



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

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

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

*Αθανάσιος Οικονόμου*

Αθήνα, Ιούνιος 2013

ΕΠΙΣΤΗΜΗ  
&  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ

Επιβλέπων: Επικ. Καθηγητής Ν. Μαμάσης

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

Τα Υδραυλικά μοντέλα αποτελούν απαραίτητο εργαλείο για την προσομοίωση των πλημμυρών και τη δημιουργία των χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας και χαρτών κινδύνων πλημμύρας, στα πλαίσια εφαρμογής της Κοινοτικής Οδηγίας 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας.

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

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

Η εφαρμογή των μοντέλων έγινε σε μια περιοχή σχετικά μικρών κλίσεων, στη δυτική πεδιάδα της Θεσσαλίας και σε τμήμα του π. Πηνειού. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας ώστε να προσδιοριστεί πως επηρεάζεται κάθε προσομοίωση από τη μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας τόσο στο κανάλι, όσο και στα πλημμυρικά πεδία.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων βαθμονομούνται μέσω της αποτύπωσης ενός πραγματικού πλημμυρικού επεισοδίου από τον δορυφόρο Landsat 7 ([www.landsat.usgs.gov](http://www.landsat.usgs.gov)) την 28η Ιανουαρίου 2003.

Τα τρία υδραυλικά μοντέλα, ελέγχονται και συγκρίνονται μεταξύ τους μέσω εφαρμογής τους σε απλοποιημένες τοπογραφίες, όπου μεταβάλλονται κάποιες εκ των παραμέτρων τους.

# Περιοχή Μελέτης

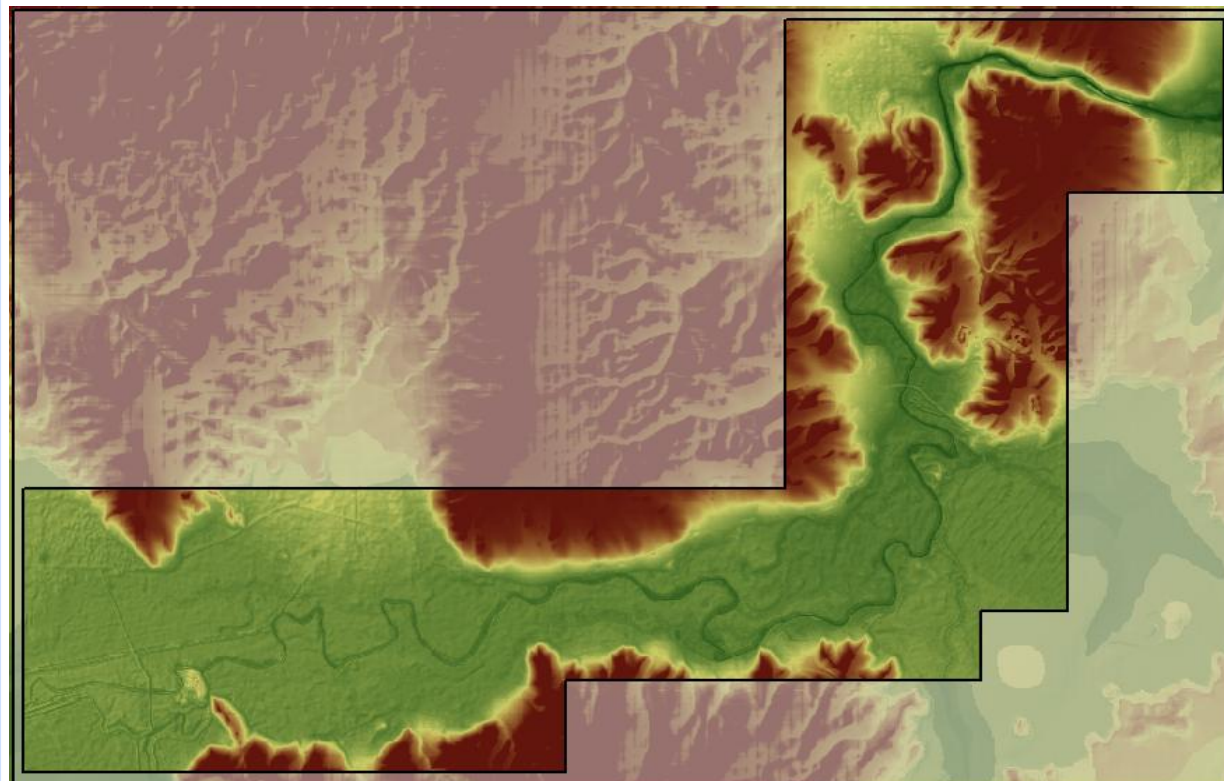
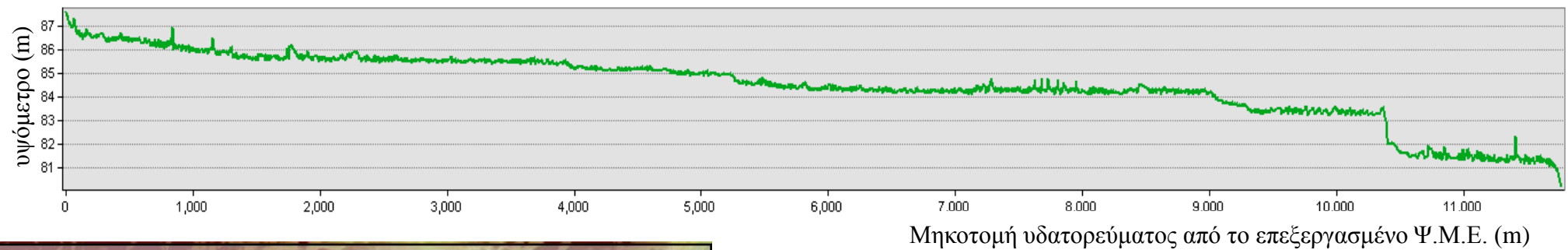
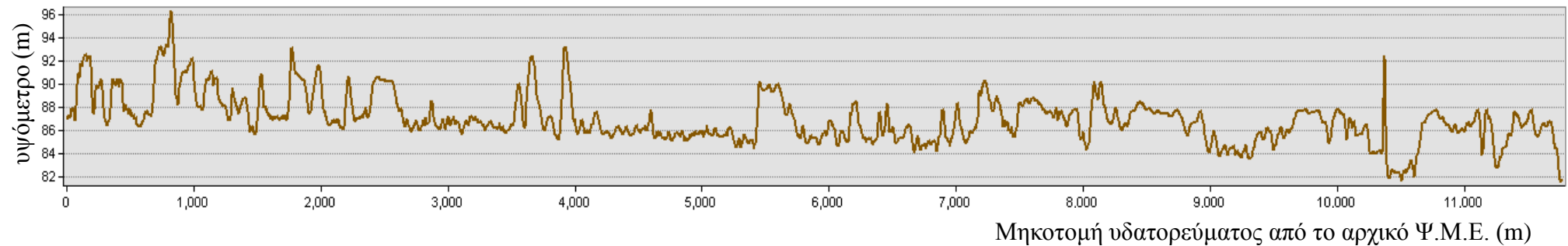


0 12,500 25,000 50,000 75,000 Μέτρα

Εικόνα 1: Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2012)

# Γεωμετρικά δεδομένα περιοχής μελέτης

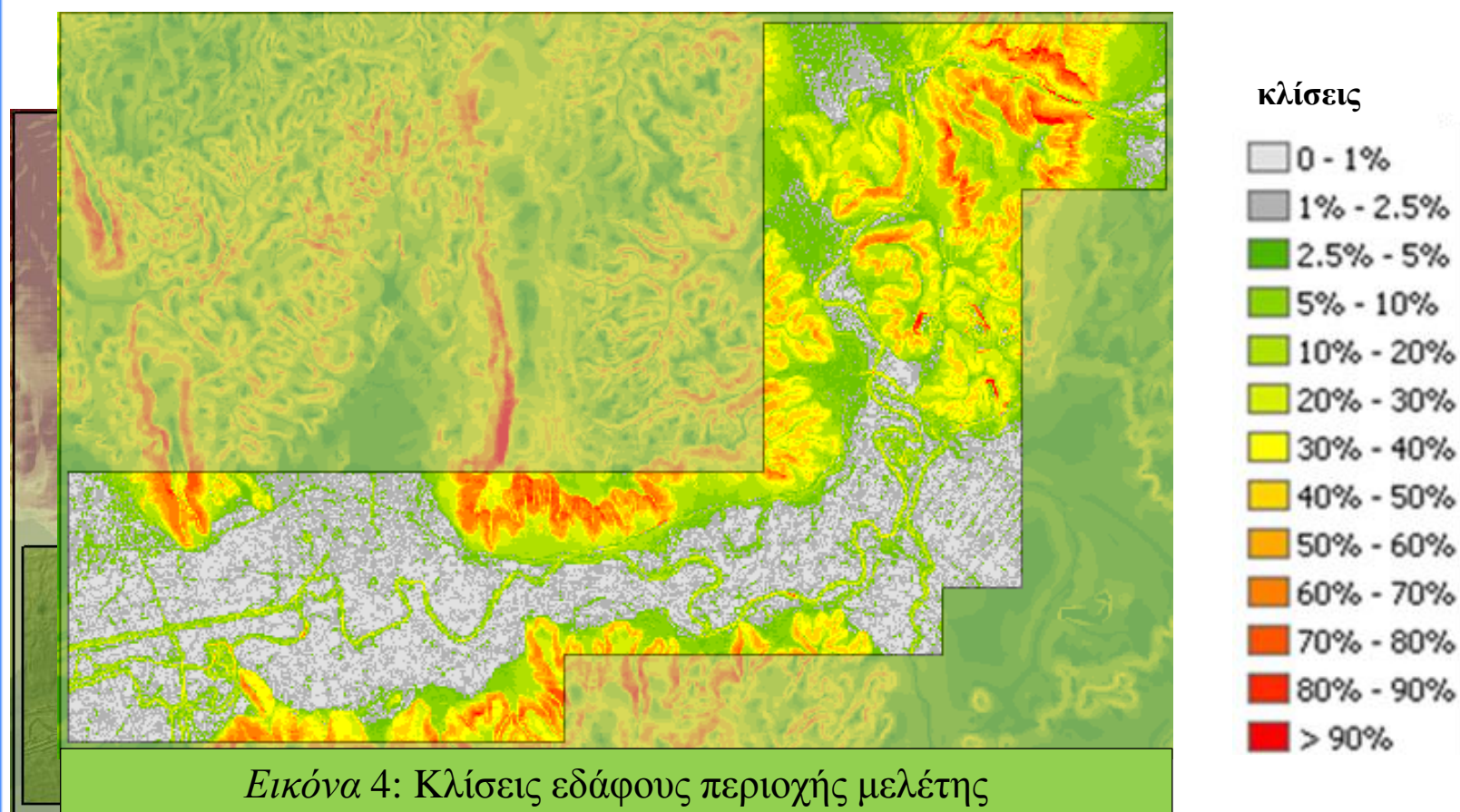
Όλα τα απαραίτητα γεωμετρικά δεδομένα για την υδραυλική προσομοίωση της περιοχής μελέτης, αντλήθηκαν από ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους κανονικοποιημένης μορφής (grid) με βήμα κανάβου 5m. Λόγω της χαμηλότερης ακρίβειας του ΨΜΕ στη διεύθυνση των υψομέτρων από εκείνη που απαιτούσαν τα μοντέλα, έγινε επεξεργασία και επαναδόμηση του ΨΜΕ.



