

# Διάδοση Κυμάτων λόγω Θραύσης Φραγμάτων σε Σειρά

Μ.Γ. Πολίτης

*Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, ΜΔΕ ΕΜΠ*

Κ.Δ. Μέμος

*Καθηγητής, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΕΜΠ*

*Λέξεις κλειδιά:* θραύση φράγματος, διόδευση πλημμυρικού κύματος

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η ροή πλημμυρικών κυμάτων λόγω θραύσης φραγμάτων που βρίσκονται στον ίδιο ποταμό είναι ένα σύνθετο πρόβλημα ιδιαίτερης σοβαρότητας για οικισμούς και εκτάσεις που βρίσκονται στη διαδρομή του κύματος. Ένα σημαντικό ζήτημα που αντιμετωπίζεται στην παρούσα εργασία είναι η διερεύνηση της αστοχίας φραγμάτων σε σειρά και του πλημμυρικού κύματος που δημιουργείται από τη θραύση. Παρουσιάζονται δύο εφαρμογές με διαφοροποιήσεις ως προς τη μεθοδολογία προσέγγισης και συνάγονται συμπεράσματα κατάλληλα για χρήση σε ανάλογες περιπτώσεις.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη μελέτη περιβαλλοντικών κινδύνων μεγάλης κλίμακας και την απομείωση των βλαβερών συνεπειών τους αναφέρεται και στο ζήτημα της θραύσης φράγματος, η οποία κατά κανόνα συνεπάγεται την απελευθέρωση τεραστίων ποσοτήτων νερού κατάντη της θέσης αστοχίας. Η ροή της εξαιρετικής αυτής πλημμυρικής παροχής παρουσιάζει άμεση απειλή για τη ζωή και την περιουσία των κατοίκων οικισμών, που είναι εγκατεστημένοι στη διαδρομή του πλημμυρικού κύματος. Είναι εύλογο επομένως το ενδιαφέρον των ερευνητών για τη μελέτη τόσο του τρόπου θραύσεως και του δημιουργούμενου κύματος όσο και της διάδοσής του προς τα κατάντη. Πολλές προσπάθειες έχουν καταγραφεί κατά τον περασμένο αιώνα, που αναφέρονται σε δύο ομάδες προβλημάτων: καθορισμό των χαρακτηριστικών της ροής κατά τη χρονική στιγμή της θραύσης και κατά την μετάδοση του πλημμυρικού κύματος προς τα κατάντη.

Για το πρώτο ζήτημα, ουσιαστικά δηλαδή για τη διαμόρφωση του υδρογραφήματος αμέσως μετά τη θραύση του φράγματος, αναφέρονται οι πρωτοπόρες θεωρητικές εργασίες των Ritter {18}, Dressler {7}, Stoker {23} κλπ., οι οποίες ακολουθήθηκαν από πιο λεπτομερείς μαθηματικές προσεγγίσεις όπως αυτές του Rajar {17}, Sakkas & Strelkoff {20}, Hunt {13}, αλλά και από άλλες που εξέταζαν τον τρόπο θραύσεως του φράγματος, π.χ. Broich {3}, Paquier et al. {16}.

Το δεύτερο ζήτημα, που αφορά τη διάδοση του πλημμυρικού κύματος κατάντη του φράγματος, έχει επίσης προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών. Αναφέρονται ενδεικτικά οι προσεγγίσεις μέσω της κλασσικής μεθόδου των χαρακτηριστικών (Abbott {1}), αυτή των πεπερασμένων διαφορών (Cunge et al. {5}) ή των πεπερασμένων στοιχείων (Fread {9}, Szymkiewicz {25}). Ένα σημαντικό θέμα στη διάδοση του πλημμυρικού κύματος είναι το κατά πόσον αναπαρίσταται αξιόπιστα η ασυνέχεια του μετώπου, ιδίως κατά την αρχική φάση της διάδοσής του. Προσπάθειες προς αυτή την κατεύθυνση αναφέρονται αυτές των Godunov {11}, Savic & Holly {21}. Οι παραπάνω προσεγγίσεις βασίζονται στις εξισώσεις St Venant ενώ δέχονται διάδοση της ροής εντός της κοίτης του ποταμού και συνεπώς χρησιμοποιούν σχήματα μιας οριζόντιας διάστασης. Όταν όμως εισαχθούν στο πρόβλημα απότομες αλλαγές της κοίτης του ποταμού, όπως αυτές που συμβαίνουν κατά την είσοδο του πλημμυρικού κύματος σε ταμειωτήρα ικανού βάθους, τότε η επίλυση του προβλήματος δυσχεραίνεται ιδιαίτερα λόγω του ότι δεν είναι πλέον αποδεκτή η χρήση των εξισώσεων ομαλώς μεταβαλλόμενης ροής μιας διάστασης.

Πολλές φορές η ροή του κύματος λόγω θραύσης καταλήγει σε πεδινή αναπεπταμένη έκταση, όπου πλέον η θεώρηση μονοδιάστατης διάδοσης παύει να ισχύει. Για την περίπτωση αυτή έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που βασίζονται στη μονοδιάστατη εξίσωση διάχυσης κύματος, π.χ. Strelkoff et al. {24}, Fread {8}, Han & Park {12} στην επίλυση των εξισώσεων ροής σε δύο διαστάσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, Xanthopoulos & Koutitas {26} στην επίλυση με τη μέθοδο των χαρακτηριστικών, Katopodes & Strelkoff {14} ή με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, D'Alraos et al. {6}.

Συχνά για εντονότερη εκμετάλλευση του υδροδυναμικού ενός ποταμού, κατασκευάζονται σε σειρά περισσότερα του ενός φράγματα. Στις περιπτώσεις αυτές το πρόβλημα γίνεται ακόμη πιο σύνθετο. Οι συνθήκες ροής μπορεί να είναι ομαλώς ή ταχέως μεταβαλλόμενες, σε μία ή δύο οριζόντιες διαστάσεις και κατά τόπους με την κατακόρυφη διάσταση να παίζει σημαντικό ρόλο. Επιπρόσθετα, και για διάφορες συνθήκες πλήρωσης των ταμιευτήρων των φραγμάτων, θα πρέπει να εκτιμηθεί το κατά πόσον το πλημμυρικό κύμα που δημιουργήθηκε από θραύση ανάντη φράγματος θα προκαλέσει θραύση κατάντη φραγμάτων και πώς θα τροποποιηθούν τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του κύματος. Εάν προστεθούν στην όλη εικόνα και οι διάφοροι εναλλακτικοί τρόποι θραύσης γεωφράγματος, π.χ. από υπερπήδηση, διασωλήνωση, κλπ, γίνεται προφανής η πολυπλοκότητα της μαθηματικής διατύπωσης και επίλυσης του προβλήματος της εν σειρά αστοχίας φραγμάτων.

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει αποτελέσματα από συγκεκριμένες εφαρμογές υποθετικής θραύσης φράγματος σε δύο ανεξάρτητους ποταμούς με παρόντα πέντε φράγματα στον κάθε ένα από αυτούς. Οι δύο αυτές εφαρμογές διαφοροποιούνται ως προς τα επί μέρους στοιχεία της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε και έτσι συνάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για μελλοντικές εφαρμογές στο υπό εξέταση πρόβλημα.

## 2 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 2.1 Περιοχή μελέτης 1 (ΠΜ1)

Πρόκειται για ποταμό στο τμήμα της κοιλάδας του οποίου είναι κατασκευασμένα σε σειρά 5 φράγματα. Ο ποταμός από το ανάντη πέρας του ταμιευτήρα του πρώτου φράγματος έως αμέσως κατάντη του πέμπτου στη σειρά φράγματος διανύει μήκος 123km. Η κατά μήκος κλίση της κοίτης του ποταμού στο τμήμα αυτό κυμαίνεται από 7.0 ‰ έως 2.3 ‰. Το 93% του μήκους των 123km καταλαμβάνεται από το νερό των ταμιευτήρων, για την περίπτωση που οι ταμιευτήρες θεωρούνται πλήρεις. Εννέα χωριά βρίσκονται στα όρια του ποταμού και τρεις γέφυρες τον διασχίζουν κάθετα στο τμήμα της κοιλάδας. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των πέντε φραγμάτων και των ταμιευτήρων τους.

