

«Υδροδυναμική προσομοίωση παροχών σχεδιασμού στο  
ρέμα Ξηριάς Αλμυρού, Μαγνησίας»

Μανιός Ιωάννης  
Επιβλέπων καθηγητής: Λάμπρος Βασιλειάδης  
Βόλος 2023

ΜΑΝΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική εργασία

«Υδροδυναμική προσομοίωση παροχών σχεδιασμού στο ρέμα Ξηριάς  
Αλμυρού, Μαγνησίας»  
Μανιός Ιωάννης

Τριμελής Επιτροπή:

Δρ. Βασιλειάδης Λάμπρος (Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών  
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δρ. Μυλόπουλος Νικήτας (Επιβλέπων) Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών  
Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δρ. Σπηλιωτόπουλος Μάριος Μέλος Ε.Δ.Ι.Π., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Βόλος, Μάιος 2023

©2023 Μανιός Ιωάννης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2)

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του κύκλου σπουδών μου στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, κλείνει το κεφάλαιο των σπουδών μου. Ένα κεφάλαιο που μου προσέφερε εμπειρίες, γνώσεις και τρόπο σκέψης καθοριστικές για το υπόλοιπο της ζωής μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή του Τομέα Υδραυλικής και Περιβάλλοντος της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κ. Λάμπρο Βασιλειάδη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και συνάμα να τον ευχαριστήσω για την κατανόηση και καθοδήγηση που μου πρόσφερε, τόσο σε επιστημονικό, όσο και ανθρώπινο επίπεδο καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης την παρούσας εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη και κατανόηση που έχουν δείξει και τη συνεχή στήριξη παρά τις δυσκολίες και την μεγάλη περίοδο που χρειάστηκα για την ολοκλήρωση της εργασίας. Ιδιαίτερο ευχαριστώ στην γιαγιά μου Παρασκευή που χωρίς τις συμβουλές και την βοήθεια της μπορεί και να είχα παρατήσει την προσπάθεια ολοκλήρωσης των σπουδών μου.

Μανιός Ιωάννης

Βόλος, 2023

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο της, τη ανάλυση της υδραυλικής συμπεριφοράς ροής ύδατος διαμέσου φυσικού ανοιχτού αγωγού μέσα από ένα μοντέλο προσομοίωσης του ποταμού ανεπτυγμένο στο περιβάλλον του λογισμικού HEC-RAS. Έναυσμα για την έναρξη της εργασίας μου, αποτέλεσαν τα φαινόμενα πλημμυρών που παρουσιάζουν μεγάλη συχνότητα εμφάνισης τα τελευταία χρόνια και με βάση τις προβλέψεις επιστημών τα επόμενα χρόνια θα γίνουν ακόμα συχνότερα λόγω της κλιματικής αλλαγής, καθώς και η Ευρωπαϊκή οδηγία 2007/60/EK για την αξιολόγηση και διαχείριση κινδύνων πλημμύρας.

Η περιοχή μελέτης που επιλέξαμε να μελετήσουμε έχει συνολικό μήκος περίπου 5 χιλιόμετρα και αποτελεί το κεντρικό τμήμα του ποταμού Ξεριά, στον Αλμυρό, Μαγνησίας. Για την περιοχή μελέτης έγινε συλλογή πρωτογενών δεδομένων μοντέλου εδάφους, αποτυπώσεις τεχνικών έργων, άλλα και στοιχεία εδάφους καθώς και υδρολογικά δεδομένα.

Αναπτύχθηκε στην συνέχεια μονοδιάστατο μοντέλο με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδατορέματος και τα τεχνικά έργα της περιοχής. Με αυτό το γεωμετρικό αρχείο ως βάση, πραγματοποιήσαμε δύο υδραυλικές προσομοιώσεις ως προς το είδος ροής, μία για συνθήκες μόνιμης ροής και μια άλλη για συνθήκες μη μόνιμης ροής. Για κάθε μία περίπτωση ροής με βάση την οδηγία 2007/60/EK, έγινε προσομοίωση για τρεις περιπτώσεις διαφορετικής έντασης βροχόπτωσης, δηλαδή τριών περιόδων επαναφοράς  $T=50$ , 100 και 1000 χρόνια, καθώς και για τρεις περιπτώσεις υπάρχων συνθηκών υγρασίας περιβάλλοντος, ευμενής, μέσης και δυσμενής, προκύπτοντας έτσι εννέα σενάρια για το κάθε είδος ροής.

Τα αποτελέσματα αυτών των μονοδιάστατων υδραυλικών προσομοιώσεων είναι οι συνολικές εκτάσεις πλημμύρας, τα βάθη ροής και οι ταχύτητες ροής. Μέσα από τις πληροφορίες των αποτελεσμάτων γίνεται προσπάθεια κατανόησης της απόκρισης του υδραυλικού μοντέλου, καθώς και εκτίμησης κινδύνου εμφάνισης πλημμύρας στην ευρύτερη περιοχή μελέτης, ενώ ταυτόχρονα προσπαθούμε να εντοπίσουμε ευάλωτες περιοχές στις οποίες μπορεί να απαιτούνται κατασκευές αντιπλημμυρικών έργων.

Λέξεις κλειδιά: Πλημμύρα, HEC-RAS, Οδηγία 2007/60/EK, Μη μόνιμη ροή, μόνιμη ροή, Περίοδος επαναφοράς, Υδραυλική προσομοίωση, Συνθήκες υγρασίας

## ABSTRACT

This thesis aims to study the hydraulic behavior of water flow through a natural open channel through a river simulation model developed in the HEC-RAS software environment. The trigger for the start of the work was the flooding phenomena that have shown a high frequency of occurrence in recent years and based on scientific forecasts in the coming years will become even more frequent due to climate change, as well as the European Directive 2007/60/EC on the evaluation and flood risk management.

The study area we chose to study has a total length of approximately 5km and is the central part of the Xerias river, in Almyros, Magnesia. For the study area there were collected primary data of digital soil model, technical structure impressions, other soil elements and hydrological data.

A one-dimensional model was then developed with the geometric characteristics of the watercourse and the technical works of the area. With this geometric file as a basis, we performed two hydraulic simulations, in terms of flow type, one for steady flow conditions and another for un-steady flow conditions. For each case of flow, based on the directive 2007/60/EC, a simulation was made for three cases of precipitation intensities, i.e., three return periods  $T=50$ , 100 and 1000 years, as well as for three cases of existing ambient humidity conditions, favorable, average, and unfavorable, thus resulting in nine scenarios for each type of flow.

The outputs of these one-dimensional hydraulic simulations are total flood areas, flow depths, and flow velocities. Through the information of the results, an attempt is made to understand the response of the hydraulic model as well as to assess the risk of flooding in the wider study area, while at the same time we try to identify vulnerable areas in which the construction of anti-flood works may be required.

Keywords: Flood, HEC-RAS, Directive 2007/60/EC, Unsteady flow, Steady flow, Recovery period, Hydraulic simulation, Moisture conditions,



## Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	16
1.1	Κίνητρο και στόχος	16
1.2	Υδραυλικά μοντέλα	17
1.3	Διάρθρωση	17
Κεφάλαιο 2	Θεωρητικό Υπόβαθρο	19
2.1	Γενικά	19
2.2	Πλημμύρες	21
2.3	Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/ΕΚ	25
2.4	Βασική ορισμοί Υδραυλικής	28
2.4.1	Ανοιχτοί – κλειστοί αγωγοί	28
2.4.2	Βασικές ιδιότητες ροής	29
2.4.3	Περίοδος επαναφοράς	30
2.4.4	Συντελεστής τραχύτητας Manning	30
2.5	Λογισμικά που αξιοποιήθηκαν	32
2.5.1	Arc GIS	32
2.5.2	Google earth pro	33
2.5.3	HEC RAS	33
2.6	Υπόβαθρο μόνιμης ροής	34
2.6.1	Εξίσωση ενέργειας	34
2.6.2	μεταφορικοί υπολογισμοί	36
2.6.3	Υπολογισμός μέσης κινητικής ενέργειας	38
2.6.4	Υπολογισμός Γραμμικών και τοπικών απωλειών	39
2.6.5	Καθορισμός κρίσιμου βάθους	40
2.6.6	Υπολογιστική διαδικασία σταθμής επιφανείας	41
2.7	Υπόβαθρο μη μόνιμης ροής	45
2.7.1	Βασικές σχέσεις υπολογισμού	45



2.7.2	Υπολογιστική διαδικασία	48
<b>2.8</b>	<b>Περιορισμοί λογισμικού υδραυλικής προσομοίωσης</b>	<b>49</b>
2.8.1	περιορισμοί μοντέλου μόνιμης ροής	49
2.8.2	Περιορισμοί μοντέλου μη μόνιμης ροής	50
<b>Κεφάλαιο 3</b>	<b>Περιοχή μελέτης</b>	<b>52</b>
<b>3.1</b>	<b>Τοποθεσία και τοπογραφία λεκάνης απορροής</b>	<b>52</b>
3.1.1	Κλιματικές συνθήκες ευρύτερης περιοχής	55
3.1.2	Γεωλογικές συνθήκες	57
3.1.3	Χρήσεις γής	57
<b>3.2</b>	<b>Ο ποταμός Ξεριάς</b>	<b>58</b>
<b>3.3</b>	<b>Η περιοχή του Αλμυρού</b>	<b>60</b>
<b>3.4</b>	<b>Υδρολογική προσομοίωση</b>	<b>60</b>
<b>Κεφάλαιο 4</b>	<b>Ανάπτυξη μοντέλου</b>	<b>63</b>
<b>4.1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>63</b>
<b>4.2</b>	<b>Ψηφιακό μοντέλο εδάφους</b>	<b>63</b>
<b>4.3</b>	<b>Ανάπτυξη Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών Μοντέλου</b>	<b>66</b>
4.3.1	Εισαγωγή και γεωαναφορά μοντέλου εδάφους	67
4.3.2	Κύρια γραμμή ροής Ποταμού (Stream Centerline)	68
4.3.3	Όχθες ποταμού (Bank lines)	69
4.3.4	μονοπατία ροής (flow paths)	70
4.3.5	Διατομές (Cross sections)	71
4.3.6	Γέφυρες και οχετοί (Brighe and culvert)	73
4.3.7	Καθορισμός Συντελεστή τραχιότητας (Manning's N)	77
<b>4.4</b>	<b>Προετοιμασία Υδραυλικών προσομοιώσεων</b>	<b>79</b>
4.4.1	Μόνιμη ροή	79
4.4.2	Μη μόνιμη ροή	82
<b>Κεφάλαιο 5</b>	<b>Αποτελέσματα</b>	<b>88</b>

<b>5.1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>88</b>
<b>5.2</b>	<b>Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή τραχύτητας Manning</b>	<b>88</b>
<b>5.3</b>	<b>Αποτελέσματα για συνθήκες μόνιμης ροής</b>	<b>95</b>
5.3.1	Χάρτες περιοχής κατάκλισης πλημμύρας	95
5.3.2	Βάθη ροής	98
5.3.3	Ταχύτητες ροής	100
5.3.4	Εμβαδά πλημμυρισμένων περιοχών	103
5.3.5	Έλεγχος κρίσιμων διατομών	106
<b>5.4</b>	<b>Αποτελέσματα για συνθήκες μη μόνιμης ροής</b>	<b>107</b>
5.4.1	Χάρτες περιοχής κατάκλισης πλημμύρας	107
5.4.2	βάθη ροής	110
5.4.3	Ταχύτητες ροής	112
5.4.4	Εμβαδά πλημμυρισμένων περιοχών	115
5.4.5	Κρίσιμες διατομές	118
<b>5.5</b>	<b>Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων</b>	<b>119</b>
<b>Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα</b>		<b>122</b>
<b>6.1</b>	<b>Ανακεφαλαίωση του ερευνητικού ερωτήματος</b>	<b>122</b>
<b>6.2</b>	<b>Παρουσίαση των κύριων ευρημάτων</b>	<b>122</b>
<b>6.3</b>	<b>Προτάσεις για μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας</b>	<b>124</b>
<b>Βιβλιογραφία – Αναφορές</b>		<b>126</b>

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 Τυπικές τιμές συντελεστή C .....	40
Πίνακας 2 Εκτάσεις λεκάνων απορροής ΥΔ08 .....	53
Πίνακας 3 Τιμές μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης.....	57
Πίνακας 4 Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκάνης απορροής.....	61
Πίνακας 5 Τιμές τραχύτητας κοίτης κατα Chow.....	78
Πίνακας 6 Τιμές τραχύτητας πλημμυρικής πεδιάδας κατα Chow .....	78
Πίνακας 7 Τιμές τραχύτητας που ελέγχθηκαν .....	89
Πίνακας 8 Αποτελέσματα δοκιμών μεγαλύτερων τιμών συντελεστή τραχύτητας .....	92
Πίνακας 9 Αποτελέσματα δοκιμών μικρότερων τιμών συντελεστή .....	92

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1 Καταγεγραμμένος αριθμός φυσικών(EM-DAT) .....	20
Σχήμα 2 Αριθμός πλημμυρών(Alieri et al.2015).....	22
Σχήμα 3 Ροή σε κλειστό και ανοιχτό αγωγό.....	28
Σχήμα 4 Τομή αγωγού με διαφορετικές τιμές τραχύτητας .....	31
Σχήμα 5 Απεικόνιση συντελεστών εξίσωσης ενέργειας.....	35
Σχήμα 6 Υποδιαίρεση διατομής με βάση συντελεστές τραχύτητάς .....	37
Σχήμα 7 Υπολογισμός μέσης κινητικής ενέργειας .....	38
Σχήμα 8 Απεικόνιση πεπερασμένης διαφοράς στοιχείων ροής .....	46
Σχήμα 9 Γεωγραφική απεικόνιση περιοχής μελέτης .....	52
Σχήμα 10 Δορυφορική απεικόνιση τοποθεσίας λεκάνης απορροής .....	52
Σχήμα 11 Δορυφορική απεικόνιση οριοθέτησης λεκάνης απορροής .....	52
Σχήμα 12 Σχηματική απεικόνιση κόμβων λεκάνης απορροής.....	54
Σχήμα 13 Χάρτης κλίσεων εδάφους.....	55
Σχήμα 14 Δεδομένα βροχώπτωσης περιοχής μελέτης(EMY,2022).....	56
Σχήμα 15 Τοπογραφική απεικόνιση ποταμού Ξεριά .....	59
Σχήμα 16 Τελική μορφή ψηφιακού μοντέλου εδάφους.....	66
Σχήμα 17 Περιβάλλον ορισμού συστήματος γεωαναφοράς .....	68
Σχήμα 18 Ψηφιακή αποτύπωση κύριας κοίτης.....	69
Σχήμα 19 Ψηφιακή αποτύπωση όχθων ποταμού .....	70
Σχήμα 20 Ψηφιακή αποτύπωση μονοπατιών ροής .....	71
Σχήμα 21 Ψηφιακή αποτύπωση διατομών .....	73
Σχήμα 22 Τυχαία διατομή του μοντέλου .....	73
Σχήμα 23 Σχέδια κάτοψης και τομών γεφυρών .....	74
Σχήμα 24 Δορυφορική εικόνα γεφυρών .....	74
Σχήμα 25 Φωτογραφία γέφυρας.....	75
Σχήμα 26 Φωτογραφία γέφυρας.....	75
Σχήμα 27 Πλευρική φωτογραφίας γέφυρας .....	75
Σχήμα 28 Όψη γέφυρας.....	75

Σχήμα 29 Χαρακτηριστικά οδοστρώματος γέφυρας.....	76
Σχήμα 30 Όψης γέφυρας ανάντη και κατόντη .....	76
Σχήμα 31 Περιβάλλον εισαγωγής παροχών αιχμής .....	80
Σχήμα 32 Περιβάλλον καθορισμού οριακών συνθηκών.....	81
Σχήμα 33 Περιβάλλον έναρξης προσομοίωσης .....	81
Σχήμα 34 Περιβάλλον εισαγωγής δεδομένων μη μόνιμης ροής .....	83
Σχήμα 35 Περιβάλλον έναρξης προσομοίωσης μη μόνιμης ροής .....	86
Σχήμα 36 Χάρτης πλημμυρικής κατάκλισης T=50 ευμενής συνθήκης.....	95
Σχήμα 37 Χάρτης πλημμυρικής κατάκλισης T=50 μέσες συνθήκες .....	96
Σχήμα 38 Χάρτης πλημμυρικής κατάκλισης T=100 μέσες συνθήκες.....	96
Σχήμα 39 Χάρτης πλημμυρικής κατάκλισης T=1000 μέσες συνθήκες.....	97
Σχήμα 40 Χάρτης βαθών ροής T=50 ευμενής συνθήκης .....	98
Σχήμα 41 Χάρτης βαθών ροής T=50 μέσες συνθήκες .....	98
Σχήμα 42 Χάρτης βάθος ροής T=100 μέσες συνθήκες.....	99
Σχήμα 43 Χάρτης βάθος ροής T=1000 μέσες συνθήκες.....	99
Σχήμα 44 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=50 ευμενής συνθήκης.....	100
Σχήμα 45 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=50 μέσες συνθήκες.....	101
Σχήμα 46 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=100 μέσες συνθήκες.....	101
Σχήμα 47 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=1000 μέσες συνθήκες .....	102
Σχήμα 48 Χάρτης έκτασης πλημμύρας T=50 ευμενής συνθήκης.....	103
Σχήμα 49 Χάρτης έκτασης πλημμύρας T=50 μέσες συνθήκες.....	103
Σχήμα 50 Χάρτης έκτασης πλημμύρας T=100 μέσες συνθήκες.....	104
Σχήμα 51 Χάρτης έκτασης πλημμύρας T=1000 μέσες συνθήκες.....	104
Σχήμα 52 Χάρτης πλημμυρικής κατάκλισης T=50 ευμενής συνθήκης.....	107
Σχήμα 53 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=50 μέσες συνθήκες.....	108
Σχήμα 54 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=100 μέσες συνθήκες.....	108
Σχήμα 55 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=1000 μέσες συνθήκες.....	109
Σχήμα 56 Χάρτης βαθών πλημμύρας T=50 ευμενής συνθήκης .....	110
Σχήμα 57 Χάρτης βαθών πλημμύρας T=50 μέσες συνθήκες .....	110

Σχήμα 58 Χάρτης βαθών πλημμύρας T=100 μέσες συνθήκες .....	111
Σχήμα 59 Χάρτης βαθών πλημμύρας T=1000 μέσες συνθήκες .....	111
Σχήμα 60 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=50 ευμενής συνθήκες.....	112
Σχήμα 61 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=50 μέσες συνθήκες.....	113
Σχήμα 62 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=100 μέσες συνθήκες.....	113
Σχήμα 63 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=1000 μέσες συνθήκες .....	114
Σχήμα 64 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=50 ευμενής συνθήκες .....	115
Σχήμα 65 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=50 μέσες συνθήκες .....	115
Σχήμα 66 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=100 μέσες συνθήκες .....	116
Σχήμα 67 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=1000 μέσες συνθήκες .....	116
Σχήμα 68 Διατομή ανάντη γέφυρας για T=50 μέσες συνθήκες.....	118
Σχήμα 69 Διατομή κατάντη γέφυρας για T=50 μέσες συνθήκες .....	118
Σχήμα 70 Σύγκριση εμβαδόν κατάκλισης μόνιμης-μη μόνιμης ροής, T=50 μέσες συνθήκες ...	120
Σχήμα 71 Παράδειγμα διατομής ελέγχου υπερχειλίσας .....	121
Σχήμα 72 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=50 δυσμενής συνθήκες .....	129
Σχήμα 73 Χάρτης βάθους ροής για T=50 δυσμενής συνθήκες .....	129
Σχήμα 74 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=50 δυσμενής συνθήκες .....	130
Σχήμα 75 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=50 δυσμενής συνθήκες.....	130
Σχήμα 76 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=100 ευμενής συνθήκες.....	131
Σχήμα 77 Χάρτης βάθους ροής για T=100 ευμενής συνθήκες.....	131
Σχήμα 78 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=100 ευμενής συνθήκες.....	132
Σχήμα 79 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=100 ευμενής συνθήκες.....	132
Σχήμα 80 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=100 δυσμενής συνθήκες .....	133
Σχήμα 81 Χάρτης βάθους ροής για T=100 δυσμενής συνθήκες .....	133
Σχήμα 82 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=100 δυσμενής συνθήκες .....	134
Σχήμα 83 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=100 δυσμενής συνθήκες.....	134
Σχήμα 84 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=1000 ευμενής συνθήκες.....	135
Σχήμα 85 Χάρτης βάθους ροής για T=1000 ευμενής συνθήκες.....	135
Σχήμα 86 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=1000 ευμενής συνθήκες .....	136

Σχήμα 87 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=1000 ευμενής συνθήκες .....	136
Σχήμα 88 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=1000 δυσμενής συνθήκες .....	137
Σχήμα 89 Χάρτης βάθους ροής για T=1000 δυσμενής συνθήκες .....	137
Σχήμα 90 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=1000 δυσμενής συνθήκες .....	138
Σχήμα 91 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=1000 δυσμενής συνθήκες .....	138
Σχήμα 92 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=50 δυσμενής συνθήκες .....	139
Σχήμα 93 Χάρτης βαθών ροής T=50 δυσμενής συνθήκες .....	139
Σχήμα 94 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=50 δυσμενής συνθήκες .....	140
Σχήμα 95 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=50 δυσμενής συνθήκες .....	140
Σχήμα 96 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=100 ευμενής συνθήκες .....	141
Σχήμα 97 Χάρτης βαθών ροής για T=100 ευμενής συνθήκες .....	141
Σχήμα 98 Χάρτης ταχυτήτων ροής για T=100 ευμενής συνθήκες .....	142
Σχήμα 99 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=100 ευμενής συνθήκες .....	143
Σχήμα 100 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=100 δυσμενής συνθήκες .....	143
Σχήμα 101 Χάρτης βαθών ροής για T=100 δυσμενής συνθήκες .....	144
Σχήμα 102 Χάρτης ταχυτήτων ροής για T=100 δυσμενής συνθήκες .....	144
Σχήμα 103 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=1000 δυσμενής συνθήκες .....	145
Σχήμα 104 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=1000 ευμενής συνθήκες .....	145
Σχήμα 105 Χάρτης βαθών ροής για T=1000 ευμενής συνθήκες .....	146
Σχήμα 106 Χάρτης ταχυτήτων ροής για T=1000 ευμενής συνθήκες .....	146
Σχήμα 107 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=1000 ευμενής συνθήκες .....	147
Σχήμα 108 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=1000 δυσμενής συνθήκες .....	147
Σχήμα 109 Χάρτης βαθών ροής για T=1000 δυσμενής συνθήκες .....	148
Σχήμα 110 Χάρτης ταχυτήτων ροής για T=1000 δυσμενής συνθήκες .....	148
Σχήμα 111 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=1000 δυσμενής συνθήκες .....	149

# Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

## 1.1 Κίνητρο και στόχος

Ο σκοπός πραγματοποίησης αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός όσο το δυνατόν ρεαλιστικότερου μοντέλου υδραυλικής προσομοίωσης περιοχής του ποταμού Ξεριά στον Αλμυρό. Στόχος μας είναι να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά του υδατορέμματος σε διάφορα σενάρια βροχόπτωσης μέσα από την ανάλυση των χαρακτηριστικών αυτού, όπως μεταβολές της ελεύθερης επιφάνειας νερού ή της ταχύτητας νερού που ρέει διαμέσου φυσικού υδατορέματος, ώστε να εκτιμήσουμε τον κίνδυνο εμφάνισης πλημμύρας στην δοσμένη περιοχή μελέτης. Το συγκεκριμένο θέμα είχε ως κίνητρο το πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2007/60/EK η οποία θεσπίστηκε για την διαχείριση κινδύνων πλημμύρας, μέσα από την οποία θα λάβουμε ουσιαστικά κατεύθυνση για τον τρόπο ανάλυσης του προβλήματος, κατά τον οποίο αναπτύσσεται ένα υδραυλικό μοντέλο ενώ ταυτόχρονα εισάγουμε σε αυτό διάφορα δεδομένα βροχοπτώσεων σε μία προσπάθεια να είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε τον βαθμό κινδύνου που υφίσταται στην συγκεκριμένη περιοχή, μέσα από την αξιοποίηση ψηφιακών δεδομένων και λογισμικών υδραυλικής ανάλυσης ποταμών σε περιβάλλον υπολογιστή.

Τα αναφερθέντα σενάρια βροχοπτώσεων παρουσιάζουν μεταβολές δύο μεταβλητών που καθορίζουν την ένταση του φαινομένου, η κάθε μεταβλητή περιγράφεται από τρεις διαφορετικές τιμές αντίστοιχα, άρα τα συνολικά σενάρια που θα αναπτυχθούν είναι συνολικά εννιά και προκύπτουν με βάση τις παρακάτω τιμές μεταβλητών:

- 1) Περίοδος επαναφοράς
  1.  $T = 50$  έτη
  2.  $T = 100$  έτη
  3.  $T = 1000$  έτη
  
- 2) Επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες
  1. Ευμενής συνθήκες
  2. Μέσες συνθήκες
  3. Δυσμενής συνθήκες

Έναυσμα για την πραγματοποίηση της εργασίας αποτέλεσε η ίδια η ευρωπαϊκή οδηγία όπως αναφέραμε, αλλά και το πλήθος των πλημμυρών που έπληξαν τον Ευρωπαϊκό χώρο τις χρονιές από το 2010 και μετά, οι οποίες συνέβησαν παράλληλα με γεγονότα έντονης βροχόπτωσής στον Ελλαδικό χώρο με καταστροφικά αποτελέσματα εντός και εκτός αστικού ιστού, τόσο σε έργα υποδομών όσο και σε ανθρώπινες ζωές.

Με βάση την οδηγία 2007/60/EK της Ευρωπαϊκής ένωσης, ως πλημμύρα ορίζεται η προσωρινή κάλυψη εδάφους από νερό το οποίο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, δεν καλύπτεται από νερό. Γενικά, οι πλημμύρες υπάγονται στα φυσικά φαινόμενα, με μεγάλη συχνότητα εμφάνισης, και με έντονες κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις στις κοινότητες που πλήττονται από αυτές, γεγονός που καθιστά απαραίτητο να γίνουν σχέδια πρόληψης και αντιμετώπισης τέτοιων φαινομένων.



Η Ελλάδα ως χώρα υπάγεται γεωγραφικά/κλιματικά στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Στη Μεσόγειο, λόγω του κλίματος και του γεωλογικού υπόβαθρου, βροχοπτώσεις μεγάλης έντασης τείνουν να οδηγήσουν σε κατάσταση πλημμύρας την εκάστοτε λεκάνη απορροής προκαλώντας αρνητικές συνέπειες στην υγεία των ανθρώπων, στα συστήματα υποδομών ακόμα και σε ανθρώπινους θανάτους. (Διακάκης Μ., et al.,2012). Οι παραπάνω συνθήκες τοποθετούν την Ελλάδα στην ομάδα των χωρών με τάση στο να εμφανίζουν ταχείας εξέλιξης πλημμύρες(flash floods), καθιστώντας απαραίτητες σε κρατικό επίπεδο, κινήσεις, μέτρα και άλλες ενέργειες με στόχο την αποτροπή μελλοντικών αρνητικών συνεπειών, την ετοιμότητα αλλά και την αντιμετώπιση φαινομένων πλημμύρας σε περίπτωση που συμβούν, όπως ορίζει και στο πλαίσιο της η αντίστοιχη Ευρωπαϊκή οδηγία.

## 1.2 Υδραυλικά μοντέλα

Μια υδραυλική προσομοίωση είναι ουσιαστικά ένα μοντέλο, με μέσο επίλυσης τον υπολογιστή, που προβλέπει πώς θα ρέει το νερό μέσα από ένα σύστημα όπως ένα ποτάμι, ένα κανάλι, ένας αγωγός ή ένα σύστημα όμβριων υδάτων. Η προσομοίωση χρησιμοποιεί μαθηματικές εξισώσεις για την προσομοίωση των φυσικών διεργασιών που διέπουν την κίνηση του νερού, όπως η μηχανική των ρευστών, η μεταφορά ιζημάτων και η ποιότητα του νερού. Μια υδραυλική προσομοίωση τυπικά απαιτεί ένα μοντέλο του συστήματος που προσομοιώνεται το οποίο περιλαμβάνει τη γεωμετρία, τις οριακές συνθήκες και τις ιδιότητες του υλικού. Το μοντέλο χωρίζεται σε διακριτά στοιχεία, όπως κελιά ή κόμβοι, και οι εξισώσεις λύνονται επαναληπτικά για κάθε στοιχείο σε μια καθορισμένη χρονική περίοδο.

Η έξοδος μιας υδραυλικής προσομοίωσης μπορεί να περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα δεδομένων, όπως επίπεδα νερού, ρυθμούς ροής, προφίλ ταχύτητας, ρυθμούς μεταφοράς ιζημάτων και συγκεντρώσεις ρύπων. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος κάτω από διάφορες συνθήκες, όπως διαφορετικούς ρυθμούς ροής, γεγονότα βροχόπτωσης ή σενάρια σχεδιασμού. Οι υδραυλικές προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται επίσης για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση υδραυλικών κατασκευών, όπως τα φράγματα, τα αναχώματα και οι οχετοί, για την αξιολόγηση των επιπτώσεων των φυσικών και ανθρωπογενών αλλαγών στους υδάτινους πόρους και για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του νερού κάτω από διαφορετικά σενάρια, όπως πλημμύρες ή ξηρασίες.

## 1.3 Διάρθρωση

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία συνιστάται από 6 κεφάλαια συμπεριλαμβάνοντας το παρόν κεφάλαιο, αυτό της εισαγωγής.

Στο Δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις έννοιες των πλημμυρών και των μελετών κινδύνου πλημμύρας με βάση την οδηγία 2007/60/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς και των

γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, του λογισμικού ανάπτυξης μοντέλου υδραυλικής προσομοίωσης που θα αξιοποιήσουμε καθώς και των μαθηματικών εξισώσεων που το υπάγουν.

Το Τρίτο κεφάλαιο παρέχει στον αναγνώστη μια αναλυτική περιγραφή των συστατικών στοιχείων της περιοχής μελέτης ξεκινώντας από τα γενικά της χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και εν συνεχεία σημαντικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.

Στο Τέταρτο κεφάλαιο αναλυτική περιγραφή όλων των διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν στα λογισμικά που χρησιμοποίησα για να πραγματοποιήσω την υδραυλική προσομοίωση του ποταμού υπό εξέταση.

Στο Πέμπτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση αποτελεσμάτων των δύο μορφές συνθηκών και τρεις συνθηκών περιβάλλοντος που πραγματοποιήθηκαν σε μορφή χαρτών, εικόνων και γραφημάτων.

Στο Έκτο κεφάλαιο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας εκφράζουμε τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο,

## Κεφάλαιο 2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 2.1 Γενικά

Με βάση το Μετσόβιο Κέντρο Διεπιστημονικής Έρευνας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου ως ένας φυσικός κίνδυνος (natural hazard) ορίζεται μια φυσική διεργασία ή ένα φαινόμενο που έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει συνθήκες οι οποίες θα έχουν επικίνδυνη επίδραση στους ανθρώπους αλλά και υλικές καταστροφές. Αυτοί οι κίνδυνοι απορρέουν από τις φυσικές διαδικασίες του περιβάλλοντος, ενώ οι φυσικοί κίνδυνοι μπορεί να είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους ή και να προέρχονται από άλλους όπως ένα σεισμός για παράδειγμα μπορεί να οδηγήσει στο να εμφανιστεί ένα τσουνάμι.

Από τον ίδιο οργανισμό ορίζεται πως μια φυσική καταστροφή (natural disaster) αναφέρεται στην περίπτωση όπου η αντιμετώπιση ενός φυσικού κινδύνου οδηγεί σε σοβαρή αναταραχή της κοινωνίας και η ζημιά που προκαλεί είναι τόσο μεγάλη, ώστε η πληγείσα κοινότητα δεν είναι σε θέση να ανακάμψει χρησιμοποιώντας μόνο τους δικούς της πόρους. Μια φυσική καταστροφή έχει ως αποτέλεσμα σημαντική αναταραχή στη λειτουργία μιας κοινωνίας, προκαλώντας ευρείς απώλειες σε ανθρώπους, σε υλικά και στο περιβάλλον.

Ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ), το 1992 έδωσε στις φυσικές καταστροφές τον ορισμό που ακολουθεί. "Οι φυσικές καταστροφές αποτελούν σοβαρές διαταραχές στη λειτουργία της κοινωνίας, οι οποίες προκαλούν εκτεταμένες ανθρώπινες, υλικές ή περιβαλλοντικές απώλειες που υπερβαίνουν την ικανότητα της κοινωνίας να τις αντιμετωπίσει με ίδιους πόρους".

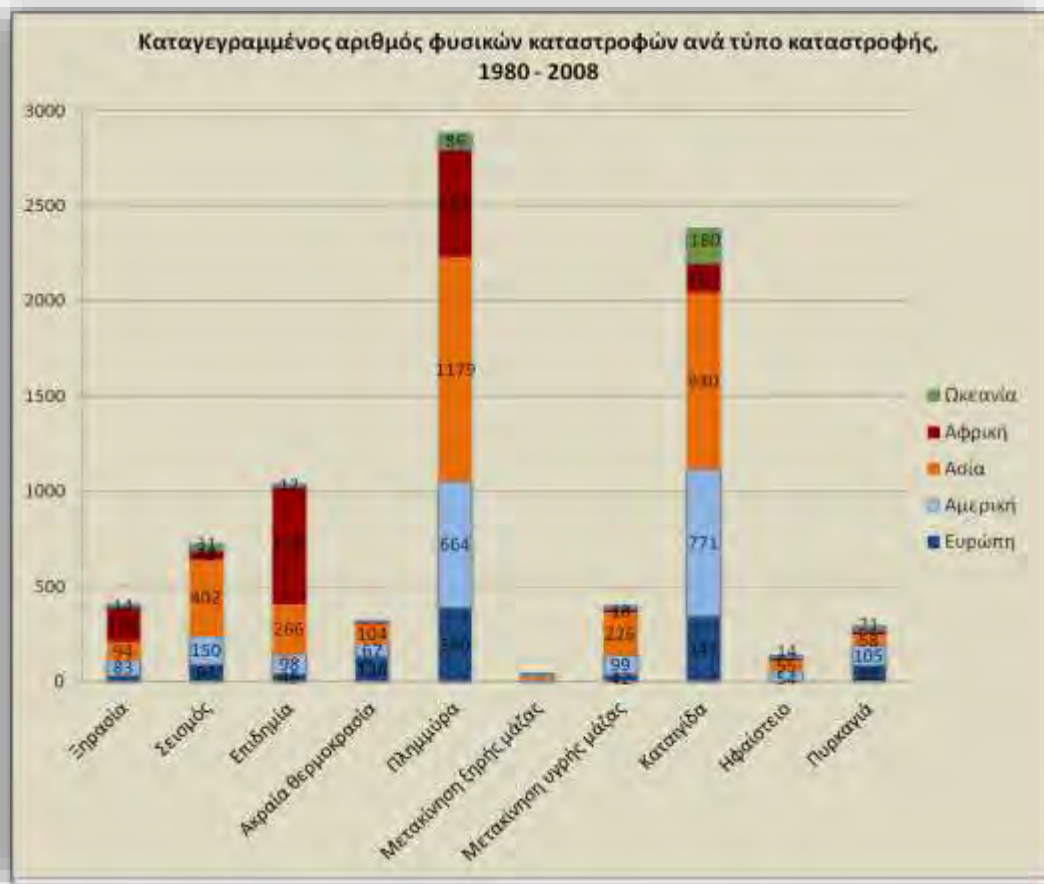
Μια κατηγοριοποίηση των φυσικών καταστροφών ανάλογα με την φύση τους πραγματοποιήθηκε από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (World Health Organization) και την παγκόσμια βάση δεδομένων για τις φυσικές καταστροφές EM-DAT (Emergency Events Database). Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας προέκυψαν πέντε κατηγορίες φυσικών καταστροφών. Οι κλιματολογικές καταστροφές που μπορούν να εμφανιστούν με την μορφή παρατεταμένων περιόδων ξηρασίας, ακραία χαμηλών ή υψηλών θερμοκρασιών ακόμα και δασικών πυρκαγιών. Οι μετεωρολογικές καταστροφές που περιλαμβάνουν τις έντονες καταιγίδες και θύελλες. Οι υδρολογικές καταστροφές όπως πλημμύρες ή κατολισθήσεις υγρής μάζας όπως χιονοστιβάδες. Οι γεωφυσικές καταστροφές με κυριότερη τους σεισμούς. Και τέλος οι βιολογικές καταστροφές, παραδείγματος χάριν, επιδημίες που οφείλονται σε παθογόνους οργανισμούς.

Οι φυσικές καταστροφές είναι θετικό να μην θεωρούνται αναπότρεπτο αποτέλεσμα ενός φυσικού κινδύνου αλλά συνέπεια της μη σωστής προετοιμασίας της κοινωνίας να διαχειριστεί αυτόν τον κίνδυνο. Το κράτος και κατά συνέπεια η ίδια η κοινωνία δημιουργεί το υπόβαθρο πάνω στο οποίο θα εξελιχθεί το φαινόμενο εκάστοτε φαινόμενο. Ως αποτέλεσμα παρατηρείται πως η συντριπτική πλειοψηφία θανάτων από φυσικές καταστροφές συνέβη σε χώρες χαμηλού ή μεσαίου οικονομικού επιπέδου. Τα φτωχότερα κράτη βιώνουν τα δυσμενέστερες και συχνότερες φυσικές καταστροφές γεγονός που παρουσιάζεται όσον αφορά τον αριθμό των νεκρών ανά

καταστροφή και ανά 100.000 πληθυσμό.( □ [Centre for Research on the Epidemiology of Disasters](#)

□ [UN Office for Disaster Risk Reduction](#))

Οι επιπτώσεις των φυσικών καταστροφών είναι συνθέτες και δύσκολο να αποτιμηθούν, μιας και δεν υπάρχει μια κατοχυρωμένη παγκόσμια μέθοδος αξιολόγησης των αποτελεσμάτων αυτού του τύπου καταστροφών. Οι επιπτώσεις μιας φυσικής καταστροφής μπορούν να είναι πολλαπλές και να αφορούν τους τομείς του περιβάλλοντος, της υγείας, της οικονομίας, την κοινωνία και την πολιτική. Οι άμεσες επιπτώσεις περιλαμβάνουν ανθρώπινες απώλειες, τραυματισμούς, καταστροφές δομικών κατασκευών, καλλιεργήσιμων περιοχών, φυσικών πόρων και άλλων υλικών. Ωστόσο, υπάρχουν επίσης και έμμεσες απώλειες, όπως προσωρινή ανεργία, διαταραχές ή διακοπή λειτουργίας επιχειρήσεων, περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ψυχολογικές συνέπειες και άλλες.



Σχήμα 1 Καταγεγραμμένοι αριθμός φυσικών(EM-DAT)

Την περίοδο 1996 έως 2015 καταγράφηκαν 7056 φυσικές καταστροφές παγκοσμίως από το **EM-DAT**, με την συχνότητα των γεωφυσικών καταστροφών(κυρίως σεισμοί, συμπεριλαμβανομένων των τσουνάμι και ηφαιστειακές εκρήξεις) να παραμένει σχετικά σταθερή κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, αλλά υπήρξε συνεχής αύξηση των γεγονότων

που συσχετίζονται με το κλίμα και τον καιρό (ιδίως πλημμύρες, καταιγίδες και καύσωνες) που αντιπροσώπευαν την πλειοψηφία των θανάτων από φυσικές καταστροφές.

Συνολικά, ο αριθμός των καταστροφών που σχετίζονται με τις καιρικές και τις κλιματικές συνθήκες υπερδιπλασιάστηκε τα τελευταία σαράντα χρόνια, αντιπροσωπεύοντας 6.392 γεγονότα την 20ετία 1996-2015, από 3.017 το 1976-1995. Αυτή η αύξηση μπορεί να σχετίζεται με την κλιματική αλλαγή αλλά και την αστικοποίηση που παρατηρείται σε όλη την Ευρώπη τις τελευταίες δεκαετίες.

## 2.2 Πλημμύρες

Αρχικά ορίζονται οι έννοιες του ποταμού, της λεκάνης απορροής, της κοίτης και της όχθης όπως προέκυψαν οι ορισμοί από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Τα ποτάμια ή τα υδάτινα ρεύματα είναι φυσικά συστήματα εσωτερικών υδάτων τα οποία ρέουν κυρίως στην επιφάνεια του εδάφους αλλά μπορεί να έχουν και υπόγεια τμήματα. Αποτελούνται από τρία κύρια συστατικά στοιχεία την ορεινή κοίτη, την λεκάνη εναποθέσεως και την πεδινή κοίτη.

Η λεκάνη απορροής ενός ποταμού αναφέρεται στην εδαφική περιοχή ελέγχου όπου όλη η απορροή συλλέγεται στο σύνολο της, μέσω ρευμάτων, ποταμών και λιμνών και τελικά αποστραγγίζεται στη θάλασσα μέσω ενός ενιαίου στόμιου του ποταμού, εκβολές η δέλτα.

Η κοίτη είναι ο φυσικός ή κατασκευασμένος ανθρωπογενής σχηματισμός γης μέσω στον οποίο ρέει υδάτινο σώμα με μόνιμη ή περιοδική μορφή ροής. Εξαιρούνται από τον παραπάνω ορισμό οι περιοχές μόνιμης ή περιοδικής κατάκλισης όταν παρουσιάζεται σε υγροτόπους.

Με τον όρο όχθη αναφερόμαστε στην γραμμή που συνδέει τα πάνω άκρα των πρανών της κοίτης (φρύδι), καθιστώντας το ξεχωριστό μορφολογικό στοιχείο της περιοχής

Όπως ορίζεται από το Άρθρο 2, του πρώτου Κεφαλαίου της Οδηγίας 2007/60/EK για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, το Ευρωπαϊκό κοινοβούλιο και το συμβούλιο της ευρωπαϊκής ένωσης, πλημμύρα είναι η προσωρινή κάλυψη του εδάφους από νερό το οποίο δεν καλύπτεται από νερό υπό φυσιολογικές συνθήκες. Σε αυτόν τον όρο συμπεριλαμβάνονται πλημμύρες από ποτάμια, ορεινούς χείμαρρους και μεσογειακά εφήμερα ρεύματα νερού καθώς και πλημμύρες που προκύπτουν από ανύψωση της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές, Ωστόσο, μπορεί να αποκλείσει πλημμύρες που είναι αποτέλεσμα συστημάτων αποχέτευσης.

Η πλημμυρική επικινδυνότητα (flood hazard) αναφέρεται στην εμφάνιση πλημμύρας σε συγκεκριμένο περιοχή. Χαρακτηρίζεται μέσα από το βάθος ροής νερού, της ταχύτητας ροής νερού ή άλλες υδρολογικές και υδραυλικές παραμέτρους, που αντιστοιχούν σε δεδομένη περίοδο επαναφοράς. (Ευστρατιάδης και Μαμάσης, 2011)

Ο κίνδυνος πλημμύρας (flood risk), από την άλλη πλευρά, είναι ο συνδυασμός της πιθανότητας να λάβει χώρα πλημμύρα και των δυνητικών αρνητικών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία, το

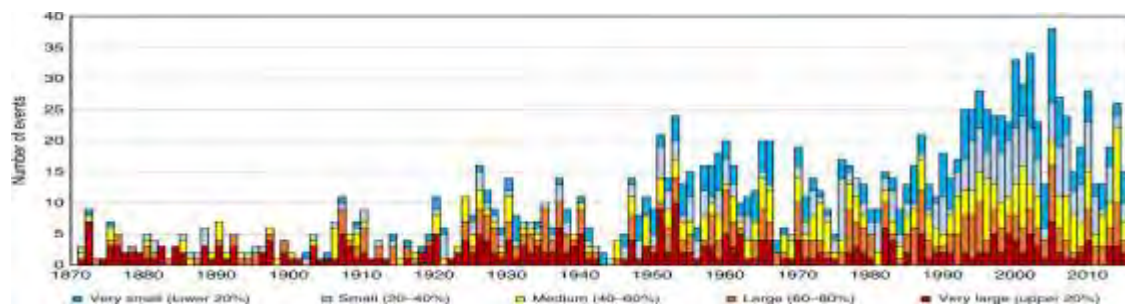
περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται μ' αυτή την πλημμύρα.

Επίσης, ορίζεται με βάση την αναφερθείσα Οδηγία 2007/60/EK πως τα επιφανειακά νερά ενός υδατικού διαμερίσματος διακρίνονται σε 4 κατηγορίες: Ποτάμια, Λίμνες, Μεταβατικά και Παράκτια ύδατα.

1. Οι ποταμοί αναφέρονται σε συστήματα ροών εσωτερικών υδάτων που καταβρέχουν κυρίως την επιφάνεια του εδάφους, αλλά μπορεί να ρέουν υπογείως σε ορισμένα τμήματα της διαδρομής τους.
2. Οι λίμνες αναφέρονται σε στάσιμα υδατικά συστήματα με σαφή εξωτερικά όρια.
3. Τα μεταβατικά ύδατα αναφέρονται σε υδάτινα συστήματα κοντά στην εκβολή των ποταμών, τα οποία είναι εν μέρει αλμυρά εξαιτίας της πλησιέστερης επαφής τους με παράκτια ύδατα, αλλά μπορεί να επηρεαστούν από ρεύματα γλυκού νερού.
4. Τα παράκτια ύδατα αναφέρονται στα επιφανειακά ύδατα που βρίσκονται στην πλευρά της ξηράς ενός παράκτιου τμήματος με απόσταση ενός ναυτικού μιλίου προς τη θάλασσα από την ακτογραμμή, που αποτελεί βάση των χωρικών υδάτων. Αυτά σε ορισμένες περιπτώσεις εκτείνονται μέχρι τα ακραία όρια των μεταβατικών υδάτων.

Οι πλημμύρες αποτελούν σημαντικό απειλή για την ανθρώπινη ασφάλεια και συμβάλουν ουσιαστικά στις ανθρώπινες απώλειες και τις οικονομικές επιπτώσεις που προκαλούνται από φυσικές καταστροφές (Milly et al. 2002, Kundzewicz and Scellnhuber 2004).

Με βάση τις προβλέψεις που αφορούν την κλιματική αλλαγή συγκεκριμένα στον μεσογειακό χώρο, αναμένεται αύξηση της συχνότητας των ακραίων καιρικών φαινομένων και κυρίως των καταιγίδων. Ως επακόλουθο προβλέπεται αύξηση των πλημμυρών (Alieri et al. 2015). Το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο κατανοητό στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2 Αριθμός πλημμυρών (Dominik Paprotny et al. 2018)

Από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Πρόληψης Κινδύνων γνωστό ως ECRP (European Center for Risk Prevention) γίνονται οι παρακάτω δύο διαχωρισμοί. Ο πρώτος με βάση τα αίτια που προκαλούν τις πλημμύρες και ο δεύτερος ανάλογα με το είδος της εκάστοτε πλημμύρας. Οι πλημμύρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κύριες ομάδες ανάλογα με τα αίτια που τις προκαλούν. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει τις πλημμύρες που προκαλούνται από έντονες ή διαρκείς βροχοπτώσεις, την έκλυση του λειψάνου νερού από το χιόνι ή την τήξη του πάγου. Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει τις πλημμύρες που προκαλούνται από έντονους ανέμους, συνήθως σε παράκτιες περιοχές και σε ποταμούς που εκβάλλουν στη θάλασσα. Τέλος, η τρίτη ομάδα

περιλαμβάνει τις πλημμύρες που προκαλούνται από υποθαλάσσιους σεισμούς και, σπάνια, από έκρηξη υποθαλάσσιου ή νησιωτικού ηφαιστείου. Οι υποθαλάσσιοι σεισμοί και οι εκρήξεις μπορούν να προκαλέσουν τσουνάμι, δηλαδή μεγάλα κύματα που συνήθως οδηγούν σε παράκτιες πλημμύρες.

Τα βασικά είδη πλημμυρών με βάση το *Ευρωπαϊκό Κέντρο Πρόληψης Κινδύνων* είναι:

- Ταχεία τήξη χιονιών και παγετώνων
- Ραγδαίες και παρατεταμένες βροχές
- Παράκτιες πλημμύρες
- Ανύψωση της θάλασσας στάθμης, εξαιτίας παλιρροιακών φαινομένων
- Πλημμύρα από τοπική αποστράγγιση ή από υπόγεια υδατικά σώματα
- Υπέρβαση της θάλασσας στην ξηρά, λόγω τσουνάμι
- Αστοχία που οδηγεί σε διάρρηξη φράγματος τεχνητής λίμνης

Στην περίπτωση της περιοχής μελέτης του Αλμυρού που μελετάμε, η κύρια αιτία πλημμύρας στην λεκάνη απορροής έχει καταγραφεί η ποτάμια ροή. Και με βασικούς μηχανισμούς πλημμύρας την φυσική υπερχειλίση, την υπερχειλίση αναχωμάτων και την παρεμπόδιση ροής που συχνά προκύπτει από συσσώρευση φερτών υλικών καθώς και έμφραξης των χειμάρρων σε διάφορες περιοχές.

