



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΟ ΑΝΑΓΛΥΦΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΜΠΕΛΛΟΥ ΒΑΣΙΛΗ

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Δ.Π.Θ.
Διπλωματούχου Δ.Π.Μ.Σ "Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων" Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Γ. ΤΣΑΚΙΡΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)
2. Β. ΧΡΥΣΑΝΘΟΥ, Καθ. Δ.Π.Θ.
3. Ι. ΝΑΛΜΠΑΝΤΗΣ, Επικ. Καθ. Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Γ. ΤΣΑΚΙΡΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)
2. Β. ΧΡΥΣΑΝΘΟΥ, Καθ. Δ.Π.Θ.
3. Ι. ΝΑΛΜΠΑΝΤΗΣ, Επικ. Καθ. Ε.Μ.Π.
4. Β. ΤΣΙΧΡΙΝΤΖΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
5. Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
6. Ε. ΜΠΑΛΤΑΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
7. Π. ΑΓΓΕΛΙΔΗΣ, Αν. Καθ. Δ.Π.Θ.

ΑΘΗΝΑ, Νοέμβριος 2015

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η αντιμετώπιση των πλημμυρών και γενικότερα των φυσικών καταστροφών, αποτελεί μία πρόκληση για τις οργανωμένες κοινωνίες εδώ και εκατοντάδες χρόνια. Βέβαια, το επίπεδο θωράκισης και προστασίας που προσφέρεται στη σημερινή εποχή είναι τελείως αναντίστοιχο σε σχέση με το επιστημονικό και τεχνολογικό επίπεδο της ανθρωπότητας. Θα μπορούσε να ισχυριστεί κάποιος ότι αυτή η γενική διαπίστωση που ισχύει για όλες τις χώρες του κόσμου είναι κάτι το αναμενόμενο, εφόσον τα διάφορα έργα προστασίας, όπως είναι ο αντιπλημμυρικός σχεδιασμός, είναι αυτά που αποφέρουν και τα λιγότερα κέρδη.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή διαπραγματεύεται τα θέματα που προκύπτουν μετά την καταστροφή. Επιχειρήθηκε μία μικρή συμβολή στην αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας που δημιουργεί η πραγματικότητα στην προσομοίωση ενός πλημμυρικού φαινομένου, σε συνδυασμό με τις νέες υπολογιστικές δυνατότητες της εποχής μας. Η κυριότερη παρακαταθήκη που άφησε αυτή η προσπάθεια στον συγγραφέα, είναι η "απομάγευση" του συναρπαστικού κόσμου των αριθμητικών ομοιωμάτων, γνωστότερων και ως μοντέλων, απορρίπτοντας όμως ταυτόχρονα και το ότι δεν μπορούμε να γνωρίσουμε ποτέ τον κόσμο έτσι όπως είναι.

Η διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του Τομέα Έργων Υποδομής και Ανάπτυξης, της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), με χρηματοδότηση από τον Ειδικό Λογαριασμό Κονδυλίων Έρευνας. Ουσιαστική ήταν επίσης η παροχή υπολογιστικής υποδομής για τις προσομοιώσεις, από το Κέντρο Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του ΕΜΠ και την πλατφόρμα Central Cloud.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα όλους τους συντελεστές αυτής της προσπάθειας. Τον επιβλέποντα της διατριβής, καθ. Γ. Τσακίρη, ο οποίος με τη συνεχή στήριξη και την επιστημονική του συμβολή καθοδήγησε αυτή την προσπάθεια να φτάσει ως το τέλος της. Τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής: τον καθ. Β. Χρυσάνθου με τον οποίο η συνεργασία μας ξεκινάει από το προπτυχιακό επίπεδο και τον επ. καθ. Ι. Ναλμπάντη, για την επιμονή και τη μεθοδικότητά του σε οποιοδήποτε θέμα έχουμε συνεργαστεί. Επίσης, τα υπόλοιπα μέλη που απαρτίζουν την εφταμελή επιτροπή: καθ. Β. Τσιχριντζή, καθ. Δ. Κουτσογιάννη, καθ. Ε. Μπαλτά, και τον αν. καθ. Π. Αγγελίδη.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους και συναδέλφισσες του Εργαστηρίου για τη συμβολή και υποστήριξή τους: τον Γ. Κοψιαύτη και Β. Χριστέλη, "συγκάτοικους" στο γραφείο, για όλες τις ατέρμονες συζητήσεις που ξεκινούν από τα πιο προσωπικά και καθημερινά ζητήματα του καθενός, μέχρι και τη θεωρία των υπερχορδών! Τον Χ. Βαγγέλη, ο οποίος μεταφέροντας την πολύτιμη εμπειρία του συνέβαλε ουσιαστικά με τις συμβουλές και υποδείξεις του. Την Ι. Παπαγεωργάκη για την πολύ σημαντική βοήθειά της στο χειρισμό της τοπογραφικής πληροφορίας. Επίσης, τους Δ. Τίγκα, Δ. Αλεξάκη και το πρώην μέλος του Εργαστηρίου, λέκτορα Μ. Σπηλιώτη.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ν. Κίτου, ο οποίος με βοήθησε να αποσαφηνίσω πολλές "σκοτεινές" λεπτομέρειες, αλλά και για τις συμβουλές πάνω στον αλγόριθμο, καθώς και την Ε. Κατωπόδη για τις συμβουλές και τη συμπαράσταση τόσο σε επιστημονικό, όσο και σε προσωπικό επίπεδο.

Τέλος, τις σημαντικότερες ευχαριστίες θα ήθελα να τις αποδώσω στην οικογένειά μου για την πολύπλευρη στήριξή της σε αυτή την προσπάθεια. Ειδικότερα, θέλω να ευχαριστήσω τον πατέρα μου Κ. Μπέλλο και για τις πολύτιμες επιστημονικές του υποδείξεις πάνω σε όλα τα ζητήματα, από το προπτυχιακό επίπεδο μέχρι και τώρα.

Βασίλης Μπέλλος

Αθήνα

Νοέμβριος, 2015

στους γονείς μου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε το αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης πλημμυρικής ροής FLOW-R2D, το οποίο επιλύει τις δισδιάστατες Εξισώσεις Αβαθών Υδάτων (two-dimensional Shallow Water Equations, 2D-SWE) με την αριθμητική μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών και το αριθμητικό σχήμα McCormack, κατάλληλο και για την κατάρτιση χαρτών πλημμυρικού κινδύνου σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60. Κύριος στόχος της διατριβής είναι η ενδελεχής επισκόπηση όλων των θεμάτων που αφορούν στη δισδιάστατη προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου.

Αρχικά γίνεται μία βιβλιογραφική επισκόπηση, η οποία ξεκινά από τις πρώτες πειραματικές προσεγγίσεις του φαινομένου του πλημμυρικού κύματος, για να περάσει στις σύγχρονες μεθόδους αριθμητικής προσομοίωσης με μονοδιάστατα και δισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα, καθώς και σε πιο ειδικά θέματα που αφορούν στην προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο, στο οποίο στηρίχθηκε το αριθμητικό μοντέλο. Αυτό είναι οι δισδιάστατες Εξισώσεις Αβαθών Υδάτων, οι οποίες προέκυψαν από την ολοκλήρωση (ως προς το βάθος ροής) των εξισώσεων Navier-Stokes. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στον εμπειρικό τρόπο προσδιορισμού των τριβών πυθμένα. Στο ίδιο πλαίσιο, παρατίθενται σύντομα οι βασικές αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αριθμητική προσομοίωση με έμφαση στη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών και στο αριθμητικό σχήμα McCormack, το οποίο χρησιμοποιείται στο μοντέλο FLOW-R2D.

Ακολουθεί η παρουσίαση του μοντέλου που αφορά στη διακριτοποίηση των Εξισώσεων Αβαθών Υδάτων με το αριθμητικό σχήμα McCormack, καθώς και στον τρόπο αντιμετώπισης διάφορων δυσκολιών, όπως είναι η προσομοίωση του ξηρού πυθμένα, όπου έγινε εισαγωγή στο μοντέλο ενός καταωφλίου διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα, καθώς και η απόσβεση ασταθειών στην αριθμητική επίλυση που έγινε με την εισαγωγή στο μοντέλο ενός συντελεστή τεχνητής διάχυσης. Παρατίθενται ο τρόπος προσδιορισμού των αρχικών και των οριακών συνθηκών, καθώς και των στερεών ορίων, ενώ δίνεται έμφαση στον τρόπο προσομοίωσης των τριβών πυθμένα στο πλαίσιο του μοντέλου. Τέλος, παρατίθεται και ο τρόπος προσδιορισμού των εισροών ή εκροών από το υπολογιστικό πεδίο, όπως είναι η βροχόπτωση και η διήθηση.

Το επόμενο βήμα είναι η διερεύνηση της επιστημονικής αρτιότητας του μοντέλου με διάφορους πρότυπους ελέγχους (benchmarking tests) με βάση τη σχετική βιβλιογραφία και τη διεθνή εμπειρία. Έγινε προσπάθεια να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα ελέγχων που να περιλαμβάνει τη σύγκριση των δεδομένων που προέκυψαν με την αριθμητική επίλυση, με αντίστοιχα δεδομένα από αναλυτικές λύσεις, από πειράματα, καθώς και από πραγματικές μετρήσεις. Το πρόγραμμα των ελέγχων περιλαμβάνει εννιά συνολικά ελέγχους με ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Ο πρώτος έλεγχος αφορά στην υποθετική θραύση κυκλικού φράγματος (circular dam-break), ο οποίος έχει ως σκοπό την ποιοτική διερεύνηση του αριθμητικού μοντέλου σε συνθήκες υδραυλικών ασυνεχειών. Ο δεύτερος αφορά στην προσομοίωση υδραυλικού άλματος σε ορθογωνικό αγωγό και παράλληλα, τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με αναλυτικές λύσεις. Με το ίδιο σενάριο εφαρμογής πραγματοποιείται και ο τρίτος έλεγχος όπου γίνεται διερεύνηση ικανοποίησης του κριτηρίου της σύγκλισης και εκτιμάται ο επηρεασμός της αριθμητικής λύσης από το μέγεθος του κελιού του υπολογιστικού πλέγματος. Οι τρεις επόμενοι έλεγχοι αφορούν στην προσομοίωση πλημμυρικής ροής που προέκυψε από θραύση φράγματος σε πειραματικές διατάξεις. Στο πρώτο πείραμα προσομοιώνεται το πλημμυρικό κύμα που δημιουργείται από απότομη και ολική θραύση φράγματος σε οριζόντιο πεδίο όπου υπάρχει πρισματικό εμπόδιο τριγωνικής διατομής και κατάντη αυτού λεκάνη ηρεμίας που οριοθετείται από κατακόρυφα τοιχώματα. Στο δεύτερο πείραμα προσομοιώνεται το πλημμυρικό κύμα που δημιουργείται από απότομη και τμηματική θραύση φράγματος σε οριζόντιο πεδίο, όπου υπάρχει στερεό εμπόδιο σε πλάγια διεύθυνση σε σχέση με τη διεύθυνση ροής. Και στους δύο αυτούς ελέγχους, αν και οι πειραματικές διατάξεις δεν είναι φυσικά μοντέλα, διερευνάται μία σειρά σημαντικών φαινομένων, όπως είναι η προσομοίωση των ασυνεχειών (υδραυλικό άλμα), η προσομοίωση ροής σε ξηρό πυθμένα, καθώς και η επίδραση των στερεών ορίων στη ροή. Στο τρίτο πείραμα προσομοιώνεται το πλημμυρικό κύμα που δημιουργείται στο φυσικό μοντέλο του ποταμού Τοσε (Ιταλία) σε ιδεατό αστικό περιβάλλον.

Οι τελευταίοι τρεις έλεγχοι αφορούν στην εφαρμογή του μοντέλου σε πραγματικές συνθήκες. Στην πρώτη εφαρμογή προσομοιώνεται το πλημμυρικό κύμα που προέκυψε έπειτα από τη θραύση του φράγματος Tous (Ισπανία) το 1982 και γίνεται σύγκριση με δεδομένα που προέκυψαν από έρευνα πεδίου. Στη δεύτερη εφαρμογή προσομοιώνεται η αστραπιαία πλημμύρα (flash flood) που συνέβη το 2013 στο Χαλάνδρι Αττικής, σε κλίμακα μικρής λεκάνης απορροής και γίνεται σύγκριση των αριθμητικών δεδομένων με πραγματικές μετρήσεις. Τέλος, προσομοιώνεται η πλημμυρική αιχμή για διάφορες περιόδους επαναφοράς στο κατάντη πεδινό τμήμα του ποταμού Σπερχειού. Λόγω έλλειψης πραγματικών μετρήσεων, γίνεται σύγκριση των αριθμητικών δεδομένων με αντίστοιχα δεδομένα που προέκυψαν με το εμπορικό λογισμικό δισδιάστατης προσομοίωσης ροής CCHE2D.

Στη συνέχεια διερευνάται μία σειρά θεμάτων που αφορούν στην προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες. Η πλημμύρα σε αστικό περιβάλλον είναι ένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα και κυρίως αφορά στον τρόπο αναπαράστασης της επίδρασης των κτιρίων στην πλημμυρική ροή. Οι διάφοροι υφιστάμενοι τρόποι που υπάρχουν στη σχετική βιβλιογραφία ιεραρχούνται με βάση την απόδοσή τους, συγκρίνοντας αριθμητικά και πειραματικά δεδομένα, καθώς και με βάση τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται. Η βαθμονόμηση των διάφορων παραμέτρων που υπεισέρχονται

στο αριθμητικό μοντέλο αποτελεί επίσης ένα κρίσιμο ζήτημα. Λόγω των μεγάλων υπολογιστικών απαιτήσεων κάθε προσομοίωσης (ο υπολογιστικός χρόνος είναι της τάξης των ωρών/ημερών) δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστούν κλασικές ή υβριδικές μέθοδοι βελτιστοποίησης. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής δίνονται τρόποι αντιμετώπισης τέτοιων δυσχερειών.

Επίσης σημαντικό ζήτημα είναι η εισαγωγή αβεβαιότητας στην αριθμητική επίλυση από τις διάφορες παραμέτρους που απαιτούνται για την αριθμητική επίλυση, καθώς και η εξέλιξη αυτής ως προς το χρόνο. Γίνεται μία προσπάθεια καταγραφής όλων αυτών των παραμέτρων, καθώς και διερεύνηση των πιο σημαντικών παραμέτρων στην εισαγωγή αβεβαιότητας. Οι τριβές πυθμένα που δημιουργούν αντίσταση στη ροή είναι μία σημαντική παράμετρος, οπότε γίνεται προσπάθεια ορθολογικής αντιμετώπισης αυτού του ζητήματος. Αναπτύσσεται πρωτότυπη σχέση προσδιορισμού του συντελεστή τραχύτητας για ροή με ελεύθερη επιφάνεια η οποία ισχύει σε όλες τις περιοχές ροής (στρωτή ροή, τυρβώδης ροή και μεταβατικές περιοχές), η οποία έχει φυσική βάση και είναι κατάλληλη για τις περιπτώσεις, όπου είναι γνωστό το ύψος τραχύτητας. Στην πλειονότητα όμως των πρακτικών εφαρμογών, ακόμα και στα ομογενή πεδία υπάρχει ένα εύρος τιμών στο ύψος τραχύτητας. Για αυτό το λόγο, προτείνεται μοντέλο προσομοίωσης των τριβών πυθμένα, ανάλογο της ταχύτητας ροής και αντιστρόφως ανάλογο του βάθους ροής, με επιπλέον τρεις παραμέτρους οι οποίες πρέπει να βαθμονομηθούν. Ενδεικτικά εκτιμώνται αυτές οι παράμετροι για μία σειρά υλικών, όπως είναι το σκυρόδεμα, η ασφαλτος, η άμμος κ.ά. Για την εκτίμηση των παραμέτρων γίνεται συσχέτιση των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου μοντέλου και της εκτίμησης, μέσω αναλυτικής επίλυσης, των τριβών πυθμένα με βάση την προτεινόμενη σχέση, για χιλιάδες τυχαίους συνδυασμούς των βαθών και των ταχυτήτων ροής, καθώς και υψών της τραχύτητας.

Τελευταία ενότητα της διατριβής είναι μία επισκόπηση της εκτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου (hazard) με έμφαση στην εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου σε πραγματικές συνθήκες. Το σενάριο εφαρμογής είναι το πλημμυρικό γεγονός έπειτα από τη θραύση του φράγματος Tous. Καταρτίζονται χάρτες, στους οποίους το πλημμυρικό πεδίο διακρίνεται σε διάφορες ζώνες αναλόγως προς τις τιμές του Δείκτη Κινδύνου (Hazard Rating) που υπολογίστηκαν.

Η πρωτοτυπία της διδακτορικής διατριβής αφορά στη δισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες και την αντιμετώπιση των διάφορων ειδικών θεμάτων που προκύπτουν από την πολυπλοκότητα του φυσικού κόσμου. Σε αντίθεση με το αντικείμενο της διατριβής, η επίλυση τέτοιων προβλημάτων τις τελευταίες δεκαετίες είχε ως στόχο την προσομοίωση πλήρως ελεγχόμενων συνθηκών ή τη χρήση εμπορικών πακέτων λογισμικού που δεν είναι εύκολο να διαφοροποιηθούν ή να λάβουν υπόψη τους σειρά θεμάτων που αποτελούν αντικείμενο έρευνας αυτής της διατριβής.

Οι βασικές καινοτόμες επιστημονικές εργασίες στην παρούσα διατριβή μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- τροποποίηση του αριθμητικού σχήματος McCormack με στόχο την εισαγωγή τεχνητής διάχυσης
-

- τροποποίηση στον τρόπο προσδιορισμού των στερεών ορίων με στόχο να υπεισέρχεται στους υπολογισμούς των τριβών πυθμένα και η επίδραση των κάθετων τοιχωμάτων στην αντίσταση που δημιουργείται στη ροή
 - κατασκευή δισδιάστατου μοντέλου υπολογισμού της καμπύλης στάθμης-παροχής κατά την εφαρμογή υδρογραφήματος σε μία διατομή, με στόχο την προσομοίωση του βρόχου που σχηματίζεται μεταξύ του ανοδικού και του καθοδικού σκέλους της εν λόγω καμπύλης
 - τεχνικές αντιμετώπισης της βαθμονόμησης των διάφορων παραμέτρων που απαιτούνται σε κάθε μοντέλο τέτοιου τύπου, από τη στιγμή που το υπολογιστικό κόστος προσομοίωσης πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες είναι υψηλό
 - υβριδική μέθοδος που συνδυάζει την υδρολογική (θεωρία μοναδιαίου υδρογραφήματος) με την υδροδυναμική προσέγγιση (παραγωγή μοναδιαίου υδρογραφήματος με το μοντέλο FLOW-R2D), για την προσομοίωση μίας αστραπιαίας πλημμύρας (flash flood) σε μικρές υδρολογικές λεκάνες
 - ρητή σχέση υπολογισμού του συντελεστή τραχύτητας f της εξίσωσης Darcy-Weisbach, η οποία έχει φυσική βάση και η οποία ισχύει σε όλες τις περιοχές (στρωτή, τυρβώδης και μεταβατικές περιοχές), ενώ είναι κατάλληλη για ροή με ελεύθερη επιφάνεια
 - μοντέλο εκτίμησης τριβών πυθμένα τριών παραμέτρων, όπου οι τριβές πυθμένα είναι ανάλογες της ταχύτητας ροής και αντιστρόφως ανάλογες του βάθους ροής.
-

EXTENDED ABSTRACT

1. Introduction

Floods are among the most disastrous natural hazards affecting millions of people around the world. Recently, the European Union set in force the Directive on Flood Risk Management presenting an innovative paradigm for the defence against floods. Among others, this Flood Directive forces the member states to identify the flood prone areas in their territory, produce detailed flood hazard and flood risk maps, and devise flood risk management plans for these vulnerable areas.

Several types of numerical models for flood routing are available either as commercial or open source numerical codes. Generally, these models can be categorised based on the form of the Partial Differential Equations (PDEs) which are solved: one-dimensional (1D), one-dimensional plus (1D+), two-dimensional minus (2D-) and two-dimensional (2D). The models can be also characterised by the numerical method which is used to solve the corresponding PDEs: the Finite Difference Method (FDM), the Finite Element Method (FEM) and the Finite Volume Method (FVM).

One-dimensional models are based on some form of the 1D Shallow Water Equations (SWE) derived by integrating the Navier-Stokes equations over the cross-sectional surface of flow. The derivation of 1D-SWE (known also as Saint Venant equations) is based on assumptions which limit their use to the main direction of flow (e.g. aligned to the centre line of the watercourse). Due to limitations created by the above assumption, several extensions of the 1D approach (named 1D plus numerical models) were presented during the last two decades.

The 1D+ numerical models aim at providing more realistic simulations of flood development giving a partial description of 2D routing. These models are also known as pseudo-2D. They are practically 1D models in which floodplains are modeled as storage cells defined only by relationships between water level and water volume. The level of water in storage cells is computed using only volume conservation, whereas no momentum conservation is incorporated. This means that water transfer from cell to cell is obtained instantaneously and very significant errors may occur in case the storage cells are large or in case the assumption of horizontality of water level is not met. For more realistic flood inundation modeling, 2D- numerical models have been devised by solving a simplified version of the 2D-SWE. These models do not incorporate the momentum conservation principle. In recent years, due

to the capacity of computing facilities, new hydrodynamic models were devised for capturing the details of flow paths which are very complex in the real world situations, especially in flood prone areas with built environment. These models are based on the full hydrodynamic 2D-SWE and are known as 2D models.

In this thesis, a new 2D hydrodynamic model is presented, named FLOW-R2D, which solves the 2D-SWE through the Finite Difference Method and a modification of the McCormack numerical scheme. The model is extensively tested by various benchmarking tests and the numerical results derived from each test are compared with analytical solutions, experimental data and field measurements.

Following the benchmarking testing phase, an effort is made to deal with some special issues appearing during the simulation of real world flood events. Namely, the flood simulation in urban environments, the calibration of the model parameters, the uncertainty introduced to the numerical results due to the uncertainty of input model parameters, the flood simulation in the scale of a catchment and the determination of the bottom friction.

2. FLOW-R2D model

The FLOW-R2D model is based on the 2D-SWE which are derived from Navier-Stokes equations by depth integration. In the classical form of the equations, source and sink terms are added in the Continuity Equation in order to represent phenomena such as precipitation, infiltration losses and drainage. Various empirical formulas can be implemented for the shear stresses created to the flow, , such as Manning, Chézy, Darcy-Weisbach etc. For the infiltration losses, several empirical equations have been proposed and used in the past, such as Kostiaikov, Horton's, Green-Ampt, Philip's and many others.

The discretisation of 2D-SWE equations is based on the Finite Difference Method (FDM) through a modification of the two-step McCormack numerical scheme, which adds artificial viscosity through a diffusion factor, in a non-staggered cell-centred computational grid. The introduction of artificial viscosity is made in order to smooth out the oscillations during the numerical simulation. The truncation error associated with the second derivative, which adds diffusion in this modified McCormack numerical scheme, is also calculated. Despite of the fact that the artificial viscosity is incorporated in the above modification, the scheme still preserves the second order of accuracy and therefore retains its shock capturing capability, allowing the description of discontinuities of the flow surface (e.g. hydraulic jumps). It should be also mentioned that McCormack numerical scheme is explicit and hence is stable under Courant-Friedrichs-Lewy condition.

The simulation of moving boundaries between wet and dry bed is obtained through a threshold of water depth which distinguishes wet and dry cells. If the water depth is below this threshold during the calculations, the flow velocity is set equal to zero. This method has the advantage that it can also describe the exponential effect of bottom friction in small water depths. As known the threshold value determination is of great importance and depends on the grid cell size. The threshold should not be high

in order to simulate very shallow flows, and not very short which may create instabilities during the implementation of the model.

The options for the initial conditions settings of the model are: dry bed in the entire computational field or water depth in an area either in a moving condition (e.g. basic flow) or in a static condition (e.g. dam-break problem). There is also an option for solid wall boundaries with reflection (vertical flow velocity on the wall is inserted in the SWE with opposite sign).

Regarding the upstream boundary conditions, it should be mentioned that two options are available in the model: a constant inflow or a flood hydrograph. If the water flow inlet to the computational field is perpendicular to the x -axis, the following equation should be valid in each time step:

$$Q = \sum_{i=1}^{i=im} (V_{i,j} h_{i,j} \Delta x) \quad (1)$$

where Q is the inlet flow, V is the flow velocity, h is the water depth and Δx is the space step.

Assuming a known inlet flow, the water depth and flow velocity must be determined in each computational cell. For the constant inflow the Manning equation can be used. For the entire flood hydrograph simulation, a new approach is presented which combines the unsteady flow equations with the kinematic wave approach in the following Partial Differential Equation:

$$h \frac{\partial V}{\partial t} - \left(\frac{2V+3g}{5} \right) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{2}{3} \frac{S_0}{r_c^2} (gh - V^2) = ghS_0 - \frac{\tau_b}{\rho} \quad (2)$$

where g is the gravitational acceleration, S_0 is the bottom slope, r_c is the flood crest subsidence, τ_b is the shear stress created to the bottom and ρ is the fluid density.

Two options are also available for the downstream boundary conditions: a given water stage for the sea or a lake and the kinematic wave condition (open boundaries) discretised by a Forward Time - Backward Space numerical scheme.

Generally, the Finite Difference Method (FDM) can be applied only in structured rectangular grids. Additionally, the topography used in flood modelling, as a computational area, is exported from GIS data and hence the resolution of the computational domain is made by a grid with square-shaped cells. However, there are many situations where the computational area is not rectangular. Various models use unstructured grids in order to approach these areas. Through this approach has severe disadvantages such as the lack of data (the most common topographic data format is GIS and hence square-shaped cells grid is available) and the complexity inserted in the algorithm of the model.

In order to represent these areas with the FLOW-R2D model, a pseudo-computational area of a rectangular grid with square-shaped cells is created which encloses the real field under study. Then, every cell of the grid takes a value which represents a different function (upstream or downstream boundaries, buildings, blank or computational area, etc). Using a control condition each cell can be classified according to its function. Another advantage of this process is that the cells which are not influenced by the flood propagation can be considered as a blank area leading to a smaller computational cost.

3. Benchmarking tests

The FLOW-R2D model is extensively tested using various benchmarking tests, according to the related literature. The numerical data derived from the model were tested against analytical solutions, experimental data and field measurements. The FLOW-R2D model is compared with the available analytical solutions for the hydraulic jump phenomenon in a rectangular channel and then for the grid convergence criterion under the same scenario. The comparison between the results from the analytical solution and the numerical results is satisfactory and the grid convergence criterion is valid.

Next, the model is tested using three experimental case-studies which are included in the IMPACT Project. The first one involves the experimental simulation of a dam-break flood wave which is created after an abrupt and entire failure of the dam. The flood wave is propagated on a dry bed and a triangular bottom sill. In the downstream section of the sill, a pool at rest exists. The second one is the experimental simulation of a dam-break flood wave which is created after a sectional failure of the dam. The flood wave is propagated on a dry bed and an isolated obstacle which is oblique to the flow. The last one is the experimental simulation of a flood wave in the physical model of Toce river (Italy) and a hypothetical urban environment. The comparisons with the numerical results seem to be satisfactory.

Finally, the FLOW-R2D model is tested in real world cases-studies. The first test includes the simulation of the Tous dam-break (Spain) flood wave propagation which occurred in 1982. The results obtained from the numerical model are compared with field measurements included in the IMPACT Project. The next test refers to the simulation of the flash flood event occurred in 2013, for a small catchment of Halandri stream (Greece). It should be mentioned that the simulation is performed at catchment scale and not just at the river or stream scale. It should be mentioned that the infiltration process is incorporated to the model using the Kostikov method. The results of the model are compared with field measurements included in the DEUCALION Project. The final test is the simulation of a flood event in the downstream mild section of Sperhios river (Greece) for various return periods. Due to the lack of field measurements, the model's output is compared with the numerical results derived from the commercial 2D software CCHE2D.

In all the above tests, the comparison between numerical results and field measurement seems to be satisfactory.

4. Special issues of flood simulation in real world conditions

In this section, the various special issues which are encountered during the flood simulation in real world conditions are presented. The simulation of an extreme event in an urban environment using flood models, constitutes a typical challenge for practical applications. Although water flow through buildings, structures or other obstacles is a 3D phenomenon, a 2D approach is also capable to simulate this phenomenon efficiently. It should be mentioned that the computational cost is quite high for the multi-dimensional modelling. However during the last few years, the sharp reduction of the

computational cost let various researchers to simulate flood events in real world case studies with 2D models. The 3D approach is still prohibitive for large scale applications.

The most important parameter in flood modelling in urban environments is how the resistance caused by buildings or other structures is represented in the model. According to the existing literature on the subject, the most common methods for simulating the water flow among the various structures of the urban environments are the blocking-out of the solid area (which depends on the numerical method or numerical scheme used), the local elevation rise of the solid area (and hence the modification of Digital Terrain Model (DTM) to Digital Elevation Model (DEM)), and the local increase of friction of the solid area via friction coefficient increase.

The disadvantage of the blocking out and elevation rise methods is that they do not simulate flood flow inside the house and therefore any possible storage effects of the buildings are not taken into account. In order to avoid this disadvantage other methods have been also proposed. One of these methods consists of the representation of just the exterior walls of each building with a hole in the front wall so that water can slip inside the house. Another approach is with the DEM used combining a 'porous' approach of each building.

In this thesis, the above three methods of building representation are used and compared. The case study which is chosen is the flood wave simulation in the urban environment at the physical model of Toce river. In order to evaluate their performance, the numerical results of the model are compared with the experimental data. Based on the performance test, the reflection boundary method is the most efficient way for representing buildings in a flood plain. In addition, the reflection boundary method seems to have the lowest computational cost (according to Courant numbers, the friction increase method has double cost and the elevation rise method tenfold, respectively). Besides, the reflection boundary method does not insert any additional variable which should be calibrated for each real world case study. This is an important advantage since it is widely known that there is a lack of data of real flood events and calibration of one more parameter produces additional computational burden.

However, one disadvantage of this method is that in the solid area where the buildings or other structures exist, no results of water depth and flow velocities are exported from the model and hence an interpolation through the neighbouring cells is needed for representing a complete flood inundation map. The simplest method for this type of interpolation is the linear interpolation based on the data of the adjacent cells.

The elevation rise method seems to be the most disadvantageous than the other methods based both on its performance and the associated computational cost. Besides a new variable should also be inserted into the model and be calibrated. Due to the nature of the elevation rise method there is no need for using detailed topographic data related to the height of each building. As can be deduced from the analysis of the elevation rise method, buildings are represented by the great increase of bottom slope source term in 2D-SWE. In the real world, if water flows against a vertical concrete wall, the height of the buildings has the same influence regardless if it is 10 or 100 m. One additional disadvantage of elevation rise method is the oscillations (numerical errors) which are created near the buildings because

of the increased bottom slope. With this method, no results of water depth and flow velocities are exported from the model in the location of the buildings.

Further to the above, the elevation rise method is quite simple and easy to use. One of the advantages for using this method is that with suitable modifications, each building can be represented as a not totally impervious structure ('porous' approach), which seems more realistic for the real world configurations.

As far as the friction increase method is concerned, it is deduced that it is quite efficient although a new variable should be incorporated into the model. In the related literature no specific way is suggested for the determination of Manning's coefficient increase for representing buildings. The reason for this is that the real world situations are very complex and each situation is quite unique. One more disadvantage of the method is the representation of wet/dry threshold increase. In urban environments flows are usually characterised by shallow water depths and therefore the threshold increase reduces the accuracy and the sensitivity of the model.

However, this method is always useful for coarser approaches where buildings are represented at the sub-grid scale. The possible storage effect of a house during a flood event in an urban area can also be simulated. One additional advantage is that the water depth and the flow velocities are calculated for the entire computational area. In some cases a coarse approach is the only way to simulate a flood event due to the high computational cost caused by a denser grid analysis. Another interesting point is the investigation of an additional friction term at the momentum equations which simulates the sub-grid building effects.

Finally, in regard to the vertical concrete walls, it is concluded that they should be mostly represented by the reflection boundary method. The elevation rise method creates many oscillations near the walls and the friction increase method is physically quite unrealistic representation for simulating these elements of the domain.

Another special issue is the calibration of the various parameters required from the model in order to simulate a flood event. The computational cost of 2D hydrodynamic models does not allow the implementation of conventional or evolutionary optimisation techniques except from the trial and error method. In various case-studies where the computational effort is excessive, none of the above methods can be applied at reasonable computational times and therefore a special treatment should be followed. For example, in order to calibrate the Tous dam break case-study, only the flow peak of the flood hydrograph is set as upstream boundary conditions. For the calibration of the flash flood of Halandri catchment a new hybrid method hydrologic/hydrodynamic is proposed where the simulated flood hydrograph is composed by the unit hydrograph created by the FLOW-R2D model. Apart from the calibration process, a sensitivity analysis of the various parameters is also performed. It is found that parameters, such as the effective slope of the upstream boundaries, the friction coefficients required to the various friction models, the cell size of the computational grid, the diffusion factor incorporated to the discretisation of the 2D-SWE through the McCormack numerical scheme and the infiltration model,

which simulates the infiltration process, are creating uncertainties to the numerical results. Besides, the evolution of this uncertainty with respect to time is also investigated but no clear trend is observed.

During the sensitivity analysis of the various parameters, it is found that the bottom friction is a dominant factor creating uncertainties in the numerical results. For this reason, an effort is made in the context of the present PhD thesis to define the friction to the flow with a more comprehensive method. A new, physical-based, explicit relationship, valid for all the regimes of the flow (laminar, transition regime from laminar to turbulent flow, hydraulically smooth flow, transition regime from hydraulically smooth flow to hydraulically rough flow and hydraulically rough flow) and appropriate for open channel flow, for the f coefficient of Darcy-Weisbach equation is presented:

$$f = \left(\frac{24}{Re_h}\right)^\alpha \left[\frac{0.86e^{W(1.35Re_h)}}{Re_h}\right]^{2(1-\alpha)b} \left\{\frac{1.34}{\left[\ln\left(12.21\frac{h}{k_s}\right)\right]^2}\right\}^{(1-\alpha)(1-b)} \quad (3)$$

where Re_h is the Reynolds number where the characteristic length is the water depth, the k_s is the roughness height and the parameters a and b can be calculated:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{Re_h}{678}\right)^{8.4}} \quad (4)$$

$$b = \frac{1}{1 + \left(\frac{Re_h \frac{h}{k_s}}{150}\right)^{1.8}} \quad (5)$$

A good approximation for the omega function $W(1.35Re_h)$ is the following:

$$W(1.35Re_h) = \ln(1.35Re_h) - \ln[\ln(1.35Re_h)] + \frac{\ln[\ln(1.35Re_h)]}{\ln(1.35Re_h)} + \frac{\ln[\ln(1.35Re_h)]^2 - 2\ln[\ln(1.35Re_h)]}{2\ln(1.35Re_h)^2} \quad (6)$$

The above equation can be used in the case studies where roughness height or equivalent roughness height is known. However, in real world conditions several ranges in roughness height exist, even for the homogeneous computational domains (such as concrete or asphalt). In order to cope with this complexity, a new friction model is proposed in respect to water depth and flow velocity:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \frac{V^A}{Bh^C} \quad (7)$$

where A , B , C parameters which should be calibrated in each case study.

The parameters are optimised based on the results of the friction derived from the analytical (Eq. (3)) and the proposed friction model (Eq. (7)). Thousands of random combinations of water depth (from 0.02 m to 20 m), flow velocity (from 0.02 m/s to 10 m/s) and roughness height (the range is depended to the material) are generated. The kinematic viscosity is assumed as $\nu_s = 10^{-6}$ m²/s. The optimisation is performed through the Nash indicator.

Table 1 Parameters of the proposed friction model for various materials

Material	Roughness Height (mm)	Parameters			NSE
		A	B	C	
silt	0.0039-0.0625	3.355	58328.9	0.169	0.54
concrete	0.3-3	2.001	475.9	0.220	0.97
untreated shot concrete	3-10	1.995	318.8	0.264	0.98
rubble masonry	5-10	1.994	304.3	0.269	0.99
asphalt	1-1.5	2.007	496.6	0.211	1.00
fine sand	0.0625-0.5	2.155	1004.9	0.184	0.95
coarse sand	0.5-2	2.016	507.4	0.214	0.99
sand	0.0625-2	2.041	579.7	0.206	0.95
fine gravel	2-16	2.000	292.7	0.286	0.95
medium coarse gravel	16-32	2.007	209.5	0.347	0.97
very coarse gravel	32-64	1.997	152.4	0.431	0.93
coarse gravel	16-64	2.057	187.9	0.410	0.91
gravel	2-64	1.980	180.2	0.377	0.86
cobble	64-256	1.834	17580.2	2.655	0.50

5. Estimation of flood hazard

Flood hazard can be estimated by various indicators analysing the effects of each flood event to the human, cars and buildings. Several indicators and criteria have been developed in order to estimate the flood hazard. In this section, the Hazard Rating indicator is adopted for a real world application. This indicator has the following form:

$$HR = h(V + 0.5) + DF \quad (8)$$

where DF is the debris factor which takes values from 0 to 1.

The case study where HR is calculated in the entire computational field is the Tous dam-break flood event. In the context of the sensitivity analysis process where the Manning coefficients and the effective slope of the upstream boundary cross-section effect on the numerical simulation are investigated, the values of HR are also derived. Then, the computational area is classified in various hazard zones (dry, low, moderate, significant and extreme). It is concluded that the major effect to the HR values has the effective slope.

6. Conclusions

This PhD thesis deals with the development of an integrated fully dynamic 2D model for the simulation of floods in real world conditions. Although the fundamental scientific background has been developed in the past, 2D modelling in real world conditions has started to be implemented quite recently due to

the recent rapid development of the computational power. The main elements of originality of the thesis can be shortly summarised below:

- the modification of the McCormack numerical scheme in order to add the artificial viscosity to the numerical results
- the modification to the solid walls boundaries in order to incorporate friction component to the flow of the vertical walls, except from the bottom
- the development of a new 2D discharge-elevation rating curve model required to determine the upstream boundary conditions when a flood hydrograph is implemented, able to describe the hysteresis phenomenon to the rating curve
- the investigation of various techniques coping with the, computationally expensive, calibration phase of the simulation
- the development of a new hybrid hydrologic/hydrodynamic method for the flash flood events simulation in small catchments
- the development of a new, physically-based, explicit relationship, valid for all flow regimes (laminar, transition regime from laminar to turbulent flow, hydraulically smooth flow, transition regime from hydraulically smooth flow to hydraulically rough flow and hydraulically rough flow) and appropriate for open channel flow, for the f coefficient of Darcy-Weisbach equation
- the development of a new friction model with respect to the water depth and flow velocity, incorporating three parameters

The thesis can be divided into two phases. During the first phase, the benchmarking testing is performed in which the comparison between simulation results and analytical solutions, experimental data and field measurements is satisfactory. The algorithm of the model is robust and able to simulate various case-studies even in real world conditions. During the second phase, the uncertainty introduced to the numerical results due to the various parameters of the model is investigated. It is concluded that parameters such as friction, diffusion factor, cell size of the computational grid, infiltration model and solid boundaries are of importance to the numerical results, based on the sensitivity analysis which is performed. The evolution of this uncertainty with respect to time has no specific trend apart from the first time moments in which the flood wave reaches the gauge.

The computational cost for the 2D numerical simulation of real world case studies is high. Specifically, due to the long simulation time which is magnitude of hours or days. Due to this high cost, the calibration phase of the various parameters cannot be performed through the conventional or evolutionary optimisation methods except from the trial and error method. Of course, this method has limited applications and requires specific treatment such as the use of the flood peak instead of the entire flood hydrograph for the upstream boundary conditions or the hybrid method proposed for the simulation in the scale of catchment.

The lack of field measurements is a disadvantage for the calibration of the parameters required to the model. In order to overcome this lack of data, two alternative approaches may be used. The first one is

the creation of databases of field measurements. The second one is the development of physically-based models in order to simulate phenomena such as friction, infiltration, turbulence etc, in a more comprehensive way. Naturally, these two alternatives do not confront with each other. It should also be stressed that the experience of the engineer or the researcher as the user of the model is of great importance.

As far as the future of this research is concerned, several extensions are suitable for further research:

- the quantification of the uncertainty introduced to the numerical results
 - the investigation of the uncertainty introduced to the numerical results due to the Digital Terrain Model (DTM)
 - the computational cost reduction through the parallel programming techniques and the High Performance Computing infrastructure
 - the coarsening of the computational grid incorporating the sub-grid effects in order to reduce the computational time
 - the calibration phase improvement through the new surrogate modelling techniques
 - the further validation and application of the friction modelling proposed
 - the further validation and application of the hybrid method proposed
 - the improvement of the FLOW-R2D model for incorporating the modelling of turbulence
 - the improvement of the FLOW-R2D model for simulating the storage effect of the buildings during a flood event in urban environments
-

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά	1
1.2 Οδηγία 2007/60 για τη διαχείριση πλημμυρικής διακινδύνευσης	2
1.3 Διάρθρωση της διδακτορικής διατριβής	4
1.4 Οι πρώτες πειραματικές προσεγγίσεις	6
1.5 Αριθμητική προσομοίωση	8
1.6 Μονοδιάστατα αριθμητικά μοντέλα	9
1.7 Δισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα	10
1.8 Προσομοίωση πλημμυρικής ροής σε αστικό περιβάλλον	14
1.9 Προσομοίωση πλημμυρικής ροής σε κλίμακα λεκάνης απορροής	16
1.10 Ιστορικά δεδομένα	17

Κεφάλαιο 2 Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Εισαγωγή	19
2.2 Ολοκλήρωση Εξισώσεων Navier-Stokes	19
2.3 Εκτίμηση διατμητικών τάσεων πυθμένα	22
2.4 Συσχέτιση πειραματικών δεδομένων Nikuradse	26
2.5 Οπισθέλκουσα δύναμη	28
2.6 Αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων	30
2.7 Αριθμητικά σχήματα	32

2.8 Υπολογιστικά πλέγματα	33
2.9 Κριτήριο Σύγκλισης	35
2.10 Αριθμητικό σχήμα McCormack	36

Κεφάλαιο 3 Παρουσίαση αριθμητικού μοντέλου

3.1 Εισαγωγή	39
3.2 Διακριτοποίηση 2D-SWE με την τροποποίηση του αριθμητικού σχήματος McCormack	40
3.3 Αρχικές συνθήκες με το μοντέλο FLOW-R2D	42
3.4 Ανάντη οριακές συνθήκες με το μοντέλο FLOW-R2D	44
3.5 Κατάντη οριακές συνθήκες με το μοντέλο FLOW-R2D	49
3.6 Όροι εισροής και εκροής	50
3.7 Προσομοίωση τριβών πυθμένα	51
3.8 Στερεά όρια	53
3.9 Υπολογιστικό πεδίο ακανόνιστης μορφής	53
3.10 Ταξινόμηση υπολογιστικών κελιών	55
3.11 Παρουσίαση αλγορίθμου	56

Κεφάλαιο 4 Πρότυποι έλεγχοι μοντέλου

4.1 Εισαγωγή	59
4.2 Υποθετική θραύση κυκλικού φράγματος	60
4.3 Υδραυλικό άλμα σε ορθογωνικό αγωγό	61
4.4 Έλεγχος κριτηρίου Σύγκλισης	64
4.5 Θραύση φράγματος και μετάδοση πλημμυρικού κύματος σε τριγωνικό αναβαθμό	65
4.6 Θραύση φράγματος και μετάδοση πλημμυρικού κύματος σε εμπόδιο	67
4.7 Μετάδοση πλημμυρικού κύματος σε αστικό περιβάλλον	71
4.8 Μετάδοση πλημμυρικού κύματος έπειτα από τη θραύση του φράγματος Tous (Ισπανία)	80
4.9 Αστραπιαία πλημμύρα έπειτα από ακραίο επεισόδια καταγίδας	87
4.10 Μετάδοση πλημμυρικού κύματος στο Σπερχειό ποταμό	93

Κεφάλαιο 5 Ειδικά θέματα προσομοίωσης πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες

5.1 Εισαγωγή	99
5.2 Προσομοίωση πλημμύρας σε αστικό περιβάλλον	100
5.3 Βαθμονόμηση και ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων	108
5.4 Επίδραση μεγέθους κελιού στην αριθμητική επίλυση	117
5.5 Χρονική εξέλιξη αβεβαιότητας	127
5.6 Μοντέλα εκτίμησης τριβών πυθμένα	130

Κεφάλαιο 6 Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου

6.1 Εισαγωγή	143
6.2 Δείκτες πλημμυρικού κινδύνου	143
6.3 Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου	146

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα

7.1 Σύνοψη διδακτορικής διατριβής	151
7.2 Πρωτοτυπία διδακτορικής διατριβής	152
7.3 Ανάλυση των συμπερασμάτων	153
7.4 Προτάσεις για συνέχιση της έρευνας	154

Βιβλιογραφία

Παράρτημα

Συνοπτικό βιογραφικό σημείωμα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Οι πλημμύρες αποτελούν έναν από τους κυριότερους φυσικούς κινδύνους για τις ανθρώπινες κοινωνίες, η αντιμετώπιση των οποίων τις απασχολεί από την αρχαιότητα. Ανάλογα με την ιστορική εποχή, το επίπεδο της τεχνολογικής εξέλιξης και το κοινωνικο-οικονομικό σύστημα, προτάθηκαν και εφαρμόστηκαν διάφορες προσεγγίσεις αντιμετώπισης του φαινομένου.

Οι πλημμύρες του ποταμού Νείλου στην αρχαία Αίγυπτο, οι οποίες ήταν κύριος παράγοντας αγροτικής ανάπτυξης της περιοχής (όταν αποσύρονταν τα νερά αφήναν μία μορφή ιλύος η οποία ήταν καταλύτης για την ευφορία του εδάφους) οδήγησαν σε ένα σχέδιο διαχείρισης των πλημμυρών αυτών. Το σχέδιο αυτό αφορούσε αφενός στον ακριβή ορισμό της εκάστοτε ιδιοκτησίας με τη βοήθεια της γεωμετρίας και της τοπογραφίας (έπειτα από την απόσυρση των νερών τα όρια ιδιοκτησίας των αγροτεμαχίων εξαφανίζονταν), αφετέρου στη συνεχή μέτρηση της στάθμης του ποταμού (νειλόμετρα) και στην εκτίμηση της επικινδυνότητας της κάθε χρονιάς όσον αφορά στα πλημμυρικά όρια.

Οι πλημμύρες στην Κίνα έχουν προκαλέσει "διαμάχη" εδώ και 2000 χρόνια, η οποία φτάνει μέχρι και το ανώτατο επίπεδο εξουσίας, για το ποιός είναι ο ορθότερος τρόπος διαχείρισης της φυσικής κοίτης ενός ποταμού: στενή κοίτη με τοιχώματα που περιορίζουν την πλημμυρική ροή αλλά με μεγαλύτερες ταχύτητες ροής και διάβρωση του εδάφους ή ευρεία κοίτη με μείωση του πλημμυρικού κινδύνου αλλά και ταυτόχρονη μείωση της καλλιεργήσιμης γης.

Στη σύγχρονη εποχή, η κύρια μορφή διαχείρισης του πλημμυρικού κινδύνου βασίζεται στην προσπάθεια αριθμητικής προσομοίωσης ενδεχόμενης πλημμυρικής ροής, χρησιμοποιώντας αλγόριθμους επίλυσης σε κάποιον ηλεκτρονικό υπολογιστή (H/Y). Τα θεμέλια αυτής προσέγγισης μπήκαν από τον 17ο αιώνα όταν διατυπώθηκε ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα και έπειτα εφαρμόστηκε και στην κίνηση των ρευστών τον 19ο αιώνα, σε συνδυασμό με τον εμπειρικό προσδιορισμό των τριβών πυθμένα, επίσης τον 19ο αιώνα. Η ανάπτυξη των H/Y από τα μέσα του 20ου αιώνα οδήγησε με βάση μία προσέγγιση του 18ου αιώνα (τις σειρές Taylor) στις σύγχρονες αριθμητικές μεθόδους επίλυσης διαφορικών εξισώσεων, αλλά και στην ανάπτυξη της αριθμητικής ανάλυσης.

Η πολυπλοκότητα του πλημμυρικού φαινομένου, σε συνδυασμό με τις πολλές παραμέτρους από τις οποίες εξαρτάται (υδρολογικές, τοπογραφικές, υδραυλικές), εμπόδισε εδώ και πολλά χρόνια να γίνει δυνατή μία συστηματική κατάρτιση ενός θεσμικού πλαισίου διαχείρισης της πλημμύρας, σε αντίθεση με άλλους τεχνολογικούς τομείς όπως είναι η κατασκευή κτιρίων. Με αυτό το υπαρκτό κενό έρχεται αντιμέτωπη η προσπάθεια της Ε.Ε. η οποία έχει καταρτίσει την Κοινοτική Οδηγία 2007/60 για την αντιμετώπιση του πλημμυρικού κινδύνου. Παρά τις επιμέρους κριτικές, η Οδηγία 2007/60 αποτελεί σήμερα ένα ορθολογικό οδηγό για την αντιμετώπιση των πλημμυρών μέσα από μία διαδικασία διαχείρισης της πλημμυρικής διακινδύνευσης (flood risk) (Tsakiris et al. 2009).

1.2 Οδηγία 2007/60 για τη διαχείριση πλημμυρικής διακινδύνευσης

Η Κοινοτική Οδηγία 2007/60 (European Council 2007) έρχεται να συμπληρώσει την Κοινοτική Οδηγία 2000/60, σύμφωνα με την οποία επιβάλλεται σε κάθε κράτος-μέλος της Ε.Ε. η ανάπτυξη σχεδίων διαχείρισης λεκάνης απορροής ποταμού για κάθε περιοχή λεκάνης απορροής ποταμού, με στόχο την επίτευξη καλής οικολογικής και χημικής κατάστασης και τον μετριασμό των επιπτώσεων των πλημμυρικών συμβάντων.

Εντούτοις, η Οδηγία 2000/60 δεν εστιάζει στη μείωση της πλημμυρικής διακινδύνευσης. Η Οδηγία 2007/60 έρχεται να καλύψει το παραπάνω κενό, έτσι ώστε να μπει ένα θεσμικό πλαίσιο για τη διαχείριση ενός καταστροφικού γεγονότος, όπως είναι ένα πλημμυρικό συμβάν. Στη συνέχεια ακολουθεί μία σύντομη επισκόπηση των σημαντικότερων σημείων της οδηγίας. Στην αρχή της Κοινοτικής Οδηγίας 2007/60, δίνεται ο παρακάτω ορισμός:

"Πλημμύρα" είναι η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, δεν καλύπτεται από νερό. Αυτό περιλαμβάνει 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 κράτη-μέλη της Ε.Ε. θα πρέπει να διεξάγουν προκαταρκτική αξιολόγηση των περιοχών που κινδυνεύουν από πλημμύρες σε κάθε λεκάνη απορροής ποταμού ή τμήμα διεθνούς περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού που βρίσκεται στην επικράτειά τους. Στην αξιολόγηση περιλαμβάνονται τουλάχιστον τα εξής:

- χάρτες της περιοχής της λεκάνης απορροής του ποταμού στην κατάλληλη κλίμακα, οι οποίοι περιλαμβάνουν τα όρια των λεκανών και των υπολεκανών απορροής ποταμών και εφόσον υπάρχουν, παράκτιων ζωνών, οι οποίοι περιγράφουν τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά και τη χρήση γης
- περιγραφή των πλημμυρών οι οποίες σημειώθηκαν κατά το παρελθόν και είχαν σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στις ανθρώπινες ζωές, στις οικονομικές δραστηριότητες και στο περιβάλλον, καθώς και της έκτασης της πλημμύρας, των οδών αποστράγγισης και της αξιολόγησης των αρνητικών επιπτώσεων που αυτές προκάλεσαν

- περιγραφή των σημαντικών πλημμυρών οι οποίες σημειώθηκαν κατά το παρελθόν, εκ των οποίων θα μπορούσαν, ενδεχομένως, να προβλεφθούν οι σημαντικές αρνητικές συνέπειες παρόμοιων φαινομένων στο μέλλον
- αξιολόγηση των δυνητικών αρνητικών συνεπειών των μελλοντικών πλημμυρών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά, την οικονομική δραστηριότητα σε συνδυασμό με άλλες παραμέτρους, όπως η τοπογραφία ή τις υφιστάμενες υποδομές προστασίας

Αφού γίνει αυτή η αξιολόγηση, θα πρέπει να γίνει καταγραφή των γεωγραφικών περιοχών όπου υπάρχει κίνδυνος πλημμύρας. Εφόσον έχει γίνει η καταγραφή αυτών, θα πρέπει να καταρτιστούν χάρτες πλημμυρικού κινδύνου και χάρτες πλημμυρικής διακινδύνευσης. Στις μεν πρώτες κατατάσσονται οι γεωγραφικές περιοχές οι οποίες θα μπορούσαν να πλημμυρίσουν σύμφωνα με τα παρακάτω σενάρια:

- πλημμύρες χαμηλής πιθανότητας ή σενάρια ακραίων φαινομένων
- πλημμύρες μέσης πιθανότητας (περίοδος επαναφοράς ίσες ή μεγαλύτερες από 100 χρόνια)
- πλημμύρες υψηλής πιθανότητας, ανάλογα με την περίπτωση

ενώ τα υδραυλικά χαρακτηριστικά τα οποία θα πρέπει να υπολογιστούν και να παρουσιαστούν είναι τα εξής:

- η έκταση της πλημμύρας
- το βάθος ή η στάθμη νερού
- η ταχύτητα ροής

Οι δε χάρτες πλημμυρικής διακινδύνευσης θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικοί των δυνητικών αρνητικών συνεπειών που προκαλεί ένα πλημμυρικό γεγονός, επομένως θα πρέπει να καταγράφονται σε αυτούς:

- ο ενδεικτικός αριθμός κατοίκων που ενδέχεται να πληγούν στην εκάστοτε περιοχή
- ο τύπος της οικονομικής δραστηριότητας στην εκάστοτε περιοχή
- καταγραφή εγκαταστάσεων στην εκάστοτε περιοχή, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν σημαντική μόλυνση με μία ενδεχόμενη καταστροφή τους

Θα πρέπει επίσης να καταρτιστούν σχέδια διαχείρισης της πλημμυρικής διακινδύνευσης λαμβάνοντας πτυχές όπως:

- το κόστος και τα οφέλη
- την έκταση της πλημμύρας και τις οδούς και περιοχές αποστράγγισης των πλημμυρών με δυνατότητα συγκράτησης των πλημμυρών, όπως είναι οι φυσικές πλημμυρικές περιοχές
- τους περιβαλλοντικούς στόχους του άρθρου 4 της οδηγίας 2000/60/ΕΚ
- τη διαχείριση του εδάφους και των υδάτων

- το χωροταξικό σχεδιασμό
- τη χρήση της γης
- τη διαφύλαξη της φύσης
- τη ναυσιπλοΐα και τις λιμενικές υποδομές

Τα σχέδια διαχείρισης της πλημμυρικής διακινδύνευσης θα πρέπει εστιάζουν στην πρόληψη, την προστασία και την ετοιμότητα. Επίσης, είναι δυνατόν να περιλαμβάνονται και κάποια μη κατασκευαστικά μέτρα αντιμετώπισης μία ενδεχόμενης πλημμύρας, καθώς και η ελεγχόμενη κατάκλυση ορισμένων περιοχών σε περίπτωση πλημμύρας.

Τέλος, όσον αφορά τις περιπτώσεις των ποταμών που δεν ρέουν αποκλειστικά στα σύνορα ενός κράτους-μέλους, το εκάστοτε κράτος-μέλος δε θα πρέπει να λαμβάνει μέτρα τα οποία αυξάνουν σημαντικά τους κινδύνους πλημμύρας, ανάντη ή κατόντη, σε άλλες χώρες στην ίδια λεκάνη ή υπολεκάνη απορροής ποταμού, εκτός εάν έχει γίνει συντονισμός των μέτρων αυτών και έχει βρεθεί συμφωνημένη λύση μεταξύ των ενδιαφερόμενων κρατών-μελών.

1.3 Διάρθρωση της διδακτορικής διατριβής

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε το αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης πλημμυρικής ροής FLOW-R2D (**FLO**od **W**ave **R**outing-**2D**), το οποίο επιλύει τις δισδιάστατες Εξισώσεις Αβαθών Υδάτων (two-dimensional Shallow Water Equations, 2D-SWE) με την αριθμητική μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Method, FDM), κατάλληλο και για την κατάρτιση χαρτών πλημμυρικού κινδύνου σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60. Ως στόχος της διατριβής μπορεί να χαρακτηριστεί η ενδεδειγμένη επισκόπηση όλων των θεμάτων που αφορούν στην δισδιάστατη προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες, για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου.

Η πρωτοτυπία της διδακτορικής διατριβής αφορά στο γεγονός ότι παρόλο που το θεωρητικό υπόβαθρο είναι γνωστό, η δισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε πραγματικές και όχι σε ελεγχόμενες συνθήκες, όπως είναι κάποιες πειραματικές διατάξεις, έχει αρχίσει και εφαρμόζεται μόλις τα τελευταία χρόνια, με συνέπεια τη μη επαρκή αντιμετώπιση των διάφορων ειδικών θεμάτων που προκύπτουν από την πολυπλοκότητα του φυσικού κόσμου. Η στροφή αυτή προς την προσομοίωση πραγματικών συνθηκών έγινε πλέον εφικτή κυρίως λόγω της ραγδαίας αύξησης της υπολογιστικής δύναμης. Επίσης, η πλειονότητα των ερευνών κινείται με πλαίσιο τα κλειστού κώδικα, εμπορικά λογισμικά, όπου όμως δεν δίνεται η δυνατότητα ελέγχου σε κάθε παράμετρο του λογισμικού.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής γίνεται έλεγχος σε κάθε παράμετρο που υπεισέρχεται στο αριθμητικό μοντέλο, ενώ παρουσιάζονται και καινοτόμες προτάσεις για την προσομοίωση φαινομένων όπως είναι οι τριβές πυθμένα, η μετάδοση ενός πλημμυρικού υδρογραφήματος κ.α.

Η διάρθρωση της διδακτορικής διατριβής είναι η ακόλουθη:

- σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση

- παρουσίαση του βασικού θεωρητικού υπόβαθρου των νόμων και των εξισώσεων που διέπουν την κίνηση των ρευστών, καθώς και των αριθμητικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση αυτών των εξισώσεων
- παρουσίαση του αριθμητικού μοντέλου FLOW-R2D
- παρουσίαση των πρότυπων ελέγχων (benchmarking test) που έγιναν με σκοπό την τεκμηρίωση της εγκυρότητας του μοντέλου
- παρουσίαση των διάφορων ειδικών θεμάτων που αφορούν στην προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες
- εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου σε πραγματικές συνθήκες
- παρουσίαση των συμπερασμάτων που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής καθώς και των προτάσεων πάνω σε θέματα που χρήζουν περισσότερης διερεύνησης

Οι βασικές προτάσεις που χαρακτηρίζονται από πρωτοτυπία και παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- τροποποιήθηκε η κλασική μορφή του αριθμητικού σχήματος McCormack με στόχο την εισαγωγή τεχνητής διάχυσης
- τροποποιήθηκε ο τρόπος προσδιορισμού των στερεών ορίων ώστε να υπεισέρχεται στους υπολογισμούς των τριβών πυθμένα και η επίδραση των κάθετων τοιχωμάτων (ως προς τη διεύθυνση ροής)
- διαμορφώθηκε δισδιάστατο μοντέλο υπολογισμού της καμπύλης στάθμης-παροχής κατά την εφαρμογή υδρογραφήματος σε μία διατομή, με στόχο την προσομοίωση του βρόχου που σχηματίζεται μεταξύ του ανοδικού και του καθοδικού σκέλους της εν λόγω καμπύλης
- διαμορφώθηκαν τεχνικές αντιμετώπισης βαθμονόμησης των διάφορων παραμέτρων που απαιτούνται σε κάθε μοντέλο τέτοιου τύπου, από τη στιγμή που το υπολογιστικό κόστος προσομοίωσης πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες είναι υψηλό
- διαμορφώθηκε υβριδική μέθοδος που συνδυάζει την υδρολογική με την υδροδυναμική προσέγγιση για την προσομοίωση μίας αστραπιαίας πλημμύρας (flash flood) σε μικρές υδρολογικές λεκάνες
- παράχθηκε ρητή σχέση υπολογισμού του συντελεστή τραχύτητας f της εξίσωσης Darcy-Weisbach η οποία έχει φυσική βάση και η οποία ισχύει σε όλες τις περιοχές (στρωτή, τυρβώδης και μεταβατικές περιοχές), ενώ είναι κατάλληλη για ροή με ελεύθερη επιφάνεια
- διαμορφώθηκε μοντέλο εκτίμησης τριβών πυθμένα τριών παραμέτρων, όπου οι τριβές πυθμένα είναι ανάλογες της ταχύτητας ροής και αντιστρόφως ανάλογες του βάθους ροής

1.4 Οι πρώτες πειραματικές προσεγγίσεις

Όπως προαναφέρθηκε, οι πρώτες προσεγγίσεις της ροής των ρευστών έγιναν με βάση το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, αλλά θεωρώντας ότι η επίδραση των τριβών πυθμένα στη ροή του ρευστού είναι μηδενική. Σε αυτό το πεδίο δημοσίευσαν σημαντικοί επιστήμονες όπως οι Bernoulli, Euler, Lagrange, Laplace κ.α. Η απλοποίηση όμως αυτή δεν είχε πρακτικά αποτελέσματα όσον αφορά στη σχεδίαση διάφορων υδραυλικών κατασκευών, επομένως αναπτύχθηκε, κατά κύριο λόγο στην κοινότητα των μηχανικών, ο κλάδος της Υδραυλικής με κύριο πεδίο αναφοράς την πειραματική διαδικασία (White 1998). Σε αυτό το πεδίο δημοσίευσαν επίσης σημαντικοί ερευνητές όπως οι Chézy, Hagen, Poiseuille, Darcy, Manning, Weisbach κ.α. Στα τέλη του 19ου αιώνα και στις αρχές του 20ου ξεκινάει η συνδυασμένη προσέγγιση της θεωρητικής υδροδυναμικής και της υδραυλικής, με δημοσιεύσεις από επιστήμονες όπως οι Navier, Stokes, Saint-Venant, Reynolds με πιο σημαντική ίσως τομή τη θεωρία των οριακών στιβάδων του Prandtl (White 1998).

Η ανάπτυξη πλέον της αριθμητικής ανάλυσης και των H/Y έχει οδηγήσει την αριθμητική προσομοίωση της πλημμυρικής ροής ως κυρίαρχη επιλογή για την ερευνητική κοινότητα σε σχέση με τα φυσικά και πειραματικά μοντέλα, από τη στιγμή που αυτή είναι και αξιόπιστη και πιο φθηνή, τόσο από άποψη κόστους όσο και από άποψη χρόνου, ενώ ένα ακόμα μειονέκτημα της πειραματικής προσέγγισης όσον αφορά την προσομοίωση μίας πραγματικής κατάστασης είναι τρόπος προσομοίωσης των τριβών πυθμένα (Bellos 2012). Αυτό φυσικά δε σημαίνει ότι η πειραματική προσέγγιση έχει εγκαταλειφθεί, απλά έχει προσαρμοστεί κυρίως:

- στη δημιουργία πρότυπων ελέγχων των αριθμητικών μοντέλων (benchmarking tests)
- στην επικουρική υποστήριξη της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων ενός αριθμητικού μοντέλου, ιδιαίτερα όταν η περιοχή μελέτης είναι σημαντική από πολλές πλευρές (κοινωνική, οικονομική, κ.λπ.)
- στην προσομοίωση φαινομένων όπου είναι δύσκολο ή και πρακτικά αδύνατο να προσομοιωθούν αριθμητικά με σχετική αξιοπιστία, ιδιαίτερα σε ελεγχόμενες συνθήκες όπως είναι οι υδραυλικές κατασκευές (π.χ. υπερχειλιστές, λεκάνες ηρεμίας, κ.λπ.).

Παρά την προσαρμογή όμως των πειραματικών προσεγγίσεων στη σύγχρονη εποχή, δεν μπορεί να παραγνωριστεί η τεράστια σημασία των τελευταίων πάνω στην επιστημονική εξέλιξη και για αυτό γίνεται προσπάθεια ενδεικτικής παρουσίασης ξεκινώντας από τον 20ο αιώνα και τη δεκαετία του '10, της πειραματικής ερευνητικής δραστηριότητας πάνω στο φαινόμενο της διάδοσης πλημμυρικού κύματος. Οι πειραματικές αυτές μελέτες αφορούν κατά κύριο λόγο στη μελέτη της μετάδοσης κυμάτων σε εργαστηριακούς ή πραγματικούς αγωγούς.

Μεταξύ των ερευνητών που ασχολήθηκαν ειδικά με την εργαστηριακή μελέτη μετάδοσης πλημμυρικών κυμάτων είναι ο Schoklitsh (1917), ο οποίος χρησιμοποίησε ως βάση τα πειραματικά αποτελέσματα των Darcy και Bazin κατά τη μελέτη της μετάδοσης μικρών κυματισμών σε μικρό ξύλινο εργαστηριακό αγωγό. Επίσης ο Eguiazaroff (1937) πραγματοποίησε μετρήσεις μετάδοσης κυμάτων σε εργαστήριο, καθώς και στο κανάλι Maxnitz.

Ο Dressler τεκμηρίωσε θεωρητικά και πειραματικά (1952, 1954) ότι η υδραυλική αντίσταση είναι από τους κυρίαρχους παράγοντες στη διάδοση ενός πλημμυρικού κύματος. Οι πειραματικές του μελέτες έγιναν σε οριζόντιο αγωγό ορθογωνικής διατομής, με πυθμένα μεταβλητής τραχύτητας. Σημαντικές πειραματικές μετρήσεις έγιναν επίσης από πληθώρα ερευνητών όπως οι Levin (1951) σε θραύση φράγματος και ο Hayashi (1953) σε μετάδοση κυματισμών σε τεχνητό αγωγό. Ο Supino (1954) μελέτησε το σχηματισμό υδραυλικού άλματος σε αγωγούς μεγάλου πλάτους, ενώ ο Semenido (1956) μελέτησε ασταθείς ροές σε τεχνητό αγωγό μήκους 7000 m. Οι Ippen and Kulin (1957) μελέτησαν την επίδραση της τραχύτητας του πυθμένα στη μετάδοση κυματισμών και οι Zienkiewicz and Sandover (1957) το κύμα που προκύπτει από την απότομη μεταβολή της ροής σε ανοιχτούς αγωγούς. Στο Laboratoire National d'Hydraulique (1959) έγιναν μεταξύ άλλων μετρήσεις μετάδοσης πλημμυρικών κυμάτων σε πρισματικούς αγωγούς, καθώς και σε αγωγούς μεταβλητής διατομής.

Προχωρώντας στις επόμενες δεκαετίες, εκτεταμένα πειράματα ολικής και μερικής ρήξης φράγματος έγιναν από το U.S. Army Corps of Engineers στο σταθμό Waterways Experiment Station - W.E.S. (1960, 1961). Τα πειράματα αυτά διεξήχθησαν σε αγωγό ορθογωνικής διατομής πλάτους 1.40 m και μήκους 122 m. Ο Montuori (1965) μελέτησε τη μετάδοση πλημμυρικού κύματος σε ορθογωνικό εργαστηριακό αγωγό και σε τεχνητό αγωγό προσαγωγής υδροηλεκτρικής εγκατάστασης. Οι Nougare et al. (1963) μελέτησαν τη μετάδοση δευτερευόντων κυματισμών σε τραπεζοειδή αγωγό μήκους 57 m, οι Vinogradova and Kononkova (1965) διεξήγαγαν πειράματα διόδευσης πλημμυρικού κύματος σε αγωγό διαστάσεων 30.0x2.5 m, ενώ οι Yevjevich and Barnes (1970) πραγματοποίησαν πειράματα διάδοσης πλημμυρικού κύματος σε εργαστηριακό αγωγό μεγάλου μήκους (250 m). Οι Chervet and Dalles (1970), Dracos (1970) πραγματοποίησαν πειράματα σε εργαστηριακό αγωγό ορθογωνικής διατομής, καθώς και σε φυσικό ομοίωμα. Οι De Jong et al. (1971) μελέτησαν τη μετάδοση κύματος σε αγωγό ορθογωνικής διατομής, ενώ οι Tscantz and Miller (1971) και Miller and Tscantz (1972) πραγματοποίησαν επί μία τριετία εκτός άλλων και πειράματα μετάδοσης κύματος που προκύπτει από τη θραύση φράγματος και ειδικότερα την επίδραση της κλίσης και της τραχύτητας πυθμένα.

Οι παραπάνω πειραματικές εργασίες αναφέρονται κατά κύριο λόγο σε μονοδιάστατες ροές. Πειραματικές εργασίες οι οποίες μελετούσαν το φαινόμενο σε δύο διαστάσεις έχουν γίνει κυρίως για προβλήματα σταθερής ροής από τους Ippen and Dawson (1951), Rouse et al. (1952). Τα πειράματα αυτά αφορούσαν το σχεδιασμό ανοιχτών αγωγών με διεύρυνση, σε συνθήκες υπερκρίσιμης ροής. Επίσης, σε μικρότερη κλίμακα ενδεικτικά, οι Rajar and Četina (1983) κατασκεύασαν υδραυλικό ομοίωμα σε κλίμακα 1:200 ενός φράγματος ύψους 20 m, οι Michouev and Sladkevich (1983) χρησιμοποίησαν πειραματικά αποτελέσματα από διάταξη θραύσης φράγματος σε αγωγό με απότομη διεύρυνση, οι Memos et al. (1983) μελέτησαν πειραματικά τη μετάδοση κύματος σε οριζόντια επιφάνεια. Οι Bellos et al. (1992) παρουσίασαν πειραματική διάταξη όπου γινόταν προσομοίωση πλημμυρικού κύματος έπειτα από θραύση φράγματος σε αγωγό μήκους 21 m και μεταβλητής διατομής.

Περνώντας στις πιο σύγχρονες προσεγγίσεις, αναφορά θα πρέπει να γίνει στη βάση δεδομένων του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος IMPACT Project (Zech and Soares-Frazao 2007) όπου γίνεται προσπάθεια δημιουργίας βάσης δεδομένων για τον πρότυπο έλεγχο των αριθμητικών μοντέλων η

οποία στηρίζεται σε πειραματικές μετρήσεις καθώς και σε μετρήσεις πεδίου. Πειραματικές προσομοιώσεις όπως είναι η στιγμιαία και απότομη θραύση φράγματος, καθώς και η επακόλουθη μετάδοση πλημμυρικού κύματος σε οριζόντιο ξηρό πυθμένα, σε τριγωνικό αναβαθμό και τέλος σε λεκάνη ηρεμίας (Soares-Frazao 2007), η τμηματική θραύσης φράγματος και η μετάδοση πλημμυρικού κύματος σε οριζόντιο, ξηρό πυθμένα, όπου υπάρχει στερεό απομονωμένο εμπόδιο σε πλάγια θέση σε σχέση με τη διεύθυνση ροής (Soares-Frazao and Zech 2007), η μετάδοση πλημμυρικού κύματος σε υποθετική πόλη τοποθετημένη εντός της πλημμυρικής κοίτης στο φυσικό μοντέλο του ποταμού Toce της Ιταλίας (Testa et al. 2007), εντάσσονται μεταξύ άλλων στη βιβλιοθήκη δεδομένων του IMPACT Project.

Διάφοροι ερευνητές έχουν προσομοιώσει επίσης πλημμυρικά γεγονότα σε πραγματικές συνθήκες χρησιμοποιώντας φυσικά μοντέλα. Οι Ishigaki et al. (2003) κατασκεύασαν φυσικό μοντέλο της πλημμυρικής κοίτης του ποταμού Kamo (Κιότο, Ιαπωνία), η οποία βρίσκεται εντός αστικού ιστού, σε κλίμακα 1:100. Δύο σενάρια προσομοιώθηκαν και αφορούν στο αν συμμετέχει στο φαινόμενο ή όχι η αποχέτευση των ομβρίων νερών. Οι Hiraish and Yasuda (2006) κατασκεύασαν σε κλίμακα 1:50 φυσικό μοντέλο του λιμανιού Yokohama (Ιαπωνία) με σκοπό να προσομοιώσουν πιθανό πλημμυρικό κύμα τσουνάμι. Οι Emelen et al. (2012) προσομοίωσαν την κατάρρευση των αναχωμάτων στον ποταμό Mississippi (Νέα Ορλεάνη, Η.Π.Α.) η οποία συνέβη έπειτα από τον γνωστό τυφώνα Κατρίνα το 2005. Συγκεκριμένα κατασκεύασαν φυσικό μοντέλο της 17ης οδού σε κλίμακα 1:50. Σε διάφορα σημεία της πειραματικής διάταξης μετρήθηκαν βάθη νερού και προφίλ ταχυτήτων. Επίσης οι Tayfur et al. (2013) κατασκεύασαν φυσικό μοντέλο σε οριζόντια κλίμακα 1:150 και σε κατακόρυφη 1:30 του χωριού Urkmez (Τουρκία) με στόχο να προσομοιώσουν την πλημμυρική ροή από την ενδεχόμενη θραύση του ανάντη ομώνυμου φράγματος. Οι μετρήσεις που έγιναν ήταν ο προσδιορισμός των βαθών νερού και των προφίλ των ταχυτήτων σε διάφορα σημεία της πειραματικής διάταξης.

Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει σε πειραματικές προσομοιώσεις πλημμυρικής ροής με φυσικά μοντέλα που χρησιμοποίησαν και ιστορικά δεδομένα από το πραγματικό πλημμυρικό γεγονός. Η Électricité de France (EDF) κατασκεύασε το 1964 φυσικό μοντέλο σε κλίμακα 1:400 για να προσομοιώσει πειραματικά το πραγματικό γεγονός της αστοχίας του φράγματος Malpasset στον ποταμό Reyran (Γαλλία). Το φυσικό μοντέλο βαθμονομήθηκε με βάση ιστορικές καταγραφές από την περιοχή που επλήγη από την καταστροφή (Goutal 1999). Επίσης οι Smith et al. (2012) κατασκεύασαν φυσικό μοντέλο σε κλίμακα 1:30 της οδού Morgan με στόχο να προσομοιώσουν πειραματικά ένα ακραίο πλημμυρικό γεγονός που συνέβη τον Ιούνιο του 2007 στο Newcastle (Αυστραλία). Το φυσικό μοντέλο βαθμονομήθηκε χρησιμοποιώντας περισσότερο από 1500 καταγεγραμμένα μέγιστα βάθη σε όλη την πληγείσα περιοχή, τα οποία δόθηκαν από τις τοπικές αρχές.

1.5 Αριθμητική προσομοίωση

Η ανάπτυξη των H/Y και της αριθμητικής ανάλυσης έκανε πλέον δυνατή την αριθμητική επίλυση των Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων. Όπως προαναφέρθηκε, η αριθμητική προσομοίωση της πλημμυρικής ροής είναι η κυρίαρχη επιλογή των σημερινών ερευνητών. Ανάλογα με τη μορφή των

Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων (πόσες διαστάσεις περιλαμβάνουν, καθώς και ποιοί όροι υπεισέρχονται) υπάρχουν διάφοροι τύποι αριθμητικών μοντέλων. Μία ταξινόμηση αυτών μπορεί να γίνει ως εξής (Néelz and Pender 2009):

- μονοδιάστατα αριθμητικά μοντέλα όπου επιλύονται αριθμητικά οι μονοδιάστατες Εξισώσεις Αβαθών Υδάτων (one-dimensional Shallow Water Equations, 1D-SWE) στην πλήρη τους μορφή, γνωστές και ως Εξισώσεις Saint-Venant (1D)
- ψευδο-δισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα, όπου η ροή στο πλημμυρικό πεδίο (floodplain) που βρίσκεται εκτός του κύριου πεδίου ροής, το οποίο και προσομοιώνεται μονοδιάστατα, προσομοιώνεται ως "αποθήκευση" η οποία προσδιορίζεται με σχέσεις στάθμης-όγκου νερού (1D+)
- δισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα, όπου έχουν παραλειφθεί κάποιοι όροι στις Εξισώσεις Ορμής των 2D-SWE (2D-)
- δισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα όπου οι 2D-SWE είναι στην πλήρη τους μορφή (2D)

Ανάλογα με την αριθμητική μέθοδο που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της μερικής παραγώγου, τα αριθμητικά μοντέλα διακρίνονται σε αυτά που χρησιμοποιούν:

- τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Method, FDM)
- τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method, FEM)
- τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων (Finite Volume Method, FVM)

Γνωστά μονοδιάστατα 1D αριθμητικά μοντέλα, τα οποία είναι είτε ανοιχτού είτε κλειστού κώδικα παρατίθενται παρακάτω: MIKE11, HEC-RAS, FLDWAV, InfoWorks-1D, CCHE1D. Τα πιο γνωστά δισδιάστατα 2D- αριθμητικά μοντέλα είναι το JFLOW και το LISFLOOD. Τέλος, στα γνωστότερα δισδιάστατα 2D αριθμητικά μοντέλα περιλαμβάνονται λογισμικά όπως: MIKE21, CCHE2D, TELEMAC-2D, ISIS-2D, SOBEK, TUFLOW, RiverFLO-2D, InfoWorks-2D.

Η κατάλληλη επιλογή του αριθμητικού μοντέλου αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα στην ορθολογική προσομοίωση της πλημμυρικής ροής. Η επιλογή μίας μονοδιάστατης ή δισδιάστατης προσέγγισης εξαρτάται από το αν οι εγκάρσιες ως προς τη διεύθυνση ροής ταχύτητες είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις αντίστοιχες κατά μήκος. Αν είναι αρκετά μικρότερες, όπου αυτό συμβαίνει σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο, όπως είναι τα ορεινά υδατορέματα, συνιστάται η μονοδιάστατη προσέγγιση. Αν είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, όπου αυτό συμβαίνει σε περιοχές με πιο ήπιο ανάγλυφο, όπως είναι η πλειονότητα των αγροτικών περιοχών και των πόλεων, συνιστάται η δισδιάστατη προσέγγιση, παρά το γεγονός ότι απαιτεί πολύ μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος και πολλές φορές πρακτικά δεν προτιμάται, οδηγώντας σε μη ρεαλιστικές και ανορθολογικές προσομοιώσεις.

1.6 Μονοδιάστατα αριθμητικά μοντέλα

Οι πρώτοι αλγόριθμοι επίλυσης όσον αφορά στα προβλήματα της πλημμυρικής ροής προσέγγιζαν το φαινόμενο σε μία διάσταση, μέσω των 1D-SWE, κυρίως λόγω υπολογιστικού κόστους, καθώς η

δισδιάστατη προσέγγιση απαιτεί πολύ περισσότερο υπολογιστική ισχύ. Στη συνέχεια γίνεται μία σύντομη και ενδεικτική βιβλιογραφική επισκόπηση των μοντέλων αυτών ξεκινώντας από τα τέλη της δεκαετίας του '60.

Την αριθμητική μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών, εφάρμοσαν μεταξύ άλλων οι Amein (1968), Preissman (1971), χρησιμοποιώντας πεπλεγμένα αριθμητικά σχήματα. Οι Terzidis and Strelkoff (1970), μελέτησαν τα κύματα (surges) και τις ασυνέχειες (shocks) σε ανοιχτούς αγωγούς. Ρητά αριθμητικά σχήματα επίλυσης των 1D SWE χρησιμοποίησαν οι Kordas and Witkowska, (1976), Rajar (1978), Chen (1980), Chen and Armbruster (1980), Odstrčil (1984), Fennema and Chaudhry (1986). Οι Bellos and Sakkas (1987) ανέπτυξαν ένα μονοδιάστατο αριθμητικό μοντέλο διόδευσης πλημμυρικού κύματος σε ξηρό πυθμένα. Οι Miller and Chaudhry (1989) ανέπτυξαν ένα αντίστοιχο μονοδιάστατο αριθμητικό μοντέλο σε καμπυλόγραμμους αγωγούς. Οι Garcia-Navarro and Saviron (1992) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο διακριτοποιώντας τις 1D-SWE με το αριθμητικό σχήμα McCormack. Οι Rahman and Chaudhry (1998) επίσης ανέδειξαν τη σημαντικότητα της τοπικής πύκνωσης του υπολογιστικού πλέγματος σε ένα πλημμυρικό κύμα έπειτα από θραύση φράγματος. Οι Bellos and Hrissanthou (2011) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο διακριτοποιώντας τις 1D-SWE με το αριθμητικό σχήμα McCormack, ελέγχοντας την αξιοπιστία του μοντέλου μέσω της προσομοίωσης πλημμυρικού κύματος έπειτα από θραύση φράγματος.

Την αριθμητική μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων χρησιμοποίησαν μεταξύ άλλων οι Keuning (1976), King (1976), Cooley and Moin (1976), Di Monaco and Molinaro (1982, 1984), Anastasiadou-Partheniou and Terzides (1988). Επίσης ο Katopodes (1980) ανέπτυξε αριθμητικό μοντέλο για μικρούς αριθμούς Froude (όπου σύμφωνα με τον συγγραφέα εμφανίζονταν αστάθειες στις περιοχές που υπερισχύουν οι όροι μεταφοράς) και στη συνέχεια παρουσίασε αριθμητικό μοντέλο που βασίζεται στην τεχνική Petrov-Galerkin. Το παραπάνω μοντέλο έχει αξιοσημείωτη ικανότητα προσδιορισμού και περιγραφής υδραυλικών αλμάτων (shock capturing capability).

1.7 Δισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα

Αν και τα πρώτα δισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα εμφανίστηκαν στα μέσα της δεκαετίας του '70, κυρίως με τη μορφή 2D-, η ραγδαία ανάπτυξη της υπολογιστικής ισχύος από τα μέσα της δεκαετίας του '90 επέτρεψε τη δισδιάστατη προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες τις δύο τελευταίες δεκαετίες, κυρίως με δισδιάστατα μοντέλα όπου οι 2D-SWE είναι στην πλήρη τους μορφή (2D).

Στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια παρουσίασης της ερευνητικής δραστηριότητας πάνω στην ανάπτυξη των δισδιάστατων αριθμητικών μοντέλων που προσομοιώνουν την πλημμυρική ροή, με διάφορες αριθμητικές μεθόδους.

Στα δισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα 2D- μπορεί να καταταχθούν αριθμητικά μοντέλα όπως το μοντέλο των Xanthopoulos and Koutitas (1976) το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών όπου για τον έλεγχο του μοντέλου τους χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που προέκυψαν από

πειράματα μετάδοσης πλημμυρικού κύματος σε ορθογωνικό εργαστηριακό αγωγό. Επίσης ο Lesleigher (1983), για την αντιμετώπιση πρακτικών προβλημάτων υπολογισμού πλημμυρών στην Βιρμανία ανέπτυξε ένα αριθμητικό μοντέλο, διαιρώντας το πεδίο σε τετράπλευρα. Οι Laura and Wang (1984), παρουσίασαν ένα παρόμοιο μοντέλο όπου το πεδίο ροής διαιρείται σε τριγωνικές περιοχές, το οποίο και εφαρμόστηκε σε περιοχή του Puerto Rico. Παρόμοια τεχνική εφαρμόστηκε από τους Hromadka II et al. (1986).

Τα πρώτα δισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα 2D, τα οποία όπως προαναφέρθηκε είναι η κυρίαρχη σημερινή επιλογή, εμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του '70. Οι Gee and McArthur (1978) χρησιμοποίησαν τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων και την τεχνική Galerkin για την επίλυση προβλημάτων δισδιάστατης ροής κατά την οριζόντια, αλλά και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.

Ο Matsutomi (1983), ο οποίος χρησιμοποίησε τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών και το αριθμητικό σχήμα Leap-Frog σε έκκεντρο υπολογιστικό πλέγμα, σε ξηρό πυθμένα με ειδική αντιμετώπιση του μετώπου του κύματος.

Ο Samuels (1983), πρότεινε τρία δισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα επίλυσης δισδιάστατων προβλημάτων με τη χρήση της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων, τα οποία στηρίζονται σε μεθόδους υπολογισμού συμπιεστών ρευστών.

Οι Rajar and Četina (1983) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, το οποίο είναι κατάλληλο για την πρόβλεψη δισδιάστατης ροής σε απότομα καμπυλωμένους αγωγούς. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, το πεδίο ροής διαιρείται σε στοιχειώδεις όγκους προσανατολισμένους στις ροϊκές γραμμές. Το μοντέλο δοκιμάστηκε σε σταθερή ροή, αλλά σύμφωνα με το συγγραφέα μπορεί να περιγράψει ασταθείς ροές με την προσθήκη της χρονικής παραγώγου ως όρου εισροής (source term).

Οι Zech et al. (1983) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο με δυνατότητα περιγραφής της προέλασης και της απόσυρσης πλημμυρικών κυμάτων. Στηρίζεται σε ένα ρητό αριθμητικό σχήμα με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών σε έκκεντρο υπολογιστικό πλέγμα. Επειδή η προσομοίωση των τριβών πυθμένα γίνεται με την εξίσωση του Manning, όταν τα βάθη ροής είναι μικρά, οι τριβές πυθμένα παίρνουν μεγάλες τιμές, οπότε η αδυναμία αυτή αντιμετωπίστηκε με την πρόσθεση στο πραγματικό βάθος νερού ενός πλασματικού βάθους. Επίσης αναγκαία προϋπόθεση για να θεωρηθεί κάποιο κελί "υγρό" είναι το βάθος νερού να είναι μεγαλύτερη από 2 cm.

Οι Michouev and Slavedich (1983) μελέτησαν το πρόβλημα της πλημμύρας που προκύπτει από τη μερική καταστροφή φράγματος. Αναπτύχθηκε ρητό αριθμητικό σχήμα με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών, τα αποτελέσματα του οποίου ελέγχθηκαν με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα.

Οι Garcia and Kahavita (1986) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών, χρησιμοποιώντας το αριθμητικό σχήμα McCormack με σταδιακό υπολογισμό των μεγεθών κατά την προέλαση του χρόνου (time-splitting). Έγινε εισαγωγή τεχνητής αριθμητικής διάχυσης με

σταθερό συντελεστή διάχυσης κατά τη διακριτοποίηση των 2D-SWE, με στόχο την εξομάλυνση των ασταθειών.

Οι Katorodes and Wu (1986), παρουσίασαν δισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, τέταρτης τάξης ακρίβειας. Η μέθοδος είναι ρητή ως προς το χρόνο και για αυτό κατάλληλη για προβλήματα που εμπεριέχουν ασυνέχειες.

Οι Bermudez and Vazquez (1994) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων και πρότειναν μέθοδο διακριτοποίησης του πυθμένα με συνεχή κλίση.

Οι Jovanović and Djordjević (1995) παρουσίασαν αριθμητικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών και το αριθμητικό σχήμα McCormack, ενώ έλεγξαν τα αποτελέσματα του αριθμητικού τους μοντέλου με πειραματικά δεδομένα.

Οι Anastasiou and Chan (1997) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων σε μη δομημένο υπολογιστικό πλέγμα (unstructured grid) και με αριθμητικό σχήμα δεύτερης τάξης ακρίβειας.

Οι Zorrou and Roberts (2000) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων, όπου προσομοιώνεται η δισδιάστατη ροή πλημμυρικού κύματος έπειτα από θραύση φράγματος.

Οι Hubbard and Garcia-Navarro (2000) παρουσίασαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων και πρότειναν ένα αριθμητικό σχήμα βασισμένο στη μέθοδο Bermudez and Vasquez.

Οι Bradford and Sanders (2002) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων, ενώ παρουσίασαν καινοτόμα προσέγγιση για το πώς περιγράφονται τα κινούμενα όρια μεταξύ υγρού και ξηρού πυθμένα.

Οι Soares-Frazae et al. (2003), παρουσίασαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων και σύγκριναν τα αποτελέσματα του αριθμητικού τους μοντέλου με πειραματικά δεδομένα, προσομοιώνοντας το πλημμυρικό κύμα που προκύπτει μετά από ενδεχόμενη θραύση φράγματος, ενώ ο αγωγός κατάντη του φράγματος διευρύνεται απότομα.

Οι Zhou et al. (2004) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων και σύγκριναν τα αποτελέσματα του μοντέλου με πειραματικά δεδομένα, όπως είναι η πειραματική προσομοίωση πλημμυρικού κύματος έπειτα από ενδεχόμενη θραύση φράγματος.

Οι Martin and Gorelick (2005) ανέπτυξαν το αριθμητικό μοντέλο MOD_FreeSurf2D χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων και ένα ημιπελεγμένο αριθμητικό σχήμα. Στο πλαίσιο των ελέγχων εγκυρότητας του αριθμητικού μοντέλου έγινε σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα αλλά και με πραγματικές μετρήσεις.

Οι Behladj et al. (2006) παρουσίασαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Πεπερασμένων Όγκων σε μη δομημένο υπολογιστικό πλέγμα, ενώ έγινε και εφαρμογή του εν λόγω μοντέλου στον ποταμό Ourika στο Μαρόκο. Για να αυξηθεί η ακρίβεια του αριθμητικού σχήματος που

χρησιμοποιήθηκε, έγινε εφαρμογή της τεχνικής MUSCL (Monotonic Upstream Schemes for Conservation Laws).

Οι Liang et al. (2006) παρουσίασαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών και το αριθμητικό σχήμα McCormack με μερικές τροποποιήσεις, ούτως ώστε να έχει την ιδιότητα της TVD (Total Variation Diminishing), ενός όρου δηλαδή εξομάλυνσης των ασταθειών χωρίς να χαθεί η περιγραφή των ασυνεχειών στο υπολογιστικό πεδίο (shock capturing capability). Η εγκυρότητα του μοντέλου ελέγχθηκε με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτού με πειραματικά δεδομένα, όπως για παράδειγμα τα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από την πειραματική θραύση του φράγματος Malpasset.

Οι Liang et al. (2008) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων, σε ένα δομημένο υπολογιστικό πλέγμα με κελιά τετραγωνικής μορφής, όπου όμως υπάρχει η δυνατότητα τοπικής πυκνώσης (adaptive quadtree grid). Στο πλαίσιο των ελέγχων εγκυρότητας του αριθμητικού μοντέλου έγινε και σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με αντίστοιχα αποτελέσματα του εμπορικού λογισμικού TUFLOW.

Οι Vázquez et al. (2009) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων. Στην εργασία αυτή σημειώνεται ότι για υπολογιστικούς λόγους (για να διατηρηθεί σταθερό το ισοζύγιο μάζας που προκύπτει από τις τιμές υπολογισμού στο πεδίο σύμφωνα με το εκάστοτε αριθμητικό σχήμα), θεωρείται ένα κατώφλι βάθους νερού, κάτω από το οποίο το κελί υπολογισμού θεωρείται ξηρό. Όσο πιο μικρό είναι αυτό το κατώφλι, τόσο πιο ακριβείς είναι οι λύσεις. Από την άλλη όμως, ο αριθμός Courant πρέπει να είναι πολύ μικρός (με αποτέλεσμα το πολύ μικρό χρονικό βήμα και το μεγάλο υπολογιστικό κόστος) και ταυτόχρονα δημιουργούνται αστάθειες στο μέτωπο του κύματος, λόγω υπολογιστικών σφαλμάτων (oscillations).

Οι Nikolos and Delis (2009) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων σε μη δομημένο υπολογιστικό πλέγμα με τριγωνικά κελιά. Για τον έλεγχο εγκυρότητας του αριθμητικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι "πρότυπο" έλεγχοι (benchmarking test).

Οι Guangcai et al. (2010) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών και το αριθμητικό σχήμα McCormack σε πεπλεγμένη μορφή.

Οι Ericum et al. (2010) παρουσίασαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων ενώ ο έλεγχος εγκυρότητας του αριθμητικού μοντέλου έγινε με μία σειρά από υποθετικά υπολογιστικά σενάρια καθώς και συγκρίνοντας τα αριθμητικά αποτελέσματα του μοντέλου με πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από πειραματική προσομοίωση πλημμυρικού κύματος έπειτα από θραύση φράγματος.

Οι Tan and Chu (2011) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων και το αριθμητικό σχήμα LBA (Lagrangian Block Advection), ενώ σύγκριναν τα αποτελέσματα του μοντέλου με πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από πειραματική

προσομοίωση πλημμυρικού κύματος έπειτα από θραύση φράγματος το οποίο βρίσκεται ανάντη μίας υποθετικής πόλης.

Οι Wang et al. (2011) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων με αριθμητικό σχήμα τύπου Godunov. Για τον έλεγχο εγκυρότητας του αριθμητικού μοντέλου έγινε σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με αναλυτικές λύσεις αλλά και με πειραματικά δεδομένα.

Οι Bosa and Petti (2011) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων με αριθμητικό σχήμα δεύτερης τάξης ακρίβειας σε μη δομημένο υπολογιστικό πλέγμα, με τετράπλευρα κελιά. Με τη χρήση αυτού του μοντέλου προσομοίωσαν το πλημμυρικό κύμα που υπερπήδησε το φράγμα Vajont (Ιταλία).

Οι Song et al. (2011) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων τροποποιώντας την κλασική μορφή των 2D-SWE με στόχο τη διατήρηση του ισοζυγίου μάζας κατά την πλημμυρική ροή, ενώ η κλίση του πυθμένα προσομοιώνεται ως συνεχής. Ο συνδυασμός αυτών των δύο στοιχείων οδήγησε σε μία αξιόπιστη τεχνική περιγραφής της διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα.

Οι Kim et al. (2014) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων. Στο πλαίσιο των ελέγχων εγκυρότητας του αριθμητικού μοντέλου ελέγχθηκε η επιρροή του υπολογιστικού πλέγματος στην τελική επίλυση.

Οι Tsakiris and Bellos (2014) ανέπτυξαν το αριθμητικό μοντέλο FLOW-R2D χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών και τροποποίηση του αριθμητικού σχήματος McCormack με στόχο την εισαγωγή τεχνητής διάχυσης. Για τον έλεγχο εγκυρότητας του αριθμητικού μοντέλου έγινε σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με αναλυτικές λύσεις, με πειραματικά δεδομένα και με αποτελέσματα του εμπορικού λογισμικού CCHE2D.

Οι Costabile and Macchione (2015) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Όγκων. Για τον έλεγχο εγκυρότητα του αριθμητικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι "πρότυποι" έλεγχοι (benchmarking test), ενώ έγινε και εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου σε πραγματικές συνθήκες.

1.8 Προσομοίωση πλημμυρικής ροής σε αστικό περιβάλλον

Όταν πλέον η διαδικασία της αριθμητικής προσομοίωσης σε πραγματικές συνθήκες έγινε εφικτή, μεγάλο βάρος δόθηκε στη διερεύνηση διάφορων ειδικών θεμάτων που αφορούν στην πολυπλοκότητα του φυσικού κόσμου. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ενασχόληση με την πλημμυρική ροή σε αστικό περιβάλλον, εφόσον αφενός εμφανίζει μεγάλη πολυπλοκότητα, αφετέρου το σύνολο των κοινωνικών και οικονομικών δραστηριοτήτων είναι συγκεντρωμένο στις πόλεις και επομένως η διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης είναι πολύ σημαντική. Ενδελεχής επισκόπηση που αφορά στην αριθμητική προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε αστικό περιβάλλον γίνεται στην εργασία των Hunter et al. (2008), όπου διάφορα εμπορικά λογισμικά συγκρίνονται σε διάφορα σενάρια εφαρμογής.

Βασική κατεύθυνση επίσης στην έρευνα που αφορά κυρίως στην προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε αστικό περιβάλλον, είναι η προσπάθεια "αραιώσης" του υπολογιστικού πλέγματος με επακόλουθο τη σημαντική μείωση του υπολογιστικού χρόνου, αλλά όχι την αντίστοιχη μείωση της ακρίβειας της αριθμητικής επίλυσης. Οι Néelz and Pender (2007) προσπάθησαν αραιώνοντας το υπολογιστικό πλέγμα να παραμετροποιήσουν τα φαινόμενα τριβών που συμβαίνουν εντός υπολογιστικού κελιού σε σχέση με το πιο πυκνό υπολογιστικό πλέγμα μέσω του συντελεστή τραχύτητας Manning, χρησιμοποιώντας το εμπορικό λογισμικό TUFLOW.

Ενδιαφέρουσα προσέγγιση όσον αφορά στην προσομοίωση των κτιρίων που βρίσκονται εξολοκλήρου εντός κελιού στο υπολογιστικό πλέγμα είναι και η προσέγγιση των Chen et al. (2012a, 2012b). Στις εν λόγω εργασίες τροποποιήθηκαν οι Εξισώσεις Συνέχειας ούτως ώστε να συνυπολογίζεται το ποσοστό κάλυψης του εκάστοτε κτιρίου στο υπολογιστικό κελί. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να αραιωθεί το υπολογιστικό πλέγμα, επομένως και να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος, χωρίς να χάνεται σημαντικά η ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Εναλλακτική προσέγγιση είναι τα αριθμητικά μοντέλα τα οποία ταυτόχρονα με την αραιώση τροποποιούν και στις Εξισώσεις Συνέχειας και Ορμής εισάγοντας ένα συντελεστή πορώδους με στόχο τα όποια στερεά εμπόδια όπως είναι τα κτίρια να μην θεωρούνται μονολιθικά, αλλά διαπερατά. Με αυτόν τον τρόπο εκτός από τη βελτίωση των αποτελεσμάτων του εκάστοτε αριθμητικού μοντέλου κατά την αραιώση του υπολογιστικού πλέγματος σε σχέση με τα αριθμητικά μοντέλα που επιλύουν την κλασική μορφή των 2D-SWE, προσομοιώνεται και το φαινόμενο της "αποθήκευσης" νερού (storage effect) στα κτίρια κατά τη διάρκεια της πλημμύρας εντάσσονται οι παρακάτω εργασίες.

Οι Soares-Frazao et al. (2008) ανέπτυξαν ένα τέτοιου τύπου αριθμητικό μοντέλο και τα αποτελέσματα αυτού συγκρίθηκαν με πειραματικά δεδομένα. Με τον ίδιο τρόπο προσομοίωσαν το φαινόμενο αυτό και οι Sanders et al. (2008), ενώ παρουσίασαν και μεθοδολογία για την προσομοίωση της οπισθέλκουσας δύναμης που προκαλεί ένα κτίριο στην πλημμυρική ροή, όταν αυτό βρίσκεται εξολοκλήρου εντός του κελιού του υπολογιστικού πλέγματος (sub-grid effect). Χρησιμοποιώντας το εν λόγω μοντέλο, οι Kim et al. (2015) ελέγξαν την εισαγωγή σφαλμάτων στις αριθμητικές λύσεις λόγω των διάφορων παραμέτρων που υπεισέρχονται λόγω προσομοίωσης του πορώδους. Στην ίδια κατηγορία εντάσσεται και η εργασία των Dottori and Todini (2013), όπου συγκρίνεται η παραπάνω τροποποίηση των Εξισώσεων Συνέχειας και Ορμής με το συντελεστή πορώδους, με την τοπική αύξηση των τριβών πυθμένα ούτως ώστε να προσομοιωθεί η συμμετοχή των κτιρίων στην αντίσταση στην πλημμυρική ροή.

Εφαρμόζοντας άλλου τύπου προσέγγιση για την περιγραφή του πορώδους υπολογιστικού πεδίου, οι Liang et al. (2007) προσομοίωσαν αυτό το φαινόμενο συνδυάζοντας τις 2D-SWE με τις Εξισώσεις Boussinesq για την Υπόγεια Ροή, ενώ έλεγξαν τα αριθμητικά τους αποτελέσματα με πειραματικά δεδομένα.