Εικόνα 3: Ψ.Μ.Ε. περιοχής μελέτης

# Γεωμετρικά δεδομένα περιοχής μελέτης

Όλα τα απαραίτητα γεωμετρικά δεδομένα για την υδραυλική προσομοίωση της περιοχής μελέτης, αντλήθηκαν από ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους κανονικοποιημένης μορφής (grid) με βήμα κανάβου 5m. Λόγω της χαμηλότερης ακρίβειας του ΨΜΕ στη διεύθυνση των υψομέτρων από εκείνη που απαιτούσαν τα μοντέλα, έγινε επεξεργασία και επαναδόμηση του ΨΜΕ.



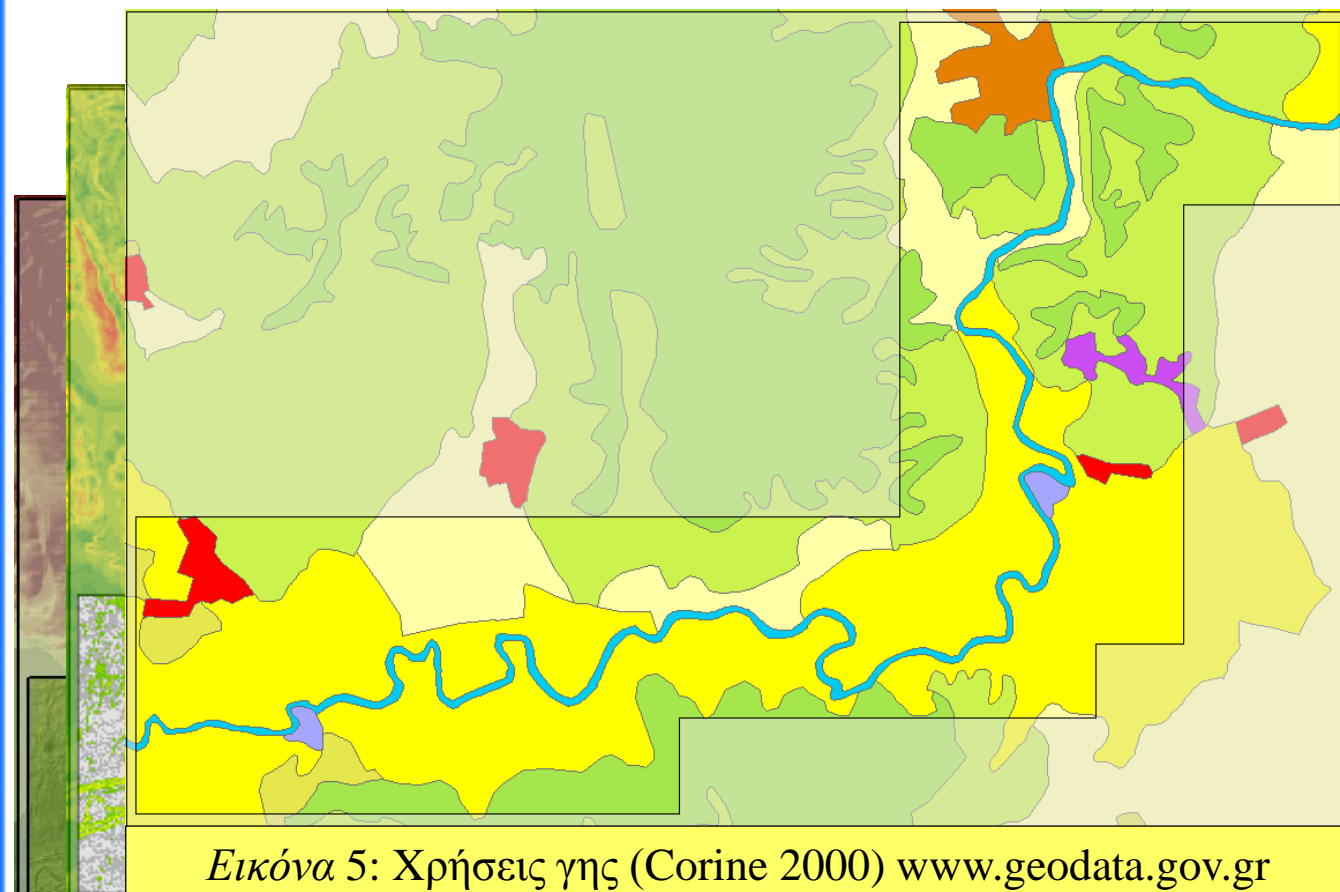
Εικόνα 4: Κλίσεις εδάφους περιοχής μελέτης

Εικόνα 3: Ψ.Μ.Ε. περιοχής μελέτης

# Γεωμετρικά δεδομένα περιοχής μελέτης

Όλα τα απαραίτητα γεωμετρικά δεδομένα για την υδραυλική προσομοίωση της περιοχής μελέτης, αντλήθηκαν από ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους κανονικοποιημένης μορφής (grid) με βήμα κανάβου 5m. Λόγω της χαμηλότερης ακρίβειας του ΨΜΕ στη διεύθυνση των υψομέτρων από εκείνη που απαιτούσαν τα μοντέλα, έγινε επεξεργασία και επαναδόμηση του ΨΜΕ.

Αξιοποιείται η καταγραφή των χρήσεων κάλυψης γης από το πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης Corine 2000, για την αρχική εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας Manning (Yan Huang 2006).



Εικόνα 5: Χρήσεις γης (Corine 2000) [www.geodata.gov.gr](http://www.geodata.gov.gr)

Εικόνα 4: Κλίσεις εδάφους περιοχής μελέτης

Εικόνα 3: Ψ.Μ.Ε. περιοχής μελέτης

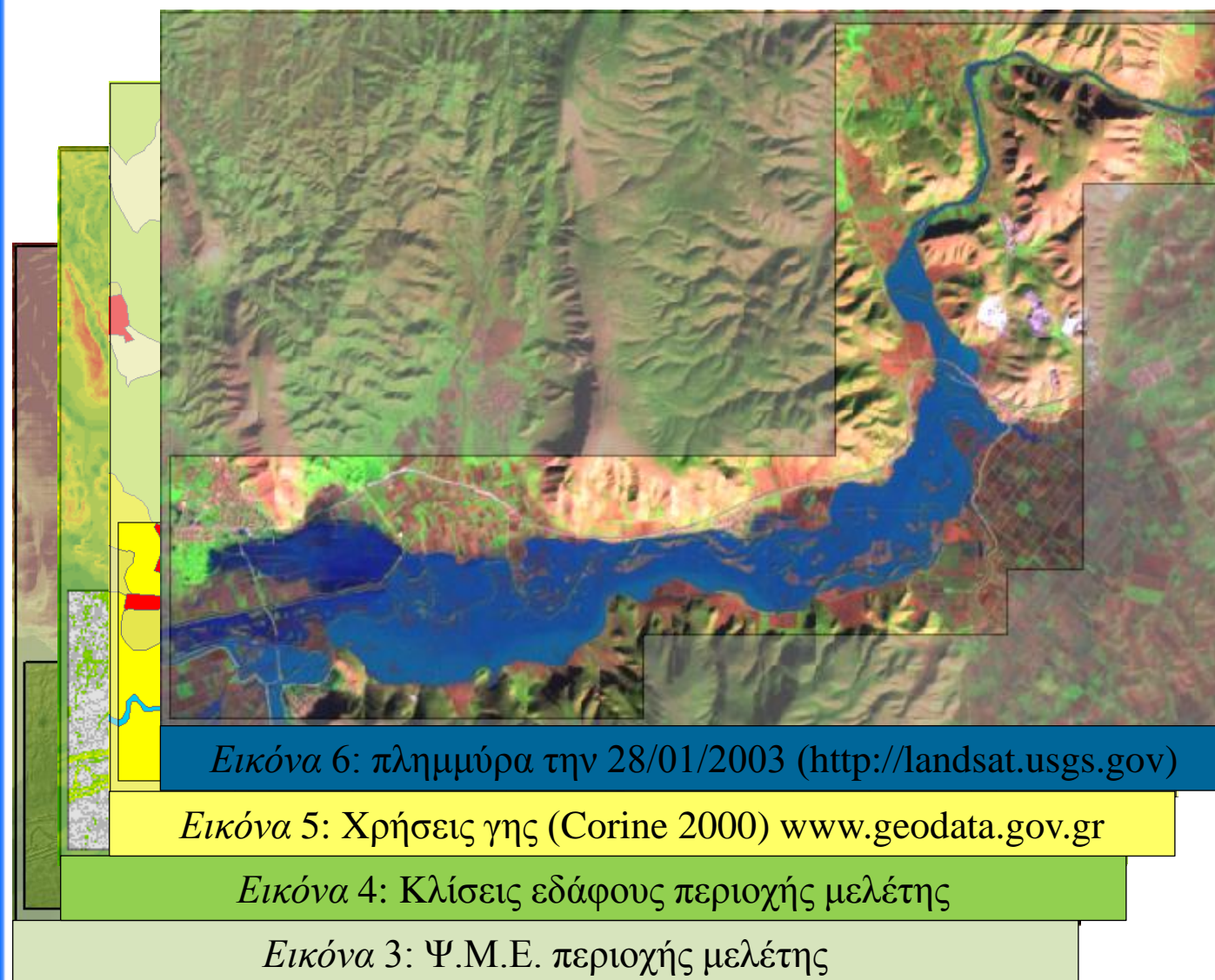
ΚΩΔ.	ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ	n Manning (m <sup>-1/3</sup> s)
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.015
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0.200
211	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	0.035
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	0.030
221	Αμπελώνες	0.100
231	Λιβάδια	0.033
321	Φυσικοί βοσκότοποι	0.035
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	0.085
411	Βάλτοι στην ενδοχώρα	0.050
511	Ροές υδάτων	0.027

# Γεωμετρικά δεδομένα περιοχής μελέτης

Όλα τα απαραίτητα γεωμετρικά δεδομένα για την υδραυλική προσομοίωση της περιοχής μελέτης, αντλήθηκαν από ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους κανονικοποιημένης μορφής (grid) με βήμα κανάβου 5m. Λόγω της χαμηλότερης ακρίβειας του ΨΜΕ στη διεύθυνση των υψομέτρων από εκείνη που απαιτούσαν τα μοντέλα, έγινε επεξεργασία και επαναδόμηση του ΨΜΕ.

Αξιοποιείται η καταγραφή των χρήσεων κάλυψης γης από το πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης Corine 2000, για την αρχική εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας Manning (Yan Huang 2006).

Για τη βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, χρησιμοποιήθηκε η καταγραφή της έκτασης της πλημμυρικής κατάκλυσης ενός συγκεκριμένου επεισοδίου, της περιόδου 21-28 Ιανουαρίου του 2003, όπως καταγράφηκε από τον δορυφόρο Landsat 7 (<https://.landsat.usgs.gov>) την 28η Ιανουαρίου 2003.



