



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ»

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ ΣΕ  
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΗ ΜΟΝΙΜΗΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ  
ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ  
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΠΗΝΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

*Έφη Μόσχου*

**Δ.Π.Μ.Σ.  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ»**

**Αθήνα, Οκτώβριος 2014**

**Επιβλέπων : Επ. Καθηγητής Ν. Μαμάσης**



**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΗ  
ΜΟΝΙΜΗΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ  
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΠΗΝΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

*Μεταπτυχιακή Εργασία*

**Έφη Μόσχου**

Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

efiemoschou@gmail.com

Δ.Π.Μ.Σ. Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων

**Αθήνα, Οκτώβριος 2014**

**Επιβλέπων : Επ. Καθηγητής Ν. Μαμάσης**



## Ευχαριστίες

Με το τέλος αυτής της εργασίας, κλείνει ο κύκλος των μεταπτυχιακών μου σπουδών στο Ε.Μ.Π.. Ήταν μια πολύ όμορφη εμπειρία κατά τη διάρκεια της οποίας εισέπραξα πολλά θετικά στοιχεία και σίγουρα αποτελεί για εμένα σταθμό στη μέχρι τώρα πορεία μου.

Η μεταπτυχιακή εργασία μου προσέφερε ποικίλες εμπειρίες όλες τους θετικές. Θα ήθελα για το λόγο αυτό να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Νίκο Μαμάση που αποδέχτηκε και είχε την επίβλεψη του θέματος της εργασίας μου για δεύτερη φορά. Η συνεργασία μας ήταν ιδιαίτερα σημαντική για εμένα και τον ευχαριστώ για όσα έχω εισπράξει από αυτόν, όσα χρόνια ήταν καθηγητής μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα Παναγιώτη Δημητριάδη, ο οποίος με καθοδήγησε και με βοήθησε σε μεγάλο βαθμό να ολοκληρώσω την εργασία παρέχοντάς μου τις συμβουλές και τις γνώσεις του όποτε τα είχα ανάγκη.

Καθοριστικής σημασίας ήταν η υποστήριξη του κ. Ηλία Μουσούλη, τεχνικού συμβούλου του ΔΗΙ στην Ελλάδα. Η βοήθεια του και η διαθεσιμότητά του καθ' όλη τη διάρκεια της διεκπεραίωσης της εργασίας, να επιλύσει και να συζητήσουμε τις όποιες απορίες είχα με το πακέτο λογισμικού MIKE FLOOD ήταν παραπάνω από σημαντική για εμένα και για το λόγο αυτό θα ήθελα να τον ευχαριστήσω ιδιαίτερω.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Διπλ. Αγρονόμο & Τοπογράφο Μηχανικό, Θάνο Οικονόμου ο οποίος ήταν σε πολύ μεγάλο βαθμό πρόθυμος να μου παρέχει τη δουλειά του και να μου εξηγήσει τη δομή της εργασίας του. Με τον τρόπο αυτό κατέστη δυνατό για εμένα να κατανοήσω την ανάλυσή του και να τη διευρύνω και γι αυτό τον ευχαριστώ θερμά.

Η παρουσία των φίλων μου οι οποίοι ήταν δίπλα μου όλο αυτό το διάστημα προσφέροντάς μου αφενός όμορφες στιγμές και ακούγοντας αφετέρου τους όποιους προβληματισμούς μου, είναι σε όλες τις στιγμές της ζωής μου ιδιαίτερα σημαντική για εμένα. Τους ευχαριστώ που είναι μαζί μου. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω το Σταμάτη και το Γιάννη οι οποίοι εκτός από πάρα πολλές ώρες συζήτησης μου έχουν δώσει πολλές φορές την αφορμή για να σκεφτώ διαφορετικά.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου, για τη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου και για τα όσα εφόδια μου έχουν δώσει και συνεχίζουν να μου δίνουν καθημερινά. Τους ευχαριστώ που είναι εκεί.



## Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος Εικόνων .....	ix
Κατάλογος Πινάκων.....	xi
Κατάλογος Σχημάτων .....	xii
Κατάλογος Χαρτών.....	xv
Περίληψη.....	xvii
Extended Abstract .....	xviii
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο μελέτης .....	1
1.2 Διάρθρωση εργασίας.....	2
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο των υπό εξέταση Πλημμυρικών Μοντέλων .....	5
2.1 Πλημμύρες .....	5
2.2 Ροή Ανοικτών Αγωγών .....	6
2.3 Εξισώσεις και Διάκριση Πλημμυρικών Κυμάτων .....	9
2.4 Πλημμυρικά Μοντέλα.....	13
2.4.1 Θεωρητικό πλαίσιο υπολογισμών στο <i>HEC-RAS</i> .....	13
2.4.2 Θεωρητικό πλαίσιο υπολογισμών στο <i>LISFLOOD-FP</i> .....	16
2.4.3 Θεωρητικό πλαίσιο υπολογισμών στο <i>MIKE FLOOD</i> .....	21
2.5 Συγκρίσεις λογισμικών υδραυλικής προσομοίωσης.....	31
3. Εφαρμογή πλημμυρικών μοντέλων στην περιοχή μελέτης.....	33
3.1 Περιγραφή Περιοχής Μελέτης.....	33
3.1.1 Δυτική λεκάνη Θεσσαλίας .....	36
3.1.2 Περιοχή Μελέτης .....	38
3.2 Υδραυλική Προσομοίωση Περιοχής Μελέτης.....	40
3.2.1 Τοπογραφική Αποτύπωση Περιοχής Μελέτης .....	40
3.2.2 Αρχική Επεξεργασία Διαθέσιμων Στοιχείων .....	44
3.2.3 Προσομοίωση στο Υδραυλικό Μοντέλο <i>HEC-RAS</i> .....	45
3.2.4 Προσομοίωση στο Υδραυλικό Μοντέλο <i>LISFLOOD-FP</i> .....	50
3.2.5 Προσομοίωση στο Υδραυλικό Μοντέλο <i>MIKE FLOOD</i> .....	52
4. Αποτελέσματα Προσομοιώσεων στα Πλημμυρικά Μοντέλα .....	75
4.1 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	75
4.2 Δείκτες Αξιολόγησης .....	76
4.3 Συνθήκες Σταθερής Εισροής.....	78

4.3.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης στο HEC-RAS.....	79
4.3.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης στο LISFLOOD-FP.....	83
4.3.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης στο MIKE FLOOD.....	85
4.4 Συνθήκες Χρονικά Μεταβαλλόμενης Εισροής.....	97
4.4.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης στο HEC-RAS.....	98
4.4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης στο MIKE FLOOD.....	100
5. Εφαρμογή Μοντέλων σε Επιλεγμένες Πρότυπες Τοπογραφίες.....	105
5.1 Μεταβολή Εισερχόμενης Παροχής.....	106
5.2 Μεταβολή Συντελεστή Τραχύτητας σε Κανάλι και Πλημμυρικά Πεδία.....	108
6. Σχόλια και Συμπεράσματα.....	111
Αναφορές.....	117
Διαδικτυακές αναφορές.....	118



## Κατάλογος Εικόνων

---

<b>Εικόνα 4.1</b> Πλημμύρα της 28/01/2003 όπως καταγράφηκε από το δορυφόρο Landsat 7, bands RGB 742 .....	76
<b>Εικόνα 4.2</b> Βέλτιστη προσαρμογή υδραυλικής προσομοίωσης με το HEC-RAS υπό σταθερή εισροή, με θεώρηση μόνιμων συνθηκών ροής .....	79
<b>Εικόνα 4.3</b> Αποτέλεσμα προσομοίωσης στο HEC-RAS υπό οριακή συνθήκη σταθερής εισροής $Q=850 \text{ m}^3/\text{s}$ , με θεώρηση συνθηκών μη μόνιμης ροής .....	80
<b>Εικόνα 4.4</b> Αποτέλεσμα προσομοίωσης στο HEC-RAS υπό οριακή συνθήκη σταθερής εισροής $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ , με θεώρηση συνθηκών μη μόνιμης ροής .....	81
<b>Εικόνα 4.5</b> Βέλτιστη προσαρμογή υδραυλικής προσομοίωσης με το LISFLOOD-FP υπό σταθερή εισροή $Q=400 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	83
<b>Εικόνα 4.6</b> Αποτέλεσμα προσομοίωσης μετά την ενσωμάτωση των αναχωμάτων στο LISFLOOD-FP υπό οριακή συνθήκη σταθερής εισροής $Q=400 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	84
<b>Εικόνα 4.7</b> Αποτέλεσμα προσομοίωσης 1 .....	85
<b>Εικόνα 4.8</b> Αποτέλεσμα προσομοίωσης 2 .....	86
<b>Εικόνα 4.9</b> Αποτέλεσμα προσομοίωσης 3 .....	87
<b>Εικόνα 4.10</b> Αποτέλεσμα προσομοίωσης 4 .....	88
<b>Εικόνα 4.11</b> Αποτέλεσμα προσομοίωσης 5 .....	90
<b>Εικόνα 4.12</b> Αποτέλεσμα προσομοίωσης 6 .....	91
<b>Εικόνα 4.13</b> Αποτέλεσμα προσομοίωσης 7 .....	92
<b>Εικόνα 4.14</b> Αποτέλεσμα προσομοίωσης 8 .....	93
<b>Εικόνα 4.15</b> Αποτέλεσμα προσομοίωσης 9 .....	94
<b>Εικόνα 4.16</b> Αποτέλεσμα προσομοίωσης στο HEC-RAS υπό συνθήκες χρονικά μεταβαλλόμενης εισροής .....	99
<b>Εικόνα 4.17</b> Εξέλιξη πλημμυρικής κατάκλυσης για $\Delta t=0$ έως 58 h .....	101

<b>Εικόνα 4.18</b> Εξέλιξη πλημμυρικής κατάκλυσης για $\Delta t=60$ έως 95 h .....	102
<b>Εικόνα 4.19</b> Εξέλιξη πλημμυρικής κατάκλυσης για $\Delta t=100$ έως 144 h .....	103
<b>Εικόνα 4.20</b> Αποτέλεσμα προσομοίωσης στο MIKE FLOOD υπό συνθήκες χρονικά μεταβαλλόμενης εισροής, $Q_p=550 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	104

## Κατάλογος Πινάκων

---

<b>Πίνακας 2.1</b> Πακέτα λογισμικού DHI και διεργασίες που προσομοιώνονται .....	21
<b>Πίνακας 3.1</b> Χαρακτηριστικά υπολεκανών Δυτικής Λεκάνης Απορροής Πηνειού .....	38
<b>Πίνακας 3.2</b> Συντελεστής τραχύτητας σε συνάρτηση με τη χρήση γης .....	43
<b>Πίνακας 3.3</b> Σταθερές Υδροδυναμικές Παράμετροι στο MIKE 11 .....	58
<b>Πίνακας 3.4</b> Σταθερές Παράμετροι Προσομοίωσης στο MIKE 11 .....	60
<b>Πίνακας 4.1</b> Μεταβολή χαρακτηριστικών μεγεθών με τη θεώρηση μη μόνιμης ροής στο HEC-RAS .....	82
<b>Πίνακας 4.2</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα MIKE FLOOD σε συνθήκες σταθερής εισροής .....	95
<b>Πίνακας 5.1</b> Επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης και βάθος νερού στην έξοδο με μεταβολή εισερχόμενης παροχής .....	106
<b>Πίνακας 5.2</b> Επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας σε κανάλι και πλημμυρικό πεδίο .....	108
<b>Πίνακας 5.3</b> Βάθος ροής στην έξοδο του καναλιού με μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας σε κανάλι και πλημμυρικό πεδίο .....	108
<b>Πίνακας 5.4</b> Ποσοστιαίες μεταβολές μοντέλων HEC-RAS και LISFLOOD-FP με τη μεταβολή της τραχύτητας του πεδίου .....	109
<b>Πίνακας 5.5</b> Ποσοστιαίες μεταβολές μοντέλων HEC-RAS και LISFLOOD-FP με τη μεταβολή της τραχύτητας του καναλιού .....	110

## Κατάλογος Σχημάτων

---

Σχήμα 2.1 Προσανατολισμός ροής καναλιού και πεδίου .....	14
Σχήμα 2.2 Τυπικό κελί πεπερασμένων διαφορών .....	15
Σχήμα 2.3 Ροή μεταξύ γειτονικών κελιών .....	19
Σχήμα 2.4 Χωρισμός διατομής σε επιμέρους ορθογωνικά κανάλια .....	23
Σχήμα 2.5 Υπολογιστικός κάναβος σε τμήμα καναλιού .....	24
Σχήμα 2.6 Κεντραρισμένο αριθμητικό σχήμα επίλυσης 6 σημείων Abbott .....	24
Σχήμα 2.7 Κέντρο σχήματος επίλυσης για την εξίσωση Συνέχειας .....	25
Σχήμα 2.8 Κέντρο σχήματος επίλυσης για την εξίσωση Ορμής .....	25
Σχήμα 2.9 Πλευρική σύνδεση ( <i>Lateral Link</i> ) μεταξύ των MIKE 11 και MIKE 21 .....	30
Σχήμα 3.1 Μηκοτομές υδατορεύματος περιοχής μελέτης από το αρχικό και επεξεργασμένο Ψ.Μ.Ε. ....	42
Σχήμα 3.2 Περιοχή μελέτης με τον ποταμό Πηνειό, τις χαρακτηριστικές διατομές και τα αναχώματα .....	46
Σχήμα 3.3 Διαμόρφωση ορθογωνικής διατομής στο HEC-RAS Cross Section Editor .....	47
Σχήμα 3.4 Διαμόρφωση διατομής στο HEC-RAS Cross Section Editor .....	47
Σχήμα 3.5 Δεδομένα εισόδου υδραυλικού μοντέλου LISFLOOD-FP .....	51
Σχήμα 3.6 Γραφική απεικόνιση του ποταμού στο MIKE 11 River Network Editor .....	53
Σχήμα 3.7 Πινακοειδής μορφή του ποταμού στο MIKE 11 River Network Editor .....	53
Σχήμα 3.8 Καρτέλα Πρωτογενών δεδομένων στο MIKE 11 Cross Section Editor .....	55
Σχήμα 3.9 Καρτέλα Επεξεργασμένων δεδομένων στο MIKE 11 Cross Section Editor .....	55
Σχήμα 3.10 Ορισμός οριακών συνθηκών στο MIKE 11 Boundary Editor .....	57
Σχήμα 3.11 Καρτέλα υδροδυναμικών παραμέτρων Προσομοίωσης (Επιλογή κύματος Προσέγγισης της Λύσης) στο MIKE 11 Hydrodynamic Editor .....	58

<b>Σχήμα 3.12</b> Καρτέλα υδροδυναμικών παραμέτρων Προσομοίωσης (Ορισμός παραμέτρων Σχήματος Επίλυσης) στο MIKE 11 Hydrodynamic Editor .....	59
<b>Σχήμα 3.13</b> Καρτέλα επιλογής Μοντέλου Υπολογισμών και Συνθηκών Ροής στο MIKE 11 Simulation Editor .....	60
<b>Σχήμα 3.14</b> Καρτέλα εισαγωγής αρχείων Ποταμού, Διατομών, Ορ. Συνθηκών και Υδροδυναμικών Παραμέτρων στο MIKE 11 Simulation Editor .....	61
<b>Σχήμα 3.15</b> Καρτέλα ορισμού Παραμέτρων Προσομοίωσης στο MIKE 11 Simulation Editor.....	61
<b>Σχήμα 3.16</b> Καρτέλα ορισμού Θέσης και Ονομασίας αρχείων Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης στο MIKE 11 Simulation Editor .....	62
<b>Σχήμα 3.17</b> Καρτέλα Έναρξης Προσομοίωσης στο MIKE 11 Simulation Editor .....	62
<b>Σχήμα 3.18</b> Ορισμός Χωρικών Ζωνών και Μέγιστου Εμβαδού τους στο Mesh Generator ...	64
<b>Σχήμα 3.19</b> Δημιουργία Τριγωνικού Πλέγματος στο Mesh Generator .....	64
<b>Σχήμα 3.20</b> Εισαγωγή και Παρεμβολή Τοπογραφικών Δεδομένων Περιοχής Μελέτης στο Mesh Generator .....	65
<b>Σχήμα 3.21</b> Αρχείο Υπολογιστικού Πλέγματος Τριγωνικών Στοιχείων .....	65
<b>Σχήμα 3.22</b> Περιοχή Ποταμού εκτός Τριγωνικού Υπολογιστικού Πλέγματος .....	66
<b>Σχήμα 3.23</b> Καρτέλα Ορισμού Χρονικού Βήματος Υπολογισμών στο MIKE 21 Flow Model FM .....	67
<b>Σχήμα 3.24</b> Καρτέλα Ορισμού Εύρους Χρονικού Βήματος Εξισώσεων Επίλυσης .....	68
<b>Σχήμα 3.25</b> Καρτέλα Ορισμού Ξηρού-Υγρού-Πλημμυρισμένου Κελιού στο MIKE 21 Flow Model FM .....	68
<b>Σχήμα 3.26</b> Καρτέλα Ορισμού της Μορφής και της Θέσης των Αρχείων Αποτελεσμάτων της Προσομοίωσης στο MIKE 21 Flow Model FM .....	69
<b>Σχήμα 3.27</b> Διδιάστατο αρχείο (.dfs2) με τις τιμές του συντελεστή N στην περιοχή μελέτης .....	70

<b>Σχήμα 3.28</b> Θέσεις Αναχωμάτων στην Περιοχή Μελέτης στο MIKE 21 Flow Model FM ...	70
<b>Σχήμα 3.29</b> Καρτέλα εισαγωγής επιμέρους αρχείων MIKE 11 και MIKE 21 στο MIKE FLOOD .....	71
<b>Σχήμα 3.30</b> Ορισμός Πλευρικού τρόπου Σύνδεσης ( <i>Lateral Link</i> ) εκατέρωθεν του άξονα του ποταμού στο MIKE FLOOD .....	72
<b>Σχήμα 3.31</b> Λεπτομέρεια Πλευρικού Τρόπου Σύνδεσης ( <i>Lateral Link</i> ) .....	72
<b>Σχήμα 3.32</b> Παράμετροι Πλευρικής Σύνδεσης ( <i>Lateral Link</i> ) στο MIKE FLOOD .....	73
<b>Σχήμα 4.1</b> Μεταβολή συντελεστή κάλυψης $E_{int}/E_s$ και συντελεστή προσαρμογής $R$ με τη μεταβολή του χρονικού βήματος, στο MIKE FLOOD .....	89
<b>Σχήμα 4.2</b> Βάθος νερού στην έξοδο του τμήματος του ποταμού με τη μεταβολή του χρονικού βήματος στο MIKE FLOOD .....	89
<b>Σχήμα 4.5</b> Βάθος νερού στην έξοδο του ποταμού με το χρόνο .....	96
<b>Σχήμα 4.6</b> Πλημμυρογράφημα εισόδου προσομοίωσης στο HEC-RAS .....	98
<b>Σχήμα 4.7</b> Πλημμυρογράφημα εισόδου προσομοίωσης στο MIKE FLOOD .....	100
<b>Σχήμα 5.1</b> Επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή εισερχόμενης παροχής .....	107
<b>Σχήμα 5.2</b> Βάθος νερού στην έξοδο του καναλιού με μεταβολή εισερχόμενης παροχής ....	107

## Κατάλογος Χαρτών

---

<b>Χάρτης 3.1</b> Λεκάνες απορροής Υδατικών Διαμερισμάτων .....	33
<b>Χάρτης 3.2</b> Γεωτεκτονικές Ζώνες Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας .....	35
<b>Χάρτης 3.3</b> Κλίσεις εδάφους Δυτικής λεκάνης Θεσσαλίας .....	36
<b>Χάρτης 3.4</b> Περιοχή Μελέτης .....	39
<b>Χάρτης 3.5</b> Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας .....	39
<b>Χάρτης 3.6</b> Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους περιοχής μελέτης .....	41
<b>Χάρτης 3.7</b> Αποτύπωση πολυγώνων χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης .....	43





## Περίληψη

---

Με αφορμή το πλαίσιο εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60/EK υπό το οποίο θα πρέπει να ληφθούν μέτρα για την πρόληψη, αντιμετώπιση και τον περιορισμό των πλημμυρών, εξετάζεται η λειτουργία τριών υδραυλικών μοντέλων μέσω της διερεύνησης της εξέλιξης της πλημμυρικής κατάκλυσης.

Συγκεκριμένα, μελετάται η εξέλιξη της κατάκλυσης και οι μεταβολές σε επιλεγμένα υδραυλικά μεγέθη όπως είναι το βάθος νερού στην έξοδο του τμήματος του ποταμού Πηνειού, το οποίο προσομοιώνεται. Εκτός από τη μελέτη με τα μοντέλα HEC-RAS και LISFLOOD-FP πραγματοποιείται εκτενής μελέτη με το πακέτο λογισμικού MIKE FLOOD του DHI. Η μελέτη γίνεται τόσο σε συνθήκες σταθερής εισροής όσο και σε συνθήκες χρονικά μεταβαλλόμενης εισροής.

Τέλος, για την περαιτέρω διερεύνηση της λειτουργίας των μοντέλων και ειδικά του MIKE FLOOD συγκριτικά με τα άλλα δύο πακέτα λογισμικού, γίνεται η εφαρμογή του μοντέλου σε επιλεγμένες πρότυπες τοπογραφίες.

Εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των μοντέλων τα οποία σε συνδυασμό με την ανάλυση του Α. Οικονόμου, η οποία προηγήθηκε και η οποία επεκτάθηκε και σε άλλα πεδία, αποτελούν σημαντικά εργαλεία για τη λήψη των αντίστοιχων αποφάσεων.

## Extended Abstract

---

### 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. The resolution and accuracy of the results obtained by the hydraulic models constitute the most important tools for risk assessment and taking the corresponding decisions.

Particularly in this study, the efficiency of three hydraulic models is initially investigated to simulate a specific flood event of a region where observed topographic gradients are considered relatively small. The models used in this study are: the 1D HEC-RAS, the quasi 2D LISFLOOD-FP and the 2D MIKE FLOOD. Specifically, the results from the work of Oikonomou (2013) concerning the HEC-RAS and LISFLOOD-FP models are directly compared to those of the present analysis. Moreover to broaden the comparison, MIKE FLOOD was added to the analysis.

Additionally, models are also compared to each other based on applications using simplified topographies and scenarios thus, leading to conclusions about their particularities and performances. Similarly, HEC-RAS and LISFLOOD-FP results were formulated within the framework of the analysis of A. Oikonomou (Οικονόμου 2013). The whole study was carried out using unsteady flow conditions schemes.

## **2. Hydraulic Models**

### **HEC-RAS**

HEC-RAS ([www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/)) is a freeware 1D hydraulic model, which can be used for one-dimensional steady and unsteady flow hydraulics computations. Regarding unsteady flow computations, Saint-Venant Equations' numerical solution is approximated using an implicit finite difference approach through the computational Box Scheme.

The required input data are the geometry of the cross section, the Manning's friction coefficient ( $n$ ) along the cross section, the inflow discharge and the hydraulic boundary conditions. Calculations in steady and unsteady flow conditions were made, so that an extended comparison between different models was possible.

It is noted that, based on research experience, the model 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 (U.S. Army Corps of Engineers 2010).

### **LISFLOOD-FP**

LISFLOOD-FP ([www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood](http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood)) is a quasi 2D hydraulic model based on a raster grid. Effectively, flooding is treated using a volume-filling process based on hydraulic principles and embodying the key physical notions of mass conservation and hydraulic connectivity. Channel flow is handled using an one-dimensional approach that is capable of capturing the downstream propagation of a floodwave and the response of flow to free surface slope. Floodplain flows are similarly described in terms of continuity and momentum equations, discretized over a grid of square cells, which allows the model to represent 2D dynamic flow fields using quasi analysis. The flow between two cells at the floodplain is assumed to be simply a function of the free surface height difference between those cells.

The basic assumptions used in the model calculations are:

- Channel flow can be represented by either the kinematic or diffusion wave approximations.

- Channel is assumed to be wide and shallow, so the wetted perimeter is approximated by the channel width.
- For plain flooding and out-of-bank flow can be treated using a series of storage cells discretized as a raster grid.
- Flow between storage cells can be calculated using analytical uniform flow formula (the Manning equation or a weir equation). This yields an approximate solution of a diffusion wave in two dimensions.
- There is no exchange of momentum between main channel and floodplain flows, only mass.
- Flow is assumed to be gradually varied.
- The model uses standard SI units for length (metres), time (seconds), flux (volume per time in  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ) etc.

The required data to initialize a simulation are a DEM, Manning's coefficient distribution over the channel and the floodplain, the river location and its averaged depth and width, the inflow discharge and some simple hydraulic boundary conditions (Bates et al., 2005).

## **MIKE FLOOD**

MIKE FLOOD is a commercial software package of DHI (Danish Hydraulics Institute). It is a coupled model that integrates the 1D models MIKE URBAN (MOUSE), MIKE 11 and the 2D model MIKE 21 into a single, dynamically coupled modelling system.

Channel flow is modelled through MIKE 11 simulation package. The set of the two implicit finite difference equations (transformed Saint Venant Equations) is resolved using a computational grid consisting of alternating  $Q$  and  $h$  points, where the discharge  $Q$  and the water level  $h$  are computed respectively. The adopted numerical scheme is a 6 point Abbott scheme.

For the channel modeling the required data are: river points' Cartesian coordinates, cross sections' data, Manning's coefficient at each point of the cross section or globally on the river, boundary conditions, as well as hydrodynamic and simulation model parameters.

Floodplain flow is described by 2D Shallow Water Equations (or else equations Saint Venant). Reformulated Shallow Water Equations constitute a Riemman problem. For the

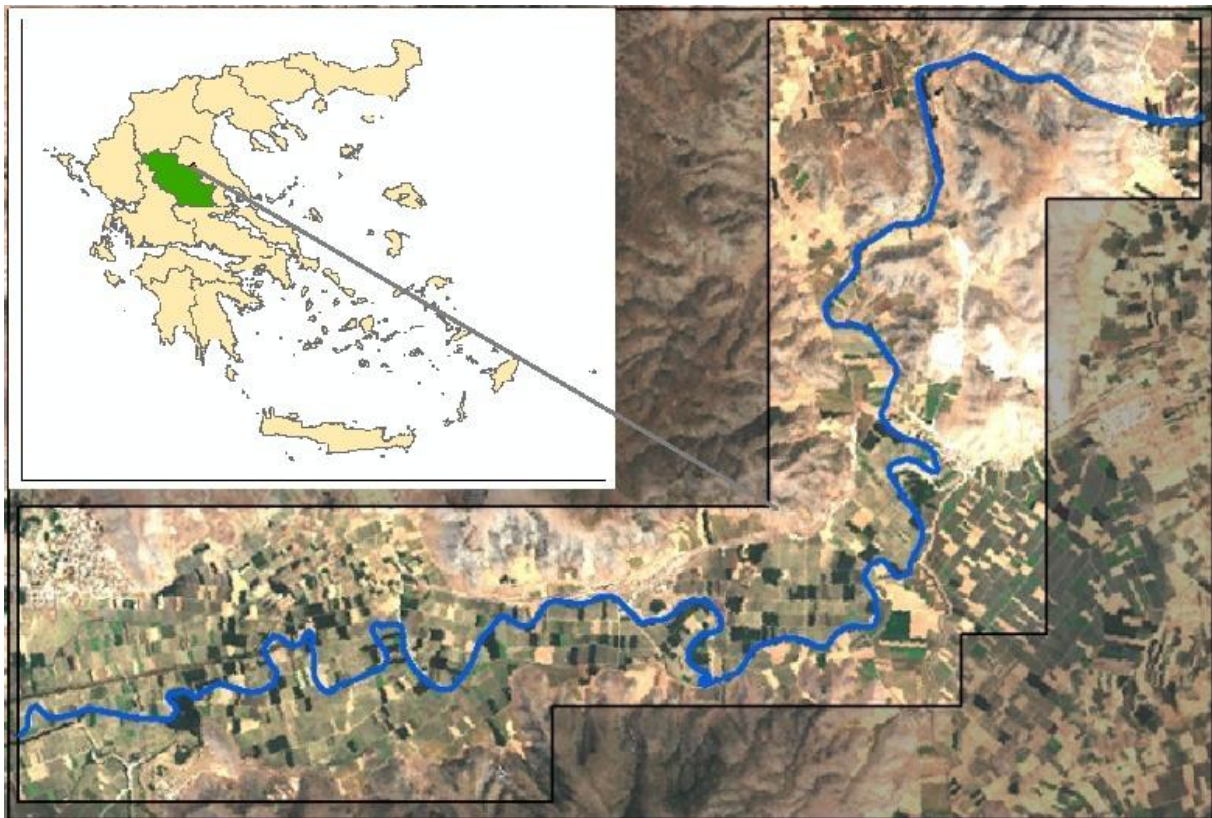
approximation of the solution Roe algorithm is used. Specifically, thereby the convective flow in the interface between the cells is calculated and therefore the dependent variables on the left and right of the interface with the second order spatial accuracy are estimated. A flexible mesh approach was made for the spatial discretization of the problem. Flexible mesh approach has a positive effect in the duration of the calculations.

Regarding to the coupling between MIKE 11 and MIKE 21 models, a Lateral Link formula is used in order to simulate the flood wave expansion in the floodplain. Lateral Link uses a hydraulic structure equation in order to calculate the related variables (MIKE by DHI 2014a, MIKE by DHI 2014b, MIKE by DHI 2014c)

## 2. Study Area and Data Initially Available

### Study Area

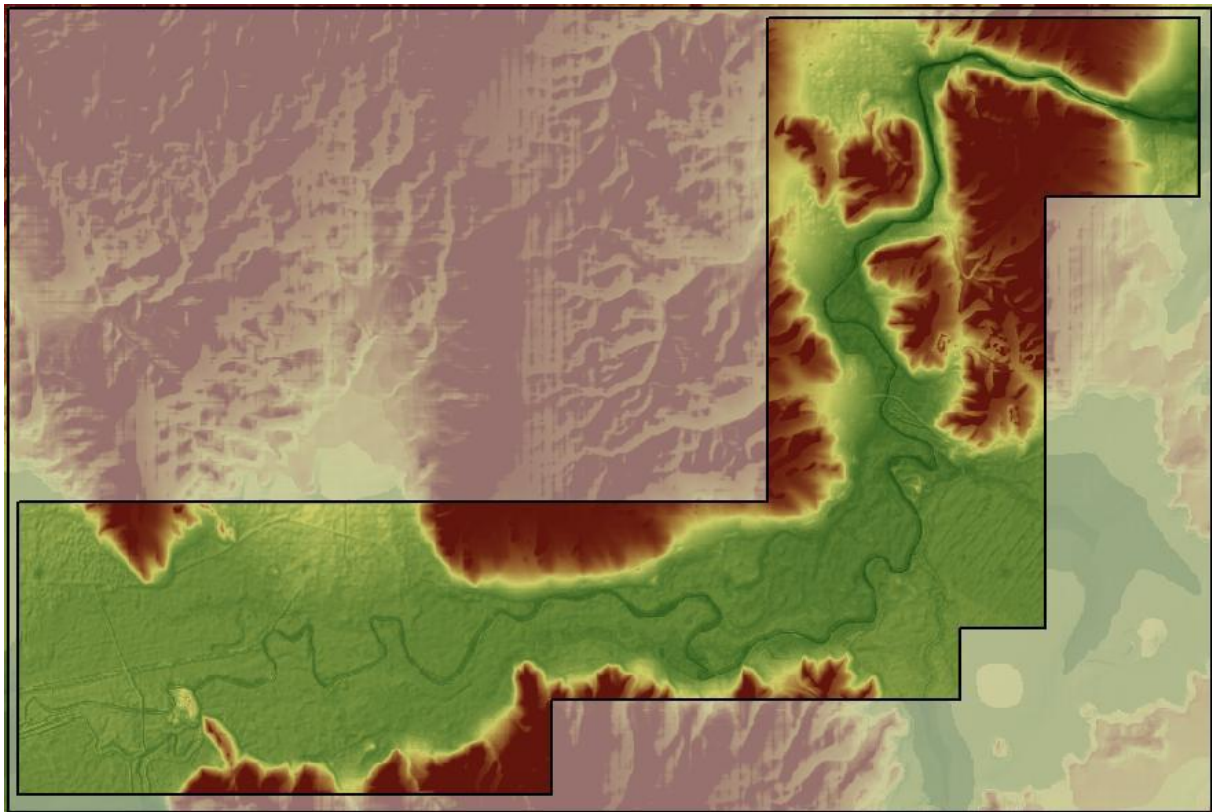
Study area is located in Thessaly, in Central Greece. The exact position of the study area is upstream bounded from Ali Efenti Bridge which is the downstream boundary of Pineios Western Subbasin. The downstream boundary of the study area is located at Amygdalia position. It is a 40 km long section of Pineios River with relatively small topographic gradients in the broader area. The study area is considered to be a part of the Zone of Potentially High Risk of Flooding according to the 2007/60/EC Directive implementation by European Member States. Study area is depicted in Figure 1.



**Figure 1** Study area location and topography (Οικονόμου 2013, landsatlook.usgs.gov).

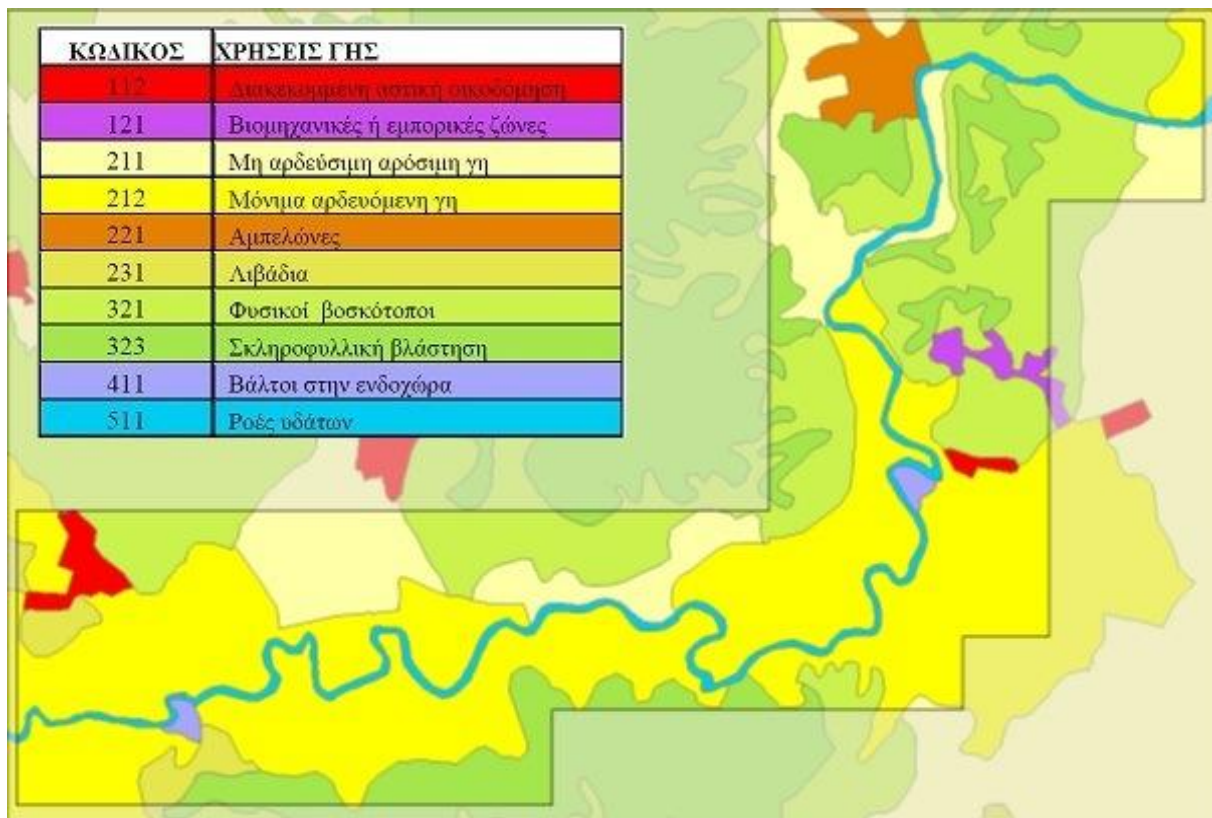
### Data Initially Available

Elevation data of study area were initially available through a Digital Elevation Model of [5m×5m] accuracy. To increase the accuracy of the DEM (Fig. 2), 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. The above mentioned procedure was carried out in the analysis of A. Oikonomou (Οικονόμου 2013). The outputs of the procedure were used to the present study's simulations.



**Figure 2** DEM of study area (Οικονόμου 2013).

Furthermore, the recording of the land use cover (Fig. 3) as configured by the European Union Corine 2000 framework is utilized in the simulations.

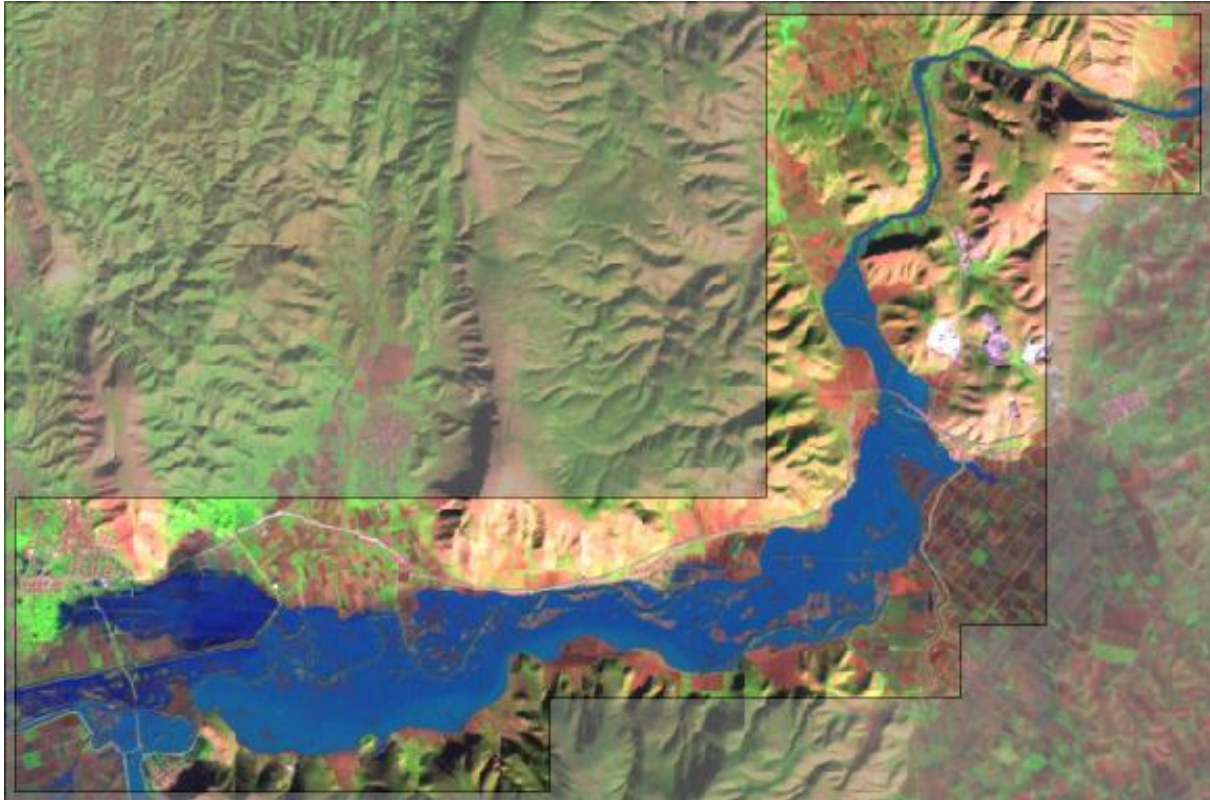


**Figure 3** Land Use records Corine 2000 (Οικονόμου 2013, [www.geodata.gov.gr](http://www.geodata.gov.gr)).

### Evaluation of the Model Results

For the evaluation of the results a satellite photo from a past flood event was used. The event lasted from the 21<sup>st</sup> to the 28<sup>th</sup> of January 2003, while satellite picture of the flood was captured in the 28<sup>th</sup> of January 2002. The extent of the floodplain inundation 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 ([landsat.usgs.gov](http://landsat.usgs.gov)). Note that the resolution of the image is 30 m (on the soil). The above mentioned satellite photo is depicted in Figure 3.





**Figure 4** Landsat-7 satellite image -flooded area (landsatlook.usgs.gov).

Some specific ratios were used in order to quantify the model result's adjustment to the observed flood extent. The ratios are explained below:

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

Where  $E_s$  is the observed flood extent area,  $E_m$  is the model simulated flooded area,  $E_{int}$  is the common model simulated and observed flooded area. R index was introduced by Oikonomou (Οικονόμου 2013) and is representative of model flood extent adjustment to the real flooded area.

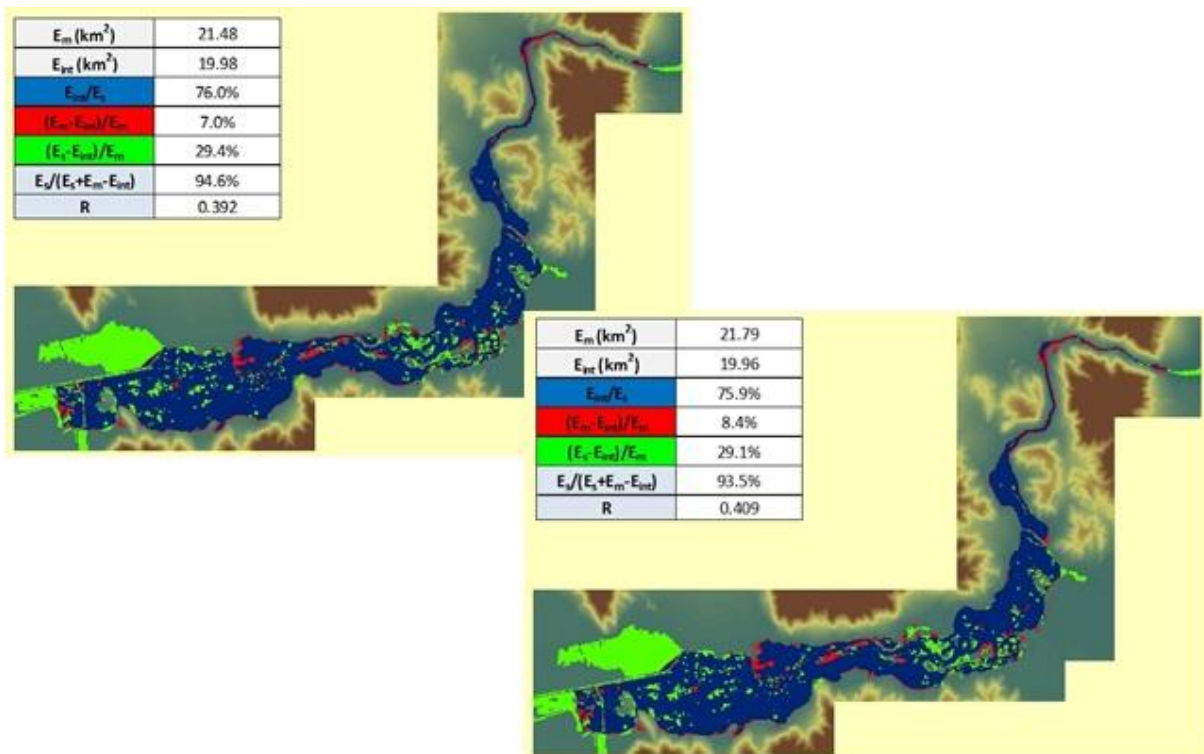
### 3. Study Area Simulation Results

#### Constant Inflow

In order to investigate unsteady flow conditions' results, constant inflow was set as an upstream boundary condition in each model simulation. The value of the constant inflow in HEC-RAS and LISFLOOD-FP was set equal to the one that has been proven to have the optimum adjustment to the observed flood extent in A. Oikonomou (Οικονόμου 2013) analysis. The related results are presented in the following paragraphs.

#### HEC-RAS Results

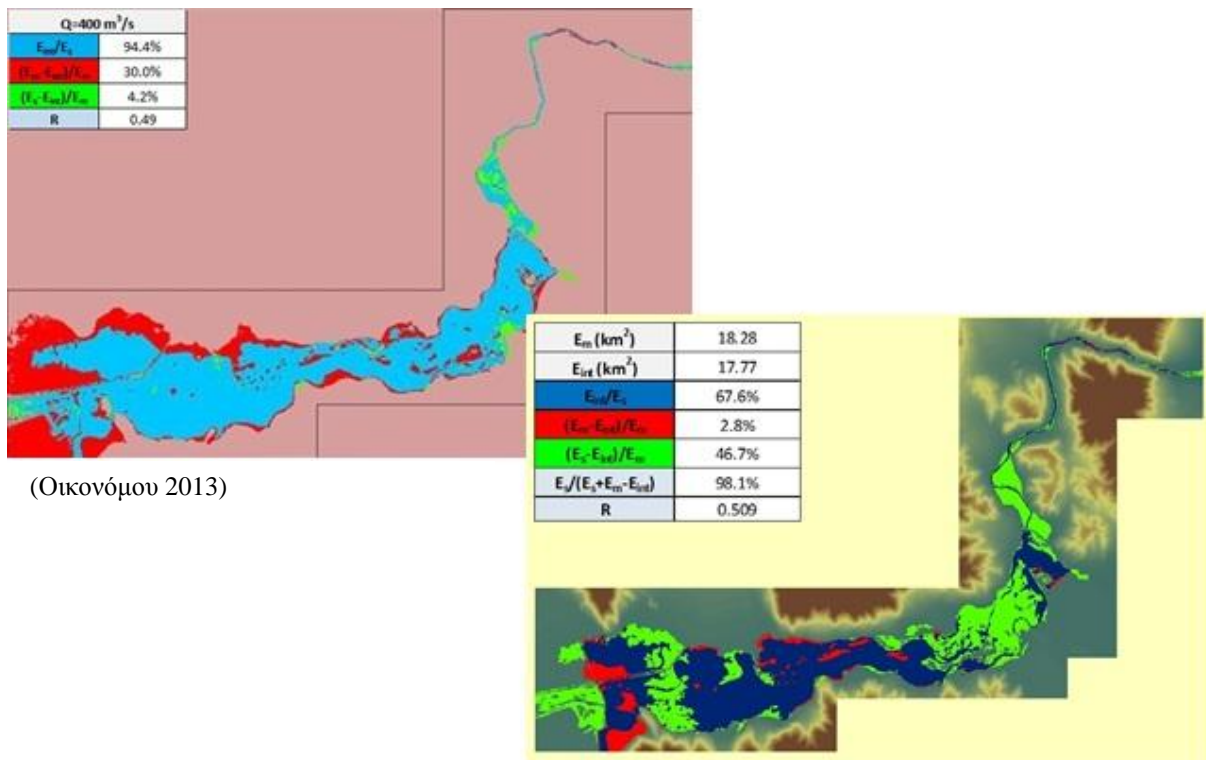
As depicted in Figure 5, there is not significant change in the flood extent area, with the unsteady flow conditions regime, or with the raise of constant inflow from 850 to 1000 m<sup>3</sup>/s. Additionally, concerning the small gradients area in the floodplain, the flow regime within this area cannot be simulated from an 1D model, such as HEC-RAS.



**Figure 5** Simulation results in unsteady flow conditions under constant inflow upstream boundary condition in HEC-RAS.

## LISFLOOD-FP Results

LISFLOOD-FP simulation results are summarized in Figure 6 where the simulation on the right resulted after the integration of the existing levees in the topography inserted in the model. As displayed, the results are significantly different from the ones in A. Oikonomou analysis (Οικονόμου 2013). Therefore, a time varying inflow analysis was not applied, as the value  $Q=400 \text{ m}^3/\text{s}$  was not the one with the optimum adjustment.



**Figure 6** LISFLOOD-FP model results before and after the integration of the existing levees in the model topography.

## MIKE FLOOD Simulation

For the optimum adjustment of the model results to the observed data, several simulations were applied. The aim of these simulations was to stabilize and optimize the generated result, through the change of many time and space factors. Examining the corresponding results it is in some extent clarified the sensitivity and the stability of the model computations, as well as the ability to predict the extent of flood inundation area.

In Figure 7 all the displayed results were generated for spatial zones of maximum area  $10 \times 10^3 \text{ m}^2 / 500 \times 10^3 \text{ m}^2 / 50 \times 10^6 \text{ m}^2$ , constant inflow  $Q=400 \text{ m}^3/\text{s}$  and various time steps. Respectively,

in Figure 8 the results were generated in MIKE FLOOD by changing several space factors. As displayed in Figure 9, despite the changes in flood extent area, the corresponding changes in water depth at the downstream boundary of the river section are insignificant.

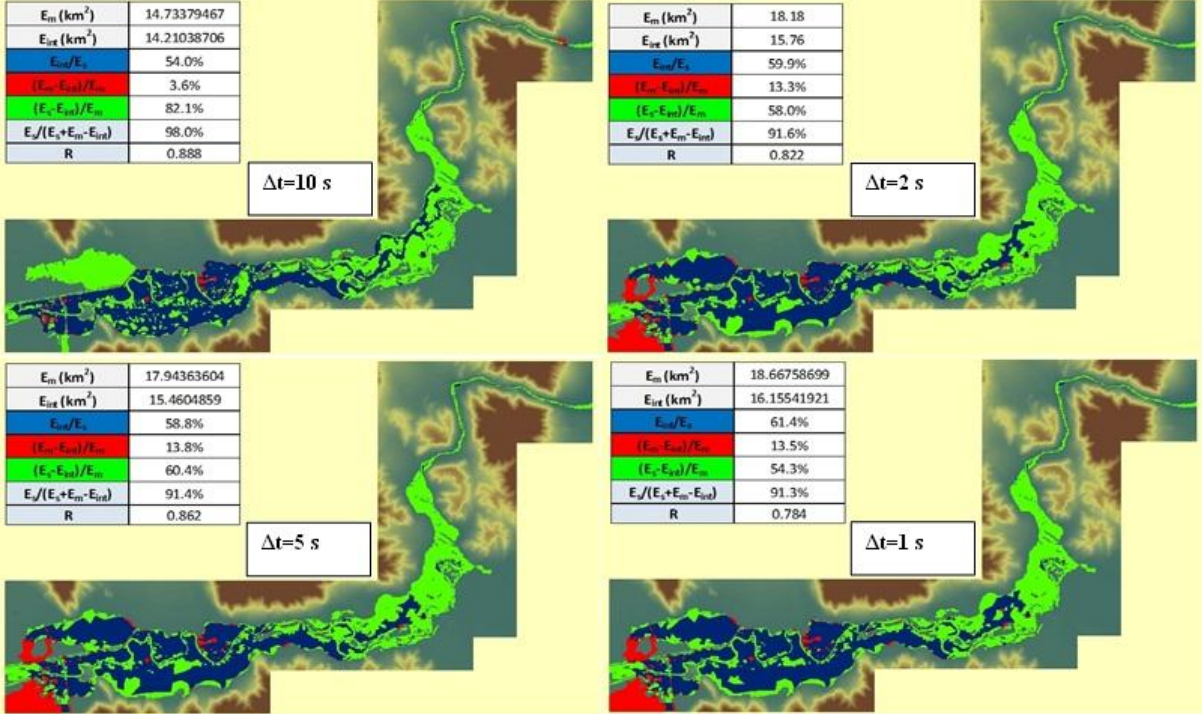


Figure 7 Flood inundation extent with the time step change in MIKE FLOOD.

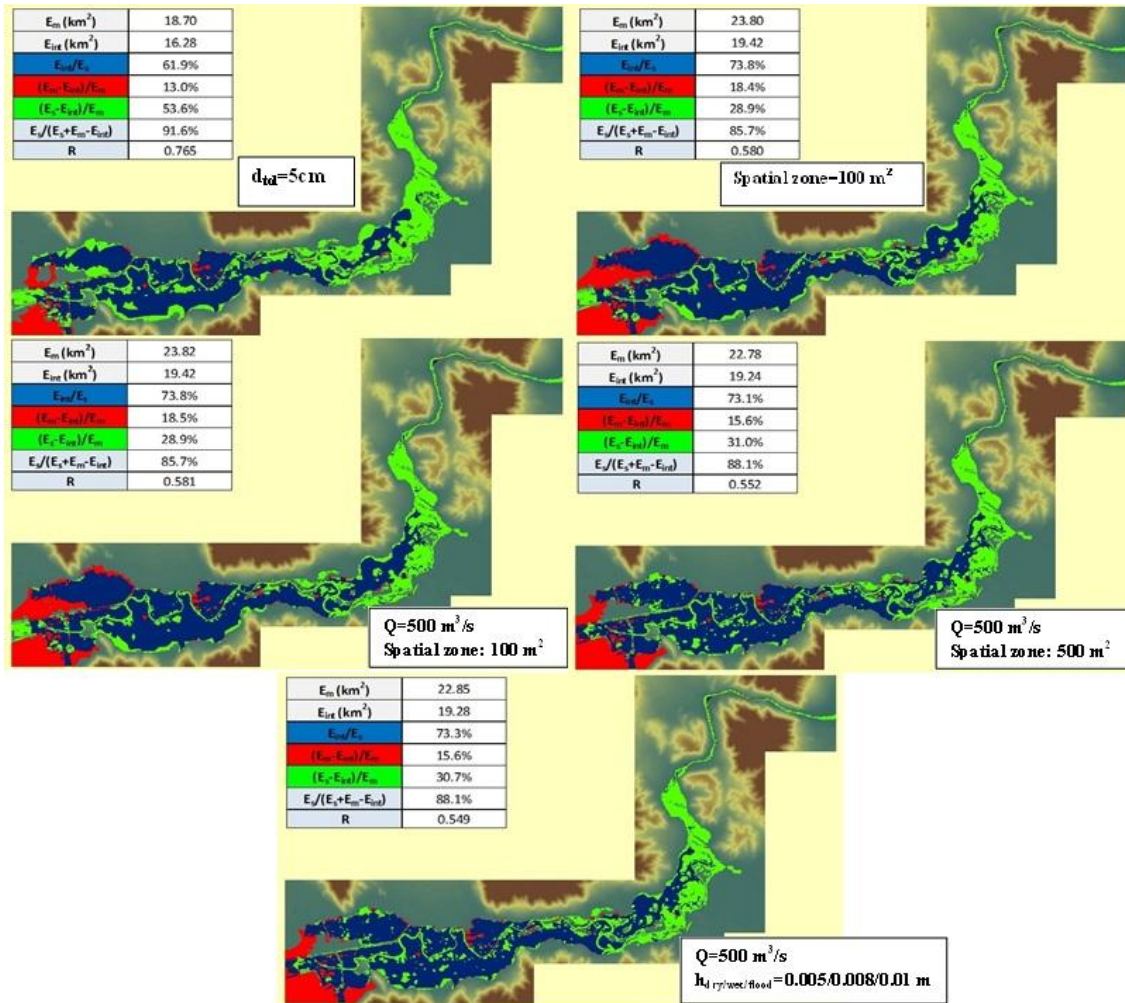


Figure 8 Flood inundation extent with spatial factors' changes in MIKE FLOOD.

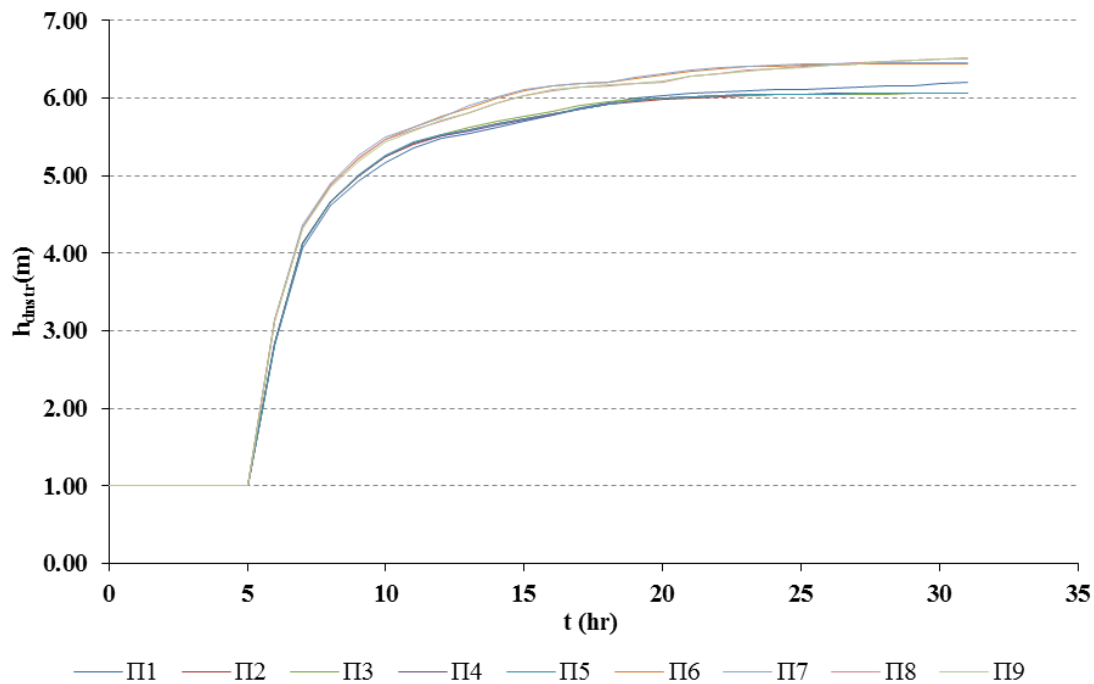


Figure 9 Water depth in downstream boundary of the river section.

