



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:
“ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ – ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ ΚΑΙ
ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ”

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων υδρολογικής
προσομοίωσης πλημμυρικού γεγονότος & προσομοίωσης
υδραυλικού κύματος σε μια μικρής έκτασης υδρολογική
λεκάνη»

Σαρχάνη Σοφία

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγητής Τσάνης Ιωάννης (Επιβλέπων)
Καθηγητής Χρυσικόπουλος Κωνσταντίνος
Δρ. Κουτρούλης Αριστείδης

Χανιά, Οκτώβριος 2018

Η έγκριση της παρούσας Μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Νόμος 5343/1932, άρθρο 202).

Στους αγαπημένους μου

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ιωάννη Τσάνη, διευθυντή του εργαστηρίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής, για την εμπιστοσύνη στο πρόσωπό μου, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησής της. Επιπρόσθετα θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Β. Χρυσικόπουλο, διευθυντή του εργαστηρίου τεχνολογίας του περιβάλλοντος (TUCeeL), καθώς και τον Δρ. Αριστείδη Κουτρούλη, μέλος του εργαστηριακού διδακτικού προσωπικού του εργαστηρίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής, για την αξιολόγηση της παρούσας εργασίας και συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή.

Για το ψηφιακό μοντέλο εδάφους υψηλής ανάλυσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Δημήτρη Αλεξάκη, και για την παραχώρηση βροχοπτωτικών δεδομένων την Δρ. Ανθή-Ειρήνη Βοζινάκη, μέλη του εργαστηρίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής.

Κλείνοντας, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την αδιάκοπη στήριξή τους.

“Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων υδρολογικής προσομοίωσης πλημμυρικού γεγονότος & προσομοίωσης υδραυλικού κύματος σε μια μικρής έκτασης υδρολογική λεκάνη”

Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία προσομοιώνεται ένα αστραπιαίο βροχοπτώτικο συμβάν που έλαβε χώρα στη λεκάνη απορροής της Αλμυρίδας, στη δυτική Κρήτη. Μέσω της υδρολογικής ανάλυσης του πλημμυρικού γεγονότος και της μοντελοποίησης του υδραυλικού κύματος, σκοπός είναι η εκτίμηση των επιπτώσεων στην μικρής έκτασης υδρολογική λεκάνη, διαμέσου συνδυασμού εργαλείων της HEC.

Η προσομοίωση του βροχοπτώτικού συμβάντος γίνεται με το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS 4.2.1. Τα βροχοπτώτικά δεδομένα εισάγονται σε κάρναβο, ενώ οι υδρολογικές παράμετροι εισάγονται σε κάθε ένα πλεγματοειδές κελί. Υπολογίζονται οι υδρολογικές παράμετροι της λεκάνης για τις οποίες διατίθενται στοιχεία, ενώ πραγματοποιείται βαθμονόμηση των υπόλοιπων παραμέτρων, από βιβλιογραφική ανασκόπηση. Γίνεται ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου, και διαπιστώνεται ποιες από τις βαθμονομούμενες παραμέτρους αλλάζουν το χρόνο εμφάνισης της μέγιστης απορροής. Συγχρόνως, ελέγχεται ποιες παράμετροι επηρεάζουν το μέγεθος της μέγιστης απορροής. Κριτήριο βαθμονόμησης των παραμέτρων είναι η επαλήθευση του μοντέλου, με τη μέτρηση των 2m του ύψους ροής, σε διατομή που ελέγχθηκε στο πέρας της πλημμύρας.

Η ανάλυση στα κατάντη του ρέματος της Αλμυρίδας, περίπου 960 m, πραγματοποιείται με το υδραυλικό 1D μοντέλο HEC-RAS 5.0.3 προσομοίωσης της πλημμύρας, καθώς και με ένα ενιαίο υδραυλικό 1D/2D μοντέλο, το 1D/2D HEC-RAS 5.0.3 μοντέλο, για τις ανάγκες των οποίων χρησιμοποιείται Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Digital Terrain Model - DTM) υψηλής ανάλυσης, 5m x 5m. Με τα μοντέλα προσομοίωσης προσδιορίζεται η έκταση της πλημμύρας, το ύψος και η ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος στις διατομές του ρέματος, ενώ γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων τους.

Μέσω της εφαρμογής των μοντελοποιήσεων με τα εργαλεία της HEC, επισημαίνονται οι πλημμυρικές επιπτώσεις του αιφνίδιου βροχοπτώτικού συμβάντος, και προτείνονται ορισμένα μέτρα περιορισμού των κινδύνων, καταλήγοντας σε συμπεράσματα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος.

Λέξεις-κλειδιά: αιφνίδιο πλημμυρικό συμβάν, HEC-HMS, 1D HEC-RAS, 1D/2D HEC-RAS.

“Parameter sensitivity analysis of hydrological flood event simulation & hydraulic wave simulation in a small hydrological basin”

Abstract

In the present Master Science thesis, a flash flood event is simulated occurring in the Almyrida basin, in western Crete. Through the hydrological analysis of the flash flood event and the modeling of the hydraulic wave, the aim is to assess the impacts on the small hydrological basin, via a combination of HEC software.

The simulation of the rainfall event occurs with the hydrological HEC-HMS 4.2.1 model. Precipitation data are input into a grid, while hydrological parameters are input into each grid cell. The hydrological parameters of the basin, for which data are available, are calculated, while the remaining parameters are calibrated through a bibliographic review. Sensitivity analysis of the model is carried out, and it is determined which of the calibrated parameters change the time of appearance of peak discharge. At the same time, it is checked which parameters affect the magnitude of peak discharge. Parameter calibration criterion is to verify the model, measuring 2m of water depth in a cross section checked after the flood.

The downstream analysis of the Almyrida stream of approximately 960 m, is carried out with the hydraulic 1D HEC-RAS 5.0.3 flood simulation model, as well as a combined hydraulic 1D/2D model, the 1D/2D HEC-RAS 5.0.3 model, for the needs of which a high resolution 5m x 5m Digital Terrain Model (DTM) is used. The simulation models determine the flood extent, the depth and velocity of the flood wave in the stream's cross sections, while comparing their results.

Through the implementation of modeling with HEC software, the flood impacts of the flash flood event are highlighted, and some suggestions are proposed as well to limit the risks, resulting in particularly interesting conclusions.

Keywords: flash flood event, HEC-HMS, 1D HEC-RAS, 1D/2D HEC-RAS.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	i
Abstract	ii
Πίνακας Περιεχομένων	iii
Κατάλογος Πινάκων	v
Κατάλογος Εικόνων	v
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Περιγραφή του προβλήματος	1
1.2 Αντικείμενο έρευνας	3
1.3 Δομή μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας	4
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση	6
2.1 Πλημμύρες	6
2.1.1 Ορισμοί	6
2.1.2 Αιτίες πλημμυρογένεσης	6
2.1.3 Κατηγορίες πλημμυρών	7
2.1.4 Επιπτώσεις πλημμυρών	11
2.1.5 Διαχείριση κινδύνων πλημμύρας	13
2.2 Μοντέλο υδρολογικής προσομοίωσης, HEC-HMS 4.2.1	15
2.3 1D HEC-RAS 5.0.3 υδραυλικό μοντέλο	17
2.4 Ενιαίο σύστημα υδραυλικής 1D/2D μοντελοποίησης HEC-RAS 5.0.3	18
Κεφάλαιο 3: Περιοχή μελέτης: Λεκάνη απορροής Αλμυρίδας	23
3.1 Θέση υδρολογικής λεκάνης Αλμυρίδας	23
3.2 Γεωμορφολογία	23
3.3 Υδρογεωλογία	25
3.4 Κλίμα	26
3.5 Χρήσεις γης	26
3.6 Περιγραφή του μελετώμενου Αιφνίδιου Πλημμυρικού γεγονότος στις 17/10/2006 στην Αλμυρίδα	28
Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία Μοντελοποίησης	30

4.1	Μοντελοποίηση του βροχοπτωτικού συμβάντος της 17/10/2006, με χρήση του υδρολογικού HEC-HMS 4.2.1 μοντέλου.....	30
4.2	Βαθμονόμηση μοντέλου HEC-HMS 4.2.1	39
4.2.1	Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων, ανάλυση μεγέθους μέγιστης απορροής - Επαλήθευση μοντέλου	39
4.3	Δεδομένα γεωμετρίας σε ArcGIS 10.1 – Σύνδεση με HEC-RAS 5.0.3	43
4.4	Μοντελοποίηση του κάτω τμήματος του ρέματος της Αλμυρίδας με χρήση του υδραυλικού 1D HEC-RAS 5.0.3 μοντέλου	45
4.4.1	Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων	45
4.4.2	Εισαγωγή Οριακών και Αρχικών Συνθηκών Ροής	51
4.4.3	Ανάλυση μη μόνιμης ροής (unsteady flow analysis).....	54
4.5	Μοντελοποίηση του κάτω τμήματος του ρέματος της Αλμυρίδας με χρήση του υδραυλικού 1D/2D HEC-RAS 5.0.3 μοντέλου	58
4.5.1	Σχεδιασμός γεωμετρίας 1D Ροής ρέματος.....	58
4.5.2	Δημιουργία 2D Επιφανειών Ροής (2D flow areas) & Γραμμών Διαχωρισμού (Breaklines).....	59
4.5.3	Δημιουργία 2D υπολογιστικού πλέγματος (computational mesh) για κάθε 2D Επιφάνεια ροής	61
4.5.4	Σύνδεση 2D Επιφανειών Ροής με 1D Ροή ρέματος μέσω Πλευρικών Δομών (Lateral Structures)	64
4.5.5	Γραφική αναπαράσταση στον RAS Mapper.....	72
4.5.6	Οριακές και Αρχικές Συνθήκες Ροής.....	73
4.5.7	Ανάλυση μη μόνιμης ροής (unsteady flow analysis).....	73
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα		79
5.1	Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης με HEC-HMS 4.2.1	79
5.2	Αποτελέσματα υδραυλικής προσομοίωσης με 1D HEC-RAS 5.0.3	82
5.3	Αποτελέσματα υδραυλικής προσομοίωσης με 1D/2D HEC-RAS 5.0.3	89
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα Έρευνας		95
6.1	Παρατηρήσεις και συμπεράσματα.....	95
6.2	Προτάσεις Ελαχιστοποίησης επιπτώσεων μελλοντικών πλημμυρών	97
Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία - Αναφορές		98

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.3.1: Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης της Αλμυρίδας. (Πηγή: Τσιτσιλώνης, 2008, σ. 47)	25
Πίνακας 3.5.1: Χρήσεις γης λεκάνης της Αλμυρίδας. (Πηγή: CORINE Land Cover)	26
Πίνακας 4.1.1: Χρονοσειρά βροχοπτώτικού συμβάντος 17/10/2006 στην Αλμυρίδα (HEC-HMS 4.2.1).	32
Πίνακας 4.1.2: Curve Numbers απορροής, για καλλιεργήσιμες και μη, αγροτικές εκτάσεις στη λεκάνη της Αλμυρίδας, για τύπο εδάφους A & μέσες συνθήκες υγρασίας. (Πηγή: USDA, 1989, Appendix A, p. 2-6, 2-7)	34
Πίνακας 4.1.3: Συντελεστής αποθήκευσης R (hr) συναρτήσει των χρήσεων γης της λεκάνης.	36
Πίνακας 4.2.1.1: Βαθμονόμηση παραμέτρων μοντέλου διεξάγοντας ανάλυση ευαισθησίας, ανάλυση μεγέθους μέγιστης απορροής (HEC-HMS 4.2.1) & επαλήθευση του μοντέλου (1D HEC-RAS 5.0.3).	40
Πίνακας 4.4.1.1: Συντελεστής Manning (n) για κανάλια ρεμάτων. (Πηγή: Chow, 1959)	46
Πίνακας 4.4.2.1: Χρονοσειρά πλημμυρικής παροχής, εξαγόμενη από HEC-HMS 4.2.1 (HEC-RAS 5.0.3).	52
Πίνακας 4.5.4.1: Συντελεστές πλευρικών υδατοφρακτών. (Πηγή: USACE, 2016b, p. 3-50) .70	

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1.1: Πλημμυρικά γεγονότα στην Ευρώπη την περίοδο 1998-2008. (Πηγή: EEA, 2008, p. 96).	2
Εικόνα 2.2.1: Τυπική διαδικασία απορροής μιας λεκάνης, κατά τη μοντελοποίηση στο HEC-HMS 4.2.1. (Πηγή: USACE, 2000, p. 12).	16
Εικόνα 2.4.1: Ορισμός 2D υπολογιστικού πλέγματος για τη μοντελοποίηση στο HEC-RAS 5.0.3 (Πηγή: USACE, 2016b, p. 3-5).	20
Εικόνα 3.1.1: Θέση της υδρολογικής λεκάνης της Αλμυρίδας. (Πηγή: Google Hybrid)	23
Εικόνα 3.2.1: Χάρτης υδρολογικής λεκάνης Αλμυρίδας & υδρογραφικού της δικτύου, βάσει Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DTM) υψηλής ανάλυσης, 5m x 5m (Σχεδιασμός σε ArcGIS 10.1).	24

Εικόνα 3.5.1: Χρήσεις γης στην υδρολογική λεκάνη της Αλμυρίδας. (Πηγή: CORINE Land Cover & επεξεργασία μέσω ArcGIS 10.1).....	27
Εικόνα 3.6.1: Περιοχές αιφνίδιων πλημμυρικών συμβάντων στις 16-17-18 Οκτωβρίου 2006. (Πηγή: Koutroulis et al., 2015)	28
Εικόνα 4.1.1: Λεκάνη Απορροής Αλμυρίδας απαρτιζόμενη από την υπολεκάνη R10W10 και την έξοδο του συστήματος Outlet (HEC-HMS 4.2.1).	30
Εικόνα 4.1.2: Επιλογή ονόματος διαδρομής (Pathname) από το DSS αρχείο (HEC-HMS 4.2.1).	31
Εικόνα 4.1.3: Σύνδεση λεκάνης R10W10 στα κατάντη με έξοδο συστήματος, επιφάνεια λεκάνης & μέθοδοι μοντελοποίησης βροχοπτώτικού γεγονότος (HEC-HMS 4.2.1).	33
Εικόνα 4.1.4: Μετεωρολογικό μοντέλο λεκάνης Αλμυρίδας (HEC-HMS 4.2.1).....	38
Εικόνα 4.1.5: Ένταξη υπολεκάνης R10W10 στο μετεωρολογικό μοντέλο λεκάνης Αλμυρίδας (HEC-HMS 4.2.1).	38
Εικόνα 4.1.6: Χρονική μετατόπιση πλέγματος μετεωρολογικών δεδομένων (HEC-HMS 4.2.1).	38
Εικόνα 4.1.7: Χρονικό πλαίσιο μοντελοποίησης βροχοπτώτικού συμβάντος (HEC-HMS 4.2.1).	39
Εικόνα 4.2.1.1: Μέθοδος Απωλειών για τη λεκάνη της Αλμυρίδας (HEC-HMS 4.2.1).	42
Εικόνα 4.2.1.2: Μέθοδος Υπολογισμού Επιφανειακής Απορροής για τη λεκάνη της Αλμυρίδας (HEC-HMS 4.2.1).	42
Εικόνα 4.2.1.3: Μέθοδος Βασικής Απορροής λεκάνης Αλμυρίδας (HEC-HMS 4.2.1).	42
Εικόνα 4.3.1: Χάρτης κεντρικής γραμμής ρέματος, αριστερής-δεξιάς όχθης ρέματος & διατομών, βάσει Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DTM) υψηλής ανάλυσης, 5m x 5m (Σχεδιασμός σε ArcGIS 10.1).....	44
Εικόνα 4.4.1.1: Κάτοψη γεωμετρίας ρέματος Αλμυρίδας, όπως προέκυψε από το DTM υψηλής ανάλυσης, 5m x 5m, και σχεδιασμό σε ArcGIS 10.1 (HEC-RAS 5.0.3).	45
Εικόνα 4.4.1.2: Γεωμετρικά στοιχεία ανωδομής γέφυρας στη Χ.Θ. 139.6015 ρέματος Αλμυρίδας (HEC-RAS 5.0.3).	46
Εικόνα 4.4.1.3: Παράμετροι ροής στη διατομή της γέφυρας (HEC-RAS 5.0.3).	46
Εικόνα 4.4.1.4: Διατομές ανάντη & κατάντη γέφυρας στη Χ.Θ. 139.6015 ρέματος Αλμυρίδας (HEC-RAS 5.0.3).....	47
Εικόνα 4.4.1.5: Κάτοψη γεωμετρίας ρέματος Αλμυρίδας, συμπεριλαμβανομένης της γέφυρας στη θέση 139.6015 πριν την εκβολή (HEC-RAS 5.0.3).....	47

Εικόνα 4.4.1.6: Ορισμός του WGS_1984_World_Mercator ως γεωαναφορά προβολής στον RAS Mapper (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	48
Εικόνα 4.4.1.7: Επιλογή του .flt αρχείου (raster2float) για εισαγωγή στον RAS Mapper (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	48
Εικόνα 4.4.1.8: Δημιουργία μοντέλου εδάφους στον RAS Mapper (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	48
Εικόνα 4.4.1.9: Μοντέλο εδάφους και γεωμετρία κάταντες τμήματος ρέματος Αλμυρίδας, γεωαναφερόμενα σε WGS_1984_World_Mercator, στον RAS Mapper (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	49
Εικόνα 4.4.1.10: Ορισμός Google Hybrid ως χάρτης υποβάθρου στον RAS Mapper (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	50
Εικόνα 4.4.1.11: Χάρτης μελετούμενου τμήματος ρέματος Αλμυρίδας στον RAS Mapper (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	50
Εικόνα 4.4.2.1: Οριακές συνθήκες μη μόνιμης ροής μελετώμενου τμήματος ρέματος Αλμυρίδας (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	51
Εικόνα 4.4.2.2: Οριακή συνθήκη υδρογραφήματος ροής στην ανάντη διατομή (946.7084) του μελετώμενου τμήματος ρέματος Αλμυρίδας (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	53
Εικόνα 4.4.2.3: Οριακή συνθήκη κανονικού βάθους στην κατάντη διατομή (23.14916) του μελετώμενου τμήματος ρέματος Αλμυρίδας (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	53
Εικόνα 4.4.2.4: Αρχική συνθήκη μη μόνιμης ροής στην ανάντη διατομή (946.7084) του μελετώμενου τμήματος ρέματος Αλμυρίδας (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	54
Εικόνα 4.4.3.1: Ανάλυση μη μόνιμης ροής (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	55
Εικόνα 4.4.3.2: Ορισμός ελάχιστης τιμής Froude & εκθέτη συντελεστή μείωσης αριθμού Froude (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	56
Εικόνα 4.4.3.3: Ορισμός επαναλήψεων έπειτα από τις οποίες ξεκινά η υποδιαίρεση χρόνου & χρονικού βήματος επαναλήψεων (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	56
Εικόνα 4.4.3.4: Επιλογές υπολογισμών & όρια ανεκτικότητας για μη μόνιμη 1D ροή (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	57
Εικόνα 4.4.3.5: Ορισμός ρυθμού απωλειών λόγω τριβής για τη γέφυρα (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>). ...	58
Εικόνα 4.5.1.1: Κάτοψη 1D ροής & διατομών ρέματος Αλμυρίδας, όπως προέκυψε από το DTM υψηλής ανάλυσης, 5m x 5m, με πλάτος ρέματος μεταξύ των οχθών (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	59
Εικόνα 4.5.2.1: Σχεδιασμός 2D Επιφανειών ροής πλημμυρικού κύματος, βάσει του DTM υψηλής ανάλυσης 5m x 5m (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	60
Εικόνα 4.5.2.2: Σχεδιασμός Γραμμών διαχωρισμού (Breaklines) -ροζ πολύγωνα-, βάσει του DTM υψηλής ανάλυσης 5m x 5m (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	61

Εικόνα 4.5.3.1: Ορισμός αριθμού Manning & λοιπών παραμέτρων για 2DFlowArea_L (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	62
Εικόνα 4.5.3.2: Ορισμός αριθμού Manning & λοιπών παραμέτρων για 2DFlowArea_R (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	62
Εικόνα 4.5.3.3: Ορισμός πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων για κάθε 2D Επιφάνεια ροής (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	62
Εικόνα 4.5.3.4: Ενίσχυση γραμμών διαχωρισμού περιμετρικά με πεπερασμένα στοιχεία (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	62
Εικόνα 4.5.3.5: Πεπερασμένα στοιχεία της 2D Επιφάνειας ροής αριστερά (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	63
Εικόνα 4.5.3.6: Πεπερασμένα στοιχεία της 2D Επιφάνειας ροής δεξιά (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	63
Εικόνα 4.5.3.7: Κάτοψη πεπερασμένων στοιχείων 2D Επιφανειών ροής αριστερά & δεξιά της 1D ροής του ρέματος (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	63
Εικόνα 4.5.3.8: Μεγέθυνση των πεπερασμένων στοιχείων τμημάτων των 2D Επιφανειών ροής αριστερά & δεξιά της 1D ροής του ρέματος (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	64
Εικόνα 4.5.4.1: Πλευρική δομή κατά μήκος αριστερής όχθης, από Χ.Θ. 946 έως 143 πριν τη θέση της γέφυρας (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	65
Εικόνα 4.5.4.2: Υψομετρικά δεδομένα ανά θέσεις σταθμών πλευρικής δομής κατά μήκος αριστερής όχθης, από Χ.Θ. 946 έως 143 πριν τη θέση της γέφυρας (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	66
Εικόνα 4.5.4.3: Πλευρική δομή κατά μήκος δεξιάς όχθης, από Χ.Θ. 945 έως Χ.Θ. 143 πριν τη θέση της γέφυρας (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	66
Εικόνα 4.5.4.4: Υψομετρικά δεδομένα ανά θέσεις σταθμών πλευρικής δομής κατά μήκος δεξιάς όχθης, από Χ.Θ. 945 έως Χ.Θ. 143 πριν τη θέση της γέφυρας (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	67
Εικόνα 4.5.4.5: Πλευρική δομή κατά μήκος αριστερής όχθης, από Χ.Θ. 117 μετά τη θέση της γέφυρας έως Χ.Θ. 23.14916 (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	67
Εικόνα 4.5.4.6: Υψομετρικά δεδομένα ανά θέσεις σταθμών πλευρικής δομής κατά μήκος αριστερής όχθης, από Χ.Θ. 117 μετά τη θέση της γέφυρας έως Χ.Θ. 23.14916 (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	68
Εικόνα 4.5.4.7: Πλευρική δομή κατά μήκος δεξιάς όχθης, από Χ.Θ. 116.9 μετά τη θέση της γέφυρας έως Χ.Θ. 23.14916 (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	68
Εικόνα 4.5.4.8: Υψομετρικά δεδομένα ανά θέσεις σταθμών πλευρικής δομής κατά μήκος δεξιάς όχθης, από Χ.Θ. 116.9 μετά τη θέση της γέφυρας έως Χ.Θ. 23.14916 (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	69

Εικόνα 4.5.4.9: Σχεδιασμός πλευρικών δομών (lateral structures) σύνδεσης 1D ροής του ρέματος με τις 2D επιφάνειες ροής (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	71
Εικόνα 4.5.4.10: Μεγέθυνση της κάτοψης τμημάτων των πλευρικών δομών (lateral structures) σύνδεσης 1D ροής του ρέματος με τις 2D επιφάνειες ροής (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	71
Εικόνα 4.5.5.1: Αεροφωτογραφία περιοχής μελέτης & γεωμετρία κάταντες τμήματος ρέματος Αλμυρίδας, στον RAS Mapper (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	72
Εικόνα 4.5.7.1: Ανάλυση μη μόνιμης ροής (<i>HEC-RAS 5.0.3</i>).	74
Εικόνα 4.5.7.2: Επιλογές υπολογισμών & όρια ανεκτικότητας για μη μόνιμη 1D ροή (<i>HEC- RAS 5.0.3</i>).	75
Εικόνα 4.5.7.3: Επιλογές υπολογισμών & όρια ανεκτικότητας για μη μόνιμη 2D ροή (<i>HEC- RAS 5.0.3</i>).	77
Εικόνα 4.5.7.4: Επιλογές υπολογισμών & όρια ανεκτικότητας για μη μόνιμη 1D/2D ροή (<i>HEC- RAS 5.0.3</i>).	78
Εικόνα 5.1.1: Συνολικά αποτελέσματα μοντελοποίησης, Global Summary (<i>HEC-HMS 4.2.1</i>).	79
Εικόνα 5.1.2: Αποτελέσματα Αιχμής (Peak) λεκάνης Αλμυρίδας (<i>HEC-HMS 4.2.1</i>).	79
Εικόνα 5.1.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου για Βροχόπτωση (ροζ χρώμα), Νερά που δεν κατεισδύουν στο έδαφος (μουσταρδί χρώμα), Διηθούμενα νερά (πράσινο χρώμα) (<i>HEC-HMS 4.2.1</i>).	80
Εικόνα 5.1.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου για Βασική Απορροή (<i>HEC-HMS 4.2.1</i>).	80
Εικόνα 5.1.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου για τη Βροχόπτωση, τις Απώλειες, την Εκροή και τη Βασική απορροή υποβάθρου λεκάνης Αλμυρίδας (<i>HEC-HMS 4.2.1</i>).	81
Εικόνα 5.1.6: Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου για την εκροή στα Κατάντη (<i>HEC-HMS 4.2.1</i>).	82
Εικόνα 5.1.7: Αποτελέσματα Αιχμής στην έξοδο του συστήματος (<i>HEC-HMS 4.2.1</i>).	82
Εικόνα 5.2.1: Διατομή 254.2505, ελέγχου ύψους απορρέοντος ύδατος στην αιχμή της πλημμύρας (<i>1D HEC-RAS 5.0.3</i>).	83
Εικόνα 5.2.2: Διατομή 139.6015 BR U ρέματος στη θέση της γέφυρας στα ανάντη, κατά την πλημμυρική αιχμή (<i>1D HEC-RAS 5.0.3</i>).	83
Εικόνα 5.2.3: Διατομή 139.6015 BR D ρέματος στη θέση της γέφυρας στα κατάντη, κατά την πλημμυρική αιχμή (<i>1D HEC-RAS 5.0.3</i>).	84
Εικόνα 5.2.4: Κατά μήκος τομή ρέματος Αλμυρίδας κατά την πλημμυρική αιχμή (<i>1D HEC- RAS 5.0.3</i>).	84

Εικόνα 5.2.5: 3D άποψη του ρέματος Αλμυρίδας κατά την πλυμμηρική αιχμή (<i>1D HEC-RAS 5.0.3</i>).	85
Εικόνα 5.2.6: Συνολικά αποτελέσματα 1D υδραυλικής μοντελοποίησης ρέματος Αλμυρίδας (<i>1D HEC-RAS 5.0.3</i>).	87
Εικόνα 5.2.7: Κάτοψη έκτασης πλημμύρας ρέματος Αλμυρίδας κατά την 1D μοντελοποίηση (<i>1D HEC-RAS 5.0.3</i>).	88
Εικόνα 5.2.8: Μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού γεγονότος σε Κάτοψη κατά την 1D μοντελοποίηση (<i>1D HEC-RAS 5.0.3</i>).	88
Εικόνα 5.3.1: Αποτελέσματα 1D/2D υδραυλικής μοντελοποίησης της 1D ροής ρέματος Αλμυρίδας (<i>1D/2D HEC-RAS 5.0.3</i>).	89
Εικόνα 5.3.2: Διατομή 139.6015 BR U, 1D ροής ρέματος, στη θέση της γέφυρας στα ανάντη, κατά την πλημμυρική αιχμή (<i>1D/2D HEC-RAS 5.0.3</i>).	90
Εικόνα 5.3.3: Διατομή 139.6015 BR D, 1D ροής ρέματος, στη θέση της γέφυρας στα κατάντη, κατά την πλημμυρική αιχμή (<i>1D/2D HEC-RAS 5.0.3</i>).	90
Εικόνα 5.3.4: Κατά μήκος τομή 1D ροής ρέματος Αλμυρίδας κατά την πλημμυρική αιχμή (<i>1D/2D HEC-RAS 5.0.3</i>).	91
Εικόνα 5.3.5: Έκταση πλημμύρας ρέματος Αλμυρίδας από την 1D/2D υδραυλική μοντελοποίηση (<i>1D/2D HEC-RAS 5.0.3</i>).	92
Εικόνα 5.3.6: Μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού κύματος σε Κάτοψη, από την 1D/2D υδραυλική μοντελοποίηση (<i>1D/2D HEC-RAS 5.0.3</i>).	92
Εικόνα 5.3.7: Διάρκεια πλημμύρας από την έναρξη της 1D/2D υδραυλικής προσομοίωσης (<i>1D/2D HEC-RAS 5.0.3</i>).	93
Εικόνα 5.3.8: Ωρα άφιξης του πλημμυρικού κύματος στις επιφάνειες ροής κατά την 1D/2D υδραυλική μοντελοποίηση (<i>1D/2D HEC-RAS 5.0.3</i>).	94

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του προβλήματος

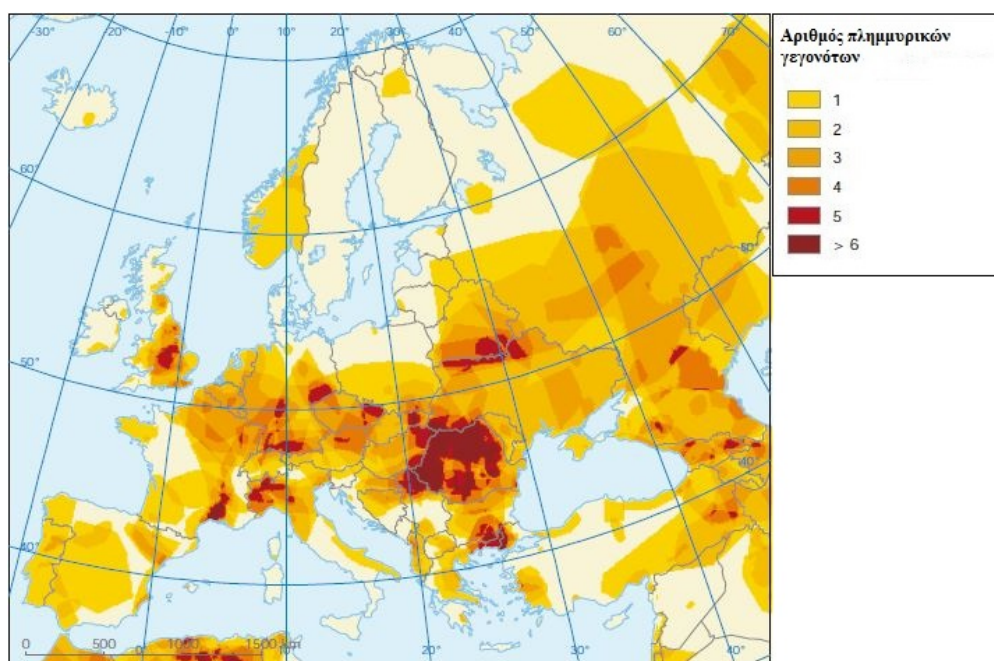
Εδώ και αρκετά χρόνια, πολλοί επιστήμονες σε διεθνές επίπεδο μελετούν τις ποτάμιες πλημμύρες που προκαλούνται από αιφνίδια βροχοπτώτικα γεγονότα, και είναι υπεύθυνες αρκετά συχνά για σημαντικές καταστροφές.

Κατά την εκδήλωση έντονης βροχόπτωσης, ιδίως σε κορεσμένο, είτε παγωμένο έδαφος, είναι δυνατή η δημιουργία αιφνίδιας πλημμύρας. Υπό αυτές τις συνθήκες κατακρήμνισης, το νερό που δεν μπορεί να απορροφηθεί, απορρέει επιφανειακά και συσσωρεύεται ταχέως σε ποταμούς ή ρέματα. Τα αιφνίδια βροχοπτώτικα συμβάντα είναι συχνά συνδεδεμένα με μεταγωγικά σύννεφα, καλύπτουν μικρές λεκάνες, και είναι βραχύβια, αλλά πολύ έντονα. Η τοπογραφία, οι συνθήκες εδάφους, καθώς και η φυτοκάλυψη αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τη γένεση πλημμυρών. Ταυτόχρονα, η αστικοποίηση, η αποψίλωση δασών και η γενικότερη ανθρωπογενής παρέμβαση στο περιβάλλον αυξάνουν την επιφανειακή απορροή των κατακρημνισμάτων, περιορίζοντας συνάμα τα υδραυλικά κανάλια απορροής, προκαλώντας ενίοτε την υπερχείλισή τους, με αποτέλεσμα την πρόκληση σημαντικών πλημμυρικών γεγονότων.

Τα τελευταία χρόνια, οι καταστροφικές πλημμύρες παρουσιάζουν αυξητική τάση τόσο ως προς τη συχνότητα, όσο και ως προς τη σφοδρότητα, σε πολλές περιοχές του κόσμου ([Kundzewicz and Schellnhuber, 2004](#)). Η συνεχής πληθυσμιακή αύξηση, καθώς και οι έντονες οικονομικές δραστηριότητες των κοινωνιών έχει ως αποτέλεσμα οι άνθρωποι και οι περιουσίες τους να κινδυνεύουν από σημαντικές καταστροφές σε περίπτωση πληγής από πλημμύρες ([Kang et al., 2005](#)).

Οι πλημμύρες αποτελούν την πιο συνήθη φυσική καταστροφή στην Ευρώπη. Από το 1990, έχουν καταγραφεί 259 σημαντικές ποτάμιες πλημμύρες στην ευρωπαϊκή ήπειρο, από τις οποίες οι 165 είναι καταγεγραμμένες μετά το 2000 ([EEA, 2008, p. 96](#)). Επτά από τα είκοσι σπουδαιότερα πλημμυρικά γεγονότα που έχουν καταγραφεί ποτέ στην Ευρώπη, πραγματοποιήθηκαν κατά τη δεκαετία 2000-2009. Αυτή τη δεκαετία έχουν σημειωθεί περισσότερες από 1000 απώλειες ανθρώπινων ζωών λόγω των πλημμυρών στην Ευρώπη, ενώ έχουν πληγεί περίπου 3.4 εκατ. άνθρωποι ([Jakubicka et al., 2010, p. 14](#)).

Σημαντικές είναι οι καταστροφές οι οποίες καταγράφηκαν εξαιτίας των μείζονων γεγονότων πλημμύρας των τελευταίων χρόνων στην Ευρώπη. Οι πλημμύρες του 1997 στην Πολωνία και στην Τσεχική Δημοκρατία ήταν υπεύθυνες για οικονομικές απώλειες της τάξης των 5.2 δισ. Ευρώ. Το 2000 παρουσιάστηκαν ζημιές σε Ιταλία, Γαλλία και Ελβετία ύψους 9.2 δισ. Ευρώ. Το 2002 σημειώθηκαν πλημμύρες στην Αυστρία, στην Τσεχική Δημοκρατία, στη Γερμανία, στη Σλοβακία και στην Ουγγαρία, οι οποίες οδήγησαν σε συνολικές ζημιές περίπου 16.8 δισ. Ευρώ, ενώ οι αποζημιώσεις ανήλθαν περίπου σε 3.4 δισ. Ευρώ. Για το Ηνωμένο Βασίλειο, το κόστος των πλημμυρών το καλοκαίρι του 2007 εκτιμάται ότι ανήλθε σε 4.3 δισ. Ευρώ. Μελλοντικές εκτιμήσεις αναφορικά με το οικονομικό κόστος των παράκτιων πλημμυρών για την Ευρώπη το 2080, υποδεικνύουν ότι αυτό θα κυμαίνεται από 12-18 δισ. Ευρώ ετησίως, υποθέτοντας ότι δε λαμβάνονται μέτρα προσαρμογής (EEA, 2008, p. 15, 170, 173).



Εικόνα 1.1.1: Πλημμυρικά γεγονότα στην Ευρώπη την περίοδο 1998-2008. (Πηγή: EEA, 2008, p. 96).

Σε εθνικό επίπεδο, σύμφωνα με τη Διεθνή Βάση Δεδομένων για τις Καταστροφές (Emergency Events Database – EM-DAT), η Πελοπόννησος επλήγη 6 φορές από πλημμύρα τη δεκαετία 2000-2009 (Jakubicka *et al.*, 2010, p. 18). Αναφορικά με την Κρήτη, έπειτα από επεξεργασία ιστορικών δεδομένων, οι περιοχές στις οποίες έχουν σημειωθεί παρελθοντικά σημαντικά γεγονότα πλημμυρών είναι οι χαμηλές παρόχθιες εκτάσεις ρεμάτων ευρύτερης περιοχής Χανίων, η χαμηλή ζώνη Ηρακλείου, η περιοχή της Ιεράπετρας, καθώς και η χαμηλή περιοχή του οροπεδίου του Λασιθίου. Πλημμυρικά γεγονότα έχουν επίσης καταγραφεί στην περιοχή του Βάμου Χανίων, αλλά και στη χώρα Σφακίων (ΕΓΥ, 2012, σ. 94).

Τη δεκαετία 2000-2009 παρουσιάζεται εποχικότητα στην εκδήλωση πλημμυρών στην Ευρώπη. Συγκεκριμένα, από τις 149 πλημμυρικές καταστροφές που καταγράφηκαν από την EM-DAT, και αφορούν τα 27 κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι 58 εμφανίστηκαν τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο. Τον Μάρτιο επίσης σημειώθηκαν 19 πλημμύρες, ενώ το Νοέμβριο ο αριθμός πλημμυρών που καταγράφηκαν ήταν 15 (Jakubicka *et al.*, 2010, p. 19).

Η παρατηρούμενη αύξηση των άμεσων καταστροφών εξαιτίας των πλημμυρών, τα τελευταία χρόνια, μπορεί να οφείλεται σε αλλαγές στους μετεωρολογικούς παράγοντες που τις καθορίζουν, ή σε αλλαγές στις χρήσεις γης και στις κοινωνικοοικονομικές εξελίξεις (Elmer *et al.*, 2012). Στην Ευρώπη, οι αιχμές πλημμυρών με περιόδους επαναφοράς άνω των 100 ετών, αναμένεται να διπλασιαστούν σε συχνότητα, κατά μέσο όρο, μέσα στις επόμενες 3 δεκαετίες (Alfieri *et al.*, 2015). Η συγκρότηση ενός ολοκληρωμένου σχεδίου αξιολόγησης των ζημιών και διαχείρισης των κινδύνων λόγω πλημμύρας είναι επιτακτικής σημασίας.

1.2 Αντικείμενο έρευνας

Ο σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση των επιπτώσεων σε μια μικρής έκτασης υδρολογική λεκάνη, μέσω της υδρολογικής ανάλυσης ενός αιφνίδιου πλημμυρικού γεγονότος που έλαβε χώρα στις 17/10/2006, καθώς και της μοντελοποίησης του υδραυλικού κύματος στα κατάντη της περιοχής μελέτης, συνδυάζοντας εργαλεία της HEC.

Η προσομοίωση του αιφνίδιου πλημμυρικού συμβάντος βροχόπτωσης θα λάβει χώρα με το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS 4.2.1. Θα πραγματοποιηθεί υπολογισμός των υδρολογικών παραμέτρων της λεκάνης για τις οποίες διατίθενται στοιχεία -από την τοπογραφία, υδρογεωλογία και χρήσεις γης της λεκάνης απορροής- ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι θα βαθμονομηθούν, από βιβλιογραφική ανασκόπηση. Τα βροχοπτώτικα δεδομένα του αιφνίδιου συμβάντος θα εισαχθούν σε κάρναβο, ενώ οι υδρολογικές παράμετροι θα εισαχθούν σε κάθε ένα πλεγματικό κελί. Θα λάβει χώρα ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου, ώστε να διαπιστωθεί ποιες από τις βαθμονομούμενες παραμέτρους αλλάζουν το χρόνο εμφάνισης της μέγιστης απορροής, ενώ ταυτόχρονα θα ελεγχθούν ποιες από τις παραμέτρους επηρεάζουν το μέγεθος της μέγιστης απορροής. Ως κριτήριο βαθμονόμησης των παραμέτρων θα είναι η επαλήθευση του μοντέλου, με τη μέτρηση ύψους ροής των 2m, σε διατομή που ελέγχθηκε στο πεδίο, στο πέρας της πλημμύρας.

Η ανάλυση του πλημμυρικού συμβάντος στα κατάντη του ρέματος της Αλμυρίδας θα πραγματοποιηθεί, μέσω προσομοίωσης της πλημμύρας, με το υδραυλικό 1D μοντέλο HEC-RAS 5.0.3, καθώς και με ένα ενιαίο υδραυλικό 1D/2D μοντέλο, το 1D/2D HEC-RAS 5.0.3 μοντέλο, για τις ανάγκες των οποίων θα χρησιμοποιηθεί Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DTM) υψηλής ανάλυσης, 5m x 5m. Με τα μοντέλα προσομοίωσης υδραυλικού κύματος θα προσδιοριστεί η έκταση που καταλαμβάνει η πλημμύρα, καθώς και διάφορες υδραυλικές παράμετροι όπως το ύψος και η ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος στις διάφορες διατομές του ρέματος, ενώ ακολούθως θα πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων τους.

Μέσω των μοντελοποιήσεων που θα πραγματοποιηθούν με τα εργαλεία της HEC, θα επισημανθούν οι πλημμυρικές επιπτώσεις του αιφνίδιου πλημμυρικού συμβάντος, και συγχρόνως θα γίνουν προτάσεις για την ελαχιστοποίηση κινδύνων από μελλοντικές πλημμύρες.

Η κατάληξη της έρευνας είναι σε συμπεράσματα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος.

1.3 Δομή μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας περιγράφεται το προς επίλυση πρόβλημα που έχει συγκεντρώσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας, και παρουσιάζεται ο σκοπός αυτής της εργασίας και το αντικείμενο της έρευνας. Επιπλέον, πραγματοποιείται ανάλυση της δομής της παρούσας εργασίας, επισημαίνοντας τα σπουδαιότερα σημεία ανά κεφάλαιο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του θεωρητικού πλαισίου στο οποίο βασίζεται η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία. Δίδονται οι έννοιες της πλημμύρας και των επιπτώσεων από αιφνίδια πλημμυρικά γεγονότα, ενώ παράλληλα συνίσταται επισκόπηση δημοσιευμένων εργασιών που αφορούν την εκτίμηση των πλημμυρικών επιπτώσεων, καθώς και τη διαχείριση της επικινδυνότητας αιφνίδιων συμβάντων πλημμύρας.

Στο τρίτο κεφάλαιο αποδίδεται με λεπτομέρεια η χωροθέτηση της περιοχής μελέτης, καθώς και τα γεωμορφολογικά, υδρογεωλογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά της, αλλά και οι χρήσεις γης. Ταυτόχρονα, παρουσιάζεται το αιφνίδιο πλημμυρικό γεγονός μελέτης στην περιοχή της Αλμυρίδας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται λεπτομερώς η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την εκτίμηση των επιπτώσεων στην μικρής έκτασης υδρολογική λεκάνη, μέσω της υδρολογικής

ανάλυσης του αιφνίδιου πλημμυρικού συμβάντος, καθώς και της μοντελοποίησης του υδραυλικού κύματος στα κατάντη της περιοχής μελέτης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναπαράγονται τα αποτελέσματα που έπονται της μεθοδολογίας για το μελετώμενο ακραίο πλημμυρικό συμβάν.

Στο έκτο κεφάλαιο εκτίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, μέσω της μελέτης και εφαρμογής των εργαλείων της HEC, ενώ παράλληλα γίνονται κάποιες προτάσεις για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στο περιβάλλον από μελλοντικές πλημμύρες.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1 Πλημμύρες

2.1.1 Ορισμοί

Σύμφωνα με την [Οδηγία 2007/60/EK](#) του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, ως «πλημμύρα» ορίζεται η προσωρινή κάλυψη του εδάφους από νερό, το οποίο υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν καλύπτεται από νερό. Ο ορισμός αυτός περιλαμβάνει πλημμύρες από ποτάμια, ορεινούς χείμαρρους, υδατορεύματα εφήμερης ροής της Μεσογείου, καθώς και θαλάσσιες πλημμύρες σε παράκτιες περιοχές.

Οι πλημμύρες είναι φυσικά φαινόμενα προερχόμενα κυρίως από μετεωρολογικές καταστάσεις, και λαμβάνουν χώρα κατά κύριο λόγο όταν το φυσικό ή ανθρωπογενές σύστημα αποστράγγισης αδυνατεί να διοχετεύσει τον όγκο νερού που παράγεται από τη βροχόπτωση. Τα φυσικά φαινόμενα που είναι υπεύθυνα για πλημμύρες δεν είναι διαχειρίσιμα, ωστόσο δύναται να υπάρξει τροποποίηση των γεωλογικών, γεωμορφολογικών και εδαφολογικών συνθηκών της λεκάνης απορροής μέσω ανθρωπογενούς παρέμβασης ([Μαμάσης, 2007](#)).

Κατά την [Οδηγία 2007/60/EK](#) του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, ως «κίνδυνος πλημμύρας» ορίζεται η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί μια πλημμύρα σε συνδυασμό με τις δυνητικές αρνητικές συνέπειες που θα προκληθούν στην ανθρώπινη υγεία, στο περιβάλλον, στην πολιτιστική κληρονομιά και στις συνδεδεμένες με την πλημμύρα οικονομικές δραστηριότητες.

2.1.2 Αιτίες πλημμυρογένεσης

Τα αίτια που δύναται να προκαλέσουν πλημμύρες διακρίνονται σε φυσικά και ανθρωπογενή.

❖ Φυσικές αιτίες

Γενεσιουργά αίτια των πλημμυρών μπορούν να είναι αρκετοί φυσικοί παράγοντες, και συγκεκριμένα: (i) μετεωρολογικά φαινόμενα, όπως οι τοπικές βροχοπτώσεις και η τήξη του χιονιού και του πάγου, (ii) η υπερχειλίση των ορίων ενός ποταμού, (iii) παλιρροιακά φαινόμενα που δύνανται να προκαλέσουν ανύψωση της στάθμης της θάλασσας, και κατά συνέπεια εισροή της θάλασσας στη χέρσο ([Μαμάσης, 2013](#)), (iv) γεωλογικά φαινόμενα, όπως οι κατολισθήσεις ([Hilker et al., 2009](#)), (v) η διατάραξη της φυσικής απορροής στα κατάντη ενός ποταμού μέσω μπλοκαρισμένων κορμών δέντρων, λόγω φραγής του από φερτά υλικά

(Gibling *et al.*, 2010), (vi) η τοπογραφία και γεωμορφολογία μιας περιοχής (Youssef *et al.*, 2011), καθώς και η υγρασία του εδάφους (Wanders *et al.*, 2014), οι οποίες καθορίζουν την υδάτινη απορροή και τη μεταφορά φερτών υλικών (Τσιτσιλώνης, 2008, σ. 15), (vii) το κλίμα, που αποτελεί παράγοντα καθορισμού της συχνότητας, διάρκειας και έντασης των βροχοπτώσεων (Τσιτσιλώνης, 2008, σ. 15; Youssef *et al.*, 2011), και (viii) η αλλαγή χρήσεων γης των λεκανών απορροής (Youssef *et al.*, 2011) και η φυτοκάλυψη, οι οποίες έχουν ουσιαστική επίδραση στη διάβρωση του εδάφους και στην απορροή των υδάτων (Τσιτσιλώνης, 2008, σ. 15).

❖ Ανθρωπογενείς αιτίες

Εκτός από τους προαναφερθέντες φυσικούς παράγοντες γένεσης πλημμυρών, υπάρχουν επίσης ανθρωπογενή αίτια υπεύθυνα για την πρόκληση σοβαρών πλημμυρών, όπως: (I) η αστικοποίηση και ελάττωση του πρασίνου, οι οποίες συντελούν στην αύξηση των πλημμυρικών αιχμών, (II) η αποψίλωση δασικών εκτάσεων μιας λεκάνης απορροής, η οποία επιταχύνει την απορροή και συντελεί στη διάβρωση του εδάφους (http://edu.chi.civil.ntua.gr/site-LESSONS/HTML_PLIMIRES/PERIEXOMENO/Prostheteis_simioseis_GREECE.htm; Μαμάσης, 2013), (III) η ευθυγράμμιση του ρου των ποταμών, (IV) η εξάλειψη των φυσικών πεδίων κατάκλυσης, (V) η κατασκευή δομών και τεχνικών σε επικίνδυνα πεδία κατάκλυσης, (VI) η αστοχία φραγμάτων (Μαμάσης, 2013) και αναχωμάτων, (VII) ο κακός σχεδιασμός ή η ανεπαρκής συντήρηση του αποστραγγιστικού δικτύου (Μαμάσης, 2013; Yang *et al.*, 2015), (VIII) η εξαφάνιση μέρους του υδρογραφικού δικτύου εντός των πόλεων, καθότι τα ρέματα συχνά καλύπτονται από δομικά έργα και έργα υποδομής, οδηγώντας σε μεγάλες καταστροφές και ενίοτε σε απώλειες ανθρώπινων ζωών, (IX) η ανεπάρκεια των εναπομεινάντων ρεμάτων στις πόλεις να αναλάβουν την αυξημένη απορροή, έχοντας ταυτόχρονα μειωμένη διατομή, αφού στην πλειοψηφία τους έχουν δομηθεί παράνομα, (X) η ανεπαρκής συντήρηση των δικτύων, και ταυτόχρονα ο ελλιπής καθαρισμός των φρεατίων (http://edu.chi.civil.ntua.gr/site-LESSONS/HTML_PLIMIRES/PERIEXOMENO/Prostheteis_simioseis_GREECE.htm), και (XI) η ρίψη μπάζων σε κοίτες ποταμών (Τσιτσιλώνης, 2008, σ. 15).

2.1.3 Κατηγορίες πλημμυρών

Οι πλημμύρες που προκαλούνται από υδρομετεωρολογικούς παράγοντες μπορούν να διακριθούν σε: (i) αιφνίδιες πλημμύρες (flash floods), (ii) ποτάμιες πλημμύρες (riverine floods), (iii) παράκτιες πλημμύρες (coastal floods), και (iv) πλημμύρες υπόγειων υδάτων (groundwater flooding). Παρακάτω θα διεξαχθεί λεπτομερής ανάλυση των κατηγοριών αυτών.

ι) Αιφνίδιες πλημμύρες (flash floods)

Οι αιφνίδιες πλημμύρες είναι ταχείες και ορμητικές πλημμύρες σε ένα υδατόρεμα ή ποταμό, που λαμβάνουν χώρα ξαφνικά, μέσα σε μερικά λεπτά έως 6 ώρες μετά το βροχοπτώτικό συμβάν (Hapuarachchi *et al.*, 2011; Gourley *et al.*, 2017; Terti *et al.*, 2017). Συνήθως συμβαίνουν πάνω από μικρές λεκάνες απορροής, της τάξης των μερικών εκατοντάδων km². Αποτελούν την πιο επικίνδυνη κατηγορία πλημμυρών, καθώς μπορούν να συμβούν έπειτα από μικρή ή και καθόλου προειδοποίηση, περιορίζοντας τον χρόνο πρόβλεψης για αποτελεσματική απόκριση (προετοιμασία και εκκένωση). Συχνά συνδέονται με ταχεία αύξηση της στάθμης των υδάτων, συνοδευόμενη από υψηλών ταχυτήτων κινούμενα νερά, ικανών να παρασύρουν ανθρώπους και τα αυτοκίνητά τους από τη διαδρομή τους (Terti *et al.*, 2017). Οι αιφνίδιες πλημμύρες είναι συνδεδεμένες με μικρής διάρκειας, αλλά υψηλής έντασης κατακρημνίσεις, κυρίως μεταγωγικής προέλευσης, που λαμβάνουν χώρα τοπικά (Borga *et al.*, 2011). Συχνά συνοδεύονται από κατολισθήσεις και ροές λάσπης (Hapuarachchi *et al.*, 2011).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη γένεση αιφνιδίων πλημμυρών είναι αρκετά πολύπλοκοι και περιλαμβάνουν κυρίως τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης (ένταση, διάρκεια, ποσότητα, χωροχρονική κατανομή), αλλά και τα φυσικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, όπως η έκταση, το μήκος της, οι απαντώμενες κλίσεις, ο τύπος εδάφους και οι χρήσεις γης, η βλάστηση, οι προγενέστερες συνθήκες κ.ά. (Rozalis *et al.*, 2010). Οι μικρές λεκάνες απορροής πλημμυρίζουν ταχέως στην περίπτωση αιφνιδίου βροχοπτώτικού γεγονότος εξαιτίας των απότομων πλαγιών, των κορεσμένων εδαφών, των αλλοιώσεων της φυσικής αποστράγγισης λόγω πυρκαγιάς, καθώς και των κατά τόπους αδιαπέρατων επιφανειών του εδάφους ή της ύπαρξης τεχνικών δομημάτων. Επομένως, συνάγεται ότι οι αστικές περιοχές είναι ιδιαίτερα ευάλωτες σε αιφνίδιες πλημμύρες, κυρίως λόγω ύπαρξης μεγάλων αδιαπέρατων περιοχών (Hapuarachchi *et al.*, 2011). Οι αιφνίδιες πλημμύρες λαμβάνουν χώρα ιδιαίτερα σε πολύπλοκες ορεογραφίες (λόφους, ορεινές περιοχές), καθώς το έντονο ανάγλυφο προάγει την ταχύτητα ροής. Ωστόσο έχουν παρατηρηθεί σημαντικές αιφνίδιες πλημμύρες σε περιοχές είτε εντελώς επίπεδες, είτε ελάχιστα επηρεασμένες από την ορεογραφία (Borga *et al.*, 2011). Η επιφανειακή απορροή υψηλών ταχυτήτων που προκαλείται σε μικρές λεκάνες, με την ταυτόχρονη μεταφορά ιζημάτων κατά τη σύντομη χρονική διάρκεια του συμβάντος, καθιστούν τις αιφνίδιες πλημμύρες σημαντική απειλή για τις ιδιοκτησίες, τις υποδομές και τις ανθρώπινες ζωές (Špitalar *et al.*, 2014).