Ο ποταμός διατρέχει το πεδινό τμήμα για 50 km μέχρι να καταλήξει στη θάλασσα. Το ανάγλυφο της πεδιάδας, η οποία έχει συνολική έκταση 1100km<sup>2</sup>, είναι σχεδόν επίπεδο με μέγιστες διαφορές υψομέτρων της τάξης των 20m. Στο κέντρο και βόρεια της πεδιάδας τα υψόμετρα χαμηλώνουν αισθητά και φτάνουν έως και τα +2m από ΜΣΘ. Η κοίτη του ποταμού είναι μη εγκλιβωτισμένη. Η περιοχή μελέτης ορίζεται από το φυσικό υδροκρίτη, τα αναχώματα των Εθνικών Οδών και τις τάφρους που επηρεάζουν περισσότερο ή λιγότερο τη διάδοση του πλημμυρικού κύματος στο πεδινό τμήμα. Συνολικά 51 οικισμοί βρίσκονται στην περιοχή της πεδιάδας και το υψόμετρό τους κυμαίνεται από +2.5 έως +29.8m πάνω από τη ΜΣΘ.

### 2.2 Περιοχή μελέτης 2 (ΠΜ2)

Παρόμοια με την ΠΜ1, στο τμήμα της κοιλάδας του ποταμού είναι τοποθετημένα σε σειρά 5 χωμάτινα φράγματα. Το συνολικό μήκος της διαδρομής, από την έναρξη του ταμιευτήρα του πρώτου έως και αμέσως κατάντη του πέμπτου στη σειρά φράγματος, ανέρχεται σε 170km. Η κατά μήκος κλίση της κοίτης του ποταμού στην κοιλάδα παρουσιάζει μια μέση τιμή περί το 3.5‰ η οποία αυξάνεται από τα ανάντη (2‰) προς τα κατάντη (7‰) Το 75% του μήκους αυτού

καλύπτεται από το νερό των ταμιευτήρων, για την περίπτωση που οι ταμιευτήρες θεωρούνται πλήρεις. Τριάντα οκτώ χωριά βρίσκονται στα όρια του ποταμού και αρκετές γέφυρες τον διασχίζουν κάθετα στο τμήμα της κοιλάδας. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των φραγμάτων και των ταμιευτήρων τους, στην εν λόγω περιοχή μελέτης.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά Φραγμάτων & Ταμιευτήρων Περιοχής Μελέτης 1

No Φράγματος	Ύψος Φράγματος (m)	Μήκος Φράγματος (m)	Μέγιστη Επιφάνεια Ταμιευτήρα (km <sup>2</sup> )	Μήκος Ταμιευτήρα (km)
1	100	500	27	46.6
2	97	295	73	41.8
3	66	260	5	9.8
4	48	200	3	12.6
5	14	1200	2	3.8

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά Φραγμάτων & Ταμιευτήρων Περιοχής Μελέτης 2

No Φράγματος	Ύψος Φράγματος (m)	Μήκος Φράγματος (m)	Μέγιστη Επιφάνεια Ταμιευτήρα (km <sup>2</sup> )	Μήκος Ταμιευτήρα (km)
1	150	330	9.4	17.4
2	170	480	12.7	23.6
3	160	500	82.9	42.9
4	94	547	30.2	33.9
5	26	1950	8.5	10.2

Η πεδινή έκταση χωρίζεται σε τρία επιμέρους τμήματα: τον κάμπο, το “λαιμό” και την πεδιάδα εκβολών. Ο κάμπος περιλαμβάνει τρεις λίμνες. Η κοίτη του ποταμού δεν είναι εγκλιβωτισμένη εκεί με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ουσιαστικό εμπόδιο διαφυγής των νερών σε περίπτωση εξαιρετικής πλημμύρας. Η συνολική έκταση του κάμπου ανέρχεται σε 415km<sup>2</sup> εκ των οποίων τα 124.5km<sup>2</sup> καταλαμβάνονται από τα νερά των τριών λιμνών. Οι μεγάλοι οδικοί και σιδηροδρομικοί άξονες που διατρέχουν την περιοχή μελέτης δεν παρουσιάζουν υψηλά αναχώματα που θα μπορούσαν να τροποποιήσουν σημαντικά τα χαρακτηριστικά του πλημμυρικού κύματος. Η ροή του ποταμού εντός του κάμπου έχει μήκος περίπου 17km. Η μορφολογία του εδάφους χαρακτηρίζεται από ήπιες κλίσεις με υψόμετρα από +100m έως +20m. Ο ποταμός αφού διασχίσει το δυτικό τμήμα του κάμπου, εισέρχεται σε μία στενή περιοχή, η οποία έπειτα από 9km καταλήγει στην πεδιάδα των εκβολών. Η έκταση της πεδιάδας, περιλαμβανομένων των λόφων, ανέρχεται κατά προσέγγιση σε 330km<sup>2</sup>. Η ροή του ποταμού εντός της πεδιάδας αυτής έχει μήκος περίπου 41km. Τα υψόμετρα κυμαίνονται από το +0m στις εκβολές έως +20m ενώ οι κλίσεις είναι ιδιαίτερα ήπιες. Στην πεδινή έκταση της περιοχής μελέτης βρίσκονται συνολικά 63 οικισμοί, 50 στον κάμπο και 13 στην πεδιάδα των εκβολών.

### 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

#### 3.1 Γενικά

Οι δύο βασικές αναλύσεις του εν λόγω προβλήματος αφορούν αφ’ ενός στη διερεύνηση της θραύσης του φράγματος και τη δημιουργία του αντίστοιχου υδρογραφήματος και αφ’ ετέρου στη διάδοση του πλημμυρικού κύματος στην κατάντη περιοχή. Η τελευταία μπορεί να υποδιαιρεθεί σε

δύο τμήματα, αυτό της μονοδιάστατης ροής και αυτό της εξάπλωσης του κύματος στο πεδινό τμήμα της διαδρομής. Άλλα επί μέρους θέματα αφορούν τη διάδοση του κύματος σε ταμιευτήρα, την αλληλεπίδρασή του με εμπόδια όπως γέφυρες {15}, κλπ. Τα τελευταία αυτά ζητήματα δεν παρουσιάζονται εδώ λόγω ανεπάρκειας διαθέσιμου χώρου.



Εικόνα 1. Περιοχές μελέτης 1 (αριστερά ) και 2 (δεξιά)

### 3.2 Ανάλυση θραύσης φράγματος

Τα μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν την θραύση φράγματος από γεωυλικά έχουν ως σκοπό την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών μεγεθών του ανοίγματος που δημιουργείται κατά τη θραύση. Ως αποτέλεσμα του τρόπου εξέλιξης των χαρακτηριστικών του χάσματος στο χρόνο και με βάση τα στοιχεία του ταμιευτήρα, προσδιορίζεται το υδρογράφημα εξόδου λόγω αστοχίας του φράγματος. Το υδρογράφημα αυτό αποτελεί την ανάντη οριακή συνθήκη για την επίλυση του προβλήματος της χωροχρονικής εξέλιξης του πλημμυρικού γεγονότος. Σημαντικός παράγοντας που καθορίζει τα αποτελέσματα του μοντέλου αποτελεί ο τύπος της θραύσης. Στη παρούσα εργασία μελετώνται δύο τύποι θραύσης: i) από υπερπήδηση, όταν δηλ. η στάθμη νερού στον ταμιευτήρα ανέλθει πάνω από τη στέψη του φράγματος κατά τη διάρκεια πλημμυρικού γεγονότος και ii) από διασωλήνωση, όπου δημιουργείται ένα άνοιγμα σε κάποια θέση στο σώμα του φράγματος.

