

# Μαθηματική προσομοίωση της αστοχίας φράγματος

Α. Ι. Στάμου

*Αναπληρωτής καθηγητής, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ*

*Λέξεις κλειδιά:* αστοχία φράγματος, μαθηματική προσομοίωση, θραύση φράγματος, όδευση κύματος

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Περιγράφεται η μαθηματική προσομοίωση της αστοχίας ενός φράγματος ως μια διαδικασία υπολογισμών που περιλαμβάνει την εφαρμογή δυο μοντέλων: (1) του μοντέλου εξέλιξης του χάσματος και (2) του μοντέλου διέλευσης του κύματος στην κατάντη περιοχή κατάκλυσης. Η διαδικασία αυτή είναι σύνθετη, σχετικά μικρής ακρίβειας, αλλά και πολύ μεγάλης σημασίας, καθόσον τα αποτελέσματά της καθορίζουν το Σχέδιο Αντιμετώπισης Αστοχίας Φράγματος. Με δεδομένη την απαίτηση της αύξησης της ακρίβειας υπολογισμών συνιστώνται: (1) η διερεύνηση ικανού αριθμού σεναρίων αστοχίας, (2) η προσεκτική εφαρμογή των μοντέλων, ιδίως των εμπορικών πακέτων, μόνο από επιστήμονες με εξειδικευμένη εμπειρία και (3) η σύνταξη τεχνικών προδιαγραφών πραγματοποίησης των σχετικών υπολογισμών.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μαθηματική προσομοίωση της αστοχίας ενός φράγματος αποτελεί μια από τις σημαντικότερες συνιστώσες της μελέτης αστοχίας ενός φράγματος. Έχει ως σκοπό τον προσδιορισμό στις θέσεις ενδιαφέροντος της κατάντη περιοχής κατάκλυσης των ακόλουθων χαρακτηριστικών του κύματος: (1) του χρόνου άφιξης του κύματος, (2) της μέγιστης στάθμης του νερού (από όπου θα προσδιοριστεί η έκταση της περιοχής κατάκλυσης), (3) του χρόνου παρατήρησης του μέγιστου βάθους ροής, (4) της μεταβολής του βάθους και της ταχύτητας ροής (για να εκτιμηθεί ο κίνδυνος καταστροφής κατασκευών) και (5) της διάρκειας της πλημμυρικής ροής.

Στην παρούσα εργασία, περιγράφεται η μαθηματική προσομοίωση της αστοχίας ενός φράγματος, ως μια υπολογιστική διαδικασία δυο βημάτων. Στο 1<sup>ο</sup> βήμα προσδιορίζονται αρχικά τα σενάρια αστοχίας του εξεταζόμενου φράγματος με βάση τα χαρακτηριστικά του και τις συνθήκες της περιοχής. Μετά, επιλέγεται το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού των διεργασιών της δημιουργίας και της χρονικής εξέλιξης του χάσματος, το οποίο στη συνέχεια θα καλείται απλά «μοντέλο χάσματος». Εφαρμόζεται το μοντέλο του χάσματος για όλα τα σενάρια αστοχίας και προσδιορίζεται η χρονοσειρά της εξερχόμενης από το καταστρεφόμενο φράγμα παροχής, η οποία καλείται «Υδρογράφημα Εκροής του Φράγματος», ΥΔΕΚΦ. Στο 2<sup>ο</sup> βήμα επιλέγεται και εφαρμόζεται το μαθηματικό μοντέλο διόδευσης του κύματος ή απλά «μοντέλο κύματος». Για κάθε ένα από τα σενάρια υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά του κύματος στις θέσεις ενδιαφέροντος της κατάντη περιοχής κατάκλυσης. Το ΥΔΕΚΦ που υπολογίστηκε με το μοντέλο χάσματος αποτελεί τη καθοριστική ανάντη συνθήκη στους υπολογισμούς του μοντέλου κύματος. Τα χαρακτηριστικά του κύματος παρουσιάζονται σε γραφική ή/και πινακοποιημένη μορφή (π.χ. περιοχές κατάκλυσης με σημειωμένους τους χρόνους άφιξης του κύματος) με στόχο να αποτελέσουν τα στοιχεία εισόδου για τη κατάστρωση του Σχεδίου Αντιμετώπισης Αστοχίας Φράγματος.

## 2 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΧΑΣΜΑΤΟΣ

Ο τελικός σκοπός του μοντέλου χάσματος είναι ο υπολογισμός του ΥΔΕΚΦ για όλα τα σενάρια αστοχίας του εξεταζόμενου φράγματος. Τα σενάρια υπολογισμών επιλέγονται αφού πρώτα καθοριστούν οι πιθανοί τρόποι αστοχίας του φράγματος.

## 2.1 Τρόποι αστοχίας ενός φράγματος

Ο τρόπος αστοχίας ενός φράγματος εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά του. Τα χωμάτινα φράγματα αστοχούν εξαιτίας (1) υπερπήδησης, (2) διασωλήνωσης και (3) διάφορων άλλων αιτιών, όπως ολίσθηση πρηνών φράγματος λόγω μειωμένης αντοχής των υλικών κατασκευής, των υλικών θεμελίωσης ή υπέρβαση του σεισμικού φορτίου και της περιοχής. Οι κυριότεροι λόγοι αστοχίας φραγμάτων από σκυρόδεμα είναι (1) η ρηγμάτωση, (2) η ανεπαρκής θεμελίωση, (3) τα ανεπαρκή αντερείσματα και (4) η απώλεια των αρχικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Εξωτερικές συνθήκες, όπως ολίσθησεις, καθιζήσεις, μετεωρολογικά φαινόμενα και σεισμοί ευθύνονται για την αστοχία πολλών φραγμάτων.