Εικόνα 6: πλημμύρα την 28/01/2003 (<http://landsat.usgs.gov>)

Εικόνα 5: Χρήσεις γης (Corine 2000) [www.geodata.gov.gr](http://www.geodata.gov.gr)

Εικόνα 4: Κλίσεις εδάφους περιοχής μελέτης

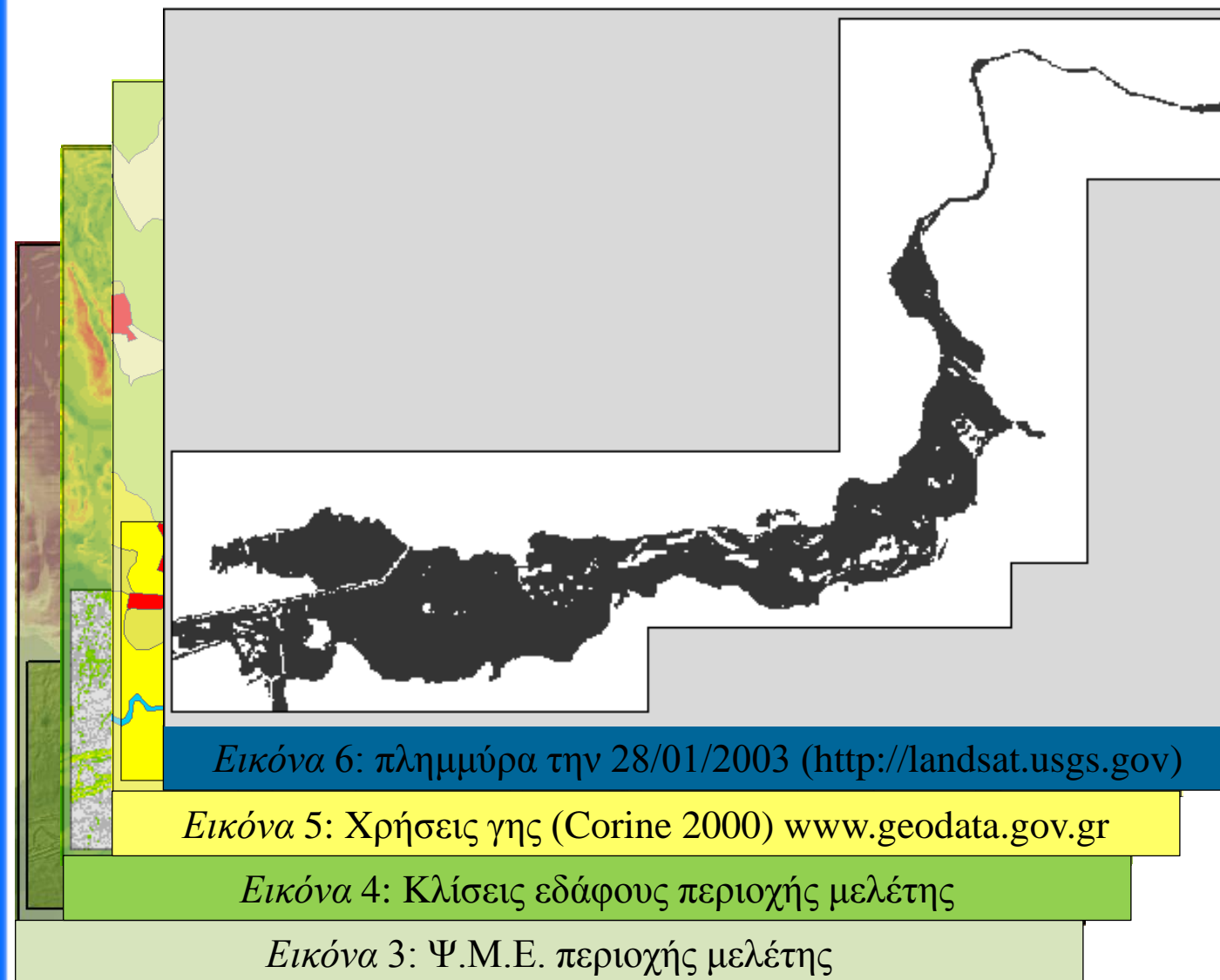
Εικόνα 3: Ψ.Μ.Ε. περιοχής μελέτης

# Γεωμετρικά δεδομένα περιοχής μελέτης

Όλα τα απαραίτητα γεωμετρικά δεδομένα για την υδραυλική προσομοίωση της περιοχής μελέτης, αντλήθηκαν από ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους κανονικοποιημένης μορφής (grid) με βήμα κανάβου 5m. Λόγω της χαμηλότερης ακρίβειας του ΨΜΕ στη διεύθυνση των υψομέτρων από εκείνη που απαιτούσαν τα μοντέλα, έγινε επεξεργασία και επαναδόμηση του ΨΜΕ.

Αξιοποιείται η καταγραφή των χρήσεων κάλυψης γης από το πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης Corine 2000, για την αρχική εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας Manning (Yan Huang 2006).

Για τη βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, χρησιμοποιήθηκε η καταγραφή της έκτασης της πλημμυρικής κατάκλυσης ενός συγκεκριμένου επεισοδίου, της περιόδου 21-28 Ιανουαρίου του 2003, όπως καταγράφηκε από τον δορυφόρο Landsat 7 (<https://.landsat.usgs.gov>) την 28η Ιανουαρίου 2003.



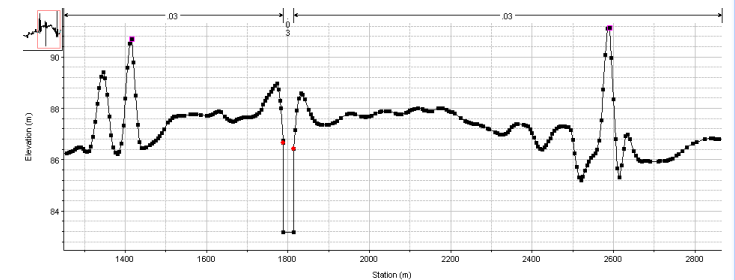
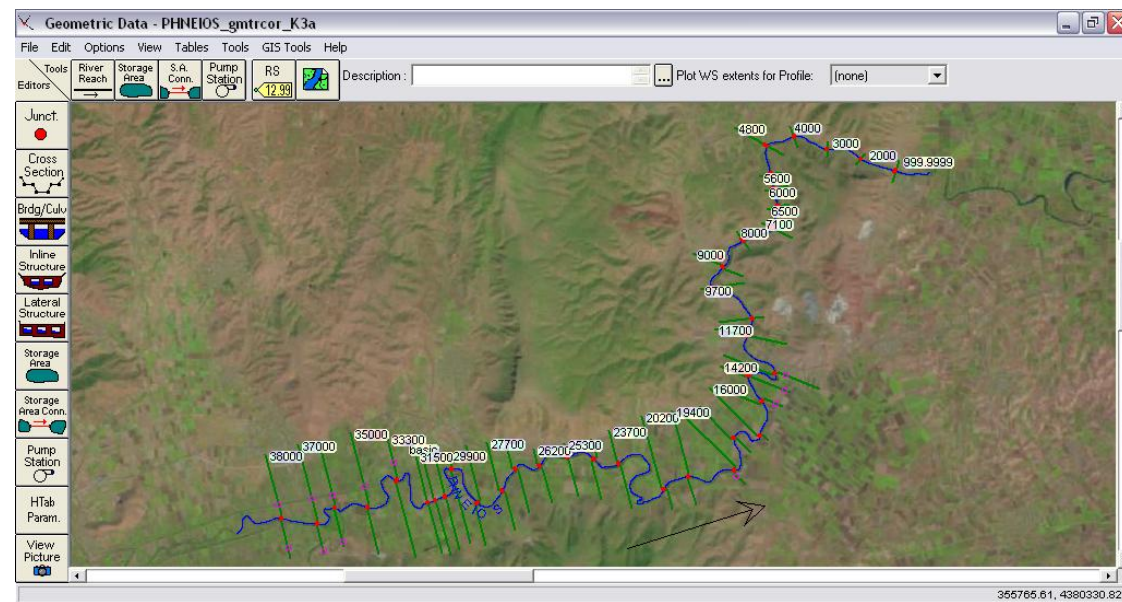
Η έκταση της πλημμύρας που δημιούργησε το μελετούμενο επεισόδιο βροχής, καταγράφηκε εφαρμόζοντας ημιαυτόματη μεθοδολογία διαχωρισμού των λιμναζόντων νερών από το έδαφος, αξιοποιώντας την εικόνα του μέσου υπέρυθρου καναλιού (5) του συστήματος Landsat ETM+, μέσω του λογισμικού ArcGIS.



# Υδραυλικό Μοντέλο HEC-RAS

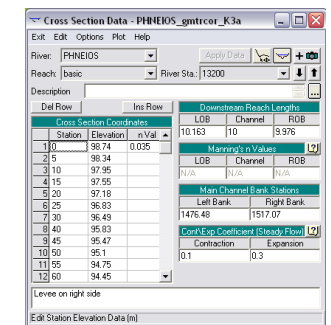
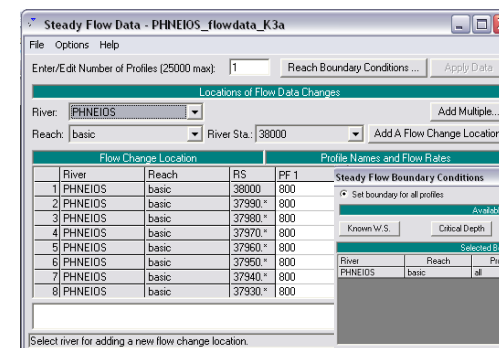
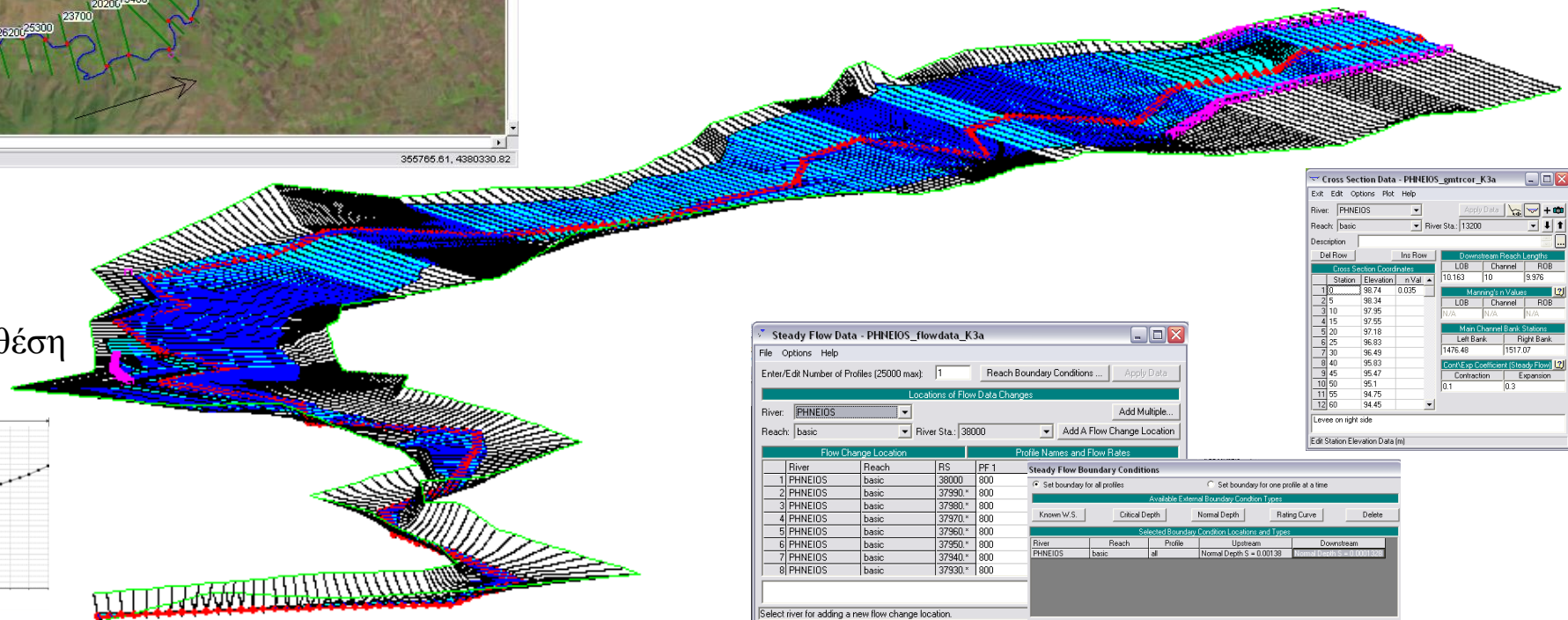
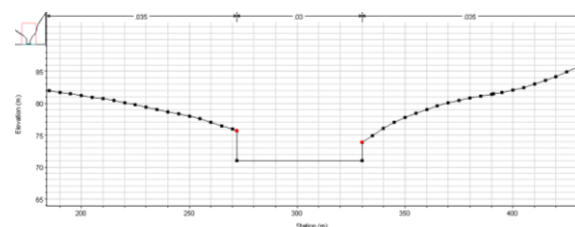
Το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS (<http://www.hec.usage.army.mil>) του U.S. Army Corps of Engineers υπολογίζει την ελεύθερη επιφάνεια υπό συνθήκες μονοδιάστατης, μόνιμης ή μη μόνιμης και ανομοιόμορφης ροής σε φυσικά ή τεχνητά υδατορεύματα. Το HEC-RAS προσδιορίζει τα υψόμετρα της υδατικής στάθμης της επιφανειακής απορροής στα επιλεγμένα σημεία (διατομές) κάτω από ορισμένες συνθήκες ροής. Ως στοιχεία εισόδου ζητούνται τα γεωμετρικά δεδομένα των διατομών καθώς και τα στοιχεία σταθερής ροής (οριακές συνθήκες) (Bruner, 2010).