**Time Varying Inflow Conditions**

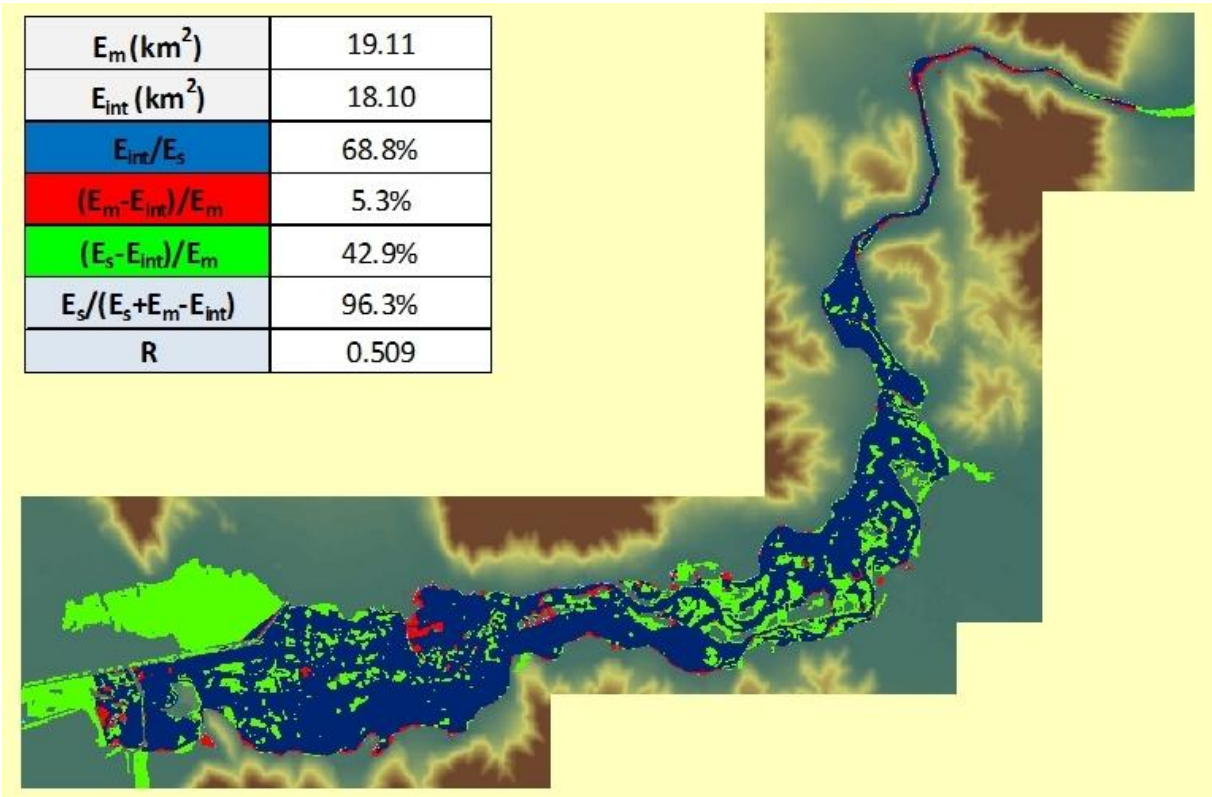
HEC-RAS and MIKE FLOOD behavior analysis was applied in order to investigate the real inflow conditions. In both models a time-discharge series was inserted as an upstream boundary condition. The flow hydrograph was calculated through the below mentioned Equation 1 (Dottori *et al.* 2009):

$$Q(t) = Q_b + (Q_p - Q_b) * \left[\frac{1}{T_p} \exp\left(1 - \frac{1}{T_p}\right)\right]^\gamma \tag{Eq. 1}$$

Where  $Q_b$  is the base flow discharge which was set equals to  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $T_p$  the time to peak flow,  $Q_p$  the peak discharge and  $\gamma$  a coefficient assumed to be equal to 16.  $Q_p$  was set equal to the one with the optimum adjustment for constant inflow conditions for each model.

**HEC-RAS Results**

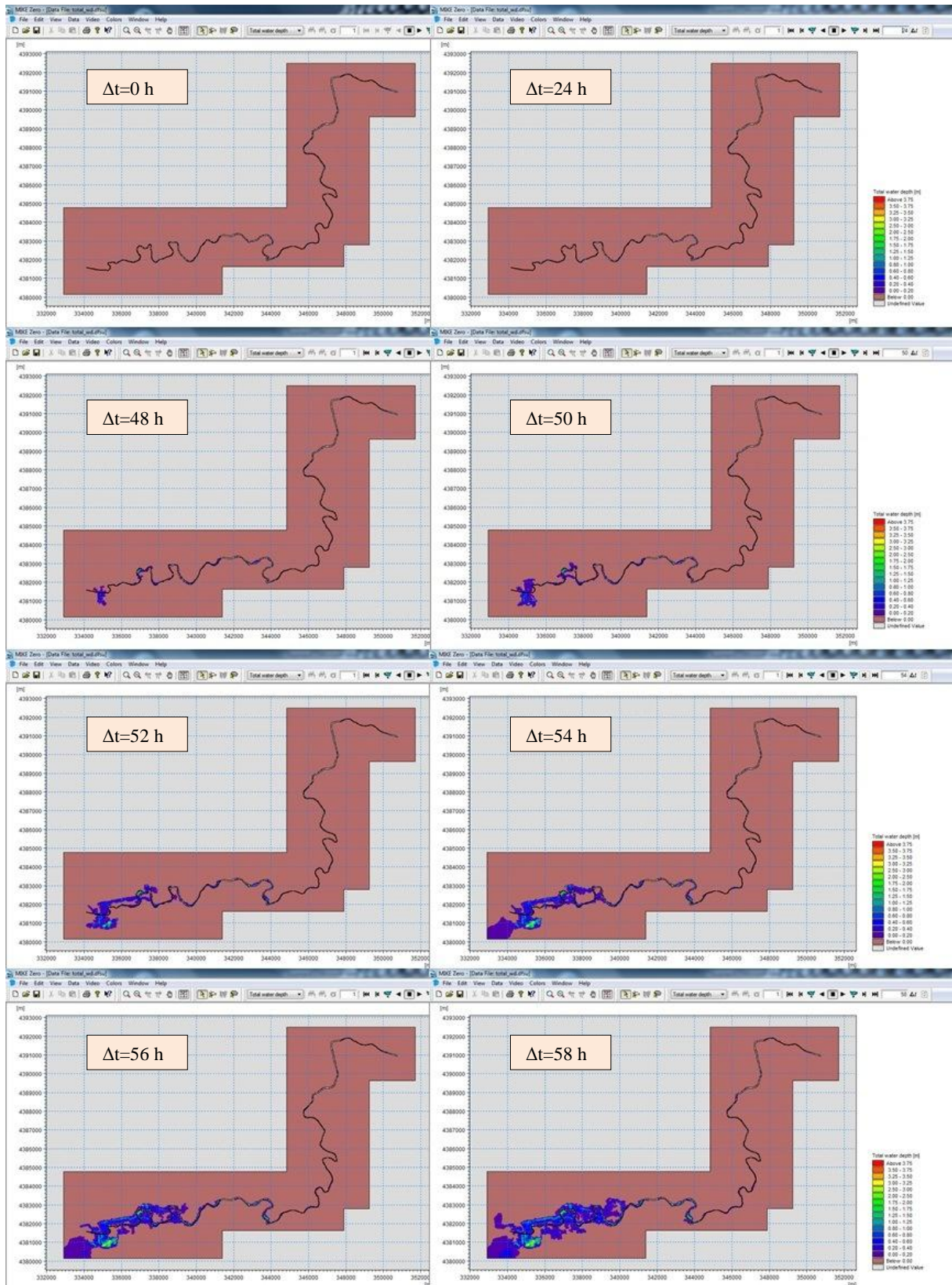
In Figure 11 the result of time varying inflow conditions with  $Q_p=850 \text{ m}^3/\text{s}$ , is depicted. As it is expected the model result does not adjust in the small gradients' area.



**Figure 10** HEC-RAS flood inundation map for time varying inflow conditions,  $Q_p=850 \text{ m}^3/\text{s}$ .

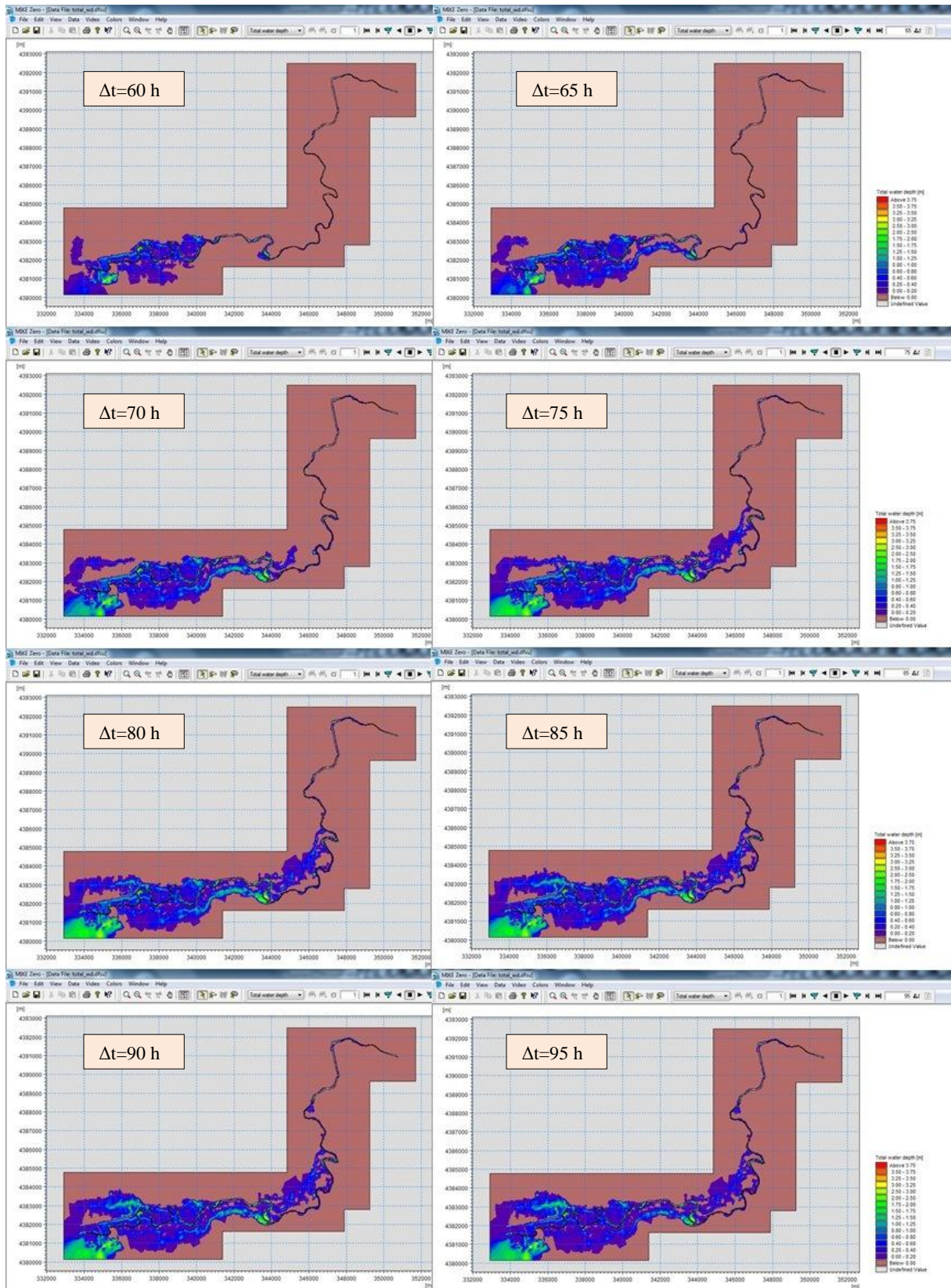
## **MIKE FLOOD Results**

MIKE FLOOD simulation was applied with  $Q_p=550 \text{ m}^3/\text{s}$ . In Figures 11, 12 and 13 flood inundation progress is displayed. As shown below, the flood extent approaches the observed satellite photo between 90 and 100 hours. Also, in Figure 14 the flood extent of the maxima water depth values is depicted.

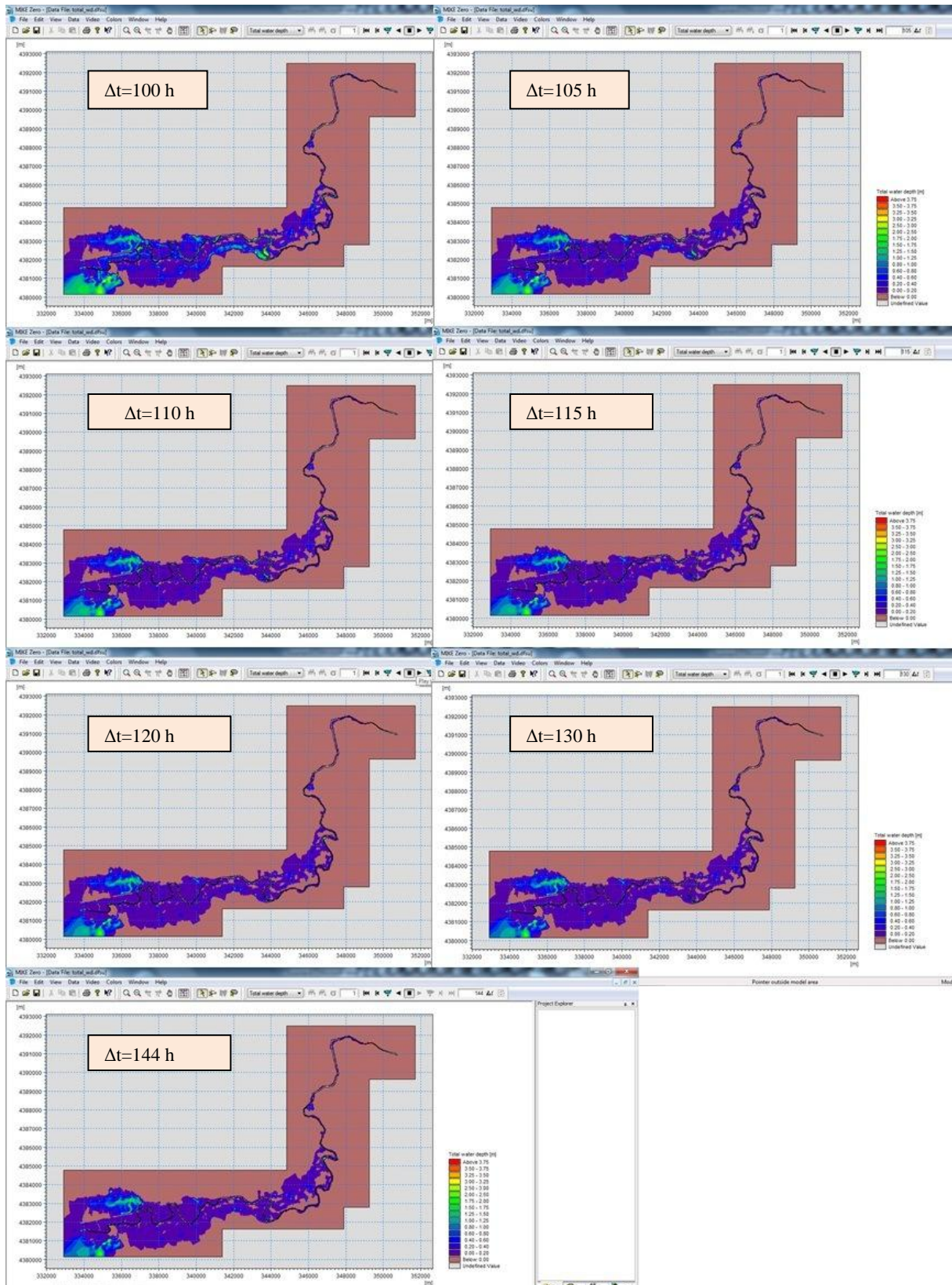


**Figure 11** Flood inundation progress between 0 and 58 h.

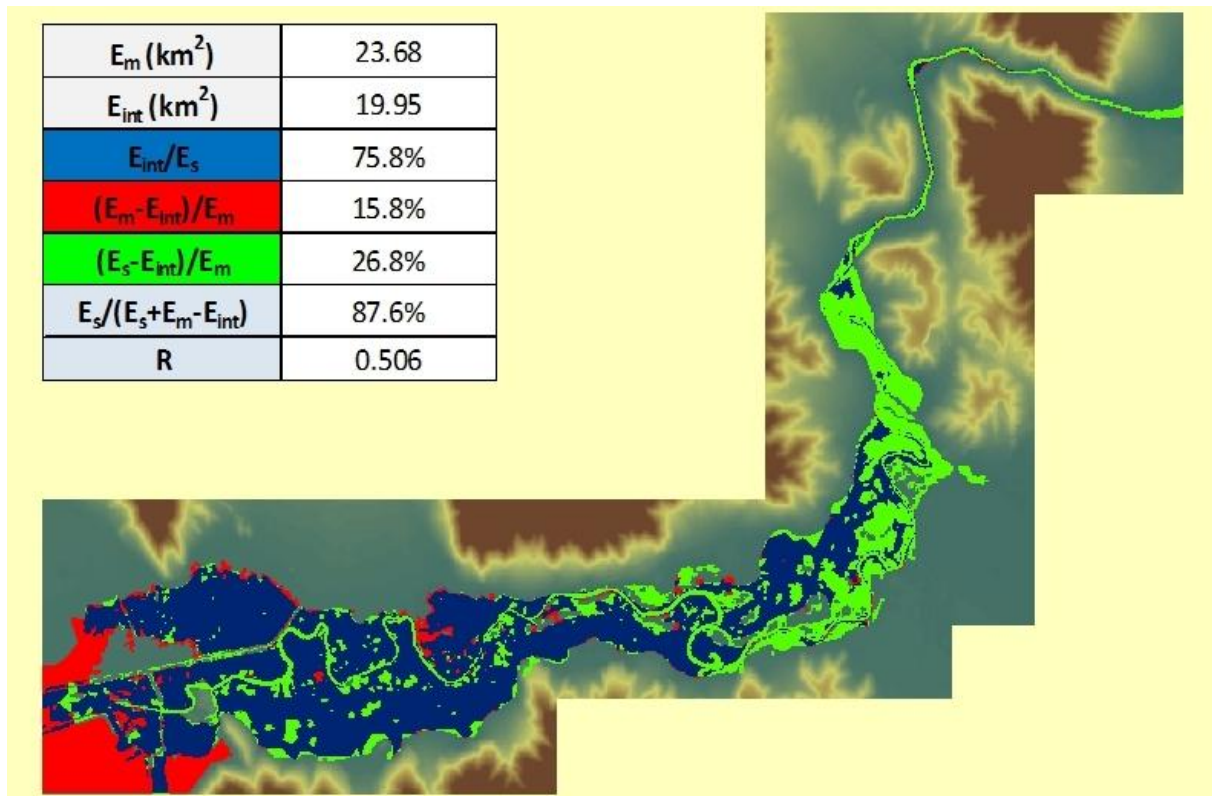




**Figure 12** Flood inundation progress between 60 and 95 h.



**Figure 13** Flood inundation progress between 100 and 144 h.



**Figure 14** MIKE FLOOD time varying inflow conditions result,  $Q_p=550 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 4. Model Comparison in Simple Topographies Application

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. Topographic gradients were set to 1% in channel and the floodplain.

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

- discharge ( $Q$ )
- channel and floodplains Manning's resistance number

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

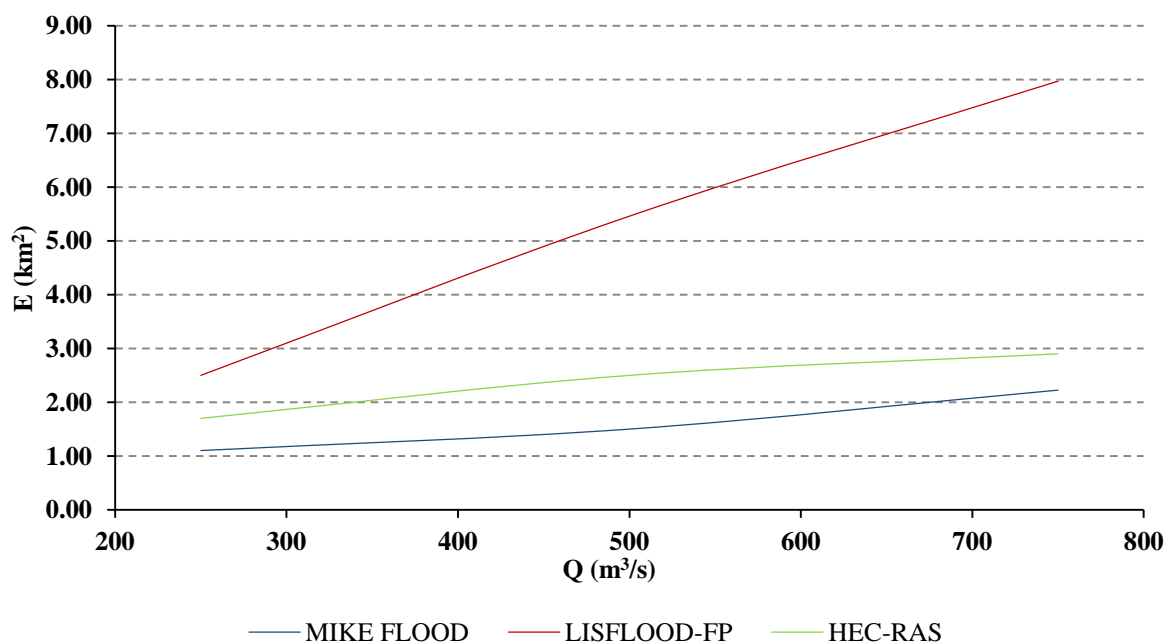
### Varying the Inflow ( $Q$ )

In this section an unsteady flow simulation in MIKE FLOOD was accomplished. The results were compared to the corresponding results in Oikonomou (2013) analysis. Both channel's and plain's Manning's coefficient value was set to 0.03. As it is displayed in Table 1, MIKE FLOOD has a restricted sensitivity in the river inflow change, as it regards to the flooded area and the channel downstream boundary water depth.

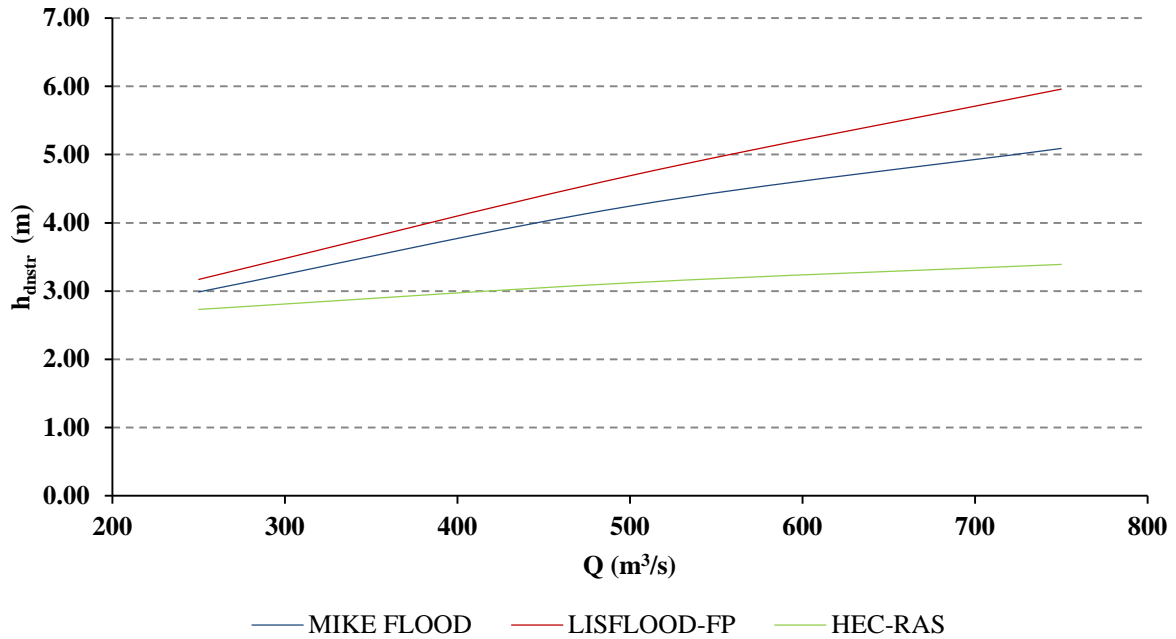
**Table 1** Flood inundation area and downstream boundary water depth with the change of channel inflow.

	Q (m <sup>3</sup> /s)		
	250	500	750
E (km <sup>2</sup> )	1.10	1.50	2.23
h <sub>dnstr</sub> (m)	2.99	3.24	4.09

As depicted in Figures 16 and 17, LISFLOOD-FP has the highest sensitivity among the three models and MIKE FLOOD the smallest, as it concerns the inflow change.



**Figure 16** Area change with the change of channel inflow in the channel (*Data: Oikonomou 2013*).



**Figure 17** Downstream boundary depth change with the change of channel inflow in the channel (*Data: Οικονόμου 2013*).

### Varying the channel and floodplain Manning’s $n$ resistance number

Here, a simulation in unsteady flow conditions is generated with a discharge of  $750\text{m}^3/\text{s}$ , a  $50\text{m}^2$  grid cell size and unique channel and floodplain gradient of 1%. Selected values for the Manning coefficient are: 0.03, 0.08 and 0.10. In Table 2 the results of MIKE FLOOD simulations concerning the flood area are displayed. MIKE FLOOD results are not significantly affected by the change in Manning’s coefficient. Similarly, in Table 3 the water depth calculations appear to have restricted alterations.

**Table 2** Flood area change with the change of Manning’s coefficient.

E (km <sup>2</sup> )		n <sub>ch</sub>		
		0.03	0.08	0.1
n <sub>fp</sub>	0.03	2.23	2.21	2.27
	0.08	2.34	2.66	2.73
	0.1	2.56	2.89	2.87

**Table 3** Water depth in the downstream channel boundary with the change of Manning’s coefficient.

<b>h (m)</b>		<b>n<sub>ch</sub></b>		
		<b>0.03</b>	<b>0.08</b>	<b>0.1</b>
<b>n<sub>fp</sub></b>	<b>0.03</b>	4.09	4.24	4.33
	<b>0.08</b>	4.31	4.34	4.36
	<b>0.1</b>	4.43	4.45	4.52

## 5. Conclusions

In general, within this study certain model features are illustrated.

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 the models that perform hydraulic analysis in more than one dimensions.

Regarding the river simulation, LISFLOOD-FP has a difficulty to accurately simulate any river topography, due to the assumptions that consist of the model structure. Although, it can simulate possible flow directions in small gradients’ areas.

Quasi-2D models such as LISFLOOD-FP could lead to more accurate results in a flood study where 1D models are used for the calculations, in order to obtain a supplementary estimation of flood extent.

Full Shallow Water Equations’ Models such as MIKE FLOOD are on the one hand more complex to configure a simulation in it, but on the other hand produce more accurate results. Their capability of simulating a real case under real flow conditions makes their use recommended in cases where more accuracy is needed, as flood protection system design, flood hazard maps, e.t.c..



# 1. Εισαγωγή

---

## 1.1 Αντικείμενο μελέτης

Στο πλαίσιο εφαρμογής της Κοινοτικής Οδηγίας Πλαίσιο για τις πλημμύρες (2007/60/ΕΚ) και λόγω της ανάγκης διερεύνησης και εκτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου μιας περιοχής, κρίνεται αναγκαία η επιλογή εκείνων των υπολογιστικών εφαρμογών που παρέχουν κατά περίπτωση τη δυνατότητα αξιόπιστης και ακριβούς υδραυλικής προσομοίωσης πλημμυρικών γεγονότων.

Η ανάλυση και η ακρίβεια των παραγόμενων αποτελεσμάτων των υδραυλικών μοντέλων αποτελούν τα σημαντικότερα εργαλεία για την εκτίμηση του κινδύνου και τη λήψη των αντίστοιχων αποφάσεων. Οι αποφάσεις μπορεί να αφορούν είτε την εφαρμογή μη κατασκευαστικών μέτρων στα πλαίσια της πολιτικής προστασίας μιας περιοχής, είτε την κατασκευή των απαραίτητων έργων υποδομής για την αντιπλημμυρική προστασία της.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται αρχικά η αποτελεσματικότητα τριών υδραυλικών μοντέλων στην προσομοίωση συγκεκριμένου πλημμυρικού επεισοδίου μιας περιοχής όπου οι τοπογραφικές κλίσεις που παρατηρούνται είναι σχετικά μικρές, μέσω της εκτίμησης της έκτασης της πλημμυρικής κατάκλυσης. Τα μοντέλα τα οποία συγκρίνονται είναι τα εξής: το HEC-RAS, το LISFLOOD-FP και το MIKE FLOOD.

Πιο αναλυτικά, συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής εργασίας του Α. Οικονόμου (2013) «Διερεύνηση λειτουργίας λογισμικών υδραυλικής προσομοίωσης στην εξέλιξη πλημμυρικής κατάκλυσης. Εφαρμογή στην πεδιάδα της Θεσσαλίας.», με αυτά που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Στην προαναφερθείσα μεταπτυχιακή εργασία του Α. Οικονόμου (2013) χρησιμοποιήθηκαν τα δύο από τα τρία υδραυλικά μοντέλα που αναφέρθηκαν, τα HEC-RAS και LISFLOOD-FP, ενώ στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εφαρμόστηκε το μοντέλο MIKE FLOOD στην ίδια περιοχή μελέτης. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των τριών μοντέλων.

Επιπρόσθετα, εκτός από την εφαρμογή των μοντέλων στην περιοχή μελέτης και τη σύγκριση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή του μοντέλου MIKE



FLOOD σε κάποιες απλές πρότυπες τοπογραφίες οι οποίες είχαν μελετηθεί και στη μεταπτυχιακή εργασία του Α. Οικονόμου (2013) και στη συνέχεια έγινε η αντίστοιχη σύγκριση.

## **1.2 Διάρθρωση εργασίας**

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο το αντικείμενο μελέτης της εργασίας, αφορά τη σύγκριση και τη διερεύνηση των αποτελεσμάτων των τριών μοντέλων υδραυλικής προσομοίωσης HEC-RAS, LISFLOOD-FP και MIKE FLOOD.

Συγκεκριμένα, στο παρόν Κεφάλαιο γίνεται αρχικά μια αναφορά και εξήγηση του αντικειμένου της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια περιγραφή των συνθηκών ροής και του θεωρητικού υποβάθρου των υπό εξέταση μοντέλων. Πιο αναλυτικά, αναφέρονται τα είδη της ροής καθώς επίσης και οι φυσικές αρχές και νόμοι που την περιγράφουν. Έμφαση δίνεται στη μη μόνιμη ροή και τις εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στα αντίστοιχα προβλήματα. Στη συνέχεια περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο των υπό μελέτη μοντέλων. Εξηγούνται αρχικά οι παραδοχές που γίνονται από το καθένα καθώς επίσης και ο τρόπος επίλυσης των εξισώσεων. Σε ότι αφορά τα σχήματα επίλυσης των διαφορετικών εξισώσεων κάθε μοντέλου γίνεται μια αναφορά στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους.

Το Κεφάλαιο 3 αφορά τη διαδικασία της υδραυλικής προσομοίωσης της περιοχής μελέτης. Πιο αναλυτικά, γίνεται αρχικά μια περιγραφή της περιοχής μελέτης και των ιδιαίτερων μορφολογικών της χαρακτηριστικών. Στη συνέχεια περιγράφεται η αρχική επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε στα διαθέσιμα στοιχεία. Τέλος αναλύεται όλη η διαδικασία που διεκπεραιώθηκε σε κάθε μοντέλο προκειμένου να προσομοιωθεί η περιοχή μελέτης και τα υδραυλικά της χαρακτηριστικά.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στα τρία μοντέλα και γίνεται η επεξήγησή τους.

Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται μια σύγκριση των τριών μοντέλων και μελέτη της συμπεριφοράς τους σε επιλεγμένες πρότυπες τοπογραφίες.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 καταγράφονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις από τη μελέτη των τριών μοντέλων στο πλαίσιο της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής εργασίας.



## 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο των υπό εξέταση Πλημμυρικών Μοντέλων

---

### 2.1 Πλημμύρες

Η Υδρολογία Πλημμυρών αναφέρεται στον κλάδο της Τεχνικής Υδρολογίας που μελετά τις διεργασίες εκείνες από την έναρξη μιας καταιγίδας 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 ενός ποταμού, υδατορεύματος, κ.λ.π..

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 με βάση τη χωροχρονική εξέλιξη της βροχόπτωσης σε συνδυασμό με τα διάφορα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, π.χ. μορφολογικά, εδαφολογικά, χρήσεις γης, φυτοκάλυψη, καθώς επίσης και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του συστήματος αποστράγγισης, όπως είναι για παράδειγμα το υδρογραφικό δίκτυο ή το ανθρωπογενές περιβάλλον και οι δραστηριότητες που αναπτύσσονται σε αυτό. Σύμφωνα με το άρθρο 2, κεφ. 1 της Οδηγίας 2007/60/EK, «Περιλαμβάνονται πλημμύρες από ποτάμια, ορεινούς χείμαρρους, εφήμερα ρεύματα της Μεσογείου και πλημμύρες από τη θάλασσα σε παράκτιες περιοχές, δύναται δε να εξαιρεί πλημμύρες από συστήματα αποχέτευσης.».

Τα κύρια μεγέθη μιας πλημμύρας είναι η παροχή αιχμής και η αντίστοιχη στάθμη στο υδατόρευμα, ο πλημμυρικός όγκος καθώς επίσης και η χρονική διάρκεια του πλημμυρικού γεγονότος που συσχετίζεται με τη διάρκεια της βροχόπτωσης. 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.

Ο πιο συνηθισμένος τύπος πλημμυρών στην Ελλάδα είναι οι αστραπιαίες πλημμύρες (*Flashfloods*) οι οποίες ευνοούνται από τη γεωμορφολογία, τη γεωλογία και τις κλιματικές παραμέτρους των διαφόρων περιοχών της χώρας. Κύρια αιτία πρόκλησης των πλημμυρών αυτών είναι η αυξημένη ένταση της βροχόπτωσης.

Οι ζημιές που καταγράφονται από μια βροχόπτωση η οποία θα προκαλέσει πλημμύρα, εξαρτώνται κυρίως από την παρουσία ή μη κατασκευαστικών αντιπλημμυρικών έργων, από την αλλοίωση του φυσικού περιβάλλοντος της λεκάνης απορροής, η οποία επιφέρει μείωση του χρόνου συρροής, από την ανάπτυξη ανθρώπινης δραστηριότητας 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' ότι οι σεισμοί.

## 2.2 Ροή Ανοικτών Αγωγών

Η εμφάνιση ροής με ελεύθερη επιφάνεια συναντάται τόσο σε φυσικούς όσο και σε τεχνητούς αγωγούς. Η ροή πραγματοποιείται σε αυτές τις περιπτώσεις στο χώρο που ορίζεται από τα στερεά όρια του αγωγού και από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Οι αγωγοί ανεξάρτητα από τη γεωμετρία τους ονομάζονται ανοικτοί και η ροή ονομάζεται «ροή ανοικτών αγωγών». Τα φυσικά ρέματα, οι χείμαρροι και τα ποτάμια καθώς επίσης και οι υπόνομοι, οι διώρυγες και οι τάφροι αποτελούν φυσικούς και τεχνητούς ανοικτούς αγωγούς αντίστοιχα.

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

Η κατάταξη της ροής σε δύο μεγάλες κατηγορίες έτσι ώστε να είναι ευχερέστερη η μελέτη των αντίστοιχων προβλημάτων πραγματοποιείται με δύο ειδών κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά είναι είτε κινηματικά, είτε δυναμικά και περιγράφονται παρακάτω.

### (α) Κινηματικά κριτήρια

Για τις κινηματικές διακρίσεις της ροής κύριο ρόλο παίζουν τόσο η τοπική όσο και η μεταθετική επιτάχυνση. Οι μεταβολές της ταχύτητας στο χώρο και το χρόνο συνεπάγονται

αντίστοιχη μεταβολή του βάθους ροής  $t$  της διατομής, το οποίο και αποτελεί το βασικό κριτήριο για την από κινηματική άποψη διάκριση της ροής σε ανοικτούς αγωγούς.

Σε ότι αφορά τις χρονικές μεταβολές του βάθους ροής  $t$  της διατομής, διακρίνονται οι εξής κατηγορίες:

- (i) Μόνιμη ροή: Η ροή θεωρείται μόνιμη όταν το βάθος ροής σε κάθε θέση κατά μήκος του αγωγού παραμένει αμετάβλητο με το χρόνο. Αυτό συνεπάγεται σταθερό εμβαδό υγρής διατομής  $E$  και για δεδομένη παροχή  $Q$  αμετάβλητη ταχύτητα  $V$  με το χρόνο.
- (ii) Μη μόνιμη ροή: Κατά τη μη μόνιμη ροή τόσο το βάθος ροής  $t$  της διατομής, όσο και η ταχύτητα  $V$  μεταβάλλονται με το χρόνο.

Από άποψη χωρικών μεταβολών του βάθους ροής  $t$  της διατομής, διακρίνονται οι εξής κατηγορίες:

- (i) Ομοιόμορφη ροή: Η ροή καλείται ομοιόμορφη όταν σε δεδομένη χρονική στιγμή το βάθος ροής  $t$  είναι ίδιο σε κάθε διατομή κατά μήκος του αγωγού. Βασική προϋπόθεση είναι ότι ο αγωγός έχει σταθερή γεωμετρία, είναι δηλαδή πρισματικής μορφής. Η θεώρηση της ομοιόμορφης ροής έχει ιδιαίτερη σημασία στην περαιτέρω ανάλυση των προβλημάτων ροής ανοικτών αγωγών.
- (ii) Ανομοιόμορφη ροή: Πρόκειται για τη ροή που λαμβάνει χώρα όταν το βάθος ροής  $t$  μεταβάλλεται από θέση σε θέση κατά μήκος του αγωγού, σε δεδομένη χρονική στιγμή.

Ανάλογα με το μέγεθος της μεταβολής του βάθους ροής  $t$  σε σχέση με το μήκος του αγωγού όπου πραγματοποιείται η ροή διακρίνονται δύο επιμέρους κατηγορίες, η βαθμιαία μεταβαλλόμενη και η ταχέως μεταβαλλόμενη ροή. Κατά τη βαθμιαία μεταβαλλόμενη ροή, το βάθος  $t$  της διατομής μεταβάλλεται σε μικρό βαθμό σε σχέση με το μήκος του αγωγού, η καμπύλωση δηλαδή της ελεύθερης επιφάνειας είναι μικρή και προσεγγιστικά οι γραμμές ροής θεωρούνται παράλληλες γεγονός που διευκολύνει την ανάλυση των αντίστοιχων προβλημάτων. Κατά την ταχέως μεταβαλλόμενη ροή η μεταβολή του βάθους ροής  $t$  κατά μήκος του αγωγού είναι σημαντική και επομένως οι γραμμές ροής εμφανίζουν έντονη καμπυλότητα και δε μπορούν να θεωρηθούν προσεγγιστικά παράλληλες. Τέτοιου είδους ροές εμφανίζονται σε μικρά τμήματα αγωγών και θεωρούνται τοπικά φαινόμενα.

## (β) Δυναμικά κριτήρια

Από δυναμική άποψη οι διακρίσεις της ροής βασίζονται στις σχέσεις των δυνάμεων αδράνειας προς κάθε μία από τις δυνάμεις που επηρεάζουν την κίνηση. Στη ροή με ελεύθερη επιφάνεια εμφανίζονται εκτός από τις δυνάμεις αδράνειας, δυνάμεις βαρύτητας, δυνάμεις διαφοράς πιέσεων, δυνάμεις ιξώδους, επιφανειακής τάσης, κ.λ.π.. Με την αδιαστατοποίηση των εξισώσεων Navier-Stokes έτσι ώστε η ροή να μην επηρεάζεται από την επιφανειακή τάση και άλλους παράγοντες, σχηματίζονται δύο χαρακτηριστικοί αδιάστατοι αριθμοί.

Ο ένας αριθμός είναι ο αριθμός Reynolds ( $Re$ ) ο οποίος εκφράζει το λόγο των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις τριβής, λόγω μη μηδενικού ιξώδους. Ο αριθμός  $Re$  εκφράζει ουσιαστικά τη συνεκτικότητα στη ροή και ορίζεται ως εξής:

$$Re = \frac{\text{Δυνάμεις Αδράνειας}}{\text{Δυνάμεις Συνεκτικότητας}} = \frac{V * L}{\nu}$$

Όπου  $V$  η μέση ταχύτητα χαρακτηριστικής διατομής,  $L$  η υδραυλική ακτίνα ή το τετραπλάσιο αυτής και  $\nu$  ο συντελεστής κινηματικής συνεκτικότητας. Για μικρές τιμές του  $Re$  η ροή είναι στρωτή ενώ για μεγάλες τιμές η ροή θεωρείται τυρβώδης. Για κάθε μία γεωμετρία αγωγού υπάρχει μια κρίσιμη τιμή του αριθμού  $Re$  κάτω από την οποία η ροή είναι στρωτή και πάνω από την οποία είναι αρχικά ασταθής και καταλήγει να είναι τυρβώδης. Η κρίσιμη αυτή τιμή είναι σχετικά μικρή και στο μεγαλύτερο ποσοστό των προβλημάτων η ροή είναι τυρβώδης. Στρωτή μπορεί να θεωρηθεί η ροή λεπτού στρώματος νερού στο έδαφος όπως συμβαίνει κατά την απορροή όμβριων υδάτων.

Η επιρροή της βαρύτητας στη ροή με ελεύθερη επιφάνεια εκφράζεται από τον αριθμό Froude ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$F = \frac{\text{Δυνάμεις Αδράνειας}}{\text{Δυνάμεις Βαρύτητας}} = \frac{V}{\sqrt{g * L}}$$

Όπου  $V$  η μέση ταχύτητα της χαρακτηριστικής διατομής και  $L$  χαρακτηριστικό μήκος ίσο με το υδραυλικό βάθος. Ανάλογα με την τιμή του αριθμού  $F$  η ροή διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες:

- (i) Για  $F < 1$  η ροή καλείται υποκρίσιμη. Η δύναμη της βαρύτητας είναι σημαντική σε σχέση με τη δύναμη αδράνειας. Τέτοιου είδους ροή εμφανίζει μικρή ταχύτητα και συναντάται στα χαμηλά τμήματα των ποταμών.

- (ii) Για  $F > 1$  η ροή καλείται υπερκρίσιμη και κυριαρχείται από τις δυνάμεις αδράνειας. Στη φύση η ροή αυτή συναντάται σε χείμαρρους και ρέματα με μεγάλη κατά μήκος κλίση.
- (iii) Για  $F = 1$  η ροή είναι κρίσιμη. Η κρίσιμη ροή αποτελεί μια ασταθή, μεταβατική κατάσταση μεταξύ υποκρίσιμης και υπερκρίσιμης ροής.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας η μελέτη γίνεται σε συνθήκες μη μόνιμης ροής. Κύριο χαρακτηριστικό της μη μόνιμης ροής είναι η μεταφορά μάζας κατά τη διάδοση των κυματισμών στην ελεύθερη επιφάνεια. Σε αντίθεση με τη μη μόνιμη ροή σε κλειστούς αγωγούς το νερό θεωρείται ασυμπίεστο και οι μεταβολές πιέσεων εκφράζονται ως μεταβολές στάθμης (Νουτσόπουλος κ.α. 2007, Παπανικολάου 2012).

### 2.3 Εξισώσεις και Διάκριση Πλημμυρικών Κυμάτων

Η μη μόνιμη, μεταβαλλόμενη ροή περιγράφεται από τις Εξισώσεις Saint Venant ή αλλιώς, Εξισώσεις Αβαθών Υδάτων (*Shallow Water Equations*). Οι Εξισώσεις Saint Venant προκύπτουν από την κατά βάθος ολοκλήρωση των εξισώσεων Συνέχειας και Navier-Stokes οι οποίες περιγράφουν τη ροή με βάση τις αρχές διατήρησης της μάζας και της ορμής. Οι Εξισώσεις Συνέχειας και Navier-Stokes είναι απόρροια του πρώτου και δεύτερου Νόμου του Νεύτωνα όταν εφαρμόζονται σε έναν όγκο ελέγχου της ροής του νερού. Η ολοκλήρωση γίνεται υπό τις παρακάτω παραδοχές:

- Το νερό είναι ασυμπίεστο και ομογενές, δηλαδή η πυκνότητά του είναι σταθερή σε όλο το πεδίο ροής ανεξαρτήτως χρόνου.
- Εισάγεται η έννοια των μέσων ταχυτήτων κατά μήκος και εγκάρσια της ροής με τη θεώρηση ότι οι μεταβολές των ταχυτήτων κατά την κατακόρυφη διεύθυνση είναι αμελητέες.
- Η κατανομή των πιέσεων σε οποιοδήποτε κατακόρυφο επίπεδο είναι υδροστατική.
- Η κλίση του πυθμένα είναι μικρή έτσι ώστε να μην υπάρχει ουσιαστική διαφορά μεταξύ του βάθους ροής, είτε αυτό μετρείται κατακόρυφα, είτε κάθετα στον πυθμένα.
- Δεν υπάρχουν ασυνέχειες ή απότομες μεταβολές στο πεδίο ροής.
- Δεν υπάρχει εισροή ή εκροή.



- Οι εσωτερικές δυνάμεις τριβής (δυναμική συνεκτικότητα ή ιξώδες) και οι αντίστοιχες εξωτερικές (τριβές στον πυθμένα και στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού) μπορούν να προσομοιωθούν με συντελεστές που προκύπτουν από ημιεμπειρικές εκφράσεις (π.χ. Manning, Chezy κ.λπ.) και οι οποίες ισχύουν σε συνθήκες ομοιόμορφης ροής.

Οι Εξισώσεις 2.1, 2.2 και 2.3 αποτελούν τη γενική μορφή των εξισώσεων Saint Venant (Εξ. 2.1 έως 2.3) που προκύπτουν έπειτα από την ολοκλήρωση, τις παραδοχές και κάποιους μαθηματικούς μετασχηματισμούς. Η εξίσωση 2.1 εκφράζει την Εξίσωση Συνέχειας της ροής ενώ οι εξισώσεις 2.2 και 2.3 εκφράζουν την Αρχή Διατήρησης της Ορμής στη ροή.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(u*h)}{\partial x} + \frac{\partial(v*h)}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial x} = gh(S_0^x - S_f^x) \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial y} = gh(S_0^y - S_f^y) \quad (2.3)$$

Όπου:

$h$  βάθος νερού (m),  $u$  ταχύτητα νερού κατά την οριζόντια διεύθυνση  $x$  (m/s),  $v$  ταχύτητα νερού κατά την οριζόντια διεύθυνση  $y$  (m/s),  $g$  επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m/s^2$ ),  $S_0^x$  κλίση πυθμένα κατά την οριζόντια διεύθυνση  $x$ ,  $S_0^y$  κλίση πυθμένα κατά την οριζόντια διεύθυνση  $y$ ,  $S_f^x$  απώλειες λόγω τριβής στον πυθμένα κατά την οριζόντια διεύθυνση  $x$  (κλίση γραμμής ενέργειας),  $S_f^y$  απώλειες λόγω τριβής στον πυθμένα κατά την οριζόντια διεύθυνση  $y$  (κλίση γραμμής ενέργειας).

Οι όροι της κλίσης των απωλειών τριβής μπορούν να γραφτούν και ως εξής:

$$S_f^x = n^2 u \frac{\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}}, S_f^y = n^2 v \frac{\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} \quad (2.4)$$

όπου  $n$  ο συντελεστής Manning.

Πολλές φορές, παρά τη διδιάστατη φύση του προβλήματος της φυσικής ροής σε πλημμυρικά πεδία, για λόγους απλοποίησης χρησιμοποιείται η μονοδιάστατη μορφή των εξισώσεων. Η αντίστοιχη έκφραση των εξισώσεων Saint Venant (Εξ. 2.5 και 2.6) για μία διάσταση είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.5)$$

$$S_f = S_o - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{u \partial u}{g \partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.6)$$

Όπου:

$A$  εμβαδόν υγρής διατομής ( $m^2$ ),  $Q$  παροχή ( $m^3/s$ ),  $u$  η ταχύτητα του νερού ( $m/s$ ),  $S_o$  η κλίση πυθμένα,  $S_f$  απώλειες λόγω τριβής στον πυθμένα. Επίσης, οι όροι  $\frac{\partial y}{\partial x}$  είναι η κλίση πίεσης,

$\frac{u \partial u}{g \partial x}$  η κλίση μεταθετικής επιτάχυνσης,  $\frac{\partial u}{g \partial t}$  η κλίση τοπικής επιτάχυνσης.

Στην παραπάνω Εξίσωση 2.6 ανάλογα με την περίπτωση του πλημμυρικού κύματος που μελετάται γίνονται κάποιες απλοποιήσεις από το κάθε πρόγραμμα. Οι απλοποιήσεις αυτές στις παραπάνω εξισώσεις τόσο στη μία διάσταση όσο και στις δύο διαστάσεις, σε συνδυασμό με το σχήμα επίλυσής τους, αποτελούν την ειδοποιό διαφορά μεταξύ των διαφόρων πακέτων λογισμικού. Η διαθέσιμη πληροφορία και ο σκοπός της προσομοίωσης αποτελούν σε κάθε περίπτωση το βασικό κριτήριο για την επιλογή του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί. Συγκεκριμένα, για κατανεμημένες παρατηρήσεις και προβλέψεις είναι καλύτερη η χρήση ενός 2D μοντέλου, ενώ για σημειακές μετρήσεις στάθμης ή παροχής είναι συμβατή και η χρήση 1D μοντέλων (Horritt & Bates 2002).

Η διάκριση των πλημμυρικών κυμάτων περιγράφεται ακολούθως. Ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περίπτωσης που μελετάται, όπως είναι για παράδειγμα η τοπογραφία, η διαθέσιμη παροχή, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά, τα διαθέσιμα στοιχεία, κ.α., επιλέγεται ο καταλληλότερος τρόπος περιγραφής και υπολογισμού της διάδοσης του πλημμυρικού κύματος.

#### (α) Κινηματικό κύμα

Στο κινηματικό κύμα, η παροχή αποτελεί συνάρτηση μόνο του βάθους και επιπλέον, η κλίση τριβών θεωρείται πρακτικά ίση με την κλίση του πυθμένα. Για το λόγο αυτό, για τη μελέτη με περιγραφή κινηματικού κύματος χρησιμοποιείται μόνο ο όρος της κλίσης τριβών πυθμένα  $S_o$ . Ένα φυσικό πλημμυρικό κύμα μπορεί κατά προσέγγιση να θεωρηθεί κινηματικό όταν η κλίση του πυθμένα είναι σχετικά μεγάλη. Χαρακτηριστικό του κινηματικού κύματος είναι ότι αυτό έχει μία μόνο ταχύτητα μετάδοσης και μάλιστα προς τα κατάντη καθώς αυτό προκύπτει βασικά μόνο από την εξίσωση συνέχειας.

(β) Κύμα διάχυσης

Κατά την περιγραφή με κύμα διάχυσης, αγνοείται η ορμή, δηλαδή ο τελευταίος όρος της Εξίσωσης 2.6. Ένα φυσικό πλημμυρικό κύμα μπορεί να περιγραφεί με αυτόν τον τρόπο όταν οι αντιστάσεις στον πυθμένα είναι σχετικά υψηλές και η αλλαγή στην ορμή είναι αμελητέα.

(γ) Δυναμικό κύμα

Κατά την περιγραφή με δυναμικό κύμα δεν αγνοείται κανένας όρος της Εξίσωσης 2.6 και συνεπώς χρησιμοποιείται όταν η μεταβολή της ορμής στο χώρο και το χρόνο είναι ιδιαίτερα σημαντική. Στη φύση, σε περιπτώσεις με μικρή κλίση ελεύθερης επιφάνειας, μικρή κλίση και τριβή πυθμένα, το δυναμικό κύμα αποτελεί την καταλληλότερη περιγραφή καθώς καθιστά δυνατή την υψηλής τάξης περιγραφή της ροής (Νουτσόπουλος κ.α. 2007, Μπέλλος 2011, Παπανικολάου 2012).

## 2.4 Πλημμυρικά Μοντέλα

Τα πλημμυρικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας για τη μελέτη της πλημμυρικής κατάκλυσης είναι τα: HEC-RAS, LISFLOOD-FP και MIKE FLOOD. Η βασική τους διαφορά έγκειται στις διαστάσεις ανάλυσης όπως θα δούμε και παρακάτω. Πιο αναλυτικά, κάθε ένα από τα μελετώμενα πακέτα λογισμικού, χρησιμοποιεί είτε την 1D είτε την 2D μορφή των εξισώσεων Saint Venant της οποίας τη λύση προσεγγίζει μέσω σχήματος πεπερασμένων διαφορών. Ο τρόπος επίλυσης των μερικών διαφορικών εξισώσεων Saint Venant είναι ίσως το πιο καθοριστικό στοιχείο σε ότι αφορά την ακρίβεια και τη μορφή της λύσης η οποία προκύπτει από το εκάστοτε μοντέλο υδραυλικής προσομοίωσης.

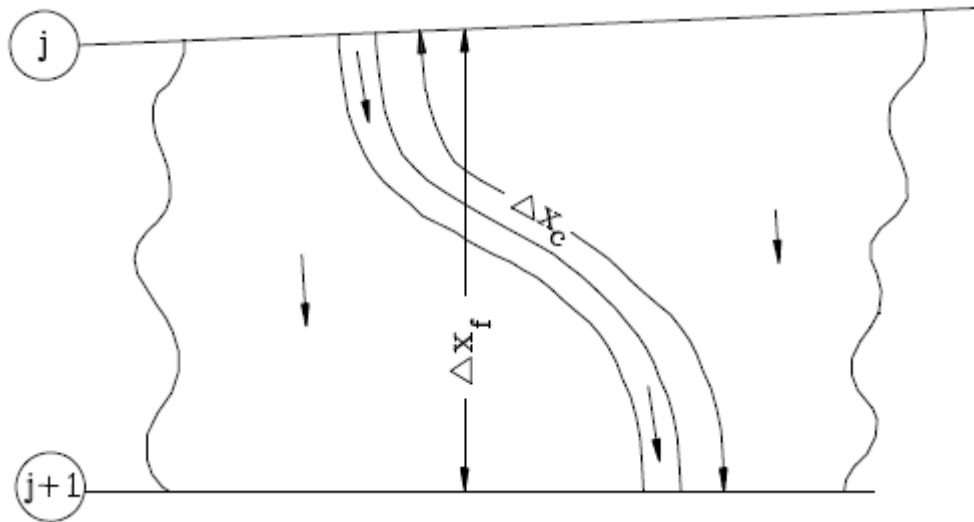
### 2.4.1 Θεωρητικό πλαίσιο υπολογισμών στο HEC-RAS

Το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS ([www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/)) του U.S. Army Corps of Engineers είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα σε πλημμυρικές μελέτες. Είναι ένα ελεύθερο πακέτο λογισμικού μονοδιάστατης ανάλυσης της ροής ποταμού και έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει συνθήκες μόνιμης ροής, μη μόνιμη ροή, περιπτώσεις μεταφοράς ιζήματος καθώς επίσης και υπολογισμούς ποιότητας νερού.

Ως δεδομένα εισόδου απαιτούνται από το λογισμικό τα γεωμετρικά και μορφολογικά στοιχεία των διατομών του ποταμού, οι οριακές συνθήκες της ροής, π.χ. υδρογράφημα εισόδου στα ανάντη, καμπύλη Q-h στα κατάντη, καθώς επίσης και οι αρχικές συνθήκες του ποταμού, π.χ. αρχική παροχή. Οι αρχές διατήρησης της μάζας και της ορμής εκφράζονται με τη μορφή μερικών διαφορικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με σχήμα πεπερασμένων διαφορών όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια.

Σε ότι αφορά τη μη μόνιμη ροή και τα διδιάστατα χαρακτηριστικά της, κατά την εκδήλωση πλημμυρικού φαινομένου αυξάνεται σταδιακά το βάθος στο ποτάμι με αποτέλεσμα αυτό να γεμίσει και να εξαπλωθεί η ροή στο πλημμυρικό πεδίο γεμίζοντας τις διαθέσιμες εκτάσεις. Έπειτα, μέρος του νερού επιστρέφει ξανά στην κοίτη. Όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 2.1, λόγω του ότι η αρχική κατεύθυνση του ποταμού είναι προσανατολισμένη στην κοίτη, οι περιοχές εξάπλωσης του νερού θεωρούνται ότι είναι και αυτές προσανατολισμένες παράπλευρα στην κοίτη. Για το λόγο αυτό γίνεται η απλοποίηση από το πρόγραμμα ότι η 1D

αναπαράσταση μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Δύο βασικές παραδοχές γίνονται προς αυτή την κατεύθυνση. Αφενός, οι περιοχές που πληρώνονται με νερό εκατέρωθεν της κοίτης προσομοιάζονται με περιοχές αποθήκευσης νερού (*Storage areas*) οι οποίες ανταλλάσσουν νερό με το ποτάμι. Αφετέρου, η ροή στις όχθες θεωρείται ως ροή ξεχωριστού καναλιού.