Με βάση τις προαναφερθείσες αιτίες και είδη πλημμυρών θα παραθέσουμε την παρακάτω κατηγοριοποίηση που πραγματοποιήθηκε από τους Kourgialas & Karatzas, κατά τους οποίους οι πλημμύρες χωρίζονται στις 5 παρακάτω περιπτώσεις:

1. πλημμύρες ποταμών (river floods) : οφείλονται στις έντονες βροχοπτώσεις για αρκετές ημέρες ή ακόμη και εβδομάδες, καθώς και σε παράγοντες όπως ο καιρός, οι χρήσεις γης και το έδαφος.
2. οι αιφνίδιες/στιγμιαίες πλημμύρες (flash floods) : οφείλονται σε έντονες τοπικές βροχοπτώσεις, οι οποίες έχουν την δυνατότητα να προκαλέσουν εκτεταμένες ζημιές και είναι δύσκολο να γίνει πρόγνωση αυτών.
3. παράκτιες πλημμύρες (coastal flooding) : προκαλούνται από την υπερχειλίση των παράκτιων περιοχών, η οποία οφείλεται συνήθως σε ακραία υδρομετεωρολογικά φαινόμενα, όπως για παράδειγμα στο συνδυασμό ισχυρών κυμάτων καταιγίδας και υψηλής παλίρροιας.
4. αστικές πλημμύρες (urban floods) : οφείλονται σε αστοχίες τεχνικών έργων, όπως για παράδειγμα ενός φράγματος ή καναλιού, με αποτέλεσμα την έντονη διάβρωση, τις ροές λάσπης και τα ορμητικά ύδατα.
5. πλημμύρες αποχέτευσης (sewer flooding) : προκαλούνται από διάφορους παράγοντες, όπως μπλοκάρισμα σωλήνων και έντονες βροχοπτώσεις

Συνήθως, οι πλημμύρες προκαλούνται από έντονες βροχοπτώσεις που σχετίζονται με χαμηλές πιέσεις και ψυχρά μέτωπα που προέρχονται από δυτικές κατευθύνσεις. Επιπλέον, οι μεταγωγικοί κλιματικοί τύποι, που περιλαμβάνουν ψυχρές αέριες μάζες και δημιουργούν αστάθεια, μπορεί να προκαλέσουν ισχυρές καταιγίδες και απρόβλεπτες πλημμύρες, κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς

μήνες (Μαμάσης και Κουτσογιάννης , 1996). Αντίθετα, δεν αποτελεί συχνό φαινόμενο να δημιουργούνται πλημμύρες ως αποτέλεσμα της πήξης του χιονιού (Κουτσογιάννης κ.α., 2012).

Το επίπεδο των καταστροφών της εκάστοτε πλημμύρας είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τα ξεχωριστά χαρακτηριστικά της ίδιας της πλημμύρας, αλλά και με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος στο οποίο συμβαίνει το φαινόμενο. Για να γίνει πιο αντιληπτό το οικονομικό μέγεθος ενός τέτοιου φαινομένου που συνδυάζει ακραία πλημμυρικά χαρακτηριστικά σε ευάλωτο σε τέτοιου είδους φυσικές καταστροφές χωρικό περιβάλλον θα αναφέρουμε παρακάτω μερικά από τα οικονομικά κόστη ζημιών των μεγαλύτερων πλημμυρών που έχουν καταγραφεί ιστορικά μέσα από στοιχεία που αντλήσαμε από το worldatlas.com. Στην συγκεκριμένη βάση δεδομένων την πρώτη θέση έχει η πλημμύρα που έγινε στην Ταϊλάνδη το 2011 με ύψος ζημιών που ανέρχεται σε περίπου 40 δισεκατομμύρια δολάρια, στην Κίνα έχουν παρατηρηθεί 3 από τις 10 πιο οικονομικά καταστροφικές πλημμύρες με το κόστος να κυμαίνεται από 30 έως 12.6 δισεκατομμύρια τέλος ενδιαφέρον παρουσιάζει η παρουσία της Γερμανίας, η οποία εμφανίζεται με την σειρά της να έχει υποστεί 2 από τις 10 πιο οικονομικά καταστροφικές πλημμύρες με εύρος κόστους ιστορικά με το κόστος να κυμαίνεται από 11.6 έως 12.9 δισεκατομμύρια.

Στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου και κατά συνέπεια στον ελλαδικό χώρο οι στιγμιαίες πλημμύρες (flash floods) αποτελούν την πιο συνηθισμένη μορφή εκδήλωσης πλημμύρας, καθώς οι λεκάνες απορροής των ποταμών και ρεμάτων έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό το μικρό μέγεθος, λόγω της γεωμορφολογίας και των έντονων βροχοπτώσεων ( Διακάκης, Μ. et al., 2012). Με βάση τα παραπάνω, στην Ελλάδα εμφανίζονται γεγονότα πλημμύρας τόσο σε ορεινές περιοχές όσο και σε περιοχές μικρότερου υψομέτρου κοντά σε ποτάμια, καθιστώντας έτσι τα γεγονότα αυτά καταστροφικά για κάθε οικονομικό σύστημα τις χώρας.

Οι στιγμιαίες πλημμύρες όπως προϋδειάζει και η ονομασία τους προκύπτουν ξαφνικά, ο χρόνος μέχρι το σημείο αιχμής είναι στις περισσότερες περιπτώσεις μερικές ώρες και για τον χρόνο αυτόν παρουσιάζουν μεγάλα επίπεδα απορροής (Chow et al., 1988). Οι βροχοπτώσεις που ευθύνονται συνήθως για αυτό το φαινόμενο παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά(Παπαστεφανάκης, 2009):

- μικρή διάρκεια ( λεπτά μέχρι ώρες)
- μεγάλη ένταση ( >100 mm ανά ώρα)

Αυτός ο τύπος πλημμύρας προκαλείτε συνήθως από τα παρακάτω δύο αίτια:

1. Μία αιφνίδια έντονη βροχόπτωση που λαμβάνει χώρα σε έδαφος που παρουσιάζει μεγάλα επίπεδα κορεσμού, οδηγώντας τα επιφανειακά ύδατα να φορτίζουν το ποτάμιο σύστημα της περιοχής με ρυθμό που δεν μπορεί να το διαχειριστεί αυτό, προκύπτοντας έτσι απότομη και μεγάλη αύξηση της στάθμης και μεγάλες ταχύτητες ροής, προκαλώντας έτσι το φαινόμενο της πλημμύρας.
2. Μπορεί ακόμα να προκληθεί από την αστοχία κάποιου τεχνικού έργου όπως ένα φράγμα, ένα αντιπλημμυρικό έργο ή ένα υδραυλικό σύστημα.

Οι στιγμιαίες πλημμύρες αποτελούν το μείζον πρόβλημα στον Ελλαδικό χώρο, παρουσιάζοντας αυξητική τάση λόγω της κλιματικής αλλαγής. Τα χαρακτηριστικά τους πως αρχίζουν απότομα



και αναπτύσσονται πολύ γρήγορα σε συνδυασμό με το γεγονός πως μπορούν να εμφανιστούν ακόμα και σε ξερά μέρη τις καθιστά εξαιρετικά επικίνδυνες. Ταυτόχρονα λόγω της φύσης τους είναι δύσκολο να γίνει πρόβλεψη ώστε να προειδοποιηθούν οι πολίτες για τέτοια φαινόμενα. Η ένταση τέτοιων πλημμυρών είναι αρκετά ισχυρή ώστε να ξεριζώσει δέντρα, να υποσκαφθούν κτήρια και γέφυρες ακόμα και να δημιουργήσουν νέα κανάλια ροής. Εδώ να αναφέρουμε το πρόσφατο παράδειγμα των πλημμυρών που συνέβησαν στην Εύβοια στις 9 Αυγούστου 2020 που είχαν ως αποτέλεσμα να χάσουν την ζωή τους επτά άνθρωποι.

Οι πλημμύρες κατατάσσονται στα φυσικά φαινόμενα που δεν είναι δυνατό να αποτραπούν. Η γεωγραφική μορφολογία της Ελλάδας ευνοεί την εμφάνισή τους, καθώς διαθέτει ένα αποστραγγιστικό σύστημα που αποτελείται σημαντικά από προσωρινούς ορεινούς χειμάρρους σε συνδυασμό με λεκάνες απορροής όχι μεγάλης έκτασης και με περιορισμένη ικανότητα αποστράγγισης. Καταλαβαίνουμε ότι η γεωμορφολογία της λεκάνης απορροής είναι το πλέον σημαντικό χαρακτηριστικό στην αντιμετώπιση ενός πλημμυρικού φαινομένου μιας και είναι κάτι που μπορούμε να επηρεάσουμε σε αντίθεση με την βροχόπτωση, στον όρο γεωμορφολογία περιλαμβάνονται τα συστατικά στοιχεία μιας λεκάνης απορροής όπως οι κλίσεις της, οι χρήσεις γης, το μέγεθος της, οι ανθρώπινες παρεμβάσεις στην περιοχή και οτιδήποτε άλλο χαρακτηρίζει το υπόβαθρο στο οποίο εξελίσσεται το φαινόμενο της βροχόπτωσης.

Όμως, ορισμένες ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η αύξηση του αστικού ιστού, η καταστροφή φυτό-κάλυψης, η υψηλή πυκνότητα συγκέντρωσης του πληθυσμού σε αστικά κέντρα, η αλλαγή του κλίματος και η επιλογή θέσεων κατοίκησης εντός περιοχών επιρρεπών σε πλημμύρες (περιοχές κοντά σε ποτάμια, παράκτιες περιοχές) συμβάλλουν στην αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης φαινομένων πλημμύρας και κατά συνέπεια των αρνητικών τους επιπτώσεων στην Ελλάδα. Οι αρνητικές αυτές συνέπειες των φαινομένων πλημμύρας στον Ελλαδικό χώρο, γίνονται ακόμα πιο έντονες από τη στιγμή που όλες οι παραπάνω ανθρώπινες δραστηριότητες δεν έχουν επαρκή νομοθεσία να τις διέπει αλλά ούτε υπάρχει εκπαίδευση και ενημέρωση του κοινού πάνω στα περιβαλλοντικά θέματα, αφήνοντας τους ανθρώπους να πραγματοποιούν αλλοιώσεις στις λεκάνες απορροής και αλλάζοντας για πάντα την πλημμυρική απόκριση τους. Δημιουργείτε έτσι μια δυσμενή κατάσταση στην χώρα που χρήζει ορθής προετοιμασίας και πρόληψης για να αποφευχθούν στο μέλλον σοβαρές καταστροφές τόσο στα μεγάλα αστικά κέντρα όσο και στις γύρω περιοχές από αυτά. Δεδομένης της μεγάλης συχνότητας εμφάνισης πλημμυρών στην Ελλάδα, δημιουργείται άμεσα η ανάγκη για την κατασκευή αντιπλημμυρικών έργων που θα προλαμβάνουν και θα αποτρέπουν στο μέγιστο τις συχνά καταστροφικές συνέπειες τους (Κουτσογιάννης, κ.ά., 1999).

### **2.3 Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/ΕΚ**

Για να μειωθεί ο κίνδυνος αρνητικών επιπτώσεων από μια πλημμύρα, είναι σημαντικό να ληφθούν μέτρα υπέρ της αντιπλημμυρικής προστασίας της περιοχής. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του υδρολογικού σχεδιασμού των προστατευτικών έργων, τον οποίο καθοδηγεί η εκτίμηση των πλημμυρικών ροών στις λεκάνες απορροής. Ταυτόχρονα με την μελέτη της υδραυλικής

συμπεριφοράς των ποταμών και των χειμάρρων που εμφανίζονται στις λεκάνες για την αποτελεσματική διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας (Κουτσογιάννης, κ.ά., 1995).

Σε αυτή την λογική πρόληψης, μετά και τις καταστροφικές πλημμύρες που έπληξαν τον Ευρωπαϊκό χώρο το διάστημα από το 1998 έως το 2002, με περίπου 100 περιστατικά σοβαρών πλημμυρών τα οποία άφησαν πίσω τους σχεδόν 700 νεκρούς, μισό εκατομμύριο άστεγους και 25 δισεκατομμύρια σε οικονομικές ζημιές η Ευρωπαϊκή κοινότητα δημιούργησε την οδηγία 2007/60/EK την οποία και εξέδωσε το 2004, με στόχο τη δημιουργία χαρτών για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας της πλημμύρας όπως και των μέτρων που πρέπει να εφαρμοστούν για τη βελτίωση της προστασίας περιοχών από μελλοντικές πλημμύρες.

Ουσιαστικά η οδηγία 2007/60 αποτελεί μια ‘‘πυξίδα’’ για τα κράτη-μέλη, την οποία και αν ακολουθήσουν, ίσως και να πετύχουν την ελαχιστοποίηση καθώς και την ορθή διαχείριση των κινδύνων μιας ενδεχόμενης πλημμύρας. Θεσπίζοντας έτσι ένα πλαίσιο αξιολόγησης για την διαχείριση κινδύνων πλημμύρας κοινό μεταξύ των χωρών της Ευρωπαϊκής ένωσης. Η διεκπεραίωση της πραγματοποιείται σε τρία στάδια:

1. Διεξαγωγή μιας προκαταρκτικής αξιολόγησης του κινδύνου πλημμύρας για κάθε λεκάνη απορροής ποταμού ή μονάδα διαχείρισης νερού, ώστε να οριστούν οι περιοχές για τις οποίες θα διεξαχθεί χαρτογράφηση των πλημμυρών καθώς και δημιουργία σχεδίων αντιμετώπισης πλημμύρας.
2. Κατάρτιση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας και χαρτών κινδύνου πλημμύρας για τις προαναφερθείσες λεκάνες απορροής. Οι χάρτες επικινδυνότητας ελέγχουν σύμφωνα με διάφορα σενάρια τις πιθανές εκτάσεις που μπορεί να πλήξει μια πλημμύρα. Οι χάρτες κινδύνου πλημμύρας απεικονίζουν τις δυνητικά αρνητικές συνέπειες που μπορεί να είχε το καθένα από τα παραπάνω σενάρια.
3. Κατάρτιση σχεδίων διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας για τις περιοχές που εμφανίζουν, με βάση τους καταρτισμένους χάρτες, μεγάλη επικινδυνότητα ή και πιθανότητα πλημμύρας. Το σχέδιο διαχείρισης της κάθε περιοχής θα πρέπει να εμπεριέχει τους στόχους της διαχείρισης του κινδύνου στην περιοχή, σύγχρονος να αναφέρει και τα μέτρα που άρθησαν για την επίτευξη των στόχων.

Ένα γεγονός πλημμύρας μπορεί να ταξινομηθεί ανάλογα με την ένταση του φαινομένου της βροχόπτωσης. Έτσι, τα σενάρια πλημμυρών που πρέπει να μελετώνται σε μία μελέτη κινδύνων πλημμύρας διακρίνονται ως προς την ένταση βροχόπτωσης που τα προκάλεσε με βάση την οδηγία 2007/60 σε:

- High ή Υψηλής πιθανότητας πλημμύρα, T=50 χρόνια
- Medium ή Μέτριας πιθανότητας, T=100 χρόνια
- Low ή Χαμηλής πιθανότητας ή σενάριο ακραίου φαινομένου, T=1000 χρόνια

Την παραπάνω κατηγοριοποίηση βοηθάει να καταστήσει πιο σαφή η έννοια της περιόδου επαναφοράς που θα εξηγήσουμε σε επόμενο κεφάλαιο το νόημα της. Η επιλογή της τιμής περιόδου επαναφοράς δεν καθορίζεται ακριβώς στην οδηγία για τις περιπτώσεις υψηλής και χαμηλής πιθανότητας εμφάνισης έντονης βροχόπτωσης, σε αντίθεση με την περίπτωση της μέτριας πιθανότητας, η τιμή της οποίας ορίζεται μεγαλύτερη ή ίση των εκατό χρόνων. Η επιλογή

πρέπει να γίνει ώστε να καλυφθούν όλες οι γεωγραφικές περιοχές που θα μπορούσαν να πλημμυρίσουν. Στην περίπτωση μας επιλέξαμε όπως φαίνεται παραπάνω της τιμές 50 και 1000 χρόνων και τα σενάρια υψηλής και χαμηλής πιθανότητας αντίστοιχα.

Επίσης, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον που λαμβάνει τόπο η κάθε βροχόπτωση δεδομένης περιόδου επαναφοράς, εφαρμόζουμε επιπρόσθετη ανάλυση σε τρεις περιπτώσεις συνθηκών ευμενής, μέσης και δυσμενής συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον (π.χ. υγρασία) και που επηρεάζουν τον βαθμό στον οποίο θα συμβεί ένα γεγονός πλημμύρας.

Για κάθε ένα από τα παραπάνω σενάρια η Οδηγία 2007/60 ορίζει πως πρέπει να αναπτυχθούν χάρτες που να περιέχουν τα παρακάτω στοιχεία για να έχουμε μια καθολική εικόνα για το φαινόμενο της πλημμύρας:

- Την συνολική έκταση της πλημμύρας
- Το βάθος ή την στάθμη του νερού
- Την ταχύτητα ροής ή την σχετική ταχύτητα υδάτων

Τα πλημμυρικά φαινόμενα μπορούν να καταταχθούν στις κατηγορίες χαμηλού, μέσου και υψηλού κινδύνου λαμβάνοντας υπόψιν τα εξής:

- Την ύπαρξη ανθρώπινων θυμάτων
- Την καταστροφή υποδομών, οδικού δικτύου κλπ.
- Το ύψος της χρηματικής αποζημίωσης που δόθηκε για τις ζημιές
- Το μέγεθος της έκτασης που κατακλύσθηκε

Την κατάρτιση των χαρτών κινδύνου πλημμύρας ακολουθεί η ανάπτυξη των σχεδίων διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας. Η κατάσταση των προαναφερθέντων σχεδίων πραγματοποιείται με βάση τους χάρτες που δημιουργούνται στο προηγούμενο στάδιο αλλά πάντα λαμβάνοντας υπόψιν παράγοντες όπως το κόστος, το όφελος και τους περιβαλλοντικούς στόχους ενός τέτοιου σχεδίου. Ένα τέτοιο σχέδιο πρέπει να αποτελεί ολιστική προσέγγιση στο πρόβλημα εστιάζοντας στην πρόληψη, την προστασία και την ετοιμότητα, ταυτόχρονα όμως, μπορεί να περιλαμβάνει και την προβολή καλύτερων επιλογών χρήσεων γης ή άλλων μορφών ελέγχου μιας πλημμύρας.

Με βάση όλα τα παραπάνω, η κατανόηση και ο μετριασμός των κινδύνων που συνδέονται με τις πλημμύρες αποτελεί επείγουσα προτεραιότητα για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, τους επιστήμονες και τους επαγγελματίες. Τα εργαλεία υδραυλικής μοντελοποίησης, όπως το HEC-RAS που θα αξιοποιήσουμε στην παρούσα εργασία, μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο σε αυτή την προσπάθεια παρέχοντας ακριβείς και αξιόπιστες προβλέψεις της συμπεριφοράς των πλημμυρών και βοηθώντας στην ενημέρωση των στρατηγικών λήψης αποφάσεων και διαχείρισης κινδύνου. Η μοντελοποίηση πλημμύρας είναι ένα ουσιαστικό εργαλείο για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των πλημμυρών και την αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων. Ωστόσο, τα μοντέλα 1D χρησιμοποιούνται συχνότερα λόγω των χαμηλότερων υπολογιστικών απαιτήσεων και της σχετικής απλότητας (Cunge et al., 1980). Τα μοντέλα 1D αντιπροσωπεύουν τη ροή του νερού σε μία μόνο διάσταση, κατά μήκος ενός καναλιού ποταμού ή μέσω ενός

σωλήνα και μπορούν να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για τη συμπεριφορά των πλημμυρών σε αυτά τα συστήματα.

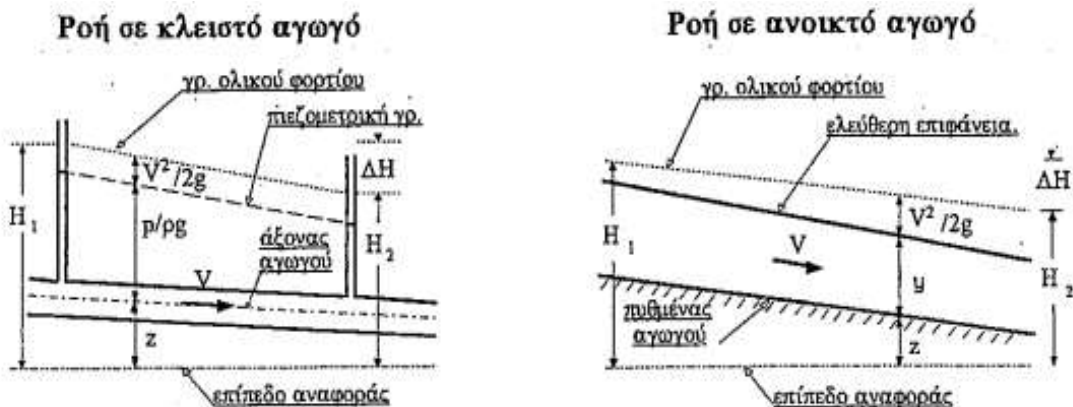
## 2.4 Βασική ορισμοί Υδραυλικής

### 2.4.1 ΑΝΟΙΧΤΟΙ – ΚΛΕΙΣΤΟΙ ΑΓΩΓΟΙ

Ένας αγωγός που εμφανίζει ελεύθερη επιφάνεια, όπου η πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση, ονομάζεται ανοιχτός ή αγωγός ελεύθερης ροής. Στον συγκεκριμένο τύπο αγωγών, η κίνηση του νερού οφείλεται κυρίως στη δράση της βαρύτητας, ενώ η επιβράδυνση της ροής συμβαίνει λόγω των δυνάμεων τριβής. Από την άλλη πλευρά, σε έναν κλειστό αγωγό, το νερό γεμίζει πλήρως τη διατομή του σωλήνα και κινείται υπό πίεση. (Α. Δαμασκηνίδου-Γεωργιάδου, Ε. Σιδηρόπουλος, 1996)

Οι ανοιχτή αγωγοί εμπεριέχουν ένα τεράστιο εύρος ροών από εφήμερα ρυάκια μέχρι μεγάλους ποταμούς και τάφρους, υπονόμους ακόμα και δίκτυα αποχετεύσεων. Οι ανοιχτοί αγωγοί όμως διαχωρίζονται και σε 2 υποκατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που έχουν δημιουργηθεί στους φυσικούς και τους τεχνητούς. Φυσικοί είναι αυτοί που έχουν δημιουργηθεί από φυσικές διεργασίες και δεν υπάρχει έντονη ανθρώπινη παρέμβαση σε αυτούς περιλαμβάνοντας όλα τα είδη φυσικών υδατορευμάτων. (ποτάμια, χείμαρρους κλπ.). Τεχνητοί είναι οι αγωγοί που έχουν κατασκευαστεί από ανθρώπους όπως οι διώρυγες, οι αποστραγγιστικές τάφροι, οι υπόνομοι και άλλοι. Κατηγοριοποιούνται με βάση το σχήμα τους σε κυκλικούς, ορθογωνικούς, τριγωνικοί κλπ.

Ανεξάρτητα από το είδος του αγωγού που μεταφέρει το νερό είτε αυτός είναι ανοιχτός είτε κλειστός, η κίνηση αυτού πραγματοποιείται από μια θέση μεγαλύτερου ολικού φορτίου σε μια μικρότερου ολικού φορτίου. Επίσης, η αντίσταση του ρευστού στην κίνηση και στις 2 περιπτώσεις αγωγών οφείλεται στην ύπαρξη απωλειών λόγω τριβών με τα τοιχώματα αλλά και τριβών που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της ροής.



Σχήμα 3 Ροή σε κλειστό και ανοικτό αγωγό

Παρά τις ομοιότητες μεταξύ των ροών σε ανοιχτούς και κλειστούς αγωγούς θα πρέπει να γίνει ξεκάθαρο πως ο βαθμός δυσκολίας επίλυσης μιας ροής σε ανοιχτό αγωγό είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν σε κλειστό αγωγό, ειδικά στην περίπτωση φυσικών αγωγών. Αυτό οφείλεται στην πιθανή χωρική και χρονική μεταβλητότητα του βάθους ροής που οδηγεί σε συνεχή μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της υγρής διατομής και συνεπώς των υδραυλικών μεγεθών που εξαρτώνται από αυτά, ωθώντας έτσι τον εκάστοτε μελετητή να εισάγει περισσότερες μεταβλητές για την όσο δυνατών ακριβέστερη επίλυση της ροής. Επίσης, η μεγάλη ποικιλία σε σχήματα διατομών ανοιχτών αγωγών, αλλά και η παρουσία μεγάλων διακυμάνσεων στην τραχύτητα από αγωγό με αγωγό, σε αντίθεση με την τραχύτητα σωλήνων που κατασκευάζονται βιομηχανικά και εμφανίζουν σταθερές τιμές τραχύτητας κατά μήκος, προσθέτει δυσκολία στην διαδικασία επίλυσης της εκάστοτε ροής..

#### **2.4.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΡΟΗΣ**

Μία ροή ονομάζεται μόνιμη όταν το πεδίο ταχύτητας είναι ανεξάρτητο του χρόνου και μη μόνιμη όταν το πεδίο ταχύτητας είναι χρονοεξαρτημένο. (Λιακόπουλος, 2016)

Η ομοιόμορφη ροή σε έναν αγωγό αναφέρεται στην περίπτωση όπου η ταχύτητα της ροής παραμένει σταθερή χωρίς να αλλάζει με την απόσταση. Αν και η ομοιόμορφη ροή σπάνια συμβαίνει σε ανοιχτούς αγωγούς, σε μια τάφρο με σταθερή κλίση και διατομή, το σφάλμα που προκύπτει από την παραδοχή ομοιόμορφης ροής είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με το σφάλμα που συνήθως εμφανίζεται κατά τον υπολογισμό της παροχής.

Αντίθετα, η ανομοιόμορφη ροή σε έναν αγωγό αναφέρεται στην περίπτωση όπου η ταχύτητα της ροής αλλάζει σε μέγεθος ή κατεύθυνση με την απόσταση. Μια ροή θεωρείται μόνιμη όταν η ταχύτητα σε ένα σημείο ή μια διατομή παραμένει σταθερή με την πάροδο του χρόνου και η τοπική επιτάχυνση είναι μηδενική. Από την άλλη πλευρά, μια ροή θεωρείται μη μόνιμη όταν η ταχύτητα σε ένα σημείο ή μια διατομή μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου και η τοπική επιτάχυνση δεν είναι μηδενική.

Οι συνθήκες ροής που παρατηρούνται στη φύση, συνήθως μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου με αποτέλεσμα οι ροές να είναι μη μόνιμες (Chaudhry, 2008). Ένα από τα σημαντικότερα φαινόμενα μη μόνιμης ροής που καλείται να αντιμετωπίσει ένας μηχανικός είναι η κίνηση ενός πλημμυρικού κύματος κατά μήκος ενός ανοικτού αγωγού, συνήθως κατά μήκος ενός φυσικού ποταμού και το σχετικό με αυτό πρόβλημα της πρόβλεψης της κίνησης του κύματος και των αλλαγών στη μορφή και στο ύψος του (Henderson, 1966).

Η ροή σε έναν ανοιχτό αγωγό δηλαδή έναν αγωγό με ελεύθερη επιφάνεια ορίζεται ως μόνιμη όταν το βάθος ροής μιας τυχαίας διατομής του αγωγού παραμένει σταθερό στο χρόνο. Αν ταυτόχρονα θεωρήσουμε πως τα χαρακτηριστικά της μεταβάλλονται μόνο κατά μία διεύθυνση στο χώρο, τότε μπορεί η ροή να αναλυθεί με τη θεωρία της μονοδιάστατης ανάλυσης.

Η μελέτη της κίνησης των ρευστών πραγματοποιείται με την βοήθεια των παρακάτω αρχών της μηχανικής και την θερμοδυναμικής:

- Αρχή διατήρησης της μάζας
- Αρχή διατήρησης της ορμής γνωστή ως δεύτερο νόμο του Νεύτωνα
- Αρχή διατήρησης της ενέργειας γνωστή ως πρώτο νόμο Θερμοδυναμικής
- Δεύτερος νόμος Θερμοδυναμικής
- Εξίσωση κατάστασης

### **2.4.3 ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ**

Ως περίοδο επαναφοράς δοθέντος ετησίου μεγέθους ενός φαινομένου ορίζουμε το μέσο χρονικό διάστημα  $T$  (έτη) μέσα στο οποίο το θεωρούμενο υδρολογικό φαινόμενο θα εμφανιστεί μια μόνο φορά με τιμή ίση ή μεγαλύτερη την δοθείσας (Γ. Τσακίρης, 2013). Ουσιαστικά αποτελεί έκφραση της πιθανότητας του να συμβεί ένα γεγονός όπως πλημμύρα. Για παράδειγμα η πλημμύρα 1000-ετών είναι το γεγονός αυτό που η τιμή του ισοφαρίζει ή ξεπερνιέται κάθε 1000 χρόνια. Η περίοδος επαναφοράς αποτελεί σημαντική παράμετρο σε οποιαδήποτε αντιπλημμυρική μελέτη. Το αντίστροφο μέγεθος την περιόδου επαναφοράς είναι η πιθανότητα υπέρβασης και συνδέονται με την σχέση:

$$T = 1/P \text{ ή } P(X > x) = 1/T$$

Η περίοδος επαναφοράς που επιλέγεται από τον εκάστοτε μελετητή για την μελέτη του αντίστοιχου έργου σχετίζεται με την σημασία του έργου και εξαρτάται από την οικονομική ζωή του έργου, τον ίδιο ή το ερευνητικό πλαίσιο που μπορεί να υπάγεται η έρευνα του..

Στην συγκεκριμένη περίπτωση θα επιλέξουμε τις παρακάτω περιόδους επαναφοράς όπως ορίζεται από την Ευρωπαϊκή οδηγία 2007/60/EK για την αξιολόγηση και την διαχείριση κινδύνων πλημμύρας:

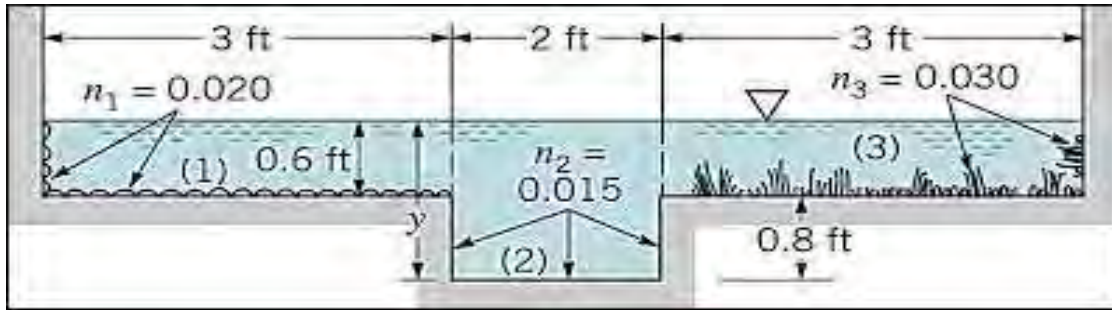
- για πλημμύρα υψηλής πιθανότητας εμφάνισης, περίοδος επαναφοράς 50 έτη,  $T=50$
- για πλημμύρα μέσης πιθανότητας εμφάνισης, περίοδος επαναφοράς 100 έτη,  $T=100$
- για πλημμύρα χαμηλής πιθανότητας εμφάνισης, περίοδος επαναφοράς 1000 έτη,  $T=1000$

Η περίοδος επαναφοράς μίας πλημμύρας σχεδιασμού δεν συμπίπτει με την περίοδο επαναφοράς μιας καταγίδας σχεδιασμού, μιας και η βροχοπτώση παρουσιάζει απώλειες λόγω διήθησης και κατακράτησης. (Γ. Τσακίρης, 2013)

### **2.4.4 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ MANNING**

Η ροή του νερού διαμέσου ενός υδατορέματος εξαρτάται από πλήθος παραγόντων όπως η ταχύτητα ροής, το εύρος της διατομής στην ελεύθερη επιφάνεια, και ο συντελεστής τραχύτητας. Ο συντελεστής τραχύτητας γνωστός και ως συντελεστής κατά Manning 'n' αποτελεί όπως όρισε ο Ven Te Chow (1959) την εκτίμηση της αντίστασης στην ροή σε ένα δεδομένο υδατόρεμα. Η αντίσταση αυτή, με βάση τον Kay (1998), εξαρτάται κυρίως από το πρωτογενές υλικό που συνθέτει το κανάλι και την μορφή βλάστησης που ενδέχεται να έχει αναπτυχθεί σε αυτό. Η βλάστηση όμως, παρουσιάζει εποχιακή διακύμανση ανάλογα με την περίοδο του

χρόνου, γεγονός που θα πρέπει να λάβει υπόψιν του ο μελετητής κατά τον καθορισμό της τιμής του συντελεστή.



Σχήμα 4 Τομή αγωγού με διαφορετικές τιμές τραχύτητας

Για να πραγματοποιηθεί ο ορθός προσδιορισμός της τραχύτητας ο μηχανικός θα πρέπει να συνδυάζει κριτική σκέψη, εμπειρία και όσο το δυνατόν περισσότερα πρωτογενή δεδομένα μιας και δεν υπάρχουν συγκεκριμένες διαδικασίες που πρέπει να ακολουθήσει για να πετύχει τον στόχο του, για την εκτέλεση των περισσότερων μεθόδων απαιτείται η συλλογή πληροφοριών από την περιοχή που εξετάζεται σχετικά με τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά, την ποιότητα του εδάφους και τον τύπο βλάστησης που καλύπτει το έδαφος της περιοχής (French, 1994). Στο βιβλίο του «Υδραυλική ανοικτών αγωγών» ο Chow προσπαθεί να δώσει κατευθυντήριες γραμμές που θα βοηθήσουν τον ερευνητή στην όσο το δυνατόν καλύτερη επιλογή του συντελεστή, αναλύοντας τους παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του συντελεστή.

Αρχικά, θα πρέπει κατανοήσουμε ποιοι παράγοντες επηρεάζουν τον συντελεστή τραχύτητας ξεκινώντας με την επιφανειακή τραχύτητα που σχετίζεται με το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων του υλικού στην βρυχώμενη επιφάνεια. Υλικά όπως η άμμος, ο άργιλος ή πηλός παρουσιάζουν πολύ μικρότερες τιμές τραχύτητας σε αντίθεση με την περίπτωση ύπαρξης χαλικιών ή γενικά ογκόλιθος που η τιμή είναι μεγαλύτερη.

Η φυτό κάλυψη ή βλάστηση μπορεί να θεωρηθεί ως μορφή επιφανειακής τραχύτητας όμως σε αντίθεση με την επιφανειακή τραχύτητα η ύπαρξη βλάστησης σε ένα κανάλι μπορεί να μειώσει εσθήτα την παροχευτική του ικανότητα και να προκαλέσει σημαντική καθυστέρηση στην ροή.

Οι ανωμαλίες που παρουσιάζει ένα κανάλι κατά μήκος περιλαμβάνουν αλλαγές στην υδραυλική ακτίνα ή αλλαγές μεταξύ διατομών. Σε φυσικά κανάλια αυτές οι ανωμαλίες είναι συχνές. Γενικά η σταδιακή και ομοιόμορφη αλλαγή της κοίτης δεν θα επηρεάσει σε έντονο βαθμό την τιμή της τραχύτητας το αντίθετο ισχύει για περιπτώσεις ραγδαίων μεταβολών.

Το πόσο ευθύγραμμο είναι το υδατόρεμα μελέτης θα επηρεάσει επίσης την τιμή. Η ομαλή καμπυλότητα ενός καναλιού με μεγάλη ακτίνα θα μας δώσει χαμηλές τιμές για τον συντελεστή τραχύτητας. Αντίθετα, έντονη καμπυλότητα με εναλλαγές στην κατεύθυνση ροής θα έχουν σαν αποτέλεσμα αύξηση του συντελεστή. Ο Scobey προτείνει αύξηση του συντελεστή για κάθε 20 μίρες καμπυλότητας ανά 100 πόδια μήκους καναλιού.

Σε μικρότερο βαθμό ο συντελεστής τραχύτητας εξαρτάται από τα παρακάτω:

- κατασκευές κατά μήκος του ποταμού ( γέφυρες, διαβάσεις κλπ.)
- σχήμα και μέγεθος καναλιού
- εποχιακή περίοδο

Καθιστάτε κατανοητό με βάση τα παραπάνω πως η τιμή του συντελεστή εντός και εκτός της κοίτης ροής διαφέρει ραγδαία, γεγονός που καθιστά απαραίτητο να γίνει διακεκριμένος καθορισμός του συντελεστή τραχύτητας για την πεδιάδα και για την κοίτη αντίστοιχα. Με βάση τον Cowan(1956) αναπτύχθηκε η παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας  $n$  σε ανοικτό αγωγό:

$$N = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_s$$

Όπου:

$n_b$  = η βασική τιμή για έναν ευθύγραμμο, ομοιόμορφο, ομαλό κανάλι από φυσικά υλικά

$n_1$  = προστιθέμενος συντελεστής διόρθωσης για τις επιφανειακές ανωμαλίες

$n_2$  = τιμή που σχετίζεται με την μεταβλητότητα στο μέγεθος και το σχήμα των διατομών

$n_3$  = τιμή που προκύπτει από τα εμπόδια που υπάρχουν στο υδατόρεμα

$n_4$  = τιμή σχετική με την βλάστηση και τις συνθήκες ροής

$m_s$  = διορθωτικός συντελεστής ως προς το ελικοειδές σχήμα του υδατορέματος

Όλες οι παραπάνω τιμές μπορούν να εντοπιστούν στον Πίνακα 1 που αναπτύχθηκε από τον Chow(1956).

## 2.5 Λογισμικά που αξιοποιήθηκαν

### 2.5.1 ARC GIS

Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών ( geographical information systems, GIS) αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο που χρησιμοποιείται για την συλλογή, αποθήκευση, χειρισμό, ανάλυση και εμφάνιση χωρικών δεδομένων. Το GIS έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διάφορους τομείς όπως ο πολεοδομικός σχεδιασμός, η διαχείριση φυσικών πόρων, η διαχείριση φυσικών καταστροφών, ο σχεδιασμός μεταφορών ακόμα και η δημόσια υγεία. Η έκδοση του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία είναι η 10.8.

Ένα από τα πλέον δημοφιλή λογισμικά της παραπάνω κατηγορίας αποτελεί το ArcGIS που έχει αναπτυχθεί από την ESRI ( environmental systems research institute), το οποίο παρέχει ένα σύνολο λειτουργιών και εργαλείων για χωρική ανάλυση και χαρτογράφηση. Το ArcGIS αποτελείται από πολλά στοιχεία όπως το ArcMap, ArcCatalog, Arc TOOLBOX και Arc SCENE



με το ArcMap να αποτελεί την κύρια διεπαφή για την χαρτογράφηση και την οπτικοποίηση δεδομένων, το ArcCatalog χρησιμοποιείται για την διαχείριση δεδομένων και το Arc TOOLBOX για την εκτέλεση διαφόρων χωρικών αναλύσεων, τέλος το Arc SCENE δίνει την δυνατότητα τρισδιάστατων απεικονίσεων. Στην συγκεκριμένη εργασία έγινε αξιοποίηση διαφόρων τύπων χωρικών αναλύσεων μέσα από το Arc TOOLBOX αλλά δημιουργήθηκαν και οι χάρτες που θα παρουσιαστούν στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων στο περιβάλλον του ArcMap.

### **2.5.2 GOOGLE EARTH PRO**

Το Google Earth Pro είναι μια εφαρμογή λογισμικού που αναπτύχθηκε από την Google που επιτρέπει στους χρήστες να προβάλλουν, να εξερευνούν και να αναλύουν την επιφάνεια της γης σε τρεις διαστάσεις. Είναι μια έκδοση επαγγελματικής ποιότητας του δημοφιλούς λογισμικού Google Earth και περιλαμβάνει πολλές πρόσθετες λειτουργίες.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του Google Earth Pro είναι η ικανότητά του να παρέχει δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης της επιφάνειας της γης. Αυτές οι εικόνες λαμβάνονται από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένης της NASA, του Γεωλογικού Ινστιτούτου των ΗΠΑ και άλλων παρόχων δορυφόρων, και ενημερώνονται τακτικά. Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό του Google Earth Pro είναι η ικανότητά του να παρέχει τρισδιάστατες προβολές της επιφάνειας της γης. Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει στους χρήστες να βλέπουν κτίρια, τοπία και άλλα χαρακτηριστικά σε τρεις διαστάσεις, τα οποία μπορεί να είναι χρήσιμα για διάφορους σκοπούς, όπως πολεοδομικό σχεδιασμό και αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Το Google Earth Pro περιλαμβάνει επίσης μια σειρά εργαλείων και λειτουργιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανάλυση και οπτικοποίηση δεδομένων. Για παράδειγμα, οι χρήστες μπορούν να εισάγουν και να επικαλύπτουν τα δικά τους σύνολα δεδομένων, όπως γεωγραφικά δεδομένα, δημογραφικά δεδομένα ή άλλους τύπους δεδομένων, στην πλατφόρμα Google Earth Pro. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να εκτελούν διάφορους τύπους ανάλυσης, όπως χωρική ανάλυση, ανάλυση δικτύου και δημογραφική ανάλυση.

Το Google Earth Pro διατίθεται ως δωρεάν λήψη για υπολογιστές Windows και Mac και είναι επίσης διαθέσιμο ως εφαρμογή για κινητά για συσκευές iOS και Android. Συνολικά, το Google Earth Pro είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την εξερεύνηση, την ανάλυση και την οπτικοποίηση της επιφάνειας της γης. Οι δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης, οι τρισδιάστατες προβολές και τα εργαλεία ανάλυσης δεδομένων και συνεργασίας το καθιστούν πολύτιμο πόρο για μια ποικιλία βιομηχανιών και εφαρμογών. Στην παρούσα εργασία θα αξιοποιηθεί για την ανάλυση και επεξεργασία δεδομένων σχετικά με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους.

### **2.5.3 HEC RAS**

Για την υδραυλική διερεύνηση της περιοχής μελέτης θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό HEC-RAS στην έκδοση 6.3.1, το οποίο αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα λογισμικού σχεδιασμένο για διαδραστική χρήση με ένα πολύ χρήσιμο περιβάλλον. Το λογισμικό σύστημα αναπτύχθηκε από

το σώμα μηχανικών του στρατού των Η.Π.Α., συγκεκριμένα από το κέντρο μηχανικής υδρολογίας (Hydrologic Engineering Center, HEC)

Το σύστημα αυτό επιτρέπει στον χρήστη να εκτελέσει υδραυλικούς υπολογισμούς και αποτελείται από ένα γραφικό περιβάλλον χρήστη ( graphical user interface, GUI), ξεχωριστά στοιχεία ανάλυσης, αποθήκες δεδομένων και διαχειριστικές δυνατότητες, γραφικές εγκαταστάσεις και εγκαταστάσεις αναφοράς.

Το λογισμικό περιλαμβάνει δυνατότητες επίλυσης για τα ακόλουθα χαρακτηριστικά ποταμών:

- Υπολογισμούς προφίλ ροής επιφάνειας νερού για μόνιμη ροή
- Υπολογισμοί ομοιόμορφης/ανομοιόμορφης μόνιμης ή μη μόνιμης ροής
- Μονοδιάστατη και/ή δισδιάστατη προσομοίωση μη μόνιμης ροής
- Υπολογισμούς μεταφοράς φερτών για μερικός η πλήρως μη μόνιμη ροή
- Ανάλυση ποιότητας νερού

Το στοιχείο κλειδί σε όλες τις παραπάνω δυνατότητες είναι πως αξιοποιούν κοινό τρόπο παρουσίασης των γεωμετρικών δεδομένων αλλά και διαφορετικές μεθόδους επίλυσης γεωμετρικών και υδραυλικών μοντέλων. ( HEC-RAS User's Manual, 2022)

## 2.6 Υπόβαθρο μόνιμης ροής

### 2.6.1 ΕΞΙΣΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η εξίσωση ενέργειας σε ανοικτό αγωγό υπολογίζεται από το άθροισμα τριών μηκών, το δυναμικό φορτίο λόγο υψομέτρου πυθμένα, το έργο πίεσης που αποτελεί ουσιαστικά το βάθος ροής και το φορτίο κινητικής ενέργειας που εμπεριέχει το υπό μελέτη ρευστό.

$$H = \frac{p}{\rho g} + z + a \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

Η εξίσωση ενέργειας μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών του αγωγού που απέχουν  $dx$  μεταξύ τους μπορεί να πάρει την εξής μορφή:

$$H(x) = H(x + dx) + dH \quad (2)$$

ή για πεπερασμένο μήκος αγωγού  $\Delta x$  ανάμεσα σε δύο διατομές (1) και (2)

$$H_1 = H_2 + \Delta H_{a(1-2)}$$

$$\text{Όπου: } H_1 = \frac{p}{\rho g} + z_1 + a \frac{v_1^2}{2g} \quad \text{και} \quad H_2 = \frac{p}{\rho g} + z_2 + a \frac{v_2^2}{2g}$$

$H_1, H_2$  = τα συνολικό ύψος ενέργειας στις διατομές 1 και 2, αντίστοιχα

$$\frac{p}{\rho g} = Y = \text{πιεζομετρικό φορτίο ή ύψος ελεύθερης επιφάνειας νερού στις διατομές}$$

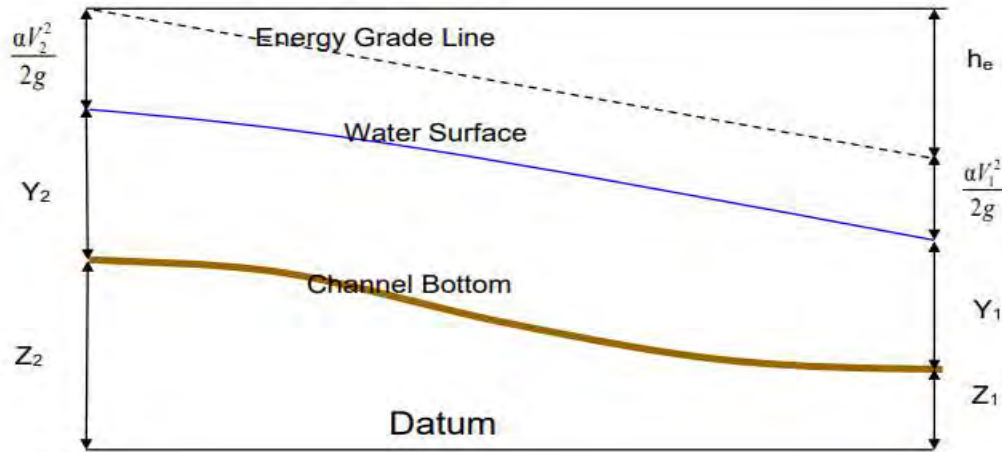
$Z_1, Z_2$  = τα υψόμετρα πυθμένα σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς

$V_1, V_2$  = οι μέσες ταχύτητες ροής

$\alpha$  = διορθωτικός συντελεστής της ταχύτητας

$g$  = η επιτάχυνση της βαρύτητας

$\Delta H_{\alpha(1-2)}$  = η απώλειες του υδραυλικού φορτίου



Σχήμα 5 Απεικόνιση συντελεστών εξίσωσης ενέργειας

Ο διορθωτικός συντελεστής  $\alpha$  ή αλλιώς συντελεστής διόρθωσης κινητικής ενέργειας, είναι απόρροια της παραδοχής της ομοιόμορφης μέσης ταχύτητας στη διατομή, η οποία δεν αντικατοπτρίζει τις πραγματικές συνθήκες ροής. Ο συντελεστής διόρθωσης, εξαρτάται από την κατανομή ταχυτήτων σε κάθε διατομή και εισάγεται για να εκφράσει την πραγματική εισροή κινητικής ενέργειας εκεί. Η πραγματική εισροή κινητικής ενέργειας σε τυχούσα διατομή είναι (Νουτσόπουλος κ.ά., 2010):

$$\int_A V \frac{v^2}{2g} dA = \alpha \frac{v^2}{2g} VA \text{ προκύπτει } \alpha = \frac{\int_A v^3 dA}{v^3 A} = \frac{\int_A v^3 dA}{Qv^2}$$

Οι απώλειες στο υδραυλικό φορτίο κατά κύριο λόγο οφείλονται σε τριβές και της αλλαγές του πλάτους του αγωγού μεταξύ των διατομών, οι απώλειες υπολογίζονται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta H_{\alpha(1-2)} = LS_f + c \left( \alpha \frac{v_2^2}{2g} - \alpha \frac{v_1^2}{2g} \right) = h_f$$

Όπου:

$L$  = το ανοιγμένο μήκος μεταξύ των διατομών 1 και 2

$S_f$  = Η κλίση της γραμμής ενέργειας υπολογισμένη από την εξίσωση Manning

C = συντελεστής στενώσεως ή διευρύνσεως

$$\left(a \frac{v_2^2}{2g} - a \frac{v_1^2}{2g}\right) = \text{διαφορά κινητικής ενέργειας}$$

Το ανοιγμένο μήκος υπολογίζεται ως:

$$L = \frac{L_l b Q_l b + L_c h Q_c h + L_r b Q_r b}{Q_l b + Q_c h + Q_r b}$$

Όπου  $L_i$  το μήκος μεταξύ διαδοχικών διατομών της κεντρικής κοίτης και των πλημμυρικών περιοχών δεξιά και αριστερά αυτής, αντίστοιχα και  $Q_i$  οι αντίστοιχες μέσες παροχές υπολογισμένες για το εκάστοτε κομμάτι της διατομής.

