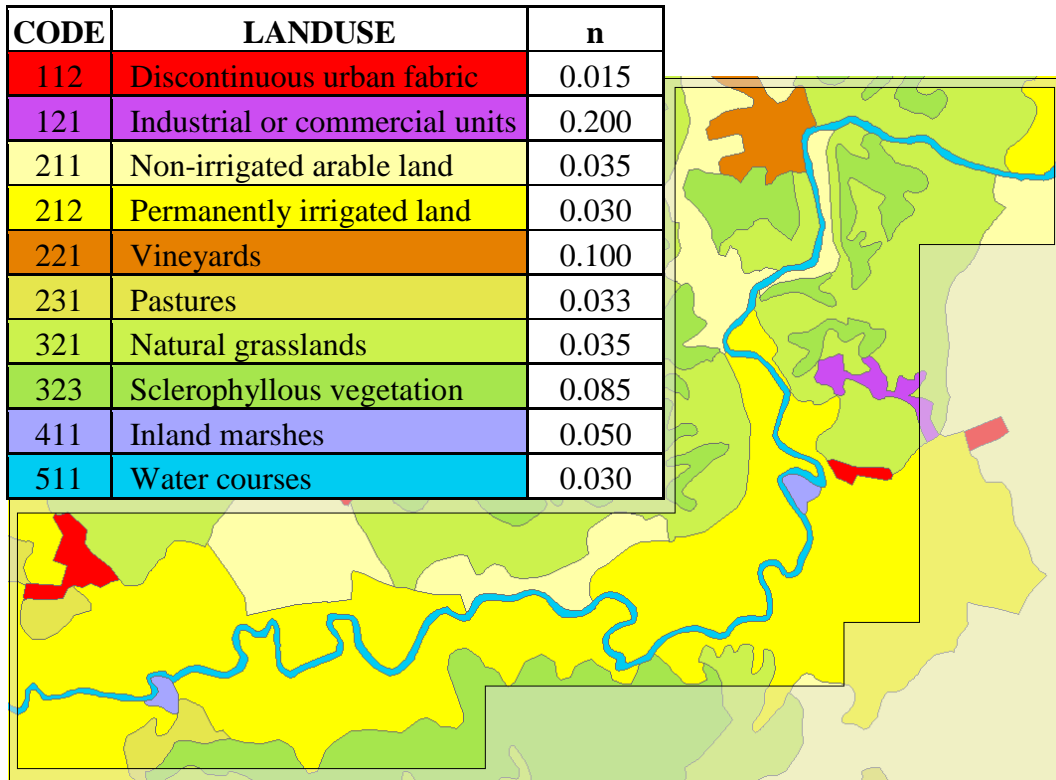


Figure 11: Land use data (Corine, 2000)

$$R = \frac{E_s + E_m}{E_{int}} - 2 \tag{1}$$

where,  $E_s$  the flooded area observed by the satellite,

$E_m$  the flooded area simulated by the model, and

$E_{int}$  the intersection of the observed flooded area and the flooded area simulated by the model.



Fitted discharge	<b>750 m<sup>3</sup>/s</b>	Fitted discharge	<b>950 m<sup>3</sup>/s</b>	Fitted discharge	<b>200 m<sup>3</sup>/s</b>
$E_{int} / E_s$	93.33%	$E_{int} / E_s$	86.80%	$E_{int} / E_s$	95.20%
$(E_m - E_{int}) / E_m$	26.34%	$(E_m - E_{int}) / E_m$	11.59%	$(E_m - E_{int}) / E_m$	24.70%
$(E_s - E_{int}) / E_m$	5.27%	$(E_s - E_{int}) / E_m$	13.44%	$(E_s - E_{int}) / E_m$	3.80%
$R$	0.43	$R$	0.28	$R$	0.38

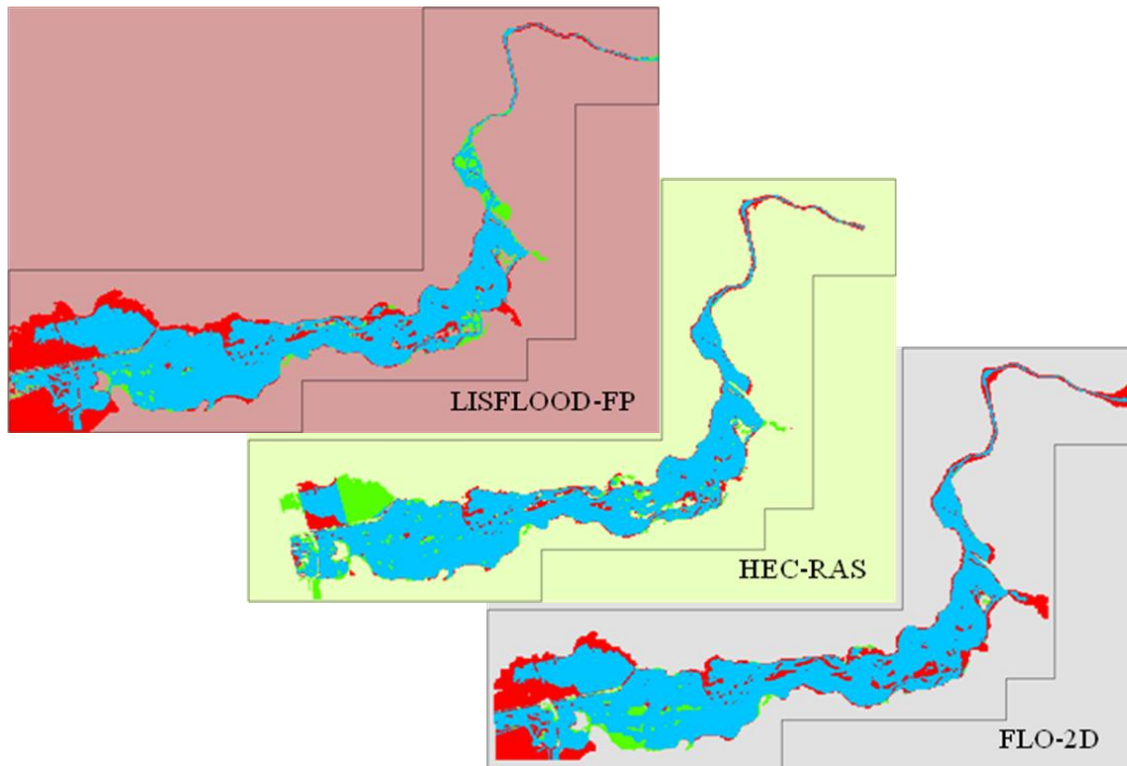


Figure 12: Best fit of the observed flooded area for each model (Oikonomou et al., 2013).

Based on previous studies (i.e. Mimikou & Koutsoyiannis, 1995), the observed discharge cannot be as large as HEC-RAS indicates and not as small as shown by the FLO-2D simulation. It will be useful to run the FLO-2D scenarios (in future studies) by adding the channel geometry and banks, so as to compare with the ones without the channel and derive more robust conclusions concerning the FLO-2D best fit simulation.

### Estimating the ‘ideal’ steady flow (5 m × 5 m DEM)

Here, the finer DEM of 5 m × 5 m analysis is used, in steady flow conditions, for the LISFLOOD-FP and HEC-RAS models. Again, the roughness coefficient is based on the land cover data of the Corine project.

Following the previous section’s analysis, the best fitted discharge is estimated at the rate of 850 m<sup>3</sup>/s (with 8.59 m water depth at the outflow point) for HEC-RAS and at 400 m<sup>3</sup>/s (with 5.96 m water depth at the outflow point) for LISFLOOD-FP. FLO-2D experiences difficulties when it comes to large extent grids and small cell size. Note that each simulation lasts approximately 60 h for the LISFLOOD-FP and only 10 min for the HEC-RAS.

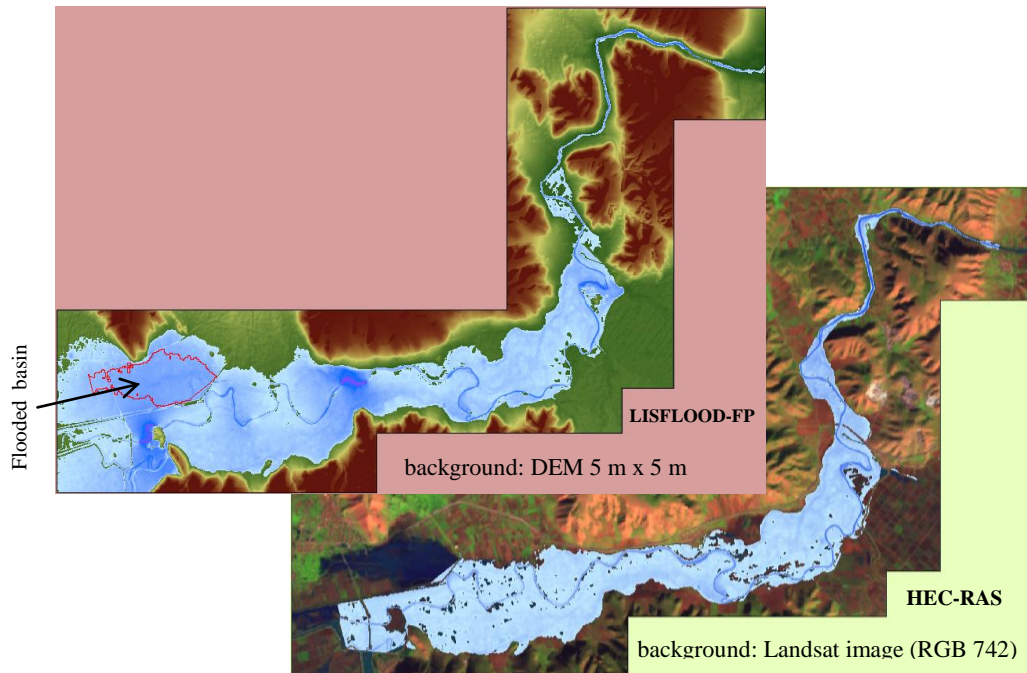


Figure 13: Flooded area using the  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  analysis DEM) (Oikonomou et al., 2013)

LISFLOOD-FP achieves a 94% coverage percentage ( $E_{\text{int}} / E_s$ ) with half the discharge of HEC-RAS (as shown in Figure 14) and also, it fits well the occurred flood in the circled upstream basin. HEC-RAS achieves a  $E_{\text{int}} / E_s = 83.5\%$  ratio. Although the downstream section's embankment is overrun by the flood, the flow cannot reach the north-west path to penetrate the small upstream basin.

Here, the resulted best fit simulation is presented for LISFLOOD-FP and HEC-RAS. Moreover, the outer line of the simulated flood for both models is shown in addition with the topographic gradients of the area. As is can be observed, the topographic gradients on both plains of the river are smaller than 2.5%. Thus, as already mentioned in section 4, the problematic behavior of HEC-RAS is maybe due to the 1D nature of the model. 1D models have difficulties to simulate flood routing in areas with small gradients, complex topography (e.g. multiple flow directions within a cross-section), and usually lead to underestimations of the flood extent as well as the flood residence times (for an unsteady flow regime).

Thus, using a 1D model in such cases can be misleading and lead to wrong conclusions about the location and geometric characteristics (height, width) of the embankment structures.

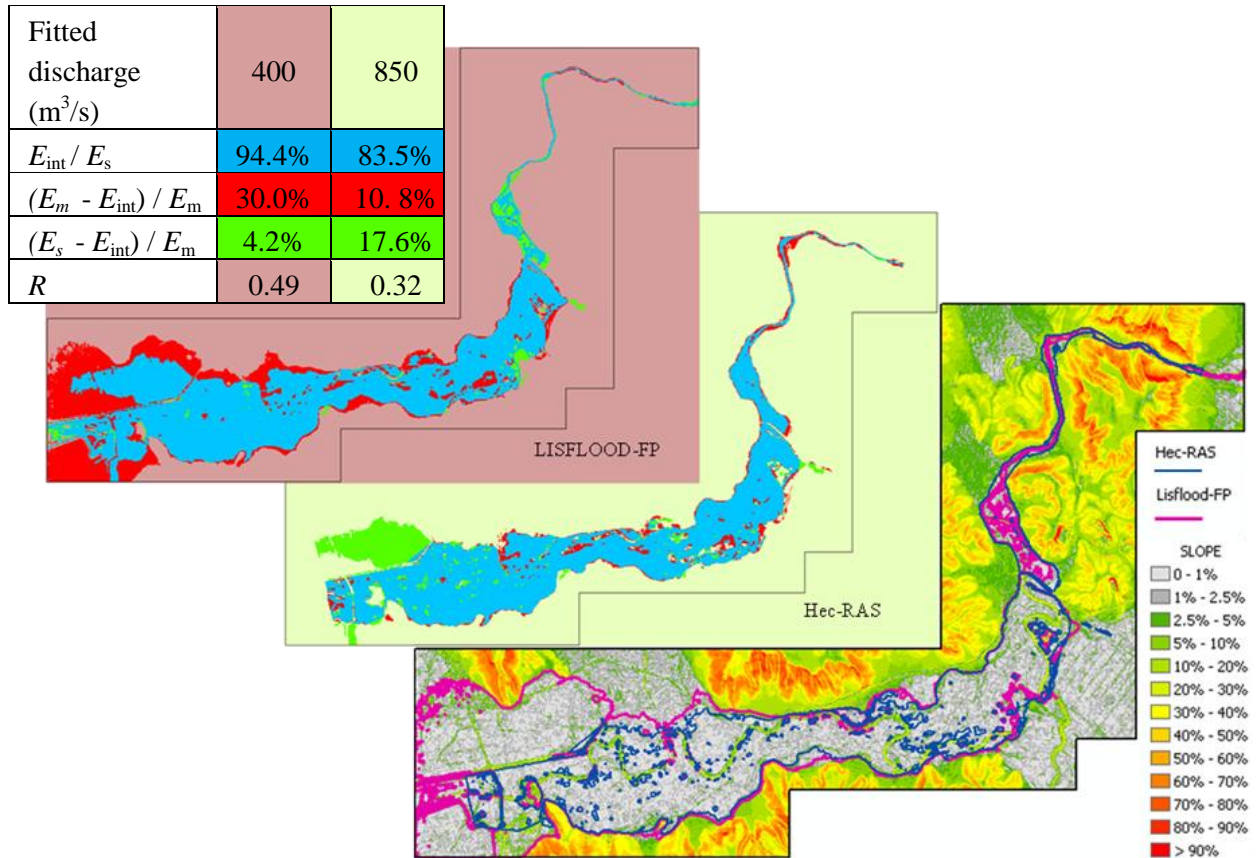


Figure 14: Best fit of the observed flooded area for LISFLOOD-FP (upper left), HEC-RAS (middle) and the outer line of the flooded area for both models as well as the topographic gradients (down right), (Oikonomou et al., 2013).

## 5. Model comparison (simple topographies)

In this section, the models are applied to some simple topographies to better understand their sensitiveness on various parameters. The topographies created are in the form of grid with dimensions 1 km x 10 km. A rectangular channel with a 10 m width ( $b$ ) and a 2m depth ( $d$ ) is generated along the surface.

The sensitivity of the models is investigated by in the following parameters:

- channel ( $S_c$ ) and floodplains ( $S_{fp}$ ) slope
- discharge ( $Q$ )
- roughness coefficient ( $n$ )
- grid cell size ( $c$ )

The output parameters are the flooded area and the water depth at the channel outflow point.

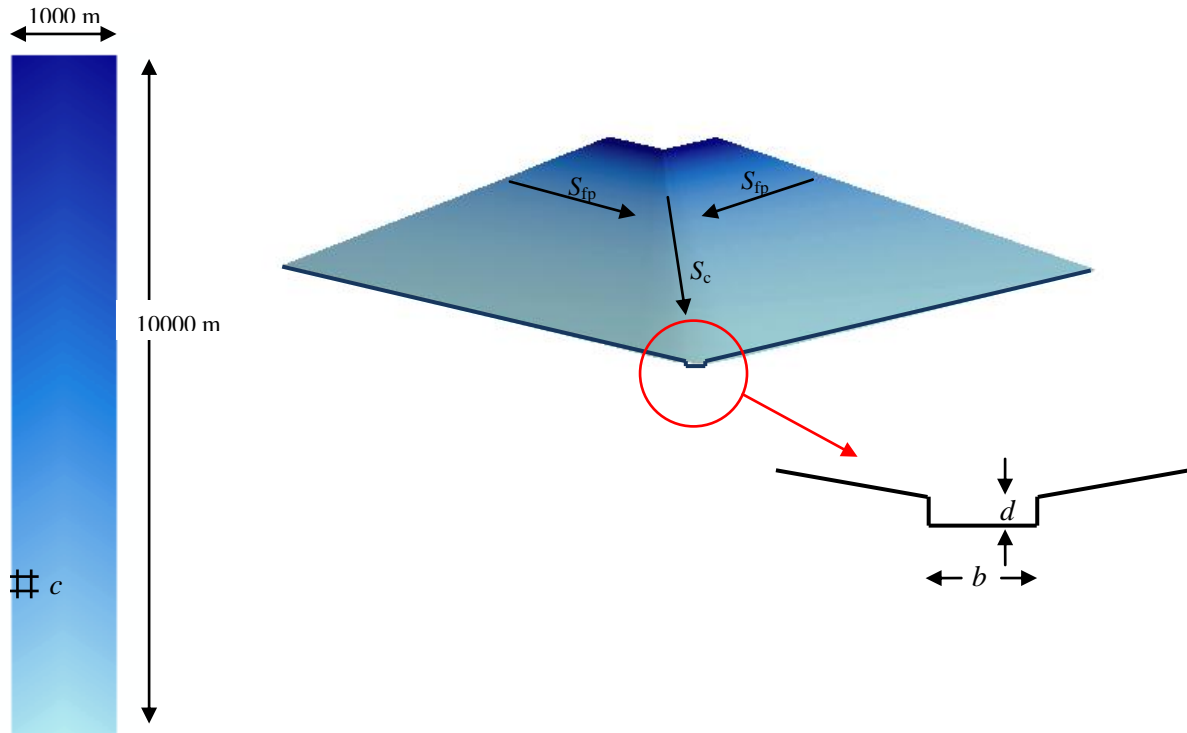


Figure 15: Geometry of the simplified topographies.

**Varying the channel ( $S_c$ ) and floodplains ( $S_{fp}$ ) slope.**

Here, a simulation in steady flow conditions is generated with a discharge of  $750\text{m}^3/\text{s}$ , 10 m grid cell size and unique channel and floodplain Manning coefficient of  $0.03\text{m}^{-1/3}\text{s}$ . Selected values for the gradient are: 1%, 2% and 5%.

Table 2: Changing channel ( $S_c$ ) and floodplains ( $S_{fp}$ ) slope.

Water depth (m)	LISFLOOD-FP			HEC-RAS			FLO-2D			
	Channel slope ( $S_c$ )			Channel slope ( $S_c$ )			Channel slope ( $S_c$ )			
Flooded area ( $\text{km}^2$ )	1 %	2%	5%	1%	2%	5%	1%	2%	5%	
Floodplain slope ( $S_{fp}$ )	1%	5.96	4.83	3.65	3.39	3.09	2.84	3.47	3.18	3.00
		7.970	5.755	3.399	2.900	2.300	1.900	3.523	3.501	3.657
	2%	6.14	5.00	3.80	3.62	3.34	3.01	3.83	3.54	3.33
		4.293	3.095	1.895	1.900	1.500	1.300	2.109	2.466	2.678
	5%	6.28	5.12	3.90	4.06	3.66	3.19	4.51	4.23	3.94
		1.906	1.504	0.903	1.100	0.900	0.700	1.250	1.104	1.504

**Varying the input discharge ( $Q$ ).**

Here, a simulation in steady flow conditions is generated with a 10 m grid cell size, unique channel and floodplain Manning coefficient of  $0.03\text{m}^{-1/3}\text{s}$  and unique channel and floodplain gradient of 1%. Selected values for the discharge are:  $250\text{m}^3/\text{s}$ ,  $500\text{m}^3/\text{s}$  and  $750\text{m}^3/\text{s}$ .

Table 3: Changing the discharge ( $Q$ ).

Water depth (m)		LISFLOOD-FP			HEC-RAS			FLO-2D		
		discharge ( $\text{m}^3/\text{s}$ )			discharge ( $\text{m}^3/\text{s}$ )			discharge ( $\text{m}^3/\text{s}$ )		
Flooded area ( $\text{km}^2$ )		250	500	750	250	500	750	250	500	750
channel & floodplain gradient	$S_c$ 1% $S_{fp}$ 1%	3.17	4.69	5.96	2.73	3.12	3.39	2.90	3.24	3.47
		2.499	5.457	7.970	1.700	2.500	2.900	2.306	3.083	3.523
	$S_c$ 1% $S_{fp}$ 2%	3.25	4.84	6.14	2.82	3.3	3.62	3.13	3.55	3.83
		1.503	3.097	4.293	1.100	1.500	1.900	1.308	1.819	2.109
	$S_c$ 1% $S_{fp}$ 5%	3.27	4.92	6.28	2.92	3.61	4.06	3.51	4.13	4.51
		0.703	1.305	1.906	0.500	0.900	1.100	0.705	1.050	1.250
	$S_c$ 2% $S_{fp}$ 1%	2.61	3.82	4.83	2.51	2.87	3.09	2.67	2.98	3.18
		1.490	3.838	5.755	1.300	1.900	2.300	2.406	3.101	3.501
	$S_c$ 2% $S_{fp}$ 2%	2.66	3.94	5.00	2.58	3.05	3.34	2.87	3.28	3.54
		0.902	2.101	3.095	0.700	1.300	1.500	1.707	2.107	2.466
	$S_c$ 2% $S_{fp}$ 5%	2.68	4.04	5.12	2.58	3.24	3.66	3.24	3.86	4.23
		0.502	1.103	1.504	0.500	0.700	0.900	0.702	0.904	1.104
$S_c$ 5% $S_{fp}$ 1%	2.06	2.92	3.65	2.24	2.63	2.84	2.55	2.82	3.00	
	0.301	2.062	3.399	0.700	1.500	1.900	2.524	3.253	3.657	
$S_c$ 5% $S_{fp}$ 2%	2.06	3.01	3.80	2.23	2.74	3.01	2.62	3.07	3.33	
	0.301	1.292	1.895	0.500	0.900	1.300	1.920	2.400	2.678	
$S_c$ 5% $S_{fp}$ 5%	2.06	3.08	3.90	2.12	2.81	3.19	2.82	3.54	3.94	
	0.301	0.702	0.903	0.300	0.500	0.700	0.949	1.305	1.504	

**Varying the Manning coefficient ( $n$ ) in the channel and floodplains.**

Here, a simulation in steady flow conditions is generated with a discharge of  $750\text{m}^3/\text{s}$ , a 10 m grid cell size and unique channel and floodplain gradient of 1%. Selected values for the Manning coefficient are:  $0.01\text{m}^{-1/3}\text{s}$ ,  $0.03\text{m}^{-1/3}\text{s}$ ,  $0.08\text{m}^{-1/3}\text{s}$ ,  $0.10\text{m}^{-1/3}\text{s}$  and  $0.20\text{m}^{-1/3}\text{s}$ .

Table 4: Changing the Manning coefficient (n) in the channel and floodplains.

LISFLOOD-FP						
Water depth (m)		Channel <i>n</i> Manning (m <sup>-1/3</sup> s)				
Flooded area (km <sup>2</sup> )		0.01	0.03	0.08	0.10	0.20
Floodplain <i>n</i> Manning (m <sup>-1/3</sup> s)	0.01	3.283	5.936	9.384	10.238	12.512
		2.696	7.961	14.451	16.108	20.361
	0.03	3.285	5.956	9.421	10.281	12.618
		2.697	7.970	14.587	16.144	20.579
	0.08	3.288	5.96	9.457	10.326	12.727
		2.698	7.975	14.631	16.287	20.793
	0.10	3.289	5.972	9.461	10.331	12.734
		2.698	7.980	14.636	16.294	20.805
	0.20	3.292	5.978	9.482	10.364	12.777
		2.700	7.986	14.658	16.336	20.864
HEC-RAS						
Water depth (m)		Channel <i>n</i> Manning (m <sup>-1/3</sup> s)				
Flooded area (km <sup>2</sup> )		0.01	0.03	0.08	0.10	0.20
Floodplain <i>n</i> Manning (m <sup>-1/3</sup> s)	0.01	2.68	2.87	2.92	2.93	2.94
		1.500	1.900	2.100	2.100	2.100
	0.03	2.96	3.39	3.41	3.42	3.44
		2.100	2.900	3.097	3.100	3.100
	0.08	3.23	3.83	4.01	4.04	4.08
		2.700	3.900	4.300	4.300	4.300
	0.10	3.29	3.97	4.18	4.21	4.27
		2.700	4.100	4.500	4.700	4.700
	0.20	3.46	4.46	4.80	4.84	4.93
		3.100	5.100	5.900	5.900	6.100
FLO-2D						
Water depth (m)		Channel <i>n</i> Manning (m <sup>-1/3</sup> s)				
Flooded area (km <sup>2</sup> )		0.01	0.03	0.08	0.10	0.20
Floodplain <i>n</i> Manning (m <sup>-1/3</sup> s)	0.01	3.11	3.14	3.08	3.08	3.09
		2.538	2.703	2.803	2.803	2.804
	0.03	3.33	3.47	3.48	3.51	3.52
		3.306	3.561	3.700	3.702	3.802
	0.08	3.73	4.00	4.02	4.04	4.07
		4.108	4.537	4.893	4.898	4.997
	0.10	3.83	4.16	4.18	4.19	4.24
		4.297	4.893	5.177	5.259	5.309
	0.20	4.17	4.68	4.78	4.83	4.88
		4.941	5.880	6.366	6.489	6.591

### Varying the grid cell size (*c*).

Here, a simulation in steady flow conditions is generated with a discharge of  $750\text{m}^3/\text{s}$ , a unique channel and floodplain Manning coefficient of  $0.03\text{ m}^{-1/3}\text{s}$  and unique channel and floodplain gradient of 1%. Selected values for the grid cell size are: 10 m and 50 m.

Table 5: Changing the grid cell size (*c*).

		LISFLOOD-FP			HEC-RAS			FLO-2D		
Water depth (m)		discharge ( $\text{m}^3/\text{s}$ )			discharge ( $\text{m}^3/\text{s}$ )			discharge ( $\text{m}^3/\text{s}$ )		
Flooded area ( $\text{km}^2$ )		250	500	750	250	500	750	250	500	750
Grid cell size (m)	10	3.17	4.69	5.96	2.73	3.12	3.39	2.9	3.24	3.47
		2.499	5.457	7.970	1.700	2.500	2.900	2.306	3.085	3.561
	50	2.78	3.33	3.72	2.6	2.94	3.17	2.78	3.12	3.43
		1.473	2.458	3.443	1.463	2.438	3.413	4.475	5.385	6.338

The overall conclusion is that LISFLOOD-FP shows greater sensitiveness than the other models when changing parameter associated with the channel rather than with the floodplain. This seems rational as the flow momentum comes from the river and not from the floodplains which play mainly the role of obstructs. This lack of sensitiveness has been noticed and justified by other scientists as well (e.g. Hunter et al., 2005).

## 6. Conclusions

In general, the case study illustrates some large uncertainties in modelling flood inundation.

In cases of a complex topography (like the one in this study) where multiple directions of the flow are possible within a cross section, 1D models often fail to correctly simulate the flood in contrast to quasi-2D models with grid-based numerical schemes (Figure 7, 8).

In cases of small gradients, the simulated discharge of the quasi-2D LISFLOOD-FP is much closer to the expected value in comparison to the underestimated one of HEC-RAS (especially in the case of a finer grid) and the overestimated one of FLO-2D (note that for the FLO-2D the channel is not modelled separately as in LISFLOOD-FP) (Figure 12 & 14).

In cases where a finer grid is applied, LISFLOOD-FP has no difficulties with the small cell size in contrast to FLO-2D. Moreover, the HEC-RAS numerical scheme is not grid-based and thus, increasing the resolution of the grid increases the topographic accuracy of the cross-sections without affecting the simulation time.

In cases of narrow channels and large input discharge, it can be noticed that the three models differ a lot (Table 2, 3 & 4). This is probably due to the nature of the numerical scheme of the models. In the case of HEC-RAS (not grid-based), the input discharge is distributed along the whole input cross-section, while in the other two model the input discharge is distributed along the input grid cell only.

LISFLOOD-FP seems to be in a better agreement with the general conclusion that there is a much greater sensitivity of the flood extent to the channel's Manning coefficient rather than

the floodplain's one (similar conclusions have been derived by Cunge et al., 1980 and Hunter et al., 2005) (Table 4).



---

# 1. Εισαγωγή

---

## 1.1 Αντικείμενο Μελέτης – Μεθοδολογία & Τεχνικές Έρευνας

Στα πλαίσια εφαρμογής της Κοινοτικής Οδηγίας-Πλαίσιο για τις πλημμύρες (2007/60/EK) και στην κατεύθυνση διερεύνησης και εκτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου μιας περιοχής, απαραίτητη κρίνεται η επιλογή εκείνων των μεθοδολογικών εφαρμογών που δίνουν κατά περίπτωση τη δυνατότητα αξιόπιστης και ακριβούς υδραυλικής προσομοίωσης πλημμυρικών γεγονότων. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των υδραυλικών μοντέλων αποτελεί το απαραίτητο εργαλείο για την εκτίμηση του κινδύνου και τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την εφαρμογή μη κατασκευαστικών μέτρων στα πλαίσια της πολιτικής προστασίας μιας περιοχής, αλλά και την κατασκευή των απαραίτητων έργων υποδομής για την αντιπλημμυρική προστασία της.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας χρήσης τριών υδραυλικών μοντέλων στην προσομοίωση πλημμυρικού επεισοδίου μιας περιοχής σχετικά μικρών κλίσεων, μέσω της εκτίμησης της έκτασης της πλημμυρικής κατάκλυσης.

Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εφαρμογή είναι το μονοδιάστατης ανάλυσης HEC-RAS και τα ψευδο-διδιάστατα μοντέλα LISFLOOD-FP και FLO-2D. Οι προσομοιώσεις έγιναν θεωρώντας συνθήκες μόνιμης ροής.

Η εφαρμογή των μοντέλων έγινε σε μια περιοχή σχετικά μικρών κλίσεων, στην πεδιάδα της Θεσσαλίας. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τα παραπάνω υδραυλικά μοντέλα χρησιμοποιήθηκε η καταγραφή της έκτασης της πλημμυρικής κατάκλυσης ενός συγκεκριμένου επεισοδίου, της περιόδου 21-28 Ιανουαρίου του 2003, όπως καταγράφηκε από τον δορυφόρο Landsat 7 ([www.landsat.usgs.gov](http://www.landsat.usgs.gov)) την 28<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2003.

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας των μοντέλων βάσει και της εμπειρίας που αποκτήθηκε από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην περιοχή μελέτης, και την καταγραφή της ευαισθησίας που παρουσιάζουν στην μεταβολή κάποιων παραμέτρων τους, χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον κάποιες πρότυπες απλές τοπογραφίες. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η μεταβολή στην εξάπλωση της πλημμύρας μέσω των τριών μοντέλων με μεταβολές στην κατά τη ροή του ποταμού και την εγκάρσια σε αυτόν κλίση, στην παροχή εισόδου καθώς και στην μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας των επιφανειών. Μια επιπλέον παράμετρος ελέγχου ήταν η ανάλυση των γεωμετρικών δεδομένων της περιοχής (μέγεθος κυττάρου κανάβου μοντέλου και τοπογραφίας).