Υπερπήδηση του φράγματος πραγματοποιείται όταν η στάθμη νερού στον ταμιευτήρα ανέλθει πάνω από τη στέψη του φράγματος κατά τη διάρκεια πλημμυρικού γεγονότος. Αυτό μπορεί να συμβεί για διάφορους λόγους, όπως (α) ο λανθασμένος σχεδιασμός του υπερχειλιστή του φράγματος (η παροχετευτικότητα του υπερχειλιστή δεν είναι αρκετή για τη διόδευση μιας μεγάλης πλημμύρας), (β) η λανθασμένη κατασκευή του υπερχειλιστή ή (γ) η έμφραξη του υπερχειλιστή. Η υπερπήδηση αρχίζει όταν η στάθμη του νερού υπερβαίνει τη στέψη του υπερχειλιστή και αρχίζει να υπερχειλίζει πάνω από «ευαίσθητες περιοχές» της στέψης του φράγματος σε π.χ. σε περιοχές με στάθμη χαμηλότερη από τη στάθμη στέψης του υπόλοιπου φράγματος. Το νερό που υπερχειλίζει σχηματίζει αρχικά ένα «κανάλι ροής» στην κατάντη επιφάνεια του φράγματος. Το κανάλι αυτό διαβρώνει την επιφάνεια του φράγματος προχωρώντας προς τα ανάντη μέχρι να φτάσει την ανάντη παρειά του φράγματος, πάνω στην οποία σχηματίζει ένα άνοιγμα (ρήγμα, χάσμα). Η δημιουργία του χάσματος αυτού αποτελεί τη χρονική αφετηρία της αστοχίας του φράγματος, εξαιτίας υπερπήδησης. Το χάσμα αυτό ξεκινά από τη στέψη και μεγαλώνει προς το πυθμένα του φράγματος με το χρόνο.

Η αστοχία από διασωλήνωση ξεκινά όταν η ταχύτητα του νερού, που διηθείται μέσα σε ένα ανάχωμα ή σε ένα αντέρεισμα, γίνεται αρκετά μεγάλη και παρασύρει λεπτόκοκκα υλικά του φράγματος. Καθώς τα σωματίδια απομακρύνονται η διόδος του νερού διευρύνεται με αποτέλεσμα την αύξηση της διερχόμενης παροχής. Έτσι, παρασύρονται ολοένα και περισσότερα σωματίδια με συνεχόμενη διεύρυνση της διόδου. Το τέλος αυτής της διαδικασίας είναι ο σχηματισμός ενός «σωλήνα» ή χάσματος μέσα στο σώμα του φράγματος ή του αντερείσματος ικανού μεγέθους για να το καταστρέψει. Το χάσμα αυτό διευρύνεται με ανάλογο τρόπο αυτού της υπερπήδησης.

Η μειωμένη αντοχή των υλικών του φράγματος επηρεάζει την ευστάθεια του φράγματος, με αποτελέσματα: (α) μακροσκοπικά, όπως π.χ. ολίσθηση πρηνών και (β) μικροσκοπικά, όπως δημιουργία τοπικών αδυναμιών στο σώμα του φράγματος που μπορεί να αποδειχθούν ευάλωτες στο φαινόμενο της διασωλήνωσης ή να ενεργοποιήσουν μακροσκοπικά φαινόμενα ολίσθησης υλικού. Οι τυχόν αδυναμίες στη θεμελίωση ενός φράγματος μπορούν να προκαλέσουν την αστοχία του, ανεξάρτητα από τον τύπο του. Η ύπαρξη ρηγμάτων στη ζώνη θεμελίωσης είναι μία σημαντική παράμετρος που διερευνάται στη φάση της μελέτης. Η κατασκευή ενός φράγματος αλλάζει την κατανομή των φορτίσεων στην περιοχή, με αποτέλεσμα ενδεχόμενες μετακινήσεις του υποβάθρου πάνω στο οποίο θεμελιώνεται το φράγμα. Σε περίπτωση ύπαρξης και σχετικής μετακίνησης ρήγματος εξ αιτίας των πρόσθετων φορτίσεων, αυτές οι μετακινήσεις είναι συχνά πολύ μεγαλύτερες από τις ανεκτές με αποτέλεσμα ενδεχόμενη κατάρρευση του φράγματος. Στα φράγματα βαρύτητας από σκυρόδεμα δημιουργείται, όπως και στα χωμάτινα, μερική ρήξη καθώς ένα ή περισσότερα τμήματα από τα οποία είναι κατασκευασμένα, παρασύρεται από το ορμητικό νερό. Η πρόβλεψη του αριθμού των τμημάτων του φράγματος, που θα μετακινηθούν ή θα παρασυρθούν κατά την αστοχία του φράγματος, είναι δύσκολη. Ο χρόνος που απαιτείται για τη δημιουργία της ρήξης είναι της τάξης των μερικών λεπτών. Αντίθετα, τα τοξωτά φράγματα συνήθως καταρρέουν ολοκληρωτικά και θεωρείται ότι απαιτούνται λίγα λεπτά για το σχηματισμό του ρήγματος.

## 2.2 Διαδικασία υπολογισμού του μοντέλου χάσματος

Καταρχήν εκτιμάται η θέση δημιουργίας του χάσματος. Η εκτίμηση αυτή είναι ιδιαίτερα δύσκολη, εξαιτίας της έλλειψης ικανοποιητικής σχετικής εμπειρίας. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η ακόλουθη διαδικασία υπολογισμού του μοντέλου χάσματος:

1. Υπολογίζονται (1) η χρονική διάρκεια της αστοχίας ( $T_F$ ), (2) η γεωμετρία και οι διαστάσεις του χάσματος και (3) ο ρυθμός υποχώρησης της στάθμης του χάσματος. Για αστοχία φράγματος από υπερπήδηση ισχύουν τα ακόλουθα: (1) για χωμάτινα φράγματα:  $T_F$  = μερικά πρώτα λεπτά μέχρι μερικές ώρες, (2) για φράγματα βαρύτητας από σκυρόδεμα:  $T_F$  = 6-30 mins (ενδεικτική τιμή,  $T_F$  = 12 mins) και (3) για τοξωτά φράγματα η  $T_F$  μπορεί να είναι πολύ μικρότερη από 6 mins (ενδεικτική τιμή,  $T_F$  = 20-30 s) {6}. Σε ένα χωμάτινο φράγμα μπορούν να θεωρηθούν διάφορες μορφές γεωμετρίας του χάσματος, όπως π.χ. τριγωνική, ορθογωνική, τραπεζοειδή, κυκλική ή παραβολική γεωμετρία. Σε ένα φράγμα από σκυρόδεμα το χάσμα θεωρείται συνήθως ότι έχει ορθογωνική διατομή με πλάτος ( $W_F$ ) ίσο με ένα ποσοστό του πλάτους στη στέψη του φράγματος.
2. Υπολογίζεται το ΥΔΕΚΦ. Στον υπολογισμό αυτό απαιτούνται τα ακόλουθα στοιχεία: (α) Η καμπύλη στάθμης-όγκου του ταμιευτήρα, (β) το πλημμυρογράφημα εισροής στον ταμιευτήρα και (γ) η καμπύλη στάθμης-παροχής του υπερχειλιστή. Τα κύρια χαρακτηριστικά του ΥΔΕΚΦ είναι (1) Η παροχή αιχμής ( $Q_P$ ) και (2) η χρονική στιγμή παρατήρησης της παροχής αιχμής ( $T_P$ ).

