ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑ ΠΟΤΑΜΟΥ

Καπερώνης Σπυρίδων

Επιβλέπων καθηγητής: Καθ. Τσιχριντζής Βασίλειος

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Αθήνα, Ιούνιος 2019

Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων i
Ευχαριστίες v
Περίληψη vi
Abstract vii
1. Εισαγωγή 1
1.1 Γενική Ανασκόπηση 1
1.2 Αντικείμενο Εργασίας 2
1.3 Δομή εργασίας 3
2. Στερεομεταφορά και Εδαφική Διάβρωση 5
2.1 Γενικά 5
2.2 Ιδιότητες Ιζημάτων 6
2.2.1 Μέγεθος κόκκων 6
2.2.2 Ταχύτητα καθίζησης 7
2.3 Είδη Στερεομεταφοράς 8
2.4 Εξισώσεις Στερεομεταφοράς 10
2.4.1 Μέθοδος Meyer-Peter and Muller 10
2.4.2 Μέθοδος Einstein 11
2.4.3 Μέθοδος Ackers and White 13
2.5 Εδαφική διάβρωση 15
2.5.1 Παγκόσμια εξίσωση εδαφικής διάβρωσης 16
2.5.2 Τροποποιημένη εξίσωση εδαφικής απώλειας 17
2.6 Βιβλιογραφική Αναδρομή 18
3. Τα Μοντέλα HEC-HMS και HEC-RAS 23
3.1 Το μοντέλο HEC-HMS 23
3.1.1 Αναπαράσταση του μοντέλου 24
3.1.2 Διεργασίες υδρολογικού μοντέλου 24
3.1.3 Μέθοδοι προσομοίωσης ταμιευτήρα 34
3.1.4 Μετεωρολογικό Μοντέλο 35
3.2 Το μοντέλο HEC-RAS 37
3.2.1 Συνθήκες μόνιμης ροής 38
3.3.2 Συνθήκες ανομοιόμορφης ροής 38
3.3.3 Ψεύδο-μη-μόνιμη Ροή 39

3.3.4 Υπολογισμοί μεταφοράς ιζημάτων/μεταβολής όχθης 39
3.3.5 Ανάλυση ποιότητας υδάτων 39
4. Περιγραφή Περιοχής Μελέτης 41
4.1 Γεωλογικά Στοιχεία 45
4.2 Χρήσεις Γης 45
4.3 Κλιματκά Στοιχεία 46
5. Υδρολογική Προσομοίωση 51
5.1 Γεωμορφολογική Ανάλυση Λεκάνης 51
5.2 Επεξεργασία Λεκάνης Απορροής και Προετοιμασία Εισαγωγής στο HEC-HMS 54
5.3 Δημιουργία Υποβάθρου Αριθμού Καμπύλης CN 59
5.3.1 Επεξεργασία υποβάθρου χρήσεων γης 59
5.3.2 Επεξεργασία υποβάθρου υδρολιθολογικών δεδομένων 60
5.3.3 Δημιουργία υποβάθρου CN 60
5.4 Στοιχεία Ταμιευτήρα 64
5.5 Εκτίμηση Βροχόπτωσης Σχεδιασμού 69
5.5.1 Υπολογισμός της έντασης και του ύψους βροχόπτωσης 69
5.6 Δημιουργία Μοντέλου στο HEC-HMS 72
5.6.1 Υπολεκάνες περιοχής μελέτης 72
5.6.2 Υδατορεύματα περιοχής μελέτης 76
5.6.3 Μετεωρολογικό μοντέλο και Control Specifications αρχείο 76
5.7 Τρέξιμο – Αποτελέσματα Υδρολογικής Προσομοίωσης 76
5.8 Υπολογισμός Εδαφικής Διάβρωσης 77
6. Υδραυλική Προσομοίωση και Προσομοίωση Μεταφοράς Φερτών 83
6.1 Δημιουργία Γεωμετρικών Γεδομένων 83
6.1.1 Κύρια γραμμή ροής ποταμού 84
6.1.2 Κύριες όχθες 84
6.1.3 Κύριες διευθύνσεις ροής 85
6.1.4 Διατομές 85
6.1.5 Χρήσεις γης 86
6.2 Ορισμός Project και Επεξεργασία Γεωμετρικού Αρχείου 87
6.3 Εισαγωγή Υδρολογικών Δεδομένων 90
6.4 Εισαγωγή Δεδομένων Στερεομεταφοράς 95
6.4.1 Επιλογή εξισώσεων στερεομεταφοράς 95
6.4.2 Ιδιότητες διατομών 95
6.4.3 Οριακές συνθήκες 97

6.5 Εκτέλεση Προσομοιώσεων Μεταφοράς Φερτών 98
6.6 Εναλλακτικά Σενάρια Υδραυλικών Προσομοιώσεων Μεταφοράς Φερτών 111
6.6.1 Σενάριο με διαφορετική κοκκομετρική διαβάθμιση πυθμένα..... 111
6.6.2 Σενάριο με διαφορετικές αρχικές στάθμες του ταμιευτήρα..... 113
6.6.3 Σενάριο με δυσμενή βροχόπτωση σχεδιασμού και βήμα υπολογισμών 1h..... 114
7. Συμπεράσματα 119
7.1 Σύνοψη 119
7.2 Αποτελέσματα 120
7.3 Προτάσεις για Περεταίρω Μελέτη 120
Βιβλιογραφία 123
Παράρτημα: Πίνακες - Δεδομένα 127

Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης του μεταπτυχιακού προγράμματος Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του καθηγητή ΕΜΠ κ. Βασίλειου Τσιχριντζή.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ Τσιχριντζή για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε αναθέτοντας μου αυτή την εργασία, για την καθοδήγηση του και την ουσιαστική βοήθεια που μου επέδειξε σε κάθε στάδιο της εργασίας. Ευχαριστώ θερμά τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής τον κ. Ναλμπάντη και την κ. Νάνου για την προσοχή που έδωσαν στον έλεγχο της εργασίας μου και τις χρήσιμες συμβουλές τους.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Βασίλη Μπέλλο για την υποδειγματική συνεργασία και για την προθυμία και υπομονή που έδειξε κάθε φορά που χρειάστηκε η βοήθεια του στην διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά όλους του κοντινούς μου ανθρώπους για την υποστήριξη και τη βοήθεια τους σε οποιοδήποτε προσωπικό μου εγχείρημα.

Περίληψη

Η εργασία αυτή πραγματεύεται τη μελέτη των επιπτώσεων της κατασκευής ενός φράγματος στη μεταφορά ιζημάτων του ποταμού Ταυρωνίτη, στο νομό Χανίων. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS και του υδραυλικού HEC-RAS. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε υδρολογική ανάλυση της περιοχής μελέτης και επεξεργασία των δεδομένων χρήσεων γης και των εδαφών της ώστε να κατασκευαστεί το γεωμετρικό μοντέλο και να υπολογιστούν οι παράμετροι των υδρολογικών μεθόδων. Οι υδρολογικές προσομοιώσεις εκτελέστηκαν χρησιμοποιώντας συνθετικές βροχοπτώσεις που κατασκευάστηκαν με βάση τα στοιχεία της όμβριας καμπύλης από το σταθμό Παλαιά Ρούματα, για επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς. Αποτέλεσμα των υδρολογικών προσομοιώσεων ήταν η εξαγωγή υδρογραφημάτων και των ποσοτήτων ιζημάτων από εδαφική διάβρωση σε διάφορα σημεία ενδιαφέροντος. Μετά την κατασκευή του γεωμετρικού μοντέλου για την υδραυλική μελέτη, τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν ως αρχεία εισόδου για τις υδραυλικές προσομοιώσεις μεταφοράς ιζημάτων. Εκτελέστηκαν διαδοχικές υδραυλικές προσομοιώσεις με και χωρίς την ύπαρξη φράγματος στο υδατόρευμα και υπολογίστηκαν οι διαφορές στην ποσότητα των φερτών που καταλήγουν στην παράκτια περιοχή. Επιπλέον, εφαρμόστηκαν τρία εναλλακτικά σενάρια που σχετίζονται με την χρήση διαφορετικών δεδομένων εδάφους, διαφορετικής στάθμης ταμιευτήρα και διαφορετικών δεδομένων βροχόπτωσης. Συμπερασματικά, με τις διαδοχικές προσομοιώσεις της υδρολογίας και της υδραυλικής του Ταυρωνίτη ποταμού και με την εφαρμογή των εναλλακτικών σεναρίων προκύπτει ότι η κατασκευή του φράγματος θα προκαλέσει συγκράτηση ενός μέρους των ιζημάτων που διαφορετικά θα κατέληγαν στην παράκτια περιοχή. Για το λόγο αυτό θα καταστεί χρήσιμο να ληφθούν προληπτικά μέτρα διάβρωσης των πρανών και υποσκαφής θεμελίων τεχνικών έργων που βρίσκονται στην κοίτη του ποταμού.

Abstract

This report elaborates on the analysis of the impacts in the sediment discharge in Tauronitis River located in Chania, Crete, due to the construction of a dam. The methodology used was based in hydrological and hydraulic simulations using the HEC-HMS and HEC-RAS software respectively. The geomorphology of Tauronitis' river basin was analysed and data concerning the land use and the soil were studied to compute parameters used in the hydrological simulations. Rain data were produced using a rainfall intensity curve from a neighbor meteorological station, corresponding to selected return periods. The simulation was run for each event resulting in a package of flood hydrographs and sediment discharge due to soil loss for each subbasin. Hydraulic simulations with and without the dam were ran using these data in order to compute the percentage difference of the sediment discharge in the coastal area of the basin. Three alternative scenarios, that deal with the change of the soil characteristics, the initial water stage in the reservoir and with the produces rain, were also simulated in order to further understand the impact of the dam in the sediment discharge of the river. In conclusion, the hydrological and hydraulic simulations of Tauronitis river basin showed that the construction of the dam will decrease the quantity of the sediments that ends up in the coastal area. For this reason, it will be useful to take precautionary measures for the erosion of the slopes and the undermining of foundations of technical works on the riverbed.

1. Εισαγωγή

1.1 Γενική Ανασκόπηση

Στη σύγχρονη εποχή η βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων προβάλλει επιτακτική. Για το λόγο αυτό ο άνθρωπος καλείται να λάβει τις βέλτιστες αποφάσεις και να προβεί στη δημιουργία μέσων και στη κατασκευή έργων που θα διαφυλάττουν τους υδατικούς πόρους και θα εξασφαλίζουν τη σωστή διαχείριση τους στις επόμενες γενιές. Ένα από τα έργα αυτά είναι τα φράγματα.

Τα φράγματα εδώ και πολλά χρόνια κατασκευάζονται σε όλο το κόσμο συγκεντρώνοντας πολλαπλά οφέλη. Τα φράγματα που κατασκευάστηκαν τα αρχαία χρόνια εξυπηρετούσαν ένα σκοπό που αφορούσε κυρίως στην άρδευση και την ύδρευση των οικισμών. Όσο οι ανάγκες της κοινωνίας αυξήθηκαν, τα φράγματα άρχισαν να εξυπηρετούν περισσότερους σκοπούς, όπως παραγωγής ενέργειας, ελέγχου πλημμυρών, πλοήγησης ή και ελέγχου μεταφοράς φερτών. Παγκοσμίως εμφανίζονται πλέον 59071 καταγεγραμμένα φράγματα. Από αυτά 29248 εξυπηρετούν μόνο ένα σκοπό και συγκεκριμένα 48% αυτών χρησιμοποιούνται για άρδευση, 17% για παραγωγή ενέργειας, 13% για ύδρευση, για έλεγχο πλημμυρών το 10% και τα υπόλοιπα φράγματα χρησιμοποιούνται για πλοήγηση και εκτροφή ψαριών. Αντίστοιχα, 9857 φράγματα εξυπηρετούν πολλαπλούς σκοπούς (ICOLD, 2014).

Η κατασκευή ενός φράγματος ωστόσο ενδέχεται να επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η αλλαγή των χαρακτηριστικών της ροής των ποταμών αποτελεί την κυριότερη περιβαλλοντική επίπτωση της κατασκευής και λειτουργίας ενός φράγματος. Οι επιπτώσεις αφορούν στον διαφορετικό χρονισμό των εκροών σε σχέση με τις εισροές ή και στη μείωση της διαθέσιμης ποσότητας νερού κατάντη. Επιπλέον, τα φράγματα ενδέχεται να προκαλέσουν την υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού (Ευστρατιάδης κα., 2018). Επίπτωση ενός φράγματος, ακόμη, μπορεί να αποτελέσει και η αλλαγή της τοπογραφίας της περιοχής καθώς μια

μεγάλη έκταση που πριν ήταν χερσαίο έδαφος πλέον αντικαθίσταται από μια τεχνική λίμνη. Παράλληλα, ένα φράγμα μπορεί να έχει και «κοινωνικοπολιτικές» επιπτώσεις στους οικισμούς της περιοχής, αφού η παραπάνω αλλαγή της τοπογραφίας μπορεί να οδηγήσει στη αναγκαστική απαλλοτρίωση τους, με χαρακτηριστικό παράδειγμα το χωριό Σφεντύλι στο φράγμα Αποσελέμη στο νομό Λασιθίου της Κρήτης.

Μια από τις επιπτώσεις στη ροή του ποταμού αφορά στα ιζήματα που μεταφέρονται με την απορροή. Τα ιζήματα αυτά διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στο σχηματισμό των ακτών, στη δημιουργία γόνιμων εδαφών αλλά και στη ζημιά αυτών. Επίσης τα ιζήματα που μεταφέρονται ενδέχεται να είναι φορείς αποθήκευσης ρύπων και να υποβαθμίζουν έτσι την ποιότητα του νερού. Η ευστάθεια τεχνικών έργων που βρίσκονται στις κοίτες ποταμών ενδέχεται να επηρεαστεί από τις διαδικασίες διάβρωσης και εναπόθεσης ιζημάτων (Παναγούλια Δ., 2008). Πλημμυρικές απορροές ποταμών προκαλούν έντονη διάβρωση του πυθμένα και μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ιζημάτων. Η ύπαρξη φραγμάτων επηρεάζει καθοριστικά τη μεταφορά φερτών, αφενός, μειώνοντας τις πλημμυρικές αυτές απορροές και αφετέρου, συγκρατώντας μεγάλες ποσότητες φερτών παγιδεύοντας τις στον νεκρό όγκο τους. Συνεπώς, είναι σημαντικό να μελετάται η επίπτωση της κατασκευής ενός φράγματος στην μεταφορά των ιζημάτων του υδατορεύματος και στην κατάντη περιοχή.

1.2 Αντικείμενο Εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η ολοκληρωμένη υδρολογική προσομοίωση λεκάνης απορροής ποταμού και στη συνέχεια η υδραυλική προσομοίωση των υδατορευμάτων της. Εξετάζονται δυο σταθερά σενάρια που αφορούν την ύπαρξη ή όχι φράγματος σε επιλεγμένη θέση. Σκοπός της εργασίας είναι να μελετηθούν οι επιπτώσεις του φράγματος στη παράκτια περιοχή, εστιάζοντας στο πρόβλημα της διάβρωσης και της μεταφοράς ιζημάτων.

Η περιοχή μελέτης αφορά τη λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη ποταμού. Βρίσκεται στο Υδατικό Διαμέρισμα της Κρήτης και στο βόρειο τμήμα του νομού Χανίων. Στη λεκάνη απορροής εμφανίζονται τρεις κύριοι παραπόταμοι ο Ρουματιανός, ο

Σεμπρενιώτης και ο Ντεριανός. Εδώ εξετάζεται η επίπτωση της κατασκευής φράγματος στον παραπόταμο Ντεριανό για την κάλυψη των αναγκών ύδρευσης και άρδευσης της γύρω περιοχής.

Για την υδρολογική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν συνδυαστικά τα προγράμματα HEC-GeoHMS στο περιβάλλον ArcGIS για την προ-επεξεργασία των γεωχωρικών δεδομένων και το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS. Αντίστοιχα, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα HEC-GeoRAS για την υδραυλική ανάλυση του ποταμού και το HEC-RAS για τις υδραυλικές προσομοιώσεις. Αναφορικά με τη διάβρωση της λεκάνης και τη μεταφορά ιζημάτων χρησιμοποιήθηκε το υπο-μοντέλο ανάλυσης μεταφοράς φερτών που βρίσκεται ενσωματωμένο στο HEC-RAS.

1.3 Δομή εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από εφτά κεφάλαια, συμπεριλαμβάνοντας το παρόν. Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των κεφαλαίων.

Στο κεφάλαιο 2 παρατίθενται μερικά βασικά θεωρητικά στοιχεία για τη μεταφορά ιζημάτων και τη διάβρωση όπως οι τρόποι μεταφοράς των ιζημάτων και μερικές βασικές εξισώσεις που έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της. Επίσης, γίνεται αναφορά στην εξίσωση υπολογισμού της διάβρωσης του εδάφους.

Στο κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται μια συνοπτική περιγραφή των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν. Παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο τα μοντέλα υδρολογικής και υδραυλικής προσομοίωσης μπορούν να συνδυαστούν και γίνεται αναφορά των διεργασιών που προσομοιώνονται.

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται η περιοχή μελέτης. Παρουσιάζονται χάρτες με τις χρήσεις γης και τη γεωλογία της περιοχής και παράλληλα, περιγράφονται τα βασικά κλιματικά στοιχεία που επικρατούν στην περιοχή.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται όλη η διαδικασία της υδρολογικής ανάλυσης. Ο τρόπος προ-επεξεργασίας των δεδομένων, η κατασκευή των υετογραφημάτων σχεδιασμού. Επίσης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης.

Στο κεφάλαιο 6 περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υδραυλική προσομοίωση της μεταφοράς φερτών. Παρουσιάζεται και εδώ ο τρόπος προ-επεξεργασίας των δεδομένων και στησίματος του μοντέλου και τα αποτελέσματα της διαδικασίας.

Στο κεφάλαιο 7 γίνεται η εξαγωγή των συμπερασμάτων από τη χρήση των μοντέλων και από τα αποτελέσματα.

2. Στερεομεταφορά και Εδαφική Διάβρωση

2.1 Γενικά

Η επιστήμη που ασχολείται με τα φαινόμενα και τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα όχι μόνο στα υδατικά συστήματα αλλά και στα χερσαία εδάφη και αφορά τη δημιουργία, μεταφορά και εναπόθεση ιζημάτων ονομάζεται μηχανική μεταφοράς ιζημάτων και αποτελεί ένα σημαντικό μέρος της υδραυλικής μηχανικής. Στην επιστήμη αυτή εντάσσονται, επίσης, και οι λύσεις μηχανικού που ανταποκρίνονται σε προβλήματα διάβρωσης και μεταφοράς ιζημάτων (Mimikou et al., 2018).

Η επιστήμη αυτή εξετάζει την αλληλεπίδραση των στερεών σωματιδίων με το νερό είτε είναι σε κίνηση ή στάσιμο. Μερικές τυπικές διεργασίες είναι η επίδραση της βροχής στα εδάφη που οδηγεί στην αποκόλληση των κόκκων και στη διάβρωση, η συλλογή και μεταφορά ιζημάτων με την επιφανειακή απορροή, η πρόσχωση και υποβιβασμός υδατορευμάτων καθώς και η εναπόθεση των ιζημάτων.

Η μελέτη των φαινομένων και των διεργασιών αυτών προβάλλει εξαιρετικά σημαντική καθώς είναι δυνατόν να δημιουργηθούν ποικίλα περιβαλλοντικά και οικολογικά θέματα. Μερικά από αυτά που θα μπορούσαν να εμφανιστούν και στον ελλαδικό χώρο είναι τα εξής:

- Αστάθεια πρανών λόγω εδαφικής διάβρωσης.
- Απώλεια εκτάσεων γεωργικής εκμετάλλευσης λόγων εδαφικής απώλειας σε καλλιεργούμενες περιοχές.
- Αστάθεια οχθών ποταμού λόγω διάβρωσης τους.
- Υποσκαφή θεμελίων έργων μέσα στις όχθες του ποταμού λόγω υποβιβασμού του πυθμένα.
- Πλημμύρες λόγω πρόσχωσης ποταμών.
- Μεταβολή κοίτης ποταμού κατάντη φράγματος λόγω «παγίδευσης» ιζημάτων.

- Μείωση έκτασης παράκτιας ζώνης κατάντη φράγματος λόγω «παγίδευσης» ιζημάτων.
- Επίδραση στη χλωρίδα και τη πανίδα της περιοχής λόγω μεταφοράς ιζημάτων.
- Ρύπανση των υδατικών συστημάτων λόγω συσσώρευσης ρύπων (φώσφορος, άζωτο, μέταλλα) στα ιζήματα που μεταφέρονται.

2.2 Ιδιότητες Ιζημάτων

Για να συνειδητοποιήσει κανείς καλύτερα τις διεργασίες και τα προβλήματα που συνδέονται με τη μεταφορά των ιζημάτων αναγκαίο είναι να υπάρχει γνώση κάποιων βασικών ιδιοτήτων τους.

2.2.1 Μέγεθος κόκκων

Το βασικό χαρακτηριστικό ενός κόκκου είναι το μέγεθός του. Πολλές από τις εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς μεταφοράς εμπεριέχουν το μέγεθος των κόκκων. Ωστόσο, καθώς δεν είναι δυνατό για κάθε κόκκο και μέγεθος να εφαρμόζεται ξεχωριστή εξίσωση, τα μεγέθη ομαδοποιούνται ανάλογα με το μέγεθος τους. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη κατάταξη μεγεθών είναι αυτή που αναπτύχθηκε από τον Lane (1947) και παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1.

Στη περίπτωση ανάλυσης κοκκομετρίας, όπου εξετάζεται ένα δείγμα, χρησιμοποιείται η μέθοδος των κοκκομετρικών καμπυλών. Οι καμπύλες αυτές ομαδοποιούν το δείγμα ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων εκφράζοντας το ποσοστό των κόκκων του δείγματος που είναι μικρότερο από διάφορα μεγέθη κοσκίνων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατός ο υπολογισμός της διαμέτρου ενός ποσοστού του δείγματος D_X, ενός όρου που χρησιμοποιείται σε διάφορες εξισώσεις υπολογισμού μεταφοράς ιζημάτων.

Πίνακας 2.1: Ομαδοποίηση μεγεθών κόκκων ιζήματος (Πηγή: Lane, 1947)

Κατηγορία		Εύρος μεγέθους (mm)
Ογκόλιθοι	Πολύ Μεγάλοι	4000-2000
	Μεγάλοι	2000-1000
	Μέτριοι	1000-500
	Μικροί	500-250
Λίθοι	Μεγάλοι	250-125
	Μικροί	125-64
Χαλίκι	Πολύ Τραχύ	64-32
	Τραχύ	32-16
	Μέτριο	8-4
	Λείο	4-2
	Πολύ Λείο	1-2
Άμμος	Πολύ Τραχύ	1-1/2
	Τραχύ	1/2-1/4
	Μέτριο	1/4-1/8
	Λείο	1/8-1/16
	Πολύ Λείο	1/16-1/32
Λάσπη	Τραχύ	1/32-1/64
	Μέτριο	1/64-1/128
	Λείο	1/128-1/256
Άργιλος	Τραχύ	1/256-1/512
	Μέτριο	1/512-1/1024
	Λείο	1/1024-1/2048
	Πολύ Λείο	1/2048-1/4096

2.2.2 Ταχύτητα καθίζησης

Ορίζεται ως η ταχύτητα καθίζησης ενός μοναδικού σωματιδίου σε στήλη αποσταγμένου νερού που εκτείνεται σε άπειρη απόσταση. Η ταχύτητα αυτή αποτελεί σημαντικό μέρος του υπολογισμού της στερεομεταφοράς καθώς από αυτή εξαρτάται

η μορφή της. Επηρεάζεται από το μέγεθος, το σχήμα, τη πυκνότητα και από την επιφάνεια του σωματιδίου, όπως επίσης, από την πυκνότητα και το ιξώδες του νερού.

Παρουσιάζεται η μέθοδος υπολογισμού της ταχύτητας καθίζησης που αναπτύχθηκε από τον Rubey (1933) και χρησιμοποιείται για σωματίδια λάσπης, άμμου και λίθων.

$$V_f = \lambda\sqrt{Dg\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}} = \lambda\sqrt{Dg\left(S_g-1\right)} \tag{2.1}$$

Όπου:

V_f: η ταχύτητα καθίζησης

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (=9.81 m/s^2)

D: η διάμετρος του σωματιδίου

γ_s, γ: το ειδικό βάρος του νερού και του σωματιδίου (N/m^3), αντίστοιχα

S_g: η ειδική βαρύτητα του σωματιδίου

v: κινηματικό ιξώδες (m^2/s) και

λ: παράμετρος που προκύπτει από τη σχέση:

$$\lambda = \begin{cases} 0.79 & \gamma\iota\alpha\ D > 1\ mm \\ \left[\frac{2}{3}+\frac{36v^2}{gD^3(S_g-1)}\right]^{\frac{1}{2}} - \left[\frac{36v^2}{gD^3(S_g-1)}\right]^{\frac{1}{2}} & \gamma\iota\alpha\ D \leq 1\ mm \end{cases} \tag{2.2}$$

2.3 Είδη Στερεομεταφοράς

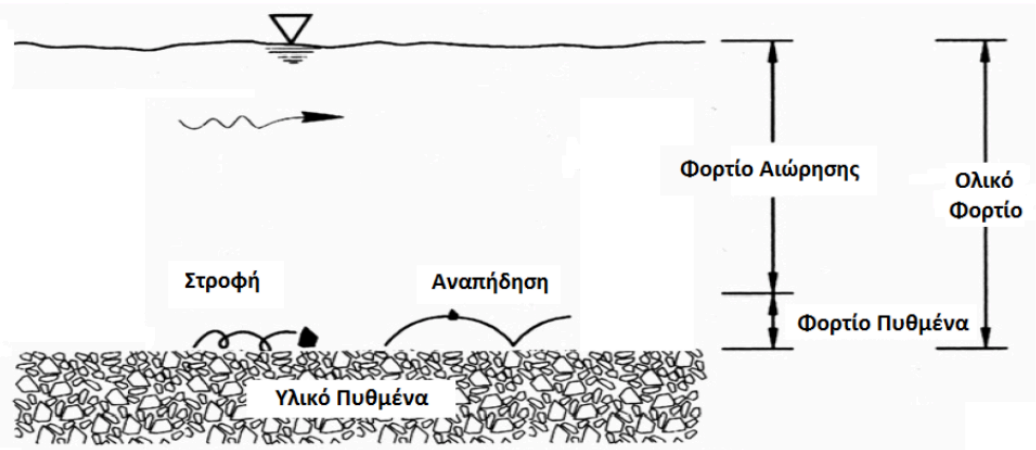
Η μεταφορά των ιζημάτων μπορεί να διακριτοποιηθεί σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη αφορά στον μηχανισμό κίνησης των ιζημάτων ενώ η δεύτερη αφορά την προέλευση τους.