Από την σχέση υπολογισμού των απωλειών ο πρώτος όρος αποτελείται από δύο μεταβλητές, το  $S_f$  που είναι η αντιπροσωπευτική κλίση τριβής και σε συνδυασμό με το ανοιγμένο L προκύπτει ο όρος  $LS_f$  που αφορά τις απώλειες λόγω τριβής, με το  $S_f$  να μπορεί να γραφεί με βάση την εξίσωση του Manning, ως εξής:

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2$$

Ο δεύτερος όρος της εξίσωσης υπολογισμού απωλειών ενέργειας  $c \left(a \frac{v_2^2}{2g} - a \frac{v_1^2}{2g}\right)$  αφορά τις απώλειες ενέργειας που συμβαίνουν λόγω μεταβολών του πλάτους ροής, δηλαδή στενώσεων και αμβλύνσεων. Το λογισμικό θεωρεί πως συμβαίνει συστολή του προφίλ της ροής όταν η κεφαλή ταχύτητας κατάντη είναι μεγαλύτερη από αυτήν ανάντη, αντίστοιχα όταν η κεφαλή είναι μεγαλύτερη ανάντη το πρόγραμμα θεωρεί πως συμβαίνει διαστολή στο προφίλ ροής.

## 2.6.2 ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Για τον υπολογισμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών σε κάθε διατομή, χρησιμοποιείται μια διαδικασία όπου η εκάστοτε διατομή του ποταμού χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα.

Συγκεκριμένα, εστιάζεται στο κομμάτι του κυρίου ρεύματος καθώς και στα τμήματα του πλημμυρικού ρεύματος, όπου η ταχύτητα μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφα κατανεμημένη.

Η προαναφερθείσα εξίσωση του Manning επιλύεται για τον υπολογισμό της παροχευτικότητας κάθε διατομής και έχει την εξής μορφή:

$$Q = K S_f^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{με } K = \frac{1.486}{n} A \cdot R^{\frac{2}{3}}$$

Όπου:

K = παροχευτικότητα

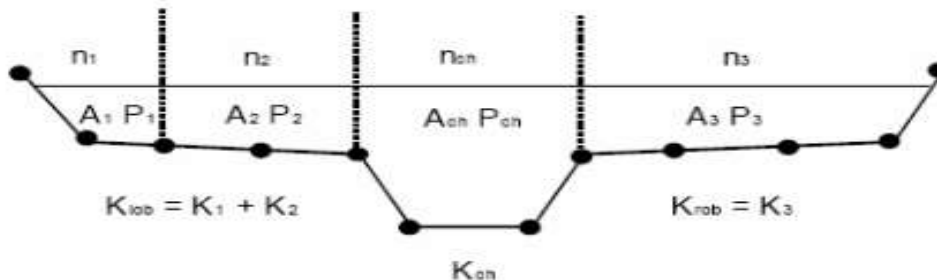
n = συντελεστής τραχύτητας κατά Manning

$A$  = εμβαδόν του προφίλ ροής

$R$  = υδραυλική ακτίνα, που προκύπτει από την διαίρεση του εμβαδού προς την βρεχόμενη περίμετρο

$s_f$  = η κλίση της γραμμής ενέργειας

Το  $K$  ορίζεται ως η ποσότητα μεταφοράς του υποδιαιεμένης σε κομμάτια διατομής σε σχέση με την τραχύτητα ή αλλιώς παροχετευτικότητα και για να επιτευχθεί ο προσδιορισμός της απαιτείται σε πρώτη φάση να γίνει διαίρεση την διατομής σε τμήματα για τα οποία το προφίλ της ταχύτητας είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο. Το λογισμικό HEC-RAS χρησιμοποιεί την εξής προσέγγιση για να πετύχει την κατανομή, υποδιαίρει την εκάστοτε διατομή σε υπό περιοχές με όρια αυτών τα σημεία αλλαγής του συντελεστή τραχύτητας  $n$ , με την μεταφορά να υπολογίζεται για κάθε περιοχή από την τροποποιημένη σχέση του Manning που παρουσιάσαμε παραπάνω και η συνολική ποσότητα μεταφοράς προκύπτει όταν προσθέσουμε τις παροχετευτικότητες της κάθε περιοχής της διατομής Στο μοντέλο που θα αναπτυχθεί στην συνέχεια της εργασίας η υποδιαίρεση της κάθε διατομής θα γίνει σε τρία τμήματα, στην κεντρική κοίτη και στις πλημμυρικές πεδιάδες δεξιά και αριστερά αυτής. Παρακάτω παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση υποδιαίρεσης τυχαίας διατομής σε επιμέρους κομμάτια, σε συνάρτηση με τους συντελεστές τραχύτητας κατά Manning, τα εμβαδά των προφίλ ροής και των υδραυλικών ακτινών.



Σχήμα 6 Υποδιαίρεση διατομής με βάση συντελεστές τραχύτητας

Στην περίπτωση διατομών που παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές του συντελεστή τραχύτητας  $n$  σε περιοχές τους, για κάθε μία από τις περιοχές εφαρμόζεται η παρακάτω σχέση:

$$n_c = \left[ \frac{\sum (P_i (n_i^{1/2}))}{P} \right]^{2/3}$$

Όπου:

$n_c$ : σύνθετος (ισοδύναμος) συντελεστής τραχύτητας

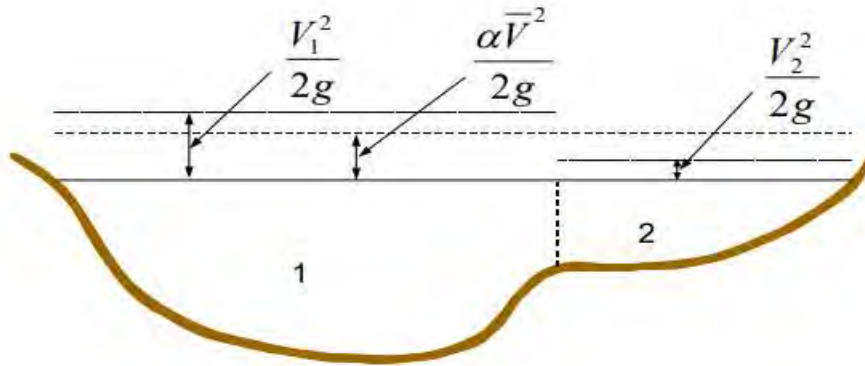
$P$ : η βρεχόμενη περίμετρος

$P_i$ : η βρεχόμενη περίμετρος του τμήματος  $i$  της διατομής

$n_i$ : ο συντελεστής τραχύτητας της διατομής

### 2.6.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΣΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ανάλυση του ρευστού που πραγματοποιεί το λογισμικό είναι μονοδιάστατη 1D, αυτό σημαίνει πως η ελεύθερη επιφάνεια του νερού είναι μοναδική για κάθε μια διατομή και συνεπώς μια μέση τιμή ενέργειας υπολογίζεται για κάθε διατομή. Για δεδομένο υψόμετρο επιφάνειας νερού η μέση ενέργεια προκύπτει από το άθροισμα των σταθμισμένων ενεργειών ροής του κάθε τμήματος της διατομής, δηλαδή της δεξιάς πεδιάδας, της κύριας κοίτης και της αριστερής πεδιάδας.



Σχήμα 7 Υπολογισμός μέσης κινητικής ενέργειας

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται πως προκύπτει η μέση κινητική ενέργεια για διατομή η οποία παρουσιάζει μόνο κύρια κοίτη και δεξιά πεδιάδα, όπου:

$V_1$  = μέση κινητική ενέργεια για το τμήμα 1

$V_2$  = μέση κινητική ενέργεια για το τμήμα 2

Για τον υπολογισμό της μέσης κινητικής ενέργειας είναι απαραίτητο να προσδιορίσουμε την τιμή του σταθμισμένου διορθωτικού συντελεστή ταχύτητας  $\alpha$ , ο προσδιορισμός αυτού επιτυγχάνεται με την σχέση:

$$\alpha \frac{\bar{v}_2^2}{2g} = \frac{Q_1 \frac{v_1^2}{2g} + Q_2 \frac{v_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2}$$

Πραγματοποιώντας τις απαραίτητες απλοποιήσεις στην παραπάνω σχέση, ο διορθωτικός συντελεστής ταχύτητας προκύπτει ως εξής:

$$\alpha = \frac{Q_1 v_1^2 + Q_2 V_2^2}{(Q_1 + Q) V^2}$$

Και η γενικευμένη μορφή της σχέσης υπολογισμού:

$$\alpha = \frac{(Q_1 v_1^2 + Q_2 V_2^2 + \dots + Q_n V_n^2)}{Q V^2}$$

Ο συντελεστής ταχύτητας  $\sigma$ , μπορεί επίσης να γραφτεί σε όρους παροχτευτικότητας και επιφάνειας (εμβαδού) ροής όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω:

$$\alpha = \frac{(A_t^3) \left[ \frac{K_a^3}{A_a^2} + \frac{k_k^3}{A_k^2} + \frac{k_\delta^3}{A_\delta^2} \right]}{K_t^3}$$

Όπου:  $A_t$  = συνολική επιφάνεια ροής της διατομής

$A_a, A_k, A_\delta$  = οι επιμέρους επιφάνειες της δεξιάς, κεντρικής και αριστερής κοίτης διατομής

$K_t$  = συνολική παροχτευτικότητα διατομής

$k_a, k_t, k_\delta$  = οι παροχτευτικότητες ξεχωριστά για το δεξιά, κεντρικό και αριστερό κομμάτι της κοίτης

#### **2.6.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ**

Οι απώλειες λόγω τριβών υπολογίζονται στο πρόγραμμα HEC-RAS ως γινόμενο της κλίσεως  $S_f$  της πιεζομετρικής γραμμής και του μήκους του εξεταζόμενου τμήματος  $L$ . Όπως καθορίζεται στην εξίσωση:

$$L = \frac{Ll_bQl_b + LchQch + LrbQrb}{Ql_b + Qch + Qrb}$$

Η κλίση της πιεζομετρικής γραμμής υπολογίζεται σε κάθε διατομή με τη χρήση του τύπου του Manning ως εξής:

$$S = (Q/K)^2$$

Για τον υπολογισμό της κλίσεως της πιεζομετρικής γραμμής σε κάθε τμήμα, το πρόγραμμα HEC-RAS χρησιμοποιεί αυτομάτως τη σχέση :

$$S = (Q1/K1 + Q2/K2)^2$$

Ο χρήστης έχει την επιλογή να επιλέξει από τρεις ακόμα εξισώσεις υπολογισμού που μπορεί να εξυπηρετούν την βέλτιστη επίλυση του εκάστοτε προβλήματος, ανάλογα με τις συνθήκες ροής, το προφίλ ροής και άλλα. Οι εναλλακτικές σχέσεις παρουσιάζονται παρακάτω:

$$S_f = (S_{f1} + S_{f2})/2$$

$$S_f = \sqrt{S_{f1} + S_{f2}}$$

$$S_f = (2(S_{f2} + S_{f2})) / (S_{f1} + S_{f2})$$

Οι τοπικές απώλειες ή αλλιώς απώλειες λόγω των στενώσεων ή διευρύνσεων που μπορεί να παρουσιάζονται μεταξύ δύο διατομών υπολογίζεται στο HEC-RAS από την σχέση:

$$H_s = C \left( a \frac{v_2^2}{2g} - a \frac{v_1^2}{2g} \right)$$

Όπου C: ο συντελεστής στένωσης η διεύρυνσης

Γενικά το πρόγραμμα κάνει την υπόθεση πως στένωση συμβαίνει κάθε φορά που η ταχύτητα ροής κατάντη είναι μεγαλύτερη από αυτήν ανάντη, ομοίως όταν συμβαίνει το αντίθετο το πρόγραμμα υποθέτει πως συμβαίνει διεύρυνση.

Τυπικές τιμές του συντελεστή C για την περίπτωση υπο κρίσιμης ροής θα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

	Στένωση	Διεύρυνση
Διατομές χωρίς τοπικές απώλειες	0.0	0.0
Σταδιακή συναρμογή	0.1	0.3
Γέφυρες( και οχετοί με πτερυγότοιχους)	0.3	0.5
Απότομη μεταβολή – Αναβαθμοί ( και οι περισσότερες περιπτώσεις οχετών)	0.6	0.8

Πίνακας 1 Τυπικές τιμές συντελεστή C

Να σημειωθεί πως για την περίπτωση κρίσιμης ροής οι τιμές του συντελεστή στένωσης και διεύρυνσης θα πρέπει να είναι να είναι μικρότερες από αυτές της περίπτωσης υπό κρίσιμης ροής.

### 2.6.5 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΚΡΙΣΙΜΟΥ ΒΑΘΟΥΣ

Αρχικά θα πρέπει να εισάγουμε ως έννοια τον αριθμό Froude, που αποτελεί ένα μέγεθος με ιδιαίτερη σημασία για όλα τα υδραυλικά έργα στα οποία υπάρχει ροή με ελεύθερη επιφάνεια. Ορίζεται ως “το πηλίκο της ταχύτητας V προς την ταχύτητα μετάδοσης μικρών κυμάτων βαρύτητας ( $\sqrt{gy}$ ) και είναι μια έκφραση της σχέσης ανάμεσα στη δύναμη αδράνειας και στη δύναμη βαρύτητας.”( Α.Δαμασκινού-Γεωργιάδου κ.α. , 1996)

Στους ανοιχτούς αγωγούς ο αριθμός Froude υπολογίζεται από την σχέση:

$$Fr = V / \sqrt{gy}$$

g = επιτάχυνση της βαρύτητας

y = το υδραυλικό βάθος

Πολύ συχνά χρησιμοποιείται από μελετητές η ισοδύναμη έκφραση του αριθμού Froude:

$$F_r^2 = \frac{Q^2 B}{g A^3}$$



A = εμβαδό της ελεύθερης επιφάνειας

B = πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας

Ο Liggett (1993) είχε προτείνει ακριβέστερη έκφραση του αριθμού Froude για ανοιχτούς αγωγούς:  $Fr = \sqrt{\beta} V / \sqrt{gy}$ , με το β αποτελεί διορθωτικό συντελεστή γραμμικής ορμής

Ανάλογα με την τιμή του αριθμού Froude η ροή χαρακτηρίζεται ως κρίσιμη για  $Fr = 1$ , υποκρίσιμη γνωστή και ως ήρεμη ή ποτάμια για  $Fr < 1$  και υπερκρίσιμη γνωστή ως ταχεία ή χειμαρρώδης για  $Fr > 1$ . Η διάκριση των παραπάνω κατηγοριών πραγματοποιείται με βάση την ταχύτητα ροής και της ταχύτητας διάδοσης μικρών κυμάτων βαρύτητας.

Ορίζεται σαν ειδική ενέργεια E μίας διατομής, το ύψος της εξίσωσης ενέργειας χωρίς την επιρροή του φορτίου λόγω ύψους πυθμένα z, δηλαδή είναι το άθροισμα του πιεζομετρικού φορτίου και της κινητικής ενέργειας.

$$H = \frac{p}{\rho g} + a \frac{v^2}{2g} \quad \text{ή} \quad H = y + a \frac{v^2}{2g}$$

Η ποσότητα της ειδικής ενέργειας ελαχιστοποιείται στην περίπτωση που το βάθος ροής πάρει τιμή ίση με αυτήν του κρίσιμου βάθους, δηλαδή η ροή είναι κρίσιμη ( $Fr=1$ ). Αυτό αποδεικνύεται αν παραγωγίσουμε την εξίσωση ειδικής ενέργειας ως προς το βάθος ροής y, θεωρώντας πως το βάθος y αντιστοιχεί στην ελάχιστη ποσότητα ενέργειας και άρα η πρώτη παράγωγος της ειδικής ενέργειας μηδενίζει:

$$\frac{dE}{dy} = 1 + \frac{d}{dy} \left( \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2} \right) = 1 - \frac{Q^2}{g \cdot A^3} \frac{dA}{dy} = 1 - \frac{Q^2}{g \cdot A^3} T = 1 - \frac{V^2}{g \cdot (A/T)} = 1 - \frac{v^2}{gD} = 0$$

$dA/dy = T$ ,  $D = A/T$  προκύπτει:

$$\frac{v^2}{gD} = Fr = 1$$

## 2.6.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΤΑΘΜΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

### 2.6.6.1 Βασική υπολογιστική διαδικασία

Η διαδικασία υπολογισμού που πραγματοποιεί το λογισμικό HEC-RAS είναι μια επαναληπτική διαδικασία επίλυσης ενός συστήματος εξισώσεων, με τις εξισώσεις αυτές να είναι η εξίσωση ενέργειας και η εξίσωση υπολογισμού απώλειών φορτίου μεταξύ διατομών τις οποίες παρουσιάσαμε παραπάνω. Πριν την έναρξη της διαδικασίας επίλυσης, ορίζεται από τον χρήστη το καθεστώς ροής που επικρατεί στο υδατόρεμα, που μπορεί να είναι υποκρίσιμο ή υπερκρίσιμο ή μεικτό προφίλ ροής.

Ανάλογα με τον τύπο ροής που ορίζουμε το λογισμικό ξεκινάει με το να υπολογίζει την στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας, από την ανάντη διατομή αν η ροή είναι υποκρίσιμη ροή ή από την

κατάντη αν είναι υπερκρίσιμη, θεωρώντας έτσι μια αρχική τιμή για την στάθμη επιφάνειας νερού  $Y_{αρχ}$ .

Με βάση την τιμή που υπολόγισε παραπάνω για την στάθμη το λογισμικό θα προχωρήσει στο να υπολογίσει την συνολική ικανότητα παροχέτευσης καθώς και το συνολικό φορτίο κινητικής ενέργειας. Ταυτόχρονα υπολογίζει την κλίση της πιεζομετρικής γραμμής και τις απώλειες μέσω της εξίσωσης απωλειών φορτίου που προαναφέραμε. Με δεδομένες τις παραπάνω τιμές, της στάθμης ελεύθερης επιφάνειας και των απωλειών φορτίου το λογισμικό πραγματοποιεί επίλυση της εξίσωσης ενέργειας μεταξύ δύο διατομών καταλήγοντας σε μια νέα διορθωμένη τιμή  $Y_{διορθ}$ .

Τέλος, η διαδικασία ολοκληρώνεται με σύγκριση των δύο υπολογισμένων τιμών  $Y_{αρχ}$  και  $Y_{διορθ}$ . Σε περίπτωση που οι δύο τιμές δεν διαφέρουν περισσότερο από 0.1 πόδια ( 0.003 μέτρα) ή δεν υπερβαίνουν τα κριτήρια ανοχής που ορίσαμε ως μελετητές, η διαδικασία ολοκληρώνεται. Σε περίπτωση υπέρβασης του κριτηρίου το λογισμικό θα επαναλάβει όλη την διαδικασία που περιγράψαμε παραπάνω με την διαφορά πως αυτή την φορά η στάθμη ελεύθερης επιφάνειας που υπολογίζει στην αρχή θα αντικατασταθεί με την παρακάτω:

$$Y_{νεα} = Y_{αρχ} + 0.7(Y_{διορθ} - Y_{αρχ})$$

Η τρίτη και κάθε επόμενη επανάληψη που θα πραγματοποιήσει το λογισμικό βασίζονται στην μέθοδο της τέμνουσας καμπύλης (“Secant” method) με βάση την οποία πραγματοποιείτε αναγωγή του βαθμού μεταβολής της διαφοράς μεταξύ υπολογισμένης και θεωρηθέντος στάθμης ελεύθερης επιφάνειας των δύο προηγούμενων προσπαθειών. Με την εξίσωση που υπάγει την μέθοδο τέμνουσα καμπύλης να είναι ως εξής(USACE, 2016):

$$WSI = WSI-2 - ErrI-2 * Assum\_Diff / Err\_Diff$$

Όπου:

$WSI$  = νέα θεωρούμενη στάθμη

$WSI-1$  = στάθμη υπολογισμένη στο πρώτο βήμα

$WSI-2$  = στάθμη υπολογισμένη στο δεύτερο βήμα

$ErrI-2$  = το σφάλμα μεταξύ των προηγούμενων δυο πρώτων βημάτων

$Assum\_Diff$  = η διαφορά των σταθμών  $WSI-2$  και  $WSI-1$ ,  $Assum\_Diff = WSI-2 - WSI-1$

$Err\_Diff$  = η διαφορά του αρχικού σφάλματος που υπολογίζει σε πρώτη φάση με το υπολογισμένο τρέχον σφάλμα,  $Err\_Diff = ErrI-2 - ErrI-1$

Η αλλαγή από τη μια δοκιμή στην επόμενη περιορίζεται στο 50 τοις εκατό το πολύ του υποτιθέμενου βάθους από την προηγούμενη δοκιμή. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η μέθοδος τομής μπορεί να αποτύχει εάν η τιμή του  $Err\_Diff$  γίνει πολύ μικρή. Εάν το  $Err\_Diff$  είναι μικρότερο από  $1.0E-2$ , τότε η μέθοδος τομής δεν χρησιμοποιείται. Όταν συμβεί αυτό, το πρόγραμμα εικάζει μια νέα τιμή λαμβάνοντας υπόψιν τον μέσο όρο των προηγούμενων θεωρηθέντων και υπολογισμένων επιφανειών νερού από την προηγούμενη επανάληψη.

Το πρόγραμμα περιορίζεται από έναν μέγιστο αριθμό επαναλήψεων (η προεπιλογή είναι 20) για την εξισορρόπηση της επιφάνειας του νερού. Ενώ το πρόγραμμα πραγματοποιεί υπολογισμούς, παρακολουθεί την επιφάνεια του νερού που παράγει την ελάχιστη ποσότητα σφάλματος μεταξύ των υποτιθέμενων και των υπολογισμένων τιμών. Αυτή η επιφάνεια νερού ονομάζεται επιφάνεια νερού ελάχιστου σφάλματος. Εάν πραγματοποιηθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων πριν επιτευχθεί μια ισορροπημένη επιφάνεια νερού, το πρόγραμμα θα υπολογίσει στη συνέχεια το κρίσιμο βάθος (αν αυτό δεν έχει ήδη γίνει). Στη συνέχεια, το πρόγραμμα ελέγχει εάν το σφάλμα που σχετίζεται με την επιφάνεια του νερού ελάχιστου σφάλματος βρίσκεται εντός εύρους μιας προκαθορισμένης ανοχής (η προεπιλογή είναι 0,3 πόδια ή 0,1 m). Εάν η επιφάνεια του νερού ελάχιστου σφάλματος έχει σχετικό σφάλμα μικρότερο από την προκαθορισμένη ανοχή και αυτή η επιφάνεια νερού βρίσκεται στη σωστή πλευρά του κρίσιμου βάθους, τότε το πρόγραμμα θα χρησιμοποιήσει αυτήν την επιφάνεια νερού ως τελική απάντηση και θα ορίσει ένα προειδοποιητικό μήνυμα ότι το έκανε. Έτσι, η επιφάνεια του νερού ελάχιστου σφάλματος έχει σχετικό σφάλμα που είναι μεγαλύτερο από την προκαθορισμένη ανοχή ή βρίσκεται στη λάθος πλευρά του κρίσιμου βάθους, το πρόγραμμα θα χρησιμοποιήσει το κρίσιμο βάθος ως τελική απάντηση για τη διατομή και θα ορίσει ένα προειδοποιητικό μήνυμα ότι το έχει κάνει.

Η λογική για τη χρήση της επιφάνειας νερού ελάχιστου σφάλματος είναι ότι είναι πιθανώς μια καλύτερη απάντηση παρά κρίσιμο βάθος, εφόσον πληρούνται τα παραπάνω κριτήρια. Τόσο το ελάχιστο σφάλμα επιφάνειας νερού και το κρίσιμο βάθος χρησιμοποιούνται μόνο σε αυτήν την περίπτωση για να επιτραπεί στο πρόγραμμα να συνεχίσει την επίλυση του προφίλ της επιφάνειας του νερού. Καμία από αυτές τις δύο απαντήσεις δεν θεωρείται έγκυρη λύση, και επομένως προειδοποιητικά μηνύματα εκδίδονται όταν χρησιμοποιείται ένα από τα δύο. Γενικά, όταν το πρόγραμμα δεν μπορεί να εξισορροπήσει την ενεργειακή εξίσωση σε μια διατομή, συνήθως προκαλείται από ανεπαρκή αριθμό διατομών (διατομές σε πολύ μεγάλη απόσταση μεταξύ τους) ή κακά δεδομένα διατομής. Περιστασιακά, αυτό μπορεί να συμβεί επειδή το πρόγραμμα προσπαθεί να υπολογίσει μια υποκρίσιμη επιφάνεια νερού όταν το καθεστώς ροής είναι στην πραγματικότητα υπερκρίσιμο.

Όταν έχει επιτευχθεί μια ισορροπημένη ανύψωση της επιφάνειας του νερού για μια διατομή, γίνονται έλεγχοι για να εξακριβωθεί ότι το υψόμετρο βρίσκεται στη δεξιά πλευρά του κρίσιμου υψόμετρου της επιφάνειας του νερού (π.χ. πάνω από το κρίσιμο υψόμετρο εάν έχει ζητηθεί από τον χρήστη ένα υποκρίσιμο προφίλ). Αν το ισορροπημένο υψόμετρο βρίσκεται στη λάθος πλευρά του κρίσιμου υψόμετρου της επιφάνειας του νερού, θεωρείται από το λογισμικό πως το κρίσιμο βάθος είναι το βάθος για τη διατομή και ένα προειδοποιητικό μήνυμα για το σκοπό αυτό εμφανίζεται από το πρόγραμμα. Ο χρήστης του προγράμματος θα πρέπει να γνωρίζει τις υποθέσεις κρίσιμου βάθους και να προσδιορίζει τους λόγους εμφάνισής τους, επειδή σε πολλές περιπτώσεις προκύπτουν από υπερβολικά μεγάλα μήκη προσέγγισης ή από εσφαλμένη παρουσίαση των αποτελεσματικών περιοχών ροής των διατομών.

Για ένα υποκρίσιμο προφίλ, ένας προκαταρκτικός έλεγχος για το σωστό καθεστώς ροής περιλαμβάνει τον έλεγχο του Froude αριθμός. Το πρόγραμμα υπολογίζει τον αριθμό Froude της ισορροπημένης επιφάνειας νερού τόσο για το κύριο κανάλι μόνο όσο και για ολόκληρη τη διατομή. Εάν κάποιος από αυτούς τους δύο αριθμούς Froude είναι μεγαλύτερος από 0,94, τότε

το πρόγραμμα θα ελέγξει το καθεστώς ροής υπολογίζοντας μια πιο ακριβή εκτίμηση του κρίσιμου βάθους χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ελάχιστης ειδικής ενέργειας (αυτή η μέθοδος περιγράφεται στην επόμενη ενότητα). Χρησιμοποιείται αριθμός Froude 0,94 αντί για 1,0, επειδή ο υπολογισμός του αριθμού Froude σε ακανόνιστα κανάλια δεν είναι ακριβής. Επομένως, η χρήση μιας τιμής 0,94 είναι συντηρητική, καθώς το πρόγραμμα θα υπολογίζει το κρίσιμο βάθος συχνότερα από ό,τι μπορεί να χρειαστεί. Για ένα υπερκρίσιμο προφίλ, το κρίσιμο βάθος υπολογίζεται αυτόματα για κάθε διατομή, γεγονός που επιτρέπει την άμεση σύγκριση μεταξύ ισορροπημένων και κρίσιμων ανυψώσεων.

### 2.6.6.2 Εφαρμογή την εξίσωσης ποσότητας κίνησης

Όταν η ελεύθερη επιφάνεια του νερού υπερβαίνει το κρίσιμο βάθος, η εξίσωση ενέργειας δεν ισχύει πλέον. Η εξίσωση ενέργειας προϋποθέτει μια σταδιακή μετάβαση σε μεταβαλλόμενη ροή, και η μετάβαση από υποκρίσιμη σε υπερκρίσιμη ροή ή αντίστροφα, αντιστοιχεί σε μια κατάσταση γρήγορα μεταβαλλόμενης ροής. Η μετάβαση αυτή μπορεί να συμβεί σε πολλές περιπτώσεις, όπως:

- έντονες τοπικές κλίσεις κατά μήκος του ποταμού
- στενώσεις σε γέφυρες
- πτώσεις και αναβαθμοί του ποταμού
- συμβολές διαφορετικών ρευμάτων
- κατασκευές όπως αναβαθμούς και φράγματα

Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως στις πτώσεις και αναβαθμούς καθώς και στα φράγματα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εμπειρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών. Ωστόσο, σε άλλες περιπτώσεις, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση της ποσότητας κίνησης για την ακριβή αποτίμηση. Στο λογισμικό HEC-RAS, η εξίσωση της ποσότητας κίνησης μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις όπως:

- ύπαρξη υδραυλικού άλματος
- ροή κάτω από γέφυρες και οχετών
- συμβολές ποταμών ή ρεμάτων

Η εξίσωση ποσότητας κινήσεως προκύπτει από το δεύτερο νόμο του Newton:

$$\Delta \text{δύναμη} = \text{Μάζα} \times \text{Επιτάχυνση} \Rightarrow \Sigma F_x = m \alpha$$

Αν εφαρμόσουμε τον νόμο του Νεύτωνα σε ένα όγκο νερού μεταξύ δύο διατομών 1 και 2 η μεταβολή της ποσότητας κινήσεως ανά μονάδα χρόνου μπορεί να γραφεί:

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q \rho \Delta V_x$$

Όπου :

P: η υδροστατική πίεση στις θέσεις 1 και 2

W<sub>x</sub>: η δύναμη από το βάρος του νερού στη διεύθυνση x

Ff: η δύναμη λόγω απώλειας τριβής μεταξύ των θέσεων 1 και 2

Q: η παροχή

p: η πυκνότητα του νερού

$\Delta Vx$  : η μεταβολή της ταχύτητας μεταξύ των θέσεων 1 και 2 στη διεύθυνση x

Εφαρμόζοντας τους κατάλληλους μετασχηματισμούς, η εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$Q^2 \beta_2 g A_2 + A_2 Y_2 + (A_1 + A_2 / 2) L S_0 - ((A_1 + A_2) / 2) L S_f = (Q^2 \beta_1 / g A_1) + A_1 Y_1$$

Όπου:

Q: παροχή

A: εμβαδόν υγρής διατομής

Y: βάθος μετρούμενο από την ελεύθερη επιφάνεια μέχρι το κέντρο βάρους της διατομής L : μήκος μεταξύ των θέσεων 1 και 2 στην διεύθυνση x

S<sub>0</sub>: κλίση πυθμένα

β: συντελεστή ορμής λόγω μεταβολής της ταχύτητας

S<sub>f</sub>: κλίση γραμμής ενέργειας

Η τελική σχέση που παρουσιάσαμε παραπάνω είναι η μορφή της εξισώσεως ποσότητας κινήσεως που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς στο πρόγραμμα HECRAS.

## 2.7 Υπόβαθρο μη μόνιμης ροής

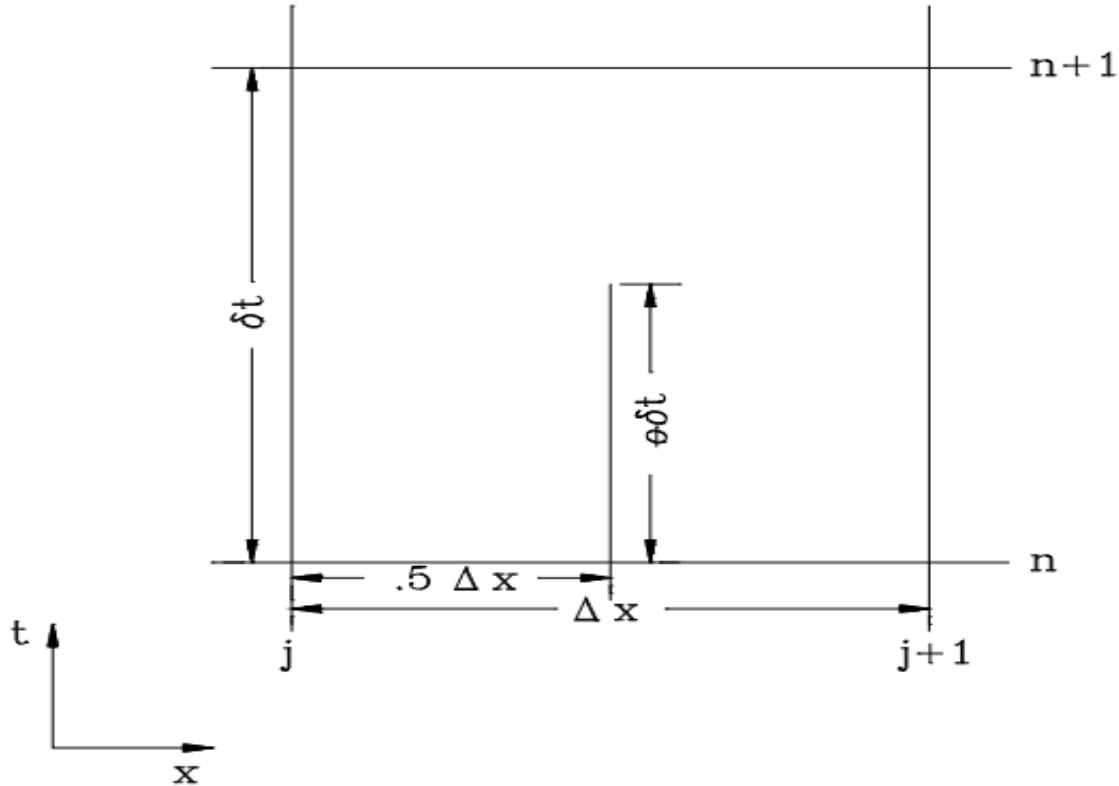
### 2.7.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

Η ασταθής ροή είναι ένα θεμελιώδες φαινόμενο στην υδραυλική μοντελοποίηση, καθώς εμφανίζεται σε πολλά φυσικά και μηχανικά συστήματα όπως ποτάμια, πλημμυρικές πεδιάδες, ταμειυτήρες και αστικά δίκτυα αποχέτευσης. Η ασταθής ροή αναφέρεται στις μη σταθερές διακυμάνσεις του βάθους, της ταχύτητας και της εκκένωσης του νερού με την πάροδο του χρόνου, που προκαλούνται από αλλαγές στις οριακές συνθήκες ανάντη, την αντίσταση κατάντη και την τοπική τοπογραφία. Η ανάλυση και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς ασταθούς ροής είναι κρίσιμες για την κατανόηση και τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, των κινδύνων πλημμύρας, της ποιότητας του νερού και των οικολογικών οικοτόπων.

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα παρουσιάσουμε τις θεωρητικές και υπολογιστικές πτυχές της μοντελοποίησης ασταθούς ροής χρησιμοποιώντας το λογισμικό HEC-RAS. Συγκεκριμένα, θα επικεντρωθούμε στη μονοδιάστατη μονάδα ασταθούς ροής του HEC-RAS, η οποία λύνει τις εξισώσεις Saint-Venant χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Θα

περιγράψουμε τις εξισώσεις, το αριθμητικό σχήμα και τις οριακές και αρχικές συνθήκες που απαιτούνται για την προσομοίωση. Θα συζητήσουμε επίσης τις διαδικασίες βαθμονόμησης και επικύρωσης για το μοντέλο ασταθούς ροής, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης παρατηρούμενων δεδομένων και ανάλυσης ευαισθησίας.

Βασικές εξισώσεις υπολογισμού για συνθήκες μη μόνιμης ροής αποτελούν η εξίσωση συνέχειας και η εξίσωση ορμής, των οποίων η επίλυση πραγματοποιείται με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα τυπικό κελί μεθόδου πεπερασμένων διαφορών:



Σχήμα 8 Απεικόνιση πεπερασμένης διαφοράς στοιχείων ροής

Με δεδομένο πως η μορφή της αρχικής εξίσωσης είναι αυτή που ακολουθεί:

$$f_i^n = f_i$$

$$\Delta f_i = f_i^{n+1} - f_i$$

$$f_i^{n+1} = f_i + \Delta f_i$$

Οι γενικοί τύποι της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών είναι:

1. Χρονικής παραγωγής:  $\frac{\partial f}{\partial t} \approx \frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{0.5(\Delta_{i+1} + \Delta_i)}{\Delta t}$
2. Χωρικής παραγωγής:  $\frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{\Delta f}{\Delta x} = \frac{(f_{i+1} - f_i) + \theta(\Delta_{i+1} + \Delta_i)}{\Delta x}$
3. Τιμή συνάρτησης:  $f \approx \bar{f} = 0.5(f_i + f_{i+1}) + 0.5\theta(\Delta_i + \Delta_{i+1})$

Σύμφωνα με τα παραπάνω η εξίσωση συνέχειας η οποία περιγράφει την διατήρηση μάζας για ένα μονοδιάστατο σύστημα ελέγχου και προκύπτει ως εξής:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0$$

Όπου το:

$x$  = απόσταση κατά μήκος του ποταμού

$t$  = χρόνος

$Q$  = παροχή

$A$  = το εμβαδόν διατομής

$S$  = οι περιοχές αποθήκευσης νερού

$q$  = πλευρικές εισροές ανά μονάδα μήκους

Η εξίσωση συνέχειας παίρνει τις παρακάτω μορφές για την περίπτωση που περιγράφει την κύρια κοίτη και τις πλυμμυρικές πεδιάδες.

$$\frac{\partial A_c}{\partial t} + \frac{\partial Q_c}{\partial x_c} = q_f$$

Και

$$\frac{\partial A_f}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q_f}{\partial x_f} = q_c + q_f$$

Μετά από σειρά μετασχηματισμών η εξίσωση παίρνει την τελική της μορφή που παρουσιάζεται ακριβώς στην συνέχεια:

$$\Delta Q + \frac{\Delta A_c}{\Delta t} \Delta x_c + \frac{\Delta S}{\Delta t} \Delta x_f + \frac{\Delta A_f}{\Delta t} \Delta x_f - \bar{Q} = 0$$

Με βάση τα προηγούμενα η εξίσωση ορμής που ουσιαστικά περιγράφει πως ο ρυθμός μεταβολής της ορμής είναι ίσος με τις εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στο σύστημα ελέγχου έχει την παρακάτω μορφή:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(VQ)}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial z}{\partial x} + Sf\right) = 0$$

Όπου το:

$g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας

$Sf$  = κλίση της γραμμής τριβής

$V$  = ταχύτητα

Όπως και με την εξίσωση συνέχειας η εξίσωση ορμής μπορεί να τροποποιηθεί για να περιγράψει την κοίτη και τις πλυμμυρικές πεδιάδες ως εξής:

$$\frac{\partial Qc}{\partial t} + \frac{\partial(VcQc)}{\partial xc} + gAc\left(\frac{\partial z}{\partial xc} + Sf\right) = Mf$$

Και

$$\frac{\partial Qf}{\partial t} + \frac{\partial(VfQf)}{\partial xf} + gAf\left(\frac{\partial z}{\partial xf} + Sf\right) = Mc$$

Όμοιος με την περίπτωση της εξίσωσης συνέχειας, πραγματοποιούνται μετασχηματισμοί στις παραπάνω σχέσεις ώστε η εξίσωση ορμής να πάρει την τελική μορφή όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\frac{\Delta(\beta VQ)}{\Delta xc} + \frac{\Delta(Qc\Delta xc + Qf\Delta xf)}{\Delta t\Delta xf} + g\bar{A}\left(\frac{\Delta z}{\Delta xf} + Sf\right) = 0$$

Η υπολογιστική διαδικασία για την λύση της ανύψωσης της επιφάνειας του νερού σε όλες τις διατομές, τους αποθηκευτικούς χώρους και τις 2-διάστατα κελιά πραγματοποιείται από έναν επαναληπτικό αλγόριθμο αποτελούμενο από εννιά βήματα.

### 2.7.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Τα κελιά της περιοχής ροής ακολουθούν τα παρακάτω αλγοριθμικά βήματα ώστε να ολοκληρώσει την υπολογιστική διαδικασία:

1. Ο λύτης κάνει μια αρχική δοκιμή στην επιφάνεια του νερού, τις ροές, τα παράγωγα κ.λπ. Οι εξισώσεις ασταθούς ροής λύνονται στην άρρητη πεπερασμένη διαφορά λύτης μήτρας (χρησιμοποιείται ένας λύτης που ονομάζεται λύτης Skyline Matrix) για τους μονοδιάστατους κόμβους. Ένας διδιάστατος σιωπηρός αλγόριθμος λύσης πεπερασμένου όγκου χρησιμοποιείται για τη διδιάστατη ροή περιοχής.
2. Όλοι οι υπολογιστικοί κόμβοι (διατομές, χώροι αποθήκευσης και 2D κελιά) ελέγχονται για να διαπιστωθεί εάν η υπολογισμένη επιφάνεια του νερού μείον τις προηγούμενες τιμές είναι μικρότερη από την αριθμητική ανοχή λύσης.
3. Εάν το σφάλμα είναι μικρότερο από την ανοχή της αριθμητικής λύσης, τότε έχει ολοκληρωθεί για εκείνο το χρονικό βήμα και χρησιμοποιεί αυτές τις απαντήσεις ως τη σωστή λύση για το δεδομένο βήμα και προχωρά στο επόμενο βήμα χρόνου.
4. Εάν το αριθμητικό σφάλμα είναι μεγαλύτερο από την ανοχή σε οποιονδήποτε κόμβο, επαναλαμβάνεται, που σημαίνει ότι κάνει μια νέα εκτίμηση όλων των παραγώγων και λύνει και πάλι τις εξισώσεις.
5. Κατά τη διαδικασία της επανάληψης, εάν προκύψει μια λύση κατά την οποία το αριθμητικό σφάλμα είναι μικρότερο από την ανοχή σε όλες τις θέσεις, εφαρμόζεται και αυτό χρησιμοποιεί σε αυτή την επανάληψη ως σωστές απαντήσεις και συνεχίζει στο επόμενο βήμα χρόνου.



6. Κατά τη διαδικασία επανάληψης (και ακόμη και της πρώτης δοκιμής), το πρόγραμμα αποθηκεύει τη δοκιμή με το μικρότερο αριθμητικό σφάλμα ως την καλύτερη λύση μέχρι στιγμής. Όλες οι επιφάνειες και ροές νερού σώζονται σε όλες τις θέσεις.
7. Οποιαδήποτε επανάληψη παράγει καλύτερη απάντηση δηλαδή μικρότερο σφάλμα, αλλά δεν πληροί τον περιορισμό της αριθμητικής ανοχής, αποθηκεύεται ως η τρέχουσα καλύτερη λύση.
8. Εάν η λύση φτάσει στον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων (20 από προεπιλογή), τότε εκτυπώνει μια προειδοποίηση. Ωστόσο, χρησιμοποιεί τη δοκιμή/επανάληψη που είχε την καλύτερη απάντηση. Εκτυπώνει επίσης την τοποθεσία που είχε τη μεγαλύτερη τιμή το αριθμητικό σφάλμα και το μέγεθος αυτού του σφάλματος.
9. Αυτό συμβαίνει ακόμα κι αν μια από τις δοκιμές/επαναλήψεις κάνει τον πίνακα να βγει εντελώς ασταθής. Εξακολουθεί να κάνει αυτή τη διαδικασία και συχνά μπορεί να βρει μια δοκιμή που να μην είναι ασταθής, αλλά δεν παράγει σφάλμα μικρότερο από την αριθμητική ανοχή, οπότε πηγαίνει με αυτή την επανάληψη και προχωρά.

## 2.8 Περιορισμοί λογισμικού υδραυλικής προσομοίωσης

### 2.8.1 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΟΝΙΜΗΣ ΡΟΗΣ

Οι παρακάτω παραδοχές ασκούνται στο μοντέλο μόνιμη ροής και έχουν να κάνουν με τις αναλυτικές εκφράσεις που περιγράψαμε εκτενώς στο προηγούμενο κομμάτι της ενότητας. Αυτές οι παραδοχές διέπουν το μοντέλο μας και περιορίζουν την πόσο ακριβές και ρεαλιστικό μπορεί να είναι το μοντέλο μας, οι περιορισμοί που εφαρμόζονται στην τρέχουσα έκδοση του λογισμικού:

1. Η ροή είναι μόνιμη, τα μοντέλα σταθερής ροής υποθέτουν σταθερό ρυθμό ροής και υψόμετρο επιφάνειας νερού και δεν μπορούν να μοντελοποιήσουν αλλαγές στον ρυθμό ροής ή στην ανύψωση της επιφάνειας του νερού με την πάροδο του χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι κατάλληλα για τη μοντελοποίηση γεγονότων που μεταβάλλονται χρονικά, όπως πλημμύρες ή καταιγίδες.
2. Η ροή είναι μερικώς μεταβαλλόμενη, με εξαίρεση τις περιπτώσεις εμφάνισης κατασκευών κατά μήκος της ροής όπως γέφυρας, οχετοί και φρεάτια. Τα μοντέλα σταθερής ροής κάνουν ορισμένες παραδοχές και απλοποιήσεις για να κάνουν τους υπολογισμούς εφικτούς, όπως η υπόθεση μιας ομοιόμορφης κατανομής ροής και η παραμέληση ορισμένων φαινομένων ροής όπως οι αναταράξεις ή η ανάμειξη. Αυτές οι απλουστεύσεις μπορούν να εισάγουν σφάλματα και ανακρίβειες στην έξοδο του μοντέλου.
3. Η ροή είναι μονοδιάστατη, δεν υπολογίζονται διανύσματα ταχύτητας σε καμία διεύθυνση πέραν από την διεύθυνση ροής.
4. Η κοίτη παρουσιάζει μικρές κλίσεις, όπου μικρές ορίζονται οι κλίσεις κάτω του 1:10.