Η μαθηματική προσομοίωση της θραύσης φραγμάτων γίνεται στις εφαρμογές που παρουσιάζονται με δύο μαθηματικά μοντέλα: α) με το μοντέλο Breach της Boss {12} και β) με ένα απλοποιημένο μοντέλο θραύσης, το οποίο περιλαμβάνεται στο μοντέλο Dambrk της Boss {9}.

Το μαθηματικό μοντέλο Breach της Boss αποτελεί ένα μοντέλο πρόβλεψης των χαρακτηριστικών μεγεθών του ανοίγματος που δημιουργείται κατά τη θραύση ενός χωμάτινου φράγματος. Στους υπολογισμούς της θραύσης με βάση το εν λόγω μοντέλο λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά του φράγματος, των υλικών κατασκευής του, του ταμιευτήρα και του υδρογραφήματος εισόδου σε αυτόν. Στους υπολογισμούς της θραύσης με το μοντέλο Dambrk η περιγραφή της θραύσης γίνεται με απλοποιημένο τρόπο, περιγράφοντας μόνο την αύξηση των διαστάσεων του ρήγματος προς το πυθμένα του φράγματος μέχρι αυτό να λάβει την τελική μορφή του.

Στις δύο περιοχές μελέτης βρίσκονται κατασκευασμένα ή υπό κατασκευή συνολικά 10 φράγματα. Είναι επομένως ευνόητο ότι μία βασική παράμετρος που καθορίζει το πλήθος των σεναρίων που εξετάζονται αναφέρεται στο φράγμα από το οποίο ξεκινάει αρχικά η αστοχία. Μια δεύτερη παράμετρος αφορά τον μηχανισμό που προκαλεί τη θραύση του φράγματος. Για την ΠΜ1 πραγματοποιήθηκαν 13 σενάρια θραύσης εκ των οποίων τα 7 αναφερόταν σε θραύση φράγματος από διασωλήνωση σε αντίθεση με την ΠΜ2 όπου από τα 10 σενάρια που μελετήθηκαν μόνο το 1 είχε ως μηχανισμό καταστροφής του φράγματος την διασωλήνωση. Η διαφορά αυτή έγκειται στο γεγονός ότι από τα αποτελέσματα της πρώτης μελέτης διαπιστώθηκε ότι οι τιμές μέγιστης παροχής  $Q_p$  για τις περιπτώσεις υπερπήδησης ήταν μεγαλύτερες από της αντίστοιχες της διασωλήνωσης.

Στην ΠΜ1 πραγματοποιήθηκε διερεύνηση με σκοπό την επιλογή ενός εκ των προγραμμάτων Breach ή Dambrk για τον υπολογισμό της θραύσης λόγω διασωλήνωσης ή λόγω υπερπήδησης. Με βάση τη διερεύνηση αυτή αποφασίστηκε: α) για κάθε σενάριο θραύσης γαιοφράγματος εξ αιτίας υπερπήδησης το υδρογράφημα εκροής από το φράγμα υπολογίζεται με το μοντέλο Breach που «υπολογίζει» κατά κάποιο τρόπο την εξέλιξη του μηχανισμού αστοχίας χωρίς να απαιτείται η προεισαγωγή παραμέτρων εξέλιξης της αστοχίας όπως στο Dambrk. Σημειώνεται επιπρόσθετα ότι το μοντέλο Breach δίδει τιμές  $Q_p$  εν γένει υψηλότερες από τα αντίστοιχα αποτελέσματα του Dambrk. Για θραύση εξ αιτίας διασωλήνωσης το υδρογράφημα εκροής υπολογίζεται είτε (α) με το μοντέλο Breach στις περιπτώσεις που αμέσως κατάντι του φράγματος ξεκινάει ο ταμιευτήρας του επόμενου φράγματος ή (β) με το απλοποιημένο μοντέλο θραύσης του Dambrk για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

Για την ΠΜ2, με εξαίρεση τη θραύση του πρώτου φράγματος, όπου εφαρμόζεται το μοντέλο Breach λόγω της πιο επιστημονικής προσέγγισης που εφαρμόζει έναντι αυτής του Dambrk όπως αναφέρθηκε ήδη, οι θραύσεις των φραγμάτων γίνονται με χρήση του μοντέλου Dambrk με εισαγωγή χαρακτηριστικών θραύσης που έχουν υπολογιστεί με το μοντέλο Breach {15}. Η μεθοδολογία αυτή αποφασίστηκε λαμβάνοντας υπόψη ότι το μοντέλο Dambrk υπολογίζει δυναμικά το βάθος ροής και την παροχή με την πάροδο του χρόνου σε κάθε διατομή του ταμιευτήρα του προς αστοχία φράγματος και δεν στηρίζεται μόνο στο ισοζύγιο μάζας, όπως στην περίπτωση του Breach. Έτσι, η αντιμετώπιση του προβλήματος της διόδευσης στον ταμιευτήρα προσεγγίζεται επίσης ικανοποιητικά με χρήση του μοντέλου Dambrk {8}.

### 3.3 Διόδευση πλημμυρικού κύματος σε κοιλάδα (1-D)

Η διόδευση πλημμυρικού κύματος από θραύση φράγματος στο τμήμα της κοιλάδας σε στεγνό πυθμένα γίνεται μέσω μονοδιάστατου μοντέλου λόγω της ευθυτενούς μορφής της διαδρομής. Για την επίλυση αυτού του τύπου των προβλημάτων χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις της μη μόνιμης βαθμιαία μεταβαλλόμενης ροής (εξισώσεις Saint-Venant {19}).

Στην παρούσα διερεύνηση, και για τις δύο περιπτώσεις εφαρμογών, για τον υπολογισμό της διόδευσης του πλημμυρικού κύματος στην κοίτη του ποταμού εφαρμόζεται το μοντέλο Dambrk της Boss. Το μοντέλο χρησιμοποιεί την πλήρη μορφή των μονοδιάστατων εξισώσεων St.Venant μη μόνιμης ροής, οι οποίες συνοδεύονται από τις οριακές συνθήκες στα ανάντη και κατάντη άκρα και από τις οριακές συνθήκες που δημιουργούνται λόγω της ύπαρξης κατασκευών (π.χ. φράγματος, γέφυρας). Το σύστημα των εξισώσεων επιλύεται με ένα μη γραμμικό πεπλεγμένο σχήμα διακριτοποίησης πεπερασμένων διαφορών τεσσάρων σημείων.

Το μοντέλο Dambrk χρησιμοποιήθηκε για την υπό συζήτηση διόδευση και στις δύο περιοχές μελέτης που εξετάζονται, στα τμήματα του ποταμού που δεν καλύπτονται από το νερό των ταμιευτήρων. Αξίζει να σημειωθεί ότι πριν από τη χρησιμοποίησή του, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση με πέντε αριθμητικά σχήματα σε προβλήματα διόδευσης πλημμυρικού κύματος {15}.

Με βάση την παραπάνω διερεύνηση αποφασίστηκε η χρησιμοποίηση του Dambrk για τους εξής λόγους : α) χρησιμοποιεί πεπλεγμένο (implicit) σχήμα επίλυσης πεπερασμένων διαφορών και τα αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα της επιλογής χρονικού βήματος, β) η σύγκλιση πραγματοποιείται γρηγορότερα και ο υπολογιστικός χρόνος είναι πολύ μικρότερος αφού δεν υπόκειται στον

περιορισμό του κριτηρίου Courant-Friedrichs-Lewy {10}, γ) η ευρεία εφαρμογή του παγκοσμίως σε παρόμοια προβλήματα αποτέλεσε ένα ισχυρό κίνητρο για τη χρησιμοποίησή του.