Το φαινόμενο απώλειας πλημμυρικού όγκου λόγω αποχέτευσης προσομοιώθηκε από τους Ishigaki et al. (2011), προσομοιώνοντας σενάριο εφαρμογής στην πόλη της Οσάκα (Ιαπωνία) με το εμπορικό λογισμικό InfoWorks CS, όπου συνδυάζεται η διδιάστατη επίλυση της πλημμυρικής ροής με

υβριδική μονοδιάστατη/δισδιάστατη προσέγγιση της ροής στο αποχετευτικό δίκτυο. Επίσης το φαινόμενο απώλειας πλημμυρικού όγκου λόγω εισόδου στο υπόγειο σιδηροδρομικό δίκτυο προσομοιώθηκε από τους Bouchenafa et al. (2014) με το εμπορικό λογισμικό MIKE URBAN.

Σημαντική παράμετρος στην προσομοίωση της πλημμύρας σε αστικό περιβάλλον είναι ο τρόπος αναπαράστασης κτιρίων. Οι Syme (2008), οι Schubert and Sanders (2012) και οι Bellos and Tsakiris (2015) με αριθμητικό μοντέλο FLOW-R2D σύγκριναν τους διάφορους διαθέσιμους τρόπους που υπάρχουν στη διαθέσιμη βιβλιογραφία για να προσομοιωθεί η επίδραση των κτιρίων στην πλημμυρική ροή, χρησιμοποιώντας διάφορα σενάρια εφαρμογής.

Επίσης σημαντική εφαρμογή για την προσομοίωση της πλημμύρας σε αστικό περιβάλλον είναι η εύρεση των κριτηρίων όπου παρασύρονται άνθρωποι ή και αντικείμενα όπως αυτοκίνητα από τα έντονα φαινόμενα της ροής. Ενδεικτικές εργασίες που κατά κύριο λόγο βασίζονται σε πειραματικά και αριθμητικά δεδομένα είναι των Jonkman and Penning-Rowsell (2008) και Xia et al. (2014) για τους ανθρώπους και Teo et al. (2012) και Arrighi et al. (2015) για τα αυτοκίνητα.

1.9 Προσομοίωση πλημμυρικής ροής σε κλίμακα λεκάνης απορροής

Μία ακόμα ειδική κατηγορία της προσομοίωσης της πλημμυρικής ροής είναι οι περιπτώσεις όπου η κλίμακα προσομοίωσης δεν είναι κάποιος ποταμός ή υδατόρεμα και η παρακείμενη περιοχή, αλλά ολόκληρη η λεκάνη απορροής, όπου η βροχόπτωση προσομοιώνεται με τους όρους εισροής (source terms) και η διήθηση με τους όρους εκροής (sink terms). Οι πρώτες προσεγγίσεις στην κλίμακα της λεκάνης απορροής έγιναν με 2D- αριθμητικά μοντέλα λόγω υπολογιστικού κόστους. Ενδεικτικά τέτοιου τύπου αριθμητικά μοντέλα παρουσίασαν οι: Tayfur et al. (1993), οι Feng et al. (1997), οι Liu et al. (2004), οι Kazezyilmaz-Alhan and Medina (2007) και οι Gottardi and Venutelli (2008).

Η ροή όμως εντός της λεκάνης απορροής χαρακτηρίζεται από χαμηλά βάθη, μεγάλη πολυπλοκότητα και ασυνέχειες (υδραυλικά άλματα). Υποστηρίζεται (Liang 2010, Costabile et al. 2012) ότι φαινόμενα όπως η καμπύλη υπερυψώσεως (backwater effect) ή η συμβολή υδατορεμάτων όπου η διατήρηση της ορμής είναι σημαντική (Singh et al. 2015), δεν προσομοιώνονται κατάλληλα με μοντέλα 2D-, αλλά απαιτούν δισδιάστατα μοντέλα όπου οι 2D-SWE είναι στην πλήρη τους μορφή. Σε αυτή την κατεύθυνση κινείται η ερευνητική κοινότητα τα τελευταία χρόνια, όπου και έγινε εφικτή η δισδιάστατη προσομοίωση πλημμυρικής ροής στην κλίμακα της λεκάνης απορροής με 2D αριθμητικά μοντέλα.

Οι Fiedler and Ramirez (2000) ανέπτυξαν αριθμητικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών και το αριθμητικό σχήμα McCormack, σε οποιαδήποτε τοπογραφία, όπου οι εμπρόσθιες και οι οπίσθιες διαφορές εναλλάσσονταν στο βήμα πρόβλεψης και στο βήμα διόρθωσης κατά την διάρκεια των χρονικών βημάτων. Για υπολογιστικούς λόγους, στις αρχικές συνθήκες το υπολογιστικό πεδίο παίρνει πολύ μικρές τιμές βάθους νερού. Επίσης, στο μοντέλο έγινε εισαγωγή τεχνητής διάχυσης, ενώ ο όρος προσομοίωσης των τριβών πυθμένα διακριτοποιήθηκε με πεπλεγμένο τρόπο, με στόχο την επιτάχυνση των υπολογισμών. Για την περιγραφή του φαινομένου της διήθησης

χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Green-Ampt. Διάφορα αριθμητικά σενάρια βροχόπτωσης-απορροής προσομοιώθηκαν σε μικροκλίμακα.

Οι Esteves et al. (2000) ανέπτυξαν επίσης αριθμητικό μοντέλο με τα ίδια χαρακτηριστικά, τα αποτελέσματα του οποίου ελέγχθηκαν με πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από πειραματική λεκάνη στο Νίγηρα (Δυτική Αφρική).

Οι Costabile et al. (2012, 2013) έλεγξαν το αντίστοιχο αριθμητικό τους μοντέλο με διάφορους "πρότυπους" ελέγχους (benchmarking test), ενώ προσομοίωσαν ακραίο πλημμυρικό γεγονός σε υπολεκάνη του ποταμού Reno (Ιταλία).

Οι Kim et al. (2012) προσομοίωσαν με το αριθμητικό τους μοντέλο σε πραγματικό πλημμυρικό γεγονός το οποίο συνέβη στη λεκάνη Peacheater Creek της πολιτείας της Οκλαχόμα (Η.Π.Α.).

Οι Singh et al. (2015) έλεγξαν τα αποτελέσματα του αριθμητικού τους μοντέλου με πειραματικά δεδομένα, ενώ προσομοίωσαν πλημμυρικό γεγονός στη λεκάνη Goodwin Creek της πολιτείας του Μισισιπή (Η.Π.Α.), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Green-Ampt για το φαινόμενο της διήθησης.

Οι Bellos and Tsakiris (2015b) χρησιμοποίησαν το μοντέλο FLOW-R2D για την προσομοίωση πραγματικού πλημμυρικού γεγονότος αστραπιαίας πλημμύρας σε υπολεκάνη του ρέματος Χαλανδρίου Αττικής με τη μέθοδο Kostiaκον για την προσομοίωση του φαινομένου της διήθησης, ενώ εκτός από την υδροδυναμική προσέγγιση παρουσίασαν και υβριδική υδρολογική/υδροδυναμική μέθοδο που συνδυάζει τη θεωρία του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος με την υδροδυναμική προσέγγιση.

1.10 Ιστορικά δεδομένα

Σημαντική αναφορά θα πρέπει να γίνει στις ιστορικές καταγραφές πλημμυρικών γεγονότων, οι οποίες γίνονται είτε μέσω έρευνας πεδίου (συνεντεύξεις κατοίκων, αποτύπωμα πλημμύρας) είτε με τεχνικές τηλεπισκόπησης. Οι συνήθεις καταγραφές είναι μέγιστα βάθη ροής, ενώ σπάνια υπάρχει καταγεγραμμένη και πληροφορία για τη χρονική εξέλιξη της πλημμύρας.

Οι καταγραφές αυτές αποτελούν τις πιο ουσιαστικές πηγές δεδομένων για τον έλεγχο επικύρωσης των διάφορων αριθμητικών μοντέλων, εφόσον αφορούν πραγματικά γεγονότα. Επίσης είναι δυνατό (αν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα σε μία περιοχή για πάνω από μία φορά) και να αποτελέσουν εναλλακτικό τρόπο κατάρτισης χαρτών πλημμυρικού κινδύνου (Jha et al. 2012, Bellos 2012), αν και υπάρχουν μειονεκτήματα όπως ότι δεν εξασφαλίζεται η αμεροληψία των διάφορων γεγονότων σε μία περιοχή από τη στιγμή που έχουν συντελεστεί διάφορες αλλαγές στην περιοχή (υποδομές, τοπογραφία, κ.λπ.), σε πολλές περιπτώσεις το πλημμυρικό γεγονός είναι μοναδικό (π.χ. θραύση φράγματος), ενώ η έλλειψη μετρήσεων ταχυτήτων ροής μπορεί να οδηγήσει στην αλλοίωση του προσδιορισμού της πλημμυρικής διακινδύνευσης, εφόσον αυτή εξαρτάται τόσο από το μέγιστο βάθος, όσο και από τη μέγιστη ταχύτητα ροής.

Οι Carloni and Mazzanti (1964) κατέγραψαν τη μέγιστη στάθμη του νερού και προσδιόρισαν τα όρια της πληγείσας περιοχής στην κοιλάδα του ποταμού Piave (Ιταλία), έπειτα από το πλημμυρικό γεγονός

που προέκυψε από την υπερπήδηση του φράγματος Vajont το 1963. Οι Bosa and Petti (2011) προσομοίωσαν αυτό το πλημμυρικό γεγονός και σύγκριναν τα αριθμητικά αποτελέσματα του μοντέλου τους με τις ιστορικές καταγραφές.

Οι ανώτατες αρχές της Ταϊβάν (Taipei City Government 2001) προσδιόρισαν τα όρια της πληγείσας περιοχής έπειτα από γεγονός αστραπιαίας πλημμύρας που συνέβη στην πόλη της Ταϊβάν έπειτα από τον τυφώνα Nari, το Σεπτέμβριο του 2001. Ο όγκος άντλησης του νερού από το υπόγειο σιδηροδρομικό δίκτυο της πόλης, καθώς και η χρονική στιγμή της αστοχίας των εν λόγω αντλιών έδωσε μία πληροφορία για τη χρονική εξέλιξη του πλημμυρικού αυτού γεγονότος (Chen et al. 2005).

Οι Mignot et al. (2005) συνέλλεξαν δεδομένα από τις αρχές του δήμου της Νιμ (Γαλλία) για την πλημμύρα που έπληξε την πόλη τον Οκτώβριο του 1988, με στόχο την αριθμητική της προσομοίωση. Τα δεδομένα ήταν τα όρια της πληγείσας περιοχής και μετρήσεις μέγιστων βαθών ροής σε διάφορα σημεία. Επίσης προσομοίωσαν το εν λόγω πλημμυρικό γεγονός με το αριθμητικό τους μοντέλο και σύγκριναν τα αριθμητικά αποτελέσματα με τις ιστορικές καταγραφές.

Οι Alcrudo and Mulet (2007) παρουσίασαν στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Προγράμματος IMPACT Project το πλημμυρικό γεγονός που συνέβη στην πόλη Sumacárcel έπειτα από την αστοχία του φράγματος Tous στον ποταμό Jucar. Οι ιστορικές καταγραφές αφορούν τα μέγιστα βάθη ροής σε διάφορα σημεία μέσα στην πόλη, καθώς και πληροφορία σε μερικά από αυτά για την χρονική εξέλιξη της πλημμύρας. Τα δεδομένα προήλθαν από έρευνα πεδίου (συνεντεύξεις κατοίκων) και την υπηρεσία του ισπανικού υπουργείου Δημοσίων Έργων CEDEX (Centre for Studies and Experimentation of the Ministry of Public Works), (CEDEX 1984, CEDEX 1989a, CEDEX 1989b)

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το θεωρητικό υπόβαθρο, πάνω στο οποίο στηρίζεται το αριθμητικό μοντέλο FLOW-R2D. Σε πρώτη φάση παρατίθενται οι θεμελιώδεις Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις της Ρευστομηχανικής γνωστές ως Navier-Stokes, η ολοκλήρωση αυτών κατά το βάθος ροής και ο τελικός μετασχηματισμός αυτών, στις Δισδιάστατες Εξισώσεις Αβαθών Υδάτων (two dimensional Shallow Water Equations, 2D-SWE). Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να περιγράψουν την ασταθή ανομοιόμορφη ροή του νερού με ελεύθερη επιφάνεια.

Στην ασταθή ροή (unsteady flow), τα υδραυλικά στοιχεία της ροής (βάθος και ταχύτητα - παροχή του νερού) μεταβάλλονται σε συνάρτηση με το χρόνο σε αντίθεση με τη σταθερή (steady flow), ενώ στην ανομοιόμορφη (non-uniform flow) ροή τα υδραυλικά στοιχεία της ροής μεταβάλλονται σε συνάρτηση με το χώρο, σε αντίθεση με την ομοιόμορφη ροή (uniform flow). Είναι προφανές ότι στη φύση, η ροή του νερού είναι κατά κύριο λόγο ασταθής ανομοιόμορφη.

Παρατίθενται επίσης οι βασικές έννοιες και το θεωρητικό υπόβαθρο, πάνω στις οποίες στηρίζεται η εμπειρική εκτίμηση των διατμητικών τάσεων (τριβές πυθμένα) που αναπτύσσονται στον πυθμένα και αντιστέκονται στη ροή του ρευστού, ενώ παρουσιάζονται συνοπτικά και τα διάφορα εμπειρική μοντέλα προσομοίωσης των τριβών πυθμένα.

Στη συνέχεια, γίνεται μία σύντομη επισκόπηση των βασικών μεθόδων αριθμητικής ανάλυσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επίλυση των 2D-SWE, ενώ γίνεται εμβάθυνση στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών και στο αριθμητικό σχήμα McCormack, το οποίο και χρησιμοποιείται στην ανάπτυξη του αριθμητικού μοντέλου FLOW-R2D.

2.2 Ολοκλήρωση Εξισώσεων Navier-Stokes

Οι εξισώσεις Navier-Stokes είναι απόρροια της Αρχής Διατήρησης Μάζας πρώτου και του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα (Αρχή Διατήρησης της Ορμής), οι οποίοι νόμοι όταν εφαρμόζονται σε έναν "όγκο ελέγχου" ροής νερού (control volume) σε ένα σύστημα συντεταγμένων x - y - z , στο οποίο οι οριζόντιοι άξονες x και y είναι παράλληλοι με τον πυθμένα και ο κάθετος άξονας z παράλληλος με το βάθος ροής, έχουν ως εξής (Chaudhry 2008):

Εξίσωση Συνέχειας

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

Εξισώσεις Ορμής

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 w \quad (2.4)$$

όπου:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.5)$$

ενώ u , v , w οι συνιστώσες της ταχύτητας κατά τις διευθύνσεις x , y , z αντίστοιχα, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, μ η δυναμική συνεκτικότητα, p η πίεση και ρ η πυκνότητα του ρευστού.

Θεωρώντας αμελητέα την ταχύτητα ροής w στον κατακόρυφο άξονα z σε σχέση με τους οριζόντιους άξονες x και y , ολοκληρώνοντας κατά βάθος τις Εξ. (2.1) έως (2.5), θεωρώντας ότι το στην άνω επιφάνεια ροής η πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική (ροή με ελεύθερη επιφάνεια), ότι ο πυθμένας δε μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το χρόνο και ότι η κατανομή των πιέσεων είναι υδροστατική, οι παραπάνω εξισώσεις μετασχηματίζονται σε συντηρητική μορφή:

Εξίσωση Συνέχειας

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}d)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}d)}{\partial y} = 0 \quad (2.6)$$

Εξισώσεις Ορμής

$$\frac{\partial(\bar{u}d)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}^2 d)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{v}d)}{\partial y} = \left(g_x - g_z \frac{\partial d}{\partial x}\right)gd + \int_{Z_b}^{Z_s} \left(\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u\right) dz \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial(\bar{v}d)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{v}^2 d)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{v}d)}{\partial y} = \left(g_y - g_z \frac{\partial d}{\partial y}\right)gd + \int_{Z_b}^{Z_s} \left(\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v\right) dz \quad (2.8)$$

όπου d το βάθος ροής, \bar{u} και \bar{v} οι μέσες ως προς το βάθος ταχύτητες ροής, Z_s , και Z_b οι συνεταγμένες στον κατακόρυφο άξονα z στο άνω όριο (surface) και στο κάτω όριο αντίστοιχα (bottom).

Όσον αφορά τους τανυστές των τάσεων, στην τυρβώδη ροή η δυναμική συνεκτικότητα αντικαθιστάται από συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στο επίπεδο x - y είναι διαφορετικές από τις αντίστοιχες που εμφανίζονται στα επίπεδα x - z και y - z . Με βάση τα παραπάνω αυτοί μπορούν να γραφούν:

$$\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u \xrightarrow{\mu\epsilon\tau} \frac{\epsilon_{xy}}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) + \frac{\epsilon_{zx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.9)$$

$$\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v \xrightarrow{\mu\epsilon\tau} \frac{\epsilon_{xy}}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) + \frac{\epsilon_{zy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2.10)$$

όπου ε_{xy} συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας (eddy or turbulent viscosity). Αν θεωρηθεί ότι οι τάσεις που εμφανίζονται στα επίπεδα x - z και y - z είναι τάξης μεγέθους μεγαλύτερες από τις υπόλοιπες, οπότε οι τελευταίες θεωρούνται αμελητέες, η ολοκλήρωση των τανυστών παίρνει τη μορφή:

$$\int_{Z_b}^{Z_s} \left(\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u \right) dz = \frac{\tau_s^x}{\rho} - \frac{\tau_b^x}{\rho} \quad (2.11)$$

$$\int_{Z_b}^{Z_s} \left(\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 v \right) dz = \frac{\tau_s^y}{\rho} - \frac{\tau_b^y}{\rho} \quad (2.12)$$

όπου τ_s η διατμητική τάση που εμφανίζεται στο άνω όριο της ροής (ελεύθερη επιφάνεια του νερού) και τ_b η διατμητική τάση που εμφανίζεται στο κάτω όριο της ροής (πυθμένας) στα οριζόντια επίπεδα x και y . Επειδή η διατμητική τάση που μπορεί να εμφανιστεί στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού κατά κύριο λόγο προέρχεται από τον άνεμο, αυτή μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα όταν προσομοιώνεται το φαινόμενο της πλημμυρικής ροής σε κλίμακα υδατορέματος, ποταμού ή λεκάνης απορροής. Για την προσομοίωση των τάσεων που εμφανίζονται στον πυθμένα χρησιμοποιούνται εμπειρικές προσεγγίσεις, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Για να μετασχηματιστούν οι Εξ. (2.6) έως (2.8) από το σύστημα συντεταγμένων που βρίσκονται στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, θα πρέπει να περιστραφεί αυτό το σύστημα καταλλήλως. Με τους απαραίτητους γεωμετρικούς μετασχηματισμούς (Chaudhry 2008) και συνδυάζοντας τις Εξ. (2.11)-(2.12), οι Εξ. (2.6) έως (2.8) μπορούν να γραφούν με τον παρακάτω τρόπο, με σφάλματα μικρότερα του 3% σε κλίσεις πυθμένα μικρότερες από 18%:

Εξίσωση Συνέχειας

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (2.13)$$

Εξισώσεις Ορμής

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = ghS_o^x - \frac{\tau_b^x}{\rho} \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = ghS_o^y - \frac{\tau_b^y}{\rho} \quad (2.15)$$

όπου u και v πλέον οι μέσες ταχύτητες ροής ως προς το βάθος στις οριζόντιες διευθύνσεις x και y αντίστοιχα, h το βάθος ροής στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, ενώ ο όρος S_o εκφράζει την κλίση του πυθμένα στις οριζόντιες διευθύνσεις x και y αντίστοιχα:

$$S_o^x = -\frac{\partial Z_b}{\partial x} \quad (2.16)$$

$$S_o^y = -\frac{\partial Z_b}{\partial y} \quad (2.17)$$

Θεωρώντας ότι είναι δυνατόν στην Εξίσωση Συνέχειας να εισαχθούν όροι εισροής και εκροής στο (source and sink terms) r και i αντίστοιχα και ότι η επίδραση αυτών είναι αμελητέα στις Εξισώσεις Ορμής λόγω μικρών ταχυτήτων, το παραπάνω σύστημα Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων μετασχηματίζεται στην τελική μορφή 2D-SWE, το οποίο και επιλύεται αριθμητικά με το μοντέλο FLOW-R2D:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = D \quad (2.18)$$

όπου

$$W = \begin{vmatrix} h \\ uh \\ vh \end{vmatrix}, F = \begin{vmatrix} uh \\ u^2h + 0.5gh^2 \end{vmatrix}, G = \begin{vmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + 0.5gh^2 \end{vmatrix}, D = \begin{vmatrix} r - i \\ ghS_0^x - \frac{\tau_b^x}{\rho} \\ ghS_0^y - \frac{\tau_b^y}{\rho} \end{vmatrix} \quad (2.19)$$

2.3 Εκτίμηση διατμητικών τάσεων πυθμένα

Όπως προαναφέρθηκε, η εκτίμηση των διατμητικών τάσεων που σχηματίζονται κατά την κίνηση του ρευστού στη διεπιφάνεια μεταξύ του ρευστού και της στερεής επιφάνειας πάνω στην οποία κινείται αυτό και οι οποίες αντιστέκονται σε αυτήν την κίνηση, είναι κυρίως εμπειρική. Οι πιο γνωστές προσεγγίσεις για την προσομοίωση αυτών των διατμητικών τάσεων (τριβές πυθμένα) είναι οι εξισώσεις Manning, Chézy και Darcy-Weisbach (Chanson 2004). Όσον αφορά στην εξίσωση Manning, οι διατμητικές αυτές τάσεις ή αλλιώς τριβές πυθμένα μπορούν να υπολογιστούν με την παρακάτω σχέση:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \frac{gn^2}{R^{1/3}} V^2 \quad (2.20)$$

όπου R η υδραυλική ακτίνα, n ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning και V η μέση ταχύτητα.

Αντίστοιχα για την εξίσωση Chézy:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \frac{g}{C^2} V^2 \quad (2.21)$$

όπου C ο συντελεστής τραχύτητας κατά Chézy.

Τέλος, για την εξίσωση Darcy-Weisbach:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \frac{f}{8} V^2 \quad (2.22)$$

όπου f ο συντελεστής τραχύτητας κατά Darcy-Weisbach.

Το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο στηρίζεται αυτή η εμπειρική εκτίμηση, βασίζεται στη θεωρία των οριακών στιβάδων (boundary layer theory), σύμφωνα με την οποία όταν ένα ρευστό κινείται πάνω σε στερεή επιφάνεια με ορισμένη ταχύτητα, τα μόρια του ρευστού που έρχονται σε επαφή με την εν λόγω επιφάνεια (οριακή στιβάδα) προσκολλούνται πάνω σε αυτή, οπότε και η ταχύτητα αυτών μηδενίζεται. (Τερζίδης 1997). Το μήκος των οριακών αυτών στιβάδων μεταβάλλεται ως προς το χρόνο μέχρι η ροή να θεωρηθεί πλήρως αναπτυγμένη, για την εμπειρική όμως εκτίμηση των διατμητικών τάσεων του πυθμένα, θεωρείται ότι το μήκος αυτό έχει μονιμοποιηθεί, παρόλο που υπεισέρχεται σε εξισώσεις ασταθούς ροής, όπως είναι οι 2D-SWE.

Πριν παρουσιαστεί ο κύριος όγκος των βασικών εξισώσεων, παρατίθεται ο τρόπος υπολογισμού δύο βασικών εννοιών που θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω. Ο πρώτος αφορά την ταχύτητα σύρσης:

$$V_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \quad (2.23)$$

και ο δεύτερος τον αριθμό Reynolds ο οποίο δείχνει την αναλογία μεταξύ δυνάμεων λόγω αδράνειας και δυνάμεων λόγω συνεκτικότητας:

$$Re_L = \frac{VL}{\nu_s} \quad (2.24)$$

όπου V η ταχύτητα ροής, ν_s η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού και L το χαρακτηριστικό μήκος της ροής, όπως είναι π.χ. το βάθος ροής ή η διάμετρος του κυκλικού αγωγού.

Εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης ορμής σε σταθερή ανομοιόμορφη ροή μεταξύ δύο θέσεων, η διατμητική τάση που σχηματίζεται στον πυθμένα είναι δυνατόν να υπολογιστεί με την παρακάτω σχέση (Τερζίδης 1997) για οποιαδήποτε περίπτωση ροής (ροή με ελεύθερη επιφάνεια και ροή υπό πίεση):

$$\frac{\tau_b}{\rho} = gRS_f \quad (2.25)$$

όπου τ_b η διατμητική τάση, S_f η κλίση της γραμμής ενέργειας ή η κλίση του ολικού φορτιού και R η υδραυλική ακτίνα.

Όσον αφορά στη στρωτή ροή, η κατανομή των διατμητικών τάσεων στον κατακόρυφο άξονα z , παράλληλου με το βάθος ροής του ρευστού, μπορεί να υπολογιστεί:

$$\frac{\tau}{\rho} = \nu_s \frac{dV}{dz} \quad (2.26)$$

όπου τ η διατμητική τάση και V η ταχύτητα ροής πάνω στον κατακόρυφο άξονα z .

Αν θεωρηθούν δύο περιπτώσεις ροής, όπου στη μεν πρώτη το ρευστό κινείται υπό πίεση σε αγωγό κυκλική διατομής διαμέτρου D και στη δεύτερη περίπτωση κινείται με ελεύθερη επιφάνεια σε αγωγό απείρου πλάτους και βάθους ροής h , τότε η υδραυλική ακτίνα για τη μεν πρώτη περίπτωση είναι $R=D/4$ και για τη δεύτερη $R=h$. Αν κοντά στα τοιχώματα του πυθμένα ισχύει $\tau=\tau_b$, εξισώνοντας τις Εξ. (2.25), (2.26) και ολοκληρώνοντας τα αποτελέσματα αυτής της εξίσωσης ως προς τον κατακόρυφο άξονα z , το προφίλ των ταχυτήτων στη στρωτή ροή κατά μήκος αυτού του άξονα προκύπτει για τη ροή υπό πίεση σε αγωγό κυκλικής διατομής και για τη ροή με ελεύθερη επιφάνεια σε αγωγό απείρου πλάτους αντίστοιχα:

$$V = \frac{gS_f}{\nu_s} \left(\frac{Dz - z^2}{4} \right) \quad (2.27)$$

$$V = \frac{gS_f}{\nu_s} \left(\frac{2hz - z^2}{2} \right) \quad (2.28)$$

Παρατηρείται ότι στη στρωτή ροή, η κατανομή των ταχυτήτων ως προς τον κατακόρυφο άξονα z είναι παραβολική. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι μέσες ταχύτητες ως προς την κυκλική διατομή διαμέτρου D για τη ροή υπό πίεση σε αγωγό κυκλικής διατομής και ως προς ορθογωνική διατομή πλάτους 1 m και βάθους h για τη ροή με ελεύθερη επιφάνεια σε αγωγό απείρου πλάτους:

$$\bar{V} = \frac{gS_f D^2}{\nu_s 32} \quad (2.29)$$

$$\bar{V} = \frac{g S_f h^2}{v_s \cdot 3} \quad (2.30)$$

Στην τυρβώδη ροή ισχύει σύμφωνα με τη θεωρία του Prandtl:

$$\frac{\tau}{\rho} = l^2 \left(\frac{dV}{dz} \right)^2 \quad (2.31)$$

όπου l το μήκος ανάμιξης (mixing length). Το μήκος αυτό μπορεί να εκτιμηθεί ως $l = \kappa z$, όπου κ σταθερά (σταθερά Von Karman), ίση περίπου με ~ 0.41 και z είναι το μήκος πάνω στον κατακόρυφο άξονα z .

Αν κοντά στα τοιχώματα του πυθμένα ισχύει $\tau = \tau_b$, εξισώνοντας τα δεύτερα μέλη των Εξ. (2.25), (2.31), ολοκληρώνοντας τα αποτελέσματα αυτής της εξίσωσης ως προς τον κατακόρυφο άξονα z και χρησιμοποιώντας το μέγεθος της ταχύτητας σύρσης της Εξ. (2.23), το προφίλ των ταχυτήτων στην τυρβώδη ροή κατά μήκος αυτού του άξονα προκύπτει και για τις δύο περιπτώσεις ροής (ροή υπό πίεση σε αγωγό κυκλικής διατομής και ροή με ελεύθερη επιφάνεια σε αγωγό απείρου πλάτους):

$$V = \frac{V_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2.32)$$

όπου z_0 η απόσταση πάνω στον κατακόρυφο άξονα z πάνω από τον πυθμένα, όπου η ταχύτητα ροής θεωρείται μηδενική. Η λογαριθμική αυτή κατανομή των ταχυτήτων πάνω στον κατακόρυφο άξονα z ονομάζεται και ως "νόμος του τοίχου" (law of the wall). Στη συνέχεια υπολογίζονται οι μέσες ταχύτητες ως προς την κυκλική διατομή διαμέτρου D για τη ροή υπό πίεση σε αγωγό κυκλικής διατομής και ως προς ορθογωνική διατομή πλάτους 1 m και βάθους h για τη ροή με ελεύθερη επιφάνεια σε αγωγό απείρου πλάτους:

$$\bar{V} = \frac{V_*}{\kappa} \ln \left(\frac{1}{e^{1.5}} \frac{D}{z_0} \right) \quad (2.33)$$

$$\bar{V} = \frac{V_*}{\kappa} \ln \left(\frac{1}{e} \frac{h}{z_0} \right) \quad (2.34)$$

Στην πραγματικότητα βέβαια, κατά την κίνηση του ρευστού σε στερεή επιφάνεια, η τύρβη δεν αναπτύσσεται σε όλο το χαρακτηριστικό μήκος της ροής αλλά σε στιβάδες (layers). Εμφανίζεται υποστιβάδα ανάντη της στερεής επιφάνειας πάνω στην οποία κινείται το ρευστό ύψους δ , όπου η ροή είναι στρωτή και το προφίλ της ταχύτητας ροής ακολουθεί την παραβολοειδή κατανομή. Πάνω από αυτή τη στιβάδα αναπτύσσεται η τυρβώδης ροή. Αν απλοποιηθεί η παραβολική κατανομή της ταχύτητας σε μία απλή γραμμική σχέση (Σχήμα 2.1), τότε η ταχύτητα ροής στη θέση δ με βάση την κατανομή της στρωτής ροής όπως παρατίθεται στις Εξ. (2.27) και (2.28), μπορεί να προσδιοριστεί και για τις δύο περιπτώσεις (ροή υπό πίεση σε αγωγό κυκλικής διατομής και ροή με ελεύθερη επιφάνεια σε αγωγό απείρου πλάτους):

$$V_\delta = V_*^2 \frac{\delta}{v_s} \quad (2.35)$$

Αντίστοιχα, η ταχύτητα ροής στη θέση δ με βάση την κατανομή της τυρβώδους ροής όπως παρατίθεται στην Εξ. (2.32), μπορεί να προσδιοριστεί επίσης και για τις δύο περιπτώσεις (ροή υπό πίεση σε αγωγό κυκλικής διατομής και ροή με ελεύθερη επιφάνεια σε αγωγό απείρου πλάτους):

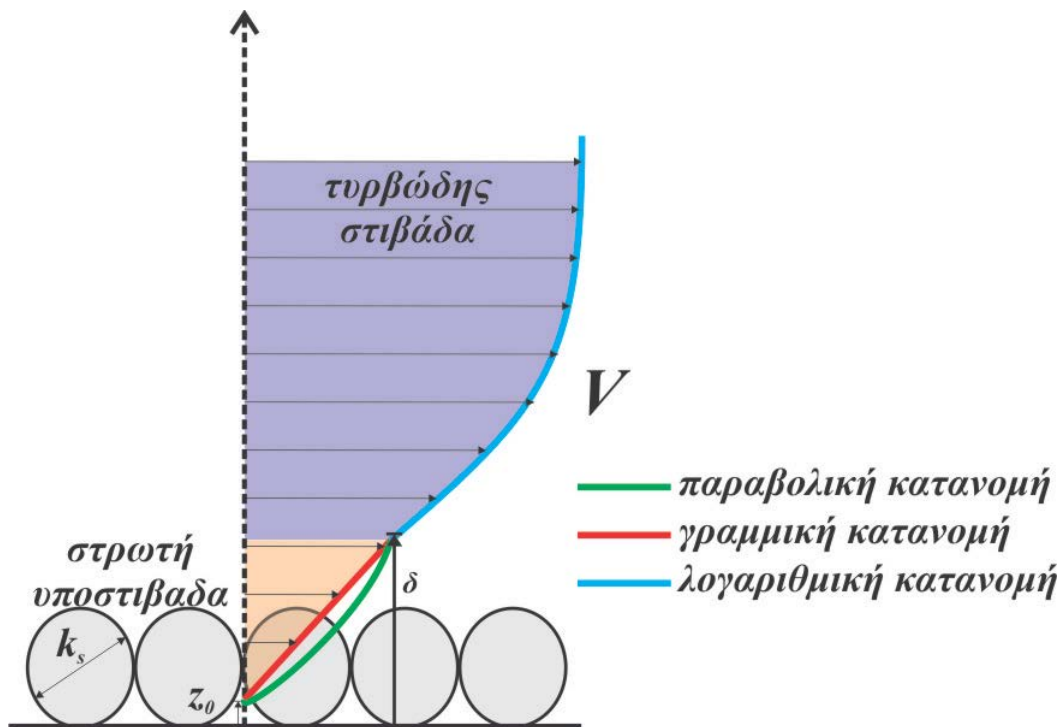
$$V_\delta = \frac{V_*}{\kappa} \ln\left(\frac{\delta}{z_0}\right) \quad (2.36)$$

Εξισώνοντας τα δεξιά μέλη των Εξ. (2.35) και (2.36):

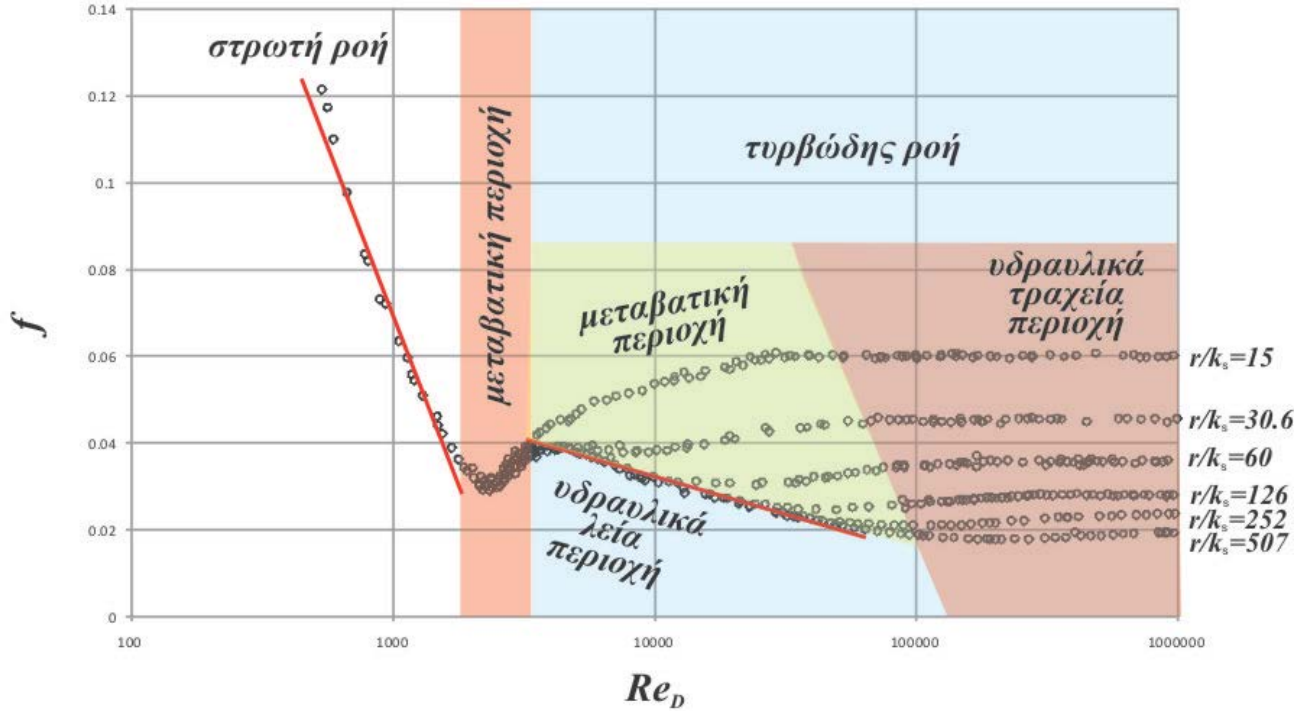
$$V_* \frac{\delta}{v_s} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{\delta}{z_0}\right) \quad (2.37)$$

Επομένως για την εκτίμηση των διατμητικών τάσεων το πρόβλημα μετατρέπεται στην εκτίμηση που διέπει τη σχέση μεταξύ του μήκους της στιβάδας δ που προσδιορίζει το μήκος της στρωτής ροής και του μήκους z_0 όπου και μηδενίζεται η ταχύτητα ροής. Η εκτίμηση αυτή έχει γίνει πειραματικά, με τα πειράματα του Nikuradse (Nikuradse 1933). Στα εν λόγω πειράματα που έγιναν σε ροή υπό πίεση σε αγωγούς με κυκλική διατομή, έγινε συσχέτιση του συντελεστή τραχύτητας f από τη σχέση Darcy-Weisbach σε συνάρτηση με τη σχετική τραχύτητα του αγωγού r/k_s , όπου r η ακτίνα του αγωγού και k_s , το ύψος τραχύτητας. Από τα πειράματα προέκυψαν οι εξής περιοχές για τη ροή (Σχήμα 2.2), αν οριστεί η ποσότητα $Re_w = V_* k_s / v_s$:

- Στρωτή ροή ($Re_D < \sim 2100$)
- Μεταβατική περιοχή από στρωτή σε τυρβώδη ροή ($\sim 2100 < Re_D < \sim 4300$)
- Υδραυλικά λεία ροή (τυρβώδης) ($\sim 5 < Re_w$)
- Μεταβατική περιοχή από υδραυλικά λεία σε υδραυλικά τραχεία ροή (τυρβώδης) ($\sim 5 < Re_w < \sim 70$)
- Υδραυλικά τραχεία ροή (τυρβώδης) ($Re_w > \sim 70$)



Σχήμα 2.1 Στιβάδες στο προφίλ ταχύτητας ροής



Σχήμα 2.2 Ταξινόμηση περιοχών ροής σε σχέση με τον συντελεστή τραχύτητας f

2.4 Συσχέτιση πειραματικών δεδομένων Nikuradse

Αν και υπάρχει μεγάλος όγκος σχετικής βιβλιογραφίας όπου με βάση τα πειραματικά δεδομένα του Nikuradse συσχετίζεται το μήκος της στιβάδας δ και του μήκους z_0 , στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής επιχειρήθηκε ανάλογη διαδικασία. Συγκεκριμένα, συσχετίστηκαν οι ποσότητες για την τουρβώδη περιοχή ($Re_D > 4300$) των δεδομένων του Nikuradse (Σχήμα 2.3):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} - 2 \log\left(\frac{r}{k_s}\right) \sim \log(Re_w) \quad (2.38)$$

Βρέθηκε ότι για την περιοχή της υδραυλικά λείας ροής ($Re_w = 4.24 \approx 5$) η συσχέτιση είναι γραμμική της μορφής $y = ax + b$, όπου $a = 2.07$ και $b = 0.6$. Επομένως, για την περιοχή της υδραυλικά λείας ροής ισχύει με βάση τις Εξ. (2.22), (2.23) και (2.38):

$$\frac{1}{\sqrt{8}} \frac{\bar{V}}{V_*} - 2 \log\left(\frac{r}{k_s}\right) = 2.07 \log\left(\frac{V_* k_s}{\nu_s}\right) + 0.6 \quad (2.39)$$

Θεωρώντας $2.07 \approx 2.00$, η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται:

$$\frac{1}{\sqrt{8}} \frac{\bar{V}}{V_*} = 2 \log\left(\frac{r V_*}{\nu_s} 10^{0.3}\right) = \frac{2}{\ln(10)} \ln\left(\frac{r V_*}{\nu_s} 10^{0.3}\right) \Rightarrow \bar{V} = \frac{2\sqrt{8}}{\ln(10)} \ln\left(\frac{r V_*}{\nu_s} 10^{0.3}\right) \quad (2.40)$$

Θεωρώντας επίσης ότι ισχύει:

$$\frac{2\sqrt{8}}{\ln(10)} \approx \frac{1}{\kappa} \approx 2.44 \div 2.46 \quad (2.41)$$

και εξισώνοντας τα δεξιά μέλη των Εξ. (2.33) και (2.40) εφόσον τα πειράματα έγιναν σε αγωγό υπό πίεση κυκλικής διατομής:

$$\frac{rV_*}{v_s} 10^{0.3} = \frac{r}{e^{1.5z_0}} \Rightarrow \frac{1}{z_0} \approx 8.94 \frac{V_*}{v_s} \quad (2.42)$$

Εξισώνοντας επίσης τις Εξ. (2.37) και (2.42):

$$\frac{V_*\delta}{v_s} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{\delta}{z_0}\right) = \frac{1}{\kappa} \ln\left(8.94 \frac{V_*\delta}{v_s}\right) \quad (2.43)$$

όπου με δοκιμές προκύπτει ότι:

$$\frac{V_*\delta}{v_s} \approx 11.25 \Rightarrow \frac{1}{z_0} \approx \frac{100.6}{\delta} \quad (2.44)$$

Για την περιοχή της υδραυλικά τραχείας ροής ($Re_w=73.28 \approx 70$), βρέθηκε ότι μπορεί να προσαρμοστεί ευθεία της μορφής $y=a$ όπου $a=1.74$. Επομένως, για την εν λόγω περιοχή ισχύει με βάση τις Εξ. (2.22), (2.23) και (2.38):

$$\frac{1}{\sqrt{8}} \frac{\bar{V}}{V_*} - 2 \log\left(\frac{r}{k_s}\right) = 1.74 \Rightarrow \bar{V} = \frac{2\sqrt{8}}{\ln(10)} \ln\left(\frac{r}{k_s} 10^{0.87}\right) \quad (2.45)$$

Εξισώνοντας τις Εξ. (2.33) και (2.45) εφόσον τα πειράματα έγιναν σε αγωγό υπό πίεση κυκλικής διατομής:

$$\frac{r}{k_s} 10^{0.87} = \frac{r}{e^{1.5z_0}} \Rightarrow \frac{1}{z_0} \approx \frac{33.2}{k_s} \quad (2.46)$$

Μετά από σχετικό έλεγχο, οι σχέσεις των Εξ. (2.42) και (2.46) είναι παραπλήσιες με ανάλογες που υπάρχουν στη σχετική βιβλιογραφία (π.χ. Bates 2005).

Από τα πειραματικά δεδομένα επιβεβαιώνεται επίσης και η θεωρητικός προσδιορισμός του συντελεστή τριβής f κατά Darcy-Weisbach για την περιοχή της στρωτής ροής, ο οποίος για τη μεν ροή υπό πίεση σε αγωγό κυκλικής διατομής υπολογίζεται σύμφωνα με τις Εξ. (2.22), (2.23) και (2.29):

$$f = 8 \frac{V_*^2}{\bar{V}^2} = \frac{64}{Re_D} \quad (2.47)$$

και για τη δε ροή με ελεύθερη επιφάνεια σε αγωγό απείρου πλάτους σύμφωνα με τις Εξ. (2.22), (2.23) και (2.30):

$$f = 8 \frac{V_*^2}{\bar{V}^2} = \frac{24}{Re_h} \quad (2.48)$$

Συσχετίζοντας με βάση τα πειραματικά δεδομένα του Nikuradse το συντελεστή τραχύτητας f και τον αριθμό Reynolds Re_D για στρωτή ροή ($Re_D < 2000$) βρέθηκε ότι:

$$f = \frac{65.16}{Re_D} \quad (2.49)$$

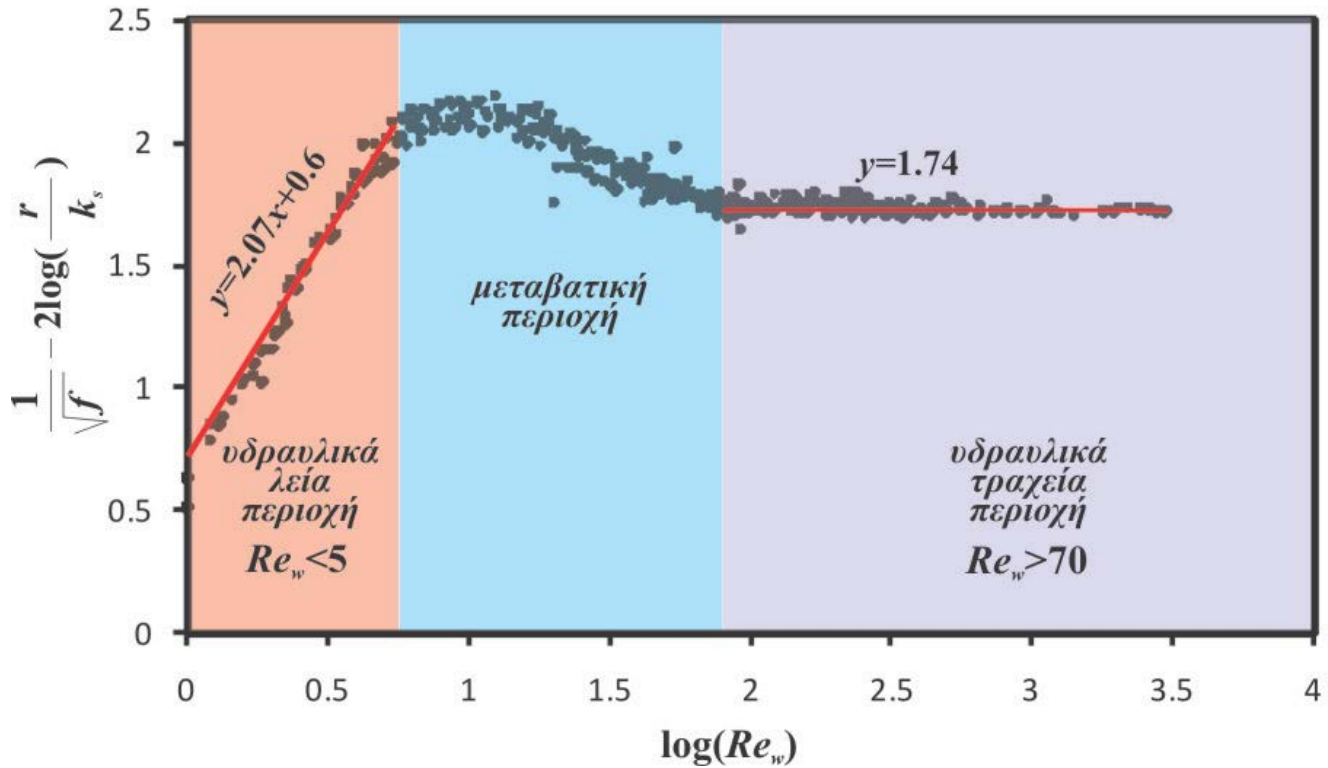
που είναι πολύ κοντά με την Εξ. (2.47), εφόσον τα πειράματα έγιναν σε αγωγό υπό πίεση κυκλικής διατομής.

Τέλος, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής παρουσιάζεται συσχέτιση του συντελεστή τραχύτητας f σε σχέση με τον αριθμό Reynolds Re_D για την περιοχή της λείας υδραυλικά ροής στην περίπτωση της ροής υπό πίεση σε αγωγό κυκλικής διατομής:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left[0.75 \ln \left(\frac{Re_D}{5.37} \right) \right] \quad (2.50)$$

και αντίστοιχη σχέση για την περιοχή της τραχείας υδραυλικά ροής σε σχέση με τη διάμετρο του κυκλικού αγωγού D και του ύψους τραχύτητας k_s :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left[0.88 \ln \left(6.82 \frac{D}{k_s} \right) \right] \quad (2.51)$$



Σχήμα 2.3 Συσχέτιση δεδομένων Nikuradse για τυρβώδη ροή

2.5 Οπισθέλκουσα δύναμη

Γενικότερα με τον όρο των διατμητικών τάσεων που υπεισέρχονται στις 2D-SWE είναι δυνατόν να συνυπολογιστεί η αντίσταση που προκαλείται στη ροή από οποιαδήποτε αντικείμενο, επιπρόσθετη με την αντίσταση που προκαλείται από την κίνηση του εκάστοτε ρευστού σε μία στερεή επιφάνεια και η οποία ονομάζεται οπισθέλκουσα δύναμη (drag force). Η γενική μορφή υπολογισμού αυτής της οπισθέλκουσας δύναμης είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\tau_f}{\rho} = \frac{1}{2} C_D A V^2 \quad (2.52)$$

όπου A το ενεργό εμβαδό της επιφάνειας που αντιστέκεται στη ροή και C_D συντελεστής, ο οποίος εξαρτάται από το σχήμα του αντικειμένου, τη θέση αυτού σε σχέση με τη διεύθυνση ροής, τον αριθμό Reynolds και τη σχετική του τραχύτητα. Στη σχετική βιβλιογραφία (π.χ. Munson et al. 2009) δίνονται οι συντελεστές C_D σε σχέση με τα μεγέθη που εξαρτάται αυτός, αλλά για συγκεκριμένα σχήματα (π.χ. σφαίρα, κύλινδρος κ.λπ.). Όπως μπορεί όμως να γίνει αντιληπτό, στις πραγματικές συνθήκες πλημμυρικής ροής είναι πρακτικά αδύνατο να υπάρχει τέτοιου είδους πληροφορία.

Μία ενδιαφέρουσα προσέγγιση αφορά στην προσομοίωση της ροής σε πεδίο όπου υπάρχει βλάστηση. Η βασική παραδοχή είναι ότι το κάθε στοιχείο της βλάστησης θεωρείται κυλινδρικού σχήματος (είτε είναι δέντρο, είτε γρασίδι). Στην περίπτωση όπου τα στοιχεία της βλάστησης είναι άκαμπτα και δεν είναι βυθισμένα στο νερό (emerged vegetation), το προφίλ της ταχύτητας μπορεί να διακριθεί σε δύο στιβάδες (Σχήμα 2.4), ενώ η διατμητική τάση μπορεί να υπολογιστεί:

$$\frac{\tau_v}{\rho} = \frac{1}{2} C_D N d h \bar{V}^2 \quad (2.53)$$

όπου C_D συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης, N ο αριθμός των στοιχείων της βλάστησης, d η διάμετρος του στοιχείου της βλάστησης, h το βάθος ροής και \bar{V} η μέση ταχύτητα ροής ως προς το βάθος ροής.

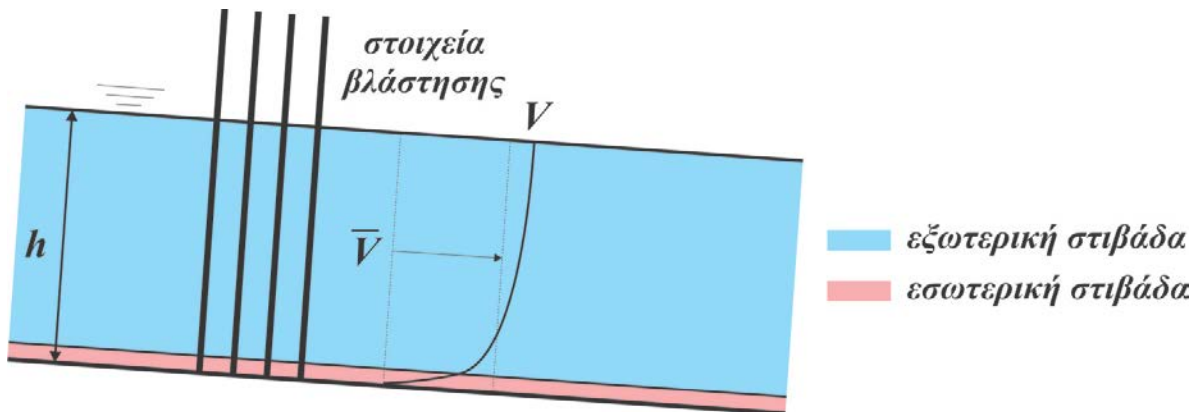
Στην περίπτωση όπου τα στοιχεία της βλάστησης είναι άκαμπτα και είναι βυθισμένα στο νερό (submerged vegetation), το προφίλ της ταχύτητας μπορεί να διακριθεί σε τρεις στιβάδες (Σχήμα 2.5), ενώ η διατμητική τάση μπορεί να υπολογιστεί:

$$\frac{\tau_v}{\rho} = \frac{1}{2} C_D N d \lambda V_u^2 \quad (2.54)$$

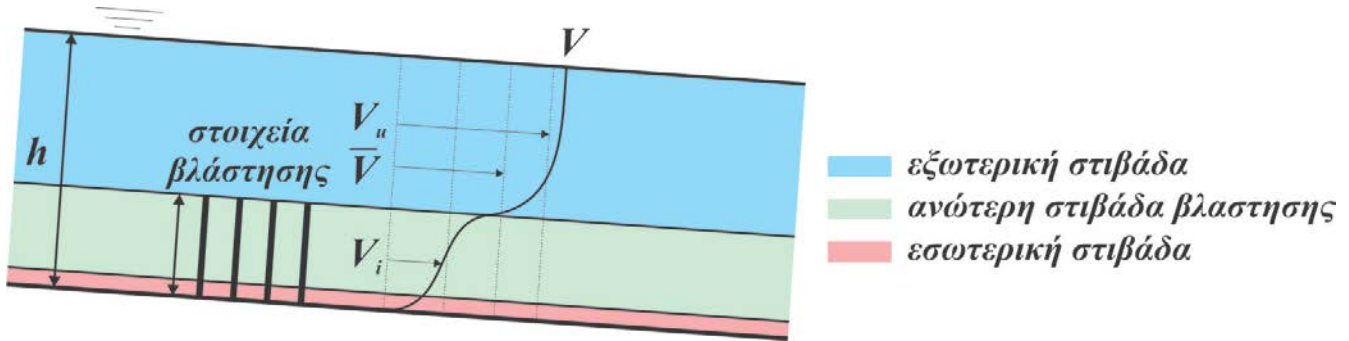
όπου λ το μήκος του στοιχείου βλάστησης και V_u η μέση ταχύτητα ροής ως προς το βάθος της εξωτερικής στιβάδας, η οποία εκτιμάται (Stone and Shen 2002):

$$V_u = \frac{V_i}{1 - d\sqrt{N}} \quad (2.55)$$

όπου V_i η μέση ταχύτητα ροής ως προς το βάθος της ανώτερης στιβάδας βλάστησης.



Σχήμα 2.4 Προφίλ ταχύτητας ροής σε μη βυθισμένη βλάστηση



Σχήμα 2.5 Προφίλ ταχύτητας ροής σε βυθισμένη βλάστηση

2.6 Αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων

Οι Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις διακρίνονται σε υπερβολικές, παραβολικές και ελλειπτικές διαφορικές εξισώσεις. Η κατηγοριοποίηση αυτή μπορεί να γίνει μαθηματικά θεωρώντας μία Μερική Διαφορική Εξίσωση δευτέρου βαθμού σε γενική μορφή:

$$A \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} + C \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + D \frac{\partial f}{\partial x} + E \frac{\partial f}{\partial y} + Gf + H = 0 \quad (2.56)$$

όπου f συνάρτηση $f(x,y)$ δύο μεταβλητών x, y και A, B, C, D, E, G, H είναι είτε σταθερές είτε συναρτήσεις των μεταβλητών x, y . Υπολογίζοντας τη "διακρίνουσα" της παραπάνω εξίσωσης $\Delta = B^2 - 4AC$ είναι δυνατόν η εκάστοτε Μερική Διαφορική Εξίσωση να κατηγοριοποιηθεί. Αν η "διακρίνουσα" Δ είναι αρνητική, τότε η Μερική Διαφορική Εξίσωση είναι ελλειπτική, αν είναι μηδενική τότε είναι παραβολική και αν είναι θετική είναι υπερβολική.

Η φυσική σημασία της παραπάνω διάκρισης έχει ως εξής: στις ελλειπτικές εξισώσεις όλα τα σημεία του πεδίου αλληλοεπηρεάζονται, στις παραβολικές τα σημεία του πεδίου εξαρτώνται από τα προηγούμενα και στις υπερβολικές η όποια διάδοση της "πληροφορίας" στο πεδίο, γίνεται πάνω σε γραμμές ή επίπεδα (αναλόγως των διαστάσεων που εξετάζεται το εκάστοτε φυσικό φαινόμενο) οι οποίες ονομάζονται "χαρακτηριστικές". Γνωστές ελλειπτικές εξισώσεις είναι οι εξισώσεις Laplace και Poisson, ενώ αντίστοιχα τυπική περίπτωση παραβολικής εξίσωσης είναι η εξίσωση της θερμότητας. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη μετάδοση κύματος ή την ασταθή ροή (συνεπώς και οι 2D-SWE) είναι υπερβολικού τύπου.

Η επίλυση μίας Μερικής Διαφορικής Εξίσωσης (ή ενός αντίστοιχου συστήματος) δεν είναι πάντα δυνατή, όπως και στην περίπτωση των 2D-SWE όπου είναι ένα μη γραμμικό σύστημα Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων, το οποίο δεν μπορεί να επιλυθεί με αναλυτικό τρόπο. Η μη γραμμικότητα αυτή πολλών μερικών διαφορικών εξισώσεων, οδήγησε από τη δεκαετία του '60 στην ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων, όπου το πρόβλημα της μη ύπαρξης αναλυτικής λύσης των εξισώσεων αυτών αντιμετωπίστηκε με τον υπολογισμό των αριθμητικών τιμών που λαμβάνουν αυτές, σε ένα συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής. Οι αριθμητικές αυτές μέθοδοι βρήκαν εφαρμογή σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους, όπως η ρευστομηχανική, η αεροναυπηγική, η μετεωρολογία κ.α.

Οι κύριες αριθμητικές μέθοδοι είναι οι εξής τρεις: η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Difference Method - FDM), η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method - FEM) και η Μέθοδος των Πεπερασμένων Όγκων (Finite Volume Method - FVM). Το μοντέλο FLOW-R2D χρησιμοποιεί τη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών για την αριθμητική επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που διέπουν την κίνηση των ρευστών (άρα και τις SWE) γίνεται δεκτή η θεώρηση Euler για την κίνηση των ρευστών. Σημειώνεται ότι δύο είναι οι βασικές θεωρήσεις για την κίνηση των ρευστών, αυτή του Lagrange και αυτή του Euler. Στη μεν πρώτη, η μάζα του ρευστού θεωρείται ότι αποτελείται από ένα άπειρο πλήθος συγκεκριμένων σωματιδίων που ορίζονται από την αρχική του θέση κατά την έναρξη της κίνησης, ενώ ο εξωτερικός παρατηρητής είναι υποχρεωμένος να παρακολουθεί την κίνηση καθενός από αυτά, όσο η θέση τους μεταβάλλεται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου. Στη δε δεύτερη, κατά την κίνηση ενός ρευστού σε ένα πεδίο, θεωρούνται συγκεκριμένες θέσεις του πεδίου, αμετάβλητες στο χρόνο, στις οποίες ο εξωτερικός παρατηρητής παρακολουθεί την κίνηση του ρευστού από τον τρόπο με τον οποίο εμπλεκόμενα στην κίνηση φυσικά μεγέθη αλλάζουν τις τιμές τους, όσο χρόνο το κινούμενο ρευστό διέρχεται από τις θέσεις αυτές.

Σύμφωνα με τη θεώρηση Euler, είναι δυνατόν να διακριτοποιηθεί με ένα συγκεκριμένο χωρικό βήμα το πεδίο κίνησης ενός ρευστού και να σχηματισθούν διάφορες θέσεις, στις οποίες θα υπολογίζονται κάθε φορά με συγκεκριμένο χρονικό βήμα τα χαρακτηριστικά της κίνησης αυτής (στην προκειμένη περίπτωση των 2D-SWE το βάθος και η ταχύτητα του νερού). Η διακριτοποίηση αυτή γίνεται αφενός στο χρόνο και αφετέρου σε μία, δύο ή τρεις διαστάσεις στο χώρο, αναλόγως του είδους των μερικών διαφορικών εξισώσεων που είναι προς επίλυση.

Ακολουθεί παράδειγμα συνάρτησης f , η οποία εξαρτάται από την ανεξάρτητη μεταβλητή x . Η μερική παράγωγός της f ως προς x σύμφωνα με τον μαθηματικό της ορισμό στο σημείο x_0 έχει ως εξής:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \quad (2.57)$$

Αν η συνάρτηση f ορίζεται στο σημείο x_0 , τότε στο σημείο $x_0 + \Delta x$ και σύμφωνα με τον τύπο του Taylor:

$$f(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + \sum_1^n \frac{\Delta x^n \partial^n f}{n! \partial x^n} = f(x_0) + \Delta x \frac{\partial f}{\partial x} + \Delta x^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \dots \quad (2.58)$$

Αν κρατηθεί μόνο ο πρώτο όρος της παραπάνω σειράς, τότε η παραπάνω Εξ. (2.58) μπορεί να γραφεί ως εξής:

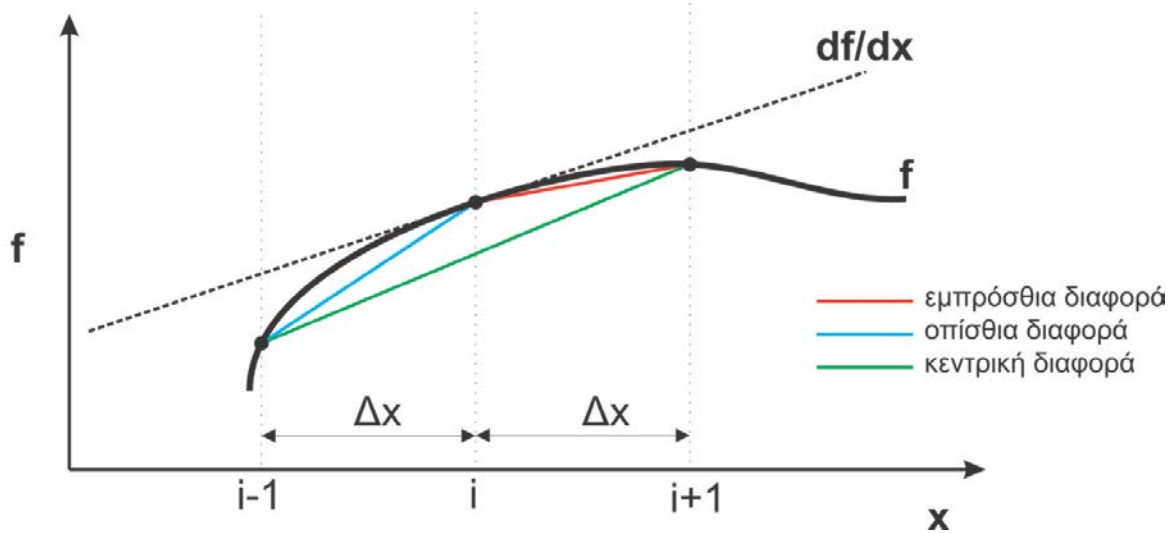
$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \quad (2.59)$$

Από την παραπάνω Εξ. (2.59) φαίνεται ότι με την παραπάνω προσέγγιση μίας πεπερασμένης διαφοράς (αποκόπτοντας όρους της σειράς Taylor) και για ένα πεπερασμένο Δx το οποίο μπορεί να πάρει μικρή σχετικά τιμή, είναι δυνατόν να προσεγγισθεί με σχετική ακρίβεια η μερική παράγωγος, όπως αυτή ορίζεται στην Εξ. (2.57). Οι γενικοί τύποι των πεπερασμένων διαφορών είναι τρεις: εμπρόσθια διαφορά, οπίσθια διαφορά και κεντρική διαφορά, όπως αντίστοιχα φαίνεται στις Εξ. (2.60) έως (2.62) και στο Σχήμα 2.6.

$$\frac{f(x_0+\Delta x)-f(x_0)}{\Delta x} = \frac{f_{i+1}-f_i}{\Delta x} \quad (2.60)$$

$$\frac{f(x_0)-f(x_0-\Delta x)}{\Delta x} = \frac{f_i-f_{i-1}}{\Delta x} \quad (2.61)$$

$$\frac{f(x_0+\Delta x)-f(x_0-\Delta x)}{2\Delta x} = \frac{f_{i+1}-f_{i-1}}{2\Delta x} \quad (2.62)$$



Σχήμα 2.6 Σχηματική απεικόνιση πεπερασμένων διαφορών

2.7 Αριθμητικά σχήματα

Η τεχνική επίλυσης ενός υπολογιστικού πεδίου με τις πεπερασμένες διαφορές γίνεται μέσω διάφορων αριθμητικών σχημάτων, τα οποία προκύπτουν από διάφορους μετασχηματισμούς των σειρών Taylor και για διάφορες προσεγγίσεις (πόσοι όροι της σειράς δεν αποκόπτονται κάθε φορά), όπου και προκύπτει η μαθηματική έκφραση υπολογισμού ενός κόμβου του υπολογιστικού πεδίου από τους όμορούς του.

Ανάλογα με το φυσικό φαινόμενο και ανάλογα με το πώς διαδίδεται η "πληροφορία" σε ένα υπολογιστικό πεδίο, διάφορα αριθμητικά σχήματα είναι κατάλληλα για την προσομοίωση συγκεκριμένων φυσικών φαινομένων, ενώ αδυνατούν να προσομοιώσουν επαρκώς κάποια άλλα. Επομένως, η επιλογή του κατάλληλου αριθμητικού σχήματος για την περιγραφή ενός φυσικού φαινομένου αποτελεί ζήτημα κομβικής σημασίας για την ανάπτυξη των αριθμητικών μοντέλων.

Η ακρίβεια του σχήματος ορίζεται σε σχέση με το πόσοι όροι της σειράς Taylor δεν αποκόπτονται. Για παράδειγμα, σε ένα απλό σχήμα εμπρόσθιας διαφοράς όπου η σειρά Taylor αποκόπτεται από το δεύτερο όρο και μετά, το σχήμα ονομάζεται πρώτης τάξης ακρίβειας ($O(\Delta x)$). Αντίστοιχα, σε ένα σχήμα κεντρικής διαφοράς η ακρίβεια είναι δεύτερης τάξης ($O(\Delta x^2)$) κ.ο.κ. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερης τάξης ακρίβειας είναι ένα αριθμητικό σχήμα, τόσο πιο πολύ πλησιάζει στην πραγματική λύση της μερικής διαφορικής εξίσωσης. Αυτό μπορεί να φανεί και στο Σχήμα 2.6, όπου η προσέγγιση

της κεντρικής διαφοράς προσεγγίζει ακριβέστερα την πραγματική λύση της πρώτης παραγώγου της συνάρτησης f , από ότι η εμπρόσθια ή η οπίσθια διαφορά.

Για να είναι ένα αριθμητικό σχήμα κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί σε κάποια αριθμητική μέθοδο πρέπει να ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια (Κουτίτας 1982):

- Κριτήριο Συνέπειας (Consistency), σύμφωνα με το οποίο η διακριτοποίηση των Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων θα πρέπει να συμπίπτει με την πραγματική τους μορφή, καθώς το χωρικό βήμα διακριτοποίησης τείνει στο μηδέν ή αλλιώς το σφάλμα αποκοπής να τείνει στο μηδέν
- Κριτήριο Σύγκλισης (Convergence), σύμφωνα με το οποίο η λύση η οποία προκύπτει από τη διακριτοποίηση των Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων θα πρέπει να συγκλίνει ασυμπτωτικά με την "πραγματική" λύση, όσο το χωρικό βήμα διακριτοποίησης τείνει στο μηδέν
- Κριτήριο Ευστάθειας (Stability), σύμφωνα με το οποίο κατά τη διαδικασία υπολογισμών, τα σφάλματα που εισάγονται από βήμα σε βήμα παραμένουν σε πεπερασμένα όρια και δεν τείνουν στο άπειρο
- Κριτήριο Συνέχειας (Conservation), σύμφωνα με το οποίο κατά τη διαδικασία υπολογισμών, θα πρέπει να διατηρείται το ισοζύγιο μάζας της εκάστοτε μεταβλητής

Τα αριθμητικά σχήματα μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες, τα ρητά (explicit) και τα πεπλεγμένα (implicit). Η βασική τους διάκριση είναι ότι στα μεν ρητά η τιμή του κάθε κόμβου μπορεί να υπολογιστεί άμεσα σε κάθε χωρικό βήμα, στα δε πεπλεγμένα δημιουργείται ένα σύστημα n αγνώστων με n εξισώσεις (όπου n ο αριθμός των κόμβων ή των κελιών), το οποίο σύστημα επιλύεται με διάφορες αριθμητικές τεχνικές στο τέλος κάθε χρονικού βήματος. Μία από τις πιο σημαντικές διαφορές μεταξύ ρητών και πεπλεγμένων σχημάτων, είναι ότι στα μεν ρητά σχήματα η ευστάθεια εξαρτάται από το μέγεθος του χρονικού βήματος, ενώ στα πεπλεγμένα όχι.

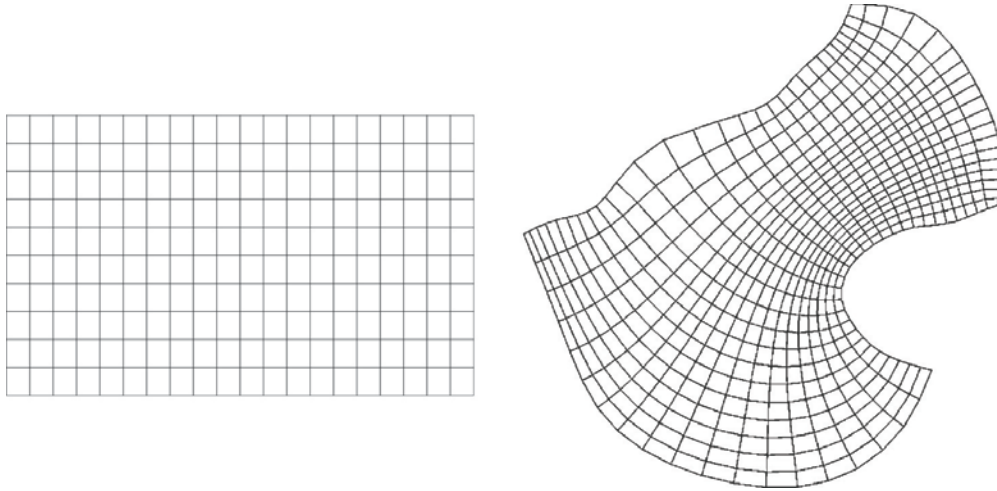
Τέλος, όσον αφορά στα σφάλματα που προκύπτουν από την υπολογιστική διαδικασία, αυτά μπορούν να διακριθούν σε σφάλματα αποκοπής (truncation errors), που αφορούν στην τάξη ακρίβειας (πόσοι όροι αποκόπτονται στη σειρά Taylor) και τα σφάλματα στρογγυλοποίησης των αριθμητικών τιμών (rounding errors), που οφείλονται στη διαδικασία των υπολογισμών της εκάστοτε γλώσσας προγραμματισμού που έχει αναπτυχθεί ο αλγόριθμος επίλυσης, καθώς και του εκάστοτε H/Y .

2.8 Υπολογιστικά πλέγματα

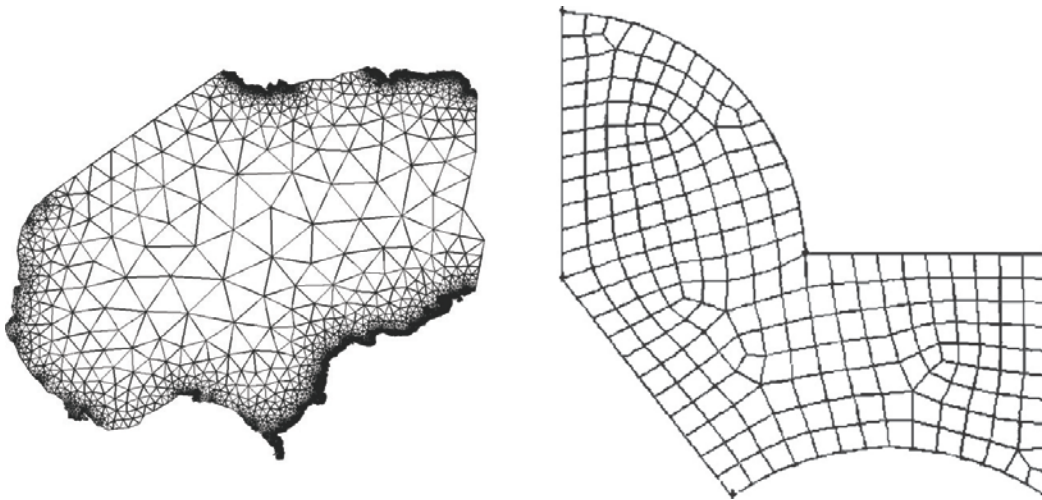
Όπως προαναφέρθηκε, το πεδίο προσομοίωσης διακριτοποιείται ανάλογα με την αριθμητική μέθοδο σε κελιά, κόμβους, στοιχεία, όγκους κ.λπ. και μετατρέπεται σε υπολογιστικό πεδίο. Μία πρώτη διάκριση που μπορεί να γίνει στο εκάστοτε υπολογιστικό πεδίο είναι όταν αυτό είναι δομημένο (structured grid), όπου υπάρχει μία συγκεκριμένη δομή κατασκευής του πλέγματος, ενώ τα κελιά είναι διαφόρων σχημάτων (τετράγωνα, ορθογώνια, τετράπλευρα κ.λπ.) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7 και όταν αυτό είναι μη δομημένο (unstructured grid), όπου δεν υπάρχει συγκεκριμένη δομή κατασκευής του πλέγματος και η σύνδεση των κελιών (τα οποία είναι επίσης διαφόρων σχημάτων όπως τρίγωνα,

τετράπλευρα, κ.λπ.) πρέπει να δηλώνεται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Για την εφαρμογή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Διαφορών είναι απαραίτητο το δομημένο πλέγμα. Αντίθετα, στις Μεθόδους των Πεπερασμένων Στοιχείων και των Πεπερασμένων Όγκων είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί είτε δομημένο είτε μη δομημένο υπολογιστικό πλέγμα.

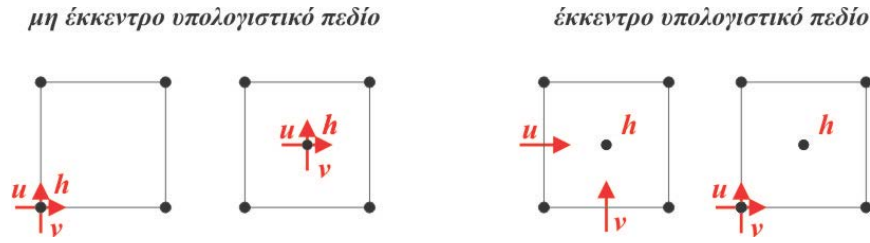
Μία δεύτερη διάκριση που μπορεί να γίνει στο υπολογιστικό πλέγμα είναι στο κατά πόσο οι εκάστοτε μεταβλητές υπολογίζονται όλες στο ίδιο σημείο ή όχι, το οποίο και ονομάζεται μη έκκεντρο ή έκκεντρο υπολογιστικό πλέγμα αντίστοιχα, αλλά και στο πού υπολογίζεται αυτές οι μεταβλητές, στο κέντρο του εκάστοτε κελιού ή στους κόμβους που ορίζουν το κελί. Στο Σχήμα 2.9 απεικονίζονται διάφορα παραδείγματα υπολογιστικών πλεγμάτων για τις μεταβλητές των 2D-SWE (h, u, v).



Σχήμα 2.7 Παραδείγματα δομημένου υπολογιστικού πλέγματος



Σχήμα 2.8 Παραδείγματα μη δομημένου υπολογιστικού πλέγματος



Σχήμα 2.9 Παραδείγματα υπολογιστικών πλεγμάτων σε σχέση με το πώς και πού υπολογίζονται οι μεταβλητές

2.9 Κριτήριο Σύγκλισης

Όπως προαναφέρθηκε, ένα βασικό κριτήριο που θα πρέπει να εξασφαλίζει κάθε αριθμητικό μοντέλο είναι το κριτήριο της Σύγκλισης (Convergence), σύμφωνα με το οποίο το σφάλμα που εισάγεται στην εκάστοτε αριθμητική επίλυση θα πρέπει να συγκλίνει ασυμπτωτικά με την "πραγματική" λύση, καθώς το μέγεθος του κελιού του υπολογιστικού πλέγματος τείνει προς το μηδέν. Η αριθμητική έκφραση της παραπάνω πρότασης είναι δυνατόν να αποτυπωθεί ως εξής (Roache 1998):

$$TE = f_L - f_{L=0} = CL^p + H.O.T. \quad (2.62)$$

όπου TE το σφάλμα λόγω αποκοπής όρων από τις σειρές Taylor, f_L η τιμή της αριθμητική επίλυσης για μία χαρακτηριστική μεταβλητή του φαινομένου το οποίο προσομοιώνεται με υπολογιστικό πλέγμα και το οποίο έχει μέγεθος κελιού L , C σταθερή παράμετρος, p η τάξη σύγκλισης, ενώ η μεταβλητή $H.O.T.$ συμβολίζει τις παραμέτρους μεγαλύτερης τάξης (Higher Order Terms).

Η τάξη της σύγκλισης μπορεί να εκφραστεί ως η κλίση που προκύπτει από τη λογαριθμική συσχέτιση μεταξύ σφάλματος και μέγεθος κελιού. Λογαριθμίζοντας την Εξ. (2.62) και αγνοώντας τις $H.O.T.$:

$$\log(TE) = \log(C) + p \log(L) \quad (2.63)$$

Θεωρώντας ότι ο λόγος αραιώσης του υπολογιστικού πλέγματος r_L είναι σταθερός (για $L_{i+1} > L_i$):

$$r_L = \frac{L_{i+1}}{L_i} \quad (2.64)$$

και θεωρώντας ότι έχουμε τρεις αριθμητικές προσομοιώσεις από τις οποίες προκύπτουν τιμές για τη χαρακτηριστική μεταβλητή f_1, f_2, f_3 και για μεγέθη κελιού L_1, L_2 και L_3 αντίστοιχα, τότε η τάξη σύγκλισης μπορεί να προσεγγιστεί με βάση την Εξ. (2.62) (με δεδομένο ότι η παράμετρος C είναι σταθερή):

$$p = \frac{\ln\left(\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1}\right)}{\ln(r_L)} \quad (2.65)$$

Στη σχετική βιβλιογραφία (Roache 1998) έχει προταθεί ο δείκτης σύγκλισης GCI (Grid Convergence Index) ο οποίος υπολογίζεται:

$$GCI_{i \rightarrow i+1} = \frac{F_s \left| \varepsilon_{i \rightarrow i+1} \right|}{r_L^{p-1}} \times 100\% \quad (2.66)$$

όπου F_s παράγοντας ασφάλειας, ο οποίος για τρία σενάρια υπολογιστικών πλεγμάτων και πάνω μπορεί να πάρει την τιμή 1.25 και ε το σχετικό σφάλμα μεταξύ δύο προσομοιώσεων με διαφορετικό υπολογιστικό πλέγμα:

$$\varepsilon_{i \rightarrow i+1} = \frac{f_i - f_{i+1}}{f_i} \quad (2.67)$$

Ο εν λόγω δείκτης είναι ένα μέτρο αποτύπωσης της αβεβαιότητας που εισάγεται στην αριθμητική επίλυση λόγω αραίωσης του υπολογιστικού πλέγματος. Εκτός από αυτόν τον δείκτη, θα πρέπει να ελέγχεται και το κατά πόσο η παράμετρος C είναι σταθερή, όπως έχει υποτεθεί αρχικά. Με βάση την Εξ. (2.62) θα πρέπει να ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$C_G = \frac{GCI_{2 \rightarrow 3}}{r_L^p GCI_{1 \rightarrow 2}} = 1 \quad (2.68)$$

2.10 Αριθμητικό σχήμα McCormack

Το ρητό αριθμητικό σχήμα δεύτερης τάξης ακρίβειας McCormack είναι μία από τις μετεξελίξεις του γνωστού αριθμητικού σχήματος Lax-Wendroff (Lax and Wendroff 1964). Τροποποίηση αυτού του σχήματος έχει χρησιμοποιηθεί για το αριθμητικό μοντέλο FLOW-R2D. Είναι σχήμα δύο βημάτων (πρόβλεψης και διόρθωσης) και χρησιμοποιούνται εναλλάξ εμπρόσθιες και οπίσθιες διαφορές. Είναι ευσταθές με την προϋπόθεση ότι ικανοποιείται το κριτήριο ευστάθειας Courant-Friedrichs-Lewy (CFL condition).

Το αριθμητικό αυτό σχήμα είναι ικανό να περιγράψει τις ασυνέχειες (shock capturing capability) του εκάστοτε υπολογιστικού πεδίου (McCormack 1969), επομένως με τη χρήση του για την αριθμητική επίλυση των 2D-SWE υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης ενδεχόμενων απότομων μεταβολών στην πλημμυρική ροή (π.χ. υδραυλικά άλματα). Η διακριτοποίηση των 2D-SWE με την τροποποίηση του αριθμητικού σχήματος McCormack γίνεται σε επόμενο κεφάλαιο. Στην παρούσα ενότητα και για να γίνει αντιληπτή η μέθοδος, γίνεται διακριτοποίηση μίας απλής εξίσωση μετάθεσης της συνάρτησης f ως προς το χρόνο t και στις δύο οριζόντιες διαστάσεις του χώρου x, y , με ταχύτητα u και v αντίστοιχα:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} = 0 \quad (2.69)$$

Τα δύο βήματα του αριθμητικού σχήματος McCormack παρουσιάζονται στις Εξ. (2.70) και (2.71), καθώς και στα Σχήματα 2.10 και 2.11.

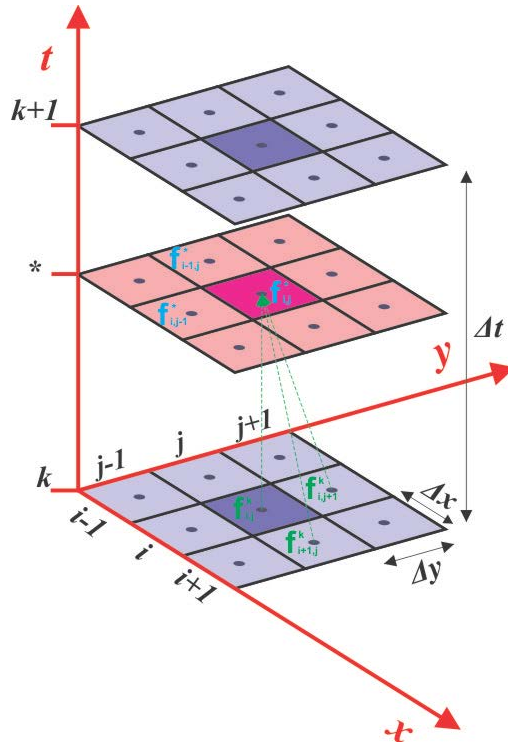
βήμα πρόβλεψης

$$f_{i,j}^* = f_{i,j}^k - u \frac{\Delta t}{\Delta x} (f_{i+1,j}^k - f_{i,j}^k) - v \frac{\Delta t}{\Delta y} (f_{i,j+1}^k - f_{i,j}^k) \quad (2.70)$$

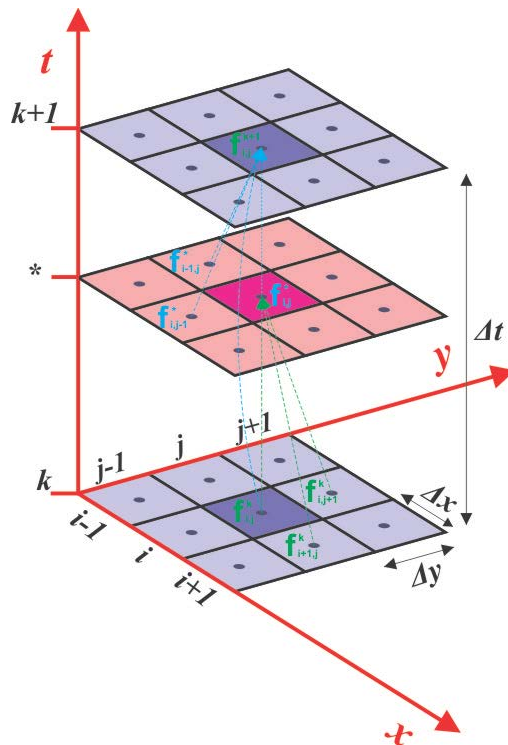
βήμα διόρθωσης

$$f_{i,j}^{k+1} = \frac{1}{2} \left[f_{i,j}^k + f_{i,j}^* - u \frac{\Delta t}{\Delta x} (f_{i,j}^* - f_{i-1,j}^*) - v \frac{\Delta t}{\Delta y} (f_{i,j}^* - f_{i,j-1}^*) \right] \quad (2.71)$$

όπου i, j οι διευθύνσεις των οριζόντιων διαστάσεων x και y αντίστοιχα, k η χρονική στιγμή, Δt το χρονικό βήμα και $\Delta x, \Delta y$ τα χωρικά βήματα για την αντίστοιχη διεύθυνση.



Σχήμα 2.10 Απεικόνιση πρώτου βήματος (πρόβλεψης) αριθμητικού σχήματος McCormack



Σχήμα 2.11 Απεικόνιση δεύτερου βήματος (διόρθωσης) αριθμητικού σχήματος McCormack

3. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το αριθμητικό μοντέλο FLOW-R2D. Σε πρώτη φάση παρατίθεται η διακριτοποίηση των 2D-SWE με την πρωτότυπη τροποποίηση του αριθμητικού σχήματος McCormack που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, ούτως ώστε να γίνει εισαγωγή τεχνητής διάχυσης στις Εξισώσεις Ορμής μέσω ενός συντελεστή διάχυσης ω . Επίσης υπολογίζεται η τάξη του σφάλματος που υπεισέρχεται στις εξισώσεις λόγω αυτής της τροποποίησης (truncation error analysis).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται όλες οι επιλογές για τις αρχικές, τις ανάντη οριακές και τις κατόντη οριακές συνθήκες, ενώ παρουσιάζεται και η τεχνική που υιοθετήθηκε στο μοντέλο FLOW-R2D για τη διάκριση των ορίων μεταξύ υγρού και ξηρού πυθμένα (wet/dry modelling). Ειδικότερα για τις ανάντη οριακές συνθήκες παρουσιάζεται πρωτότυπη μεθοδολογία με στόχο να προσομοιωθεί ο βρόχος που παρατηρείται στο ανοδικό και στο καθοδικό σκέλος της καμπύλης στάθμης-παροχής της ανάντη οριακής διατομής.

Επίσης, παρουσιάζονται οι δυνατότητες που υπάρχουν για να προσομοιωθούν διάφορες διαδικασίες που παρουσιάζονται σε πραγματικές συνθήκες πλημμύρας, μέσω όρων των 2D-SWE. Με τη βοήθεια του όρου εισροής (source term) στην Εξίσωση Συνέχειας είναι δυνατόν να προσομοιωθεί η βροχόπτωση στο υπολογιστικό πεδίο. Με τη βοήθεια του όρου εκροής (sink term) επίσης στην Εξίσωση Συνέχειας είναι δυνατόν να προσομοιωθεί τόσο το φαινόμενο της διήθησης όσο και της αποχέτευσης ομβρίων νερών, μέσω εμπειρικών σχέσεων. Παρουσιάζονται οι διάφορες δυνατότητες επιλογής μοντέλου προσομοίωσης των τριβών πυθμένα, οι οποίες υπεισέρχονται ως όρος στις Εξισώσεις Ορμής των 2D-SWE, επίσης μέσω εμπειρικών σχέσεων. Παρουσιάζεται ο τρόπος αναπαράστασης στερεών εμποδίων μέσω της οριακής συνθήκης της ανάκλασης, ο οποίος έχει και πολύ σημαντική εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες πλημμύρας, όπως είναι η πλημμυρική ροή σε αστικό περιβάλλον ή η ροή ποταμού σε διευθετημένη κοίτη με κάποιο τεχνικό έργο. Ειδικότερα, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής ο τρόπος αυτός τροποποιείται μερικώς με σκοπό να συνυπολογίζεται και η επίδραση των κάθετων -ως προς τη διεύθυνση ροής- τοιχωμάτων του εκάστοτε στερεού ορίου, στη ροή του νερού.

Παρουσιάζονται ακόμα διάφορες αλγοριθμικές τεχνικές με τις οποίες αντιμετωπίστηκαν οι όποιες δυσκολίες παρουσιάζονται στον χειρισμό του υπολογιστικού πεδίου για την προσομοίωση μίας πραγματικής κατάστασης πλημμυρικής ροής. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται τεχνική με τη βοήθεια της οποίας είναι δυνατόν να εφαρμοστεί η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών, οι οποία χρειάζεται ένα δομημένο υπολογιστικό πλέγμα (structured grid) σε ένα υπολογιστικό πεδίο ακανόνιστης μορφής (π.χ. λεκάνη απορροής η ακτογραμμή). Επίσης παρουσιάζεται αλγοριθμική τεχνική με τη βοήθεια της οποίας αυτοματοποιείται η διαδικασία ταξινόμησης του εκάστοτε υπολογιστικού κελιού και η οποία έχει γεωμετρική βάση.

Τέλος, παρατίθεται μία σύντομη ανάλυση της δομής του αλγορίθμου του αριθμητικού μοντέλου FLOW-R2D, ο οποίος αναπτύχθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Fortran 90/95 και ο οποίος παρατίθεται αυτούσιος στο Παράρτημα της παρούσας διατριβής.

3.2 Διακριτοποίηση 2D-SWE με την τροποποίηση του αριθμητικού σχήματος McCormack

Η διακριτοποίηση των 2D-SWE έγινε με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών και με τροποποίηση του αριθμητικού σχήματος δεύτερης τάξης ακρίβειας McCormack σε μη έκκεντρο υπολογιστικό πλέγμα, όπου όλες οι μεταβλητές (βάθος και ταχύτητες ροής) υπολογίζονται στο κέντρο του εκάστοτε κελιού (non-staggered, cell-centered computational grid). Η επιλογή του αριθμητικού σχήματος McCormack έγινε διότι το αριθμητικό αυτό σχήμα έχει τη δυνατότητα περιγραφής ασυνεχειών (shock capturing capability), φαινόμενο που είναι σύνηθες στην πλημμυρική ροή σε πραγματικές συνθήκες (π.χ. υδραυλικό άλμα). Επίσης για τον ίδιο λόγο επιλέχθηκε η συντηρητική μορφή των 2D-SWE, καθώς αυτή αν μετασχηματιστεί σε ασθενή μορφή (weak formulation) δεν εμφανίζονται παράγωγοι του βάθους και της ταχύτητας ροής (Vreugdenhil 1994).

Τα δύο βήματα της διακριτοποίησης (πρόβλεψης και διόρθωσης) παρουσιάζονται παρακάτω:

βήμα πρόβλεψης

$$W_{i,j}^* = W_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1,j}^k - F_{i,j}^k) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (G_{i,j+1}^k - G_{i,j}^k) + \Delta t D_{i,j}^k \quad (3.1)$$

βήμα διόρθωσης

$$W_{i,j}^{k+1} = \frac{1}{2} \left[\omega W_{i,j}^k + \frac{1}{4} (1 - \omega) (W_{i+1,j}^k + W_{i-1,j}^k + W_{i,j+1}^k + W_{i,j-1}^k) + W_{i,j}^* - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i,j}^* - F_{i-1,j}^*) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (G_{i,j}^* - G_{i,j-1}^*) + \Delta t D_{i,j}^* \right] \quad (3.2)$$

Το αριθμητικό σχήμα McCormack είναι ευσταθές αν και εφόσον ικανοποιείται το κριτήριο Courant-Friedrichs-Lewy (CFL condition) ή αλλιώς κριτήριο Courant:

$$CFL \leq 1 \quad (3.3)$$

όπου CFL ο αριθμός Courant, ο οποίος μπορεί να εκτιμηθεί (Katorpodes and Strelkoff 1979):

$$CFL = (\sqrt{u^2 + v^2 + c}) \frac{\Delta t}{\min(\Delta x, \Delta y)} \quad (3.4)$$

όπου c η ταχύτητα προέλασης των μικρών κυματισμών (celerity) η οποία υπολογίζεται:

$$c = \sqrt{gh} \quad (3.5)$$

Η τροποποίηση σε σχέση με την κλασική μορφή του αριθμητικού σχήματος McCormack έγκειται στην προσθήκη του συντελεστή ω , με την οποία εισάγεται στην ουσία ένας επιπλέον όρος στο σφάλμα αποκοπής, το οποίο και προκύπτει από τη διακριτοποίηση των 2D-SWE με το αριθμητικό σχήμα McCormack (Tsakiris and Bellos 2014). Οι τιμές του ω είναι κάτω από 1, ενώ όταν αυτές παίρνουν την τιμή 1, το αριθμητικό σχήμα McCormack έχει πλέον την κλασική του μορφή.

Για να υπολογιστεί το επιπλέον αυτό σφάλμα, σε πρώτη φάση υπολογίζεται η επιπλέον "ποσότητα" που προστίθεται στο τελικό βήμα διόρθωσης του αριθμητικού σχήματος McCormack σε σχέση με την κλασική του μορφή:

$$\frac{1-\omega}{2} W_{i,j}^k + \frac{1-\omega}{8} (W_{i+1,j}^k + W_{i-1,j}^k + W_{i,j+1}^k + W_{i,j-1}^k) \quad (3.6)$$

Αναλύοντας με τη βοήθεια των σειρών Taylor κάθε όρο της Εξ. (3.6):

$$W_{i+1,j}^k = W_{i,j}^k + \Delta x \frac{\partial W}{\partial x} + \Delta x^2 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \dots \quad (3.7)$$

$$W_{i-1,j}^k = W_{i,j}^k - \Delta x \frac{\partial W}{\partial x} + \Delta x^2 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \dots \quad (3.8)$$

$$W_{i,j+1}^k = W_{i,j}^k + \Delta y \frac{\partial W}{\partial y} + \Delta y^2 \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \dots \quad (3.9)$$

$$W_{i,j-1}^k = W_{i,j}^k - \Delta y \frac{\partial W}{\partial y} + \Delta y^2 \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \dots \quad (3.10)$$

Αν οι παραπάνω Εξ. (3.7-3.10) προστεθούν στην Εξ. (3.6), τότε το επιπλέον σφάλμα αποκοπής που προτίθεται στην αριθμητική επίλυση των 2D-SWE με την τροποποίηση που εισάγεται στην παρούσα μεθοδολογία είναι αυτής της μορφής:

$$TE = \frac{(1-\omega)}{4} \Delta x^2 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{(1-\omega)}{4} \Delta y^2 \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \dots \quad (3.11)$$

Το παραπάνω σφάλμα είναι ανάλογο της δεύτερης παραγώγου το οποίο εισάγει τεχνητά όρους διάχυσης στην επίλυση των 2D-SWE, ενώ ταυτόχρονα δεν αλλάζει την τάξη ακρίβειας του αριθμητικού σχήματος (δεύτερη τάξη) και δεν αλλοιώνεται η ικανότητα περιγραφής των ασυνεχειών (shock capturing capability). Αυτοί οι όροι διάχυσης είναι απαραίτητοι ούτως ώστε να "αποσβέσουν" τις διαταραχές που προκαλούν αστάθεια στο αριθμητικό μοντέλο και παρατηρούνται λόγω σφαλμάτων διασποράς τα οποία και εμφανίζονται ιδιαίτερα σε πολύπλοκες υπολογιστικά πεδία, όπως συνήθως είναι οι πραγματικές συνθήκες πλημμυρικής ροής. Για αυτούς τους λόγους, ο συντελεστής ω ονομάστηκε συντελεστής διάχυσης.

Από τη στιγμή που εισάγονται ποσότητες μέσω του σφάλματος αποκοπής στις 2D-SWE οι οποίες είναι ανάλογες της δεύτερης παραγώγου, είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι αυτές οι επιπρόσθετες ποσότητες είναι ένα είδος προσομοίωσης των διατμητικών τάσεων που εμφανίζονται στο οριζόντιο επίπεδο $x-y$ και οι οποίες στην κλασική μορφή των 2D-SWE θεωρούνται αμελητέες. Για παράδειγμα, όταν η ροή είναι τυρβώδης στην Εξίσωση Ορμής και σύμφωνα με την υπόθεση Boussinesq (Chanson 2009) αυτές οι διατμητικές τάσεις είναι της μορφής:

$$\tau_{xy} = \frac{\varepsilon_{xy}}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) \quad (3.12)$$

όπου ε_{xy} συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας (eddy or turbulent viscosity) και ο οποίος έχει διάφορες προσεγγίσεις (μοντέλα προσομοίωσης τύρβης), ανάλογα με την κλίμακα που εξετάζεται (Bates et al. 2005). Αν και οι διατμητικές αυτές τάσεις θεωρούνται αμελητέες σε σχέση με τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο κάθετο άξονα (επίπεδα $x-z$ και $y-z$) στη διεπιφάνεια της ροής με κάποιο στερεό όριο (πυθμένας), όπως έχει προαναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, στην προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε πραγματική κατάσταση είναι σημαντικές, επομένως θα πρέπει να συνυπολογίζονται με κάποιο τρόπο. Στο παρόν μοντέλο FLOW-R2D αυτό γίνεται τεχνητά (artificial eddy or turbulent viscosity), μέσω του συντελεστή διάχυσης, ο οποίος παίρνει την τιμή 1 για την Εξίσωση Συνέχειας (κλασική μορφή αριθμητικού σχήματος McCormack), ενώ για τις Εξισώσεις Ορμής από 0.9-1.0, αναλόγως την εκτίμηση που γίνεται για το κατά πόσο τα φαινόμενα τύρβης είναι σημαντικά στην τελική επίλυση (όσο πιο σημαντικά είναι, τόσο χαμηλότερος και ο συντελεστής διάχυσης). Συνδυάζοντας τις Εξ. (3.11-3.12), ο συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας προσομοιώνεται με το μοντέλο FLOW-R2D σε συνάρτηση με το συντελεστή διάχυσης ω , με την παρακάτω σχέση:

$$\frac{\varepsilon_{xy}}{\rho} = \left(\frac{1-\omega}{4} \Delta x^2 h \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1-\omega}{4} \Delta x^2 u \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{1-\omega}{2} \Delta x^2 \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1-\omega}{4} \Delta y^2 h \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1-\omega}{4} \Delta y^2 u \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{1-\omega}{2} \Delta y^2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} \right) \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^{-1} \quad (3.13)$$

3.3 Αρχικές συνθήκες με το μοντέλο FLOW-R2D

Το μοντέλο FLOW-R2D δίνει μία δυνατότητα επιλογών για τις αρχικές συνθήκες οι οποίες είναι απαραίτητες για να επιτευχθεί η οποιαδήποτε προσομοίωση. Είναι δυνατόν να θεωρηθεί ακίνητος όγκος νερού σε συγκεκριμένη θέση. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να προσομοιωθεί η διόδευση πλημμυρικού κύματος που προκύπτει από απότομη και στιγμιαία θραύση φράγματος (όπως συμβαίνει στα φράγματα από σκυρόδεμα). Επίσης είναι δυνατόν ως αρχική συνθήκη να εισαχθεί ένα πεδίο ροής (π.χ. βασική απορροή σε τμήμα ποταμού) αν και εφόσον είναι γνωστές οι μεταβλητές του βάθους και των ταχυτήτων ροής σε κάθε θέση του υπολογιστικού πλέγματος.