5. Αβεβαιότητα στα αποτελέσματα του μοντέλου: Όπως όλα τα μοντέλα, τα μοντέλα σταθερής ροής υπόκεινται σε αβεβαιότητα και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την ακρίβεια των δεδομένων εισόδου, τις υποθέσεις που γίνονται στο μοντέλο και άλλους παράγοντες. Είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη αυτή η αβεβαιότητα κατά την ερμηνεία και τη χρήση των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Πέραν από τους παραπάνω περιορισμούς υπάρχουν περιπτώσεις που τα μοντέλα σταθερής ροής δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται. Τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν οι ακόλουθες καταστάσεις για τυχαίο σύστημα ποταμών που αναλύεται:

- Ο ποταμός επηρεάζεται παλιρροιακά και η παλίρροια έχει σημαντική επίδραση στα υψόμετρα της επιφάνειας του νερού για την περιοχή ενδιαφέροντος
- Τα γεγονότα που μοντελοποιούνται είναι πολύ δυναμικά σε σχέση με το χρόνο όπως πλημμυρικά κύματα κατάρριψης του φράγματος και πλημμύρες,
- Πολύπλοκα δίκτυα ροής ή/και αντιστροφές ροής συμβαίνουν κατά τη διάρκεια του συμβάντος.
- Κατά τη διάρκεια του συμβάντος συμβαίνουν δυναμικά γεγονότα, όπως υπέρβαση αναχώματος και παραβίαση.
- Εξαιρετικά επίπεδα ποτάμια συστήματα, όπου η βαρύτητα, η υδροστατική πίεση και η τριβή δεν είναι απαραίτητα η μόνη σημαντική δύναμη που επιδρά στη ροή.
- Συστήματα με αντλιοστάσια που μετακινούν σημαντική ποσότητα νερού.
- Συστήματα με δομές που έχουν πολύπλοκες λειτουργίες πύλης με βάση τα στάδια και τις ροές στο σύστημα

### **2.8.2 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΗ ΜΟΝΙΜΗΣ ΡΟΗΣ**

Οι παρακάτω παραδοχές ασκούνται στο μοντέλο μη-μόνιμης ροής και έχουν να κάνουν με τις αναλυτικές εκφράσεις που διέπουν την φύση του μοντέλου μας και τις περιγράψαμε εκτενώς στο προηγούμενο κομμάτι της ενότητας. Υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί στη χρήση ενός μοντέλου ασταθούς ροής στο HEC-RAS:

- Χρόνος και υπολογιστικές απαιτήσεις: Τα μοντέλα μη μόνιμης ροής απαιτούν περισσότερο χρόνο και υπολογιστικούς πόρους για την εκτέλεση από τα μοντέλα σταθερής ροής. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να μην είναι πρακτικά για μεγαλύτερα ή πιο σύνθετα μοντέλα ή για καταστάσεις όπου ο χρόνος είναι κρίσιμος παράγοντας.
- Περιορισμένη ακρίβεια των δεδομένων εισόδου: Τα μοντέλα ασταθούς ροής απαιτούν αναλυτικές και ακριβείς εισαγωγές δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των συνοριακών συνθηκών, των συντελεστών τραχύτητας και της γεωμετρίας διατομής. Τα ανακριβή ή ελλιπή δεδομένα μπορεί να οδηγήσουν σε σφάλματα και ανακρίβειες στην έξοδο του μοντέλου.
- Περιορισμένη εφαρμογή σε ακραία γεγονότα: Τα μοντέλα αστάθειας ροής δεν είναι κατάλληλα για την πρόβλεψη ακραίων γεγονότων, όπως πλημμύρες ή καταιγίδες, καθώς

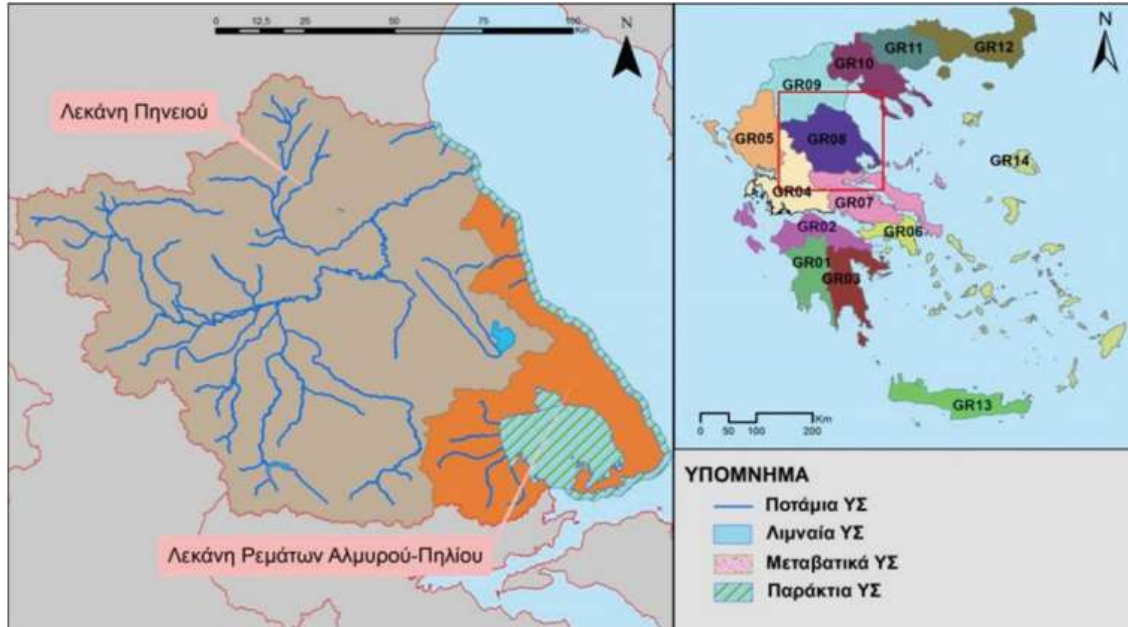
αυτά τα συμβάντα είναι εξαιρετικά μη γραμμικά και μπορεί να είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν με ακρίβεια. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός μοντέλων ασταθούς και σταθερής ροής για να έχετε μια πιο ακριβή εικόνα αυτών των τύπων συμβάντων.

- Απλοποιήσεις στις υποθέσεις μοντελοποίησης: Τα μοντέλα ασταθούς ροής κάνουν ορισμένες παραδοχές και απλοποιήσεις προκειμένου να κάνουν τους υπολογισμούς εφικτούς, όπως η υπόθεση μιας ομοιόμορφης κατανομής ροής και η παραμέληση ορισμένων φαινομένων ροής όπως οι αναταράξεις ή η ανάμειξη. Αυτές οι απλουστεύσεις μπορούν να εισάγουν σφάλματα και ανακρίβειες στην έξοδο του μοντέλου.

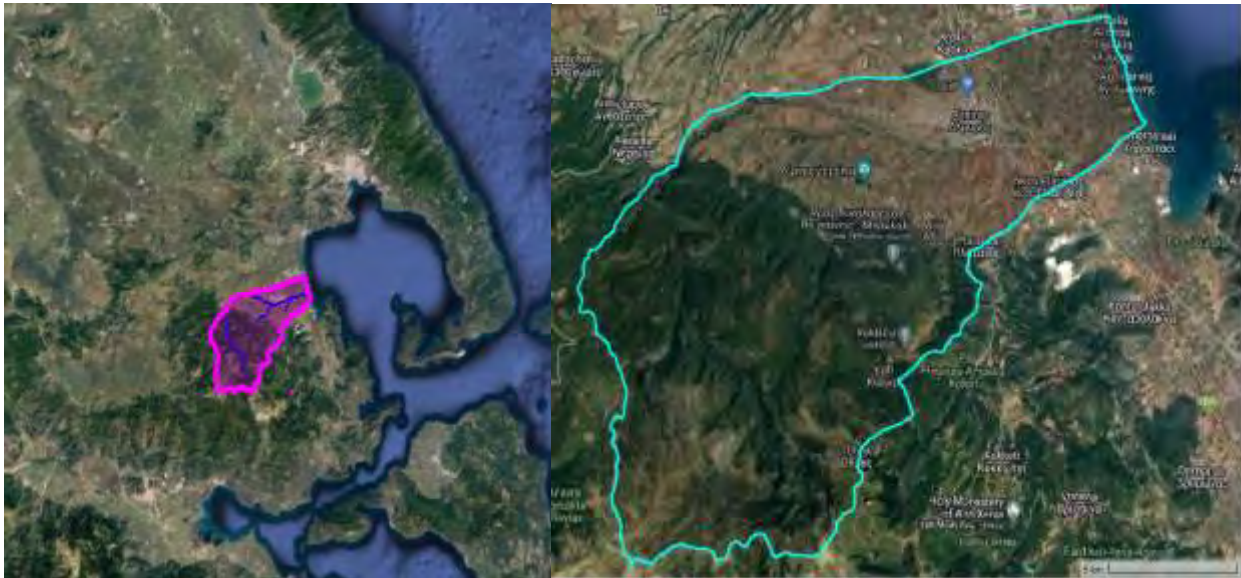
Αβεβαιότητα στα αποτελέσματα του μοντέλου: Όπως όλα τα μοντέλα, τα μοντέλα ασταθούς ροής υπόκεινται σε αβεβαιότητα και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την ακρίβεια των δεδομένων εισόδου, τις υποθέσεις που γίνονται στο μοντέλο και άλλους παράγοντες. Είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη αυτή η αβεβαιότητα κατά την ερμηνεία και τη χρήση των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

## Κεφάλαιο 3 Περιοχή μελέτης

### 3.1 Τοποθεσία και τοπογραφία λεκάνης απορροής



Σχήμα 9 Γεωγραφική απεικόνιση περιοχής μελέτης



Σχήμα 10 Δορυφορική απεικόνιση τοποθεσίας λεκάνης απορροής

Σχήμα 11 Δορυφορική απεικόνιση οριοθέτησης λεκάνης απορροής

Η λεκάνη απορροής του ρέματος Ξεριά στον Αλμυρό χωροθετείται εντός της ευρύτερης περιοχής του Υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας ή αλλιώς υδατικό διαμέρισμα 8 (ΥΔ08) σύμφωνα με την αρίθμηση των υδατικών διαμερισμάτων της χώρας. Το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας είναι ένα εκ των 14 συνολικά Ελληνικών διαμερισμάτων με συνολική έκταση 13.140 km<sup>2</sup>, ο πληθυσμός του, με βάση τα απογραφικά στοιχεία της ΕΛ. ΣΤΑΤ του 2022 είναι 687.527 κάτοικοι, αριθμός μειωμένος σε σχέση με την προηγούμενη απογραφή κατά την οποία είχε εκτιμηθεί ο πληθυσμός του της Θεσσαλίας 731.700 κάτοικοι.

Το Υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας περιλαμβάνει δύο κύριες υδρολογικές λεκάνες, αυτήν του Πηνειού(EL16) και του Αλμυρού –Πηλίου(EL17).

<b>Λεκάνη ΥΔ Θεσσαλίας</b>	<b>Έκταση (km<sup>2</sup>)</b>
<b>Πηνειού</b>	<b>11.062</b>
<b>Ρεμάτων Αλμυρού – Πηλίου</b>	<b>2.079</b>

Πίνακας 2 Εκτάσεις λεκάνων απορροής ΥΔ08

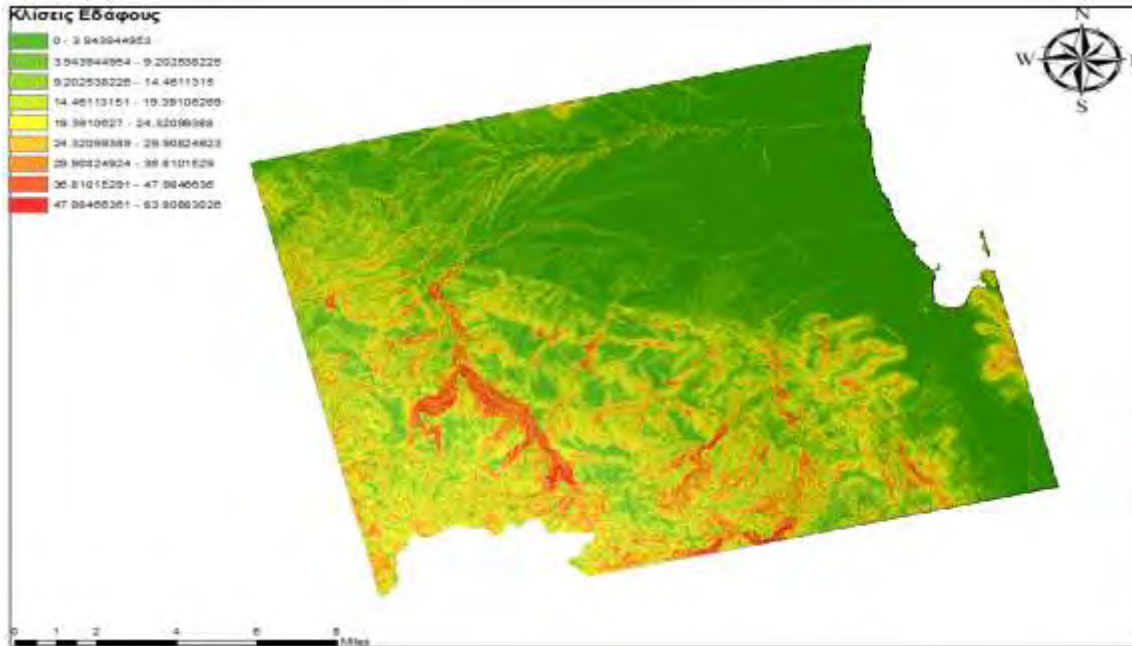
Το συνολικό μέγεθος της λεκάνης απορροής του χειμάρρου Ξεριά είναι περίπου 173 km<sup>2</sup>. Το μεγαλύτερο μέρος της έκτασης χαρακτηρίζεται ως ορεινό καταλαμβάνοντας περίπου το 78,6% του συνόλου ή 136 km<sup>2</sup> επιφάνειας. Το υπόλοιπο κομμάτι παρότι μικρότερο σε έκταση, καλύπτοντας συνολική επιφάνεια 37 km<sup>2</sup>, καλύπτει την πεδινή έκταση του τοπογραφικού παρουσιάζοντας ήπιες κλίσεις στην διεύθυνση ροής του υδατορέμματος. Περεταίρω ανάλυση του τοπογραφικού της λεκάνης πραγματοποιείται στην συνέχεια του κεφαλαίου.



Σχήμα 12 Σχηματική απεικόνιση κόμβων λεκάνης απορροής

Το τοπογραφικό της περιοχής παρουσιάζει μέγιστο υψόμετρο 1652 μέτρα στο ορεινό μέρος και ελάχιστο το μηδενικό στην εκβολή του δηλαδή το σημείο αυτό που ο ποταμός συναντάει την ακτογραμμή, το μέσο υψόμετρο της λεκάνης είναι 598,6 μέτρα. Όπως φαίνεται από τον χάρτη κλίσεων εδάφους, ο οποίος αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του ArcGIS με την εντολή Slope(Spatial Analyst), που παρουσιάζεται παρακάτω όπου βλέπουμε ξεκάθαρα το ορεινό κομμάτι, το κομμάτι της πεδιάδας και την διαδρομή που ακολουθά ο ποταμός Ξεριάς





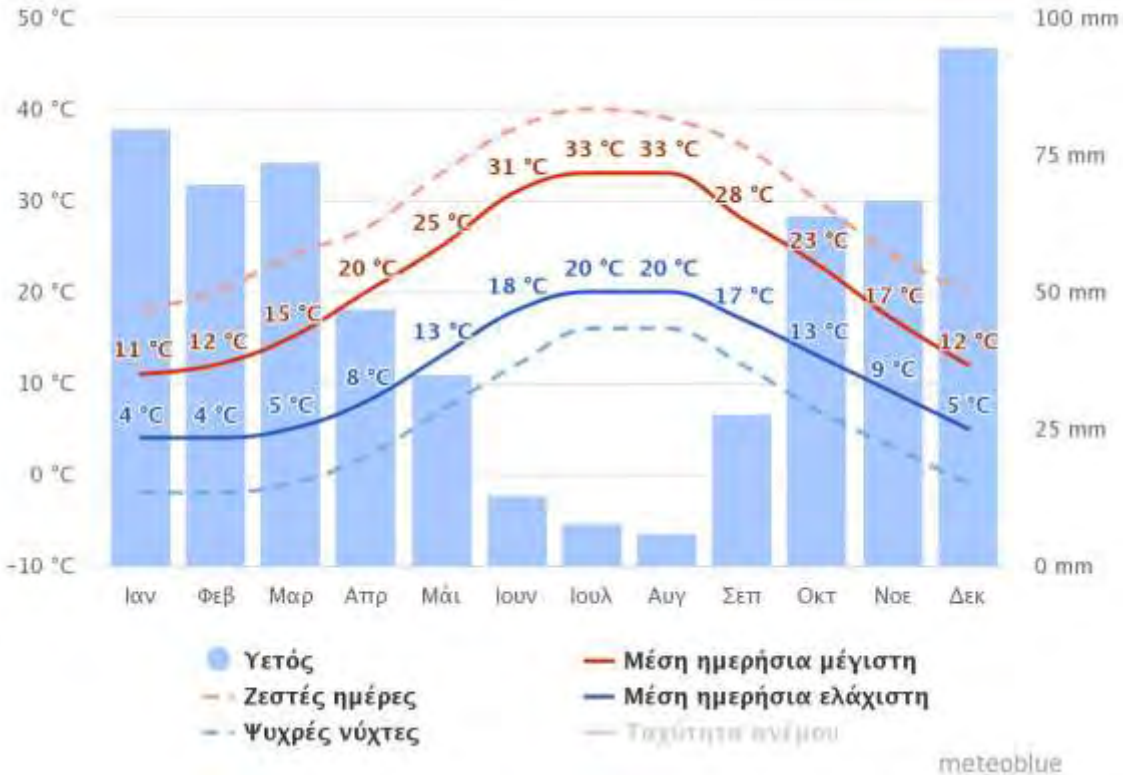
Σχήμα 13 Χάρτης κλίσεων εδάφους

### 3.1.1 ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Το κλίμα της Ελλάδας είναι τυπικά μεσογειακό με σχετικά θερμά και ξηρά καλοκαίρια και σε όλη την διάρκεια του έτους παρουσιάζει μεγάλες περιόδους ηλιοφάνειας. Συνεπώς, το κλίμα που επικρατεί στην περιοχή μελέτης είναι τυπικά μεσογειακό με ήπιους και υγρούς χειμώνες, σχετικά θερμά και ξηρά καλοκαίρια. Οι μακρές περίοδοι ηλιοφάνειας είναι σύνηθες χαρακτηριστικό. Διαφορετικές περιοχές του Ελλαδικού χώρου παρουσιάζουν ποικιλία κλιματικών τύπων, πάντα στο πλαίσιο του μεσογειακού κλίματος. Αυτό οφείλεται στην τοπογραφική διάρθρωση της χώρας που παρουσιάζει μεγάλες διαφορές υψομέτρου ανά περιοχή και την ύπαρξη συχνών αλλαγών μεταξύ στεριάς και θάλασσας. Με αυτές τις διαφορές να γίνονται εμφανείς ακόμα και σε περιοχές που δεν απέχουν πολύ η μια από την άλλη, χαρακτηριστικό που συναντάται σε λίγες χώρες του κόσμου. (ΕΜΥ, 2022)

Πιο συγκεκριμένα για την Θεσσαλία, το υδατικό διαμέρισμα χωρίζεται σε τρεις περιοχές με διαφορετικά κλιματικά χαρακτηριστικά. Η ανατολική παράκτια και ορεινή περιοχή που επηρεάζεται από το μεσογειακό κλίμα, η κεντρική πεδινή περιοχή έχει ηπειρωτικό κλίμα, ενώ η δυτική ορεινή περιοχή έχει ορεινό κλίμα.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 16 ως 17°C, ενώ το ετήσιο εύρος θερμοκρασιών δεν υπερβαίνει τους 22°C. Οι πιο ζεστοί μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος ενώ οι πιο ψυχροί ο Ιανουάριος, ο Φεβρουάριος και ο Δεκέμβριος. Οι παγετοί είναι συχνοί και συμβαίνουν συνήθως από τον Νοέμβριο έως τον Απρίλιο.



Σχήμα 14 Δεδομένα βροχόπτωσης περιοχής μελέτης(ΕΜΥ,2022)

Η μέση ετήσια νέφωση διακυμαίνεται από 4 ως 5 βαθμίδες, με τα δυτικά του διαμερίσματος να παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές ενώ τα ανατολικά τις χαμηλότερες. Η μέση ετήσια σχετική υγρασία κυμαίνεται από 67 ως 72 τις εκατό.

Το υψόμετρο του υδατικού διαμερίσματος στη Θεσσαλία αποτελεί παράγοντα που επηρεάζει έντονα την ποσότητα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Συγκεκριμένα, στα δυτικά μέρη η βροχόπτωση είναι σχετικά υψηλή, ενώ μειώνεται στο πεδινό τμήμα και αυξάνεται ξανά στο ορεινό ανατολικό τμήμα. Αναφέρονται οι παρακάτω ενδεικτικές τιμές ετήσιας βροχόπτωσης:

- Στον σταθμό Λάρισας, η ετήσια βροχόπτωση είναι περίπου 468 mm.
- Στον σταθμό Τυρνάβου, καταγράφονται περίπου 550 mm βροχής ετησίως.
- Στον πιο ορεινό σταθμό του Μουζακίου, η εκτιμώμενη βροχόπτωση φθάνει τα 1.142 mm.

Συνολικά, σε όλο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, η μέση ετήσια επιφανειακή βροχόπτωση υπολογίζεται στα 678 mm. Οι πιο βροχεροί μήνες είναι από τον Οκτώβριο έως τον Ιανουάριο, ενώ οι πιο ξηροί μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Επιπλέον, οι χιονοπτώσεις είναι συχνές, ιδίως στα ορεινά μέρη της Θεσσαλίας, και εντονότερες κατά τη μετάβαση από τα νότια προς τα βόρεια και από τα ανατολικά προς τα δυτικά(ΥΠΕΚΑ, 2014). Με βάση την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία οι παγετοί είναι συχνοί και εμφανίζονται κατά την περίοδο Νοεμβρίου – Απριλίου.



Τέλος, όσο αφορά τους ανέμους που αναπτύσσονται στην περιφέρεια Θεσσαλίας, δεν υπάρχει επικρατούσα κατάσταση για όλο το διαμέρισμα αντιθέτως ανάλογα την τοποθεσία οι άνεμοι παρουσιάζουν διαφορετικά προφίλ.(ΕΜΥ) Η περιοχή του Αλμυρού όντας κοντά στον Βόλο θα θεωρήσουμε ότι το προφίλ ανέμων υπάγεται σε αυτό του Βόλου, δηλαδή κυρίως βορειοδυτικοί άνεμοι.

Η τιμές μέσης μηνιαίας υγρασίας που προκύπτουν από μετρήσεις σταθμού της ΕΜΥ τοποθετημένο στην Αγχιάλο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Μέση Μηνιαία Υγρασία	74.8	73.3	73.2	68.7	63.5	53.7	50.7	52.8	60.0	68.8	74.9	76.0

Πίνακας 3 Τιμές μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης

### 3.1.2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Στην περιοχή της Θεσσαλίας, το έδαφος διαθέτει πλούσιους ορυκτούς πόρους, με κύριο είδος τον χρωμίτη, θειούχα μεταλλεύματα, αμίαντο, ιλμενίτη και κοιτάσματα λιγνίτη. Στην υδρολογική λεκάνη του Αλμυρού, συναντούνται γεωλογικοί σχηματισμοί από τη Ζώνη της Πίνδου, η οποία εκτείνεται σε μικρή έκταση στα ανατολικά της λεκάνης. Επιπλέον, παρουσιάζονται η Μαλιακή Ζώνη, το Ηωελληνικό τεκτονικό Κάλυμμα, η Πελαγονική Ζώνη και η ενότητα Αμπελακίων. Στις περιοχές αυτές έχουν αποθεθεί νεογενείς σχηματισμοί όπως κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, αργίλους και μάργες, καθώς και τεταρτογενείς αποθέσεις όπως αλλουβιανές αποθέσεις, υλικά αναβαθμίδων, κώνοι κορημάτων και παράκτιοι σχηματισμοί. Αυτές οι αποθέσεις εμφανίζονται στην πεδινή περιοχή του Βόλου και του Αλμυρού.

Όσον αφορά τις υδρογεωλογικές συνθήκες, οι υπόγειοι υδροφορίες της λεκάνης απορρόησης Αλμυρού-Πηλίου αναπτύσσονται τόσο στους ανθρακικούς σχηματισμούς, επηρεαζόμενες από τη διείδυση της θάλασσας, όσο και στους κοκκώδεις σχηματισμούς των τεταρτογενών αποθέσεων. Οι τοπικές υδροφορίες αναπτύσσονται στα οφιολιθικά και μεταμορφωμένα πετρώματα γνευσιοσχιστόλιθων, αποδίδοντας νερό μέσω πηγών. Οι δυνατότητες αυτών των υδροφοριών εξαρτώνται από τον κοκκομετρικό χαρακτήρα και τις συνθήκες τροφοδοσίας. Επιπλέον, παρουσιάζονται τοπικές υδροφορίες στην πεδινή περιοχή του Βόλου και του Αλμυρού(ΥΠΕΚΑ, 2014).

### 3.1.3 ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ

Μετά από ανάλυση των χρήσεων γης της περιοχής μελέτης που πραγματοποιήθηκε από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα εξής: οι κύριες μορφές γεωργικής χρήσης γης στην υπό εξέταση λεκάνη απορροής αποτελούν οι ευρείες γραμμικές καλλιέργειες με ποσοστό 41,13%, οι καλλιέργειες σιτηρών με ποσοστό 3,25% και τέλος δεντρόκηποι η δενδροκαλλιέργειες με ποσοστό 9,39%. αναπτύσσονται, επίσης δασικές εκτάσεις γύρο από το ποτάμι κυρίως στο ορεινό κομμάτι της περιοχής μελέτης στα δυτικά, με την μορφή της δασικής κάλυψης να είναι σχετικά πυκνή και αποτελείται από χαμηλή βλάστηση.

Δομημένες περιοχές υπάρχουν στο αριστερό κατά την διεύθυνση ροής του ποταμού, με μέγιστης σημασίας το κομμάτι του ποταμού που διασταυρώνεται με τις γέφυρες. Σημαντικό ρόλο στην ανάλυση των χρήσεων γης έπαιξαν οι χάρτες βλάστησης και χρήσεων γης που αναπτύχθηκαν επίσης από το ΥΠΕΝ και ο χάρτης κατηγοριών καλύψεων εδάφους που δημιουργήθηκε για την περιοχή του Δήμου Αλμυρού από το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας συγκεκριμένα από το εργαστήριο αγροτικού χώρου, όλοι οι αναφερθέντες πίνακες θα παρουσιάζονται στα παραρτήματα. Από τους προαναφερθέντες χάρτες προκύπτουν οι παρακάτω 11 βασικές μορφές κάλυψης γης:

- Γεωργική χρήση
- Οπωροφόρα δένδρα
- Ελαιώνες
- Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας και φυσική βλάστηση
- Δάση
- Φυσικοί βοσκότοποι
- Θαμνώδεις εκτάσεις
- Παραθαλάσσιοι υγροβιότοποι
- Τεχνικές επιφάνειες
- Υδρογραφικό δίκτυο
- Οδικό δίκτυο

### 3.2 Ο ποταμός Ξεριάς

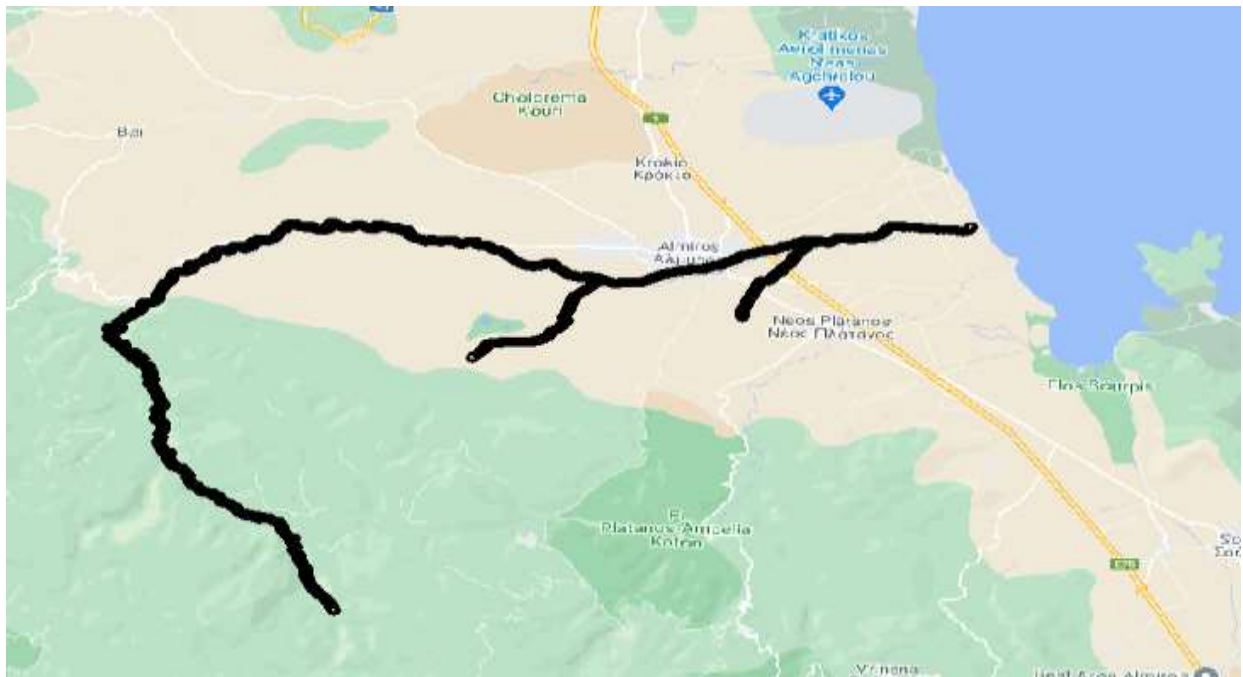
Το υδατόρεμα Ξεριάς αποτελεί το μεγαλύτερο σε μήκος ρέμα της λεκάνης απορροής Αλμυρού – Πηλίου. Στην συγκεκριμένη λεκάνη απορροής, δεν υπάρχουν μεγάλοι ποταμοί, σε αντίθεση με αυτή του Πηνειού αλλά ένα σύνολο ρεμάτων που καταλήγουν ως επι το πλείστον στον Παγασητικό κόλπο. Τα κυριότερα ρέματα που διατρέχουν την λεκάνη είναι το Λαχανόρεμα με συνολικού μήκους περίπου 12 km, το Χολόρεμμα με μήκους περίπου 18 km, το ρέμα Πλατανόρεμμα περίπου 22 km, το ρέμα Ξηρόρεμμα περίπου 16 km και τέλος το ρέμα Ξεριάς Αλμυρού με συνολικό μήκος περίπου 24 km. (ΥΠΕΚΑ, 2014)

Όπως προαναφέραμε ο Ξεριάς αποτελεί τον μεγαλύτερο σε μήκος ποταμό της λεκάνης απορροής ρεμάτων Αλμυρού – Πηλίου, με συνολικό μήκος πάνω από 24 χιλιόμετρα. Ο ποταμός Ξεριάς εμφανίζει μηδενικές παροχές τους περισσότερους καλοκαιρινούς μήνες, γεγονός που μας οδηγεί στο να εξαιρέσουμε την συνεισφορά οποιουδήποτε άλλου συντελεστή του υδρολογικού κύκλου στην δημιουργία απορροών, καταλήγουμε έτσι στο συμπέρασμα πως το γεγονός της βροχόπτωσης είναι ο αποκλειστικός συντελεστής παραγωγής πλημμυρικής απορροής στην περιοχή μελέτης.

Ο ποταμός ουσιαστικά ξεκινά την πορεία του από τις ορεινές περιοχές ΝΔ της περιοχής του Αλμυρού που αποτελούν και όριο της λεκάνης απορροής με την παρουσία του όρους Όθρυος, περνάει από το νότιο κομμάτι της περιοχής του Αλμυρού και καταλήγει να εκβάλλει ανατολικά

στον Παγασητικό Κόλπο. Στην πορεία του εφάπτεται με το νότιο κομμάτι της περιοχής του Αλμυρού, ενώ παρουσιάζει κατά μήκος γέφυρες, αναβαθμούς και διαβάσεις. Ο ποταμός πριν συναντήσει την περιοχή του Αλμυρού περνά από περιοχές χωρίς δόμηση με κυρίαρχο εδαφικό υπόβαθρο γεωργικές καλλιέργειες ή αραιές δασικές εκτάσεις στο βορειότερο κομμάτι, οι συγκεκριμένες περιοχές δεν θα αναπαρασταθούν στο μοντέλο που θα αναπτύξουμε μιας και πρόκειται για ορεινές περιοχές ή ημιορεινές περιοχές χωρίς κατοικήσιμες περιοχές σε κοντινή απόσταση ούτε κάποια κατασκευή ή δομικό έργο ενδιαφέροντος πάρα μόνο δασικές εκτάσεις.

Παρακάτω παρουσιάζεται εικόνα δορυφορικής απεικόνισης της περιοχής που αποσπάσαμε από το Google Maps, σε συνδυασμό με έντονα υπογραμμισμένο το ποτάμι υπό εξέταση, ώστε να κατανοήσουμε πλήρως τις περιοχές ενδιαφέροντος για την μελέτη μας, οι οποίες είναι η περιοχή που το ποτάμι περνά νότια της πόλης του Αλμυρού, τα σημεία που το ποτάμι συναντά δομικά έργα όπως διακλαδώσεις με το οδικό δίκτυο.



Σχήμα 15 Τοπογραφική απεικόνιση ποταμού Ξεριά

Ουσιαστικά η περιοχή μελέτης αποτελείται από το κομμάτι μετά την πρώτη συμβολή του κύριου άξονα του ποταμού με πλευρική εισροή μέχρι το σημείο της δεύτερης συμβολής του ποταμού, με συνολικό μήκος 4,982 km. Κατά μήκος της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται τρεις γέφυρες οι οποίες θα αναπτυχθούν στο υδραυλικό μοντέλο και αποτελούν μέγιστης σημασίας δομικά έργα. Το σύστημα παρουσιάζει συμβολή με δεύτερο ρέμα το οποίο δεν θα αναπτυχθεί στο υδραυλικό μοντέλο επιλογή που έγινε με βάση περιορισμούς που υπήρχαν στην ακρίβεια του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

### 3.3 Η περιοχή του Αλμυρού

Ο Δήμος Αλμυρού εντοπίζεται στον κεντρικό ηπειρωτικό ελλαδικό χώρο, στην Περιφέρεια Θεσσαλίας συγκεκριμένα στο νοτιοδυτικό άκρο του νομού Μαγνησίας. Έχει έκταση 905,364 τετραγωνικά χιλιόμετρα.(ΕΣΥΕ, 2001) Η περιοχή χαρακτηρίζεται από πεδινές, ημιορεινές και ορεινές εκτάσεις. Η πεδιάδα του Αλμυρού είναι το κυρίαρχο γνώρισμα της περιοχής, αυτή εμφανίζεται προς νότια και δυτικά της οροσειράς της Όθρυος και των βουνών της Γκούρας. Στα νότια συνεχίζεται η πεδιάδα της Σούρπης, η οποία συνορεύει με το Χλωμό Όρος στα ανατολικά και έχει ως δυτικό όριο τις πρόποδες του όρους Όθρυς. Η περιοχή διαθέτει ποικιλία τόπων με στοιχεία βιοποικιλότητας και φυσικού κάλλους, περιλαμβάνοντας περιοχές NATURA 2000, όπως το Κουρί Αλμυρού - Άγιος Σεραφείμ και το όρος Όθρυς, το βουνό Γκούρας και το φαράγγι Παλιοκερασιάς. Επίσης, όπως προέκυψε από έρευνα του ΕΚΒΥ φαίνεται να υπάρχουν πολλοί υγρότοποι και καταφύγια άγριας ζωής, με πλούσια χλωρίδα και πανίδα. (Μπουρδάκης Ε., 2005)

Οι κύριοι οικισμοί στην περιοχή είναι ο Αλμυρός με συνολικό πληθυσμό 7826 κατοίκους σύμφωνα με την καταμέτρηση που πραγματοποιήθηκε το 2021 από την Ελ. Στατ., η Σούρπη με 2008 κατοίκους, η Ευξεινούπολη με 2281 και η Νέα Αγκία με 5132 κατοίκους. Η γεωργία είναι η κυρίαρχη δραστηριότητα στην περιοχή, ακολουθούμενη από την κτηνοτροφία. Ο κάμπος του Αλμυρού χρησιμοποιείται για την καλλιέργεια σιτηρών, κηπευτικών, βαμβακιού, καλαμποκιού, ελιών, αμυγδαλιών και αμπελιών. Υπάρχει επίσης αλιεία στις παράκτιες περιοχές του Παγασητικού Κόλπου. Τέλος, ο τουρισμός είναι σημαντικός, ειδικά κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, λόγω της παρουσίας παραθαλάσσιων περιοχών και της αστικής ύπαρξης του Αλμυρού.

### 3.4 Υδρολογική προσομοίωση

Στο πλαίσιο την παρούσας πτυχιακής εργασίας δεν εκπονείται ξεχωριστή υδρολογική μελέτη για την εξεταζόμενη περιοχή αλλά αξιοποιούνται τα στοιχεία από τις ήδη καταρτισμένες υδρολογικές μελέτες που έγιναν σε επίπεδο χώρας, κατά την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Συγκεντρωμένα τα υδρογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης υπό μελέτη είναι:

- Έκταση λεκάνης απορροής  $A = 196.82 \text{ km}^2$
- Μέσο υψόμετρο  $z = 598.6 \text{ m}$
- Υψόμετρο κόμβου εξόδου  $z = 0.0 \text{ m}$
- Μέγιστο μήκος ροής  $L = 42.61 \text{ km}$
- Χρόνος συγκέντρωσης  $\tau = 6.13 \text{ h}$

Το μοντέλο στο του οποίου τα χαρακτηριστικά παραθέσαμε από πάνω αναπτύχθηκε κατά το Στάδιο 1 2<sup>η</sup> φάση Παραδοτέο 4 πλημμυρικά υδρογραφήματα των Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας και αποτελείται 14 υπολεκάνες, 9 κόμβους και 8 κλάδους που συνδέονται για να σχηματιστεί τελικά το υδρολογικό σύστημα που μελετάμε. Στο μοντέλο που αναπτύσσουμε στην συνέχεια της εργασίας περιλαμβάνονται μόνο οι 3 τελευταίοι μιας και οι

υπόλοιποι πρώτοι βρίσκονται σε ορεινή περιοχή χαμηλού ενδιαφέροντος όπως αναφέραμε προηγουμένως.

Τα τελικά συγκεντρωτικά αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης απορροής παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα που αντλήθηκε από το αρχείο της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, που είχαν υπολογισθεί στο πρώτο στάδιο κατά την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας στην Ελλάδα.

Δεδομένα εισόδου κόμβου J4			
X (m)	390928.90	Υψόμετρο (m)	72.95
Y (m)	4336490.00	Κατάντη κλάδος	R42
Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης			
	Ευμενείς συνθήκες	Μέσες συνθήκες	Δυσμενείς συνθήκες
Συνολική παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)			
T = 50	31.06	360.51	792.18
T = 100	47.03	475.84	1034.24
T = 1000	247.08	1124.34	2124.12
Συνολικός όγκος υδρογραφήματος (hm <sup>3</sup> )			
T = 50	2.08	8.23	16.05
T = 100	3.43	11.19	21.05
T = 1000	7.67	22.51	44.08

Πίνακας 4 Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκάνης απορροής

Στην συγκεκριμένη εργασία θα αναλυθούν και οι τρεις κατηγορίες συνθηκών ευμενείς, μέσες και δυσμενής με όλες τις αντίστοιχες κατηγορίες περιόδων επαναφοράς, δημιουργώντας τελικά εννιά συνολικά θεωρητικά σενάρια.

Ολοκληρώνοντας την διαδικασία επιλογής τελικών παροχών σχεδιασμού θα πραγματοποιήσουμε σύγκριση των τιμών παροχών της έρευνας που πήραμε ως δεδομένες, με τις τιμές παροχών από πρόσφατη έρευνα που πραγματοποιήθηκε πρόσφατο από ιδιωτικό τεχνικό γραφείο με τίτλο μελέτης: “ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΗ ΧΕΙΜΑΡΡΟΥ ΞΗΡΙΑ ΑΛΜΥΡΟΥ ΣΕ ΜΗΚΟΣ 2ΧΛΜ ΕΚΑΤΕΡΩΘΕΝ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΤΟΥ ΕΠΑΡΧΙΑΚΟΥ ΟΔΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ (1300Μ ΑΝΑΝΤΙ ΚΑΙ 700Μ ΚΑΤΑΝΤΙ)”. Στην τεχνική έκθεση την μελέτης υπολογίστηκαν με εφαρμογή της ορθολογικής μεθόδου υπολογισμού παροχής σχεδιασμού, για περίοδο επαναφοράς T=100 χρόνια, αναλύοντας τις τρεις περιπτώσεις συνθηκών περιβάλλοντος που επιλέξαμε και στην δική μας περίπτωση δηλαδή ευμενής συνθήκες, μέσες συνθήκες και δυσμενείς συνθήκες. Οι παροχές που προέκυψαν είναι οι εξής:

- Για ευμενής συνθήκες Q= 63 m<sup>3</sup>/sec
- Για μέσες συνθήκες Q= 569 m<sup>3</sup>/sec
- Για δυσμενείς συνθήκες Q= 1224.4 m<sup>3</sup>/sec

Παρατηρούμε πως οι τιμές της μελέτης που παρουσιάσαμε παραπάνω εμφανίζουν πολύ μικρή απόκλιση με τις τιμές παροχών που επιλέξαμε, οπότε η αρχικές τιμές που επιλέξαμε από την μελέτη του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, θα είναι και αυτές που θα υπάγουν το την προσομοίωση μόνιμης ροής που θα αναπτύξουμε παρακάτω. Από την ίδια μελέτη αντλήθηκε

αρχείο πρωτογενών δεδομένων υδρογραφημάτων τα όποια θα εισαχθούν στο κομμάτι της μη μόνιμης ροής.

Σημειώνουμε στο σημείο αυτό πως η βέλτιστη μέθοδος υπολογισμού της πλημμυρικής παροχής υδατορέματος θα ήταν η επεξεργασία δεδομένων που προκύπτουν από απευθείας μετρήσεις της απορροής. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την ύπαρξη σταθμού μέτρησης παροχής μέσα στην κοίτη του ποταμού, πράγμα που είναι ιδιαίτερα σπάνιο για τα ελληνικά δεδομένα.

Στην περίπτωση της προσομοίωσης μη μόνιμης ροής τα υδρολογικά δεδομένα που θα εισάγουμε ήταν αποτέλεσμα της προαναφερθείσας μελέτης του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, και είχαν την μορφή υδρογραφημάτων

## Κεφάλαιο 4 Ανάπτυξη μοντέλου

### 4.1 Εισαγωγή

Σε αυτή την ενότητα της εργασίας θα παρουσιαστεί η διαδικασία που πραγματοποιήθηκε για την δημιουργία του μοντέλου υδραυλικής προσομοίωσης του υδατορέματος. Το μοντέλο προσομοίωσης αναπτύσσεται στο περιβάλλον του HEC-RAS 5.0.7 συγκεκριμένα το μεγαλύτερο μέρος της διαδικασίας πραγματοποιείται στο περιβάλλον του RAS Mapper. Το RAS Mapper αποτελεί μια επέκταση του HEC-RAS και ουσιαστικά είναι ένα σύνολο διαδικασιών, εργαλείων και βοηθητικών προγραμμάτων για την επεξεργασία γεωχωρικών δεδομένων στο HEC-RAS χρησιμοποιώντας ένα γραφικό περιβάλλον χρήστη (GUI). Το πρώτο βήμα της διαδικασίας είναι να αναπτύξουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ποταμού με όσο δυνατόν περισσότερη ακρίβεια μιας και αυτά θα αποτελούν τα δεδομένα εισόδου με βάση τα οποία το λογισμικό θα πραγματοποιήσει τους υπολογισμούς που θα του ζητήσουμε.

Αξιοποιήθηκαν αρχεία ψηφιακού μοντέλου εδάφους και αναπαράστασης τεχνικών έργων κατά μήκος του ποταμού που προέκυψαν από αυτοψίες μελετητών στην περιοχή του Αλμυρού κατά την πραγματοποίηση του Σταδίου Ι, 1<sup>η</sup> Φάση της Οδηγίας 2000.60.EK τα οποία διανεμήθηκαν σε μορφή Tiff και SHP file αντίστοιχα από το Εργαστήριο Υδρολογίας του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα αρχεία των τεχνικών έργων είχαν λογισμικό παραγωγής τους το AutoCAD, τα οποία μετατράπηκαν στην συνέχεια μέσα από διαδικασίες στο ArcGIS σε αρχεία προσιτά από το λογισμικό HEC-RAS. Επιπρόσθετα αξιοποιήσαμε υδρολογικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή στα πλαίσια της προαναφερθείσας οδηγίας 2000/60/EK. Τελική φάση της προσομοίωσης αποτελεί η ρύθμιση των παραμέτρων προσομοίωσης, των οριακών συνθηκών και η εισαγωγή των υδρολογικών δεδομένων που θα αντλήσουμε από προηγούμενες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή, δηλαδή εισάγουμε στο λογισμικό παροχές αιχμής οι οποίες υπολογίστηκαν για τις διάφορες περιόδους επαναφοράς που μας ενδιαφέρουν και ταυτόχρονα ο καθορισμός των οριακών συνθηκών που θα υπάγουν την διαδικασία επίλυσης που πραγματοποιεί το λογισμικό.

### 4.2 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους

Ως ψηφιακό μοντέλο εδάφους, Digital Elevation Model (DEM), ορίζεται κάθε “ψηφιακή αναπαράσταση της συνεχούς μεταβολής του ανάγλυφου στον χώρο”, αυτό είναι το βασικότερο στοιχείο με βάση το οποίο θα αναπτυχθεί το μοντέλο μας αφού αποτελεί το υπόβαθρο στο οποίο θα αναπτύξουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδάτινου σώματος υπο μελέτη. Ουσιαστικά το ψηφιακό μοντέλο εδάφους είναι ένας κάρναβος με στοιχεία υψομέτρων που αναπαριστούν δεδομένα υψομέτρου που αντιπροσωπεύουν το έδαφος. Τα στοιχεία που συνθέτουν τον κάρναβο ονομάζονται κελιά ή φατνία (grid) και είναι το στοιχειώδες μέγεθος επιφάνειας ή αλλιώς pixel του εκάστοτε μοντέλου, με το κάθε κελί να εμπεριέχει μια πληροφορία υψομέτρου. Εισάγοντας έτσι αυτό το σύνολο δεδομένων, γνωστό ως DEM, στο λογισμικό επιλογής μας λαμβάνουμε

πίσω ένα μία τρισδιάστατη αναπαράσταση του ανάγλυφου της ευρύτερης επιλεγμένης περιοχής μελέτης. Το DEM αποτελεί την σημαντικότερη πηγή δεδομένων για την δημιουργία ενός υδραυλικού μοντέλου, αφού καθορίζει τα όρια των χαρακτηριστικών του. Επιπρόσθετα αρχεία που μπορεί να είναι χρήσιμα είναι αέριες φωτογραφίες την περιοχής μελέτης και πληροφορίες για τις χρήσεις γης ώστε να έχουμε ως μελετητές μια σφαιρική άποψη της περιοχής και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της. Το αρχικό μοντέλο εδάφους που θα εισάγουμε στην περίπτωση μας αναπτύχθηκε για την ιστοσελίδα του Υπουργείου Ενέργειας, οδηγία 2007/60/ΕΚ. Το συγκεκριμένο DEM είναι ανάλυσης 5x5m και κλίμακας 1:50.000 και διατίθενται από τα Σχέδια Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών της Οδηγίας 2000/60/ΕΕ. Τα DEM κλίμακας 1:5.000 και 1:1.000 διατίθενται στο πλαίσιο της άδειας CreativeCommons Αναφορά Δημιουργού 3.0 Ελλάδα, από τον ΟΚΧΕ τα οποία δημιουργήθηκαν για να αξιοποιηθούν κατά τη φάση σύνταξης των μελετών κτηματογράφησης της ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε. Τα παραπάνω αρχεία δεν μας προσέφεραν την ακρίβεια ανάλυσης εδάφους που επιθυμούμε όποτε στην συνέχεια θα πραγματοποιήσουμε ενέργειας για την αύξηση της ανάλυσης του μοντέλου εδάφους αξιοποιώντας τα λογισμικά Google Earth Pro και Arc GIS.

Γενικά, για να αυξήσουμε την ακρίβεια του ψηφιακού μοντέλου εδάφους απαιτούνται χρονοβόρες και σύνθετες ενέργειες, όμως είναι μια διαδικασία που χρειάζεται απαραίτητη κατά την ανάπτυξη ενός μοντέλου ποταμού στο οποίο οι συνθήκες ροής που θα επικρατούν είναι μη μόνιμες, μιας και τέτοια μοντέλα απαιτούν μεγάλη ακρίβεια. Αυτό απορρέει από τις εξισώσεις που επιλύει το μοντέλο για το συγκεκριμένο τύπο ροής, μιας και όπως αναφέραμε οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται μεταξύ διαδοχικών διατομών του ποταμού, όπου οι συγκεκριμένες εξισώσεις απαιτούν ακριβής και ξεκάθαρες διατομές εδάφους ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση και να μην οδηγείτε σε αστάθεια του μοντέλου και τερματισμό της προσομοίωσης. Εν συνεχεία η ακρίβεια του εδάφους δηλαδή ο βαθμός στον οποίο αυτό αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα είναι κάτι που μπορούμε να βελτιώσουμε κάνοντας το μοντέλο εδάφους μας σύγκριση ή/και σύνθεση με άλλα μοντέλα εδάφους διαφορετικής ακρίβειας η που αναπτύχθηκαν με διαφορετικό τρόπο.