Αναφορικά με την πρώτη κατηγορία παρουσιάζονται δυο μηχανισμοί. Ο πρώτος αφορά την κίνηση τους σε επαφή με τον πυθμένα (bed load) όπου τα ιζήματα μετακινούνται με στροφή, σύρση ή αναπήδηση. Ο δεύτερος μηχανισμός κίνησης των σωματιδίων είναι με αιώρηση (suspended load). Στην περίπτωση αυτή ιζήματα

μικρότερου μεγέθους μεταφέρονται λόγω τυρβωδών δυνάμεων που σχηματίζονται λόγω ροής και τους επιτρέπουν να μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς να έρχονται σε επαφή με τον πυθμένα (Εικόνα 2.1). Όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 2.1 τα φορτία πυθμένα και αιώρησης αποτελούν το ολικό φορτίο.

Ο τρόπος κίνησης των φερτών εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων (μέγεθος, βάρος, σχήμα) αλλά και από τις υδραυλικές συνθήκες της περιβάλλουσας ροής (τύρβη, ταχύτητα ροής) (Bagnold, 1966). Ακόμη, λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο εξίσωσης της συρτικής ταχύτητας με την ταχύτητα καθίζησης, φερτά υλικά μεγαλύτερα από 0.85 mm τείνουν να μετακινούνται με σύρση (Παναγούλια & Ζαρρής, 2008).

Η δεύτερη κατηγορία διάκρισης είναι με βάση τη προέλευση των ιζημάτων. Στην περίπτωση αυτή εμφανίζεται το φορτίο υλικού κοίτης (bed sediment load) και το



Εικόνα 2.1: Μηχανισμοί κίνησης ιζημάτων (Πηγή: Καλογήρου, 2014)

φορτίο απόπλυσης (wash load). Το φορτίο υλικού κοίτης προέρχεται κυρίως από την διάβρωση της κοίτης του υδατορεύματος και μετακινείται με σύρση και αιώρηση. Το φορτίο απόπλυσης προέρχεται από την διάβρωση της λεκάνης απορροής και μετακινείται αποκλειστικά σχεδόν με αιώρηση καθώς είναι πιο λεπτόκοκκο (Κουτσογιάννης & Τάρλα, 1987).

2.4 Εξισώσεις Στερεομεταφοράς

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται μερικές από τις πιο γνωστές και ευρέως χρησιμοποιημένες εξισώσεις μεταφοράς ιζημάτων.

2.4.1 Μέθοδος Meyer-Peter and Muller

Μια από τις πιο διαχρονικές μεθόδους είναι αυτή των Meyer-Peter and Muller (1948) που ανταποκρίνεται πολύ ικανοποιητικά για εδάφη με άμμο και λίθους. Η μορφή της είναι:

$$q_{Bm} = \frac{8}{\sqrt{\rho}}\left(\frac{1}{S_g - 1}\right)(\tau_o - \tau_c)^{1.5} \tag{2.3}$$

Όπου:

q_{Bm}: ο ρυθμός μεταφοράς φορτίου πυθμένα. Ορίζεται ως η μάζα που διέρχεται ανά μονάδα πλάτους του καναλιού (kg/s/m)

τ_o: η διατμητική τάση (N/m^2)

τ_c: η κρίσιμη διατμητική τάση (N/m^2)

Η διατμητική και η κρίσιμη διατμητική τάση δίνονται από τους τύπους (2.4) και (2.5) αντίστοιχα:

$$\tau_o = \gamma R S \tag{2.4}$$

$$\tau_c = 0.047\gamma\left(S_g - 1\right)D_s \tag{2.5}$$

Όπου:

R: η υδραυλική ακτίνα (m)

S: η κλίση της γραμμής ενέργειας (m/m)

Στην περίπτωση όπου το υλικό πυθμένα αποτελείται από κόκκους πολλών μεγεθών στην εξίσωση (2.5) χρησιμοποιείται για τη διάμετρο D_s ο τύπος:

$$D_s = \sum_{i=1}^{N}(p_i D_{si}) \quad (2.6)$$

Όπου:

p_i: το ποσοστό βάρους μιας διαμέτρου D_{si} στο δείγμα.

2.4.2 Μέθοδος Einstein

Η μέθοδος του Einstein (1950) βασιζεται στη χρήση δυο αδιάστατων παραμέτρων. Η πρώτη παράμετρος εκφράζει το ρυθμό μεταφοράς (Φ) και η δεύτερη την ένταση της ροής (Ψ΄). Οι παράμετροι Φ και Ψ' χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν τη μεταφορά φερτών σε αγωγούς με ομοιόμορφη κοκκομετρία και έτσι χρησιμοποιείται η D_{35} διάμετρος κόκκων. Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ των δυο συντελεστών, όπως αυτή προέκυψε από πειράματικά δεδομένα.

$$\Phi = \frac{q_{Bw}}{\gamma_s}\left[\frac{1}{(S_g-1)\, g D_s{}^3}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

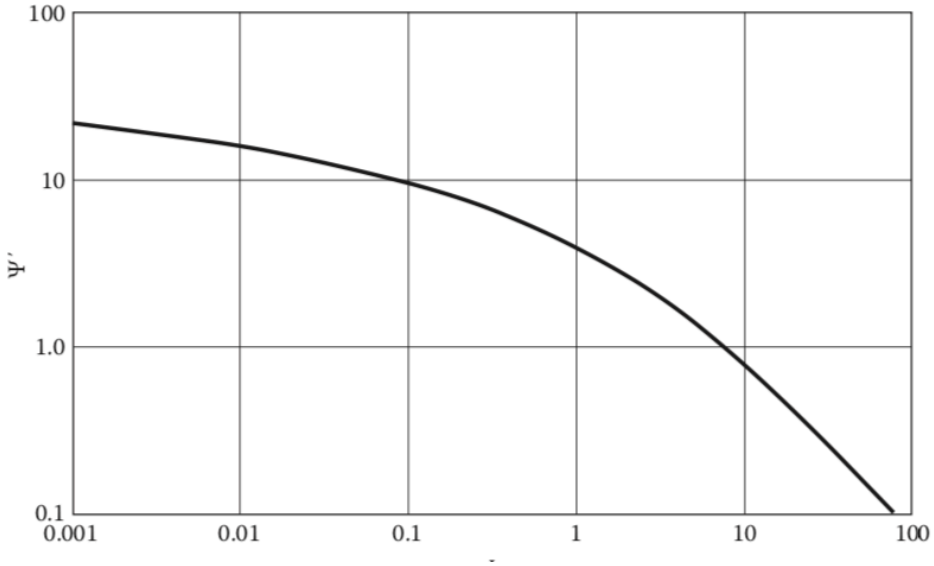
$$\Psi' = (S_g - 1)\frac{D_{35}}{R'S} \quad (2.8)$$

Όπου:

q_{Bw}: το βάρος του φορτίου πυθμένα ανά μονάδα χρόνου και πλάτους του καναλιού (N/s/m)

Στην περίπτωση όπου το υλικό του πυθμένα δεν είναι ομοιόμορφο ο Einstein πρότεινε τον υπολογισμό του φορτίου πυθμένα για κάθε διάμετρο κόκκου q_{Bwi} με τους συντελεστές Φ και Ψ* να υπολογίζονται και αυτοί για κάθε διάμετρο.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση ανομοιόμορφου υλικού ο συντελεστής Ψ' υπολογίζεται ως εξής:



Εικόνα 2.2: Σχέση μεταξύ συντελεστών Φ και Ψ΄ μεθόδου Einstein (Πηγή: Mimikou et al., 2018)

$$\Psi_i^* = \xi_i \Upsilon \left[\frac{\log(10.6)}{\log(xX/D_{65}}\right]^2 \Psi'_i \tag{2.9}$$

Όπου:

ξ_i: κρυφός συντελεστής διόρθωσης για κόκκους μικρότερους από το μέγεθος X. Υπολογίζεται διαγραμματικά για κάθε διάμετρο.

Υ: συντελεστής διόρθωσης πίεσης λαμβάνοντας υπόψη την αντίσταση κάθε κόκκου στη ροή του νερού. Υπολογίζεται διαγραμματικά για κάθε παράμετρο.

x: παράμετρος που και εξαρτάται από το ποσοστό σκληρότητας και πάχους του κόκκου.

δ: παράμετρος που υποδηλώνει το πάχος του εσωτερικού στρώματος του κόκκου

X: μέγεθος κόκκου που υπολογίζεται από τη σχέση

$$X = \begin{cases} 0.77\frac{D_{65}}{x} & \gamma\iota\alpha\ \frac{D_{65}}{x\delta} > 1.8 \\ 1.398\delta & \gamma\iota\alpha\ \frac{D_{65}}{x\delta} < 1.8 \end{cases} \tag{2.10}$$

Συνεπώς, αφού υπολογιστούν οι παράμετροι Φ_i^* από το διάγραμμα της εικόνα 2.3 για κάθε διάμετρο, υπολογίζεται το φορτίο μεταφοράς q_{Bw} με τον ακόλουθο τύπο:

$$q_{Bw} = \gamma_s\left[\left(S_g - 1\right)g\right]^{\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^{N}\left(p_{Bi}\Phi_i^* D_{si}^{\frac{3}{2}}\right) \tag{2.11}$$

Πολλές μελέτες (Shen & Julien, 1992) έχουν αποδείξει ότι με κατάλληλους μετασχηματισμούς οι περισσότερες μέθοδοι υπολογισμού της στερεομεταφοράς μπορούν να εναρμονιστούν με τη μέθοδο του Einstein (1950).

2.4.3 Μέθοδος Ackers and White

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε από τους Ackers και White (1973) επικεντρώνεται στον υπολογισμό της μέσης συγκέντρωσης ιζημάτων C_m. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται προκύπτει μετά από πειραματικά δεδομένα και χρησιμοποιεί τέσσερις παραμέτρους a_i οι οποίες εξαρτώνται από το μέγεθος των κόκκων.

$$C_m = \left(\frac{V}{V_*}\right)^{a_1} \frac{S_g D_s}{d} a_2 \left(\frac{F}{a_3} - 1\right)^{a_4} \tag{2.12}$$

Όπου:

V: η μέση ταχύτητα ροής (m/s)

V_*: η διατμητική ταχύτητα

F: παράμετρος που δίνεται από τον τύπο:

$$F = \frac{V_*^{a_1}}{\sqrt{gd(S_g-1)}}\left[\frac{V}{\sqrt{32}\log\left(10\left(\frac{d}{D_s}\right)\right)}\right]^{1-a_1} \tag{2.13}$$

Οι παράμετροι a_i υπολογίζονται βάση της αδιάστατης διαμέτρου κόκκου D_* σύμφωνα με τους τύπους του Πίνακα 2.2.

$$D_* = D_s\left[\frac{g(S_g-1)}{\nu^2}\right]^{\frac{1}{3}} \tag{2.14}$$

Πίνακας 2.2: Πίνακας τύπων παραμέτρων α

Παράμετρος	$D_* \geq 60$	$1 < D_* \leq 60$
a_1	0	$1.00 - 0.56\log D_*$
a_2	0.025	$10^{(2.86logD_* - (logD_*)^2 - 3.53)}$
a_3	0.17	$\frac{0.23}{\sqrt{D_*}} + 0.14$
a_4	1.5	$\frac{9.66}{D_*} + 1.34$

Έχοντας υπολογίσει τη συγκέντρωση και γνωρίζοντας την παροχή του νερού ανά μονάδα πλάτους του καναλιού q ($m^3/s/m$), είναι δυνατός ο υπολογισμός του συνολικού φορτίου ιζημάτων (total sediment load) χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$q_{Tv} = \frac{C_m q}{S_g(1-C_m)} \tag{2.15}$$

Όπου:

q_{Tv}: παροχή ιζήματος ανά μονάδα πλάτους καναλιού ($m^3/s/m$)

2.4.4. Μέθοδος Yang

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μια εμπειρική εξίσωση που υπολογίζει τη μέση συγκέντρωση ιζημάτων C_m που έχει προκύψει από εργαστηριακές μετρήσεις (Yang, 1972). Στη μέθοδο αυτή συσχετίζεται το ολικό φορτίο ιζημάτων άμμου με την ενέργεια ροής.

$$logC_m = 5.435 - 0.286\log\left(\frac{V_f D_s}{v}\right) - 0.457\log\left(\frac{V_*}{V_f}\right) + \left[1.799 - 0.409log\left(\frac{V_f D_s}{v}\right) - 0.314log\left(\frac{V_*}{V_f}\right)\right] log\left(\frac{VS}{V_f} - \frac{V_{cr}S}{V_f}\right) \tag{2.16}$$

Όπου:

C_m: η μέση συγκέντρωση ιζήματος (ppm)

V_{cr}: η κρίσιμη ταχύτητα αρχική κίνησης

V_f: η ταχύτητα καθίζησης

Με τη συγκέντρωση ιζημάτων C_m γνωστή είναι δυνατός ο υπολογισμού του συνολικού φορτίου ιζημάτων χρησιμοποιώντας τον τύπο (2.15).

2.5 Εδαφική διάβρωση

Η εδαφική διάβρωση αποτελεί ένα φυσικό φαινόμενο που διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στις διεργασίες της μηχανικής μεταφοράς ιζημάτων. Όπως περιεγράφηκε παραπάνω, αποτελεί μια από τις δύο πηγές προέλευσης ιζημάτων. Ο ακριβής υπολογισμός της εδαφικής διάβρωσης αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στοιχείο καθώς η εκτεταμένη διάβρωση μπορεί να οδηγήσει στην αλλαγή της τοπογραφίας, στη συγκέντρωση ιζημάτων στους ταμιευτήρες ακόμα και στη μείωση των καλλιεργούμενων εκτάσεων δημιουργώντας, έτσι, πρόβλημα στις χρήσεις γης μια περιοχής (Mimikou et al., 2018).

Η διαδικασία της διάβρωσης αποτελείται από δύο μέρη: α) την αποκόλληση των κόκκων από το πάνω στρώμα του εδάφους από την επίδραση της βροχής και β) τη μεταφορά των ιζημάτων από την επιφανειακή απορροή. Μερικοί τύποι εδαφικής διάβρωσης είναι (Goldman et al., 1986):

- Διάβρωση αποκόλλησης (splash erosion): Ο τύπος αυτός εμφανίζεται σε ακαλλιέργητο γυμνό έδαφος και οφείλεται στην επίδραση της επαφής έντονης βροχόπτωσης με το χώμα.
- Επιφανειακή διάβρωση (sheet erosion): Ο τύπος αυτός εμφανίζεται σε ομαλό έδαφος με μικρή κλίση και αφορά τη μεταφορά των κόκκων που έχουν διασπαστεί από το βροχόπτωση.
- Αυλακωτή διάβρωση (rill erosion): Η επιφανειακή απορροή συγκεντρώνεται σε πιο απότομες καμπύλες του εδάφους όπου οι κόκκοι αποκολλούνται και μεταφέρονται πιο εύκολα δημιουργώντας μικρά αυλάκια.

- Διάβρωση σε χαντάκι (gully erosion): Δημιουργία μεγαλύτερων και βαθύτερων αυλακιών λόγω εντονότερης βροχόπτωσης ή ένωσης μικρότερων αυλακιών.

Η εδαφική διάβρωση επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες και συγκεκριμένα από κλιματικά χαρακτηριστικά, την τοπογραφία, την κάλυψη του εδάφους και το είδος του (Kirkby & Morgan, 1980). Το κλίμα έχει άμεση επίπτωση στην διάβρωση καθώς είναι ένα φαινόμενο που προκαλείται από τη βροχή. Σημαντικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν είναι η ένταση της βροχόπτωσης και το μέγεθος των σταγόνων της. Αναφορικά με τα χαρακτηριστικά του εδάφους, η υφή, η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, η δομή και η υδροπερατότητα διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο. Η τοπογραφία της περιοχής και η κάλυψη του εδάφους επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή και την ταχύτητα του νερού.

2.5.1 Παγκόσμια εξίσωση εδαφικής διάβρωσης

Η Universal Soil Loss Equation (USLE) (Smith & Wischmeier, 1957; Meyer & Monke, 1965; Wischmeier & Smith, 1965; 1978) είναι η πιο χρησιμοποιημένη μέθοδος για τον υπολογισμό της εδαφικής διάβρωσης. Αναπτύχθηκε από την Soil Conservation Service του Τμήματος Καλλιεργειών της Αμερικής (USDA) και προέκυψε από πειραματικές διαδικασίες που έλαβαν χώρα από το 1930 στην Αμερική. Ο τύπος της εξίσωσης είναι:

$$A = RKLSCP \tag{2.17}$$

Όπου:

A: η ετήσια εδαφική απώλεια (tons/ha)

R: ο συντελεστής διάβρωσης της βροχόπτωσης

K: ο συντελεστής διάβρωσης του εδάφους

LS: ο συντελεστής τοπογραφίας

C: ο συντελεστής φυτοκάλυψης εδάφους

P: ο συντελεστής μέτρων ελέγχου διάβρωσης

2.5.2 Τροποποιημένη εξίσωση εδαφικής απώλειας

Η USLE χρησιμοποιείται ευρέως για τον υπολογισμό της ετήσιας ή μια μεγάλης χρονικής διάρκειας ποσότητας ιζημάτων που προκύπτουν από μια περιοχή χωρίς να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεμονομένα γεγονότα βροχόπτωσης. Για το λόγο αυτό οι Williams και Berndt (1972) τροποποίησαν την USLE έτσι ώστε να μπορεί να υπολογίσει την παραγόμενη ποσότητα ιζημάτων για ένα γεγονός βροχής προσθέτωντας ένα συνετελεστή για την απορροή. Ο συντελεστής αυτός αναπαριστά την ενέργεια που χρειάζεται για την αποκόλληση και μεταφορά του ιζήματος σε αντίθεση με την USLE όπου ο συντελεστής R αφορούσε μόνο την αποκόλληση (Καπερώνης, 2016). Ο τύπος της Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) είναι:

$$Y = 11.8\ (VQ_p)^{0.56} KLSCP \tag{2.18}$$

Όπου:

Y: η μάζα φερτών (tons)

V: ο όγκος απορροής (m^3)

Q_p: η παροχή αιχμής (m^3/s)

Οι παραπάνω συντελεστές που χρησιμοποιούνται στην MUSLE προκύπτουν από πίνακες και εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της περιοχής. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής διαβρωσιμότητας εδάφους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους της περιοχής. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζεται μια αντιστοιχία τιμών του συντελεστή με διάφορα είδη γεωλογικών σχηματισμών όπως έχει προκύψει από τη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία (Mitchell & Bubenzer, 1980; Χρυσάνθου & Πυλιώτης, 1995; Zarris et al.,2001). Αντίστοιχα, ο συντελεστής φυτοκάλυψης C λαμβάνει τιμές ανάλογα με τις χρήσεις γης (Πίνακας 2.4) (Zarris et al., 2001). Ο συντελεστής μέτρων ελέγχου διάβρωσης εκφράζει τα μέτρα που έχουν ληφθεί για τη μείωση της ταχύτητας της απορροής όπως είναι η δημιουργία επιπέδων σε πρανή ή η περιστροφή των καλλιεργειών (Mimikou et al., 2018). Σε περιπτώσεις όπου δεν έχουν ληφθεί μέτρα ο συντελεστής P λαμβάνει την τιμή 1. Ο συντελεστής LS εκφράζει την επίδραση της γεωμορφολογίας και του αναγλύφου χρησιμοποιώντας το μήκος κλίσης, δηλαδή την απόσταση από το σημείο έναρξης της επιφανειακής απορροής

κατά μήκος μιας διαδρομής απορροής μέχρι το σημείο απόθεσης των υλικών διάβρωσης, και του βαθμού της κλίσης. (Wischeimer & Smith, 1978). Ο συντελεστής LS δίνεται από την εξίσωση:

$$LS = \left(\frac{l}{22.13}\right)^m (0.065 + 4.5sin\theta + 65.41sin^2\theta) \quad (2.19)$$

Όπου:

l: η κλίση μήκους του απορρέοντος τμήματος

θ: η γωνία κλίσης που εκφράζεται ως:

$$sin\theta = \frac{s}{\sqrt{10^4+s^2}} \quad (2.20)$$

Όπου:

s: το ποσοστό κλίσης (%)

m: συντελεστής που εξαρτάται από την κλίση σύμφωνα με τον Πίνακα 2.5.

2.6 Βιβλιογραφική Αναδρομή

Η στερεομεταφορά των ποταμών αποτελεί ένα φαινόμενο καθοριστικής σημασίας σε θέματα σχεδιασμού τεχνικών έργων και περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για το λόγο αυτό έχει απασχολήσει εδώ και πολλά χρόνια αρκετούς ερευνητές (Χρυσανθου & Πυλιώτης, 1995; Κουτσογιάννης & Τάρλα, 1987; Καλογήρου, 2014; Shelley et al., 2015).

Οι παραπάνω μελέτες στηρίζονται σε διάφορες μεθόδους υπολογισμού της ποσότητας φερτών που μεταφέρονται σε ένα ποτάμι. Οι Zarris & Koutsoyiannis (2005) χρησιμοποίησαν τις βαθυμετρικές αλλαγές της λεκάνης απορροής του ταμιευτήρα Κρεμαστών στον Αχελώο. Επίσης, οι Κουτσογιάννης & Τάρλα (1987) έκαναν εκτιμήσεις της στερεοαπορροής στην Ελλάδα με βάση διαθέσιμα δεδομένα απο σταθμούς και στατιστικές μεθοδολογίες.

Πίνακας 2.3: Τιμές συντελεστή Κ για διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς (Πηγή: Zarris et al., 2001)

Γεωλογικός Σχηματισμός	Συντελεστής Κ
Αδιαπέρατοι Σχηματισμοί-Φλυσχης	0.05
Αδιαπέρατοι Σχηματισμοί-Πλουτώνια και ηφαιστιακά πετρώματα	0.07
Αδιαπέρατοι Σχηματισμοί-μεταμορφωμένα πετρώματα	0.06
Καρστικοί Σχηματισμοί-Ασβεστόλιθοι και μάρμαρα εκτεταμένης ανάπτυξης, μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας	0.1
Καρστικοί Σχηματισμοί-Ασβεστόλιθοι και μάρμαρα περιορισμένης ανάπτυξης, κυμαινόμενης υδροπερατότητας	0.06
Πορώδεις Σχηματισμοί-Κοκκώδεις προσχωματικές αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας	0.31
Πορώδεις Σχηματσμοί-Κοκκώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις μέτριας έως πολύ μικρής υδροπερατότητας	0.28
Πορώδεις Σχηματισμοί-Κοκκώδεις μαλλασικές αποθέσεις σχετικά μικρής υδροπερατότητας	0.3

Μια άλλη προσέγγιση υπολογισμού της μεταφοράς φερτών είναι με προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας κατάλληλα λογισμικά. Η Καλογήρου (2014) χρησιμοποίησε το λογισμικό HEC-RAS για να εκτιμήσει την στερεοπαροχή κατά μήκος του ποταμού Αράχθου ενώ οι (Rehman et al., 2018) υπολόγισαν με τη χρήση του HEC-RAS τις εισροές φερτών σε τρεις ταμιευτήρες συγκρίνοντας τις με μετρημένες τιμές από σταθμούς. Ακόμη, οι Farajzadeh et al. (2014) ανέλυσαν τις μεθόδους ανάλυσης της μεταφοράς φερτών στο HEC-HMS για την περίπτωση του φράγματος Teleghan στο Ιράκ.

Σημαντικό, επίσης, κομμάτι του φαινομένου μεταφοράς φερτών αποτελεί και ο υπολογισμός της εδαφικής διάβρωσης. Οι Belasri & Lakhouili (2016) χρησιμοποιούν την παγκόσμια εξίσωση εδαφικής απώλειας και εφαρμογές γεωπληροφορικής για τον υπολογισμό της εδαφικής διάβρωσης σε μια λεκάνη απορροής στο Μαρόκο. Επίσης, οι Arekhi et al. (2012) χρησιμοποίησαν την τροποποιημένη εξίσωση εδαφικής

Πίνακας 2.4: Τιμές συντελεστή C για διαφορετικές χρήσεις γης (Πηγή: Zarris et al., 2001)

Χρήση Γης	Κωδικός CLC	Συντελεστής C
Διακεκομμένη αστική δόμηση	112	0.001
Μη αρδεύσιμη αρώσιμη γη	211	0.3
Ορυζώνες	213	0.15
Αμπελώνες	221	0.2
Οπωροφόρα δέντρα	222	0.2
Ετήσιες καλλιέργειες	241	0.18
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	242	0.18
Γεωργική γη με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	243	0.1
Γεωργοδασικές περιοχές	244	0.05
Δάσος πλατύφυλλων	311	0.001
Δάσος κωνοφόρων	312	0.001
Μικτό δάσος	313	0.001
Φυσικοί βοσκότοποι	321	0.3
Θάμνοι και χερσότοποι	322	0.45
Σκληροφυλλική βλάστηση	323	0.03
Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	324	0.02
Παραλίες-αμμόλοφοι-αμμουδιές	331	0.45
Απογυμνωμένοι βράχοι	332	0.45
Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	333	0.45
Συλλογές υδάτων	512	0

Πίνακας 2.5: Τιμές συντελεστή m για τον υπολογισμό της τιμής LS (Πηγή: Wischeimer & Smith, 1978)

s(%)	m
<1	0.2
1-3	0.3
3-5	0.4
>5	0.5

απώλειας με στόχο τον υπολογισμό της εδαφικής διάβρωσης και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με παρατηρημένες τιμές.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα φράγματα ενδέχεται να προκαλέσουν επιπώσεις στη μεταφορά φερτών του ποταμού. Αρκετές μελέτες έχουν δημοσιευθεί που να ασχολούνται με τις επιπτώσεις των φραγμάτων. Οι Xu & Milliman (2009) υπολογίζουν τις εποχιακές διακυμάνσεις της μεταφοράς φερτών και πως το φράγμα Three Gorges Dam επηρεάζει το φαινόμενο αυτό. Επιπλέον, οι Ibanez et al. (1996) εκτιμούν τις επιπτώσεις φραγμάτων στον ποταμό Ebro, στην υδρολογία και τη μεταφορά φερτών. Μια ακόμα μελέτη που εστιάζει στην επίπτωση τς κατασκευής φράγματος στη μεταφορά φερτών είναι των Sadaoui et al. (2018) που βασίζεται σε εμπειρικές προσομοιώσεις. Τέλος, οι Chen et al. (2018) ασχολήθηκαν με τη μελέτη των επιπτώσεων στη μεταφορά ιζημάτων από τροποποιημένα από τον άνθρωπο υδατικά συστήματα.

