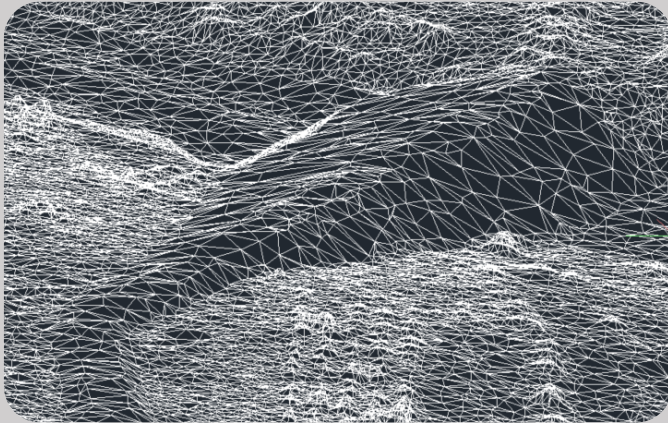


**«ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ
ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΑΝΤΙΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΤΟΝ
ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟ ΚΙΝΔΥΝΟ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ
ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟ ΑΤΤΙΚΗΣ, ΣΤΙΣ ΕΚΒΟΛΕΣ
ΤΟΥ ΡΕΜΑΤΟΣ ΕΡΑΣΙΝΟΥ»**



Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»



**Μεταπτυχιακή
Διπλωματική
Εργασία**

**Καλαμάτας
Βελισάριος**

**Επιβλέπων :
ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ Ι. ΣΤΑΜΟΥ
Καθηγητής ΕΜΠ**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την παρούσα διπλωματική κλείνει ένας μεγάλος κύκλος σπουδών μου στο Ε.Μ.Π. τόσο σε προπτυχιακό όσο και σε μεταπτυχιακό επίπεδο. Θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου σε όλο το προσωπικό του εργαστηρίου Υδραυλικής και συγκεκριμένα στον καθηγητή Κ. Στάμου για την εμπιστοσύνη και την στήριξη που μου έδειξε καθολη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας. Η ενασχόληση μου, με την υδραυλική μοντελοποίηση, άνοιξε ένα νέο κεφάλαιο για μένα τόσο σε επαγγελματικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο ερευνητικού ενδιαφέροντος, γύρω από την κατανόηση των φαινομένων που διέπουν την κίνηση των ρευστών. Μάλιστα είχα την τύχη να εργαστώ για ένα διάστημα στα υπό μελέτη αντιπλημμυρικά έργα του Ρέματος Ερασίνου, και να καταπιαστώ στην πράξη με τα φαινόμενα που μελετώνται στη εργασία. Κλείνοντας, θέλω να επισημάνω, ότι το δύσκολο εγχείρημα, σπουδών ταυτόχρονα με εργασία, δεν θα ήταν ποτέ εφικτό χωρίς τη αμέριστη στήριξη και συμπαράσταση της οικογένειας μου, της κοπέλας μου και των φίλων μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	3
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	8
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 Αντικείμενο και στόχος της εργασίας	10
1.2 Διάρθρωση της εργασίας.....	10
1.3 Πλημμύρες	11
1.4 Η οδηγία 2007/60/ΕΚ.....	12
1.5 Προτεινόμενα μέτρα για πλημμύρες.....	13
2 ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HEC-RAS 1D/2D	15
2.1 Εισαγωγή - Γενικά χαρακτηριστικά.....	15
2.2 Οι εξισώσεις του μοντέλου	15
2.2.1 Εξισώσεις μονοδιάστατης (1D) ροής σε συνθήκες σταθερής ροής.....	15
2.2.2 Εξισώσεις μονοδιάστατης (1D) ροής σε συνθήκες μη σταθερής ροής.....	16
2.2.3 Εξισώσεις δισδιάστατης (2D) ροής.....	17
2.3 Δεδομένα εισόδου του μοντέλου	18
2.4 Οριακές και αρχικές συνθήκες του μοντέλου.....	18
2.5 Εξωτερικές οριακές συνθήκες (external boundary conditions)	19
2.6 Εσωτερικές οριακές συνθήκες (internal boundary conditions)	19
2.7 Μοντελοποίηση τεχνικών έργων	20
3 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΡΕΜΑΤΟΣ ΕΡΑΣΙΝΟΥ	22
3.1 Γενικά.....	22
3.2 Περιοχή αρχαιολογικού χώρου Βραυρώνας και εκβολές ρ. Ερασίνου	24
3.3 Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής	24
3.3.1 Ρέμα Ερασίνου	24
3.3.2 Ρέμα Αγίου Γεωργίου	25
3.3.3 Ρέμα Μαρκοπούλου	25
3.4 Οι πλημμύρες στο Μαρκόπουλο Αττικής	25
3.4.1 Σχέδιο διαχείρισης πλημμυρών Αττικής (ΕΛ06)	26
4 ΤΑ ΕΡΓΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΕΡΑΣΙΝΟΥ	28
4.1 Γενικά.....	28
4.2 Κατασκευασμένα Έργα στην περιοχή.....	28
4.3 Διατομές διεύθεσης	29
4.4 Κυρίως φράγμα ανάσχεσης	30
4.4.1 Γεωμετρία φράγματος	30
4.5 Πρόφραγμα / Οδικό ανάχωμα.....	32

4.5.1	Γεωμετρία αναχώματος	32
4.6	Ανάχωμα προστασίας Αρχαιολογικού χώρου Βραυρώνας	33
5	ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	34
5.1	Γενικά	34
5.2	Παροχές σχεδιασμού	34
5.3	Ψηφιακό μοντέλο εδάφους	34
5.4	Χάρτης χρήσεων γης (Corine)	34
5.5	Επιπρόσθετο υλικό (Κατασκευαστικά σχέδια, μελέτες).....	36
5.6	Υδρογραφήματα εισόδου	36
6	ΔΟΜΗΣΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	39
6.1	Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων	39
6.2	Δισδιάτατες γεωμετρίες.....	40
6.3	Τροποποίηση υποβάθρου για μοντελοποίηση φραγμάτων	41
6.4	Τεχνικά έργα και οχετοί	42
6.5	Πλέγμα και υπολογιστικό βήμα.....	45
7	ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	47
7.1	Υδραυλικοί υπολογισμοί των σχεδιαζόμενων έργων.....	47
8	ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ	52
8.1	Γενικά	52
8.2	Θεωρητικό πλαίσιο	52
8.3	Υπερπήδηση (Overtopping)	53
8.4	Ripring (Διασωλήνωση)	53
8.5	Ιστορικά/ Στατιστικά στοιχεία για αστοχίες φραγμάτων	54
8.6	Μεθοδολογία προσέγγισης	55
8.7	Εκτίμηση παραμέτρων θραύσης.....	57
8.8	Αποτελέσματα.....	58
8.8.1	Σενάριο 1 ^ο - Ripring	58
8.8.2	Σενάριο 2 ^ο - Overtopping	60
8.9	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	62
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	64
9.1	Συμπεράσματα.....	64
9.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	65
10	Βιβλιογραφία.....	67

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 : Αντιστοίχιση χρήσεων γης με τιμές mapping	35
Πίνακας 2 : Τιμές υδρογραφήματος εισόδου, ακριβώς ανάντη του φράγματος ανάσχεσης	37
Πίνακας 3 : Υδρογράφημα εισόδου στην συμβολή των ρεμάτων Αγίου Γεωργίου κ' Ερασίνου	38
Πίνακας 4 : Γεωμετρικά στοιχεία τεχνικών, στο ρέμα του Ερασίνου	43
Πίνακας 5 : Λόγοι αστοχιών σε χωμάτινα φράγματα	55
Πίνακας 6 : Παράμετροι θραύσης φράγματος	57

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 : Κατανομή ανθρώπινων απωλειών λόγω πλημμύρας στον Ελλαδικό χώρο	12
Εικόνα 2 : Ολικό φορτίο ενέργειας ρευστού.....	16
Εικόνα 3 : Χαρακτηριστικές διατομές μοντελοποίησης των τεχνικών.	20
Εικόνα 4 Λεκάνη απορροής Ρέματος Ερασίνου & Αγίου Γεωργίου.....	23
Εικόνα 5 : Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας.....	27
Εικόνα 6 : Διατομή διευθέτησης ανάντη τμήματος διευθέτησης	29
Εικόνα 7 : Διατομή διευθέτησης κατάντη τμήματος διευθέτησης.....	29
Εικόνα 8 : Τυπική διατομή Φράγματος.....	30
Εικόνα 9 : Οχετός φράγματος.....	31
Εικόνα 10 : Κάτοψη υπερχειλιστή.....	31
Εικόνα 11 : Μηκοτομή διώρυγας υπερχειλιστή.....	31
Εικόνα 12 : Τυπική διατομή οδικού αναχώματος.....	32
Εικόνα 13 : Οχετοί οδικού αναχώματος.....	32
Εικόνα 14 : Ανάχωμα προστασίας αρχαιολογικού χώρου.....	33
Εικόνα 15 : Corine Land Cover 2018 & κωδικοί κατηγοριών	35
Εικόνα 16 : Υδρογράφημα εισόδου, ακριβώς ανάντη του φράγματος ανάσχεσης	36
Εικόνα 17 : Υδρογράφημα εισόδου στην συμβολή των ρεμάτων Αγίου Γεωργίου κ' Ερασίνου	38
Εικόνα 18 : Γεωμετρία διευθετημένης κοίτης με συρματοκιβώτια στο HEC-ras	39
Εικόνα 19 : Βασική γεωμετρία υδραυλικού μοντέλου	40
Εικόνα 20 : Εργαλείο τροποποίησης υποβάθρου/ τομή φράγματος	41
Εικόνα 21 : Μοντελοποίηση φραγμάτων στο HEC-RAS	41
Εικόνα 22 : Τρισδιάστατο μοντέλο υπερχειλιστή	42
Εικόνα 23 : Χιλιομετρικές θέσεις τεχνικών/ Ρέμα Ερασίνου	42
Εικόνα 24 : Πλέγμα διαστάσεων 20x20 & 5x5	45
Εικόνα 25 : Περιοχή κατάκλυσης πλημμύρας/ Σύγκριση Υδραυλικής προσομοίωσης & μελέτης	47
Εικόνα 26 : Βάθος ροής για πλημμυρογράφημα T=50 ετών	48
Εικόνα 27 : Ταχύτητα ροής για πλημμυρογράφημα T=50 ετών	48
Εικόνα 28 : Μηκοτομή Μελέτης χ.θ. 0+834 έως 1+1500.....	49
Εικόνα 29 : Μηκοτομή υδραυλικής προσομοίωσης χ.θ. 0+834 έως 1+1500	49
Εικόνα 30 : Οχετός φράγματος (Stage and flow hydrograph).....	50
Εικόνα 31 : Σύγκριση πλημμυρογραφήματων : α)T= 50 και β) πλημμυρογραφήματος εκροής του φράγματος	50
Εικόνα 32 : Χρονική εξέλιξη θραύσης φράγματος.....	54
Εικόνα 33 : Τρόποι μοντελοποίησης θραύσης φράγματος στο λογισμικό HEC-ras	56
Εικόνα 34 : Μοντελοποίηση θραύσης	56
Εικόνα 35 : Χάρτης κατάκλυσης πλημμύρας ανάντη του φράγματος.....	56
Εικόνα 36 : Καμπύλη στάθμης όγκου της οντότητας storage area.....	56
Εικόνα 37 : Τελικό σχήμα του ρήγματος.....	57
Εικόνα 38 : Τελικό σχήμα του ρήγματος.....	57
Εικόνα 39 : Μέγιστο βάθος ροής/Piping.....	58
Εικόνα 40 : Μέγιστη ταχύτητα ροής/Piping.....	59
Εικόνα 41 : Χάρτης χρόνου άφιξης πλημμύρας /Piping.....	59
Εικόνα 42 : Μέγιστο βάθος ροής/ Overtopping	60
Εικόνα 43 : Μέγιστη ταχύτητα ροής/ Overtopping.....	61
Εικόνα 44 : Χάρτης χρόνου άφιξης πλημμύρας /Overtopping	61
Εικόνα 45 : Πλημμυρογράφημα εξόδου κατάντη του κυρίως φράγματος ανάσχεσης.....	62
Εικόνα 46 : Πλημμυρογράφημα εξόδου κατάντη του κυρίως φράγματος ανάσχεσης.....	63
Εικόνα 47 : Σύγκριση πλημμυρογραφήματων piping & overtopping.....	63

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στην υδρολογική λεκάνη του Ρέματος Ερασίνου σε συνδυασμό με τα έντονα καιρικά φαινόμενα που παρατηρούνται τελευταία εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής καθιστούν αναγκαία την αντιπλημμυρική θωράκιση της. Σε αυτήν την κατεύθυνση η περιοχή θωρακίζεται με την κατασκευή νέων αντιπλημμυρικών έργων που στόχο έχουν την ασφαλή διόδευση της απορροής στο θαλάσσιο αποδέκτη. Τα έργα συνοπτικά περιλαμβάνουν από ανάντη προς κατάντη την διευθέτηση της κοίτης με συρματοκιβώτια, την κατασκευή δυο φραγμάτων ανάσχεσης και την κατασκευή αναχώματος προστασίας του αρχαιολογικού χώρου.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, εξετάζεται η αποτελεσματικότητά των έργων αυτών για πλημύρα περιόδου επαναφοράς $T=50$ ετών και καταδεικνύονται τα σημεία που αντιμετωπίζουν κίνδυνο πλημμύρας. Η αξιολόγηση γίνεται μέσω υδραυλικής προσομοίωσης στο υδροδυναμικό μοντέλο Hec-ras, μέσω του οποίου αξιοποιούνται εργαλεία δυσδιάστατης και μονοδιάστατης ανάλυσης τα οποία συνδυάζονται για την ακριβέστερη περιγραφή του πλημμυρικού φαινομένου. Η δισδιάστατη ανάλυση αξιοποιείται όσο το δυνατόν περισσότερο για να μοντελοποιηθεί καλύτερα η κίνηση του πλημμυρικού κύματος στη λεκάνη κατάκλισης του φράγματος και στις περιοχές εκτός κοίτης και αντίστοιχα η μονοδιάστατη αξιοποιείται εντός του κύριου κλάδου του ρέματος. Επιπλέον επιχειρείται η προσομοίωση οντοτήτων μέσω των εργαλείων τροποποίησης του υποβάθρου, ώστε το μοντέλο να γίνει όσο πιο απλό γίνεται και να αποφευχθούν οι αστάθειες.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται εκτενώς σε μορφή πινάκων και χαρτών.

Με βάση τα πορίσματα, προκύπτει ότι ο κύριος όγκος της πλημμυρικής αιχμής διοδεύεται με ασφάλεια από τα αντιπλημμυρικά έργα με εξαίρεση το σημείο συμβολής του ρέματος Ερασίνου με το Ρέμα Αγ. Γεωργίου. Στην περιοχή αυτή, υπάρχουν σημεία που κατακλύζονται από πλημμυρικά φαινόμενα αλλά παρόλα αυτά δεν αποτελούν κίνδυνο για την ζωή και τις περιουσίες των ανθρώπων, εφόσον η κυρίαρχη κατηγορία χρήσεων γης, είναι η αγροτική.

Τέλος, γίνεται μια μοντελοποίηση θραύσης του κυρίως φράγματος ανάσχεσης, εξετάζοντας δύο πιθανά σενάρια αστοχίας που οφείλονται στο φαινόμενο της υπερπήδησης και της διασωλήνωσης. Με βάση την μοντελοποίηση, καταδεικνύονται οι περιοχές που πλήττονται περισσότερο καθώς και χρήσιμα στοιχεία για τα χαρακτηριστικά και την ώρα άφιξης του πλημμυρικού κύματος.

Τα πορίσματα της παρούσας διπλωματικής μπορούν να αξιοποιηθούν από τους αρμόδιους φορείς, για μια ορθολογικότερη διαχείριση και προστασία του ποτάμιου συστήματος στην λεκάνη του Ερασίνου.

Λέξεις – Κλειδιά : Μαθηματικό μοντέλο, HEC-RAS 1D/2D, Ερασίνος, Υδροδυναμική Μοντελοποίηση, Αντιπλημμυρικά έργα, Θραύση φράγματος, υπερχειλιστής, δισδιάστατη ανάλυση

ABSTRACT

Human interference in combination with the severe weather phenomena observed lately due to the climate change, require that the hydrological basin of the Erasinios Creek be protected from flooding with appropriate methods. To this end, the area is being fortified with the construction of new flood-protection measures, aimed at safely draining the runoff to the sea. In brief, these works comprise the arrangement of the riverbed with gabions, the construction of two retention dams and the construction of an embankment for the protection of the archaeological site.

The scope of this thesis is twofold: i) to examine the effectiveness of the aforementioned works for a flood event of a return period of $T=50$ years; ii) identify the regions that face flood danger.

The assessment is carried out via a hydraulic simulation in the Hec-ras model. For a more precise and comprehensive description of the flood event, both two-dimensional as well as one-dimensional techniques/analyses are employed and combined. The former analysis is utilized to model the propagation of the flood-wave in the basin of the dam and in areas outside the riverbed, while the latter analysis is used within the main branch of the creek.

In addition, terrain modification tools are utilized in order to simulate entities like retention dams, levees etc. The purpose is to construct a simple model that makes it possible to capture the essence of the situation and at the same time avoid instabilities.

The results of the simulations are extensively presented in the form of tables and maps. The findings reveal that the main volume of the flood-peak safely transits through the main creek, with the exception of the area where the Erasinios stream intersects with the Agios Georgios stream. Although this area can in principle be affected by flooding, this should not pose a risk to the lives and properties of people, because its (current) main use is agricultural. Finally, a simulation of a dam-failure is carried out by examining two possible failure scenarios, overtopping and piping. The modeling allows to identify the most affected areas, and also provides useful information about the characteristics and arrival time of the flood-wave. The findings of this thesis could and should be utilized by the relevant authorities for a more rational management and protection of the river system of the Erasinios basin.

Key-words: Mathematical model, HEC-RAS 1D/2D, Erasinios, Hydrodynamic simulation, Flood defence measures, Dam failure, weir, 2d modeling

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο και στόχος της εργασίας

Αντικείμενο της μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η προσομοίωση και ανάλυση πλημμυρικών φαινομένων στην περιοχή του ρέματος Ερασίνου, με σκοπό την δημιουργία μαθηματικού μοντέλου που μπορεί να περιγράψει σε ικανοποιητικό βαθμό την συμπεριφορά αυτών των φαινομένων. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να γίνει εκτίμηση της αποτελεσματικότητας όλων των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας όσον αφορά την αντιμετώπιση πολλών και διαφορετικών σεναρίων πλημύρας. Αξιοποιώντας συγκεκριμένους δείκτες, όπως το βάθος ροής και η ταχύτητα ροής, σε κατάλληλα σημεία ενδιαφέροντος, το φαινόμενο περιγράφεται πλήρως και κατ' επέκταση καταδεικνύονται οι περιοχές που είναι ευάλωτες σε έντονα πλημμυρικά φαινόμενα.

1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε 10 Κεφάλαια, για τα οποία ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή στη συνέχεια:

Στο **Κεφάλαιο 1** περιγράφεται το αντικείμενο και ο στόχος της διπλωματικής εργασίας και παρουσιάζονται σημαντικές πληροφορίες για τις πλημμύρες, τους τρόπους πρόληψης και αντιμετώπισης τους καθώς και το ευρύτερο νομοθετικό πλαίσιο (οδηγία 2007/60, Σχέδια διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας).

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μια περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου HEC-RAS, περιγράφονται οι βασικές του δυνατότητες, οι μαθηματικές εξισώσεις που επιλύει το μοντέλο καθώς και όλες οι απαραίτητες παράμετροι που χρειάζεται (δεδομένα εισόδου, οριακές και αρχικές συνθήκες). Αναλύεται επίσης η μοντελοποίηση των τεχνικών έργων.

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται η περιοχή μελέτης του Ρέματος Ερασίνου, δίνοντας πληροφορίες για την έκταση και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, το βασικό υδρογραφικό δίκτυο καθώς και το ιστορικό πλημμυρών.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφονται συνοπτικά τα έργα διευθέτησης, δίνοντας βασικές πληροφορίες των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των διατομών, των φραγμάτων και των αναχωμάτων που πρόκειται να κατασκευαστούν στην περιοχή.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται όλα τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου όπως το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιήθηκε, ο χάρτης χρήσεων γης Corine Land Cover, τα πλημμυρογραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν σαν οριακές συνθήκες καθώς και πλήθος άλλων μελετών και εγγράφων από τα οποία αντλήθηκαν χρήσιμα στοιχεία.

Στο **Κεφάλαιο 6** περιγράφεται η δόμηση του υδροδυναμικού μοντέλου, με όλες τις λεπτομέρειες για τον τρόπο που μοντελοποιήθηκαν τα έργα διευθέτησης, και τα χαρακτηριστικά (διάσταση πλέγματος, χρονικό βήμα) που επιλέχθηκαν για να υπάρχει όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση των σύνθετων πλημμυρικών φαινομένων.

Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υδραυλικών υπολογισμών και γίνεται ο σχολιασμός τους.

Στο **Κεφάλαιο 8** γίνεται μια ανάλυση θραύσης φράγματος, και παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο που διέπει την μοντελοποίηση αυτών των αστοχιών. Γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή και στη

συνέχεια παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της θραύσης του Φράγματος ανάσχεσης πλημμυρών στο ρέμα Ερασίνου.

Στο **Κεφάλαιο 9** δίνονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για πιθανή μελλοντική έρευνα.

1.3 Πλημμύρες

Η πλημμύρα είναι το φυσικό φαινόμενο, κατά το οποίο, μια στεγνή περιοχή κατακλύζεται από νερό για ένα συγκεκριμένο διάστημα (**Hawk & Eagleson, 1992**). Ο τρόπος εκδήλωσης των πλημμυρών είναι που τις καθιστά επικίνδυνες, καθώς συμβαίνουν ξαφνικά και απρόβλεπτα, χωρίς να αφήνουν περιθώρια αντίδρασης στον άνθρωπο. Η πλημμύρα είναι ένα από τα πιο επικίνδυνα και καταστροφικά φαινόμενα, καθώς εκτιμάται ότι επηρεάζει την ζωή περισσότερων ανθρώπων σε σχέση με άλλες φυσικές καταστροφές, και επιπλέον επιφέρει τις περισσότερες ζημιές ετησίως από οικονομική άποψη (**Downton & Pielke, 2001**).

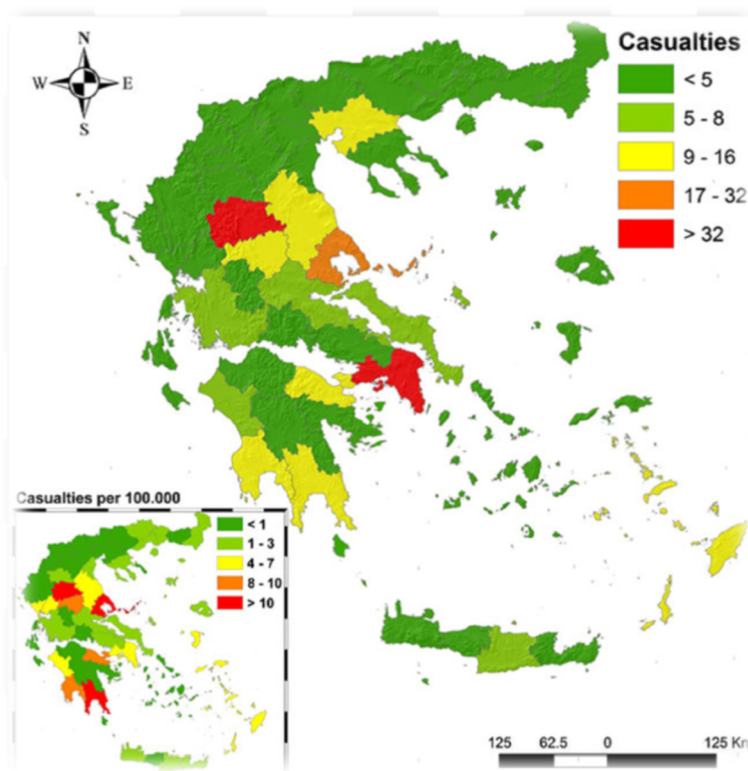
Ως κίνδυνος πλημμύρας ορίζεται ο συνδυασμός της πιθανότητας να λάβει χώρα πλημμύρα και των δυνητικών αρνητικών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται με αυτή την πλημμύρα (**Owen & Ευρ.Ελεγκτικό Συνέδριο, 2018**).

Στην Ελλάδα οι πλημμύρες οφείλονται κυρίως σε φυσικά αίτια και δύναται να διακριθούν σε χερσαίες ή ποτάμιες και σε παράκτιες.

Οι χερσαίες ή ποτάμιες πλημμύρες προκαλούνται λόγω ραγδαίων βροχοπτώσεων-ισχυρών καταιγίδων ή από το ξαφνικό λιώσιμο χιονιού, ή ακόμα και από συνδυασμό των παραπάνω με συνέπεια τη μεγάλη αύξηση της απορροής των ποταμών, όπως επίσης και από αστοχία μεγάλων υδραυλικών έργων. Οι χερσαίες ή ποτάμιες πλημμύρες δύναται να διακριθούν περαιτέρω σε πλημμύρες που παρουσιάζουν βραδεία εξέλιξη (πλημμύρες πεδίου) και σε πλημμύρες που παρουσιάζουν ταχεία εξέλιξη (ξαφνικές ή αιφνίδιες πλημμύρες).

Οι ξαφνικές ή αιφνίδιες πλημμύρες, με κύριο χαρακτηριστικό την ραγδαία εξέλιξή τους, είναι το πιο συνηθισμένο είδος πλημμύρας στην Ελλάδα λόγω της γεωμορφολογίας της χώρας μας, η οποία συμβάλλει στην ανάπτυξη μεγάλου αριθμού ρεμάτων με μικρές σχετικά λεκάνες απορροής, στις οποίες κυριαρχούν οι έντονες κλίσεις που συντελούν στη γρήγορη αποστράγγισή τους. Οι ξαφνικές πλημμύρες ή αιφνίδιες πλημμύρες έχουν προκαλέσει κατά το παρελθόν μεγάλες καταστροφές σε υποδομές (οδικό δίκτυο, κλπ), αγροτικές εκμεταλλεύσεις, κατοικίες κλπ. και έχουν κοστίσει σημαντικό αριθμό ανθρώπινων ζώων την περίοδο 1880-2010 (**Diakakis & Mavroulis, 2012**). Αν και η ένταση, η διάρκεια και η χωρική κατανομή των βροχοπτώσεων αποτελεί σημαντική αιτία πρόκλησης πλημμυρικών φαινομένων, η εμφάνιση ενός πλημμυρικού φαινομένου εξαρτάται και από ένα πλήθος άλλων παραγόντων οι οποίοι μπορούν να δράσουν είτε αποτρεπτικά, είτε ενισχυτικά. Τέτοιοι παράγοντες που μπορούν να καθορίσουν την εμφάνιση ή όχι ενός πλημμυρικού φαινομένου είναι:

- η ικανότητα του υδρογραφικού δικτύου να παροχετεύσει αποτελεσματικά την επιφανειακή απορροή
- η γεωλογία, το μέγεθος και η γεωμορφολογία της λεκάνης απορροής
- ο κορεσμός του επιφανειακού εδάφους από προηγηθείσες βροχοπτώσεις
- η φυτοκάλυψη του εδάφους
- οι χρήσεις γης, κλπ.