Για να πετύχουμε μία αύξηση της ακρίβειας του ψηφιακού μοντέλου εδάφους μέσα από σύγκριση και σύνθεση με άλλα μοντέλα εδάφους επιλέξαμε να αξιοποιήσουμε το λογισμικό Google Earth Pro, το οποία διανέμεται δωρεάν από την Google και αποτελεί μια ευρέως χρησιμοποιούμενη πλατφόρμα που παρέχει πληθώρα λειτουργιών για ερευνητές, στο οποίο θα συλλέξουμε δεδομένα εδάφους από την περιοχή μελέτης και θα πραγματοποιήσαμε μια διαδικασία κατά την οποία θα αναπτύσσουμε τα δικά μας ψηφιακά μοντέλα εδάφους με βάση αυτά τα δεδομένα που αντλήσαμε στο λογισμικό ArcGIS συγκεκριμένα στο ArcMap.

Αρχικά, ανοίγουμε το λογισμικό και εμφανίζεται η γη με δορυφορική εικόνα, σε αυτήν πρέπει αρχικά να βρούμε την περιοχή μελέτης που μας ενδιαφέρει και να εστιάσουμε σε αυτήν. Σε αυτήν την περιοχή, μέσα από την επιλογή New Path, μπορούμε να πάμε και να επιχειρήσουμε να μαρκάρουμε ουσιαστικά όλα τα σημεία εντός και γύρο από την επιφάνεια ροής του ποταμού. Το μαρκάρισμα πρέπει να γίνει με μεγάλη πυκνότητα και να καλύπτει όλα τα σημεία που ενδέχεται να ενδιαφέρουν τον μελετητή. Ουσιαστικά ορίζουμε στο λογισμικό να μαζέψει πληροφορίες συντεταγμένων και υψόμετρου από κάθε σημείο που περνάμε. Σώζουμε το Path που είναι



ουσιαστικά το αρχείο που περιέχει όλα τα χαρακτηριστικά από τα σημεία τα οποία επιλέξαμε και κάνουμε εξαγωγή των δεδομένων σε μορφή .kml. Αυτός ο τύπος αρχείων χρησιμοποιείται για να αποθηκεύει και να παρουσιάζει γεωγραφικά δεδομένα και μπορούν να εμπεριέχουν σημεία, γραμμές, πολύγωνα και εικόνες.

Αφού κατεβάσουμε το συγκεκριμένο αρχείο μεταβαίνουμε σε ένα εργαλείο ανοιχτού κώδικα που πραγματοποιεί μετατροπές δεδομένων gps σε άλλη μορφή δεδομένων. Αυτό βρίσκεται στην ηλεκτρονική σελίδα gps visualizer στην οποία μπορούμε να πραγματοποιήσουμε δωρεάν μετατροπές αρχείων .kml σε .gpx όπως αναφέραμε είναι αρχεία με μορφή συντεταγμένων gps τα οποία μπορούμε να εισάγουμε σε περιβάλλον ArcGIS συγκεκριμένα στο ArcMap και να πραγματοποιήσουμε τροποποιήσεις σε αυτά.

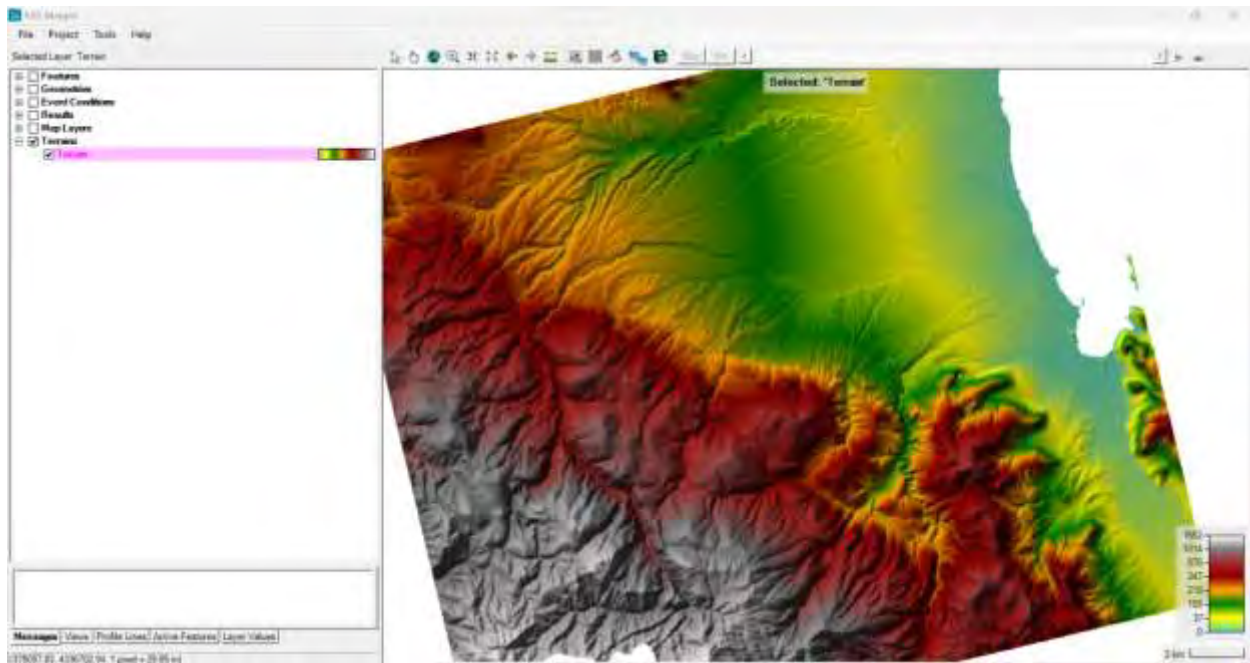
Τα αρχεία .gpx θα τα εισάγουμε στο περιβάλλον ArcMap με την βοήθεια του εργαλείου GPX to Features conversion, σε αυτό το εργαλείο εισάγουμε το GPS αρχείο μας και το λογισμικό το μετατρέπει στο σύνολο χαρακτηριστικών που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι το σύνολο των σημείων που σχεδιάσαμε αρχικά. Είναι απαραίτητη επίσης η αναγωγή από το σύστημα αναφοράς στο σύστημα ΕΓΣΑ '87, διαδικασία που είναι σχετικά απλή και πραγματοποιείται μέσα από το Layer Properties πάμε στο Coordinate System και επιλέγουμε αυτό που επιθυμούμε, στην συγκεκριμένη περίπτωση GCS\_GGRS\_1987. Το σύνολο των σημείων αυτών αποτελεί το raster αρχείο στο οποίο θα πραγματοποιήσουμε spatial analysis δηλαδή τεχνικές παρεμβολής μέσα από δύο εργαλεία του λογισμικού το IDW και το Kriging. Μόλις ολοκληρώνεται η διαδικασία το σύνολο των σημείων στο λογισμικό έχει αντικατασταθεί από ένα ψηφιακό αρχείο εδάφους με υψόμετρα, κλίσεις και καμπυλότητα, έχοντας δημιουργήσει μία συνεχή επιφάνεια. Τελευταίο βήμα πριν εξάγουμε τα αρχεία που αναπτύξαμε αποτελεί η δημιουργία contours δηλαδή ισοϋψών γραμμών εδάφους, τις οποίες εμφανίζουμε στο μοντέλο εδάφους μας μέσα από το ομώνυμο εργαλείο Contour(spatial analyst), στην περίπτωση μας αναπτύξαμε ισοϋψείς καμπύλες των 5 και του 1 μέτρου. Τέλος, κάνουμε εξαγωγή του τελικού ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε μορφή .tiff ώστε να μπορέσουμε να εισάγουμε αυτά τα μοντέλα στο περιβάλλον του HEC RAS. Επίσης, πέραν από τα μοντέλα εδάφους DEM που αναπτύξαμε μέσα από το layer των ισοϋψών θα δημιουργήσουμε ένα ψηφιακό επίπεδο μόνο με αυτές ώστε να τις εισάγουμε σε επόμενο στάδιο πάνω από το βασικό μοντέλο εδάφους.

Στόχος της παραπάνω διαδικασίας είναι να καταφέρουμε να έχουμε όσο δυνατόν ακριβέστερη αποτύπωση του εδάφους έτσι ώστε να πετύχουμε όσο το δυνατόν ρεαλιστική και ακριβή αποτύπωση των χαρακτηριστικών του ποταμού όπως η γραμμή ροής της κύριας κοίτης αλλά και των χαρακτηριστικών των διατομών που αποτελούν σημαντικά συστατικά στοιχεία του μοντέλου μας.

Επιπρόσθετα, έγινε προσπάθεια σύνθεσης ψηφιακών μοντέλων εδάφους με το βασικό μοντέλο εδάφους μας. Η συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιήθηκε μέσα στο περιβάλλον του HEC-RAS, στο RAS mapper μέσα από την επιλογή Terrain και Create new RAS terrain κάνουμε εισαγωγή του κύριου DEM και όσων άλλων αρχείων Raster μορφής επιθυμούμε. Επιλέγουμε την διαδικασία συγχώνευσης των εισαχθέν αρχείων σε μοναδικό αρχείο Raster με την προοπτική να δημιουργήσουμε ένα μοναδικό ψηφιακό αρχείο εδάφους που θα παρουσιάζει αυξημένη ακρίβεια. Το τελικό παράγωγο της διαδικασίας δεν ανταποκρίνεται στις προσδοκίες μας, δεν μας

δίνει δηλαδή μια πιο καθαρή εικόνα του εδάφους, οπότε συνεχίζουμε να έχουμε σαν βασικό υπόβαθρο του μοντέλου μας το αρχικό DEM.

Σε αυτό το κεφάλαιο, έχω περιγράψει τη διαδικασία συλλογής και μετασχηματισμού δεδομένων χρησιμοποιώντας το Google Earth Pro και το ArcGIS για τη δημιουργία ακριβών DEM για την έρευνά μου. Εξήγησα πώς μετέτρεψα τα δεδομένα .kml σε .gpx και χρησιμοποίησα το ArcGIS για τη δημιουργία ακριβών DEM και παράγωγων αυτών όπως ισοϋψής γραμμές υψομέτρου χρησιμοποιώντας μια σειρά τεχνικών παρεμβολής. Τα DEM που δημιουργήθηκαν ήταν κρίσιμα για τη διασταύρωση του κύριου DEM που χρησιμοποιήθηκε για το μοντέλο μου και τη βελτίωση της ακρίβειας του μοντέλου. Το τελικό DEM φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 16 Τελική μορφή ψηφιακού μοντέλου εδάφους

### 4.3 Ανάπτυξη Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών Μοντέλου

Η ανάπτυξη των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του μοντέλου πραγματοποιείται στο περιβάλλον του RAS mapper, που αποτελεί προέκταση του λογισμικού HEC RAS. Τα γεωμετρικά στοιχεία που πρέπει να δημιουργήσει ο χρήστης είναι τα εξής:

- Εισαγωγή και Γεωαναφορά ψηφιακού μοντέλου εδάφους
- Κύρια Γραμμή Ροής ποταμού (Stream centerline)
- Όχθες ποταμού (Bank lines)
- Κύριες διευθύνσεις ροής (Flow paths)
- Διατομές του υδατικού σώματος (Cross sections)
- Γέφυρες και οχετοί (Bridges and Culvert data)
- Χρήσεις γης (Land use)

Στο περιβάλλον του RAS Mapper η αριστερή στήλη ονομάζεται Data Layer Window( παράθυρο επιπέδων δεδομένων), και περιέχει όλα τα διαθέσιμα επίπεδα και τα σχετιζόμενα με αυτά δεδομένα. Το κάθε επίπεδο(layer) αριστερά από την ονομασία του υπάρχει ένα σύμβολο πρόσθεσης συν(+), μέσω της επιλογής με το σύμβολο συν (+) αναπτύσσονται με μορφή δέντροδιαγράμματος υποκατηγορίες του κάθε θεματικού επιπέδου. Αυτές είναι ουσιαστικά κενές βάσεις δεδομένων στις οποίες θα εισάγουμε χειροκίνητα τα χαρακτηριστικά του υδατορέματος τα οποία απαιτούνται από το λογισμικό για να πραγματοποιήσει την υδραυλική προσομοίωση. Η σύνθεση των παραπάνω θεματικών επιπέδων αποτελεί ουσιαστικά όπως θα δούμε στην συνέχεια την ανάπτυξη των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και την δημιουργία του γεωμετρικού αρχείου του μοντέλο μας.

Αρχικά πριν ξεκινήσουμε την διαδικασία δημιουργίας των γεωμετρικών δεδομένων της προσομοίωσης πρέπει να ορίσουμε ονομασία και τοποθεσία αποθήκευσης των δεδομένων καθώς και μονάδες μέτρησης των χαρακτηριστικών της μελέτης μας. Οι ενέργειες αυτές πραγματοποιούνται στο κεντρικό μενού του λογισμικού με την επιλογή File > New Project και ο καθορισμός μονάδων μέτρησης από την επιλογή Options > Unit System.

#### **4.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΓΕΩΑΝΑΦΟΡΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ**

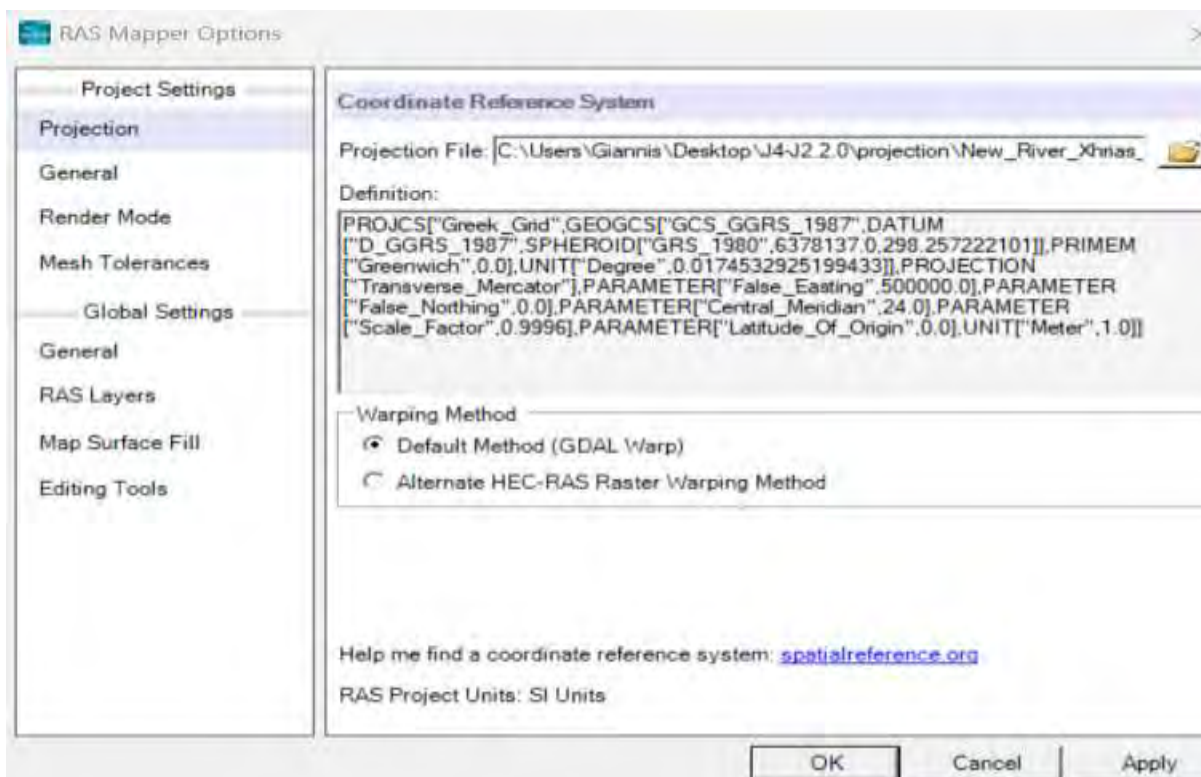
Με την ολοκλήρωση των αρχικών βημάτων είμαστε σε θέση να μεταβούμε στο περιβάλλον του RAS mapper μέσα από την ομώνυμη επιλογή Open RAS mapper. Η γεωαναφορά αποτελεί διαδικασία μέγιστης σημασίας, πρακτικά είναι η διαδικασία κατά την οποία πραγματοποιείται από το λογισμικό εκχώρηση πραγματικών συντεταγμένων σε κάθε γεωγραφικό πλαίσιο αναφοράς(Pixel), πραγματοποιείτε δηλαδή συσχέτιση θέσεων στον χάρτη με ένα προβολικό σύστημα αναφοράς. Γενικά, ορίζεται ως η διαδικασία συσχέτισης πληροφοριών με μια γεωγραφική θέση.(Hill, 2009). Η διαδικασία πραγματοποιείτε μέσα από την επιλογή Project > Set Projection και επιλέγουμε το αρχείο γεωαναφοράς μορφής PRJ το οποίο αντιπροσωπεύει το σύστημα συντεταγμένων που συνδέεται με την Ελλάδα γνωστό ως Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 ή ΕΓΣΑ87 ( GGRS 87).

Αμέσως μετά φορτώνουμε το αρχείο που περιλαμβάνει το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων(DEM), μέσω τις παρακάτω σειράς επιλογών στο RAS Mapper:

- Tools > New Terrain > Add New Terrain > επιλογή αρχείου TIF file > Create.

Το επίπεδο Map Layers αξιοποιείτε για την διασταύρωση εγκυρότητας των τοπογραφικών δεδομένων μας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της επιλογής Add Web Imagery Layer που μας δίνει ένα πλήθος επιλογών ψηφιακών εικόνων να επιλέξουμε και να δούμε οι ίδιοι πόσο αποκλίνουν τα δεδομένα μας σε σχέση με άλλους χάρτες. Στην παρούσα εργασία έγινε διασταύρωση με πλήθος εικόνων όπως: Google Terrain, Google Satellite, ArcGIS World Topo Map και Google Map όμως με όλες τις παραπάνω εικόνες παρατηρώ πως δεν υπάρχει πλήρη ταύτιση των αντίστοιχων σημείων. Η λύση βρίσκεται στην γεωαναφορά που πραγματοποιήθηκε προηγουμένως στην οποία δεν αλλάξαμε το χαρακτηριστικό Default Raster Warping Method

(GDAL Warp), αφού το αλλάξουμε σε Alternate HEC-RAS Raste Warping Method παρατηρούμε ότι το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε και πλέον τα Map layers ταιριάζουν πλήρως με το Terrain.



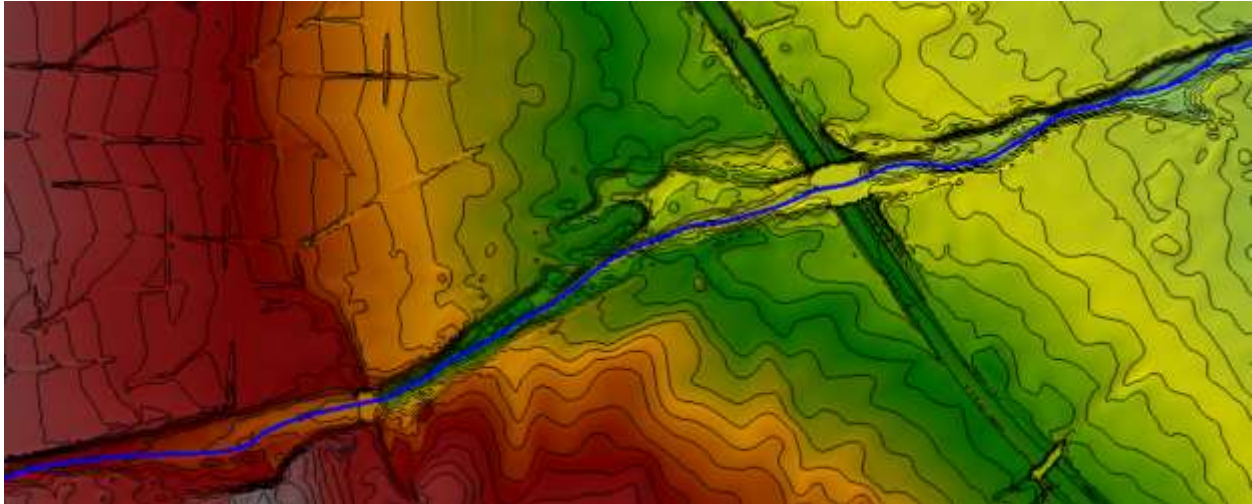
Σχήμα 17 Περιβάλλον ορισμού συστήματος γεωαναφοράς

### 4.3.2 ΚΥΡΙΑ ΓΡΑΜΜΗ ΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΟΥ (STREAM CENTERLINE)

Η διαδικασία χάραξης της κύριας γραμμής ροής ξεκινά αρχικά δημιουργώντας νέο γεωμετρικό αρχείο μέσα από την επιλογή Add New Geometry > River > Edit Geometry. Πραγματοποιούμε ανάλυση του τοπογραφικού της περιοχής και εισάγοντας τις ισοϋψείς καμπύλες που αναπτύξαμε σε προηγούμενο βήμα είμαστε σε θέση να ξεκινήσουμε την διαδικασία χάραξης. Η διαδικασία αυτή πρέπει να πραγματοποιηθεί με βάση την κατεύθυνση ροής, από ανάντη προς κατόντη ουσιαστικά ξεκινώντας από μεγάλο υψόμετρο και φτάνοντας στο μηδενικό υψόμετρο που παρουσιάζεται στην εκβολή με την θάλασσα του συστήματος. Στο συγκεκριμένο μοντέλο η ροή θα έχει κατεύθυνση από τα βόρειο-δυτικά προς τα νότιο-ανατολικά. Η διαδικασία ψηφιοποίησης των σημείων της κεντρικής κοίτης απαιτεί μικρό σφάλμα για να επιτευχθεί με ακρίβεια την οποία δεν μπορούμε να εξασφαλίσουμε πάντα από το τοπογραφικό, συνεπώς απαιτούνται πολλές δοκιμές μέχρι να πετύχουμε μια ρεαλιστική αποτύπωση του ποταμού. Σε αυτή την προσπάθεια σημαντική βοήθεια αποτέλεσαν οι ισοϋψείς καμπύλες που έπαιξαν τον ρόλο του οδηγού σε πολλές περιπτώσεις μιας και στις περιοχές που οι ισοϋψείς παρουσιάζουν έντονη σύγκλιση και ως αποτέλεσμα οξείες γωνίες υποδεικνύουν με αυτό το τρόπο διάρθρωση την κατεύθυνση του υδατορέματος, η εισαγωγή τους γίνεται μέσα από το θεματικό επίπεδο Terrain

με την εντολή Plot Contours μέσα από τις ιδιότητες εμφάνισης εικόνας (image display properties) και επιλέγοντας τις ισοϋψείς με ισοδιάσταση ένα μέτρο.

Τέλος, θα πρέπει να σιγουρευτούμε ότι το γεωμετρικό αρχείο που αναπτύσσουμε συνδέεται με τα στοιχεία εδάφους που επιθυμούμε μέσα από την επιλογή Manage Geometry Associations... επιλέγοντας το αρχείο μοντέλου εδάφους (Terrain) που επιθυμούμε.



Σχήμα 18 Ψηφιακή αποτύπωση κύριας κοίτης

#### 4.3.3 ΟΧΘΕΣ ΠΟΤΑΜΟΥ (BANK LINES)

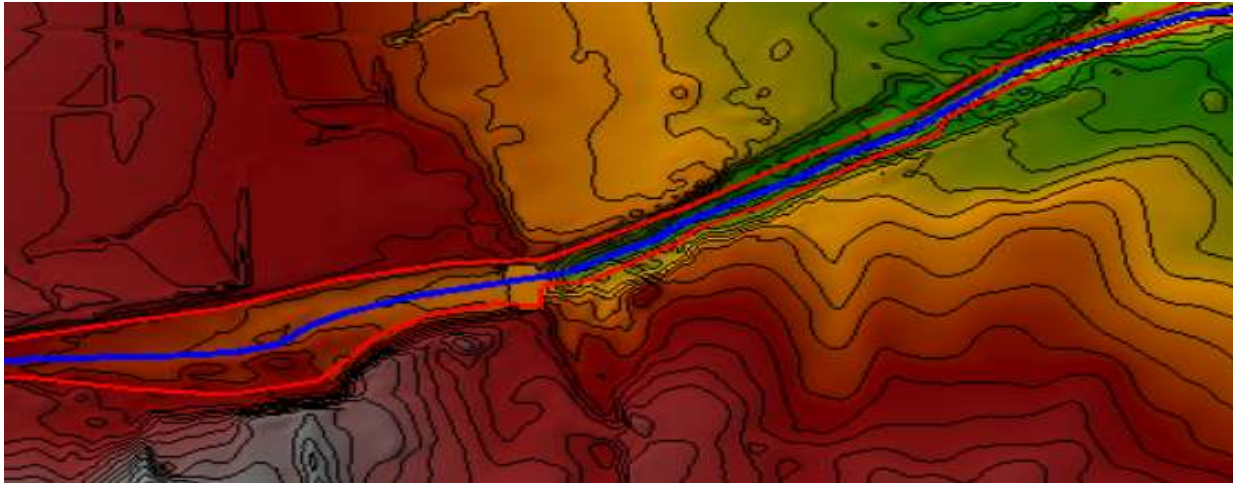
Ο σχεδιασμός των όχθων του ποταμού θα πραγματοποιηθεί στην παρούσα εργασία μιας και η δημιουργία αυτού του θεματικού επιπέδου βοηθάει τον μετέπειτα ορισμό των οχθών στο HEC-RAS και βοηθάει στον διαχωρισμό των διαφόρων μεταβολών στην τραχύτητα μεταξύ του εσωτερικού του πεδίου ροής και εξωτερικά αυτού, ο σχεδιασμός τους δεν αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την υδραυλική προσομοίωση. Αυτές θα αποτυπωθούν στο μοντέλο εδάφους ως δύο πολυγωνικές γραμμές δεξιά και αριστερά της κύριας γραμμής ροής του ποταμού, οι οποίες ορίζουν τα όρια της ροής στο εσωτερικό της κοίτης και των περιοχών πλημμύρας.

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται χωρίς να έχει σαν βάση ένα σύνολο αυστηρών κανόνων που πρέπει να ακολουθήσει ο μελετητής όπως συνέβαινε στην κύρια γραμμή ποταμού, πέραν του κανόνα που ορίζει πως οι δύο γραμμές δεν πρέπει να τέμνονται μεταξύ τους και ταυτόχρονα ούτε με την κύρια γραμμή ροής σε οποιοδήποτε σημείο, αλλά για να έχει ρεαλιστικό αποτελέσματα στην τελική προσομοίωση του θα πρέπει να σχεδιαστούν με βάση την ανάλυση του τοπογραφικού. Σε αυτό το εγχείρημα μπορεί να βοηθήσει η αξιοποίηση των ισοϋψών καμπυλών τις οποίες μπορούμε να εμφανίσουμε στο θεματικό επίπεδο Terrain με την εντολή Plot Contours μέσα από τις ιδιότητες εμφάνισης εικόνας (image display properties). Επίσης ανάλογα με το αποτέλεσμα που επιδιώκουμε μπορούμε να μεταβάλουμε την ισοδιάσταση των ισοϋψών ανεβάζοντας το Interval, στην περίπτωση μας επιλέξαμε τα 5 μέτρα.

Οι γραμμές αυτές είναι ανεξάρτητες του προσανατολισμού που θα τις σχεδιάσουμε αν και στην περίπτωση μας σχεδιάζονται με βάση τον προσανατολισμό της ροής του ποταμού και



ξεκινώντας από την αριστερή πλευρά του ποταμού. Τέλος σχεδιάζουμε τις γραμμές όχθης ως συνεχείς γραμμές χωρίς να απαιτείται να συμβαίνει αυτό μιας και μπορούν να παρουσιάσουν και ασυνέχειες χωρίς αυτό να μας δημιουργεί πρόβλημα.

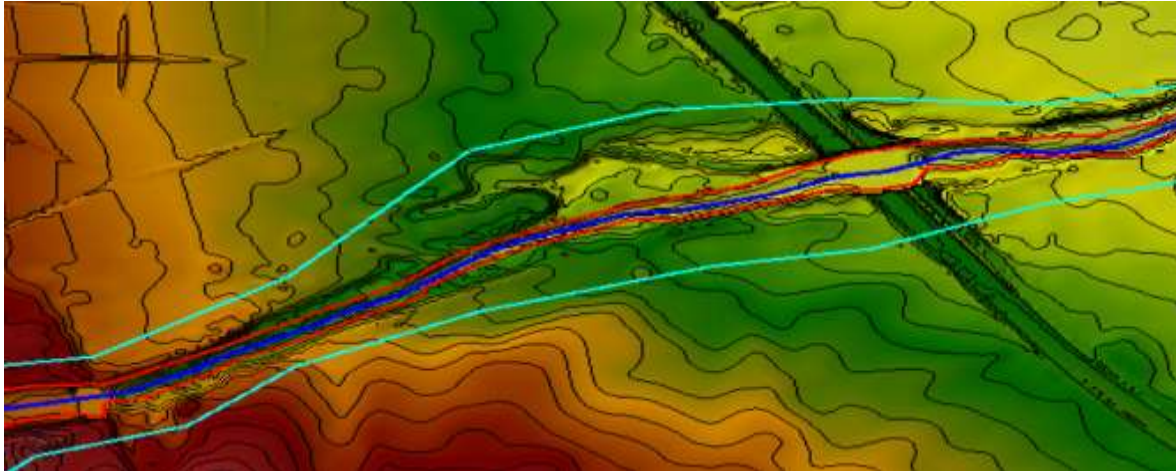


Σχήμα 19 Ψηφιακή αποτύπωση όχθων ποταμού

#### 4.3.4 ΜΟΝΟΠΑΤΙΑ ΡΟΗΣ (FLOW PATHS)

Τα μονοπάτια ροής αναπτύσσονται για να ολοκληρωθούν σε επόμενο βήμα υπολογισμοί μεταξύ διαδοχικών διατομών και είναι περιοχές εκτός της κοίτης των οποίων την απόσταση από την κύρια γραμμή ροής πρέπει να επιλεγεί με βάση το ανάγλυφο και την λογική μας. Αυτές οι γραμμές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της απόστασης πλημμυρικής πεδιάδας μεταξύ των διατομών.

Κατά την αποτύπωση τους πρέπει να χαράξουμε τις πολυγωνικές γραμμές ξεχωριστά για κάθε πλευρά των υδατορεμμάτων. Πρέπει να βεβαιωθούμε ότι αυτές δεν τέμνονται μεταξύ τους ή με οποιοδήποτε άλλο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα βήματα (κύρια γραμμή ροής, γραμμές όχθης). Στην περίπτωση μας επέλεξα να τις σχεδιάσω ξεκινώντας με την αριστερή σε σχέση με την κατεύθυνση ροής και στην συνέχεια την δεξιά.



Σχήμα 20 Ψηφιακή αποτύπωση μονοπατιών ροής

#### 4.3.5 ΔΙΑΤΟΜΕΣ (CROSS SECTIONS)

Οι διατομές αποτελούν ένα πολύ σημαντικό δεδομένο για το HEC-RAS. Οι διατομές μας παρέχουν μέσα από τα δεδομένα που θα τους δώσουμε το προφίλ του εδάφους κατά μήκος της ροής του ποταμού, για αυτό και η θέσεις κατασκευής αυτών πρέπει να επιλεγθούν με γνώμονα την ιδιαίτερη μορφολογία των υδατορεμάτων που αναπτύχθηκαν.

Ως γενικός εμπειρικός κανόνας, οι μοντελιστές HEC-RAS συνήθως συνιστούν τη δημιουργία διατομών σε διαστήματα 50 έως 200 μέτρων, ανάλογα με την πολυπλοκότητα του ποταμού. Ωστόσο, σημειώνεται πώς το παραπάνω αποτελεί μία βάση εκκίνησης και ο αριθμός των διατομών μπορεί να χρειαστεί να προσαρμοστεί με βάση τις ειδικές συνθήκες του ποταμού που μοντελοποιείται. Άλλοι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν τον αριθμό των διατομών που απαιτούνται περιλαμβάνουν την παρουσία σημαντικών αλλαγών στη γεωμετρία του ποταμού, όπως στροφές ή στενώσεις, και την παρουσία τεχνητών κατασκευών όπως γέφυρες ή φράγματα. Σε γενικές γραμμές, είναι καλύτερη η επιλογή δημιουργίας περισσότερων διατομών, καθώς αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα ένα πιο ακριβές και αξιόπιστο μοντέλο. Στην παρούσα εργασία οι διατομές σχεδιάστηκαν με μέση απόσταση διαδοχικών διατομών περίπου 50 μέτρα και μέσο μήκος διατομής τα 350 μέτρα.

Συνεπώς, η ανάπτυξη επαρκούς αριθμού διατομών απαιτείται για την όσο το δυνατόν καλύτερη αποτύπωση του υδατορέμματος. Κατά την διαδικασία ανάπτυξης αυτών θα πρέπει να ακολουθηθούν οι παρακάτω προδιαγραφές:

- Σχεδιάζονται πάντα κάθετα στην διεύθυνση ροής του ποταμού
- Πρέπει να καλύπτουν όλη την έκταση του ποταμού
- Πρέπει να καλύπτουν όλη την περιοχή πλημμύρας
- Σχεδιάζονται από τα αριστερά προς τα δεξιά ως προς την κατεύθυνση ροής

- Κάθε διατομή πρέπει να τέμνει και την κύρια γραμμή και τις γραμμές όχθης και τα μονοπάτια ροής ταυτόχρονα
- Οι διατομές σχεδιάζονται από ανάντη προς κατάντη

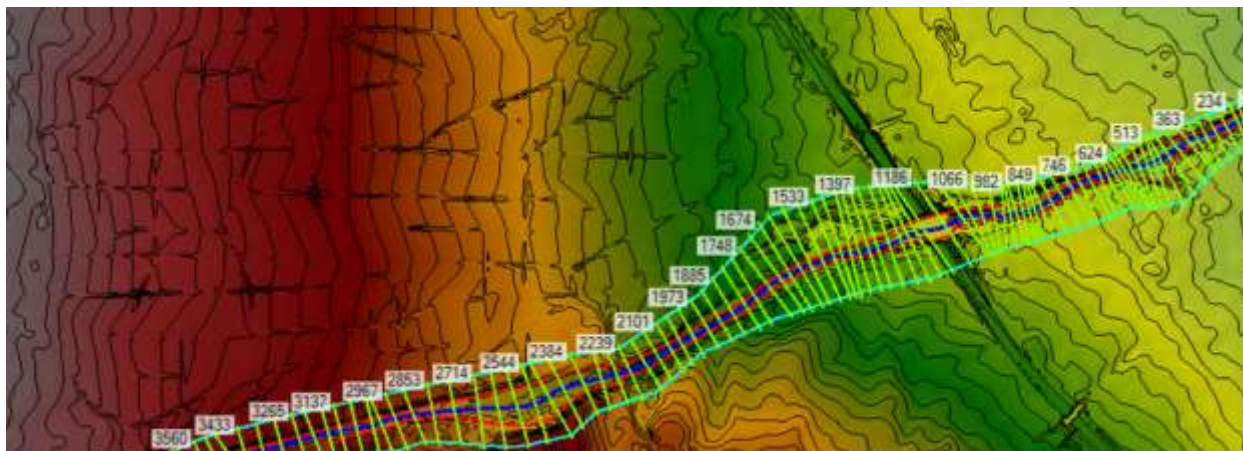
Η απόσταση που επιλέγουμε μεταξύ δύο διατομών δεν είναι απαραίτητο να είναι σταθερή, όμως βοηθάει να είναι σχετικά κοντινές αποστάσεις για την καλύτερη αποτύπωση, ακριβέστερους υπολογισμούς αλλά και ευκολότερη κατανόηση του μοντέλου.

Σε περίπτωση που παρεμβάλει κάποια κατασκευή με τον ποταμό η οποία μπορεί να είναι γέφυρα ή οχετός πρέπει να σιγουρευτούμε πως έχουν δημιουργηθεί πριν και μετά από αυτήν διατομές σε αρκετά κοντινή απόσταση ως προς την αρχή και το πέρας της κατασκευής αντίστοιχα για να μπορέσουμε σε επόμενο βήμα να αναπτύξουμε και να προσθέσουμε στο μοντέλο μας την συγκεκριμένη κατασκευή, η παραπάνω διαδικασία δεν απαιτείται να πραγματοποιηθεί για άλλες μορφές κατασκευών όπως αναβαθμούς ή ιρλανδικές διαβάσεις ή συνδυασμό αυτών. Η ύπαρξη κατασκευών μπορεί να ελεγχθεί μέσα από φωτογραφίες αέρος και από έρευνα τοπίου ομάδας μελετητών, στην περίπτωση μας η αντιστοίχιση μοντέλου με την πραγματικότητα έγινε, όπως αναφέρεται στην εισαγωγή του κεφαλαίου, από αρχεία που αντλήθηκαν από την Ειδική Γραμματεία Υδάτων, μέσα από τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας. Πιο συγκεκριμένα Σταδίου Ι, «1η ΦΑΣΗ – ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ / ΕΠΙΓΕΙΕΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ, Παράρτημα 33: Ξεριάς Αλμυρού – Ξεριάς Αλμυρού (GR0817FR00300)» σε συνδυασμό με έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή υπό εξέταση.

Κατά την διάρκεια της ψηφιοποίησης των διατομών θα πρέπει να σιγουρευτούμε πως αυτές είναι αρκετά φαρδιές ώστε να περιλαμβάνουν όλη την περιοχή πλημμύρας, για να επιτευχθεί αυτό πρέπει οι διατομές να εκτείνονται μέχρι μεγάλα υψόμετρα ώστε οι περιοχές πλημμύρας να είναι ξεκάθαρες. Μετά από την παραγωγή μιας διατομής μπορούμε να ελέγξουμε αν πετύχαμε τα παραπάνω δημιουργώντας το προφίλ του εδάφους της διατομής επιλέγοντας αυτή και πατώντας δεξιά κλικ εμφανίζεται η επιλογή Plot Terrain Profile.

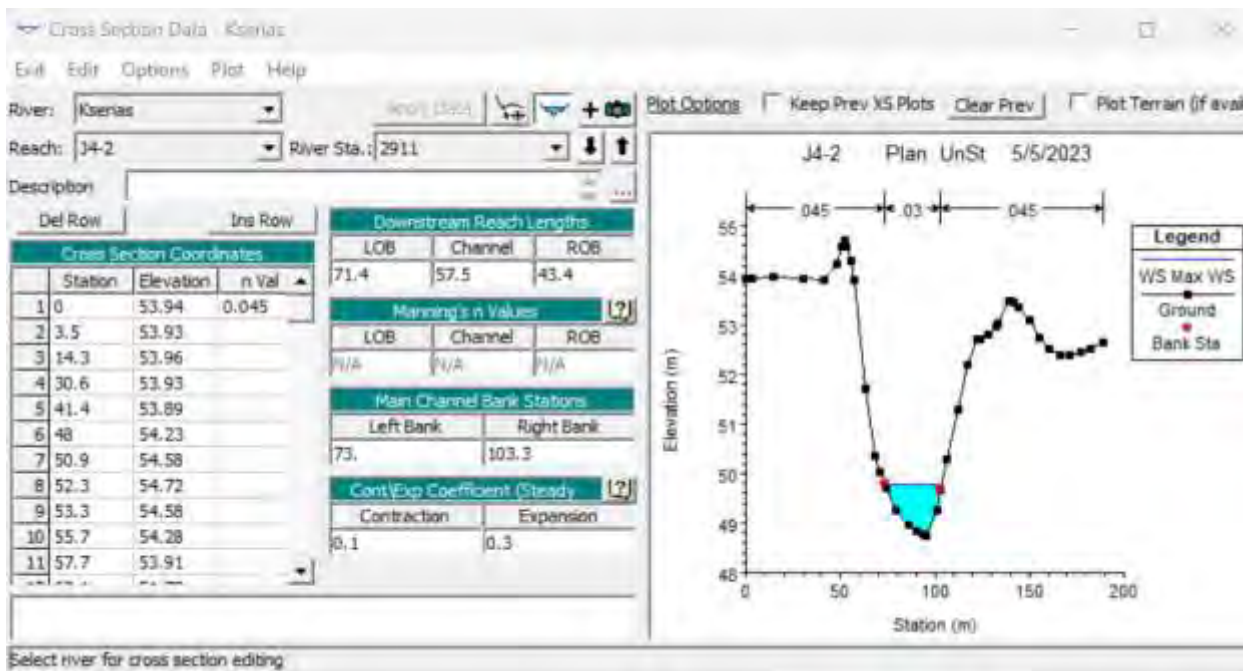
Με το πέρας της ψηφιοποίησης των διατομών θα πρέπει να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί των διατομών μέσα από την επιλογή Compute > All Xs Attributes





Σχήμα 21 Ψηφιακή αποτύπωση διατομών

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας ανάπτυξης διατομών είμαστε σε θέση να μεταβούμε στο περιβάλλον επεξεργασίας γεωμετρικών δεδομένων (View/Edit geometric data). Εκεί μέσα από την επιλογή δεδομένα διατομών (cross section data) μπορούμε να ελέγξουμε την μορφή των διατομών αλλά και όλα τα συστατικά χαρακτηριστικά τους όπως το πλάτος της κύριας κούρας και των οχθών, τις συντεταγμένες της διατομής που είναι ουσιαστικά όλα τα σημεία της διατομής με τα αντίστοιχα υψόμετρα τους ακόμα και τις τιμές συντελεστών τοπικών απωλειών συστολής και διαστολής.



Σχήμα 22 Τυχία διατομή του μοντέλου

#### 4.3.6 ΓΕΦΥΡΕΣ ΚΑΙ ΟΧΕΤΟΙ (BRIDGE AND CULVERT)

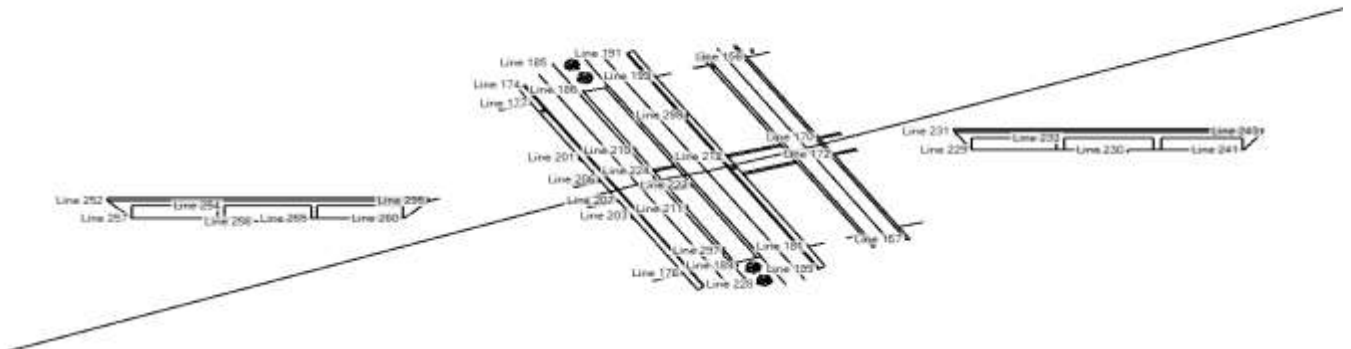
Στην περίπτωση του Ξεριά υπάρχουν κατασκευές σε διάφορα σημεία κατά μήκος της κούρας του ποταμού όπως ιρλανδικές διαβάσεις, αναβαθμοί και γέφυρες. Στην περίπτωση της περιοχής

μελέτης που καλύπτει το μοντέλο μας θα εστιάσουμε στην ανάπτυξη των γεφυρών παραλείποντας τις άλλες δύο μορφές κατασκευών μιας και δεν απαιτούν σχεδίαση όπως προαναφέραμε. Γέφυρες εμφανίζονται σε τρία σημεία κατά μήκος του ποταμού που εξετάζουμε, με τις δύο από αυτές να αποτελούν μέρος του πρωτεύοντος Εθνικού Οδικού Δικτύου και είναι τμήμα της νέας Εθνικής Οδού Αθηνών- Θεσσαλονίκης (Ε.Ο. 1) ενώ η άλλη μία αποτελεί κομμάτι του πρωτεύοντος αντίστοιχα Επαρχιακού Οδικού Δικτύου.

Συντεταγμένες έργων:

1. X= 394405,631 Y= 4337351,132 Z= 39,420
2. X= 394417,583 Y= 4337371,525 Z= 39,420
3. X= 394461,237 Y= 4337374,637 Z= 38,920

Από τις συντεταγμένες των γεφυρών και από εικόνες του έργου φαίνεται πως οι γέφυρες με βάση τα χαρακτηριστικά τους δεν έχουν ενδιάμεσα μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Όταν παρατηρούμε τα ανεπτυγμένα αρχεία αναπαράστασης τους σε ένα γραφικό περιβάλλον όπως ArcGIS είναι πλέον ξεκάθαρο πως οι γέφυρες είναι σε πολύ κοντινή απόσταση μεταξύ τους το οποίο ελέγχουμε τέλος μέσα από φωτογραφίες αέρος που έχουν παρθεί από την συγκεκριμένη περιοχή.



Σχήμα 23 Σχέδια κάτοψης και τομών γεφυρών



Σχήμα 24 Δορυφορική εικόνα γεφυρών



Σχήμα 26 Φωτογραφία γέφυρας



Σχήμα 25 Φωτογραφία γέφυρας



Σχήμα 27 Πλευρική φωτογραφία γέφυρας



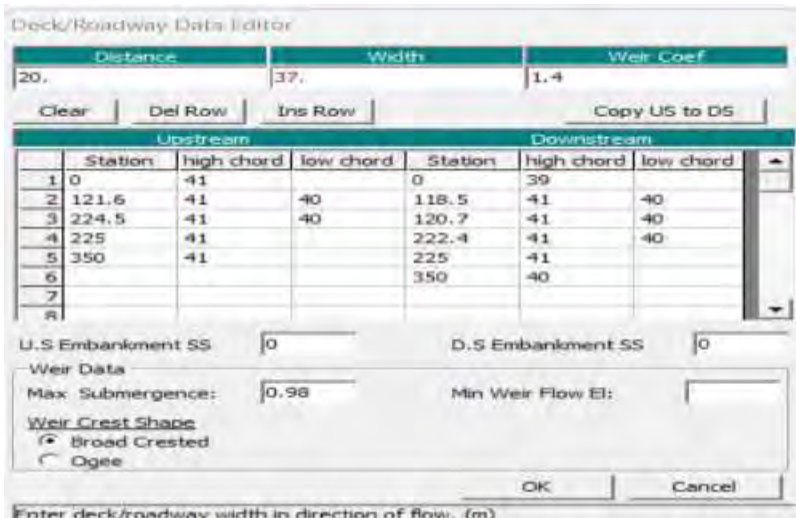
Σχήμα 28 Όψη γέφυρας

Αυτό μας κάνει αδύνατο να ακολουθήσουμε τον κανόνα ανάπτυξης διατομών που απαιτεί σε μικρή απόσταση πριν και μετά την κάθε γέφυρα να υπάρχουν διατομές, μιας και η απόσταση μεταξύ των γεφυρών είναι μόλις μερικά μέτρα ενώ εμείς θέλουμε η συγκεκριμένη διατομή να βρίσκεται σε απόσταση μερικών δεκάδων μέτρων. Συγκεκριμένα, στο εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού HEC-RAS στο υπό κεφάλαιο που σχετίζεται με τον τρόπο ανάπτυξης γεφυρών αναφέρει πως η διατομή κατάντη μιας γέφυρας πρέπει ιδανικά σε είναι στην απόσταση αποκατάστασης της ροής, δηλαδή πέρα από το σημείο που η ροή επηρεάζεται από την ύπαρξη κατασκευής, με την απόσταση του σημείου αποκατάστασης από την κατασκευή ιδανικά υπολογισμένο μέσα από αυτοψίες κανόνας που επεκτείνεται και στον τρόπο σχεδιασμού της ανάντη διατομής με αυτήν ιδανικά να σχεδιαστεί μερικά μέτρα πριν την γέφυρα. Έτσι, με βάση τα παραπάνω κάνω την θεώρηση για την ακριβέστερη ανάπτυξη του μοντέλου πως οι γέφυρες 1,2 και 3 θα προσομοιωθούν με μία γέφυρα που θα έχει συνολικό πλάτος οδοστρώματος ίσο με το άθροισμα των πλατών των αντίστοιχων γεφυρών,  $L = 14,3 + 12,9 + 10,4 = 37,6$  m, όπου L είναι



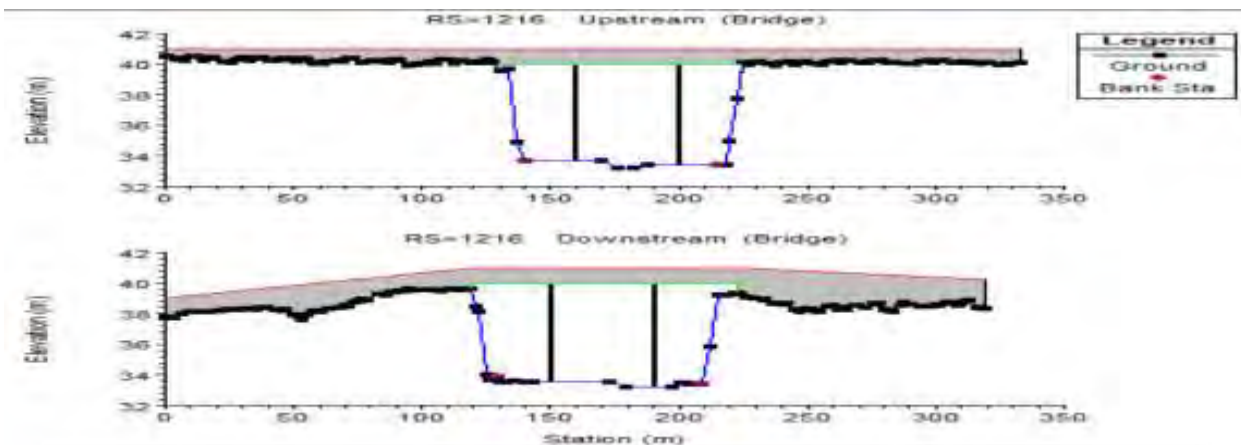
το πλάτος του στοιχείου σαν τεχνικό έργο συνολικά και όχι ξεχωριστά σαν πλάτος οδοστρώματος, το υψόμετρο της γέφυρας πάρθηκε επίσης τεχνικά σχέδια των γεφυρών.