Με βάση την έως τώρα εμπειρία, φαίνεται ότι το μοντέλο ανταποκρίνεται καλύτερα σε κανάλια στενής διατομής και απότομης κατά μήκος κλίσης, σε σχέση με τις περιπτώσεις περιοχών μικρών κλίσεων όπου η πλημμύρα εκτείνεται στην πεδιάδα.



Διατομή στην πλέον ανάντη θέση (Αλή Εφέντη)

Διατομή στην πλέον κατάντη θέση (Αμυγδαλιά)



Εικόνα 7: υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS

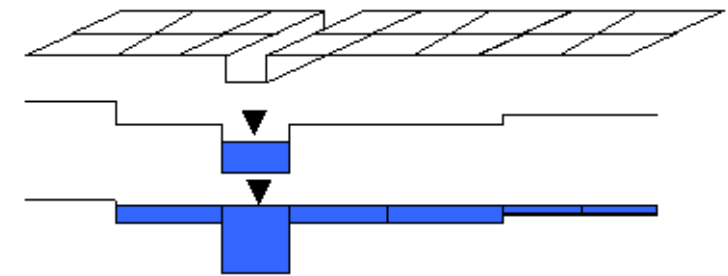
# Υδραυλικό Μοντέλο LISFLOOD-FP

Το LISFLOOD-FP (<http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood>) του Πανεπιστημίου του Bristol, αποτελεί ένα πρωτότυπο υδραυλικό ψευδο-διδιάστατο μοντέλο που χρησιμοποιεί μονοδιάστατη ανάλυση σε δύο διευθύνσεις, μία στην κύρια διεύθυνση της ροής και μία στην εγκάρσια διεύθυνση αυτής (Bates et al., 2005).

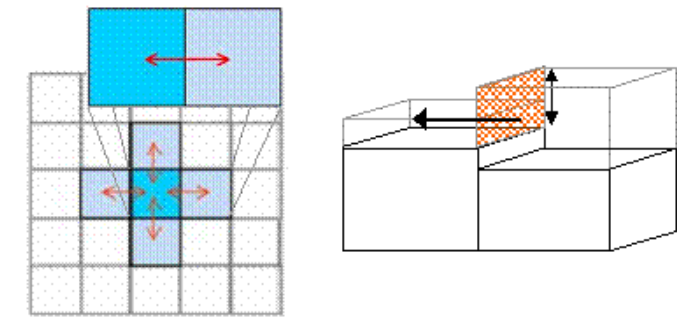
Η μονοδιάστατη ανάλυση εφαρμόζεται ξεχωριστά για το κανάλι και το πλημμυρικό πεδίο και συνδυάζονται μέσω μιας σχέσης συνέχειας.

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

Η ροή στα πλημμυρικά πεδία –πλευρική ροή- περιγράφεται από την εξίσωση του Manning ή την εξίσωση υπερχείλισης. Οι πλημμυρικές περιοχές υλοποιούνται μέσω ενός ψηφιδωτού αρχείου, όπου οι ροή περιγράφεται από φατνίο σε φατνίο μέσω της διαφοράς του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας σε κάθε ένα από αυτά.



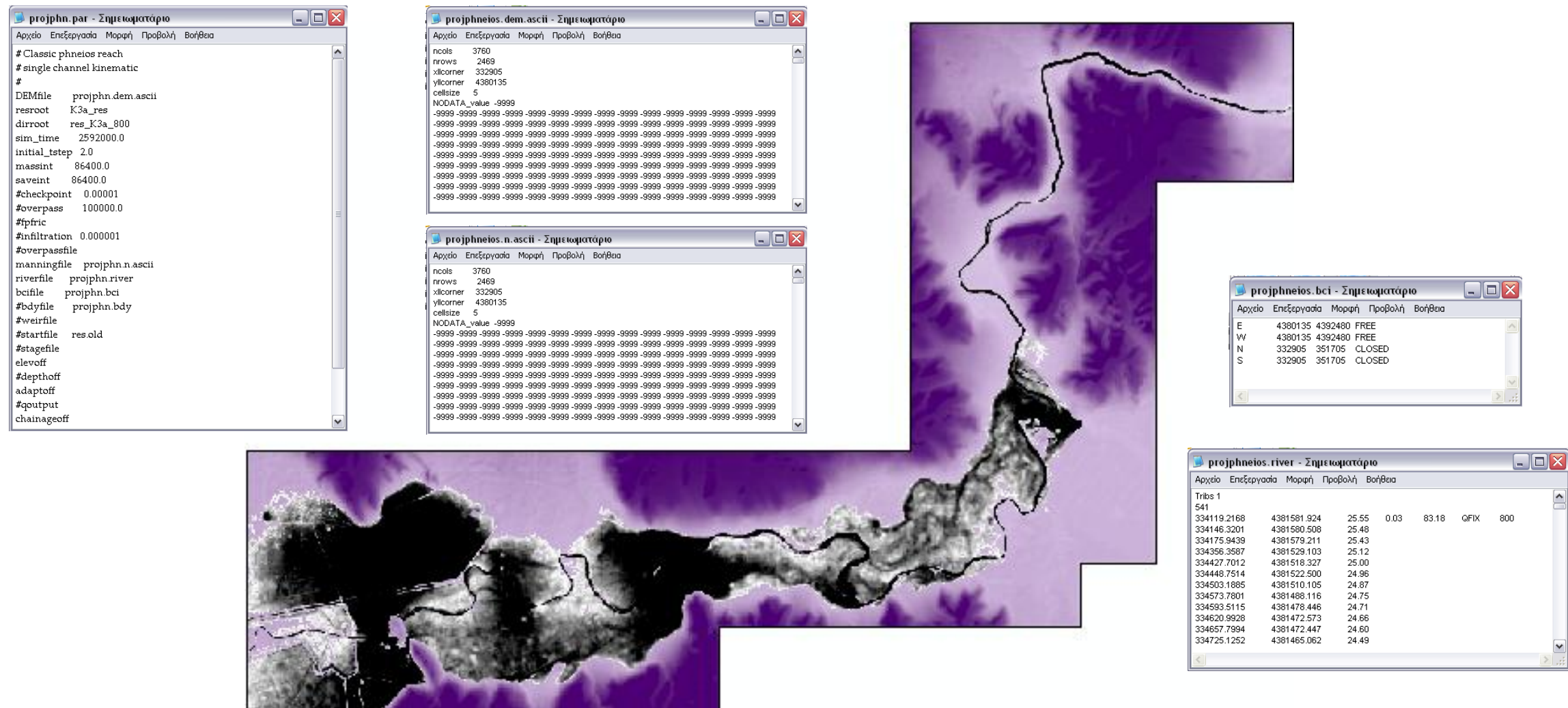
Εικόνα 8: υδραυλικό μοντέλο LISFLOOD-FP



Εικόνα 9: Φατνία πλημμυρικού πεδίου, ροή μεταξύ αυτών.

# Υδραυλικό Μοντέλο LISFLOOD-FP

Το LISFLOOD-FP (<http://www.bris.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood>) του Πανεπιστημίου του Bristol, αποτελεί ένα πρωτότυπο υδραυλικό ψευδο-διδιάστατο μοντέλο που χρησιμοποιεί μονοδιάστατη ανάλυση σε δύο διευθύνσεις, μία στην κύρια διεύθυνση της ροής και μία στην εγκάρσια διεύθυνση αυτής (Bates et al., 2005).