3. Τα Μοντέλα HEC-HMS και HEC-RAS

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μια συνοπτική περιγραφή των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία. Για τον υπολογισμό των επιπτώσεων του φράγματος στη παράκτια περιοχή και συγκεκριμένα στο θέμα της μεταφοράς ιζημάτων απαιτείται η συνδυαστική χρήση των δύο μοντέλων HEC-HMS και HEC-RAS. Τα μοντέλα HEC-HMS και HEC-RAS έχουν αναπτυχθεί από το Σώμα Μηχανικών του Αμερικανικού στρατού και συγκεκριμένα από το Hydrologic Engineering Center (HEC). Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως σε όλο τον κόσμο σε ερευνητικό και επιχειρησιακό επίπεδο (Hanmaihgari et al., 2018; Farajzadeh et al., 2014; Μπενέκου, 2014; Asadi & Boostani, 2013).

3.1 Το μοντέλο HEC-HMS

Το μοντέλο HEC-HMS (Hydrologic Modelling System) είναι σχεδιασμένο να προσομοιώνει το φαινόμενο της βροχόπτωσης απορροής σε δενδριτικού τύπου λεκάνες απορροές. Το HMS μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια μεγάλη ποικιλία γεωγραφικών περιοχών όπως αγροτικές ή και αστικές λεκάνες απορροής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνδυαστικά με άλλα προγράμματα για μελέτες όπως διαθεσιμότητας υδατικών πόρων, αστικής υδρολογίας, επίπτωσης ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, σχεδιασμό αντιπλημμυρικών έργων (US Army Corps of Engineers, 2016).

Αναφορικά με τα είδη μοντέλων, το HMS είναι δυνατόν να ανήκει σε περισσότερες κατηγορίες ανάλογα με το είδος. Αναλυτικότερα, το HMS σε ότι αφορά τη χωρική κλίμακα μπορεί ανάλογα με την επιλογή του χρήστη να είναι συγκεντρωτικό, δηλαδή η λεκάνη απορροής να προσομοιώνεται ως ενιαία ή ημι-κατανεμημένη, να χωρίζεται, δηλαδή, σε μικρότερες υπολεκάνες. Αναφορικά με τη χρονική κλίμακα, το HMS μπορεί να λειτουργήσει ως συνεχές και να πραγματοποιήσει μια μεγάλης χρονικής διάρκειας προσομοίωση ή ως μοντέλο μεμονωμένου γεγονότος βροχόπτωσης-απορροής όπου η προσομοίωση διαρκεί όσο και το γεγονός. Τέλος, με βάση τη

μαθηματική δομή του μοντέλου ανήκει στην κατηγορία των εννοιολογικών μοντέλων όπου χρησιμοποιούνται απλουστευτικές παραδοχές του φυσικού συστήματος.

3.1.1 Αναπαράσταση του μοντέλου

Το μοντέλο HEC-HMS συνεργάζεται με το πρόγραμμα HEC-GeoHMS το οποίο αποτελεί ένα πρόσθετο του προγράμματος ArcGIS. Στο HEC-GeoHMS γίνεται η προ-επεξεργασία των γεωχωρικών δεδομένων (ψηφιακό μοντέλο εδάφους, χρήσεις γης, γεωλογία). Το αποτέλεσμα της προ-επεξεργασίας αυτής είναι η δημιουργία του αρχείου basin file στο οποίο έχει σχεδιαστεί η αναπαράσταση της λεκάνης απορροής και η δημιουργία των υδρολογικών στοιχείων. Τα στοιχεία που δύναται να κατασκευαστούν είναι η υπολεκάνη, το υδατόρευμα, η ένωση, ο ταμιευτήρας, η εκτροπή, η πηγή και η καταβόθρα/πηγάδι (Πίνακας 3.1). Όλα τα παραπάνω στοιχεία ενώνονται μεταξύ τους δενδριτικά για να προσομοιώσουν τις διεργασίες της απορροής.

3.1.2 Διεργασίες υδρολογικού μοντέλου

Το μοντέλο προσομοίωσης κατασκευάζεται διαφοροποιώντας τον υδρολογικό κύκλο σε μικρότερα τμήματα, με στόχο ο χρήστης να μπορεί να επιλέξει ποια μέθοδος προσομοίωσης του κάθε φυσικού φαινομένου ταιριάζει καλύτερα στη περιοχή και στους στόχους της μελέτης. Συγκεκριμένα τα μέρη της υδρολογικής προσομοίωσης που διαχωρίζονται είναι:

- Loss Method: αφορά τη μέθοδο υπολογισμού των απωλειών
- Transform method: αφορά τη μέθοδο μετατροπής της βροχής σε απορροή
- Baseflow method: αφορά τον υπολογισμό της βασικής απορροής
- Rooting method: αφορά τον τρόπο διόδευσης διαμέσου των υδατορευμάτων
- Canopy Method: αφορά τη φυτοκάλυψη της λεκάνης απορροής
- Surface Method: αφορά την επιφάνεια του εδάφους

Πίνακας 3.1: Υδρολογικά στοιχεία HMS

Στοιχείο	Περιγραφή
	Subbasin (Υπολεκάνη): Συμβολίζει τον φυσικό υδροκρίτη. Με δεδομενη βροχόπτωση, υπολογίζεται για την κάθε υπολεκάνη η εκροή καθώς αφαιρούνται οι απώλειες, η επιφανειακή απορροή και λαμβάνεται υπόψη η βασική απορροή
	Reach (ρέμα): Χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του νερού στη λεκάνη. Η εισροή στο ρέμα μπορεί να προέρχεται από ένα ή περισσότερα στοιχεία ανάντη. Οι απώλειες στο ρέμα, υπολογίζονται κατά τη διαδικασία της διόδευσης
	Junction (κόμβος): Είναι το σημείο όπου ενώνονται απορροές οι οποίες προέρχονται από στοιχεία ανάντη αυτού. Η εισροή μπορεί να προέρχεται από ένα ή περισσότερα στοιχεία ανάντη, ενώ η εκροή υπολογίζεται ως το άθροισμα της απορροής
	Source (πηγή): Η πηγή χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει με εισροή τη λεκάνη απορροής. Η εκροή της καθορίζεται από τον χρήστη
	Reservoir (ταμιευτήρας): Η εισροή του ταμιευτήρα μπορεί να προέλθει από ένα ή περισσότερα στοιχεία ανάντη αυτού. Η εκροή του μπορεί να υπολογιστεί βάσει μιας από τρεις μεθόδους διόδευσης
	Diversion (εκτροπή): Είναι το σημείο απ' όπου ποσότητα ροής από το κύριο ρεύμα ακολουθεί διαφορετική πορεία.
	Sink (καταβόθρα / πηγάδι): Αποτελεί τη διέξοδο του φυσικού υδροκρίτη. Η εισροή στην καταβόθρα μπορεί να προέρχεται από ένα ή περισσότερα στοιχεία που βρίσκονται ανάντη. Για την καταβόθρα δεν υπολογίζεται εκροή.

Παρακάτω αναφέρονται για κάθε υδρολογική διαδικασία οι μέθοδοι που εμπεριέχονται στο HEC-HMS. Αναλυτικότερη περιγραφή θα πραγματοποιηθεί για τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή.

3.1.2.1 Μέθοδος απωλειών

Μια ποικιλία μεθόδων είναι διαθέσιμες για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω διήθησης για κάθε υπολεκάνη. Οι μέθοδοι αυτές είναι (US Army Corps of Engineers, 2016):

Initial and Constant: Πρόκειται για μια απλή μέθοδο κατάλληλη για λεκάνες απορροής στις οποίες υπάρχει έλλειψη πληροφοριών για τα εδάφη. Οι αρχικές απώλειες εκφράζουν το νερό που διηθείται ή αποθηκεύεται στο έδαφος πριν την έναρξη της επιφανειακής απορροής ενώ το ποσοστό σταθερών απωλειών εκφράζει το ποσό του νερού που διηθείται αφού έχει ξεκινήσει η επιφανειακή απορροή.

Green and Ampt: Το μοντέλο διήθησης αυτό είναι ένα εννοιολογικό μοντέλο διήθησης των κατακρημνισμάτων σε μια λεκάνη απορροής. Η αποθηκευτικότητα και η ικανότητα διήθησης του εδάφους προσδιορίζονται από την εξίσωση Richards, μια εξίσωση που προέρχεται από τον νόμο του Darcy.

Smith Parlange: Η εξίσωση Richards χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διήθησης στο έδαφος θεωρώντας ότι το μέτωπο διαβροχής μπορεί να αναπαρασταθεί με εκθετική κλιμάκωση της κορεσμένης αγωγιμότητας. Έτσι υπολογίζεται με γρήγορο τρόπο η διήθηση και ταυτόχρονα επιτυγχάνεται μια καλή προσέγγιση του μετώπου διαβροχής.

Deficit Constant Method: Στη μέθοδο αυτή υπολογίζονται οι συνεχόμενες αλλαγές της κατάστασης της υγρασίας του εδάφους. Για τον υπολογισμό αυτόν απαιτείται η χρήση μεθόδων φυτοκάλυψης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

Soil Moisture Accounting: Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη χρήση διαφορετικών στρωμάτων του εδάφους. Στο ένα στρώμα το νερό απομακρύνεται με την εξατμισοδιαπνοή και τη διήθηση ενώ στο άλλο μόνο από εξατμισοδιαπνοή. Το νερό κινείται στο πάνω υπόγειο στρώμα από το έδαφος και από εκεί στο κατώτερο υπόγειο στρώμα από το οποίο και βγαίνει εκτός συστήματος.

Exponential: Πρόκειται για μια εμπειρική μέθοδο που απαιτεί βαθμονόμηση. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι το ποσό της σταδιακά αυξανόμενης διήθησης μειώνεται λογαριθμικά συναρτήσει του ήδη συσσωρευμένου ποσού διήθησης.

SCS Curve Number Method: Η μέθοδος αυτή (US Soil Conservation Service, 1972) αποτελεί μια εμπειρική μέθοδο εκτίμησης των απωλειών χρησιμοποιώντας ως μεταβλητές το ύψος της βροχόπτωσης, την αρχική κατάσταση υγρασίας του εδάφους και το σύμπλοκο εδάφους-καλύμματος. Για τον υπολογισμό των υδρολογικών απωλειών χρησιμοποιείται ένας αριθμός καμπύλης Curve Number στον οποίο ενσωματώνονται η κάλυψη και η χρήση γης. Ακόμη, οι αρχικές απώλειες θεωρούνται ίσες με το 20% των συνολικών απωλειών. Σύμφωνα με τη μέθοδο προκύπτει ότι οι απώλειες δίνονται από τον τύπο:

$$h_R = \begin{cases} \frac{(h_r - 0.2S)^2}{h_R + 0.8S} & \gamma\iota\alpha\ h_r > 0.2S \\ 0 & \gamma\iota\alpha\ h_r < 0.2S \end{cases} \tag{3.1}$$

Όπου:

h_R: το περίσσευμα βροχής (mm)

h_r: η βροχόπτωση (mm)

S: η μέγιστη δυνητική κατακράτηση (mm) η οποία προκύπτει από τον αριθμό καμπύλης CN μέσω του τύπου:

$$S = 254\left(\frac{100}{CN} - 1\right) \tag{3.2}$$

Τα εδάφη ανάλογα με τη διαπερατότητα τους διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες κατά την SCS (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2006):

- Κατηγορία A: Εδάφη με υψηλή διηθητική ικανότητα και υψηλή διαπερατότητα (αμμώδη, χαλικώδη) ακόμη και αν διαβραχούν διεξοδικά (χαμηλό δυναμικό απορροής).
- Κατηγορία B: Εδάφη με μέτρια διηθητική ικανότητα και διαπερατότητα (πλήρως στραγγιζόμενες άμμους ή χαλίκια).
- Κατηγορία C: Εδάφη με μικρή διηθητική ικανότητα και διαπερατότητα (εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου).

- Κατηγορία D: Εδάφη με πολύ χαμηλή διηθητική ικανότητα και διαπερατότητα (πολύ υψηλό δυναμικό απορροής). Συνήθως περιλαμβάνουν αργιλώδη εδάφη με υψηλή πιθανότητα διόγκωσης ή ρηχά εδάφη πάνω σε σχεδόν αδιαπέρατο υλικό.

Ακόμη, οι αριθμοί καμπύλης χωρίζονται και με βάση τις υπάρχουσες συνθήκες εδαφικής υγρασίας (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2006):

- Κατάσταση I: Η κατάσταση στην οποία τα εδάφη είναι στεγνά, αλλά όχι στο σημείο μόνιμου μαρασμού.
- Κατάσταση II: Η μέση περίπτωση για ετήσιες πλημμύρες, δηλαδή ένας μέσος όρος των συνθηκών που προηγήθηκαν της μέγιστης ετήσιας πλημμύρας σε αρκετές λεκάνες απορροής.
- Κατάσταση III: Αν έντονη βροχόπτωση ή ελαφρά βροχόπτωση και χαμηλές θερμοκρασίες έχουν συμβεί τις τελευταίες πέντε ημέρες πριν τη δεδομένη καταιγίδα και το έδαφος είναι σχεδόν κορεσμένο.

Τελικά, οι αριθμοί καμπύλης CN προκύπτουν από πίνακες ανάλογα με την κατάσταση της υγρασίας και τη χρήση γης. Παρακάτω, παρουσιάζεται ο Πίνακας 3.2 με τιμές της καμπύλης CN για κατάσταση II ανάλογα με τις χρήσεις γης (Wanielista, 1978).

<u>Gridded Deficit Constant, Gridded SCS Curve Number, Gridded Soil Moisture Accounting</u>: Οι μέθοδοι αυτές είναι ίδιες με αυτές που αναφέρθηκαν ήδη με τη διαφορά ότι χρησιμοποιούν ένα πλέγμα κελιών.

Τέλος, σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό επιπλέον απωλειών στο μοντέλο μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι συγκράτησης και παγίδευσης του νερού από τη φυτοκάλυψη και την επιφάνεια του εδάφους.

Πίνακας 3.2: Αριθμός καμπύλης CN (Πηγή: Wanielista, 1978)

Χρήση Γης		Υδρολογικός τύπος εδάφους A	B	C	D
Καλλιεργημένες εκτάσεις					
• Χωρίς έργα συντήρησης		72	81	88	91
• Με έργα συντήρησης		62	71	78	81
Ορεινοί βοσκότοποι					
• Κακή κατάσταση		68	79	86	89
• Καλή κατάσταση		39	61	74	80
Λιβαδικές εκτάσεις					
• Καλή κατάσταση		30	58	71	78
Δασικές εκτάσεις					
• Αραιή συστάδα		45	66	77	83
• Πυκνή συστάδα		25	55	70	77
Ελεύθερες εκτάσεις, γήπεδα γκόλφ, πάρκα					
• Καλή κατάσταση, κάλυψη με γρασίδι στο 75% της έκτασης		39.	61	74	80
• Μέτρια κατάσταση, κάλυψη με γρασίδι στο 50% της περιοχής		49	69	79	84
Εμπορικές περιοχές (85% αδιαπέρατες)		89	92	94	95
Βιομηχανικές περιοχές (72% αδιαπέρατες)		81	88	91	93
Οικιστικές περιοχές					
Μέσο μέγεθος οικοπέδου	Ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας				
< 500	65	77	85	90	92
1000	40	61	75	83	87
1500	30	57	72	81	86
2000	25	54	70	80	85
4000	20	51	68	79	84
Χώροι πάρκινγκ, στέγες, κ.λ.π.		98	98	98	98
Δρόμοι					
• με οδόστρωμα και αγωγούς ομβρίων		98	98	98	98
• χαλικόστρωτοι		76	85	89	91
• χωματόδρομοι		72	82	87	89
Αστικές συνθήκες					
• Γυμνό έδαφος		77	86	91	94
• Κήποι ή θάμνοι		72	81	88	91
• Μεγάλη κάλυψη με πράσινο (> 75% της διαπερατής περιοχής)		39	61	74	80
• Μέτρια κάλυψη πρασίνου (50 - 75% της διαπερατής περιοχής)		49	69	79	84
• Μικρή κάλυψη πρασίνου (< 50% της διαπερατής περιοχής)		68	79	86	89
• Άλση		36	60	73	79

3.1.2.2. Μέθοδοι μετατροπής βροχόπτωσης σε απορροή

Ο χρήστης του HMS μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε έξι διαφορετικές μεθόδους για τη μετατροπή της βροχόπτωσης σε απορροή οι οποίες βασίζονται στα μοναδιαία υδρογραφήματα (US Army Corps of Engineers, 2016):

Clark Unit Hydrograph: Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μια καμπύλη χρόνου-εμβαδού και το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης και δημιουργεί ένα υδρογράφημα που μεταδίδεται στο χώρο και το χρόνο.

Snyder Unit Hydrograph: Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όταν δεν υπάρχουν στοιχεία για την περιοχή μελέτης. Προσδιορίζονται η χρονική βάση, η παροχή αιχμής και τέσσερα σημεία του μοναδιαίου υδρογραφήματος συναρτήσει γεωμετρικών χαρακτηριστικών της λεκάνης.

ModClark: Η μέθοδος αυτή αποτελεί τροποποίηση της μεθόδου Clark με τη διαφορά ότι χρησιμοποιεί κελιά καννάβου που εμφανίζουν διαφορετικό χρόνο μετάδοσης του πλημμυρικού κύματος.

Kinematic Wave: Η μέθοδος χρησιμοποιεί την εξίσωση συνέχειας και την εξίσωση της ορμής για να μετασχηματίσει την κατακρήμνιση σε απορροή. Χρησιμοποιεί δυο πεδία ροής για αδιαπερατές και διαπερατές περιοχές, αντίστοιχα. Για κάθε πεδίο ροής δημιουργείται ένα υδρογράφημα που στη συνέχεια συνδυάζεται και διανέμεται κατά μήκος της λεκάνης.

User's Specified S-Graph, User's specified Unit Hydrograph: Στις δυο αυτές μεθόδους ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να καθορίσει ο ίδιος της σχέση βροχόπτωσης και απορροής.

SCS Unit Hydrograph: Το αδιάστατο υδρογράφημα της SCS είναι ένα συνθετικό υδρογράφημα στο οποίο η απορροή της λεκάνης εκφράζεται από το λόγο της παροχής q προς την παροχή αιχμής q_p. Ο χρόνος βάσης του υδρογραφήματος προκύπτει από το λόγο του χρόνου t προς το χρόνο ανόδου του υδρογραφήματος t_p. Έχοντας ως δεδομένη την παροχή αιχμής και τη χρονική επιβάρυνση για γνωστή διάρκεια ενεργούς βροχόπτωσης είναι δυνατό να υπολογιστεί το μοναδιαίο υδρογράφημα μια λεκάνης απορροής.

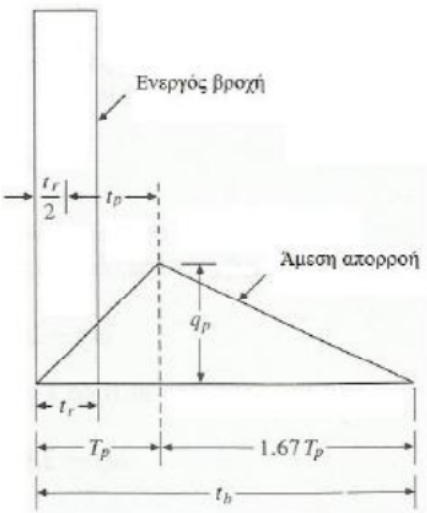
Οι τιμές q_p και t_p υπολογίζονται χρησιμοποιώντας ένα απλό μοντέλο ΜΥΓ όπως στην Εικόνα 3.1. Επίσης, η παροχή αιχμής δίνεται από τον τύπο:

$$q_p = \frac{CA}{t_p} \tag{3.3}$$

Όπου:

C: 2.08

A: το εμβαδόν της λεκάνης απορροής (km^2)



Εικόνα 3.1: Το μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS (Πηγή: Μπαριαμης, 2013)

3.1.2.3 Μέθοδοι υπολογισμού βασικής απορροής

Το μοντέλο HEC-HMS έχει ενσωματωμένες πέντε μεθόδους υπολογισμού της βασικής απορροής για τον υπολογισμό της συνολικής απορροής για κάθε υπολεκάνη (US Army Corps of Engineers, 2016).

<u>Recession</u>: Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη θεωρία ότι μετά από ένα πλημμυρικό γεγονός η ροή σε ένα ρέμα μειώνεται εκθετικά. Απαιτεί την εισαγωγή αρχικής παροχής.

Bounded Recession: Η μέθοδος αυτή είναι όμοια με την παραπάνω, με τη διαφορά ότι σε αυτή ορίζονται όρια για τη τιμή της βασικής απορροής για κάθε μήνα του έτους. Χρησιμοποιείται για προσομοιώσεις σε πραγματικό χρόνο.

Constant Monthly: Η μέθοδος αυτή θεωρεί για κάθε μήνα μια σταθερή τιμή βασικής απορροής. Επιλέγεται κυρίως όταν το μοντέλο χρησιμοποιείται ως συνεχές.

Linear Reservoir: Στη μέθοδο αυτή η βασική απορροή θεωρείται ότι μειώνεται μετά από κάποιο πλημμυρικό γεγονός σύμφωνα με τη μέθοδο των γραμμικών ταμιευτήρων. Ως εισροή του ταμιευτήρα θεωρείται η υπολογισμένη διήθηση από τη μέθοδο υπολογισμού των απωλειών.

Nonlinear Boosinesq Baseflow: Παρόμοια με την μέθοδο recession, σε αυτή τη μέθοδο θεωρείται ότι υπάρχει απεριόριστη διάθεση υπόγειων νερών όπου με την εφαρμογή του θεωρήματος Boussinesq είναι δυνατή η παραμετροποίηση της μεθόδου χρησιμοποιώντας μετρημένα δεδομένα πεδίου.

3.1.2.4 Μέθοδοι για τον υπολογισμό της διόδευσης

Συνολικά στο HEC-HMS διατίθενται έξι υδρολογικές μέθοδοι διόδευσης και προσομοίωσης υδατορευμάτων (US Army Corps of Engineers, 2016). Αυτές είναι:

Lag: Η πιο απλή μέθοδος στην οποία υπολογίζεται ο χρόνος που χρειάζεται το νερό για να διανύσει ολόκληρο το υδατόρευμα. Χρησιμοποιείται κυρίως για μικρού μήκους υδατορεύματα.

Straddle Stagger: Η μέθοδος αυτή υπολογίζει την εκροή μέσα από τα δεδομένα εισόδου. Απαραίτητα δεδομένα είναι η μέθοδος αποθήκευσης, η αρχική συνθήκη και μια καμπύλη αποθήκευσης-εκροής.

Modified Puls: Γνωστή και ως μέθοδος «διόδευσης αποθήκευσης», η μέθοδος αυτή βασίζεται σε μια προσέγγιση συνδυασμού των εξισώσεων συνέχειας και ορμής.

Απαραίτητες παράμετροι είναι μια καμπύλη αποθήκευσης-εκροής, ο αριθμός των sub-reaches και μια αρχική συνθήκη.

Kinematic Wave: Στη μέθοδο αυτή θεωρείται ότι για κάθε χρονική βήμα η ροή παραμένει σταθερή και ομοιόμορφη και περιγράφεται είτε από την εξίσωση του Manning είτε από την εξίσωση Chezy. Σημειώνεται ότι κινηματικά κύματα ονομάζονται αυτά για τα οποία η αδράνεια και η βαθμίδα πίεσης έχουν παραλειφθεί.

Muskingum: Η μέθοδος αυτή είναι μια απλή υδρολογική μέθοδος η οποία συνδυάζει την εξίσωση συνέχειας με μια εξίσωση υπολογισμού της αποθήκευσης που στηρίζεται στο διαχωρισμό της αποθηκευτικότητας σε πρισματική και σφηνοειδή, για την εξαγωγή μιας αναδρομικής σχέσης υπολογισμού της εκροής.

Η συνολική αποθήκευση του υδατορεύματος σύμφωνα με τη μέθοδο Muskingum υπολογίζεται από τον τύπο:

$$S_{o\lambda} = S_{\pi\rho\iota\sigma\mu} + S_{\sigma\varphi\eta\nu} = KQ + Kx(I - Q) = K[xI + (1 - x)Q] \quad (3.4)$$

Όπου:

K: παράμετρος που εκφράζει το χρόνο που χρειάζεται το πλημμυρικό κύμα για να διανύσει το συγκεκριμένο τμήμα ποταμού και είναι περίπου ίσο με τη χρονική απόσταση των αιχμών των πλημμυρογραφημάτων εισόδου και εξόδου. Η παράμετρος K μπορεί να δοθεί από τον τύπο (US Army Corps of Engineers, 2016):

$$K = \frac{L}{3600V} \quad (3.5)$$

Όπου:

L: το μέγιστο μήκος του υδατορεύματος (m)

V: η μέση ταχύτητα ροής (m/s)

x: αδιάστατη παράμετρος που εκφράζει την εξασθένιση του πλημμυρικού κύματος. Το εύρος τιμών της είναι από 0 έως 0.5 με τις μεγάλες τιμές να αντιστοιχούν σε μικρή εξασθένιση άρα οι παροχές αιχμής των υδρογραφημάτων εισόδου και εξόδου συμπίπτουν. Η τιμή εκφράζει, επίσης, τη συμμετοχή της εισροής και της εκροής στην αποθηκευτικότητα του τμήματος.

Για την εκτίμηση των παραμέτρων K και x συνήθως χρησιμοποιούνται υδρογραφήματα εισροής και εκροής από μετρήσεις πεδίου. Στην περίπτωση όμως που δεν υπάρχουν παρατηρημένα δεδομένα, οι παράμετροι υπολογίζονται εμπειρικά με τον παραπάνω τρόπο.

Muskingum-Cunge: Η μέθοδος αυτή είναι βασισμένη στη λύση της εξίσωσης συνέχειας και της εξίσωσης διάχυσης. Σημαντική διαφορά με τη μέθοδο Muskingum είναι ότι οι παράμετροι υπολογίζονται από τις διατομές των τμημάτων και όχι από τις μέσες τιμές κάθε τμήματος. Χρησιμοποιείται και για περιπτώσεις ασταθών ροών σε φυσικά ρεύματα, όπου δεν παρουσιάζεται σημαντική αποθήκευση.