## 1.2 Πλημμύρες

Η Υδρολογία Πλημμυρών αναφέρεται στο κλάδο της Τεχνικής Υδρολογίας που μελετά τις διεργασίες εκείνες από την έναρξη μιας καταγίδας έως το τέλος της απορροής που οφείλεται στο συγκεκριμένο επεισόδιο βροχής. Στη διαδικασία αυτή δίνεται έμφαση στην επιφανειακή απορροή η οποία έχει ως συνέπεια την αύξηση της διερχόμενης παροχής του ποταμού.

Ως Πλημμύρα αναφέρεται «η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν καλύπτεται από νερό» (άρθρο 2, κεφ. 1 της Οδηγίας 2007/60/EK) και αναπτύσσεται βάσει της χωροχρονικής εξέλιξης της βροχόπτωσης σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (μορφολογικά, εδαφολογικά, χρήσεις γης-φυτοκάλυψη) καθώς και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του συστήματος αποστράγγισης (υδρογραφικό δίκτυο ή ανθρωπογενές περιβάλλον).

Τα κύρια μεγέθη μιας πλημμύρας είναι η παροχή αιχμής και η αντίστοιχη στάθμη στο υδατόρευμα, ο πλημμυρικός όγκος και η χρονική διάρκεια του πλημμυρικού γεγονότος που συσχετίζεται με τη διάρκεια της βροχόπτωσης. Οι πλημμύρες δύναται να προκληθούν από τοπικές βροχοπτώσεις, υπερχείλιση ποταμών, την τήξη του χιονιού, από την εισροή της θάλασσας στη στεριά, από ατυχήματα όπως θραύση φράγματος ή και από ανύψωση υπογείων υδάτων. Το μέγεθος μιας πλημμύρας συνδέεται με τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης (συνολικό ύψος, ένταση, διάρκεια), της λεκάνης απορροής (έκταση, συντελεστής απορροής, χρόνος συρροής) και των υδατορευμάτων (διατομή, κλίση, τραχύτητα, κατάντη στάθμες).

Η ανάλυση των πλημμυρών περιλαμβάνει δύο κύρια πεδία, την υδρολογική και την υδραυλική ανάλυση. Με την υδρολογική ανάλυση μελετάται το επεισόδιο της βροχής και γίνεται η εκτίμηση των παροχών απορροής σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Με αυτά τα δεδομένα η υδραυλική ανάλυση περιγράφει την εξέλιξη της ροής στο υφιστάμενο υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης καθώς και την πιθανή κατάκλυση στα πλημμυρικά πεδία εκατέρωθεν των καναλιών.

### 1.2.1 Οι Πλημμύρες στην Ελλάδα

Ο Ελλαδικός χώρος χαρακτηρίζεται από την μεγάλη ακτογραμμή, το έντονο ανάγλυφο και την μεγάλη οριζόντια κατάτμηση, περιλαμβάνοντας περίπου 3000 νησιά. Τα αποθέματα σε γλυκό νερό κατατάσσουν την Ελλάδα στις πιο πλούσιες χώρες της Μεσογείου σε νερό. Παρόλα αυτά, λόγω της άνισης κατανομής των πόρων, της εξάρτησης από πηγές άλλων χωρών, την ανισοκατανομή του πληθυσμού, της εποχικότητας της ζήτησης, αλλά και της παρατηρούμενης υπερεκμετάλλευσης που έχει ως αποτέλεσμα την υφαλμύριση πολλών υπογείων υδροφορέων, παρατηρούνται συχνά προβλήματα διαθεσιμότητας νερού σε κάποιες περιοχές της χώρας (Θεσσαλία, Ανατολική Πελοπόννησος, Νησιά Αιγαίου).

Το πολύπλοκο ανάγλυφο της Ελλάδας οδηγεί και στην διαφοροποίηση των βροχοπτώσεων. Αυξημένες βροχοπτώσεις καταγράφονται στη δυτική Ελλάδα, όπου η μέσο ετήσιο ύψος βροχής υπερβαίνει τα 1800mm. Ανατολικά της Πίνδου οι βροχοπτώσεις είναι πολύ μικρότερες και αυξάνουν και πάλι με την επίδραση της θάλασσας στα νησιά του Ανατολικού Αιγαίου. Τα μέσα ετήσια ύψη βροχόπτωσης, δεν σχετίζονται με τη συχνότητα εμφάνισης των πλημμυρικών επεισοδίων. Όπως και στην υπόλοιπη Μεσόγειο ο πιο συνηθισμένος τύπος πλημμυρών στην Ελλάδα είναι οι αστραπιαίες πλημμύρες (flashfloods) και ευνοούνται από

τη γεωμορφολογία, τη γεωλογία και τις κλιματικές παραμέτρους της περιοχής. Κύρια αιτία πρόκλησης των πλημμυρών αυτών είναι η αυξημένη ένταση της βροχόπτωσης.

Οι ζημιές που καταγράφονται από μια βροχόπτωση η οποία θα προκαλέσει πλημμύρα, εξαρτάται κυρίως από την παρουσία ή μη κατασκευαστικών αντιπλημμυρικών έργων, από την αλλοίωση του φυσικού περιβάλλοντος της λεκάνης απορροής (μείωση χρόνου συρροής), από την ανθρώπινη δραστηριότητα ειδικά στα πιθανά πλημμυρικά πεδία και από την ετοιμότητα των μηχανισμών πολιτικής προστασίας. Τα τελευταία 40 χρόνια στην Ελλάδα οι πλημμύρες έχουν προκαλέσει πολύ περισσότερα θύματα σε ανθρώπινες ζωές απ' ό,τι οι σεισμοί.

### 1.2.2 Θεσμικό πλαίσιο

Η Ελληνική νομοθεσία αναφέρεται στον υπολογισμό των πλημμυρικών παροχών στο Νόμο 696/1974 (ΦΕΚ 301/Α/8-10-1974) «Περί αμοιβών μηχανικών δια σύνταξιν μελετών, επίβλεψιν, παραλαβήν κλπ ... και σχετικών τεχνικών προδιαγραφών μελετών», στον οποίο προτείνεται ο υπολογισμός της πλημμυρικής παροχής ανάλογα με το μελετούμενο έργο και το σκοπό της μελέτης, με εφαρμογή εμπειρικών μεθόδων, στατιστικών μεθόδων, της μεθόδου ισόχρονων καμπυλών και υδρομετεωρολογικών μεθόδων. Ιδιαίτερη μνεία γίνεται στον υπολογισμό των πλημμυρικών παροχών με την ορθολογική μέθοδο (άρθρο 187).

Η ανάγκη εμπλουτισμού των προδιαγραφών αυτών για μεγάλης κλίμακας έργα, καλύφθηκε από τους μεγάλους Οργανισμούς, όπως η Εγνατία Οδός και η ΕΡΓΟΣΕ, που διεύθυναν αυτά τα έργα, μέσω της έκδοσης σχετικών προδιαγραφών – Οδηγιών μελετών. Στις οδηγίες αυτές για λεκάνες μεγάλου μεγέθους, αντί της ορθολογικής μεθόδου προτείνεται για τον υπολογισμό των πλημμυρικών παροχών η εφαρμογή μοναδιαίων υδρογραφημάτων ή και η χρήση του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος της US Soil Conservation Service (SCS).

Στο πλαίσιο της πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα Ύδατα η Οδηγία Πλαίσιο 2000/60/ΕΚ εισήγαγε μια νέα αντίληψη ολοκληρωμένης πολιτικής και έβαλε το πλαίσιο για την ποιότητα των υδάτων, έχοντας σκοπό την αποτροπή της περαιτέρω επιδείνωσης των υδάτων, την προστασία και βελτίωση της κατάστασης των υδάτινων οικοσυστημάτων, καθώς και των αμέσως εξαρτώμενων από αυτά χερσαίων οικοσυστημάτων και υγροτόπων σε ό,τι αφορά τις ανάγκες τους σε νερό. Μεταξύ άλλων συμβάλλει στο μετριασμό των επιπτώσεων από τις πλημμύρες και τις ξηρασίες. Στην κατεύθυνση αυτή, ενισχυτικά και εξειδικευμένα διατυπώνεται η 2007/60/ΕΚ Οδηγία για την αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Βασικός στόχος της Οδηγίας είναι η δημιουργία ενός ευρωπαϊκού πλαισίου για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, ώστε να μειωθούν οι αρνητικές συνέπειες στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες. Η διαδικασία διαχείρισης του κινδύνου πλημμύρας, σύμφωνα με την Οδηγία υλοποιείται σε τρία στάδια:

Στο πρώτο στάδιο τα κράτη μέλη συντάσσουν προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας για τις λεκάνες απορροής ποταμών ώστε να προσδιοριστούν οι περιοχές με σοβαρή επικινδυνότητα πλημμύρας.

Στο δεύτερο στάδιο, εκπονούνται χάρτες επικινδυνότητας και χάρτες κινδύνων πλημμύρας για τις περιοχές που είναι δυνητικά επικίνδυνες για εκδήλωση πλημμυρών, στους οποίους αποτυπώνονται οι αρνητικές συνέπειες των πλημμυρών σε πληθυσμό, εγκαταστάσεις κλπ.

Στο τρίτο στάδιο καταρτίζονται σχέδια διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας τα οποία περιλαμβάνουν μέτρα μείωσης της πιθανότητας πλημμύρας και περιορισμού των πιθανών επιπτώσεων της. Τα σχέδια αυτά θα εστιάζουν στην πρόληψη των πλημμυρών και των επιπτώσεων τους, στην προστασία μέσω κατασκευαστικών και μη κατασκευαστικών μέτρων και στην ετοιμότητα του πληθυσμού για την αντιμετώπιση ενός πλημμυρικού γεγονότος.

Η Οδηγία για την αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας ενσωματώθηκε στο Εθνικό Δίκαιο με την ΚΥΑ ΗΠ31822/1542/Ε103 (ΦΕΚ 1108/Β/21-7-2010).

Σε εφαρμογή των ανωτέρω η Ειδική Γραμματεία Υδάτων προχώρησε το Δεκέμβριο του 2012 στην προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας, η οποία περιλαμβάνει την καταγραφή των ιστορικών πλημμυρών με τα κύρια χαρακτηριστικά τους, τον εντοπισμό των περιοχών όπου είναι πιθανόν να εκδηλωθούν πλημμύρες με αξιολόγηση των δυνητικών αρνητικών συνεπειών τους και τον καθορισμό των Ζωνών Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας. Ως Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας προσδιορίστηκαν οι περιοχές εκείνες που είναι πιθανόν να σημειωθεί πλημμύρα -θέσεις προσχωματικών αποθέσεων και θέσεις με κλίσης εδάφους μικρότερη από 2%- και για τις οποίες εκτιμώνται δυνητικά σημαντικές συνέπειες από μελλοντικές πλημμύρες -λόγω των χρήσεων γης που περιλαμβάνουν λαμβάνοντας υπόψη και τα στοιχεία των ιστορικά καταγεγραμμένων πλημμυρών και των απόψεων των περιφερειακών φορέων. Μεταξύ αυτών καταγράφεται και η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας.

### **1.3 Διάρθρωση εργασίας**

Η εργασία μαζί με την παρούσα εισαγωγή διαρθρώνεται σε 6 κεφάλαια:

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται η περιγραφή της περιοχής μελέτης που επιλέχθηκε για την εφαρμογή των υδραυλικών μοντέλων. Γίνεται αναφορά στην ευρύτερη περιοχή που εντάσσεται υδρολογικά η περιοχή μελέτης και περιγράφεται η ακριβής θέση και οι ιδιαιτερότητες της.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται τα Υδραυλικά Μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ως προς το θεωρητικό πλαίσιο υπολογισμού της ροής που το καθένα ακολουθεί.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η μεθοδολογία εφαρμογής των υδραυλικών μοντέλων στην περιοχή μελέτης και αναλύονται τα αποτελέσματα αυτής.

Στο Κεφάλαιο 5 αναλύεται η εφαρμογή των μοντέλων σε κάποιες πρότυπες απλές τοπογραφίες και παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα και συμπεράσματα.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 καταγράφονται τα τελικά συμπεράσματα που προέκυψαν από το σύνολο της εργασίας ενώ προτείνονται και κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο.

---

## 2. Περιγραφή Περιοχής Μελέτης

---

### 2.1 Το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας

Το Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας όπως καθορίστηκε με το Ν.1739/1987 (ΦΕΚ 201/Α/20-11-1987), με έκταση 13 377 km<sup>2</sup> αποτελεί το δεύτερο μεγαλύτερο Υδατικό Διαμέρισμα της χώρας. Τα όρια του ακολουθούν σε μεγάλο βαθμό τα όρια του αντίστοιχου γεωγραφικού διαμερίσματος Θεσσαλίας, το οποίο καλύπτει το 88% της έκτασης του υδατικού διαμερίσματος. Περιλαμβάνει σχεδόν το σύνολο των Περιφερειακών Ενοτήτων Λάρισας, Μαγνησίας και τα μεγαλύτερα τμήματα των Περιφερειακών Ενοτήτων Καρδίτσας και Τρικάλων. Περιλαμβάνει επίσης τμήματα των Περιφερειών Στερεάς Ελλάδας (τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Φθιώτιδας), Ηπείρου (μικρό τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Γρεβενών), Δυτικής Μακεδονίας (μικρό τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Κοζάνης) και Κεντρικής Μακεδονίας (μικρό τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Πιερίας).



Εικόνα 2.1: Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (www.geodata.gov.gr - επεξεργασμένα στοιχεία).

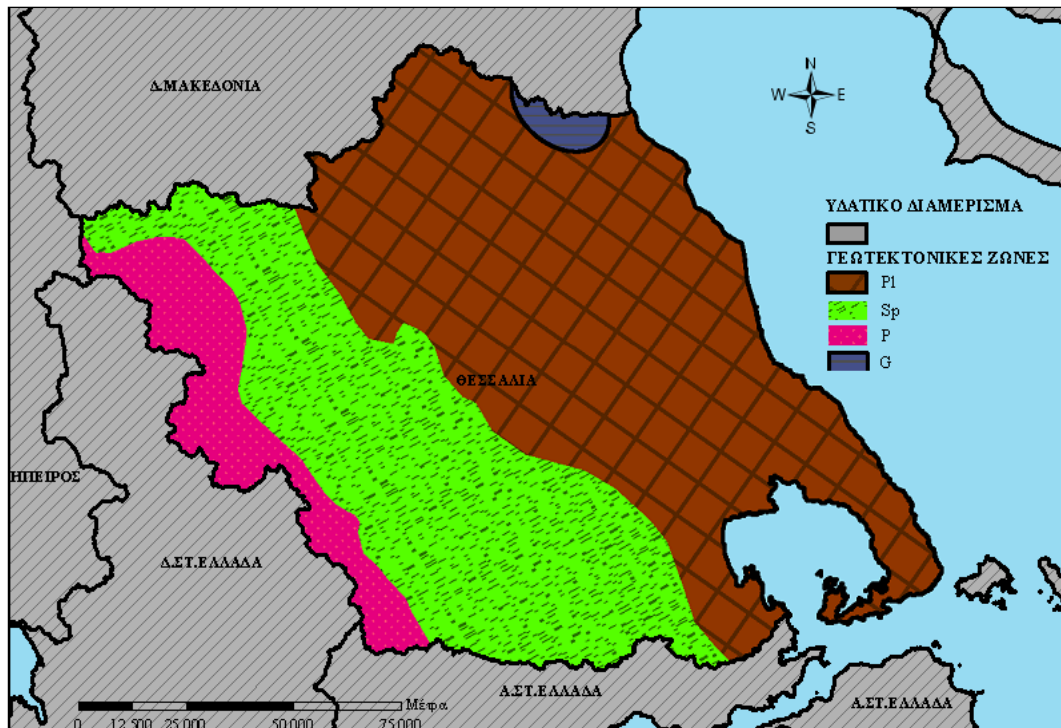
Σύμφωνα με την από 16-7-2010 πρώτη απόφαση (ΦΕΚ 1383/Β/2-9-2010) της Εθνικής Επιτροπής Υδάτων, η οποία συστάθηκε ως αρμόδιο διυπουργικό όργανο για την χάραξη της πολιτικής για την προστασία και διαχείριση των Υδάτων στα πλαίσια του Ν. 3199/2003 (ΦΕΚ 280/Α/9.12.2003) με τον οποίο ενσωματώθηκε στο Εθνικό Δίκαιο η Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά (60/2000/ΕΚ), καθορίστηκαν οι 45 Λεκάνες Απορροής Ποταμών, οι οποίες υπάγονται στα 14 Υδατικά Διαμερίσματα της χώρας. Σύμφωνα με αυτήν το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας αποτελείται από δύο Λεκάνες απορροής, τη Λεκάνη απορροής Πηνειού και τη Λεκάνη απορροής Ρεμάτων Αλμυρού-Πηλίου. Η Λεκάνη απορροής του Πηνειού αποτελεί την κύρια υδρολογική λεκάνη του υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας με έκταση της τάξης των 9.500 km<sup>2</sup> και διατρέχεται από τον ποταμό Πηνειό και τους παραποτάμους του. Κύριοι παραπόταμοι του Πηνειού είναι στο νότιο τμήμα της Λεκάνης ο π. Ενιπέας, ο π. Φαρσαλιώτης, ο π. Σοφαδίτης και ο π. Καλέντζης, στο δυτικό τμήμα το ρ. Μαλακασιώτικο, ο π. Πορταϊκός και ο π. Πάμισος (Πλιούρης) και στο βόρειο τμήμα ο π. Ληθαίος, ο π. Νεοχωρίτης και ο π. Τιταρήσιος. Στον ποταμό Σοφαδίτη έχει κατασκευαστεί το φράγμα του Σμοκόβου, ενώ στο υδατικό διαμέρισμα βρίσκεται και η κλειστή λεκάνη της Λ. Κάρλας. Με τον ποταμό Καλέντζη μεταφέρονται τα νερά από την εκτροπή του ποταμού Ταυρωπού μέσω του ταμιευτήρα Πλαστήρα από το γειτονικό υδατικό διαμέρισμα Δυτικής Στερεάς Ελλάδας.

Οι υδατικές ανάγκες του Διαμερίσματος καταγράφονται σε 1632 hm<sup>3</sup>/y εκ των οποίων 1559 hm<sup>3</sup> για κάλυψη των αναγκών άρδευσης, 69 hm<sup>3</sup> για ύδρευση και 13 hm<sup>3</sup> για τις ανάγκες της κτηνοτροφίας (Εθνικό πρόγραμμα Διαχείρισης και προστασίας των Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ 2008).



Εικόνα 2.2: Λεκάνες Απορροής Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (www.geodata.gov.gr - επεξεργασμένα στοιχεία).

Το Θεσσαλικό πεδίο αποτελεί ένα τεκτονικό βύθισμα, διαμορφώνοντας μια γεωμορφολογική εικόνα με τα πεδινά τμήματα στην κεντρική περιοχή η οποία περιβάλλεται από τα ορεινά τμήματα και συγκεκριμένα τις οροσειρές Ολύμπου – Καμβουνίων στα βόρεια, Πίνδου στα δυτικά, Όθρυος στα νότια και Πηλίου – Όσσας στα ανατολικά. Το μέσο υψόμετρο του υδατικού διαμερίσματος είναι 427.5 m. Με τα Χαλκηδόνια όρη, η πεδιάδα της Θεσσαλίας χωρίζεται στην Ανατολική και τη Δυτική, οι οποίες θεωρούνται ανεξάρτητες από υδρογεωλογική άποψη.



Εικόνα 2.3: Γεωτεκτονικές Ζώνες Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας ([www.geodata.gov.gr](http://www.geodata.gov.gr) - [www.geo.auth.gr/museum/MuseumGeol\\_Paleont\\_files/page0005.htm](http://www.geo.auth.gr/museum/MuseumGeol_Paleont_files/page0005.htm) -επεξεργασμένα στοιχεία).

Από τις συνολικά 13 ζώνες που απαντώνται στον Ελλαδικό χώρο, στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας αναπτύσσονται τρεις γεωτεκτονικές ζώνες με βορειοδυτική – νοτιοανατολική κατεύθυνση. Διακρίνονται μεταξύ τους με βάση το παλαιοπεριβάλλον απόθεσης που αντιπροσωπεύουν και τη γεωτεκτονική ιστορία τους. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα καταγράφονται οι παρακάτω ζώνες (Εθνικό πρόγραμμα Διαχείρισης και προστασίας των Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ 2008):

- (α) η Πελαγονική ζώνη (P1) με παλαιά μεταμορφωμένα σχιστογενευσιακά και ανθρακικά πετρώματα,
- (β) η Υποπελαγονική ζώνη (Sp) με κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα τις μεγάλες οφιολιθικές μάζες και τη συνοδεύουσα σχιστοκερατολιθική διάπλαση, και
- (γ) η Ζώνη Ολωνού – Πίνδου (P) με μεσοζωϊκούς ασβεστολιθικούς ορίζοντες και πυριτόλιθους.



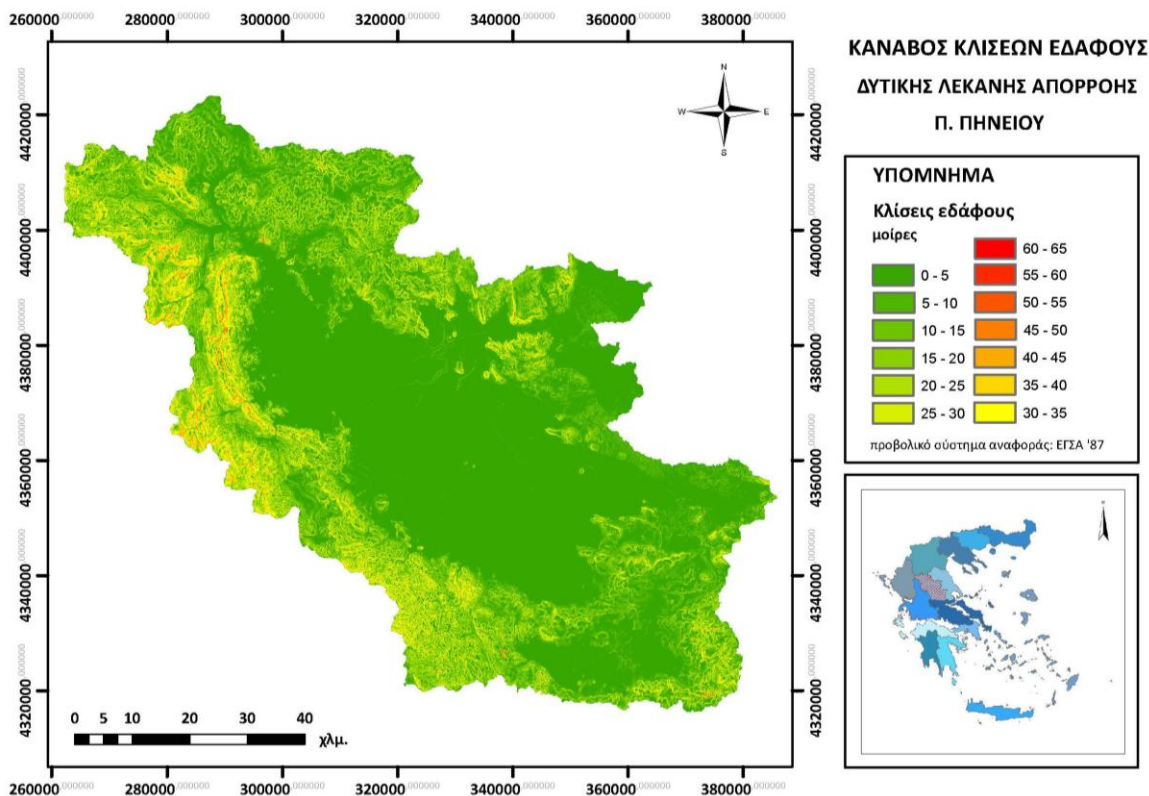
(δ) η Ενότητα Όσσας (G), στο βουνό Όλυμπο, ένα τεκτονικό παράθυρο από φυλλίτες, μάρμαρα και δολομίτες.

Στο Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας καταγράφονται σημαντικοί προσχωματικοί υδροφορείς. Η κοιλάδα της Θεσσαλίας χωρίζεται σε δύο κύριες υδρογεωλογικές λεκάνες, τη Δυτική και την Ανατολική. Οι δύο λεκάνες διαχωρίζονται με μια λοφώδη περιοχή νεογενών αποθέσεων που θεωρείται ξεχωριστή υδρογεωλογική ενότητα. Στην περίμετρο των δύο υδροφορέων, αναπτύσσονται καρστικές ενότητες με πολύ σημαντική υδροφορία.

### 2.1.1 Δυτική Λεκάνη Θεσσαλίας

Η Δυτική Λεκάνη του Πηνειού οριοθετείται ανάντη της θέσης Αμυγδαλιά. Έχει έκταση 6300 km<sup>2</sup>, μέση ετήσια βροχόπτωση 779 mm και μέση ετήσια απορροή 259 mm (συντελεστής απορροής 0.33), λαμβάνοντας υπόψη τις απολήψεις (Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών απορροής ποταμών Αχελώου και Πηνειού, ΥΠΕΧΩΔΕ 2006).

Όπως φαίνεται και στον κάρτα κλίσεων εδάφους που δημιουργήθηκε από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (εικόνα 2.4.) η Δυτική Λεκάνη της Θεσσαλίας αποτελείται από την δυτική πεδιάδα με πολύ μικρές κλίσεις η οποία περιβάλλεται περιμετρικά από οροσειρές με αυξανόμενες κλίσεις, ενώ στα κατάντη τα Χαλκηδόνια όρη την διαχωρίζουν από την Ανατολική Λεκάνη.



Εικόνα 2.4: Κλίσεις εδάφους Δυτικής λεκάνης Θεσσαλίας.



Διατρέχεται από τον κύριο κλάδο του ποταμού Πηνειού και τους σημαντικότερους παραποτάμους του, εκτός από τον Τιταρήσιο, ο οποίος διατρέχει την ανατολική λεκάνη. Πρόκειται για τη σημαντικότερη περιοχή από πλευράς διαθέσιμων πόρων αλλά και την περιοχή με τις μεγαλύτερες καταναλώσεις κυρίως για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών της πεδιάδας.

Η ύπαρξη ενός πλούσιου δικτύου ποταμών ευνοεί τον εμπλουτισμό των υπογείων υδροφόρων οριζόντων της Δυτικής πεδιάδας από κατεισδύσεις κατά μήκος των κοιτών με τις σημαντικότερες να σημειώνονται στους κώνους αποθέσεων από πιο αδρομερή υλικά που έχουν δημιουργηθεί στις περιοχές όπου οι ορεινές κοίτες συναντούν την πεδιάδα. Ο εμπλουτισμός των υπογείων υδροφόρων ενισχύεται και από τις υπόγειες πλευρικές διηθήσεις κατά μήκος των επαφών του πεδινού προσχωματικού με τους γύρω ορεινούς όγκους. Σύμφωνα με τη Διαχειριστική Μελέτη Υδατικών Πόρων Λεκάνης Απορροής π. Πηνειού, ο διαχωρισμός των υδατικών πόρων σε επιφανειακούς και υπόγειους δεν είναι αρκετά σαφής. Στη Δυτική πεδιάδα, η σχέση μεταξύ επιφανειακών απορροών και υπογείων νερών είναι πολύ στενή. Στα ανάντη της πεδιάδας, οι υδροφόροι εμπλουτίζονται από επιφανειακές απορροές, ενώ στα κατάντη υπάρχουν εκφορτίσεις των υπογείων νερών οι οποίες ενισχύουν την επιφανειακή ροή. Η σχέση αυτή είναι ιδιαίτερα στενή και αμφίδρομη επειδή η Δυτική πεδιάδα θεωρείται πρακτικά υδρογεωλογικά κλειστή, χωρίς αξιόλογες υπόγειες διαφυγές. Έτσι, η απορροή στην κατάντη θέση Αμυγδαλιά καθορίζεται αθροιστικά από την επιφανειακή απορροή και τις υπόγειες εκφορτίσεις, μειούμενη από τις καταναλώσεις.

Η Δυτική λεκάνη απορροής του Πηνειού αποτελείται από δύο ευρύτερες υπολεκάνες, του κύριου κλάδου του Πηνειού -η οποία περιλαμβάνει και τις λεκάνες του Ληθαίου, του Πάμισου, του Πορταϊκού και του Νεοχωρήτη- και του Ενιπέα -η οποία περιλαμβάνει και τις λεκάνες του Καλέντζη, του Σοφαδίτη και του Φαρσαλιώτη. Η πλέον κατάντη θέση της πρώτης υπολεκάνης είναι η θέση Αλή Εφέντη. Οι δύο λεκάνες παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά βροχόπτωσης – απορροής όπως φαίνονται στον πίνακα.

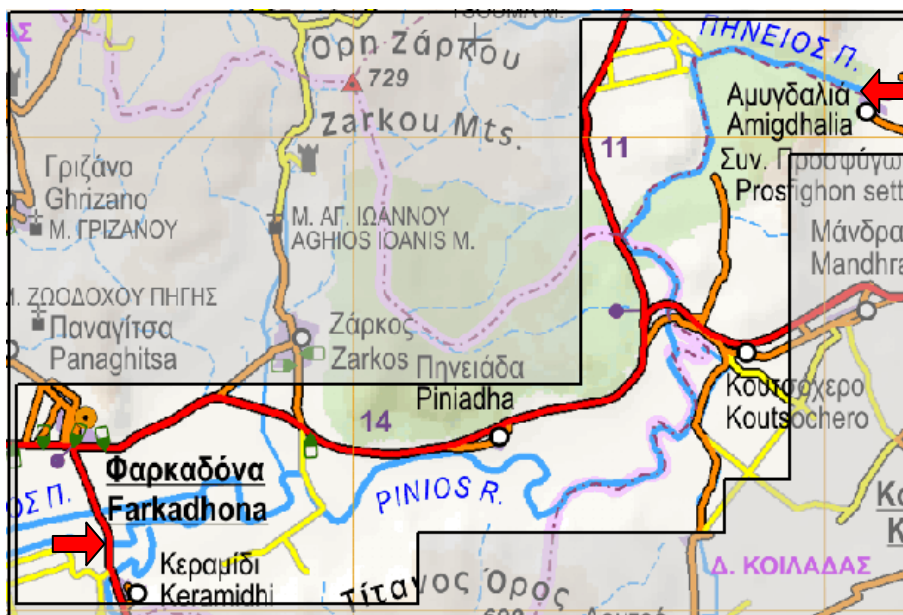
Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά υπολεκανών Δυτικής Λεκάνης Απορροής Πηνειού (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006).

