



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Π.Μ.Σ.: «Περιβαλλοντική Μηχανική»
Κατεύθυνση: «Υδατικοί Πόροι και Κλιματική Αλλαγή»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δισδιάστατη προσομοίωση της ταχύτητας ροής και των φερτών υλών σε
ποτάμια συστήματα γεωργικών λεκανών απορροής.

Μοριανού Γιασεμή

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Καρατζάς Γεώργιος (επιβλέπων καθηγητής)

Κουργιαλάς Νεκτάριος

Νικολαΐδης Νικόλαος

Χανιά,

Απρίλιος, 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Καρατζά Γεώργιο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντας μου το θέμα αυτής της διπλωματικής εργασίας, αλλά και για την συνεχή του καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Κουργιαλά Νεκτάριο, μέλος του εργαστηρίου Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής και μέλος της εξεταστικής μου επιτροπής για την άριστη συνεργασία μας, την πολύτιμη βοήθεια του και τον χρόνο που διέθεσε για την εργασία μου όλο αυτό το διάστημα.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στο τρίτο μέλος της εξεταστικής επιτροπής τον καθηγητή κ. Νικολαΐδη Νικόλαο για το χρόνο που διέθεσε για την εργασία μου και την παροχή δεδομένων για την εκπόνηση της.

Για την παροχή δεδομένων θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ Αλεξάκη Δημήτρη, μέλος του εργαστηρίου Διαχείρισης Υδατικών Πόρων και Παράκτιας Μηχανικής και τους υποψήφιους Διδάκτορες Νεραντζάκη Σοφία και Γιαννάκη Γιώργο, μέλη του εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω την εταιρεία DHI για την δωρεάν παροχή των υδραυλικών μοντέλων προσομοίωσης και ιδιαίτερα τον αντιπρόσωπο της στην Ελλάδα κ. Μουσσούλη Ηλία για την βοήθεια του και την καθοδήγηση του στην χρήση του λογισμικού.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Δρ Δόκου Ζωή και Δρ Βαρουχάκη Μανώλη, μέλη του εργαστηρίου Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής και τις Δρ Βοζινάκη Ειρήνη, Δρ Ταπόγλου Ευδοκία και την Υποψήφια Διδάκτωρ Λεοντοπούλου Γεωργία για τις πολύτιμες συμβουλές τους και την καθοδήγηση τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά και αφιερώνω αυτή την εργασία στην οικογένεια μου, για την ηθική και υλική τους υποστήριξη όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η προσομοίωση του ύψους νερού, της ταχύτητας ροής και της μεταφοράς ιζήματος στο κατάντη τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη (Κρήτη – Ελλάδα). Για την υλοποίηση του παραπάνω εγχειρήματος χρησιμοποιήθηκαν τα δισδιάστατα υδραυλικά μοντέλα MIKE 21 και MIKE 21C. Αναλυτικότερα, μια ιδιαίτερα σημαντική προσέγγιση της παρούσας εργασίας ήταν η σύγκριση, του ευρέως χρησιμοποιούμενου υδροδυναμικό μοντέλο MIKE 21 με αυτό του MIKE 21C για την προσομοίωση της ροής του ποταμού Κοιλιάρη. Το μοντέλο MIKE 21C έχει αναπτυχθεί ειδικά για την προσομοίωση της δισδιάστατης ροής και της αλλαγής της μορφολογίας ποτάμιων συστημάτων. Είναι βασισμένο σε ένα ορθογώνιο καμπυλόγραμμο υπολογιστικό πλέγμα και περιέχει δύο μέρη: α) το υδροδυναμικό μοντέλο το οποίο επιλύει τις εξισώσεις Saint-Venant και β) το μοντέλο αλλαγής της μορφολογίας των υδατορεμάτων καθώς και της μεταφοράς ιζήματος. Σε αντίθεση με το μοντέλο MIKE 21C η γενική μορφή του μοντέλου MIKE 21 βασίζεται σε ευθύγραμμο πλέγμα. Η διαφορά μεταξύ του καμπυλόγραμμου και του ευθύγραμμου πλέγματος είναι ότι οι γραμμές πλέγματος του πρώτου ακολουθούν τις γραμμές των όχθων του ποταμού, παρέχοντας ταυτόχρονα καλύτερη ανάλυση. Τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων συγκρίθηκαν με τις μετρήσεις πεδίου και με βάση την εφαρμογή διαφόρων στατιστικών δεικτών αποδείχθηκε ότι η χρήση του μοντέλου που είναι βασισμένο σε καμπυλόγραμμο πλέγμα (MIKE 21C) προσομοιώνει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις διάφορες υδραυλικές παραμέτρους όπως είναι η ταχύτητα και το ύψος ροής σε ποτάμια συστήματα. Μετά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων επιλέγεται το μοντέλο MIKE 21C για την προσομοίωση της μεταφοράς αιωρούμενου ιζήματος.

Τα κύρια δεδομένα εισόδου αφορούσαν στη δημιουργία πυκνού καμπυλόγραμμου πλέγματος και της αντίστοιχης βαθυμετρίας χρησιμοποιώντας ψηφιακό αρχείο εδάφους (DEM) πολύ υψηλής ανάλυσης, 1m x 1m. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα χρονοσειρών παροχής από υδρομετρικό σταθμό στα ανάντη της περιοχής μελέτης. Αντίστοιχα, στο μοντέλο μεταφοράς ιζήματος, εισήχθησαν χαρακτηριστικά του ιζήματος, όπως η μέση διάμετρος κόκκων, από μετρήσεις πεδίου, και χρονοσειρές αιωρούμενου ιζήματος. Το μοντέλο MIKE 21C βαθμονομήθηκε και επαληθεύτηκε χρησιμοποιώντας μετρήσεις πεδίου για το βάθος νερού και τη συγκέντρωση αιωρούμενου ιζήματος, οι οποίες συλλέχθηκαν σε περιόδους υψηλών και χαμηλών παροχών. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μοντέλου ήταν σε καλή συμφωνία με τις μετρήσεις πεδίου, όπως αυτή επαληθεύτηκε από διάφορους στατιστικούς δείκτες.

Με βάση τα παραπάνω και μετά την επιτυχή διαδικασία βαθμονόμησης και επαλήθευσης το μοντέλο MIKE 21C μας δίνει δισδιάστατους χάρτες προσομοίωσης της ταχύτητας ροής, του βάθους νερού, της μεταφοράς ιζήματος και της αλλαγής των επιπέδων της κοίτης. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα αυτά, μπορούμε να προβλέψουμε και να ελέγξουμε ακραία γεγονότα, όπως είναι οι στιγμιαίες πλημμυρικές αιχμές που δύναται να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες λάσπης και ρύπων στα κατάντη.

ABSTRACT

The objective of this work was the simulation of water depth, flow velocity and sediment transport in the downstream part of the Koiliaris River (Crete – Greece). The two-dimensional hydraulic models MIKE 21 and MIKE 21C were used. More specifically, an important approach of the present study was the comparison of the widely used MIKE 21 hydrodynamic model with the MIKE 21C, which also is a hydrodynamic model for the simulation of the Koiliaris river flow. The MIKE 21C model has been developed specifically to simulate 2D flow and morphological changes in rivers. It is based on an orthogonal curvilinear grid and comprises two parts: (a) the hydrodynamic part that is based on the Saint-Venant equations and (b) the morphological changes part for the simulation of sediment transport. In contrast to model MIKE 21 C, the general version of MIKE 21 is based on a rectilinear grid. The difference between the curvilinear and the rectilinear grid is that the grid lines of the curvilinear grid follow the bank lines of the river, providing a better resolution of the flow near the boundaries. The water depth results of the two models compared with the field observations and a series of statistical indicators proved that the curvilinear grid based model results were in better agreement. After comparing the results of the two models the MIKE 21C model was selected for the simulation of suspended sediment transport.

The curvilinear grid and bathymetry files were generated using a very high resolution DEM 1m x 1m. Time series discharge data from a hydrometric station also introduced as input parameters in the hydrodynamic part of the model. Regarding the sediment transport model, the field measurements of the sediment characteristics (grain size) and the suspended sediment concentration were used. The model was calibrated and verified using water level field data and sediment concentration data that have been collected during high and low flow discharges. Model simulation results were in good agreement with the field observations, as indicated by a variety of statistical measures. The results of the model were presented as 2D maps of flow velocity, water depth, sediment transport and bed level changes. Using the obtained results, extreme hydrological events such as flash-floods transporting large sediment loads to the downstream area, can be successfully monitored.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ii
ABSTRACT	iv
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : Εισαγωγή	1
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : Θεωρητικό Υπόβαθρο	3
2.1. Ορισμοί και Βασικές Έννοιες.....	3
2.1.1. Υδρολογικός Κύκλος.....	3
2.1.2. Ποταμοί και Χείμαρροι	4
2.2. Μεταφορά Ιζήματος σε ποτάμι.....	5
2.2.1. Κατηγοριοποίηση ιζημάτων	5
2.2.2. Η διαδικασία της διάβρωσης.....	6
2.2.3. Τρόποι μεταφοράς ιζήματος σε ποτάμια	7
2.2.4. Αιωρούμενα στερεά σε ποτάμια συστήματα	8
2.2.5. Τρόποι μέτρησης των αιωρούμενων στερεών σε ποτάμια συστήματα	9
2.3. Εξισώσεις Υδραυλικής Προσομοίωσης σε Ποτάμια.....	14
2.4. Δισδιάστατα Υδραυλικά Μοντέλα	16
2.5. Μοντέλα Προσομοίωσης Μεταφοράς Ιζήματος σε Ποτάμια	18
2.6. Μοντέλα MIKE 21 και MIKE 21C.....	21
2.6.1. Υδροδυναμικό μοντέλο (Hydrodynamic model).....	23
2.6.2. Μοντέλο μεταφοράς αιωρούμενου ιζήματος (Suspended sediment transport model)	25
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο : Περιοχή Μελέτης.....	29
3.1. Περιγραφή Λεκάνης απορροής ποταμού Κοιλιάρη.....	29
3.1.1. Γεωλογικές συνθήκες της Λεκάνης Απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.....	31
3.1.2. Χρήσεις Γης Λεκάνης Απορροής ποταμού Κοιλιάρη	32

3.1.3.	Κλιματολογικά Χαρακτηριστικά.....	33
3.2.	Περιγραφή Περιοχής Μελέτης	35
3.3.	Επίδραση των Γεωργικών Χρήσεων γης στη Διάβρωση.....	36
3.4.	Μεταφορά Ιζήματος στον Ποταμό Κοιλιάρη	38
4.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο : Μεθοδολογία	40
4.1.	Συλλογή Δεδομένων στην Περιοχή Μελέτης	41
4.1.1.	Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων Παροχής.....	41
4.1.2.	Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων Αιωρούμενου Ιζήματος	43
4.2.	Στήσιμο του Υδροδυναμικού μοντέλου καμπυλόγραμμου πλέγματος (MIKE 21C)	52
4.2.1.	Δημιουργία του Curvilinear Grid	53
4.2.2.	Εισαγωγή Βαθυμετρίας	54
4.2.3.	Περίοδος Προσομοίωσης (Simulation Period).....	55
4.2.4.	Προσδιορισμός Οριακών Τιμών (Boundary Conditions).....	56
4.2.5.	Υγρές και Ξηρές Συνθήκες (Flood and Dry Conditions)	56
4.2.6.	Ιξώδες Τύρβης (Eddy Viscosity)	57
4.2.7.	Αντίσταση (Resistance)	57
4.2.8.	Υδροδυναμική Ολοκλήρωση (Hydrodynamic Integration)	57
4.3.	Βαθμονόμηση και Επαλήθευση του υδροδυναμικού μοντέλου MIKE 21C	58
4.4.	Στήσιμο του Υδροδυναμικού μοντέλου τετραγωνισμένου πλέγματος (MIKE 21)	58
4.5.	Στήσιμο του Μοντέλου Μορφολογίας ποταμού MIKE 21C	60
4.5.1.	Περίοδος Προσομοίωσης (Simulation Period).....	60
4.5.2.	Ελικοειδής Ροή (Helical Flow).....	60
4.5.3.	Μεταφορά Ιζήματος (Sediment transport)	62
4.5.4.	Μέγεθος κόκκων (Grain Size).....	63

4.5.5.	Συντελεστές Διασποράς (Dispersion Coefficients)	63
4.5.6.	Αρχική Συγκέντρωση (Initial Concentration)	63
4.5.7.	Θεωρία Μεταφοράς (Transport Theory)	64
4.5.8.	Διάβρωση Πρατών (Bank Erosion).....	64
4.5.9.	Αλλαγή Μορφολογίας ποταμού (Morphological Update)	65
4.5.10.	Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions)	65
4.6.	Βαθμονόμηση και Επαλήθευση του μοντέλου μεταφοράς ιζήματος MIKE 21C ..	65
4.7.	Δείκτες στατιστικής ανάλυσης αποτελεσμάτων Βαθμονόμησης – Επαλήθευσης των δύο μοντέλων.	66
5.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο : Αποτελέσματα	69
5.1.	Αποτελέσματα Υδροδυναμικού Μοντέλου MIKE 21C	69
5.2.	Σύγκριση αποτελεσμάτων χρήσης καμπυλόγραμμου και ευθύγραμμου πλέγματος. 74	
5.3.	Αποτελέσματα μοντέλου Μεταφοράς Ιζήματος	76
6.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο : Συμπεράσματα	81
	Βιβλιογραφία	84
	Ελληνική Βιβλιογραφία	84
	Διεθνής Βιβλιογραφία.....	84

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2. 1.	Απλοποιημένη γραφική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου.....	4
Εικόνα 2. 2.	Τρόποι μεταφοράς ιζήματος σε ποτάμια.	8
Εικόνα 2. 3.	α) σχηματική απεικόνιση του συστήματος αυτοματοποιημένης δειγματοληψίας ιζημάτων, β) φωτογραφία της συσκευής.	11
Εικόνα 2. 4.	Σχηματική απεικόνιση του ολοκληρωμένου δειγματολήπτη.	11
Εικόνα 2. 5.	Αντλία δειγματοληψίας αιωρούμενου ιζήματος, Α) το γενικό σχέδιο και Β) το σύστημα λειτουργίας	13

Εικόνα 2. 6. Αριστερά: Ευθύγραμμο πλέγμα (MIKE 21 model). Δεξιά: Καμπυλόγραμμο πλέγμα (MIKE 21C model)	22
Εικόνα 2. 7. Θέση των παραμέτρων ροής: παροχές P και Q, και το βάθος ροής H σε ένα καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων (s, n)	24
Εικόνα 3. 1. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη στον χάρτη.	29
Εικόνα 3. 2. Τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.	30
Εικόνα 3. 3. Οι δύο μόνιμες πηγές στο χωριό Στύλος.	31
Εικόνα 3. 4. Υδρογεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.	32
Εικόνα 3. 5. Χάρτης χρήσεων γης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη	33
Εικόνα 3. 6. Θερμοκρασιακές μεταβολές διαστήματος 1958-1997, πηγή: ΟΑΔΥΚ, 2010	34
Εικόνα 3. 7. Μέση βροχόπτωση διαστήματος 1958-1997, πηγή: ΟΑΔΥΚ, 2010	35
Εικόνα 3. 8. Το κατάντη τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, από το σημείο ένωσης όλων των παραποτάμων έως το σημείο εκροής του ποταμού στη θάλασσα.	36
Εικόνα 3. 9. α) Χάρτης Χρήσεων γης στο κατάντη τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη. β) Χάρτης γεωλογικών σχηματισμών στο κατάντη τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη.	37
Εικόνα 3. 10. Μίξη των δύο ροών, αριστερά η ροή από τις πηγές του Στύλου με χαμηλή συγκέντρωση ιζήματος και δεξιά η ροή από τον παραπόταμο Κεραμιανό με υψηλές συγκεντρώσεις ιζήματος, πηγή: Nerantzaki, 2014.	38
Εικόνα 3. 11. Αεροφωτογραφία της ευρύτερης περιοχής του ποταμού Κοιλιάρη.	39
Εικόνα 4. 1. Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας υδροδυναμικής προσομοίωσης και προσομοίωσης μεταφοράς ιζήματος στον ποταμό Κοιλιάρη.	40
Εικόνα 4. 2. Α) Το σημείο ένωσης των παραποτάμων όπου βρίσκεται ο υδρομετρικός σταθμός του Αγ. Γεωργίου στο χάρτη, Β) φωτογραφία του σταθμού και Γ) φωτογραφία του σημείου ένωσης των παραποτάμων.	42
Εικόνα 4. 3. Πίνακας της μεθόδου Wentworth για τον χαρακτηρισμό δειγμάτων ιζήματος.	45
Εικόνα 4. 4. Διάγραμμα συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος (mg/l) σε συνάρτηση με την συσσωρευμένη βροχόπτωση (mm). Με μπλε χρώμα η εξίσωση της μορφής 4.4 και με πορτοκαλί η εξίσωση της μορφής 4.5.	47
Εικόνα 4. 5. Χρονοσειρά Συγκέντρωσης Αιωρούμενου Ιζήματος	48
Εικόνα 4. 6. Χάρτης της περιοχής με τις τοποθεσίες των μετεωρολογικών σταθμών.	50
Εικόνα 4. 7. Διάγραμμα συσχέτισης βροχοβαθμίδας ευρύτερης περιοχής ποταμού Κοιλιάρη. ..	51

Εικόνα 4. 8. Η διεπαφή χρήστη του μοντέλου MIKE 21C – δενδρόδες διάγραμμα.	53
Εικόνα 4. 9. Αριστερά το καλυπλόγραμμα πλέγμα που δημιουργήθηκε για τον ποταμό Κοιλιάρη και δεξιά η μεγέθυνση ενός τμήματος του.	54
Εικόνα 4. 10. Η Βαθυμετρία του ποταμού Κοιλιάρη.	55
Εικόνα 4. 11. Χρονοσειρά Παροχής Υδρολογικού έτους 2011-2012	56
Εικόνα 4. 12. Βαθυμετρία σε τετραγωνισμένο κάνναβο στο μοντέλο MIKE 21.	59
Εικόνα 4. 13. Θεωρητικές απεικονίσεις της δευτερεύουσας ροής σε τμήματα ποταμού που αλλάζει έντονα η διεύθυνση ροής	61
Εικόνα 5. 1. Υδρογράφημα προσομοιωμένων τιμών βάθους νερού στον ποταμό Κοιλιάρη (κόκκινο χρώμα) σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου (μπλε χρώμα) για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης.	69
Εικόνα 5. 2. Α) Οι ζώνες των τιμών Manning M στον κάνναβο του μοντέλου MIKE 21C, Β) Σχηματική απεικόνιση των διαφορετικών ζωνών βλάστησης στην διατομή ενός ποταμού,.	71
Εικόνα 5. 3. Α) ύψος νερού στον ποταμό Κοιλιάρη μία θερινή ημέρα (31/08/2011), Β) ύψος νερού μετά από ένα γεγονός έντονης βροχής(14/03/2012).	73
Εικόνα 5. 4. Αριστερά ο δισδιάστατος χάρτης ταχυτήτων στον ποταμό Κοιλιάρη μετά από ένα γεγονός έντονης βροχής (14/03/2012) και δεξιά μεγέθυνση ενός τμήματος του ποταμού όπου διακρίνονται τα βέλη ταχύτητας.	74
Εικόνα 5. 5. προσομοιωμένες τιμές του βάθους νερού από το μοντέλο MIKE 21C (κόκκινο χρώμα), από το μοντέλο MIKE 21 (πράσινο χρώμα), σε σύγκριση με τις παρατηρούμενες τιμές (μπλε χρώμα) για το χρονικό διάστημα 11/11/2011 - 01/12/2011.	75
Εικόνα 5. 6. Χρονοσειρά προσομοιωμένων τιμών συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος στον ποταμό Κοιλιάρη (μπλε χρώμα) σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου (κόκκινο χρώμα) για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης σε λογαριθμικό άξονα y.	77
Εικόνα 5. 7. Α) Θερινή ημέρα (31/08/2011) με πολύ χαμηλή συγκέντρωση αιωρούμενου ιζήματος, Β) Ημέρα με έντονη βροχή (06/02/2012) και υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενου ιζήματος.	80

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2. 1. Τεχνικές Μέτρησης Αιωρούμενου Ιζήματος (Wren, Bennett et al. 2000).	14
Πίνακας 4. 1. Πίνακας συγκεντρώσης αιωρούμενου ιζήματος των δειγμάτων.	43

Πίνακας 4. 2. Πίνακας τιμών συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος, παροχής και συσσωρευμένης βροχόπτωσης σε συγκεκριμένες ημερομηνίες.	46
Πίνακας 4. 3. Μέσο ετήσιο ύψος βροχής ανά απόλυτο υψόμετρο σταθμού.	49
Πίνακας 4. 4. Πίνακας αξιολόγησης της απόδοσης των μοντέλων με τρεις στατιστικούς δείκτες, Moriasi 2007.	68
Πίνακας 5. 1. Δείκτες συσχέτισης των μοντέλων με τις μετρήσεις πεδίου.	75
Πίνακας 5. 2. Πίνακας με τις μετρήσεις συγκέντρωσης από το πεδίο και τις αντίστοιχες προσομοιωμένες τιμές με την αξιολόγηση από τρεις στατιστικούς δείκτες.	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Εισαγωγή

Η ροή των ποταμών αποτελεί αντικείμενο των υδρολογικών μελετών, τα αποτελέσματα των οποίων είναι χρήσιμα για την πρόβλεψη και την αντιμετώπιση ακραίων φαινομένων όπως είναι οι πλημμύρες. Το φυσικό φαινόμενο της πλημμύρας απασχολεί ιδιαίτερα τους ερευνητές τα τελευταία χρόνια, διότι έχει άμεσες επιπτώσεις στις υποδομές και στις γεωργικές καλλιέργειες. Οι ζημιές που προκαλούνται από το φαινόμενο της πλημμύρας επιτείνονται από την μεταφορά λάσπης και άλλων ρυπαντών.

Για το λόγο αυτό, παράλληλα με την ροή του ποταμού στην παρούσα μελέτη εξετάζεται και το αιωρούμενο ιζήμα που αυτή μπορεί να μεταφέρει. Τα ιζήματα παίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στο υδατικό περιβάλλον, διότι είναι υπεύθυνα για την αποθήκευση και τη μεταφορά ενός μεγάλου μέρους θρεπτικών ουσιών και ρύπων. Τα περισσότερα ιζήματα στα επιφανειακά νερά προέρχονται από την διάβρωση της επιφάνειας του εδάφους (κοίτη και όχθες) και περιέχουν ορυκτά συστατικά, που προκύπτουν από τη διάβρωση του βραχώδους υποστρώματος, αλλά και οργανικά συστατικά που προκύπτουν από την διαδικασία σχηματισμού του εδάφους (παραγωγή και αποσύνθεση μικροοργανισμών). Τα οργανικά συστατικά των ιζημάτων είναι πιθανό να προέρχονται και από τις βιολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο υδάτινο σώμα.

Η προσομοίωση και ο έλεγχος των ροών νερού και ιζήματος, είναι ιδιαίτερης σημασίας και ιδιαίτερα στις γεωργικές λεκάνες απορροής της Μεσογείου, οι οποίες χαρακτηρίζονται από ένα μοναδικό μικρο-κλίμα και μία ιδιαίτερη γεωμορφολογία. Οι δύο αυτοί παράγοντες οδηγούν στην δημιουργία εποχιακών χειμάρρων. Κατά τη διάρκεια των θερινών περιόδων οι χείμαρροι είναι στεγνοί, ενώ κατά τη διάρκεια του χειμώνα έχουν αυξημένη ροή και συχνά λαμβάνουν χώρα φαινόμενα ξαφνικών πλημμυρών (flash floods). Οι μεγάλες ταχύτητες στους χειμάρρους είναι υπεύθυνες για τη διάβρωση και τη μεταφορά ιζήματος.

Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται αρχικά η ροή του ποταμού Κοιλιάρη, ο οποίος βρίσκεται στα δυτικά της Κρήτης - Ελλάδα, με δύο διαφορετικά δισδιάστατα υδραυλικά μοντέλα, το MIKE 21 και το MIKE 21C. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται σε πλέγματα υπολογιστικής επίλυσης των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών, που περιγράφουν τη δισδιάστατη ροή. Το μοντέλο MIKE 21 βασίζεται σε ένα ευθύγραμμο πλέγμα τετραγώνων, ενώ το μοντέλο MIKE 21C σε ένα καμπυλόγραμμο πλέγμα τετραγώνων όπου οι γραμμές του πλέγματος ακολουθούν τις γραμμές των όχθων στο ποτάμι. Στην ουσία δεν αλλάζει κάτι στις φυσικές εξισώσεις που χρησιμοποιούν

τα δύο μοντέλα αλλά στην επίλυση τους, δηλαδή στον κάνναβο. Μετά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης υδραυλικών παραμέτρων όπως του ύψους ροής και της ταχύτητας με τις αντίστοιχες μετρήσεις πεδίου προέκυψε ότι το μοντέλο MIKE 21C προσομοιώνει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη ροή σε σχέση με το μοντέλο MIKE 21.

Με βάση τα ανωτέρω επιλέγεται το μοντέλο MIKE 21C για την προσομοίωση της μεταφοράς αιωρούμενου ιζήματος. Σκοπός είναι να βαθμονομηθεί τόσο το υδροδυναμικό μοντέλο όσο και το μοντέλο μορφολογίας, στο λογισμικό MIKE 21C, ώστε τα αποτελέσματα τους να συμφωνούν με τις παρατηρούμενες μετρήσεις ύψους νερού και συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος αντίστοιχα. Με τη χρήση του βαθμονομημένου και επαληθευμένου μοντέλου MIKE 21C μας δίνεται η δυνατότητα δισδιάστατης προσομοίωσης του ύψους νερού στο ποτάμι, της ταχύτητας ροής, της συγκέντρωσης ιζήματος και της αλλαγής της μορφολογίας του καναλιού σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1. Ορισμοί και Βασικές Έννοιες

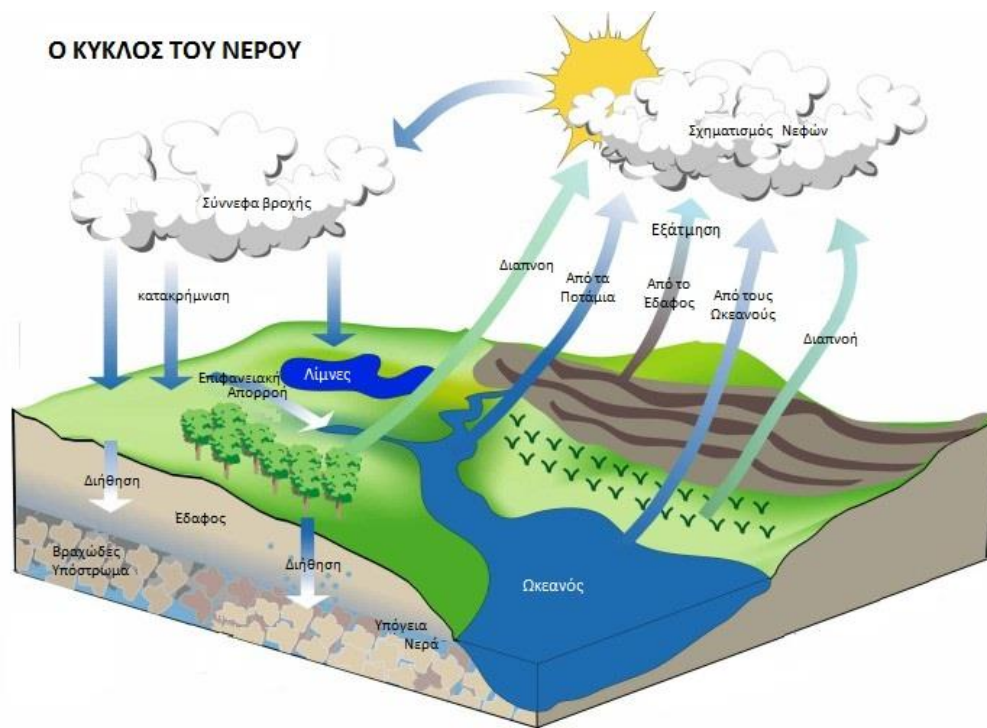
2.1.1. Υδρολογικός Κύκλος

Ο Υδρολογικός κύκλος αποτελεί τη σχηματική περιγραφή μιας σειράς διαδικασιών με τις οποίες το νερό κυκλοφορεί στη φύση μεταξύ ατμόσφαιρας ξηράς και θάλασσας. Σε αυτήν την αλυσίδα των εμφανίσεων το νερό παρουσιάζεται μ' όλες τις πιθανές καταστάσεις: υγρό, αέριο (υδρατμός), στερεό (χιόνι/ χαλάζι).

Η σειρά των εμφανίσεων του νερού στη φύση δεν έχει πρακτικά αρχή και τέλος. Όμως η αρχή θα μπορούσε να τοποθετηθεί στην ατμόσφαιρα όπου το νερό συγκεντρώνεται με μορφή υδρατμών που προέρχονται από την εξάτμιση του νερού προς τις θάλασσες, λίμνες, ποταμούς, έδαφος, βλάστηση κ.λπ.

Οι υδρατμοί μεταφέρονται από αέριες μάζες και μπορεί κάτω από κατάλληλες συνθήκες να συμπυκνωθούν σε σύννεφα και στη συνέχεια με μορφή ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων να επανεμφανιστούν στην επιφάνεια της γης.

Ένα μέρος του νερού που φτάνει στην επιφάνεια της γης συγκρατείται από τη βλάστηση και εξατμίζεται ή διαπνέεται από τα φυτά. Ένα άλλο μέρος του νερού διηθείται στο έδαφος ενώ το μεγαλύτερο μέρος των κατακρημνισμάτων απορρέει επιφανειακά προς τα ρέματα και καταλήγει σε λίμνες και θάλασσες. Κατά την πορεία αυτή ένα μέρος του νερού εξατμίζεται. Το υπόλοιπο του νερού που διηθείται, αποθηκεύεται ως υπόγειο νερό και συχνά εμφανίζεται στην επιφάνεια της γης σε χαμηλότερα σημεία. Τέλος το νερό της θάλασσας με την εξάτμιση επανέρχεται στην ατμόσφαιρα και με τον τρόπο αυτό κλείνει ο υδρολογικός κύκλος (Εικόνα 2.1.) (Τσακίρης, 1995).



Εικόνα 2. 1. Απλοποιημένη γραφική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου (<http://plemenosem.wikispaces.com/>).

2.1.2. Ποταμοί και Χείμαρροι

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το μεγαλύτερο μέρος των κατακρημνισμάτων ρέει επιφανειακά ακολουθώντας την κατεύθυνση της μεγαλύτερης κλίσης και των μικρότερων εμποδίων. Η ροή αυτή του νερού γίνεται διαμέσου του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής, το οποίο αποτελείται στην αρχή από μικρές χαραδρώσεις και στη συνέχεια από μεγαλύτερα ρεύματα (Στεφανίδης 2008)

Οι σπουδαιότερες υδρολογικές κατηγορίες ρευμάτων είναι οι ποταμοί και οι χείμαρροι. Οι διαφορές μεταξύ ποταμών και χειμάρρων συνίστανται στα εξής (Κωτούλας 2001):

Οι **ποταμοί** ρέουν κατά κανόνα σε ευρείες κοιλάδες, έχουν μεγάλη λεκάνη απορροής, πλατιά κοίτη, μεγάλη παροχή, με σχετικά σταθερή δίαυτα, μικρή κλίση πυθμένα και δημιουργούν παρατεταμένες πλημμύρες. Στις λεκάνες τους κυριαρχούν τα τμήματα με ημιπεδινή, λοφώδη και ημιορεινή διαμόρφωση.

Οι **χείμαρροι** ρέουν σε πολύ μικρές κοιλάδες και σε χαράδρες, έχουν μικρή λεκάνη απορροής (έως 300 km²) και κλίση σχετικά έντονη, στενή κοίτη με σημαντική κλίση πυθμένα, μικρή σχετικά

υδατοπαροχή, ανώμαλη δίαιτα και δημιουργούν αιφνίδιες και σύντομες πλημμύρες. Στις λεκάνες τους κυριαρχούν τα τμήματα με ημιορεινή, ορεινή και πολύ ορεινή διαμόρφωση.

Στην Ελλάδα και ιδιαίτερα στην Κρήτη, μεγάλη διακύμανση της υδατοπαροχής εμφανίζουν εκτός από τους χείμαρρους και οι χειμαρροπόταμοι, οι οποίοι είναι κάτι ενδιάμεσο στις δύο κατηγορίες.

Τόσο οι ποταμοί όσο και οι χείμαρροι μπορούν να μεταφέρουν στερεά υλικά (φερτές ύλες). Οι κοίτες των ποταμών τροφοδοτούνται με υλικά, τα οποία προέρχονται κυρίως από τους χείμαρρους (παραπόταμους) που εκβάλουν σ' αυτούς, ενώ οι κοίτες των χειμάρρων εμπλουτίζονται με φερτές ύλες που αποσπώνται από τις γύρω περιοχές, καθώς και από τα πρηνή και τον πυθμένα τους (Στεφανίδης 2008).

2.2. Μεταφορά ιζήματος σε ποτάμι

2.2.1. Κατηγοριοποίηση ιζημάτων

Τα ιζήματα στα επιφανειακά νερά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως καθιζάνοντα και αιωρούμενα. **Καθιζάνοντα στερεά** είναι αυτά που συναντάμε στην κοίτη ενός ποταμού ή μιας λίμνης ενώ **αιωρούμενα στερεά** ονομάζονται εκείνα που συναντάμε στο υδάτινο σώμα (δεν καθιζάνουν) και μεταφέρονται με την κίνηση του νερού (Bartram et al., 1996).

Τα ιζήματα στα ποτάμια μπορούν επίσης να ταξινομηθούν σύμφωνα με το μέγεθος των κόκκων τους σε **συνεκτικά (cohesive)** και **μη-συνεκτικά (non-cohesive)**. Τα συνεκτικά ιζήματα αποτελούνται κυρίως από πηλό και ιλύ. Πρόκειται για λεπτόκοκκα υλικά, τα οποία προσροφούν εύκολα οργανική ύλη όταν αυτή εισάγεται σε ένα υδάτινο σύστημα. Τα βαρέα μέταλλα και οι οργανικές χημικές ουσίες είναι επίσης ιδιαίτερα επιρρεπή στην προσρόφηση σε λεπτόκοκκα ιζήματα. Τα μη-συνεκτικά ιζήματα αποτελούνται κυρίως από μικρής και μεσαίας διαμέτρου άμμου και σε γενικές γραμμές δεν συνδέονται με μολυσματικούς παράγοντες. Δεν υπάρχει σαφές όριο μεταξύ συνεκτικού και μη συνεκτικού ιζήματος. Τα μεγέθη των ιζημάτων με διάμετρο κόκκων μικρότερη από 2μm (άργιλος) γενικά θεωρούνται ως συνεκτικά ιζήματα και ιζήματα με διάμετρο μεγέθους μεγαλύτερου από 63 μm ως μη-συνεκτικά. Ιλύς με μέγεθος κόκκων μεταξύ 2μm και 63μm μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μεταξύ συνεκτικού και μη συνεκτικού ιζήματος (Yang, 2006). Υλικό διαμέτρου μικρότερης των 0.45 μm θεωρείται διαλυμένο στο νερό.