3.1.3 Μέθοδοι προσομοίωσης ταμιευτήρα

Ο τρόπος με τον οποίο προσομοιώνει το μοντέλο HEC-HMS τους ταμιευτήρες είναι μέσω διόδευσης. Διατίθενται τρεις μέθοδοι διόδευσης διαμέσου του ταμιευτήρα (US Army Corps of Engineers, 2016):

Outflow Curve: Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η απόκριση του ταμιευτήρα στο πλημμυρικό κύμα εκφράζεται μέσω διαφορετικών σχέσεων των χαρακτηριστικών αποθήκευσης του ταμιευτήρα.

- Καμπύλη στάθμης επιφάνειας-εκροής
- Καμπύλη στάθμης-αποθήκευσης-εκροής
- Καμπύλη αποθήκευσης-εκροής

Οι καμπύλες αυτές προκύπτουν από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα, τη τοπογραφία και τον τρόπο λειτουργίας του υπερχειλιστή του ταμιευτήρα.

Specified Release: Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για ταμιευτήρες όπου η παροχή εκροής είναι γνωστή για κάθε χρονικά βήμα προσομοίωσης.

Outflow Structures Routing: Με τη μέθοδο αυτή προσομοιώνονται οι ταμιευτήρες που έχουν μη ελεγχόμενες κατασκευές εκροής όπως χαμηλού ύψους σωλήνες εκροής.

3.1.4 Μετεωρολογικό Μοντέλο

Στο HEC-HMS, η ανάλυση των μετεωρολογικών δεδομένων πραγματοποιείται από το μετεωρολογικό μοντέλο. Αυτό περιλαμβάνει διεργασίες για την ακτινοβολία μικρού και μεγάλου μήκους, τη βροχόπτωση, την εξατμισοδιαπνοή και την τήξη του χιονιού. Για προσομοίωση μεμονωμένων γεγονότων βροχόπτωσης, αναγκαία είναι μόνο η επιλογή μεθόδου για τη βροχόπτωση ενώ μέθοδος για τη τήξη χιονιού επιλέγεται όταν γίνεται προσομοίωση σε λεκάνης απορροής ψυχρών κλιμάτων (US Army Corps of Engineers, 2016). Παρακάτω περιγράφονται όλες οι πιθανές μέθοδοι εισαγωγής δεδομένων βροχόπτωσης στο μετεωρολογικό μοντέλο του HEC-HMS.

Specified Hyetograph: Η μέθοδος του υετογραφήματος επιτρέπει στον χρήστη να εισάγει για κάθε λεκάνη συγκεκριμένο υετογράφημα με τη μορφή χρονοσειράς. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν διατίθενται δεδομένα βροχόπτωσης τα οποία εισάγονται στο μοντέλο χωρίς καμία τροποποίηση.

Gage Weights: Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη λογική ότι κάθε βροχομετρικός σταθμός έχει μια ιδιαίτερη βαρύτητα σε σχέση με το συνολικό βάρος του επεισοδίου της βροχόπτωσης. Τα βάρη αυτά μπορούν να υπολογιστούν με διάφορες μεθόδους επιφανειακής ολοκλήρωσης, όπως η μέθοδος Thiessen.

Inverse Distance: Η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη για όταν δεν υπάρχουν δεδομένα με σταθερό χρονικό βήμα ή ακριβώς στην περιοχή μελέτης. Χρησιμοποιούνται οι γεωγραφικές συντεταγμένες των σταθμών για να καθοριστεί η απόσταση του σταθμού από κάθε υπολεκάνη.

Gridded Precipitation: Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή για κάθε κελί της περιοχής μελέτης αντιστοιχίζεται μια τιμή βροχόπτωσης. Συνήθως χρησιμοποιείται πρόσθετο λογισμικό σύνδεσης του HMS με δεδομένα από Radar.

3.1.5 Διάβρωση και μεταφορά φερτών

Στο πρόγραμμα HEC-HMS είναι δυνατός ο υπολογισμός της εδαφικής διάβρωσης και της μεταφοράς φερτών. Για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση των διεργασιών αυτών απαιτείται να προσδιοριστούν ορισμένες παράμετροι που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Για όλα τα στοιχεία του μοντέλου επιλέγονται οι μέθοδοι μεταφοράς ιζημάτων, ταχύτητας καθίζησης και κατανομής των κόκκων του εδάφους (US Army Corps of Engineers, 2016)

Στο πλαίσιο της κάθε υπολεκάνης επιλέγεται η μέθοδος εδαφικής διάβρωσης. Οι διαθέσιμες μέθοδοι εδαφικής διάβρωσης είναι:

Build-up Wash-off: Η μέθοδος αυτή επιλέγεται για αστικό περιβάλλον. Τα ιζήματα θεωρείται ότι συγκεντρώνονται στις άκρες των δρόμων λόγω του αέρα και της διάβρωσης από τις διαπερατές επιφάνειες. Με την άμεση απορροή τα ιζήματα αυτά παρασύρονται κατά τη διάρκεια καταιγίδας.

Modified USLE: Η μέθοδος αυτή έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 2.

Οι διαδικασίες μεταφοράς ιζημάτων στα υδατορεύματα σχετίζονται με την ικανότητα τους να μεταφέρουν αποκολλημένους κόκκους. Η μεταφορική ικανότητα αυτή υπολογίζεται βάσει των παραμέτρων ροής και τις ιδιότητες των ιζημάτων. Στο HEC-HMS υπάρχουν οι παρακάτω επιλογές σχετικά με τη μέθοδο μεταφοράς των ιζημάτων:

Fisher's Dispersion: Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην οριζόντια μεταφορά και διάχυση του ιζήματος σε ένα υδατόρευμα. Είναι η πιο λεπτομερής μέθοδος που διαθέτει και απαιτεί τα περισσότερα δεδομένα.

Linear Reservoir: Με τη μέθοδο αυτή κάθε μέγεθος κόκκου μεταφέρεται μέσα στο υδατόρευμα βασιζόμενη στη ποσότητα που εισέρχεται από τα ανάντη και από την τοπική διάβρωση ή εναπόθεση.

Uniform Equilibrium: Στη μέθοδο αυτή θεωρείται ότι τα ιζήματα μεταφέρονται αυτόματα στην έξοδο του υδατορεύματος. Είναι η πιο απλή μέθοδος καθώς δεν υπολογίζει κάποια χρονική καθυστέρηση για τα ιζήματα που εισέρχονται στο υδατόρευμα.

Volume Ratio: Η μέθοδος αυτή συνδέει την μεταφορά ιζημάτων με τη ροή θεωρώντας ότι για κάθε χρονικό βήμα η ανάντη ποσότητα ιζημάτων προστίθεται στην ήδη υφιστάμενη ποσότητα ιζημάτων του υδατορεύματος. Η ποσότητα ιζημάτων που εξέρχεται από το υδατόρευμα θεωρείται αντίστοιχη με την απορροή που εξέρχεται από το υδατόρευμα.

3.2 Το μοντέλο HEC-RAS

Το μοντέλο HEC-RAS (River Analysis System) έχει αναπτυχθεί έτσι ώστε να κάνει υδραυλικούς υπολογισμούς μονοδιάστατης και δυσδιάστατης ροής για μια πληθώρα περιπτώσεων όπως φυσικά και τεχνητά υδατορεύματα, περιοχές κατάκλυσης πλημμύρας κ.α. (US Corps of Engineers, 2016). Το HEC-RAS περιλαμβάνει υπό-μοντέλα με υπολογιστικές δυνατότητας για:

- Προσομοίωση μόνιμης ροής
- Προσομοίωση ανομοιόμορφης ροής
- Υπολογισμό μεταφοράς ιζημάτων
- Ανάλυση ποιότητας υδάτων

Τα παραπάνω υπο-μοντέλα, αν και είναι διακριτά μεταξύ τους, χρησιμοποιούν το ίδιο γεωμετρικό και υδραυλικό μοντέλο. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι βασικές παράμετροι ανάλυσης υδατορευμάτων.

3.2.1 Συνθήκες μόνιμης ροής

Το μέρος προσομοίωσης μόνιμης ροής χρησιμοποιείται για να υπολογίζει το προφίλ της υδάτινης επιφάνειας για μόνιμη και σταδιακά μεταβαλλόμενη ροή. Είναι ικανό να προσομοιώνει πλήρες δίκτυο αγωγών, δενδριτικού τύπου ή και μεμονωμένα υδατορεύματα σε περιπτώσεις υποκρίσιμης, υπερκρίσιμης και μικτής ροής. Η υπολογιστική διαδικασία βασίζεται στην επίλυση της μονοδιάστασης εξίσωσης ενέργειας. Οι γραμμικές απώλειες ενέργειας υπολογίζονται μέσω της τριβής και της εξίσωσης του Manning, όπως επίσης, και με έναν συντελεστή διαφοράς της κινητικής ενέργειας σε περιοχές συστολής/διαστολής. Ακόμη, σε περιπτώσεις αιφνίδιων μεταβολών του προφίλ της επιφάνειας του νερού χρησιμοποιείται η εξίσωση της ορμής. Τέλος, με το μοντέλο μόνιμης ροής δύναται να προσομοιωθούν πλημμύρες, και τεχνικά έργα όπως γέφυρες και φράγματα.

3.3.2 Συνθήκες ανομοιόμορφης ροής

Το υπό-μοντέλο προσομοίωσης ανομοιόμορφης ροής είναι υπεύθυνο για τη προσομοίωση μονοδιάστατης και δισδιάστατης ανομοιόμορφης ροής διαμέσου δικτύου καναλιών και πεδίων κατάκλυσης πλημμύρας. Χρησιμοποιείται για τη προσομοίωση υποκρίσιμης, υπερκρίσιμης και μικτής ροής ενώ είναι δυνατό να προσομοιωθούν διατομές, γέφυρες και άλλες υδραυλικές κατασκευές όπως και στη περίπτωση μόνιμης ροής. Τέλος, με το υπο-μοντέλο αυτό είναι δυνατή η προσομοίωση πιο σπάνιων περιπτώσεων όπως η θραύση και η υπερχείλιση φράγματος, αντλιοστάσια, συστήματα αγωγών υπό πίεση και προσομοίωση λειτουργιών φραγμάτων πλοήγησης.

3.3.3 Ψεύδο-μη-μόνιμη Ροή

Στην περίπτωση που πρόκειται να γίνει ανάλυση της μεταφοράς φερτών η υδραυλική προσομοίωση πραγματοποιείται με την ψευδό-μη-μόνιμη ροή. Πρόκειται για μόνιμη ροή η οποία μεταβάλλεται ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

3.3.4 Υπολογισμοί μεταφοράς ιζημάτων/μεταβολής όχθης

Το υπο-μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για τη προσομοίωση μονοδιάστατης μεταφοράς φερτών και μεταβολής της όχθης του ποταμού λόγω των διεργασιών διάβρωσης και εναπόθεσης φερτών υλών. Η μεταφορά των ιζημάτων υπολογίζεται ανά μέγεθος κόκκου επιτρέποντας, έτσι, την προσομοίωση της υδραυλικής διαλογής και της θωράκισης του πυθμένα. Το μοντέλο αυτό είναι σχεδιασμένο για την εκτίμηση μακροπρόθεσμων αποτελεσμάτων διεργασιών διάβρωσης και εναπόθεσης φερτών που μπορεί να προκύψουν από μεταβολές στη συχνότητα και τη διάρκεια της παροχής νερού ή στη γεωμετρία του υδατορεύματος. Μερικές συχνές εφαρμογές αφορούν την εκτίμηση της εναπόθεσης ιζημάτων σε ταμιευτήρες, πρόβλεψη της βυθοκόρησης του πυθμένα σε σημεία τεχνικών έργων ή και τον υπολογισμό της μέγιστης διάβρωσης σε πλημμυρικά γεγονότα. Προκειμένου να υπολογιστούν αυτά, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τη μέθοδο υπολογισμού από μια ποικιλία μεθόδων και εξισώσεων.

- Ackers-White (Ackers & White, 1973)
- Engeluns-Hansen (Engelund & Hansen, 1967)
- Laursen (Laursen, 1958)
- Meyer Peter & Muller (Meyer-Peter & Muller, 1948)
- Toffaleti (Toffaleti, 1969)
- Yang (Yang, 1972)

3.3.5 Ανάλυση ποιότητας υδάτων

Η ανάλυση της ποιότητας των υδάτων πραγματοποιείται με τη προσομοίωση της

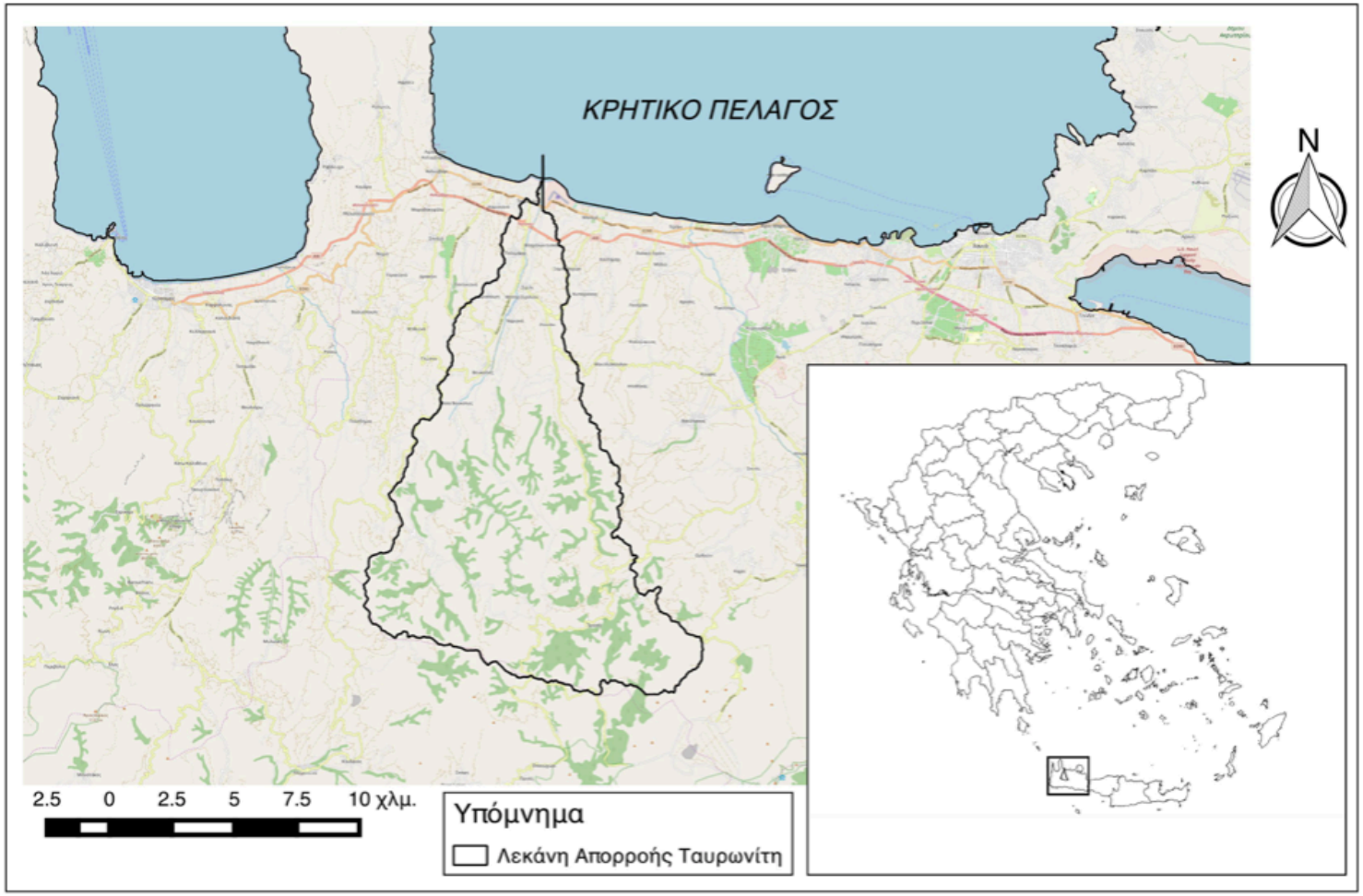
θερμοκρασίας του νερού και της μεταφοράς μερικών δεικτών ποιότητας όπως οι άλγες, το διαλυμένο οξυγόνο, διαλυμένα φωσφορικά και νιτρικά.

4. Περιγραφή Περιοχής Μελέτης

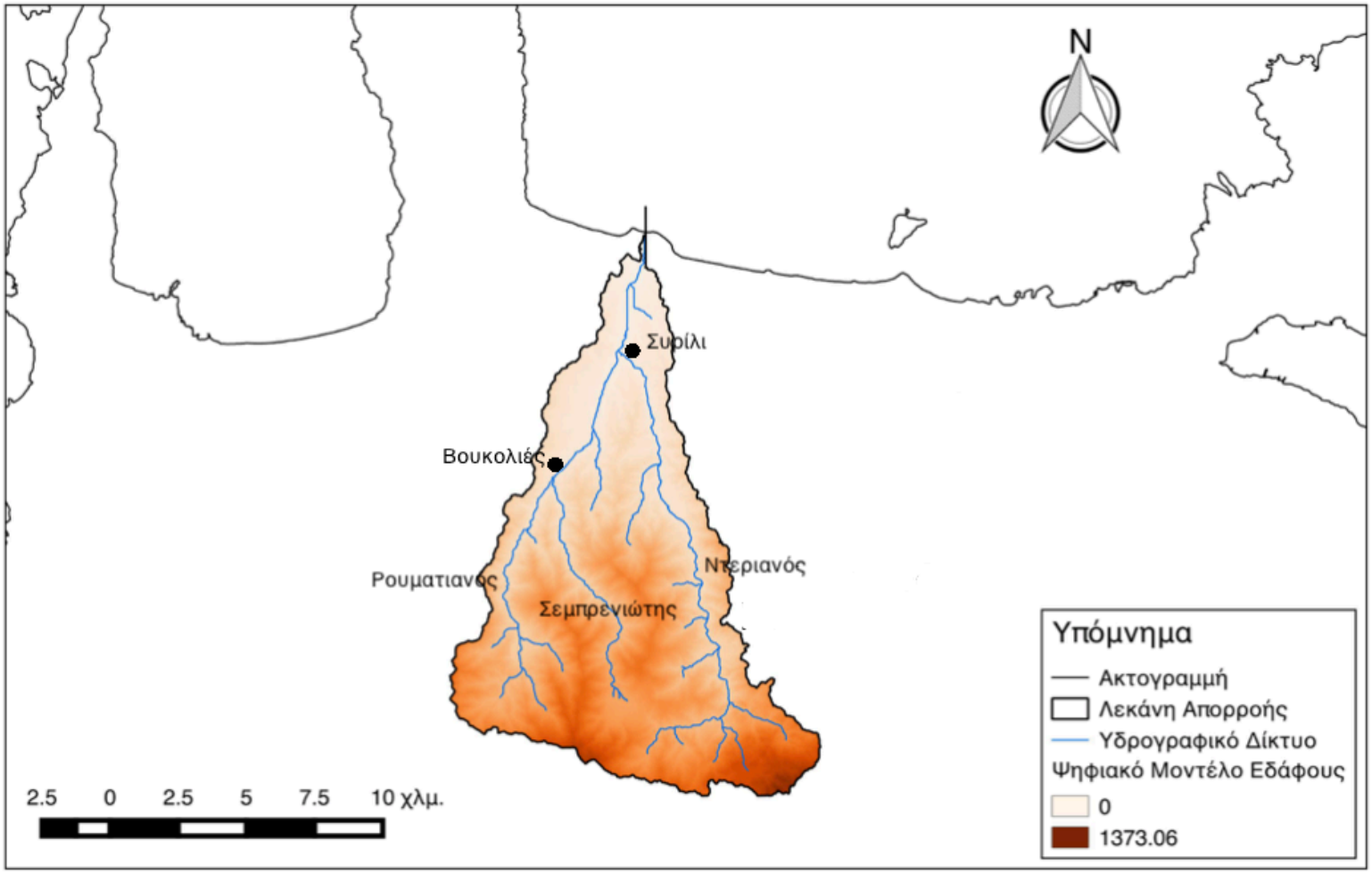
Η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη που βρίσκεται στη νήσο Κρήτη, στο νομό Χανίων. Ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Κρήτης και συγκεκριμένα στις λεκάνες απορροής ρεμάτων Τμήματος Χανίων-Ρεθύμνου-Ηρακλείου (GR39). Η λεκάνη απέχει 20 χιλιόμετρα δυτικά από την πόλη των Χανιών και οριοθετείται στο νότιο μέρος από τα Λευκά Όρη από τα οποία και πηγάζει ο ποταμός Ταυρωνίτης σε υψόμετρο 1400m και βόρια από το Κρητικό πέλαγος στο οποίο και εκβάλει (Εικόνα 4.1).

Ο ποταμός Ταυρωνίτης είναι από τους μεγαλύτερους της Δυτικής Κρήτης και η λεκάνη απορροής του καταλαμβάνει έκταση περίπου 131 km^2. Σε ότι αφορά το υδρολογικό δίκτυο του Ταυρωνίτη εμφανίζονται τρεις κύριοι παραπόταμοι με τις υπολεκάνες τους. Από δυτικά προς ανατολικά, ο Ρουματιανός όπου η υπολεκάνη του καταλαμβάνει έκταση 28 km^2, ο Σεμπρενιώτης με έκταση 22 km^2 και ο Ντεριανός με λεκάνη απορροής 58 km^2. Η κεντρική κοίτη του Ταυρωνίτη σχηματίζεται κατάντη του χωριού Βουκολιές στο οποίο και ενώνονται οι δυο πρώτοι παραπόταμοι. Ο χείμαρρος Ντεριανός ενώνεται με τον Ταυρωνίτη στο χωριό Συρίλι, περίπου τρία χιλιόμετρα πριν την εκβολή του στη θάλασσα (Εικόνα 4.2) (Νικολαΐδης & Καρατζάς, 2012).

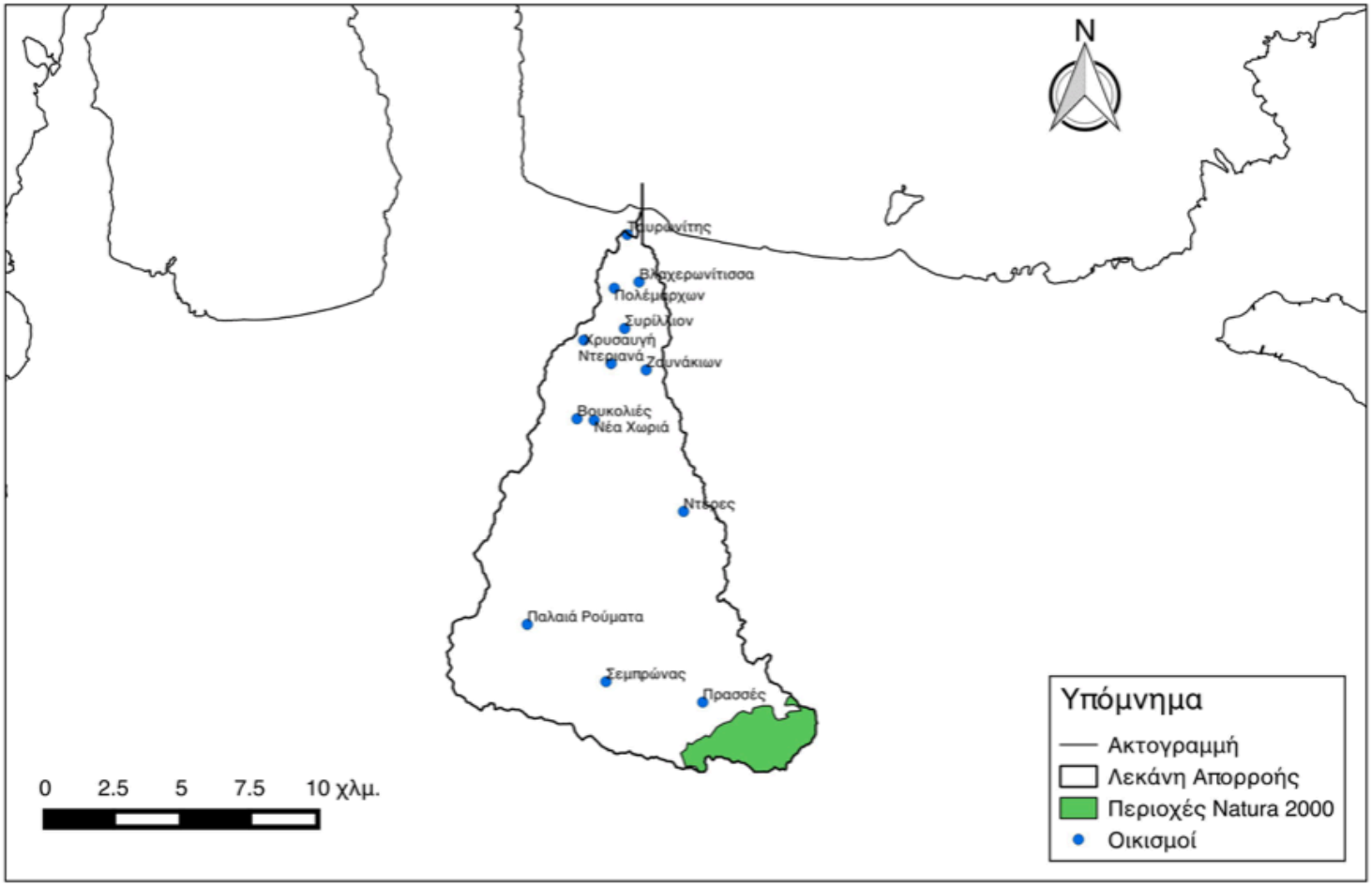
Στη λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη υπάρχουν αρκετοί οικισμοί με αρκετούς κατοίκους. Ακόμα, αξίζει να σημειωθεί ότι στο νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης εμφανίζεται προστατευόμενη περιοχή Natura (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.1: Περιοχή μελέτης (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 4.2: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους και υδρογραφικό δίκτυο (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 4.3: Οικισμοί και περιοχές Natura 2000 *(Πηγή: Προσωπικό αρχεί*

4.1 Γεωλογικά Στοιχεία

Στη περιοχή μελέτης συναντώνται πέντε διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί διαφορετικής σύστασης και υδροπερατότητας (Νικολαΐδης & Καρατζάς, 2012). Οι σχηματισμοί αυτοί περιγράφονται παρακάτω:

Ένα μεγάλο μέρος της λεκάνης, με έκταση 84.6 km^2 περίπου, καταλαμβάνεται από φυλλιτικούς χαλαζιτικούς σχηματισμούς, οι οποίοι καλύπτονται από αλλούβια και υλικά τεταρτογενών αναβαθμίδων μικρής έκτασης και πάχους. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι αδιαπέρατοι ή εκλεκτικής κυκλοφορίας και μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Α2). Στο νότιο τμήμα της λεκάνης εμφανίζονται ανθρακικοί σχηματισμοί που καταλαμβάνουν έκταση 12 km^2. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας (Κ1).