Λεκάνη	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Μέση Βροχόπτωση (mm/y)	Μέση Απορροή (mm/y)	Συντελεστής Απορροής
Υπολεκάνη κυρίου κλάδου Πηνειού και παραποτάμων του ανάντη της θέσης Αλή Εφέντη	2 800	939	421	0.43
Υπολεκάνη Ενιπέα και άλλων παραποτάμων Πηνειού κατάντη της θέσης Αλή Εφέντη και ανάντη της θέσης Αμυγδαλιά	3 500	651	129	0.20
Δυτική Λεκάνη Πηνειού	6 300	779	259	0.33

## 2.1.1.1 Περιοχή Μελέτης

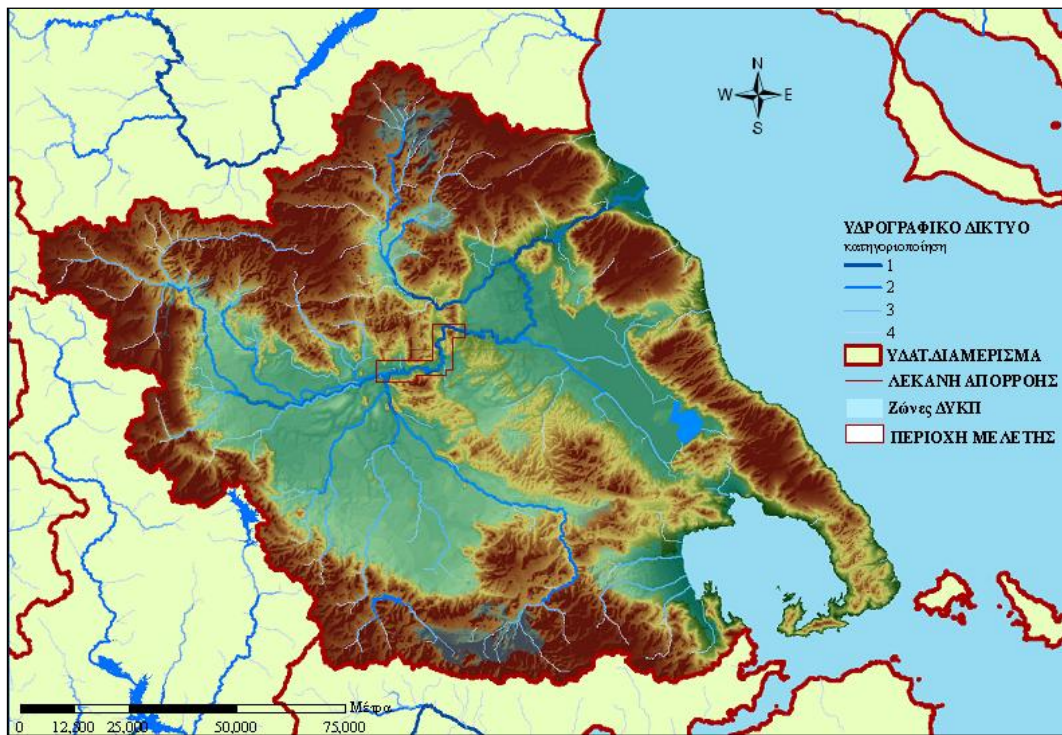
Η περιοχή μελέτης εντάσσεται στη Δυτική Λεκάνη του Υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας, στα όρια των Νομών Τρικάλων και Λάρισας. Αφορά το πλέον κατάντη τμήμα του ποταμού Πηνειού στην Δυτική Λεκάνη της Θεσσαλίας. Ξεκινάει στα ανάντη από τη θέση Αλή Εφέντη έως τη θέση Αμυγδαλιά στα κατάντη.

Πρόκειται για ένα μήκος ποταμού της τάξης των 40km, ο οποίος διέρχεται από την πεδιάδα της Θεσσαλίας με πολύ μικρές κλίσεις ιδιαίτερα στα πρώτα χιλιόμετρα. Στο μήκος αυτό του ποταμού κατάντη της συμβολής με τον ποταμό Ενιπέα (πλησίον της θέσης Αλή Εφέντη) δεν εκβάλλει άλλος παραπόταμος στον Πηνειό ποταμό. Στην περιοχή αυτή έχουν κατασκευαστεί κάποια αναχώματα για την προστασία της πεδιάδας από επικείμενες πλημμύρες. Κύρια χρήση της περιοχής η καλλιέργεια της γης.



Εικόνα 2.5: Περιοχή μελέτης (www.anavasi.gr).

Η περιοχή μελέτης αποτελεί τμήμα Ζώνης Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας, σύμφωνα με την προκαταρκτική αξιολόγηση κινδύνων πλημμύρας που συντάχθηκε στα πλαίσια εφαρμογής της Οδηγίας για την αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας (2007/60/ΕΚ) και πρόκειται για το πλέον κατάντη θέση της Δυτικής ζώνης.



Εικόνα 2.6: Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2012)



---

### 3. Περιγραφή Υδραυλικών Μοντέλων

---

Τα υδραυλικά μοντέλα ανάλογα με τη διάσταση των διανυσμάτων των υπολογιζόμενων υδραυλικών χαρακτηριστικών διακρίνονται γενικά σε μονοδιάστατης, διδιάστατης και τριδιάστατης ανάλυσης.

Τα μονοδιάστατα μοντέλα υδραυλικής προσομοίωσης διόδευσης πλημμύρας υπολογίζουν το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας κατά περίπτωση για συνθήκες μόνιμης ομοιόμορφης, μόνιμης ανομοιόμορφης, ή μη μόνιμης – απότομα ή βαθμιαία - μεταβαλλόμενης ροής. Τα μοντέλα αυτά συνήθως χρησιμοποιούν την εξίσωση Manning και η επίλυση του μοντέλου αφορά τον υπολογισμό του μέσου βάθους ροής και της μέσης ταχύτητας κάθετα στην διατομή του ποταμού, η οποία κατανέμεται ομοιόμορφα στη διατομή (ή σε τμήματα αυτής) με κοινό συντελεστή τραχύτητας. Με βάση την τοπογραφία της περιοχής παράγεται ο πλημμυρικός χάρτης, με πλημμυρικές περιοχές εκείνες με χαμηλότερο υψόμετρο από εκείνο της υπολογισμένης ελεύθερης επιφάνειας του νερού.

Τα διδιάστατα μοντέλα επιχειρούν την προσομοίωση των πλημμυρικών φαινομένων στις διαστάσεις μήκους και πλάτους. Γίνεται εκτίμηση του βάθους ροής σε κάθε σημείο της περιοχής μελέτης αλλά και ο υπολογισμός της κατανομής της ταχύτητας ροής στις δύο διαστάσεις, κατά την ροή του ποταμού και εγκάρσια αυτού.

Τα τριδιάστατα μοντέλα, χρησιμοποιούνται σε πιο σύνθετες υδραυλικές εφαρμογές, όπως σε περιπτώσεις όπου η κατακόρυφη ταχύτητα είναι σημαντική –αναλύσεις υδραυλικών αλμάτων, σχεδιασμό υπερχειλιστών κ.α.. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιώντας σύνθετες υπολογιστικές σχέσεις επιτυγχάνοντας τον ακριβέστερο υπολογισμό της ροής.

Μια άλλη κατηγορία μοντέλων αποτελούν τα ψευδο-διδιάστατα μοντέλα, τα οποία επιλύουν ξεχωριστά την μονοδιάστατη εξίσωση της ορμής στην κύρια διεύθυνση της ροής αλλά και στην διεύθυνση κάθετα σε αυτήν. Με αυτόν τον τρόπο συνδυάζουν τον σύντομο υπολογιστικό χρόνο των μοντέλων μονοδιάστατης ανάλυσης παρέχοντας επιπλέον πληροφορία στην δεύτερη διάσταση. Αυτού του είδους τα μοντέλα έχουν αποδειχτεί εξαιρετικά χρήσιμα στην προσομοίωση πλημμυρικών φαινομένων (Horritt & Bates, 2002), διότι (α) οι περιοχές που πλημμυρίζουν είναι συνήθως πολλών km<sup>2</sup>, αυξάνοντας πολύ το υπολογιστικό κόστος, (β) η ορμή της ροής στην κύρια διεύθυνσή της αναμένεται να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή στην εγκάρσια, με αποτέλεσμα ο υπολογισμός της αλληλεπίδρασης των δύο διευθύνσεων να έχει μικρή βαρύτητα στην τελική κατεύθυνση του πλημμυρικού κύματος παράλληλα όμως αυξάνοντας το υπολογιστικό κόστος.

### 3.1 Θεωρητικό πλαίσιο

#### 3.1.1 Ροή με ελεύθερη επιφάνεια

Η ροή με ελεύθερη επιφάνεια χωρίζεται σε κατηγορίες ανάλογα με χαρακτηριστικά που βασίζονται σε κινηματικά ή δυναμικά κριτήρια.

Από κινηματική άποψη η ροή χαρακτηρίζεται σε:

- (α) Μόνιμη ροή (steady flow), στην οποία τα χαρακτηριστικά της ροής παραμένουν αμετάβλητο στο χρόνο
- (β) Μη μόνιμη ή χρονικά μεταβαλλόμενη ροή (unsteady flow), στην οποία τα χαρακτηριστικά της ροής μεταβάλλονται στο χρόνο.
- (γ) Ομοιόμορφη (uniform), όπου τα χαρακτηριστικά της ροής είναι σταθερά σε όλο το μήκος του αγωγού και
- (δ) Ανομοιόμορφη (non-uniform), όπου τα χαρακτηριστικά της ροής μεταβάλλονται κατά μήκος του αγωγού.

Στη φύση οι ροές είναι συνήθως μη μόνιμες και ανομοιόμορφες, παρουσιάζουν δηλαδή χωρική και χρονική μεταβλητότητα.

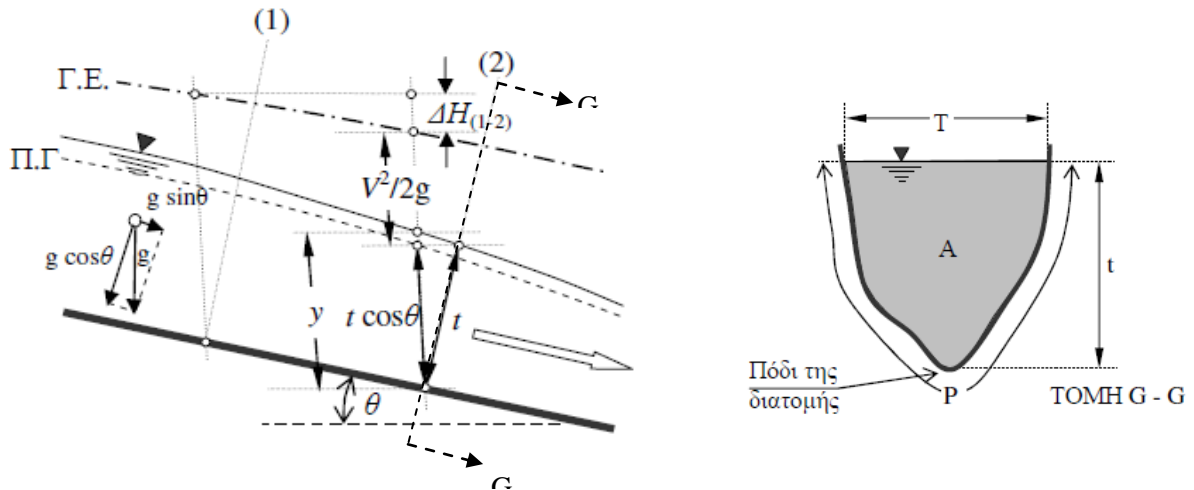
Από δυναμική άποψη η ροή χαρακτηρίζεται σύμφωνα με τη σχέση των δυνάμεων αδράνειας (ταχύτητα ρευστού) και βαρύτητας (κύματα) που τη χωρίζουν σε:

- (α) Υποκρίσιμη ροή (subcritical), όταν οι δυνάμεις βαρύτητας υπερσχύουν των δυνάμεων αδράνειας. Στην περίπτωση αυτή ένα κύμα κινείται ταχύτερα από τη μέση ροή με αποτέλεσμα τυχόν μικροδιαταραχές στην ελεύθερη επιφάνεια να μεταδίδονται και προς τα ανάντη. Στην υποκρίσιμη ροή ο αριθμός Froude:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}, \text{ έχει τιμή } Fr < 1 \quad (3.1)$$

- (β) Υπερκρίσιμη ροή (supercritical), όταν οι δυνάμεις αδράνειας υπερσχύουν των δυνάμεων βαρύτητας. Στην περίπτωση αυτή ένα κύμα κινείται βραδύτερα από τη μέση ροή με αποτέλεσμα τυχόν μικροδιαταραχές στην ελεύθερη επιφάνεια να παρασύρονται προς τα κατάντη. Στην υπερκρίσιμη ροή ο αριθμός Froude έχει τιμή  $Fr > 1$
- (γ) Κρίσιμη ροή, όταν οι δυνάμεις βαρύτητας και αδράνειας είναι ισοδύναμες. Πρόκειται για ασταθή ροή η οποία μεταπίπτει από υπερκρίσιμη σε υποκρίσιμη και αντίστροφα. Στην κρίσιμη ροή ο αριθμός Froude έχει τιμή  $Fr = 1$ .

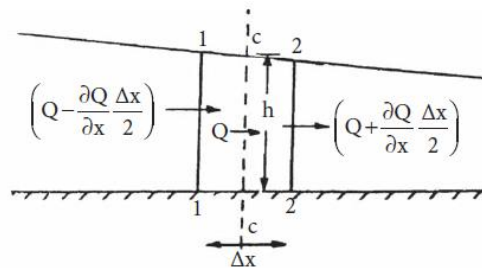
Η ροή για την οποία η παροχή δεν είναι ίδια κατά μήκος του αγωγού, όπως για παράδειγμα η ροή ενός ποταμού, ονομάζεται χωρικά μεταβαλλόμενη ροή (spatially varied flow) και μπορεί να είναι μόνιμη ή μη μόνιμη.



Εικόνα 3.1: Χαρακτηριστικά μεγέθη της ροής σε αγωγό με ελεύθερη επιφάνεια (Παπανικολάου, 2012).

Ενώ η ροή είναι κατά κανόνα τριδιάστατη με μια κύρια συνιστώσα στη διεύθυνση του καναλιού, η ανάλυση γίνεται συνήθως προσεγγιστικά σε μια διάσταση, επιλέγοντας κάποιο όγκο αναφοράς (πεπερασμένο ή διαφορικό) και εφαρμόζοντας τους νόμους της ρευστομηχανικής. Οι βασικές εξισώσεις της ρευστομηχανικής που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη ροή σε ανοιχτούς αγωγούς θεωρώντας ένα ολοκληρωματικό όγκο αναφοράς είναι:

(α) Εξίσωση συνέχειας



Εικόνα 3.2: Εισροή και εκροή σε όγκο ελέγχου (Πρίνος, 2009).

Η εξίσωση συνέχειας διατυπώνεται σε:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3.2)$$

και εκφράζοντας την παροχή σαν γινόμενο της μέσης ταχύτητας και της παροχής, έχουμε:

$$\frac{\partial}{\partial x} (A \bar{V}) + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3.3)$$

Στην περίπτωση μόνιμης ροής θεωρώντας έναν ολοκληρωματικό όγκο αναφοράς η εξίσωση συνέχειας διαμορφώνεται σε:

$$\int_A \rho(V dA) = 0 \Leftrightarrow A_1 V_1 = A_2 V_2 = A V = Q \quad (3.4)$$

όπου,  $A$  : το εμβαδόν της υγρής διατομής,

$V$  : η μέση ταχύτητα του υγρού στη διατομή και

$\rho$  : η πυκνότητα του υγρού

(β) Εξίσωση ποσότητας της κίνησης (ορμής)

Η διατήρηση της ορμής ενός κινούμενου ρευστού εκφράζεται με την εξίσωση των ασκούμενων εξωτερικών δυνάμεων σε έναν όγκο αναφοράς με το ρυθμό μεταβολής της συνολικής ορμής. Η αρχή διατήρησης της ορμής εφαρμόζεται χωριστά σε κάθε κύρια διεύθυνση του τριδιάστατου συστήματος αναφοράς και λαμβάνει τη μορφή:

$$\sum F_i = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho V_i dS + \sum (M_{out})_i - \sum (M_{in})_i \quad (3.5)$$

όπου,  $F_i$  : οι δυνάμεις που ασκούνται σε έναν όγκο αναφοράς κατά την διεύθυνση  $i$

$t$  : ο χρόνος

$cv$  : ο όγκος ελέγχου

$V$  : η συνιστώσα της ταχύτητας στη διεύθυνση  $i$

$A$  : το εμβαδόν της υγρής διατομής,

$\rho$  : η πυκνότητα του υγρού

$S$  : ο όγκος του ρευστού

$M_{out}$  : ο ρυθμός απώλειας ορμής από τον όγκο ελέγχου

$M_{in}$  : ο ρυθμός εισροής ορμής στον όγκο ελέγχου

Στην περίπτωση της μόνιμης ροής η αρχή διατήρησης της ορμής εφαρμοζόμενη μεταξύ δύο διατομών 1 και 2 διαμορφώνεται σε:

$$\sum F = \rho Q (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) = 0 \quad (3.6)$$

όπου,  $Q$  : η παροχή

$\rho$  : η πυκνότητα του υγρού

$V$  : η μέση ταχύτητα σε κάθε διατομή

$\beta$  : ο συντελεστής διόρθωσης όταν αμελείται η πραγματική κατανομή της  $u(z)$  ταχύτητας στον υπολογισμό των αδρανειακών όρων της ορμής, ο οποίος προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\beta = \frac{\int_A u^2 dA}{V^2 A} \quad (3.7)$$



(γ) Εξίσωση ενέργειας

Η εξίσωση ενέργειας μεταξύ δύο εγκάρσιων στον πυθμένα διατομών (1) και (2) γράφεται ως εξής:

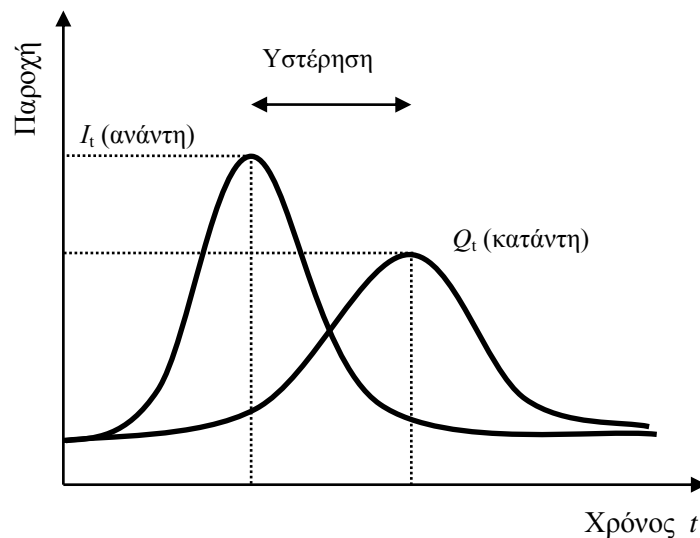
$$H_1 = H_2 + \Delta H_{(1-2)}, \quad H = \frac{p}{\rho g} + z + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (3.8)$$

όπου  $\Delta H_{(1-2)}$  οι απώλειες ενέργειας ανάμεσα στις διατομές (1) και (2),  $V$  η μέση ταχύτητα του υγρού στη διατομή,  $\rho$  η πυκνότητα του υγρού,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $\alpha$  διορθωτικός συντελεστής λόγω ανομοιομορφίας της κατανομής ταχύτητας, ο οποίος προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{\int_A u^3 dA}{V^3 A} \quad (3.9)$$

### 3.1.2 Διόδευση Πλημμυρών

Με τον όρο διόδευση νοείται ο υπολογισμός του πλημμυρικού υδρογραφήματος σε μια θέση στα κατάντη ενός υδατορεύματος όταν αυτό είναι γνωστό σε μια θέση στα ανάντη. Πρόκειται για τη μαθηματική αναπαράσταση ενός πλημμυρικού φαινομένου στο χώρο και στο χρόνο. Εφόσον δεν πραγματοποιούνται πλευρικές εισροές κατά μήκος ενός υδατορεύματος, το υδρογράφημα που εισάγεται ανάντη, εμφανίζεται στα κατάντη με χρονική υστέρηση, μειωμένη αιχμή και αυξημένη χρονική διασπορά.



Διάγραμμα 3.1: Μεταβολή πλημμυρικού κύματος.

Για τη μαθηματική περιγραφή του φαινομένου χρησιμοποιούνται οι διαφορικές εξισώσεις μονοδιάστατης βαθμιαία μεταβαλλόμενης ροής σε ανοιχτούς αγωγούς (πλήρεις εξισώσεις St. Venant - εξίσωση συνέχειας και διατήρησης της ποσότητας κίνησης). Το σύστημα των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων που προκύπτει σε συνδυασμό με την εξίσωση της συνέχειας, δεν επιλύεται αναλυτικά. Για την επίλυσή τους εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι οι

οποίες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες τις υδραυλικές μεθόδους και τις υδρολογικές μεθόδους επίλυσης των διοδεύσεων.

Οι υδρολογικές μέθοδοι αποτελούν την πλέον εύχρηστη μεθοδολογία, ελέγχοντας τη στάθμη και την παροχή σε δύο σημεία ανάντη και κατάντη, μη εξετάζοντας τη πλήρη χωροχρονική εξέλιξη του φαινομένου. Οι υδραυλικές μέθοδοι επιλύουν το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων βασιζόμενες σε σχήματα πεπερασμένων διαφορών είτε σε απλοποιήσεις που επιτρέπουν την αναλυτική επίλυση.

### 3.2 Θεωρητικό πλαίσιο υπολογισμών της ροής στο HEC RAS

Το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS (<http://www.hec.usage.army.mil>) του U.S. Army Corps of Engineers υπολογίζει την ελεύθερη επιφάνεια υπό συνθήκες μονοδιάστατης, μόνιμης ή μη μόνιμης και ανομοιόμορφης ροής σε φυσικά ή τεχνητά υδατορεύματα. Χρησιμοποιεί την εξίσωση μονοδιάστατης ενέργειας σαν βασική υπολογιστική διαδικασία για την προσομοίωση της ροής σε υδατόρευμα.

#### 3.2.1 Μόνιμη ροή

Το HEC-RAS προσδιορίζει τα υψόμετρα της υδατικής στάθμης της επιφανειακής απορροής στα επιλεγμένα σημεία (διατομές) κάτω από ορισμένες συνθήκες ροής. Ως στοιχεία εισόδου ζητούνται τα γεωμετρικά δεδομένα των διατομών καθώς και τα στοιχεία σταθερής ροής (οριακές συνθήκες). Η κατάσταση της ροής ελέγχεται σύμφωνα με τον αριθμό Froude, βάσει του οποίου προσομοιώνονται περιπτώσεις όπου εμφανίζονται εναλλαγές των καταστάσεων ροής. Η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας προσδιορίζεται για υποκρίσιμη, υπερκρίσιμη ή μικτή ροή.

Επιλύοντας την εξίσωση της ενέργειας σε μονοδιάστατη ανάλυση, το HEC-RAS υπολογίζει σε συνθήκες μόνιμης ροής την ελεύθερη επιφάνεια του νερού διαδοχικά από διατομή σε διατομή με μία επαναληπτική διαδικασία η οποία βασίζεται σε πέντε στάδια όπως περιγράφονται παρακάτω (η ανάλυση γίνεται από κατάντη προς ανάντη για υποκρίσιμη ροή και από ανάντη προς κατάντη για υπερκρίσιμη ροή):

- (i) Αρχικά γίνεται υπόθεση του ύψους της επιφάνειας ροής ( $WS$ ) στην ανάντη διατομή (ή στην κατάντη εφόσον έχει οριστεί ότι γίνεται υπολογισμός υπερκρίσιμης ροής).
- (ii) Υπολογίζεται η παροχευτικότητα και το ύψος κινητικής ενέργειας ( $\alpha \frac{V^2}{2g}$ ).
- (iii) Υπολογίζονται οι απώλειες λόγω τριβής και οι ολικές απώλειες ενέργειας.
- (iv) Επιλύεται η εξίσωση ενέργειας.
- (v) Συγκρίνεται η αρχική υπόθεση του ύψους της επιφάνειας ροής με την τιμή που υπολογίστηκε.

Τα βήματα (i) έως (v) επαναλαμβάνονται έως να ταυτιστούν οι δύο τιμές με μια προκαθορισμένη ανοχή (προεπιλεγμένη τιμή 0.003 m). Στην πρώτη προσπάθεια η επιλογή της αρχικής εκτίμησης της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας λαμβάνεται από το βάθος ροής της προηγούμενης διατομής αφού προσαρμοστεί στο βάθος ροής της εξεταζόμενης διατομής. Στη δεύτερη επανάληψη η στάθμη επιλέγεται ίση με την αρχικά επιλεγείσα στάθμη συν 70% του λάθους της πρώτης προσπάθειας. Από την τρίτη επανάληψη και μετά ακολουθείται η

μέθοδος της τέμνουσας (*secand method*). Γίνεται ουσιαστικά αναγωγή της μεταβολής της διαφοράς ανάμεσα στην υπολογισθείσα και την υποτιθέμενη στάθμη των δυο προηγούμενων επαναλήψεων με τον περιορισμό του  $\pm 50\%$  της αρχικής στάθμης από την προηγούμενη επανάληψη. Εκτελούνται έως 20 επαναλήψεις και αν δεν επιτευχθεί η απαιτούμενη σύγκλιση, τότε στη εξεταζόμενη διατομή χρησιμοποιείται το κρίσιμο βάθος.

Εκτός της παραδοχής της μονοδιάστατης ανάλυσης της ροής, η εφαρμογή θεωρεί κλίση του υδατορεύματος μικρότερη του 1:10.

Η βασική υδραυλική εξίσωση που επιλύει το HEC-RAS είναι η εξίσωση ενέργειας ανάμεσα σε δύο διαδοχικές διατομές, η οποία διατυπώνεται ως:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (3.10)$$

όπου,  $Z_1, Z_2$  : υψόμετρα πυθμένα του υδατορεύματος σε δύο διαδοχικές διατομές 1 και 2

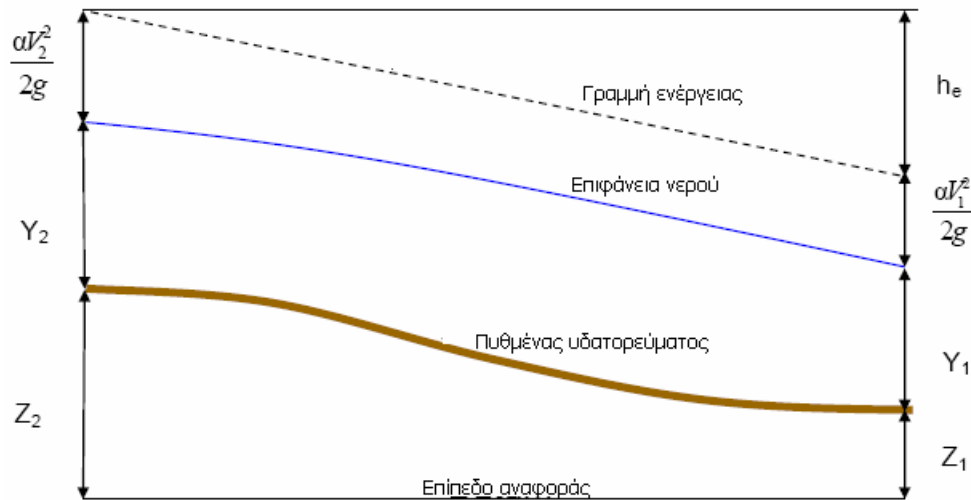
$Y_1, Y_2$  : βάθη νερού σε δύο διαδοχικές διατομές 1 και 2

$\alpha_1, \alpha_2$  : συντελεστές διόρθωσης κινητικής ενέργειας

$V_1, V_2$  : μέσες ταχύτητες διατομών 1 και 2 (παροχή  $Q$  / Εμβαδόν διατομής  $A$ )

$g$  : επιτάχυνση της βαρύτητας

$h_e$  : ολικές απώλειες ενέργειας



Εικόνα 3.3: Παράσταση των όρων της εξίσωσης ενέργειας (Brunner, 2010).

Το ολικό ύψος των απωλειών ενέργειας μεταξύ δύο διατομών συνίσταται στο ύψος των γραμμικών απωλειών -απώλειες λόγω τριβής- οι οποίες υπολογίζονται ως το γινόμενο της κλίσεως της πιεζομετρικής γραμμής και του μήκους του εξεταζόμενου τμήματος και στο ύψος των τοπικών απωλειών -απώλειες λόγω στενώσεων και διευρύνσεων-, σύμφωνα με τη σχέση:

$$h_e = L \bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (3.11)$$

όπου,  $L$ : η μέση σταθμισμένη απόσταση μεταξύ 2 διαδοχικών διατομών 1 και 2

$\bar{S}_f$ : η κλίση πιεζομετρικής γραμμής

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

$\left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$ : η μεταβολή της υδροστατικής πίεσης μεταξύ 2 διαδοχικών διατομών οφειλόμενης στην ταχύτητα ροής.

Με τη μεθοδολογία αυτή γίνεται εφικτός ο χειρισμός διαφόρων υδραυλικών προβλημάτων, όπως υδραυλικά άλματα, η εκτίμηση υψομετρικών υδραυλικών προφίλ των υδατορευμάτων και ο προσδιορισμός των επιπτώσεων από διάφορες κατασκευές, όπως γέφυρες κα.

Η μέση σταθμισμένη, ως προς τις παροχές, απόσταση μεταξύ των διαδοχικών διατομών  $L$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (3.12)$$

όπου,  $L_{lob}$ ,  $L_{ch}$ ,  $L_{rob}$ : οι αποστάσεις μεταξύ δύο διατομών για το αριστερό τμήμα κατά μήκος της διεύθυνσης ροής, την κοίτη και το δεξί τμήμα, αντίστοιχα.

$\bar{Q}_{lob}$ ,  $\bar{Q}_{ch}$ ,  $\bar{Q}_{rob}$ : οι μέσες παροχές μεταξύ δύο διατομών στο αριστερό τμήμα κατά μήκος της διεύθυνσης ροής, την κοίτη και το δεξί τμήμα, αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τη σχέση του Manning για την παροχή ισχύει:

$$Q = K S_f^{1/2}, \quad K = \frac{1.486}{n} A R^{2/3} \quad (3.13)$$

όπου,  $K$ : η παροχευτικότητα

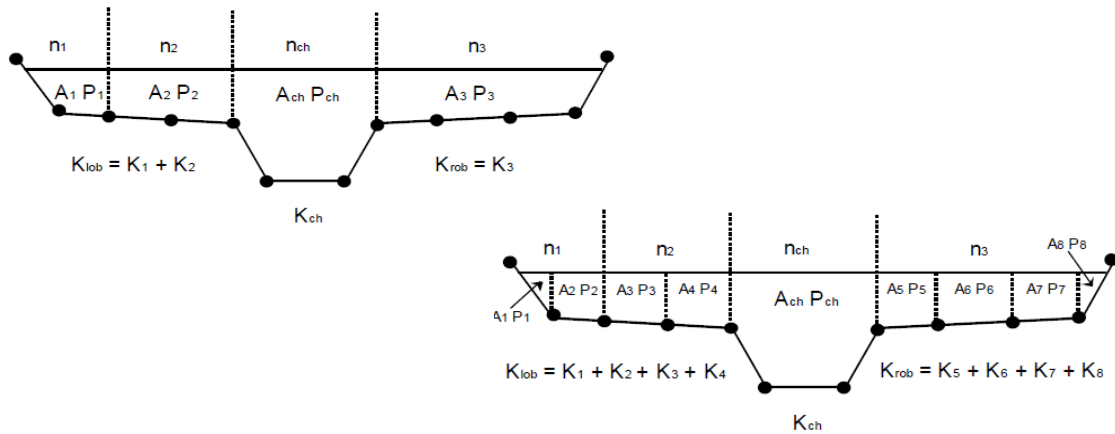
$S_f$ : η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής

$n$ : ο συντελεστής τραχύτητας του Manning

$A$ : το εμβαδόν της υγρής διατομής

$R$ : υδραυλική ακτίνα διατομής (εμβαδόν  $A$  / βρεχόμενη περίμετρος  $P$ )

Η προσέγγιση που χρησιμοποιείται στο HEC-RAS για τον υπολογισμό της παροχευτικότητας, είναι να υποδιαιρείται η διατομή σε τμήματα όπου η ταχύτητα θεωρείται ομοιόμορφα κατανομημένη.