Εικόνα 1 : Κατανομή ανθρώπινων απωλειών λόγω πλημμύρας στον Ελλαδικό χώρο
Πηγή: (ELSTAT 2001) (Diakakis et al., 2012)

1.4 Η οδηγία 2007/60/ΕΚ

Η οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις πλημμύρες, ξεκίνησε το 2007, ως αποτέλεσμα μια σειράς πλημμυρών που έλαβαν χώρα σε μεγάλα ποτάμια της Ευρώπης, και έχει ως στόχο την μείωση της πλημμυρικής διακινδύνευσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το οικονομικό κόστος που συνεπέφεραν τα υδρολογικά συμβάντα στην ΕΕ μεταξύ 1980 και 2017 ανήλθε σε περίπου 166 δισεκατομμύρια ευρώ (Owen & Ευρ.Ελεγκτικό Συνέδριο , 2018). Ως αποτέλεσμα διαμορφώθηκε ένα θεσμικό πλαίσιο για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας με στόχο τη μείωση των αρνητικών συνεπειών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες.

Οι βασικές απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής οδηγίας χωρίζονται σε τρία στάδια:

1. Προκαταρκτική εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας στις λεκάνες απορροής των ποταμών και τις αντίστοιχες παράκτιες ζώνες και προσδιορισμός των περιοχών όπου υπάρχουν δυνητικοί σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας ή είναι πιθανό να σημειωθεί πλημμύρα
2. Κατάρτιση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας και χαρτών κινδύνων πλημμύρας για τις ζώνες δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας
3. Κατάρτιση σχεδίων διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας. Τα σχέδια διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας καλύπτουν όλες τις πτυχές της διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας εστιαζόμενα στη πρόληψη, την προστασία και την ετοιμότητα συμπεριλαμβανομένων των προβλέψεων

πλημμυρών και συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης και λαμβάνοντάς υπόψιν τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης λεκάνης ή υπολεκάνης απορροής του ποταμού.

1.5 Προτεινόμενα μέτρα για πλημμύρες

Με δεδομένη την εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων στη χώρα μας με καταστροφικές συνέπειες, προκύπτει η ανάγκη για την δημιουργία σχεδίων διαχείρισης του πλημμυρικού κινδύνου τόσο για τη δρομολόγηση έργων και εργασιών αντιπλημμυρικής προστασίας με στόχο την αποτροπή εμφάνισής τους και τη μείωση των επιπτώσεών τους, όσο και της λήψης μέτρων πολιτικής προστασίας για την εξασφάλιση της ετοιμότητας για την αντιμετώπιση εκτάκτων αναγκών και την άμεση διαχείριση των συνεπειών τους. Επειδή τα αίτια και οι συνέπειες σε περίπτωση πλημμύρας ποικίλλουν ανάλογα με τις χώρες και τις περιφέρειες της Κοινότητας, τα σχέδια διαχείρισης λαμβάνουν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των περιοχών που καλύπτουν και παρέχουν ενδεδειγμένες λύσεις, ανάλογα με τις ανάγκες και τις προτεραιότητες των περιοχών αυτών, εξασφαλίζοντας παράλληλα συναφή συντονισμό εντός των περιοχών λεκάνης απορροής ποταμών και προωθώντας την επίτευξη περιβαλλοντικών στόχων που έχουν θεσπισθεί στην κοινοτική νομοθεσία.

Οι βασικοί άξονες αντιμετώπισης των πλημμυρών με τους οποίους δομούνται τα σχέδια διαχείρισης είναι έξι (**Μαμάσης, 2018**), και περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω :

1. Πρόληψη: Ήπιες παρεμβάσεις τοπικής και ευρύτερης κλίμακας, που αφορούν στα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, στο δομημένο περιβάλλον και τις χρήσεις γης, αλλά και στην ενσωμάτωση του πλημμυρικού κινδύνου στον πυρήνα του χωροταξικού και πολεοδομικού σχεδιασμού.
2. Προστασία: Αντιπλημμυρικά έργα που έχουν σαν στόχο την αποθήκευση, ανάσχεση, εκτροπή ή παραλαβή των πλημμυρικών παροχών, και τα οποία σχεδιάζονται υδρολογικά με βάση την περίοδο επαναφοράς του φαινομένου. Το ζητούμενο επίπεδο διακινδύνευσης αλλά και η σκοπιμότητα του έργου είναι οι καθοριστικότεροι παράμετροι σχεδιασμού.
3. Ετοιμότητα: Στις καταστάσεις έκτακτης ανάγκης είναι απαραίτητη η δημιουργία μιας οργανωτικής δομής για τον συντονισμό όλων των απαιτούμενων δράσεων, που θα υποστηρίζεται από επιχειρησιακά σχέδια διαχείρισης του πλημμυρικού κινδύνου, σύγχρονα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης και προγνωστικά συστήματα που αφορούν μετεωρολογικά και υδρολογικά δεδομένα.
4. Μετρίαση: Όλες οι δράσεις ανάσχεσης της πλημμύρας, σε πραγματικό χρόνο, οι οποίες αποσκοπούν τόσο στη μείωση των πλημμυρικών παροχών, όσο και στον περιορισμό των δυνητικών επιπτώσεων, με απώτερο σκοπό την προστασία της ανθρώπινης ζωής και περιουσίας.

5. Αντιμετώπιση: Η άμεση ανταπόκριση του κρατικού μηχανισμού κατά τη διάρκεια αλλά και μετά την παρέλευση της πλημμύρας, για την στήριξη του πληθυσμού και των αναγκών του, τις δύσκολες αυτές ώρες.
6. Αποκατάσταση: Η ανασυγκρότηση των υποδομών που υπέστησαν βλάβες από μια πλημμύρα και η επαναξιολόγηση των υφιστάμενων μέτρων πρόληψης και προστασίας, με στόχο την αποφυγή παρόμοιων επιπτώσεων στο μέλλον.

Στη κατηγορία των έργων και εργασιών αντιπλημμυρικής προστασίας, την αποτελεσματικότητα των οποίων εξετάζει η παρούσα διπλωματική, αξίζει να αναφερθούν τα συνηθέστερα που συναντάμε στην Ελλάδα αλλά και διεθνώς :

- Αντιπλημμυρικοί ταμιευτήρες στα ανάντη σημεία της λεκάνης
- Ενίσχυση πρανών και περιοχών μεγάλων κλίσεων
- Αναχώματα και προστατευτικοί τοίχοι
- Λεκάνες κατάκλισης δίπλα στις χαμηλές περιοχές
- Δίκτυα ομβρίων
- Εκτροπές ποταμών
- Παράκτια προστασία
- Αύξηση της παροχευτικότητας των ποταμών με καθαρισμό, εκβάθυνση και διάνοιξη των διατομών.
- Εισαγωγή πρόσθετων διαδρομών παράλληλα με το ποτάμι
- Υπερχειλιστές σε ταμιευτήρες
- Επαναδιάθεση κτιρίων ή καταστροφή κατασκευών

(Σουλιώτης, 2018)

Είναι σκόπιμο να διευκρινιστεί ότι κατά τη διάρκεια και μετά την εκδήλωση της καταστροφής, τα έργα και οι δραστηριότητες που απαιτούνται για την άμεση αποκατάσταση της λειτουργίας των πάσης φύσεως έργων αντιπλημμυρικής προστασίας, στο πλαίσιο εφαρμογής του σχεδιασμού αντιμετώπισης εκτάκτων αναγκών και άμεσης/βραχείας διαχείρισης συνεπειών, έχει χαρακτήρα κατεπείγουσας ανάγκης, ειδικά όταν συνδέεται με την προστασία της ζωής και της περιουσίας των πολιτών, και εκτελείται από τους φορείς που έχουν τη θεσμική αρμοδιότητα λειτουργίας και συντήρησης των έργων αυτών.

Συνεπώς, για την αποτελεσματική διαχείριση καταστροφών λόγω πλημμυρικών φαινομένων έχει βαρύνουσα σημασία ο προσδιορισμός των ρόλων και αρμοδιοτήτων, τόσο των φορέων συντήρησης και λειτουργίας των πάσης φύσεως αντιπλημμυρικών έργων, υποδομών και δικτύων, όσο και των λοιπών φορέων πολιτικής προστασίας που εμπλέκονται άμεσα στην αντιμετώπιση εκτάκτων αναγκών και τη διαχείριση των συνεπειών, καθώς απαιτείται ο μεταξύ τους συντονισμός και συνεργασία για την από κοινού αντιμετώπιση των συνεπειών του καταστροφικού φαινομένου. **(Δ/ση σχεδιασμού και αντιμετώπισης έκτακτων αναγκών, 2019)**

2 ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HEC-RAS 1D/2D

2.1 Εισαγωγή - Γενικά χαρακτηριστικά

Το Hec-ras είναι ένα υδραυλικό- μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον Αμερικανικό Στρατό, και συγκεκριμένα από το Hydrologic Engineering Center (HEC), για την προσομοίωση υδατορεμάτων (River Analysis System – RAS). Οι βασικές του λειτουργίες είναι : μονοδιάστατη ανάλυση (1D) , δισδιάστατη ανάλυση ροής (2D), μεταφορά ιζήματος και έλεγχος ποιότητας υδάτων. Οι πιο πάνω λειτουργίες μπορούν να συνδυαστούν ώστε να προκύψει, ένα πιο ολοκληρωμένο μοντέλο που θα συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των διαφορετικών προσεγγίσεων. Επιπλέον οι λειτουργίες του χωρίζονται με βάση τον τύπο της ροής. Σε κατάσταση σταθερής ροής(steady flow), και πιο συγκεκριμένα όταν η ροή είναι βαθμιαία μεταβαλλόμενη, το μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει σύνθετα υδρογραφικά δίκτυα, αξιοποιώντας τον μονοδιάστατο τρόπο επίλυσης- προσέγγισης. Σε κατάσταση μη σταθερής ροής(unsteady flow), μπορούν να προσομοιωθούν δισδιάστατες γεωμετρίες, όπως επιφάνειες κατάκλισης (2D flow areas) ή ταμιευτήρες(storage areas) κτλ.

2.2 Οι εξισώσεις του μοντέλου

2.2.1 Εξισώσεις μονοδιάστατης (1D) ροής σε συνθήκες σταθερής ροής.

Στην μονοδιάστατη μοντελοποίηση όταν η ροή είναι σταθερή και βαθμιαία μεταβαλλόμενη, η ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού μπορεί να προσεγγιστεί, επιλύοντας την εξίσωση ενέργειας με μια επαναληπτική διαδικασία μεταξύ γειτονικών διατομών. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται standard step method.

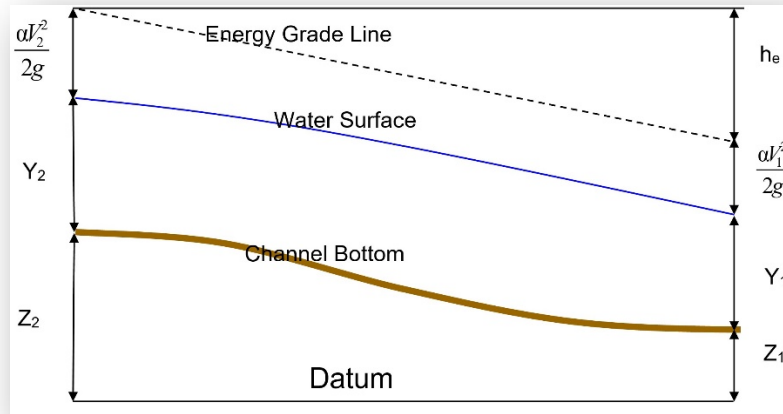
Η βασικές εξισώσεις που επιλύονται φαίνονται παρακάτω:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad \text{Εξίσωση ενέργειας} \quad (2.2.1)$$

$$h_e = L \overline{Sf} + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad \text{Απώλειες ενέργειας} \quad (2.2.2)$$

Z_1, Z_2	υψόμετρα πυθμένα διατομής
Y_1, Y_2	βάθος
V_1, V_2	μέση ταχύτητα (απορροή/υγρή διατομή)
a_1, a_2	συντελεστής ταχύτητας
g	επιτάχυνση της βαρύτητας
h_e	απώλειες ενέργειας
Sf	η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής μεταξύ των δύο διατομών
C	ο συντελεστής στενώσεως ή διευρύνσεως
L	το ανηγμένο μήκος μεταξύ των διατομών 1 και 2

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται όλοι οι όροι της εξίσωσης ενέργειας εκφρασμένοι σε ισοδύναμο ύψος, ως προς ένα σύστημα αναφοράς.



Εικόνα 2 : Ολικό φορτίο ενέργειας ρευστού

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η εξίσωση ενέργειας μπορεί να αξιοποιηθεί μόνο σε περιπτώσεις βαθμιαία μεταβαλλόμενης ροής. Σε περιπτώσεις που υπάρχει μετάβαση από υποκρίσιμη σε υπερκρίσιμη ροή ή το αντίθετο, η προσέγγιση αυτή δεν δίνει ικανοποιητικές λύσεις. Κάποια παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων, είναι απότομες κλίσεις πυθμένα, υπερχειλιστές, stream junctions κτλ. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται είτε η εξίσωση ποσότητας κίνησης είτε εμπειρικές σχέσεις.

2.2.2 Εξισώσεις μονοδιάστατης (1D) ροής σε συνθήκες μη σταθερής ροής.

Οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την κίνηση ενός ρευστού σε συνθήκες μη σταθερής ροής είναι ο νόμος διατήρησης της μάζας και ο νόμος διατήρησης της ορμής.

Η αρχή διατήρησης μάζας δηλώνει ότι η ολική εισροή μάζας σε έναν όγκο αναφοράς ισούται με τον ρυθμό μεταβολής της μάζας, στον όγκο αυτόν.

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \quad (\text{εξίσωση συνέχειας}) \quad (2.2.3)$$

Όπου:

- A_T = η υγρή διατομή(m^2)
- Q = η ροή (m^3/s)
- q_l = η πλευρική εισροή ανά μονάδα μήκους (m^2/s)

Η αρχή διατήρησης ορμής για έναν όγκο ελέγχου δηλώνει ότι ο καθαρός ρυθμός ορμής που εισέρχεται στον όγκο συν το άθροισμα των εξωτερικών δυνάμεων που δρουν στον όγκο είναι ίσα με το ρυθμό συσσώρευσης της ορμής. Η εξίσωση αυτή είναι στη ουσία μια έκφραση του 2^{ου} νόμου του Newton, και μπορεί να διατυπωθεί επιπλέον ως εξής: το διανυσματικό άθροισμα ΣF, όλων των εξωτερικών δυνάμεων που ενεργούν σε μια μάζα ρευστού ισούται με τον ρυθμό χρονικής μεταβολής του διανύσματος της γραμμικής ποσότητας κινήσεως, της μάζας του ρευστού.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(VQ)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + Sf \right) = 0 \quad (\text{εξίσωση ποσότητας κίνησης}) \quad (2.2.4)$$

Όπου:

- Q= η ροή(m³/s)
- V= η ταχύτητα ροής (m/sec)
- g= η επιτάχυνση της βαρύτητας (m²/s)
- A= η υγρή διατομή (m²)
- dz/dx= η κλίση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού
- Sf= η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής

2.2.3 Εξισώσεις δισδιάστατης (2D) ροής.

Οι εξισώσεις ορμής(Navier-Stokes) και συνέχειας, είναι η καλύτερη προσέγγιση της κίνησης των ρευστών στο χώρο. Περιγράφουν επ' ακριβώς όλες τις καταστάσεις ροής από τις πιο απλές, όπως η στρωτή ροή, μέχρι τις πλέον περίπλοκες, όπως π.χ. η τυρβώδης ροή. Λόγω όμως της πολυπλοκότητας που παρουσιάζουν και της μη αναλυτικής επίλυσης, πολλές φορές στα πλαίσια μοντελοποίησης πλημμυρών επιλέγεται η απλοποίηση τους. Έτσι προκύπτουν οι εξισώσεις ρηχών νερών(shallow water) ή αλλιώς εξισώσεις saint-venant, στις οποίες γίνονται οι παραδοχές ότι το ρευστό είναι ασυμπίεστο, η πυκνότητα δεν παρουσιάζει μεταβολές και η πίεση είναι υδροστατική. Επιπλέον, επειδή τα βάθη ροής είναι αμελητέα σε σχέση με την έκταση μια πλημμύρας, θεωρείται ότι το κατακόρυφο διάνυσμα της ταχύτητας είναι μηδενικό, και μπορεί να απαλειφθεί. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι εξισώσεις shallow water μπορούν να απλοποιηθούν περαιτέρω. Έτσι προκύπτει η εξίσωση ορμής στην μορφή diffusion wave. Η εξίσωση αυτή μπορεί να συνδυαστεί με την εξίσωση συνέχειας ώστε να προκύψει το σύστημα εξισώσεων γνωστό ως Diffusive Wave Approximation of the Shallow Water (DSW) equations.

Οι διαφορικές εξισώσεις Shallow water είναι οι εξής :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (\text{εξίσωση συνέχειας}) \quad (2.2.5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f_v$$

(εξίσωση ποσότητας κίνησης) (2.2.6)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f_u$$

Όπου:

u και v οι ταχύτητες κατά X και Y αντίστοιχα

H υψόμετρο ελεύθερης επιφάνειας

g η επιτάχυνση της βαρύτητας

v_t ο συντελεστής ιξώδους

c_f ο συντελεστής τραχύτητας πυθμένα

f παράμετρος coriolis

Για τις εξισώσεις ορμής Διάχυσης Κύματος χρησιμοποιούνται οι 2D εξισώσεις Saint Venant, από τις οποίες απαλείφονται: το ιξώδες, η παράμετρος Coriolis, η μεταγωγική επιτάχυνση και η τοπική επιτάχυνση και κυριαρχούν οι όροι της επιτάχυνσης της βαρύτητας και του συντελεστή τριβής στον πυθμένα.

Οπότε, οι εξισώσεις Diffusion Wave έχουν την μορφή:

$$-g \frac{\partial H}{\partial x} = c_f * u \quad (2.2.7)$$

$$-g \frac{\partial H}{\partial y} = c_f * v$$

2.3 Δεδομένα εισόδου του μοντέλου

Τα απαραίτητα στοιχεία για να γίνει μια υδραυλική προσομοίωση στο HEC-RAS, τα οποία καλείται ο χρήστης να εισάγει, είναι :

- Λεπτομερή στοιχεία διατομών της κοίτης του ρέματος ή ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) της ευρύτερης περιοχής
- Πλημμυρογράφημα εισόδου, το οποίο αξιοποιείται σαν ανάντη οριακή συνθήκη
- Χάρτης χρήσεων γης, μέσω του οποίου καθορίζεται ο συντελεστής manning σε όλη την υπό μελέτη περιοχή
- Λεπτομερή γεωμετρικά στοιχεία για οτιδήποτε, επηρεάζει την ροή(τεχνικά, αναχώματα κτλ)
- Συντελεστές για διάφορες οντότητες που εισάγει ο χρήστης(culverts, υπερχειλιστές)

2.4 Οριακές και αρχικές συνθήκες του μοντέλου

Κάθε υπολογιστικό μοντέλο, το οποίο περιγράφεται με διαφορικές εξισώσεις, χρειάζεται κάποιες γνωστές τιμές στα άκρα του, ώστε να μπορούν να επιλυθούν οι εξισώσεις του. Οι τιμές αυτές , ονομάζονται οριακές συνθήκες, και είναι απαραίτητες για να ξεκινήσει η επαναληπτική διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων. Επιπλέον για λόγους σταθερότητας του υδραυλικού μοντέλου, πολλές φορές ορίζονται αρχικές συνθήκες. Με αυτό τον τρόπο καθορίζονται σε όλα τα σημεία του μοντέλου, η παροχή και το βάθος ροής, κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης.

Το υδραυλικό μοντέλο HEC-RAS δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει δύο τύπους οριακών συνθηκών, τις εξωτερικές(external) και τις εσωτερικές(internal). Οι εξωτερικές συνθήκες αναφέρονται στα άκρα του μοντέλου ενώ οι εσωτερικές σε ενδιάμεσα σημεία.

2.5 Εξωτερικές οριακές συνθήκες (external boundary conditions)

Για τις ανάντη οριακές συνθήκες, χρησιμοποιούνται συνήθως

- **Υδρογραφήματα**, που περιγράφουν είτε την παροχή(flow) είτε την στάθμη(stage), σε συνάρτηση με το χρόνο, στην θέση εισόδου του ρέματος. Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα να συνδυαστούν και οι δύο τύποι υδρογραφημάτων(stage&flow) για μια καλύτερη προσέγγιση.

Για τις κατάντη οριακές συνθήκες, χρησιμοποιούνται :

- **Καμπύλες στάθμης παροχής (rating curve)**, μέσω των οποίων αντιστοιχείται σε κάθε μία τιμή παροχής μία τιμή ελεύθερης επιφάνειας.
- **Ομοιόμορφο βάθος(normal depth)**, το οποίο υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης Manning's. Απαραίτητη παράμετρος για να λυθεί η εξίσωση, είναι η κλίση της γραμμής ενέργειας η οποία προσεγγίζεται ικανοποιητικά από την κλίση του πυθμένα ή της ελεύθερης επιφάνειας του ρευστού.
- **Υδρογραφήματα**, με τον ίδιο τρόπο που αναφέρθηκαν παραπάνω.

2.6 Εσωτερικές οριακές συνθήκες (internal boundary conditions)

Στα ενδιάμεσα σημεία του μοντέλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω οριακές συνθήκες:

- **Πλευρικό υδρογράφημα εισροής(Lateral inflow hydrograph & uniform lateral inflow hydrograph)**, με το οποίο υπάρχει επιπρόσθετη ροή στις όχθες του ρέματος, όπως για παράδειγμα σε μικρά συμβάλλοντα ρέματα.
- **Groundwater interflow**, η οριακή συνθήκη αυτή περιγράφει την αλληλεπίδραση της ελεύθερης επιφάνειας με τα υπόγεια νερά.
- **Internal Stage and flow hydrograph**, μέσω των οποίων ρυθμίζονται οι στάθμες σε συγκεκριμένες θέσεις, με βάση ιστορικά στοιχεία η εμπειρικές σχέσεις.

Επιπλέον σε θυροφράγματα και αντίστοιχες κατασκευές μπορούν να εισαχθούν οριακές συνθήκες που περιγράφουν την λειτουργία τους. Ενδεικτικά αναφέρονται τα εξής

- **Time series of gate openings**, μέσω αυτής της οριακής συνθήκης περιγράφεται με λεπτομέρεια το άνοιγμα των θυροφραγμάτων σε σχέση με τον χρόνο.
- **Elevation controlled gate**, η κίνηση των θυροφραγμάτων είναι συνάρτηση ενός βάθους ροής, το οποίο παραμετροποιείται από τον χρήστη.

2.7 Μοντελοποίηση τεχνικών έργων

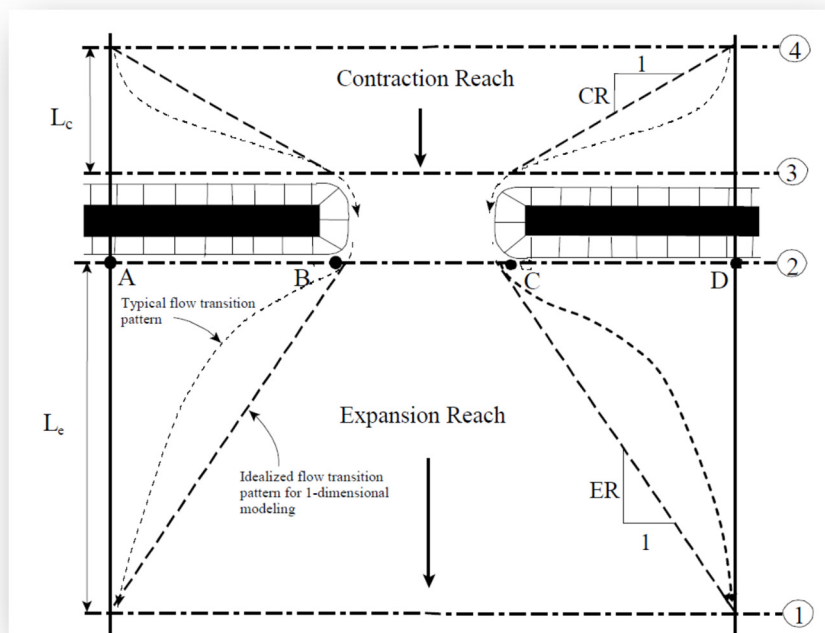
Για την μοντελοποίηση των τεχνικών έργων αξιοποιήθηκαν τα εργαλεία που προσφέρει το λογισμικό, μέσω των οποίων γίνεται προσομοίωση της ροής στις δομές αυτές και υπολογίζονται οι απώλειες ενέργειας, οι οποίες οφείλονται στην συστολή και διαστολή της ροής.(Contraction and Expansion losses), αλλά και σε απώλειες τριβών (friction losses) μέσα στο τεχνικό. Ο υπολογισμός των απωλειών λόγω τριβών γίνεται με την κλίση της γραμμής ενέργειας, ενώ οι απώλειες λόγω συστολής και διαστολής υπολογίζονται από το γινόμενο του συντελεστή C με την διαφορά του ύψους της ταχύτητας ανάμεσα στις υπό εξέταση διατομές.

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right|$$

Όπου:

- L το μήκος μεταξύ των διατομών
- \bar{S}_f η κλίση της γραμμής ενέργειας
- C συντελεστής συστολή-διαστολής

Οι απαραίτητες διατομές για την σωστότερη προσέγγιση της επίδρασης των τεχνικών στη ροή, είναι αυτές που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα :



Εικόνα 3 : Χαρακτηριστικές διατομές μοντελοποίησης των τεχνικών.

- **Στην διατομή 1** βρίσκεται το σημείο κατάντη του τεχνικού, στο οποίο η ροή δεν επηρεάζεται πλέον από την ύπαρξη του τεχνικού. Στο σημείο αυτό έχει σταματήσει πλέον η διαστολή λόγω στένωσης και η ροή έχει αποκατασταθεί πλήρως.
- **Στην διατομή 2** βρίσκεται το σημείο αμέσως κατάντη του τεχνικού. Η διατομή αυτή τοποθετείται για να αναπαρασταθεί η ακριβής γεωμετρία του ρέματος στο σημείο εξόδου του τεχνικού.
- **Στην διατομή 3** βρίσκεται, όπως παραπάνω, το σημείο αμέσως ανάντη του τεχνικού, και περιγράφει πλήρως την γεωμετρία στο σημείο εισόδου του τεχνικού.
- **Στην διατομή 4** βρίσκεται το σημείο ανάντη του τεχνικού στο οποίο ξεκινά η συστολή της ροής.