Το βόρειο τμήμα της λεκάνης απορροής φαίνεται να καταλαμβάνεται από νεογενείς σχηματισμούς μικρότερης υδροπερατότητας. Έκταση 12 km^2 καταλαμβάνουν μάργες που είναι κυρίως κοκκώδεις, μη προσχωματικές αποθέσεις μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (Π3). Επιπλέον, κροκαλοπαγή και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι νεογενών σχηματισμών καλύπτουν έκταση 14 km^2 με μέτρια έως μικρή υδροπερατότητα (Π2). Τέλος, εμφανίζεται ένας σχηματισμός που αποτελείται από ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και τεταρτογενείς αποθέσεις αναβαθμίδων και σύγχρονων αλλούβιων σχηματισμών. Ο σχηματισμός αυτός καλύπτει την περιοχή της κοίτης του Ταυρωνίτη, έκτασης 9 km^2 και παρουσιάζει κυμαινόμενη υδροπερατότητα (Π1)(Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Χανίων, 1996). Οι παραπάνω σχηματισμοί παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.4.

4.2 Χρήσεις Γης

Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα από τη βάση δεδομένων του Corine Land Cover 2012 υπολογίζονται οι χρήσεις γης της περιοχής μελέτης. Παρακάτω παρουσιάζεται ο χάρτης με τις χρήσεις γης της λεκάνης απορροής του Ταυρωνίτη (Εικόνα 4.4), όπως

επίσης, και ο πίνακας με το συνολικό εμβαδό κάθε χρήσεις και του ποσοστού κάλυψης της έναντι της συνολικής έκτασης της λεκάνης (Πίνακας 4.1).

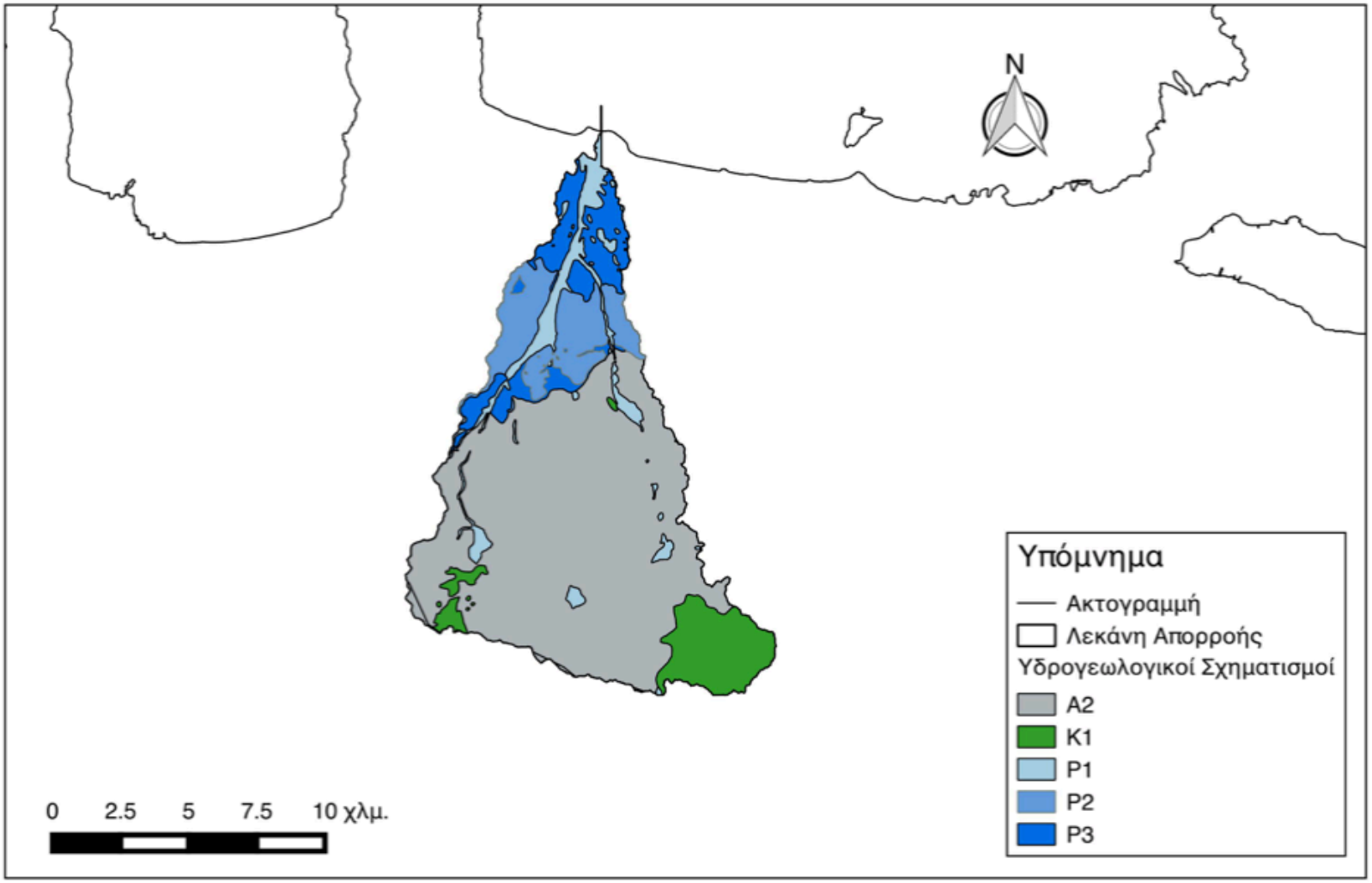
Πίνακας 4.1: Χρήσεις γης περιοχής μελέτης (Πηγή: Corine Land Cover)

Κωδικός Corine Land Cover	Περιγραφή	Area (km2)	%
122	Οδικό Δίκτυο	0.215	0.163
124	Αεροδρόμιο	0.020	0.016
221	Αμπελώνες	0.258	0.196
222	Οπωροφόρα δένδρα	2.958	2.246
223	Ελαιώνες	38.167	28.983
242	Σύνθετες καλλιέργειες	1.156	0.878
243	Καλλιεργήσιμη γη με φυσική βλάστηση	11.027	8.373
311	Δάσος πλατύφυλλων	20.128	15.285
312	Δάσος κωνοφόρων	2.446	1.858
313	Μικτό δάσος	0.402	0.305
321	Φυσικοί Βοσκότοποι	10.279	7.805
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	40.500	30.754
324	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	4.133	3.138
Σύνολο		131.689	100.0

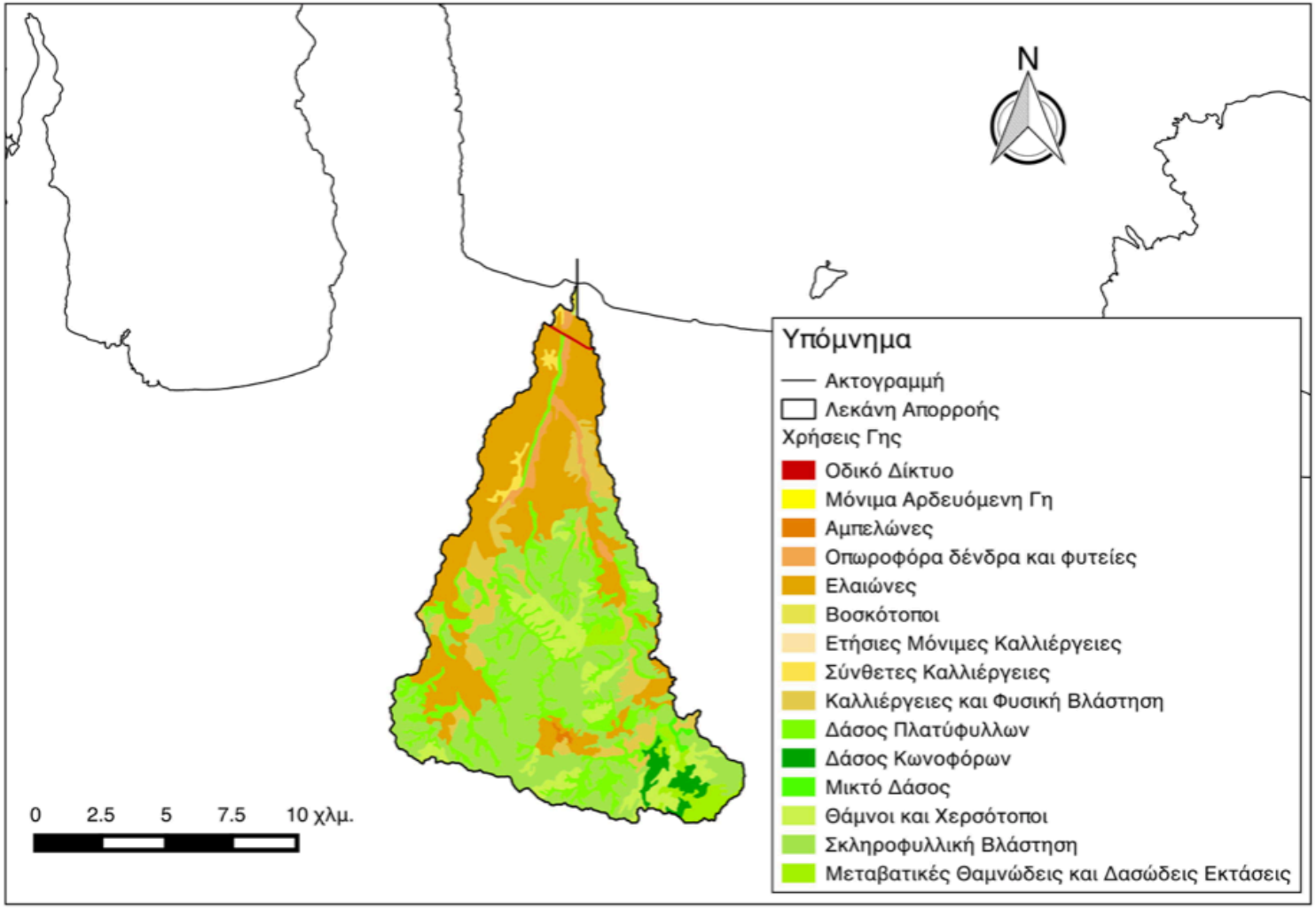
4.3 Κλιματκά Στοιχεία

Το κλίμα της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται ως εύκρατο μεσογειακό και ξηροθερμικό. Ο χειμώνας χαρακτηρίζεται ήπιος και διαρκεί από το Νοέμβριο έως και το Μάρτιο. Συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά του χειμώνα εμφανίζονται στα μέσα Νοεμβρίου και διαρκούν μέχρι το Μάρτιο με αρκετές βροχοπτώσεις. Η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται ως κρύα, όχι όμως παγερή. Επιπλέον, δεν σημειώνονται αρκετές χιονοπτώσεις ή χαλαζοπτώσεις χωρίς να δημιουργείται πρόβλημα στα χαμηλά υψόμετρα. Η θερμοκρασία παραμένει άνω του μηδενός εκτός από μερικές περιπτώσεις σε μεγάλα υψόμετρα.

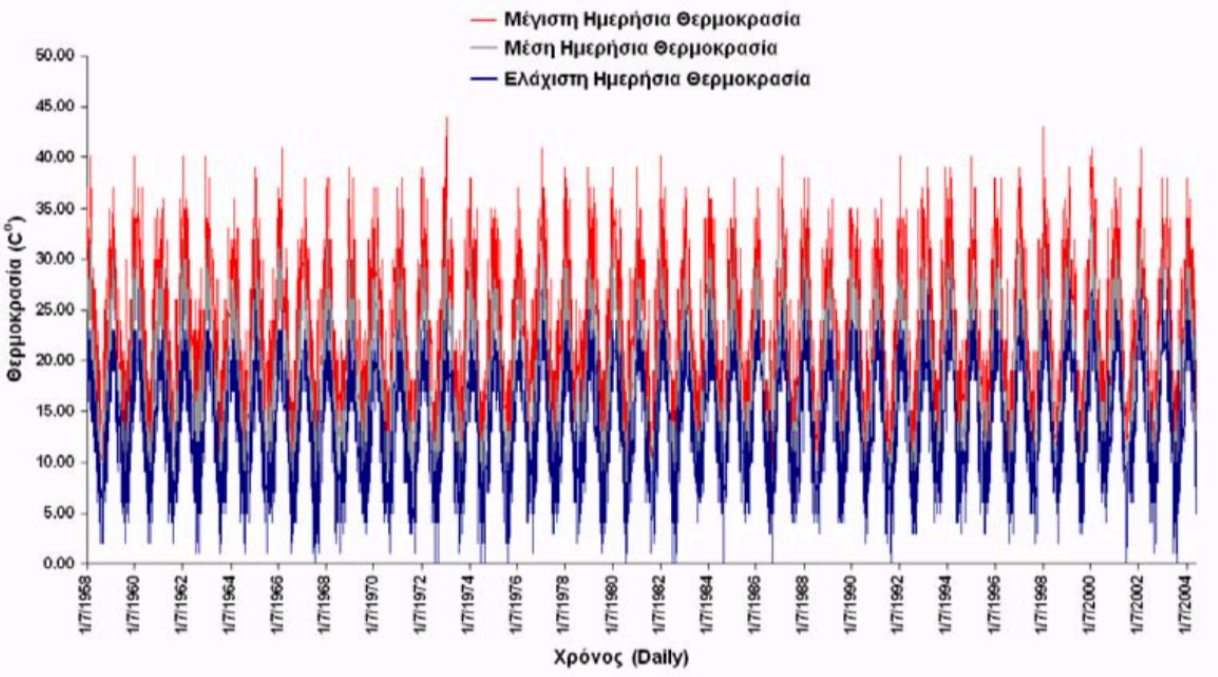
Η άνοιξη διαρκεί από τον Απρίλιο έως και αρχές Μαΐου και το καλοκαίρι από τα μέσα Μαΐου έως τα τέλη Σεπτέμβρη. Στην περίοδο αυτή εμφανίζονται σπάνιες και μικρές βροχοπτώσεις. Ακολουθούν διαγράμματα με τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες για την περίοδο 1958-2005 (Εικόνα 4.6) και τις ετήσιες βροχοπτώσεις για τον πλησιέστερο στη λεκάνη απορροής βροχομετρικό σταθμό Παλαιά Ρούματα για την περίοδο 1960-2010 (Εικόνα 4.7).



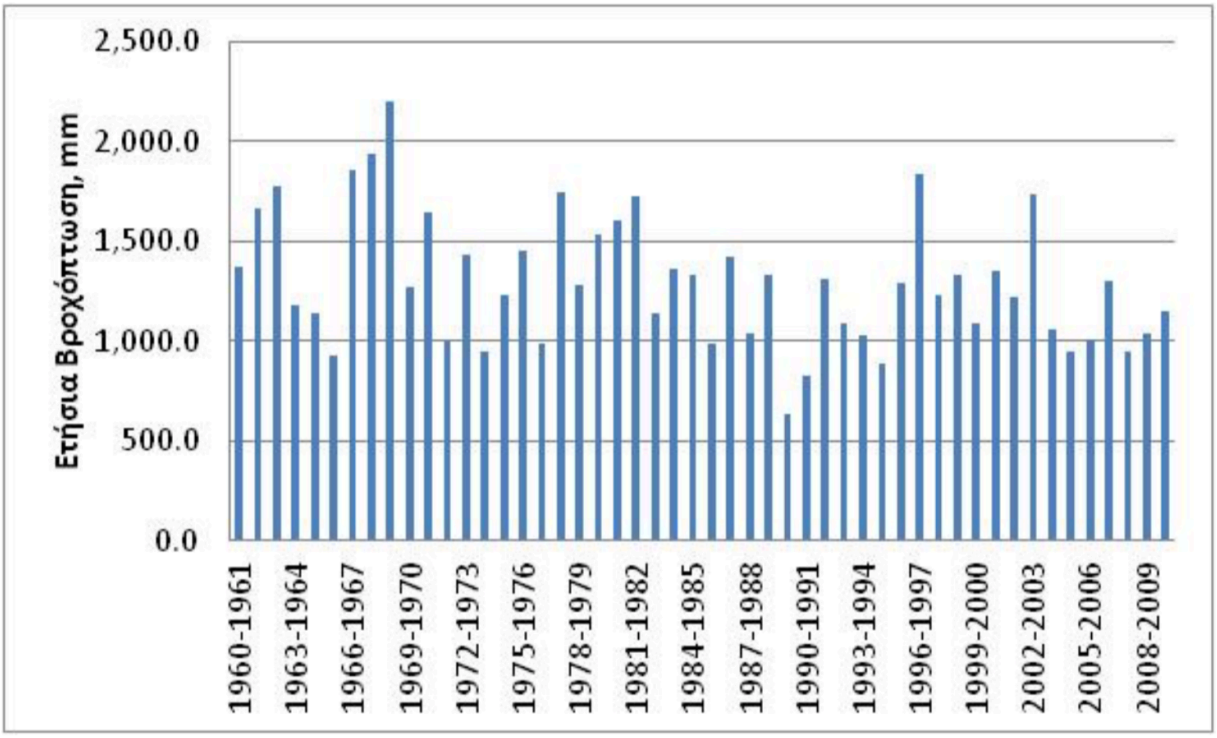
Εικόνα 4.4: Υδρολιθολογικός χάρτης περιοχής μελέτης (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 4.5: Χάρτης χρήσεων γης περιοχής μελέτης (Πηγή: Προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 4.6: Μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας (Πηγή: Νικολαΐδης & Καρατζάς, 2012)



Εικόνα 4.7: Ετήσιες βροχοπτώσεις (Πηγή: Νικολαΐδης & Καρατζας, 2012)

5. Υδρολογική Προσομοίωση

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής του Ταυρωνίτη. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει αρχικά την υδρολογική ανάλυση της περιοχής και στη συνέχεια την υδρολογική προσομοίωση. Η υδρολογική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς. Στόχος των προσομοιώσεων είναι η εξαγωγή πλημμυρογραφημάτων για την εκπόνηση των υδραυλικών προσομοιώσεων. Επιπλέον, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο υπολογισμός των ιζημάτων που προέρχονται από την επιφανειακή διάβρωση.

Για τη γεωμορφολογική ανάλυση και την προ-επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό HEC-GeoHMS. Το HEC-GeoHMS αποτελεί επέκταση του προγράμματος ArcGIS 10.2 και δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να διαχειρίζεται γεωχωρικά δεδομένα, να οριοθετεί τις λεκάνες και τα ρέματα και να παράγει τα απαραίτητα αρχεία για την υδρολογική προσομοίωση. Για την υδρολογική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο HEC-HMS.

5.1 Γεωμορφολογική Ανάλυση Λεκάνης

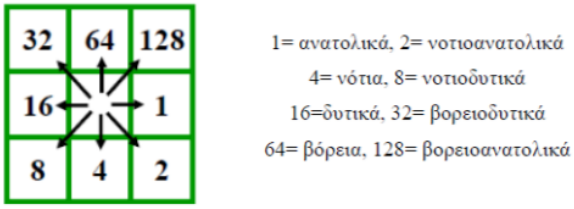
Αναγκαίο για τη μετέπειτα επεξεργασία στο HEC-GeoHMS είναι η προ-επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Στην εργασία αυτή, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που χρησιμοποιήθηκε έχει διάσταση κανάβου 5x5 μέτρα και διατέθηκε από την Κτηματολόγιο Α.Ε.

Η προ-επεξεργασία αφορά μια σειρά εντολών που στόχο έχουν τη διόρθωση του ανάγλυφου και την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου. Οι εντολές αυτές είναι:

Fill Sinks: Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται για την διόρθωση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε περίπτωση που υπάρχουν ψευδή βυθίσματα. Βυθίσματα εννοούνται τα σημεία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, στα οποία γειτονικά κελιά έχουν απότομες

αυξομειώσεις ύψους. Τα βυθίσματα εξομαλύνονται ώστε να μην δημιουργηθεί πρόβλημα στην εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου.

Flow Direction: Με την εντολή αυτή δημιουργείται ο κάναβος διεύθυνσης απορροής. Για κάθε κελί του ψηφιακού μοντέλου εδάφους υπολογίζεται η κατεύθυνση της ροής λαμβάνοντας υπόψη ότι η απορροή κατευθύνεται από ένα κελί σε ένα μόνο γειτονικό ανάλογα με τη μέγιστη κλίση του (Σκοπελίτη & Στάμου, 2013). Ανάλογα με τη διεύθυνση της απορροής, το κάθε κελί λαμβάνει μια τιμή όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1. Ο κάναβος διεύθυνσης απορροής παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2.

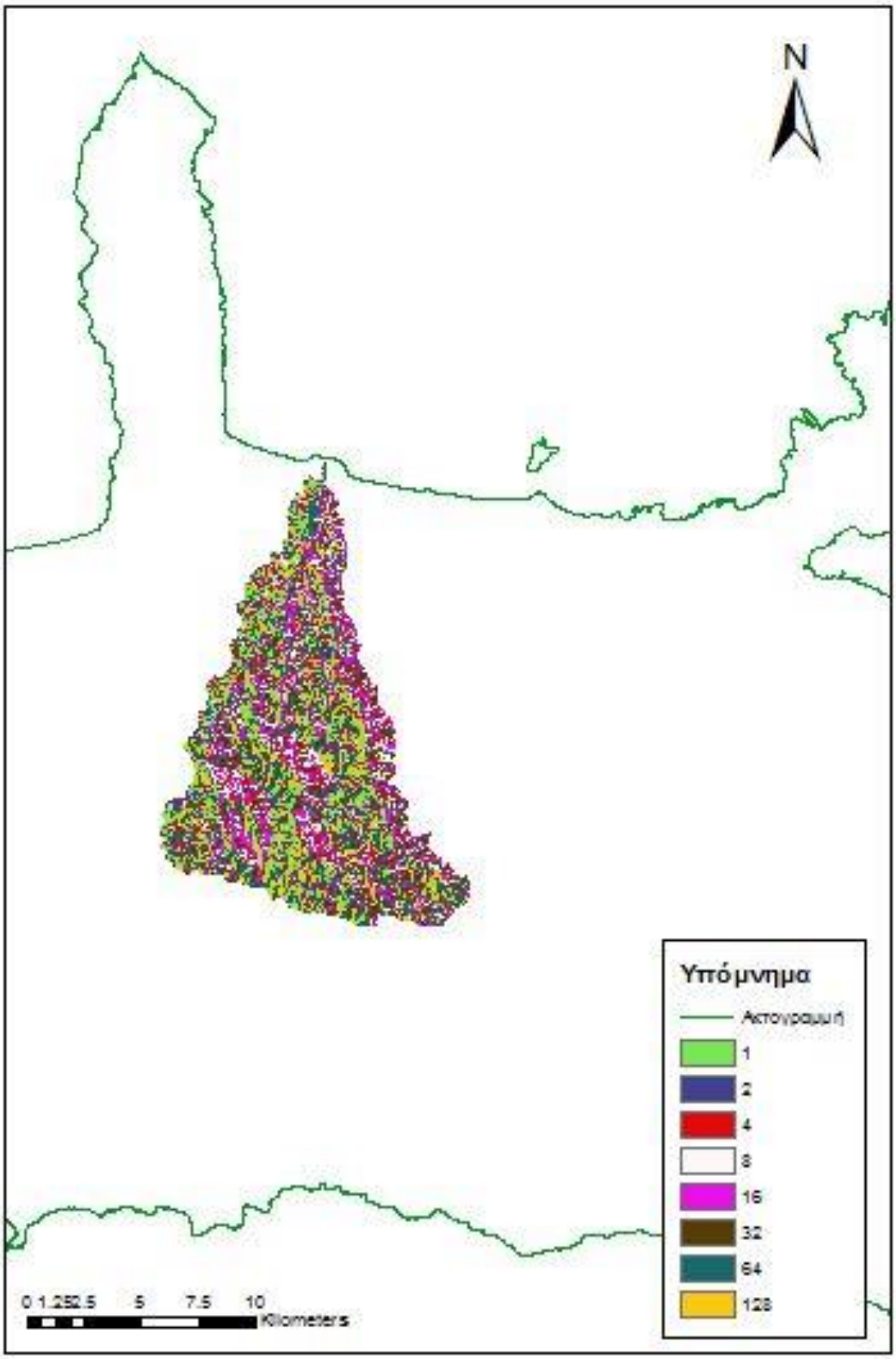


Εικόνα 5.1: Τιμή κελιού ανάλογα με τη διεύθυνση ροής (Πηγή: *Σκοπελίτη & Στάμου, 2013*)

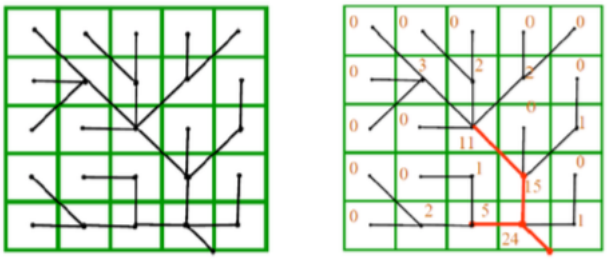
Flow accumulation: Η εντολή αυτή βασίζεται στη δημιουργία του κανάβου συγκεντρωτικής ροής λαμβάνοντας υπόψη το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και τον κάναβο διεύθυνσης απορροής. Η συγκεντρωτική ροή για κάθε κελί είναι ίση με το άθροισμα των γειτονικών κελιών που απορρέουν σε αυτό (Εικόνα 5.3). Έτσι, μηδενικές τιμές λαμβάνουν περιοχές όπως κορυφογραμμές, ενώ μισγάγγειες λαμβάνουν ψηλές τιμές συγκέντρωσης (Σκοπελίτη & Στάμου, 2013).

Stream Definition: Με αυτή την εντολή δημιουργείται ένας κάναβος υδατορευμάτων χρησιμοποιώντας τον κάναβο της συγκεντρωτικής απορροής και ένα κατώφλι οριοθέτησης ποταμού. Το κατώφλι χρησιμοποιείται για να ορίσει τα κελιά που έχουν συγκέντρωση ροής μεγαλύτερη από το οριζόμενο αυτό κατώφλι.

Stream Segmentation: Η ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου γίνεται μέσω αυτής της εντολής, με μια μέθοδο αρίθμησης της σύνδεσης των τμημάτων. Με την ιεράρχηση εντοπίζονται και ταξινομούνται οι τύποι των ροών ανάλογα με τον αριθμό των παραποτάμων. Στην εργασία αυτή επιλέχθηκε η μέθοδος αρίθμησης Strahler.