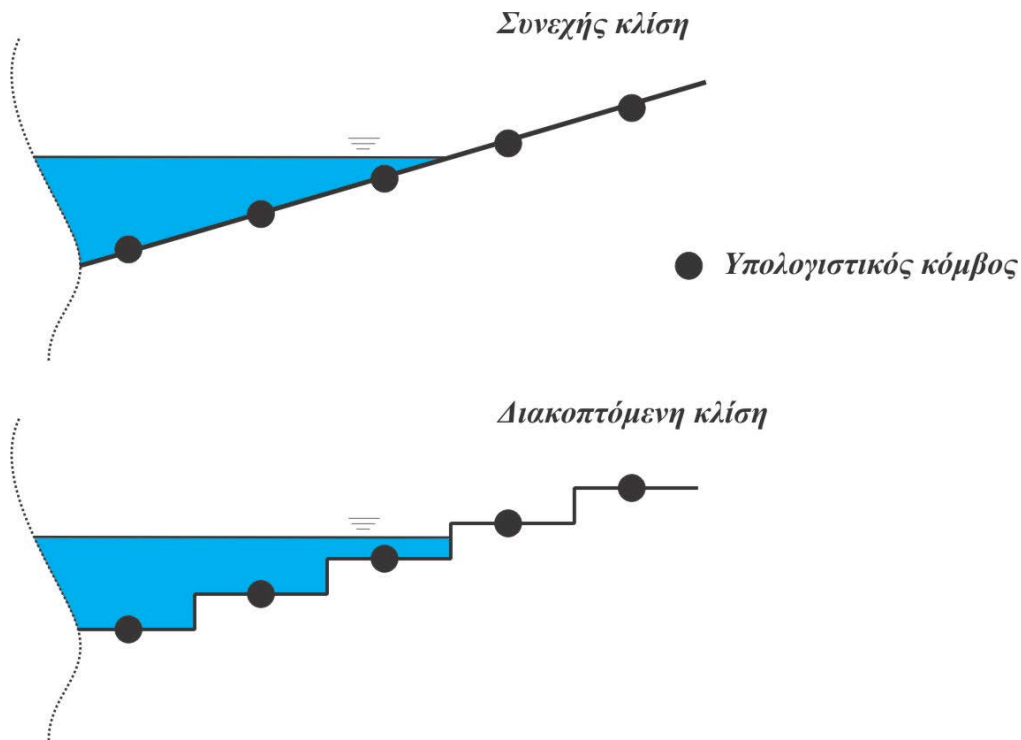
Επειδή όμως στη συντριπτική πλειονότητα των πραγματικών περιπτώσεων η παραπάνω πληροφορία είναι άγνωστη, αλλά και επειδή συνήθως η πλημμυρική αιχμή είναι κάποιες τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τη βασική απορροή, η συνηθέστερη αρχική συνθήκη είναι ο ξηρός πυθμένας. Η πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπίσει το κάθε μοντέλο που προσομοιώνει πλημμυρικές ροές είναι η τεχνική που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση των ορίων μεταξύ υγρού και ξηρού πυθμένα σε κάθε χρονικό βήμα προέλασης της πλημμυρικής ροής (wet/dry modelling), εφόσον οι 2D-SWE ισχύουν μόνο εκεί που υπάρχει σχετικά αβαθές πεδίο νερού. Οι προσεγγίσεις που μπορούν να γίνουν εξαρτώνται από τον τρόπο προσομοίωσης της τοπογραφίας του υπολογιστικού πεδίου, ο οποίος είναι σε συνάρτηση με την αριθμητική μέθοδο και τον τρόπο δημιουργίας του υπολογιστικού πλέγματος (Bates et al. 2005). Συγκεκριμένα, οι τρόποι αυτοί είναι (Σχήμα 3.1):

- συνεχής κλίση η οποία εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο σε μοντέλα που βασίζονται στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων και σε μη δομημένα υπολογιστικά πλέγματα (unstructured grids)

- διακοπτόμενη κλίση (μέθοδος "σκαλοπατιού") η οποία εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο σε μοντέλα που βασίζονται στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών ή Όγκων και σε δομημένα υπολογιστικά πλέγματα (structured grids)

Το μοντέλο FLOW-R2D εφόσον έχει αναπτυχθεί με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών, άρα και σε δομημένο πλέγμα ακολουθεί τον δεύτερο τρόπο. Για να επιλύσει το πρόβλημα των κινούμενων ορίων χρησιμοποιεί το κατώφλι διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα h_{dry} . Μετά από την επίλυση κάθε χρονικού βήματος, ελέγχεται αν το βάθος ροής κάθε κελιού του υπολογιστικού πλέγματος είναι μικρότερο ή μεγαλύτερο από αυτό το κατώφλι. Αν είναι μεγαλύτερο η διαδικασία συνεχίζεται απρόσκοπτα, αλλιώς το βάθος και οι ταχύτητες ροής μηδενίζονται (Tsakiris and Bellos 2014). Το κατώφλι αυτό εξαρτάται από το μέγεθος του κελιού του εκάστοτε υπολογιστικού πλέγματος και πρέπει να προσδιοριστεί σε κάθε περίπτωση. Ανάλογες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί και από άλλους ερευνητές (Liang et al. 2006).

Εναλλακτικός τρόπος αντιμετώπισης της παραπάνω δυσκολίας αν θεωρηθεί ως αρχική συνθήκη ελάχιστο βάθος ροής σε όλο το υπολογιστικό πεδίο, ο οποίος έχει χρησιμοποιηθεί επίσης και από διάφορους άλλους ερευνητές (Fiedler and Ramirez 2000). Η τεχνική αυτή όμως δημιουργεί άλλου είδους προβλήματα, όπως ο επιπρόσθετος όγκος νερού ο οποίος πρέπει να συνυπολογιστεί στο ισοζύγιο μάζας του νερού (Bates et al. 2005), όπως επίσης και το ότι επηρεάζει την προέλαση του πλημμυρικού κύματος, καθώς αυτό αναπτύσσει άλλη συμπεριφορά αν μεταδίδεται σε υγρό (ακόμα και πολύ μικρού βάθους) και άλλη σε πλήρως ξηρό πυθμένα (Bradford and Sanders 2002). Ο τρόπος αυτός είναι δυνατόν να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις όπου η κλίμακα προσομοίωσης είναι η λεκάνη απορροής (Bellos and Tsakiris 2015b).



Σχήμα 3.1 Συνεχής και διακοπτόμενη κλίση

3.4 Ανάντη οριακές συνθήκες με το μοντέλο FLOW-R2D

Οι ανάντη οριακές συνθήκες επί της ουσίας είναι ο προσδιορισμός του βάθους και των ταχυτήτων ροής σε κάθε κελί της ανάντη οριακής διατομής. Στην πραγματικότητα όμως είναι σχεδόν απίθανο να είναι γνωστή τέτοιου είδους πληροφορία. Αντιθέτως αυτό που είναι γνωστό είναι είτε μία παροχή είτε ένα υδρογράφημα πλημμυρικής παροχής (Dirichelet boundary conditions). Επομένως αν υπάρχει υπολογιστικό πεδίο όπου εισρέει πλημμυρική ροή με παροχή Q (Σχήμα 3.2), θα πρέπει με βάση αυτή την πληροφορία να γίνει κατανομή του βάθους και των ταχυτήτων ροής στην ανάντη οριακή διατομή με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να ικανοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$Q = \sum_{i=1}^{i=im} (V_{i,j} h_{i,j} \Delta x) \quad (3.14)$$

Σε περίπτωση που ως ανάντη οριακή συνθήκη θεωρείται σταθερή παροχή σε σχέση με το χρόνο (π.χ. πλημμυρική αιχμή), για τον προσδιορισμό της κατανομής του βάθους και των ταχυτήτων ροής στην ανάντη οριακή διατομή είναι δυνατόν να ακολουθηθεί η παρακάτω μεθοδολογία, η οποία στηρίζεται στην εμπειρική εξίσωση του Manning. Αν θεωρηθεί ότι σε κάθε κελί της ανάντη οριακής διατομής ισχύει η παραπάνω εξίσωση τότε η Εξ. (3.14) μπορεί να μετασχηματιστεί:

$$Q = \frac{\Delta x S_{eff}^{1/2}}{n} \sum_{i=1}^{i=im} (h_{i,j}^{5/3}) \quad (3.15)$$

όπου S_{eff} μέγεθος που ισούται με την κλίση της γραμμής ενέργειας και ονομάζεται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής "ενεργή κλίση". Η ενεργή κλίση δεν ταυτίζεται με την κλίση του πυθμένα ροής παρά μόνο σε περιπτώσεις όπου η ροή είναι σταθερή και ομοιόμορφη, κάτι που δεν ισχύει στην προσομοίωση ροής σε πραγματικές συνθήκες. Από τη στιγμή που δεν υπάρχει καμία πληροφορία για την κατάσταση της ροής ανάντη της ανάντη οριακής διατομής, η ενεργή κλίση αποτελεί ένα μέγεθος το οποίο πρέπει με κάποιο τρόπο να βαθμονομηθεί είτε να προσδιοριστεί, με βάση την εμπειρία του ερευνητή και για κάθε υπολογιστικό σενάριο.

Θεωρώντας ότι η στάθμη νερού H στην ανάντη οριακή διατομή θα είναι κοινή για κάθε κελί, η Εξ. 3.15 μπορεί να μετασχηματιστεί:

$$Q = \frac{\Delta x S_{eff}^{1/2}}{n} \sum_{i=1}^{i=im} (H - z_{i,j})^{5/3} \quad (3.16)$$

όπου z το υψόμετρο του εδάφους σε κάθε κελί της ανάντη οριακής διατομής.

Η παραπάνω Εξ. 3.16 είναι πεπλεγμένη, επομένως για την επίλυση της απαιτείται κάποια αριθμητική τεχνική. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε η μέθοδος Newton-Raphson. Συγκεκριμένα δημιουργείται η συνάρτηση-στόχος $F(H)$:

$$F(H) = \Delta x \frac{S_{eff}^{1/2}}{n} \sum_{i=1}^{i=im} \left[(H - z_{i,j})^{5/3} \right] - Q_{obs} \quad (3.17)$$

και η παράγωγος αυτής:

$$F'(H) = \frac{5}{3} \Delta x \frac{S_{eff}^{1/2}}{n} \sum_{i=1}^{i=im} \left[(H - z_i)^{2/3} \right] \quad (3.18)$$

όπου Q_{obs} είναι η παροχή που δίνεται ως δεδομένο.

Η βέλτιστη τιμή H είναι προφανώς αυτή που μηδενίζει τη συνάρτηση-στόχο $F(h)$. Ακολουθώντας την επαναληπτική διαδικασία Newton-Raphson για n φορές, είναι δυνατόν βρεθεί η βέλτιστη τιμή H που να ικανοποιεί αυτή τη συνθήκη με κάποιο κριτήριο σύγκλισης (π.χ. $|H_{n+1}-H_n| < 0.00001$ m)

$$H_{n+1} = H_n - \frac{F(H_n)}{F'(H_n)} \quad (3.19)$$

Εφόσον έχει προσδιοριστεί η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού είναι δυνατόν να υπολογιστεί και το βάθος ροής σε κάθε κελί της ανάντη οριακής διατομής:

$$h_{i,j} = H - z_{i,j} \quad (3.20)$$

και οι ταχύτητες ροής:

$$u_{i,j} = \frac{1}{n} h^{2/3} S_{eff}^{1/2} \cdot \cos\varphi, \quad v_{i,j} = \frac{1}{n} h^{2/3} S_{eff}^{1/2} \cdot \sin\varphi \quad (3.21)$$

Σε περίπτωση που ως ανάντη οριακή συνθήκη θεωρείται παροχή μεταβλητή σε σχέση με το χρόνο (π.χ. πλημμυρικό υδρογράφημα), χρειάζεται διαφορετική προσέγγιση. Η πιο απλή προσέγγιση είναι αυτή του κινηματικού κύματος (kinematic wave), όπου θεωρείται ότι σε κάθε χρονικό βήμα αντιστοιχεί μία παροχή Q , σε κάθε παροχή Q αντιστοιχεί μία στάθμη ελεύθερης επιφάνειας H και ακολουθώντας τη διαδικασία που έχει περιγραφεί πιο πάνω, προσδιορίζονται το βάθος και οι ταχύτητες ροής σε κάθε κελί της ανάντη οριακής διατομής και σε κάθε χρονική στιγμή. Βασικό μειονέκτημα της παραπάνω προσέγγισης είναι ότι ακολουθείται μία μονοσήμαντη καμπύλη στάθμης-παροχής (Q-H) και δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν τα φαινόμενα υστέρησης που υπάρχουν συνήθως στις καμπύλες αυτές στην πραγματικότητα (Σχήμα 3.3). Για αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι Εξισώσεις Συνέχειας και Ορμής στην πλήρη, δυναμική τους μορφή.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται πρωτότυπη μεθοδολογία προσδιορισμού ανάντη ορίων η οποία έχει εφαρμοστεί για τις 1D-SWE (Fread 1973), αλλά όχι και για τις 2D-SWE (Bellos and Tsakiris 2015c). Αν θεωρηθεί ότι κατά την εισροή νερού σε ένα υπολογιστικό πεδίο (Σχήμα 3.2), η εγκάρσια ταχύτητα ροής θεωρείται αμελητέα, οι εξισώσεις 2D-SWE για την ανάντη οριακή διατομή απλοποιούνται ως εξής (σε μη συντηρητική μορφή):

Εξίσωση Συνέχειας

$$\frac{\partial h}{\partial t} + V \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3.22)$$

Εξίσωση Ορμής κατά τη διεύθυνση ροής

$$V \frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial V}{\partial t} + 2Vh \frac{\partial V}{\partial x} + \underbrace{(V^2 + gh) \frac{\partial h}{\partial x}}_{\text{κίνηματικό κύμα}} - \underbrace{ghS_0 + \frac{\tau_b}{\rho}}_{\text{κύμα διάχυσης}} = 0 \quad (3.23)$$

$\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{δυναμικό κύμα}}$

Για να είναι δυνατόν οι παραπάνω εξισώσεις να αποτελούν ανάντη όριο, θα πρέπει να απαλειφθούν οι παράγωγοι ως προς το χώρο και να παραμείνουν μόνο οι παράγωγοι ως προς το χρόνο. Αυτό συμβαίνει

διότι αν υπάρχει παράγωγος μίας μεταβλητής ως προς το χώρο σε εξίσωση ανάντη ορίου, δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί ένα αριθμητικό σχήμα με οπίσθιες διαφορές στο χώρο (εφόσον δεν υπάρχει υπολογιστικό πεδίο ανάντη από το ανάντη όριο), ενώ ένα σχήμα με αποκλειστικά εμπρόσθιες διαφορές στο χώρο μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στην περίπτωση της υποκρίσιμης ροής.

Θεωρώντας ότι η μετάδοση του πλημμυρικού κύματος μπορεί να προσομοιωθεί με την εξίσωση του κινηματικού κύματος με μία μικρή διόρθωση λόγω της υποχώρησης της πλημμυρικής αιχμής (Henderson 1966):

$$\frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{1}{c} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{2}{3} \frac{S_0}{r_c^2} \quad (3.24)$$

όπου c η ταχύτητα προέλασης των κυματισμών (celerity) και r_c ο λόγος της κλίσης του πυθμένα προς μέση κλίση του κύματος, ο οποίος προσομοιώνει την υποχώρηση της πλημμυρικής αιχμής (subsidence of flood crest):

$$r_c = \frac{S_0}{S_w} \quad (3.25)$$

Ισχύει ότι $c=dq/dh$ όπου q η μοναδιαία παροχή, άρα αν θεωρήσουμε ότι ισχύει η εξίσωση Manning για ομοιόμορφες και σταθερές συνθήκες ροής:

$$c = \left(\frac{1}{n} h^{5/3} S_0^{1/2} \right)' = \frac{5}{3} \frac{1}{n} h^{2/3} S_0^{1/2} = \frac{5}{3} V \quad (3.26)$$

Η μέση κλίση του κύματος μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση (Σχήμα 3.4):

$$S_w = \frac{y_0}{x_0} \quad (3.27)$$

και

$$y_0 = h_p - h_0 \quad (3.28)$$

$$x_0 = ct = \frac{5}{3} \bar{V} t_p \quad (3.29)$$

όπου t χρόνος από την αρχή του υδρογραφήματος μέχρι την αιχμή του, h_0 στάθμη που αντιστοιχεί στην αρχική παροχή, h_p στάθμη που αντιστοιχεί στην παροχή αιχμής και \bar{V} η μέση ταχύτητα:

$$\bar{V} = \frac{V_0 + V_p}{2} \quad (3.30)$$

Συνδυάζοντας τις Εξ. (3.26) έως (3.29) η παράμετρος r_c μπορεί να εκτιμηθεί:

$$r_c = \frac{5t_p S_0}{6(h_p - h_0)} (V_0 + V_p) \quad (3.31)$$

Σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία (Fread 1973), η παράμετρος r_c παίρνει τιμές μεγαλύτερες του 10 για φυσικές διατομές.

Λύνοντας την Εξ. (3.22) ως προς την παράγωγο της ταχύτητας ως προς το χώρο:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -\frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{V}{h} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.32)$$

και συνδυάζοντας τις Εξ. (3.32) και (3.24):

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -\frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{V}{h} \left(-\frac{1}{c} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{2}{3} \frac{S_0}{r_c^2} \right) \quad (3.33)$$

είναι δυνατόν να αντικαταστήσουμε την παράγωγο της ταχύτητας ως προς το χώρο στην Εξ. (3.23) και θεωρώντας ότι ισχύει η Εξ. (3.26):

$$h \frac{\partial V}{\partial t} - \left(\frac{2V+3g}{5} \right) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{2}{3} \frac{S_0}{r_c^2} (gh - V^2) = ghS_0 - \frac{\tau_b}{\rho} \quad (3.34)$$

Παρατηρείται ότι στην παραπάνω Εξ. (3.34) έχει επιτευχθεί ο στόχος απαλοιφής των παραγώγων ως προς το χώρο. Αν για τον υπολογισμό του όρου των τριβών πυθμένα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση Manning, η παραπάνω εξίσωση είναι δυνατόν να διακριτοποιηθεί χρησιμοποιώντας αριθμητικό σχήμα με εμπρόσθιες διαφορές ως προς το χρόνο:

$$V_{i,j}^{k+1} = V_{i,j}^k + \Delta t \left[gS_0 - g \frac{n^2 V_{i,j}^{k^2}}{h_{i,j}^{4/3}} + \left(\frac{2V_{i,j}^k + 3g}{5h_{i,j}^k} \right) \frac{h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k}{\Delta t} + \frac{2}{3} \frac{S_0}{r_c^2} \frac{gh_{i,j}^k - V_{i,j}^{k^2}}{h_{i,j}^k} \right] \quad (3.35)$$

Παρουσιάζεται το ίδιο πρόβλημα που εμφανίστηκε και στην περίπτωση της σταθερής παροχής, όπου η παροχή είναι μεν γνωστή σε κάθε χρονικό βήμα, αλλά δεν είναι γνωστή η κατανομή του βάθους και των ταχυτήτων ροής στην ανάντη οριακή διατομή.

Για να αντιμετωπιστεί το παραπάνω πρόβλημα, ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με αυτή της σταθερής παροχής. Η Εξ. (3.35) είναι δυνατόν να γραφτεί και με τον παρακάτω τρόπο:

$$V2_{i,j} = V1_{i,j} + \Delta t \left[gS_0 - g \frac{n^2 V1_{i,j}^2}{h1_{i,j}^{4/3}} + \left(\frac{2V1_{i,j} + 3g}{5h1_{i,j}} \right) \frac{\Delta H}{\Delta t} + \frac{2}{3} \frac{S_0}{r_c^2} \frac{gh1_{i,j} - V1_{i,j}^2}{h1_{i,j}} \right] \quad (3.36)$$

όπου με 1 σημειώνονται οι τιμές των μεταβλητών τη χρονική στιγμή t και με 2 τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$. Η παράμετρος ΔH είναι η μεταβολή της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας σε σχέση με το χρόνο:

$$\Delta H = h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k \quad (3.37)$$

ή αλλιώς

$$\Delta H = h2_{i,j} - h1_{i,j} \quad (3.38)$$

Για κάθε χρονική στιγμή $t+\Delta t$ θεωρείται η συνάρτηση-στόχος $G(\Delta H)$:

$$G(\Delta H) = \Delta x \sum_{i=1}^{i=im} [V2_{i,j}(\Delta H) \cdot h2_{i,j}(\Delta H)] - Q_{obs} \quad (3.39)$$

όπου Q_{obs} είναι η δεδομένη παροχή που αντιστοιχεί στην χρονική στιγμή $t+\Delta t$.

Η παράγωγος της συνάρτησης στόχου υπολογίζεται παρακάτω:

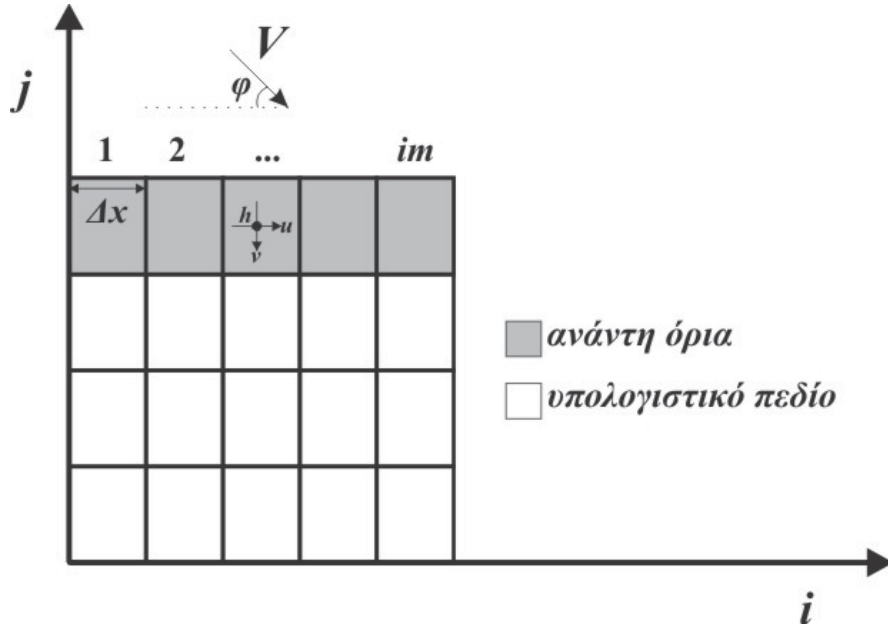
$$G'(\Delta H) = \Delta x \sum_{i=1}^{i=im} \left[\frac{3g+2V2_{i,j}(\Delta H)}{5} + V2_{i,j}(\Delta H) \right] \quad (3.40)$$

Η βέλτιστη τιμή ΔH είναι προφανώς αυτή που μηδενίζει τη συνάρτηση-στόχο $G(\Delta h)$. Ακολουθώντας την επαναληπτική διαδικασία Newton-Raphson για n φορές, είναι δυνατόν βρεθεί η βέλτιστη τιμή ΔH που να ικανοποιεί αυτή τη συνθήκη με κάποιο κριτήριο σύγκλισης (π.χ. $|\Delta H_{n+1} - \Delta H_n| < 0.00001$ m)

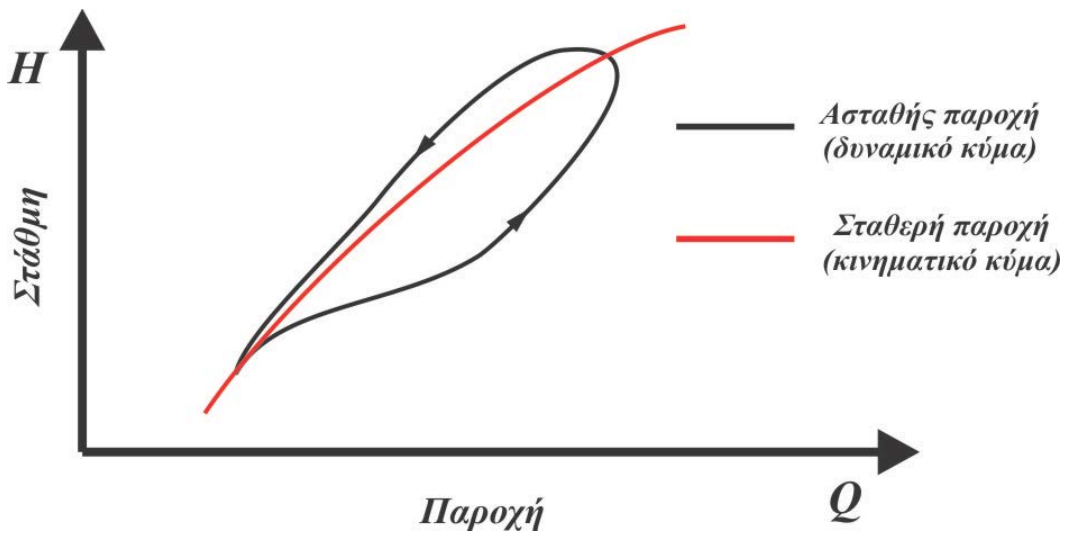
$$\Delta H_{n+1} = \Delta H_n - \frac{G(\Delta H_n)}{G'(\Delta H_n)} \quad (3.41)$$

Εφόσον έχει προσδιοριστεί η μεταβολή της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού υπολογίζεται η ταχύτητα ροής σε κάθε κελί της ανάντη οριακής διατομής με την Εξ. (3.36), για τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$. Στη συνέχεια υπολογίζεται η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$, σύμφωνα με την Εξ. (3.38), άρα και το βάθος ροής σε κάθε κελί της ανάντη οριακής διατομής με την Εξ. (3.20). Τέλος, υπολογίζονται οι συνιστώσες της ταχύτητας ροής σε κάθε κελί, αναλόγως με τη γωνία εισροής του πλημμυρικού κύματος στο υπολογιστικό πεδίο:

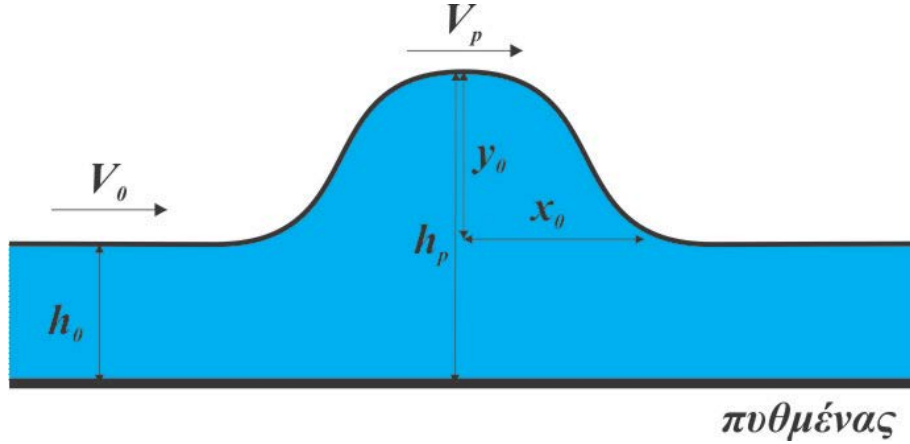
$$u_{i,j} = V_{i,j} \cdot \cos\varphi, \quad v_{i,j} = V_{i,j} \cdot \sin\varphi \quad (3.42)$$



Σχήμα 3.2 Εισροή νερού στο υπολογιστικό πεδίο



Σχήμα 3.3 Καμπύλες στάθμης-παροχής και φαινόμενο υστέρησης



Σχήμα 3.4 Μετάδοση πλημμυρικού κύματος

3.5 Κατάντη οριακές συνθήκες με το μοντέλο FLOW-R2D

Για τις κατάντη οριακές συνθήκες υπάρχει επίσης δυνατότητα επιλογών. Καταρχάς υπάρχει η δυνατότητα ορισμού ακίνητου όγκου νερού που προσομοιώνει είτε τη θάλασσα είτε κάποια λίμνη. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα σε περίπτωση που είναι γνωστές οι συνθήκες ροής στο κατάντη όριο του υπολογιστικού πεδίου, για τις μεν υποκρίσιμες συνθήκες ροής να απαιτείται μόνο το βάθος ροής, ενώ για τις δε υπερκρίσιμες συνθήκες ροής να μην απαιτείται κάποια πληροφορία (Abbott 1979).

Σε πραγματικές συνθήκες όμως είναι σχεδόν αδύνατον να είναι γνωστό εκ των προτέρων ποιές είναι οι συνθήκες ροής στο κατάντη όριο του υπολογιστικού πεδίου, για αυτό και υπάρχει η δυνατότητα στο μοντέλο FLOW-R2D των ανοιχτών ορίων, μέσω της προσέγγισης του κινηματικού κύματος (Dirichelet boundary conditions). Συγκεκριμένα το βάθος ροής στο κατάντη όριο προσδιορίζεται από την παρακάτω Εξ. (3.43):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + c \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (3.43)$$

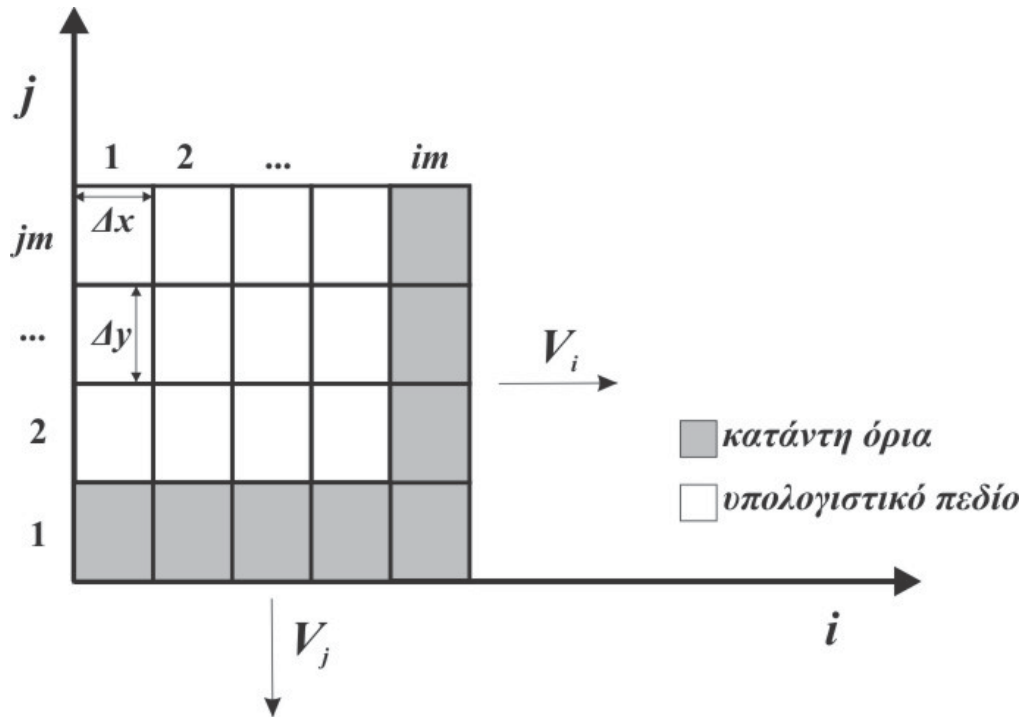
όπου αυτή διακριτοποιείται με αριθμητικό σχήμα εμπρόσθιων διαφορών για το χρόνο και οπίσθιων διαφορών για το χώρο (FTBS numerical scheme). Για παράδειγμα, αν το νερό εκρέει από ένα υπολογιστικό πεδίο (Σχήμα 3.5) ισχύουν για την μεν εκροή V_i :

$$h_{i,j}^{k+1} = h_{i,j}^k - c \frac{\Delta t}{\Delta x} (h_{i,j}^k - h_{i-1,j}^k) \quad (3.44)$$

για τη δε εκροή V_j :

$$h_{i,j}^{k+1} = h_{i,j}^k - c \frac{\Delta t}{\Delta y} (h_{i,j+1}^k - h_{i,j}^k) \quad (3.45)$$

Όσον αφορά στην ταχύτητα ροής, δε χρειάζεται να προσδιοριστεί. Με τα ανοιχτά όρια είναι δυνατόν να προσομοιωθεί οποιοδήποτε τμήμα ποταμού, χωρίς τα κατάντη όρια να επηρεάζουν την ανάντη περιοχή.



Σχήμα 3.5 Κατάντη οριακές συνθήκες

3.6 Όροι εισροής και εκροής

Οι όροι εισροής και εκροής (source and sink terms) υπεισέρχονται στην Εξίσωση Συνέχειας των 2D-SWE. Το μέγεθος αυτό συνίσταται σε ένα ρυθμό μάζας νερού που εισέρχεται ή εξέρχεται από το υπολογιστικό πεδίο, ανά χρονικό βήμα.

Με τον όρο εισροής είναι δυνατόν να προσομοιωθεί οποιαδήποτε "εξωτερική", σε σχέση με το υπολογιστικό πεδίο εισροή νερού σε αυτό. Η πιο σημαντική εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες που μπορεί να επιτευχθεί με τον όρο αυτόν, είναι η προσομοίωση της βροχόπτωσης σε ένα υπολογιστικό πεδίο.

Αντίστοιχα, με τον όρο εκροής είναι δυνατόν να προσομοιωθεί οποιαδήποτε "εξωτερική", εκροή νερού στο υπολογιστικό πεδίο. Οι πιο σημαντικές εφαρμογές σε πραγματικές συνθήκες που μπορεί να επιτευχθεί με τον όρο αυτόν και χρησιμοποιώντας εμπειρικές σχέσεις, είναι οι παρακάτω:

- το φαινόμενο της διήθησης
- η αποχέτευση των ομβρίων νερών
- η διοχέτευση πλημμυρικού όγκου στο υπόγειο δίκτυο ηλεκτρικού σιδηρόδρομου

Η διήθηση αν και δεν είναι σημαντική όταν εξετάζεται τμήμα ποταμού το οποίο και πλημμυρίζει, έχει σημαντική συνεισφορά όταν η κλίμακα προσομοίωσης είναι μεγαλύτερη από κάποιο τμήμα ποταμού, όπως είναι η λεκάνη απορροής. Σε αυτή την κλίμακα, η υδροδυναμική προσομοίωση κάποιου πλημμυρικού φαινομένου είναι απαραίτητο να συνυπολογίζει τις απώλειες λόγω διήθησης.

Στην πραγματικότητα το φαινόμενο της διήθησης περιγράφεται από τις Μερικές Διαφορικές Εξισώσεις Richards οι οποίες επιδέχονται μόνο αριθμητική λύση. Στην προκειμένη περίπτωση υιοθετείται απλοποιημένη προσέγγιση μέσω εμπειρικών εξισώσεων, όπως είναι η εξίσωση Kostiaikov, η εξίσωση Horton, η μέθοδος Green-Ampt, η εξίσωση Philip κ.λπ. (Borah 2011). Ενδεικτικά παρατίθεται η εξίσωση Kostiaikov η οποία είναι η σχετικά πιο απλή και έχει μόνο δύο παραμέτρους:

$$i = abt^{b-1} \quad (3.46)$$

όπου οι παράμετροι a και b εκτιμούνται από το είδος του εδάφους και t το χρονικό διάστημα που έχει περάσει από την έναρξη της διαδικασίας της διήθησης.

Ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων a , b μπορούν να βρεθούν στον παρακάτω Πίνακα 3.1 (Αντωνόπουλος 1999). Σημειώνεται επίσης ότι η διαδικασία της διήθησης δεν συνυπολογίζεται στις Εξισώσεις Ορμής, καθώς οι ταχύτητες που αναπτύσσονται είναι μικρές και δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα την Ποσότητα Κίνησης.

Όσον αφορά την αποχέτευση των ομβρίων νερών, επίσης υπάρχουν διάφορες εμπειρικές προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό του ρυθμού εκροής i , οι οποίες εξαρτώνται από το είδος της διάταξης εισόδου του νερού στο αποχετευτικό σύστημα (σχάρα, άνοιγμα στο κράσπεδο του πεζοδρομίου, συνδυασμός των δύο, κ.λπ.).

Πίνακας 3.1 Παράμετροι εξίσωσης Kostiaikov

Έδαφος	a (m/min ^b)	b
Αργίλος	0.00383	0.317
Αργιλώδης πηλός	0.00330	0.437
Ίλυο-πηλός	0.00320	0.503
Αμμώδης πηλός	0.00328	0.584
Άμμος	0.00361	0.642

3.7 Προσομοίωση τριβών πυθμένα

Η προσομοίωση τριβών πυθμένα αποτελεί ένα σημαντικό και πολύπλοκο ζήτημα στην προσομοίωση της πλημμυρικής ροής, ενώ δημιουργεί και αβεβαιότητα στα αποτελέσματα της όποιας προσομοίωσης. Οι διάφορες μέθοδοι προσομοίωσης των τριβών πυθμένα στην κλίμακα που εξετάζεται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής είναι κατά κύριο λόγο εμπειρικές.

Οι πιο γνωστές προσεγγίσεις για την προσομοίωση των τριβών πυθμένα, οι οποίες υιοθετούνται και στο μοντέλο FLOW-R2D είναι οι εξισώσεις Manning, Chézy και Darcy-Weisbach. Όσον αφορά στην εξίσωση Manning, οι τριβές μπορούν να υπολογιστούν με την παρακάτω σχέση:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \frac{gn^2}{R^{1/3}} V^2 \quad (3.47)$$

όπου R η υδραυλική ακτίνα, n ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning και V η μέση ταχύτητα.

Αντίστοιχα για την εξίσωση Chézy:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \frac{g}{C^2} V^2 \quad (3.48)$$

όπου C ο συντελεστής τραχύτητας κατά Chézy.

Τέλος, για την εξίσωση Darcy-Weisbach:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \frac{f}{8} V^2 \quad (3.49)$$

όπου f ο συντελεστής τραχύτητας κατά Darcy-Weisbach.

Για τους συντελεστές τραχύτητας κατά Manning και Chézy υπάρχει πληθώρα πινάκων προσδιορισμού των τιμών αυτών αναλόγως την περίπτωση, στη σχετική βιβλιογραφία (Chaudhry 2008, Chanson 2004). Ιδιαίτερα η εξίσωση Manning αποτελεί τη συνήθη επιλογή των ερευνητών και αποτελεί και την κύρια επιλογή ως μοντέλου τριβών πυθμένα στην παρούσα διατριβή. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή τραχύτητας κατά Darcy-Weisbach υπάρχει προσπάθεια μία πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση, η οποία είναι φυσικής βάσης και προκύπτει από τα πειράματα του Nikuradse (Nikuradse 1933).

Καταρχάς υπάρχει η πεπλεγμένη προσέγγιση των Colebrook-White (Colebrook 1939) για πλήρως τυρβώδη ροή ($Re > 4000$), που καλύπτει και την υδραυλικά λεία και την υδραυλικά τραχεία περιοχή για αγωγό κυκλικής διατομής:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k_s}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (3.50)$$

όπου k_s το ύψος τραχύτητας, Re ο αριθμός Reynolds και D η διάμετρος του αγωγού.

Μία ρητή επίλυση της Εξ. (3.50) είναι η προσέγγιση των Swamee-Jain (Swamee and Jain 1976):

$$f = 0.25 \left[\log \left(\frac{k_s}{3.7D} + \frac{5.74}{Re \sqrt{f}} \right) \right]^{-2} \quad (3.51)$$

Υπενθυμίζεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι παραπάνω σχέσεις σε περιπτώσεις ροής με ελεύθερη επιφάνεια θεωρώντας ότι ισχύει $D=4R$ και αγνοώντας ότι οι παραπάνω σχέσεις προέκυψαν από πειράματα που έγιναν σε αγωγό κυκλικής διατομής υπό πίεση. Επίσης, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται όταν χρησιμοποιούνται οι παραπάνω εξισώσεις στο ότι θα πρέπει να διασφαλίζεται ότι η ροή εντός του υπολογιστικού πεδίου είναι πλήρως τυρβώδης και σίγουρα ο αριθμός Reynolds να είναι $Re > 4000$.

Εφόσον έχει προσδιοριστεί η συνισταμένη διατμητική τάση, θα πρέπει να γίνει ανάλυση αυτής στις δύο διευθύνσεις x και y . Θεωρείται ότι το διάνυσμα αυτό είναι παράλληλο προς το αντίστοιχο της ταχύτητας, άρα η διατμητική τάση αναλύεται ως εξής:

$$\tau_{bx} = \tau_b \cdot \frac{u}{V}, \quad \tau_{by} = \tau_b \cdot \frac{v}{V} \quad (3.51)$$

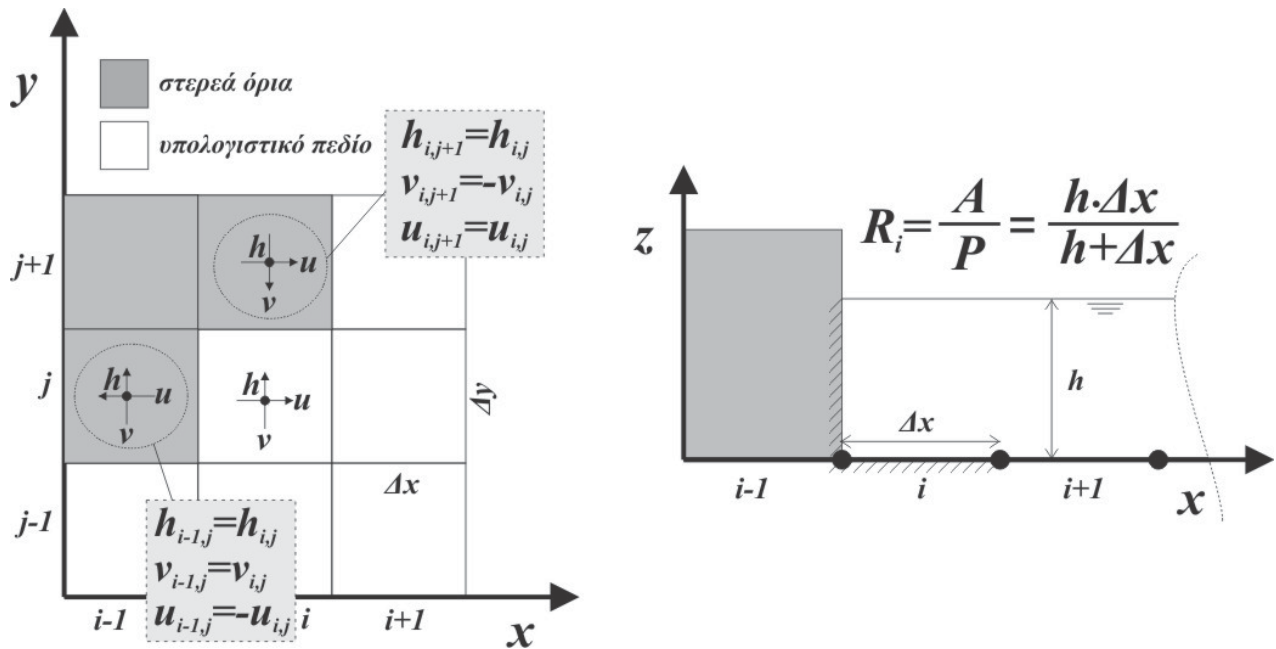
3.8 Στερεά όρια

Για τον ορισμό των στερεών ορίων χρησιμοποιείται η "μέθοδος της ανάκλασης" (reflection boundary method) (Chaudhry 2008). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, αν ένα κελί στο οποίο ρέει νερό συνορεύει με κάποιο στερεό κελί, αυτό το στερεό κελί παίρνει την τιμή του βάθους ροής και της παράλληλης συνιστώσας της ταχύτητας του υγρού γειτονικού κελιού και την τιμή της κάθετη συνιστώσας της ταχύτητας με αντίθετο πρόσημο (Σχήμα 3.6).

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής έγινε πρωτότυπη τροποποίηση της κλασικής μορφής της μεθόδου της ανάκλασης ούτως ώστε να συνυπολογίζεται και η επιπρόσθετη συνεισφορά των κάθετων τοιχωμάτων του εκάστοτε στερεού ορίου στις τριβές που αναπτύσσονται στη ροή, εκτός από τις τριβές πυθμένα (Bellos and Tsakiris 2015a). Συγκεκριμένα, η υδραυλική ακτίνα στα κελιά που συνορεύουν με στερεά κελιά δεν ταυτίζεται με το βάθος ροής, αλλά με την παρακάτω ποσότητα (Σχήμα 3.6):

$$R = \frac{A}{P} = \frac{h \cdot \Delta x}{h + \Delta x} \quad (3.52)$$

όπου A το εμβαδόν της υγρής διατομής και P το μήκος της βρεχόμενης περιμέτρου.



Σχήμα 3.6 Προσομοίωση στερεών ορίων

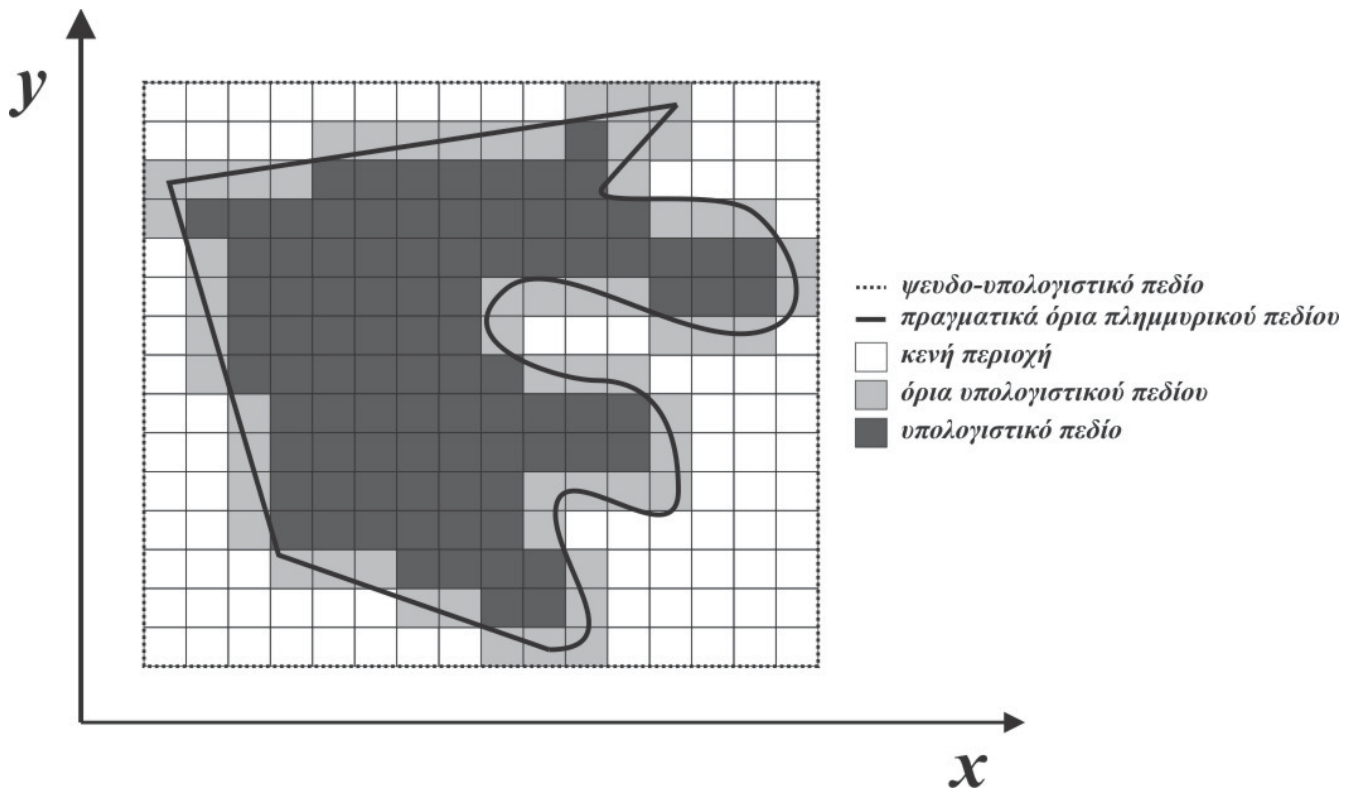
3.9 Υπολογιστικό πεδίο ακανόνιστης μορφής

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών είναι δυνατόν να εφαρμοστεί μόνο σε δομημένο πλέγμα. Ειδικότερα, οι 2D-SWE στην αρχική τους μορφή και χωρίς μετασχηματισμούς απαιτούν δομημένο πλέγμα ορθογωνικής μορφής. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις που απαιτείται προσομοίωση σε πραγματική κατάσταση, το υπολογιστικό πεδίο δεν είναι ορθογωνικής μορφής (π.χ. το κατάντη τμήμα του είναι κάποια ακτογραμμή ή επιλέγεται ως υπολογιστικό πεδίο μία ολόκληρη λεκάνη απορροής). Η

μία αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι το μη δομημένο πλέγμα (unstructured grid) και η αναγκαστική αλλαγή αριθμητικής μεθόδου (Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων ή Μέθοδος Πεπερασμένων Όγκων).

Η βασική όμως πηγή τοπογραφικής πληροφορίας στη σύγχρονη εποχή είναι τα δεδομένα GIS και δη η τοπογραφική πληροφορία σε μορφή raster (τετραγωνικά κελιά με την πληροφορία του υψομέτρου του εδάφους). Η μετατροπή αυτής της πληροφορίας σε μη δομημένο πλέγμα, μεταβλητής πυκνότητας και με μορφή κελιών διάφορης της τετραγωνικής, είναι δυνατόν να οδηγήσει σε σημαντική πολυπλοκότητα του αλγόριθμου αλλά και να "θυσιάσει" την πιστότητα της τοπογραφικής αποτύπωσης για χάρη της υδροδυναμικής προσομοίωσης (Hodges 2015).

Με το μοντέλο FLOW-R2D αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται θεωρώντας ότι υπάρχει ένα ψευδο-υπολογιστικό πεδίο το οποίο εσωκλείει το πραγματικό (Σχήμα 3.7). Η διάκριση μεταξύ των κελιών του πραγματικού υπολογιστικού πεδίου και του ψευδο-υπολογιστικού πεδίου γίνεται με μία χαρακτηριστική τιμή που παίρνει το κάθε κελί πριν από κάθε προσομοίωση. Όταν σαρώνει ο αλγόριθμος του μοντέλου FLOW-R2D το ψευδο-υπολογιστικό πεδίο ελέγχει σε κάθε κελί τη χαρακτηριστική αυτή τιμή και αναλόγως είτε εκτελεί την κυρίως υπορουτίνα των 2D-SWE ή δεν εκτελεί τίποτα. Με την παραπάνω αλγοριθμική τεχνική αντιμετωπίζονται όλα τα ζητήματα που αναλύθηκαν και πιο πάνω. Έτσι, διαφορετική χαρακτηριστική τιμή παίρνει κάθε κελί που είναι ανάντη όριο, κατάντη όριο, στερεό όριο κ.ο.κ.



Σχήμα 3.7 Ψευδο-υπολογιστικό πεδίο

3.10 Ταξινόμηση υπολογιστικών κελιών

Όπως προαναφέρθηκε, κάθε κελί του υπολογιστικού πεδίου είτε είναι κάποιο είδους όριο είτε όχι, παίρνει μία χαρακτηριστική τιμή. Επίσης υπάρχει περίπτωση η τραχύτητα του πυθμένα να μην είναι ενιαία σε όλο το υπολογιστικό πεδίο, επομένως να χρειάζεται η δημιουργία ζωνών τραχύτητας. Στην προσομοίωση κάποιας πραγματικής κατάστασης όμως, ενδέχεται ο ορισμός των στερεών ορίων (π.χ. οι συντεταγμένες των κτιρίων μίας πόλης) ή η δημιουργία ζωνών τραχύτητας να είναι μία εξαιρετικά επίπονη διαδικασία αν γίνεται "χειροκίνητα".

Στο πλαίσιο του μοντέλου FLOW-R2D αναπτύχθηκε υπορουτίνα η οποία αυτοματοποιεί την παραπάνω διαδικασία. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- ορισμός και εισαγωγή συντεταγμένων της εκάστοτε ζώνης σε πολύγωνα κυρτής μορφής
- σάρωση όλων των κελιών του υπολογιστικού πλέγματος
- έλεγχος αν οι συντεταγμένες του κάθε κελιού του υπολογιστικού πλέγματος βρίσκεται η δεν βρίσκεται στην υπό εξέταση ζώνη
- αλλαγή ή όχι της εκάστοτε μεταβλητής (π.χ. συντελεστής τραχύτητας ή χαρακτηριστική τιμή κελιού)

Ο έλεγχος που γίνεται για το αν οι συντεταγμένες του εκάστοτε κελιού του υπολογιστικού πλέγματος βρίσκονται εντός ή εκτός της υπό εξέταση ζώνης έχει βάση τη διανυσματική γεωμετρία και παρατίθεται παρακάτω.

Έστω τετράπλευρο πολύγωνα κυρτής μορφής ΑΒΓΔ (Σχήμα 3.8) και Ε το υπό έλεγχο σημείο. Υπολογίζονται τα εξωτερικά γινόμενα μεταξύ του σημείου ελέγχου και ανά δύο σημείων του τετραπλεύρου:

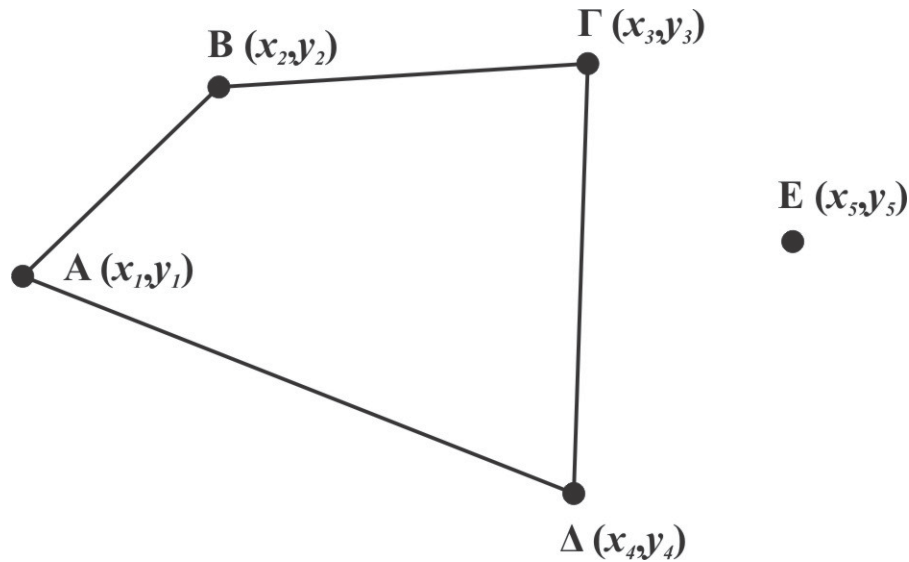
$$\det(\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{AE}) = \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_5 - x_1 & y_5 - y_1 \end{vmatrix}$$

$$\det(\overrightarrow{BG}, \overrightarrow{BE}) = \begin{vmatrix} x_3 - x_2 & y_3 - y_2 \\ x_5 - x_2 & y_5 - y_2 \end{vmatrix}$$

$$\det(\overrightarrow{GD}, \overrightarrow{GE}) = \begin{vmatrix} x_4 - x_3 & y_4 - y_3 \\ x_5 - x_3 & y_5 - y_3 \end{vmatrix}$$

$$\det(\overrightarrow{DA}, \overrightarrow{DE}) = \begin{vmatrix} x_1 - x_4 & y_1 - y_4 \\ x_5 - x_4 & y_5 - y_4 \end{vmatrix}$$

Αν τα εξωτερικά γινόμενα έχουν όλα το ίδιο πρόσημο, τότε το σημείο Ε είναι εντός πολυγώνου, αλλιώς είναι εκτός. Εκτός από τετράπλευρο, η παραπάνω μέθοδος μπορεί να γενικευτεί για οποιοδήποτε πολύγωνα n πλευρών, αλλά με την προϋπόθεση ότι αυτό είναι κυρτό.



Σχήμα 3.8 Κυρτό πολύγωνο

3.11 Παρουσίαση αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος του αριθμητικού μοντέλου FLOW-R2D αναπτύχθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Fortran 90/95 και παρατίθεται στο Παράρτημα της παρούσας διατριβής όπου παρεμβάλλονται ενδεικτικά σχόλια για την καλύτερη κατανόησή του. Η γλώσσα προγραμματισμού επιλέχθηκε με βάση το κριτήριο της ταχύτητας των υπολογισμών εφόσον οι προσομοιώσεις απαιτούν σημαντικό υπολογιστικό χρόνο. Στη συνέχεια ακολουθεί σύντομη ανάλυση της δομής του αλγορίθμου.

Σε πρώτη φάση δηλώνονται όλες οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στο αριθμητικό μοντέλο, είτε είναι απλές μεταβλητές είτε είναι πίνακες. Ακολουθεί η εισαγωγή δεδομένων με το αρχείο *data.csv*. με το οποίο εισάγονται οι εξής μεταβλητές: η επιτάχυνση της βαρύτητας, το βήμα χώρου καθώς και ο αριθμός κελιών στις δύο διευθύνσεις *x* και *y*, ο συντελεστής διάχυσης, ο αριθμός Courant, το κατώφλι διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα, η γωνία εισροής της ροής στο υπολογιστικό πεδίο, η σταθερή παροχή της ανάντη οριακής συνθήκης, η ενεργή κλίση της ανάντη οριακής διατομής, η διόρθωση λόγω υποχώρησης της πλημμυρικής αιχμής, το σταθερό βάθος ροής στις κατάντη οριακές συνθήκες και ο αριθμός των χρονικών στιγμών που εγγράφονται τα αποτελέσματα καθώς και των θέσεων όπου επιθυμείται καταγραφή της υγρής διατομής. Επίσης στο ίδιο αρχείο δηλώνεται αν οι ανάντη οριακές συνθήκες αφορούν σταθερή παροχή ή ένα πλημμυρικό υδρογράφημα, αν υπάρχουν οριακές συνθήκες και αν υπάρχει υετογράφημα ως όρος εισροή στο υπολογιστικό πεδίο.

Με άλλο αρχείο το οποίο ονομάζεται *dtm.csv* εισάγονται οι συντεταγμένες του υπολογιστικού πεδίου, το υψόμετρο του εδάφους, ο συντελεστής τραχύτητας σε κάθε κελί και η χαρακτηριστική τιμή του κάθε κελιού έτσι όπως ορίστηκε παραπάνω. Τέλος, με τα αρχεία *hydrograph.csv*, *hyetograph.csv* και *initial.csv* εισάγονται το πλημμυρικό υδρογράφημα της ανάντη οριακής συνθήκης, το υετογράφημα και οι αρχικές συνθήκες σε κάθε κελί του υπολογιστικού πεδίου, εφόσον έχει δηλωθεί στο αρχείο *data.csv* ότι τα εν λόγω αρχεία απαιτούνται.

Στη συνέχεια και αφού υπολογιστούν κάποια προκαταρκτικά μεγέθη όπως είναι οι κλίσεις του πυθμένα και ο υπολογισμός του αρχικού όγκου νερού ο οποίος απαιτείται για τον προσδιορισμό του ισοζυγίου του υδάτινου όγκου σε κάθε χρονικό βήμα με στόχο τον έλεγχο του μοντέλου, ακολουθεί το κύριο σώμα του αλγορίθμου, το οποίο έχει αναπτυχθεί για προγραμματιστικούς λόγους με διάφορες υπορουτίνες οι οποίες παρατίθενται μετά το τέλος του κυρίως αυτού τμήματος.

Στο κυρίως αυτό τμήμα προσδιορίζεται κάθε φορά το χρονικό βήμα με βάση τον αριθμό Courant και καλούνται διαδοχικά οι υπορουτίνες των ανάντη οριακών συνθηκών, της επίλυσης των 2D-SWE και των κατάντη οριακών συνθηκών τόσο για το βήμα πρόβλεψης όσο και για το βήμα διόρθωσης, ενώ καλούνται επίσης εφόσον χρειάζεται και τις υπορουτίνες των στερεών ορίων. Στη συνέχεια, αφού τελειώσει ο κύριος όγκος των υπολογισμών, υπολογίζεται η ταχύτητα ροής ως συνισταμένη των ταχυτήτων ροής u και v , ο αριθμός Froude και το μέγιστο βάθος ροής σε κάθε κελί του υπολογιστικού πλέγματος. Υπολογίζεται επίσης το ισοζύγιο του υδάτινου όγκου. Τέλος, πριν το τέλος κάθε επαναληπτικού βήματος γίνεται "παλαίωση" των μεταβλητών με στόχο να χρησιμοποιηθούν για το επόμενο χρονικό βήμα.

Έπειτα από κάθε χρονική στιγμή που δηλώνεται ότι επιθυμείται καταγραφή των δεδομένων εγγράφονται σε διάφορα αρχεία τα βάθη ροής, οι ταχύτητες ροής, τα μέγιστα βάθη ροής και ο αριθμός Froude σε κάθε κελί του υπολογιστικού πλέγματος, ενώ επίσης εγγράφονται και οι υγρές διατομές καθώς και μηκοτομές (προφίλ) νερού σε θέσεις οι οποίες έχουν δηλωθεί στα δεδομένα εισόδου. Τέλος καταγράφεται η χρονική εξέλιξη του βάθους ροής σε διάφορα κελιά τα οποία έχουν δηλωθεί στα δεδομένα εισόδου.

4. ΠΡΟΤΥΠΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι πρότυποι έλεγχοι του μοντέλου FLOW-R2D (benchmarking test), με τους οποίους επιβεβαιώνεται η ικανότητα του μοντέλου να προσομοιώσει διάφορες περιπτώσεις πλημμυρικής ροής. Υπάρχουν διάφορες μελέτες στη σχετική βιβλιογραφία για το ποιες είναι οι προδιαγραφές που πρέπει να πληρούνται για τον έλεγχο του εκάστοτε μοντέλου (Bates et al. 2005), καθώς και προτάσεις για το ποιοί έλεγχοι πρέπει να πραγματοποιούνται (Néelz and Pender 2010). Στην παρούσα διατριβή προτείνεται ότι εφόσον οι διάφοροι έλεγχοι που αφορούν στο αριθμητικό σχήμα (κριτήριο ευστάθειας, κριτήριο σύγκλισης και κριτήριο συνέπειας) έχουν γίνει, το κάθε μοντέλο που αφορά στην προσομοίωση ροής σε πραγματικές συνθήκες θα πρέπει να ελέγχεται με αντίστοιχα δεδομένα που προκύπτουν από:

- αναλυτικές λύσεις
- πειραματικά δεδομένα
- μετρήσεις πεδίου σε πραγματικά πλημμυρικά γεγονότα

Είναι κοινά αποδεκτό ότι ειδικά για το φαινόμενο των πλημμυρικών ροών, υπάρχει έλλειψη δεδομένων ιδιαίτερα όσον αφορά τις πραγματικές μετρήσεις, γεγονός που οφείλεται και στη δυσκολία λόγω της φύσης του φαινομένου. Σημαντική προσπάθεια συλλογής δεδομένων από πραγματικές μετρήσεις και πειράματα αποτελεί το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα IMPACT (Investigation of extreme flood Processes And unCerTainty), (Zech and Soares-Frazao 2007), καθώς και το Δίκτυο Δεδομένων ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ (<http://deucalionproject.gr/>).

Ένα ακόμα ενδιαφέρον πεδίο συζήτησης είναι το ποιες μεταβλητές ελέγχονται καθώς και ποιοί δείκτες χρησιμοποιούνται για να χαρακτηριστεί μία προσομοίωση επιτυχής ή όχι. Από τη σχετική βιβλιογραφία μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη προδιαγραφή για το ποιες μεταβλητές ελέγχονται, όπως επίσης και ποιος δείκτης χρησιμοποιείται. Συνεπώς, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής δεν ακολουθείται συγκεκριμένη μεθοδολογία, αλλά εξετάζεται η κάθε περίπτωση ξεχωριστά ανάλογα με το φαινόμενο, αλλά και τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα. Σαν γενικές αρχές όμως πρέπει να διατυπωθεί ότι για τα δισδιάστατα μοντέλα δεν επαρκεί ως παράμετρος

ελέγχου μόνο το βάθος ροής, αλλά και η ταχύτητα ροής (Guinot and Cappelaere 2009). Δυστυχώς, δεδομένα ταχύτητας ροής είναι πολύ πιο σπάνια σε σχέση με τα αντίστοιχα του βάθους ροής.

Όσον αφορά τις περιπτώσεις όπου είναι καταγεγραμμένη η εξέλιξη στον χρόνο των διάφορων μεταβλητών, για την εκάστοτε σύγκριση το ενδιαφέρον εστιάζεται στο κατά πόσον επιτυγχάνεται ικανοποιητική προσομοίωση της μορφής και της τάξης μεγέθους της μεταβλητής σε σχέση με τις μετρήσεις. Για αυτές τις περιπτώσεις θεωρείται καταλληλότερος ο συντελεστής συσχέτισης κατά Pearson (Forrester et al. 2008, Pearson 1895), σε αντίθεση με άλλους δείκτες όπως ο Nash-Sutcliffe κλπ. Συγκεκριμένα ο συντελεστής συσχέτισης κατά Pearson υπολογίζεται:

$$PCC = \frac{m \sum_{i=1}^m (f_{num} f_{obs}) - \sum_{i=1}^m (f_{obs}) \sum_{i=1}^m (f_{num})}{\sqrt{[m \sum_{i=1}^m (f_{obs})^2 - (\sum_{i=1}^m (f_{obs}))^2][m \sum_{i=1}^m (f_{num})^2 - (\sum_{i=1}^m (f_{num}))^2]}} \quad (4.1)$$

όπου f η εκάστοτε μεταβλητή (βάθος ροής, ταχύτητα ροής κλπ) και m το μέγεθος του δείγματος. Ο δείκτης num συμβολίζει την προσομοιωμένη μεταβλητή, ενώ ο δείκτης obs την πραγματική τιμή της μεταβλητής. Η βέλτιστη τιμή του PCC είναι το 1, ενώ η χειρότερη το 0.

Στις περιπτώσεις όπου δεν είναι καταγεγραμμένη η δυναμική εξέλιξη του φαινομένου, αλλά τα μόνα διαθέσιμα δεδομένα είναι κάποιες ακραίες τιμές σε διάφορες θέσεις (π.χ. μέγιστο βάθος ροής ή χρονική στιγμή που παρουσιάζεται αυτό το μέγιστο), ακολουθείται διαφορετική προσέγγιση και χρησιμοποιείται η Ρίζα του Μέσου Τετραγωνικό Σφάλματος:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^m (f_{obs} - f_{num})^2} \quad (4.2)$$

Η βέλτιστη τιμή του $RMSE$ είναι το 0, ενώ δεν υπάρχει άνω όριο.

Σημαντική παράμετρος που πρέπει επίσης να ελέγχεται κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων είναι το ισοζύγιο μάζας του υδάτινου όγκου. Σε όλες τις προσομοιώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο του μοντέλου, το ισοζύγιο μάζας δεν είχε αποκλίσεις μεγαλύτερες από 10%.

Τέλος, ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται είναι ακόμα μία σημαντική παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε κάθε προσομοίωση. Λόγω της συνεχούς αλλαγής των υπολογιστικών δυνατοτήτων, ο υπολογιστικός χρόνος θα κατηγοριοποιείται με βάση την τάξη μεγέθους του χρονικού διαστήματος που απαιτείται (δευτερόλεπτα, λεπτά, ώρες, ημέρες, μήνες).

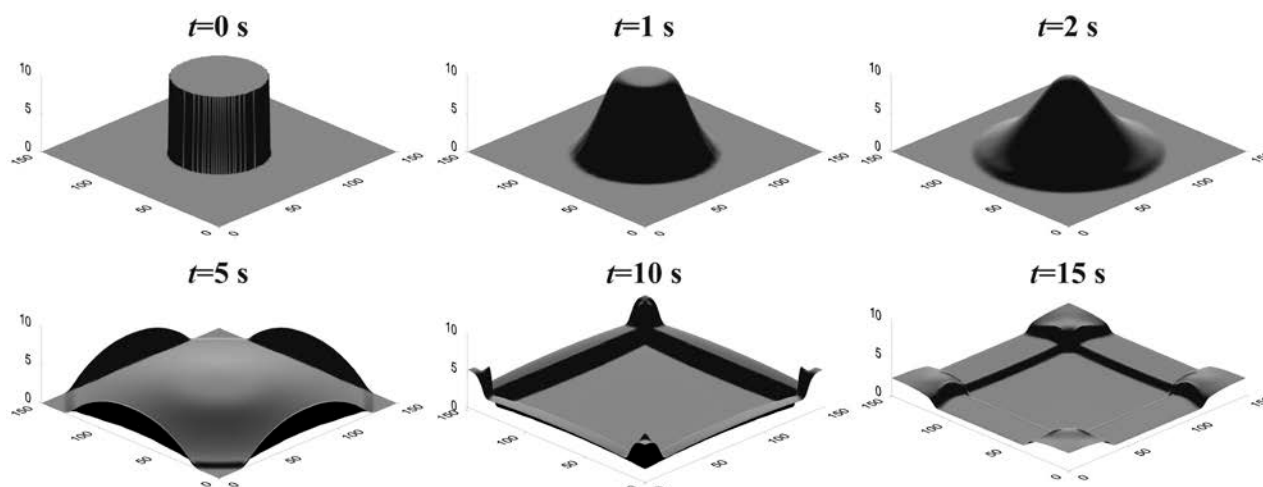
Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση των ελέγχων. Σημειώνεται ότι σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται απλά η σύγκριση των δεδομένων με την βέλτιστη προσομοίωση και όχι η ανάλυση ευαισθησίας ή η βαθμονόμηση των εκάστοτε παραμέτρων.

4.2 Υποθετική θραύση κυκλικού φράγματος

Ο έλεγχος αυτός εντάσσεται στο πλαίσιο του αρχικού σταδίου διερεύνησης της ικανότητας του μοντέλου και κυρίως χρησιμοποιείται για τον ποιοτικό έλεγχο του μοντέλου σε συνθήκες ασυνεχειών (shock capturing capability) καθώς και σε έλεγχο των στερεών ορίων, εφόσον δεν μπορεί να γίνει σύγκριση με κάποια αναλυτική λύση, ούτε υπάρχουν αντίστοιχα δεδομένα από πειράματα ή πραγματικές μετρήσεις (Tsakiris and Bellos 2014). Εντούτοις χρησιμοποιείται από αρκετούς ερευνητές

για να συγκρίνουν τα αριθμητικά αποτελέσματα του μοντέλου τους (Anastasiou and Chan 1997, Gwo-Fon et al. 2003, Epricum et al. 2010).

Στην παρούσα προσομοίωση θεωρήθηκε υπολογιστικό πεδίο οριζόντιου πυθμένα πλάτους 150x150 m, με στερεά περιμετρικά όρια, ενώ στο κέντρο του υπολογιστικού πεδίου θεωρήθηκε ως αρχική συνθήκη κυλινδρικός όγκος νερού βάθους 10 m και διαμέτρου 30 m. Για το υπολογιστικό πλέγμα χρησιμοποιήθηκαν τετράγωνα κελιά διαστάσεων 1x1 m. Το υπολογιστικό πεδίο διακριτοποιήθηκε με 22500 κελιά. Ο συντελεστής διάχυσης θεωρήθηκε $\omega=0.90$, ο αριθμός Courant $CFL=0.1$ και το κατώφλι διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα $h_{dry}=7 \times 10^{-5}$ m. Για την προσομοίωση των τριβών πυθμένα χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Manning. Ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning $n=0.012$ s/m^{1/3}. Στο Σχήμα 4.1 που ακολουθεί φαίνεται σε διάφορες χρονικές στιγμές η εξέλιξη της προσομοίωσης. Παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του υδάτινου όγκου είναι η αναμενόμενη. Η ασυνέχεια στο μέτωπο του κύματος προσομοιώθηκε χωρίς αστάθειες, ενώ τα στερεά όρια προσομοίωσαν ικανοποιητικά το φαινόμενο της ανάκλασης του νερού σε στερεά επιφάνεια. Τέλος, η τάξη μεγέθους του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για τον εν λόγω έλεγχο είναι "δευτερόλεπτα".



Σχήμα 4.1 Υποθετική θραύση κυκλικού φράγματος σε διάφορες χρονικές στιγμές

4.3 Υδραυλικό άλμα σε ορθογωνικό αγωγό

Στο πλαίσιο αυτού του ελέγχου έγινε η προσομοίωση της μετάβασης της ροής από υπερκρίσιμες σε υποκρίσιμες συνθήκες (Tsakiris and Bellos 2014). Για το σκοπό αυτό θεωρήθηκε ορθογωνικός αγωγός στον οποίο ρέει παροχή $Q=10$ m³/s, ενώ είναι πλάτους $B=20$ m και μήκους $L=100$ m, όπου στο ανάντη μισό τμήμα η κλίση του αγωγού είναι 3% (απότομη κλίση και υπερκρίσιμες συνθήκες ροής) και στο κατόντη μισό τμήμα 0.03% (ήπια κλίση και υποκρίσιμες συνθήκες ροής). Ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning θεωρήθηκε $n=0.030$ s/m^{1/3}.

Από τη θεωρία, κατά τη μετάβαση από την υπερκρίσιμη συνθήκη ροής στην υποκρίσιμη σχηματίζεται υδραυλικό άλμα. Ο έλεγχος αυτός είναι σημαντικός διότι εκτός του ότι είναι δυνατόν γίνει σύγκριση της προσομοίωσης με δεδομένα που προέκυψαν από αναλυτικές σχέσεις, ελέγχεται η ικανότητα του

μοντέλου περιγραφής των ασυνεχειών (shock capturing capability), οι οποίες παρουσιάζονται πολύ συχνά σε πραγματικές συνθήκες και η προσομοίωσή τους είναι σημαντική για όποιο σχέδιο διαχείρισης της πλημμύρας καταρτιστεί.

Όσον αφορά στην αναλυτική λύση, σύμφωνα με την Εξίσωση του Manning για σταθερή ομοιόμορφη ροή σε αγωγό απείρου πλάτους (εφόσον θεωρηθεί ότι τα κάθετα τοιχώματα του αγωγού δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα τη ροή):

$$q = \frac{1}{n} h_n^{5/3} S_o^{1/2} \quad (4.3)$$

όπου q η μοναδιαία παροχή, ίση με Q/B .

Από την Εξ. (4.1), προκύπτει ότι το κανονικό βάθος ροής για το μεν ανάντη μισό του αγωγού είναι $h_n=0.23$ m, για το δε κατάντη $h_n=0.92$ m. Το κρίσιμο βάθος ροής προκύπτει από την παρακάτω Εξ (4.2) ίσο με $h_c=0.29$ m:

$$h_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3} \quad (4.4)$$

Άρα με τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλυτικών σχέσεων επιβεβαιώνεται ότι η ροή στο ανάντη μισό τμήμα του αγωγού είναι υπερκρίσιμη και στο κατάντη μισό υποκρίσιμη. Στην περιοχή μετάβασης όμως η ροή γίνεται σταθερή ανομοιόμορφη και βαθμιαία μεταβαλλόμενη, ενώ κάποια στιγμή σχηματίζεται υδραυλικό άλμα. Τρεις είναι οι πιθανές θέσεις του υδραυλικού άλματος:

- στο απότομο τμήμα του αγωγού σχηματίζεται υδραυλικό άλμα και στη συνέχεια η ροή μεταβάλλεται βαθμιαία ακολουθώντας το υδραυλικό προφίλ S1 μέχρι να φτάσει το κανονικό βάθος ροής του κατάντη μισού τμήματος του αγωγού
- στο σημείο αλλαγής κλίσης του αγωγού, η ροή μεταβάλλεται βαθμιαία ακολουθώντας το υδραυλικό προφίλ M3, όπου φτάνοντας το συζυγές βάθος του κανονικού βάθους ροής του κατάντη μισού τμήματος του αγωγού σχηματίζεται υδραυλικό άλμα
- στο σημείο αλλαγής της κλίσης σχηματίζεται υδραυλικό άλμα, εφόσον τα δύο κανονικά βάθη ροής για το ανάντη και το κατάντη τμήμα του αγωγού είναι συζυγή

Στην προκειμένη περίπτωση το υδραυλικό άλμα σχηματίζεται στο απότομο τμήμα του αγωγού. Το συζυγές βάθος που προκύπτει από το κανονικό βάθος ροής στο ανάντη μισό τμήμα του αγωγού προκύπτει από τη διατήρηση της Ειδικής Ενέργειας:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \quad (4.5)$$

όπου Fr_1 είναι ο αριθμός Froude number υπολογισμένος με το βάθος ροής h_1 .

Το μήκος του υδραυλικού άλματος μπορεί να εκτιμηθεί από την παρακάτω εμπειρική σχέση που προέκυψε από πειραματικές μετρήσεις για $h/B < 0.1$ (Chaudhry 2008):

$$\frac{L_r}{h} = 160 \tanh\left(\frac{Fr}{20}\right) - 1.2 \quad (4.6)$$

όπου L_r είναι το μήκος του υδραυλικού άλματος.

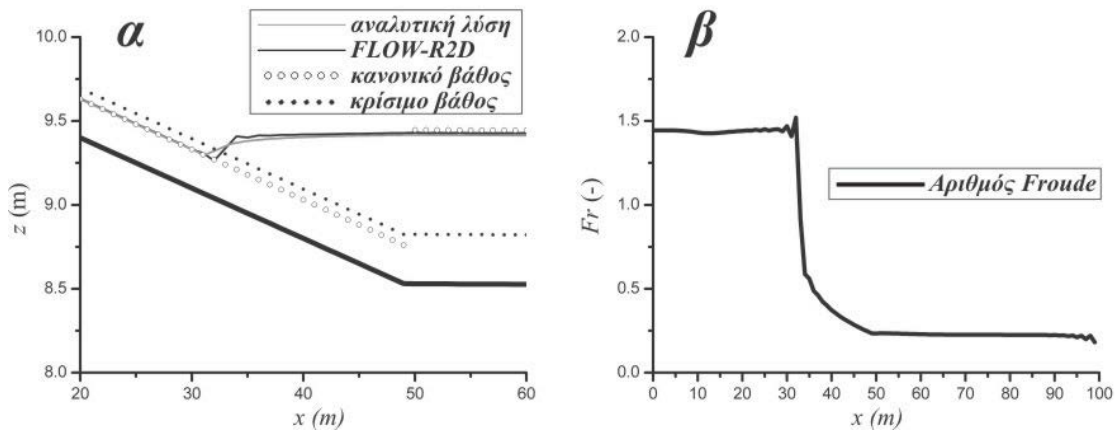
Τέλος, τα βάθη στη βαθμιαία μεταβαλλόμενη ροή είναι δυνατόν να υπολογιστούν από την αναλυτική σχέση της Διατήρησης της Ενέργειας:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - Fr^2} \quad (4.7)$$

όπου dh/dx είναι η παράγωγος του βάθους ροής σε σχέση με μήκος.

Για την αριθμητική προσομοίωση του παραπάνω ελέγχου με το μοντέλο FLOW-R2D χρησιμοποιήθηκε υπολογιστικό πλέγμα με τετραγωνικά κελιά διαστάσεων 1×1 m. Το υπολογιστικό πεδίο διακριτοποιήθηκε με 2200 κελιά. Ο συντελεστής διάχυσης θεωρήθηκε $\omega=0.99$, ο αριθμός Courant $CFL=0.1$ και το κατώφλι διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα $h_{dry}=3 \times 10^{-3}$ m. Σημειώνεται ότι στην εν λόγω προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε η τεχνική Time-Marching Method, όπου ως αρχική συνθήκη θεωρήθηκε ο άδειος αγωγός, ενώ έπειτα από κάποιο χρονικό διάστημα προσομοίωσης η ροή μονιμοποιείται και δεν μεταβάλλονται οι εκάστοτε μεταβλητές (βάθος και ταχύτητα ροής). Ως ανάντη οριακή συνθήκη θεωρήθηκε η παροχή $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$ και ως κατάντη το κανονικό βάθος ροής για την κλίση του κατάντη μισού του αγωγού, $h_n=0.92$ m. Η τάξη μεγέθους του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για τον εν λόγω έλεγχο είναι "δευτερόλεπτα".

Στο παρακάτω Σχήμα 4.2α απεικονίζεται λεπτομέρεια του προφίλ ροής στο μεταβατικό τμήμα του αγωγού και κατά μήκος του κεντρικού του άξονα, καθώς και σύγκριση των αριθμητικών με τα αναλυτικά δεδομένα. Στο Σχήμα 4.2β απεικονίζεται ο αριθμός Froude επίσης κατά μήκος του κεντρικού άξονα του αγωγού. Παρατηρείται ότι υπάρχει σχεδόν ταύτιση των δεδομένων της προσομοίωσης με τα δεδομένα των αναλυτικών σχέσεων, ενώ η περιγραφή του υδραυλικού άλματος είναι ικανοποιητική. Με κριτήριο τον αριθμό Froude, όπου το υδραυλικό άλμα σχηματίζεται όταν αυτός πάρει την τιμή 1, το υδραυλικό άλμα σύμφωνα με το μοντέλο FLOW-R2D σχηματίζεται στη θέση $x=32.9$ m από το ανάντη όριο του αγωγού. Σύμφωνα με την αναλυτική επίλυση, το υδραυλικό άλμα σχηματίζεται στη θέση $x=32.3$ m.



Σχήμα 4.2 α) Προφίλ ροής στο μεταβατικό τμήμα του αγωγού κατά μήκος του κεντρικού άξονα β) Αριθμός Froude κατά μήκος του κεντρικού άξονα του αγωγού

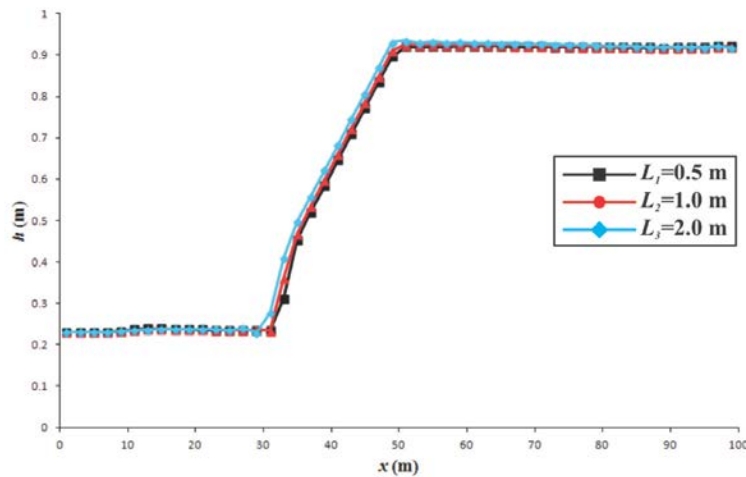
4.4 Έλεγχος κριτηρίου Σύγκλισης

Στο πλαίσιο αυτού του ελέγχου εξετάζεται το πώς επηρεάζεται η αριθμητική επίλυση από το μέγεθος του κελιού του υπολογιστικού πλέγματος, καθώς και για το αν ικανοποιείται το κριτήριο Σύγκλισης (Convergence) στο αριθμητικό μοντέλο FLOW-R2D. Το σενάριο εφαρμογής είναι επίσης το υδραυλικό άλμα σε ορθογωνικό αγωγό, έτσι όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Ως χαρακτηριστική μεταβλητή επιλέχθηκε το βάθος ροής κατά μήκος του κεντρικού άξονα του υποθετικού αγωγού. Τρία διαφορετικά σενάρια προσομοιώθηκαν με λόγο αραίωσης υπολογιστικού πλέγματος $r_L=2$ και για μεγέθη κελιού $L_1=0.5$ m, $L_2=1.0$ m και $L_3=2.0$.

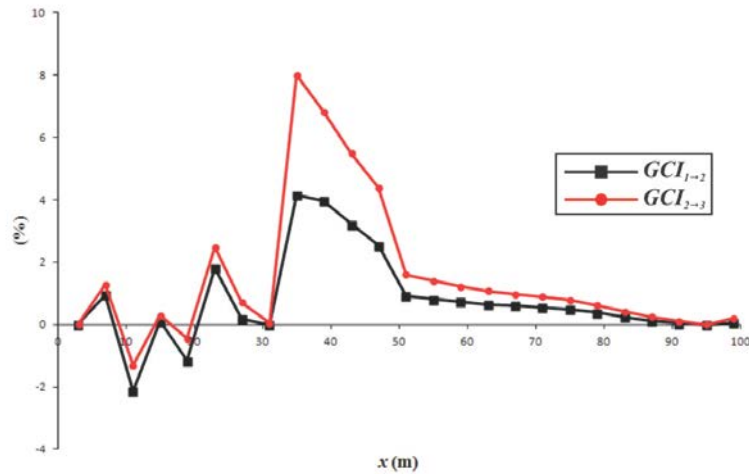
Στο Σχήμα 4.3 παρατίθενται τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης για το βάθος ροής και για τα διάφορα σενάρια μεγέθους του κανάβου, ενώ στο Σχήμα 4.4 απεικονίζονται ο $GCI_{1 \rightarrow 2}$ και ο $GCI_{2 \rightarrow 3}$, κατά μήκος του υποθετικού αγωγού. Με βάση τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης, φαίνεται ότι το εύρος τιμών του GCI για την αραίωση του υπολογιστικού πλέγματος από $L_1=0.5$ m σε $L_2=1.0$ m, αλλά και για την αραίωση του υπολογιστικού πλέγματος από $L_2=1.0$ m σε $L_3=2.0$ m κινείται εντός αποδεκτού πλαισίου, ενώ στην πρώτη περίπτωση είναι μικρότερος από τη δεύτερη, όπως και αναμενόταν.

Επίσης υπολογίζεται και ο λόγος $C_G=GCI_{2 \rightarrow 3}/r^p \cdot GCI_{1 \rightarrow 2}$ ο οποίος και απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5, επίσης κατά μήκος του υποθετικού αγωγού. Υπενθυμίζεται ότι όσο πιο κοντά στη μονάδα βρίσκεται αυτός ο λόγος τόσο ικανοποιείται το κριτήριο της σύγκλισης, όπου η αριθμητική επίλυση τείνει σε μία ασυμπτωτική λύση καθώς το μέγεθος του κελιού τείνει προς το μηδέν. Κρίνοντας τα αποτελέσματα, φαίνεται ότι το κριτήριο σύγκλισης ικανοποιείται από το αριθμητικό μοντέλο FLOW-R2D.

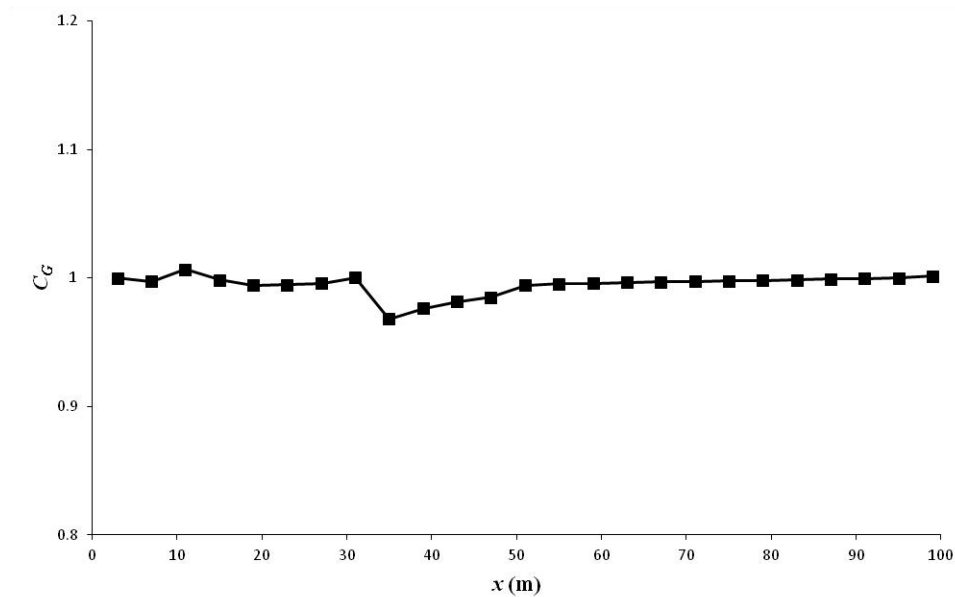
Φαίνεται ότι υπάρχει μία σχετική αύξηση του σφάλματος, καθώς και μείωση του παραπάνω λόγου στην περιοχή που συμβαίνει το υδραυλικό άλμα, γεγονός που δείχνει ότι σε περιπτώσεις ασυνεχειών εισάγεται μεγαλύτερο ποσοστό αβεβαιότητας λόγω μεγέθους κανάβου στην αριθμητική επίλυση, σε σχέση με τις σχετικά πιο ομαλές περιπτώσεις ροής και το οποίο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.



Σχήμα 4.3 Βάθος ροής κατά μήκος του κεντρικού άξονα του υποθετικού αγωγού για διάφορα μεγέθη κανάβου



Σχήμα 4.4 Δείκτες GCI για τα διάφορα σενάρια αραιώσης υπολογιστικού πλέγματος κατά μήκος του κεντρικού άξονα του υποθετικού αγωγού



Σχήμα 4.5 Λόγος C_G για τα διάφορα κατά μήκος του κεντρικού άξονα του υποθετικού αγωγού

4.5 Θραύση φράγματος και μετάδοση πλημμυρικού κύματος σε τριγωνικό αναβαθμό

Σε αυτόν τον έλεγχο γίνεται προσομοίωση με το μοντέλο FLOW-R2D στιγμιαίας και απότομης θραύσης φράγματος, καθώς και της επακόλουθης μετάδοσης πλημμυρικού κύματος σε οριζόντιο ξηρό πυθμένα, σε τριγωνικό αναβαθμό και τέλος σε λεκάνη ηρεμίας (Tsakiris and Bellos 2014). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με αντίστοιχα δεδομένα που προέκυψαν από πειραματική διαδικασία (Soares-Frazao 2007), η οποία εντάσσεται στη βιβλιοθήκη δεδομένων του IMPACT Project. Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζεται τομή της πειραματικής διάταξης. Τα πειραματικά

δεδομένα αποτελούνται από πέντε προφίλ νερού σε διάφορες χρονικές στιγμές, καθώς και η χρονική εξέλιξη του βάθους ροής σε τρεις θέσεις όπου και υπάρχουν μετρητές (G1, G2, G3 στο Σχήμα 4.6)

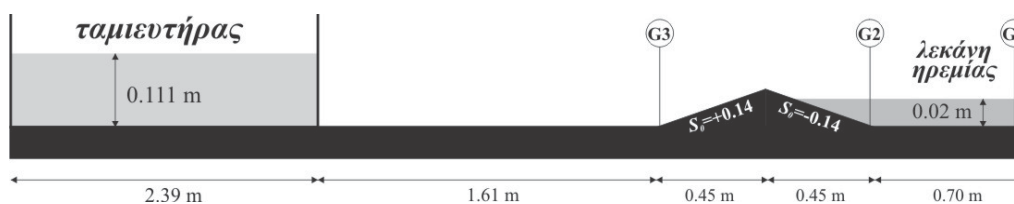
Αν και το εν λόγω πείραμα μπορεί να προσομοιωθεί και με μονοδιάστατα μοντέλα, παραμένει ένας χρήσιμος έλεγχος εφόσον συνδυάζονται και ελέγχονται διάφορα φαινόμενα, τα οποία εμφανίζονται σε πραγματικές συνθήκες πλημμύρας όπως:

- θραύση φράγματος και μετάδοση πλημμυρικού κύματος σε ξηρό πυθμένα
- μετάδοση κύματος σε τριγωνικό αναβαθμό με αρνητική κλίση
- σχηματισμός υδραυλικού άλματος
- μετάδοση πλημμυρικού κύματος σε λεκάνη ηρεμίας
- ανάκλαση ροής σε στερεά όρια

Για αυτό το λόγο κι άλλοι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει το εν λόγω πείραμα για να συγκρίνουν τα αριθμητικά αποτελέσματα από τα δισδιάστατα μοντέλα τους. (Epicum et al. 2010).

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα πειραματικά δεδομένα απεικονίζονται για τα προφίλ ροής σε διάφορες χρονικές στιγμές και για τη χρονική εξέλιξη των βαθών ροής στο Σχήμα 4.7. Για την αριθμητική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν ορθογωνικά κελιά τα οποία έχουν διαστάσεις στην μεν εγκάρσια διεύθυνση 0.01 m, στη δε κατά μήκος 0.05 m. Το υπολογιστικό πεδίο διακριτοποιήθηκε με 5600 κελιά. Ο συντελεστής διάχυσης θεωρήθηκε $\omega=0.99$, ο αριθμός Courant $CFL=0.1$ και το κατώφλι διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα $h_{dry}=3 \times 10^{-6}$ m. Για την προσομοίωση των τριβών πυθμένα χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Manning. Ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning $n=0.011 \text{ s/m}^{1/3}$, σύμφωνα με τις σχετικές υποδείξεις (Soares-Frazao 2007). Η τάξη μεγέθους του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για τον εν λόγω έλεγχο είναι "λεπτά".

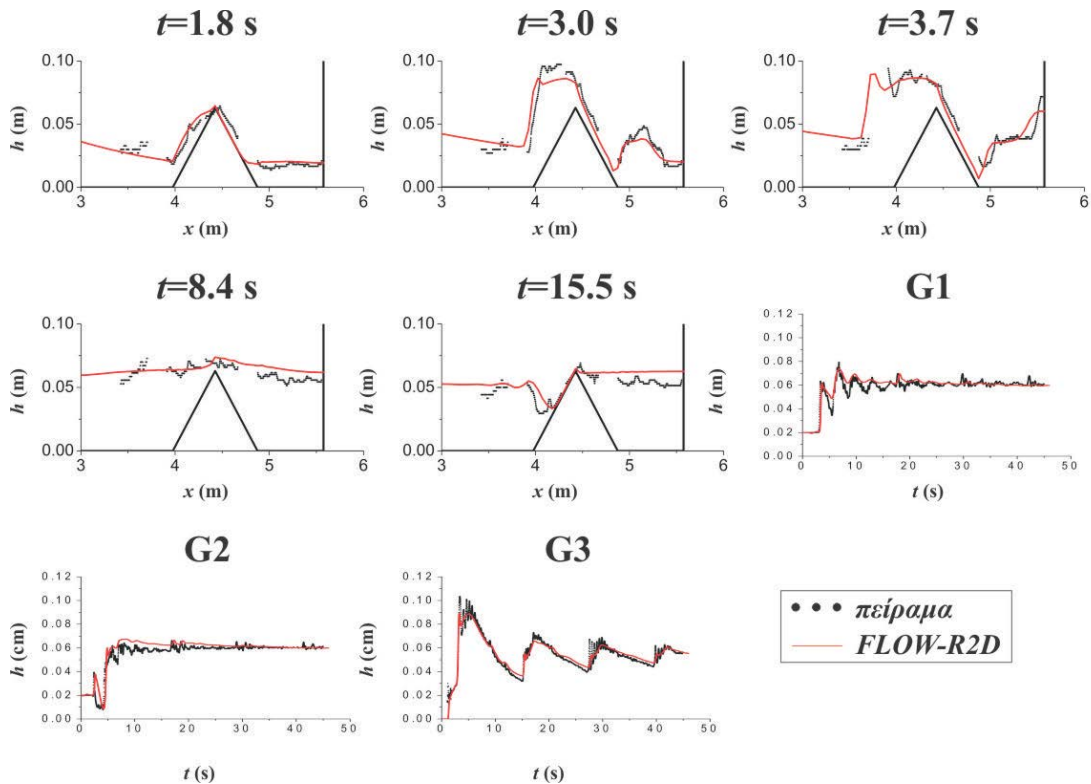
Εκτός από τη γραφική σύγκριση υπολογίστηκε και ο συντελεστής συσχέτισης PCC για όλες τις παραπάνω μετρήσεις. Οι τιμές του εν λόγω δείκτη παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Με κριτήριο αυτές τις τιμές μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η προσομοίωση είναι επιτυχής. Ικανοποιητική είναι και η προσομοίωση των ασυνεχειών, όσο και η δυναμική εξέλιξη του φαινομένου. Οι σχετικά χαμηλότερες τιμές του δείκτη συσχέτισης για τα προφίλ ροής στις χρονικές στιγμές $t=8.4 \text{ s}$ και $t=15.5 \text{ s}$ σε σχέση με τα υπόλοιπα προφίλ πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι στο μοντέλο FLOW-R2D δεν προσομοιώνεται η απώλεια ενέργειας που προκύπτει από την ανάκλαση της ροής σε κάθετα τοιχώματα.



Σχήμα 4.6 Τομή πειραματικής διάταξης

Πίνακας 4.1 Συντελεστής συσχέτισης αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων

t (s)	Μετρητής	PCC
1.8		0.96
3.0		0.96
3.7		0.95
8.4		0.63
15.5		0.83
	G1	0.95
	G2	0.94
	G3	0.98



Σχήμα 4.7 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων στα προφίλ ροής σε διάφορες χρονικές στιγμές και στη χρονική εξέλιξη των βαθών ροής σε διάφορες θέσεις

4.6 Θραύση φράγματος και μετάδοση πλημμυρικού κύματος σε εμπόδιο

Σε αυτόν τον έλεγχο γίνεται προσομοίωση τμηματικής θραύσης φράγματος και μετάδοσης πλημμυρικού κύματος σε οριζόντιο, ξηρό πυθμένα, όπου υπάρχει στερεό απομονωμένο εμπόδιο σε πλάγια θέση σε σχέση με τη διεύθυνση ροής, με το μοντέλο FLOW-R2D (Μπέλλος 2015). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επίσης συγκρίθηκαν με αποτελέσματα που προέκυψαν από πειραματική διαδικασία (Soares-Frazao and Zech 2007), η οποία ανήκει και αυτή στη βιβλιοθήκη

δεδομένων του IMPACT Project. Τα πειραματικά δεδομένα έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης και από άλλους ερευνητές, με σκοπό να ελέγξουν τα αριθμητικά τους μοντέλα (Abderrezzak et al. 2008).

Η προσομοίωση του εν λόγω πειράματος αποτελεί έναν πολύ σημαντικό έλεγχο, καθώς απαιτείται δισδιάστατη (τουλάχιστον) προσέγγιση, εφόσον οι εγκάρσιες κατά τη διεύθυνση ροής ταχύτητες, είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις αντίστοιχες κατά μήκος, δεν υπάρχει συμμετρία στην πειραματική διάταξη, ενώ υπάρχει και στερεό εμπόδιο. Τα παραπάνω συνηγορούν στο ότι η μονοδιάστατη προσέγγιση δεν επαρκεί. Επίσης, για το συγκεκριμένο πείραμα υπάρχουν και μετρήσεις της ταχύτητας ροής.

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από αγωγό μήκους 35.80 m και πλάτους 3.60 m. Στα 6.75 m από το ανάντη όριο της πειραματικής διάταξης τοποθετήθηκαν κατακόρυφα τοιχώματα πλάτους 0.80 m, τα οποία αναπαριστούν το φράγμα. Ανάντη του φράγματος υπάρχει νερό σε βάθος 0.40 m αναπαριστώντας τον ταμιευτήρα. Κατά μήκος του φράγματος υπάρχει άνοιγμα 1.00 m, το οποίο με κατάλληλη διάταξη συγκρατεί τον ανάντη όγκο νερού. Όταν η διάταξη αυτή ανοίξει απότομα, απελευθερώνεται ο εν λόγω όγκος νερού στο υπόλοιπο πειραματικό πεδίο, αναπαριστώντας έτσι την τμηματική αστοχία του φράγματος. Κατάντη του φράγματος ο πυθμένας είναι οριζόντιος, ενώ σε απόσταση 3.44 m βρίσκεται κατακόρυφο ορθογωνικό εμπόδιο διαστάσεων 0.40 m x 0.80 m, σε πλάγια θέση σε σχέση με τη διεύθυνση της ροής. Εκατέρωθεν του εμποδίου υπάρχουν 5 μετρητές (G1 έως G5), οι οποίοι καταγράφουν τη χρονική εξέλιξη του βάθους και της ταχύτητας ροής κατά τη διάρκεια του πειράματος. Υπάρχει επίσης και έκτος μετρητής (G6), εντός της περιοχής που αναπαριστά τον ταμιευτήρα, ο οποίος καταγράφει τη χρονική εξέλιξη μόνο του βάθους ροής. Τέλος, όσον αφορά στα καταγεγραμμένα δεδομένα, είναι διαθέσιμες επίσης 5 αποτυπώσεις της ταχύτητας ροής σε διάφορες χρονικές στιγμές. Στο Σχήμα 4.8 απεικονίζεται σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης.