Για την ΠΜ1 η βάση του υδρογραφήματος εσόδου στον ταμιευτήρα του πρώτου φράγματος εκτείνεται σε 122 ώρες, η παροχή βάσεως είναι  $386\text{m}^3/\text{sec}$  (προ) και  $343\text{m}^3/\text{sec}$  (μετά), ενώ η μέγιστη τιμή παροχής ανέρχεται σε  $7\,867\text{m}^3/\text{sec}$ . Για διάρκεια 122 ωρών η συνολική απορροή φθάνει τα  $952 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . Ο κλάδος ανόδου διαρκεί 30 ώρες και αυτός της καθόδου τις υπόλοιπες 92 ώρες. Η γεωμετρία της κοιλάδας καθορίζεται μέσω 136 χαρακτηριστικών διατομών. Η επιλογή της τιμής του συντελεστή τραχύτητας  $n$  Manning που εφαρμόζεται στους υπολογισμούς έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπεριλαμβάνονται, εκτός από τις απώλειες φορτίου λόγω τραχύτητας των στερεών ορίων και οι πρόσθετες απώλειες ενέργειας λόγω ιδιοτυπίας της ροής. Θεωρήθηκε για το τμήμα της διαδρομής του κύματος στην κοιλάδα του ποταμού ένας γενικός συντελεστής τραχύτητας κατά Manning  $n = 1:0,035\text{m}^{1/3}/\text{s}$ .

Αντίστοιχα για την ΠΜ2 η βάση του υδρογραφήματος εκτείνεται σε 142 ώρες, η παροχή βάσεως είναι  $14 \text{ m}^3/\text{s}$  (προ) και  $83 \text{ m}^3/\text{s}$  (μετά), ενώ η μέγιστη τιμή  $3\,524 \text{ m}^3/\text{s}$ . Για τη διάρκεια των 142 ωρών η συνολική απορροή φθάνει τα  $630 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . Ο κλάδος ανόδου διαρκεί 48 ώρες και αυτός της καθόδου τις υπόλοιπες 94 ώρες. Η γεωμετρία καθορίζεται μέσω 141 χαρακτηριστικών διατομών. Ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning  $n$  ελήφθη ίσος με  $1:0,03(\text{m}^{1/3}/\text{s})$ .

### 3.4 Εξάπλωση πλημμυρικού κύματος σε πεδινή έκταση

Μετά τη διαδρομή στη φυσική κοίτη της κοιλάδας το πλημμυρικό κύμα συχνά καταλήγει σε πεδινή έκταση, όπου για την προσομοίωση της διάδοσής του πρέπει να ληφθούν πλέον υπόψη και οι δύο οριζόντιες διαστάσεις. Υπάρχουν αρκετά αριθμητικά ομοιώματα για περιγραφή της εν λόγω εξάπλωσης του κύματος, π.χ. {2}, {4}, {13}.

Στην ΠΜ1 για τον υπολογισμό του πλημμυρικού κύματος εφαρμόστηκε το μοντέλο FROM-2D (Flood Routing Model in 2 Dimensions), το οποίο δομήθηκε με την επιστημονική ευθύνη του Α. Ι. Στάμου {22}, Αναπλ. Καθηγητή στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Χρησιμοποιούνται οι δισδιάστατες εξισώσεις της μη μόνιμης ροής για περίπου οριζόντια ταχύτητα με συνιστώσες  $u$ ,  $v$  κατά  $x$  και  $y$ . Οι κλίσεις των επιφανειών ενεργείας υπολογίζονται κατά προσέγγιση από τις εξισώσεις ομοιόμορφης ροής (Manning), οι οποίες προκύπτουν θεωρώντας ότι οι όροι αδρανείας στις αρχικές εξισώσεις είναι αμελητέοι, οπότε οι κλίσεις αυτές κατά  $x$  και  $y$  ταυτίζονται με τις κλίσεις της ελεύθερης επιφάνειας.

Το μοντέλο FROM έχει τα ακόλουθα γενικά χαρακτηριστικά: Επιλύει τις προσεγγιστικές δισδιάστατες εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης του δυναμικού κύματος με την τεχνική των πεπερασμένων διαφορών. Για τη χωρική διακριτοποίηση εφαρμόζεται το σχήμα των κεντρικών διαφορών (central differences) σε εναλλασσόμενο πλέγμα (non-staggered grid). Η απαίτηση του κριτηρίου ευστάθειας κατά Courant οδηγεί στην αναγκαστική χρήση πολύ μικρών χρονικών βημάτων. Για την προσομοίωση της ΠΜ1 χρησιμοποιήθηκαν 1748 διαφορεικοί όγκοι ίσων διαστάσεων  $DX=1000 \text{ m}$  και  $DY=1000 \text{ m}$ . Η τιμή του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning θεωρήθηκε ίση με  $30.0 \text{ m}^{1/3}/\text{sec}$ .

Στην ΠΜ2 για τον υπολογισμό του πλημμυρικού κύματος σε 2 διαστάσεις εφαρμόζεται το μοντέλο Mike 21 2005 (Hydrodynamic Model in 2 Dimensions), το οποίο δομήθηκε από την εταιρεία DHI Water & Environment. Το μοντέλο MIKE έχει τα ακόλουθα γενικά χαρακτηριστικά: α) επιλύει τις δισδιάστατες εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης του δυναμικού κύματος με την τεχνική των πεπερασμένων διαφορών και πεπλεγμένο σχήμα επίλυσης β) δεν απαιτείται ικανοποίηση του κριτηρίου ευστάθειας των υπολογισμών κατά Courant, επιτρέπεται έτσι η χρήση μεγαλύτερων χρονικών και μικρότερων χωρικών βημάτων επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη ανάλυση του προβλήματος, γ) η επιλογή του χρονικού βήματος δεν δημιουργεί προβλήματα σύγκλισης στο αριθμητικό μοντέλο. Το μοντέλο Mike 21 χρησιμοποιεί τις δισδιάστατες εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης της μη μόνιμης ροής.

Από διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε επιλέχθηκαν οι τελικές τιμές των διαφόρων παραμέτρων και συντελεστών που χρησιμοποιήθηκαν στο τελικό προσομοίωμα. Για ένα μεγάλο τμήμα του κάμπου υπήρχε πληροφορία από την τοπογραφική μελέτη σε πλέγμα διάστασης 50m. Για το υπόλοιπο τμήμα του κάμπου, καθώς και για την πεδιάδα των εκβολών η υψομετρική πληροφορία της περιοχής αντλήθηκε από χάρτες κλίμακας 1:20000, η οποία δεν μπορούσε να αποτυπωθεί με μεγάλη ακρίβεια σε πλέγμα διάστασης 50m. Ο κάνναβος των 50m οδηγούσε σε πολύ μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους χωρίς παράλληλα να εξασφαλίζεται κάποια μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Για τους παραπάνω λόγους επιλέχθηκε πλέγμα 200m x 200m και χρησιμοποιήθηκαν συνολικά  $NI \times NJ = 263 \times 212 = 55756$  διαφορικοί όγκοι.