## 2.3 Κατηγορίες μοντέλων χάσματος

Τα μοντέλα υπολογισμού του χάσματος και της εξερχόμενης παροχής μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες :

1. Εμπειρικές εξισώσεις, οι οποίες έχουν εξαχθεί με βάση πειραματικές μετρήσεις και παρατηρήσεις. Με τις εξισώσεις αυτές υπολογίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του χάσματος ή/και του ΥΔΕΚΦ, αλλά όχι το αναλυτικό ΥΔΕΚΦ. Χαρακτηριστικά αναφέρονται οι εξισώσεις του Froehlich {8,9}.
2. Μηχανιστικά μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά αποτελούνται από εξισώσεις περιγραφής των φυσικών φαινομένων που διέπουν τη δημιουργία και εξέλιξη του χάσματος, όπως η διάβρωση, η δημιουργία του καναλιού ροής, καθώς και η ροή και η μεταφορά των στερεών στο κανάλι ροής. Χαρακτηριστικός εκπρόσωπος της κατηγορίας αυτής των μοντέλων είναι το μοντέλο BREACH {2}, του οποίου οι εξισώσεις περιγραφής της διάβρωσης του χάσματος βασίζονται σε στοιχεία που συγκεντρώθηκαν από πραγματοποιηθείσες αστοχίες πέντε φραγμάτων. Στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής (EYE) της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ έχει δομηθεί (σε γλώσσα FORTRAN) το μοντέλο NTUA-BREACH στο πλαίσιο διπλωματικής εργασίας {14}. Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του προγράμματος NTUA-BREACH για την περίπτωση αστοχίας χωμάτινου φράγματος εξαιτίας υπερπήδησης ή διασωλήνωσης.
3. Ημι-εμπειρικά μοντέλα, τα οποία αποτελούν συνδυασμό των εμπειρικών και μηχανιστικών μοντέλων.
4. Απλά υδραυλικά μοντέλα υπερχείλισης. Τα μοντέλα αυτά εφαρμόζονται κυρίως στα φράγματα από βαρύτητα, όπου εξαιτίας της συμπαγούς κατασκευής, μπορεί να θεωρηθεί το ανώτερο τμήμα ορισμένων (π.χ. 2 μέχρι 4) επιμέρους λωρίδων του φράγματος, καταστρέφονται διαδοχικά και σχεδόν ακαριαία. Για λόγους υπολογιστικούς το χρονικό διάστημα της «ακαριαίας» καταστροφής του κάθε τμήματος θεωρείται ίσο με μερικά δευτερόλεπτα. Το μοναδικό μοντέλο αυτής της κατηγορίας έχει προταθεί από τους Ahmed & Morris {1} της HR Wallingford και έχει εφαρμοστεί στον υπολογισμό του πλημμυρογραφήματος εκροής του φράγματος Malpasset. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό,

η παροχή εκροής υπολογίζεται θεωρώντας τη ροή σε κάθε ένα από τα κατεστραμμένα επιμέρους τμήματα του φράγματος ως ροή πάνω από υπερχειλιστή ευρείας στέγης. Για τα χρονικά διαστήματα που διαρκεί η καταστροφή της κάθε λωρίδας θεωρείται ότι η στέγη υποχωρεί βαθμιαία με σταθερή ταχύτητα, ενώ για το υπόλοιπο χρονικό διάστημα η στέγη παραμένει σε σταθερή στάθμη.

5. Μοντέλα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής ή CFD (Computational Fluid Dynamics). Τα μοντέλα αυτά υπολογίζουν (1) την τρισδιάστατη ροή από το φράγμα στο χάσμα, στο κανάλι ροής και σε ένα τμήμα του κατάντη χειμάρρου χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις ροής και (2) τη διάβρωση του φράγματος χρησιμοποιώντας κατάλληλο μοντέλο περιγραφής των στερεών. Υπάρχουν διάφορα 3-D CFD μοντέλα χάσματος. Η εμπειρία του γράφοντα είναι ότι για την περιγραφή σύνθετων ροών με ελεύθερη επιφάνεια, το μοντέλο FLOW-3D {3} αποτελεί μια ικανοποιητική επιλογή.