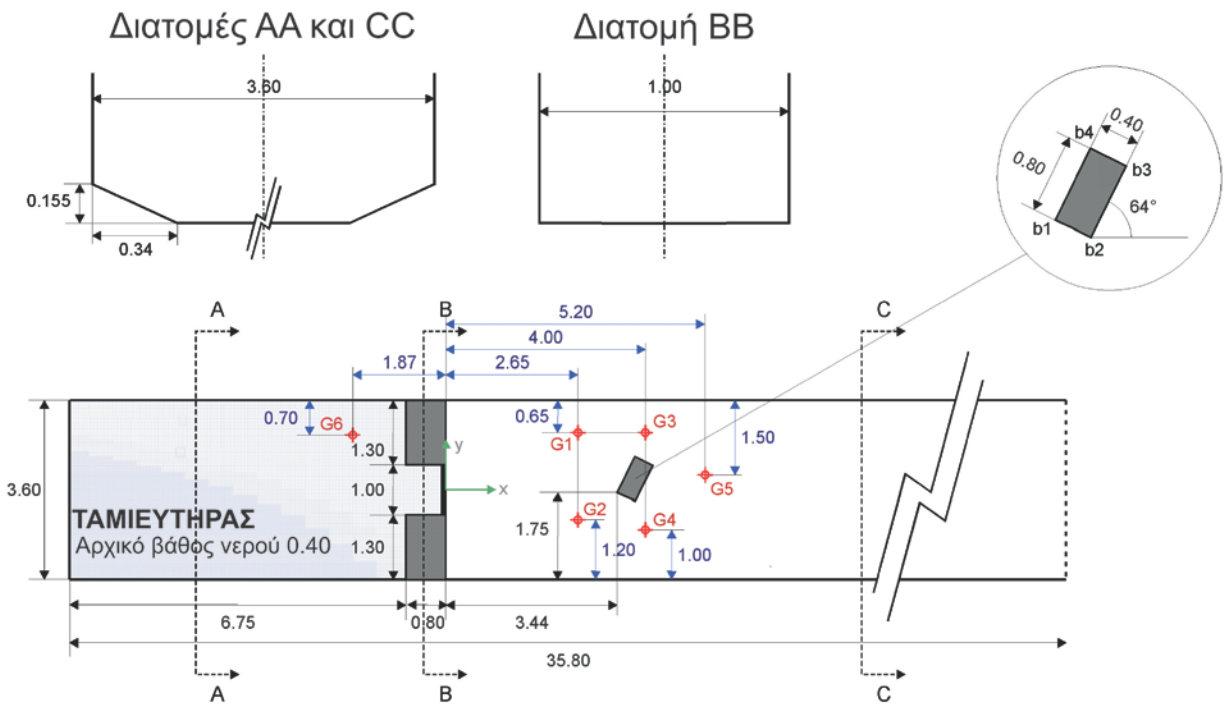
Όσον αφορά στην αριθμητική προσομοίωση, το υπολογιστικό πεδίο διακριτοποιήθηκε με τετράγωνα κελιά διαστάσεων 0.05x0.05 m, με συνολικά 73132 κελιά. Το χρονικό βήμα προσδιορίστηκε από τον αριθμό Courant ως $CFL=0.01$. Το κατώφλι διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα προσδιορίστηκε ως $h_{dry}=10^{-4}$ m, ενώ ο συντελεστής διάχυσης πήρε τιμή ίση με $\omega=0.99$. Ως αρχική συνθήκη θεωρήθηκε ακίνητος όγκος νερού βάθους 0.40 m στην περιοχή που είναι ο ταμιευτήρας, ενώ δε χρειάζεται κάποιος ειδικός προσδιορισμός ανάντη, κατάντη και παραπλεύρων ορίων, εφόσον αυτά είναι στερεά. Για την προσομοίωση των τριβών πυθμένα χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Manning. Σε όλο το υπολογιστικό πεδίο ο συντελεστής Manning πήρε την τιμή $n=0.010$ s/m^{1/3} σύμφωνα με τις σχετικές υποδείξεις (Soares-Frazao and Zech 2007). Η τάξη μεγέθους του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για τον εν λόγω έλεγχο είναι "ώρες".

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης για τη χρονική εξέλιξη του βάθους ροής (h), καθώς και για την αντίστοιχη της ταχύτητας ροής (V) στις διάφορες θέσεις όπου υπάρχουν μετρητές. Στο Σχήμα 4.10 αντιπαραβάλλονται τα πειραματικά δεδομένα με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης σε κατόψεις τμήματος του υπολογιστικού πεδίου που απεικονίζουν ταχύτητες ροής, για διάφορες χρονικές στιγμές. Τέλος, στον Πίνακα 4.2 παρατίθεται ο συντελεστής συσχέτισης PCC των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης.

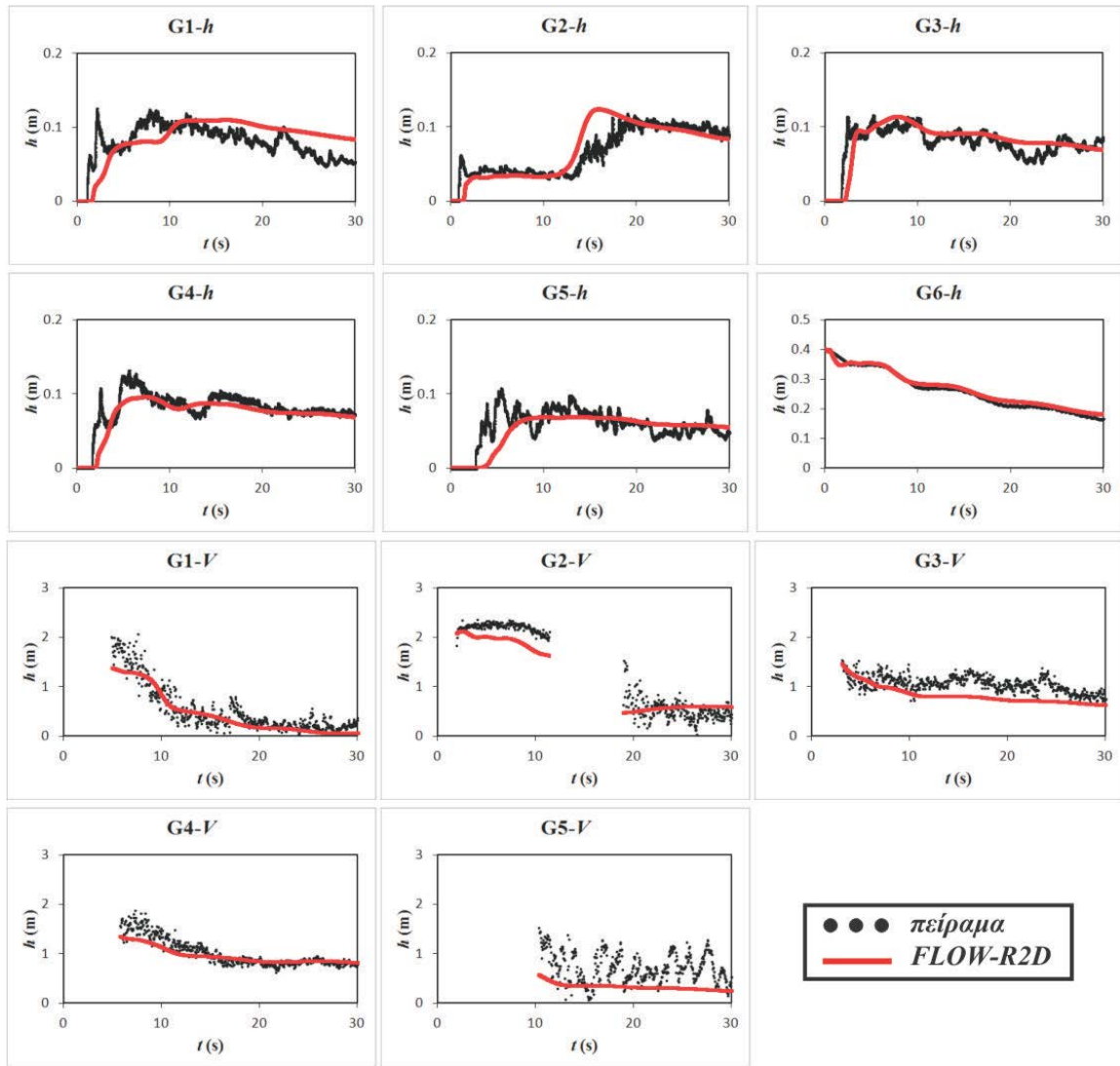
Από τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα, η προσομοίωση μπορεί να θεωρηθεί επιτυχής, καθώς ο συντελεστής συσχέτισης στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ικανοποιητικός. Το μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει επιτυχώς τη δυναμικότητα του φαινομένου, τόσο όσον αφορά στην τάξη μεγέθους της εκάστοτε μεταβλητής, όσο και τη χρονική στιγμή που αυτή λαμβάνει χώρα. Παρατηρείται ότι στον μετρητή G6 η συσχέτιση προσεγγίζει το μέγιστο, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους που είναι πιο χαμηλά. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι ο μετρητής G6 βρίσκεται εντός του πεδίου του ταμιευτήρα ο οποίος αδειάζει και δεν παρατηρούνται τα πιο δυναμικά φαινόμενα στο βάθος και την ταχύτητα ροής που παρατηρούνται στους άλλους μετρητές.

Διαφαίνεται μία αδυναμία του μοντέλου να περιγράψει τις έντονες διακυμάνσεις στην ταχύτητα ροής (μετρητής G5) που παρατηρούνται στη ζώνη κατόντη του εμποδίου (wake zone), κάτι που είναι αναμενόμενο, καθώς στην εν λόγω ζώνη αναπτύσσονται έντονα και χαοτικά φαινόμενα τυρβώδους ροής, τα οποία μπορούν να προσομοιωθούν στοχαστικά και όχι με την επίλυση των 2D-SWE. Εντούτοις, όσον αφορά την αντίστοιχη σύγκριση στο βάθος ροής δεν παρατηρούνται ιδιαίτερα προβλήματα.

Από την αντιπαραβολή των κατόψεων παρατηρείται ποιοτικά ότι στα αποτελέσματα της προσομοίωσης οι ταχύτητες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε ζώνες ανάλογες με αυτές των πειραματικών δεδομένων, παρόλο που είναι υποεκτιμημένες σε σχέση με αυτές.



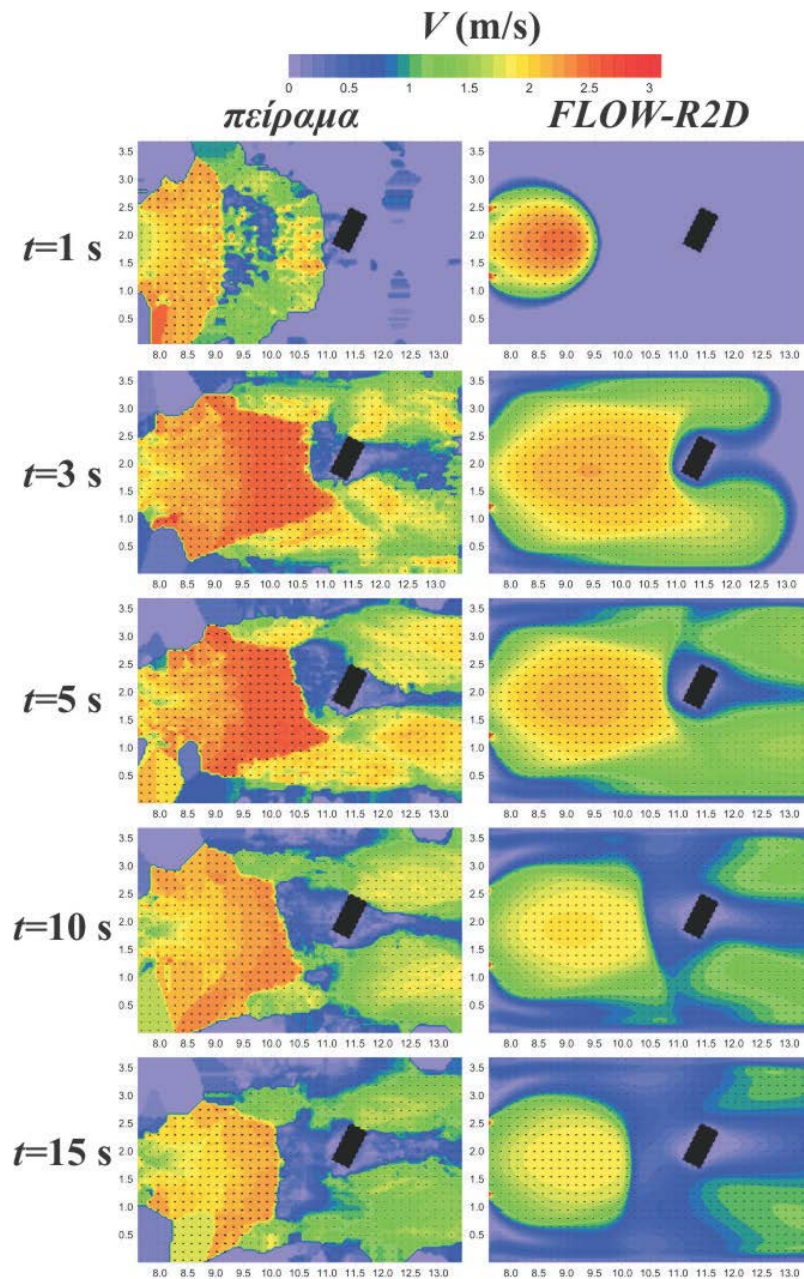
Σχήμα 4.8 Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης (οι διαστάσεις είναι σε m)



Σχήμα 4.9 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων για τη χρονική εξέλιξη του βάθους και της ταχύτητας ροής σε διάφορες θέσεις

Πίνακας 4.2 Συντελεστής συσχέτισης αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων

Βάθος ροής		Ταχύτητα ροής	
Μετρητής	PCC	Μετρητής	PCC
G1	0.56	G1	0.92
G2	0.84	G2	0.97
G3	0.81	G3	0.53
G4	0.85	G4	0.94
G5	0.64	G5	0.38
G6	1.00		



Σχήμα 4.10 Αντιπαραβολή αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων των ταχυτήτων ροής σε διάφορες χρονικές στιγμές

4.7 Μετάδοση πλημμυρικού κύματος σε αστικό περιβάλλον

Σε αυτόν τον έλεγχο γίνεται προσομοίωση της μετάδοσης πλημμυρικού κύματος σε αστικό περιβάλλον (Bellos and Tsakiris 2015a). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή πλημμυρικών υδρογραφημάτων στο φυσικό μοντέλο του ποταμού Tose της Ιταλίας, καθώς και η τοποθέτηση στο πλημμυρικό πεδίο στερεών εμποδίων που αναπαριστούν μία υποθετική πόλη (Testa et al. 2007). Η εν λόγω πειραματική διαδικασία ανήκει επίσης στη βιβλιοθήκη δεδομένων του IMPACT Project. Τα πειραματικά δεδομένα έχουν χρησιμοποιηθεί και από άλλους

ερευνητές, με σκοπό να ελέγξουν τα αριθμητικά τους μοντέλα (Abderrezzak et al. 2008, Dottori and Todini 2013).

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από 4 παραλλαγές. Η μία διαφοροποίηση αφορά στο αν το πλημμυρικό πεδίο είναι διευθετημένο με κάθετα τοιχώματα ως προς τη διεύθυνση ροής ή όχι και η άλλη στο αν η διάταξη των κτιρίων της υποθετικής πόλης είναι ευθυγραμμισμένη ή όχι. Τρία υδρογραφήματα εφαρμόστηκαν στο πλημμυρικό πεδίο του φυσικού μοντέλου: α) χαμηλό, β) μεσαίο, γ) υψηλό. 10 μετρητές κατανεμημένοι στο πλημμυρικό πεδίο (P1-P10) καταγράφουν τη χρονική εξέλιξη του βάθους ροής. Στο Σχήμα 4.11 απεικονίζεται η κάτοψη της πειραματικής διάταξης και για τις 4 παραλλαγές, ενώ στο Σχήμα 4.12 τα πλημμυρικά υδρογραφήματα που εφαρμόστηκαν σε κάθε περίπτωση.

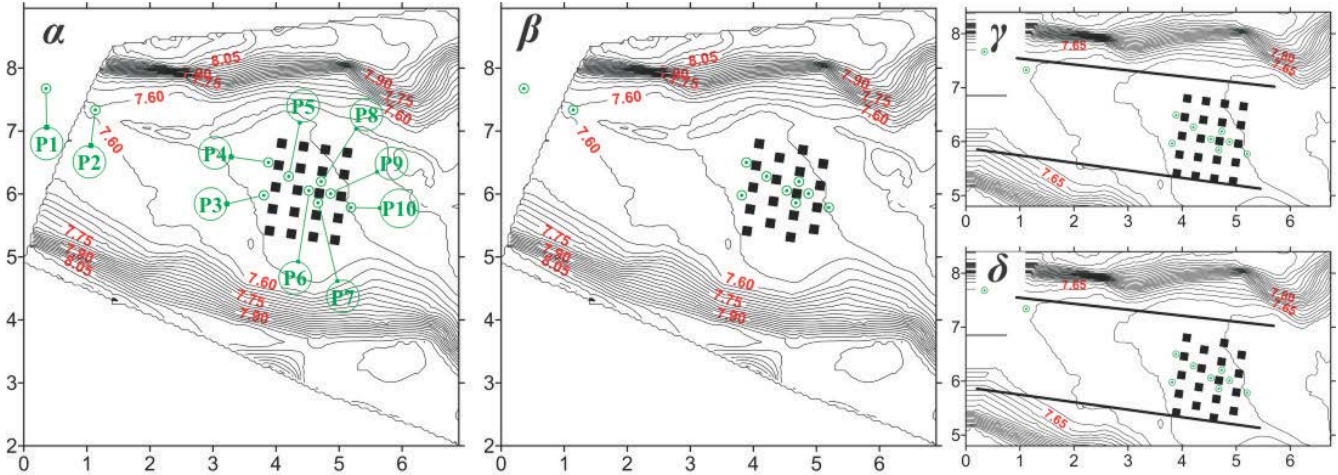
Για την αριθμητική προσομοίωση με το μοντέλο FLOW-R2D το υπολογιστικό πεδίο διακριτοποιήθηκε με κελιά διαστάσεων 0.05×0.05 m σε 13417 κελιά. Η βαθμονόμηση των διάφορων παραμέτρων έγινε με το σενάριο του χαμηλού πλημμυρικού υδρογραφήματος, του μη διευθετημένου πλημμυρικού πεδίου και της ευθυγραμμισμένης πόλης και πραγματοποιήθηκε με δοκιμές (trial and error method). Οι τιμές των παραμέτρων που βαθμονομήθηκαν έχουν ως εξής: ο αριθμός Courant $CFL=0.1$, ο συντελεστής διάχυσης $\omega=0.90$ και το κατώφλι διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα $h_{dry}=10^{-4}$ m. Για την προσομοίωση των τριβών πυθμένα χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Manning. Σε όλο το υπολογιστικό πεδίο ο συντελεστής Manning πήρε την τιμή $n=0.0162$ s/m^{1/3} σύμφωνα με τις σχετικές υποδείξεις (Testa et al. 2007). Η τάξη μεγέθους του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για τον εν λόγω έλεγχο είναι "ώρες".

Τα κτίρια θεωρήθηκαν ως στερεά όρια. Κάθε κτίριο έχει μέγεθος 0.15×0.15 m και τα διαστήματα μεταξύ τους που αναπαριστούν τους δρόμους της υποθετικής πόλης κυμαίνονται από 0.15 m έως 0.25 m. Η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης των κτιρίων και του οριζόντιου άξονα x είναι μικρή (της τάξης των 8°), οπότε τα κτίρια μπορούν να προσομοιωθούν ως παράλληλα στο οριζόντιο άξονα x , χωρίς ιδιαίτερη πρόβλημα. Κάθε κτίριο αναπαριστάται από 3×3 κελιά, ενώ κάθε δρόμος από 3 έως 5 κελιά.

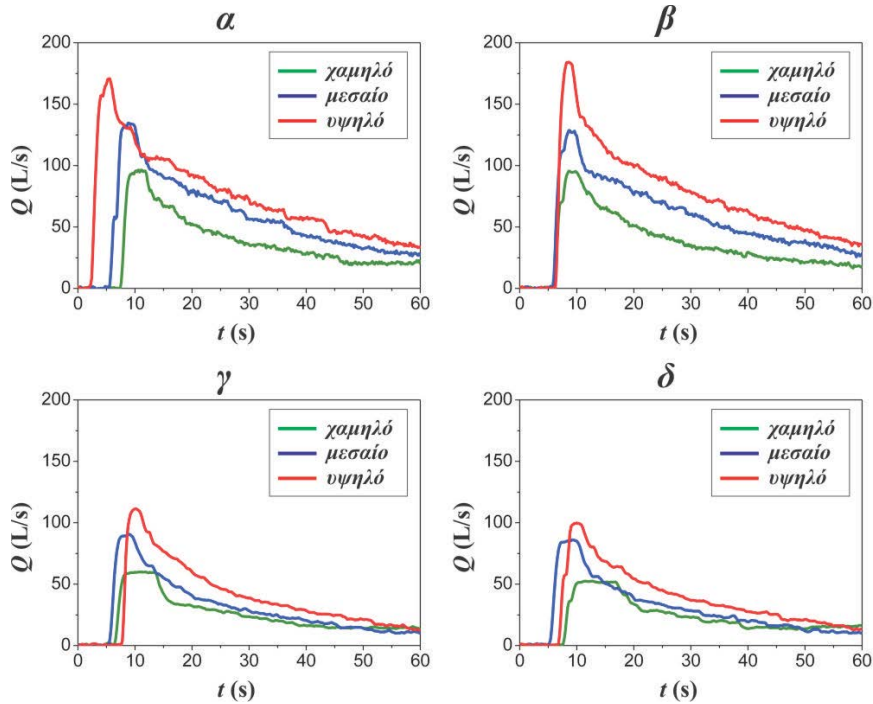
Για τις ανάντη οριακές συνθήκες υπάρχουν δύο επιλογές. Η πρώτη αφορά στη χρησιμοποίηση των δεδομένων του μετρητή P1 για τη χρονικής εξέλιξης του βάθους ροής, όπου όμως δεν υπάρχει αντίστοιχα καταγεγραμμένη η χρονική εξέλιξη της ταχύτητας ροής. Η δεύτερη επιλογή η οποία και εφαρμόστηκε, είναι η εισαγωγή του πλημμυρικού υδρογραφήματος, έτσι όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, όπου παρουσιάστηκε το μοντέλο εκτενώς. Η γωνία εισόδου του υδρογραφήματος είναι $\varphi=23.5^\circ$ με ωρολογιακή φορά σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα x , ενώ η κλίση του εδάφους θεωρήθηκε σταθερή και ίση με $S_0=0.01$. Επειδή η παράμετρος αυτή επηρεάζει το αρχικό τμήμα των ανάντη ορίων, η σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών δεδομένων περιορίζεται στους μετρητές P3-P10, από τη στιγμή που ο μετρητής P2 βρίσκεται αρκετά κοντά στο ανάντη όριο. Ως κατάντη οριακή συνθήκη θεωρήθηκε το ανοιχτό όριο.

Στα Σχήματα 4.13-4.24 απεικονίζεται η σύγκριση των αριθμητικών και των πειραματικών δεδομένων για όλες τις παραλλαγές του φυσικού μοντέλου. Εκτός από τη γραφική σύγκριση, στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι συντελεστές συσχέτισης. Παρατηρείται ότι η προσομοίωση είναι επιτυχής. Το

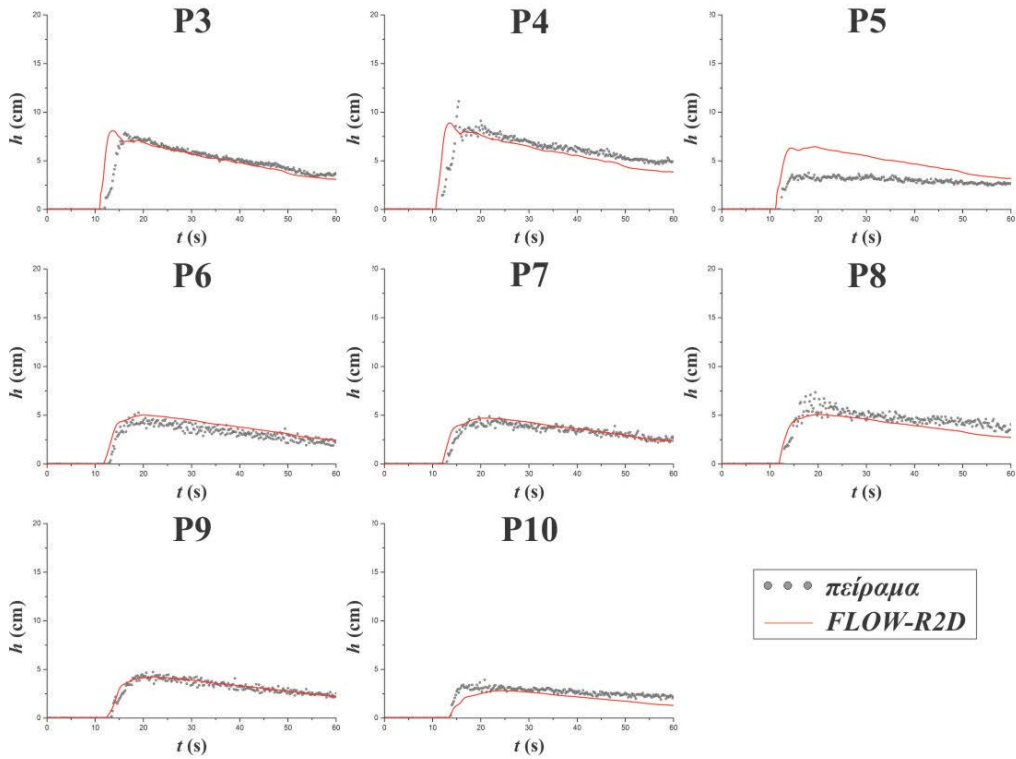
μοντέλο είναι ικανό να προσομοιώσει επιτυχώς τη δυναμικότητα του φαινομένου, τόσο όσον αφορά στην τάξη μεγέθους της εκάστοτε μεταβλητής, όσο και τη χρονική στιγμή που αυτή λαμβάνει χώρα. Επιπλέον δε, είναι ικανό να ανταποκριθεί σε περιπτώσεις πλημμυρικής ροής τόσο σε φυσικού ανάγλυφο, αλλά και σε αστικό περιβάλλον και όχι μόνο σε ιδεατές περιπτώσεις όπως είναι οι συνήθεις πειραματικές διατάξεις.



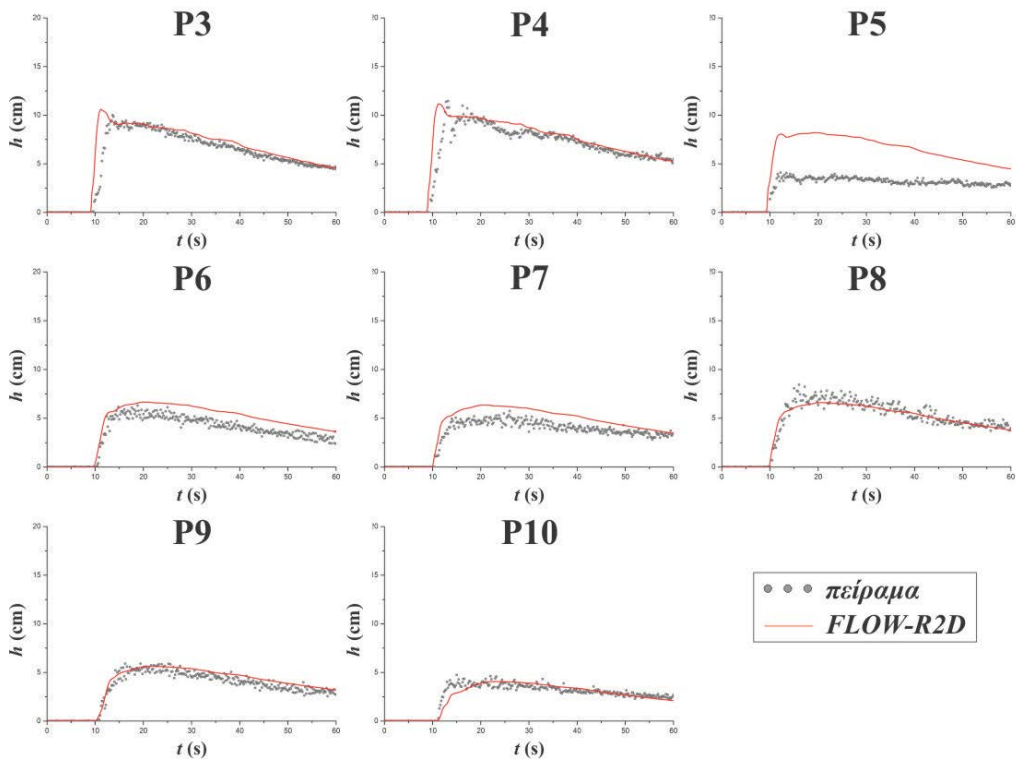
Σχήμα 4.11 Κατόψεις φυσικού μοντέλου: α) μη διευθετημένο ανάγλυφο και ευθυγραμμισμένη πόλη β) μη διευθετημένο ανάγλυφο και μη ευθυγραμμισμένη πόλη γ) διευθετημένο ανάγλυφο και ευθυγραμμισμένη πόλη δ) διευθετημένο ανάγλυφο και μη ευθυγραμμισμένη πόλη



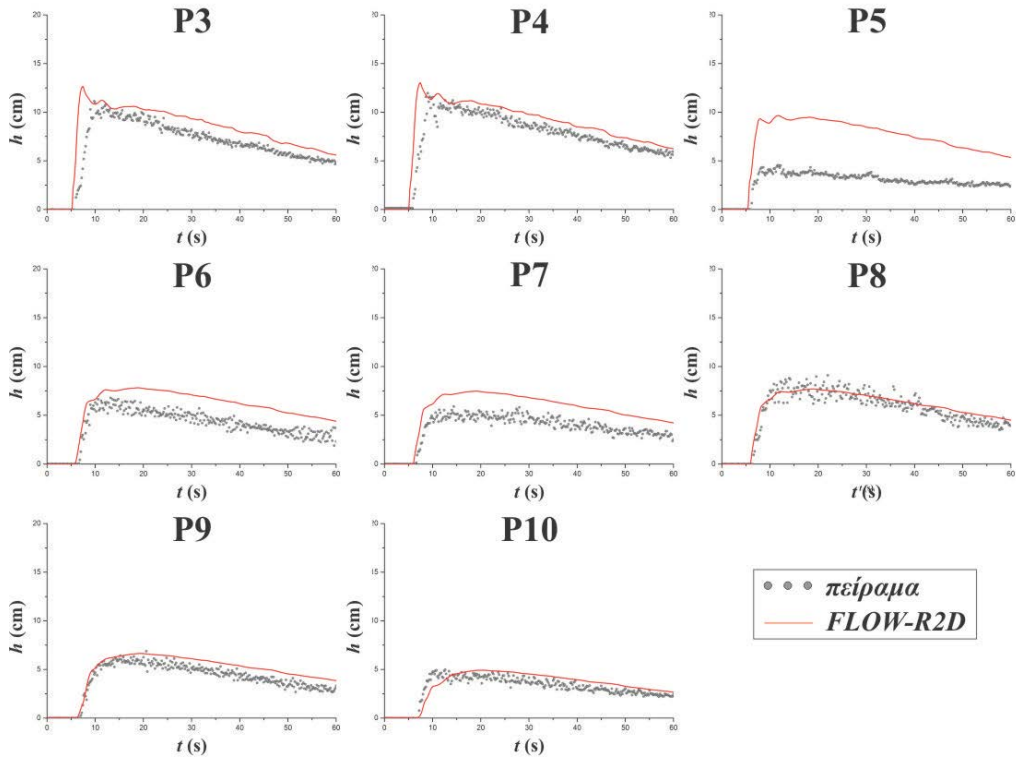
Σχήμα 4.12 Πλημμυρικά υδρογραφήματα: α) μη διευθετημένο ανάγλυφο και ευθυγραμμισμένη πόλη β) μη διευθετημένο ανάγλυφο και μη ευθυγραμμισμένη πόλη γ) διευθετημένο ανάγλυφο και ευθυγραμμισμένη πόλη δ) διευθετημένο ανάγλυφο και μη ευθυγραμμισμένη πόλη



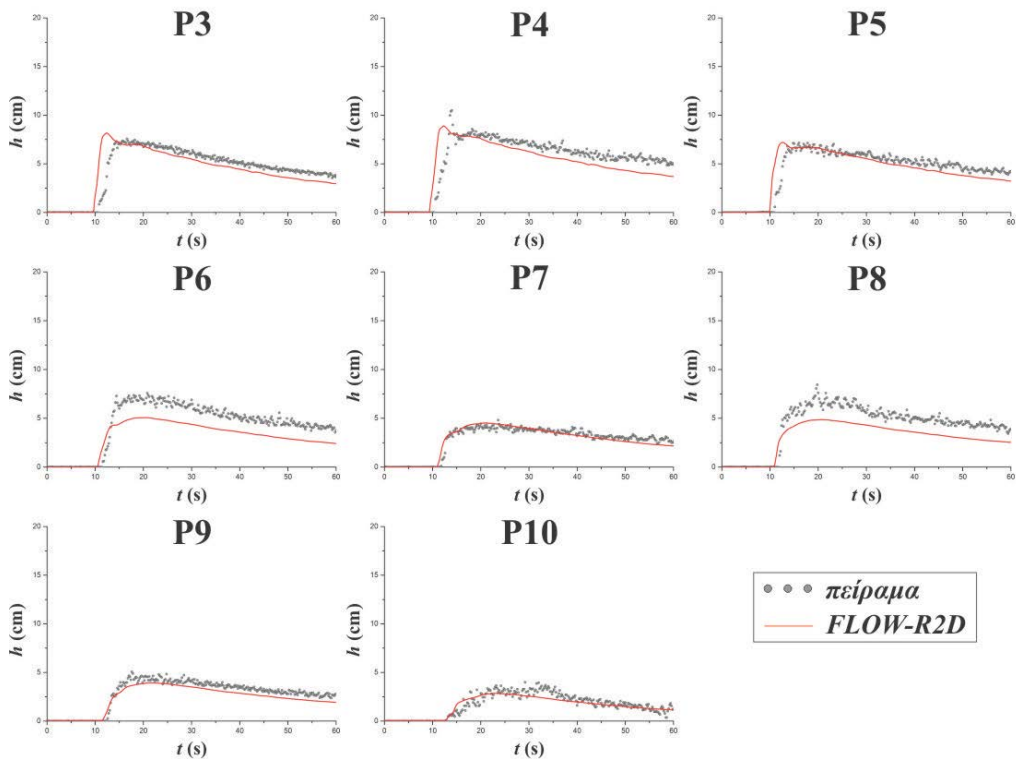
Σχήμα 4.13 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων στην περίπτωση του χαμηλού υδρογραφήματος, του μη διευθετημένου ανάγλυφου και της ευθυγραμμισμένης πόλης



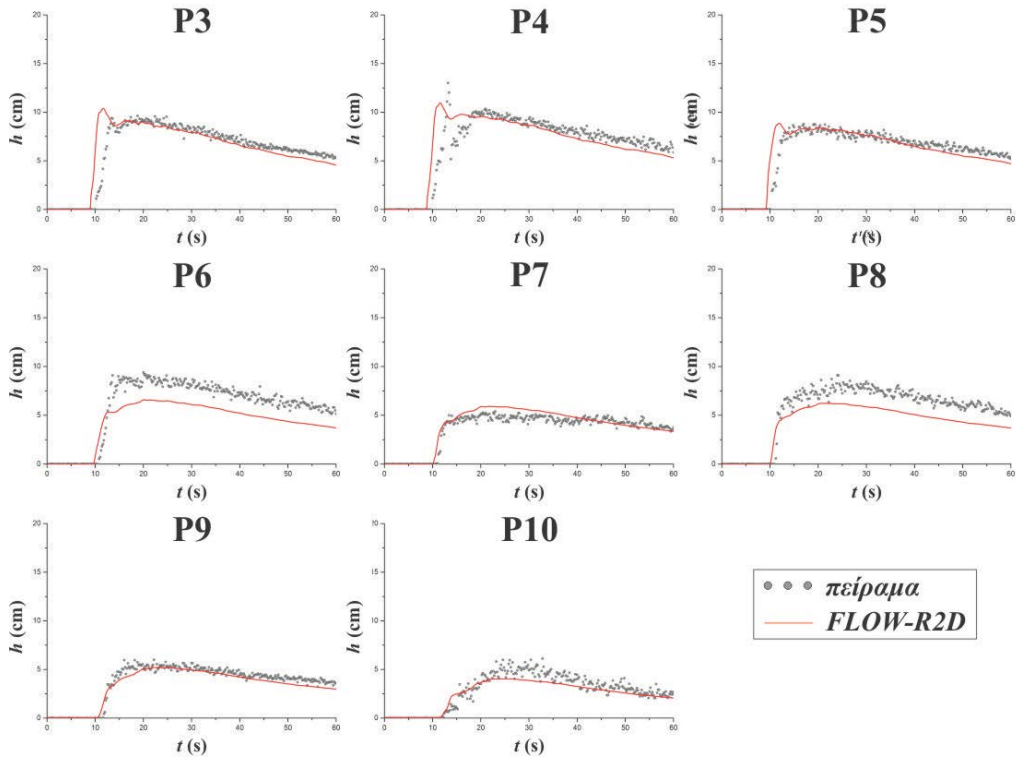
Σχήμα 4.14 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων στην περίπτωση του μεσαίου υδρογραφήματος, του μη διευθετημένου ανάγλυφου και της ευθυγραμμισμένης πόλης



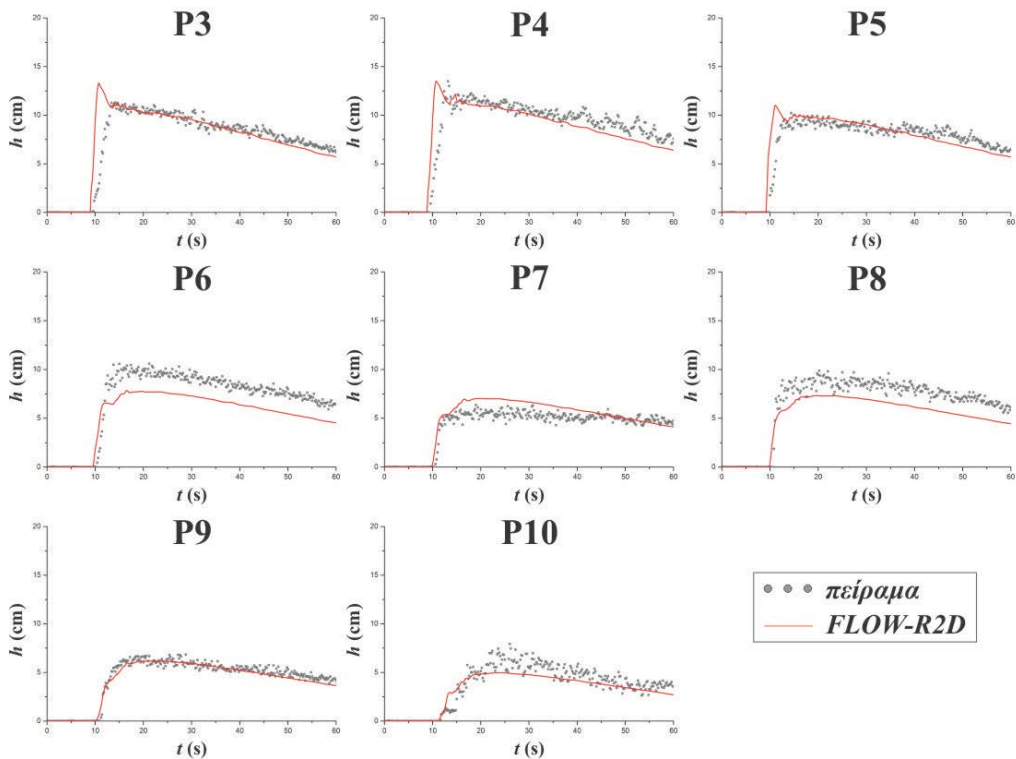
Σχήμα 4.15 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων στην περίπτωση του υψηλού υδρογραφήματος, του μη διευθετημένου ανάγλυφου και της ευθυγραμμισμένης πόλης



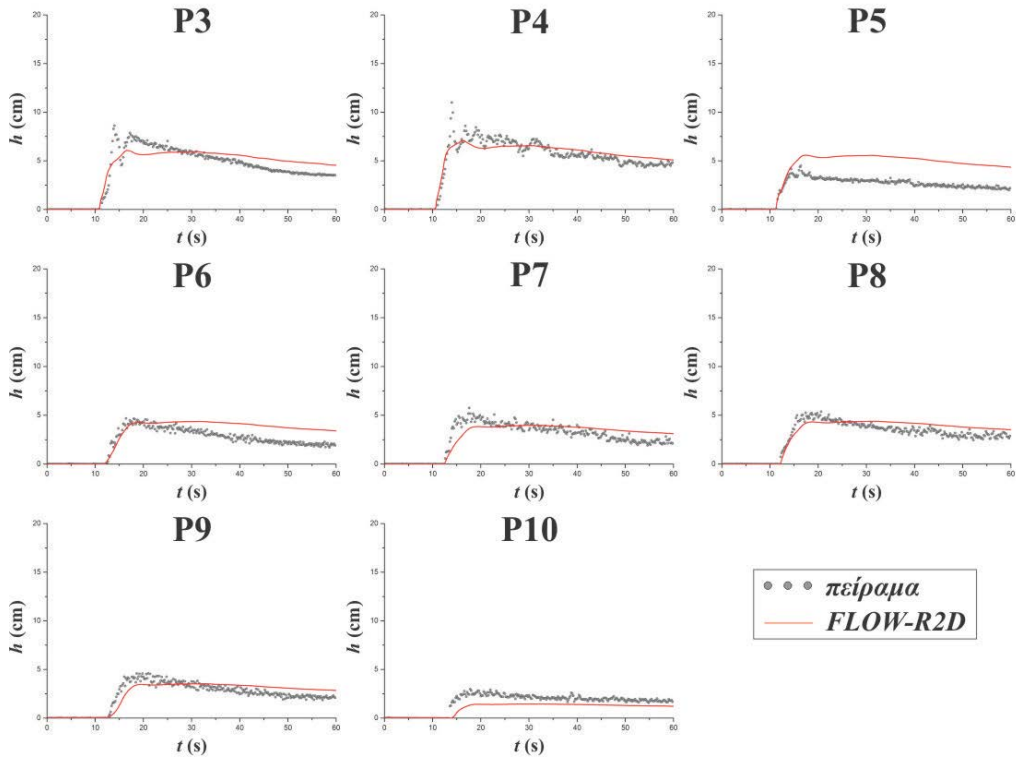
Σχήμα 4.16 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων στην περίπτωση του χαμηλού υδρογραφήματος, του μη διευθετημένου ανάγλυφου και της μη ευθυγραμμισμένης πόλης



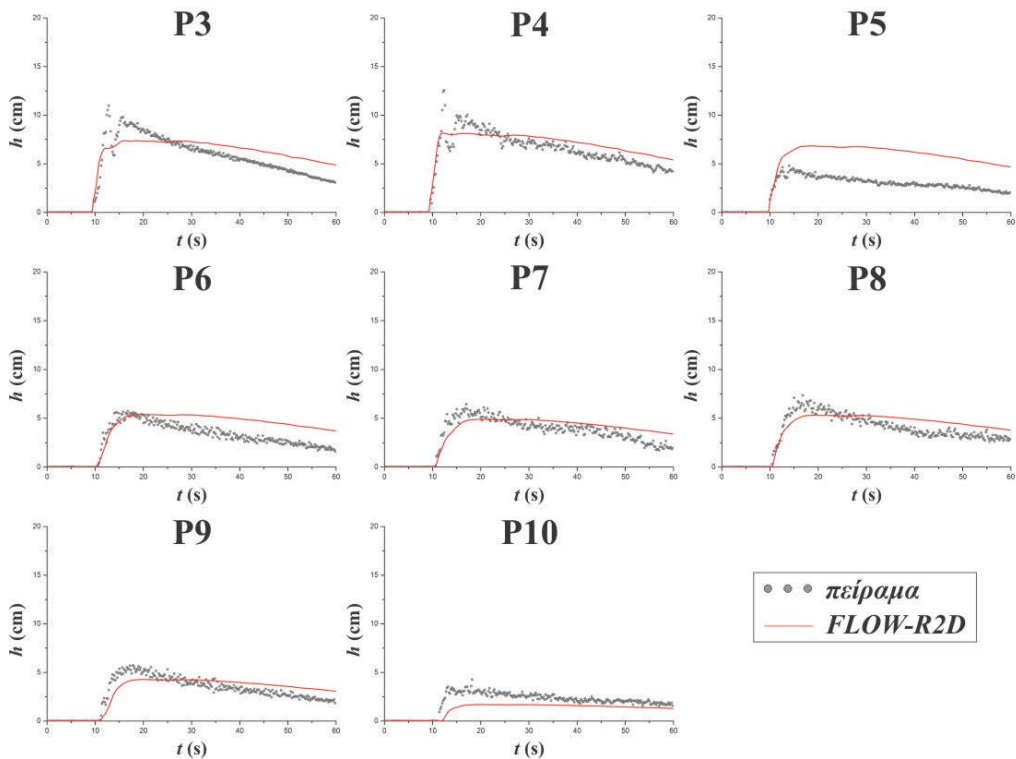
Σχήμα 4.17 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων στην περίπτωση του μεσαίου υδρογραφήματος, του μη διευθετημένου ανάγλυφου και της μη ευθυγραμμισμένης πόλης



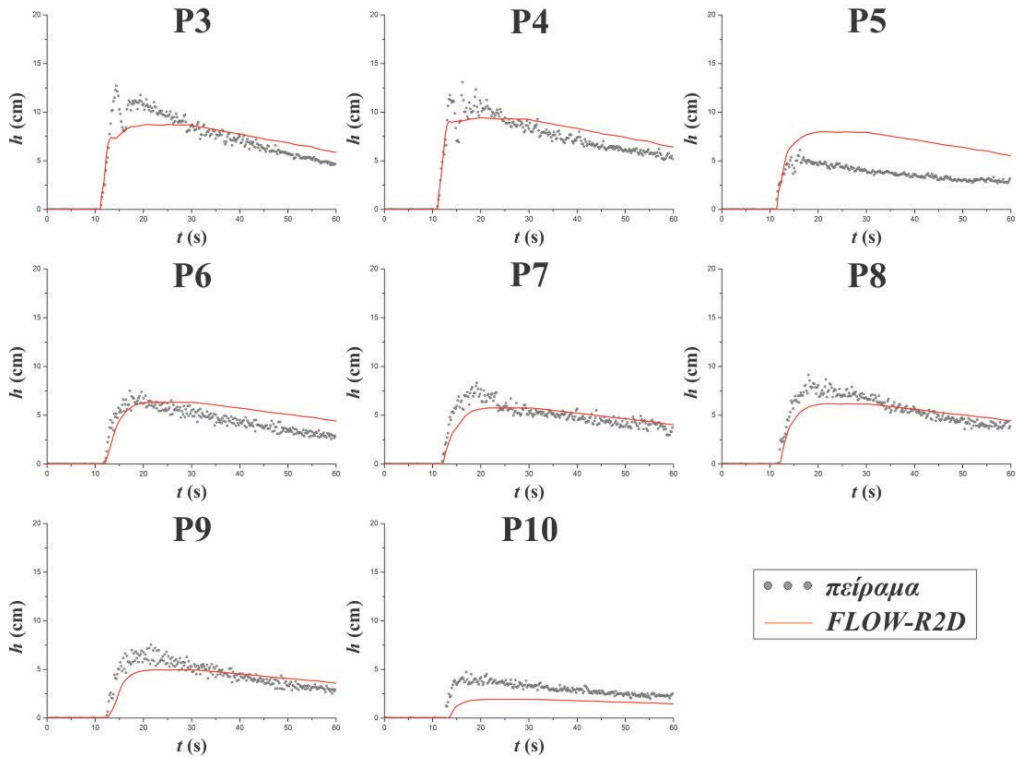
Σχήμα 4.18 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων στην περίπτωση του υψηλού υδρογραφήματος, του μη διευθετημένου ανάγλυφου και της μη ευθυγραμμισμένης πόλης



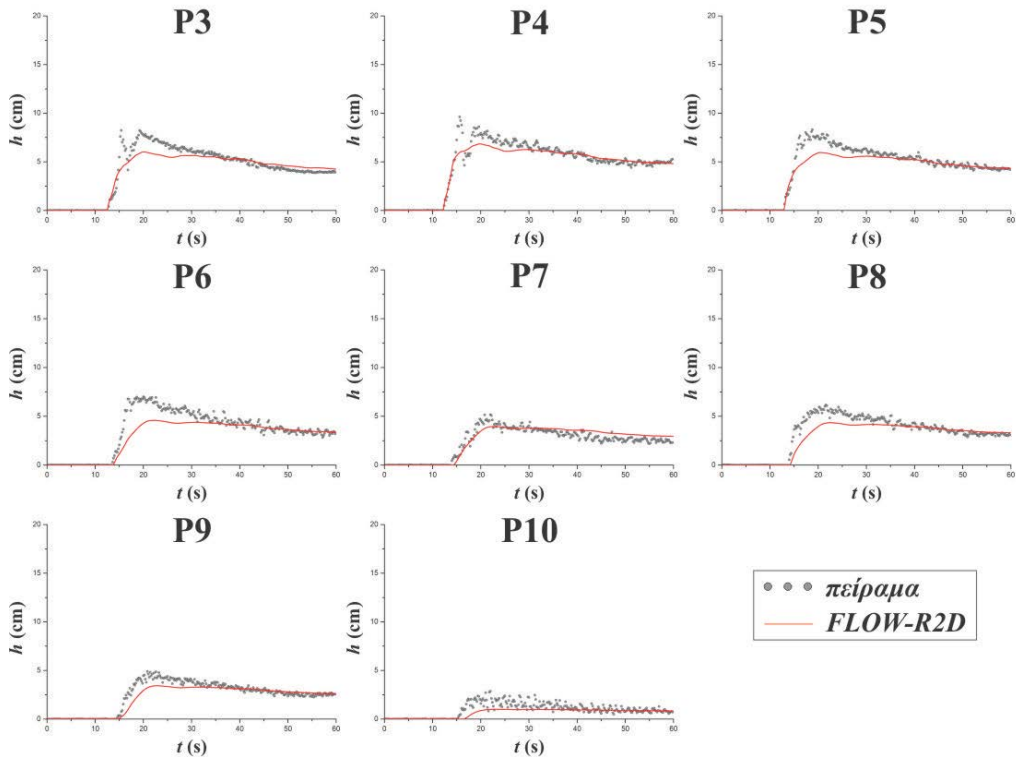
Σχήμα 4.19 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων στην περίπτωση του χαμηλού υδρογραφήματος, του διευθετημένου ανάγλυφου και της ευθυγραμμισμένης πόλης



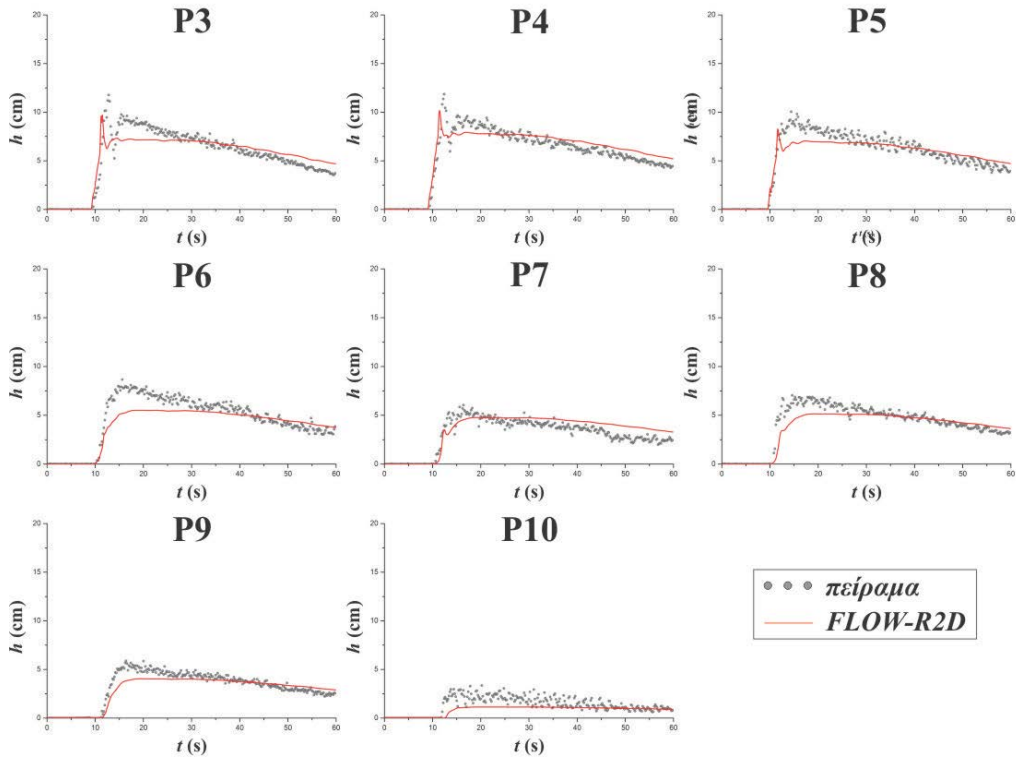
Σχήμα 4.20 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων στην περίπτωση του μεσαίου υδρογραφήματος, του διευθετημένου ανάγλυφου και της ευθυγραμμισμένης πόλης



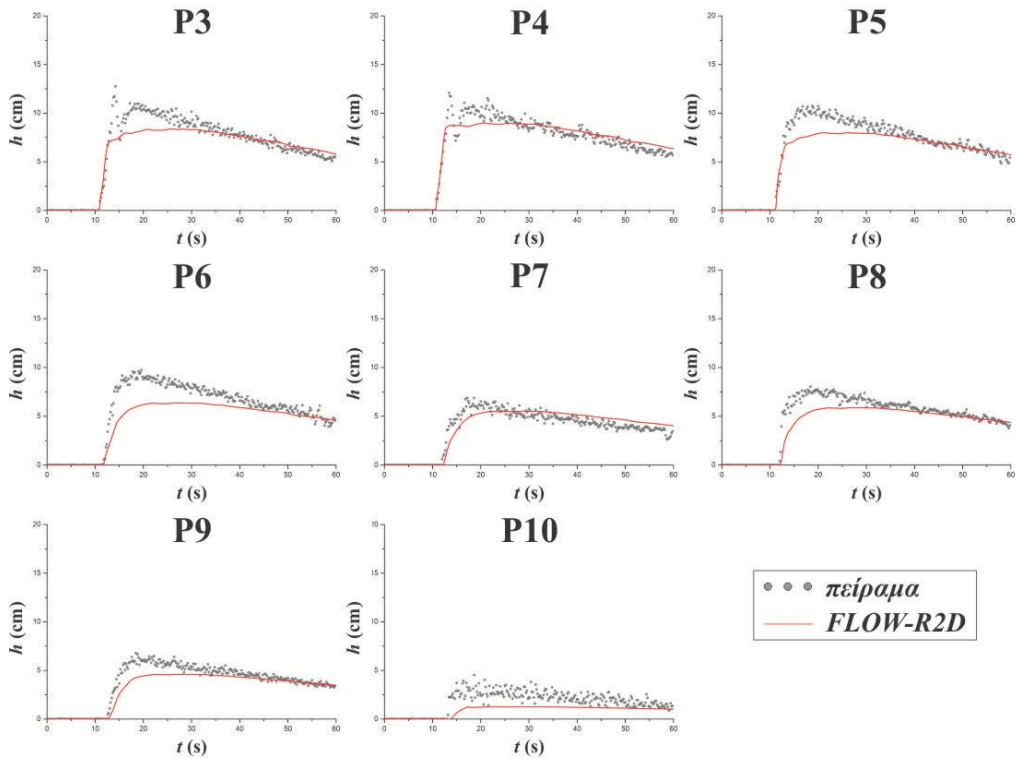
Σχήμα 4.21 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων στην περίπτωση του υψηλού υδρογραφήματος, του διευθετημένου ανάγλυφου και της ευθυγραμμισμένης πόλης



Σχήμα 4.22 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων στην περίπτωση του χαμηλού υδρογραφήματος, του διευθετημένου ανάγλυφου και της μη ευθυγραμμισμένης πόλης



Σχήμα 4.23 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων στην περίπτωση του μεσαίου υδρογραφήματος, του διευθετημένου ανάγλυφου και της μη ευθυγραμμισμένης πόλης



Σχήμα 4.24 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων στην περίπτωση του υψηλού υδρογραφήματος, του διευθετημένου ανάγλυφου και της μη ευθυγραμμισμένης πόλης

Πίνακας 4.3 Συντελεστής συσχέτισης αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων για όλες τις παραλλαγές του φυσικού μοντέλου

Υδρογράφημα	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
<i>μη διευθετημένο ανάγλυφο/ευθυγραμμισμένη πόλη</i>								
Χαμηλό	0.88	0.89	0.93	0.97	0.97	0.95	0.98	0.95
Μεσαίο	0.92	0.93	0.95	0.98	0.97	0.97	0.98	0.94
Υψηλό	0.89	0.91	0.96	0.95	0.96	0.95	0.97	0.90
<i>μη διευθετημένο ανάγλυφο/μη ευθυγραμμισμένη πόλη</i>								
Χαμηλό	0.86	0.87	0.90	0.96	0.96	0.97	0.98	0.92
Μεσαίο	0.88	0.88	0.91	0.96	0.95	0.97	0.98	0.95
Υψηλό	0.88	0.90	0.91	0.97	0.95	0.97	0.98	0.94
<i>διευθετημένο ανάγλυφο/ευθυγραμμισμένη πόλη</i>								
Χαμηλό	0.92	0.96	0.95	0.89	0.89	0.94	0.89	0.93
Μεσαίο	0.91	0.95	0.94	0.87	0.90	0.91	0.88	0.89
Υψηλό	0.94	0.96	0.95	0.92	0.93	0.94	0.91	0.91
<i>διευθετημένο ανάγλυφο/μη ευθυγραμμισμένη πόλη</i>								
Χαμηλό	0.96	0.97	0.97	0.91	0.95	0.93	0.94	0.75
Μεσαίο	0.93	0.96	0.95	0.93	0.92	0.93	0.94	0.74
Υψηλό	0.96	0.97	0.97	0.95	0.94	0.94	0.95	0.82

4.8 Μετάδοση πλημμυρικού κύματος έπειτα από τη θραύση του φράγματος Tous (Ισπανία)

Εφόσον το μοντέλο FLOW-R2D ανταποκρίνεται με επιτυχία σε μία σειρά ποιοτικών και πειραματικών ελέγχων, το επόμενο βήμα είναι ο έλεγχος του μοντέλου σε πραγματικές συνθήκες. Στην παρούσα ενότητα προσομοιώνεται η θραύση του φράγματος του Tous (Βαλένθια, Ισπανία), η οποία συνέβη στις 19:15 στις 20 Οκτωβρίου του 1982, έπειτα από ακραίο διήμερο επεισόδιο βροχής, όπου καταγράφηκε βροχόπτωση περίπου 500 mm μέσα σε μία ημέρα (Bellos and Tsakiris 2015c). Το χωμάτινο φράγμα Tous ήταν κατασκευασμένο περίπου 5 km ανάντη της μικρής πόλης Sumacárcel (Σχήμα 4.25), στον ποταμό Júcar. Σημειώνεται ότι έπειτα από μερικά χρόνια μετά την αστοχία, ένα νέο φράγμα κατασκευάστηκε στη θέση του παλιού.

Έχει πραγματοποιηθεί εκτενής καταγραφή και παρουσίαση του γεγονότος (Alcrudo and Mulet 2007), η οποία εντάσσεται επίσης στο πλαίσιο της βιβλιοθήκης δεδομένων του IMPACT Project. Τα διαθέσιμα δεδομένα αποτελούνται από δύο Ψηφιακά Ανάγλυφα Εδάφους (Digital Terrain Models - DTM) της περιοχής μελέτης (ένα αποτυπωμένο λίγες ημέρες μετά της αστοχία -1982 DTM- και ένα αποτυπωμένο το 1998 -1998 DTM-έπειτα από την ανακατασκευή του φράγματος), οι συντεταγμένες των κτιρίων της πόλης, το υδρογράφημα εισροής στον ταμιευτήρα, το πλημμυρικό υδρογράφημα που προέκυψε έπειτα από την αστοχία του φράγματος, τεχνικά χαρακτηριστικά του φράγματος και οι συντεταγμένες των πορτοκαλεώνων της περιοχής. Από επιτόπιες συνεντεύξεις με τους κατοίκους καταγράφηκαν τα μέγιστα βάθη που προέκυψαν από τη μετάδοση του πλημμυρικού κύματος σε 21 θέσεις, ενώ για τρία από αυτά υπάρχουν και στοιχεία για τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου. Λόγω

απόκλισης των απαντήσεων των συνεντευξιασθέντων, σε ορισμένα σημεία παρουσιάζεται εύρος τιμών για τα μέγιστα βάθη ροής.

Για την αριθμητική προσομοίωση με το μοντέλο FLOW-R2D, τα δύο υπολογιστικά πεδία διακριτοποιήθηκαν σε κελιά διαστάσεων 5x5 m. Για λόγους υπολογιστικού κόστους, η αριθμητική προσομοίωση περιορίστηκε σε τμήμα της περιοχής μελέτης που περιλαμβάνει από τα ανάντη της πόλης έως τα κατάντη αυτής, όπου και υπάρχουν οι ιστορικές καταγραφές των μέγιστων βαθών (Σχήμα 4.26). Τα συνολικά κελιά του υπολογιστικού πεδίου είναι 36337.

Τα κτίρια θεωρήθηκαν στερεά όρια, ενώ τα όρια του κάθε υπολογιστικού πεδίου θεωρήθηκαν επίσης ως στερεά όρια για λόγους διατήρησης του ισοζυγίου μάζας του υδάτινου όγκου. Ως κατάντη οριακή συνθήκη επιλέχθηκε το ανοιχτό όριο. Ο αριθμός Courant ορίστηκε $CFL=0.05$, ο συντελεστής διάχυσης $\omega=0.90$ και το κατώφλι διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα $h_{dry}=10^{-2}$ m. Για την προσομοίωση των τριβών πυθμένα χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Manning. Το υπολογιστικό πεδίο χωρίστηκε σε δύο ζώνες τραχύτητας: στους πορτοκαλεώνες και στο υπόλοιπο υπολογιστικό πεδίο. Ο συντελεστής τραχύτητας πήρε την τιμή $n=0.05$ s/m^{1/3} στους πορτοκαλεώνες και $n=0.12$ s/m^{1/3} σε όλο το υπόλοιπο υπολογιστικό πεδίο (Σχήμα 4.26).

Δοκιμάστηκαν δύο περιπτώσεις οριακών συνθηκών: α) η παροχή εισροής είναι σταθερή και ίση με την παροχή αιχμής του πλημμυρικού υδρογραφήματος (15000 m³/s), β) το πλήρες υδρογράφημα (Σχήμα 4.27). Η κατεύθυνση εισροής της πλημμυρικής ροής είναι κάθετη στον οριζόντιο άξονα x . Ο χρόνος προσομοίωσης για την περίπτωση της σταθερής παροχής επιλέχθηκε στα 700 s (όπου η κατάσταση της ροής μονιμοποιείται), ενώ για την εφαρμογή του πλήρους υδρογραφήματος, προσομοιώθηκε ολόκληρο το γεγονός. Σημειώνεται, ότι ενώ θεωρητικά θα αναμένεται διόδευση του πλημμυρικού υδρογραφήματος και αλλαγή των χαρακτηριστικών του καθώς αυτό μεταδίδεται από το φράγμα προς την πόλη (μείωση και καθυστέρηση της πλημμυρικής αιχμής). Εντούτοις, επειδή η απόσταση είναι μικρή (περίπου 5 km όπως προαναφέρθηκε), η αλλαγή αυτή θεωρείται αμελητέα, πράγμα το οποίο επιβεβαιώνεται και από την αντιπαραβολή της ώρας αιχμής του πλημμυρικού υδρογραφήματος με την ώρα που καταγράφηκε το μέγιστο βάθος στους μετρητές 1, 7 και 8, όπου και υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα της χρονικής εξέλιξης του φαινομένου (απόκλιση λίγων λεπτών). Επίσης τα εξαγόμενα που προέκυψαν από τη μονοδιάστατη αριθμητική προσομοίωση που έγινε στη μετάδοση του πλημμυρικού κύματος από το φράγμα έως την είσοδο της πόλης (Abderrezzak et al. 2008) έδειξαν ότι η μείωση της πλημμυρικής αιχμής είναι της τάξης του 2.5%. Τα παραπάνω συνεπικουρούν ότι μπορεί να θεωρηθεί το πλημμυρικό υδρογράφημα ως έχει στο υπολογιστικό πεδίο χωρίς ιδιαίτερο πρόβλημα.

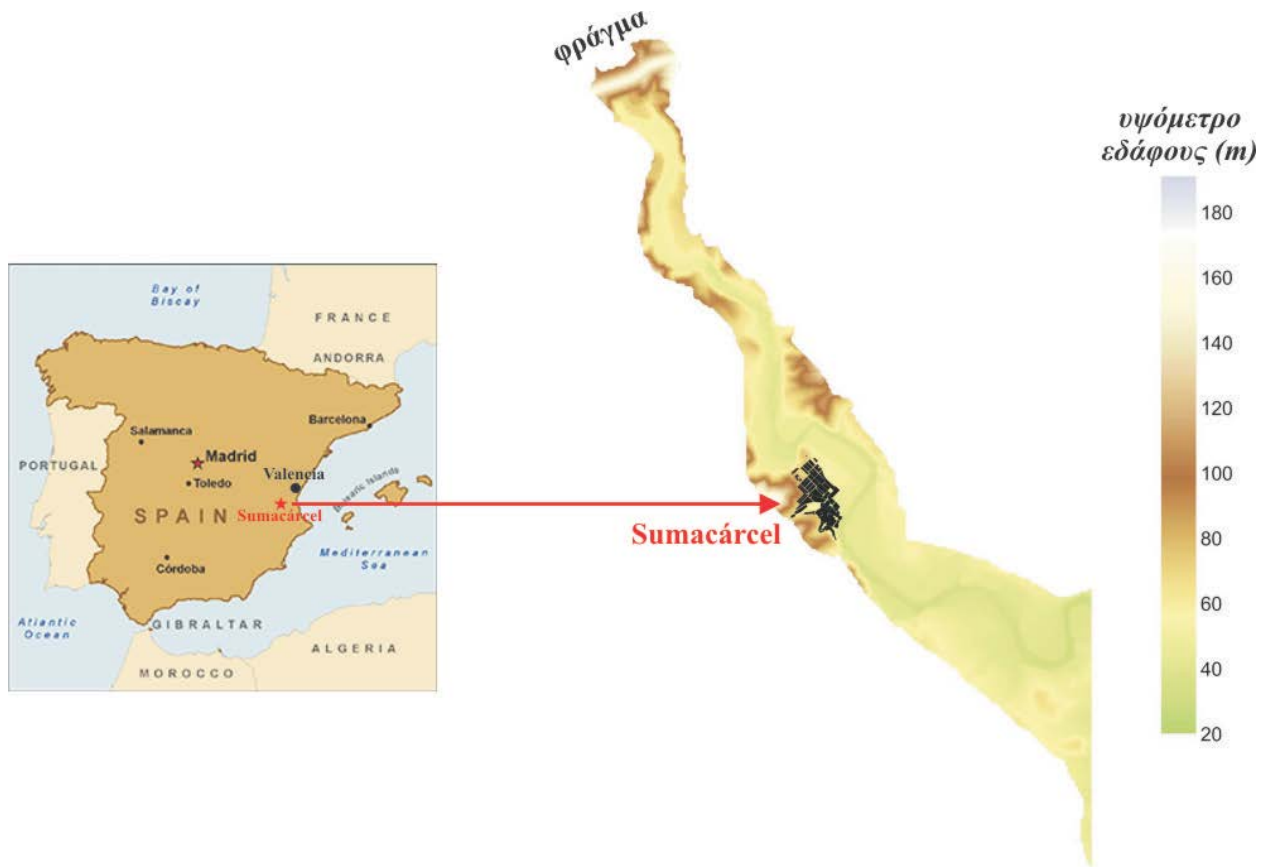
Ως αρχική συνθήκη ορίστηκε ο ξηρός πυθμένας, εφόσον η βασική απορροή (περίπου 50 m³/s, σύμφωνα με τους Alcrudo and Mulet (2007) είναι πολύ μικρή σε σχέση με τον όγκο νερού που εισέρχεται στο πλημμυρικό πεδίο στο εν λόγω γεγονός. Η ενεργή κλίση για την περίπτωση της σταθερής παροχής ορίστηκε $S_{eff}=0.01$. Για την περίπτωση εφαρμογής του πλήρους υδρογραφήματος, η κλίση του εδάφους στην ανάντη οριακή διατομή θεωρήθηκε σταθερή και ίση με την ενεργή κλίση της σταθερής παροχής. Η καμπύλη στάθμης παροχής έτσι όπως υπολογίστηκε με τις παραπάνω παραμέτρους απεικονίζεται στο Σχήμα 4.28. Η παράμετρος προσομοίωσης της υποχώρησης της

πλημμυρικής αιχμής εκτιμήθηκε $r_c=100$. Για τη διαδικασία βαθμονόμησης των παραπάνω παραμέτρων, όπως και για τους συντελεστές τραχύτητας γίνεται λόγος σε επόμενο κεφάλαιο. Η τάξη μεγέθους του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για τον εν λόγω έλεγχο είναι "ημέρες".

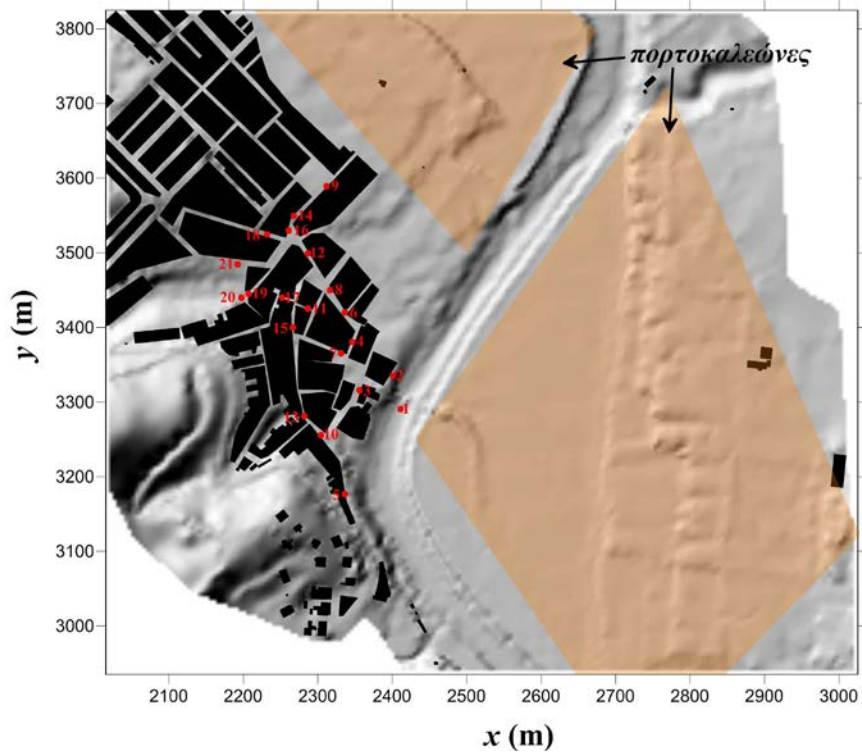
Στα Σχήματα 4.29-4.30 απεικονίζονται οι χάρτες πλημμυρικού κινδύνου (βάθη και ταχύτητες ροής) έτσι όπως προέκυψαν με το μοντέλο FLOW-R2D για σταθερή παροχή. Στο Σχήμα 4.31 φαίνεται σύγκριση των μέγιστων καταγεγραμμένων βαθών και για τα δύο DTM, επίσης για σταθερή παροχή. Στο Σχήμα 4.32 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του φαινομένου (βάθη ροής) για τους τρεις μετρητές που υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα, θεωρώντας ως ανάντη οριακή συνθήκη το πλήρες υδρογράφημα και για το 1998 DTM. Στο ίδιο Σχήμα, απεικονίζεται και το μέγιστο βάθος ροής έτσι όπως προέκυψε με το σενάριο της σταθερής παροχής. Τέλος, στον Πίνακα 4.4 παρατίθενται τα καταγεγραμμένα βάθη και τα αντίστοιχα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης, ενώ στον Πίνακα 4.5 παρατίθενται οι τιμές του *RMSE* και για τα δύο DTM. Σημειώνεται ότι επειδή σε ορισμένες θέσεις υπάρχουν αντικρουόμενες μαρτυρίες, οι τιμές του *RMSE* υπολογίστηκαν για την ελάχιστη και τη μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή του βάθους ροής, καθώς και για το μέσο όρο των δύο αυτών τιμών.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι η προσομοίωση είναι επιτυχής. Οι τιμές του *RMSE* παραμένουν σχετικά χαμηλές, αν συνυπολογιστεί η πολυπλοκότητα της προσομοίωσης (φυσικό ανάγλυφο και ακραίο φαινόμενο με δυναμική εξέλιξη) και η αβεβαιότητα των δεδομένων και των παραμέτρων, όπως είναι η εκτίμηση των μέγιστων βαθών ροής (υπενθυμίζεται ότι αυτή προέκυψε με ερωτηματολόγια) ή το DTM. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με το σενάριο του πλήρους υδρογραφήματος είναι πολύ κοντά με τα αποτελέσματα που προέκυψαν με το σενάριο της σταθερής παροχής αν και ελαφρώς υπερεκτιμημένα, επομένως φαίνεται ότι η αν δεν είναι απαραίτητη η προσομοίωση της χρονικής εξέλιξης του εκάστοτε γεγονότος, η υιοθέτηση του σεναρίου της σταθερής παροχής ίσης με την αιχμή του πλημμυρικού υδρογραφήματος μπορεί να προσομοιώσει ικανοποιητικά τις μέγιστες μεταβλητές (βάθος και ταχύτητα ροής). Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση του υπολογιστικού κόστους, ιδιαίτερα όταν το εκάστοτε γεγονός έχει μεγάλη χρονική διάρκεια.

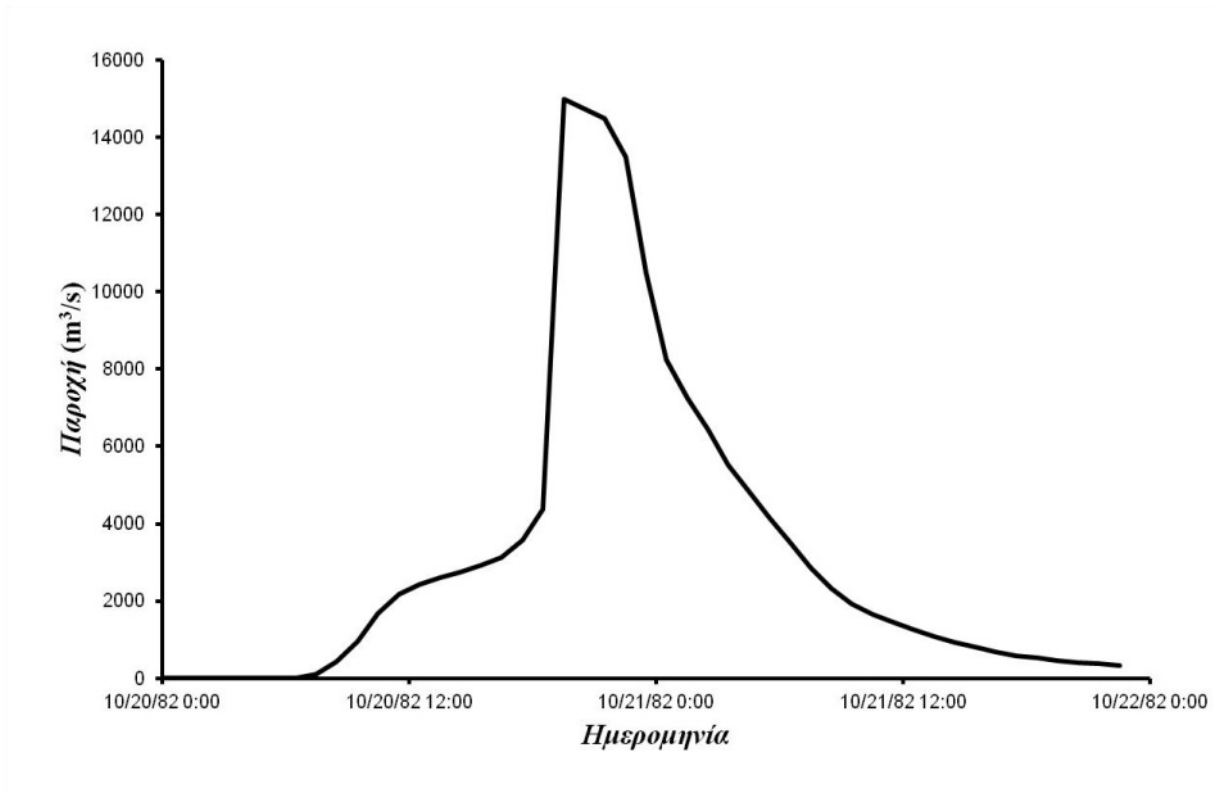
Όσον αφορά στη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο DTM, φαίνεται ότι το 1998 DTM δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Αυτό πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι το 1982 DTM αποτυπώθηκε λίγες ημέρες μετά την αστοχία, όπου η περιοχή κατάντη του φράγματος είχε αλλοιωθεί σημαντικά λόγω διαβρώσεων και αποθέσεων φερτών υλών μετά το ακραίο γεγονός, σε σχέση με την πρότερη κατάσταση.



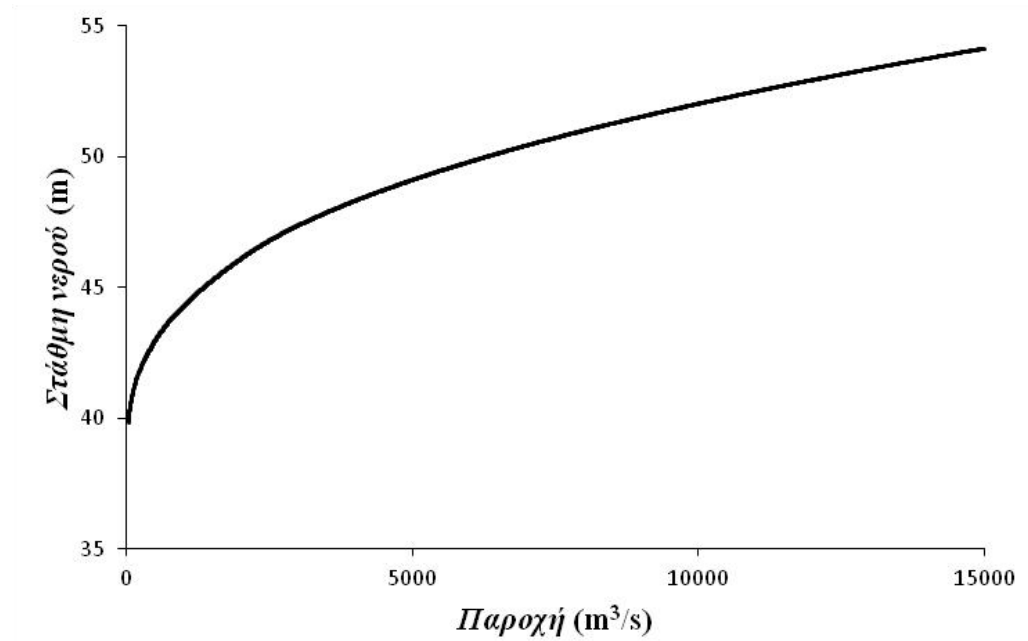
Σχήμα 4.25 Περιοχή μελέτης



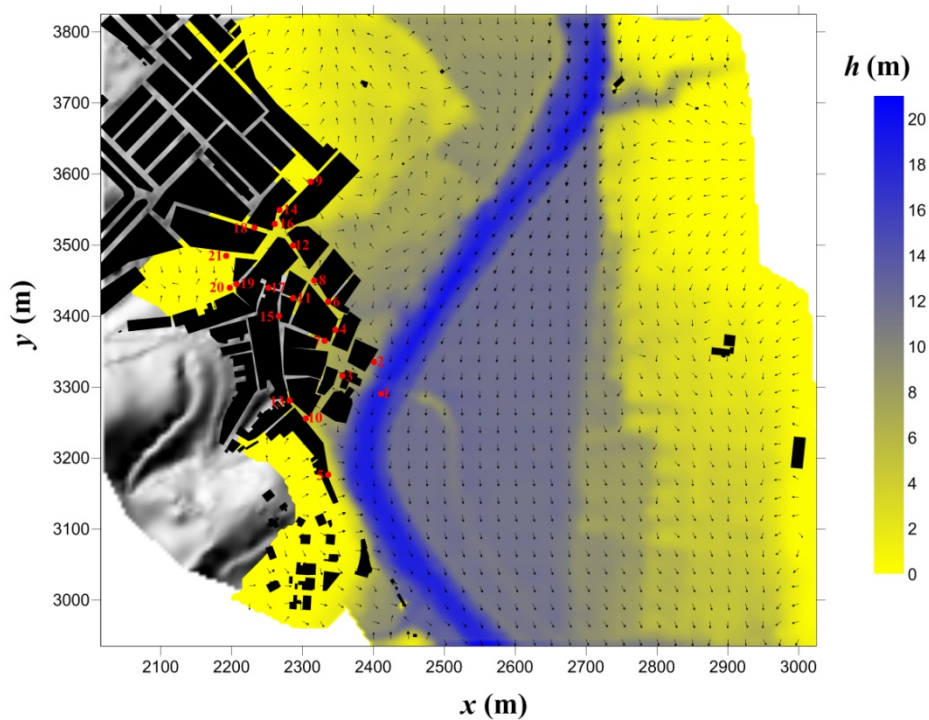
Σχήμα 4.26 Υπολογιστικό πεδίο και ζώνες τραχύτητας



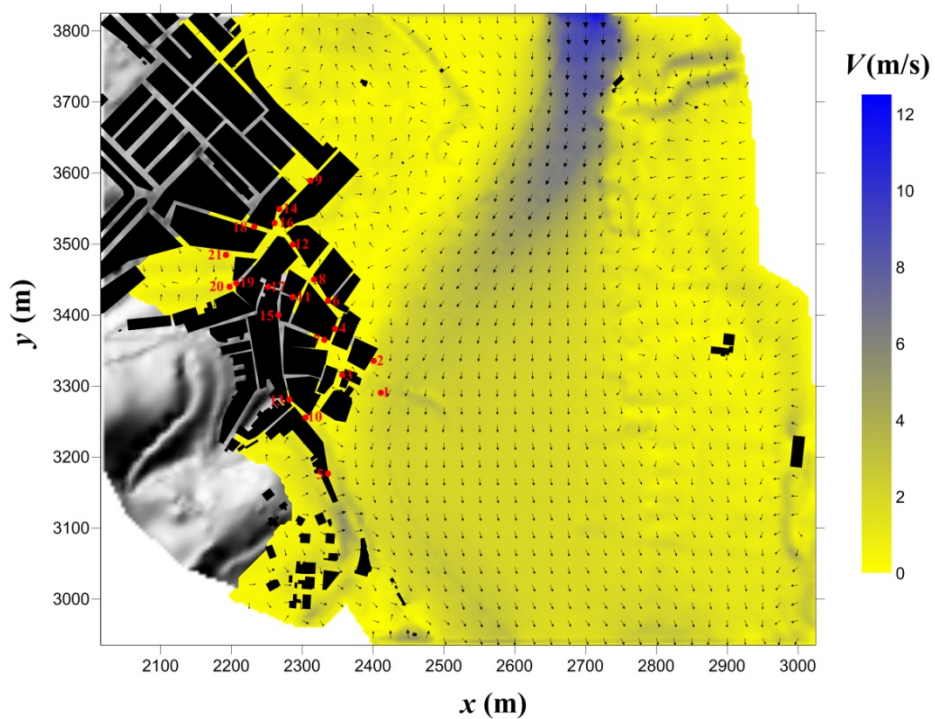
Σχήμα 4.27 Πλημμυρικό υδρογράφημα έπειτα από τη θραύση του φράγματος Tous



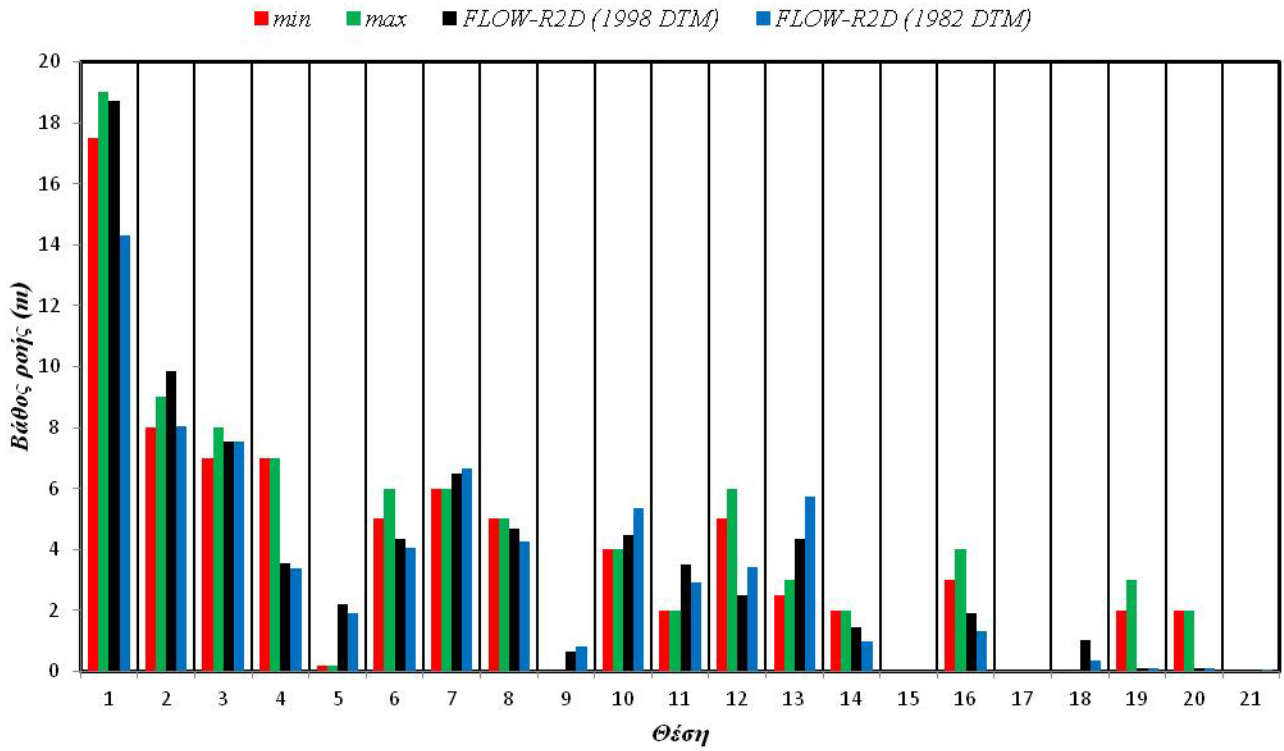
Σχήμα 4.28 Καμπύλη στάθμης-παροχής στην ανάντη οριακή διατομή, σύμφωνα με το μοντέλο FLOW-R2D



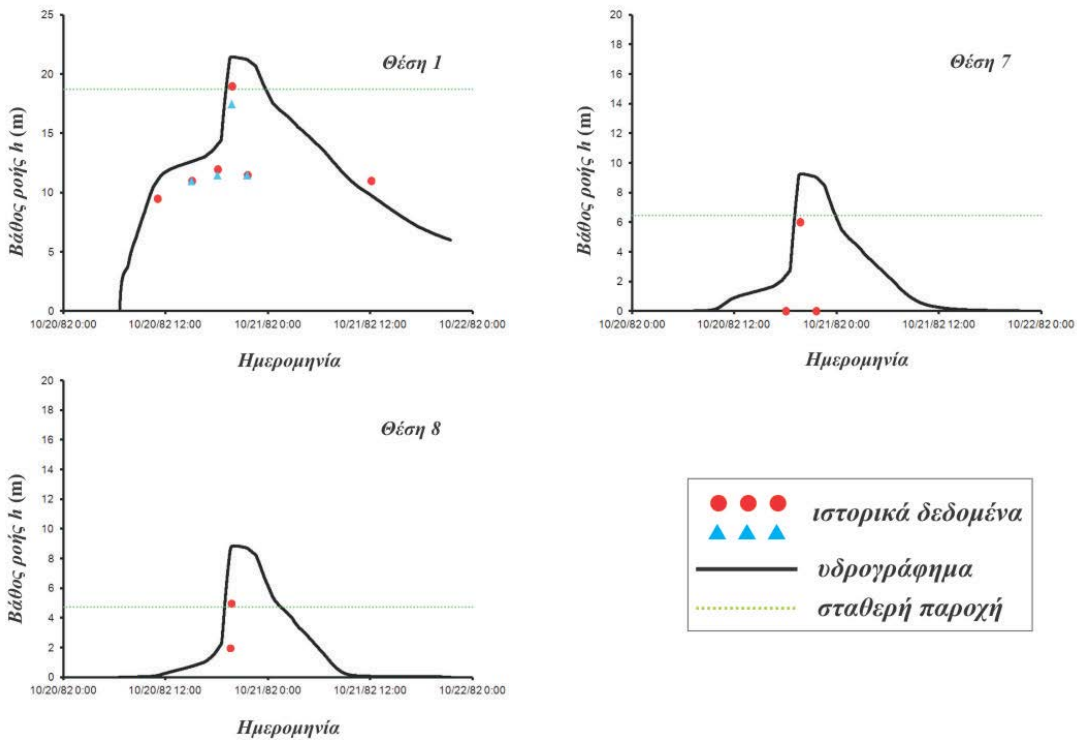
Σχήμα 4.29 Χάρτης πλημμυρικού κινδύνου (μέγιστα βάθη ροής) σύμφωνα με το σενάριο της σταθερής παροχής



Σχήμα 4.30 Χάρτης πλημμυρικού κινδύνου (μέγιστες ταχύτητες ροής) σύμφωνα με το σενάριο της σταθερής παροχής



Σχήμα 4.31 Σύγκριση αριθμητικής προσομοίωσης και ιστορικών καταγραφών για τα δύο DTM και για το σενάριο της σταθερής παροχής



Σχήμα 4.32 Σύγκριση αριθμητικής προσομοίωσης και ιστορικών καταγραφών της χρονικής εξέλιξης της πλημμύρας, για το 1998 DTM

Πίνακας 4.4 Σύγκριση δεδομένων αριθμητικής προσομοίωσης και καταγεγραμμένων μαρτυριών μεγίστων βαθών ροής, σε διάφορες θέσεις της πόλης *Sumacárcel* και για τα δυο DTM

Θέση	Τοποθεσία	Ιστορική Καταγραφή (m)	FLOW-R2D (1998 DTM) (m)	FLOW-R2D (1982 DTM) (m)
1	Γέφυρα	17.5-19	18.71	14.29
2	Σινεμά	8-9	9.85	8.05
3	Οδός εκκλησίας	7-8	7.55	7.53
4	Οδός Condes de Orgaz	7	3.53	3.37
5	Οδός Júcar	0.2	2.21	1.91
6	Οδός Proyecto C.	5-6	4.36	4.04
7	Παλιό δημαρχείο	6	6.47	6.68
8	Κεντρικό ρολόι	5	4.70	4.25
9	Πλατεία Era	0	0.64	0.81
10	Οδός Júcar	4	4.49	5.34
11	Οδός Stair.	2	3.51	2.93
12	Οδός Condes de Orgaz	5-6	2.48	3.43
13	Οδός Valencia	2.5-3	4.35	5.72
14	Οδός Pintor Sorolla	2	1.46	0.99
15	Οδός Valencia	0	0.00	0.00
16	Οδός Pintor Sorolla	3-4	1.90	1.32
17	Οδός Pallicer	0	0.00	0.00
18	Οδός Severo Ochoa	0	1.03	0.35
19	Οδός Virgen	2-3	0.12	0.12
20	Οδός Virgen	2	0.10	0.09
21	Λεωφόρος West	0	0.07	0.05

Πίνακας 4.5 Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος για κάθε DTM

DTM	$RMSE_{MIN}$	$RMSE_{AVG}$	$RMSE_{MAX}$
1998	1.45	1.50	1.62
1982	1.63	1.78	1.98

4.9 Αστραπιαία πλημμύρα έπειτα από ακραίο επεισόδια καταγίδας

Σε αυτόν τον έλεγχο το μοντέλο FLOW-R2D ελέγχεται επίσης σε πραγματικές συνθήκες και συγκεκριμένα στην προσομοίωση της αστραπιαίας πλημμύρας που συνέβη στις 22 Φεβρουαρίου το 2013 στο Χαλάνδρι, ως αποτέλεσμα ακραίου επεισοδίου βροχής (Bellos and Tsakiris 2015c). Ο έλεγχος αυτός είναι πολύ σημαντικός, διότι δείχνει την ικανότητα του μοντέλου να ανταποκρίνεται σε μεγαλύτερες κλίμακες προσομοιώσεων (λεκάνες απορροής), από τις συνήθεις διαστάσεις προσεγγίσεις οι οποίες περιορίζονταν σε τμήματα ποταμών (κυρίως ρέμα και πλημμυρικό πεδίο). Επίσης ελέγχεται η ικανότητα του μοντέλου σε χαμηλού βάθους και υψηλής ταχύτητας ροές, οι οποίες

είναι και οι πιο δύσκολες στην αριθμητική προσομοίωση, λόγω των ασταθειών που ενδέχεται να προκληθούν στην αριθμητική επίλυση. Τέλος, ελέγχονται και η ικανότητα περιγραφής μέρους του υδρολογικού κύκλου (βροχόπτωση και διήθηση) με τους όρους εισροής και εκροής (source and sink terms) που υπεισέρχονται στις 2D-SWE. Τα δεδομένα που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση συγκρίθηκαν με πραγματικές μετρήσεις οι οποίες εντάσσονται στο Δίκτυο Δεδομένων ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ.

Η λεκάνη απορροής που προσομοιώνεται είναι μικρή (της τάξης των 5 km²) και συμβάλλει στο ρέμα Χαλανδρίου. Στο Σχήμα 4.33 απεικονίζεται αεροφωτογραφία της περιοχής μελέτης. Επίσης σημειώνονται και οι θέσεις του υδρομετρικού σταθμού όπου καταγράφεται το πλημμυρικό υδρογράφημα (Νέα Πεντέλη), καθώς και του μετεωρολογικού σταθμού όπου καταγράφεται το ύψος βροχόπτωσης (Παλαιά Πεντέλη). Η γεωλογική σύσταση της λεκάνης είναι από μάρμαρο. Το μέγιστο υψόμετρο εδάφους, το ελάχιστο και το μέσο είναι 1045 m, 325 m και 609 m αντίστοιχα. Το μήκος του κύριου υδατορέματος είναι 4.75 km. Η μέση κλίση της λεκάνης είναι 32%, ενώ του κυρίου υδατορέματος είναι 12%. Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά, ο χρόνος συγκέντρωσης σύμφωνα με τη μέθοδο Giandotti υπολογίζεται 1.19 h, ενώ σύμφωνα με τη μέθοδο Kirpich 0.50 h (Τσακίρης 2013). Επίσης υπολογίστηκαν και διάφορες γεωμορφολογικές παράμετροι της λεκάνης: ο δείκτης Cravelius $K_c=1.43$, ο "δείκτης μορφής" $F=0.27$, η κυκλικότητα λεκάνης $R_c=0.49$ και η επιμήκυνση της λεκάνης $R_L=0.59$ (Τσακίρης 2013).

Όσον αφορά στο επεισόδιο της βροχής που προσομοιώθηκε το οποίο και απεικονίζεται στο Σχήμα 4.34, αποτελεί ένα ακραίο γεγονός (121.4 mm βροχόπτωσης μέσα σε 5 h), ενώ η αιχμή του πλημμυρικού υδρογραφήματος καταγράφηκε ως 45.7 m³/s. Ο συντελεστής απορροής της λεκάνης για αυτό το πλημμυρικό γεγονός υπολογίζεται περίπου 0.50. Το επεισόδιο της βροχής μπορεί να χωριστεί σε δύο τμήματα: από τις 05:30 μέχρι τις 09:00 και από τις 09:00 μέχρι τις 11:00. Παρατηρείται ότι ενώ η τάξη μεγέθους της βροχόπτωσης είναι περίπου η ίδια και στα δύο τμήματα (η αιχμή της βροχόπτωσης στο πρώτο τμήμα είναι περίπου το 70% της αιχμής του δεύτερου τμήματος), εντούτοις η διαφορά στην πλημμυρική απορροή είναι αρκετά μεγαλύτερη (η πλημμυρική αιχμή στο πρώτο τμήμα είναι περίπου το 30% της πλημμυρικής αιχμής του δεύτερου τμήματος). Αυτό πιθανόν οφείλεται στο ότι η λεκάνη αποτελείται από μάρμαρο, οπότε αναμένεται ότι το φαινόμενο της διήθησης θα είναι σημαντικό. Έτσι στο πρώτο τμήμα του επεισοδίου το έδαφος μετατρέπεται σε πλήρως κορεσμένο και στο δεύτερο τμήμα, το μεγαλύτερο μέρος της βροχόπτωσης μετατρέπεται σε πλημμυρική απορροή.