Εικόνα 5.2: Χάρτης κανάβου διεύθυνσης απορροής



Εικόνα 5.3: Κάναβος πλήθους φατνίων συγκέντρωσης απορροής (Πηγή: Σκοπελίτη & Στάμου, 2013)

Catchment Grid Delineation: Με την εντολή αυτή δημιουργούνται οι υπολεκάνες για κάθε τμήμα του υδρογραφικού δικτύου (Εικόνα 5.4).

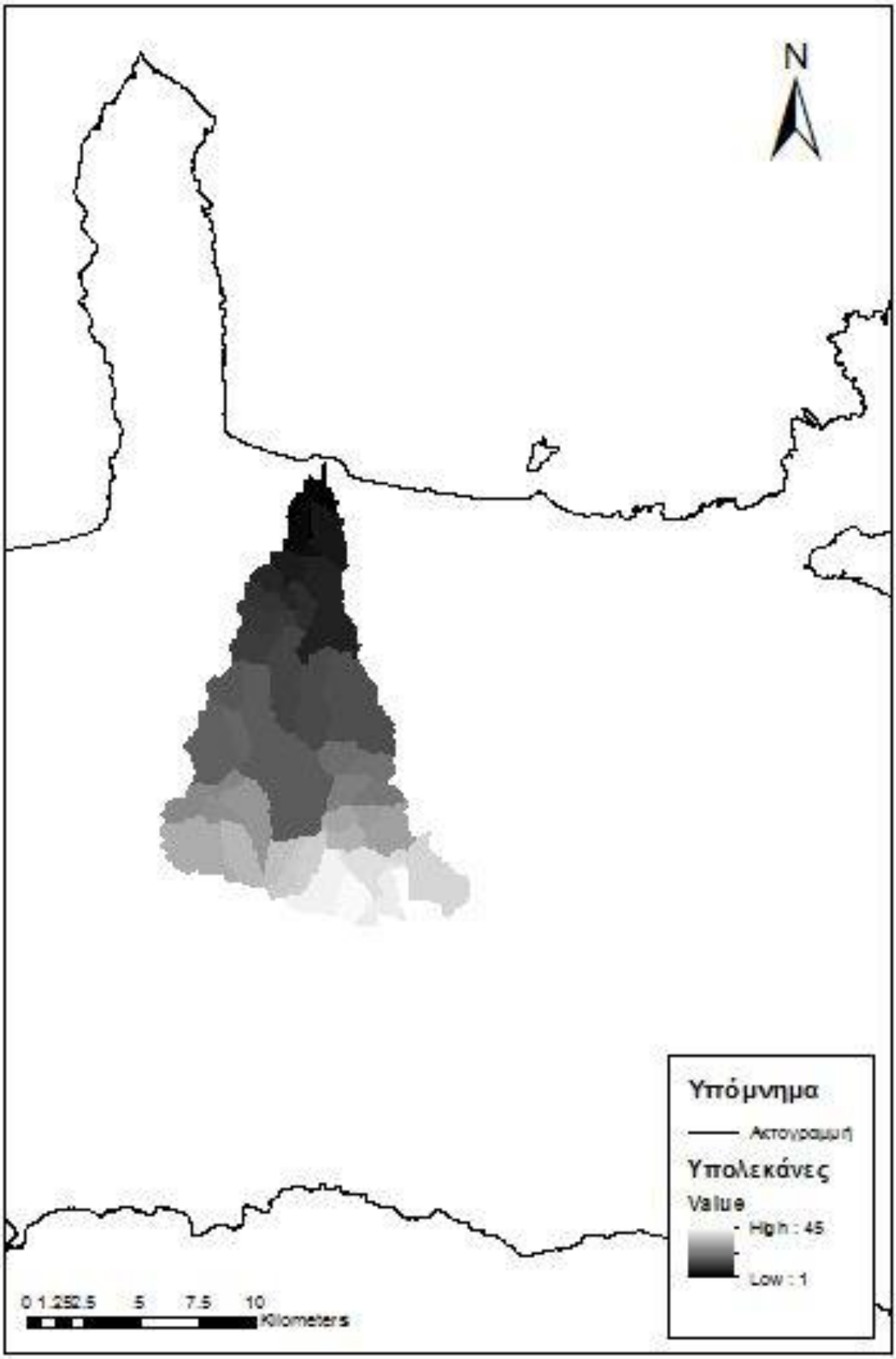
Catchment Polygon Processing: Με την εντολή αυτή μετατρέπεται το αποτέλεσμα της προηγούμενης εντολής σε διανυσματική μορφή.

Drainage Line Processing: Με την εντολή αυτή μετατρέπεται το υδρογραφικό δίκτυο σε διανυσματική μορφή.

Adjoint Catchment Processing: Χωρίς να υπάρχει υδρολογική σημασία για τη συγκεκριμένη εντολή, με αυτήν οι ανάντη υπολεκάνες αθροίζονται σε κάθε συμβολή υδατορεύματος.

5.2 Επεξεργασία Λεκάνης Απορροής και Προετοιμασία Εισαγωγής στο HEC-HMS

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία επεξεργασίας του ψηφιακού μοντέλου εδάφους πραγματοποιείται η προετοιμασία των αρχείων εισόδου στο πρόγραμμα HEC-HMS. Στην προετοιμασία αυτή ορίζονται οι υπολεκάνες μελέτης, υπολογίζονται τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά τους και επιλέγονται οι υδρολογικές μέθοδοι προσομοίωσης τους.



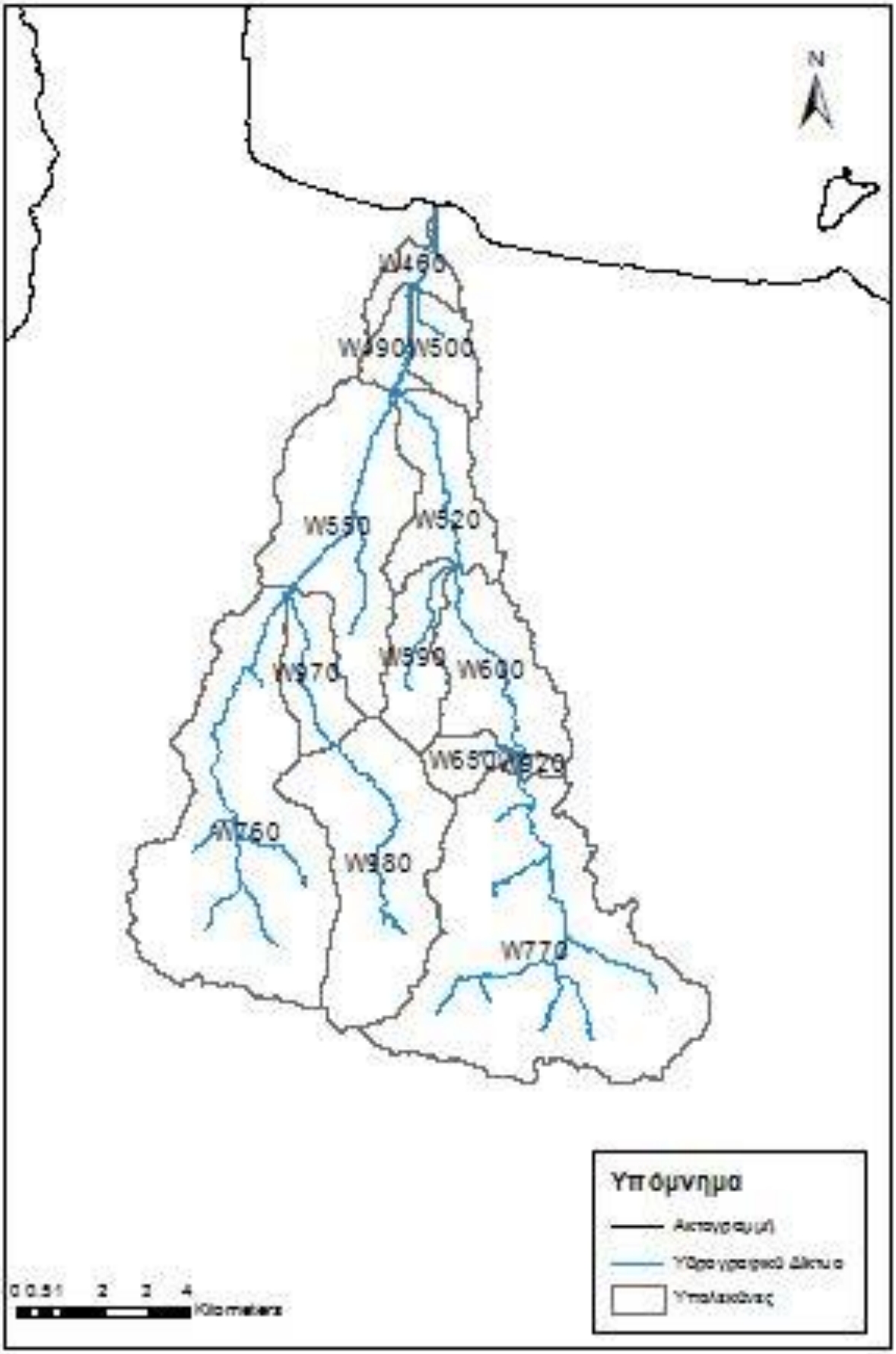
Εικόνα 5.4: Οριοθέτηση λεκανών για κάθε τμήμα του υδρογραφικού δικτύου

Μέσω της επόμενης σειράς εντολών του HEC-GeoHMS, HMS Project Setup δημιουργείται ένα Project για το οποίο παράγονται μήτρες δεδομένων για τα αρχεία που κατασκευάστηκαν στη γεωμορφολογική ανάλυση. Σημαντικό βήμα της διαδικασία αυτής είναι να καθοριστεί με το εργαλείο το σημείο εξόδου της λεκάνης απορροής για την οποία δημιουργείται το project. Με την επιλογή του σημείου και την εντολή Generate Project ολοκληρώνεται η διαδικασία της δημιουργίας του project και η οριοθέτηση της περιοχής μελέτης.

Επόμενο στάδιο είναι η επεξεργασία των υπολεκανών. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.4 από τη γεωμορφολογική ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους προέκυψαν 45 υπολεκάνες. Ο αριθμός αυτός οφείλεται στο υδρογραφικό δίκτυο που δημιουργήθηκε αρχικά. Με την εντολή Basin Merge πραγματοποιήθηκε ενοποίηση μερικών υπολεκανών για την απλοποίηση του συστήματος. Η ενοποίηση αυτή πραγματοποιήθηκε με τρόπο τέτοιο ώστε να υπάρχει μια ενιαία υπολεκάνη με σημείο εξόδου τη προτεινόμενη θέση του φράγματος των Παπαδιανών, αντίστοιχα για το προτεινόμενο φράγμα του Σεμπρενιώτη, μια ενιαία λεκάνη για τον παραπόταμο Ρουματιανό όπως επίσης και μια ενιαία λεκάνη για το κομμάτι του Ταυρωνίτη από την ένωση των δυο παραπάνω μέχρι το σημείο ένωσης με τον παραπόταμο Ντεριανό. Σημειώνεται ότι η προτεινόμενη θέση του φράγματος Παπαδιανών είναι στην έξοδο της λεκάνης W770. Αντίστοιχα, η θέση που προτείνεται για το φράγμα του Σεμπρενιώτη είναι στην έξοδο της υπολεκάνης W980. Μετά την παραπάνω επεξεργασία και ένωση των υπολεκανών προκύπτουν, τελικά, 13 υπολεκάνες οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.5.

Επόμενο βήμα, μέσω του μενού Characteristics, είναι ο υπολογισμός των τοπογραφικών χαρακτηριστικών των υπολεκανών. Τα χαρακτηριστικά αυτά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των παραμέτρων των υδρολογικών διεργασιών και είναι:

- River Length: Υπολογίζεται το μήκος των υδατορευμάτων
- River Slope: Υπολογίζεται η κλίση του ποταμού



Εικόνα 5.5: Οριοθέτηση και επεξεργασία υπολεκανών

- Basin Slope: Υπολογίζεται η κλίση κάθε υπολεκάνης
- Basin Centroid: Υπολογίζεται το κέντρο βάρους κάθε υπολεκάνης
- Longest Flowpath: Υπολογίζεται το μέγιστο μήκος της υδάτινης διαδρομής της υπολεκάνης μέχρι την έξοδο της
- Centroidal Flowpath: Υπολογίζεται το μήκος της υδάτινης διαδρομής από το κέντρο βάρους της λεκάνης μέχρι την έξοδο της

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω εντολών, δίνεται η δυνατότητα επιλογής των μεθόδων για την υδρολογική προσομοίωση στο HEC-HMS μέσω του μενού Parameters. Ακόμη, υπάρχουν εντολές για τον υπολογισμό των παραμέτρων που απαιτούνται για διάφορες μεθόδους, η ανάλυση των οποίων θα πραγματοποιηθεί παρακάτω. Επιλέγονται οι μέθοδοι για τον υπολογισμό των απωλειών βροχόπτωσης, για την άμεση απορροή, τη βασική ροή και για τη διόδευση του πλημμυρογραφήματος. Οι μέθοδοι που επιλέχθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι:

- Μέθοδος απωλειών βροχής: SCS
- Μέθοδος άμεσης απορροή: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα SCS
- Μέθοδος βασικής ροής: Δεν επιλέχθηκε
- Μέθοδος διόδευσης πλημμυρογραφήματος: Muskingum

Τέλος, πραγματοποιείται η τελική επεξεργασία των αρχείων εισόδου για την εισαγωγή τους στο HEC-HMS. Η επεξεργασία αυτή πραγματοποιείται με μια σειρά εντολών του μενού HMS οι οποίες είναι:

- Map to HMS Units: Πραγματοποιείται αντιστοίχιση των μονάδων των δεδομένων σε μονάδες συμβατές με το HEC-HMS
- Check Data: Πραγματοποιείται έλεγχος ορθότητας των δεδομένων
- HMS Schematic: Δημιουργείται ένα απλό υδρογραφικό δίκτυο και ελέγχεται η σύνδεση των κόμβων και των συνδέσμων
- HMS Legend: Αναπαρίστανται τα βασικά στοιχεία με τη μορφή του HMS

- Add Coordinates: Δίνονται συντεταγμένες για τα βασικά στοιχεία
- Prepare Data for model export: Τα δεδομένα των υπολεκανών και των υδατορευμάτων αποθηκεύονται σε πίνακες ιδιοτήτων
- Background Shapefile: Δημιουργία χάρτη συμβατού στο περιβάλλον του HMS
- Basin Model File: Πραγματοποιείται η εξαγωγή του μοντέλου λεκάνης με τα υδρολογικά στοιχεία, τη σύνδεση των στοιχείων και τις απαραίτητες γεωγραφικές πληροφορίες
- Create HEC-HMS Project: Δημιουργείται ένα Project έτοιμο για επεξεργασία στο HEC-HMS.

5.3 Δημιουργία Υποβάθρου Αριθμού Καμπύλης CN

Η μέθοδος που επιλέχθηκε για τον υπολογισμό των απωλειών βροχόπτωσης είναι η μέθοδος Curve Number της SCS. Η μέθοδος αυτή, όπως έγινε η ανάλυση της στο κεφάλαιο 3, βασίζεται στη χρήση ενός αριθμού καμπύλης ο οποίος προκύπτει από τις συνθήκες εδάφους, χρήσεις γης και τις προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού του αριθμού αυτού με χρήση των προγραμμάτων ArcGIS και HEC-GeoHMS, για κάθε υπολεκάνη της περιοχή μελέτης όπως προκύπτει βιβλιογραφικά (Venkatesh, 2012)

5.3.1 Επεξεργασία υποβάθρου χρήσεων γης

Αρχικά, εισάγεται στο πρόγραμμα το υπόβαθρο των χρήσεων γης, όπως αυτό προκύπτει από το Corine Land Cover. Το υπόβαθρό αυτό με τη χρήση της εντολής Clip κόβεται στο σχήμα της λεκάνης απορροής του Ταυρωνίτη (Εικόνα 4.5).

Η κωδικοποίηση του Corine Land Cover είναι αρκετά αναλυτική και έτσι για λόγους απλοποίησης καθώς και για να είναι εφικτή η αντιστοίχιση με τις κατηγορίες του Wanielista (1978) (Πίνακας 3.2), πραγματοποιείται μια συγχώνευση τους σε επτά κατηγορίες (Πίνακας 5.1). Η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται με την εντολή Reclassify, αφού πρώτα μετατραπεί το υπόβαθρο από vector file σε raster. Το

αποτέλεσμα της νέας κατηγοριοποίησης των χρήσεων γης παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.6.

5.3.2 Επεξεργασία υποβάθρου υδρολιθολογικών δεδομένων

Τα υδρολιθολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης λήφθηκαν από την ιστοσελίδα της Περιφέρειας Κρήτης στη μορφή ψηφιακού υποβάθρου. Όπως και το αρχείο των

Πίνακας 5.1: Κατηγοριοποίηση χρήσεων γης

Νέα Κατηγορία Χρήσης Γης	Περιγραφή	Χρήσεις Γης Corine
1	Ασυνεχής αστικός ιστός	112
2	Οδικό δίκτυο-Οικοδομές	122-124-131-133
3	Καλλιέργειες	221-222-223-242-243
4	Δάση	311-312-313-323-324
5	Βοσκότοποι	321
6	Θάλασσα	523
7	Γυμνό έδαφος	211

χρήσεων γης, έτσι και το υπόβαθρο των υδρογεωλογικών σχηματισμών κόπηκε στο σχήμα της λεκάνης απορροής του Ταυρωνίτη (Εικόνα 4.4).

Η κατηγοριοποίηση των εδαφών σύμφωνα με την SCS γίνεται με βάση την υδροπερατότητα τους σε τέσσερις κατηγορίες A, B, C, D. Για τον λόγο αυτό, αναγκαία ήταν η εκ νέου κατηγοριοποίηση των εδαφών της περιοχής μελέτης στις κατηγορίες αυτές. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2 και στον χάρτη της Εικόνας 5.7.

5.3.3 Δημιουργία υποβάθρου CN

Για τον υπολογισμό των αριθμό καμπύλης απαιτείται η δημιουργία ενός πίνακα “look up” με συγκεκριμένες προδιαγραφές ως προς την ονομασία των στοιχείων.

Πίνακας 5.2: Αντιστοίχιση υδρογεωλογικών σχηματισμών σε κατηγορίες A, B, C, D

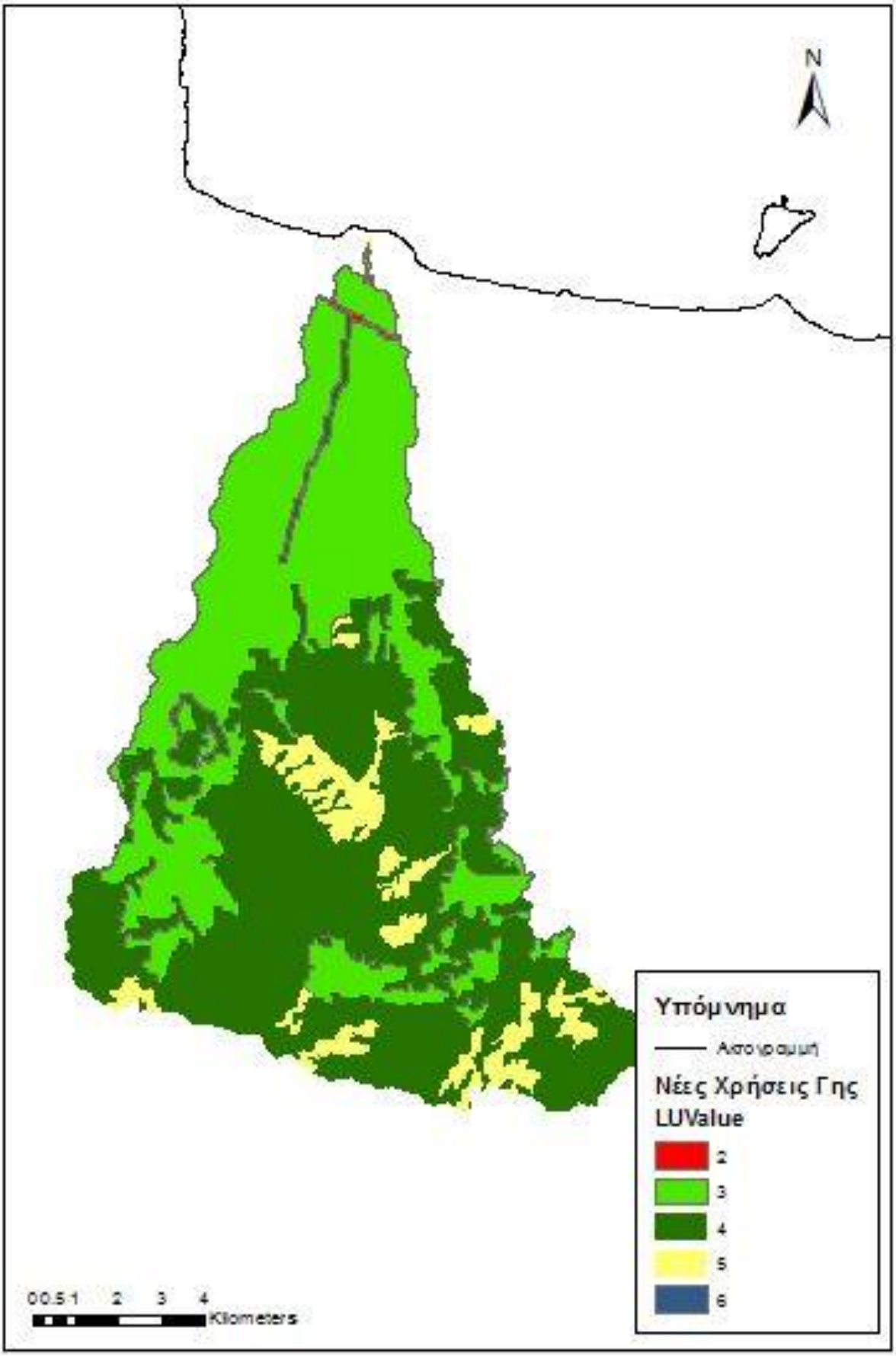
Σχηματισμός	Περιγραφή	Νέα Κατηγορία
A2	Αδιαπέρατο ή Μικρής Υδροπερατότητας	C
K1	Υψηλής ή Μέτριας Υδροπερατότητας	A
P1	Κυμαινόμενη Υδροπερατότητα	B
P2	(Κροκαλοπαγή- Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι)	B
P3	Μικρή-Πολύ Μικρή Υδροπερατότητα	C

Στον Πίνακα αυτό γίνεται αντιστοίχιση τιμών CN ανάλογα την χρήση γης και την κατηγορία του εδάφους. Στην παρούσα εργασία οι τιμές προέκυψαν από αυτές που έχουν δοθεί από τον Wanielista (1978) (Πίνακας 5.3).

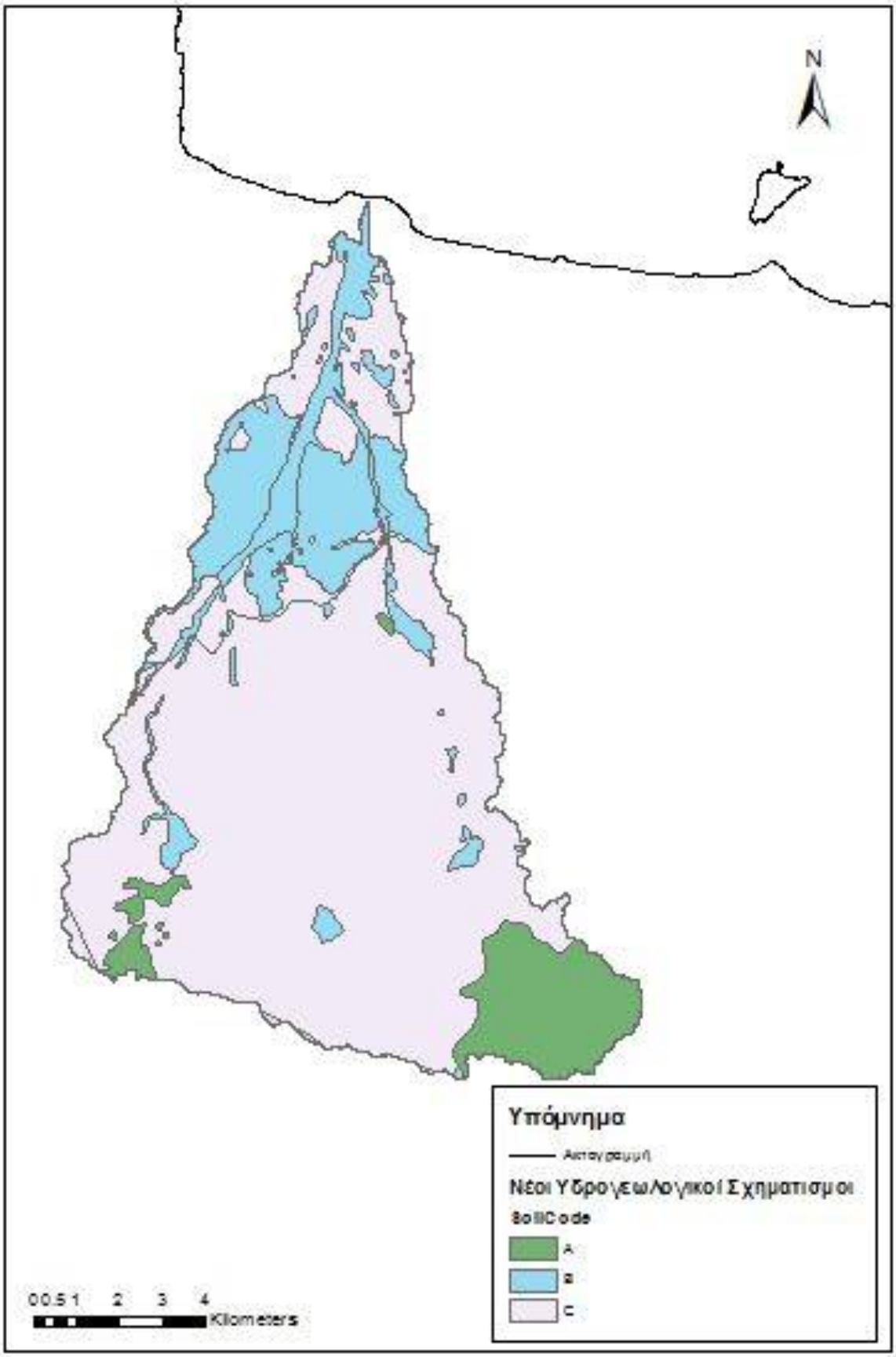
Πίνακας 5.3: Τιμές CN για κάθε χρήση γης και υδρολογικό τύπο εδάφους

Χρήση Γης	Περιγραφή	Αριθμός Curve Number			
		A	B	C	D
1	Ασυνεχής αστικός ιστός	54	70	80	85
2	Οδικό δίκτυο-Οικοδομές	81	88	91	93
3	Καλλιέργειες	67	76	83	86
4	Δάση	35	61	74	80
5	Βοσκότοποι	49	69	79	84
6	Θάλασσα	0	0	0	0
7	Γυμνό έδαφος	72	82	87	89

Απαραίτητο βήμα της διαδικασίας είναι η συγχώνευση των δυο υποβάθρων που κατασκευάστηκαν. Οι νέες χρήσεις γης και υδρογεωλογικοί μέσω της εντολής Intersect συγχωνεύονται σε ένα ενιαίο υπόβαθρο.