Εικόνα 10: υδραυλικό μοντέλο LISFLOOD-FP

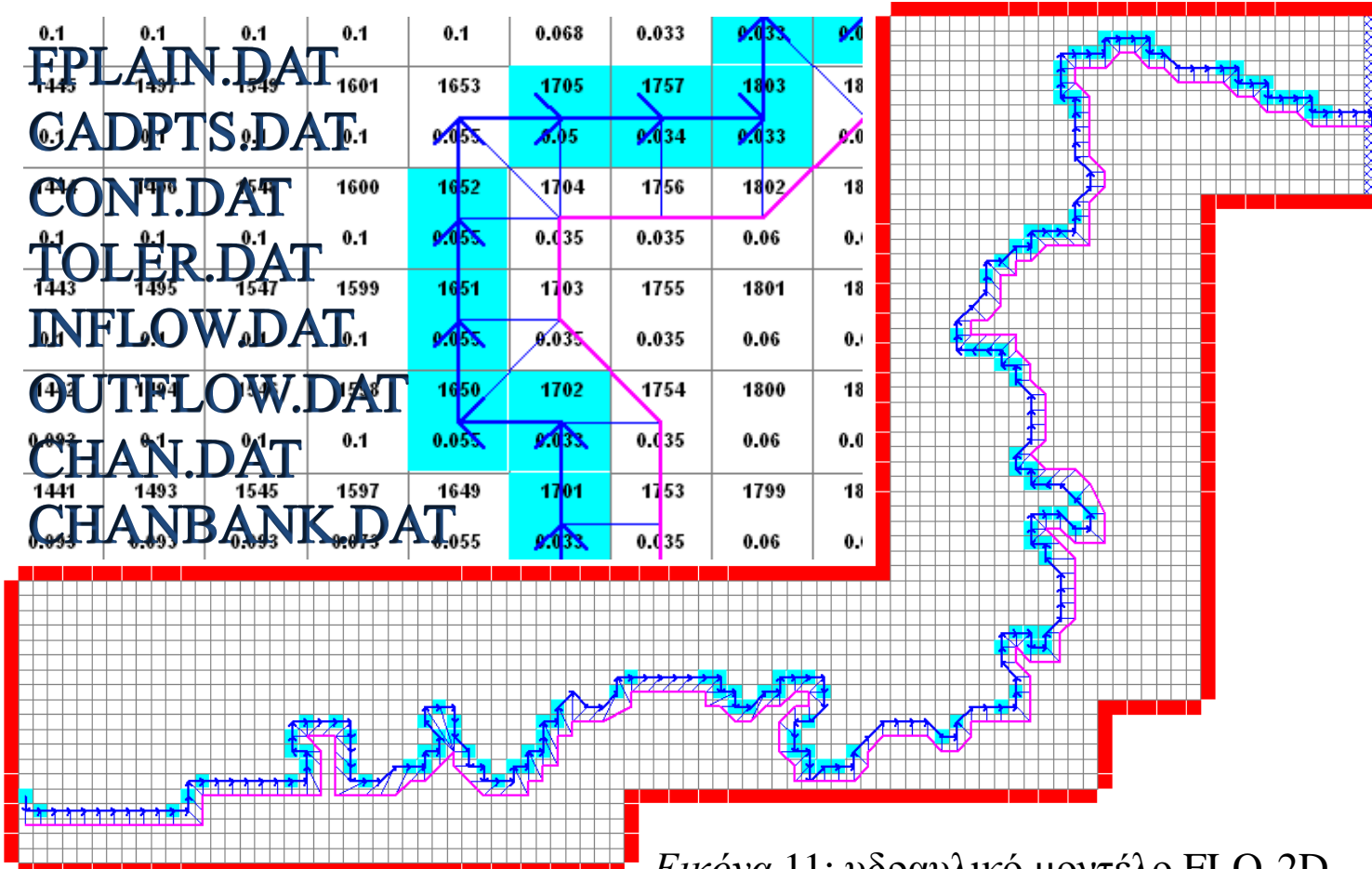
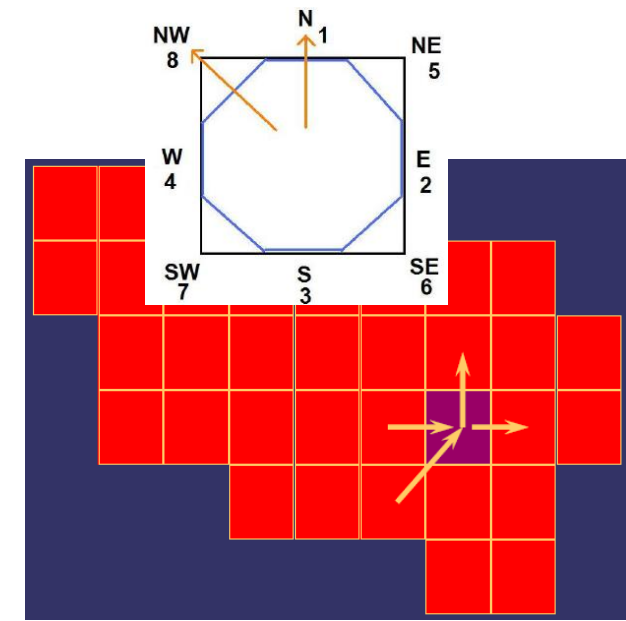
Δεδομένα εισόδου του μοντέλου είναι το πλάτος του καναλιού, η κλίση του πυθμένα του, τα τοπογραφικά υψόμετρα του καναλιού και πλημμυρικού πεδίου και ο συντελεστής τραχύτητας Manning στο κανάλι και στο πλημμυρικό πεδίο, στοιχεία τα οποία μπορούν να μεταβάλλονται κατά μήκος του υδατορεύματος και πλημμυρικού πεδίου. Επίσης, επιλέγονται συνθήκες ορίων: ομοιόμορφο, κλειστό, με σταθερή ή μεταβαλλόμενη στο χρόνο ελεύθερη επιφάνεια ή παροχή.

# Υδραυλικό Μοντέλο FLO-2D

Το FLO-2D (<http://www.flo-2d.com>) αποτελεί ένα ψευδο-διδιάστατο υδραυλικό μοντέλο το οποίο επιλύει την εξίσωση διατήρησης της ορμής (1-Δ) μέσω υπολογισμού της μέσης ταχύτητας ροής κατά μήκος κάθε φατνίου του κανάβου με τον οποίο αναπαριστά το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης. Η παροχή υπολογίζεται σε κάθε κύτταρο του κανάβου για κάθε μια από τις 8 δυνατές κατευθύνσεις (Loomis & Riano, 2011).

Δεδομένα εισόδου του μοντέλου αποτελούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης (καναλιού και πλημμυρικών πεδίων), τα υδρολογικά δεδομένα και οι αριθμητικοί συντελεστές ευστάθειας του μοντέλου.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε η ελεύθερη βασική έκδοση του μοντέλου η οποία λειτουργεί μέσω της εφαρμογής Grid Developer System (GDS).



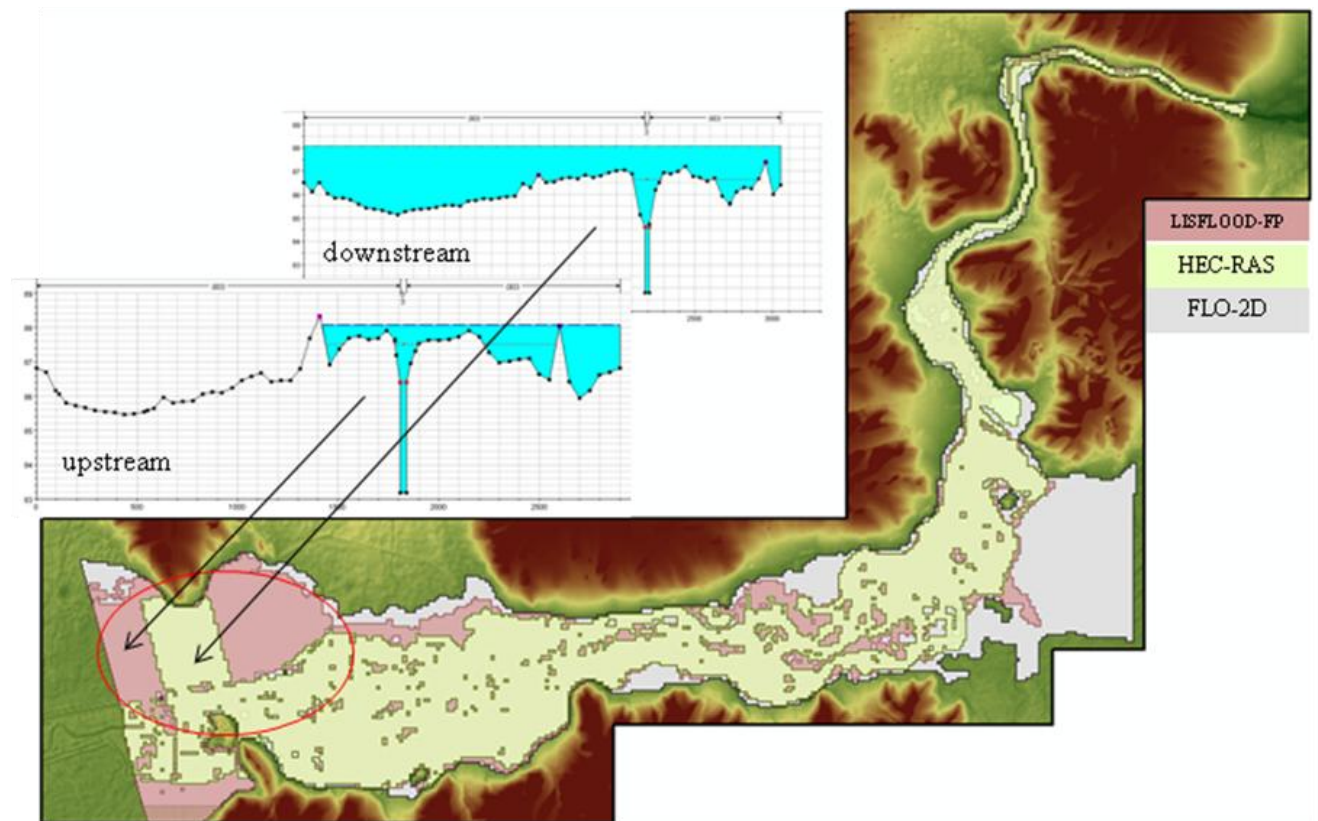
Εικόνα 11: υδραυλικό μοντέλο FLO-2D

Η εφαρμογή του μοντέλου παρουσίασε σημαντικά προβλήματα, τα οποία σχετίζονται με την επιλογή βήματος κανάβου αλλά και την υψομετρική ακρίβεια του Ψ.Μ.Ε. Στις προσομοιώσεις που υλοποιήθηκαν στην περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκε χωρίς να ληφθεί υπόψη το κανάλι. Η παροχή δίνεται στην πλέον ανάντη θέση (θέση Αλή Εφέντη) και διοχετεύεται στην κατάντη θέση (θέση Αμυγδαλιά) λαμβάνοντας υπόψη τη μορφολογία όπως ορίζεται από τα υψόμετρα της πεδιάδας.

# Εφαρμογή στην πεδιάδα του Πηνειού (I)

Αρχικά τα τρία μοντέλα συγκρίθηκαν σε συνθήκες μόνιμης ροής και για παροχή 800 m<sup>3</sup>/s. Θεωρήθηκε κοινός συντελεστής τραχύτητας στο κανάλι και τα πλημμυρικά πεδία ίσος με 0.03 m<sup>-1/3</sup> s.

- Μεγαλύτερη εξάπλωση της πλημμύρας στην πεδιάδα με τις προσομοιώσεις των ψευδο-διδιάστατων μοντέλων.
- Μη δυνατότητα πλήρους κάλυψης της λεκάνης κατάκλυσης βόρεια του αναχώματος από το μονοδιάστατης ανάλυσης HEC-RAS.



Εικόνα 12: σύγκριση μοντέλων με κοινό συν/τη n Manning

Με τις ίδιες συνθήκες διερευνήθηκε η ευαισθησία των μοντέλων στην μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας του καναλιού και των πλημμυρικών πεδίων. Εφαρμόστηκε ο συντελεστής τραχύτητας 0.03 m<sup>-1/3</sup>s, ο οποίος συμφωνεί με τις χρήσεις γης της περιοχής μελέτης και μεταβλήθηκε σε κάποιες ακραίες και μη ρεαλιστικές τιμές, 0.3 m<sup>-1/3</sup>s και 0.003 m<sup>-1/3</sup>s.