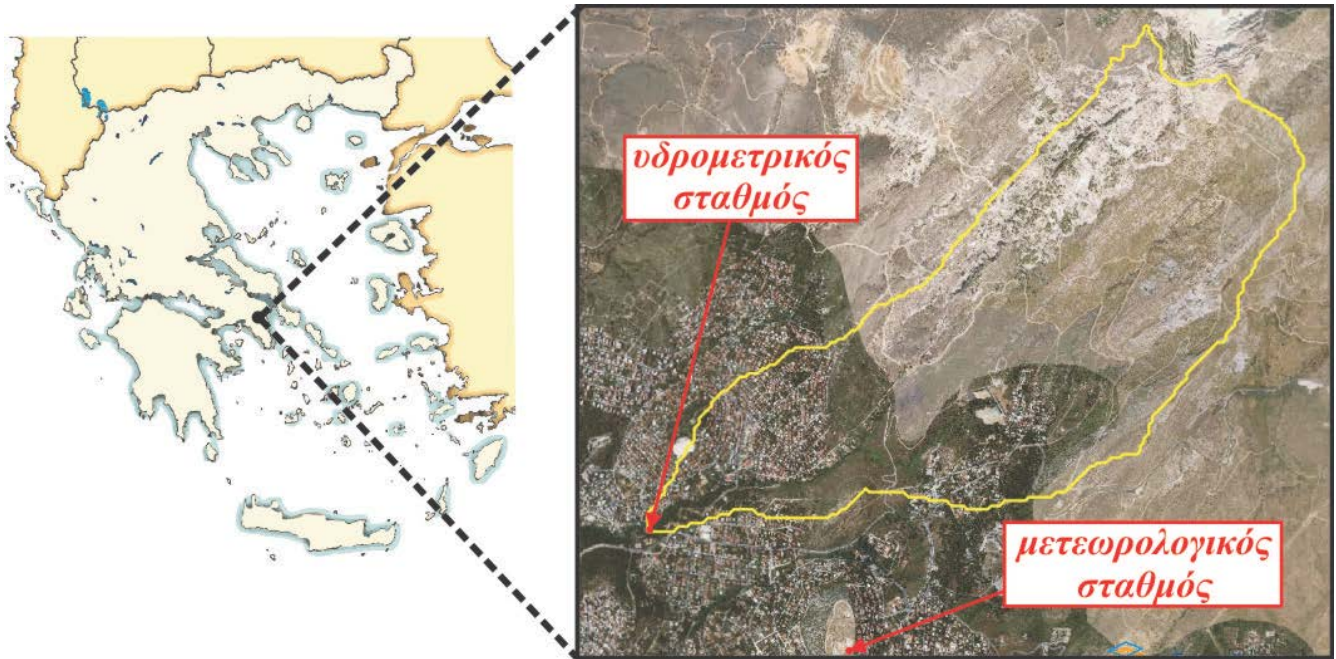
Όσον αφορά στην αριθμητική προσομοίωση με το μοντέλο FLOW-R2D, η λεκάνη διακριτοποιήθηκε με τετραγωνικά κελιά διαστάσεων 10x10 m. Συνολικά 50811 κελιά απαρτίζουν το υπολογιστικό πεδίο. Το χρονικό βήμα ορίστηκε σταθερό και ίσο με $\Delta t=0.004$ s, ενώ ο συντελεστής διάχυσης $\omega=0.99$. Το κατώφλι διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα ορίστηκε $h_{dry}=10^{-4}$ m, ενώ ως αρχική συνθήκη θεωρήθηκε ότι σε όλη τη λεκάνη υπάρχει νερό βάθους 10^{-3} m, για υπολογιστικούς λόγους. Τα όρια της λεκάνης ορίστηκαν ως στερεά με στόχο τη διατήρηση του ισοζυγίου μάζας του νερού, ενώ η έξοδος της λεκάνης ορίστηκε ως ανοιχτό όριο.

Για την προσομοίωση των τριβών πυθμένα χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Manning. Το υπολογιστικό πεδίο χωρίστηκε σε ζώνες τραχύτητας, οι οποίες προέκυψαν από τις χρήσεις γης σύμφωνα με τους

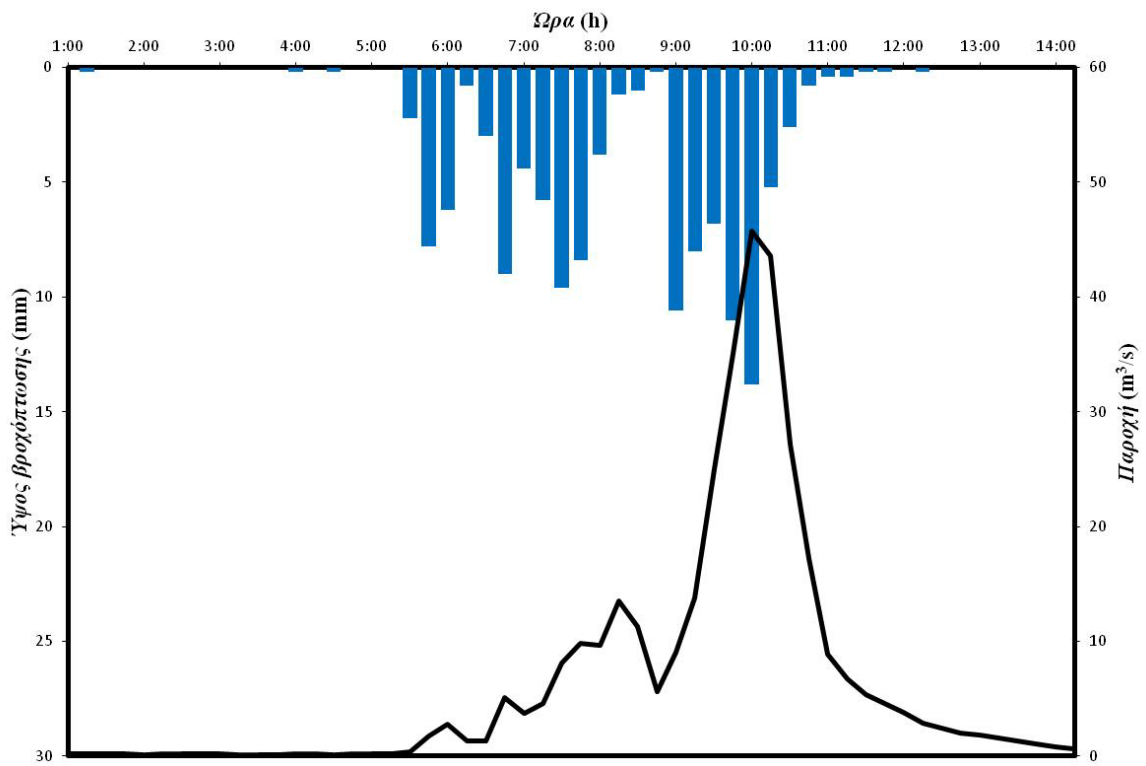
χάρτες CORINE 2000. Για υπολογιστικούς λόγους, στην παρούσα προσομοίωση οι πέντε ζώνες που υπάρχουν στους εν λόγω χάρτες συνενώθηκαν σε τρεις, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.35. Το δάσος κωνοφόρων παρέμεινε ως έχει και αποτελεί τη Ζώνη Α, η διακεκομμένη αστική δόμηση συνενώθηκε με το χώρο εξόρυξης ορυκτών (Ζώνη Β) και οι μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις συνενώθηκαν με τη σκληροφυλλική βλάστηση για να αποτελέσουν τη Ζώνη C. Οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας βαθμονομήθηκαν με δοκιμές (trial and error method) και προσδιορίστηκαν για την Ζώνη Α $n=0.060 \text{ s/m}^{1/3}$, για τη Ζώνη Β $n=0.025 \text{ s/m}^{1/3}$ και για τη Ζώνη C $n=0.035 \text{ s/m}^{1/3}$. Περαιτέρω λεπτομέρειες για τη διαδικασία βαθμονόμησης παρατίθενται σε επόμενο κεφάλαιο. Η τάξη μεγέθους του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για τον εν λόγω έλεγχο είναι "ημέρες".

Όσον αφορά στους όρους εισροής και εκροής, για το μεν όρο εισροής ορίζεται ο ρυθμός βροχόπτωσης έτσι όπως έχει καταγραφεί στο μετεωρολογικό σταθμό της Παλαιάς Πεντέλης, ενώ για τον όρο εκροής που προσομοιώνει τη διήθηση, επιλέχθηκε η εμπειρική εξίσωση Kostiaκον, καθώς εισάγει μόνο δύο παραμέτρους. Ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων a , b της παραπάνω εξίσωσης παρατίθενται στον Πίνακα 4.6 (Αντωνόπουλος 1999). Από τη στιγμή που αναμένονται σημαντικά φαινόμενα διήθησης, η λεκάνη θεωρήθηκε ότι μπορεί να χαρακτηριστεί "αργιλώδης πηλός" και επομένως για την παρούσα προσομοίωση οι παράμετροι της διήθησης προσδιορίστηκαν $a=0.00328 \text{ m/min}^{0.584}$ και $b=0.584$.

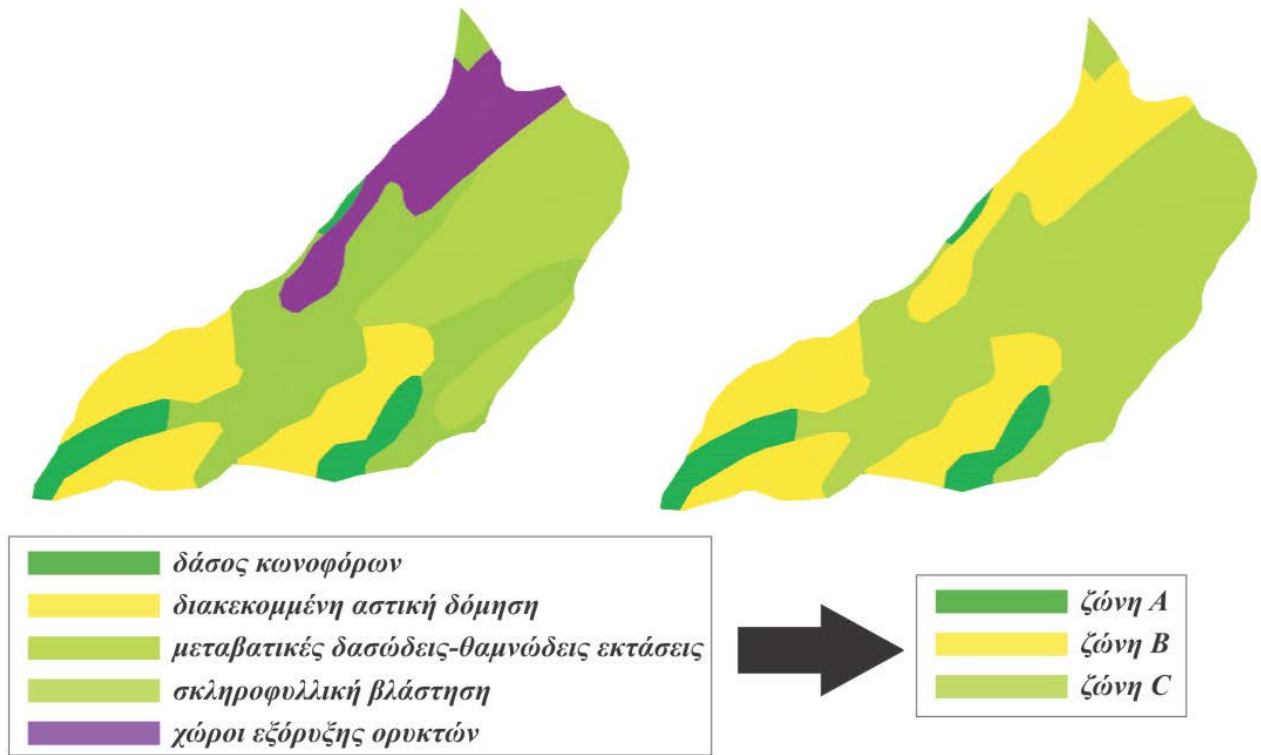
Στο Σχήμα 4.36 απεικονίζεται το αποτέλεσμα της αριθμητικής προσομοίωσης με το μοντέλο FLOW-R2D, σε αντιπαραβολή με τις πραγματικές μετρήσεις, ενώ στο Σχήμα 4.37 απεικονίζεται ενδεικτική κάτοψη της λεκάνης απορροής με σχηματισμένο το υδρογραφικό δίκτυο σύμφωνα με την προσομοίωση του επεισοδίου βροχής με το μοντέλο FLOW-R2D. Ο συντελεστής συσχέτισης των δεδομένων που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση με τις πραγματικές μετρήσεις είναι $PCC=0.96$. Όπως φαίνεται από τη γραφική σύγκριση, αλλά και από την υψηλή τιμή του PCC , η προσομοίωση μπορεί να θεωρηθεί επιτυχημένη. Το μοντέλο ανταποκρίνεται σε ακραία φαινόμενα (χαμηλά βάθη και υψηλές ταχύτητες ροής που έχουν δυναμική εξέλιξη) και σε μεγαλύτερη κλίμακα από κάποιον ποταμό. Η υδροδυναμική προσέγγιση σε συνδυασμό με κάποιο εμπειρικό μοντέλο διήθησης φαίνεται ότι μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά το φαινόμενο των αστραπιαίων πλημμυρών σε μικρές λεκάνες, παράλληλα και επικουρικά με οποιοδήποτε μοντέλο "μαύρου κουτιού", που προκύπτει από στατιστική ανάλυση των μετεωρολογικών και υδρομετρικών δεδομένων της περιοχής. Ιδιαίτερα δε, από τη στιγμή που σπανίζουν τα δεδομένα από πραγματικές μετρήσεις, τα μοντέλα "φυσικής-βάσης" είναι μία αξιόπιστη επιλογή, εφόσον κάθε παράμετρος προσδιοριστεί μέσα από ένα εύρος τιμών, το οποίο έχει φυσική σημασία.



Σχήμα 4.33 Αεροφωτογραφία περιοχής μελέτης και θέσεις υδρομετρικού και μετεωρολογικού σταθμού



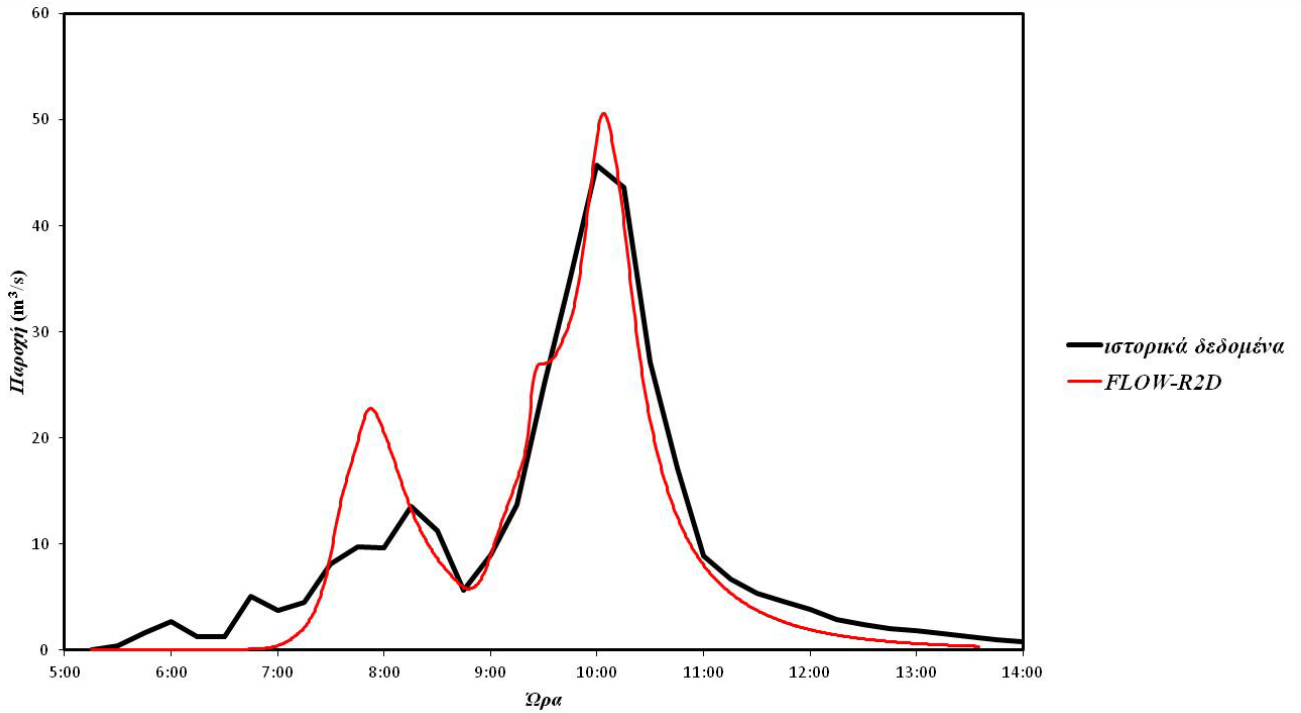
Σχήμα 4.34 Υετόγραμμα και πλημμυρικό υδρογράφημα του ακραίου επεισοδίου της 22/10/2013



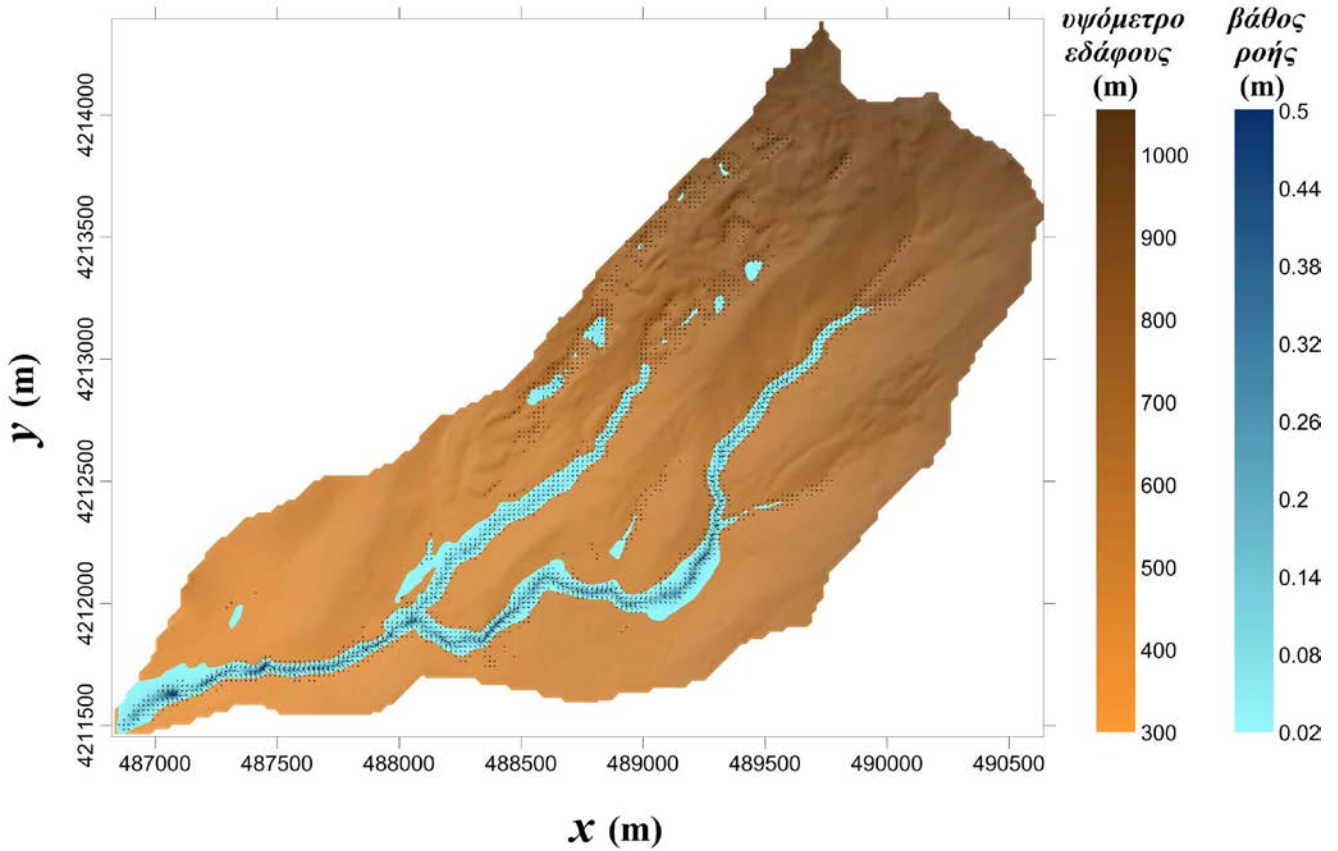
Σχήμα 4.35 Χρήσεις γης από CORINE 2000 και συνένωση ζωνών

Πίνακας 4.6 Παράμετροι διήθησης για την εμπειρική εξίσωση Kostiakov

Έδαφος	a (m/min ^b)	b
Άργιλος	0.00383	0.317
Αργιλώδης πηλός	0.00330	0.437
Ίλο-πηλός	0.00320	0.503
Αμμώδης πηλός	0.00328	0.584
Άμμος	0.00361	0.642



Σχήμα 4.36 Σύγκριση αριθμητικής προσομοίωσης με πραγματικές μετρήσεις



Σχήμα 4.37 Ενδεικτική κάτοψη λεκάνης απορροής με σχηματισμένο το υδρογραφικό δίκτυο

4.10 Μετάδοση πλημμυρικού κύματος στο Σπερχειό ποταμό

Ο έλεγχος αυτός εντάσσεται μεν στην προσομοίωση μίας πραγματικής κατάστασης, αλλά η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με το μοντέλο FLOW-R2D έγινε με τα αποτελέσματα που προέκυψαν με το αντίστοιχο γνωστό λογισμικό CCHE2D (Jia and Wang 1999), ελλείπει πραγματικών μετρήσεων (Tsakiris and Bellos 2014). Το συγκεκριμένο λογισμικό αναπτύχθηκε από το "National Center for Computational Hydroscience and Engineering" των Η.Π.Α. και επιλύει τις 2D-SWE με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

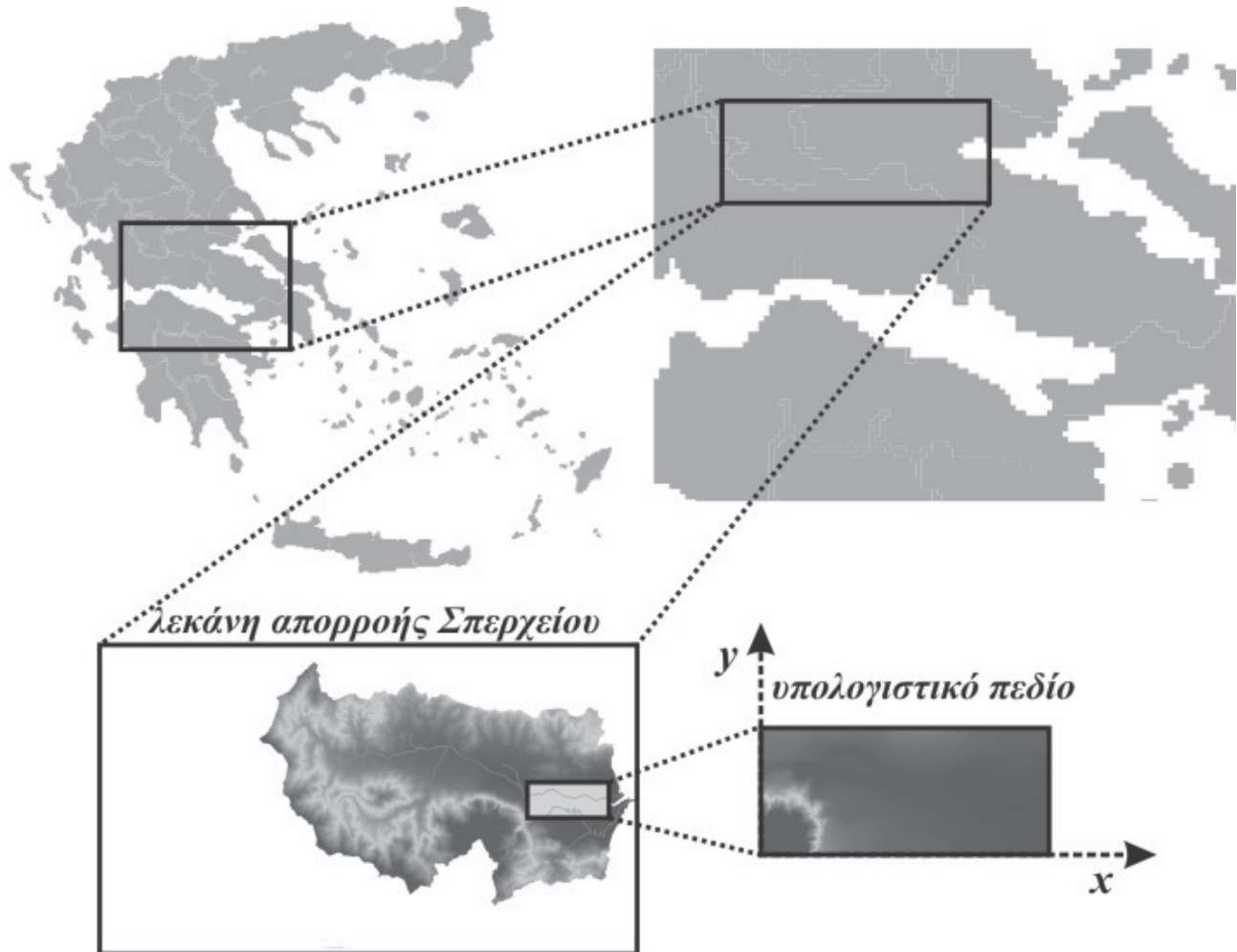
Ως περιοχή μελέτης ορίστηκε το πεδινό κατάντη τμήμα του Σπερχειού ποταμού αμέσως πριν την εκβολή του στη θάλασσα (Σχήμα 4.38). Το γεγονός ότι η περιοχή διέπεται από ήπιες κλίσεις εδάφους (και συνεπώς οι εγκάρσιες ταχύτητες ροής είναι της ίδιας τάξης μεγέθους σε σχέση με τις κατά μήκος) μαζί με το ότι η διαθέσιμη τοπογραφική πληροφορία (DTM) είναι σχετικά αραιή με τετραγωνικά κελιά διαστάσεων 25x25 m (οπότε δεν είναι δυνατόν να αναπαρασταθεί το κυρίως ρέμα), οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η προσομοίωση πρέπει να γίνει με δισδιάστατο μοντέλο θεωρώντας την περιοχή όλη σαν πλημμυρικό πεδίο (floodplain) και μη κάνοντας τη διάκριση μεταξύ πλημμυρικού πεδίου και κυρίου ρέματος.

Για την αριθμητική προσομοίωση με το μοντέλο FLOW-R2D, ο συντελεστής διάχυσης θεωρήθηκε $\omega=0.90$, ο αριθμός Courant $CFL=0.2$, το κατώφλι διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα $h_{dry}=3 \times 10^{-2}$ m. Για την αριθμητική προσομοίωση με το λογισμικό CCHE2D θεωρήθηκε σταθερό χρονικό βήμα $\Delta t=0.1$ s, ενώ το κατώφλι διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα επίσης $h_{dry}=3 \times 10^{-2}$ m. Και για τα δύο μοντέλα, για την προσομοίωση των τριβών πυθμένα χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Manning. Ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning εκτιμήθηκε $n=0.030$ s/m^{1/3} για όλο το υπολογιστικό πεδίο. Σημειώνεται ότι το υπολογιστικό πεδίο αποτελείται από 99047 κελιά. Ως αρχική συνθήκη θεωρήθηκε ο ξηρός πυθμένας και αγνοήθηκε η βασική απορροή, η οποία είναι πολύ μικρή σε σχέση με τα πλημμυρικά σενάρια που προσομοιώθηκαν, για τα οποία η πλημμυρική αιχμή είναι για περίοδο επαναφοράς $T=50$ και $T=500$ έτη, $Q=2200$ m³/s και $Q=4000$ m³/s αντίστοιχα (Κουτσογιάννης et al. 2003) και τα οποία ορίστηκαν ως ανάντη οριακές συνθήκες. Σημειώνεται ότι μόνο η αιχμή των υδρογραφημάτων θεωρήθηκε ως εισροή στο υπολογιστικό πεδίο, επομένως έπειτα από χρονικό διάστημα προσομοίωσης η κατάσταση της ροής μονιμοποιείται. Ως κατάντη οριακή συνθήκη ορίστηκε και στα δύο μοντέλα το ανοιχτό όριο (open boundary conditions) έτσι όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η τάξη μεγέθους του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για τον εν λόγω έλεγχο είναι "ώρες" και για τα δύο μοντέλα.

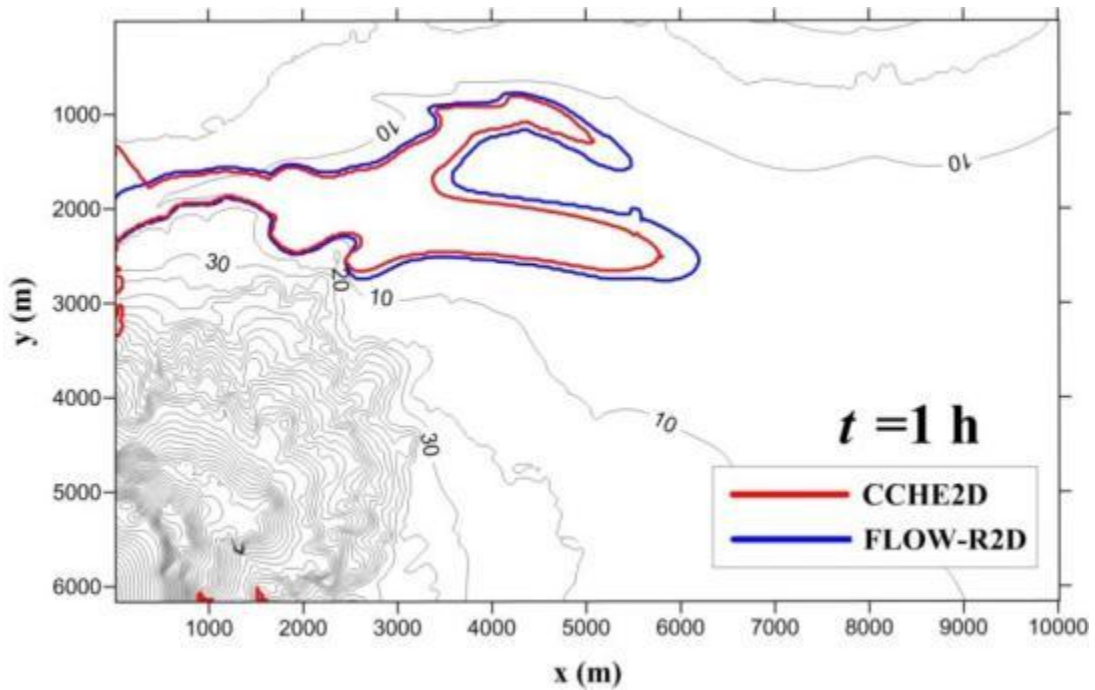
Στα Σχήματα 4.39-4.42 παρουσιάζεται η σύγκριση των δύο μοντέλων όσον αφορά στα πλημμυρικά όρια, για διάφορες χρονικές στιγμές και για διάφορες περιόδους επαναφοράς. Η διαφορά στη χρονική στιγμή που παρατηρείται η μόνιμη κατάσταση οφείλεται στο γεγονός ότι η ροή μονιμοποιείται νωρίτερα στο σενάριο με περίοδο επαναφοράς $T=500$ έτη. Στα Σχήματα 4.43-4.44 παρουσιάζεται η σύγκριση των δύο μοντέλων σε ενδεικτικές διατομές όταν η ροή έχει μονιμοποιηθεί.

Εκτός από τη γραφική σύγκριση, χρησιμοποιήθηκε και ο συντελεστής συσχέτισης κατά Pearson για να ελεγχθεί η συσχέτιση των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων. Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται οι τιμές του PCC για τα βάθη και τις ταχύτητες ροής, για τις διάφορες χρονικές στιγμές και για τα

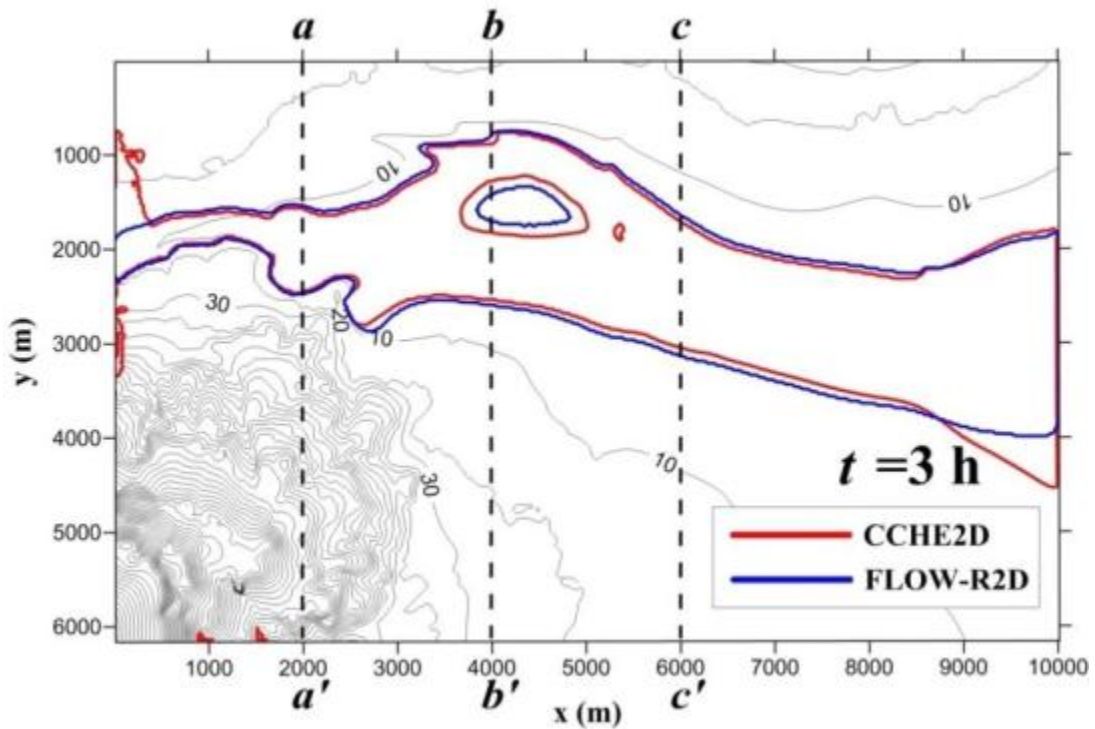
διάφορα σενάρια περιόδων επαναφοράς, όπου με βάση αυτές τις τιμές η προσομοίωση μπορεί να χαρακτηριστεί επιτυχής. Σημειώνεται ότι υπάρχουν διαφορές στον τρόπο υπολογισμού της σταθερής παροχής ως ανάντη ορίου, για αυτό και παρατηρείται ότι υπάρχουν διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων στο ανάντη τμήμα του υπολογιστικού πεδίου, οι οποίες εξομαλύνονται παρακάτω. Παρατηρήθηκε επίσης ότι υπάρχει αδυναμία του λογισμικού CCHE2D στα ανοιχτά όριο (η ροή δεν μονιμοποιείται). Όσον αφορά τους υπολογιστικούς χρόνους, το μοντέλο FLOW-R2D, είναι 5-6 φορές πιο γρήγορο σε σχέση με το λογισμικό CCHE2D για τα παραπάνω σενάρια εφαρμογής. Τέλος, στα Σχήματα 4.45-4.46 παρουσιάζονται οι χάρτες πλημμυρικού κινδύνου (βάθη και ταχύτητες ροής), έτσι όπως ορίζονται από την Κοινοτική Οδηγία 2007/60 (European Council 2007), για περίοδο επαναφοράς $T=500$ έτη με το μοντέλο FLOW-R2D.



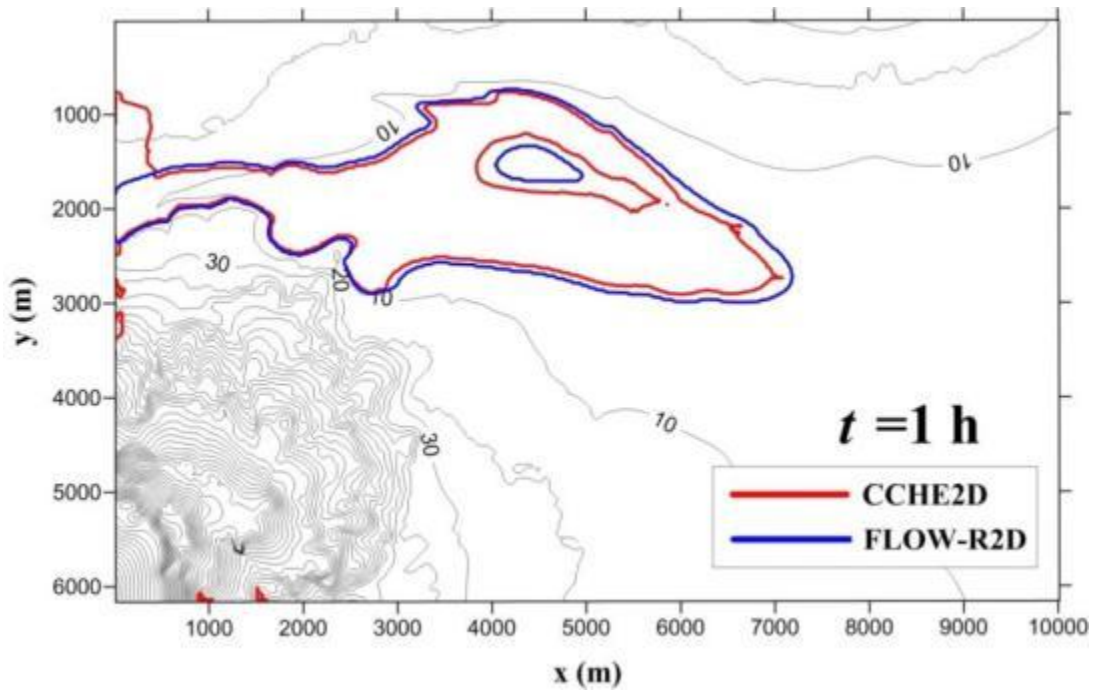
Σχήμα 4.38 Λεκάνη απορροής Σπερχειού ποταμού και υπολογιστικό πεδίο προσομοίωσης



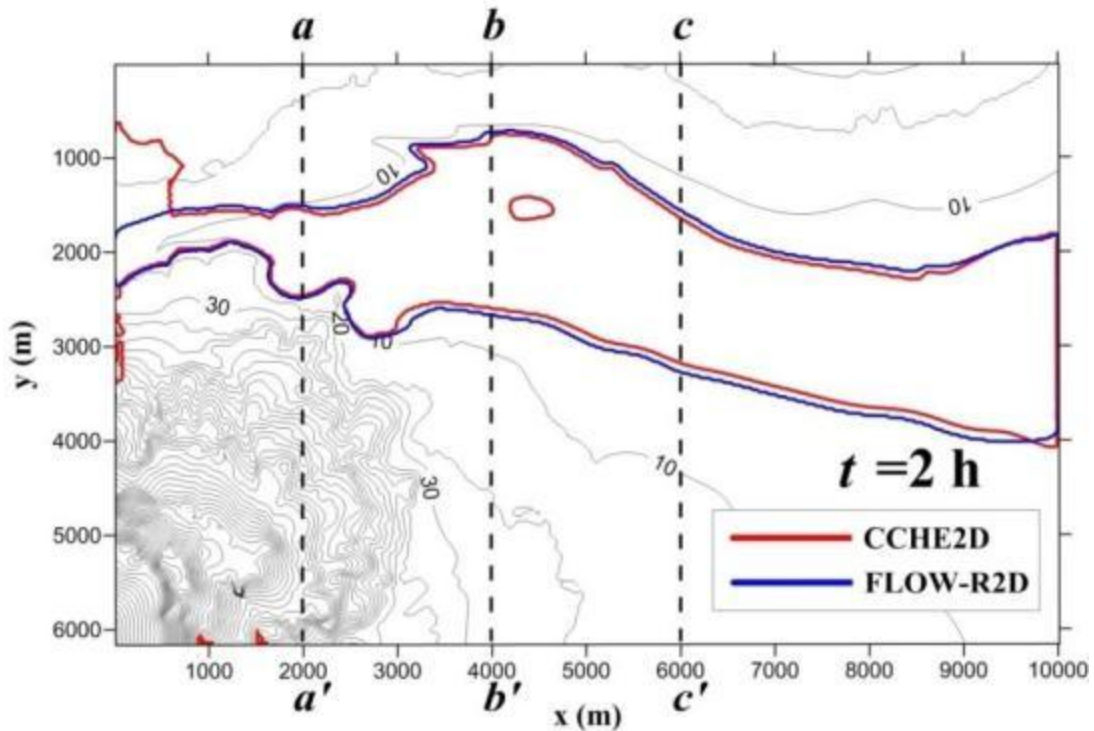
Σχήμα 4.39 Πλημμυρικά όρια με τα μοντέλα CCHE2D και FLOW-R2D για $T=50$ έτη τη χρονική στιγμή $t=1 h$



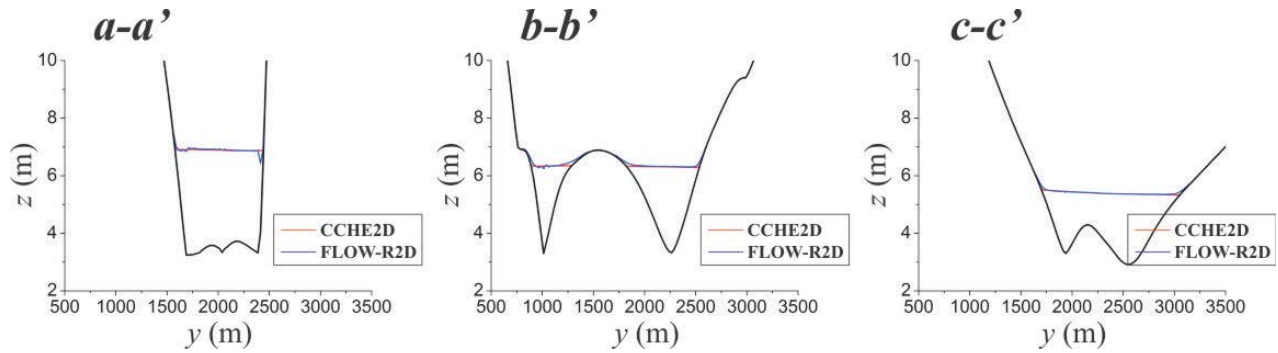
Σχήμα 4.40 Πλημμυρικά όρια με τα μοντέλα CCHE2D και FLOW-R2D για $T=50$ έτη τη χρονική στιγμή $t=3 h$



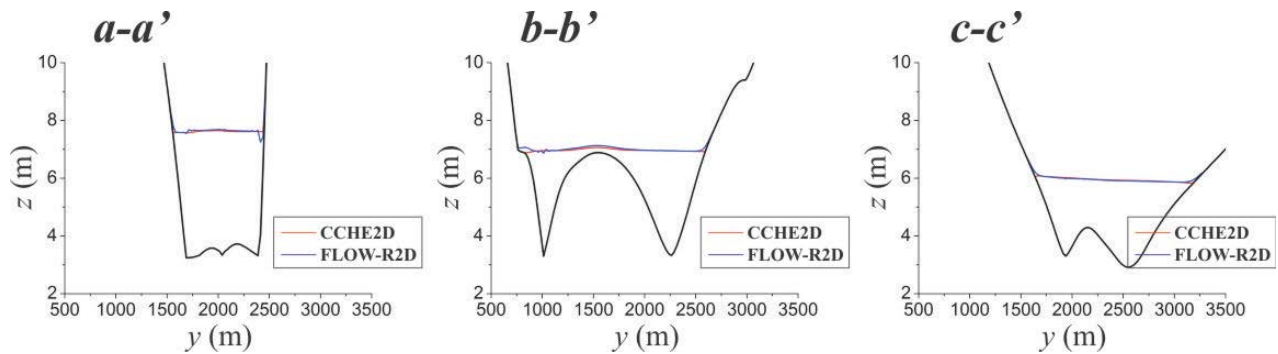
Σχήμα 4.41 Πλημμυρικά όρια με τα μοντέλα CCHE2D και FLOW-R2D για $T=500$ έτη τη χρονική στιγμή $t=1 h$



Σχήμα 4.42 Πλημμυρικά όρια με τα μοντέλα CCHE2D και FLOW-R2D για $T=500$ έτη τη χρονική στιγμή $t=2 h$



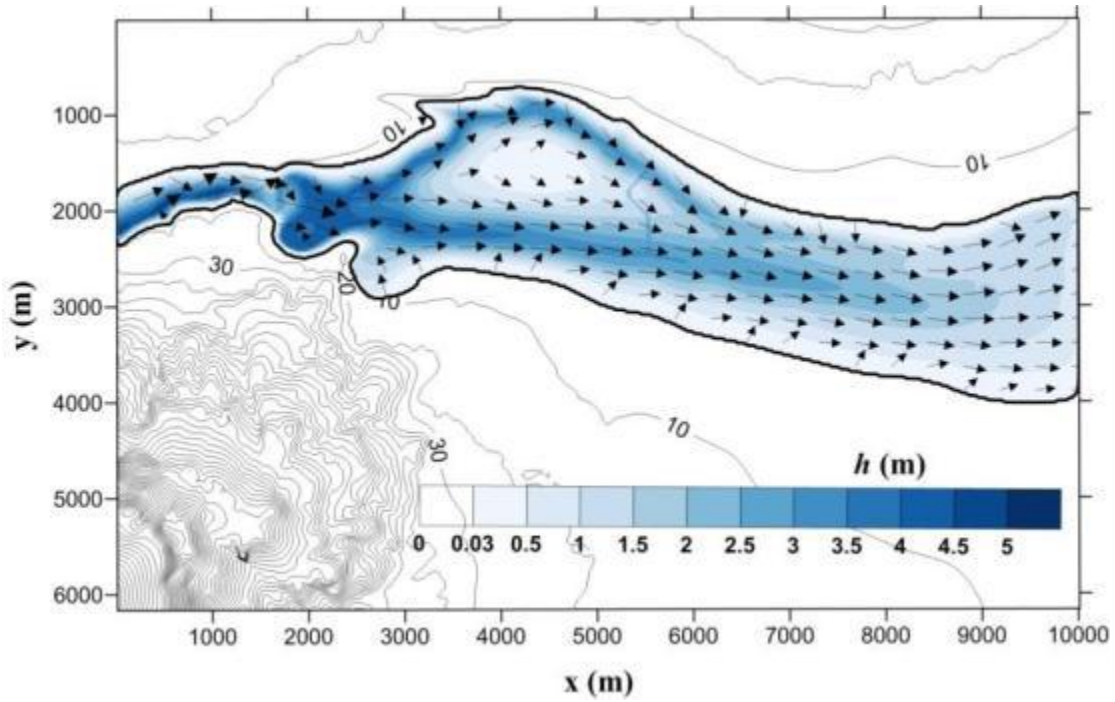
Σχήμα 4.43 Διατομές με τα μοντέλα CICHE2D και FLOW-R2D για $T=50$ έτη στις θέσεις $x=2$ km, $x=4$ km και $x=6$ km



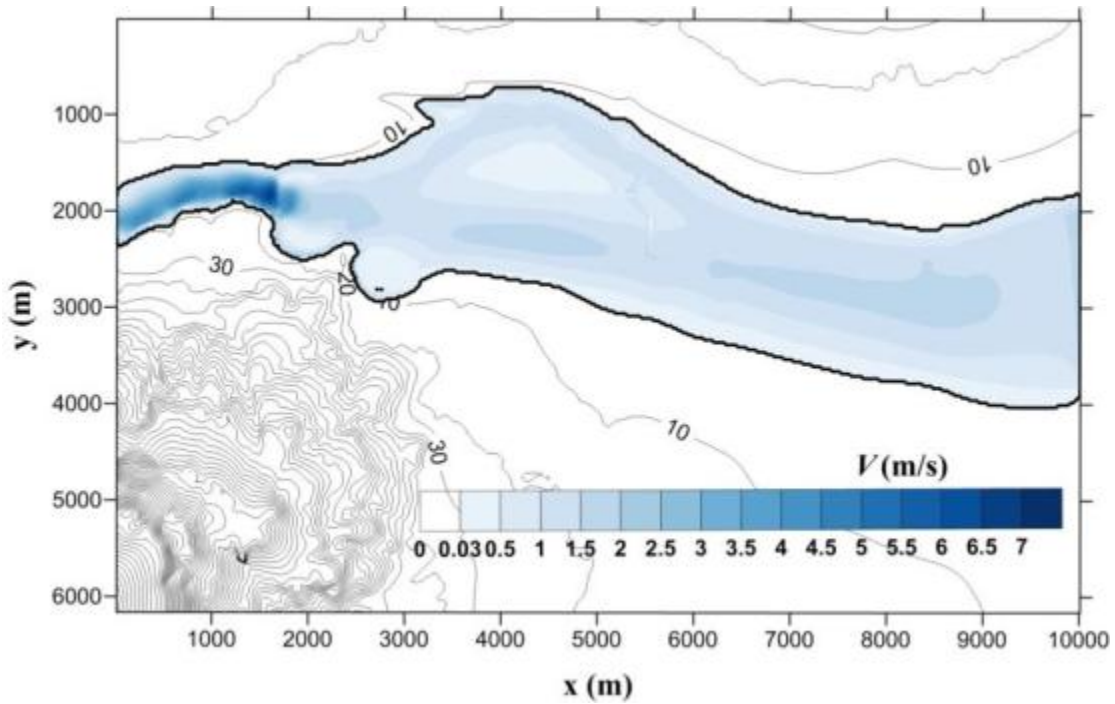
Σχήμα 4.44 Διατομές με τα μοντέλα CICHE2D και FLOW-R2D για $T=500$ έτη στις θέσεις $x=2$ km, $x=4$ km και $x=6$ km

Πίνακας 4.7 Συντελεστής συσχέτισης για τα αποτελέσματα των μοντέλων CICHE2D και FLOW-R2D

T (έτη)	t (h)	Μεταβλητή	PCC
50	1	h	0.97
50	1	V	0.88
50	3	h	0.95
50	3	V	0.88
500	1	h	0.98
500	1	V	0.90
500	2	h	0.98
500	2	V	0.91



Σχήμα 4.45 Βάθη ροής για $T=500$ έτη με το μοντέλο FLOW-R2D



Σχήμα 4.46 Ταχύτητες ροής για $T=500$ έτη με το μοντέλο FLOW-R2D

5. ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των ειδικών θεμάτων και δυσκολιών που προκύπτουν κατά την προσομοίωση της εκάστοτε πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες λόγω πολυπλοκότητας του φυσικού κόσμου, καθώς και πώς αντιμετωπίστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, χρησιμοποιώντας ως αφετηρία τη σχετική βιβλιογραφία και ενίοτε αναπτύσσοντας πρωτότυπες προσεγγίσεις.

Σε πρώτη φάση παρατίθεται το πλαίσιο πάνω στο οποίο πραγματοποιείται η προσομοίωση πλημμυρικής ροής σε αστικό περιβάλλον και αφορά κατά κύριο λόγο στον τρόπο αναπαράστασης των κτιρίων εντός του πεδίου πλημμυρικής ροής.

Στη συνέχεια, αντιμετωπίζεται το ζήτημα πολυπλοκότητας της προσομοίωσης των τριβών που αντιστέκονται στην πλημμυρική ροή και παρουσιάζεται πρωτότυπη ρητή σχέση προσδιορισμού του συντελεστή τραχύτητας f κατά Darcy-Weisbach για ροή με ελεύθερη επιφάνεια, η οποία έχει φυσική βάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις περιοχές (από στρωτή μέχρι τυρβώδη ροή, καθώς και στις μεταβατικές περιοχές). Η σχέση αυτή είναι κατάλληλη για ομογενές πεδίο ενώ για ετερογενές πεδίο παρατίθεται μεθοδολογία ταξινόμησης των διάφορων εδαφών σε σχέση με την τραχύτητα του πυθμένα.

Εκτός από την κλίμακα του υδατορέματος ή του ποταμού, το μοντέλο FLOW-R2D έχει εφαρμογή και σε κλίμακα λεκάνης απορροής, όπου λόγω του υπολογιστικού κόστους, προτείνεται παράλληλα με την κλασική υδροδυναμική προσέγγιση, υβριδική υδρολογική/υδροδυναμική μέθοδος, η οποία συνδυάζει τη θεωρία του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος με την υδροδυναμική προσομοίωση.

Σημαντικό ζήτημα είναι και η βαθμονόμηση των εκάστοτε παραμέτρων, οι οποίες πρέπει να καθοριστούν ούτως ώστε η αριθμητική επίλυση να έχει κάποια συνέπεια σε σχέση με την πραγματικότητα. Παρά τις διάφορες μεθόδους βελτιστοποίησης που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία

χρόνια (π.χ. εξελικτικοί αλγόριθμοι), αυτές είναι εφαρμόσιμες σε αριθμητικά μοντέλα τα οποία απαιτούν μικρό υπολογιστικό χρόνο για την επίτευξη της τελικής λύσης, της τάξης των δευτερολέπτων/λεπτών. Στην δισδιάστατη όμως προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες, συνήθως η τάξη μεγέθους του απαραίτητου υπολογιστικού χρόνου είναι ώρες/ημέρες, επομένως στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής εφαρμόστηκε η κλασική μέθοδος των δοκιμών (trial and error method), φυσικά με τα περιορισμένα αποτελέσματα που αυτή εγγυάται.

Τέλος, παρουσιάζεται ανάλυση ευαισθησίας των διάφορων παραμέτρων που υπεισέρχονται στην αριθμητική επίλυση, όπως είναι η ενεργή κλίση της ανάντη οριακής συνθήκης, η τραχύτητα πυθμένα και ο συντελεστής διάχυσης, της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στην τελική επίλυση, καθώς και τη χρονική της εξέλιξη.

5.2 Προσομοίωση πλημμύρας σε αστικό περιβάλλον

Η προσομοίωση ενός πλημμυρικού γεγονότος σε αστικό περιβάλλον είναι μία από τις πιο σημαντικές προκλήσεις, αφενός διότι η πολυπλοκότητα του αστικού ιστού γεννάει μία σειρά από τεχνικές δυσκολίες στην προσομοίωση, αφετέρου διότι η διακινδύνευση (risk) στο αστικό περιβάλλον είναι πολύ υψηλή σε σχέση με την ύπαιθρο, εφόσον ο πληθυσμός αλλά και η οικονομική δραστηριότητα μίας κοινωνίας είναι συγκεντρωμένη στις πόλεις (Tsakiris 2013). Η έλλειψη επίσης δεδομένων που έχουν αντληθεί από πραγματικά πλημμυρικά γεγονότα, αλλά και το σχετικά χαμηλό κόστος, έχουν καταστήσει ως μονόδρομο την αριθμητική προσομοίωση για την κατάρτιση χαρτών πλημμυρικού κινδύνου (flood hazard maps), σε σχέση με άλλες προσεγγίσεις, όπως είναι τα φυσικά μοντέλα ή οι ιστορικές καταγραφές (Abderrezzak et al. 2008, Bellos 2012).

Το βασικότερο πρόβλημα στην προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε αστικό περιβάλλον είναι ο τρόπος αναπαράστασης των κτιρίων ή και άλλων στερεών εμποδίων που επηρεάζουν άμεσα τη διαδρομή του νερού, ενώ δημιουργούν και ασυνέχειες στη ροή. Αν και λόγω φύσης του φαινομένου η τρισδιάστατη προσέγγιση είναι ο πιο ενδεδειγμένος τρόπος προσομοίωσης (Nearby 1999, Weber 2001), η δισδιάστατη προσέγγιση μπορεί να προσομοιώσει επαρκώς το φαινόμενο στην κλίμακα που εξετάζει τα μέγιστα βάρη και ταχύτητες ροής, καθώς και τα πλημμυρικά όρια (Shettar and Murthy 1996), με πολύ χαμηλότερο υπολογιστικό κόστος.

Οι κύριοι τρόποι αναπαράστασης των κτιρίων και με βάση τη σχετική βιβλιογραφία (Syme 2008, Bellos 2012, Bellos and Tsakiris 2015a) είναι οι εξής:

- το κάθε κελί του υπολογιστικού πλέγματος που βρίσκεται εντός των ορίων του εκάστοτε κτιρίου ορίζεται στο αριθμητικό μοντέλο ως στερεό όριο
- στο κάθε κελί του υπολογιστικού πλέγματος που βρίσκεται εντός των ορίων του εκάστοτε κτιρίου αυξάνεται τοπικά το υψόμετρο του εδάφους
- στο κάθε κελί του υπολογιστικού πλέγματος που βρίσκεται εντός των ορίων του εκάστοτε κτιρίου αυξάνονται τοπικά οι τριβές πυθμένα

Σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο, η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας ροής μηδενίζεται πάνω στο στερεό όριο. Η διαδικασία με την οποία επιτυγχάνεται αυτό ποικίλλει αναλόγως του αριθμητικού σχήματος. Στο πλαίσιο του μοντέλου FLOW-R2D, χρησιμοποιείται η "μέθοδος της ανάκλασης", όπως έχει αναλυθεί και σε προηγούμενο Κεφάλαιο. Με αυτόν τον τρόπο δεν εισάγεται καμία καινούρια παράμετρος στο αριθμητικό μοντέλο.

Με τον δεύτερο τρόπο, η "συμμετοχή" του κτιρίου στην προσομοίωση της πλημμυρικής ροής επιτυγχάνεται μέσω των όρων της κλίσης εδάφους S_0^x , S_0^y που υπεισέρχονται στις Εξισώσεις Ορμής των 2D-SWE. Για να γίνει αυτό, είτε μετατρέπεται το DTM (Digital Terrain Model) σε DEM (Digital Elevation Model) (Hunter et al. 2008), είτε εισάγεται νέα παράμετρος στο αριθμητικό μοντέλο που αναπαριστά το ύψος του εκάστοτε κτιρίου.

Με τον τρίτο τρόπο, η "συμμετοχή" του κτιρίου στην προσομοίωση της πλημμυρικής ροής επιτυγχάνεται είτε μέσω της αύξησης του όρου των τριβών πυθμένα (τ_{bx}/ρ , τ_{by}/ρ) που υπεισέρχονται στις Εξισώσεις Ορμής των 2D-SWE η οποία επιτυγχάνεται μέσω της τοπικής αύξησης του συντελεστή τραχύτητας (Mannng, Chézy, Darcy-Weisbach κ.λπ.), είτε προσθέτοντας επιπλέον όρους τριβής, οι οποίοι προσομοιώνουν την οπισθέλκουσα δύναμη που ασκεί το κτίριο στη ροή (Schubert and Sanders, 2012). Με τον τρόπο αυτό επίσης εισάγονται νέες παράμετροι στο αριθμητικό μοντέλο.

Μειονέκτημα των δύο πρώτων τρόπων είναι ότι τα κτίρια θεωρούνται αδιαπέρατα και έτσι δεν προσομοιώνεται το φαινόμενο εισροής της πλημμυρικής ροής εντός των κτιρίων (storage effect). Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα στο πλαίσιο του πρώτου τρόπου, είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι θα οριστούν ως στερεά όρια μόνο τα κελιά που ορίζουν την περίμετρο του εκάστοτε κτιρίου, εκτός από κάποιο ή κάποια κελιά που θα αφήνουν δίοδο στο νερό να εισρεύσει εντός του κτιρίου. Εντούτοις, για να εφαρμοστεί η παραπάνω προσέγγιση θα πρέπει να είναι γνωστή εκ των προτέρων η διεύθυνση της ροής. Σημειώνεται όμως, ότι η πληροφορία αυτή σε πολύπλοκο αστικό περιβάλλον συνήθως δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή (Syme 2008). Στο πλαίσιο του δεύτερου τρόπου, τα κελιά που ορίζουν τα εκάστοτε κτίρια δε θεωρούνται αδιαπέρατα, αλλά μέσω διάφορων προσεγγίσεων του φαινομένου της διήθησης αποκτούν "πορώδη συμπεριφορά" (Liang et al. 2007, Sanders et al. 2008)

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής έγινε σύγκριση των τριών προαναφερθέντων τρόπων στο πλαίσιο της προσομοίωσης της πλημμυρικής ροής σε υποθετική πόλη, στο φυσικό μοντέλο του ιταλικού ποταμού Toce (Testa et al. 2007). Τα κριτήρια με βάση τα οποία έγινε η σύγκριση των τρόπων αναπαράστασης των κτιρίων είναι:

- ο συντελεστής συσχέτισης αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων
- ο υπολογιστικός χρόνος
- αν εισάγονται καινούριες παράμετροι στο αριθμητικό μοντέλο

Τρία πλημμυρικά υδρογραφήματα (χαμηλό, μεσαίο, υψηλό) εφαρμόστηκαν για κάθε μία από τις τέσσερις παραλλαγές της πειραματικής διάταξης (διευθετημένο πλημμυρικό πεδίο ή όχι και ευθυγραμμισμένη διάταξη της υποθετικής πόλης ή όχι). Τα πειραματικά δεδομένα είναι η χρονική εξέλιξη του βάθους ροής σε 10 σημεία-μετρητές (P1-P10). Ο συντελεστής συσχέτισης πειραματικών

και αριθμητικών δεδομένων γίνεται μόνο στους 8 από τους 10 μετρητές, καθώς ο πρώτος (P1) βρίσκεται εκτός πειραματικής διάταξης και χρησιμεύει ως εναλλακτικός τρόπος προσδιορισμού των ανάντη ορίων και ο δεύτερος (P2) βρίσκεται πολύ κοντά στην ανάντη οριακή διατομή και έτσι επηρεάζεται από την παράμετρο της ενεργής κλίσης που χρησιμοποιείται στην ανάντη οριακή συνθήκη στο πλαίσιο του μοντέλου FLOW-R2D. Περισσότερες λεπτομέρειες για την αριθμητική προσομοίωση έχουν παρατεθεί σε προηγούμενο Κεφάλαιο όπου παρουσιάζονται οι πρότυποι έλεγχοι του μοντέλου.

Η διαδικασία βαθμονόμησης έγινε με δοκιμές (trial and error method) στο σενάριο του χαμηλού υδρογραφήματος, του μη διευθετημένου ανάγλυφου και της ευθυγραμμισμένης πόλης και για τους τρεις τρόπους αναπαράστασης των κτιρίων. Για τον πρώτο τρόπο, ο αριθμός Courant προσδιορίστηκε $CFL=0.1$, ο συντελεστής διάχυσης $\omega=0.9$ και το κατώφλι διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα $h_{dry}=10^{-4}$ m. Για το δεύτερο τρόπο, ο αριθμός Courant προσδιορίστηκε $CFL=0.01$, ο συντελεστής διάχυσης $\omega=0.98$, το κατώφλι διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα $h_{dry}=10^{-4}$ m και το ύψος του κάθε κτιρίου 0.2 m. Για τον τρίτο τρόπο, ο αριθμός Courant προσδιορίστηκε $CFL=0.05$, ο συντελεστής διάχυσης $\omega=0.9$, το κατώφλι διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα $h_{dry}=10^{-3}$ m και στο κάθε κελί του υπολογιστικού πεδίου που αναπαριστούσε κάποιο κτίριο ο συντελεστής τραχύτητας Manning αυξήθηκε τοπικά κατά $0.5 \text{ s/m}^{1/3}$.

Για τον προσδιορισμό της καλύτερης συσχέτισης μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων, ο κάθε τρόπος αναπαράστασης κτιρίων κατατάσσεται με βάση το συντελεστή συσχέτισης αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων για 8 μετρητές, 4 παραλλαγές της πειραματικής διάταξης και 3 πλημμυρικά υδρογραφήματα, δηλαδή 96 κατατάξεις. Σε κάθε κατάταξη η πρώτη θέση (δηλαδή ο βέλτιστος συντελεστής συσχέτισης) παίρνει 3 βαθμούς, η δεύτερη 2 και η τελευταία 1 βαθμό. Όσον αφορά στο συντελεστή συσχέτισης που χρησιμοποιήθηκε στην κάθε κατάταξη των τριών τρόπων, κρίθηκε καταλληλότερος ο δείκτης Nash (Nash and Sutcliffe 1970), εφόσον είναι σημαντικά πιο ευαίσθητος από άλλους δείκτες (π.χ. Pearson):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (f_{obs} - f_{num})^2}{\sum_{i=1}^n (f_{obs} - \bar{f}_{obs})^2} \quad (5.1)$$

Στους Πίνακες 5.1 έως 5.4 φαίνεται ο συντελεστής συσχέτισης για όλες τις παραπάνω κατατάξεις. Η συνολική βαθμολογία που συγκέντρωσε ο πρώτος τρόπος (στερεά όρια, RB) είναι 217 βαθμοί, ο δεύτερος τρόπος (τοπική αύξηση του εδάφους, ER) 165 βαθμοί και ο τελευταίος τρόπος (τοπική αύξηση των τριβών πυθμένα, N) 194 βαθμοί.

Με βάση το κριτήριο συσχέτισης, κρίνεται ως καταλληλότερος τρόπος αναπαράστασης των κτιρίων στην πλημμυρική ροή τα στερεά όρια, ενώ ακολουθούν με τη σειρά η τοπική αύξηση των τριβών πυθμένα και η τοπική αύξηση του υψόμετρου εδάφους. Με βάση το κριτήριο του υπολογιστικού κόστους (αριθμός Courant), η σειρά κατάταξης είναι επίσης η ίδια, εφόσον απαιτείται διπλάσιος υπολογιστικός χρόνος με τον τρόπο της τοπικής αύξησης των τριβών πυθμένα σε σχέση με τον τρόπο των στερεών ορίων και αντίστοιχα δεκαπλάσιος με τον τρόπο της τοπικής αύξησης του εδάφους. Επίσης, με βάση τις επιπλέον παραμέτρους που εισάγονται στο αριθμητικό μοντέλο, ο τρόπος των στερεών ορίων κρίνεται επίσης καταλληλότερος, εφόσον δεν εισάγει καμία νέα παράμετρο, άρα και αβεβαιότητα, κάτι που είναι πολύ σημαντικό σε περιπτώσεις προσομοίωσης πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες, όπου υπάρχει μεγάλη έλλειψη δεδομένων.

Στη συνέχεια ελέγχεται το κατά πόσο η προσομοίωση της πλημμυρικής ροής επηρεάζεται η όχι από την ύπαρξη των κτιρίων. Προσομοιώνεται το σενάριο του χαμηλού υδρογραφήματος και του μη διευθετημένου ανάγλυφου χωρίς την πόλη και αντιπαραβάλλεται με το αντίστοιχο σενάριο της ευθυγραμμισμένης πόλης (Σχήμα 5.1). Από τη σύγκριση αυτή φαίνεται ότι η ύπαρξη των κτιρίων είναι σημαντική στην προσομοίωση της πλημμυρικής ροής και ότι το αριθμητικό μοντέλο FLOW-R2D είναι ικανό να περιγράψει αυτή τη διαφοροποίηση.

Όσον αφορά στον τρόπο αναπαράστασης των κτιρίων με την τοπική αύξηση του υψόμετρου του εδάφους αναφέρθηκε προηγουμένως ότι αυτό επιτυγχάνεται με την αύξηση των κλίσεων του πυθμένα, οι οποίες εφόσον είναι παράγωγοι της μεταβολής του υψόμετρου του εδάφους σε σχέση με τις δύο οριζόντιες διευθύνσεις x και y , είναι δυνατόν να διακριτοποιηθούν με τρεις τρόπους:

- εμπρόσθια διαφορά
- οπίσθια διαφορά
- κεντρική διαφορά

Μετά από σχετικό έλεγχο, φαίνεται ότι ο μόνος τρόπος διακριτοποίησης του όρου των κλίσεων πυθμένα στην προκειμένη περίπτωση είναι με τη μέθοδο της κεντρικής διαφοράς.

Επίσης, γίνεται ανάλυση ευαισθησίας στο κατά πόσο επηρεάζεται η αριθμητική επίλυση με βάση τις νέες παραμέτρους που εισάγονται στο αριθμητικό μοντέλο FLOW-R2D με την τοπική αύξηση του εδάφους και των τριβών πυθμένα, στους τρόπους αναπαράστασης των κτιρίων. Στα Σχήματα 5.2 και 5.3 αντιπαραβάλλονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για διάφορες τιμές των δύο παραμέτρων. Όσον αφορά στην τοπική αύξηση του εδάφους, φαίνεται ότι η τιμή 0.20 m είναι καλύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες, ενώ όσον αφορά στην τοπική αύξηση των τριβών πυθμένα, η αντίστοιχη τιμή είναι $0.5 \text{ s/m}^{1/3}$. Ιδιαίτερα δε για την τοπική αύξηση των τριβών πυθμένα φαίνεται ότι πέρα από μία τιμή, η περαιτέρω αύξηση δεν βελτιώνει ανάλογα τα αποτελέσματα, ενώ αντίθετα απαιτεί μείωση του υπολογιστικού χρόνου, καθώς και αύξηση του κατωφλίου διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα (εφόσον το βάθος ροής βρίσκεται στον παρονομαστή του όρου τριβών πυθμένα στο μοντέλο τριβών Manning), το οποίο είναι μειονέκτημα σε πλημμυρικές ροές σε αστικό περιβάλλον, όπου τα βάθη ροής είναι σχετικά χαμηλά (Hunter et al. 2008).

Αναλύοντας τα στοιχεία που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας, φαίνεται ότι οι παράμετροι που εισάγονται με την τοπική αύξηση του υψόμετρου του εδάφους και των τριβών πυθμένα για την αναπαράσταση των κτιρίων εισάγουν αβεβαιότητα στο αριθμητικό μοντέλο, ενώ η επιρροή τους δεν εξελίσσεται γραμμικά. Συνεπώς, αυτές οι παράμετροι δεν μπορούν να προσδιοριστούν με συγκεκριμένο τρόπο, αλλά να βαθμονομηθούν. Επίσης, όσον αφορά στον τρόπο της τοπικής αύξησης του υψόμετρου του εδάφους, από τη στιγμή που το κτίριο αναπαριστάται με την αύξηση των όρων κλίσεων του πυθμένα δεν έχει κάποιο νόημα η πιστή αποτύπωση του ύψους κάθε κτιρίου με βάση την τοπογραφική πληροφορία, εφόσον το νερό θα έχει ίδια συμπεριφορά απέναντι σε ένα κάθετο τοίχωμα, είτε είναι 10 m είτε είναι 100 m (με την προϋπόθεση ότι το βάθος ροής δεν ξεπερνάει το ύψος του τοιχώματος).

Συνοψίζοντας και με βάση την παραπάνω εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου FLOW-R2D, καλύτερος τρόπος αναπαράστασης των κτιρίων είναι ο ορισμός των κελιών που περιγράφουν τα εκάστοτε κτίρια ως στερεού ορίου, εφόσον τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι πιο συναφή με τα πειραματικά δεδομένα, σε μικρότερο υπολογιστικό κόστος και χωρίς να εισάγεται νέα παράμετρος που εισάγει αβεβαιότητα. Μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι δεν προσομοιώνεται το φαινόμενο εισροής υδάτινου όγκου στα σπίτια και επομένως δεν δίνει τιμές βάθους και ταχύτητας ροής σε αυτή την περιοχή, στοιχεία απαραίτητα για τους χάρτες πλημμυρικού κινδύνου (flood hazard maps) (Tsakiris et al. 2009), καθώς και για τις διάφορες σχέσεις που συνδέουν το βάθος και την ταχύτητα ροής με το ύψος των καταστροφών που επιφέρει το ενδεχόμενο πλημμυρικό γεγονός (damage functions) (Ramsbottom et al. 2004, Pistrika et al. 2014). Το μειονέκτημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί εκτιμώντας τις ζητούμενες τιμές των μεταβλητών από τα γειτονικά κελιά με παρεμβολές (Syme 2008). Τέλος, όσον αφορά στα κάθετα τοιχώματα που διευθετούν το εκάστοτε τμήμα ποταμού, ο καλύτερος τρόπος αναπαράστασης είναι επίσης τα στερεά όρια (με την προϋπόθεση ότι αυτά δεν αστοχούν), εφόσον αφενός με το μεν τρόπο της τοπικής αύξησης των τριβών πυθμένα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι μη ρεαλιστικά και αφετέρου με τον τρόπο της τοπικής αύξησης του υψόμετρου του εδάφους δημιουργούνται αστάθειες στα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου.

Η τοπική αύξηση των τριβών πυθμένα αποτελεί επίσης έναν αξιόπιστο τρόπο για την αναπαράσταση των κτιρίων στην πλημμυρική ροή, ενώ είναι μονόδρομος όταν το υπολογιστικό πλέγμα είναι σχετικά αδρομερές, όπου κάθε υπολογιστικό κελί μπορεί να περιλαμβάνει μία συστοιχία κτιρίων ή εμποδίων (sub-grid scale). Ενδιαφέρουσα εφαρμογή του τρόπου αυτού είναι η τεχνητή αραίωση του υπολογιστικού πλέγματος θεωρώντας ισοδύναμες τριβές πυθμένα με ένα πιο πυκνό υπολογιστικό πλέγμα, με στόχο τη μείωση του υπολογιστικού κόστους (Chen et al. 2012a, Chen et al. 2012b). Πλεονέκτημα του τρόπου αυτού επίσης, είναι ότι οι μεταβλητές του βάθους και της ταχύτητας ροής υπολογίζονται σε κάθε θέση, επομένως δε χρειάζεται κάποια ειδική αντιμετώπιση, όπως χρειάζεται ο τρόπος των στερεών ορίων. Μειονέκτημα είναι ότι πιθανώς να χρειάζεται αύξηση των κατωφλίου διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα.

Τέλος, η τοπική αύξηση του υψόμετρου του εδάφους είναι επίσης ένας απλός τρόπος αναπαράστασης των κτιρίων, ενώ με την προσθήκη της δυνατότητας των εμποδίων με "πορώδη συμπεριφορά" είναι δυνατόν να αντιμετωπίσει την έλλειψη υπολογισμού τιμών εντός των κτιρίων.

Πίνακας 5.1 Συντελεστής συσχέτισης NSE αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων στο μη διευθετημένο ανάγλυφο και στην ευθυγραμμισμένη πόλη

Υδρογράφημα	Τρόπος		P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
	Αναπαράστασης	Κτιρίων								
Χαμηλό	ER		0.76	0.81	-1.49	0.94	0.92	0.73	0.87	0.10
Χαμηλό	N		0.78	0.72	-0.54	0.84	0.88	0.81	0.93	0.56
Χαμηλό	RB		0.76	0.79	-1.28	0.81	0.91	0.83	0.96	0.75
Μεσαίο	ER		0.82	0.85	-6.32	0.92	0.69	0.89	0.93	0.59
Μεσαίο	N		0.89	0.89	-4.02	0.77	0.52	0.92	0.89	0.85
Μεσαίο	RB		0.81	0.83	-6.20	0.65	0.55	0.94	0.92	0.87
Υψηλό	ER		0.60	0.73	-16.25	0.54	-0.26	0.87	0.94	0.82
Υψηλό	N		0.89	0.91	-11.44	0.15	-0.59	0.90	0.67	0.85
Υψηλό	RB		0.51	0.66	-16.55	-0.22	-0.60	0.90	0.73	0.68

Πίνακας 5.2 Συντελεστής συσχέτισης NSE αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων στο μη διευθετημένο ανάγλυφο και στη μη ευθυγραμμισμένη πόλη

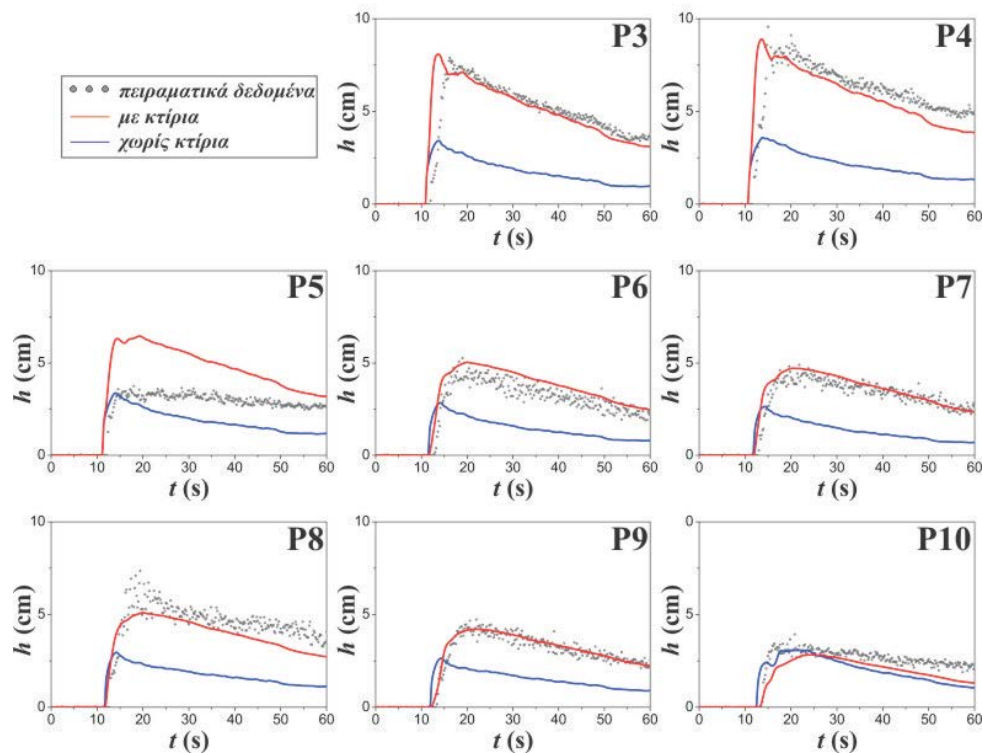
Υδρογράφημα	Τρόπος		P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
	Αναπαράστασης	Κτιρίων								
Χαμηλό	ER		0.76	0.78	0.61	0.65	0.89	0.44	0.06	0.03
Χαμηλό	N		0.65	0.59	0.70	0.38	0.86	0.53	0.83	0.77
Χαμηλό	RB		0.73	0.73	0.80	0.57	0.92	0.58	0.86	0.83
Μεσαίο	ER		0.78	0.79	0.74	0.67	0.87	0.54	0.31	0.08
Μεσαίο	N		0.72	0.70	0.77	0.43	0.81	0.60	0.89	0.78
Μεσαίο	RB		0.76	0.76	0.83	0.61	0.85	0.66	0.92	0.83
Υψηλό	ER		0.82	0.86	0.74	0.71	0.74	0.61	0.45	0.21
Υψηλό	N		0.75	0.69	0.76	0.52	0.69	0.67	0.91	0.76
Υψηλό	RB		0.75	0.81	0.82	0.69	0.76	0.72	0.95	0.81

Πίνακας 5.3 Συντελεστής συσχέτισης NSE αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων στο διευθετημένο ανάγλυφο και στην ευθυγραμμισμένη πόλη

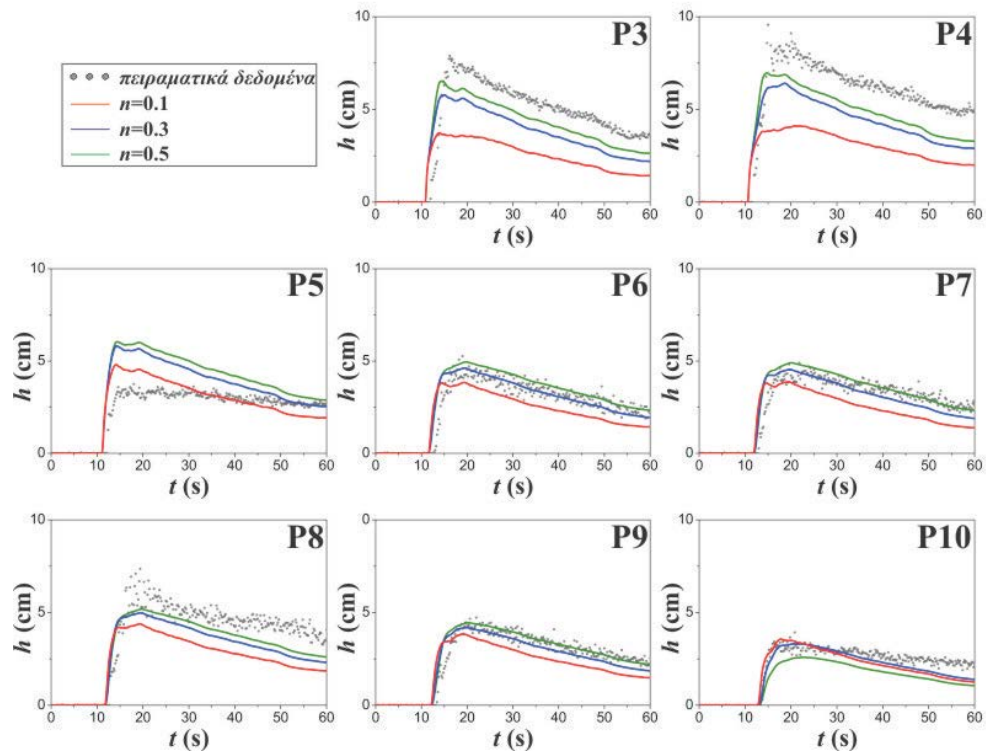
Υδρογράφημα	Τρόπος		P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
	Αναπαράστασης	Κτιρίων								
Χαμηλό	ER		0.65	0.76	-4.02	0.33	0.58	0.70	0.66	0.10
Χαμηλό	N		0.78	0.77	-0.29	0.85	0.87	0.94	0.90	0.79
Χαμηλό	RB		0.84	0.92	-2.12	0.39	0.77	0.84	0.78	0.36
Μεσαίο	ER		0.75	0.78	-4.75	0.49	0.74	0.76	0.71	0.03
Μεσαίο	N		0.77	0.80	-0.93	0.83	0.91	0.91	0.89	0.76
Μεσαίο	RB		0.80	0.88	-3.69	0.30	0.79	0.78	0.76	0.23
Υψηλό	ER		0.88	0.87	-2.81	0.80	0.85	0.89	0.73	0.02
Υψηλό	N		0.71	0.82	-0.48	0.91	0.89	0.88	0.86	0.76
Υψηλό	RB		0.87	0.90	-2.45	0.69	0.86	0.87	0.81	0.11

Πίνακας 5.4 Συντελεστής συσχέτισης NSE αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων στο διευθετημένο ανάγλυφο και στη μη ευθυγραμμισμένη πόλη

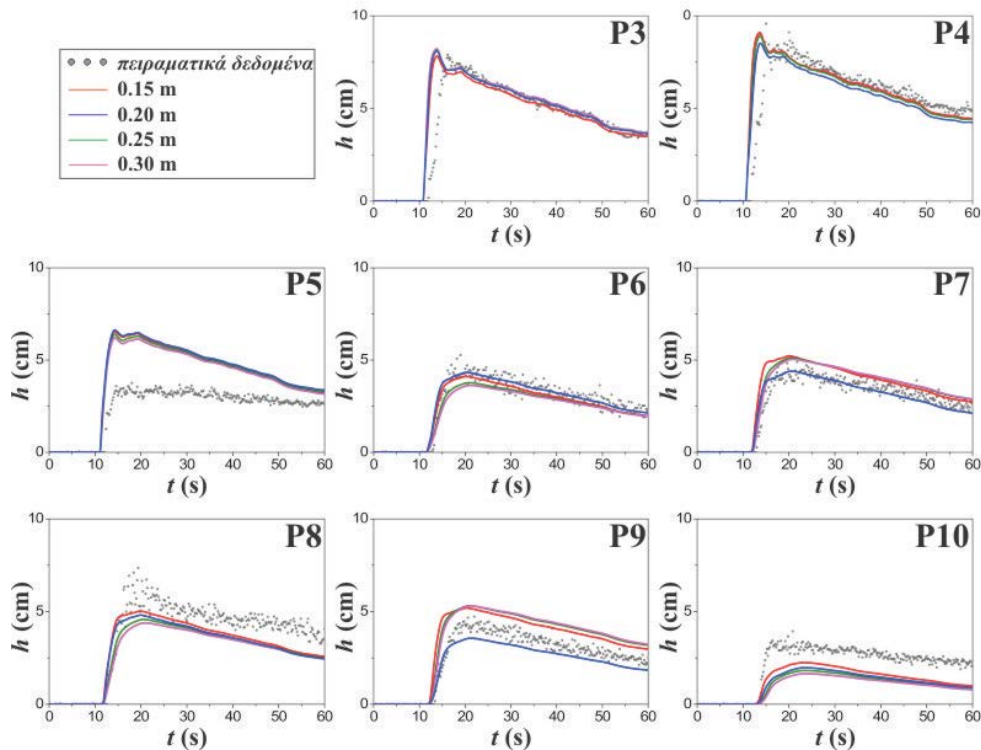
Υδρογράφημα	Τρόπος		P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
	Αναπαράστασης	Κτιρίων								
Χαμηλό	ER		0.79	0.81	0.81	0.69	0.68	0.72	0.40	-0.29
Χαμηλό	N		0.71	0.74	0.72	0.61	0.95	0.81	0.85	0.57
Χαμηλό	RB		0.90	0.94	0.90	0.75	0.89	0.83	0.85	0.36
Μεσαίο	ER		0.84	0.82	0.85	0.82	0.65	0.79	0.40	-0.53
Μεσαίο	N		0.64	0.76	0.70	0.60	0.92	0.81	0.85	0.61
Μεσαίο	RB		0.85	0.91	0.90	0.80	0.78	0.83	0.86	0.18
Υψηλό	ER		0.91	0.93	0.82	0.82	0.85	0.80	0.39	-0.79
Υψηλό	N		0.61	0.74	0.65	0.53	0.94	0.78	0.83	0.73
Υψηλό	RB		0.89	0.95	0.89	0.74	0.88	0.82	0.83	-0.09



Σχήμα 5.1 Έλεγχος επιρροής κτιρίων στην προσομοίωση της πλημμυρικής ροής στο σενάριο του χαμηλού υδρογραφήματος, στο διευθετημένο ανάγλυφο και την ευθυγραμμισμένη πόλη



Σχήμα 5.2 Ανάλυση ευαισθησίας της τοπικής αύξησης των τριβών πυθμένα στο σενάριο του χαμηλού υδρογραφήματος, στο διευθετημένο ανάγλυφο και την ευθυγραμμισμένη πόλη



Σχήμα 5.3 Ανάλυση ευαισθησίας της τοπικής αύξησης του υψόμετρου του εδάφους στο σενάριο του χαμηλού υδρογραφήματος, στο διευθετημένο ανάγλυφο και την ευθυγραμμισμένη πόλη

5.3 Βαθμονόμηση και ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων

Η βαθμονόμηση των διάφορων παραμέτρων ενός υδροδυναμικού μοντέλου δύο διαστάσεων όπως είναι το μοντέλο FLOW-R2D, δεν μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας κάποια κλασική ή εξελικτική μέθοδο βελτιστοποίησης, εφόσον κάθε εκτέλεση του μοντέλου σε πραγματική κατάσταση απαιτεί κάποιες ώρες ή ημέρες χρόνο προσομοίωσης. Επομένως στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής και παράλληλα με την ανάλυση ευαισθησίας κάποιων παραμέτρων του μοντέλου, η μέθοδος βαθμονόμησης που εφαρμόστηκε είναι η μέθοδος των δοκιμών (trial and error method). Επίσης, είναι πιθανόν ακόμα και αυτή η μέθοδος των δοκιμών να μην είναι εφαρμόσιμη σε περιπτώσεις όπου το υπολογιστικό κόστος είναι πολύ μεγάλο και επομένως να απαιτείται κάποιος ιδιαίτερος χειρισμός. Για παράδειγμα, αντί της προσομοίωσης ενός ολόκληρου πλημμυρικού γεγονότος να επιλέγεται η πλημμυρική αιχμή ή άλλες προσεγγίσεις αναλόγως του φαινομένου που εξετάζεται, όπως είναι η προτεινόμενη υβριδική μέθοδος που αναλύεται παρακάτω.

Σε πρώτη φάση, βαθμονομούνται και αναλύονται ως προς την ευαισθησία τους, οι παράμετροι της ενεργής κλίσης των ανάντη οριακών συνθηκών, καθώς και οι αντίστοιχες των τριβών πυθμένα μέσω του συντελεστή τραχύτητας Manning. Για τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το πλημμυρικό γεγονός που συνέβη έπειτα από τη θραύση του φράγματος Tous, το οποίο έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενο Κεφάλαιο (Alcrudo and Mulet 2007, Bellos and Tsakiris 2015c). Η διαδικασία αυτή έγινε θεωρώντας ως ανάντη οριακή συνθήκη τη σταθερή παροχή (ίση με την αιχμή του πλημμυρικού υδρογραφήματος) και όχι ολόκληρο το υδρογράφημα, λόγω υπολογιστικού κόστους. Σημειώνεται ότι η δημιουργία ζωνών τραχύτητας στο εκάστοτε υπολογιστικό πεδίο χρησιμοποιώντας είτε χάρτες χρήσης γης είτε δεδομένα φωτοερμηνείας (Ravgnani 2009) αποδίδει ρεαλιστικότερες προσομοιώσεις, όπως έχει υποστηριχθεί από διάφορους ερευνητές (Mignot 2006, Abderrezzak 2008).

Εκτελέστηκαν 45 διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης του πλημμυρικού γεγονότος με το αριθμητικό μοντέλο FLOW-R2D με το 1998 DTM και 8 αντίστοιχα με το 1982 DTM, τα οποία είναι της μορφής $S_1.S_2.S_3$. Ο πρώτος δείκτης παίρνει τιμές από 1 έως 5 για αντίστοιχες τιμές της ενεργής κλίσης της ανάντη οριακής συνθήκης $S_{eff}=0.0001, 0.001, 0.01, 0.02, 0.05$. Η δεύτερη παράμετρος παίρνει τιμές από 3 έως 5 για αντίστοιχες τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning σε όλο το υπολογιστικό πεδίο εκτός των πορτοκαλεώνων $n=0.03, 0.04, 0.05 \text{ s/m}^{1/3}$. Η τρίτη παράμετρος παίρνει τιμές 8, 10, 12 για αντίστοιχες τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning στην περιοχή των πορτοκαλεώνων $n=0.08, 0.10, 0.12 \text{ s/m}^{1/3}$. Στον Πίνακα 5.5 που ακολουθεί παρατίθεται το *RMSE* για κάθε σενάριο με το 1998 DTM, ενώ στον Πίνακα 5.6 για κάθε σενάριο με το 1982 DTM. Με βάση τις τιμές του *RMSE*, βέλτιστο σενάριο είναι το 3.5.12 και για τα δύο DTM, άρα ο βέλτιστος συνδυασμός των τριών αυτών παραμέτρων είναι $S_{eff}=0.01$, συντελεστής τραχύτητας Manning για το υπολογιστικό πεδίο εκτός των πορτοκαλεώνων $n=0.05 \text{ s/m}^{1/3}$ και αντίστοιχα εντός πορτοκαλεώνων $n=0.12 \text{ s/m}^{1/3}$, έτσι όπως προέκυψε μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης μέσω δοκιμών. Με βάση αυτές τις βαθμονομημένες τιμές έγινε και η προσομοίωση ολόκληρου του πλημμυρικού γεγονότος.

Προχωρώντας στην ανάλυση ευαισθησίας, οι παράμετροι που εξετάστηκαν, εισάγουν σημαντική αβεβαιότητα στην αριθμητική επίλυση. Φαίνεται ότι η ενεργή κλίση της ανάντη οριακής συνθήκης κάτω από ένα κατώφλι επηρεάζει περισσότερο την τελική επίλυση από τις τριβές πυθμένα. Πάνω από

αυτό το κατώφλι, η επίδραση των τριβών πυθμένα και της ενεργής κλίσης της ανάντη οριακής συνθήκης είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Μείωση της επίδρασης της ανάντη οριακής συνθήκης μπορεί να επιτευχθεί αν διευρυνθεί το υπολογιστικό πεδίο, αλλά με ταυτόχρονο μειονέκτημα την αύξηση του υπολογιστικού χρόνου. Επίσης η ενεργή κλίση δεν μπορεί να προσδιοριστεί σε σχέση με την κλίση πυθμένα, εφόσον στη συγκεκριμένη περίπτωση η κλίση του πυθμένα της ανάντη οριακής διατομής κυμαίνεται από -30% έως 60%, ενώ η μικρότερη κλίση σε απόλυτη τιμή είναι 0.02%.

Όσον αφορά στην αβεβαιότητα λόγω τριβών πυθμένα, αν υπολογιστούν οι πέντε μέσοι όροι των $RMSE_{AVG}$ για κάθε ενεργή κλίση (σενάρια 1. S_2 . S_3 έως 5. S_2 . S_3), η απόκλιση από αυτούς τους μέσους όρους κυμαίνεται από 4% στην καλύτερη περίπτωση (σενάριο 3. S_2 . S_3) έως 20% στη χειρότερη περίπτωση (σενάριο 1. S_2 . S_3). Επομένως η επίδραση των τριβών πυθμένα είναι σημαντική και από τη μία γεννιέται αφενός η ανάγκη για περισσότερη πληροφορία πεδίου, αφετέρου η ανάγκη να αναπτυχθούν πιο ορθολογικές εκτιμήσεις των τριβών αυτών, οι οποίες να στηρίζονται περισσότερο σε μεθόδους φυσικής βάσης.

Διερευνώντας την επίδραση της παραμέτρου προσομοίωσης της πλημμυρικής αιχμής r_c , φαίνεται ότι αυτή είναι πολύ μικρή. Αντιθέτως, η κλίση του πυθμένα στην ανάντη οριακή διατομή φαίνεται να επηρεάζει τις καμπύλες στάθμης-παροχής. Στα Σχήματα 5.4, παρουσιάζονται διάφορες καμπύλες στάθμης-παροχής για διάφορες κλίσεις, ενιαίες σε όλο το πλάτος της ανάντη οριακής διατομής. Παρατηρείται ότι η πρωτότυπη πρόταση προσδιορισμού των ανάντη οριακών συνθηκών που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο Κεφάλαιο, είναι ικανή να προσομοιώσει το φαινόμενο του βρόχου που παρατηρείται στο ανιόν και κατιόν σκέλος της καμπύλης στάθμης παροχής, ενώ παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η ανάντη οριακή κλίση τόσο μειώνεται το εύρος αυτής του βρόχου.

Διερευνήθηκε επίσης και η ίδια η επίδραση των καμπύλων στάθμης-παροχής στην αριθμητική επίλυση. Εκτός από την καμπύλη στάθμης-παροχής με βάση την πραγματική κλίση πυθμένα, εκτελέστηκε και σενάριο αριθμητικής προσομοίωσης θεωρώντας ότι η κλίση πυθμένα στην ανάντη οριακή διατομή είναι ενιαία σε κάθε κόμβο αυτής και ίση με 0.01. Στο Σχήμα 5.5 αντιπαραβάλλονται οι δύο καμπύλες στάθμης-παροχής και στο Σχήμα 5.6 τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση. Στην ίδια Εικόνα, απεικονίζεται και το μέγιστο βάθος ροής έτσι όπως προέκυψε με το σενάριο της σταθερής παροχής για ενεργή κλίση $S_{eff}=0.01$, καθώς και τα καταγεγραμμένα ιστορικά δεδομένα. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι υπάρχει επίδραση των καμπύλων στάθμης-παροχής. Επίσης φαίνεται ότι το μέγιστο βάθος ροής που προκύπτει από την αριθμητική προσομοίωση με ανάντη οριακή συνθήκη ολόκληρο το υδρογράφημα και με καμπύλη στάθμης-παροχής που προέκυψε θεωρώντας ότι η κλίση στην ανάντη οριακή διατομή είναι ενιαία και ίση με 0.01, είναι πιο κοντά με το μέγιστο βάθος ροής που προκύπτει με ανάντη οριακή συνθήκη τη σταθερή παροχή ίση με την αιχμή του υδρογραφήματος και θεωρώντας ότι η ενεργή κλίση είναι $S_{eff}=0.01$, σε σχέση με το αντίστοιχο σενάριο όπου η καμπύλη στάθμης-παροχής προέκυψε από την πραγματική κλίση πυθμένα.

Τέλος, οι διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των $RMSE$ για τα ίδια σενάρια στα διαφορετικά DTM, δείχνουν ότι η τοπογραφία και η επιλογή του κατάλληλου DTM για την προσομοίωση της πλημμυρικής ροής είναι σημαντική στην τελική επίλυση, παρόλο που και στις δύο περιπτώσεις

βέλτιστο σενάριο είναι το 3.5.12. Σημειώνεται ότι το 1982 DTM δίνει συστηματικά μικρότερα βάθη ροής σε σχέση με το 1998 DTM, γεγονός που οφείλεται πιθανώς στο ότι το 1982 DTM αποτυπώθηκε λίγες ημέρες μετά την αστοχία του φράγματος, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο Κεφάλαιο, επομένως υπήρχαν έντονα φαινόμενα απόθεσης φερτών υλών εντός της κοίτης του ποταμού. Αν εξαιρεθεί η μέτρηση της πρώτης θέσης που βρίσκεται εντός του ποταμού ούτως ώστε να μειωθεί η επιρροή των αποθέσεων, ο δείκτης $RMSE_{AVG}$ για το 1998 DTM υπολογίζεται 1.54, ενώ για το 1982 DTM 1.60, ενώ η μη εξαίρεση της μέτρησής αυτής η οποία δίνει για τις αντίστοιχες τιμές 1.50 και 1.78, δείχνει ότι η διαφορά μεταξύ των δύο DTM μειώθηκε.

Στη συνέχεια, διερευνάται επίσης η επίδραση των τριβών πυθμένα, ενώ παράλληλα προτείνεται διαδικασία βαθμονόμησης μέσω δοκιμών, όταν η κλίμακα μελέτης δεν είναι υδατόρεμα ή τμήμα ποταμού, αλλά ολόκληρη λεκάνη απορροής. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το πλημμυρικό γεγονός που συνέβη στις 22/2/2013 στο Χαλάνδρι Αττικής έπειτα από τη θραύση του φράγματος, το οποίο έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενο Κεφάλαιο (Bellos and Tsakiris 2015b). Λόγω υπολογιστικού κόστους, η βαθμονόμηση, καθώς και η ανάλυση ευαισθησίας δεν είναι δυνατή σε ολόκληρο το επεισόδιο βροχής, επομένως για να αντιμετωπιστεί αυτή η δυσκολία προτείνεται η παρακάτω υβριδική υδρολογική/υδροδυναμική μέθοδος.

Συγκεκριμένα, με την υβριδική αυτή μέθοδο υπολογίζεται το Μοναδιαίο Υδρογράφημα (Unit Hydrograph) συγκεκριμένης χρονικής διάρκειας της λεκάνης απορροής και έπειτα με βάση το συγκεκριμένο επεισόδιο βροχής γίνεται σύνθεση των επιμέρους υδρογραφήματων αφού έχει αφαιρεθεί και το ύψος διήθησης. Όσον αφορά στην τριβή πυθμένα, υπενθυμίζεται ότι η υπό μελέτη λεκάνη απορροής έχει χωριστεί σε τρεις ζώνες τραχύτητας. Εκτελούνται 8 διαφορετικά σενάρια που αφορούν στις διαφορετικές τιμές του συντελεστή τραχύτητας Manning σε κάθε ζώνη, τα οποία είναι της μορφής S_1, S_2, S_3 , ενώ αποτέλεσμα της κάθε προσομοίωσης είναι το Μοναδιαίο Υδρογράφημα. Ως χρονική διάρκεια του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος επιλέχθηκε $t=15$ min.

Οι τιμές που παίρνουν οι παράμετροι S_1, S_2 και S_3 αφορούν τις τιμές του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning για τις ζώνες τραχύτητας A, B και C αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, η παράμετρος S_1 παίρνει τιμές 1 και 2 για συντελεστή τραχύτητας $n=0.060$ και 0.070 s/m^{1/3} αντίστοιχα, η παράμετρος S_2 παίρνει τιμές 1 και 2 για συντελεστή τραχύτητας $n=0.025$ και 0.035 s/m^{1/3} αντίστοιχα και η παράμετρος S_3 παίρνει τιμές 1 και 2 για συντελεστή τραχύτητας $n=0.035$ και 0.050 s/m^{1/3} αντίστοιχα. Το χρονικό βήμα ορίστηκε σταθερό και ίσο με $\Delta t=0.005$ s, ενώ ο συντελεστής διάχυσης $\omega=0.99$. Το κατώφλι διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα ορίστηκε $h_{dry}=10^{-4}$ m, ενώ ως αρχική συνθήκη θεωρήθηκε ότι σε όλη τη λεκάνη υπάρχει νερό βάθους 10^{-3} m, για υπολογιστικούς λόγους. Για λόγους συνέπειας και διατήρησης του ισοζυγίου της μάζας του υδάτινου όγκου, εφόσον ως αρχική συνθήκη θεωρήθηκε βάθος νερού $h=0.001$ m σε όλη τη λεκάνη απορροής, θεωρήθηκε ότι υπάρχει σταθερός όρος διήθησης ο οποίος αφαιρεί την αρχική ποσότητα νερού κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης και είναι ίσος με $i_0=6.67 \times 10^{-5}$ m/min. Τα όρια της λεκάνης ορίστηκαν ως στερεά με στόχο τη διατήρηση του ισοζυγίου μάζας του νερού, ενώ η έξοδος της λεκάνης ορίστηκε ως ανοιχτό όριο.