**Σχήμα 2.1** Προσανατολισμός ροής καναλιού και πεδίου (Πηγή: U.S. Army Corps of Engineers 2010).

Ως βασική υπολογιστική διαδικασία το HEC-RAS χρησιμοποιεί την Εξίσωση Συνέχειας σε συνδυασμό με την 1D Εξίσωση Saint Venant των οποίων η γενική μορφή διατυπώνεται σε προηγούμενο υποκεφάλαιο. Για την απλοποίηση των υπολογισμών, οι Fread και Smith το 1976 και 1978 αντίστοιχα, προσέγγισαν το πρόβλημα του υπολογισμού της ροής μεταξύ καναλιού και πεδίου (*Storage areas*) θεωρώντας την ελεύθερη επιφάνεια του νερού οριζόντια ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής. Για το λόγο αυτό η ανταλλαγή ορμής μεταξύ ποταμού και πεδίου θεωρείται αμελητέα και επιπλέον η κατανομή της παροχής γίνεται ανάλογα με την παροχευτικότητα.

Οι γενικές εξισώσεις μετασχηματίστηκαν αρχικά από τους Fread και Smith όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο και έπειτα από τον Barkau, ο οποίος με σχετική έρευνα το 1982, διαμόρφωσε στη συνέχεια και το σχήμα επίλυσής τους. Οι εξισώσεις που προέκυψαν και τελικά επιλύονται από το λογισμικό είναι οι παρακάτω:

$$Q_c = \varphi Q \quad (2.7)$$

Όπου:

$Q_c$  η ροή (παροχή) στο ποτάμι ( $m^3/s$ )

$Q$  η συνολική ροή ( $m^3/s$ )

$$\varphi = \frac{K_c}{K_c + K_f}$$

$K_c$  μεταφορά ροής στο κανάλι

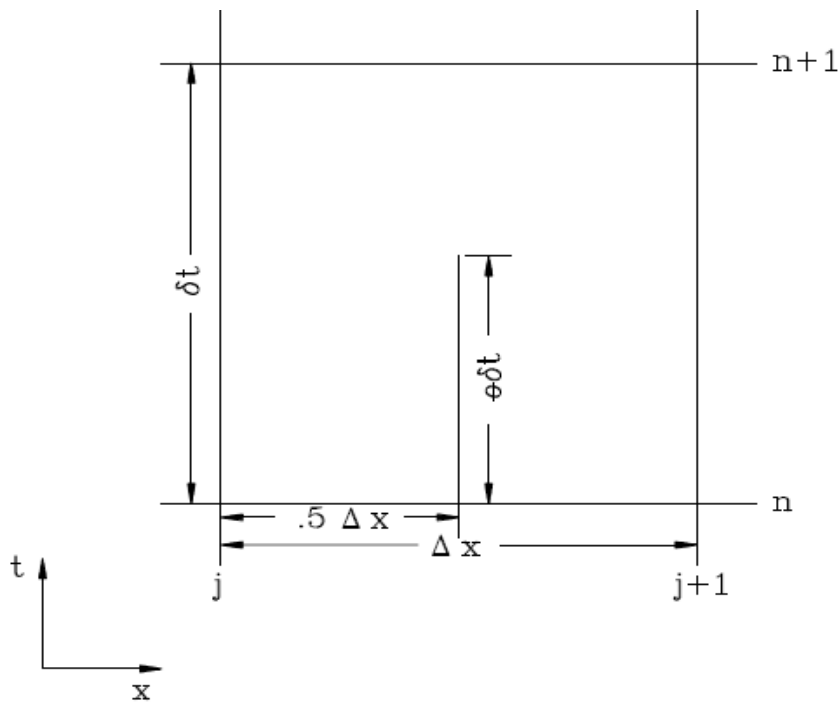
$K_f$  μεταφορά ροής στο πλημμυρικό πεδίο

Οι τελικές εξισώσεις είναι:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(\Phi Q)}{\partial x_c} + \frac{\partial[(1-\Phi)Q]}{\partial x_f} = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial\left(\frac{\Phi^2 Q^2}{A_c}\right)}{\partial x_c} + \frac{\partial\left(\frac{(1-\Phi)^2 Q^2}{A_f}\right)}{\partial x_f} + gA_c \left[\frac{\partial Z}{\partial x_c} + S_{fc}\right] + gA_f \left[\frac{\partial Z}{\partial x_f} + S_{ff}\right] = 0 \quad (2.9)$$

Στις παραπάνω Εξισώσεις 2.8 και 2.9 έχει ληφθεί υπόψη η πλήρης έκφραση της 1D εξίσωσης Saint Venant, χρησιμοποιείται δηλαδή το δυναμικό κύμα για τον υπολογισμό της διάδοσης του πλημμυρικού κύματος. Η επίλυση των παραπάνω μερικών διαφορικών εξισώσεων γίνεται μέσω έμμεσου σχήματος πεπερασμένων διαφορών τεσσάρων σημείων (*Box Scheme*), το οποίο απεικονίζεται γραφικά στο ακόλουθο Σχήμα 2.2.



**Σχήμα 2.2** Τυπικό κελί πεπερασμένων διαφορών (Πηγή: U.S. Army Corps of Engineers 2010).

Η ανάλυση σταθερότητας κατά Von Neumann έδειξε ότι το σχήμα είναι θεωρητικά σταθερό για  $0.5 < \theta \leq 1.0$ , υπό προϋποθέσεις σταθερό  $\theta = 0.5$  και ασταθές για  $\theta < 0.4$ . Πιο

συγκεκριμένα, με τη μείωση του λόγου  $\frac{\lambda}{\Delta x}$  αυξάνεται η αριθμητική αυξομείωση, όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος εντός του υδραυλικού συστήματος και  $\Delta x$  το βήμα χωρικής ανάλυσης. Διάφοροι άλλοι παράγοντες όπως είναι για παράδειγμα η σχετική απόσταση των διατομών υπολογισμού, οι ξαφνικές μεταβολές των ιδιοτήτων των διατομών, οι αιφνίδιες μεταβολές της κλίσης του ποταμού, η φύση του πλημμυρικού κύματος, η ύπαρξη υδραυλικών κατασκευών, κ.α. μπορούν επίσης να προκαλέσουν αστάθειες στη λύση. Για το λόγο αυτό θα πρέπει οποιαδήποτε λύση να συνοδεύεται και από την αντίστοιχη ανάλυση ευαισθησίας σε διάφορες παραμέτρους χωρικού και χρονικού βήματος ανάλυσης. Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι το λογισμικό θεωρείται σύμφωνα με προγενέστερη έρευνα ότι παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε στενά και απότομη κλίση κανάλια ενώ εμφανίζει μεγάλες αποκλίσεις σε πλημμυρικά πεδία με μικρές τοπογραφικές κλίσεις (U.S. Army Corps of Engineers 2010).

#### 2.4.2 Θεωρητικό πλαίσιο υπολογισμών στο LISFLOOD-FP

Το LISFLOOD-FP ([www.bristol.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood/](http://www.bristol.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood/)) του Πανεπιστημίου του Bristol, είναι ένα μοντέλο που δημιουργήθηκε για ερευνητικούς σκοπούς και δεν αποτελεί εμπορικό πακέτο λογισμικού. Πρόκειται για ένα πρωτότυπο υδραυλικό ψευδο-διδιάστατο μοντέλο που χρησιμοποιεί μονοδιάστατη ανάλυση σε δύο διευθύνσεις προκειμένου να προσομοιώσει τη ροή στο πλημμυρικό πεδίο. Επιπρόσθετα, η μονοδιάστατη ανάλυση εφαρμόζεται ξεχωριστά για το κανάλι και το πεδίο και συνδυάζονται μέσω μιας σχέσης συνέχειας.

Δεδομένα εισόδου του μοντέλου είναι το πλάτος του καναλιού, η κλίση του πυθμένα του, τα τοπογραφικά υψόμετρα του καναλιού και του πλημμυρικού πεδίου και ο συντελεστής τραχύτητας Manning στο κανάλι και στο πλημμυρικό πεδίο, καθώς επίσης και οι οριακές συνθήκες, στοιχεία τα οποία μπορούν να μεταβάλλονται κατά μήκος του υδατορεύματος και του πλημμυρικού πεδίου.

Στο LISFLOOD-FP επιλύονται οι 1D εξισώσεις Saint Venant σε δύο διευθύνσεις, μία κατά την κύρια διεύθυνση της ροής και μία στην εγκάρσια διεύθυνση αυτής. Δίνεται η δυνατότητα επιλογής στο χρήστη μεταξύ διαφόρων σχημάτων επίλυσης (*solvers*) τόσο για τις εξισώσεις του καναλιού όσο και για τις εξισώσεις του πεδίου. Ανάλογα με το σχήμα επίλυσης που χρησιμοποιείται διαφοροποιούνται και οι αντίστοιχες απλοποιήσεις των εξισώσεων Saint Venant.

Στο επίπεδο του καναλιού το LISFLOOD-FP επιλύει τις εξισώσεις Συνέχειας (Εξ. 2.10) και 1D Saint Venant (Εξ. 2.11) σε μία διάσταση, ώστε να περιγράψει την κατάντη διάδοση ενός πλημμυρικού κύματος υπολογίζοντας την κλίση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (2.10)$$

$$S_0 - \frac{n^2 P^{4\beta} Q^2}{A^{\frac{10}{3}}} - \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (2.11)$$

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

$S_0$  η κλίση του πυθμένα του καναλιού

$n$  ο συντελεστής τραχύτητας του Manning

$P$  η βρεχόμενη περίμετρος της διατομής

$h$  το βάθος ροής.

Ο τελευταίος όρος της 2<sup>ης</sup> εξίσωσης αποτελεί τον όρο του κύματος διάχυσης. Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής της προσέγγισης του πλημμυρικού κύματος εντός του ποταμού είτε με το κινηματικό κύμα είτε με το κύμα διάχυσης μέσω της επιλογής του αντίστοιχου εργαλείου επίλυσης (*solver*) κατά την προσομοίωση.

Σε ότι αφορά τις παραπάνω εξισώσεις περιγραφής της ροής στο ποτάμι γίνονται οι εξής παραδοχές από τα σχήματα επίλυσης που είναι διαθέσιμα στον κώδικα:

- Η ροή εντός του καναλιού μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από την 1D εξίσωση κινηματικού κύματος ή κύματος διάχυσης, με την απλοποίηση ορθογωνικής διατομής στο ποτάμι. Αγνοούνται δηλαδή οι όροι της μεταγωγικής και τοπικής επιτάχυνσης, και γίνεται η παραδοχή ότι δεν υπάρχει μεταφορά ορμής.
- Το ποτάμι θεωρείται φαρδύ και ρηχό ώστε η βρεχόμενη περίμετρος να προσεγγίζει αριθμητικά το πλάτος του ποταμού και έτσι η πλευρική τριβή να θεωρείται αμελητέα.

Κάθε υδατόρευμα υλοποιείται ως ένα διάνυσμα το οποίο αντιπροσωπεύει αποκλειστικά τη ροή του νερού στο κανάλι και είναι ανεξάρτητο από το ψηφιδωτό αρχείο της επιφάνειας, το οποίο περιλαμβάνει τις πλημμυρικές περιοχές. 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, ως 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.

Σε επίπεδο πλημμυρικού πεδίου, όταν ξεπεραστεί το βάθος του πληρωμένου πλέον ποταμού το νερό μεταφέρεται από το κανάλι στο υπερκείμενο πλημμυρικό πεδίο. Η ροή του πεδίου περιγράφεται ομοίως με όρους συνέχειας και ορμής, διακριτοποιημένους σε έναν κানাβο τετραγωνικών φατνίων, το οποίο επιτρέπει τη διδιάστατη αναπαράσταση της ροής. Η ροή μεταξύ δύο γειτονικών κελιών θεωρείται ως συνάρτηση της διαφοράς του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας σε κάθε ένα από αυτά, κάτι το οποίο απεικονίζεται γραφικά στο ακόλουθο Σχήμα 2.3. Υπολογίζεται ουσιαστικά η χωροχρονική μετατόπιση ενός πλημμυρικού κύματος σε δύο διαστάσεις. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθες Εξισώσεις 2.11 και 2.12:

$$\frac{dh^{i,j}}{dt} = \frac{Q_x^{i-1,j} - Q_x^{i,j} + Q_y^{i,j-1} - Q_y^{i,j}}{\Delta x \Delta y} \quad (2.11)$$

$$Q_x^{i,j} = \frac{h_{\text{flow}}^{5\beta}}{n} \left[ \frac{h^{i-1,j} - h^{i,j}}{\Delta x} \right]^{1/2} \Delta y \quad (2.12)$$

Όπου:

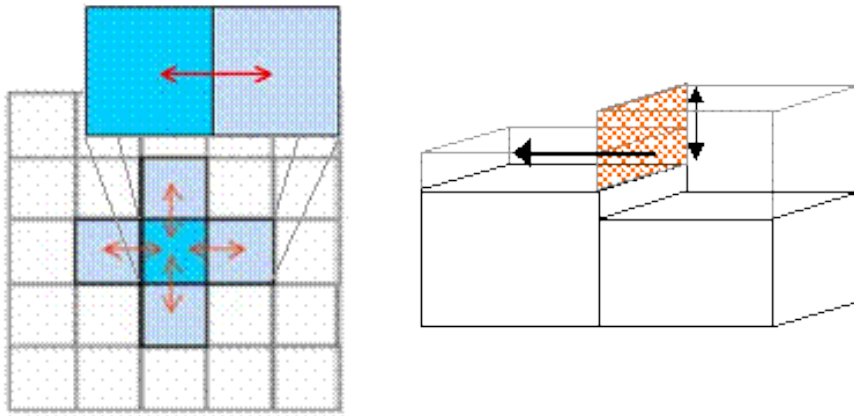
$h_{i,j}$  το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στο φατνίο  $i, j$

$\Delta x, \Delta y$  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.



**Σχήμα 2.3** Ροή μεταξύ γειτονικών κελιών (Πηγή: [www.bristol.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood/](http://www.bristol.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood/)).

Αναφορικά με τις προηγούμενες εξισώσεις περιγραφής της ροής στο πεδίο, γίνονται επίσης κάποιες παραδοχές και απλοποιήσεις από το μοντέλο και τα σχήματα επίλυσης που αυτό χρησιμοποιεί. Πιο αναλυτικά:

- Η ροή εκτός κοίτης προσομοιώνεται με τη χρήση κελιών διακριτοποιημένων σε ψηφιδωτό κάναβο, με ροή μόνο κατά τις καρτεσιανές συντεταγμένες.
- Δεν υπάρχει ανταλλαγή ορμής μεταξύ καναλιού και πεδίου, μόνο ανταλλαγή μάζας.
- Κατά τη ροή στο πεδίο η πλευρική τριβή θεωρείται αμελητέα και αγνοείται.
- Υποεκτιμάται η ταχύτητα διάδοσης του κύματος και έτσι δεν είναι δυνατή η προσομοίωση της δυναμικής της ροής.
- Κάποια σχήματα επίλυσης δε συνιστώνται για υψηλής ανάλυσης προσομοιώσεις λόγω υψηλού υπολογιστικού κόστους.
- Σε περιπτώσεις μικρής τραχύτητας η ταχύτητα διάδοσης του κύματος υποεκτιμάται και έτσι και ο αριθμός Froude. Το μοντέλο αδυνατεί δηλαδή να προσομοιώσει συνθήκες υπερκρίσιμης ροής.
- Διάφορες αστάθειες μπορεί να προκύψουν από τα διάφορα σχήματα επίλυσης, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, π.χ. χαμηλή τραχύτητα.

Το μοντέλο έχει επίσης κάποιους γενικότερους περιορισμούς και παραδοχές οι οποίες πρέπει να αναφερθούν σε αυτό το σημείο.

- Η καταλληλότητα εφαρμογής του κώδικα περιορίζεται σε περιπτώσεις όπου η γνώση των αρχικών συνθηκών είναι ικανοποιητική, ειδικά σε ότι αφορά τη ροή μάζας στο χρόνο σε όλα τα σημεία εισόδου.
- Σε όλα τα μεγέθη χρησιμοποιούνται μονάδες SI.

- Η ροή θεωρείται βαθμιαία μεταβαλλόμενη.
- Αν και κατά μήκος του καναλιού μπορεί στην πραγματικότητα να μεταβάλλεται η κλίση του πυθμένα, είναι απαραίτητο για το μοντέλο να διατηρείται συνεχώς αρνητική.

Το χρονικό βήμα των υπολογισμών καθορίζεται από το χρήστη και θα πρέπει να είναι το βέλτιστο δυνατό ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα της λύσης. Η σταθερότητα των υπολογισμών εξασφαλίζεται από το μοντέλο με την αντίστοιχη επιλογή (*Adaptive time step*) (Bates *et al.* 2005).

### 2.4.3 Θεωρητικό πλαίσιο υπολογισμών στο MIKE FLOOD

Το MIKE FLOOD είναι ένα εμπορικό πακέτο λογισμικού του DHI (Danish Hydraulic Institute Water and Environment), ενός ανεξάρτητου, διεθνούς, συμβουλευτικού και ερευνητικού οργανισμού. Το DHI αποτελεί ένα αξιόπιστο ερευνητικό κέντρο το οποίο δραστηριοποιείται στον τομέα του υδάτινου περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, το DHI έχει αναπτύξει πληθώρα προγραμμάτων MIKE τα οποία μπορούν να προσομοιώσουν τα διάφορα υδάτινα σώματα και τις φυσικές διεργασίες που πραγματοποιούνται σε αυτά. Στον ακόλουθο Πίνακα 2.1 φαίνονται κάποια από τα πακέτα λογισμικού του DHI και το είδος της περίπτωσης που προσομοιώνεται.

**Πίνακας 2.1** Πακέτα λογισμικού DHI και διεργασίες που προσομοιώνονται (Δεδομένα: [www.mikebydhi.com](http://www.mikebydhi.com)).

	Μελετώμενη Περίπτωση	Πακέτο Λογισμικού
Υδάτινοι πόροι	Ποταμοί & Ταμιευτήρες	MIKE 11, MIKE 21C, MIKE FLOOD
	Πλημμύρα ποταμού	MIKE 11, MIKE FLOOD
	Υπόγεια Νερά	MIKESHE, FEFLOW
	Διαχείριση Υδ. Πόρων	MIKE HYDRO basin, MIKE SHE
Παράκτιο & Θαλάσσιο Περιβάλλον	Υδροδυναμική	2D: MIKE 21 HD, MIKE 21 FM 3D: MIKE 3 HD, MIKE 3 FM
	Ιζήματα	LIPTRACK, MIKE 21, MIKE 3
	Κύματα	MIKE 21
	Περιβαλλοντικά	MIKE 21, MIKE 3
	Παράκτια Πλημμύρα	MIKE FLOOD, MIKE 21 HD, MIKE 21 FM, MIKE 3 HD, MIKE 3 FM
Αστικό Περιβάλλον	Συστήματα Συλλογής	MIKE URBAN
	Διανομή Νερού	MIKE URBAN
	Αστική Πλημμύρα	MIKE URBAN, MIKE FLOOD
	Εγκ. Επεξεργασίας Λυμάτων	WEST

Σε ότι αφορά το MIKE FLOOD αυτό αποτελεί ένα προϊόν το οποίο ενσωματώνει τα μονοδιάστατα μοντέλα MIKE-URBAN, MIKE 11 και το διδιάστατο μοντέλο MIKE 21 σε ένα δυναμικά συζευγμένο (*Coupled*) σύστημα μοντελοποίησης. Με την προσέγγιση μέσω σύζευξης καθίσταται δυνατή η χρήση των καλύτερων χαρακτηριστικών των επιμέρους 1D και 2D μοντέλων. Ταυτόχρονα, αποφεύγονται πολλοί από τους περιορισμούς στην ανάλυση και την ακρίβεια της λύσης, οι οποίοι υφίστανται με τη χρήση κάθε μοντέλου χωριστά.

Μέσω του MIKE FLOOD είναι εφικτή η βελτίωση και η προσομοίωση διάφορων εφαρμογών όπως είναι η πλημμύρα ενός πεδίου, η μελέτη κύματος θύελλας (storm surge), η αστική ξηρασία, η θραύση φράγματος, ο υδραυλικός σχεδιασμός διάφορων κατασκευών καθώς επίσης και ευρείας κλίμακας μελέτες εκβολών ποταμού.

Στο MIKE FLOOD προσομοιώνονται και επιλύονται ξεχωριστά η ροή εντός του ποταμού και η ροή στο πλημμυρικό πεδίο. Η ροή από το ποτάμι προς το πεδίο περιγράφεται με τον αντίστοιχο τρόπο σύνδεσης (*Link*), ο οποίος θα περιγραφεί παρακάτω λεπτομερέστερα (MIKE by DHI 2014c).

Σε ότι αφορά τη ροή του ποταμού αυτή προσομοιώνεται με το πακέτο λογισμικού MIKE 11. Ως δεδομένα απαιτούνται από το μοντέλο τα σημεία του ποταμού, τα μορφολογικά και υδραυλικά στοιχεία των διατομών, το είδος και η θέση των οριακών συνθηκών καθώς επίσης και κάποιες υδροδυναμικές παράμετροι και το χρονικό βήμα των υπολογισμών. Πιο αναλυτική περιγραφή των στοιχείων εισόδου θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο.

Ως βασική υπολογιστική διαδικασία χρησιμοποιείται η πλήρης 1D μορφή των εξισώσεων Saint Venant. Δίνεται η δυνατότητα επιλογής από το χρήστη είτε της εξίσωσης δυναμικού κύματος, είτε της εξίσωσης κύματος διάχυσης, είτε της εξίσωσης κινηματικού κύματος. Εκείνη που προτείνεται για λόγους ακρίβειας και πληρότητας είναι η πλήρης εξίσωση δυναμικού κύματος υψηλής τάξης (*High Order Fully Dynamic*) η οποία εμπεριέχει ανώτερης τάξης όρους τριβής σε σχέση με την πλήρως δυναμική περιγραφή (*Fully Dynamic*).

Οι εξισώσεις Συνέχειας (Εξ. 2.13) και Ορμής (Εξ. 2.14) οι οποίες επιλύονται, φαίνονται παρακάτω διατυπωμένες για ορθογωνική διατομή.

$$\frac{\partial(Hb)}{\partial t} = - \frac{\partial(Hb\bar{u})}{\partial x} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial(Hb\bar{u})}{\partial t} = - \frac{\partial(a'Hb\bar{u}^2)}{\partial x} - Hbg \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.14)$$

Όπου:

$\rho$  η πυκνότητα

$H$  το βάθος

$h$  το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας του νερού

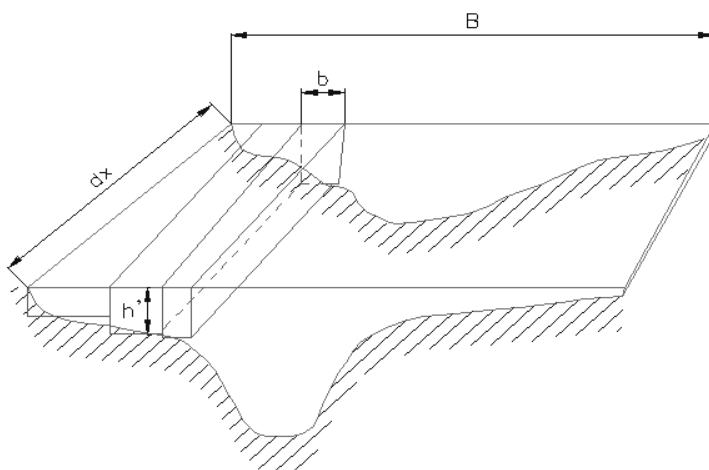
$b$  το πλάτος

$\bar{u}$  η μέση ταχύτητα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση  
α' συντελεστής κατανομής της κατακόρυφης ταχύτητας.

Για την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

- Το νερό είναι ομογενές και ασυμπίεστο, δηλαδή δεν υπάρχουν σημαντικές μεταβολές στην πυκνότητα.
- Η κλίση πυθμένα είναι μικρή.
- Τα μήκη κύματος είναι μεγάλα σε σχέση με το βάθος νερού. Αυτό διασφαλίζει ότι η ροή σε κάθε σημείο μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει κατεύθυνση παράλληλη με τον πυθμένα και επομένως ότι η κατακόρυφη επιτάχυνση μπορεί να αγνοηθεί και ότι η κατανομή της πίεσης κατά την κάθετη διεύθυνση μπορεί να θεωρηθεί υδροστατική.
- Η ροή είναι υποκρίσιμη.

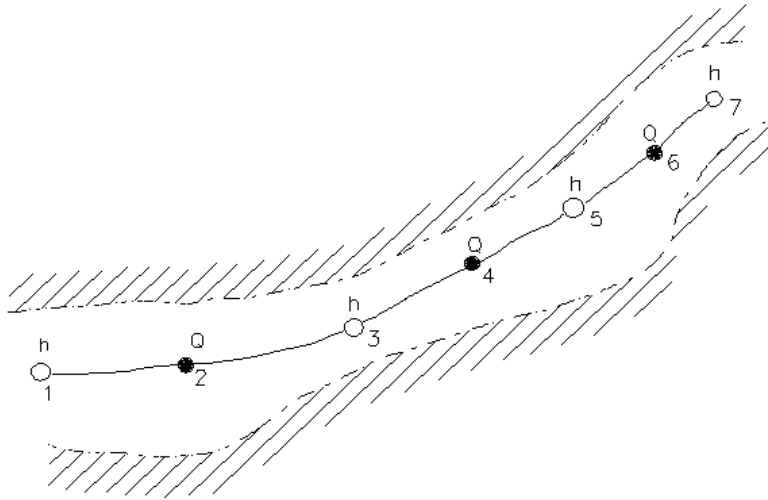
Η επίλυση των ανωτέρω εξισώσεων για διατομή οποιουδήποτε σχήματος πραγματοποιείται με τη διαίρεση της διατομής σε επιμέρους ορθογωνικά τμήματα όπως απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 2.4. Σε ότι αφορά το σχήμα επίλυσης των παραπάνω συνδυασμένων εξισώσεων αυτό περιγράφεται ακολούθως. Πρέπει να αναφερθεί ότι το σχήμα επίλυσης δεν επηρεάζεται από την επιλογή του χρήστη σε ότι αφορά την εξίσωση περιγραφής του πλημμυρικού κύματος.



**Σχήμα 2.4** Χωρισμός διατομής σε επιμέρους ορθογωνικά κανάλια (Πηγή: MIKE by DHI 2014a).

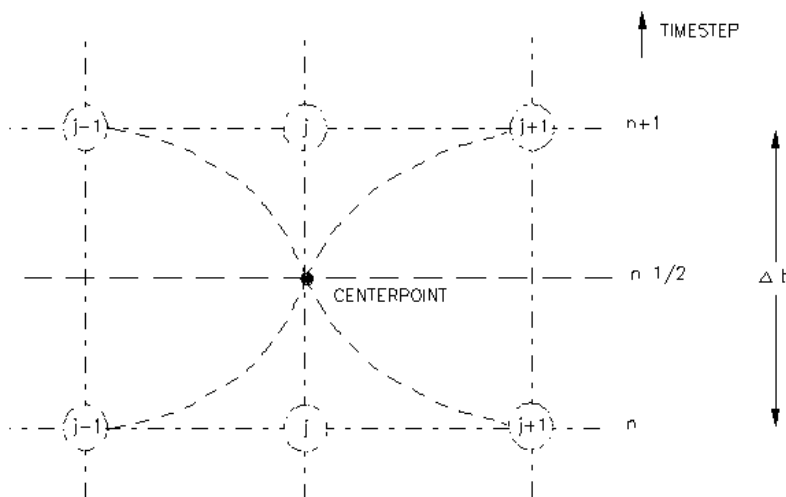
Αρχικά, διαμορφώνεται αυτόματα από το πρόγραμμα σύμφωνα με τις απαιτήσεις του χρήστη ένας υπολογιστικός κানাβος κατά μήκος του άξονα του καναλιού, αποτελούμενος από  $Q$  και

$h$  υπολογιστικά σημεία. Στα  $Q$  και  $h$  σημεία υπολογίζονται η παροχή και το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας του νερού αντίστοιχα, σε κάθε χρονικό βήμα. Η απόσταση μεταξύ των  $h$  σημείων ορίζεται έμμεσα από το χρήστη ενώ τα  $Q$  σημεία τοποθετούνται αυτόματα στο μέσο της απόστασης μεταξύ των  $h$  σημείων. Η σχηματική αναπαράσταση του υπολογιστικού κানাβου απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 2.5.



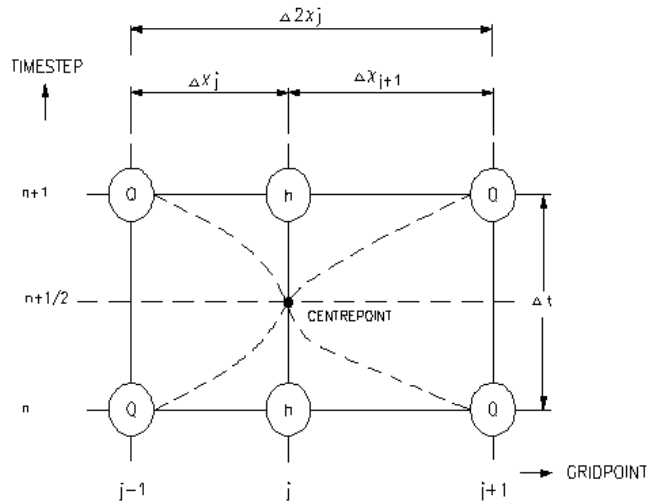
**Σχήμα 2.5** Υπολογιστικός κানাβος σε τμήμα καναλιού (Πηγή: MIKE by DHI 2014a).

Το χρησιμοποιούμενο σχήμα αριθμητικής επίλυσης είναι ένα σχήμα 6 συνολικά σημείων διαμορφωμένο από τον Abbott, το οποίο απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 2.6.

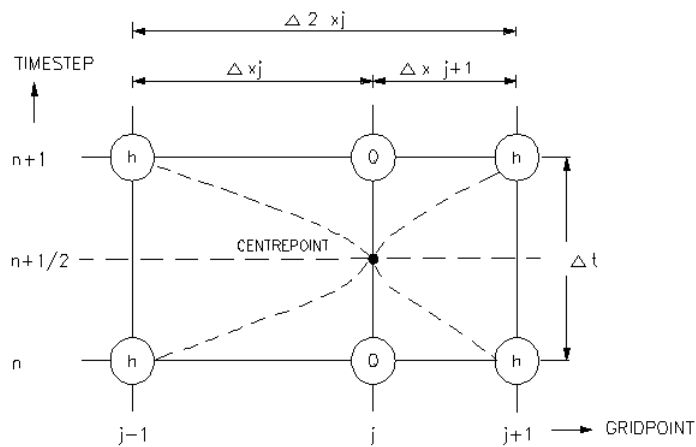


**Σχήμα 2.6** Κεντραρισμένο αριθμητικό σχήμα επίλυσης 6 σημείων Abbott (Πηγή: MIKE by DHI 2014a).

Για την εξίσωση Συνέχειας κέντρο του σχήματος επίλυσης αποτελεί ένα  $h$  σημείο ενώ αντίστοιχα για την επίλυση της εξίσωσης ορμής κέντρο αποτελεί ένα  $Q$  σημείο, όπως φαίνεται ακολούθως στα Σχήματα 2.7 και 2.8.



**Σχήμα 2.7** Κέντρο σχήματος επίλυσης για την εξίσωση Συνέχειας (Πηγή: MIKE by DHI 2014a).



**Σχήμα 2.8** Κέντρο σχήματος επίλυσης για την εξίσωση Ορμής (Πηγή: MIKE by DHI 2014a).

Για λόγους πληρότητας και ακρίβειας στο αντίστοιχο σχήμα επίλυσης οι εξισώσεις επιλύονται δύο τουλάχιστον φορές σε κάθε χρονικό βήμα. Την πρώτη φορά λύνονται με αρχικές τιμές αυτές του προηγούμενου χρονικού βήματος και τη δεύτερη φορά με αρχικές τιμές αυτές της πρώτης επίλυσης. Ο αριθμός των επαναλήψεων μπορεί να καθοριστεί από το χρήστη.

Συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά του MIKE 11 τα οποία είτε χρησιμοποιούνται από το MIKE FLOOD είτε περιορίζονται από αυτό, είναι τα ακόλουθα:



- Έχει ολοκληρωμένες και δοκιμασμένες ρουτίνες.
- Μπορεί να προσομοιώσει μεγάλου μήκους και πολύπλοκα ποτάμια συστήματα με μικρή υπολογιστική προσπάθεια.
- Μπορεί να προσομοιώσει με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια τη μονοδιάστατη ροή καναλιού.
- Μπορεί εύκολα να διασυνδεθεί με προγράμματα βροχής απορροής.
- Μπορεί να προσομοιώσει υψηλές ταχύτητες και υπερκρίσιμη ροή.
- Είναι μονοδιάστατο, επομένως δε μπορεί να προσομοιώσει διδιάστατα φαινόμενα, όπως για παράδειγμα η ροή ορμής εγκάρσια του ποταμού.
- Η ροή στο πεδίο είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί αν η γνώση των περιοχών ροής είναι ελλιπής.
- Απαιτούνται περισσότερες προσεγγίσεις και καλύτερη αποσαφήνιση των συνθηκών ροής.
- Δε μπορεί να προσομοιωθεί εύκολα μια παράκτια περίπτωση (MIKE by DHI 2014a, MIKE by DHI 2014c).

Η ροή εντός του πεδίου μοντελοποιείται με το πακέτο λογισμικού MIKE 21. Ως δεδομένα εισόδου απαιτούνται από το πρόγραμμα ο υπολογιστικός κάναβος, ο οποίος διαμορφώνεται από το χρήστη, το χρονικό βήμα των υπολογισμών για τις εξισώσεις Αβαθών Υδάτων και Μεταφοράς καθώς επίσης και κάποιες υδροδυναμικές παράμετροι σε συνδυασμό με την κατανομή του συντελεστή τραχύτητας στην έκταση του πεδίου. Η διαμόρφωση του υπολογιστικού κανάβου από το χρήστη καθώς επίσης και πιο αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο.

Η επίλυση της ροής στο πεδίο βασίζεται στην επίλυση των 2D Εξισώσεων Αβαθών Υδάτων (*Saint Venant*). Η χωρική διακριτοποίηση πραγματοποιείται με τη χρήση μεθόδου πεπερασμένων όγκων με κέντρο το υπολογιστικό κελί. Το χωρικό πεδίο διακριτοποιείται με την υποδιαίρεση του συνεχούς συνόλου σε μη επικαλυπτόμενα στοιχεία (κελιά). Συγκεκριμένα, διαμορφώνεται κάναβος τετραγωνικών ή τριγωνικών στοιχείων. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι από το MIKE 21 παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη να διαμορφώσει είτε σταθερό τετραγωνικό κάναβο (*Rectangular Grid*) είτε ευέλικτο υπολογιστικό πλέγμα ορθογωνικών ή τριγωνικών στοιχείων (*Flexible Mesh*). Ανάλογα με την περίπτωση που προσομοιώνεται και τα διαθέσιμα στοιχεία, επιλέγεται από το χρήστη ποιος τύπος υπολογιστικού πλέγματος θα χρησιμοποιηθεί.

Οι δυνατότητες και οι περιορισμοί του σταθερού τετραγωνικού κανάβου οι οποίες σχετίζονται με το MIKE FLOOD και επηρεάζουν την προσομοίωση σε αυτό είναι οι ακόλουθοι:

- Παρέχει τη δυνατότητα ανάλυσης χαρακτηριστικών μικρής κλίμακας.
- Λιγότερη ευελιξία.
- Δυσκολία μοντελοποίησης στενών καναλιών και περιοχών ροής, π.χ. σε περιπτώσεις που ροή πραγματοποιείται διαγώνια σε σχέση με τον κανάβο.
- Τα όρια θα πρέπει να είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένα με τον κανάβο.

Αντίστοιχα, οι δυνατότητες του ευέλικτου πλέγματος οι οποίες αφορούν την προσομοίωση στο MIKE FLOOD είναι οι ακόλουθες:

- Προσαρμόζόμενο χρονικό βήμα (*Adaptive Time Step*) έτσι ώστε το χρονικό βήμα του 2D τμήματος να προσαρμόζει τη δυναμική των υπολογισμών της ροής.
- Τα όρια μπορούν αν έχουν οποιαδήποτε στοίχιση.
- Το περίγραμμα του ποταμού ενσωματώνεται στο πλέγμα.
- Με λεπτό πλέγμα καθίσταται δυνατή η επίλυση ποταμών και ρεμάτων εντός του πλέγματος.

Το βασικό πλεονέκτημα του ευέλικτου πλέγματος έναντι του σταθερού είναι η δυνατότητα διαμόρφωσης μεγάλης έκτασης υπολογιστικού κελιού σε περιοχές που ο χρήστης κρίνει ότι χρειάζεται πιο αδρομερής λύση, π.χ. σε περιοχές μεγάλων υψομέτρων κατά τη μελέτη της διάδοσης ενός πλημμυρικού κύματος. Αντίστοιχα, σε περιοχές όπου είναι απαραίτητη μεγάλη λεπτομέρεια και ακρίβεια, π.χ. γύρω από αστικές περιοχές, αυτό είναι δυνατό να επιτευχθεί με τη χρήση κελιού μικρού εμβαδού. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η μείωση του υπολογιστικού χρόνου σε σημαντικό βαθμό. Για τους λόγους αυτούς, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε ευέλικτο πλέγμα τριγωνικών στοιχείων (MIKE by DHI 2014c).

Οι εξισώσεις που επιλύονται από το MIKE 21 είναι οι 2D Εξισώσεις Αβαθών Υδάτων των οποίων μια γενική μορφή περιγράφεται ακολούθως (Εξ. 2.15 έως 2.19):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(F_x^I - F_x^V)}{\partial x} + \frac{\partial(F_y^I - F_y^V)}{\partial y} = S \quad (2.15)$$

Όπου  $F$  το διάνυσμα που περιγράφει τη ροή,  $U$  το διάνυσμα που περιγράφει τις μεταβλητές που διατηρούνται και  $S$  το διάνυσμα που περιγράφει τις μεταβλητές που εισρέουν σαν πηγές

στο σύστημα. Τα  $I$ ,  $V$  υποδηλώνουν τις μεταγωγικές και λόγω συνεκτικότητας ροές. Επιπλέον, είναι:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ h\bar{u} \\ h\bar{v} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{F}_x^I = \begin{bmatrix} h\bar{u} \\ h\bar{u}^{-2} + \frac{1}{2} * g(h^2 - d^2) \\ h\bar{u}\bar{v} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_x^V = \begin{bmatrix} 0 \\ hA \left( \frac{2\partial\bar{u}}{\partial x} \right) \\ hA \left( \frac{\partial\bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial\bar{v}}{\partial x} \right) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\mathbf{F}_y^I = \begin{bmatrix} h\bar{v} \\ h\bar{v}\bar{u} \\ h\bar{v}^{-2} + \frac{1}{2} * g(h^2 - d^2) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_y^V = \begin{bmatrix} 0 \\ hA \left( \frac{\partial\bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial\bar{v}}{\partial x} \right) \\ hA \left( \frac{2\partial\bar{v}}{\partial x} \right) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ g\eta \frac{\partial d}{\partial x} + f\bar{v}h - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \\ + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + hu_s \\ g\eta \frac{\partial d}{\partial y} + f\bar{u}h - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \\ + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + hv_s \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις συνιστούν ένα πρόβλημα Riemann για την προσέγγιση της λύσης του οποίου χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Roe. Συγκεκριμένα, με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η μεταγωγική ροή στη διεπιφάνεια μεταξύ των κελιών, εκτιμώνται δηλαδή οι εξαρτημένες μεταβλητές στα αριστερά και δεξιά της διεπιφάνειας με χωρική ακρίβεια δεύτερης τάξης. Για τη χρονική ολοκλήρωση των εξισώσεων, δίνεται η δυνατότητα επιλογής στο χρήστη μεταξύ δύο αλγόριθμων επίλυσης: του χαμηλής τάξης, γρήγορου αλγορίθμου και της μεθόδου υψηλότερης τάξης. Η μέθοδος χαμηλής τάξης είναι μιας πρώτης τάξης ρητή μέθοδος Euler ενώ η μέθοδος υψηλότερης τάξης χρησιμοποιεί μια δεύτερης τάξης Runge-Kutta μέθοδο. Οι γενικές σχέσεις των δύο μεθόδων είναι οι ακόλουθες Εξισώσεις 2.20 και 2.21, 2.22 αντίστοιχα.

$$U_{n+1} = U_n + \Delta t G(U_n) \quad (2.20)$$

$$U_{n+1/2} = U_n + \frac{1}{2} \Delta t G(U_n) \quad (2.21)$$

$$U_{n+1} = U_n + \Delta t G(U_{n+1/2}) \quad (2.22)$$

Για λόγους ακρίβειας καθώς επίσης και για η διευκόλυνση των υπολογισμών, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να θέσει τρία συνολικά όρια για το βάθος του νερού στα κελιά, τα  $h_{dry}$ ,  $h_{flood}$ , και  $h_{wet}$ . Πιο αναλυτικά, όταν το βάθος είναι μικρότερο από το  $h_{dry}$  σε ένα κελί, το κελί θεωρείται στεγνό και αφαιρείται από τους υπολογισμούς ενώ στη συνέχεια το πρόβλημα επαναπροσδιορίζεται. Αντίστοιχα, όταν το βάθος νερού σε ένα κελί είναι μεγαλύτερο από το  $h_{dry}$  και μικρότερο από το  $h_{wet}$  το κελί θεωρείται μερικώς υγρό και υπολογίζονται για αυτό μόνο οι ροές μάζας ενώ οι ροές ορμής θεωρούνται μηδενικές. Τέλος, όταν ένα κελί έχει βάθος νερού μεγαλύτερο από το  $h_{wet}$  θεωρείται υγρό και υπολογίζονται για αυτό τόσο οι ροές μάζας όσο και οι ροές ορμής. Το  $h_{flood}$  είναι το βάθος εκείνο που καθορίζει αν το όριο του κελιού είναι υγρό ή στεγνό. Γίνεται εύκολα κατανοητό από τα παραπάνω ότι θα πρέπει να ισχύει η εξής ανισότητα:  $h_{dry} < h_{flood} < h_{wet}$ . Η τιμή που δίνεται από το χρήστη στα παραπάνω όρια είναι καθοριστικής σημασίας τόσο για την ακρίβεια της λύσης και την ταχύτητα της επίλυσης όσο και για τη σταθερότητα της προσομοίωσης (MIKE by DHI 2014b).

Συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά του MIKE 21 τα οποία είτε χρησιμοποιούνται από το MIKE FLOOD είτε περιρίζονται από αυτό, είναι τα ακόλουθα:

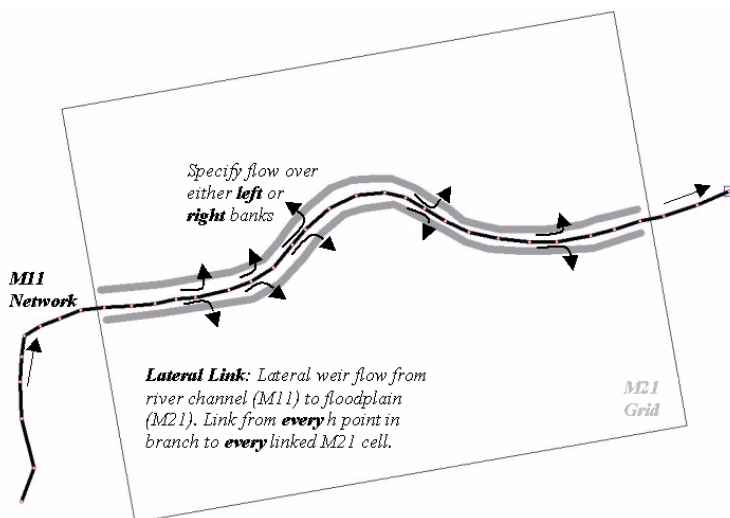
- Είναι 2D οπότε παρέχει στην προσομοίωση ακρίβεια και υψηλή ανάλυση.
- Δεν απαιτείται εκ των προτέρων γνώση των συνθηκών και των περιοχών ροής στο πεδίο.
- Είναι εύκολος ο χειρισμός υγρής και ξηρής περιοχής μέσα από δυναμικούς αλγόριθμους.
- Μπορεί να προσομοιώσει υψηλές ταχύτητες και υπερκρίσιμη ροή.
- Μπορεί να προσομοιώσει μια παράκτια περίπτωση.
- Έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος.

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας δε χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο MIKE URBAN. Αναφέρονται σε αυτό το σημείο τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του, τα οποία είναι τα εξής:

- Εμπεριέχει πλήρεις περιγραφές για ροή σε κλειστούς αγωγούς και διάφορες κατασκευές.

- Μπορεί να προσομοιώσει ιδιαίτερα περίπλοκα αστικά δίκτυα αγωγών.
- Μπορεί να συνδεθεί εύκολα με προγράμματα βροχής απορροής.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση ανοιχτών τμημάτων.
- Είναι 1D οπότε αδυνατεί να περιγράψει την 2D ροή στη χερσαία επιφάνεια.
- Αδυναμία περιγραφής της ροής και της αλληλεπίδρασης μεταξύ επιφανειακής ροής και ροής στο δίκτυο.

Σε ότι αφορά τη σύζευξη (*Coupling*) των επιμέρους μοντέλων, αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω των επτά συνολικά διαφορετικών τρόπων σύνδεσης που υπάρχουν. Για τη μελετώμενη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η πλευρική σύνδεση (*Lateral Link*), η οποία και περιγράφεται παρακάτω. Με την επιλογή πλευρικής σύνδεσης (*Lateral Link*), τα στοιχεία του MIKE 21 συνδέονται πλευρικά με το επιθυμητό τμήμα ή κλάδο ποταμού του MIKE 11. Η ροή μέσω της σύνδεσης υπολογίζεται από μια σχέση υδραυλικής κατασκευής στην οποία εισάγονται παράμετροι όπως είναι ο συντελεστής απωλειών τριβής, η μέθοδος κατανομής της ροής, το κατώτατο βάθος στη σύνδεση με το οποίο εξομαλύνονται οι μεταβολές όταν η ροή αλλάζει κατεύθυνση, κ.λ.π.. Αυτός ο τρόπος σύνδεσης είναι ο πλέον κατάλληλος για την προσομοίωση της υπερχειλίσης ποταμού στο πλημμυρικό πεδίο. Στο ακόλουθο Σχήμα 2.9 φαίνονται σχηματικά τα βασικά σημεία της πλευρικής σύνδεσης (MIKE by DHI 2014b, MIKE by DHI 2014c).



**Σχήμα 2.9** Πλευρική σύνδεση (*Lateral Link*) μεταξύ των MIKE 11 και MIKE 21 (Πηγή: MIKE by DHI 2014c).

## 2.5 Συγκρίσεις λογισμικών υδραυλικής προσομοίωσης

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο οι πλημμύρες αποτελούν έναν ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα επιρροής των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και της ίδιας της ανθρώπινης ζωής. Πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες που αναπτύσσονται κοντά σε πλημμυρικά πεδία, όπως είναι για παράδειγμα η γεωργία, πλήττονται με την εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων. Επιπρόσθετα, ακόμα και στις περισσότερο αναπτυγμένες χώρες πολλοί άνθρωποι χάνουν τη ζωή τους ετησίως εξαιτίας κάποιου πλημμυρικού επεισοδίου.

Στο πλαίσιο της πρόβλεψης και της πρόληψης από τις πλημμύρες, έχουν πραγματοποιηθεί ποικίλες συγκριτικές μελέτες για τα διάφορα πακέτα λογισμικού υδραυλικής προσομοίωσης που υπάρχουν. Η σύγκριση συνοψίζεται στην ικανότητα ή μη των διάφορων πακέτων να προσομοιώσουν την εκδήλωση ενός πλημμυρικού φαινομένου καθώς επίσης και διάφορα μεγέθη που σχετίζονται με αυτό, π.χ. ταχύτητες ροής, παροχές εξόδου, κ.λ.π.. Ακολουθώς αναφέρονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από τις διάφορες μέχρι τώρα μελέτες, τα οποία αφορούν τα τρία πακέτα λογισμικού που μελετώνται στη συγκεκριμένη εργασία.

- Το 1D HEC-RAS είναι δυνατό σε σχετικά απλές τοπογραφίες να έχει ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα με τη χρήση κανάβου υψηλής ανάλυσης, έπειτα από βαθμονόμηση με υδρομετρικά δεδομένα (Horritt & Bates 2002).
- Αντίστοιχα, το LISFLOOD-FP υστερεί στην ακριβή πρόβλεψη της έκτασης της πλημμυρικής κατάκλυσης με βαθμονόμηση από υδρομετρικά δεδομένα. Κάτι τέτοιο δικαιολογείται από το σχεδιασμό και τη φύση του συγκεκριμένου μοντέλου καθώς αυτό έχει διαφορετική απόκριση στη βαθμονόμηση συγκριτικά με το 1D HEC-RAS. Επιπλέον, το LISFLOOD-FP είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στην τραχύτητα εντός του ποταμού και λιγότερο ευαίσθητο στην τραχύτητα εντός του πλημμυρικού πεδίου (Horritt & Bates 2002).
- Η βασική διαφορά στην αποτελεσματικότητα των LISFLOOD-FP και MIKE FLOOD έγκειται στην αδυναμία του LISFLOOD-FP να προσομοιώσει ταχέως μεταβαλλόμενες συνθήκες ροής και περιπτώσεις διατήρησης της ορμής οι οποίες μπορεί να εμφανιστούν σε διάφορες περιπτώσεις, π.χ. σε περίπτωση θραύσης φράγματος (Bates *et al.* 2005, Environment Agency 2013).
- Μοντέλα όπως το LISFLOOD-FP υστερούν επίσης σε περιπτώσεις όπου εμφανίζονται ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες ροής και υπερκρίσιμες συνθήκες ροής, π.χ.

κατά την εκδήλωση αστικής πλημμύρας (Bates *et al.* 2005, Environment Agency 2013).

- Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το θέμα της σύνδεσης μεταξύ των 1D και 2D μοντέλων το οποίο γίνεται τόσο στο LISFLOOD-FP όσο και στο MIKE FLOOD. Αποτελεί ένα ζήτημα που θα έπρεπε να διερευνηθεί περαιτέρω (Environment Agency 2013).
- Για πιο περίπλοκες περιπτώσεις όπου ιδιαίτερα μεταβαλλόμενες και υπερκρίσιμες συνθήκες ροής μπορεί να υπάρξουν, συνίσταται η χρήση μοντέλων που χρησιμοποιούν τις πλήρεις εξισώσεις Saint Venant, όπως είναι το MIKE FLOOD (Environment Agency 2013).
- Για μεγάλης κλίμακας χάρτες πλημμυρικού κινδύνου, τόσο μοντέλα όπως το MIKE FLOOD όσο και μοντέλα όπως το LISFLOOD-FP μπορούν να εξάγουν ικανοποιητικά αποτελέσματα (Environment Agency 2013).
- Αντίθετα, σε περιπτώσεις που απαιτείται περισσότερη ακρίβεια στις ταχύτητες και στη ροή της ορμής, όπως είναι για παράδειγμα η εκτίμηση της έκτασης της πλημμυρικής κατάκλυσης, η εκτίμηση των πλημμυρικών κινδύνων, η διαμόρφωση λεπτομερών πλημμυρικών χαρτών, η στρατηγική εκτίμηση των κινδύνων, οι χάρτες πλημμυρικής επικινδυνότητας, ο σχεδιασμός συστήματος έκτακτης ανάγκης για real-time διαχείριση πλημμυρών καθώς επίσης και περιπτώσεις όπως η πλημμυρική κατάκλυση ταμιευτήρα, συνίσταται η χρήση μοντέλων που χρησιμοποιούν τις πλήρεις εξισώσεις Saint Venant, όπως είναι το MIKE FLOOD (Environment Agency 2013).

### 3. Εφαρμογή πλημμυρικών μοντέλων στην περιοχή μελέτης

#### 3.1 Περιγραφή Περιοχής Μελέτης

Το Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας όπως καθορίστηκε με το Ν.1739/1987 (ΦΕΚ 201/Α/20-11-1987), με έκταση 12.377 km<sup>2</sup> αποτελεί το δεύτερο μεγαλύτερο Υδατικό Διαμέρισμα της χώρας. Τα όριά 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). Στον ακόλουθο Χάρτη 3.1, απεικονίζονται τα όρια των υδατικών και γεωγραφικών διαμερισμάτων.



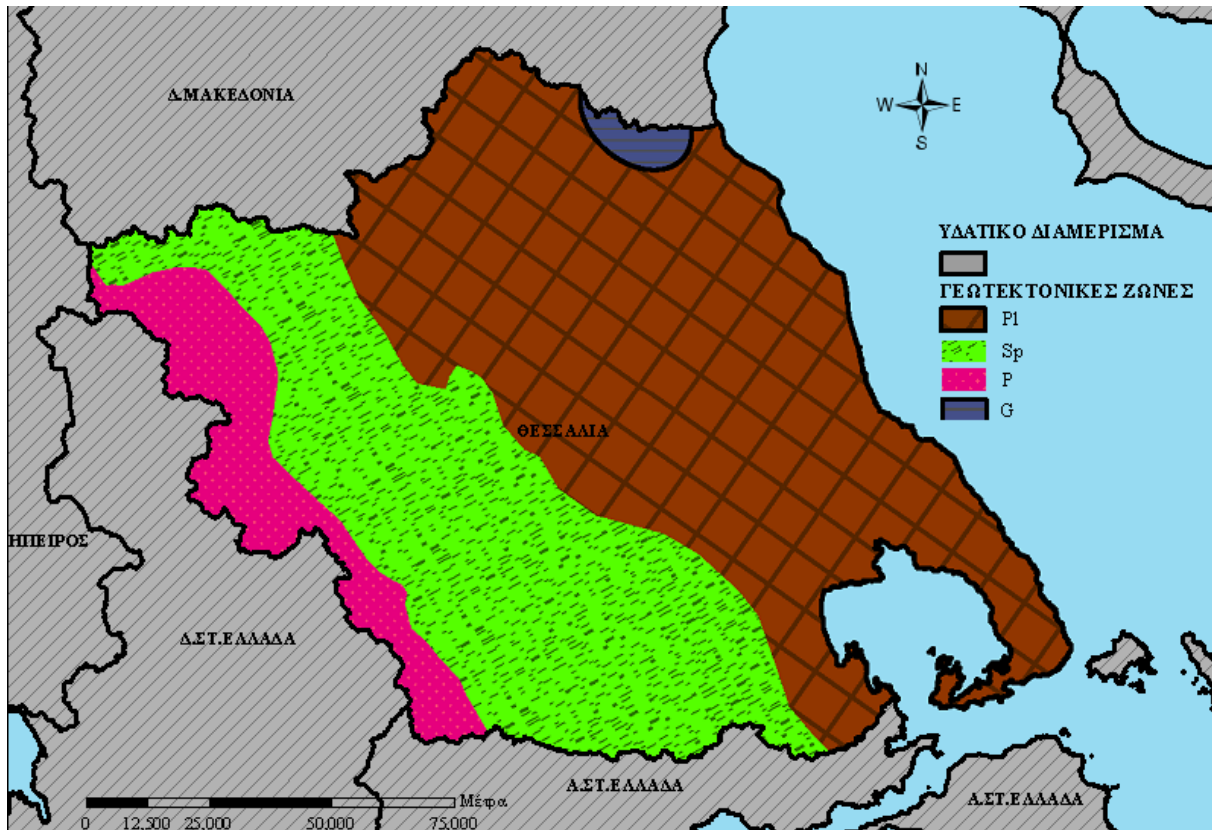
Χάρτης 3.1 Λεκάνες απορροής Υδατικών Διαμερισμάτων (Πηγή: Οικονόμου 2013, [www.geodata.gov.gr](http://www.geodata.gov.gr) - επεξεργασμένα στοιχεία).



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 τη 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 (Κουτσογιάννης κ.α. 2008, Οικονόμου 2013).

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.



**Χάρτης 3.2** Γεωτεκτονικές Ζώνες Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (Πηγή: Οικονόμου 2013, [www.geodata.gov.gr](http://www.geodata.gov.gr) - [www.geo.auth.gr/museum/MuseumGeol\\_Paleont\\_files/page0004.htm](http://www.geo.auth.gr/museum/MuseumGeol_Paleont_files/page0004.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 παλαιό περιβάλλον απόθεσης που αντιπροσωπεύουν και τη γεωτεκτονική ιστορία τους. Όπως φαίνεται και στον προηγούμενο Χάρτη 3.2, καταγράφονται οι παρακάτω ζώνες:

- (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.