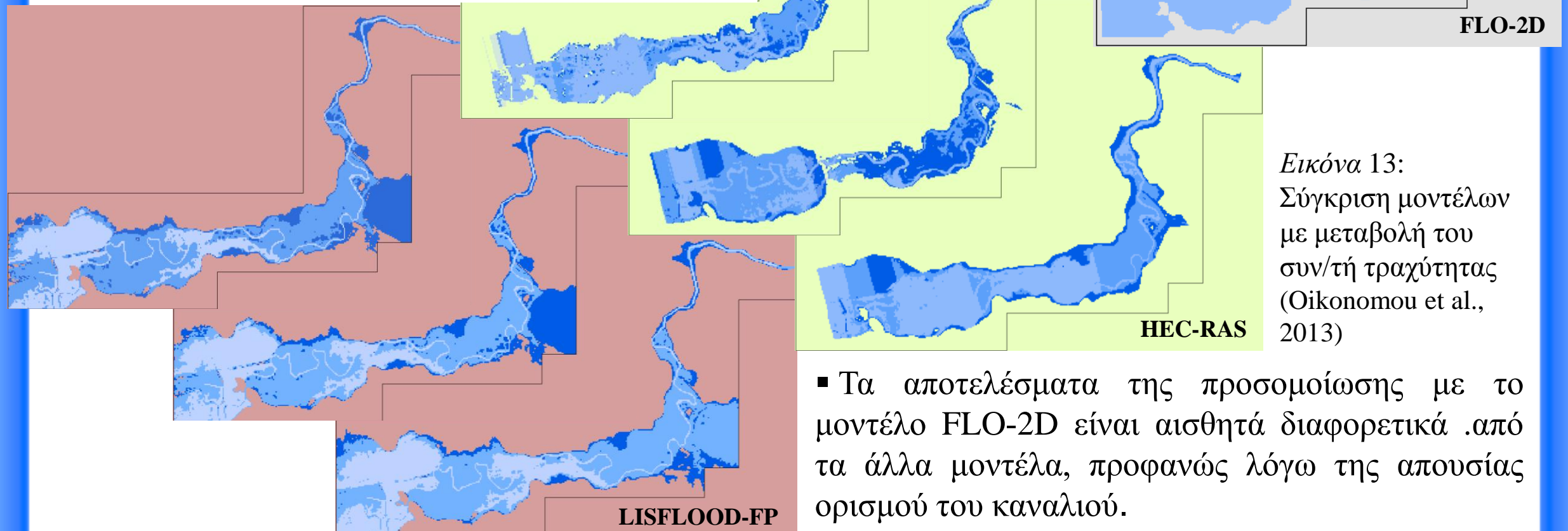
Σημείωση: στο μοντέλο FLO-2D δεν μοντελοποιήθηκε η γεωμετρία του καναλιού, αλλά καταχωρήθηκε ο συντελεστής τραχύτητας του καναλιού στα κελιά του κανάβου που βρίσκονται στη θέση ροής του ποταμού.

Πίνακας 1: βάθος ροής στο σημείο εξόδου

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

# Εφαρμογή στην πεδιάδα του Πηνειού (I)

- Το μοντέλο LISFLOOD-FP παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στη μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας στο κανάλι σε αντίθεση με τη μεταβολή του στα πλημμυρικά πεδία.
- Το μοντέλο HEC-RAS αν και παρουσιάζει σημαντική ευαισθησία στη μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας τόσο στο ποτάμι όσο και στα πλημμυρικά πεδία, εμφανίζει στην πλημμυρική κατάκλυση της πεδιάδας ‘μη φυσιολογικές’ ασυνέχειες (μονοδιάστατη θεώρηση).
- Αντίθετα, τόσο με το LISFLOOD-FP όσο και με το FLO-2D η απόδοση της πλημμυρικής κατάκλυσης παρουσιάζει ομοιόμορφη κατανομή.



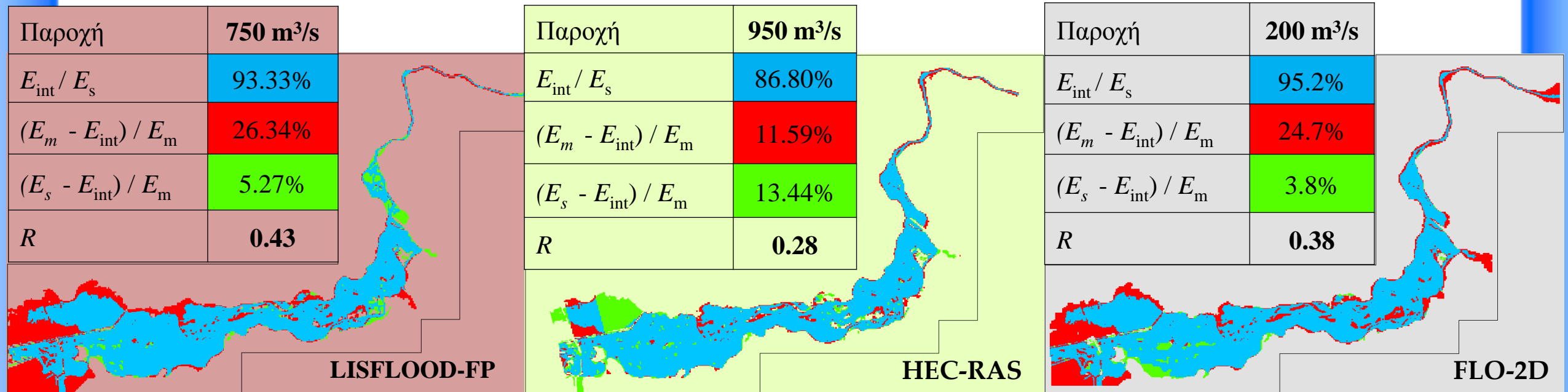
Εικόνα 13:  
Σύγκριση μοντέλων  
με μεταβολή του  
συν/τή τραχύτητας  
(Oikonomou et al.,  
2013)

- Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το μοντέλο FLO-2D είναι αισθητά διαφορετικά από τα άλλα μοντέλα, προφανώς λόγω της απουσίας ορισμού του καναλιού.

# Εφαρμογή στην πεδιάδα του Πηνειού (II)

Αναζητήθηκε η παροχή εκείνη που για κάθε μοντέλο, σε συνθήκες μόνιμης ροής, δημιουργεί το αποτύπωμα της πραγματικής πλημμύρας όπως καταγράφηκε από την εικόνα του δορυφόρου.

Για την υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας λήφθησαν υπόψη οι χρήσεις γης της περιοχής μελέτης όπως καταγράφηκαν από το πρόγραμμα Corine της Ε.Ε. το 2000. Τα γεωμετρικά δεδομένα της περιοχής μελέτης αντλήθηκαν από το αδρομερές ΨΜΕ, με βήμα κανάβου **50 m**.



Εικόνα 14: Βέλτιστη προσαρμογή μοντέλων στην πραγματική πλημμύρα (Oikonomou et al., 2013)

$$R = \frac{E_s + E_m}{E_{int}} - 2 \quad (1)$$

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

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

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

Βασιζόμενοι σε προηγούμενες μελέτες (Mimikou & Koutsoyiannis, 1995), η αναμενόμενη παροχή δεν μπορεί να είναι τόσο μεγάλη όσο αποδίδουν τα μοντέλα HEC-RAS αλλά και LISFLOOD-FP.

Η μεγαλύτερη παροχή που έχει καταγραφεί στη θέση Αλή Εφέντη το Μάρτιο του 1987 ήταν 637 m<sup>3</sup>/s.

# Εφαρμογή στην πεδιάδα του Πηνειού (III)

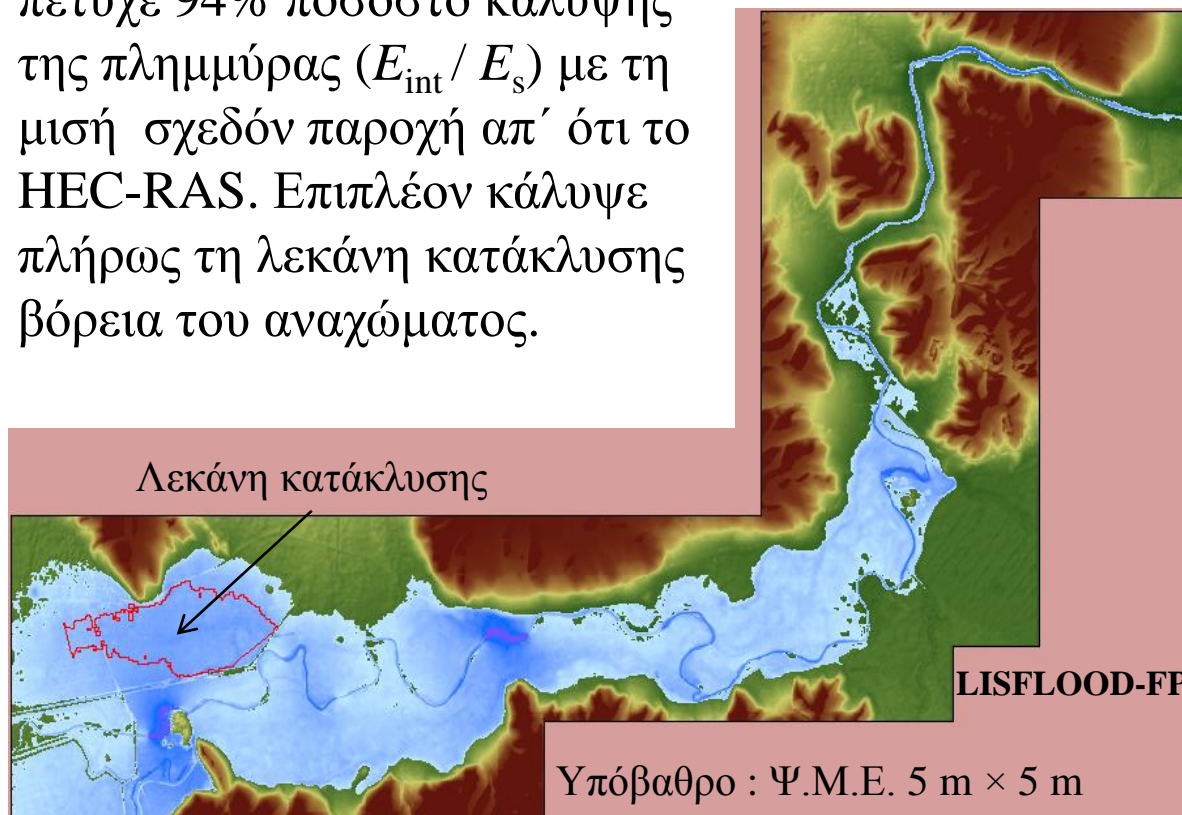
Με τα μοντέλα LISFLOOD-FP και HEC-RAS, αξιοποιώντας το λεπτομερέστερο Ψ.Μ.Ε., με βήμα κανάβου **5m**, αναζητήθηκε η παροχή εκείνη η οποία σε συνθήκες μόνιμης ροής δίνει το αποτέλεσμα της πραγματικής πλημμύρας.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα χρήσεων γης για την Ελλάδα το έτος 2000, σύμφωνα με το πρόγραμμα CORINE της ΕΕ.