2.2.2. Η διαδικασία της διάβρωσης

Η διαδικασία της διάβρωσης μπορεί να περιγραφεί σε τρία στάδια: την αποκόλληση, τη μεταφορά και την εναπόθεση. Η αποκόλληση των ιζημάτων από την επιφάνεια του εδάφους είναι αποτέλεσμα της βροχόπτωσης και της επιφανειακής απορροής. Η απόσπαση λόγω βροχόπτωσης προκαλείται από τις τοπικά έντονες διατμητικές τάσεις που δημιουργούνται στην επιφάνεια του εδάφους από την επίδραση βροχής. Ομοίως, η επιφανειακή απορροή προκαλεί μια διατμητική τάση στην επιφάνεια του εδάφους η οποία, αν υπερβαίνει τη συνεκτική αντοχή του εδάφους, δηλαδή την κρίσιμη διατμητική τάση, έχει ως αποτέλεσμα την απόσπαση του ιζήματος (Merritt et al., 2003).

Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τύποι διάβρωσης: η επιφανειακή, η διάβρωση σε μικρά ρυάκια, η διάβρωση σε ρέμα και η διάβρωση μέσα στη ροή ποταμού, αναλυτικότερα

- Η επιφανειακή διάβρωση αναφέρεται στην ομοιόμορφη απόσπαση και αφαίρεση χώματος, ιζήματος ή σωματιδίων εδάφους από την επιφάνεια λόγω βροχής ή χερσαίας ροής και κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την πλαγιά (Bonell et al., 2005).
- Η διάβρωση σε ρυάκι συμβαίνει όταν το νερό που κινείται στη επιφάνεια, παρασέρνοντας στερεά υλικά, ακολουθεί μικρές χαραδρώσεις του εδάφους. Η διάβρωση σε ρυάκι και η διάβρωση επιφανειακής απορροής συχνά παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία ως μια κατηγορία, διότι τα ρυάκια δεν έχουν μεγάλο βάθος και επηρεάζονται από τον αγροτικό παράγοντα (Merritt et al., 2003).
- Η διάβρωση σε ρέμα, σε αντίθεση με τη διάβρωση σε ρυάκι, απαντάται σε κανάλια συμπυκνωμένης ροής με μεγάλο βάθος που δεν επηρεάζονται από την καλλιέργεια της γης. Στην κατηγορία αυτή η βροχόπτωση δεν παίζει σημαντικό ρόλο στην αντίσταση της ροής ή στην αποκόλληση σωματιδίων. Τη ροή νερού και τη διάβρωση στην περίπτωση αυτή προκαλεί η κλίση του εδάφους της περιοχής (Loch et al., 1996).
- Η διάβρωση μέσα σε ποτάμι περιλαμβάνει την άμεση απομάκρυνση των ιζημάτων από τα πρανή του ποταμού (πλευρική διάβρωση) ή την κοίτη του. Επομένως κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής ροής, ένα μεγάλο μέρος του ιζήματος που μεταφέρεται μέσω του δικτύου του ποταμού μπορεί να προέρχεται από το ίδιο το κανάλι (Merritt et al., 2003).

2.2.3. Τρόποι μεταφοράς ιζηματος σε ποτάμια

Η μεταφορά ιζημάτων είναι αποτέλεσμα της κίνησης του νερού. Κατά τη μεταφορά σε ένα σώμα νερού, τα σωματίδια ιζηματος διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: αιωρούμενο φορτίο (suspended load) το οποίο περιλαμβάνει πηλό, άργιλο και άμμο, το χονδρό και σχετικά ανενεργό φορτίο κοίτης (bed load) και το φορτίο αναπήδησης (saltation load) (Bartram et al., 1996).

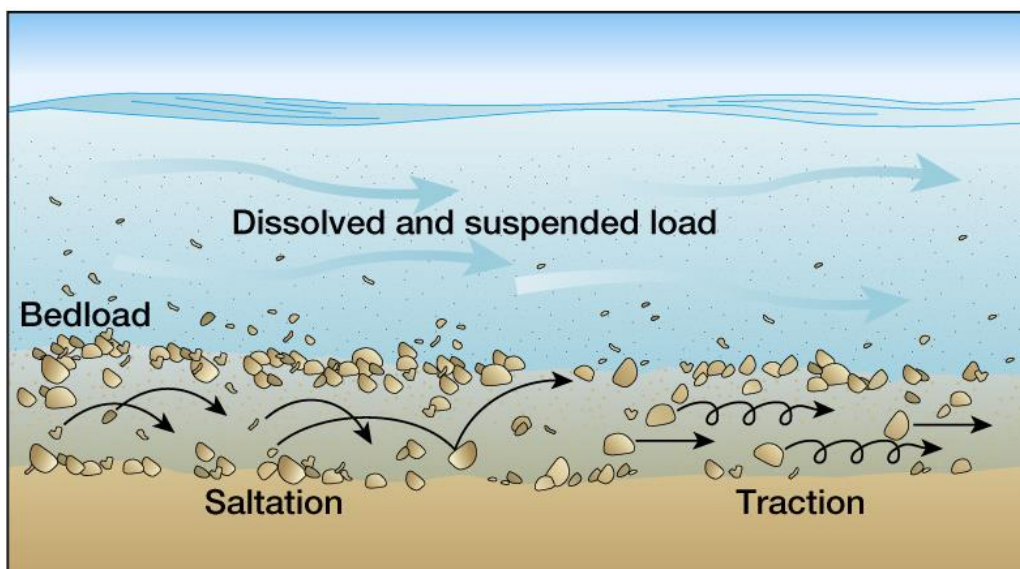
Το **αιωρούμενο φορτίο (suspended load)** περιλαμβάνει υλικά στο μέγεθος του πηλού, του αργίλου και της άμμου (<63μm σωματιδιακής διαμέτρου) και συνήθως αναφέρεται ως «λεπτόκοκκο ίζημα». Η ποσότητα του αιωρούμενου φορτίου είναι ευθέως ανάλογη των μεγάλων ταχυτήτων του νερού στο ποτάμι και προέρχεται κυρίως από την διάβρωση της κοίτης και των όχθων του ποταμού. Σε πολλά ποτάμια, τα αιωρούμενα ιζήματα αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του ολικού μεταφερόμενου φορτίου (total load).

Το **φορτίο κοίτης (bed load)** αποτελείται από υλικά όπως χαλίκια και βότσαλα τα οποία κυλάνε κατά μήκος του ποταμού. Το φορτίο κοίτης συναντάται κυρίως σε περιόδους μεγάλων παροχών ή σε ανάγλυφα ποταμών με απότομες κλίσεις. Σπάνια όμως το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε περιοχές με χαμηλό υψόμετρο.

Το **φορτίο αναπήδησης (saltation load)** είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα ιζήματα που βρίσκονται ανάμεσα στις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Τα ελαφρύτερα σωματίδια της κοίτης ανασηκώνονται από αυτήν όταν το νερό έχει μεγάλη ταχύτητα, αλλά παραμένουν αρκετά βαριά για να αιωρηθούν και βυθίζονται ξανά, προκαλώντας έτσι το φαινόμενο της αναπήδησης.

Οι δύο τελευταίες κατηγορίες δεν αποτελούν συνήθως αντικείμενο υδρολογικών μελετών. Ενώ η μελέτη των αιωρούμενων ιζημάτων στα ποτάμια γίνεται ολοένα και πιο σημαντική καθώς αυξάνεται η ανάγκη να αξιολογηθούν οι ροές των θρεπτικών ουσιών και ρύπων. Ένα από τα σοβαρότερα περιβαλλοντικά προβλήματα που συμβάλει στην δημιουργία αιωρούμενων ιζημάτων, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι η διάβρωση. Παρά το γεγονός ότι η διάβρωση είναι ένα φυσικό φαινόμενο, το ποσοστό της απώλειας του εδάφους αυξάνεται σημαντικά από μη δόκιμες γεωργικές πρακτικές, όπως είναι η χρήση μεγάλων γεωργικών μηχανημάτων (π.χ. τρακτέρ) που καταστρέφουν τους αναβαθμούς και η υπερβόσκηση, οι οποίες οδηγούν με τη σειρά τους στην αύξηση των αιωρούμενων ιζημάτων στα γλυκά ύδατα (Bartram et al., 1996).

Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζονται οι τρεις τρόποι μεταφοράς ιζηματος.



Εικόνα 2. 2. Τρόποι μεταφοράς ιζήματος σε ποτάμια.

2.2.4. Αιωρούμενα στερεά σε ποτάμια συστήματα.

Η μεταφορά αιωρούμενων στερεών, από αγροτικές περιοχές στα ποτάμια συστήματα, είναι υπεύθυνη για την υποβάθμιση των υδάτων λόγω της μεταφοράς ρύπων (φυτοφάρμακα, θρεπτικές ουσίες, βαρέα μέταλλα και άλλες τοξικές ουσίες). Το φαινόμενο των έντονων βροχοπτώσεων είναι ένα φυσικό φαινόμενο υπεύθυνο για την αύξηση της μεταφοράς ιζήματος μέσα σε ποτάμια και λίμνες (Ramos et al., 2015).

Όταν υψηλής έντασης βροχές πέφτουν πάνω σε ξηρό έδαφος μετά από μακρές περιόδους ξηρασίας προκαλείται πολύ γρήγορη και έντονη επιφανειακή απορροή. Οι πρώτες εκδηλώσεις των ξαφνικών αυτών πλημμυρών (flash floods) μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ιζημάτων και ρύπων τόσο στις αστικές όσο και στις αγροτικές περιοχές. Οι χείμαρροι και τα ποτάμια παραλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του ετήσιου φορτίου ρύπανσης από τα λίγα πλημμυρικά γεγονότα τα οποία συνήθως διαρκούν ελάχιστες ώρες (Moraetis et al., 2010).

Μέσα από επιστημονικές μελέτες έχει αποδειχθεί ότι οι αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου και των παρόχθιων οικοσυστημάτων αυξάνει, καθώς τα επίπεδα θολότητας, αρά και η συγκέντρωση ιζήματος, αυξάνονται. Το αποδεκτό εύρος της θολρότητας εξαρτάται από το μέγεθος και τις τοπικές συνθήκες του ποταμού που μελετάται. Παρ'όλα αυτά, ένας γενικός οδηγός για μικρά ποτάμια, όπως τα ποτάμια που συναντάμε στο μεγαλύτερο μέρος της Ελλάδας, είναι ότι η θολότητα πάνω από 5 NTU μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία (WHO,

2003, Kourgialas et al., 2013). Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η μελέτη και ο έλεγχος της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών σε ποτάμια συστήματα γεωργικών λεκανών απορροής.

2.2.5. Τρόποι μέτρησης των αιωρούμενων στερεών σε ποτάμια συστήματα

Η μέτρηση του αιωρούμενου ιζήματος αποτελεί μία δύσκολη πτυχή της έρευνας για τη μεταφορά ιζήματος σε ποτάμια. Ακριβείς μετρήσεις αιωρούμενου ιζήματος είναι δύσκολο να επιτευχθούν, διότι το φορτίο του αιωρούμενου ιζήματος είναι συνεχώς μεταβαλλόμενο στον χώρο και το χρόνο (Nerantzaki, 2014). Στην ενότητα αυτή περιγράφονται κάποιες μεθοδολογίες μέτρησης της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών.

Σύμφωνα με τους Bartram et al. (1996) υπάρχουν τέσσερις κυρίως τύποι δειγματοληψίας αιωρούμενου ιζήματος:

- ολοκληρωμένοι δειγματολήπτες (integrated samplers),
- δειγματολήπτες στιγμιαίας αρπαγής (instantaneous grab samplers),
- δειγματολήπτες αντλίας (pump samplers), και
- παγίδες ιζήματος (sedimentation traps)

Η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών αυξάνει όσο βαθαίνει ο πυθμένας του καναλιού. Αυτός ο διαχωρισμός του υλικού σύμφωνα με το μέγεθος των κόκκων απαιτεί τεχνικές δειγματοληψίας που λαμβάνουν δείγμα από περιοχές με διαφορετικές συγκεντρώσεις ιζήματος στο κάθετο προφίλ του ποταμού.

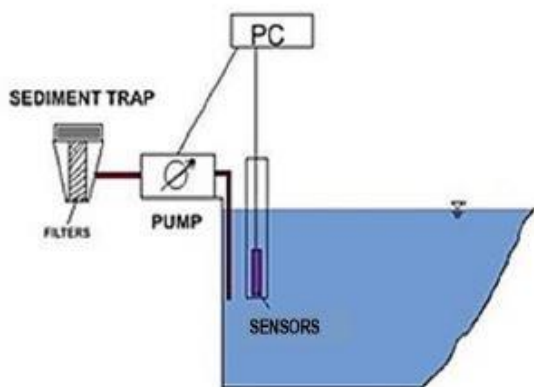
Η Μέθοδος παγίδευσης ιζήματος, είναι η μέθοδος που θα εστιάσουμε, γιατί είναι η τεχνική με την οποία πραγματοποιήθηκε η συλλογή δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία. Επίσης γίνεται παράθεση ενός παραδείγματος για κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες.

Παγίδες ιζήματος (sedimentation traps)

Σύμφωνα με τους Bloesch et al. (1980) η πρώτη χρήση της παγίδας ιζήματος έγινε από τον Albert Heim στις αρχές του 1900. Μόνο από το 1950 και μετά όμως οι παγίδες ιζήματος είναι ένα δημοφιλές εργαλείο για την έρευνα σε ποτάμια, λίμνες και ωκεανούς. Πολλοί μελετητές (Bloesch et al., 1980, Gardner, 1980, Butman et al., 1986, Rosa et al., 1994) έχουν εργασθεί σχολαστικά για την βελτίωση και την εφαρμογή αυτής της τεχνικής.

Μέχρι τώρα, η εκτίμηση του αιωρούμενου ιζήματος σε ποτάμια διεξάγονταν στο εργαστήριο με διήθηση τυχαίων δειγμάτων νερού. Η τεχνική αυτή παρέχει μόνο μια πρόχειρη εκτίμηση της μεταφοράς ιζημάτων. Για να ξεπεραστεί αυτό, καθώς και η έλλειψη αντιπροσωπευτικών στοιχείων μεταφοράς φερτών υλών κατά τη διάρκεια ακραίων φαινομένων ροής (π.χ. πλημμύρες), οι Sibetheros et al 2013, παρουσίασαν μια συσκευή αυτοματοποιημένης δειγματοληψίας ιζημάτων (Sediment Trap), η οποία χρησιμοποιεί τη θολότητα και το επίπεδο του νερού ως έναυσμα για την έναρξη της μέτρησης. Όταν ένας καθορισμένος όγκος νερού περνά από ένα σημείο ελέγχου, ο μετρητής ροής ενεργοποιεί ένα αυτόματο δειγματολήπτη ανάληψης ενός όγκου (50ml-500ml) του δείγματος. Τα δείγματα αυτά είναι γνωστά ως κλάσματα (aliquots). Ο δειγματολήπτης θα συνεχίσει να αντλεί δείγματα σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα. Σε υψηλότερους ρυθμούς ροής, οι δειγματοληψίες πραγματοποιούνται συχνότερα και το σύνολο όλων αυτών των κλασμάτων είναι το σύνθετο δείγμα σταθμισμένης ροής. Η καινοτομία του συστήματος αυτού είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχει κανένας περιορισμός σχετικά με τον όγκο του δείγματος του νερού, διότι το σύνθετο δείγμα περνά μέσα από το φίλτρο και μόνο το αιωρούμενο ίζημα διατηρείται. Μια άλλη διαφορά με τις συνηθισμένες αναλογικής ροής τεχνικές δειγματοληψίας νερού είναι ότι, τώρα αυτό που αλλάζει σε αναλογία προς τη ροή είναι ο ρυθμός άντλησης, και όχι η πυκνότητα των δειγμάτων (Nerantzaki, 2014).

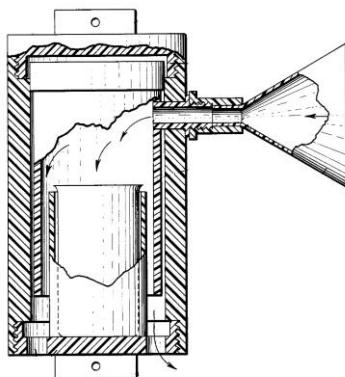
Στην Εικόνα 2.3.α απεικονίζεται η εγκατάσταση του συστήματος: το ύψος του νερού και αισθητήρες θολερότητας, και η αντλία που εκκινεί τη συλλογή όταν λάβει σήμα. Στη συνέχεια, το νερό περνά μέσα από την παγίδα των ιζημάτων, όπου φιλτράρεται. Στην Εικόνα 2.3.β απεικονίζεται η πραγματική συσκευή που λειτουργεί με μπαταρία, το ηλεκτρονικό σύστημα και η μπαταρία είναι μέσα στην παγίδα, ενώ η αντλία και το φίλτρο είναι στην εξωτερική πλευρά της.



Εικόνα 2. 3. α) σχηματική απεικόνιση του συστήματος αυτοματοποιημένης δειγματοληψίας ιζημάτων, β) φωτογραφία της συσκευής. (Nerantzaki, 2014)

Ολοκληρωμένοι δειγματολήπτες (integrated samplers)

Ο Scrudto (1988) δημιούργησε έναν in-situ ολοκληρωμένο δειγματολήπτη (in-situ integrated sampler), ο οποίος βασίζεται στην φυσική διαδικασία της καθίζησης και συλλέγει συνεχώς αιωρούμενα ιζήματα από ένα ρέον ρεύμα για παρατεταμένες χρονικές περιόδους. Ένα ανάντη χωνί συλλαμβάνει ένα μέρος του ρέοντος ρεύματος και το κατευθύνει σε ένα θάλαμο ιζήματος, όπου η ροή επιβραδύνεται επαρκώς για να προκληθεί καθίζηση του ιζήματος. Ένα δοχείο τοποθετείται μέσα στο θάλαμο το οποίο συλλέγει το ίζημα και, μέσω κάποιων οπών του, επιτρέπει στο επιπλέον νερό να διαφύγει από το θάλαμο. Ένας πάσσαλος τοποθετείται στην κοίτη του ρέματος ο οποίος χρησιμοποιείται για τον προσανατολισμό και την τοποθέτηση του δειγματολήπτη σε ένα επιθυμητό βάθος.



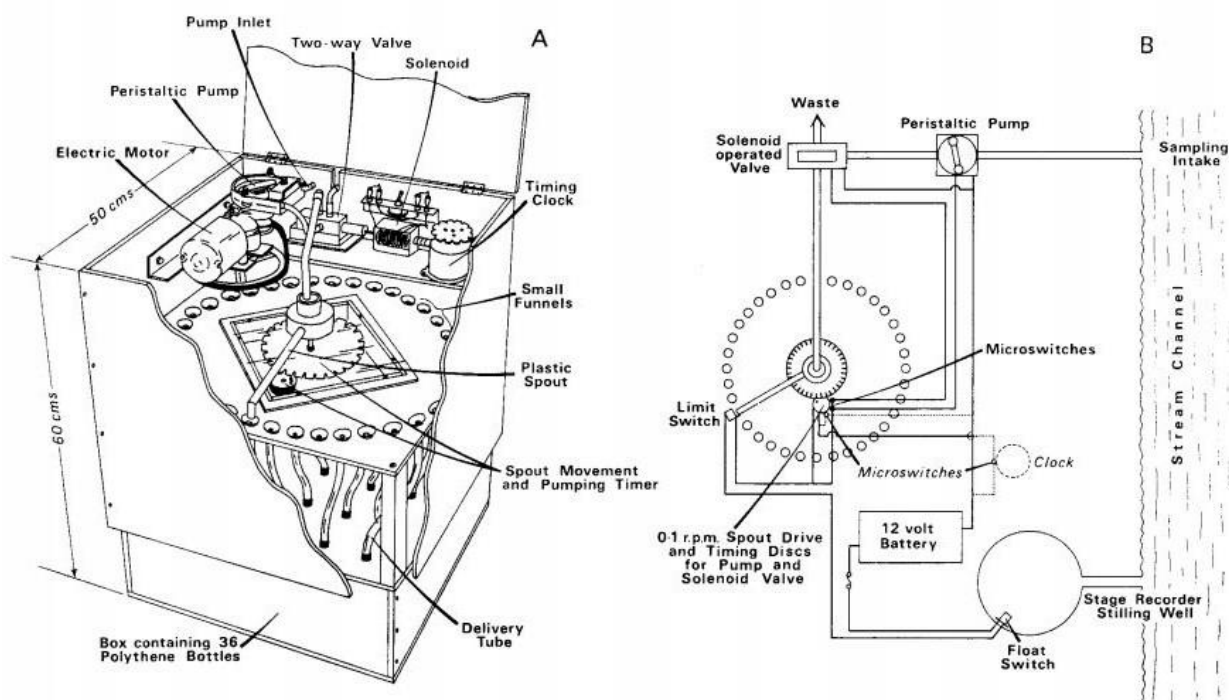
Εικόνα 2. 4. Σχηματική απεικόνιση του ολοκληρωμένου δειγματολήπτη (Scrudto, 1988).

Δειγματολήπτες στιγμιαίας αρπαγής (instantaneous grab samplers)

Η πιο γνωστή μέθοδος στιγμιαίας δειγματοληψίας είναι η δειγματοληψία με φιάλη (bottle sampling), όπου ένα δείγμα νερού – ιζήματος συλλαμβάνεται ισοκινηματικά με τη βύθιση μίας φιάλης στο νερό του ποταμού. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση του δείγματος στο εργαστήριο. Είναι μία αποδεκτή μέθοδος, καλά τεκμηριωμένη, και χρησιμοποιείται ευρέως. Το βάθος και το σημείο ενσωμάτωσης δειγματοληπτών πρέπει να επιτρέπουν να λαμβάνονται δείγματα σχεδόν σε ολόκληρο το βάθος ρεύματος. Η δειγματοληψία με φιάλη γενικά θεωρείται το πρότυπο βάσει του οποίου οι άλλοι τύποι δειγματοληπτών βαθμονομούνται. Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η κακή χρονική ανάλυση. Σε αντίθεση με αυτοματοποιημένες μεθόδους, όπως η αντλία δειγματοληψίας, το προσωπικό πρέπει να είναι σε ετοιμότητα για τη λήψη δειγμάτων. Αυτό περιλαμβάνει συχνά την εργασία αργά τη νύχτα σε συνθήκες καταιγίδας (Wren et al., 2000).

Δειγματολήπτες αντλίας (pump samplers)

Οι Walling et al. (1971) κατασκεύασαν και εγκατέστησαν σε μια μικρή λεκάνη απορροής έναν απλό δειγματολήπτη αιωρούμενου ιζήματος που λειτουργεί με άντληση (pumping suspended sediment sampler). Τα αποτελέσματα παρείχαν χρήσιμα στοιχεία για τις μεταβολές του αιωρούμενου ιζήματος και της συγκέντρωσης του διαλυμένου φορτίου κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας και για τους παράγοντες που ελέγχουν τα επίπεδα της συγκέντρωσης αιωρούμενων φερτών υλών σε ένα ρεύμα. Τα κύρια μέρη αυτού του τύπου δειγματολήπτη είναι η αντλία, το σύστημα χορήγησης του δείγματος σε ένα σύνολο φιαλών, ο μηχανισμός χρονισμού για τον έλεγχο του διαστήματος άντλησης και ένας μηχανισμός διακοπής για να περιορίζει τη λειτουργία του δειγματολήπτη σε περιόδους καταιγίδας - μεγάλης απορροής.



Εικόνα 2. 5. Αντλία δειγματοληψίας αιωρούμενου ιζήματος, Α) το γενικό σχέδιο και Β) το σύστημα λειτουργίας (Walling et al., 1971)

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται συνοπτικά μερικές ακόμη τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για τη δειγματοληψία και τη μέτρηση της συγκέντρωσης του αιωρούμενου ιζήματος.

Πίνακας 2. 1. Τεχνικές Μέτρησης Αιωρούμενου Ιζήματος (Wren et al., 2000).

Τεχνική	Βασική Λειτουργία
Ακουστική	Ήχος που αναδιαχέεται από ιζήματα χρησιμοποιείται για να καθορίσει το μέγεθος και την κατανομή της συγκέντρωσης.
Εστιασμένη δέσμη ανάκλασης	Μετριέται ο χρόνος αντανάκλασης μίας δέσμης λέιζερ σε σωματίδια ιζήματος
Διάθλαση με Laser	Μετριέται η γωνία διάθλασης μίας δέσμης λέιζερ σε σωματίδια ιζήματος
Πυρηνική	Μετριέται ο επανασκεδασμός ή η μετάδοση των ακτινών γάμμα ή Χ μέσω δειγμάτων νερού-ιζήματος
Οπτική	Μετριέται ο επανασκεδασμός ή η μετάδοση του ορατού φωτός ή της υπέρυθρης ακτινοβολίας μέσω δειγμάτων νερού-ιζήματος
Απομακρυσμένη φασματική ανάκλαση	Το φως που ανακλάται και διαχέεται από ένα σώμα νερού μετριέται από απόσταση.

2.3. Εξισώσεις Υδραυλικής Προσομοίωσης σε Ποτάμια

Τα μοντέλα προσομοίωσης της ροής του νερού στα ποτάμια χρησιμοποιούν τεχνικές που βασίζονται κυρίως στην διατήρηση της μάζας και σε μια απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης διατήρησης της ορμής. Κάποιες από αυτές τις τεχνικές παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό.

Εξίσωση Manning

Λόγω της απλοποιημένης μορφής της και των ικανοποιητικών της αποτελεσμάτων η εξίσωση Manning έχει γίνει η πιο διαδεδομένη από όλες τις εξισώσεις ομοιόμορφης ροής σε ανοιχτό κανάλι για τον υπολογισμό ροής (Te Chow, 1959). Η εξίσωση Manning με την παρακάτω μορφή χρησιμοποιείται συνήθως για τον υπολογισμό παροχής σε φυσικό κανάλι.

$$Q = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} S_o^{1/2} \quad (2.1)$$

Όπου:

Q: η παροχή (L^3/T)

A: η διατομή της ροής (L^2)

n: ο συντελεστής τραχύτητας Manning ($M^{1/3} T$)

R: η υδραυλική ακτίνα του ρεύματος (L)

S_o: η κλίση του καναλιού κατά το διαμήκες προφίλ (αδιάστατο)

Η εξίσωση (2.1) αναπτύχθηκε για συνθήκες ομοιόμορφης ροής όπου η έκταση, το βάθος και η ταχύτητα είναι σταθερά σε όλο μήκος του καναλιού (Thomsen et al., 1991). Η εξίσωση αυτή ισχύει επίσης και για την μη ομοιόμορφη ροή, αρκεί η ενεργειακή μεταβολή να τροποποιηθεί έτσι ώστε να αντικατοπτρίζει μόνο τις απώλειες λόγω οριακής τριβής (Phillips et al., 2006).

Εξίσωση Κινηματικού Κύματος (Kinematic – wave equation)

Η εξίσωση κινηματικού κύματος είναι μια απλοποιημένη προσέγγιση των εξισώσεων Saint-Venant για τον υπολογισμό της ροής μέσω ορθογώνιων ή μη-πρισματικών καναλιών. Η εξίσωση κινηματικού κύματος για δρομολόγηση ροής σε ρέματα μπορεί να γραφτεί (Miller, 1984):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2.2)$$

Όπου:

A: η βρεχόμενη επιφάνεια διατομής (L^2)

Q: η παροχή (L^3/T)

Διάφορες μορφές της εξίσωσης ορμής συνδυάζονται με την εξίσωση (2.2) για τη δρομολόγηση της ροής προς τα κατάντη. Η μορφή της εξίσωσης ορμής λαμβάνει διάφορες μορφές ανάλογα με το πως οι διαστάσεις των διατομών και οι κλίσεις του καναλιού θα απεικονίζονται στην εξίσωση του Manning.

Η προσέγγιση κινηματικού κύματος αγνοεί τη δυναμική συνιστώσα της ροής η οποία αντιπροσωπεύεται από τα παράγωγα του όρου στην πιο ολοκληρωμένη μορφή της εξίσωσης ορμής στις εξισώσεις Saint-Venant. Υποθέτουμε ότι οι βαρυτικές δυνάμεις εξισορροποούνται με δυνάμεις τριβής έτσι ώστε:

$$S_o = S_f \quad (2.3)$$

Όπου:

S_o : η κλίση του καναλιού στο διαμήκες προφίλ (αδιάστατο)

S_f : η κλίση τριβής του καναλιού στο διαμήκες προφίλ (αδιάστατο)

Εξίσωση Διάχυσης Κύματος

Μια άλλη λιγότερο απλοποιημένη προσέγγιση των εξισώσεων Saint-Venant συνδυάζει την χωρική παράγωγο, από την εξίσωση ορμής, με την εξίσωση συνέχειας, η οποία οδηγεί σε ένα δεύτερο παραγωγικό όρο στην εξίσωση συνέχειας (Liggett, 1975). Ο δεύτερος παραγωγικός όρος στην εξίσωση συνέχειας προκαλεί το κύμα πλημμυρών να εξαπλωθεί ανάντη ελαφρώς και συνήθως αναφέρεται ως αναλογία διάχυσης για τη δυναμική συνιστώσα της εξίσωσης ορμής.

Η απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης ορμής:

$$s_f - \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (2.4)$$

Η εξίσωση (2.4) επιτρέπει την κατευθυνόμενη ροή προς τα ανάντη. Ο Brakensiek (1965) έλυσε τις εξισώσεις με μια πεπλεγμένη (implicit) τεχνική επίλυσης πεπερασμένων διαφορών στο κέντρο τεσσάρων σημείων. Οι Harder et al. (1966) χρησιμοποίησαν μια ρητή (explicit) τεχνική επίλυσης πεπερασμένων διαφορών. Το μη-γραμμικό μοντέλο διάχυσης κύματος αποτελεί μια σημαντική βελτίωση του κινηματικού μοντέλου, λόγω της ένταξης στην εξίσωση (2.4) του όρου της κλίσης επιφανειακών υδάτων ($\partial h / \partial x$). Ο όρος αυτός επιτρέπει στο μοντέλο διάχυσης να περιγράψει την εξασθένηση (φαινόμενο διάχυσης) της πλημμύρας στο κατάντη άκρο του καναλιού για την αντιπροσώπευση του φαινομένου της επιστροφής νερού μέσα στο ποτάμι (backwater effects). Δεν χρησιμοποιεί τους αδρανείς όρους της εξίσωσης ορμής, ως εκ τούτου, περιορίζεται στην ελαφρά επιβράδυνση της ανόδου του πλημμυρικού κύματος σε κανάλια ομοιόμορφης γεωμετρίας.

2.4. Δισδιάστατα Υδραυλικά Μοντέλα

Τα υδραυλικά μοντέλα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: μονοδιάστατα (1D) και δισδιάστατα (2D). Τα μονοδιάστατα αριθμητικά μοντέλα βασίζονται κυρίως σε επιλύσεις

πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι η πιο δημοφιλής λόγω του συγκριτικά μικρού υπολογιστικού χρόνου. Υπάρχουν διάφορα εργαλεία λογισμικού για την δυναμική 1D προσομοίωση της ροής σε ποταμούς, όπως το μοντέλο HEC River Analysis System από το Army Corps of Engineers των ΗΠΑ (USACE, 2002) και το υδραυλικό μοντέλο MIKE 11 που αναπτύχθηκε από την DHI (DHI, 2001), τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς.

Τα μονοδιάστατα μοντέλα, αν και απλά στη χρήση, δεν παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με το πεδίο ροής. Τα μοντέλα δύο διαστάσεων έχουν το πλεονέκτημα της προσομοίωσης της ροής με μεγάλη ακρίβεια και έχουν την δυνατότητα της παραγωγής λεπτομερών δισδιάστατων χαρτών. Παρ' όλα αυτά, το μειονέκτημα των μοντέλων 2D είναι ότι απαιτούν σημαντικό υπολογιστικό χρόνο και λεπτομερές πλέγμα που απαιτεί μεγάλη μνήμη.

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια ανασκόπηση των δισδιάστατων υδραυλικών μοντέλων που συναντάμε στην βιβλιογραφία. Τα υδροδυναμικά αυτά μοντέλα είναι βασισμένα στις εξισώσεις δύο διαστάσεων για την προσομοίωση της ροής του νερού μέσα σε ποτάμια συστήματα.

Μοντέλο LISFLOOD-FP

Το LISFLOOD-FP είναι ένα μοντέλο πλέγματος (raster-based model) για την προσομοίωση πλημμύρας που βασίζεται στην υψηλή ανάλυση τοπογραφικών δεδομένων (Bates et al., 2000). Η ροή μέσα στο κανάλι προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας μία 1D προσέγγιση του πλημμυρικού κύματος και την απόκριση της ροής σε κλίση ελεύθερης επιφάνειας, η οποία μπορεί να περιγραφεί από τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής. Η ροή στις πλημμυρικές ζώνες ομοίως περιγράφεται από τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής οι οποίες επιλύονται πάνω σε ένα πλέγμα το οποίο αντιπροσωπεύει τα δισδιάστατα πεδία δυναμικής ροής (Horritt et al., 2002).

Μοντέλο TELEMAC-2D

Το μοντέλο TELEMAC-2D (Galland et al., 1991) εφαρμόζεται σε προσομοιώσεις ποτάμιων πλημμυρών (Bates et al., 1998). Το μοντέλο επιλύει τις δισδιάστατες εξισώσεις ροής, γνωστές και ως εξισώσεις Saint Venant σε υπολογιστικό πλέγμα.

Μοντέλο TUFLOW

Το μοντέλο TUFLOW είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιεί τους κώδικες πεπερασμένων διαφορών, με την πεπλεγμένη τεχνική επίλυσης ADI (alternating direction implicit). Οι εξισώσεις που επιλύονται είναι οι πλήρεις δισδιάστατες εξισώσεις για τη ροή σε ελεύθερη επιφάνεια (Syme, 2001).