Για την δημιουργία της γέφυρας επιλέγουμε το κουμπί που μας δείχνει το παρακάτω σχήμα και ανοίγουμε έτσι το παράθυρο των δεδομένων οχετών γεφυρών (Bridge-Culvert). Αρχικά δεν υπάρχουν δεδομένα οπότε πρέπει να τα φτιάξουμε εμείς μέσω του Options και Add new bridge and/or culvert. Όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά πάρθηκαν από τις ανεπτυγμένες όψεις – κατόψεις που παρουσιάστηκαν στην ενότητα.



Σχήμα 29 Χαρακτηριστικά οδοστρώματος γέφυρας

Το παράθυρο που παρουσιάζεται ακριβώς παραπάνω είναι αυτό στο οποίο δίνουμε στην γέφυρα τα χαρακτηριστικά της. Ουσιαστικά, ορίζουμε τις διατομές ακριβώς πριν και μετά την γέφυρα, την απόσταση των διατομών από της προβλήτες της γέφυρας, το φάρδος, την κρέμαση, τα όρια άνω και κάτω πέλματος του οδοστρώματος. Τέλος το τρόπο διαμόρφωσης των στηλών στήριξης αυτής αλλά και τα χαρακτηριστικά των ίδιων των στύλων τα ορίζουμε σε νέο παράθυρο που θα ανοίξουμε μέσα από την επιλογή Bridge Design. Με το πέρας τον παραπάνω διαδικασιών προκύπτει η γέφυρα που αναπτύξαμε όπως παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 30 Όψης γέφυρας ανάντη και κατόντη

#### **4.3.7 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ(MANNING'S N)**

Παραμένοντας στο ίδιο περιβάλλον επεξεργασίας γεωμετρικών δεδομένων επιλέγουμε το κουμπί των πινάκων(tables) και διαλέγουμε το ‘Manning’s n or k values’. Ανοίγει, έτσι ένα νέο παράθυρο με τρεις άδειες στήλες που θα πρέπει ο εκάστοτε μελετητής να δώσει σε αυτές τιμές ώστε να γεμίσουν με δεδομένα και να αποκτήσουν νόημα. Η κεντρική στήλη αφορά την τραχύτητα εντός της κοίτης ροής και αναμένεται να είναι μικρότερη η τιμή της σε σχέση με της τιμές του συντελεστή εκτός αυτής, με βάση όσα γνωρίζουμε για τον συντελεστή τραχύτητας και τις μεταβλητές που τον επηρεάζουν. Οι άλλες δύο στήλες αφορούν τις περιοχές δεξιά και αριστερά εκτός της κοίτης δηλαδή την πλημμυρική πεδιάδα και είναι σαφές πως θα έχουν μεγαλύτερες τιμές τραχύτητας από αυτήν της κοίτης. Οι τιμές αυτές μπορούν να βρεθούν σε είδη ανεπτυγμένους χάρτες φυτό κάλυψης ή άλλης μορφής κάλυψης του εδάφους ή χρήσεων γης γενικότερα. Οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας μπορούν να οριστούν είτε για όλο το μήκος της κοίτης και των πλημμυρικών πεδιάδων, είτε για ακριβέστερα αποτελέσματα να ορισθούν διαφορετικές τιμές ανάλογα τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε κομματιού γης. Στο παρών μοντέλο θα πραγματοποιήσουμε την μέθοδο καθορισμού του συντελεστή τραχύτητας που αναφέραμε στην ενότητα 3.4.2. Ο Chow ανέπτυξε τον παρακάτω πίνακα για φυσικούς ανοιχτούς αγωγούς οι οποίοι παρουσιάζουν πλάτος ροής μέχρι και 100 πόδια ή 30.48 μέτρα.

Type of channel and description	Roughness Coefficient n		
	Minimum	Normal	Maximum
Natural Streams Minor streams (top width at flood stage <100 ft)			
1. Clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0,025	0,030	0,033
2. Same as above, but more stones and weeds	0,030	0,035	0,040
3. Clean, winding, some pools and shoals	0,033	0,040	0,045
4. Same as above, but some weeds and stones	0,035	0,045	0,050
5. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0,040	0,048	0,055
6. Same as 4, but more stones	0,045	0,048	0,055
7. Sluggish reaches, weedy, deep pools	0,050	0,070	0,080
8. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stand of timber and underbrush	0,075	0,100	0,150

Πίνακας 5 Τιμές τραχύτητας κοίτης κατά Chow

3. Floodplains			
a. Pasture, no brush			
1. short grass	0.025	0.030	0.035
2. high grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. no crop	0.020	0.030	0.040
2. mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. mature field crops	0.030	0.040	0.050
c. Brush			
1. scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d. Trees			
1. dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200
2. cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
3. same as above, but with heavy growth of sprouts	0.050	0.060	0.080
4. heavy stand of timber, a few down trees, little undergrowth, flood stage below branches	0.080	0.100	0.120
5. same as 4. with flood stage reaching branches	0.100	0.120	0.160

Πίνακας 6 Τιμές τραχύτητας πλημμυρικής πεδιάδας κατά Chow

Ταυτόχρονα ρόλο στην τελική επιλογή του συντελεστή ταχύτητας, αλλά κυρίως για τον έλεγχο της τιμής που θα επιλέξουμε και όχι τόσο για τον καθορισμό αυτής, έπαιξε το Τεύχος Β με τις Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων(ΟΜΟΕ) που αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων συγκεκριμένα από την Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, διεύθυνση μελετών έργων οδοποιίας. Στο τεύχος αναλύεται ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για τον βέλτιστο τρόπο μελέτης αποχετευτικών, στραγγιστικών και υδραυλικών έργων σε σχέση με

οδικά έργα. Επιπρόσθετα στο πλαίσιο των οδηγιών αναπτύχθηκε, από την ομάδα συγγραφής των ΟΜΟΕ, ένας πίνακας καθορισμού συντελεστή ταχύτητας Manning για την περίπτωση υπολογισμού σε τεχνητές εγκαταστάσεις και σε φυσικά ρέματα, ο πίνακας παρουσιάζει εύρη τιμών του συντελεστή τραχύτητας που μπορούν να αξιοποιηθούν για διάφορα έργα και τύπους φυσικών αγωγών, τον πίνακα παραθέτουμε στο κεφάλαιο με Παραρτήματα.

Οι σημαντικότεροι συντελεστές που επηρεάζουν την τιμή του συντελεστή τραχύτητας είναι ο τύπος και το μέγεθος των αδρανών εντός της κοίτης του ποταμού και η συνολική εικόνα του σχήματος του ποταμού. Το κανάλι δεν παρουσιάζει ραγδαίες μεταβολές μεταξύ διατομών σε μορφή στενώσεων ή αμβλύνσεων ούτε έντονες αλλαγές κατεύθυνσης ροής όποτε επιλέγουμε και τους αντίστοιχους συντελεστές τραχύτητας με βάση τον πίνακα του Chow και τις επιβεβαιώνουμε από τον ανεπτυγμένο πίνακα με τις ΟΜΟΕ. Στην περίπτωση της πλημμυρικής πεδιάδας παρατηρούμε πως κατά μήκος του ποταμού δεν υπάρχουν σημαντικές μεταβολές της μορφής κάλυψης γης οπότε θα επιλέξουμε μία τιμή σταθερή και για τις δύο πλευρές. Τελικά καταλήγουμε στις δύο παρακάτω τιμές:

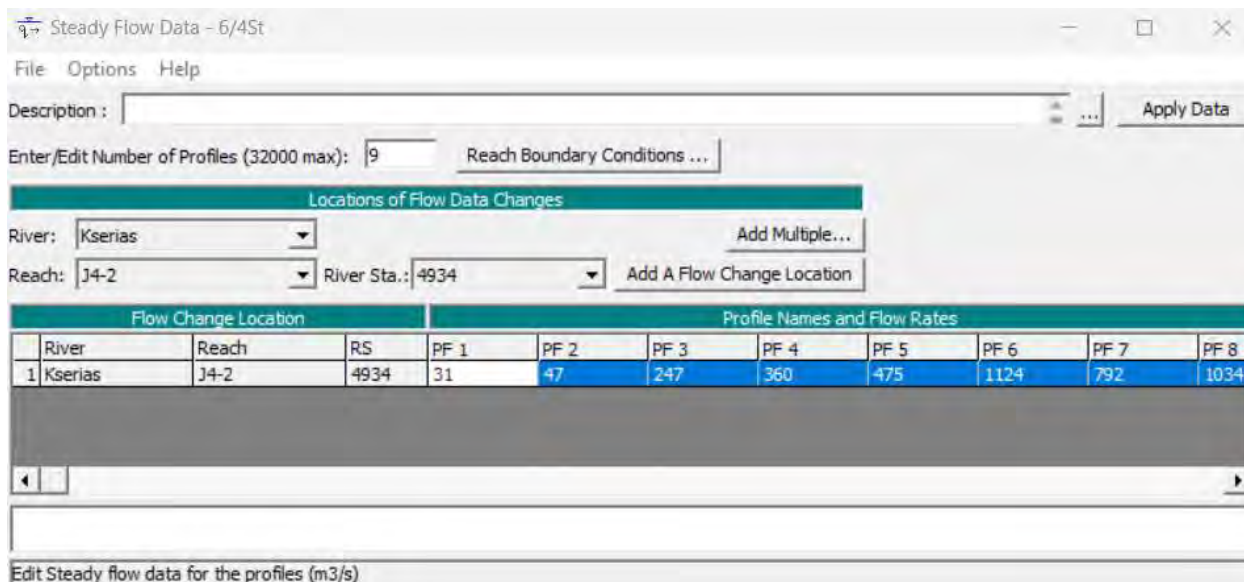
- Κοίτη: 0.03
- Πλημμυρική πεδιάδα: 0.045

## 4.4 Προετοιμασία Υδραυλικών προσομοιώσεων

### 4.4.1 ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ

Μέσα από την επιλογή View/Edit Steady flow data θα ξεκινήσει η τελική διαδικασία του σχεδιασμού του μοντέλου προσομοίωσης. Πραγματοποιείται εισαγωγή των προφίλ ροής που θα πρέπει να επιλυθούν από το μοντέλο, στην περίπτωση μας θα αναπτυχθούν τα προφίλ για τρεις περιπτώσεις που θα σχετίζονται με τις επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς, όπως απαιτείται με βάση την ευρωπαϊκή οδηγία 2007/60/ΕΚ, δηλαδή ένα προφίλ για παροχή αιχμής που έπεται ως αποτέλεσμα βροχόπτωσης με περίοδο επαναφοράς 50 χρόνια, ένα για 100 χρόνια και τέλος για 1000 χρόνια. Επίσης, για το κάθε προφίλ θα αναπτυχθούν 3 υπό προφίλ με βάση τις συνθήκες περιβάλλοντος που επικρατούν στο σημείο της πλημμύρας δηλαδή για ευμενής, μέσες και δυσμενής συνθήκες, προκύπτουν έτσι τελικά ανεπτυγμένα 9 σενάρια παροχών αιχμής.

Επόμενο βήμα είναι να συμπληρώσουμε τον κενό πίνακα στο παράθυρο με τις υπολογισμένες παροχές αιχμής που προέκυψαν από την υδρολογική ανάλυση της περιοχής μελέτης. Αυτές οι τιμές θα αντληθούν από το παράρτημα Π04 Πλημμυρικά υδρογραφήματα της παραδοτέας μελέτης σχεδίου διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας ΥΔ EL08 που αναπτύχθηκαν από το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας και την Ειδική Γραμματεία Υδάτων, συγκεκριμένα από την ενότητα 4 Δεδομένα Κόμβων Υδρογραφικού δικτύου. Στο κεφάλαιο 3.4 που παρουσιάζεται η υδρολογική ανάλυση της περιοχής μελέτης παρουσιάζετε ο πίνακας που αξιοποιήσαμε για τον καθορισμό των παροχών.



Σχήμα 31 Περιβάλλον εισαγωγής παροχών αιχμής

Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την εισαγωγή των οριακών συνθηκών στα αντίστοιχα κομμάτια του ποταμού που το απαιτούν. Οι οριακές συνθήκες (boundary conditions) είναι απαραίτητα για να καθοριστεί το βάθος ροής ανάντη και κατάντη του υδατορέματος. Ο καθορισμός του βάθους ροής είναι αναγκαίος για την εκκίνηση υπολογισμών του λογισμικού. Στην περίπτωση της υπό-κρίσιμης ροής αρκεί να ορίσουμε οριακές συνθήκες στο κατάντη άκρο του υδατορέματος σε αντίθεση με την περίπτωση υπέρ-κρίσιμης ροής που απαιτείται ο καθορισμός οριακής συνθήκης στο ανάντη κομμάτι. Σε περίπτωση μεικτής ροής πρέπει να καθοριστούν οριακές συνθήκες σε όλα τα άκρα του υδατορέματος.

Οι επιλογές οριακών συνθηκών που μας δίνει το πρόγραμμα είναι:

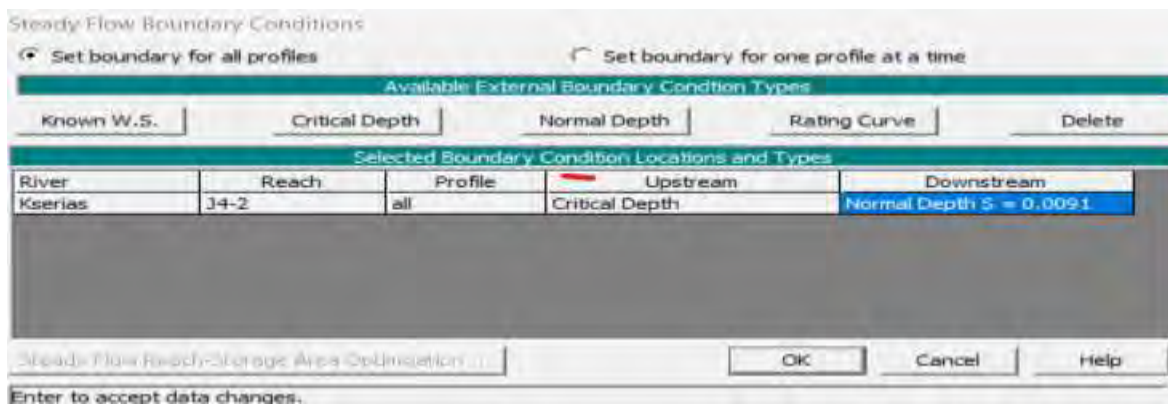
- Known Water Surface Elevation (Γνωστό υψόμετρο επιφάνειας νερού)
- Critical Depth (Κρίσιμο βάθος ροής)
- Normal Depth (Ομοιόμορφο βάθος ροής)
- Rating Curve (Καμπύλη στάθμης – παροχής)

Ανάλογα με την επιλογή συνθήκης πρέπει να γίνει εισαγωγή και αναγκαίων δεδομένων στην περίπτωση γνωστού υψομέτρου επιφάνειας νερού πρέπει πρακτικά να εισάγουμε την τιμή του πιεζομετρικού φορτίου για κάθε προφίλ ροής. Με την επιλογή κρίσιμου βάθους δεν χρειάζεται να εισάγουμε κάποιο δεδομένο, θα γίνει αυτόματος υπολογισμός του κρίσιμου βάθους για κάθε προφίλ ροής. Στο ομοιόμορφο βάθος θα μας ζητηθεί να καθορίσουμε την κλίση της γραμμής ενέργειας ώστε το πρόγραμμα να πραγματοποιήσει τον υπολογισμό του ομοιόμορφου βάθους, αν αυτή η τιμή δεν είναι γνωστή μπορεί να προσεγγιστεί είτε εξισώνοντας την με την κλίση της ελεύθερης επιφάνειας είτε με την κλίση του πυθμένα ανάλογα τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα. Τέλος, όταν επιλέγεται η καμπύλη στάθμης – ροής ο χρήστης πρέπει να εισάγει δεδομένα

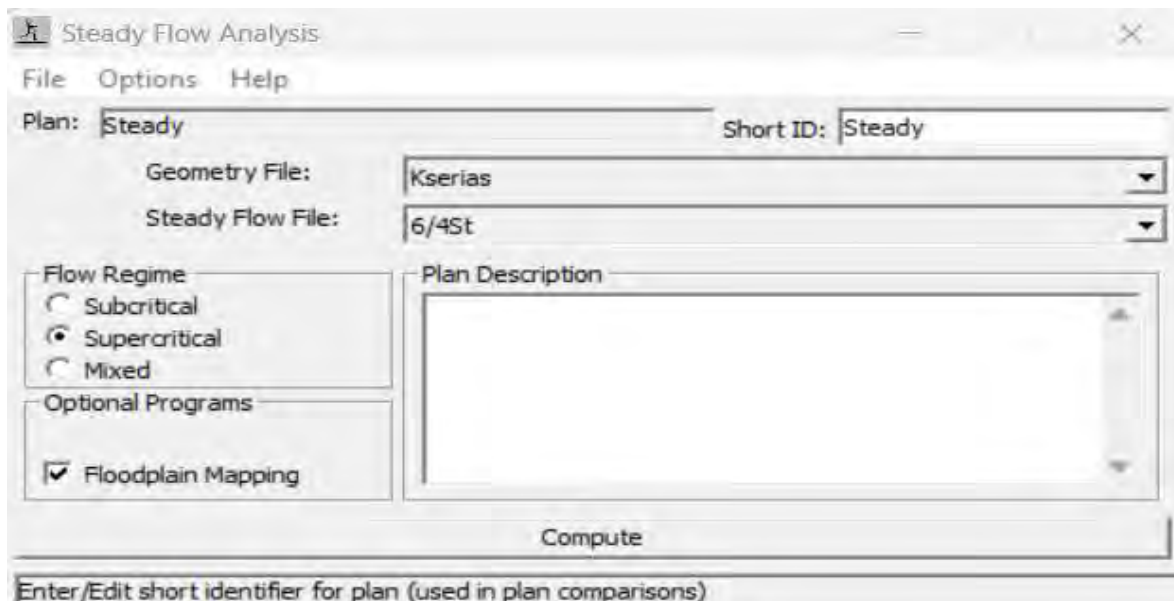


υψομέτρου στάθμης ως προς την παροχή του αντίστοιχου σημείου, όπου για κάθε προφίλ που αναπτύσσουμε το λογισμικό μέσα από παρεμβολή μεταξύ των ζευγών τιμών υπολογίζει την τιμή του πιεζομετρικού φορτίου για δεδομένη παροχή.

Στην παρούσα εργασία οι οριακές συνθήκες ορίστηκαν για την έναρξη της υδραυλικής προσομοίωσης όπως φαίνεται και στο παρακάτω παράθυρο. Στο ανάντη κομμάτι του ποταμού το κρίσιμο βάθος ροής, το οποίο δεν απαιτεί κάποιο πρόσθετο δεδομένο. Ενώ στο κατόντη κομμάτι επέλεξα το ομοιόμορφο βάθος που στην συνέχεια απαιτεί να ορίσω την τιμή κλίσης πυθμένα, την οποία μπορούμε να συσχετίσουμε με την κλίση της επιφάνειας του νερού ή και την κλίση πυθμένα όπως αναφέραμε και προηγουμένως, στην συγκεκριμένη περίπτωση ορίσαμε την κλίση ίση με την κλίση που υπάρχει μεταξύ του προτελευταίου και του τελευταίου κόμβου στο μοντέλο μας είναι J4 σε J2 (=0.0091).



Σχήμα 32 Περιβάλλον καθορισμού οριακών συνθηκών



Σχήμα 33 Περιβάλλον έναρξης προσομοίωσης

#### 4.4.2 ΜΗ ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ

Μέσα από την επιλογή View/Edit Unsteady flow data θα ξεκινήσει η διαδικασία της προσομοίωσης του μοντέλου. Πραγματοποιείται εισαγωγή των δεδομένων ασταθούς ροής που επιθυμούμε να υπάγουν το πρόβλημα, τα δεδομένα αυτά μπορούν να εισαχθούν στο μοντέλο μας ως οριακές ή και αρχικές συνθήκες.

Οι οριακές συνθήκες (boundary conditions) έχουν κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό της συμπεριφοράς της ροής σε προσομοιώσεις ασταθούς ροής στο HEC-RAS. Παρακάτω θα συζητήσουμε τους διαφορετικούς τύπους οριακών συνθηκών που είναι διαθέσιμοι στο HEC-RAS και θα γίνει περιγραφή σχετικά με τον τρόπο επιλογής μεταξύ των διαθέσιμων επιλογών. Ο καθορισμός των οριακών συνθηκών ροής περιλαμβάνει τον καθορισμό των οριακών συνθηκών ανάντη και κατόντη του κάθε μοντέλου, αυτές μπορεί να είναι τυχόν ρυθμοί ροής, υδρογραφήματα ή τιμές επιπέδων νερού, καθώς και τυχόν πλευρικές εισροές ή εκροές.

Στην προσομοίωση ασταθούς ροής, οι οριακές συνθήκες ανάντη είναι κρίσιμες για τον καθορισμό της εισροής στον υπολογιστικό τομέα. Στο HEC-RAS, υπάρχουν διάφοροι τύποι οριακών συνθηκών ανάντη που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό της εισροής. Στην συνέχεια θα αναφέρουμε όλους τους τύπους οριακών συνθηκών ανάντη που είναι διαθέσιμοι στο HEC-RAS για προσομοίωση ασταθούς ροής.

- Flow Hydrograph
- Stage Hydrograph
- Stage/Flow Hydrograph

Αντίστοιχα κρίσιμο κομμάτι της εργασίας αποτελεί ο καθορισμός των οριακών συνθηκών κατόντη του μοντέλου μας. Οι διαθέσιμες επιλογές για τις οριακές συνθήκες κατόντη είναι οι παρακάτω:

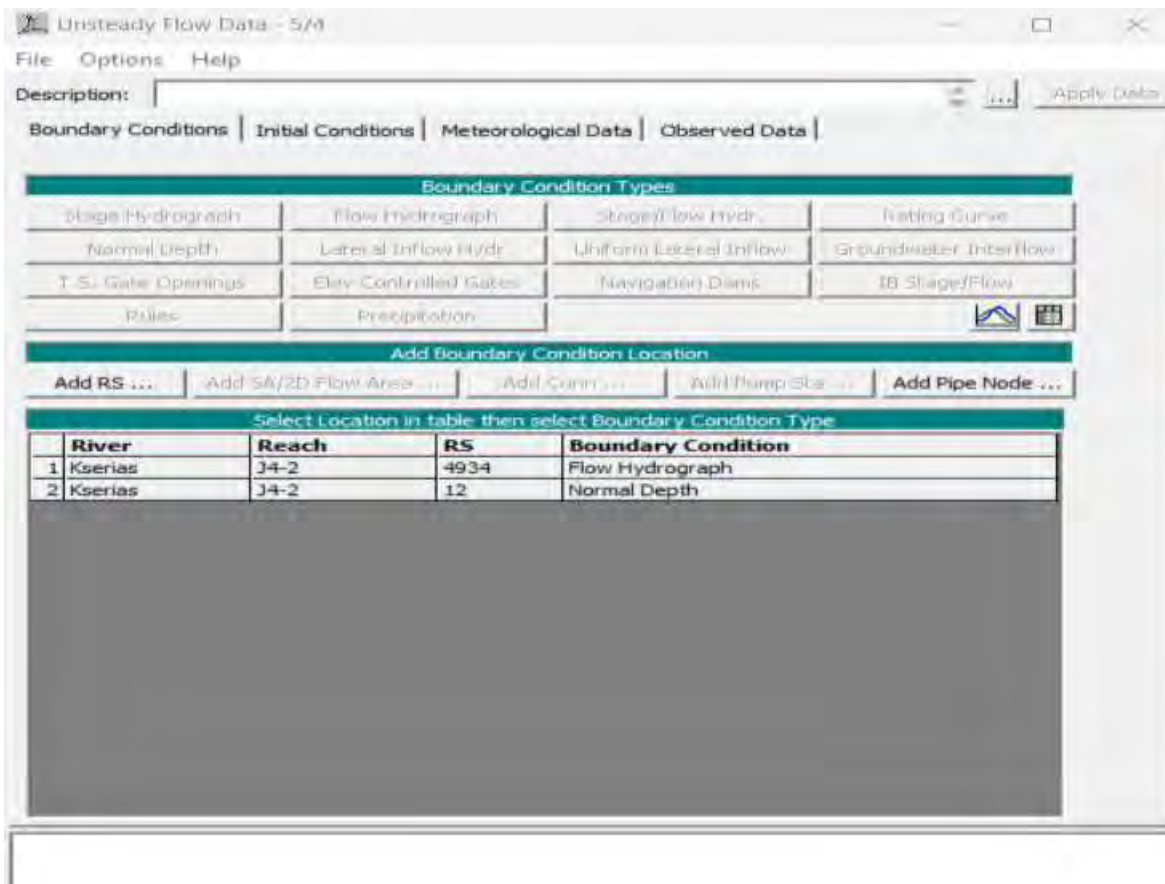
- Flow Hydrograph
- Stage Hydrograph
- Stage/Flow Hydrograph
- Rating curve καμπύλη συσχέτισης παροχής-ροής
- Normal depth

Η επιλογή της οριακής συνθήκης θα εξαρτηθεί από τα ειδικά χαρακτηριστικά του συστήματος ροής που μοντελοποιείται όπως το καθεστώς ροής, τα διαθέσιμα δεδομένα, τη σημασία της οριακής συνθήκης, την επιθυμητή ακρίβεια του μοντέλου και την ικανότητα βαθμονόμησης του μοντέλου. Κρίνοντας προσεκτικά τα χαρακτηριστικά του μοντέλου που αναπτύξαμε αλλά και τα δεδομένα που έχουμε στην διάθεση μας επιλέγουμε ως ανάντη οριακή συνθήκη επιλέγουμε το υδρογράφημα παροχής μιας και μπορούσαμε να εξασφαλίσουμε ιστορικά δεδομένα βροχοπτώσεων για τα συγκεκριμένα στοιχεία τα οποία μας παραχωρήθηκαν από το εργαστήριο υδρολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας σε μορφή Dss. Για την εξαγωγή και αξιοποίηση τους

χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό που διανέμεται ελεύθερα από το Κέντρο Υδρολογικής Μηχανικής του Σώματος Μηχανικών Στρατού των ΗΠΑ (USACE).

Ως κατάντη οριακή συνθήκη επιλέχθηκε το ομοιόμορφο βάθος, το οποίο μπορεί να πάρει την τιμή της κλίσης της γραμμής ενέργειας την οποία σε περίπτωση που δεν γνωρίζουμε μπορούμε να την ορίσουμε ίση με την κλίση του πυθμένα ή την κλίση της ελεύθερης επιφάνειας, στην περίπτωση μας η κλίση ορίζεται με βάση αποτελέσματα ανάλυσης στο λογισμικό Arc GIS και επιβεβαιώνεται από την έρευνα του Υπουργείου Περιβάλλοντος στην περιοχή κατά την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 200760/EK .

Στην συνέχεια δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να καθορίσει κάποια αρχική συνθήκη που επιθυμεί να επικρατεί στο μοντέλο. Αυτή περιλαμβάνει τον καθορισμό των αρχικών επιπέδων νερού και ρυθμών ροής σε κάθε μία από τις διατομές του μοντέλου δηλαδή της κατάστασης που επικρατεί στην αρχική στιγμή έναρξης της προσομοίωσης μη μόνιμης ροής.



Σχήμα 34 Περιβάλλον εισαγωγής δεδομένων μη μόνιμης ροής

Επόμενο βήμα προς την έναρξη της προσομοίωσης αποτελεί η επιλογή των προγραμμάτων που θα τρέξουν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Υπάρχουν τρία στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση ανάλυσης ασταθούς ροής εντός του HEC-RAS. Αυτά τα στοιχεία είναι: ένας προεπεξεργαστής γεωμετρικών δεδομένων geometry pre processor, τον προσομοιωτή ασταθούς ροής unsteady flow simulation, και έναν μετα-επεξεργαστή εξόδου post

processor. Επιπλέον, υπάρχει μια επιλογή αυτοματοποίησης της διαδικασίας υπολογισμού ενός χάρτη πλημμύρας στατικής πλημμύρας μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης ασταθούς ροής.

Στην προσομοίωση μας θα επιλέξουμε να τρέξουν ο γεωμετρικός προεπεξεργαστής που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των γεωμετρικών δεδομένων σε μια σειρά από πίνακες υδραυλικών ιδιοτήτων, καμπύλες βαθμολόγησης και οικογένεια καμπυλών βαθμολόγησης με σκοπό την επιτάχυνση των υπολογισμών της ασταθούς ροής δίνοντας την δυνατότητα στο πρόγραμμα να παρεμβάλλει τις υδραυλικές μεταβλητές από τους πίνακες. Επίσης ο μετα-επεξεργαστής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό λεπτομερών υδραυλικών πληροφοριών για ένα σύνολο γραμμών χρόνου που καθορίζονται από τον χρήστη κατά τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης ασταθούς ροής. Γενικά, οι υπολογισμοί ασταθούς ροής υπολογίζουν μόνο το στάδιο και τη ροή σε όλους τους κόμβους υπολογισμού, καθώς και τα υδρογραφήματα σταδίου και ροής σε θέσεις που καθορίζονται από τον χρήστη. Εάν δεν εκτελείται ο Post Processor, τότε ο χρήστης θα μπορεί να δει μόνο τα υδρογραφήματα σταδίου και ροής, καθώς και τη χαρτογράφηση πλημμύρας (HEC-RAS Mapper), χωρίς άλλη έξοδο από το HEC-RAS. Με την εκτέλεση του Post Processor, ο χρήστης θα έχει όλα τα διαθέσιμα διαγράμματα και πίνακες για ασταθή ροή που παράγει συνήθως το HEC-RAS για σταθερή ροή. Τέλος θα επιλέξουμε και τον μετα-επεξεργαστής ο οποίος από προεπιλογή θα υπολογίσει λεπτομερή αποτελέσματα εξόδου για ένα μέγιστο στάδιο του προφίλ επιφάνειας νερού. Αυτό το προφίλ δεν αντιπροσωπεύει κάποιο συγκεκριμένο στιγμιότυπο στο χρόνο, αλλά είναι συχνά χρήσιμο για τη γρήγορη προβολή της μέγιστης έκτασης πλημμύρας κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου συμβάντος.

Ο χρήστης πρέπει να εισάγει ένα χρονικό παράθυρο που ορίζει την έναρξη και το τέλος της περιόδου προσομοίωσης. Το παράθυρο ώρας απαιτεί ημερομηνία και ώρα έναρξης και ημερομηνία και ώρα λήξης. Η ημερομηνία πρέπει να έχει τετραψήφιο έτος και μπορεί να εισαχθεί σε οποιαδήποτε από τις δύο ακόλουθες μορφές: 01 Ιαν 2023 ή 01/01/2023. Το πεδίο ώρας εισάγεται σε μορφή στρατιωτικού στυλ (δηλαδή η 13:00 εισάγεται ως 1300) και πρέπει να είναι ίσης διάρκειας με το γεγονός βροχόπτωσης του οποίου τα δεδομένα που καταχωρήσαμε ως οριακή συνθήκη. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας τα δεδομένα είχαν ώρα έναρξης 0005 της 01 Σεπτεμβρίου 2000 ή 01/09/2000 και ολοκληρώνονται επτά ημέρες μετά στις 08 Σεπτεμβρίου του ίδιου έτους ή 08/09/2000.

Τελευταίο βήμα πριν την έναρξη της προσομοίωσης είναι να ορίσουμε τα computational settings δηλαδή τις υπολογιστικές ρυθμίσεις της προσομοίωσης. Η περιοχή με τις ρυθμίσεις υπολογισμού του παραθύρου της ανάλυσης ασταθούς ροής περιέχει:

- υπολογιστικό διάστημα(computational interval )
- διάστημα εξόδου χαρτογράφησης(mapping output interval )
- διάστημα εξόδου υδρογραφήματος(hydrograph output interval )
- αναλυτικό διάστημα εξόδου(detailed output interval )

Το υπολογιστικό διάστημα ή χρονικό βήμα(Computational Interval) είναι ίσως μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που εισάγονται στο μοντέλο και μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τόσο

την ακρίβεια του μοντέλου όσο και την αποτελεσματικότητα της προσομοίωσης. Ουσιαστικά το υπολογιστικό βήμα καθορίζει την χρονική ανάλυση της προσομοίωσης δηλαδή το πόσο συχνά θα πραγματοποιεί υπολογισμούς του βάθους ροής, της ταχύτητας και άλλως μεταβλητών. Η επιλογή του υπολογιστικού διαστήματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του καναλιού, το καθεστώς ροής που επικρατεί σε αυτό, η διάρκεια της προσομοίωσης μας και τέλος οι διαθέσιμοι υπολογιστικοί πόροι.

Γενικά, το υπολογιστικό διάστημα πρέπει να είναι αρκετά μικρό ώστε να αποτυπώνεται με ακρίβεια η δυναμική ροής, όπως η κίνηση των κυμάτων ή η διάδοση των υδραυλικών αλμάτων. Ένας καλός εμπειρικός κανόνας είναι να χρησιμοποιείτε ένα χρονικό βήμα που είναι μικρότερο από το 1/10 του χρόνου που χρειάζεται για ένα κύμα να διανύσει το μήκος μιας διατομής. Ακόμα, το διάστημα θα πρέπει να είναι αρκετά μικρό ώστε να περιγράφει με ακρίβεια την άνοδο και την πτώση των υδρογραφήματων που δρομολογούνται. Ένας γενικός εμπειρικός κανόνας είναι η χρήση ενός υπολογιστικού διαστήματος που είναι ίσο ή μικρότερο από το χρόνο ανόδου του υδρογραφήματος διαιρούμενο με το 20. Ένας ακόμα τρόπος υπολογισμού του κατάλληλου χρονικού βήματος που αναγράφεται στο εγχειρίδιο του Hec RAS είναι η εφαρμογή ενός κριτηρίου αριθμητικής ακρίβειας που ονομάζεται συνθήκη Courant. Τα κριτήρια συνθήκης Courant εξετάζουν την απόσταση διατομής και την ταχύτητα των κυμάτων πλημμύρας. Η βασική προϋπόθεση είναι ότι το υπολογιστικό διάστημα πρέπει να είναι ίσο ή μικρότερο από το χρόνο που χρειάζεται το νερό για να ταξιδέψει από τη μια διατομή στην άλλη. Μια λεπτομερής περιγραφή της συνθήκης Courant μπορεί να βρεθεί στην ενότητα Ακρίβεια, σταθερότητα και ευαισθησία μοντέλου αυτού του κεφαλαίου. Η χρήση ενός χρονικού βήματος που βασίζεται στη συνθήκη Courant θα δώσει την καλύτερη αριθμητική λύση, αλλά μπορεί να προκαλέσει πολύ περισσότερο χρόνο εκτέλεσης του μοντέλου. Συνολικά, η επιλογή του υπολογιστικού διαστήματος στο HEC-RAS εξαρτάται από τις συγκεκριμένες ανάγκες της προσομοίωσής σας και τις αντισταθμίσεις μεταξύ ακρίβειας και υπολογιστικής απόδοσης

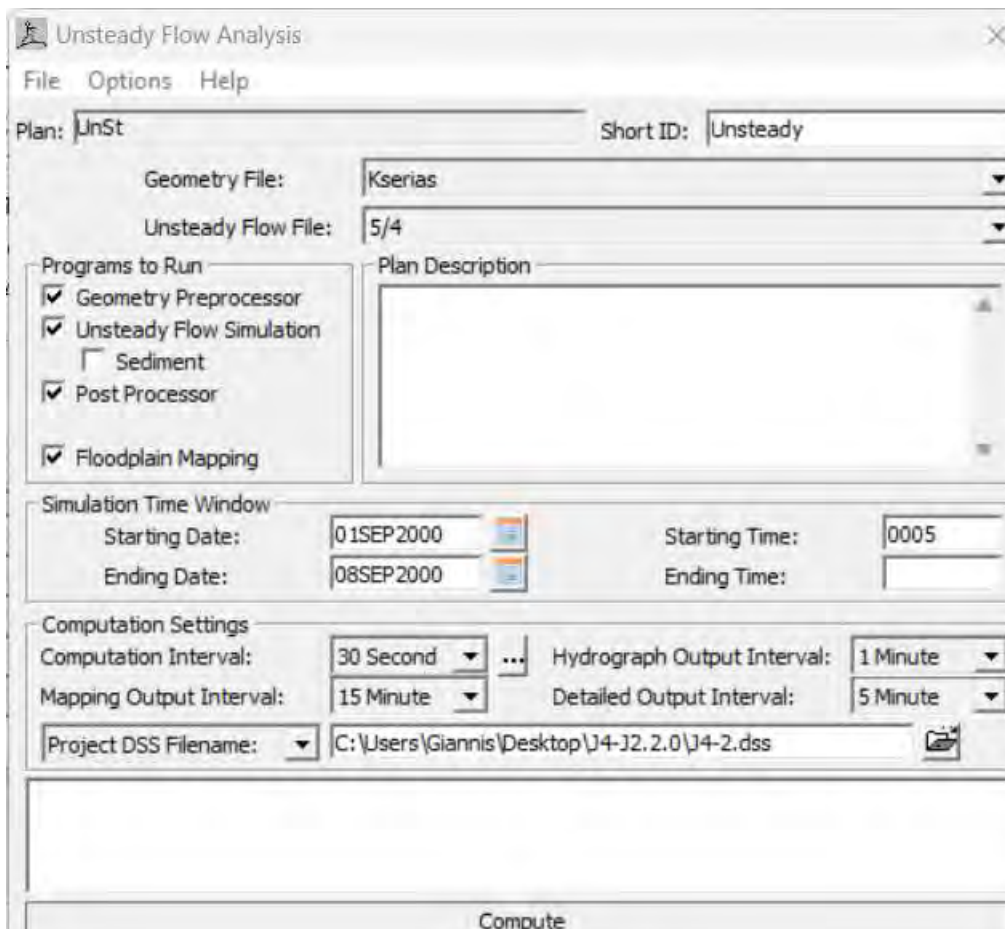
Το διάστημα εξόδου υδρογραφήματος (Hydrograph Output Interval) χρησιμοποιείται για να καθοριστεί σε ποιο διάστημα θα εγγραφούν στο HEC-DSS τα υπολογισμένα υδρογραφήματα σταδίου και ροής. Αυτό το διάστημα θα πρέπει να επιλεγεί για να δώσει έναν επαρκή αριθμό σημείων για τον καθορισμό του σχήματος των υπολογισμένων υδρογραφήματων χωρίς να χάνονται πληροφορίες σχετικά με την κορυφή ή τον όγκο των υδρογραφήματων. Αυτό το διάστημα πρέπει να είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το επιλεγμένο υπολογιστικό διάστημα.

Το πεδίο του αναλυτικού διαστήματος εξόδου (Detailed Output Interval) επιτρέπει στο χρήστη να γράψει προφίλ υψομέτρου και ροής της επιφάνειας του νερού σε ένα χρονικό διάστημα που καθορίζεται από τον χρήστη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Τα προφίλ δεν γράφονται για κάθε υπολογιστικό χρονικό βήμα, επειδή θα απαιτούσε πολύ χώρο για την αποθήκευση όλων των πληροφοριών για τις περισσότερες εργασίες. Επίσης, όταν εκτελείται το Post-Processor, το πρόγραμμα θα υπολογίσει λεπτομερείς υδραυλικές πληροφορίες για κάθε ένα από τα στιγμιαία προφίλ που είναι γραμμένα. Αυτή η επιλογή ενεργοποιείται επιλέγοντας ένα διάστημα από το αναπτυσσόμενο πλαίσιο δίπλα στη λεπτομερή ετικέτα εξόδου υδρογραφίας. Το επιλεγμένο διάστημα πρέπει να είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το διάστημα υπολογισμού.

Το διάστημα εξόδου χαρτογράφησης(Mapping Output Interval) χρησιμοποιείται για την εισαγωγή του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο ο χρήστης θα μπορεί να οπτικοποιήσει τα αποτελέσματα εξόδου χαρτογράφησης. Κατά την εφαρμογή της προσομοίωσης ένα περιορισμένο σύνολο εξόδων εγγράφεται σε ένα ξεχωριστό αρχείο εξόδου HDF5 που αντιστοιχεί στο αρχείο Plan που έχουμε αναπτύξει. Ουσιαστικά η τιμή περιγράφει τα διαστήματα που θα παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα του γεγονότος βροχόπτωσης υπό μελέτη μέσα στο HEC-RAS Mapper στο θεματικό επίπεδο με τα αποτελέσματα. Στην περίπτωση μας επιλέχθηκαν οι παρακάτω τιμές:

- Αναλυτικό διάστημα εξόδου(Detailed Output Interval) : 5 min
- Υπολογιστικό διάστημα/χρονικό βήμα(Computational Interval) : 30 sec
- Διάστημα εξόδου υδρογραφήματος(Hydrograph Output Interval) : 1 min
- Διάστημα εξόδου χαρτογράφησης(Mapping Output Interval) : 15 min

Αφού πραγματοποιήσουμε όλες τις παραπάνω επιλογές, ορίζουμε το Plan ή σχέδιο μη μόνιμης ροής μπορούμε να ξεκινήσουμε τους υπολογισμούς πατώντας το κουμπί Compute στο κάτω μέρος του παραθύρου, ολοκληρώνοντας έτσι την προσομοίωση μη μόνιμης ροής.



Σχήμα 35 Περιβάλλον έναρξης προσομοίωσης μη μόνιμης ροής



## Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα

### 5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδραυλικής ανάλυσης που επικεντρώθηκε στην μελέτη της συμπεριφοράς μέρους του ποταμού Ξεριά κάτω από διαφορετικά σενάρια περιόδων επαναφοράς αλλά και για διαφορετικές συνθήκες ροής τόσο σταθερής όσο και ασταθούς ροής. Τα αποτελέσματα της μελέτης παρουσιάζονται με τη μορφή χαρτών, διατομών και γραφημάτων, τα οποία δείχνουν την έκταση της πλημμυρικής πεδιάδας, τα βάθη του νερού και τις ταχύτητες για κάθε σενάριο. Η ανάλυση παρέχει πληροφορίες για την υδραυλική συμπεριφορά του ποταμιού συστήματος, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση του κινδύνου πλημμύρας και την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών μετριασμού των πλημμυρών.

Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων και παρουσίαση των χαρτών κατανομής βαθών ροής και ταχυτήτων ροής θα πραγματοποιήσουμε ταξινόμηση των αποτελεσμάτων σε επίπεδα διαβάθμισης. Στην περίπτωση των χαρτών βάθους θα γίνει κατηγοριοποίηση σε 5 ομάδες: <1.25m, 1.25-2.5m, 2.5-3.75m, 3.75-5.0m και >5.0m. Για τους χάρτες αποτύπωσης ταχυτήτων θα επιλέξουμε 7 επίπεδα διάταξης: <2m/sec, 2-4m/sec, 4-6m/sec, 6.0-8.0m/sec, 8-10 m/sec, 10-15m/sec και >15m/sec. Επιπλέον, για συντομία όπου τοποθετείται ο συντελεστής U σημαίνει πως οι συνθήκες υγρασίας περιβάλλοντος είναι δυσμενής ενώ στην περίπτωση του L οι συνθήκες περιβάλλοντος είναι ευμενής.

### 5.2 Ανάλυση ευαισθησίας συντελεστή τραχύτητας Manning

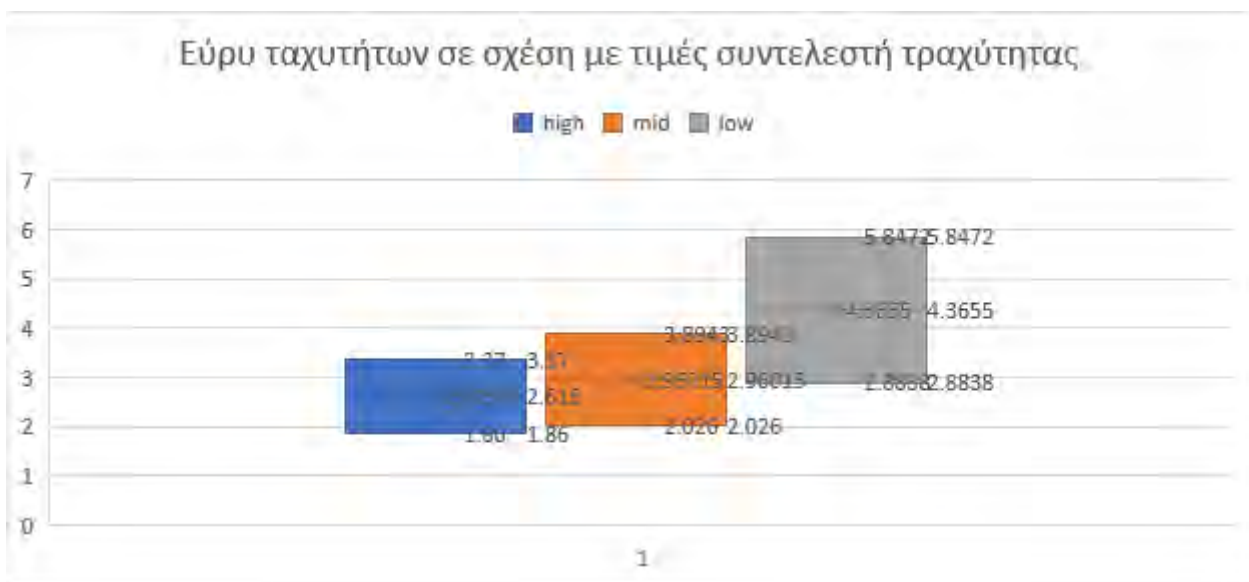
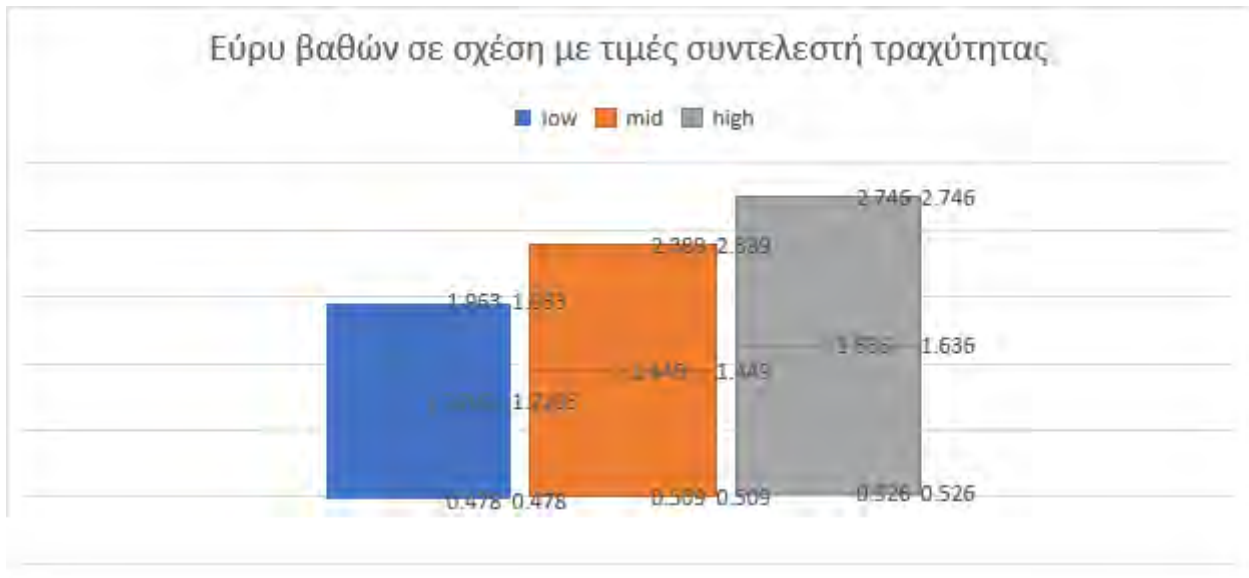
Η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) ενός συγκεκριμένου συντελεστή μιας δεδομένης συνάρτησης έχει ως στόχο να μελετήσει τις συνέπειες που επιφέρει στην λύση της δεδομένης συνάρτησης η μεταβολή της παραμέτρου που επιλέχθηκε για ανάλυση. Ουσιαστικά, η ανάλυση ευαισθησίας είναι μια συστηματική προσέγγιση για την αξιολόγηση της επίδρασης της αλλαγής μιας ή περισσότερων παραμέτρων εισόδου στα αποτελέσματα του μοντέλου, στην περίπτωση του συντελεστή τραχύτητας Manning's n, η ανάλυση ευαισθησίας περιλαμβάνει την εκτέλεση του μοντέλου με διαφορετικές τιμές του Manning's n και τη σύγκριση των τιμών εξόδου για τον προσδιορισμό του αντίκτυπου των αλλαγών. Μια τέτοια μορφή ανάλυσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην διαχείριση προβλημάτων που λαμβάνουν χώρα σε δυναμικό περιβάλλον, με ανακριβείς ή δυσκολίες στο να επιτευχθούν εκτιμήσεις συντελεστών. Τέλος, αναφέρουμε πως μικρότερη ευαισθησία ενός συντελεστή συνεπάγεται μεγαλύτερη σιγουριά επίτευξης μιας ρεαλιστικής επίλυσης του προβλήματος, σε αντίθετη περίπτωση παρατηρούνται για μικρές μεταβολές του συντελεστή έντονες αλλαγές στο αποτέλεσμα γεγονός που καθιστά τον υπολογισμό των συντελεστών δυσκολότερο και πιο απαιτητικό ως προς την ακρίβεια των τιμών. Ο συντελεστής τραχύτητας Manning αποτελεί μία από τις πιο κρίσιμες παραμέτρους στην υδραυλική μοντελοποίηση, με αυτήν ουσιαστικά να αντιπροσωπεύει την αντίσταση στη ροή του



καναλιού που επικρατεί στην κύρια κοίτη και στις όχθες του ποταμού. Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις τρεις τιμές ελέγχου, την τιμή που επιλέξαμε για το μοντέλο μας, μία μικρότερη κατά 50% και μία μεγαλύτερη κατά 100% για την περίπτωση μόνιμη ροής. Θα παρουσιαστούν τα εύρη τιμών βαθών ροής και ταχυτήτων ροής καθώς και οι συνολικές εκτάσεις πλημμύρας.