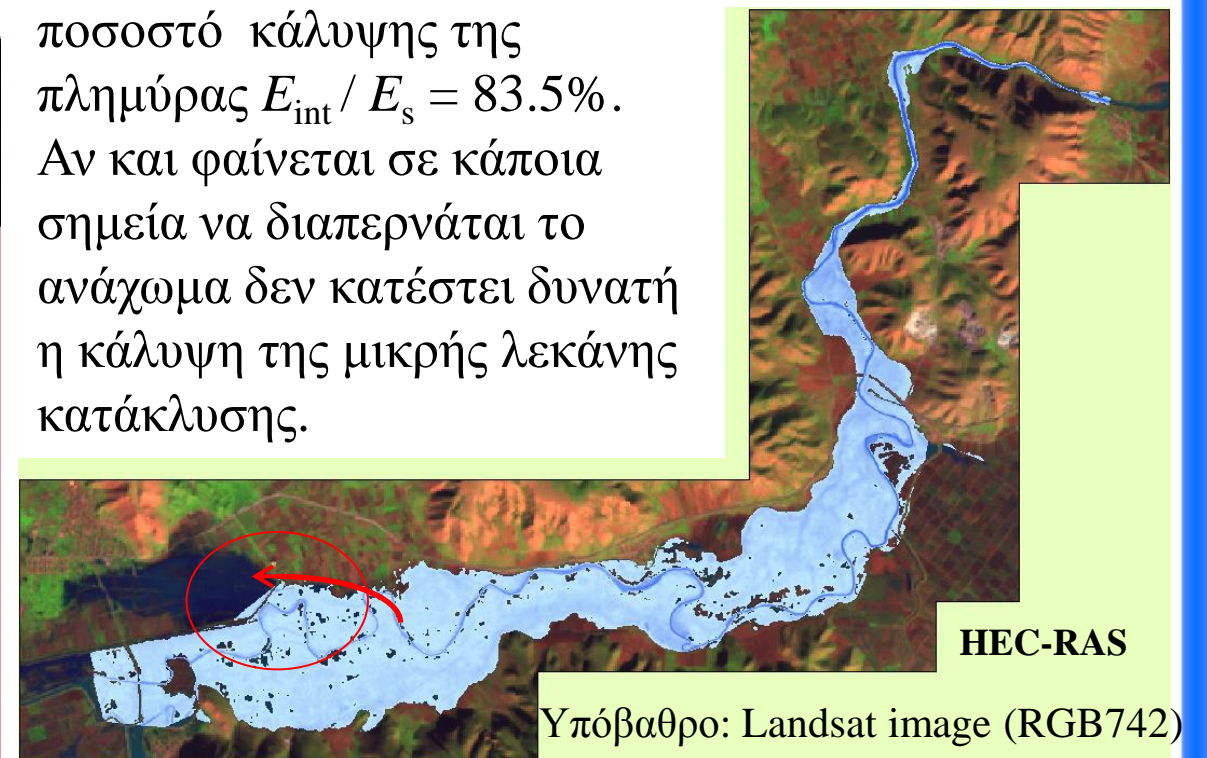
Κατόπιν επαναληπτικής διαδικασίας η απαιτούμενη παροχή στο HEC-RAS υπολογίστηκε σε  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  (με βάθος νερού στο σημείο εξόδου  $8.59 \text{ m}$ ) ενώ στο LISFLOOD-FP σε  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  (με βάθος νερού στο σημείο εξόδου  $5.96 \text{ m}$ ).

Αναφέρεται ενδεικτικά ότι κάθε προσομοίωση στο HEC-RAS διήρκησε  $10 \text{ min}$  ενώ στο LISFLOOD-FP  $60 \text{ h}$ .

Το μοντέλο LISFLOOD-FP πέτυχε  $94\%$  ποσοστό κάλυψης της πλημμύρας ( $E_{\text{int}} / E_s$ ) με τη μισή σχεδόν παροχή απ' ότι το HEC-RAS. Επιπλέον κάλυψε πλήρως τη λεκάνη κατάκλυσης βόρεια του αναχώματος.



Το μοντέλο HEC-RAS πέτυχε ποσοστό κάλυψης της πλημμύρας  $E_{\text{int}} / E_s = 83.5\%$ . Αν και φαίνεται σε κάποια σημεία να διαπερνάται το ανάχωμα δεν κατέστη δυνατή η κάλυψη της μικρής λεκάνης κατάκλυσης.



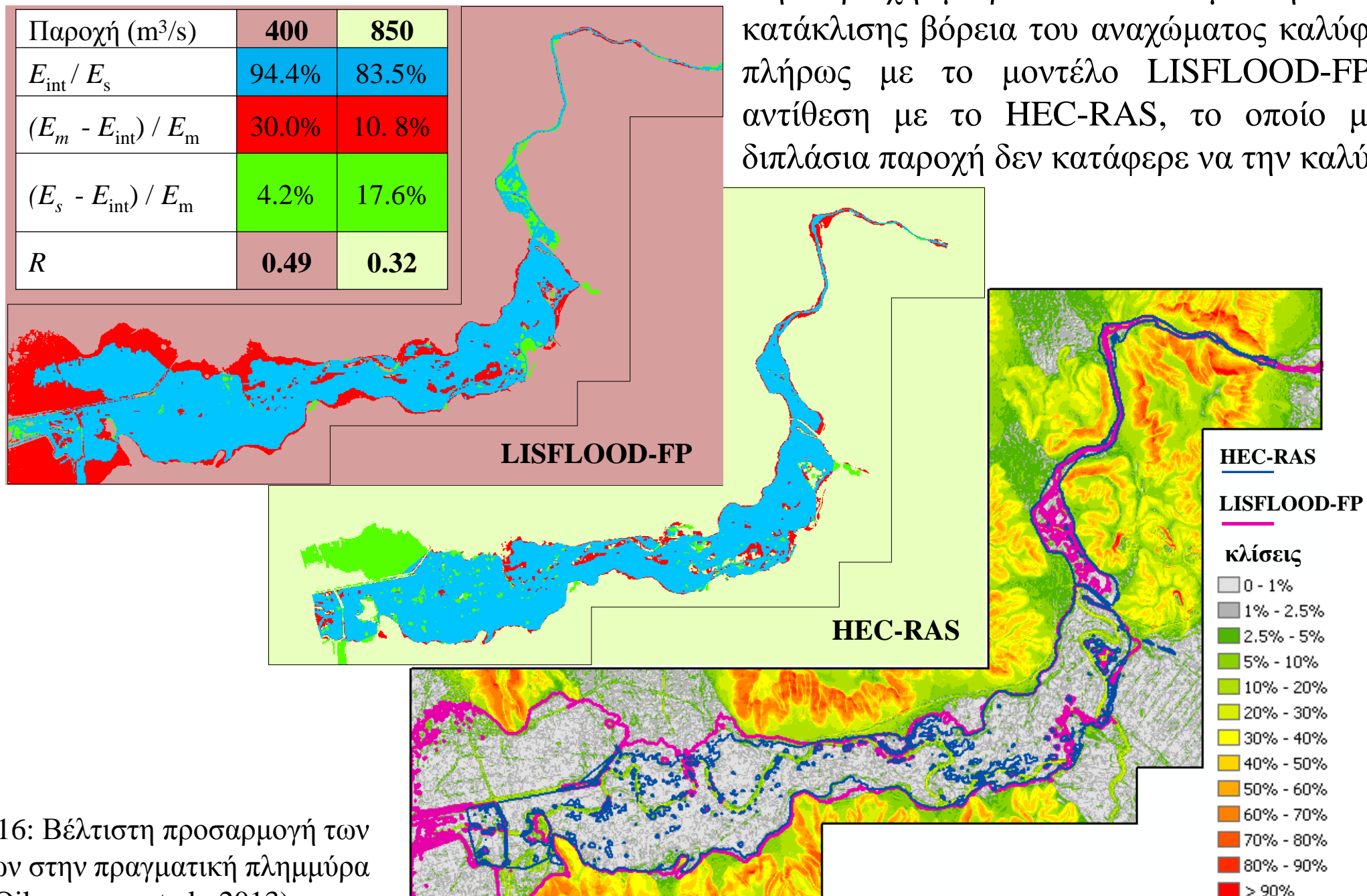
Εικόνα 15: Πλημμυρά βάσει Ψ.Μ.Ε. με βήμα κανάβου  $5 \text{ m}$  (Oikonomou et al., 2013)



# Εφαρμογή στην πεδιάδα του Πηνειού (III)

- με το HEC- RAS η ‘ιδανική’ παροχή είναι σχεδόν η ίδια όπως προέκυψε και με το αδρομερές Ψ.Μ.Ε.
- αντίθετα, με το μοντέλο LISFLOOD-FP, βάσει του αναλυτικού ΨΜΕ απαιτείται σχεδόν η μισή παροχή.
- το αποτύπωμα της πλημμύρας για το κάθε μοντέλο εμφανίζεται στο χάρτη κλίσεων της περιοχής μελέτης. Όπως φαίνεται η πεδιάδα εκατέρωθεν του ποταμού εκτείνεται σε μεγάλη έκταση με κλίσεις μικρότερες του 2.5%. Με το μονοδιάστατης ανάλυσης HEC-RAS η πλημμύρα διαχέεται συνολικά σε μικρότερη έκταση συγκριτικά με το LLISFLOOD-FP.

- η περιοχή μικρών κλίσεων με την λεκάνη κατάκλισης βόρεια του αναχώματος καλύφθηκε πλήρως με το μοντέλο LISFLOOD-FP, σε αντίθεση με το HEC-RAS, το οποίο με τη διπλάσια παροχή δεν κατάφερε να την καλύψει.

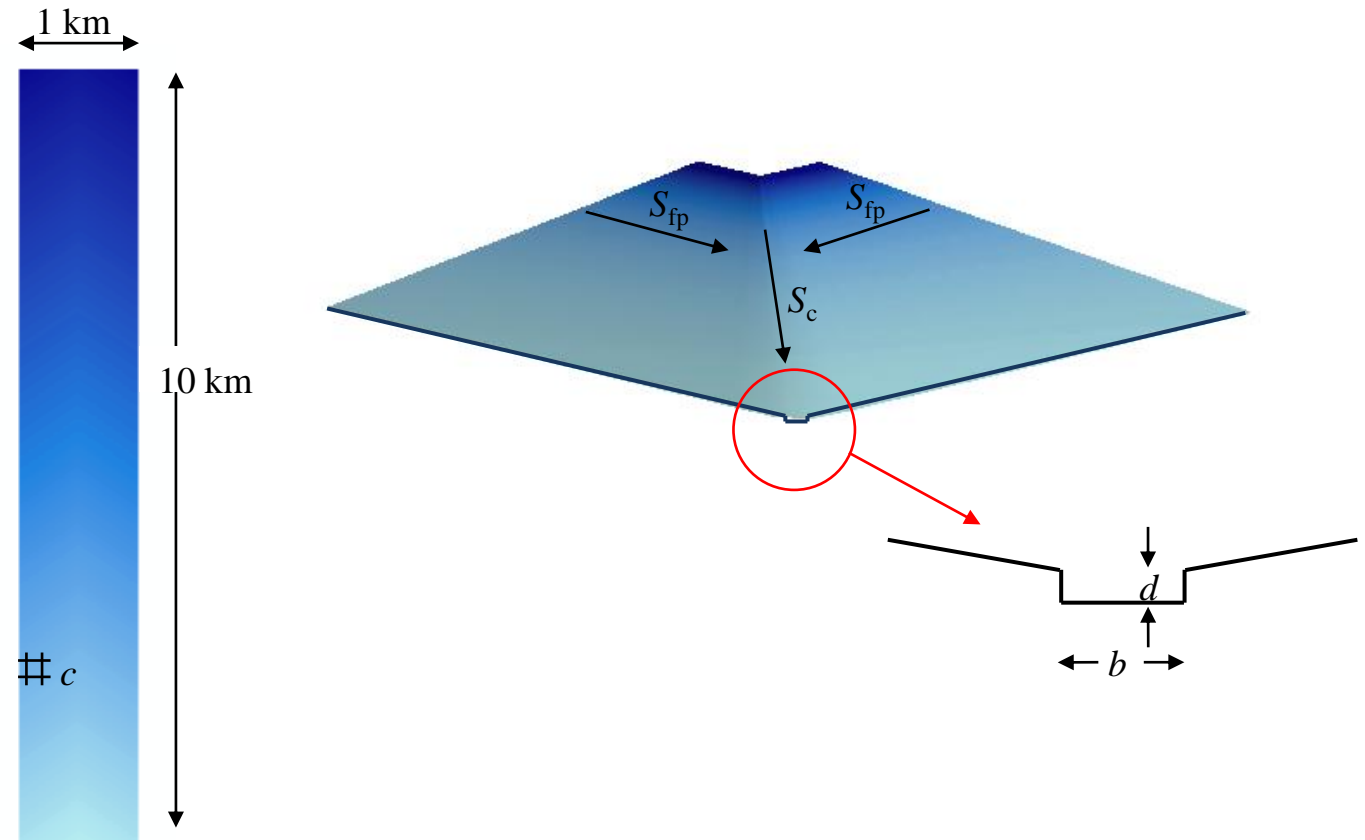


Εικόνα 16: Βέλτιστη προσαρμογή των μοντέλων στην πραγματική πλημμύρα (Oikonomou et al., 2013)