Μοντέλο JFLOW

Το JFLOW είναι ένα 2D εργαλείο μοντελοποίησης των πλημμυρών, αναπτύχθηκε ως μια λύση να αξιοποιηθούν πλήρως οι λεπτομέρειες των διαθέσιμων τοπογραφικών δεδομένων και να αντιμετωπιστεί η ανάγκη να διερευνηθούν χερσαίες διαδρομές ροής με περισσότερες λεπτομέρειες γρηγορότερα από ότι ήταν μέχρι σήμερα δυνατό. Το μοντέλο ακολουθεί ένα υποκείμενο μοντέλο εδάφους μέσα από ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) και επιλύει μια απλουστευμένη μορφή των 2D υδροδυναμικών εξισώσεων ροής (Bradbrook, 2006).

2.5. Μοντέλα Προσομοίωσης Μεταφοράς Ιζήματος σε Ποτάμια

Σύμφωνα με τους Merritt et al. (2003) υπάρχει ένα μεγάλο εύρος από μοντέλα προσομοίωσης μεταφοράς ιζήματος. Γενικά στη βιβλιογραφία τα μοντέλα διάβρωσης και μεταφοράς ιζήματος κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις φυσικές διεργασίες που προσομοιώνονται από το μοντέλο, τους αλγόριθμους που περιγράφουν αυτές τις διαδικασίες και την εξάρτηση των δεδομένων από το μοντέλο. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- Εμπειρικά ή στατιστικά μοντέλα (Empirical or Statistical),
- Εννοιολογικά μοντέλα (Conceptual), και
- Μοντέλα βασισμένα στην φυσική (Physics based)

Η διάκριση μεταξύ των μοντέλων δεν είναι πάντα σαφής και ως εκ τούτου μπορεί να είναι κάπως υποκειμενική. Στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι πιθανό το μοντέλο να περιέχει ένα μίγμα των παραπάνω τριών κατηγοριών.

Στην παρούσα εργασία, θα γίνει αναφορά κυρίως σε μοντέλα που προσομοιώνουν την ροή και την μεταφορά ιζήματος μέσα σε ποτάμι. Πολλοί αλγόριθμοι που περιγράφουν την διάβρωση και την μεταφορά ιζήματος έχουν ενσωματωθεί σε υδρολογικά και υδραυλικά μοντέλα με σημαντικότερο τον αλγόριθμο της θεμελιώδους εξίσωσης μεταφοράς ενέργειας για μεταφορά και εναπόθεση ιζήματος κατά μήκος μιας κοίτης (Engelund et al., 1968):

$$q_T = 0.04 \frac{(S \cdot h)^{3/2}}{(s-1)^2 \cdot d_{50} \cdot g^{1/2}} \cdot v^2 = 0.04 \left(\frac{2 \cdot g}{f} \right)^{1/6} \frac{(S \cdot q)^{5/3}}{(s-1)^2 \cdot d_{50} \cdot g^{1/2}} \quad (2.5)$$

Όπου:

q_T : η ποσότητα του μεταφερόμενου ιζήματος ($\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

S : η κλίση της ενέργειας

s : ο λόγος του ειδικού βάρους ή της πυκνότητας ιζήματος στο νερό

v : η ταχύτητα ροής (m s^{-1})

h : το βάθος νερού (m)

f : ο συντελεστής τραχύτητας

d_{50} : η μέση διάμετρος κόκκου στο δείγμα (μm)

q : η απορροή ($\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

Στην παρούσα εργασία, θα γίνει αναφορά κυρίως σε μοντέλα που προσομοιώνουν την ροή και την μεταφορά ιζήματος μέσα σε ποτάμι. Τα μοντέλα που περιγράφονται παρακάτω διαφέρουν σημαντικά στη μεταχείριση των διεργασιών παραγωγής φερτών υλικών, της μεταφοράς και της εναπόθεσης αλλά και στην κλίμακα εφαρμογής και λειτουργίας.

Μοντέλο HSPF

Το Υδρολογικό Πρόγραμμα Προσομοίωσης, Fortran (HSPF) αναπτύχθηκε με βάση το μοντέλο Stanford Watershed (1960), για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής και

της ποιότητας του νερού (άζωτο, φώσφορος, αιωρούμενα ιζήματα και άλλοι τοξικοί οργανικοί ή ανόργανοι ρύποι) (Walton et al., 1996). Πρόκειται για ένα εννοιολογικό μοντέλο όπου οι λεκάνες απορροής χωρίζονται σε υδρολογικά ομοιογενή τμήματα γης. Η ποσότητα και ποιότητα του νερού υπολογίζεται για κάθε χρήση γης σε ένα τμήμα γης. Η ροή του νερού, τα ιζήματα και οι χημικές ροές στη συνέχεια προστίθεται στο ποτάμι, και κατευθύνονται προς την έξοδο της λεκάνης. Το μοντέλο προσομοιώνει μόνο μονοδιάστατη ροή στο ποτάμι.

Μοντέλο IHACRES-WQ

Το μοντέλο IHACRES-WQ αποτελείται από το μοντέλο βροχής - απορροής IHACRES (Jakeman et al., 1990) και το μοντέλο STARS (Green et al., 1999) για μεταφορά αιωρούμενων φερτών υλών επιφανειακής απορροής μέσα σε ποτάμια συστήματα. Το μοντέλο STARS απαιτεί για τη βαθμονόμηση του, συγκεντρώσεις αιωρούμενου ιζήματος ανάντη και κατάντη. Είναι ένα μονοδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης της μεταφοράς μάζας μεταξύ δύο σταθμών μέτρησης ή κόμβων με δεδομένη ροή. Το μοντέλο προσομοιώνει διεργασίες, όπως την καθίζηση των σωματιδίων, την εναπόθεση και την επαναιώρηση του ιζήματος, καθώς και τις πλευρικές πηγές του ιζήματος από την διάβρωση των όχθων και τις τοπικές βροχοπτώσεις.

Μοντέλο IQQM

Το μοντέλο ποσότητας και ποιότητας IQQM (Integrated Water Quantity and Quality Model) είναι ένα εννοιολογικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στο NSW από το τμήμα Διατήρησης Γης και Νερού στην Αυστραλία. Το μοντέλο είναι σχεδιασμένο για χρήση ως εργαλείο για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση των πολιτικών διαχείρισης των υδάτινων πόρων σε κλίμακα λεκάνης απορροής ποταμού (Simons et al., 1996). Στο μοντέλο αυτό περιέχονται εργαλεία για την προσομοίωση της ποσότητας και της ποιότητας του νερού μέσα στο ποτάμι.

Τεχνική OpenMP

Η OpenMP (Open Multiprocessing) τεχνική υιοθετείται για να παραλληλίσει τους κώδικες συζευγμένων 2D μοντέλου υδροδυναμικής και μεταφορά ιζήματος (Huang et al., 2014). Το συνδυασμένο μοντέλο αποτελείται από τις εξισώσεις 2D ροής οι οποίες περιλαμβάνουν τις εξισώσεις μάζας και διατήρησης της ορμής για ροή μείγματος νερού-ιζήματος και τις εξισώσεις διατήρησης μάζας για τα ιζήματα και το υλικό της κοίτης.

Μοντέλο SedNet

Το μοντέλο Sediment River Network είναι ένα μοντέλο σταθερών συνθηκών (steady – state) που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της παραγωγής φερτών υλικών και την απόθεση τους από πλαγιές λόφων, ρέματα και όχθες ποταμών σε ένα δίκτυο ποταμών (Prosser et al., 2001). Το SedNet συνδέεται με το GIS και παρέχει ως δεδομένα εξόδου τα χωρικά πρότυπα των φορτίων ιζημάτων και εναπόθεσης μέσα στο ποτάμι. Ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) πρέπει να εισαχθεί στο μοντέλο για να καθοριστεί το δίκτυο του ποταμού. Για την προσομοίωση της μεταφοράς ιζήματος μέσα στο ποτάμι χρησιμοποιούνται υπομοντέλα για την διάβρωση των όχθων, την εναπόθεση στις πλημμυρικές ζώνες και τη μεταφορά.

Μοντέλο MIKE 11

Το MIKE 11 είναι ένα σύστημα λογισμικού που αναπτύχθηκε από το Υδρολογικό Ινστιτούτο της Δανίας (DHI). Το μοντέλο είναι ένα μονοδιάστατο (εγκάρσιας διατομής) δυναμικό μοντέλο. Αποτελείται από την υδροδυναμική ενότητα του μονοδιάστατου υδραυλικού μοντέλου, που προσομοιώνει ασταθείς μονοδιάστατες ροές και την ενότητα μεταφοράς - διασποράς για τη μεταφορά ιζημάτων (Hanley et al., 1998, Kourgialas et al., 2013).

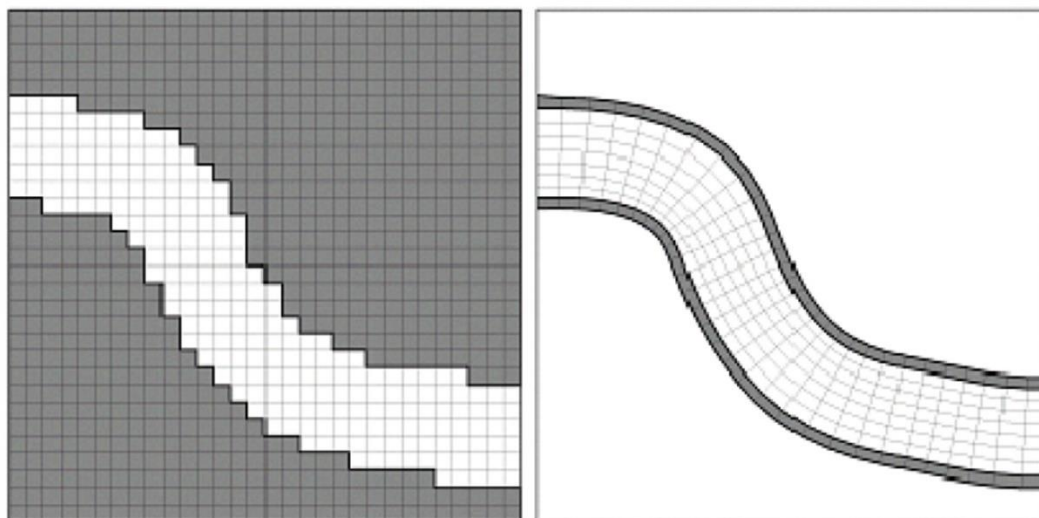
Μοντέλο SWAT

Το SWAT είναι ένα μοντέλο λεκάνης απορροής το οποίο έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώσει την υδρολογία, τη μεταφορά φερτών υλικών και την ποιότητα των υδάτων των λεκανών απορροής και για να εκτιμηθεί ο αντίκτυπος των πρακτικών διαχείρισης της γης για την υδρολογία, τα ιζήματα, και τη μεταφορά ρύπων σε γεωργικές λεκάνες απορροής. Το σύστημα SWAT είναι ενσωματωμένο μέσα σε ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) που περιέχει διάφορα χωρικά δεδομένα όπως το έδαφος, η κάλυψη γης, το κλίμα, και τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά (Sibetheros et al., 2013, Gamvroudis et al., 2015, Nerantzaki et al., 2015).

2.6. Μοντέλα MIKE 21 και MIKE 21C

Τα μοντέλα MIKE 21 και MIKE 21C είναι δισδιάστατα μαθηματικά μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της ροής, του ύψους νερού, της ταχύτητας και της μεταφοράς ιζήματος σε ποτάμια και εκβολές ποταμών. Η γενική μορφή του μοντέλου MIKE 21

βασίζεται σε ένα ευθύγραμμο (rectilinear) πλέγμα επίλυσης για προσομοιώσεις ανοιχτής θαλάσσης και παράκτιων περιοχών. Ωστόσο, για υδραυλικές προσομοιώσεις σε ποτάμια συστήματα απαιτείται μια ακριβέστερη ανάλυση των γραμμών που αποτυπώνουν τις όχθες, για αυτό το λόγο γίνεται χρήση ενός καμπυλόγραμμου (curvilinear) πλέγματος υπολογιστικής επίλυσης. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης ενός καμπυλόγραμμου (curvilinear) πλέγματος υπολογιστικής επίλυσης είναι ότι οι εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών, που περιγράφουν τη δισδιάστατη ροή, γίνονται απλούστερες από την εφαρμογή ενός ευθύγραμμου πλέγματος. Στην ουσία δεν αλλάζει κάτι στις φυσικές εξισώσεις αλλά στην επίλυση τους, δηλαδή στον κάνναβο. Το καμπυλόγραμμο (MIKE 21C) πλέγμα απαιτεί επίσης, λιγότερα υπολογιστικά σημεία από το ευθύγραμμο και, ως εκ τούτου, μικρότερη χωρητικότητα αποθήκευσης στη μνήμη του υπολογιστή. Τέλος παρέχει μια καλύτερη ανάλυση της ροής κοντά στα όρια - όχθες, αυτό μπορεί να γίνει σαφές στην Εικόνα 2.3 όπου ένα ποτάμι αναπαρίσταται από τα δύο πλέγματα.



Εικόνα 2. 6. Αριστερά: Ευθύγραμμο πλέγμα (MIKE 21 model). Δεξιά: Καμπυλόγραμμο πλέγμα (MIKE 21C model), πηγή: MIKE 21C, 2011, User Guide

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε τα δύο αυτά μοντέλα, για λόγους σύγκρισης του ευρέως χρησιμοποιούμενου υδροδυναμικό μοντέλο MIKE 21 με αυτό του MIKE 21C για την προσομοίωση της ροής σε ποτάμι.

Το υπολογιστικό πλέγμα για το MIKE 21C κατασκευάζεται με το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων μερικής παραγωγίσης:

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(g \frac{\partial x}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(g \frac{\partial x}{\partial \eta} \right) = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(g \frac{\partial y}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(g \frac{\partial y}{\partial \eta} \right) = 0 \quad (2.7)$$

Όπου x και y είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες, και g ένας παράγοντας βάρους (weight factor) που ορίζεται ως εξής:

$$g = \sqrt{\frac{x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2}{x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2}} \quad (2.8)$$

Η οριακή συνθήκη αυτού του συστήματος είναι η μη-γραμμική συνθήκη ορθογωνικότητας:

$$x_{\xi}x_{\eta} + y_{\xi}y_{\eta} = 0 \quad (2.9)$$

$$f(x, y) = 0 \quad (2.10)$$

Όπου η εξίσωση (2.9) εκφράζει την συνθήκη της ορθογωνικότητας και η εξίσωση (2.10) εκφράζει ότι τα x και y βρίσκονται σε μια συγκεκριμένη καμπύλη. Το σύστημα αυτό παράγει ένα ορθογώνιο πλέγμα και είναι ισοδύναμο με την απλή θεωρία δυναμικού, όπου οι ξ και η γραμμές μπορούν να λαμβάνονται ως γραμμές ρέματος και δυναμικές γραμμές (DHI b, 2011).

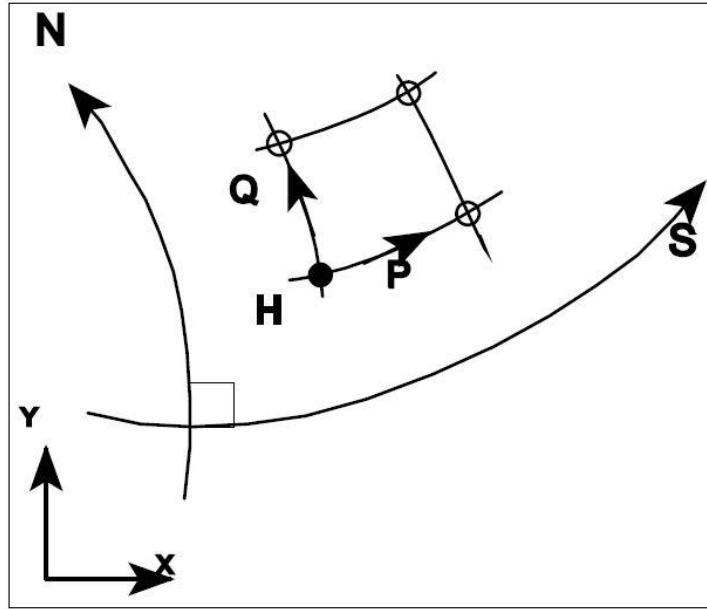
2.6.1. Υδροδυναμικό μοντέλο (Hydrodynamic model)

Το υδροδυναμικό μοντέλο τόσο στο περιβάλλον εργασίας MIKE 21 όσο και στο περιβάλλον εργασίας MIKE 21C (HD module) υπολογίζει την υδροδυναμική συμπεριφορά του νερού που αποτελεί αποτέλεσμα ποικίλων λειτουργιών, όπως είναι τα αρχικά ύψη νερού ή/και η ροή στα ανοικτά όρια (DHI a, 2011).

Η διαφορά του μοντέλου MIKE 21C από το MIKE 21 είναι ότι στο πρώτο οι δύο οριζόντιοι άξονες (s και n) του υπολογιστικού πλέγματος περιγράφονται σε ένα καμπυλόγραμμο ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων, όπου ένας άξονας μπορεί να ακολουθήσει τις γραμμές των όχθων του ποταμού. Το αποτέλεσμα είναι μία καλύτερη περιγραφή (πιο ακριβή) της ροής κοντά στα όρια, το

οποίο είναι πολύ σημαντικό ιδιαίτερα όταν οι υπολογισμοί περιέχουν διάβρωση των όχθων (DHI b, 2011).

Η χρήση ενός καμπυλόγραμμου ορθογώνιου συστήματος συντεταγμένων, κάνουν την μαθηματική και αριθμητική περιγραφή ουσιαστικά απλούστερη. Τα σφάλματα στο σύστημα πεπερασμένων διαφορών γίνονται μικρότερα και η ακρίβεια μεγαλύτερη από ότι σε ένα ευθύγραμμο πλέγμα.



Εικόνα 2. 7. Θέση των παραμέτρων ροής: παροχές P και Q , και το βάθος ροής H σε ένα καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων (s, n)

Το υδροδυναμικό μοντέλο λύνει τις κάθετα ολοκληρωμένες εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της ορμής (Saint Venant) σε δύο διευθύνσεις. Συγκεκριμένα οι εξισώσεις που επιλύονται στο καμπυλόγραμμο υδροδυναμικό μοντέλο είναι:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{pq}{h} \right) + 2 \frac{pq}{hR_n} + \frac{p^2 - q^2}{hR_s} + gh \frac{\partial H}{\partial s} + \frac{g}{C^2} \frac{p\sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} = RHS \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{pq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{q^2}{h} \right) + 2 \frac{pq}{hR_s} + \frac{q^2 - p^2}{hR_n} + gh \frac{\partial H}{\partial n} + \frac{g}{C^2} \frac{q\sqrt{p^2 + q^2}}{h^2} = RHS \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\partial q}{\partial n} - \frac{q}{R_s} + \frac{p}{R_n} = 0 \quad (2.13)$$

Όπου:

s, n : οι συντεταγμένες του καμπυλόγραμμου σύστημα συντεταγμένων

p, q : οι ροές μάζας στις διευθύνσεις s και n , αντίστοιχα

H : το ύψος νερού (επιφάνειας)

h : το βάθος νερού

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

C : ο αριθμός τραχύτητας Chezy

R_s και R_d : είναι η ακτίνα καμπυλότητας του S και N γραμμών αντίστοιχα και

RHS : η δεξιόστροφη ισορροπία δυνάμεων, η οποία περιέχει (μεταξύ άλλων) τις δυνάμεις Reynold.

Οι δυνάμεις Reynolds, που περιλαμβάνονται στους όρους RHS , μπορούν να περιγράψουν σε ένα καμπυλόγραμμο πλέγμα, υποθέτοντας ότι είναι ομαλό (smooth). Για την p -διεύθυνση:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E \frac{\partial P}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial s} \left(E \frac{\partial p}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(E \frac{\partial p}{\partial n} \right) + \frac{2E}{R_s} \frac{\partial q}{\partial s} + \frac{\partial E}{\partial s} \frac{q}{R_s} + \frac{2E}{R_n} \frac{\partial q}{\partial n} + \frac{\partial E}{\partial n} \frac{q}{R_n} \quad (2.14)$$

Ομοίως για την q - διεύθυνση:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E \frac{\partial Q}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial s} \left(E \frac{\partial q}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(E \frac{\partial q}{\partial n} \right) + \frac{2E}{R_s} \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\partial E}{\partial s} \frac{p}{R_s} + \frac{2E}{R_n} \frac{\partial p}{\partial n} + \frac{\partial E}{\partial n} \frac{p}{R_n} \quad (2.15)$$

Όπου $P - Q$ είναι παροχές ροής σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x, y) και $p - q$ οι παροχές ροής στο καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων (s, n) .

2.6.2. Μοντέλο μεταφοράς αιωρούμενου ιζήματος (Suspended sediment transport model)

Το μοντέλο MIKE 21C έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει τη μεταφορά ιζήματος και την αλλαγή της μορφολογίας ποταμών (River Morphology Model). Στην παρούσα εργασία προσομοιώνεται η μεταφορά αιωρούμενου ιζήματος. Ως μεταφορά αιωρούμενου ιζήματος

ορίζεται η μεταφορά στερεών τα οποία αιωρούνται για κάποιο χρονικό διάστημα στο ρευστό και ακολουθούν την κίνηση του. Το μοντέλο για τη μεταφορά αιωρούμενου ιζήματος βασίζεται στη θεωρία που περιγράφηκε από τον Galappati (1983). Η μερική διαφορική εξίσωση για τη μεταφορά αιωρούμενου ιζήματος με συναγωγή και τυρβώδη διάχυση περιγράφεται από την εξίσωση 2.16 (DHI b, 2011).

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = w_s \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (2.16)$$

Όπου:

z : η κατακόρυφη συντεταγμένη,

c : η συγκέντρωση του αιωρούμενου ιζήματος,

ε : ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης

w_s : ταχύτητα πτώσης του ιζήματος στην αιώρηση

u, v, w : οι ταχύτητες ροής στις κατευθύνσεις x, y και z διευθύνσεις, αντίστοιχα.

Στο μοντέλο MIKE 21C υπάρχουν επτά διαφορετικές φόρμουλες για την προσομοίωση της μεταφοράς ιζήματος:

1. Engelund – Hansen
2. Van Rijn
3. Engelud – Fredsoe
4. Meyer – Peter and Muller
5. Empirical formulation
6. Yang for sand
7. Yang for gravel

Κάποιες από τις φόρμουλες, όπως για παράδειγμα η Engelud-Hansen, χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν τη συνολική μεταφορά ιζήματος (total – transport expressions). Υπάρχει όμως και η δυνατότητα χρήσης διαφορετικής φόρμουλας για κάθε περίπτωση, για παράδειγμα την φόρμουλα van Rijn για το αιωρούμενο ίζημα και την φόρμουλα Engelud-Fredsoe για το ίζημα κοίτης (DHI a, 2011). Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιηθεί η φόρμουλα

Engelud - Hansen (1967) για την προσομοίωση της μεταφοράς αιωρούμενου ιζήματος. Η φόρμουλα αυτή επιλέχθηκε διότι είναι μία φόρμουλα συνολικής μεταφοράς (total load) που έχει την δυνατότητα να προσομοιώνει χωριστά την μεταφορά αιωρούμενου ιζήματος από την μεταφορά ιζήματος κοίτης με τη χρήση δύο συντελεστών βαθμονόμησης, το συντελεστή αιωρούμενου φορτίου (suspended load factor) και το συντελεστή φορτίου κοίτης (bed load factor).

Μοντέλο Engelud-Hansen

Το μοντέλο Engelud and Hansen (1967) είναι ένα μοντέλο ολικής μεταφοράς ιζήματος το οποίο μπορεί να διαχωρίσει την μεταφορά του ιζήματος κοίτης με την μεταφορά του αιωρούμενου ιζήματος με τις παρακάτω σχέσεις:

$$S_{bl} = k_b \cdot S_{tl} \quad (2.17)$$

$$S_{sl} = k_s \cdot S_{tl} \quad (2.18)$$

Όπου S_{bl} (m^2/s) το φορτίο κοίτης, k_b ο παράγων βαθμονόμησης του φορτίου κοίτης, S_{sl} (m^2/s) το φορτίο αιώρησης, k_s ο παράγων βαθμονόμησης του φορτίου αιώρησης και το S_{tl} (m^2/s) το ολικό φορτίο το οποίο δίνεται από την σχέση:

$$S_{tl} = 0.05 \frac{C^2}{g} \theta^{5/2} \sqrt{(s-1) \cdot g \cdot d_{50}^3} \quad (2.19)$$

Όπου s η σχετική πυκνότητα του ιζήματος, C ($m^{1/2}/s$) ο αριθμός αντίστασης Chezy, d_{50} (mm) η διάμετρος των κόκκων του 50% του ιζήματος, g η επιτάχυνση της βαρύτητας (m^2/s) και θ η παράμετρος του Shields η οποία ορίζεται από την σχέση:

$$\theta = \frac{\tau}{\rho g (s-1) d_{50}} \quad (2.20)$$

Όπου τ η ροή διατμητικής τάσης και ρ η πυκνότητα νερού (1000 kg/m^3)

Η χρονική κλίμακα για την προσαρμογή στο προφίλ της συγκέντρωσης ισορροπίας ορίζεται από:

$$t_s = \frac{h}{2w_s} \quad (2.21)$$

Η συγκέντρωση ισορροπίας ορίζεται ως το φορτίο αιώρησης διαιρεμένο από την παροχή νερού και μεταποιημένο από ογκομετρική συγκέντρωση σε συγκέντρωση μάζας.

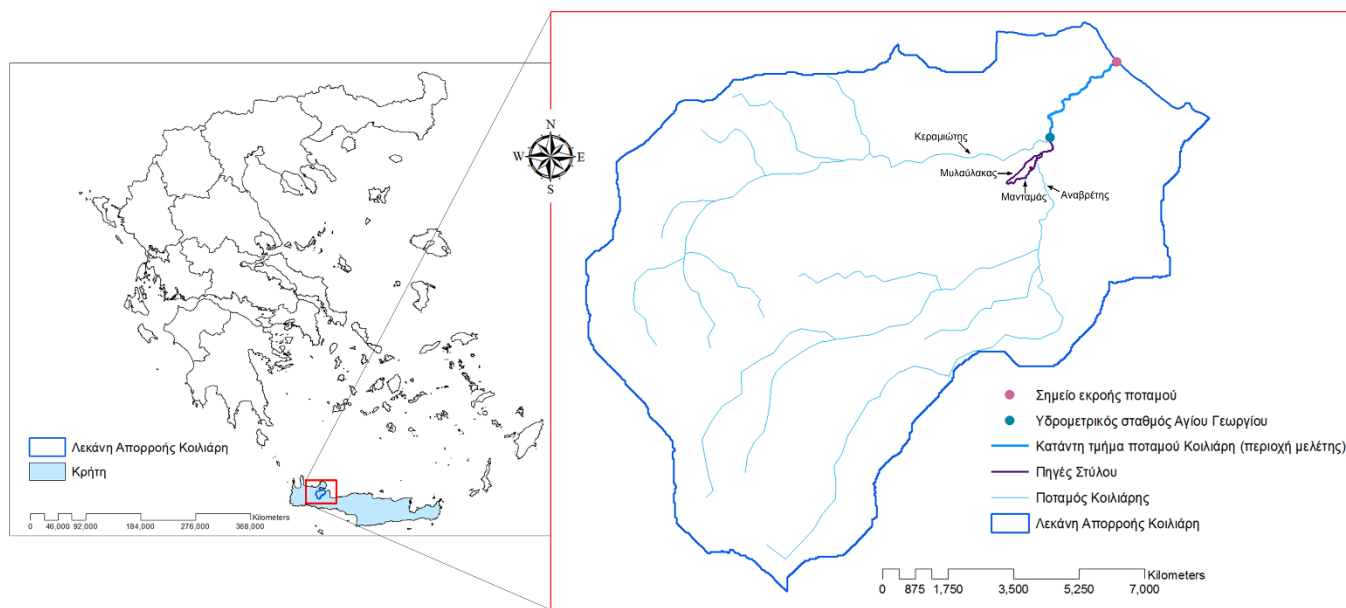
$$C_e = \frac{S_{sl}}{u \cdot h} \cdot s \cdot 10^6 \quad (2.22)$$

Όπου u (m/s) η ταχύτητα και h (m) το βάθος νερού και w_s (m/s) η ταχύτητα καθίζησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Περιοχή Μελέτης

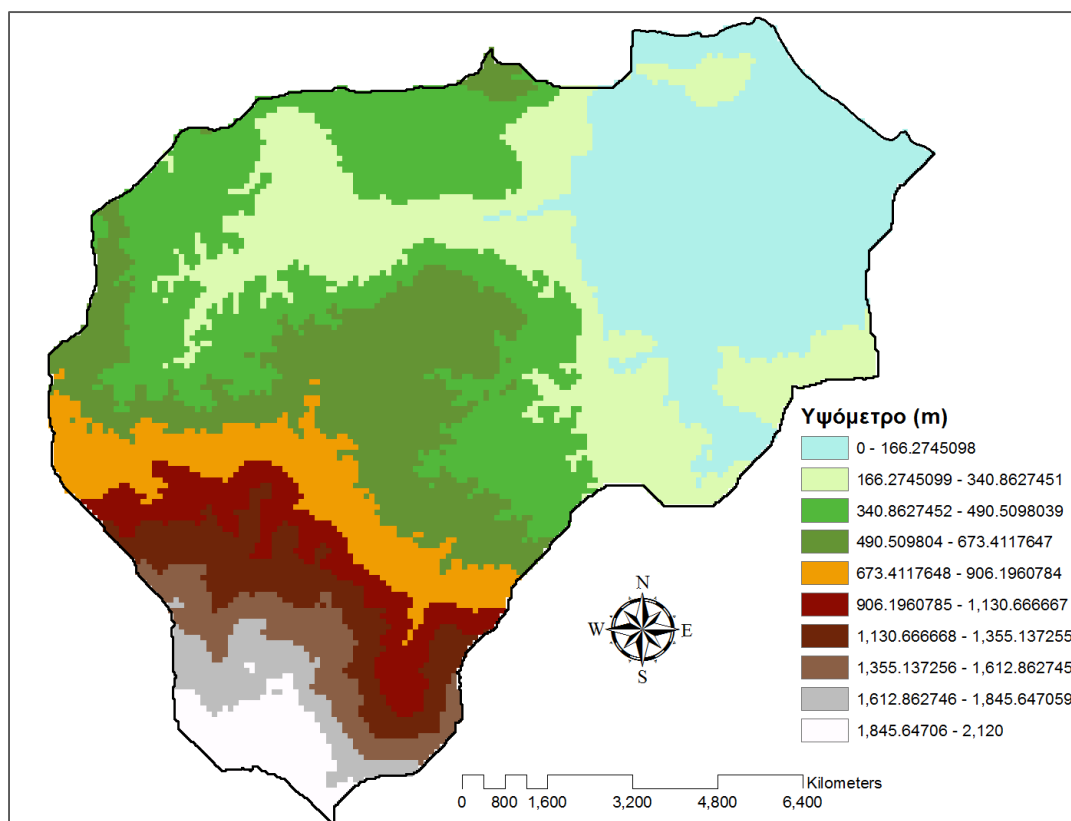
3.1. Περιγραφή Λεκάνης απορροής ποταμού Κοιλιάρη

Η Λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη οριοθετείται 15 χιλιόμετρα δυτικά της πόλης των Χανίων, στην Κρήτη (Εικόνα 3.1). Η υδρολογική λεκάνη εκτείνεται από τους πρόποδες των Λευκών Ορών μέχρι την παράκτια ζώνη του Δήμου Αρμένων και έχει έκταση περίπου 130 km². Το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου του ποταμού Κοιλιάρη είναι 36km. Ο ποταμός τροφοδοτείται από ποσότητες υδάτων οι οποίες προέρχονται από τα Λευκά Όρη και απαρτίζεται από τέσσερις παραπόταμους από τους οποίους οι δύο χαρακτηρίζονται ως προσωρινά υδατορεύματα (Κεραμιώτης και Αναβρέτης), ενώ ο Μυλαύλακας και ο Μανταμάς έχουν μόνιμη ροή καθόλη τη διάρκεια του έτους, γι' αυτό και χαρακτηρίζονται ως μόνιμα υδατορέμματα. Τα μόνιμα υδατορέμματα του ποταμού Κοιλιάρη τροφοδοτούνται από τις πηγές του Στύλου και από επιφανειακές απορροές. Μετά από την συμβολή των παραπόταμων (στο σημείο όπου βρίσκεται ο υδρομετρικός σταθμός του Αγίου Γεωργίου) μέχρι τις εκβολές του ποταμού Κοιλιάρη το μήκος του είναι 3.3 km (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3. 1. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη στον χάρτη.

Η λεκάνη απορροής εκτείνεται από την ακτογραμμή (υψόμετρο 0 m) έως και το υψόμετρο των 2130 m (Εικόνα 3.2). Το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής ποικίλει, στους πρόποδες των Λευκών Ορών οι κλίσεις είναι της τάξης του 43% και σε μεγαλύτερα υψόμετρα φτάνει και το 90%, ενώ σε πεδινές περιοχές της λεκάνης όπου βρίσκονται οι πηγές του Στύλου και ο σταθμός του Αγίου Γεωργίου οι κλίσεις κυμαίνονται από 0,5 έως 2% (Κουργιαλάς, 2010).



Εικόνα 3. 2. Τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Όλες οι πηγές που συναντώνται στην περιοχή μελέτης είναι καρστικές, δηλαδή οι εκροές νερού γίνονται από ενεργό καρστικό σύστημα το οποίο και τροφοδοτείται από τη φρεατία ζώνη. Αναλυτικά οι κυριότερες πηγές που βρίσκονται στην περιοχή μελέτης είναι (ΟΑΔΥΚ, 2010):

- Πηγές Στύλου: Πρόκειται για πηγές που βρίσκονται στο χωρίο Στύλος σε απόλυτο υψόμετρο 17 m. Οι σπουδαιότερες πηγές είναι στις θέσεις Κάραβος και Καβούσι οι οποίες εκφορτίζονται συνεχώς, ενώ η πηγή στη θέση Βρύση εμφανίζεται μόνο τη χειμερινή περίοδο.

- Πηγές Ζούρμπου: Πρόκειται για υφάλμυρες πηγές που βρίσκονται σε υψόμετρο 1-2 m στον οικισμό Καλύβες.
- Πηγές Βλυχάδων: Πρόκειται για υφάλμυρες πηγές συνεχούς ροής που βρίσκονται σε υψόμετρο 1000 m ανάντη των εκβολών του ποταμού Κοιλιάρη οπού και εκφορτίζονται.
- Πηγές Αναβρέτης: Πρόκειται για εποχιακές πηγές και βρίσκονται σε υψόμετρο 24 m, στις παρυφές του Νέου Χωριού.

Η συνολική παροχή των πηγών ανά έτος υπολογίζεται περίπου στα $170 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$.



Εικόνα 3. 3. Οι δύο μόνιμες πηγές στο χωριό Στύλος.