3 Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΡΕΜΑΤΟΣ ΕΡΑΣΙΝΟΥ

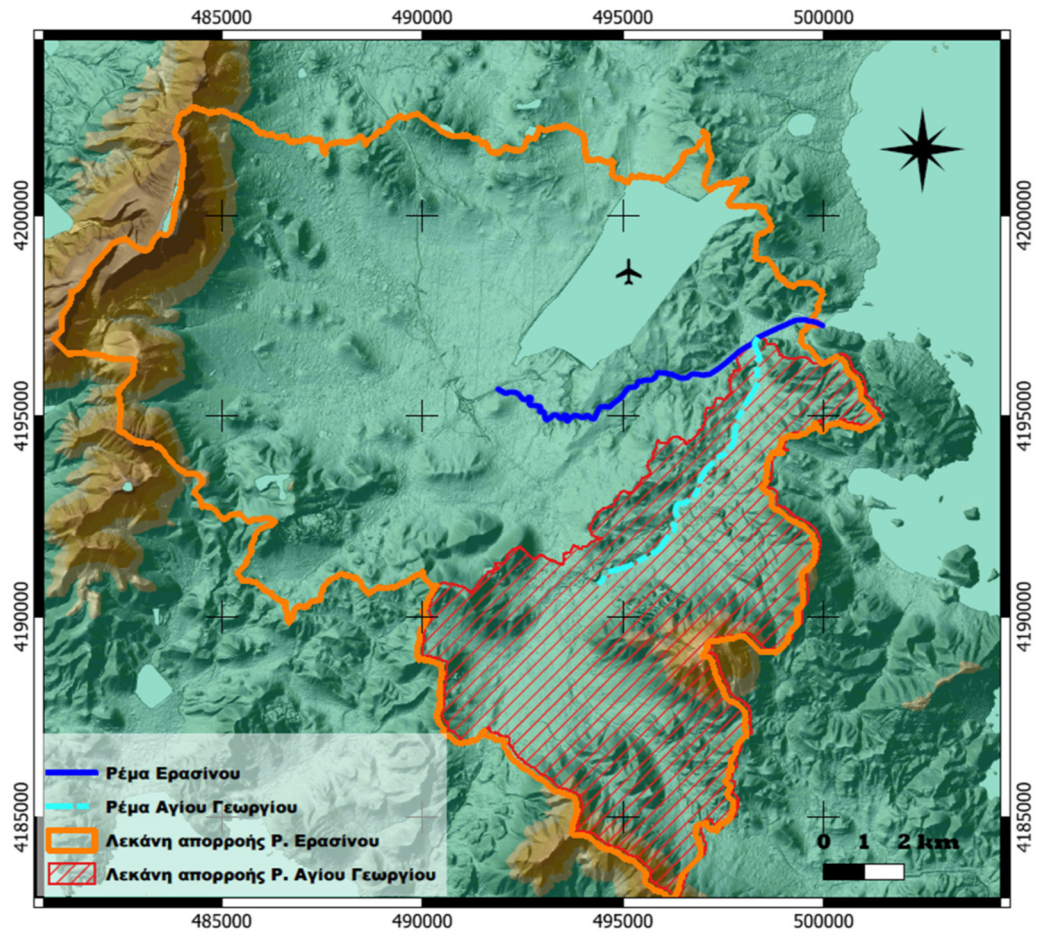
3.1 Γενικά

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης περιλαμβάνει την υδρολογική λεκάνη του ποταμού Ερασίνου, που αναπτύσσεται αξονικά από τις ανατολικές κλιτύες του Υμηττού, μέχρι τον όρμο της Βραυρώνας. Το μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης παρουσιάζει μορφολογία κατά βάση πεδινή, αλλά το μεγάλο πλήθος των χαμηλών λοφωδών εξάρσεων προσδίδει στο γενικό ανάγλυφο μορφή ελαφρά κυματοειδή. Γενικά, η μορφολογία της περιοχής συνίσταται από ένα κεντρικό επίπεδο τμήμα, την πεδιάδα των Μεσογείων με υψόμετρο μέχρι +100 μ., μια περιμετρική λοφώδη ζώνη με εδαφικές επιφάνειες ήπιων κλίσεων με υψόμετρα μέχρι +300 μ. και την ορεινή ζώνη με ισχυρές κλίσεις και μεγαλύτερα υψόμετρα.

Η συνολική λεκάνη απορροής του ρέματος Ερασίνου, ανέρχεται σε 204 χλμ². Στην περιοχή αυτή υπάρχουν τρεις κύριοι αποδέκτες ομβρίων υδάτων: το ρέμα Αγίου Γεωργίου, το ρέμα Αγ. Κων/νου – Μαρκοπούλου και το ρέμα Ερασίνου, που είναι και ο τελικός αποδέκτης και εκβάλλει στη θάλασσα, στον όρμο της Βραυρώνας. Το ρέμα Κοιλιάδας των Βασιλέων αποτελεί το βασικό αποδέκτη των όμβριων της ανατολικής πλευράς του αεροδρομίου Ελ. Βενιζέλος και καταλήγει στο ρ. Ερασίνο. Τα άλλα κύρια ρέματα που διασχίζουν την περιοχή, είναι τα ρέματα Κουβαρά, Καλυβίων, Μάλεξη και Αγίας Άννας, που έχουν αποδέκτη το ρέμα Αγίου Γεωργίου.

Στην περιοχή έχουν κατασκευαστεί σημαντικά έργα όπως: το Διεθνές Αεροδρόμιο Αθηνών, η Αττική Οδός, η Λεωφόρος Βάρης - Κορωπίου, το Ολυμπιακό Ιππικό Κέντρο. Η κατασκευή αυτών των έργων, σε συνδυασμό με τις ραγδαίες μεταβολές στις χρήσεις γης, μετέβαλε ουσιαστικά τις παραμέτρους απορροής στον Ερασίνο και τον Αγ. Γεώργιο και κατέστησε αναγκαία την παρέμβαση στην ούτως ή άλλως ανεπαρκή φυσική κοίτη. Η περιοχή των έργων διευθέτησης της κοίτης του κατάντη τμήματος, περιλαμβάνει την ευρεία κοίτη του ρέματος Ερασίνο που διατρέχει την περιοχή από τη θέση του φράγματος ανάσχεσης, 3,0 χλμ. περίπου ανάντη του λόφου του Πύργου της Βραυρώνας και μέχρι την ακτογραμμή του ομώνυμου όρμου. Από τη θέση του φράγματος ανάσχεσης μέχρι τις εκβολές του ρέματος, η γενική κλίση είναι 1,5 - 2% και δεν παρατηρείται φυσικό στένωμα σε όλο το μήκος που διατρέχεται.

Οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις αποτελούνται κατά κύριο λόγο από τις υδρολογικά δυσμενέστερες τροποποιήσεις των χρήσεων γης από γεωργική σε οικιστική και στη συνέχεια βιοτεχνική, βιομηχανική και εμπορική. Υπάρχει δραστική ανθρωπογενής παρέμβαση που τροποποιεί τη φυσική απορροή προς τον Ερασίνο. Χαρακτηριστικό του μέσου τμήματος και των επιδράσεων που έχει δεχθεί, είναι η ολική έλλειψη μισογαγγειών. Η έλλειψη μισογαγγειών και φυσικών αποδεκτών προκαλεί πλανώμενη απορροή, που στις περιοχές καλλιεργήσιμης γης διηθείται και εμπλουτίζει τον υδροφόρο ορίζοντα, χωρίς να προκαλεί προβλήματα κατακλίσεων. Το Δέλτα του ποταμού Ερασίνο αναπτύσσεται μεταξύ των λόφων που περιβάλλουν από βορρά και νότο τον όρμο Βραυρώνας και σχηματίζει αλλουβιακή επίπεδη έκταση 600 περίπου στρεμμάτων με τις αποθέσεις των προσχωματικών υλικών.



Εικόνα 4 Λεκάνη απορροής Ρέματος Ερασίνου & Αγίου Γεωργίου

3.2 Περιοχή αρχαιολογικού χώρου Βραυρώνας και εκβολές ρ. Ερασίνου

Η Βραυρώνα είναι σημαντικός αρχαιολογικός χώρος της Αττικής γνωστή για τον ναό της Αρτέμιδος που έχει δώσει το όνομά του στον σύγχρονο δήμο της ανατολικής Αττικής, αλλά και στον παραθαλάσσιο γειτονικό οικισμό της Λούτσας (σημερινό όνομα Αρτέμιδα). Ήταν χτισμένη σε έναν κολπίσκο στις ακτές του Νότιου Ευβοϊκού κόλπου, κοντά στον σημερινό οικισμό της Λούτσας. Πρωτοκατοικήθηκε από την νεολιθική εποχή. Την εποχή του Θησέα (εποχή του χαλκού) η Βραυρώνα ήταν ένας από τους 20 δήμους που ενώθηκαν και αποτέλεσαν το μετέπειτα Αθηναϊκό κράτος. Σταδιακά η Βραυρώνα εξελίχθηκε σε τόπος λατρείας της Αρτέμιδας και χτίστηκε ναός αφιερωμένος σε αυτή. Το τοπίο στην περιοχή του αρχαιολογικού χώρου συνθέτουν, το αναπεπταμένο πεδίο του ναού της Αρτέμιδας και η περιμετρική ζώνη των υψύκορμων δένδρων. Η υφή του τοπίου είναι λεία από τις μαρμάρινες επιφάνειες που καλύπτουν το έδαφος και τα άλλα δομικά στοιχεία του ναού. Από την περιμετρική ζώνη προς τον υγρότοπο, το τοπίο γίνεται χαρακτηριστικής μορφής από τις επίπεδες πράσινες επιφάνειες της υδροχαρούς βλάστησης. Κάθετες ή σφαιρικές ή ομπρελοειδείς μορφές δένδρων, διαμορφώνουν το στοιχείο της διαδοχής στο τοπίο.

Ο υγρότοπος που έχει σχηματιστεί στις εκβολές του ρ. Ερασίνου, βόρεια και ανατολικά του αρχαιολογικού χώρου Βραυρώνας, αποτελεί σημαντικό καταφύγιο άγριας ζωής, σχεδόν ίδιο από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα. Ο Ερασίνος δημιούργησε τις συνθήκες για τη δημιουργία του υγροτόπου, ενώ το νερό του χρησιμοποιείται για το πότισμα των χωραφιών που συνορεύουν με τις όχθες του. Οι καλαμώνες, τα υγρά λιβάδια και οι αρμυρικές είναι συνυφασμένα με την ύπαρξη του χειμάρρου, όπως και τα αμπέλια, οι φιστικιές και τα κηπευτικά που καλλιεργούνται στις παρακείμενες εκτάσεις. Μέρος της συνολικής έκτασης του υδροβιότοπου της Βραυρώνας, είναι ήδη ενταγμένο στο δίκτυο Natura 2000, ένα πανευρωπαϊκό δίκτυο προστατευμένων περιοχών μέγιστης σημασίας για φυσικά οικοσυστήματα και είδη χλωρίδας και πανίδας, που είναι σπάνια ή απειλούμενα. Στην ευρύτερη περιοχή έχουν παρατηρηθεί 175 είδη πτηνών, σπάνια είδη φυτών και ζώων (2 είδη θηλαστικών και 4 αμφιβίων και ερπετών), καθώς και αξιόλογοι οικότοποι (υποθαλάσσια λιβάδια Ποσειδώνιας, υγρά λιβάδια, καλαμώνες, θαμνώνες με αλμυρική).

3.3 Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής

3.3.1 Ρέμα Ερασίνου

Ο Ερασίνος αποτελεί τον αποδέκτη της απορροής της κεντρικής περιοχής των Μεσογείων (ευρύτερη περιοχή Παιανίας, Κορωπίου, νότια ζώνη Σπατών) και της νότιας περιοχής των Μεσογείων (Μαρκόπουλο, Κουβαράς). Η λεκάνη απορροής του (204 km²) οριοθετείται από τον υδροκρίτη του ρέματος Ραφήνας(βόρεια), την οροσειρά του Υμηττού(δυτικά) και τους αυχένες μεταξύ των υψωμάτων Ψηλόβραχος, Κορυφή, Μερέντα, Κερατοβούνι, Πάνειο Όρος, Στρογγυλοπούλα, Ζυγός και Κόντρα νότια.

Η λεκάνη του Ερασίνου χωρίζεται σε τρία τμήματα :

- Το πάνω τμήμα, το οποίο χαρακτηρίζεται από απότομες κλίσεις χωρίς έντονες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις.
- Το μεσαίο τμήμα, το οποίο τα τελευταία χρόνια έχει μετατραπεί σε ζώνη οικιστικής και βιομηχανικής ανάπτυξης. Οι κλίσεις του εδάφους είναι πολύ χαμηλές και οι φυσικές μισγάγειες έχουν εξαφανιστεί.
- Το κατώτερο τμήμα, στο οποίο παρουσιάζονται χαμηλές κλίσεις εδάφους και η κύρια χρήση γης είναι αγροτική.

3.3.2 Ρέμα Αγίου Γεωργίου

Η λεκάνη απορροής του ρέματος Αγίου Γεωργίου, από το σημείο της συμβολής των ρεμάτων Καλυβίων και Κουβαρά, μέχρι την εκβολή του στο �έμα Ερασίνου, ανέρχεται σε 23,95 χλμ². Η συνολική λεκάνη απορροής του ρ. Αγ. Γεωργίου, συμπεριλαμβανομένων και των λεκανών απορροής των ρεμάτων Καλυβίων και Κουβαρά, καθώς και των ρεμάτων Μαλέξη και Αγίας Άννας αγγίζει τα 66,67 χλμ². Η λεκάνη απορροής του ρέματος χαρακτηρίζεται από μικρές κατά μήκος κλίσεις. Στη λεκάνη απορροής του εν λόγω ρέματος, οριοθετήθηκε και κατασκευάστηκε το νέο Ολυμπιακό Ιππικό Κέντρο.

Το κατάντη τμήμα του ρ. Αγ. Γεωργίου, μήκους 825 μ. περίπου, περιλαμβάνεται στο έργο διευθέτησης του ρ. Ερασίνου. Για το υπόλοιπο ανάντη τμήμα του ρ. Αγ. Γεωργίου, μήκους 8 χλμ περίπου, έχει ολοκληρωθεί η εκπόνηση των οριστικών μελετών, και προγραμματίζεται η δημοπράτηση του έργου. Τελικός αποδέκτης είναι το �έμα Ερασίνου, 1.800 μ. περίπου ανάντη της εκβολής του στον όρμο Βραυρώνας. Συμβάλλοντα ρέματα στο Ρ. Αγ. Γεωργίου είναι τα ρέματα Καλυβίων (αποχετεύει έκταση 17,15 χλμ² νότια και δυτικά της περιοχής του ομώνυμου οικισμού) και το �έμα Κουβαρά (αποχετεύει έκταση 20,04 χλμ²).

3.3.3 Ρέμα Μαρκοπούλου

Η λεκάνη απορροής του ρέματος Μαρκοπούλου, ανέρχεται σε 27,30 χλμ². Οι κλίσεις είναι ήπιες και το ανάγλυφο γενικά ομαλό. Δυτικά υπάρχουν υψώματα που έχουν μεγαλύτερες κλίσεις, αλλά όχι με διαφοροποίηση της ομαλότητας του ανάγλυφου.

Το �έμα Μαρκοπούλου αποτελείται από δύο κύριους κλάδους, που συμβάλουν κοντά στο βόρειο άκρο της ομώνυμης πόλης. Ο βορειότερος κλάδος είναι το �έμα Αγίου Κωνσταντίνου, που ρέει παράλληλα με τη λεωφόρο Βάρης – Κορωπίου για 4 περίπου χιλιόμετρα. Φυσική κοίτη δεν παρατηρείται σήμερα στο εν λόγω �έμα. Υπάρχει μία φυσική μισογάγγεια, που πολλές φορές διακόπτεται από περιφράξεις ιδιοκτησιών, κτιριακά συγκροτήματα ή καλλιεργημένες εκτάσεις, παροδίως της λεωφόρου

3.4 Οι πλημμύρες στο Μαρκόπουλο Αττικής

Τα πλημμυρικά φαινόμενα στην λεκάνη του ρέματος Ερασίνου είναι σπάνια και ηπιότερα σε σχέση με άλλα ρέματα της ανατολικής Αττικής. Παρόλα αυτά έχουν συμβεί σημαντικά πλημμυρικά φαινόμενα από την αρχαιότητα έως σήμερα, τόσο στις εκβολές του ρέματος, όπου ο αρχαίος ναός της Αρτέμιδος, έχει υποστεί σημαντικές ζημιές, αλλά και σε άλλες περιοχές πλησίον του ρέματος. Συγκεκριμένα τις 3 τελευταίες δεκαετίες έχουν καταγραφεί τουλάχιστον 12 πλημμυρικά επεισόδια (1991, 1993, 1998, 1998β, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2008, 2013), άλλα περιορισμένης και άλλα μεγαλύτερης έκτασης (Λέκκας & Διακάκης, 2009). Τα γεγονότα αυτά δείχνουν ότι το πρόβλημα είναι υπαρκτό και χρήζει αντιμετώπισης.

Η συχνότητα και η ένταση των φαινομένων αυξάνεται στα σημεία που τα ρέματα διασχίζουν δομημένες εκτάσεις. Στα σημεία αυτά, οι φυσικές οδοί αποστράγγισης παρεμποδίζονται και πολλές φορές έχουν εξαφανιστεί πλήρως από την οικιστική ανάπτυξη και τις υποδομές. Ως αποτέλεσμα τα νερά υπερχειλίζουν και δημιουργούν πλημμυρικά φαινόμενα εντός του κοινωνικού ιστού του Κορωπίου, της Παιανίας και του Μαρκοπούλου.

Νότια του αεροδρομίου και κατάντη της Αττικής Οδού, οι ροές των εγκιβωτισμένων αγωγών δημιουργούν πλημμυρικά φαινόμενα έχουν μέση έως υψηλή συχνότητα, με μικρές όμως επιπτώσεις, καθώς ρέουν σε αγροτικές εκτάσεις και με μικρές ταχύτητες.

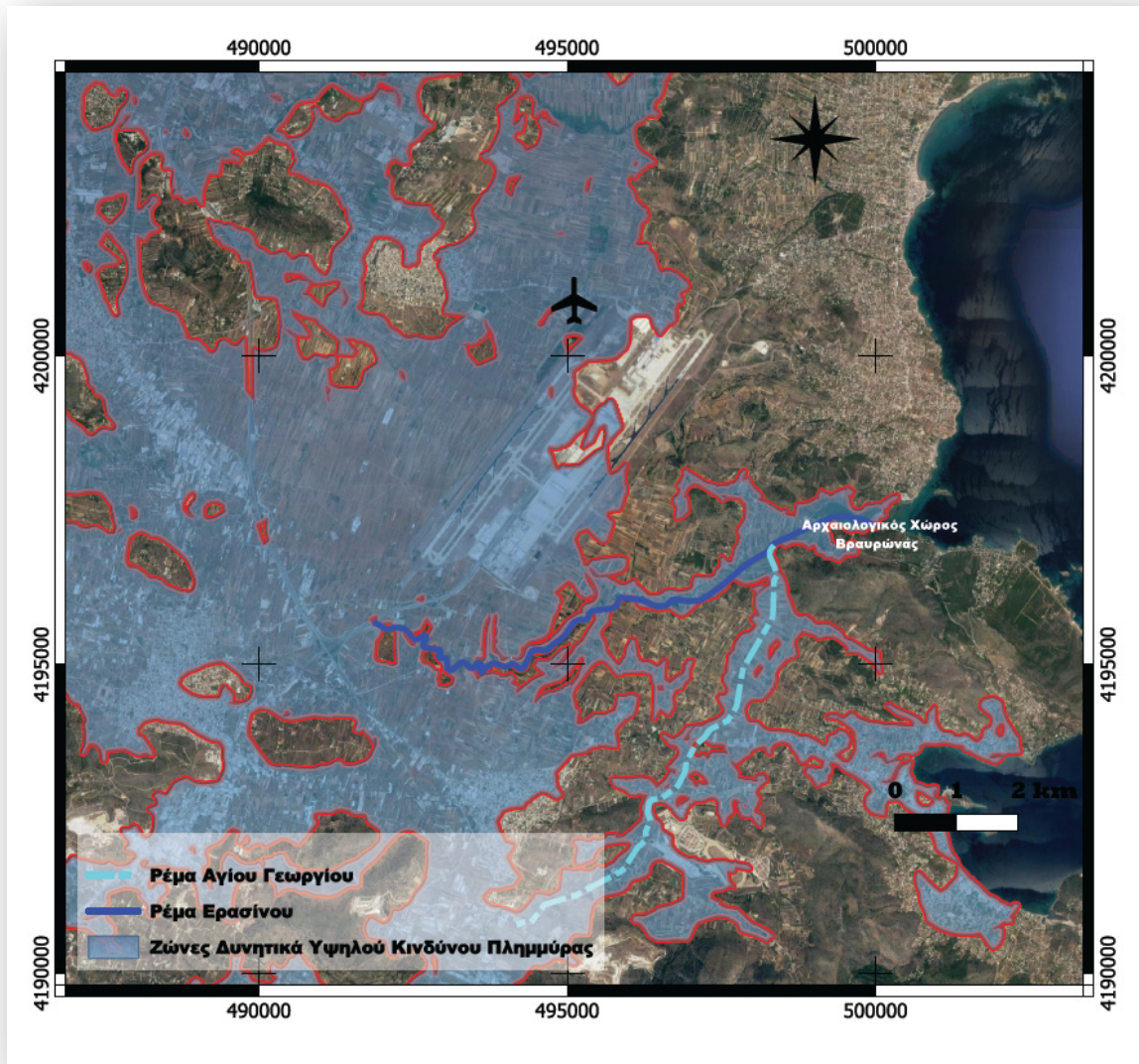
3.4.1 Σχέδιο διαχείρισης πλημμυρών Αττικής (EL06)

Η περιοχή των Μεσογείων διαχωρίζεται από υδρογραφική άποψη σε δύο μείζονες λεκάνες απορροής. Τα βόρεια Μεσόγεια απορρέουν στο ρέμα Ραφήνας ενώ τα κεντρικά Μεσόγεια απορρέουν στον Ερασίνο ποταμό όπου αμέσως ανάντη της εκβολής του στον όρμο της Βραυρώνας συμβάλλει και ο αποδέκτης των νότιων Μεσογείων το Ρέμα Αγίου Γεωργίου. Εντός των λεκανών απορροής επικρατούν οι δενδρόκηποι και δενδροκαλλιέργειες (47,48%) και ακολουθούν οι ευρείες γραμμικές καλλιέργειες (29,49%), οι περιοχές με γυμνό έδαφος (11,94%) και οι αστικές περιοχές με πυκνή δόμηση (7,33%). Σύμφωνα με τα πορίσματα του σχεδίου διαχείρισης κίνδυνων πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής, τα αίτια των πλημμυρικών επεισοδίων οφείλονται :

- Στην έντονη οικιστική ανάπτυξη με άναρχο τρόπο, με δασικές καταπατήσεις, μπαζώματα ρεμάτων κ.α.
- Στην κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων : ο Αερολιμένας Σπάτων δημιουργεί παροχές που απορρέουν στον ποταμό Ερασίνο, η Αττική Οδός και ο Προαστιακός σιδηρόδρομος τέμνουν κάθετα τις φυσικές ροές. Δεδομένου του μεγέθους τους τα έργα αυτά επηρεάζουν σημαντικά την απορροή των ομβρίων υδάτων στις γύρω περιοχές είτε ανακόπτοντας τη ροή τους προς τους φυσικούς τους αποδέκτες είτε επιβαρύνοντας την πλημμυρική παροχή των γύρω ρεμάτων διοχετεύοντας στην κοίτη τους τα όμβρια ύδατα που συγκεντρώνονται στην επιφάνειά τους.
- Στον περιορισμό των δασικών εκτάσεων: η περιοχή της Ανατολικής Αττικής έχει πληγεί τα τελευταία 30 χρόνια αρκετές φορές από καταστροφικές πυρκαγιές (1995, 1998, 2005, 2009). Από υδρολογικής άποψης οι πυρκαγιές αυτές συντέλεσαν στην αύξηση της απορροής, της πλημμυρικής αιχμής, και του χρόνου συρροής, και κατ' επέκταση στην ένταση των πλημμυρικών φαινομένων.
- Στην έντονη αγροτική δραστηριότητα: ειδικότερα στην περιοχή των Μεσογαίων οι έντονες αγροτικές χρήσεις ασκούν πιέσεις στην ποιότητα (ρυπαντικά φορτία αζώτου και φωσφόρου που βρίσκονται στα λιπάσματα), και ποσότητα των υδατικών πόρων (έντονες απολήψεις από τα υπόγεια νερά), ενώ παράλληλα συντελούν στην αυξημένη απορροή και τα πλημμυρικά φαινόμενα σε σχέση με άλλες χρήσεις γης.

Υδραυλική μοντελοποίηση για περίοδο επαναφοράς $T=50$ χρόνια

Συγκεκριμένα στον κύριο κλάδο του ρέματος Ερασίνου και ειδικά στη συμβολή του με το ρέμα Αγ. Γεωργίου καθώς και στις εκβολές του ρέματος η πλημμύρα φαίνεται να ξεφεύγει των ορίων και να διαχέεται εντός των καλλιεργούμενων εκτάσεων εκατέρωθεν αυτής. Η πλημμύρα φαίνεται να επηρεάζει τη λεωφόρο Βραυρώνος καθώς και τον Αρχαιολογικό Χώρο της περιοχής.



Εικόνα 5 : Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας

Πηγή: Υπουργείο Περιβάλλοντος & ενέργειας

4 ΤΑ ΕΡΓΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΕΡΑΣΙΝΟΥ

4.1 Γενικά

Τα σχεδιαζόμενα έργα, τα οποία αξιολογούνται στην παρούσα διπλωματική, έχουν σκοπό την ασφαλή διόδευση της όμβριας απορροής της ευρύτερης ανάντη περιοχής των Μεσογείων μέσω του φυσικού τους αποδέκτη, το ρέμα Ερασίνου.

Κατασκευάζονται σε τρεις διακριτές ζώνες :

- Ανάντη τμήμα διευθέτησης
- Περιοχή κατάκλισης- Φράγμα
- Κατάντη τμήμα διευθέτησης.

Πιο αναλυτικά, τα έργα διευθέτησης περιλαμβάνουν (με σειρά από ανάντη προς κατάντη) :

- έργο κεφαλής (σύνδεση με υφιστάμενη τάφρο της Αττικής οδού)
- ανοικτή τραπεζοειδή διατομή με 4 σειρές λιθοπλήρωτα συρματοκιβώτια (ανάντη τμήμα)
- πρόφραγμα ανάσχεσης πλημμυρών- οδικό ανάχωμα
- κυρίως φράγμα ανάσχεσης πλημμυρών
- ανοικτή τραπεζοειδή διατομή με 3 σειρές λιθοπλήρωτα συρματοκιβώτια (κατάντη τμήμα)
- ανάχωμα προστασίας αρχαιολογικού χώρου Βραυρώνας μήκους 800 μέτρων.

4.2 Κατασκευασμένα Έργα στην περιοχή

Στη φυσική κοίτη του Ερασίνου, εκβάλουν δύο μεγάλα έργα συλλογής και μεταφοράς πλυμμυρικών απορροών.

➤ Αντιπλημμυρικός συλλεκτής Μεσογείων Τ0

Κατασκευάστηκε στα πλαίσια της Αττικής Οδού, και αποτελεί αποδέκτη όλων των ανάντη πλανώμενων απορροών από τις περιοχές Παιανίας, Καρελά, Κορωπίου. Η πλημμυρική παροχή σχεδιασμού $T=50$ ετών, ανέρχεται σε $Q_{50}=420 \text{ m}^3/\text{sec}$, αμέσως κατάντη του οδικού άξονα Κορωπίου-Α/Δ Σπάτων, όπου έχει απορρεύσει το σύνολο των ανάντη της Ε.Λ.Ε.Σ-Σ (Αττική Οδός) λεκανών.

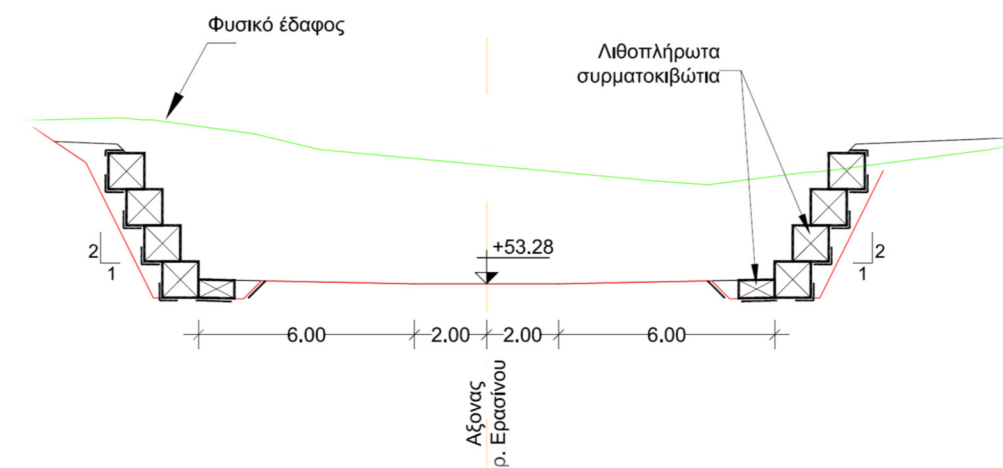
➤ Τάφρος νότιας περιμέτρου του Α/Δ Σπατών

Η περιφερειακή συλλεκτήρια τάφρος, η οποία συλλέγει όλα τα όμβρια ύδατα του αεροδρομίου Σπατών, καταλήγει στην νότια περίμετρο του αεροδρομίου, όπου μέσω κατάλληλης τάφρου, τα όμβρια διοχετεύονται στον φυσικό αποδέκτη που είναι το ρέμα Ερασίνου.