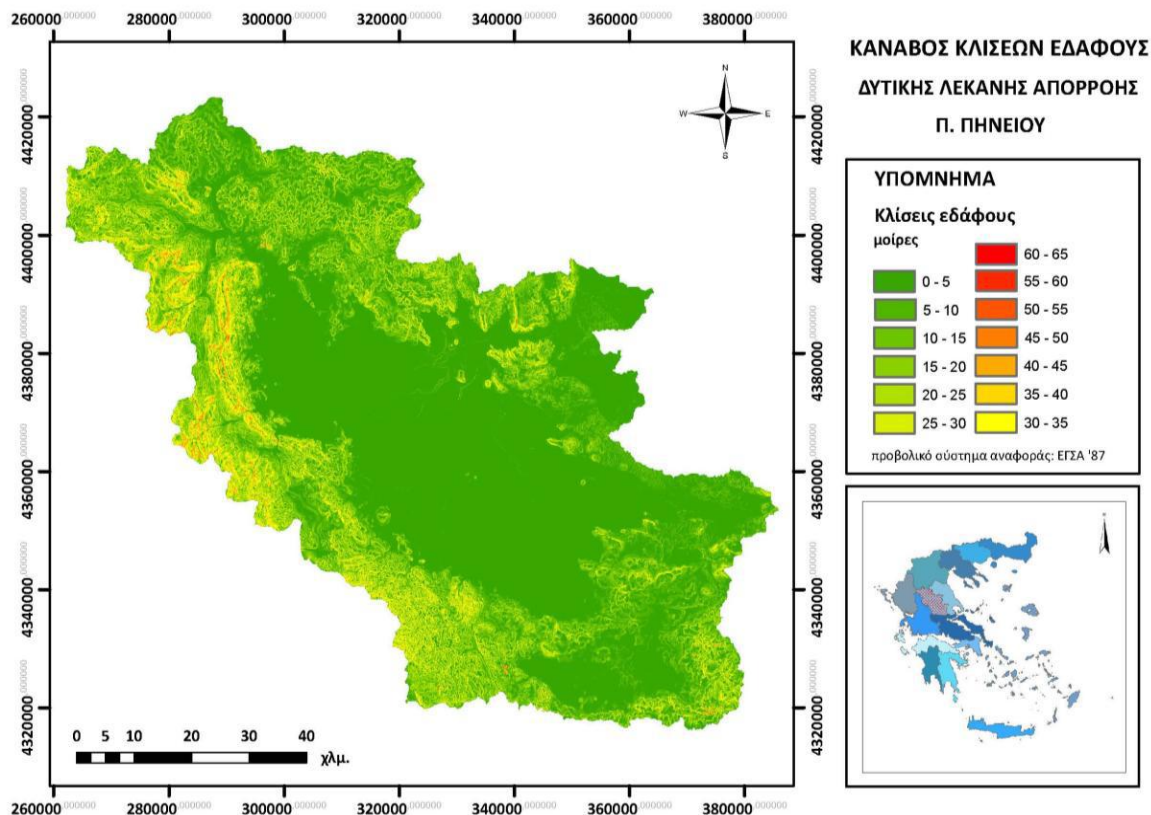
Στο Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας καταγράφονται σημαντικοί προσχωματικοί υδροφορείς. Η κοιλάδα της Θεσσαλίας χωρίζεται σε δύο κύριες υδρογεωλογικές λεκάνες, τη

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 (Κουτσογιάννης κ.α. 2008, Οικονόμου 2013).

### 3.1.1 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 (ΥΠΕΧΩΔΕ 2006).

Όπως φαίνεται και στον κানাβο κλίσεων εδάφους στον ακόλουθο Χάρτη 3.3 που δημιουργήθηκε από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, η Δυτική Λεκάνη της Θεσσαλίας αποτελείται από τη δυτική πεδιάδα με πολύ μικρές κλίσεις η οποία περιβάλλεται περιμετρικά από οροσειρές με αυξανόμενες κλίσεις, ενώ στα κατάντη τα Χαλκηδόνια όρη τη διαχωρίζουν από την Ανατολική Λεκάνη.



**Χάρτης 3.3** Κλίσεις εδάφους Δυτικής λεκάνης Θεσσαλίας (Πηγή: Οικονόμου 2013).

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 υδροφορέων 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 υδροφορέων 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 Νεοχωρίτη 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 και απορροής όπως φαίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3.1** Χαρακτηριστικά υπολεκανών Δυτικής Λεκάνης Απορροής Πηνειού (Πηγή: ΥΠΕΧΩΔΕ 2006, Οικονόμου 2013).

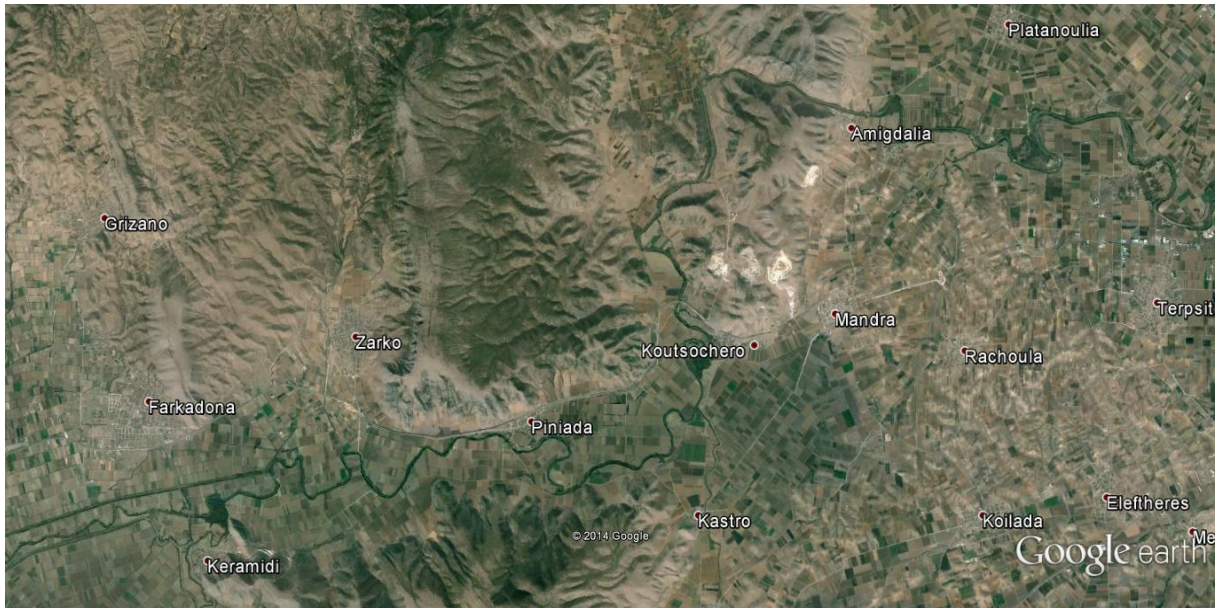
Λεκάνη	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Μέση Βροχόπτωση (mm/y)	Μέση Απορροή (mm/y)	Συντελεστής Απορροής
Υπολεκάνη κυρίου κλάδου Πηνειού και παραποτάμων του ανάντη της θέσης Αλή Εφέντη	2800	939	421	0.43
Υπολεκάνη Ενιπέα και άλλων παραποτάμων Πηνειού κατάντη της θέσης Αλή Εφέντη και ανάντη της θέσης Αμυγδαλιά	3500	651	129	0.2
<b>Δυτική Λεκάνη Πηνειού</b>	6300	779	259	0.33

### 3.1.2 Περιοχή Μελέτης

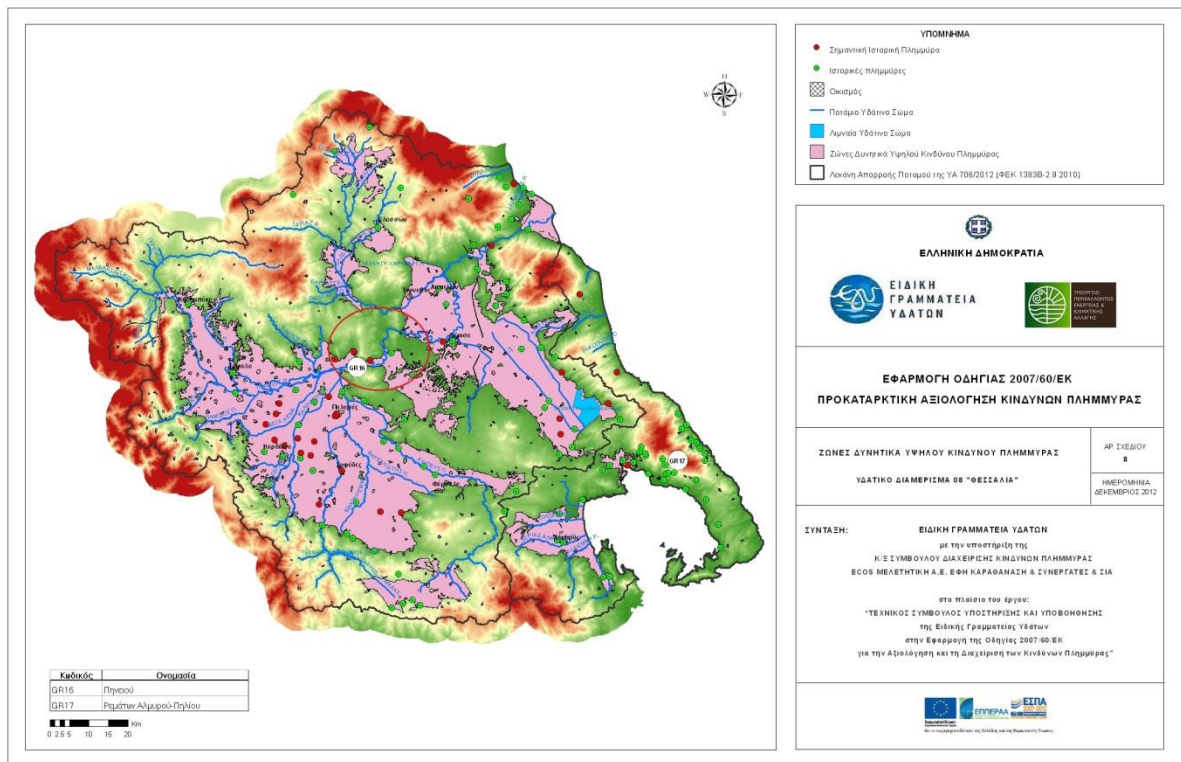
Η περιοχή μελέτης εντάσσεται στη Δυτική Λεκάνη του Υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας, στα όρια των Νομών Τρικάλων και Λάρισας. Αφορά το πλέον κατάντη τμήμα του ποταμού Πηνειού στην Δυτική Λεκάνη της Θεσσαλίας. Ξεκινάει στα ανάντη από τη θέση Αλή Εφέντη έως τη θέση Αμυγδαλιά στα κατάντη.

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.

Η περιοχή μελέτης αποτελεί τμήμα της 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 τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας (2007/60/ΕΚ) και πρόκειται για την πλέον κατάντη θέση της Δυτικής ζώνης. Συνολικά η περιοχή μελέτης και οι ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας του Υδ. Διαμερίσματος απεικονίζονται στους παρακάτω Χάρτες 3.4 και 3.4.



Χάρτης 3.4 Περιοχή Μελέτης.



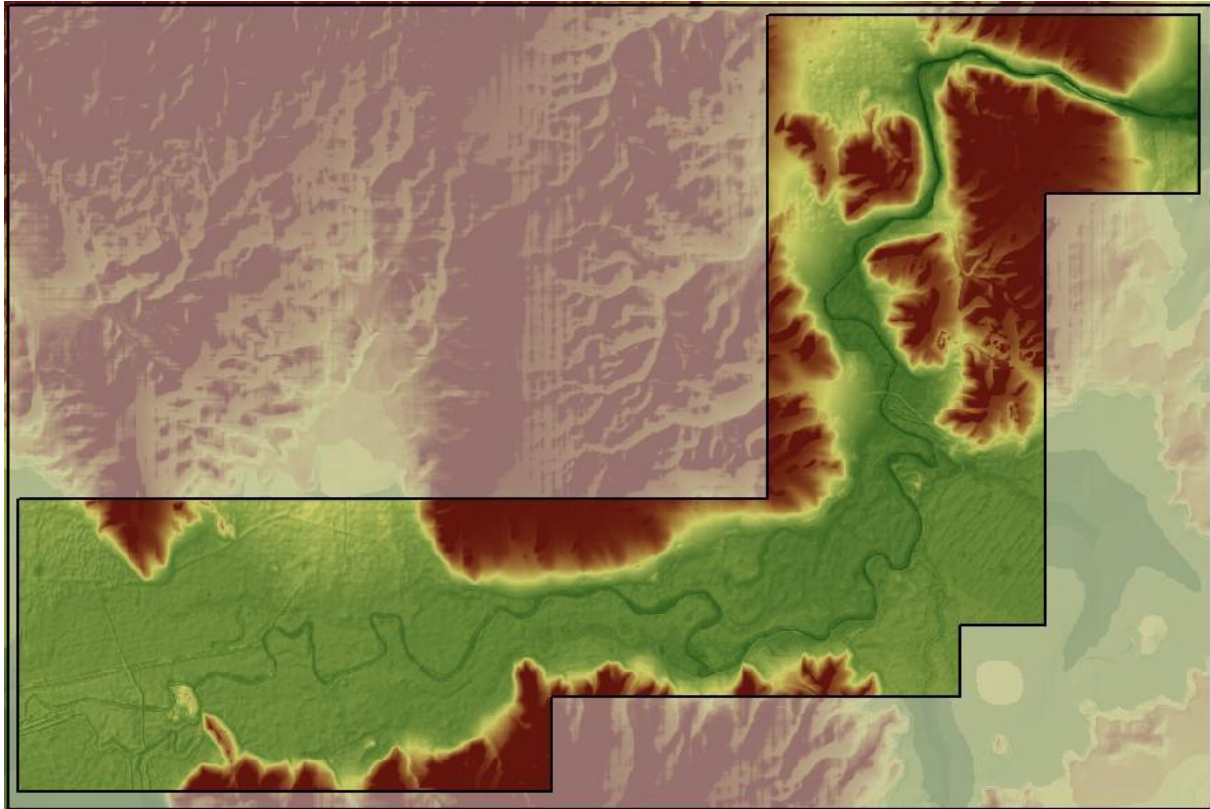
Χάρτης 3.5 Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (Πηγή: Ειδική Γραμματεία Υδάτων 2012).

### **3.2 Υδραυλική Προσομοίωση Περιοχής Μελέτης**

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η υδραυλική προσομοίωση της περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκε σε τρία συνολικά μοντέλα: στο μονοδιάστατο HEC-RAS, και στα μοντέλα σύζευξης LISFLOOD-FP και MIKE FLOOD. Σε ότι αφορά την προσομοίωση στα HEC-RAS και LISFLOOD-FP, η διαδικασία που περιγράφεται στις αντίστοιχες παραγράφους σε ότι αφορά τις συνθήκες μόνιμης ροής, διεκπεραιώθηκε στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής εργασίας του Οικονόμου (2013). Ακολούθως περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση σε κάθε ένα από τα μελετώμενα υδραυλικά μοντέλα.

#### *3.2.1 Τοπογραφική Αποτύπωση Περιοχής Μελέτης*

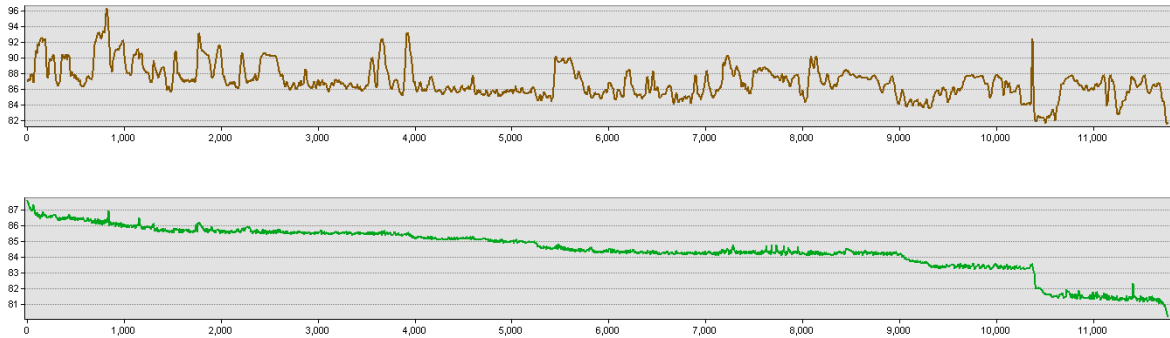
Η μορφολογία της περιοχής μελέτης περιγράφεται μέσω ενός Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους, όπως αυτό δόθηκε από το Ε.Κ.Χ.Α. Α.Ε., κανονικοποιημένης μορφής (grid) και ανάλυσης [5m×5m], από το οποίο αντλήθηκαν όλα τα απαραίτητα γεωμετρικά δεδομένα για την υδραυλική προσομοίωση της περιοχής. Παρακάτω, στο Χάρτη 3.6 απεικονίζεται το Ψ.Μ.Ε. της περιοχής μελέτης.



**Χάρτης 3.6** Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους περιοχής μελέτης (Πηγή: Οικονόμου 2013, δεδομένα - [www.geodata.gov.gr](http://www.geodata.gov.gr)).

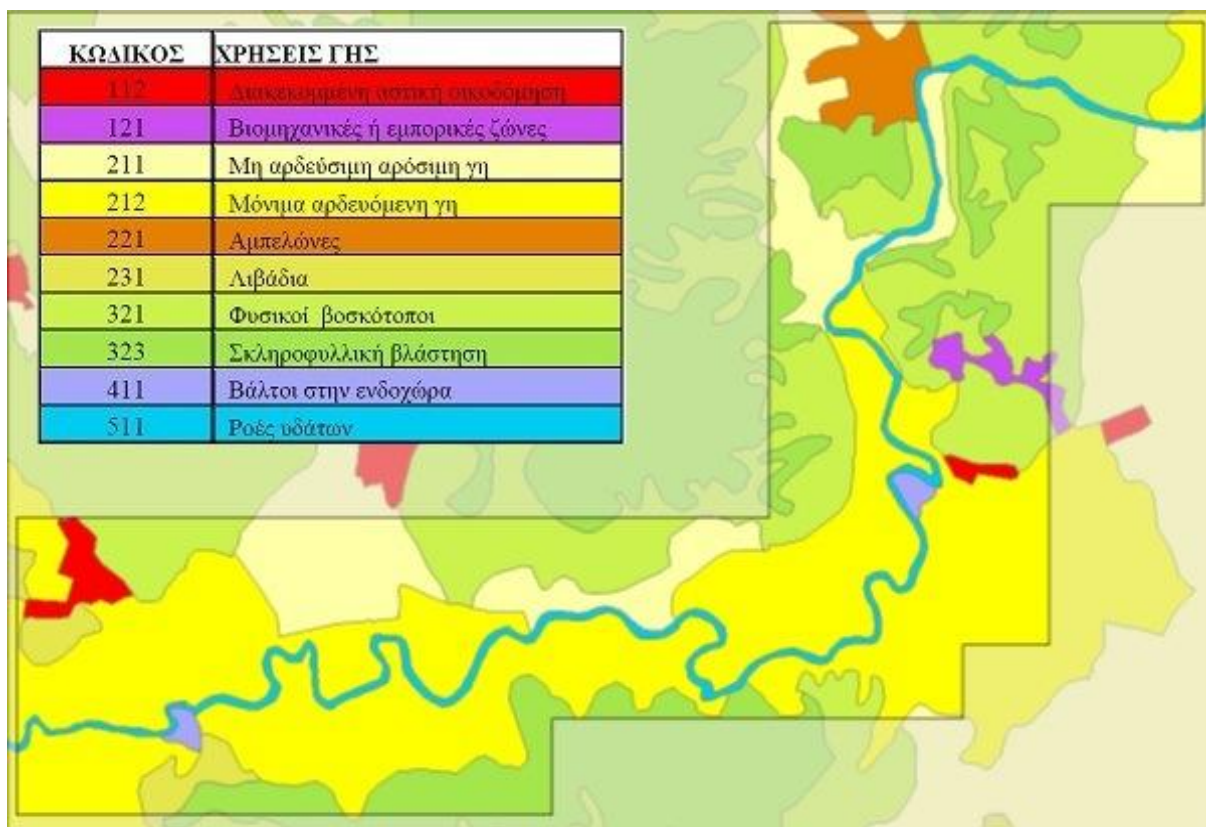
Από τον έλεγχο των παραγόμενων δεδομένων προέκυψε ότι η ακρίβεια του Ψ.Μ.Ε. στην υψομετρική διεύθυνση δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Το πρόβλημα εστιάζεται στη κατεύθυνση ροής του κυρίως κλάδου του υδατορεύματος (ποταμός Πηνειός), η μηκοτομή του οποίου παρουσιάζει έντονη μεταβολή της κλίσης, 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 στο Σχήμα 3.1. Η παραπάνω επεξεργασία με σκοπό τη διόρθωση του Ψ.Μ.Ε. έγινε στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής εργασίας του Οικονόμου (2013). Τα αποτελέσματα της περιγραφόμενης διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.





**Σχήμα 3.1** Μηκοτομές υδατορεύματος περιοχής μελέτης από το αρχικό και επεξεργασμένο Ψ.Μ.Ε. (Πηγή: Οικονόμου 2013).

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. Η αρχική εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας του Manning για τις επιμέρους κατηγορίες χρήσεων γης που καταγράφονται στην περιοχή μελέτης, φαίνονται στον Πίνακα 3.2. Αντίστοιχα, στο Χάρτη 3.7 απεικονίζεται ο χάρτης των χρήσεων γης της περιοχής μελέτης (Yan Huang 2005).



**Χάρτης 3.7** Αποτύπωση πολυγώνων χρήσεων γης στην περιοχή μελέτης (Δεδομένα: [www.geodata.gov.gr](http://www.geodata.gov.gr)).

**Πίνακας 3.2** Συντελεστής τραχύτητας σε συνάρτηση με τη χρήση γης (Δεδομένα: Yan Huang 2005).

Κωδικός	Χρήση	Συντελεστής n Manning
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.015
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0.2
211	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	0.035
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	0.03
221	Αμπελώνες	0.1
231	Λιβάδια	0.033
321	Φυσικοί βοσκότοποι	0.035
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	0.085
411	Βάλτοι στην ενδοχώρα	0.05
511	Ροές υδάτων	0.027

### 3.2.2 Αρχική Επεξεργασία Διαθέσιμων Στοιχείων

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, τα στοιχεία που ήταν αρχικά διαθέσιμα ήταν: το επαναδομημένο Ψ.Μ.Ε. ανάλυσης [5m×5m] της περιοχής μελέτης, καθώς επίσης και το αρχείο με τα πολύγωνα των χρήσεων γης όπως αυτό προκύπτει από το Corine 2000. Στα αρχικά αυτά δεδομένα έγινε μια επεξεργασία ώστε να προκύψουν τα στοιχεία στην επιθυμητή μορφή, για εισαγωγή στα τρία επιμέρους μοντέλα. Η αρχική αυτή επεξεργασία περιγράφεται ακολούθως.

Αρχικά, 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 επιπλέον το πλάτος του ποταμού στο τμήμα της περιοχής μελέτης. Η καταγραφή έγινε σε περιβάλλον GIS μέσω WMS (*Web Mapping Service*) σε γεωγραφικό σύστημα WGS84 ([gis.ktimanet.gr/wms/wmsopen/wmserver.aspx](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. Σαν αποτέλεσμα προέκυψε το αρχείο (shapefile) με τις συντεταγμένες ( $x,y$ ) των σημείων του άξονα του ποταμού.

Στη συνέχεια επιλέχθηκαν οι κύριες διατομές του ποταμού, με τρόπο κατάλληλο ώστε να αποτυπώνονται χαρακτηριστικές θέσεις του υδατορεύματος. Πιο αναλυτικά, 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. Συνολικά χαράχθηκαν 38 κύριες διατομές. Τέλος, δημιουργήθηκε το θεματικό επίπεδο χρήσεων γης βάσει του οποίου αντιστοιχήθηκε ο συντελεστής τραχύτητας του Manning για κάθε σημείο κάθε διατομής. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η χάραξη των διατομών και η εξαγωγή των σημείων ( $x,z,n$ ) κάθε διατομής, η οποία έγινε επίσης σε περιβάλλον ArcGIS. Η περιγραφόμενη επεξεργασία με σκοπό την εξαγωγή των στοιχείων των διατομών έγινε στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής εργασίας του Οικονόμου (2013), όπου πραγματοποιείται εφαρμογή στην ίδια περιοχή μελέτης. Τα αποτελέσματα της περιγραφόμενης διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

Οι συντεταγμένες των σημείων των επιμέρους διατομών ( $x,z,n$ ) χρησιμοποιήθηκαν τόσο για την προσομοίωση στο HEC-RAS όσο και στο MIKE FLOOD. Για κάθε ένα από τα

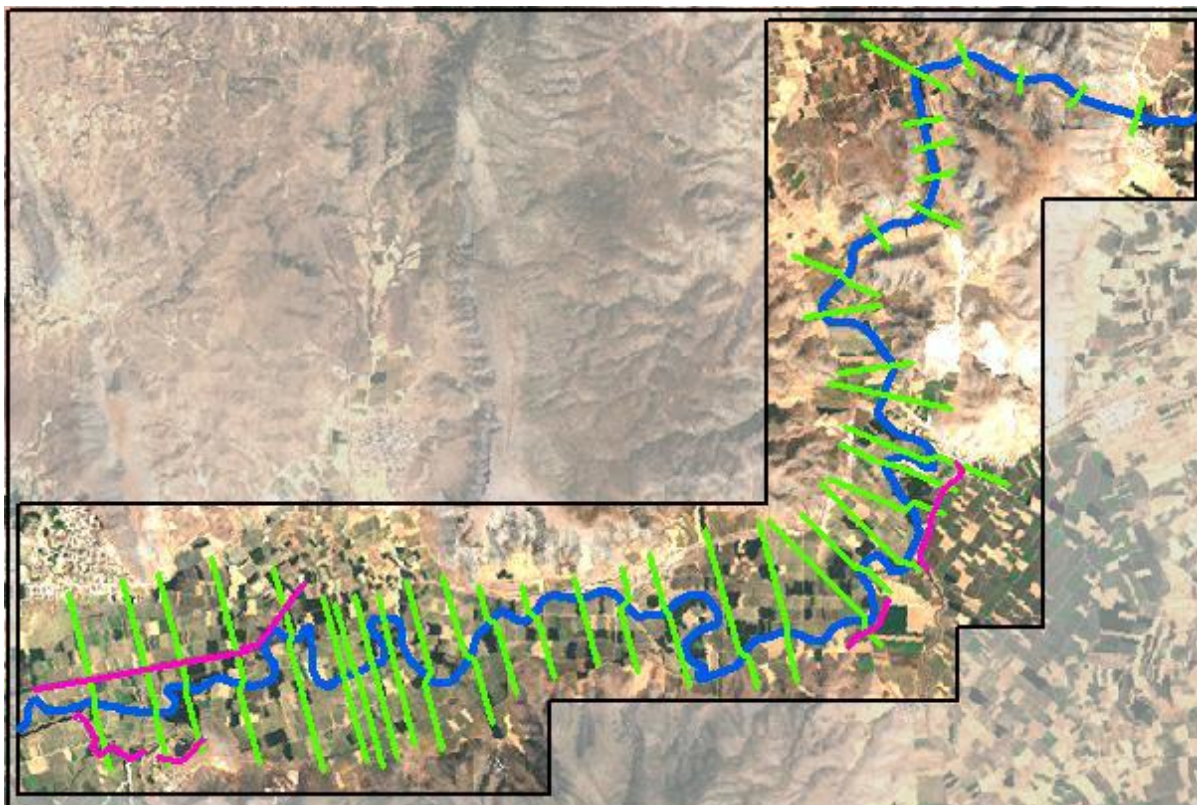
συγκεκριμένα πακέτα λογισμικού έγινε μια επιπλέον τροποποίηση των μέχρι τώρα στοιχείων των διατομών, η οποία περιγράφεται στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο. Για την προσομοίωση στο LISFLOOD-FP δεν απαιτείται η διαμόρφωση διατομών του ποταμού.

### 3.2.3 Προσομοίωση στο Υδραυλικό Μοντέλο HEC-RAS

Δεδομένα εισόδου στο μοντέλο αποτελούν τα γεωμετρικά στοιχεία του ποταμού και της ευρύτερης περιοχής εκατέρωθεν των όχθων του καθώς επίσης και οι εφαρμοζόμενες οριακές και αρχικές συνθήκες οι οποίες σχετίζονται με τις συνθήκες ροής. Το γεωμετρικό αρχείο το οποίο δημιουργείται με την εργαλειοθήκη HEC-GeoRAS σε περιβάλλον ArcGIS, περιλαμβάνει τη χάραξη του ποταμού (κοίτη και όχθες), τις διευθύνσεις ροής, τα πλευρικά αναχώματα, τις διατομές του ποταμού σε χαρακτηριστικά σημεία καθώς επίσης 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. Στο ακόλουθο Σχήμα 3.2 αποτυπώνεται το γεωμετρικό αρχείο όπως αυτό διαμορφώθηκε στο ArcGIS με την εργαλειοθήκη HEC-GeoRAS.

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 του ποταμού, των γραμμών των διατομών και των αναχωμάτων και στη συνέχεια 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.

Πιο αναλυτικά, στον *Geometric Data Editor* απεικονίζονται ο άξονας του ποταμού, οι γραμμές διατομής καθώς επίσης και οι άξονες των αναχωμάτων. Πρέπει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι για την αύξηση της ακρίβειας της λύσης, διαμορφώθηκαν εκτός από τις 38 κύριες διατομές και επιπλέον διατομές μεταξύ αυτών οι οποίες προέκυψαν από παρεμβολή. Συγκεκριμένα, διαμορφώθηκαν διατομές ανά 10m με παρεμβολή μεταξύ των κύριων, αυτόματα από το πρόγραμμα με την αντίστοιχη επιλογή.

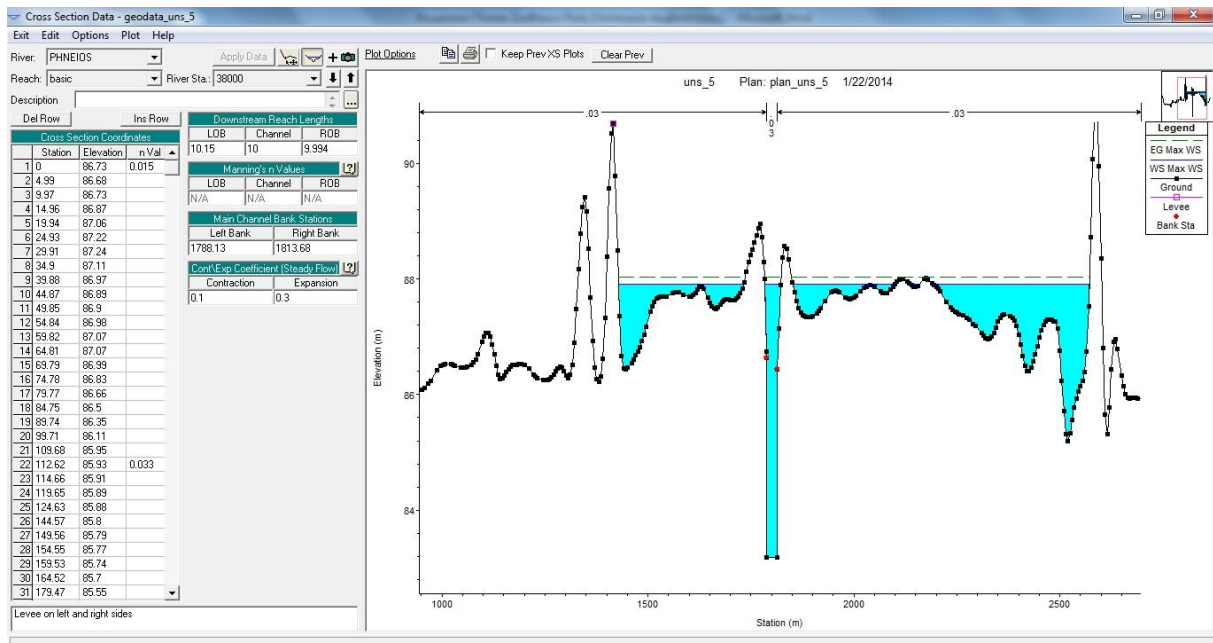


**Σχήμα 3.2** Περιοχή μελέτης με τον ποταμό Πηνειό, τις χαρακτηριστικές διατομές και τα αναχώματα (Πηγή: Οικονόμου 2013).

Στον *Cross Section Editor*, στην καρτέλα κάθε διατομής καταγράφονται ο κλάδος του ποταμού που ανήκει η διατομή, ο κωδικός αριθμός της διατομής, σύμφωνα με τη χιλιομετρική της θέση, πίνακας με όλα τα σημεία της διατομής (απόσταση από το πρώτο αριστερό σημείο στην προς την 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. Με τη χρήση του *Cross Section* και του *Geometric Data Editor* δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επέμβει και ενδεχομένως να διορθώσει το γεωμετρικό αρχείο αν είναι διαθέσιμα στοιχεία μεγαλύτερης ακρίβειας. Στο παρακάτω Σχήμα 3.3 φαίνεται η καρτέλα μιας διατομής εντός του μοντέλου HEC-RAS και τα γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά της.

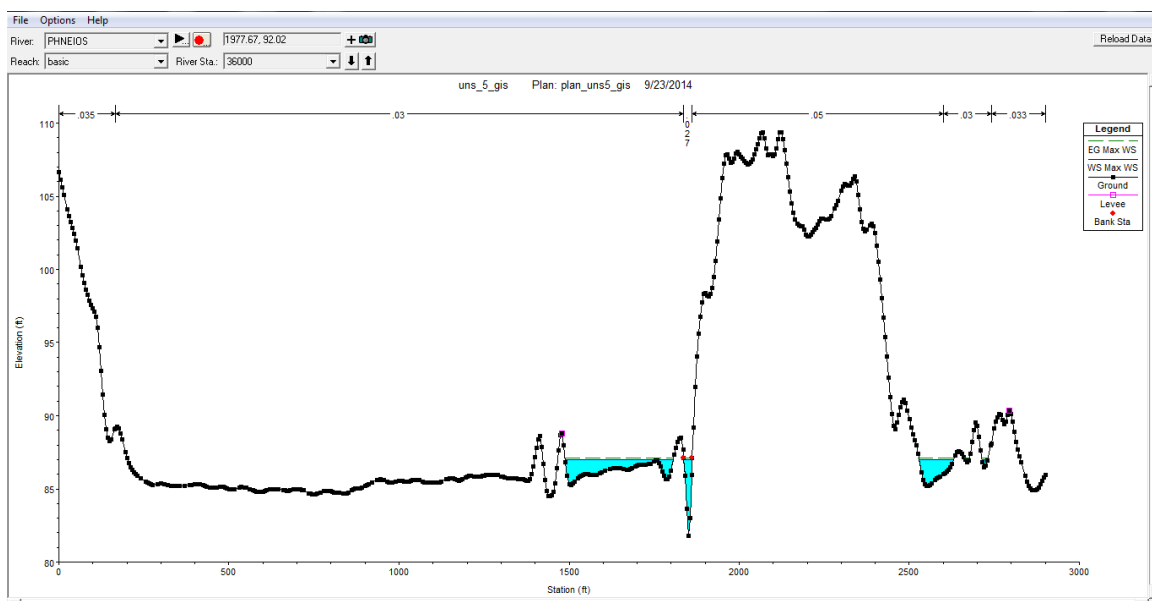
Πρέπει σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας του Οικονόμου (2013), το σύνολο των διατομών διαμορφώθηκαν να είναι ορθογωνικές. Εφόσον

στο LISFLOOD-FP γίνεται η παραδοχή ορθογωνικής διατομής αυτόματα από το μοντέλο, κάτι τέτοιο επιλέχθηκε έτσι ώστε τα αποτελέσματα που συγκρίθηκαν στην εν λόγω εργασία να προκύπτουν για την ίδια γεωμετρία ποταμού.



**Σχήμα 3.3** Διαμόρφωση ορθογωνικής διατομής στο HEC-RAS Cross Section Editor (Πηγή: Οικονόμου 2013).

Στην παρούσα εργασία, σε ότι αφορά το μοντέλο HEC-RAS στις επιπλέον προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν έγιναν με τις διατομές διαμορφωμένες όπως αυτές προέκυψαν από τη χάραξη των διατομών στο Ψ.Μ.Ε., όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.4.



**Σχήμα 3.4** Διαμόρφωση διατομής στο HEC-RAS Cross Section Editor.

Δεδομένου ότι οι διατομές δημιουργήθηκαν με βάση το Ψ.Μ.Ε. κανονικοποιημένης μορφής και ανάλυσης [5m×5m] 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 από το μοντέλο θέτοντας όρια ανοχής, ως προς τη 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). Η αυτοματοποιημένη διαδικασία επιλέχθηκε και στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας.

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 δικτύου, στην περίπτωση υποκρίσιμης ροής ζητείται ο καθορισμός οριακών συνθηκών στο πλέον κατάντη άκρο του δικτύου, ενώ στην περίπτωση μικτής ροής απαιτείται ορισμός και στα δύο άκρα.

(α) Μόνιμη Ροή: Για συνθήκες μόνιμης ροής, οι οποίες και επιλέχθηκαν στη μεταπτυχιακή εργασία του Οικονόμου (2013), οι οριακές συνθήκες που μπορούν να ορισθούν αναφέρονται ακολούθως:

- (i) το Γνωστό Πιεζομετρικό Φορτίο (*Known Water Surface Elevation*) για κάθε προσομοίωση και υδραυλική ανάλυση συγκεκριμένου επεισοδίου βροχόπτωσης.
- (ii) 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.
- (iii) το Ομοιόμορφο Βάθος (*Normal Depth*), το οποίο υπολογίζεται για κάθε υδραυλική ανάλυση και 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.
- (iv) η καμπύλη Στάθμης - Παροχής (*Rating Curve*), από την οποία υπολογίζεται το πιεζομετρικό φορτίο για κάθε παροχή.

Επιλέχθηκαν τελικά για τον υπολογισμό μικτής ροής, ως οριακές συνθήκες, σταθερή παροχή εισόδου στα ανάντη και το ομοιόμορφο βάθος στα κατάντη, μέσω καθορισμού της κλίση του

πυθμένα του υδατορεύματος. Πιο αναλυτική αναφορά στις τιμές της παροχής εισόδου θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο.

(β) Μη Μόνιμη Ροή: Για συνθήκες μη μόνιμης ροής υπό τις οποίες έγινε εκ νέου προσομοίωση, υφίστανται τα ακόλουθα είδη οριακών συνθηκών:

- (i) το Υδρογράφημα Στάθμης (*Stage Hydrograph*), είτε σαν ανάντη είτε σαν κατόντη οριακή συνθήκη,
- (ii) το Υδρογράφημα Παροχής (*Flow Hydrograph*), είτε στα ανάντη είτε στα κατόντη
- (iii) το Υδρογράφημα Στάθμης – Παροχής (*Stage – Flow Hydrograph*), το οποίο μπορεί επίσης να ορισθεί είτε στα ανάντη είτε στα κατόντη και το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν δεδομένα στάθμης και είναι επιθυμητή μια πρόβλεψη πλημμύρας.
- (iv) η καμπύλη Στάθμης – Παροχής (*Rating Curve*), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα κατόντη
- (v) το Ομοιόμορφο Βάθος (*Normal Depth*) από το οποίο υπολογίζεται μια τιμή στάθμης για κάθε τιμή παροχής που υπολογίζεται από το πρόγραμμα. Προσεγγιστικά, αντί της κλίσης της γραμμής ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κλίση της ελεύθερης επιφάνειας και εναλλακτικά η κλίση του πυθμένα του υδατορεύματος.

Η προσομοίωση για μη μόνιμες συνθήκες ροής πραγματοποιήθηκε τόσο για σταθερή εισροή όσο και για συγκεκριμένα υδρογραφήματα. Σε όλες τις προσομοιώσεις έγινε η θεώρηση μικτής ροής. Η παρουσίαση και ανάλυση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων θα γίνει στο αντίστοιχο κεφάλαιο.



### 3.2.4 Προσομοίωση στο Υδραυλικό Μοντέλο LISFLOOD-FP

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

Η γεωμετρία των πλημμυρικών πεδίων εισάγεται μέσω ενός αρχείου κειμένου, μορφής *.ascii*, το οποίο καταγράφει την περιοχή υπό μορφή κανάβου (επέκταση αρχείου *.dem.ascii*). Αξιοποιείται πλήρως το επεξεργασμένο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, το οποίο εξάγεται στη συγκεκριμένη μορφή, κρατώντας τη χωρική ανάλυση του Ψ.Μ.Ε., απευθείας μέσω του λογισμικού ArcMap. Σε ένα όμοιο αρχείο καταγράφεται σε μορφή κανάβου ίδιας ανάλυσης με το Ψ.Μ.Ε. η τιμή του συντελεστή τραχύτητας του Manning (επέκταση αρχείου *.n.ascii*). Σε ότι αφορά τα ήδη υπάρχοντα αποτελέσματα από το LISFLOOD-FP πρέπει να πρέπει να αναφερθεί ότι στην τοπογραφία της περιοχής μελέτης όπως αυτή εισάχθηκε στο μοντέλο, δεν έχουν συμπεριληφθεί τα υφιστάμενα αναχώματα (Οικονόμου 2013).

Η γεωμετρία του καναλιού, το οποίο όπως αναφέρθηκε αποτελεί μια διανυσματική οντότητα, εισάγεται με δεδομένα για το κάθε σημείο του διανύσματος τα εξής: τις συντεταγμένες ( $x, y$ ), το πλάτος του καναλιού στη συγκεκριμένη θέση, το συντελεστή τραχύτητας, το υψόμετρο του πυθμένα. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η γεωμετρία του καναλιού δεν υπεισέρχεται ως δεδομένο εισόδου στο μοντέλο καθώς γίνεται η απλοποιητική θεώρηση ορθογωνικής διατομής. Στη συνέχεια, στο πρώτο σημείο του διανύσματος καταγράφονται οι οριακές συνθήκες ροής του καναλιού (επέκταση αρχείου *.river*). Τα πλάτη του καναλιού προέκυψαν από την καταγραφή που έγινε χρησιμοποιώντας τις ορθοεικόνες της Κτηματολόγιο ΑΕ, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο υποκεφάλαιο.

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 (ανάντη 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 επιτευχθεί παντού αρνητική κλίση.

Ως 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*)

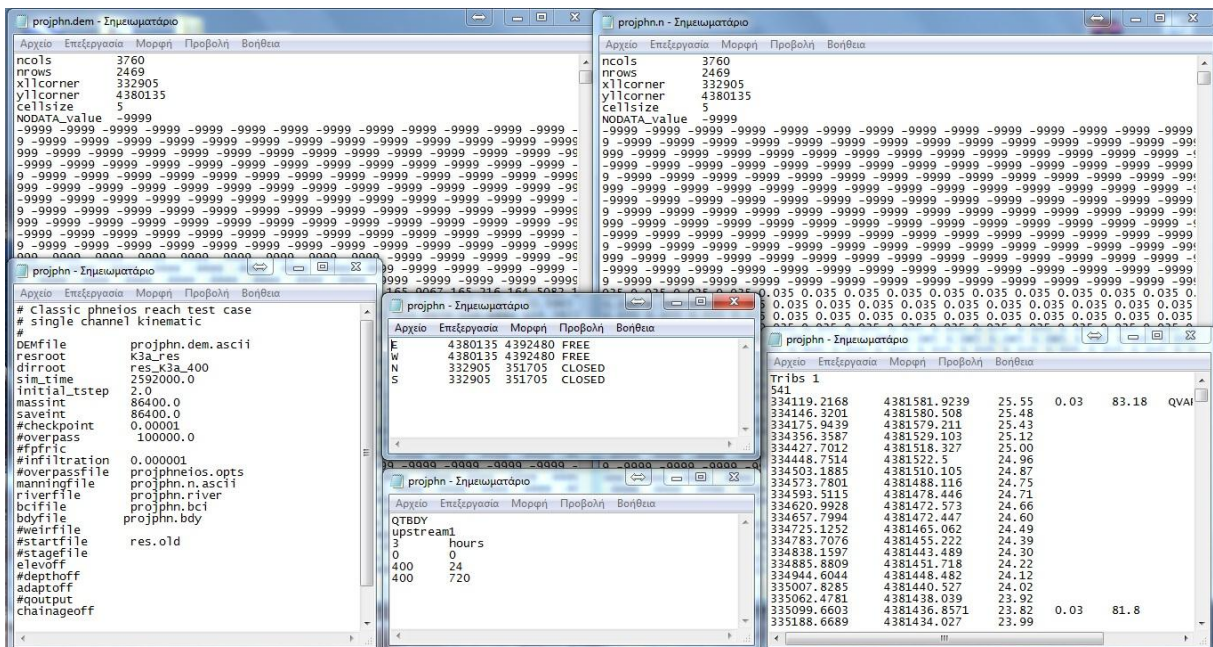
(δ) η Χρονικά Μεταβαλλόμενη Ελεύθερη Επιφάνεια του νερού (*Time Varying free surface Elevation*)

(ε) η Σταθερή Παροχή για συνθήκες σταθερής εισροής (*Fixed flow*)

(στ) η Χρονικά Μεταβαλλόμενη ροή (*Time varying flow*)

Ο επιλεγμένος τύπος των οριακών συνθηκών, το αν δηλαδή πρόκειται για ανοιχτό ή κλειστό όριο καθορίζεται από ένα αρχείο της μορφής *.bci*, ενώ το αρχείο που περιγράφει την οριακή συνθήκη είναι της μορφής *.bdy*. Επιλέχθηκαν τα ανατολικά και δυτικά όρια του πλημμυρικού πεδίου ως ανοιχτά ενώ το βόρειο και νότιο επιλέχθηκαν να είναι κλειστά. Σε ότι αφορά τις οριακές συνθήκες του ποταμού, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο επιλέχθηκε αρχικά σταθερή παροχή εισόδου. Στη συνέχεια, στο πλαίσιο της σύγκρισης και της διερεύνησης πραγματοποιήθηκε επιπλέον προσομοίωση με χρονικά μεταβαλλόμενη εισροή.

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. Στο ακόλουθο Σχήμα 3.5 φαίνεται το σύνολο των δεδομένων που εισάχθηκαν στο υδραυλικό μοντέλο LISFLOOD-FP.



Σχήμα 3.5 Δεδομένα εισόδου υδραυλικού μοντέλου LISFLOOD-FP.

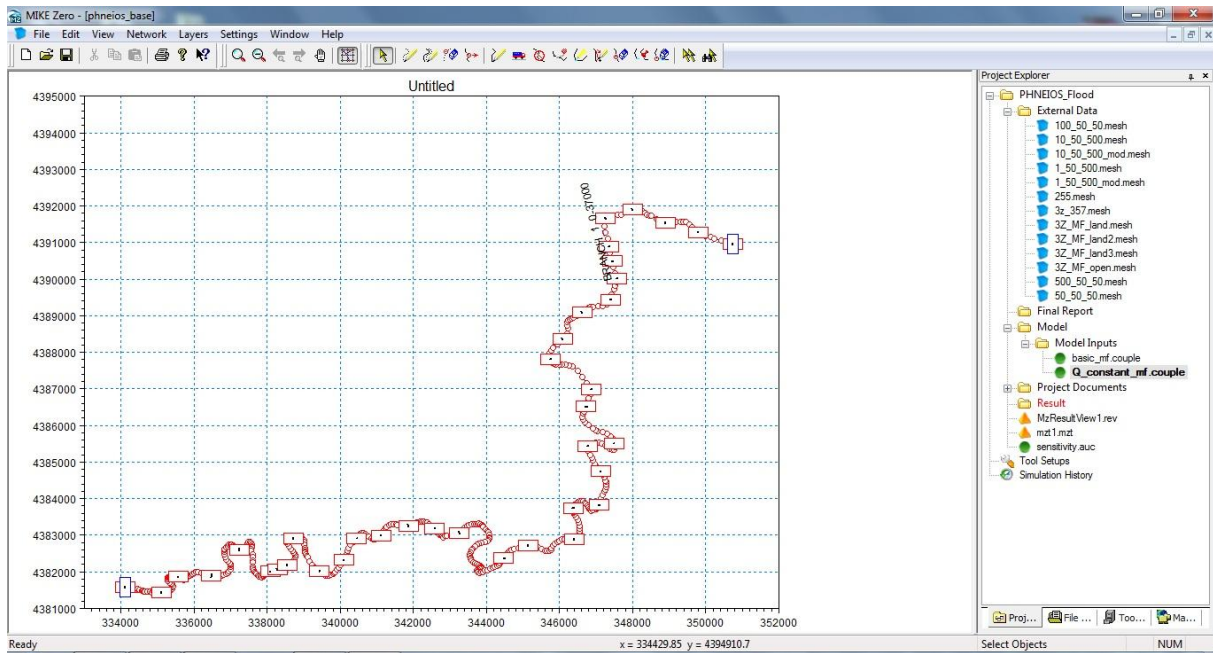
### 3.2.5 Προσομοίωση στο Υδραυλικό Μοντέλο MIKE FLOOD

Όπως έχει αναλυθεί, για την προσομοίωση στο MIKE FLOOD πραγματοποιείται σύζευξη των επιμέρους μοντέλων MIKE 11 και MIKE 21. Συγκεκριμένα, η ροή του ποταμού προσομοιώνεται στο MIKE 11 ενώ η ροή του πλημμυρικού πεδίου προσομοιώνεται στο MIKE 21. Βασική προϋπόθεση για την ορθή ενσωμάτωση των δύο επιμέρους προσομοιώσεων είναι κάθε μία να είναι ορθή και ευσταθής μεμονωμένα, να μην εμφανίζονται δηλαδή σφάλματα και αστάθειες σε καθεμία από αυτές. Στα επόμενα εδάφια περιγράφονται οι επιμέρους υδραυλικές προσομοιώσεις καθώς επίσης και η ενσωμάτωσή τους σε ένα ενιαίο υδραυλικό μοντέλο.

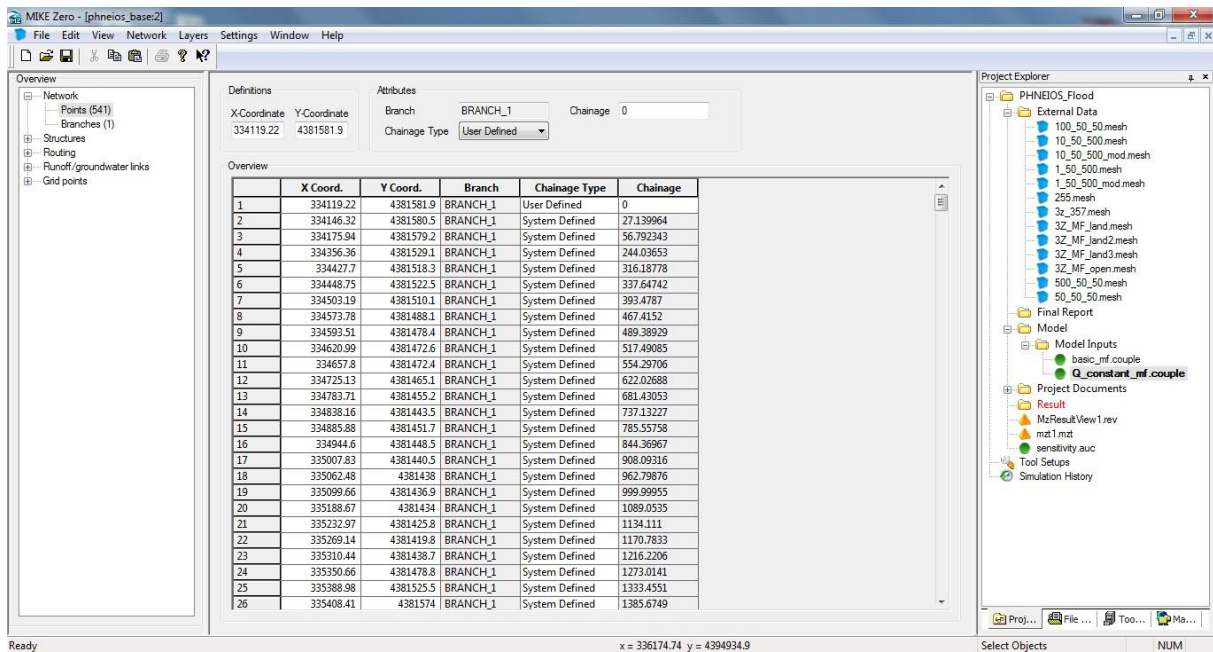
#### (α) Προσομοίωση Ροής Ποταμού στο MIKE 11

Η διάρθρωση του μοντέλου MIKE 11 συνοψίζεται στο εξής: όλες οι επιμέρους συνιστώσες όπως είναι τα σημεία του ποταμού, οι διατομές του, οι υδροδυναμικές παράμετροι, οι οριακές συνθήκες και οποιεσδήποτε άλλες παράμετροι, ενσωματώνονται σε έναν κοινό επεξεργαστή προσομοίωσης στον οποίο ορίζονται επιπλέον κάποιες μεταβλητές της προσομοίωσης.

Αρχικά, στο Εργαλείο Επεξεργασίας Υδρογραφικού Δικτύου (*River Network Editor*) δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει το σύνολο των σημείων του ποταμού όπως αυτά προέκυψαν από την αρχική επεξεργασία. Πιο αναλυτικά, εισάγονται τα σημεία του ποταμού πολύ εύκολα μέσω *.ascii* αρχείου, είτε μέσω *.shp*. Στη συγκεκριμένη εργασία ο υπό μελέτη κλάδος του ποταμού διαμορφώθηκε απευθείας από το *shapefile* της αρχικής επεξεργασίας. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα μέσω της προβολής σε μορφή πίνακα είτε μέσω γραφικής προβολής να μορφοποιήσει και να εμπλουτίσει τα δεδομένα για κάθε σημείο του ποταμού ανάλογα με τα διαθέσιμα στοιχεία, μέσω πληθώρας εργαλείων. Σε περιπτώσεις πολύπλοκων υδρογραφικών δικτύων, ορίζεται κάθε κλάδος ξεχωριστά και είναι εφικτή η επεξεργασία καθενός μεμονωμένα. Στα ακόλουθα Σχήματα 3.6 και 3.7 φαίνονται τόσο η γραφική όσο και η πινακοειδής προβολή του κλάδου.



Σχήμα 3.6 Γραφική απεικόνιση του ποταμού στο MIKE 11 River Network Editor.



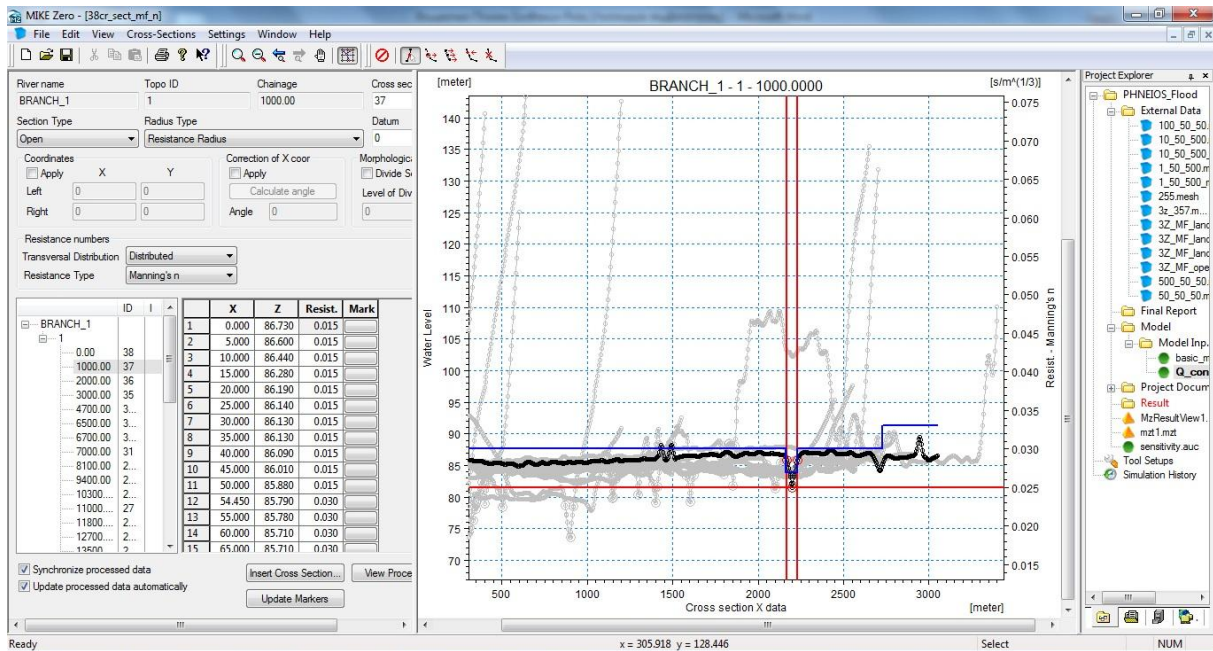
Σχήμα 3.7 Πινακοειδής μορφή του ποταμού στο MIKE 11 River Network Editor.