Έχει διαπιστωθεί η επίδραση της εποχικότητας σε συμβάντα αιφνιδίων πλημμυρών, με γεγονότα να λαμβάνουν χώρα κυρίως το φθινόπωρο στην περιοχή της Μεσογείου και την

ευρύτερη περιοχή Άλπεων-Μεσογείου, συμπεριλαμβανομένης της Καταλονίας, της Κρήτης, της Γαλλίας, της Ιταλίας και της Σλοβενίας, ενώ στην ενδοχώρα της ηπειρωτικής Ευρώπης, για παράδειγμα στην Αυστρία, τη Ρουμανία και τη Σλοβακία, τα γεγονότα συμβαίνουν κατά κύριο λόγο το καλοκαίρι, υποδεικνύοντας διαφορετικές κλιματολογικές επιδράσεις. Ταυτόχρονα, η χωρική έκταση καθώς και η διάρκεια των γεγονότων είναι γενικά μικρότερες για τις αιφνίδιες πλημμύρες που περατώνονται στην ηπειρωτική Ευρώπη, σε σχέση με τις πλημμύρες που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή της Μεσογείου (Borga *et al.*, 2011).

ii) Ποτάμιες πλημμύρες (riverine floods)

Οι πλημμύρες των ποταμών είναι η συχνότερη και πιο δαπανηρή φυσική καταστροφή για την πλειοψηφία των χωρών του πλανήτη (Jongman *et al.*, 2012). Οι αργές ποτάμιες πλημμύρες λαμβάνουν χώρα σε σχετικά επίπεδες περιοχές, όπου η γη μπορεί να παραμείνει καλυμμένη με ρηχά, είτε αργά μεταβαλλόμενα ύδατα για μέρες ή και εβδομάδες. Οι ταχείες ποτάμιες πλημμύρες συμβαίνουν σε λοφώδεις και ορεινές περιοχές, και χαρακτηρίζονται από ταχεία αύξηση της στάθμης των υδάτων, συνοδευόμενη από υψηλές ταχύτητες που αναπτύσσονται στη λεκάνη απορροής ενός ποταμού, για μια σύντομη χρονική περίοδο (Liu *et al.*, 2016).

Στην Ευρώπη, οι ποτάμιες πλημμύρες συσχετίζονται με την εποχικότητα. Το καλοκαίρι και το φθινόπωρο προκαλούνται συνήθως από υψηλές ποσότητες βροχής τοπικά. Σε αυτή την περίπτωση, το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο, υπερβαίνοντας την ικανότητα απορρόφησης υδάτων, έχοντας ως αποτέλεσμα αυξημένη ορμητική επιφανειακή απορροή. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να παρατηρηθεί έπειτα από αρκετές ημέρες, ή και εβδομάδες βροχοπτώσεων. Απ' την άλλη, το χειμώνα και την άνοιξη, οι ποτάμιες πλημμύρες προκαλούνται από μεγάλες βροχοπτώσεις, και μπορούν να συνδεθούν εν μέρει με το λιώσιμο του χιονιού και των πάγων. Η αντισταθμιστική επίδραση στον κορεσμό του εδάφους μπορεί να παράγεται από κατεψυγμένο έδαφος, το οποίο εμποδίζει τη διήθηση του νερού, και κατά συνέπεια μπορεί να αυξήσει την χερσαία απορροή (Barredo, 2007).

iii) Παράκτιες πλημμύρες (coastal floods)

Οι παράκτιες πλημμύρες μπορούν να προκληθούν από μετεωρολογικές παλίρροιες και φουσκοθαλασσιές εξαιτίας τροπικών κυκλώνων, από παλιρροιακά κύματα και θαλάσσιους σεισμογενείς κυματισμούς (tsunamis). Οι παράκτιες πλημμύρες λαμβάνουν χώρα σε κανονικά ξηρές παράκτιες περιοχές, οι οποίες πλημμυρίζουν από θαλασσινό νερό (Liu *et al.*, 2016). Οι πλημμύρες από θυελλογενείς κυματισμούς είναι σπάνιες, ωστόσο όταν λαμβάνουν χώρα, δύνανται να προκαλέσουν απώλειες ανθρώπινων ζωών και περιουσιών. Τέτοιου τύπου

πλημμύρες μπορούν να συμβούν στις ακτές των θαλασσών και σε μεγάλες λίμνες (Barredo, 2007). Προκαλούνται συνήθως από έντονα συστήματα χαμηλής πίεσης και τυφώνες. Οι περισσότεροι θάνατοι από τυφώνες οφείλονται σε θυελλογενείς κυματισμούς, με πιο επικίνδυνες μελέτες περίπτωσης αυτές όπου οι θυελλογενείς κυματισμοί συνοδεύονται από υψηλή παλίρροια (Perry, 2000).

iv) Πλημμύρες υπόγειων υδάτων (groundwater flooding)

Επίμονες πλημμύρες υπόγειων υδάτων συμβαίνουν σε χαμηλά τοπογραφικά υψόμετρα και σε ζώνες εκφόρτισης. Οι μηχανισμοί που προκαλούν τις πλημμύρες των υπόγειων υδάτων είναι οι ακόλουθοι:

- ✓ επαφή με καθαρό νερό όταν ανυψώνονται τα υπόγεια ύδατα σε έναν απεριόριστο υδροφορέα και τέμνουν την επιφάνεια του εδάφους,
- ✓ πλημμυρικές διαπερατές επιφανειακές εναποθέσεις, όταν τα υπόγεια ύδατα ανεβαίνουν στην επιφάνεια του εδάφους της πλημμυρικής κοίτης ενός ποταμού,
- ✓ υπόγειες κατασκευές που δρουν ως εμπόδιο στην υπόγεια ροή, και
- ✓ αναπήδηση υπόγειων υδάτων όταν τα επίπεδά τους αυξάνονται με την παύση της άντλησης (MacDonald *et al.*, 2014).

Άλλοι λιγότεροι συνηθισμένοι τύποι πλημμυρών είναι: (a) πλημμύρες από παγιδευμένο πάγο (ice-jam floods), (b) πλημμύρες από αστοχία φραγμάτων και αναχωμάτων (dam-and levee-failure floods), και (c) πλημμύρες από συντρίμια, κατολισθήσεις και ροές λάσπης (debris, landslide and mudflow floods). Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι δευτερεύουσες αυτές κατηγορίες πλημμυρών.

a) Πλημμύρες από παγιδευμένο πάγο (ice-jam floods)

Οι πλημμύρες από παγιδευμένο πάγο λαμβάνουν χώρα σε ποτάμια μερικώς ή ολικώς κατεψυγμένα, στα οποία εάν ανέβει η στάθμη ύδατος, είναι δυνατό να δημιουργηθούν ροές πάγου που μπορούν να συσσωρευτούν σε υφιστάμενα εμπόδια στο ποτάμι, όπως σε μπλοκαρισμένους κορμούς δέντρων, είτε βάθρα γεφυρών. Ως αποτέλεσμα, το ρέον μείγμα νερού και πάγου φράσσεται κατά τόπους, δημιουργώντας επιπρόσθετες εμπλοκές. Το νερό που ακολουθεί μπορεί να υπερχειλίσει εκτός των οχθών του ποταμού, με την πλημμύρα να κινείται στα κατάντη έχοντας χαρακτηριστικά αιφνίδιας πλημμύρας, μαζί με τον επιπρόσθετο κίνδυνο του ρέοντος πάγου, ο οποίος καθοδηγούμενος από την ενέργεια του πλημμυρικού κύματος δύναται να προκαλέσει σοβαρές ζημιές σε δομές. Ένας πρόσθετος κίνδυνος για ανθρώπους

που μπορεί να παρασυρθούν από πλημμύρα που εμπεριέχει παγιδευμένο πάγο είναι η υποθερμία, η οποία λειτουργεί θανατηφόρα ταχέως (Perry, 2000).

b) Πλημμύρες από αστοχία φραγμάτων και αναχωμάτων (dam-and levee-failure floods)

Στην περίπτωση έντονων βροχοπτώτικών γεγονότων, είναι πιθανό το νερό που συγκρατείται από ένα φράγμα ή ανάχωμα να υπερπηδήσει. Λόγω της υπερπήδησης, το φράγμα δύναται να αστοχήσει ή να αποπλυθεί, έχοντας ως αποτέλεσμα τα νερά που βρίσκονται πίσω από αυτό να απελευθερωθούν, προκαλώντας αιφνίδια πλημμύρα. Η αστοχία φραγμάτων είτε αναχωμάτων μπορεί να είναι η αιτία καταστροφικών πλημμυρών για τους ανθρώπους και τις περιουσίες τους, καθώς το νερό που απελευθερώνεται έχει τεράστια ενέργεια (Perry, 2000).

c) Πλημμύρες από συντρίμια, κατολισθήσεις & ροές λάσπης (debris, landslide & mudflow floods)

Οι πλημμύρες από χαλάσματα ή κατολισθήσεις δημιουργούνται μέσω συσσώρευσης συντριμμίων, λάσπης, βράχων ή/και κορμών δέντρων σε ένα κανάλι, το οποίο λειτουργεί ως προσωρινό φράγμα, επιτρέποντας τη δημιουργία πλημμύρας στα ανάντη. Ο μηχανισμός που λαμβάνει χώρα αφορά το νερό που αποθηκεύεται πίσω από το προσωρινό φράγμα, το οποίο ακολούθως προκαλεί μια αιφνίδια πλημμύρα, καθώς το φράγμα αστοχεί και αποπλένεται ταχέως. Ιδιαίτερα επικίνδυνες είναι οι κατολισθήσεις, καθώς μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλα πλημμυρικά κύματα σε λίμνες ή εκβολές, τα οποία δύναται να είναι θανατηφόρα. Πλημμύρες από ροές λάσπης μπορούν να συμβούν στην περίπτωση ηφαιστειακής δραστηριότητας, η οποία λιώνει γρήγορα το χιόνι των ορέων και τους παγετώνες, ενώ το αναμειγνυόμενο νερό με λάσπη και συντρίμια κινείται ταχέως στα κατάντη (Perry, 2000).

2.1.4 Επιπτώσεις πλημμυρών

Το μέγεθος των καταστροφών που προκαλείται από πλημμύρες εξαρτάται από παραμέτρους όπως: (α) η ένταση των φυσικών φαινομένων, (β) η παρουσία και επάρκεια υφιστάμενων αντιπλημμυρικών έργων, (γ) η αλλοίωση του φυσικού περιβάλλοντος, για παράδειγμα λόγω αποψίλωσης δασικών εκτάσεων, είτε κατασκευής δομικών έργων, (δ) η ετοιμότητα του κρατικού μηχανισμού, και (ε) η ένταση της ανθρώπινης δραστηριότητας σε πλημμυρικά πεδία, και τρωτότητα αυτής (Μαμάσης, 2013).

Οι πλημμύρες έχουν ενίοτε ωφέλιμες επιδράσεις όπως η αύξηση της γονιμότητας των εδαφών, λόγω των θρεπτικών φερτών υλικών, είτε του εμπλουτισμού των υπόγειων υδροφορέων (Jakubicka *et al.*, 2010, p. 14). Συνηθέστερα, οι πλημμύρες έχουν αρνητικές κοινωνικές,

οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε μια πληγείσα περιοχή. Οι αρνητικές επιπτώσεις των πλημμυρών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε *άμεσες* και *έμμεσες*.

Οι άμεσες επιδράσεις που δύνανται να λάβουν χώρα, επιφέρονται από το ίδιο το πλημμυρικό συμβάν και την άμεση επαφή του πλημμυρικού ύδατος με τον άνθρωπο, τις ιδιοκτησίες και το περιβάλλον. Αφορούν:

- ✧ απώλειες ανθρώπινων ζωών, τραυματισμούς και εγκλωβισμούς πολιτών σε πλημμυρισμένους χώρους,
- ✧ υλικές ζημιές σε δομικά έργα, έργα υποδομής (δρόμους, σιδηρόδρομους, δίκτυα ύδρευσης-τηλεπικοινωνιών-ηλεκτρισμού) και οικονομικά αγαθά ([Messner and Meyer, 2005, p. 2-3](#)),
- ✧ διάβρωση αγροτικών περιοχών, απώλεια μέρους του εδαφικού μανδύα, της επικείμενης βλάστησης, των ζώων, και μη αποδοτικότητα των καλλιεργειών,
- ✧ καταστροφές στην πολιτιστική κληρονομιά ([Merz et al., 2010](#)),
- ✧ ρύπανση οικοσυστημάτων ([Messner and Meyer, 2005, p. 3](#)).

Οι έμμεσες επιδράσεις των πλημμυρών, ανακύπτουν ακριβώς μετά την εξασθένιση του πλημμυρικού συμβάντος, ως περαιτέρω συνέπεια μιας πλημμύρας, και των διαταραχών των οικονομικών και κοινωνικών δραστηριοτήτων. Οι ζημιές μπορούν να επηρεάσουν περιοχές αρκετά μεγαλύτερες από αυτές που πραγματικά πλημμύρισαν. Οι έμμεσες επιπτώσεις ανάγονται σε:

- ✧ οχλήσεις από τις διεργασίες αποκατάστασης μετά την πλημμύρα,
- ✧ μόνιμη ή προσωρινή απομάκρυνση κατοίκων από τα πλημμυρισμένα νοικοκυριά,
- ✧ απώλειες υπηρεσιών κοινής ωφέλειας,
- ✧ αυξημένες δαπάνες μετακίνησης ([MUFHRC, 2014, p. 9, 22](#)),
- ✧ απώλεια παραγωγής, μακροπρόθεσμη απώλεια εσόδων και κύκλου εργασιών,
- ✧ περιορισμούς στη μεταφορά λόγω διαταραχής της κυκλοφορίας ([Thieken et al., 2008](#)),
- ✧ απώλειες εισροών/εκροών σε επιχειρήσεις που είναι πελάτες είτε προμηθευτές σε άμεσα επηρεαζόμενες επιχειρήσεις της πλημμυρικής περιοχής,
- ✧ μείωση κατανάλωσης εργαζομένων και ιδιοκτητών επιχειρήσεων, λόγω απώλειας εισοδήματος ως αποτέλεσμα της διακοπής λειτουργίας της επιχείρησης,

- ❖ απώλεια εμπιστοσύνης στις αρχές (Merz *et al.*, 2010),
- ❖ διαταραχές στις αγορές, όπως για παράδειγμα υψηλότερες τιμές τροφίμων, ή μειωμένες τιμές ακίνητης περιουσίας πλησίον πλημμυρισμένης περιοχής (Messner and Meyer, 2005, p. 3).

Σχετικά με τις επιπτώσεις των πλημμυρών αναφορικά με την κατηγοριοποίησή τους, οι αιφνίδιες πλημμύρες είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες, και μπορούν να προκαλέσουν κατάρρευση τεχνικών, κατολισθήσεις, καταστροφές σε καλλιέργειες, ζημιές σε κτίρια και επιχειρήσεις, ψυχολογικά τραύματα στους ανθρώπους, και σε εξαιρετικές περιπτώσεις συχνά ευθύνονται για απώλειες ανθρώπινων ζωών (Rozalis *et al.*, 2010; Hapuarachchi *et al.*, 2011).

Οι ποτάμιες πλημμύρες αποτελούν σημαντικές διόδους χερσαίων υλικών στη θάλασσα και μια κυρίαρχη πηγή παράκτιων ρύπων. Συγκεκριμένα, η οξεία επίδραση των ποτάμιων πλημμυρών σε θαλάσσια οικοσυστήματα περιλαμβάνει την παρατεταμένη έκθεση σε γλυκό νερό, τη μειωμένη διαθεσιμότητα φωτός και τη θόλωση των υδάτων λόγω υψηλής καθίζησης κατά τη διάρκεια της ποτάμιας πλημμύρας, είτε λόγω συσσωμάτωσης των λεπτών ιζημάτων εξαιτίας του αέρα και των παλιρροιακών κυμάτων μετά την πλημμύρα (Devlin *et al.*, 2012).

2.1.5 Διαχείριση κινδύνων πλημμύρας

Σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης υποχρεούνται να καταρτίζουν συντονισμένα σχέδια διαχείρισης των κινδύνων από πλημμύρες σε επίπεδο περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού, βάσει χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας και χαρτών κινδύνων πλημμύρας.

Τα μέτρα για την αντιμετώπιση των πλημμυρών μπορούν να διακριθούν σε κατασκευαστικά, μη-δομικά, αλλά και σε ατομικά μέτρα για τη μείωση του κινδύνου πλημμύρας σε κατοικίες.

❖ Κατασκευαστικά μέτρα

Στόχος των δομικών έργων είναι η αποθήκευση νερού και η αύξηση της ικανότητας μεταφοράς του. Αφορούν: (i) αντιπλημμυρικούς ταμιευτήρες νερού (φράγματα) ανάντη των λεκανών απορροής, (ii) αναχώματα και προστατευτικούς τοίχους, (iii) λεκάνες κατάκλυσης παραπλεύρως του ποταμού, αλλά και σε χαμηλές περιοχές, (iv) δίκτυα ομβρίων υδάτων, (v) εκτροπές ποταμών και διευθετήσεις ρεμάτων, (vi) παράκτια προστασία, (vii) αύξηση της παροχευτικότητας ποταμών με καθαρισμό αυτών, εκβάθυνση και διάνοιξη των διατομών τους, (viii) διαμόρφωση πρόσθετων διαδρομών είτε καναλιών παράλληλων στο ποτάμι, και (ix) υπερχειλιστές σε ταμιευτήρες νερού.

❖ *Μη-δομικά μέτρα*

Τα μη-δομικά μέτρα αντιμετώπισης πλημμυρών διακρίνονται σε: (I) διατήρηση και επέκταση των δασών στα ορεινά της λεκάνης απορροής, (II) διατήρηση των υδροτόπων και πλημμυρικών πεδίων από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις και χρήσεις, ώστε οι φυσικές πλημμυρικές ζώνες να εκτονώνουν την πλημμυρική αιχμή, (III) προσαρμογή των χρήσεων των πλημμυρικών πεδίων σε πιθανή καταστροφή, καθώς και χωροθέτηση των σημαντικών εγκαταστάσεων σε περιοχές που δε διατρέχουν κίνδυνο, (IV) διατήρηση των μαιάνδρων των ποταμών και των φυσικών τους συνδέσεων με τις πλημμυρικές περιοχές, (V) έλεγχο και συντήρηση των αποχετευτικών συστημάτων σε αστικές περιοχές, (VI) χρήση ιστορικών δεδομένων, καθώς και ανάπτυξη συστημάτων πρόγνωσης καταιγίδων και υδρολογικών μοντέλων πρόβλεψης στάθμης απορρέοντος ύδατος, (VII) συστήματα ειδοποίησης πληθυσμού, (VIII) μηχανισμό διαρκούς ενημέρωσης πολιτών, με ταυτόχρονη αναίρεση της εσφαλμένης αντίληψης περί απόλυτης προστασίας, και (IX) οργάνωση φορέων για πρόληψη και αντιμετώπιση πλημμυρικών ζημιών.

❖ *Ατομικά μέτρα για τη μείωση κινδύνου πλημμύρας κατοικιών*

Τα ατομικά μέτρα για την ελαχιστοποίηση των κινδύνων κατοικιών από πλημμύρες αφορούν τα ακόλουθα: (i) ανύψωση δομήματος κατοικίας, (ii) στεγανοποίηση δαπέδων και τοίχων, (iii) κατασκευή τοίχου ή αναχώματος περιμετρικά της κατοικίας, (iv) διευκόλυνση μελλοντικών εκκενώσεων, και (v) ασφάλεια έναντι πλημμυρών. Η διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας στοχεύει στη μείωση της πιθανότητας εκδήλωσης πλημμύρας και των δυσμενών επιπτώσεων από πλημμύρες (Μαμάσης, 2007). Στους άξονες διαχείρισης των πλημμυρικών κινδύνων υπάγονται η πρόληψη, προστασία, ετοιμότητα, μετρίαση, αντιμετώπιση και αποκατάσταση.

✧ *Πρόληψη*

Η πρόληψη έναντι πλημμυρικών ζημιών αφορά στην εφαρμογή μη-δομικών μέτρων, καθώς και ήπιων παρεμβάσεων τοπικής και διευρυμένης κλίμακας, στη γεωμορφολογία μιας λεκάνης απορροής, στο δομημένο περιβάλλον και στις χρήσεις γης, με σκοπό την εκτόνωση της πλημμυρικής απορροής και την ελαχιστοποίηση των δυνητικών πλημμυρικών επιπτώσεων.

✧ *Προστασία*

Η προστασία από πλημμύρες συνίσταται στην εκπόνηση αντιπλημμυρικών έργων, στοχεύοντας στην αποθήκευση, ανάσχεση, εκτροπή ή παραλαβή των πλημμυρικών παροχών, καθώς και στον υδρολογικό σχεδιασμό για συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς, ανάλογη της σκοπιμότητας του έργου και του ζητούμενου επιπέδου διακινδύνευσης.

✧ *Ετοιμότητα*

Η ετοιμότητα αφορά στην προετοιμασία μιας οργανωτικής δομής είτε συνεργαζόμενων φορέων ώστε να αντιμετωπιστούν συντονισμένα καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, υποστηριζόμενες από επιχειρησιακά σχέδια διαχείρισης του πλημμυρικού κινδύνου, συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης των πολιτών, καθώς και προγνωστικά μετεωρολογικά μοντέλα, και υδρολογικά/υδραυλικά μοντέλα πρόβλεψης του απορρέοντος υδάτινου όγκου.

✧ *Μετρίαση*

Δράσεις μετρίασης των πλημμυρικών κινδύνων αφορούν σε ενέργειες έναντι μιας επερχόμενης πλημμύρας σε πραγματικό χρόνο, αποσκοπώντας αφενός στη μείωση της μέγιστης πλημμυρικής παροχής, με κατάλληλη διαχείριση των υφιστάμενων υδραυλικών έργων στα ανάντη, όσο και στον περιορισμό των αναμενόμενων επιπτώσεων, ώστε να προφυλαχθούν ανθρώπινες ζωές και περιουσίες.

✧ *Αντιμετώπιση*

Η αντιμετώπιση των πλημμυρικών επιπτώσεων συνίσταται στη δραστηριοποίηση του κρατικού μηχανισμού κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά την παρέλευση της πλημμύρας, ώστε να περιθλαφθούν οι πολίτες και να ικανοποιηθούν οι επείγουσες ανάγκες τους.

✧ *Αποκατάσταση*

Εργασίες αποκατάστασης από πλημμύρες αφορούν στην ανασυγκρότηση των υποδομών που υπέστησαν ζημιές, αλλά και στην επαναξιολόγηση των τρεχόντων μέτρων πρόληψης και προστασίας, ώστε να αποφευχθούν παρόμοιες βλάβες μελλοντικά (Μαμάσης, 2013).

2.2 Μοντέλο υδρολογικής προσομοίωσης, HEC-HMS 4.2.1

Το μοντέλο HEC-HMS είναι σχεδιασμένο να προσομοιώνει τις διαδικασίες βροχόπτωσης-απορροής σε δενδροειδείς λεκάνες απορροής. Δύναται να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα γεωγραφικών περιοχών για την επίλυση μεγάλου φάσματος προβλημάτων, όπως είναι η παροχετευτικότητα μεγάλων λεκανών απορροής ποταμών και η δυνάμενη υδρολογική πλημμύρα, αλλά και η απορροή μικρών αστικών ή φυσικών λεκανών (USACE, 2016d, p. 1).

Τα δεδομένα βροχόπτωσης δύνανται, μεταξύ άλλων, να προέρχονται από πηγές ραντάρ. Ένα ραντάρ επιτρέπει την παρατήρηση της θέσης και της κίνησης νεφώσεων, ενώ ορισμένοι τύποι εξοπλισμού ραντάρ μπορούν να αποδώσουν εκτιμήσεις για τα ποσοστά βροχόπτωσης σε περιοχές εντός του εύρους τους. Η ισχύς του ανακλώμενου σήματος, εκφραζόμενη συνήθως

σε όρους ανάκλασης, μετρίεται στον πομπό κατά τη διάρκεια αζιμουθιακών σαρώσεων 360°, με κέντρο τη μονάδα ραντάρ. Οι παρατηρήσεις ανάκλασης από τις σαρώσεις ενσωματώνονται στο χρόνο και στο χώρο, ώστε να αποδώσουν εκτιμήσεις του μεγέθους και της πυκνότητας των σωματιδίων σε μια ατμοσφαιρική στήλη, σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Το απλούστερο μοντέλο για την εκτίμηση της βροχόπτωσης από την ανάκλαση είναι μια σχέση Z-R, με πιο συνηθισμένη την:

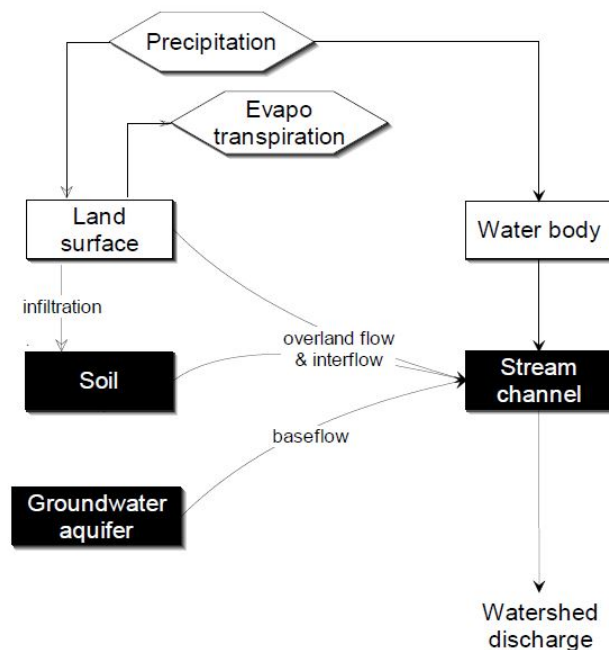
$$Z = aR^b, \text{ όπου:}$$

Z: ο συντελεστής ανάκλασης,

R: η ένταση της βροχόπτωσης, και

a, b: εμπειρικοί συντελεστές (USACE, 2000, p. 23).

Ο συντελεστής ανάκλασης Z μετρίεται σε mm^6/m^3 , και εκφράζεται συνήθως σε μονάδες dbZ, ενώ είναι συνάρτηση του αριθμού και του μεγέθους των σταγόνων εντός ενός δεδομένου όγκου. Η σχέση Z-R είναι μη γραμμική και μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή και το καταιγιδόφορο γεγονός που πρέπει να εκτιμηθεί, γεγονός που καθιστά πολύπλοκη τη σωστή επιλογή των εμπειρικών παραμέτρων. Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η βαθμονόμηση μιας κατάλληλης σχέσης Z-R για τον υπολογισμό της βροχόπτωσης (Daliakopoulos and Tsanis, 2012). Στην Εικόνα 2.2.1 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα της διαδικασίας βροχόπτωσης-απορροής, στο οποίο στηρίζεται το HEC-HMS 4.2.1 μοντέλο.



Εικόνα 2.2.1: Τυπική διαδικασία απορροής μιας λεκάνης, κατά τη μοντελοποίηση στο HEC-HMS 4.2.1. (Πηγή: USACE, 2000, p. 12).

Η εκροή σε μια λεκάνη απορροής υπολογίζεται από τα μετεωρολογικά δεδομένα, αφαιρώντας τις απώλειες διήθησης (*loss*), υπολογίζοντας την επιφανειακή απορροή, δηλαδή αυτή που δεν κατεισδύει στο έδαφος (*transform*), και προσθέτοντας τη βασική απορροή (*baseflow*). Προαιρετικά δύναται να συμπεριληφθεί η φυτοκάλυψη (*canopy*), για την αντιπροσώπευση της παρεμπόδισης και εξατμισοδιαπνοής. Εξίσου προαιρετικά μπορεί να συμπεριληφθεί η επιφανειακή αναπαράσταση εδάφους (*surface*), ώστε να αντιπροσωπευθεί η κατακράτηση ύδατος στους εδαφικούς πόρους, μέχρι τον κορεσμό της αποθηκευτικής τους ικανότητας (USACE, 2016d, p. 185).

Κατά κύριο λόγο, τα μοντέλα που περιλαμβάνονται στο λογισμικό υδρολογικής προσομοίωσης HEC-HMS 4.2.1 είναι μοντέλα συμβάντος, που προσομοιώνουν μία μόνο καταιγίδα. Συγχρόνως, τα περισσότερα περιλαμβανόμενα μοντέλα είναι συγκεντρωτικά, με εξαίρεση το μοντέλο ModClark που είναι κατανεμημένο. Επιπρόσθετα, το HEC-HMS 4.2.1 περιλαμβάνει τόσο μοντέλα μετρούμενων παραμέτρων, όσο και μοντέλα προσαρμοσμένων παραμέτρων. Εν ολίγοις, άλλα μοντέλα είναι εμπειρικά, και επομένως οι παράμετροί του δεν μπορούν να μετρηθούν, αντιθέτως, για μια επιλεγμένη λεκάνη απορροής, οι παράμετροι προκύπτουν από βαθμονόμηση. Απ' την άλλη, σε κάποια άλλα μοντέλα υφίστανται παράμετροι που μπορούν να προσδιοριστούν από τα χαρακτηριστικά εδάφους, όπως προκύπτουν από δειγματοληψία (USACE, 2000, p. 6).

2.3 1D HEC-RAS 5.0.3 υδραυλικό μοντέλο

Η συνιστώσα προσομοίωσης μη μόνιμης ροής (*unsteady flow*) του συστήματος μοντελοποίησης HEC-RAS 5.0.3 είναι ικανή να προσομοιώνει 1D μη μόνιμη ροή, μέσω ενός πλήρους δικτύου ανοικτών καναλιών. Η συνιστώσα προσομοίωσης μη μόνιμης ροής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πραγματοποίηση υπολογισμών υποκρίσιμης ροής, υπερκρίσιμης ροής, καθώς και μικτού καθεστώτος ροής (υποκρίσιμη, υπερκρίσιμη, υδραυλικά άλματα, υποβιβασμοί ροής) (USACE, 2016a, p. 1-3).

Οι φυσικοί νόμοι που διέπουν τη ροή ύδατος σε ένα ρέμα είναι: (i) η αρχή διατήρησης της μάζας (συνέχεια), και (ii) η αρχή διατήρησης της ορμής. Αυτοί οι νόμοι εκφράζονται μαθηματικά με τη μορφή μερικών διαφορικών εξισώσεων, των εξισώσεων συνέχειας και ορμής, αντίστοιχα.

Η διατήρηση της μάζας για έναν όγκο ελέγχου δηλώνει ότι ο καθαρός ρυθμός ροής στον όγκο είναι ίσος με το ρυθμό μεταβολής της αποθήκευσης μέσα στον όγκο. Η τελική μορφή της εξίσωσης συνέχειας (*continuity equation*) δίδεται ως εξής:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_L = 0$$

όπου:

A_T [m^2] η συνολική πλημμυρική επιφάνεια,

Q [m^3/s] η συνολική ροή ως συνάρτηση της απόστασης x και του χρόνου t , και

q_L [m^2/s] η πλευρική εισροή ανά μονάδα μήκους (USACE, 2016c, p. 2-22, 2-23).

Η διατήρηση της ορμής για έναν όγκο ελέγχου εκφράζεται από το 2^ο νόμο του Newton, δηλώνοντας ότι ο καθαρός ρυθμός ορμής που εισέρχεται στον όγκο (ροή ορμής) συν το άθροισμα όλων των εξωτερικών δυνάμεων που δρουν στον όγκο, ισούται με το ρυθμό συσσώρευσης ορμής. Η τελική μορφή της εξίσωσης ορμής (*momentum equation*) δίδεται ως:

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

όπου:

Q [m^3/s] η συνολική ροή ως συνάρτηση της απόστασης x και του χρόνου t ,

V [m^3] ο όγκος ελέγχου,

g [m/s^2] η επιτάχυνση της βαρύτητας,

A [m^2] η συνολική πλημμυρική επιφάνεια,

$\frac{\partial z}{\partial x}$ [-] η κλίση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού, και

S_f [-] ο ρυθμός απωλειών λόγω τριβής (USACE, 2016c, p. 2-23, 2-26, 2-27).

2.4 Ενιαίο σύστημα υδραυλικής 1D/2D μοντελοποίησης HEC-RAS 5.0.3

Ένα ενιαίο μονοδιάστατο-δισδιάστατο σύστημα υδραυλικής προσομοίωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση ποτάμιας πλημμύρας.

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης 2D ροής έχει την ικανότητα εκτέλεσης ενιαίας 1D/2D μοντελοποίησης στο πλαίσιο της ίδιας μη μόνιμης ροής σε σύνθετα ποτάμια συστήματα,

χρησιμοποιώντας 1D μοντελοποίηση για παράδειγμα στο κύριο σύστημα ποταμών, και 2D μοντελοποίηση σε περιοχές που απαιτούν υψηλότερο επίπεδο της υδροδυναμικής αξιοπιστίας.

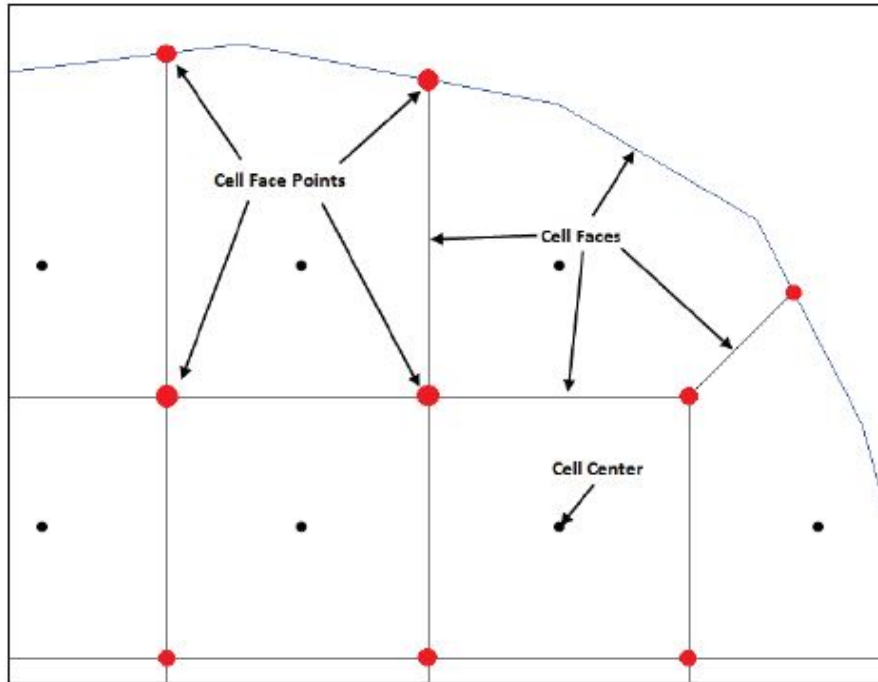
Μια επιπλέον δυνατότητα της ενιαίας 1D/2D HEC-RAS 5.0.3 μοντελοποίησης είναι ο αλγόριθμος ενιαίας 1D/2D λύσης. Οι αλγόριθμοι λύσεων 1D και 2D είναι στενά συνδεδεμένοι χρονικό βήμα προς χρονικό βήμα, με την επιλογή της επανάληψης μεταξύ 1D και 2D μεταφορών ροής μέσα σε ένα χρονικό βήμα. Αυτό επιτρέπει την άμεση ανατροφοδότηση σε κάθε χρονικό βήμα μεταξύ των 1D και 2D στοιχείων ροής (USACE, 2016b, p. 1-2).

Τα βασικά βήματα για την εκτέλεση ενιαίας μοντελοποίησης 1D/2D μη μόνιμης ροής στο HEC-RAS 5.0.3 περιγράφονται παρακάτω:

- (1) Δημιουργία μιας οριζόντιας προβολής συντεταγμένων που θα χρησιμοποιηθεί για το μοντέλο, μέσα από τον HEC-RAS Mapper. Αυτό γίνεται συνήθως επιλέγοντας ένα υπάρχον αρχείο προβολής από ένα γεωχωρικό διανυσματικό αρχείο (shapefile) σε ArcGIS περιβάλλον ή από άλλο επίπεδο χαρτογράφησης.
- (2) Ανάπτυξη ενός μοντέλου εδάφους στον HEC-RAS Mapper. Το μοντέλο εδάφους είναι απαιτούμενο για 2D μοντελοποίηση, καθώς χρησιμοποιείται για να καθορίσει τις γεωμετρικές και υδραυλικές ιδιότητες των 2D πλεγμάτων. Ένα λεπτομερές και ακριβές μοντέλο εδάφους είναι απαραίτητο για την εκτέλεση οποιασδήποτε χαρτογράφησης πλημμυρών στον HEC-RAS Mapper, με λεπτομέρεια και ακρίβεια.
- (3) Κατασκευή ενός συνόλου δεδομένων ταξινόμησης χρήσεων γης στον HEC-RAS Mapper για τον καθορισμό των τιμών n του Manning εντός των 2D περιοχών ροής. Επιπρόσθετα, το HEC-RAS 5.0.3 έχει ως επιλογή καθορισμένα πολύγωνα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρακάμψουν τα δεδομένα ταξινόμησης χρήσεων γης, είτε ως ζώνες βαθμονόμησης.
- (4) Προσθήκη πρόσθετων επιπέδων χαρτογράφησης που μπορεί να απαιτούνται για την απεικόνιση, όπως αεροφωτογραφίες, θέσεις αναχωμάτων, οδικό δίκτυο κλπ.
- (5) Σχεδιασμός πολυγωνικού ορίου για κάθε μία από τις 2D επιφάνειες ροής που θα μοντελοποιηθούν, μέσα από τον επεξεργαστή γεωμετρίας. Διαφορετικά, δύναται να εισαχθούν οι συντεταγμένες των ορίων X, Y από άλλη πηγή.
- (6) Διάταξη οποιωνδήποτε διαχωριστικών γραμμών εντός της 2D επιφάνειας ροής ώστε να αντιπροσωπευθούν σημαντικά εμπόδια προς την ροή, όπως αναχώματα, δρόμοι,

φυσικά επιχώματα, μεγάλα υψόμετρα εδάφους μεταξύ του κεντρικού καναλιού και των περιοχών εκτός έκαστης όχθης, υδραυλικές κατασκευές κλπ.

- (7) Δημιουργία 2D υπολογιστικού πλέγματος για κάθε 2D επιφάνεια ροής, χρησιμοποιώντας τον επεξεργαστή 2D επιφάνειας ροής.



Εικόνα 2.4.1: Ορισμός 2D υπολογιστικού πλέγματος για τη μοντελοποίηση στο HEC-RAS 5.0.3 (Πηγή: USACE, 2016b, p. 3-5).

- (8) Επεξεργασία του 2D πλέγματος επιφάνειας ροής προκειμένου να βελτιωθεί, με (i) προσθήκη επιπλέον διαχωριστικών γραμμών, (ii) αύξηση ή μείωση πυκνότητας πλέγματος, όπως απαιτείται, (iii) προσθήκη, μετακίνηση ή διαγραφή πλεγματικών κελιών όπου απαιτείται.
- (9) Εκτέλεση του 2D γεωμετρικού προ-επεξεργαστή από τον RAS Mapper, ώστε να δημιουργηθούν πίνακες με τις υδραυλικές ιδιότητες των κελιών.
- (10) Σύνδεση των 2D επιφανειών ροής με τα 1D υδραυλικά στοιχεία (ποτάμια, πλευρικές κατασκευές, υδραυλικές συνδέσεις του χώρου αποθήκευσης με την 2D επιφάνεια ροής) ανάλογα με τις απαιτήσεις.
- (11) Προσθήκη τυχόν απαραίτητων υδραυλικών δομών μέσα σε μια 2D επιφάνεια ροής.
- (12) Σχεδιασμός γραμμών εξωτερικών οριακών συνθηκών κατά μήκος της περιμέτρου των 2D επιφανειών ροής μέσω του επεξεργαστή γεωμετρικών δεδομένων.

- (13) Εισαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων οριακών και αρχικών συνθηκών για τις 2D επιφάνειες ροής στον επεξεργαστή δεδομένων μη μόνιμης ροής.
- (14) Ορισμός των απαραίτητων υπολογιστικών επιλογών και ρυθμίσεων που απαιτούνται για τις 2D επιφάνειες ροής, μέσω του παραθύρου προσομοίωσης μη μόνιμης ροής.
- (15) Εκτέλεση της προσομοίωσης μη μόνιμης ροής.
- (16) Ανασκόπηση του ενιαίου 1D/2D εξερχόμενου αποτελέσματος στον RAS Mapper, καθώς και χρήση των υπάρχουσών δυνατοτήτων για τα αποτελέσματα των 1D τμημάτων του μοντέλου (USACE, 2016b, p. 1-6, 1-7).

Το HEC-RAS 5.0.3 έχει δύο σύνολα εξισώσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση της ροής που μετακινείται πάνω στο υπολογιστικό πλέγμα: (I) τις εξισώσεις Saint Venant, οι οποίες συχνά αναφέρονται ως εξισώσεις ρηχών υδάτων, και αποκαλούνται “πλήρους ορμής (*full momentum*)”, και (II) τις εξισώσεις Διάχυσης Κύματος (*Diffusion Wave*).

Για μη μόνιμη ροή, υποθέτοντας ότι η ροή είναι ασυμπίεστη, ομοιόμορφης πυκνότητας και υδροστατικής πίεσης, η 2D μορφή της διαφορικής εξίσωσης ρηχών υδάτων (Saint Venant) διατήρησης μάζας (συνέχειας) δίδεται ως:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0$$

όπου:

$H(x, y, t)$ [m] το υψόμετρο της στάθμης του νερού,

$h(x, y, t)$ [m] το βάθος νερού,

u, v [m/s] οι συνιστώσες ταχύτητας στην x - και y - διεύθυνση, και

q [m³/s] η εισερχόμενη ροή (USACE, 2016c, p. 2-52, 2-53).

Οι 2D εξισώσεις ορμής ρηχών υδάτων (Saint Venant), για τη x - και y - διεύθυνση αντίστοιχα, δίδονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f_v \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f_u \end{aligned}$$

όπου:

u, v [m/s] οι συνιστώσες ταχύτητας στην x - και y - διεύθυνση,

g [m/s²] η επιτάχυνση της βαρύτητας,

$H(x, y, t)$ [m] το υψόμετρο της στάθμης του νερού,

ν_t [m²/s] ο συντελεστής οριζόντιου κινηματικού ιξώδους,

c_f [s⁻¹] ο συντελεστής τριβής στον πυθμένα, και

f [s⁻¹] η παράμετρος Coriolis (USACE, 2016c, p. 2-55, 2-56, 2-57, 2-58).

Οι 2D εξισώσεις ορμής Διάχυσης Κύματος βασίζονται στις 2D εξισώσεις πλήρους ορμής (Saint Venant), στις οποίες είναι κυρίαρχοι οι όροι που περιλαμβάνουν την επιτάχυνση της βαρύτητας και το συντελεστή τριβής στον πυθμένα, ενώ το ιξώδες, η παράμετρος Coriolis, η μεταγωγική επιτάχυνση και η τοπική επιτάχυνση μπορούν να αγνοηθούν (USACE, 2016c, p. 2-52). Επομένως, οι 2D εξισώσεις ορμής Διάχυσης Κύματος διαμορφώνονται ως εξής:

$$-g \frac{\partial H}{\partial x} = c_f u$$

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

Στις εξισώσεις Διάχυσης Κύματος δύνανται να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερα χρονικά βήματα από ότι μπορεί να συμβεί στις εξισώσεις Saint Venant, αποδίδοντας συγχρόνως αριθμητικά σταθερές και ακριβείς λύσεις. Για την επιλογή ενός υπολογιστικού διαστήματος για τις εξισώσεις Saint Venant και τις εξισώσεις Διάχυσης Κύματος, ακολουθούνται τα παρακάτω:

I) Εξισώσεις Saint Venant (πλήρους ορμής):

$$C = \frac{V \cdot \Delta T}{\Delta X} \leq 1.0 \quad (\text{με μέγιστο } C=3.0) \quad \text{H' } \quad \Delta T \leq \frac{\Delta X}{V} \quad (\text{με } C=1.0), \text{ όπου:}$$

C [-] ο αριθμός Courant,

V (m/s) η ταχύτητα πλημμυρικού κύματος,

ΔT (s) το υπολογιστικό χρονικό βήμα, και

ΔX (m) το μέσο μέγεθος κελιού.

II) Εξισώσεις Διάχυσης Κύματος (Diffusion Wave):

$$C = \frac{V \cdot \Delta T}{\Delta X} \leq 2.0 \quad (\text{με μέγιστο } C=5.0) \quad \text{H' } \quad \Delta T \leq \frac{2\Delta X}{V} \quad (\text{με } C=1.0) \quad (\text{USACE, 2016b, p. 4-5}).$$

Κεφάλαιο 3: Περιοχή μελέτης: Λεκάνη απορροής Αλμυρίδας

3.1 Θέση υδρολογικής λεκάνης Αλμυρίδας

Η λεκάνη απορροής της Αλμυρίδας ($24^{\circ}12'05,65''$ E, $35^{\circ}26'51,99''$ N) χωροθετείται στη Δημοτική Ενότητα Βάμου, στο βορειοανατολικό τμήμα του νομού Χανίων, όπως φαίνεται στην κάτωθι Εικόνα 3.1.1. Η απόσταση της λεκάνης από την πόλη των Χανίων είναι περίπου 20 km. Βόρεια της λεκάνης απορροής βρίσκεται ο όρμος της Σούδας, νότια το χωριό των Βρυσών, ανατολικά η Γεωργιούπολη και ο όρμος Αλμυρού, και δυτικά το χωριό Αρμένιοι (Τσιτσιλώνης, 2008, σ. 46; Παπαστεφανάκης, 2009, σ. 39; Δαλιακόπουλος, 2011, σ. 64).

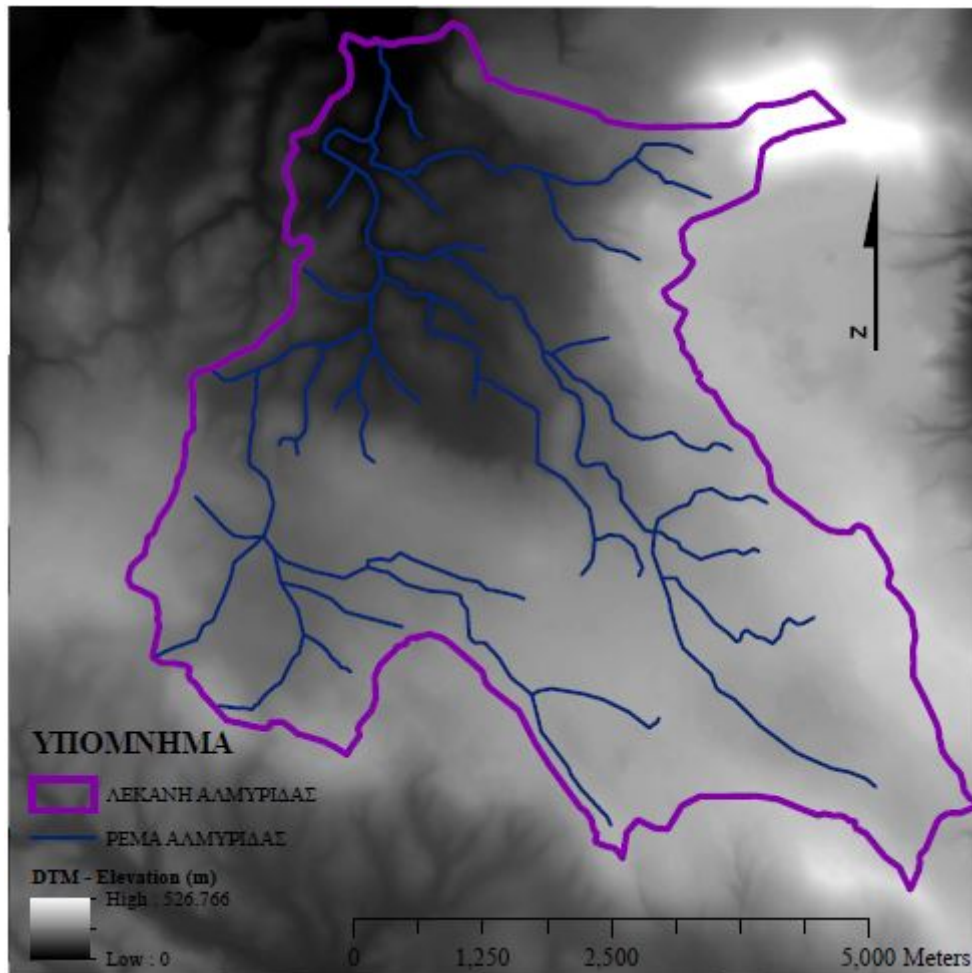


Εικόνα 3.1.1: Θέση της υδρολογικής λεκάνης της Αλμυρίδας. (Πηγή: *Google Hybrid*)

3.2 Γεωμορφολογία

Η έκταση της λεκάνης απορροής της Αλμυρίδας είναι **36.74 km²**, όπως προκύπτει από το σχεδιασμό της στο ArcGIS 10.1. Στα βόρεια, δυτικά και ανατολικά της λεκάνης επικρατεί τόσο ημιορεινή όσο και πεδινή ζώνη, με υψηλότερη κορυφή τα Δραπανοκέφαλα, ενώ σταδιακά απαντάται η παραθαλάσσια ζώνη του Κρητικού Πελάγους μέσω απόκρημνων ακτών. Στα νότια λαμβάνει χώρα ο μεγάλος ορεινός όγκος των Λευκών Ορέων (Τσιτσιλώνης, 2008, σ. 47;

Παπαστεφανάκης, 2009, σ. 39, 41; Δαλιακόπουλος, 2011, σ. 64). Η υδρολογική λεκάνη παρουσιάζει μέτρια ορεογραφία, ενώ το μέσο υψόμετρό της είναι τα 206 m, με ελάχιστο τα 0 m και μέγιστο τα 527 m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής ποικίλλει, αποτελούμενο από ήπιες πλαγιές στο μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης απορροής, με εξαίρεση κάποιες περιοχές που παρουσιάζουν κλίσεις πάνω από 10%. Τα υψόμετρα στη λεκάνη απορροής της Αλμυρίδας παρουσιάζονται στο χάρτη της Εικόνας 3.2.1, όπως προκύπτουν από ένα Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Digital Terrain Model - DTM) υψηλής ανάλυσης, 5m x 5m. Έπειτα από περίοδο παρατήρησης 32 ετών (1975-2007), η μέση ετήσια βροχόπτωση στη λεκάνη έχει υπολογιστεί ίση με 648.7 mm. Η απορροή της λεκάνης είναι εφήμερη, και λαμβάνει χώρα μόνο κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων (Τσιτσιλώνης, 2008, σ. 47; Δαλιακόπουλος, 2011, σ. 64; Tsanis *et al.*, 2014; Koutroulis *et al.*, 2015; Grillakis *et al.*, 2016).