# Εφαρμογή Μοντέλων σε πρότυπες τοπογραφίες

Στην παρούσα ενότητα, έγινε εφαρμογή των τριών υδραυλικών μοντέλων σε τοπογραφίες απλής γεωμετρίας (Εικόνα 17) με σταθερά χαρακτηριστικά:

- επιφάνεια υπό μορφή κανάβου
- διαστάσεων 1.000 m x 10.000 m.
- κανάλι ορθογωνικής διατομής κατά μήκος της επιφάνειας, πλάτους ( $b$ ) 10m και βάθους ( $d$ ) 2m.



Εικόνα 17: Γεωμετρία πρότυπων τοπογραφιών.

Διερευνήθηκε η ευαισθησία των μοντέλων στη μεταβολή των παρακάτω παραμέτρων:

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

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

$Q$	$c$	$nc$	$nfp$	$S_c$	$S_{fp}$
-----	-----	------	-------	-------	----------

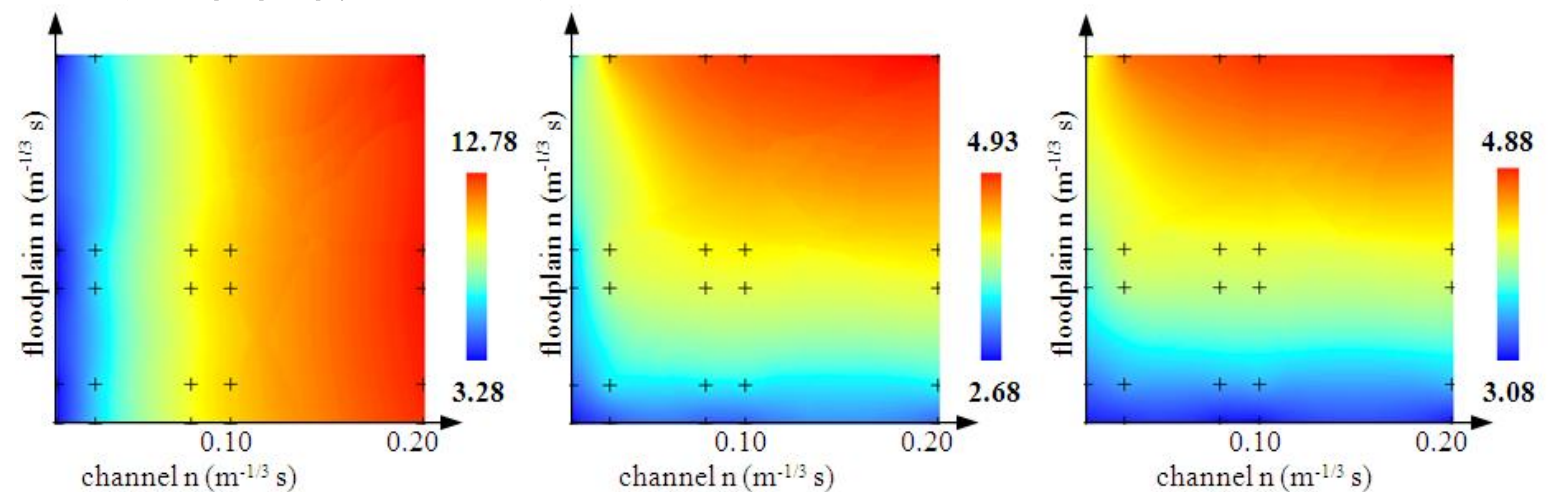
- γενικά, με τα δύο ψευδο-διδιάστατα μοντέλα, η πλημμύρα διαχέεται σε μεγαλύτερο βαθμό στα πλημμυρικά πεδία καταγράφοντας μεγαλύτερη έκταση της πλημμυρικής κατάκλυσης απ' ό τι με το μονοδιάστατης ανάλυσης HEC-RAS.
- το μοντέλο LISFLOOD-FP καταγράφει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στην μεταβολή της εισερχόμενης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

$Q$	$c$	$nc$	$nfp$	$S_c$	$S_{fp}$
-----	-----	------	-------	-------	----------

- αντίθετα τα δύο ψευδο-διδιάστατα μοντέλα το μονοδιάστατης ανάλυσης HEC-RAS, δεν δείχνει να επηρεάζεται σημαντικά από τη μεταβολή της ανάλυσης της επιφάνειας, όπως ήταν αναμενόμενο, δεδομένου ότι δεν βασίζει τη γεωμετρία του στο κανονικοποιημένης μορφής (μορφής grid) γεωμετρικό αρχείο.

$Q$	$c$	$nc$	$nfp$	$S_c$	$S_{fp}$
-----	-----	------	-------	-------	----------

- το LISFLOOD-FP παρουσιάζει έντονη ευαισθησία στη μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας του καναλιού και πολύ μικρή στη μεταβολή του συντελεστή τραχύτητας στα πλημμυρικά πεδία.
- καταγράφει τη μεγαλύτερη έκταση πλημμυρικής κατάκλυσης από τα άλλα μοντέλα, ενώ εμφανίζει εξαιρετικά μεγάλα βάθη ροής στο κανάλι (θεώρηση μοντέλου).



Εικόνα 18: Μεταβολή συν/τη τραχύτητας.

$Q$	$c$	$nc$	$nfp$	$S_c$	$S_{fp}$
-----	-----	------	-------	-------	----------

- το μοντέλο LISFLOOD-FP παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερη ευαισθησία στη μεταβολή των κλίσεων στο κανάλι και τα πλημμυρικά πεδία σε σύγκριση με το HEC-RAS.

# Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα

- Στη μοντελοποίηση πλημμυρικών γεγονότων υπεισέρχονται μεγάλες αβεβαιότητες (υδρολογικές, υδραυλικές, γεωμετρικές).
- Απαίτηση επεξεργασίας του Ψ.Μ.Ε. (κυρίως κατά μήκος του ποταμού) για τη λειτουργία των ψευδο-διδιάστατων μοντέλων.
- Η ανάλυση των γεωμετρικών δεδομένων (βήμα κανάβου) επηρεάζει σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο στα ψευδο-διδιάστατα μοντέλα.
- Το LISFLOOD-FP σε αντίθεση με το FLO-2D ανταποκρίνεται καλύτερα σε περιπτώσεις λεπτομερέστερου Ψ.Μ.Ε.
- Περιπτώσεις με σύνθετη τοπογραφία, όπου καταγράφονται πολλαπλές κατευθύνσεις ροής σε κάθε διατομή, το μονοδιάστατο μοντέλο αδυνατεί να προσομοιώσει με ακρίβεια τη χωρική κατάκλυση της πλημμύρας, σε αντίθεση με τα ψευδο-διδιάστατα μοντέλα.
- Σε περιοχές σχετικά μικρών κλίσεων, όπως η περιοχή μελέτης, το μονοδιάστατης ανάλυσης HEC-RAS υπερεκτιμά το μέγεθος της εισερχόμενης παροχής. Το LISFLOOD-FP φαίνεται να δίνει εκτιμήσεις πιο κοντά στην πραγματικότητα, ειδικά με την χρήση λεπτομερούς Ψ.Μ.Ε.
- Σε περιπτώσεις καναλιών μικρής διατομής και μεγάλης εισερχόμενης παροχής, τα μοντέλα ανταποκρίνονται διαφορετικά ανάλογα με το θεωρητικό τους υπόβαθρο. Στο HEC-RAS η εισερχόμενη παροχή κατανέμεται στο σύνολο της ανάντη διατομής, σε αντίθεση με τα ψευδο-διδιάστατα όπου η εισερχόμενη παροχή αναφέρεται σε συγκεκριμένο κύτταρο του κανάβου.
- Στη θεώρηση του μοντέλου LISFLOOD-FP (η δυναμική της ροής προέρχεται από το ποτάμι και όχι από τα πλημμυρικά πεδία) δικαιολογείται και η μεγαλύτερη ευαισθησία που παρουσιάζει σε σχέση με τα άλλα μοντέλα στην αλλαγή των παραμέτρων που σχετίζονται με το κανάλι απ' ότι των παραμέτρων που σχετίζονται με τα πλημμυρικά πεδία.
- Το FLO-2D αποτελεί ένα σύνθετο μοντέλο με πολλές παραμέτρους, το οποίο όμως δεν υποστηρίζεται από κατάλληλα εργαλεία για την εύκολη λειτουργία του. Από την παρούσα εφαρμογή προκύπτει ότι εκτιμά καλά την πλημμυρική κατάκλυση, όμως απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση για την πλήρη αξιοποίηση των λειτουργιών του και την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

# Αναφορές

- Bruner, G., HEC-RAS, river analysis system user's manual, US army corps of engineers, *Hydrologic engineering center*, 2010.
- Bates, P., Horritt, M., Wilson, M., Hunter, N., LISFLOOD-FP, User manual and technical note, *School of Geographical Sciences, University of Bristol*, 2005.
- Oikonomou, A., Dimitriadis, P., Koukouvinos, A., Tegos, A., Pagana, V., Panagopoulos, P., Mamasis, N. and Koutsoyiannis, D., Floodplain mapping via 1D and quasi-2D numerical models in the valley of Thessaly, Greece, *European Geosciences Union General Assembly 2013, Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, Vienna, EGU2013-10366, European Geosciences Union*, 2013.
- Loomis, T.R. and Riano, A., FLO-2D Training For Technical Reviewers, *Flood Control District of Maricopa County*, 2011.
- Mimikou, M., Koutsoyiannis, D., Extreme Floods in Greece: The case of 1994. *Proc. Research Workshop on the Hydrometeorology, Impacts and Management of Extreme Floods, US-NSF and Italian Research Council, Perugia, Italy, Nov., 1995.*
- Yan Huang, Appropriate modeling for integrated flood risk assessment, 2005.
- Εφαρμογή Οδηγίας 2007/60/ΕΚ Προκαταρκτική Αξιολόγηση Κινδύνων Πλημμύρας, Ειδική Γραμματεία Υδάτων, ΥΠΕΚΑ, Αθήνα, Δεκέμβριος 2012.