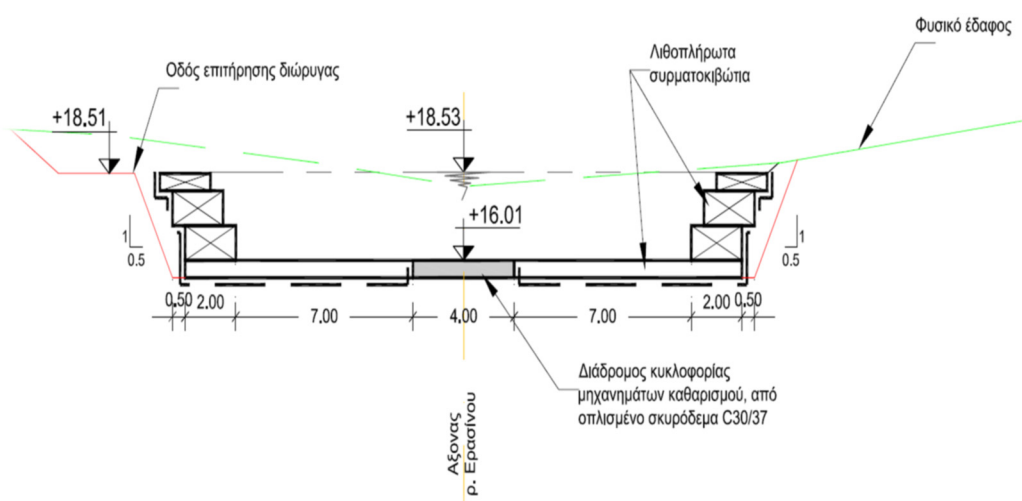
4.3 Διατομές διευθέτησης

Οι διατομές που κατασκευάζονται είναι ανοικτές τραπεζοειδείς τάφροι με δυο, τρεις ή τέσσερις σειρές συρματοκιβωτίων κατά περίπτωση. Ανάντη του φράγματος, τα συρματοκιβώτια αξιοποιούνται μόνο στα πρανή της κοίτης και στα άκρα του πυθμένα (το μεγαλύτερο τμήμα του πυθμένα διαμορφώνεται ανεπένδυτο). Κατάντη του φράγματος η επένδυση με λιθοπλήρωτα συρματοκιβώτια καταλαμβάνει όλο το πλάτος της διατομής.

Όσον αφορά στην υψομετρική χάραξη, έγινε προσπάθεια να σχεδιαστεί όσον το δυνατόν ρηχότερη διατομή, σε συνδυασμό με την επιδίωξη για μικρό πλάτος κατάληψης της τάφρου. Στις θέσεις διασταυρώσεων με δρόμους που χρησιμοποιούνται για πρόσβαση στις ιδιοκτησίες προβλέπεται αποκατάσταση της οδοποιίας με κατάλληλα τεχνικά. Προβλέπεται επίσης και δρόμος επιτήρησης/συντήρησης της τάφρου, παράλληλα μ' αυτήν, ο οποίος ταυτόχρονα αποκαθιστά και τη σύνδεση με τους κάθετους δρόμους πρόσβασης με τις ιδιοκτησίες.



Εικόνα 6 : Διατομή διευθέτησης ανάντη τμήματος διευθέτησης



Εικόνα 7 : Διατομή διευθέτησης κατάντη τμήματος διευθέτησης

4.4 Κυρίως φράγμα ανάσχεσης

Στα πλαίσια προστασίας σημαντικών έργων(Αττική οδός, Αεροδρόμιο) υλοποιήθηκαν σημαντικά αντιπλημμυρικά έργα, τα οποία προστατεύουν τις συγκεκριμένες κατασκευές, αλλά διοχετεύουν τις ροές στα κατάντη με αποτέλεσμα να δυσμενοποιούνται σημαντικά οι συνθήκες στις εκβολές του ρέματος Ερασίνου.

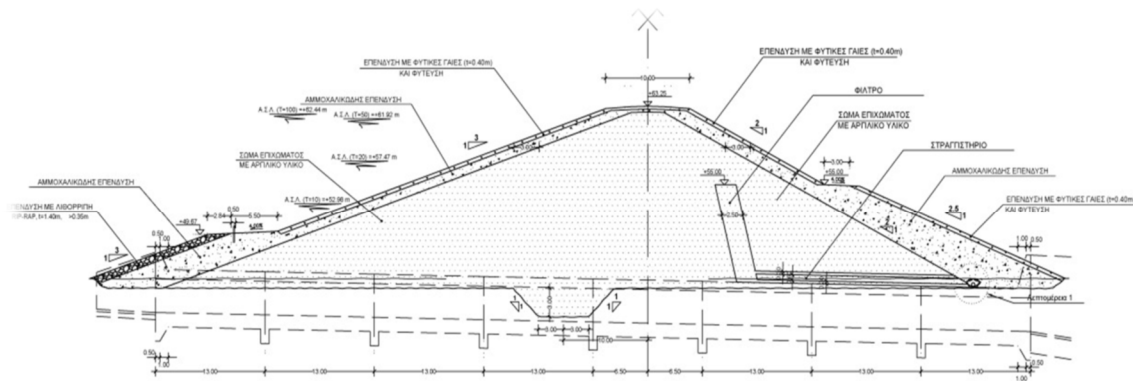
Για την αντιπλημμυρική θωράκιση των περιοχών της ευρύτερης λεκάνης των Μεσογείων προτείνεται η κατασκευή φράγματος ανάσχεσης το οποίο χωροθετείται 800 m νότια του αεροδρομίου Ελευθέριος Βενιζέλος. Με την κατασκευή του έργου αυτού θα βελτιωθεί σημαντικά η αντιπλημμυρική προστασία τόσο της ευρύτερης οικιστικής και γεωργικής περιοχής όσο και των σημαντικών αρχαιολογικών χώρων, που βρίσκονται τώρα εκτεθειμένοι.

4.4.1 Γεωμετρία φράγματος

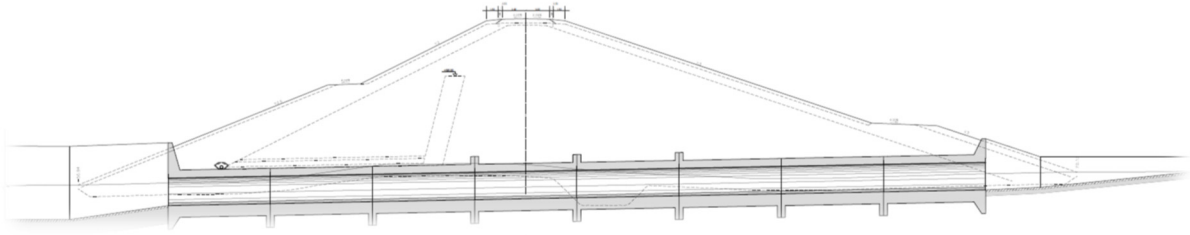
Το φράγμα ανάσχεσης είναι χωμάτινο, με ύψος 20 m από την βαθιά γραμμή του ρέματος. Το μήκος του είναι περίπου 290 m και η κλίση των πρανών είναι:

- 1:3 (κατακόρυφα προς οριζόντια) στα ανάντη
- 1:2 (κατακόρυφα προς οριζόντια) στα κατάντη

Η στέψη του φράγματος είναι σε υψόμετρο +63,25 μ.υ.θ. και η στέψη του υπερχειλιστή σε υψόμετρο +62,00 μ.υ.θ. Η διόδευση ενός μέρους της πλημμυρικής παροχής, εξασφαλίζεται με την κατασκευή δίδυμου οχετού πεταλοειδούς διατομής διαμέτρου 3.5m και συνολικού μήκους 104 m.



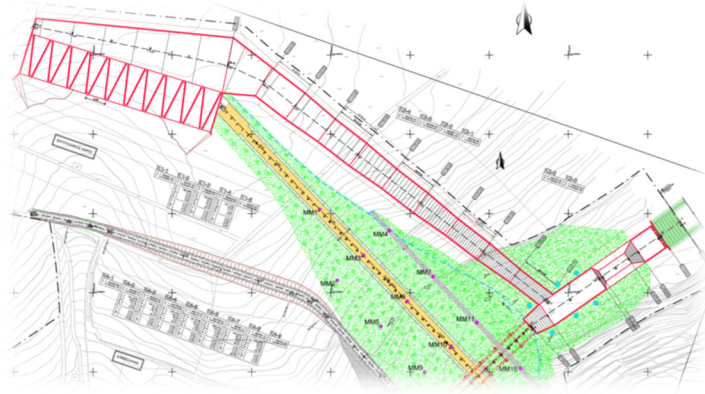
Εικόνα 8 : Τυπική διατομή Φράγματος



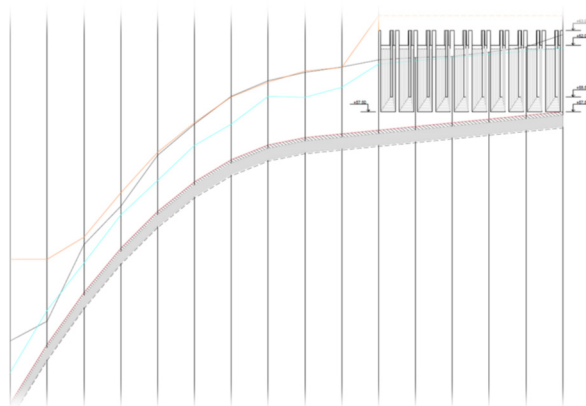
Εικόνα 9 : Οχετός φράγματος

Υπερχειλιστής

Στο ηπιότερο βόρειο αντέρεισμα του φράγματος προβλέπεται η κατασκευή υπερχειλιστή, διαστάσεων 26 x 125m., με ύψος στέψης +62.00m. Η υπερχείλιση προβλέπεται, μέσω κεκλιμένης διώρυγας από σκυρόδεμα σχήματος ανάποδου Π, η οποία θα καταλήγει στην διώρυγα μεταφοράς του νερού από τον αγωγό- οχετό υπό το φράγμα προς την λεκάνη καταστροφής ενέργειας.



Εικόνα 10 : Κάτοψη υπερχειλιστή



Εικόνα 11 : Μηκοτομή διώρυγας υπερχειλιστή

4.5 Πρόφραγμα / Οδικό ανάχωμα

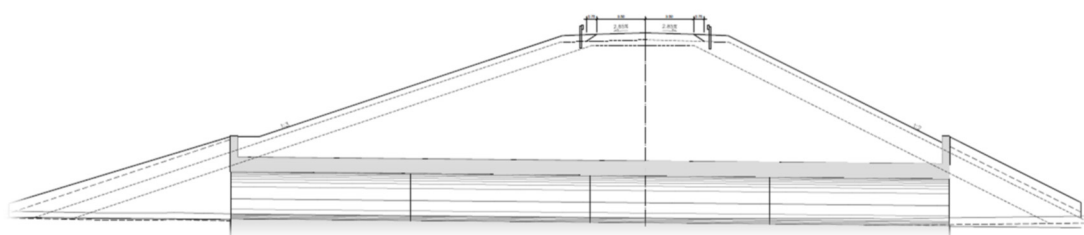
Για να επιτευχθεί ακόμη μεγαλύτερη ανάσχεση των πλημμυρικών φαινομένων αξιοποιείται το τεχνικό της επαρχιακής οδού Μαρκοπούλου – Αρτέμιδας ώστε να αποτελέσει ένα ανάντη έργο ανάσχεσης (οδικό ανάχωμα) με υψηλότερη στάθμη στέψης (+65,00 μ.υ.θ) από την στάθμη του κυρίως φράγματος(+63,25 μ.υ.θ). Με αυτό τον τρόπο η κατασκευή οδικού επιχώματος εντάσσεται στο συνολικότερο στόχο του έργου, που είναι η διαχείριση των πλημμυρικών ροών της περιοχής. Η βασική λειτουργία αυτού του ανάντη φράγματος είναι η εξής :

Όταν η στάθμη νερού του ταμιευτήρα του κυρίου φράγματος ανάσχεσης, ανεβεί σημαντικά και ξεπεράσει την στέψη των οχετών διέλευσης ροής του επιχώματος , παρατηρείται σημαντική μείωση της παροχετευτικότητας των οχετών, με συνέπεια την πρόσθετη ανύψωση στάθμης στα ανάντη του επιχώματος. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένας δεύτερος ανάντη ταμιευτήρας με υπερυψωμένη στάθμη σε σχέση με τον κατάντη ταμιευτήρα. Με αυτό τον τρόπο μεγιστοποιείται σημαντικά ο βαθμός ανάσχεσης των πλημμυρών, εφόσον αυξάνεται αθροιστικά, ο συνολικός διαθέσιμος όγκος των ταμιευτήρων.

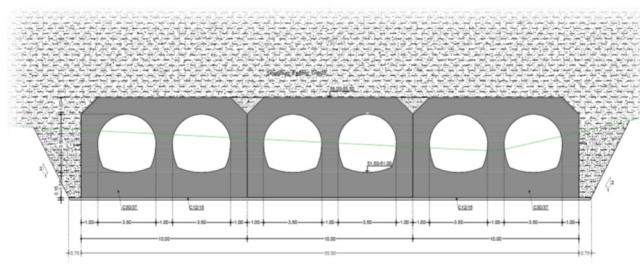
Η κατασκευή του επιχώματος για την αποκατάσταση της επαρχιακής οδού Μαρκοπούλου-Αρτέμιδας διέπεται από τις ίδιες αρχές κατασκευής του φράγματος (υλικά, κλίσεις πρανών κ.λ.π.) αλλά και του έργου ασφαλείας (υπερχειλιστής).

4.5.1 Γεωμετρία αναχώματος

Η κλίση των πρανών του αναχώματος είναι 1:3 στα ανάντη και 1:2 στα κατάντη. Η στέψη του, έχει υψόμετρο +65 m και η στέψη του υπερχειλιστή +63,5m. Το πλάτος της στέψης προβλέπεται να είναι 12m. Η διέλευση της ροής θα γίνεται μέσω έξι οχετών από σκυρόδεμα, πεταλοειδούς διατομής, διαμέτρου 3,50 m και συνολικού μήκους 52 m. Στην είσοδο και έξοδο του οχετού προβλέπεται η κατασκευή έργων εισόδου και εξόδου, τραπεζοειδούς κάτοψης. Με την ολοκλήρωση της κατασκευής του θα λειτουργεί σαν οδός τοπικής κυκλοφορίας



Εικόνα 12: Τυπική διατομή οδικού αναχώματος

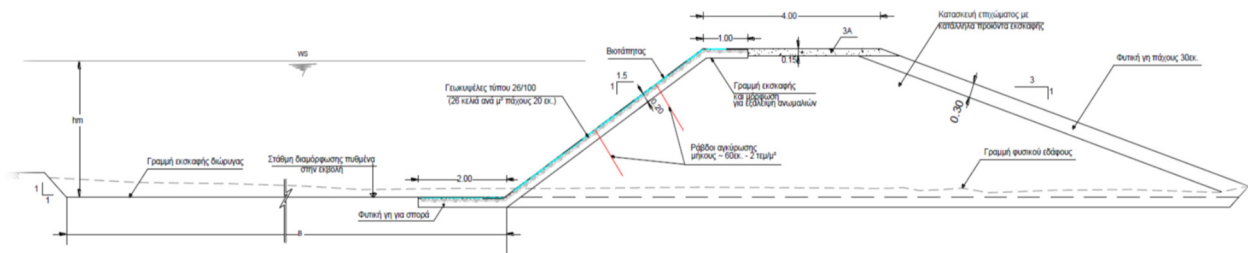


Εικόνα 13: Οχετοί οδικού αναχώματος

4.6 Ανάχωμα προστασίας Αρχαιολογικού χώρου Βραυρώνας

Στην εκβολή του ρέματος Ερασίνου και συγκεκριμένα κατόπιν του τεχνικού στο δρόμο Μαρκοπούλου-Βραυρώνας κατασκευάζεται, δεξιά κατά τη ροή ανάχωμα που έχει σαν στόχο την προστασία του ναού της Αρτέμιδας. Η συγκεκριμένη περιοχή, αποτελεί έναν υγροβιότοπο σπάνιας πανίδας και χλωρίδας και είναι χαρακτηρισμένη ως προστατευόμενη περιοχή, ενταγμένη στο Ευρωπαϊκό Δίκτυο Περιοχών Natura 2000. Ως εκ τούτου το ανάχωμα επενδύεται μόνο με υλικά (γεωκυψέλες και βιοτάπητα) φιλικά στο περιβάλλον, χωρίς την επένδυση συρματοκιβωτίων.

Το ύψος του αναχώματος κυμαίνεται μεταξύ 3-4 m ανάλογα με την χιλιομετρική θέση και η κλίση των πρανών είναι 1:1.5 εσωτερικά και 1:3 εξωτερικά. Στην στέψη του αναχώματος θα κατασκευαστεί δρόμος επιτήρησης του ρέματος ο οποίος θα αποκαθιστά και τη σύνδεση με τους κάθετους δρόμους.



Εικόνα 14: Ανάχωμα προστασίας αρχαιολογικού χώρου

5 ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

5.1 Γενικά

Για το στήσιμο του υδραυλικού μοντέλου και την εκκίνηση της προσομοίωσης απαιτούνται στοιχεία, τα οποία εισάγει ο χρήστης. Παρακάτω παρουσιάζονται όλοι οι τύποι δεδομένων που είναι απαραίτητα για να γίνει μια υδραυλική προσομοίωση.

5.2 Παροχές σχεδιασμού

Οι παροχές σχεδιασμού των αντιπλημμυρικών έργων διευθέτησης του ρέματος Ερασίνου προέκυψαν από το εγκεκριμένο από την Ε.ΥΔ.Α.Π. μαθηματικό ομοίωμα υπολογισμού παροχών και υδρογραφημάτων και αναφέρονται σε περίοδο επαναφοράς $T=50$ ετών.

Παρακάτω, παρουσιάζονται οι παροχές σχεδιασμού για τα επιμέρους τμήματα του ρέματος.

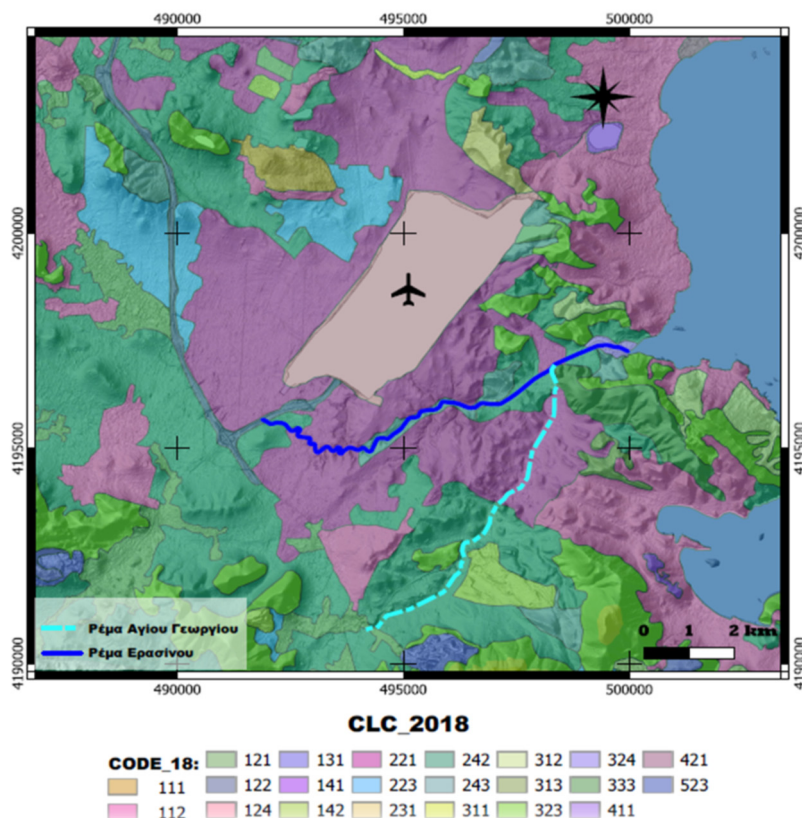
- Ανάντη τμήμα : 195 m³/sec
- Κατάντη τμήμα
 - Φράγμα έως συμβολή με ρ. Μαρκοπούλου : 250 m³/sec
 - Ρ. Μαρκοπούλου έως ρ. Αγ. Γεωργίου : 320-340 m³/sec
 - Ρ. Αγ. Γεωργίου- Εκβολή : 545-565 m³/sec

5.3 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους

Για τις ανάγκες τις εργασίας, χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό μοντέλο επιφάνειας (DSM) υψηλής διακριτικής ικανότητας, με μέγεθος εικονοστοιχείου 0.8x0.8m ώστε να αναπαρασταθούν κτήρια και λοιπές κατασκευές. Συνδυαστικά χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό μοντέλο εδάφους διακριτικής ικανότητας 5x5m της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. Σε εκτάσεις στρατιωτικής χρήσης χωρίς υψομετρική πληροφορία έγινε παρεμβολή υψομέτρων με βάση τα όρια των περιοχών αυτών, ώστε το υπόβαθρο να μην εμφανίζει κενά και επηρεάσει την υδραυλική προσομοίωση. Επιπρόσθετα παρατηρήθηκε υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο ψηφιακών μοντέλων εδάφους στα σημεία ένωσης τους, της τάξεως του ενός μέτρου. Κατά συνέπεια έγινε καταβιβασμός του ψηφιακού μοντέλου της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε., ώστε τα υψομετρικά δεδομένα να ταυτίζονται πλήρως. Τέλος έγινε επιπλέον διόρθωση στις κοίτες των ρεμάτων, όπου αφαιρέθηκαν τα δέντρα ώστε να μην δημιουργούνται ανακρίβειες στην μονοδιάστατη ανάλυση και εν συνεχεία στην επιφάνεια κατάκλισης.

5.4 Χάρτης χρήσεων γης (Corine)

Για τον προσδιορισμό των συντελεστών τραχύτητας χρησιμοποιήθηκε ο χάρτης κάλυψης γης Corine® 2018 Land Cover. Η κάλυψη γης ταξινομείται σε 44 κατηγορίες. Στη συνέχεια αντιστοιχίζονται σε αυτές τις κατηγορίες, κατάλληλοι συντελεστές τραχύτητας με βάση την βιβλιογραφία. Για την σωστότερη αναπαράσταση των χρήσεων γης προστέθηκαν επιπλέον περιοχές (calibration regions) με αλλαγμένο συντελεστή τραχύτητας, όπου κρίθηκε απαραίτητο ότι ο χάρτης Corine δεν ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα. Οι κατηγορίες που συναντάμε στην υπό μελέτη περιοχή και ο αντίστοιχος συντελεστής τραχύτητας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.



Εικόνα 15 : Corine Land Cover 2018 & κωδικοί κατηγοριών

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	ΕΠΙΛΟΓΗ
111	Συνεχής αστική οικοδόμηση	0.011-0.018	0.013
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.08-0.16	0.08
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0.12-0.20	0.15
122	Οδικά σιδηροδρομικά δίκτυα και γεινιάζουσα γη	0.013-0.016	0.013
124	Αεροδρόμια	0.013-0.016	0.013
131	Ορυχεία/Μεταλεία	0.011-0.019	0.013
141	Περιοχές αστικού πρασίνου	0.023-0.027	0.025
142	Εγκαταστάσεις αναψυχής	0.023-0.027	0.025
221	Αμπελώνες	0.078-0.085	0.08
223	Ελαιώνες	0.03-0.08	0.045
231	Βοσκοτόπια	0.033-0.04	0.035
242	Σύνθετες καλλιέργειες	0.02-0.05	0.035
243	Μικτές εκτάσεις καλλιέργειας και φυσικής βλάστησης	0.048-0.052	0.05
313	Μικτό δάσος	0.08-0.20	0.12
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	0.035-0.16	0.100
324	Μεταβατικές θαμνώδης /δασώδης εκτάσεις	0.025-0.10	0.050
333	Περιοχές με αραιή βλάστηση	0.025-0.029	0.027
411	Βαλτώδης εκτάσεις	0.038-0.042	0.04
421	Βαλτώδης παραθαλάσσιες εκτάσεις	0.038-0.045	0.04
523	Θαλάσσιες εκτάσεις	0.068-0.075	0.07

Πίνακας 1 : Αντιστοίχιση χρήσεων γης με τιμές mapping

Πηγή: (Chow, 1973)

5.5 Επιπρόσθετο υλικό (Κατασκευαστικά σχέδια, μελέτες)

Για την μοντελοποίηση όλων των αντιπλημμυρικών έργων που κατασκευάστηκαν στην περιοχή , χρειάστηκε πληθώρα γεωμετρικών στοιχείων και τεχνικών χαρακτηριστικών , τα οποία αντλήθηκαν από τις αντίστοιχες μελέτες.

- ΕΠΙΚΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗ ΟΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΛΕΤΩΝ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΡΕΜΑΤΟΣ ΕΡΑΣΙΝΟΥ – ΦΡΑΓΜΑ ΑΝΑΣΧΕΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ
- «ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΛΕΩΦΟΡΟΣ ΕΛΕΥΣΙΝΑΣ – ΣΤΑΥΡΟΥ – Α/Δ ΣΠΑΤΩΝ & ΔΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ Λ. ΥΜΗΤΤΟΥ (ΑΤΤΙΚΗ ΟΔΟΣ)»
- «ΜΠΕ ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΗΣ ΡΕΜΑΤΟΣ ΕΡΑΣΙΝΟΥ»
- «ΜΕΛΕΤΗ ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗΣ Ρ. ΕΡΑΣΙΝΟΥ» (ΥΠΕΧΩΔΕ/ΔΝΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΣ ΑΤΤΙΚΗΣ (Δ10) - Νοέμβριος 2005)

5.6 Υδρογραφήματα εισόδου

Τα υδρολογικά στοιχεία για την διαστασιολόγηση των έργων του φράγματος προέκυψαν από τη μελέτη «Οριστική Υδραυλική μελέτη Φράγματος Ανάσχεσης Ερασίνου Ποταμού – Υδραυλικοί υπολογισμοί», η οποία συντάχθηκε στα πλαίσια του έργου «Ελεύθερη Λεωφόρος Ελευσίνας – Σταυρού – Α/Δ Σπάτων & Δυτική Περιφερειακή Λ. Υμηττού (Αττική Οδός)». Στην ως άνω μελέτη εξετάστηκαν σενάρια με πλημμύρες περιόδου επαναφοράς $T= 10, 20, 50$ και 100 έτη.

Στη παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε το υδρογράφημα περιόδου επαναφοράς $T=50$ ετών, ως ανάντη οριακή συνθήκη του υδραυλικού μοντέλου. Οι τιμές του υδρογραφήματος παρουσιάζονται στον πίνακα Πίνακας 2.