3.1.1. Γεωλογικές συνθήκες της Λεκάνης Απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαρτίζουν τη λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη είναι οι εξής (ΟΑΔΥΚ, 2010):

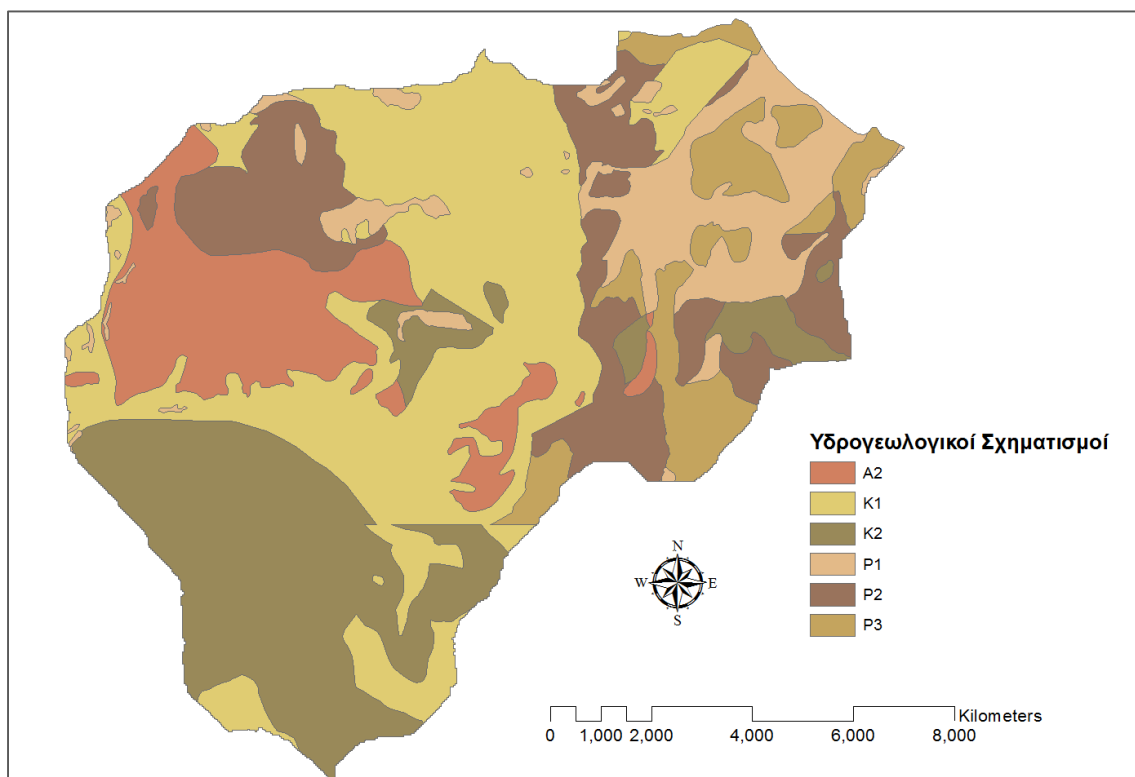
Ανθρακικά πετρώματα (σχηματισμοί Τρυπαλίου και πλακώδεις): Στη λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη εντοπίζονται ανθρακικά πετρώματα στο νότιο τμήμα και στο βόρειο-κεντρικό τμήμα της λεκάνης. Τα καρστικά πετρώματα είναι έντονα υδατοπερατά, υδροπερατότητας (K1 και K2), αποτελούνται από ασβεστολιθικά και δολομιτικά πετρώματα.

Φλύσχης - Σχιστόλιθοι: απαντώνται στο δυτικό τμήμα της λεκάνης. Τα κύρια πετρώματα της ακολουθίας του φλύσχη είναι ο ψαμμίτης, ο αργιλικός σχιστόλιθος, καθώς και ο ιλυόλιθος, ωστόσο μπορούν να εμφανιστούν άργιλοι, ασβεστόλιθοι κ.α. Γενικά χαρακτηρίζονται ως μη υδατοπερατοί σχηματισμοί, μικρής έως πολύ μικρής διαπερατότητας (A2).

Νεογενή ιζήματα – Αλλούβιοι σχηματισμοί: απαντώνται κυρίως στο βόρειο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, παραλιακά της λεκάνης απορροής και στο βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης.

Οι νεογενής σχηματισμοί είναι μέτριας (P2) ή μικρής (P3) διαπερατότητα και οι αλλούβιοι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας (P1).

Η Γεωλογία της Λεκάνης Απορροής του ποταμού Κοιλιάρη συνεισφέρει στην κίνηση του υπόγειου νερού από τα καρστικά Λευκά όρη (στο νότιο τμήμα της λεκάνης) προς τις πηγές του Στύλου (Kourgialas et al., 2008). Ακολουθεί ο γεωλογικός χάρτης της Λεκάνης Απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, ο οποίος δημιουργήθηκε με τη χρήση GIS (Εικόνα 3.4).



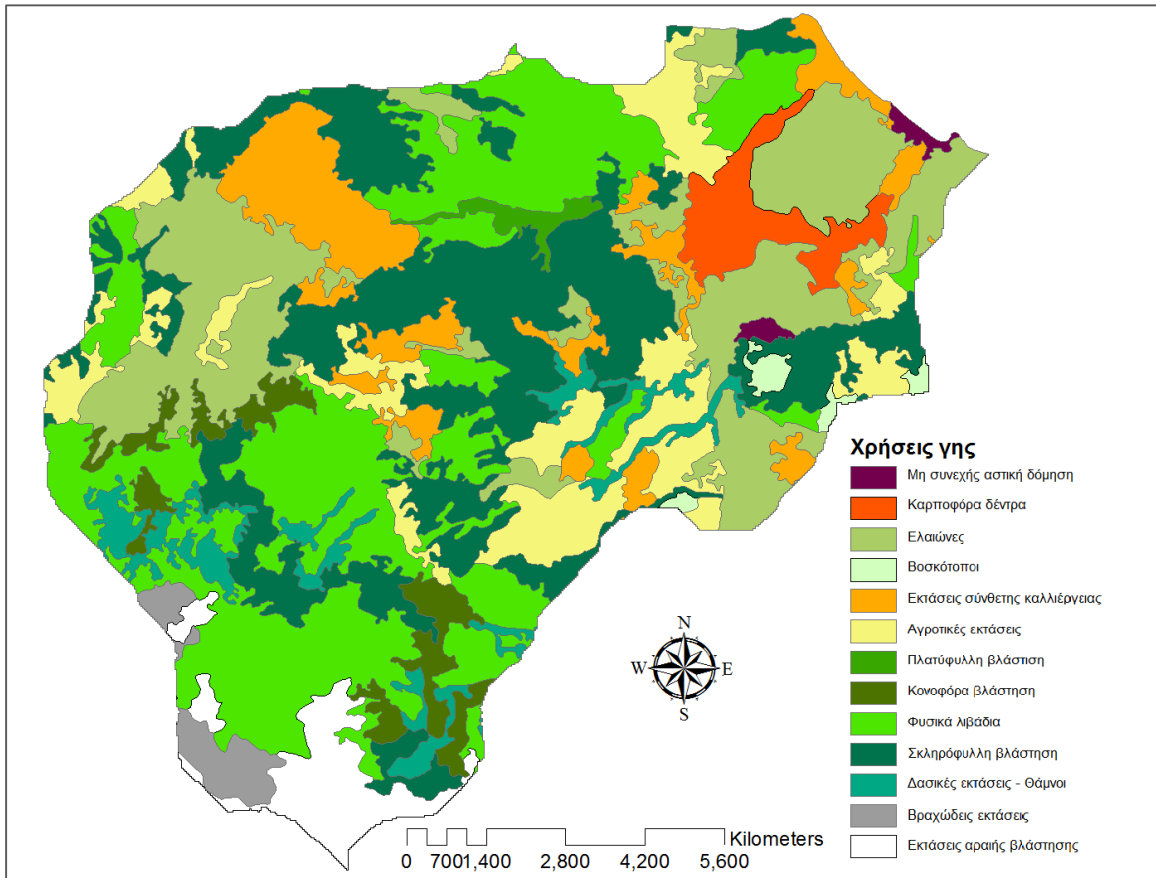
Εικόνα 3. 4. Υδρογεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

3.1.2. Χρήσεις Γης Λεκάνης Απορροής ποταμού Κοιλιάρη

Χρησιμοποιώντας στοιχεία της βάσης δεδομένων Corine 2000 και με τη βοήθεια του GIS, υπολογίστηκαν χωρικά οι χρήσεις γης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. Αναλυτικότερα παρακάτω περιγράφονται το εμβαδό και η ποσοστιαία αναλογία των πιο σημαντικών χρήσεων γης για την υδρολογική λεκάνη (Εικόνα 3.5)

- **Βοσκότοποι** (ιδιωτικοί και φυσικά λιβάδια): 26.2% (37.8 km²)

- **Αγροτικές εκτάσεις** (ελαιώνες, καρποφόρα δέντρα, συνθέτες καλλιέργειες κ.λπ.): 39.4% (56.9 km²)
- **Δάση:** 29% (42 km²)
- **Άγονη γη** (βραχώδεις και με αραιή βλάστηση εκτάσεις): 5% (7.3 km²)
- **Αστική Δόμηση:** 0.4% (0.6 km²)



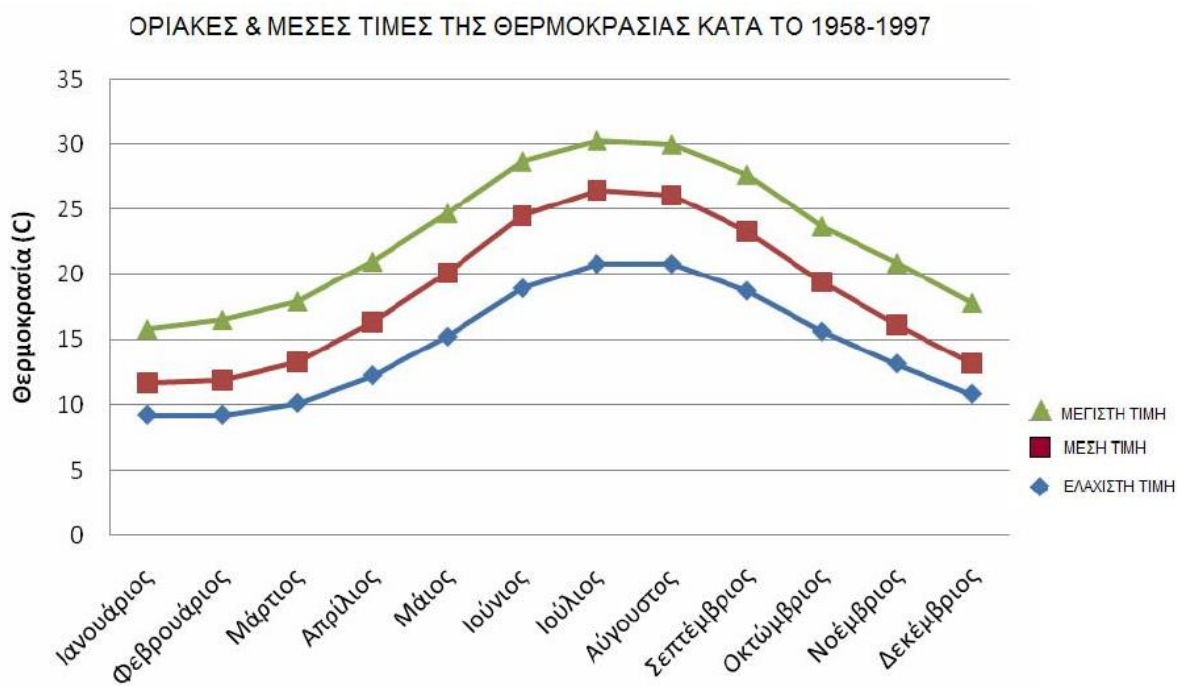
Εικόνα 3. 5. Χάρτης χρήσεων γης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (corine 2000)

3.1.3. Κλιματολογικά Χαρακτηριστικά

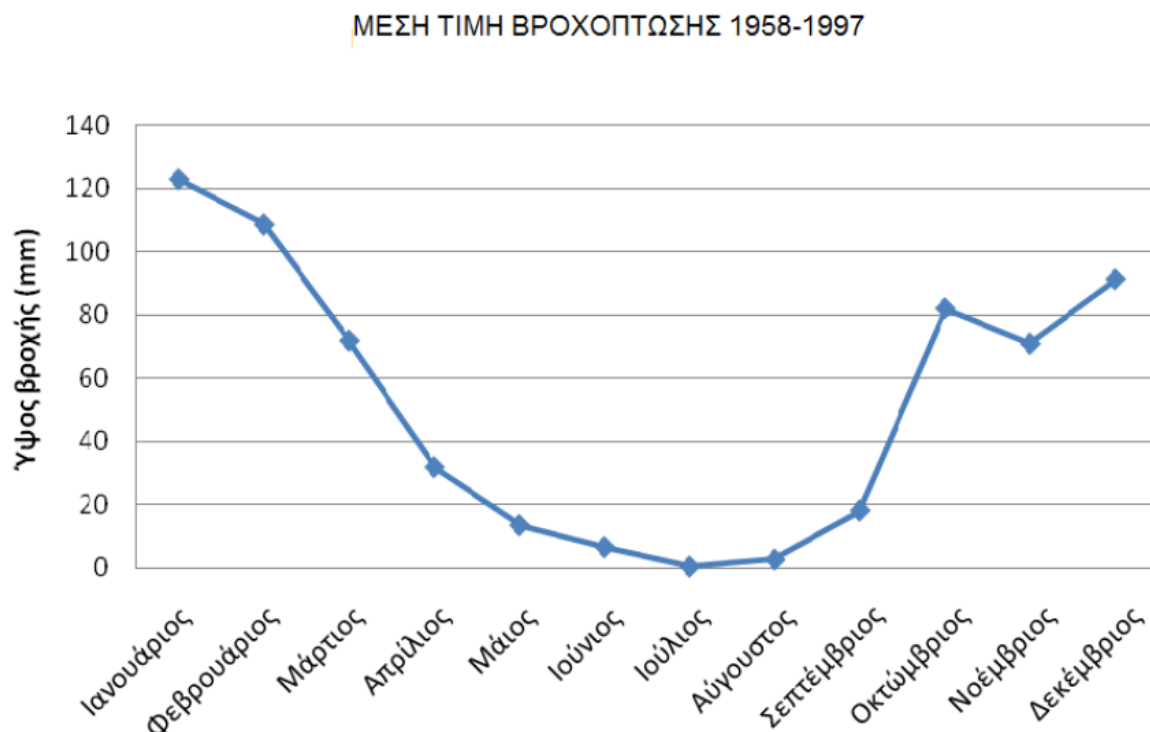
Το κλίμα στην περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται ως ημίξηρο, με βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις (στα ορεινά) το χειμώνα και θερμά - ξηρά καλοκαίρια με μεγάλα ποσοστά εξατμισοδιαπνοής. Η μέση ετήσια βροχόπτωση στο βόρειο τμήμα της λεκάνης είναι 705 mm ενώ στο νότιο τμήμα (ορεινή ζώνη) είναι 2125 mm.

Μέχρι και το έτος 2007 στην λεκάνη απορροής λειτουργούσε μόνο ένας μετεωρολογικός σταθμός στις Καλύβες (υψόμετρο 24m). Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού έργου FLOODMED τοποθετήθηκαν δύο τηλεμετρικοί μετεωρολογικοί σταθμοί. Ο πρώτος τοποθετήθηκε στην περιοχή του Σαμωνά και σε υψόμετρο 390 m MSL και ο δεύτερος στην περιοχή Ψυχρό Πηγάδι και σε υψόμετρο 948 m MSL. Οι σταθμοί αυτοί τοποθετηθήκαν στις θέσεις αυτές έτσι ώστε να παρέχουν αξιόπιστα μετεωρολογικά δεδομένα σε σχέση με την υψομετρική διαβάθμιση της λεκάνης (Κουργιαλάς, 2010).

Τα κλιματικά στοιχεία για την ευρύτερη περιοχή προέρχονται από το μετεωρολογικό σταθμό της Σούδας, που βρίσκεται σε υψόμετρο 151 m. Τα στοιχεία αφορούν το χρονικό διάστημα 1958-1997. Στην Εικόνα 3.6 παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις σε ελάχιστη, μέγιστη και μέση θερμοκρασία για το διάστημα 1958-1997. Στο διάστημα αυτό η μέση ετήσια θερμοκρασία ήταν 18,5°C. Στην Εικόνα 3.7 παρουσιάζεται η διακύμανση των υψών των βροχοπτώσεων στο διάστημα των ετών 1958 - 1997.



Εικόνα 3. 6. Θερμοκρασιακές μεταβολές διαστήματος 1958-1997, πηγή: ΟΑΔΥΚ, 2010



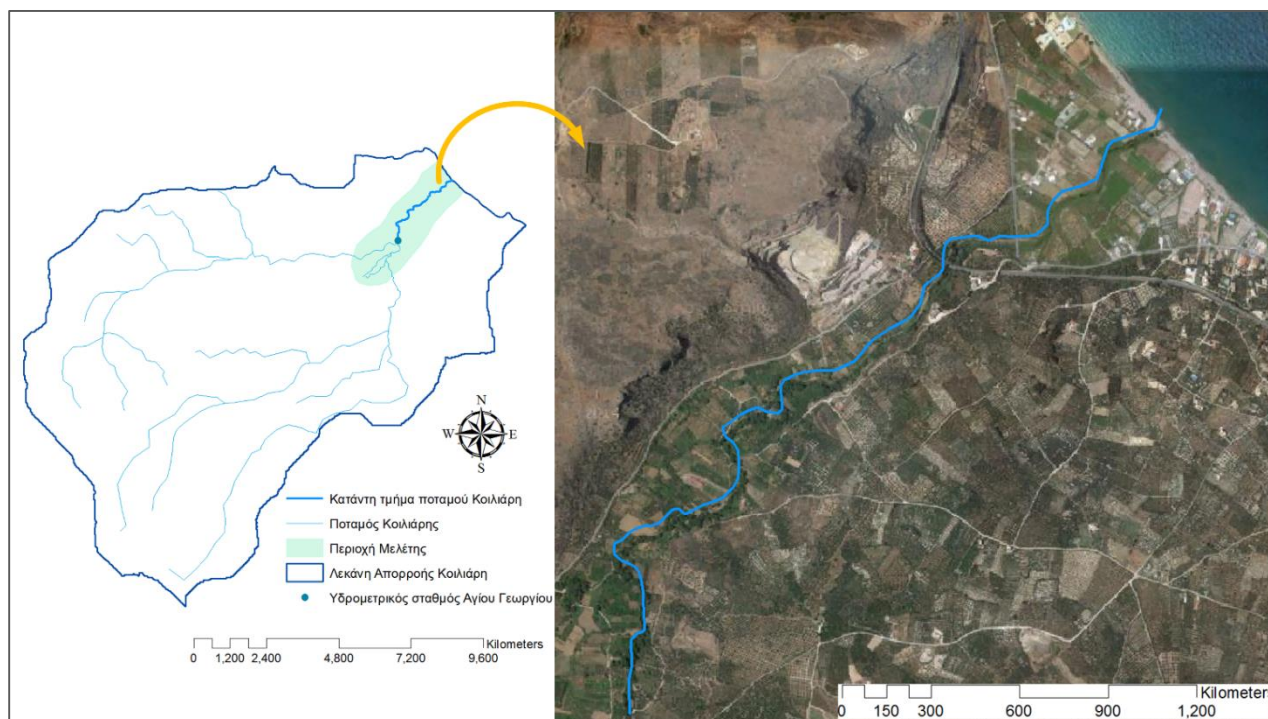
Εικόνα 3. 7. Μέση βροχόπτωση διαστήματος 1958-1997, πηγή: ΟΑΔΥΚ, 2010

3.2. Περιγραφή Περιοχής Μελέτης

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η υδραυλική συμπεριφορά και η μεταφορά ιζημάτων στο κατάντη τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη, δηλαδή το τμήμα του ποταμού από τον σταθμό του Αγίου Γεωργίου, όπου όλοι οι παραπόταμοι συμβάλλουν, μέχρι την εκροή του ποταμού στην θάλασσα (Εικόνα 3.8.). Από το σημείο ένωσης όλων των παραποτάμων μέχρι τις εκβολές του ποταμού Κοιλιάρη το μήκος του είναι 3.3 km. Η επιλογή του συγκεκριμένου τμήματος του ποταμού για μελέτη έγινε διότι τα κατάντη τμήματα των ποταμών είναι περισσότερα ευαίσθητα σε φαινόμενα ξαφνικών πλημμυρών που μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες στερεών συμβάλλοντας στην αλλαγή της μορφολογίας του ποταμού.

Η συνολική παροχή στη έξοδο του ποταμού έχει εκτιμηθεί στα 136.29 εκατομμύρια κυβικά μέτρα το χρόνο. Από τη συνολική αυτή παροχή, το 80% προέρχεται από την καρστική ροή των πηγών του Στύλου, ενώ το υπόλοιπο 20% έχει εκτιμηθεί ότι προέρχεται από τη συμβολή των εποχιακών ροών των παραποτάμων Κεραμιώτη και Αναβρέτη (Kourgialas et al., 2010). Τα

υδρογραφήματα του ποταμού χαρακτηρίζονται από μια σειρά απότομων peaks τα οποία αποδίδονται κυρίως στην συμβολή του παραπόταμου Κεραμιανού κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων (Moraetis et al., 2010).



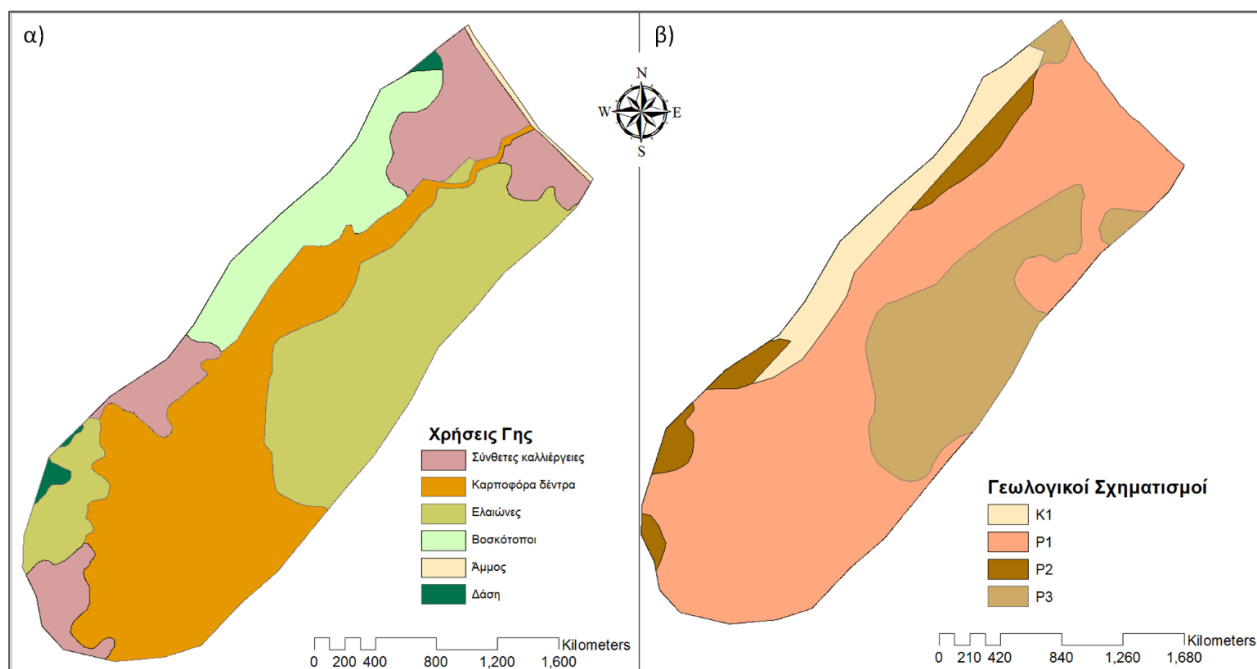
Εικόνα 3. 8. Το κατάντη τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, από το σημείο ένωσης όλων των παραποτάμων έως το σημείο εκροής του ποταμού στη θάλασσα.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που επικρατούν στο κατάντη τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη είναι νεογενή ιζήματα και αλλούβιοι σχηματισμοί (Εικόνα 3.9.β), ενώ οι χρήσεις γης στην περιοχή αυτή χαρακτηρίζονται κυρίως από σύνθετες μορφές καλλιέργειας, ελαιώνες και δέντρα (Εικόνα 3.9.α).

3.3. Επίδραση των Γεωργικών Χρήσεων γης στη Διάβρωση

Η αλλαγή των χρήσεων γης στο κατάντη τμήμα της Λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, με το πέρασμα των χρόνων, από φυσική βλάστηση και δασικές εκτάσεις σε καλλιεργήσιμη γη και βοσκοτόπους, αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα διάβρωσης του εδάφους. Συγκεκριμένα, οι συνεχείς αλλαγές στις γεωργικές πρακτικές, η εισαγωγή μεγάλων

γεωργικών μηχανημάτων (π.χ. τρακτέρ) που καταστρέφουν τους αναβαθμούς και η υπερβόσκηση έχουν αφήσει την επιφάνεια του εδάφους απροστάτευτη και ευάλωτη στην επιφανειακή απορροή.



Εικόνα 3. 9. α) Χάρτης Χρήσεων γης στο κατάντη τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη. β) Χάρτης γεωλογικών σχηματισμών στο κατάντη τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη.

Επιπλέον παράγοντες που προκαλούν διάβρωση στην αγροτική γη είναι η μεγάλη εξάτμιση νερού, η χρήση φυτοφαρμάκων και η άρδευση. Οι παράγοντες αυτοί οδηγούν στη συγκέντρωση αλάτων στο ανώτερο τμήμα των εδαφών, γεγονός που αυξάνει την ευαισθησία τους στην υδατική διάβρωση. Σε αυτές τις περιπτώσεις ακόμη και με χαμηλής έντασης βροχή προκαλείται διάβρωση του εδάφους (Imeson, 2012).

Η ύπαρξη βλάστησης στις λεκάνες απορροής ποταμών καθίσταται αναγκαία διότι συντελεί στη μείωση της ταχύτητας του νερού απορροής, με αποτέλεσμα να διηθείται περισσότερο νερό στο έδαφος κατά την βροχόπτωση. Η πυκνότητα της φυτοκάλυψης αλλά και ορισμένα χαρακτηριστικά των φυτών όπως το ύψος, το μέγεθος των φύλλων και το ριζικό τους σύστημα το οποίο στηρίζει και σταθεροποιεί το έδαφος, αποτελούν σημαντικούς παράγοντες αντιδιαβρωτικής προστασίας (Λιλλή, 2011).

3.4. Μεταφορά Ιζήματος στον Ποταμό Κοιλιάρη

Σύμφωνα με την Nerantzaki (2014) για τη μεταφορά ιζήματος στον ποταμό Κοιλιάρη, κύριος υπεύθυνος είναι ο παραπόταμος Κεραμιανός (Εικόνα 3.9). Ο παραπόταμος Κεραμιανός αποστραγγίζει μία μικρή υπολεκάνη απορροής, πριν την εισαγωγή του σε ένα καρστικό φαράγγι, στην οποία δημιουργείται έντονη επιφανειακή απορροή λόγω των σχιστολιθικών πετρωμάτων της. Ο στιχόλιθος από μόνος του είναι αρκετά σαθρός και σε συνδυασμό με τις απότομες κλίσεις και τις γεωργικές και αγροτικές πρακτικές που ασκούνται στην περιοχή, η επιφάνεια του εδάφους γίνεται εξαιρετικά εύθραυστη με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η μεταφορά στερεών υλικών.

Έτσι, ο Κεραμιανός είναι ο κύριος υπεύθυνος για τη μεταφορά φερτών υλών στον ποταμό Κοιλιάρη. Οι άλλοι παραπόταμοι του Κοιλιάρη, πηγάζουν από τις καρστικές πηγές του Στύλου, και έχουν μια σχετικά σταθερή - χαμηλή συγκέντρωση (μικρότερη των 4 mg / l). Ωστόσο, μόνο δύο έως τέσσερις φορές το χρόνο, κατά τη διάρκεια συνθηκών έντονης βροχόπτωσης, ο παραπόταμος Κεραμιανός κατεβάζει νερό και συγχωνεύεται με τις πηγές του Στύλου, μεταφέροντας σημαντικά φορτία αιωρούμενου ιζήματος. Κάτω από αυτό το όριο, ο Κεραμιανός «εξαφανίζεται» στο καρστικό φαράγγι (Εικόνα 3.11). Στην Εικόνα 3.10 παρουσιάζεται η μίξη των δύο ροών στον σταθμό Αγ. Γεώργιος την ώρα που λαμβάνει χώρα ένα πλημμυρικό γεγονός και ο ποταμός Κεραμιανός μεταφέρει μεγάλες ποσότητες στερεών υλών (Nerantzaki, 2014).



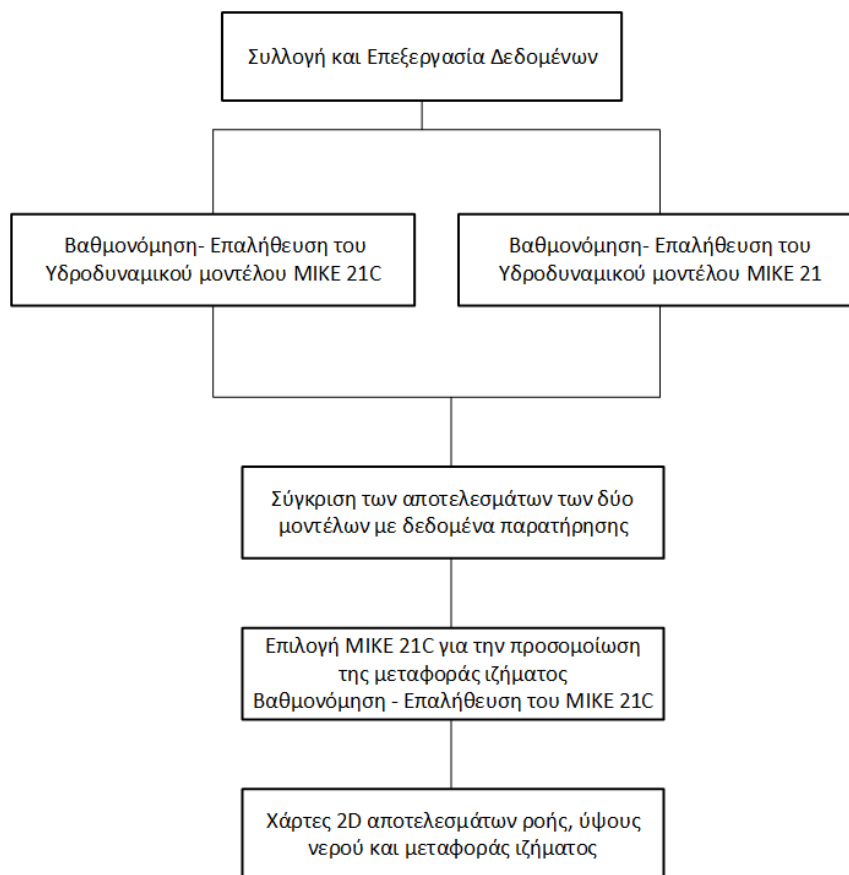
Εικόνα 3. 10. Μίξη των δύο ροών, αριστερά η ροή από τις πηγές του Στύλου με χαμηλή συγκέντρωση ιζήματος και δεξιά η ροή από τον παραπόταμο Κεραμιανό με υψηλές συγκεντρώσεις ιζήματος, πηγή: Nerantzaki, 2014.



Εικόνα 3. 11. Αεροφωτογραφία της ευρύτερης περιοχής του ποταμού Κοιλιάρη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: Μεθοδολογία

Για την προσομοίωση της ροής και της μεταφοράς ιζήματος στον ποταμό Κοιλιάρη, αρχικά ήταν απαραίτητη η συλλογή και επεξεργασία δεδομένων από την περιοχή μελέτης. Στη συνέχεια στήθηκε, βαθμονομήθηκε και επαληθεύτηκε το υδροδυναμικό μοντέλο MIKE 21C που είναι βασισμένο σε καμπυλόγραμμο κάνναβο υπολογιστικής επίλυσης των εξισώσεων ροής. Η ίδια προσομοίωση πραγματοποιήθηκε και στην βασική έκδοση του μοντέλου MIKE 21 η οποία βασίζεται σε ευθύγραμμο κάνναβο. Τα αποτελέσματα των δύο καννάβων συγκρίνονται με τιμές στο πεδίο και αποδεικνύεται καλύτερη η εφαρμογή του μοντέλου με καμπυλόγραμμο κάνναβο (MIKE 21C), το οποίο και επιλέγεται για την προσομοίωση της μεταφοράς ιζήματος. Το διάγραμμα ροής της παραπάνω μεθοδολογίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4. 1. Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας υδροδυναμικής προσομοίωσης και προσομοίωσης μεταφοράς ιζήματος στον ποταμό Κοιλιάρη.

4.1. Συλλογή Δεδομένων στην Περιοχή Μελέτης

4.1.1. Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων Παροχής

Από το 2005 βρίσκεται σε λειτουργία ο τηλεμετρικός υδρομετρικός σταθμός του Αγίου Γεωργίου σε συντεταγμένες $35^{\circ} 26' 33''$, $24^{\circ} 08'$ και σε υψόμετρο 20m από τη στάθμη της θάλασσας. Ο υδρομετρικός αυτός σταθμός είναι τοποθετημένος στο σημείο όπου όλοι οι παραπόταμοι του ποταμού Κοιλιάρη συμβάλουν και συγκεκριμένα σε απόσταση 3.3 km από το σημείο εκβολής του (Εικόνα 4.2).

Επομένως, λόγω της θέσης του, ο υδρομετρικός σταθμός του Αγίου Γεωργίου καταγράφει την ολική ποσότητα ύδατος που απορρέει είτε επιφανειακά είτε υπόγεια από το ανάντη τμήμα της λεκάνης απορροής στον ποταμό Κοιλιάρη. Από τον σταθμό αυτό λαμβάνουμε την στάθμη του νερού στο ποτάμι ανά μία ώρα και με την καμπύλη στάθμης – παροχής, που προτάθηκε από τον Κουργιαλά (2010) για τον ποταμό Κοιλιάρη, μετατρέπουμε τις τιμές αυτές σε ωριαίες παροχές. Η καμπύλη στάθμης παροχής για τον τηλεμετρικό σταθμό παρακολούθησης του Αγίου Γεωργίου, είναι καμπύλη δύο τμημάτων με το πρώτο να ακολουθεί τον τύπο $Q = a \times H^b$ (Τσακίρης, 1995) για στάθμη μικρότερη των 40 cm:

$$Q_1 = 0.079 \cdot H^{0.343} \quad (4.1)$$

Ενώ για στάθμη που ξεπερνά τα 40 cm χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση που προέκυψε από την γραμμική παρεμβολή της στάθμης με την παροχή και η οποία είναι της μορφής:

$$Q_2 = 29.54 \cdot H - 10.782 \quad (4.2)$$

Όπου Q (m^3/s) η παροχή και H (m) η στάθμη νερού.