Εικόνα 3.2.1: Χάρτης υδρολογικής λεκάνης Αλμυρίδας & υδρογραφικού της δικτύου, βάσει Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DTM) υψηλής ανάλυσης, 5m x 5m (Σχεδιασμός σε ArcGIS 10.1).

3.3 Υδρογεωλογία

Στα νότια της λεκάνης απαντώνται κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, κατά τόπους μάρμαρα και βιογενείς ασβεστόλιθοι, μάργες, άργιλοι και κροκαλοπαγή πετρώματα. Σε μικρότερο βαθμό συναντώνται καρστικές κοιλότητες με αργλικές αποθέσεις. Στα βόρεια της λεκάνης κυριαρχούν μάρμαρα, φυλλίτες, δολομίτες, χαλαζίτες, κροκαλοπαγή σε διαδοχικές στρώσεις, και αλλουβιακές αποθέσεις κυρίως κατά μήκος των πρηνών των ρεμάτων (Τσιτσιλώνης, 2008, σ. 47). Αναλυτικά οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται στη λεκάνη της Αλμυρίδας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.1.

Πίνακας 3.3.1: Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης της Αλμυρίδας. (Πηγή: Τσιτσιλώνης, 2008, σ. 47)

Τύποι εδάφους	Ποσοστό (%)
Βιογενείς ασβεστόλιθοι, μάργες, άργιλοι και κροκαλοπαγή πετρώματα (Μειόκαινο)	40
Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και κατά τόπους μάρμαρα (Μέσο Ιουρασικό – Ηώκαινο)	29.4
Μάρμαρα, φυλλίτες, δολομίτες, χαλαζίτες και κροκαλοπαγή σε διαδοχικές στρώσεις (Μεσοζωικό)	11.8
Αργλικές αποθέσεις σε καρστικές κοιλότητες	9.4
Ανθρακικές στρώσεις ασβεστόλιθων και δολομιτών (Τριάσιο – Μέσο Ηώκαινο)	5
Αλλουβιακές αποθέσεις στα πρηνή των ρεμάτων (Ολόκαινο)	4.4

Σχετικά με τους γεωλογικούς σχηματισμούς που απαντώνται στη λεκάνη, τα κροκαλοπαγή, οι καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες, οι χαλαζίτες, καθώς και τα μάρμαρα αποτελούν κοκκώδεις είτε κρυσταλλικούς υδατοπερατούς σχηματισμούς, επιτρέποντας την κατείδυση και μεταφορά του βρόχινου νερού μέσα από τους κόκκους τους. Οι άργιλοι και οι μάργες συνιστούν πρακτικώς αδιαπέρατους σχηματισμούς, δηλαδή δεν επιτρέπουν την κίνηση του βρόχινου νερού διαμέσου αυτών. Σε ό,τι αφορά τις αλλουβιακές αποθέσεις, αυτές αποτελούν υλικά που έχουν μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις μέσω ρεόντων υδάτων. Τέτοια υλικά μπορούν να είναι τόσο χαλίκια και άμμοι, όσο πηλός και άργιλοι (Λουπασάκης, 2013; Μαμάσης, 2009). Γενικώς, εδάφη που παρουσιάζουν μεγάλους ρυθμούς διήθησης, όπως είναι τα αμμώδη, αλλά και χαλικώδη εδάφη, και ταυτόχρονα χαρακτηρίζονται από μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου, ταξινομούνται ως εδάφη ομάδας Α, αναλόγως την υδροπερατότητά τους, σύμφωνα με τη μέθοδο του Αμερικανικού Soil Conservation Service (SCS) (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 274, 276, 277).

3.4 Κλίμα

Το κλίμα της ευρύτερης περιοχής χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό, με ζεστά ξηρά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες (Grillakis *et al.*, 2016). Το 53% περίπου των ετήσιων βροχοπτώσεων σημειώνονται το χειμώνα, το 23% το φθινόπωρο και το 20% την άνοιξη, ενώ κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού παρατηρούνται αμελητέες βροχοπτώσεις (Tsanis *et al.*, 2014). Η μεγάλη ποσότητα ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που κατεισδύει στα Λευκά Όρη με μορφή βροχής ή χιονιού, έχει ως αποτέλεσμα την τροφοδότηση του υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή με μεγάλα ποσά ύδατος (Παπαστεφανάκης, 2009, σ. 42). Για το νησί της Κρήτης, η μέση βροχόπτωση κυμαίνεται από 440 mm/yr στα ανατολικά, έως άνω των 2000 mm/yr στα όρη της δυτικής Κρήτης, όπου οι ορεογραφικές επιδράσεις τείνουν να αυξάνουν τόσο τη συχνότητα όσο και την ένταση των χειμερινών βροχοπτώσεων (Koutroulis *et al.*, 2010). Τα παραπάνω χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με το τραχύ έδαφος και τις λεκάνες μικρού μεγέθους, καθιστούν την Κρήτη επιρρεπή σε πλημμύρες (Tsanis *et al.*, 2014).

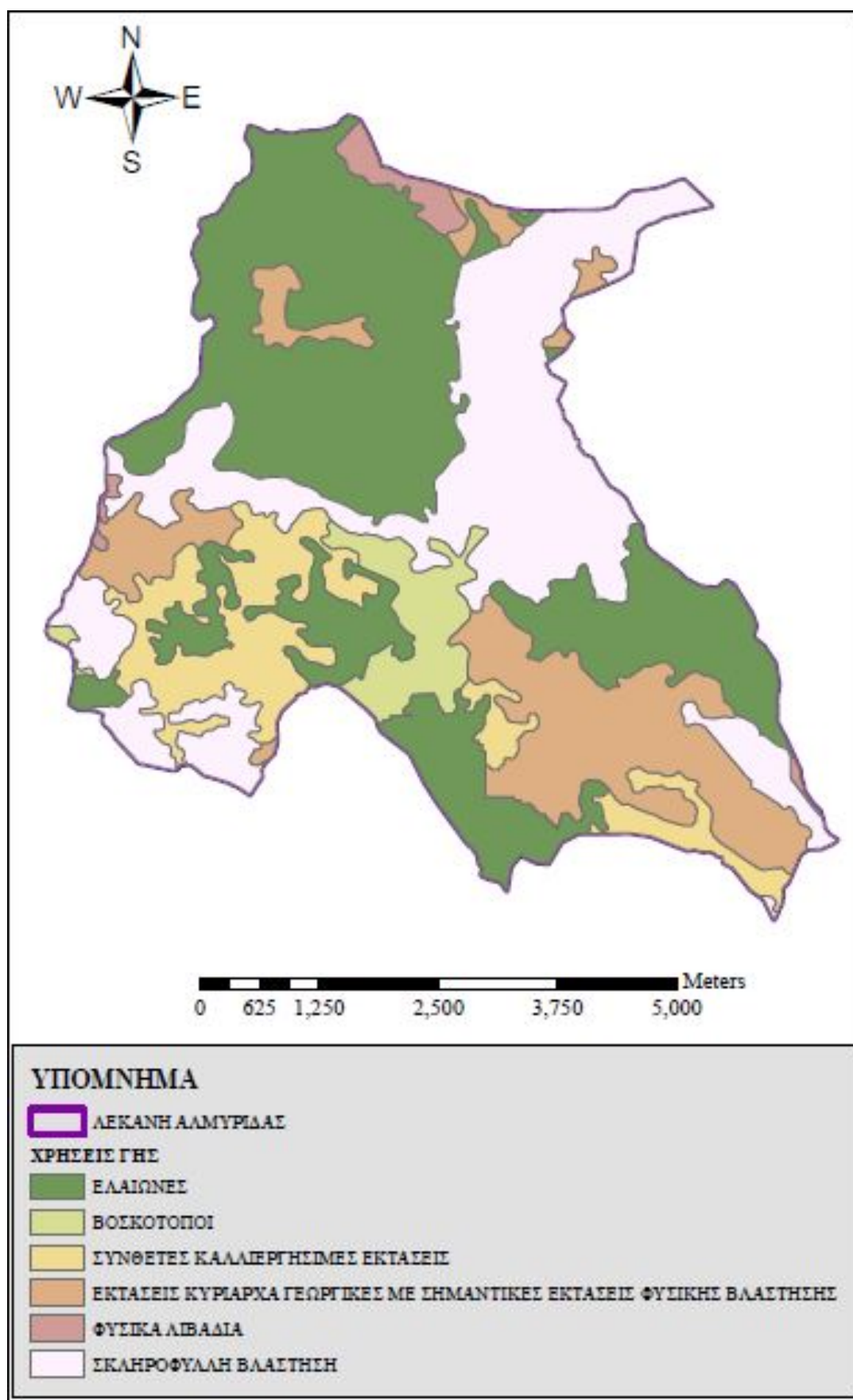
3.5 Χρήσεις γης

Η περιοχή της Αλμυρίδας είναι καλλιεργήσιμη και καλύπτεται κατά κύριο λόγο από ελαιόδεντρα και φυσική βλάστηση (Tsanis *et al.*, 2014). Στον Πίνακα 3.5.1 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι κατηγοριοποιημένες χρήσεις γης που απαντώνται στην υδρολογική λεκάνη της Αλμυρίδας, όπως προέκυψαν από χάρτες κάλυψης γης, σύμφωνα με τα παραδοτέα του προγράμματος CORINE Land Cover της Ευρωπαϊκής Ένωσης το έτος 2000, και επεξεργασία μέσω ArcGIS 10.1.

Πίνακας 3.5.1: Χρήσεις γης λεκάνης της Αλμυρίδας. (Πηγή: CORINE Land Cover)

Κατηγορίες χρήσεων γης	Επιφάνεια Κάλυψης (km ²)	Ποσοστό (%)
Ελαιώνες	14.954	40.705
Βοσκότοποι	1.667	4.54
Σύνθετες καλλιεργήσιμες εκτάσεις	4.039	10.995
Εκτάσεις κυρίαρχα Γεωργικές, με σημαντικές εκτάσεις Φυσικής Βλάστησης	5.995	16.32
Φυσικά λιβάδια	0.551	1.50
Σκληρόφυλλη βλάστηση	9.530	25.94
Σύνολο	36.736	100

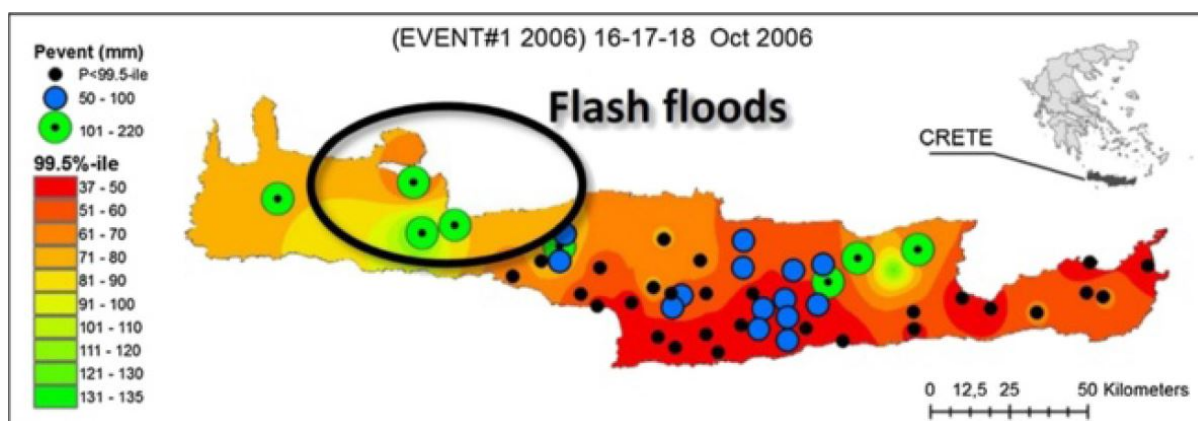
Στο χάρτη της Εικόνας 3.5.1 παρακάτω απεικονίζονται οι κατηγορίες των χρήσεων γης της λεκάνης της Αλμυρίδας.



Εικόνα 3.5.1: Χρήσεις γης στην υδρολογική λεκάνη της Αλμυρίδας. (Πηγή: *CORINE Land Cover & επεξεργασία μέσω ArcGIS 10.1*)

3.6 Περιγραφή του μελετώμενου Αιφνίδιου Πλημμυρικού γεγονότος στις 17/10/2006 στην Αλμυρίδα

Στις 16 Οκτωβρίου 2006, ένα βαρομετρικό χαμηλό με κέντρο τα 1010 hPa, τοποθετημένο πάνω από την κεντρική Μεσόγειο και συγκεκριμένα επάνω από τη Μάλτα, κινήθηκε γρήγορα προς τα ανατολικά, διασχίζοντας το νησί της Κρήτης μέχρι το μεσημέρι της ίδιας ημέρας, αναπτύσσοντας μια εκτιμώμενη ταχύτητα περίπου 65 km/h, που το χαρακτηρίζει ως πιθανή μεσογειακή τροπική καταιγίδα, ένα μάλλον σπάνιο φαινόμενο για την περιοχή. Στις 17 Οκτωβρίου 2006 ώρα 00:00 UTC το βαρομετρικό χαμηλό έφτασε στη δυτική Κρήτη, όπου ο κυκλώνας υποχώρησε σε ακόμα χαμηλότερα επίπεδα πίεσης από αυτά των 1008 hPa (Tsanis *et al.*, 2014), προκαλώντας ένα υψηλής έντασης, αλλά μικρής διάρκειας έντονο βροχοπτώτικό συμβάν, με αποτέλεσμα μια αστραπιαία πλημμύρα στην περιοχή της Αλμυρίδας. Από τα δεδομένα μετεωρολογικού ραντάρ έγινε σαφές ότι το σύστημα ήταν ουσιαστικά ένας μεγάλος κυκλώνας, με μέγιστη διάμετρο περίπου 200 km. Κατά τη διάρκεια της καταιγίδας υπήρχε κίνηση μεμονωμένων καταιγιδοφόρων κυττάρων στο εσωτερικό του σχηματισμού, με το κέντρο του κυκλώνα να εστιάζεται στα βορειοανατολικά της λεκάνης της Αλμυρίδας, που αποτελεί μια θέση ορεογραφικής ανύψωσης από τους ορεινούς όγκους στα νότια της λεκάνης απορροής (Daliakopoulos and Tsanis, 2012).



Εικόνα 3.6.1: Περιοχές αιφνίδιων πλημμυρικών συμβάντων στις 16-17-18 Οκτωβρίου 2006. (Πηγή: Koutroulis *et al.*, 2015)

Εξαιτίας του γεγονότος ότι η απορροή στη λεκάνη της Αλμυρίδας είναι εφήμερη, δεν υφίσταται εγκατεστημένος εξοπλισμός μέτρησης στην περιοχή (Grillakis *et al.*, 2016). Οι κοντινότεροι βροχομετρικοί σταθμοί στην περιοχή βρίσκονται στη Σούδα και στις Καλύβες. Το γειτνιάζον βροχόμετρο στον κόλπο της Σούδας, σε απόσταση 16 km από την περιοχή, κατέγραψε μέγιστη ωριαία βροχόπτωση 25.2 mm, ενώ ο βροχομετρικός σταθμός στις Καλύβες, που απείχε 3 km από τη λεκάνη απορροής, κατέγραψε ημερησίως ύψος

βροχόπτωσης 220 mm, ξεπερνώντας κατά πολύ το 1% AEP του συγκεκριμένου σταθμού. Το AEP (Annual Exceedance Probability) εκφράζει την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης του πλημμυρικού γεγονότος, έχοντας περίοδο επαναφοράς 100 χρόνων (Koutroulis *et al.*, 2015). Ο κύριος όγκος νερού κατακρημνίστηκε κατά τη διάρκεια 7h, από 07:00 έως 14:00 τοπική ώρα, με τη μέγιστη βροχόπτωση να έλαβε χώρα το μεσημέρι (Tsanis *et al.*, 2014). Με χρήση επίγειων μετρήσεων και μετρήσεων ραντάρ εκτιμήθηκε ότι η ένταση της μέγιστης βροχόπτωσης ήταν περίπου 23 mm/h (Daliakopoulos and Tsanis, 2012), ενισχύοντας την επιφανειακή ροή και προκαλώντας μια εκτιμώμενη μέγιστη απορροή 120 m³/s (Tsanis *et al.*, 2014; ECLISE, 2014, p. 25). Έπειτα από τοπογραφικές μετρήσεις κατά τη διάρκεια των ημερών μετά την πλημμύρα, συλλογή φωτογραφικού υλικού, καθώς και μαρτυρίες μόνιμων κατοίκων, διαπιστώθηκε ότι το ύψος νερού της απορροής ανήλθε έως και 2m στην κατάντη διατομή ελέγχου, στην έξοδο της λεκάνης (Tsanis *et al.*, 2014).

Η βαρύτητα του αιφνιδίου αυτού πλημμυρικού συμβάντος έγκειται στο γεγονός ότι προκλήθηκε πάνω από 1 εκ. € ζημία στην περιοχή της Αλμυρίδας, ενώ το συνολικό ποσό ζημιών ανήλθε σε 3 εκ. €. Ταυτόχρονα στην πληγείσα περιοχή καταγράφηκε απώλεια μιας ανθρώπινης ζωής (Koutroulis *et al.*, 2015).

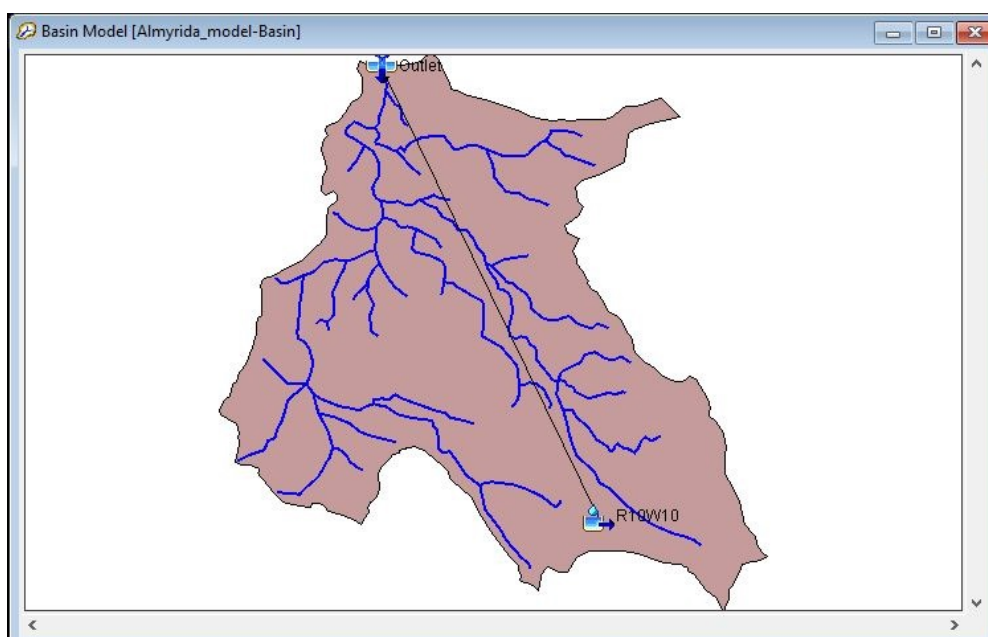
Σχετικά με την υγρασία του εδάφους, να σημειωθεί ότι πριν το ακραίο βροχοπτώτικό γεγονός της Αλμυρίδας, ήταν πολύ χαμηλή, ενώ αυξήθηκε σχεδόν κατά 50% έπειτα από το αιφνίδιο πλημμυρικό συμβάν (Grillakis *et al.*, 2016).

Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία Μοντελοποίησης

4.1 Μοντελοποίηση του βροχοπτωτικού συμβάντος της 17/10/2006, με χρήση του υδρολογικού HEC-HMS 4.2.1 μοντέλου

Η υδρολογική προσομοίωση του αστραπιαίου πλημμυρικού γεγονότος που έλαβε χώρα στην Αλμυρίδα στις 17/10/2006, έγινε με χρήση του μοντέλου HEC-HMS 4.2.1.

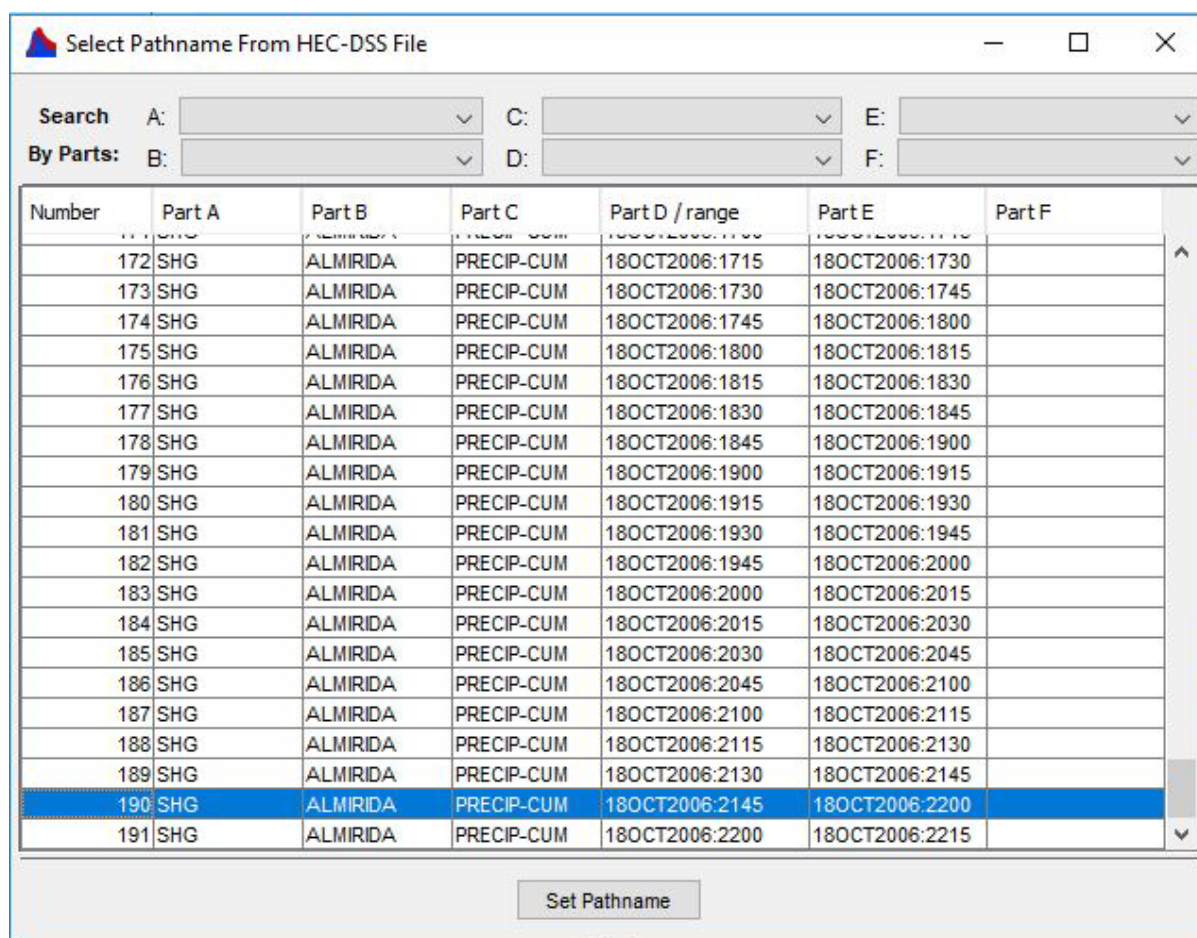
Αρχικά δημιουργήθηκε ένα νέο project, το [Almyrida_model.hms](#), και ακολούθως κατασκευάστηκε ένα καινούριο μοντέλο λεκάνης απορροής (Basin Model) στον Basin Model Manager, το [Almyrida_model-Basin](#), όπου και εισήχθησαν τα shapefiles που δημιουργήθηκαν στο ArcGIS 10.1, της υδρολογικής λεκάνης και του ρέματος της Αλμυρίδας, τα [Basin.shp](#) και [WHOLE_RIVER.shp](#) αντίστοιχα. Επάνω στο χάρτη της λεκάνης, στο Basin Model, τοποθετήθηκαν δύο υδρολογικά στοιχεία που συνθέτουν το εξεταζόμενο υδρολογικό σύστημα, μία υπολεκάνη (R10W10), καθώς και μία έξοδος του συστήματος (Outlet) ([USACE, 2016d, p. 49, 50, 123, 124, 132, 139](#)).



Εικόνα 4.1.1: Λεκάνη Απορροής Αλμυρίδας απαρτιζόμενη από την υπολεκάνη R10W10 και την έξοδο του συστήματος Outlet (HEC-HMS 4.2.1).

Έπειτα, μέσω του Grid Data Manager, δημιουργήθηκε ένας νέος κάνναβος, ο [Almyrida_model-Grid](#), που περιελάμβανε τα βροχοπτωτικά δεδομένα (Precipitation Gridset) που συλλέχθηκαν στη λεκάνη. Οι παράμετροι των μεθόδων που θα οριστούν στη συνέχεια θα πρέπει να εισαχθούν σε κάθε ξεχωριστό κελί, ενώ επιπλέον οι οριακές συνθήκες, όπως η

βροχόπτωση, πρέπει να είναι διαθέσιμες για κάθε πλεγματικό κελί. Το αρχείο .dss (Single Record HEC-DSS) που εισήχθη, το [precipitation_Almyrida.dss](#), δημιουργήθηκε μέσω του λογισμικού HEC-DSSVue 2.0.1, και περιείχε τα δεδομένα της βροχόπτωσης από τρία βροχής όπως καταγράφηκαν από το βροχομετρικό σταθμό της αεροπορίας στη Σούδα, και τα οποία ανάχθηκαν σε δεδομένα βροχόπτωσης ανά τέταρτο. Τα δεδομένα βροχόπτωσης που εισήχθησαν στο λογισμικό HEC-DSSVue 2.0.1 αφορούσαν την περίοδο από 16/10/2006 ώρα 22:30 έως 18/10/2006 ώρα 22:15. Από το αρχείο αυτό καθορίστηκε στο HEC-HMS 4.2.1 το όνομα της διαδρομής (pathname) προς ανάκτηση από το DSS αρχείο, [/SHG/ALMIRIDA/PRECIP-CUM/18OCT2006:2145/18OCT2006:2200//](#), το οποίο περιελάμβανε τα δεδομένα της αθροιστικής βροχόπτωσης, έως 18-10-2006 στις 22:00, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.1.2 παρακάτω (USACE, 2016d, p. 109, 115, 116).



Εικόνα 4.1.2: Επιλογή ονόματος διαδρομής (Pathname) από το DSS αρχείο (HEC-HMS 4.2.1).

Στον Πίνακα 4.1.1 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η χρονοσειρά της βροχόπτωσης η οποία χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του αιφνίδιου καταιγιδοφόρου συμβάντος στις 17/10/2006 στην Αλμυρίδα.

Πίνακας 4.1.1: Χρονοσειρά βροχοπτώτικού συμβάντος 17/10/2006 στην Αλμυρίδα (HEC-HMS 4.2.1).

Ημερομηνία / Ωρα	Βροχό- πτωση (mm)	Ημερομηνία / Ωρα	Βροχό- πτωση (mm)	Ημερομηνία / Ωρα	Βροχό- πτωση (mm)	Ημερομηνία / Ωρα	Βροχό- πτωση (mm)
16Οκτ2006 23:45	0.5	17Οκτ2006 11:30	1.5	17Οκτ2006 23:15	0.3	18Οκτ2006 11:00	0.3
17Οκτ2006 0:00	0.5	17Οκτ2006 11:45	1.5	17Οκτ2006 23:30	0.3	18Οκτ2006 11:15	0.3
17Οκτ2006 0:15	0.5	17Οκτ2006 12:00	1.5	17Οκτ2006 23:45	0.3	18Οκτ2006 11:30	0.3
17Οκτ2006 0:30	0.5	17Οκτ2006 12:15	1.0	18Οκτ2006 0:00	0.3	18Οκτ2006 11:45	0.3
17Οκτ2006 0:45	0.8	17Οκτ2006 12:30	1.0	18Οκτ2006 0:15	0.3	18Οκτ2006 12:00	0.3
17Οκτ2006 1:00	0.8	17Οκτ2006 12:45	1.0	18Οκτ2006 0:30	0.3	18Οκτ2006 12:15	0.3
17Οκτ2006 1:15	0.8	17Οκτ2006 13:00	1.0	18Οκτ2006 0:45	0.3	18Οκτ2006 12:30	0.3
17Οκτ2006 1:30	0.8	17Οκτ2006 13:15	0.3	18Οκτ2006 1:00	0.3	18Οκτ2006 12:45	0.3
17Οκτ2006 1:45	0.8	17Οκτ2006 13:30	0.3	18Οκτ2006 1:15	0.3	18Οκτ2006 13:00	0.3
17Οκτ2006 2:00	0.8	17Οκτ2006 13:45	0.3	18Οκτ2006 1:30	0.3	18Οκτ2006 13:15	0.3
17Οκτ2006 2:15	0.8	17Οκτ2006 14:00	0.3	18Οκτ2006 1:45	0.3	18Οκτ2006 13:30	0.3
17Οκτ2006 2:30	0.8	17Οκτ2006 14:15	0.3	18Οκτ2006 2:00	0.3	18Οκτ2006 13:45	0.3
17Οκτ2006 2:45	0.8	17Οκτ2006 14:30	0.3	18Οκτ2006 2:15	0.3	18Οκτ2006 14:00	0.3
17Οκτ2006 3:00	0.8	17Οκτ2006 14:45	0.3	18Οκτ2006 2:30	0.3	18Οκτ2006 14:15	0.3
17Οκτ2006 3:15	0.8	17Οκτ2006 15:00	0.3	18Οκτ2006 2:45	0.3	18Οκτ2006 14:30	0.3
17Οκτ2006 3:30	0.8	17Οκτ2006 15:15	0.3	18Οκτ2006 3:00	0.3	18Οκτ2006 14:45	0.3
17Οκτ2006 3:45	1.0	17Οκτ2006 15:30	0.3	18Οκτ2006 3:15	0.3	18Οκτ2006 15:00	0.3
17Οκτ2006 4:00	1.0	17Οκτ2006 15:45	0.3	18Οκτ2006 3:30	0.3	18Οκτ2006 15:15	0.3
17Οκτ2006 4:15	1.0	17Οκτ2006 16:00	0.3	18Οκτ2006 3:45	0.3	18Οκτ2006 15:30	0.3
17Οκτ2006 4:30	1.0	17Οκτ2006 16:15	0.3	18Οκτ2006 4:00	0.3	18Οκτ2006 15:45	0.3
17Οκτ2006 4:45	1.0	17Οκτ2006 16:30	0.3	18Οκτ2006 4:15	0.3	18Οκτ2006 16:00	0.3
17Οκτ2006 5:00	1.0	17Οκτ2006 16:45	0.3	18Οκτ2006 4:30	0.3	18Οκτ2006 16:15	0.3
17Οκτ2006 5:15	1.5	17Οκτ2006 17:00	0.3	18Οκτ2006 4:45	0.3	18Οκτ2006 16:30	0.3
17Οκτ2006 5:30	1.5	17Οκτ2006 17:15	0.3	18Οκτ2006 5:00	0.3	18Οκτ2006 16:45	0.3
17Οκτ2006 5:45	1.5	17Οκτ2006 17:30	0.3	18Οκτ2006 5:15	0.3	18Οκτ2006 17:00	0.3
17Οκτ2006 6:00	1.5	17Οκτ2006 17:45	0.3	18Οκτ2006 5:30	0.3	18Οκτ2006 17:15	0.3
17Οκτ2006 6:15	1.5	17Οκτ2006 18:00	0.3	18Οκτ2006 5:45	0.3	18Οκτ2006 17:30	0.3
17Οκτ2006 6:30	1.5	17Οκτ2006 18:15	0.3	18Οκτ2006 6:00	0.3	18Οκτ2006 17:45	0.3
17Οκτ2006 6:45	1.5	17Οκτ2006 18:30	0.3	18Οκτ2006 6:15	0.3	18Οκτ2006 18:00	0.3
17Οκτ2006 7:00	1.5	17Οκτ2006 18:45	0.3	18Οκτ2006 6:30	0.3	18Οκτ2006 18:15	0.3
17Οκτ2006 7:15	5.0	17Οκτ2006 19:00	0.3	18Οκτ2006 6:45	0.3	18Οκτ2006 18:30	0.3
17Οκτ2006 7:30	5.0	17Οκτ2006 19:15	0.3	18Οκτ2006 7:00	0.3	18Οκτ2006 18:45	0.3
17Οκτ2006 7:45	5.0	17Οκτ2006 19:30	0.3	18Οκτ2006 7:15	0.3	18Οκτ2006 19:00	0.3
17Οκτ2006 8:00	5.0	17Οκτ2006 19:45	0.3	18Οκτ2006 7:30	0.3	18Οκτ2006 19:15	0.3
17Οκτ2006 8:15	5.0	17Οκτ2006 20:00	0.3	18Οκτ2006 7:45	0.3	18Οκτ2006 19:30	0.3
17Οκτ2006 8:30	5.0	17Οκτ2006 20:15	0.3	18Οκτ2006 8:00	0.3	18Οκτ2006 19:45	0.3
17Οκτ2006 8:45	7.0	17Οκτ2006 20:30	0.3	18Οκτ2006 8:15	0.3	18Οκτ2006 20:00	0.3
17Οκτ2006 9:00	7.0	17Οκτ2006 20:45	0.3	18Οκτ2006 8:30	0.3	18Οκτ2006 20:15	0.3
17Οκτ2006 9:15	7.0	17Οκτ2006 21:00	0.3	18Οκτ2006 8:45	0.3	18Οκτ2006 20:30	0.3
17Οκτ2006 9:30	7.0	17Οκτ2006 21:15	0.3	18Οκτ2006 9:00	0.3	18Οκτ2006 20:45	0.3
17Οκτ2006 9:45	7.0	17Οκτ2006 21:30	0.3	18Οκτ2006 9:15	0.3	18Οκτ2006 21:00	0.3
17Οκτ2006 10:00	7.0	17Οκτ2006 21:45	0.3	18Οκτ2006 9:30	0.3	18Οκτ2006 21:15	0.3
17Οκτ2006 10:15	17.5	17Οκτ2006 22:00	0.3	18Οκτ2006 9:45	0.3	18Οκτ2006 21:30	0.3
17Οκτ2006 10:30	17.5	17Οκτ2006 22:15	0.3	18Οκτ2006 10:00	0.3	18Οκτ2006 21:45	0.3
17Οκτ2006 10:45	5.0	17Οκτ2006 22:30	0.3	18Οκτ2006 10:15	0.3	18Οκτ2006 22:00	0.3
17Οκτ2006 11:00	5.0	17Οκτ2006 22:45	0.3	18Οκτ2006 10:30	0.3	Σύνολο (mm)	196.2
17Οκτ2006 11:15	1.5	17Οκτ2006 23:00	0.3	18Οκτ2006 10:45	0.3		

Ακολούθως, στο μοντέλο της λεκάνης απορροής της Αλμυρίδας, το [Almyrida_model-Basin](#), επιλέχθηκε ως αρχείο πλεγματοκελιών (Grid Cell File) το ψηφιακό αρχείο [Almyrida.mod](#), το οποίο είναι απαραίτητο για τη μέθοδο πλεγματοκελιού υπολογισμού επιφανειακής απορροής ModClark. Οι απώλειες καθώς και ο υπολογισμός επιφανειακής απορροής θα πραγματοποιηθούν με βάση τα πλεγματοκελιά ([USACE, 2016d, p. 57, 129](#)). Η υπολεκάνη R10W10, επιφάνειας ίσης με 36.74 km², όπως σχεδιάστηκε και μετρήθηκε στο ArcGIS 10.1, εκρέει στα κατάντη στο σταθμό Outlet (έξοδος συστήματος), όπως φαίνεται και στην κάτωθι Εικόνα 4.1.3.

The screenshot shows the 'Subbasin' dialog box in HEC-HMS 4.2.1. The 'Basin Name' is 'Almyrida_model-Basin' and the 'Element Name' is 'R10W10'. The 'Description' field is empty. The 'Downstream' dropdown is set to 'Outlet'. The 'Area (KM2)' is 36,74. The latitude and longitude fields are empty. The 'Canopy Method' is set to '--None--', 'Surface Method' is '--None--', 'Loss Method' is 'SCS Curve Number', 'Transform Method' is 'ModClark', and 'Baseflow Method' is 'Recession'.

Εικόνα 4.1.3: Σύνδεση λεκάνης R10W10 στα κατάντη με έξοδο συστήματος, επιφάνεια λεκάνης & μέθοδοι μοντελοποίησης βροχοπτώσιου γεγονότος (HEC-HMS 4.2.1).

Οι μέθοδοι που ακολουθήθηκαν για τη μοντελοποίηση του μελετώμενου βροχοπτώσιου γεγονότος στη λεκάνη περιγράφονται παρακάτω:

✧ Μέθοδος Απωλειών (Loss Method): *SCS Curve Number*

Η μέθοδος αυτή υπολογίζει την περίσσεια βροχόπτωσης που απορρέει απευθείας επιφανειακά, ως συνάρτηση της συσσωρευτικής βροχόπτωσης, της κάλυψης του εδάφους, των χρήσεων γης και των προγενέστερων συνθηκών εδαφικής υγρασίας ([USACE, 2000, p. 37](#)). Η διήθηση κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος ορίζεται ως η διαφορά του κατακρημνισμένου και απορρέοντος όγκου ύδατος στο τέλος δύο διαδοχικών χρονικών διαστημάτων. Οι παράμετροι που αφορούν τη μέθοδο απωλειών είναι: η *Initial abstraction*, που εκφράζει την ποσότητα της βροχόπτωσης στο έδαφος προτού ξεκινήσει η επιφανειακή απορροή, και ο *Curve number (CN)* που αντιπροσωπεύει όλους τους διαφορετικούς τύπους εδάφους και τις διαφορετικές χρήσεις γης. Στην εν λόγω παράμετρο δε συμπεριλαμβάνονται οι αδιαπέρατες εκτάσεις της λεκάνης, οι οποίες εξετάζονται ξεχωριστά ως ποσοστό της αδιαπερατότητας (*Impervious %*).

Συγκεκριμένα, δεν πραγματοποιούνται υπολογισμοί απωλειών σε αδιαπέρατες περιοχές της λεκάνης, στις οποίες όλη η ποσότητα της βροχόπτωσης καταλήγει σε απευθείας απορροή επιφανειακά (USACE, 2016d, p. 202, 203).

Για μια λεκάνη η οποία αποτελείται από διάφορους τύπους εδάφους και διαφορετικές χρήσεις γης, ο curve number υπολογίζεται ως τα επιμέρους αθροίσματα των % καλύψεων (Land Use – LU) επί τον αντίστοιχο curve number (CN), δηλαδή: $CN = \sum_{i=1}^N (LU_i \times CN_i)$.

Για την υπό μελέτη λεκάνη θεωρούμε έναν ενιαίο τύπο εδάφους που σχετίζεται με τη γεωλογική σύσταση, και ο οποίος χαρακτηρίζεται ως τύπος εδάφους A: άμμος, αργιλώδης άμμος ή αμμώδης άργιλος. Τα εδάφη που ανήκουν στον τύπο A έχουν χαμηλό δυναμικό απορροής και υψηλές ταχύτητες διείσδυσης, ακόμη και όταν είναι καλά διαβρεγμένα. Αποτελούνται κυρίως από βαθιά, καλά έως πολύ αποστραγγισμένη άμμο ή χαλίκια, έχοντας υψηλό ρυθμό διαβίβασης του νερού (μεγαλύτερο από 0.30 in/hr \approx 7.62 mm/hr) (USDA, 1989, Appendix A, p. A-1). Στην περιοχή της Αλμυρίδας, πριν το ακραίο καιταιγιδόφορο γεγονός της 17/10/2006, δεν είχε σημειωθεί βροχόπτωση για περίοδο 5 μηνών, εκτός από την 11^η και 12^η Οκτωβρίου που σημειώθηκε ύψος βροχόπτωσης 21 mm (Grillakis *et al.*, 2016). Οι συνθήκες υγρασίας που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των 5 προηγούμενων ημερών ανάμεσα σε 13 mm και 38 mm, χαρακτηρίζονται ως *συνθήκες υγρασίας Τύπου II* (μέσες συνθήκες) (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 277). Για τύπο εδάφους A, ο curve number ανά εμφανιζόμενη χρήση γης, για μέτρια υδρολογική κατάσταση (συνθήκες υγρασίας Τύπου II), παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1.2 που ακολουθεί (USDA, 1989, Appendix A, p. 2-6, 2-7).

Πίνακας 4.1.2: Curve Numbers απορροής, για καλλιεργήσιμες και μη, αγροτικές εκτάσεις στη λεκάνη της Αλμυρίδας, για τύπο εδάφους A & μέσες συνθήκες υγρασίας. (Πηγή: USDA, 1989, Appendix A, p. 2-6, 2-7)

Κατηγορίες χρήσεων γης	Curve Number (Τύπος Εδάφους A)
Ελαιώνες	64
Βοσκότοποι	49
Σύνθετες καλλιεργήσιμες εκτάσεις	69.5
Εκτάσεις κυρίαρχα Γεωργικές, με σημαντικές εκτάσεις Φυσικής Βλάστησης	69.5
Φυσικά λιβάδια	30
Σκληρόφυλλη βλάστηση	35

Τότε ο curve number της υδρολογικής λεκάνης της Αλμυρίδας υπολογίζεται ίσος με:

$$CN = (40.705\% \times 64) + (4.54\% \times 49) + (10.995\% \times 69.5)$$

$$+ (16.32\% \times 69.5) + (1.50\% \times 30) + (25.94\% \times 35) \Rightarrow \mathbf{CN=56.79}$$

Η αρχική απώλεια (Initial Abstraction – I_a) μπορεί να οριστεί ως ένα ποσοστό της δυνητικά μέγιστης κατακράτησης (Potential maximum retention – S) αφού ξεκινήσει η απορροή, και συγκεκριμένα: $I_a = 0.2S$, όπου $S = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \text{in}$ (USACE, 2000, p. 37-38), επομένως:

$$I_a = 0.2 \times \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \text{in} \times 25.4 \frac{\text{mm}}{\text{in}} \Rightarrow I_a = 0.2 \times \left(\frac{1000}{56.79} - 10 \right) \times 25.4 \text{mm} \Rightarrow I_a = 38.65 \text{ mm}$$

Λόγω της γεωλογικής σύστασης της μελετώμενης λεκάνης, σύμφωνα με τον προγενέστερο Πίνακα 3.3.1, δεν είναι εφικτό να εκτιμηθεί ακριβώς το ποσοστό των αδιαπέρατων πετρωμάτων για τη συνολική λεκάνη, αποτελούμενο από μάργες, αργίλους, αργιλικές αποθέσεις, και πιθανώς μέρος των αλλουβιακών αποθέσεων στις όχθες των ρεμάτων. Επομένως το % **Impervious** θα υπολογιστεί μέσω *βαθμονόμησης* του μοντέλου. Βάσει του Πίνακα 3.3.1, λαμβάνεται εύρος τιμών για τη βαθμονόμηση (5-24.5)%.

✧ Μέθοδος Υπολογισμού Επιφανειακής Απορροής (Transform Method): *ModClark*

Η μέθοδος υπολογισμού επιφανειακής απορροής ModClark πρόκειται για μία γραμμική, ομοιόμορφη-κατανομημένη μέθοδο, βασισμένη στο εννοιολογικό μοναδιαίο υδρογράφημα Clark. Κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η αναπαράσταση της λεκάνης μέσω κελιών καννάβου. Οι παράμετροι που αφορούν τη μέθοδο ModClark επιφανειακής απορροής είναι: ο *χρόνος συγκέντρωσης* T_c , που ορίζεται ως ο απαιτούμενος χρόνος ώστε το βρόχινο νερό στο πιο απομακρυσμένο πλεγματοειδές κελί της εξεταζόμενης λεκάνης να φτάσει στην εκβολή, και ο *συντελεστής αποθήκευσης* (*storage coefficient*, R), ο οποίος χρησιμοποιείται σε ένα γραμμικό ταμιευτήρα για κάθε κελί του (USACE, 2016d, p. 213). Ο συντελεστής αποθήκευσης της λεκάνης εκφράζει την προσωρινή αποθήκευση της περίσσειας κατακρήμνισης στη λεκάνη απορροής καθώς διοχετεύεται στην έξοδο αυτής, που ερμηνεύεται ως εξασθένιση του απορρέοντος ύδατος εξαιτίας της διήθησης, ενώ λαμβάνει την ίδια τιμή για όλα τα κελιά της λεκάνης (USACE, 2000, p. 59; USACE, 2016c, p. 213). Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ένας δείκτης χρόνου μεταφοράς για κάθε κελί, ο οποίος καθορίζεται ανά κελί από το συνολικό χρόνο συγκέντρωσης. Το πλεγματοειδές κελί της λεκάνης απορροής με το μεγαλύτερο δείκτη χρόνου μεταφοράς θα έχει ακριβώς αυτό τον χρόνο συγκέντρωσης. Τα υπόλοιπα πλεγματοειδή κελιά θα έχουν ένα κλιμακωτό χρόνο συγκέντρωσης με βάση την αναλογία του δείκτη χρόνου μεταφοράς του κελιού προς το μέγιστο δείκτη χρόνου μεταφοράς (USACE, 2016d, p. 213).

Από την εμπειρική σχέση των Turazza-Giandotti, ο χρόνος συγκέντρωσης ή χρόνος συρροής, T_c (hr) υπολογίζεται ως:

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}}, \text{ όπου:}$$

A: η έκταση της λεκάνης (km²)

L: το μήκος της κύριας μισγάγκειας (μέγιστος υδραυλικός δρόμος) (km)

ΔH: η διαφορά του μέσου υψομέτρου από το υψόμετρο στην έξοδο (m) (Μαμάσης και Κουτσογιάννης, 1999).

Από τη σχεδίαση του ρέματος της Αλμυρίδας στο ArcGIS 10.1, προκύπτει ότι το μήκος της κύριας μισγάγκειας ισούται με L=11525.50973 m, ήτοι 11.5255 km. Τότε, για έκταση της λεκάνης A=36.74 km² και διαφορά μέσου υψομέτρου από το υψόμετρο εξόδου ΔH= (206-0) m = 206 m, προκύπτει χρόνος συγκέντρωσης:

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}} = \frac{4\sqrt{36.74} + (1.5 \times 11.5255)}{0.8\sqrt{206}} \text{ hr} \Rightarrow T_c = 3.6172 \text{ hr}$$

Σύμφωνα με τον USACE, 2016d, p. 208, σε πολλές μελέτες έχει εξακριβωθεί ότι ο όρος

$\frac{R}{T_c + R}$ παραμένει σταθερός σε μια περιοχή. Ο όρος αυτός μπορεί να λαμβάνει τιμές από 0.1,

οπότε και το μοναδιαίο υδρογράφημα αυξάνεται απότομα και είναι αντιπροσωπευτικό της απορροής σε μια αστική λεκάνη απορροής, έως και 0.7, οπότε και το μοναδιαίο υδρογράφημα είναι αρκετά εξασθενημένο και αντιπροσωπεύει συνήθως μια επίπεδη και βαλτώδη λεκάνη απορροής (USACE, 1994, p. 7-9). Για τιμές του όρου από 0.1 έως 0.7, υπολογίζονται αναλυτικά οι τιμές του συντελεστή αποθήκευσης R, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1.3 που ακολουθεί.

Πίνακας 4.1.3: Συντελεστής αποθήκευσης R (hr) συναρτήσει των χρήσεων γης της λεκάνης.

R/(T _c +R)	Συντελεστής αποθήκευσης R (hr)	R/(T _c +R)	Συντελεστής αποθήκευσης R (hr)
0.1	0.40191	0.4	2.41147
0.15	0.63833	0.45	2.95953
0.2	0.9043	0.5	3.6172
0.25	1.20573	0.55	4.42102
0.3	1.55023	0.6	5.4258
0.325	1.7416	0.65	6.71766
0.35	1.94772	0.7	8.44013
0.375	2.17032		

Ο συντελεστής αποθήκευσης R (hr) θα υπολογιστεί μέσω βαθμονόμησης του μοντέλου.

✧ Μέθοδος Βασικής Απορροής (Baseflow Method): *Recession*

Με την εν λόγω μέθοδο μοντελοποιείται η ύφεση που υφίσταται η βασική απορροή σε μια λεκάνη απορροής, προσεγγίζοντας την τυπική συμπεριφορά που παρατηρείται κατά την εκθετική μείωση ροής εντός του καναλιού, έπειτα από ένα καταγιδόφορο γεγονός. Στη συγκεκριμένη μέθοδο δεν ισχύει η αρχή διατήρησης της μάζας εντός μιας υπολεκάνης. Προαπαιτούμενος της μεθόδου είναι ο προσδιορισμός της αρχικής βασικής απορροής. Για τη μελετώμενη υδρολογική λεκάνη επιλέχθηκε η μέθοδος *αρχικής απορροής ανά επιφάνεια* (*initial discharge per area*). Η αρχική βασική απορροή ορίζεται ως ο όγκος νερού ανά επιφάνεια και ανά χρόνο. Η **αρχική απορροή ανά επιφάνεια** θα υπολογιστεί μέσω [βαθμονόμησης](#) του μοντέλου. Η *σταθερά ύφεσης* (*recession constant*) περιγράφει το ρυθμό μείωσης της βασικής απορροής μεταξύ δύο καταγιδόφωρων γεγονότων, και ορίζεται ως ο λόγος της ποσότητας βασικής απορροής που μετρείται σε μια δεδομένη χρονική στιγμή προς την αντίστοιχη ποσότητα βασικής απορροής που μετρήθηκε μια μέρα νωρίτερα (USACE, 2016d, p. 226). Το εύρος των τιμών της σταθεράς ύφεσης για επιφανειακή απορροή υδάτων είναι μεταξύ 0.3 και 0.8 (USACE, 2000, p. 73). Η **σταθερά ύφεσης** θα υπολογιστεί μέσω [βαθμονόμησης](#) του μοντέλου. Η μέθοδος επαναφοράς της βασικής απορροής στο αρχικό της επίπεδο, που επιλέχθηκε μετά το πέρας ενός καταγιδόφωρου συμβάντος, είναι η *αναλογία έως την κορυφή* (*Ratio to peak*). Η **αναλογία έως την κορυφή** θα υπολογιστεί μέσω [βαθμονόμησης](#) του μοντέλου. Η βασική απορροή θα επαναρυθμιστεί στο αρχικό επίπεδό της όταν η τρέχουσα ροή διαιρούμενη με τη μέγιστη ροή του βροχοπτώσιου γεγονότος μειωθεί στην καθορισμένη τιμή (USACE, 2016d, p. 226).

Για την υδρολογική προσομοίωση του αιφνίδιου πλημμυρικού γεγονότος στη λεκάνη της Αλμυρίδας στις 17/10/2006, δεν ελήφθησαν υπ' όψιν μέθοδοι φυτοκάλυψης (*canopy method*), καθώς και επιφανειακής προσομοίωσης του εδάφους (*surface method*).

Ακολούθως, δημιουργήθηκε το μετεωρολογικό μοντέλο (Meteorologic Model) στον Meteorologic Model Manager, το [Almyrida_model-Met](#), όπου επιλέχθηκε να συμπεριληφθεί η υπολεκάνη R10W10, ενώ ως Μέθοδος Βροχόπτωσης (Precipitation) επιλέχθηκε η *Gridded Precipitation*, όπως φαίνεται στις Εικόνες 4.1.4 και 4.1.5 παρακάτω. Η εν λόγω μέθοδος είναι σχεδιασμένη ώστε να λειτουργεί με τη μέθοδο πλεγματού υπολογισμού επιφανειακής απορροής ModClark. Η συνηθέστερη εφαρμογή της μεθόδου είναι για την εκτίμηση του κατακρημνιζόμενου ύδατος με χρήση ραντάρ. Τα πλεγματού δεδομένα βροχόπτωσης μπορούν να προέρχονται από πηγές ραντάρ, είτε να είναι αποτέλεσμα πολύπλοκων υπολογισμών, που ωστόσο αποθηκεύονται ως πλέγμα βροχής. Στην περίπτωση που το πλέγμα

βροχής έχει αποθηκευτεί με μετατόπιση ζώνης ώρας, δύναται να χρησιμοποιηθεί η *χρονική μετατόπιση (time shift)* για τη διόρθωση του πλέγματος δεδομένων. Κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης, όλοι οι υπολογισμοί υπολογίζονται υποθέτοντας μια αυθαίρετη τοπική ζώνη ώρας. Τα δεδομένα βροχόπτωσης από πηγές ραντάρ συνήθως αναφέρονται σε Coordinated Universal Time (UTC). Στη μελετώμενη βροχόπτωση στη λεκάνη της Αλμυρίδας την 17/10/2006, όλες οι χρονοσειρές και τα πλεγματικά δεδομένα αναφέρονται στην ίδια τοπική ζώνη ώρας, και για το λόγο αυτό η **χρονική μετατόπιση** τίθεται ίση με **0 hr** (USACE, 2016d, p. 283, 284, 310, 318, 319), όπως παρουσιάζεται και στην κάτωθι Εικόνα 4.1.6.