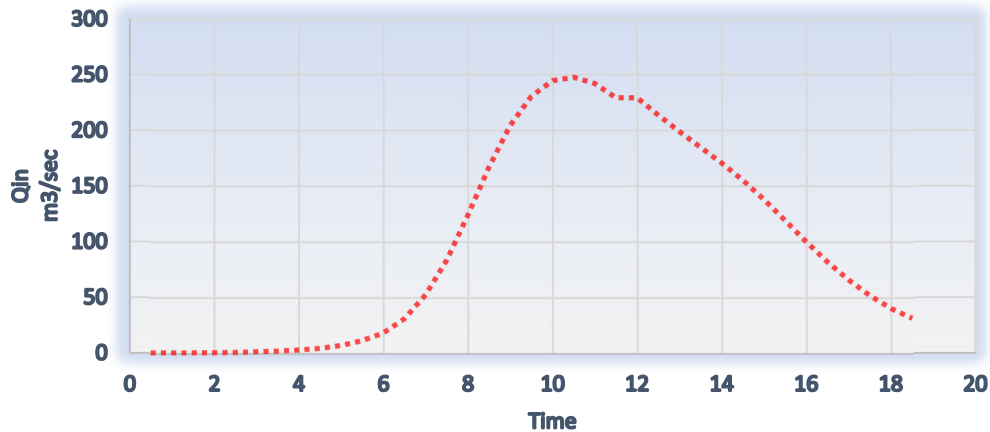
Εικόνα 16 : Υδρογράφημα εισόδου, ακριβώς ανάντη του φράγματος ανάσχεσης

Time	Qin	Time	Qin	Time	Qin	Time	Qin	Time	Qin	Time	Qin
Hours	m3/sec	Hours	m3/sec	Hours	m3/sec	Hours	m3/sec	Hours	m3/sec	Hours	m3/sec
0.13	7.96	3.13	339.3	6.13	396.02	9.13	171.39	12.13	87.56	15.13	55.95
0.25	13.27	3.25	363.73	6.25	384.22	9.25	165.16	12.25	85.42	15.25	54.82
0.38	22.31	3.38	386.34	6.38	376.24	9.38	159.39	12.38	84.02	15.38	53.97
0.5	31.4	3.50	411.48	6.50	366.39	9.50	154.78	12.50	82.77	15.50	53.17
0.63	40.87	3.63	422.47	6.63	356.25	9.63	150.45	12.63	81.11	15.63	52.08
0.75	50.35	3.75	433.45	6.75	346.11	9.75	146.13	12.75	79.45	15.75	50.94
0.88	60.75	3.88	445.21	6.88	334.65	9.88	141.64	12.88	78.1	15.88	50.21
1	71.15	4.00	456.96	7.00	323.19	10.00	137.15	13.00	76.74	16.00	49.43
1.13	79.06	4.13	463.74	7.13	313.36	10.13	133.14	13.13	75.2	16.13	48.37
1.25	87.19	4.25	469.84	7.25	302.58	10.25	129.37	13.25	73.74	16.25	47.32
1.38	101.55	4.38	473.93	7.38	291.71	10.38	125.8	13.38	72.28	16.38	46.66
1.5	115.9	4.50	478.01	7.50	280.33	10.50	122.22	13.50	70.83	16.50	46
1.63	127.94	4.63	472.01	7.63	270.53	10.63	118.65	13.63	69.49	16.63	44.93
1.75	139.98	4.75	466	7.75	260.23	10.75	115.07	13.75	68.15	16.75	43.86
1.88	154.7	4.88	459.52	7.88	249.83	10.88	111.97	13.88	67	16.88	43.08
2	169.71	5.00	451.86	8.00	238.97	11.00	109.45	14.00	65.96	17.00	42.44
2.13	185.29	5.13	444.02	8.13	229.55	11.13	106.26	14.13	64.73	17.13	41.96
2.25	200.87	5.25	436.17	8.25	220.13	11.25	103.06	14.25	63.5	17.25	40.95
2.38	218.47	5.38	430.93	8.38	212.22	11.38	100.73	14.38	62.33	17.38	40.41
2.5	236.07	5.50	425.68	8.50	204.32	11.50	98.4	14.50	61.15	17.50	39.86
2.63	253.86	5.63	425.51	8.63	197.18	11.63	95.39	14.63	60.16		
2.75	272.16	5.75	419.55	8.75	190.73	11.75	92.86	14.75	59.27		
2.88	293.51	5.88	413.69	8.88	184.18	11.88	91.27	14.88	58.18		
3.00	314.87	6.00	407.83	9.00	177.63	12.00	89.69	15.00	57.09		

Πίνακας 2 : Τιμές υδρογραφήματος εισόδου, ακριβώς ανάντη του φράγματος ανάσχεσης

Για το πλημμυρογράφημα εισόδου στο ρέμα Αγίου Γεωργίου και συγκεκριμένα στην θέση συμβολής του ρέματος με τον Ερασίνο, αντλήθηκαν στοιχεία από την διπλωματική εργασία « Εκτίμηση Πλημμυρικών Μεγεθών στην Υδρολογική Λεκάνη του Ερασίνου » (Κασιμάτης & Τσακίρης, 2011). Οι τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακας 3

Υδρογράφημα T=50 έτη



Εικόνα 17 : Υδρογράφημα εισόδου στην συμβολή των ρεμάτων Αγίου Γεωργίου κ' Ερασίνου

Time	Qin	Time	Qin
Hours	m3/sec	Hours	m3/sec
0.5	0.5	10	244.3
1	0.5	10.5	247.4
1.5	0.6	11	241.7
2	0.7	11.5	229
2.5	1.1	12	229
3	1.6	12.5	213.4
3.5	2.2	13	198.6
4	3.2	13.5	184.6
4.5	4.7	14	170.5
5	7.3	14.5	155
5.5	11.6	15	137.6
6	18.5	15.5	118.9
6.5	31.2	16	99.8
7	52.7	16.5	81.8
7.5	83.8	17	65.7
8	124.1	17.5	51.8
8.5	167.2	18	40.3
9	204.4	18.5	31.6
9.5	230.4		

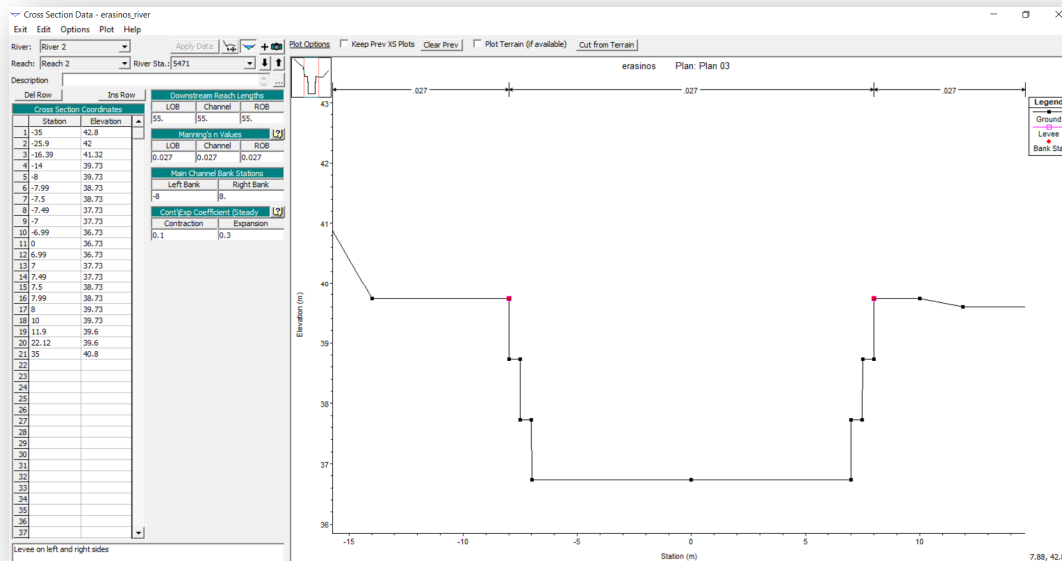
Πίνακας 3: Υδρογράφημα εισόδου στην συμβολή των ρεμάτων Αγίου Γεωργίου κ' Ερασίνου

6 ΔΟΜΗΣΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

6.1 Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων

Το πρώτο στάδιο δημιουργίας του μοντέλου είναι η εισαγωγή κατάλληλου συστήματος αναφοράς, με βάση το οποίο προκύπτουν οι συντεταγμένες κάθε οντότητας-γεωμετρίας. Το σύστημα που χρησιμοποιείται περισσότερο στην Ελλάδα είναι το Ε.Γ.Σ.Α.87, επομένως επιλέχθηκε και σαν σύστημα αναφοράς του μοντέλου. Στη συνέχεια εισήχθησαν οι άξονες των διευθετημένων ρεμάτων καθώς και οι αντίστοιχες διατομές της μελέτης, ώστε να προσομοιωθεί η διευθετημένη κοίτη με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια, αξιοποιώντας τις δυνατότητες που δίνει το μοντέλο στην 1D ανάλυση. Εφόσον η διευθετημένη κοίτη, με τα υπό κατασκευή έργα(συρματοκιβώτια κτλ), δημιουργούν ένα πεδίο ροής χωρίς έντονες εναλλαγές κατευθύνσεων, η καταλληλότερη προσέγγιση μοντελοποίησης είναι η μονοδιάστατη.

Ένας γενικός κανόνας επιλογής, μονοδιάστατου έναντι δισδιάστατου τρόπου προσέγγισης πλημμυρικών φαινομένων, είναι όταν ο λόγος του μήκους διάδοσης προς το πλάτος διάδοσης είναι μεγαλύτερος από 3:1. (Pende, 2009).



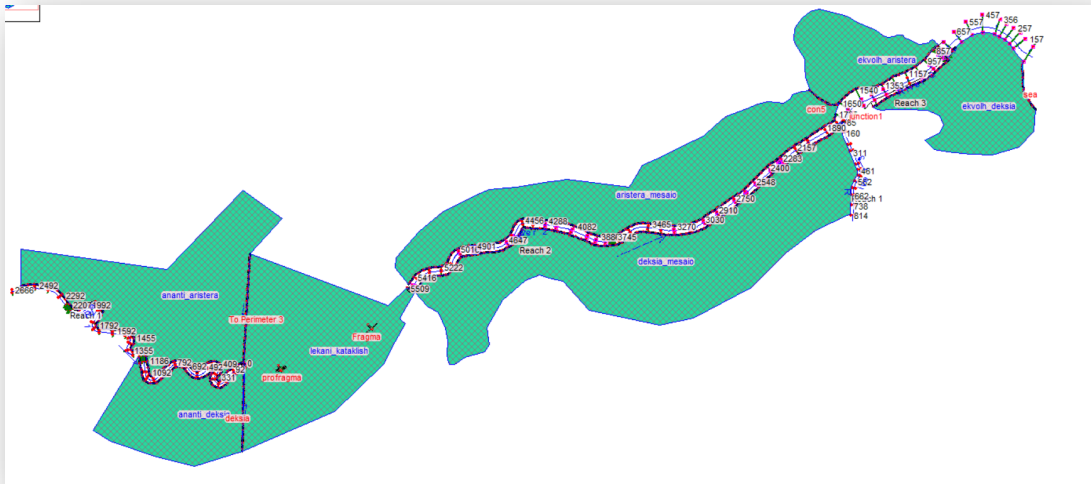
Εικόνα 18 : Γεωμετρία διευθετημένης κοίτης με συρματοκιβώτια στο HEC-ras

6.2 Δισδιάστατες γεωμετρίες

Οι περιοχές όπου η ροή δεν ακολουθεί μια κατεύθυνση και η διάδοση του πλημμυρικού φαινομένου γίνεται ακανόνιστα είναι απαραίτητο να μοντελοποιηθούν με τα δισδιάστατα εργαλεία που προσφέρει το Hec-ras. (Goodell, 2016)

Επομένως χρησιμοποιήθηκαν 2d flow areas, στις περιοχές εκτός της κοίτης του ρέματος όπου η πλημμύρα μπορεί να εξαπλωθεί πλευρικά καθώς και σε όλη την περιοχή ανάμεσα στα δύο φράγματα, που αποτελεί ουσιαστικά την λεκάνη κατάκλισης των ταμειωτήρων.

Η σύνδεση της μονοδιάστατης κοίτης και των πλευρικών δισδιάστατων γεωμετριών έγινε μέσω υπερχειλιστών (**lateral structures**) ενώ με την περιοχή κατάκλισης έγινε απευθείας. Όταν μια μονοδιάστατη οντότητα συνδέεται απευθείας με μια δισδιάστατη, προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν αστάθειες στο υδραυλικό μοντέλο πρέπει στο σημείο σύνδεσης να επικρατεί αυστηρά “μονοδιάστατη” ροή (Gibson S. , 2021).

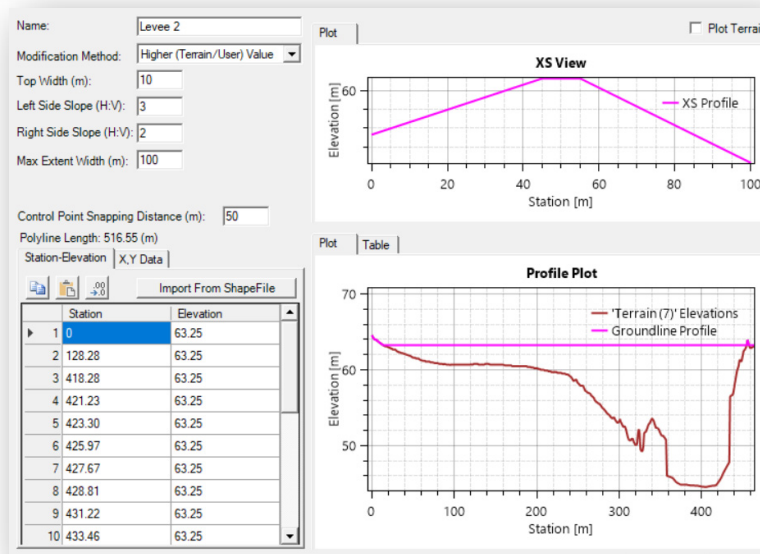


Εικόνα 19 : Βασική γεωμετρία υδραυλικού μοντέλου

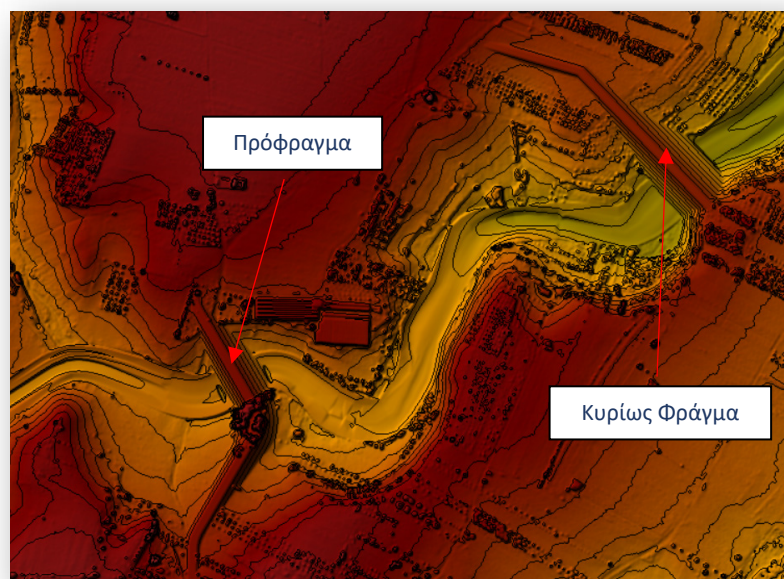
6.3 Τροποποίηση υποβάθρου για μοντελοποίηση φραγμάτων

Όπου υπήρχε η δυνατότητα να μην χρησιμοποιηθούν σύνθετες γεωμετρίες και οντότητες ώστε να δημιουργηθεί ένα μοντέλο χωρίς προβλήματα και αστάθειες, αξιοποιήθηκαν τα εργαλεία τροποποίησης του υποβάθρου ώστε να ενσωματωθούν συγκεκριμένες οντότητες που επηρεάζουν τη ροή, στο υπόβαθρο.

Έτσι επιλέχθηκε η μοντελοποίηση των φραγμάτων και του αναχώματος να γίνει αξιοποιώντας τα εργαλεία τροποποίησης του υποβάθρου, ώστε τα συγκεκριμένα έργα να ενσωματωθούν πρωτογενώς στο υπόβαθρο, με βάση το οποίο γίνεται η υδραυλική επίλυση.



Εικόνα 20 : Εργαλείο τροποποίησης υποβάθρου/ τομή φράγματος



Εικόνα 21 : Μοντελοποίηση φραγμάτων στο HEC-RAS

Για την μοντελοποίηση του υπερχειλιστή, αξιοποιήθηκε όλη η διαθέσιμη πληροφορία από τα σχέδια της μελέτης ώστε να δημιουργηθεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο(βλ. **Εικόνα 22**) σε περιβάλλον civil3d. Στη συνέχεια η επιφάνεια αυτή, ενοποιήθηκε με το terrain του υδραυλικό μοντέλου στο Hec-Ras.



Εικόνα 22 : Τρισδιάστατο μοντέλο υπερχειλιστή


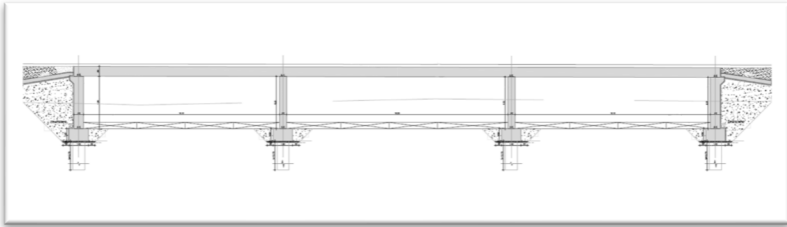

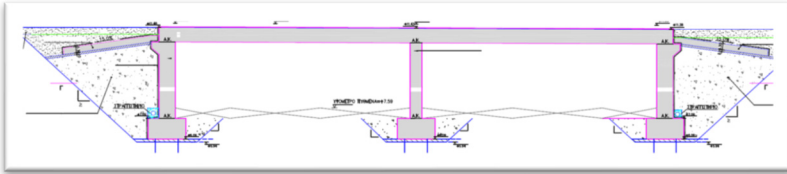


6.4 Τεχνικά έργα και οχετοί


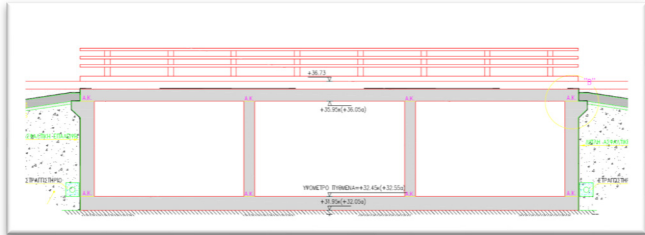

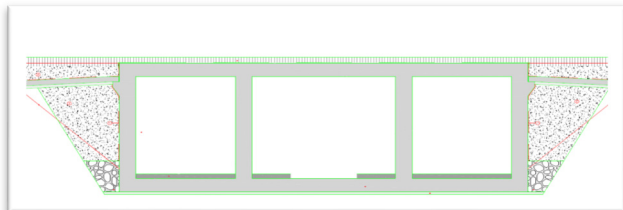

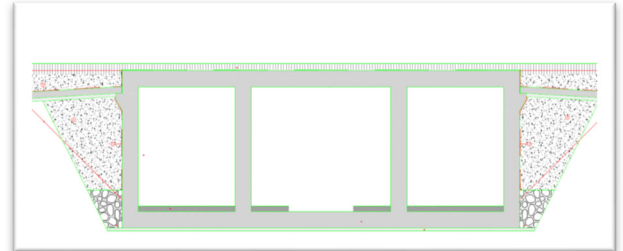
Στην υπό μελέτη περιοχή, με βάση τα προτεινόμενα έργα, θα κατασκευαστούν 6 τεχνικά, στα σημεία που ένας δρόμος διασταυρώνεται με το ρέμα του Ερασίνου. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι θέσεις των τεχνικών, καθώς και η χιλιομετρική τους θέση, με βάση των άξονα διεύθυνσης του ρέματος.



Εικόνα 23 : Χιλιομετρικές θέσεις τεχνικών/ Ρέμα Ερασίνου

Πίνακας 4 : Γεωμετρικά στοιχεία τεχνικών, στο ρέμα του Ερασίνου

Κωδικός/ Χιλιομετρική θέση	Μοντελοποίηση τεχνικών στο HEC-RAS	Κατασκευαστικά σχέδια	Χαρακτηριστικά τεχνικών
T5 Χ.Θ 0+834			Πλάτος τεχνικού: 51.60m Ύψος οχετού: 3.75m Μήκος οχετού: 10.00m Διατομή: Ορθογωνική με δύο μεσόβαθρα
T4 Χ.Θ 2+309			Πλάτος τεχνικού: 21.22m Ύψος οχετού: 3.14m Μήκος οχετού: 9.50m Διατομή: Ορθογωνική με ένα μεσόβαθρο
T3 Χ.Θ 3+764			Πλάτος οχετού: 21.80m Ύψος οχετού: 3.00m Μήκος οχετού: 10.00m Διατομή: Τρίδυμη ορθογωνική

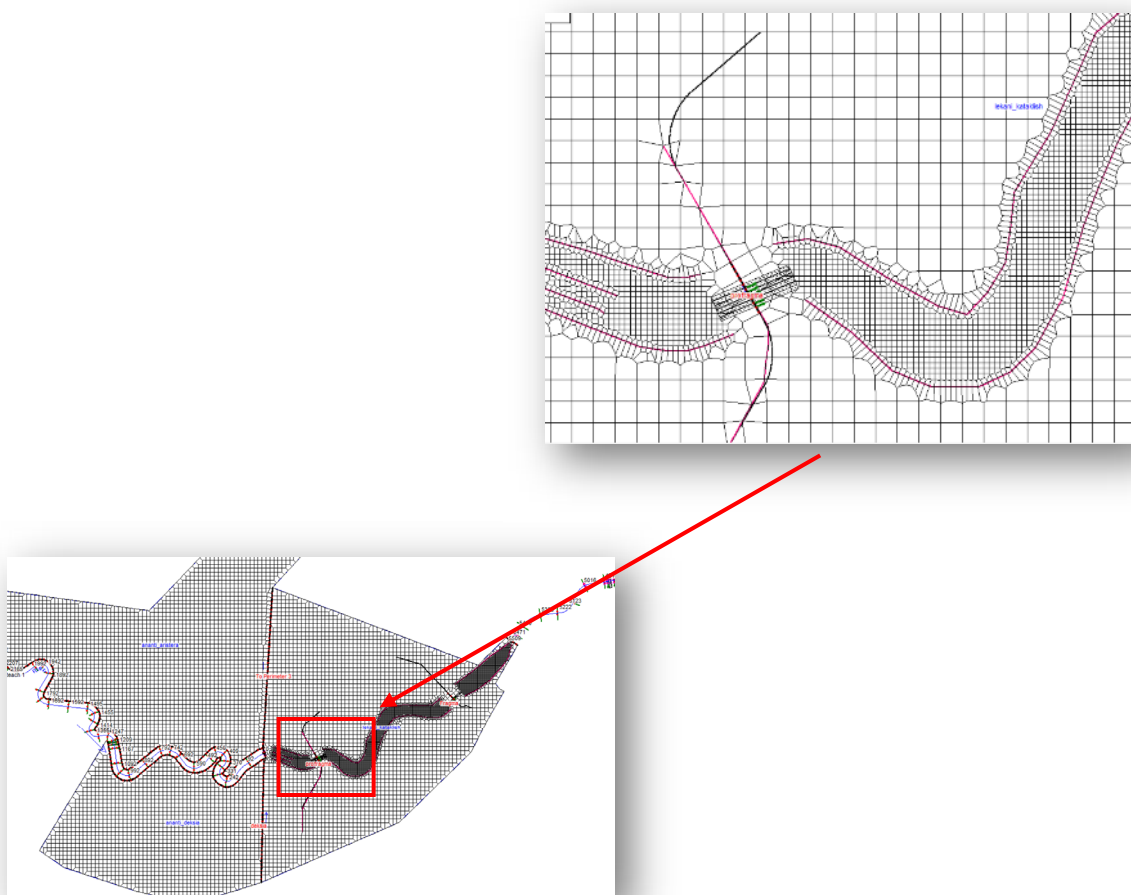
Κωδικός/ Χιλιομετρική θέση	Μοντελοποίηση τεχνικών στο HEC-RAS	Κατασκευαστικά σχέδια	Χαρακτηριστικά τεχνικών
T1 Χ.Θ 4+888			<p>Πλάτος οχετού: 17.30m Ύψος οχετού: 3.50m Μήκος οχετού: 10.00m Διατομή: Τρίδυμη ορθογωνική</p>
TA1 Χ.Θ 8+321			<p>Πλάτος οχετού: 17.00m Ύψος οχετού: 5.55m Μήκος οχετού: 10.00m Διατομή: Τρίδυμη ορθογωνική</p>
TA2 Χ.Θ 9+324			<p>Πλάτος οχετού: 17.00m Ύψος οχετού: 5.55m Μήκος οχετού: 10.00m Διατομή: Τρίδυμη ορθογωνική</p>

6.5 Πλέγμα και υπολογιστικό βήμα

Η αναπαράσταση των δισδιάστατων γεωμετριών (2d flow areas) γίνεται με την επιλογή κατάλληλου πλέγματος, μέσω του οποίου δίνεται υψομετρική πληροφορία και στη συνέχεια επιλύεται το κατάλληλο σχήμα πεπερασμένων διαφορών. Πολλά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιούν πλέγματα στα οποία το κάθε κελί αντιστοιχίζεται σε μια μόνο τιμή υψόμετρου η εναλλακτικά σε τρεις τιμές (μία σε κάθε κορυφή) αν τα κελιά είναι τριγωνικά. Το *Hec-Ras* χρησιμοποιεί μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση μέσω της οποίας, τα κελιά του πλέγματος δεν αντιστοιχίζονται σε ένα μόνο υψόμετρο αλλά είναι μια πιστή αναπαράσταση του υψομετρικού υποβάθρου. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερης διάστασης κελιά, χωρίς να μειώνεται η ακρίβεια αναπαράστασης του υποβάθρου.

Τα κελιά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική ήταν διαστάσεων 20x20m. Στα σημεία που παρατηρούνται μεγάλες ταχύτητες και η ελεύθερη επιφάνεια του νερού εμφανίζει μεγάλες κλίσεις, η διάσταση του πλέγματος πρέπει να είναι μικρότερη ώστε να μπορούν να προσομοιωθούν με ακρίβεια οι αλλαγές της ροής. (Shustikova, C Neal, Domeneghetti, & Castellarin, 2019)

Για αυτό το λόγο κρίθηκε σκόπιμο, εντός της κοίτης του ρέματος που παρατηρούνται μεγάλες ταχύτητες ροής, να χρησιμοποιηθεί πλέγμα διαστάσεων 5m x 5m. Επιπλέον στα σημεία του υποβάθρου, τα οποία αποτελούν εμπόδιο στη ροή, όπως αναχώματα κ.λπ. σχεδιάστηκαν break lines, ώστε η δημιουργία του πλέγματος τοπικά να τροποποιηθεί και τα κελιά να ευθυγραμμιστούν με αυτές τις γραμμικές οντότητες.