Στο Σχήμα 5.7 παρατίθενται τα διάφορα Μοναδιαία Υδρογραφήματα των 15 min για τα διάφορα σενάρια του συντελεστή τραχύτητας. Σημειώνεται ότι ελέγχεται ο πλημμυρικός όγκος νερού που

αντιστοιχεί σε κάθε Μοναδιαίο Υδρογράφημα σε σχέση με τον όγκο νερού που αντιστοιχεί στην ενεργή βροχόπτωση, όπου στη χειρότερη περίπτωση αντιστοιχεί στο 90%. Η αναντιστοιχία αυτή εν μέρει οφείλεται στο ότι δεν υπολογίζεται το Μοναδιαίο Υδρογράφημα σε όλη τη χρονική εξέλιξή του, καθώς αυτή δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την τελική σύνθεση.

Στη συνέχεια συντίθεται το τελικό πλημμυρικό υδρογράφημα με βάση το εκάστοτε Μοναδιαίο Υδρογράφημα με δύο τρόπους: α) χωρίς να συνυπολογίζεται το φαινόμενο της διήθησης και β) αφού έχει αφαιρεθεί το ύψος της διήθησης, το οποίο εκτιμήθηκε με τη μέθοδο Kostiaκov. Από τη στιγμή που αναμένονται σημαντικά φαινόμενα διήθησης εφόσον η γεωλογική σύσταση της λεκάνης είναι από μάρμαρο, θεωρήθηκε ότι αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως "αργιλώδης πηλός" και επομένως οι παράμετροι της διήθησης προσδιορίστηκαν $a=0.00328 \text{ m/min}^{0.584}$ και $b=0.584$ (Αντωνόπουλος 1999). Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται το συνθετικό υδρογράφημα για τα διάφορα σενάρια σε σύγκριση με το μετρημένο πλημμυρικό υδρογράφημα, χωρίς να συνυπολογιστεί το φαινόμενο της διήθησης, ενώ στο Σχήμα 5.9 φαίνεται το συνθετικό υδρογράφημα για τα διάφορα σενάρια σε σύγκριση με το μετρημένο πλημμυρικό υδρογράφημα, συνυπολογίζοντας το φαινόμενο της διήθησης. Στον Πίνακα 5.7 παρατίθεται η συσχέτιση μέσω του συντελεστή συσχέτισης Pearson μεταξύ αριθμητικών δεδομένων και μετρήσεων για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις.

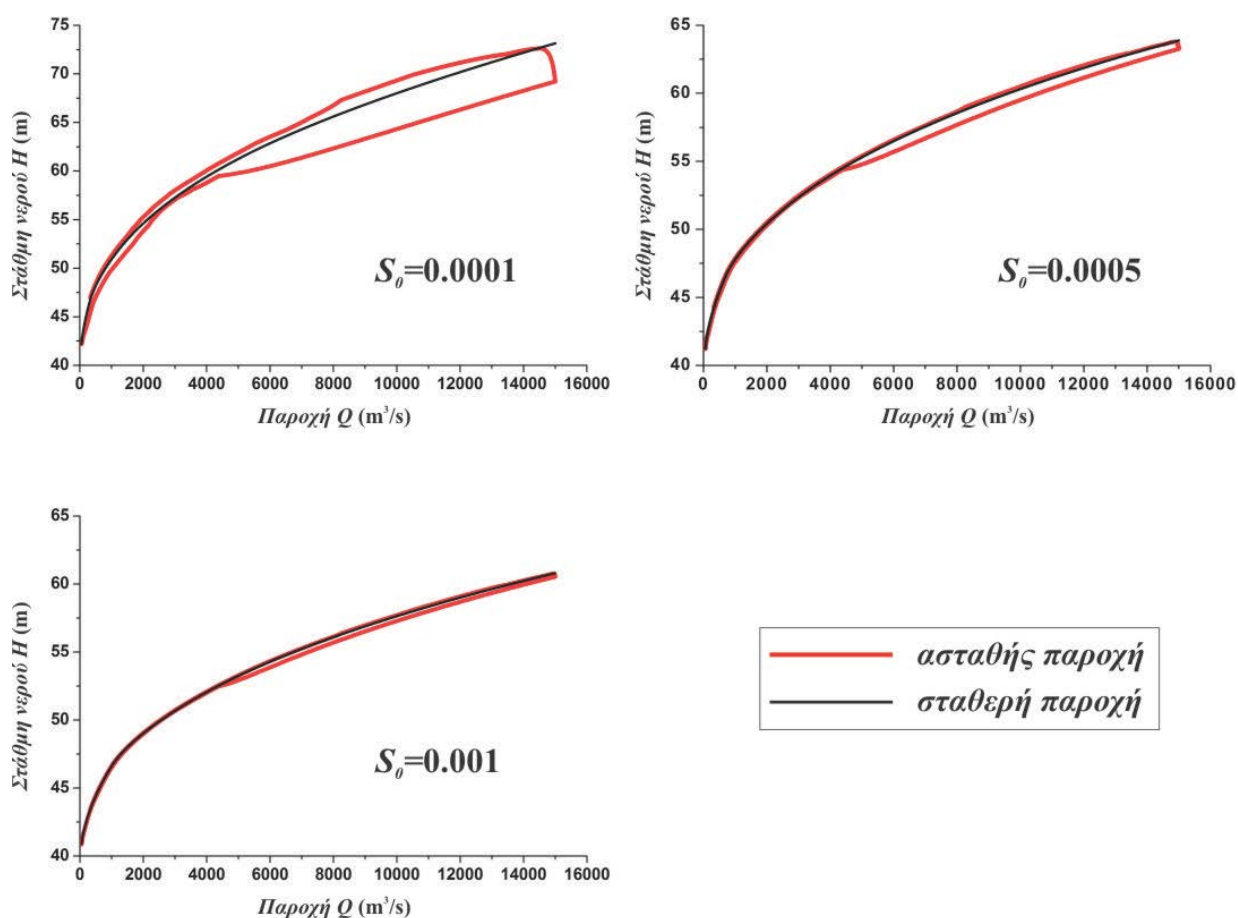
Με βάση τις τιμές του PCC , βέλτιστο σενάριο είναι το 1.1.1 συνυπολογίζοντας το φαινόμενο της διήθησης, άρα ο βέλτιστος συνδυασμός των συντελεστών τραχύτητας είναι $n=0.060$, 0.025 και $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$ για τις ζώνες τραχύτητας Α, Β και C αντίστοιχα, έτσι όπως προέκυψε μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης μέσω δοκιμών. Με βάση αυτές τις βαθμονομημένες τιμές έγινε και η προσομοίωση ολόκληρου του επεισοδίου βροχής. Βέβαια, όπως αναμενόταν, αν συγκριθεί ο συντελεστής συσχέτισης που προκύπτει από την προσομοίωση ολόκληρου του επεισοδίου βροχής με την πλήρη υδροδυναμική μέθοδο όπως έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενο Κεφάλαιο, αυτός είναι μεγαλύτερος, αλλά με τίμημα το μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος (περίπου τριπλάσιο).

Όσον αφορά στην ανάλυση ευαισθησίας του συντελεστή τραχύτητας και με βάση τις τιμές του συντελεστή συσχέτισης, φαίνεται ότι η παράμετρος των τριβών πυθμένα εισάγει σημαντική αβεβαιότητα στην τελική επίλυση, το οποίο και επικυρώνει το προηγούμενο συμπέρασμα που προέκυψε από ανάλογη διαδικασία προσομοιώνοντας το πλημμυρικό γεγονός που προέκυψε έπειτα από τη θραύση του φράγματος Tous. Η αιχμή του συνθετικού υδρογραφήματος του δυσμενέστερου σεναρίου 2.2.2 είναι περίπου το 70% από το καλύτερο σενάριο 1.1.1, ενώ εμφανίζει και υστέρηση 15 min σε σχέση με αυτό. Η ζώνη τραχύτητας που κυρίως επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα είναι η ζώνη C και ακολουθεί η ζώνη B. Η ζώνη A δε φαίνεται να επηρεάζει ιδιαίτερα τα τελικά αποτελέσματα, κάτι που είναι λογικό εφόσον η ζώνη A καλύπτει μικρό ποσοστό της υπό μελέτη λεκάνης απορροής.

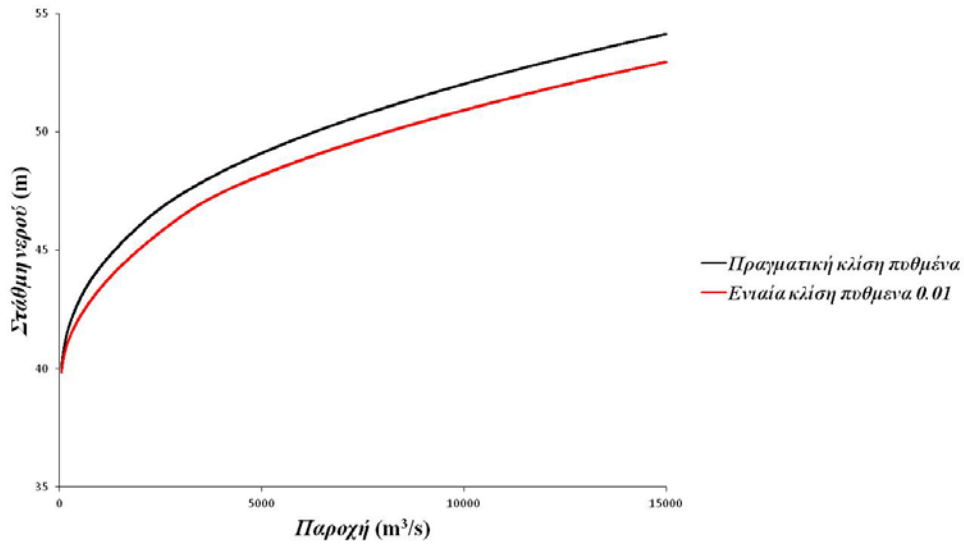
Αναλύοντας το φαινόμενο της διήθησης και με βάση του συντελεστές συσχέτισης, φαίνεται ότι αν αυτό συνυπολογίζεται βελτιώνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Για το δεύτερο μέρος του επεισοδίου της βροχής, έτσι όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενο Κεφάλαιο και για το βέλτιστο σενάριο 1.1.1, η αιχμή του συνθετικού υδρογραφήματος χωρίς τη διήθηση είναι περίπου 82% της αιχμής του μετρημένου πλημμυρικού υδρογραφήματος. Το αντίστοιχο ποσοστό για το πρώτο μέρος

του επεισοδίου είναι περίπου 212%. Από την άλλη πλευρά, τα αντίστοιχα ποσοστά για την περίπτωση του συνθετικού υδρογραφήματος όπου συνυπολογίζεται η διήθηση είναι 96% και 60%, επίσης για το σενάριο 1.1.1. Όσον αφορά στο χρόνο εμφάνισης της πλημμυρικής αιχμής, παρατηρείται υστέρηση περίπου ώρας στο δεύτερο μέρος του επεισοδίου βροχόπτωσης. Συνεπώς διαπιστώνεται ότι ο τρόπος εκτίμησης της διήθησης παίζει σημαντικό ρόλο και πιθανή εναλλακτική μεθοδολογία προσδιορισμού του ύψους διήθησης θα βελτιώνει τα αποτελέσματα.

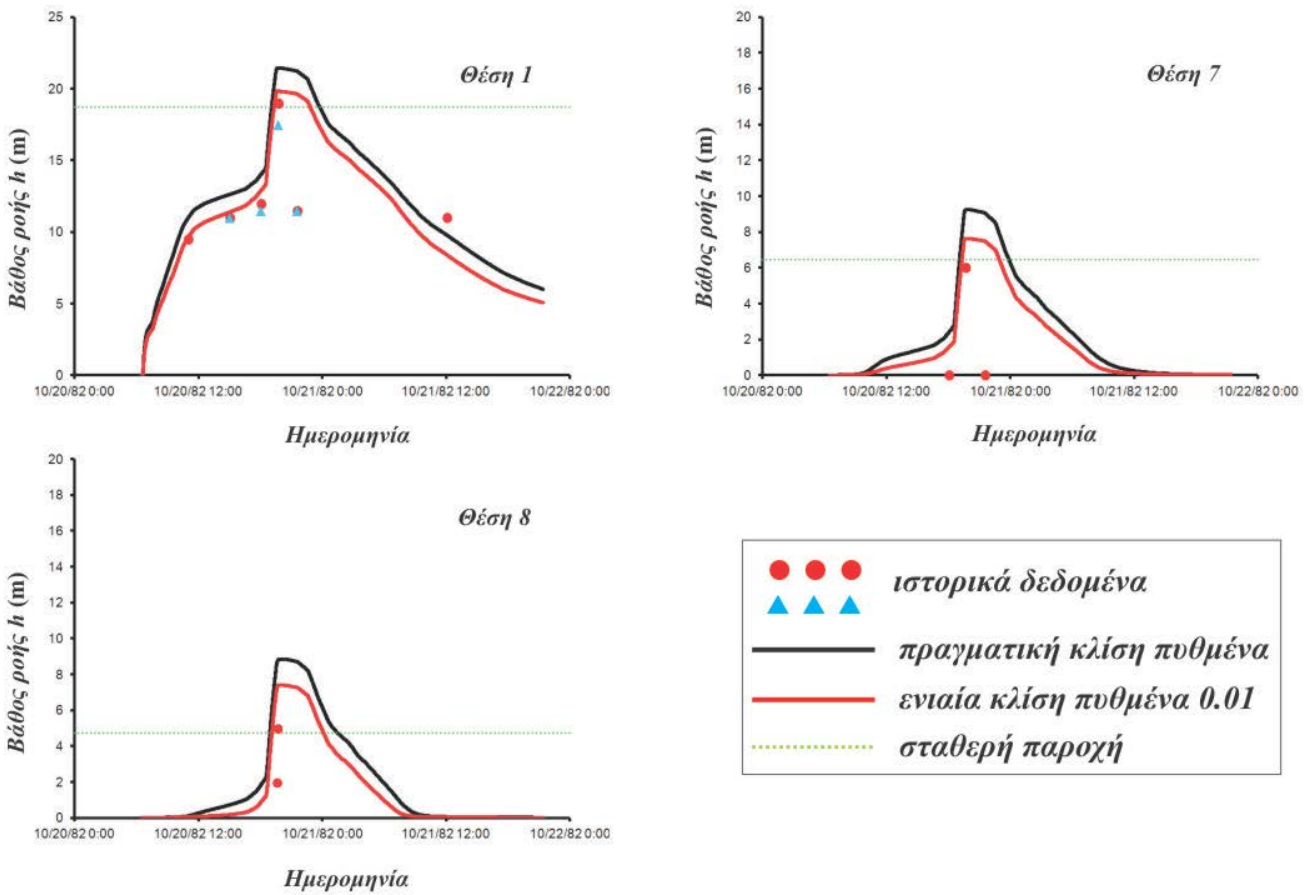
Συνοψίζοντας, φαίνεται ότι η υβριδική μέθοδος αν και δίνει χειρότερα αποτελέσματα σε σχέση με την πλήρη υδροδυναμική μέθοδο είναι ικανή να προσομοιώσει ένα πλημμυρικό γεγονός με σχετική ακρίβεια και με πολύ μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Επιπλέον, είναι χρήσιμη διότι από τη στιγμή που αποτελεί ένα χαρακτηριστικό μέγεθος της εκάστοτε λεκάνης απορροής, είναι δυνατόν να εφαρμοστεί και σε επεισόδια βροχόπτωσης που διαρκούν πολύ περισσότερο και η προσομοίωση με την πλήρη υδροδυναμική μέθοδο θα ήταν πρακτικά αδύνατη. Τέλος, η υβριδική μέθοδος αποτελεί τον μόνο πιθανό τρόπο με τον οποίο μπορεί να βαθμονομηθούν οι διάφορες παράμετροι.



Σχήμα 5.4 Επιρροή της ανάντη οριακής κλίσης πυθμένα στις καμπύλες στάθμης-παροχής



Σχήμα 5.5 Καμπύλες στάθμης-παροχής για την πραγματική κλίση πυθμένα και για ενιαία κλίση ίση με 0.01 στην ανάντη οριακή διατομή



Σχήμα 5.6 Αριθμητική προσομοίωση για καμπύλες στάθμης-παροχής για την πραγματική κλίση πυθμένα και για ενιαία κλίση ίση με 0.01 στην ανάντη οριακή διατομή

Πίνακας 5.5 Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος για τα διάφορα σενάρια $S_1.S_2.S_3$ για το 1998 DTM

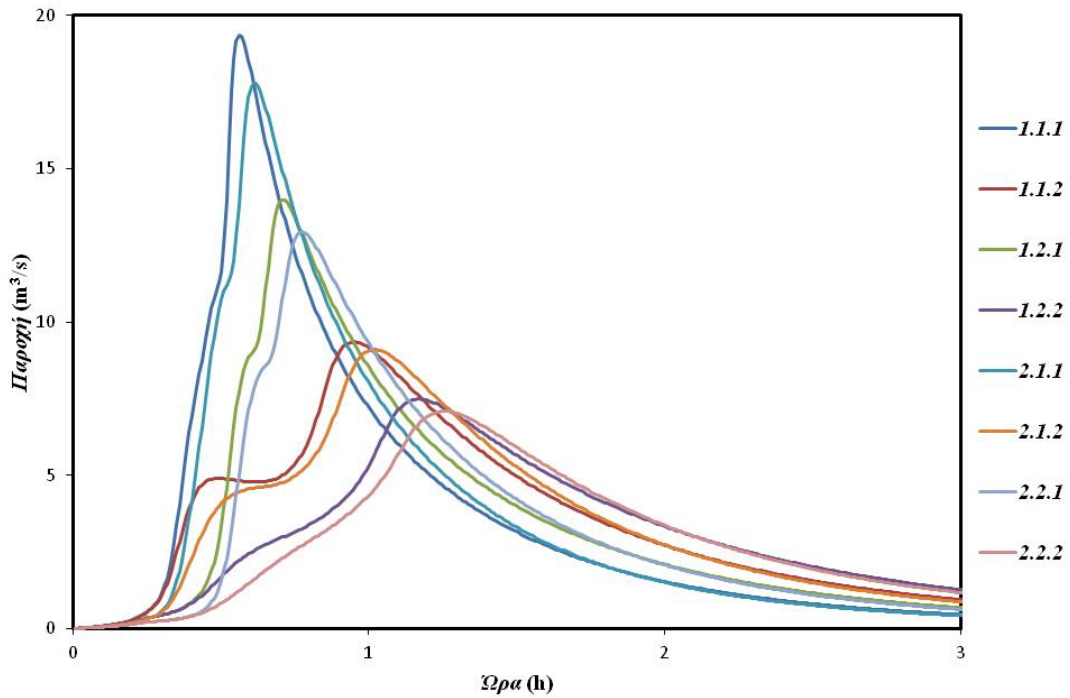
Σενάριο	$RMSE_{MIN}$	$RMSE_{AVG}$	$RMSE_{MAX}$
1.3.8	6.94	6.76	6.59
1.3.10	7.63	7.44	7.26
1.3.12	8.13	7.94	7.77
1.4.8	7.94	7.75	7.58
1.4.10	8.81	8.62	8.44
1.4.12	9.48	9.29	9.11
1.5.8	8.68	8.49	8.31
1.5.10	9.71	9.52	9.34
1.5.12	10.52	10.33	10.15
2.3.8	2.02	1.93	1.89
2.3.10	2.21	2.10	2.04
2.3.12	2.38	2.26	2.18
2.4.8	2.27	2.16	2.09
2.4.10	2.57	2.44	2.34
2.4.12	2.82	2.68	2.57
2.5.8	2.50	2.37	2.28
2.5.10	2.88	2.73	2.62
2.5.12	3.20	3.05	2.92
3.3.8	1.59	1.63	1.74
3.3.10	1.57	1.59	1.68
3.3.12	1.58	1.58	1.64
3.4.8	1.54	1.61	1.74
3.4.10	1.51	1.56	1.67
3.4.12	1.50	1.53	1.63
3.5.8	1.51	1.60	1.75
3.5.10	1.47	1.54	1.67
3.5.12	1.45	1.50	1.62
4.3.8	1.68	1.69	1.77
4.3.10	1.67	1.65	1.70
4.3.12	1.67	1.64	1.67
4.4.8	1.55	1.61	1.73
4.4.10	1.52	1.56	1.66
4.4.12	1.51	1.53	1.62
4.5.8	1.52	1.62	1.76
4.5.10	1.48	1.55	1.68
4.5.12	1.45	1.51	1.62
5.3.8	1.85	1.86	1.91
5.3.10	1.92	1.88	1.89
5.3.12	1.97	1.90	1.88
5.4.8	1.66	1.68	1.75
5.4.10	1.65	1.64	1.68
5.4.12	1.67	1.63	1.66
5.5.8	1.53	1.59	1.71
5.5.10	1.51	1.54	1.64
5.5.12	1.50	1.52	1.59

Πίνακας 5.6 Ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος για τα διάφορα σενάρια S_1, S_2, S_3 για το 1982 DTM

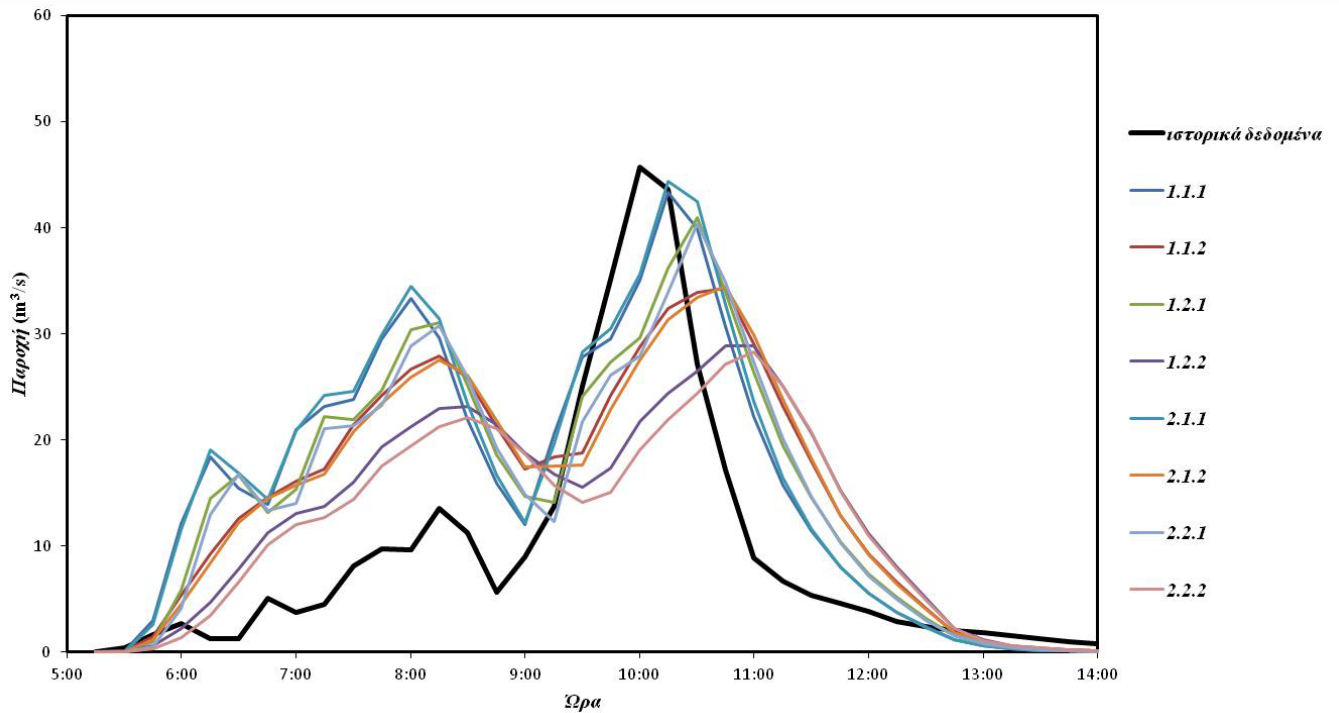
Σενάριο	$RMSE_{MIN}$	$RMSE_{AVG}$	$RMSE_{MAX}$
3.4.10	1.68	1.84	2.03
3.4.12	1.64	1.78	1.97
3.5.10	1.68	1.84	2.04
3.5.12	1.63	1.78	1.98
4.4.10	1.70	1.86	2.05
4.4.12	1.65	1.79	1.98
4.5.10	1.71	1.88	2.09
4.5.12	1.65	1.82	2.02

Πίνακας 5.7 Συντελεστή συσχέτισης μετρημένου και συνθετικού υδρογραφήματος για τα διάφορα σενάρια συντελεστή τραχύτητας και συνυπολογίζοντας ή όχι το φαινόμενο της διήθησης

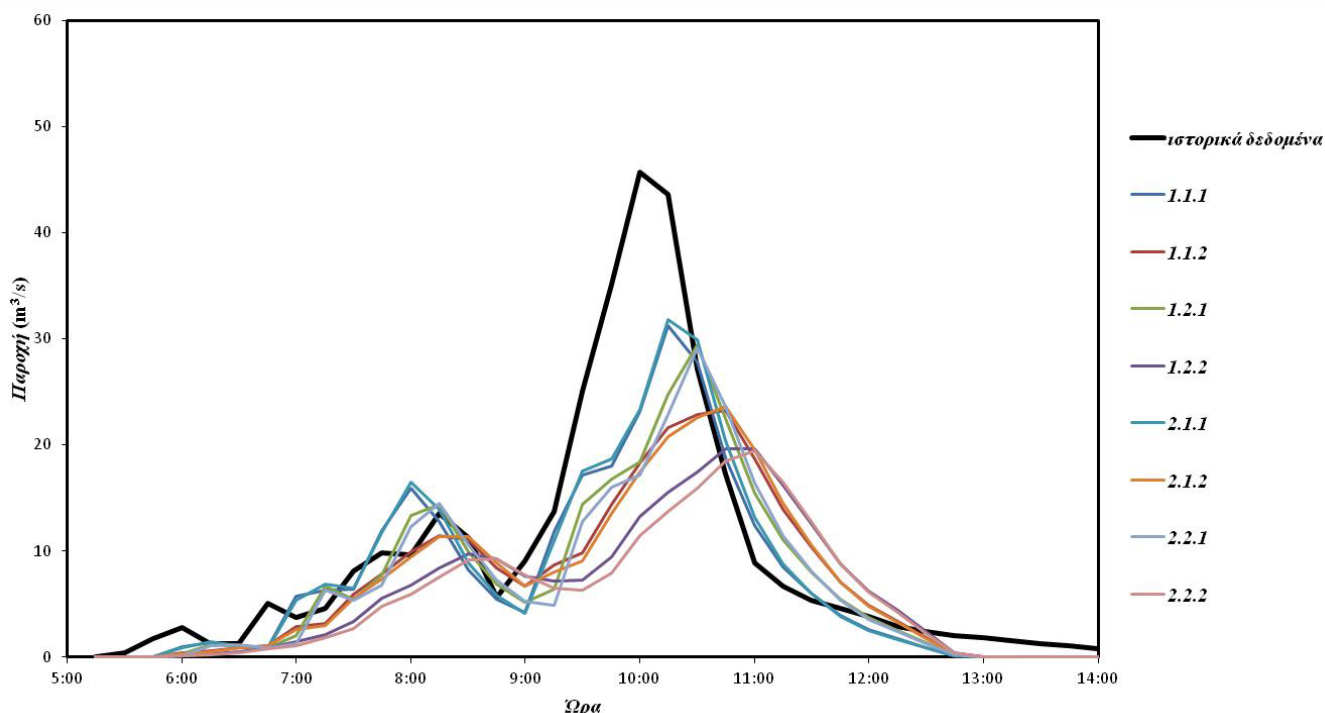
Σενάριο	Διήθηση	PCC
1.1.1	OXI	0.79
1.1.2	OXI	0.71
1.2.1	OXI	0.74
1.2.2	OXI	0.61
2.1.1	OXI	0.78
2.1.2	OXI	0.69
2.2.1	OXI	0.72
2.2.2	OXI	0.57
1.1.1	NAI	0.91
1.1.2	NAI	0.79
1.2.1	NAI	0.84
1.2.2	NAI	0.64
2.1.1	NAI	0.90
2.1.2	NAI	0.76
2.2.1	NAI	0.80
2.2.2	NAI	0.58



Σχήμα 5.7 Μοναδιαία υδρογραφήματα για διάφορα σενάρια συντελεστή τραχύτητας Manning



Σχήμα 5.8 Συνθετικά υδρογραφήματα για τα διάφορα σενάρια συντελεστή τραχύτητας χωρίς το φαινόμενο της διήθησης



Σχήμα 5.9 Συνθετικά υδρογραφήματα για τα διάφορα σενάρια συντελεστή τραχύτητας συνυπολογίζοντας το φαινόμενο της διήθησης

5.4 Επίδραση μεγέθους κελιού στην αριθμητική επίλυση

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η ανάλυση ευαισθησίας του μεγέθους του κελιού του υπολογιστικού πλέγματος με βάση το αριθμητικό μοντέλο FLOW-R2D. Για αυτή την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από τη μελέτη διάδοσης του πλημμυρικού κύματος σε οριζόντιο πυθμένα και με απομονωμένο εμπόδιο εντός του πεδίου ροής, το οποίο προκύπτει έπειτα από τμηματική θραύση φράγματος. Το εν λόγω πείραμα έχει παρουσιαστεί εκτενώς σε προηγούμενο Κεφάλαιο (Soares-Frazao and Zech 2007, Μπέλλος 2015). Ένας από τους λόγους για τους οποίους χρησιμοποιήθηκε το εν λόγω πείραμα στη διερεύνηση της επίδρασης του μεγέθους του κελιού, είναι ότι η σχετική απλότητα της γεωμετρίας του δεν δημιουργεί περαιτέρω αβεβαιότητα στην αριθμητική επίλυση, όταν διερευνάται η επίδραση της αραίωσης ή πύκνωσης του υπολογιστικού πλέγματος.

Η ανάλυση ευαισθησίας έγινε θεωρώντας ως μεταβλητή το μέγεθος του υπολογιστικού κελιού και συγκεκριμένα διακριτοποιώντας το υπολογιστικό πεδίο με τετράγωνα κελιά μεγέθους $L=5$ cm, $L=10$ cm και $L=25$ cm. Παράλληλα με το μέγεθος του κελιού, διερευνήθηκε και η επίδραση του συντελεστή διάχυσης, αφενός μεταβάλλοντας το μέγεθος του κελιού κρατώντας σταθερό το συντελεστή διάχυσης και αφετέρου κρατώντας σταθερό το μέγεθος του κελιού και μεταβάλλοντας το συντελεστή διάχυσης.

Για όλα τα σενάρια μεγέθους κελιού, ο αριθμός Courant προσδιορίστηκε $CFL=0.01$, το κατώφλι διάκρισης υγρών και ξηρών κελιών $h_{dry}=10^{-4}$ m και ο συντελεστής διάχυσης πήρε τρεις τιμές: $\omega=0.99$,

$\omega=0.90$ και $\omega=0.95$. Ως αρχική συνθήκη θεωρήθηκε ακίνητος όγκος νερού βάθους 0.40 m στην περιοχή που είναι ο ταμιευτήρας, ενώ δε χρειάζεται κάποιος ειδικός προσδιορισμός ανάντη, κατάντη και παραπλεύρων ορίων, εφόσον αυτά είναι στερεά. Για την προσομοίωση των τριβών πυθμένα χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Manning. Σε όλο το υπολογιστικό πεδίο ο συντελεστής τραχύτητας Manning πήρε την τιμή $n=0.010 \text{ s/m}^{1/3}$ σύμφωνα με τις σχετικές υποδείξεις (Soares-Frazao and Zech 2007).

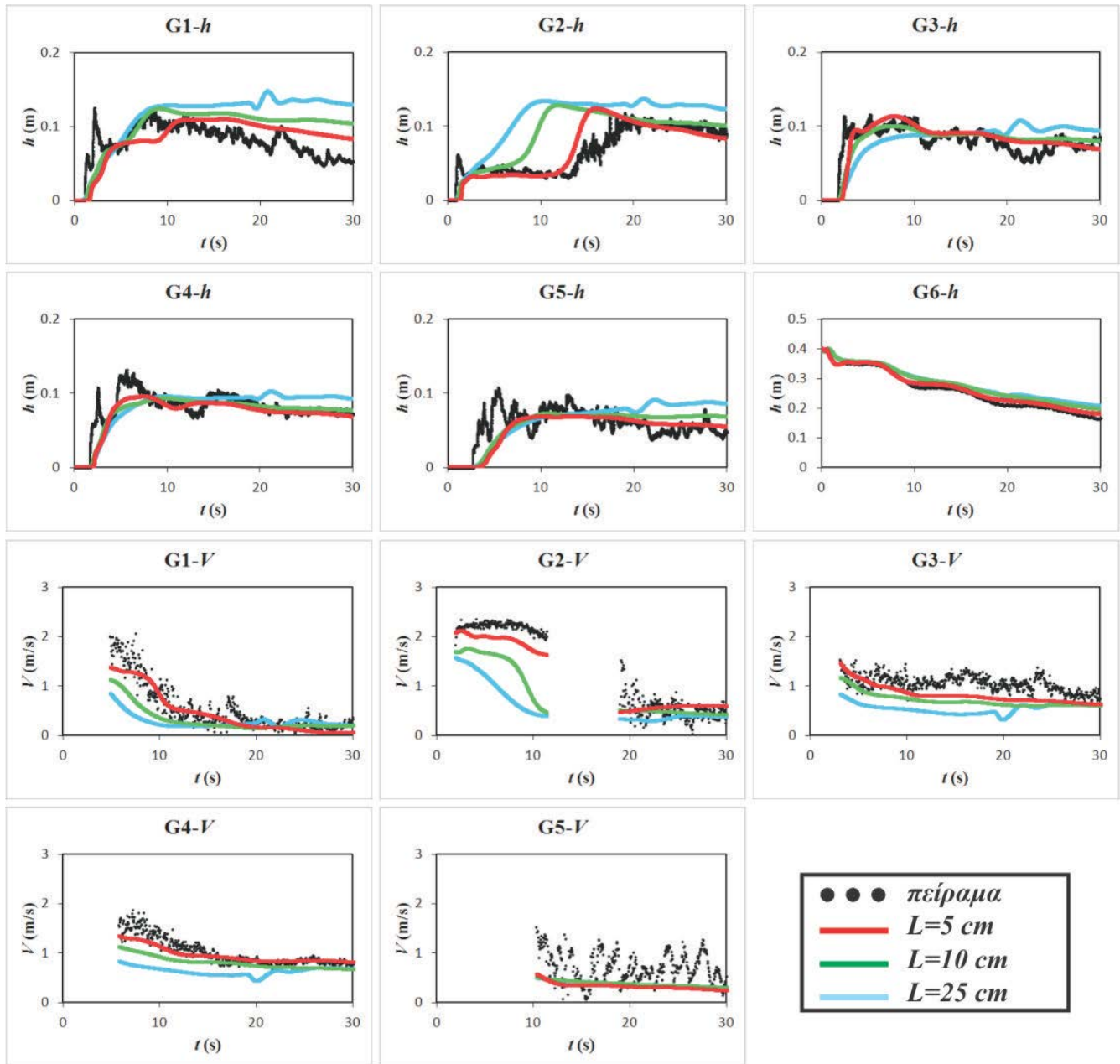
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης. Στα Σχήματα 5.10 έως 5.15 παρουσιάζεται σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης για το βάθος (h) και για την ταχύτητα ροής (V) σε σχέση με το χρόνο, για όλα τα μεγέθη του κανάβου και για όλες τις τιμές του συντελεστή διάχυσης. Επίσης στον Πίνακα 5.8 παρατίθεται ο συντελεστής συσχέτισης κατά Pearson (PCC) των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις.

Από την αντιπαραβολή αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων φαίνεται ότι το μέγεθος κελιού επηρεάζει σημαντικά την τελική επίλυση και εισάγει αβεβαιότητα σε αυτήν. Επίσης επιβεβαιώθηκε η αρχική εκτίμηση ότι το πυκνότερο υπολογιστικό πλέγμα αποδίδει ακριβέστερη επίλυση, όπως και αναμενόταν. Όσον αφορά στο συντελεστή διάχυσης, φαίνεται ότι όσο αυτός αυξάνεται, η συσχέτιση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων βελτιώνεται. Επίσης φαίνεται ότι όσο μειώνεται η τιμή του συντελεστή διάχυσης τόσο λιγότερο επηρεάζεται η τελική αριθμητική επίλυση από το μέγεθος του κελιού του υπολογιστικού πλέγματος. Τα παραπάνω μπορούν να διαπιστωθούν και από τις παρακάτω εικόνες. Στο Σχήμα 5.16 παρατίθεται ο μέσος όρος καθώς και το εύρος των τιμών του συντελεστή συσχέτισης για τα διάφορα μεγέθη κελιού και για όλες τις τιμές του συντελεστή διάχυσης, ενώ στο Σχήμα 5.17 παρατίθεται ο μέσος όρος καθώς και το εύρος των τιμών του συντελεστή συσχέτισης για τις διάφορες τιμές συντελεστή διάχυσης και για όλα τα μεγέθη κελιού.

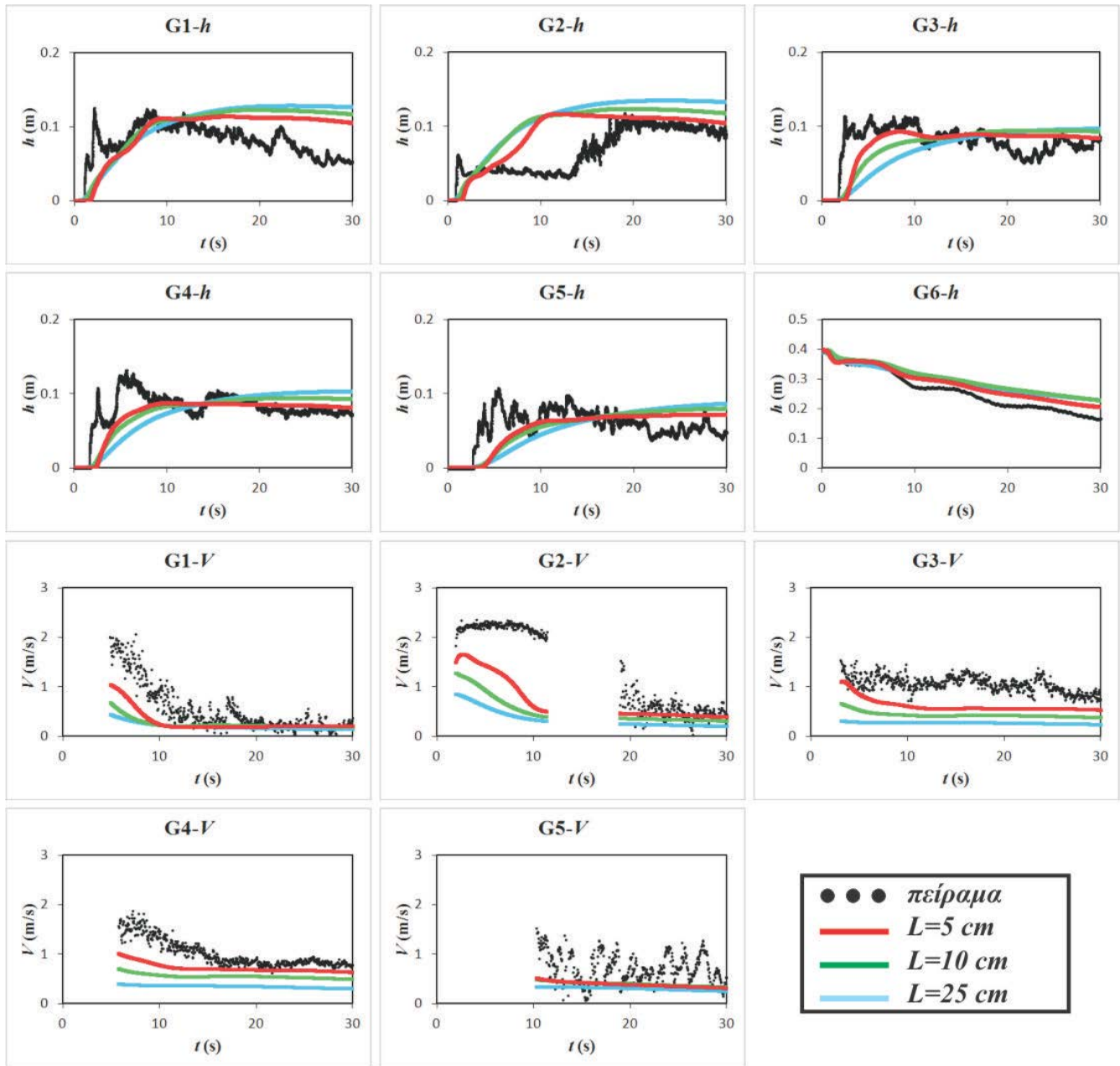
Παρατηρείται επίσης ότι για όλες τις προσομοιώσεις όπου το πεδίο ροής είναι μία ιδεατή συνθήκη (είτε είναι πειραματική διάταξη είτε υποθετικό σενάριο), η βέλτιστη τιμή του συντελεστή διάχυσης είναι μεγάλη και αρκετά κοντά στη μονάδα ($\omega=0.99$). Αντιθέτως, στην προσομοίωση ροής πεδίο με σημαντική πολυπλοκότητα, όπως είναι η προσομοίωση ροής σε πραγματικές συνθήκες ή σε φυσικό μοντέλο, η αντίστοιχη τιμή του συντελεστή διάχυσης είναι αρκετά χαμηλότερη ($\omega=0.90$). Πιθανώς αυτό οφείλεται ότι σε πολύπλοκο πεδίο τα φαινόμενα της τύρβης είναι αρκετά πιο έντονα σε σχέση με τις πεδία όπου η ροή είναι σχετικά ελεγχόμενη, επομένως εφόσον ο συντελεστής διάχυσης λειτουργεί σαν ένα είδος προσομοίωσης της τύρβης όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, η χαμηλότερη τιμή να αποδίδεται εκεί. Εξάιρεση αποτελεί η προσομοίωση πλημμυρικής ροής σε επίπεδο λεκάνης απορροής, όπου η σχετικά υψηλή τιμή του συντελεστή διάχυσης ($\omega=0.99$) πιθανώς να οφείλεται ότι οι ροές είχαν σχετικά χαμηλό βάθος και μία χαμηλότερη τιμή του συντελεστή διάχυσης "εξομαλύνει" υπερβολικά την αριθμητική επίλυση και αλλοιώνει σημαντικά την ακρίβεια της προσομοίωσης.

Η κατάλληλη επιλογή του συντελεστή διάχυσης είναι σημαντικό ζήτημα και εξαρτάται από την εμπειρία του κάθε ερευνητή και τη γνώση της περιοχής μελέτης, όπου είναι δυνατόν να εκτιμηθεί αν

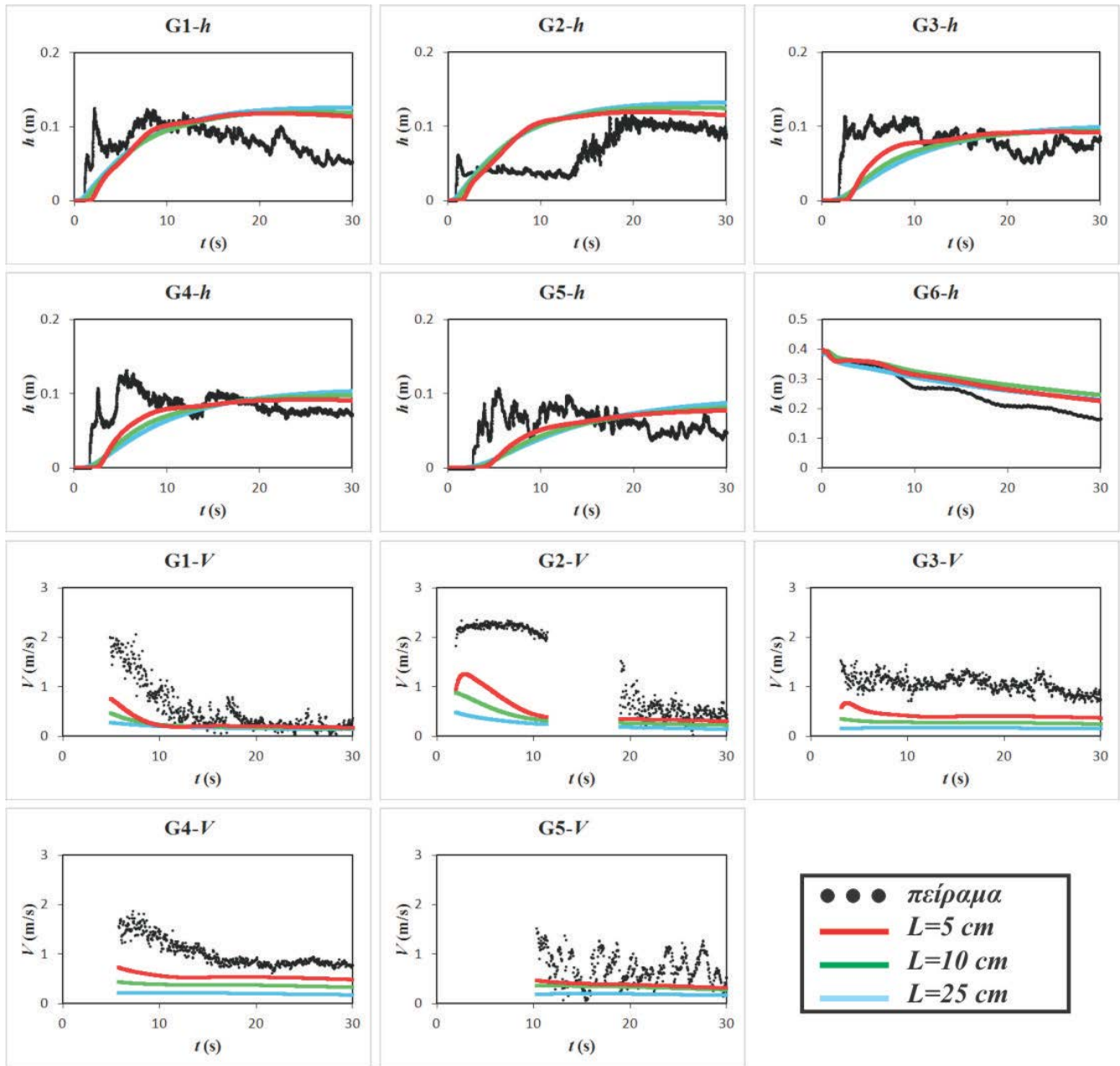
τα φαινόμενα της τύρβης είναι σημαντικά ή όχι. Γενικότερα, προτείνεται στην προσομοίωση ροής πραγματικής κατάστασης ο συντελεστής διάχυσης να παίρνει τιμή $\omega=0.90$.



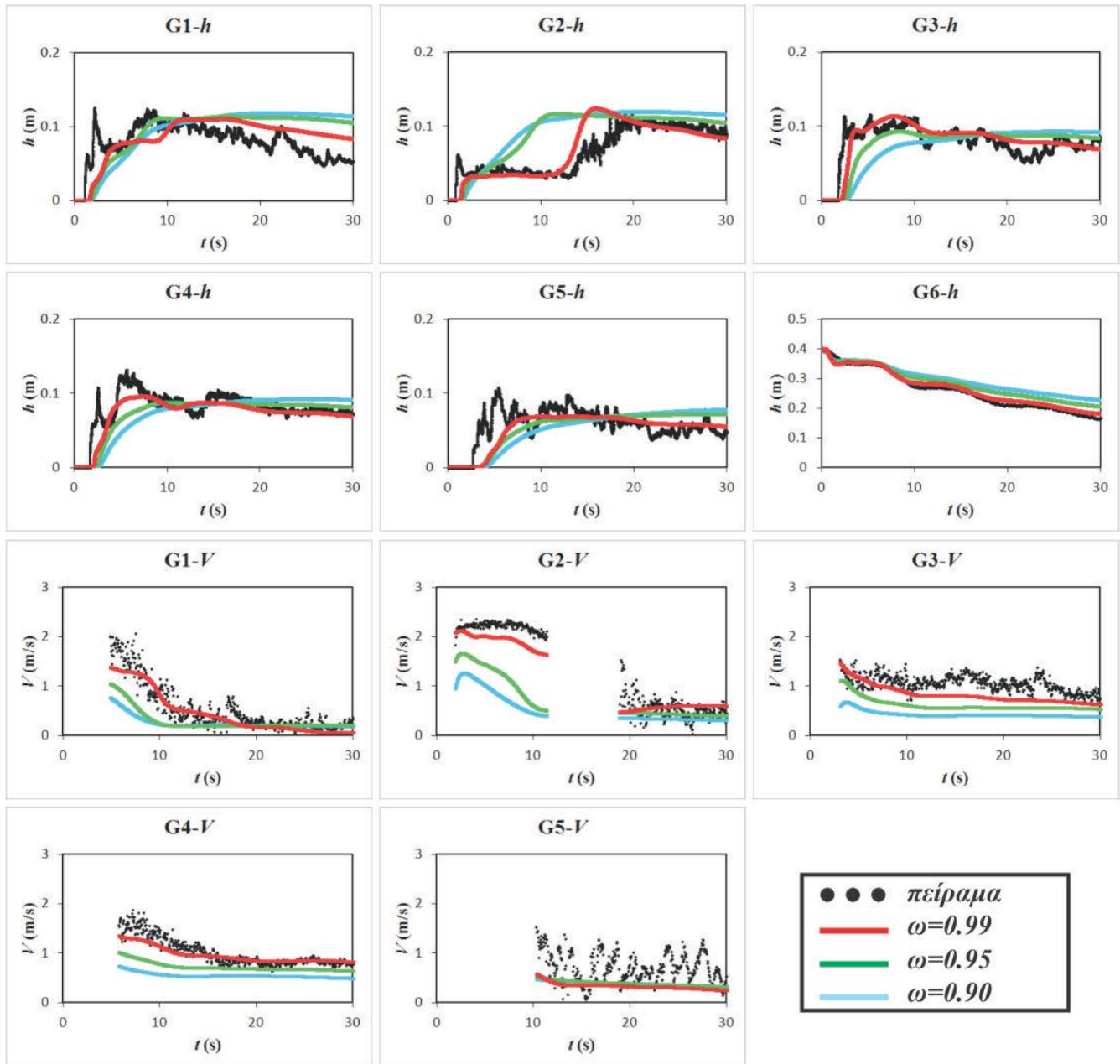
Σχήμα 5.10 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων για το βάθος και την ταχύτητα ροής σε σχέση με το χρόνο, για τα διάφορα μεγέθη κανάβου και για συντελεστή διάχυσης $\omega=0.99$



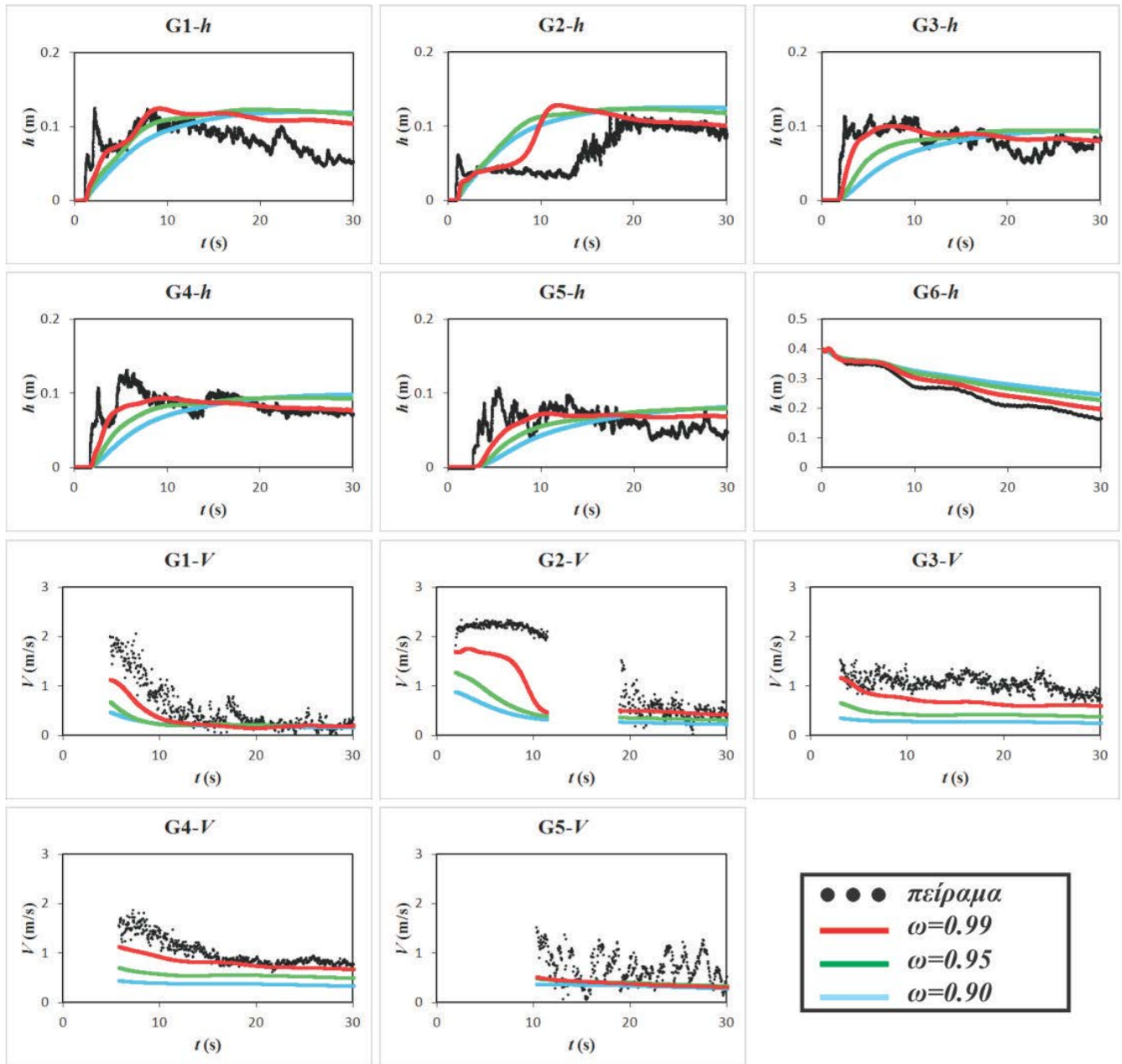
Σχήμα 5.11 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων για το βάθος και την ταχύτητα ροής σε σχέση με το χρόνο, για τα διάφορα μεγέθη κανάλιου και για συντελεστή διάχυσης $\omega=0.95$



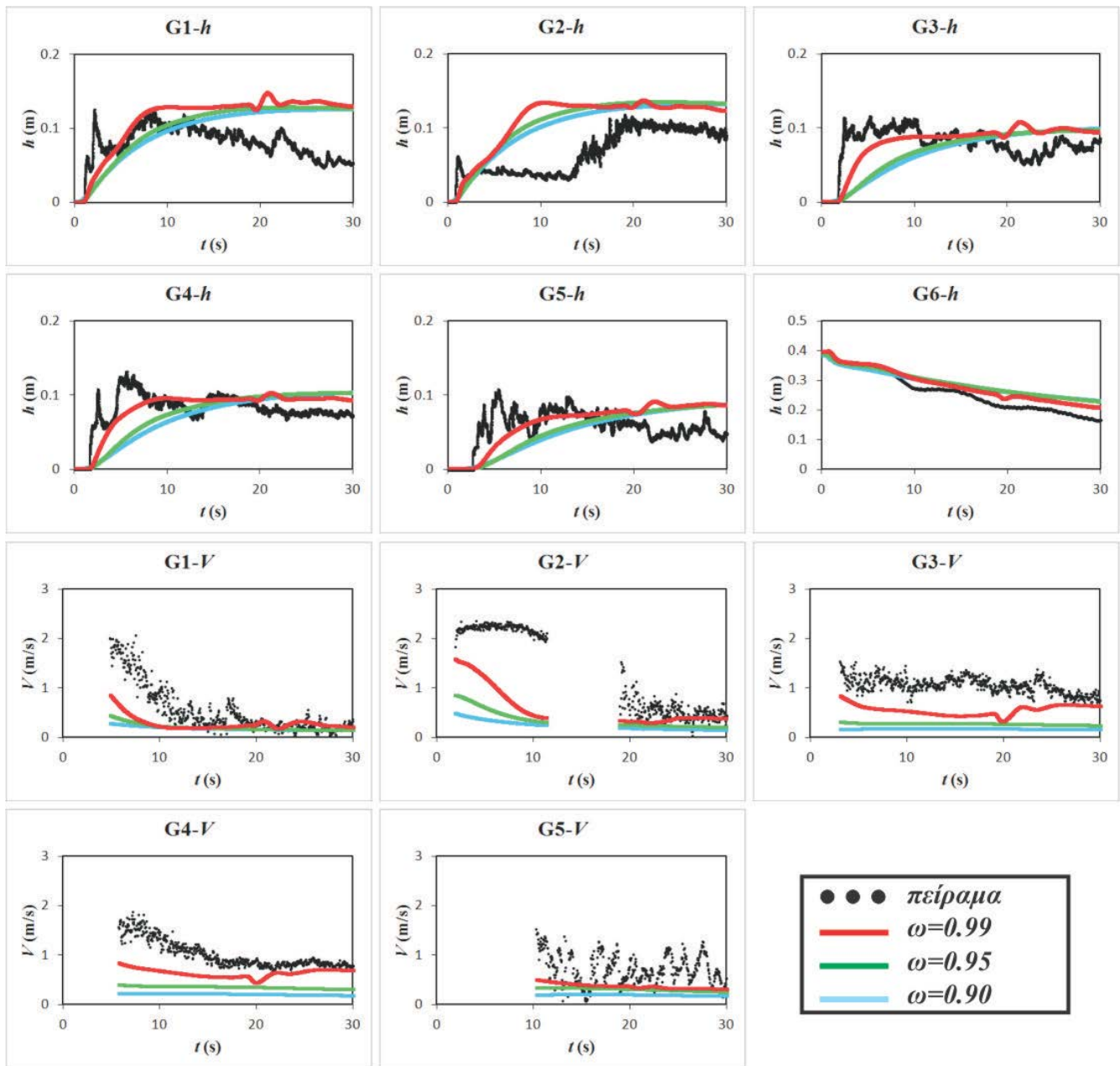
Σχήμα 5.12 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων για το βάθος και την ταχύτητα ροής σε σχέση με το χρόνο, για τα διάφορα μεγέθη κανάλιου και για συντελεστή διάχυσης $\omega=0.95$



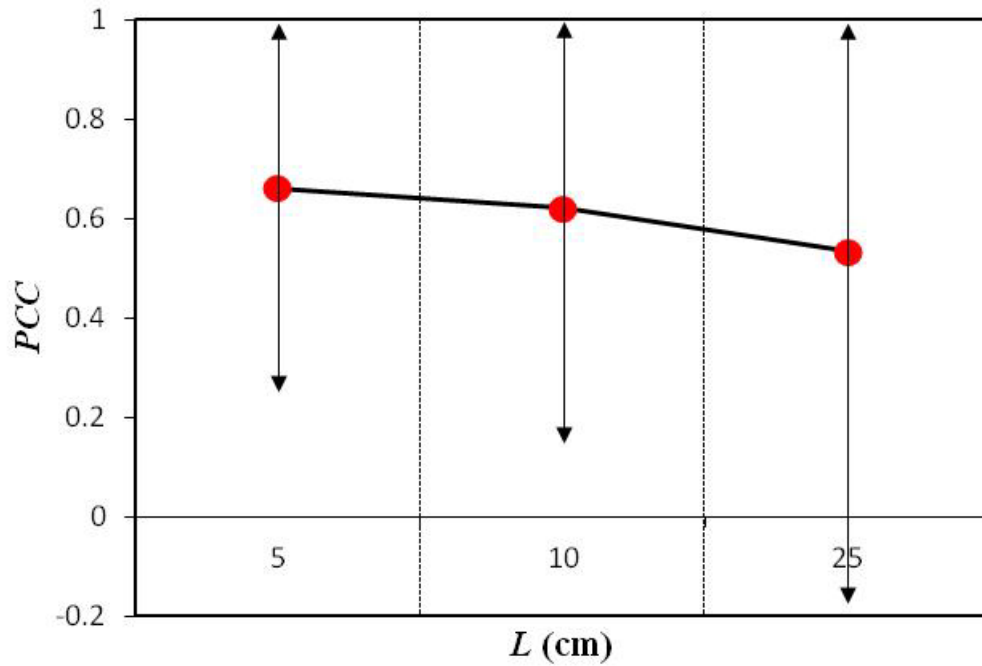
Σχήμα 5.13 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων για το βάθος και την ταχύτητα ροής σε σχέση με το χρόνο, για μέγεθος κελιού $L=5\text{ cm}$ και για διάφορους συντελεστές διάχυσης



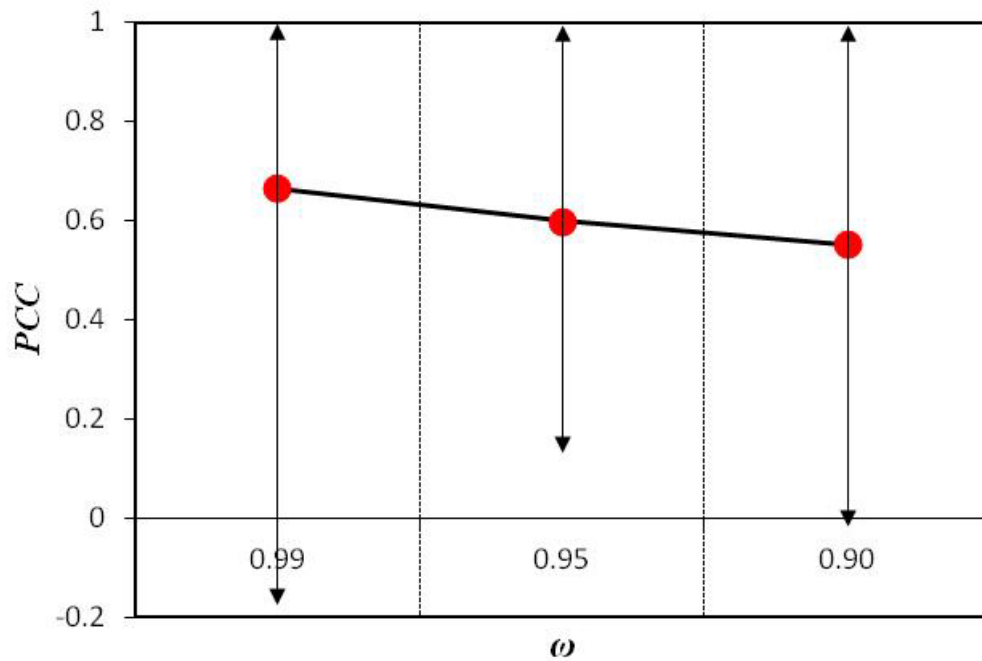
Σχήμα 5.14 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων για το βάθος και την ταχύτητα ροής σε σχέση με το χρόνο, για μέγεθος κελιού $L=10$ cm και για διάφορους συντελεστές διάχυσης



Σχήμα 5.15 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων για το βάθος και την ταχύτητα ροής σε σχέση με το χρόνο, για μέγεθος κελιού $L=25\text{ cm}$ και για διάφορους συντελεστές διάχυσης



Σχήμα 5.16 Μέσος όρος και εύρος τιμών συντελεστή συσχέτισης για τα διάφορα μεγέθη κελιού και για όλες τις τιμές του συντελεστή διάχυσης



Σχήμα 5.17 Μέσος όρος και εύρος τιμών συντελεστή συσχέτισης για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διάχυσης και για όλα τα μεγέθη κελιού

Πίνακας 5.8 Συντελεστές συσχέτισης κατά Pearson αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων για διάφορα μεγέθη κανάβου και για διάφορους συντελεστές διάχυσης

Βάθος ροής				Ταχύτητα ροής			
Μετρητής	L (cm)	ω	PCC	Μετρητής	L (cm)	ω	PCC
G1	5	0.99	0.561	G1	5	0.99	0.919
G1	10	0.99	0.620	G1	10	0.99	0.922
G1	25	0.99	0.463	G1	25	0.99	0.739
G1	5	0.95	0.476	G1	5	0.95	0.882
G1	10	0.95	0.418	G1	10	0.95	0.851
G1	25	0.95	0.320	G1	25	0.95	0.935
G1	5	0.90	0.354	G1	5	0.90	0.873
G1	10	0.90	0.294	G1	10	0.90	0.932
G1	25	0.90	0.271	G1	25	0.90	0.924
G2	5	0.99	0.842	G2	5	0.99	0.970
G2	10	0.99	0.543	G2	10	0.99	0.858
G2	25	0.99	0.556	G2	25	0.99	0.719
G2	5	0.95	0.592	G2	5	0.95	0.816
G2	10	0.95	0.633	G2	10	0.95	0.737
G2	25	0.95	0.704	G2	25	0.95	0.782
G2	5	0.90	0.656	G2	5	0.90	0.769
G2	10	0.90	0.716	G2	10	0.90	0.774
G2	25	0.90	0.746	G2	25	0.90	0.874
G3	5	0.99	0.807	G3	5	0.99	0.526
G3	10	0.99	0.778	G3	10	0.99	0.471
G3	25	0.99	0.495	G3	25	0.99	-0.174
G3	5	0.95	0.579	G3	5	0.95	0.400
G3	10	0.95	0.405	G3	10	0.95	0.477
G3	25	0.95	0.219	G3	25	0.95	0.665
G3	5	0.90	0.339	G3	5	0.90	0.412
G3	10	0.90	0.230	G3	10	0.90	0.602
G3	25	0.90	0.168	G3	25	0.90	0.495
G4	5	0.99	0.852	G4	5	0.99	0.940
G4	10	0.99	0.803	G4	10	0.99	0.913
G4	25	0.99	0.688	G4	25	0.99	0.531
G4	5	0.95	0.686	G4	5	0.95	0.884
G4	10	0.95	0.579	G4	10	0.95	0.789
G4	25	0.95	0.414	G4	25	0.95	0.729
G4	5	0.90	0.526	G4	5	0.90	0.800
G4	10	0.90	0.420	G4	10	0.90	0.780
G4	25	0.90	0.346	G4	25	0.90	0.661
G5	5	0.99	0.644	G5	5	0.99	0.379
G5	10	0.99	0.625	G5	10	0.99	0.246
G5	25	0.99	0.465	G5	25	0.99	0.268
G5	5	0.95	0.493	G5	5	0.95	0.259
G5	10	0.95	0.406	G5	10	0.95	0.242
G5	25	0.95	0.287	G5	25	0.95	0.134
G5	5	0.90	0.359	G5	5	0.90	0.252
G5	10	0.90	0.290	G5	10	0.90	0.148
G5	25	0.90	0.251	G5	25	0.90	-0.015
G6	5	0.99	0.996				
G6	10	0.99	0.997				
G6	25	0.99	0.996				
G6	5	0.95	0.995				
G6	10	0.95	0.995				
G6	25	0.95	0.994				
G6	5	0.90	0.994				
G6	10	0.90	0.994				
G6	25	0.90	0.991				

5.5 Χρονική εξέλιξη αβεβαιότητας

Στην ενότητα αυτή θα γίνει προσπάθεια διερεύνησης της χρονικής εξέλιξης της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στην αριθμητική λύση, καθώς η προσομοίωση της πλημμυρικής ροής είναι δυναμικό φαινόμενο. Σε πρώτη φάση διερευνήθηκε η χρονική εξέλιξη της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στην αριθμητική επίλυση λόγω μεγέθους κελιού υπολογιστικού πλέγματος. Για τη διερεύνηση αυτή, χρησιμοποιήθηκαν επίσης τα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από τη μελέτη διάδοσης του πλημμυρικού κύματος σε οριζόντιο πυθμένα και με απομονωμένο εμπόδιο εντός του πεδίου ροής, το οποίο προκύπτει έπειτα από τμηματική θραύση φράγματος (Soares-Frazao and Zech 2007, Μπέλλος 2015).

Για τη μελέτη αυτού του φαινομένου υπάρχουν διάφοροι τρόποι προσέγγισης στη σχετική βιβλιογραφία (Roy 2003). Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, η διερεύνηση περιορίστηκε στη σύγκριση της χρονικής εξέλιξης του σφάλματος μεταξύ πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, καθώς και η ποιοτική σύγκριση των σφαλμάτων αυτών για κάθε σενάριο μεγέθους υπολογιστικού κελιού. Για την εύρεση του σφάλματος αυτού χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω δείκτης:

$$SE_L = \left| \frac{f_L - f_{obs}}{f_L} \right| 100\% \quad (5.2)$$

όπου η μεταβλητή f είναι η εκάστοτε τιμή σύγκρισης (βάθος h και ταχύτητα ροής V σε διάφορες χρονικές στιγμές), ενώ ο μεν δείκτης L υποδηλώνει το εκάστοτε σενάριο μεγέθους υπολογιστικού κελιού, ο δε δείκτης obs τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα.

Στο Σχήμα 5.18 παρουσιάζονται τα σφάλματα των αριθμητικών λύσεων όπως εξελίσσονται στο χρόνο, σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα για τα διάφορα σενάρια μεγέθους κανάβου και για συντελεστή διάχυσης $\omega=0.99$. Σημειώνεται ότι για τα μεν βάθη ροής απεικονίζεται ο κινούμενος μέσος όρος των 2 s, για τις δε ταχύτητες ροής ο κινούμενος μέσος όρος των 4 s. Όπως φαίνεται, η αβεβαιότητα που υπεισέρχεται στην αριθμητική επίλυση είναι έντονη και εξαρτάται από το χρόνο, λόγω δυναμικότητας της διάδοσης του πλημμυρικού κύματος. Ιδιαίτερα στις πρώτες στιγμές όπου και προσεγγίζει το μέτωπο του νερού τον εκάστοτε μετρητή, εμφανίζονται εξάρσεις στα σφάλματα μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών δεδομένων. Παρατηρώντας το ίδιο σφάλμα μεταξύ αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραματικών δεδομένων διαφαίνεται σαφής τάση (η οποία ήταν και αναμενόμενη) ότι ο πυκνότερος κανάβος προσφέρει και την ακριβέστερη επίλυση. Εντούτοις δεν υπάρχει σαφής ένδειξη μείωσης ή αύξησης του σφάλματος σε σχέση με το χρόνο.

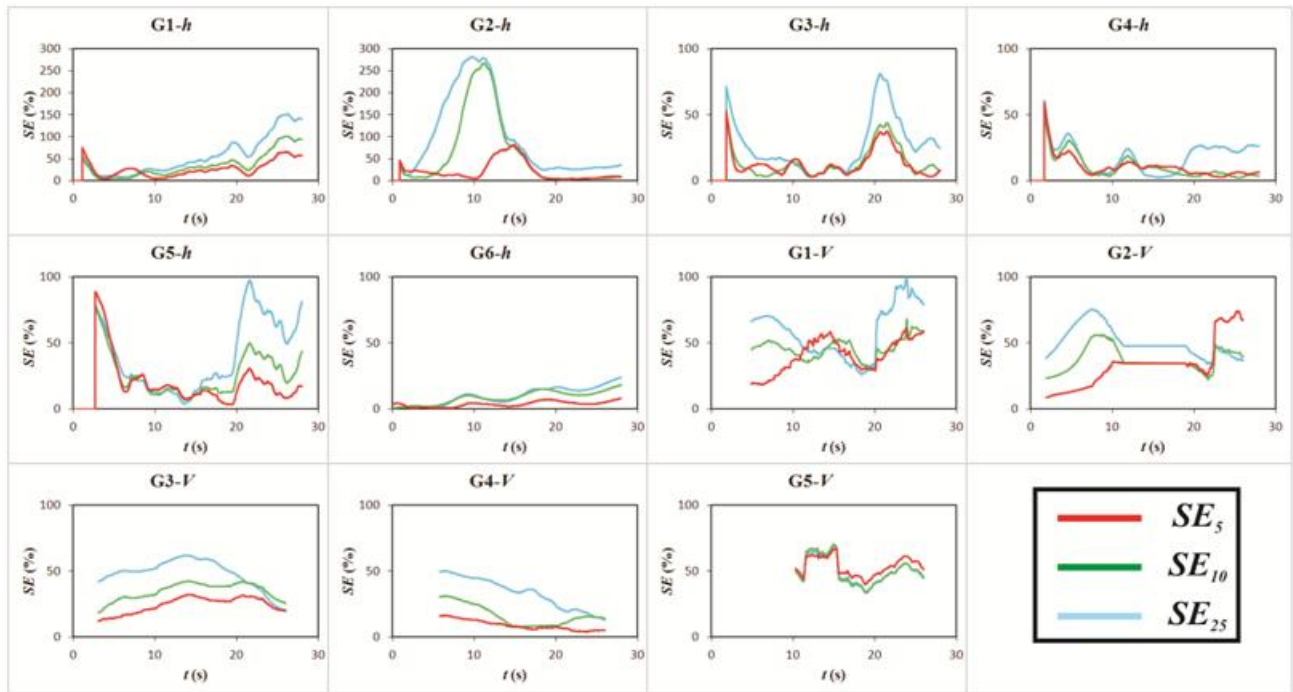
Σε δεύτερη φάση διερευνήθηκε η χρονική εξέλιξη της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στην αριθμητική επίλυση λόγω των επιπλέον παραμέτρων που εισάγονται στο αριθμητικό μοντέλο FLOW-R2D για την αναπαράσταση των κτιρίων σε πλημμυρική ροή, οι οποίες παράμετροι είναι η τοπική αύξηση του συντελεστή τραχύτητας και η τοπική αύξηση του υψόμετρου του εδάφους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πλημμυρικής ροής στο φυσικό μοντέλο του ποταμού Τοσε και στην υποθετική πόλη (Testa et al. 2007, Bellos and Tsakiris 2015a), έτσι όπως έχουν περιγραφεί και προηγουμένως, για το σενάριο του

χαμηλού πλημμυρικού υδρογραφήματος, του μη διευθετημένου ανάγλυφου και της ευθυγραμμισμένης πόλης.

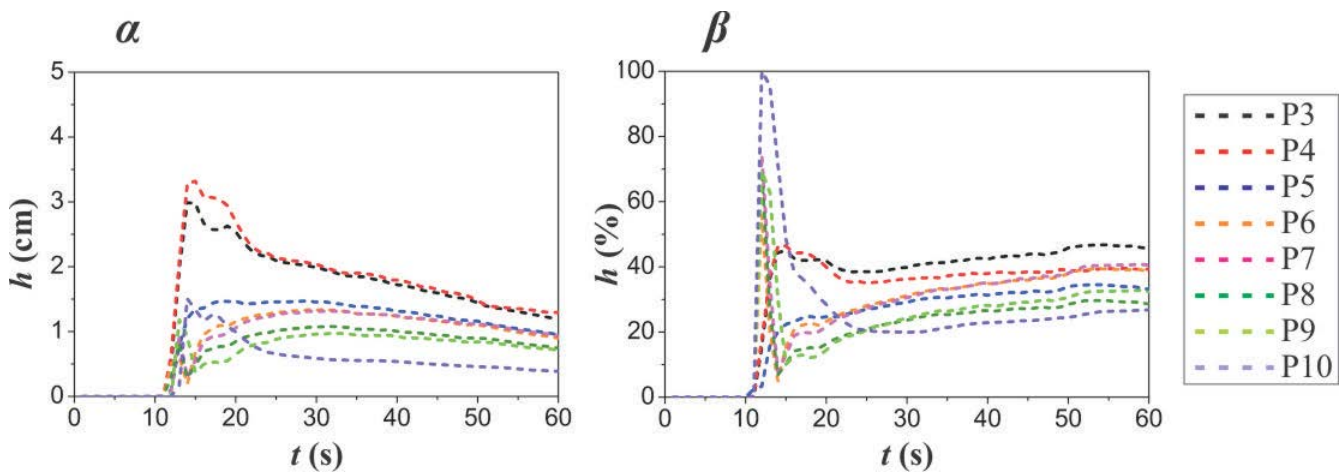
Στα Σχήματα 5.19α και 5.20α φαίνεται το εύρος των τιμών μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης τιμής του βάθους ροής για τις διάφορες τιμές που έλαβε η παράμετρος της τοπικής αύξησης του συντελεστή τραχύτητας (0.1, 0.3 και 0.5 s/m^{1/3} επιπλέον) και η παράμετρος της τοπικής αύξησης του υψόμετρου του εδάφους (0.15, 0.20, 0.25 και 0.30 m επιπλέον) αντίστοιχα. Στα Σχήματα 5.19β και 5.20β φαίνεται το ποσοστό αυτού του εύρους σε σχέση με το μέγιστο βάθος ροής έτσι όπως προσδιορίστηκε πειραματικά.

Παρατηρείται ότι το εύρος αυτό μειώνεται κατά το κατιόν σκέλος του πλημμυρικού υδρογραφήματος και σχεδόν γίνεται σταθερό (για την τοπική αύξηση του υψόμετρου του εδάφους) ή εμφανίζει μικρή τάση μείωσης (για την τοπική αύξηση του συντελεστή τραχύτητας), έπειτα από τοπική έξαρση η οποία συμβαίνει όταν το μέτωπο του πλημμυρικού κύματος προσεγγίζει τον εκάστοτε μετρητή. Αυτή η τοπική έξαρση εμφανίζεται και στο σχετικό εύρος, αλλά με εμφανή αυξητική τάση σε σχέση με το χρόνο. Φαίνεται ότι οι παράμετροι που διερευνήθηκαν εισάγουν σημαντική αβεβαιότητα, εφόσον ακόμα κι αν εξαιρεθεί η τοπική αυτή έξαρση, το σχετικό εύρος μπορεί να φτάσει και μέχρι 40% του μέγιστου βάθους ροής.

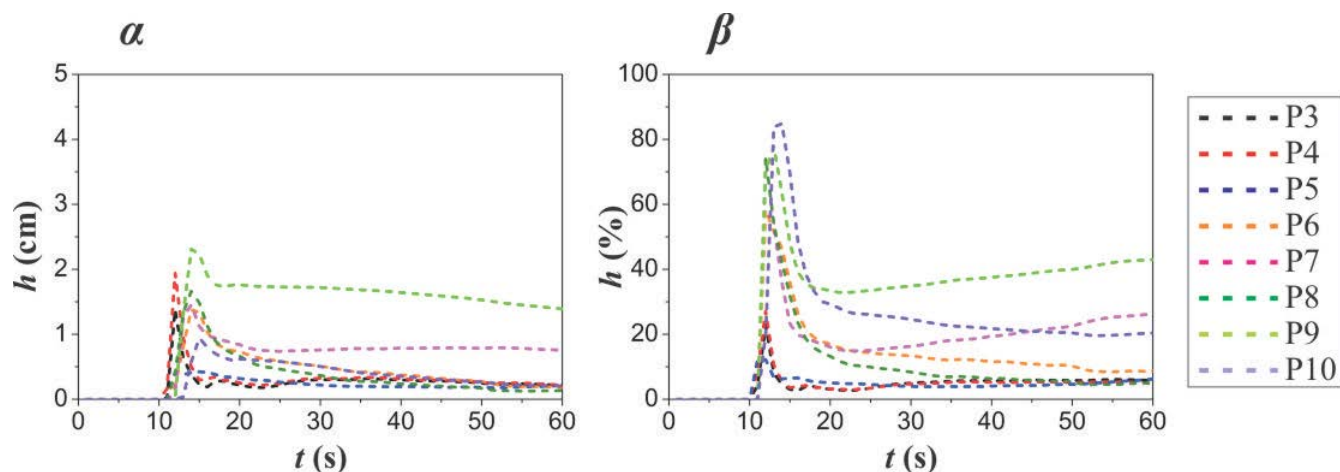
Συνοψίζοντας, κάθε νέα παράμετρος που εισάγεται στο αριθμητικό μοντέλο εισάγει αβεβαιότητα, η οποία απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση, καθώς και προσπάθεια ποσοτικοποίησης αυτής, ούτως ώστε αν είναι δυνατόν να μπορεί να λαμβάνεται υπόψη σε κάθε προσομοίωση μίας πραγματικής κατάστασης, όπως π.χ. στην κατάρτιση χαρτών πλημμυρικού κινδύνου. Ως γενική τάση διαπιστώνεται ότι ιδιαίτερα τις πρώτες χρονικές στιγμές όπου προσεγγίζει το μέτωπο του πλημμυρικού κύματος τα σημεία ενδιαφέροντος υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα, κάτι που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η χρονική πρόβλεψη του πότε θα πληγεί κάποιο μέρος από κάποιο πλημμυρικό γεγονός είναι αρκετά δύσκολη σε αντίθεση με το μέγιστο βάθος τη πλημμυρικής ροής που μπορεί να εκτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια. Επίσης από την ανάλυση των παραπάνω δεν προέκυψε σαφής τάση για το πώς εξελίσσεται η αβεβαιότητα στο χρόνο, εφόσον παρατηρείται σε άλλες περιπτώσεις μείωση, αύξηση ή ακόμα και διατήρηση, επομένως είναι κάτι που πρέπει να εξειδικευτεί κατά περίπτωση.



Σχήμα 5.18 Χρονική εξέλιξη σφάλματος μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών δεδομένων για τα διάφορα μεγέθη κανάβου



Σχήμα 5.19 α) Χρονική εξέλιξη εύρους τιμών μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης τιμής του βάθους ροής για τις διάφορες τιμές της τοπικής αύξησης του συντελεστή τραχύτητας β) Χρονική εξέλιξη σχετικού εύρους τιμών μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης τιμής του βάθους ροής σε σχέση με το μετρημένο μέγιστο βάθος ροής για τις διάφορες τιμές της τοπικής αύξησης του συντελεστή τραχύτητας



Σχήμα 5.20 α) Χρονική εξέλιξη εύρους τιμών μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης τιμής του βάθους ροής για τις διάφορες τιμές της τοπικής αύξησης του υψόμετρου του εδάφους β) Χρονική εξέλιξη σχετικού εύρους τιμών μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης τιμής του βάθους ροής σε σχέση με το μετρημένο μέγιστο βάθος ροής για τις διάφορες τιμές της τοπικής αύξησης του υψόμετρου του εδάφους

5.6 Μοντέλα εκτίμησης τριβών πυθμένα

Όπως αναλύθηκε και προηγουμένως, οι τριβές πυθμένα αποτελούν σημαντική παράμετρο στην προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες. Η μεθοδολογία προσδιορισμού τους μέσω εμπειρικών συντελεστών για το εκάστοτε μοντέλο προσομοίωσης τριβών πυθμένα (Manning, Chézy, Darcy-Weisbach) γεννάει σημαντικές αβεβαιότητες, ενώ η πολυπλοκότητα του φυσικού κόσμου και η έλλειψη σχετικών δεδομένων δυσχεραίνει την ορθολογική εκτίμηση αυτών των συντελεστών. Τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια ώστε οι εμπειρικές αυτές σχέσεις να αποκτήσουν και κάποια φυσική βάση, εφόσον αμφισβητείται η εγκυρότητα των κλασικών προσεγγίσεων (Chanson 2004).

Γενικότερα η ροή του νερού μπορεί να χωριστεί στις παρακάτω κατηγορίες αναλόγως με την αντίσταση που προκαλείται σε αυτή:

- ροή διαμέσου κάποιου απλού υλικού
- ροή διαμέσου βλάστησης
- ροή διαμέσου στερεών εμποδίων

Στην πρώτη κατηγορία μπορεί να ενταχθεί η ροή διαμέσου κάποιου ομογενούς υλικού (π.χ. σκυρόδεμα, ασφαλτος, χαλίκι συγκεκριμένης διαμέτρου κ.λπ.) είτε κάποιου ετερογενούς (π.χ. ροή σε φυσική κοίτη). Το κρίσιμο μέγεθος για τον προσδιορισμό των τριβών είναι το ύψος τραχύτητας στην περίπτωση του ομογενούς πεδίου και του ισοδύναμου ύψους τραχύτητας στην περίπτωση του ετερογενούς πεδίου.

Στη δεύτερη κατηγορία, η αντίσταση που προκαλείται από τα διάφορα στοιχεία της βλάστησης (δέντρα, θάμνοι, χόρτα) είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή που προκαλείται από την πρώτη

κατηγορία (Nepf 2012). Σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την αντίσταση στη ροή είναι αν τα στοιχεία της βλάστησης είναι βυθισμένα ή όχι και αν είναι εύκαμπτα ή όχι. Τα κρίσιμα μεγέθη που πρέπει να προσδιοριστούν είναι το ύψος της βλάστησης (αν είναι βυθισμένη μέσα στο νερό), η διάμετρος και η πυκνότητα των στοιχείων.

Τέλος, στην τρίτη κατηγορία εκτιμάται η οπισθέλκουσα δύναμη (drag force) που προκαλείται στη ροή λόγω διάφορων αντικειμένων. Σημαντική παράμετρος είναι το σχήμα του αντικειμένου και αναλόγως του σχήματος αυτού, προσδιορίζεται το εκάστοτε κρίσιμο μέγεθος (διάμετρος αν είναι κύλινδρος, διαστάσεις αν είναι ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο κ.λπ.) (Munson et al. 2009).

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε πρωτότυπη σχέση με την οποία υπολογίζεται με ρητό τρόπο ο συντελεστής τραχύτητας Darcy-Weisbach f με βάση πειραματικά δεδομένα (Nikuradse 1933) και η οποία έχει φυσική βάση. Η πρωτότυπη αυτή σχέση είναι ρητή, ισχύει για όλες τις περιοχές (στρωτή ροή, τυρβώδης ροής και μεταβατικές περιοχές) και είναι κατάλληλη για ροή με ελεύθερη επιφάνεια.

Το πλεονέκτημα της ρητής επίλυσης είναι προφανές, ιδιαίτερα όταν μία τέτοιου τύπου σχέση θα πρέπει να εισαχθεί σε κάποιον αλγόριθμο, όπως είναι το αριθμητικό μοντέλο FLOW-R2D. Το πρώτο πλεονέκτημα της εγκυρότητας της σχέσης σε όλες τις περιοχές όσον αφορά στην εισαγωγή αυτής σε κάποιο αλγόριθμο, είναι ότι αποφεύγονται οι συνθήκες ελέγχου. Το δεύτερο έχει σχέση με τα όρια εγκυρότητας της εκάστοτε προσέγγισης. Αν και η συντριπτική πλειονότητα της πλημμυρικής ροής είναι τυρβώδης, είναι δυνατόν κατά την προσομοίωση της πλημμυρικής ροής το νερό να εγκλωβιστεί σε κάποια τυφλά σημεία με χαμηλό βάθος και σχεδόν μηδενική ταχύτητα, επομένως η ροή να είναι είτε στρωτή είτε σε μεταβατική περιοχή. Επίσης σε περιπτώσεις όπου ως αρχική συνθήκη θεωρείται ακίνητος αρχικός όγκος νερού (π.χ. θραύση φράγματος), μέχρι αυτός να αποκτήσει κάποια ταχύτητα, επίσης η ροή να βρίσκεται σε ανάλογη περιοχή. Επομένως, για παράδειγμα, αν η εκάστοτε προσέγγιση αφορά μόνο στην τυρβώδη ροή, δημιουργείται πρόβλημα στην προσομοίωση. Τέλος, όπως προαναφέρθηκε, η προτεινόμενη εξίσωση είναι κατάλληλη για περιπτώσεις ροής με ελεύθερη επιφάνεια όπως είναι η πλημμυρική ροή, σε αντίθεση με τις υπάρχουσες προσεγγίσεις που είναι για ροή υπό πίεση.

Η πιο γνωστή προσέγγιση του συντελεστή τραχύτητας f είναι η πεπλεγμένη σχέση Colebrook-White (Colebrook 1939), για τυρβώδη ροή ($Re_D > 4300$) η οποία ισχύει και στην υδραυλικά λεία, καθώς και στην υδραυλικά τραχεία περιοχή:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k_s}{3.7D} + \frac{2.51}{Re_D \sqrt{f}} \right) \quad (5.3)$$

και η ρητή προσέγγιση αυτής (Swamee and Jain 1976):

$$f = \frac{0.25}{\left\{ \log \left[\frac{5.74}{(Re_D)^{0.9} + \frac{k_s/D}{3.7}} \right] \right\}^2} \quad (5.4)$$

Για να γίνει κατανοητό το τι μπορεί να συμβεί όταν εφαρμόζεται η παραπάνω εξίσωση σε μη πλήρως αναπτυγμένη τυρβώδη ροή, ακολουθεί το παρακάτω αριθμητικό παράδειγμα. Καταρχάς μετατρέπεται η Εξ. (5.4) σε κατάλληλη μορφή για ροή με ελεύθερη επιφάνεια ($D=4R=4h$):

$$f = \frac{0.25}{\left\{ \log \left[\frac{5.74}{(4Re_h)^{0.9}} + \frac{k_s/4h}{3.7} \right] \right\}^2} \quad (5.5)$$

Στη συνέχεια θεωρείται ροή με ύψος τραχύτητας $k_s=0.02$ m, κινηματική συνεκτικότητα $\nu_s=10^{-6}$ m²/s και ταχύτητα ροής $V=0.01$ m/s, τότε ο συντελεστής τραχύτητας f σε σχέση με τον αριθμό Reynolds Re_h παρατίθεται στο Σχήμα 5.21, με βάση την Εξ. (5.5). Παρατηρείται ότι για χαμηλούς αριθμούς Reynolds, ο συντελεστής τραχύτητας παίρνει μη ρεαλιστικές τιμές, κάτι που θα οδηγούσε σε αποτυχία της προσομοίωσης.

Εκτός από την παραπάνω προσέγγιση, υπάρχει πληθώρα ερευνητών που έχει προτείνει κάποιες εξισώσεις που προσεγγίζουν τη σχέση του συντελεστή τραχύτητας f με τον αριθμό Reynolds σε όλες τις περιοχές (Brownlie 1981, Ligrani and Moffat 1986, Cheng and Chiew 1998, Yalin and Da Silva 2001), αλλά θεωρώντας ότι ισχύουν διαφορετικές εξισώσεις σε κάθε περιοχή (στρωτή, τυρβώδης και μεταβατικές), επομένως για τη χρήση αυτών απαιτείται συνθήκη ελέγχου, ενώ ακόμα και τα όρια σύμφωνα με τα οποία ισχύει η κάθε εξίσωση είναι δυσδιάκριτα

Η πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση μίας συνολικής ρητής σχέσης η οποία ισχύει σε όλες τις περιοχές (στρωτή, τυρβώδης, μεταβατικές περιοχές) είναι της μορφής (Cheng 2008):

$$f = f_L^a f_{TS}^{(1-a)b} f_{TR}^{(1-a)(1-b)} \quad (5.6)$$

όπου f_L ο τρόπος προσδιορισμού του συντελεστή τραχύτητας f στην περιοχή της στρωτής ροής, f_{TS} ο τρόπος προσδιορισμού του συντελεστή τραχύτητας f στην περιοχή της τυρβώδους υδραυλικά λείας ροής, f_{TR} ο τρόπος προσδιορισμού του συντελεστή τραχύτητας f στην περιοχή της τυρβώδους υδραυλικά τραχείας ροής και a, b :

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{Re}{Re_{LT}} \right)^m} \quad (5.7)$$

$$b = \frac{1}{1 + \left(\frac{Re}{Re_{SR}} \right)^n} = \frac{1}{1 + \left(\frac{Re}{\eta/k_s} \right)^n} \quad (5.8)$$

όπου Re_{LT}, m, η, n παράμετροι οι οποίες θα πρέπει να προσδιοριστούν με βάση τη συσχέτιση με τα πειραματικά δεδομένα Nikuradse.

Οι εξισώσεις προσδιορισμού των f_L, f_{TS} και f_{TR} που χρησιμοποιήθηκαν στη σχετική βιβλιογραφία (Cheng 2008) και οι οποίες ισχύουν σε ροή υπό πίεση σε αγωγό κυκλικής διατομής είναι οι εξής:

$$f_L = \frac{64}{Re_D} \quad (5.9)$$

$$f_{TS} = \left(1.8 \log \frac{Re_D}{6.8} \right)^{-2} \quad (5.10)$$

$$f_{TR} = \left(2.0 \log \frac{3.7D}{k_s}\right)^{-2} \quad (5.11)$$

Στη σχετική βιβλιογραφία (Cheng 2008) η συσχέτιση με βάση τα πειραματικά δεδομένα του Nikuradse έδωσε τις εξής τιμές για τις διάφορες παραμέτρους: $m \approx 9$, $Re_{LT} \approx 2720$, $n \approx 2$ και $\eta \approx 320$.

Ανάλογη διαδικασία ακολουθήθηκε και στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, όπου όμως για τον προσδιορισμό των f_L , f_{TS} και f_{TR} χρησιμοποιήθηκαν οι πρωτότυπες σχέσεις που αναπτύχθηκαν σε προηγούμενο Κεφάλαιο (εκτός από τον τρόπο προσδιορισμού του συντελεστή τραχύτητας f στην περιοχή της στρωτής ροής όπου έχει φυσική βάση):

$$f_L = \frac{64}{Re_D} \quad (5.12)$$

$$f_{TS} = \left(0.75 \ln \frac{Re_D}{5.37}\right)^{-2} \quad (5.13)$$

$$f_{TR} = \left(0.88 \ln \frac{6.82D}{k_s}\right)^{-2} \quad (5.14)$$

Η συσχέτιση με βάση τα πειραματικά δεδομένα του Nikuradse στο πλαίσιο της παρούσας προσέγγισης έδωσε τις παραπλήσιες με τη σχετική βιβλιογραφία τιμές για τις διάφορες παραμέτρους: $m \approx 8.4$, $Re_{LT} \approx 2712$, $n \approx 1.8$ και $\eta \approx 300$.

Συνοψίζοντας, η ρητή επίλυση που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής για τον προσδιορισμό του συντελεστή τραχύτητας f και η οποία ισχύει σε όλες τις περιοχές (στρωτή, τυρβώδης και μεταβατικές περιοχές) και σε περιπτώσεις ροής υπό πίεση σε αγωγό κυκλικής διατομής, είναι η εξής:

$$f = \left(\frac{64}{Re_D}\right)^a \left[0.75 \ln \left(\frac{Re_D}{5.37}\right)\right]^{2(\alpha-1)b} \left[0.88 \ln \left(6.82 \frac{D}{k_s}\right)\right]^{2(\alpha-1)(1-b)} \quad (5.15)$$

όπου:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{Re_D}{2712}\right)^{8.4}} \quad (5.16)$$

$$b = \frac{1}{1 + \left(\frac{Re_D}{150 \frac{D}{k_s}}\right)^{1.8}} \quad (5.17)$$

Στο Σχήμα 5.22 φαίνεται η συσχέτιση αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία των Εξ. (5.15) έως (5.17).

Στη σχετική βιβλιογραφία (Cheng 2008), ο παραπάνω τρόπος προσέγγισης (Εξ. (5.6) έως (5.8) και (5.9) έως (5.11) με $m \approx 9$, $Re_{LT} \approx 2720$, $n \approx 2$ και $\eta \approx 320$) επεκτείνεται και για ροή με ελεύθερη επιφάνεια:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{Re_h}{24}\right)^\alpha \left(1.8 \log \frac{Re_h}{2.1}\right)^{2(1-\alpha)b} \left(2.0 \log \frac{11.8h}{k_s}\right)^{2(1-\alpha)(1-b)} \quad (5.18)$$

όπου h το βάθος ροής το οποίο έχει προκύψει θεωρώντας $R=3.2h$ με στόχο να συνυπολογιστεί και η επίδραση των κάθετων τοιχωμάτων της εκάστοτε διατομής στην τριβή πυθμένα (Montes 1998), ενώ a και b :

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{Re_h}{850}\right)^9} \quad (5.19)$$

$$b = \frac{1}{1 + \left(\frac{Re}{160 \frac{h}{k_s}}\right)^2} \quad (5.20)$$

Παρατηρείται ότι εκτός από τον τρόπο προσδιορισμού του f_L ο οποίος έχει φυσική βάση, οι σχέσεις προσδιορισμού των f_{TS} και f_{TR} έχουν αντληθεί από τη συσχέτιση των δεδομένων με βάση τα πειραματικά δεδομένα του Nikuradse (Εξ. (5.10) και (5.11)), τα οποία και έγιναν σε αγωγό με ροή υπό πίεση. Επιπλέον ο συνυπολογισμός των κάθετων τοιχωμάτων μέσω της υδραυλικής ακτίνας είναι κατάλληλος κυρίως για μονοδιάστατη προσέγγιση.

Στη συνέχεια, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκαν σχέσεις προσδιορισμού των f_{TS} και f_{TR} , οι οποίες είναι φυσική βάσης.

Υπενθυμίζεται από προηγούμενο Κεφάλαιο ότι ισχύει για τη μεν υδραυλικά λεία ροή:

$$\frac{1}{z_0} \approx 8.94 \frac{V_*}{v_s} \approx \frac{100.6}{\delta} \quad (5.21)$$

και για τη δε υδραυλικά τραχεία ροή:

$$\frac{1}{z_0} \approx \frac{33.2}{k_s} \quad (5.22)$$

Επίσης για την τυρβώδη ροή με ελεύθερη επιφάνεια:

$$\bar{V} = \frac{V_*}{\kappa} \ln\left(\frac{1}{e} \frac{h}{z_0}\right) \quad (5.23)$$

Τέλος υπενθυμίζεται ότι η εξίσωση Darcy-Weisbach είναι η εξής:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \frac{f}{8} V^2 \quad (5.24)$$

Συνδυάζοντας τις Εξ. (5.21), (5.23) και (5.24) προκύπτει:

$$\frac{1}{\sqrt{f_{TS}}} = \frac{1}{\sqrt{8\kappa}} \ln\left(Re_h \sqrt{f_{TS}} \frac{8.94}{\sqrt{8e}}\right) = 0.86 \ln(1.16 Re_h \sqrt{f_{TS}}) \quad (5.25)$$

Το μειονέκτημα της Εξ. (5.25) είναι ότι αυτή είναι πεπλεγμένη και μπορεί να επιλυθεί μόνο με τη βοήθεια κάποιας μεθόδου βελτιστοποίησης (π.χ. Newton-Raphson). Μία καλή ρητή προσέγγιση της Εξ. (5.25) μπορεί να γίνει με τη βοήθεια του μετασχηματισμού της συνάρτησης ωμέγα:

$$\frac{1}{\sqrt{f_{TS}}} = \frac{Re_h}{0.86 e^{W(1.35 Re_h)}} \quad (5.26)$$

όπου:

$$W(1.35 Re_h) = \ln(1.35 Re_h) - \ln[\ln(1.35 Re_h)] + \frac{\ln[\ln(1.35 Re_h)]}{\ln(1.35 Re_h)} + \frac{\ln[\ln(1.35 Re_h)]^2 - 2\ln[\ln(1.35 Re_h)]}{2\ln(1.35 Re_h)^2} \quad (5.27)$$

Το σφάλμα που εισάγεται με αυτή την προσέγγιση και την επίλυση της Εξ. 5.25 με την αριθμητική μέθοδο Newton-Raphson είναι μέχρι 1.3% για πολύ μικρούς αριθμούς Reynolds (κάτω από 100) με σαφή τάση μείωσης όσο αυτοί μεγαλώνουν.