Εικόνα 4.1.4: Μετεωρολογικό μοντέλο λεκάνης Αλμυρίδας (HEC-HMS 4.2.1).

Met Name: Almyrida_model-Met	
Basin Model	Include Subbasins
Almyrida_model-Basin	Yes

Εικόνα 4.1.5: Ένταξη υπολεκάνης R10W10 στο μετεωρολογικό μοντέλο λεκάνης Αλμυρίδας (HEC-HMS 4.2.1).

Εικόνα 4.1.6: Χρονική μετατόπιση πλέγματος μετεωρολογικών δεδομένων (HEC-HMS 4.2.1).

Τέλος, ορίστηκαν οι προδιαγραφές ελέγχου (Control Specifications) στον Control Specifications Manager, με όνομα [Almyrida_16-17-18Oct2006](#), θέτοντας ημερομηνία έναρξης, ώρα έναρξης, ημερομηνία λήξης και ώρα λήξης του βροχοπτώσιου γεγονότος, καθώς και το χρονικό βήμα εκτέλεσης των υπολογισμών κατά την προσομοίωση. Το χρονικό βήμα δύναται να κυμαίνεται από 1 min έως 1 day. Το ίδιο χρονικό βήμα θα χρησιμοποιηθεί κατά την προβολή των αποτελεσμάτων της χρονοσειράς από την προσομοίωση (USACE, 2016d, p. 59, 65, 66). Για την υδρολογική προσομοίωση του συμβάντος ορίστηκε χρονικό πλαίσιο με έναρξη την 16-10-2006, ώρα 23:30, λήξη την 18-10-2006, ώρα 22:00, και χρονικό βήμα 15 min, με συνολική διάρκεια μοντελοποίησης τις 46.5 h, όπως φαίνεται αναλυτικά και στην Εικόνα 4.1.7 που ακολουθεί.

Name: Almyrida_16-17-18Oct2006	
Description:	Hourly Gridded
*Start Date (ddMMYYYY)	16Oct2006
*Start Time (HH:mm)	23:30
*End Date (ddMMYYYY)	18Oct2006
*End Time (HH:mm)	22:00
Time Interval:	15 Minutes

Εικόνα 4.1.7: Χρονικό πλαίσιο μοντελοποίησης βροχοπτώτικού συμβάντος (HEC-HMS 4.2.1).

4.2 Βαθμονόμηση μοντέλου HEC-HMS 4.2.1

Για την υπολεκάνη R10W10, χρησιμοποιώντας τις υπολογισμένες τιμές των παραμέτρων: $CN=56.79$, $I_a=38.65$ mm και $T_c=3.6172$ hr, θα πραγματοποιηθεί *βαθμονόμηση (calibration)* των υπόλοιπων παραμέτρων, από βιβλιογραφική ανασκόπηση, όπως έχει ήδη σημειωθεί. Εν γένει, η βαθμονόμηση χρησιμοποιεί τα παρατηρούμενα υδρομετεωρολογικά δεδομένα, αναζητώντας συστηματικά τις υπόλοιπες παραμέτρους που παρέχουν την καλύτερη προσαρμογή των υπολογισθέντων αποτελεσμάτων με τη μετρηθείσα απορροή (USACE, 2000, p. 94). Στη συνέχεια, θα γίνει *ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis)* του μοντέλου, ώστε να διαπιστωθεί ποιες από τις βαθμονομούμενες παραμέτρους αλλάζουν το χρόνο εμφάνισης της μέγιστης απορροής (peak discharge). Ταυτόχρονα θα ελεγχθεί ποιες παράμετροι επηρεάζουν το μέγεθος της μέγιστης απορροής (*order of magnitude analysis & sensitivity analysis*). Οι παράμετροι θα βαθμονομηθούν με τρόπο τέτοιο ώστε να γίνει *επαλήθευση του μοντέλου (model verification)* σύμφωνα με τη μέτρηση του ύψους ροής στη διατομή ελέγχου έπειτα από την πλημμύρα (*post flood measurement*) των 2m. Όπως έχει ήδη καταγραφεί, τα εύρη τιμών για το Impervious (%) είναι (5-24.5)%, για το συντελεστή αποθήκευσης R είναι (0.40191-8.44013) hr, και για τη σταθερά ύφεσης είναι 0.3-0.8 [-].

4.2.1 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων, ανάλυση μεγέθους μέγιστης απορροής - Επαλήθευση μοντέλου

Οι δοκιμές που διεξήχθησαν για την ανάλυση ευαισθησίας, την ανάλυση του μεγέθους μέγιστης απορροής και την επαλήθευση του υδρολογικού μοντέλου φαίνονται συνολικά στον Πίνακα 4.2.1.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 4.2.1.1: Βαθμονόμηση παραμέτρων μοντέλου διεξάγοντας ανάλυση ευαισθησίας, ανάλυση μεγέθους μέγιστης απορροής (HEC-HMS 4.2.1) & επαλήθευση του μοντέλου (1D HEC-RAS 5.0.3).

A/A	Impervious (%)	Storage Coefficient R (hr)	Initial Discharge per area (m ³ /s/km ²)	Recession Constant	Ratio to Peak	Peak Discharge (m ³ /s)	Time of Peak	Depth in down-stream XS (m)
1	5	4.42102	0.2	0.3	0.1	72.6	13:45	0.98
2	5	3.6172	0.2	0.3	0.1	81.4	13:30	1.08
3	5	2.41147	0.2	0.3	0.1	100.1	13:30	1.56
4	5	2.41147	0.2	0.8	0.1	102.9	13:30	1.70
5	5	1.55023	0.2	0.3	0.1	118.7	13:15	2.24
6	10	1.55023	0.2	0.3	0.1	126.5	13:15	2.27
7	10	1.55023	0.5	0.3	0.1	132	13:15	2.29
8	10	1.55023	0.05	0.3	0.1	123.7	13:15	2.26
9	15	1.55023	0.05	0.3	0.1	131.6	13:15	2.29
10	15	1.20573	0.05	0.3	0.1	140.5	13:00	2.32
11	15	1.20573	0.05	0.3	0.2	140.5	13:00	2.32
12	15	1.20573	0.05	0.3	0.025	140.5	13:00	2.32
13	10	1.20573	0.05	0.3	0.025	132.6	13:15	2.29
14	10	1.55023	0.05	0.3	0.025	123.7	13:15	2.26
15	10	1.94772	0.05	0.3	0.025	113.9	13:15	2.19
16	10	2.41147	0.05	0.3	0.025	104.5	13:30	1.77
17	10	2.17032	0.05	0.3	0.025	109.2	13:30	1.99
18	10	1.7416	0.05	0.3	0.025	118.9	13:15	2.24
19	8.5	1.7416	0.05	0.3	0.025	116.6	13:15	2.22
20	8.5	1.55023	0.05	0.3	0.025	121.4	13:15	2.25
21	6.5	1.55023	0.05	0.3	0.025	118.3	13:15	2.23
22	6.5	1.7416	0.05	0.3	0.025	113.5	13:15	2.15
23	6	1.7416	0.05	0.3	0.025	112.7	13:15	2.11
24	5.5	1.7416	0.05	0.3	0.025	111.9	13:15	2.08
25	5	1.7416	0.05	0.3	0.025	111.1	13:15	2.04

Αρχικά έγινε τυχαία επιλογή, εντός των προαναφερθέντων ευρών, για τις 5 εξεταζόμενες παραμέτρους. Βάσει των αποτελεσμάτων, έγινε αλλαγή σε μία παράμετρο κάθε φορά, με στόχο την επίτευξη εκτιμώμενης μέγιστης απορροής (peak discharge) περίπου 120 m³/s, εξαιτίας της μέγιστης βροχόπτωσης που έλαβε χώρα το μεσημέρι (Tsanis *et al.*, 2014; ECLISE, 2014, p. 25). Η εκτιμώμενη μέγιστη απορροή θα πρέπει να αποδίδει στο υδραυλικό μοντέλο (HEC-RAS 5.0.3) ύψος απορρέοντος ύδατος περίπου 2m στην κατάντη διατομή ελέγχου, στην έξοδο της λεκάνης, όπως μετρήθηκε τις επόμενες μέρες, μετά το πέρας της πλημμύρας (Tsanis *et al.*, 2014).

Οι δοκιμές ξεκίνησαν με αλλαγές στο συντελεστή αποθήκευσης R , μειώνοντάς τον σταδιακά από 4.42102 hr σε 2.41147 hr, οπότε και διαπιστώθηκε ότι το μέγεθος της μέγιστης απορροής αυξανόταν, από 72.6 m³/s σε 100.1 m³/s, με ταυτόχρονη μείωση του χρόνου στον οποίο σημειωνόταν η μέγιστη αυτή απορροή, από τις 13:45 στις 13:30. Ακολούθως αυξήθηκε η σταθερά ύφεσης στο ανώτατο όριο της, δηλ. 0.8, και προκλήθηκε νέα αύξηση της μέγιστης απορροής σε 102.9 m³/s, χωρίς να επηρεάζεται η ώρα εμφάνισης του peak. Στο δεδομένο σημείο αποφασίστηκε να σταθεροποιηθεί η τιμή της **σταθεράς ύφεσης** (recession constant) στο κατώτατο όριο της, δηλ. **0.3**. Με επιπλέον μείωση του συντελεστή αποθήκευσης R σε 1.55023 hr, παρατηρήθηκε νέα μείωση του χρόνου εμφάνισης της μέγιστης απορροής – η οποία αυξήθηκε σε 118.7 m³/s – στις 13:15. Στη συνέχεια δοκιμάστηκε η αύξηση του ποσοστού αδιαπερατότητας από 5% σε 10%. Ως αποτέλεσμα, αυξήθηκε το μέγεθος της μέγιστης απορροής σε 126.5 m³/s, χωρίς μεταβολή στο χρόνο εμφάνισης του μεγέθους αυτού. Έπειτα δοκιμάστηκαν μεταβολές στην αρχική απορροή ανά επιφάνεια, αρχικά με αύξηση από 0.2 m³/s/km² σε 0.5 m³/s/km², οπότε και αυξήθηκε η μέγιστη απορροή σε 132 m³/s, και στη συνέχεια με μείωση σε 0.05 m³/s/km², οπότε και μειώθηκε το μέγεθος της μέγιστης απορροής σε 123.7 m³/s, χωρίς μεταβολή της ώρας εμφάνισης του peak. Οπότε, στο σημείο αυτό αποφασίστηκε η σταθεροποίηση της **αρχικής απορροής ανά επιφάνεια** (initial discharge per area) σε **0.05 m³/s/km²**. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκαν κάποιες δοκιμές για περαιτέρω αύξηση της % αδιαπερατότητας σε 15%. Όπως αναμενόταν, η μέγιστη απορροή αυξήθηκε σε 131.6 m³/s, χωρίς μεταβολή του χρόνου εμφάνισης αυτής. Με περαιτέρω επίσης μείωση του συντελεστή αποθήκευσης R σε 1.20573 hr, η μέγιστη απορροή αυξήθηκε σε 140.5 m³/s, με ταυτόχρονη μείωση του χρόνου εμφάνισής της, στις 13:00. Κατόπιν, έγιναν κάποιες δοκιμές στην αναλογία έως την κορυφή, αρχικά αυξάνοντάς την από 0.1 σε 0.2, και έπειτα μειώνοντας την σε 0.025, και παρατηρήθηκε ότι το μέγεθος της μέγιστης απορροής έμεινε αμετάβλητο, όπως και ο χρόνος εμφάνισής του. Επομένως, στο σημείο αυτό κρίθηκε ότι δύναται να σταθεροποιηθεί η τιμή της **αναλογίας έως την κορυφή** (ratio to peak) σε **0.025**. Η μείωση της % αδιαπερατότητας σε 10% σήμανε μείωση της μέγιστης απορροής σε 132.6 m³/s, με ταυτόχρονη αύξηση του χρόνου εμφάνισης του peak, στις 13:15. Ακολούθως η αύξηση του συντελεστή αποθήκευσης R , σταδιακά, έως την τιμή 2.41147 hr, επέφερε επιπλέον μείωση της μέγιστης απορροής σε 104.5 m³/s, και συγχρόνως αυξήθηκε ο χρόνος εμφάνισης του peak, στις 13:30. Οπότε, στην πορεία διεξήχθησαν περαιτέρω δοκιμές αναφορικά με το συντελεστή αποθήκευσης R , μειώνοντάς τον σταδιακά σε 1.7416, οπότε και το μέγεθος μέγιστης απορροής αυξήθηκε σε 118.9 m³/s, με ταυτόχρονη μείωση του χρόνου εμφάνισής του, στις 13:15. Εφεξής, όσες δοκιμές εκτελέστηκαν, όλες έδωσαν ως αποτέλεσμα χρόνο εμφάνισης της

μέγιστης απορροής στις 13:15. Στη συνέχεια, δοκιμάστηκε η μείωση της % αδιαπερατότητας σε 8.5%, οπότε και μειώθηκε η μέγιστη απορροή σε 116.6 m³/s, και έπειτα κρίθηκε να δοκιμαστεί η μείωση του συντελεστή αποθήκευσης R σε 1.55023 hr, οπότε και η μέγιστη απορροή αυξήθηκε σε 121.4 m³/s. Για την επαλήθευση του μοντέλου χρειάστηκαν ακόμα κάποιες δοκιμές. Έτσι, μειώθηκε η % αδιαπερατότητα σε 6.5% που συνέβαλε σε μείωση της μέγιστης απορροής σε 118.3 m³/s. Έπειτα, κρίθηκε ότι πρέπει να αυξηθεί ο συντελεστής αποθήκευσης σε 1.7416 hr, ο οποίος προκάλεσε επιπλέον μείωση του μεγέθους μέγιστης απορροής σε 113.5 m³/s. Στη φάση αυτή, κρίθηκε ότι πρέπει να σταθεροποιηθεί ο **συντελεστής αποθήκευσης** (storage coefficient) σε **R=1.7416 hr**. Ακολούθως, έγιναν κάποιες δοκιμές σταδιακής μείωσης του ποσοστού αδιαπερατότητας έως την τιμή 5%, οπότε και μειώθηκε επιπρόσθετα η μέγιστη απορροή σε 111.1 m³/s. Η τιμή της **% αδιαπερατότητας** (% Impervious) του **5%** είναι αυτή που σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες βαθμονομημένες παραμέτρους, συνεπάγεται μέγιστη απορροή 111.1 m³/s στις 13:15, η οποία επαληθεύει το μοντέλο (*model verification*) σύμφωνα με τη μέτρηση του ύψους ροής των 2 m στη διατομή ελέγχου, μετά το πέρας της πλημμύρας.

Basin Name: Almyrida_model-Basin
Element Name: R10W10
Initial Abstraction (MM): 38,65
*Curve Number: 56,79
*Impervious (%): 5

Εικόνα 4.2.1.1: Μέθοδος Απωλειών για τη λεκάνη της Αλμυρίδας (HEC-HMS 4.2.1).

Basin Name: Almyrida_model-Basin
Element Name: R10W10
*Time of Concentration (HR): 3,6172
*Storage Coefficient (HR): 1,7416

Εικόνα 4.2.1.2: Μέθοδος Υπολογισμού Επιφανειακής Απορροής για τη λεκάνη της Αλμυρίδας (HEC-HMS 4.2.1).

Basin Name: Almyrida_model-Basin
Element Name: R10W10
Initial Type: Discharge per Area
*Initial Discharge (M3/S /KM2): 0,05
*Recession Constant: 0,3
Threshold Type: Ratio To Peak
*Ratio: 0,025

Εικόνα 4.2.1.3: Μέθοδος Βασικής Απορροής λεκάνης Αλμυρίδας (HEC-HMS 4.2.1).

Επομένως, με την εισαγωγή των παραπάνω υπολογισμένων και βαθμονομημένων μεταβλητών, προσομοιάστηκε υδρολογικά η πλημμύρα, και με την εκτέλεση του μοντέλου εξήχθησαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα οποία παρουσιάζονται στην §5.1.

4.3 Δεδομένα γεωμετρίας σε ArcGIS 10.1 – Σύνδεση με HEC-RAS 5.0.3

Για την παρούσα μελέτη, το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DTM) υψηλής ανάλυσης παρείχε τα δεδομένα των διατομών που χρησιμοποιήθηκαν για την 1D υδραυλική μοντελοποίηση, καθώς και για το ενιαίο υδραυλικό μοντέλο 1D/2D προσομοίωσης του πλημμυρικού συμβάντος στην Αλμυρίδα, με το HEC-RAS 5.0.3.

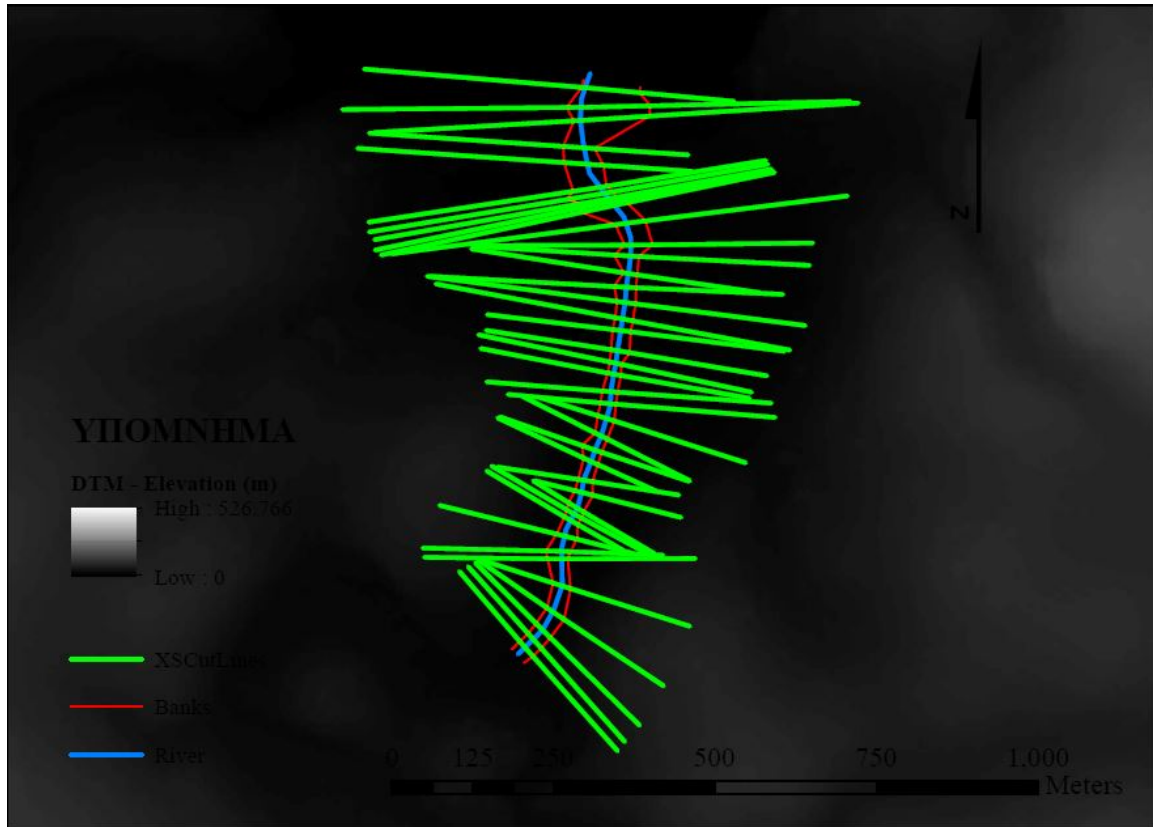
Χρησιμοποιήθηκε το HEC-GeoRAS 10.1, μια επέκταση του HEC-RAS στο ArcGIS 10.1, για τη δημιουργία των layers γεωμετρίας που θα εισαχθούν στο HEC-RAS 5.0.3. Έτσι, με βάση το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Digital Terrain Model - DTM) υψηλής ανάλυσης, 5m x 5m, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο **TIN** (Triangulated Irregular Network model) από τον ArcToolbox του ArcGIS 10.1 (*raster to TIN*) (USACE, 2012, p. 1-2), καθώς και ένα **float** (.flt) αρχείο (*raster to float*) (USACE, 2016a, p. 20-10), και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η εργαλειοθήκη του HEC-GeoRAS 10.1, και ψηφιοποιήθηκαν με σειρά:

- (i) η κεντρική γραμμή του ρέματος της Αλμυρίδας στα κατάντη (*Stream Centerline*), με κατεύθυνση σχεδιασμού από το άνω τμήμα προς τα κατάντη, με όνομα ποταμού **Almyrida_stream**, και όνομα μοντελοποιούμενου τμήματος **lower_reach**,
- (ii) οι γραμμές όπου εμφανίζονται η αριστερή και δεξιά όχθη του ρέματος (*Bank Lines*), ώστε να διαφοροποιείται το κύριο κανάλι μεταφοράς υδάτων από τις περιοχές άνω της κάθε όχθης,
- (iii) οι γραμμές των διαδρομών ροής: άνω της αριστερής όχθης (*Left overbank*), κύριου καναλιού (*main Channel*) και άνω της δεξιάς όχθης (*Right overbank*) (*Flow Path Centerlines*), οι οποίες σχεδιάζονται προς την κατεύθυνση ροής, δηλαδή από τα ανάντη προς τα κατάντη, καθώς και
- (iv) οι διατομές, κάθετες ως επί το πλείστον στην κεντρική γραμμή του ρέματος (*XS Cut Lines*), ψηφιοποιώντας τις από άνω της αριστερής όχθης, έως άνω της δεξιάς όχθης, ενώ συγχρόνως η κάθε διατομή διασταυρώνεται μόνο μια φορά τόσο με κάθε γραμμή όχθης, όσο και με την κεντρική γραμμή του ρέματος της Αλμυρίδας, αλλά και δεν διασταυρώνεται με άλλες διατομές. Να επισημανθεί ότι κάθε διατομή πρέπει να καλύπτει ολόκληρη την έκταση της πλημμυρικής περιοχής (USACE, 2012, p. 3-7, 3-8, 3-9, 3-10).

Το Γεωγραφικό Σύστημα Αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε γενικώς ήταν το WGS_1984_World_Mercator. Για την υδραυλική προσομοίωση περίπου **960 m** στο κάτω τμήμα του ρέματος της Αλμυρίδας που επηρεάστηκε από το πλημμυρικό γεγονός, χρησιμοποιήθηκαν **40 διατομές**. Το πλάτος των διατομών για το 1D HEC-RAS μοντέλο

κυμάνθηκε από 218 m έως 751 m περίπου, ώστε να καλυφθεί με ακρίβεια η έκταση της πλημμύρας σε κάθε διατομή.

Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του κατάντες τμήματος του ρέματος παρουσιάζεται στο χάρτη της Εικόνας 4.3.1 παρακάτω, όπως προκύπτει από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Digital Terrain Model - DTM) υψηλής ανάλυσης, 5m x 5m.



Εικόνα 4.3.1: Χάρτης κεντρικής γραμμής ρέματος, αριστερής-δεξιάς όχθης ρέματος & διατομών, βάσει Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DTM) υψηλής ανάλυσης, 5m x 5m (Σχεδιασμός σε ArcGIS 10.1).

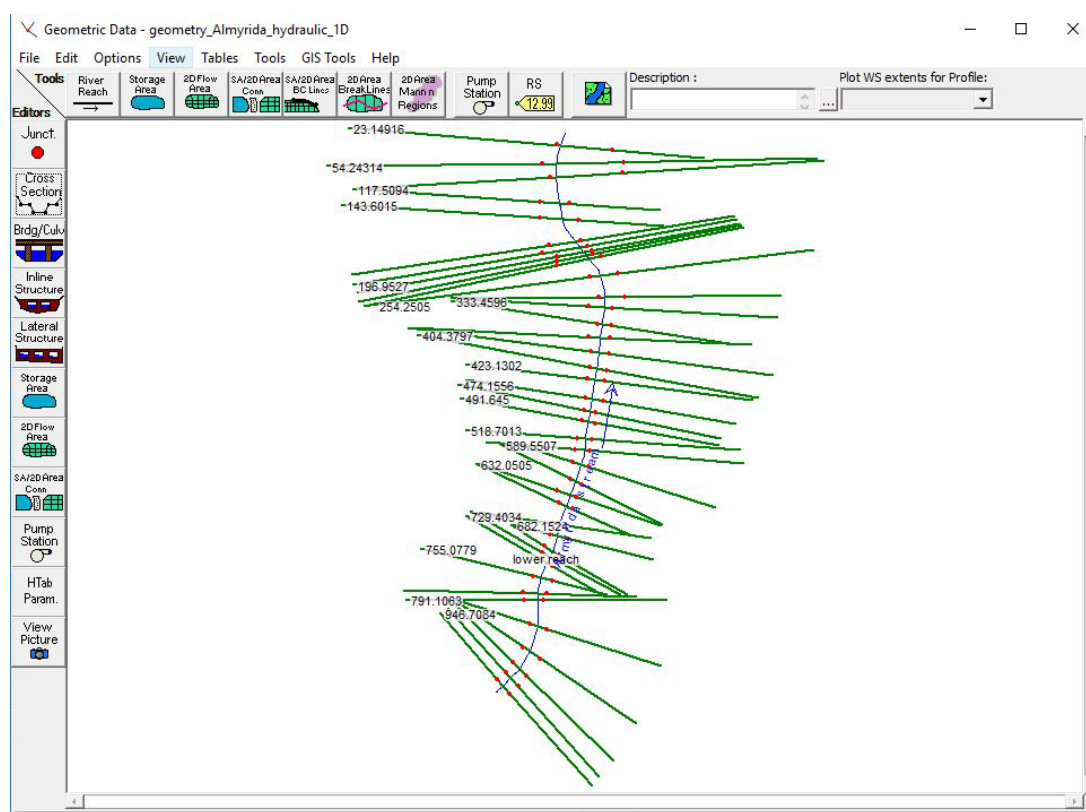
Ακολουθώντας, αποδόθηκαν χαρακτηριστικά στην κεντρική γραμμή του ρέματος της Αλμυρίδας (*Stream Centerline Attributes*), αναφορικά με την τοπολογία, τα μήκη και τους σταθμούς, καθώς και τα υψόμετρα, βάσει DTM. Έπειτα, ακολούθησε η απόδοση χαρακτηριστικών στις διατομές (*XS Cut Line Attributes*), σχετικά με το όνομα του ποταμού και του μοντελοποιούμενου τμήματος αυτού, τη χιλιομετρική θέση των διατομών (σταθμούς), τη θέση κάθε όχθης, των μηκών του τμήματος του ποταμού στα κατάντη, καθώς και των υψομέτρων μέσω του DTM. Η διαδικασία εξαγωγής των υψομέτρων μετατρέπει τα 2D χαρακτηριστικά της κεντρικής γραμμής του ρέματος και των διατομών, σε 3D χαρακτηριστικά ([River3D](#), [XSCutLines3D](#)) (USACE, 2012, p. 3-16).

Κατόπιν, έγινε εξαγωγή των δεδομένων γεωμετρίας στο HEC-RAS (*Export RAS Data*), με αποτέλεσμα τη δημιουργία του ASCII αρχείου [GIS2RAS.sdf](#) (USACE, 2012, p. 4-49, 4-50).

4.4 Μοντελοποίηση του κάτω τμήματος του ρέματος της Αλμυρίδας με χρήση του υδραυλικού 1D HEC-RAS 5.0.3 μοντέλου

4.4.1 Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων

Για την υδραυλική προσομοίωση του ρέματος της Αλμυρίδας στα κατάντη, που επηρεάστηκε από το αστραπιαίο πλημμυρικό γεγονός στις 17/10/2006, με χρήση του μοντέλου 1D HEC-RAS 5.0.3, αρχικά δημιουργήθηκε ένα νέο project, το [Almyrida_hydraulic_1D.prj](#), και ακολούθως κατασκευάστηκε ένα αρχείο γεωμετρίας στον Geometric Data editor, το [geometry_Almyrida_hydraulic_1D.g01](#), όπου και έγινε εισαγωγή του αρχείου γεωμετρίας που δημιουργήθηκε μέσω του HEC-GeoRAS 10.1 στο ArcGIS 10.1, το [GIS2RAS.RASImport.sdf](#), σε μονάδες S.I. (USACE, 2016a, p. 14-2, 14-6, 14-7, 14-8).



Εικόνα 4.4.1.1: Κάτοψη γεωμετρίας ρέματος Αλμυρίδας, όπως προέκυψε από το DTM υψηλής ανάλυσης, 5m x 5m, και σχεδιασμό σε ArcGIS 10.1 (HEC-RAS 5.0.3).

Για μη μόνιμη ροή, όπως χαρακτηρίζεται η μελετώμενη, και για την καλύτερη προσέγγιση των δυνάμεων που δρουν επί του ύδατος, καθώς και της προκύπτουσας ανύψωσης της υδάτινης επιφάνειας σε συστολή ή διαστολή, τίθενται εμπειρικοί συντελεστές συστολής και διαστολής ίσοι με 0.1 και 0.3 αντίστοιχα, για όλες τις διατομές (USACE, 2016a, p. 6-143, 6-144). Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά ροής, ο συντελεστής τριβής Manning θεωρήθηκε ομοιόμορφος και ίσος με **0.04** για ολόκληρη την κοίτη του ποταμού, ενώ για τις πλημμυρικές

επιφάνειες ορίστηκε ίσος με **0.08**, και για τις 40 διατομές, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.4.1.1 που ακολουθεί (Chow, 1959).

Πίνακας 4.4.1.1: Συντελεστής Manning (n) για κανάλια ρεμάτων. (Πηγή: Chow, 1959)

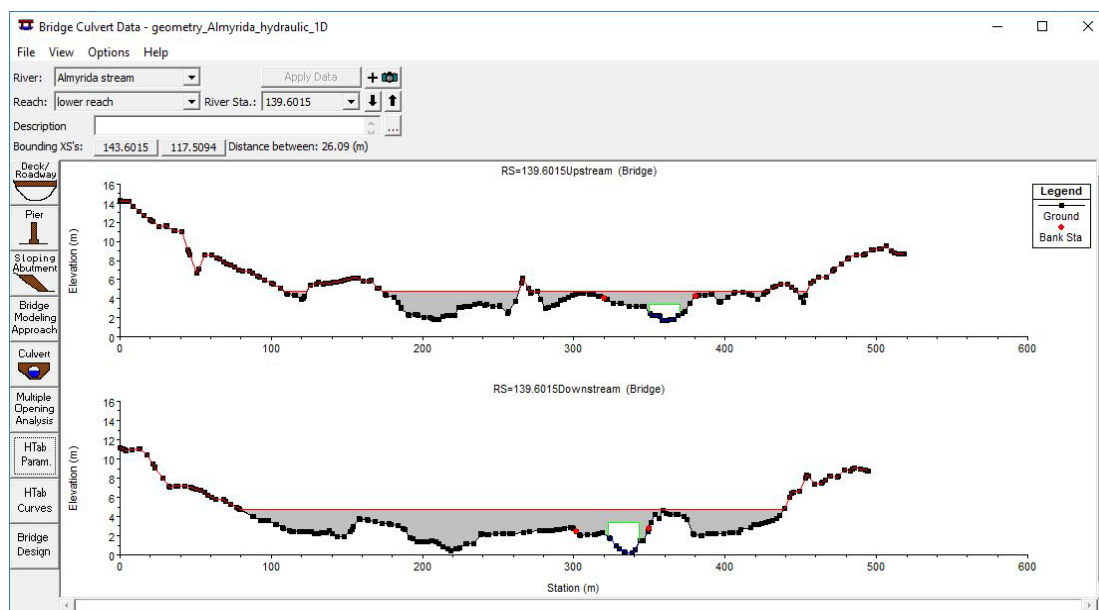
Τύπος καναλιού & Περιγραφή αυτού	Μέγιστος αναπτυσσόμενος συντελεστής Manning (n)
Κύριο κανάλι: καθαρό, ευθύ, χωρίς ρωγμές ή βαθείς λάκκους, με κάποιες πέτρες και αγριόχορτα	0.04
Πλημμυρικές επιφάνειες: καθαρή γη με παγίδες δέντρων & υψηλή καλλιέργεια βλαστών	0.08

Σε ό,τι αφορά τα γεωμετρικά στοιχεία του κάτω τμήματος του ρέματος, στο HEC-RAS 5.0.3, δημιουργήθηκε η διατομή της γέφυρας που χωροθετείται στα 139.6015 m πριν την εκβολή του ρέματος. Η απόσταση ανάντη της γέφυρας από την προηγούμενη διατομή είναι 4 m. Η ανωδομή της γέφυρας λαμβάνει χώρα σε υψόμετρο 4.74 m, έχει πλάτος 9.5 m, ενώ το πάχος της ανέρχεται σε 1.40 m. Ο συντελεστής υδατοφράγματος, για ροή υδατοφράγματος πάνω από το κατάστρωμα της γέφυρας, τέθηκε ίσος με 1.4 (USACE, 2016a, p. 6-36, 6-38, 6-39). Αναλυτικά τα στοιχεία για τη δημιουργία της διατομής της γέφυρας παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.4.1.2.

Εικόνα 4.4.1.2: Γεωμετρικά στοιχεία ανωδομής γέφυρας στη Χ.Θ. 139.6015 ρέματος Αλμυρίδας (HEC-RAS 5.0.3).

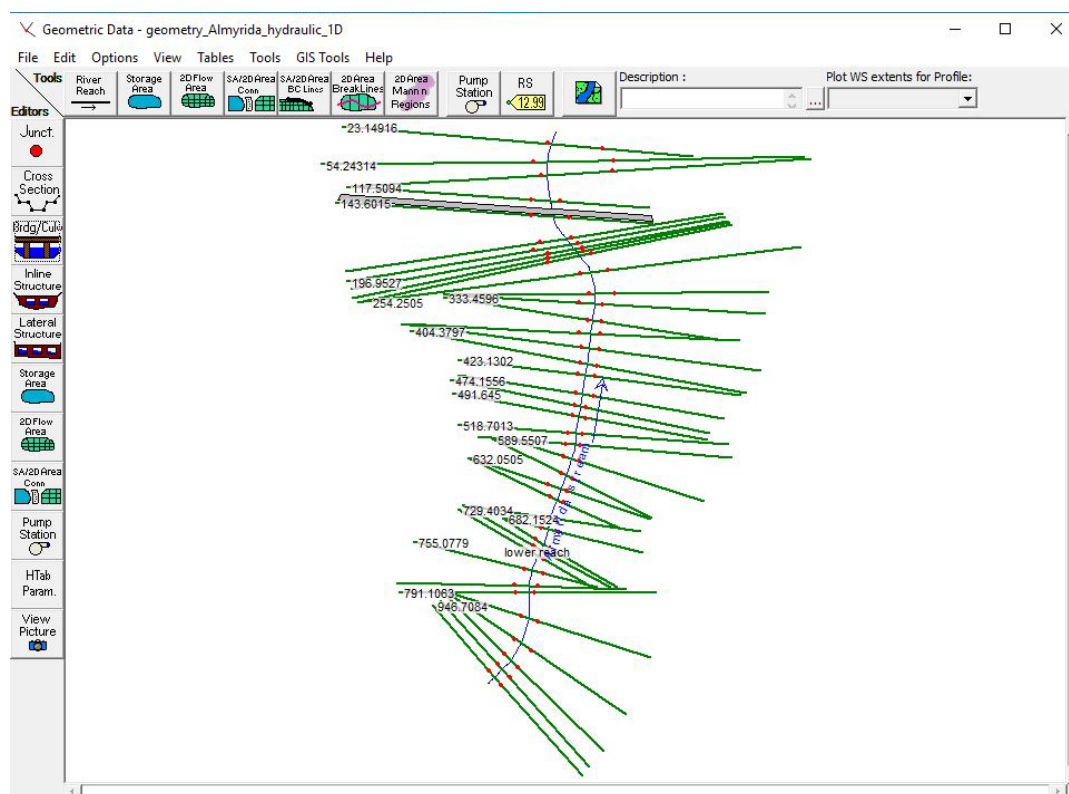
Τέθηκε επίσης μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό καταβύθισης, κατά τη διάρκεια υπολογισμών ροής υδατοφράγματος πάνω από την ανωδομή της γέφυρας ίσο με 0.98. Στην περίπτωση υπέρβασης του ποσοστού, το λογισμικό μεταβαίνει αυτομάτως σε υπολογισμούς βάσει ενέργειας, αντί για πίεσης και ροής. Επιπρόσθετα, ορίστηκε ως υψόμετρο μέγιστης ανύψωσης πλημμυρικού ύδατος στη διατομή της γέφυρας τα 6 m (USACE, 2016a, p. 6-40, 8-23). Οι διατομές στα ανάντη και κατάντη της γέφυρας δίδονται στην Εικόνα 4.4.1.4.

Εικόνα 4.4.1.3: Παράμετροι ροής στη διατομή της γέφυρας (HEC-RAS 5.0.3).



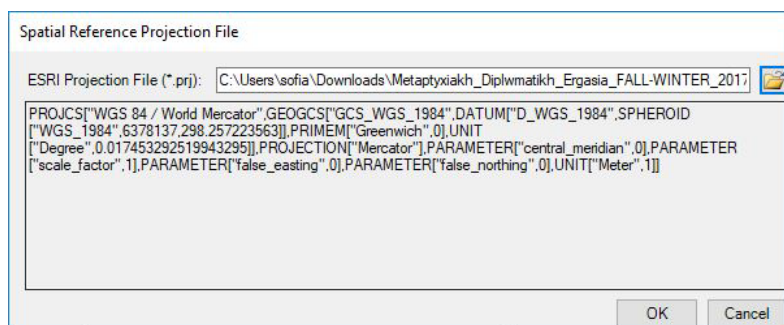
Εικόνα 4.4.1.4: Διατομές ανάντη & κατόντη γέφυρας στη Χ.Θ. 139.6015 ρέματος Αλμυρίδας (HEC-RAS 5.0.3).

Η κάτοψη των διατομών του ρέματος, συμπεριλαμβανομένης και της γέφυρας στη Χ.Θ. 139.6015 του ρέματος φαίνεται στην Εικόνα 4.4.1.5 παρακάτω.



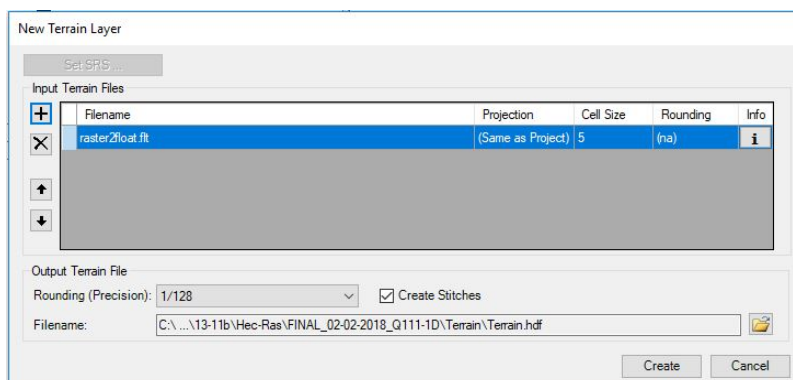
Εικόνα 4.4.1.5: Κάτοψη γεωμετρίας ρέματος Αλμυρίδας, συμπεριλαμβανομένης της γέφυρας στη θέση 139.6015 πριν την εκβολή (HEC-RAS 5.0.3).

Στη συνέχεια, ορίστηκε ως γεωαναφορά προβολής, στον RAS Mapper, το Γεωγραφικό Σύστημα Αναφοράς WGS_1984_World_Mercator, επιλέγοντάς το από shapefile της ESRI (USACE, 2016a, p. 20-7, 20-8).

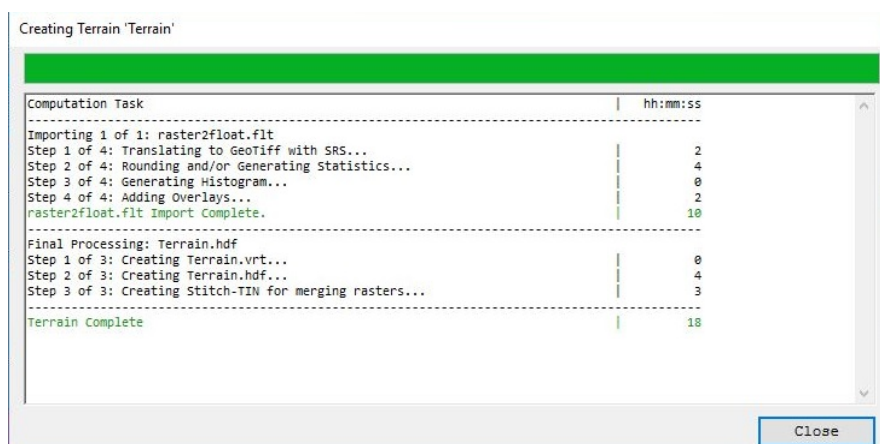


Εικόνα 4.4.1.6: Ορισμός του WGS_1984_World_Mercator ως γεωαναφορά προβολής στον RAS Mapper (HEC-RAS 5.0.3).

Έγινε εισαγωγή του μοντέλου εδάφους ως float αρχείο, όπως δημιουργήθηκε από τη raster μορφή στο ArcGIS 10.1, και φαίνεται στην Εικόνα 4.4.1.7, ενώ κατά την επεξεργασία του έγινε αποθήκευση αυτού σε GeoTiff μορφή, και ακολούθως παράχθηκε στον RAS Mapper ως .hdf αρχείο, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.4.1.8 (USACE, 2016a, p. 20-9, 20-10).

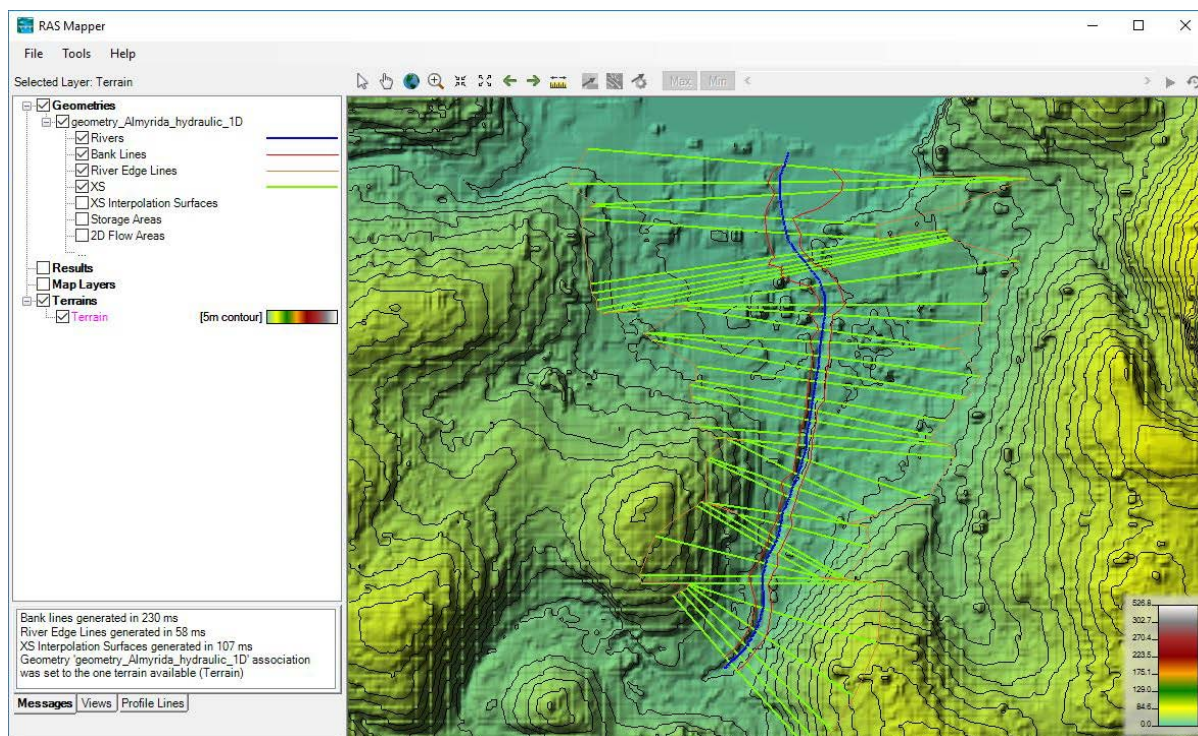


Εικόνα 4.4.1.7: Επιλογή του .flt αρχείου (raster2float) για εισαγωγή στον RAS Mapper (HEC-RAS 5.0.3).



Εικόνα 4.4.1.8: Δημιουργία μοντέλου εδάφους στον RAS Mapper (HEC-RAS 5.0.3).

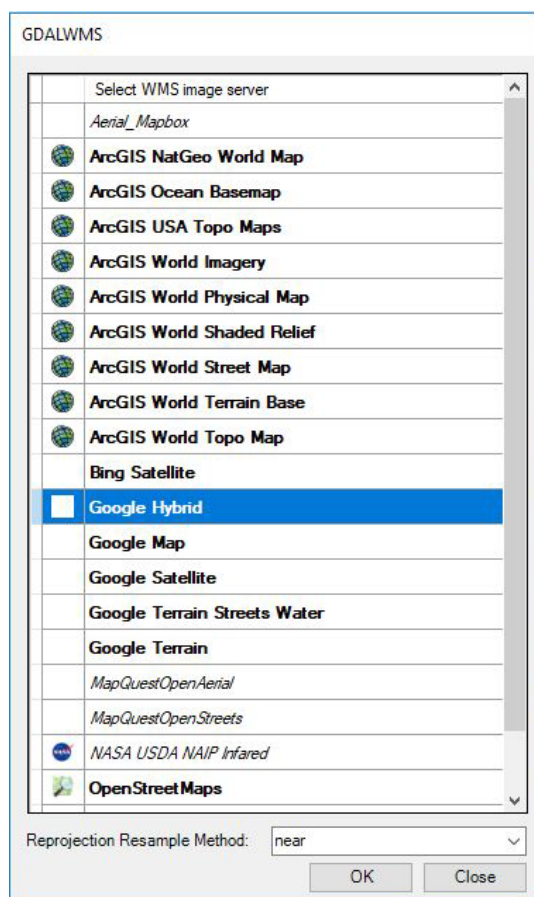
Το τελικό αποτέλεσμα αναπαράστασης του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και της γεωμετρίας του κάτω τμήματος του ρέματος Αλμυρίδας, δηλαδή της κεντρικής γραμμής του ρέματος (μπλε χρώμα), της αριστερής και δεξιάς όχθης του ρέματος (κόκκινο χρώμα), των γραμμών των διαδρομών ροής άνω της αριστερής και δεξιάς όχθης (πορτοκαλί χρώμα), και των διατομών (λαχανί χρώμα), γεωαναφερμένων στο Γεωγραφικό Σύστημα Αναφοράς WGS_1984_World_Mercator, φαίνεται στην Εικόνα 4.4.1.9.



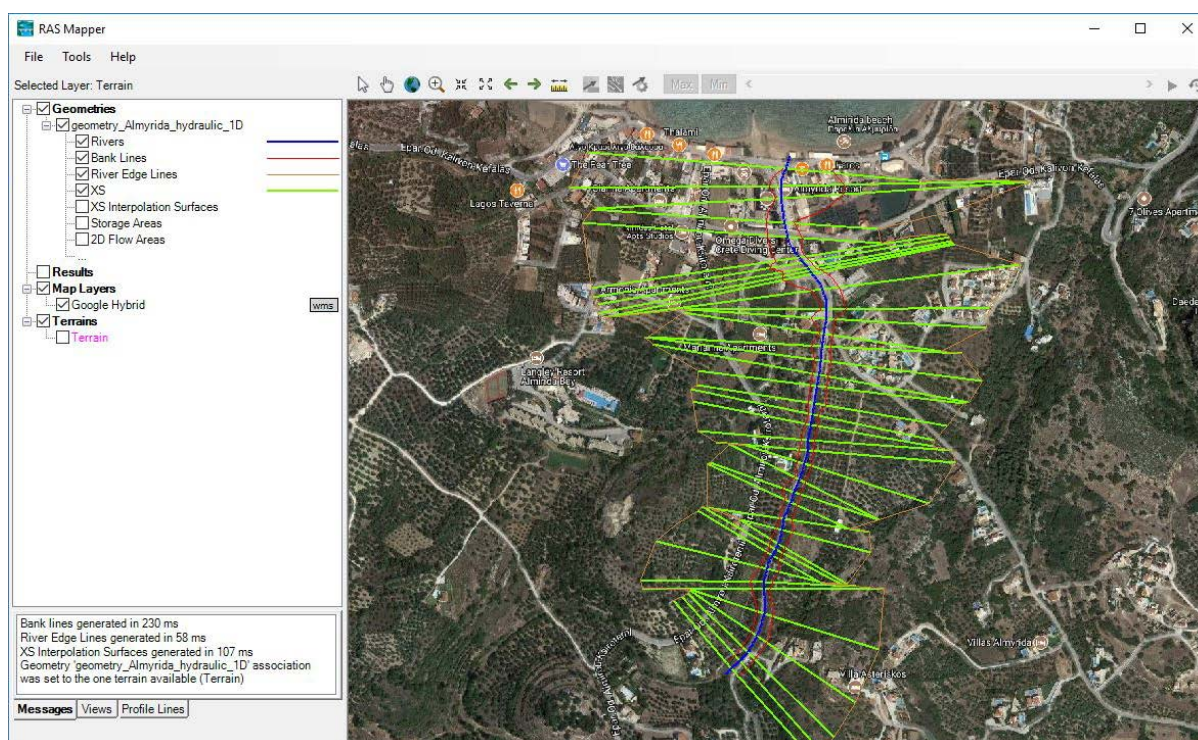
Εικόνα 4.4.1.9: Μοντέλο εδάφους και γεωμετρία κάτω τμήματος ρέματος Αλμυρίδας, γεωαναφερμένα σε WGS_1984_World_Mercator, στον RAS Mapper (HEC-RAS 5.0.3).

Σχετικά με το μοντέλο εδάφους στον RAS Mapper, εκτός από τη χρωματική αναπαράσταση των υψομέτρων, διαφαίνονται επίσης οι ισοϋψείς ανά 5 m. Επιπρόσθετα, υπάρχει μια σκίαση στους λόφους (*hillshade*), με τις περιοχές με υψηλότερα υψόμετρα να είναι πιο φωτισμένες, ενώ οι επιφάνειες με χαμηλότερα υψόμετρα να είναι περισσότερο σκουρόχρωμες, δημιουργώντας μια αίσθηση ψευδούς 3D αναπαράστασης του εδάφους, ως ανάγλυφο (USACE, 2016a, p. 20-13).

Έπειτα προστέθηκε ως χάρτης υποβάθρου στον RAS Mapper ο υβριδικός χάρτης της Google (Google Hybrid), για την καλύτερη οπτικοποίηση του μελετώμενου τμήματος (USACE, 2016a, p. 20-8). Η εισαγωγή διαφαίνεται από την Εικόνα 4.4.1.10, ενώ το αποτέλεσμα είναι ο χάρτης της Εικόνας 4.4.1.11 παρακάτω. Πάνω στο χάρτη αυτό, μετά την εκτέλεση του προγράμματος, θα αναπαρασταθεί η έκταση της πλημμύρας από το βροχοπτώτικό γεγονός της 17/10/2006, καθώς και οι μέγιστες ταχύτητες του ύδατος που αναπτύχθηκαν.