Εικόνα 3.4: Υποδιαίρεση της διατομής για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς (Brunner, 2010).

Ως βάση υποδιαίρεσης της διατομής πλέον των τριών τμημάτων της -κοίτης και δύο πλευρές πέραν αυτής (πλημμυρικές κοίτες)- χρησιμοποιούνται τα σημεία μεταβολής του συντελεστή τραχύτητας του Manning. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σημεία υποδιαίρεσης της διατομής όλα τα σημεία που ορίζουν τη διατομή πέραν της κοίτης. Υπολογίζεται τελικά ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς  $K$  ως άθροισμα των τριών τμημάτων, της κοίτης ( $K_{ch}$ ), του τμήματος δεξιά αυτής ( $K_{rob}$ ) ως άθροισμα των επιμέρους  $K_i$  και του τμήματος αριστερά αυτής ( $K_{lob}$ ) ως άθροισμα επίσης των επιμέρους  $K_i$ .

Στις περιπτώσεις όπου ο συντελεστής τραχύτητας του Manning διαφοροποιείται εντός της κοίτης στην διατομή μπορεί να υποδιαιρευθεί η κοίτη στα αντίστοιχα τμήματα ή να υπολογιστεί ένας σύνθετος συντελεστής  $n_c$ , θέτοντας ως κριτήριο της επιλογής την μέγιστη κλίση του πρανούς της κοίτης (προεπιλεγμένη τιμή 5H:1V). Ο σύνθετος συντελεστής  $n_c$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$n_c = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (P_i n_i^{1.5})}{P} \right]^{2/3} \quad (3.14)$$

όπου,  $n_i$  : ο συντελεστής τραχύτητας του Manning για το τμήμα  $i$  της κοίτης

$P$  : η βρεχόμενη περίμετρος της κοίτης

$P_i$  : η βρεχόμενη περίμετρος του τμήματος  $i$  της κοίτης

Η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής  $S_f$  μεταξύ δύο διατομών δύναται να υπολογιστεί με εναλλακτικούς τρόπους, όπως αναφέρονται παρακάτω:

$$\bar{S}_f = \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (3.15)$$

(Average Conveyance Equation), η οποία αποτελεί και την προεπιλεγμένη εξίσωση υπολογισμού

$$\bar{S}_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \quad (3.16)$$

(Average Friction Slope Equation),

$$\bar{S}_f = \sqrt[3]{(S_{f1} S_{f2})} \quad (3.17)$$

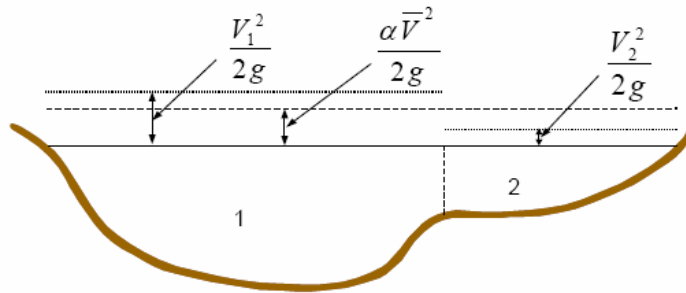
(Geometric Mean Friction Slope Equation),

$$\bar{S}_f = \frac{2(S_{f1} S_{f2})}{S_{f1} + S_{f2}} \quad (3.18)$$

(Harmonic Mean Friction Slope Equation).

ενώ δίνεται η δυνατότητα να επιτραπεί στο πρόγραμμα να επιλέξει την κατάλληλη εξίσωση ανάλογα με τις συνθήκες της ροής.

Για την εκτίμηση των τοπικών απωλειών ενέργειας σε δύο διαδοχικές διατομές, υπολογίζεται η μέση κινητική ενέργεια στην κάθε διατομή όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο σχήμα. Σε κάθε διατομή υπολογίζεται μόνο μία στάθμη ελεύθερης επιφάνειας και ένα μέσο ύψος κινητικής ενέργειας, δεδομένου ότι η εφαρμογή επιλύει μόνο την περίπτωση της μονοδιάστατης ροής. Συνεπώς, για δεδομένη στάθμη νερού, το μέσο ύψος της ενέργειας προκύπτει ως μέσος όρος των υψών ενέργειας των διαφόρων τμημάτων της διατομής.



Εικόνα 3.5: Υπολογισμός Μέσης Κινητικής Ενέργειας σε διατομή (Brunner, 2010).

Αρχικά υπολογίζεται ο συντελεστής διόρθωσης  $\alpha$  μέσω της γενικής σχέσης:

$$\alpha = \frac{(Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2 + \dots + Q_N V_N^2)}{Q V^2} \quad (3.19)$$

Ο υπολογισμός γίνεται στα τρία βασικά τμήματα της διατομής, την κοίτη και τα τμήματα εκατέρωθεν αυτής (δεξιά και αριστερά). Ο συντελεστής  $\alpha$  συναρτήσει της επιφάνειας της υγρής διατομής και της παροχετευτικότητας διατυπώνεται ως:

$$\alpha = A_t^2 \frac{\frac{K_{lob}^3}{A_{lob}^2} + \frac{K_{ch}^3}{A_{ch}^2} + \frac{K_{rob}^3}{A_{rob}^2}}{K_t^3} \quad (3.20)$$

όπου,  $A_t$ ,  $A_{lob}$ ,  $A_{ch}$ ,  $A_{rob}$  : επιφάνεια υγρής διατομής (συνολική, πέραν της αριστερής όχθης, στην κοίτη και πέραν της δεξιάς όχθης, αντίστοιχα)

$K_t$ ,  $K_{lob}$ ,  $K_{ch}$ ,  $K_{rob}$  : παροχτευτικότητα (συνολική, στην αριστερή πλημμυρική κοίτη, στην κοίτη και στην δεξιά πλημμυρική κοίτη, αντίστοιχα)

Στις περιπτώσεις όπου η ελεύθερη επιφάνεια του νερού διέρχεται από το κρίσιμο βάθος (μετάβαση από υποκρίσιμη σε υπερκρίσιμη ροή και αντίστροφα), η εξίσωση της ενέργειας δεν είναι εφαρμοστέα δεδομένου ότι πρόκειται για κατάσταση ταχέως μεταβαλλόμενης ροής ενώ η εξίσωση ενέργειας προϋποθέτει συνθήκες βαθμιαίας μεταβαλλόμενης ροής.

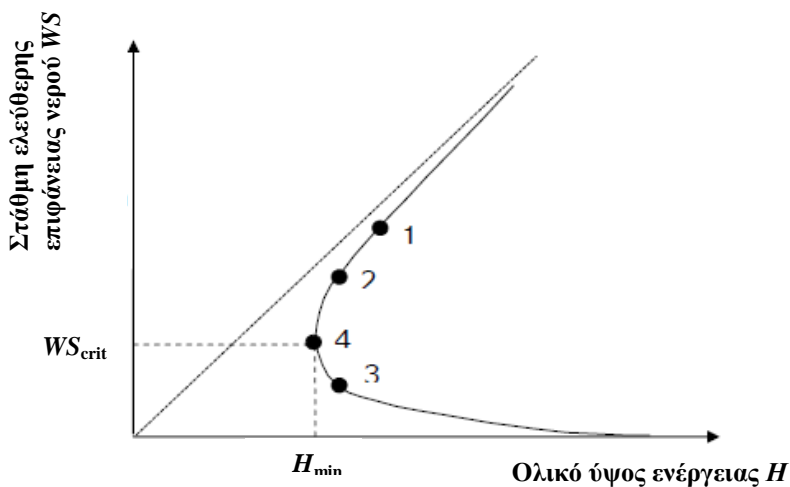
Ο υπολογισμός του κρίσιμου βάθους γίνεται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας εφαρμογής της σχέσης του ολικού ύψους ενέργειας σε κάθε διατομή, η οποία μπορεί να υλοποιηθεί με δύο μεθόδους, τη μέθοδο της τέμνουσας ή την παραβολική μέθοδο. Η παραβολική μέθοδος (ταχύτερη και προεπιλεγμένη από την εφαρμογή μέθοδος) δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού μίας μόνο ελάχιστης τιμής στην καμπύλη ενέργειας. Το ολικό ύψος ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$H = WS + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (3.21)$$

όπου,  $WS$  : η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού

$\frac{\alpha V^2}{2g}$  : το φορτίο λόγω ταχύτητας

Το κρίσιμο βάθος ( $WS_{crit}$ ) είναι η στάθμη της επιφάνειας του νερού για την οποία το ολικό ύψος ενέργειας γίνεται ελάχιστο.



Διάγραμμα 3.2: Μεταβολή της ενέργειας συναρτήσει της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού.

Σε περιπτώσεις που όπως αναφέρθηκε δεν μπορεί να εφαρμοστεί η εξίσωση της ενέργειας, όπως για παράδειγμα οι απότομες αλλαγές στη κλίση του υδατορεύματος, σε στενώσεις γεφυρών, σε διώρυγες πτώσης, σε κόμβους υδατορευμάτων κ.α. χρησιμοποιείται η εξίσωση διατήρησης της ορμής, η οποία διατυπώνεται ως:

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q \rho \Delta V_x \quad (3.22)$$

όπου,  $P$  : η υδροστατική πίεση σε δύο διαδοχικές διατομές 1 και 2

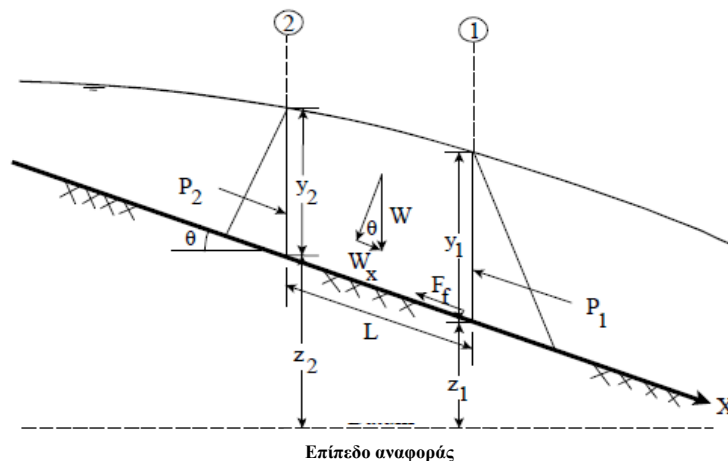
$W_x$  : η δύναμη από το βάρος του νερού στη διεύθυνση  $x$

$F_f$  : η δύναμη λόγω των εξωτερικών απωλειών τριβής από τη διατομή 2 στην 1

$Q$  : η παροχή

$\rho$  : η πυκνότητα του νερού

$\Delta V_x$  : η μεταβολή της ταχύτητας από τη διατομή 2 στην 1 κατά τη διεύθυνση  $x$



Εικόνα 3.6: Παράσταση των όρων της εξίσωσης διατήρησης της ορμής (Brunner, 2010).

Η υδροστατική πίεση  $P$  στη διεύθυνση  $x$ , υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$P = \gamma A \bar{Y} \cos\theta \quad (3.23)$$

όπου,  $\gamma$  : το ειδικό βάρος του νερού,

$A$  : η βρεχόμενη επιφάνεια της διατομής,

$\bar{Y}$  : το βάθος από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού έως το κέντρο βάρους της διατομής.

Το βάρος του νερού στην  $x$  διεύθυνση μεταξύ των δύο διατομών είναι:

$$W_x = \gamma \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) L S_o \quad (3.24)$$

όπου,  $\gamma$  : το ειδικό βάρος του νερού,

$A_i$  : η βρεχόμενη επιφάνεια της κάθε διατομής,

$L$  : το μήκος μεταξύ των δύο διατομών 1 και 2,

$S_o$  : η κλίση του πυθμένα του υδατορεύματος.

Η δύναμη λόγω των εξωτερικών τριβών υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_f = \tau \bar{P} L \quad (3.25)$$



όπου,  $\bar{P}$  : η μέση βρεχόμενη περιμετρος μεταξύ των διατομών 1 και 2,

$L$  : το μήκος μεταξύ των δύο διατομών 1 και 2,

$\tau$  : η διατμητική τάση, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\tau = \gamma \bar{R} \bar{S}_f \quad (3.26)$$

όπου,  $\bar{R}$  : η υδραυλική ακτίνα ( $R = A / P$ )

$\bar{S}_f$  : η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής

Η μεταβολή της ταχύτητας από τη διατομή 2 στην διατομή 1 υπολογίζεται ως:

$$\Delta V_x = \beta_1 V_1 - \beta_2 V_2 \quad (3.27)$$

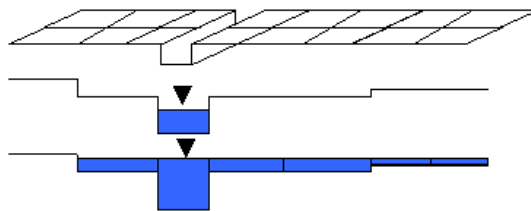
όπου,  $\beta$  : ο συντελεστής διόρθωσης της κατανομής της ταχύτητας (όταν αμελείται η πραγματική κατανομή της  $u(z)$  ταχύτητας στον υπολογισμό των αδρανειακών όρων της ορμής).

Η εξίσωση που τελικά χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της αρχής διατήρησης της ορμής έχει τη διατύπωση:

$$\frac{Q_2^2 \beta_2}{g A_2} + A_2 \bar{Y}_2 + \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) L S_o - \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) L \bar{S}_f = \frac{Q_1^2 \beta_1}{g A_1} + A_1 \bar{Y}_1 \quad (3.28)$$

### 3.3 Θεωρητικό πλαίσιο υπολογισμών της ροής στο LISFLOOD-FP

Το LISFLOOD-FP (<http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood>) του Πανεπιστημίου του Bristol, αποτελεί ένα πρωτότυπο υδραυλικό ψευδο-διδιάστατο μοντέλο που χρησιμοποιεί μονοδιάστατη ανάλυση σε δύο διευθύνσεις, μία στην κύρια διεύθυνση της ροής και μία στην εγκάρσια διεύθυνση αυτής. Επίσης, η μονοδιάστατη ανάλυση εφαρμόζεται ξεχωριστά για το κανάλι και το πλημμυρικό πεδίο και συνδυάζονται μέσω μιας σχέσης συνέχειας.



Εικόνα 3.7: Υδραυλικό μοντέλο LISFLOOD-FP (πηγή: <http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood>).

Στο επίπεδο του καναλιού το LISFLOOD-FP επιλύει τις εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας της κίνησης (ορμής) σε μονοδιάστατη ανάλυση ώστε να περιγράψει την κατάντη διάδοση ενός πλημμυρικού κύματος υπολογίζοντας την κλίση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (3.29)$$

$$S_o - \frac{n^2 P^{4/3} Q^2}{A^{10/3}} = 0 \quad (3.30)$$

όπου,  $Q$  : η παροχή στο κανάλι

$A$  : η βρεχόμενη επιφάνεια της διατομής

$q$  : η ροή προς το κανάλι από άλλες πηγές, όπως από οι πλημμυρικές κοίτες ή τυχόν παράπλευρα κανάλια

$S_o$  : η κλίση του πυθμένα του καναλιού

$n$  : ο συντελεστής τραχύτητας του Manning

$P$  : η βρεχόμενη περίμετρος της διατομής. Γίνεται υπόθεση ότι το κανάλι είναι ευρύ και ρηχό ώστε το πλάτος του να προσεγγίζει τη βρεχόμενη περίμετρο.

Οι παραπάνω εξισώσεις με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών διαμορφώνονται σε ένα μη γραμμικό σύστημα το οποίο επιλύεται χρησιμοποιώντας την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson.

Βάσει του πλημμυρογραφήματος που τίθεται ανάντη του υδατορεύματος καθορίζονται οι οριακές συνθήκες της ροής. Δεδομένα εισόδου του μοντέλου είναι το πλάτος του καναλιού, η κλίση του πυθμένα του, τα τοπογραφικά υψόμετρα του καναλιού και πλημμυρικού πεδίου και ο συντελεστής τραχύτητας Manning στο κανάλι και στο πλημμυρικό πεδίο, στοιχεία τα οποία μπορούν να μεταβάλλονται κατά μήκος του υδατορεύματος και πλημμυρικού πεδίου.

Κάθε κανάλι-υδατόρευμα υλοποιείται ως ένα διάνυσμα ανεξάρτητο από το ψηφιδωτό αρχείο της επιφάνειας το οποίο περιλαμβάνει τις πλημμυρικές περιοχές και αντιπροσωπεύει αποκλειστικά τη ροή του νερού στο κανάλι. Με αυτόν τον τρόπο κάθε φατνίο του ψηφιδωτού αρχείου που βρίσκεται πάνω στο κανάλι έχει δύο βάθη νερού. Εκείνο που προέρχεται από τη ροή του καναλιού και εκείνο που προέρχεται από τις πλημμυρικές περιοχές. Το κανάλι (διανυσματικό αρχείο) αλληλεπιδρά με τις πλημμυρικές περιοχές (φατνία ψηφιδωτού αρχείου που διέρχονται πάνω από το διανυσματικό) με αποτέλεσμα το νερό να ρέει από το κανάλι στο πλημμυρικό πεδίο και αντίστροφα, ροή η οποία υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης του Manning. Αυτή η λειτουργία δίνει τη δυνατότητα αξιοποίησης δύο διαφορετικής ανάλυσης αρχείων, ενός πιο λεπτομερούς διανυσματικού αρχείου για το κανάλι και ενός πιο αδρομερούς ψηφιδωτού αρχείου για τις πλημμυρικές παροχές, κάτι το οποίο είναι χρήσιμο στην προσομοίωση πλημμυρικών επεισοδίων μεγάλων περιοχών που διατρέχονται από μικρού πλάτους υδατορεύματα.

Ένας βασικός περιορισμός στην εφαρμογή είναι ότι αν και κατά μήκος του καναλιού μπορεί να αλλάζει η κλίση του πυθμένα του, είναι απαραίτητο να διατηρείται συνεχώς αρνητική.

Η ροή στα πλημμυρικά πεδία –πλευρική ροή- περιγράφεται από την εξίσωση του Manning ή την εξίσωση υπερχειλίσης. Οι πλημμυρικές περιοχές υλοποιούνται μέσω ενός ψηφιδωτού αρχείου, όπου οι ροή περιγράφεται από φατνίο σε φατνίο μέσω της διαφοράς του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας σε κάθε ένα από αυτά. Υπολογίζεται ουσιαστικά η χωροχρονική μετατόπιση ενός πλημμυρικού κύματος σε δύο διαστάσεις. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθες:

$$\frac{dh^{i,j}}{dt} = \frac{Q_x^{i-1,j} - Q_x^{i,j} + Q_y^{i,j-1} - Q_y^{i,j}}{\Delta x \Delta y} \quad (3.31)$$

$$Q_x^{i,j} = \frac{h_{\text{flow}}^{5/3}}{n} \left( \frac{h^{i-1,j} - h^{i,j}}{\Delta x} \right)^{1/2} \Delta y \quad (3.32)$$

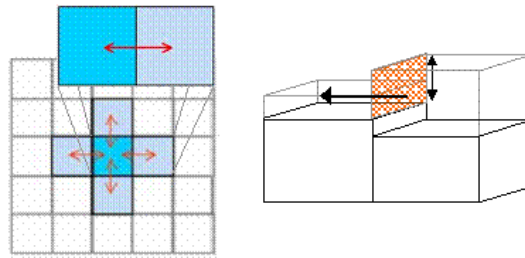
όπου,  $h^{i,j}$ : το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στο φατνίο  $i, j$

$\Delta x, \Delta y$ : οι διαστάσεις του φατνίου

$n$ : ο συντελεστής τραχύτητας για τις πλημμυρικές περιοχές

$Q_x, Q_y$ : οι παροχές μεταξύ των φατνίων στις δύο διευθύνσεις (η  $Q_y$  προκύπτει κατ' αντιστοιχία με την τελευταία εξίσωση).

$h_{\text{flow}}$ : το ικανό βάθος ώστε να υπάρχει ροή από το ένα φατνίο στο άλλο, το οποίο ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της υψηλότερης στάθμης ελεύθερης επιφάνειας των δύο φατνίων και του υψηλότερου υψομέτρου από το επίπεδο αναφοράς των δύο φατνίων.



Εικόνα 3.8: Φατνία πλημμυρικού πεδίου, ροή μεταξύ αυτών (Πηγή: <http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood>)

Με την ίδια μεθοδολογία οι παραπάνω εξισώσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ροής μεταξύ πλημμυρικών πεδίων και καναλιού. Σε συνδυασμό με την αρχική εξίσωση του καναλιού επιτυγχάνεται η σύνδεση των πλημμυρικών πεδίων με το κανάλι. Πρόκειται για μια απλουστευμένη προσέγγιση στη σύνδεση πλημμυρικών πεδίων και καναλιού, η οποία βασίζεται αποκλειστικά στη σχετική μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας του νερού (μεταβολή μάζας), χωρίς να λαμβάνονται υπόψη μεταβολές ορμής μεταξύ καναλιού και πλημμυρικών πεδίων.

Το μοντέλο επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει χρονικό βήμα υπολογισμών ενώ, για την αποφυγή αστοχιών, υπολογίζεται και μια μέγιστη επιτρεπτή παροχή μεταξύ των φατνίων ως συνάρτηση του βάθους ροής, του μεγέθους του φατνίου, και του χρονικού βήματος υπολογισμών:

$$Q_x^{i,j} = \min \left( Q_x^{i,j}, \frac{\Delta x \Delta y (h^{i,j} - h^{i-1,j})}{4\Delta t} \right) \quad (3.33)$$

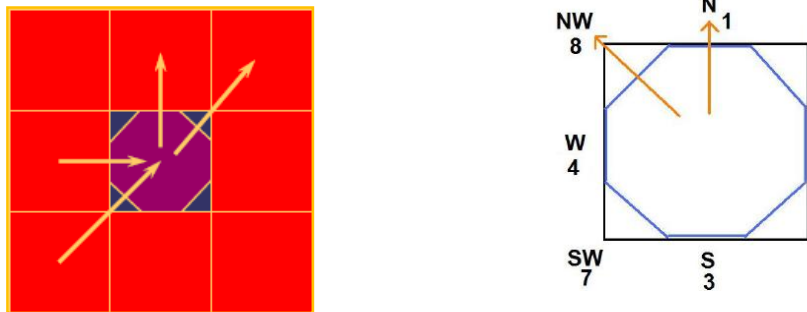
Θέτοντας το παραπάνω περιορισμό εξασφαλίζεται ότι η παροχή δεν θα υπερβεί κάποιο όριο το οποίο θα οδηγήσει σε αντιστροφή της ροής προς ή από το φατνίο στο επόμενο χρονικό βήμα. Σε πιθανή τέτοια περίπτωση αντικαθίσταται η παροχή που υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση του Manning από μια νέα τιμή η οποία προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη τις

παραμέτρους του μοντέλου -όπως το μέγεθος του φατνίου και το χρονικό βήμα υπολογισμών- και η οποία δεν παρουσιάζει ευαισθησία στο συντελεστή τραχύτητας του Manning. Η εξεύρεση βέλτιστου χρονικού βήματος, τέτοιου ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη υπολογιστική αποδοτικότητα και ταυτόχρονα η μέγιστη σταθερότητα των υπολογισμών άρει την ανάγκη χρήσης του παραπάνω περιορισμού.

### 3.4 Θεωρητικό πλαίσιο Υπολογισμών της ροής στο FLO-2D

Η βασική έκδοση του μοντέλου FLO-2D αποτελεί ένα ελεύθερο μοντέλο φυσικής βάσης (<http://www.flo-2d.com>) το οποίο συνδυάζει ένα υδρολογικό και ένα υδραυλικό μοντέλο.

Πρόκειται για ένα ψευδο-διδιάστατο υδραυλικό μοντέλο το οποίο επιλύει την εξίσωση διατήρησης της ορμής (1-Δ) μέσω υπολογισμού της μέσης ταχύτητας ροής κατά μήκος κάθε φατνίου του κανάβου με τον οποίο αναπαριστά το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης. Η παροχή υπολογίζεται σε κάθε κύτταρο του κανάβου για κάθε μια από τις 8 δυνατές κατευθύνσεις.



Εικόνα 3.9: Υπολογισμός ταχύτητας ροής σε κάθε κύτταρο του κανάβου (Loomis & Riano, 2011)

Για τον υπολογισμό της ροής το μοντέλο χρησιμοποιεί τις παρακάτω εξισώσεις:

Η εξίσωση συνέχειας διατυπώνεται ως:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} = i \quad (3.34)$$

Η εξίσωση διατήρησης της ορμής διατυπώνεται σε:

$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x \partial V_x}{g \partial x} - \frac{\partial V_x}{g \partial t} \quad (3.35)$$

όπου,  $h$  το βάθος ροής

$V_x$  η ταχύτητα ροής

$i$  η περίσσεια της έντασης της βροχόπτωσης

$S_{fx}$  η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής

$S_{0x}$  η κλίση της επιφάνειας

Η εξίσωση διατήρησης της ορμής διατυπώνεται ως πλήρη δυναμική εξίσωση κύματος και είναι μια δεύτερης τάξης, μη γραμμική, διαφορική εξίσωση. Το βάθος ροής  $h$  που

χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας σε κάθε όριο του κυττάρου του κανάβου για το επόμενο χρονικό βήμα ( $t+1$ ), εκτιμάται από το προηγούμενο βήμα  $t$  χρησιμοποιώντας μια γραμμική εκτίμηση (το μέσο βάθος μεταξύ των δύο κυττάρων). Η πλήρης δυναμική εξίσωση κύματος επιλύεται χρησιμοποιώντας την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson. Στο πρώτο βήμα η ταχύτητα ροής υπολογίζεται από την εξίσωση διάχυσης κύματος:

$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.36)$$

Η μεταβολή του όγκου (παροχή x χρονικό βήμα) κατανέμεται στην επιφάνεια του κανάβου (διαθέσιμος χώρος αποθήκευσης) μέσω του καναλιού ή του κανάβου της πεδιάδας ώστε να καθοριστεί μια σταδιακή αύξηση του βάθους ροής.

Στη συνέχεια ελέγχονται τα αριθμητικά κριτήρια σταθερότητας (numerical stability criteria) - τα οποία αποτελούν δεδομένα εισόδου για το κανάλι και την πεδιάδα- για τον καθορισμό του βάθους ροής σε κάθε κύτταρο του κανάβου. Τα αριθμητικά κριτήρια σταθερότητας ελέγχονται σε κάθε κύτταρο του κανάβου και σε κάθε χρονικό βήμα για να εξασφαλιστεί η ευστάθεια της επίλυσης. Εάν καταγραφεί υπέρβαση κάποιου εκ των κριτηρίων σταθερότητας, ο χρόνος προσομοίωσης επανέρχεται στο προηγούμενο βήμα και απορρίπτονται οι υπολογισμοί του συγκεκριμένου χρονικού βήματος. Η προσομοίωση συνεχίζεται με την αύξηση των χρονικών βημάτων ώστε να ισχύουν τα κριτήρια σταθερότητας. Το FLO-2D χρησιμοποιεί ένα χρονικό βήμα που ποικίλλει ώστε να ικανοποιούνται τα αριθμητικά κριτήρια σταθερότητας.



---

## 4. Εφαρμογή Μοντέλων στη Λεκάνη Πηνειού

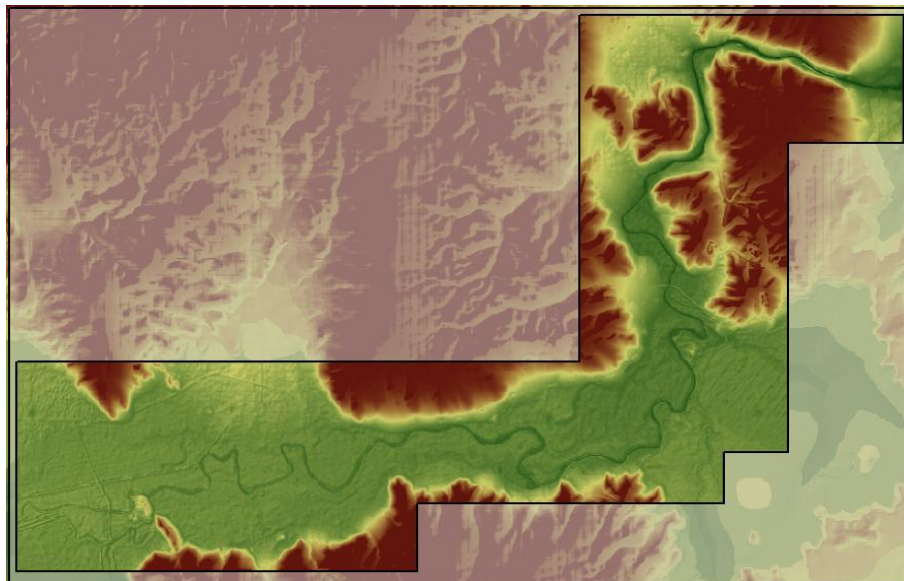
---

### 4.1 Υδραυλική προσομοίωση περιοχής μελέτης

Για την υδραυλική προσομοίωση της περιοχής μελέτης αξιοποιήθηκαν, όπως αναφέρθηκε, τρία υδραυλικά μοντέλα. Το μονοδιάστατης ανάλυσης HEC-RAS και τα ψευδο-διδιάστατα LISFLOOD-FP και FLO-2D.