Σημαντικό αντικείμενο της διερεύνησης αποτέλεσε ο τρόπος προσομοίωσης της εισόδου του υδρογραφήματος που προκύπτει από τη θραύση του τελευταίου σε σειρά φράγματα. Θεωρήθηκε ότι η ροή εισέρχεται από 5 στοιχεία καννάβου και επομένως ότι έχει πλάτος 1000m. Επιλέχθηκε η μέθοδος της «πηγής» (source) έναντι της μεθόδου του ανοιχτού ορίου (open boundary). Ο λόγος είναι ότι η πρώτη μέθοδος περιγράφει τη δυναμική είσοδο του νερού στην περιοχή προσομοίωσης αφού εισάγεται όχι μόνο η παροχή αλλά και η ταχύτητα. Είναι προφανές ότι η φύση του υπό εξέταση προβλήματος, που διαλαμβάνει τεράστια μεγέθη ορμής ύδατος, οδηγεί στην ως άνω επιλογή, η οποία δίνει το ίδιο αξιόπιστα αποτελέσματα ενώ είναι λιγότερο επιρρεπής σε προβλήματα αριθμητικής αστάθειας. Το χρονικό βήμα επιλέχθηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε το μοντέλο να μη παρουσιάζει αριθμητικά προβλήματα σε σχέση πάντα και με το ανάγλυφο της περιοχής και το χρησιμοποιούμενο πλέγμα (200m x 200m). Η τιμή  $\Delta t = 1 \text{ sec}$  είναι η μέγιστη τιμή που ικανοποίησε τα παραπάνω κριτήρια και επιπλέον δεν οδηγεί σε πολύ μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους.

Οι αβεβαιότητες που υφίστανται στην εκτίμηση της τιμής του συντελεστή Manning είναι αρκετές. Η τιμή του συντελεστή Manning μεταβάλλεται από θέση σε θέση ανάλογα με το είδος του εδάφους (αγροτικό περιβάλλον, αστικό περιβάλλον, υγρό περιβάλλον) αλλά και με το χρόνο. Εντός της πεδιάδας υπάρχουν συνολικά 3 λίμνες οι οποίες αποτελούν σημαντικό παράγοντα εκτόνωσης του πλημμυρικού κύματος. Επίσης οι συνθήκες μη μόνιμης ροής και τα μεγάλα βάθη και ταχύτητες επηρεάζουν κατά πολύ την αντιστοιχία τιμών του συντελεστή αυτού με τιμές υπό «συνθήκες» συνθήκες μόνιμης ροής. Οι επί τόπου παρατηρήσεις σε συνδυασμό με τις υπολογιστικές αναλύσεις που προηγήθηκαν μας οδήγησαν στην επιλογή ελαφρά συντηρητικών (από άποψη βάθους ροής) τιμών  $n=28.57 \text{ m}^{1/3}/\text{sec}$  για τα ξηρά τμήματα και  $n=60.00 \text{ m}^{1/3}/\text{sec}$  για τις υγρές επιφάνειες της πεδινής έκτασης.

Η τιμή του συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας καθορίστηκε ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα αριθμητικής αστάθειας ή στροβιλισμοί της ροής. Από τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε, από βιβλιογραφικές αναφορές αλλά και από την προϋπάρχουσα εμπειρία αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η τιμή  $E = 100 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Τέλος διερευνήθηκε η επίδραση της διήθησης και της εξάτμισης στην εξέλιξη του φαινομένου της διόδευσης του πλημμυρικού κύματος. Οι παράμετροι αυτές αποτελούν μια σημαντική συνιστώσα σε λιγότερο δυναμικά και μεγαλύτερης χρονικής κλίμακας φαινόμενα. Εν προκειμένω, δεδομένων των μεγεθών που υφίστανται, είναι αναμενόμενο οι αντίστοιχες απώλειες να παίζουν ασήμαντο ρόλο στην εξέλιξη της διόδευσης του πλημμυρικού κύματος. Προκαταρκτικές αναλύσεις επιβεβαίωσαν τα παραπάνω και έτσι αποφασίστηκε να μη ληφθεί υπόψη η επίδραση της διήθησης και της εξάτμισης λειτουργώντας παράλληλα και υπέρ της ασφάλειας ως προς τον υπολογισμό του χρόνου αποστράγγισης του νερού προς την πεδιάδα των εκβολών μέσω του «λαιμού».

#### 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Και στις δύο περιπτώσεις που μελετήθηκαν ανεξάρτητα από τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και το μοντέλο που εφαρμόστηκε παράγονται αποτελέσματα που περιγράφουν το πρόβλημα και δίνουν απαντήσεις σε κρίσιμα ερωτήματα όπως ο χρόνος άφιξης του πλημμυρικού κύματος κ.α.

Για το πρώτο τμήμα της διαδρομής του κύματος προς τη θάλασσα, όπου εφαρμόζεται μονοδιάστατη προσέγγιση, προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά στοιχεία της θραύσης των φραγμάτων, στοιχεία διάδοσης του πλημμυρικού κύματος σε χαρακτηριστικές θέσεις της κοιλάδας όπως οι χρόνοι άφιξης του πλημμυρικού κύματος και της μέγιστης παροχής, καθώς και οι μέγιστες τιμές της παροχής και της στάθμης ροής, τα υδρογραφήματα και πλημμυρογραφήματα σε χαρακτηριστικές διατομές, οι ζώνες κατάκλυσης και οι χρόνοι άφιξης κύματος στην πεδιάδα. Αντίστοιχα για το τμήμα της διαδρομής του κύματος στην πεδιάδα προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά του πλημμυρικού κύματος σε κάθε οικισμό (χρόνος άφιξης του πλημμυρικού κύματος, μέγιστο βάθος ροής νερού, χρόνος παρατήρησης μέγιστου βάθους ροής νερού, μέγιστη τιμή ενεργειακού ύψους, και χρονική εξέλιξη βάθους ροής νερού) και τα χαρακτηριστικά του πλημμυρικού κύματος στο σύνολο της περιοχής μελέτης (καμπύλες μέγιστων ταχυτήτων κίνησης, καμπύλες μέγιστων βαθών ροής του πλημμυρικού κύματος και καμπύλες χρόνων άφιξης του πλημμυρικού κύματος).

Στη ΠΜ2 ο συνολικό όγκος του νερού που είναι αποθηκευμένος στους ταμιευτήρες είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο όγκο στην ΠΜ1. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του φράγματος και του τύπου της θραύσης να προκύπτουν υδρογραφήματα εκροής κατάντη του φράγματος με μεγαλύτερη  $Q_p$  και μεγαλύτερο χρόνο βάσης του υδρογραφήματος από την ΠΜ1. Για το δυσμενέστερο σενάριο της ΠΜ1 όπου θραύονται και τα 5 φράγματα του ποταμού σε σειρά ο χρόνος άφιξης του πλημμυρικού κύματος στην πεδιάδα είναι 2.71 hr και η μέγιστη παροχή περίπου στις 280000 m<sup>3</sup>/sec ενώ για την ΠΜ2 4.15 hr και 315000 m<sup>3</sup>/sec αντίστοιχα. Σύγκριση μεταξύ των χρόνων άφιξης των δύο περιοχών μελέτης δεν υφίσταται λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας και τοπολογίας των δύο προβλημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι βασική διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων που εφαρμόστηκαν στη κοιλάδα είναι η χρήση του μοντέλου Dambrk στην ΠΜ2 που υπολογίζει δυναμικά το βάθος ροής και την παροχή με την πάροδο του χρόνου σε κάθε διατομή του ταμιευτήρα σε αντίθεση με τη ΠΜ1 που πραγματοποιεί ισοζύγιο μάζας και ο χρόνος διάδωσης υπολογίζεται με εμπειρικό μοντέλο.

Η διάδωση του πλημμυρικού κύματος στην πεδιάδα της ΠΜ1 προκαλεί απότομη και σημαντική μείωση των βαθών, των παροχών και των ταχυτήτων ροής με την απομάκρυνση από την περιοχή του τελευταίου στη σειρά φράγματος. Σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελεί η εκλεκτική κίνηση του πλημμυρικού κύματος προς το Βορρά λόγω της ύπαρξης αποξηρανθείσας λίμνης, η οποία έχει χαμηλά υψόμετρα εδάφους από την υπόλοιπη γύρω περιοχή και παρατηρούνται σχετικά μεγαλύτερα βάθη ροής. Κατά το δυσμενέστερο σενάριο (μεγαλύτερες τιμές παροχών και βαθών ροής) κατακλύζονται οι 45 από τους 51 οικισμούς της περιοχής με μέγιστα βάθη ροής, τα οποία κυμαίνονται από 1.6m μέχρι 18.2 m. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζονται οι καμπύλες των μέγιστων βαθών ροής του πλημμυρικού κύματος στο σύνολο της ΠΜ1.