Εικόνα 5.6: Αναδιαμορφωμένες χρήσεις γης λεκάνης απορροής Ταυρωνίτη



Εικόνα 5.7: Αναδιαμορφωμένοι υδρογεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης απορροής Ταυρωνίτη

Η δημιουργία του υποβάθρου με τους αριθμούς CN πραγματοποιείται με την εκτέλεση της εντολής Generate CN Grid. Στην εντολή αυτή συνδυάζονται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, το συγχωνευμένο υπόβαθρο χρήσεων γης και εδαφών και ο πίνακας lookup. Το αποτέλεσμα είναι ένα υπόβαθρο (Εικόνα 5.8) όπου σε κάθε συνδυασμό εδάφους και χρήσεις γης έχει δοθεί μια τιμή βάση του πίνακα look up.

Ωστόσο, στο μοντέλο HEC-HMS μπορεί να δοθεί μια τιμή CN για κάθε υπολεκάνη. Για το λόγο αυτό υπολογίστηκαν χειροκίνητα οι σταθμισμένες τιμές των αριθμών καμπύλης για κάθε υπολεκάνη, Οι σταθμισμένοι αριθμοί CN παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.9.

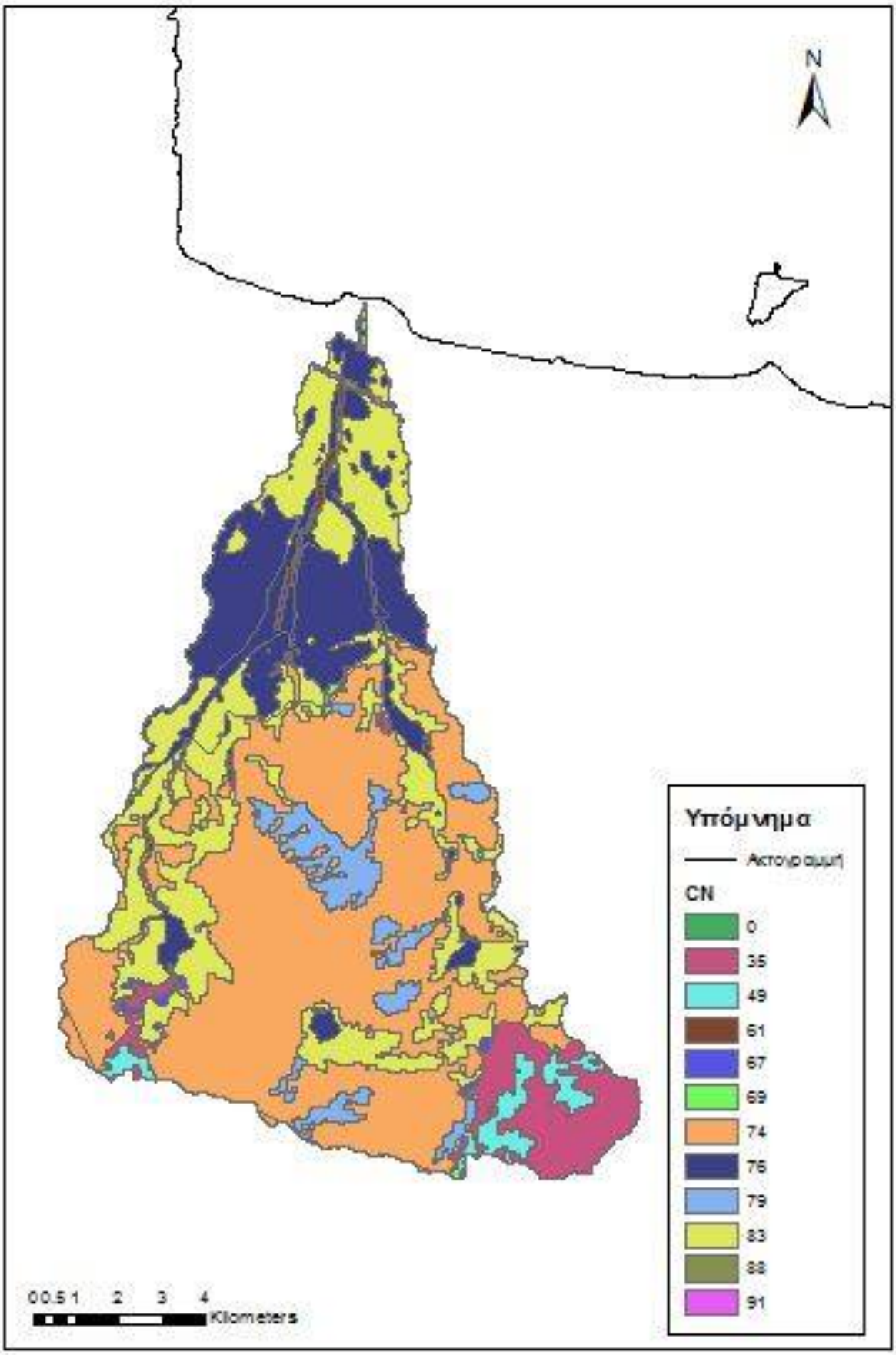
5.4 Στοιχεία Ταμιευτήρα

Η θέση του προτεινόμενου φράγματος βρίσκεται σε υψόμετρο 251 μέτρα. Η ελάχιστη στάθμη θεωρήθηκε η στάθμη +284 m στην οποία αντιστοιχεί νεκρός όγκος νερού 2.45×10^6 m^3. Επίσης, η στάθμη στέψης του υπερχειλιστή τοποθετείται στα +326 m και αντιστοιχεί σε συνολικό όγκο νερού 25.57×10^6 m^3.

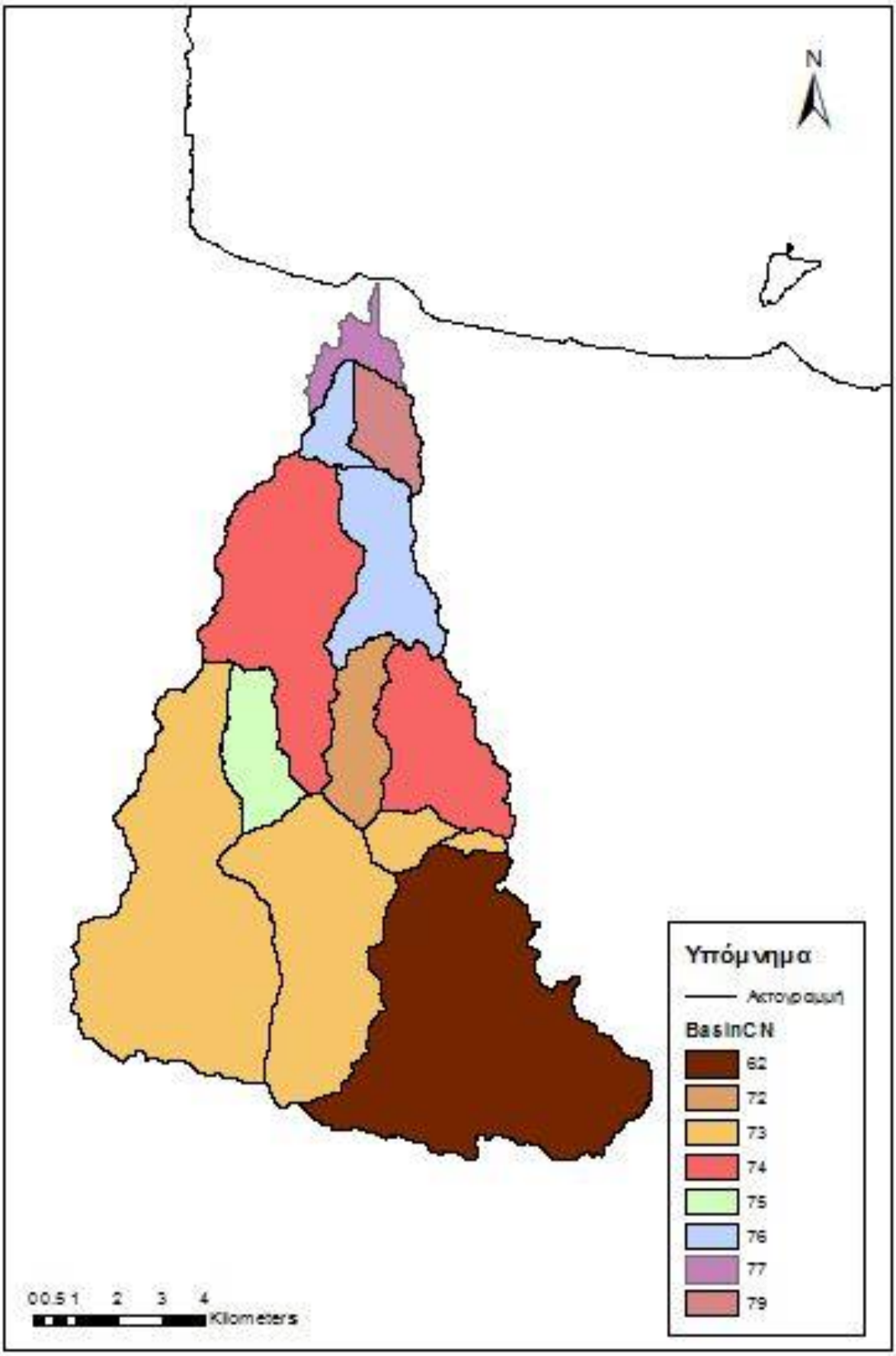
Στο μοντέλο HEC-HMS είναι δυνατή η προσομοίωση ταμιευτήρων. Στο τρίτο κεφάλαιο της διπλωματικής παρατίθενται οι πιθανοί μέθοδοι διόδευσης των πλημμυρογραφημάτων διαμέσου ταμιευτήρα. Για την μελέτη αυτής της διπλωματικής έγινε επιλογή της μεθόδου της Καμπύλης Εκροής. Για την μέθοδο αυτή αναγκαίες είναι οι καμπύλες:

- Καμπύλη στάθμης και χωρητικότητας
- Καμπύλη χωρητικότητας και παροχής ταμιευτήρα

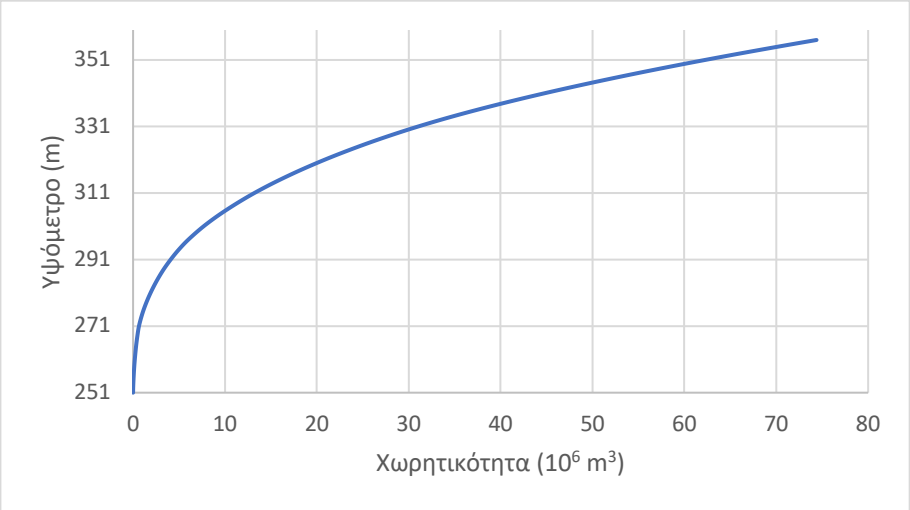
Η καμπύλη στάθμης και χωρητικότητας του ταμιευτήρα στη προτεινόμενη θέση ανάντη του χωριού των Παπαδιανών προέκυψε μετά από τοπογραφική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε από το Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος. Η καμπύλη παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.10.



Εικόνα 5.8: Αριθμοί CN λεκάνης απορροής Ταυρωνίτη



Εικόνα 5.9: Σταθμισμένες τιμές CN λεκάνης απορροής Ταυρωνίτη



Εικόνα 5.10: Διάγραμμα Στάθμης-Χωρητικότητας

Η καμπύλη χωρητικότητας-εκροής απαιτεί τον υπολογισμό της παροχής υπερχείλισης. Η παροχή υπερχείλισης Q υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας με βάση τον τύπο:

$$Q = CL(H - z_0)^{\frac{3}{2}} \tag{5.1}$$

Όπου:

Q: η παροχή υπερχείλισης (m^3/s)

C: ο συντελεστής παροχής

L: το μήκος του υπερχειλιστή (m)

H: η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας (m)

z_0: η στάθμη της στέψης του υπερχειλιστή (m)

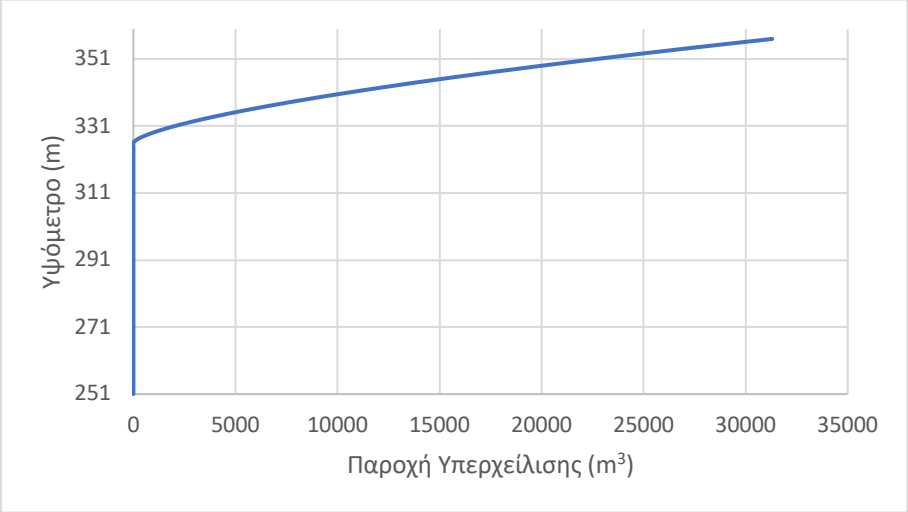
Ο συντελεστής παροχής είναι εμπειρικός και μεταβλητός και εξαρτάται από τις εξής παραμέτρους (US Bureau of Reclamation, 1987):

- Το βάθος ροής πάνω από τον υπερχειλιστή
- Τη σχέση της ιδεατής καμπύλης ροής με την πραγματική καμπύλη του υπερχειλιστή
- Την κλίση του ανάντη τμήματος του υπερχειλιστή

- Την επίδραση των κατάντη συνθηκών

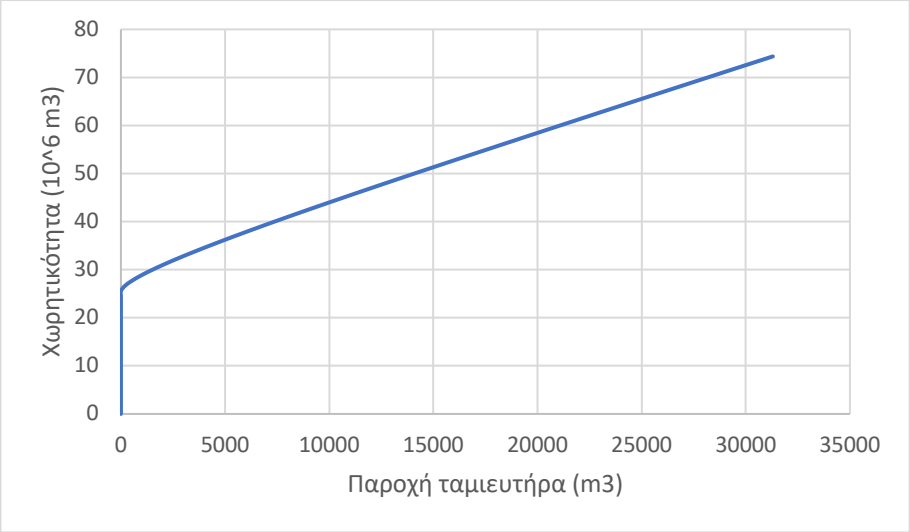
Οι τιμές του κυμαίνονται από 1.5, για χαμηλά βάθη ροής τις πρώτες χρονικές στιγμές της υπερχείλισης, έως 2.2 για την παροχή αιχμής. Στην εργασία αυτή επιλέχθηκε η τιμή C=1.55.

Με βάση τα προβλεπόμενα χαρακτηριστικά του φράγματος το μήκος του υπερχειλιστή προκύπτει ίσο με 117 μέτρα. Με βάση τα παραπάνω είναι δυνατή η επίλυση της Εξι. (5.1) για τον υπολογισμό της παροχής εξόδου. Η καμπύλη στάθμης-παροχής υπερχείλισης παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.11.



Εικόνα 5.11: Διάγραμμα στάθμης ελεύθερης επιφάνειας-παροχής υπερχείλισης

Προκειμένου να προκύψει η ζητούμενη καμπύλη χωρητικότητας-παροχής ταμιευτήρα πραγματοποιήθηκε αντιστοίχιση των τιμών της καμπύλης στάθμης χωρητικότητας με τις υπολογισμένες παροχές υπερχείλισης. Ακόμη, λαμβάνεται υπόψη η οικολογική παροχή του ταμιευτήρα η οποία εκτιμάται ως 0.045 m^3/s. Συνεπώς, για τις στάθμες άνω των 284 m που βρίσκεται ο αγωγός υδροληψίας προστίθεται η παροχή αυτή. Η καμπύλη χωρητικότητας παροχής παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.12.



Εικόνα 5.12: Διάγραμμα χωρητικότητας-παροχής ταμιευτήρα

5.5 Εκτίμηση Βροχόπτωσης Σχεδιασμού

5.5.1 Υπολογισμός της έντασης και του ύψους βροχόπτωσης

Για την εκτίμηση της βροχόπτωσης σχεδιασμού έγινε επιλογή της όμβριας καμπύλης του βροχομετρικού σταθμού Παλαιά Ρούματα. Η επιλογή του σταθμού έγινε λόγω της γεωγραφικής του θέσης, καθώς είναι ο μόνος μετεωρολογικός σταθμός ο οποίος βρίσκεται εντός της λεκάνης απορροής του Ταυρωνίτη. Η εν λόγω όμβρια καμπύλη έχει εξαχθεί στο πλαίσιο της εκπόνησης του πρόσφατου Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνου πλημμύρας στις λεκάνες απορροής του Υδατικού Διαμέρισμα της Νήσου Κρήτης (ΥΠΕΝ/ΕΓΥ, 2015).

Η αναλυτική έκφραση της όμβριας καμπύλης, στην οποία λαμβάνονται υπόψη οι περίοδος επαναφοράς (T) και η διάρκεια της βροχόπτωσης έχει την παρακάτω μορφή.

$$i = \frac{\lambda'\left\{\left[-\ln\left(1-\frac{1}{T}\right)\right]^{-\kappa} - \psi'\right\}}{\left(1+\frac{t}{\theta}\right)^{\eta}} \tag{5.2}$$

Όπου:

i: η μέγιστη ένταση βροχόπτωσης (mm/h)

λ,ψ,κ,θ,η: παράμετροι της όμβριας

t: η διάρκεια της βροχόπτωσης (h)

T: η περίοδος επαναφοράς (year)

Οι τιμές των παραμέτρων για την όμβρια καμπύλη των Παλαιών Ρουμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

Η τιμή της έντασης της βροχόπτωσης αφορά τη σημειακή βροχόπτωση στον βροχομετρικό σταθμό. Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται ο μειωτικός συντελεστής r, όπως προκύπτει από τη σχέση Leclerc και Shaake (1972), για τον υπολογισμό της χωρικά μέσης βροχόπτωσης.

Πίνακας 5.4: Τιμές παραμέτρων όμβριας καμπύλης Παλαιών Ρουμάτων

Παράμετρος	Τιμή
θ	0.093
η	0.691
κ	0.088
λ	705.735
ψ	0.695

$$r = 1 - \exp\left(-1.1t^{\frac{1}{4}}\right) + exp\left(-1.1t^{\frac{1}{4}} - 0.004A\right) \quad (5.3)$$

Όπου:

t: η διάρκεια της βροχόπτωσης (h)

A: το εμβαδόν της λεκάνης απορροής (km^2)

Συνεπώς, ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της έντασης της βροχόπτωσης είναι:

$$i_m = \left(1 - \exp\left(-1.1t^{\frac{1}{4}}\right) + exp\left(-1.1t^{\frac{1}{4}} - 0.004A\right)\right)\frac{705.735\left\{\left[-ln\left(1-\frac{1}{T}\right)\right]^{0.088} - 0.695\right\}}{\left(1+\frac{t}{0.093}\right)^{0.691}} \quad (5.4)$$

Λαμβάνοντας τις υδρομετεωρολογικές συνθήκες της λεκάνης απορροής του Ταυρωνίτη η διάρκεια της βροχόπτωσης λήφθηκε ίση με 12 ώρες. Επίσης, οι περίοδοι επαναφοράς οι οποίες εξετάστηκαν ήταν τα 2, 5, 10, 25, 50 και 100 χρόνια. Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται οι τιμές της έντασης της βροχόπτωσης και το ύψος της βροχόπτωσης για τις επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς και διάρκεια βροχόπτωσης ίση με 12 ώρες.

Πίνακας 5.5: Ετήσια μέγιστη ένταση της χωρικά μέσης βροχόπτωσης στη λεκάνη Ταυρωνίτη και αντίστοιχα ύψη βροχής

Περίοδος επαναφοράς (έτη)	Ένταση (mm/h)	Ύψος βροχόπτωσης (mm)
2	7.8	93.8
5	10.3	123.8
10	11.9	142.3
25	14.6	174.9
50	16.5	198.4
100	18.6	223.2

5.5.2 Χρονική κατανομή βροχόπτωσης

Για την κατάρτιση των υετογραφημάτων και τη χρονική κατανομή της βροχόπτωσης επιλέχθηκε η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά στα παρακάτω βήματα.

Βήμα 1^{ο}: Με βάση την επιλεγμένη όμβρια καμπύλη υπολογίζονται τα τμηματικά ύψη βροχής των επιμέρους διαρκειών.

Βήμα 2^{ο}: Γίνεται υπολογισμός του βάρους του ύψους βροχής κάθε επιμέρους διάρκειας και κατατάσσονται έναντι της συνολικής βροχόπτωσης του επεισοδίου.

Βήμα 3ο: Τα βάρη αυτά κατατάσσονται με τρόπο τέτοιο ώστε το μεγαλύτερο βάρος να βρίσκεται στη μέση της διάρκειας της βροχόπτωσης και τα υπόλοιπα σε φθίνουσα σειρά εναλλακτικά εκατέρωθεν του μεγίστου.

Βήμα 4ο: Πολλαπλασιάζονται τα ανακατανεμημένα βάρη με το συνολικό ύψος βροχόπτωσης του επεισοδίου και έτσι προκύπτει το υετογράφημα σχεδιασμού.

Για τη χρονική κατανομή της καταιγίδας επιλέχθηκε το χρονικό βήμα των 15 λεπτών. Τα υετογραφήματα που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ για τις επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.13.

5.6 Δημιουργία Μοντέλου στο HEC-HMS

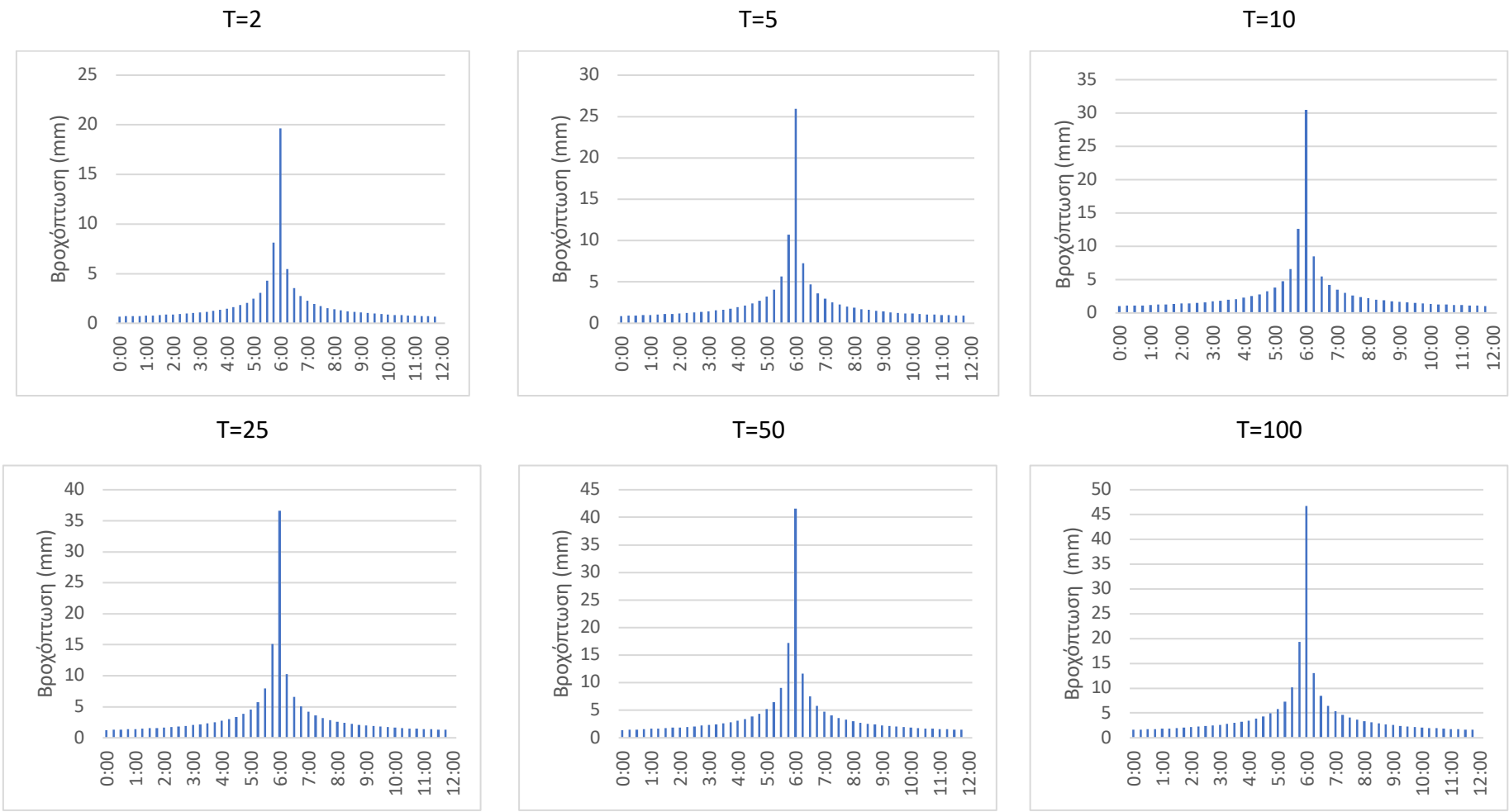
Μετά την προετοιμασία των δεδομένων είναι δυνατή η κατασκευή του μοντέλου της λεκάνης Ταυρωνίτη στο HEC-HMS. Αρχικά, εισάγονται τα αρχεία που κατασκευάστηκαν από το HEC-GeoHMS. Στην Εικόνα 5.14 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης στο περιβάλλον του HEC-HMS.