#### 4.1.1 Γεωμετρικά δεδομένα περιοχής μελέτης

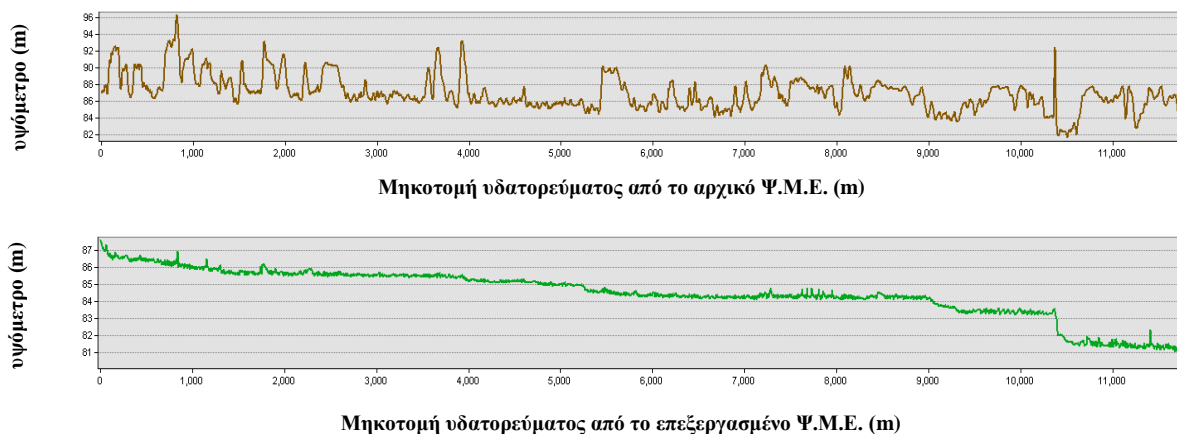
Η μορφολογία της περιοχής μελέτης περιγράφεται μέσω ενός Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους, κανονικοποιημένης μορφής (grid) και ανάλυσης 5m x 5m, από το οποίο αντλήθηκαν όλα τα απαραίτητα γεωμετρικά δεδομένα για την υδραυλική προσομοίωση της περιοχής.



Εικόνα 4.1: Ψ.Μ.Ε. της περιοχής μελέτης.

Από τον έλεγχο των παραγόμενων δεδομένων προέκυψε ότι η ακρίβεια του Ψ.Μ.Ε. στην υψομετρική διεύθυνση δεν ικανοποιεί τις ανάγκες των υδραυλικών μοντέλων για τα οποία παρήχθησαν. Το πρόβλημα εστιάζεται στη κατεύθυνση ροής του κυρίως κλάδου του υδατορεύματος (ποταμός Πηνειός), η μηκοτομή του οποίου παρουσιάζει έντονη μεταβολή της κλίσης, αρνητική και θετική, κάτι που όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό δεν οφείλεται στη μορφολογία της περιοχής αλλά στην ακρίβεια του Ψ.Μ.Ε. Για το λόγο αυτό το Ψ.Μ.Ε. επαναδομήθηκε λαμβάνοντας υπόψη μια επιπλέον έμμεση υψομετρική πληροφορία, η οποία

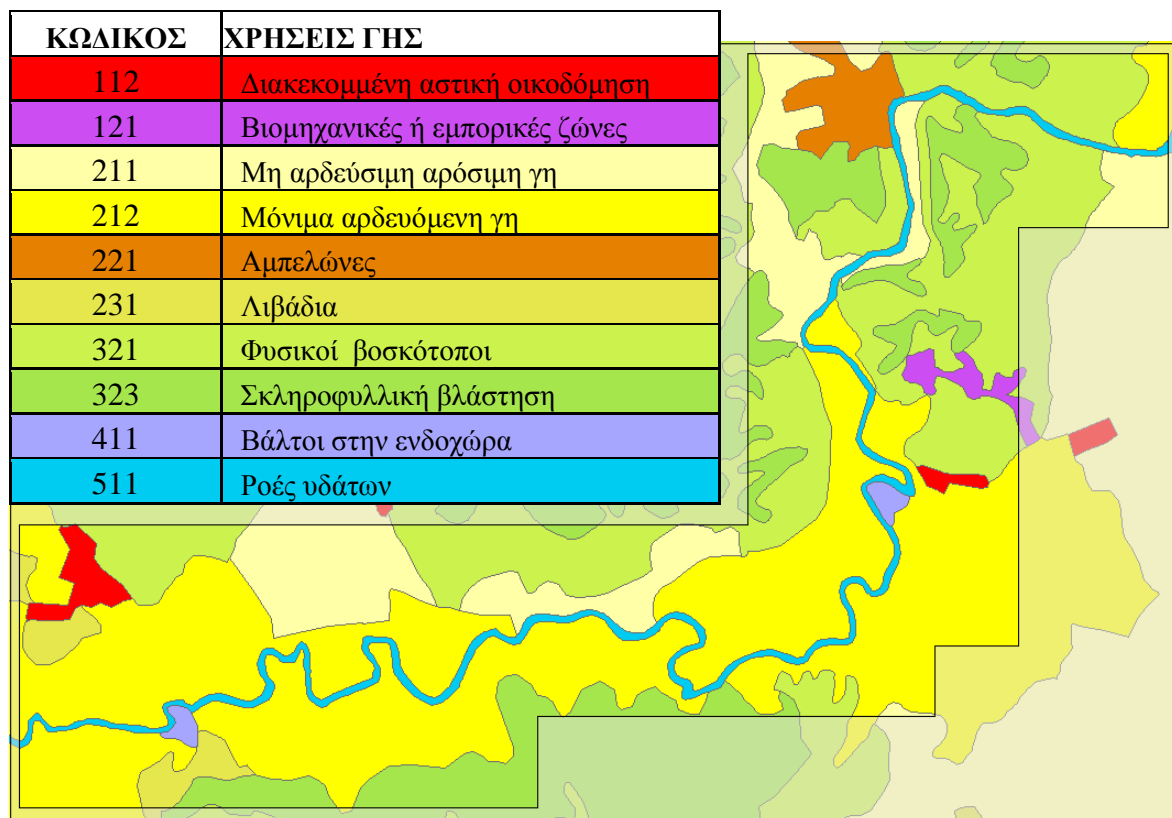
προκύπτει από το ίδιο το Ψ.Μ.Ε., τη γραμμή ροής του κύριου υδατορεύματος. Η γραμμή ροής του ποταμού δίνει την ακμή μεταβολής της κλίσης των επιφανειών εκατέρωθεν του υδατορεύματος και παράλληλα αποτελεί τη βαθιά γραμμή ροής του. Η υπόλοιπη περιοχή μελέτης διατηρεί την υψομετρική πληροφορία του αρχικού Ψ.Μ.Ε. Η περιγραφόμενη επεξεργασία υλοποιήθηκε σε περιβάλλον ArcGIS, το αποτέλεσμα της οποίας παρουσιάζεται για τμήμα του υδατορεύματος στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2: Μηκοτομές τμήματος π.Πηνειού από το αρχικό και επεξεργασμένο Ψ.Μ.Ε.

Επιπλέον, αξιοποιείται στην εφαρμογή η καταγραφή των χρήσεων κάλυψης γης από το πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης Corine 2000, για την εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας του Manning. Η δημιουργία του Corine (CO-ordination of Information on the Environment) βασίζεται σε οπτική φωτοερμηνεία εικόνων του δορυφόρου LANDSAT 7 ETM+ από εθνικές ομάδες εργασίας.





Εικόνα 4.3: Ζώνες corine 2000 στην περιοχή μελέτης (Πηγή: [www.geodata.gov.gr](http://www.geodata.gov.gr)).

Η αρχική εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας του Manning για τις επιμέρους κατηγορίες χρήσεων γης που καταγράφονται στην περιοχή μελέτης, φαίνονται στον πίνακα 4.1. (Yan Huang 2006).

Πίνακας 4.1: Συντελεστής τραχύτητας συναρτήσει της χρήσης γης.

κωδικός	Χρήση	Συντελεστής n Manning ( $m^{-1/3} s$ )
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.015
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0.200
211	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	0.035
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	0.030
221	Αμπελώνες	0.100
231	Λιβάδια	0.033
321	Φυσικοί βοσκότοποι	0.035
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	0.085
411	Βάλτοι στην ενδοχώρα	0.050
511	Ροές υδάτων	0.027

#### 4.1.2 Συνθήκες Ροής

Η διερεύνηση των τριών μοντέλων έγινε θεωρώντας συνθήκες μόνιμης ροής. Ως παροχή εισόδου θεωρήθηκε αρχικά ίση με  $800\text{m}^3/\text{s}$ , η οποία αποτελούσε μια μέση παροχή με την οποία σε κάθε μοντέλο το αποτέλεσμα της πλημμύρας πλησίαζε την έκταση του πραγματικού πλημμυρικού επεισοδίου που αναλύεται στην επόμενη ενότητα. Με μεταβολή της παροχής διερευνήθηκε η τιμή εκείνη που απαιτούσε κάθε μοντέλο ώστε να αποδώσει την πλημμύρα του πραγματικού επεισοδίου.

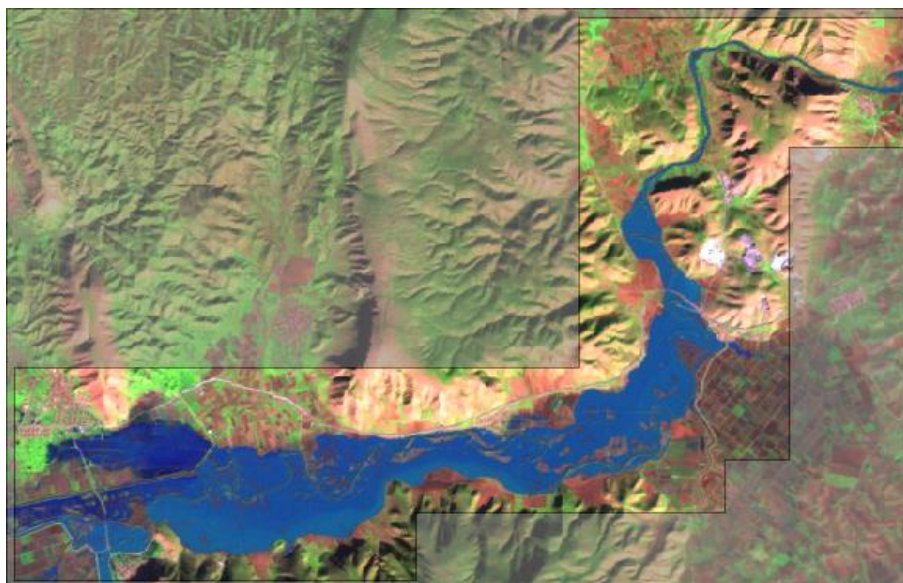
#### 4.1.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τα τρία υδραυλικά μοντέλα στην περιοχή μελέτης που επιλέχτηκε, χρησιμοποιήθηκε η καταγραφή της έκτασης της πλημμυρικής κατάκλυσης ενός συγκεκριμένου επεισοδίου, της περιόδου 21-28 Ιανουαρίου του 2003, όπως καταγράφηκε από τον δορυφόρο Landsat 7 (<https://landsat.usgs.gov>) την 28<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2003. Ο συγκεκριμένος δορυφόρος παρέχει εικόνες σε επτά κανάλια (ορατό φάσμα: μπλε, πράσινο και κόκκινο, υπέρυθρο φάσμα: εγγύς και δύο κανάλια στο μεσαίο, και θερμικό) με χωρική ανάλυση 30 m εκτός από το θερμικό που έχει 60 m. Επίσης ένα παγχρωματικό (ασπρόμαυρο) με διπλάσια χωρική ευκρίνεια (15 m).



Εικόνα 4.4: Δορυφορική εικόνα περιοχής μελέτης. Δορυφόρος Landsat 7 (bands RGB 321). Σημειώνεται η ροή του π. Πηνειού (Πηγή: landsatlook.usgs.gov).

Η έκταση της πλημμύρας που δημιουργήσε το μελετούμενο επεισόδιο βροχής, καταγράφηκε εφαρμόζοντας ημιαυτόματη μεθοδολογία διαχωρισμού των λιμναζόντων νερών από το έδαφος, αξιοποιώντας την εικόνα του μέσου υπέρυθρου καναλιού (5) του συστήματος Landsat ETM+, μέσω του λογισμικού ArcGIS.



Εικόνα 4.5: Πλημμύρα της 28/01/2003 όπως καταγράφηκε από το δορυφόρο Landsat 7, bands RGB 742 (Πηγή: <https://landsat.usgs.gov>)

Για συγκεκριμένη παροχή διερευνήθηκε η εξάπλωση της πλημμύρας στα πλημμυρικά πεδία του Θεσσαλικού κάμπου αλλά και η μεταβολή του βάθους ροής στο σημείο εξόδου (θέση Αμυγδαλιά), μέσω των τριών μοντέλων, ενώ έγινε ανάλυση της ευαισθησίας των μοντέλων στην μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας του Manning τόσο στο κανάλι όσο και στα πλημμυρικά πεδία.

Επιπλέον έγινε προσπάθεια μέσω των τριών μοντέλων να εκτιμηθεί η απαιτούμενη παροχή που δημιουργήσει τη συγκεκριμένη πλημμύρα, όπως καταγράφηκε στην εικόνα του δορυφόρου.

#### 4.1.4 Υδραυλικό Μοντέλο HEC-RAS

Δεδομένα εισόδου του μοντέλου αποτελούν τα γεωμετρικά στοιχεία της περιοχής μελέτης και τα εφαρμοζόμενα σε αυτήν υδρολογικά δεδομένα.

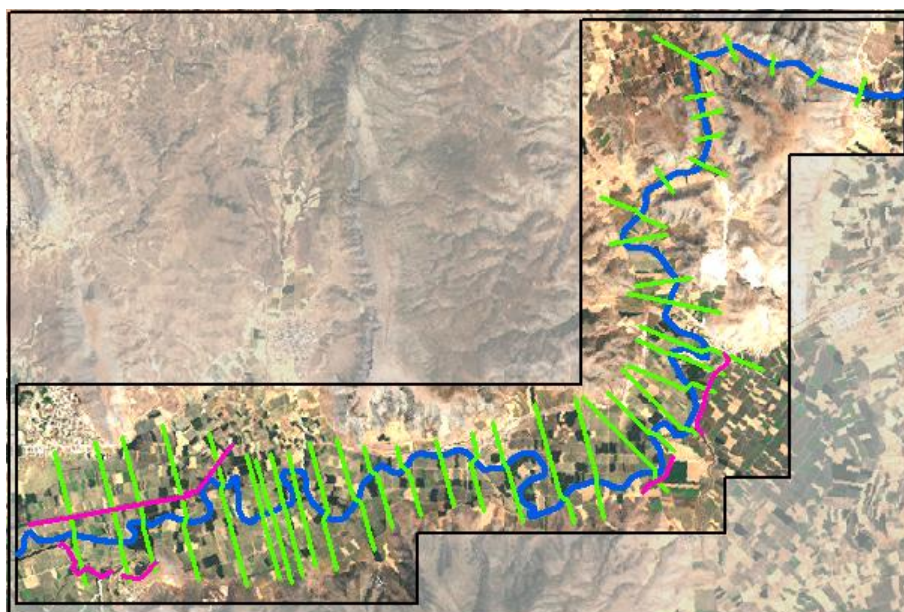
Το γεωμετρικό αρχείο το οποίο δημιουργείται με την εφαρμογή HEC-GeoRAS, περιλαμβάνει την χάραξη του ποταμού (κοίτη και όχθες), τις διευθύνσεις ροής, τα πλευρικά αναχώματα, τις διατομές του ποταμού σε χαρακτηριστικά σημεία καθώς και το συντελεστή τραχύτητας του Manning κατά μήκος της κοίτης και στα πλημμυρικά πεδία εκατέρωθεν αυτής. Από το πρόγραμμα δίνεται η δυνατότητα μοντελοποίησης και άλλων γεωμετρικών δεδομένων όπως γέφυρες και λοιπές κατασκευές, περιοχές αποθήκευσης νερού, ανενεργού ροής κ.α., που δεν αξιοποιούνται στην παρούσα εφαρμογή.

Τα γεωμετρικά δεδομένα δημιουργήθηκαν καταρχήν από τα στοιχεία του επεξεργασμένου Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους που περιγράφηκε παραπάνω. Σε περιβάλλον ArcGIS και έχοντας ως υπόβαθρο το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, λαμβάνονται με ψηφιοποίηση ο άξονας του προς μελέτη υδατορεύματος και ο άξονας των αναχωμάτων. Αξιοποιώντας ορθοφωτοχάρτες της περιοχής μελέτης από την εφαρμογή θέασης ορθοφωτοχαρτών της Κτηματολόγιο ΑΕ, έγινε η καταγραφή των όχθων του ποταμού Πηνειού ώστε να εκτιμηθεί και το πλάτος του ποταμού στο τμήμα της περιοχής μελέτης. Η καταγραφή έγινε σε



περιβάλλον GIS μέσω WMS (Web Mapping Service) σε γεωγραφικό σύστημα WGS84 (<http://gis.ktimanet.gr/wms/wmsopen/wmserver.aspx>). Το αποτέλεσμα της ψηφιοποίησης μετασχηματίστηκε –μέσω του λογισμικού ArcGIS– στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ'87 ώστε η πληροφορία να είναι συμβατή με τα υπόλοιπα δεδομένα και αξιοποιήσιμη. Οι διατομές επιλέχθηκαν έτσι ώστε να αποτυπώνουν χαρακτηριστικές θέσεις του υδατορεύματος. Επιλέχθηκαν τεθλασμένες γραμμές, κάθετες στον άξονα του ποταμού, κατά το δυνατόν παράλληλες με τις γειτνιάζουσες στην πεδιάδα και με τέτοιο μήκος ώστε να καλύπτονται τα πιθανά πλημμυρικά πεδία.

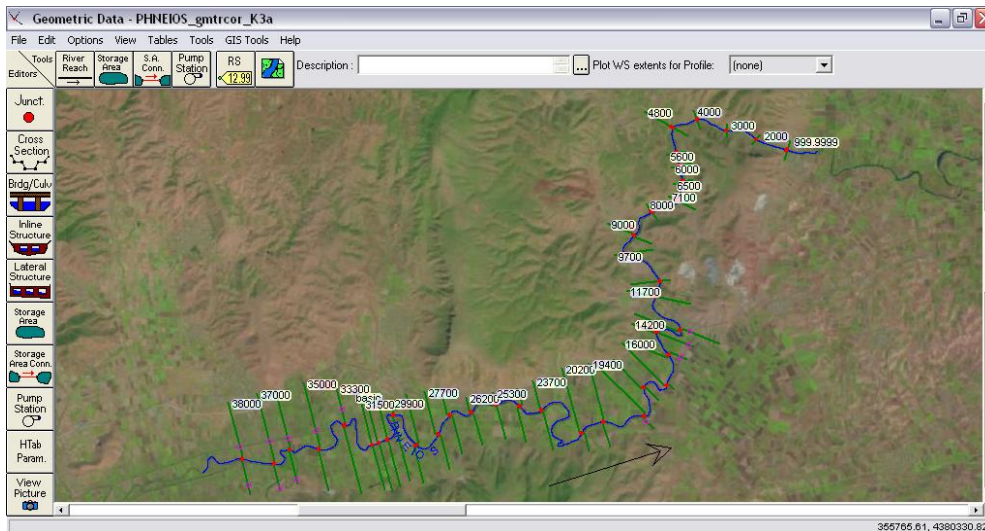
Όλα τα γεωμετρικά στοιχεία οργανώθηκαν σε αντίστοιχα θεματικά επίπεδα μέσω της εργαλειοθήκης HEC-GeoRAS.



Εικόνα 4.6: Περιοχή μελέτης με τον ποταμό Πηνειό, τις χαρακτηριστικές διατομές και τα αναχώματα.

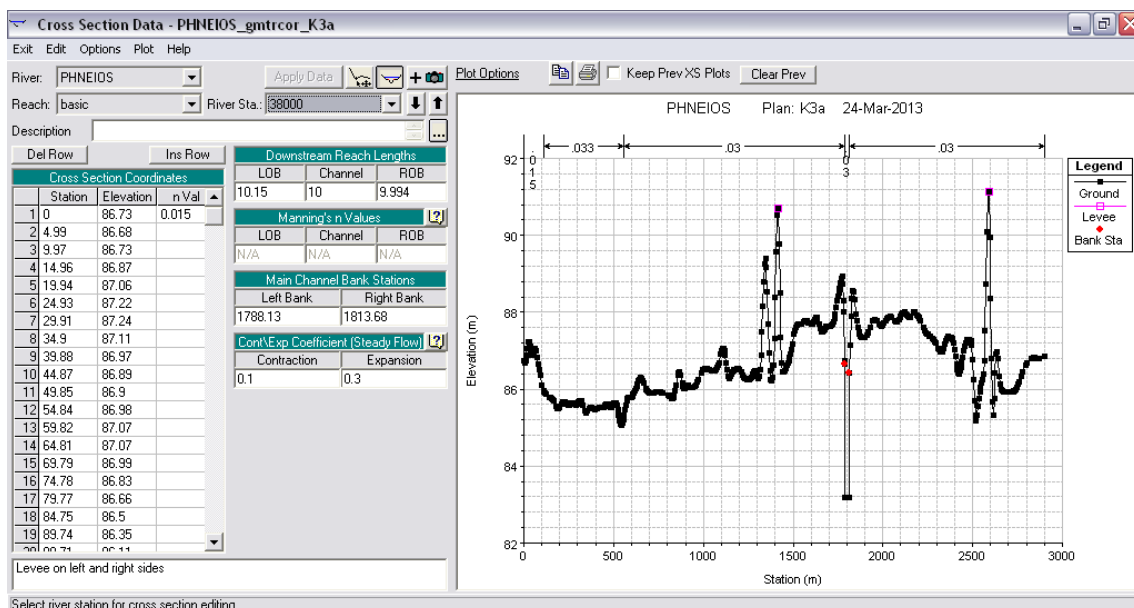
Τέλος, δημιουργήθηκε το θεματικό επίπεδο χρήσεων γης βάσει του οποίου επιλέχθηκε ο συντελεστής τραχύτητας  $n$  για κάθε θέση κάθε διατομής.

Μέσω της εργαλειοθήκης HEC-GeoRAS ([www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/)) συνθέτονται τα επιμέρους θεματικά επίπεδα και δημιουργείται το γεωμετρικό αρχείο το οποίο θα αποτελέσει αρχείο εισόδου του υδραυλικού μοντέλου HEC-RAS. Στο περιβάλλον του HEC-RAS εισάγεται το γεωμετρικό αρχείο και δίνεται η δυνατότητα να ελεγχθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υδατορευμάτων και των διατομών τους καθώς και η δυνατότητα επέμβασης και διόρθωσης της γεωμετρίας αυτών, όπως στην περίπτωση που είναι διαθέσιμα στοιχεία μεγαλύτερης ακρίβειας.



Εικόνα 4.7: Καρτέλα γεωμετρικού αρχείου μοντέλου HEC-RAS (υπό μελέτη υδατόρευμα και διατομές)

Στην καρτέλα κάθε διατομής καταγράφονται ο κλάδος του ποταμού που ανήκει η διατομή, ο κωδικός αριθμός της διατομής (αρχικά σύμφωνα με τη χιλιομετρική της θέση), πίνακας με όλα τα σημεία της διατομής (απόσταση από το πρώτο αριστερά σημείο στην προς κατάντη κατεύθυνση, απόλυτο υψόμετρο κάθε σημείου και συντελεστής τραχύτητας στο κάθε σημείο), αποστάσεις της αριστερής και δεξιάς όχθης από το αριστερό άκρο της διατομής, απόσταση κάθε διατομής από την επόμενη κατάντη διατομή βάσει των κύριων διευθύνσεων ροής (σε τρία σημεία, κανάλι και δύο όχθες εκατέρωθεν), συντελεστής συστολής και διαστολής για τον υπολογισμό των τοπικών απωλειών (χρησιμοποιούνται οι προεπιλεγμένες τιμές 0.1 και 0.3, αντίστοιχα) και τέλος γραφική απεικόνιση της διατομής.



Εικόνα 4.8: καρτέλα διατομής μοντέλου HEC-RAS με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτής

Δεδομένου ότι οι διατομές δημιουργήθηκαν με βάση το Ψ.Μ.Ε. κανονικοποιημένης μορφής και ανάλυσης 5 m x 5 m και το πλάτος τους σε κάποιες περιπτώσεις ξεπερνά τα 3000 m, η περιγραφή τους γίνεται από μεγάλο πλήθος σημείων. Το πρόγραμμα επιτρέπει την περιγραφή κάθε διατομής με μέγιστο αριθμό 500 σημεία. Η απαλοιφή των επιπλέον σημείων μπορεί να γίνει και με αυτοματοποιημένη διαδικασία θέτοντας όρια ανοχής, ως προς την μεταξύ τους απόσταση (στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση) και ως προς τη συγγραμμικότητα που παρουσιάζουν μεταξύ τους (στην κατακόρυφη διεύθυνση και την μεταβολή της κλίσης). Στη συγκεκριμένη εφαρμογή η απαλοιφή σημείων περιορίστηκε αποκλειστικά στις περιοχές των πλημμυρικών πεδίων και δεν εφαρμόστηκε εντός του καναλιού, το οποίο διαμορφώθηκε με ορθογωνική διατομή.

Απαραίτητο στοιχείο των υδραυλικών δεδομένων είναι ο ορισμός των οριακών συνθηκών. Στην περίπτωση υπολογισμού υπερκρίσιμης ροής είναι απαραίτητος ο καθορισμός οριακών συνθηκών στο πλέον ανάντη άκρο του υδροσυστήματος, στην περίπτωση υποκρίσιμης ροής ζητείται ο καθορισμός οριακών συνθηκών στο πλέον κατάντη άκρο του υδροσυστήματος, ενώ στην περίπτωση μικτής ροής απαιτείται ορισμός και στα δύο άκρα. Ως οριακές συνθήκες μπορούν να ορισθούν:

- (α) το γνωστό πιεζομετρικό φορτίο (Known Water Surface Elevation) για κάθε προσομοίωση – υδραυλική ανάλυση συγκεκριμένου επεισοδίου βροχόπτωσης.
- (β) το κρίσιμο βάθος (Critical Depth): Με αυτήν την επιλογή δε χρειάζεται καμία επιπλέον πληροφορία. Το πρόγραμμα υπολογίζει από μόνο του το κρίσιμο βάθος για κάθε προφίλ και το χρησιμοποιεί σαν οριακή συνθήκη.
- (γ) το ομοιόμορφο βάθος (Normal Depth), το οποίο υπολογίζεται για κάθε υδραυλική ανάλυση – προσομοίωση, εισάγοντας την κλίση της γραμμής ενέργειας. Προσεγγιστικά, αντί της κλίσης της γραμμής ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κλίση της ελεύθερης επιφάνειας και εναλλακτικά η κλίση του πυθμένα του υδατορεύματος.
- (δ) η καμπύλη στάθμης – παροχής (Rating Curve), από την οποία υπολογίζεται το πιεζομετρικό φορτίο για κάθε παροχή.

Στην παρούσα εφαρμογή λόγω έλλειψης λοιπών στοιχείων επιλέγεται για τον υπολογισμό μικτής ροής, ως οριακές συνθήκες, το ομοιόμορφο βάθος, μέσω καθορισμού της κλίσης του πυθμένα του υδατορεύματος στα δύο άκρα, ανάντη και κατάντη.

#### 4.1.5 Υδραυλικό Μοντέλο LISFLOOD-FP

Δεδομένα εισόδου του μοντέλου αποτελούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης (καναλιού και πλημμυρικών πεδίων), τα υδρολογικά δεδομένα και οι οριακές συνθήκες της ροής.

Η γεωμετρία των πλημμυρικών πεδίων εισάγεται μέσω ενός αρχείου μορφής ascii, το οποίο καταγράφει την περιοχή υπό μορφή κανάβου (επέκταση αρχείου .dem.ascii). Αξιοποιείται πλήρως το επεξεργασμένο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, το οποίο εξάγεται στην συγκεκριμένη μορφή (κρατώντας την ανάλυση του Ψ.Μ.Ε.) απευθείας μέσω του λογισμικού ArcMap. Ένα όμοιο αρχείο καταγράφει σε μορφή κανάβου (και πάλι ίδιας ανάλυσης με το Ψ.Μ.Ε.) την τιμή του συντελεστή τραχύτητας του Manning (επέκταση αρχείου .n.ascii).

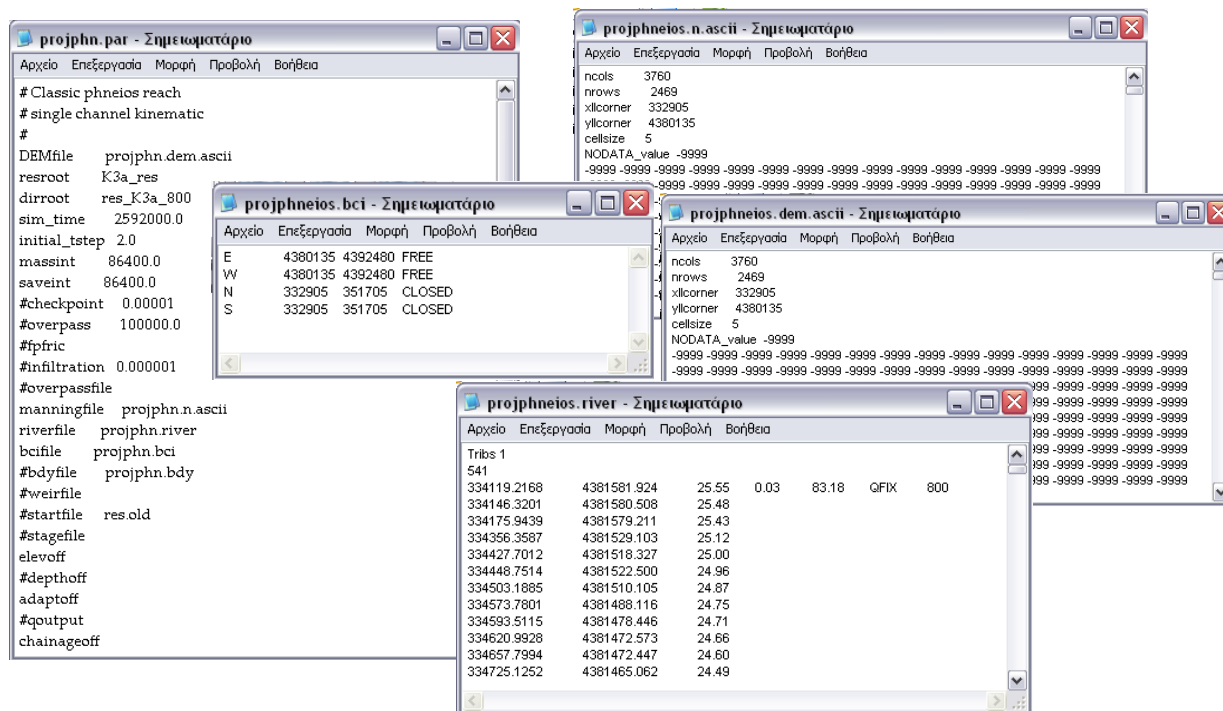
Η γεωμετρία του καναλιού, το οποίο όπως αναφέρθηκε αποτελεί μια διανυσματική οντότητα, εισάγεται με δεδομένα για τη κάθε κορυφή του διανύσματος τις συντεταγμένες (x, y), το πλάτος του καναλιού στη συγκεκριμένη θέση, τον συντελεστή τραχύτητας, το υψόμετρο του πυθμένα. Επιπλέον στο πρώτο σημείο του διανύσματος καταγράφονται οι οριακές συνθήκες ροής του καναλιού (επέκταση αρχείου .river). Το πλάτος του καναλιού προέκυψε από την καταγραφή που έγινε χρησιμοποιώντας τις ορθοεικόνες της Κτηματολόγιο ΑΕ, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Το βάθος του καναλιού προέκυψε από το Ψ.Μ.Ε. κατόπιν επιπλέον επεξεργασίας από την αρχική επεξεργασία του Ψ.Μ.Ε. Αυτό απαιτήθηκε γιατί το μοντέλο στην προς τα κατάντη ροή του ποταμού δέχεται μόνο αρνητικές κλίσεις, κάτι που δεν ικανοποιούσε πλήρως ούτε το επεξεργασμένο Ψ.Μ.Ε. Τα επιπλέον υψομετρικά δεδομένα είναι το υψόμετρο του πυθμένα του ποταμού στη θέση Αλή Εφέντη (ανάτη θέση περιοχής μελέτης) και στη θέση Αμυγδαλιά (κατάντη θέση) τα οποία προέρχονται από τα στοιχεία των σταθμημέτρων στις συγκεκριμένες θέσεις. Με βάση αυτά τα δεδομένα διορθώθηκαν υψομετρικά τα ενδιάμεσα σημεία, όπου ήταν απαραίτητο, ώστε να επιτύχουμε παντού αρνητική κλίση. Τα στοιχεία του καναλιού, όπως διαμορφώθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν και στα άλλα δύο μοντέλα, ώστε να υπάρχει η ίδια γεωμετρία και να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα.