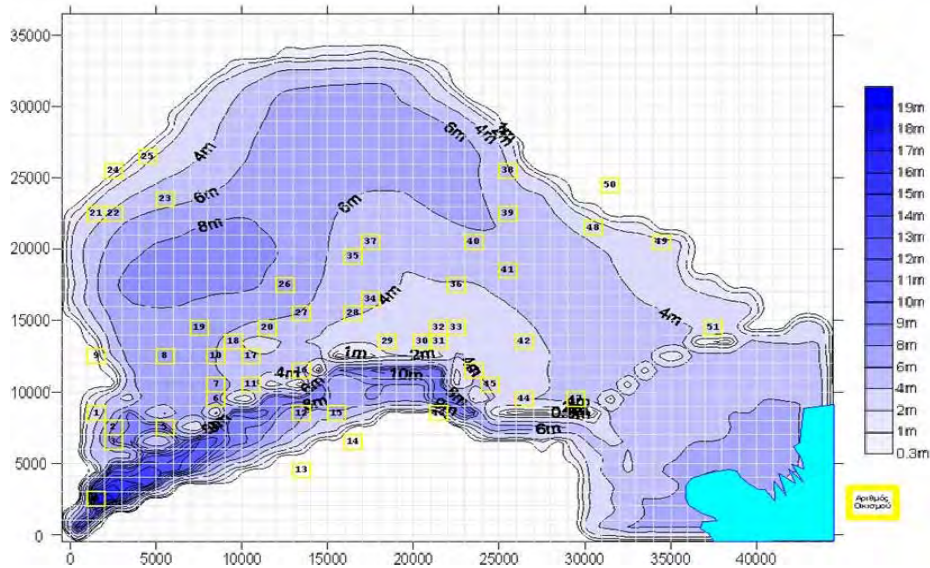
Η μετάδοση του πλημμυρικού κύματος στον κάμπο της ΠΜ2 εμποδίζεται από την παρουσία του λαιμού νότια του. Το αποτέλεσμα είναι ο εγκλωβισμός του πλημμυρικού κύματος για μεγάλο χρονικό διάστημα εντός του κάμπου και η σταδιακή απορροή της από αυτόν προς νότο. Μετά την έξοδο του κύματος από το λαιμό χωρίζεται σε τρεις κλάδους προτού εκβάλει στη θάλασσα. Κατά το δυσμενέστερο σενάριο της ΠΜ2 κατακλύζονται οι 20 από τους 50 οικισμούς του κάμπου και οι 7 από τους 13 οικισμούς της Πεδιάδας. Τα μέγιστα βάθη ροής στους οικισμούς κυμαίνονται από 0.95m μέχρι 23.87m. Σε αντίθεση με τη ΠΜ1, τα μέγιστα βάθη ροής δεν μειώνονται με την αύξηση της απόστασης της θέσης από το τελευταίο στη σειρά φράγμα. Σημαντικά βάθη παρατηρούνται και στο λαιμό και στην περιοχή νοτιοανατολικά της θέσης του φράγματος που εγκλωβίζεται το πλημμυρικό κύμα (Εικόνα 3).

Οι μέγιστες ταχύτητες διάδοσης του πλημμυρικού κύματος στην ΠΜ1 για το δυσμενέστερο σενάριο κατάντη του τελευταίου φράγματος δεν υπερβαίνουν τα 4 m/sec, γεγονός που αιτιολογεί τη βασική παραδοχή στους υπολογισμούς για την αγνόηση των όρων αδράνειας στις εξισώσεις ποσότητας κίνησης. Αντίστοιχα οι μέγιστες ταχύτητες διάδοσης στη ΠΜ2 κατάντη του τελευταίου φράγματος, δεν υπερβαίνουν τα 6m/sec. Μεγάλες ταχύτητες ροής δεν παρατηρούνται μόνο κοντά

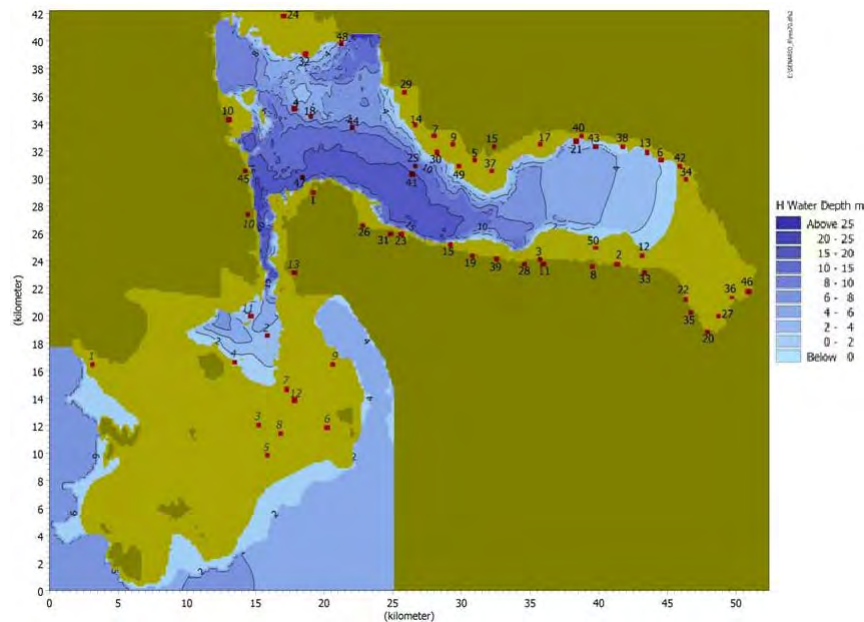


στη περιοχή του φράγματος όπως συμβαίνει στη ΠΜ1, αλλά και στο λαιμό, λόγω της γεωμετρίας της περιοχής (Εικόνα 4).