Αντίστοιχα για την υδραυλικά τραχεία ροή συνδυάζονται οι Εξ. (5.22), (5.23) και (5.24) και προκύπτει:

$$\frac{1}{\sqrt{f_{TR}}} = \frac{1}{\sqrt{8\kappa}} \ln\left(\frac{33.2}{e} \frac{h}{k_s}\right) = 0.86 \ln\left(12.21 \frac{h}{k_s}\right) \quad (5.28)$$

Συνοψίζοντας ο τρόπος προσδιορισμού των f_L , f_{TS} και f_{TR} με στοιχειώδη φυσική συνέπεια έτσι όπως προέκυψε στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης είναι ο εξής:

$$f_L = \frac{24}{Re_h} \quad (5.29)$$

$$f_{TS} = \left[\frac{0.86e^{W(1.35Re_h)}}{Re_h} \right]^2 \quad (5.30)$$

$$f_{TR} = \frac{1.34}{\left[\ln\left(12.21 \frac{h}{k_s}\right) \right]^2} \quad (5.31)$$

Θεωρώντας ότι οι εκθέτες a και b παραμένουν σταθεροί, τόσο για ροή υπό πίεση, όσο και για ροή με ελεύθερη επιφάνεια και ότι μπορούν να υπολογιστούν με τις Εξ. (5.16) και (5.17) και θεωρώντας ότι $Re_D = 4Re_h$, η προτεινόμενη ρητή σχέση προσδιορισμού του συντελεστή τραχύτητας f η οποία ισχύει σε όλες τις περιοχές (στρωτή, τυρβώδης και μεταβατικές) για την περίπτωση της ροής με ελεύθερη επιφάνεια είναι η εξής:

$$f = \left(\frac{24}{Re_h}\right)^\alpha \left[\frac{0.86e^{W(1.35Re_h)}}{Re_h} \right]^{2(1-\alpha)b} \left\{ \frac{1.34}{\left[\ln\left(12.21 \frac{h}{k_s}\right) \right]^2} \right\}^{(1-\alpha)(1-b)} \quad (5.32)$$

όπου:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{Re_h}{678}\right)^{8.4}} \quad (5.33)$$

$$b = \frac{1}{1 + \left(\frac{Re_h \frac{h}{k_s}}{150}\right)^{1.8}} \quad (5.34)$$

Στο Σχήμα 5.23 φαίνεται η εφαρμογή της προτεινόμενης σχέσης των Εξ. (5.32) έως (5.34) για διάφορους λόγους h/k_s .

Αν εξισωθεί ο τρόπος προσδιορισμού τριβών πυθμένα με τη μέθοδο Darcy-Weisbach (Εξ. (5.24)) με τον αντίστοιχο της μεθόδου Manning:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \frac{gn^2}{h^{1/3}} V^2 \quad (5.35)$$

προκύπτει:

$$n = \sqrt{\frac{f}{8g}} h^{1/6} \quad (5.36)$$

που σημαίνει ότι εφόσον ο συντελεστής τραχύτητας f εξαρτάται από το βάθος και την ταχύτητα ροής, από τα ίδια μεγέθη εξαρτάται και ο συντελεστής τραχύτητας n . Στη συντριπτική πλειονότητα όμως των

εφαρμογών από την επιστημονική κοινότητα ο συντελεστής τραχύτητας Manning λαμβάνεται σταθερός, παρά το γεγονός ότι αυτό δεν είναι ακριβές. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη πληθώρας υποδείξεων στη σχετική βιβλιογραφία για τις τιμές του n αναλόγως την τραχύτητα του πεδίου ροής, γεγονός που έχει οδηγήσει σχεδόν σε μονοπώληση του προσδιορισμού τριβών πυθμένα από την εξίσωση Manning.

Ο όρος των τριβών πυθμένα υπεισέρχεται ως όρος εκροών (sink term) αντιπαραθετικά με τον όρο των δυνάμεων βαρύτητας που είναι όρος εισροών (source term) και είναι ανάλογος της κλίσης του πυθμένα, στις Εξισώσεις Ορμής των 2D-SWE. Για να γίνει αντιληπτό το πώς επηρεάζει ο κάθε όρος τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ακολουθεί το παρακάτω αριθμητικό παράδειγμα. Θεωρείται "τυπική" κατάσταση ροής με βάθος ροής 1 m, ταχύτητα ροής 1 m/s και κινηματική συνεκτικότητα $\nu_s = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Για διάφορα υλικά πυθμένα, υπολογίζονται οι τριβές πυθμένα με βάση τις Εξ. (5.24) και (5.32) έως (5.34) και στη συνέχεια υπολογίζεται ο λόγος των τριβών πυθμένα προς τις δυνάμεις λόγω βαρύτητας, $\lambda = (\tau_b/\rho)/ghS_o$. Στο Σχήμα 5.24 παρατίθεται ο λόγος λ σε σχέση με την κλίση πυθμένα.

Παρατηρείται ότι για αυτή την "τυπική" κατάσταση, για κλίσεις πυθμένα μικρότερες από 0.1% και για σχετικά "λεία" υλικά όπως είναι η ασφαλτος και το σκυρόδεμα, οι τριβές πυθμένα κυμαίνονται από το 25% των δυνάμεων βαρύτητας ενώ όσο οι κλίσεις γίνονται ηπιότερες μπορεί να φτάσουν να είναι έως και 2-2.5 φορές μεγαλύτερες. Για τα πιο "τραχέα" υλικά όπως είναι οι κροκάλες, ο εν λόγω λόγος ξεκινάει από 10% και φτάνει έως και 1000% για ηπιότερες κλίσεις πυθμένα. Ως συμπέρασμα μπορεί να θεωρηθεί ότι για τις πιο ήπιες κλίσεις (όπως είναι συνήθως τα πλημμυρικά πεδία), οι τριβές πυθμένα μπορεί να γίνουν πολύ σημαντικότερη παράμετρος στα αποτελέσματα της εκάστοτε προσομοίωσης από τις δυνάμεις βαρύτητας, άρα και κατ' επέκταση της τοπογραφίας (κλίσεις πυθμένα) του πλημμυρικού πεδίου.

Επομένως, όταν προσομοιώνεται η πλημμυρική ροή σε πεδίο στο οποίο το ύψος τραχύτητας είναι γνωστό και μοναδικό, είναι δυνατόν να εφαρμοστεί η παραπάνω προτεινόμενη μεθοδολογία. Στην πραγματικότητα όμως, ακόμα και το ομογενές πεδίο διακρίνεται από ένα εύρος τιμών τραχύτητας σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία. Από την άλλη, στο ετερογενές πεδίο όπως είναι η πλειονότητα των φυσικών αγωγών, η κατάσταση είναι ακόμα πιο περίπλοκη, εφόσον υπάρχει μία κοκκομετρική σύσταση του εδάφους μοναδική για κάθε περίπτωση. Ως τρόπος προσέγγισης έχει προταθεί η εύρεση ενός ισοδύναμου ύψους τραχύτητας που αντιστοιχεί σε κάθε περίπτωση (Bathurst 1985). Με βάση αυτήν την προσέγγιση, διάφορες σχέσεις έχουν προταθεί στη σχετική βιβλιογραφία, οι οποίες είναι της μορφής:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = A_1 \log\left(\frac{h}{d_i}\right) + A_2 \quad (5.37)$$

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = B_1 \left[\left(\frac{h}{h - B_2 d_i}\right) \ln\left(\frac{h}{B_2 d_i}\right) - 1 \right] \quad (5.38)$$

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = C_1 \left\{ 1 + \frac{C_2 d_i}{h} \ln \left[\frac{\cosh\left(\frac{1}{C_2} \frac{h}{C_2 d_i}\right)}{\cosh\left(\frac{1}{C_2}\right)} \right] \right\} \quad (5.39)$$

όπου d_i είναι το χαρακτηριστική διάμετρος του υλικού (ισοδύναμο ύψος τραχύτητας), i το ποσοστό της κοκκομετρικής καμπύλης όπου συγκρατείται η παραπάνω διάμετρος και $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$, παράμετροι που εξαρτώνται από την εκάστοτε προσέγγιση. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο Πίνακας 5.9 (López Alonso et al. 2009) όπου παρατίθενται διάφορες τιμές των παραπάνω παραμέτρων αναλόγως την ερευνητική ομάδα. Το πρόβλημα πλέον έγκειται στον προσδιορισμό της κοκκομετρικής σύστασης του εδάφους της εκάστοτε περιοχής, πληροφορία που πρακτικά δεν υπάρχει για την προσομοίωση μίας πραγματικής κατάστασης.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής προτείνεται νέο μοντέλο εκτίμησης τριβών πυθμένα τριών παραμέτρων, οι οποίες θα πρέπει να βαθμονομούνται κατά περίπτωση. Συγκεκριμένα, θεωρώντας ότι υπάρχει λογαριθμική γραμμική σχέση μεταξύ των τριβών πυθμένα και του γινομένου του βάθους και της ταχύτητας ροής υψωμένα σε δύναμη προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\log\left(\frac{\tau_b}{\rho}\right) = a \log(h^c V^d) + b = \log(10^b R^{ac} V^{ad}) \Rightarrow \frac{\tau_b}{\rho} = 10^b h^{ac} V^{ad} \quad (5.40)$$

όπου a, b, c, d παράμετροι.

Η παραπάνω Εξ. (5.40) μπορεί να μετασχηματιστεί στην τελική της μορφή:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = \frac{V^A}{Bh^C} \quad (5.41)$$

όπου A, B, C οι παράμετροι του προτεινόμενου μοντέλου.

Σημειώνεται ότι διατηρείται μία στοιχειώδης συνέπεια σε σχέση με το φυσικό πρόβλημα, εφόσον οι τριβές πυθμένα είναι ανάλογες της ταχύτητας και αντιστρόφως ανάλογες του βάθους ροής.

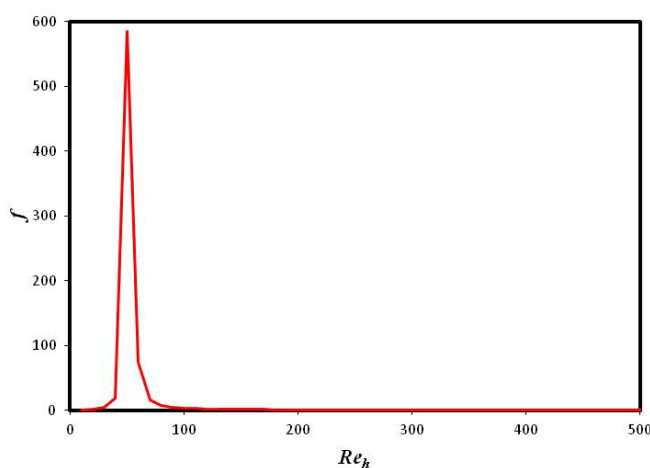
Στα ετερογενή πεδία οι παραπάνω παράμετροι θα πρέπει να βαθμονομούνται. Για τα ομογενή πεδία, προτείνονται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής ενδεικτικές τιμές των A, B, C , για διάφορα υλικά. Το πρώτο βήμα της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε ήταν να προσδιοριστεί το εύρος της τραχύτητας σε μία σειρά υλικών που είναι συνήθη σε πλημμυρικά πεδία, καθώς και ένα "ρεαλιστικό" εύρος τιμών του βάθους και της ταχύτητας ροής. Για το μεν βάθος το συγκεκριμένο εύρος θεωρήθηκε ότι εκτείνεται από 0.02 m έως 20 m, ενώ αντίστοιχα για την ταχύτητα ροής από 0.02 m/s έως 10 m/s.

Στη συνέχεια παράχθηκαν 100000 τυχαίοι συνδυασμοί των τριών αυτών μεγεθών και υπολογίστηκαν οι τριβές πυθμένα με βάση τις αναλυτικές σχέσεις των Εξ. (5.24) και (5.32) έως (5.34). Σημειώνεται ότι όσον αφορά στην κινηματική συνεκτικότητα αυτή θεωρήθηκε σταθερή με τιμή $\nu_s = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, εφόσον έχει μικρή επίδραση στις τριβές πυθμένα. Με βάση αυτές τις υπολογισμένες τιμές, εκτιμήθηκαν οι παράμετροι A, B, C της Εξ. (5.41) χρησιμοποιώντας ως μέγεθος βελτιστοποίησης το δείκτη Nash. Στον Πίνακα 5.10 παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων για κάθε υλικό, καθώς και ο δείκτης Nash που προέκυψε σε κάθε παραμετροποίηση. Στο Σχήμα 5.25 απεικονίζεται η συσχέτιση του προτεινόμενου μοντέλου με τις αναλυτικές λύσεις.

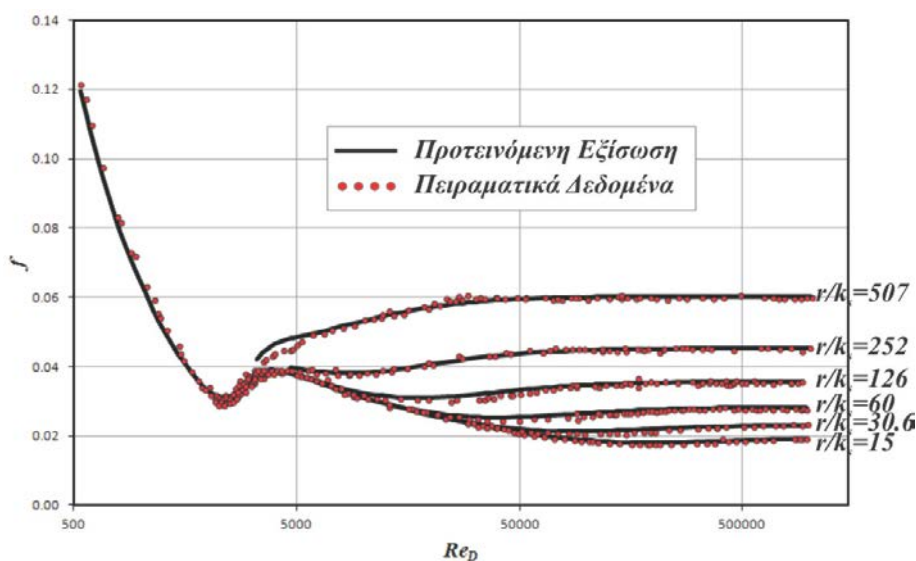
Με βάση το δείκτη Nash, αλλά και την ποιοτική παρατήρηση των διαγραμμάτων συσχέτισης, προκύπτει αδυναμία εφαρμογής του προτεινόμενου μοντέλου, όταν το υλικό του πεδίου είναι λάσπη και όταν είναι κροκάλες. Για το μεν πρώτο υλικό η αδυναμία αυτή αποδίδεται στις πολύ χαμηλές τιμές

του ύψους τραχύτητας. Από την άλλη, η ύπαρξη ενός πηλημυρικού πεδίου που αποτελείται αποκλειστικά από λάσπη είναι μη πιθανό, καθώς ανάλογες περιοχές (π.χ. βαλτώδεις εκτάσεις) χαρακτηρίζονται από έντονη βλάστηση, τα στοιχεία της οποίας επιδρούν πολύ περισσότερο στην τριβή πυθμένα. Όσον αφορά στην αδυναμία εφαρμογής του μοντέλου σε πεδία που αποτελούνται από κροκάλες, αυτή αποδίδεται στο πολύ μεγάλο εύρος των τιμών τραχύτητας που ορίζουν το μέγεθος της κροκάλας. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, απαιτείται η δημιουργία περαιτέρω ζωνών σε αυτήν την περιοχή τραχύτητας, αλλά με μικρότερο εύρος τιμών.

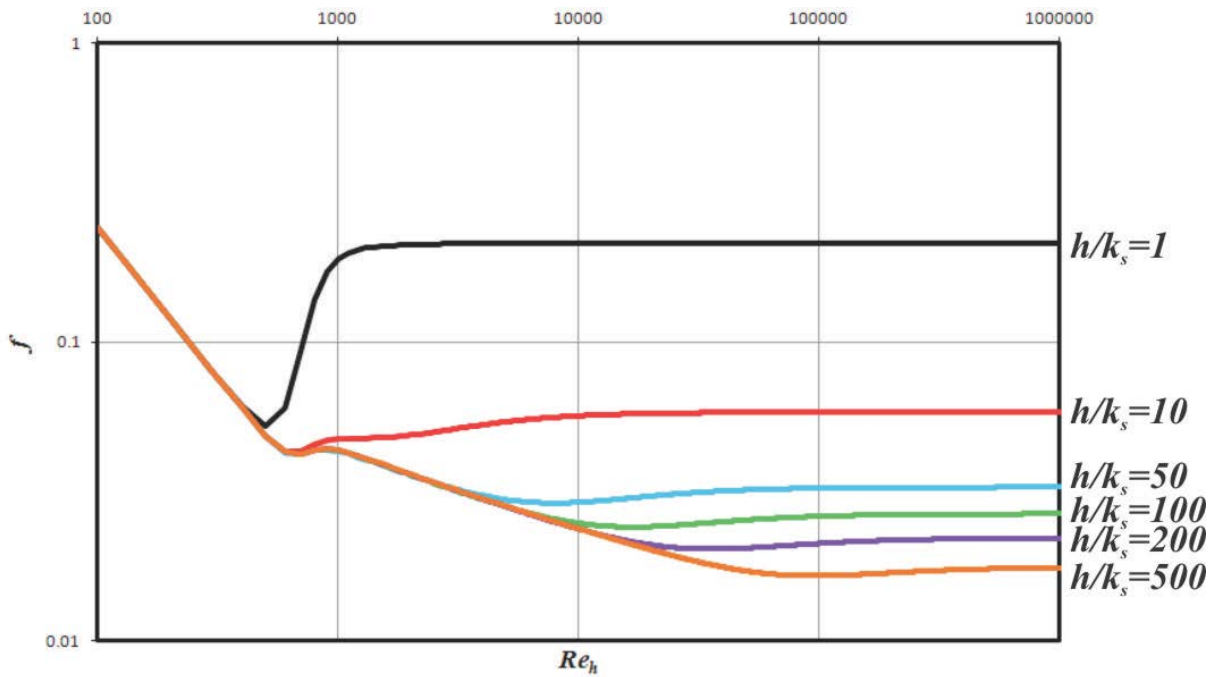
Όπως προαναφέρθηκε, οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές και ισχύουν κάτω από προϋποθέσεις. Συνίσταται η παραμετροποίηση αυτή να λαμβάνει χώρα πριν από κάθε προσομοίωση, ακόμα και σε πεδία με ομογενή υλικά, εφόσον κάθε σενάριο εφαρμογής είναι μοναδικό. Εξειδικεύοντας κατά περίπτωση, είναι δυνατόν να υπάρχει ορθότερη εκτίμηση του εύρους των τιμών για το κάθε μέγεθος.



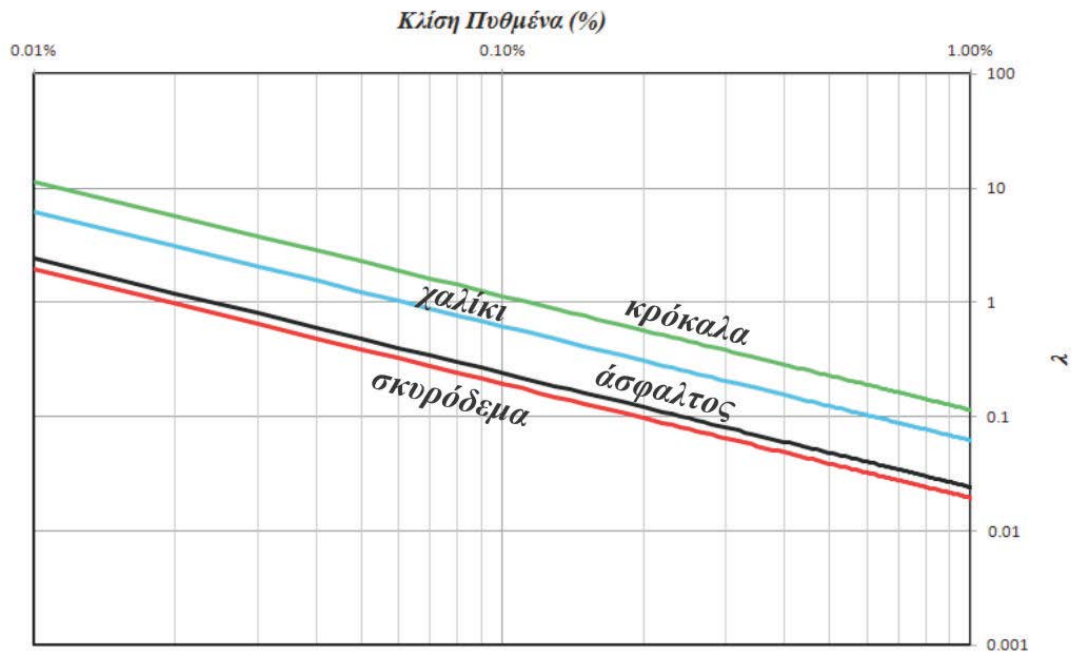
Σχήμα 5.21 Συντελεστής τραχύτητας f σε σχέση με τον αριθμό Reynolds Re_h με βάση τη σχέση Swamee and Jain



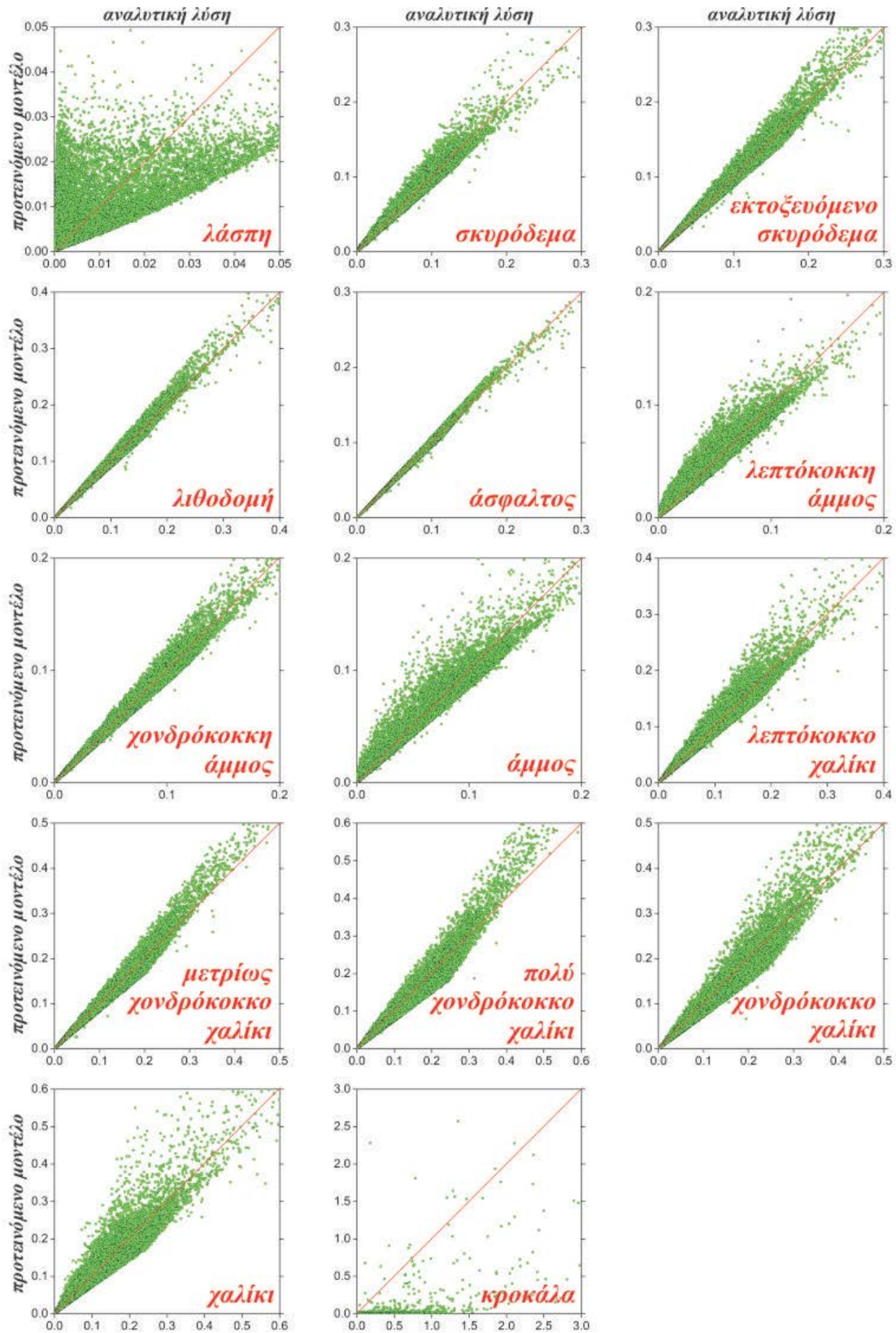
Σχήμα 5.22 Συσχέτιση των πειραματικών δεδομένων Nikuradse με τα αποτελέσματα της προτεινόμενης εξίσωσης



Σχήμα 5.23 Αποτελέσματα προτεινόμενης εξίσωσης προσδιορισμού συντελεστής τραχύτητας f σε ροή με ελεύθερη επιφάνεια



Σχήμα 5.24 Σχέση λόγου τριβών πυθμένα προς τις δυνάμεις βαρύτητας σε σχέση με την κλίση πυθμένα για βάθος ροής 1 m, ταχύτητα ροής 1 m/s και για διάφορα υλικά πυθμένα



Σχήμα 5.25 Συσχέτιση τιμών τριβής πυθμένα που προκύπτουν με αναλυτική λύση και με το προτεινόμενο μοντέλο για διάφορα υλικά

Πίνακας 5.9 Παράμετροι για διάφορες προσεγγίσεις τριβών πυθμένα σε ετερογενές πεδίο

Εξ.	Αναφορά	d_i	Παράμετροι	Παρατηρήσεις
(5.37)	Griffiths (1981)	d_{50}	A1=5.60, A2=2.15	gravel-bed rivers
(5.37)	Ugarte and Méndez (1994)	d_{50}	A1=4.63, A2=2.50	coarse material-bed rivers
(5.37)	Bathurst (1985)	d_{84}	A1=5.62, A2=4.00	coarse material-bed rivers
(5.37)	Knighton (1998)	d_{84}	A1=5.34, A2=3.41	gravel-bed rivers
(5.37)	Ferguson (2007)	d_{84}	A1=5.76, A2=2.53	gravel and boulder bed rivers
(5.37)	Bray (1979)	d_{90}	A1=6.11, A2=3.56	gravel-bed rivers
(5.37)	Maynord (1991)	d_{90}	A1=3.92, A2=6.86	riprap flumes
(5.38)	Smart et al. (2002)	d_{84}	B1=2.50, B2=0.10	flume data with fixed bed
(5.38)	López et al. (2006)	d_{90}	B1=3.43, B2=0.12	riprap channels
(5.39)	Katul et al. (2002)	d_{84}	C1=4.50, C2=1.00	flumes and gravel-bed rivers
(5.39)	López et al. (2006)	d_{90}	C1=6.47, C2=1.22	riprap channels

Πίνακας 5.10 Παράμετροι A, B, C προτεινόμενου μοντέλου τραχύτητας

Υλικό	Εύρος Τραχύτητας (mm)	Αναφορά	Παράμετροι			NSE
			A	B	C	
Λάσπη	0.0039-0.0625	Krumbein and Aberdeen (1937)	3.355	58328.9	0.169	0.54
Σκυρόδεμα	0.3-3	Chanson (2004)	2.001	475.9	0.220	0.97
Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα	3-10	Chanson (2004)	1.995	318.8	0.264	0.98
Λιθοδομή	5-10	Chanson (2004)	1.994	304.3	0.269	0.99
Άσφαλτος	1-1.5	ΕΛΟΤ (2009)	2.007	496.6	0.211	1.00
Λεπτόκοκκη Άμμος	0.0625-0.5	Krumbein and Aberdeen (1937)	2.155	1004.9	0.184	0.95
Χονδρόκοκκη Άμμος	0.5-2	Krumbein and Aberdeen (1937)	2.016	507.4	0.214	0.99
Άμμος	0.0625-2	Krumbein and Aberdeen (1937)	2.041	579.7	0.206	0.95
Λεπτόκοκκο Χαλίκι	2-16	Krumbein and Aberdeen (1937)	2.000	292.7	0.286	0.95
Μετρίως Χονδρόκοκκο Χαλίκι	16-32	Krumbein and Aberdeen (1937)	2.007	209.5	0.347	0.97
Πολύ Χονδρόκοκκο Χαλίκι	32-64	Krumbein and Aberdeen (1937)	1.997	152.4	0.431	0.93
Χονδρόκοκκο Χαλίκι	16-64	Krumbein and Aberdeen (1937)	2.057	187.9	0.410	0.91
Χαλίκι	2-64	Krumbein and Aberdeen (1937)	1.980	180.2	0.377	0.86
Κροκάλα	64-256	Krumbein and Aberdeen (1937)	1.834	17580.2	2.655	0.50

6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κύριες κατευθύνσεις της αντιμετώπισης του πλημμυρικού κινδύνου (hazard) με βάση τη σχετική βιβλιογραφία από κρατικές υπηρεσίες και οργανισμούς, καθώς και με σχετική εφαρμογή. Σημειώνεται ότι γίνεται διάκριση μεταξύ του κινδύνου (hazard) και της διακινδύνευσης (risk).

Πολλοί ερευνητές για την εκτίμηση του μεγέθους του πλημμυρικού κινδύνου χρησιμοποιούν εμπειρικούς δείκτες δυνητικών απωλειών στους ανθρώπους, στα οχήματα και στα κτίρια, χωρίς όμως να αναφέρονται στην τρωτότητα του συστήματος που επηρεάζεται από τα πλημμυρικά γεγονότα. Στη συνέχεια η πληγείσα περιοχή ταξινομείται σε διάφορες ζώνες επικινδυνότητας αναλόγως των τιμών των εμπειρικών αυτών δεικτών. Στη δε διακινδύνευση, εκτιμώνται οι οικονομικές απώλειες για ένα πλημμυρικό γεγονός και καταρτίζεται σχέδιο διαχείρισης της διακινδύνευσης αυτής. Για την εκτίμηση των οικονομικών απωλειών, λαμβάνονται επίσης στοιχεία και από τις εκτιμήσεις του πλημμυρικού κινδύνου.

Ακολουθεί σχετική εφαρμογή για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου στο πλημμυρικό γεγονός που συνέβη 20 Οκτωβρίου του 1982, έπειτα από τη θραύση του φράγματος του Tous (Βαλένθια, Ισπανία). Σημειώνεται ότι το φράγμα επανακατασκευάστηκε, ενώ εντός του πλημμυρικού πεδίου βρίσκεται κατοικημένη ζώνη (η μικρή πόλη Sumacárcel) επομένως η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου είναι καίριας σημασίας. Παράλληλα γίνεται ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων που επηρεάζουν τις τιμές των δεικτών και επομένως δημιουργούν αβεβαιότητες όσον αφορά στην αντιμετώπιση του πλημμυρικού κινδύνου.

6.2 Δείκτες πλημμυρικού κινδύνου

Οι Asselman and Jonkman (2003) ανέπτυξαν Δείκτη Θνησιμότητας (Flood Mortality) στις βόρειες περιοχές της Ολλανδίας οι οποίες έχουν αποξηραθεί (polders) και οι οποίες είναι πιο ευάλωτες στον πλημμυρικό κίνδυνο λόγω ανόδου της στάθμης της θάλασσας. Για την ανάπτυξη αυτού του δείκτη

χρησιμοποιήθηκαν ιστορικές καταγραφές από τις πλημμύρες του 1953 στις εν λόγω περιοχές. Ο Δείκτης που αναπτύχθηκε είναι της παρακάτω μορφής:

$$D = c_1 e^{c_2 h} \quad (6.1)$$

όπου D το ποσοστό των θυμάτων σε σχέση με τον πληθυσμό της περιοχής, για βάθη ροής h . Οι παράμετροι c_1 και c_2 παίρνουν τιμές 0.000918 και 1.52 αντίστοιχα για τις περιπτώσεις όπου η αύξηση του βάθους ροής έχει ρυθμό μεγαλύτερο από 1 m/hr, ενώ για πιο αργό ρυθμό οι αντίστοιχες τιμές είναι 0.00141 και 0.59.

Εκτιμώντας τον πλημμυρικό κίνδυνο για τα κτίρια, προτάθηκε ότι τα κρίσιμα μεγέθη όσον αφορά στη καταστροφή των δομικών στοιχείων ενός κτιρίου από πλημμύρα είναι $V \cdot h \geq 7 \text{ m}^2/\text{s}$ και $V \geq 2 \text{ m/s}$, όπου V η ταχύτητα ροής.

Ο Betâmio de Aleida (2001) ανέπτυξε Δείκτη Πλημμύρας (ή "Επιθετικότητα") για πλημμυρικά γεγονότα λόγω θραύσης φράγματος με βάση διάφορα φυσικά μεγέθη. Ο δείκτης είναι της παρακάτω μορφής:

$$I = \frac{K_1 h_{max} V_{max}^\alpha + K_2 V_{max} + K_3 \frac{dh}{dt}}{K_4 t_p^\beta} \quad (6.2)$$

όπου h_{max} το μέγιστο βάθος ροής, V_{max} η μέγιστη ταχύτητα ροής, t_p ο χρόνος που χρειάζεται να προσεγγίσει το πλημμυρικό κύμα την περιοχή μελέτης έπειτα από την αστοχία του φράγματος και $K_1, K_2, K_3, K_4, \alpha, \beta$ παράμετροι που πρέπει να βαθμονομηθούν.

Οι Abt et al. (1989) προσπάθησαν να εκτιμήσουν το κριτήριο το οποίο πρέπει να ικανοποιείται ούτως ώστε να παρασυρθεί άνθρωπος από πλημμυρική ροή. Η σχέση στην οποία κατέληξαν είναι της μορφής:

$$(Vh)_c = 0.0929 \left[e^{0.022(2.2W_h + H_h/25.4) + 1.09} \right]^2 \quad (6.3)$$

όπου $(Vh)_c$ το κρίσιμο μέγεθος του γινομένου του βάθους επί την ταχύτητα ροής, W_h το βάρος και H_h το ύψος του εκάστοτε ανθρώπου.

Ανάλογα κριτήρια διαμόρφωσαν και οι Xia et al. (2014). Χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα διέκριναν δύο μηχανισμούς παράσυρσης ενός ανθρώπου από πλημμυρική ροή: την ολίσθηση και την ανατροπή. Για τη μεν ολίσθηση ανέπτυξαν την παρακάτω σχέση:

$$V_c = a \left(\frac{h}{H_h} \right)^\beta \sqrt{\frac{W_h}{\rho H_h h} - \left(a_1 \frac{h}{H_h} + b_1 \right) \frac{(a_2 W_h + b_2)}{H_h^2}} \quad (6.4)$$

ενώ για την ανατροπή:

$$V_c = a \left(\frac{h}{h_p} \right)^\beta \sqrt{\frac{W_h}{\rho h^2} - \left(\frac{a_1}{H_h^2} + \frac{b_1}{H_h h} \right) (a_2 W_h + b_2)} \quad (6.5)$$

όπου ρ η πυκνότητα του νερού, a και β εμπειρικές παράμετροι και a_1, b_1, a_2, b_2 εμπειρικές παράμετροι που έχουν σχέση με τον εκάστοτε σωματότυπο.

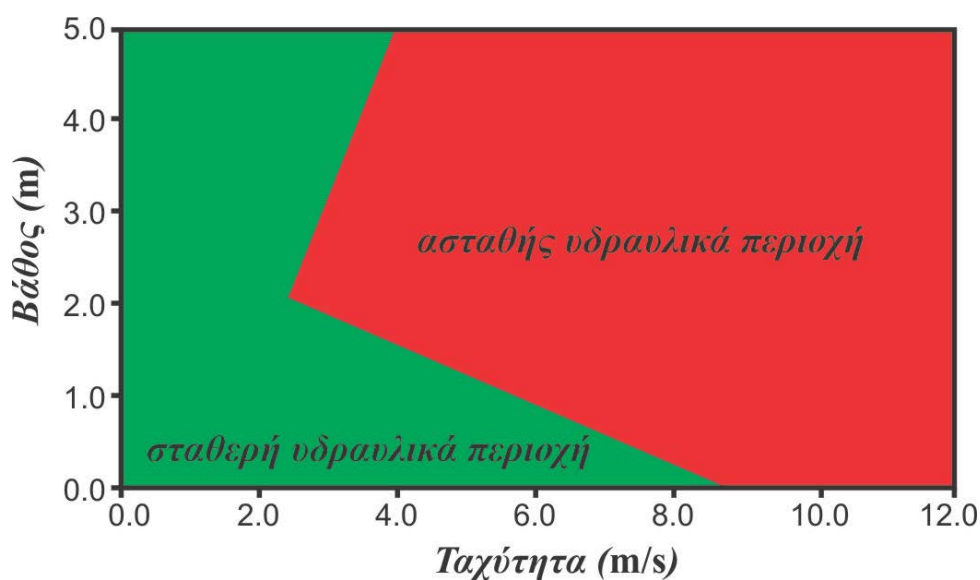
Οι Teo et al. (2012) με βάση πειραματικά δεδομένα πάνω σε ομοιώματα διαφορετικών τύπων αυτοκινήτων (Mitsubishi Pajero, BMW M5, Mini Cooper και Ford Escort) διαμόρφωσαν διάγραμμα υδραυλικής περιοχής σε σχέση με το βάθος και την ταχύτητα ροής (Σχήμα 6.1), το οποίο διακρίνεται σε δύο ζώνες, στην ασταθή και στη σταθερή περιοχή. Ο χαρακτηρισμός αυτός αφορά στα όρια ευστάθειας ενός οχήματος εντός του πλημμυρικού πεδίου.

Οι Ramsbottom et al. (2006) ανέπτυξαν το Δείκτη Κινδύνου (Hazard Rating), ο οποίος είναι της μορφής:

$$HR = h(V + 0.5) + DF \quad (6.6)$$

όπου DF παράγοντας "συντριμμίων" (debris factor) ο οποίος κυμαίνεται από 0 έως 1.

Στη συνέχεια ταξινομήσαν τις τιμές του εν λόγω δείκτη σε διάφορες ζώνες κινδύνου, όπως αυτές φαίνονται στον Πίνακα 6.1.



Σχήμα 6.1 Διάγραμμα υδραυλικής περιοχής όσον αφορά την ευστάθεια των οχημάτων σε πλημμυρικό πεδίο

Πίνακας 6.1 Ζώνες επικινδυνότητας με βάση το Δείκτη Κινδύνου

Δείκτης Κινδύνου (HR)	Περιγραφή Ζώνης	Χαρακτηρισμός Κινδύνου
0	ασφαλής (ξηρός πυθμένας)	Κανένας
0-0.75	συνίσταται προσοχή	Χαμηλός
0.75-1.5	κίνδυνος για τις πιο ευπαθείς πληθυσμιακές ομάδες	Μεσαίος
1.5-2.5	κίνδυνος για τις περισσότερες πληθυσμιακές ομάδες	Μεγάλος
≥2.5	κίνδυνος για όλο τον πληθυσμό	Ακραίος

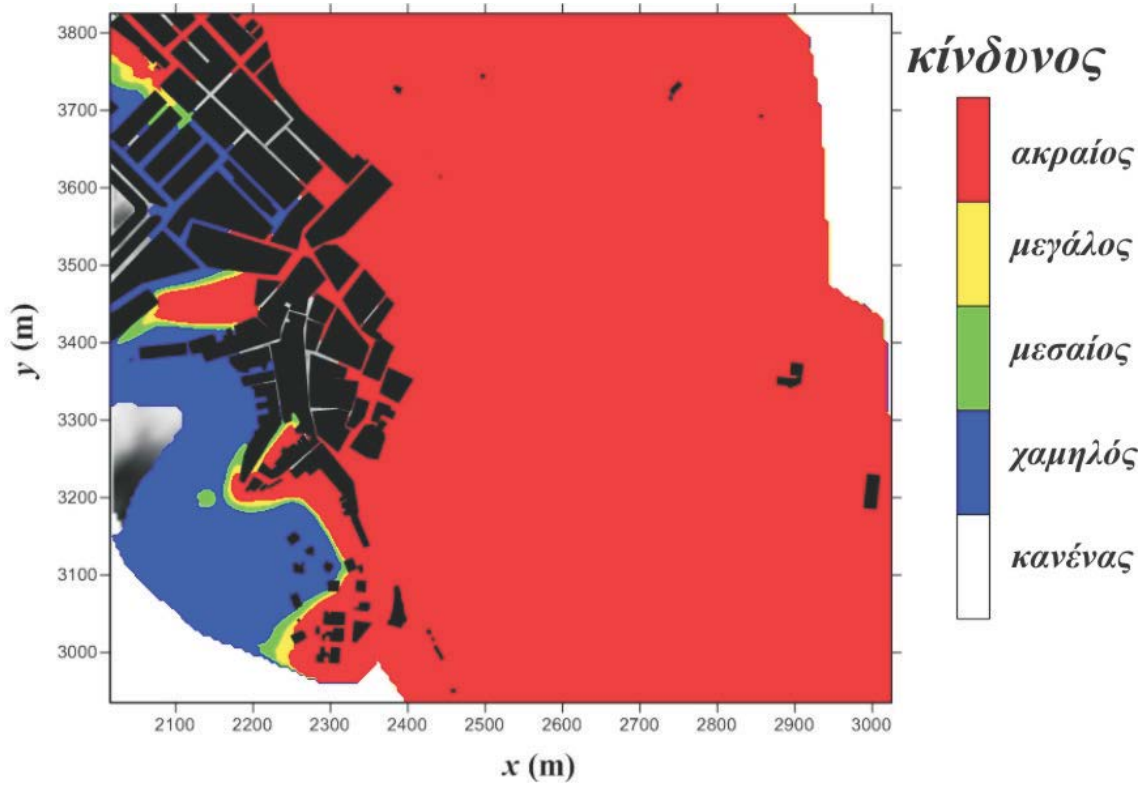
6.3 Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου

Στην παρούσα ενότητα γίνεται η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου με βάση το Δείκτη Κινδύνου, για το πλημμυρικό γεγονός που προέκυψε έπειτα από τη θραύση του φράγματος του Tous (Βαλένθια, Ισπανία) (Alcrudo and Mulet 2007) και το οποίο προσομοιώθηκε με το μοντέλο FLOW-R2D (Bellos and Tsakiris 2015c) κατά τη διαδικασία των προτύπων ελέγχων (benchmarking tests). Ο εν λόγω δείκτης έχει εφαρμοστεί και σε άλλες περιπτώσεις (Knočka et al. 2015)

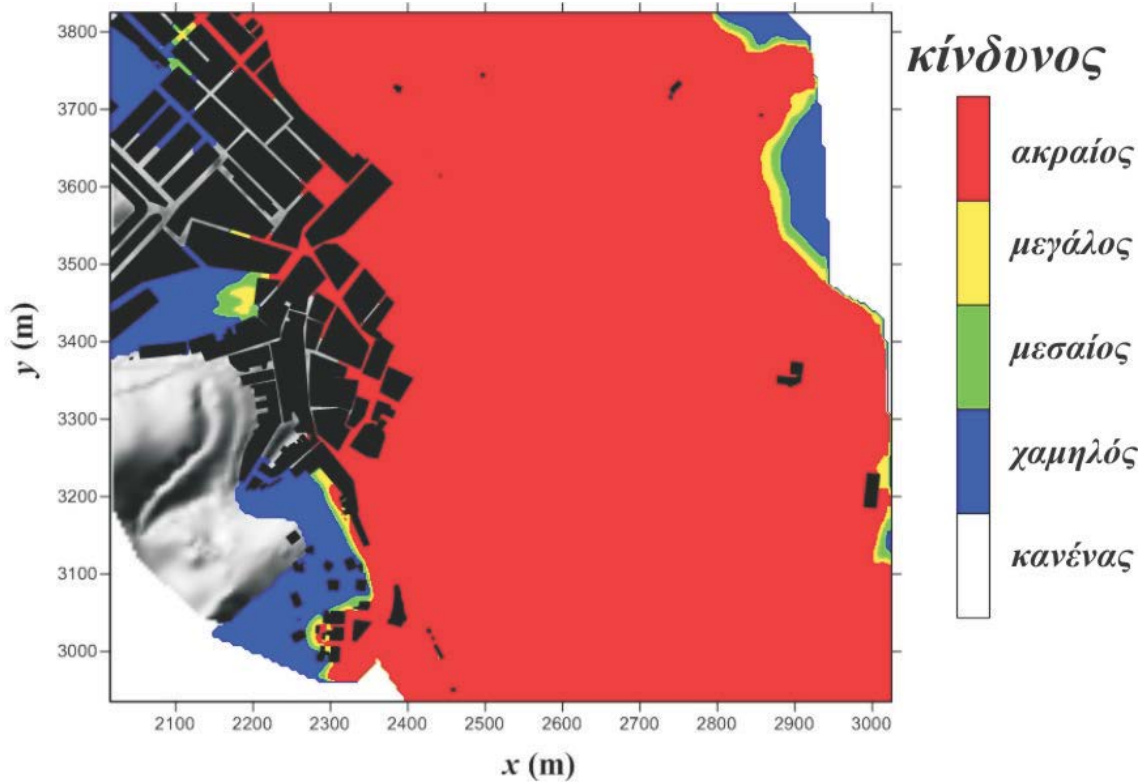
Αν και το πλημμυρικό γεγονός συνέβη το 1982, το φράγμα επανακατασκευάστηκε, επομένως υπάρχει και σήμερα η αναγκαιότητα κατάρτισης χαρτών πλημμυρικού κινδύνου, καθώς και του Δείκτη Κινδύνου, με σκοπό τη διαχείριση ενός τέτοιου ακραίου γεγονότος. Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο Κεφάλαιο, εκτελέστηκαν 45 διαφορετικά σενάρια για το 1998 DTM, διερευνώντας την αβεβαιότητα που εισάγεται στην αριθμητική επίλυση εξαιτίας των τριβών πυθμένα καθώς και της ενεργής κλίσης της ανάντη οριακής διατομής. Για όλα αυτά τα σενάρια, με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν για τα βάθη και τις ταχύτητες ροής, υπολογίστηκε ο Δείκτης Κινδύνου. Ο παράγοντας DF θεωρήθηκε αμελητέος.

Στα Σχήματα 6.2 έως 6.6 παρατίθενται ενδεικτικά χάρτες των Δεικτών Κινδύνου στην περιοχή εφαρμογής για διάφορα σενάρια. Υπενθυμίζεται ότι βέλτιστο σενάριο σε σχέση με τα ιστορικά δεδομένα που έχουν καταγραφεί είναι το 3.5.12.

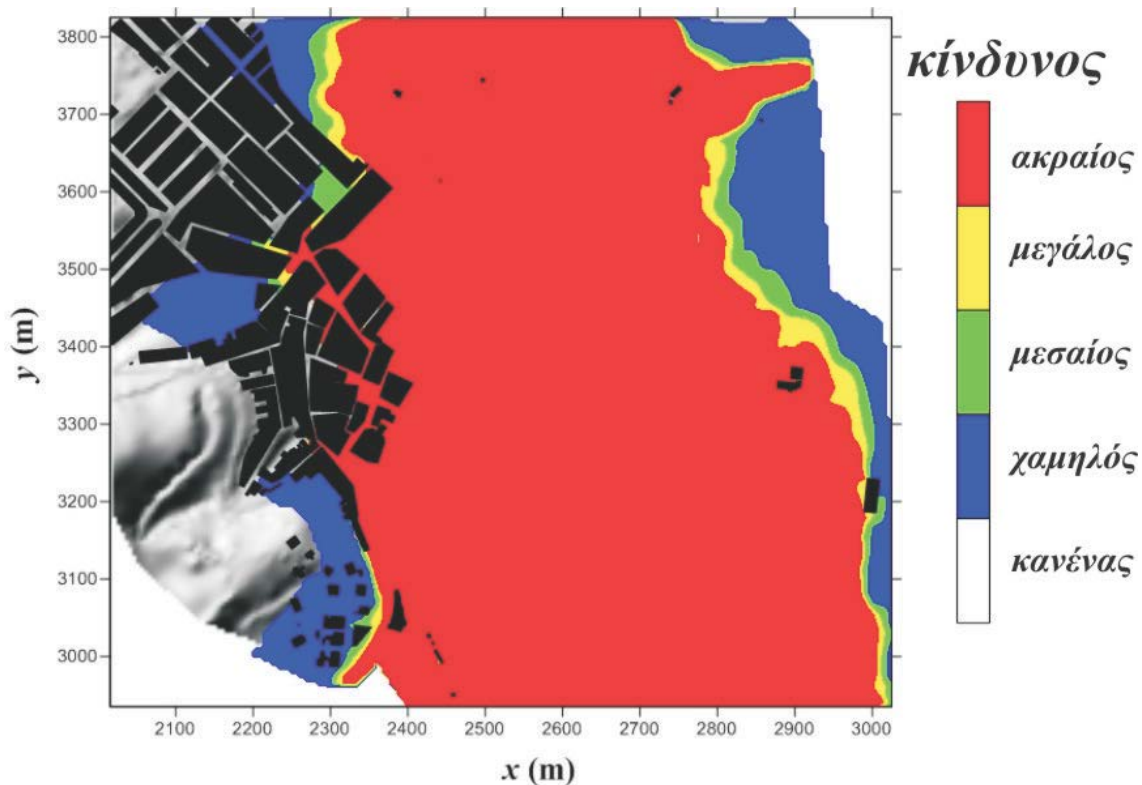
Από την ανάλυση ευαισθησίας φαίνεται ότι οι παράμετροι που εξετάστηκαν επηρεάζουν το Δείκτη Κινδύνου. Στα Σχήματα 6.7 και 6.8 απεικονίζεται το εμβαδόν της κάθε ζώνης κινδύνου και για κάθε σενάριο, όπου φαίνεται ότι υπάρχουν αποκλίσεις κυρίως λόγω της παραμέτρου της ενεργής κλίσης της ανάντη οριακής διατομής, οι οποίες όμως μειώνονται έπειτα από μία τιμή αυτής. Μία επιπρόσθετη ένδειξη της επιρροής της ενεργής κλίσης στην εκτίμηση των Δεικτών Κινδύνου παρατίθεται στο Σχήμα 6.9, όπου απεικονίζονται οι τιμές του Δείκτη Κινδύνου για το βέλτιστο σενάριο 3.5.12, όπου φαίνεται η περιοχή του υπολογιστικού πεδίου που βρίσκεται κοντά στο ανάντη όριο επηρεάζεται σημαντικά.



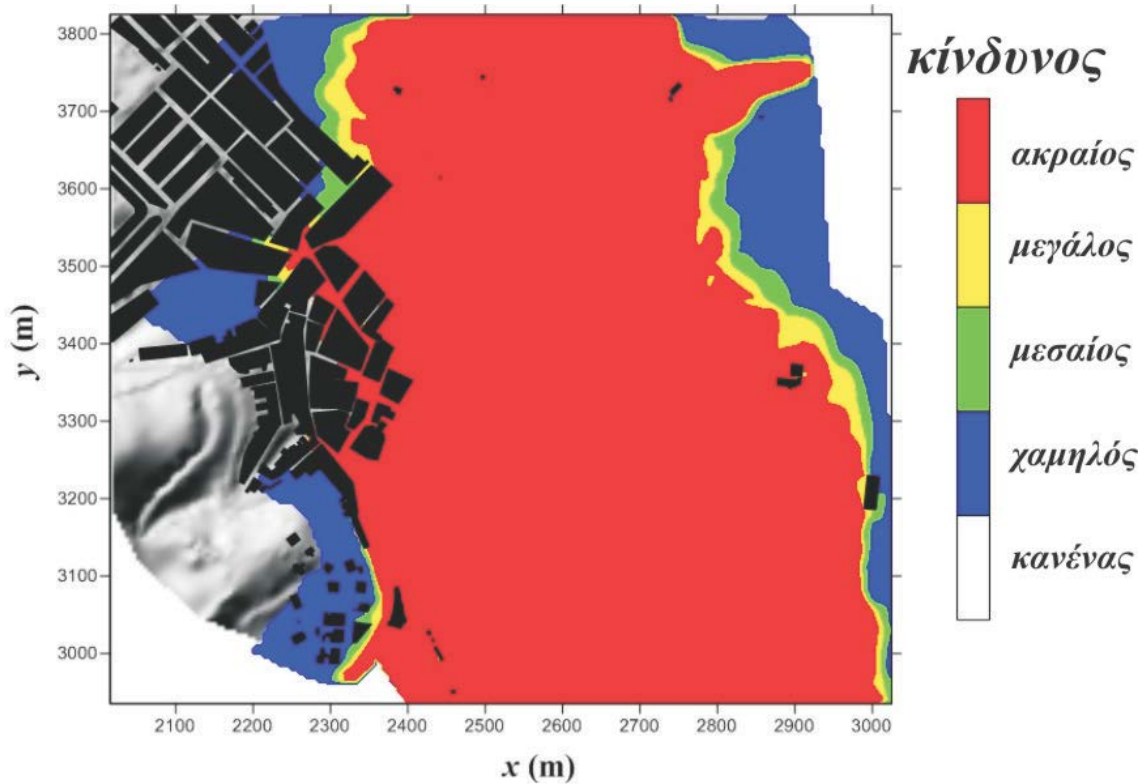
Σχήμα 6.2 Χάρτης κινδύνου με βάση το Δείκτη Κινδύνου για το σενάριο 1.5.12



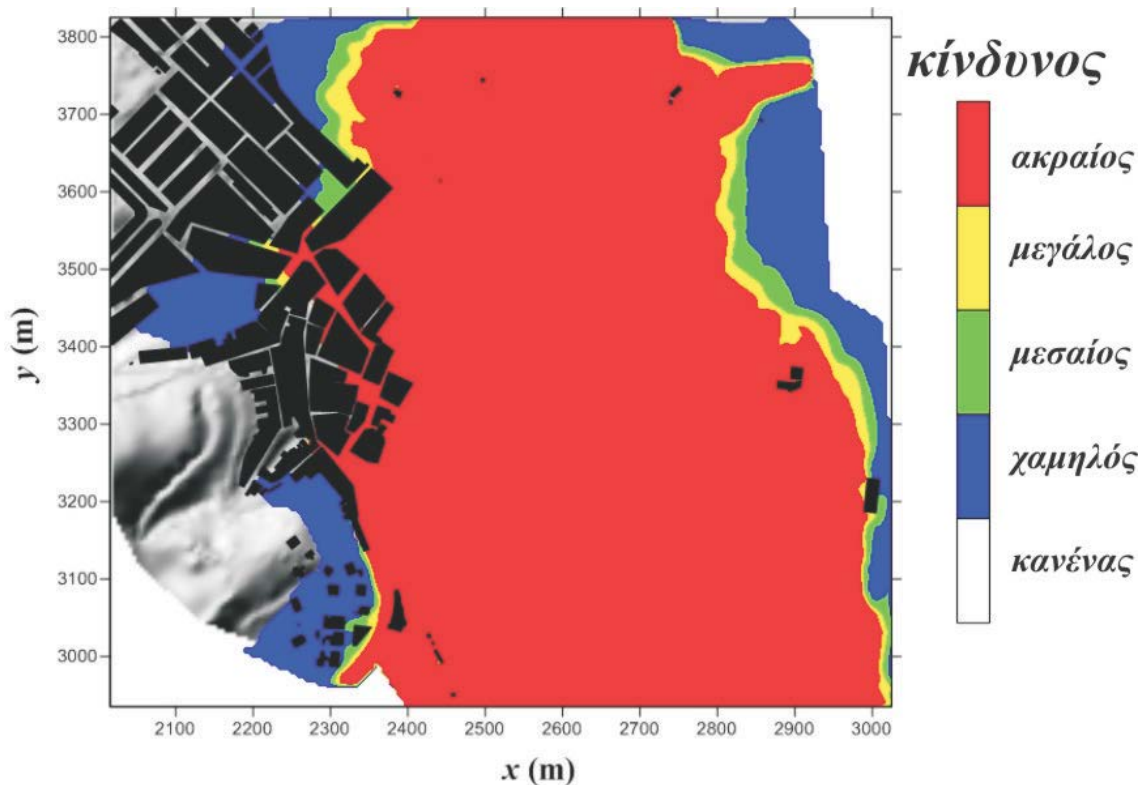
Σχήμα 6.3 Χάρτης κινδύνου με βάση το Δείκτη Κινδύνου για το σενάριο 2.5.12



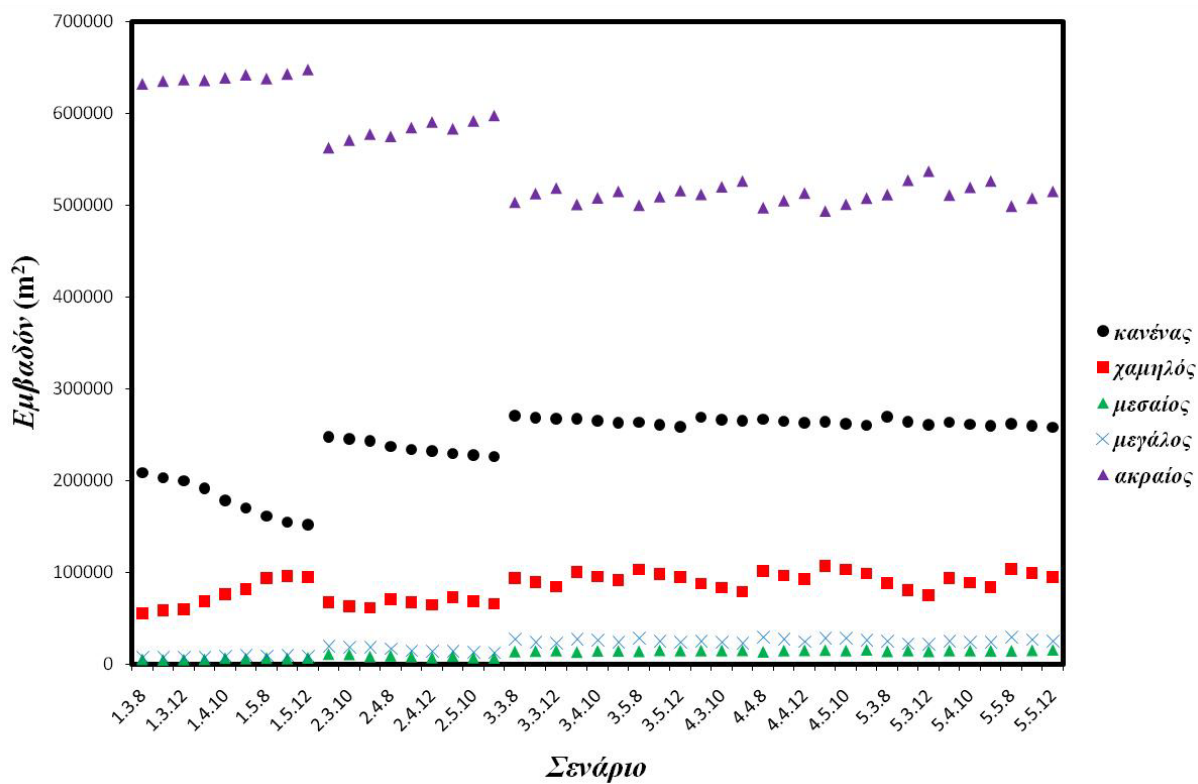
Σχήμα 6.4 Χάρτης κινδύνου με βάση το Δείκτη Κινδύνου για το σενάριο 3.5.12



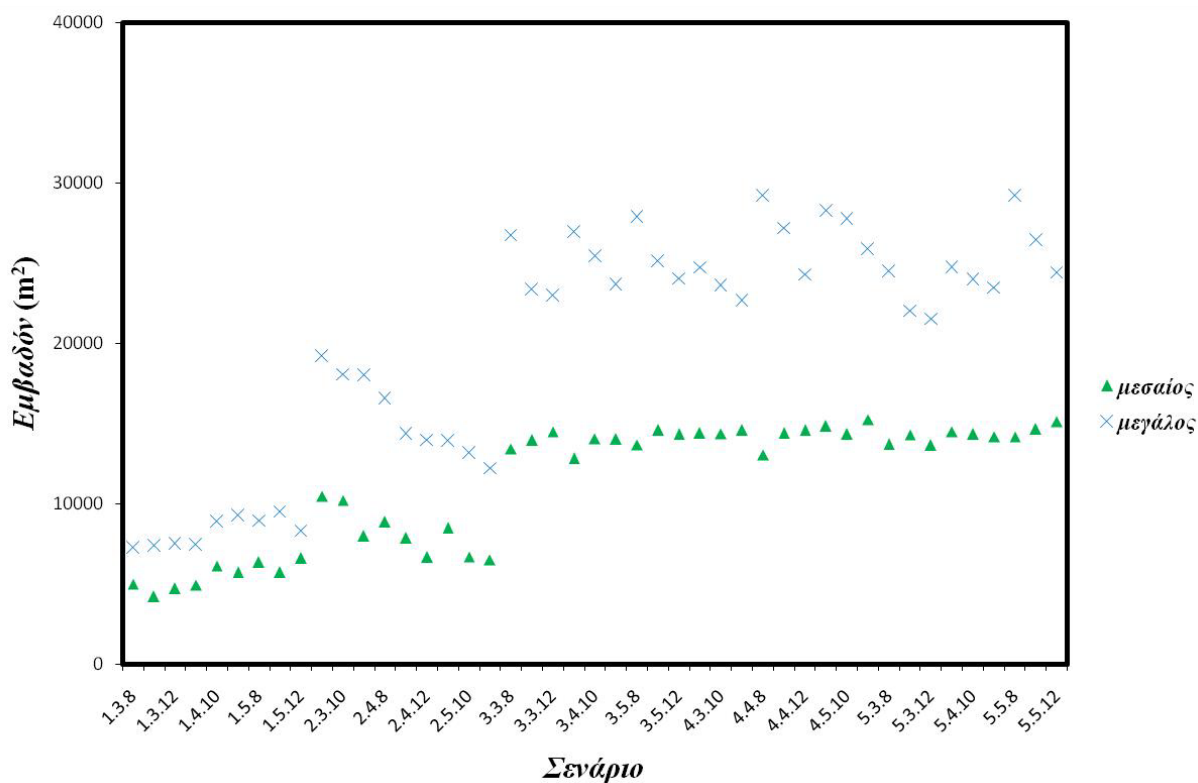
Σχήμα 6.5 Χάρτης κινδύνου με βάση το Δείκτη Κινδύνου για το σενάριο 4.5.12



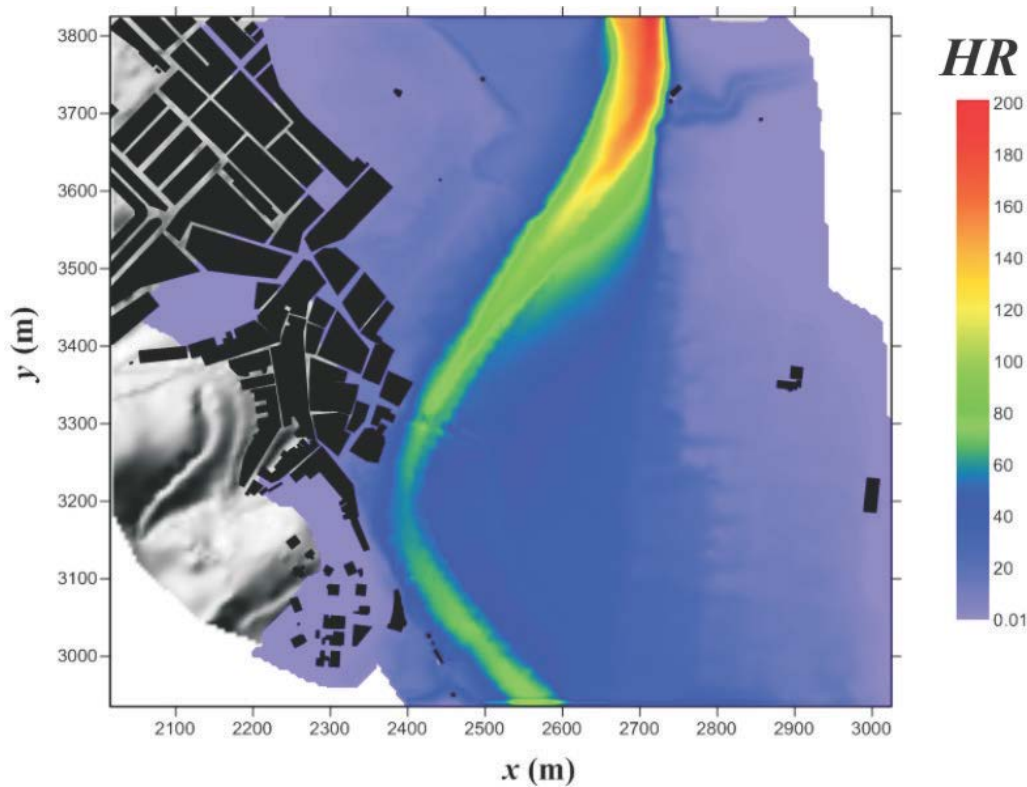
Σχήμα 6.6 Χάρτης κινδύνου με βάση το Δείκτη Κινδύνου για το σενάριο 5.5.12



Σχήμα 6.7 Εμβαδόν ζωνών κινδύνου για τα διάφορα σενάρια προσομοίωσης



Σχήμα 6.8 Εμβαδόν ζωνών κινδύνου για τα διάφορα σενάρια προσομοίωσης (λεπτομέρεια)



Σχήμα 6.9 Χάρτης Δείκτη Κινδύνου (HR) για το σενάριο 3.5.12

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Σύνοψη διδακτορικής διατριβής

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε το αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης πλημμυρικής ροής FLOW-R2D, το οποίο επιλύει τις δισδιάστατες Εξισώσεις Αβαθών Υδάτων (two-dimensional Shallow Water Equations, 2D-SWE) με την αριθμητική μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών και το αριθμητικό σχήμα McCormack. Στόχος της διατριβής ήταν η διαμόρφωση μίας ολοκληρωμένης πρωτότυπης μεθοδολογίας προσομοίωσης της πλημμυρικής ροής σε δύο διαστάσεις για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου, σε πραγματικές συνθήκες. Στην προσπάθεια αυτή αντιμετωπίστηκαν σειρά προβλημάτων και ειδικών θεμάτων, με αποτέλεσμα η μέθοδος που προτείνεται να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία ποικιλία πραγματικών συνθηκών.

Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας στηρίχθηκε από την αρχή στην ενδελεχή ανάλυση της υπάρχουσας τεχνικής βιβλιογραφίας, η οποία αναφέρεται σε όλες τις εξελίξεις: από τις πρώτες πειραματικές προσεγγίσεις του φαινομένου του πλημμυρικού κύματος μέχρι τις σύγχρονες μεθόδους αριθμητικής προσομοίωσης με μονοδιάστατα και δισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα, καθώς και σε πιο ειδικά θέματα που αφορούν στην προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο στηρίχθηκε το αριθμητικό μοντέλο, το οποίο είναι οι δισδιάστατες Εξισώσεις Αβαθών Υδάτων, οι οποίες προέκυψαν από την ολοκλήρωση ως προς το βάθος ροής των εξισώσεων Navier-Stokes. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στον εμπειρικό προσδιορισμό των τριβών πυθμένα. Στο ίδιο πλαίσιο, παρατίθενται σύντομα οι βασικές αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αριθμητική προσομοίωση με έμφαση στη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών και το αριθμητικό σχήμα McCormack, το οποίο χρησιμοποιείται στο μοντέλο FLOW-R2D.

Ακολουθεί η παρουσίαση του μοντέλου που αφορά στη διακριτοποίηση των Εξισώσεων Αβαθών Υδάτων με το αριθμητικό σχήμα McCormack, καθώς και στον τρόπο αντιμετώπισης διάφορων δυσκολιών, όπως είναι η προσομοίωση του ξηρού πυθμένα όπου έγινε εισαγωγή στο μοντέλο ενός καταωφλιού διάκρισης υγρού/ξηρού πυθμένα, καθώς και της απόσβεσης ασταθειών στην αριθμητική επίλυση, που αντιμετωπίστηκε με την εισαγωγή ενός συντελεστή τεχνητής διάχυσης. Παρατέθηκαν ο τρόπος προσδιορισμού των αρχικών και των οριακών συνθηκών, καθώς και των στερεών ορίων, ενώ δόθηκε και έμφαση στον τρόπο προσομοίωσης των τριβών πυθμένα στο πλαίσιο του μοντέλου. Επίσης

παρατέθηκαν και ο τρόπος προσδιορισμού των φαινομένων εισροής ή εκροής από το υπολογιστικό πεδίο, όπως είναι η βροχόπτωση ή η διήθηση.

Το επόμενο βήμα είναι η διερεύνηση της εγκυρότητας του μοντέλου με διάφορους πρότυπους ελέγχους (benchmarking tests) με βάση τη σχετική βιβλιογραφία και τη διεθνή εμπειρία. Έγινε προσπάθεια να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα ελέγχων που να περιλαμβάνει τη σύγκριση των δεδομένων που προέκυψαν με την αριθμητική επίλυση με αντίστοιχα δεδομένα από αναλυτικές λύσεις, από πειράματα, καθώς και από πραγματικές μετρήσεις. Πραγματοποιήθηκαν εννέα συνολικά έλεγχοι με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στη συνέχεια εξετάζεται μία σειρά από ειδικά ζητήματα που αφορούν στην προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες λόγω πολυπλοκότητας του φυσικού κόσμου, όπως είναι η πλημμύρα σε αστικό περιβάλλον, η προσομοίωση πλημμυρικής ροής σε κλίμακα λεκάνης απορροής, η βαθμονόμηση των διάφορων παραμέτρων, η διερεύνηση της αβεβαιότητας που εισάγεται στην αριθμητική επίλυση από τις διάφορες αυτές παραμέτρους και η ορθολογική προσομοίωση με στοιχειώδη φυσική βάση των τριβών που αναπτύσσονται στον πυθμένα.

7.2 Πρωτοτυπία διδακτορικής διατριβής

Η πρωτοτυπία της διδακτορικής διατριβής αφορά στο γεγονός ότι παρόλο που το θεωρητικό υπόβαθρο είναι γνωστό, η δισδιάστατη αριθμητική προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε πραγματικές και όχι σε κάποιες ελεγχόμενες συνθήκες έχει αρχίσει και εφαρμόζεται μόλις τα τελευταία χρόνια (λόγω ραγδαίας αύξησης της υπολογιστικής δύναμης), με συνέπεια τη μη επαρκή αντιμετώπιση των διάφορων ειδικών θεμάτων που προκύπτουν από την πολυπλοκότητα του φυσικού κόσμου. Επίσης, η πλειονότητα των ερευνών κινείται με πλαίσιο τα έτοιμα, εμπορικά λογισμικά, όπου όμως δεν δίνεται η δυνατότητα ελέγχου σε κάθε μεταβλητή του λογισμικού. Οι βασικές πρωτοτυπίες που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- τροποποιήθηκε η κλασική μορφή του αριθμητικού σχήματος McCormack με στόχο την εισαγωγή τεχνητής διάχυσης
- τροποποιήθηκε ο τρόπος προσδιορισμού των στερεών ορίων ώστε να υπεισέρχεται στους υπολογισμούς των τριβών πυθμένα και η επίδραση των κάθετων τοιχωμάτων
- διαμορφώθηκε δισδιάστατο μοντέλο υπολογισμού της καμπύλης στάθμης-παροχής κατά την εφαρμογή υδρογραφήματος σε μία διατομή, με στόχο την προσομοίωση του βρόχου που σχηματίζεται μεταξύ του ανοδικού και του καθοδικού σκέλους της εν λόγω καμπύλης
- διαμορφώθηκαν τεχνικές αντιμετώπισης βαθμονόμησης των διάφορων παραμέτρων που απαιτούνται σε κάθε μοντέλο τέτοιου τύπου, από τη στιγμή που το υπολογιστικό κόστος προσομοίωσης πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες είναι υψηλό
- διαμορφώθηκε υβριδική μέθοδος που συνδυάζει την υδρολογική με την υδροδυναμική προσέγγιση για την προσομοίωση μίας αστραπιαίας πλημμύρας (flash flood) σε μικρές υδρολογικές λεκάνες

- παράχθηκε ρητή σχέση υπολογισμού του συντελεστή τραχύτητας f της εξίσωσης Darcy-Weisbach, η οποία έχει φυσική βάση και η οποία ισχύει σε όλες τις περιοχές (στρωτή, τυρβώδης και μεταβατικές περιοχές), ενώ είναι κατάλληλη για ροή με ελεύθερη επιφάνεια
- διαμορφώθηκε μοντέλο εκτίμησης τριβών πυθμένα τριών παραμέτρων, όπου οι τριβές πυθμένα είναι αύξηση συνάρτηση της ταχύτητας ροής και φθίνουσα συνάρτηση του βάθους ροής

7.3 Ανάλυση των συμπερασμάτων

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου στους διάφορους πρότυπους ελέγχους (benchmarking tests) μπορούν να χαρακτηριστούν ικανοποιητικά και αποδεικνύουν την εγκυρότητα του αριθμητικού μοντέλου FLOW-R2D σε ένα μεγάλο εύρος ελέγχων που καλύπτει τη σύγκριση των αριθμητικών δεδομένων με αναλυτικές λύσεις, πειραματικά δεδομένα και πραγματικές μετρήσεις.

Από τη διερεύνηση της αβεβαιότητας που εισάγεται στην αριθμητική επίλυση διαπιστώθηκε ότι παράμετροι όπως είναι ο τριβές πυθμένα, ο συντελεστής διάχυσης, η ενεργή κλίση της ανάντη οριακής συνθήκης, το μέγεθος του κελιού του υπολογιστικού πλέγματος, η διήθηση, ο τρόπος αναπαράστασης των στερεών εμποδίων που βρίσκονται εντός του πλημμυρικού πεδίου, που υπεισέρχονται ως δεδομένα εισόδου στο αριθμητικό μοντέλο, εισάγουν αβεβαιότητα στην αριθμητική επίλυση, η οποία θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε κάθε σενάριο εφαρμογής. Η εξέλιξη αυτής της αβεβαιότητας στο χρόνο δε δείχνει κάποια σαφή τάση μείωσης ή αύξησης παρά μόνο μία έξαρση αυτής στις πρώτες χρονικές στιγμές όταν το πλημμυρικό μέτωπο προσεγγίζει το εκάστοτε σημείο του ενδιαφέροντος.

Το υπολογιστικό κόστος για τη δισδιάστατη προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες είναι μεγάλο με τα σημερινά δεδομένα της υπολογιστικής ισχύος. Η τάξη μεγέθους του απαιτούμενου χρόνου προσομοίωσης είναι ώρες/ημέρες για το σύνολο των εφαρμογών σε πραγματικά σενάρια. Το μεγάλο αυτό υπολογιστικό κόστος έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία εφαρμογής κλασικών μεθόδων βελτιστοποίησης με στόχο τη βαθμονόμηση των διάφορων παραμέτρων που απαιτούνται από το αριθμητικό μοντέλο. Επιχειρήθηκε η εφαρμογή της κλασικής μεθόδου των δοκιμών (trial and error method), η οποία είναι εξαιρετικά επίπονη από πλευράς χρόνου προσομοίωσης, έχει συγκεκριμένα όρια εφαρμογής και απαιτεί και κάποιες ιδιαίτερες παραδοχές, όπως το να προσομοιώνεται μόνο η πλημμυρική αιχμή αντί για ολόκληρο το πλημμυρικό υδρογράφημα ή η υβριδική μέθοδος που προτάθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής για την προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε κλίμακα μικρής λεκάνης απορροής.

Η έλλειψη πραγματικών μετρήσεων είναι ένας ακόμη αποθαρρυντικός παράγοντας για την ορθολογική βαθμονόμηση ή εκτίμηση των απαιτούμενων παραμέτρων. Η μία προσέγγιση για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος είναι η πίεση σε διάφορους θεσμούς ή ακόμα και η πρωτοβουλία για τη δημιουργία βιβλιοθήκης δεδομένων πραγματικών μετρήσεων. Η άλλη προσέγγιση είναι η ανάπτυξη ορθολογικότερων μοντέλων που έχουν στοιχειώδη φυσική βάση για την προσομοίωση μίας σειράς φυσικών φαινομένων όπως είναι οι τριβές πυθμένα, η διήθηση, η τύρβη κ.λπ. και οι παράμετροι των

οποίων υπόκεινται σε φυσικούς περιορισμούς. Οι δύο αυτοί δρόμοι προσέγγισης δεν πρέπει να θεωρηθούν σε καμία περίπτωση αντιπαραθετικοί μεταξύ τους, αλλά αντιθέτως, θα πρέπει να τροφοδοτεί ο ένας τον άλλον. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής προτάθηκε μοντέλο προσομοίωσης των τριβών πυθμένα, οι οποίες αποτελούν σημαντική παράμετρο αβεβαιότητας, το οποίο έχει στοιχειώδη φυσική βάση και έρχεται να συμπληρώσει τα διάφορα υφιστάμενα εμπειρικά μοντέλα.

Τέλος, ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει και στην πολύτιμη και αναντικατάστατη εμπειρία του εκάστοτε ερευνητή, όσον αφορά στην κατανόηση του φυσικού προβλήματος από την πολύ μικρή κλίμακα, μέχρι και την κλίμακα ενός ποτάμιου συστήματος ή μίας λεκάνης απορροής. Η ορθολογική προσομοίωση της πλημμυρικής ροής σε πραγματικές συνθήκες δεν μπορεί να επιτευχθεί από τους απλούς χρήστες κάποιου λογισμικού που αντιμετωπίζουν το εκάστοτε μοντέλο ως "μαγικό κουτί".

7.4 Προτάσεις για συνέχιση της έρευνας

Η παρούσα διατριβή ασχολείται με μία σειρά θεμάτων τα οποία δεν εξαντλήθηκαν στο πλαίσιο αυτής. Ένα σημαντικό ζήτημα το οποίο απαιτείται για περαιτέρω διερεύνηση είναι η προσπάθεια ποσοτικοποίησης της αβεβαιότητας που εισάγεται με κάθε παράμετρο στην αριθμητική επίλυση, με στόχο τη δημιουργία ενός πρακτικού οδηγού για το πώς θα λαμβάνεται υπόψη το εύρος των πιθανών λύσεων, αναλόγως με το εύρος τιμών των παραμέτρων.

Η μείωση του υπολογιστικού κόστους είναι επίσης ένα σημαντικό ζήτημα. Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί σημαντικά η προσομοίωση σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας (High Performance Computing) μέσω υπερ-υπολογιστών (super computers) οι οποίοι εκμεταλλεύονται τις αρχιτεκτονικές της παράλληλης δομής (clusters). Εκτός από τη μείωση του χρόνου προσομοίωσης, με την εκμετάλλευση των παραπάνω τεχνολογικών εξελίξεων ανοίγει και η δυνατότητα εφαρμογών σε πολύ μεγαλύτερα υπολογιστικά πεδία, η προσομοίωση των οποίων απαιτεί πολύ μεγάλη μνήμη.

Η μείωση αυτή του υπολογιστικού χρόνου σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των μοντέλων βελτιστοποίησης surrogate, που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια ειδικά για αριθμητικά μοντέλα που απαιτούν μεγάλο υπολογιστικό κόστος είναι δυνατόν να οδηγήσει σε μία ορθολογικότερη διαδικασία βαθμονόμησης των διάφορων απαραίτητων παραμέτρων του αριθμητικού μοντέλου, σε σχέση με την κλασική μέθοδο των δοκιμών.

Ενδιαφέροντα ακόμη ζητήματα για την εξέλιξη της ερευνητικής δραστηριότητας στην επιστημονική αυτή περιοχή, είναι η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου προσομοίωσης των τριβών πυθμένα σε διάφορα σενάρια εφαρμογής πραγματικών συνθηκών, καθώς και η σύγκριση της μεθοδολογίας με τις κλασικές εμπειρικές προσεγγίσεις. Η επέκταση του αριθμητικού μοντέλου ούτως ώστε να συνυπολογίζει και το φαινόμενο της τύρβης το οποίο σε πραγματικές συνθήκες είναι σημαντικό. Η βελτίωση του αριθμητικού μοντέλου ούτως ώστε να συνυπολογίζεται η εισροή του νερού εντός των κτιρίων (storage effect) σε περιπτώσεις πλημμυρικής ροής σε αστικό περιβάλλον. Η περαιτέρω τεκμηρίωση καθώς και εφαρμογή της προτεινόμενης υβριδικής υδρολογικής/υδροδυναμικής μεθόδου και σε άλλα σενάρια είναι ένα πεδίο έρευνας το οποίο έχει και πρακτικό ενδιαφέρον.

Τέλος, η διερεύνηση της επίδρασης της τοπογραφικής πληροφορίας στην αριθμητική επίλυση, καθώς και η προσπάθεια αραίωσης του υπολογιστικού πλέγματος με στόχο την εύρεση ενός ισοδύναμου κανάβου που απαιτεί μικρότερο υπολογιστικό κόστος, καθώς και η επακόλουθη παραμετροποίηση των διάφορων φαινομένων σε κλίμακα εντός του κελιού (sub-grid scale), αποτελεί επίσης ένα ενδιαφέρον πεδίο για συνέχιση της έρευνας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abbott, M.B. (1979). *Computational Hydraulics*. Pitman Publishing Ltd.
- Abderrezzak, K., Paquier, A., Mignot, E. (2008). Modelling flash flood propagation in urban areas using a two-dimensional numerical model. *Natural Hazards*, 50(3): 433-460.
- Abt, S.R, Whittler, R.J., Taylor, A., Love, D.J. (1989). Human stability in a high flood hazard zone. *Water Resources Bulletin*, 25(4): 881-890.
- Alcrudo, F. and Mulet, J. (2007). Description of the Tous Dam break case study (Spain). *Journal of Hydraulic Research*, 45: 45-57.
- Amein, M. (1968). An implicit method for numerical flood routing. *Water Resources Research*, 4(4): 719-726.
- Anastasiadou-Partheniou, L. and Terzidis, G. (1988). A dissipative finite element model for discontinuous unsteady flow in open channels. *Agricultural Water Management*, 13(2-4): 157-168.
- Anastasiou, K. and Chan, C.T. (1997). Solution of the 2D Shallow Water Equations using the Finite Volume Method on unstructured triangular mesh. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 24(11): 1225-1245.
- Arrighi, C., Alcerreca-Huerta, J.C., Oumeraci, H., Castelli, F. (2015). Dynamics of vehicle debris during a flood: incipient motion conditions and numerical experiments. *Proceedings of the 36th World Congress of IAHR*, the Hague, the Netherlands.
- Asselman, N.E.M. and Jonkman, S.N. (2003). *Consequences of floods: the development of a method to estimate the loss of life*. Report 02.03.03.01, WL Delft Hydraulics.
- Bates P.D., Lane S.N, Ferguson R.I. (2005). *Computational Fluid Dynamics: Applications in Environmental Hydraulics*, Wiley.
- Bathurst, C.J. (1985). Flow resistance estimation in mountain rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(4): 625-643.
- Behladj, H., Tail, A., Ouazar, D. (2006). Computing two-dimensional flood wave propagation using unstructured finite volume method: Application to the Ourika Valley. *International Journal on Finite Volumes*, 3(1): 1-21.
- Bellos, C.V. and Sakkas, J.G. (1987). 1D dam-break flood wave propagation on dry bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(12): 1510-1524.
- Bellos, C.V., Soulis, V., Sakkas, J.G. (1992). Experimental investigation of two-dimensional dam-break induced flows. *Journal of Hydraulic Research*, 30(1): 47-63.
- Bellos, V. (2012). Ways for flood hazard mapping in urbanised environments: a short literature review. *Water Utility Journal*, 4: 25-31.

- Bellos, V. and Hrisanthou, V. (2011). Numerical simulation of a dam-break flood wave. *European Water*, 33: 45-53.
- Bellos V. and Tsakiris G. (2015a). Comparing various methods of building representation for 2D flood modelling in built-up areas. *Water Resources Management*, 29(2): 379-397.
- Bellos V. and Tsakiris G. (2015b). Flash flood simulation in small catchments based on combined hydrodynamic and hydrologic approach. *Proceedings of the 9th World Congress of EWRA*, Istanbul, Turkey.
- Bellos V. and Tsakiris G. (2015c). 2D flood modelling: the case of Tous dam break. *Proceedings of the 36th World Congress of IAHR*, the Hague, the Netherlands.
- Bermudez, A. and Vazquez, M.E. (1994). Upwind methods for hyperbolic conservation laws with source terms. *Computers and Fluids*, 23(8): 1049–1071.
- Betâmio de Aleida, A. (2001). Dam risk management at downstream valleys. The Portuguese NATO integrated Project. *Proceedings of the ICOLD European Symposium*, Geiranger, Norway.
- Borah, K.D. (2011) Hydrologic procedures of storm event watershed models: a comprehensive review and comparison. *Hydrological Processes*, 25(22): 3472-3489.
- Bosa, S. and Petti, M. (2011). Shallow water numerical model of the wave generated by the Vajont landslide. *Environmental Modelling and Software*, 26(4): 406-418.
- Bouchenafa, W., Mouhous-Voyneau, N., Sergent, P., Brochet, J. (2014). Study of flow in a staircase at subway station. *Advances in Hydroinformatics: SIMHYDRO 2012 - New frontiers of simulation*. Springer.
- Bradford, S.F, Sanders, B.F. (2002). Finite volume model for shallow-water flooding of arbitrary topography. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(3): 289-298.
- Bray, D.I. (1979). Estimating average velocity in gravel-bed rivers. *Journal of the Hydraulics Division*, 105(9): 1103-1122.
- Brownlie, W.R. (1981). Reexamination of Nikuradse roughness data. *Journal of the Hydraulics Division*, 107(1): 115-119.
- Carlioni, G.C. and Mazzanti, R. (1964). Rilevamento geologico della frana del Vaiont. In: Selli, R. et al. *Giornale di Geologia*, S.2, 32(1). (in Italian).
- CEDEX, 1984. Estudio hidrológico de la crecida ocurrida en los días 20 y 21 de Octubre de 1982 en la Cuenca del Júcar, Spain. (in Spanish).
- CEDEX, 1989a. Revisión del estudio hidrológico de la crecida ocurrida en los días 20 y 21 de Octubre de 1982 en la Cuenca del Júcar, Spain. (in Spanish).
- CEDEX, 1989b. Revisión del estudio en modelo matemático de las inundaciones de Octubre de 1982 en la zona del Júcar, Spain. (in Spanish).
- Chanson, H. (2004). *The Hydraulics of Open Channel Flow: an Introduction (Second Edition)*. Elsevier.
- Chanson, H. (2009). *Applied Hydrodynamics: an Introduction to Ideal and Real Fluids*. Taylor & Francis.
- Chaudhry, M.H. (2008). *Open Channel Flow (Second Edition)*. Springer.
- Chen, A.S., Hsu, M.H., Chen, T.S., Chang, T.I. (2005). An integrated evacuation model for highly developed urban areas. *Water Science and Technology*, 51(2): 221-229.
- Chen, C. and Armbruster, J.T. (1980). Dam-break wave model: formulation and verification. *Journal of the Hydraulics Division*, 106(5): 747-767.
- Chen, S.A., Evans, B., Djordjevic, S., Savic D.A. (2012a). A coarse-grid approach to representing building blockage effects in 2D urban flood modelling. *Journal of Hydrology*, 426-427: 1-16.

- Chen, S.A., Evans, B., Djordjevic, S., Savic D.A. (2012b). Multi-layered coarse grid modelling in 2D urban flood simulations. *Journal of Hydrology*, 470-471: 1-11.
- Cheng, N.S. (2008). Formulas for friction factor in transitional regions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(9): 1357-1362.
- Cheng, N.S. and Chiew, Y.M. (1998). Modified logarithmic law for velocity distribution subjected to upward seepage. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(12): 1235-1241.
- Chervet, A. and Dalleves, P. (1970). Calcul de l' onde de submersion consecutive a la rupture d' un barrage. *Schweizerische Bauzeitung*, 88(19): 22/1-22/12. (in French)
- Colebrook, C.F. (1939). Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition between the smooth and rough pipe laws. *Journal of the Institution of Civil Engineers*, London, 11, 1938–1939: 133–156.
- Cooley, R.L. and Moin, S.A. (1976). Finite element solution of Saint-Venant equations. *Journal of the Hydraulics Division*, 102(6): 759-775.
- Costabile, P., Costanzo, C., Macchione, F. (2012). Comparative analysis of overland flow using finite volume schemes. *Journal of Hydroinformatics*, 14(1): 122-135.
- Costabile, P., Costanzo, C., Macchione, F. (2013). A storm event watershed model for surface runoff based on 2D fully dynamic wave equations. *Hydrological Processes*, 27(4): 554-569.
- Costabile, P. and Macchione, F. (2015). Enhancing river model set-up for 2-D dynamic flood modelling. *Environmental Modelling and Software*, 67: 89-107.
- De Jong, Remy L.A., Miller, W.A. (1971). *Experimental investigation of hydraulic transients in river-reservoir systems, Phase III*. Research Report No 22, Water Resources Research Center, University of Tennessee.
- Di Monaco, A. and Molinaro, P. (1982). Finite element solution of the Lagrangian equations of unsteady free surface flows on dry river beds. *Proceedings of the 4th International Conference on Finite Elements in Water Resources*, Hannover, Germany: 257-267.
- Di Monaco, A. and Molinaro, P. (1984). Lagrangian finite-element model of dam-break wave on dry bed versus experimental data. *Proceedings of the HYDROSOFT Conference*, Portoroz, Yugoslavia: 2.111-2.120.
- Dottori, F. and Todini, E. (2013). Testing a simple 2D hydraulic model in an urban flood experiment. *Hydrological Processes*, 27(9), 1301-1320.
- Dressler, R.F. (1952). Hydraulic resistance effect upon the dam-break functions. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 49(3): 217–225.
- Dressler, R.F. (1954). Comparison of theories and experiments for the hydraulic dam-break wave. *International Association of Scientific Hydrology*, 38(3): 319-328.
- Dracos, T. (1970). Die Berechnung Instationärer Abflüsse in offene Gerinnen beliebiger Geometrie. *Schweizerische Bauzeitung*, 88(19): 21/1-21/8. (in German)
- Eguiazaroff, I.B. (1935). Regulation of the water level in the reaches of canalized rivers and regulation of the flow below the last cock dam according to whether the water power is or is not used. *Proceedings of the 16th International Congress of Navigation*, Report No 8, Inlnad Navigation, 2nd question, sec. 1, Brussels, Belgium.
- Emelen, V.S., Soares-Fraza, S., Riahi-Nezhad, K.C., Chaudhry, M.H., Imran, J., Zech, Y. (2012). Simulations of the New Orleans 17th street canal breach flood. *Journal of Hydraulic Research*, 50(1): 70-81.
- Epicum, S., Dewals, B.J., Archambeau, P., Piroton, M. (2010). Dam break flow computation based on efficient flux vector splitting. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 234(7): 2143-2151.
- Esteves, M., Faucher, X., Galle, S., Vauclin, M. (2000). Overland flow and infiltration modelling for small plots during unsteady rain: numerical results versus observed results. *Journal of Hydrology*, 228(3-4): 265-282.

- European Council (2007). *EU Directive of the European Parliament and of the European Council on the estimation and management of flood risks* (2007/60/EU).
- Feng, K., Molz, G.J. (1997). A 2-D, diffusion-based, wetland flow model. *Journal of Hydrology*, 196(1-4): 230-250.
- Fennema, R.J. and Chaudhry, M.H. (1986). Explicit numerical schemes for unsteady free-surface flows with shocks. *Water Resources Research*, 22(13): 1923-1930.
- Ferguson, R. (2007). Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams. *Water Resources Research*, 43(5): W05427.
- Fiedler, F.R. and Ramirez, J.A. (2000). A numerical method for simulating discontinuous shallow flow over an infiltrating surface. *International Journal for Numerical Methods in Fluid*, 32(2): 219-240.
- Forrester A., Sóbester A., Keane A. (2008). *Engineering Design via Surrogate Modelling*. Wiley.
- Fread, D.L. (1973). A dynamic model for stage-discharge relations affected by changing discharge. *NOAA Technical Memorandum*, NWS - Hydro 16.
- Garcia, R. and Kahawita, R.A. (1986). Numerical solution of the St. Venant equations with the McCormack finite-difference scheme. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 6(5): 259-274.
- Garcia-Navarro, P. and Saviron, J.M. (1992). McCormack's method for the numerical simulation of one-dimensional discontinuous unsteady open channel flow. *Journal of Hydraulic Research*, 30(1): 95-105.
- Gee, M.D. and McArthur, R.C. (1978). Development of generalized free surface flow models using finite element techniques. *Proceedings of the 2nd International Conference on Finite Elements in Water Resources*, London, England: 61-77.
- Gottardi, G. and Venutelli, M. (2008). An accurate time integration method for simplified overland flow models. *Advances in Water Resources*, 31(1): 173-180.
- Goutal N. (1999). The Malpasset dam failure: An overview and test case definition. *Proceedings of the CADAM Zaragoza meeting*, Zaragoza, Spain: 1-7.
- Griffiths, G.A. (1981). Flow resistance in coarse gravel bed rivers, *Journal of the Hydraulics Division*, 107(7): 899-918.
- Guangcai, S., Wenli, W., Liu, Y.L. (2010). Numerical scheme for simulation of 2D flood waves. *Proceedings of the International Conference on Computational and Information Science*, Chengdu, China: 846-849.
- Guinot V. and Cappelaere, B (2009). Sensitivity analysis of 2D steady-state shallow water flow. Application to free surface model calibration. *Advances in Water Resources*, 32(4): 540-560.
- Gwo-Fong, L., Jihn-Sung, L., Wen-Dar, G. (2003). Finite volume component-wise TVD schemes for 2D shallow water equations. *Advances in Water Resources*, 26(8): 861-873.
- Hayashi, T. (1953). Mathematical theory and experiment of flood waves. *Transactions of Japan Society of Civil Engineers*, 18: 13-26.
- Henderson, F.M. (1966). *Open channel flow*. MacMillan.
- Hiraishi, T. and Yasuda, T. (2006). Numerical Simulation of Tsunami Inundation in Urban Areas. *Journal of Disaster Research*, 1(1): 148-156.
- Hodges, B.R. (2015) Representing hydrodynamically important blocking features in coastal or riverine lidar topography. *Natural Hazards and Earth System Science*, 15(5): 1011-1023.
- Hromadka II, T.V. and Yen, C.C. (1986). A diffusion hydrodynamic model (DHM). *Advances in Water Resources*, 9(3): 118-170.

- Hubbard, M.E. and Garcia-Navarro, P. (2000). Flux difference splitting and the balancing of source terms and flux gradients. *Journal of Computational Physics*, 165(1), 89–125.
- Hunter, N.M., Bates, P.D., Néelz, S., Pender, G., Villanueva, N.G., Wright, N.G., Liang, D., Falconer, R.A., Lin, B., Waller, S., Crossley, A.J., Mason D.C. (2008). Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding. *Water Management*, 161(1): 13-30.
- Ippen, A.T. and Dawson, J.H. (1951). Design of supercritical contractions. *Transactions of ASCE*, 116, 326-346.
- Ippen, A.T. and Kulin, G. (1957). The effect of boundary resistance on solitary waves. *La Houille Blanche*, 3: 390-407.
- Ishigaki T., Toda, K., Inoue, K. (2003). Hydraulic model tests of inundation in urban area with underground space. *Proceedings of the 30th IAHR Congress*, Thessaloniki: 487-493.
- Ishigaki, T., Ozaki, T., Inoue, T., Shimada, H., Toda, K. (2011). Drainage system, rainwater flooding, and underground inundation in urban area. *Proceedings of the 12th International Conference on Urban Drainage*, Porto Alegre, Brazil: 1-8.
- Jha, K.A., Bloch, R., Lamond, J., 2012. *Cities and Flooding: A guide to integrated urban flood risk management for the 21st century*. The World Bank Publications.
- Jia, Y. and Wang, S.S.Y. (1999). Numerical model for channel flow and morphological change studies. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(9): 924-933.
- Jonkman, S.N. and Penning-Rowsell, E. (2008). Human instability on flood flows. *Journal of the American Water Resources Association*, 44(4): 1-11.
- Jovanović, M. and Djordjević, D. (1995). Experimental verification of the McCormack numerical scheme. *Advances in Engineering Software*, 23(1): 61-67.
- Katopodes, N. (1980). Finite element model for open channel flow near critical conditions. *Proceedings of the 3rd International Conference on Finite Elements in Water Resources*, University of Mississippi, Oxford, USA: 5.37-5.46.
- Katopodes, N.D. and Strelkoff, T. (1979). Two-dimensional shallow water-wave models. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 105(4): 317-334.
- Katopodes, N.D. and Wu, C.T. (1986). Explicit computation of discontinuous channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 102(4): 459-468.
- Katul, G., Wiberg, P., Albertson, J., Hornberger, G. (2002). A mixing layer theory for flow resistance in shallow streams. *Water Resources Research*, 38(11): 1250.
- Kazezyilmaz-Alhan, C. and Medina, M.A. (2007). Kinematic and diffusion waves: analytical and numerical solutions to overland and channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2): 217-228.
- Keuning, D.H. (1976). Application of finite-element method to open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 102(4): 459-468.
- Kim, B., Sanders, B.F., Schubert, J.E., Famiglietti, J.S. 2014. Mesh type tradeoffs in 2D hydrodynamic modeling of flooding with a Godunov-based flow solver. *Advances in Water Resources*, 68: 42-61.
- Kim, B., Sanders, B.F., Famiglietti, J.S., Guinot, V. (2015). Urban flood model with porous shallow water equations: a case-study of model errors in the presence of anisotropic porosity. *Journal of Hydrology*, 523: 680-692.
- Kim, J., Warnock, A., Ivanov, V.Y., Katopodes, N.D. (2012). Coupled modeling of hydrologic and hydrodynamic processes including overland and channel flow. *Advances in Water Resources*, 37: 104-126.
- King, I.P. (1976). Finite element models for unsteady flow routing through irregular channels. *Proceedings of the International Conference on Finite Elements in Water Resources*, London, England: 4.165-4.184.

- Knighton, D. (1998). *Fluvial forms and processes: A new perspective*. Arnold.
- Kordas, B. and Witkowska, H. (1976). Mathematical model of a dam-break wave. *Proceedings of the International Symposium on Unsteady Flow in Open Channels*, Newcastle-upon-Tyne, U.K.: C2.19-C2.28.
- Krumbein W.C. and Aberdeen, E. (1937). The sediments of Barataria bay. *Journal of Sedimentary Petrology*, 7(1): 3-17.
- Kvočka, D., Falconer, R.A., Bray, M. (2015). Appropriate flood risk assessment tools for predicting flood inundation extend and assessing flood hazard risk for flash flood events. *Proceedings of the 36th World Congress of IAHR*, the Hague, the Netherlands.
- Laboratoire National d'Hydraulique (1959). *Mouvement nonpermanent dans les canaux à section prismatique et variable quelconque*. National Hydraulic Laboratory, Châtou, France: Report T218B. (in French)
- Lax, P.D. and Wendroff, B. (1964). Difference schemes for hyperbolic equations with high order of accuracy. *Communications on Pure Applied Mathematics*, 17: 381-398.
- Laura, R.A. and Wang, J.D. (1984). Two dimensional flood routing on steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(8): 1121-1135.
- Lesleighter, E.G. (1983). Flood plain flow using a two-dimensional numerical simulation. *Proceedings of the International Conference on the Hydraulics Aspects of Floods and Flood Control*, London, U.K.: 207-215.
- Levin, L. (1951). Etude experimental du regime transitoire engendre par la rupture d' un barrage. *Comptes Rendus*, 233: 646-648. (in French)
- Liang, D., Falconer, R.A., Lin, B. (2007). Coupling surface and subsurface flows in a depth averaged flood wave model. *Journal of Hydrology*, 337(1-2): 147-158.
- Liang, D., Lin, B., Falconer, F.A. (2006). A boundary-fitted numerical model for flow routing with shock-capturing capability. *Journal of Hydrology*, 332(3-4): 477-486.
- Liang, D., Lin, B., Falconer, R.A. (2006). Simulation of rapidly varying flow using an efficient TVD-McCormack scheme. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 53(5): 811-826.
- Liang, J. (2010). Evaluation of runoff response to moving rainstorms. *Dissertations (2009-)*, Paper 73, http://epublications.marquette.edu/dissertations_mu/73, Marquette University.
- Liang, Q., Du, G., Hall, J.W., Borthwick, A.G.L. (2008). Flood inundation modeling with an adaptive quadtree grid Shallow Water Equation solver. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(11): 1603-1610.
- Ligrani, P.M. and Moffat, R.J. (1986). Structure of Transitionally Rough and Fully Rough Turbulent Boundary-Layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 162: 69-98.
- Liu, Q.Q., Chen, L., Li, J.C., Singh, V.P. (2004). Two-dimensional kinematic wave model of overland-flow. *Journal of Hydrology*, 291(1-2): 28-41.
- López, R., Barragán, J., Colomer, M.A. (2006). Evaluación de ecuaciones de resistencia al flujo sobre escollera. *Ingeniería del Agua*, 13(2): 99-111. (in spanish)
- López, R., Barragán, J., Colomer, M.A. (2009). Flow resistance equations for mountain rivers. *Forest Systems (formerly, Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales)*, 18(1): 81-91.
- Martin, N. and Gorelick, S.M. (2005). MOD_FreeSurf2D: A MATLAB surface fluid flow model for rivers and streams. *Computers and Geosciences*, 31(7): 929-946.
- Matsutomi, H. (1983). Numerical computations of two-dimensional inundation of rapidly varied flows due to breaking of dams. *Proceedings of the 20th IAHR Congress*, Moskow, USSR: 479-488.
- Maynord, S. (1991). Flow resistance of riprap. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(6): 687-696.