Οριακές συνθήκες ροής στα πλημμυρικά πεδία μπορούν να ορισθούν:

- (α) κλειστό όριο (zero-flux), η οποία αποτελεί και την προεπιλεγμένη συνθήκη,
- (β) ανοιχτό όριο (uniform flow)
- (γ) η σταθερή ελεύθερη επιφάνεια του νερού (Fixed free surface elevation)
- (δ) η χρονικά μεταβαλλόμενη ελεύθερη επιφάνεια του νερού (Time varying free surface elevation)
- (ε) η σταθερή παροχή για συνθήκες μόνιμης ροής (Fixed flow)
- (στ) η χρονικά μεταβαλλόμενη ροή (Time varying flow)

Ο επιλεγμένος τύπος των οριακών συνθηκών σε κάποια θέση του πλημμυρικού πεδίου καταγράφεται σε ένα αρχείο μορφής .bc1, ενώ το αρχείο που περιγράφει την τυχόν μεταβαλλόμενη ροή είναι της μορφής .bdy.

Το σύνολο των δεδομένων οργανώνονται σε ένα αρχείο (με επέκταση .par) το οποίο αποτελεί το αρχείο δεδομένων που εισάγεται στο μοντέλο για την υδραυλική προσομοίωση.



Εικόνα 4.9: Δεδομένα εισόδου υδραυλικού μοντέλου LISFLOOD-FP

#### 4.1.6 Υδραυλικό Μοντέλο FLO-2D

Δεδομένα εισόδου του μοντέλου αποτελούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης (καναλιού και πλημμυρικών πεδίων), τα υδρολογικά δεδομένα και οι αριθμητικοί συντελεστές ευστάθειας του μοντέλου. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε η ελεύθερη βασική έκδοση του μοντέλου η οποία λειτουργεί μέσω της εφαρμογής Grid Developer System (GDS).

Η γεωμετρία των πλημμυρικών πεδίων εισάγεται με διάφορους τρόπους, όπως μέσω αρχείων ascii, shapfiles κ.α. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή η εισαγωγή της γεωμετρικής πληροφορίας της περιοχής μελέτης έγινε μέσω του αρχείου ascii που χρησιμοποιήθηκε και στο μοντέλο LISFLOOD-FP. Το μοντέλο FLO-2D οργανώνει την πληροφορία αυτή μέσω ενός κανάβου που δημιουργείται εσωτερικά, αφού οριστεί το μέγεθος του κυττάρου του κανάβου. Για την επιλογή του μεγέθους του κυττάρου του κανάβου προτείνεται η χρήση ενός κανόνα βασισμένου στη μέγιστη παροχή:

$$0.03 < Q_{\text{peak}}/A_{\text{gridsurf}} < 0.3 \text{ m}^3/\text{s/m}^2$$

όπου,  $Q_{\text{peak}}$  η μέγιστη παροχή σε  $\text{m}^3/\text{s}$

$A_{\text{gridsurf}}$  η επιφάνεια του κυττάρου του κανάβου σε  $\text{m}^2$

Αν και δεν είναι δεσμευτικός κανόνας η εμπειρία από την εφαρμογή του μοντέλου έδειξε ότι οι απαιτούμενοι χρόνοι για τη λειτουργία του όταν δεν τηρείται ο κανόνας αυτός είναι απαγορευτικοί. Για την παροχή των  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  που χρησιμοποιήθηκε αρχικά στην παρούσα εργασία η επιλογή μεγέθους κυττάρου κανάβου  $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  αποτελεί το κατώτερο οριακά μέγεθος. Αφού επιλεγεί η περιοχή μελέτης με ένα πολύγωνο, το μοντέλο αριθμεί τα κελιά που περιλαμβάνει και η αρίθμηση αυτή είναι η αναφορά σε όλα τα γεωμετρικά αρχεία που



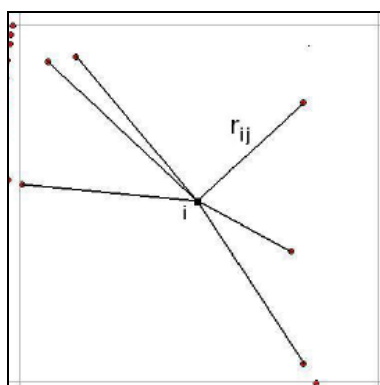
δημιουργεί. Για τον υψομετρικό προσδιορισμό του κάθε κυττάρου του κανάβου, το μοντέλο χρησιμοποιεί παρεμβολή αντιστρόφων αποστάσεων μέσω της σχέσης:

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{j=1}^{NDTM} Z_j \frac{1}{r_{ij}^n}}{\sum_{j=1}^{NDTM} \frac{1}{r_{ij}^n}} \quad (4.1)$$

όπου,  $\bar{Z}$  το υψόμετρο του κυττάρου του κανάβου

$Z_j$  το υψόμετρο του σημείου  $j$  εντός του κυττάρου

$r_{ij}$  η απόσταση του σημείου  $j$  από το κέντρο βάρους του κυττάρου



Εικόνα 4.10: Υλοποίηση παρεμβολής για τον υψομετρικό προσδιορισμό κάθε κυττάρου του κανάβου (Loomis & Riano, 2011)

Το μοντέλο απαιτεί τη δημιουργία έξι βασικών αρχείων της μορφής .DAT όπως περιγράφονται παρακάτω:

Το αρχείο FPLAIN.DAT περιλαμβάνει όλα τα κελιά του κανάβου με την αρίθμηση που έχουν λάβει. Για κάθε ένα από αυτά καταγράφεται ο αριθμός του κυττάρου βόρεια, ανατολικά, νότια και δυτικά αυτού, ο συντελεστής τραχύτητας και το απόλυτο υψόμετρο του.

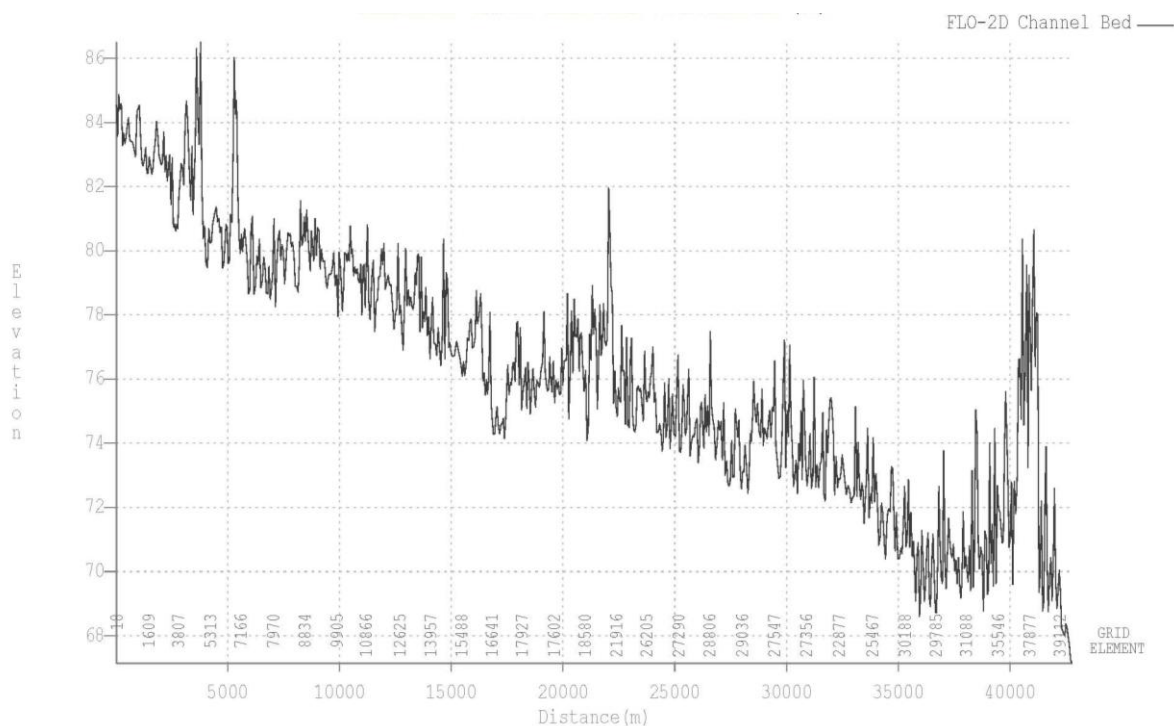
Το αρχείο CADPTS.DAT περιλαμβάνει λίστα με τον αριθμό κάθε κυττάρου του κανάβου και τις απόλυτες συντεταγμένες του κέντρου βάρους του.

Το αρχείο CONT.DAT περιλαμβάνει τους συντελεστές και τα λοιπά στοιχεία της προσομοίωσης. Αποτελεί ουσιαστικά το αρχείο που συγκεντρώνει τις μεταβλητές ελέγχου της προσομοίωσης, όπως το χρόνο της προσομοίωσης, τα γεωμετρικά δεδομένα που λαμβάνονται υπόψη -κανάλια, αναχώματα κλπ- δεδομένα φυσικών διεργασιών -βροχόπτωση, εξάτμιση, διήθηση κλπ.

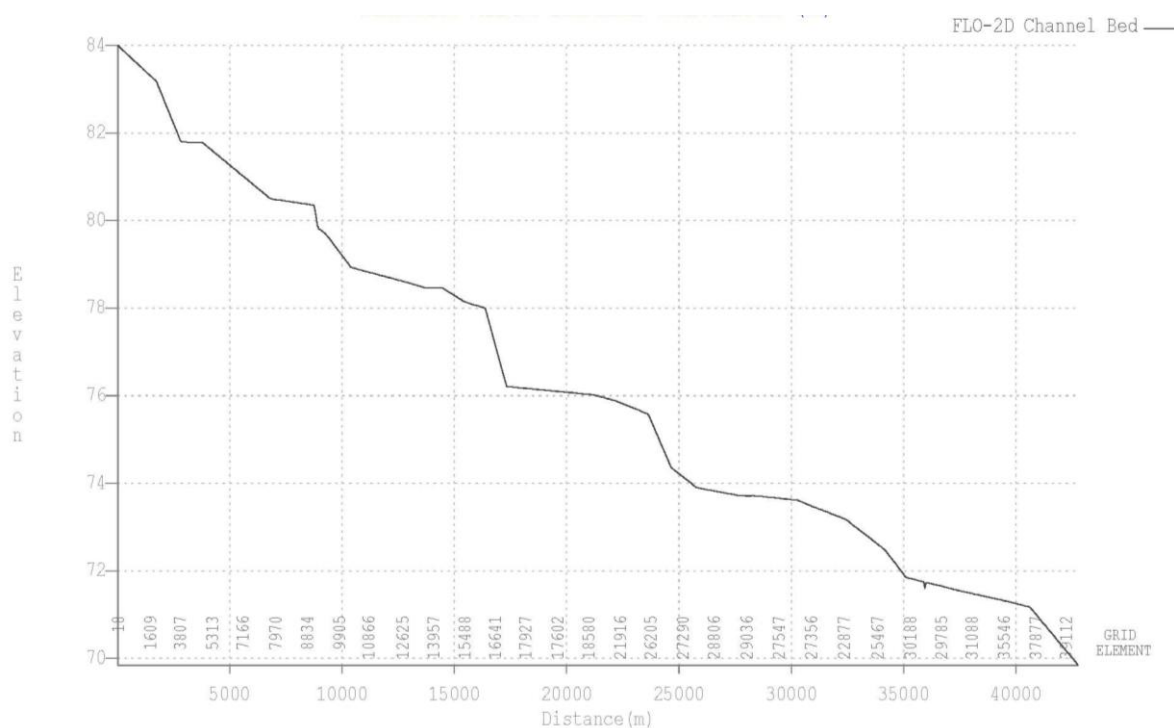
Το αρχείο TOLER.DAT περιλαμβάνει τα αριθμητικά κριτήρια σταθερότητας, τα οποία όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 3.4 αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους ευστάθειας του μοντέλου.

Τα αρχεία INFLOW.DAT / OUTFLOW.DAT περιλαμβάνουν τα υδρογραφήματα εισόδου και εξόδου –εφόσον υπάρχει- του μοντέλου.





Διάγραμμα 4.1: Κλίσεις πυθμένα καναλιού βάσει του κανάβου, πριν την επεξεργασία.



Διάγραμμα 4.2: Κλίσεις πυθμένα καναλιού μετά την επεξεργασία.

Η εισαγωγή της γεωμετρίας του καναλιού μπορεί να γίνει αξιοποιώντας γεωμετρικά αρχεία από το HEC-RAS. Στη συγκεκριμένη περίπτωση αυτό δεν ήταν εφικτό, δεδομένου ότι οι

διατομές που υπήρχαν διαθέσιμες από το HEC-RAS περιλάμβαναν εκτός του καναλιού και τη γεωμετρία της περιοχής των πλημμυρικών πεδίων. Τυχόν αξιοποίηση αυτού του δεδομένου θα επιβάρυνε επιπλέον τη διαδικασία καταγραφής του καναλιού.

Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης εκτός του καναλιού και άλλων στοιχείων, όπως αναχώματα, δρόμοι και λοιπές κατασκευές, κάτι το οποίο δεν υλοποιήθηκε λόγω δυσχρηστίας του μοντέλου (εισαγωγή δεδομένων ανά κύτταρο κανάβου).

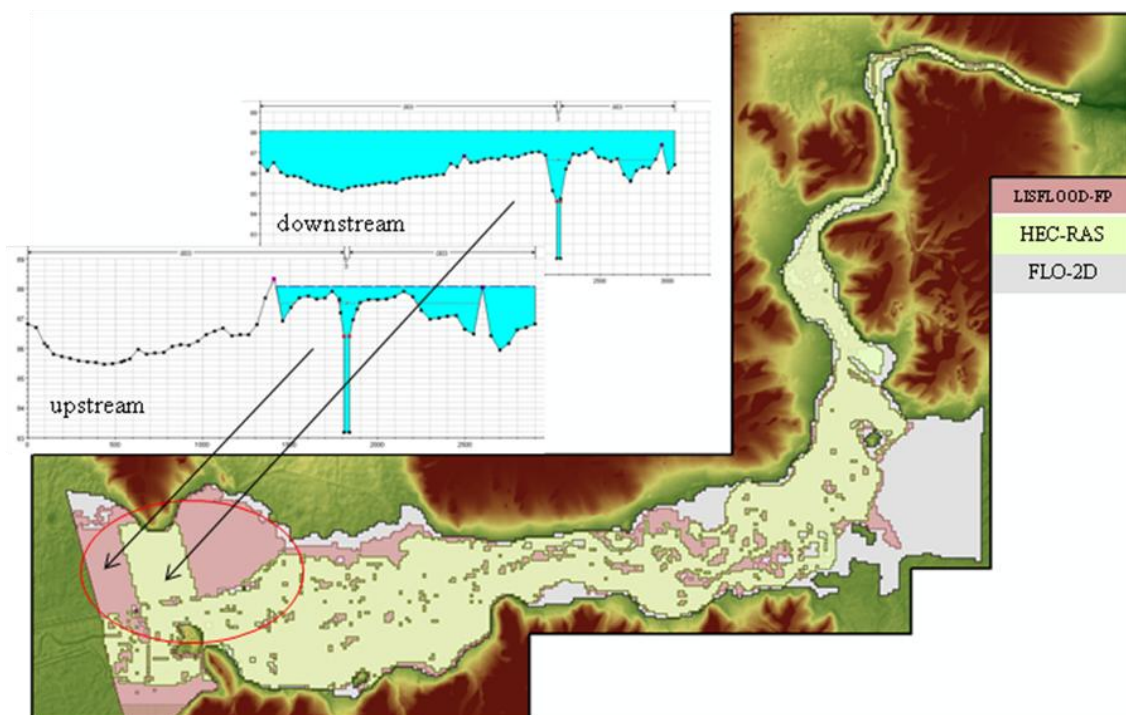
Η εφαρμογή του μοντέλου που περιγράφεται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες παρουσίασε σημαντικά προβλήματα. Κύριος λόγος κρίνεται ότι αποτέλεσε το γεγονός ότι η επιλογή του μεγέθους του κανάβου σε 50 m x 50 m είναι στο κάτω αποδεκτό όριο της συνθήκης που ορίζει το μοντέλο. Επιπλέον, η επιδείνωση του προβλήματος προκαλείται και από την υψομετρική ακρίβεια του Ψ.Μ.Ε. Αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός ότι η κατάσταση βελτιώθηκε σημαντικά με την υψομετρική επεξεργασία του καναλιού, κάτι το οποίο δεν κατέστη δυνατόν να υλοποιηθεί και στην πεδιάδα. Τα προβλήματα αυτά δεν παρουσιάζονται στην εφαρμογή του μοντέλου στις πρότυπες τοπογραφίες (ΚΕΦ. 5) οι οποίες είναι μικρότερες σε έκταση και στις οποίες η πεδιάδα και το κανάλι διατηρούν σταθερές κλίσεις χωρίς ανωμαλίες. Για τους λόγους αυτούς στις παρακάτω προσομοιώσεις, το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε χωρίς να ληφθεί υπόψη το κανάλι. Η παροχή δίνεται στην πλέον ανάντη θέση (θέση Αλή Εφέντη) και διοχετεύεται στην κατάντη θέση (θέση Αμυδαλιά) λαμβάνοντας υπόψη τη μορφολογία όπως ορίζεται από τα υψόμετρα της πεδιάδας.

Σημειώνεται ότι έγινε προσπάθεια αύξησης του μεγέθους του καναλιού σε 100m x 100m και σε 200 m x 200 m, όμως μετά την παρεμβολή που εφαρμόζει το μοντέλο για τον υψομετρικό προσδιορισμό των κυττάρων του κανάβου, το πρόβλημα της υψομετρικής ακρίβειας της τελικής επιφάνειας του κανάβου διογκώθηκε. Αποτέλεσμα σε προσπάθεια προσομοίωσης χωρίς ορισμό καναλιού το νερό να μην ακολουθεί την κατεύθυνση του ποταμού αλλά να βρίσκει διέξοδο νοτιοανατολικά εκτός του κανάβου.

## **4.2 Προσομοίωση Πλημμύρας**

### **4.2.1 Σύγκριση μοντέλων με κοινή παροχή**

Σε πρώτη εφαρμογή, χρησιμοποιώντας και τα τρία υδραυλικά μοντέλα αποτυπώθηκε η πλημμύρα που προκαλείται από παροχή ποταμού 800 m<sup>3</sup>/s. Η προσομοίωση έγινε σε συνθήκες μόνιμης ροής. Ως γεωμετρικό υπόβαθρο αξιοποιήθηκε εκείνο με ανάλυση 50 m x 50 m. Συντελεστής τραχύτητας επιλέχθηκε αρχικά κοινός στο κανάλι και στην πεδιάδα, ίσος με 0.03 m<sup>-1/3</sup> s, όπως προκύπτει από τις χρήσεις γης της περιοχής. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης φαίνεται συγκεντρωτικά στην Εικόνα 4.12.



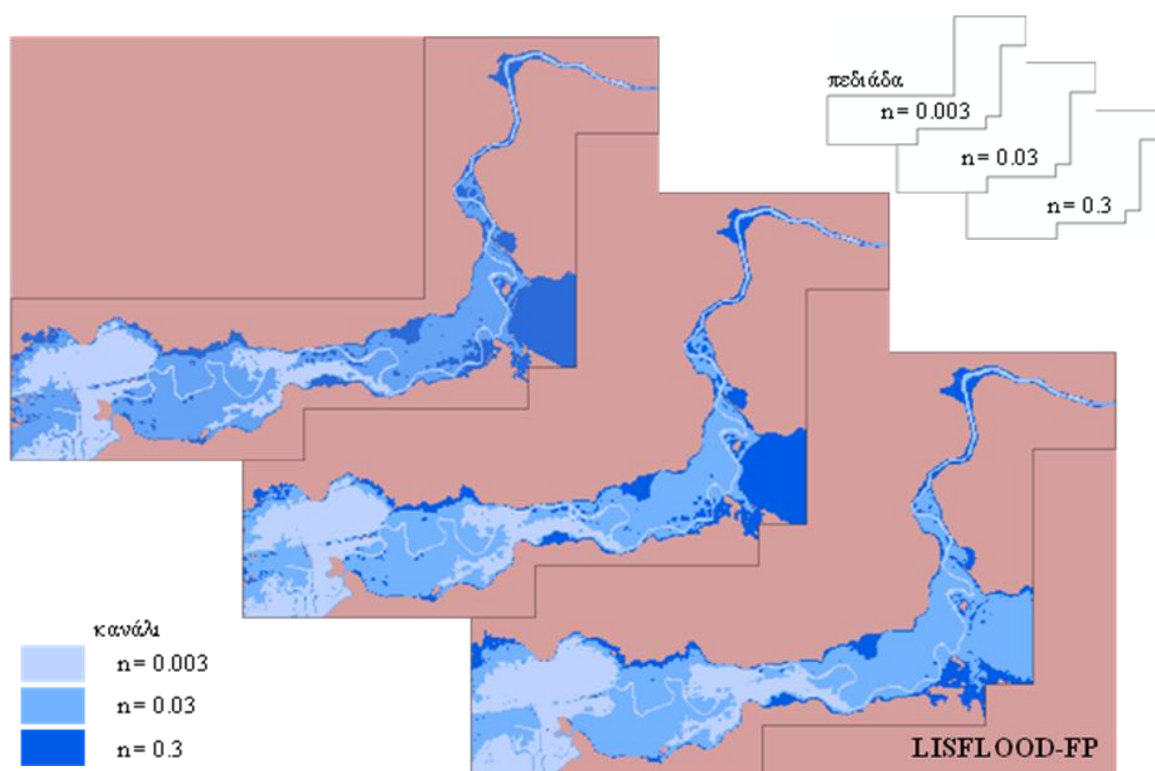
Εικόνα 4.12: Αποτέλεσμα προσομοίωσης για παροχή 800 m<sup>3</sup>/s και κοινό συντελεστή τραχύτητας σε πεδιάδα και κανάλι.

Η απόδοση της πλημμύρας με τα ψευδο-διδιάστατα μοντέλα FLO-2D και LISFLOOD-FP, καλύπτει τα πλημμυρικά πεδία σε μεγαλύτερο βαθμό από το HEC-RAS και προς όλες τις διευθύνσεις. Με τη χρήση του μοντέλου HEC-RAS, ειδικά στη θέση των αναχωμάτων (ανάντη τμήμα) γίνεται σαφής η μη δυνατότητα κάλυψης του. Ενώ το ύψος του νερού σε κάποιες διατομές ξεπερνά τα αναχώματα, η πλημμύρα περιορίζεται μεταξύ των διατομών αυτών και δεν απλώνεται στη συνολική λεκάνη κατάκλυσης που υπάρχει βόρεια του αναχώματος (σημειώνεται με κόκκινο κύκλο). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μοντέλο HEC-RAS εξετάζει μόνο σε μια κατεύθυνση τη ροή μεταξύ δύο διατομών.

Με τις ίδιες συνθήκες διερευνήθηκε η ευαισθησία των μοντέλων στην μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας του καναλιού και των πλημμυρικών πεδίων. Εφαρμόστηκε ο συντελεστής τραχύτητας 0.03 m<sup>-1/3</sup>s, ο οποίος συμφωνεί με τις χρήσεις γης της περιοχής μελέτης και μεταβλήθηκε σε κάποιες ακραίες και μη ρεαλιστικές τιμές, 0.3 m<sup>-1/3</sup>s και 0.003 m<sup>-1/3</sup>s. Από το αποτέλεσμα των προσομοιώσεων έγινε καταγραφή της επιφάνειας της πλημμύρας αλλά και της στάθμης του νερού στο σημείο εξόδου. Σημειώνεται ότι, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, στο μοντέλο FLO-2D δεν μοντελοποιήθηκε η γεωμετρία του καναλιού, αλλά καταχωρήθηκε ο συντελεστής τραχύτητας του καναλιού στα κελιά του κανάβου που βρίσκονται στη θέση ροής του ποταμού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 και στις Εικόνες 4.13, 4.14 και 4.15.

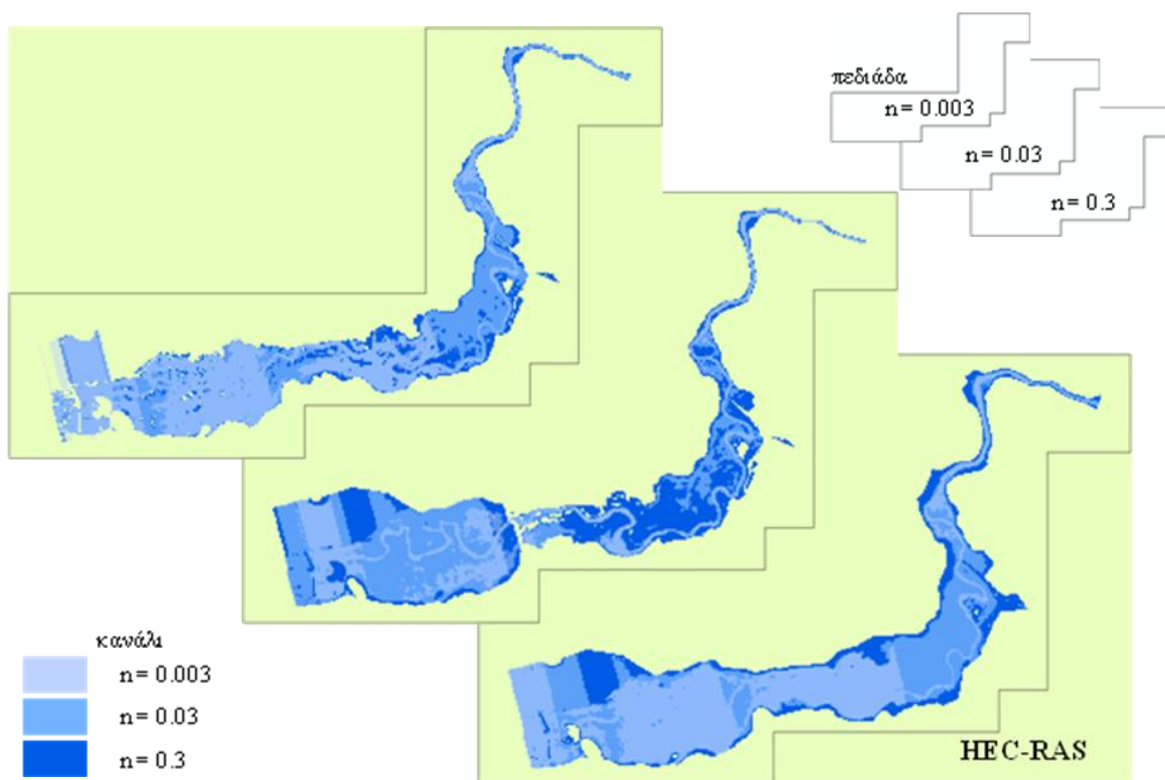
Πίνακας 4.2: Μεταβολή βάθους ροής στο σημείο εξόδου.

Βάθος ροής (m)			Συντελεστής τραχύτητας στην πεδιάδα ( $m^{-1/3}s$ )		
			0.003	0.03	0.3
LISFLOOD-FP	Συντελεστής τραχύτητας στο κανάλι ( $m^{-1/3}s$ )	0.003	2.23	2.23	2.23
		0.03	5.65	5.78	6.36
		0.3	6.90	7.17	8.31
HEC-RAS	Συντελεστής τραχύτητας στο κανάλι ( $m^{-1/3}s$ )	0.003	1.64	1.64	1.62
		0.03	6.05	7.9	8.83
		0.3	6.79	11.29	19.47
FLO-2D	Συντελεστής τραχύτητας στο κανάλι ( $m^{-1/3}s$ )	0.003	11	10.11	5.74
		0.03	9.41	10.12	6.39
		0.3	11.37	11.57	10.17

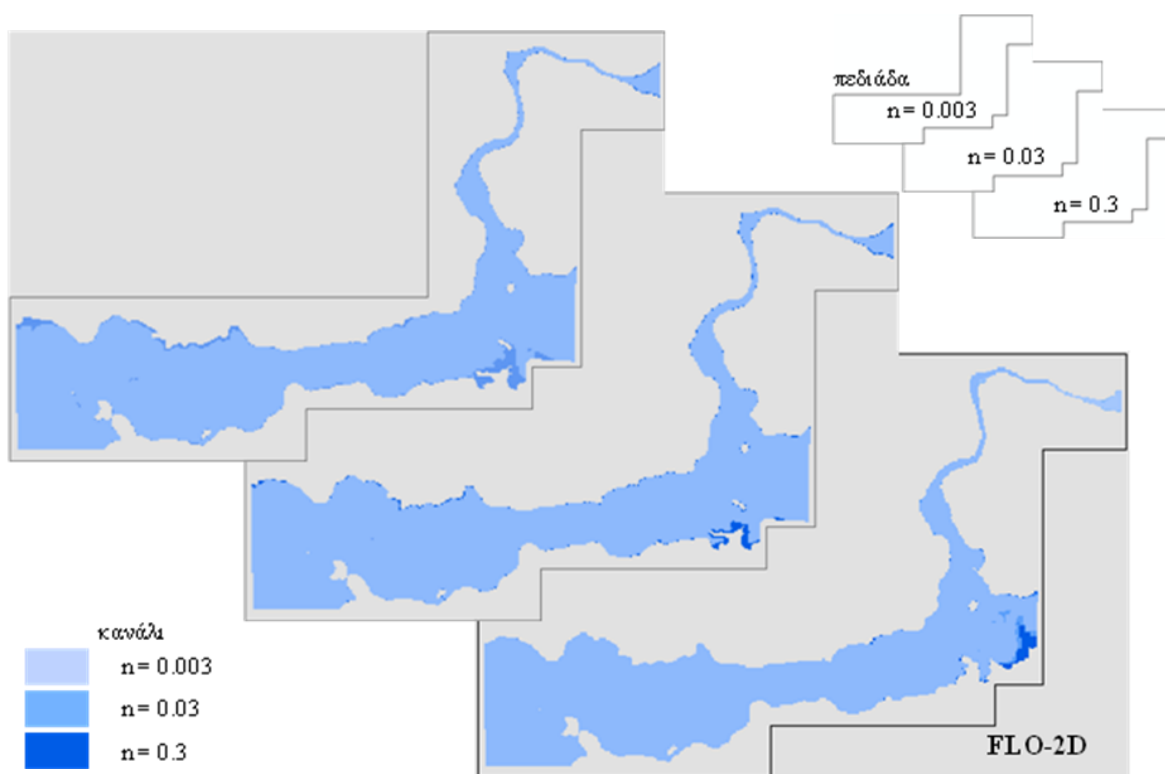


Εικόνα 4.13: Μεταβολή πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή του συν/τή τραχύτητας (LISFLOOD-FP).