Τιμές Τραχύτητας(κοίτης-όχθης)	Βάθη ροής	Ταχύτητες ροής
0.015-0.0225	0.478-1.963	2.8838-5.8472
0.03-0.045	0.509-2.389	2.203-3.89
0.06-0.09	0.526-2.746	1.862-3.37

Πίνακας 7 Τιμές τραχύτητας που ελέγχθηκαν

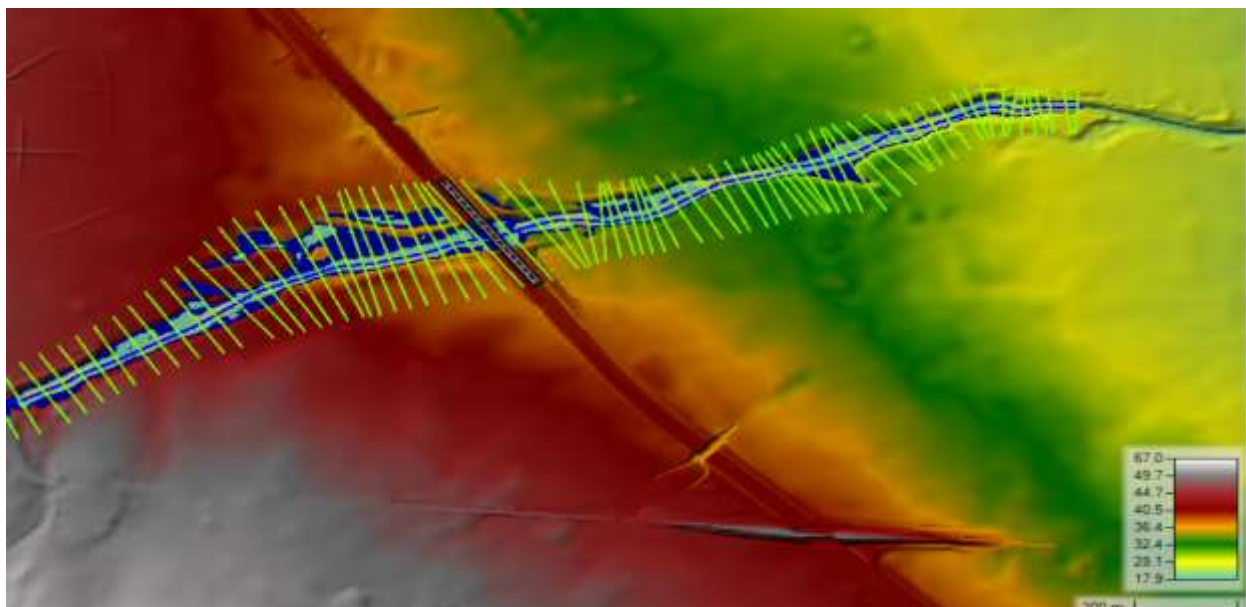


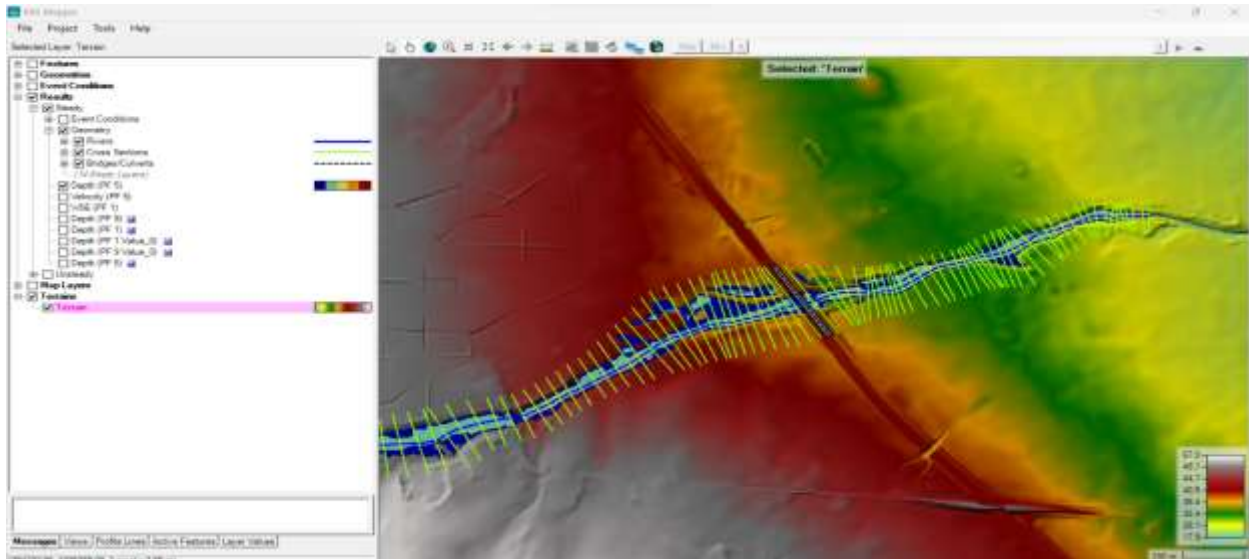
Για τις εκτάσεις πλημμύρας τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Manning's n	AREA (T=50l)	AREA (T=1000u)
0.015	101477	704687
0.03	115229	884446
0.06	118229	947764

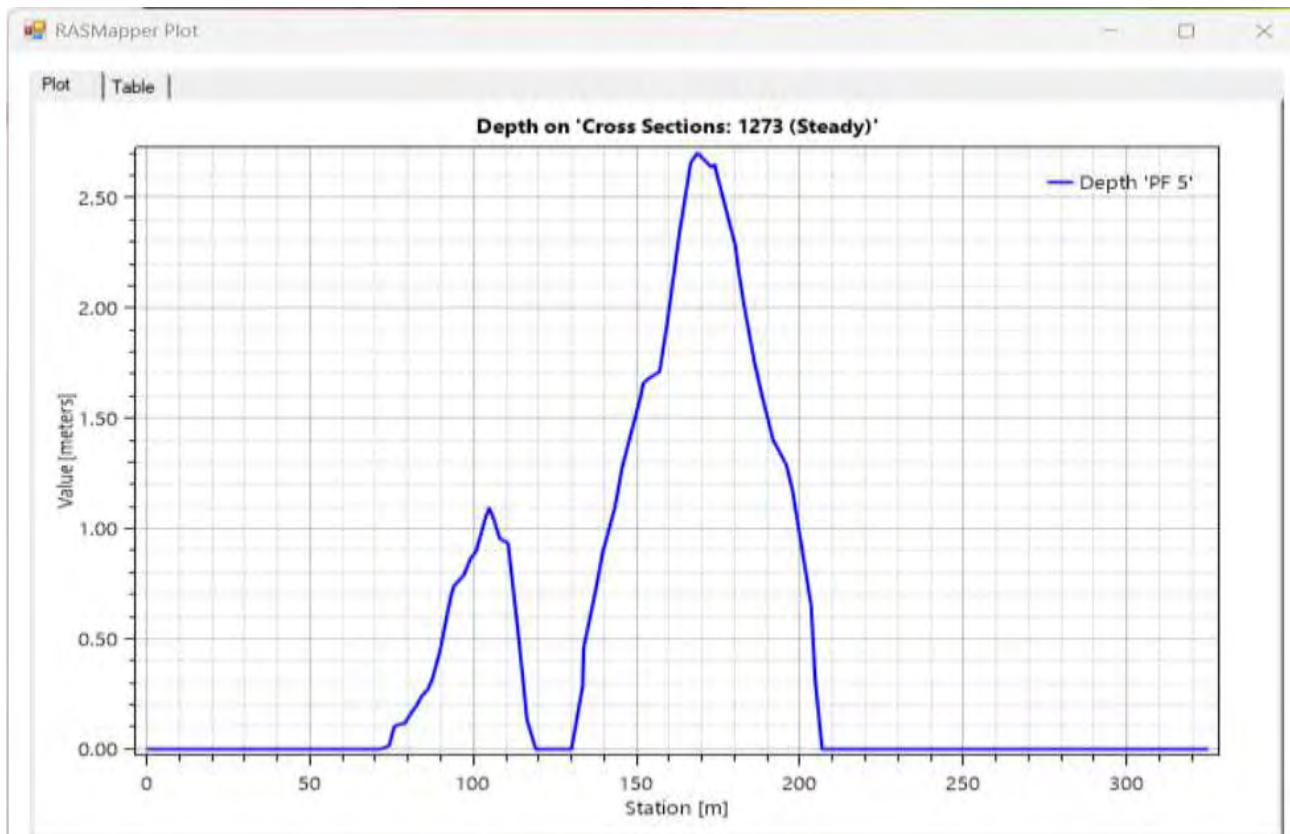
Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψαν για την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου μας ως προς την τιμή τραχύτητας Manning, για συνθήκες μόνιμης. Παρατηρούμε πως παρουσιάζεται μεταβολή των τιμών μέσων βαθών ροής και των τιμών μέσων ταχυτήτων ροής σε σχέση με την τιμή του συντελεστή τραχύτητας. Αύξησή του συντελεστή οδηγεί σε αύξηση των μέσων βαθών ροής, αύξηση της συνολικής κατακλισμένης επιφάνειας ενώ μειώνονται η μέσες ταχύτητες. Μείωση του συντελεστή οδηγεί στα αντίθετα αποτελέσματα δηλαδή μείωση των βαθών ροής, μείωση των συνολικών εκτάσεων κατάκλισης και αύξηση των μέσων ταχυτήτων ροής. Συγκεκριμένα ο διπλασιασμός του συντελεστή τραχύτητας δηλαδή αύξηση της τάξης του 100% οδηγεί σε αύξηση των μέσων βαθών κατά 12.905%, αύξηση συνολικής πλημμυρισμένης έκτασης 2.6-7.15% ενώ οι ταχύτητες μειώθηκαν κατά 13.76%. Η μείωση του συντελεστή στο 50% της αρχικής τιμής είχε ως αποτέλεσμα μείωση των μέσων βαθών ροής κατά 15.77%, μείωση των συνολικής πλημμυρισμένης επιφάνειας κατά 11.93-20.3245% ενώ αυξάνονται οι μέσες ταχύτητες ροής κατά 47.4755%.

Για την καλύτερη κατανόηση της επιρροής του συντελεστή τραχύτητας, θα εστιάσουμε το επόμενο κομμάτι της ανάλυσης ευαισθησίας στην απόκριση συγκεκριμένων διατομών σε περιπτώσεις μεταβολής της τιμής του συντελεστή. Αρχικά για να εξάγουμε τα δεδομένα βάθους ροής συγκεκριμένων διατομών πρέπει να μεταβούμε στο περιβάλλον του RAS mapper. Εκεί επιλέγουμε το θεματικό επίπεδο με τα αποτελέσματα και χρησιμοποιούμε την επιλογή Geometry για να εμφανιστούν γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου όπως διατομές και γέφυρες.





Στο περιβάλλον αυτό έχουμε την δυνατότητα να επιλέξουμε οποιαδήποτε διατομή επιθυμούμε και με δεξί κλικ σε αυτήν επιλέγοντας το Results Profile Plot > Depth να εμφανίσουμε το διάγραμμα που περιγράφει το μέγιστο βάθος ροής της συγκεκριμένης διατομής σε σχέση με την απόσταση από το αριστερό άκρο της διατομής. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζουν διαφορετικές μορφές ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες αλλά κυρίως ανάλογα με τα ειδικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε διατομής. Παρακάτω φαίνεται παράδειγμα διαγράμματος βάθους τυχαίας διατομής.



Στην περίπτωση μας επιλέξαμε να μελετήσουμε την απόκριση των δύο κρισιμότερων διατομών της περιοχής μελέτης, αυτών ακριβώς πριν και μετά της γέφυρας. Η συγκεκριμένη ανάλυση θα γίνει για το προφίλ ροής μόνιμης ροής περιόδου επαναφοράς T=100 έτη και μέσες συνθήκες περιβάλλοντος. Το προφίλ αυτό αντιπροσωπεύει παροχή αιχμής  $Q = 475.84 \text{ m}^3/\text{sec}$ .

Τραχύτητα κοίτης	Τραχύτητα όχθης	Βάθος διατομής ανάντη	Βάθος διατομής κατάντη
0.04	0.06	1.46	1.71
0.045	0.0675	1.52	1.71
0.054	0.081	1.69	1.71
0.057	0.0855	1.76	1.71
0.06	0.09	1.8	1.71
0.3	0.45	1.8	1.71
0.6	0.9	1.8	1.71

Πίνακας 8 Αποτελέσματα δοκιμών μεγαλύτερων τιμών συντελεστή τραχύτητας

Τραχύτητα κοίτης	Τραχύτητα όχθης	Βάθος διατομής ανάντη	Βάθος διατομής κατάντη
0.02	0.03	1.3	1.71
0.015	0.0225	1.21	1.4
0.009	0.0135	0.89	0.9
0.006	0.009	0.73	0.71
0.0015	0.00225	0.66	0.6
0.001	0.00045	0.67	0.61
0.0003	0.000045	0.67	0.61

Πίνακας 9 Αποτελέσματα δοκιμών μικρότερων τιμών συντελεστή

Ολοκληρώνοντας την διαδικασία των δοκιμών διαφορετικών τιμών παρατηρούμε πως το βάθος ύδατος ακολουθεί την συμπεριφορά των υπόλοιπων χαρακτηριστικών πλημμύρας που ελέγξαμε παραπάνω. Δηλαδή αύξηση της τιμής του συντελεστή τραχύτητας οδηγεί σε αύξηση του βάθους ροής. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσα από δοκιμές μεγαλύτερων και μικρότερων τιμών του συντελεστή τραχύτητας παρουσιάζονται στους παραπάνω πίνακες.

Επόμενο βήμα αποτελεί η επανάληψη της ίδια διαδικασίας για την περίπτωση μη μόνιμης ροής. Η συγκεκριμένη διαδικασία στην περίπτωση της μη μόνιμης ροής επέφερε αποτελέσματα με ιδιόμορφο χαρακτήρα. Η ικανότητα παροχέτευσης ενός συμβάντος βροχόπτωσης συνδέεται στενά με τα ειδικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και με την μορφή του υδρογραφήματος που περιγράφει το δεδομένο συμβάν. Τα υδρογραφήματα παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις ανάλογα στην μορφή τους που καθορίζεται σε σχέση με την περίπτωση περιόδου επαναφοράς, καθώς και τις συνθήκες υγρασίας που επικρατούν. Για να γίνει αντιληπτή η παραπάνω κατάσταση θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα για 27 σενάρια ελέγχου. Τα 27 αυτά σενάρια προέκυψαν από εξέταση των 9 συνολικά περιπτώσεων υδρογραφημάτων για τρεις τιμές συντελεστή τραχύτητας το καθένα,  $9 \times 3 = 27$ . Εδώ να αναφέρουμε ότι σε μερικές από τις περιπτώσεις σεναρίων που ελέγχθηκαν η προσομοίωση καταλήγει σε αστάθεια πριν την ολοκλήρωση της. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος επιλέχθηκαν τιμές του συντελεστή που δεν οδηγούν την προσομοίωση σε αυτό το αποτέλεσμα. Ακόμα σε τρία από τα ελεγχόμενα σενάρια υπήρξαν προβλήματα κατά την λειτουργία του μετά επεξεργαστή ( post processor) οπότε τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων περιπτώσεων είναι αμφισβητούμενα. Το

πρόβλημα με τον μετα-επεξεργαστή λύθηκε μέσω επιλογής διαφορετικών τιμών συντελεστή τραχύτητας μιας όπως και στην περίπτωση των ασταθειών. Με βάση τα προηγούμενα οι τιμές του συντελεστή που επιλέχθηκαν μέσω δοκιμών ώστε να μην συμβαίνει κανένα από τα προβλήματα κατά την προσομοίωση. Οι τιμές που επιλέξαμε στην περίπτωση Low ανάλογα το σενάριο 40-50% μικρότερη την τιμή που επιλέξαμε ως αρχική, στην περίπτωση High έγινε αύξηση της αρχικής τιμής από 50-100%. Για το κάθε ένα σενάριο στον παρακάτω πίνακα θα δώσουμε αποτελέσματα μέσω των βαθμών ροής, μέσω των ταχυτήτων ροής και συνολικών εκτάσεων πλημμύρας.

Περίοδος Επαναφοράς	Συνθήκες υγρασίας	Συντελεστής τραχύτητας	Μέσα βάθη ροής	Μέση ταχύτητα ροής	Συνολική επιφάνεια κατάκλισης
T+50	Ευμενής	Low	0.92669	4.596976	213557
		Mid	1.021219	3.617228	222532
		High	1.213014	2.2271	261144
	Μέσες	Low	2.43894	11.74	274855
		Mid	2.81952	5.7449	342426
		High	3.329857	3.396729	413566
	Δυσμενής	Low	4.523797	35.32239	377650
		Mid	4.916286	8.2028	411608
		High	8.27619	6.2495	746994
T=100	Ευμενής	Low	1.051016	12.99574	225211
		Mid	1.208496	8.56897	251855
		High	1.3115	3.457832	283935
	Μέσες	Low	3.18314	7.291354	291221
		Mid	3.6649	5.94239	345774
		High	4.044065	3.92383	437434
	Δυσμενής	Low	4.26132	11.5639	326782
		Mid	5.038024	7.6447	421578
		High	11.13053	7.533083	1022188
T=1000	Ευμενής	Low	1.90039	16.21392	310328

		Mid	3.04634	15.32	344208
		High	4.50839	13.28821	427242
	Μέσες	Low	4.8681	39.31444	409022
		Mid	7.6752	8.07849	626488
		High	7.84439	6.746	746579
	Δυσμενής	Low	9.63409	36.2504	863370
		Mid	14.67889	15.613	929222
		High	22.73143	8.4298	964115

Με βάση όλα τα ελεγχόμενα σενάρια που παρατέθηκαν στον παραπάνω πίνακα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Για αύξηση του συντελεστή τραχύτητας ως και 100% τα μέσα βάθη παρουσιάζουν αύξηση από 2.204% έως και 121% με την μέση αύξηση να έχει τιμή 38.91%. Οι μέσες ταχύτητες μειώθηκαν από 1.46% έως 59.6% και μέση μείωση στο 30.49%. Τα εμβαδά πλημμύρας αυξήθηκαν από 3.755 έως 142.5% και μέσο ποσοστό αύξησης 38.71%.

Για μείωση του συντελεστή από 40-50% προέκυψε μέση μείωση στα βάθη 20.1% με διακύμανση από 7.98% έως 37.6%. Τα εμβαδά μειώθηκαν κατά μέσο όρο 14.72% με διακύμανση από 4.03% έως 34.7%. Οι ταχύτητες παρουσίασαν μέση αύξηση κατά 123.64% με διακύμανση στα ελεγχόμενα σενάρια από 5.83 έως 330%.

Συμπεραίνουμε ότι το μοντέλο παρουσιάζει έντονη ευαισθησία σε σχέση με τον συντελεστή τραχύτητας  $n$ , με τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας που παρατέθηκαν στον παραπάνω πίνακα δείχνουν πως υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ του συντελεστή τραχύτητας και των χαρακτηριστικών μεγεθών πλημμύρας. Αύξηση του συντελεστή τραχύτητας οδηγεί σε αύξηση του μέσου βάθους ροής και μείωση της μέσης ταχύτητας ρευστού, η μείωση του συντελεστή έχει αντίθετα αποτελέσματα. Από τις τιμές παραπάνω φαίνεται πως το η ευαισθησία του μοντέλου προσομοίωσης μη μόνιμης ροής είναι σχετικά μεγαλύτερη στις περιπτώσεις εντονότερων υδρογραφήματων και σχετικά μικρότερο στις αντίθετες περιπτώσεις. Οι έντονες αυτές διαφοροποιήσεις των χαρακτηριστικών της πλημμύρας καθιστούν απαραίτητο τον ακριβή και ρεαλιστικό προσδιορισμό της τιμής του συντελεστή τραχύτητας. Τα αποτελέσματα των συνολικών εμβαδών των περιοχών πλημμύρας παρουσιάζουν την ίδια συσχέτιση με την μεταβολή των υπόλοιπων αποτελεσμάτων. Το μοντέλο μη μόνιμης ροής ωστόσο παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στα έντονα σενάρια βροχοπτώσεων, που είναι και αυτά που μας ενδιαφέρουν περισσότερο κατά την εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου σε δεδομένη περιοχή, γεγονός που το καθιστά απαιτητική και δύσχρηστη μια τέτοια μορφή ανάλυσης.



### 5.3 Αποτελέσματα για συνθήκες μόνιμης ροής

Στην συγκεκριμένη ενότητα γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της υδραυλικής προσομοίωσης μόνιμης ροής. Συγκεκριμένα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που εξήγαμε με τις παρακάτω μορφές:

- Χάρτες περιοχής κατάκλισης πλημμύρας
- Χάρτες μέσω βαθών ροής
- Χάρτες μέσω ταχυτήτων ροής
- Χάρτες συνολικών εμβαδών πλημμύρας
- Παρουσίαση αποτελεσμάτων κρίσιμων διατομών

#### 5.3.1 ΧΑΡΤΕΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΚΑΤΑΚΛΙΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ



Σχήμα 36 Χάρτης πλημμυρικής κατάκλισης  $T=50$  ευμενής συνθήκες



Σχήμα 37 Χάρτης πλημμυρικής κατάκλισης T=50 μέρες συνθήκες



Σχήμα 38 Χάρτης πλημμυρικής κατάκλισης T=100 μέρες συνθήκες





Σχήμα 39 Χάρτης πλημμυρικής κατάκλισης  $T=1000$  μέσες συνθήκες

### 5.3.2 ΒΑΘΗ ΡΟΗΣ



Σχήμα 40 Χάρτης βαθών ροής T=50 ευμενής συνθήκες



Σχήμα 41 Χάρτης βαθών ροής T=50 μέσες συνθήκες

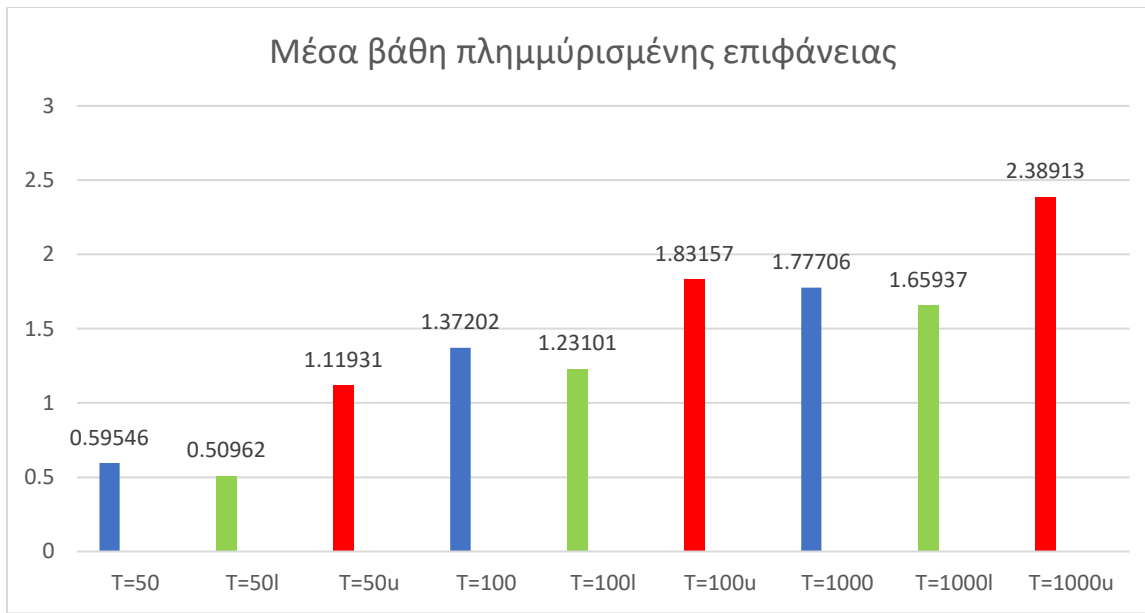




Σχήμα 42 Χάρτης βάθος ροής T=100 μέσες συνθήκες



Σχήμα 43 Χάρτης βάθος ροής T=1000 μέσες συνθήκες



### 5.3.3 ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΡΟΗΣ



Σχήμα 44 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=50 ευμενής συνθήκες





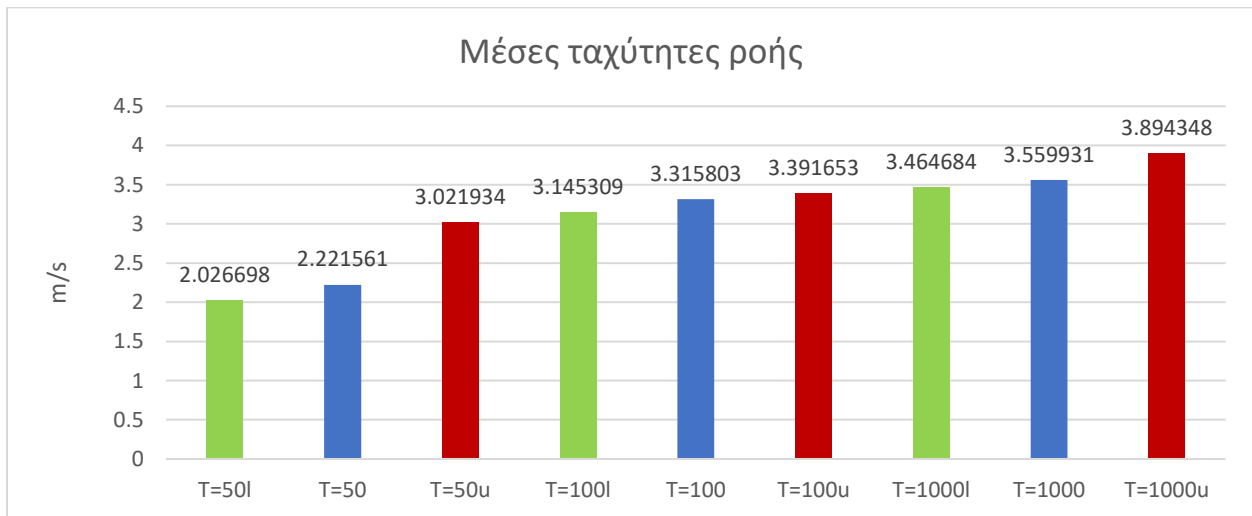
Σχήμα 45 Χάρτης ταχυτήτων ροής  $T=50$  μέσες συνθήκες



Σχήμα 46 Χάρτης ταχυτήτων ροής  $T=100$  μέσες συνθήκες



Σχήμα 47 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=1000 μέσες συνθήκες





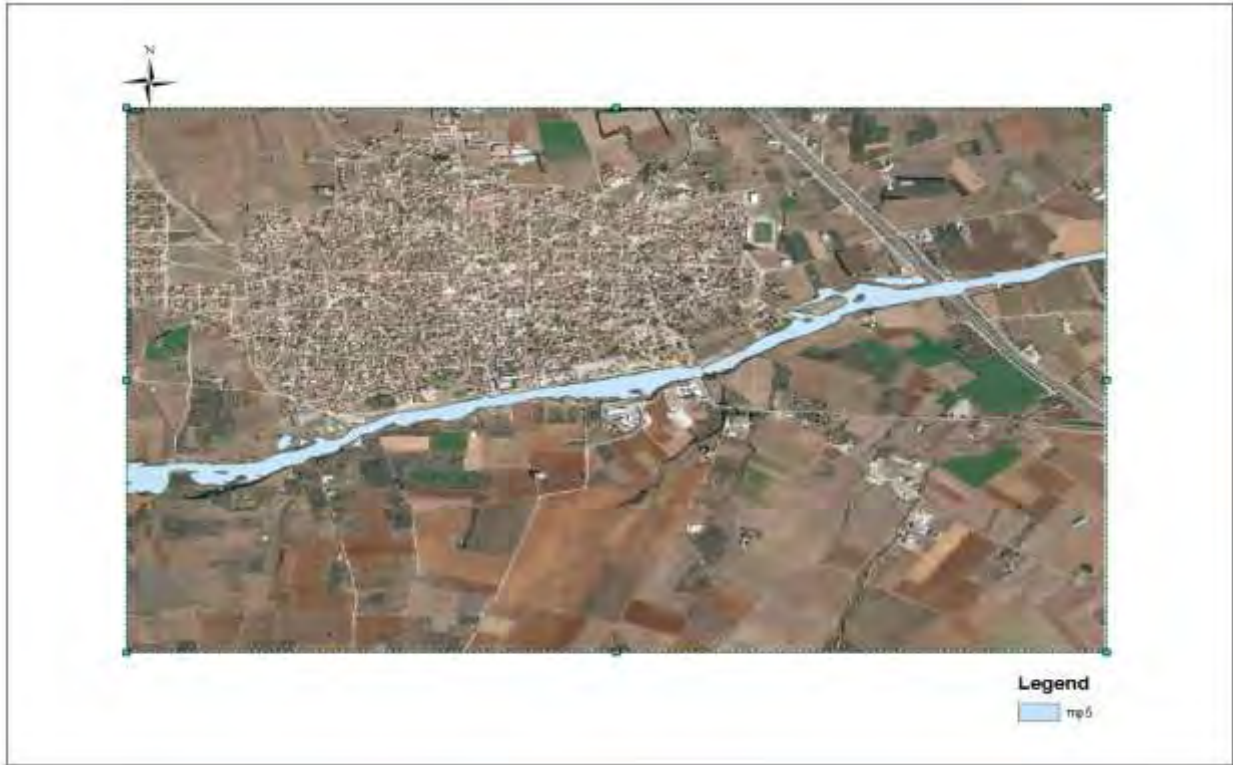
### 5.3.4 ΕΜΒΑΔΑ ΠΛΗΜΜΥΡΙΣΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ



Σχήμα 48 Χάρτης έκτασης πλημμύρας T=50 ευμενής συνθήκες



Σχήμα 49 Χάρτης έκτασης πλημμύρας T=50 μέσες συνθήκες



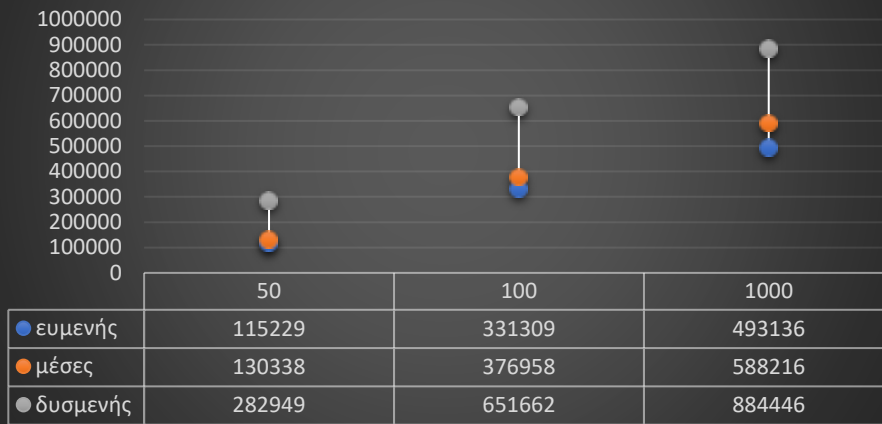
Σχήμα 50 Χάρτης έκτασης πλημμύρας T=100 μέσες συνθήκες



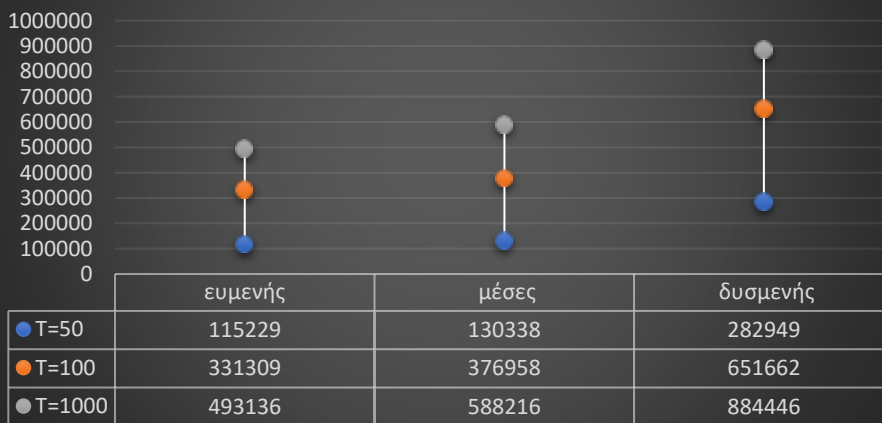
Σχήμα 51 Χάρτης έκτασης πλημμύρας T=1000 μέσες συνθήκες



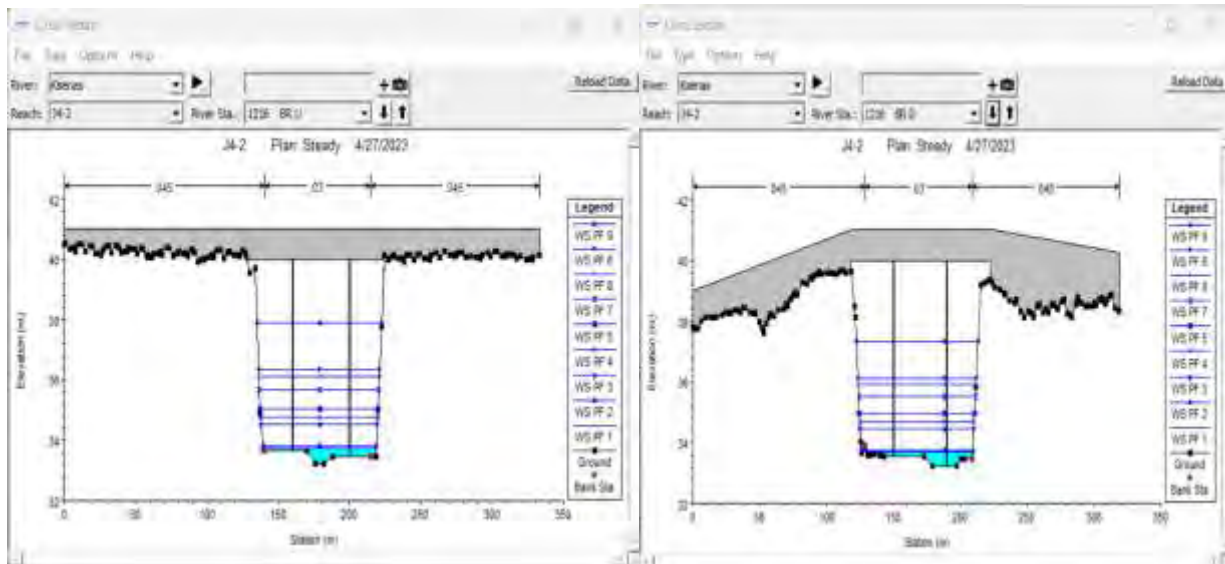
## Ευαισθησία μοντέλου ως προς περίοδο επαναφοράς



## Ευαισθησία μοντέλου ως προς συνθήκες περιβάλλοντος



### 5.3.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ



Τέλος, έγινε έλεγχος υπερχειλίσης των διατομών μια προς μια για κάθε ένα ανεπτυγμένο σενάριο προσομοίωσης με τα αποτελέσματα να έχουν ως εξής:

Στην περίπτωση προσομοίωσης μόνιμης ροής οι περισσότερες διατομές του υδατορέματος πλημμυρίζουν για την περίπτωση παροχής ελέγχου περιόδου επαναφοράς  $T=1000$  και δυσμενών συνθηκών για την ακρίβεια παρουσιάζει υπερχειλίση εμφανίζεται στο 79.49% του συνόλου των διατομών, 23.06% των διατομών παρουσίασαν πλημμύρα για  $T=1000$  μέσες συνθήκες και 16.24% στην περίπτωση  $T=100$  δυσμενής. Στις περιπτώσεις των υπόλοιπων ελεγχόμενων σεναρίων δεν παρουσιάζεται υπερχειλίση καμίας διατομής.

## 5.4 Αποτελέσματα για συνθήκες μη μόνιμης ροής

Στην συγκεκριμένη ενότητα γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της υδραυλικής προσομοίωσης μη μόνιμης ροής. Συγκεκριμένα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που εξήγαμε με τις παρακάτω μορφές:

- Χάρτες περιοχής κατάκλισης πλημμύρας
- Χάρτες μέσω βαθών ροής
- Χάρτες μέσω ταχυτήτων ροής
- Χάρτες συνολικών εμβαδών πλημμύρας
- Παρουσίαση αποτελεσμάτων κρίσιμων διατομών

### 5.4.1 ΧΑΡΤΕΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΚΑΤΑΚΛΙΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ



Σχήμα 52 Χάρτης πλημμυρικής κατάκλισης  $T=50$  ευμενής συνθήκες





Σχήμα 53 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=50 μέρες συνθήκες



Σχήμα 54 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=100 μέρες συνθήκες



Σχήμα 55 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για  $T=1000$  μέσες συνθήκες



## 5.4.2 ΒΑΘΗ ΡΟΗΣ



Σχήμα 56 Χάρτης βαθών πλημμύρας T=50 ευμενής συνθήκες



Σχήμα 57 Χάρτης βαθών πλημμύρας T=50 μέσες συνθήκες

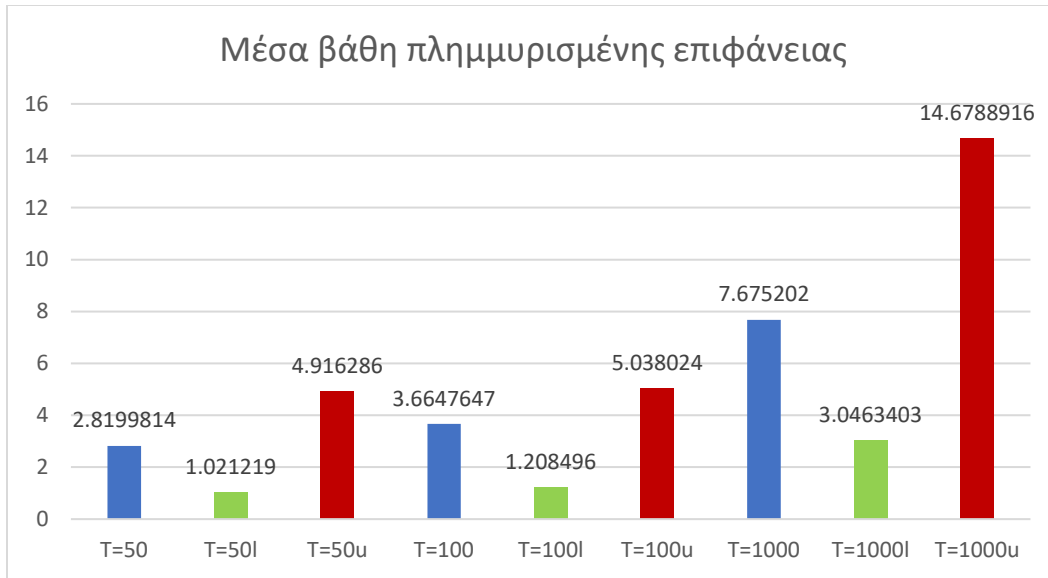




Σχήμα 58 Χάρτης βαθών πλημμύρας T=100 μέρες συνθήκες



Σχήμα 59 Χάρτης βαθών πλημμύρας T=1000 μέρες συνθήκες



### 5.4.3 ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΡΟΗΣ



Σχήμα 60 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=50 ευμενής συνθήκες





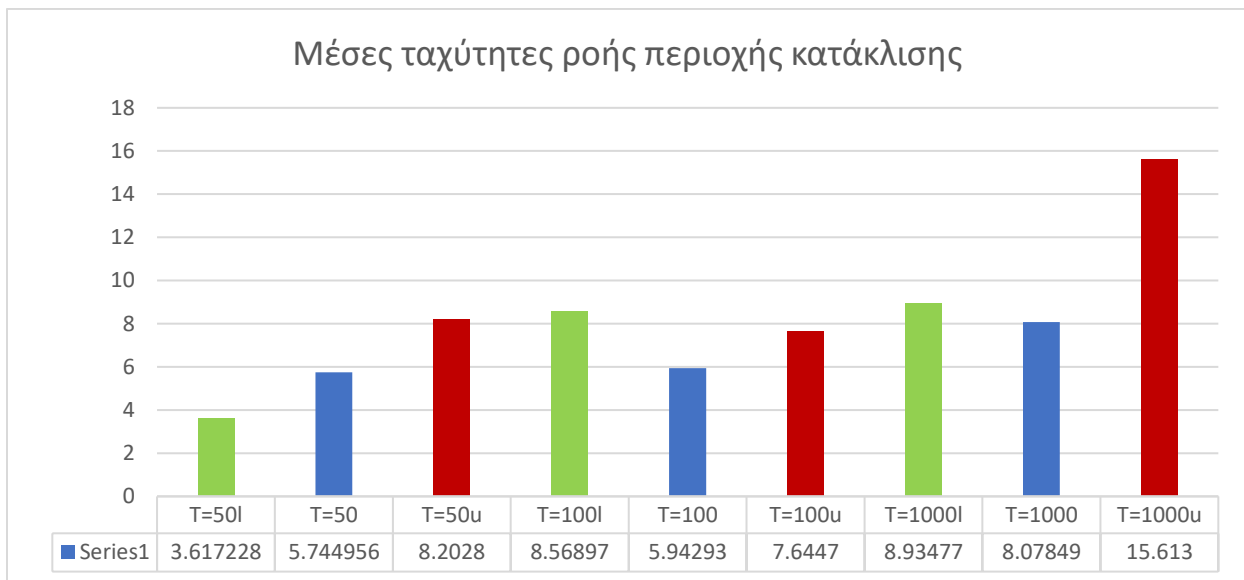
Σχήμα 61 Χάρτης ταχυτήτων ροής  $T=50$  μέρες συνθήκες



Σχήμα 62 Χάρτης ταχυτήτων ροής  $T=100$  μέρες συνθήκες



Σχήμα 63 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=1000 μέσες συνθήκες





#### 5.4.4 ΕΜΒΑΔΑ ΠΛΗΜΜΥΡΙΣΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ



Σχήμα 64 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=50 ευμενής συνθήκες



Σχήμα 65 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=50 μέσες συνθήκες

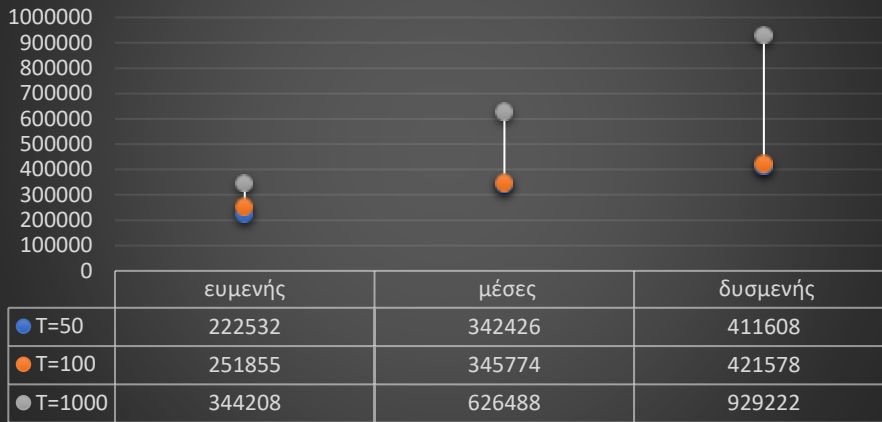


Σχήμα 66 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=100 μέσες συνθήκες

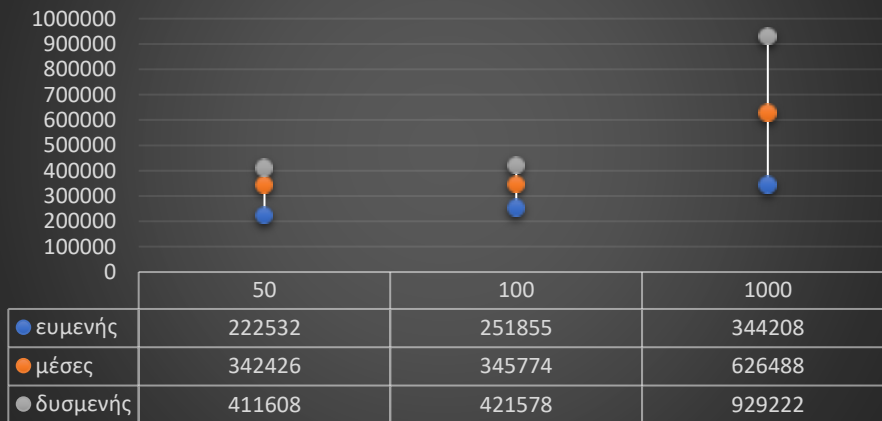


Σχήμα 67 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=1000 μέσες συνθήκες