- McCormack, R.W. (1969). The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering. *Proceedings of the AIAA Hypervelocity Impact Conference*, Cincinnati, USA: Paper 69-354.
- Memos, C.D., Georgakakos, A., Vomvoris, S. (1983). Some experimental results of the two-dimensional dam-break problem. *Proceedings of the 20th IAHR Congress*, Moscow, USSR: 555-563.
- Michouev, A.V. and Sladkevich, M.S. (1983). Ecoulement dans le bief aval dans le cas d'une rupture partielle d'un barrage. *Proceedings of the 20th IAHR Congress*, Moscow, USSR: 512-519.
- Mignot, E., Paquier, A., Haider, S. (2005). Modelling floods in a dense urban area using 2D shallow water equations. *Journal of Hydrology*, 327(1-2): 186-199.
- Miller, S. and Chaudhry, M.H. (1989). Dam-break flows in curved channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(11): 1465-1478.
- Miller, W.A. and Tschantz, B. A. (1972). Laboratory investigation of one-dimensional wave motion in open channels. Paper presented at the National Water Resources Engineering Meeting, ASCE, Atlanta, Georgia, USA.
- Montes, S. (1998). *Hydraulics of open channel flow*. ASCE Press.
- Montuori, C. (1965). Introduction d'un débit constant dans un canal vide. *Proceedings of the 11th IAHR Congress*, Leningrad, USSR: Paper 3.55.
- Munson, B.R., Young, D.F., Okiishi, T.H., Huebsch, W.W. (2009) *Fundamentals of Fluid Mechanics (Sixth Edition)*. Wiley.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3): 282-290.
- Neary, V.S., Sotiropoulos, F., Odgaard, A.J. (1999). Three dimensional numerical model of lateral intake flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(2): 126-140.
- Néelz, S. and Pender, G. (2007). Sub-grid parameterisation of 2D hydrodynamic models of inundation in the urban area. *ActaGeophysica*, 55(1), 65-72.
- Néelz, S. and Pender, G. (2009). *Desktop review of 2D hydraulic modelling packages*. Environmental Agency, Bristol, U.K.
- Néelz, S. and Pender, G. (2010). *Benchmarking of 2D Hydraulic Modelling Packages*. Environmental Agency, Bristol.
- Nepf, H.M. (2012). Hydrodynamics of vegetated channels. *Journal of Hydraulic Research*, 50(3): 262-279.
- Nikolos, I.K. and Delis, A.I. (2009). An unstructured node-centered finite volume scheme for shallow water flows with wet/dry fronts over complex topography. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 198(47-48): 3723-3750.
- Nikuradse, J. (1933). Stromungsgesetze in rauhen Rohren. *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, Forschungsheft 361, VDI Verlag, Berlin, Germany (in German). (English translation: Laws of flow in rough pipes, NACA TM 1292, 1950).
- Nougaro, J. (1952). Recherches expérimentales sur les intumescences dans les canaux découverts. *Comptes Rendus*, 235(15): 788-791. (in French)
- Odstrčil, D. (1984). Numerical solution of a dam-break waves propagation in open channels with a dry bed. *Proceedings of the HYDROSOFT Conference*, Portoroz, Yugoslavia: 2.121-2.134.
- Pearson, K. (1895). Note on regression and inheritance in the case of two parents. *Royal Society proceedings*, 58: 240-242.
- Pistrika, A., Tsakiris, G., Nalbantis, I. (2014). Flood depth-damage functions for built environment. *Environmental Processes*, 1(4): 553-572.

- Preissman, A. (1971). Modèles pour le calcul de la propagation des crues. *La Houille Blanche*, 3: 219-224. (in French).
- Rahman, M. and Chaudhry, M.H. (1998). Simulation of dam-break flow with grid adaptation. *Advances in Water Resources*, 21(1): 1–9.
- Rajar, R. (1978). Mathematical simulation of dam-break flow. *Journal of the Hydraulics Division*, 104(7): 1011-1026.
- Rajar, R. and Četina, M. (1983). Two-dimensional dam-break flow in steep curved channels. *Proceedings of the 20th IAHR Congress, Moskow, USSR*: 571-579.
- Ramsbottom, D., Wade, S., Bain, V., Hassan, M., Penning-Rowsell, E., Wilson, T., Fernandez, A., House, M., Floyd, P. (2004). *R&D outputs: flood risks to people*, Phase 2, FD2321/IR2, Department for the Environment, Food and Rural Affairs/Environment Agency.
- Ravagnani, F., Pellegrinelli, A., Franchini, M. (2009). Estimation of urban impervious fraction from satellite images and its impact on peak discharge entering a storm sewer system. *Water Resources Management*, 23(10): 1893-1915.
- Roache P.J. (1998). *Verification and validation in computational science and engineering*. Hermosa publishers.
- Rouse, H., Bhoota, B.V. and En-Yen Hsu (1951). Design of channel expansions. *Transactions of ASCE*, 116: 347-363.
- Roy, C.J. (2003). Grid convergence error analysis for mixed-order numerical schemes. *AIAA Journal*, 41(4): 595-604.
- Samuels, P.G. (1983). Two-dimensional modeling of flood flows using the finite element method. *Proceedings of the International Conference on the Hydraulics Aspects of Floods and Flood Control*, London, U.K.: 229-240.
- Sanders, B.F., Schubert, J.E., Gallegos, H.A. (2008). Integral formulation of shallow-water equations with anisotropic porosity for urban flood modelling. *Journal of Hydrology*, 362(1-2): 19-38.
- Schloktisch, A. (1917). Über Dambruchwellen. *Sitzungsberichten der Königlichen Akademie der Wissenschaften*, 126(IIa): 1489–1514. (in German).
- Schubert, J.E. and Sanders, B.F. (2012). Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modelling efficiency. *Advances in Water Resources*, 41: 49-64.
- Semenido, V.I. (1956). Verification of computation of unsteady movement in open channel. *Gidroteknika i Melioratsiya*, 7: 51-52. (in Russian).
- Shettar, A.S. and Murthy, K.K. (1996). A numerical study of division of flow in open channels. *Journal of Hydraulic Research*, 34(5): 651-675.
- Singh, J., Mustafa, S.A., Ding, Y. (2015). Numerical modeling of rainfall-generated overland flow using nonlinear Shallow-Water Equations. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(8), 04014089.
- Smart, G.M., Duncan, M.J., Walsh, J.M. (2002). Relatively rough flow resistance equations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(3): 267-276.
- Smith, G.P., Wasko, C.D., Miller, B.M. (2012). Modelling the influence of buildings on flood flow. *Proceedings of the 52th Floodplain Management Association Conference*, Batemans Bay, Australia: (online publication).
- Soares-Frazao, S. (2007). Experiments of dam-break wave over a triangular bottom sill. *Journal of Hydraulic Research*, 45: 19-26.
- Soares-Frazao, S., Lhomme, J., Guinot, V., Zech, Y. (2008). Two-dimensional shallow-water model with porosity for urban flood modelling. *Journal of Hydraulic Research*, 46(1): 45-64.

- Soares-Frazao, S., Lories, D., Taminiau, S., Zech, Y. (2003). Dam-break flow in channel with sudden enlargement. *Proceedings of the 30th IAHR Congress*, Thessaloniki, Greece: 221-228.
- Soares-Frazao S. and Zech Y. (2007). Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle. *Journal of Hydraulic Research*, 45: 27-36.
- Song, L., Zhou, J., Guo, J, Zou, Q., Liu, Y. (2011). A robust well-balanced finite volume model for shallow water flows with wetting and drying over irregular terrain. *Advances in Water Resources*, 34(7): 915-932.
- Stone, B.M. and Shen, H.T. (2002). Hydraulic Resistance of Flow in Channels with Cylindrical Roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(50): 500-506.
- Supino, G. (1954). Le oscillazioni del risalto idraulico durante una propagazione ondososa. *Energia Electrica*, 31(2): 90-94. (in Italian).
- Syme, W.J. (2008). Flooding in urban areas - 2D modelling approaches for building and fences, *Proceedings of the 9th National Conference on Hydraulics in Water Engineering*, Darwin Convention Centre, Australia, 25-32.
- Swamee, P.K. and Jain, A.K. (1976). Explicit equations for pipe-flow problems. *Journal of the Hydraulics Division* 102(5): 657-664.
- Taipei City Government, (2001). *The reconstruction plan for the damage caused by typhoon Nari*, Taiwan.
- Tan, L.W. and Chu, V.H. (2011). Flood wave dynamics using Lagrangian Block Advection. *Proceedings of the 4th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization*, Kuala Lumpur, Malaysia: art. No 5775567.
- Tayfur, G. and Guney, M.S. (2013). A physical model to study dam failure flood propagation. *Water Utility Journal*, 6: 19-27.
- Tayfur, G., Kavvas, M.L., Govindaraju, R.S., Storm, D.E. (1993). Applicability of St. Venant equations for two-dimensional overland flows over rough infiltrating surfaces. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(1): 51-63.
- Teo, F.Y., Xia, J., Falconer, R.A., Lin, B. (2012). Experimental studies on the interaction between vehicles and floodplain flows. *International Journal of River Basin Management*, 10(2): 1-12.
- Terzidis, G. and Strelkoff, T. (1970). Computation of open-channel surges and shocks. *Journal of the Hydraulics Division*, 96(12): 2581-2610.
- Testa, G., Zuccala, D., Alcrudo, F., Mulet, J., Soares-Frazao, S. (2007). Flash flood flow experiment in a simplified urban district. *Journal of Hydraulic Research*, 45: 37-44.
- Tsakiris, G. (2013). Flood risk assessment: Concepts, Modelling, Applications. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2(1): 261-286.
- Tsakiris, G. and Bellos, V. (2014). A numerical model for two-dimensional flood routing in complex terrains. *Water Resources Management*, 28(5): 1277-1291.
- Tsakiris, G., Nalbantis, I., Pistrika, A. (2009). Critical technical issues on the EU flood directive. *European Water*, 25/26: 39-51.
- Tschantz, B.A. and Miller, W.A. (1971). *Experimental investigation of hydraulic transients in river-reservoir systems, Phase II*. Research Report No 21, Water Resources Research Center, University of Tennessee.
- Ugarte, A. and Méndez, R. (1994). Resistencia al flujo en ríos de montaña. *Actas del XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Santiago: 503-514. (in spanish)
- Vázquez-Cendón, M.E., Cea, L., Puertas, J. (2009). The Shallow Water Model: The relevance of geometry and turbulence. *Monografías de la Real Academia de Ciencias de Zaragoza*, 31: 217-236.

- Vinogradova, E.A. and Kononkova, G.E. (1965). Experimental investigation of release wave transformation on a river-type reservoir model. *Selected Soviet Hydrology Papers*, 5, AGU.
- Vreugdenhil, C.B. (1994). *Numerical methods for shallow-water flow*. Water Science and Technology Library, 13, Kluwer Academic Publishers.
- Wang, Y., Qiuhua, L., Kesserwani, G., Hall, J.W. (2011). A 2D shallow flow model for practical dam-break simulations. *Journal of Hydraulic Research*, 49(3): 307-316.
- Weber, L.J., Schumate, E.D., Mawer, N. (2001). Experiments on flow at a 90o open-channel junction. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(5): 340-350.
- WES (Waterways Experiment Station) (1960). Conditions of minimum resistance. *Floods resulting from suddenly breached dams*, Miscellaneous Paper No 2-374, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, USA: Report 1.
- WES (Waterways Experiment Station) (1961). Conditions of high resistance. *Floods resulting from suddenly breached dams*, Miscellaneous Paper No 2-374, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, USA: Report 2.
- White, F.M (1998). *Fluid Mechanics*, 4th edition, McGraw-Hill.
- Xanthopoulos, T. and Koutitas, C. (1976). Numerical simulation of a two-dimensional flood wave propagation due to a dam failure. *Journal of Hydraulic Research*, 14(4): 321-331.
- Xia, J., Falconer, R.A., Xiao, X. (2014). New criterion for the stability of a human body in floodwaters. *Journal of Hydraulic Research*, 52(1): 93-104.
- Yalin, M.S. and Da Silva, A.M.A.F. (2001). *Fluvial Processes*, IAHR, Delft, Netherlands.
- Yevjevich, V. and Barnes A.H. (1970). Flood routing through storm drains - Part II, physical facilities and experiments. Hydrology Paper no. 44, Colorado State University.
- Zech, Y. and Soares-Fraza, S. (2007). Dam-break flow experiments and real-case data. A database from the European IMPACT research. *Journal of Hydraulic Research*, 45: 5-7.
- Zech, Y., Sorel, M.C., Vansnick, M. (1983). Mathematical modelling of floods in rivers and uncovering of flood plains. *Proceedings of the International Conference on the Hydraulic Aspects of Floods and Flood Control*, London, U.K.: 217-227.
- Zhou, J.G., Causon, D.M., Mingham, C.G., Ingram, D.M. (2004). Numerical Prediction of dam-break flows in general geometries with complex bed topography. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(4): 332-340.
- Zienkiewicz, O.C. and Sandover, J.A. (1957). Conservation form of the equations of fluid dynamics in general nonsteady coordinates. *AIAA Journal*, 23(11): 1819:1820.
- Zoppou, C. and Roberts, S. (2000). Numerical solution of the two-dimensional unsteady dam break. *Applied Mathematical Modelling*, 24(7): 457-475.
- Αντωνόπουλος, Β.Ζ. (1999). *Υδρολογία της ακόρεστης ζώνης του εδάφους*. Έκδοση Υπηρεσίας Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ.
- ΕΛΟΤ (2009). Αντιολισθηρή στρώση ασφαλικού σκυροδέματος. *Ελληνική Τεχνική Προδιαγραφή*, ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-05-03-12-01:2009
- Κουτίτας, Χ. (1982). *Υπολογιστική Υδραυλική*. Εκδόσεις Δ.Π.Θ.
- Κουτσογιάννης, Δ., Μαμάσης Ν., Ευστρατιάδης Α., (2003). Υδρολογική μελέτη λεκάνης Σπερχειού. Στο πλαίσιο της Μελέτης: 'Υδρολογική - Υδραυλική μελέτη για την αντιπλημμυρική προστασία της νέας διπλής σιδηροδρομικής γραμμής κατά τη διέλευσή της από την περιοχή του ποταμού Σπερχειού', για την ΕΡΓΑ ΟΣΕ ΑΕ, Ανάδοχος: Δ. Σωτηρόπουλος & Συνεργάτες Ανώνυμη Μελετητική Εταιρεία, Αθήνα.

- Μπέλλος, Β. (2015). Δισδιάστατη προσομοίωση πλημμύρας και διερεύνηση αβεβαιότητας λόγω μεγέθους υπολογιστικού κανάβου. *Πρακτικά 3ου Κοινού Συνεδρίου Ε.Υ.Ε.-Ε.Ε.Δ.Υ.Π-Ε.Υ.Σ.*, Αθήνα.
- Τερζίδης, Γ.Ζ. (1997). *Εφαρμοσμένη Υδραυλική*. Εκδόσεις Ζήτη.
- Τσακίρης, Γ. (2013). *Υδατικοί Πόροι: Ι. Υδρολογία & Εισαγωγή στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων*. Συμμετρία.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο Παράρτημα της παρούσας διατριβής παρατίθεται ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Fortran 90/95 για το αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης πλημμυρικής ροής FLOW-R2D. Εκτός από το κύριο σώμα του αλγορίθμου παρουσιάζονται στο τέλος και οι υπορουτίνες, ενώ παρεμβάλλονται και σχόλια τα οποία είναι απαραίτητα για τη στοιχειώδη κατανόηση του αλγορίθμου.

program flowr2d

!ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

integer,parameter:: xx1=200
integer,parameter:: yy1=200
integer,parameter:: xx2=20000
integer,parameter:: xx3=500

!ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

real,dimension(xx1):: x
real,dimension(yy1):: y
real,dimension(xx2):: time,cross,t_hydro,qqq_u,hhh_u,t_hyeto,ra,dra
real,dimension(xx1,yy1):: z,h,u,v,h1,u1,v1,h2,u2,v2,zy,hu,hv,hu1,hv1,hu2,hv2,h3,u3
real,dimension(xx1,yy1):: v3,sox,soy,n,h4,zy2,vsum,fr,rain,drain
integer,dimension(xx1,yy1):: switch
real:: na,na2,dx,dy,dt,sfx,sfy,ww,ffe,ffw,ffc,ff,ggn,ggg,ggc,gg,dd,ome
real:: umax,vmax,hmax,dtc,cc,hdry,tsum,ttt,harx,qqq_s,dis_neuman
real:: dis_neuman2,soarx,mass_in,mass_up,mass_down,mass_com,mass,h_sea real:: angl,r
real,dimension(xx2):: time2,ht1,ht2,ht3,ht4,ht5,ht6,ht7,ht8,ht9,ht10,ht11,ht12
real,dimension(xx2):: ht13,ht14,ht15,ht16,ht17,ht18,ht19,ht20,ht21
character(40):: numchr,numchr2,upstream,initial,hyetograph
integer:: i,j,tt,im,jm,kk,ikk,mm,imm,ccc,id,idh,err,iht

!ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

open(33,file='data.csv')
read(33,*)na,g,dx,dy,ome,cc,hdry,angl,im,jm,ikk,imm,qqq_s,soarx,r,h_sea
read(33,*)upstream,initial,hyetograph
close(33)

!g	ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ
!dx	ΒΗΜΑ ΧΩΡΟΥ (ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ x)
!dy	ΒΗΜΑ ΧΩΡΟΥ (ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ y)
!ome	ΣΤΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ
!cc	ΑΡΙΘΜΟΣ COURANT
!hdry	ΚΑΤΩΦΛΙ ΔΙΑΚΡΙΣΗΣ ΥΓΡΟΥ/ΞΗΡΟΥ ΠΥΘΜΕΝΑ
!angl	ΓΩΝΙΑ ΕΙΣΡΟΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ
!im	ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΕΛΙΩΝ (ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ x)
!jm	ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΕΛΙΩΝ (ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ y)
!ikk	ΑΡΙΘΜΟΣ ΧΡΟΝΙΚΩΝ ΣΤΙΓΜΩΝ ΠΟΥ ΕΓΓΡΑΦΟΝΤΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
!imm	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΠΟΥ ΕΓΓΡΑΦΟΝΤΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
!qqq_s	ΣΤΑΘΕΡΗ ΠΑΡΟΧΗ
!soarx	ΕΝΕΡΓΗ ΚΛΙΣΗ
!r	ΥΠΟΧΩΡΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΑΙΧΜΗΣ
!h_sea	ΚΑΤΑΝΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟ ΒΑΘΟΣ ΡΟΗΣ
!upstream	ΔΗΛΩΝΕΤΑΙ ΑΝ Η ΑΝΑΝΤΗ ΠΑΡΟΧΗ ΕΙΝΑΙ ΣΤΑΘΕΡΗ Η ΑΣΤΑΘΗΣ
!initial	ΔΗΛΩΝΕΤΑΙ ΑΝ ΥΠΑΡΧΟΥΝ ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΤΥΝΘΗΚΕΣ
!hyetograph	ΔΗΛΩΝΕΤΑΙ ΑΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΥΕΤΟΓΡΑΦΗΜΑ

!ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΣΤΙΓΜΕΣ ΕΓΓΡΑΦΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

time(1)=1000; time(2)=2000; time(3)=3000;

!ΘΕΣΕΙΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΕΓΓΡΑΦΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

cross(1)=100; cross(2)=200; cross(3)=300;

```

!ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
open(77,file='dtm.csv')
do j=1,jm
do i=1,im
read(77,*) x(i),y(j),z(i,j),switch(i,j),n(i,j)
end do
end do
close(77)
!ΣΤΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ
!ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΤΙΜΗ ΚΕΛΙΟΥ
!ΨΟΜΕΤΡΟ ΕΔΑΦΟΥΣ
!ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ ΠΥΘΜΕΝΑ

!ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ
if(upstream.eq.'unsteady') then
i=1
open(83,file='hydrograph.csv')
do
read(83,*,iostat=err) t_hydro(i),qqq_u(i),hhh_u(i)
if(err.eq.-1) exit
i=i+1
id=i
end do
i=0
close(83)
idh=id-1
qqq_s=qqq_u(1)
harx=hhh_u(1)
end if

!ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΎΠΕΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ
if(hyetograph.eq.'yes') then
i=1
open(85,file='hyetograph.csv')
do
read(85,*,iostat=err) t_hyeto(i),ra(i),dra(i)
if(err.eq.-1) exit
i=i+1
id=i
end do
i=0
close(85)
idy=id-1
end if

!ΕΓΓΡΑΦΗ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ
open(30,file='RESULTS\anaglyfo.csv')
do j=1,jm
do i=1,im
write(30,*) x(i),',',y(j),',',z(i,j)
end do
end do
close(30)

!ΤΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΛΙΣΕΩΝ ΠΥΘΜΕΝΑ
call slopes(sox,soy,z,dx,dy,im,jm,i,j,xx1,yy1)

```

```
!ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΝΕΡΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΝΤΗ ΟΡΙΑΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ
```

```
if(upstream.eq.'steady')then
call steady(i,j,xx1,yy1,xx3,im,jm,z,soarx,na,harx,dx,qqq_s,switch,n)
end if
```

```
!ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΤΥΝΘΗΚΕΣ
```

```
call
initial_con(h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,hu,hu1,hu2,hv,hv1,hv2,n,sox,soy,z,harx,h_sea,i,j,im,jm,xx1,yy1,switch,
soarx,ang1,initial)
```

```
!ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΡΧΙΚΟΥ ΟΓΚΟΥ ΝΕΡΟΥ
```

```
do j=1,jm
do i=1,im
mass_in=mass_in+h(i,j)*dx*dy
end do
end do
```

```
!ΕΓΓΡΑΦΗ ΣΕ ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΣΤΙΓΜΕΣ
```

```
do kk=1,ikk
ttt=time(kk)
write(numchr,*) kk
```

```
!ΚΥΡΙΟ ΣΩΜΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ
```

```
loop1:do while (tsum.lt.ttt) !xekinan oi epanalipseis
```

```
!ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΧΡΟΝΙΚΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ
```

```
umax=u(1,1); vmax=v(1,1); hmax=h(1,1)
do i=1,im
do j=1,jm
if (umax.lt.u(i,j)) then
umax=u(i,j)
end if
if (vmax.lt.v(i,j)) then
vmax=v(i,j)
end if
if (hmax.lt.h(i,j)) then
hmax=h(i,j)
end if
end do
end do
dte=dx/((umax**2+vmax**2)**0.5+((g*hmax)**0.5))
dt=dte*cc
if (dte.gt.50) then
dt=50
end if
```

```
!ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΓΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΕΙΣΡΟΗΣ
```

```
mass_up=qqq_s*dt+mass_up
```

```
!ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΩΝ
```

```
tt=tt+1
```

```
!ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ
```

```
tsum=tsum+dt
```

```
!ΕΙΣΡΟΗ ΚΑΙ ΕΚΡΟΗ ΝΕΡΟΥ (ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗ)
```

```
call rain_drain(i,j,im,jm,rain,drain,xx1,xx2,yy1,idy,tsum,ra,dra,t_hyeto)
```

```
!ANANTH OPIAKES STNΘHKES
```

```
do i=1,im
do j=1,jm
```

```
!ΣΤΑΘΕΡΗ ΠΑΡΟΧΗ
```

```
if(switch(i,j).eq.11) then
call up_steady(i,j,harx,h,u,v,hu,hv,h2,u2,v2,hu2,hv2,h1,u1,v1,hu1,hv1,soy,n,z,xx1,yy1,soarx,ang1)
end if
```

```
!ΑΣΤΑΘΗΣ ΠΑΡΟΧΗ (ΠΛΗΡΕΣ ΓΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑ)
```

```
if(switch(i,j).eq.12) then
call
up_unsteady(i,j,xx1,xx2,yy1,qqq_u,hhh_u,t_hydro,tsum,qqq_s,harx,id,idh,z,h,u,v,hu,hv,h1,u1,v1,hu1,hv1,h2,u2,v2,hu2,hv2,n,dt,soarx,r,g,soy)
end if
```

```
end do
end do
```

```
!ΒΗΜΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ
```

```
do i=1,im
do j=1,jm
```

```
!2D-SWE
```

```
if(switch(i,j).eq.1) then
!ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΤΝΕΧΕΙΑΣ
call mass_pre(xx1,yy1,i,j,ww,h,ffe,u,ffc,ff,ggn,v,ggc,gg,dd,h1,dx,dy,dt,rain,drain)
!ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΟΡΜΗΣ (x ΔΙΕΤΘΤΝΣΗ)
call mom_x_pre(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,ggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox)
!ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΟΡΜΗΣ (y ΔΙΕΤΘΤΝΣΗ)
call mom_y_pre(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,ggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
end if
```

```
!KATANTH OPIAKES STNΘHKES
```

```
!ΟΓΚΟΣ ΝΕΡΟΥ (ΘΑΛΑΣΣΑ, ΛΙΜΝΗ)
```

```
if(switch(i,j).eq.25) then
call down_sea(i,j,z,h,u,v,hu,hv,h1,u1,v1,hu1,hv1,h2,u2,v2,hu2,hv2,h_sea,xx1,yy1)
end if
```

```
!ΣΤΕΡΕΑ ΟΡΙΑ
```

```
if(switch(i,j).eq.101) then
call left(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_pre(xx1,yy1,i,j,ww,h,ffe,u,ffc,ff,ggn,v,ggc,gg,dd,h1,dx,dy,dt,rain,drain);
call mom_x_pre(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,ggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox);
call mom_y_pre_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,ggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
end if
```

```
if(switch(i,j).eq.102) then
call up(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_pre(xx1,yy1,i,j,ww,h,ffe,u,ffc,ff,ggn,v,ggc,gg,dd,h1,dx,dy,dt,rain,drain);
call mom_x_pre_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,ggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox);
call mom_y_pre(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,ggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
end if
```

```

if(switch(i,j).eq.103) then
call right(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_pre(xx1,yy1,i,j,ww,h,ffe,u,ffc,ff,gggn,v,ggc,gg,dd,h1,dx,dy,dt,rain,drain);
call mom_x_pre(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox);
call mom_y_pre_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
end if

```

```

if(switch(i,j).eq.104) then
call down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_pre(xx1,yy1,i,j,ww,h,ffe,u,ffc,ff,gggn,v,ggc,gg,dd,h1,dx,dy,dt,rain,drain);
call mom_x_pre_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox);
call mom_y_pre(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
end if

```

```

if(switch(i,j).eq.201) then
call left_up(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_pre(xx1,yy1,i,j,ww,h,ffe,u,ffc,ff,gggn,v,ggc,gg,dd,h1,dx,dy,dt,rain,drain);
call mom_x_pre_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox);
call mom_y_pre_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
end if

```

```

if(switch(i,j).eq.202) then
call right_up(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_pre(xx1,yy1,i,j,ww,h,ffe,u,ffc,ff,gggn,v,ggc,gg,dd,h1,dx,dy,dt,rain,drain);
call mom_x_pre_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox);
call mom_y_pre_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
end if

```

```

if(switch(i,j).eq.203) then
call right_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_pre(xx1,yy1,i,j,ww,h,ffe,u,ffc,ff,gggn,v,ggc,gg,dd,h1,dx,dy,dt,rain,drain);
call mom_x_pre_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox);
call mom_y_pre_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
end if

```

```

if(switch(i,j).eq.204) then
call left_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_pre(xx1,yy1,i,j,ww,h,ffe,u,ffc,ff,gggn,v,ggc,gg,dd,h1,dx,dy,dt,rain,drain);
call mom_x_pre_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox);
call mom_y_pre_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
end if

```

```

if(switch(i,j).eq.205) then
call left_right(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_pre(xx1,yy1,i,j,ww,h,ffe,u,ffc,ff,gggn,v,ggc,gg,dd,h1,dx,dy,dt,rain,drain);
call mom_x_pre(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox);
call mom_y_pre_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
end if

```

```

if(switch(i,j).eq.206) then
call up_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_pre(xx1,yy1,i,j,ww,h,ffe,u,ffc,ff,gggn,v,ggc,gg,dd,h1,dx,dy,dt,rain,drain);
call mom_x_pre_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox);
call mom_y_pre(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
end if

```

```

if(switch(i,j).eq.301) then
call left_up_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_pre(xx1,yy1,i,j,ww,h,ffe,u,ffc,ff,gggn,v,ggc,gg,dd,h1,dx,dy,dt,rain,drain);
call mom_x_pre_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox);
call mom_y_pre_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
end if

if(switch(i,j).eq.302) then
call left_right_up(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_pre(xx1,yy1,i,j,ww,h,ffe,u,ffc,ff,gggn,v,ggc,gg,dd,h1,dx,dy,dt,rain,drain);
call mom_x_pre_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox);
call mom_y_pre_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
end if

if(switch(i,j).eq.303) then
call right_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_pre(xx1,yy1,i,j,ww,h,ffe,u,ffc,ff,gggn,v,ggc,gg,dd,h1,dx,dy,dt,rain,drain);
call mom_x_pre_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox);
call mom_y_pre_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
end if

if(switch(i,j).eq.304) then
call left_right_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_pre(xx1,yy1,i,j,ww,h,ffe,u,ffc,ff,gggn,v,ggc,gg,dd,h1,dx,dy,dt,rain,drain);
call mom_x_pre_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox);
call mom_y_pre_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
end if

if(switch(i,j).eq.400) then
call left_right_up_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_pre(xx1,yy1,i,j,ww,h,ffe,u,ffc,ff,gggn,v,ggc,gg,dd,h1,dx,dy,dt,rain,drain);
call mom_x_pre_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox);
call mom_y_pre_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
end if

end do
end do

!BHMA ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ
do i=1,im
do j=1,jm

!2D-SWE
if(switch(i,j).eq.1) then
!ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΤΝΕΧΕΙΑΣ
call mass_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dt,dy,ome,h,h1,u1,v1,h2,rain,drain)
!ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΟΡΜΗΣ (x ΔΙΕΤΘΥΝΣΗ)
call
mom_x_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h2,u
2)
!ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΟΡΜΗΣ (y ΔΙΕΤΘΥΝΣΗ)
call
mom_y_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2,v2)
end if

```

!KATANTH OPIAKES STNΘHKES

!KINHMATIKO KYMA

```
if(switch(i,j).eq.21) then
dis_neuman=dis_neuman+hu(i-1,j)*dy
call down_kinematic_y_l(i,j,h,h1,h2,soy,u1,u2,n,dt,dx,g,xx1,yy1)
end if
```

```
if(switch(i,j).eq.22) then
dis_neuman=dis_neuman+hv(i,j-1)*dx
call down_kinematic_x_d(i,j,h,h1,h2,soy,u1,u2,n,dt,dy,g,xx1,yy1)
end if
```

```
if(switch(i,j).eq.23) then
dis_neuman=dis_neuman+hu(i+1,j)*dy
call down_kinematic_y_r(i,j,h,h1,h2,soy,u1,u2,n,dt,dx,g,xx1,yy1)
end if
```

```
if(switch(i,j).eq.24) then
dis_neuman=dis_neuman+hv(i,j+1)*dx
call down_kinematic_x_u(i,j,h,h1,h2,soy,u1,u2,n,dt,dy,g,xx1,yy1)
end if
```

!OΓKOS NEPOY (ΘAΛAΣΣA, AIMNH)

```
if(switch(i,j).eq.25) then
dis_neuman=dis_neuman+hv(i,j-1)*dx
call down_sea(i,j,z,h,u,v,hu,hv,h1,u1,v1,hu1,hv1,h2,u2,v2,hu2,hv2,h_sea,xx1,yy1)
end if
```

!ΣTEPEA OPIA

```
if(switch(i,j).eq.101) then
call left(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dt,dy,ome,h,h1,u1,v1,h2,rain,drain);
call
mom_x_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h2,u
2);
call
mom_y_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2,
v2)
end if
```

```
if(switch(i,j).eq.102) then
call up(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dt,dy,ome,h,h1,u1,v1,h2,rain,drain);
call
mom_x_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h2
,u2);
call
mom_y_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2,v2)
end if
```



```

if(switch(i,j).eq.103) then
call right(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dt,dy,ome,h,h1,u1,v1,h2,rain,drain);
call
mom_x_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h2,u
2);
call
mom_y_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2,
v2)
end if

if(switch(i,j).eq.104) then
call down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dt,dy,ome,h,h1,u1,v1,h2,rain,drain);
call
mom_x_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h2
,u2);
call
mom_y_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2,v2)
end if

if(switch(i,j).eq.201) then
call left_up(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)

call mass_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dt,dy,ome,h,h1,u1,v1,h2,rain,drain);
call
mom_x_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h2
,u2);
call
mom_y_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2,
v2)
end if

if(switch(i,j).eq.202) then
call right_up(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dt,dy,ome,h,h1,u1,v1,h2,rain,drain);
call
mom_x_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h2
,u2);
call
mom_y_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2,
v2)
end if

if(switch(i,j).eq.203) then
call right_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dt,dy,ome,h,h1,u1,v1,h2,rain,drain);
call
mom_x_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h2
,u2);
call
mom_y_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2,
v2)
end if

```

```

if(switch(i,j).eq.204) then
call left_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dt,dy,ome,h,h1,u1,v1,h2,rain,drain);
call
mom_x_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h2
,u2);
call
mom_y_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2,
v2)
end if

```

```

if(switch(i,j).eq.205) then
call left_right(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dt,dy,ome,h,h1,u1,v1,h2,rain,drain);
call
mom_x_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h2
,u2);
call
mom_y_cor_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2
,v2)
end if

```

```

if(switch(i,j).eq.206) then
call up_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dt,dy,ome,h,h1,u1,v1,h2,rain,drain);
call
mom_x_cor_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h
2,u2);
call
mom_y_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2,
v2)
end if

```

```

if(switch(i,j).eq.301) then
call left_up_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dt,dy,ome,h,h1,u1,v1,h2,rain,drain);
call
mom_x_cor_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h
2,u2);
call
mom_y_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2,
v2)
end if

```

```

if(switch(i,j).eq.302) then
call left_right_up(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dt,dy,ome,h,h1,u1,v1,h2,rain,drain);
call
mom_x_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h2
,u2);
call
mom_y_cor_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2
,v2)
end if

```

```

if(switch(i,j).eq.303) then
call right_up_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dt,dy,ome,h,h1,u1,v1,h2,rain,drain);
call
mom_x_cor_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h
2,u2);
call
mom_y_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2,
v2)
end if

```

```

if(switch(i,j).eq.304) then
call left_right_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dt,dy,ome,h,h1,u1,v1,h2,rain,drain);
call
mom_x_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h2
,u2);
call
mom_y_cor_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2
,v2)
end if

```

```

if(switch(i,j).eq.400) then
call left_right_up_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
call mass_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dt,dy,ome,h,h1,u1,v1,h2,rain,drain);
call
mom_x_cor_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h
2,u2);
call
mom_y_cor_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2
,v2)
end if

```

```

end do
end do

```

!ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΡΙΘΜΟΥ FROUDE

```

do j=1,jm
do i=1,im
if (h2(i,j).gt.0) then
fr(i,j)=((u2(i,j)**2+v2(i,j)**2)**0.5)/((g*h2(i,j))**0.5)
end if
end do
end do

```

!ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΧΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ

```

do j=1,jm
do i=1,im
vsum(i,j)=(u2(i,j)**2+ v2(i,j)**2)**0.5
end do
end do

```

!ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΓΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

```

mass_com=0
do j=2,jm-1
do i=2,im-1
if(switch(i,j).ne.0) then
mass_com=mass_com+h2(i,j)*dx*dy
end if
end do
end do

```

!ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΓΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΕΚΡΟΗΣ

```

mass_down=abs(dis_neuman)*dt+mass_down

```

!ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΟΓΚΟΥ ΝΕΡΟΥ

```

mass=((mass_com+mass_down-mass_in-mass_up)/(mass_in+mass_up))*100

```

!ΕΓΓΡΑΦΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΒΑΘΩΝ ΡΟΗΣ

```

!eggrafi megiston vathon
do i=1,im
do j=1,jm
if(h2(i,j).gt.h4(i,j)) then
h4(i,j)=h2(i,j)
end if
end do
end do

```

!ΕΓΓΡΑΦΗ ΒΑΘΩΝ ΡΟΗΣ ΣΤΙΣ ΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΣΤΙΓΜΕΣ

```

if (tsum.ge.ttt) then
do i=1,im
do j=1,jm
h3(i,j)=(1-(ttt-tsum+dt)/dt)*h(i,j)+(1-(tsum-ttt)/dt)*h2(i,j)
u3(i,j)=(1-(ttt-tsum+dt)/dt)*u(i,j)+(1-(tsum-ttt)/dt)*u2(i,j)
v3(i,j)=(1-(ttt-tsum+dt)/dt)*v(i,j)+(1-(tsum-ttt)/dt)*v2(i,j)
end do
end do
end if

```

!ΕΓΓΡΑΦΗ ΒΑΘΩΝ ΡΟΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΘΕΣΕΙΣ

```
if(mod(tt,200).eq.0) then
iht=iht+1
time2(iht)=tsum
ht1(iht)=h2(80,72)
ht2(iht)=h2(78,81)
ht3(iht)=h2(69,77)
ht4(iht)=h2(67,90)
ht5(iht)=h2(65,49)
ht6(iht)=h2(65,98)
ht7(iht)=h2(64,87)
ht8(iht)=h2(61,104)
ht9(iht)=h2(60,132)
ht10(iht)=h2(59,65)
ht11(iht)=h2(55,99)
ht12(iht)=h2(55,114)
ht13(iht)=h2(54,70)
ht14(iht)=h2(51,124)
ht15(iht)=h2(51,94)
ht16(iht)=h2(50,120)
ht17(iht)=h2(48,102)
ht18(iht)=h2(44,119)
ht19(iht)=h2(39,103)
ht20(iht)=h2(37,102)
ht21(iht)=h2(36,111)
end if
```

!ΠΑΛΑΙΩΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

```
do i=1,im
do j=1,jm
u1(i,j)=0; v1(i,j)=0; h1(i,j)=0; hu1(i,j)=0; hv1(i,j)=0
u(i,j)=u2(i,j); v(i,j)=v2(i,j); h(i,j)=h2(i,j); hu(i,j)=hu2(i,j); hv(i,j)=hv2(i,j)
end do
end do
```

!ΕΓΓΡΑΦΗ ΣΤΗΝ ΟΘΟΝΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

```
write(*,'(2x,1f7.2,3x,1f10.6,3x,1f10.4,2x,1i6,2x,1f14.2,2x,1f8.2,2x,1f9.2)')mass,dt,tsum,tt,dis_neuman,harx
,qqq_s
```

!ΕΓΓΡΑΦΗ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΟΓΚΟΥ

```
open(222,file='RESULTS\mass_balance.csv')
if(mod(tt,100).eq.0) then
write(222,*)tsum,"",mass
end if
```

!ΕΓΓΡΑΦΗ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΕΚΡΟΗΣ

```
open(333,file='RESULTS\outflow.csv')
if(mod(tt,100).eq.0) then
write(333,*)tsum,"",abs(dis_neuman)
end if
dis_neuman2=dis_neuman
dis_neuman=0
```

```
end do loop1
```

```
!ΚΑΤΩΦΛΙ ΔΙΑΚΡΙΣΗΣ ΥΓΡΟΥ/ΞΗΡΟΥ ΠΥΘΜΕΝΑ
```

```
do i=1,im
do j=1,jm
if(h3(i,j).lt.hdry) then
h3(i,j)=0
end if
zy(i,j)=h3(i,j)+z(i,j)
zy2(i,j)=h4(i,j)+z(i,j)
end do
end do
```

```
!ΕΓΓΡΑΦΗ ΒΑΘΩΝ ΡΟΗΣ
```

```
open(40,file="RESULTS\vathi"//trim(adjustl(numchr))//".csv")
do j=1,jm
do i=1,im
write(40,*) x(i),',',y(j),',',h3(i,j)
end do
end do
close(40)
```

```
!ΕΓΓΡΑΦΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ (x ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ)
```

```
open(50,file="RESULTS\uuu"//trim(adjustl(numchr))//".csv")
do j=1,jm
do i=1,im
write(50,*) x(i),',',y(j),',',u3(i,j)
end do
end do
close(50)
```

```
!ΕΓΓΡΑΦΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ (y ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ)
```

```
open(60,file="RESULTS\vvv"//trim(adjustl(numchr))//".csv")
do j=1,jm
do i=1,im
write(60,*) x(i),',',y(j),',',v3(i,j)
end do
end do
close(60)
```

```
!ΕΓΓΡΑΦΗ ΣΤΑΘΜΗΣ ΝΕΡΟΥ
```

```
open(70,file="RESULTS\zy"//trim(adjustl(numchr))//".csv")
do j=1,jm
do i=1,im
write(70,*) x(i),',',y(j),',',zy(i,j)
end do
end do
close(70)
```

```
!ΕΓΓΡΑΦΗ ΔΙΑΤΟΜΩΝ
```

```
do mm=1,imm
ccc=cross(mm)
write(numchr2,*) mm
open(80,file="RESULTS\xxx"//trim(adjustl(numchr))//trim(adjustl(numchr2))//".csv")
do j=ccc,ccc
do i=1,im
write(80,*) x(i),',',z(i,j),',',zy(i,j)
end do
end do
end do
```

!ΕΓΓΡΑΦΗ ΜΗΚΟΤΟΜΗΣ

```
open(90,file="RESULTS\yy"//trim(adjustl(numchr))//".csv")
do i=im-1,im-1
do j=1,jm
write(90,*) y(j),',',z(i,j),',',zy(i,j)
end do
end do
close(90)
```

!ΕΓΓΡΑΦΗ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΒΑΘΩΝ ΡΟΗΣ

```
open(100,file="RESULTS\vathi_max"//trim(adjustl(numchr))//".csv")
do j=1,jm
do i=1,im
write(100,*) x(i),',',y(j),',',h4(i,j)
end do
end do
close(100)
```

!ΕΓΓΡΑΦΗ ΑΡΙΘΜΟΥ FROUDE

```
open(110,file="RESULTS\froude"//trim(adjustl(numchr))//".csv")
do j=1,jm
do i=1,im
write(110,*) x(i),',',y(j),',',fr(i,j)
end do
end do
close(110)
```

!ΕΓΓΡΑΦΗ ΤΑΧΤΗΤΩΝ ΡΟΗΣ

```
open(120,file="RESULTS\velocity"//trim(adjustl(numchr))//".csv")
do j=1,jm
do i=1,im
write(120,*) x(i),',',y(j),',',vsum(i,j)
end do
end do
close(120)
```

!ΕΓΓΡΑΦΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΓΙΑ ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΤΥΝΘΗΚΕΣ

```
open(130,file="RESULTS\initial.csv")
do j=1,jm
do i=1,im
write(130,*) h3(i,j),',',u3(i,j),',',v3(i,j)
end do
end do
close(130)
```

end do

close(222)

close(333)


```
!~~~~~
!~~~~~
!~~~~~
!~~~~~
!ΤΠΟΡΟΥΤΙΝΕΣ
!~~~~~
!~~~~~
!~~~~~
!~~~~~
```

```
!ANANTH OPIAKES SYNΘΗΚΕΣ
```

```
!ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΝΕΡΟΥ ΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗ ΠΑΡΟΧΗ
```

```
subroutine steady(i,j,xx1,yy1,xx3,im,jm,z,soarx,na,harx,dx,qqq_s,switch,n)
```

```
integer: : i,j,xx1,yy1,xx3,im,jm,ic,icm
```

```
real,dimension(xx1,yy1):: z,n
```

```
integer,dimension(xx1,yy1):: switch
```

```
real,dimension(xx3):: qq,uu,zc,nc
```

```
real: : harx,harx0,harx1,soarx,sss,sss0,sss1,dx,na
```

```
harx0=44.1
```

```
sss0=10.0
```

```
sss1=0.00001
```

```
do i=1,im
```

```
do j=1,jm
```

```
if(switch(i,j).eq.11) then
```

```
icm=icm+1
```

```
zc(icm)=z(i,j)
```

```
nc(icm)=n(i,j)
```

```
end if
```

```
end do
```

```
end do
```

```
harx=harx0
```

```
sss=sss0
```

```
loop15: do while (sss.gt.sss1)
```

```
do ic=1,icm
```

```
if (harx-zc(ic).gt.0.0) then
```

```
!uu(ic)=((harx-zc(ic))**(2./3.))
```

```
uu(ic)=((harx-zc(ic))**(2./3.))/(nc(ic))
```

```
!qq(ic)=((harx-zc(ic))**(5./3.))
```

```
qq(ic)=((harx-zc(ic))**(5./3.))/(nc(ic))
```

```
else
```

```
uu(ic)=0.0
```

```
qq(ic)=0.0
```

```
end if
```

```
end do
```

```
uuu=0.0
```

```
qqq=0.0
```

```
do ic=1,icm
```

```
qqq=qqq+qq(ic)
```

```
uuu=uuu+uu(ic)
```

```
end do
```

```
!harx1=harx-(((qqq*(1/na)*dx*(soarx**0.5))-qqq_s)/(uuu*(1/na)*dx*(soarx**0.5)*(5.0/3.0)))
```

```
harx1=harx-(((qqq*dx*(soarx**0.5))-qqq_s)/(uuu*dx*(soarx**0.5)*(5.0/3.0)))
```

```
sss=abs(harx1-harx)
```

```
harx=harx1
```

```
end do loop15
```

```
end
```

!ANANTH OPIAKES ΣΤΥΝΘΗΚΕΣ

!ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΗΝ ANANTH OPIAKH ΔΙΑΤΟΜΗ ΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗ ΠΑΡΟΧΗ

subroutine up_steady(i,j,harx,h,u,v,hu,hv,h2,u2,v2,hu2,hv2,h1,u1,v1,hu1,hv1,soy,n,z,xx1,yy1,soarx,ang1)

integer :: i,j,xx1,yy1

real,dimension(xx1,yy1) :: h,u,v,hu,hv,h2,u2,v2,hu2,hv2,h1,u1,v1,hu1,hv1,soy,n,z

real :: harx,soarx,ang1

if (harx-z(i,j).le.0) then

h(i,j)=0

u(i,j)=0

v(i,j)=0

hu(i,j)=h(i,j)*u(i,j)

hv(i,j)=h(i,j)*v(i,j)

h2(i,j)=0

u2(i,j)=0

v2(i,j)=0

hu2(i,j)=h2(i,j)*u2(i,j)

hv2(i,j)=h2(i,j)*v2(i,j)

h1(i,j)=0

u1(i,j)=0

v1(i,j)=0

hu1(i,j)=h1(i,j)*u1(i,j)

hv1(i,j)=h1(i,j)*v1(i,j)

else

if(soy(i,j).gt.0.0) then

h(i,j)=harx-z(i,j)

u(i,j)=cosd(ang1)*(1/n(i,j))*(h(i,j)**(2./3.))*(soarx**0.5)

v(i,j)=sind(ang1)*(1/n(i,j))*(h(i,j)**(2./3.))*(soarx**0.5)

hu(i,j)=h(i,j)*u(i,j)

hv(i,j)=h(i,j)*v(i,j)

h2(i,j)=harx-z(i,j)

u2(i,j)=cosd(ang1)*(1/n(i,j))*(h(i,j)**(2./3.))*(soarx**0.5)

v2(i,j)=sind(ang1)*(1/n(i,j))*(h(i,j)**(2./3.))*(soarx**0.5)

hu2(i,j)=h2(i,j)*u2(i,j)

hv2(i,j)=h2(i,j)*v2(i,j)

h1(i,j)=harx-z(i,j)

u1(i,j)=cosd(ang1)*(1/n(i,j))*(h(i,j)**(2./3.))*(soarx**0.5)

v1(i,j)=sind(ang1)*(1/n(i,j))*(h(i,j)**(2./3.))*(soarx**0.5)

hu1(i,j)=h1(i,j)*u1(i,j)

hv1(i,j)=h1(i,j)*v1(i,j)

end if

end if

end

```

!ANANTH OPIAKES SYNΘHKES
!ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΗΝ ANANTH OPIAKH ΔΙΑΤΟΜΗ ΓΙΑ ΑΣΤΑΘΗ ΠΑΡΟΧΗ
subroutine
up_unsteady(i,j,xx1,xx2,yy1,qqq_u,hhh_u,t_hydro,tsum,qqq_s,harx,id,idh,z,h,u,v,hu,hv,h1,u1,v1,hu1,hv1
,h2,u2,v2,hu2,hv2,n,dt,soarx,r,g,soy)
integer :: i,j,iu,xx1,xx2,yy1,id,idu,idh,ff
real,dimension(xx2):: qqq_u,hhh_u,t_hydro
real,dimension(xx1,yy1):: z,h,u,v,hu,hv,h1,u1,v1,hu1,hv1,h2,u2,v2,hu2,hv2,n,soy
real:: tsum,qqq_s,harx,dt,soarx,r,g
real:: up1,up2,up3,up4,up5,up
real:: x1
do iu=1,idh
if(tsum.ge.t_hydro(iu)) then
qqq_s=qqq_u(iu)+((tsum-t_hydro(iu))/(t_hydro(iu+1)-t_hydro(iu)))*(qqq_u(iu+1)-qqq_u(iu))
harx=hhh_u(iu)+((tsum-t_hydro(iu))/(t_hydro(iu+1)-t_hydro(iu)))*(hhh_u(iu+1)-hhh_u(iu))
end if
end do
if (harx-z(i,j).gt.0.01) then
h1(i,j)=harx-z(i,j)
h2(i,j)=harx-z(i,j)
!up1=g*soarx
up1=g*soy(i,j)
up2=(g*((n(i,j)**2.0)*(abs(v(i,j)**2.0))/(h(i,j)**(4.0/3.0)))
up3=((2*(abs(v(i,j)**2.0)+3*g*abs(v(i,j)))/(5*abs(v(i,j))*h(i,j)))
up4=((g*h(i,j)-(abs(v(i,j)**2.0))/h(i,j))
!up5=(2.0/3.0)*(soarx/(r**2.0))*up4
up5=(2.0/3.0)*(soy(i,j)/(r**2.0))*up4
!x1=abs(v(i,j))+dt*(up1-up2+up3*(dh/dt)+up5)
x1=abs(v(i,j))+dt*(up1-up2+up3*((h2(i,j)-h(i,j))/dt)+up5)
if(x1.gt.0.0) then
v1(i,j)=-x1
v2(i,j)=-x1
hv1(i,j)=h1(i,j)*v1(i,j)
hv2(i,j)=h2(i,j)*v2(i,j)
else
v1(i,j)=-0.01
v2(i,j)=-0.01
end if
end if
end

```

!ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗ

```

subroutine rain_drain(i,j,im,jm,rain,drain,xx1,xx2,yy1,idy,tsum,ra,dra,t_hyeto)
integer : i,j,im,jm,xx1,xx2,yy1,id,idy
real,dimension(xx2):: ra,dra,t_hyeto
real,dimension(xx1,yy1):: rain,drain
real:: tsum,rai,drai
do id=1,idy
if(tsum.gt.t_hyeto(id)) then
rai=ra(id); drai=dra(id)
end if
end do
do i=2,im-1
do j=2,jm-1
rain(i,j)=rai
end do
end do
do i=im-1,im-1
do j=jm-1,jm-1
drain(i,j)=drai
end do
end do
end

```

!KATANTH OPIAKES STNΘHKES

!KINHMATIKO KYMA

```
subroutine down_kinematic_y_l(i,j,h,h1,h2,soy,u1,u2,n,dt,dx,g,xx1,yy1)
integer: : i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1): : h,h1,h2,soy,u1,u2,n
real: : dt,dx,g
h2(i,j)=h(i,j)-(dt/dx)*((g*h(i-1,j))**0.5)*(h(i,j)-h(i-1,j))
!u2(i,j)=(g*h(i-1,j))**0.5
end
```

```
subroutine down_kinematic_x_d(i,j,h,h1,h2,soy,u1,u2,n,dt,dy,g,xx1,yy1)
integer: : i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1): : h,h1,h2,soy,u1,u2,n
real: : dt,dy,g
h2(i,j)=h(i,j)-(dt/dy)*((g*h(i,j-1))**0.5)*(h(i,j)-h(i,j-1))
!u2(i,j)=(g*h(i,j-1))**0.5
end
```

```
subroutine down_kinematic_y_r(i,j,h,h1,h2,soy,u1,u2,n,dt,dx,g,xx1,yy1)
integer: : i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1): : h,h1,h2,soy,u1,u2,n
real: : dt,dx,g
h2(i,j)=h(i,j)-(dt/dx)*((g*h(i+1,j))**0.5)*(h(i,j)-h(i+1,j))
!u2(i,j)=(g*h(i+1,j))**0.5
end
```

```
subroutine down_kinematic_x_u(i,j,h,h1,h2,soy,u1,u2,n,dt,dy,g,xx1,yy1)
integer: : i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1): : h,h1,h2,soy,u1,u2,n
real: : dt,dy,g
h2(i,j)=h(i,j)-(dt/dy)*((g*h(i,j+1))**0.5)*(h(i,j)-h(i,j+1))
!u2(i,j)=(g*h(i,j+1))**0.5
end
```

!KATANTH OPIAKES STNΘHKES

!OΓKOS NEPOY

```
down_sea(i,j,z,h,u,v,hu,hv,h1,u1,v1,hu1,hv1,h2,u2,v2,hu2,hv2,h_sea,xx1,yy1)
integer: : i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1): : z,h,u,v,hu,hv,h1,u1,v1,hu1,hv1,h2,u2,v2,hu2,hv2
real: : h_sea
h(i,j)=h_sea-z(i,j); h1(i,j)=h_sea-z(i,j); h2(i,j)=h_sea-z(i,j)
u(i,j)=0; u1(i,j)=0; u2(i,j)=0; hu(i,j)=0; hu1(i,j)=0; hu2(i,j)=0
v(i,j)=0; v1(i,j)=0; v2(i,j)=0; hv(i,j)=0; hv1(i,j)=0; hv2(i,j)=0
end
```

!ΣΤΕΡΕΑ ΟΡΙΑ

```
subroutine left(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
integer: : i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1): : h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2
h(i-1,j)=h(i,j); u(i-1,j)=-u(i,j); v(i-1,j)=v(i,j)
h1(i-1,j)=h1(i,j); u1(i-1,j)=-u1(i,j); v1(i-1,j)=v1(i,j)
h2(i-1,j)=h2(i,j); u2(i-1,j)=-u2(i,j); v2(i-1,j)=v2(i,j)
end
```

```
subroutine up(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
integer: : i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1): : h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2
h(i,j+1)=h(i,j); u(i,j+1)=u(i,j); v(i,j+1)=-v(i,j)
h1(i,j+1)=h1(i,j); u1(i,j+1)=u1(i,j); v1(i,j+1)=-v1(i,j)
h2(i,j+1)=h2(i,j); u2(i,j+1)=u2(i,j); v2(i,j+1)=-v2(i,j)
end
```

```
subroutine right(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
integer: : i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1): : h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2
h(i+1,j)=h(i,j); u(i+1,j)=-u(i,j); v(i+1,j)=v(i,j)
h1(i+1,j)=h1(i,j); u1(i+1,j)=-u1(i,j); v1(i+1,j)=v1(i,j)
h2(i+1,j)=h2(i,j); u2(i+1,j)=-u2(i,j); v2(i+1,j)=v2(i,j)
end
```

```
subroutine down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
integer: : i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1): : h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2
h(i,j-1)=h(i,j); u(i,j-1)=u(i,j); v(i,j-1)=-v(i,j);
h1(i,j-1)=h1(i,j); u1(i,j-1)=u1(i,j); v1(i,j-1)=-v1(i,j)
h2(i,j-1)=h2(i,j); u2(i,j-1)=u2(i,j); v2(i,j-1)=-v2(i,j)
end
```

```
subroutine left_up(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
integer: : i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1): : h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2
h(i-1,j)=h(i,j); u(i-1,j)=-u(i,j); v(i-1,j)=v(i,j)
h1(i-1,j)=h1(i,j); u1(i-1,j)=-u1(i,j); v1(i-1,j)=v1(i,j)
h2(i-1,j)=h2(i,j); u2(i-1,j)=-u2(i,j); v2(i-1,j)=v2(i,j)
h(i,j+1)=h(i,j); u(i,j+1)=u(i,j); v(i,j+1)=-v(i,j)
h1(i,j+1)=h1(i,j); u1(i,j+1)=u1(i,j); v1(i,j+1)=-v1(i,j)
h2(i,j+1)=h2(i,j); u2(i,j+1)=u2(i,j); v2(i,j+1)=-v2(i,j)
h(i-1,j+1)=h(i,j); h1(i-1,j+1)=h1(i,j); h2(i-1,j+1)=h2(i,j)
end
```

```
subroutine right_up(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
integer: : i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1): : h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2
h(i+1,j)=h(i,j); u(i+1,j)=-u(i,j); v(i+1,j)=v(i,j)
h1(i+1,j)=h1(i,j); u1(i+1,j)=-u1(i,j); v1(i+1,j)=v1(i,j)
h2(i+1,j)=h2(i,j); u2(i+1,j)=-u2(i,j); v2(i+1,j)=v2(i,j)
h(i,j+1)=h(i,j); u(i,j+1)=u(i,j); v(i,j+1)=-v(i,j)
h1(i,j+1)=h1(i,j); u1(i,j+1)=u1(i,j); v1(i,j+1)=-v1(i,j)
h2(i,j+1)=h2(i,j); u2(i,j+1)=u2(i,j); v2(i,j+1)=-v2(i,j)
h(i+1,j+1)=h(i,j); h1(i+1,j+1)=h1(i,j); h2(i+1,j+1)=h2(i,j)
end
```

```

subroutine right_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
integer:: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1):: h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2
h(i+1,j)=h(i,j); u(i+1,j)=-u(i,j); v(i+1,j)=v(i,j)
h1(i+1,j)=h1(i,j); u1(i+1,j)=-u1(i,j); v1(i+1,j)=v1(i,j)
h2(i+1,j)=h2(i,j); u2(i+1,j)=-u2(i,j); v2(i+1,j)=v2(i,j)
h(i,j-1)=h(i,j); u(i,j-1)=u(i,j); v(i,j-1)=-v(i,j)
h1(i,j-1)=h1(i,j); u1(i,j-1)=u1(i,j); v1(i,j-1)=-v1(i,j)
h2(i,j-1)=h2(i,j); u2(i,j-1)=u2(i,j); v2(i,j-1)=-v2(i,j)
h(i+1,j-1)=h(i,j); h1(i+1,j-1)=h1(i,j); h2(i+1,j-1)=h2(i,j)
end

```

```

subroutine left_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
integer:: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1):: h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2
h(i-1,j)=h(i,j); u(i-1,j)=-u(i,j); v(i-1,j)=v(i,j)
h1(i-1,j)=h1(i,j); u1(i-1,j)=-u1(i,j); v1(i-1,j)=v1(i,j)
h2(i-1,j)=h2(i,j); u2(i-1,j)=-u2(i,j); v2(i-1,j)=v2(i,j)
h(i,j-1)=h(i,j); u(i,j-1)=u(i,j); v(i,j-1)=-v(i,j)
h1(i,j-1)=h1(i,j); u1(i,j-1)=u1(i,j); v1(i,j-1)=-v1(i,j)
h2(i,j-1)=h2(i,j); u2(i,j-1)=u2(i,j); v2(i,j-1)=-v2(i,j)
h(i-1,j-1)=h(i,j); h1(i-1,j-1)=h1(i,j); h2(i-1,j-1)=h2(i,j)
end

```

```

subroutine left_right(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
integer:: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1):: h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2
h(i-1,j)=h(i,j); u(i-1,j)=-u(i,j); v(i-1,j)=v(i,j)
h1(i-1,j)=h1(i,j); u1(i-1,j)=-u1(i,j); v1(i-1,j)=v1(i,j)
h2(i-1,j)=h2(i,j); u2(i-1,j)=-u2(i,j); v2(i-1,j)=v2(i,j)
h(i+1,j)=h(i,j); u(i+1,j)=-u(i,j); v(i+1,j)=v(i,j)
h1(i+1,j)=h1(i,j); u1(i+1,j)=-u1(i,j); v1(i+1,j)=v1(i,j)
h2(i+1,j)=h2(i,j); u2(i+1,j)=-u2(i,j); v2(i+1,j)=v2(i,j)
end

```

```

subroutine up_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
integer:: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1):: h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2
h(i,j+1)=h(i,j); u(i,j+1)=u(i,j); v(i,j+1)=-v(i,j)
h1(i,j+1)=h1(i,j); u1(i,j+1)=u1(i,j); v1(i,j+1)=-v1(i,j)
h2(i,j+1)=h2(i,j); u2(i,j+1)=u2(i,j); v2(i,j+1)=-v2(i,j)
h(i,j-1)=h(i,j); u(i,j-1)=u(i,j); v(i,j-1)=-v(i,j);
h1(i,j-1)=h1(i,j); u1(i,j-1)=u1(i,j); v1(i,j-1)=-v1(i,j)
h2(i,j-1)=h2(i,j); u2(i,j-1)=u2(i,j); v2(i,j-1)=-v2(i,j)
end

```

```

subroutine left_up_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
integer:: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1):: h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2
h(i-1,j)=h(i,j); u(i-1,j)=-u(i,j); v(i-1,j)=v(i,j); h1(i-1,j)=h1(i,j); u1(i-1,j)=-u1(i,j); v1(i-1,j)=v1(i,j)
h2(i-1,j)=h2(i,j); u2(i-1,j)=-u2(i,j); v2(i-1,j)=v2(i,j)
h(i,j+1)=h(i,j); u(i,j+1)=u(i,j); v(i,j+1)=-v(i,j)
h1(i,j+1)=h1(i,j); u1(i,j+1)=u1(i,j); v1(i,j+1)=-v1(i,j)
h2(i,j+1)=h2(i,j); u2(i,j+1)=u2(i,j); v2(i,j+1)=-v2(i,j)
h(i,j-1)=h(i,j); u(i,j-1)=u(i,j); v(i,j-1)=-v(i,j);
h1(i,j-1)=h1(i,j); u1(i,j-1)=u1(i,j); v1(i,j-1)=-v1(i,j)
h2(i,j-1)=h2(i,j); u2(i,j-1)=u2(i,j); v2(i,j-1)=-v2(i,j)
end

```

```

subroutine left_right_up(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
integer:: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1):: h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2
h(i-1,j)=h(i,j); u(i-1,j)=-u(i,j); v(i-1,j)=v(i,j)
h1(i-1,j)=h1(i,j); u1(i-1,j)=-u1(i,j); v1(i-1,j)=v1(i,j)
h2(i-1,j)=h2(i,j); u2(i-1,j)=-u2(i,j); v2(i-1,j)=v2(i,j)
h(i+1,j)=h(i,j); u(i+1,j)=-u(i,j); v(i+1,j)=v(i,j)
h1(i+1,j)=h1(i,j); u1(i+1,j)=-u1(i,j); v1(i+1,j)=v1(i,j)
h2(i+1,j)=h2(i,j); u2(i+1,j)=-u2(i,j); v2(i+1,j)=v2(i,j)
h(i,j+1)=h(i,j); u(i,j+1)=u(i,j); v(i,j+1)=-v(i,j)
h1(i,j+1)=h1(i,j); u1(i,j+1)=u1(i,j); v1(i,j+1)=-v1(i,j)
h2(i,j+1)=h2(i,j); u2(i,j+1)=u2(i,j); v2(i,j+1)=-v2(i,j)
end

```

```

subroutine right_up_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
integer:: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1):: h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2
h(i+1,j)=h(i,j); u(i+1,j)=-u(i,j); v(i+1,j)=v(i,j)
h1(i+1,j)=h1(i,j); u1(i+1,j)=-u1(i,j); v1(i+1,j)=v1(i,j)
h2(i+1,j)=h2(i,j); u2(i+1,j)=-u2(i,j); v2(i+1,j)=v2(i,j)
h(i,j+1)=h(i,j); u(i,j+1)=u(i,j); v(i,j+1)=-v(i,j)
h1(i,j+1)=h1(i,j); u1(i,j+1)=u1(i,j); v1(i,j+1)=-v1(i,j)
h2(i,j+1)=h2(i,j); u2(i,j+1)=u2(i,j); v2(i,j+1)=-v2(i,j)
h(i,j-1)=h(i,j); u(i,j-1)=u(i,j); v(i,j-1)=-v(i,j);
h1(i,j-1)=h1(i,j); u1(i,j-1)=u1(i,j); v1(i,j-1)=-v1(i,j)
h2(i,j-1)=h2(i,j); u2(i,j-1)=u2(i,j); v2(i,j-1)=-v2(i,j)
end

```

```

subroutine left_right_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
integer:: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1):: h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2
h(i-1,j)=h(i,j); u(i-1,j)=-u(i,j); v(i-1,j)=v(i,j)
h1(i-1,j)=h1(i,j); u1(i-1,j)=-u1(i,j); v1(i-1,j)=v1(i,j)
h2(i-1,j)=h2(i,j); u2(i-1,j)=-u2(i,j); v2(i-1,j)=v2(i,j)
h(i+1,j)=h(i,j); u(i+1,j)=-u(i,j); v(i+1,j)=v(i,j)
h1(i+1,j)=h1(i,j); u1(i+1,j)=-u1(i,j); v1(i+1,j)=v1(i,j)
h2(i+1,j)=h2(i,j); u2(i+1,j)=-u2(i,j); v2(i+1,j)=v2(i,j)
h(i,j-1)=h(i,j); u(i,j-1)=u(i,j); v(i,j-1)=-v(i,j);
h1(i,j-1)=h1(i,j); u1(i,j-1)=u1(i,j); v1(i,j-1)=-v1(i,j)
h2(i,j-1)=h2(i,j); u2(i,j-1)=u2(i,j); v2(i,j-1)=-v2(i,j)
end

```

```

subroutine left_right_up_down(i,j,h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,xx1,yy1)
integer:: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1):: h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2
h(i-1,j)=h(i,j); u(i-1,j)=-u(i,j); v(i-1,j)=v(i,j)
h1(i-1,j)=h1(i,j); u1(i-1,j)=-u1(i,j); v1(i-1,j)=v1(i,j)
h2(i-1,j)=h2(i,j); u2(i-1,j)=-u2(i,j); v2(i-1,j)=v2(i,j)
h(i+1,j)=h(i,j); u(i+1,j)=-u(i,j); v(i+1,j)=v(i,j)
h1(i+1,j)=h1(i,j); u1(i+1,j)=-u1(i,j); v1(i+1,j)=v1(i,j)
h2(i+1,j)=h2(i,j); u2(i+1,j)=-u2(i,j); v2(i+1,j)=v2(i,j)
h(i,j+1)=h(i,j); u(i,j+1)=u(i,j); v(i,j+1)=-v(i,j)
h1(i,j+1)=h1(i,j); u1(i,j+1)=u1(i,j); v1(i,j+1)=-v1(i,j)
h2(i,j+1)=h2(i,j); u2(i,j+1)=u2(i,j); v2(i,j+1)=-v2(i,j)
h(i,j-1)=h(i,j); u(i,j-1)=u(i,j); v(i,j-1)=-v(i,j);
h1(i,j-1)=h1(i,j); u1(i,j-1)=u1(i,j); v1(i,j-1)=-v1(i,j)
h2(i,j-1)=h2(i,j); u2(i,j-1)=u2(i,j); v2(i,j-1)=-v2(i,j)
end

```


!APXIKES ΣΤΝΘΗΚΕΣ

```

subroutine
initial_con(h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,hu,hu1,hu2,hv,hv1,hv2,n,sox,soy,z,harx,h_sea,i,j,im,jm,xx1,yy1,switch,
soarx,ang1,initial)
integer:: i,j,im,jm,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1):: h,h1,h2,u,u1,u2,v,v1,v2,hu,hu1,hu2,hv,hv1,hv2,n,sox,soy,z
integer,dimension(xx1,yy1):: switch
real:: harx,h_sea,soarx,ang1
character(40):: initial
if(initial.eq.'yes') then
open(44,file='initial.csv')
do j=1,jm; do i=1,im
read(44,*) h(i,j),u(i,j),v(i,j)
end do; end do
close(44)
end if
do j=1,1
do i=1,im
u(i,j)=0; u1(i,j)=0; u2(i,j)=0; hu(i,j)=0; hu1(i,j)=0; hu2(i,j)=0; sox(i,j)=sox(i,j)
end do
end do
do j=1,jm
do i=1,im
if(switch(i,j).eq.11.or.switch(i,j).eq.12) then
if (harx-z(i,j).le.0) then
h(i,j)=0.01
v(i,j)=-0.01
hu(i,j)=h(i,j)*u(i,j)
hv(i,j)=h(i,j)*v(i,j)
h2(i,j)=0.01
v2(i,j)=-0.01
hu2(i,j)=h2(i,j)*u2(i,j)
hv2(i,j)=h2(i,j)*v2(i,j)
h1(i,j)=0.01
v1(i,j)=-0.01
hu1(i,j)=h1(i,j)*u1(i,j)
hv1(i,j)=h1(i,j)*v1(i,j)
else
h(i,j)=harx-z(i,j)
u(i,j)=cosd(ang1)*(1/n(i,j))*(h(i,j)**(2./3.))*(soarx**0.5)
v(i,j)=sind(ang1)*(1/n(i,j))*(h(i,j)**(2./3.))*(soarx**0.5)
hu(i,j)=h(i,j)*u(i,j)
hv(i,j)=h(i,j)*v(i,j)
h2(i,j)=harx-z(i,j)
u2(i,j)=cosd(ang1)*(1/n(i,j))*(h(i,j)**(2./3.))*(soarx**0.5)
v2(i,j)=sind(ang1)*(1/n(i,j))*(h(i,j)**(2./3.))*(soarx**0.5)
hu2(i,j)=h2(i,j)*u2(i,j)
hv2(i,j)=h2(i,j)*v2(i,j)
h1(i,j)=harx-z(i,j)
u1(i,j)=cosd(ang1)*(1/n(i,j))*(h(i,j)**(2./3.))*(soarx**0.5)
v1(i,j)=sind(ang1)*(1/n(i,j))*(h(i,j)**(2./3.))*(soarx**0.5)
hu1(i,j)=h1(i,j)*u1(i,j)
hv1(i,j)=h1(i,j)*v1(i,j)
end if
end if
end do
end do
end do
end

```

!ΚΛΙΣΕΙΣ ΠΥΘΜΕΝΑ

```

subroutine slopes(sox,soy,z,dx,dy,im,jm,i,j,xx1,yy1)
integer: : i,j,im,jm,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1):: z,sox,soy
real:: dx,dy
do i=1,1
do j=1,jm
sox(i,j)=(z(i,j)-z(i+1,j))/dx
end do
end do
do i=im,im
do j=1,jm
sox(i,j)=(z(i-1,j)-z(i,j))/dx
end do
end do
do i=1,im
do j=1,1
soy(i,j)=(z(i,j)-z(i,j+1))/dy
end do
end do
do i=1,im
do j=jm,jm
soy(i,j)=(z(i,j-1)-z(i,j))/dy
end do
end do
do i=2,im-1
do j=1,jm
sox(i,j)=(z(i-1,j)-z(i+1,j))/(2*dx)
end do
end do
do i=1,im
do j=2,jm-1
soy(i,j)=(z(i,j-1)-z(i,j+1))/(2*dy)
end do
end do
end

```

```
!ΒΗΜΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ
!ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ
```

```
subroutine mass_pre(xx1,yy1,i,j,ww,h,ffe,u,ffc,ff,ggn,v,ggc,gg,dd,h1,dx,dy,dt,rain,drain)
integer :: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1):: h,u,v,h1,rain,drain
real:: ww,ffe,ffc,ff,ggn,ggc,gg,dd,dx,dy,dt
ww=h(i,j)
ffe=h(i+1,j)*u(i+1,j)
ffc=h(i,j)*u(i,j)
ff=ffe-ffc
ggn=h(i,j+1)*v(i,j+1)
ggc=h(i,j)*v(i,j)
gg=ggn-ggc
dd=rain(i,j)-drain(i,j)
h1(i,j)=ww-(dt/dx)*ff-(dt/dy)*gg+dt*dd
if(h1(i,j).le.0) then
h1(i,j)=0
end if
end
```

```
!ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΟΡΜΗΣ (x ΔΙΕΤΘΤΝΣΗ)
```

```
subroutine
mom_x_pre(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,ggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox)
integer :: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1):: h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox
real:: ww,ffe,ffc,ff,ggn,ggc,gg,dd,g,sfx,dx,dy,dt
ww=hu(i,j)
ffe=(h(i+1,j)*u(i+1,j)**2)+0.5*g*h(i+1,j)**2
ffc=(h(i,j)*u(i,j)**2)+0.5*g*h(i,j)**2
ff=ffe-ffc
ggn=h(i,j+1)*u(i,j+1)*v(i,j+1)
ggc=h(i,j)*u(i,j)*v(i,j)
gg=ggn-ggc
if (h(i,j).gt.hdry) then
sfx=((n(i,j)**2)*(u(i,j))*(((u(i,j)**2)+(v(i,j)**2)**0.5)))/((h(i,j))**(4./3.))
dd=g*h(i,j)*(sox(i,j)-sfx)
hu1(i,j)=ww-(dt/dx)*ff-(dt/dy)*gg+dt*dd
else
hu1(i,j)=0
end if
if (h1(i,j).gt.0) then
u1(i,j)=hu1(i,j)/h1(i,j)
else
u1(i,j)=0
end if
end
```

!ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΟΡΜΗΣ (y ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ)

```

subroutine
mom_y_pre(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
integer: : i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1): : h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy
real: : ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfy,dx,dy,dt
ww=hv(i,j)
ffe=h(i+1,j)*u(i+1,j)*v(i+1,j)
ffc=h(i,j)*u(i,j)*v(i,j)
ff=ffe-ffc
gggn=(h(i,j+1)*v(i,j+1)**2)+0.5*g*h(i,j+1)**2
ggc=(h(i,j)*v(i,j)**2)+0.5*g*h(i,j)**2
gg=gggn-ggc
if (h(i,j).gt.hdry) then
sfy=((n(i,j)**2)*(v(i,j))*(((u(i,j)**2)+(v(i,j)**2)**0.5)))/((h(i,j))**(4./3.))
dd=g*h(i,j)*(soy(i,j)-sfy)
hv1(i,j)=ww-(dt/dx)*ff-(dt/dy)*gg+dt*dd
else
hv1(i,j)=0
end if
if (h1(i,j).gt.0) then
v1(i,j)=hv1(i,j)/h1(i,j)
else
v1(i,j)=0
end if
end

```

!ΒΗΜΑ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ

!ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ

```

subroutine mass_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dt,dy,ome,h,h1,u1,v1,h2,rain,drain)
integer: : i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1): : h,h1,u1,v1,h2,rain,drain
real: : ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dy,dt,ome
ww=ome*h(i,j)+0.25*(1-ome)*(h(i+1,j)+h(i-1,j)+h(i,j+1)+h(i,j-1))
ffc=h1(i,j)*u1(i,j)
ffw=h1(i-1,j)*u1(i-1,j)
ff=ffc-ffw
ggc=h1(i,j)*v1(i,j)
ggs=h1(i,j-1)*v1(i,j-1)
gg=ggc-ggs
dd=rain(i,j)-drain(i,j)
h2(i,j)=0.5*(h1(i,j)+ww-(dt/dx)*ff-(dt/dy)*gg+dt*dd)
if(h2(i,j).le.0) then
h2(i,j)=0
end if
end

```

!ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΟΡΜΗΣ (x ΔΙΕΤΘΥΝΣΗ)

```

subroutine
mom_x_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h2,u
2)
integer:: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1):: hu,h1,u1,v1,n,sox,hu2,h2,u2,hu1
real:: ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dy,dt,ome,sfx,hdry
ww=ome*hu(i,j)+0.25*(1-ome)*(hu(i+1,j)+hu(i-1,j)+hu(i,j+1)+hu(i,j-1))
ffc=(h1(i,j)*u1(i,j)**2)+0.5*g*h1(i,j)**2
ffw=(h1(i-1,j)*u1(i-1,j)**2)+0.5*g*h1(i-1,j)**2
ff=ffc-ffw
ggc=h1(i,j)*u1(i,j)*v1(i,j)
ggs=h1(i,j-1)*u1(i,j-1)*v1(i,j-1)
gg=ggc-ggs
if (h1(i,j).gt.hdry) then
sfx=((n(i,j)**2)*(u1(i,j))*(((u1(i,j)**2)+(v1(i,j)**2)**0.5)))/((h1(i,j))**(4./3.))
dd=g*h1(i,j)*(sox(i,j)-sfx)
hu2(i,j)=0.5*(hu1(i,j)+ww-(dt/dx)*ff-(dt/dy)*gg+dt*dd)
else
hu2(i,j)=0
end if
if (h2(i,j).gt.0) then
u2(i,j)=hu2(i,j)/h2(i,j)
else
u2(i,j)=0
end if
end

```

!ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΟΡΜΗΣ (y ΔΙΕΤΘΥΝΣΗ)

!momentum conservation - y axis

```

subroutine
mom_y_cor(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2,v2)
integer:: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1):: hv,h1,u1,v1,n,soy,hv2,h2,v2,hv1
real:: ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dy,dt,ome,sfy,hdry
ww=ome*hv(i,j)+0.25*(1-ome)*(hv(i+1,j)+hv(i-1,j)+hv(i,j+1)+hv(i,j-1))
ffc=h1(i,j)*u1(i,j)*v1(i,j)
ffw=h1(i-1,j)*u1(i-1,j)*v1(i-1,j)
ff=ffc-ffw
ggc=(h1(i,j)*v1(i,j)**2)+0.5*g*h1(i,j)**2
ggs=(h1(i,j-1)*v1(i,j-1)**2)+0.5*g*h1(i,j-1)**2
gg=ggc-ggs
if (h1(i,j).gt.hdry) then
sfy=((n(i,j)**2)*(v1(i,j))*(((u1(i,j)**2)+(v1(i,j)**2)**0.5)))/((h1(i,j))**(4./3.))
dd=g*h1(i,j)*(soy(i,j)-sfy)
hv2(i,j)=0.5*(hv1(i,j)+ww-(dt/dx)*ff-(dt/dy)*gg+dt*dd)
else
hv2(i,j)=0
end if
if (h2(i,j).gt.0) then
v2(i,j)=hv2(i,j)/h2(i,j)
else
v2(i,j)=0
end if
end

```

!ΒΗΜΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ

!ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΟΡΜΗΣ (x ΔΙΕΤΘΤΝΣΗ)

```

subroutine
mom_x_pre_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox)
integer: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1): h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox
real: ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfx,dx,dy,dt
ww=hu(i,j)
ffe=(h(i+1,j)*u(i+1,j)**2)+0.5*g*h(i+1,j)**2
ffc=(h(i,j)*u(i,j)**2)+0.5*g*h(i,j)**2
ff=ffe-ffc
gggn=h(i,j+1)*u(i,j+1)*v(i,j+1)
ggc=h(i,j)*u(i,j)*v(i,j)
gg=gggn-ggc
if (h(i,j).gt.hdry) then
sfx=((n(i,j)**2)*(u(i,j))*(((u(i,j)**2)+(v(i,j)**2))*0.5))/(((h(i,j)*dx)/(h(i,j)+dx))**(4./3.))
dd=g*h(i,j)*sox(i,j)-g*((h(i,j)*dx)/(h(i,j)+dx))*sfx
hu1(i,j)=ww-(dt/dx)*ff-(dt/dy)*gg+dt*dd
else
hu1(i,j)=0
end if
if (h1(i,j).gt.0) then
u1(i,j)=hu1(i,j)/h1(i,j)
else
u1(i,j)=0
end if
end

```

!ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΟΡΜΗΣ (y ΔΙΕΤΘΤΝΣΗ)

```

subroutine
mom_y_pre_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
integer: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1): h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy
real: ww,ffe,ffc,ff,gggn,ggc,gg,dd,g,sfy,dx,dy,dt
ww=hv(i,j)
ffe=h(i+1,j)*u(i+1,j)*v(i+1,j)
ffc=h(i,j)*u(i,j)*v(i,j)
ff=ffe-ffc
gggn=(h(i,j+1)*v(i,j+1)**2)+0.5*g*h(i,j+1)**2
ggc=(h(i,j)*v(i,j)**2)+0.5*g*h(i,j)**2
gg=gggn-ggc
if (h(i,j).gt.hdry) then
sfy=((n(i,j)**2)*(v(i,j))*(((u(i,j)**2)+(v(i,j)**2))*0.5))/(((h(i,j)*dy)/(h(i,j)+dy))**(4./3.))
dd=g*h(i,j)*soy(i,j)-g*((h(i,j)*dy)/(h(i,j)+dy))*sfy
hv1(i,j)=ww-(dt/dx)*ff-(dt/dy)*gg+dt*dd
else
hv1(i,j)=0
end if
if (h1(i,j).gt.0) then
v1(i,j)=hv1(i,j)/h1(i,j)
else
v1(i,j)=0
end if
end

```

!ΒΗΜΑ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ

!ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΟΡΜΗΣ (x ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ)

subroutine

mom_x_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h2,u2)

integer:: i,j,xx1,yy1

real,dimension(xx1,yy1):: hu,h1,u1,v1,n,sox,hu2,h2,u2,hu1

real:: ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dy,dt,ome,sfx,hdry

ww=ome*hu(i,j)+0.25*(1-ome)*(hu(i+1,j)+hu(i-1,j)+hu(i,j+1)+hu(i,j-1))

ffc=(h1(i,j)*u1(i,j)**2)+0.5*g*h1(i,j)**2

ffw=(h1(i-1,j)*u1(i-1,j)**2)+0.5*g*h1(i-1,j)**2

ff=ffc-ffw

ggc=h1(i,j)*u1(i,j)*v1(i,j)

ggs=h1(i,j-1)*u1(i,j-1)*v1(i,j-1)

gg=ggc-ggs

if (h1(i,j).gt.hdry) then

sfx=((n(i,j)**2)*(u1(i,j))*(((u1(i,j)**2)+(v1(i,j)**2))*0.5))/(((h1(i,j)*dx)/(h1(i,j)+dx))**(4./3.))

dd=g*h1(i,j)*sox(i,j)-g*((h1(i,j)*dx)/(h1(i,j)+dx))*sfx

hu2(i,j)=0.5*(hu1(i,j)+ww-(dt/dx)*ff-(dt/dy)*gg+dt*dd)

else

hu2(i,j)=0

end if

if (h2(i,j).gt.0) then

u2(i,j)=hu2(i,j)/h2(i,j)

else

u2(i,j)=0

end if

end

!ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΟΡΜΗΣ (y ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ)

subroutine

mom_y_cor_s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2,v2)

integer:: i,j,xx1,yy1

real,dimension(xx1,yy1):: hv,h1,u1,v1,n,soy,hv2,h2,v2,hv1

real:: ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dy,dt,ome,sfy,hdry

ww=ome*hv(i,j)+0.25*(1-ome)*(hv(i+1,j)+hv(i-1,j)+hv(i,j+1)+hv(i,j-1))

ffc=h1(i,j)*u1(i,j)*v1(i,j)

ffw=h1(i-1,j)*u1(i-1,j)*v1(i-1,j)

ff=ffc-ffw

ggc=(h1(i,j)*v1(i,j)**2)+0.5*g*h1(i,j)**2

ggs=(h1(i,j-1)*v1(i,j-1)**2)+0.5*g*h1(i,j-1)**2

gg=ggc-ggs

if (h1(i,j).gt.hdry) then

sfy=((n(i,j)**2)*(v1(i,j))*(((u1(i,j)**2)+(v1(i,j)**2))*0.5))/(((h1(i,j)*dy)/(h1(i,j)+dy))**(4./3.))

dd=g*h1(i,j)*soy(i,j)-g*((h1(i,j)*dy)/(h1(i,j)+dy))*sfy

hv2(i,j)=0.5*(hv1(i,j)+ww-(dt/dx)*ff-(dt/dy)*gg+dt*dd)

else

hv2(i,j)=0

end if

if (h2(i,j).gt.0) then

v2(i,j)=hv2(i,j)/h2(i,j)

else

v2(i,j)=0

end if

end

!ΒΗΜΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ

!ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΟΡΜΗΣ (x ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ)

```
subroutine
mom_x_pre_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,ggn,ggc,gg,dd,g,sfx,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox)
integer: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1): h,u,v,hu,hu1,u1,h1,n,sox
real: ww,ffe,ffc,ff,ggn,ggc,gg,dd,g,sfx,dx,dy,dt
ww=hu(i,j)
ffe=(h(i+1,j)*u(i+1,j)**2)+0.5*g*h(i+1,j)**2
ffc=(h(i,j)*u(i,j)**2)+0.5*g*h(i,j)**2
ff=ffe-ffc
ggn=h(i,j+1)*u(i,j+1)*v(i,j+1)
ggc=h(i,j)*u(i,j)*v(i,j)
gg=ggn-ggc
if (h(i,j).gt.hdry) then
sfx=((n(i,j)**2)*(u(i,j))*(((u(i,j)**2)+(v(i,j)**2)**0.5)))/(((h(i,j)*dx)/(h(i,j)+2*dx))**(4./3.))
dd=g*h(i,j)*sox(i,j)-g*((h(i,j)*dx)/(h(i,j)+2*dx))*sfx
hu1(i,j)=ww-(dt/dx)*ff-(dt/dy)*gg+dt*dd
else
hu1(i,j)=0
end if
if (h1(i,j).gt.0) then
u1(i,j)=hu1(i,j)/h1(i,j)
else
u1(i,j)=0
end if
end
```

!ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΟΡΜΗΣ (y ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ)

```
subroutine
mom_y_pre_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffe,ffc,ff,ggn,ggc,gg,dd,g,sfy,hdry,dx,dy,dt,h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy)
integer: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1): h,u,v,hv,hv1,v1,h1,n,soy
real: ww,ffe,ffc,ff,ggn,ggc,gg,dd,g,sfy,dx,dy,dt
ww=hv(i,j)
ffe=h(i+1,j)*u(i+1,j)*v(i+1,j)
ffc=h(i,j)*u(i,j)*v(i,j)
ff=ffe-ffc
ggn=(h(i,j+1)*v(i,j+1)**2)+0.5*g*h(i,j+1)**2
ggc=(h(i,j)*v(i,j)**2)+0.5*g*h(i,j)**2
gg=ggn-ggc
if (h(i,j).gt.hdry) then
sfy=((n(i,j)**2)*(v(i,j))*(((u(i,j)**2)+(v(i,j)**2)**0.5)))/(((h(i,j)*dy)/(h(i,j)+2*dy))**(4./3.))
dd=g*h(i,j)*soy(i,j)-g*((h(i,j)*dy)/(h(i,j)+2*dy))*sfy
hv1(i,j)=ww-(dt/dx)*ff-(dt/dy)*gg+dt*dd
else
hv1(i,j)=0
end if
if (h1(i,j).gt.0) then
v1(i,j)=hv1(i,j)/h1(i,j)
else
v1(i,j)=0
end if
end
```

!ΒΗΜΑ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ

!ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΟΡΜΗΣ (x ΔΙΕΤΘΥΝΣΗ)

```

subroutine
mom_x_cor_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfx,ome,g,dx,dt,dy,hu,h1,u1,hu1,v1,n,sox,hu2,h2,u2)
integer:: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1):: hu,h1,u1,v1,n,sox,hu2,h2,u2,hu1
real:: ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dy,dt,ome,sfx,hdry
ww=ome*hu(i,j)+0.25*(1-ome)*(hu(i+1,j)+hu(i-1,j)+hu(i,j+1)+hu(i,j-1))
ffc=(h1(i,j)*u1(i,j)**2)+0.5*g*h1(i,j)**2
ffw=(h1(i-1,j)*u1(i-1,j)**2)+0.5*g*h1(i-1,j)**2
ff=ffc-ffw
ggc=h1(i,j)*u1(i,j)*v1(i,j)
ggs=h1(i,j-1)*u1(i,j-1)*v1(i,j-1)
gg=ggc-ggs
if (h1(i,j).gt.hdry) then
sfx=((n(i,j)**2)*(u1(i,j))*(((u1(i,j)**2)+(v1(i,j)**2)**0.5)))/(((h1(i,j)*dx)/(h1(i,j)+2*dx))**(4./3.))
dd=g*h1(i,j)*sox(i,j)-g*((h1(i,j)*dx)/(h1(i,j)+2*dx))*sfx
hu2(i,j)=0.5*(hu1(i,j)+ww-(dt/dx)*ff-(dt/dy)*gg+dt*dd)
else
hu2(i,j)=0
end if
if (h2(i,j).gt.0) then
u2(i,j)=hu2(i,j)/h2(i,j)
else
u2(i,j)=0
end if
end

```

!ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΟΡΜΗΣ (y ΔΙΕΤΘΥΝΣΗ)

```

subroutine
mom_y_cor_2s(xx1,yy1,i,j,ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,hdry,sfy,ome,g,dx,dt,dy,hv,h1,u1,hv1,v1,n,soy,hv2,h2,v2)
integer:: i,j,xx1,yy1
real,dimension(xx1,yy1):: hv,h1,u1,v1,n,soy,hv2,h2,v2,hv1
real:: ww,ffc,ffw,ff,ggc,ggs,gg,dd,dx,dy,dt,ome,sfy,hdry
ww=ome*hv(i,j)+0.25*(1-ome)*(hv(i+1,j)+hv(i-1,j)+hv(i,j+1)+hv(i,j-1))
ffc=h1(i,j)*u1(i,j)*v1(i,j)
ffw=h1(i-1,j)*u1(i-1,j)*v1(i-1,j)
ff=ffc-ffw
ggc=(h1(i,j)*v1(i,j)**2)+0.5*g*h1(i,j)**2
ggs=(h1(i,j-1)*v1(i,j-1)**2)+0.5*g*h1(i,j-1)**2
gg=ggc-ggs
if (h1(i,j).gt.hdry) then
sfy=((n(i,j)**2)*(v1(i,j))*(((u1(i,j)**2)+(v1(i,j)**2)**0.5)))/(((h1(i,j)*dy)/(h1(i,j)+2*dy))**(4./3.))
dd=g*h1(i,j)*soy(i,j)-g*((h1(i,j)*dy)/(h1(i,j)+2*dy))*sfy
hv2(i,j)=0.5*(hv1(i,j)+ww-(dt/dx)*ff-(dt/dy)*gg+dt*dd)
else
hv2(i,j)=0
end if
if (h2(i,j).gt.0) then
v2(i,j)=hv2(i,j)/h2(i,j)
else
v2(i,j)=0
end if
end

```


ΣΥΝΟΠΤΙΚΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Βιογραφικά Στοιχεία

Όνομα:	Μπέλλος
Επώνυμο:	Βασίλης
Ημερομηνία Γεννήσεως:	13 Σεπτεμβρίου 1983
Διεύθυνση Κατοικίας:	Φειδίου 11, 15562, Χολαργός
Τηλέφωνα:	210 7722649 / 6932 389386
e-mail:	vmpellos@mail.ntua.gr

Σπουδές

- Διπλωματούχος του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με τίτλο: "Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων" (2011)
Μεταπτυχιακή Διατριβή: "Διόδευση πλημμύρας σε ήπιο ανάγλυφο"
- Διπλωματούχος του Δημοκρίτειου Πανεπιστήμιου Θράκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών - Κατεύθυνση Υδραυλικών Έργων (2009)
Διπλωματική Εργασία: "Αριθμητική Προσομοίωση Διόδευσης Πλημμυρικού Κύματος μετά από Θραύση Φράγματος"
- Απόφοιτος του 3^{ου} Ενιαίου Λυκείου Ξάνθης (2001)

Ξένες Γλώσσες

- Αγγλικά – Καλή γνώση, επίπεδο B2 (First Certificate in English – University of Cambridge)

Γνώσεις Η/Υ

- Γλώσσες προγραμματισμού: Fortran, Matlab

- Ενδεικτικές γνώσεις λογισμικού: MS Office, ArcGIS, Surfer, Corel, Photoshop, Autocad
- Υδρολογικά και υδραυλικά πακέτα λογισμικού: HEC-RAS, HEC-HMS, FLDWAV, CCHE2D, MIKE-FLOOD, EPANET

Διακρίσεις / Υποτροφίες

- [2014] Υποτροφία του ΕΛΚΕ (3 χρόνια)
- [2013] Θωμαΐδειο βραβείο ΕΜΠ για τη δημοσίευση της εργασίας: Bellos, V. and Tsakiris, G. (2013). Flood Modelling in Complex Urban Environments. In Proceedings of 8th International Conference of EWRA "Water Resources Management in an Interdisciplinary and Changing Context", 26-29 June 2013, Porto, Portugal

Επαγγελματική δραστηριότητα

- [12/2008 - 9/2010] Μελετητική Εταιρεία Υδραυλικών Έργων ΜΕΤΕΡ Ε.Π.Ε. (Αθήνα)
- [10/2007 - 02/2008] Μελετητική Εταιρεία ΕΥΕΡΓΟΣ Α.Ε. (Ξάνθη), (ημιαπασχόληση)

Διδακτική δραστηριότητα

- [2011 - σήμερα] Διδασκαλία των Ασκήσεων του μαθήματος "Υδραυλικά Έργα", που διδάσκεται στο 7ο εξάμηνο της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Ερευνητική δραστηριότητα

Συμμετοχή στα Ερευνητικά Προγράμματα:

- Τίτλος: "Διευθέτηση του στραγγιστικού-αρδευτικού αγωγού Δεκάρχου-Μαγγάνων-Παραλίας με σκοπό την αποτελεσματικότερη κάλυψη των αρδευτικών και στραγγιστικών αναγκών της περιοχής Δεκάρχου"

Διάρκεια συμμετοχής: 17/02/2015 - 30/04/2015

Χρηματοδότης: Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης

- Τίτλος: "Εκτίμηση της τρωτότητας και της διακινδύνευσης των υπόγειων υδατικών πόρων του Βελγίου λόγω γεγονότων ξηρασίας"

Διάρκεια συμμετοχής: 03/02/2015 - 30/04/2015

Χρηματοδότης: BELSPO

- Τίτλος: "Κατασκευή Φυσικού Ομοιώματος και Πειραματική Προσομοίωση Υπερχειλιστή Φράγματος Berkeche (Αλγερία)"

Διάρκεια συμμετοχής: 01/04/2013 – 31/06/2013

Χρηματοδότης: République Algérienne Démocratique et Populaire, Ministère des Ressources en Eau, Agence Nationale des Barrages et Transferts - ANBT

Λοιπές δραστηριότητες

- Μέλος του Τεχνικού Επιμελητηρίου (ΤΕΕ) από τον Οκτώβριο του 2009
- Μέλος ελληνικών και διεθνών επιστημονικών ενώσεων: IAHR, EWRA, ΕΕΔΥΠ

Συγγραφικό Έργο

Διεθνή Περιοδικά

1. Bellos, V. and Tsakiris, G. (2015). *Comparing various methods of building representation for 2D flood modelling in built-up areas*. *Water Resources Management*, 29(2): 379-397
2. Tsakiris, G. and Bellos, V. (2014). *A numerical model for two-dimensional flood routing in complex terrains*. *Water Resources Management*, 28(5): 1277-1291
3. Bellos, V. (2012). *Ways for flood hazard mapping in urbanised environments: a short literature review*. *Water Utility Journal*, 4: 25-31
4. Bellos, V. and Hrissanthou, V. (2011). *Numerical Simulation of a Dam-Break Flood Wave*. *European Water*, 33: 45-53
5. Tsakiris, G., Bellos, V., Ziogas, C. (2010). *Embankment Dam Failure: A Downstream Flood Hazard Assessment*. *European Water*, 32: 35-45

Διεθνή Συνέδρια

1. Bellos, V. and Tsakiris, G. (2016). *Grid Coarsening and Uncertainty in 2D Hydrodynamic Modelling*. 4th European Congress of IAHR "Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change", 27-29 July 2015, Liege, Belgium (abstract submitted)
2. Christelis, V., Bellos, V., Tsakiris, G. (2016). *Calibrating a 2D Flood Model Using Surrogate Modelling in a Real World Application*. 4th European Congress of IAHR "Sustainable Hydraulics in the Era of Global Change", 27-29 July 2015, Liege, Belgium (abstract submitted)
3. Bellos, V. and Tsakiris, G. (2015). *2D Flood Modelling: the Case of Tous Dam Break*. In Proceedings of 36th World Congress of IAHR "Deltas of the Future and what Happens Upstream", 28 June -3 July 2015, the Hague, the Netherlands
4. Bellos, V. and Tsakiris, G. (2015). *Flash Flood Simulation in Small Catchments based on Combined Hydrodynamic and Hydrologic Approach*. In Proceedings of 9th World Congress of EWRA "Water Resources Management in a Changing World: Challenges and Opportunities", 10-13 June 2015, Istanbul, Turkey
5. Bellos, V. and Tsakiris, G. (2013). *Flood Modelling in Complex Urban Environments*. In Proceedings of 8th International Conference of EWRA "Water Resources Management in an Interdisciplinary and Changing Context", 26-29 June 2013, Porto, Portugal
6. Bellos, V. and Hrissanthou, V. (2009). *Numerical Simulation of a Dam-Break Flood Wave*. In Proceedings of EWRA 7th International Conference "Water Resources Conservancy and Risk Reduction under Climatic Uncertainty", 25-27 June 2009, Limassol, Cyprus

Εθνικά Συνέδρια

1. Μπέλλος, Β. (2015). *Δισδιάστατη Προσομοίωση Πλημμύρας και Διερεύνηση Αβεβαιότητας λόγω Μεγέθους Υπολογιστικού Κανάβου*. 3ο Κοινό Συνέδριο ΕΥΕ-ΕΕΔΥΠ "Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων στη Νέα Εποχή", Αθήνα (δεκτή για προφορική ανακοίνωση)
2. Αυγέρης, Λ., Μπέλλος, Β., Ξυλούδης, Ν., Παπαλεξόπουλος, Β., Μπενσασσών, Α. και Μπέλλος, Κ. (2015). Πειραματική Προσομοίωση Υπερχειλιστή Φράγματος Berkeche. 3ο Κοινό Συνέδριο ΕΥΕ-ΕΕΔΥΠ "Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων στη Νέα Εποχή", Αθήνα (δεκτή για προφορική ανακοίνωση)
3. Μπέλλος, Β. και Τσακίρης, Γ. (2012). *Δισδιάστατη Αριθμητική Προσομοίωση σε Φυσικό Ανάγλυφο*. Από τα πρακτικά του 2ου Κοινού Συνεδρίου της ΕΥΕ-ΕΕΔΥΠ "Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων προς την Αειφόρο Ανάπτυξη", Πάτρα
4. Μπέλλος, Β. και Χρυσάνθου, Β. (2009). *Αριθμητική Προσομοίωση Διόδευσης Πλημμυρικού Κύματος μετά από Θραύση Φράγματος*". Από τα πρακτικά του 1ου Κοινού Συνεδρίου της ΕΥΕ-ΕΕΔΥΠ "Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων σε Συνθήκες Κλιματικών Αλλαγών", Βόλος
5. Ζιώγας, Κ. και Μπέλλος, Β. (2005). *Βελτιστοποίηση Διαστασιολόγησης Αγωγών Μεταφοράς στο Φράγμα Δεσκάτης*. Από τα πρακτικά του 3ου Πανελληνίου Συνεδρίου Φοιτητών Πολιτικών Μηχανικών, Χαλκιδική.