#### 2.4 Ανάλυση ευαισθησίας και ακρίβεια υπολογισμών

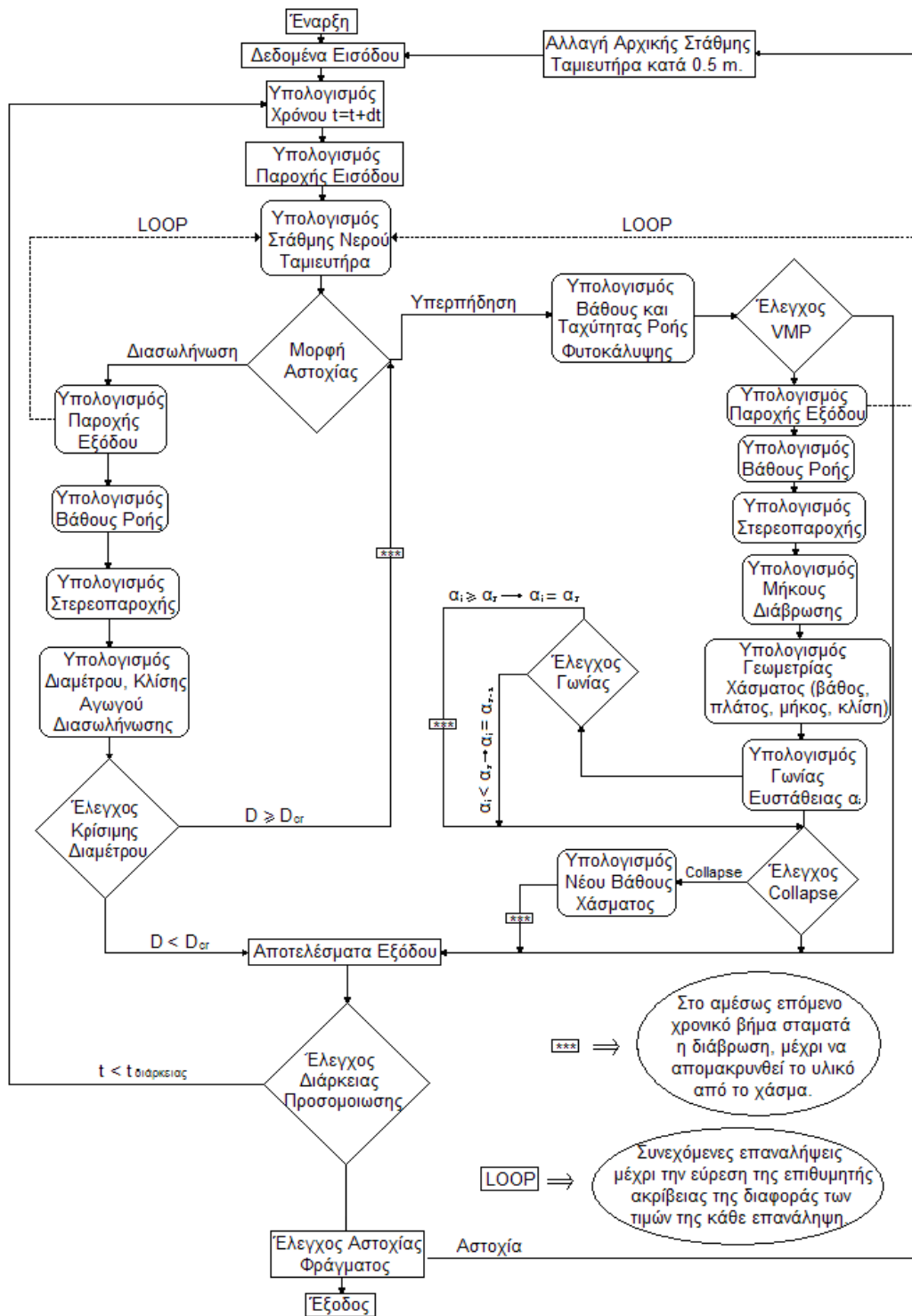
Στα χωμάτινα φράγματα η χρησιμοποίηση ντετερμινιστικών μοντέλων, όπως το BREACH {2} και τα όμοιά του, όπως το NTUA-BREACH, αναμενόταν να αποπνέει εμπιστοσύνη και επομένως να εξασφαλίζει ικανοποιητική ακρίβεια. Το γεγονός όμως ότι ορισμένες από τις εξισώσεις των ντετερμινιστικών μοντέλων έχουν βασιστεί στα χαρακτηριστικά πέντε μόνο φραγμάτων, τα οποία πιθανώς να έχουν τελείως διαφορετικά χαρακτηριστικά από το εξεταζόμενο, οδηγεί σε σημαντικό βαθμό αβεβαιότητας. Το πρακτικό αποτέλεσμα είναι ότι ακόμα και με τη χρησιμοποίηση ντετερμινιστικών μοντέλων, η ακρίβεια υπολογισμού του  $Q_P$  είναι της τάξης του  $\pm 50\%$ , ενώ η αντίστοιχη υπολογισμού του  $T_F$  είναι σημαντικά μικρότερη. Είναι ευνόητο ότι η κατάσταση στα φράγματα από σκυρόδεμα είναι πολύ χειρότερη. Στην εικόνα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε σε ένα τυπικό φράγμα {11} εφαρμόζοντας τη μέθοδο των Ahmed and Morris {1}, από την οποία διαπιστώνεται η εντυπωσιακή ευαισθησία των τιμών  $Q_P$  από τις θεωρούμενες τιμές (1) του χρόνου αστοχίας ( $T_F$ ), (2) του πλάτους του χάσματος ( $W_F$ ) και (3) του ποσοστού του καταστρεφόμενου ύψους του φράγματος ( $P, \%$ ).

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, ο μοναδικός τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος της χαμηλής ακρίβειας των υπολογισμών είναι η διερεύνηση ικανού αριθμού σεναρίων αστοχίας για τα οποία θα πρέπει να πραγματοποιούνται υπολογισμοί και των δυο μοντέλων (χάσματος και κύματος) για να προσδιορίζεται η ευαισθησία των υπολογισμών για την εξεταζόμενη περίπτωση.