Στη συνέχεια διαμορφώνονται οι κύριες διατομές στο Εργαλείο Επεξεργασίας Διατομών (*Cross Section Editor*). Αναλυτικότερα, για κάθε διατομή στην Καρτέλα Πρωτογενών Δεδομένων (*Raw Data View*) απαιτούνται να οριστούν τα εξής: ο κλάδος στον οποίο ανήκει, η χιλιομετρική θέση, ο τύπος της (ανοικτή, κλειστή, κ.λ.π.), ο τύπος της κατανομής της τραχύτητας και τέλος τα σημεία της με συντεταγμένες. Τα σημεία μιας διατομής ορίζονται με

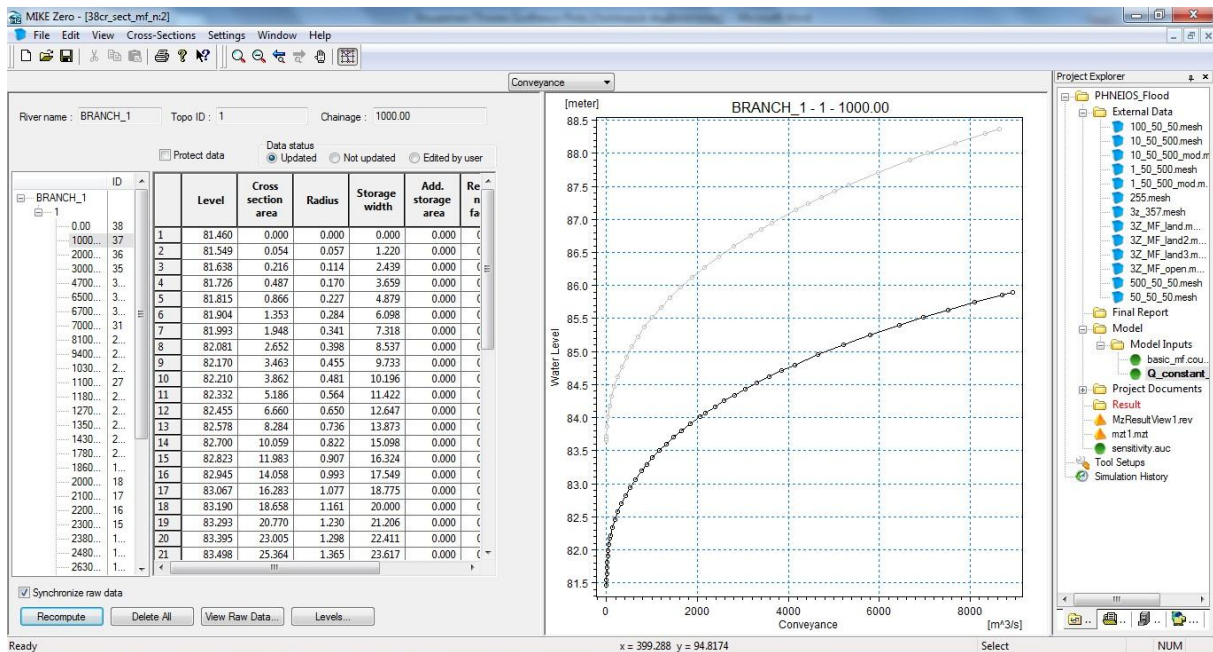
συντεταγμένες την απόσταση από το πρώτο αριστερά σημείο στην προς την κατάντη κατεύθυνση ( $x$ ) και το απόλυτο υψόμετρο κάθε σημείου ( $z$ ), όπως αυτά προέκυψαν από τη χάραξη των διατομών κατά την αρχική επεξεργασία. Σε ότι αφορά την κατανομή της τραχύτητας υπάρχουν τρεις συνολικά επιλογές που παρέχονται στο χρήστη: ομοιόμορφη τραχύτητα, τραχύτητα κατανεμημένη σε ζώνες και κατανεμημένη τραχύτητα. Με την τρίτη επιλογή της κατανεμημένης τραχύτητας ο χρήστης πρέπει να ορίσει σε κάθε σημείο της εκάστοτε διατομής εκτός από τις συντεταγμένες του και το συντελεστής τραχύτητας. Ο τύπος του συντελεστή τραχύτητας που δίνεται διαφοροποιείται ανάλογα με την επιθυμητή φόρμουλα που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί και μπορεί να είναι είτε ο συντελεστής τραχύτητας Manning, είτε  $N = \frac{1}{N_{Manning}}$ , είτε ο συντελεστής Chezy, είτε ο συντελεστής Darcy-Weisbach. Επιλέχθηκε ο συντελεστής τραχύτητας του Manning και του δόθηκαν τιμές όπως αυτές προέκυψαν από την αποτύπωση των πολυγώνων χρήσεων γης. Διατομές μπορούν επίσης να εισαχθούν στο πρόγραμμα και από αρχείο κειμένου (.txt) αν αυτό έχει την κατάλληλη μορφή.

Ορίστηκαν αρχικά οι 38 κύριες διατομές και για λόγους ευστάθειας και ακρίβειας της λύσης διαμορφώθηκαν επιπλέον διατομές από παρεμβολή αυτόματα από το πρόγραμμα ανά 10 m μεταξύ των κύριων. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι οι ενδιάμεσες διατομές είναι απαραίτητες μόνο για τη μεμονωμένη προσομοίωση στο MIKE 11. Όπως θα περιγραφεί και αναλυτικότερα παρακάτω, κατά τη σύζευξη των επιμέρους μοντέλων οι ενδιάμεσες αυτές διατομές θα αφαιρεθούν. Η αφαίρεση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε ότι αφορά την ευκολότερη διαχείριση του αρχείου.

Υφίσταται και στον Cross Section Editor η προβολή σε μορφή πίνακα των στοιχείων της διατομής (*Processed Data View*), στην οποία περιλαμβάνονται επεξεργασμένα δεδομένα και υπολογισμένα μεγέθη για την εκάστοτε διατομή. Τέτοια μεγέθη μπορεί να είναι το εμβαδό της διατομής ή η υδραυλική ακτίνα ανάλογα με τη στάθμη του νερού, η μέγιστη στάθμη, η παροχρεωτικότητα, κ.λ.π.. Τα επεξεργασμένα δεδομένα χρησιμοποιούνται απευθείας από το μοντέλο για τους υπολογισμούς και η επεξεργασία ή τροποποίησή τους είναι ιδιαίτερα σημαντική σε θέματα που αφορούν προβλήματα κατά την προσομοίωση, σε μεμονωμένα χρονικά βήματα ή σε μεμονωμένα σημεία για συγκεκριμένη στάθμη νερού κ.λ.π.. Στα παρακάτω Σχήματα 3.8 και 3.9 φαίνονται τόσο η καρτέλα των Πρωτογενών Δεδομένων όσο και η καρτέλα των Επεξεργασμένων Δεδομένων.



Σχήμα 3.8 Καρτέλα Πρωτογενών δεδομένων στο MIKE 11 Cross Section Editor.



Σχήμα 3.9 Καρτέλα Επεξεργασμένων δεδομένων στο MIKE 11 Cross Section Editor.

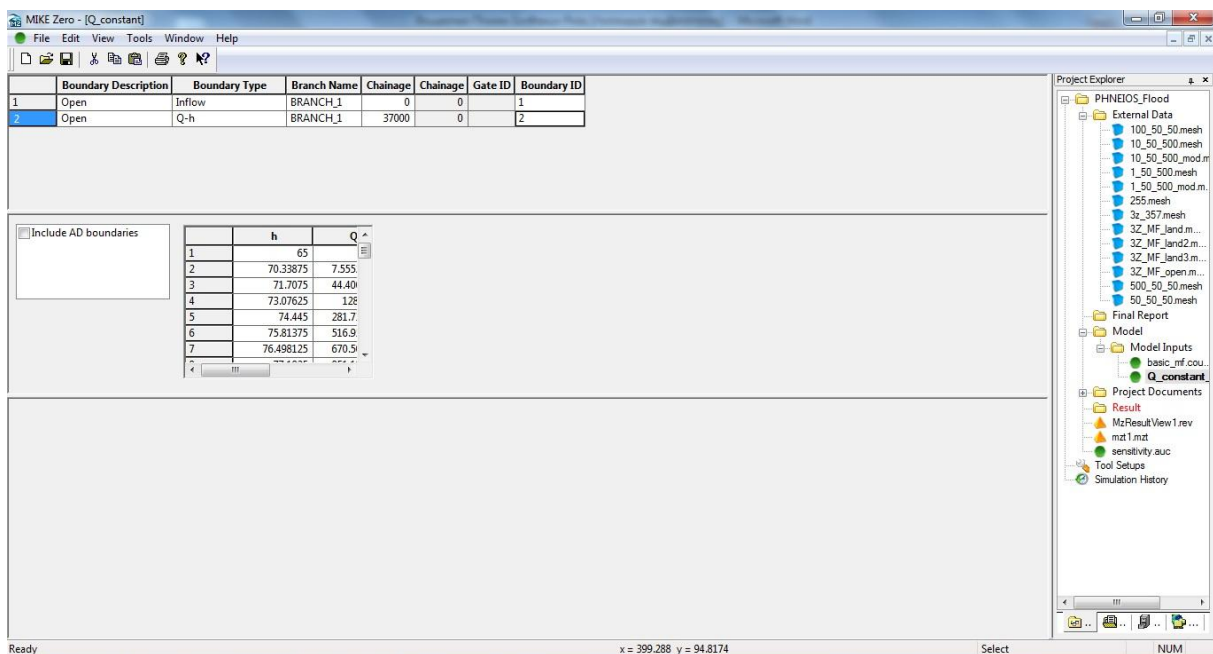
Η διαμόρφωση και ο ορισμός των οριακών συνθηκών του κλάδου γίνονται στο αντίστοιχο εργαλείο επεξεργασίας (*Boundary Editor*). Για κάθε ένα όριο απαιτούνται η περιγραφή του, ο τύπος του και η τιμή ή το αρχείο με τις τιμές της οριακής συνθήκης που ορίστηκε καθώς επίσης και η χιλιομετρική του θέση κατά μήκος του κλάδου.

Σε ότι αφορά την περιγραφή του ορίου αυτό μπορεί να είναι ανοικτό, σημειακή πηγή, καταναμημένη πηγή, καθολικό όριο, υδραυλικής κατασκευής ή κλειστό. Ακολούθως φαίνεται μια σύντομη περιγραφή των διαφόρων ειδών των ορίων και των τύπων των οριακών συνθηκών που μπορούν να επιλεγθούν για κάθε τύπο ορίου.

- **Ανοικτό (*Open*):** Εφαρμόζεται σε ελεύθερα ανάντη και κατάντη άκρα των τμημάτων των ποταμών τα οποία μοντελοποιούνται. Για υδροδυναμική προσομοίωση, εισροή (*Inflow*), στάθμη νερού (*Water Level*) ή καμπύλη Q-h μπορούν να επιλεγθούν σαν οριακές συνθήκες.
- **Σημειακή πηγή (*Point Source*):** Σημειακές εισροές στο ποτάμι είτε σταθερές είτε μεταβλητές με το χρόνο. Για υδροδυναμική προσομοίωση απαιτείται οριακή συνθήκη τύπου εισροής (*Inflow*).
- **Καταναμημένη Πηγή (*Distributed Source*):** Συνήθως χρησιμοποιείται για την περιγραφή πλευρικών εισροών ή εκροών στην περιοχή που μοντελοποιείται, οι οποίες συνήθως προέρχονται από μετεωρολογικά κατακρημνίσματα. Εισροή (*Inflow*), εξάτμιση (*Evaporation*), βροχόπτωση (*Rainfall*), συντελεστής τριβής (*Resistance Factor*) ή δύναμη ανέμου είναι κάποιες από τις οριακές συνθήκες που μπορεί να εφαρμοστούν σε τέτοιου είδους όρια.
- **Καθολικό Όριο (*Global Boundary*):** Σε αυτήν την περίπτωση η οριακή συνθήκη εφαρμόζεται σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης και οι οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται είναι αυτές του ορίου τύπου Καταναμημένης Πηγής.
- **Όριο Υδραυλικών Κατασκευών (*Structures Boundary*):** Οι οριακές συνθήκες που μπορούν να εφαρμοστούν περιλαμβάνουν την ύπαρξη φράγματος στα κατάντη (*Dam*), την περίπτωση θραύσης φράγματος (*Dam Break*), ρυθμιστική κατασκευή (*Regulating Structure*), κ.λ.π..
- **Κλειστό Όριο (*Closed Boundary*):** Σε περιπτώσεις όπου σε ελεύθερα άκρα ποταμών υφίσταται συνθήκη μηδενικής ροής και παροχής.

Όλες οι παραπάνω περιγραφές αποτελούν τους βασικούς τύπους οριακών συνθηκών. Ωστόσο, υπάρχουν μερικές ακόμη οριακές συνθήκες ιδιαίτερα εξειδικευμένες, οι οποίες δεν εμπίπτουν στην περίπτωση που μελετάται στην παρούσα εργασία και για το λόγο αυτό δεν αναφέρονται. Ανάλογα με το αν η συνθήκη που επιλέχθηκε παραμένει σταθερή με το χρόνο, π.χ. σταθερή εισροή ή μεταβάλλεται ορίζεται αντίστοιχα μια σταθερή τιμή ή ένα αρχείο μεταβολής της τιμής με το χρόνο (*TS.dfs0*).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε ανοιχτό όριο (*Open Boundary*) τόσο στα ανάντη όσο και στα κατόντη. Στα ανάντη επιλέχθηκε εισροή είτε σταθερή είτε μεταβλητή με το χρόνο (*Inflow*) όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο, ενώ στα κατόντη επιλέχθηκε καμπύλη Q-h. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα αυτόματου υπολογισμού της καμπύλης Q-h στα κατόντη από τα επεξεργασμένα δεδομένα των διατομών (*Processed Data*) κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις έλλειψης δεδομένων στα κατόντη. Για την προσομοίωση της περιοχής μελέτης αξιοποιήθηκε η συγκεκριμένη δυνατότητα του προγράμματος λόγω έλλειψης στοιχείων. Στο Σχήμα 3.10 φαίνεται η καρτέλα του Boundary Editor κατά τη διαμόρφωση των οριακών συνθηκών για την περιοχή μελέτης.



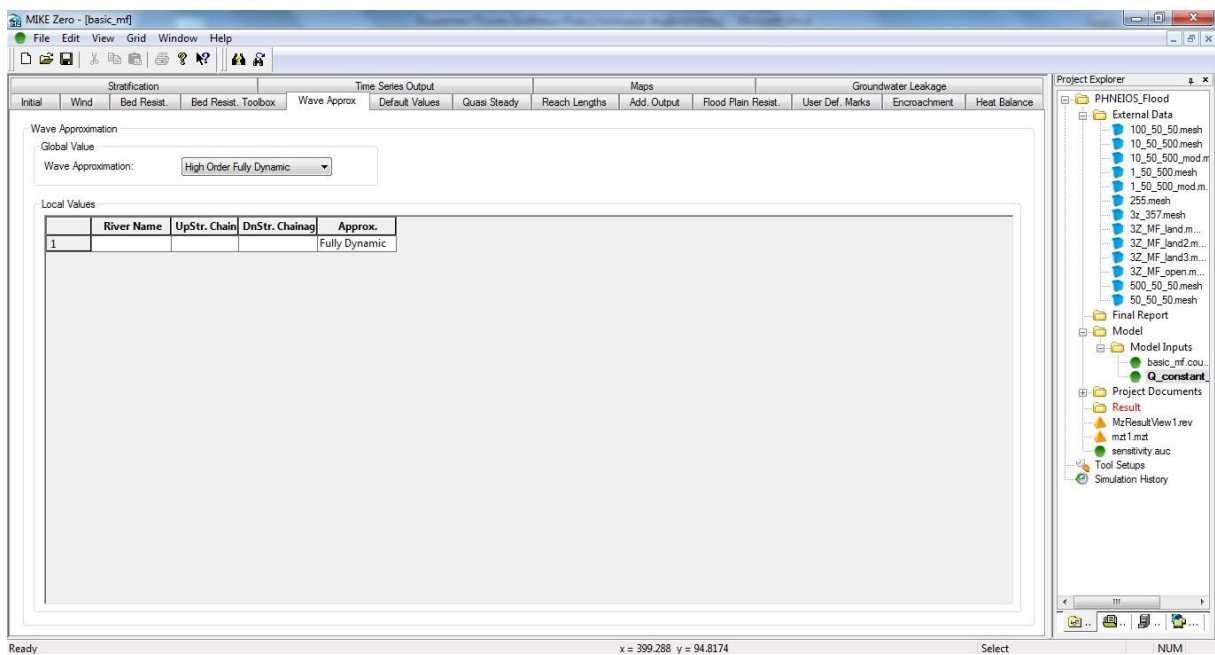
**Σχήμα 3.10** Ορισμός οριακών συνθηκών στο MIKE 11 Boundary Editor.

Αναφορικά με τις υδροδυναμικές παραμέτρους της προσομοίωσης, στο αντίστοιχο εργαλείο (*Hydrodynamic Parameters Editor*) ορίζονται παράμετροι όπως είναι για παράδειγμα οι πρωταρχικές συνθήκες, η επίδραση της δύναμης του ανέμου, η τριβή του πυθμένα, το είδος του κύματος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ροής και κάποιες παράμετροι του διαφορικού σχήματος επίλυσης. Παράλληλα, ορίζονται τα παραγόμενα από την προσομοίωση αποτελέσματα και η μορφή τους. Οι σημαντικότερες υδροδυναμικές παράμετροι που επιλέχθηκαν στο πλαίσιο της μελετώμενης υδραυλικής προσομοίωσης, οι οποίες παρέμειναν σταθερές σε κάθε προσομοίωση, αναφέρονται στον ακόλουθο Πίνακα 3.2. Αντίστοιχα, στα Σχήματα 3.11 και 3.12 φαίνεται η καρτέλα των υδροδυναμικών παραμέτρων προσομοίωσης.

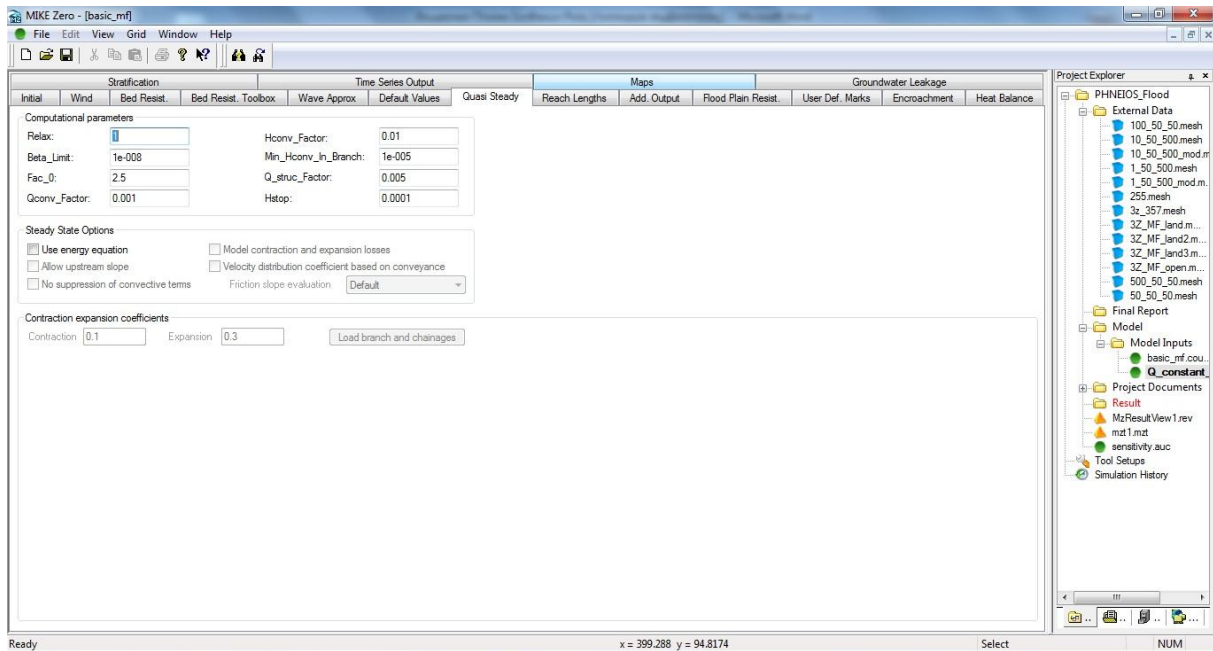


**Πίνακας 3.3** Σταθερές Υδροδυναμικές Παράμετροι στο MIKE 11.

<b>Αρχικό βάθος νερού</b> ( <i>Initial Water Depth</i> )	1.0 m
<b>Τριβή Πυθμένα</b> ( <i>Bed Resistance, n Manning</i> )	0.027
<b>Πλημμυρικό Κύμα</b> ( <i>Wave Approximation</i> )	High Order Fully Dynamic



**Σχήμα 3.11** Καρτέλα υδροδυναμικών παραμέτρων Προσομοίωσης (Επιλογή κύματος Προσέγγισης της Λύσης) στο MIKE 11 Hydrodynamic Editor.

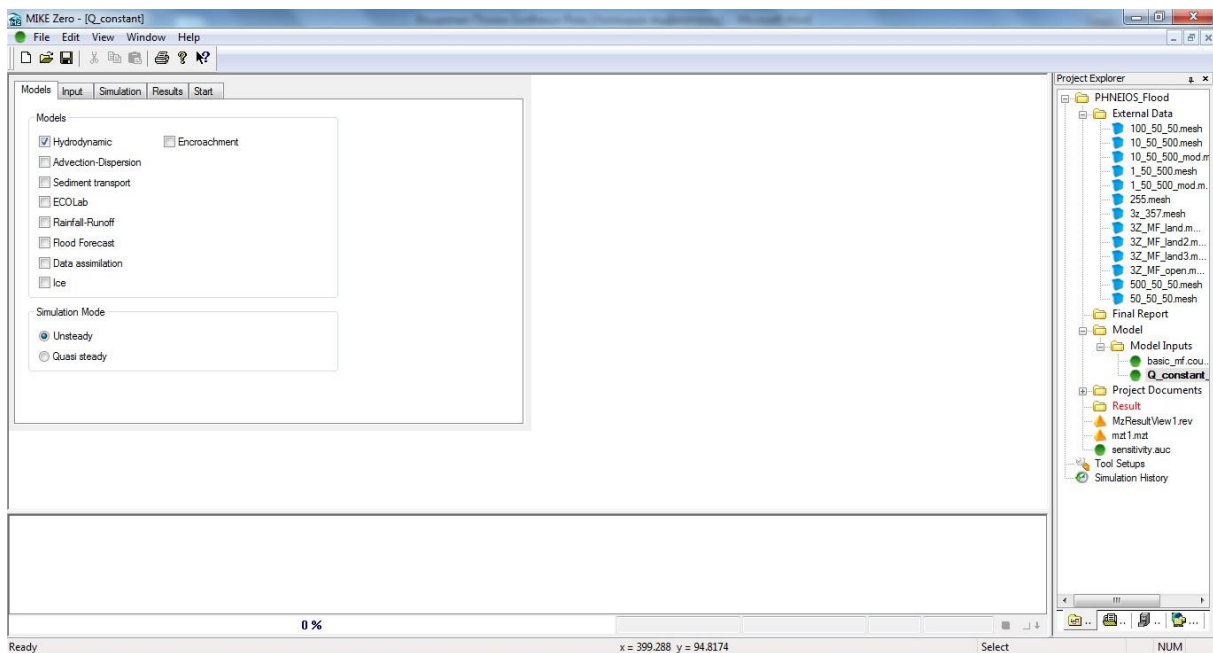


**Σχήμα 3.12** Καρτέλα υδροδυναμικών παραμέτρων Προσομοίωσης (Ορισμός παραμέτρων Σχήματος Επίλυσης) στο MIKE 11 Hydrodynamic Editor.

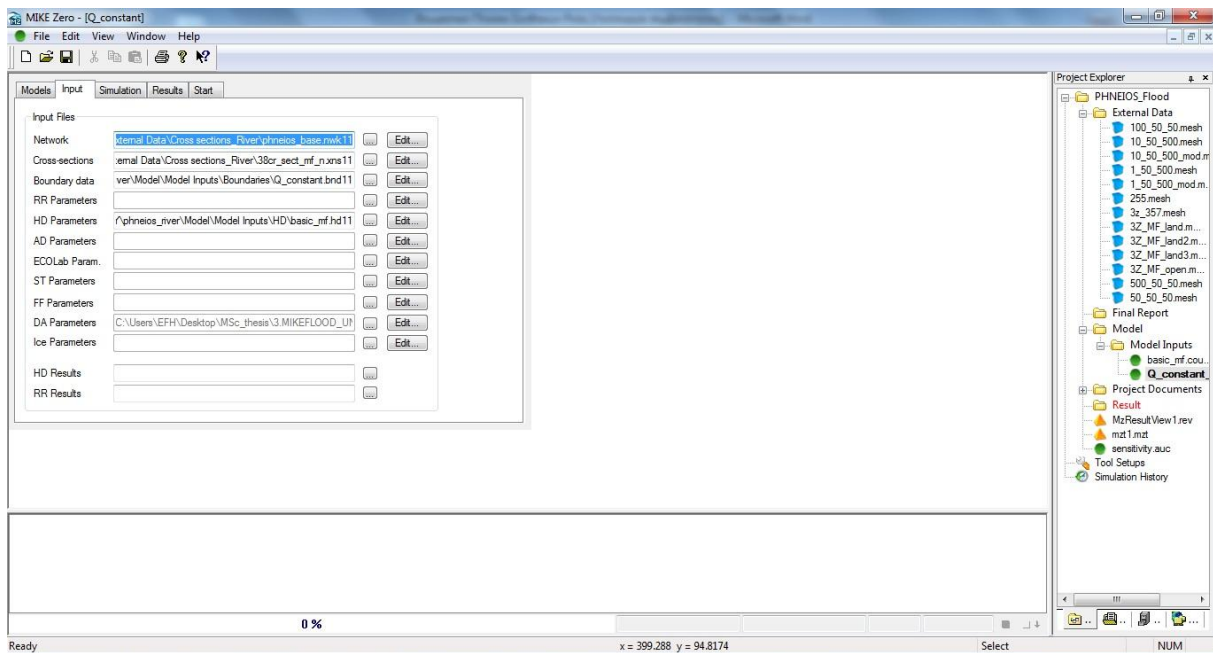
Τέλος, στον Επεξεργαστή Προσομοίωσης (*Simulation Editor*) εισάγονται τα αρχεία του ποταμού (*.nwk11*), των διατομών (*.xns11*), των οριακών συνθηκών (*.bnd11*) και των υδροδυναμικών παραμέτρων (*.hd11*). Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ διάφορων μοντέλων υπολογισμών κάποια από τα οποία είναι αλληλοεξαρτώμενα. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει το υδροδυναμικό μοντέλο υπολογισμών (*HD Hydrodynamic Module*), το μοντέλο μεταφοράς και διάχυσης (*AD Advection-Dispersion*), το μοντέλο μεταφοράς ιζήματος (*ST Sediment Transport*), το μοντέλο βροχής απορροής (*RR Rainfall Runoff*), κ.α.. Έπειτα ορίζονται οι συνθήκες της ροής (*Unsteady* ή *Quasi Steady*), το χρονικό βήμα και η περίοδος της προσομοίωσης καθώς επίσης και η συχνότητα αποθήκευσης των αποτελεσμάτων στα αντίστοιχα αρχεία. Οι παράμετροι προσομοίωσης που επιλέχθηκαν, οι οποίες παρέμειναν σταθερές σε κάθε προσομοίωση, αναφέρονται στον ακόλουθο Πίνακα 3.3. Στα Σχήματα 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 και 3.17 φαίνονται οι αντίστοιχες καρτέλες του *Simulation Editor*.

**Πίνακας 3.4** Σταθερές Παράμετροι Προσομοίωσης στο MIKE 11.

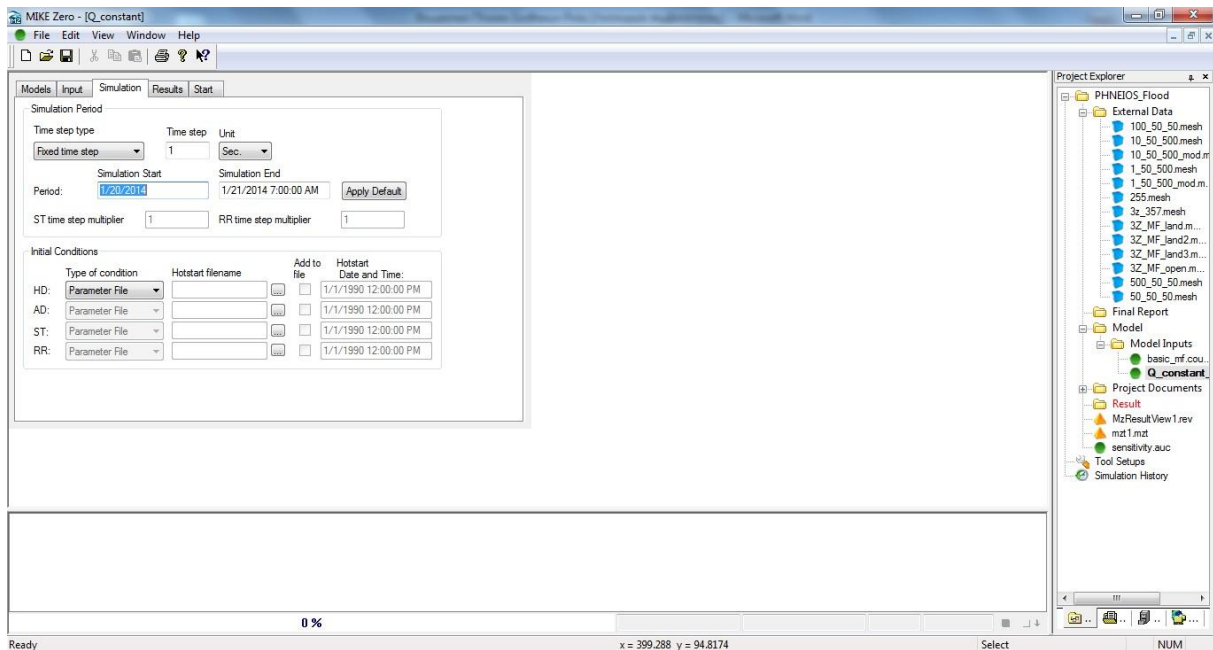
<b>Μοντέλο Υπολογισμών</b>	HD Hydrodynamic
<b>Είδος Προσομοίωσης (Simulation Mode)</b>	Unsteady
<b>Περίοδος αποθήκευσης Αποτελεσμάτων</b>	1 h



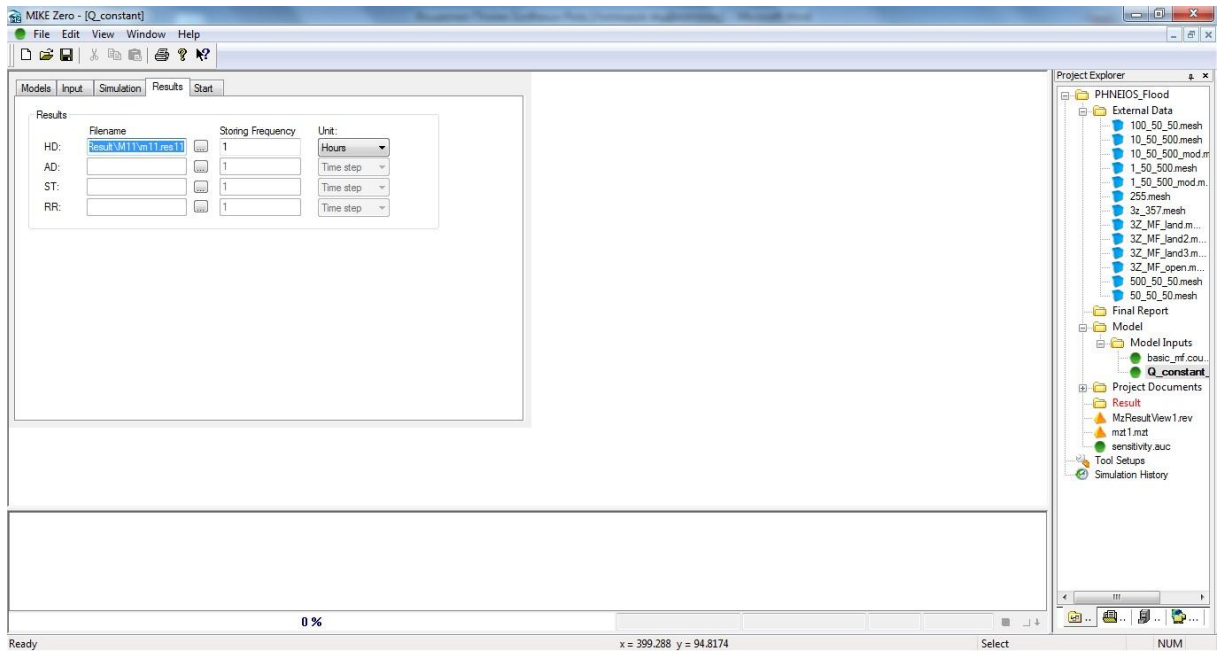
**Σχήμα 3.13** Καρτέλα επιλογής Μοντέλου Υπολογισμών και Συνθηκών Ροής στο MIKE 11 Simulation Editor.



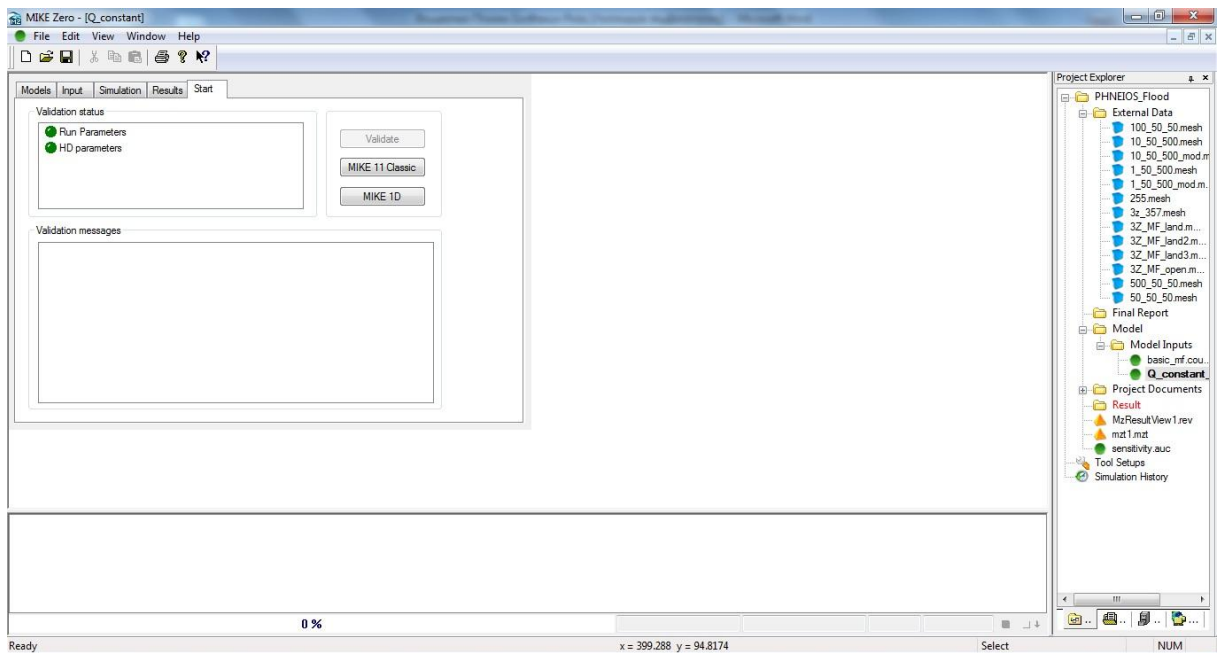
Σχήμα 3.14 Καρτέλα εισαγωγής αρχείων Ποταμού, Διατομών, Ορ. Συνθηκών και Υδροδυναμικών Παραμέτρων στο MIKE 11 Simulation Editor.



Σχήμα 3.15 Καρτέλα ορισμού Παραμέτρων Προσομοίωσης στο MIKE 11 Simulation Editor.



Σχήμα 3.16 Καρτέλα ορισμού Θέσης και Ονομασίας αρχείων Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης στο MIKE 11 Simulation Editor.



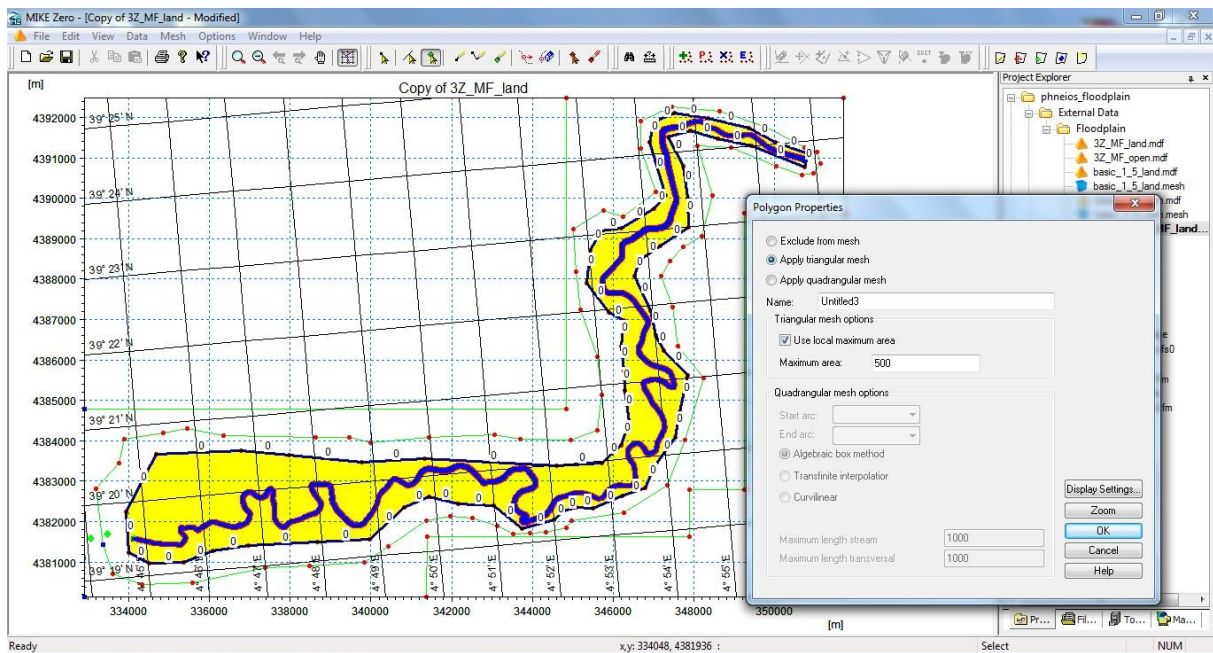
Σχήμα 3.17 Καρτέλα Έναρξης Προσομοίωσης στο MIKE 11 Simulation Editor.

## (β) Προσομοίωση Ροής στο Πλημμυρικό Πεδίο στο MIKE 21

Για την προσομοίωση του πλημμυρικού πεδίου και της ροής σε αυτό, όλα τα αρχεία των διαθέσιμων δεδομένων ενσωματώνονται στο αρχείο των υπολογισμών του μοντέλου προσομοίωσης (*Flow Model FM*).

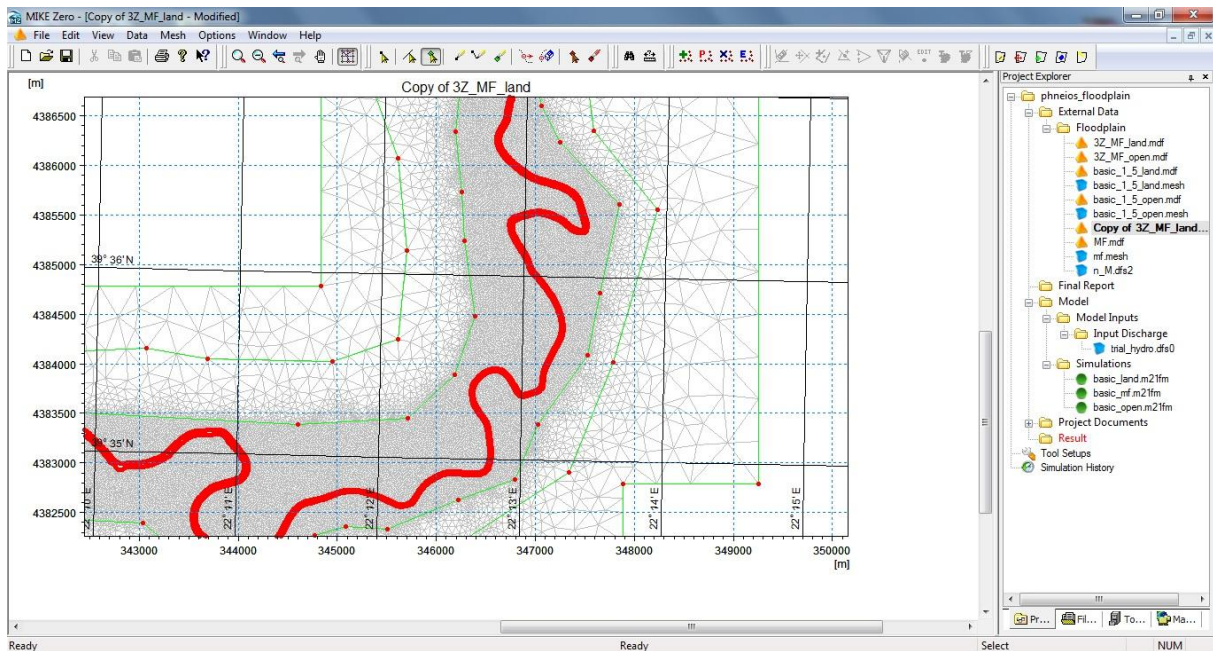
Πιο αναλυτικά, εισάγεται αρχικά το υπολογιστικό πλέγμα της περιοχής μελέτης. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το ευέλικτο πλέγμα τριγωνικών στοιχείων (*Flexible Mesh FM*). Το πλέγμα διαμορφώθηκε ως εξής:

- Στην εφαρμογή διαμόρφωσης ευέλικτου πλέγματος (*Mesh Generator*), η οποία εμπεριέχεται στο πρόγραμμα, αρχικά ορίστηκε το όριο του πλέγματος εισάγοντας με τη μορφή αρχείου κειμένου τα όρια της περιοχής μελέτης με τις συντεταγμένες των σημείων ορισμένες στο ελληνικό σύστημα αναφοράς.
- Έπειτα ορίστηκε το είδος των ορίων το οποίο επιλέχθηκε να είναι όριο εδάφους (*Land Boundary*).
- Στο στάδιο αυτό ορίζονται χωρικά οι διάφορες κλειστές ζώνες με το αντίστοιχο εργαλείο. Κάθε ζώνη επιλέγεται να έχει διαφορετικό μέγεθος τριγωνικού κελιού. Το γεγονός αυτό αποτελεί το βασικό πλεονέκτημα του ευέλικτου πλέγματος έναντι του σταθερού κανάβου προσδίδοντας ταχύτητα στους υπολογισμούς. Συγκεκριμένα ορίζεται για κάθε ζώνη το μέγιστο εμβαδό του τριγωνικού κελιού. Για τις διάφορες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν επιλέχθηκαν διαφορετικές τιμές εμβαδού τριγωνικού κελιού κάθε φορά. Οι εκάστοτε τιμές που επιλέχθηκαν θα αναφερθούν σε επόμενο κεφάλαιο με τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Στο Σχήμα 3.18 φαίνονται οι χωρικές ζώνες και ο ορισμός του εμβαδού τους.



Σχήμα 3.18 Ορισμός Χωρικών Ζωνών και Μέγιστου Εμβαδού τους στο Mesh Generator.

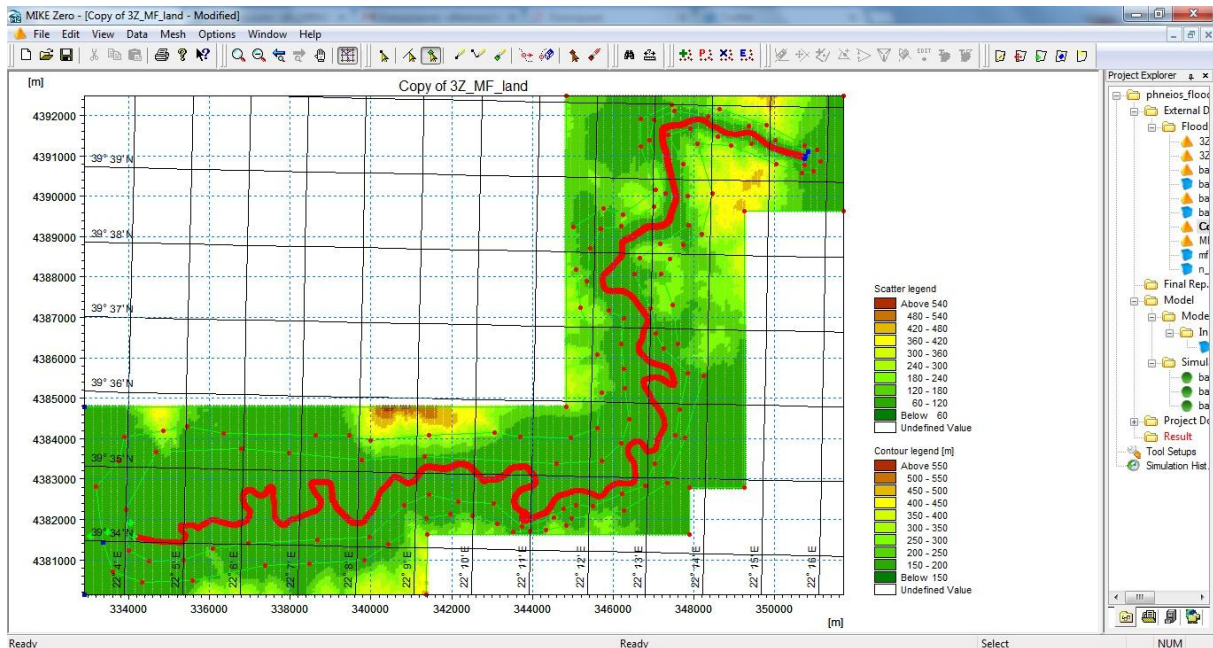
- Γίνεται έπειτα η δημιουργία του τριγωνικού πλέγματος με την αντίστοιχη επιλογή (*Generate Mesh*). Στο Σχήμα 3.19 απεικονίζεται η δημιουργία του τριγωνικού πλέγματος όπως αυτό ορίστηκε.



Σχήμα 3.19 Δημιουργία Τριγωνικού Πλέγματος στο Mesh Generator.

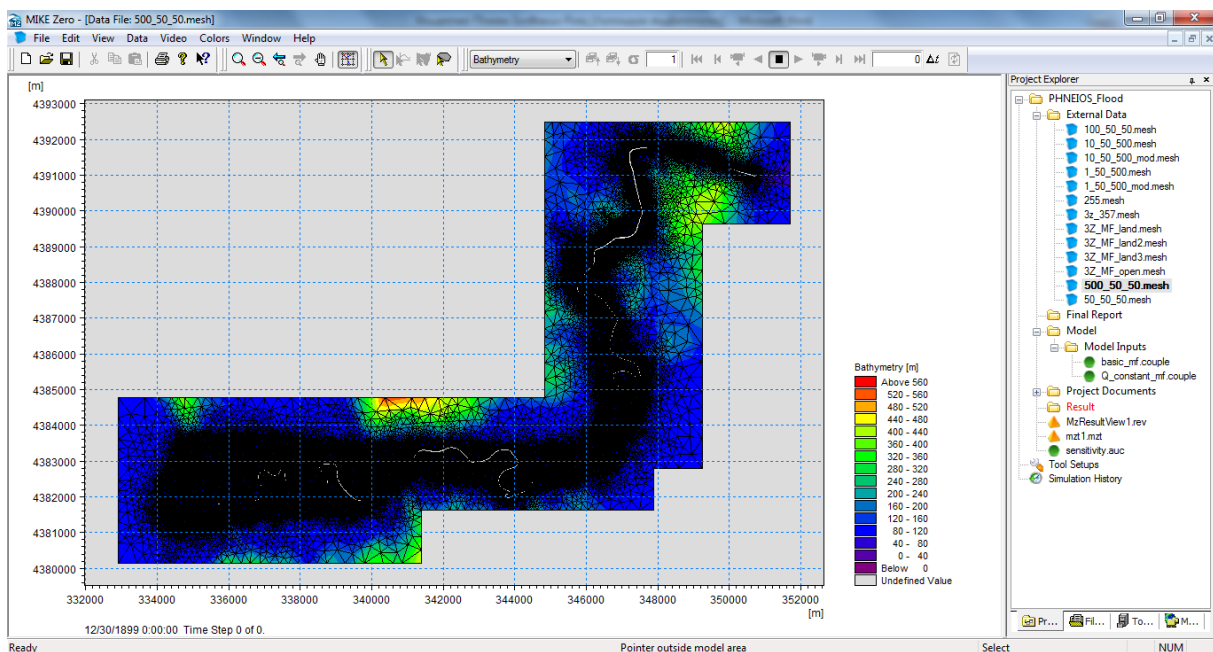
- Στη συνέχεια εισάγονται τα τοπογραφικά δεδομένα της περιοχής μελέτης με τη μορφή αρχείου κειμένου που περιέχει τις συντεταγμένες  $(x,y,z)$  και τα δεδομένα αυτά

παρεμβάλλονται εντός του υπολογιστικού πλέγματος με την αντίστοιχη επιλογή (*Interpolate*), διαμορφώνοντας υψομετρικές ζώνες όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.20.



**Σχήμα 3.20** Εισαγωγή και Παρεμβολή Τοπογραφικών Δεδομένων Περιοχής Μελέτης στο Mesh Generator.

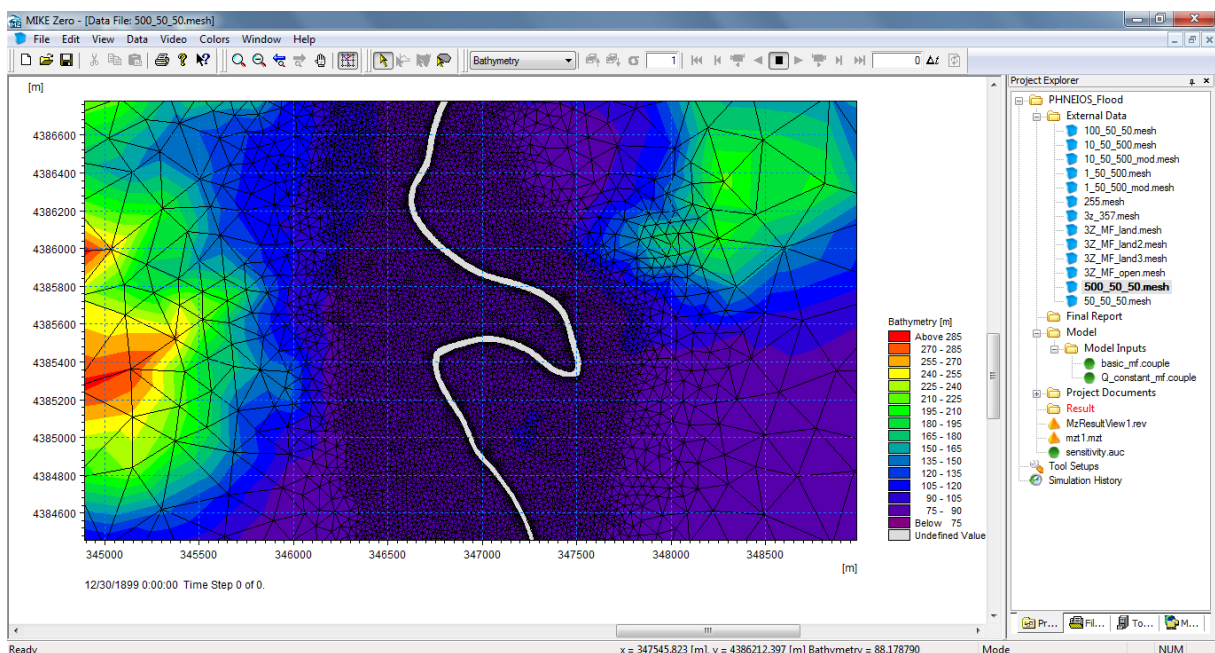
- Τέλος το αρχείο εξάγεται σε μορφή αρχείου υπολογιστικού πλέγματος (.mesh) και έπειτα εισάγεται στο αρχείο της προσομοίωσης. Το αρχείο του υπολογιστικού πλέγματος φαίνεται ακολούθως στο Σχήμα 3.21.



**Σχήμα 3.21** Αρχείο Υπολογιστικού Πλέγματος Τριγωνικών Στοιχείων.



Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι ένα από τα πολύγωνα που ορίστηκαν ήταν αυτό της επιφάνειας του ποταμού. Στο πολύγωνο αυτό έγινε η επιλογή να εξαιρεθεί από το πλέγμα που δημιουργήθηκε αφήνοντας κενή την αντίστοιχη περιοχή. Για το σκοπό αυτό το πολύγωνο του ποταμού εισάχθηκε στο εργαλείο διαμόρφωσης του ευέλικτου πλέγματος ως αρχείο κειμένου (.xy) που περιέχει τις συντεταγμένες των όχθων του ποταμού. Το αρχείο αυτό δημιουργήθηκε από ένα δοκιμαστικό «τρέξιμο» της προσομοίωσης το οποίο γίνεται για αυτόν ακριβώς το σκοπό. Ο λόγος που εξαιρείται η έκταση του ποταμού από το πλέγμα είναι ότι οι υπολογισμοί που αφορούν το ποτάμι θα πραγματοποιηθούν από το αρχείο της προσομοίωσης του ποταμού όπως αυτό έχει διαμορφωθεί στο MIKE 11 (*Simulation Editor*, κατάληξη αρχείου *.sim11*) συνδέοντας τα επιμέρους αρχεία προσομοίωσης. Αν η έκταση του ποταμού δεν εξαιρούταν από το πλέγμα τότε οι υπολογισμοί για το ποτάμι θα πραγματοποιούνταν δύο συνολικά φορές: μία από τους υπολογισμούς της προσομοίωσης του MIKE 11 το οποίο είναι και το επιθυμητό και μία από την προσομοίωση του MIKE 21 ως τμήμα του πεδίου. Κάτι τέτοιο θα δημιουργούσε αστάθειες και λάθη στους υπολογισμούς και στα αποτελέσματα. Στο Σχήμα 3.22 φαίνεται η επιφάνεια του ποταμού στην οποία επιλέχθηκε να μη διαμορφωθεί τριγωνικό πλέγμα.



**Σχήμα 3.22** Περιοχή Ποταμού εκτός Τριγωνικού Υπολογιστικού Πλέγματος.

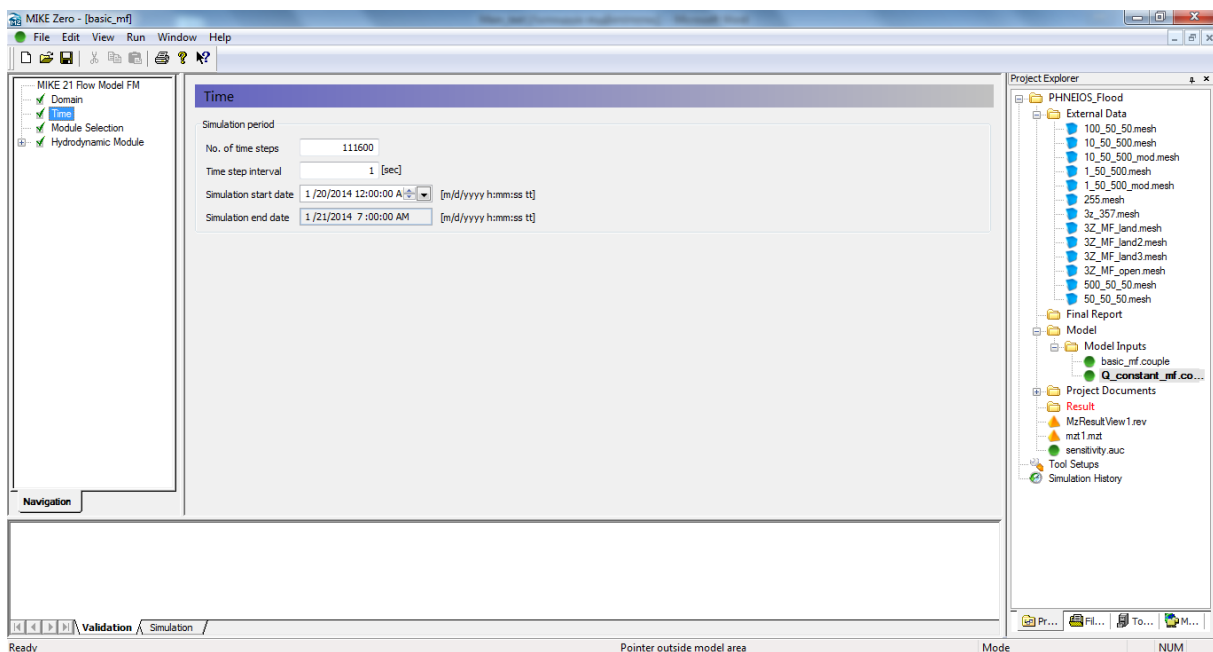
Έχοντας εισάγει το υπολογιστικό πλέγμα της περιοχής μελέτης (*Mesh*) επιλέγονται από τις αντίστοιχες καρτέλες του αρχείου προσομοίωσης διάφορες παράμετροι όπως είναι ο τύπος της εξίσωσης επίλυσης, το χρονικό βήμα των υπολογισμών και το όριο υγρού και στεγνού

κελιού η σημασία του οποίου έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο (*Flood and Dry*). Επιπλέον, επιλέγονται τα αποτελέσματα και η μορφή τους. Οι παραπάνω παράμετροι πήραν διάφορες τιμές για τις διάφορες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Οι τιμές και τα αντίστοιχα αποτελέσματα αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο. Στα Σχήματα 3.23, 3.24, 3.25 και 3.26 φαίνονται οι αντίστοιχες καρτέλες ορισμού των παραμέτρων που προαναφέρθηκαν.