## Ευαισθησία μοντέλου ως προς συνθήκες περιβάλλοντος

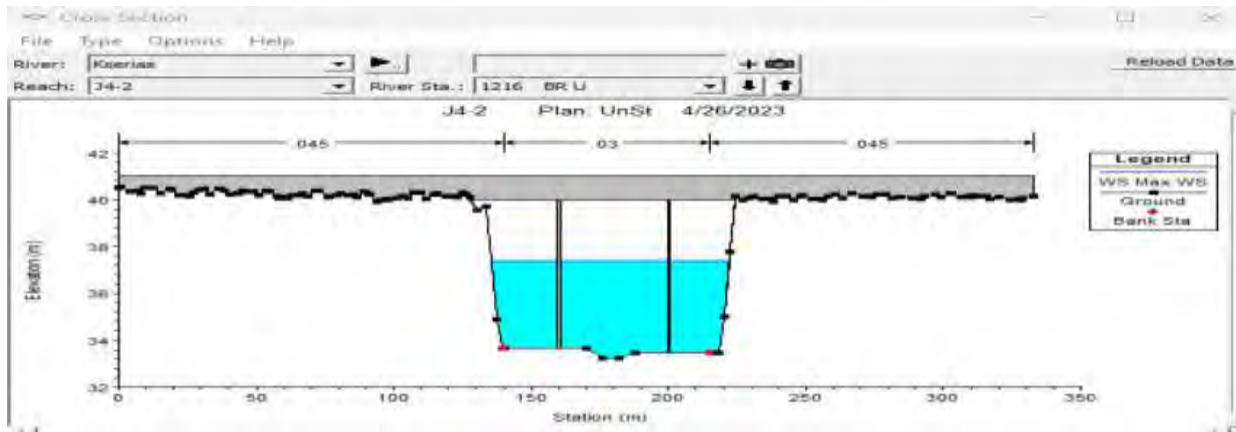


## Ευαισθησία μοντέλου ως προς περίοδο επαναφοράς

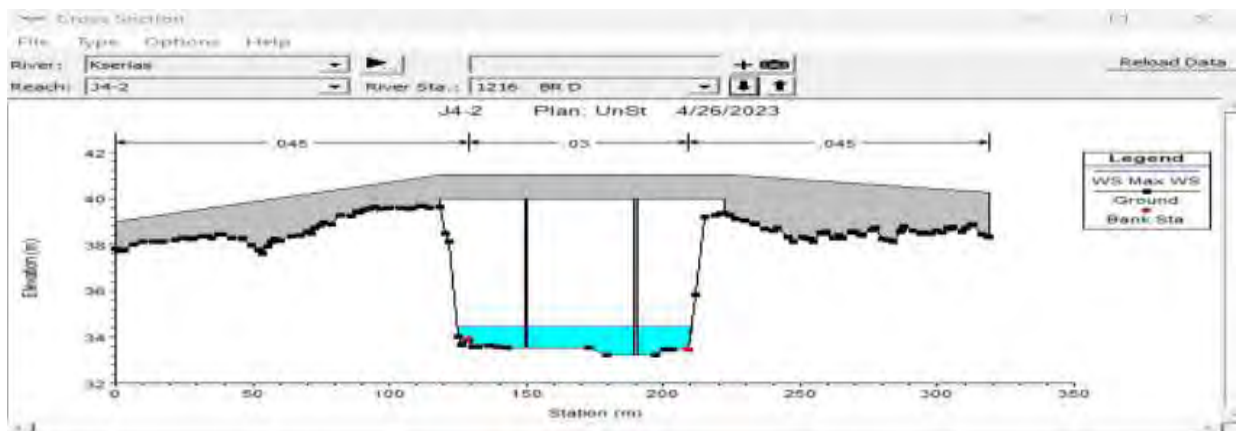




## 5.4.5 ΚΡΙΣΙΜΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ



Σχήμα 68 Διατομή ανάντη γέφυρας για  $T=50$  μέσες συνθήκες



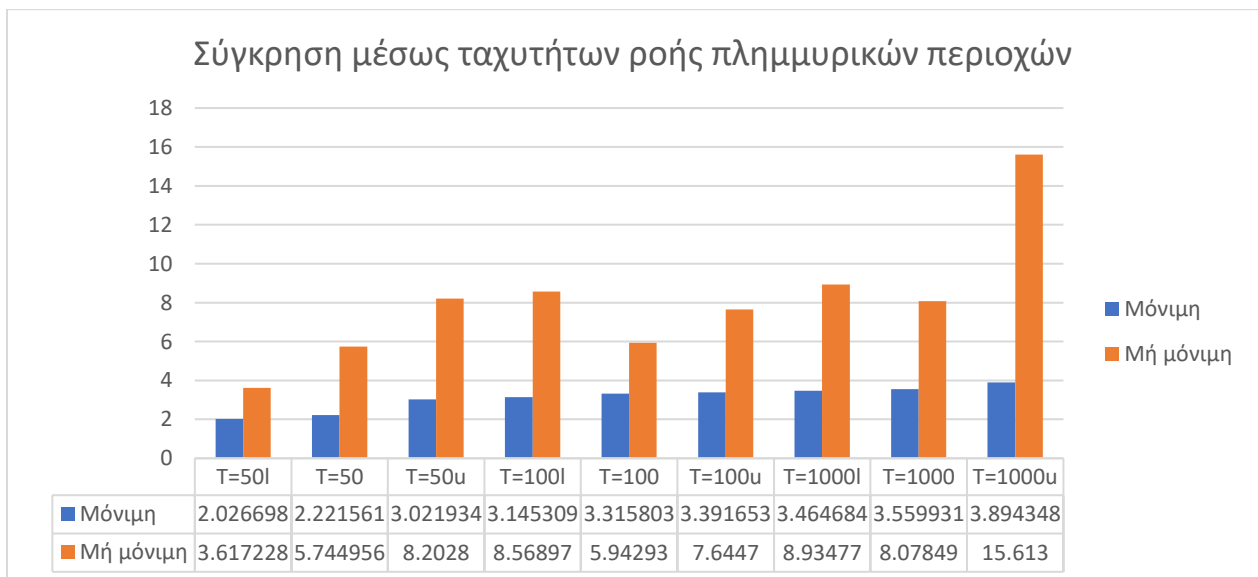
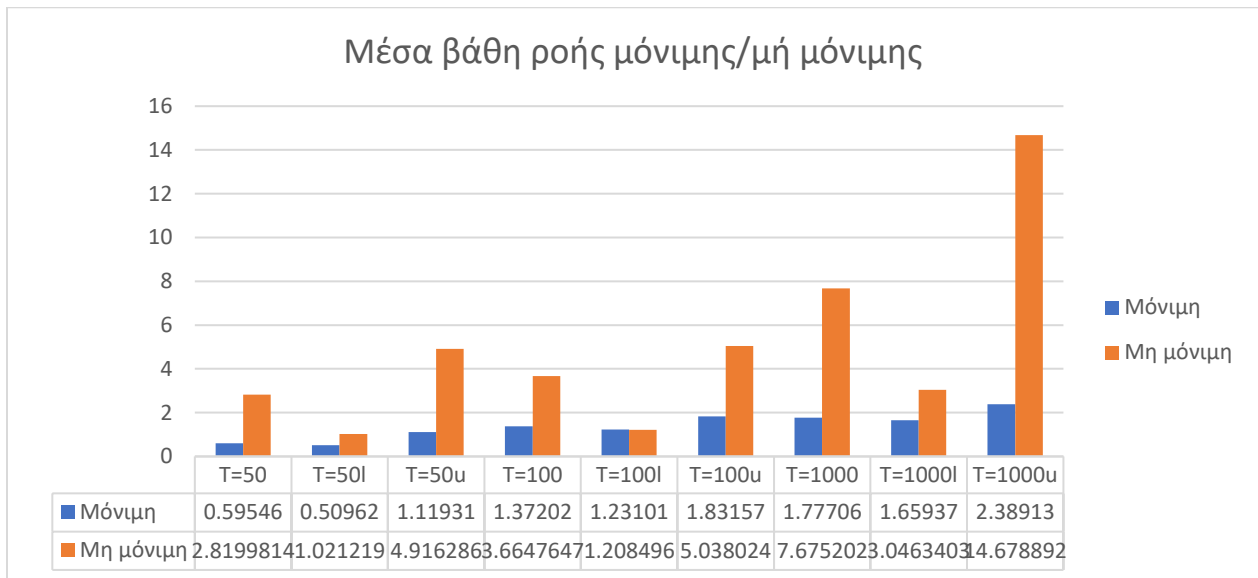
Σχήμα 69 Διατομή κατόντη γέφυρας για  $T=50$  μέσες συνθήκες

Τέλος, έγινε έλεγχος υπερχείλισης των διατομών μια προς μια για κάθε ένα ανεπτυγμένο σενάριο προσομοίωσης με τα αποτελέσματα να έχουν ως εξής:

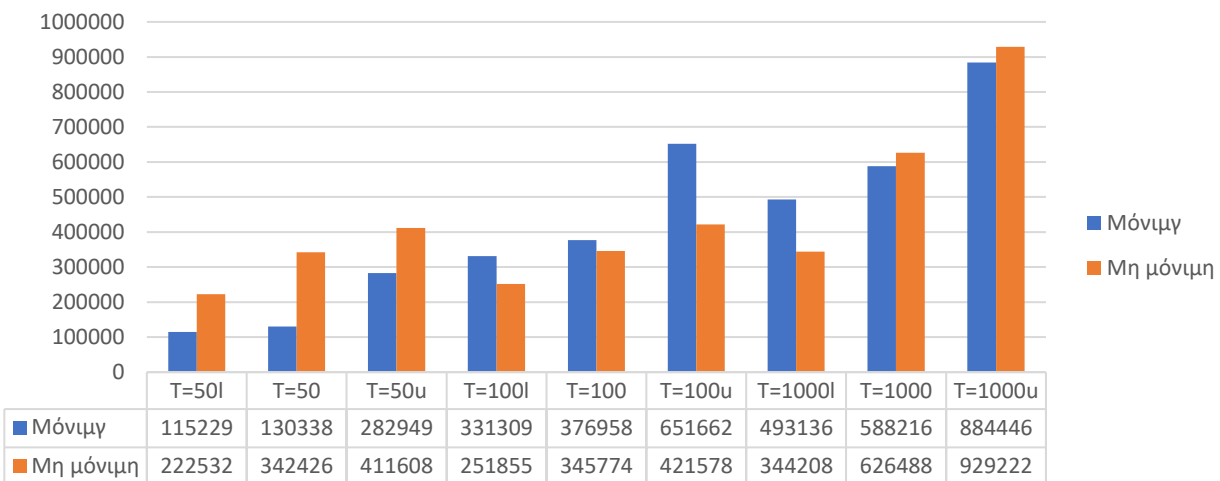
Στην περίπτωση μη μόνιμης ροής παρουσιάζονται φαινόμενα υπερχείλισης διατομών σε όλα τα ελεγχόμενα σενάρια. Συγκεκριμένα ξεκινώντας από το σενάριο περιόδου επαναφοράς  $T=50$  για ευμενής συνθήκες παρουσιάζεται υπερχείλιση στο 4.27% των διατομών, για ίδια περίοδο επαναφοράς και μέσες συνθήκες εμφανίζει πλημμύρα στο 5.89%, τέλος για δυσμενής συνθήκες 7.69%. Για περίοδο επαναφοράς  $T=100$  και μέσες συνθήκες πλημμύρα εμφανίστηκε στο 11.11% των διατομών, για  $T=100$  ευμενής πλημμύρησε το 1.71% τέλος για δυσμενής συνθήκες πλημμυρίζει το 14.53%. Στην περίπτωση των σεναρίων  $T=1000$  για μέσες συνθήκες προέκυψε πλημμύρα στο 33.33% των διατομών, στην περίπτωση ευμενών συνθηκών 6.84% και σε αυτήν των δυσμενών πλημμυρίζει το 66.67%.

## 5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων

Στην συγκεκριμένη υπό ενότητα θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των υδραυλικών προσομοιώσεων όπως αυτά προέκυψαν από την χρήση του λογισμικού HEC-RAS. Γίνεται σύγκριση των μέσων βαθών ροής και μέσων ταχυτήτων ροής για τις ελεγχόμενες περιόδους επαναφοράς και συνθήκες υγρασίας περιβάλλοντος. Ταυτόχρονα θα αναπτύξουμε πλημμυρικούς χάρτες κατάκλισης με περιεχόμενα τα αντίστοιχα σενάρια μόνιμης και μη μόνιμης ροής.



### Σύγκριση συνολικών εμβαδών πλημμύρας

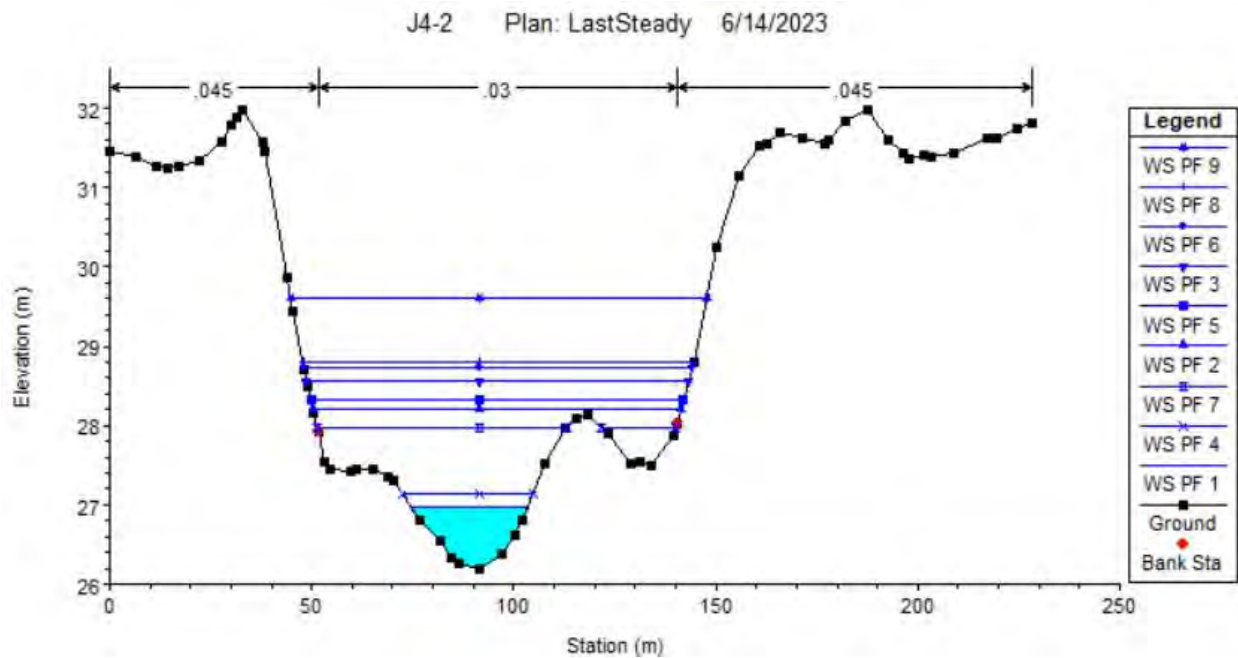


Σχήμα 70 Σύγκριση εμβαδόν κατάκλισης μόνιμης-μη μόνιμης ροής, T=50 μέσες συνθήκες



Τα παραπάνω αποτελέσματα που προέκυψαν από τον έλεγχο υπερχειλίσης διατομών παρουσιάζονται συγκεντρωτικά με την μορφή ποσοστών των συνολικών διατομών του μοντέλου που παρουσίασαν υπερχειλίση στον παρακάτω πίνακα.

	Μόνιμη ροή	Μη μόνιμη ροή
T=1000 δυσμενής	79.49%	66.67%
T=1000 μέσες	23.06%	33.33%
T=1000 ευμενής	0	6.84%
T=100 δυσμενής	16.24%	14.53%
T=100 μέσες	0	11.11%
T=100 ευμενής	0	1.71%
T=50 δυσμενής	0	7.69%
T=50 μέσες	0	5.89%
T=50 ευμενής	0	4.27%



Σχήμα 71 Παράδειγμα διατομής ελέγχου υπερχειλίσης

## Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα

### 6.1 Ανακεφαλαίωση του ερευνητικού ερωτήματος

Το κύριο ερευνητικό ερώτημα ήταν η υδραυλική μοντελοποίηση του ρέματος του Ξεριά που τοποθετείται στην περιοχή του Αλμυρού με στόχο την ανάλυση της συμπεριφοράς του, μέσα από την αξιοποίηση λογισμικού υδραυλικής προσομοίωσης. Η υδραυλική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για δύο τύπους ανάλυσης ροής αυτόν της μόνιμης ροής και αυτόν της μη μόνιμης εισάγοντας στην κάθε περίπτωση ροής βροχοπτώσεις με τρεις τιμές περιόδων επαναφοράς  $T=50, 100$  και  $1000$  χρόνια όπως μας κατευθύνει η Ευρωπαϊκή οδηγία 2007/60/EK καθώς και για τις αντίστοιχες περιπτώσεις συνθηκών περιβάλλοντος που ορίζονται από στην οδηγία, καταλήγοντας έτσι για κάθε μία από της μορφές υδραυλικής ανάλυσης να αναπτύσσονται εννιά σενάρια βροχοπτώσεων. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν με στόχο την κατανόηση της υδραυλικής απόκρισης ανοιχτού φυσικού αγωγού για τα προαναφερθέντα σενάρια και την πρόβλεψη φαινομένων πλημμύρας στην περιοχή μελέτης.

### 6.2 Παρουσίαση των κύριων ευρημάτων

Ένα βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από την ανάλυση των αποτελεσμάτων και των δύο περιπτώσεων ροής είναι πως η περίοδος επαναφοράς αποτελεί ένα μέγεθος που σχετίζεται άμεσα με την ένταση του γεγονότος βροχόπτωσης, με την αύξηση αυτής να έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των βαθών ροής και των συνολικών πλημμυρισμένων εκτάσεων. Ταυτόχρονα ίδιας σημασίας κρίνεται και η συνεισφορά των συνθηκών που επικρατούν στο περιβάλλον στα αποτελέσματα του φαινομένου της βροχόπτωσης και κατά συνέπεια της εμφάνισης φαινομένων πλημμύρας στην περιοχή μελέτης. Ως αποτέλεσμα, η επιλογή ακριβών δεδομένων βροχόπτωσης των πρωτογενών δεδομένων συνθηκών περιβάλλοντος απαιτεί βασική προϋπόθεση για ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Επίσης είναι φανερή η σχέση της τιμής του συντελεστή τραχύτητας με τα βάθη και τις ταχύτητες ροής. Ουσιαστικά αύξηση της τιμής του συντελεστή οδηγεί σε αύξηση των βαθών ροής και σε μείωση των ταχυτήτων, με την μείωση της τιμής συντελεστή προφανώς να έχει τα αντίθετα αποτελέσματα. Ταυτόχρονα μείωσης της τιμής οδηγεί σε μείωση της συνολικής έκτασης πλημμύρας ενώ η αύξηση του συντελεστή τραχύτητας έχει ως αποτέλεσμα αύξηση της συνολικής έκτασης πλημμύρας.

Τα βασικά αποτελέσματα των υπολογισμών σταθερής και ασταθούς ροής είναι πως η πρώτη δίνει μικρότερες τιμές και στο μέσο βάθος ροής και στην συνολική έκταση πλημμύρας, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στην θεώρηση σταθερής ροής με την πάροδο του χρόνου, αυτή η υπόθεση μπορεί να μην αντικατοπτρίζει την πραγματική συμπεριφορά του ποταμού κατά τη διάρκεια μιας πλημμύρας, καθώς η ροή σε ένα ποτάμι μπορεί να ποικίλλει σημαντικά με την πάροδο του χρόνου, με αποτέλεσμα, η ανάλυση σταθερής ροής μπορεί να υποτιμήσει τα συνολικά αποτελέσματα.

Από την άλλη ανάλυση ασταθούς ροής περιγράφει τη χρονικά μεταβαλλόμενη φύση της ροής στο δίκτυο του ποταμού, επιτρέποντας αλλαγές στο υψόμετρο και την ταχύτητα της επιφάνειας του νερού με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η ακριβέστερη αναπαράσταση της συμπεριφοράς της ροής μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερα βάθη και ταχύτητες νερού, καθώς και σε μικρότερη συνολική περιοχή πλημμύρας μιας και η ροή μπορεί να περιοριστεί καλύτερα μέσα στο κανάλι του ποταμού γεγονός που παρατηρείτε στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Επιπλέον, η ανάλυση ασταθούς ροής μπορεί να εξηγήσει παράγοντες όπως τα φαινόμενα τέλματος, που συμβαίνουν όταν η ροή παρεμποδίζεται από εμπόδια όπως γέφυρες ή οχετοί και μπορεί να προκαλέσει πλημμύρα ανάντη του εμπόδιου. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερα βάθη και ταχύτητες νερού σε αυτές τις ανάντη περιοχές.

Διαπιστώθηκε πως οι γέφυρες που υπάρχουν νότια την πόλης του Αλμυρού δεν μπλοκάρουν την ροή σε έντονο βαθμό ώστε να εμφανίζει κίνδυνο υπερχειλίσης ή γενικότερων φθορών. Η γέφυρες που αποτελούν σημεία μέγιστης σημασίας εμφανίζουν εξαιρετική συμπεριφορά μιας και δεν παρουσιάζουν φαινόμενα πλημμύρας ή υπερχειλίσης σε όλα τα σενάρια εκτός από το πιο ακραίο από τα αναπτυχθέντα σενάρια αυτό των δυσμενών συνθηκών με βροχόπτωση επαναφοράς χιλίων ετών, γεγονός που είναι θετικό για την μελλοντική συμπεριφορά του έργου. Το ύψος επιφάνειας ύδατος δεν ξεπερνά σε κανένα από τα σενάρια μόνιμης ροής και μη μόνιμης ροής το ύψος καταστρώματος της οδού αλλά ούτε το χαμηλότερο σημείο της κατασκευής πέραν της περίπτωσης του σεναρίου με της βροχόπτωσης με περίοδο επαναφοράς 1000 χρόνια με δυσμενής συνθήκες περιβάλλοντος

Έχοντας παρουσιάσει τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι φανερό πως το υδατόρεμα παρουσιάζει μία αρκετά καλή ικανότητα παροχέτευσης, χωρίς να παρουσιάζει έντονα φαινόμενα πλημμύρας. Συγκεκριμένα υπενθυμίζουμε πως στην περίπτωση προσομοίωσης μόνιμης ροής οι διατομές του υδατορέματος παρουσιάζουν φαινόμενα υπερχειλίσης για την περίπτωση παροχής ελέγχου περιόδου επαναφοράς  $T=1000$  και δυσμενών συνθηκών, για  $T=1000$  μέσες συνθήκες και στην περίπτωση  $T=100$  δυσμενής, δεν πλημμυρίζουν σε κανένα άλλο σενάριο ελέγχου.

Στην περίπτωση μη μόνιμης ροής παρουσιάζονται φαινόμενα πλημμύρας σε όλα τα ελεγχόμενα σενάρια, ακόμα και σε αυτά μικρής περιόδου επαναφοράς και ύπαρξη ευμενών συνθηκών υγρασίας περιβάλλοντος. Τα συνολικά ποσοστά διατομών που υπερχειλίσαν κυμαίνονται από 1.71% έως 66.67% ανάλογα με το σενάριο ελέγχου με το μικρότερο ποσοστό να αντιστοιχεί σε σενάριο μεσαίας περιόδου επαναφοράς με ευμενής συνθήκες περιβάλλοντος και το μεγαλύτερο ποσοστό να αντιστοιχεί στο δυσμενέστερο σενάριο ελέγχου δηλαδή αυτό των 1000 χρόνων περιόδου επαναφοράς σε συνδυασμό με δυσμενής περιβαλλοντικές συνθήκες.

Με βάση τα παραπάνω και λόγω της παρουσίας δομημένων περιοχών και αστικού ιστού πλησίον της κοίτης της περιοχής μελέτης προκύπτει άμεση ανάγκη για την εφαρμογή αντιπλημμυρικών έργων και μέτρων θωράκισης για την αποφυγή φαινομένων υπερχειλίσης και συνεπώς πλημμύρας με αρνητικά αποτελέσματα στην κοινωνία της περιοχής.

### 6.3 Προτάσεις για μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας

Ολοκληρώνοντας την εργασία και έχοντας μια πλήρη εικόνα του προβλήματος που διερευνήθηκε, είναι φανερό πως τα φαινόμενα πλημμύρας αποτελούν ένα σύνθετο φαινόμενο καθιστώντας την προσπάθεια προσομοίωσης τους απαιτητική και χρονοβόρα. Κατά τη διάρκεια εκπόνησης την προσομοίωσης του ποταμού ήρθαμε αντιμέτωποι με πολλά προβλήματα, ένα από αυτά αφορούσε στην ρεαλιστική αποτύπωση της κοίτης του ποταμού, το οποίο είναι καθοριστικό για όλη την εξέλιξη της ανάλυσης. Το πρόβλημα αυτό αφορά την αδυναμία αποτύπωσης του ποταμού σε υπόβαθρο που μπορεί να μην έχει μεγάλη ακρίβεια πράγμα που κάνει δυσκολότερη την αποτύπωση του. Συνεπώς, θα ήταν θετικό στο μέλλον να αξιοποιηθούν μοντέλα υψομέτρων εδάφους DEM μεγαλύτερης ακρίβειας φατνίων. Ή ακόμα και να πραγματοποιηθεί τοπογραφική αποτύπωση του ποταμού με ειδικό εξοπλισμό για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια.

Παρότι επιλέξαμε στην παρούσα εργασία να μελετήσουμε ένα συγκεκριμένο κομμάτι του ποταμού, θα ήταν θετικό στο μέλλον για την εξέλιξη του θέματος να πραγματοποιηθεί ανάπτυξη μοντέλου που να καλύπτει το συνολικό μήκος του Ξεριά ώστε να κατανοήσουμε ποιες περιοχές είναι ευάλωτες και που απαιτούνται παρεμβάσεις για να αποφευχθούν μελλοντικά φαινόμενα πλημμύρας.

Ακόμα, με δεδομένη την κλιματική αλλαγή και τα αποτελέσματα που αυτή έχει στα καιρικά φαινόμενα καθώς και στις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε περιοχή κρίνουμε πως ακριβέστερα πρωτογενή δεδομένα βροχόπτωσης θα είχαν θετικό αποτέλεσμα σε μελλοντική μελέτη. Για την επίτευξη αυτού θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν απευθείας μετρήσεις της παροχής του υδατορέματος, ώστε οι παροχές σχεδιασμού που θα εισάγουμε για την υδραυλική προσομοίωση να είναι όσο δυνατό ρεαλιστικότερες.

Επίσης, έχοντας υπόψιν την ευαισθησία που παρουσιάζει το μοντέλο μας σε σχέση με τον συντελεστή τραχύτητας καθιστάτε απαραίτητο η διαδικασία καθορισμού του συντελεστή τραχύτητας Manning που επικρατεί στην κύρια κοίτη αλλά και τις πεδιάδες δεξιά και αριστερά αυτής να γίνει όσο το δυνατόν ακριβέστερη γίνεται. Ιδανικά η διαδικασία αυτή να επιτευχθεί με την βοήθεια ψηφιακών αρχείων χρήσεων γης, ανεπτυγμένα από κάποιον οργανισμό ή φορέα που να εξασφαλίζει την ποιότητα τους και την ανταπόκριση στην πραγματικότητα, ώστε τελικά να μπορούν να εισαχθούν στην προσομοίωση ακριβείς τιμές συντελεστών.

Με δεδομένη την ανάγκη για αντιπλημμυρική προστασία στην περιοχή μελέτης, έντονο ενδιαφέρον αποτελεί η μελέτη της περιοχής μελέτης μετά την εφαρμογή τέτοιων τεχνικών έργων που έχουν στόχο τον περιορισμό και την διευθέτηση πλημμύρας.

Μελλοντικά, μιας και τα φαινόμενα πλημμύρας συνδέονται με φαινόμενα στερεό-μεταφοράς, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μελέτη εδαφικής απώλειας και τελικά της στερεό-μεταφοράς. Τέτοια φαινόμενα έχουν σημασία μιας και μπορούν να επηρεάσουν την γεωμετρία της κοίτης, της πλημμυρικής πεδιάδας ακόμα και των περιοχών εκβολής του ποταμού.

Επίσης, θα μπορούσε μελλοντικά να γίνει μοντελοποίηση του ποταμού με αξιοποίηση όλων των δυνατοτήτων που προσφέρει το λογισμικό HEC-RAS όπως δισδιάστατη ανάλυση ή ανάλυση θερμοκρασίας, μεταφοράς ιζημάτων και άλλων.

Τέλος, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση του υδατικού συστήματος μέσω άλλων λογισμικών υδραυλικής προσομοίωσης όπως MIKE Flood, TUFLOW, InfoWorks ICM, EPANET ή άλλο και στην συνέχεια να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των λογισμικών.

## Βιβλιογραφία – Αναφορές

### ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Α. Δαμασκινού-Γεωργιάδου, Ε. Σιδηρόπουλος, Σημειώσεις ανοιχτών αγωγών, Α.Π.Θ., 1996
- ΑΝ.Ε.ΒΟ Α.Ε., 2014, Σχέδιο δράσης αιεφόρου ενέργειας Δήμου Βόλου, Σύμφωνο των Δημάρχων υπέρ της Τοπικής Βιώσιμης Ενέργειας, Βόλος
- Βαφειάδης Μ., Μηχανική ποταμών, Διδακτικές σημειώσεις, Α.Π.Θ.
- Δ. Κουτσογιάννης, Σ. Ρώτη, Ι. Τζεράνης, και Θ. Ξανθόπουλος, Όμβριες καμπύλες, *Υδρολογική διερεύνηση υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας*, Τεύχος 3, 501 pages
- Διακάκης, Μ., 2012, Εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας με τη χρήση μοντέλων προσομοίωσης, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Αθήνα
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων, ΥΠΕΚΑ (2012), Προκαταρκτική Αξιολόγηση Κινδύνων Πλημμύρας, Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/ΕΚ
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2016). Σχέδιο διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας των λεκανών απορροής ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας
- Ευρωπαϊκή Ένωση. (2007, Οκτώβριος 23). Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 23ης Οκτωβρίου 2007 , για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης(L 288/27)
- Κουτσογιάννης, Δ. «Στατιστική Υδρολογία», Έκδοση 4, 312 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997
- Κωτούλας Δ., 2001: Διευθετήσεις χειμαρρικών ρευμάτων. Μέρος Ι. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ.
- Λιακόπουλος Α., Μηχανική ρευστών, Εκδόσεις Τζιόλα, 2016
- Μαμάσης Ν. (2012), Πλημμύρες - Εκτίμηση πλημμυρικών αιχμών, Διδακτικές Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Μαμάσης, Ν., 2007. Διαχείριση Πλημμυρικού Κινδύνου, Σημειώσεις μαθήματος Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά Έργα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Δ. Κουτσογιάννης, και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Εκδοση 3, 418 pages, [doi:10.13140/RG.2.1.4856.0888](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4856.0888), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999
- Υ.Π.Ε.Κ.Α., 2017. Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας, των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας, Ειδική Γραμματεία Υδάτων
- ΥΠΕΝ-Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων. (2013). Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων(ΟΜΟΕ)-Τεύχος 8: Αποχέτευση - Στράγγιση,Υδραυλικά Έργα Οδών(ΟΜΟΕ – ΑΣΥΕΟ)

## **ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L. and Forzieri, G., 2015, 'Global warming increases the frequency of river floods in Europe', *Hydrology and Earth System Sciences* 19(5), 2247–2260 (DOI: 10.5194/hess-19-2247-2015)
- Brunner, G. W., (2022) HEC-RAS River Analysis System Hydraulic reference Manual Version 6.2
- Brunner, G., Piper, S., Marston, L., Warner, J., Wolfe, B., 2016. HEC-RAS, River Analysis System Application Guide, Version 5.0, US Army Corps of Engineers, Hydrologic, Engineering Center.
- Burnash, R.J.C., Ferral R.L., McQuire R.A., 1973, A Generalized Streamflow Simulation System. In: *Conceptual Modeling for Digital Computers*. U.S. National Weather Service
- Chow, V. T., Maidment, D.R., and Mays, L.M. 1988. *Applied hydrology*. New York: McGraw Hill.
- Cowan WL (1956) Estimating hydraulic roughness coefficients. *Agricultural Engineering*, 37:473-475.
- Floods in the IPCC TAR Perspective, Z. W. Kundzewicz & H.-J. Schellnhuber , *Natural Hazards* volume 31, pages111–128 (2004)
- P. Parhi, "HEC-RAS Model for Mannig’s Roughness: A Case Study," *Open Journal of Modern Hydrology*, Vol. 3 No. 3, 2013, pp. 97-101. doi: [10.4236/ojmh.2013.33013](https://doi.org/10.4236/ojmh.2013.33013).
- Increasing risk of great floods in a changing climate, P. C. D. Milly, R. T. Wetherald, K. A. Dunne & T. L. Delworth , *Nature* volume 415, pages514–517 (2002)
- Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains, GJ Arcement, VR Schneider - 1989 - [ton.sdsu.edu](http://ton.sdsu.edu)
- Simulation of unsteady flow in alluvial streams, Pierre Chollet, Jean A. Cunge
- Trends in flood losses in Europe over the past 150 years, Dominik Paprotny, Antonia Sebastian, Oswaldo Morales-Nápoles & Sebastiaan N. Jonkman
- USACE. Hydrologic modeling system HEC-HMS: Technical reference manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA., 2000a
- USACE. Hydrologic modeling system HEC-HMS: User's manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 2000b
- US Army Corps of Engineers (USACE), Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center 83 (2016), HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual Version 5.0.
- V. T. Chow, “Open Channel Hydraulics,” McGraw Hill Book Company, New York, 1959.

Winsemius, H. C. et al. Global drivers of future river flood risk. *Nat. Clim. Change* 6, 381–385 (2016)

### **ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ/WEBSITES**

1. [Hydrologic Engineering Center \(army.mil\)](http://www.army.mil)
2. <https://www.esri.com/>
3. <https://scholar.google.com/>
4. <https://floods.ypela.gr>
5. <https://www.copernicus.eu/en>
6. <https://www.sciencedirect.com/>
7. <https://www.itia.ntua.gr/en/>
8. <http://www.emy.gr/emyl/el/>
9. [GEODATA.gov.gr](http://www.geodata.gov.gr)
10. [DSpace Home \(ntua.gr\)](http://www.dspace.ntua.gr)
11. [Εθνικό Αρχείο Διδακτορικών Διατριβών: Αρχική \(didaktorika.gr\)](http://www.didaktorika.gr)
12. [The Most Expensive Floods In The World - WorldAtlas](http://www.worldatlas.com)
13. [Environment \(europa.eu\)](http://www.environment.europa.eu)
14. <https://ypen.gov.gr/>

### **ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΘΕΝΤΩΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ**

HEC-RAS 6.3.1

ArcGIS 10.1

AutoCAD 2022

Google Earth Pro

HEC-DSS Vue 3.2.3



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α' - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

### Αποτελέσματα μόνιμης ροής:



Σχήμα 72 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για  $T=50$  δυσμενής συνθήκες



Σχήμα 73 Χάρτης βάθους ροής για  $T=50$  δυσμενής συνθήκες





Σχήμα 74 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=50 δυσμενής συνθήκες



Σχήμα 75 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=50 δυσμενής συνθήκες



Σχήμα 76 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=100 ευμενής συνθήκες



Σχήμα 77 Χάρτης βάθους ροής για T=100 ευμενής συνθήκες





Σχήμα 78 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=100 ευμενής συνθήκες



Σχήμα 79 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=100 ευμενής συνθήκες





Σχήμα 80 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για  $T=100$  δυσμενής συνθήκες



Σχήμα 81 Χάρτης βάθους ροής για  $T=100$  δυσμενής συνθήκες





Σχήμα 82 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=100 δυσμενής συνθήκες



Σχήμα 83 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=100 δυσμενής συνθήκες





Σχήμα 84 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=1000 ευμενής συνθήκες



Σχήμα 85 Χάρτης βάθους ροής για T=1000 ευμενής συνθήκες





Σχήμα 86 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=1000 ευμενής συνθήκες



Σχήμα 87 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=1000 ευμενής συνθήκες





Σχήμα 88 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για  $T=1000$  δυσμενής συνθήκες



Σχήμα 89 Χάρτης βάθους ροής για  $T=1000$  δυσμενής συνθήκες





Σχήμα 90 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=1000 δυσμενής συνθήκες

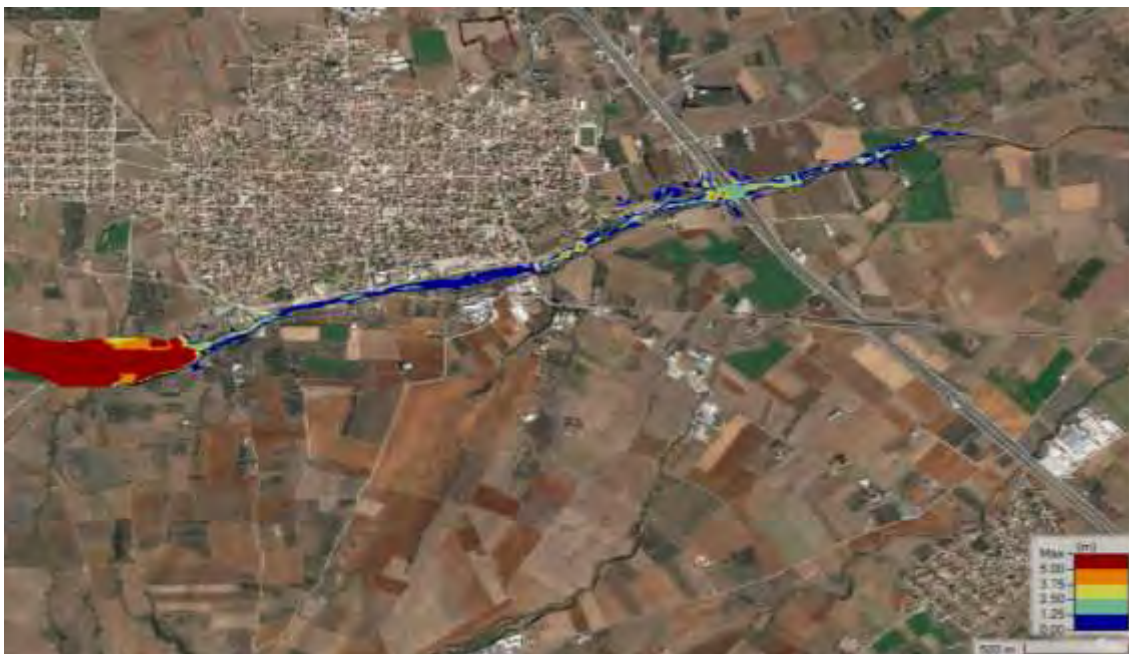


Σχήμα 91 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=1000 δυσμενής συνθήκες

## Αποτελέσματα μη μόνιμης ροής:



Σχήμα 92 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για  $T=50$  δυσμενής συνθήκες



Σχήμα 93 Χάρτης βαθών ροής  $T=50$  δυσμενής συνθήκες





Σχήμα 94 Χάρτης ταχυτήτων ροής T=50 δυσμενής συνθήκες



Σχήμα 95 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας T=50 δυσμενής συνθήκες



Σχήμα 96 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για T=100 ευμενής συνθήκες



Σχήμα 97 Χάρτης βαθών ροής για T=100 ευμενής συνθήκες





Σχήμα 98 Χάρτης ταχυτήτων ροής για  $T=100$  ευμενής συνθήκες



Σχήμα 99 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας  $T=100$  ευμενής συνθήκες



Σχήμα 100 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για  $T=100$  δυσμενής συνθήκες





Σχήμα 101 Χάρτης βαθών ροής για  $T=100$  δυσμενής συνθήκες



Σχήμα 102 Χάρτης ταχυτήτων ροής για  $T=100$  δυσμενής συνθήκες

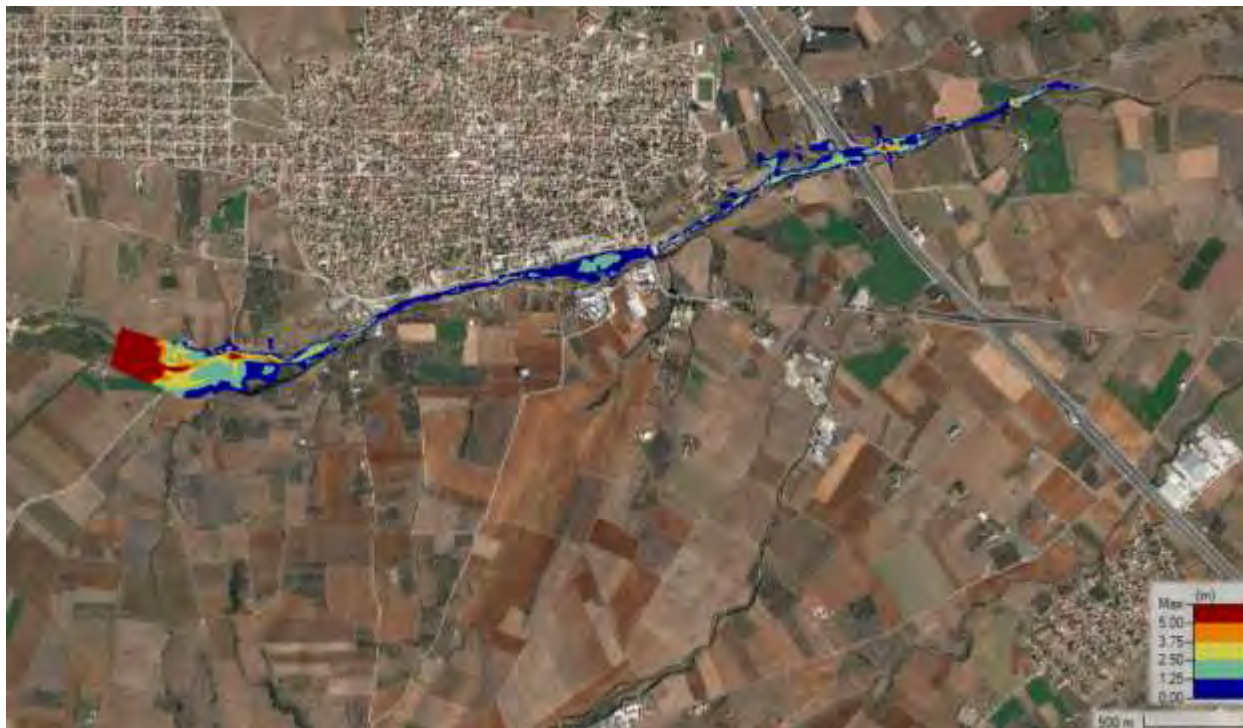


Σχήμα 103 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας  $T=1000$  δυσμενής συνθήκες



Σχήμα 104 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για  $T=1000$  ευμενής συνθήκες





Σχήμα 105 Χάρτης βαθών ροής για  $T=1000$  ευμενής συνθήκες



Σχήμα 106 Χάρτης ταχυτήτων ροής για  $T=1000$  ευμενής συνθήκες



Σχήμα 107 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας  $T=1000$  ευμενής συνθήκες



Σχήμα 108 Χάρτης κατακλισμένης περιοχής για  $T=1000$  δυσμενής συνθήκες





Σχήμα 109 Χάρτης βαθών ροής για  $T=1000$  δυσμενής συνθήκες



Σχήμα 110 Χάρτης ταχυτήτων ροής για  $T=1000$  δυσμενής συνθήκες



Σχήμα 111 Χάρτης συνολικής έκτασης πλημμύρας  $T=1000$  δυσμενής συνθήκες



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β'- ΠΙΝΑΚΕΣ

Έργο	Ιδιότητες τοιχωμάτων	Συντελεστής n [m <sup>-1/3</sup> · s]
Ταπεινωμένη τάφος νησιδας	<ul style="list-style-type: none"> <li>Γαιώδη (χωρίς φυτική κάλυψη)</li> <li>Γαιώδη (με φυτική κάλυψη)</li> <li>Χαλικόστρωτα</li> </ul>	0,040 0,050 0,055
Επενδεδυμένες τάφοι (αποχέτευσης, συνέχειας, σφρύος, κτλ.), έγχυτοι ορθογωνικοί αγωγοί	Παλαιό σκυρόδεμα με καθαρές επιφάνειες	0,016
"Αβαθείς Πλευρικές τάφοι" επενδεδυμένες (τριγωνικές, τραπεζοειδείς, ρείθρα οδών)	Παλαιό σκυρόδεμα, ασφαλτικό οδό- στρωμα (επιφάνειες με κατακάθιση φερτών)	0,018
Αγωγοί με διαμόρφωση πυθμένα με κολυμβητούς λίθους σε σκυρόδεμα	Χονδρή λιθοδομή	0,020
Οχετοί υπεραστικών οδών και συλλεκτήρες αποχέτευσης ομβρίων αστικών περιοχών	Επιφάνεια σκυροδέματος : <ul style="list-style-type: none"> <li>για έλεγχο πληρότητας (ανώτατη στάθμη νερού)</li> <li>για έλεγχο μέγιστης ταχύτητας</li> </ul>	0,018 0,012
Τσιμεντοσωλήνες	Επιφάνεια παλαιού σκυροδέματος, καθαρές επιφάνειες	0,016
Ανεπένδυτοι τάφοι σε έδαφος Γαιοημιβραχώδες	<ul style="list-style-type: none"> <li>πυθμένας τάφρου με αποθέσεις</li> <li>ανώμαλος βραχώδης</li> </ul>	0,025 0,030
Ανεπένδυτοι τάφοι σε βραχώδες έδαφος	Ανώμαλη περίμετρος	0,040
Επενδεδυμένες τάφοι με συμματοκιβώτια ή με λιθορριπή (Rip-Rap)	Λίθοι με ομαλές επιφάνειες	0,025
Σωληνωτοί αγωγοί ακαθάρτων (για ροή λυμάτων με βαρύτητα)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Πλαστικοί</li> <li>Αμιαντοτσιμεντοσωλήνες</li> <li>Τσιμεντοσωλήνες</li> </ul>	0,014 0,015 0,016
Χαλυβδοσωλήνες Ελατός Χάλυβας	<ul style="list-style-type: none"> <li>Γαλβανισμένες επιφάνειες</li> <li>Μαύρες επιφάνειες</li> </ul>	0,013-0,017 0,012-0,015
Ελατοί Χυτοσιδηροί αγωγοί	<ul style="list-style-type: none"> <li>Επενδεδυμένες επιφάνειες</li> <li>Ανεπένδυτες επιφάνειες</li> </ul>	0,011-0,014 0,012-0,016
Κύρια κοίτη χειμάρρων-ρεμάτων	Χόρτα- χαμηλή βλάστηση	0,025-0,060
Κοίτη πλημμύρας χειμάρρων	Βλάστηση και δένδρα	0,050-0,150

<b>1. Ακαμπτα τοιχώματα</b>		
1.1	Επένδυση με εκτοξευμένο σκυρόδεμα, γαιώδη σε καλή κατάσταση	0,017
1.2	Ευθύγραμμες κοίτες γαιώδεις σε καλή κατάσταση	0,020
1.3	Ορεινά ρέματα με βραχώδη κοίτη	0,040-0,050
<b>2. Μικρά ρέματα σε πεδιάδες (πλάτος πλημμυρικής επιφάνειας &lt;30 m)</b>		
2.1	Καθαρά, ευθύγραμμα, πλήρη, χωρίς ρήγματα ή σχηματιζόμενες λίμνες μικρού βάθους	0,025-0,033
2.2	Όπως (2.1), αλλά με περισσότερους λίθους και χόρτα	0,030-0,040
2.3	Καθαρά, ελικοειδή, με μερικές λίμνες και τέλματα	0,033-0,045
2.4	Όπως (2.3), αλλά με λίγα χόρτα και λίθους	0,035-0,050
2.5	Όπως (2.4), χαμηλότερη πληρότητα, περισσότερες μη ενεργές κλίσεις και τμήματα	0,040-0,055
2.6	Όπως (2.5), αλλά με περισσότερους λίθους	0,045-0,060
2.7	Βραδείας κίνησης, χορταριασμένα, βαθιές λίμνες	0,050-0,080
2.8	Πολύ χορταριασμένα, βαθιές λίμνες, ή πλημμυριζόμενης διαδρομής με πάρα πολλά εμπόδια από κλαδιά και θάμνους	0,075-0,150
<b>3. Ορεινά ρέματα, χωρίς βλάστηση, όχθες απότομες, δένδρα και θάμνοι κατά μήκος των όχθων που πλημμυρίζονται</b>		
3.1	Κοίτη: χαλίκια, κροκάλες και λίγοι ογκόλιθοι	0,030-0,050
3.2	Κοίτη: κροκάλες με μεγάλους ογκόλιθους	0,040-0,070
<b>4. Μεγάλα ρέματα (πλάτος πλημμυρικής επιφάνειας &gt;30 m)</b>		
Η τιμή "n" είναι μικρότερη από εκείνες των μικρών ρεμάτων με παρόμοια περιγραφή, επειδή οι όχθες προσφέρουν λιγότερη αποτελεσματική αντίσταση στη ροή.		
4.1	Κανονική διατομή χωρίς ογκόλιθους ή θάμνους	0,025-0,060
4.2	Ακανόνιστη διατομή και τραχέα τμήματα	0,035-0,100
<b>5. Αλουβιακές τάφροι με αμμώδη κοίτη χωρίς βλάστηση</b>		
5.1 Ήρεμη ροή, $Fr < 1$		
5.1.1	Επίπεδη κοίτη	0,014-0,020
5.1.2	Πτυχωτή κοίτη	0,018-0,030
5.1.3	Αμμοθύνες	0,020-0,040
5.1.4	Ξεπλυμένες αμμοθύνες ή σε μεταβατική κατάσταση	0,014-0,025
5.2 Ταχεία ροή, $Fr > 1$		
5.2.1	Στάσιμοι κυματισμοί	0,010-0,015
5.2.2	Antidunes	0,012-0,020