Εικόνα 24 : Πλέγμα διαστάσεων 20x20 & 5x5

Στη συνέχεια επιλέχθηκε το χρονικό βήμα, βάσει του οποίου, έγινε η χρονική διακριτοποίηση του μοντέλου. Η επιλογή του έγινε με γνώμονα το κριτήριο Courant

- $C = v \frac{dT}{dx} \leq 1$ για τις εξισώσεις Saint Venant
- $C = v \frac{dT}{dx} \leq 2$ για τις εξισώσεις Diffusion Wave

Όπου :

C ο αριθμός courant

v η ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος

dT το χρονικό βήμα

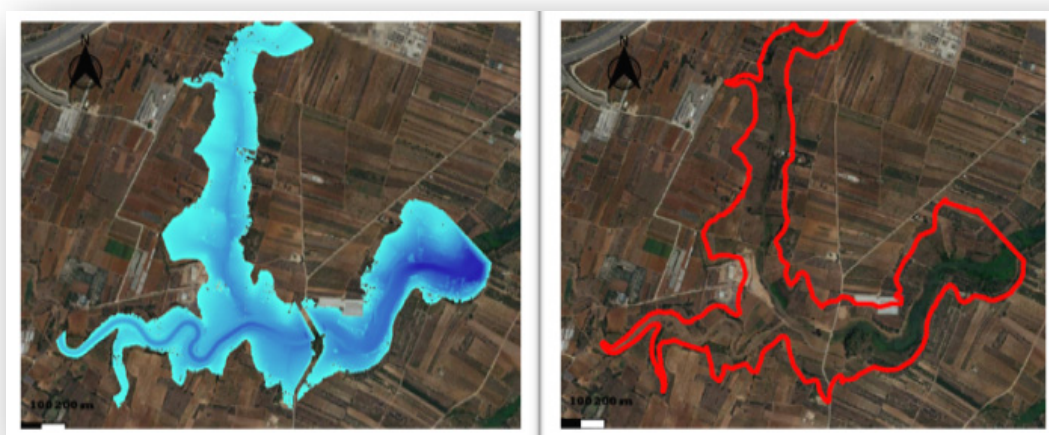
dx η διάσταση του κελιού

Σε κάποια σημεία τοπικά μπορεί να δημιουργηθούν μεγάλες ταχύτητες που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα αλλά μπορεί να δημιουργήσουν αστάθειες στο μοντέλο. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε μετά από πολλές διερευνητικές προσομοιώσεις το χρονικό βήμα να πάρει την τιμή 0,5sec. Η τιμή αυτή είναι αρκετά "συντηρητική", με βάση το κριτήριο courant και τις ταχύτητες ροής που αναπτύσσονται στο μεγαλύτερο κομμάτι του μοντέλου, αλλά γίνεται για λόγους ευστάθειας του μοντέλου.

7 ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

7.1 Υδραυλικοί υπολογισμοί των σχεδιαζόμενων έργων

Στο υδροδυναμικό μοντέλο που εφαρμόστηκε, στη παρούσα διπλωματική, ενσωματώθηκαν όλα τα υπό κατασκευή αντιπλημμυρικά έργα στην περιοχή του ρέματος Ερασίνου. Το σενάριο για το οποίο έγινε διερεύνηση της επάρκειας αυτών των έργων, ήταν ένα πλημμυρικό φαινόμενο περιόδου επαναφοράς $T=50$ ετών, η οποία αποτελεί εξάλλου και την πλημμύρα σχεδιασμού αυτών των έργων. Οι παροχές αιχμής των πλημμυρογραφημάτων που χρησιμοποιήθηκαν, για το ρέμα Ερασίνου και το ρέμα Αγ. Γεωργίου είναι $476,16 \text{ m}^3/\text{sec}$ και $247,4 \text{ m}^3/\text{sec}$ αντίστοιχα. Το κυρίως φράγμα ανάσχεσης συγκρατεί το μεγαλύτερο ποσοστό του πλημμυρικού κύματος, παροχετεύοντας κατάντη, μέσω του δίδυμου οχετού, $204 \text{ m}^3/\text{sec}$. Η συνολική πλημμυρική λεκάνη κατάκλισης (**Εικόνα 25**) που δημιουργείται, από τα δύο φράγματα ανάσχεσης, καταλαμβάνει έκταση 670.000 m^2



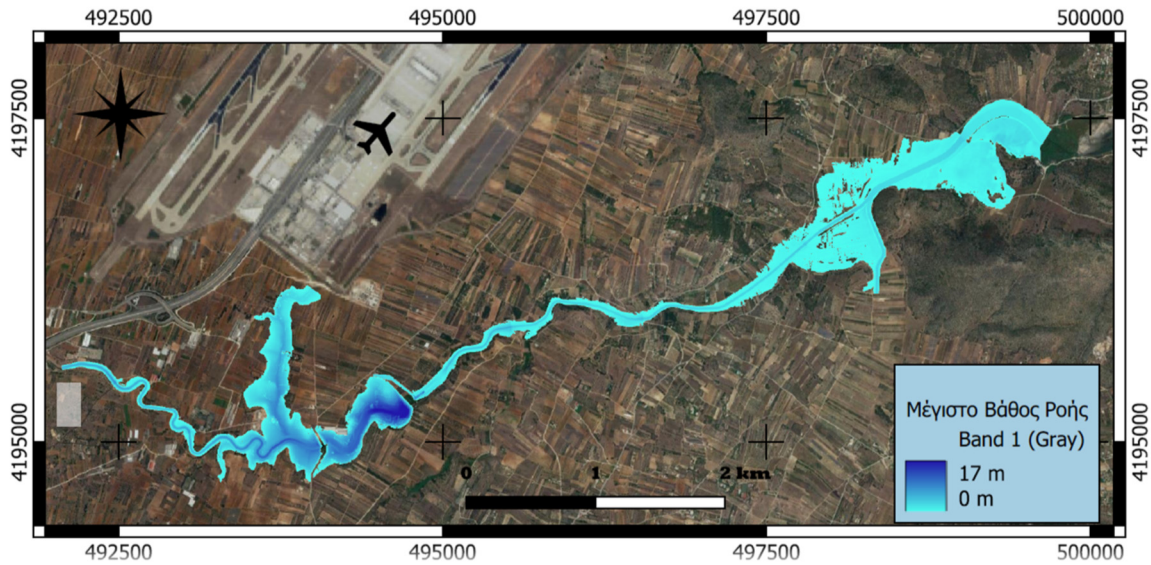
Εικόνα 25 : Περιοχή κατάκλισης πλημμύρας/ Σύγκριση Υδραυλικής προσομοίωσης & μελέτης

Πιο συγκεκριμένα, οι περιοχές πλημμυρικής κατάκλισης εκατέρωθεν του κύριου κλάδου του ρέματος είναι πολύ περιορισμένες στο ανάντη τμήμα διεύθετησης (Χ.Θ. 8+000m - Χ.Θ. 9+800m). Από την Χ.Θ. 8+000m και κατάντη, ξεκινά η πλημμυρική λεκάνη κατάκλισης που δημιουργεί το πρόφραγμα. Στη συνέχεια δημιουργείται η κύρια λεκάνη κατάκλισης ανάμεσα στο κυρίως φράγμα και στο πρόφραγμα η οποία καταλαμβάνει έκταση 240.000 m^2 και ο αποθηκευτικός της όγκος είναι $1,9 \text{ εκ. m}^3$.

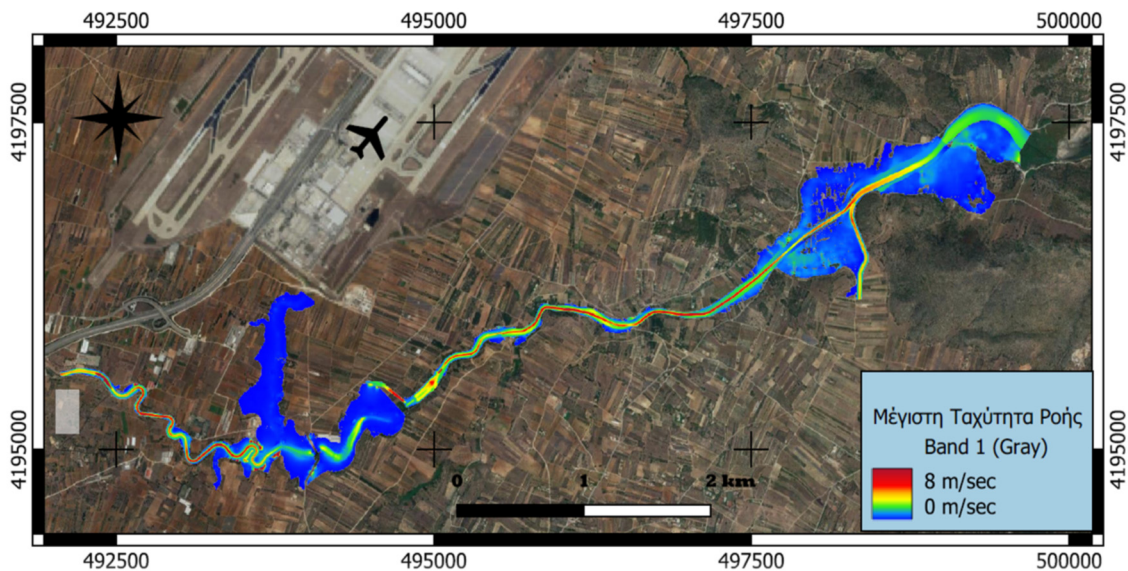
Κατάντη του φράγματος, η διευθετημένη κοίτη με συρματοκιβώτια επαρκεί, και δεν έχουμε περιοχές πλημμύρας έως το σημείο της συμβολής του ρέματος Ερασίνου με το ρέμα Αγ. Γεωργίου. Από το σημείο αυτό (Χ.Θ. 2+300m) και κατάντη, ξεκινάνε περιοχές εκατέρωθεν του κυρίως κλάδου του ρέματος η οποίες πλημμυρίζουν. Παρόλα αυτά, τα βάθη και η ταχύτητες ροής παραμένουν σε χαμηλές τιμές (λιγότερο από 1 m & $0.5 \text{ m}/\text{sec}$ αντίστοιχα) και σε συνδυασμό με την οικιστική χρήση της περιοχής (καλλιέργειες κτλ) δεν αποτελούν ιδιαίτερο κίνδυνο.

Το ανάχωμα προστασίας του αρχαιολογικού χώρου, δεν υπερπηδάται και ο κύριος όγκος της ροής συγκρατείται εντός της κοίτης. Παρόλα αυτά, η περιοχή του αρχαιολογικού χώρου, κατακλιζεται από το πλημμυρικό κύμα που έχει διαφύγει στις πιο ανάντη περιοχές. Τα βάθη ροής και οι ταχύτητες ροής παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται χάρτες με τα βάθη και τις ταχύτητες ροής. Αξίζει να σημειωθεί ότι, βάθη μικρότερα από 0.6 m και ταχύτητες ροής μικρότερες από 0.6 m/sec, δεν αποτελούν κίνδυνο για τον άνθρωπο. (ASCE, 1952)

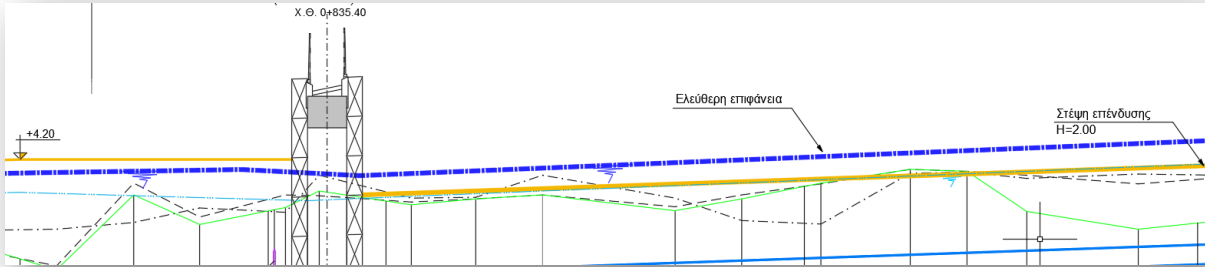


Εικόνα 26 : Βάθος ροής για πλημμυρογράφημα T=50 ετών

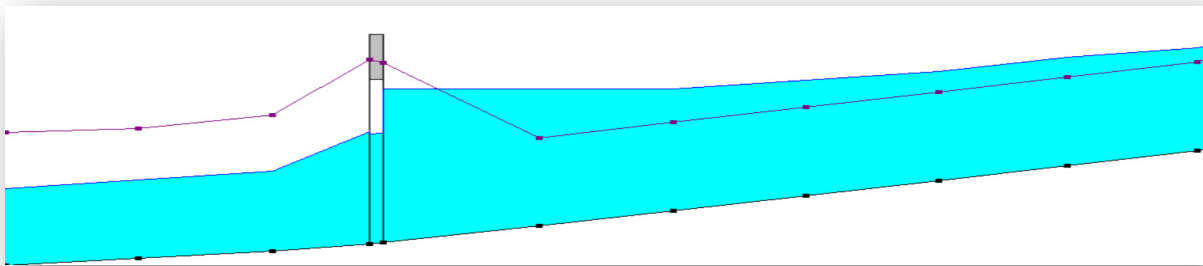


Εικόνα 27: Ταχύτητα ροής για πλημμυρογράφημα T=50 ετών

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το τμήμα στις Χ.Θ. 0+834 έως 1+500, ανάντη του τεχνικού Τ5, δεν είναι επαρκές, καθώς η ελεύθερη επιφάνεια ξεπερνάει την στέψη της διαμορφωμένης κοίτης. Παρακάτω παρουσιάζεται η μηκοτομή της υδραυλικής προσομοίωσης καθώς αντίστοιχα και της μελέτης, που επιβεβαιώνει το συμπέρασμα αυτό. Το πλημμυρικό κύμα που διαφεύγει από το σημείο αυτό κατακλύζει τις πλευρικές περιοχές και ένα τμήμα του αρχαιολογικού χώρου.



Εικόνα 28: Μηκοτομή Μελέτης χ.θ. 0+834 έως 1+1500

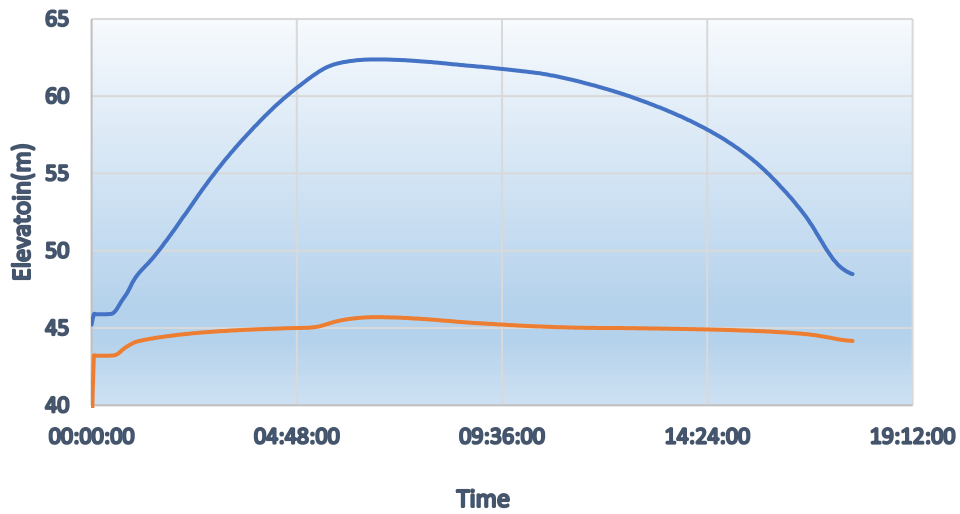


Εικόνα 29 : Μηκοτομή υδραυλικής προσομοίωσης χ.θ. 0+834 έως 1+1500

Ο κεντρικός δίδυμος αγωγός του φράγματος αποτελεί ένα από τα βασικότερα στοιχεία του σχεδιασμού του, καθώς μέσω αυτού διαδίδεται μέρος της πλημμυρικής παροχής και το φράγμα δεν υπερχειλίζει. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να γίνει μια εκτενέστερη ανάλυση για τα χαρακτηριστικά της ροής του αγωγού. Ο άντυγας του οχετού στην είσοδο είναι +49.00 m και στην έξοδο +48.00m.

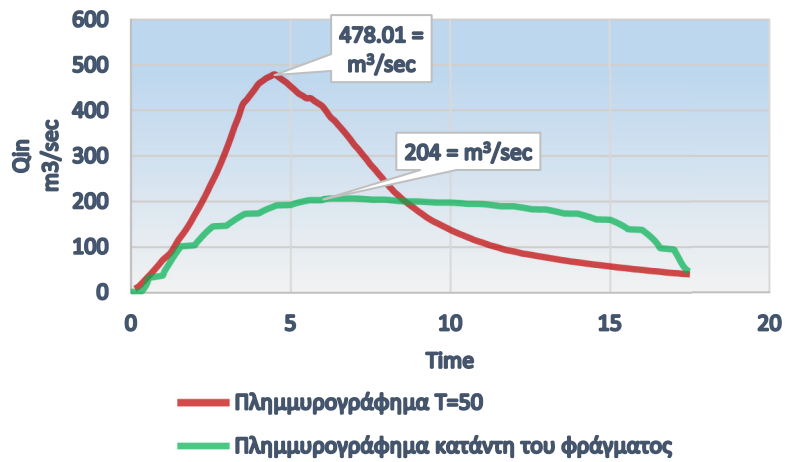
Στη παρακάτω εικόνα, φαίνεται το βάθος ροής στην είσοδο και στην έξοδο του κεντρικού οχετού του φράγματος ανάσχεσης πλημμυρών, μέσω του εργαλείου(stage and flow hydrograph) που προσφέρει το λογισμικό. Ενώ στο στόμιο εισόδου έχουμε πλήρη βύθιση του οχετού, στο στόμιο εξόδου παρατηρείται πολύ μικρό βάθος ροής(1m). Επομένως γίνεται σαφές ότι ο οχετός διαμέτρου 3,5m, λειτουργεί χωρίς υπερπλήρωση. Ο τύπος της ροής που περιγράφει τη συγκεκριμένη περίπτωση λέγεται (**inlet control**) και υποδηλώνει ότι η παροχετευτικότητα του οχετού καθορίζεται από το ανάντη στόμιο.

Stage and Flow Hydrograph



Εικόνα 30 : Οχετός φράγματος (Stage and flow hydrograph)

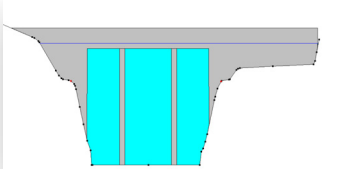
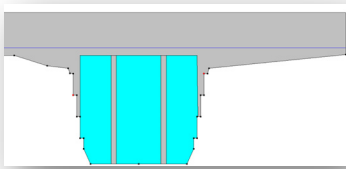
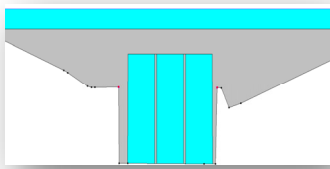
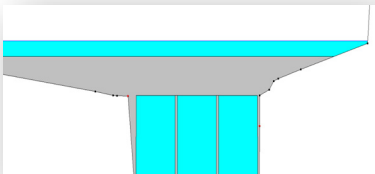
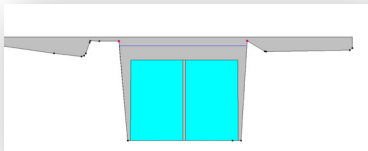
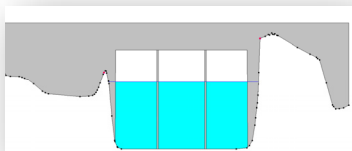
Επιπλέον κρίθηκε σκόπιμο να γίνει μια σύγκριση του πλημυρογραφήματος εισόδου ανάντη του φράγματος με το πλημυρογράφημα εκροής κατόντη. Παρατηρείται ότι ο οχετός, κρατάει μια σταθερή παροχή (βλ. **Εικόνα 31**) $204\text{m}^3/\text{sec}$, για το μεγαλύτερο διάστημα του πλημμυρικού γεγονότος, επιμερίζοντας την αιχμή σε μεγαλύτερο χρόνο.



Εικόνα 31 : Σύγκριση πλημυρογραφημάτων : α) $T=50$ και β) πλημυρογραφήματος εκροής του φράγματος

Μοντελοποίηση των τεχνικών

Στη περιοχή μελέτης κατασκευάζονται 6 τεχνικά. Από την υδραυλική προσομοίωση προκύπτει ότι μόνο το T1 και το T3 δεν είναι επαρκή για τη διόδευση του πλημμυρικού κύματος καθώς η στάθμη του νερού ξεπερνάει τη στέψη τους κατά περίπου 0.5 m.

Τεχνικό TA2	Τεχνικό TA1	Τεχνικό T1
		
Τεχνικό T3	Τεχνικό T4	Τεχνικό T5
		

8 ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

8.1 Γενικά

Παρόλα τα αμέτρητα πλεονεκτήματα που έχει η κατασκευή μεγάλων φραγμάτων, η αστοχία τους, δημιουργεί πλημμυρικά φαινόμενα με τις πιο καταστροφικές συνέπειες (**Xiong, 2011**). Ως αστοχία του φράγματος ορίζεται η ολική κατάρρευση του ή κάποιου τμήματος του, δημιουργώντας ανεξέλεγκτα πλημμυρικά φαινόμενα στις κατάντη περιοχές (**George & Nair, 2015**)

Μια από τις πιο σημαντικές συνέπειες είναι η απώλεια μεγάλου αριθμού ανθρώπινων ζωών, καθώς τα φαινόμενα αυτά εξελίσσονται πολύ γρήγορα μην αφήνοντας τον απαραίτητο χρόνο για αντιδράσεις.

Ως εκ τούτου, η ανάλυση και η προσομοίωση σεναρίων αστοχίας κρίνεται απαραίτητη για την κατανόηση της σοβαρότητας της πλημμύρας κατά την αστοχία και τον σαφή εντοπισμό των περιοχών που απειλούνται. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει ένας πιο σωστός πολεοδομικός σχεδιασμός που θα λαμβάνει υπόψιν τις περιοχές πλησίον του φράγματος που κινδυνεύουν, και θα τους αποδίδει αντίστοιχα τις κατάλληλες χρήσεις γης ώστε να ελαχιστοποιούνται οι συνέπειες.

Σκοπός της μοντελοποίησης του μηχανισμού θραύσης του φράγματος είναι :

- ο υπολογισμός του υδρογραφήματος κατάντη του φράγματος, εξαιτίας της αστοχίας
- η δημιουργία των χαρτών πλημμύρας στις κατάντη περιοχές.

Τα πιο ευρέως διαδεδομένα φράγματα είναι τα χωμάτινα, λόγω της καταλληλότητάς τους για κάθε τύπο θεμελίωσης, της απλής σχετικά κατασκευής του αλλά και του σημαντικά χαμηλού κόστους. (**Maddamsetty et al., 2010**).

Μελέτες σε πάνω από 1000 χωμάτινα φράγματα έχουν δείξει ότι οι σημαντικότερες αιτίες αστοχίας των χωμάτινων φραγμάτων είναι η υπερπήδηση (overtopping) και η διασωλήνωση (ripping). Η αστοχία λόγω overtopping συμβαίνει κυρίως στο κατάντη πρηνές του φράγματος ενώ το ripping μπορεί να εμφανιστεί σε όλα τα σημεία της διατομής του φράγματος.

Η μοντελοποίηση στο HEC-RAS δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να μοντελοποιήσει μόνο τις αστοχίες λόγω overtopping και ripping.

8.2 Θεωρητικό πλαίσιο

Η εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της θραύσης ενός φράγματος, όπως επίσης και της χρονικής εξέλιξης του φαινομένου είναι απαραίτητα ώστε να μοντελοποιηθεί σωστά η αστοχία του φράγματος και να προσεγγίσει όσο το δυνατόν καλύτερα ένα πραγματικό σενάριο. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αφορούν την θέση στην οποία θα συμβεί το ρήγμα στο σώμα του φράγματος και το τελικό σχήμα που θα πάρει ενώ η χρονική παράμετρος αφορά το συνολικό χρόνο στον οποίο, η αστοχία θα πάρει την πλήρη μορφή της. Για την εκτίμηση των παραμέτρων αυτών, χρησιμοποιούνται μοντέλα παλινδρόμησης (regression equations), σκοπός των οποίων είναι, να εξακριβωθεί η συναρτησιακή σχέση, μεταξύ των χαρακτηριστικών του φράγματος και των παραμέτρων της θραύσης του. (**Wahl, 1998**)

Τα μοντέλα αυτά αναπτύχθηκαν, αξιοποιώντας όλα τα ιστορικά γεγονότα αστοχίας χωμάτινων φραγμάτων και επιχειρούν να συσχετίσουν τη γεωμετρία (ύψος στέψης, πλάτος στέψης κτλ) και τον τύπο του φράγματος (αργιλικός πυρήνας κτλ), με τον τρόπο που αστοχούν. Τα σημαντικότερα μοντέλα τα οποία έχουν ενσωματωθεί και στο HEC-RAS, παρουσιάζονται παρακάτω :

- Froehlich (1995a)
- Froehlich (2008)
- MacDonald and Langridge-Monopolis (1984)
- Von Thun and Gillette (1990)
- Xu and Zhang (2009)

8.3 Υπερπήδηση (Overtopping)

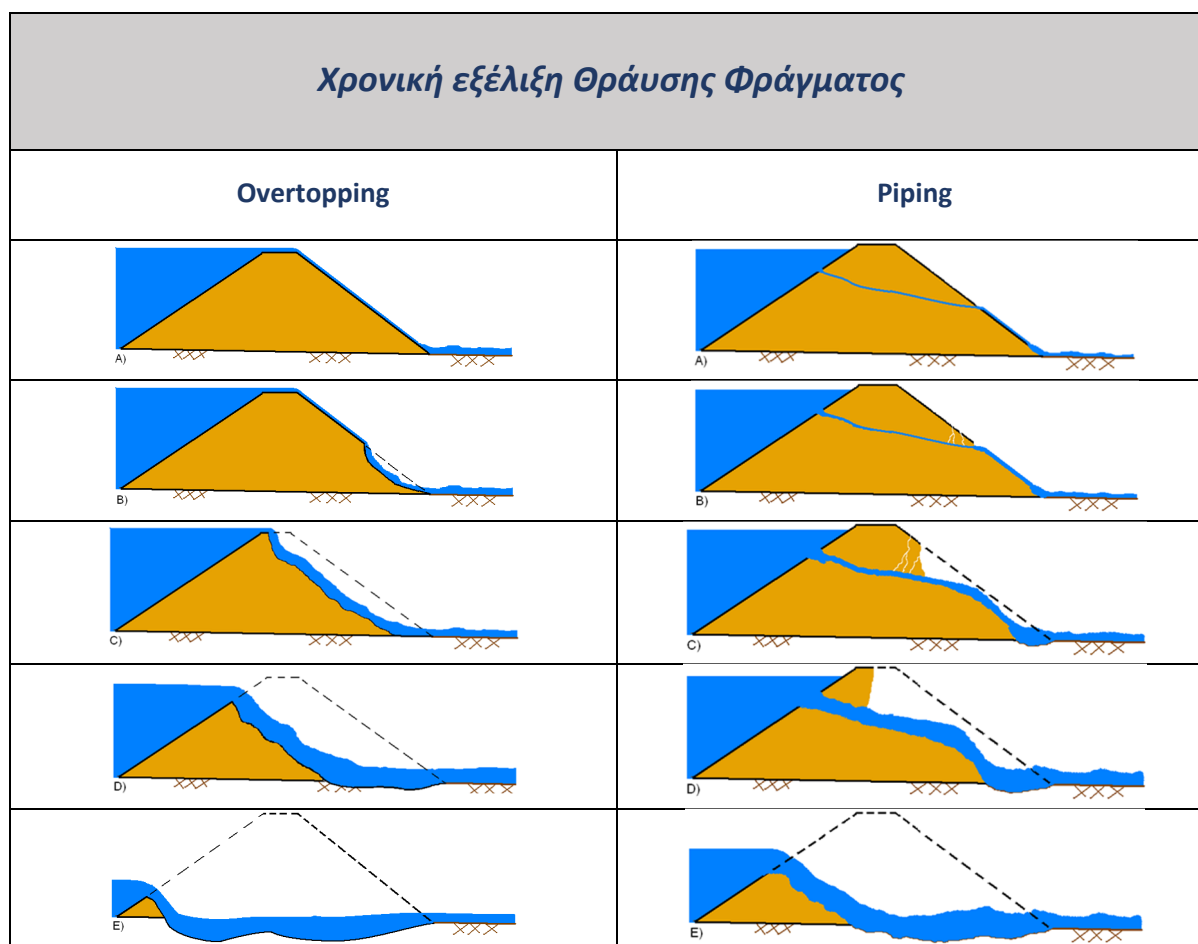
Κατά τη διάρκεια της αστοχίας ενός χωμάτινου φράγματος λόγω υπερπήδησης, το φαινόμενο ξεκινά με την διάβρωση του κατάντη πρανούς (βλ. Εικόνα 32). Η στέψη του φράγματος λειτουργεί σαν υπερχειλιστής, καθώς το νερό υπερπηδά το σημείο αυτό. Ο τύπος του υπερχειλιστή που προσομοιώνει το φαινόμενο αυτό, στην δεδομένη χρονική στιγμή λέγεται broad crested weir($C=2.6$). Στη συνέχεια καθώς η διάβρωση συνεχίζεται και φτάνει έως την στέψη, μειώνοντας το πλάτος της, ο τύπος υπερχειλιστή που προσομοιώνει το φαινόμενο αυτή την χρονική στιγμή, λέγεται sharp crested weir($C=3.2$). Στη φάση αυτή, μπορεί να προκύψει ξαφνική αστοχία μέρους της στέψης του φράγματος, αυξάνοντας ακόμα περισσότερο την ροή. Ο τύπος της ροής, συνεχίζει την δεδομένη χρονική στιγμή, να μοιάζει με ροή πάνω από sharp crested weir($C=3.2$). Καθώς το φαινόμενο εξελίσσεται και η διάβρωση επηρεάζει αντίστοιχα το ανάντη πρανές, ο τύπος της ροής προσιδιάζει ξανά έναν υπερχειλιστή broad crested($C=2.6$). Ο συγκεκριμένος τύπος ροής περιγράφει το φαινόμενο από τη στιγμή αυτή και μέχρι η διάβρωση να εξαφανίσει όλη τη μάζα του φράγματος, φτάνοντας στη φυσική κοίτη του ρέματος. Η χρονική στιγμή που θα συμβεί η αιχμή του πλημμυρογραφήματος εξόδου κατάντη του φράγματος είναι ένα πολύ πολύ σημαντικό μέγεθος, με βάση το οποίο γίνεται η επιλογή του συντελεστή C . Η επιλογή πρέπει να γίνει λαμβάνοντας υπόψιν, την μορφή που θα έχει πάρει το ρήγμα, την στιγμή που θα εμφανιστεί η μέγιστη παροχή. Η εκτίμηση αυτή βασίζεται στον διαθέσιμο όγκο του ταμιευτήρα, καθώς ταμιευτήρες μικρού όγκου θα παρουσιάσουν την αιχμή τους πριν η διάβρωση πάρει την πλήρη μορφή της, ενώ ταμιευτήρες μεγάλου όγκου θα εμφανίσουν την αιχμή όταν η διάβρωση εξελιχθεί πλήρως.