Εικόνα 4.14: Μεταβολή πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή του συν/τή τραχύτητας (HEC-RAS).

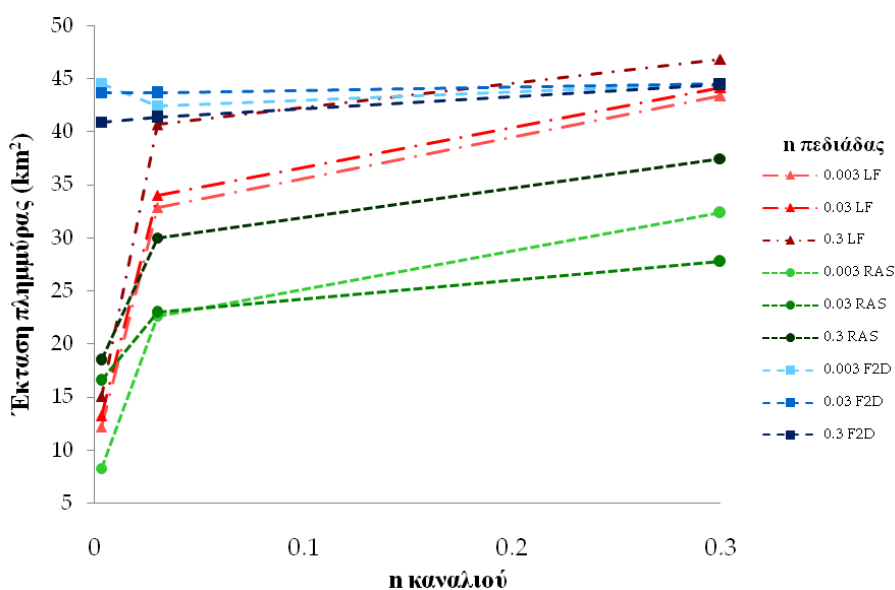


Εικόνα 4.15: Μεταβολή πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή του συν/τή τραχύτητας (FLO-2D).

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, τα μοντέλα παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία στη μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας στο ποτάμι, έναντι της μεταβολής στα πλημμυρικά πεδία. Επίσης, είναι εμφανές ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το μοντέλο FLO-2D είναι αισθητά διαφορετικά από τα άλλα μοντέλα λόγω της απουσίας ορισμού του καναλιού.

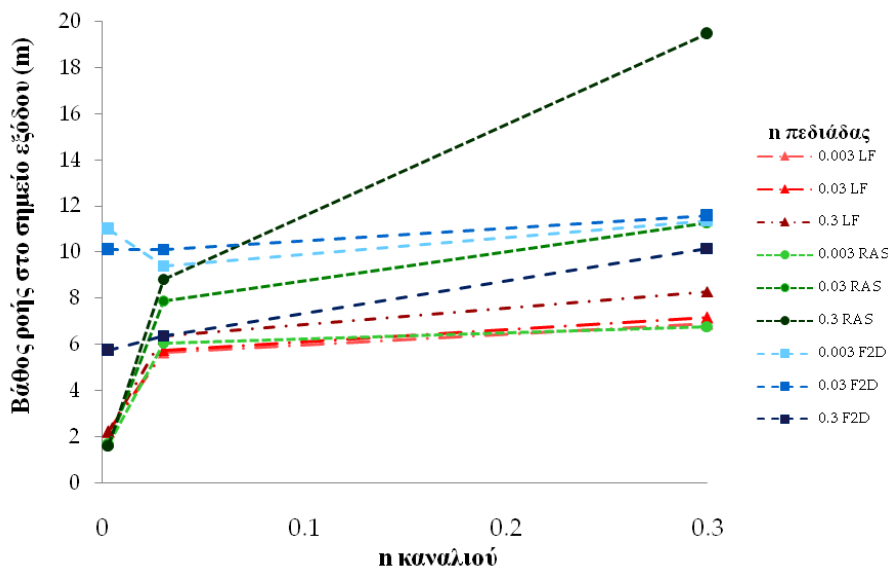
Τόσο στο LISFLOOD-FP όσο και στο FLO-2D η απόδοση της πλημμυρικής κατάκλυσης παρουσιάζει ομοιόμορφη κατανομή σε αντίθεση με το HEC-RAS το οποίο εξετάζει τη διόδευση από διατομή σε διατομή, ως μονοδιάστατο μοντέλο, δημιουργώντας σε ορισμένες περιπτώσεις ‘μη φυσιολογικές’ ασυνέχειες. Επίσης στο FLO-2D η πλημμύρα εξαπλώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό από τα άλλα δύο μοντέλα, κάτι που εξηγείται επίσης με την έλλειψη του καναλιού.

Στα διαγράμματα 4.3 & 4.4 που ακολουθούν παρουσιάζεται η μεταβολή της επιφάνειας της πλημμύρας και της στάθμης του νερού στην έξοδο συναρτήσει της μεταβολής του συντελεστή τραχύτητας τόσο στο κανάλι όσο στα πλημμυρικά πεδία. Παρατηρείται ότι στο FLO-2D δεν παρουσιάζει ευαισθησία στη μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας πιθανώς λόγω της μη μοντελοποίησης του καναλιού. Στο HEC-RAS καταγράφεται σημαντική ευαισθησία στη μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας τόσο στο ποτάμι, όσο και στα πλημμυρικά πεδία. Τέλος, οι καμπύλες που αντιστοιχούν στο LISFLOOD-FP παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στη μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας στο κανάλι σε αντίθεση με τη μεταβολή στα πλημμυρικά πεδία.



Διάγραμμα 4.3: Επιφάνεια πλημμύρας συναρτήσει του συν/τη τραχύτητας.





Διάγραμμα 4.4: Βάθος ροής στο σημείο εξόδου συναρτήσει του συν/τη τραχύτητας.

#### 4.2.2 Διερεύνηση αποτυπώματος πραγματικής πλημμύρας (Ψ.Μ.Ε. 50 m x 50 m)

Σε αυτή την ενότητα, αναζητήθηκε η παροχή εκείνη που για κάθε μοντέλο, σε συνθήκες μόνιμης ροής, δημιουργεί το αποτύπωμα της πραγματικής πλημμύρας όπως καταγράφηκε από την εικόνα του δορυφόρου την 28/1/2003. Για τον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας (Yan Huang, 2005) λήφθηκαν υπόψη οι χρήσεις γης της περιοχής μελέτης όπως καταγράφηκαν από το πρόγραμμα Corine της ΕΕ το 2000. Τα γεωμετρικά δεδομένα της περιοχής μελέτης αντλήθηκαν από το αδρομερές ΨΜΕ, ανάλυσης 50 m x 50 m.

Η 'ιδανική' παροχή για το κάθε μοντέλο εκτιμήθηκε βάσει της ελαχιστοποίησης ενός συντελεστή βέλτιστη προσαρμογής ( $R$ ), ο οποίος λαμβάνει υπόψη το ποσοστό κάλυψης της πραγματικής πλημμύρας, την έκταση της πραγματικής πλημμύρας που δεν αποτύπωσε το μοντέλο, καθώς και τη πλημμύρα του μοντέλου επιπλέον της πραγματικής:

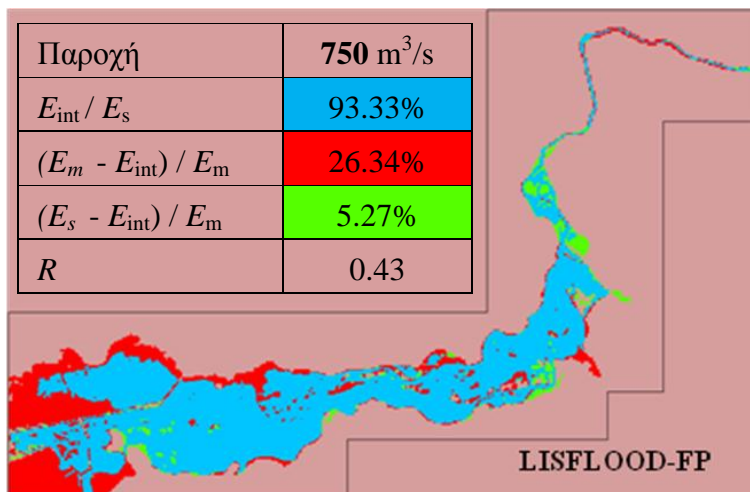
$$R = \frac{E_s + E_m}{E_{int}} - 2 \quad (4.2)$$

όπου,  $E_s$  : η αποτυπωμένη από τον δορυφόρο έκταση της πλημμύρας,

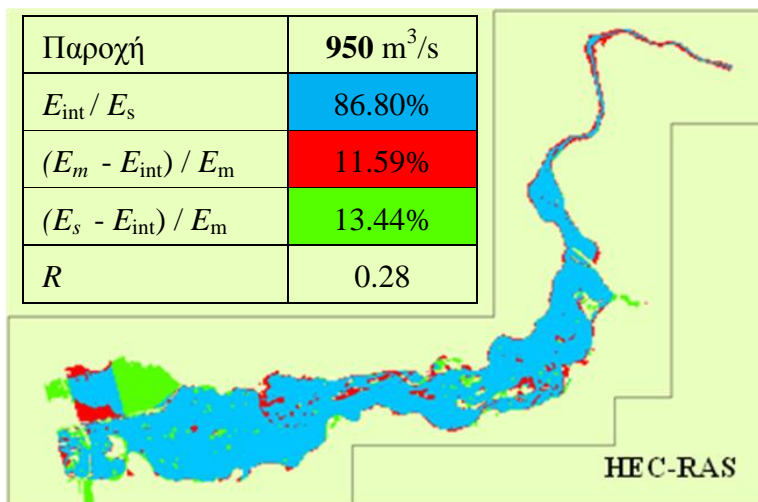
$E_m$  : η έκταση της πλημμύρας όπως προκύπτει από την προσομοίωση του μοντέλου

$E_{int}$  : η τομή της αποτυπωμένης από τον δορυφόρο έκτασης της πλημμύρας με εκείνη που προέκυψε από την προσομοίωση του μοντέλου.

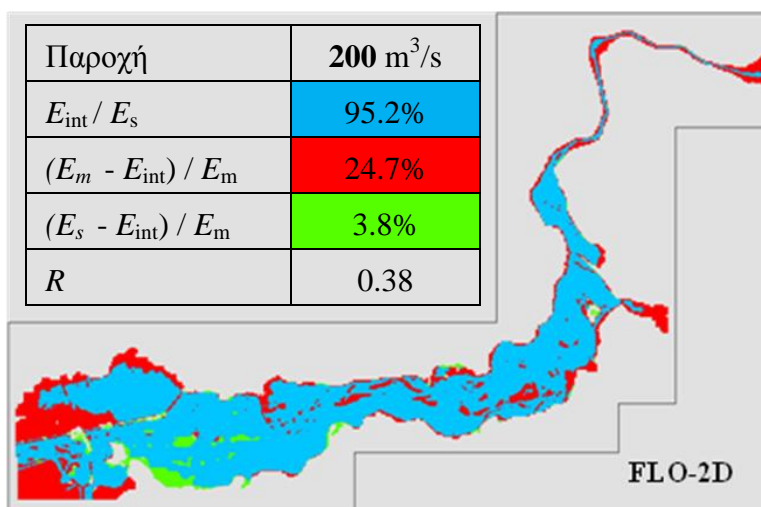
Στις εικόνες που ακολουθούν αποτυπώνεται για το κάθε μοντέλο η έκταση της πλημμύρας ως το αποτέλεσμα της προσομοίωσης η οποία διακρίνεται στο κοινό τμήμα με την πλημμύρα όπως καταγράφηκε από το δορυφόρο (μπλε χρώμα), στην περιοχή κατάκλυσης από την προσομοίωση που δεν συμβαδίζει με αυτή της πλημμύρας του δορυφόρου (κόκκινο χρώμα) και με πράσινο χρώμα στη πλημμύρα εκείνη που καταγράφηκε από το δορυφόρο αλλά δεν αποδόθηκε από την προσομοίωση του μοντέλου.



Εικόνα 4.16: Βέλτιστη προσαρμογή του μοντέλου LISFLOOD-FP στην πραγματική πλημμύρα.



Εικόνα 4.17: Βέλτιστη προσαρμογή του μοντέλου HEC-RAS στην πραγματική πλημμύρα.



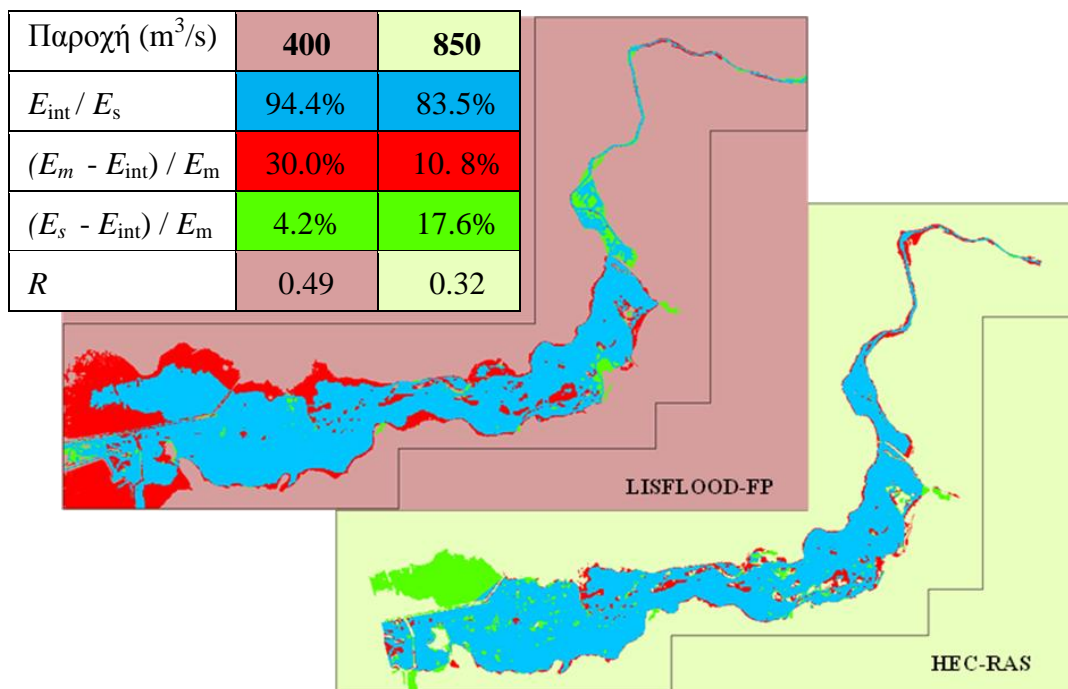
Εικόνα 4.18: Βέλτιστη προσαρμογή του μοντέλου FLO-2D στην πραγματική πλημμύρα.

Τα αποτελέσματα δίνουν σημαντική διαφοροποίηση στην απαιτούμενη παροχή για την κάλυψη της έκτασης της πραγματικής πλημμύρας όπως αποτυπώθηκε από τον δορυφόρο την 28η Ιανουαρίου το 2003. Ενώ το HEC-RAS απαιτεί παροχή ποταμού της τάξης των 950 m<sup>3</sup>/s το LISFLOOD-FP χρειάζεται παροχή της τάξης των 750 m<sup>3</sup>/s ενώ το FLO-2D μόλις 200 m<sup>3</sup>/s. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μεγαλύτερη παροχή που έχει καταγραφεί στην θέση Αλή Εφέντη (ανάντη θέση της περιοχής μελέτης) είναι 631 m<sup>3</sup>/s τον Μάρτιο του 1987, ενώ στις μεγάλες πλημμύρες του 1994 η παροχή στην ίδια θέση ήταν της τάξης των 540 m<sup>3</sup>/s (Mimikou & Koutsoyiannis, 1995).

Σημειώνεται τέλος, ότι αν και το μοντέλο HEC-RAS απαιτεί μια πολύ μεγάλη –και μη ρεαλιστική παροχή– δεν κατέστη δυνατή η ολοκληρωμένη κάλυψη της λεκάνης κατάκλυσης βόρεια του αναχώματος στην ανάντη περιοχή.

#### 4.2.3 Διερεύνηση αποτυπώματος πραγματικής πλημμύρας (Ψ.Μ.Ε. 5 m x 5 m)

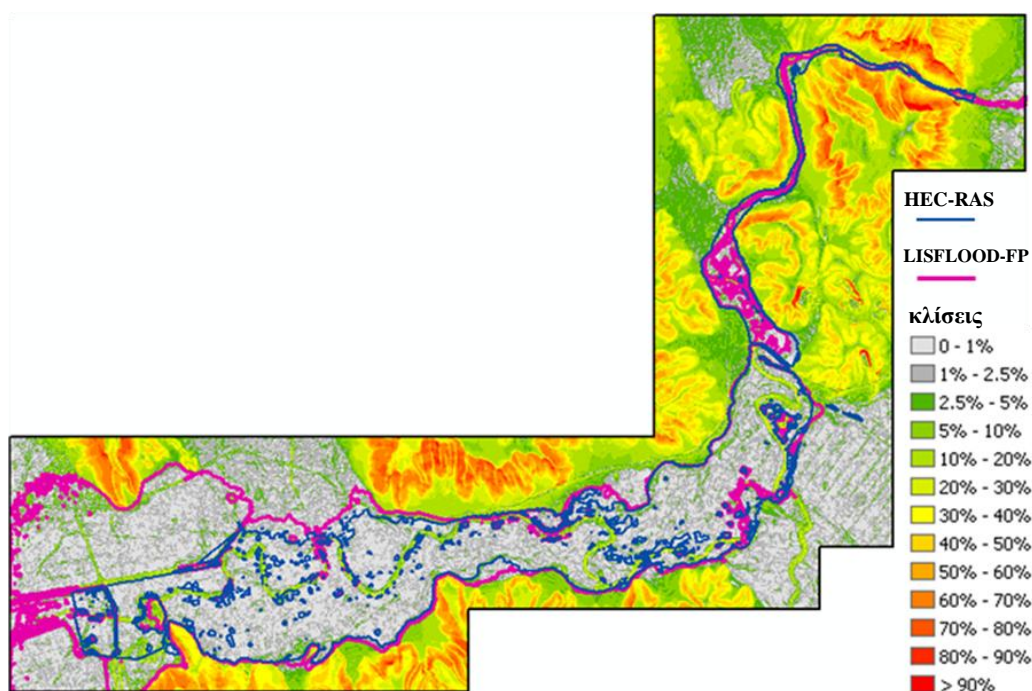
Αξιοποιώντας το λεπτομερέστερο Ψ.Μ.Ε., ανάλυσης 5 m x 5 m, πραγματοποιήθηκε η αναζήτηση της παροχής η οποία δίνει το αποτέλεσμα της πραγματικής πλημμύρας με τα δύο μοντέλα LISFLOOD -FP και HEC -RAS, σε συνθήκες μόνιμης ροής. Όπως ήδη αναφέρθηκε σε αυτή την ανάλυση δεν είναι δυνατόν να λειτουργήσει το μοντέλο FLO-2D. Για τον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας χρησιμοποιήθηκαν και πάλι τα δεδομένα χρήσεων γης για την Ελλάδα το έτος 2000, σύμφωνα με το πρόγραμμα CORINE της ΕΕ. Κατόπιν επαναληπτικής διαδικασίας η απαιτούμενη παροχή στο HEC-RAS υπολογίστηκε σε 850 m<sup>3</sup>/s (με βάθος νερού στο σημείο εξόδου 8.59 m) ενώ στο LISFLOOD-FP απαιτήθηκαν 400 m<sup>3</sup>/s (με βάθος νερού στο σημείο εξόδου 6.38 m).



Εικόνα 4.19: Βέλτιστη προσαρμογή των μοντέλων στην πραγματική πλημμύρα (κάναβος 5 m x 5 m).

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.19, με σχεδόν τη μισή παροχή στο LISFLOOD-FP η πλημμύρα απλώνει στην κοιλάδα πολύ περισσότερο επιτυγχάνοντας ποσοστό κάλυψης της πραγματικής πλημμύρας 96%. Με νερό υπερκαλύπτεται και η λεκάνη κατάκλυσης βόρεια του αναχώματος. Στο HEC -RAS αν και η παροχή είναι πολύ μεγαλύτερη, η πλημμύρα περιορίζεται από τα αναχώματα και δεν έχει τη δυνατότητα να καλύψει τη λεκάνη κατάκλυσης. Το ποσοστό κάλυψης της πραγματικής πλημμύρας ανέρχεται σε 83.5%. Διακρίνεται για κάθε μοντέλο το τμήμα της πραγματικής πλημμύρας (μπλε χρώμα), το τμήμα της πραγματικής πλημμύρας που δεν κατέστη δυνατόν να αποδοθεί από το μοντέλο (πράσινο χρώμα) και η πλημμύρα του μοντέλου που δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα (κόκκινο χρώμα).

Το αποτύπωμα της πλημμύρας για το κάθε μοντέλο εμφανίζεται στο χάρτη κλίσεων της περιοχής μελέτης (εικόνα 4.20). Παρατηρείται, ότι οι κλίσεις στην πεδιάδα εκατέρωθεν του ποταμού είναι μικρότερες από 2.5%. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, καταγράφεται η προβληματική συμπεριφορά του μοντέλου HEC-RAS που πιθανώς οφείλεται στο μονοδιάστατο χαρακτήρα του μοντέλου. Τα μονοδιάστατα μοντέλα παρουσιάζουν δυσκολία στην προσομοίωση της διάδευσης πλημμυρών σε περιοχές μικρών κλίσεων όπως και σε περιοχές με σύνθετη τοπογραφία (π.χ. πολλαπλές κατευθύνσεις ροής σε μία διατομή) και συνήθως οδηγούν σε υποτίμηση της έκτασης των πλημμυρών καθώς και σε υποτίμηση του χρόνου παραμονής των πλημμυρών (σε συνθήκες μη μόνιμης ροής).



Εικόνα 4.20: Κλίσεις γης περιοχής μελέτης και αποτύπωμα πλημμύρας.

---

## 5. Εφαρμογή Μοντέλων σε Πρότυπες Τοπογραφίες

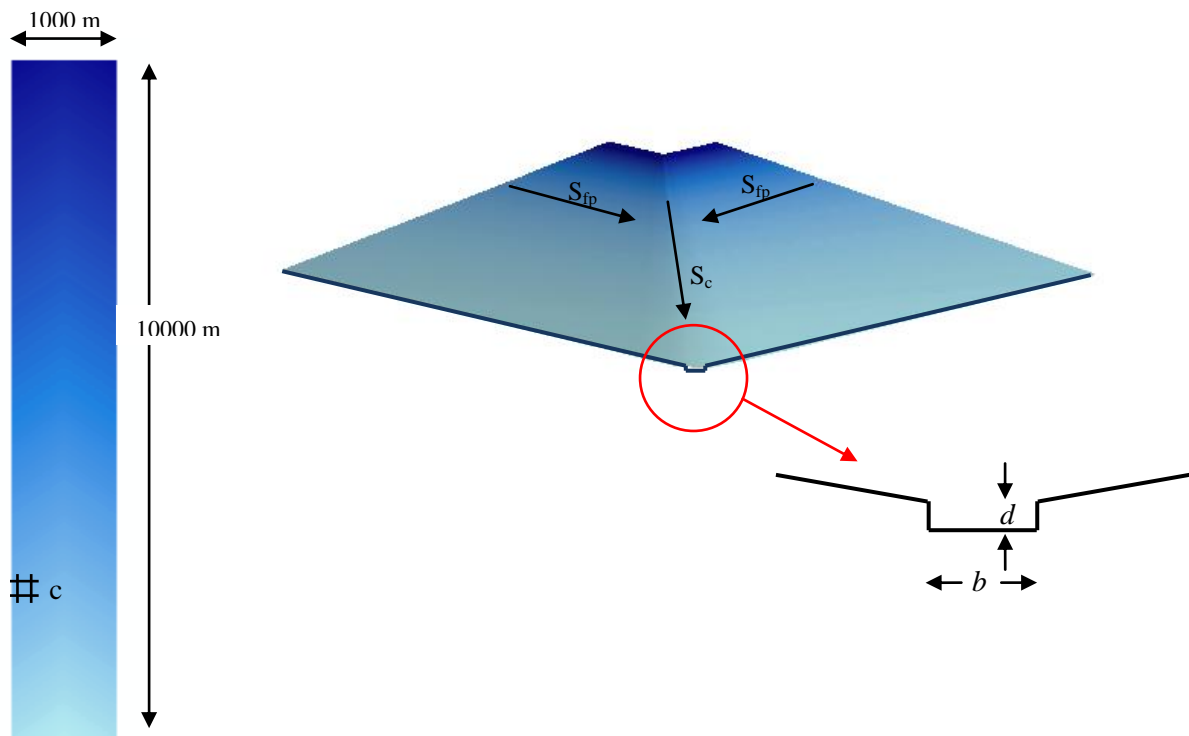
---

Στην παρούσα ενότητα, και μετά την εμπειρία που αποκομίσθηκε από την εφαρμογή των μοντέλων στην περιοχή μελέτης, για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας των μοντέλων και της ευαισθησίας που παρουσιάζουν σε διάφορες παραμέτρους, εφαρμόστηκαν σε κάποιες απλές πρότυπες τοπογραφίες. Οι τοπογραφίες αυτές δημιουργήθηκαν υπό μορφή κανάβου με διαστάσεις 1.000 m x 10.000 m. Κατά μήκος της επιφάνειας δημιουργείται κανάλι ορθογωνικής διατομής, πλάτους ( $b$ ) 10m και βάθους ( $d$ ) 2m.

Διερευνήθηκε η ευαισθησία των μοντέλων στη μεταβολή των παρακάτω παραμέτρων:

- Κλίση καναλιού ( $S_c$ ) και πλημμυρικών πεδίων ( $S_{fp}$ )
- Παροχή ( $Q$ )
- Συντελεστής τραχύτητας ( $n$ )
- Μέγεθος κυττάρου κανάβου ( $c$ )

Τα μεγέθη που ελέγχθηκαν από τις παραπάνω μεταβολές είναι η επιφάνεια της πλημμυρικής κατάκλυσης και το βάθος ροής στο σημείο εκροής του καναλιού.



Εικόνα 5.1: Γεωμετρία πρότυπων τοπογραφιών.

### 5.1 Μεταβολή κλίσης καναλιού ( $S_c$ ) και πλημμυρικών πεδίων ( $S_{fp}$ )

Μελετήθηκε το αποτέλεσμα της προσομοίωσης σε συνθήκες μόνιμης ροής για εισερχόμενη παροχή  $750\text{m}^3/\text{s}$  σε επιφάνεια με μέγεθος κυττάρου κανάβου  $10\text{ m}$  και κοινό συντελεστή τραχύτητας σε κανάλι και πλημμυρικά πεδία  $0.03\text{m}^{-1/3}\text{s}$ , μεταβάλλοντας τη κλίση κατά μήκος του καναλιού ( $S_c$ ) και εγκάρσια αυτού, στα πλημμυρικά πεδία ( $S_{fp}$ ). Επιλέχθηκαν οι τιμές κλίσης 1%, 2% και 5%. Τα αποτελέσματα για το βάθος ροής στο σημείο εκροής και την επιφάνεια της πλημμυρικής κατάκλυσης παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1 και 5.2, αντίστοιχα.

Πίνακας 5.1: Βάθος ροής στο σημείο εκροής με μεταβολή της κλίσης καναλιού και πλημμυρικών πεδίων.

Βάθος ροής (m)		LISFLOOD-FP			HEC-RAS			FLO-2D		
		κλίση καναλιού ( $S_c$ )			κλίση καναλιού ( $S_c$ )			κλίση καναλιού ( $S_c$ )		
		1 %	2%	5%	1%	2%	5%	1%	2%	5%
κλίση πλημ. Πεδίων ( $S_{fp}$ )	1%	5.96	4.83	3.65	3.39	3.09	2.84	3.47	3.18	3.00
	2%	6.14	5.00	3.80	3.62	3.34	3.01	3.83	3.54	3.33
	5%	6.28	5.12	3.90	4.06	3.66	3.19	4.51	4.23	3.94

Πίνακας 5.2: Επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή της κλίσης καναλιού και πλημμυρικών πεδίων.

Επιφάνεια πλημ. κατάκλ. ( $\text{km}^2$ )		LISFLOOD-FP			HEC-RAS			FLO-2D		
		κλίση καναλιού ( $S_c$ )			κλίση καναλιού ( $S_c$ )			κλίση καναλιού ( $S_c$ )		
		1 %	2%	5%	1%	2%	5%	1%	2%	5%
κλίση πλημ. πεδίων ( $S_{fp}$ )	1%	7.970	5.755	3.399	2.900	2.300	1.900	3.523	3.501	3.657
	2%	4.293	3.095	1.895	1.900	1.500	1.300	2.109	2.466	2.678
	5%	1.906	1.504	0.903	1.100	0.900	0.700	1.250	1.104	1.504

Όπως παρατηρούμε από τον πίνακα καταγραφής του βάθους ροής (Πίνακας 5.1) το μοντέλο LISFLOOD-FP παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στη μεταβολή της κλίσης του καναλιού και σχετικά μικρότερη ευαισθησία στη μεταβολή της εγκάρσιας κλίσης των πλημμυρικών πεδίων.

Συμπληρωματικά διερευνήθηκε και η συμπεριφορά των μοντέλων σε εξαιρετικά μικρές κλίσεις 0.1% και 0.5% σε κανάλι και πλημμυρικά πεδία. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα για παροχή  $100\text{ m}^3/\text{s}$  και συντελεστή τραχύτητας κοινό στο κανάλι και στα πλημμυρικά πεδία  $0.03\text{ m}^{-1/3}\text{s}$ .