Εικόνα 4. 2. Α) Το σημείο ένωσης των παραπόταμων όπου βρίσκεται ο υδρομετρικός σταθμός του Αγ. Γεωργίου στο χάρτη, Β) φωτογραφία του σταθμού και Γ) φωτογραφία του σημείου ένωσης των παραποτάμων.

4.1.2. Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων Αιωρούμενου Ιζήματος

Το σημείο δειγματοληψίας για το αιωρούμενο ίζημα βρίσκεται ακριβώς κατάντη του σημείου που ο παραπόταμος Κεραμιανός ενώνεται με τους άλλους παραπόταμους οι οποίοι τροφοδοτούνται από τις καρστικές πηγές. Τα δεδομένα για το αιωρούμενο ίζημα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία συλλέχθηκαν από τους Sibetheros et al. (2013) και Nerantzaki et al (2015) με ένα σύστημα αυτοματοποιημένης δειγματοληψίας ιζημάτων (Sediment Trap), το οποίο παρουσιάστηκε από τους ίδιους και περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2.2.5 της παρούσας εργασίας. Τα δείγματα που συλλέχθηκαν και οι συγκεντρώσεις τους σε αιωρούμενο ίζημα για τα έτη 2011-2013 παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4. 1. Πίνακας συγκεντρώσης αιωρούμενου ιζήματος των δειγμάτων.

Ημερομηνία συλλογής	Συγκέντρωση (mg/L)
12/12/2011	3.85
29/03/2012	3.40
25/06/2012	3.35
21/08/2012	2.00
30/10/2012	3.60
15/11/2012	2.50
10/12/2012	8.05
14/12/2012	7.30
15/02/2013	3.70
11/03/2013	2.90
16/03/2013	4.25
06/08/2013	3.70
02/09/2013	1.50
25/10/2013	2.20
16/11/2013	15.00
04/12/2013	300.00

Κοκκομετρική ανάλυση – Χαρακτηρισμός δειγμάτων

Τα παραπάνω δείγματα αιωρούμενου ιζήματος συλλέχθηκαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, για το λόγο αυτό ήταν απαραίτητη μία κοκκομετρική ανάλυση, η οποία πραγματοποιήθηκε από την Nerantzaki (2014). Μία ανάλυση ακτίνων Χ φθορισμού (XRF) διεξήχθη για να προσδιοριστεί ο χημικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων ενώ η κατανομή του μεγέθους των κόκκων του ιζήματος προσδιορίστηκε με τη χρήση ενός λέιζερ περίθλασης σωματιδίων για την ανάλυση μεγέθους (laser diffraction particle size analyzer). Από την

κοκκομετρική ανάλυση των δειγμάτων που συνελέγησαν από το σταθμό του Αγ. Γεωργίου προέκυψε ότι η μέση τιμή της διαμέτρου των κόκκων ήταν 6.74 phi (Nerantzaki, 2014)

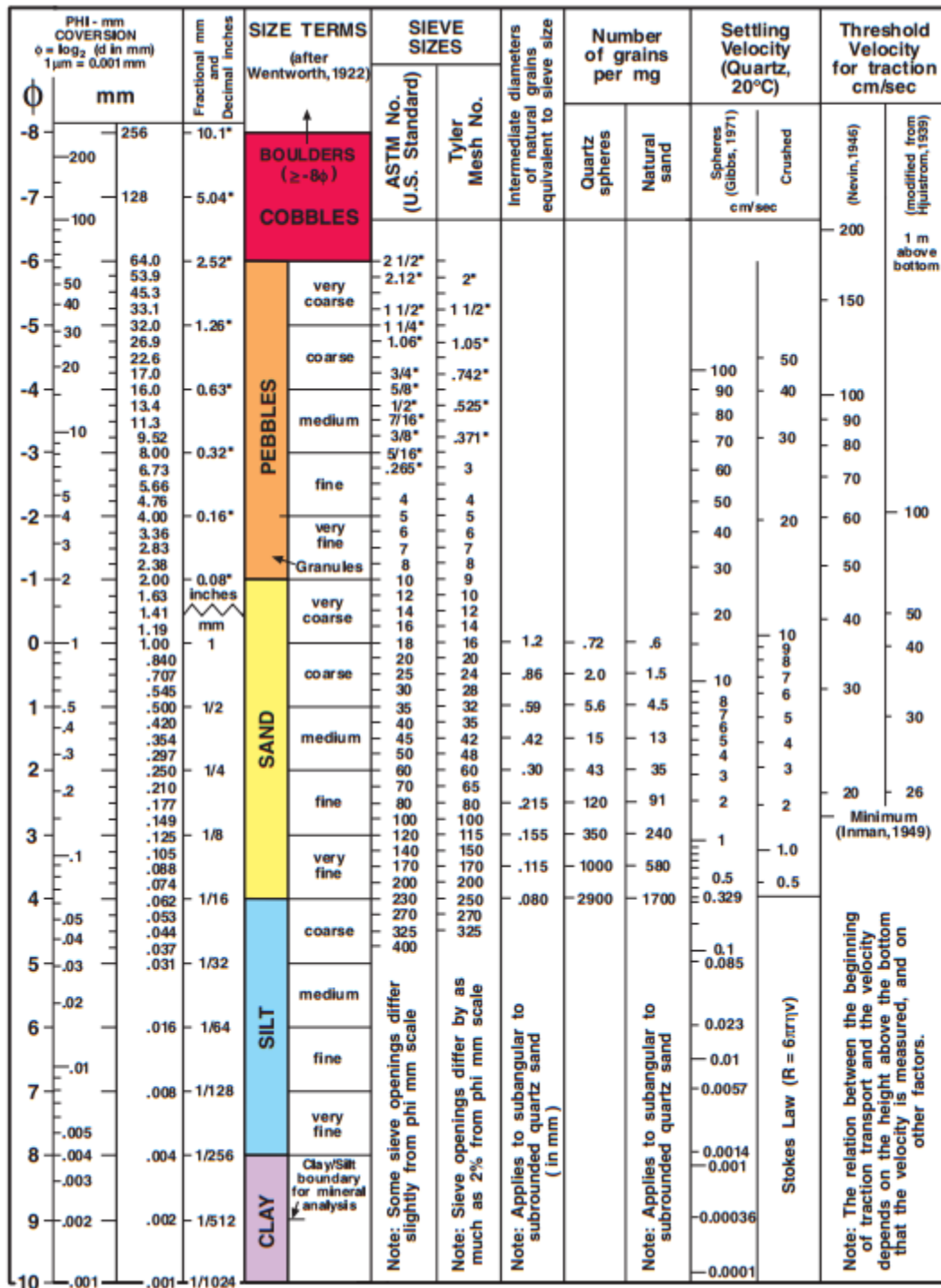
Η τιμή phi αποτελεί έναν λογαριθμικό μετασχηματισμό των χιλιοστών (mm) σε ακέραιο αριθμό σύμφωνα με την φόρμουλα.

$$\Phi = -\log_2 d \quad (4.3)$$

Όπου d η διάμετρος των κόκκων (mm)

Επιλύοντας την παραπάνω φόρμουλα ως προς d υπολογίστηκε η μέση τιμή της διαμέτρου των κόκκων των δειγμάτων σε 9.35 mm

Ο χαρακτηρισμός του δείγματος, με κριτήριο την τιμή της μέσης διαμέτρου δίνεται στην εικόνα 4.3, όπου απεικονίζεται ο πίνακας της μεθόδου Wentworth (1922). Τα δείγματα μας σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή χαρακτηρίζεται ως λεπτή ιλύς.



Εικόνα 4. 3. Πίνακας της μεθόδου Wentworth (1922) για τον χαρακτηρισμό δειγμάτων ιζήματος.

Δημιουργία Χρονοσειρών Συγκέντρωσης Αιωρούμενου Ιζήματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ήταν αναγκαία η δημιουργία χρονοσειρών συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος για τα υδρολογικά έτη 2011-2012 και 2012-2013, για τα οποία και είχαμε δεδομένα παρατήρησης συγκέντρωσης (πίνακας 4.1). Οι χρονοσειρές αυτές είναι απαραίτητες διότι χρησιμοποιούνται ως οριακές συνθήκες στο μοντέλο μορφολογίας και μεταφοράς ιζήματος. Σύμφωνα με τους Nadal-Romero et al. (2008), Rodríguez-Blanco et al. (2010) και τους Kourgialas et al. (2013) η παροχή του ποταμού και η βροχόπτωση είναι οι κύριοι υπεύθυνοι παράγοντες για τη δημιουργία και την μεταφορά του ιζήματος.

Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκε ο πίνακας 4.2. Στην πρώτη στήλη του οποίου παρουσιάζεται η συγκέντρωση αιωρούμενου ιζήματος (mg/L) που μετρήθηκε την συγκεκριμένη ημερομηνία στον υδρομετρικό σταθμό του Αγ. Γεωργίου (H1), στη δεύτερη στήλη η αντίστοιχη μέτρηση παροχής (m³/s), ενώ στην τρίτη στήλη παρουσιάζονται καταγραφές συσσωρευμένης βροχόπτωσης από τον μετεωρολογικό σταθμό στο Ψυχρό Πηγάδι (M1) για κάθε γεγονός βροχής.

Πίνακας 4. 2. Πίνακας τιμών συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος, παροχής και συσσωρευμένης βροχόπτωσης σε συγκεκριμένες ημερομηνίες.

Ημερομηνία	Συγκέντρωση (mg/L)	Παροχή (m³/s)	Συσσωρευμένη Βροχόπτωση (mm)
12/13/2011	3.85	14.78	0
3/29/2012	3.4	21.28	1.4
6/25/2012	3.35	6.47	0
8/21/2012	2	1.56	0
11/15/2012	2.5	2.24	0
12/10/2012	8.05	12.50	0
12/14/2012	7.3	14.24	0
1/28/2013	2.42	5.54	0
2/15/2013	3.7	13.01	0
3/11/2013	2.9	15.78	0
3/16/2013	4.25	19.06	0
8/6/2013	3.7	0.99	0
9/2/2013	1.5	1.09	0
10/25/2013	2.2	1.61	0
11/16/2013	15	28.27	16.4
2/3/2014	10	12.10	13.84
12/4/2013	300	29.80	36.8

Όπως παρατηρούμε από τον πίνακα 4.2 η παροχή δεν είναι σε άμεση συσχέτιση με τη συγκέντρωση του ιζήματος, αυτό συμβαίνει διότι στον Άγιο Γεώργιο συμβάλουν συνεχώς οι πηγές

του Στύλου των οποίων το νερό είναι πολύ φτωχό σε συγκέντρωση αιωρούμενου ιζήματος (< 4 mg/L). Για παράδειγμα την εποχή που λιώνουν τα χιόνια στα Λευκά όρη (καρστικά βουνά) παρότι η παροχή από τις πηγές αυξάνεται, άρα αυξάνεται και η παροχή που μετρίεται στην συμβολή όλων των παραποτάμων, η συγκέντρωση του αιωρούμενου ιζήματος παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Όπως έχουμε προαναφέρει, ο κύριος υπεύθυνος για τη μεταφορά ιζήματος στον ποταμό Κοιλιάρη είναι ο παραπόταμος Κεραμειανός ο οποίος μεταφέρει μεγάλες ποσότητες στερεών υλών κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων. Η εξίσωση που συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη περιγράφεται ως εξής:

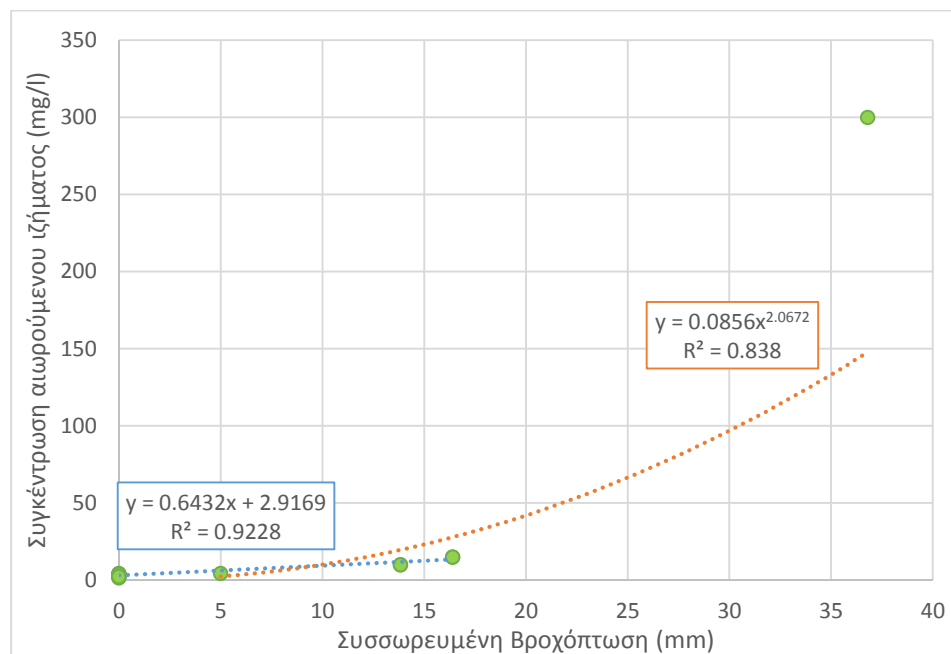
Για τις μικρές τιμές βροχόπτωσης:

$$SSC = a \cdot P + b \quad (4.4)$$

Για τις μεγάλες τιμές βροχόπτωσης:

$$SSC = a \cdot P^b \quad (4.5)$$

Όπου SSC είναι η συγκέντρωση αιωρούμενου ιζήματος (mg/L), P η συσσωρευμένη βροχόπτωση ενός γεγονότος βροχής (mm) και οι a , b , είναι συντελεστές.



Εικόνα 4. 4. Διάγραμμα συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος (mg/L) σε συνάρτηση με την συσσωρευμένη βροχόπτωση (mm). Με μπλε χρώμα η εξίσωση της μορφής 4.4 και με πορτοκαλί η εξίσωση της μορφής 4.5.

Από το διάγραμμα της εικόνας 4.4 προκύπτει:

Η εξίσωση της μορφής 4.4 για τιμές βροχόπτωσης μικρότερης των 10 mm:

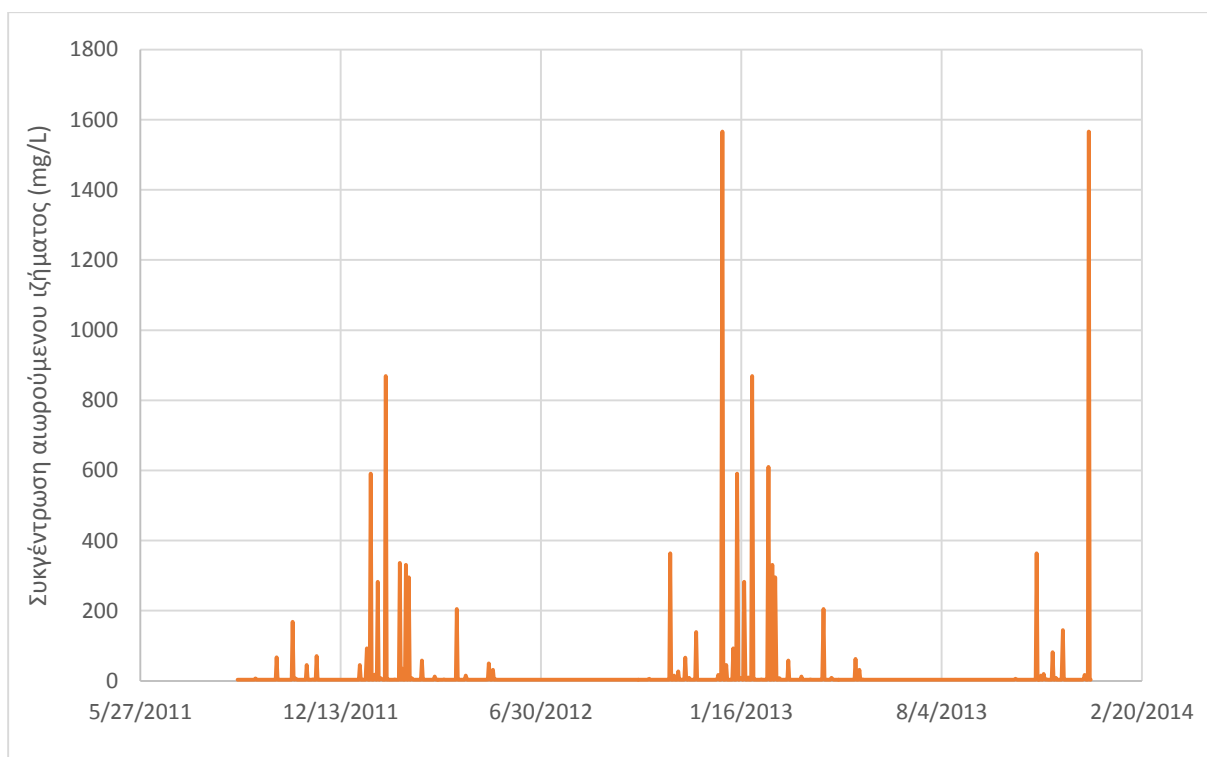
$$SSC = 0.6432 \cdot P + 2.91 \quad R^2 = 0.92 \quad (4.6)$$

Και η εξίσωση της μορφής 4.5 για τιμές βροχόπτωσης μεγαλύτερης των 10 mm:

$$SSC = 0.086 \cdot P^{2.07} \quad R^2 = 0.84 \quad (4.7)$$

Για την αξιολόγηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ο στατιστικός δείκτης R^2 , το οποίος εκφράζει το ποσοστό της μεταβλητότητας των παρατηρήσεων. Τιμές μεγαλύτερες του 0.8 δείχνουν μια αρκετά καλή συσχέτιση.

Η χρονοσειρά συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος που παράχθηκε από την παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.5.



Εικόνα 4. 5. Χρονοσειρά Συγκέντρωσης Αιωρούμενου Ιζήματος

Συγκέντρωση και Συμπλήρωση Βροχομετρικών Δεδομένων

Τα βροχομετρικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των χρονοσειρών ιζήματος συλλέχθηκαν, όπως αναφέρονε και προηγουμένως, από τον μετεωρολογικό σταθμό στο Ψυχρό Πηγάδι (M1). Κατά τη διάρκεια όμως των υδρολογικών ετών 2011-2012 και 2012-2013 υπήρχαν χρονικά διαστήματα κατά τα οποία ο σταθμός δεν λειτουργούσε λόγω βλάβης. Για το λόγο αυτό ήταν απαραίτητη η δημιουργία μίας βροχοβαθμίδας της περιοχής με την οποία και έγινε η συμπλήρωση των βροχομετρικών δεδομένων που έλλειπαν.

Με τον όρο βροχοβαθμίδα εννοούμε την μεταβολή του ύψους βροχής ανά μονάδα μεταβολής του υψόμετρου (mm/m). Η βροχοβαθμίδα επομένως αποτελεί μια συσχέτιση των απόλυτων υψομέτρων των σταθμών (m) και των μέσων ετήσιων υψών βροχής (mm). Οι σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της βροχοβαθμίδας στην ευρύτερη περιοχή του ποταμού Κουιάρη είναι: Ψυχρό Πηγάδι, Σαμωνάς, Βρύσες, Ακρωτηρί και Σαμαριά (Εικόνα 4.6). Για τους σταθμούς αυτούς είχαμε ταυτόχρονα δεδομένα βροχόπτωσης για τρία συνεχόμενα έτη (2009-2011) (Πίνακας 4.3).

Πίνακας 4. 3. Μέσο ετήσιο ύψος βροχής ανά απόλυτο υψόμετρο σταθμού.

Σταθμός	Μέσο ετήσιο ύψος βροχής (mm)	Απόλυτο υψόμετρο σταθμού (m)
Ψυχρό Πηγάδι	1267.813	948
Σαμωνάς	833.008	390
Ακρωτήρι	568.067	137
Βρύσες	894.467	60
Σαμαριά	2011.367	1250



Εικόνα 4. 6. Χάρτης της περιοχής με τις τοποθεσίες των μετεωρολογικών σταθμών.

Η συσχέτιση αυτή παρουσιάζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 4.7 και η εξίσωση της βροχοβαθμίδας με την οποία έγινε η συμπλήρωση των δεδομένων είναι η:

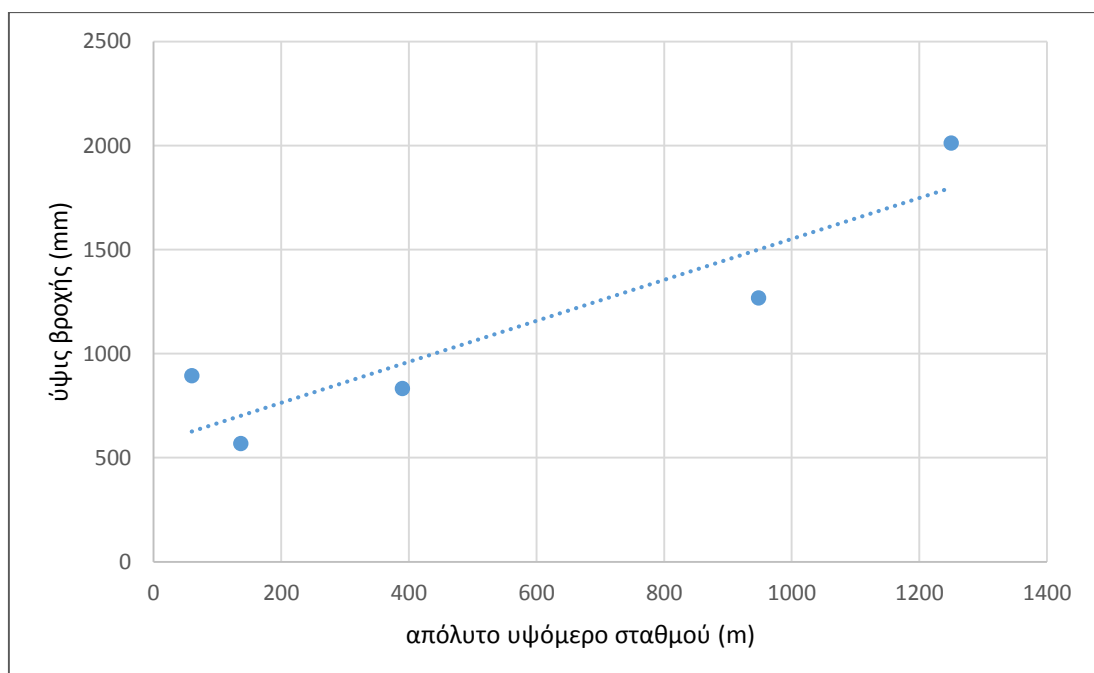
$$y = 0.98 \cdot x + 566.72 \quad R^2 = 0.84 \quad (4.8)$$

Έπειτα, υπολογίσαμε τον συντελεστή συσχέτισης της βροχοβαθμίδας μεταξύ ενός σταθμού για τον οποίο είχαμε δεδομένα και του σταθμού στο Ψυχ. Πηγάδι στον οποίο θέλαμε να συμπληρώσουμε δεδομένα.

$$\frac{y}{y_n} = \frac{0.98 \cdot 1250 + 566.72}{0.98 \cdot 948 + 566.72} = 1.2 \quad (4.9)$$

Όπου:

- y : το ύψος βροχής (mm) του άγνωστου σταθμού (Ψυχ. Πηγάδι)
- y_n : το ύψος βροχής (mm) του γνωστού σταθμού (Σαμαριά)

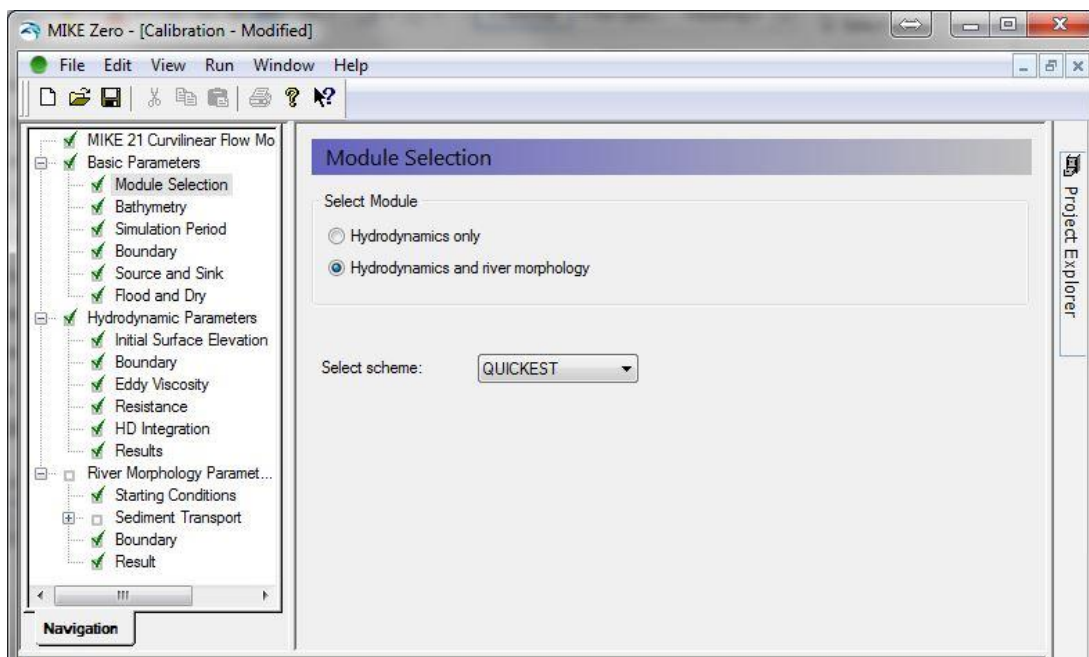


Εικόνα 4. 7. Διάγραμμα συσχέτισης βροχοβαθμίδας ευρύτερης περιοχής ποταμού Κοιλιάρη.

4.2. Δημιουργία του Υδροδυναμικού μοντέλου καμπυλόγραμμου πλέγματος (MIKE 21C)

Η δημιουργία ενός υδροδυναμικού ποτάμιου συστήματος, χρησιμοποιώντας το μοντέλο MIKE 21C, περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Επιλέγεται η έκταση της περιοχής προσομοίωσης και σχεδιάζεται το υπολογιστικό πλέγμα για το ποτάμι
- Η βαθυμετρία του ποταμού εισάγεται στο υπολογιστικό πλέγμα. Το υψόμετρο της κοίτης καθορίζεται για κάθε σημείο του υπολογιστικού πλέγματος, κάτι τέτοιο πραγματοποιείται με τη δημιουργία ενός αρχείου εισόδου με τις συντεταγμένες και τα ύψη αυτών από το επίπεδο της θάλασσας. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει και ενέργειες όπως η γραμμική παρεμβολή (interpolation) για σημεία που δεν υπάρχουν δεδομένα.
- Η δημιουργία του μοντέλου γίνεται στο δενδρώδες διάγραμμα (data tree) (Εικόνα 4.8), όπου εισάγουμε αρχεία και αλλάζουμε τιμές σε παραμέτρους. Τα δεδομένα εισάγονται με συγκεκριμένη σειρά από την κορυφή του διαγράμματος προς τα κάτω. Μετά την εισαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων εισόδου στο μοντέλο μας ακολουθεί η εκτέλεση – τρέξιμο του μοντέλου
- Καθεμία από τις δύο ενότητες του μοντέλου μπορεί να επιλεγεί από τον χρήστη. Η πρώτη επιλογή είναι η «Hydrodynamics only» η οποία υπολογίζει το βάθος νερού, το υψόμετρο επιφάνειας, την παροχή και τις ταχύτητες κατά μήκος του μοντέλου. Η δεύτερη επιλογή είναι η «Hydrodynamics and river morphology» όπου υπολογίζεται επιπλέον τις αλλαγές στα υψόμετρα της κοίτης λόγω της μεταφοράς ιζήματος, της εναπόθεσης και της διάβρωσης.

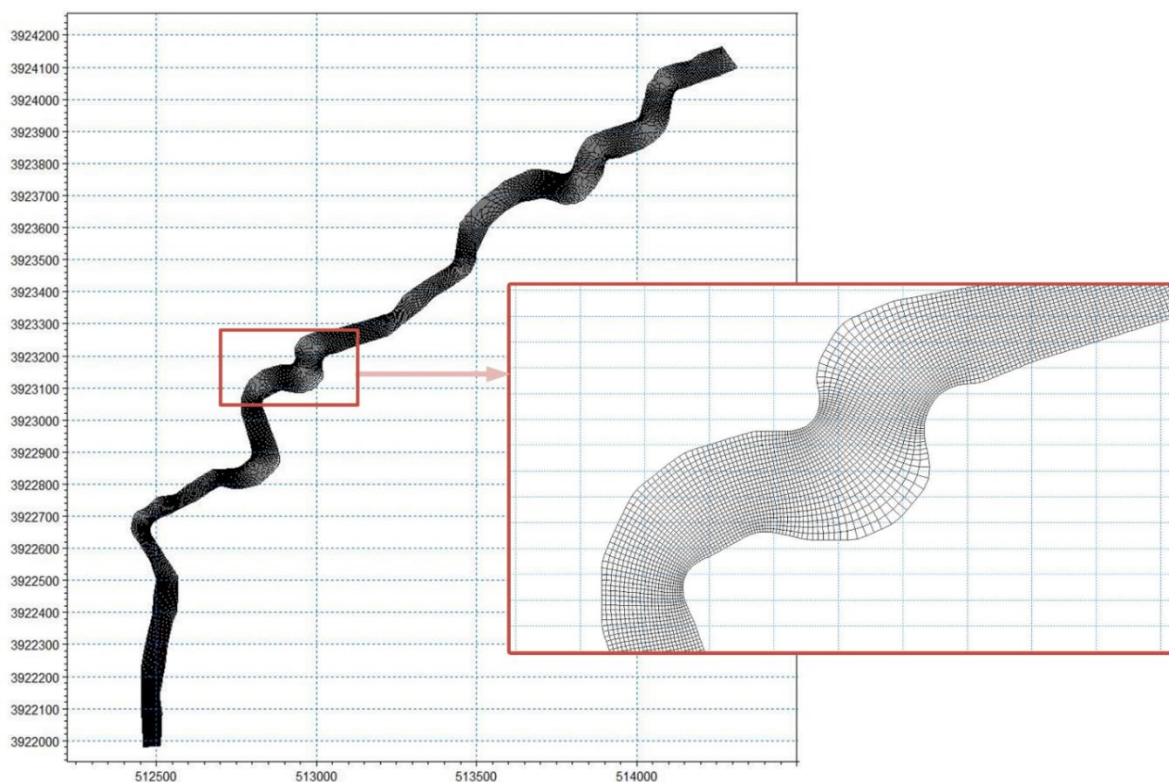


Εικόνα 4. 8. Η διεπαφή χρήσης του μοντέλου MIKE 21C – δένδρoδες διάγραμμα.

4.2.1. Δημιουργία του Curvilinear Grid

Το μοντέλο MIKE 21C είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε ορθογώνιο καμπυλόγραμμο πλέγμα (orthogonal curvilinear grid). Το αριθμητικό πλέγμα δημιουργείται από το εργαλείο Grid Generator. Για τον ακριβή σχεδιασμό των γραμμών των όχθων χρησιμοποιήθηκαν φωτογραφίες από δορυφόρο και εικόνες με τα υψόμετρα της περιοχής που κατασκευάστηκαν στο ArcGIS. Στη συνέχεια επιλέγεται ο αριθμός των κελιών κατά μήκος και κάθετα της ροής για τη δημιουργία του πλέγματος με μια ανισότροπα σύμμορφη μέθοδο χαρτογράφησης (anisotropic conformal mapping method). Στη συνέχεια, ακολουθεί η διαδικασία της ομαλοποίησης (smoothing) των γραμμών του πλέγματος έως ότου το πλέγμα να μην περιέχει απότομες γωνίες και μεγάλα διαστήματα μεταξύ των κελιών. Το μέγεθος και η ποιότητα του υπολογιστικού πλέγματος παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην «σταθερότητα» και στο χρόνο προσομοίωσης. Με περισσότερα υπολογιστικά κελιά η προσομοίωση είναι πιο λεπτομερής αλλά απαιτεί περισσότερο υπολογιστικό χρόνο και μνήμη.

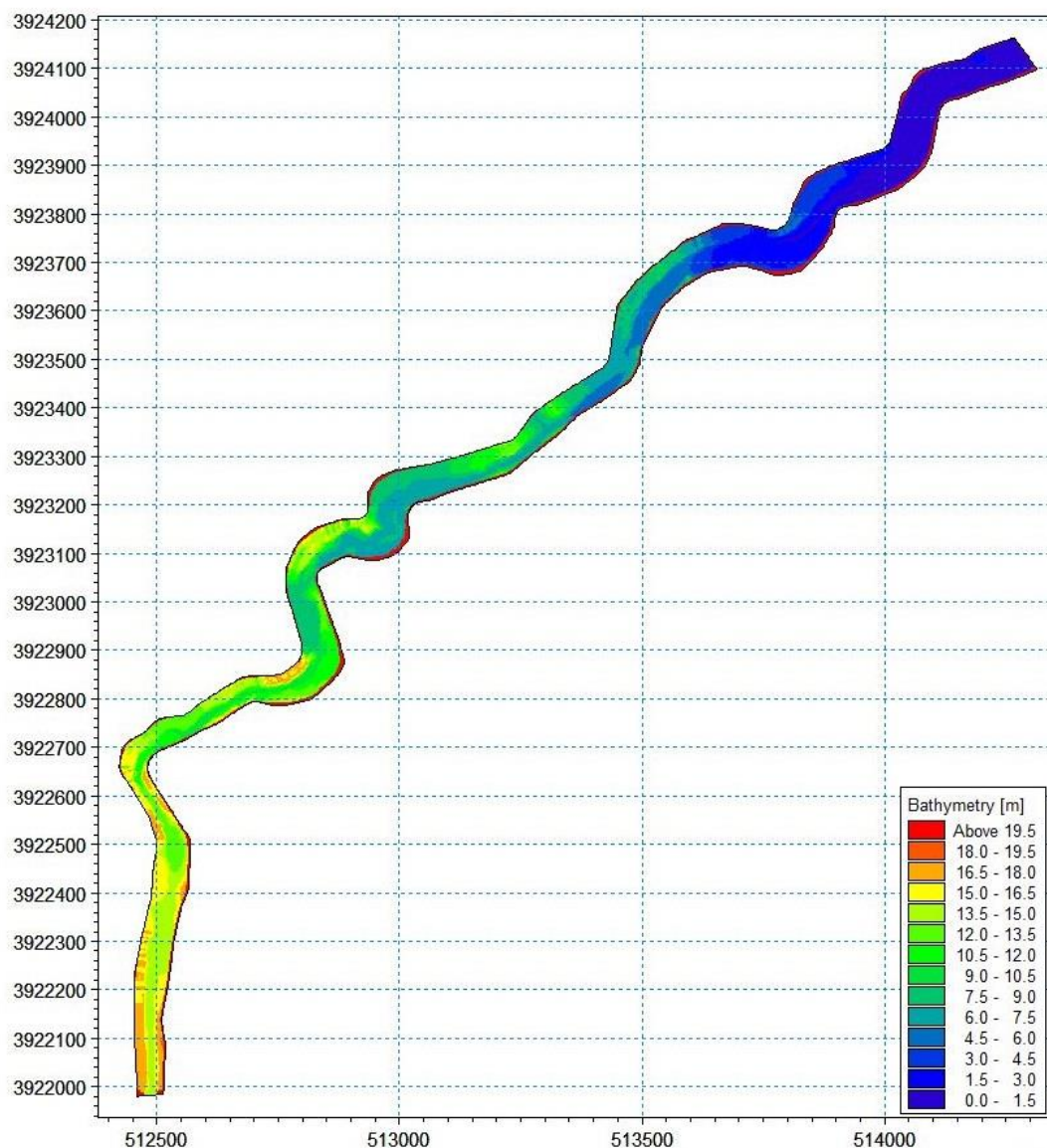
Στην Εικόνα 4.9 παρουσιάζεται το καμπυλόγραμμο υπολογιστικό πλέγμα 1000 x 25 που κατασκευάστηκε για το κατάντη τμήμα του ποταμού Κουιλάρη.