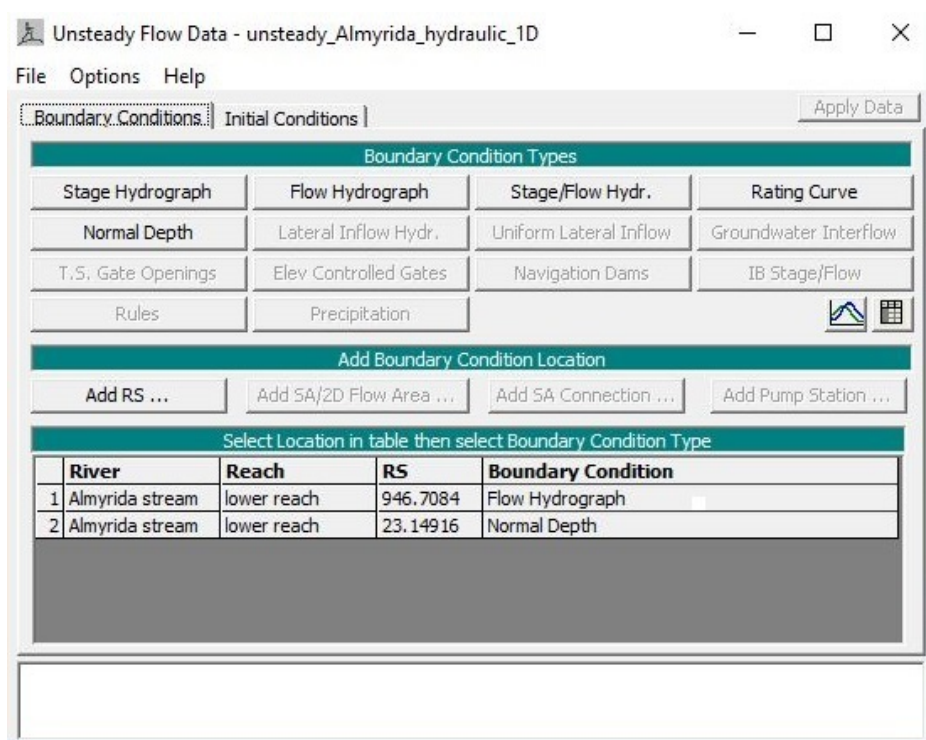
Εικόνα 4.4.1.10:: Ορισμός Google Hybrid ως χάρτης υποβάθρου στον RAS Mapper (HEC-RAS 5.0.3).



Εικόνα 4.4.1.11: Χάρτης μελετούμενου τμήματος ρέματος Αλμυρίδας στον RAS Mapper (HEC-RAS 5.0.3).

4.4.2 Εισαγωγή Οριακών και Αρχικών Συνθηκών Ροής

Δημιουργήθηκε ένα αρχείο δεδομένων μη μόνιμης ροής στον Unsteady Flow Data editor, το [unsteady_Almyrida_hydraulic_1D.u01](#). Τα δεδομένα ροής, όπως προέκυψαν από το πλημμυρικό υδρογράφημα (*Flow Hydrograph*) από το HEC-HMS 4.2.1, που συσχετίζει την απορροή Q (m^3/s) με το χρόνο t , εισήχθησαν ως *οριακή συνθήκη* μη μόνιμης ροής (unsteady flow) στην ανάντη διατομή του μελετώμενου τμήματος του ρέματος Αλμυρίδας (διατομή 946.7084). Τα δεδομένα απορροής-χρόνου εισήχθησαν από 17-10-2006 ώρα 08:00 έως 18-10-2006 ώρα 18:00, με χρονικό βήμα 15 min. Επιπλέον, τέθηκε ως μέγιστη μεταβολή ροής, χωρίς αλλαγή του χρονικού βήματος, τα $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Με αυτή την επιλογή γίνεται έλεγχος του προγράμματος εάν υπάρχει υπέρβαση της αλλαγής του ρυθμού ροής από ένα χρονικό βήμα έως το επόμενο. Σε περίπτωση που συμβαίνει υπέρβαση της τιμής αυτής, λαμβάνει χώρα μείωση του χρονικού βήματος στο ήμισυ, έως ότου η μεταβολή του ρυθμού ροής δεν υπερβαίνει τη μέγιστη τιθέμενη. Επιπρόσθετα, ορίστηκε ως ελάχιστη ροή που θα χρησιμοποιηθεί στο υδρογράφημα το $1 \text{ m}^3/\text{s}$, έτσι ώστε εάν εμφανίζονταν τιμές ροής χαμηλότερες από αυτό το μέγεθος, θα άλλαζαν σε αυτή την τιμή (USACE, 2016a, p. 8-2, 8-3, 8-4, 8-5). Στην Εικόνα 4.4.2.1 που ακολουθεί, φαίνονται οι οριακές συνθήκες που εισήχθησαν στο πρόγραμμα, στην ανάντη και κατάντη διατομή του μελετώμενου τμήματος του ρέματος της Αλμυρίδας.



Εικόνα 4.4.2.1: Οριακές συνθήκες μη μόνιμης ροής μελετώμενου τμήματος ρέματος Αλμυρίδας (HEC-RAS 5.0.3).

Στον Πίνακα 4.4.2.1 παρακάτω, παρουσιάζεται το πλημμυρικό υδρογράφημα εξόδου του συστήματος όπως προέκυψε από το HEC-HMS 4.2.1, και εισήχθη ως οριακή συνθήκη στην ανάντη διατομή του μελετώμενου τμήματος του ρέματος της Αλμυρίδας.

Πίνακας 4.4.2.1: Χρονοσειρά πλημμυρικής παροχής, εξαγόμενη από HEC-HMS 4.2.1 (HEC-RAS 5.0.3).

Date	Time	Outflow (m ³ /s)
17Οκτ2006	8:00	3.7
17Οκτ2006	8:15	4
17Οκτ2006	8:30	4.4
17Οκτ2006	8:45	5.1
17Οκτ2006	9:00	6
17Οκτ2006	9:15	7.4
17Οκτ2006	9:30	9.4
17Οκτ2006	9:45	11.9
17Οκτ2006	10:00	15
17Οκτ2006	10:15	19.1
17Οκτ2006	10:30	24.4
17Οκτ2006	10:45	32
17Οκτ2006	11:00	41
17Οκτ2006	11:15	49.6
17Οκτ2006	11:30	59
17Οκτ2006	11:45	69.8
17Οκτ2006	12:00	80.8
17Οκτ2006	12:15	87.7
17Οκτ2006	12:30	94.5
17Οκτ2006	12:45	103.3
17Οκτ2006	13:00	108.4
17Οκτ2006	13:15	111.1
17Οκτ2006	13:30	110.7
17Οκτ2006	13:45	106.4
17Οκτ2006	14:00	99.5
17Οκτ2006	14:15	91.8
17Οκτ2006	14:30	83.6
17Οκτ2006	14:45	75.7
17Οκτ2006	15:00	68.4
17Οκτ2006	15:15	61.9
17Οκτ2006	15:30	55.7
17Οκτ2006	15:45	50.1
17Οκτ2006	16:00	45
17Οκτ2006	16:15	40.3
17Οκτ2006	16:30	36.2
17Οκτ2006	16:45	32.5
17Οκτ2006	17:00	29.3
17Οκτ2006	17:15	26.5
17Οκτ2006	17:30	24.1
17Οκτ2006	17:45	22
17Οκτ2006	18:00	20.2

Ακολουθώντας, στην Εικόνα 4.4.2.2 παρουσιάζονται τα δεδομένα που εισήχθησαν για την οριακή συνθήκη Πλημμυρικού Υδρογραφήματος στην ανάντη διατομή του ρέματος.

Flow Hydrograph

River: Almyrida stream Reach: lower reach RS: 946.7084

☐ Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:

Path:

☒ Enter Table Data time interval: 15 Minute

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

☐ Use Simulation Time: Date: Time:

☒ Fixed Start Time: Date: 17OCT2006 Time: 8:00

No. Ordinates Interpolate Missing Values Del Row Ins Row

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m3/s)
1	17Oct2006 0800	00:00	3.7
2	17Oct2006 0815	00:15	4.
3	17Oct2006 0830	00:30	4.4
4	17Oct2006 0845	00:45	5.1
5	17Oct2006 0900	01:00	6.
6	17Oct2006 0915	01:15	7.4
7	17Oct2006 0930	01:30	9.4
8	17Oct2006 0945	01:45	11.9
9	17Oct2006 1000	02:00	15.
10	17Oct2006 1015	02:15	19.1
11	17Oct2006 1030	02:30	24.4
12	17Oct2006 1045	02:45	32.
13	17Oct2006 1100	03:00	41.

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

☐ Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step): 0.1

Min Flow: 1 Multiplier:

Plot Data OK Cancel

Εικόνα 4.4.2.2: Οριακή συνθήκη υδρογραφήματος ροής στην ανάντη διατομή (946.7084) του μελετώμενου τμήματος ρέματος Αλμυρίδας (HEC-RAS 5.0.3).

Στην κατάντη διατομή του μελετώμενου τμήματος του ρέματος Αλμυρίδας (διατομή 23.14916), εισήχθη ως *οριακή συνθήκη* μη μόνιμης ροής το κανονικό βάθος (*Normal Depth*). Η συνθήκη αυτή χρησιμοποιεί την εξίσωση Manning για την εκτίμηση του ύψους ροής σε κάθε διατομή. Για τη συνθήκη κανονικού βάθους ορίστηκε τιμή για το ρυθμό απωλειών λόγω τριβής ίση με 0.03, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.4.2.3 (USACE, 2016a, p. 8-6).

Normal Depth Downstream Boundary

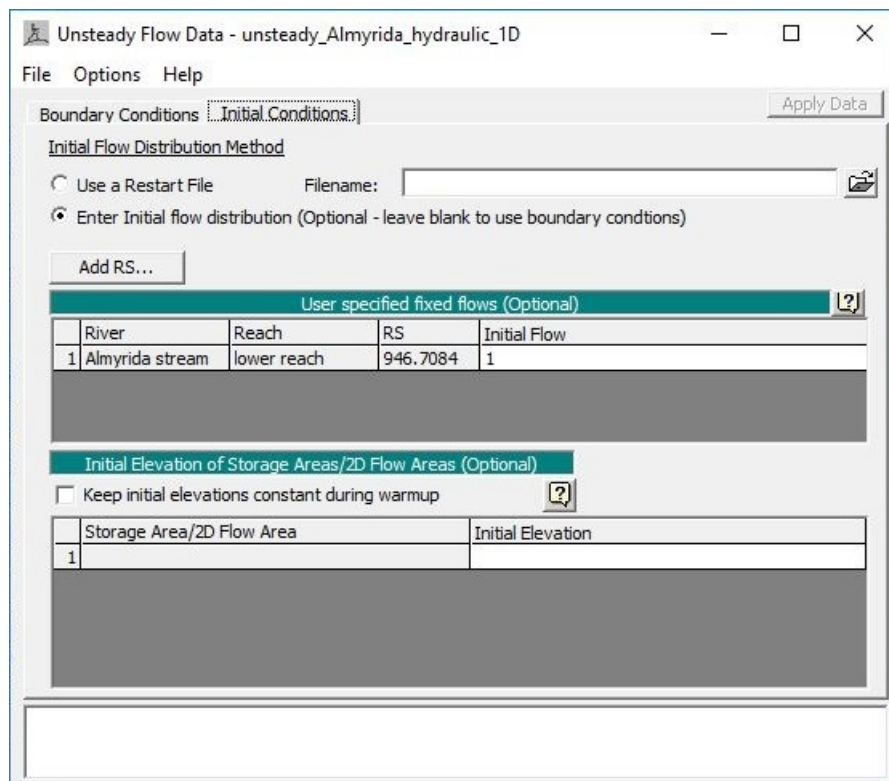
River: Almyrida stream Reach: lower reach

Friction Slope: 0.03

OK Cancel

Εικόνα 4.4.2.3: Οριακή συνθήκη κανονικού βάθους στην κατάντη διατομή (23.14916) του μελετώμενου τμήματος ρέματος Αλμυρίδας (HEC-RAS 5.0.3).

Στη συνέχεια, ορίστηκε η αρχική συνθήκη κατά την έναρξη προσομοίωσης μη μόνιμης ροής, στην ανάντη διατομή του μελετώμενου τμήματος του ρέματος Αλμυρίδας (διατομή 946.7084), με τιμή ροής ίση με $1 \text{ m}^3/\text{s}$, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 4.4.2.4 ακολούθως (USACE, 2016a, p. 8-12).

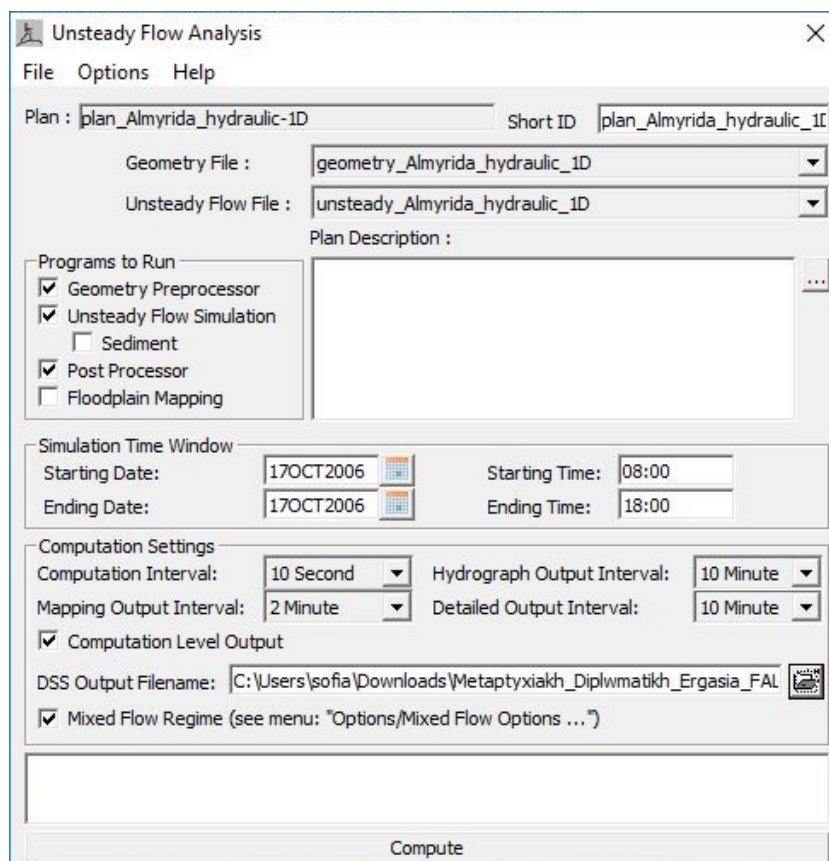


Εικόνα 4.4.2.4: Αρχική συνθήκη μη μόνιμης ροής στην ανάντη διατομή (946.7084) του μελετώμενου τμήματος ρέματος Αλμυρίδας (HEC-RAS 5.0.3).

4.4.3 Ανάλυση μη μόνιμης ροής (unsteady flow analysis)

Δημιουργήθηκε ένα αρχείο εκτέλεσης υδραυλικής προσομοίωσης στον Unsteady Flow Analysis editor, το [plan_Almyrida_hydraulic-1D.p01](#). Οι υδραυλικοί υπολογισμοί του κάτω τμήματος του ρέματος της Αλμυρίδας εκτελέστηκαν από 17/10/2006 ώρα 08:00 έως 17/10/2006 ώρα 18:00, με χρονικό βήμα προσομοίωσης τα 10 sec. Επιλέχθηκε να εκτελεστούν τα εξής προγράμματα: (i) προ-επεξεργασία της γεωμετρίας, ώστε να επιταχυνθούν οι υπολογισμοί μη μόνιμης ροής, (ii) προσομοίωση της μη μόνιμης ροής, αλλά και (iii) μετα-επεξεργασία της μη μόνιμης ροής, για τον υπολογισμό λεπτομερών υδραυλικών πληροφοριών σχετικά με το ύψος ροής και τη ροή, για ένα σύνολο χρονικών διαστημάτων κατά τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης της μη μόνιμης ροής. Ως βήμα εξαγόμενων λεπτομερών αποτελεσμάτων, αλλά και υδρογραφημάτων ορίστηκαν τα 10 min, ενώ το βήμα χαρτογραφημένων αποτελεσμάτων τέθηκε ίσο με 2 min. Επιπρόσθετα, επιλέχθηκε η εξαγωγή αποτελεσμάτων για ένα σύνολο μεταβλητών για κάθε διατομή, και για κάθε υπολογιστικό

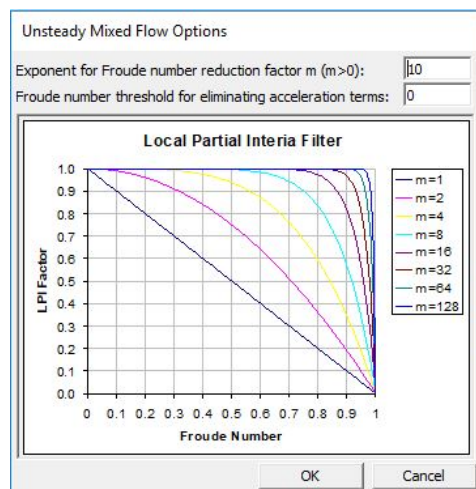
χρονικό βήμα. Πριν την εκτέλεση του προγράμματος, απαραίτητο είναι το πεδίο με το όνομα DSS Output Filename. Επιπλέον, ορίστηκε ως καθεστώς ροής η μικτή, η οποία επιτρέπει τόσο υποκρίσιμη ροή, όσο και υπερκρίσιμη, αλλά και υδραυλικά άλματα και πτώσεις ροής κάτω από τις υποκρίσιμες μεταβάσεις (USACE, 2016a, p. 8-19, 8-20, 8-25, 8-27, 8-28, 8-29).



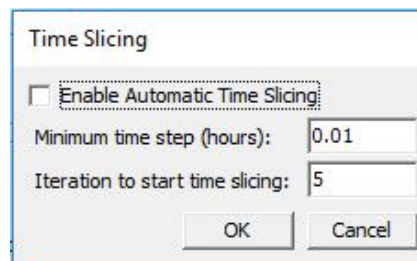
Εικόνα 4.4.3.1: Ανάλυση μη μόνιμης ροής (HEC-RAS 5.0.3).

Για τη μικτή ροή πρέπει να δοθούν τιμές σχετικά με τον αριθμό Froude. Η προκαθορισμένη ελάχιστη τιμή Froude για την εξάλειψη επιταχύνσεων είναι $FT=0.8$, ενώ για τον εκθέτη m του συντελεστή μείωσης του αριθμού Froude είναι 4. Επιλέχθηκε να μειωθεί η τιμή της ελάχιστης τιμής Froude σε $FT=0$, καθώς και να αυξηθεί ο εκθέτης m σε 10, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.4.3.2. Με τη μείωση των παραπάνω τιμών, αυξάνεται η σταθερότητα του συστήματος, ωστόσο μειώνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Αντιθέτως, με την αύξηση των παραπάνω τιμών, μειώνεται η σταθερότητα του συστήματος, αλλά αυξάνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Όταν ο αριθμός Froude είναι μεγαλύτερος από την κατώτατη οριζόμενη τιμή, δηλαδή το «0», τότε ο εκθέτης m τίθεται ίσος με 0 (USACE, 2016a, p. 16-2, 16-3). Για την προσομοίωση, ορίστηκε επίσης να ξεκινά η υποδιαίρεση χρόνου έπειτα από την 5^η επανάληψη (iteration) για ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα, με ελάχιστο χρονικό βήμα

επαναλήψεων κάθε 0.01 hr, δηλαδή τα 36sec, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.4.3.3 (USACE, 2016a, p. 8-37).



Εικόνα 4.4.3.2: Ορισμός ελάχιστης τιμής Froude & εκθέτη συντελεστή μείωσης αριθμού Froude (HEC-RAS 5.0.3).



Εικόνα 4.4.3.3: Ορισμός επαναλήψεων έπειτα από τις οποίες ξεκινά η υποδιαίρεση χρόνου & χρονικού βήματος επαναλήψεων (HEC-RAS 5.0.3).

Ακολουθώντας, τέθηκαν κάποιες επιλογές υπολογισμών για 1D προσομοίωση ροής. Συγκεκριμένα, ο έμμεσος συντελεστής στάθμισης theta παρέμεινε ίσος με την προκαθορισμένη του τιμή, δηλαδή «1», ώστε να προκληθεί μεγαλύτερη σταθερότητα στη λύση, η οποία ωστόσο μπορεί να μην είναι εξίσου ακριβής. Ίδια τιμή χρησιμοποιείται για τον συντελεστή theta κατά την περίοδο “προθέρμανσης” του προγράμματος.

Τίθενται επίσης κάποια όρια ανεκτικότητας, ώστε να συγκριθούν οι διαφορές ανάμεσα στις υπολογιζόμενες και θεωρούμενες ανυψώσεις της στάθμης του νερού, τόσο στις διατομές (*water surface calculation tolerance*), όσο και στις περιοχές αποθήκευσης (*storage area elevation tolerance*). Οι μέγιστες τιθέμενες επιτρεπόμενες διαφορές είναι 0.006 m και 0.015 m αντίστοιχα, που είναι και οι προκαθορισμένες τιμές του λογισμικού. Στην περίπτωση που οι διαφορές είναι μεγαλύτερες από το όριο ανεκτικότητας, το πρόγραμμα συνεχίζει τις επαναλήψεις με το τρέχον χρονικό βήμα.

Επιπλέον, τέθηκε το μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα για την ανύψωση της στάθμης του νερού ίσο με την προκαθορισμένη τιμή των 30 m, η υπέρβαση του οποίου οδηγεί στην παύση της εκτέλεσης του προγράμματος.

Ορίστηκε επίσης ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για την επίλυση των εξισώσεων μη μόνιμης ροής από το πρόγραμμα, με βάση τα προκαθορισμένα όρια ανεκτικότητας, ίσος με 40.

Δύναται ακόμη να οριστεί μια περίοδος “προθέρμανσης”, με την εκτέλεση από μια σειρά από χρονικά βήματα με σταθερές εισροές, πριν την έναρξη της περιόδου προσομοίωσης. Σκοπός

είναι η εξομάλυνση του προφίλ του ρέματος, πριν την εισαγωγή του πλημμυρικού υδρογραφήματος, οδηγώντας σε μια πιο σταθερή λύση κατά την έναρξη της προσομοίωσης. Ο αριθμός των χρονικών βημάτων “προθέρμανσης” ορίστηκε ίσος με 200, με χρονικό βήμα κατά την “προθέρμανση” ίσο με 0 hr.

Επιπρόσθετα, τέθηκε ως χρονικό βήμα έναρξης υποδιαίρεσης χρόνου οι 0 hr, με μέγιστο αριθμό παρεμβλλόμενων χρονικών βημάτων, τα οποία δύνανται να χρησιμοποιηθούν για την υποδιαίρεση του χρόνου, ίσο με 20.

Οι υπόλοιποι συντελεστές σταθερότητας είτε εκθετικής φθοράς, για την προσομοίωση μη μόνιμης ροής, αφορούν κατασκευές (πλευρικές, κατά μήκος, φράγματα, αποβάθρες). Τέτοιες κατασκευές δεν υφίστανται στο εξεταζόμενο σύστημα, και λαμβάνονται οι προκαθορισμένες τιμές του προγράμματος.

Τέλος, τέθηκε η προκαθορισμένη τιμή ελέγχου της ποσότητας και των λεπτομερειών των εγγραφόμενων μηνυμάτων στο αρχείο καταγραφής κατά την ανάγνωση και εγγραφή δεδομένων στο HEC-DSS, ίση με 4.

Σχετικά με τις εσωτερικές οριακές συνθήκες, επιλέχθηκε το πρόγραμμα να χρησιμοποιεί τις ήδη υπολογισμένες καμπύλες, όπου είναι δυνατό. Καθορίστηκε επίσης, η επίλυση της 1D εξίσωσης μη μόνιμης ροής να γίνεται κατά Skyline/Gauss (USACE, 2016a, p. 8-37, 8-38, 8-39, 8-40, 8-41).

HEC-RAS Unsteady Computation Options and Tolerances

General (1D Options) | 2D Flow Options | 1D/2D Options

Unsteady Flow Options

Theta [implicit weighting factor] (0.6-1.0):	1	Number of warm up time steps (0 - 100,000):	200
Theta for warm up [implicit weighting factor] (0.6-1.0):	1	Time step during warm up period (hrs):	0
Water surface calculation tolerance [max=0.06] (m):	0.006	Minimum time step for time slicing (hrs):	0
Storage Area elevation tolerance [max=0.06] (m):	0.015	Maximum number of time slices:	20
Flow calculation tolerance [optional] (m3/s):		Lateral Structure flow stability factor (1.0-3.0):	2
Max error in water surface solution (Abort Tolerance)(m):	30	Inline Structure flow stability factor (1.0-3.0):	1
Maximum number of iterations (0-40):	40	Weir flow submergence decay exponent (1.0-3.0):	1
Maximum iterations without improvement (0-40):		Gate flow submergence decay exponent (1.0-3.0):	1
		DSS Messaging Level (1 to 10, Default = 4)	4

Geometry Preprocessor Options

Family of Rating Curves for Internal Boundaries

☒ Use existing internal boundary tables when possible.

☐ Recompute at all internal boundaries

1D Equation Solver

☒ Skyline/Gaussian (Default: Faster for dendritic systems)

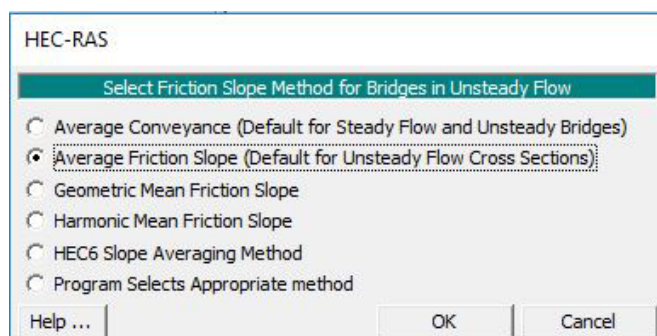
☐ Pardiso (Optional: May be faster for large interconnected systems)

Number of cores to use with Pardiso solver: All Available

OK Cancel Defaults ...

Εικόνα 4.4.3.4: Επιλογές υπολογισμών & όρια ανεκτικότητας για μη μόνιμη 1D ροή (HEC-RAS 5.0.3).

Σε ό,τι αφορά το ρυθμό απωλειών λόγω τριβής για τη γέφυρα στη Χ.Θ. 139.6015 του ρέματος, επιλέχθηκε η μέθοδος average friction slope, η οποία είναι προκαθορισμένη για μη μόνιμη ροή (USACE, 2016a, p. 8-51).



Εικόνα 4.4.3.5: Ορισμός ρυθμού απωλειών λόγω τριβής για τη γέφυρα (HEC-RAS 5.0.3).

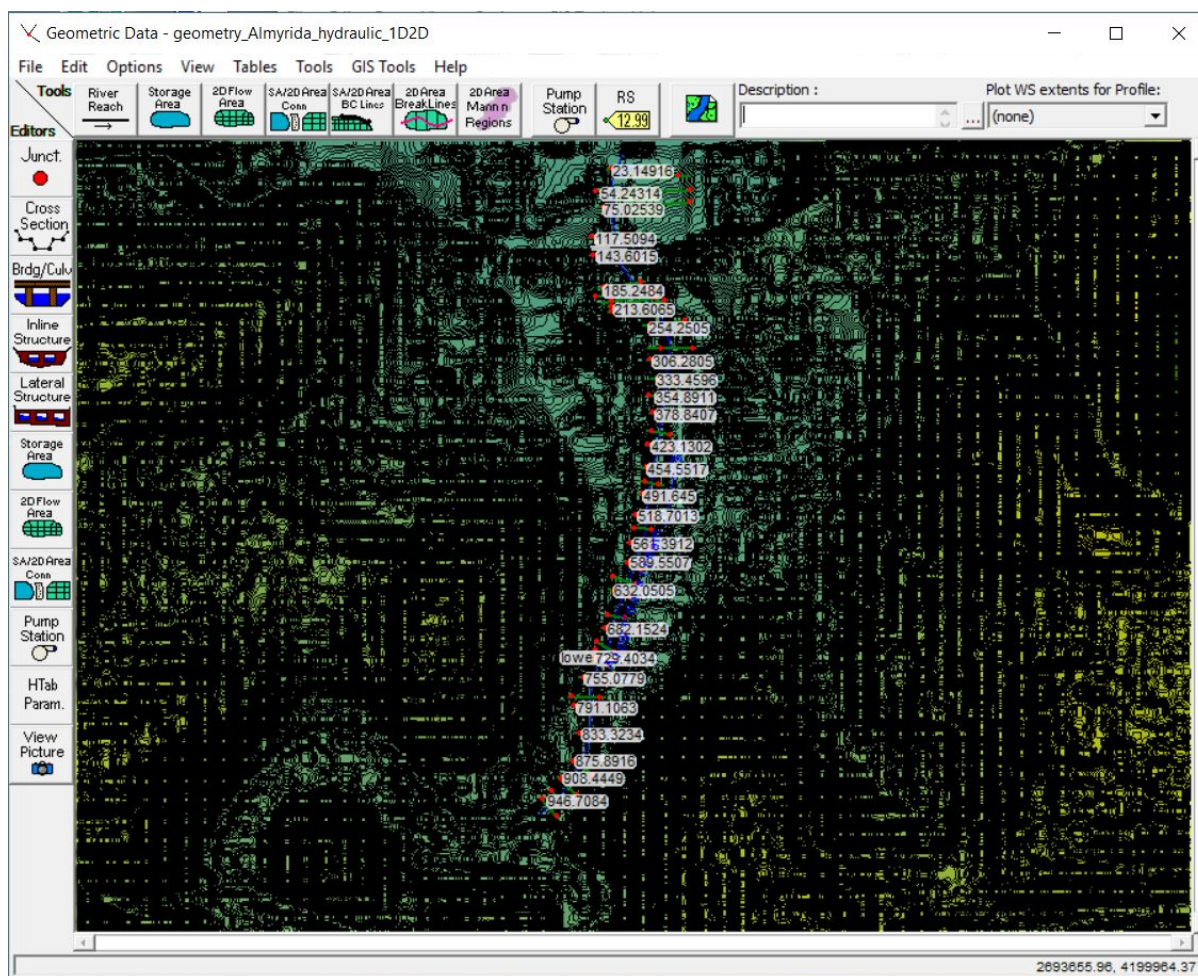
Ακολούθως, εκτελέστηκε το μοντέλο και εξήχθησαν τα αποτελέσματα της υδραυλικής 1D προσομοίωσης μη μόνιμης ροής του κάτω τμήματος του ρέματος της Αλμυρίδας, τα οποία παρουσιάζονται στην §5.2.

4.5 Μοντελοποίηση του κάτω τμήματος του ρέματος της Αλμυρίδας με χρήση του υδραυλικού 1D/2D HEC-RAS 5.0.3 μοντέλου

4.5.1 Σχεδιασμός γεωμετρίας 1D Ροής ρέματος

Για την προσομοίωση του υδραυλικού κύματος του ρέματος της Αλμυρίδας στα κατάντη, που προκλήθηκε από το αιφνίδιο βροχοπτώτικό συμβάν της 17/10/2006, με χρήση του ενιαίου 1D/2D HEC-RAS 5.0.3 μοντέλου, αρχικά σώθηκε το μονοδιάστατο project, το [Almyrida_hydraulic_1D.prj](#), ως [Almyrida_hydraulic_1D2D.prj](#), και στη συνέχεια σώθηκε το αρχείο γεωμετρίας του μονοδιάστατου project, στον Geometric Data editor, το [geometry_Almyrida_hydraulic_1D.g01](#), ως [geometry_Almyrida_hydraulic_1D2D.g02](#), όπου και ακολούθησαν οι τροποποιήσεις της γεωμετρίας όπως περιγράφονται παρακάτω.

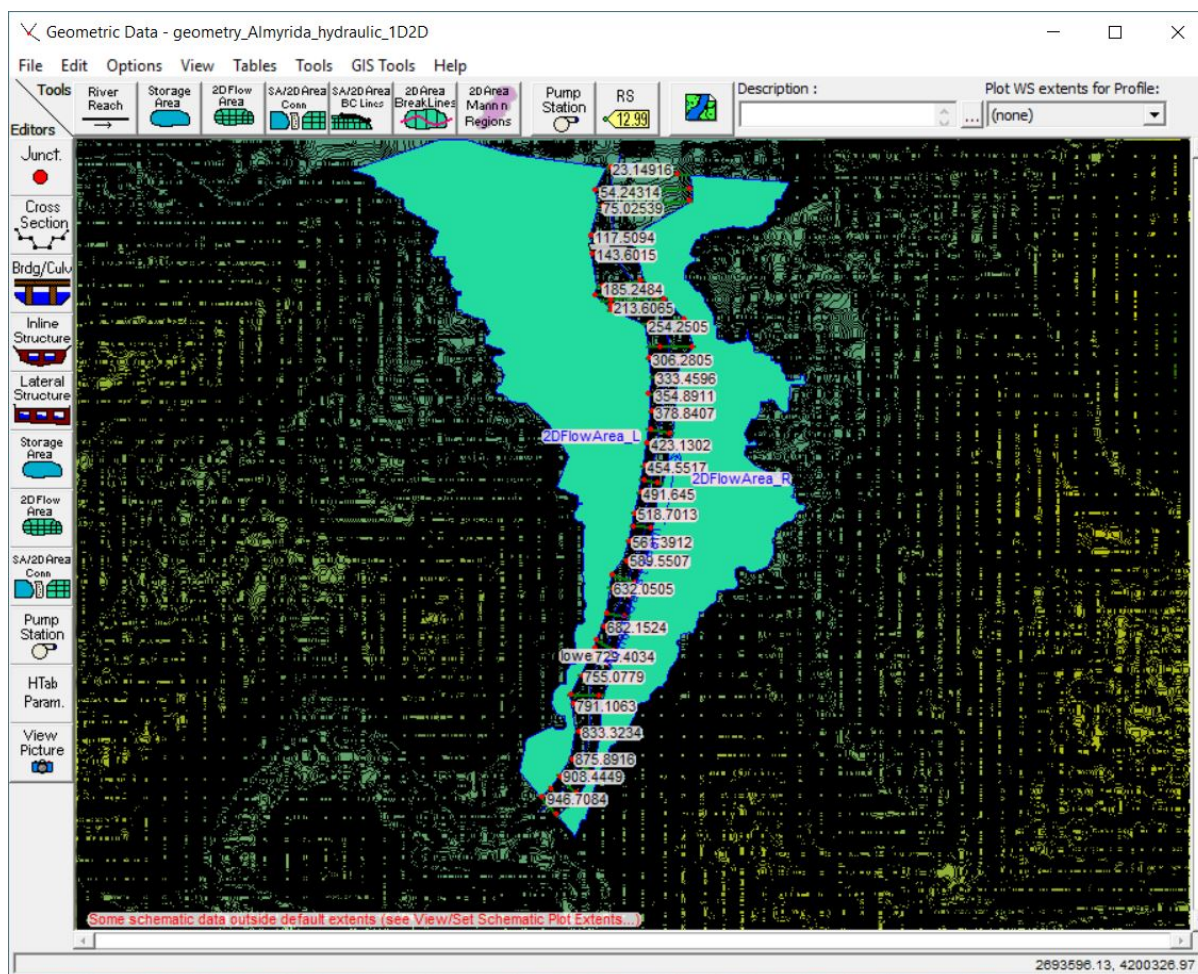
Οι αρχικώς σχεδιασμένες διατομές του ρέματος της Αλμυρίδας στα κατάντη, που εκτείνονταν και στις δύο πλευρές του ρέματος ώστε να αντιπροσωπεύουν την τοπογραφία της πλημμυρικής περιοχής, με πλάτος από 218 m έως 751 m περίπου -όπως προέκυψαν από την αρχική σχεδίαση στο ArcGIS 10.1, μέσω της επέκτασης Hec-GeoRAS 10.1, που ακολούθως εξήχθησαν στο 1D HEC-RAS μοντέλο- πλέον για το ενιαίο 1D/2D HEC-RAS μοντέλο περικόπηκαν ώστε να καλύπτουν την κοίτη του ποταμού (stream centerline) έως την αριστερή και δεξιά όχθη (banks), με πλάτος από 30 m έως 134 m περίπου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5.1.1.



Εικόνα 4.5.1.1: Κάτοψη 1D ροής & διατομών ρέματος Αλμυρίδας, όπως προέκυψε από το DTM υψηλής ανάλυσης, 5m x 5m, με πλάτος ρέματος μεταξύ των οχθών (HEC-RAS 5.0.3).

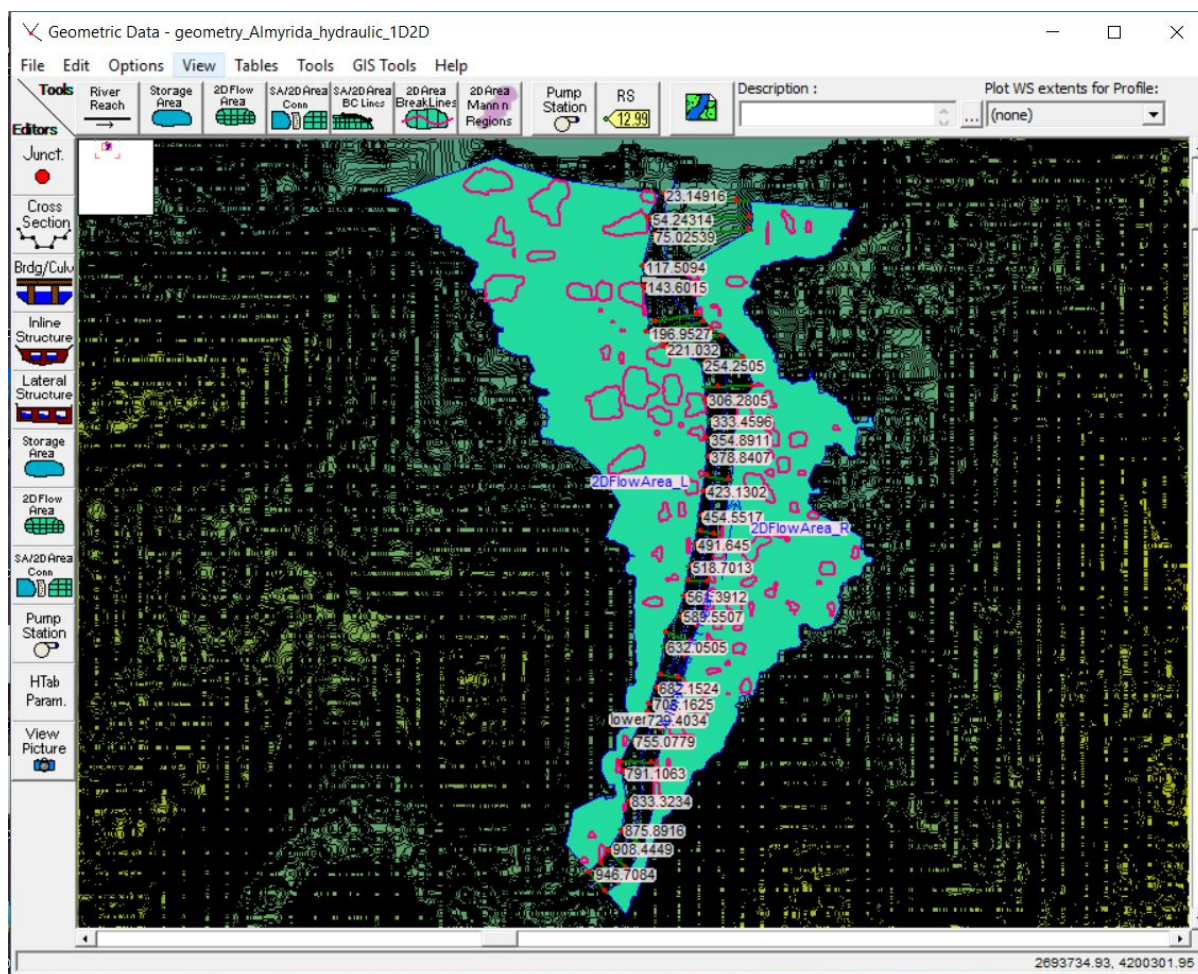
4.5.2 Δημιουργία 2D Επιφανειών Ροής (2D flow areas) & Γραμμών Διαχωρισμού (Breaklines)

Αριστερά και δεξιά από τις όχθες του ρέματος, και καθ' όλο το μήκος του ρέματος, σχεδιάστηκαν οι 2D πλημμυρικές περιοχές (2D flow areas), ως κλειστά πολύγωνα, η [2DFlow_area_L](#) και [2DFlow_area_R](#) αντίστοιχα, σύμφωνα με την τοπογραφία από το υψηλής ανάλυσης DEM 5m x 5m, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.5.2.1. Το υψηλής ανάλυσης DEM 5m x 5m εμφανίζεται ως εικόνα φόντου στον Geometric Data editor, απ' τη στιγμή που έχει φορτωθεί στον HEC-RAS Mapper. Οι 2D πλημμυρικές επιφάνειες ορίζουν τα όρια εντός των οποίων το λογισμικό θα υπολογίσει ότι θα κινηθεί το πλημμυρικό κύμα. Εντός των σχεδιασμένων 2D πλημμυρικών επιφανειών περιλαμβάνονται οι κορυφές των λόφων και το υψηλό έδαφος, που θα λειτουργήσουν ως φράγμα στη ροή του πλημμυρικού κύματος. Το όριο μεταξύ της 1D ροής του ρέματος και της 2D πλημμυρικής περιοχής είναι το υψηλό έδαφος που χωρίζει το ρέμα από την πλημμυρική επιφάνεια (USACE, 2016a, p. 6-98, 6-99).



Εικόνα 4.5.2.1: Σχεδιασμός 2D Επιφανειών ροής πλημμυρικού κύματος, βάσει του DTM υψηλής ανάλυσης 5m x 5m (HEC-RAS 5.0.3).

Γενικά, θα πρέπει επίσης να προστίθενται γραμμές διαχωρισμού (breaklines) σε κάθε θέση που αποτελεί εμπόδιο στη ροή του ρέματος, είτε επηρεάζει την κατεύθυνση της ροής. Στις σχεδιασμένες 2D πλημμυρικές περιοχές το ανάγλυφο είναι ιδιαίτερα έντονο, με λόφους και επιφάνειες υψηλού εδάφους να απαντώνται συχνά. Επομένως, σχεδιάστηκαν γραμμές διαχωρισμού κατά μήκος των λόφων (levees), σύμφωνα με τη γεωμορφολογία -όπως προκύπτει από το υψηλής ανάλυσης DEM 5m x 5m-, καθώς αποτελούν υψηλό έδαφος. Το μέτωπο των πεπερασμένων πλεγματοειδών στοιχείων (grid cells), τα οποία θα δημιουργηθούν στη συνέχεια, θα πρέπει να ευθυγραμμιστεί κατά μήκος των γραμμών αυτών (USACE, 2016a, p. 6-100). Οι γραμμές διαχωρισμού που σχεδιάστηκαν εντός των 2D πλημμυρικών επιφανειών ήταν στον αριθμό 98, η καθεμία με δικό της όνομα, και παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.5.2.2 με ροζ χρώμα. Οι γραμμές αυτές σχεδιάστηκαν περιμετρικά αντίστοιχου αριθμού λόφων, για να αποφευχθεί η ανακατεύθυνση της ροής του ρέματος, μέσω της διαδικασίας ενίσχυσης της περιμέτρου αυτών με πεπερασμένα στοιχεία κατά τη δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος.



Εικόνα 4.5.2.2: Σχεδιασμός Γραμμών διαχωρισμού (Breaklines) -ροζ πολύγωνα-, βάσει του DTM υψηλής ανάλυσης 5m x 5m (HEC-RAS 5.0.3).

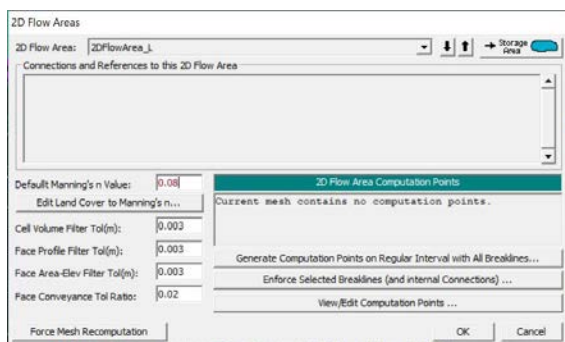
4.5.3 Δημιουργία 2D υπολογιστικού πλέγματος (computational mesh) για κάθε 2D Επιφάνεια ροής

Από τον 2D Flow area editor, επιλέχθηκε ο αριθμός Manning $n=0.08$ και για τις δύο εκατέρωθεν των διατομών 2D πλημμυρικές επιφάνειες. Οι υπόλοιπες 4 παράμετροι αφορούν:

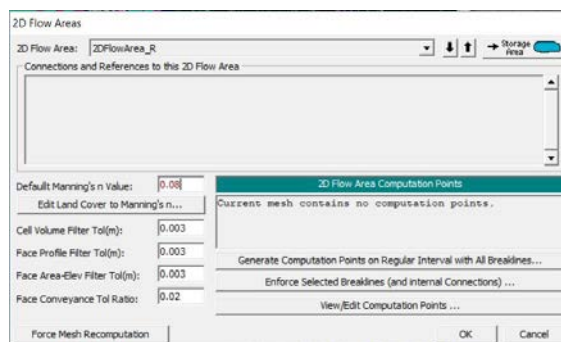
- την ανεκτικότητα ύψους ροής κάθε κελιού (*Cell Volume Filter Tolerance*), και χρησιμοποιείται για να μειωθεί ο αριθμός των σημείων στις καμπύλες όγκου ύδατος έκαστου 2D κελιού, που αναπτύσσονται στον 2D προ-επεξεργαστή.
- την ανεκτικότητα μετώπων των κελιών (*Face Profile Filter Tolerance*), και χρησιμοποιείται για να μειωθεί ο αριθμός των σημείων που εξάγονται από το υψηλής ανάλυσης έδαφος για κάθε μέτωπο έκαστου 2D κελιού.
- την ανεκτικότητα μετώπου επιφάνειας-ύψους ροής (*Face Area-Elevation Filter Tolerance*), και χρησιμοποιείται για να μειωθεί ο αριθμός των σημείων στους πίνακες υδραυλικών ιδιοτήτων των μετώπων των κελιών.

- την αναλογία ανεκτικότητας μεταβίβασης στο μέτωπο (*Face Conveyance Tolerance Ratio*), και χρησιμοποιείται ώστε να γίνει αντιληπτό εάν απαιτούνται περισσότερα ή λιγότερα σημεία στο χαμηλότερο άκρο των πινάκων ιδιοτήτων των μετώπων των κελιών.

Οι τιμές των 4 παραμέτρων παρέμειναν ίσες με τις προκαθορισμένες από το λογισμικό τιμές, δηλαδή 0.003m οι τρεις πρώτες παράμετροι και 0.02 η τελευταία (USACE, 2016a, p. 6-103).

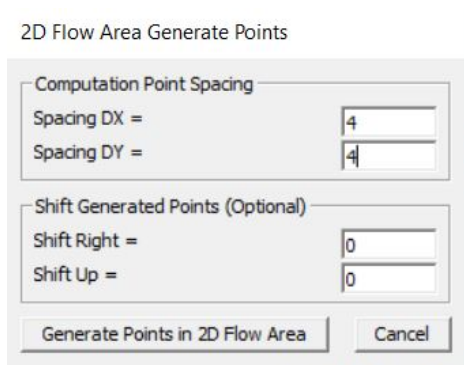


Εικόνα 4.5.3.1: Ορισμός αριθμού Manning & λοιπών παραμέτρων για 2DFlowArea_L (HEC-RAS 5.0.3).

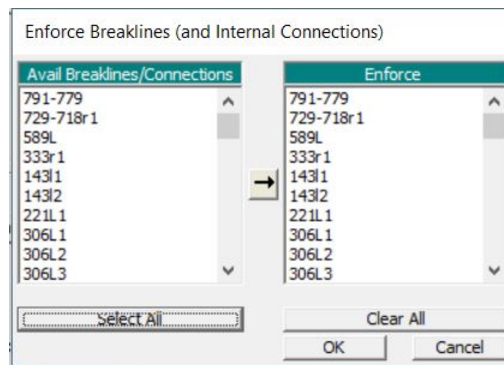


Εικόνα 4.5.3.2: Ορισμός αριθμού Manning & λοιπών παραμέτρων για 2DFlowArea_R (HEC-RAS 5.0.3).

Από τον 2D Flow area editor, επιλέχθηκε να δημιουργηθούν τα υπολογιστικά σημεία, μαζί με όλες τις γραμμές διαχωρισμού (*generate computation points on regular intervals with all breaklines*), για κάθε 2D flow area -αριστερά και δεξιά της 1D ροής του ρέματος-, και συγχρόνως να ενισχυθούν όλες οι γραμμές διαχωρισμού και οι εσωτερικές τους συνδέσεις (*enforce selected breaklines and internal connections: All*), ώστε να διασφαλιστεί ότι η ροή θα μπορεί να περάσει διαμέσου των κελιών αυτών μέχρι η επιφάνεια του ύδατος να είναι υψηλότερη από το έδαφος κατά μήκος της εκάστοτε γραμμής διαχωρισμού. Επιλέχθηκε η απόσταση μεταξύ των υπολογιστικών σημείων (*computation point spacing*), δηλαδή των κέντρων των κελιών, να είναι ένα πλέγμα DX= 4m και DY=4m, για κάθε 2D επιφάνεια ροής.

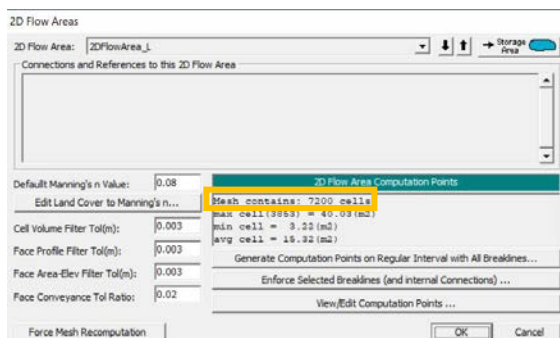


Εικόνα 4.5.3.3: Ορισμός πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων για κάθε 2D Επιφάνεια ροής (HEC-RAS 5.0.3).

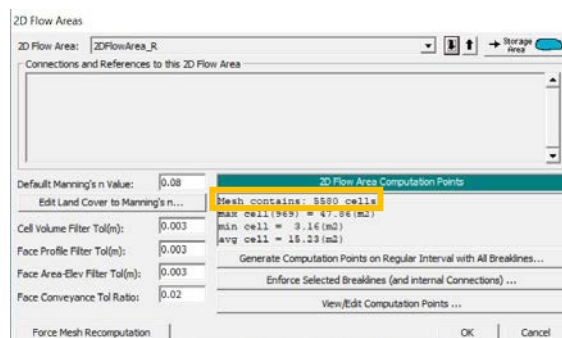


Εικόνα 4.5.3.4: Ενίσχυση γραμμών διαχωρισμού περιμετρικά με πεπερασμένα στοιχεία (HEC-RAS 5.0.3).

Τα πεπερασμένα στοιχεία (cells) που δημιουργήθηκαν για την 2DFlow_Area_L ήταν **7200**, ενώ για την 2DFlow_Area_R ήταν **5580** (USACE, 2016a, p. 6-101).

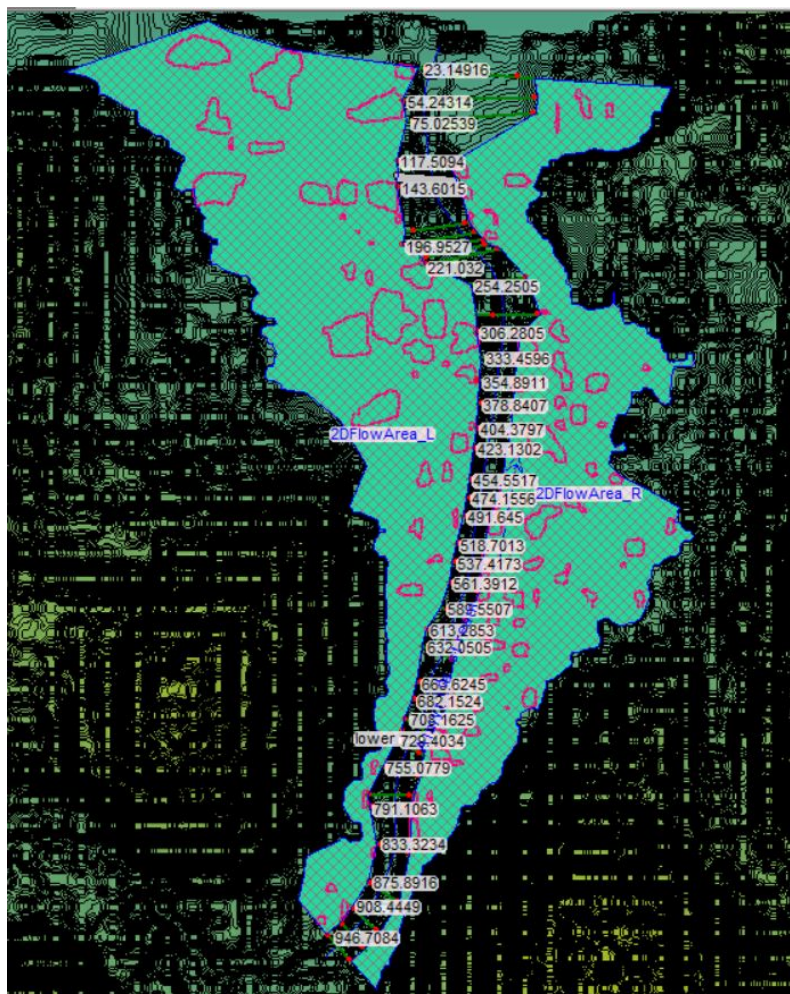


Εικόνα 4.5.3.5: Πεπερασμένα στοιχεία της 2D Επιφάνειας ροής αριστερά (HEC-RAS 5.0.3).