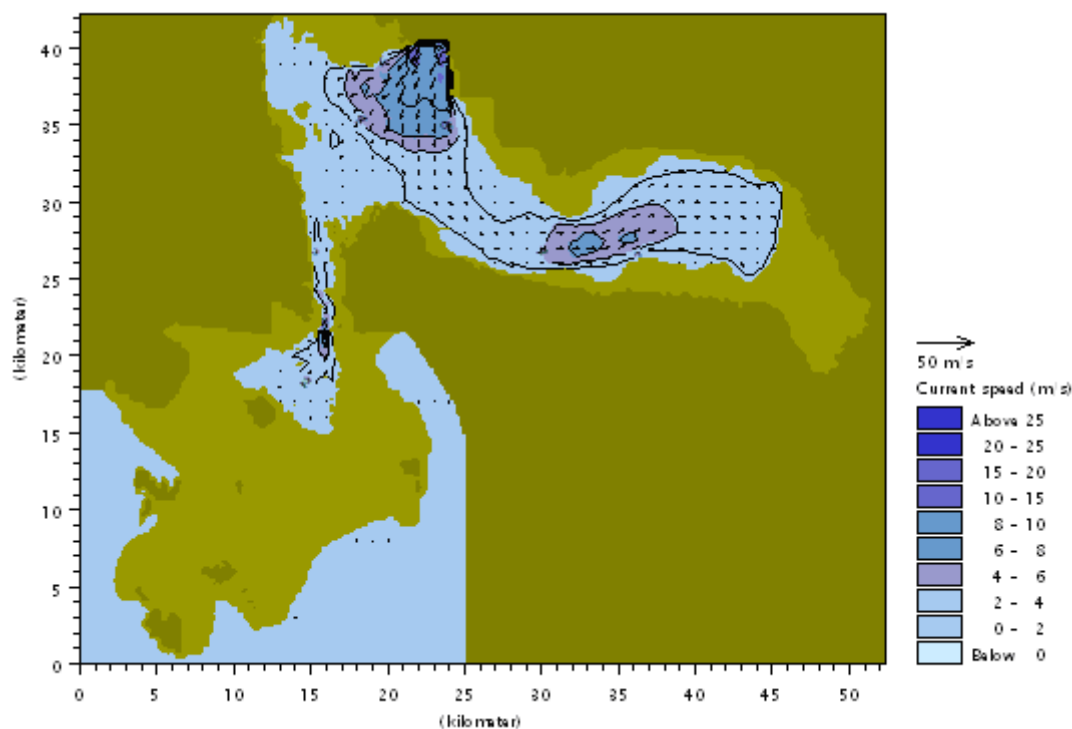
Οι χρόνοι άφιξης σε κάθε θέση της περιοχής μελέτης αυξάνονται με την αύξηση της απόστασης για την ΠΜ1 και διαφέρουν από σενάριο σε σενάριο. Θεωρείται ότι οι διαθέσιμοι χρόνοι αντίδρασης στα σενάρια θραύσης των φραγμάτων είναι περίπου ίσοι με τους χρόνους άφιξης του πλημμυρικού κύματος και για της δύο περιοχές μελέτης. Οι χρόνοι αντίδρασης της ΠΜ1, για το δυσμενέστερο σενάριο από άποψη χρόνου, είναι σχετικά μικροί (περ. 1,5 ώρα), γεγονός που κάνει επιτακτική την ανάγκη ποργραμματισμένης αντιμετώπισης ενός συμβάντος θραύσης των εξετασθέντων φραγμάτων. Οι αντίστοιχοι χρόνοι αντίδρασης για την ΠΜ2 είναι περίπου 0.68hr.



Εικόνα 2. Μέγιστα βάθη ροής ΠΜ1(m)



Εικόνα 3. Χρόνοι άφιξης και περιοχές κατάκλυσης στην ΠΜ2 τη χρονική στιγμή t=7hr



Εικόνα 4. Ταχύτητες ροής στην ΜΠ2 τη χρονική στιγμή  $t=7hr$

Οι χρόνοι αποστράγγισης στην ΠΜ1 στους οικισμούς που βρίσκονται σε υψηλά υψόμετρα εδάφους είναι της τάξης των 5 ωρών, στους οικισμούς που βρίσκονται σε χαμηλά υψόμετρα εδάφους είναι της τάξης των 20-25 ωρών και σε ορισμένους οικισμούς υπερβαίνει τις 25 ώρες. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του οικισμού ο οποίος βρίσκεται σε περιοχή με χαμηλά υψόμετρα εδάφους και δεν αποστραγγίζεται, με τα βάθη νερού να παραμένουν στα 3.0 m (περιοχή αποξηραθείσας λίμνης). Οι αντίστοιχοι χρόνοι στη ΠΜ2 στους οικισμούς που βρίσκονται σε υψηλά υψόμετρα εδάφους είναι της τάξης των 16ωρών, στους οικισμούς που βρίσκονται σε χαμηλά υψόμετρα εδάφους είναι της τάξης των 7ημερών και σε ορισμένους οικισμούς υπερβαίνει τις 9ημέρες. Στην τρίτη περίπτωση τα νερά δεν αποστραγγίζονται εντελώς μετά την πάροδο των 9 ημερών που εξετάζεται, με τα βάθη νερού να παραμένουν μέχρι και 2.0m, περίπου.

Ως προς τις σημαντικές γέφυρες επί της ΠΜ1 εκτιμάται ότι για τα εν λόγω δυσμενή σενάρια πλημμυρικού κύματος, 2 γέφυρες θα καταστραφούν, άλλες 2 κατάντη γέφυρες θα υποστούν σημαντικές ζημιές και 1 τοπικές ζημιές. Ένα μεγάλο τμήμα σημαντικής οδού στην πεδιάδα, μήκους περί τα 20km, θα καταστραφεί, ενώ μικρότερης έκτασης ζημιές θα υποστεί το λοιπό οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο της πεδιάδας. Για όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν στη ΠΜ2 εκτιμάται ότι τμήμα του επιχώματος μεγάλου οδικού άξονα θα καταστραφεί.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πολλαπλή θραύση φραγμάτων σε σειρά αποτελεί ένα σύνθετο και πολυδιάστατο πρόβλημα που περιλαμβάνει μια σειρά από επιμέρους ζητήματα (θραύση φράγματος, διάδοση πλημμυρικού κύματος σε ταμιευτήρα κ.α.). Με την παρούσα εργασία, δίδεται μια γενική μεθοδολογία για αντιμετώπιση του προβλήματος καθώς και τρόποι μοντελοποίησης των επιμέρους φαινομένων που συνθέτουν το συνολικό πρόβλημα. Εν τούτοις διαπιστώθηκε ότι η προσέγγιση που θα ακολουθηθεί κάθε φορά εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε περίπτωσης. Από τη σύγκριση των

δύο περιοχών μελέτης και τη διερεύνηση που προηγήθηκε, έγινε φανερό ότι η επικινδυνότητα του ενδεχόμενου της θραύσης φράγματος εντοπίζεται σε πολύ μεγάλο ποσοστό στα πεδινά τμήματα της διαδρομής των ποταμών.

Η θραύση του φράγματος μελετάται με τα μοντέλα Breach ή Dambrk κατά περίπτωση. Στην ΠΜ1, χρησιμοποιώντας απλό εμπειρικό μοντέλο για τη διόδευση του κύματος στον ταμιευτήρα και θραύση μέσω Breach και στην ΠΜ2 με χρήση του μοντέλου Dambrk για χαρακτηριστικά θραύσης που έχουν υπολογιστεί προηγουμένως με το μοντέλο Breach. Προτείνεται η δεύτερη μεθοδολογία, γιατί με αυτήν υπολογίζονται δυναμικά το βάθος ροής και η παροχή με την πάροδο του χρόνου στον ταμιευτήρα, ενώ εξετάζεται η θραύση με το μοντέλο Dambrk με πιο ασφαλή δεδομένα από το μοντέλο Breach. Το τελευταίο αποτελεί ένα μοντέλο πρόβλεψης των χαρακτηριστικών μεγεθών του ανοίγματος που δημιουργείται κατά τη θραύση του φράγματος και λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά του φράγματος και των υλικών κατασκευής του. Σε αντίθετη περίπτωση χρησιμοποιώντας μόνο ένα από τα δύο μοντέλα και όχι συνδυασμό αυτών, είτε δεν πραγματοποιείται δυναμική διόδευση του κύματος στον ταμιευτήρα με χρήση του μοντέλου Breach, είτε εξετάζεται η θραύση με απλοποιημένο τρόπο περιγράφοντας μόνο την αύξηση των διαστάσεων του ρήγματος προς τον πυθμένα του φράγματος, με απαίτηση την εκ των προτέρων γνώση ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων, όπως της κλίσης των πρανών του χάσματος, του υψομέτρου του πυθμένα του χάσματος, του ρυθμού αύξησης των διαστάσεών του, κ.α. (μοντέλο Dambrk).