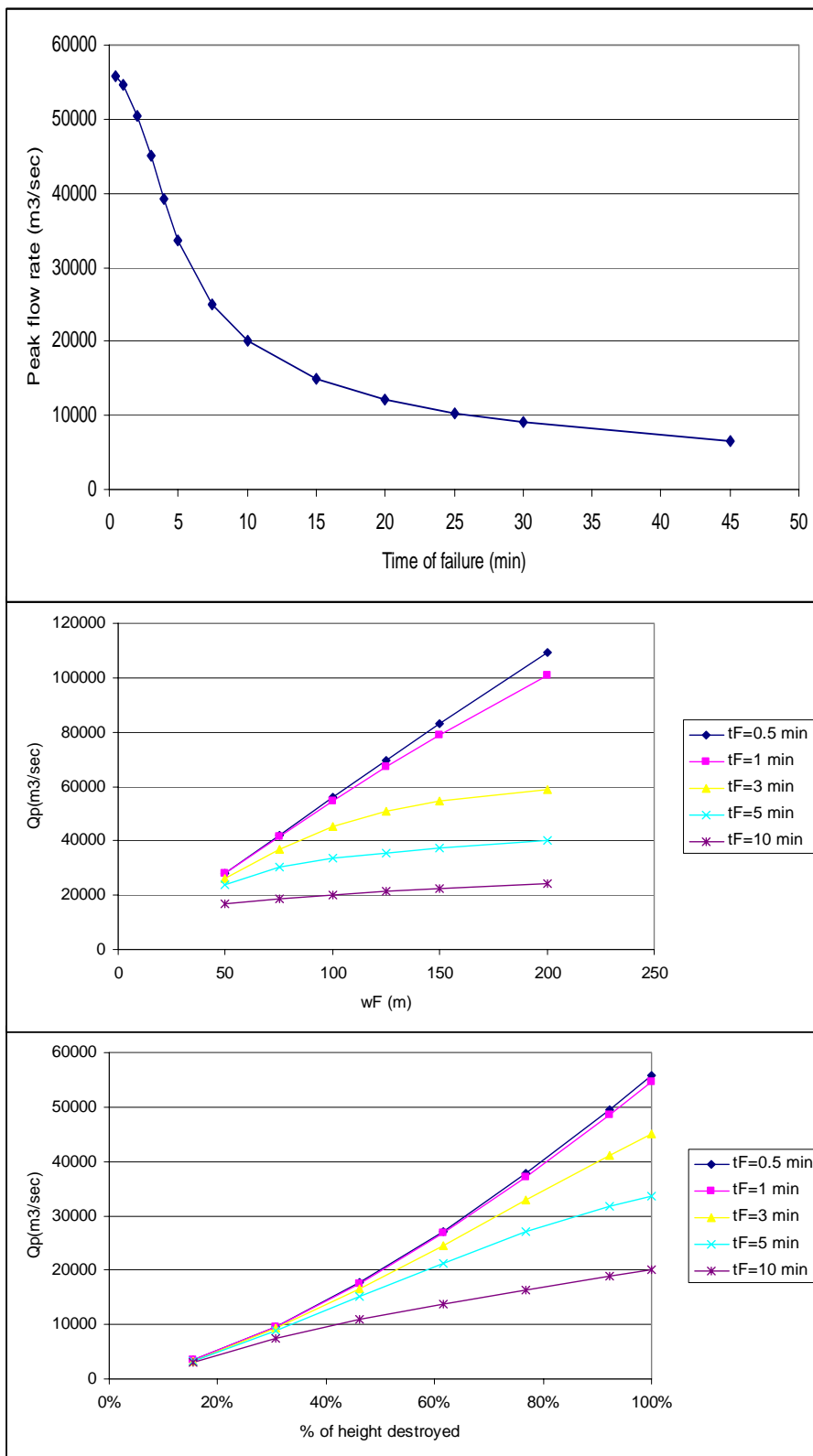
#### 2.5 Παραδείγματα υπολογισμών

Στην εικόνα 3 παρουσιάζονται τα ΥΔΕΚΦ, όπως υπολογίστηκαν από τα μοντέλα BREACH {2} και NTUA-BREACH {14} για την περίπτωση της διασωλήνωσης στο φράγμα Διπόταμου – Αλεξανδρούπολης {21}. Οι διαφορές μεταξύ των δυο ΥΔΕΚΦ είναι πολύ μικρές.

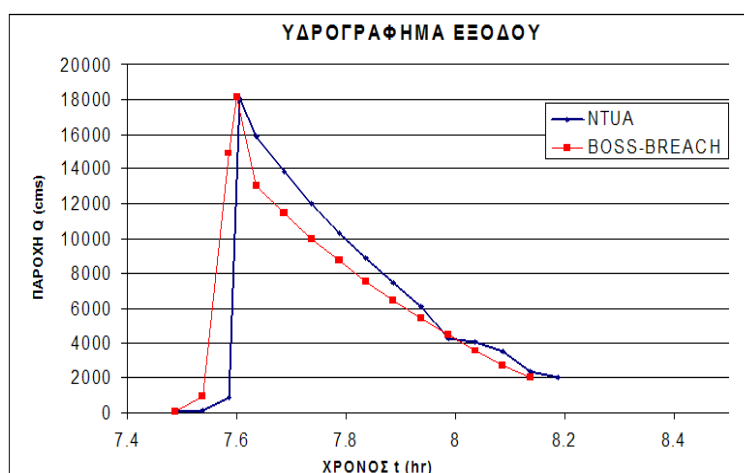
Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται ενδεικτικοί υπολογισμοί καταστροφής ενός φράγματος ύψους 200 m, πλάτους στέγης 50 m. Το υλικό του φράγματος έχει ένα μέσο μέγεθος ίσο με 0.14 mm, γωνία εσωτερικής τριβής  $45^\circ$  και η κρίσιμη παράμετρος Shields είναι ίση με 0.04. Η αστοχία του φράγματος της Εικόνας 2 πραγματοποιείται ως εξής (1)  $t=0$ , δημιουργείται μια μικρή διαρροή στη στέγη του φράγματος, (2)  $t=18$  sec, αρχίζει η δημιουργία του καναλιού διάβρωσης στην κατάντη πλευρά του φράγματος με χαμηλούς ρυθμούς εξαιτίας της μικρής ταχύτητας ροής και της μικρής διατμητικής τάσης, (3)  $t=60$  sec, αυξάνεται η παροχή του καναλιού με αποτέλεσμα τη ολοένα μεγαλύτερη διάβρωση του φράγματος και (4)  $t=180$  sec, πραγματοποιείται η πλήρης κατάρρευση του φράγματος.



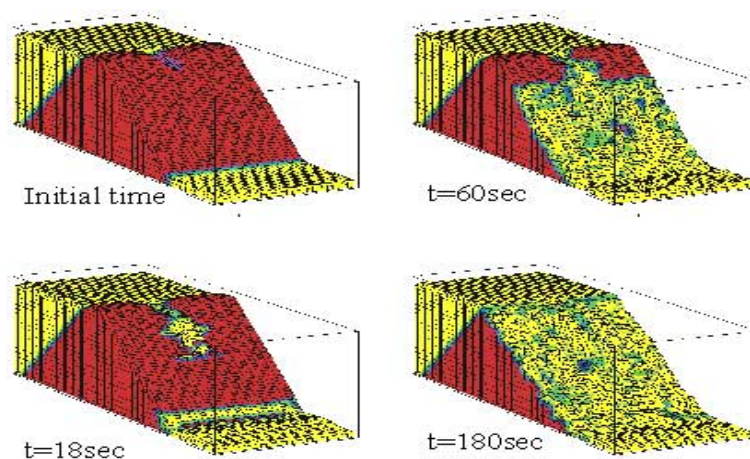
Εικόνα 1: Διάγραμμα ροής του μοντέλου NTUA-BREACH {14}