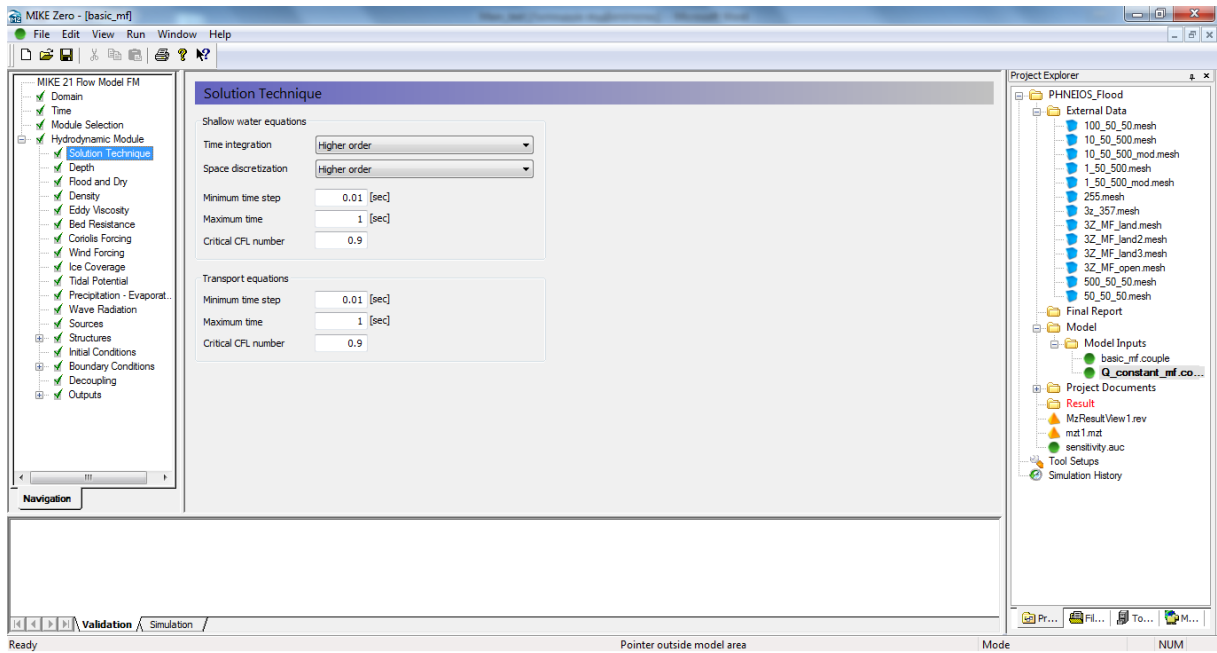
Αναφορικά με το ιξώδες τύρβης (*Eddy Viscosity*) αυτό επιλέχθηκε σταθερό και ίσο με  $0.2 \text{ m}^2/\text{s}$  σε όλες τις προσομοιώσεις. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε για λόγους σταθερότητας του μοντέλου και σε συμφωνία με το χωρικό και χρονικό βήμα που επιλέχθηκε. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή για το ιξώδες όπως αυτό εισάγεται στο μοντέλο δίνεται από την ακόλουθη Σχέση 3.1 (MIKE by DHI 2014b):

$$E = 0.1 * \left( \frac{\Delta x^2}{\Delta t} \right) \quad (3.1)$$

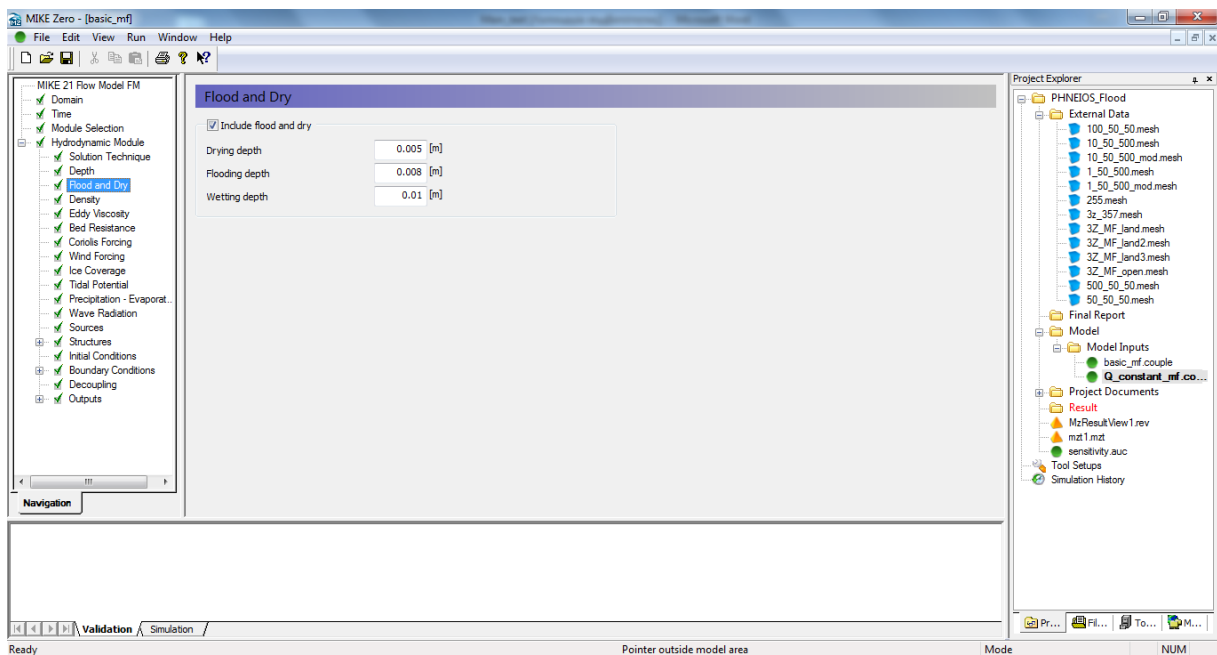
όπου  $\Delta x$  η πλευρά του κελιού και  $\Delta t$  το χρονικό βήμα.



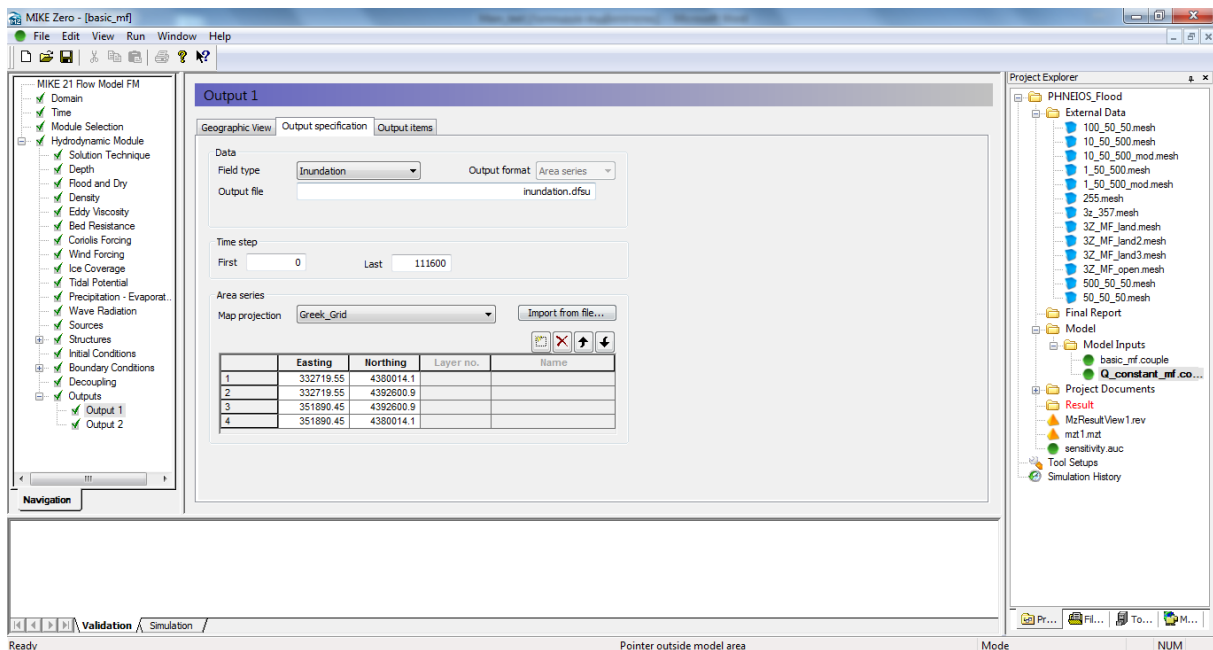
**Σχήμα 3.23** Καρτέλα Ορισμού Χρονικού Βήματος Υπολογισμών στο MIKE 21 Flow Model FM.



Σχήμα 3.24 Καρτέλα Ορισμού Εύρους Χρονικού Βήματος Εξισώσεων Επίλυσης (Εξ. Αβαθών Υδάτων και Εξ. Μεταφοράς) στο MIKE 21 Flow Model FM.

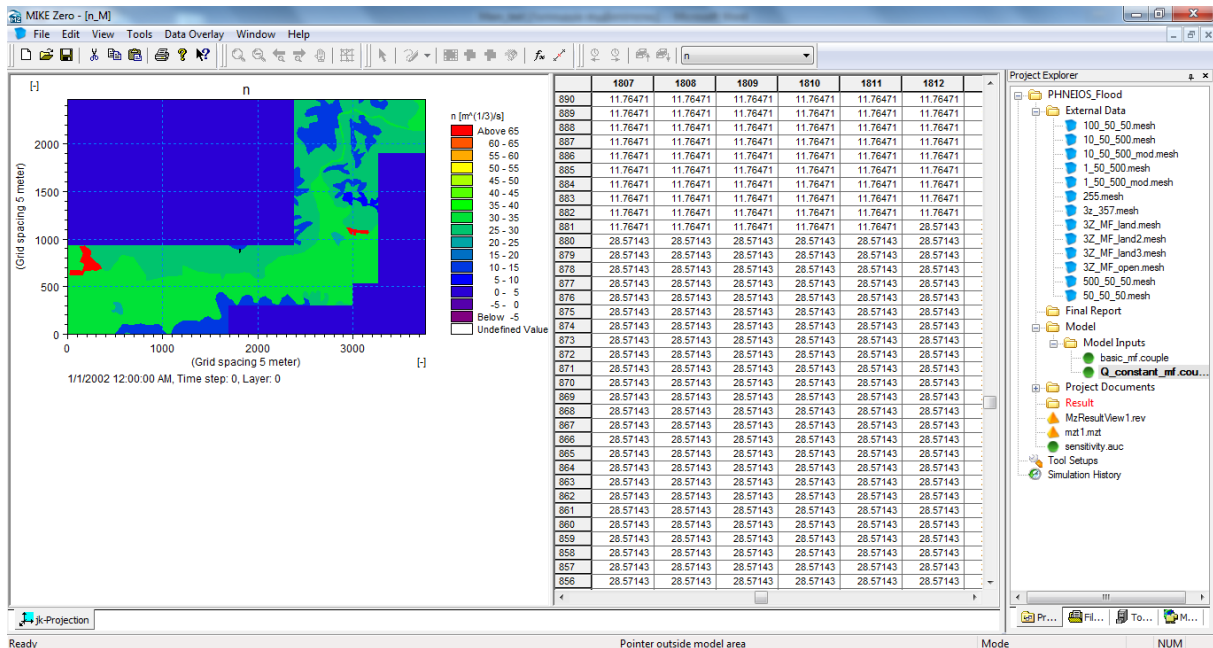


Σχήμα 3.25 Καρτέλα Ορισμού Ξηρού-Υγρού-Πλημμυρισμένου Κελιού στο MIKE 21 Flow Model FM.



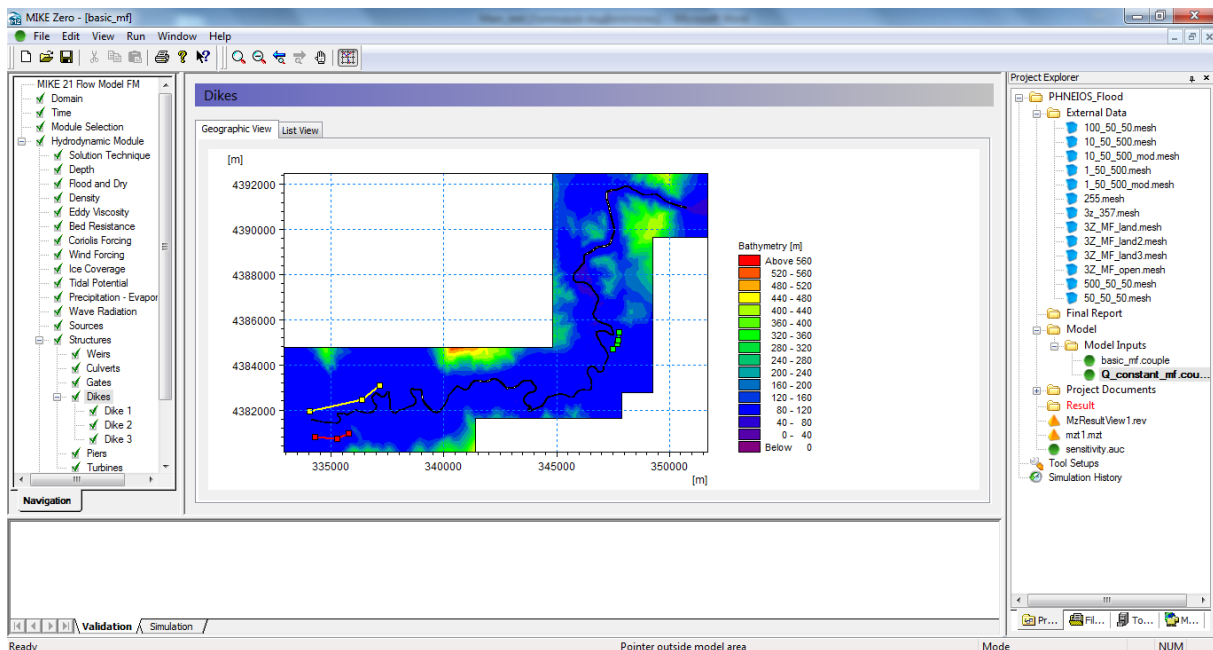
**Σχήμα 3.26** Καρτέλα Ορισμού της Μορφής και της Θέσης των Αρχείων Αποτελεσμάτων της Προσομοίωσης στο MIKE 21 Flow Model FM.

Εισάγεται επίσης η τιμή της αντίστασης τριβής στο πλημμυρικό πεδίο με τη μορφή είτε του συντελεστή Chezy, είτε του συντελεστή  $N = \frac{1}{n_{\text{Manning}}}$ . Ο συντελεστής τραχύτητας μπορεί να είναι είτε σταθερός είτε να έχει τη μορφή διδιάστατου αρχείου σε μορφή πίνακα. Στη συγκεκριμένη υδραυλική προσομοίωση δημιουργήθηκε διδιάστατος πίνακας με το συντελεστή  $N=1/n_{\text{Manning}}$  όπως αυτός προκύπτει από τα πολύγωνα των χρήσεων γης για το σύνολο της περιοχής μελέτης. Στο Σχήμα 3.27 απεικονίζεται το διδιάστατο αρχείο (.dfs2) με το συντελεστή  $N$ .



Σχήμα 3.27 Διδιάστατο αρχείο (.dfs2) με τις τιμές του συντελεστή N στην περιοχή μελέτης.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, στην περιοχή μελέτης υπάρχουν τρία συνολικά αναχώματα κατά μήκος του ποταμού. Τα αναχώματα αυτά ορίζονται από την αντίστοιχη καρτέλα του αρχείου προσομοίωσης του MIKE 21 (*Dikes*), με δεδομένα τις συντεταγμένες (x,y,z) των σημείων του κάθε αναχώματος. Στο Σχήμα 3.28 φαίνονται οι θέσεις των αναχωμάτων στην περιοχή μελέτης.

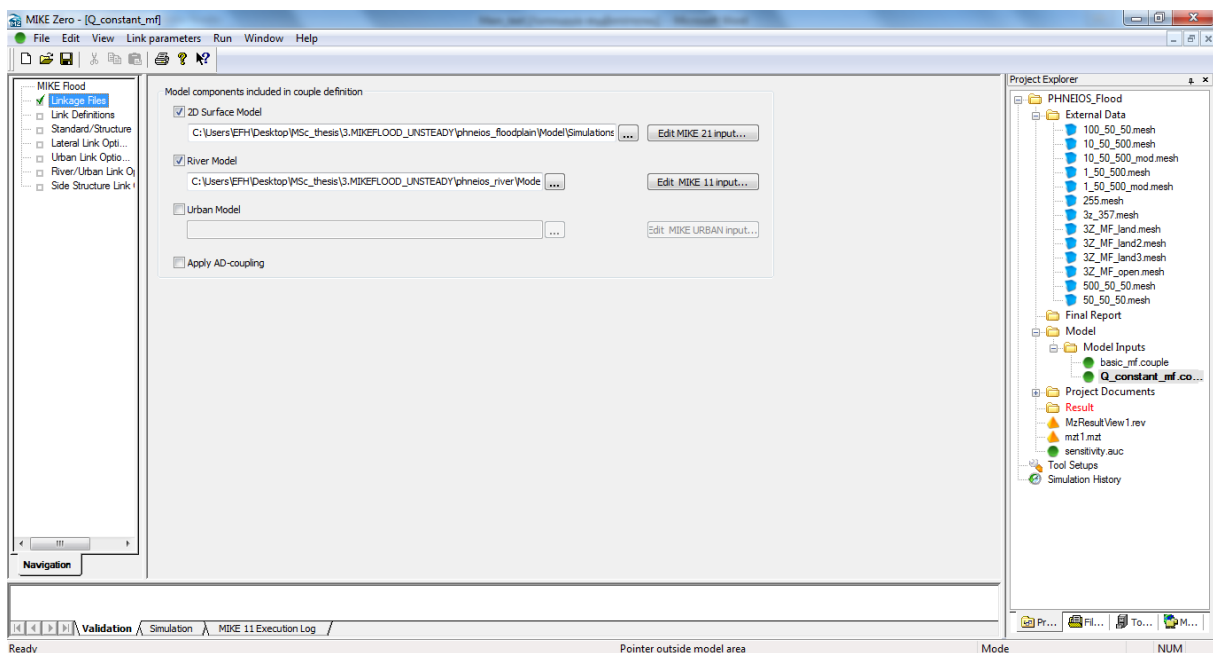


Σχήμα 3.28 Θέσεις Αναχωμάτων στην Περιοχή Μελέτης στο MIKE 21 Flow Model FM.

Τέλος ορίζεται η μορφή των αρχείων των αποτελεσμάτων. Πιο αναλυτικά επιλέχθηκε να διαμορφωθούν από το πρόγραμμα με τη μορφή διδιάστατων αρχείων ο χάρτης της πλημμυρικής κατάκλυσης με τα μέγιστα βάθη νερού και τις μέγιστες ταχύτητες ροής καθώς επίσης και τους αντίστοιχους χρόνους παραμονής. Επιπλέον διαμορφώθηκαν χάρτες με τον αριθμό Courant (CFL) και τις ταχύτητες  $u$  και  $v$  όπως αυτές υπολογίστηκαν στο πεδίο ροής.

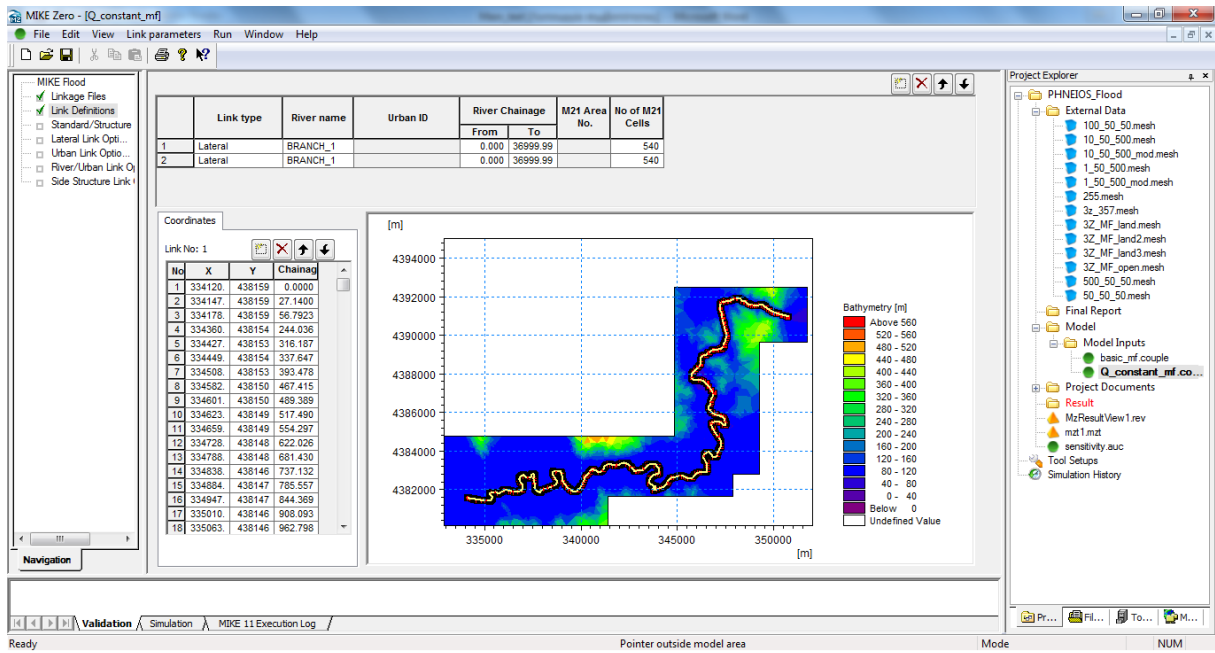
### (γ) Ενσωμάτωση των επιμέρους αρχείων στο MIKE FLOOD

Έχοντας ολοκληρώσει την εισαγωγή των απαιτούμενων αρχείων τόσο στο MIKE 11, όσο και στο MIKE 21, πραγματοποιούνται τα αντίστοιχα μεμονωμένα τρεξίματα έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι κάθε μία προσομοίωση είναι σταθερή και ολοκληρώνεται χωρίς λάθη και προβλήματα. Στη συνέχεια, τα δύο επιμέρους αρχεία ενσωματώνονται στο MIKE FLOOD. Αρχικά εισάγονται τα επιμέρους αρχεία στην αντίστοιχη καρτέλα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.29.

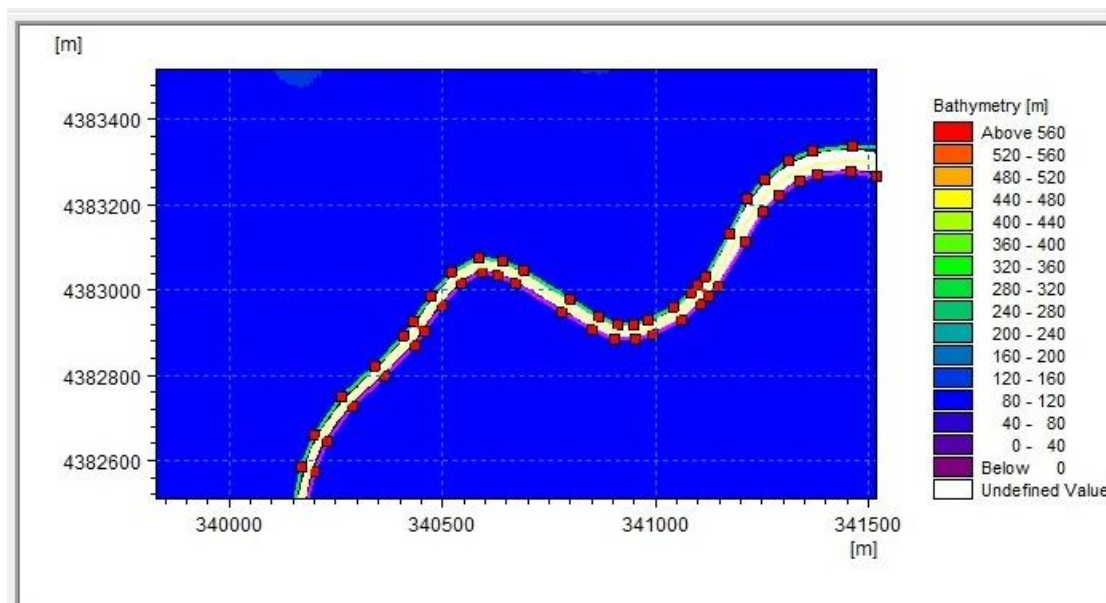


**Σχήμα 3.29** Καρτέλα εισαγωγής επιμέρους αρχείων MIKE 11 και MIKE 21 στο MIKE FLOOD.

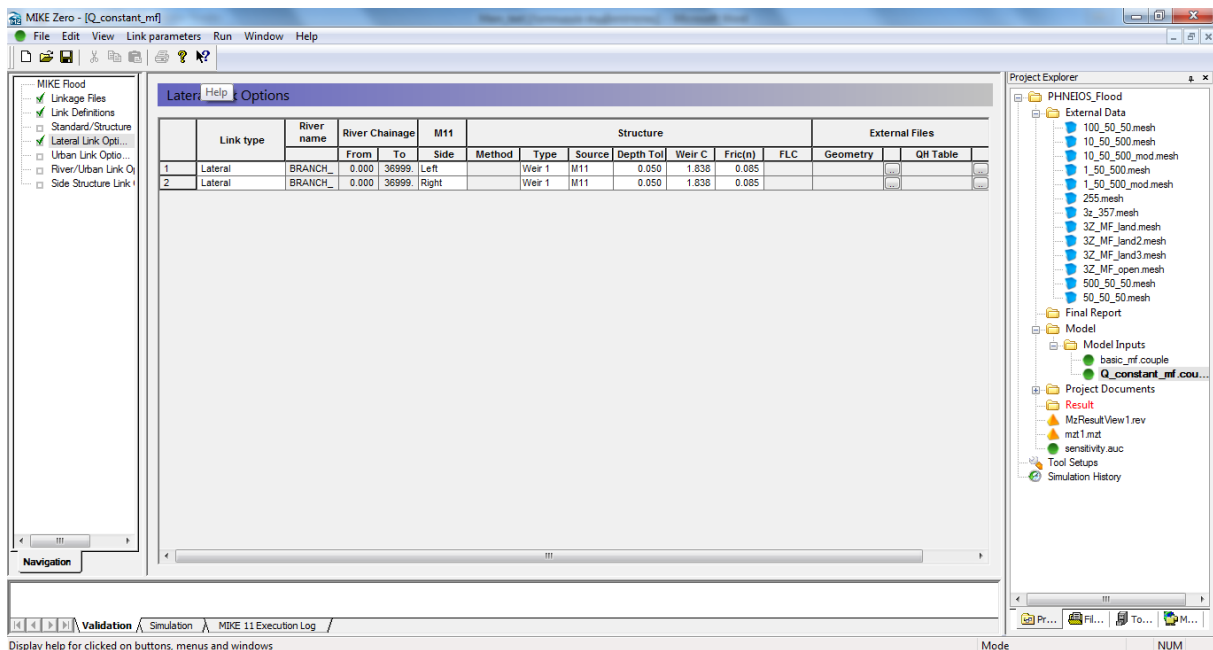
Έπειτα στην αντίστοιχη καρτέλα ορίζεται ο τρόπος σύνδεσης μεταξύ του πλημμυρικού πεδίου και του ποταμού. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε πλευρικός τρόπος σύνδεσης (*Lateral Link*) στη δεξιά και την αριστερή όχθη του ποταμού, όπως αποτυπώνεται στα ακόλουθα Σχήματα 3.30, 3.31 και 3.32.



Σχήμα 3.30 Ορισμός Πλευρικού τρόπου Σύνδεσης (*Lateral Link*) εκατέρωθεν του άξονα του ποταμού στο MIKE FLOOD.



Σχήμα 3.31 Λεπτομέρεια Πλευρικού Τρόπου Σύνδεσης (*Lateral Link*).



**Σχήμα 3.32** Παράμετροι Πλευρικής Σύνδεσης (*Lateral Link*) στο MIKE FLOOD.

Με το συγκεκριμένο τρόπο σύνδεσης, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, προσομοιώνεται η εισροή νερού από το ποτάμι στο πλημμυρικό πεδίο. Στην αντίστοιχη καρτέλα ορίζονται οι παράμετροι της σύνδεσης που επιλέχθηκε. Συγκεκριμένα ορίζονται: οι χιλιομετρικές θέσεις αρχής και τέλους της σύνδεσης, η θέση της σε σχέση με τον άξονα του ποταμού, ο τύπος της εξίσωσης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διερχόμενης παροχής, το βάθος ανοχής καθώς επίσης και κάποιοι συντελεστές όπως είναι για παράδειγμα ο συντελεστής τριβής. Οι διάφορες αυτές παράμετροι μεταβάλλονταν στις διάφορες προσομοιώσεις, όπως θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Τέλος, εφόσον έχουν ορισθεί όλα τα παραπάνω η προσομοίωση μπορεί να ξεκινήσει. Τα παραγόμενα αρχεία αποτελεσμάτων είναι αυτά που έχουν ορισθεί στις επιμέρους προσομοιώσεις των MIKE 11 Simulation Editor και MIKE 21 Flow Model FM.





## 4. Αποτελέσματα Προσομοιώσεων στα Πλημμυρικά Μοντέλα

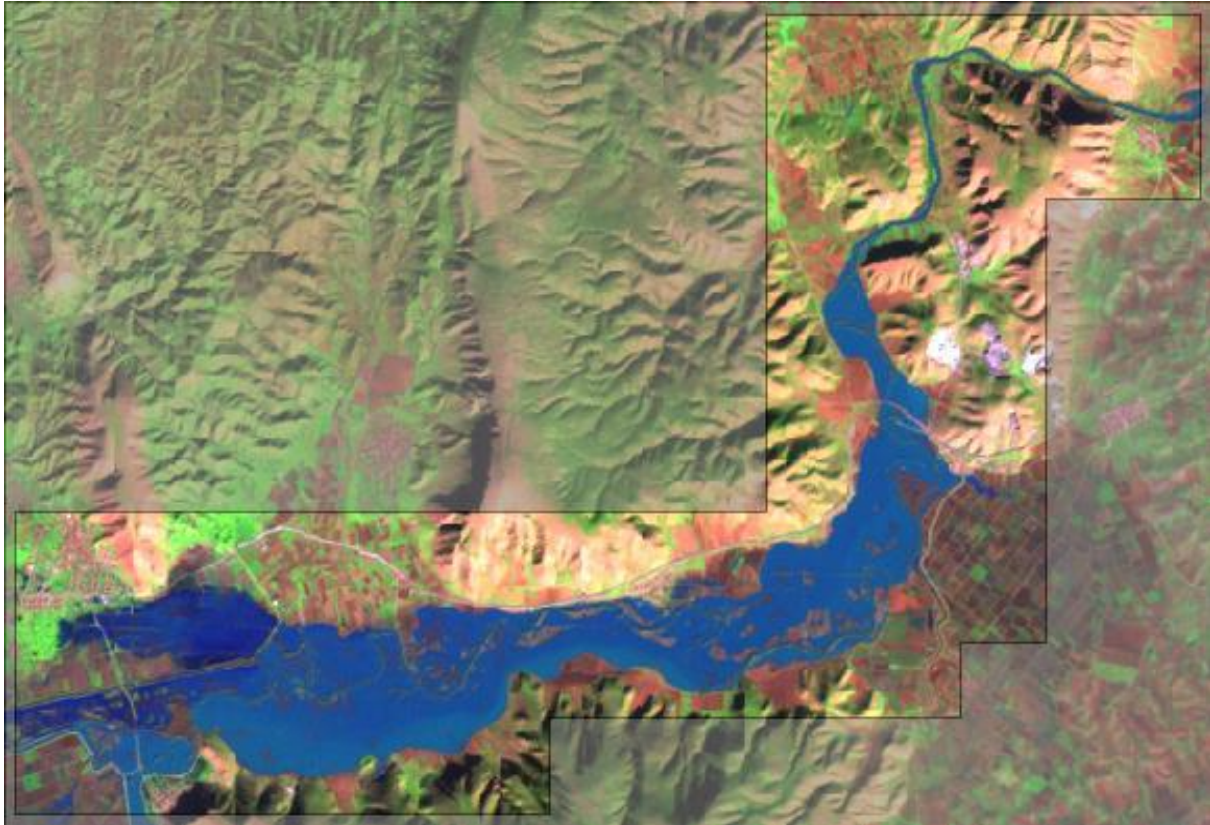
---

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από κάθε μοντέλο τόσο από τη μεταπτυχιακή εργασία του Οικονόμου (2013), όσο και από την παρούσα εφαρμογή. Τα αποτελέσματα διαχωρίζονται για τα τρία μοντέλα σε αυτά που προέκυψαν από τη θεώρηση ανάντη οριακής συνθήκης σταθερής εισροής και σε αυτά που προέκυψαν για μεταβαλλόμενη εισροή.

### 4.1 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τα τρία υδραυλικά μοντέλα στην περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε, 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 ([landsatlook.usgs.gov](http://landsatlook.usgs.gov)) την 28η Ιανουαρίου 2002. 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). Η έκταση της πλημμύρας που δημιούργησε το μελετώμενο 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. Στην Εικόνα 4.1 φαίνεται η έκταση της πλημμυρισμένης περιοχής όπως αυτή καταγράφηκε από το δορυφόρο (Οικονόμου 2013).

Πρέπει στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι η μεγαλύτερη παροχή που έχει καταγραφεί στην θέση Αλή Εφέντη (ανάντη θέση της περιοχής μελέτης) είναι  $637 \text{ m}^3/\text{s}$  τον Μάρτιο του 1987, ενώ στις μεγάλες πλημμύρες του 1994 η παροχή στην ίδια θέση ήταν της τάξης των  $540 \text{ m}^3/\text{s}$  (Mimikou & Koutsoyiannis 1995).



**Εικόνα 4.1** Πλημμύρα της 28/01/2003 όπως καταγράφηκε από το δορυφόρο Landsat 7, bands RGB 742 (Πηγή: landsatlook.usgs.gov).

#### 4.2 Δείκτες Αξιολόγησης

Όπως αναφέρθηκε, για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των τριών μοντέλων χρησιμοποιήθηκε το παρατηρημένο αποτύπωμα συγκεκριμένου πλημμυρικού επεισοδίου. Για την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν 5 συνολικά δείκτες οι οποίοι βοηθούν στην καλύτερη απεικόνιση της αποτελεσματικότητας των μοντέλων. Οι δείκτες περιγράφονται ακολούθως.

Ορίζονται τα εξής για την παρατηρημένη έκταση και την αντίστοιχη που προέκυψε από το κάθε μοντέλο:

- $E_s$  η έκταση της επιφάνειας πλημμυρικής κατάκλυσης όπως αυτή αποτυπώθηκε από το δορυφόρο, η οποία είναι σταθερή και ίση με  $26.30 \text{ km}^2$
- $E_m$  η έκταση της πλημμύρας όπως αυτή προκύπτει από το μοντέλο
- $E_{int}$  η τομή της αποτυπωμένης από το δορυφόρο έκτασης της πλημμύρας με αυτή που προέκυψε από το μοντέλο.

Από τα παραπάνω μεγέθη διαμορφώνονται και επιλέγονται οι ακόλουθοι δείκτες για την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων:

- $\frac{E_{int}}{E_s}$ , ο οποίος είναι ο λόγος της κοινής πλημμύρας σε σχέση με την παρατηρημένη
- $\frac{E_m - E_{int}}{E_m}$ , ο οποίος περιγράφει την επιπλέον έκταση που φαίνεται πλημμυρισμένη στα αποτελέσματα του μοντέλου χωρίς να είναι πλημμυρισμένη στην πραγματικότητα
- $\frac{E_s - E_{int}}{E_m}$ , ο οποίος περιγράφει την έκταση της πραγματικής πλημμύρας η οποία δεν αποτυπώθηκε από το μοντέλο
- $\frac{E_s}{E_s + E_m - E_{int}}$ , ο οποίος είναι ενδεικτικός της προσαρμογής στο παρατηρημένο αποτύπωμα
- $R = \frac{E_s + E_m}{E_{int}} - 2$ , δείκτης ο οποίος αποτελεί ένα συντελεστή βέλτιστης προσαρμογής ο οποίος χρησιμοποιήθηκε και στη μεταπτυχιακή εργασία του Οικονόμου (2013).

Στα επιμέρους αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο επόμενο υποκεφάλαιο, συγκρίνονται κάθε φορά το πλημμυρικό αποτύπωμα που προκύπτει από τα μέγιστα βάθη νερού με την υπάρχουσα δορυφορική φωτογραφία. Επιπλέον, σε στοιχείο σύγκρισης χρησιμοποιείται και το βάθος νερού στην έξοδο του τμήματος του ποταμού  $h_{dnstr}$ .

### 4.3 Συνθήκες Σταθερής Εισροής

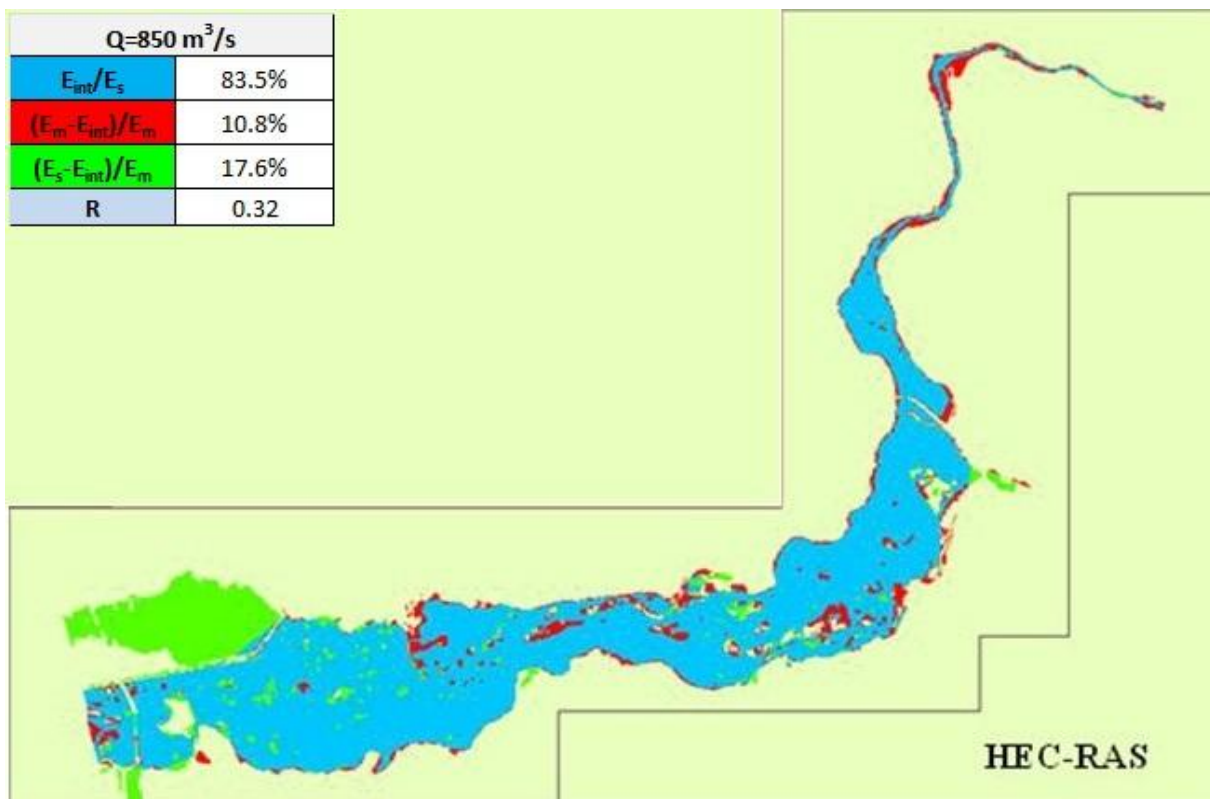
Εξετάσθηκαν και συγκρίθηκαν αρχικά τα αποτελέσματα για συνθήκες σταθερής εισροής στα τρία υδραυλικά μοντέλα. Σε ότι αφορά το HEC-RAS παρουσιάζονται αρχικά τα αποτελέσματα για μόνιμη ροή όπως αυτά προέκυψαν από τη μεταπτυχιακή εργασία του Οικονόμου (2013). Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για σταθερή εισροή και μη μόνιμες συνθήκες ροής. Στο υδραυλικό μοντέλο LISFLOOD-FP παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεταπτυχιακής εργασίας του Οικονόμου (2013) για σταθερή εισροή και τα αντίστοιχα αποτελέσματα μετά την ενσωμάτωση των αναχωμάτων στην τοπογραφία του πεδίου. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις υπό συνθήκες χρονικά μεταβαλλόμενης εισροής, τα αποτελέσματα των οποίων αναλύονται στην αντίστοιχη παράγραφο.

Τέλος, σχετικά με το υδραυλικό μοντέλο MIKE FLOOD παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από επιλεγμένες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν υπό ανάντη συνθήκη σταθερής εισροής με στόχο τη σταθεροποίηση του αποτελέσματος και τη βέλτιστη προσαρμογή του στο παρατηρημένο αποτύπωμα της λεκάνης πλημμυρικής κατάκλυσης. Οι προσομοιώσεις που παρουσιάζονται βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση του μοντέλου και της ευαισθησίας του σε συγκεκριμένες παραμέτρους.

Στο σύνολο των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται για τα τρία υδραυλικά μοντέλα, με μπλε χρώμα απεικονίζεται το τμήμα εκείνο της πραγματικής επιφάνειας πλημμυρικής κατάκλυσης που προσομοιώθηκε από το μοντέλο, με πράσινο χρώμα το τμήμα που ενώ φαίνεται να έχει πλημμυρίσει στη δορυφορική εικόνα, δεν αποτυπώνεται πλημμυρισμένο από το μοντέλο. Τέλος, με κόκκινο χρώμα υποδεικνύεται το τμήμα εκείνο που ενώ φαίνεται πλημμυρισμένο από την προσομοίωση του μοντέλου δεν έχει πλημμυρίσει σύμφωνα με το παρατηρημένο πλημμυρικό αποτύπωμα.

#### 4.3.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης στο HEC-RAS

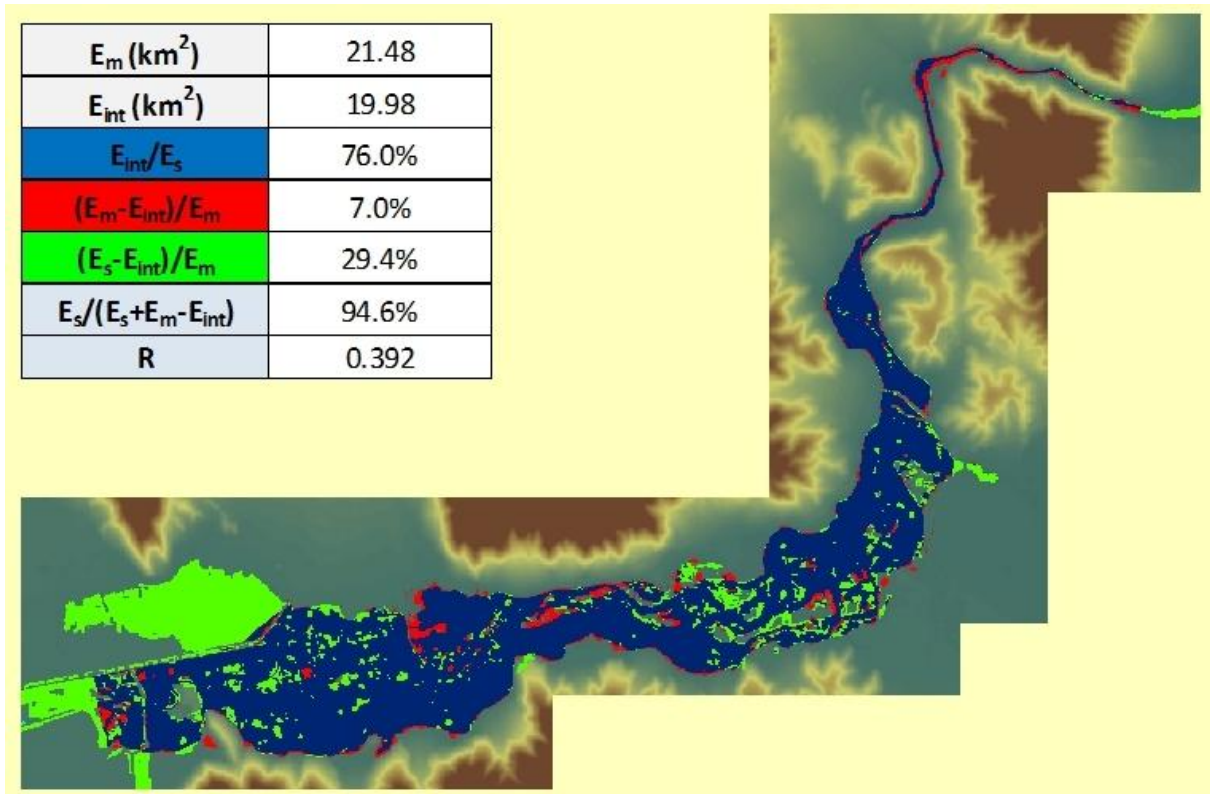
Στο πλαίσιο της εργασίας του Οικονόμου (2013) η προσομοίωση έγινε σε συνθήκες σταθερής εισροής με στόχο τη βέλτιστη προσαρμογή των αποτελεσμάτων στην παρατηρημένη πλημμυρική έκταση. Επιπλέον, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο έγινε θεώρηση συνθηκών μόνιμης ροής. Στην Εικόνα 4.2 φαίνεται το αποτέλεσμα της βέλτιστης προσαρμογής το οποίο όπως φαίνεται προκύπτει για παροχή εισόδου  $Q=850 \text{ m}^3/\text{s}$ . Αναγράφονται επίσης οι τιμές των διάφορων δεικτών που αναφέρθηκαννωρίτερα. Το βάθος ροής στην έξοδο για τη βέλτιστη προσαρμογή του μοντέλου που απεικονίζεται, προέκυψε ίσο με 8.59 m (Οικονόμου 2013).



**Εικόνα 4.2** Βέλτιστη προσαρμογή υδραυλικής προσομοίωσης με το HEC-RAS υπό σταθερή εισροή, με θεώρηση μόνιμων συνθηκών ροής (Πηγή: Οικονόμου 2013).

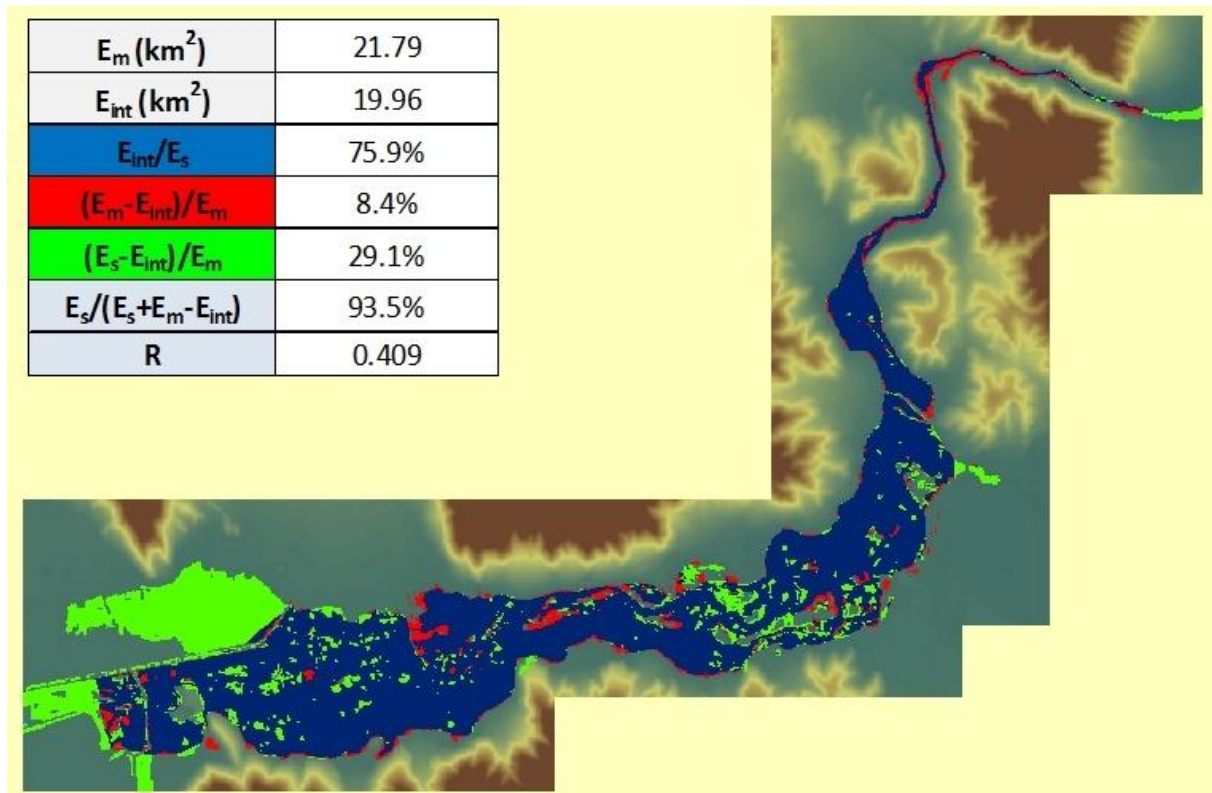
Με στόχο τη διερεύνηση της μεταβολής της πλημμυρικής κατάκλυσης έγινε η υδραυλική προσομοίωση σε συνθήκες μη μόνιμης ροής για σταθερή εισροή επίσης. Παρακάτω αναλύονται οι προσομοιώσεις που έγιναν καθώς επίσης και τα αποτελέσματά τους.

(α) Προσομοίωση με σταθερή εισροή  $Q=850 \text{ m}^3/\text{s}$  και χρονικό βήμα υπολογισμών 2 s. Στην Εικόνα 4.3 φαίνεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης και οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης. Το βάθος ροής στην έξοδο του τμήματος του ποταμού προέκυψε ίσο με 9.91 m.



**Εικόνα 4.3** Αποτέλεσμα προσομοίωσης στο HEC-RAS υπό οριακή συνθήκη σταθερής εισροής  $Q=850 \text{ m}^3/\text{s}$ , με θεώρηση συνθηκών μη μόνιμης ροής.

(β) Προσομοίωση με σταθερή εισροή  $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$  και χρονικό βήμα υπολογισμών 2 s. Στην Εικόνα 4.4 φαίνεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης και οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης. Το βάθος ροής στην έξοδο του τμήματος του ποταμού προέκυψε ίσο με 10.05 m.



**Εικόνα 4.4** Αποτέλεσμα προσομοίωσης στο HEC-RAS υπό οριακή συνθήκη σταθερής εισροής  $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ , με θεώρηση συνθηκών μη μόνιμης ροής.

Όπως είναι εμφανές από τις Εικόνες 4.2, 4.3 και 4.4 παρατηρούνται σχετικά μικρές μεταβολές στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης του μοντέλου και της προσαρμογής του στο πραγματικό αποτύπωμα της λεκάνης κατάκλυσης. Τα αποτελέσματα δε διαφοροποιούνται σημαντικά με την αύξηση της εισερχόμενης παροχής, όσο και με τη θεώρηση μη μόνιμης ροής.

Σε ότι αφορά την προσομοίωση υπό ανάντη οριακή συνθήκη σταθερής εισροής στο HEC-RAS, τόσο για συνθήκες μόνιμης όσο και για συνθήκες μη μόνιμης ροής, παρατηρείται η αδυναμία του μοντέλου να προσομοιώσει την περιοχή στο ανάντη βόρειο τμήμα της λεκάνης κατάκλυσης. Πιο συγκεκριμένα, τόσο με παροχή εισόδου  $850 \text{ m}^3/\text{s}$ , όσο και με παροχή εισόδου  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  οι οποίες αποτελούν μη ρεαλιστικές τιμές για τη συγκεκριμένη περιοχή σύμφωνα με τα υπάρχοντα δεδομένα, το αποτέλεσμα του μοντέλου δεν προσεγγίζει ικανοποιητικά το πραγματικό πλημμυρικό αποτύπωμα. Πρόκειται για μια περιοχή ιδιαίτερα



μικρών κλίσεων όπως προκύπτει από την τοπογραφία της περιοχής, στην οποία πιθανώς εμφανίζονται πολλαπλές κατευθύνσεις ροής. Το HEC-RAS ως μονοδιάστατο μοντέλο υποεκτιμά την έκταση της λεκάνης κατάκλυσης ενώ ταυτόχρονα, υποεκτιμά το χρόνο παραμονής.

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζεται η μεταβολή του δείκτη προσαρμογής R, του συντελεστή κάλυψης  $E_{int}/E_s$  καθώς επίσης και του βάθους ροής  $h_{dnstr}$  στην έξοδο του ποταμού με τη μεταβολή της εισερχόμενης παροχής Q.

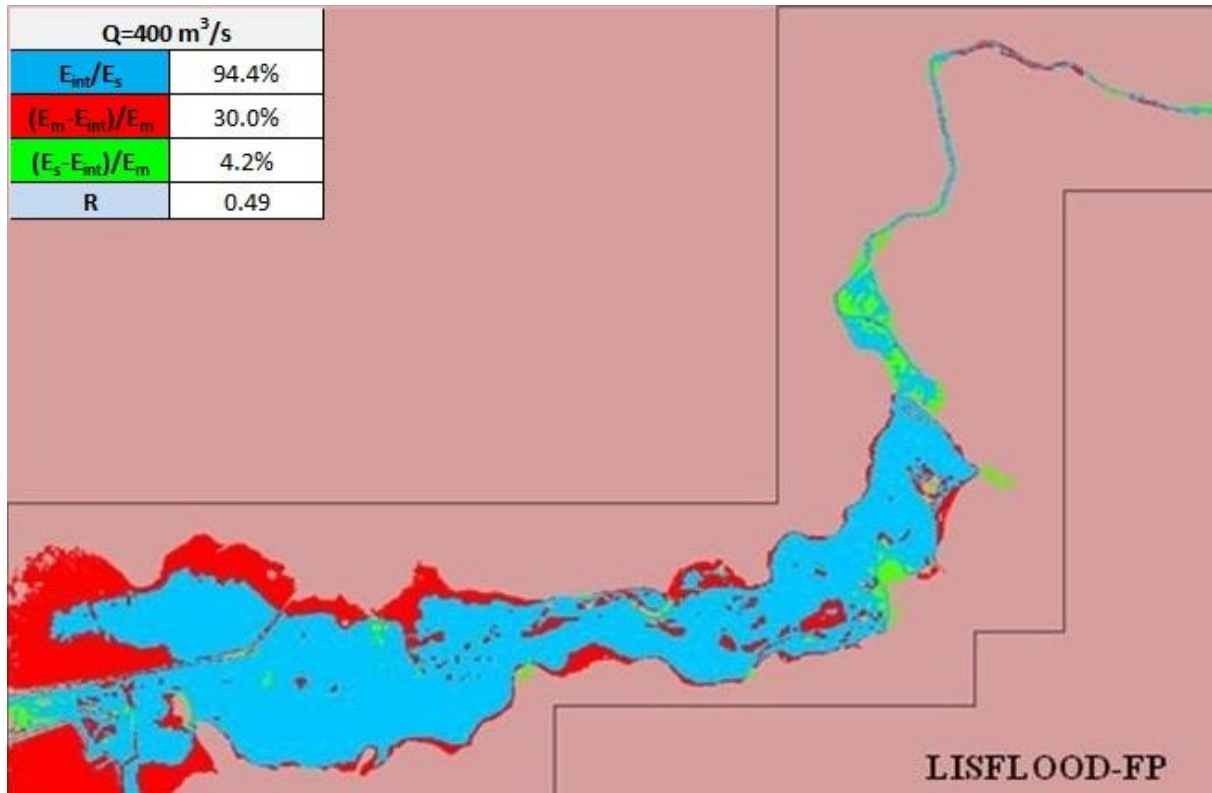
**Πίνακας 4.1** Μεταβολή χαρακτηριστικών μεγεθών με τη θεώρηση μη μόνιμης ροής στο HEC-RAS.

Συνθήκες Ροής	Q (m <sup>3</sup> /s)	R	$E_{int}/E_s$	$h_{dnstr}$ (m)
Μόνιμη Ροή	850	0.320	82.5%	8.59
Μη Μόνιμη Ροή	850	0.392	76.0%	9.91
Μη Μόνιμη Ροή	1000	0.409	74.9%	10.05

Όπως φαίνεται, η μεγαλύτερη μεταβολή σε αυτά τα μεγέθη πραγματοποιείται με τη θεώρηση μη μόνιμης ροής και όχι με τη μεταβολή της εισερχόμενης παροχής. Η μεταβολή του βάθους ροής στην έξοδο του τμήματος του ποταμού με τη θεώρηση μη μόνιμων συνθηκών ροής κυμαίνεται στο 1.30 m περίπου. Αυτό υποδηλώνει ότι το υπολογιστικό σχήμα της μη μόνιμης ροής είναι καταλληλότερο μιας και προσεγγίζει περισσότερο την πραγματικότητα και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε μια πλημμυρική μελέτη. Αφετέρου είναι ένδειξη σχετικής αστάθειας του μοντέλου σε ότι αφορά τον υπολογισμό του συγκεκριμένου μεγέθους.

#### 4.3.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης στο LISFLOOD-FP

Η προσομοίωση έγινε και πάλι με στόχο τη βέλτιστη προσαρμογή στο παρατηρημένο αποτύπωμα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5, το αποτέλεσμα του μοντέλου έχει τη βέλτιστη προσαρμογή για εισερχόμενη παροχή  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ . Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο στην τοπογραφία της περιοχής μελέτης όπως αυτή εισάχθηκε στο μοντέλο, δεν έχουν συμπεριληφθεί τα υφιστάμενα αναχώματα.