Στην ΠΜ2 για τον υπολογισμό του πλημμυρικού κύματος σε 2 διαστάσεις εφαρμόζεται το μοντέλο Mike 21 σε αντίθεση με την ΠΜ1 όπου εφαρμόστηκε το μοντέλο FROM-2D. Η διάδοση του πλημμυρικού κύματος στον κάμπο της ΠΜ2 εμποδίζεται από την παρουσία του «λαιμού». Αποτέλεσμα είναι ο εγκλωβισμός του πλημμυρικού κύματος για μεγάλο χρονικό διάστημα εντός του κάμπου και η αύξηση του χρόνου αποστράγγισης. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη μεγαλύτερη ανάλυση που απαιτήθηκε στο πεδινό τμήμα της ΠΜ2 (μείωση του χωρικού βήματος στο 1/5 του χωρικού βήματος της ΠΜ1 και αντίστοιχη αύξηση του πλήθους των διαφορικών όγκων επίλυσης) οδήγησε στη επιλογή του μοντέλου Mike 21 που χρησιμοποιεί πεπλεγμένο (implicit) σχήμα επίλυσης των εξισώσεων και μη απαίτηση ικανοποίησης του κριτηρίου ευστάθειας με αποτέλεσμα τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για το μοντέλο FROM-2D στην ΠΜ2 καθιστά τη χρήση του απαγορευτική, παρόλο που και αυτό θεωρείται αξιόπιστο. Γενικά η επιλογή του μοντέλου για περιγραφή της διόδευσης του πλημμυρικού κύματος στο πεδινό τμήμα δεν είναι μονοσήμαντη και πρέπει να γίνεται με βάση όλα τα δεδομένα της κάθε περίπτωσης.

Ο χρόνος άφιξης του πλημμυρικού κύματος σε δεδομένη θέση είναι μια σημαντική παράμετρος, που είναι απαραίτητη κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος έγκαιρης ειδοποίησης και αντιμετώπισης του κινδύνου. Ο χρόνος αυτός μπορεί να επαυξηθεί αρκετά εάν δομηθεί το σύστημα προειδοποίησης, έτσι ώστε οι σχετικές αποφάσεις να στηρίζονται σε ενδείξεις κατά τις πρώιμες φάσεις εξέλιξης του προβλήματος, όπως εξαιρετική βροχόπτωση, ανύψωση στάθμης σε ανάντη διατομές, κλπ. Σημαντική συνιστώσα για το σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος αποτελεί και ο ανθρώπινος παράγοντας και κατά πόσο μπορεί έγκαιρα να αντιληφθεί κανείς σε ποιο σενάριο βρίσκεται και να ενεργοποιήσει τον κατάλληλο μηχανισμό του συστήματος προειδοποίησης / εκκένωσης των κατοίκων των επικίνδυνων οικισμών ώστε τουλάχιστον να αποφευχθεί η απώλεια ανθρώπινων ζωών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ: Εκφράζονται ευχαριστίες προς τους Πολ. Μηχ. Ι.Φαρά και Γ.Φουντούλη, καθώς και στον Αν. Καθ. Α.Στάμου για την ουσιαστική συμβολή τους στην εκτέλεση της εν λόγω έρευνας.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Abbott M.B. 1966. An introduction to the Method of Characteristics, Elsevier, New-York.
2. Bradford S.F., Sanders B.F. 2002. Finite-volume model for shallow-water flooding of arbitrary topography, *J. Hydraul. Eng.*, Vol.128, No. 3, pp.289–298.
3. Broich K. 1998. Mathematical modeling of DAM-Break erosion caused by overtopping, CADAM, 2nd-Project workshop held in Munich, 8-9 Oct. 1998.
4. Brufau P., Garcia-Navarro. 2000. Two-dimensional dam break flow simulation, *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 33, pp.35–57.
5. Cunge J., Holly F.M., Verwey A. 1980. Practical aspects of computational river hydraulics, Pitman Advanced Publishing Program, London.
6. D'Alpaos L., Delfina A., Matticchio B. 1994. 2D finite element modeling of flooding due to river bank collapse, in P. Molinaro and L. Natale (eds), *Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas*, ASCE, pp.60-71.
7. Dressler R.F. 1952. Hydraulic resistance effect upon the dam-break functions, *U.S. NBS. Journal of research*, Vol. 49, No.3, Sept.1952.
8. Fread D.L. 1985. Channel routing. In: *Hydrological forecasting*, M.G.Anderson and T.P.Burt (Ed.), Wiley, New-York.
9. Fread D.L. 1982. DAMBRK:The NWS dam-break flood forecasting model, Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, Silver Spring, Maryland, pp.56.
10. Friedrichs K.O. 1954. Symmetric hyperbolic linear differential equations, *Communications on pure and applied Mathematics*, Vol.VII, pp.345-392.
11. Godunov S.K. 1959. A difference scheme for numerical computation of discontinuous solution of hydrodynamic equations, *Mathematics Sbornik*, Vol.47, pp.271-306.
12. Han K.Y., Park J.H. 1995. Two-dimensional model for the prediction of inundation area in urbanized rivers, *J. of Korean Water Resources Association*, Seoul, Korea, Vol.28, No. 6, pp. 119-131.
13. Hunt B. 1982. Asymptotic solution of dam-break problem, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Jan.1982.
14. Katopodes N.D., Strelkoff T. 1978. Computing two-dimensional dam-break flood waves, *J. of Hydraulics Division*, ASCE, Vol.104, No.HY9, pp.1269-1288.
15. Memos C.D., Stamou A.I., Politis G.M. 2006. Flooding due to Sequential Dam Breaking, 2006 IASME/WSEAS Int.Conf. on Water Resources, Hydraulics & Hydrology (WHH'06), Chalkida, Evia Island, Greece, 11-13 May 2006, WSEAS transactions on fluid mechanics, March 2006, Issue 3, Vol.1, pp.221-229 , ISSN: 1790-5087.
16. Paquier A., Nogues P., Herledan R. 1998. Model of piping in order to compute dam-break wave, CADAM, 2nd-Project workshop held in Munich, 8-9 October.
17. Rajar R. 1973, *Modèle mathématique et abaques sans dimensions pour la détermination de l'écoulement qui suit la rupture d' un barrage*, XI Congress Int. Commission on Large Dams, Madrid, Q.40, R.34.
18. Ritter A. 1892. Die Fortpflanzung der Wasserwellen, *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol.36, No.33, Aug.1892.
19. Saint-Venant B. 1871. Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l' introduction des marées dans leurs lits, *C.R. Séan. Acad. Sci.*, Vol.73, pp.147-154 and 237-240.
20. Sakkas J., Strelkoff T. 1976. Dimensionless solution of dam-break flood waves, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Feb.1976.
21. Savic L.J., Holly Jr. F.M. 1993. Dambreak flood waves computed by modified Godunov method, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.31, No.2.
22. Stamou A.I. 2005. Flood routing Model in 2 Dimensions, NTUA.
23. Stoker J.J. 1957. *Water Waves*, Interscience Publishers Inc., New York.
24. Strelkoff T., Chamber D.R., Katopodes N.D. 1977. Comparative analysis of routing techniques for the flood wave from a ruptured dam, *Proc. Dam-Break Flood routing Model Workshop*, Water Resources Council, Washington D.C, pp.229-291.
25. Szymkiewicz R. 1991, Finite-element method for the solution of the Saint Venant equations in an open channel network, *J.Hydrol.*, Vol.122, pp.257-287.
26. Xanthopoulos T., Koutitas C. 1976. Numerical simulation of a two-dimensional flood wave propagation due to dam failure, *J. of Hydraulic Research*, Vol.14, No.4, pp.321-331.

# Flood Wave Propagation due to Failed In-line Dams

M.G. Politis

*Civil Engineer, NTUA, MSc. Water Resources Science & Technology*

C. D. Memos

*Professor, Department of Water Resources and Environmental Engineering, NTUA*

*Key- words:* Dam break, Flood wave propagation

**ABSTRACT:** The propagation of flood waves due to multiple dam breaking along a river is a complex problem of particular importance for settlements located downstream of the breached dams. A key question tackled in the present work is whether a specific dam downstream of the initial failure can survive the incoming flood wave or fail, too. The objective of this investigation is to determine the wave resulting through subsequent failures of in-line dams. Two applications are presented with variations of methodology used and conclusions are drawn applicable to similar cases.