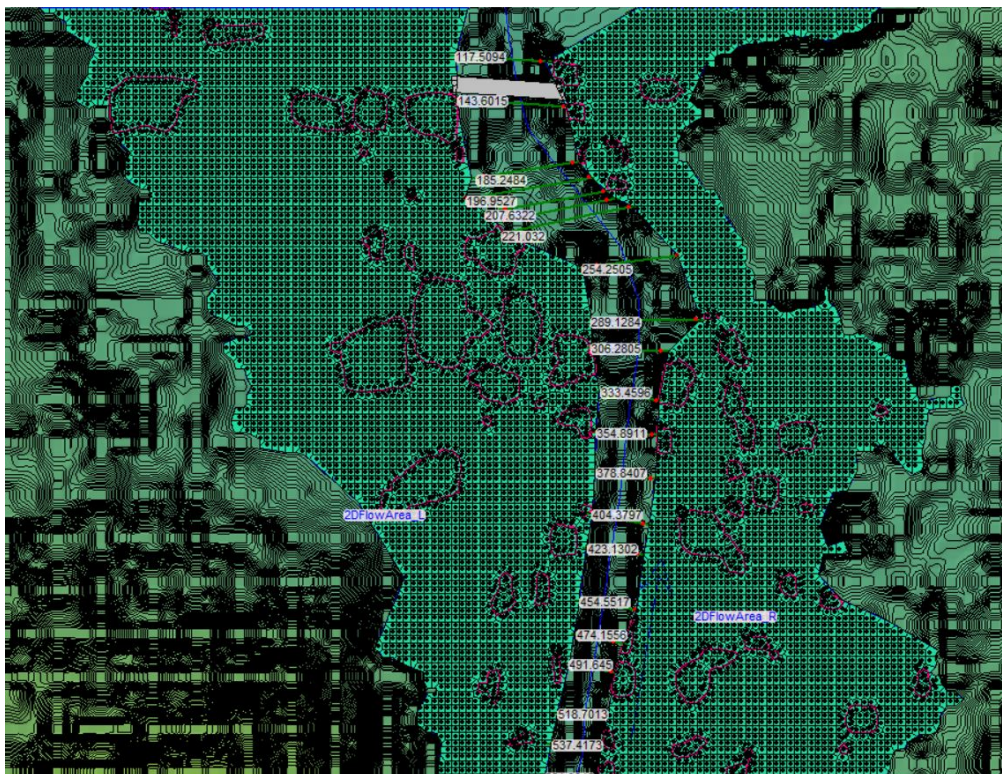


Εικόνα 4.5.3.6: Πεπερασμένα στοιχεία της 2D Επιφάνειας ροής δεξιά (HEC-RAS 5.0.3).

Το υπολογιστικό πλέγμα που δημιουργήθηκε στις 2D Επιφάνειες ροής, αριστερά και δεξιά της 1D Ροής του ρέματος φαίνεται αναλυτικά στην Εικόνα 4.5.3.7 παρακάτω, καθώς και τμηματικά, σε μεγέθυνση στην Εικόνα 4.5.3.8.



Εικόνα 4.5.3.7: Κάτοψη πεπερασμένων στοιχείων 2D Επιφανειών ροής αριστερά & δεξιά της 1D ροής του ρέματος (HEC-RAS 5.0.3).



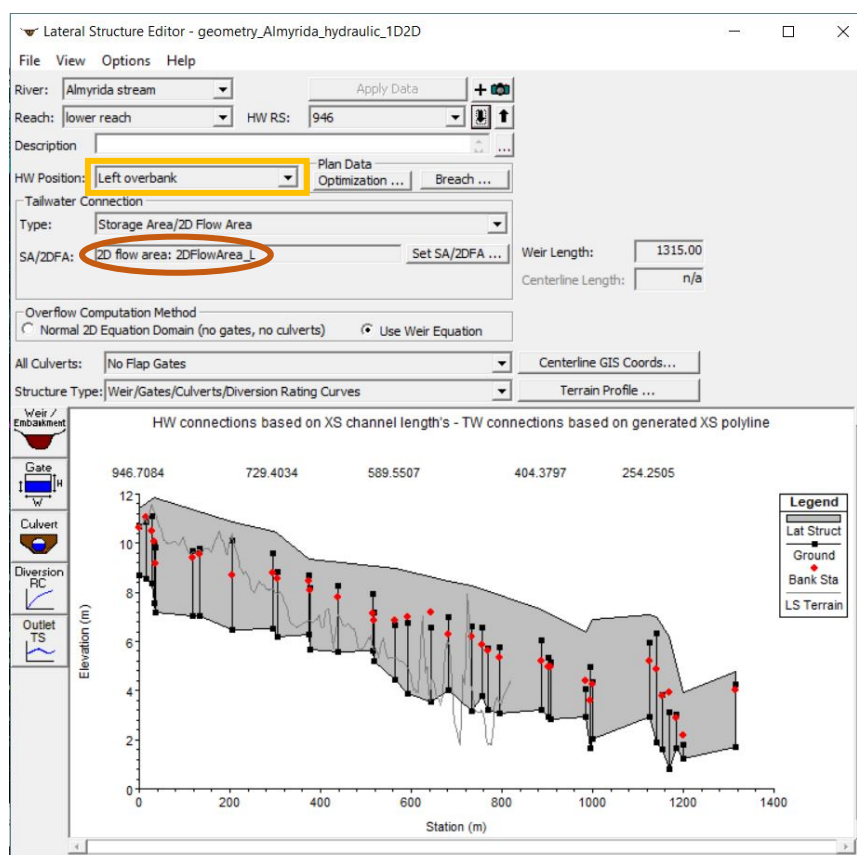
Εικόνα 4.5.3.8: Μεγέθυνση των πεπερασμένων στοιχείων τμημάτων των 2D Επιφανειών ροής αριστερά & δεξιά της 1D ροής του ρέματος (HEC-RAS 5.0.3).

4.5.4 Σύνδεση 2D Επιφανειών Ροής με 1D Ροή ρέματος μέσω Πλευρικών Δομών (Lateral Structures)

Για τη σύνδεση της 1D ροής του ρέματος με τις 2D Επιφάνειες ροής σχεδιάστηκαν 4 πλευρικές δομές (Lateral Structures). Η καθεμία ορίζεται από το άνω άκρο που αποτελεί σταθμό του ρέματος της Αλμυρίδας, εισάγοντας στη συνέχεια τις υψομετρικές θέσεις των σταθμών που αντιπροσωπεύουν την κεντρική γραμμή της στέγης της δομής. Σχεδιάστηκαν λοιπόν οι 946 και 945, αριστερά και δεξιά των οχθών αντίστοιχα, από την ανάντη διατομή του ρέματος 946.7084 έως τη διατομή 143.6015 πριν τη θέση της γέφυρας, καθώς και οι 117 και 116.9, επίσης αριστερά και δεξιά των οχθών αντιστοίχως, από τη διατομή 117.5094 μετά τη θέση της γέφυρας έως την κατάντη διατομή του ρέματος 23.14916. Οι πλευρικές δομές αντιπροσωπεύουν το υψηλό έδαφος επάνω από την αριστερή και δεξιά όχθη του ρέματος, ενώ οι θέσεις τους είναι στην *Left overbank* και *Right overbank* αντιστοίχως. Απ' τη στιγμή που γίνεται η σύνδεση μιας πλευρικής δομής με μια 2D Επιφάνεια ροής, τότε οι σταθμοί της πλευρικής δομής συνδέονται αυτομάτως με τα σημεία του μετώπου της 2D Επιφάνειας. Κάθε πλευρική δομή μοντελοποιεί τη ροή που ανέρχεται επάνω από την αντίστοιχη όχθη του ρέματος. Οι πλευρικές δομές 946 και 117 συνδέονται με την 2DFlowArea_L, ενώ οι πλευρικές δομές 945 και 116.9 συνδέονται με την 2DFlowArea_R (USACE, 2016b, p. 3-36, 3-37, 3-39).

Ακολουθώντας, στον Lateral Structure Editor, γίνεται η επιλογή της καρτέλας ‘Weir/Embankment’, όπου ορίζεται το προφίλ της στέψης έκαστου αναχώματος. Για καθένα λοιπόν από τα 4 αναχώματα επιλέχθηκε ως *επίπεδο αναφοράς του υδατοφράκτη ροής (weir flow reference)*: η επιφάνεια του νερού (*water surface*), ενώ ως *σχήμα της στέψης του υδατοφράκτη (weir crest shape)*: *ευρεία στέψη (broad crested)*. Οι υπολογισμοί για κάθε υδατοφράκτη (*weir computations*) θα διεξαχθούν με την *κανονική εξίσωση για υδατοφράκτες (standard weir equation)* (USACE, 2016a, p. 6-86, 6-87). Επιπλέον, στον Lateral Weir Embankment Editor - στην καρτέλα HeadWater Connections- παρατάσσονται οι σταθμοί μιας πλευρικής δομής (*weir stations*), οι οποίοι διασταυρώνονται με τις διατομές του 1D ρέματος, και επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν οι προκαθορισμένοι από υπολογισμό του λογισμικού. Ταυτόχρονα, οι σταθμοί αυτοί συνδέονται με τα σημεία των μετώπων της αντίστοιχης 2D επιφάνειας ροής - στην καρτέλα TailWater Connections-, και επίσης επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν τα προκαθορισμένα από υπολογισμό του λογισμικού (USACE, 2016b, p. 3-40, 3-41, 3-42).

Η διαδικασία που περιγράφηκε για έκαστη από τις 4 πλευρικές δομές παρουσιάζεται αναλυτικά στις Εικόνες 4.5.4.1 έως 4.5.4.8 παρακάτω.



Εικόνα 4.5.4.1: Πλευρική δομή κατά μήκος αριστερής όχθης, από Χ.Θ. 946 έως 143 πριν τη θέση της γέφυρας (HEC-RAS 5.0.3).

Lateral Weir Embankment

Weir Data
 Weir Width: 10
 Weir Computations: Standard Weir Eqn
 Standard Weir Equation Parameters
 Weir flow reference: Water Surface
 Weir Coefficient (Cd): 0.28
 Weir Crest Shape: Broad Crested

Weir Stationing Reference
 HW Distance to Upstream XS: 0
 TW flow goes: to a point between two XS's

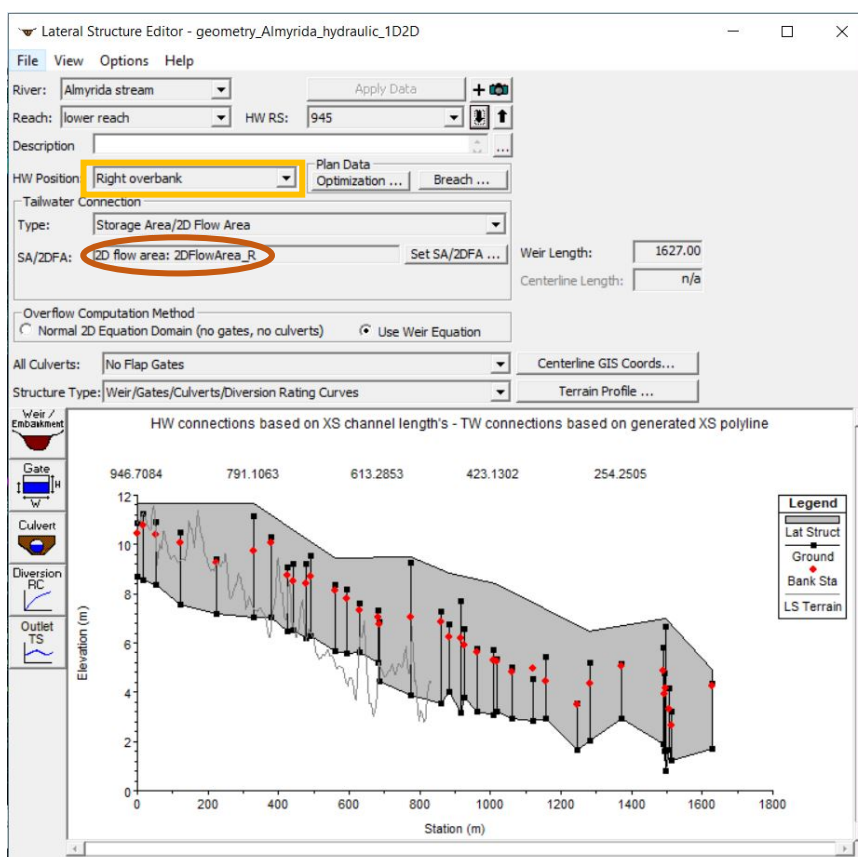
HW Connections ... TW Connections ...

Embankment Station/Elevation Table

	Station	Elevation
1	0.	11.45
2	34.	11.85
3	204.	10.85
4	294.	10.5
5	306.	10.4
6	374.	9.35
7	565.	9.
8	681.	8.45
9	733.	8.25
10	885.	7.34
11	984.	6.39
12	1000.	6.91
13	1125.	7.1
14	1142.	7.01
15	1169.	6.19
16	1200.	3.94
17	1315.	4.76
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		

OK Cancel

Εικόνα 4.5.4.2: Υψομετρικά δεδομένα ανά θέσεις σταθμών πλευρικής δομής κατά μήκος αριστερής όχθης, από Χ.Θ. 946 έως 143 πριν τη θέση της γέφυρας (HEC-RAS 5.0.3).



Εικόνα 4.5.4.3: Πλευρική δομή κατά μήκος δεξιάς όχθης, από Χ.Θ. 945 έως Χ.Θ. 143 πριν τη θέση της γέφυρας (HEC-RAS 5.0.3).

Lateral Weir Embankment

Weir Data
 Weir Width: 10
 Weir Computations: Standard Weir Eqn
 Standard Weir Equation Parameters
 Weir flow reference: Water Surface
 Weir Coefficient (Cd): 0.28
 Weir Crest Shape: Broad Crested

Weir Stationing Reference
 HW Distance to Upstream XS: 0
 TW flow goes: to a point between two XS's

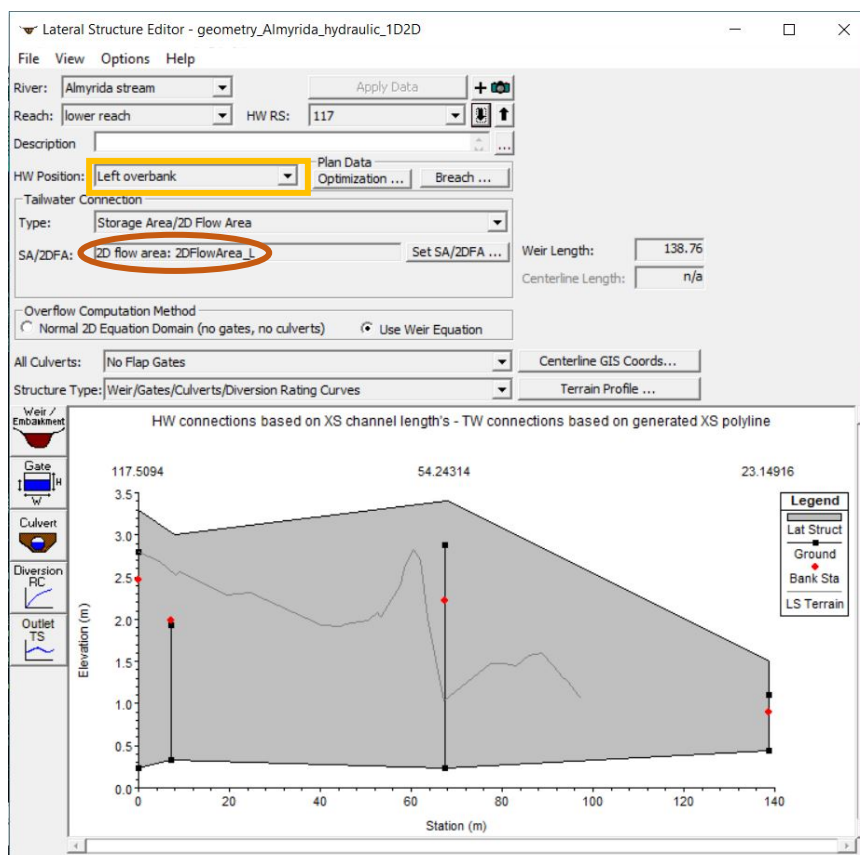
HW Connections ... TW Connections ...

Embankment Station/Elevation Table

	Station	Elevation
1	0.	11.65
2	329.	11.66
3	491.	10.1
4	560.	9.45
5	775.	9.5
6	882.	8.85
7	1017.	8.4
8	1280.	6.48
9	1496.	7.
10	1627.	4.92
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		

OK Cancel

Εικόνα 4.5.4.4: Υψομετρικά δεδομένα ανά θέσεις σταθμών πλευρικής δομής κατά μήκος δεξιάς όχθης, από Χ.Θ. 945 έως Χ.Θ. 143 πριν τη θέση της γέφυρας (HEC-RAS 5.0.3).



Εικόνα 4.5.4.5: Πλευρική δομή κατά μήκος αριστερής όχθης, από Χ.Θ. 117 μετά τη θέση της γέφυρας έως Χ.Θ. 23.14916 (HEC-RAS 5.0.3).

Lateral Weir Embankment

Weir Data

Weir Width: 10

Weir Computations: Standard Weir Eqn

Standard Weir Equation Parameters

Weir flow reference: Water Surface

Weir Coefficient (Cd): 0.28

Weir Crest Shape: Broad Crested

Weir Stationing Reference

HW Distance to Upstream XS: 0

TW flow goes: to a point between two XS's

HW Connections ... TW Connections ...

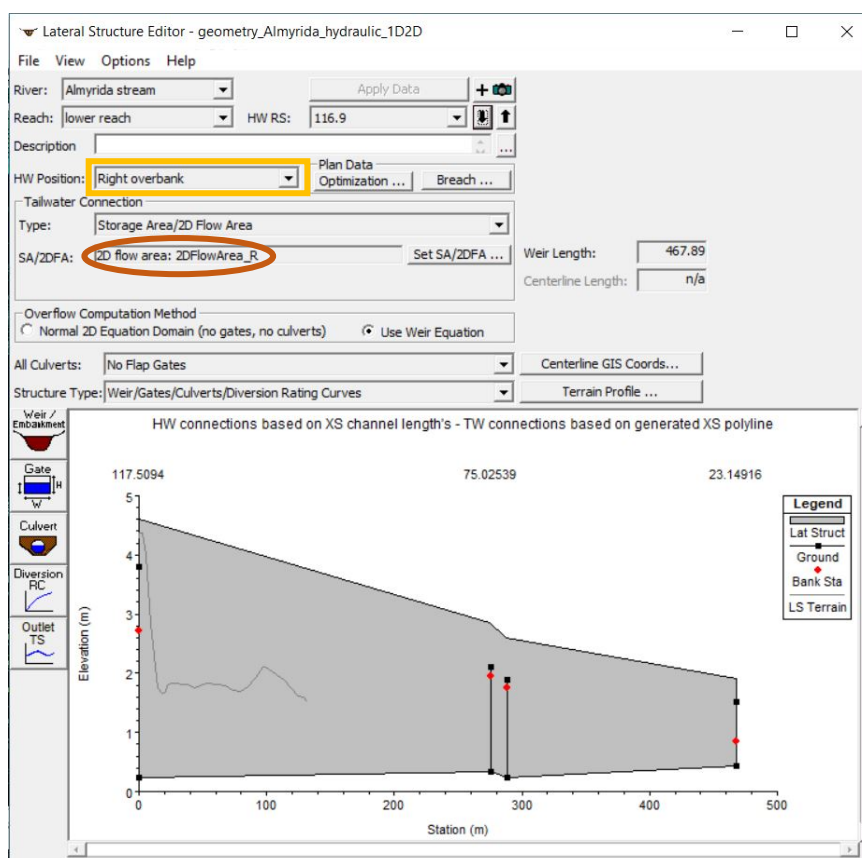
Embankment Station/Elevation Table

Insert Row Delete Row Filter ...

	Station	Elevation
1	0.	3.3
2	8.	3.
3	68.	3.4
4	138.76	1.5
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		

OK Cancel

Εικόνα 4.5.4.6: Υψομετρικά δεδομένα ανά θέσεις σταθμών πλευρικής δομής κατά μήκος αριστερής όχθης, από Χ.Θ. 117 μετά τη θέση της γέφυρας έως Χ.Θ. 23.14916 (HEC-RAS 5.0.3).



Εικόνα 4.5.4.7: Πλευρική δομή κατά μήκος δεξιάς όχθης, από Χ.Θ. 116.9 μετά τη θέση της γέφυρας έως Χ.Θ. 23.14916 (HEC-RAS 5.0.3).

Lateral Weir Embankment

Weir Data

Weir Width: 10

Weir Computations: Standard Weir Eqn

Standard Weir Equation Parameters

Weir flow reference: Water Surface

Weir Coefficient (Cd): 0.28

Weir Crest Shape: Broad Crested

Weir Stationing Reference

HW Distance to Upstream XS: 0

TW flow goes: to a point between two XS's

HW Connections ... TW Connections ...

Embankment Station/Elevation Table

Insert Row Delete Row Filter...

	Station	Elevation
1	0.	4.6
2	275.	2.85
3	288.	2.6
4	467.89	1.9
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		

OK Cancel

Εικόνα 4.5.4.8: Υψομετρικά δεδομένα ανά θέσεις σταθμών πλευρικής δομής κατά μήκος δεξιάς όχθης, από Χ.Θ. 116.9 μετά τη θέση της γέφυρας έως Χ.Θ. 23.14916 (HEC-RAS 5.0.3).

Όπως φαίνεται από τις Εικόνες 4.5.4.2, 4.5.4.4, 4.5.4.6 και 4.5.4.8, για να ολοκληρωθεί η διαδικασία εισαγωγής κάθε πλευρικής δομής πρέπει να εισαχθούν: (i) το πλάτος του υδατοφράκτη (weir width), (ii) ο συντελεστής υδατοφράκτη (weir coefficient), (iii) η απόσταση του σταθμού αναφοράς (weir stationing reference) από την ανάντη διατομή, (iv) οι σταθμοί του υδατοφράκτη (weir stations), καθώς και (v) τα υψόμετρα στους σταθμούς αυτούς (elevations).

Όσον αφορά το πλάτος του υδατοφράκτη στη στέψη του, επιλέχθηκε ίσο προς 10m, αν και είναι καθαρά για γραφικούς λόγους, χωρίς να επηρεάζει τους υπολογισμούς.

Σχετικά με την απόσταση του σταθμού αναφοράς, δηλαδή του άναντες άκρου του υδατοφράκτη -βάσει του οποίου θα γίνει η εισαγωγή των υψομετρικών δεδομένων των υπόλοιπων σταθμών-, από την ανάντη διατομή, τη διατομή δηλαδή ακριβώς πριν από τη δομή, για όλες τις πλευρικές δομές τέθηκε ίση με “0”.

Αναφορικά με τη γεωμετρία του υδατοφράκτη, οι σταθμοί και τα υψόμετρα της στέψης του αναχώματος του υδατοφράκτη εισάγονται από τα ανάντη προς τα κατόντη. Απ’ τη στιγμή που μια πλευρική δομή είναι συνδεδεμένη π.χ. με την Left overbank του ρέματος, τότε οι

αποστάσεις των σταθμών της δομής είναι οι αποστάσεις μεταξύ των διατομών κατά μήκος της Left overbank (USACE, 2016a, p. 6-86, 6-87, 6-88).

Ο συντελεστής υδατοφράκτη (weir coefficient) χρησιμοποιείται στην standard weir equation ώστε να οριστεί η ροή επάνω από το ανάχωμα του υδατοφράκτη (USACE, 2016a, p. 6-86). Όταν χρησιμοποιείται μια πλευρική δομή (π.χ. εξίσωση υδατοφράκτη) για τη μεταφορά της ροής από ένα ρέμα (1D περιοχή) στην πλημμυρική ζώνη (2D επιφάνεια ροής), τότε οι συντελεστές υδατοφράκτη που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι πολύ χαμηλοί, διαφορετικά θα μεταφερθεί πολύ μεγάλη ροή. Στον Πίνακα 4.5.4.1 που ακολουθεί, παρουσιάζονται γενικές κατευθυντήριες γραμμές για τους συντελεστές πλευρικών υδατοφρακτών υπό διαφορετικές συνθήκες (USACE, 2016b, p. 3-50).

Πίνακας 4.5.4.1: Συντελεστές πλευρικών υδατοφρακτών. (Πηγή: USACE, 2016b, p. 3-50)

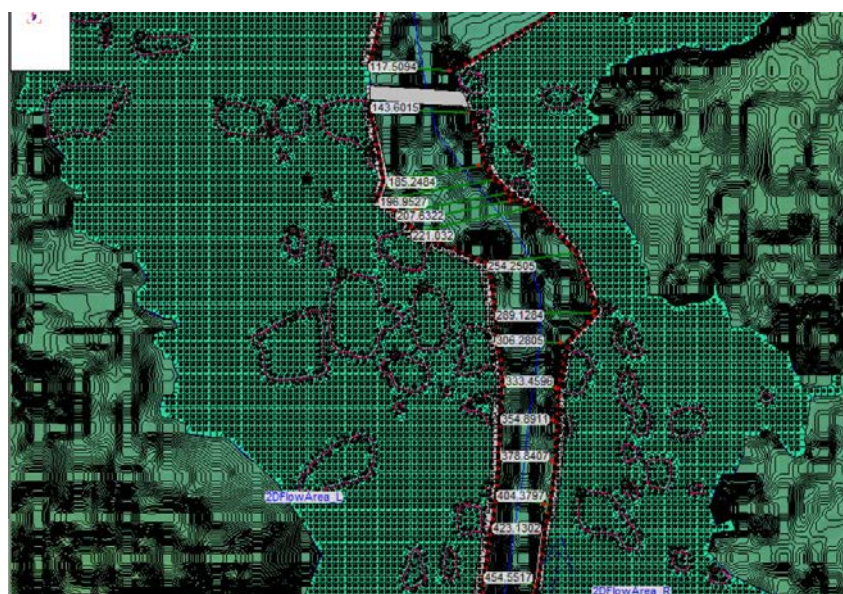
Τι μοντελοποιείται με Πλευρική Δομή (Lateral Structure)	Περιγραφή	Εύρος τιμών συντελεστή υδατοφράκτη (weir coefficient) στο S.I.
Ανάχωμα ή δρόμος: 1m ή υψηλότερα επάνω από το φυσικό έδαφος	Η ροή ευρείας ανύψωσης, σχήματος υδατοφράκτη, πάνω από ανάχωμα ή δρόμο δρα όπως η ροή υδατοφράκτη	0.83~1.43
Ανάχωμα ή δρόμος: 0.33m έως 1m υψηλότερα από το έδαφος	Η ροή ευρείας ανύψωσης, σχήματος υδατοφράκτη, πάνω από ανάχωμα ή δρόμο δρα όπως η ροή υδατοφράκτη, αλλά βυθίζεται εύκολα	0.55~1.1
Φυσικά υψηλό εμπόδιο εδάφους ύψους από 0.33m έως 1m	Δε λειτουργεί πραγματικά ως φράγμα, αλλά το νερό πρέπει να ρέει επάνω από το υψηλό έδαφος ώστε να εισέλθει στην 2D Επιφάνεια ροής	0.28~0.55
Μη ανυψωμένο έδαφος επάνω από τις όχθες ρέματος: Η πλευρική δομή δεν ανυψώνεται επάνω από το έδαφος	Η υπέργεια ροή διαφεύγει από το κύριο ρέμα	0.11~0.28

Βάσει του άνωθεν Πίνακα, για τις 4 πλευρικές δομές σύνδεσης της 1D ροής του ρέματος με τις 2D Επιφάνειες ροής, και σύμφωνα με την τοπογραφία του ρέματος της Αλμυρίδας, έγινε χρήση του συντελεστή υδατοφράκτη (weir coefficient) ίσου προς **0.28** (μονάδες S.I.). Η επιλογή αυτή υποδεικνύει ότι έκαστη πλευρική δομή δεν ανυψώνεται επάνω από το έδαφος είτε αποτελεί φυσικά υψηλό εμπόδιο εδάφους, μέχρι περίπου 0.33m. Επομένως, η γεωμετρία της σύνδεσης της 1D ροής του ρέματος με τις 2D επιφάνειες ροής μέσω πλευρικών δομών

διαμορφώνεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.5.4.9 παρακάτω, καθώς και τμηματικά, σε μεγέθυνση στην Εικόνα 4.5.4.10.



Εικόνα 4.5.4.9: Σχεδιασμός πλευρικών δομών (lateral structures) σύνδεσης 1D ροής του ρέματος με τις 2D επιφάνειες ροής (HEC-RAS 5.0.3).

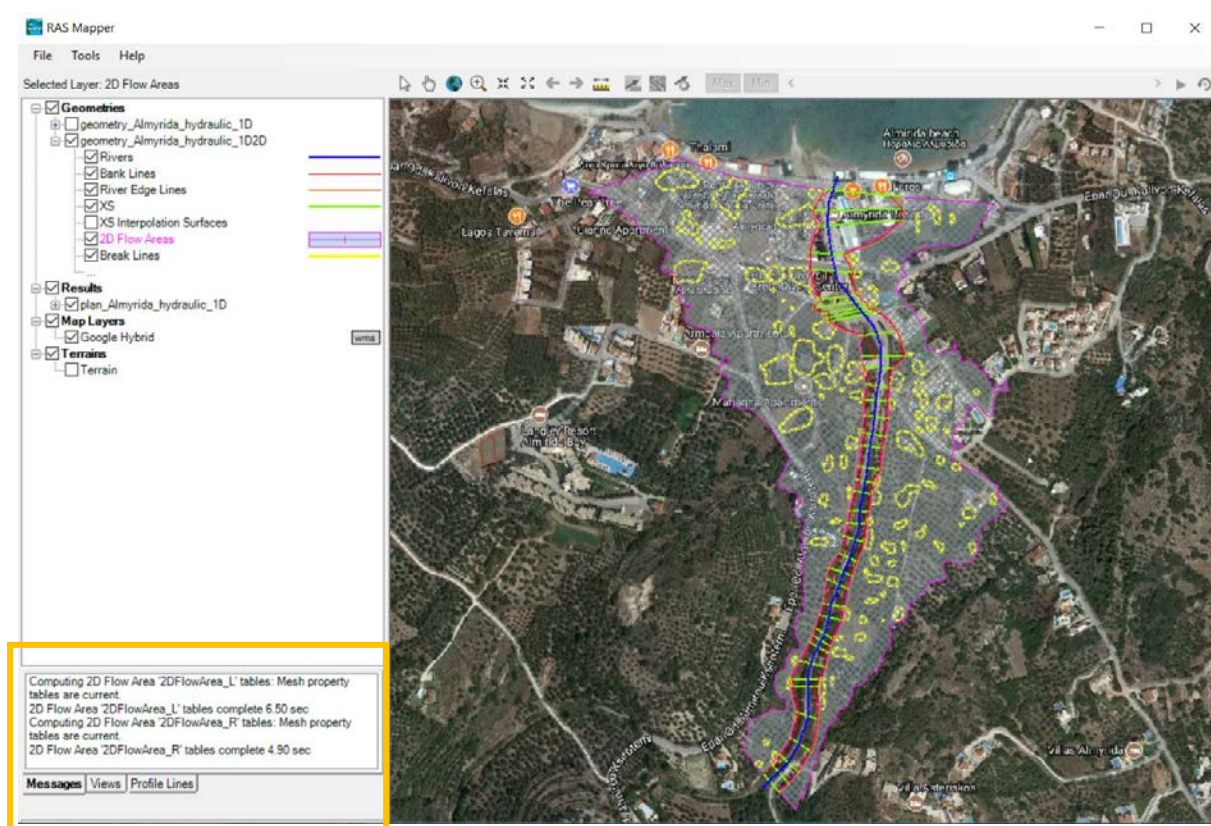


Εικόνα 4.5.4.10: Μεγέθυνση της κάτοψης τμημάτων των πλευρικών δομών (lateral structures) σύνδεσης 1D ροής του ρέματος με τις 2D επιφάνειες ροής (HEC-RAS 5.0.3).

Όπως φαίνεται από τις Εικόνες 4.5.4.9 και 4.5.4.10, κατά μήκος των σημείων των μετώπων των πεπερασμένων στοιχείων εμφανίζεται μια παχιά μαύρη γραμμή, η οποία υποδεικνύει τις θέσεις όπου μια πλευρική δομή συνδέεται με την 2D επιφάνεια ροής του πλημμυρικού κύματος. Αυτή η παχιά μαύρη γραμμή ξεκινά και τελειώνει πάντα στην αρχή ή στο τέλος του μετώπου ενός πεπερασμένου στοιχείου. Στην κορυφή της μαύρης γραμμής υπάρχει μια διακεκομμένη κόκκινη γραμμή, η οποία αντιπροσωπεύει τις θέσεις όπου το λογισμικό έχει συνδέσει την πλευρική δομή με το όριο της 2D επιφάνειας ροής. Αυτή η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή μπορεί να ξεκινά και να τελειώνει στο μέσο του 2D μετώπου ενός πεπερασμένου στοιχείου, υποδεικνύοντας την ακριβή θέση του τρόπου με τον οποίο η 2D επιφάνεια ροής συνδέεται με την πλευρική δομή (USACE, 2016b, p. 3-44, 3-45).

4.5.5 Γραφική αναπαράσταση στον RAS Mapper

Ανοίγοντας τον RAS Mapper, υπενθυμίζεται ότι από το στήσιμο του 1D προσομοιώματος, έχει ήδη οριστεί ως γεωαναφορά προβολής το Γεωγραφικό Σύστημα Αναφοράς WGS_1984_World_Mercator. Στην Εικόνα 4.5.5.1 παρακάτω, φαίνεται το τελικό αποτέλεσμα αναπαράστασης του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και της γεωμετρίας του ρέματος.



Εικόνα 4.5.5.1: Αεροφωτογραφία περιοχής μελέτης & γεωμετρία κάταντες τμήματος ρέματος Αλμυρίδας, στον RAS Mapper (HEC-RAS 5.0.3).

Στην παραπάνω Εικόνα, με γεωαναφορά στο Γεωγραφικό Σύστημα Αναφοράς WGS_1984_World_Mercator, διακρίνεται η κεντρική γραμμή του ρέματος (μπλε χρώμα), η αριστερή και δεξιά όχθη του ρέματος (κόκκινο χρώμα), οι γραμμές των διαδρομών ροής άνω της αριστερής και δεξιάς όχθης (πορτοκαλί χρώμα), οι κομμένες διατομές στο άνω όριο των οχθών του ρέματος (λαχανί χρώμα), οι 2D επιφάνειες ροής (μωβ χρώμα), καθώς και οι γραμμές διαχωρισμού (κίτρινο χρώμα). Συγχρόνως, από τα layers που βλέπουμε αριστερά στον RAS Mapper, σε ό,τι αφορά τις 2D Επιφάνειες ροής, επιλέχθηκε να γίνει υπολογισμός των Υδραυλικών τους Πινάκων (*compute 2D Flow Areas Hydraulic Tables*). Το αποτέλεσμα των υπολογισμών αυτών είναι τοποθετημένο σε πορτοκαλί πλαίσιο, κάτω αριστερά της Εικόνας 4.5.5.1.

4.5.6 Οριακές και Αρχικές Συνθήκες Ροής

Από το μονοδιάστατο project σώθηκε το αρχείο δεδομένων μη μόνιμης ροής, στον Unsteady Flow Data editor, το [unsteady_Almyrida_hydraulic_1D.u01](#), ως [unsteady_Almyrida_hydraulic_1D2D.u02](#), όπου και διατηρήθηκαν οι οριακές και αρχικές συνθήκες του μονοδιάστατου μοντέλου. Συνοπτικά, για το μελετώμενο τμήμα του ρέματος της Αλμυρίδας εισήχθη:

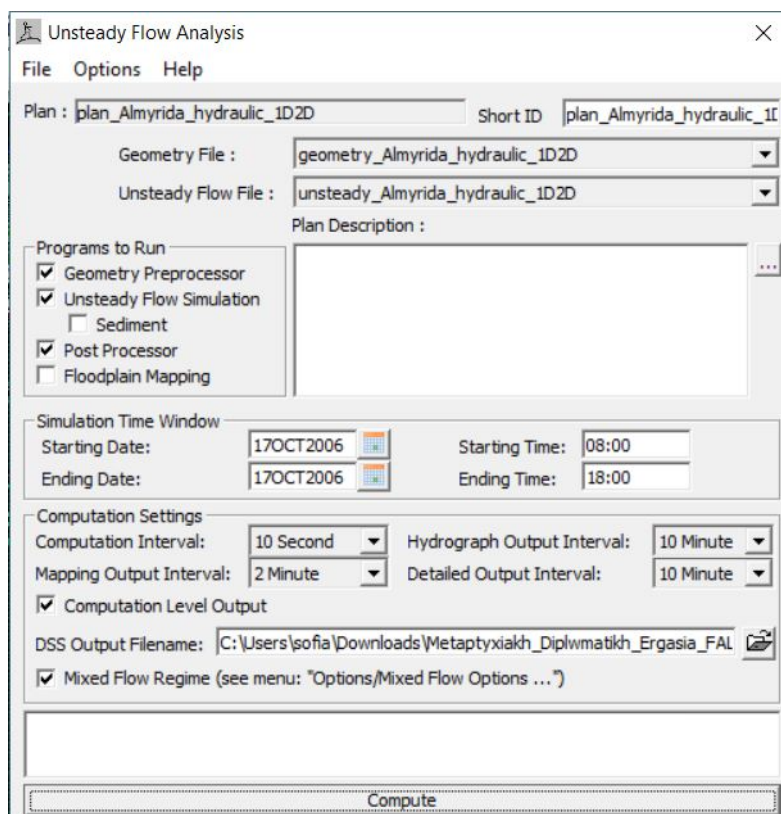
- ✧ ως οριακή συνθήκη μη μόνιμης ροής στην ανάντη διατομή: το πλημμυρικό υδρογράφημα Q-t, όπως προέκυψε από το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS 4.2.1,
- ✧ ως οριακή συνθήκη μη μόνιμης ροής στην κατάντη διατομή: το κανονικό βάθος, με ρυθμό απωλειών λόγω τριβής ίσο με 0.03,
- ✧ ως αρχική συνθήκη μη μόνιμης ροής κατά την έναρξη της προσομοίωσης στην ανάντη διατομή: ροή παροχής $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.5.7 Ανάλυση μη μόνιμης ροής (unsteady flow analysis)

Αρχικά δημιουργήθηκε ένα αρχείο εκτέλεσης της υδραυλικής προσομοίωσης στον Unsteady Flow Analysis editor, το [plan_Almyrida_hydraulic_1D2D.p02](#). Επειδή εξ' αρχής έγινε save as το μονοδιάστατο υδραυλικό προσομοίωμα -επί του οποίου γίνονται οι τροποποιήσεις για το στήσιμο του 1D/2D μοντέλου-, το αρχείο εκτέλεσης που δημιουργήθηκε περιλαμβάνει ήδη τις επιλογές που έγιναν για την εκτέλεση των υπολογισμών του 1D μοντέλου.

Συντόμως, να αναφερθεί ότι οι υδραυλικοί υπολογισμοί του κάταντες τμήματος του ρέματος της Αλμυρίδας εκτελέστηκαν στις 17/10/2006 από ώρα 08:00 έως 18:00, με χρονικό βήμα προσομοίωσης τα 10 sec. Εκτελέστηκε προ-επεξεργασία της γεωμετρίας, προσομοίωση της μη

μόνιμης ροής, αλλά και μετα-επεξεργασία της μη μόνιμης ροής. Το βήμα εξαγόμενων λεπτομερών αποτελεσμάτων και υδρογραφημάτων ήταν τα 10 min, ενώ ως βήμα χαρτογραφημένων αποτελεσμάτων ορίστηκαν τα 2 min. Για κάθε διατομή και για κάθε υπολογιστικό χρονικό βήμα θα εξαχθούν αποτελέσματα για ένα σύνολο μεταβλητών. Πριν εκτελεστεί το πρόγραμμα, απαραίτητο είναι το πεδίο με το όνομα DSS Output Filename. Ως καθεστώς ροής ορίστηκε η μικτή (USACE, 2016a, p. 8-19, 8-20, 8-25, 8-27, 8-28, 8-29). Οι παραπάνω επιλογές για την εκτέλεση του προγράμματος φαίνονται στην Εικόνα 4.5.7.1.



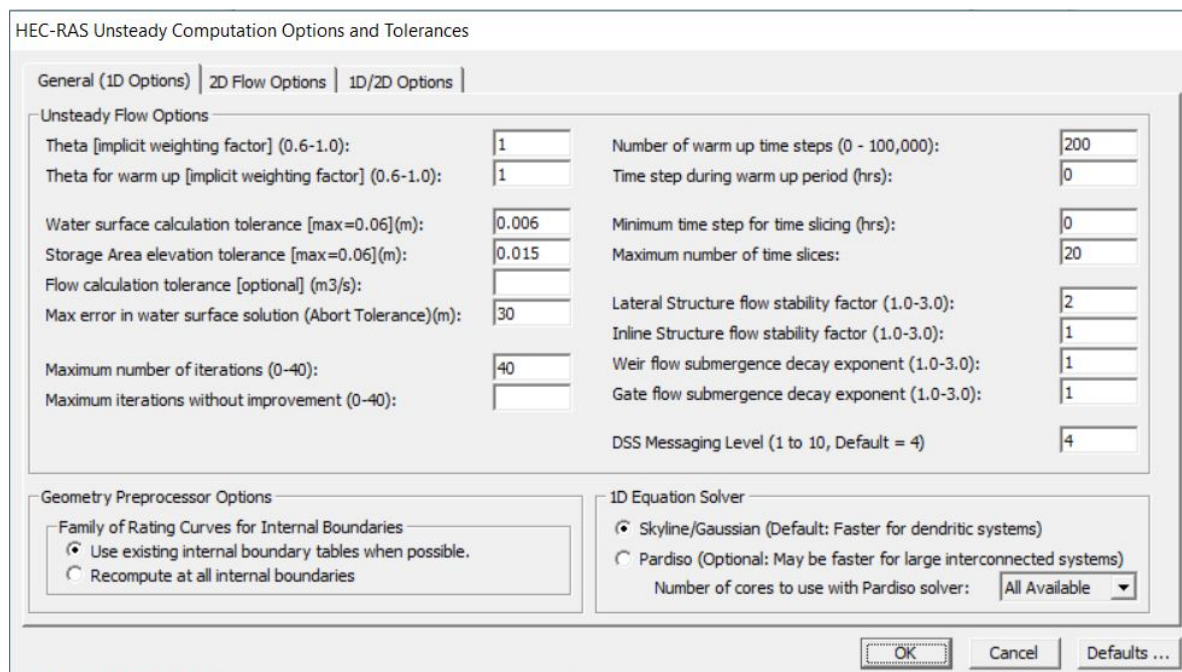
Εικόνα 4.5.7.1: Ανάλυση μη μόνιμης ροής (HEC-RAS 5.0.3).

Συνοπτικά, για μικτή ροή τέθηκε ελάχιστη τιμή Froude $Fr=0$ και εκθέτης του συντελεστή μείωσης του αριθμού Froude, $m=10$. Για την προσομοίωση, η υποδιαίρεση χρόνου θα ξεκινά ύστερα από την 5^η επανάληψη, με ελάχιστο χρονικό βήμα επανάληψης τις 0.01 hr (USACE, 2016a, p. 16-2, 16-3, 8-37). Για το ρυθμό απωλειών λόγω τριβής στη θέση της γέφυρας, θα εφαρμοστεί η μέθοδος average friction slope (προκαθορισμένη για μη μόνιμη ροή) (USACE, 2016a, p. 8-51). Για την 1D προσομοίωση ροής τέθηκαν οι εξής επιλογές υπολογισμών:

- ✧ Ο έμμεσος συντελεστής στάθμισης theta: ίσος με 1. Ομοίως και ο συντελεστής theta κατά την περίοδο “προθέρμανσης” του προγράμματος.
- ✧ Το όριο ανεκτικότητας στις ανυψώσεις της στάθμης του νερού στις διατομές: ίσο με 0.006 m, ενώ στις περιοχές αποθήκευσης: ίσο με 0.015 m.

- ✧ Το μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα για την ανύψωση της στάθμης του νερού: ίσο με 30 m, η υπέρβαση του οποίου οδηγεί στην παύση εκτέλεσης του προγράμματος.
- ✧ Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για την επίλυση των εξισώσεων μη μόνιμης ροής: ίσος με 40.
- ✧ Ο αριθμός των χρονικών βημάτων περιόδου “προθέρμανσης” πριν την έναρξη της προσομοίωσης: ίσος με 200, με χρονικό βήμα κατά την “προθέρμανση”: ίσο με 0 hr.
- ✧ Ως χρονικό βήμα έναρξης υποδιαίρεσης χρόνου: οι 0 hr, με μέγιστο αριθμό παρεμβλλόμενων χρονικών βημάτων: ίσο με 20.
- ✧ Λοιποί συντελεστές σταθερότητας ή εκθετικής φθοράς που αφορούν κατασκευές (πλευρικές, κατά μήκος, φράγματα, αποβάθρες): ίσες με τις προκαθορισμένες τιμές του λογισμικού.
- ✧ Η προκαθορισμένη τιμή ελέγχου της ποσότητας και των λεπτομερειών των εγγραφόμενων μηνυμάτων στο αρχείο καταγραφής κατά την ανάγνωση και εγγραφή δεδομένων στο HEC-DSS: ίση με 4.
- ✧ Για τις εσωτερικές οριακές συνθήκες, το πρόγραμμα θα χρησιμοποιεί τις ήδη υπολογισμένες καμπύλες, όπου είναι δυνατό. Η επίλυση της 1D εξίσωσης μη μόνιμης ροής θα γίνεται κατά Skyline/Gauss (USACE, 2016a, p. 8-37, 8-38, 8-39, 8-40, 8-41).

Οι παραπάνω επιλογές 1D προσομοίωσης της ροής παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.5.7.2.



Εικόνα 4.5.7.2: Επιλογές υπολογισμών & όρια ανεκτικότητας για μη μόνιμη 1D ροή (HEC-RAS 5.0.3).

Στη συνέχεια, για την εκτέλεση του 1D/2D λογισμικού προσομοίωσης του υδραυλικού κύματος, τέθηκαν κάποιες επιλογές υπολογισμών για 2D προσομοίωση ροής. Ειδικότερα, επιλέχθηκε ότι οι πυρήνες της CPU που θα χρησιμοποιηθούν από το λογισμικό για τους 2D υπολογισμούς θα είναι οι προκαθορισμένοι από το πρόγραμμα, δηλαδή όλοι οι διαθέσιμοι από τον Η/Υ. Ο έμμεσος συντελεστής στάθμισης θ παρέμεινε ίσος με την προκαθορισμένη του τιμή, δηλαδή «1», παρέχοντας την πιο σταθερή λύση, η οποία πιθανώς να έχει μικρότερη ακρίβεια. Η ίδια προκαθορισμένη τιμή χρησιμοποιείται για τον συντελεστή θ κατά την περίοδο “προθέρμανσης” και “επεξεργασίας” του προγράμματος.

Επιπρόσθετα, τίθεται όριο ανεκτικότητας στην 2D λύση αναφορικά με την ανύψωση της στάθμης του νερού (*water surface tolerance*) και το μοτίβο επαναλήψεων, ίσο με την προκαθορισμένη από το λογισμικό τιμή, 0.003 m. Εάν η αριθμητική λύση των εξισώσεων δίνει μικρότερο αριθμητικό σφάλμα από την καθορισμένη ανοχή, τότε η επίλυση γίνεται με το συγκεκριμένο χρονικό βήμα. Εάν ωστόσο το σφάλμα είναι μεγαλύτερο από την καθορισμένη ανοχή, τότε το πρόγραμμα θα συνεχίσει τις επαναλήψεις έως το μέγιστο αριθμό που έχει καθοριστεί, μέχρι να πάρει καλύτερη λύση. Επιπλέον τέθηκε ένα ακόμα όριο ανεκτικότητας στον όγκο του υδραυλικού κύματος (*volume tolerance*), ίσο με 0.003 m.

Ορίστηκε επίσης ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για την επίλυση των εξισώσεων μη μόνιμης ροής από το πρόγραμμα, με βάση τα προκαθορισμένα όρια ανεκτικότητας, ίσος με 20, ώστε η λύση να δίνει αριθμητικό σφάλμα μικρότερο από το καθορισμένο όριο ανοχής σε όλες τις θέσεις του 2D υπολογιστικού πλέγματος.

Για την επίλυση της ροής που μετακινείται επάνω στο 2D υπολογιστικό πλέγμα χρησιμοποιούνται οι 2D εξισώσεις Διάχυσης Κύματος (*Diffusion Wave*), που είναι και οι προεπιλεγμένες από το λογισμικό, με τις οποίες οι περισσότερες εφαρμογές πλημμυρών λειτουργούν καλά, καθώς το σύνολο των εξισώσεων Διάχυσης Κύματος εκτελείται πιο γρήγορα και χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη σταθερότητα.

Τέθηκε επίσης το ποσοστό του χρόνου επεξεργασίας (*ramp up time*) κατά την αρχική συνθήκη που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των οριακών συνθηκών των 2D επιφανειών ροής, από μηδενικές ή άνυδρες, έως την αρχική ροή. Το εύρος τιμών που δύναται να εισαχθεί είναι από 0 έως 1, αντιπροσωπεύοντας το δεκαδικό κλάσμα της ώρας επεξεργασίας κατά την αρχική συνθήκη. Καθορίστηκε τιμή 10%.

Τέλος, ρυθμίζεται ένα υπολογιστικό χρονικό βήμα για κάθε 2D επιφάνεια ροής, δηλαδή μια υποδιαίρεση (*time slice*) του συνολικού χρονικού βήματος προσομοίωσης της μη μόνιμης

ροής. Στην καρτέλα Unsteady Flow Analysis editor έχει τεθεί χρονικό βήμα προσομοίωσης υδραυλικών υπολογισμών τα 10 sec. Ως χρονική υποδιαίρεση του χρονικού βήματος προσομοίωσης τέθηκε η προκαθορισμένη τιμή του λογισμικού, ίση με 1, για κάθε 2D επιφάνεια ροής, πράγμα που σημαίνει ότι οι 2D επιφάνειες ροής χρησιμοποιούν το ίδιο υπολογιστικό χρονικό βήμα με τη συνολική λύση της μη μόνιμης ροής (USACE, 2016a, p. 8-42, 8-43, 8-44, 8-45).

Οι παραπάνω επιλογές που αφορούν την 2D προσομοίωση της ροής παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.5.7.3 παρακάτω.

HEC-RAS Unsteady Computation Options and Tolerances

General (1D Options) **2D Flow Options** 1D/2D Options

☐ Use Coriolis Effects (only when using the momentum equation)

Number of cores to use in 2D computations: All Available

	Parameter	(Default)	2DFlowArea_L	2DFlowArea_R
1	Theta (0.6-1.0):	1	1	1
2	Theta Warmup (0.6-1.0):	1	1	1
3	Water Surface Tolerance [max=0.06](m)	0.003	0.003	0.003
4	Volume Tolerance (m)	0.003	0.003	0.003
5	Maximum Iterations	20	20	20
6	Equation Set	Diffusion Wave	Diffusion Wave	Diffusion Wave
7	Initial Conditions Time (hrs)			
8	Initial Conditions Ramp Up Fraction (0-1)	0.1	0.1	0.1
9	Number of Time Slices (Integer Value)	1	1	1
10	Eddy Viscosity Transverse Mixing Coefficient			
11	Boundary Condition Volume Check	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	Latitude for Coriolis (-90 to 90)			

OK Cancel Defaults ...