Εικόνα 4. 9. Αριστερά το καλυπλόγραμμα πλέγμα που δημιουργήθηκε για τον ποταμό Κοιλιάρη και δεξιά η μεγέθυνση ενός τμήματος του.

4.2.2. Εισαγωγή Βαθυμετρίας

Στη συνέχεια γίνεται εισαγωγή της βαθυμετρίας στο κατασκευασμένο υπολογιστικό πλέγμα από αρχεία που περιέχουν τις συντεταγμένες της περιοχής και τα υψόμετρα αυτών από την επιφάνεια της θάλασσας. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα πολύ μεγάλης ακρίβειας, 1m x 1m, μοντέλο ψηφιακού εδάφους (DEM). Το μοντέλο MIKE 21C απαιτεί επίσης τον ορισμό μιας τιμής υψομέτρου την οποία θα θεωρεί ως τιμή γης (true land value). Όλα τα σημεία του πλέγματος με υψόμετρο μεγαλύτερο ή ίσο αυτής της τιμής θα θεωρούνται ως στεριά και δεν θα λαμβάνονται υπόψη στην προσομοίωση της ροής του νερού. Στην παρούσα εργασία, η τιμή γης ορίστηκε στα 20 m. Η τιμή αυτή εφαρμόστηκε επίσης κατά μήκος των όχθων του ποταμού έτσι ώστε το μοντέλο να επιτρέπει στο νερό να εισρέει και να εκρέει μόνο από τα ανάντη και κατόντη όρια. Στην Εικόνα 4.10 παρουσιάζεται η βαθυμετρία του ποταμού Κοιλιάρη από τον σταθμό του Αγίου Γεωργίου έως την εκβολή του στη θάλασσα.



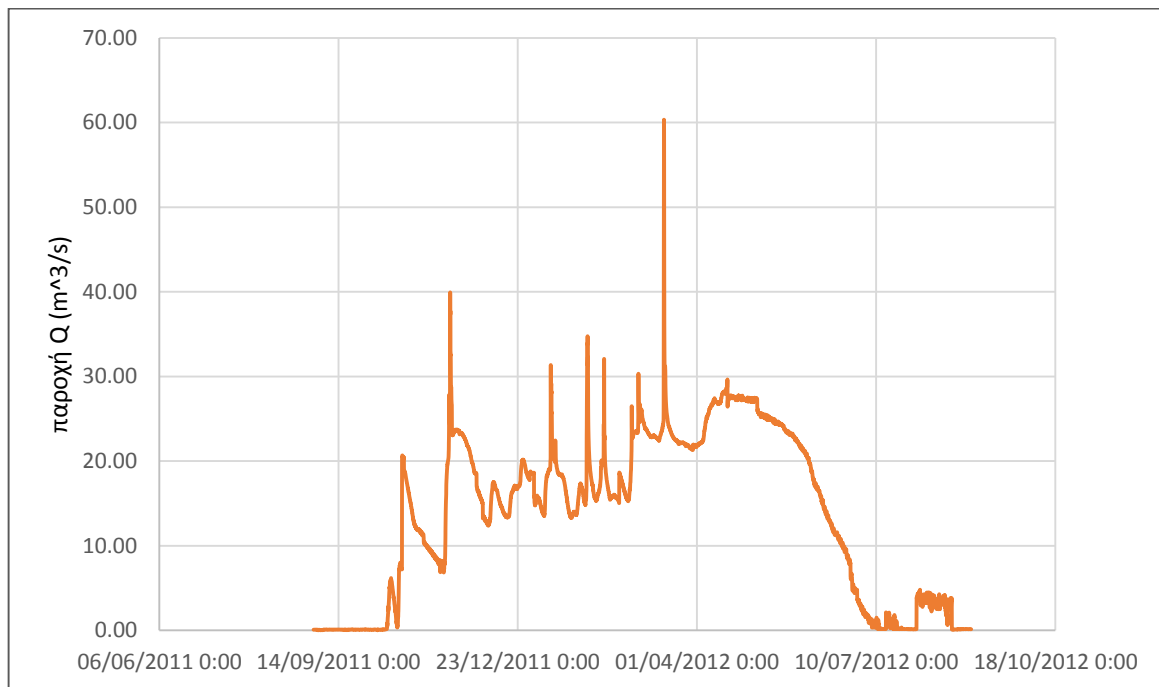
Εικόνα 4. 10. Η Βαθυμετρία του ποταμού Κοιλιάρη.

4.2.3. Περίοδος Προσομοίωσης (Simulation Period)

Στην παρούσα εργασία το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης για τη βαθμονόμηση του μοντέλου καθορίστηκε από 01/09/2010 έως 31/08/2011 και για την επαλήθευση του από 01/09/2011 έως 31/08/2012, ενώ το χρονικό βήμα καθορίστηκε στο 1 min.

4.2.4. Προσδιορισμός Οριακών Τιμών (Boundary Conditions)

Στην προσομοίωση της ροής ενός ποταμού, υπάρχουν συνήθως δύο όρια (boundaries), το ανάντη και κατόντη όριο. Στην παρούσα εργασία στο ανάντη όριο εισάγουμε χρονοσειρές παροχής από τον υδρομετρικό σταθμό του Αγίου Γεωργίου που βρίσκεται στο σημείο αυτό, ενώ στο κατόντη όριο ορίσαμε μια τιμή ύψους νερού ίση με 0.5 m. Μια τυπική χρονοσειρά παροχής από τον σταθμό του Αγ. Γεωργίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.11.



Εικόνα 4. 11. Χρονοσειρά Παροχής Υδρολογικού έτους 2011-2012

4.2.5. Υγρές και Ξηρές Συνθήκες (Flood and Dry Conditions)

Στα ποτάμια συστήματα, το ύψος του νερού ανεβαίνει και κατεβαίνει συνεχώς. Αυτό συχνά έχει ως αποτέλεσμα, αρχικά στεγνές περιοχές να πλημμυρίζουν και αρχικά υγρές περιοχές να ξηραίνονται. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να περιπλέξει αρκετά τους υδροδυναμικούς υπολογισμούς και μπορεί ακόμη να κάνει τη διαδικασία προσομοίωσης ασταθή (unstable). Για το λόγο αυτό, δύο συντελεστές ασφαλείας, το ξηρό βάθος και το υγρό βάθος, προσδιορίστηκαν για να εξασφαλίσουν τη σταθερότητα του υδροδυναμικού μοντέλου. Το ξηρό βάθος (drying depth) είναι το τοπικό βάθος νερού κάτω από το οποίο ένα σημείο του πλέγματος θα θεωρείται ως γη. Το

υγρό βάθος (flooding depth) είναι το τοπικό βάθος νερού πάνω από το οποίο ένα σημείο του πλέγματος λαμβάνεται υπόψη ως βυθισμένο (submerged) και επομένως, θα συμμετέχει στους υπολογισμούς της προσομοίωσης. Στην παρούσα εργασία οι συντελεστές αυτοί προσδιορίστηκαν στις τιμές 0.02 m για το drying depth και 0.03 m για το flooding depth

4.2.6. Ιξώδες Τύρβης (Eddy Viscosity)

Το Ιξώδες της τύρβης (Eddy Viscosity) αντιπροσωπεύει το μοριακό ιξώδες και τις επιδράσεις των αναταράξεων από τις δυνάμεις Reynolds. Η παράμετρος αυτή του μοντέλου επηρεάζει το προφίλ της επιφάνειας του νερού σε ποτάμια προσομοιώσεις γι' αυτό και επιλέχθηκε ως παράμετρος βαθμονόμησης.

Στο μοντέλο υπάρχει η δυνατότητα της επιλογής μεταξύ του βασισμένου στην ταχύτητα (velocity based) ή του βασισμένου στην παροχή (flux based) ιξώδους τύρβης. Για εφαρμογές σε ποτάμια όμως το βασισμένο στην παροχή ιξώδες τύρβης θα πρέπει να αποφεύγεται (DHI a, 2011).

4.2.7. Αντίσταση (Resistance)

Ο αριθμός Manning M χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αντίσταση που συναντά η ροή του νερού λόγω της τραχύτητας του καναλιού η οποία προκαλείται από τα στρώματα άμμου ή χαλικιού, την βλάστηση στην κοίτη και τις όχθες και αλλά εμπόδια. Ο αριθμός Manning M είναι το αντίστροφο του γνωστού Manning's n. Η τιμή του n τυπικά κυμαίνεται από 0.01 (λεία κανάλια) έως 0.10 (κανάλια με πυκνή βλάστηση). Αυτό αντιστοιχεί σε τιμές του M μεταξύ 100 και 10, αντίστοιχα. Ο παράγων αυτός επίσης επηρεάζει το προφίλ της επιφάνειας του νερού σε ποτάμια προσομοιώσεις γι' αυτό και επιλέχθηκε ως παράμετρος βαθμονόμησης του μοντέλου.

4.2.8. Υδροδυναμική Ολοκλήρωση (Hydrodynamic Integration)

Στο κομμάτι αυτό του δένδροειδούς διαγράμματος του μοντέλου (Εικόνα 4.6) επιλέγεται ο τύπος της υδροδυναμικής ολοκλήρωσης και μπορεί να είναι ένας από τους παρακάτω:

- Fully Dynamic
- Scaled Dynamic
- Quasi – Steady
- Steady

Στην παρούσα εργασία κάθε κελί του υπολογιστικού πλέγματος αντιπροσωπεύει στην πραγματικότητα περίπου 3m το οποίο σημαίνει ότι θα πρέπει να έχουμε ένα πολύ μικρό χρονικό βήμα προσομοίωσης (κάτω των 3sec) για την χρήση της Fully Dynamic επίλυσης. Για το λόγο αυτό επιλέγεται η επίλυση Scaled-Dynamic με γενικό χρονικό βήμα 60 sec και HD χρονικό βήμα 0.6 sec.

4.3. Βαθμονόμηση και Επαλήθευση του υδροδυναμικού μοντέλου MIKE 21C

Βαθμονόμηση (calibration) ενός υδραυλικού μοντέλου είναι η διαδικασία σύγκρισης των αποτελεσμάτων προσομοίωσης ενός ή περισσότερων παραμέτρων του μοντέλου (έξοδος) σε συγκεκριμένες συνθήκες, με τα δεδομένα των παρατηρήσεων – μετρήσεων των αντίστοιχων παραμέτρων στις ίδιες συνθήκες.

Η επικύρωση – επαλήθευση (validation) του μοντέλου περιλαμβάνει τη διαδικασία σύγκρισης των αποτελεσμάτων του βαθμονομημένου μοντέλου με αυτών του πεδίου σε άλλες συνθήκες. Για την αξιολόγηση της βαθμονόμησης αλλά και της επαλήθευσης του μοντέλου χρησιμοποιούμε διάφορους στατιστικούς δείκτες.

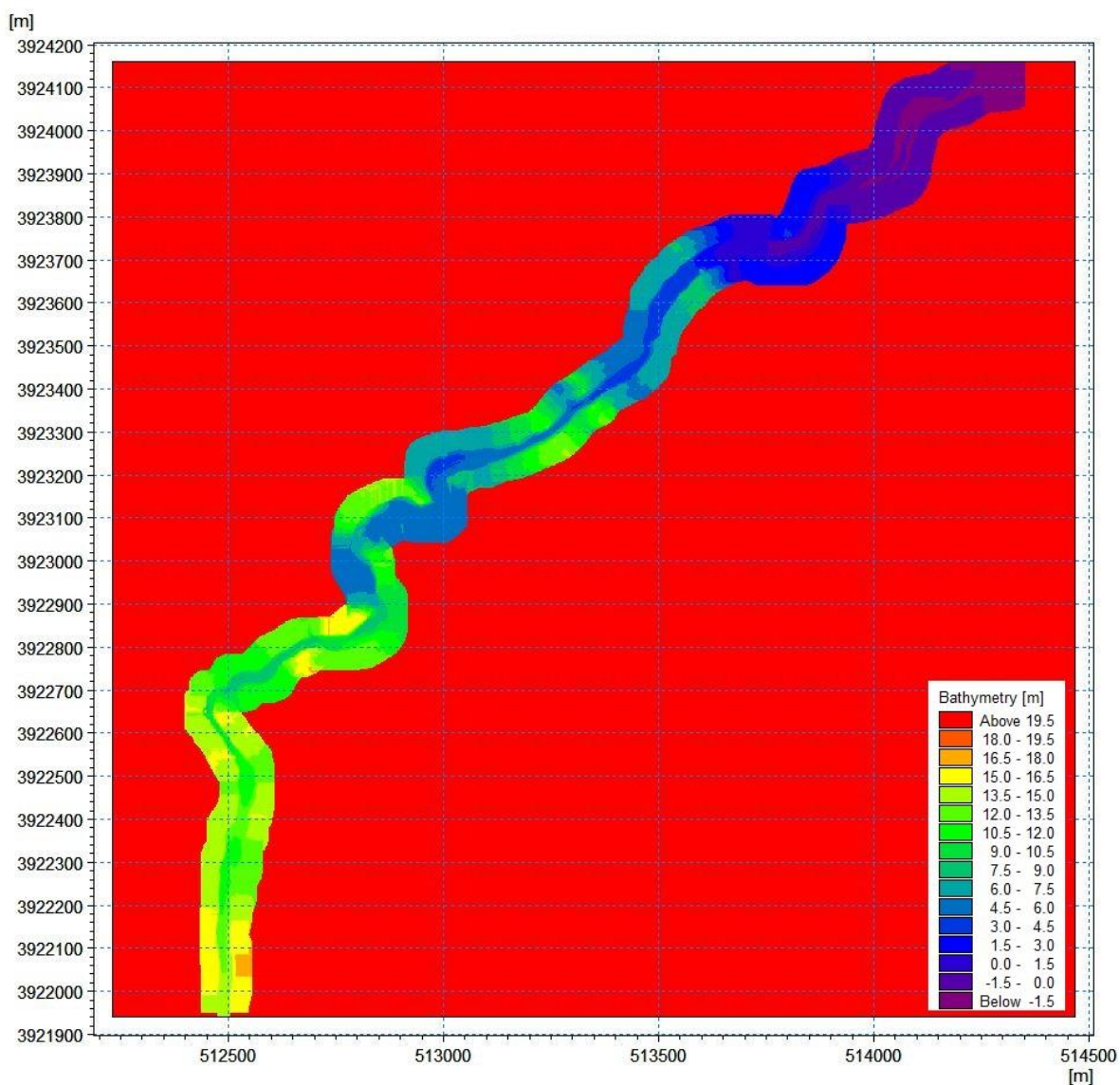
Ως παράμετροι βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, επιλέχθηκαν ο αριθμός Manning M και το ιξώδες της τύρβης (Eddy Viscosity). Ο αριθμός Manning εκφράζει την αντίσταση της ροής μέσα στο κανάλι που προκαλείται από τα υλικά του πυθμένα και την βλάστηση στις όχθες. Το ιξώδες της τύρβης αντιπροσωπεύει το μοριακό ιξώδες και τις επιπτώσεις των αναταράξεων από τους τις δυνάμεις Reynolds. Και οι δύο αυτοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν το προφίλ της επιφάνειας του νερού σε μια προσομοίωση ροής ποταμού.

4.4. Δημιουργία του Υδροδυναμικού μοντέλου τετραγωνισμένου πλέγματος (MIKE 21)

Για λόγους σύγκρισης, δημιουργήθηκε το ίδιο υδροδυναμικό ποτάμιο σύστημα χρησιμοποιώντας το μοντέλο MIKE 21 HD. Το Μοντέλο Ροής MIKE 21 είναι ένα μοντέλο

πεπερασμένων διαφορών με σταθερές αποστάσεις πλέγματος στην x και y κατεύθυνση, και ως εκ τούτου η περιοχή προσομοίωσης θα πρέπει να είναι ορθογώνια. Τα υπολογιστικά σημεία θα βρίσκονται επίσης σε ένα τετραγωνισμένο πλέγμα.

Στην ουσία, όπως έχουμε προαναφέρει, δεν αλλάζει κάτι στις φυσικές εξισώσεις αλλά στην επίλυση τους, δηλαδή στον κάνναβο. Επομένως, όλες οι παράμετροι του υδροδυναμικού μοντέλου MIKE 21 θα είναι ίδιες με αυτές που εισήχθησαν στο υδροδυναμικό μοντέλο MIKE 21C μετά την βαθμονόμηση του, εκτός της βαθυμετρίας η οποία δημιουργήθηκε σε τετραγωνισμένο κάνναβο και έχει τη μορφή της Εικόνας 4.12.



Εικόνα 4. 12. Βαθυμετρία σε τετραγωνισμένο κάνναβο στο μοντέλο MIKE 21.

4.5. Δημιουργία του Μοντέλου Μορφολογίας ποταμού MIKE 21C

Μετά από την επιτυχημένη βαθμονόμηση και επαλήθευση του υδροδυναμικού μοντέλου MIKE 21C και τη σύγκριση του με την βασική έκδοση του μοντέλου MIKE 21, σειρά έχει η δημιουργία και η βαθμονόμηση του μοντέλου μορφολογίας ποταμού MIKE 21C στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση μεταφοράς αιωρούμενου ιζήματος. Για την προσομοίωση της μεταφοράς ιζήματος, δημιουργήθηκε ένα αρχείο «hot start» από την υδροδυναμική προσομοίωση, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως αρχικές συνθήκες στην προσομοίωση της μεταφοράς στερών υλών. Στην καρτέλα Starting Conditions του μοντέλου μορφολογίας ενεργοποιούμε τα πεδία: Helical Flow (Ελικοειδής – Δευτερεύουσα ταχύτητα), Sediment Transport (Μεταφορά Ιζήματος), Planform (Διάβρωση) και Morphological Update (Αλλαγή Μορφολογίας).

4.5.1. Περίοδος Προσομοίωσης (Simulation Period)

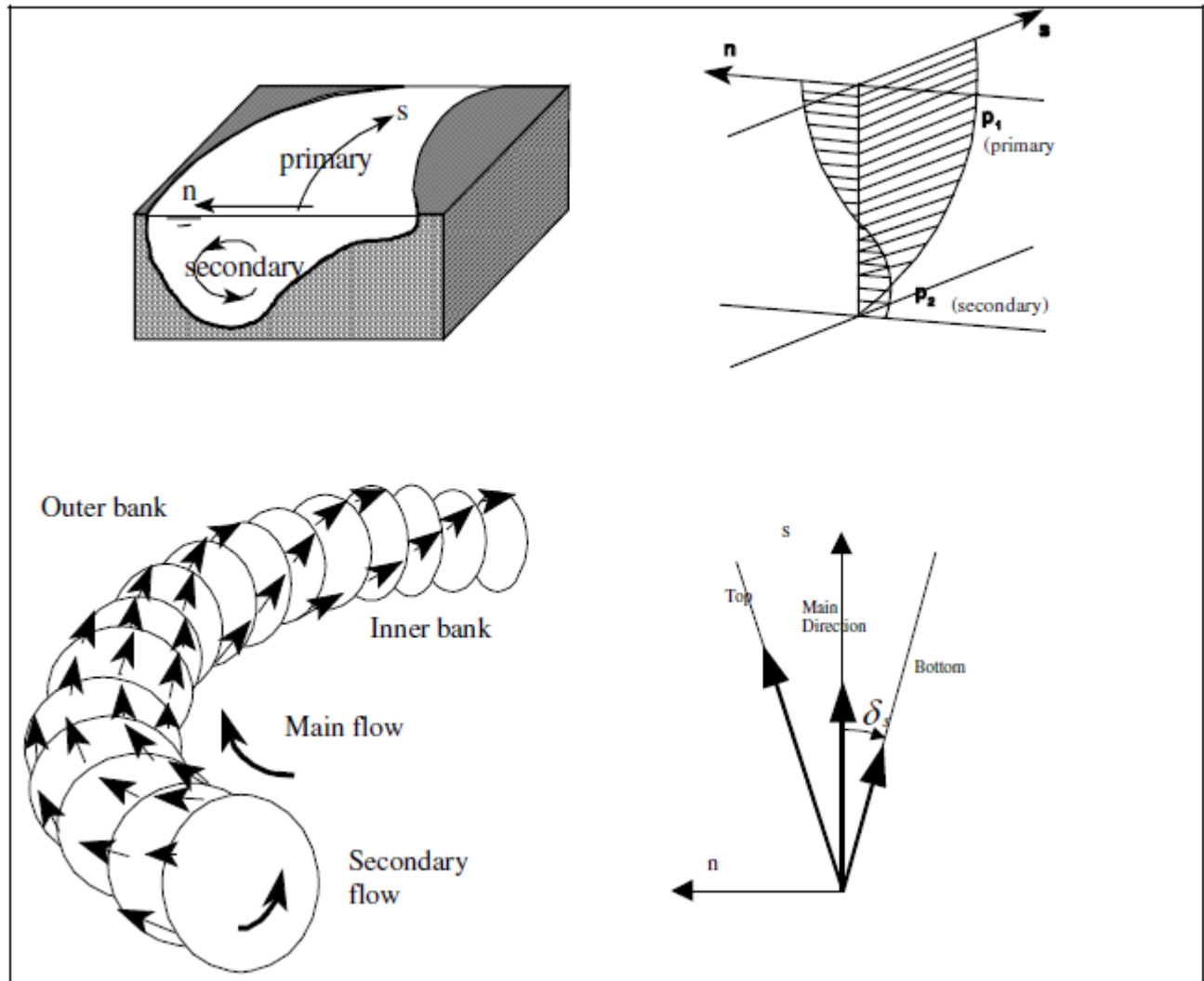
Μια προσομοίωση που ξεκινάει με αρχείο hot start σαν αρχικές συνθήκες θα χρησιμοποιήσει ως χρονικό βήμα, το βήμα που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της δημιουργίας αυτού του hot start αρχείου και η προσομοίωση θα ξεκινήσει με πρώτο βήμα το τελευταίο αυτού. Το αρχείο hot start δημιουργήθηκε κατά την προσομοίωση του υδρολογικού έτους 2010-2011 και η προσομοίωση της μεταφοράς ιζήματος πραγματοποιήθηκε για τις περιόδους 01/09/2011-31/12/2012 και 01/01/2013- 31/12/2013.

4.5.2. Ελικοειδής Ροή (Helical Flow)

Η ελικοειδής ροή είναι μία κύρια δευτερεύουσα ροή στο ποτάμι. Σε κανάλια με μεγάλη αναλογία πλάτους – βάθους η ροή αυτή δεν έχει μεγάλη επίπτωση στην γενική ροή, έχει όμως επίπτωση στην μεταφορά ιζήματος και την κατεύθυνση της και ως εκ τούτου και στην αλλαγή της μορφολογίας του ποταμού (Olesen et al., 1987). Η ελικοειδής ροή υπολογίζεται επομένως σε σύνδεση με την προσομοίωση της μεταφοράς ιζήματος διότι προκαλεί διάβρωση και αποσάθρωση του εδάφους, ιδιαίτερα σε τμήματα ποταμού που αλλάζει έντονα η διεύθυνση ροής (μαιάνδρους) και στις συμβολές των παραπόταμων δημιουργεί προσχωματικές καταθέσεις στις όχθες.

Η ελικοειδής ροή συμβαίνει κυρίως σε καμπύλες ροές και ιδιαίτερα στις στροφές των ποταμών. Προκύπτει από μια ανισορροπία μεταξύ της πίεσης και της κεντρομόλου επιτάχυνσης

που ασκείται στο νερό που κινείται κατά μήκος μιας καμπύλης διαδρομής. Κοντά στη κοίτη, η ελικοειδής ροή κατευθύνεται προς το κέντρο καμπυλότητας ροής. Το μέγεθος της ελικοειδούς ροής (η συνιστώσα της ταχύτητας εγκάρσιας ροής) σπάνια υπερβαίνει το 5-10% της κύριας ταχύτητας ροής σε φυσικά ποτάμια (Εικόνα 4.13).



Εικόνα 4. 13. Θεωρητικές απεικονίσεις της δευτερεύουσας ροής σε τμήματα ποταμού που αλλάζει έντονα η διεύθυνση ροής

Το μέγεθος της δευτερεύουσας ροής είναι ανάλογο προς το βάθος ροής και αντιστρόφως ανάλογο προς την ακτίνα καμπυλότητας της κύριας γραμμής του καναλιού. Αυτό έχει οριστεί από τον De Vriend (1981):

$$i_s = u \cdot \frac{h}{R_s} \quad (4.10)$$

Όπου: u είναι η κύρια ταχύτητα ροής (m/s), R_s είναι η ακτίνα καμπυλότητας των γραμμών ροής (m), h το βάθος (m) και i_s είναι η ένταση της ελικοειδούς ροής (m/s).

Στο μοντέλο η ελικοειδής ροή εκφράζεται με την μορφή μιας σταθεράς a . Η σχέση της σταθεράς αυτής με την ελικοειδή ροή καθορίζεται από τις δύο παρακάτω εξισώσεις:

$$\tan \delta_s = \beta \cdot \frac{h}{R_s} \quad (4.11)$$

$$\beta = \alpha \cdot \frac{2}{\kappa^2} \left(1 - \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right) \quad (4.12)$$

Όπου δ_s είναι η γωνία μεταξύ της διατμητικής τάσης της κοίτης και του μέσου βάθους ροής, κ είναι η σταθερά von Karman ίση με 0.4, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας 9.81 m/s^2 , C ο αριθμός Chezy και α η παράμετρος εισαγωγής στο μοντέλο.

Η σταθερά α χρησιμοποιείται και ως σταθερά βαθμονόμησης του μοντέλου και το εύρος τιμών, που προτείνεται από τον οδηγό χρήσης του, είναι από 0.4 έως 1.2.

4.5.3. Μεταφορά Ιζήματος (Sediment transport)

Στην υπορουτίνα αυτή καθορίστηκε ο τύπος του ιζήματος ως συνεκτικό (cohesive), η επιλογή αυτή έγινε με βάση την κοκκομετρική ανάλυση (Κεφάλαιο 4.1.2) και την μέση διάμετρο των κόκκων (0.00935 mm). Επίσης καθορίστηκε το πορώδες του ιζήματος $n=0.5$ και η πυκνότητα του $s=2.65 \text{ kg/m}^3$. Σύμφωνα με τον οδηγό χρήσης του MIKE 21C οι τιμές αυτές είναι τυπικές για ένα λεπτόκοκκο ιζήμα. Στην ίδια καρτέλα καθορίστηκε και η τιμή της παραμέτρου critical Shields η οποία σε πολλές περιπτώσεις αποτελεί παράμετρο βαθμονόμησης του μοντέλου. Στην παρούσα εργασία η τιμή αυτής της παραμέτρου βρέθηκε να μην επηρεάζει τη συγκέντρωση αιωρούμενου ιζήματος κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου οπότε και έμεινε στην προκαθορισμένη από το μοντέλο τιμή της $\theta=0.0056$.

Η επίδραση της κλίσης της κοίτης καθορίζεται επίσης στο μοντέλο μεταφοράς ιζήματος με τις παραμέτρους G και α . Η κλίση της κοίτης υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\tan v = G \cdot \theta^{-\alpha} \cdot \frac{dz}{dn} \quad (4.13)$$

Όπου θ είναι η critical Shields παράμετρος και dz/dn η εγκάρσια κλίση της κοίτης.

Οι προκαθορισμένες τιμές του μοντέλου για τις παραμέτρους G και α είναι $G=1.25$ και $\alpha=0.5$ και είναι τιμές που ανταποκρίνονται σε συνθήκες πεδίου (DHI a, 2011).

4.5.4. Μέγεθος κόκκων (Grain Size)

Στην καρτέλα *Grain Size* εισάγουμε την τιμή της μέσης διαμέτρου του ιζήματος που είναι ίση με 0.00935mm.

4.5.5. Συντελεστές Διασποράς (Dispersion Coefficients)

Οι συντελεστές διασποράς καθορίζονται για το μοντέλο μεταφοράς-διασποράς (advection-dispersion model), το οποίο χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς της μεταφοράς αιωρούμενου ιζήματος. Οι συντελεστές αυτοί αντιπροσωπεύουν την ανάμειξη λόγω ανομοιομορφίας στα προφίλ κάθετης ροής και συγκέντρωσης και λόγω της δευτεροβάθμιας ροής (ελικοειδής ροή). Οι τιμές αυτών των συντελεστών προσδιορίζονται μέσα από την βαθμονόμηση του μοντέλου και τη σύγκριση με παρατηρούμενες τιμές συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος. Σύμφωνα με τον οδηγό χρήσης του μοντέλου τιμές μεγαλύτερες του 0.5 m²/s μπορούν να προκαλέσουν ασταθείς συνθήκες.

4.5.6. Αρχική Συγκέντρωση (Initial Concentration)

Η αρχικές συνθήκες στο μοντέλο μεταφοράς ιζήματος αφορούν την αρχική συγκέντρωση ιζήματος στο ποτάμι στην αρχή της προσομοίωσης. Η τιμή αυτή καθορίστηκε στα 1.5 mg/L και είναι ίση με την μικρότερη τιμή συγκέντρωσης των δεδομένων παρατήρησης.

4.5.7. Θεωρία Μεταφοράς (Transport Theory)

Όπως προαναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2.6.2 η θεωρία μεταφοράς που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι η Engelund and Hansen (1967). Ο συντελεστής μεταφοράς αιωρούμενου ιζήματος (Suspended load factor) χρησιμοποιήθηκε ως παράμετρος βαθμονόμησης του μοντέλου, ενώ για τον συντελεστή μεταφοράς ιζήματος κοίτης (Bed load factor) ισχύει: $k_b=1-k_s$, λόγω των εξισώσεων 2.17 και 2.18 (Κεφάλαιο 2.6.2).

4.5.8. Διάβρωση Πρανών (Bank Erosion)

Σημαντικό ρόλο στην προσομοίωση μεταφοράς ιζήματος και της αλλαγής της μορφολογίας ποταμών παίζει και η διάβρωση των πρανών. Για φυσικά ποτάμια, όπως ο ποταμός Κοιλιάρης, που δεν υπάρχει κάποιο έργο προστασίας των πρανών, η προσθήκη μίας περιγραφής της διάβρωσης τους στην προσομοίωση είναι ζωτικής σημασίας για την πλήρη περιγραφή της μορφολογίας της περιοχής. Στο μοντέλο MIKE 21C, η διάβρωση των πρανών μπορεί να προσομοιωθεί παράλληλα με την υδροδυναμική προσομοίωση και την προσομοίωση μεταφοράς ιζήματος. Επομένως σε κάθε χρονικό βήμα, το υλικό από τα διαβρωμένα πρανή συμπεριλαμβάνεται στην επίλυση της εξίσωσης συνέχειας για το ίζημα. Η εξίσωση 4.14 περιγράφει το μοντέλο διάβρωσης πρανών:

$$E_b = -\alpha \cdot \frac{\partial z}{\partial t} + \beta \cdot \frac{S}{h} + \gamma \quad (4.14)$$

Όπου E_b ο ρυθμός διάβρωσης σε m/s, z το τοπικό ύψος κοίτης, S η μεταφορά ιζήματος κοντά στις όχθες, h το τοπικό βάθος νερού και α , β , γ συντελεστές βαθμονόμησης που καθορίζονται μέσα στο μοντέλο. Στην παρούσα εργασία οι συντελεστές αυτοί έλαβαν τις τιμές 1, 0.01 και 0 αντίστοιχα, σύμφωνα με τα εύρη τιμών που δίνονται από τον οδηγό χρήσης του μοντέλου.

Το έξτρα ίζημα που απορρέει μέσα στο ποτάμι από την διάβρωση και που προστίθεται στην εξίσωση συνέχειας είναι:

$$\Delta S_e = E_b \cdot (h + h_b) \quad (4.15)$$

Όπου h_b το ύψος της κοίτης πάνω από ύψος νερού.

Η συσσωρευμένη διάβρωση των πρανών προκαλεί μια υποχώρηση στη θέση των γραμμών – πρανών. Το MIKE 21C ενσωματώνει αυτή την παράμετρο με αναδιαμόρφωση του καννάβου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

4.5.9. Αλλαγή Μορφολογίας ποταμού (Morphological Update)

Το πεδίο αυτό ενεργοποιείται έτσι ώστε το μοντέλο να δίνει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή του ύψους της κοίτης σε κάθε σημείο του καννάβου κάθε χρονική στιγμή. Η αλλαγή αυτή προκαλείται από την μεταφορά ιζήματος και την διάβρωση. Οι παράμετροι στο πεδίο αυτό έμειναν όπως ήταν προκαθορισμένες από το μοντέλο.

Επομένως, η διάβρωση των πρανών που περιγράφηκε παραπάνω και η αλλαγή της μορφολογίας μπορούν να δώσουν σαν αποτέλεσμα έναν νέο κάνναβο με νέες συντεταγμένες για τα πρανή και νέα ύψη κοίτης.

4.5.10. Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions)

Ως οριακές συνθήκες για την μεταφορά ιζήματος στα κατάντη και στα ανάντη του ποταμού εισήχθησαν οι χρονοσειρές συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος που παρήχθησαν στο Κεφάλαιο 4.1.2.