Εικόνα 2: Εξάρτηση της παροχής αιχμής από το χρόνο αστοχίας, το πλάτος του χάσματος και το ποσοστό του καταστρεφόμενου ύψους του φράγματος {11}



Εικόνα 3: Υπολογιζόμενα ΥΔΕΚΦ για το φράγμα Διπόταμου – Αλεξανδρούπολης {20}



Εικόνα 4: Υπολογισμός θραύσης φράγματος με το μοντέλο FLOW-3D {3}

### 3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΥΜΑΤΟΣ

#### 3.1 Κατηγορίες μοντέλων κύματος

Τα μοντέλα κύματος βασίζονται στις διαφορικές εξισώσεις Saint-Venant ή των ρηχών νερών με μικρές συνήθως παραδοχές, όπως π.χ. της υδροστατικής κατανομής της πίεσης. Οι εξισώσεις αυτές επιλύονται με διάφορες αριθμητικές μεθόδους, όπως κυρίως των πεπερασμένων διαφορών. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορα 1-D, 2-D και 3-D μοντέλα. Ιδιαίτερη σημασία έχει το σχήμα διακριτοποίησης, γιατί καθορίζει τη δυνατότητα του μοντέλου να προσομοιώνει τις έντονες κυματικές διαταραχές. Τα περισσότερο γνωστά εμπορικά προγράμματα είναι το DAMBRK {6} και το FLDWAV {7}. Στην Ελλάδα, το DAMBRK έχει χρησιμοποιηθεί σχεδόν αποκλειστικά σε σχετικές μελέτες, γιατί εφαρμόζεται σχετικά εύκολα παρέχοντας τη δυνατότητα απλής εισαγωγής δεδομένων και εξαγωγής αποτελεσμάτων, ενώ παράλληλα είναι ιδιαίτερα φιλικό στο χρήστη. Όμως, δεν παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα επέμβασης στο πρόγραμμα και αποτελεί γι' αυτόν ένα μοντέλο τύπου «μαύρου κουτιού», όπως άλλωστε τα περισσότερα από τα υπάρχοντα εμπορικά

προγράμματα. Το πλέον συνηθισμένο αριθμητικό σχήμα επίλυσης των εξισώσεων Saint-Venant είναι το πεπλεγμένο σχήμα των 4 σημείων {5} και χρησιμοποιείται στο DAMBRK. Η εφαρμογή του σχήματος αυτού βασίζεται στον εντοπισμό των θέσεων του χειμάρρου, όπου η ροή αναμένεται να είναι κρίσιμη και το διαχωρισμό του συνόλου του μήκους του χειμάρρου σε τμήματα με υποκρίσιμη ή υπερκρίσιμη ροή. Στις ροές, όπου ο εντοπισμός των θέσεων κρίσιμης ροής γίνεται εύκολα, όπως π.χ. σε απότομη αλλαγή κλίσης του χειμάρρου από υποκρίσιμη σε υπερκρίσιμη, το σχήμα αυτό έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικό. Όμως σε πολλές περιπτώσεις, όπου η ροή πλησιάζει την κρίσιμη και ο αριθμός Froude μεταβάλλεται χρονικά από 0.9 μέχρι 1.1, το πεπλεγμένο σχήμα των 4 σημείων παρουσιάζει προβλήματα αριθμητικής αστάθειας και ακρίβειας, αλλά και δυσκολίας επίλυσης στις περιπτώσεις στιγμιαίας και μεγάλης κατάρρευσης φράγματος, η οποία δημιουργεί μια κινούμενη διεπιφάνεια «σύνθετης» υποκρίσιμης-υπερκρίσιμης ροής {4}. Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί διάφορες τεχνικές για την επίλυση περιπτώσεων «σύνθετης» ροής, όπως η μέθοδος του Godunov, το ρητό σχήμα ENO, το σχήμα TVD-McCormack κ.α., τα βασικότερα από τα οποία έχουν διερευνηθεί στο EYE {18}. Επίσης, στο EYU έχει δομηθεί το μοντέλο FROM (Flood Routing Model) {19,20}. Το FROM χρησιμοποιεί ένα ρητό σχήμα που βασίζεται στην τεχνική των Yang et al {13}, στο οποίο οι όροι μεταφοράς των εξισώσεων Saint-Venant διαχωρίζονται σε δύο μέρη, το κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί στις δυο χαρακτηριστικές διευθύνσεις της ροής (ανάντη και κατάντη). Το FROM έχει εφαρμοστεί στις ακόλουθες 6 περιπτώσεις μελέτης αστοχίας φράγματος: (1) φράγμα RCC Κόρη-Γεφύρι της νήσου Χίου, (2) φράγμα RCC του Αγίου Νικολάου, (3) φράγμα λιμνοδεξαμενής Πανόρμου της νήσου Σκοπέλου, (4) φράγμα λιμνοδεξαμενής Αγίας της νήσου Κρήτης {17}, (5) φράγμα Διπόταμου – Αλεξανδρούπολης {21} και (6) φράγμα Κνίδης στο χειμάρρο Ποταμιάς, παραπόταμου του ποταμού Αλιάκμονα. Πρόσφατα έχει δομηθεί στο EYU του ΕΜΠ το μοντέλο RISH-1D {12}, το οποίο χρησιμοποιεί το πεπλεγμένο σχήμα των 4 σημείων του DAMBRK και αποτελεί το κύριο υδραυλικό μοντέλο της πλατφόρμας OPEN-MI {16}.