8.4 Piping (Διασωλήνωση)

Η διασωλήνωση (ripping) δημιουργείται, όταν το νερό διαπερνά το φράγμα σε κάποιο σημείο, με ρυθμό τέτοιο ώστε να μπορεί να μεταφέρει υλικό από την μάζα του φράγματος. Ως αποτέλεσμα καθώς το φαινόμενο εξελίσσεται, η οπή που δημιουργείται όλο και αυξάνεται με αποτέλεσμα μεγαλύτερη ροή νερού και μεγαλύτερη διάβρωση. Ο τύπος της ροής που περιγράφει αυτό το φαινόμενο είναι η ροή υπό πίεση σε έναν κλειστό αγωγό. Η διάβρωση ξεκινά από το κατάντη πρανές του φράγματος (βλ. Εικόνα 32), ως αποτέλεσμα της ροής που εξέρχεται από την σχηματισμένη οπή. Καθώς το φαινόμενο εξελίσσεται και η οπή μεγαλώνει, το υλικό που βρίσκεται ακριβώς από επάνω, αρχίζει να καταρρέει, διευρύνοντας την οπή. Όταν η οπή μεγαλώσει αρκετά, το βάρος του υλικού που βρίσκεται από πάνω της, είναι πολύ μεγάλο με αποτέλεσμα την ολική κατάρρευση. Στο σημείο αυτό ο τύπος της ροής αλλάζει και από ροή υπό πίεση περνάει σε ανοιχτή ροή πάνω από υπερχειλιστή broad crested($C=2.6$). Η διάβρωση συνεχίζεται, ανάλογα με τον όγκο νερού του ταμιευτήρα, μέχρι να φτάσει την φυσική κοίτη του ρέματος. Κατόπιν αυτού, αν η ροή συνεχίζεται ακόμα, η διάβρωση του ρήγματος προχωρά κατά πλάτος, μέχρι να εξαντληθεί το υλικό του φράγματος. Το πρόβλημα διασωλήνωσης εμφανίζεται συνήθως σε δύσκολα προς συμπύκνωση σημεία, όπως γύρω από αγωγούς εκκένωσης ή τροφοδοσίας, υπερχειλιστές κοκ.

Σε φράγματα αντιπλημμυρικής προστασίας τα οποία το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου παραμένουν κενά, τα αργιλικά υλικά αποξηραίνονται και συρρικνώνονται με αποτέλεσμα σημαντική μεταβολή του όγκου τους και

δημιουργία δικτύου ρωγμών συρρίκνωσης. Όταν ο ταμιευτήρας πληρωθεί με νερό, αυτό μπορεί να διεισδύσει στις ρωγμές αυτές, δημιουργώντας το φαινόμενο της διασωλήνωσης(**ripping**).



Εικόνα 32: Χρονική εξέλιξη θράυσης φράγματος

Πηγή: Hydraulic reference manual Hec-ras

8.5 Ιστορικά/ Στατιστικά στοιχεία για αστοχίες φραγμάτων

Με βάση τα διαθέσιμα ιστορικά στοιχεία για τις αστοχίες που έχουν συμβεί σε φράγματα, το 34% συνέβη εξαιτίας υπερπήδησης(overtopping), 30% εξαιτίας προβλημάτων στα θεμέλια, 30% εξαιτίας διασωλήνωσης(ripping) και 8% εξαιτίας άλλων αιτιών. Συγκεκριμένα στα χωμάτινα φράγματα οι αιτίες αστοχίας οφείλονται κατά 35% σε υπερπήδηση(overtopping), 38% σε διασωλήνωση(ripping), 21% σε προβλήματα θεμελίων και 6% σε άλλες αιτίες (Costa, 1985)

Στον Πίνακα 5, γίνεται μια πιο λεπτομερής καταγραφή του τρόπου αστοχίας, σε 136 περιπτώσεις μεγάλων χωμάτινων φραγμάτων. Επιπλέον αναφέρεται, κατά πόσον η αστοχία συνέβη κατά την πρώτη λειτουργία του φράγματος. Η πρώτη πλήρωση θεωρείται η πρώτη αληθινή δοκιμή του επιχώματος υπό συνθήκες υδραυλικής φόρτισης. Εάν ένα φράγμα είναι κακώς κατασκευασμένο ή περιέχει ελαττώματα, η πρώτη πλήρωση πιθανότατα θα αποκαλύψει αυτές τις αδυναμίες. Ωστόσο, ορισμένες αστοχίες που οφείλονται στο φαινόμενο της σωλήνωσης, μπορεί να εξελιχθούν αργά με την πάροδο του χρόνου.

Τρόπος αστοχίας	Αριθμός Αστοχιών	Αστοχίες κατά την πρώτη πλήρωση	Αστοχίες κατά τη φάση λειτουργίας
Overtopping	46	6	40
Spillway/gate	16	1	15
Piping through embankment	39	1	38
Piping through foundation	19	1	18
Piping from embankment into foundation	2	0	2
Slides	7	2	5
Earthquakes/ Liquefaction	2	0	2
Unknown	8	1	7
Total number of failures	136		124

Πίνακας 5 : Λόγοι αστοχιών σε χωμάτινα φράγματα

Πηγή: (Nasrat Adamo et al., 2020)

8.6 Μεθοδολογία προσέγγισης

Το σενάριο που εξετάστηκε αφορά την θραύση του κυρίως φράγματος ανάσχεσης πλημμυρών, στην περιοχή Μαρκόπουλο Αττικής.

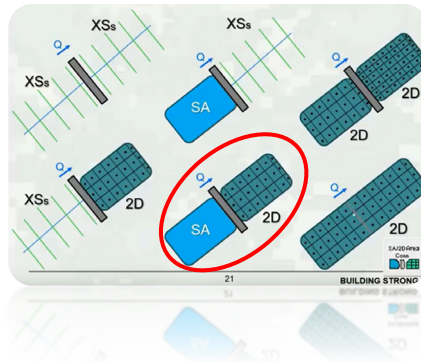
Εξετάστηκαν δύο σενάρια τα οποία αφορούν:

- μια αστοχία από το φαινόμενο της υπερπήδησης (overtopping)
- και μια αστοχία από το φαινόμενο της διασωλήνωσης (piping).

Οι δυνατότητες που δίνει το HEC-ras στον χρήστη, για την μοντελοποίηση της θραύσης ενός φράγματος είναι πολλές (βλ. **Εικόνα 33**). Ο χρήστης μπορεί να συνδυάσει μονοδιάστατες και δυοδιάστατες οντότητες για να στήσει το μοντέλο, ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες και τις ανάγκες του κάθε σεναρίου. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η διάταξη στην οποία :

- ο ταμιευτήρας προσομοιώνεται με μια οντότητα **storage area**
- το φράγμα με μια οντότητα **SA/2d connection**
- η περιοχή κατάντη του φράγματος, προσομοιώνεται εξ ολοκλήρου με μια οντότητα **2dflow area**

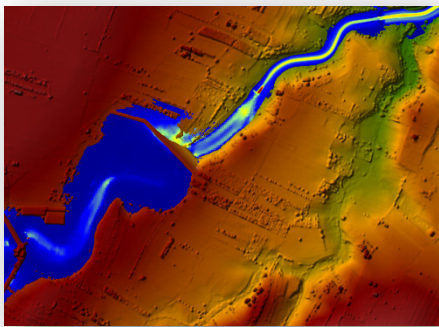
Η συγκεκριμένη διάταξη, λόγω της απλής γεωμετρίας της, συνδυάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως πολύ μικρός χρόνος προσομοίωσης αλλά και μειωμένες αστάθειες στο μοντέλο (Gibson S. , 2015)



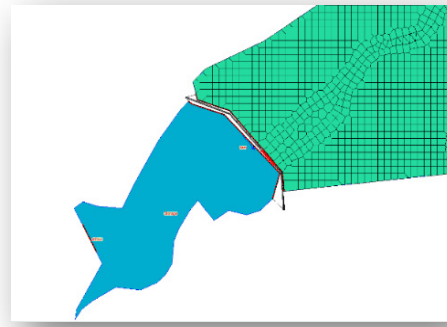
Εικόνα 33 : Τρόποι μοντελοποίησης θραύσης φράγματος στο λογισμικό HEC-ras

πηγή: (US Army Corps of Engineers)

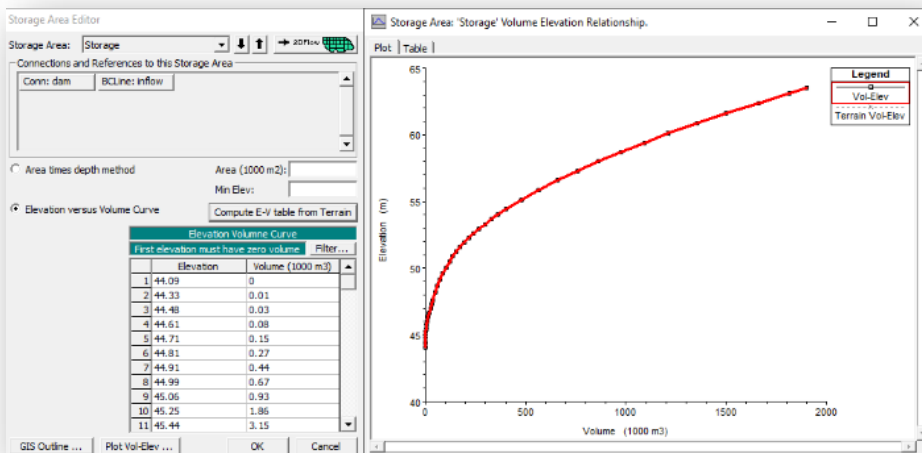
Για την δημιουργία της οντότητας storage area αξιοποιήθηκε ο χάρτης κατάκλισης πλημύρας ανάντη του φράγματος, που προέκυψε από την μοντελοποίηση των αντιπλημμυρικών έργων στο κεφάλαιο 7.1. Αφού σχεδιάστηκε η γεωμετρία, αξιοποιώντας τα εργαλεία που παρέχονται από το λογισμικό, υπολογίστηκε με βάση την καμπύλη στάθμης-όγκου(βλ. Εικόνα 36), ο συνολικός όγκος νερού, την στιγμή που ξεκινάει η αστοχία. Για τη μέγιστη στάθμη +63,5, ο διαθέσιμος όγκος του ταμειευτήρα προκύπτει 1.901.610 m³.



Εικόνα 35: Χάρτης κατάκλισης πλημύρας ανάντη του φράγματος



Εικόνα 34 : Μοντελοποίηση θραύσης



Εικόνα 36 : Καμπύλη στάθμης όγκου της οντότητας storage area

8.7 Εκτίμηση παραμέτρων θραύσης

Για την προσομοίωση της θραύσης ενός φράγματος, είναι απαραίτητο ο χρήστης να εισάγει στο μοντέλο τις παραμέτρους θραύσης. Η εκτίμηση αυτών των παραμέτρων όπως αναφέρθηκε και παραπάνω γίνεται μέσω εξισώσεων/μοντέλων που συσχετίζουν την γεωμετρία του φράγματος με τον τρόπο που αυτό καταρρέει.

Η εκτίμηση των παραμέτρων της θραύσης του φράγματος ανάσχεσης πλημμυρών στο ρέμα Ερασίνου, έγινε με τη μέθοδο του **Froehlich (2008)**, και για τα δύο σενάρια (ripping & overtopping) που εξετάζονται. Οι παράμετροι αυτοί όπως το μέσο πλάτος του ρήγματος, η κλίση των πρανών του και ο χρόνος μέχρι την πλήρη σχηματοποίηση του ρήγματος, χρησιμοποιούνται ως γεωμετρικά δεδομένα κατά την προσομοίωση. Το ύψος της στάθμης του νερού, τη στιγμή της αστοχίας, επιλέχθηκε να είναι στο μέγιστο δυνατό (+63,5) ώστε να εξεταστεί ένα πολύ δυσμενές σενάριο θραύσης. Η περίπτωση αυτή προσομοιώνει μια πραγματική κατάσταση στην οποία ο υπερχειλιστής έχει υποστεί πλήρη απόφραξη και δεν επιτελεί το έργο του.

Τα αποτελέσματα των παραμέτρων θραύσης με βάση τις εξισώσεις του Froehlich 2008 παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Piping		Overtopping	
Center station	400	Center station	390
Final Bottom width	18	Final Bottom width	23
Final Bottom elevation	44.5	Final Bottom elevation	46
Left Side Slope	0.7	Left Side Slope	1
Right Side Slope	0.7	Right Side Slope	1
Breach Weir Coef	3.2	Breach Weir Coef	2.6
Breach Formation Time	0.41	Breach Formation Time	0.44
Piping Coefficient	0.5	Piping Coefficient	-
Initian Piping Elev.	44.6	Initian Piping Elev.	-
Starting WS	63.5	Starting WS	63.5

Εικόνα 37: Τελικό σχήμα του ρήγματος

Εικόνα 38: Τελικό σχήμα του ρήγματος

Πίνακας 6 : Παράμετροι θραύσης φράγματος

8.8 Αποτελέσματα

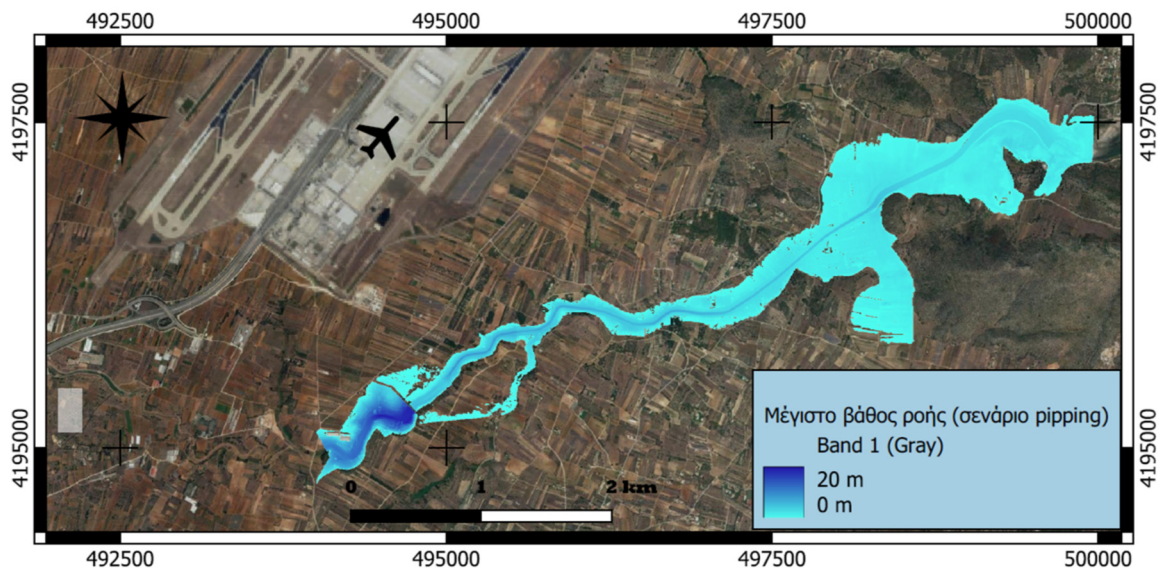
8.8.1 Σενάριο 1^ο - Pipping

Το σενάριο θραύσης φράγματος λόγω διασωλήνωσης, είναι ένα από τα πιθανότερα σενάρια αστοχίας χωμάτινων φραγμάτων. Το νερό διεισδύει μέσω ρωγμών ή διαπερατών στρωμάτων στη θεμελίωση, διαβρώνοντας σταδιακά το υλικό και θέτοντας σε κίνδυνο τη σταθερότητα της κατασκευής. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης του σεναρίου της θραύσης, συνοψίζονται στον κάτωθι πίνακα:

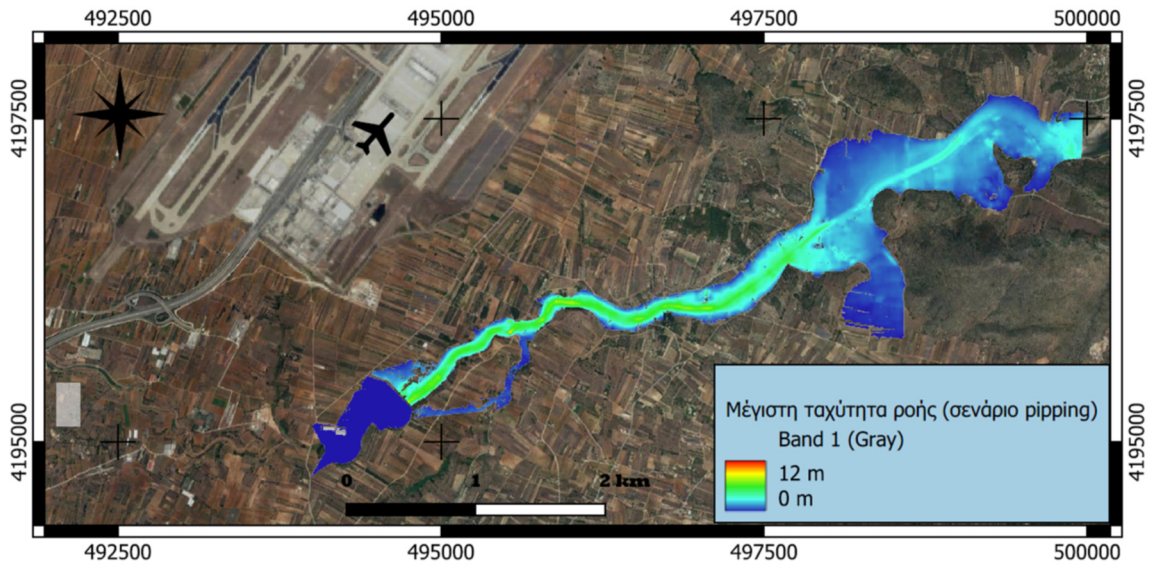
Μέγιστη παροχή θραύσης Q_{max}	3.720,17 m ³ /sec
Χρονική στιγμή εκκίνησης της θραύσης	03:25
Χρονική στιγμή αιχμής	03:46
Άνοιγμα ρήγματος στη βάση του φράγματος	18 m
Στάθμη αρχικής διασωλήνωσης(υψόμετρο οχετού)	+44.5
Χρόνος σχηματισμού του ρήγματος	0.41 h
Στάθμη ταμειυτήρα την στιγμή της θραύσης	+63.5

Στη συνέχεια παρουσιάζονται χάρτες των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την υδραυλική προσομοίωση, καταδεικνύοντας την κίνηση του πλημμυρικού κύματος στις κατάντη περιοχές για την όσο το δυνατόν καλύτερη εκτίμηση των συνεπειών του φαινομένου.

1) Βάθος ροής-ταχύτητες ροής

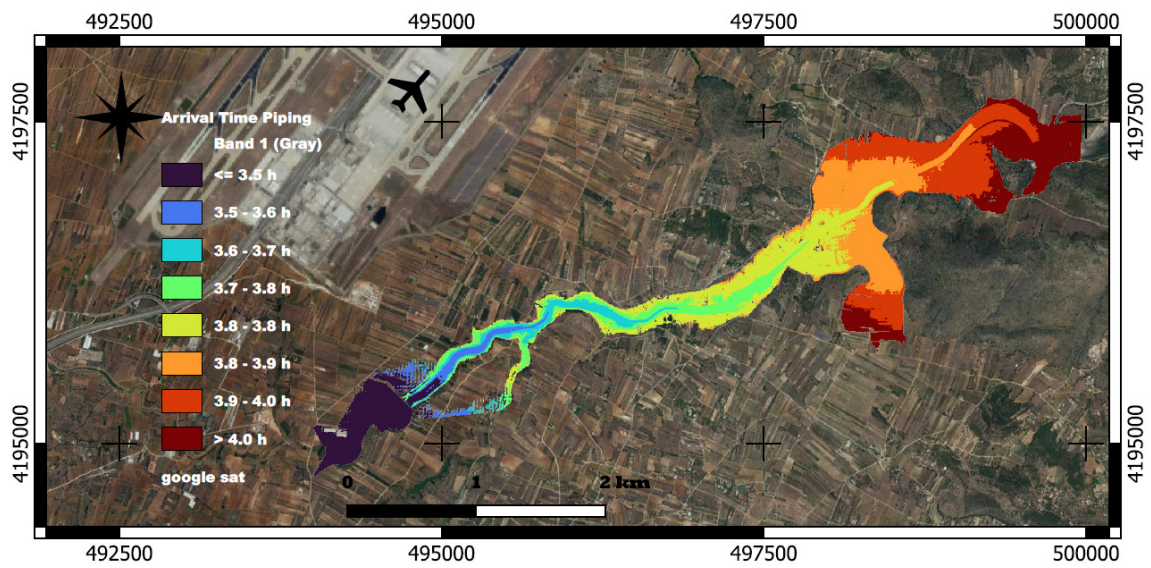


Εικόνα 39 : Μέγιστο βάθος ροής/Pipping



Εικόνα 40 : Μέγιστη ταχύτητα ροής/Piping

2) Χάρτης χρόνου άφιξης πλημμύρας



Εικόνα 41 : Χάρτης χρόνου άφιξης πλημμύρας /Piping

8.8.2 Σενάριο 2^ο - Overtopping

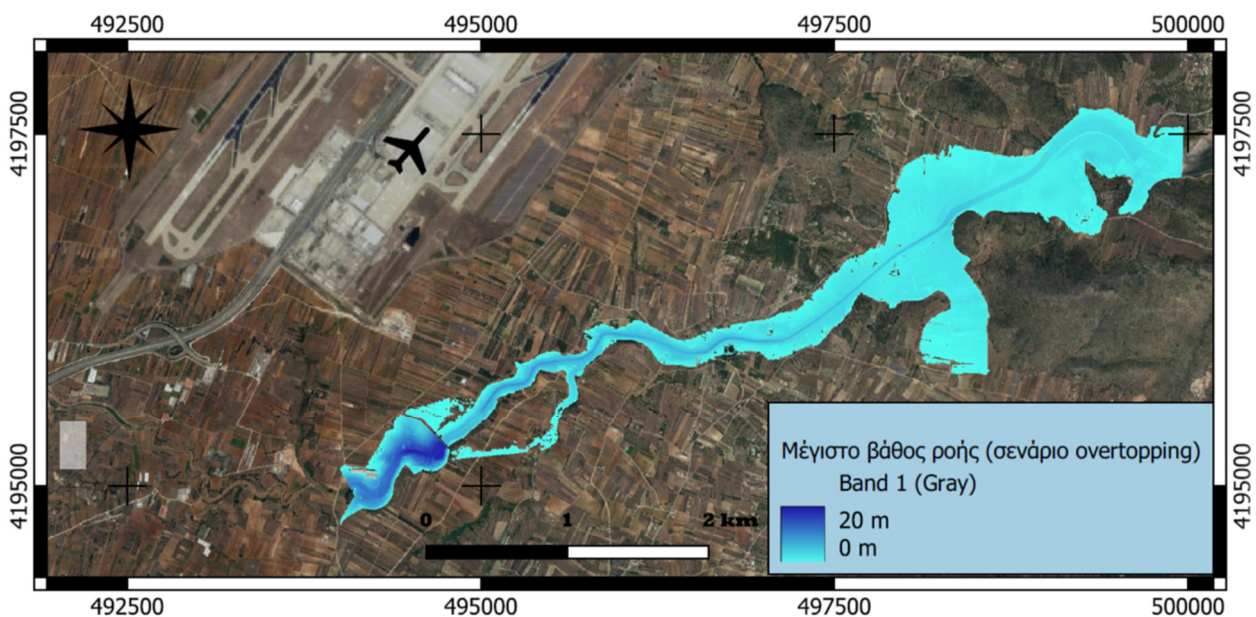
Το σενάριο θραύσης φράγματος λόγω υπερπήδησης είναι μια κοινή αιτία αστοχιών φράγματος, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων ή όταν ο ταμιευτήρας ενός φράγματος γεμίζει πέρα από τη χωρητικότητά του. Η υπερπήδηση συμβαίνει όταν η στάθμη του νερού ανεβαίνει σε επίπεδο υψηλότερο από την στέψη του φράγματος, με αποτέλεσμα το νερό να ρέει πάνω από την κορυφή και να διαβρώνει τη δομή του φράγματος. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης του σεναρίου της θραύσης, συνοψίζονται στον κάτωθι πίνακα:

Μέγιστη παροχή θραύσης Q_{max}	3.329 m ³ /sec
Χρονική στιγμή εκκίνησης της θραύσης	03:25
Χρονική στιγμή αιχμής	03:43
Άνοιγμα ρήγματος στη βάση του φράγματος	23 m
Χρόνος σχηματισμού του ρήγματος	0.44 h
Στάθμη ταμιευτήρα την στιγμή της θραύσης	+63.5

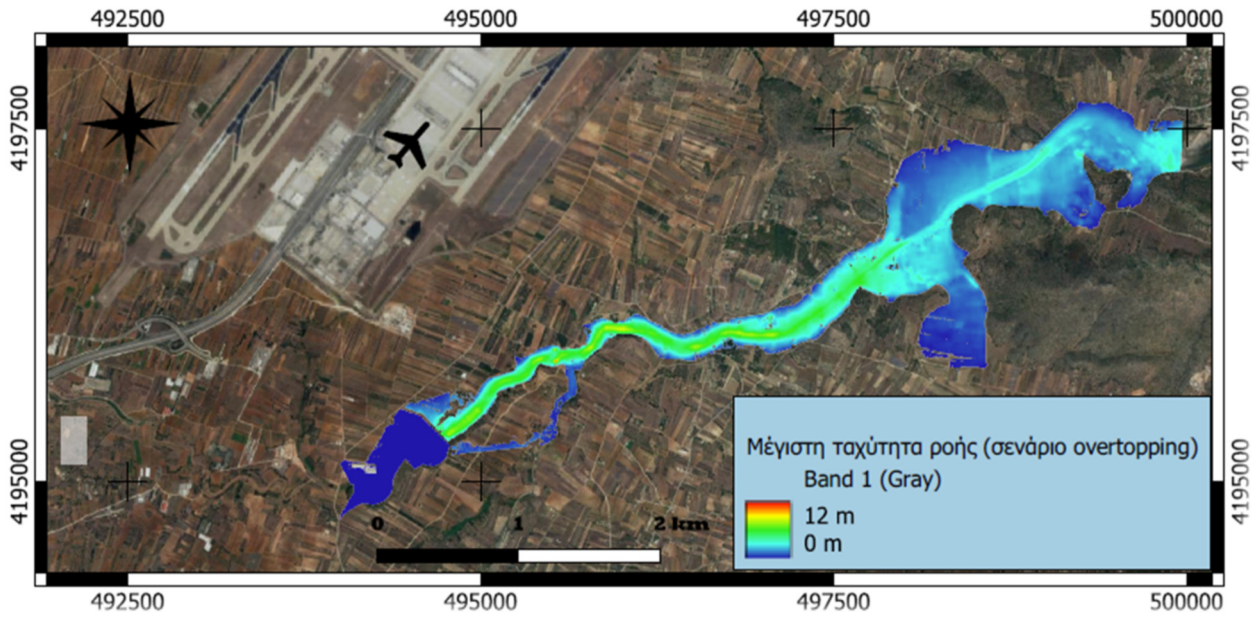
Στη συνέχεια παρουσιάζονται χάρτες των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την υδραυλική προσομοίωση, καταδεικνύοντας την κίνηση του πλημμυρικού κύματος στις κατάντη περιοχές για την όσο το δυνατόν καλύτερη εκτίμηση των συνεπειών του φαινομένου.