4.6. Βαθμονόμηση και Επαλήθευση του μοντέλου μεταφοράς ιζήματος MIKE 21C

Η βαθμονόμηση του μοντέλου μεταφοράς ιζήματος πραγματοποιήθηκε για την περίοδο 01/01/2013 έως 31/12/2013, ενώ η επαλήθευση του πραγματοποιήθηκε για την περίοδο 01/09/2011 έως 31/12/2012. Η επιλογή της περιόδου βαθμονόμησης έγινε με βάση τις τιμές παρατήρησης (τιμές πεδίου) όπου και υπήρχε μία μόνο πολύ υψηλή τιμή συγκέντρωσης (300 mg/L) στις 04/12/2013 έτσι ώστε το μοντέλο να βαθμονομηθεί τόσο στις πολύ χαμηλές όσο και στις πολύ υψηλές τιμές συγκέντρωσης.

Ως παράμετροι βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου επιλέχθηκαν: η σταθερά a η οποία καθορίζει το μέγεθος της ελικοειδούς ροής (Helical Flow) σύμφωνα με τις εξισώσεις 4.11 και 4.12, οι συντελεστές διασποράς (Dispersion coefficients) στις κατευθύνσεις x και y οι οποίοι αντιπροσωπεύουν την ανάμειξη λόγω ανομοιομορφίας στα προφίλ κάθετης ροής και λόγω συγκέντρωσης και ο συντελεστής μεταφοράς αιωρούμενου ιζήματος (Suspended load factor).

4.7. Δείκτες στατιστικής ανάλυσης αποτελεσμάτων Βαθμονόμησης – Επαλήθευσης των δύο μοντέλων.

Για την εκτίμηση της καλής συσχέτισης μεταξύ των δεδομένων του πεδίου και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω στατιστικούς δείκτες:

Δείκτης Nash-Sutcliffe (NSE): Ο συντελεστής αποδοτικότητας Nash-Sutcliffe (NSE) είναι ένας κανονικοποιημένος στατιστικός δείκτης που καθορίζει το μέτρο της ποιότητας του μοντέλου σε σχέση με την αντιπροσωπευτικότητα της διακύμανσης των δεδομένων (Nash and Sutcliffe, 1970). Ο δείκτης NSE κυμαίνεται μεταξύ $-\infty$ και 1.0, με $NSE = 1$ να είναι η βέλτιστη τιμή. Τιμές μεγαλύτερες του 0.75 θεωρούνται γενικά ως αποδεκτά επίπεδα απόδοσης, ενώ οι τιμές < 0.0 δείχνουν ότι η μέση τιμή των δεδομένων που παρατηρήθηκαν είναι ένας καλύτερος προγνωστικός δείκτης από τις προσομοιωμένες τιμές του μοντέλου, οι οποίες αποδεικνύουν πολύ κακή απόδοση (Moriasi, 2007). Ο NSE υπολογίζεται από τη σχέση (4.16):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.16)$$

Ο δείκτης RSR είναι ένας δείκτης που τυποποιεί τον γνωστό δείκτη RMSE χρησιμοποιώντας την τυπική απόκλιση των παρατηρήσεων (observations standard deviation) και υπολογίζεται από τη σχέση (4.17):

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.17)$$

RSR κυμαίνεται από τη βέλτιστη τιμή 0, η οποία δείχνει το μηδέν RMSE και συνεπώς τέλεια προσομοίωση μοντέλου, έως μεγάλες θετικές τιμές. Όσο χαμηλότερη η τιμή του RSR, τόσο χαμηλότερη είναι η τιμή του RMSE, και τόσο καλύτερη είναι η απόδοση του μοντέλου (Moriasi, 2007).

Ο δείκτης Pbias (%) υπολογίζει αν η μέση τάση των προσομοιωμένων τιμών είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την αντίστοιχη των δεδομένων παρατήρησης. Η βέλτιστη τιμή του είναι το 0, με θετικές τιμές να υποδηλώνουν υποεκτίμηση, και αρνητικές τιμές υπερεκτίμηση του μοντέλου (Moriasi, 2007). Ο δείκτης Pbias (%) δίνεται από την σχέση (4.18)

$$Pbias(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) * 100}{\sum_{i=1}^n (y_i)} \quad (4.18)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης R(correlation), είναι ένα μέτρο της ακρίβειας ή του βαθμού στον οποίο συμφωνούν οι μετρούμενες και προβλεπόμενες τιμές. Ο συντελεστής R περιγράφεται από την εξίσωση (4.19):

$$R(correl) = \frac{\sum (y_i - \bar{y}_i)(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}_i)}{\sqrt{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2 \sum (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}_i)^2}} \quad (4.17)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης είναι καθαρός αριθμός, δηλαδή δεν εκφράζεται σε συγκεκριμένες μονάδες μέτρησης και οι τιμές του πρέπει να βρίσκονται στο εύρος: $-1 < R < +1$. Πιο συγκεκριμένα για την περίπτωση μας όταν $R = +1$ τότε έχουμε τέλεια θετική γραμμική συσχέτιση των δύο χρονοσειρών. Αποδεκτές για την βαθμονόμηση του μοντέλου θεωρούμε τιμές μεγαλύτερες του 0.8.

Για τις εξισώσεις 4.16, 4.17, 4.18 και 4.19, n είναι ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων, y_i είναι η τιμή πεδίου (παρατήρησης), \hat{y}_i είναι η αντίστοιχη τιμή προσομοίωσης και \bar{y} είναι η μέση τιμή των n παρατηρήσεων.

Ο πίνακα 4.4, προτάθηκε από τον Moriasi (2007) για την αξιολόγηση των προσομοιώσεων ροής και μεταφοράς ιζήματος σε ποτάμια.

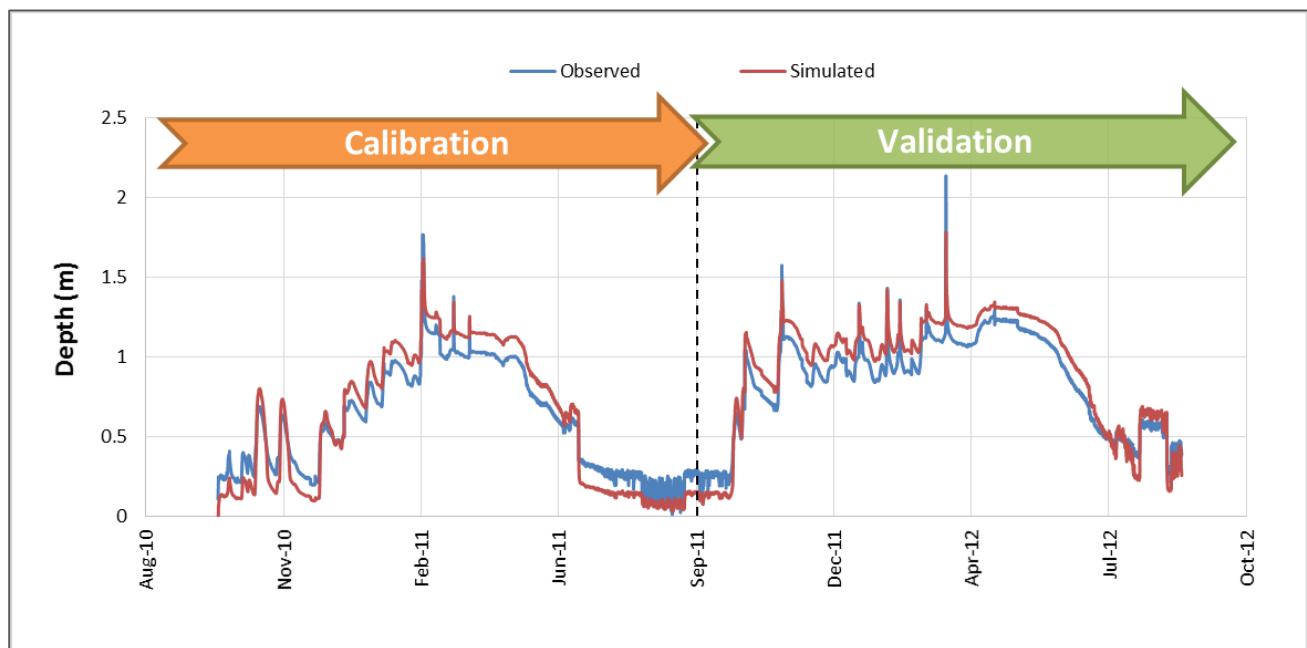
Πίνακας 4. Πίνακας αξιολόγησης της απόδοσης των μοντέλων με τρεις στατιστικούς δείκτες, Moriasi 2007.

Απόδοση	RSR	NSE	Pbias(%)	
			Ροή ποταμού	Ίζημα
Πολύ καλή	$0.00 \leq \text{RSR} \leq 0.50$	$0.75 \leq \text{NSE} \leq 1.00$	$\text{Pbias} < \pm 10$	$\text{Pbias} < \pm 15$
Καλή	$0.50 < \text{RSR} \leq 0.60$	$0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$	$\pm 10 \leq \text{Pbias} < \pm 15$	$\pm 15 \leq \text{Pbias} < \pm 30$
Ικανοποιητική	$0.60 < \text{RSR} \leq 0.70$	$0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$	$\pm 15 \leq \text{Pbias} < \pm 25$	$\pm 30 \leq \text{Pbias} < \pm 55$
Μη ικανοποιητική	$\text{RSR} > 0.70$	$\text{NSE} \leq 0.50$	$\text{Pbias} \geq \pm 25$	$\text{Pbias} \geq \pm 55$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Αποτελέσματα

5.1. Αποτελέσματα Υδροδυναμικού Μοντέλου MIKE 21C

Το υδροδυναμικό μοντέλο προσομοίωσης βαθμονομήθηκε για το υδρολογικό έτος 2010-2011 και επαληθεύτηκε για το υδρολογικό έτος 2011-2012, χρησιμοποιώντας ωριαία δεδομένα στάθμης νερού από το σταθμό του Αγ. Γεωργίου (observed data). Τα δεδομένα αυτά συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια υψηλών και χαμηλών παροχών. Η Εικόνα 5.1 παρουσιάζει τις προσομοιωμένες τιμές (κόκκινο χρώμα) του βάθους νερού σε σύγκριση με τις παρατηρούμενες τιμές από τον Αγ. Γεώργιο (μπλε χρώμα) για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης.



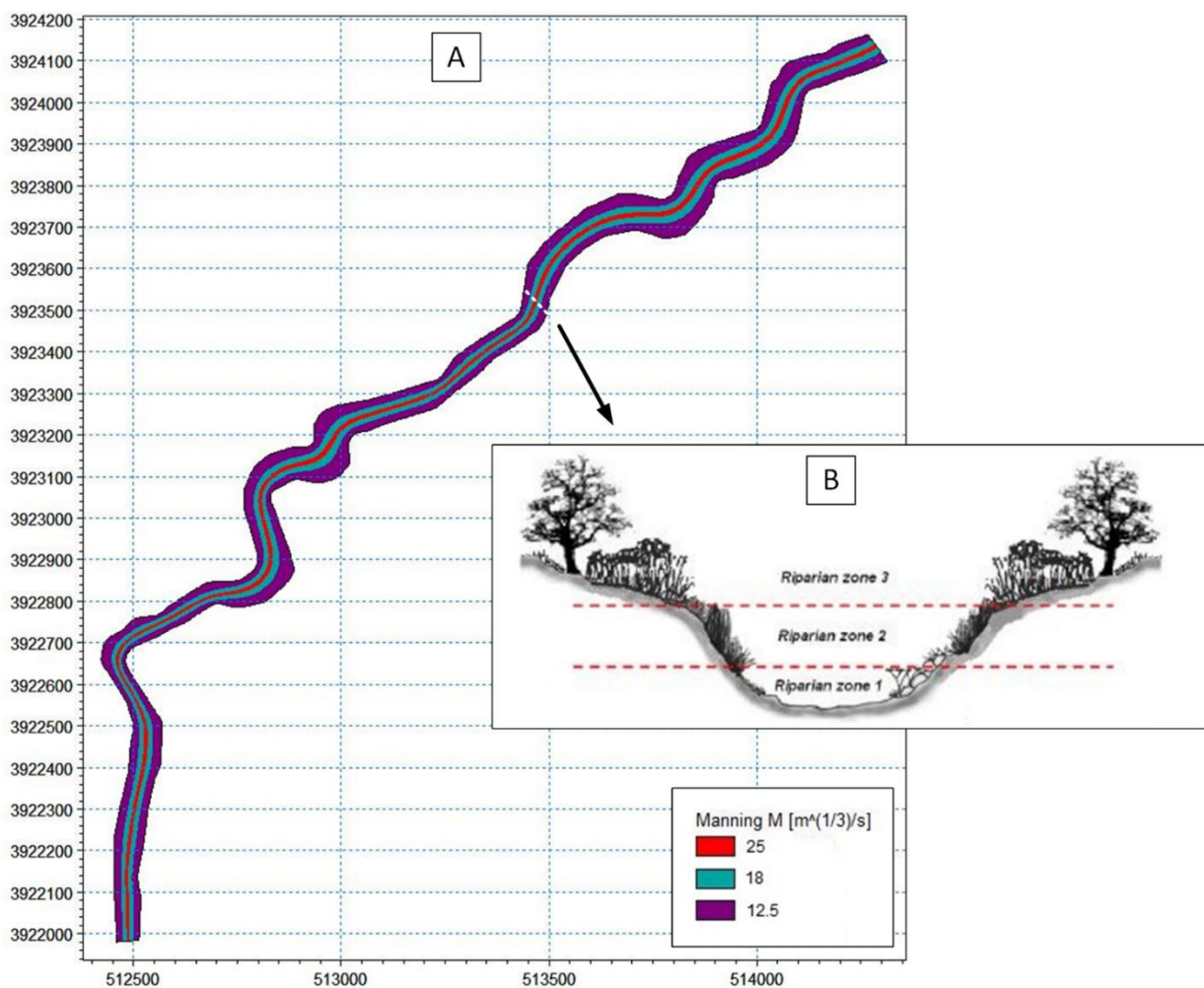
Εικόνα 5. 1. Υδρογράφημα προσομοιωμένων τιμών βάθους νερού στον ποταμό Κοιλιάρη (κόκκινο χρώμα) σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου (μπλε χρώμα) για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης.

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4.3 οι διαδικασίες της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης πραγματοποιήθηκαν με την εκτίμηση του αριθμού Manning και της τιμής του ιξώδους της τύρβης (Eddy Viscosity), έτσι ώστε τα αποτελέσματα του μοντέλου να είναι σε καλή συσχέτιση με τα δεδομένα παρατήρησης. Η καλή συσχέτιση είναι εμφανής από τους τρεις στατιστικούς δείκτες που υπολογιστήκαν για τις δύο περιόδους. Για την περίοδο βαθμονόμησης

είχαμε τον δείκτη αποδοτικότητας $NSE = 0.88$, το $RSR = 0.35$ και το $Pbias = -2.6$ και για την περίοδο επαλήθευσης $NSE = 0.87$, $RSR = 0.35$ και $Pbias = -8$, οι οποίοι αποδεικνύουν πολύ καλή συσχέτιση σύμφωνα με τον πίνακα 4.4 και με τον δείκτη $Pbias$ (αρνητικές τιμές) να υποδηλώνει υπερεκτίμηση του μοντέλου.

Ο αριθμός Manning (M) έχει διαφορετικές τιμές κατά μήκος μίας διατομής ποταμού. Οι Kourgialas et al. (2013) χώρισαν τις διατομές του ποταμού Κοιλιάρη σε τρεις ζώνες με διαφορετική αντίσταση πυθμένα σύμφωνα με τη βλάστηση (Εικόνα 5.2. Β). Η πρώτη ζώνη (Riparian zone 1) αντιπροσωπεύει τον πυθμένα του προφίλ του ποταμού, δηλαδή την κυρίως κοίτη, η δεύτερη ζώνη (Riparian zone 2) αντιπροσωπεύει την περιοχή γύρω από τις όχθες του και η τρίτη ζώνη (Riparian zone 3) την περιοχή εκτός των όχθων όπου υπάρχει περισσότερη βλάστηση (δέντρα και θάμνοι). Στο υπολογιστικό πλέγμα του μοντέλου MIKE 21C, δίνεται η δυνατότητα να χωριστεί το ποτάμι σε τρεις ζώνες με διαφορετικές τιμές αντίστασης πυθμένα (Εικόνα 5.2. Α). Σε κάθε ζώνη του ποταμού αντιστοιχεί μια τιμή του αριθμού Manning M . Η τιμή αυτή είναι συνήθως μεγαλύτερη στην κυρίως στον πυθμένα του υδατορέματος, όπου το νερό δεν συναντά μεγάλες αντιστάσεις, ενώ γίνεται μικρότερη όσο πλησιάζουμε προς τις όχθες. Μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου οι τιμές Manning M για τις ζώνες 1, 2 και 3 εκτιμήθηκαν στα $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, $18 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ και $12.5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ αντίστοιχα.

Η δεύτερη παράμετρος βαθμονόμησης, η παράμετρος Eddy Viscosity, μετά τη διαδικασία βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου εκτιμήθηκε στην τιμή των $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$.



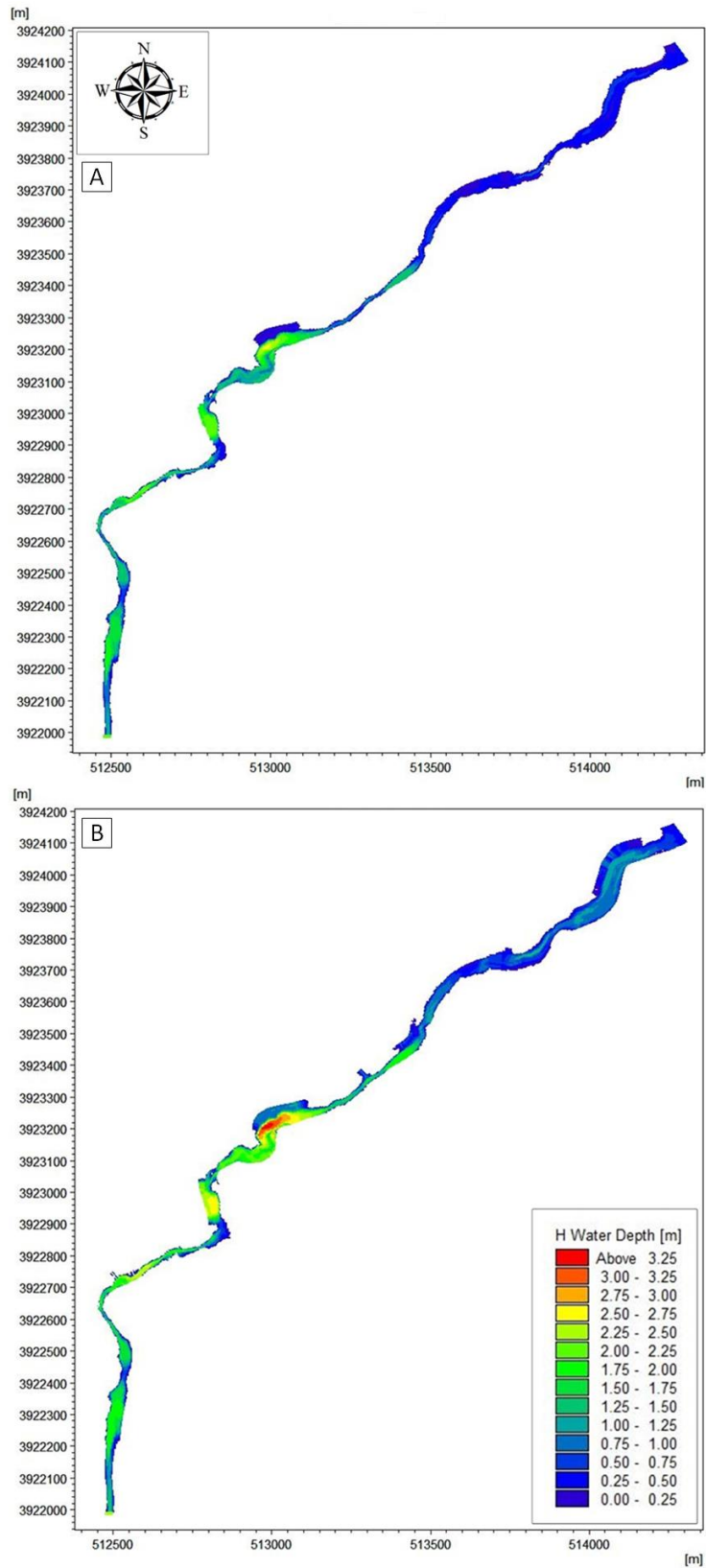
Εικόνα 5. 2. Α) Οι ζώνες των τιμών Manning M στον κάνναβο του μοντέλου MIKE 21C, Β) Σχηματική απεικόνιση των διαφορετικών ζωνών βλάστησης στην διατομή ενός ποταμού, Kourgialas and Karatzas (2013).

Μετά την επιτυχή διαδικασία βαθμονόμησης και επαλήθευσης, το μοντέλο MIKE 21C έχει τη δυνατότητα δημιουργίας δισδιάστατων χαρτών του βάθους νερού στο ποτάμι και της ταχύτητας ροής του σε οποιοδήποτε σημείο του υδατορέμματος. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται δύο χάρτες (Εικόνα 5.3) για το βάθος νερού στον ποταμό Κοιλιάρη, οι οποίοι δημιουργήθηκαν για δύο αντιπροσωπευτικά χρονικά βήματα της προσομοίωσης. Ο πρώτος χάρτης αντιστοιχεί σε μία θερινή ημέρα (31/08/2011) όπου η παροχή του ποταμού είναι πολύ χαμηλή και ο δεύτερος αντιστοιχεί σε μία ημέρα με ένα γεγονός έντονης βροχής (14/03/2012), όπου η παροχή που μετρήθηκε στον Αγ. Γεώργιο ξεπερνούσε τα $60 \text{ m}^3/\text{sec}$. Όπως μπορούμε να δούμε στην Εικόνα 5.3, το κανάλι στις υψηλές παροχές είναι ευρύτερο σε μήκος διατομής και το βάθος νερού μπορεί

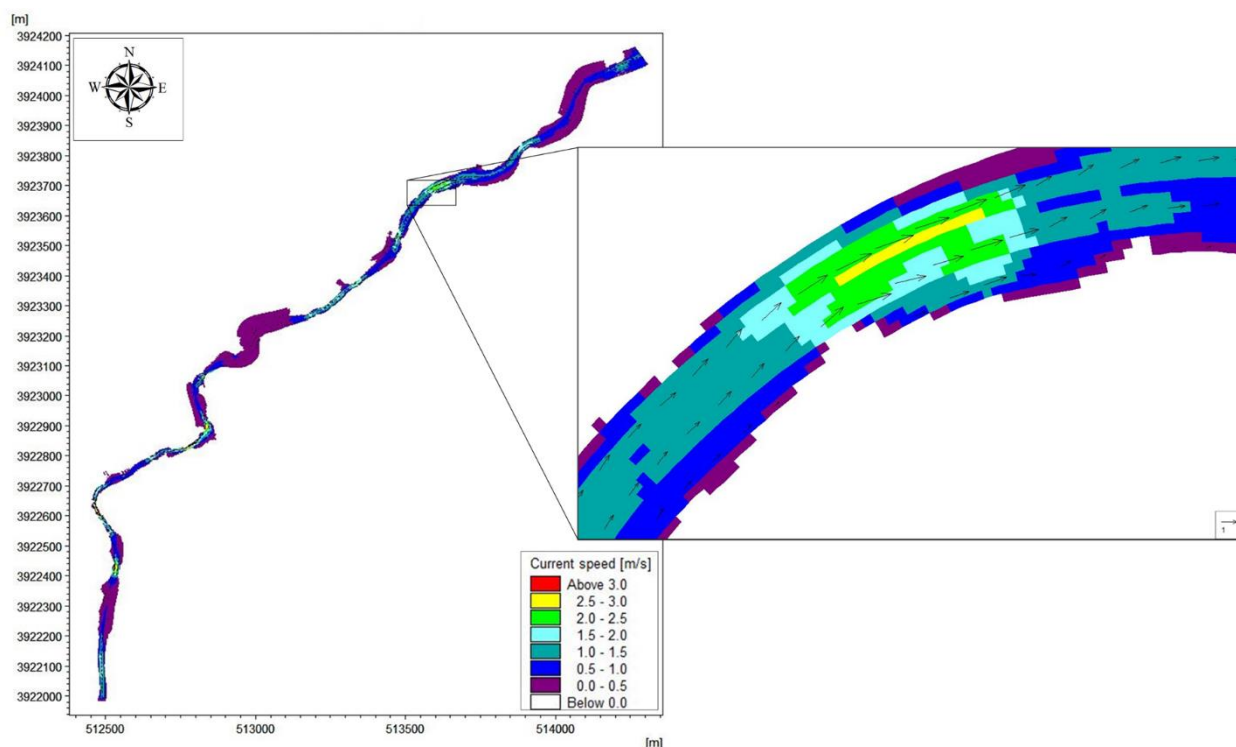
να ξεπεράσει, σε ορισμένα τμήματα του ποταμού, τα 3 m. Επίσης, από τους χάρτες αυτούς μπορούν να παρατηρηθούν τα τμήματα του ποταμού τα οποία έχουν την μεγαλύτερη πλημμυρική επικινδυνότητα. Οι περιοχές αυτές, όπως προκύπτει από την Εικόνα 5.3.B, είναι τα κατάντη του ποταμού και τμήματα όπου αλλάζει η γεωμετρία του (μαϊάνδροι).

Ένας ακόμη δισδιάστατος χάρτης παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.4, με τα αποτελέσματα της ταχύτητας ροής του ποταμού, την ώρα που λαμβάνει χώρα ένα γεγονός έντονης βροχής (14/03/2012). Στον χάρτη η ταχύτητα μπορεί εμφανιστεί και με μορφή βελών, τα οποία δίνουν την κατεύθυνση της συνολικής ταχύτητας (συνισταμένης ταχύτητας στον άξονα x και στον άξονα y) και το μέγεθος αυτής. Και σε αυτόν το χάρτη παρατηρούμε ότι υπάρχουν τμήματα του ποταμού που η ταχύτητα ροής υπερβαίνει τα 2.5-3 m/s. Τα τμήματα αυτά του ποταμού είναι συνήθως στενώσεις του καναλιού ή απότομης αλλαγής της γεωμετρίας του (μαϊάνδροι). Οι μεγάλες ταχύτητες σε ένα ποτάμι μπορούν να προκαλέσουν μεταφορά ιζήματος και αλλαγές στην μορφολογία του.

Στις Εικόνες 5.3 και 5.4 μπορούμε να επισημάνουμε τις περιοχές του ποταμού με αυξημένη επικινδυνότητα σε υπερχείλιση (μαϊάνδροι) και διάβρωση των όχθων (στενώσεις ποταμού) αντίστοιχα, έτσι ώστε να εντοπιστούν σημεία για την κατασκευή τεχνικών έργων με σκοπό την αντιμετώπιση ακραίων φαινομένων.



Εικόνα 5. 3. Α) ύψος νερού στον ποταμό Κοιλιάρη μία θερινή ημέρα (31/08/2011), Β) ύψος νερού μετά από ένα γεγονός έντονης βροχής(14/03/2012).



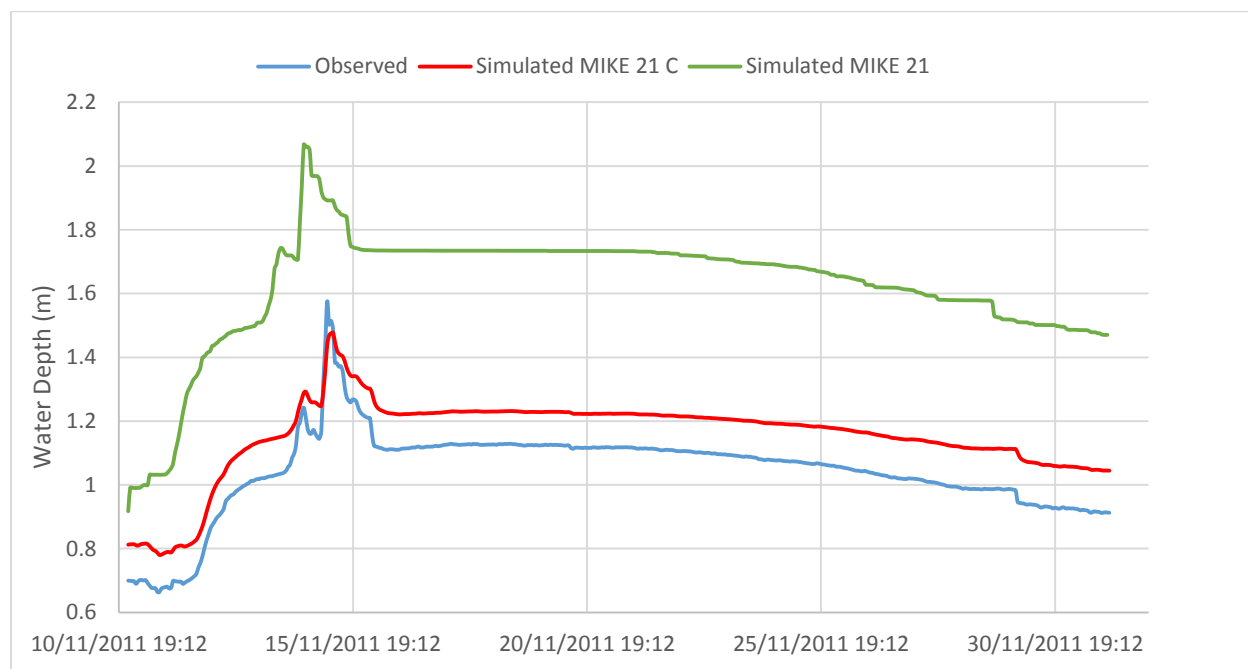
Εικόνα 5. 4. Αριστερά ο δισδιάστατος χάρτης ταχυτήτων στον ποταμό Κοιλιάρη μετά από ένα γεγονός έντονης βροχής (14/03/2012) και δεξιά μεγέθυνση ενός τμήματος του ποταμού όπου διακρίνονται τα βέλη ταχύτητας.

5.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων χρήσης καμπυλόγραμμου και ευθύγραμμου πλέγματος.

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4.4, για λόγους σύγκρισης, εκτός από το υδροδυναμικό μοντέλο MIKE 21C, δημιουργήθηκε το ίδιο υδροδυναμικό ποτάμιο σύστημα και για το μοντέλο MIKE 21. Στο περιβάλλον εργασίας του MIKE 21 εισήχθησαν οι ίδιες παράμετροι, όπως αυτές είχαν οριστεί και βαθμονομηθεί με το μοντέλο MIKE 21C. Στο μοντέλο όμως MIKE 21 η βαθυμετρία δεν συνδέεται με καμπυλόγραμμο κάνναβο αλλά με πλέγμα τετραγώνων (quadrangular grid).

Κατά τη διάρκεια της υδροδυναμικής προσομοίωσης με το βασισμένο σε ευθύγραμμο κάνναβο MIKE 21, δημιουργήθηκαν ασταθής συνθήκες στο μοντέλο (Unsteady Conditions) με αποτέλεσμα το μοντέλο να σταματάει την προσομοίωση πριν την ολοκλήρωσή της. Η λύση που δόθηκε ήταν η εκτέλεση της προσομοίωσης με μικρότερο χρονικό βήμα, αυτό όμως σημαίνει αύξηση του υπολογιστικού χρόνου και μεγαλύτερη απαίτηση μνήμη

Η Εικόνα 5.5 παρουσιάζει τις προσομοιωμένες τιμές του βάθους νερού από το μοντέλο MIKE 21C (κόκκινο χρώμα), και τις προσομοιωμένες τιμές του βάθους νερού από το μοντέλο MIKE 21 (πράσινο χρώμα), συγκρινόμενες με τις παρατηρούμενες τιμές από τον Αγ. Γεώργιο (μπλε χρώμα), για ένα χρονικό διάστημα είκοσι ημερών 11/11/2011 - 01/12/2011. Το χρονικό αυτό διάστημα επιλέχθηκε διότι είναι μία αντιπροσωπευτική περίοδος η οποία περιέχει απότομες αλλαγές στην στάθμη του νερού (πολύ χαμηλές και πολύ υψηλές τιμές παροχής).



Εικόνα 5. 5. προσομοιωμένες τιμές του βάθους νερού από το μοντέλο MIKE 21C (κόκκινο χρώμα), από το μοντέλο MIKE 21 (πράσινο χρώμα), σε σύγκριση με τις παρατηρούμενες τιμές (μπλε χρώμα) για το χρονικό διάστημα 11/11/2011 - 01/12/2011.

Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων του κάθε μοντέλου με τις τιμές πεδίου αξιολογήθηκε με τρεις στατιστικούς δείκτες: το δείκτη συσχέτισης R(correl) και το RSR. Οι δείκτες για τα δύο μοντέλα πήραν τις τιμές ου πίνακα 5.1.

Πίνακας 5. 1. Δείκτες συσχέτισης των μοντέλων με τις μετρήσεις πεδίου

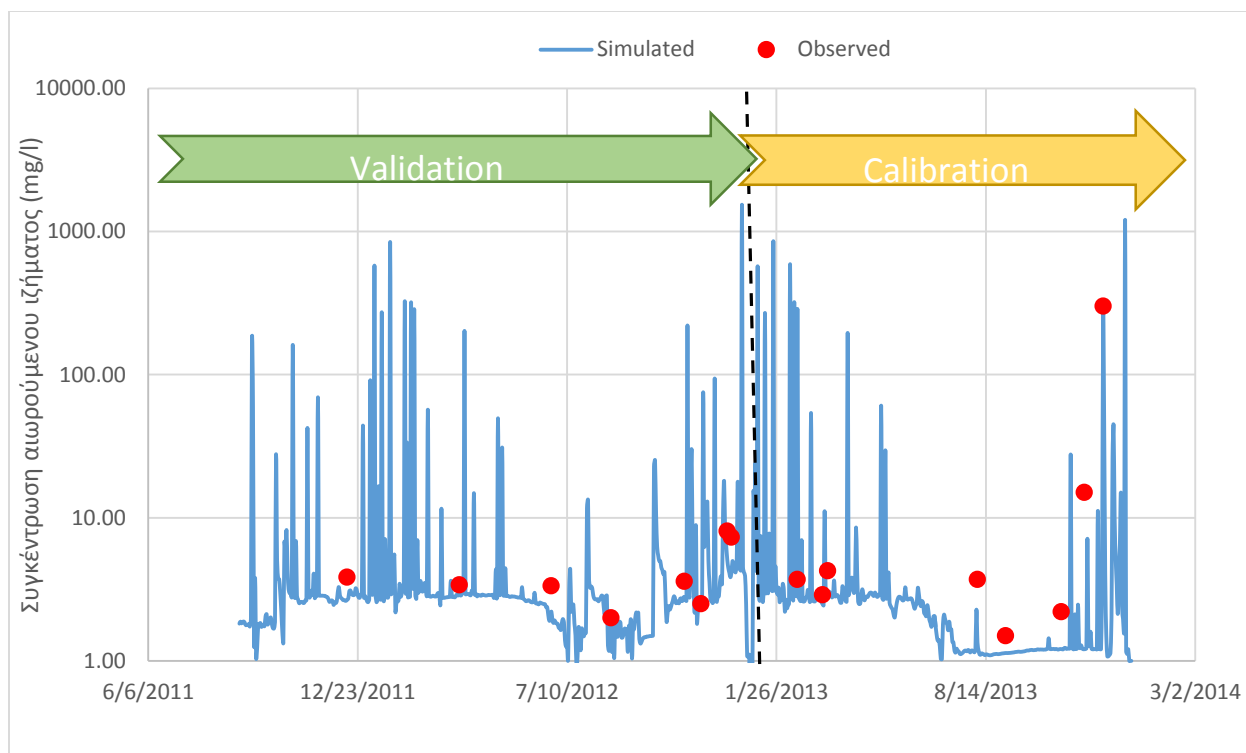
Στατιστικός δείκτης	Μοντέλο MIKE 21C	Μοντέλο MIKE 21
R(correl)	0.99	0.93
RSR	0.82	4.26

Όπως παρατηρούμε από τον πίνακα 5.1 και για τα δύο μοντέλα έχουμε έναν καλό δείκτη συσχέτισης $R(\text{correl})$ (κοντά στην τιμή του 1), με καλύτερο αυτόν για το μοντέλο MIKE 21C. Ο δείκτης όμως αυτός από μόνος του δεν αρκεί για να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για την αποδοτικότητα των μοντέλων. Για το λόγο αυτό, εξετάστηκαν επίσης και ο δείκτης RSR, σύμφωνα με τον οποίο και διαπιστώνουμε την καλύτερη απόδοση του μοντέλου MIKE 21C (πίνακας 5.1).