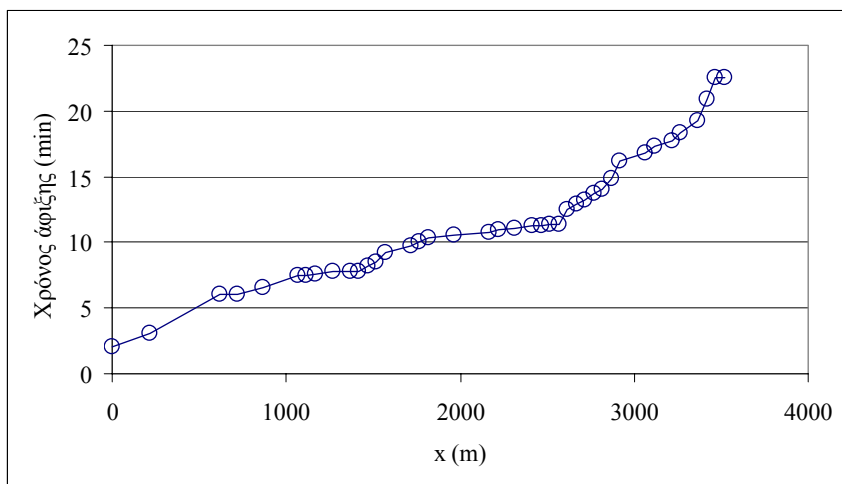
### 3.2 Αξιολόγηση των μοντέλων κύματος

Δεν υπάρχει στη βιβλιογραφία ένα μοντέλο υπολογισμού διέλευσης του κύματος που θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ιδανικό. Με βάση τη βιβλιογραφία και την εμπειρία του συγγραφέα σημειώνονται τα ακόλουθα:

1. Η επιλογή του μοντέλου γίνεται με γνώμονα το σκοπό της προσομοίωσης (όπως σε όλες τις περιπτώσεις προσομοίωσης), τα χαρακτηριστικά του χειμάρρου και τις συνθήκες ροής.
2. Τα αποτελέσματα ενός 1-D μοντέλου είναι περίπου τα ίδια με αυτά ενός άλλου 1-D μοντέλου. Στις διάφορες πρακτικές περιπτώσεις συνιστάται η εφαρμογή δυο μοντέλων για λόγους σύγκρισης και «ελέγχου». Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι οι αποκλίσεις στις υπολογιζόμενες τιμές της παροχής αιχμής και των μέγιστων βαθών του FROM από του DAMBRK σε 6 περιπτώσεις αστοχίας φραγμάτων ήταν μικρότερες από  $\pm 5\%$ . Αριθμητικές δυσκολίες σύγκλισης, καθώς και αστάθειες παρουσιάστηκαν και στα δυο μοντέλα, οι οποίες όμως δεν επηρέασαν αισθητά τα αποτελέσματα.
3. Σε σχετικά 1-D περιοχές τα αποτελέσματα ενός 1-D μοντέλου δεν διαφέρουν σημαντικά από τα αντίστοιχα ενός 2-D μοντέλου. Αυτό δεν ισχύει σε περιοχές με έντονο 2-D χαρακτήρα, όπου «επιβάλλεται» η χρησιμοποίηση ενός 2-D μοντέλου. Όταν δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα απαιτείται προσεκτική διαχείριση του 1-D μοντέλου ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις των 2-D περιοχών. Η βέλτιστη λύση είναι η χρησιμοποίηση ενός υβριδικού 1-D/2-D μοντέλου, το οποίο εφαρμόζεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της περιοχής. Ένα υβριδικό μοντέλο εφαρμόστηκε στην περίπτωση της μελέτης αστοχίας φράγματος στον Ποταμό Αλιάκμονα {10,15}. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται η χρησιμοποίηση του μοντέλου από έμπειρους χρήστες με πολύ καλές γνώσεις της υδραυλικής συμπεριφοράς του φαινομένου.



4. Ιδιαίτερη πρακτική σημασία έχει ο υπολογισμός των χρόνων άφιξης του κύματος στις διάφορες θέσεις του χειμάρρου, που επηρεάζονται από την υπολογιζόμενη ταχύτητα κίνησης του κύματος. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται στην εικόνα 5 το διάγραμμα των χρόνων άφιξης στην περίπτωση ενός σεναρίου αστοχίας του φράγματος Κνίδης. Γενικά, έχει παρατηρηθεί ότι τα 1-D μοντέλα υπερεκτιμούν την ταχύτητα του κύματος σε σχέση με τα 2-D μοντέλα, με αποτέλεσμα να υπολογίζουν μικρότερους χρόνους άφιξης που οδηγούν σε «γρηγορότερο» σχέδιο αντιμετώπισης της αστοχίας ενός φράγματος.



Εικόνα 5: Διάγραμμα των χρόνων άφιξης στην περίπτωση ενός σεναρίου αστοχίας του φράγματος Κνίδης

5. Κατά τους υπολογισμούς επιβάλλεται η εξακρίβωση ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου δεν εξαρτώνται από τη διάσταση του πλέγματος υπολογισμού. Αρκετές φορές αυτό είναι πρακτικά αδύνατο, όπως π.χ. σε υπολογισμούς με το DAMBRK {6} σε περιπτώσεις πολύπλοκης γεωμετρίας του χειμάρρου, όπου πρακτικά «επιβάλλεται» η παράλειψη κάποιων «δύσκολων» διατομών για να επιτευχθεί σύγκλιση των υπολογισμών.
6. Η ακρίβεια των υπολογισμών του μοντέλου κύματος δεν είναι τόσο μικρή όσο αυτή των υπολογισμών του μοντέλου χάσματος. Δεν είναι όμως μεγάλη. Ιδιαίτερα σε κατοικημένες περιοχές με μικρές κλίσεις εδάφους, η ακρίβεια υπολογισμού της στάθμης κατάκλυσης δεν αναμένεται να είναι μικρότερη από  $\pm 0.5-1.0$  m και της ταχύτητας μετάδοσης του κύματος μικρότερη από  $\pm 25\%$ .

### 3.3 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων του μοντέλου κύματος

Η ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα σημεία της διαδικασίας και αυτό που έχει τη μεγαλύτερη πρακτική σημασία, γιατί αποτελεί τη βάση του Σχεδίου Αντιμετώπισης Αστοχίας Φράγματος. Σε κατάλληλους πίνακες και χάρτες της περιοχής κατάκλυσης πρέπει να σημειώνονται τα χαρακτηριστικά του κύματος που αναφέρθηκαν στην εισαγωγή, ιδιαίτερα στις θέσεις ενδιαφέροντος, όπως π.χ. σε κατοικημένες περιοχές, σε γέφυρες, σε διαβάσεις κ.α. Ειδικότερα, η πεμπτουσία των υπολογισμών είναι ο χάρτης της περιοχής κατάκλυσης του κύματος με τους τοπικούς χρόνους άφιξης του κύματος για κάθε εξεταζόμενο σενάριο.