Απώτερος στόχος είναι να αξιολογήσουμε τις πιθανές συνέπειες μιας θραύσης του φράγματος λόγω υπερπήδησης και να εντοπίσουμε στρατηγικές που μπορούν να εφαρμοστούν για τη μείωση του κινδύνου.

1) Βάθος ροής-ταχύτητες ροής

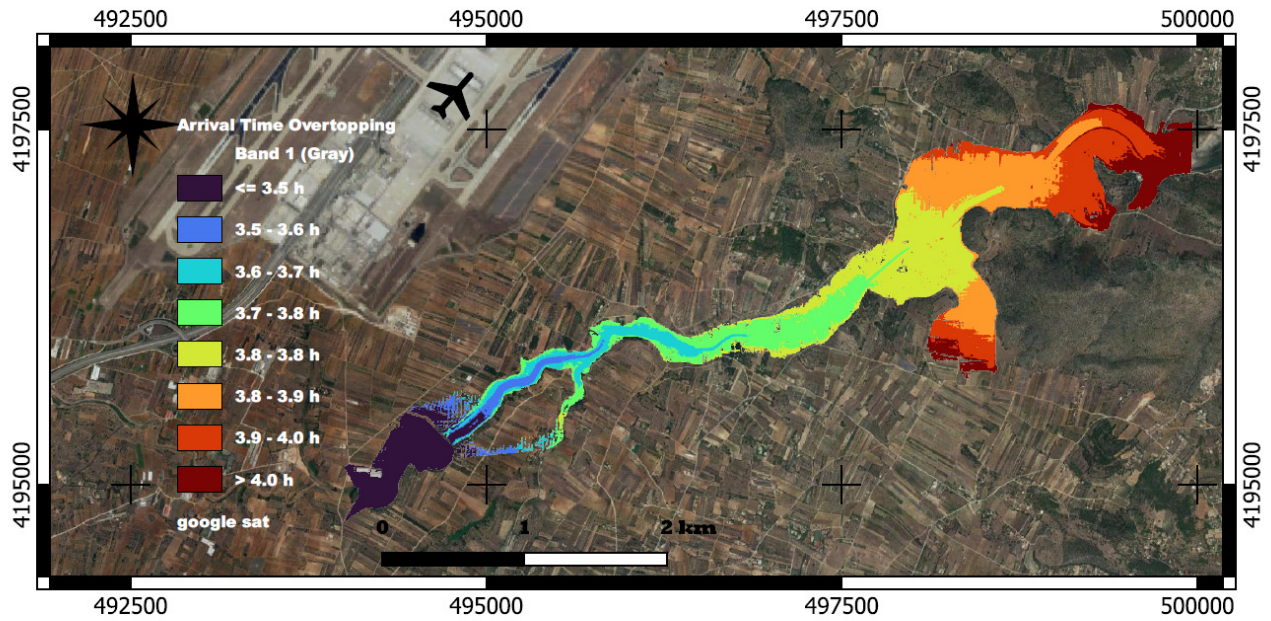


Εικόνα 42: Μέγιστο βάθος ροής/ Overtopping



Εικόνα 43: Μέγιστη ταχύτητα ροής/ Overtopping

2) Χάρτης χρόνου άφιξης πλημμύρας



Εικόνα 44 : Χάρτης χρόνου άφιξης πλημμύρας /Overtopping

8.9 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

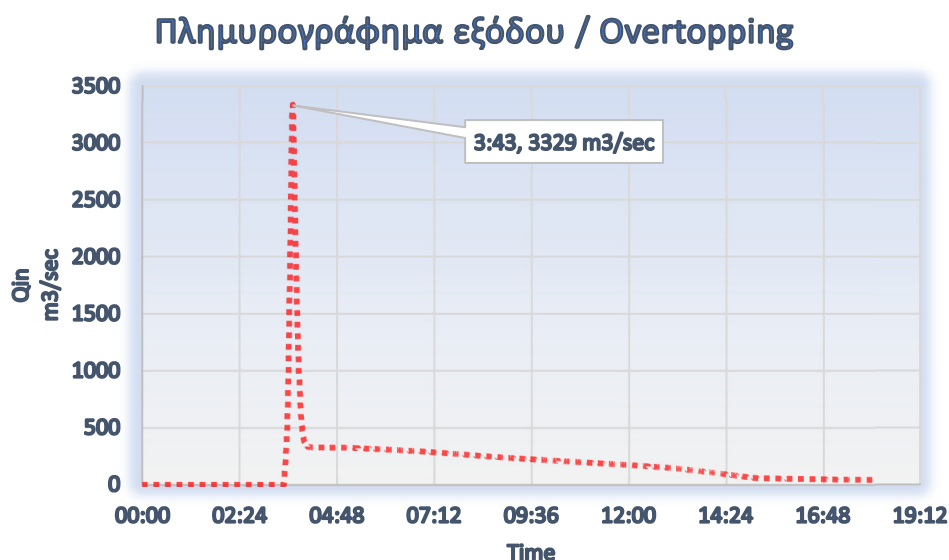
Για τα δυο σενάρια αστοχίας του κυρίως φράγματος ανάσχεσης πλημμυρών, αξιοποιήθηκαν οι εξισώσεις του Froehlich(2008) όσον αφορά την εκτίμηση των παραμέτρων θραύσης. Οι εξισώσεις αυτές είναι ευρέως αποδεκτές, για την ανάλυση θραύσης φράγματος καθώς λαμβάνουν υπόψιν τους, σύνθετες φυσικές διεργασίες(τυρβώδης ροή, μεταφορά φερτών κ.α.) που συμβαίνουν κατά την αστοχία.

Ο συνολικός όγκος του ταμιευτήρα που παροχετεύεται προς τα κατάντη είναι 11,8 εκ. m³ για τα δύο σενάρια, το οποίο σημαίνει ότι το φράγμα αδειάζει τελείως. Η μικρή διαφορά με τον συνολικό όγκο(11,9 εκ. m³) του ταμιευτήρα τη στιγμή της αστοχίας, ίσως να οφείλεται στο φυσικό ανάγλυφο και συγκεκριμένα σε κάποια σημεία της λεκάνης κατάκλισης που συγκρατούν κάποια ποσότητα νερού, το οποίο δεν παροχετεύεται προς τα κατάντη.

Τα χαρακτηριστικά διάδοσης του πλημμυρικού κύματος είναι παρεμφερή για τα δύο σενάρια θραύσης και περιγράφονται ως εξής:

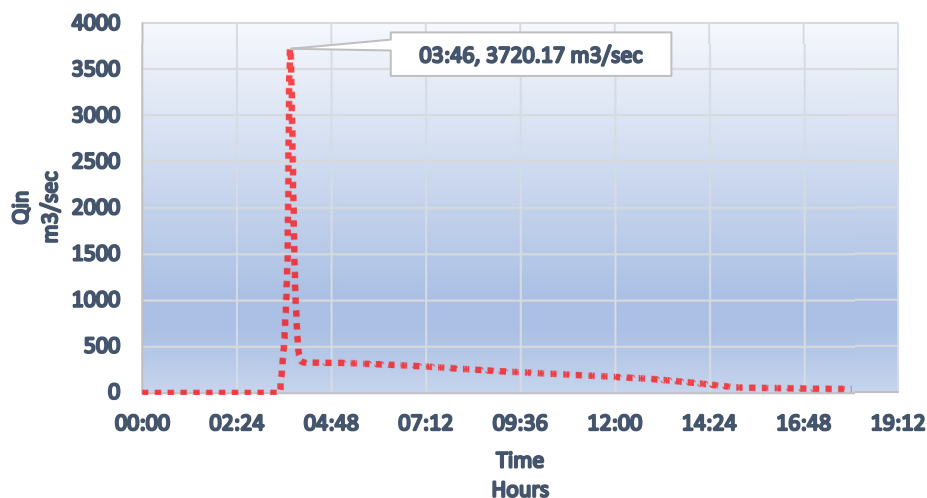
- Η αστοχία ξεκινά στις 3.25 και το πλημμυρικό κύμα που κινείται προς τα κατάντη διανύει απόσταση 6 km μέχρι τον κόλπο της Βραυρώνας σε περίπου 30 λεπτά, κινούμενο με μέση ταχύτητα 3,5 m/sec. ή 12,6 km/h.
- Η ταχύτητα του κύματος αμέσως κατάντη του φράγματος μέχρι το σημείο συμβολής των δύο ρεμάτων είναι μεγάλη(5m/sec ή 18 km/h) καθώς εκατέρωθεν της κοίτης τα έντονα πρηνή δημιουργούν μια φυσική στένωση. Από το σημείο που συμβάλουν τα δύο ρέματα και κατάντη, το φυσικό ανάγλυφο γίνεται πιο ήπιο με αποτέλεσμα το πλημμυρικό κύμα να απλωθεί και να μειωθεί η ταχύτητα του(1 m/sec).

Από τα πλημμυρογράφημα εξόδου, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω, παρατηρούμε ότι η παροχή αιχμής του σεναρίου riping, είναι μεγαλύτερη (3.720,17 m³/sec) από την παροχή αιχμής για το σενάριο του overtopping 3.329 m³/sec).



Εικόνα 45 : Πλημμυρογράφημα εξόδου κατάντη του κυρίως φράγματος ανάσχεσης

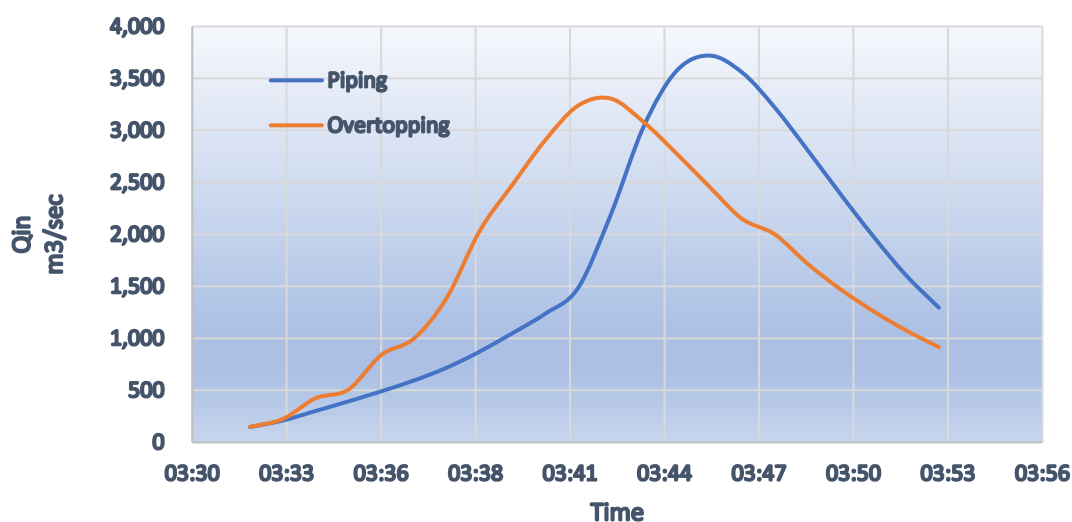
Πλημμυρογράφημα εξόδου / Piping



Εικόνα 46: Πλημμυρογράφημα εξόδου κατάντη του κυρίως φράγματος ανάσχεσης

Αν εστιάσουμε στα δύο πλημμυρογραφήματα, στη χρονική στιγμή που συμβαίνει η παροχή αιχμής, γίνεται ξεκάθαρο ότι στο σενάριο του piping συμβαίνει πιο απότομη άνοδος του πλημμυρογραφήματος σε σχέση με το σενάριο του overtopping που υπάρχει πιο ομαλή άνοδος. Αυτό ερμηνεύεται με τον εξής τρόπο :

Το νερό κατά την αρχή της αστοχίας σε ένα σενάριο piping, περνάει μέσα από την οπή, διεργύνοντας την σταδιακά, μέχρις ότου να γίνει αρκετά μεγάλη και να καταρρεύσει η μάζα του φράγματος. Ως αποτέλεσμα, τη στιγμή αυτή απελευθερώνεται μεγάλος όγκος νερού.



Εικόνα 47: Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων piping & overtopping

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

9.1 Συμπεράσματα

Από την εκτενή διερεύνηση και μοντελοποίηση των αντιπλημμυρικών έργων του ρέματος Ερασίνου, προέκυψαν τα κάτωθι συμπεράσματα:

- ❖ Ο συνδυασμός μονοδιάστατης και δυσδιάστατης επίλυσης που προσφέρει το λογισμικό, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την εξοικονόμηση υπολογιστικής ισχύος και χρόνου, παρόλα αυτά, τα συγκεκριμένα μοντέλα απαιτούν την παραμετροποίηση των επιμέρους οντοτήτων που εισάγονται από το χρήστη (inline structures, lateral structures κτλ). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να προκύπτουν συχνά αστάθειες στα μοντέλα αυτά, καθώς πολλές διαφορετικές οντότητες αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, και για αυτό χρειάζεται ο χρήστης που κάνει την παραμετροποίηση τους, να γνωρίζει καλά τις δυνατότητες και αλλά και τις αδυναμίες του προγράμματος. Σε αντίθετη περίπτωση ένα μοντέλο δυσδιάστατης ανάλυσης, δεν χρειάζεται την εισαγωγή επιμέρους οντοτήτων, εφόσον ότι επηρεάζει την ροή προσομοιώνεται τροποποιώντας κατάλληλα το υπόβαθρο. Η τροποποίηση του υποβάθρου δεν είναι πάντα εύκολη υπόθεση, όπως αντίστοιχα και η σωστή δόμηση του πλέγματος που λαμβάνει υπόψιν του, τις ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής. Παρόλα αυτά, τα αμιγώς δισδιάστατα μοντέλα, ενώ απαιτούν βαθύτερη κατανόηση των φαινομένων και των αλγορίθμων που χρησιμοποιούν, για την σωστή χωρική και χρονική διακριτοποίηση τους, όταν στηθούν μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις αστάθειες του μοντέλου. Αυτό σημαίνει ότι η σταθερότητα αυτών των μοντέλων εξαρτάται κυρίως από την σωστή παραμετροποίηση του σχήματος πεπερασμένων διαφορών που θα χρησιμοποιηθεί, και όχι από επιμέρους οντότητες. Στη παρούσα διπλωματική αξιοποιήθηκαν τα πλεονεκτήματα της δυσδιάστατης ανάλυσης για την προσομοίωση των φραγμάτων της περιοχής καθώς και του αναχώματος προστασίας του αρχαιολογικού χώρου και επιχειρήθηκε να γίνει το μοντέλο όσο πιο απλό γινόταν.
- ❖ Τα έργα αντιπλημμυρικής θωράκισης των παραρεμάτων περιοχών στις εκβολές του ρέματος Ερασίνου, αποδεικνύεται ότι συγκρατούν τον μεγαλύτερο όγκο των ροών οι οποίες διοχετεύονται με ασφάλεια στον θαλάσσιο αποδέκτη. Το φράγμα ανάσχεσης, μειώνει την πλημμυρική αιχμή των 476,16 m³/sec, "απλώνοντας" την σε μεγαλύτερο χρόνο, διατηρώντας μια σταθερή εκροή 204 m³/sec. Οι περιορισμένες εκτάσεις, που πλημμυρίζουν είναι κυρίως αγροτικές στη συμβολή των ρεμάτων Ερασίνου κ' Αγίου Γεωργίου, και ένα τμήμα του Αρχαιολογικού χώρου.
- ❖ Το σημείο του ρέματος που εμφανίζει το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι ανάμεσα στις χιλιόμετρικές θέσεις 0+834 έως 1+500. Με βάση την μελέτη υπάρχει απόλυτη ταύτιση με τα πορίσματα της παρούσας διπλωματικής. Η ελεύθερη επιφάνεια στο τμήμα αυτό, σύμφωνα με τη μελέτη, ξεπερνάει την στέψη των συρματοκιβωτίων κατά 0,5 m. Αντίστοιχα, σύμφωνα με την υδραυλική προσομοίωση, η ελεύθερη επιφάνεια ξεπερνάει το ύψος της διαμορφωμένης κοίτης. Ως αποτέλεσμα το κύμα που διαφεύγει, από το σημείο αυτό, πλημμυρίζει τις παράπλευρες αγροτικές εκτάσεις και πιο κατάντη τον αρχαιολογικό χώρο. Η αλλαγή της υψομετρικής χάραξης της λεωφόρου Βραυρώνος, θα μπορούσε να λειτουργήσει σαν ένα εγκάρσιο ανάχωμα προστασίας, περιορίζοντας εντελώς τα πλημμυρικά φαινόμενα στον αρχαιολογικό χώρο.

- ❖ Το ανάχωμα προστασίας του αρχαιολογικού χώρου κρίνεται επαρκές καθώς η ελεύθερη επιφάνεια τη ροής στο τμήμα αυτό, είναι σημαντικά χαμηλότερη από τη στέψη του αναχώματος. Παρόλα αυτά η περιοχή κατακλύζεται από ροές που έχουν διαφύγει σε πιο ανάντη σημεία του ρέματος. Ως συμπέρασμα προκύπτει, ότι για την προστασία συγκεκριμένων θέσεων κατά μήκος ενός ρέματος δεν αρκεί η ενίσχυση της κοίτης τοπικά ακριβώς μπροστά από τη θέση ενδιαφέροντος αλλά πρέπει να γίνεται περαιτέρω διερεύνηση. Με την μονοδιάστατη ανάλυση, που επιλύονται συνήθως οι διευθετήσεις των ρεμάτων, δεν είναι πάντα ασφαλές για να αποφανθούμε αν μια περιοχή τελικά θα πλημμυρίσει. Χρειάζεται πάντα η δισδιάστατη ανάλυση, που καταδεικνύει με ακρίβεια την κίνηση των πλημμυρικών ροών εκτός της κοίτης.
- ❖ Τα βάθη και οι ταχύτητες ροής στις περιοχές που κατακλύζονται από τα πλημμυρικά φαινόμενα είναι χαμηλά (1m & 0.5m/sec), και δεν αποτελούν κίνδυνο για την ζωή και τις περιουσίες των ανθρώπων, εφόσον η κυρίαρχη κατηγορία χρήσεων γης, είναι η αγροτική.
- ❖ Η αστοχία του φράγματος έχει ως συνέπεια την απελευθέρωση 11,8 εκ. m³ νερού στις κατάντη περιοχές, με παροχή αιχμής 3.720,17 m³/sec για το σενάριο του riping και 3.329 m³/sec για το σενάριο του overtopping. Το πλημμυρικό κύμα διανύει απόσταση 6 km σε περίπου 30 λεπτά, πριν εκτονωθεί στο κόλπο της Βραυρώνας. Η ζώνη κατάκλισης που δημιουργείται κατά μήκος του ρέματος έχει μέσο πλάτος 200 μέτρα. Στη συμβολή των ρεμάτων Ερασίνου και Αγίου Γεωργίου, όπου τα έντονα πρηνή εκατέρωθεν της κοίτης εξαφανίζονται, το πλημμυρικό πεδίο καταλαμβάνει έκταση 1.5 km². Οι περιοχές που πλήττονται είναι κυρίως αγροτικές, με εξαίρεση τον αρχαιολογικό χώρο.

9.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με βάση τα πορίσματα που προέκυψαν από την υδραυλική προσομοίωση αλλά και την εγγενή αβεβαιότητα των υδροδυναμικών συστημάτων, παρατίθενται στη συνέχεια κάποιες ενδεικτικές προτάσεις περαιτέρω διερεύνησης. Απώτερος στόχος είναι να βελτιωθεί το υδραυλικό μοντέλο όσον αφορά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων αλλά και να συνδυαστεί με άλλους επιστημονικούς τομείς, ώστε να δοθούν απαντήσεις σε ένα ευρύτερο φάσμα ερευνητικών ερωτημάτων σχετικά με τη διαχείριση και προστασία των ποτάμιων συστημάτων.

- ❖ Βαθμονόμηση του μοντέλου, χρησιμοποιώντας μετρήσεις στάθμης παροχής σε συγκεκριμένα σημεία του ρέματος.
- ❖ Ανάλυση ευαισθησίας με την οποία θα προσδιορισθούν οι παράμετροι που έχουν την μεγαλύτερη επίπτωση στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν, ώστε το στάδιο της βαθμονόμησης να επικεντρωθεί στην βελτιστοποίηση αυτών των παραμέτρων.
- ❖ Υδραυλική μοντελοποίηση με αμιγώς δισδιάστατη ανάλυση, και σύγκριση αποτελεσμάτων με το μοντέλο που στήθηκε στην παρούσα διπλωματική.
- ❖ Συνδυασμός με οικο-υδραυλικά μοντέλα για την καλύτερη κατανόηση των επιπτώσεων των αλλαγών στις χρήσεις γης, των μέτρων διαχείρισης των υδάτων και άλλων πιέσεων στο ποτάμιο οικοσύστημα.
- ❖ Σχεδιασμός συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης του φράγματος ανάσχεσης πλημμυρών. Βάσει των αποτελεσμάτων του υδραυλικού μοντέλου και τους πιθανούς κινδύνους μπορεί να γίνει σωστότερη λήψη αποφάσεων από τους αρμόδιους φορείς.

- ❖ Αξιοποίηση του υδραυλικού μοντέλου για την διερεύνηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στα ποτάμια οικοσυστήματα, καθώς οι αλλαγές στο κλίμα επηρεάζουν την συχνότητα και το μέγεθος των πλημμυρών, την μεταφορά των ιζημάτων κ.α

10 Βιβλιογραφία

- ASCE, A. S. (1952). *Flood Hazard Maps*.
- Bodhaine, G. (1968). *Measurement of Peak Discharge at Culverts by Indirect Methods*. U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 3, Chapter A3.
- Chow, V. T. (1973). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill Book Company.
- Costa, J. E. (1985). *Floods from dam failures*. Denver, Colorado: United States department of the interior geological survey.
- Diakakis, M., & Mavroulis, S. (2012). Floods in Greece, a statistical and spatial approach. *Natural Hazards* .
- Downton, M., & Pielke, R. (2001). *Discretion without accountability : Politics, Flood damage and Climate* .
- George, A., & Nair, B. (2015). Dam break analysis using BOSS DAMBRK. *Aquatic Procedia, Volume 4*, 853-860.
- Gibson, S. (2015). *Dam Breaching Analysis with Combined 1D and 2d Elements*. US Army Corps of Engineers.
- Gibson, S. (2021). HEC-RAS 2D Class: 1D/2D Direct Connections.
- Goodell, C. (2016). *THE RAS SOLUTION*. Ανάκτηση από <https://www.kleinschmidtgroup.com>: <https://www.kleinschmidtgroup.com>
- Hawk, K., & Eagleson, P. (1992). *climatology of station storm rainfall in the continental united states: parameters of the bartlett-lewis and poisson rectangular pulses models*.
- Maddamsetty et al. (2010). Tehri Dam-breach versus monsoon flood routing in the Ganga River system. *ISH J. Hydraul. Eng.*, 16, 109-131.
- Nasrat Adamo et al. (2020). Dam Safety Problems Related to Seepage. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, Vol. 10, No. 6, 2020, 191-239*.
- Owen, P. W., & Ευρ.Ελεγκτικό Συνέδριο . (2018). *Οδηγία για τις πλημμύρες: πρόοδος ως προς την αξιολόγηση των κινδύνων, ανάγκη βελτίωσης του σχεδιασμού και της υλοποίησης*.
- Pende, S. N. (2009). *Desktop review of 2D hydraulic modelling packages*. Environment Agency, Rio House, Waterside Drive, Aztec West, Almondsbury, Bristol, BS32 4UD.
- Shustikova, I., C Neal, J., Domeneghetti, A., & Castellarin, A. (2019). Comparing 2D capabilities of HEC-RAS and LISFLOOD-FP on complex topography. *Hydrological Sciences Journal*.
- Wahl, T. L. (1998). *Prediction of Embankment Dam Breach Parameters*. Water Resources Research Laboratory.
- Xiong, Y. (2011). A Dam Break Analysis Using HEC-RAS. *Journal of Water Resource and Protection, Vol. 3 No. 6*, 370-379.
- Δ/νση σχεδιασμού και αντιμετώπισης έκτακτων αναγκών. (2019). *Σχέδιο δράσεων Πολιτικής Προστασίας για την αντιμετώπιση κινδύνων από την εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων*. Αθήνα.
- Κασιμάτης, Δ., & Τσακίρης, Γ. (2011). *Εκτίμηση Πλημμυρικών Μεγεθών στην Υδρολογική Λεκάνη του Ερασίνου*. Αθήνα.
- Λέκκας, Σ., & Διακάκης, Μ. (2009). Ανάκτηση από <https://mthymettosgreece.com/topotheses/erasinos-rotamos/>
- Μαμάσης, Ν. (2018). *Πλημμύρες & αντιπλημμυρικά έργα*. Ανάκτηση από https://ocw.aoc.ntua.gr/modules/document/file.php/CIVIL113/Floods_14_Metra.pdf
- Σουλιώτης, Ν. (2018). *Στοιχεία κινδύνου πλημμυρών και κατολισθήσεων στο Δήμο Καρπενησίου*.