5.3. Αποτελέσματα μοντέλου Μεταφοράς Ιζήματος

Μετά την σύγκριση των μοντέλων MIKE 21 και MIKE 21C και την διαπίστωση της καλύτερης απόδοσης του μοντέλου MIKE 21C, προχωρήσαμε στην προσομοίωση μεταφοράς αιωρούμενου ιζήματος με το μοντέλο MIKE 21C.

Το μοντέλο μορφολογίας ποταμού, του MIKE 21C, βαθμονομήθηκε για την περίοδο 01/01/2013 – 31/12/2013 και επαληθεύτηκε για την περίοδο 01/09/2011 – 31/12/2012, χρησιμοποιώντας δεδομένα συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος από το σταθμό του Αγ. Γεωργίου (observed data). Η Εικόνα 5.6 παρουσιάζει τη χρονοσειρά των προσομοιωμένων τιμών από το μοντέλο MIKE 21C (μπλε χρώμα) της συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος σε σύγκριση με τις παρατηρούμενες τιμές από τον Αγ. Γεώργιο (κόκκινο χρώμα), για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης. Στη συνέχεια ο πίνακας 5.2 παρουσιάζει λεπτομερέστερα τις προσομοιωμένες τιμές σε σύγκριση με τις τιμές πεδίου της αντίστοιχης ημερομηνίας. Η σύγκριση αυτή αξιολογείται με τρεις στατιστικούς δείκτες, οι οποίοι προτάθηκαν από τον Moriasi το 2007 για την αξιολόγηση προσομοιώσεων από μοντέλα για τη ροή σε ποτάμια και τη μεταφορά ιζήματος. Οι δείκτες αυτοί είναι ο δείκτης αποδοτικότητας Nash- Sutcliffe (NSE), το RSR και ο δείκτης Pbias(%) (Κεφάλαιο 4.7).



Εικόνα 5. 6. Χρονοσειρά προσομοιωμένων τιμών συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος στον ποταμό Κοιλιάρη (μπλε χρώμα) σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου (κόκκινο χρώμα) για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης σε λογαριθμικό άξονα y.

Πίνακας 5. 2. Πίνακας με τις μετρήσεις συγκέντρωσης από το πεδίο και τις αντίστοιχες προσομοιωμένες τιμές με την αξιολόγηση από τρεις στατιστικούς δείκτες.

Ημερομηνία	Μέτρηση Πεδίου (g/m³)	Προσομοιωμένη τιμή (g/m³)	Στατιστικοί Δείκτες
Περίοδος Βαθμονόμησης			
2/15/2013	3.7	3.14	NSE=0.97 RSR=0.17 Pbias(%)=17.18
3/11/2013	2.9	2.50	
3/16/2013	4.25	3.65	
8/6/2013	3.7	2.28	
9/2/2013	1.5	1.14	
10/25/2013	2.2	1.21	
11/16/2013	15.0	7.14	
12/4/2013	300.0	254.95	
Περίοδος Επαλήθευσης			
12/13/2011	3.85	2.98	NSE=0.68 RSR=0.58 Pbias(%)=19.08
3/29/2012	3.4	3.38	
6/25/2012	3.35	1.92	
8/21/2012	2	2.09	
10/30/2012	3.6	2.63	
11/15/2012	2.5	2.33	
12/10/2012	8.05	7.63	
12/14/2012	7.3	4.59	

Οι διαδικασίες της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης πραγματοποιήθηκαν με την εκτίμηση των εξής παραμέτρων: τη σταθερά α η οποία καθορίζει το μέγεθος της ελικοειδούς ροής (Helical Flow), τους συντελεστές διασποράς (Dispersion coefficients) στις κατευθύνσεις x και y και το συντελεστή μεταφοράς αιωρούμενου ιζήματος (Suspended load factor), έτσι ώστε τα αποτελέσματα του μοντέλου να είναι σε καλή συσχέτιση με τα δεδομένα παρατήρησης. Η καλή συσχέτιση είναι εμφανής από τους τρεις στατιστικούς δείκτες που υπολογιστήκαν για τις δύο περιόδους. Για την περίοδο βαθμονόμησης ο δείκτης συσχέτισης $NSE = 0.97$, το $RSR = 0.17$ και το $Pbias (\%) = 17.18$ και για την περίοδο επαλήθευσης $NSE = 0.68$, το $RSR = 0.58$ και το $Pbias (\%) = 19.08$. Σύμφωνα με τον πίνακα 4.4, ο οποίος προτάθηκε από τον Moriasi (2007) για την αξιολόγηση των προσομοιώσεων σε ποτάμια, η απόδοση του μοντέλου αξιολογήθηκε ως πολύ καλή, εκτός από την περίπτωση του δείκτη $Pbias (\%)$ που ξεπερνά την τιμή του 15, αλλά και πάλι κρίνεται ως καλή.

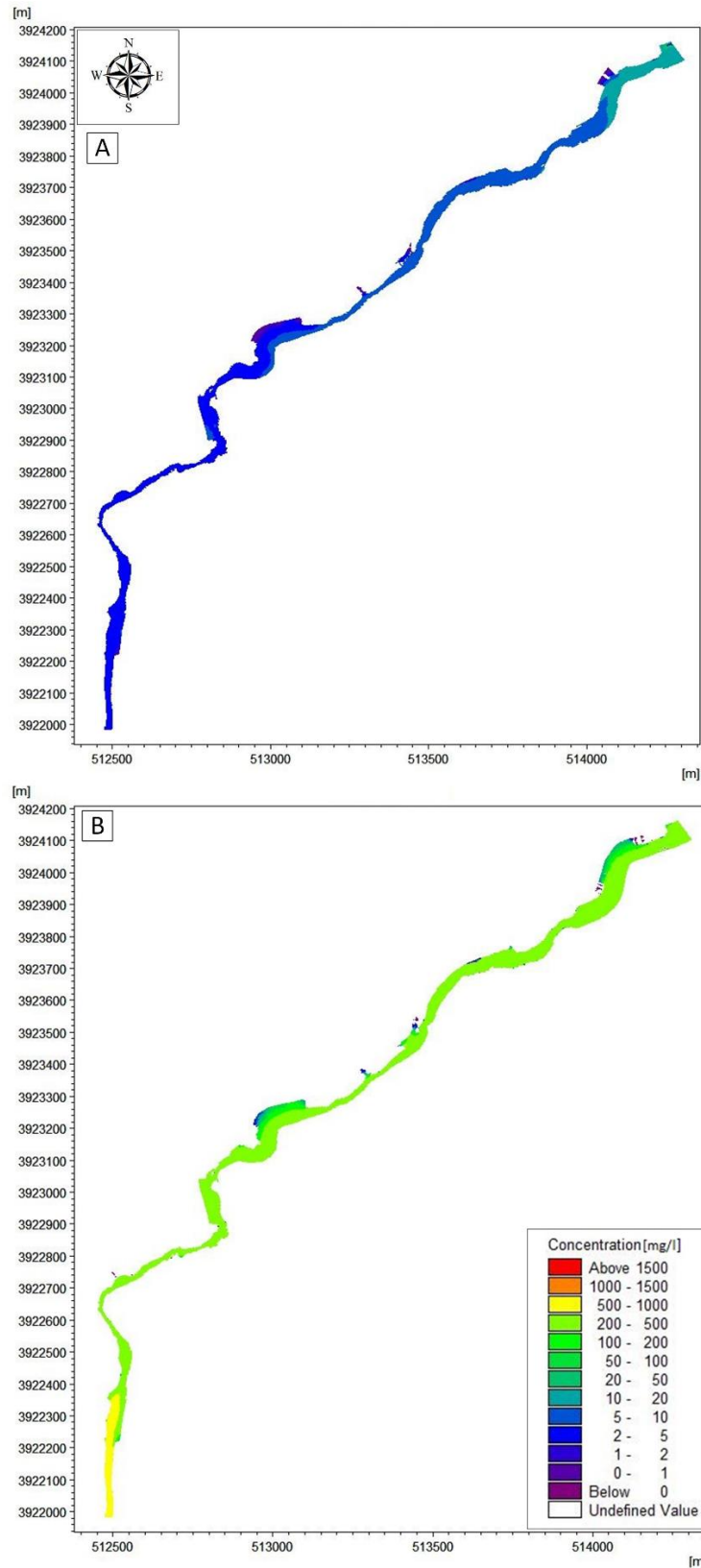
Οι τιμές των παραμέτρων βαθμονόμησης έλαβαν τις εξής τιμές: η σταθερά η οποία καθορίζει το μέγεθος της ελικοειδούς ροής (Helical Flow) $\alpha=0.4$, οι συντελεστές διασποράς (Dispersion coefficients) στις κατευθύνσεις x και y προσδιορίστηκε στην τιμή του $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ και ο συντελεστής μεταφοράς αιωρούμενου ιζήματος (Suspended load factor) $k_s=1$.

Τα αποτελέσματα που δίνει σαν έξοδο (output) το μοντέλο μορφολογίας και μεταφοράς ιζήματος είναι δισδιάστατοι χάρτες της συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος και της αλλαγής της μορφολογίας του ποταμού για κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται δύο χάρτες (Εικόνα 5.7) για τη συγκέντρωση αιωρούμενου ιζήματος στον ποταμό Κοιλιάρη, οι οποίοι δημιουργήθηκαν για δύο αντιπροσωπευτικά χρονικά βήματα της προσομοίωσης. Ο πρώτος χάρτης αντιστοιχεί σε μία θερινή ημέρα (31/08/2011) όπου η παροχή του ποταμού είναι πολύ χαμηλή και δεν έχουμε βροχοπτώσεις στην περιοχή, με αποτέλεσμα η συγκέντρωση αιωρούμενου ιζήματος στο ποτάμι να μην ξεπερνά τα 5 mg/l . Ο δεύτερος αντιστοιχεί σε μία ημέρα με ένα γεγονός έντονης βροχής (06/02/2012), όπου ο παραπόταμος Κεραμιανός μεταφέρει ίζημα και η συγκέντρωση αιωρούμενου ιζήματος στα κατάντη του Αγίου Γεωργίου ξεπερνά τα 300 mg/l .

Το μοντέλο μεταφοράς ιζήματος στήθηκε και βαθμονομήθηκε για την προσομοίωση αιωρούμενου φορτίου με μέση τιμή διαμέτρου $9\mu\text{m}$. Σε αυτή τη περίπτωση το ίζημα χαρακτηρίζεται ως συνεκτικό. Το μοντέλο MIKE 21C μας δίνει την δυνατότητα να προσθέσουμε επιπλέον μη-συνεκτικά συστατικά με τα οποία μπορεί να υπολογιστεί και το φορτίο κοίτης (bed

load). Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μία δοκιμαστική προσομοίωση με ένα επιπλέον μη-συνεκτικό συστατικό μέσης διαμέτρου $63\mu\text{m}$ (όριο συνεκτικού με μη-συνεκτικό) και παρατηρήθηκε ότι η αλλαγή στο επίπεδο της κοίτης (bed level change) ήταν της τάξης 10^{-7} έως 10^{-5} m/day, με αποτέλεσμα να μην έχουμε ορατές αλλαγές στον χάρτη της βαθυμετρίας μετά από δύο έτη προσομοίωσης.



Εικόνα 5. 7. Α) Θερινή ημέρα (31/08/2011) με πολύ χαμηλή συγκέντρωση αιωρούμενου ιζήματος, Β) Ημέρα με έντονη βροχή (06/02/2012) και υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενου ιζήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η υδραυλική προσομοίωση του ύψους νερού, της ταχύτητας ροής και της μεταφοράς ιζήματος στο κατάντη τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το δισδιάστατο υδραυλικό μοντέλο MIKE 21C. Το μοντέλο είναι βασισμένο σε ένα ορθογώνιο καμπυλόγραμμο υπολογιστικό πλέγμα και περιέχει δύο μέρη: α) το υδροδυναμικό μοντέλο το οποίο επιλύει τις εξισώσεις Saint-Venant και β) το μοντέλο αλλαγής μορφολογίας και μεταφοράς ιζήματος.

Για τη λειτουργία του μοντέλου ήταν απαραίτητη η συλλογή και επεξεργασία μεγάλου αριθμού δεδομένων, καθώς το μοντέλο περιλαμβάνει πολλές μεταβλητές οι οποίες αφορούν το σύνολο της γεωμορφολογίας του ποταμού και τις οριακές συνθήκες (ωριαίες χρονοσειρές παροχής και ημερήσιες χρονοσειρές συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος). Το μεγάλο πλήθος αυτών των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται σαν δεδομένα εισόδου, αυξάνουν την αξιοπιστία του μοντέλου, σε σύγκριση με άλλα υδραυλικά μοντέλα.

Για την λεπτομερή προσομοίωση της ροής του ποταμού Κοιλιάρη ήταν απαραίτητη η δημιουργία ενός πολύ πυκνού καμπυλόγραμμου πλέγματος (1000 m x 25 m). Το πυκνό αυτό υπολογιστικό πλέγμα απαιτεί, με τη σειρά του, ένα ψηφιακό αρχείο εδάφους (DEM) πολύ υψηλής ανάλυσης (1 m x 1 m) για τη δημιουργία του αρχείου της βαθυμετρίας. Τα δύο αυτά αρχεία μεγάλης λεπτομέρειας προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση της ροής και της μεταφοράς ιζήματος, και ιδιαίτερα κοντά στις όχθες του ποταμού.

Κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης και επαλήθευσης του υδροδυναμικού μοντέλου προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν, για την αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου, οι στατιστικοί δείκτες αποδοτικότητας Nash-Sutcliffe (Nash Sutcliffe Efficiency - NSE), ο RSR και ο Pbias (%) και προσδιορίστηκαν ως ικανοποιητικοί. Αναφέρουμε χαρακτηριστικό τον δείκτη αποδοτικότητας Nash-Sutcliffe που πήρε τις τιμές 0.88 και 0.87 για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης αντίστοιχα.

Από τις προσομοιωμένες τιμές του μοντέλου και τους δισδιάστατους χάρτες που δίνει ως αποτελέσματα προκύπτει ότι η παροχή του ποταμού Κοιλιάρη είναι πολύ χαμηλή τους θερινούς μήνες, ενώ τους χειμερινούς μήνες και ιδιαίτερα μετά από γεγονότα έντονης βροχής το βάθος νερού μπορεί να ξεπεράσει, σε ορισμένα τμήματα του ποταμού, τα 3 m και η ταχύτητα ροής τα 2.5 m/s. Στα τμήματα αυτά των ποταμών, απαραίτητη είναι η κατασκευή τεχνικών έργων για την προστασία της περιοχής από ακραία φαινόμενα.

Για λόγους σύγκρισης, το υδροδυναμικό μοντέλο MIKE 21 χρησιμοποιήθηκε επίσης για την προσομοίωση της ροής του ποταμού Κοιλιάρη. Η μοναδική διαφορά των δύο μοντέλων είναι ότι το MIKE 21 βασίζεται σε ευθύγραμμο κάρναβο και όχι σε καμπυλόγραμμο όπως το MIKE 21C. Στην ουσία δεν αλλάζει κάτι στις φυσικές εξισώσεις αλλά στην επίλυση τους δηλαδή στον κάρναβο. Τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων συγκρίθηκαν με τις μετρήσεις πεδίου και μια σειρά στατιστικών δεικτών απέδειξαν την καλύτερη συμφωνία του μοντέλου MIKE 21C το οποίο είναι βασισμένο σε καμπυλόγραμμο πλέγμα. Η καλύτερη συμφωνία του καμπυλόγραμμου πλέγματος οφείλεται στην καλύτερη ποιότητα του κάρναβου, ο οποίος έχει δημιουργηθεί ειδικά για τις προσομοιώσεις σε ποτάμια συστήματα, με τις γραμμές του πλέγματος να ακολουθούν τις γραμμές των όχθων. Η προσομοίωση με το βασισμένο σε ευθύγραμμο κάρναβο, μοντέλο MIKE 21 εκτελέστηκε με μικρότερο χρονικό βήμα ώστε να μην δημιουργούνται σε αυτό ασταθής συνθήκες (Unsteady Conditions). Αυτό όμως απαιτεί αύξηση του υπολογιστικού χρόνου και μεγαλύτερη ανάγκη σε μνήμη από αυτήν που απαιτεί το μοντέλο MIKE 21C. Η διαδικασία της σύγκρισης των δύο μοντέλων με διαφορετικό πλέγμα υπολογιστικής επίλυσης κατά τη διάρκεια της υδροδυναμικής προσομοίωσης μας οδήγησε στην επιλογή του μοντέλου MIKE 21C για την προσομοίωση της μεταφοράς ιζήματος.

Στη συνέχεια με βάση το μοντέλο MIKE 21C έλαβε χώρα η προσομοίωση της μεταφοράς ιζήματος στον ποταμό Κοιλιάρη. Στα πλαίσια αυτής της προσομοίωσης ήταν απαραίτητη η δημιουργία χρονοσειρών αιωρούμενου ιζήματος, με βάση τις παρατηρούμενες τιμές, ώστε αυτές να χρησιμοποιηθούν ως οριακές συνθήκες. Όπως παρατηρήθηκε οι τιμές συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος του πεδίου δεν είχαν άμεση συσχέτιση με τις αντίστοιχες τιμές παροχής και αυτό συμβαίνει διότι στο σημείο καταγραφής του υδρομετρικού σταθμού στον Αγ Γεώργιο συμβάλουν συνεχώς οι πηγές του Στύλου των οποίων το νερό έχει πολύ χαμηλές τιμές συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος ($< 4 \text{ mg/L}$). Ο κύριος υπεύθυνος για τη μεταφορά ιζήματος στον ποταμό Κοιλιάρη είναι ο παραπόταμος Κεραμιανός, ο οποίος μεταφέρει μεγάλες ποσότητες στερεών υλών κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων. Για το λόγο αυτό, με τη διαδικασία της παλινδρόμησης, δημιουργήθηκε ένα σύστημα δύο εξισώσεων που εκφράζουν τη σχέση της συσσωρευμένης βροχόπτωσης με τη συγκέντρωση αιωρούμενου ιζήματος. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε ότι στις δεκαέξι παρατηρήσεις πεδίου περιλαμβάνεται μόνο μία πολύ υψηλή τιμή συγκέντρωσης ιζήματος (300 mg/L), με τις υπόλοιπες να κυμαίνονται μεταξύ 1.5 και 15 mg/L . Εάν είχαμε στη διάθεση μας περισσότερες μετρήσεις πεδίου και ιδιαίτερα περισσότερες υψηλές

τιμές συγκέντρωσης, τότε και το σύστημα εξισώσεων που εκφράζει τη σχέση των δύο μεγεθών ενδέχεται να ήταν διαφορετικό.

Κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου μεταφοράς ιζήματος αξιολογήθηκαν οι εξής στατιστικοί δείκτες: ο δείκτης αποδοτικότητας NSE, ο RSR και ο Pbias (%) οι οποίοι και κρίθηκαν ως ικανοποιητικοί. Με χαρακτηριστικό τον δείκτη NSE ο οποίος πήρε τις τιμές 0.97 και 0.68 για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης αντίστοιχα. Επομένως οι προσομοιωμένες τιμές είναι σε καλή συμφωνία με τις μετρήσεις πεδίου.

Από τους δισδιάστατους χάρτες για τη μεταφορά ιζήματος και τις χρονοσειρές που δημιουργεί το μοντέλο, παρατηρούμε ότι κατά τις χειμερινές περιόδους, όταν λαμβάνουν χώρα γεγονότα έντονης βροχής, ο παραπόταμος Κεραμιανός μεταφέρει στον ποταμό Κοιλιάρη μεγάλες ποσότητες αιωρούμενου ιζήματος που σε πολλές περιπτώσεις η συγκέντρωσή τους στο ποτάμι μπορεί να ξεπεράσει την τιμή των 500mg/l.

Στην παρούσα εργασία, θεωρήσαμε ότι το ίζημα αποτελείται από ένα συνεκτικό συστατικό με μέση διάμετρο 9.35 μm το οποίο μας δίνει τα αποτελέσματα συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος. Πραγματοποιήθηκε, επίσης και μία δοκιμαστική προσομοίωση με ένα επιπλέον μη-συνεκτικό συστατικό μέσης διαμέτρου 63 μm για να εκτιμηθεί η μεταφορά ιζημάτων μεγαλύτερης διαμέτρου στην κοίτη (π.χ. άμμου) του ποταμού. Συνυπολογίστηκε με τη διαδικασία αυτή και η αλλαγή στο επίπεδο της κοίτης ανά ημέρα και παρατηρήθηκε ότι ήταν ελάχιστη, με αποτέλεσμα να μην έχουμε ορατές αλλαγές στον χάρτη της βαθυμετρίας μετά από δύο έτη προσομοίωσης. Επίσης η περίοδος προσομοίωσης ήταν αρκετά μικρή έτσι ώστε να μην έχουμε ως αποτέλεσμα αλλαγή των συντεταγμένων στα πρανή λόγω διάβρωσης.

Μία πρόταση για μελλοντική έρευνα είναι, το βαθμονομημένο μοντέλο να εφαρμοστεί σε μία μεγάλης χρονικής κλίμακας προσομοίωση, όπως είναι ένα κλιματικό σενάριο 50 ή 100 ετών. Στην προσομοίωση αυτή μπορεί να συνυπολογιστεί η διάβρωση των πρανών και η αλλαγή των υψομέτρων της κοίτης, με σκοπό να παραχθούν χάρτες με νέες συντεταγμένες για τα πρανή και νέα ύψη κοίτης. Είναι επομένως δυνατό να εξετασθεί η αλλαγή της μορφολογίας του ποταμού Κοιλιάρη μετά το πέρας δεκαετιών και στα πλαίσια σεναρίων για την αλλαγή του κλίματος.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Κουργιαλάς, Ν., 2010. «Ολοκληρωμένη διαχείριση - πρόβλεψη & αντιμετώπιση πλημμυρικών φαινομένων σε σύνθετες γεωμορφολογικά περιοχές με χρήση μαθηματικών μοντέλων και GIS», Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείου Κρήτης.
2. Κωτούλας, Δ. (2001). Ορεινή Υδρονομική Τόμος Ι. Θεσσαλονίκη Α.Π.Θ. Τμήμα Εκδόσεων.
3. Λιλλή, Μ., 2011. «Ανάπτυξη Μεθοδολογίας για την Εκτίμηση της Διάβρωσης και της Αστοχίας του Πρανούς του Ποταμού Κοιλιάρη». Μεταπτυχιακή Διατριβή. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείου Κρήτης.
4. Νικολαΐδης, Ν., Καρατζάς, Γ., 2010. Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τις Λεκάνες Απορροής των Ποταμών Κερίτη - Θερίσου και Κοιλιάρη, Χανιά, Τεχνική Έκθεση προς ΟΑΔΥΚ, Χανιά
5. Στεφανίδης, Π., (2008). Ορεινή Υδρονομική Ι. Πανεπιστημιακές σημειώσεις. Θεσσαλονίκη Α.Π.Θ. Τμήμα Εκδόσεων.
6. Τσακίρης, Γ., 1995. Υδατικοί πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Bartram, J. and R. Ballance (1996). Water quality monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes, CRC Press.
2. Bates, P., M. Stewart, G. Siggers, C. Smith, J. Hervouet and R. Sellin (1998). "Internal and external validation of a two-dimensional finite element code for river flood simulations." Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy **130**(3): 127-141.
3. Bates, P. D. and A. De Roo (2000). "A simple raster-based model for flood inundation simulation." Journal of hydrology **236**(1): 54-77.
4. Bloesch, J. and N. Burns (1980). "A critical review of sedimentation trap technique." Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie **42**(1): 15-55.
5. Bonell, M., M. M. Hufschmidt and J. S. Gladwell (2005). Hydrology and water management in the humid tropics: hydrological research issues and strategies for water management, Cambridge university press.
6. Bradbrook, K. (2006). "JFLOW: a multiscale two-dimensional dynamic flood model." Water and Environment Journal **20**(2): 79-86.

7. Brankensiek, D.L. (1965). An Implicit Flood Routing Method. Hydraulics Division Speciality Conference, American Society of Civil Engineers, Tucson, Arizona
8. Butman, C. A., W. D. Grant and K. D. Stolzenbach (1986). "Predictions of sediment trap biases in turbulent flows: a theoretical analysis based on observations from the literature." *Journal of Marine Research* **44**(3): 601-644.
9. Coulibary, P., and C.K. Baldwin (2005). Nonstationary hydrological time series forecasting using nonlinear dynamic methods. *Journal of Hydrology* **307**: 164-174.
10. De Vriend, H. (1981). "Velocity redistribution in curved rectangular channels." *Journal of Fluid Mechanics* **107**: 423-439.
11. DHI Water & Environment (2001), MIKE11 Hydrodynamic Reference Manual, DHI, Denmark
12. DHI a (2011). MIKE 21C a. Curvilinear Model for River Morphology, User Guide, DHI Water & Environment, Denmark.
13. DHI b (2011). MIKE 21C b. Curvilinear Model, Scientific Documentation, DHI Water & Environment, Denmark.
14. Engelhund, F. and E. Hansen (1968). A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Teknisk Forlag, Technical Press, Copenhagen, Denmark.
15. Galland, J.-C., N. Goutal and J.-M. Hervouet (1991). "TELEMAC: A new numerical model for solving shallow water equations." *Advances in Water Resources* **14**(3): 138-148.
16. Gamvroudis, C., N. Nikolaidis, O. Tzoraki, V. Papadoulakis and N. Karalemas (2015). "Water and sediment transport modeling of a large temporary river basin in Greece." *Science of The Total Environment* **508**: 354-365.
17. Gardner, W. D. (1980). "Field assessment of sediment trapsl."
18. Green, T. R., S. G. Beavis, C. R. Dietrich and A. J. Jakeman (1999). "Relating stream-bank erosion to in-stream transport of suspended sediment." *Hydrological Processes* **13**(5): 777-787.
19. Hanley, N., R. Faichney, A. Munro and J. S. Shortle (1998). "Economic and environmental modelling for pollution control in an estuary." *Journal of Environmental Management* **52**(3): 211-225.
20. Harder, J. and L. Armacost (1966). Wave propogation in rivers. Hydraulic Engineering Laboratory, report.
21. Horritt, M. and P. Bates (2002). "Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation." *Journal of hydrology* **268**(1): 87-99.
22. Huang, W., Z.-x. Cao, P. Carling and G. Pender (2014). "Coupled 2D hydrodynamic and sediment transport modeling of megaflood due to glacier dam-break in Altai Mountains, Southern Siberia." *Journal of Mountain Science* **11**(6): 1442-1453.

23. Imeson, A. (2012). Desertification, land degradation and sustainability, John Wiley & Sons.
24. Jakeman, A., I. Littlewood and P. Whitehead (1990). "Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments." *Journal of hydrology* **117**(1): 275-300.
25. Kourgialas, N. N. and G. P. Karatzas (2013). "A hydro-sedimentary modelling system for flash flood propagation and hazard estimation under different agricultural practices." *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions* **1**(5): 5855-5880.
26. Kourgialas, N. N. and G. P. Karatzas (2013). "A hydro-economic modelling framework for flood damage estimation and the role of riparian vegetation." *Hydrological Processes* **27**(4): 515-531.
27. Kourgialas, N. N., G. P. Karatzas and N. N. Nikolaidis (2008). Simulation of the flow in the Koiliaris River basin (Greece) using a combination of GIS, the HSPF model and a karstic-snow melt model, International Environmental Modelling and Software Society.
28. Kourgialas, N. N., G. P. Karatzas and N. P. Nikolaidis (2010). "An integrated framework for the hydrologic simulation of a complex geomorphological river basin." *Journal of hydrology* **381**(3): 308-321.
29. Liggett, J. A. (1975). "Basic equations of unsteady flow. Unsteady Flow In Open Channels, edited by K. Mahmood and V. Yevjevich, Vol. I, Chapter 3, 29-62." Water Resour. Pub., Ft. Collins, Colorado.
30. Loch, R. and D. Silburn (1996). "Constraints to sustainability—soil erosion." Sustainable crop production in the sub-tropics: an Australian perspective. QDPI.
31. Merritt, W. S., R. A. Letcher and A. J. Jakeman (2003). "A review of erosion and sediment transport models." *Environmental Modelling & Software* **18**(8): 761-799.
32. Miller, J.E. (1984). "Basic Concepts of Kinematic –Wave Model". U. S. Geological Survey Professional Paper 1302
33. Moraetis, D., D. Efstathiou, F. Stamati, O. Tzoraki, N. P. Nikolaidis, J. L. Schnoor and K. Vozinakis (2010). "High-frequency monitoring for the identification of hydrological and biogeochemical processes in a Mediterranean river basin." *Journal of hydrology* **389**(1): 127-136.
34. Moriasi, D., J. Arnold, M. Van Liew, R. Bingner, R. Harmel and T. Veith (2007). "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations." *Trans. Asabe* **50**(3): 885-900.
35. Nadal-Romero, E., D. Regüés and J. Latron (2008). "Relationships among rainfall, runoff, and suspended sediment in a small catchment with badlands." *Catena* **74**(2): 127-136.
36. Nerantzaki, S. (2014). "Sediment Transport in Koiliaris River". Master Thesis. School of Environmental Engineering. Technical University of Crete.
37. Nerantzaki, S., G. Giannakis, D. Efstathiou, N. Nikolaidis, I. Sibetheros, G. Karatzas and I. Zacharias (2015). "Modeling suspended sediment transport and assessing the impacts of climate change in a karstic Mediterranean watershed." *Science of The Total Environment* **538**: 288-297.

38. Olesen, J., S. Hahn and L. Guarente (1987). "Yeast HAP2 and HAP3 activators both bind to the CYC1 upstream activation site, UAS2, in an interdependent manner." *Cell* **51**(6): 953-961.
39. Phillips, J. V. and S. Tadayon (2006). Selection of Manning's roughness coefficient for natural and constructed vegetated and non-vegetated channels, and vegetation maintenance plan guidelines for vegetated channels in Central Arizona, CiteSeer.
40. Prosser, I. P., I. D. Rutherford, J. M. Olley, W. J. Young, P. J. Wallbrink and C. J. Moran (2001). "Large-scale patterns of erosion and sediment transport in river networks, with examples from Australia." *Marine and Freshwater Research* **52**(1): 81-99.
41. Ramos, T. B., M. C. Gonçalves, M. A. Branco, D. Brito, S. Rodrigues, J.-M. Sánchez-Pérez, S. Sauvage, Â. Prazeres, J. C. Martins and M. L. Fernandes (2015). "Sediment and nutrient dynamics during storm events in the Enxoé temporary river, southern Portugal." *Catena* **127**: 177-190.
42. Rodríguez-Blanco, M., M. Taboada-Castro and M. Taboada-Castro (2010). "Factors controlling hydro-sedimentary response during runoff events in a rural catchment in the humid Spanish zone." *Catena* **82**(3): 206-217.
43. Rosa, E., J. Bloizsch and D. E. Rathke (1994). "Sampling the settling and suspended particulate matter (SPM)." *Handbook of techniques for aquatic sediments sampling*. CRC: 97-129.
44. Scrudto, R. J. (1988). In-situ integrated suspended sediment stream sampler, Google Patents.
45. Sibetheros, I., S. Nerantzaki, D. Efstathiou, G. Giannakis and N. Nikolaidis (2013). "Sediment transport in the Koiliaris river of Crete." *Procedia Technology* **8**: 315-323.
46. Simons, M., G. Podger and R. Cooke (1996). "IQQM—a hydrologic modelling tool for water resource and salinity management." *Environmental Software* **11**(1): 185-192.
47. Syme, W. (2001). TUFLOW-Two & Onedimensional unsteady flow Software for rivers, estuaries and coastal waters. IEAust Water Panel Seminar and Workshop on 2d Flood Modelling, Sydney.
48. Te Chow, V. (1959). "Open channel hydraulics.": New York, McGraw-Hill: 680.
49. Thomsen, B. and H. Hjalmarson (1991). "Estimated Manning's roughness coefficients for stream channels and flood plains in Maricopa County, Arizona." April 1991. 132 p, 35 fig, 19 tab, 12 ref.
50. US Army Corps of Engineers (2002), HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual, USACE Hydrologic Engineering Center, Davis CA.
51. Walling, D. and A. Teed (1971). "A simple pumping sampler for research into suspended sediment transport in small catchments." *Journal of hydrology* **13**: 325-337.
52. Walton, R. and H. Hunter (1996). "Modelling water quality and nutrient fluxes in the Johnstone River Catchment, North Queensland."
53. Wentworth, C. K. (1922). "A scale of grade and class terms for clastic sediments." *The Journal of Geology* **30**(5): 377-392.

54. WHO (2003). "Lead in drinking-water: background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality." World Health Organization.
55. Wren, D. G., S. Bennett, B. D. Barkdoll and R. A. Kuhnle (2000). Studies in suspended sediment and turbulence in open channel flows, University of Mississippi.
56. Yang, C. T. (2006). "Erosion and sedimentation manual." US Dep. of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, CO.