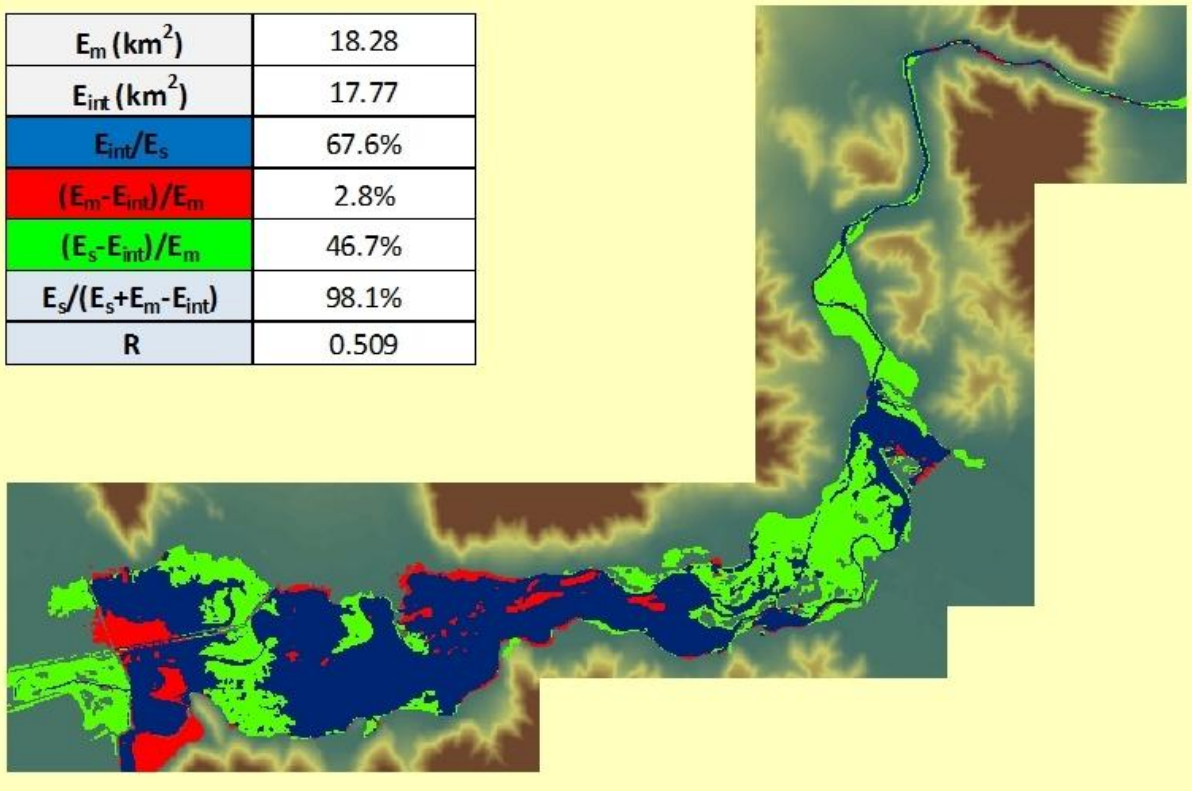


**Εικόνα 4.5** Βέλτιστη προσαρμογή υδραυλικής προσομοίωσης με το LISFLOOD-FP υπό σταθερή εισροή  $Q=400 \text{ m}^3/\text{s}$  (Πηγή: Οικονόμου 2013).

Η προσαρμογή όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4.5 είναι αρκετά ικανοποιητική, με μια σημαντική υπερεκτίμηση της επιφάνειας της πλημμυρικής κατάκλυσης, η οποία πιθανώς οφείλεται στην έλλειψη των αναχωμάτων από την τοπογραφία. Το βάθος νερού υπολογίστηκε ίσο με 6.38 m.

Στο πλαίσιο της διερεύνησης της πλημμυρικής κατάκλυσης πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με την ενσωμάτωση των αναχωμάτων στην τοπογραφία της περιοχής μελέτης. Ως παροχή εισόδου λήφθηκε η παροχή  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  η οποία είναι αυτή που θεωρήθηκε ότι οδηγεί στο αποτέλεσμα με τη βέλτιστη προσαρμογή σύμφωνα με τη μεταπτυχιακή εργασία του Οικονόμου (2013). Το αποτέλεσμα της νέας προσομοίωσης εμφανίζεται στην Εικόνα 4.6.

$E_m$ (km <sup>2</sup> )	18.28
$E_{int}$ (km <sup>2</sup> )	17.77
$E_{int}/E_s$	67.6%
$(E_m - E_{int})/E_m$	2.8%
$(E_s - E_{int})/E_m$	46.7%
$E_s/(E_s + E_m - E_{int})$	98.1%
R	0.509



**Εικόνα 4.6** Αποτέλεσμα προσομοίωσης μετά την ενσωμάτωση των αναχωμάτων στο LISFLOOD-FP υπό οριακή συνθήκη σταθερής εισροής  $Q=400 \text{ m}^3/\text{s}$ .

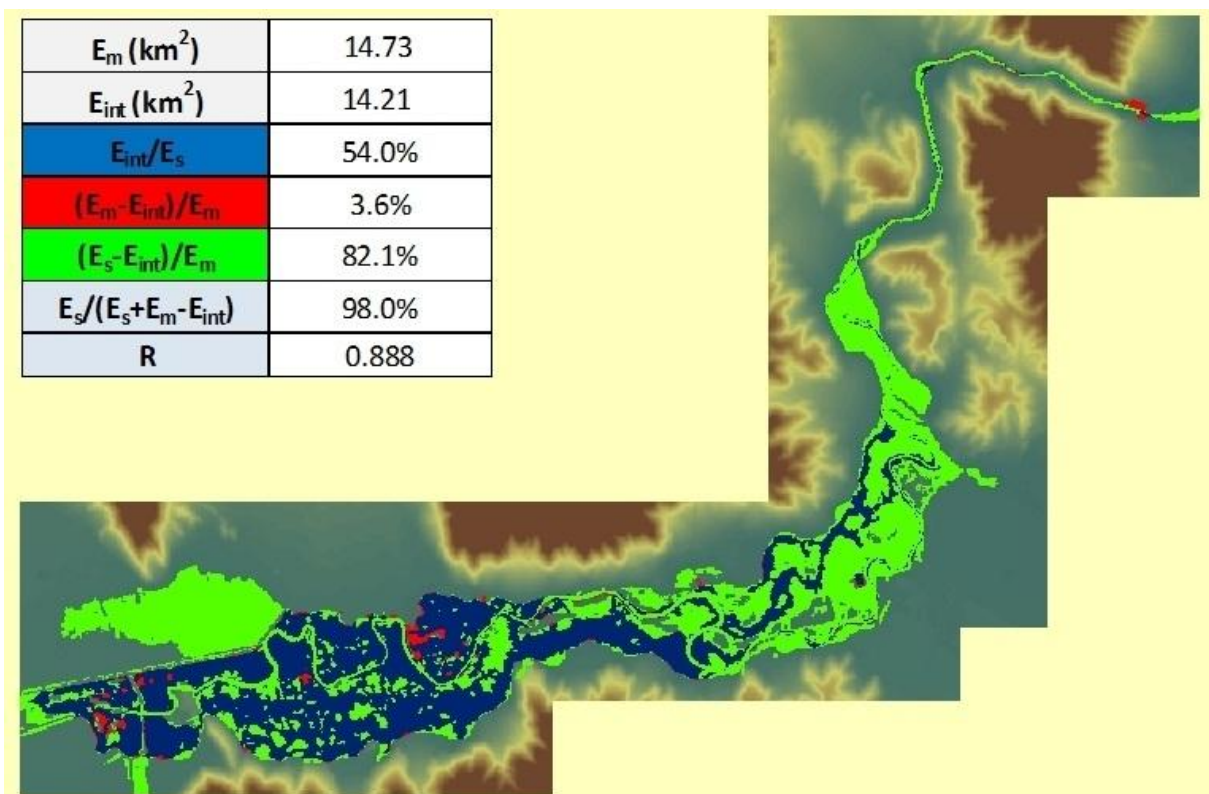
Όπως φαίνεται, το αποτέλεσμα του μοντέλου διαφοροποιείται αρκετά. Πιο συγκεκριμένα, καλύπτεται μερικώς με νερό η περιοχή στο βόρειο τμήμα του αναχώματος στο ανάντη τμήμα. Ωστόσο, σε ότι αφορά την κατάντη περιοχή του ποταμού, από το μέσο του ποταμού και μετά, ένα μεγάλο τμήμα της δεν καλύπτεται από το αποτέλεσμα του μοντέλου. Το βάθος ροής υπολογίστηκε ίσο με 4.50 m.

Όπως λοιπόν προκύπτει από τα παραπάνω, η παροχή  $Q=400 \text{ m}^3/\text{s}$  δεν αποτελεί την παροχή εκείνη για την οποία το αποτέλεσμα του μοντέλου έχει τη βέλτιστη προσαρμογή στο παρατηρημένο αποτύπωμα. Ενδεχομένως, αύξηση της εισερχόμενης παροχής και περισσότερη λεπτομέρεια σχετικά με τα στοιχεία των αναχωμάτων που εισάγονται στο μοντέλο θα είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της έκτασης της πλημμυρικής κατάκλυσης. Για το λόγο αυτό, δε διερευνήθηκε η συμπεριφορά του μοντέλου σε συνθήκες χρονικά μεταβαλλόμενης εισροής.

#### 4.3.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης στο MIKE FLOOD

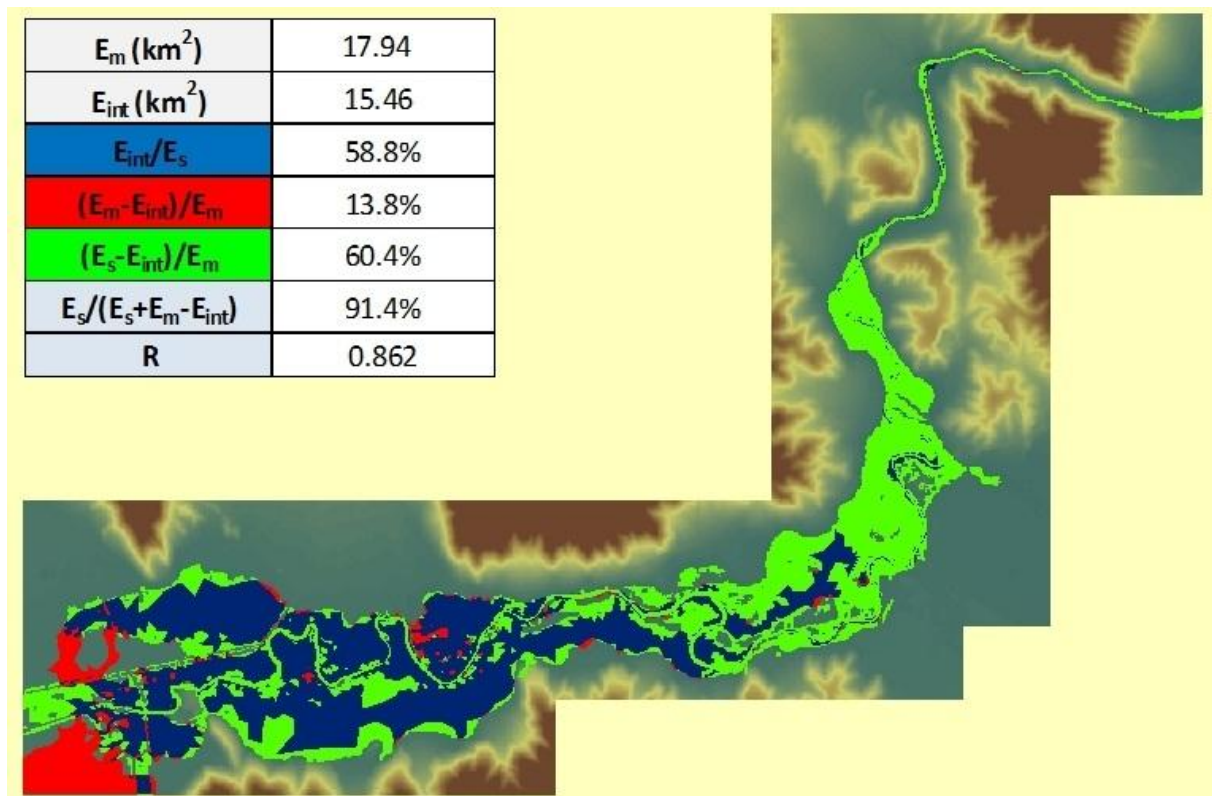
Για την επίτευξη της βέλτιστης προσαρμογής των αποτελεσμάτων του συγκεκριμένου μοντέλου πραγματοποιήθηκαν πολλές διαφορετικές προσομοιώσεις. Στόχος αυτών των προσομοιώσεων ήταν η σταθεροποίηση και βελτιστοποίηση του παραγόμενου κάθε φορά αποτελέσματος μέσα από την αλλαγή διάφορων παραμέτρων όπως είναι η χωρική ανάλυση, το χρονικό βήμα, κ.α.. Εξετάζοντας τα αντίστοιχα αποτελέσματα αποσαφηνίζεται σε μερικό βαθμό η ευαισθησία και η σταθερότητα της λύσης του μοντέλου καθώς επίσης και η ικανότητά του στην πρόβλεψη της επιφάνειας της πλημμυρικής κατάκλυσης. Ακολούθως περιγράφονται οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν ενώ παράλληλα αναλύονται τα αποτελέσματά τους.

Προσομοίωση 1: Με κελιά τριγωνικού κανάβου εμβαδού  $10 \times 10^3 \text{ m}^2 / 500 \times 10^3 \text{ m}^2 / 50 \times 10^6 \text{ m}^2$ , με χρονικό βήμα 10 s, παροχή εισροής  $Q=400 \text{ m}^3/\text{s}$ , τιμές  $h_{\text{dry/wet/flood}}=0.005/0.04/0.05 \text{ m}$ . Σε ότι αφορά την πλευρική σύνδεση (*Lateral Link*) επιλέχθηκαν οι παράμετροι για το βάθος ανοχής και την αντίσταση τριβής ίσοι με  $d_{\text{tol}}=0.1 \text{ m}$ ,  $F(n)=0.085$  αντίστοιχα. Στην Εικόνα 4.7 φαίνεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης και οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης. Το βάθος ροής στην έξοδο προέκυψε ίσο με 6.21 m.



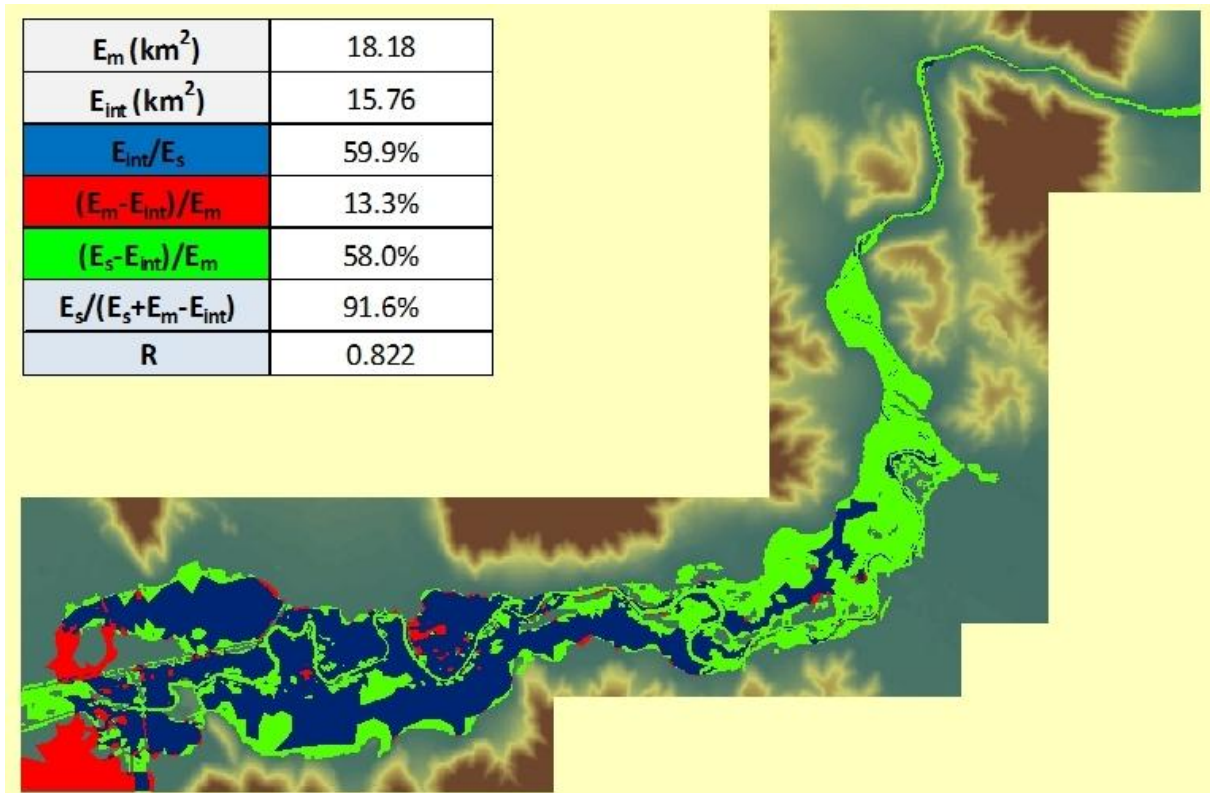
Εικόνα 4.7 Αποτέλεσμα προσομοίωσης 1.

Προσομοίωση 2: Με κελιά τριγωνικού κανάβου εμβαδού  $10 \times 10^3 \text{ m}^2 / 500 \times 10^3 \text{ m}^2 / 50 \times 10^6 \text{ m}^2$ , με χρονικό βήμα 5 s, παροχή εισροής  $Q=400 \text{ m}^3/\text{s}$ , τιμές  $h_{\text{dry/wet/flood}}=0.005/0.03/0.04 \text{ m}$ . Σε ότι αφορά την πλευρική σύνδεση (*Lateral Link*) επιλέχθηκαν οι παράμετροι για το βάθος ανοχής και την αντίσταση τριβής ίσοι με  $d_{\text{tol}}=0.1 \text{ m}$ ,  $F(n)=0.085$  αντίστοιχα. Στην Εικόνα 4.8 φαίνεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης και οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης. Το βάθος ροής στην έξοδο προέκυψε ίσο με 6.06 m.



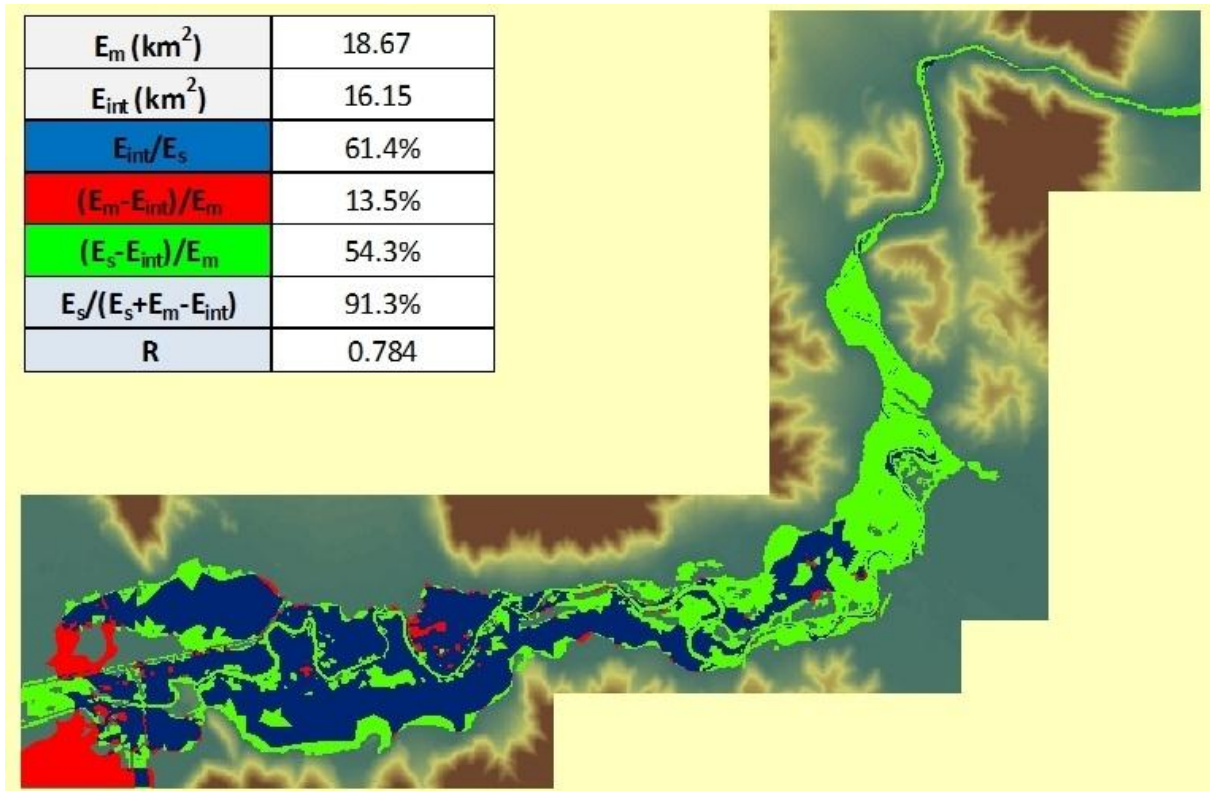
**Εικόνα 4.8** Αποτέλεσμα προσομοίωσης 2.

Προσομοίωση 3: Με κελιά τριγωνικού κανάβου εμβαδού  $10 \times 10^3 \text{ m}^2 / 500 \times 10^3 \text{ m}^2 / 50 \times 10^6 \text{ m}^2$ , με χρονικό βήμα 2 s, παροχή εισροής  $Q=400 \text{ m}^3/\text{s}$ , τιμές  $h_{\text{dry/wet/flood}}=0.005/0.01/0.02 \text{ m}$ . Σε ότι αφορά την πλευρική σύνδεση (*Lateral Link*) επιλέχθηκαν οι παράμετροι για το βάθος ανοχής και την αντίσταση τριβής ίσοι με  $d_{\text{tol}}=0.1 \text{ m}$ ,  $F(n)=0.085$  αντίστοιχα. Στην Εικόνα 4.9 φαίνεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης και οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης. Το βάθος ροής στην έξοδο προέκυψε ίσο με 6.06 m.



**Εικόνα 4.9** Αποτέλεσμα προσομοίωσης 3.

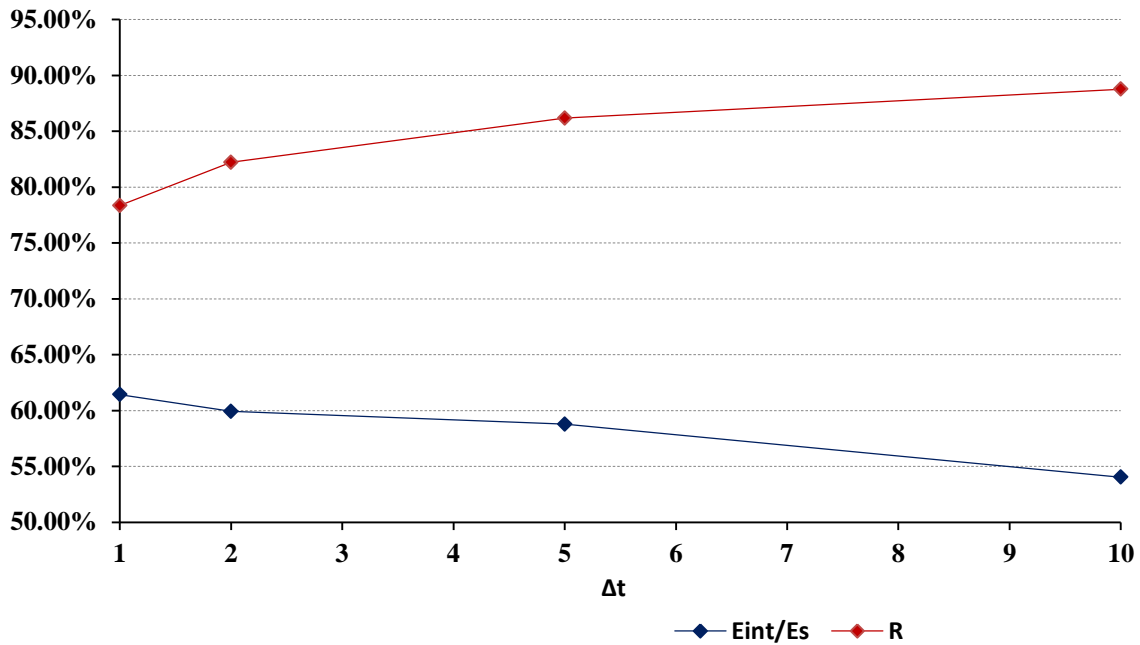
Προσομοίωση 4: Με κελιά τριγωνικού κανάβου εμβαδού  $10 \times 10^3 \text{ m}^2 / 500 \times 10^3 \text{ m}^2 / 50 \times 10^6 \text{ m}^2$ , με χρονικό βήμα 1 s, παροχή εισροής  $Q=400 \text{ m}^3/\text{s}$ , τιμές  $h_{\text{dry/wet/flood}}=0.005/0.01/0.02 \text{ m}$ . Σε ότι αφορά την πλευρική σύνδεση (*Lateral Link*) επιλέχθηκαν οι παράμετροι για το βάθος ανοχής και την αντίσταση τριβής ίσοι με  $d_{\text{tol}}=0.1 \text{ m}$ ,  $F(n)=0.085$  αντίστοιχα. Στην Εικόνα 4.10 φαίνεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης και οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης. Το βάθος ροής στην έξοδο προέκυψε ίσο με 6.06 m.



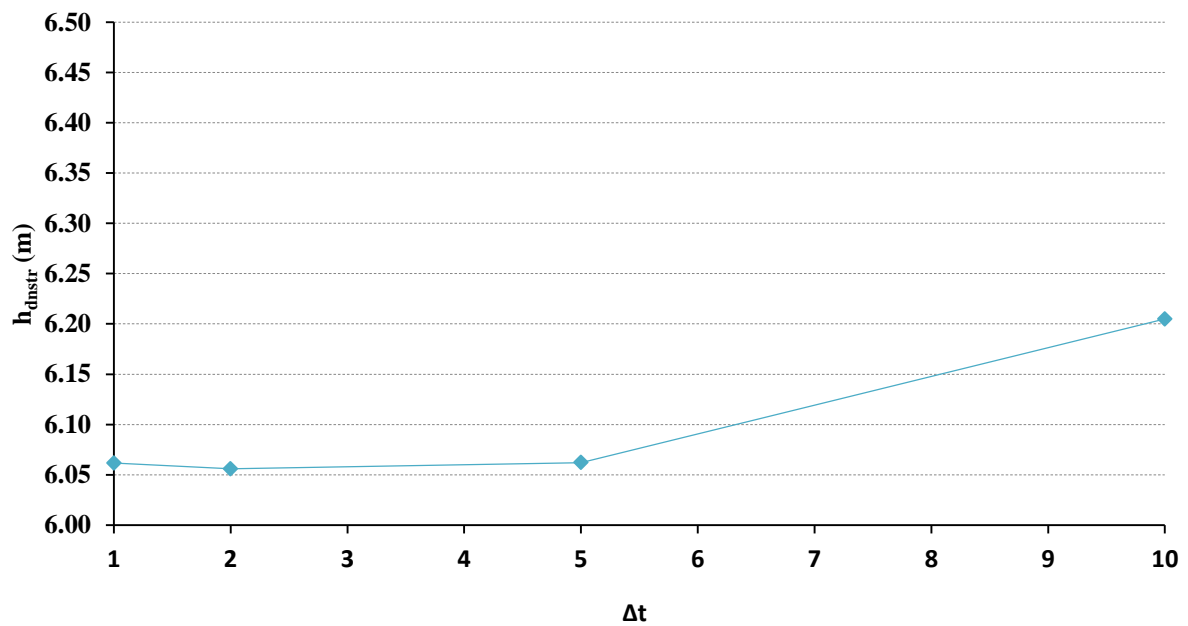
**Εικόνα 4.10** Αποτέλεσμα προσομοίωσης 4.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων 1 έως 4 φαίνεται ότι αρχικά με τη μείωση του χρονικού βήματος από 10 σε 5 s το μοντέλο προσομοιώνει την περιοχή στο ανάντη τμήμα του ποταμού η οποία βρίσκεται στο βόρειο μέρος του μεγάλου αναχώματος με σημαντική ακρίβεια. Η αλλαγή της διεύθυνσης της ροής προσομοιώνεται επαρκώς από το MIKE FLOOD γεγονός που είναι ενδεικτικό της καταλληλότητάς του σε περιπτώσεις περιοχών με μικρές κλίσεις όπου οι συνθήκες ροής χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερη μεταβλητότητα. Ταυτόχρονα, αυξάνεται η επιφάνεια της πλημμυρικής κατάκλυσης με τη μείωση του χρονικού βήματος στα 5 s. Επιπρόσθετα, με την περαιτέρω μείωση του χρονικού βήματος των υπολογισμών σε 2 και 1 s, καθώς επίσης και με τη μείωση του ορίου για ξηρό ή υγρό υπολογιστικό κελί σε 0.005/0.01/0.02 m παρατηρείται σταδιακή αύξηση του πλημμυρικού αποτυπώματος.

Στο Σχήμα 4.1 φαίνονται γραφικά τα όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Επιπλέον, στο Σχήμα 4.2 φαίνονται τα βάθη νερού στην έξοδο για τις τέσσερις πρώτες προσομοιώσεις.



**Σχήμα 4.1** Μεταβολή συντελεστή κάλυψης  $E_{int}/E_s$  και συντελεστή προσαρμογής R με τη μεταβολή του χρονικού βήματος, στο MIKE FLOOD.

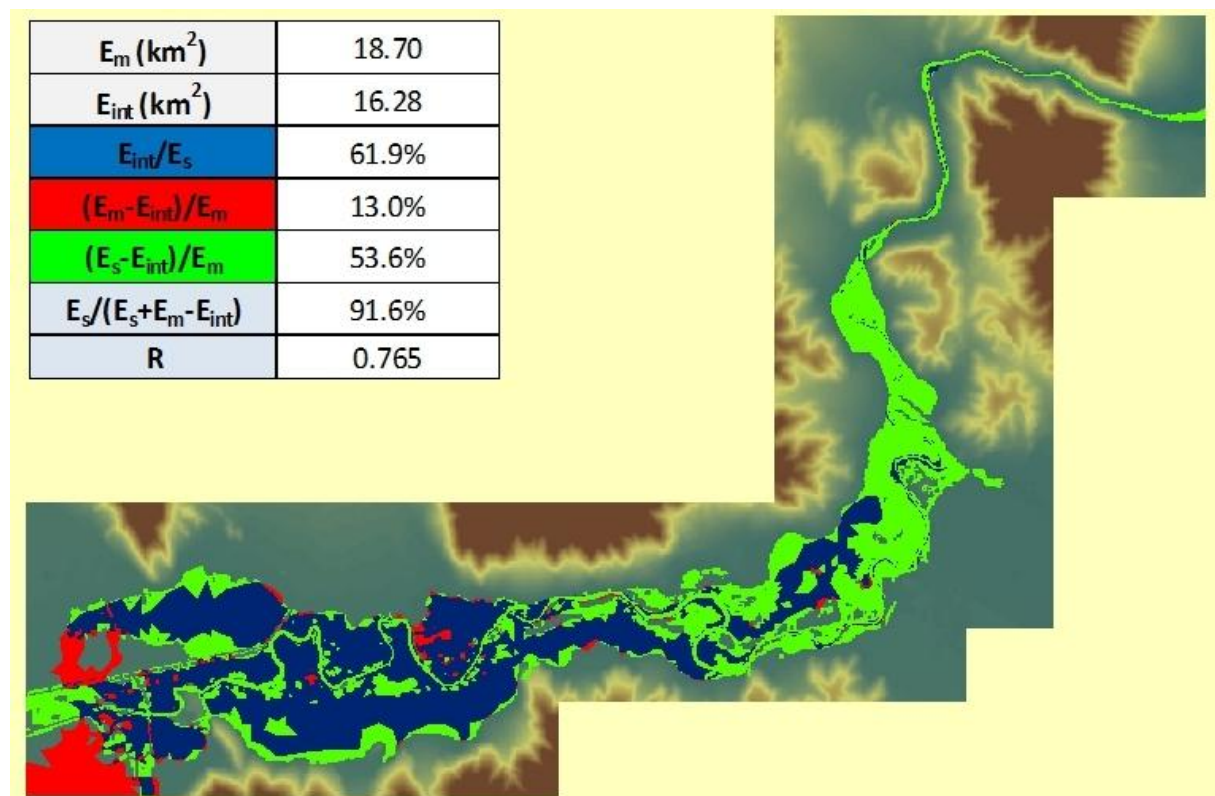


**Σχήμα 4.2** Βάθος νερού στην έξοδο του τμήματος του ποταμού με τη μεταβολή του χρονικού βήματος στο MIKE FLOOD.



Όπως είναι εμφανές από το Σχήμα 4.1, το ποσοστό κάλυψης αυξάνεται σταδιακά με μείωση του χρονικού βήματος. Κατ'έπекταση, ο δείκτης βέλτιστης προσαρμογής R ακολουθεί αντίστοιχη μείωση. Σε ότι αφορά το βάθος νερού στην έξοδο, αυτό παραμένει πρακτικά αμετάβλητο όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.2, καθώς η συνολική του μεταβολή για μεταβολή του χρονικού βήματος από 10 σε 1 s είναι της τάξης των 15 cm περίπου. Συγκεκριμένα, μετά τη θέσπιση του χρονικού βήματος των 5 s δεν παρατηρείται καμία μεταβολή στο βάθος ροής στην έξοδο.

Προσομοίωση 5: Με κελιά τριγωνικού κανάβου εμβαδού  $10 \times 10^3 \text{ m}^2 / 500 \times 10^3 \text{ m}^2 / 50 \times 10^6 \text{ m}^2$ , με χρονικό βήμα 1 s, παροχή εισροής  $Q=400 \text{ m}^3/\text{s}$ , τιμές  $h_{\text{dry/wet/flood}}=0.005/0.01/0.02 \text{ m}$ . Σε ότι αφορά την πλευρική σύνδεση (*Lateral Link*) επιλέχθηκαν οι παράμετροι για το βάθος ανοχής και την αντίσταση τριβής ίσοι με  $d_{\text{oi}}=0.05 \text{ m}$ ,  $F(n)=0.085$  αντίστοιχα. Στην Εικόνα 4.11 φαίνεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης και οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης. Το βάθος ροής στην έξοδο προέκυψε ίσο με 6.06 m.

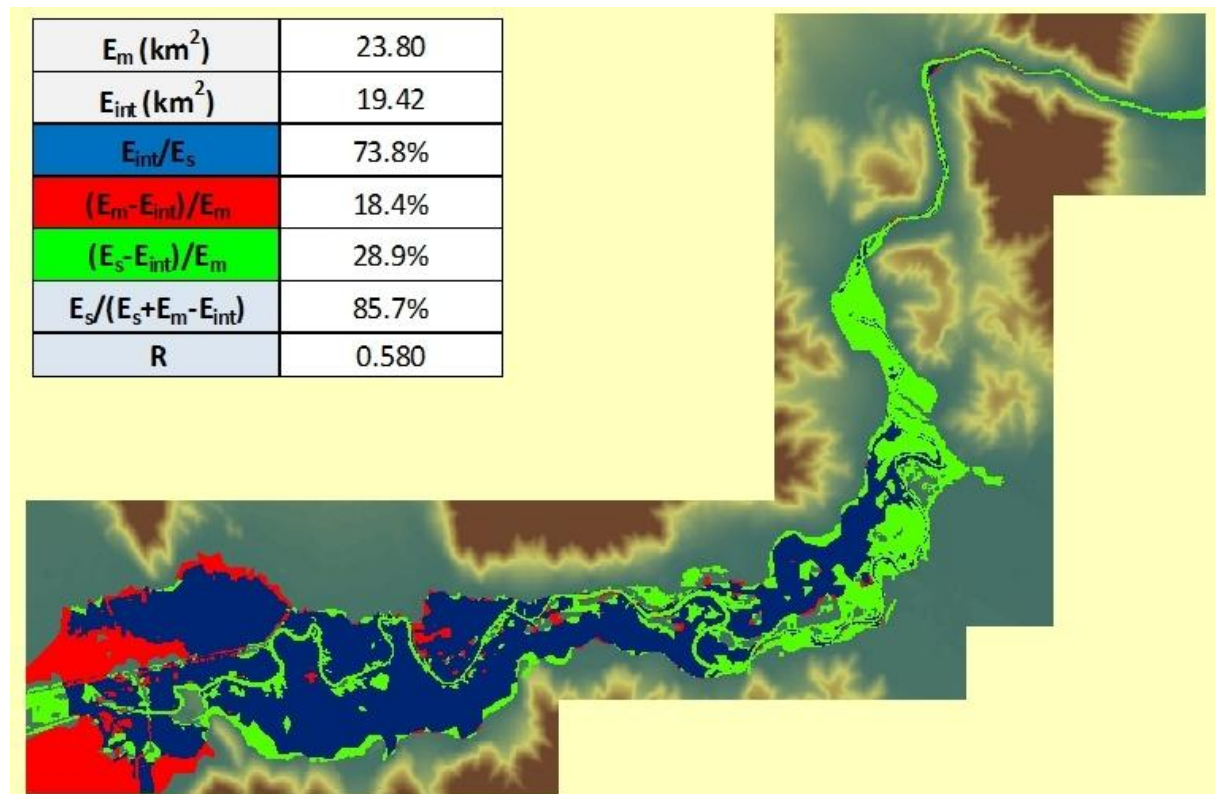


**Εικόνα 4.11** Αποτέλεσμα προσομοίωσης 5.

Συγκριτικά με τις τέσσερις πρώτες, στην πέμπτη προσομοίωση μεταβάλλεται το βάθος ανοχής στο Link. Όπως φαίνεται από τις Εικόνες 4.10 και 4.11 η μεταβολή της επιφάνειας πλημμυρικής κατάκλυσης είναι σχετικά μικρή. Ομοίως και η μείωση του συντελεστή

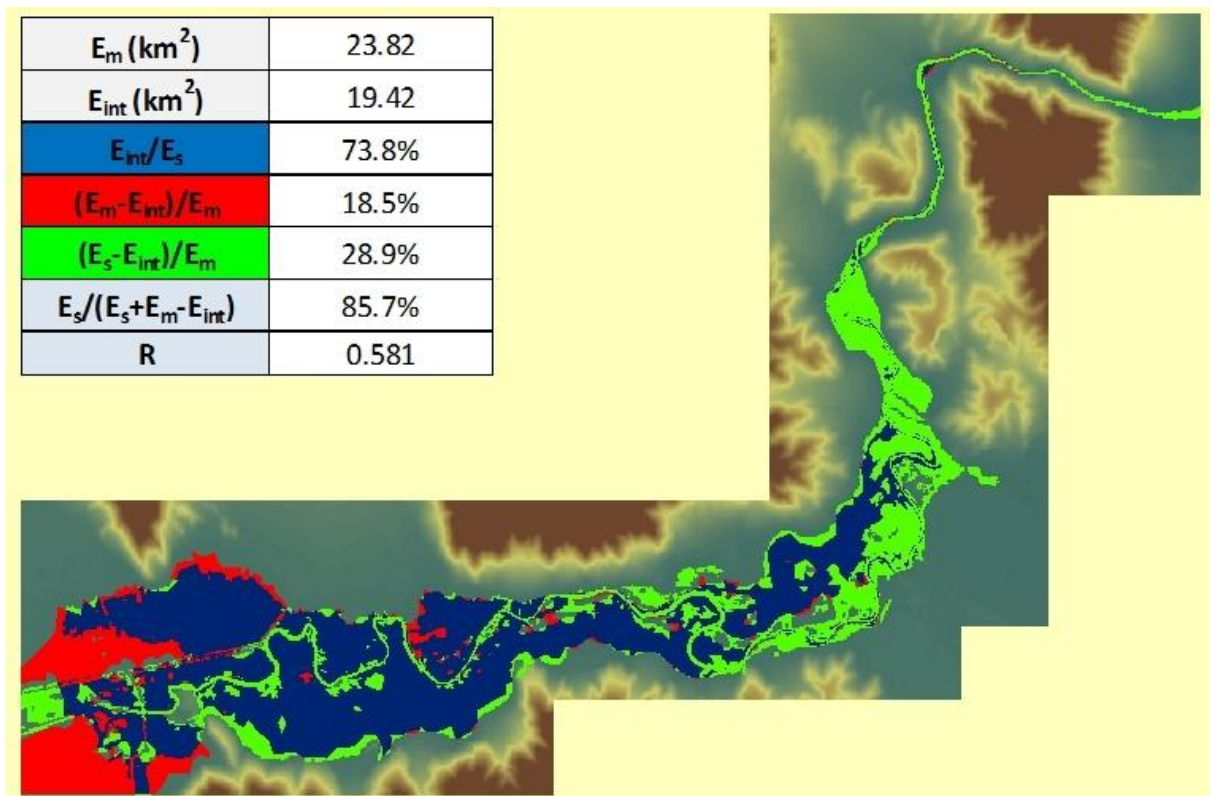
βέλτιστης προσαρμογής R. Σε ότι αφορά το βάθος ροής στην έξοδο, αυτό παρέμεινε σταθερό στα 6.06 m.

Προσομοίωση 6: Με κελιά τριγωνικού κανάβου εμβαδού  $100 \text{ m}^2/10 \times 10^3 \text{ m}^2/500 \times 10^3 \text{ m}^2/50 \times 10^6 \text{ m}^2$ , με χρονικό βήμα 1 s, παροχή εισροής  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ , τιμές  $h_{\text{dry/wet/flood}}=0.005/0.01/0.02 \text{ m}$ . Σε ότι αφορά την πλευρική σύνδεση (*Lateral Link*) επιλέχθηκαν οι παράμετροι για το βάθος ανοχής και την αντίσταση τριβής ίσοι με  $d_{\text{tot}}=0.05 \text{ m}$ ,  $F(n)=0.085$  αντίστοιχα. Στην Εικόνα 4.12 φαίνεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης και οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης. Το βάθος ροής στην έξοδο προέκυψε ίσο με 6.44 m.



Εικόνα 4.12 Αποτέλεσμα προσομοίωσης 6.

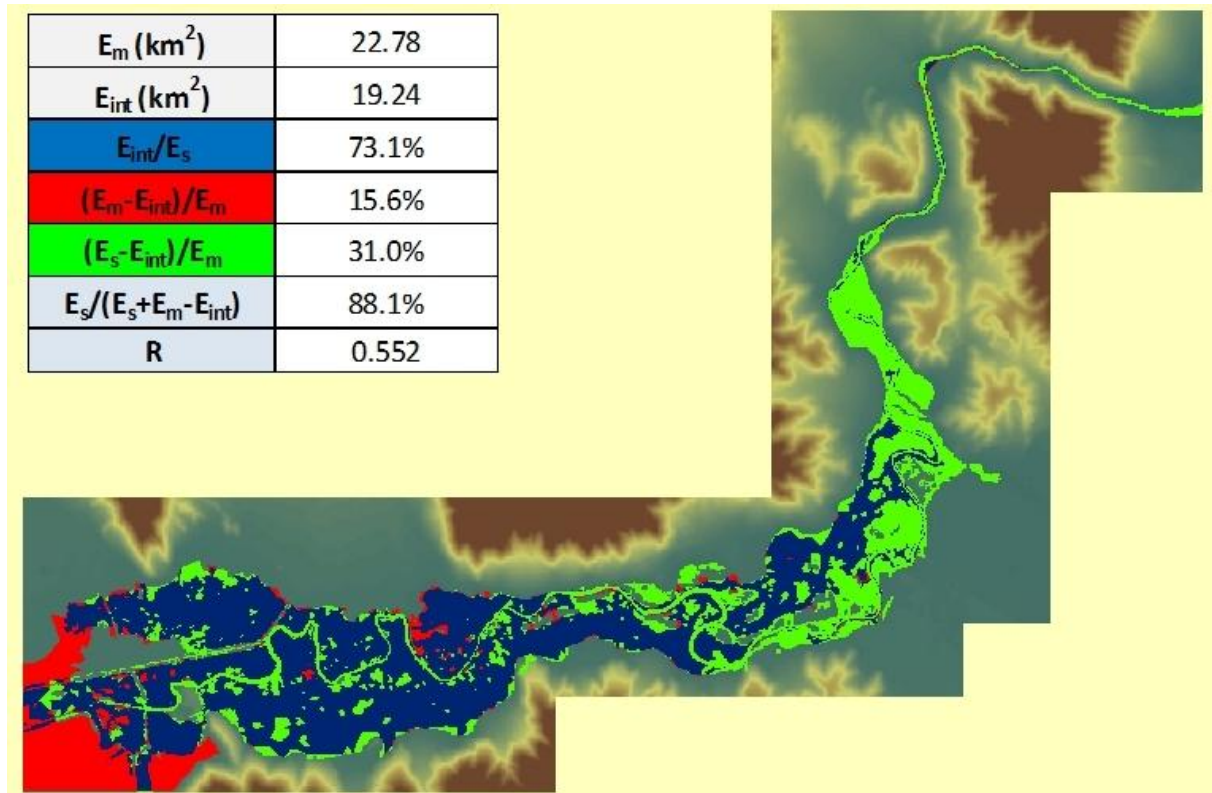
Προσομοίωση 7: Με κελιά τριγωνικού κανάβου εμβαδού  $100 \text{ m}^2/10 \times 10^3 \text{ m}^2/500 \times 10^3 \text{ m}^2/50 \times 10^6 \text{ m}^2$ , με χρονικό βήμα  $1 \text{ s}$ , παροχή εισροής  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ , τιμές  $h_{\text{dry/wet/flood}}=0.005/0.01/0.02 \text{ m}$ . Σε ότι αφορά την πλευρική σύνδεση (*Lateral Link*) επιλέχθηκαν οι παράμετροι για το βάθος ανοχής και την αντίσταση τριβής ίσοι με  $d_{\text{tol}}=0.05 \text{ m}$ ,  $F(n)=0.05$  αντίστοιχα. Στην Εικόνα 4.13 φαίνεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης και οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης. Το βάθος ροής στην έξοδο προέκυψε ίσο με  $6.46 \text{ m}$ .



**Εικόνα 4.13** Αποτέλεσμα προσομοίωσης 7.

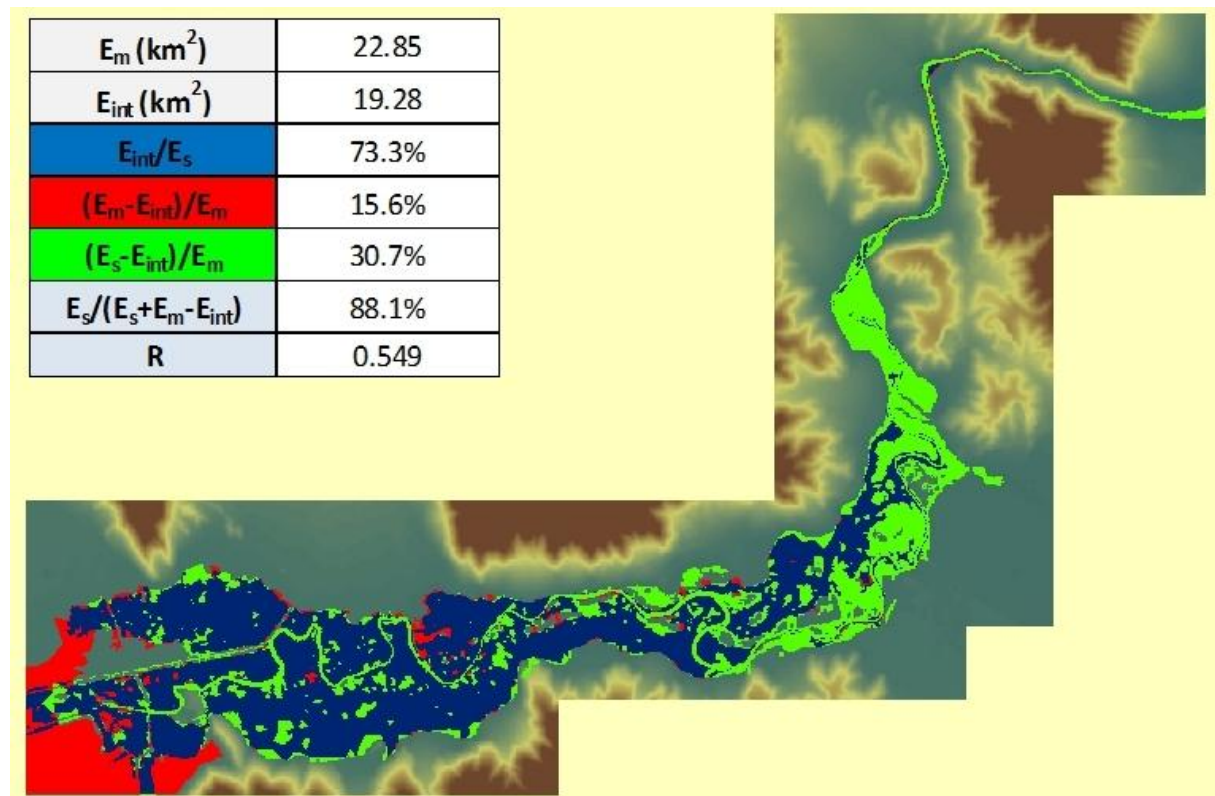
Σε ότι αφορά την έκτη προσομοίωση, προστίθεται ακόμα μία ζώνη τριγωνικών κελιών μέγιστου εμβαδού  $100 \text{ m}^2$  με σκοπό την αύξηση της χωρικής ανάλυσης. Ταυτόχρονα, η εισερχόμενη σταθερή παροχή αυξάνεται από τα  $400$  στα  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ . Σαν αποτέλεσμα, όπως φαίνεται από την Εικόνα 4.12 υπάρχει εμφανώς καλύτερη προσαρμογή του αποτελέσματος του μοντέλου στο παρατηρημένο και αξιοσημείωτη μείωση του συντελεστή R από  $0.77$  σε  $0.58$ . Στη συνέχεια, στην έβδομη προσομοίωση μεταβλήθηκε η αντίσταση τοπικά στο Link, γεγονός που δεν επέφερε πρακτικά καμία μεταβολή στο παραγόμενο αποτέλεσμα. Η μεταβολή του βάθους νερού στην έξοδο του τμήματος του ποταμού είναι ιδιαίτερα περιορισμένη.

Προσομοίωση 8: Με κελιά τριγωνικού κανάβου εμβαδού  $500 \text{ m}^2/50 \times 10^3 \text{ m}^2/50 \times 10^6 \text{ m}^2$ , με χρονικό βήμα  $1 \text{ s}$ , παροχή εισροής  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$ , τιμές  $h_{\text{dry/wet/flood}}=0.005/0.01/0.02 \text{ m}$ . Σε ότι αφορά την πλευρική σύνδεση (*Lateral Link*) επιλέχθηκαν οι παράμετροι για το βάθος ανοχής και την αντίσταση τριβής ίσοι με  $d_{\text{tot}}=0.05 \text{ m}$ ,  $F(n)=0.05$  αντίστοιχα. Στην Εικόνα 4.14 φαίνεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης και οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης. Το βάθος ροής στην έξοδο υπολογίστηκε ίσο με  $6.51 \text{ m}$ .



**Εικόνα 4.14** Αποτέλεσμα προσομοίωσης 8.

Προσομοίωση 9: Με κελιά τριγωνικού κανάβου εμβαδού  $500 \text{ m}^2/50 \times 10^3 \text{ m}^2/50 \times 10^6 \text{ m}^2$ , με χρονικό βήμα  $1 \text{ s}$ , παροχή εισροής  $Q=550 \text{ m}^3/\text{s}$ , τιμές  $h_{\text{dry/wet/flood}}=0.005/0.008/0.01 \text{ m}$ . Σε ότι αφορά την πλευρική σύνδεση (*Lateral Link*) επιλέχθηκαν οι παράμετροι για το βάθος ανοχής και την αντίσταση τριβής ίσοι με  $d_{\text{tol}}=0.085 \text{ m}$ ,  $F(n)=0.05$  αντίστοιχα. Στην Εικόνα 4.15 φαίνεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης και οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης. Το βάθος ροής στην έξοδο υπολογίστηκε ίσο με  $6.51 \text{ m}$ .



**Εικόνα 4.15** Αποτέλεσμα προσομοίωσης 9.

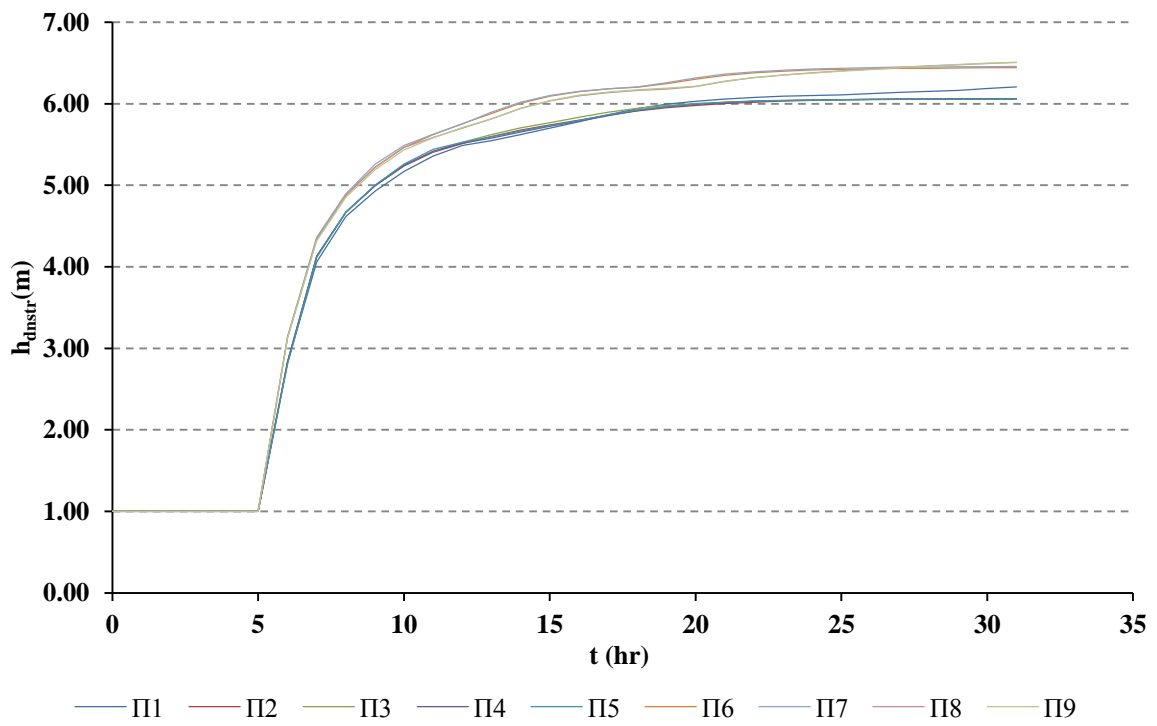
Στην όγδοη προσομοίωση σε σχέση με την έβδομη μεταβλήθηκε η πρώτη ζώνη χωρικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, από τριγωνικά κελιά μέγιστου εμβαδού  $100 \text{ m}^2$  και  $10000 \text{ m}^2$  η πρώτη ζώνη διαμορφώθηκε με κελιά εμβαδού  $500 \text{ m}^2$ . Τέλος, στην ένατη προσομοίωση, μειώθηκε το όριο ξηρού ή υγρού υπολογιστικού κελιού από  $0.005/0.01/0.02$  σε  $0.005/0.008/0.01 \text{ m}$ .

Τόσο αναφορικά με την επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης, όσο και αναφορικά με το βάθος νερού στην έξοδο, οι μεταβολές που παρατηρούνται στις πέντε τελευταίες προσομοιώσεις είναι ιδιαίτερα μικρές. Συγκεκριμένα, το ποσοστό υπερκάλυψης της παρατηρημένης πλημμυρικής έκτασης από το αποτέλεσμα του μοντέλου κυμαίνεται στο 73 έως 74%. Αντίστοιχα, η μέγιστη μεταβολή του βάθους ροής κυμαίνεται στα  $0.50 \text{ m}$ .

Συνολικά, όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 4.2 και στο Σχήμα 4.5 το μοντέλο δεν παρουσιάζει ευαισθησία στη μεταβολή του χρονικού βήματος καθώς επίσης και στις μεταβολές των χωρικών ζωνών που αναφέρθηκαν, σε ότι αφορά τον υπολογισμό του βάθους νερού στην έξοδο του τμήματος του ποταμού. Όπως είναι εμφανές η μεγαλύτερη μεταβολή στο βάθος ροής στην έξοδο εμφανίζεται με την αύξηση της τιμής της εισερχόμενης παροχής, μετά την έκτη προσομοίωση.