Πίνακας 5.3: Βάθος ροής στο σημείο εκροής και επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλισης για εξαιρετικά μικρές κλίσεις σε κανάλι και πλημμυρικά πεδία

κλίσεις τοπογραφίας	LISFLOOD-FP		HEC-RAS		FLO-2D	
	Βάθος ροής (m)	Επιφάνεια πλημ. κατάκλ. (km <sup>2</sup> )	Βάθος ροής (m)	Επιφάνεια πλημ. κατάκλ. (km <sup>2</sup> )	Βάθος ροής (m)	Επιφάνεια πλημ. κατάκλ. (km <sup>2</sup> )
$S_c$ 0.1% $S_{fp}$ 0.1%	2.94	18.132	2.39	7.900	2.39	9.445
$S_c$ 0.1% $S_{fp}$ 0.5%	3.51	6.287	2.68	2.900	2.63	3.301
$S_c$ 0.5% $S_{fp}$ 0.1%	2.21	4.047	2.22	4.356	2.24	5.741
$S_c$ 0.5% $S_{fp}$ 0.5%	2.31	1.500	2.29	1.403	2.36	2.162

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω αποτελέσματα, η πλημμύρα διαχέεται σε μεγαλύτερο βαθμό για πολύ μικρότερες κλίσεις στο κανάλι, απ' ό,τι στα πλημμυρικά πεδία. Ειδικά για το μοντέλο LISFLOOD-FP η επιρροή είναι πολύ μεγαλύτερη. Για να καταγραφεί το μέγεθος χρειάστηκε να επεκταθεί η πρότυπη επιφάνεια που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο μοντέλο.

## 5.2 Μεταβολή εισερχόμενης παροχής ( $Q$ )

Μελετήθηκε το αποτέλεσμα της προσομοίωσης σε συνθήκες μόνιμης ροής σε επιφάνεια με μέγεθος κυττάρου κανάβου 10 m και κοινό συντελεστή τραχύτητας σε κανάλι και πλημμυρικά πεδία  $0.03\text{m}^{-1/3}\text{s}$ , μεταβάλλοντας την εισερχόμενη παροχή από  $250\text{ m}^3/\text{s}$  σε  $500\text{ m}^3/\text{s}$  και  $750\text{ m}^3/\text{s}$ . Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το βάθος ροής στο σημείο εκροής και την επιφάνεια της πλημμυρικής κατάκλισης παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4 και 5.5, αντίστοιχα. Αξιοποιήθηκαν όλες οι διαθέσιμες τοπογραφίες με κλίσεις 1%, 2% και 5% σε κανάλι και πλημμυρικά πεδία.

Πίνακας 5.4: Βάθος ροής στο σημείο εκροής με μεταβολή της εισερχόμενης παροχής.

Βάθος ροής (m)		LISFLOOD-FP			HEC-RAS			FLO-2D		
		παροχή (m <sup>3</sup> /s)			παροχή (m <sup>3</sup> /s)			παροχή (m <sup>3</sup> /s)		
		250	500	750	250	500	750	250	500	750
κλίσεις τοπογραφίας	$S_c$ 1% $S_{fp}$ 1%	3.17	4.69	5.96	2.73	3.12	3.39	2.90	3.24	3.47
	$S_c$ 1% $S_{fp}$ 2%	3.25	4.84	6.14	2.82	3.3	3.62	3.13	3.55	3.83
	$S_c$ 1% $S_{fp}$ 5%	3.27	4.92	6.28	2.92	3.61	4.06	3.51	4.13	4.51
	$S_c$ 2% $S_{fp}$ 1%	2.61	3.82	4.83	2.51	2.87	3.09	2.67	2.98	3.18
	$S_c$ 2% $S_{fp}$ 2%	2.66	3.94	5.00	2.58	3.05	3.34	2.87	3.28	3.54
	$S_c$ 2% $S_{fp}$ 5%	2.68	4.04	5.12	2.58	3.24	3.66	3.24	3.86	4.23
	$S_c$ 5% $S_{fp}$ 1%	2.06	2.92	3.65	2.24	2.63	2.84	2.55	2.82	3.00
	$S_c$ 5% $S_{fp}$ 2%	2.06	3.01	3.80	2.23	2.74	3.01	2.62	3.07	3.33
$S_c$ 5% $S_{fp}$ 5%	2.06	3.08	3.90	2.12	2.81	3.19	2.82	3.54	3.94	



Πίνακας 5.5: Επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή της εισερχόμενης παροχής.

Επιφάνεια πλημ. κατάκλ. (km <sup>2</sup> )		LISFLOOD-FP			HEC-RAS			FLO-2D		
		παροχή (m <sup>3</sup> /s)			παροχή (m <sup>3</sup> /s)			παροχή (m <sup>3</sup> /s)		
		250	500	750	250	500	750	250	500	750
κλίσεις τοπογραφίας	$S_c$ 1% $S_{fp}$ 1%	2.499	5.457	7.970	1.700	2.500	2.900	2.306	3.083	3.523
	$S_c$ 1% $S_{fp}$ 2%	1.503	3.097	4.293	1.100	1.500	1.900	1.308	1.819	2.109
	$S_c$ 1% $S_{fp}$ 5%	0.703	1.305	1.906	0.500	0.900	1.100	0.705	1.050	1.250
	$S_c$ 2% $S_{fp}$ 1%	1.490	3.838	5.755	1.300	1.900	2.300	2.406	3.101	3.501
	$S_c$ 2% $S_{fp}$ 2%	0.902	2.101	3.095	0.700	1.300	1.500	1.707	2.107	2.466
	$S_c$ 2% $S_{fp}$ 5%	0.502	1.103	1.504	0.500	0.700	0.900	0.702	0.904	1.104
	$S_c$ 5% $S_{fp}$ 1%	0.301	2.062	3.399	0.700	1.500	1.900	2.524	3.253	3.657
	$S_c$ 5% $S_{fp}$ 2%	0.301	1.292	1.895	0.500	0.900	1.300	1.920	2.400	2.678
	$S_c$ 5% $S_{fp}$ 5%	0.301	0.702	0.903	0.300	0.500	0.700	0.949	1.305	1.504

Και σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο LISFLOOD-FP καταγράφει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στην μεταβολή της εισερχόμενης παροχής. Με τα δύο ψευδο-διδιάστατα μοντέλα, η πλημμύρα διαχέεται σε μεγαλύτερο βαθμό στα πλημμυρικά πεδία καταγράφοντας μεγαλύτερη έκταση της πλημμυρικής κατάκλυσης απ' ό,τι με το μονοδιάστατης ανάλυσης HEC-RAS.

### 5.3 Μεταβολή συντελεστή τραχύτητας ( $n$ ) σε κανάλι και πλημμυρικά πεδία

Μελετήθηκε το αποτέλεσμα της προσομοίωσης σε επιφάνεια με κλίσεις καναλιού και πλημμυρικών πεδίων 1% και μέγεθος κυττάρου κανάβου 10 m, σε συνθήκες μόνιμης ροής με εισερχόμενη παροχή 750 m<sup>3</sup>/s. Ο συντελεστής τραχύτητας του Manning σε κανάλι και πλημμυρικά πεδία έλαβε τιμές 0.01 m<sup>-1/3</sup>s, 0.03 m<sup>-1/3</sup>s, 0.08 m<sup>-1/3</sup>s, 0.10 m<sup>-1/3</sup>s και 0.20 m<sup>-1/3</sup>s. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το βάθος ροής στο σημείο εκροής και την επιφάνεια της πλημμυρικής κατάκλυσης παρουσιάζονται για το κάθε μοντέλο στους πίνακες 5.6, 5.7 και 5.8.



Πίνακας 5.6: Βάθος ροής στο σημείο εκροής και επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλισης με μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας με χρήση του μοντέλου LISFLOOD-FP.

LISFLOOD-FP						
Βάθος ροής (m)		Συντελεστής τραχύτητας καναλιού ( $m^{-1/3}s$ )				
Επιφάνεια πλημ. κατάκλ. ( $km^2$ )		0.01	0.03	0.08	0.10	0.20
Συντελεστής τραχύτητας πλημ. Πεδίων ( $m^{-1/3}s$ )	0.01	3.283	5.936	9.384	10.238	12.512
		2.696	7.961	14.451	16.108	20.361
	0.03	3.285	5.956	9.421	10.281	12.618
		2.697	7.970	14.587	16.144	20.579
	0.08	3.288	5.96	9.457	10.326	12.727
		2.698	7.975	14.631	16.287	20.793
	0.10	3.289	5.972	9.461	10.331	12.734
		2.698	7.980	14.636	16.294	20.805
	0.20	3.292	5.978	9.482	10.364	12.777
		2.700	7.986	14.658	16.336	20.864

Πίνακας 5.7: Βάθος ροής στο σημείο εκροής και επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλισης με μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας με χρήση του μοντέλου HEC-RAS.

HEC-RAS						
Βάθος ροής (m)		Συντελεστής τραχύτητας καναλιού ( $m^{-1/3}s$ )				
Επιφάνεια πλημ. κατάκλ. ( $km^2$ )		0.01	0.03	0.08	0.10	0.20
Συντελεστής τραχύτητας πλημ. Πεδίων ( $m^{-1/3}s$ )	0.01	2.68	2.87	2.92	2.93	2.94
		1.500	1.900	2.100	2.100	2.100
	0.03	2.96	3.39	3.41	3.42	3.44
		2.100	2.900	3.097	3.100	3.100
	0.08	3.23	3.83	4.01	4.04	4.08
		2.700	3.900	4.300	4.300	4.300
	0.10	3.29	3.97	4.18	4.21	4.27
		2.700	4.100	4.500	4.700	4.700
	0.20	3.46	4.46	4.80	4.84	4.93
		3.100	5.100	5.900	5.900	6.100

Πίνακας 5.8: Βάθος ροής στο σημείο εκροής και επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας με χρήση του μοντέλου FLO-2D.

FLO-2D						
Βάθος ροής (m)		Συντελεστής τραχύτητας καναλιού ( $m^{-1/3}s$ )				
Επιφάνεια πλημ. κατάκλ. ( $km^2$ )		0.01	0.03	0.08	0.10	0.20
Συντελεστής τραχύτητας πλημ. πεδίων ( $m^{-1/3}s$ )	0.01	3.11	3.14	3.08	3.08	3.09
		2.538	2.703	2.803	2.803	2.804
	0.03	3.33	3.47	3.48	3.51	3.52
		3.306	3.561	3.700	3.702	3.802
	0.08	3.73	4.00	4.02	4.04	4.07
		4.108	4.537	4.893	4.898	4.997
	0.10	3.83	4.16	4.18	4.19	4.24
		4.297	4.893	5.177	5.259	5.309
	0.20	4.17	4.68	4.78	4.83	4.88
		4.941	5.880	6.366	6.489	6.591

Είναι σαφές από τους παραπάνω πίνακες αποτελεσμάτων ότι το LISFLOOD-FP παρουσιάζει έντονη ευαισθησία στη μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας του καναλιού και πολύ μικρή στη μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας στα πλημμυρικά πεδία. Επίσης, καταγράφει τη μεγαλύτερη έκταση πλημμυρικής κατάκλυσης από τα άλλα μοντέλα, ενώ εμφανίζει εξαιρετικά μεγάλα βάθη ροής στο κανάλι. Πιθανολογείται ότι το γεγονός αυτό οφείλεται στη θεώρηση του μοντέλου όπου το κανάλι επιλύεται χωριστά, δέχεται το σύνολο της εισερχόμενης παροχής και στη συνέχεια τη διαχέει στα πλημμυρικά πεδία.

#### 5.4 Μεταβολή μεγέθους κυττάρου κανάβου επιφάνειας (c)

Μελετήθηκε το αποτέλεσμα της προσομοίωσης, σε συνθήκες μόνιμης ροής με εισερχόμενη παροχή  $250 m^3/s$ ,  $500 m^3/s$  και  $750 m^3/s$  σε επιφάνεια με κλίσεις καναλιού και πλημμυρικών πεδίων 1% και κοινό συντελεστή τραχύτητας  $0.03 m^{-1/3}s$ . Μεταβλήθηκε το μέγεθος του κυττάρου του κανάβου της επιφάνειας από 10 m σε 50 m. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το βάθος ροής στο σημείο εκροής και την επιφάνεια της πλημμυρικής κατάκλυσης παρουσιάζονται στους πίνακες 5.9 και 5.10, αντίστοιχα.

Πίνακας 5.9: Βάθος ροής στο σημείο εκροής με μεταβολή του μεγέθους του κυττάρου του κανάβου της επιφάνειας.

Βάθος ροής (m)		LISFLOOD-FP			HEC-RAS			FLO-2D		
		παροχή (m <sup>3</sup> /s)			παροχή (m <sup>3</sup> /s)			παροχή (m <sup>3</sup> /s)		
		250	500	750	250	500	750	250	500	750
Μέγεθος κυττάρου (m)	10	3.17	4.69	5.96	2.73	3.12	3.39	2.9	3.24	3.47
	50	2.78	3.33	3.72	2.6	2.94	3.17	2.78	3.12	3.43
Μεταβολή (%)		-12	-29	-38	-4.8	-5.8	-6.5	-4.1	-3.7	-1.2

Πίνακας 5.10: Επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή του μεγέθους του κυττάρου του κανάβου της επιφάνειας.

Επιφάνεια πλημ. κατάκλ. (km <sup>2</sup> )		LISFLOOD-FP			HEC-RAS			FLO-2D		
		παροχή (m <sup>3</sup> /s)			παροχή (m <sup>3</sup> /s)			παροχή (m <sup>3</sup> /s)		
		250	500	750	250	500	750	250	500	750
Μέγεθος κυττάρου (m)	10	2.499	5.457	7.970	1.700	2.500	2.900	2.306	3.085	3.561
	50	1.473	2.458	3.443	1.463	2.438	3.413	4.475	5.385	6.338
Μεταβολή (%)		-41	-55	-57	-14.0	-2.5	17.7	94	75	78

Το μονοδιάστατης ανάλυσης HEC-RAS, δεν δείχνει να επηρεάζεται σημαντικά από τη μεταβολή της ανάλυσης της επιφάνειας, όπως ήταν αναμενόμενο, δεδομένου ότι δεν βασίζει τη γεωμετρία του στο κανονικοποιημένης μορφής (μορφής grid) γεωμετρικό αρχείο. Αντίθετα τα δύο ψευδο-διδιάστατα μοντέλα επηρεάζονται αρκετά και προς διαφορετική κατεύθυνση, όσον αφορά την επιφάνεια της πλημμυρικής κατάκλυσης.



---

## 6. Σχολιασμός – Συμπεράσματα

---

Συμπερασματικά, η συγκεκριμένη εφαρμογή και η συνολική διερεύνηση καταγράφει τις μεγάλες αβεβαιότητες (υδρολογικές, υδραυλικές γεωμετρικές) που υπεισέρχονται στη μοντελοποίηση πλημμυρικών γεγονότων. Τα συμπεράσματα αφορούν τις λειτουργικές απαιτήσεις, την ευαισθησία αλλά και τους περιορισμούς κάθε μοντέλου σχετικά με τη διαθέσιμη τοπογραφία καθώς και παρατηρήσεις ως προς την προσομοίωση της ροής με το κάθε μοντέλο και της ευαισθησίας που αυτά παρουσιάζουν στη μεταβολή των παραμέτρων του καναλιού και των πλημμυρικών πεδίων.

- Για τη δημιουργία των γεωμετρικών δεδομένων στο HEC-RAS η διαδικασία είναι τυπική. Για τις διατομές που δημιουργήθηκαν βάσει του λεπτομερούς Ψ.Μ.Ε., λόγω της μεγάλης έκτασης της πεδιάδας, χρειάστηκε να γίνει επεξεργασία με την απαιτούμενη προσοχή ανά διατομή ώστε να μην αλλοιωθούν τα χαρακτηριστικά της, αφού το μοντέλο δέχεται περιορισμένο αριθμό σημείων ανά διατομή (παρ. 4.1.4). Στο μοντέλο LISFLOOD-FP απαιτήθηκε επεξεργασία στο γεωμετρικό αρχείο του ποταμού όπως αυτό αντλήθηκε από το Ψ.Μ.Ε., γιατί παρατηρήθηκε εναλλαγή των κλίσεων του ποταμού (θετικές και αρνητικές κλίσεις) κάτι το οποίο δεν γίνεται αποδεκτό από το μοντέλο (παρ. 4.1.5.). Οι εναλλαγές αυτές οφείλονταν κυρίως στις μικρές κλίσεις της περιοχής και στο ότι οι υψομετρικές διαφορές στη γραμμή ροής του ποταμού ήταν μικρότερες από την υψομετρική ακρίβεια του Ψ.Μ.Ε. Το ίδιο πρόβλημα παρουσιάστηκε και με το μοντέλο FLO-2D στο οποίο η δημιουργία του γεωμετρικού αρχείου του ποταμού είναι περίπλοκη και χρονοβόρα. Η ένταξη του στη γεωμετρία της περιοχής επιβάρυνε χρονικά τις προσομοιώσεις σε σημείο που δεν ήταν λειτουργικό το μοντέλο. Η απαίτηση για πιο αδρομερή απόδοση της γεωμετρίας της περιοχής δημιούργησε πρόβλημα στην προσομοίωση λόγω της υψομετρικής ακρίβειας του διατιθέμενου Ψ.Μ.Ε.
- Η ανάλυση των γεωμετρικών δεδομένων (grid) επηρεάζει σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο στα ψευδο-διδιάστατα μοντέλα. Το LISFLOOD-FP ανταποκρίνεται καλύτερα στη χρήση αναλυτικού Ψ.Μ.Ε. σε σχέση με το FLO-2D, το οποίο θέτει όριο στην ανάλυση της τοπογραφίας. Το HEC-RAS, το οποίο δεν βασίζεται σε ανάλυση κανάβου, η λεπτομερέστερη τοπογραφία απαιτεί απλώς περισσότερες διατομές. Σε αντίθεση με το μονοδιάστατης ανάλυσης HEC-RAS το ψευδο-διδιάστατο μοντέλο LISFLOOD-FP επηρεάζεται σημαντικά από την ανάλυση της τοπογραφίας, στην προσομοίωση της πλημμυρικής διόδευσης και κατάκλυσης (παρ. 4.2.3 & Πίνακες 5.9, 5.10).
- Περιπτώσεις όπως η συγκεκριμένη με σύνθετη τοπογραφία, όπου καταγράφονται πολλαπλές κατευθύνσεις ροής σε κάθε διατομή, τα μονοδιάστατα μοντέλα αδυνατούν να προσομοιώσουν με ακρίβεια τη χωρική κατάκλυση της πλημμύρας, σε αντίθεση με τα

ψευδο-διδιάστατα μοντέλα (Εικόνα 4.12). Το HEC-RAS εξετάζει την ροή από διατομή σε διατομή μη λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική ροή του ποταμού και την αλληλεπίδρασή του με την πεδιάδα. Σε περιοχές όπου εκατέρωθεν του ποταμού εκτείνονται μεγάλες πεδιάδες (με μικρές κλίσεις) όπως και στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης, η εφαρμογή του μοντέλου δημιουργεί απεικονίσεις όπου φαίνεται να μην ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα (Εικόνες 4.14, 4.17). Αντίθετα τα μοντέλα LISFLOOD-FP και FLO-2D φαίνεται να προσομοιώνουν καλύτερα τη πλημμύρα (Εικόνες 4.13, 4.15) διαχέοντας την στην πεδιάδα, προς όλες τις κατευθύνσεις, ακόμα και αν χρειαστεί σε κάποιες θέσεις αυτή να οδηγηθεί προς τα ανάντη (π.χ. στις περιπτώσεις περιοχών με αναχώματα).

- Σε περιοχές σχετικά μικρών κλίσεων, όπως η περιοχή μελέτης, το μονοδιάστατης ανάλυσης HEC-RAS υπερεκτιμά το μέγεθος της εισερχόμενης παροχής. Το LISFLOOD-FP δίνει εκτιμήσεις πιο κοντά στην πραγματικότητα, ειδικά με την χρήση λεπτομερούς Ψ.Μ.Ε. (Εικόνα 4.19). Εξετάζοντας περαιτέρω τη διαπίστωση αυτή με εφαρμογή σε απλή τοπογραφία μικρών κλίσεων με κανάλι μικρής ορθογωνικής διατομής και με σημαντική εισερχόμενη παροχή το LISFLOOD-FP εμφανίζει εξαιρετικά μεγάλα βάθη ροής στο κανάλι. Πιθανολογείται ότι το γεγονός αυτό οφείλεται στη θεώρηση του μοντέλου όπου το κανάλι επιλύεται χωριστά, δέχεται το σύνολο της εισερχόμενης παροχής και στη συνέχεια τη διαχέει στα πλημμυρικά πεδία (Πίνακας 5.6). Τα αποτελέσματα στη μέτρηση του βάρους ροής είναι κοντά και στα τρία μοντέλα στην περίπτωση σχετικά μικρής εισερχόμενης παροχής (Πίνακας 5.3).
- Στη θεώρηση του μοντέλου LISFLOOD-FP (η δυναμική της ροής προέρχεται από το ποτάμι και όχι από τα πλημμυρικά πεδία τα οποία λειτουργούν περισσότερο ως επιφάνειες αποθήκευσης παρά ως συμπληρωματικές διαδρομές ροής) δικαιολογείται και η μεγαλύτερη ευαισθησία που παρουσιάζει σε σχέση με τα άλλα μοντέλα στην αλλαγή των παραμέτρων που σχετίζονται με το κανάλι απ' ότι των παραμέτρων που σχετίζονται με τα πλημμυρικά πεδία. Καταγράφεται μεγαλύτερη ευαισθησία στη μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας του καναλιού απ' ότι των πλημμυρικών πεδίων (Πίνακας 5.6). Το ίδιο παρατηρείται και στην μεταβολή της κλίσης στο κανάλι σε σχέση με τη κλίση στα πλημμυρικά πεδία (Πίνακες 5.1, 5.2). Μεγαλύτερη ευαισθησία σημειώνεται τέλος στη μεταβολή της εισερχόμενης παροχής καταλαμβάνοντας με μικρότερες παροχές μεγαλύτερες πλημμυρικές εκτάσεις (Πίνακας 5.5).
- Το FLO-2D αποτελεί ένα σύνθετο μοντέλο με πολλές παραμέτρους, το οποίο όμως δεν υποστηρίζεται από κατάλληλα εργαλεία για την εύκολη λειτουργία του. Από την παρούσα εφαρμογή προκύπτει ότι εκτιμά καλά την πλημμυρική κατάκλυση, όμως απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση για την πλήρη αξιοποίηση των λειτουργιών του και την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Από τη γενικότερη ενασχόληση με το συγκεκριμένο αντικείμενο, προκύπτει ότι η εφαρμογή των ψευδο-διδιάστατων μοντέλων είναι χρήσιμη σε περιοχές μικρών κλίσεων και σε σύνθετες τοπογραφίες. Προτείνεται η περαιτέρω έρευνα των μοντέλων αυτών σε κατευθύνσεις όπως:

- Διερεύνηση και καταγραφή μεθοδολογίας επεξεργασίας και εξομάλυνσης υψομετρικών δεδομένων χαμηλής ακρίβειας και απόδοσης τοπογραφίας συμβατής με τις ανάγκες ακριβείας των υδραυλικών μοντέλων.

- Υδρολογική διερεύνηση συγκεκριμένου επεισοδίου βροχής σε συνδυασμό με την αποτύπωση της πλημμυρικής κατάκλυσης που προκάλεσε, όπως μπορεί να καταγραφεί από δορυφόρο. Πιθανώς αναζήτηση τέτοιας περίπτωσης πρέπει να γίνει σε περιοχή εκτός του Ελλαδικού χώρου, όπου θα υπάρχει πλήρης καταγραφή υδρολογικών δεδομένων.
- Σύγκριση των μοντέλων με χρήση πραγματικού πλημμυρογραφήματος που μεταβάλλεται στο χρόνο (συνθήκες μη μόνιμης ροής).
- Δεδομένου ότι το μοντέλο LISFLOOD-FP, αποτελεί μοντέλο απλής και ευχερούς λειτουργίας, προτείνεται η ευρεία και συμπληρωματική εφαρμογή του σε μελέτες περιπτώσεων όπου χρησιμοποιούνται άλλα μοντέλα (κυρίως μονοδιάστατης ανάλυσης), ώστε να διερευνηθούν πλήρως οι δυνατότητες και να αναδειχτούν τα τυχόν πλεονεκτήματά του.
- Λόγω των αβεβαιοτήτων που αναφέρθηκαν απαιτείται ένα σύγχρονο πλαίσιο σε επιστημονικό – τεχνολογικό επίπεδο για τη μελέτη του φαινομένου προεξάρχουσας της πιθανοτικής μεταβολής των παραμέτρων του.





---

## Αναφορές

---

- Baldassare Di G., Schumann, G., Bates P.D., Freer J.E. and Keith Beven J.K., Flood-plain mapping: a critical discussion of deterministic and probabilistic approaches. *Hydrological Sciences Journal*, 55:3, 364-376, 2010.
- Bates, P., Horritt, M., Wilson, M., Hunter, N., LISFLOOD-FP, User manual and technical note, *School of Geographical Sciences, University of Bristol, University Road, Bristol, BS8 1SS, UK*, 2005.
- Bruner, G., HEC-RAS, river analysis system user's manual, *US army corps of engineers, Hydrologic engineering center*, 2010.
- Bruner, G., HEC-RAS, river analysis system hydraulic reference manual, *US army corps of engineers, Hydrologic engineering center*, 2010.
- Cunge, J.A., Holly, F.M. Jr. and Verwey, A., Practical aspects of computational river hydraulics, *Pitman, London*, 420pp, 1980.
- Horritt, M.S. and Bates, P.D., Evaluation of 1-D and 2-D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 268, 87-99, 2002.
- Hunter, N.M., Horritt, M.S., Bates, P.D., Wilson, M.D. and Werner, M.G.F., An adaptive time step solution for raster-based storage cell modeling of floodplain inundation. *Advances in Water Resources*, 28(9), 975-991, 2005.
- Mimikou, M., Koutsoyiannis, D., Extreme Floods in Greece: The case of 1994. *Proc. Research Workshop on the Hydrometeorology, Impacts and management of Extreme Floods, US-NSF and Italian Research Council, Perugia, Italy*, Nov. 1995
- Oikonomou, A., Dimitriadis, P., Koukouvinos, A., Tegos, A., Pagana, V., Panagopoulos, P., Mamasis, N. and Koutsoyiannis, D., Floodplain mapping via 1D and quasi-2D numerical models in the valley of Thessaly, Greece, *European Geosciences Union General Assembly 2013, Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, Vienna, EGU2013-10366, European Geosciences Union*, 2013.
- Loomis, T.R. and Riano, A., FLO-2D Training For Technical Reviewers, *Flood Control District of Maricopa County*, 2011
- Yan Huang, Appropriate modeling for integrated flood risk assessment, 2005
- Κουτσογιάννης, Δ., Ανδρεαδάκης, Α., Μαυροδήμου, Π., Χριστοφίδης, Α., Μαμάσης, Ν., Ευστρατιάδης, Α., Κουκουβίνος, Α., Καραβοκυρός, Γ., Κοζάνης, Σ., Μαμάης, Δ., Νουτσόπουλος, Κ., Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας Υδατικών Πόρων,

---

*Υποστήριξη της κατάρτισης Εθνικού Προγράμματος Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, ΕΜΠ, Αθήνα, 2008*

Παπανικολάου, Π., Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση & αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια, *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Διδακτικές Σημειώσεις, Αθήνα, 2012.*

Πρίνος, Π., *Υδραυλική Ανοιχτών Αγωγών, εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2009.*

Οδηγία Πλαίσιο για τις Πλημμύρες (2007/60/ΕΚ).

Εφαρμογή Οδηγίας 2007/60/ΕΚ Προκαταρκτική Αξιολόγηση Κινδύνων Πλημμύρας, Ειδική Γραμματεία Υδάτων, ΥΠΕΚΑ, Αθήνα, Δεκέμβριος 2012.

Διαχειριστική Μελέτη Υδατικών Πόρων Λεκάνης Απορροής π. Πηνειού, Α. Φυσικό Σύστημα, ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006.

Σχέδιο διαχείρισης των λεκανών απορροής των ποταμών Αχελώου και Πηνειού Θεσσαλίας, ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006.

---

## Βιβλιογραφία

---

- Loomis, T.R. and Riano, A., FLO-2D Software New Release Overview, *Flood Control District of Maricopa County, AFMA Spring 2012 Conference*, 2012
- Warner, J., Bruner, G., Wolfe, B., Piper, St., HEC-RAS, river analysis system application guide, *US army corps of engineers, Hydrologic engineering center*, 2010.
- Βαφειάδης, Μ., Διοδεύσεις, *Διδακτικές Σημειώσεις, ΤΥΤΠ - ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη*, 2005.
- Γεωργακάκου, Η.-Γ., Μόνιμη και μη-μόνιμη ροή με ελεύθερη επιφάνεια σε διώρυγες ορθογωνικής και κυκλικής διατομής, *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Διπλωματική εργασία, Αθήνα*, 2010.
- Γκιοκάς, Α., Κατάρτιση μεθοδολογικού πλαισίου για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας, Εφαρμογή στο νομό Αρκαδίας, *Διπλωματική εργασία, ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδάτινων Πόρων»*, Αθήνα, 2009.
- Δεδούσης, Σ., Επιπτώσεις από εναλλακτικές λύσεις διαμόρφωσης του εξωτερικού κλάδου του Πηνειού ποταμού στην πόλη της Λάρισας, *Διπλωματική εργασία, ΜΠΕ «Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη»*, Θεσσαλονίκη, 1999.
- Παγανά, Β., Κατάρτιση Χαρτών Πλημμύρας στην Περιοχή της Ραφήνας, *Διπλωματική εργασία, ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδάτινων Πόρων»*, Αθήνα, 2012
- Δημητρίου, Ι., Εφαρμοσμένη Υδραυλική – Εφαρμογές, *εκδόσεις Γρ.Φούντας, Αθήνα*, 1994
- Κοσμάνης, Θ., Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών- υλοποίηση σε στατικά και χρονικά εξαρτημένα προβλήματα, *Σημειώσεις μαθήματος Υπολογιστικές Τεχνικές στις Τηλεπικοινωνίες, Σέρρες*.
- Κουτσογιάννης, Δ., Υδρολογικές μέθοδοι διόδευσης πλημμυρών, *Εντατικό πρόγραμμα επιμόρφωσης στις απορροές και διευθετήσεις υδατορευμάτων, ΕΜΠ, Αθήνα*, 1988.
- Κουτσογιάννης, Δ., Ευστρατιάδης, Α., Κουτσογιάννης, Δ., Μαμάσης, Ν., Δημητριάδης, Π., Μαχαίρας, Α., ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων. Ενότητα Εργασίας 3: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένων εργαλείων υδρολογίας πλημμυρών (ΕΤΜΕ:Πέππας & Συν/τες ΕΕ, Γραφείο Μαχαίρα ΑΕ, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΕΜΠ, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας).
- Λουκάς, Α., Εφαρμογές Προσομοίωσης σε Υδροσυστήματα. Προσομοίωση ροής σε φυσικά υδατορρέυματα με τη χρήση του υδραυλικού μοντέλου HEC-RAS, *Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας*,

*Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Διδακτικές σημειώσεις του Μαθήματος «Προσομοίωση Συστημάτων Επιφανειακών και Υπόγειων Υδατικών Πόρων» του Μεταπτυχιακού προγράμματος «Προσομοίωση Συστημάτων & Σχεδιασμός Έργων Πολιτικού Μηχανικού».*

*Μαμάσης, Ν., Πλημμύρες, Σημειώσεις μαθήματος Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά Έργα, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα, 2013.*