Εικόνα 4.5.7.3: Επιλογές υπολογισμών & όρια ανεκτικότητας για μη μόνιμη 2D ροή (HEC-RAS 5.0.3).

Για την επιτυχή εκτέλεση του 1D/2D λογισμικού προσομοίωσης του υδραυλικού κύματος, τέθηκαν κάποιες επιλογές υπολογισμών για 1D/2D προσομοίωση ροής. Συγκεκριμένα, για τους υπολογισμούς ροής από το 1D ρέμα στις 2D επιφάνειες ροής, τέθηκε ότι οι μέγιστες επαναλήψεις που θα διεξαχθούν μεταξύ της 1D και της 2D προσομοίωσης θα είναι μηδενικές, δηλαδή οι συνδέσεις 1D με 2D δε θα χρειαστούν επιπλέον επαναλήψεις.

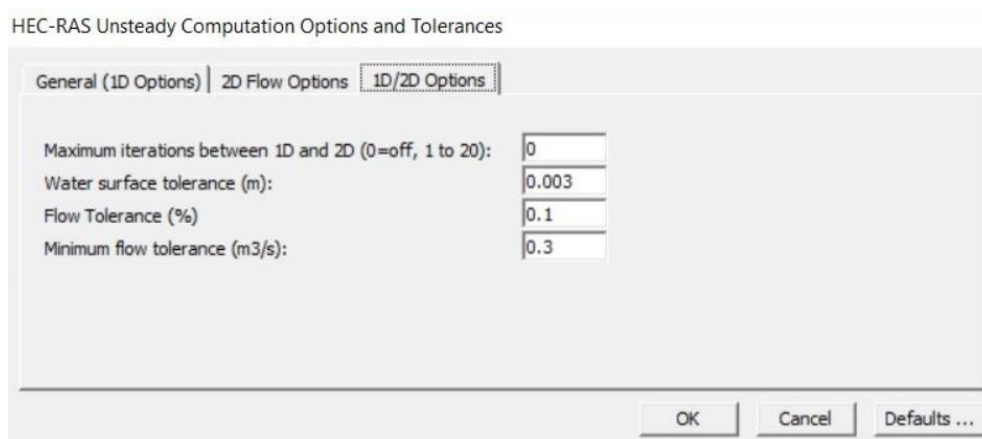
Έπειτα τέθηκε όριο ανεκτικότητας για την επιφάνεια του νερού, μια παράμετρος που χρησιμοποιείται μόνον όταν ένα 1D ρέμα στα ανάντη συνδέεται στα κατόντη με 2D επιφάνεια ροής. Σε μια τέτοια περίπτωση, πρώτα υπολογίζεται η 1D ροή και έπειτα η 2D, ενώ η αναμενόμενη ανύψωση της επιφάνειας του νερού στο όριο επαναξιολογείται. Στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης το 1D ρέμα συνδέεται πλευρικά με τις 2D επιφάνειες ροής,

επομένως η τιθέμενη τιμή της ανοχής στην ανύψωση της επιφάνειας του ύδατος ίση με 0.003 m, επί της ουσίας δε λαμβάνεται υπόψιν.

Άλλη μια παράμετρος που τέθηκε είναι το ποσοστό ανεκτικότητας στη ροή (*flow tolerance*) (%). Αυτό το όριο ανοχής χρησιμοποιείται για τις πλευρικές δομές, αλλά και για τη σύνδεση 2D επιφανειών ροής με 1D ρέμα. Η τιμή που τέθηκε είναι ίση με την προκαθορισμένη από το λογισμικό, δηλαδή 0.1%.

Μια τελευταία παράμετρος που τίθεται είναι η ανεκτικότητα ελάχιστης ροής (*minimum flow tolerance*). Ο σκοπός αυτής της ανοχής είναι να εμποδιστεί το πρόγραμμα να προχωρήσει σε επαναλήψεις όταν η ροή που περνά από ένα στοιχείο 1D -μέσω σύνδεσης με πλευρική δομή- σε ένα στοιχείο 2D είναι πολύ μικρή και ασήμαντη για τη λύση. Μια τόσο μικρή ροή μπορεί να μην έχει καμιά σημασία για τη λύση, οπότε η επανάληψη ολόκληρης της λύσης για τη βελτίωση αυτής της μικρής ροής μεταξύ των στοιχείων 1D και 2D δεν έχει νόημα, αντιθέτως μάλλον αποτελεί σπατάλη για τον χρόνο υπολογισμού. Η τιμή που τέθηκε είναι ίση με την προεπιλεγμένη από το πρόγραμμα, δηλαδή 0.3 m³/s (USACE, 2016a, p. 8-47, 8-48).

Οι επιλογές που αναλύθηκαν και αφορούν την 1D/2D προσομοίωση της ροής, παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.5.7.4 που ακολουθεί.



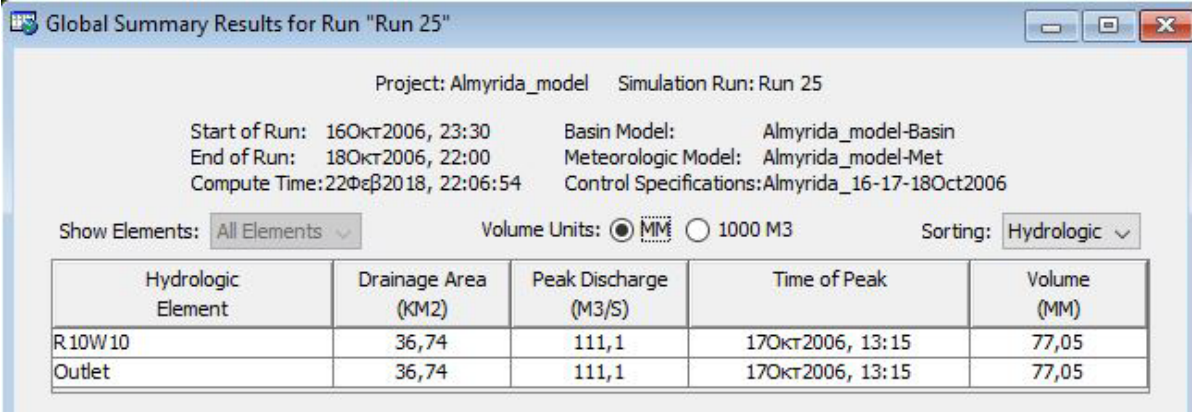
Εικόνα 4.5.7.4: Επιλογές υπολογισμών & όρια ανεκτικότητας για μη μόνιμη 1D/2D ροή (HEC-RAS 5.0.3).

Στη συνέχεια εκτελέστηκε το μοντέλο και εξήχθησαν τα αποτελέσματα της υδραυλικής 1D/2D προσομοίωσης μη μόνιμης ροής του κάτω τμήματος του ρέματος της Αλμυρίδας, τα οποία παρουσιάζονται στην §5.3.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα

5.1 Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης με HEC-HMS 4.2.1

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα, διαπιστώνεται ότι την 17-10-2006, ώρα 13:15, σημειώνεται η μέγιστη απορροή από το προσομοιωμένο βροχοπτώτικό γεγονός στην επιφάνεια απορροής των 36.74 km² της λεκάνης, με τιμή ίση με 111.1 m³/s, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.1.1.



Project: Almyrida_model Simulation Run: Run 25

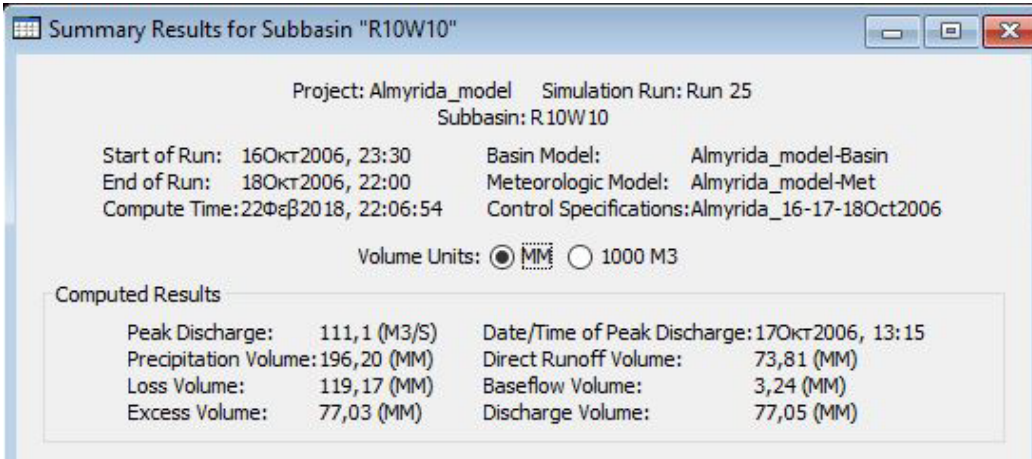
Start of Run: 16Οκτ2006, 23:30 Basin Model: Almyrida_model-Basin
 End of Run: 18Οκτ2006, 22:00 Meteorologic Model: Almyrida_model-Met
 Compute Time: 22Φεβ2018, 22:06:54 Control Specifications: Almyrida_16-17-18Oct2006

Show Elements: All Elements Volume Units: ☒ MM ☐ 1000 M3 Sorting: Hydrologic

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
R10W10	36,74	111,1	17Οκτ2006, 13:15	77,05
Outlet	36,74	111,1	17Οκτ2006, 13:15	77,05

Εικόνα 5.1.1: Συνολικά αποτελέσματα μοντελοποίησης, Global Summary (HEC-HMS 4.2.1).

Τα συνολικά χιλιοστά βροχόπτωσης, από 16-10-2006 ώρα 23:30 έως 18-10-2006 ώρα 22:00, ήταν 196.20 mm, εκ των οποίων, τα 119.17 mm διηθήθηκαν (loss), ενώ τα 77.03 mm δεν κατείσδυσαν στο έδαφος (excess). Από αυτά που δεν κατείσδυσαν στο έδαφος, τα 73.81 mm απορρέουν επιφανειακά (direct runoff), ενώ τα 3.24 mm είναι τα χιλιοστά της βασικής απορροής (baseflow). Ως εκ τούτου, τα συνολικά χιλιοστά κατακρημνισμένου ύδατος που απορρέουν είναι 77.05 mm, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.1.2 παρακάτω.



Project: Almyrida_model Simulation Run: Run 25
Subbasin: R10W10

Start of Run: 16Οκτ2006, 23:30 Basin Model: Almyrida_model-Basin
 End of Run: 18Οκτ2006, 22:00 Meteorologic Model: Almyrida_model-Met
 Compute Time: 22Φεβ2018, 22:06:54 Control Specifications: Almyrida_16-17-18Oct2006

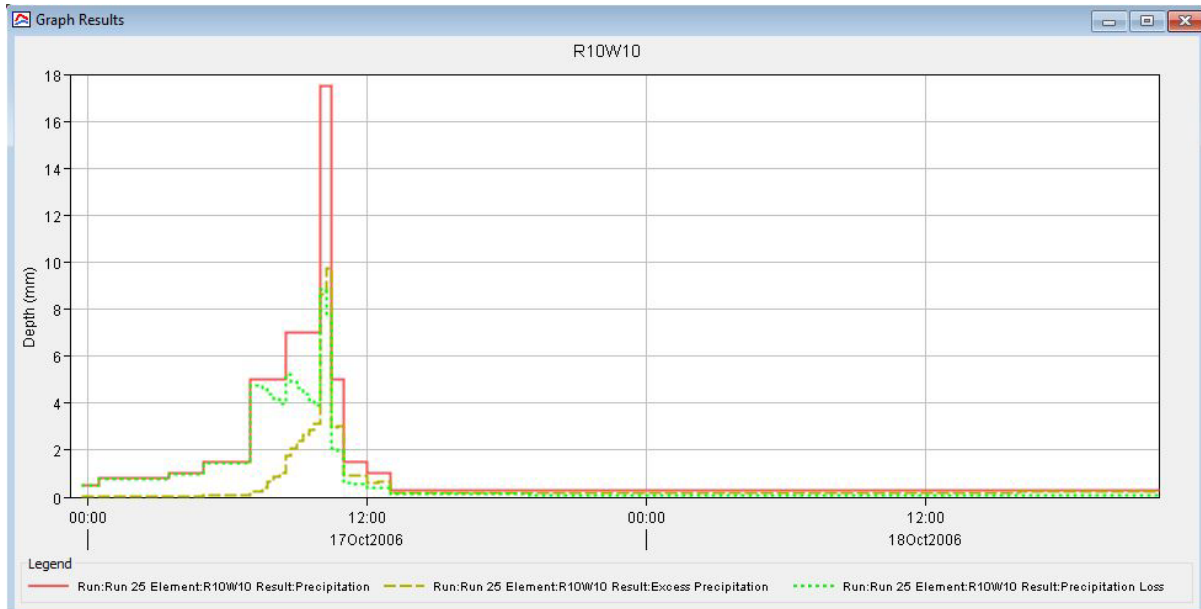
Volume Units: ☒ MM ☐ 1000 M3

Computed Results

Peak Discharge:	111,1 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge:	17Οκτ2006, 13:15
Precipitation Volume:	196,20 (MM)	Direct Runoff Volume:	73,81 (MM)
Loss Volume:	119,17 (MM)	Baseflow Volume:	3,24 (MM)
Excess Volume:	77,03 (MM)	Discharge Volume:	77,05 (MM)

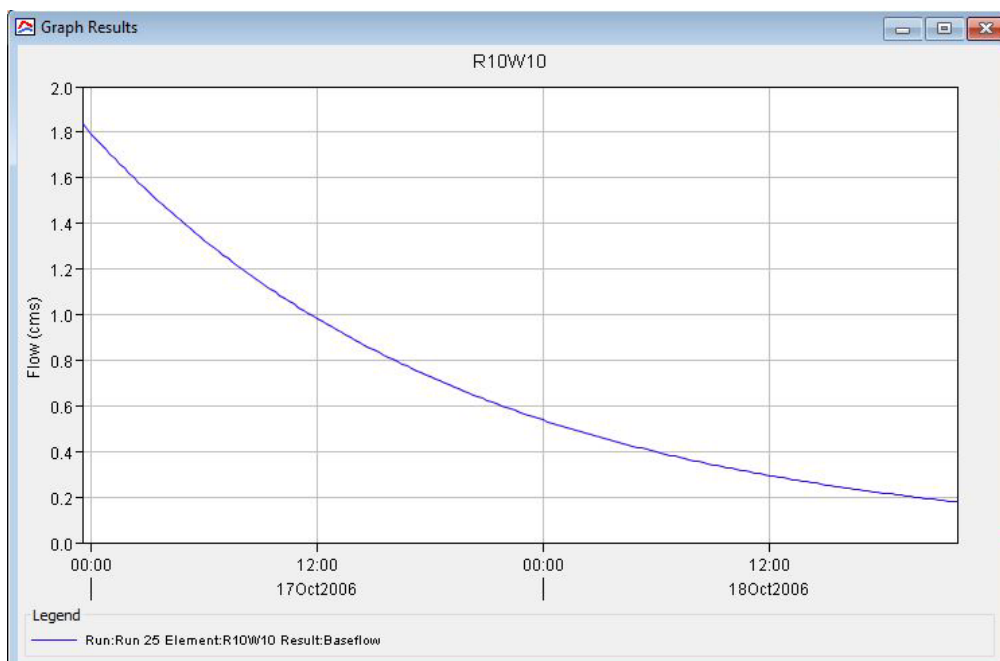
Εικόνα 5.1.2: Αποτελέσματα Αιχμής (Peak) λεκάνης Αλμυρίδας (HEC-HMS 4.2.1).

Το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης σημειώθηκε στις 17-10-2006, στις 10:15 και 10:30, ίσο με 17.50 mm. Την ίδια ημέρα, στις 10:30, έλαβαν χώρα τα μέγιστα χιλιοστά που δεν κατεΐσδυσαν στο έδαφος, με τιμή ίση με 9.71 mm. Η μέγιστη τιμή διηθούμενου ύδατος (απωλειών) παρατηρήθηκε στις 17-10-2006, ώρα 10:15, ίση με 8.85 mm. Οι παραπάνω τιμές φαίνονται ευκρινώς και στην Εικόνα 5.1.3.



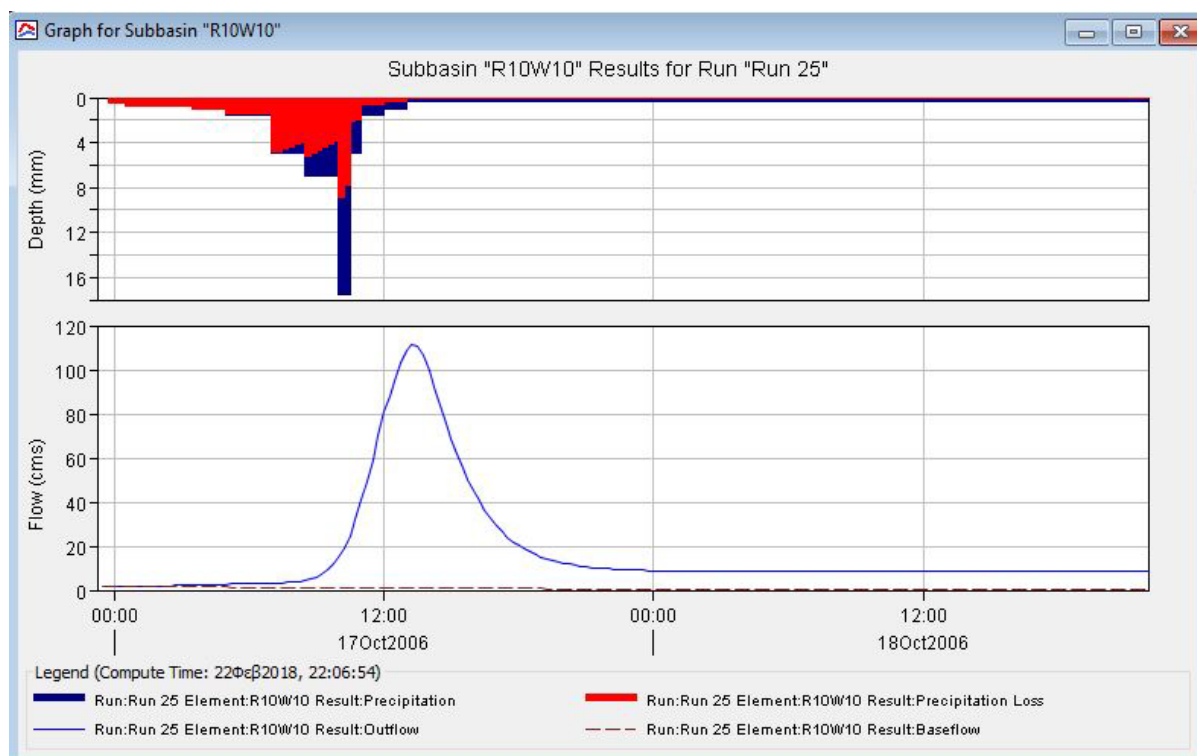
Εικόνα 5.1.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου για Βροχόπτωση (ροζ χρώμα), Νερά που δεν κατεΐσδύουν στο έδαφος (μουσταρδί χρώμα), Διηθούμενα νερά (πράσινο χρώμα) (HEC-HMS 4.2.1).

Η βασική απορροή σημείωσε εκθετική μείωση καθ' όλη τη διάρκεια της μοντελοποίησης, από 1.8 mm σε 0.2 mm, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1.4.



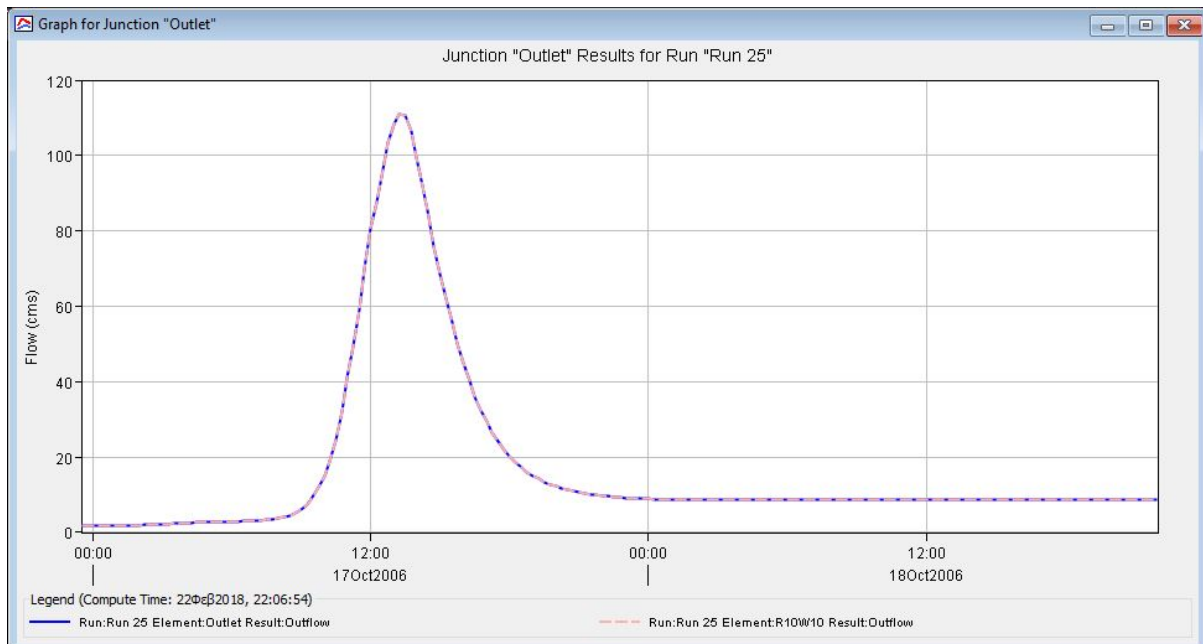
Εικόνα 5.1.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου για Βασική Απορροή (HEC-HMS 4.2.1).

Στην Εικόνα 5.1.5 που ακολουθεί, στο άνω γράφημα, αναπαρίσταται με μπλε χρώμα η βροχόπτωση και με κόκκινο χρώμα το νερό που διηθείται. Στο κάτω γράφημα, η συνεχής μπλε γραμμή υποδεικνύει την απορροή στη λεκάνη. Η μέγιστη τιμή απορροής (απορροή αιχμής) στη λεκάνη της Αλμυρίδας σημειώνεται στις 17-10-2006, ώρα 13:15 και είναι $111.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Η διακεκομμένη καφέ γραμμή αναπαριστά τη βασική απορροή υποβάθρου (baseflow).

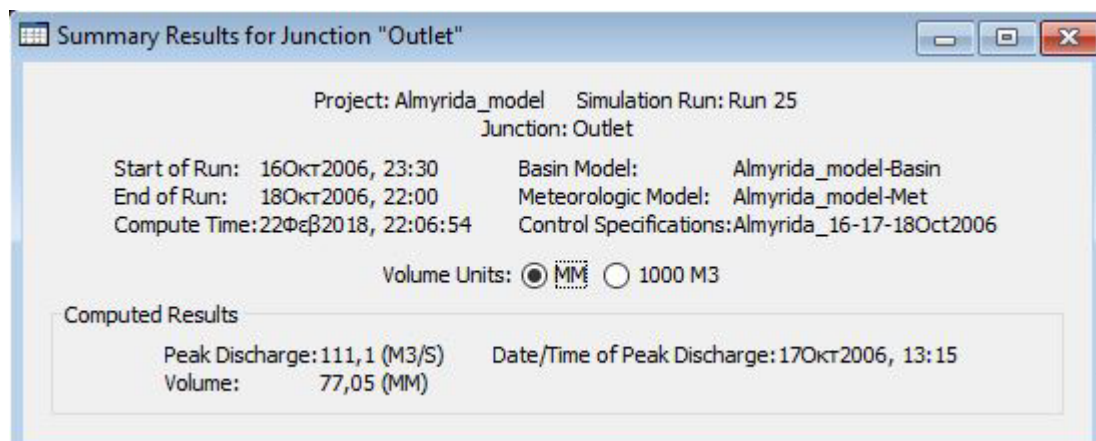


Εικόνα 5.1.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου για τη Βροχόπτωση, τις Απώλειες, την Εκροή και τη Βασική απορροή υποβάθρου λεκάνης Αλμυρίδας (HEC-HMS 4.2.1).

Από την κάτωθι Εικόνα 5.1.6, παρατηρείται ότι η εισερχόμενη παροχή στην υπολεκάνη R10W10 (ροζ χρώμα), καθώς και η παροχή του ρέματος της Αλμυρίδας που εκρέει στα κατάντη (μπλε χρώμα), ταυτίζονται. Η εξήγηση του γεγονότος αυτού, είναι ότι δεν σημειώνεται κάποια άλλη διακλάδωση εντός της λεκάνης απορροής πριν την έξοδο του συστήματος. Κατά συνέπεια, εφόσον δεν σημειώνονται άλλες απώλειες στο μελετώμενο υδρολογικό σύστημα, ό,τι παροχή μετράται στα ανάντη, θα εκρέει στο κατάντες τμήμα. Η απορροή αιχμής σημειώνεται στις 17-10-2006, ώρα 13:15, δηλαδή 2h και 45 min αργότερα από τη μέγιστη βροχόπτωση που παρατηρήθηκε στις 10.30 το πρωί, και έχει τιμή ίση με $111.1 \text{ m}^3/\text{s}$.



Εικόνα 5.1.6: Αποτελέσματα προσομοίωσης μοντέλου για την εκροή στα Κατάντη (HEC-HMS 4.2.1).

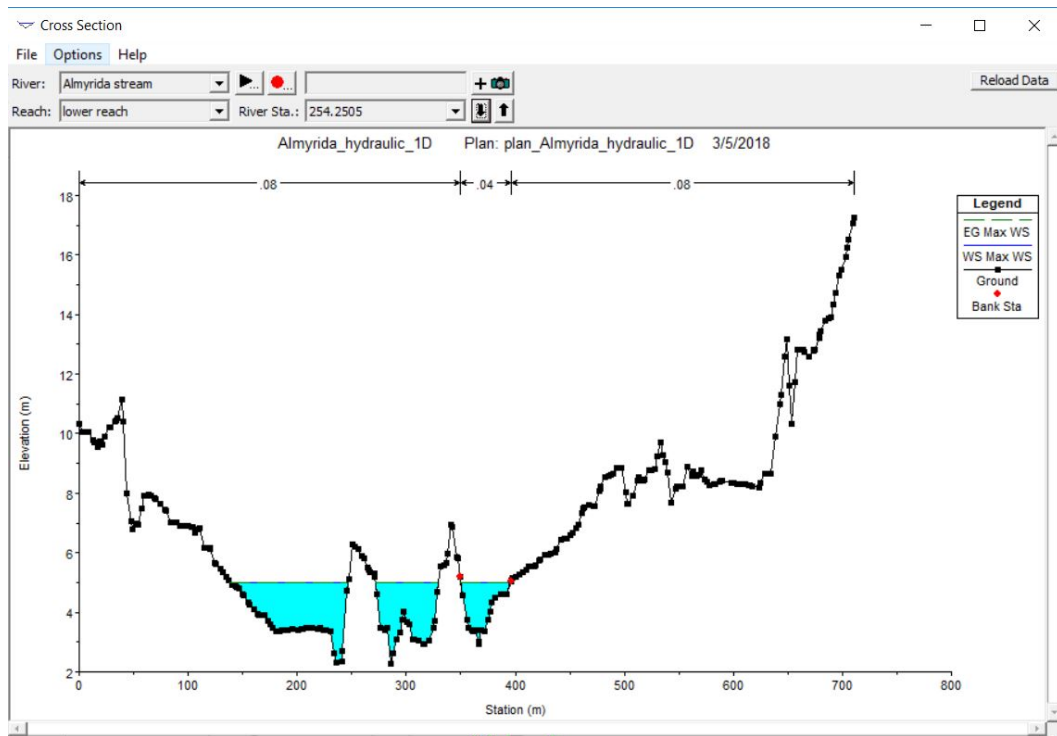


Εικόνα 5.1.7: Αποτελέσματα Αιχμής στην έξοδο του συστήματος (HEC-HMS 4.2.1).

Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 5.1.7, τα συνολικά χιλιοστά που εκρέουν στα κατάντη είναι 77.05 mm.

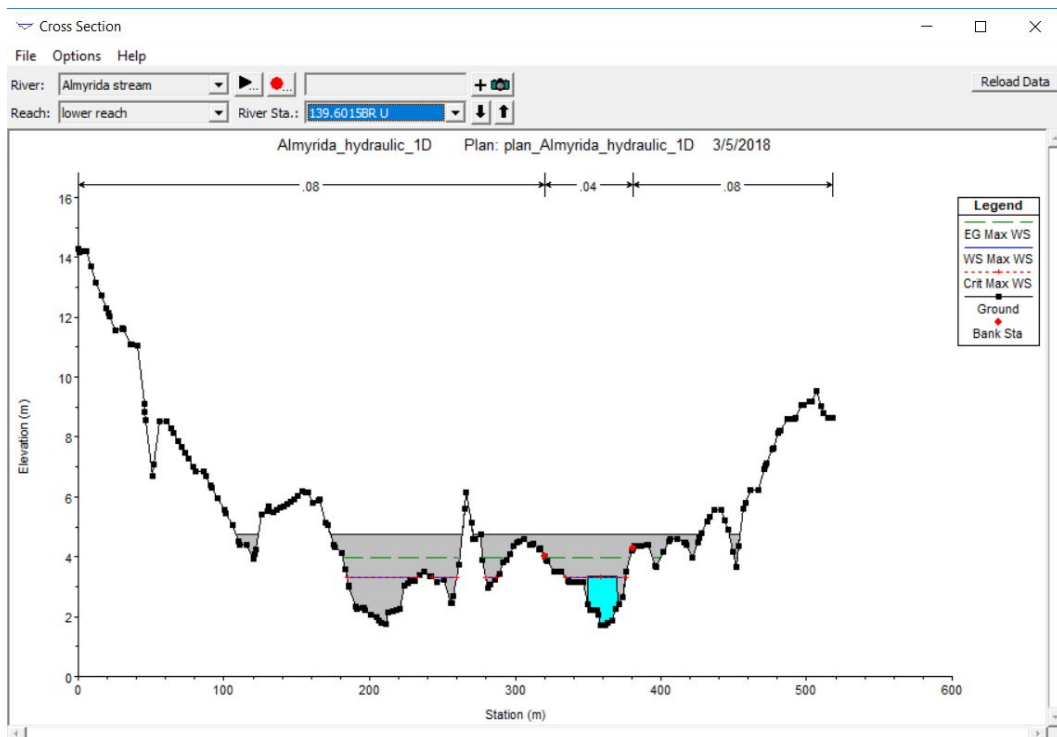
5.2 Αποτελέσματα υδραυλικής προσομοίωσης με 1D HEC-RAS 5.0.3

Από τη διατομή ελέγχου (διατομή 254.2505) του ύψους του πλημμυρικού ύδατος που παρουσιάζεται στην κάτωθι Εικόνα 5.2.1, συγκρίνοντας αυτό με τη μέτρηση πεδίου, παρατηρείται ότι έγινε μια πολύ καλή προσέγγιση με την υδραυλική προσομοίωση, καθ' ότι το μοντελοποιημένο ύψος της πλημμύρας άγγιξε τα **2.04 m** (υψόμετρο ύδατος: 4.98 m, υψόμετρο εδάφους: 2.94 m), και ήταν πάρα πολύ κοντά στη μετρηθείσα τιμή του πεδίου, αυτή των 2 m.

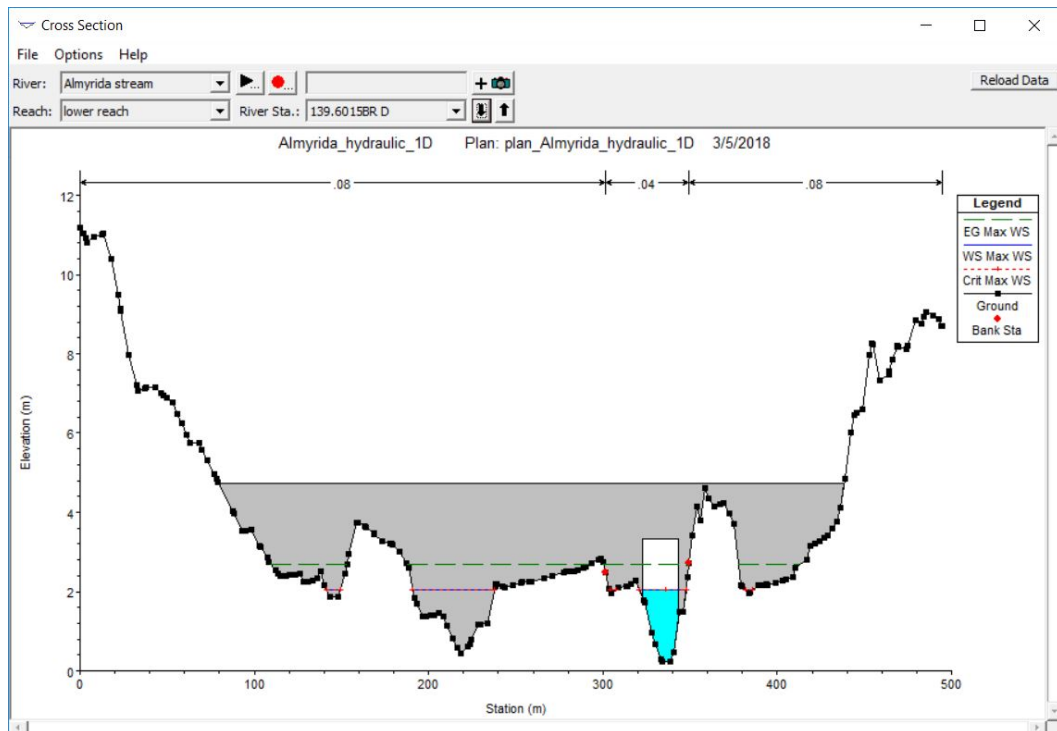


Εικόνα 5.2.1: Διατομή 254.2505, ελέγχου ύψους απορρέοντος ύδατος στην αιχμή της πλημμύρας (ID HEC-RAS 5.0.3).

Στις Εικόνες 5.2.2 και 5.2.3 που ακολουθούν, αναπαρίστανται οι διατομές του ρέματος στη θέση της γέφυρας, τόσο στα ανάντη (139.6015 BR U), όσο και στα κατόντη αυτής (139.6015 BR D), κατά την αιχμή του πλημμυρικού ύδατος.



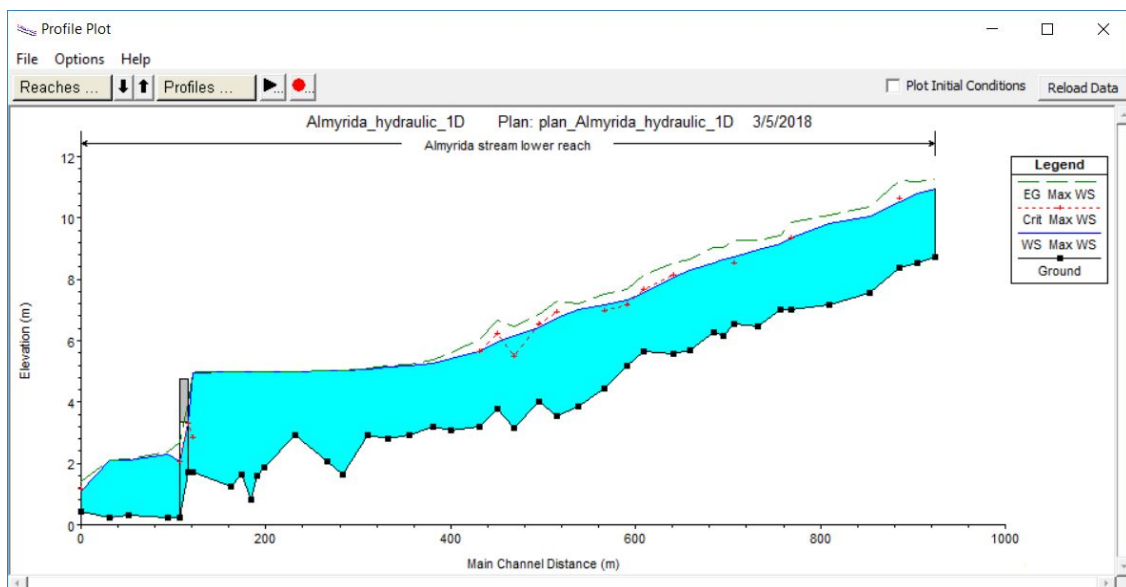
Εικόνα 5.2.2: Διατομή 139.6015 BR U ρέματος στη θέση της γέφυρας στα ανάντη, κατά την πλημμυρική αιχμή (ID HEC-RAS 5.0.3).



Εικόνα 5.2.3: Διατομή 139.6015 BR D ρέματος στη θέση της γέφυρας στα κατάντη, κατά την πλημμυρική αιχμή (ID HEC-RAS 5.0.3).

Διαπιστώνεται ότι η παρουσία της γέφυρας λειτουργεί ως φυσικό εμπόδιο που ανακόπτει την ορμή των πλημμυρικών υδάτων, αλλά και αυξάνει το ύψος της πλημμυρικής στάθμης ανάντη της γέφυρας, η οποία αγγίζει το υψόμετρο των 3.30 m, σε σχέση με τη στάθμη του πλημμυρικού ύδατος στα κατάντη, που είναι σε υψόμετρο 2.05 m.

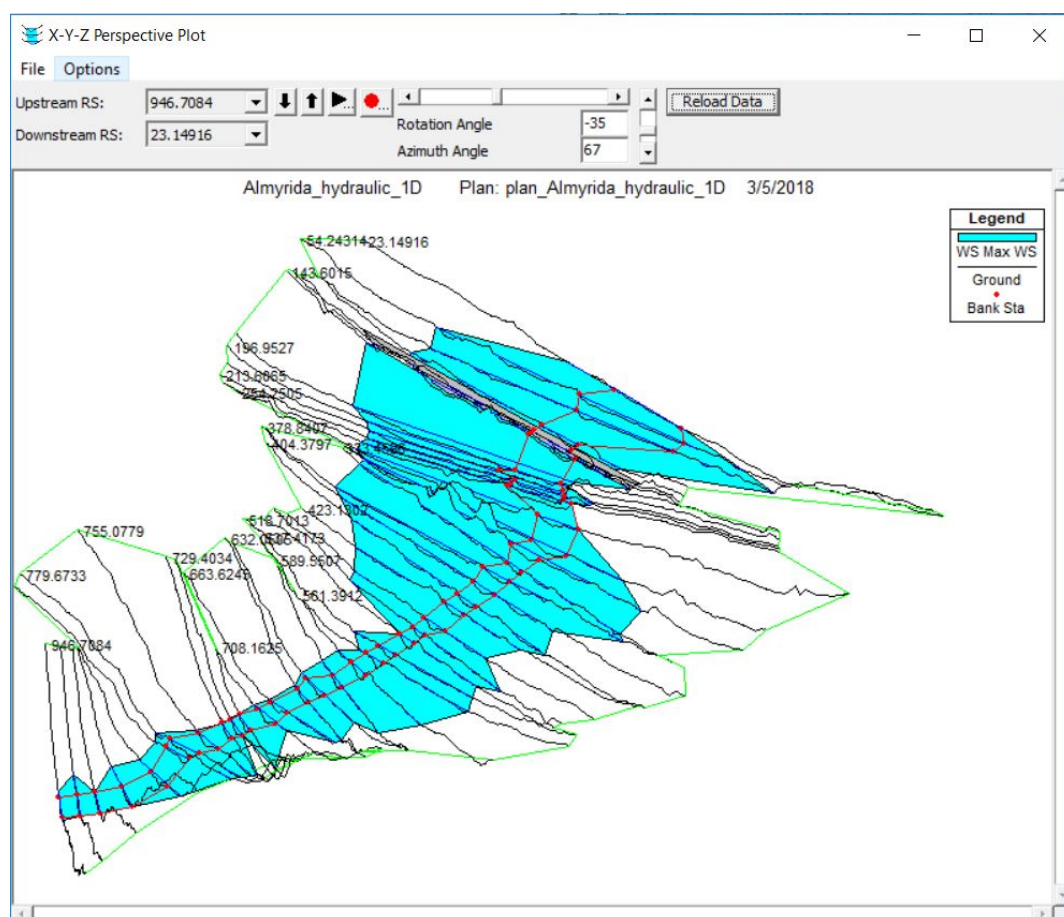
Η κατά μήκος τομή του μελετώμενου τμήματος του ρέματος της Αλμυρίδας, κατά την πλημμυρική αιχμή, παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2.4 παρακάτω.



Εικόνα 5.2.4: Κατά μήκος τομή ρέματος Αλμυρίδας κατά την πλημμυρική αιχμή (ID HEC-RAS 5.0.3).

Καθ' όλο το μήκος του ρέματος της Αλμυρίδας, και σε κάθε διατομή, η ολική ενέργεια του συστήματος (*Energy Grade Line*) δίδεται από τον τύπο: $z + h + \frac{U^2}{2g}$, και συμβολίζεται με την πράσινη διακεκομμένη γραμμή. Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 5.2.4, η ολική ενέργεια του συστήματος από τα ανάντη έως και τις διατομές λίγο πριν τη γέφυρα, είναι καθαρά υψηλότερη από την ελεύθερη επιφάνεια του πλημμυρικού ύδατος (μαύρη συνεχής γραμμή). Λίγο πριν και λίγο μετά τη γέφυρα οι δύο γραμμές είναι πολύ κοντά υψομετρικά. Επομένως, η αυξημένη ταχύτητα του ρέματος στο άναντες τμήμα επηρεάζει περισσότερο την ολική ενέργεια του συστήματος απ' ότι κοντά στη γέφυρα, όπου μειώνεται η ταχύτητα λόγω της λειτουργίας ως φυσικού εμποδίου. Ως αποτέλεσμα, παρουσιάζεται αυξημένη ολική ενέργεια του συστήματος στα ανάντη, σε σχέση με την ελεύθερη επιφάνεια των υδάτων.

Η 3D άποψη του μελετηθέντος κάταντες τμήματος του ρέματος της Αλμυρίδας κατά την αιχμή της πλημμύρας φαίνεται στην Εικόνα 5.2.5 που ακολουθεί.



Εικόνα 5.2.5: 3D άποψη του ρέματος Αλμυρίδας κατά την πλημμυρική αιχμή (1D HEC-RAS 5.0.3).

Πλησιάζοντας προς τα κατάντη, είναι εμφανές από την Εικόνα 5.2.5 ότι η έκταση της πλημμυρικής επιφάνειας αυξάνεται. Διαπιστώθηκε επίσης, ότι η μεγαλύτερη πλημμυρισμένη

επιφάνεια εμφανίστηκε από 13:10 έως 13:50, γεγονός που επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα αιχμής όπως προέκυψαν από το HEC-HMS 4.2.1.

Στην Εικόνα 5.2.6 που ακολουθεί, φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του προγράμματος, για όλες τις διατομές, και αφορούν τα ακόλουθα στοιχεία: την παροχή, το υψόμετρο πυθμένα του καναλιού, την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, το κρίσιμο βάθος της ελεύθερης επιφάνειας, την ολική ενέργεια, την κλίση της γραμμής ολικής ενέργειας, την ταχύτητα του καναλιού, την πλημμυρική επιφάνεια, το πλάτος της πλημμύρας στην ελεύθερη επιφάνεια, τον αριθμό Froude στο κανάλι.

Σε ό,τι αφορά την παροχή στο σύστημα, διαπιστώνεται ότι στην ανάντη διατομή η παροχή του ρέματος είναι ίση με την παροχή αιχμής, όπως προέκυψε από το πλημμυρικό υδρογράφημα από το HEC-HMS 4.2.1, η οποία κατά τη ροή προς τα κατάντη υπόκειται σε μικρή μείωση.

Από τον αριθμό Froude διαπιστώνεται μετάβαση από υποκρίσιμη σε υπερκρίσιμη ροή, καθ' όλο το μήκος του κάταντες τμήματος του ρέματος, και αντιστρόφως, το οποίο εξηγείται από το θεωρούμενο καθεστώς μικτής ροής. Η κλίση της γραμμής ολικής ενέργειας μεταβάλλεται καθ' όλο το μήκος του ρέματος, και από διατομή σε διατομή, από ήπια έως πιο απότομη, με τιμές σε εύρος από 0.03‰ έως 31‰ περίπου. Η ταχύτητα στο κανάλι κυμαίνεται σε εύρος από 4.06 m/s έως 0.29 m/s, οι διαφοροποιήσεις της οποίας οφείλονται στη μεταβλητότητα των υψομέτρων του πυθμένα του καναλιού, από διατομή σε διατομή.

Από τα ανάντη προς τα κατάντη (διατομή 946.7084 → 23.14916) η υψομετρική διαφορά του πυθμένα του ρέματος (*Min Channel Elevation*) ανέρχεται σε (8.71-0.44) m = 8.27 m, ενώ η διαφορά της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας (*Water Surface Elevation*) αγγίζει τα (10.93-1.09) m = 9.84 m.

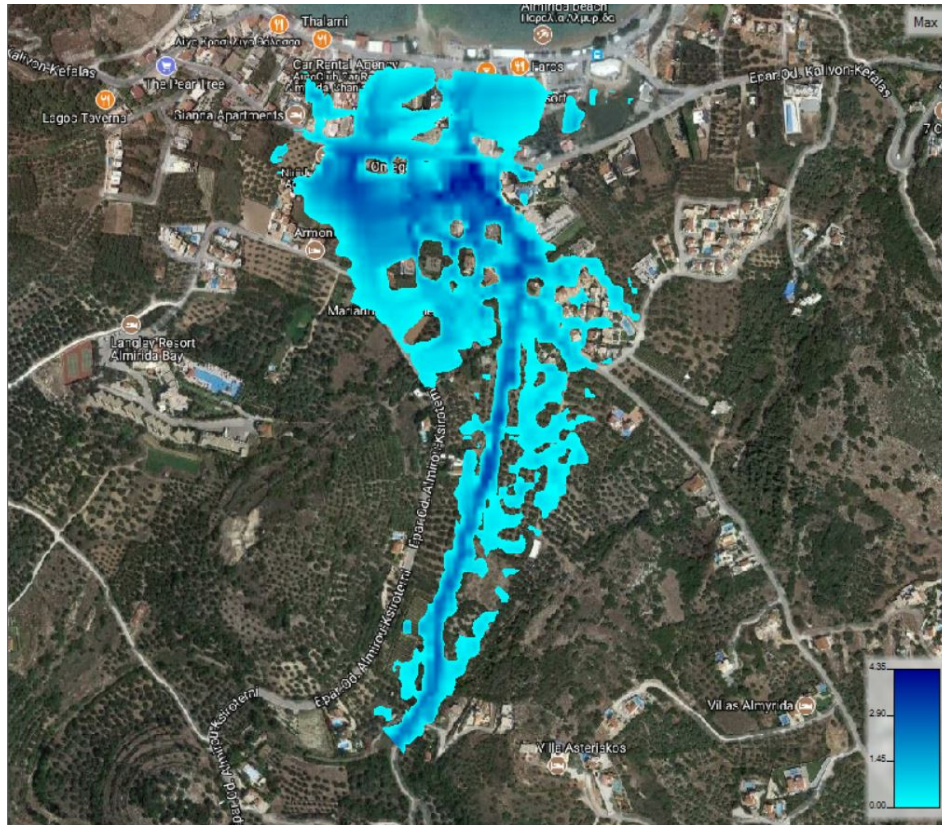
Στις διατομές κοντά στη γέφυρα και ανάντη αυτής (διατομές 306.2805 έως 139.6015 BR U), σημειώνεται μειωμένη ταχύτητα υδάτων σε σχέση με τις διατομές στα κατάντη αυτής (διατομές 139.6015 BR D έως 54.24314). Η συνολική πλημμυρική επιφάνεια (*Flow Area*) του μελετώμενου κάταντες τμήματος του ρέματος, συμπεριλαμβανομένης της επιφάνειας του ρέματος, καταλαμβάνει έκταση 5837.05 m². Γενικώς, από τη διατομή 474.1556 και προς τα κατάντη, διαπιστώνεται ότι το πλάτος της πλημμυρικής επιφάνειας (*Top Width*) αυξάνεται.

Στις διατομές 729.4034, 613.2853, 589.5507, 491.645 και 143.6015, παρατηρείται ότι το κρίσιμο βάθος ροής (y_{cr}) είναι μικρότερο από το κανονικό βάθος ροής (*normal depth*), το οποίο εξηγείται καθ' ό,τι η ροή είναι υποκρίσιμη.