**Πίνακας 4.2** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα MIKE FLOOD σε συνθήκες σταθερής εισροής.

	Ελάχιστη χωρική ζώνη (m <sup>2</sup> )	Χρονικό Βήμα (s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	h <sub>dry/wet/flood</sub> (m)	d <sub>tol</sub> (m)	F(n)	E <sub>m</sub> (km <sup>2</sup> )	h <sub>dnstr</sub> (m)	R
Προσομοίωση 1	10×10 <sup>3</sup>	10	400	0.005/0.04/0.05	0.10	0.085	14.73	6.21	0.888
Προσομοίωση 2	10×10 <sup>3</sup>	5	400	0.005/0.03/0.04	0.10	0.085	17.94	6.06	0.862
Προσομοίωση 3	10×10 <sup>3</sup>	2	400	0.005/0.01/0.02	0.10	0.085	18.18	6.06	0.822
Προσομοίωση 4	10×10 <sup>3</sup>	1	400	0.005/0.01/0.02	0.10	0.085	18.67	6.06	0.784
Προσομοίωση 5	10×10 <sup>3</sup>	1	400	0.005/0.01/0.02	0.05	0.085	18.70	6.06	0.765
Προσομοίωση 6	100	1	500	0.005/0.01/0.02	0.05	0.085	23.82	6.44	0.580
Προσομοίωση 7	100	1	500	0.005/0.01/0.02	0.05	0.050	23.81	6.46	0.581
Προσομοίωση 8	500	1	500	0.005/0.01/0.02	0.05	0.085	22.78	6.51	0.552
Προσομοίωση 9	500	1	550	0.005/0.008/0.01	0.05	0.085	22.85	6.51	0.549



**Σχήμα 4.5** Βάθος νερού στην έξοδο του ποταμού με το χρόνο.

#### 4.4 Συνθήκες Χρονικά Μεταβαλλόμενης Εισροής

Για τα δύο μοντέλα που μελετώνται πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις θέτοντας ανάντη οριακή συνθήκη χρονικά μεταβαλλόμενης εισροής. Πιο αναλυτικά ορίστηκε ένα πλημμυρογράφημα εισόδου για κάθε ένα από τα δύο μοντέλα. Τα πλημμυρογραφήματα διαμορφώθηκαν από την ακόλουθη Σχέση 4.1 (Dottori *et al.* 2009):

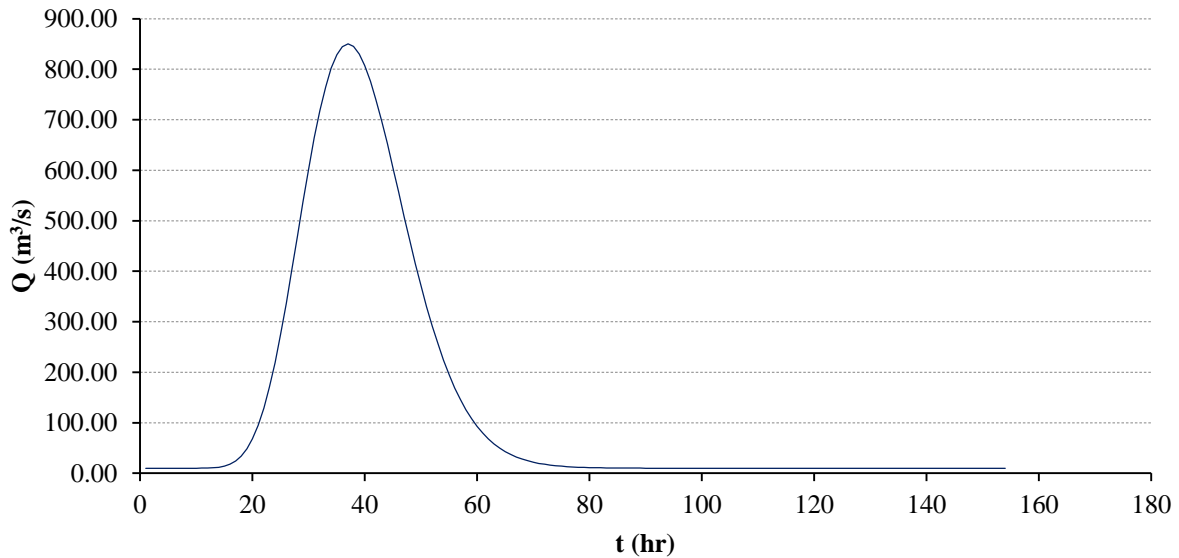
$$Q(t) = Q_b + (Q_p - Q_b) * \left[ \frac{1}{T_p} \exp\left(1 - \frac{1}{T_p}\right) \right]^\gamma \quad (4.1)$$

Όπου,  $Q_b$  είναι η βασική ροή η οποία θεωρήθηκε ίση με  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $T_p$  ο χρόνος ανόδου ο οποίος θεωρήθηκε ίσος με 36 h,  $Q_p$  η παροχή αιχμής και  $\gamma$  ένας συντελεστής που θεωρήθηκε ίσος με 16. Για κάθε ένα μοντέλο διαμορφώθηκε το υδρογράφημα θέτοντας ως παροχή αιχμής αυτή που προέκυψε κατά την προσομοίωση με σταθερή εισροή ότι έχει τη βέλτιστη προσαρμογή.

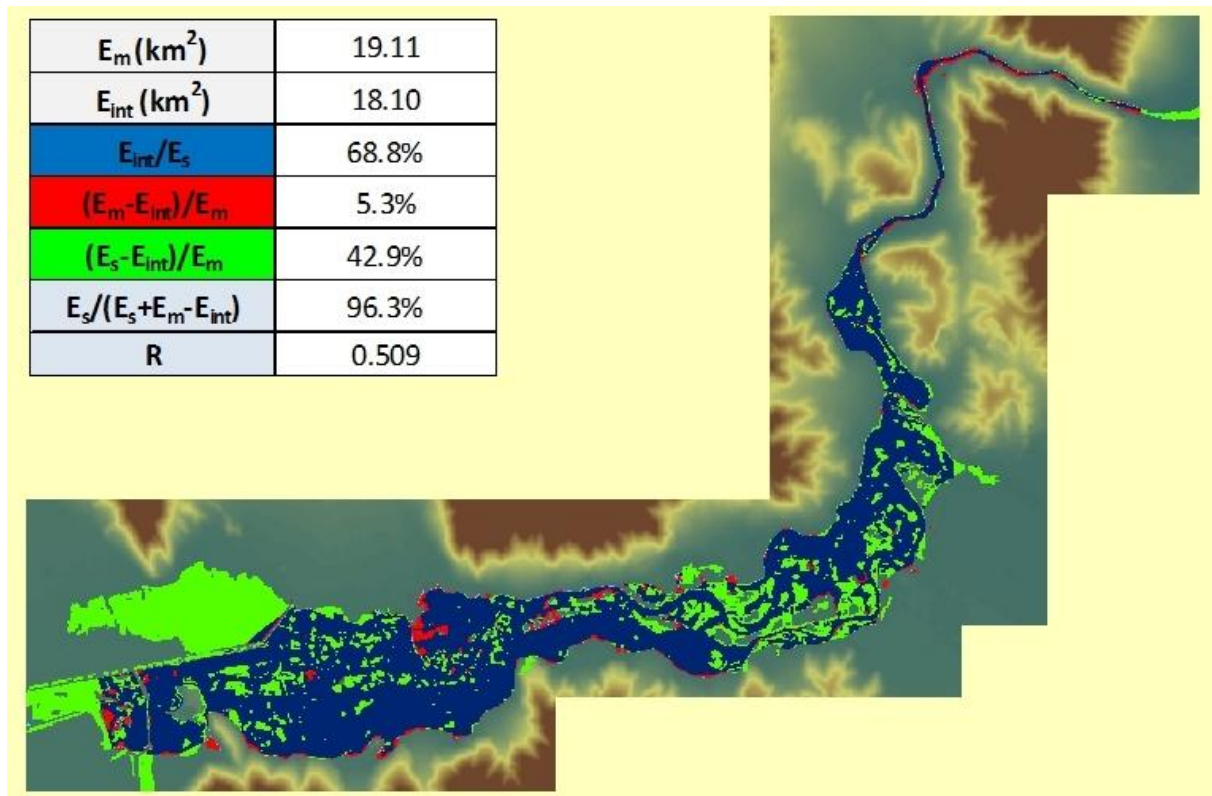


#### 4.4.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης στο HEC-RAS

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με πλημμυρογράφημα αιχμής  $Q=850 \text{ m}^3/\text{s}$ , χρονικό βήμα υπολογισμών  $2 \text{ s}$  και αρχική παροχή ποταμού  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται το πλημμυρογράφημα εισόδου, ενώ στην Εικόνα 4.16 φαίνεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης και οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης. Το βάθος ροής στην έξοδο του τμήματος του ποταμού προέκυψε ίσο με  $9.15 \text{ m}$ .



**Σχήμα 4.6** Πλημμυρογράφημα εισόδου προσομοίωσης στο HEC-RAS.

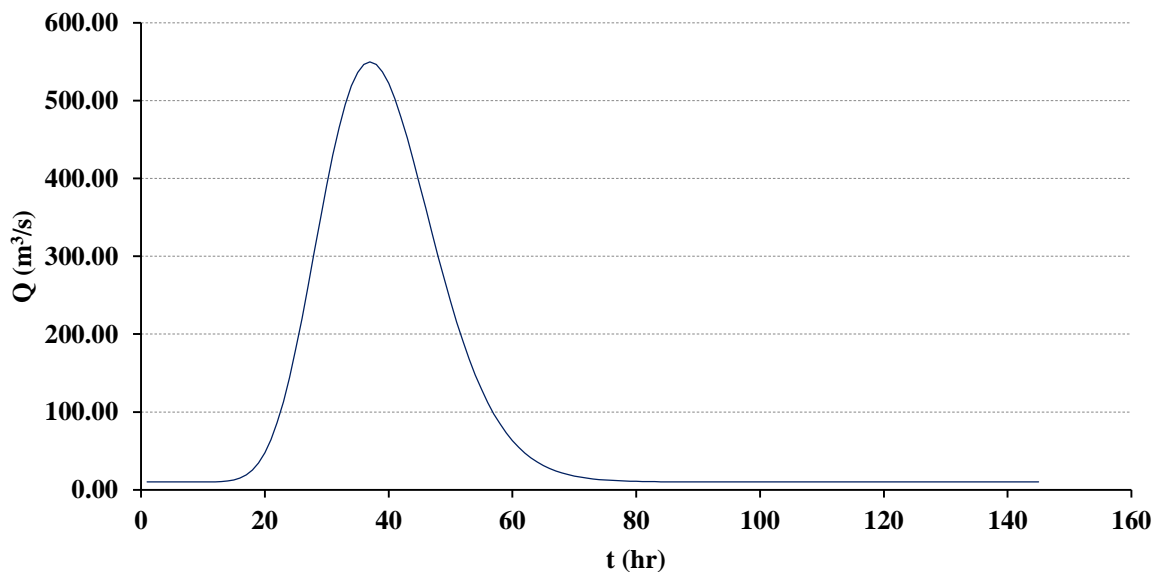


**Εικόνα 4.16** Αποτέλεσμα προσομοίωσης στο HEC-RAS υπό συνθήκες χρονικά μεταβαλλόμενης εισροής.

Όπως είναι αναμενόμενο, στο αποτέλεσμα του μοντέλου και πάλι δεν κατακλύζεται με νερό η περιοχή που βρίσκεται στο ανάντη τμήμα στη βόρεια πλευρά του αναχώματος του ποταμού. Επίσης, παρατηρείται μία μείωση της τάξης του 11% στην έκταση της πλημμυρικής κατάκλυσης καθώς επίσης και μια μικρή μείωση στο βάθος ροής στην έξοδο του τμήματος του ποταμού της τάξης των 0.75 m σε σχέση με την προσομοίωση με σταθερή εισροή, ίση με την παροχή αιχμής του πλημμυρογραφήματος.

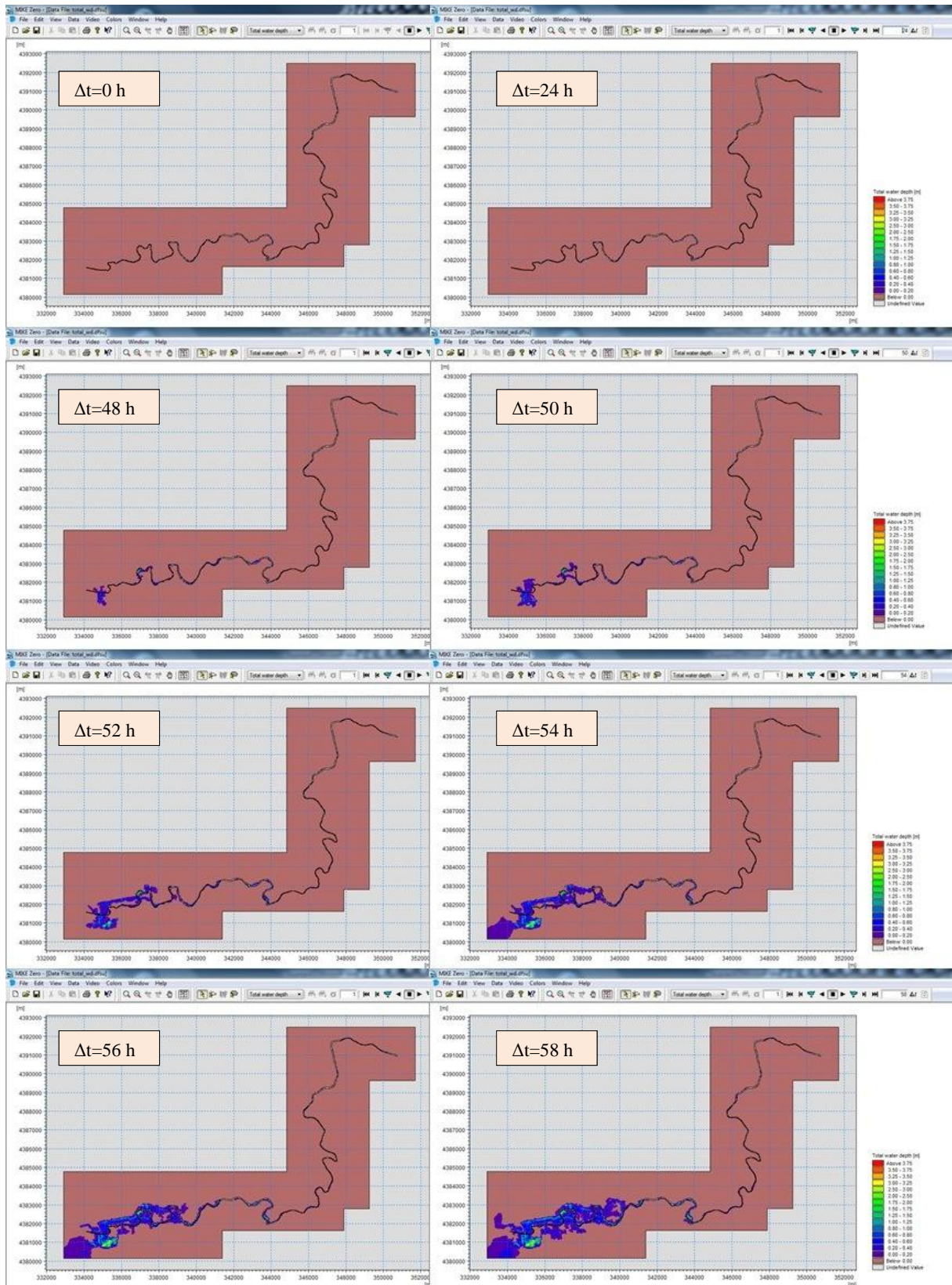
#### 4.4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης στο MIKE FLOOD

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με πλημμυρογράφημα αιχμής  $Q=550 \text{ m}^3/\text{s}$ , χρονικό βήμα υπολογισμών 1 s και αρχική παροχή ποταμού  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Στο Σχήμα 4.7 απεικονίζεται το πλημμυρογράφημα εισόδου, ενώ στην Εικόνα 4.18 φαίνεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης και οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης. Το βάθος ροής στην έξοδο του τμήματος του ποταμού προέκυψε ίσο με 6.59 m.

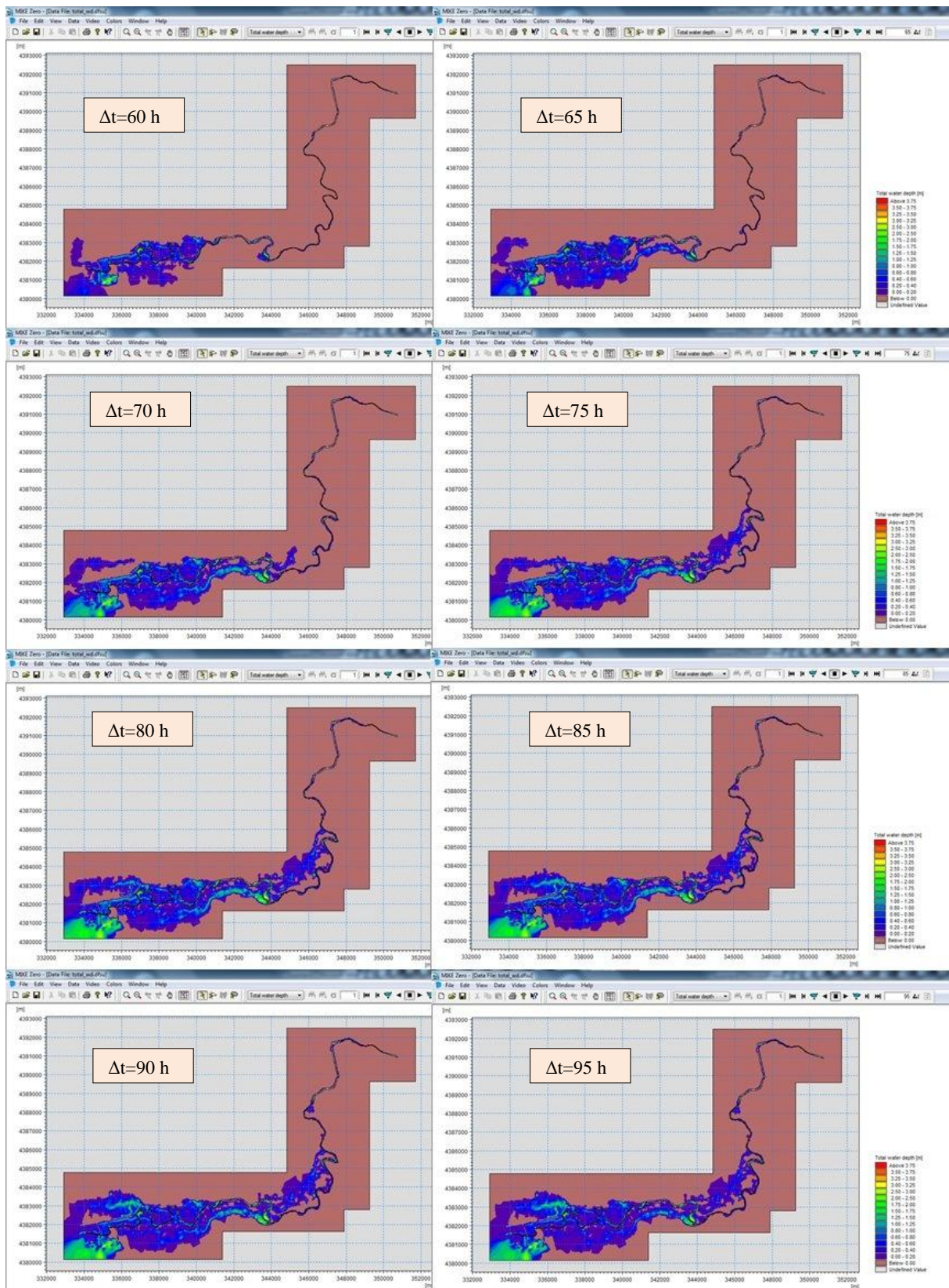


**Σχήμα 4.7** Πλημμυρογράφημα εισόδου προσομοίωσης στο MIKE FLOOD.

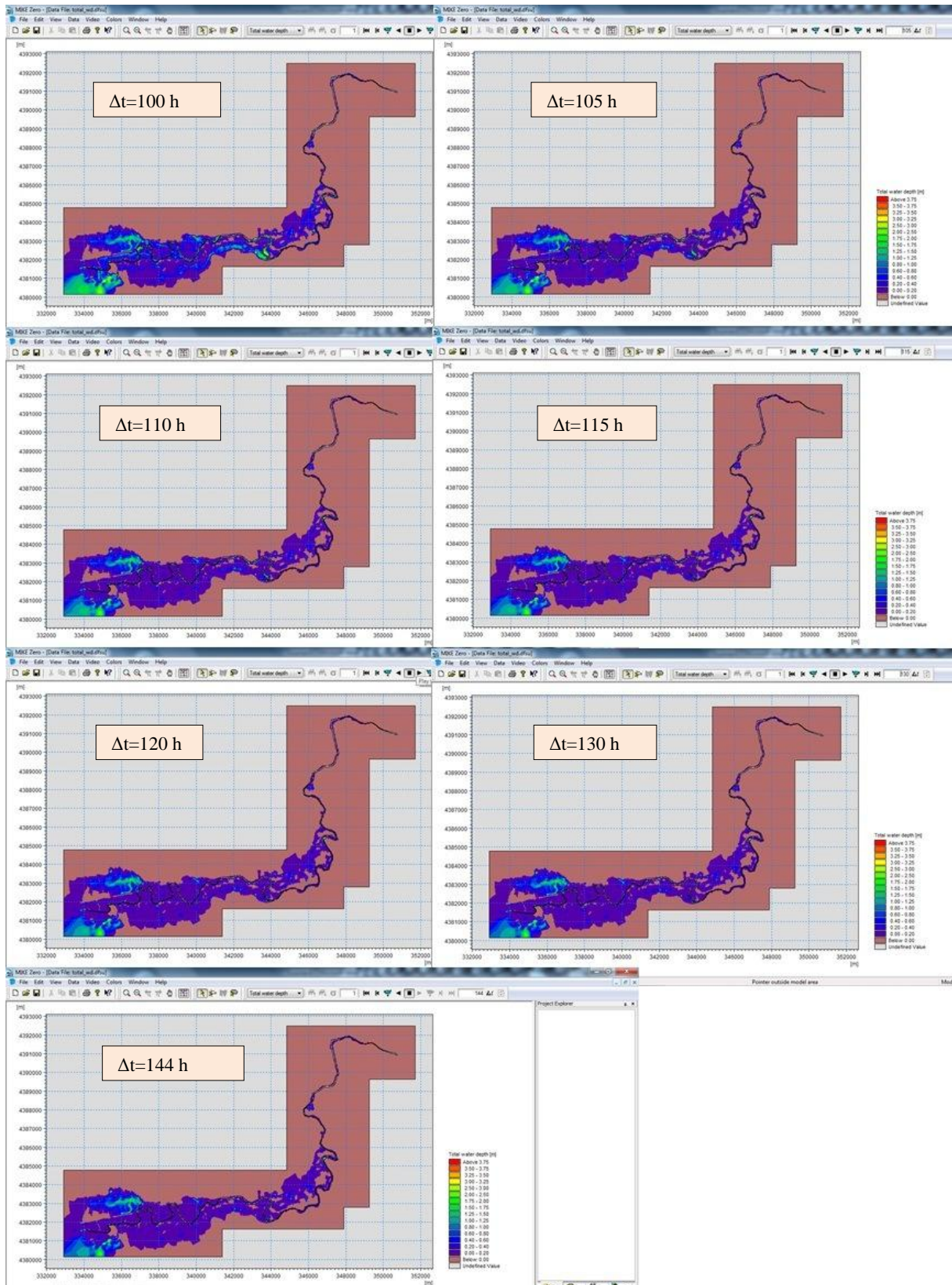
Στις ακόλουθες Εικόνες 4.17, 4.18 και 4.19 απεικονίζεται η εξέλιξη της πλημμυρικής κατάκλυσης στο πλημμυρικό πεδίο. Παρατηρούμε ότι το αποτύπωμα εκείνο που ανταποκρίνεται περισσότερο στο πραγματικό είναι εκείνο των 90 και 100 ωρών. Έπειτα, στην Εικόνα 4.20 αποτυπώνεται το πλημμυρικό αποτύπωμα με τα μέγιστα βάθη νερού της ίδιας προσομοίωσης. Τόσο η προσαρμογή όσο και η πλημμυρισμένη επιφάνεια εμφανίζονται να είναι πολύ κοντά στο παρατηρημένο αποτύπωμα.



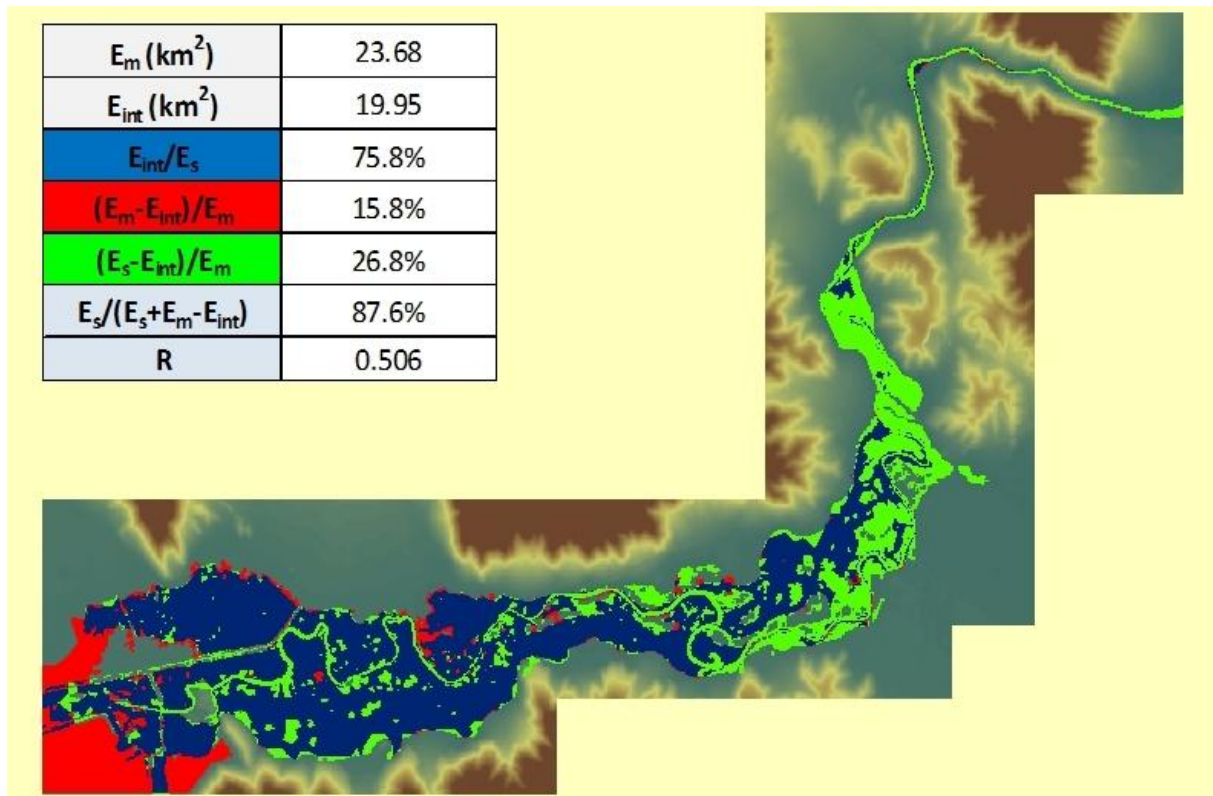
Εικόνα 4.17 Εξέλιξη πλημμυρικής κατάκλισης για  $\Delta t=0$  έως 58 h.



Εικόνα 4.18 Εξέλιξη πλημμυρικής κατάκλισης για  $\Delta t=60$  έως 95 h.



Εικόνα 4.19 Εξέλιξη πλημμυρικής κατάκλισης για  $\Delta t=100$  έως 144 h.



**Εικόνα 4.20** Αποτέλεσμα προσομοίωσης στο MIKE FLOOD υπό συνθήκες χρονικά μεταβαλλόμενης εισροής,  $Q_p=550 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 5. Εφαρμογή Μοντέλων σε Επιλεγμένες Πρότυπες Τοπογραφίες

---

Στην παρούσα ενότητα, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας των μοντέλων και της ευαισθησίας που παρουσιάζουν σε διάφορες παραμέτρους, πραγματοποιήθηκε εφαρμογή σε επιλεγμένη απλή πρότυπη τοπογραφία. Οι τοπογραφία αυτή δημιουργήθηκε υπό μορφή κανάλιου με διαστάσεις 1.000 m x 10.000 m. Κατά μήκος της επιφάνειας δημιουργείται κανάλι ορθογωνικής διατομής, πλάτους ( $b$ ) 10 m και βάθους ( $d$ ) 2 m. Τόσο στο πλημμυρικό πεδίο όσο και εντός του καναλιού η τοπογραφική κλίση επιλέχθηκε να είναι ίση με 1%. Διερευνήθηκε και συγκρίθηκε η ευαισθησία των μοντέλων στη μεταβολή των παρακάτω παραμέτρων:

- Παροχή ( $Q$ )
- Συντελεστής τραχύτητας ( $n$ )

Τα μεγέθη που ελέγχθηκαν από τις παραπάνω μεταβολές είναι η επιφάνεια της πλημμυρικής κατάκλυσης και το βάθος ροής στο σημείο εκροής του καναλιού. Οι επιλεγμένες τοπογραφίες που μελετάται στο παρόν κεφάλαιο έχει μελετηθεί στη μεταπτυχιακή εργασία του Οικονόμου (2013) με τα μοντέλα HEC-RAS και LISFLOOD-FP. Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται συγκριτική μελέτη με τα αντίστοιχα αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν με την προσομοίωση στο MIKE FLOOD. Στο σύνολο των προσομοιώσεων το υπολογιστικό κελί επιλέχθηκε να έχει εμβαδό 50 m<sup>2</sup>.



## 5.1 Μεταβολή Εισερχόμενης Παροχής

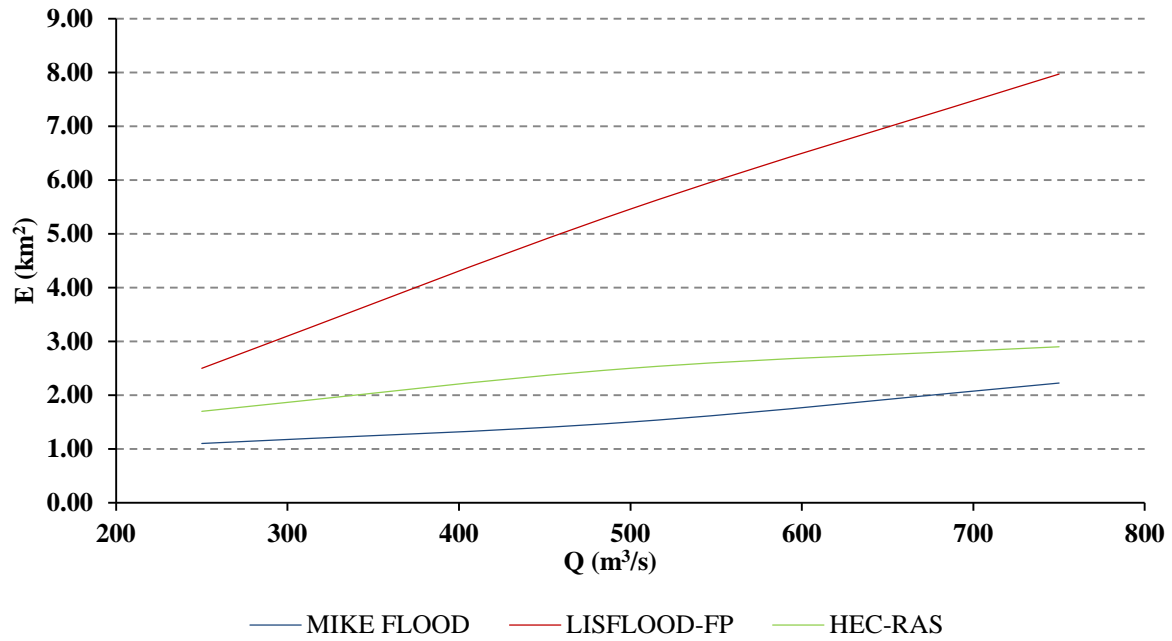
Μελετήθηκε το αποτύπωμα της προσομοίωσης υπό συνθήκες σταθερής εισροής με εμβαδό τριγωνικού κελιού ίσο με  $50 \text{ m}^2$  και κοινό συντελεστή τραχύτητας ίσο με 0.03 μεταβάλλοντας την εισερχόμενη παροχή από  $250 \text{ m}^3/\text{s}$  σε  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  και  $750 \text{ m}^3/\text{s}$ . Τα αποτελέσματα για το βάθος ροής στην εκροή του καναλιού και την έκταση της πλημμυρικής κατάκλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

**Πίνακας 5.1** Επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης και βάθος νερού στην έξοδο με μεταβολή εισερχόμενης παροχής.

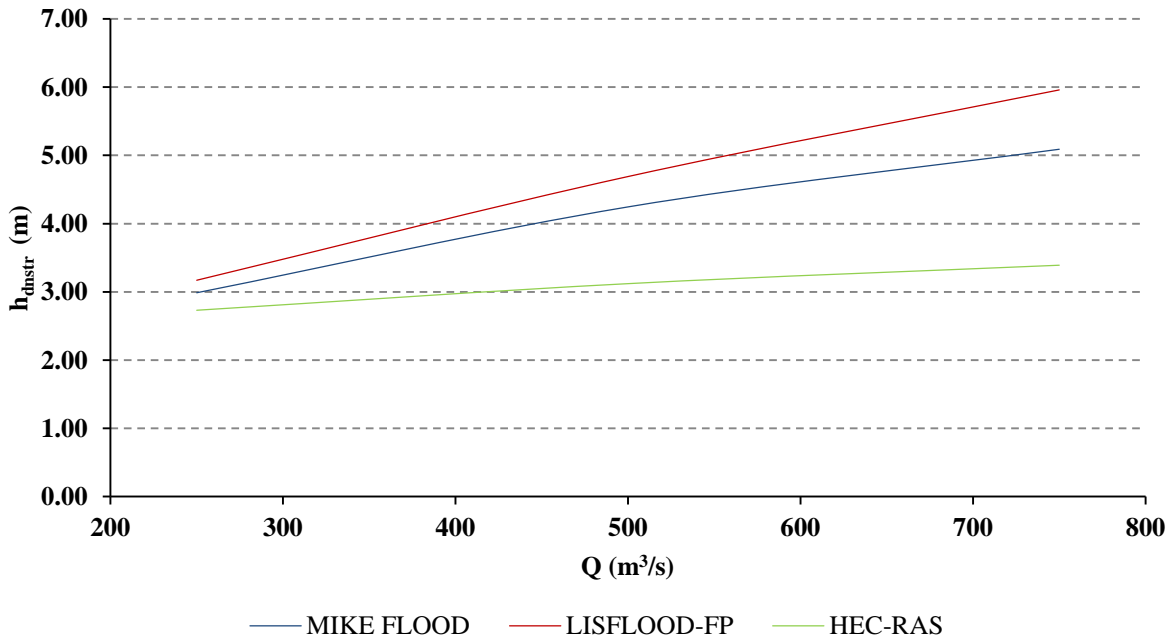
	Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ )		
	250	500	750
E ( $\text{km}^2$ )	1.10	1.50	2.23
h (m)	2.99	3.24	4.09

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 5.1 και από το ακόλουθο Σχήμα 5.1, το MIKE FLOOD εμφανίζεται να έχει τη μικρότερη ευαισθησία στη μεταβολή της εισερχόμενης παροχής. Αντίθετα το LISFLOOD-FP εμφανίζεται να είναι το πιο ευαίσθητο.

Παράλληλα, στο Σχήμα 5.2 απεικονίζεται η μεταβολή του βάθους ροής στην έξοδο του καναλιού όπως αυτή έχει προκύψει για τα τρία μοντέλα. Το MIKE FLOOD εμφανίζεται και πάλι να είναι λιγότερο ευαίσθητο από το LISFLOOD-FP και περισσότερο ευαίσθητο από το HEC-RAS. Αυτή η διαφορά στα αποτελέσματα οφείλεται πιθανότατα στο γεγονός ότι στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής εργασίας του Οικονόμου έγινε η θεώρηση μόνιμων συνθηκών ροής στο HEC-RAS.



**Σχήμα 5.1** Επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή εισερχόμενης παροχής (Δεδομένα: Οικονόμου 2013).



**Σχήμα 5.2** Βάθος νερού στην έξοδο του καναλιού με μεταβολή εισερχόμενης παροχής (Δεδομένα: Οικονόμου 2013).

## 5.2 Μεταβολή Συντελεστή Τραχύτητας σε Κανάλι και Πλημμυρικά Πεδία

Μελετήθηκε το αποτύπωμα της προσομοίωσης υπό συνθήκες σταθερής εισροής με εμβαδό τριγωνικού κελιού ίσο με  $50 \text{ m}^2$  και εισερχόμενη παροχή  $750 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ο συντελεστής τραχύτητας του Manning έλαβε τιμές 0.03, 0.08 και 0.1. Τα αποτελέσματα για την έκταση της πλημμυρικής κατάκλυσης και το βάθος ροής στην έξοδο του καναλιού παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.2 και 5.3 αντίστοιχα.

**Πίνακας 5.2** Επιφάνεια πλημμυρικής κατάκλυσης με μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας σε κανάλι και πλημμυρικό πεδίο.

E (km <sup>2</sup> )		n <sub>ch</sub>		
		0.03	0.08	0.1
n <sub>fp</sub>	0.03	2.23	2.21	2.27
	0.08	2.34	2.66	2.73
	0.1	2.56	2.89	2.87

**Πίνακας 5.3** Βάθος ροής στην έξοδο του καναλιού με μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας σε κανάλι και πλημμυρικό πεδίο.

h (m)		n <sub>ch</sub>		
		0.03	0.08	0.1
n <sub>fp</sub>	0.03	4.09	4.24	4.33
	0.08	4.31	4.34	4.36
	0.1	4.43	4.45	4.52

Όπως προκύπτει από τους Πίνακες 5.2 και 5.3 το MIKE FLOOD δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στην τριβή του ποταμού ενώ εμφανίζεται πιο ευαίσθητο στην τριβή του πλημμυρικού πεδίου, σε ότι αφορά τα μεγέθη της επιφάνειας πλημμυρικής κατάκλυσης και του βάθους ροής στην έξοδο του καναλιού.

Συγκριτικά με τα αντίστοιχα αποτελέσματα στα μοντέλα HEC-RAS και LISFLOOD-FP όπως προκύπτει από τους Πίνακες 5.4 και 5.5 το HEC-RAS εμφανίζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στη μεταβολή της τραχύτητας του πεδίου ενώ αντίθετα το LISFLOOD-FP εμφανίζει τη μεγαλύτερη μεταβολή στην έκταση της πλημμυρικής κατάκλυσης και στο βάθος ροής στην έξοδο του καναλιού με τη μεταβολή της τραχύτητας του καναλιού.

Συνολικά, τα MIKE FLOOD και LISFLOOD-FP είναι τα λιγότερο ευαίσθητα στη μεταβολή της τραχύτητας του πλημμυρικού πεδίου, ενώ το MIKE FLOOD είναι αυτό με τη μικρότερη ευαισθησία στη μεταβολή της τραχύτητας του καναλιού.

**Πίνακας 5.4** Ποσοστιαίες μεταβολές μοντέλων HEC-RAS και LISFLOOD-FP με τη μεταβολή της τραχύτητας του πεδίου (Δεδομένα: Οικονόμου 2013).

		$n_{ch}$			
		0.03	0.08	0.1	
<b><math>\Delta E</math> (km<sup>2</sup>)</b>					
<b><math>n_{fp}</math></b>	<b>0.03</b>	<b>HEC-RAS</b>			
	<b>0.08</b>		26%	28%	28%
	<b>0.1</b>		5%	4%	9%
	<b>0.03</b>	<b>LISFLOOD-FP</b>			
	<b>0.08</b>		0%	0%	1%
	<b>0.1</b>		0%	0%	0%
<b><math>\Delta h</math> (m)</b>					
<b><math>n_{fp}</math></b>	<b>0.03</b>	<b>HEC-RAS</b>			
	<b>0.08</b>		11%	15%	15%
	<b>0.1</b>		4%	4%	4%
	<b>0.03</b>	<b>LISFLOOD-FP</b>			
	<b>0.08</b>		0%	0%	0%
	<b>0.1</b>		0%	0%	0%

**Πίνακας 5.5** Ποσοστιαίες μεταβολές μοντέλων HEC-RAS και LISFLOOD-FP με τη μεταβολή της τραχύτητας του καναλιού (Δεδομένα: Οικονόμου 2013).

		$n_{ch}$			
		0.03	0.08	0.1	
<b><math>\Delta E</math> (km<sup>2</sup>)</b>					
$n_{fp}$	0.03	HEC-RAS		6%	0%
	0.08			9%	0%
	0.1			9%	4%
	0.03	LISFLOOD-FP		45%	10%
	0.08			45%	10%
	0.1			45%	10%
<b><math>\Delta h</math> (m)</b>					
$n_{fp}$	0.03	HEC-RAS		1%	0%
	0.08			4%	1%
	0.1			5%	1%
	0.03	LISFLOOD-FP		37%	8%
	0.08			37%	8%
	0.1			37%	8%

## 6. Σχόλια και Συμπεράσματα

---

Τόσο από τη μελέτη της υδραυλικής προσομοίωσης της περιοχής μελέτης, όσο και από την υδραυλική προσομοίωση των πρότυπων διατομών προκύπτουν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα για τα τρία υδραυλικά μοντέλα και ιδιαίτερα για το MIKE FLOOD η συμπεριφορά του οποίου μελετήθηκε εκτενέστερα.

Σε ότι αφορά κάποια γενικά χαρακτηριστικά των μοντέλων, τη χρήση τους και τη δυνατότητα τους να προσομοιωθεί μια πραγματική περιοχή στο καθένα από αυτά:

- Το HEC-RAS αποτελεί ένα ελεύθερο πακέτο λογισμικού γεγονός που καθιστά ευρεία τη χρήση του. Αναφορικά με τον υπολογιστικό χρόνο το HEC-RAS λόγω της μονοδιάστατης θεώρησής του είναι ιδιαίτερα ταχύ.
- Η προσομοίωση των υδραυλικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής είναι ιδιαίτερα απλή διαδικασία στο HEC-RAS καθώς μπορεί να προσομοιωθεί με ικανοποιητική ακρίβεια η τοπογραφία του ποταμού και οι όποιες υδραυλικές κατασκευές ενδεχομένως υπάρχουν στο πεδίο ροής (Εδ. 2.4.1, 3.2.3).
- Σε ότι αφορά την προσομοίωση του πλημμυρικού πεδίου, λόγω της μονοδιάστατης θεώρησης του μοντέλου απαιτούνται ιδιαίτερα λεπτομερή τοπογραφικά στοιχεία προκειμένου να είναι εφικτή μια ικανοποιητική υδραυλική προσομοίωση (Εδ. 2.4.1, 3.2.3).
- Το LISFLOOD-FP αποτελεί ένα πανεπιστημιακό μοντέλο του πανεπιστημίου του Bristol, το οποίο δεν είναι άμεσα διαθέσιμο, διατίθεται όμως δωρεάν για ερευνητικούς και άλλους σκοπούς. Σε ότι αφορά την ταχύτητα των υπολογισμών της προσομοίωσης, λόγω της δομής του είναι ιδιαίτερα απαιτητικό χρονικά ενώ επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τη χωρική ανάλυση των δεδομένων. Ωστόσο, είναι ένα μοντέλο που εξελίσσεται καθώς προστίθενται σε αυτό νέες δυνατότητες και εργαλεία επίλυσης.
- Αναφορικά με την προσομοίωση του ποταμού, το LISFLOOD-FP λόγω των παραδοχών στις οποίες στηρίζεται σύμφωνα με τις οποίες το υδατόρευμα έχει ορθογωνική διατομή μεγάλου πλάτους και ιδιαίτερα μικρού βάθους, είναι δύσκολο να προσομοιώσει οποιαδήποτε μορφολογία ποταμού (Εδ. 2.4.2, Bates *et al.* 2005).

- Στο υδραυλικό μοντέλο LISFLOOD-FP αναπαρίσταται με ιδιαίτερη απλότητα με την ακρίβεια του Ψ.Μ.Ε. το πλημμυρικό πεδίο, και οι όποιες υποδομές υπάρχουν σε αυτό, π.χ. υφιστάμενα αναχώματα, γέφυρες, αστική δόμηση, κ.λ.π. (Εδ. 2.4.2, 3.2.4, Bates *et al.* 2005).
- Το MIKE FLOOD αποτελεί ένα εμπορικό πακέτο λογισμικού το οποίο υποστηρίζεται από το DHI. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι χρησιμοποιούνται οι πλήρεις εξισώσεις Saint Venant και υπολογίζονται με ακρίβεια τα υδραυλικά μεγέθη της πλημμυρικής ροής μπορεί να θεωρηθεί μια αρκετά ταχεία εφαρμογή. Επιπρόσθετα υπάρχει ευελιξία στον υπολογιστικό χρόνο με την ανάλογη επίδραση στη λεπτομέρεια του αποτελέσματος, με την αξιοποίηση συγκεκριμένων εργαλείων που αφορούν τη χωρική ανάλυση του υπολογιστικού πλέγματος (Εδ. 2.4.3, 3.2.5, MIKE by DHI 2014c).
- Από το MIKE FLOOD μπορούν να προσομοιωθούν με υψηλή ακρίβεια η τοπογραφία ενός ποταμού καθώς επίσης και άλλοι παράγοντες οι οποίοι μπορεί να συνυπάρχουν και να επηρεάζουν τη ροή του ποταμού π.χ. βλάστηση (Εδ. 2.4.3, 3.2.5, MIKE by DHI 2014a).
- Το υδραυλικό μοντέλο MIKE FLOOD μέσω της ιδιαίτερα μεγάλης ποικιλίας εργαλείων και εφαρμογών που εμπεριέχει είναι εφικτό να προσομοιώσει πληθώρα φυσικών περιπτώσεων αναπαριστώντας με λεπτομέρεια υδραυλικές κατασκευές, καιρικά φαινόμενα, αστική δόμηση, φυσικά φαινόμενα, κ.λ.π. τα οποία επιδρούν στη διάδοση του πλημμυρικού κύματος εντός του πλημμυρικού πεδίου (Εδ. 2.4.3, 3.2.5).
- Επιπρόσθετα, στο MIKE FLOOD δίνεται η δυνατότητα πιο λεπτομερούς ανάλυσης σε κρίσιμες περιοχές, του πλημμυρικού πεδίου π.χ. κοντά σε αστικές περιοχές για το σχεδιασμό έργων αντιπλημμυρικής προστασίας, μέσω του ευέλικτου υπολογιστικού πλέγματος κάτι το οποίο μπορεί να αποτελέσει σημαντική συνιστώσα σε μια πλημμυρική μελέτη (Εδ. 2.4.3, 3.2.5).

Σε ότι αφορά την ικανότητα προσομοίωσης των συνθηκών ροής του πεδίου:

- Σε περιοχές μικρών κλίσεων μονοδιάστατα μοντέλα όπως το HEC-RAS δε μπορούν να προσομοιώσουν τις αντίστοιχες συνθήκες ροής, ανεξάρτητα με το μέγεθος της εισερχόμενης παροχής ή των επιλεγμένων υδραυλικών παραμέτρων. Ακόμα και με λεπτομερή ανάλυση των χαρακτηριστικών του πλημμυρικού πεδίου, τις περισσότερες φορές είναι αδύνατη η προσομοίωση των ιδιαίτερων συνθηκών ροής σε περιοχές με

μικρές τοπογραφικές κλίσεις από τέτοιου είδους μοντέλα (Εικόνα 4.2, 4.3, 4.4, 4.15. Οικονόμου 2013).

- Το LISFLOOD-FP ως μοντέλο που χρησιμοποιεί τις απλοποιημένες εξισώσεις Saint-Venant σε δύο διευθύνσεις (Εδ. 2.4.2), μπορεί να αποδώσει σε ιδιαίτερα ικανοποιητικό βαθμό την έκταση της πλημμυρικής κατάκλυσης στο πεδίο (Εικόνα 4.6).
- Σε περιοχές μικρών κλίσεων όπου η ροή συχνά αλλάζει κατεύθυνση, η επίλυση μοντέλων που χρησιμοποιούν τις πλήρεις εξισώσεις Saint Venant, όπως είναι το MIKE FLOOD (Εδ. 2.4.3, 2.5) μπορεί να είναι ιδιαίτερα ακριβής και σταθερή με την επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων προσομοίωσης (Εικόνα 4.14, 4.15).
- Αναφορικά με τα υδραυλικά μεγέθη της ροής όπως είναι για παράδειγμα το βάθος ροής στην έξοδο του τμήματος ενός ποταμού, η επίλυση του μοντέλου χαρακτηρίζεται από ακρίβεια και σχετική σταθερότητα (Πίνακας 4.2, Σχήμα 4.5).

Σχετικά με τα παραγόμενα αποτελέσματα, την ακρίβεια και την πληρότητά τους:

- Σε ότι αφορά το μονοδιάστατο μοντέλο HEC-RAS αυτό εμφανίζει τη βέλτιστη προσαρμογή για τιμή παροχής εισόδου η οποία δεν είναι ρεαλιστική σύμφωνα με τα δεδομένα που υπάρχουν στην περιοχή (Εδ. 4.2.1, Mimikou & Koutsoyiannis 1995).
- Με το υδραυλικό μοντέλο MIKE FLOOD προσομοιώνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια οι συνθήκες ροής ακόμη και σε περιοχές έντονης μεταβλητότητας. Επιπρόσθετα, το μοντέλο εμφανίζει περιορισμένη ευαισθησία στον υπολογισμό υδραυλικών μεγεθών όπως είναι για παράδειγμα το βάθος ροής στην έξοδο του ποταμού, με τη μεταβολή χρονικών και χωρικών παραμέτρων. Τέλος, η θεώρηση χρονικά μεταβαλλόμενης εισροής έχει περιορισμένη επίπτωση στα αποτελέσματα του μοντέλου γεγονός που υποδηλώνει την καταλληλότητα του μοντέλου να αναπαραστήσει πραγματικές συνθήκες ροής.

Σχετικά με την ευαισθησία των μοντέλων στις διάφορες παραμέτρους, όπως προκύπτει από τη μελέτη των προσομοιώσεων στις πρότυπες τοπογραφίες:

- Το LISFLOOD-FP εμφανίζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στη μεταβολή της εισερχόμενης παροχής, ενώ αντίθετα, το MIKE FLOOD είναι το λιγότερο ευαίσθητο από τα τρία μελετώμενα υδραυλικά μοντέλα. Το γεγονός αυτό οφείλεται πιθανότατα στη θεώρηση του LISFLOOD-FP ότι το κανάλι αρχικά δέχεται το σύνολο της



εισερχόμενης παροχής και στη συνέχεια τη διαχέει στα εκατέρωθεν πλημμυρικά πεδία (Πίνακας 5.1, Σχήματα 5.1, 5.2, Οικονόμου 2013).

- Σχετικά με την τραχύτητα στο πλημμυρικό πεδίο, το μονοδιάστατο HEC-RAS είναι το περισσότερο ευαίσθητο σε ότι αφορά την έκταση της πλημμυρικής κατάκλυσης και τον υπολογισμό του βάθους ροής στην έξοδο του καναλιού (Πίνακας 5.4, 5.5).
- Τα υδραυλικά μοντέλα LISFLOOD-FP και MIKE FLOOD δεν παρουσιάζουν κάποια ιδιαίτερη ευαισθησία στην τραχύτητα του πλημμυρικού πεδίου (Πίνακας 5.2, 5.3, 5.4, 5.5)
- Σε ότι αφορά την τραχύτητα του καναλιού, το LISFLOOD-FP εμφανίζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία από τα τρία μοντέλα. Αντίθετα, το MIKE FLOOD εμφανίζεται να είναι το πιο σταθερό στον υπολογισμό της πλημμυρικής κατάκλυσης και του βάθους ροής στην έξοδο του καναλιού. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα, αυτό πιθανολογείται ότι οφείλεται στη θεώρηση του μοντέλου για τη δυναμική της ροής (Πίνακες 5.4, 5.5, Οικονόμου 2013).

Από την ενασχόληση και μελέτη των τριών μοντέλων, σχετικά με τη χρήση τους, και την περαιτέρω διερεύνηση σε διάφορα πεδία προτείνονται τα εξής:

- Υδρολογική διερεύνηση επεισοδίων βροχής με πληθώρα καταγεγραμμένων στοιχείων, όπως π.χ. ωριαίες παροχές εισόδου, ωριαίες στάθμες στην έξοδο τμήματος υδατορεύματος, καταγραφές στάθμης σε υδραυλικές κατασκευές, κ.λ.π.. Κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε βαθμιαία αποσαφήνιση της ακρίβειας του συνόλου των αποτελεσμάτων των μοντέλων.
- Διερεύνηση πλημμυρικών επεισοδίων σε ιδιαίτερες συνθήκες ροής, π.χ. θραύση φράγματος, αστικές περιοχές.
- Το ψευδο-διδιάστατο μοντέλο LISFLOOD-FP μπορεί να προσομοιώσει τις ιδιαίτερες συνθήκες ροής σε περιοχές μικρών κλίσεων, είναι ωστόσο απαραίτητη η ακριβής γνώση κάποιων παραμέτρων όπως είναι οι οριακές συνθήκες του πεδίου. Η συμπληρωματική χρήση του σε περιπτώσεις μελετών όπου χρησιμοποιούνται μονοδιάστατα μοντέλα μπορεί να οδηγήσει σε πιο ασφαλή αποτελέσματα.
- Για μεγάλης κλίμακας πλημμυρικούς χάρτες η χρήση μοντέλων όπως το LISFLOOD-FP μπορεί να αποδώσει ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα.

- Σε περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητος ο υπολογισμός υδραυλικών μεγεθών με σχετική ακρίβεια όπως είναι για παράδειγμα η σύσταση χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας, ο σχεδιασμός συστήματος αντιπλημμυρικής προστασίας, η χωροθέτηση αντιπλημμυρικών κατασκευαστικών έργων, κ.λ.π. συνιστάται η χρήση μοντέλων όπως το MIKE FLOOD τα οποία μπορούν να αναπαραστήσουν με ακρίβεια τη διάδοση του πλημμυρικού κύματος.



## Αναφορές

---

- Bates P., Horritt M. S., Wilson M. & Hunter N., 2005, *LISFLOOD-FP User manual and Technical Note*, School of Geographical Sciences, University of Bristol, U.K..
- Environment Agency, 2013, *Delivering Benefits through Evidence Benchmarking the latest generation of 2D hydraulic modelling packages, Report – SC120002*, Bristol, U.K..
- Dottori F., Martina M. L. V. & Todini E., 2009, *A dynamic rating curve approach to indirect discharge measurement*, Hydrology and Earth System Sciences. 13. 847-863.
- Horritt M. S. & Bates P.D., 2002, *Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation*, Journal of Hydrology, 268, 87-99.
- MIKE by DHI, 2014a, *MIKE 11 A modelling system for rivers and channels Reference Manual*, MIKE by DHI Documentation.
- MIKE by DHI, 2014b, *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM Hydrodynamic & Transport Module*, MIKE by DHI Documentation.
- MIKE by DHI, 2014c, *MIKE FLOOD 1D-2D Modelling User Manual*, MIKE by DHI Documentation.
- Mimikou, M., and D. Koutsoyiannis, 1995, *Extreme floods in Greece: The case of 1994, U.S. - ITALY Research Workshop on the Hydrometeorology, Impacts, and Management of Extreme Floods*, Perugia, Italy.
- U.S. Army Corps of Engineers, 2010, *HEC-RAS Hydraulic Reference Manual*, Version 4.1.
- Yan Huang, 2005, *Appropriate Modeling for Integrated Flood Risk Assessment*, University of Twente, Netherlands.
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2012, *Εφαρμογή Οδηγίας 2007/60/ΕΚ Προκαταρκτική Αξιολόγηση Κινδύνων Πλημμύρας*, ΥΠΕΚΑ, Αθήνα.
- Κουτσογιάννης, Δ., Ανδρεαδάκης, Α., Μαυροδήμου, Ρ., Χριστοφίδης, Α., Μαμάσης, Ν., Ευστρατιάδης, Α., Κουκουβίνος, Α., Καραβοκυρός, Γ., Κοζάνης, Σ., Μαμάης, Δ., Νουτσόπουλος, Κ., 2008, *Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας Υδατικών Πόρων, Υποστήριξη της κατάρτισης Εθνικού Προγράμματος Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος*, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Μπέλλος Β., 2011, Διόδευση πλημμύρας σε ήπιο ανάγλυφο, Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Νουτσόπουλος Γ., Χριστοδούλου Γ. & Παπαθανασιάδης Τ., 2007, *Υδραυλική Ανοικτών Αγωγών*, 1<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Οικονόμου Α., 2013, *Διερεύνηση λειτουργίας λογισμικών υδραυλικής προσομοίωσης στην εξέλιξη πλημμυρικής κατάκλυσης. Εφαρμογή στην πεδιάδα της Θεσσαλίας*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Παπανικολάου Π. , 2012, *Στοιχεία Μόνιμης Ροής σε Αγωγούς υπό Πίεση & Αγωγούς με Ελεύθερη Επιφάνεια*, Εκπαιδευτικές Σημειώσεις Ε.Μ.Π..

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

#### **Διαδικτυακές αναφορές**

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

HEC-RAS ([www.hec.usace.army.mil](http://www.hec.usace.army.mil))

MIKE by DHI ([www.mikebydhi.com](http://www.mikebydhi.com))

E.K.X.A. (<http://gis.ktimanet.gr/wms/ktbasemap/default.aspx>)