## 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η μαθηματική προσομοίωση της αστοχίας ενός φράγματος είναι μια σύνθετη διαδικασία, σχετικά μικρής ακρίβειας, αλλά και πολύ μεγάλης σημασίας, καθόσον τα αποτελέσματά της καθορίζουν το

Σχέδιο Αντιμετώπισης Αστοχίας Φράγματος. Με δεδομένη την απαίτηση της αύξησης της ακρίβειας υπολογισμών συνιστώνται: (1) η διερεύνηση ικανού αριθμού σεναρίων αστοχίας, (2) η προσεκτική εφαρμογή των μοντέλων, ιδίως των εμπορικών πακέτων, μόνο από επιστήμονες με εξειδικευμένη εμπειρία και (3) η σύνταξη τεχνικών προδιαγραφών πραγματοποίησης των σχετικών υπολογισμών.

#### ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Ahmed, M. & Morris, M. 2000. Malpasset dam-break test case, a comparison between the ISIS numerical model results and the field and physical model data, HR Wallingford, Howbery Park, Wallingford, OX10 8BA, England.
2. BREACH model. 2005. <http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/rvrmech/modelsbrch.htm>.
3. Flow Science Inc. 2005. FLOW-3D User's Manual, Santa Fe, NM. <http://www.flow3d.com/about.htm>.
4. Jin, M. & Fread, D. L. 1997. Dynamic flood routing with explicit and implicit numerical solution schemes, J. Hydr. Engrg., ASCE, 123(3), 166-173.
5. Fread, D. L. 1985. Channel routing Hydrological forecasting, M.G. Anderson and T.P. Burt, eds., John Willey & Sons, Inc., New York, N.Y. 437-503.
6. Fread, D. L. 1988. The NWS DAMBRK model: theoretical background and user documentation, HRL-258, Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, Silver Spring, Md. 4.
7. Fread, D.L. & Jin, M. 1993. Real-time dynamic flood routing with NWS FLDWAY model using Kalman filter updating, Engineering hydrology, Y.K. Chin, ed., ASCE, New York, N.Y. 946-951.
8. Froehlich, D. C. 1995a. Peak Outflow from Breached Embankment Dam, Water Resources Engineering, Proceedings of the 1995 ASCE Conference on Water Resources Engineering, San Antonio, Texas, August 14-18, 887-891.
9. Froehlich, D. C. 1995b. Embankment Dam Breach Parameters Revisited, Journal of Water Resources Planning and Management, 121(1), 90-97.
10. Memos, C. D., Stamou, A. I. and Politis, M. G. 2006. Flooding due to Sequential Dam Breaking, IASME Transactions on Fluid Mechanics, 3(1), 221-229.
11. Stamou, A. 2005. Modeling of the failure of concrete dams: general principles, limitations and challenges for research, NW – IALAD workshop on Dam Safety and Integrity Assessment, Athens, 18 March 2005.
12. Stamou, A. 2008. The computer code RISH-1D (River Stream Hydraulics in 1 Dimension).
13. Yang, J. Y., Hsu, C.A. & Cjang, S.H. 1993. Computations of free surface flows, J. Hydr. Res., 31(1), 20-33.
14. Δημητριάδης, Π. 2006. Διερεύνηση αστοχίας γεωφράγματος, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Επιβλέπων: Α. Στάμου.
15. Ε.Μ.Π. 2007. Διάδοση εξαιρετικών κυμάτων στον ποταμό Αλιάκμονα, ΔΕΗ ΑΕ, Επιστ. Υπεύθ.: Κ. Μέμος.
16. Ε.Μ.Π. Ερευνητικό έργο. 2008. OpenMI-LIFE- Bringing the OpenMI to Life, LIFE-Environment demonstration projects, European Commission, DG Environment, LIFE06 ENV/UK/000409, Επιστ. Υπεύθ. Μ. Μιμίκου.
17. Ε.Μ.Π. 2006. Ερευνητικό έργο ΔΕΗ ΑΕ. «Διερεύνηση διάδοσης πλημμυρικού κύματος σε περίπτωση αστοχίας του φράγματος Αγιάς με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων», Επιστ. Υπεύθ.: Α. Στάμου.
18. Πολίτης, Μ. 2005. Αριθμητικά σχήματα υπολογισμού μη μόνιμης ροής σε ανοικτούς αγωγούς - Εφαρμογή στη διάδοση πλημμυρικού κύματος κατά τη θραύση φράγματος., Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Επιβλέπων: Α. Στάμου.
19. Στάμου, Α. 2004. Υπολογιστικός κώδικας FROM (Flood Routing Model), ΕΜΠ, Αθήνα.
20. Στάμου, Α. & Κατσίρης, Ι. 2005. Μαθηματικό μοντέλο διάδοσης πλημμύρας κατά τη θραύση φράγματος, Πρακτικά του 5<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου της ΕΕΔΥΠ, Ξάνθη, σελ.153-159.
21. Στάμου, Α., Ξανθοπούλου, Ι., Κονδύλης, Ι. & Ξενουδάκης, Γ. 2006. Διερεύνηση διάδοσης πλημμυρικού κύματος σε περίπτωση αστοχίας του υδροταμιευτήρα περιοχής Διπόταμου, Πρακτικά του 10<sup>ου</sup> Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Θράκη.

# Mathematical modeling of dam failure

A. I. Stamou

*Assoc. Professor, Department of Water Resources and Environmental Engineering, School of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Greece.*

**ABSTRACT:** The mathematical modeling of dam failure is described as a calculation process, which includes the use of two sub-models: (1) the dam breach sub-model and (2) the hydraulic sub-model (for the dynamic flood routing). This modeling process is extremely important, because its results determine the characteristics of the Emergency Action Plans (EAPs). However, the process is complex and normally has low accuracy. In the performance of Dam Failure Studies (DFSs) a series of proposals is made aiming at the simplification of the process and the increase its level of accuracy; these proposals include the following: (1) the investigation of a sufficient number of failure scenarios in the DFS, (2) the careful application of both sub-models, specially the commercial codes, by specialized scientists, and (3) the formulation of technical specifications for DFS.