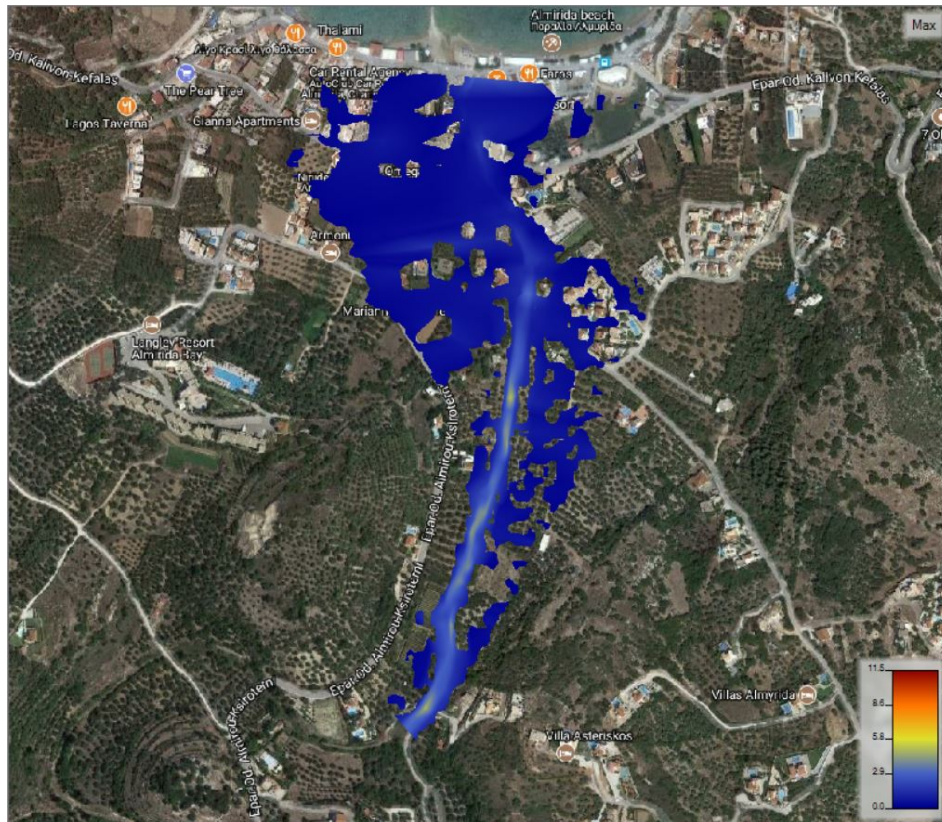
Profile Output Table - Standard Table 1												
HEC-RAS Plan: plan_Almyrida_hydraulic_1D River: Almyrida stream Reach: lower reach Profile: Max WS Reload Data												
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
lower reach	946.7084	Max WS	111.08	8.71	10.93		11.24	0.006076	2.49	47.05	46.04	0.66
lower reach	928.0643	Max WS	111.08	8.55	10.80		11.17	0.007601	2.71	45.25	50.50	0.73
lower reach	908.4449	Max WS	111.07	8.37	10.52	10.65	11.22	0.023101	3.70	30.14	33.39	1.20
lower reach	875.8916	Max WS	111.06	7.56	10.06		10.38	0.006931	2.51	47.24	63.32	0.69
lower reach	833.3234	Max WS	111.05	7.18	9.82		10.08	0.004562	2.30	57.86	69.14	0.58
lower reach	791.1063	Max WS	111.03	7.02	9.33	9.35	9.86	0.014838	3.24	37.25	47.48	0.98
lower reach	779.6733	Max WS	111.03	7.03	9.17		9.42	0.006368	2.32	59.98	65.84	0.65
lower reach	755.0779	Max WS	111.02	6.48	8.97		9.27	0.006395	2.46	50.50	58.10	0.67
lower reach	729.4034	Max WS	111.02	6.54	8.74	8.55	9.26	0.010007	3.21	36.10	35.83	0.84
lower reach	718.5134	Max WS	111.02	6.17	8.64		9.04	0.007410	2.80	39.84	28.19	0.73
lower reach	708.1625	Max WS	111.02	6.26	8.54		9.04	0.011127	3.13	35.65	29.82	0.87
lower reach	682.1524	Max WS	111.01	5.69	8.30		8.66	0.007524	2.69	43.66	49.41	0.72
lower reach	663.6245	Max WS	111.01	5.56	8.05	8.13	8.53	0.012117	3.27	50.28	84.02	0.90
lower reach	632.0505	Max WS	110.99	5.64	7.55	7.66	8.13	0.013426	3.44	39.16	66.24	0.96
lower reach	613.2853	Max WS	110.98	5.20	7.34	7.16	7.67	0.007755	2.58	51.81	87.92	0.73
lower reach	589.5507	Max WS	110.97	4.43	7.18	6.98	7.54	0.005927	2.76	57.35	88.27	0.66
lower reach	561.3912	Max WS	110.97	3.87	7.02		7.22	0.002698	2.02	66.22	84.16	0.45
lower reach	537.4173	Max WS	110.96	3.56	6.73	6.92	7.29	0.013641	3.52	47.87	94.06	0.94
lower reach	518.7013	Max WS	110.95	4.03	6.43	6.55	6.87	0.012362	3.18	54.96	115.73	0.91
lower reach	491.645	Max WS	110.92	3.17	6.16	5.48	6.48	0.004585	2.56	56.09	78.68	0.58
lower reach	474.1556	Max WS	110.74	3.78	5.96	6.24	6.68	0.019571	4.06	43.62	110.27	1.14
lower reach	454.5517	Max WS	110.50	3.20	5.66	5.66	6.04	0.010061	2.83	54.19	103.71	0.82
lower reach	423.1302	Max WS	107.15	3.06	5.42		5.62	0.005094	2.20	85.08	161.50	0.60
lower reach	404.3797	Max WS	102.46	3.19	5.25		5.38	0.004324	1.92	101.70	181.34	0.54
lower reach	378.8407	Max WS	99.59	2.92	5.17		5.23	0.001679	1.31	160.68	254.67	0.35
lower reach	354.8911	Max WS	98.59	2.82	5.13		5.16	0.001146	1.05	202.77	286.01	0.28
lower reach	333.4596	Max WS	97.38	2.93	5.06		5.11	0.001719	1.36	170.40	254.53	0.35
lower reach	306.2805	Max WS	96.88	1.65	5.02		5.04	0.000255	0.73	241.29	219.38	0.15
lower reach	289.1284	Max WS	96.87	2.05	5.02		5.04	0.000393	0.79	216.69	230.08	0.18
lower reach	254.2505	Max WS	96.62	2.94	4.98		4.99	0.000398	0.49	281.38	211.33	0.16
lower reach	221.032	Max WS	96.58	1.87	4.97		4.98	0.000072	0.38	393.43	225.57	0.08
lower reach	213.6065	Max WS	96.58	1.61	4.97		4.98	0.000078	0.40	403.53	234.85	0.08
lower reach	207.6322	Max WS	96.58	0.82	4.97		4.97	0.000069	0.38	430.09	232.45	0.08
lower reach	196.9527	Max WS	96.58	1.65	4.97		4.97	0.000041	0.30	499.85	228.26	0.06
lower reach	185.2484	Max WS	96.58	1.23	4.97		4.97	0.000029	0.29	596.51	253.44	0.05
lower reach	143.6015	Max WS	96.56	1.70	4.96	2.85	4.97	0.000098	0.40	401.94	277.95	0.09
lower reach	139.6015	Bridge										
lower reach	117.5094	Max WS	96.56	0.24	2.32		2.38	0.003939	1.42	105.42	166.42	0.49
lower reach	75.02539	Max WS	96.55	0.33	2.11		2.13	0.000978	0.71	194.67	317.61	0.24
lower reach	54.24314	Max WS	96.55	0.24	2.10		2.11	0.000316	0.49	256.89	265.33	0.15
lower reach	23.14916	Max WS	96.55	0.44	1.09	1.16	1.39	0.031491	2.48	42.66	133.52	1.23
Total flow in cross section.												

Εικόνα 5.2.6: Συνολικά αποτελέσματα 1D υδραυλικής μοντελοποίησης ρέματος Αλμυρίδας (1D HEC-RAS 5.0.3).

Στις Εικόνες 5.2.7 και 5.2.8 που ακολουθούν, αναπαρίστανται στον RAS Mapper η έκταση της πλημμύρας από το βροχοπτώτικό γεγονός της 17/10/2006 στο κάτω τμήμα του ρέματος που μελετάται, καθώς και οι αναπτυσσόμενες μέγιστες ταχύτητες του πλημμυρικού κύματος, κατά την 1D υδραυλική προσομοίωση. Παρατηρείται ότι το ύψος της πλημμύρας έφτασε έως και 4.35m, περίπου 10m πριν από τη θέση της γέφυρας. Απ' την άλλη, οι μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού κύματος σημειώθηκαν περίπου στα μισά του συνολικού κάτω τμήματος του ρέματος, αγγίζοντας τα 5.1 m/s.



Εικόνα 5.2.7: Κάτοψη έκτασης πλημμύρας ρέματος Αλμυρίδας κατά την 1D μοντελοποίηση (1D HEC-RAS 5.0.3).



Εικόνα 5.2.8: Μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού γεγονότος σε Κάτοψη κατά την 1D μοντελοποίηση (1D HEC-RAS 5.0.3).

5.3 Αποτελέσματα υδραυλικής προσομοίωσης με 1D/2D HEC-RAS 5.0.3

Στην Εικόνα 5.3.1 ακολούθως, διακρίνονται τα αποτελέσματα από την 1D/2D προσομοίωση του πλημμυρικού κύματος, και αφορούν την 1D ροή του ρέματος. Τα στοιχεία που συνθέτουν τις πληροφορίες για το κανάλι 1D ροής -για όλες τις διατομές- είναι: η παροχή, το υψόμετρο πυθμένα, η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, το κρίσιμο βάθος της ελεύθερης επιφάνειας, η ολική ενέργεια, η κλίση της γραμμής ολικής ενέργειας, η ταχύτητα ροής, η πλημμυρική επιφάνεια, το πλάτος της πλημμύρας στην ελεύθερη επιφάνεια και ο αριθμός Froude.

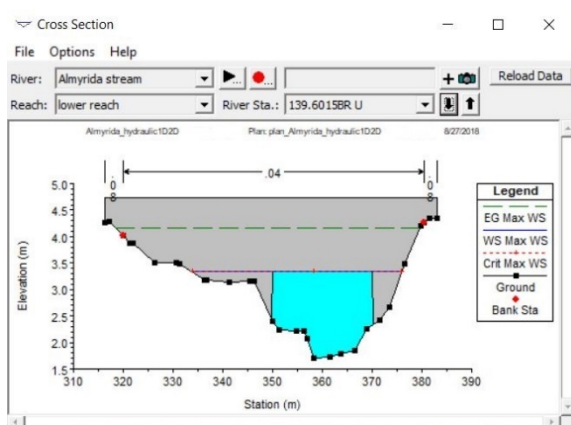
Profile Output Table - Standard Table 1												
HEC-RAS Plan: plan_Almyrida_hydraulic1D2D_21-08c_05-07 River: Almyrida stream Reach: lower reach												
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
lower reach	946.7084	Max WS	111.09	8.71	10.93		11.25	0.006114	2.49	45.59	36.14	0.66
lower reach	946	Lat Struct										
lower reach	945	Lat Struct										
lower reach	928.0643	Max WS	111.09	8.55	10.80		11.19	0.007960	2.77	40.07	28.59	0.75
lower reach	908.4449	Max WS	111.08	8.37	10.51	10.66	11.22	0.023748	3.73	29.88	33.18	1.21
lower reach	875.8916	Max WS	111.08	7.56	10.05		10.38	0.007313	2.57	43.56	38.18	0.71
lower reach	833.3234	Max WS	111.08	7.18	9.78		10.08	0.005279	2.44	47.12	36.23	0.62
lower reach	791.1063	Max WS	111.07	7.02	9.29	9.32	9.89	0.017542	3.44	32.24	29.63	1.05
lower reach	779.6733	Max WS	111.07	7.03	9.14		9.50	0.008582	2.66	41.75	33.09	0.76
lower reach	755.0779	Max WS	111.06	6.48	8.95		9.28	0.006985	2.54	44.39	37.33	0.70
lower reach	729.4034	Max WS	111.06	6.54	8.72		9.26	0.010357	3.26	34.15	23.55	0.85
lower reach	718.5134	Max WS	111.06	6.17	8.63		9.03	0.007636	2.82	39.47	27.99	0.74
lower reach	708.1625	Max WS	111.06	6.26	8.53		9.04	0.011553	3.17	35.10	27.22	0.89
lower reach	682.1524	Max WS	111.06	5.69	8.27		8.66	0.008095	2.75	41.17	35.21	0.75
lower reach	663.6245	Max WS	111.06	5.56	8.04	8.08	8.76	0.015965	3.74	30.08	25.90	1.04
lower reach	632.0505	Max WS	111.05	5.64	7.56	7.58	8.20	0.014255	3.55	32.69	33.12	0.99
lower reach	613.2853	Max WS	111.05	5.20	7.35		7.70	0.008052	2.64	42.96	37.90	0.74
lower reach	589.5507	Max WS	111.05	4.43	7.17		7.62	0.007048	3.00	39.77	29.98	0.72
lower reach	561.3912	Max WS	111.05	3.87	7.02		7.25	0.002902	2.09	53.46	29.62	0.47
lower reach	537.4173	Max WS	111.05	3.56	6.80	6.82	7.53	0.015387	3.78	29.78	23.30	1.01
lower reach	518.7013	Max WS	111.05	4.03	6.54	6.48	7.13	0.012550	3.40	33.05	26.88	0.93
lower reach	491.645	Max WS	111.05	3.17	6.32		6.64	0.003890	2.48	44.79	21.75	0.54
lower reach	474.1556	Max WS	111.05	3.78	6.13	6.26	7.04	0.017946	4.22	26.67	20.90	1.12
lower reach	454.5517	Max WS	111.05	3.20	5.89		6.24	0.006864	2.62	43.13	36.59	0.69
lower reach	423.1302	Max WS	111.04	3.06	5.72		5.99	0.004434	2.33	48.89	34.99	0.57
lower reach	404.3797	Max WS	111.04	3.19	5.62		5.93	0.005138	2.48	46.64	34.42	0.62
lower reach	378.8407	Max WS	111.04	2.92	5.51		5.73	0.003224	2.09	56.42	38.69	0.50
lower reach	354.8911	Max WS	111.04	2.82	5.44		5.62	0.002838	1.88	62.16	40.05	0.46
lower reach	333.4596	Max WS	111.02	2.93	5.33		5.64	0.004959	2.57	52.97	37.60	0.61
lower reach	306.2805	Max WS	111.01	1.65	5.25		5.30	0.000444	1.02	118.32	48.23	0.20
lower reach	289.1284	Max WS	111.01	2.05	5.24		5.30	0.000647	1.09	116.71	66.96	0.23
lower reach	254.2505	Max WS	111.04	2.94	4.69	4.84	5.31	0.028026	3.49	31.83	41.52	1.27
lower reach	221.032	Max WS	111.02	1.87	4.28		4.32	0.000547	0.87	127.94	70.03	0.20
lower reach	213.6065	Max WS	111.02	1.61	4.28		4.33	0.000817	1.04	108.80	67.49	0.25
lower reach	207.6322	Max WS	111.02	0.82	4.27		4.33	0.000787	1.03	115.39	72.04	0.24
lower reach	196.9527	Max WS	111.02	1.65	4.27		4.30	0.000428	0.79	142.84	77.01	0.18
lower reach	185.2484	Max WS	110.90	1.23	4.26		4.29	0.000314	0.81	154.34	65.68	0.16
lower reach	143.6015	Max WS	110.05	1.70	4.21	3.39	4.30	0.001977	1.36	81.36	61.82	0.37
lower reach	139.6015	Bridge										
lower reach	117.5094	Max WS	110.05	0.24	2.29	2.26	2.70	0.016089	2.82	39.04	46.14	0.98
lower reach	117	Lat Struct										
lower reach	116.9	Lat Struct										
lower reach	75.02539	Max WS	110.05	0.33	1.79		1.94	0.009427	1.69	65.11	111.76	0.71
lower reach	54.24314	Max WS	110.05	0.24	1.67		1.74	0.002986	1.14	96.50	126.29	0.42
lower reach	23.14916	Max WS	110.33	0.44	1.13	1.20	1.47	0.030042	2.59	44.48	105.35	1.22

Total flow in cross section.

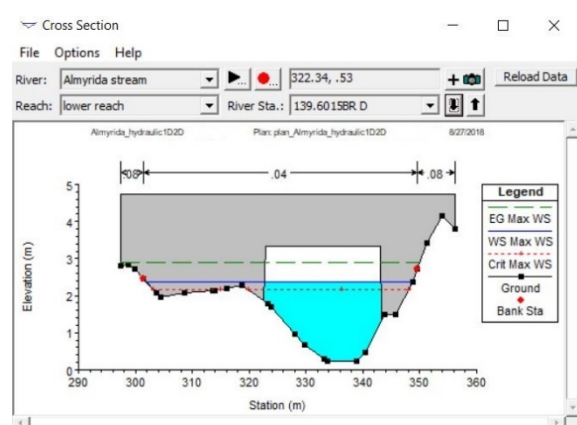
Εικόνα 5.3.1: Αποτελέσματα 1D/2D υδραυλικής μοντελοποίησης της 1D ροής ρέματος Αλμυρίδας (1D/2D HEC-RAS 5.0.3).

Μελετώντας τα συγκεντρωτικά στοιχεία της 1D ροής του ρέματος από την Εικόνα 5.3.1, όπως προέκυψαν από την 1D/2D υδραυλική προσομοίωση, παρατηρείται ότι στην ανάντη διατομή 946.7084, η 1D παροχή του ρέματος είναι ίση με την παροχή αιχμής, όπως προέκυψε από το πλημμυρικό υδρογράφημα από το λογισμικό HEC-HMS 4.2.1, η οποία κατά τη ροή προς τα κατάντη υπόκειται σε πολύ μικρή και αμελητέα μείωση. Λόγω του καθεστώτος μικτής ροής, η ροή είναι άλλοτε υποκρίσιμη και άλλοτε υπερκρίσιμη κατά μήκος της 1D ροής του ρέματος, το οποίο ταυτοποιείται και από τον αριθμό Froude. Καθ' όλο το μήκος της 1D ροής, η κλίση της γραμμής ολικής ενέργειας μεταβάλλεται από πολύ ήπια έως αρκετά απότομη, από 0.03‰ έως 30‰ περίπου. Η ταχύτητα 1D ροής διαφοροποιείται σε ένα εύρος από 4.22 m/s έως 0.79 m/s από διατομή σε διατομή, λόγω της μεταβλητότητας των υψομέτρων του πυθμένα. Παρατηρώντας την 1D ροή από τα ανάντη προς τα κατάντη (διατομή 946.7084 → 23.14916), η διαφορά υψομέτρων του πυθμένα ανέρχεται σε $(8.71-0.44) \text{ m} = 8.27 \text{ m}$, ενώ η διαφορά στην ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας φτάνει τα $(10.93-1.13) \text{ m} = 9.80 \text{ m}$. Στις διατομές 518.7013, 143.6015 και 117.5094, διαπιστώνεται ότι το κρίσιμο βάθος 1D ροής είναι ελαφρώς μικρότερο από την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, το οποίο δικαιολογείται αφού η ροή στις συγκεκριμένες διατομές είναι υποκρίσιμη ($Fr < 1$).

Επιπλέον, στις Εικόνες 5.3.2 και 5.3.3 παρακάτω, παρατίθενται οι διατομές του 1D ρέματος στη θέση της γέφυρας, στα ανάντη (139.6015 BR U) και κατάντη (139.6015 BR D), για πλάτος από λίγο άνω της μίας όχθης έως λίγο άνω της άλλης, κατά την πλημμυρική αιχμή.



Εικόνα 5.3.2: Διατομή 139.6015 BR U, 1D ροής ρέματος, στη θέση της γέφυρας στα ανάντη, κατά την πλημμυρική αιχμή (1D/2D HEC-RAS 5.0.3).

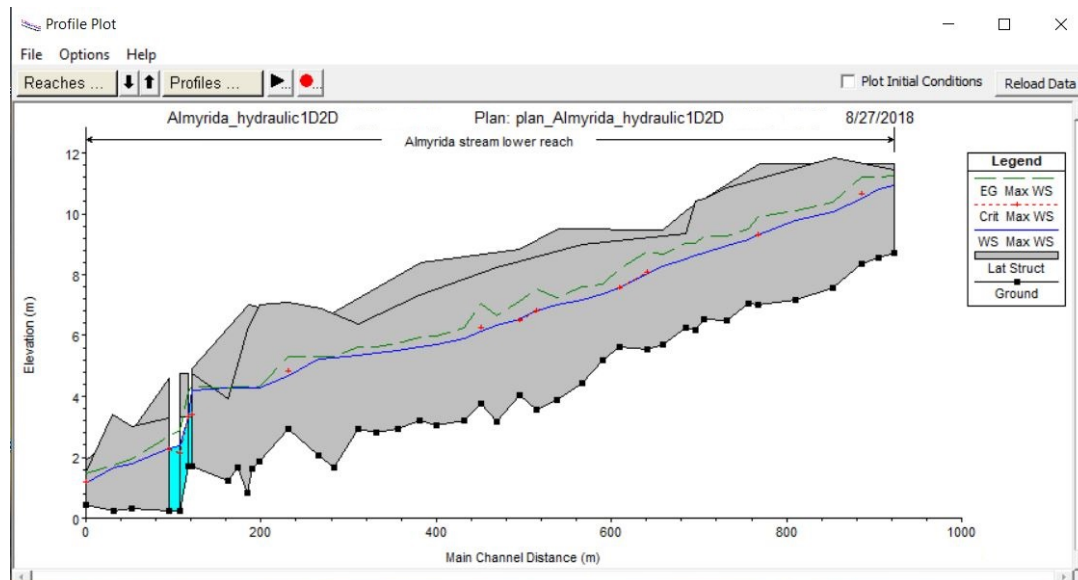


Εικόνα 5.3.3: Διατομή 139.6015 BR D, 1D ροής ρέματος, στη θέση της γέφυρας στα κατάντη, κατά την πλημμυρική αιχμή (1D/2D HEC-RAS 5.0.3).

Από τις άνωθεν Εικόνες, παρατηρείται ότι κατά την 1D/2D υδραυλική προσομοίωση, σαφώς η γέφυρα ανακόπτει την ορμητικότητα του πλημμυρικού κύματος, με την ελεύθερη επιφάνεια

των υδάτων να αγγίζει τα 3.34 m ανάντη της γέφυρας, ενώ στα κατάντη αυτής, το υψόμετρο της στάθμης των υδάτων φτάνει στα 2.38 m, για το 1D ρέμα.

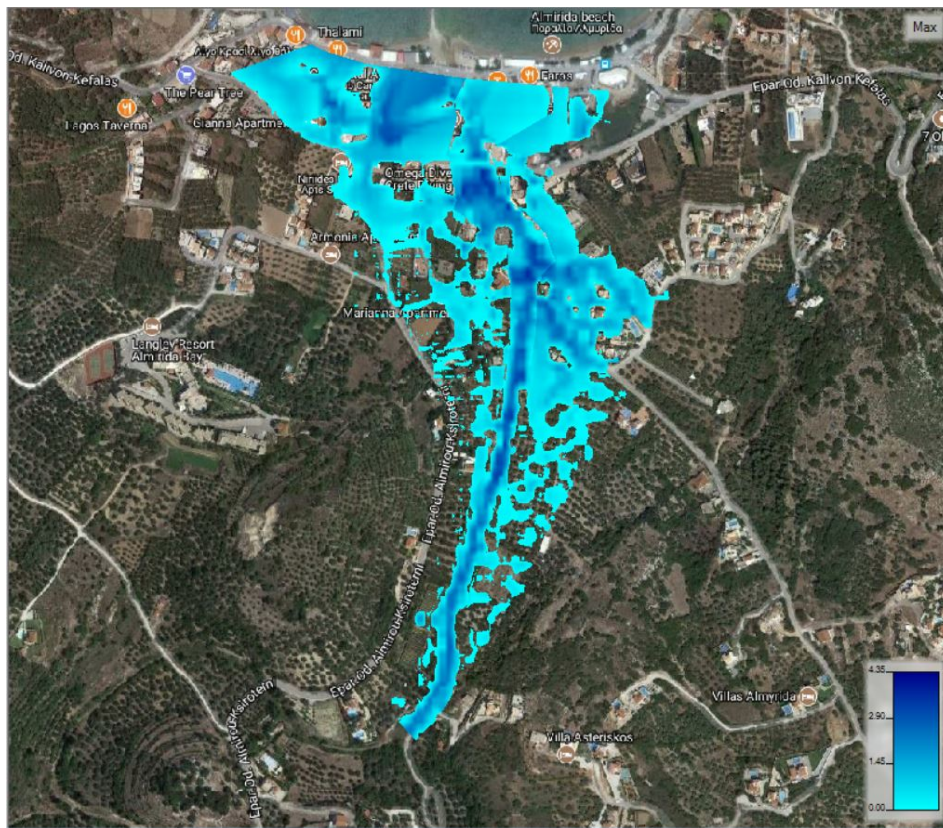
Η ανακοπή του πλημμυρικού κύματος από τη γέφυρα κατά την αιχμή του, διακρίνεται και από την κατά μήκος τομή του ρέματος στην κάτωθι Εικόνα 5.3.4, στην οποία φαίνεται και η στέψη των πλευρικών δομών σύνδεσης της 1D ροής ρέματος με τις 2D επιφάνειες ροής.



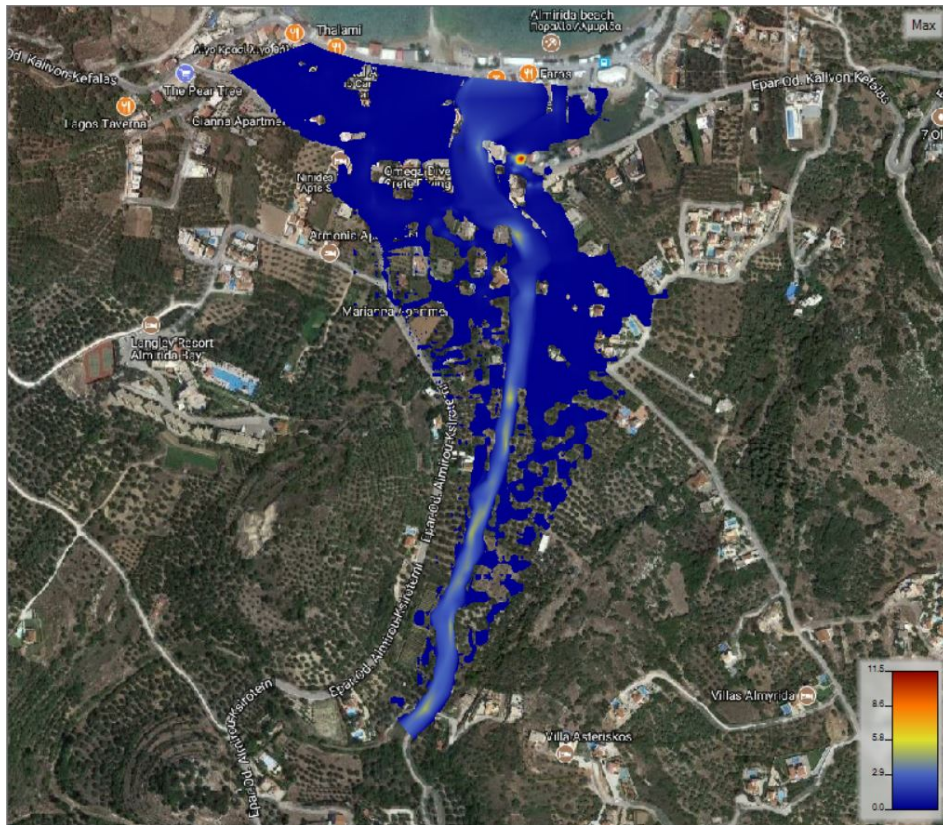
Εικόνα 5.3.4: Κατά μήκος τομή 1D ροής ρέματος Αλμυρίδας κατά την πλημμυρική αιχμή (1D/2D HEC-RAS 5.0.3).

Στις ακόλουθες Εικόνες 5.3.5 και 5.3.6, από τον RAS Mapper, διαφαίνεται η έκταση της πλημμύρας που έλαβε χώρα από το αιφνίδιο συμβάν (flash flood) της 17/10/2006 στα κατάντη του ρέματος της Αλμυρίδας, κατά την πλημμυρική αιχμή, αλλά και οι μέγιστες ταχύτητες του υδραυλικού κύματος, όπως προέκυψαν από την 1D/2D υδραυλική προσομοίωση.

Από τον Animator του RAS Mapper, διαπιστώνεται ότι η μεγαλύτερη πλημμυρισμένη επιφάνεια σημειώθηκε μεταξύ 13:30 και 14:00. Από την Εικόνα 5.3.5 παρατηρείται ότι το ύψος της πλημμύρας έφτασε έως και 3.60m, μόλις περίπου 20m πριν από τη θέση της γέφυρας. Στη θέση της διατομής ελέγχου (διατομή 254.2505) του ύψους ροής μετά το πέρας της πλημμύρας, προκύπτει ότι η υδραυλική 1D/2D μοντελοποίηση επαληθεύει την μέτρηση πεδίου των 2m, με μοντελοποιούμενο ύψος τα **1.97m**. Αναφορικά με τις μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού κύματος, από την Εικόνα 5.3.6 εξακριβώνεται ότι ως επί το πλείστον αγγίζουν έως και 5.2 m/s εντός του καναλιού 1D ροής. Οι ταχύτητες εξάπλωσης επί των 2D πλημμυρικών επιφανειών είναι γενικά ιδιαίτερα χαμηλές, με πιο αξιοσημείωτες αυτές που φτάνουν στα 0.7 m/s. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί μια ιδιαίτερος αυξημένη ταχύτητα κατά την πλημμυρική αιχμή, τοπικά, στα δεξιά της γέφυρας, που αγγίζει τα 11.5 m/s.

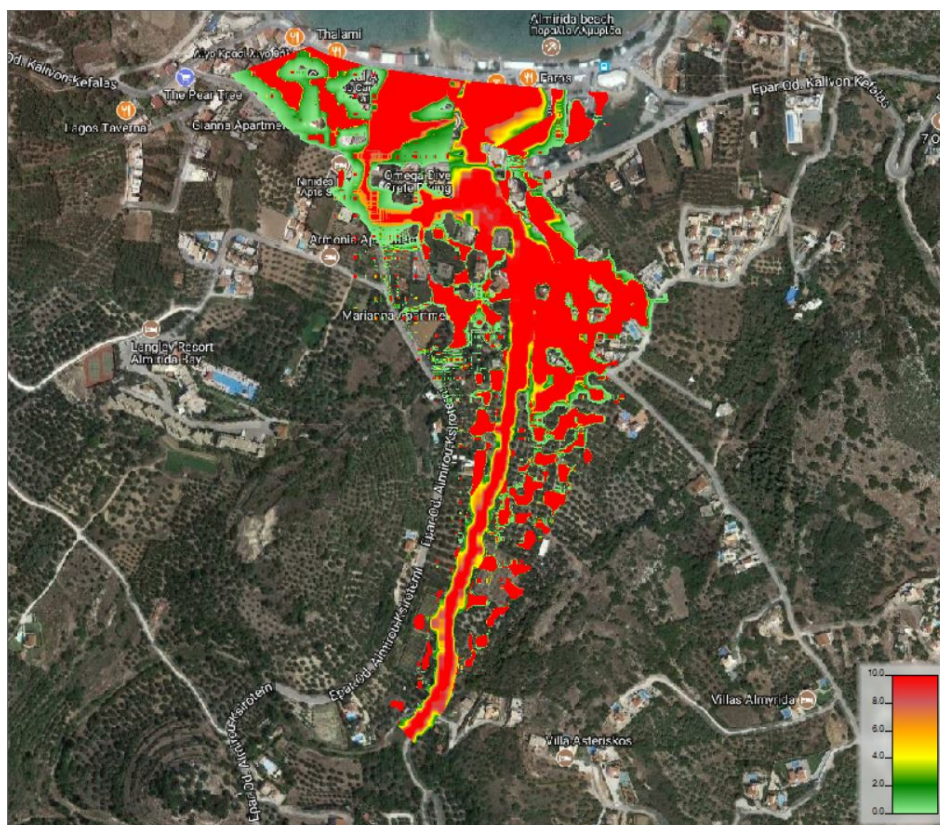


Εικόνα 5.3.5: Έκταση πλημμύρας ρέματος Αλμυρίδας από την 1D/2D υδραυλική μοντελοποίηση (1D/2D HEC-RAS 5.0.3).



Εικόνα 5.3.6: Μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού κύματος σε Κάτοψη, από την 1D/2D υδραυλική μοντελοποίηση (1D/2D HEC-RAS 5.0.3).

Στην Εικόνα 5.3.7 που ακολουθεί φαίνεται, για τις 10h (17/10/2006 ώρα 08:00 έως 17/10/2006 ώρα 18:00) που πραγματοποιήθηκε η υδραυλική μοντελοποίηση, η διάρκεια κατά την οποία οι επιφάνειες που πλημμύρισαν, παρέμειναν πλημμυρισμένες. Παρατηρείται λοιπόν ότι το πλείστον των επιφανειών που πλημμύρισαν παρέμειναν πλημμυρισμένες καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, δηλαδή και τις 10h. Υπήρξαν ωστόσο και επιφάνειες ροής που πλημμύρισαν μόλις για μερικά λεπτά, και άλλες για λίγες ώρες.



Εικόνα 5.3.7: Διάρκεια πλημμύρας από την έναρξη της 1D/2D υδραυλικής προσομοίωσης (1D/2D HEC-RAS 5.0.3).

Ένας ακόμα ενδιαφέρον χάρτης που εξήχθη από τον RAS Mapper ήταν αυτός που παρουσιάζεται στην κάτωθι Εικόνα 5.3.8. Στην Εικόνα αυτή, διακρίνεται η ώρα άφιξης του πλημμυρικού κύματος στις 2D επιφάνειες ροής. Όπως αναμένεται, ο χρόνος άφιξης στις επιφάνειες που προηγουμένως διαπιστώθηκε ότι παρέμειναν πλημμυρισμένες καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, ήταν άμεσος, δηλαδή 0 hr. Σε ορισμένες θέσεις της μοντελοποιούμενης περιοχής ωστόσο, το πλημμυρικό κύμα άργησε να φτάσει, δηλαδή οι περιοχές αυτές μπορεί να πλημμύρισαν έως και 6 hr αργότερα από την έναρξη της προσομοίωσης.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα Έρευνας

6.1 Παρατηρήσεις και συμπεράσματα

Η μελέτη αυτή περιλαμβάνει μια προσπάθεια να προσομοιωθεί το αιφνίδιο βροχοπτωτικό γεγονός στην υδρολογική λεκάνη της Αλμυρίδας, που έλαβε χώρα στις 17 Οκτωβρίου 2006, ώστε να αξιολογηθούν οι πλημμυρικές επιπτώσεις. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε: α) μέσω του υδρολογικού HEC-HMS 4.2.1 μοντέλου, β) μέσω του υδραυλικού 1D HEC-RAS 5.0.3 μοντέλου, καθώς και γ) του ενιαίου υδραυλικού 1D/2D HEC-RAS 5.0.3 μοντέλου. Τα σπουδαιότερα συμπεράσματα της έρευνας συνοψίζονται ως εξής:

- ✧ Λόγω ύπαρξης δεδομένων βροχής από radar έγινε χρήση καννάβου (grid cell basis). Η χωροχρονική κατανομή του γεγονότος βροχής μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στη μορφή του παραγόμενου υδρογραφήματος, και κυρίως στις μέγιστες τιμές. Επομένως, με χρήση των δεδομένων από radar πιθανώς αυξάνεται η ακρίβεια στις εκτιμήσεις του υδρογραφήματος.
- ✧ Η μέγιστη απορροή του προσομοιωμένου βροχοπτωτικού συμβάντος προέκυψε ίση με $111.1 \text{ m}^3/\text{s}$ και σημειώθηκε στις 17-10-2006 ώρα 13:15, δηλαδή 2h και 45 min, έως 3h αργότερα από το μέγιστο καταγεγραμμένο ύψος βροχόπτωσης των 17.50 mm. Η μοντελοποιημένη τιμή μέγιστης απορροής αποτελεί μια ικανοποιητική προσέγγιση της εκτιμώμενης μέγιστης απορροής στο πεδίο, αυτής των $120 \text{ m}^3/\text{s}$, αναδίδοντας μια μικρή υποεκτίμηση του μοντέλου σε σχέση με την εκτιμώμενη πραγματοποιηθείσα μέγιστη απορροή, της τάξης:

$$\frac{Q_{\text{observed}} - Q_{\text{modeled}}}{Q_{\text{observed}}} \times 100\% = \frac{(120 - 111.1) \text{ m}^3/\text{s}}{120 \text{ m}^3/\text{s}} \times 100\% = 7.416\%$$

- ✧ Το προσομοιωμένο -με το 1D HEC-RAS υδραυλικό μοντέλο- πλημμυρικό βάθος στη διατομή ελέγχου (διατομή 254.2505) προέκυψε 2.04 m, και αποτελεί μια εξαιρετικά καλή προσέγγιση στη μετρούμενη τιμή του πεδίου, από το σημάδι που είχε αποτυπωθεί στον τοίχο αντιστήριξης στο ξενοδοχείο (floodmark), αυτή των 2 m, αποδίδοντας μια πολύ μικρή υπερεκτίμηση του μοντέλου σε σχέση με το μετρηθέν βάθος ροής, της τάξης:

$$\frac{(2.04 - 2) \text{ m}}{2 \text{ m}} \times 100\% = 2\%$$

- ✧ Εξίσου πολύ καλή προσέγγιση στη μετρούμενη τιμή του πεδίου, αυτή των 2m, είναι το προσομοιωμένο -με το 1D/2D HEC-RAS υδραυλικό μοντέλο- πλημμυρικό βάθος στη διατομή ελέγχου (διατομή 254.2505) που προέκυψε ίσο με 1.97m, αναδίδοντας μια μικρή υποεκτίμηση του μοντέλου σε σχέση με το μετρηθέν βάθος ροής, της τάξης:

$$\frac{y_{\text{observed}} - y_{\text{modeled}}}{y_{\text{observed}}} \times 100\% = \frac{(2 - 1.97)m}{2m} \times 100\% = 1.5\%$$

- ✧ Τα αποτελέσματα των δύο υδραυλικών μοντέλων έχουν κάποιες ουσιαστικές διαφορές. Συγκεκριμένα, στο 1D HEC-RAS υδραυλικό μοντέλο το ύψος της πλημμύρας άγγιξε τα 4.35m, περίπου 10m πριν από τη θέση της γέφυρας, ενώ οι μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού κύματος σημειώθηκαν περίπου στο μέσο του συνολικού μήκους του κάταντες τμήματος του ρέματος, φτάνοντας τα 5.1 m/s. Απ' την άλλη, στο 1D/2D HEC-RAS υδραυλικό μοντέλο διαπιστώθηκε ότι το ύψος της πλημμύρας άγγιξε τα 3.60m, αρκετά χαμηλότερα από τα αποτελέσματα του 1D μοντέλου, και μόλις περίπου 20m πριν από τη θέση της γέφυρας. Σχετικά με τις μέγιστες ταχύτητες πλημμυρικού κύματος στην 1D/2D υδραυλική μοντελοποίηση, στην πλειονότητα φτάνουν έως και 5.2 m/s εντός του καναλιού 1D ροής, ενώ επί των 2D πλημμυρικών επιφανειών είναι ιδιαίτερα χαμηλές, με μέγιστη τιμή περίπου τα 0.7 m/s.
- ✧ Και στα δύο υδραυλικά μοντέλα η μεγαλύτερη πλημμυρισμένη επιφάνεια σημειώθηκε περίπου μεταξύ 13:00 και 14:00 της 17/10/2006, ενώ η έκταση της πλημμύρας είναι περίπου ανάλογη. Συγχρόνως, αυτή η υπερχειλίση της ροής πλημμύρισε την αστική περιοχή σημαντικά.
- ✧ Το 1D HEC-RAS υδραυλικό μοντέλο, παρόλο που λειτουργεί επαρκώς, δεν παρέχει ικανοποιητικές δισδιάστατες πληροφορίες, ιδίως για τις πλημμυρικές επιφάνειες, σε σχέση με τα αποτελέσματα του ενιαίου 1D/2D HEC-RAS υδραυλικού μοντέλου, το οποίο παρέχει λεπτομερείς δισδιάστατους χάρτες πληροφοριών. Από τον RAS Mapper του 1D/2D HEC-RAS μοντέλου εξάγονται πληροφορίες όχι μόνο για την έκταση της πλημμύρας κατά την παροχή αιχμής, αλλά και για τις μέγιστες τιμές του βάθους ροής σε όλες τις θέσεις του μοντελοποιημένου πλέγματος.
- ✧ Η συνολική πλημμυρική επιφάνεια του μελετηθέντος κάταντες τμήματος του ρέματος Αλμυρίδας, συμπεριλαμβανομένης της επιφάνειας του ρέματος, καταλαμβάνει έκταση 5837.05 m², σύμφωνα με το 1D HEC-RAS μοντέλο.

6.2 Προτάσεις Ελαχιστοποίησης επιπτώσεων μελλοντικών πλημμυρών

Παρά τη μικρή συχνότητα εμφάνισης ακραίων καταιγισμοφόρων γεγονότων, η εξεταζόμενη περιοχή της Αλμυρίδας είναι επιρρεπής σε πλημμυρικά φαινόμενα, λόγω ανθρωπογενών παρεμβάσεων και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών. Η αυξανόμενη τουριστική ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες έχει οδηγήσει σε ανεξέλεγκτη αστικοποίηση εντός του εφήμερου ρέματος, αλλά και στα ανάντη, γεγονός που διαδραμάτισε σημαντικό -αν όχι τον κυρίαρχο- ρόλο στην εξέλιξη της πλημμύρας και των ζημιών του αιφνίδιου βροχοπτώσιου γεγονότος της 17/10/2006. Είναι προφανές ότι πρέπει να ληφθούν μια σειρά από μέτρα προστασίας έναντι πλημμυρών ώστε να αποφευχθούν παρόμοιες μελλοντικές καταστάσεις που ενέχουν μεγάλο κίνδυνο για τους ανθρώπους και τις ιδιοκτησίες τους, όπως καταγράφονται παρακάτω:

- ❑ Κατά την [Οδηγία 2007/60/ΕΚ](#) του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, τα κράτη-μέλη της ΕΕ θα πρέπει να εκπονήσουν χάρτες κινδύνου πλημμύρας. Ο ακριβής προσδιορισμός της έκτασης μιας πλημμύρας βασιζόμενος σε πολύ υψηλής ακρίβειας τοπογραφικά δεδομένα, αποτελεί πρωταρχικό χαρακτηριστικό για την ανάπτυξη λεπτομερών χαρτών κινδύνου πλημμύρας.
- ❑ Στην περιοχή μελέτης, το κάταντες τμήμα του ρέματος παρουσιάζεται ιδιαίτερα επιρρεπές στον κίνδυνο πλημμύρας, και για το λόγο αυτό θα πρέπει να συγκεντρώσει τη μεγαλύτερη προσοχή κατά τη σχεδίαση της διαχείρισης των κινδύνων από πλημμύρες.
- ❑ Για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας στη μοντελοποίηση χρειάζεται μεγαλύτερη διαθεσιμότητα πληροφοριών από το πεδίο αναφορικά με την χωροχρονική κατανομή της βροχόπτωσης, ώστε να βαθμονομηθεί ορθότερα η επιφανειακή απορροή που δύναται να προκαλέσει πλημμυρικές ζημιές.
- ❑ Η διαθεσιμότητα ενός μοντέλου εδάφους ακόμα υψηλότερης ανάλυσης, π.χ. 1m x 1m, θα βελτιώσει ακόμη περισσότερο την εκτίμηση υδρολογικών παραμέτρων που βασίζονται στις γεωμορφολογικές συνθήκες της περιοχής, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη ακρίβεια στο μοντελοποιούμενο πλημμυρικό υδρογράφημα.

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία - Αναφορές

Ξενόγλωσση Αρθρογραφία

- Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., Forzieri, G. (2015). Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19: 2247-2260.
- Barredo, J.I. (2007). Major flood disasters in Europe: 1950–2005. *Natural Hazards*, 42: 125-148.
- Borga, M., Anagnostou, E.N., G. Blöschl, G., Creutin, J.-D. (2011). Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project. *Environmental Science and Policy*, 14: 834-844.
- Daliakopoulos, I.N., Tsanis, I.K. (2012). A weather radar data processing module for storm analysis. *Journal of Hydroinformatics*, 14 (2): 332-344. doi:10.2166/hydro.2011.118.
- Devlin, M.J., McKinna, L.W., Álvarez-Romero, J.G., Petus, C., Abott, B., Harkness, P., Brodie, J. (2012). Mapping the pollutants in surface riverine flood plume waters in the Great Barrier Reef, Australia. *Marine Pollution Bulletin*, 65: 224-235.
- Elmer, F., Hoymann, J., Dütthmann, D., Vorogushyn, S., Kreibich, H. (2012). Drivers of flood risk change in residential areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12: 1641-1657.
- Gibling, M.R., Bashforth, A.R., Falcon-Lang, H.J., Allen, J.P., Fielding, C.R. (2010). Log Jams and Flood Sediment Buildup caused Channel Abandonment and Avulsion in the Pennsylvanian of Atlantic Canada. *Journal of Sedimentary Research*, 80: 268-287.
- Gourley, J.J., Flamig, Z.L., Vergara, H., Kirstetter, P.-E., Clark III, R.A., Argyle, E., Arthur, A., Martinaitis, S., Terti, G., Erlingis, J.M., Hong, Y., Howard, K.W. (2017). The FLASH Project: Improving the Tools for Flash Flood Monitoring and Prediction across the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98 (2): 361-372.
- Grillakis, M.G., Koutroulis, A.G., Komma, J., Tsanis, I.K., Wagner, W., Blöschl, G. (2016). Initial soil moisture effects on flash flood generation – A comparison between basins of contrasting hydro-climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 541: 206-217.
- Hapuarachchi, H.A.P., Wang, Q.J., Pagano, T.C. (2011). A review of advances in flash flood forecasting. *Hydrological Processes*, 25: 2771-2784.

- Hilker, N., Badoux, A., Hegg, C. (2009). The Swiss flood and landslide damage database 1972–2007. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9: 913-925.
- Jongman, B., Kreibich, H., Apel, H., Barredo, J.I., Bates, P.D., Feyen, L., Gericke, A., Neal, J., Aerts, J.C.J.H., Ward, P.J. (2012). Comparative flood damage model assessment: towards a European approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12: 3733-3752.
- Kang, J.-L., Su, M.-D., Chang, L.-F. (2005). Loss Functions and Framework for Regional Flood Damage Estimation in Residential Area. *Journal of Marine Science and Technology*, 13 (3): 193-199.
- Koutroulis, A.G., Tsanis, I.K., Daliakopoulos, I.N. (2010). Seasonality of floods and their hydrometeorologic characteristics in the island of Crete. *Journal of Hydrology*, 394: 90-100.
- Koutroulis, A.G., Grillakis, M.G., Tsanis, I.K., Jacob, D. (2015). Exploring the ability of current climate information to facilitate local climate services for the water sector. *Earth Perspectives*, 1-19.
- Kundzewicz, Z.W. and Schellnhuber, H.-J. (2004). Floods in the IPCC TAR perspective. *Natural Hazards*, 31: 111-128.
- Liu, B., Siu, Y.L., Mitchell, G. (2016). Hazard interaction analysis for multi-hazard risk assessment: a systematic classification based on hazard-forming environment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16: 629-642.
- MacDonald, A.M., Lapworth, D.J., Hughes, A.G., Auton, C.A., Maurice, L., Finlayson, A., Gooddy, D.C. (2014). Groundwater, flooding and hydrological functioning in the Findhorn floodplain, Scotland. *Hydrology Research*, 45 (6): 755-773.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., Thielen, A. (2010). Review article “Assessment of economic flood damage”. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10: 1697-1724.
- Perry, C.A. (2000). Significant Floods in the United States During the 20th Century-USGS Measures a Century of Floods. *U.S. Geological Survey, Fact Sheet 024-00, March 2000*.
- Rozalis, S., Morin, E., Yair, Y., Price, C. (2010). Flash flood prediction using an uncalibrated hydrological model and radar rainfall data in a Mediterranean watershed under changing hydrological conditions. *Journal of Hydrology*, 394: 245-255.

- Špitalar, M., Gourley, J.J., Lutoff, C., Kirstetter, P.-E., Brilly, M., Carr, N. (2014). Analysis of flash flood parameters and human impacts in the US from 2006 to 2012. *Journal of Hydrology*, 519: 863-870.
- Terti, G., Ruin, I., Anquetin, S., Gourley, J.J. (2017). A Situation-based Analysis of Flash Flood Fatalities in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98 (2): 333-345.
- Thieken, A.H., Ackermann, V., Elmer, F., Kreibich, H., Kuhlmann, B., Kunert, U., Maiwald, H., Merz, B., Müller, M., Piroth, K., Schwarz, J., Schwarze, R., Seifert, I., Seifert, J. (2008). Methods for the Evaluation of Direct and Indirect Flood Losses. *4th International Symposium on Flood Defence: Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability, 6-8 May 2008, Toronto, Ontario, Canada*.
- Tsanis, I.K., Seiradakis, K.D., Daliakopoulos, I.N., Grillakis, M.G., Koutroulis, A.G. (2014). Assessment of GeoEye-1 stereo-pair-generated DEM in flood mapping of an ungauged basin. *Journal of Hydroinformatics*, 16 (1): 1-18.
- Wanders, N., Karssenbergh, D., de Roo, A., de Jong, S.M., Bierkens, M.F.P. (2014). The suitability of remotely sensed soil moisture for improving operational flood forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18: 2343-2357.
- Yang, T.-H., Yang, S.-C., Ho, J.-Y., Lin, G.-F., Hwang, G.-D., Lee, C.-S. (2015). Flash flood warnings using the ensemble precipitation forecasting technique: A case study on forecasting floods in Taiwan caused by typhoons. *Journal of Hydrology*, 520: 367-378.
- Youssef, A.M., Pradhan, B., Hassan, A.M. (2011). Flash flood risk estimation along the St. Katherine road, southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery. *Environ Earth Sci*, 62: 611-623.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Enabling CLimate Information Services for Europe (ECLISE) (2014). *Climate change effect on hydro-meteorologic variables related to water budget and precipitation extremes for the region of Crete*, Report 5.5, European Union's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013).

European Environment Agency (EEA) (2008). *Impacts of Europe's changing climate: 2008 indicator-based assessment*, Joint EEA–JRC–WHO report, EEA Report No 4/2008, JRC Reference Report No JRC47756, Copenhagen.

Jakubicka, T., Vos, F., Phalkey, R., Marx, M. (2010). *Health impacts of floods in Europe: Data gaps and information needs from a spatial perspective*, A MICRODIS Report, European Commission, Brussels.

Messner, F. and Meyer, V. (2005). *Flood damage, vulnerability and risk perception - challenges for flood damage research*, UFZ-Diskussionspapiere, No. 13/2005, Leipzig.

Middlesex University Flood Hazard Research Centre (MUFHRC) (2014). *A Common Framework of Flood Risk Management Cost Benefit Analysis Features. Support Tool No. 1: Cost Benefit Analysis Guidelines*, διαθέσιμο διαδικτυακά στη διεύθυνση:
<http://www.floodcba.eu/main/wp-content/uploads/Cost-Benefit-Analysis-Guidelines.pdf>.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (1994). *Flood-Runoff Analysis: Engineer Manual*, Engineering and Design, Washington, DC.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual*, Hydrologic Engineering Center, CPD-74B, Davis, CA.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2012). *HEC-GeoRAS GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS® 10: User's Manual, Version 10*, Hydrologic Engineering Center, CPD-83, Davis, CA.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2016a). *HEC-RAS River Analysis System: User's Manual, Version 5.0*, Hydrologic Engineering Center, CPD-68, Davis, CA.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2016b). *HEC-RAS River Analysis System: 2D Modeling User's Manual, Version 5.0*, Hydrologic Engineering Center, CPD-68A, Davis, CA.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2016c). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, Version 5.0*, Hydrologic Engineering Center, CPD-69, Davis, CA.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2016d). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual, Version 4.2*, Hydrologic Engineering Center, CPD-74A, Davis, CA.

United States Department of Agriculture (USDA) (1989). *Engineering Hydrology Training Series Module 104: Runoff Curve Number Computations*, National Employee Development Staff, Soil Conservation Service.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Δαλιακόπουλος Ι.Ν. (2011). *Ανάλυση αβεβαιότητας στη διαχείριση υδατικών πόρων σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης με τη χρήση μετεωρολογικού ραντάρ*, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Ειδική Γραμματεία Υδάτων (ΕΓΥ) (2012). *Εφαρμογή Οδηγίας 2007/60/ΕΚ: Προκαταρκτική Αξιολόγηση Κινδύνων Πλημμύρας*, Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας & Κλιματικής Αλλαγής, Αθήνα.

Κουτσογιάννης Δ. και Ξανθόπουλος Θ. (1999). *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, Τομέας Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα. Διαθέσιμο διαδικτυακά στη διεύθυνση: <https://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/115/>

Λουπασάκης Κ. (2013). *Τεχνική Γεωλογία Ι*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα. Διαθέσιμες διαδικτυακά στη διεύθυνση: http://www.legah.metal.ntua.gr/pdf/tex1/2013/02_Τεχνικης_Γεωλογιας_I_Γεωλογικοι_Σχηματισμοι.pdf

Μαμάσης Ν. και Κουτσογιάννης Δ. (1999). *Προχωρημένη Υδρολογία - Γεωμορφολογία και απορροή*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τομέας Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα. Διαθέσιμες διαδικτυακά στη διεύθυνση: <https://www.itia.ntua.gr/el/getfile/199/2/documents/1999AdvHydroRunoff.pdf>

Μαμάσης Ν. (2007). *Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα - Διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Αθήνα. Διαθέσιμες διαδικτυακά στη διεύθυνση: <http://users.itia.ntua.gr/nikos/floods/antipl.pdf>

Μαμάσης Ν. (2009). *Υδρομετεωρολογία – Υπόγεια νερά*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Αθήνα. Διαθέσιμες διαδικτυακά στη διεύθυνση: http://users.itia.ntua.gr/nikos/emy/emy_ypgia_09.pdf

Μαμάσης Ν. (2013). *Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα – Πλημμύρες*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Αθήνα. Διαθέσιμες διαδικτυακά στη διεύθυνση: http://users.itia.ntua.gr/nikos/floods/floods_2013.pdf

Οδηγία 2007/60/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2007 για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης της 6.11.2007, L 288: 27-34, διαθέσιμη διαδικτυακά στη διεύθυνση:

<http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=VWgl%2B6AhMdU%3D&tabid=252>

Παπαστεφανάκης Ν. (2009). *Στοχαστική ανάλυση του πλημμυρικού γεγονότος της 17^{ης} Οκτωβρίου 2006 στην υδρολογική λεκάνη της Αλμυρίδας*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.

Τσιτσιλώνης Σ. (2008). *Μεταπλημμυρική έρευνα και μελέτη αστραπιαίων πλημμυρών. Προσομοίωση του πλημμυρικού γεγονότος 17/10/2006 στην Αλμυρίδα*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά.

Ιστοσελίδες

- ❖ http://edu.chi.civil.ntua.gr/site-LESSONS/HTML_PLIMIRES/PERIEXOMENO/Prostheteis_simioseis_GREECE.htm, Μιμίκου, Μ.Α., πρόσθετες σημειώσεις, *Πλημμύρες και Αντιπλημμυρική Προστασία: Το Πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα, (Τελευταία επίσκεψη 10-09-2017).
- ❖ http://www.fsl.orst.edu/geowater/FX3/help/8_Hydraulic_Reference/Mannings_n_Tables.htm, Chow (1959). *Reference tables for Manning's n Values for Channels, Closed Conduits Flowing Partially Full, and Corrugated Metal Pipes*, (Τελευταία επίσκεψη 30-01-2018).