5.6.1 Υπολεκάνες περιοχής μελέτης

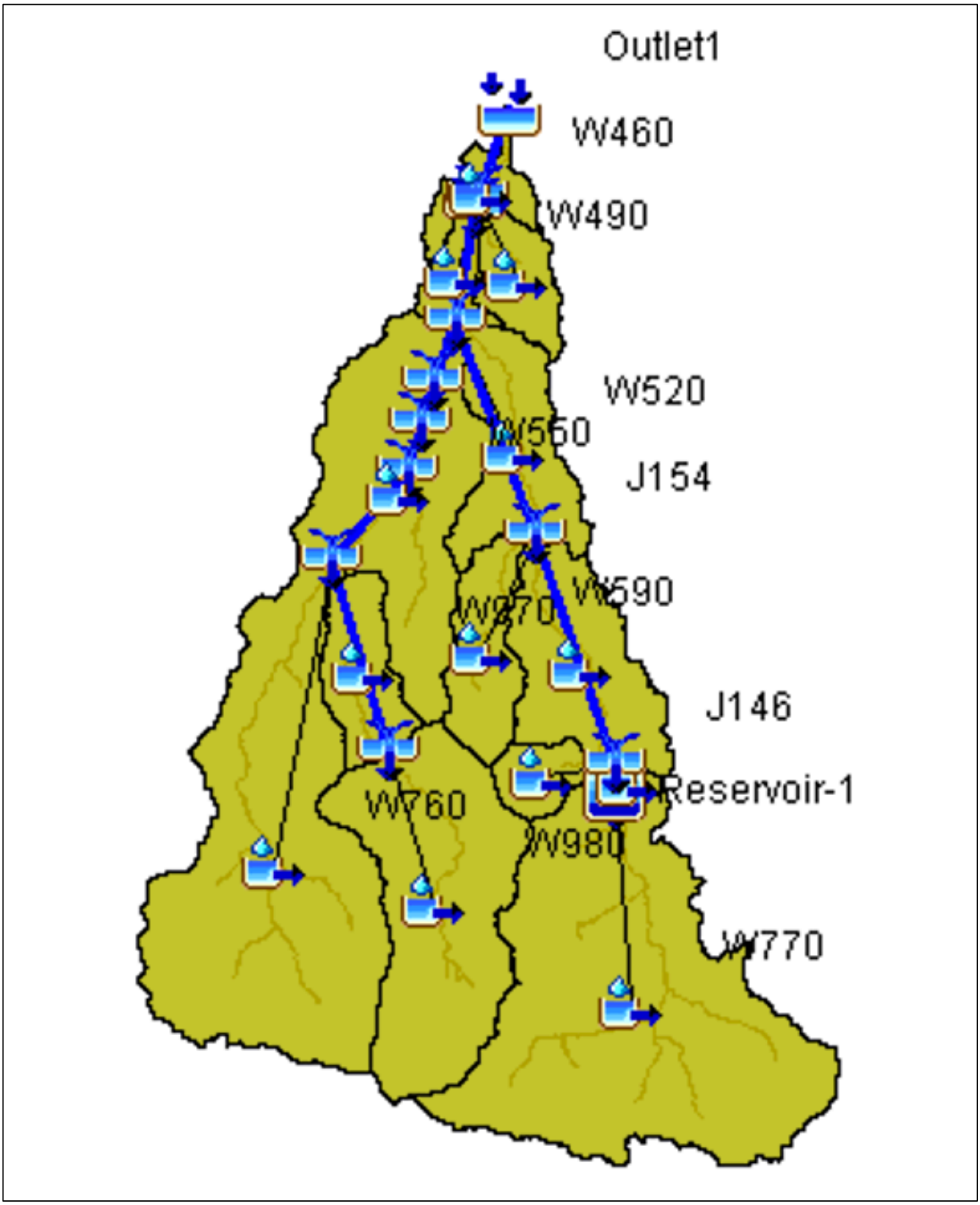
Οι μέθοδοι που αναλύθηκαν παραπάνω λειτουργούν σε επίπεδο υπολεκάνης. Έτσι, για κάθε υπολεκάνη δίνονται οι απαραίτητες μεταβλητές για την κάθε μέθοδο.

<u>Μέθοδος απωλειών βροχόπτωσης</u>

Οι παράμετροι που απαιτούνται για τη μέθοδο αυτή είναι οι τιμές CN για την κάθε υπολεκάνη (Πίνακας 5.6). Στη μέθοδο αυτή δύναται να δοθούν τιμές για το ποσοστό των αδιαπερατών επιφανειών και για τις αρχικές απώλειες. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία οι αδιαπερατές επιφάνειες έχουν ληφθεί υπόψη στους αριθμούς CN και η αρχική απώλεια θεωρήθηκε ίση με το 0.



Εικόνα 5.13: Υετογραφήματα σχεδιασμού



Εικόνα 5.14: Περιοχή μελέτης σε περιβάλλον HEC-HMS

Μέθοδος άμεσης απορροής

Για τη μέθοδο μετατροπής της βροχόπτωσης σε άμεση απορροή που έχει αναπτυχθεί από την SCS, αναγκαία μεταβλητή είναι ο χρόνος υστέρησης της κάθε υπολεκάνης. Ο χρόνος υστέρησης υπολογίστηκε στο πρόγραμμα HEC-GeoHMS με τη χρήση της εντολής CN Lag. Με την εντολή αυτή, η οποία προϋποθέτει να είναι υπολογισμένος για την κάθε υπολεκάνη ο αριθμός CN, υπολογίζεται με βάση τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά ο χρόνος υστέρησης σε ώρες. Οι τιμές που προέκυψαν και χρησιμοποιήθηκαν στο HEC-HMS παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6: Τιμές CN και χρόνοι υστέρησης για κάθε υπολεκάνη

Υπολεκάνης	Τιμή CN	Χρόνος Υστέρησης (min)
W460	77	41.33
W490	76	33.35
W500	79	32.58
W520	76	45.2
W550	74	65.14
W590	72	37.81
W600	74	43.33
W650	73	21.57
W760	73	67.99
W770	62	86.16
W920	73	10.8
W970	75	32.3
W980	73	54.42

Μέθοδος βασικής ροής

Στο HEC-HMS είναι δυνατή η επιλογή μεθόδων για την βασική ροή του ποταμού. Ωστόσο, στη παρούσα εργασία δεν επιλέχθηκε κάποια μέθοδος καθώς:

- Ο ποταμός Ταυρωνίτης έχει χειμαρρικό καθεστώς ροής με χαμηλές απορροές κατά τις ξηρές περιόδους και πολύ υψηλότερες απορροές στις περιπτώσεις έντονων πλημμυρικών γεγονότων.
- Δεν διατίθεται συνεχής χρονοσειρά ημερήσιων παροχών του ρέματος έτσι ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της βασικής ροής.

5.6.2 Υδατορεύματα περιοχής μελέτης

Σε ότι αφορά την προσομοίωση των υδατορευμάτων του μοντέλου επιλέγεται η μέθοδος διόδευσης του πλημμυρικού κύματος. Η μέθοδος που επιλέχθηκε είναι η μέθοδος Muskingum. Οι παράμετροι που απαιτούνται για τη μέθοδο αυτή είναι οι συντελεστές K και x. Ο συντελεστής K υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση 3.5 (Πίνακας 5.7) και για τον συντελεστή x δόθηκε η τιμή 0.2.

5.6.3 Μετεωρολογικό μοντέλο και Control Specifications αρχείο

Τα μετεωρολογικά δεδομένα εισέρχονται στο μοντέλο με τη μορφή ενός μετεωρολογικού μοντέλου. Για κάθε υπολεκάνη επιλέγεται η μέθοδος βροχόπτωσης. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκαν τα συνθετικά υετογραφήματα με τη μέθοδο Specific Hyetograph.

Κάθε μοντέλο ρυθμίζεται από το control specifications μέρος του HEC-HMS. Στο μέρος αυτό επιλέγεται η χρονική περίοδος των προσομοιώσεων καθώς επίσης και το χρονικό τους βήμα. Η διάρκεια των προσομοιώσεων επιλέχθηκε ίση με 24 ώρες και το χρονικό βήμα ίσο με 15 λεπτά, όσο και αυτό των υετογραφημάτων.

5.7 Τρέξιμο – Αποτελέσματα Υδρολογικής Προσομοίωσης

Μόλις ολοκληρωθεί η ετοιμασία όλων των αρχείων εισόδου και συμπληρωθούν οι παράμετροι των μεθόδων είναι δυνατή η υδρολογική προσομοίωση. Για κάθε προσομοίωση δημιουργείται ένα αρχείο στο οποίο επιλέγεται το μοντέλο της λεκάνης απορροής, το μετεωρολογικό μοντέλο και το αρχείο ελέγχου.

Πίνακας 5.7: Τιμές παραμέτρου K της μεθόδου Muskingum

Υδατόρευμα	Παράμετρος K (h)
R10	0.52
R100	0.266
R110	1.22
R120	0.637
R170	1.29
R190	0.13
R20	0.065
R300	1.07
R50	0.61
R60	0.34
R80	0.23

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας εξετάστηκαν δυο σενάρια. Το πρώτο σενάριο αφορά την προσομοίωση της λεκάνης απορροής χωρίς την ύπαρξη του φράγματος Παπαδιανών. Το δεύτερο σενάριο προσομοιώνει την λεκάνη απορροής του Ταυρωνίτη με την ύπαρξη του φράγματος. Τα δυο αυτά σενάρια έχουν στόχο τον υπολογισμό των επιπτώσεων του φράγματος στα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της λεκάνης.

Τα αποτελέσματα των δυο σεναρίων παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.8 και 5.9 με τη μορφή της παροχής αιχμής κάθε υπολεκάνης, στην εκβολή του ποταμού στη θάλασσα και η διοδευμένη παροχή αιχμής του ταμιευτήρα.

5.8 Υπολογισμός Εδαφικής Διάβρωσης

Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε υπολογισμός της εδαφικής διάβρωσης με τη χρήση του μοντέλου HEC-HMS. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στο πρόγραμμα HEC-HMS είναι δυνατή η προσομοίωση της εδαφικής διάβρωσης και της μεταφοράς με υδραυλικές προσομοιώσεις στο HEC-RAS.

Πίνακας 5.8: Παροχές αιχμής για το σενάριο χωρίς το φράγμα Παπαδιανών

Υπολεκάνη	Εμβαδόν (km^2)	Παροχή αιχμής για διάφορες περιόδους επαναφοράς (m^3/s)					
		T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100
W460	2.27	9.9	16	20.8	27.6	33	38.9
W490	2.14	10.1	16.7	21.7	28.7	34.3	40.4
W500	3.22	17.8	28.2	36	46.8	55.5	64.7
W520	7.42	29.9	49.4	64.2	84.8	101.6	119.5
W550	16.58	48.5	82.5	109.1	146.8	177.6	210.7
W590	4.95	17.3	30.8	41.2	56.1	68.3	81.5
W600	9.20	34	57.5	75.5	101	121.7	143.8
W650	2.18	10.7	18.6	24.6	33.2	40.2	47.7
W760	28.19	76.6	131.6	174.1	234.6	285.4	339.8
W770	32.95	36.8	77.4	111.8	164.5	209.5	259.1
W920	0.61	3.8	6.5	8.7	11.7	14.2	16.8
W970	4.68	21.3	35.6	46.5	61.9	74.3	87.6
W980	17.30	53.2	91.3	120.7	163.2	198.4	236.2
Έξοδος	131.69	178.1	305.8	406.5	551.4	671.5	801.4

ιζημάτων. Μεγαλύτερη σημασία δόθηκε στην εδαφική διάβρωση καθώς η μεταφορά των ιζημάτων θα εξεταστεί παρακάτω

Για τον υπολογισμό, λοιπόν, της διάβρωσης επιλέχθηκε η μέθοδος Modified USLE. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ορισμένες παραμέτρους. Στην περιοχή μελέτης οι τιμές των παραμέτρων αυτών προέκυψαν με βάση τους Πίνακες 2.3 και 2.4 και την εξίσωση 2.19. Ειδικά για τον συντελεστή μέτρων ελέγχου διάβρωσης δόθηκε η τιμή 1 καθώς δεν υπάρχουν καθόλου τέτοια μέτρα. Οι τιμές που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.10.

Πίνακας 5.9: Παροχές αιχμής για το σενάριο με το φράγμα Παπαδιανών

Υπολεκάνη	Εμβαδόν (km^2)	Παροχή αιχμής για διάφορες περιόδους επαναφοράς (m^3/s)					
		T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100
W460	2.27	9.9	16	20.8	27.6	33	38.9
W490	2.14	10.1	16.7	21.7	28.7	34.3	40.4
W500	3.22	17.8	28.2	36	46.8	55.5	64.7
W520	7.42	29.9	49.4	64.2	84.8	101.6	119.5
W550	16.58	48.5	82.5	109.1	146.8	177.6	210.7
W590	4.95	17.3	30.8	41.2	56.1	68.3	81.5
W600	9.20	34	57.5	75.5	101	121.7	143.8
W650	2.18	10.7	18.6	24.6	33.2	40.2	47.7
W760	28.19	76.6	131.6	174.1	234.6	285.4	339.8
W770	32.95	36.8	77.4	111.8	164.5	209.5	259.1
W920	0.61	3.8	6.5	8.7	11.7	14.2	16.8
W970	4.68	21.3	35.6	46.5	61.9	74.3	87.6
W980	17.30	53.2	91.3	120.7	163.2	198.4	236.2
Papadiana Dam	-	25.3	51.9	74.4	108.5	137.8	170.3
Outlet	131.69	170.3	289	381.6	514.2	623.7	742.3

Στο μοντέλο HEC-HMS όταν επιλέγεται να πραγματοποιηθεί προσομοίωση της διάβρωσης και της μεταφοράς ιζημάτων υπάρχει ένας περιορισμός σχετικά με την μέθοδο διόδευσης των υδατορευμάτων. Καθώς στη μεταφορά φερτών υπολογίζεται η ικανότητα μεταφοράς ιζημάτων κάθε υδατορεύματος με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, αυτά απαιτούνται. Συνεπώς, πρέπει να γίνει επιλογή μιας μεθόδου στην οποία δίνονται αυτά. Οι διαθέσιμες τέτοιες μέθοδοι είναι η Muskingum-Cunge και η Kinematic Wave.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε η μέθοδος Muskingum-Cunge στην οποία οι παράμετροι που απαιτούνται είναι το μήκος, η κλίση των υδατορευμάτων, ο συντελεστής Manning και το σχήμα της κοίτης. Το μήκος και η κλίση των υδατορευμάτων προέκυψε από την προετοιμασία των δεδομένων μέσω του HEC-

Πίνακας 5.10: Τιμές παραμέτρων εξίσωσης MUSLE

Υπολεκάνη	Συντελεστής διαβρωσιμότητας (K)	Συντελεστής τοπογραφίας (LS)	Συντελεστής φυτοκάλυψης (C)	Συντελεστής μέτρων διάβρωσης (P)
W460	0.0698	2.51	0.146	1
W490	0.0666	2.03	0.128	1
W500	0.0652	1.2	0.144	1
W520	0.0633	2.23	0.141	1
W550	0.0658	2.05	0.127	1
W590	0.0788	1.68	0.039	1
W600	0.0802	2.11	0.070	1
W650	0.08	1.74	0.073	1
W760	0.07988	1.8	0.073	1
W770	0.08629	1.73	0.072	1
W920	0.08	2.37	0.043	1
W970	0.07634	2	0.091	1
W980	0.08	1.85	0.061	1

GeoHMS. Ο συντελεστής Manning χρησιμοποιήθηκε ίσος με 0.03 $s/m^{1/3}$ και το σχήμα τριγωνικό.

Προκειμένου τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας να συμπίπτουν με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, όπου η μέθοδος διόδευσης του πλημμυρογραφήματος ήταν η Muskingum, πραγματοποιήθηκε χειροκίνητη βαθμονόμηση. Στη βαθμονόμηση αυτή χρησιμοποιήθηκαν στο ρόλο των παρατηρημένων δεδομένων τα προηγούμενα αποτελέσματα με σημεία ελέγχου κάποια καθοριστικά σημεία κόμβων των παραποτάμων. Οι παράμετροι στις οποίες δόθηκαν διαφορετικές τιμές ήταν ο συντελεστής Manning καθώς και ο λόγος του πυθμένα προς τις κοίτες του ποταμού που αφορούν τη μορφή του υδατορεύματος. Στη διαδικασία αυτή δόθηκε σημασία στη χρονική στιγμή της παροχής αιχμής και

στον συνολικό όγκο της απορροής, ενώ ο συντελεστής απόδοσης Nash-Sutcliffe εμφάνισε τιμές που βρίσκονταν κοντά στο 0.9.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.11.

Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα εδαφικής διάβρωσης με τη μέθοδο MUSLE

Υπολεκάνες	Συνολική Ποσότητα Φερτών (tons)					
	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100
W460	637.9	1095.7	1465.8	2004.8	2457.3	2951
W490	408.6	713.6	957.5	1312.7	1610.9	1936.7
W500	502.5	841.6	1107.5	1490.4	1809.3	2156.2
W520	1767.2	3069.2	4107.6	5620.3	6889.5	8277.7
W550	2968.2	5299.8	7200.5	9997.5	12362.2	14960.2
W590	241.8	447.4	616.6	866.7	1080	1314.7
W600	1216.7	2167.1	2933.7	4058.8	5008.3	6049
W650	234.9	428.7	585.7	818.3	1015.2	1231.5
W760	3100.1	5595.1	7621.9	10619.9	13188.2	16018.2
W770	1611.7	3540.6	5255.9	7969.2	10368.1	13086.4
W920	35.8	75	110	163.4	210.5	263.9
W970	767.8	1352	1820.8	2505.9	3082.1	3713.1
W980	1647.7	2972	4047.1	5650.3	7016.5	8521.6

Τα αποτελέσματα τόσο της υδρολογικής προσομοίωσης, όσο και της εδαφικής διάβρωσης, χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο HEC-RAS ως αρχεία εισόδου και ως οριακές συνθήκες για τις υδραυλικές και τις προσομοιώσεις μεταφοράς ιζημάτων.

6. Υδραυλική Προσομοίωση και Προσομοίωση Μεταφοράς Φερτών

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι επιπτώσεις κατασκευής του φράγματος Παπαδιανών στην παράκτια περιοχή εστιάζοντας στη μεταφορά φερτών του ρέματος Ντεριανού. Ο υπολογισμός των επιπτώσεων πραγματοποιήθηκε με διαδοχικές προσομοιώσεις της υδραυλικής του ποταμού με τις παραδοχές ύπαρξης και μη, του προτεινόμενου φράγματος. Για τις προσομοιώσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό HEC-RAS και συνδυάστηκε το υπο-μοντέλο ψευδο-μονοδιάστατης ροής (quassi-unsteady flow) και το υπο-μοντέλο για τον υπολογισμό της μεταφοράς φερτών.

6.1 Δημιουργία Γεωμετρικών Γεδομένων

Για την δημιουργία των αρχικών γεωμετρικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό HEC-GeoRAS. Το λογισμικό αυτό αποτελεί επέκταση του ArcGIS και ακολουθεί την φιλοσοφία του HEC-GeoHMS, τη δημιουργία, δηλαδή, αρχείων εισόδου που θα χρησιμοποιηθούν στο HEC-RAS. Συγκεκριμένα, το αρχείο γεωμετρικών δεδομένων περιλαμβάνει την οριζοντιογραφία της περιοχής μελέτης, τη μηκοτομή του τμήματος του ποταμού και έναν αριθμό διατομών σε καθορισμένες θέσεις. Σημαντικό βήμα της διαδικασίας αυτής είναι η δημιουργία θεματικών επιπέδων που περιλαμβάνουν σημαντικά γεωμετρικά στοιχεία για τη μετέπειτα επεξεργασία:

- Κύρια γραμμή ροής ποταμού
- Όχθες ποταμού
- Κύριες διευθύνσεις ροής
- Διατομές ποταμού
- Χρήσεις γης

Το υπολογιστικό πεδίο ορίζεται από την περιοχή του ταμιευτήρα Παπαδιανών στα ανάντη και την εκβολή του ρέματος Ντεριανού στη θάλασσα, στα κατάντη. Παράλληλα, γίνεται εισαγωγή τεσσάρων ρεμάτων στο κυρίως υδατόρευμα που αντιστοιχούν σε πλευρικές εισροές από τις κατάντη υπολεκάνες του φράγματος

καθώς, επίσης, και στη συμβολή με τους δυο παραποτάμους Ρουματιανό και Σεμπρενιώτη.

6.1.1 Κύρια γραμμή ροής ποταμού

Η κύρια γραμμή ροής είναι το πρώτο θεματικό επίπεδο που δημιουργείται. Λαμβάνοντας υπόψη την υδρολογική ανάλυση της λεκάνης απορροής και το υδρογραφικό δίκτυο, ψηφιοποιήθηκε το τμήμα του ποταμού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στην υδραυλική μελέτη. Η ψηφιοποίηση πραγματοποιείται κατά τη φορά της ροής από τα ανάντη στα κατάντη. Μετά την ψηφιοποίηση κάθε γραμμής ροής χρησιμοποιείται το εργαλείο river reach id με το οποίο δίνεται όνομα στο υδατόρευμα. Στη συνέχεια, με τη χρήση των εντολών του μενού RAS Geometry-Stream Centerline Attribute ελέγχονται και υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά του ποταμού.

- Topology: ελέγχεται η σύνδεση και ο προσανατολισμός των τμημάτων του υδρογραφικού δικτύου που έχει σχηματιστεί.
- Lengths/Stations: υπολογίζονται τα μήκη των γραμμών ροής για κάθε τμήμα και καθορίζεται η φορά ροής
- Elevations: με βάση το ψηφιακό μοντέλο μετατρέπεται η διάσταση γραμμή ροής σε τρισδιάστατη

6.1.2 Κύριες όχθες

Το θεματικό επίπεδο που σχετίζεται με τις όχθες του ποταμού αποτελείται από δυο γραμμές εκατέρωθεν της κύριας γραμμής ροής του. Οι γραμμές αυτές διαχωρίζουν τη ροή του ποταμού εντός και εκτός της κοίτης. Η δημιουργία του επιπέδου είναι προαιρετική στο HEC-GeoRAS, οπότε, στην διπλωματική αυτή ο ορισμός των οχθών πραγματοποιήθηκε κατευθείαν στο HEC-RAS.

6.1.3 Κύριες διευθύνσεις ροής

Οι κύριες διευθύνσεις ροής δημιουργούνται κατά τη διεύθυνσης ροής από τα ανάντη στα κατάντη. Η κύρια διεύθυνση ροής δημιουργείται με βάση την κύρια γραμμή ροής του ποταμού. Επιπλέον, σχηματίζονται δυο γραμμές αριστερά και δεξιά της κύριας διεύθυνσης που χρησιμοποιούνται για την οριοθέτηση του ποταμού. Το επίπεδο αυτό χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των αποστάσεων μεταξύ των διατομών.

6.1.4 Διατομές

Το θεματικό επίπεδο των διατομών σχετίζεται με την κατασκευή τους σε αντιπροσωπευτικές θέσεις. Οι θέσεις αυτές επιλέγονται έτσι ώστε να μπορούν να προσομοιωθούν τα μαιανδρικά στοιχεία του ποταμού. Οι διατομές σχεδιάζονται κάθετα στη ροή του ποταμού από αριστερά προς τα δεξιά ακολουθώντας τη ροή του ποταμού. Το πλάτος τους είναι απαραίτητο να καλύπτει, τουλάχιστον, όλο το πεδίο κατάκλυσης. Η σχεδίαση των διατομών μπορεί να γίνει χειροκίνητα μια προς μια με τη χρήση της εντολής XS Cut Lines-Edit. Επίσης, είναι δυνατή η αυτόματη κατασκευή των διατομών με την εντολή Construct Cut Lines όπου από το χρήστη επιλέγεται η απόσταση μεταξύ των διατομών και το πλάτος τους. Στην εργασία αυτή σχεδιάστηκαν χειροκίνητα οι διατομές σε αντιπροσωπευτικές θέσεις και στη συνέχεια κατασκευάστηκαν αυτόματα διατομές με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των αρχικά κατασκευασμένων ανά 50 μέτρα. Πριν ολοκληρωθεί η διαδικασία υπολογίζονται ορισμένα χαρακτηριστικά των διατομών μέσω της εντολής XS Cut Lines Attributes:

- River/Reach Names: χρησιμοποιούνται τα στοιχεία της κύριας γραμμής ροής και προστίθενται στον πίνακα ιδιοτήτων των διατομών
- Stationing: υπολογίζεται η απόσταση κάθε διατομής από την εκβολή του ποταμού
- Bank Stations: υπολογίζεται το πλάτος κάθε διατομής μεταξύ της αριστερής και δεξιά όχθης
- Downstream Reach Lengths: καθορίζεται η απόσταση κάθε διατομής από την επόμενη κατάντη διατομή.

- Elevations: υπολογίζεται το υψόμετρο από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και οι διατομές μετατρέπονται σε τρισδιάστατο επίπεδο.

Σε μετέπειτα επεξεργασία στο μοντέλο HEC-RAS δημιουργήθηκαν επιπλέον διατομές με μεταξύ τους απόσταση τα 10 μέτρα.

6.1.5 Χρήσεις γης

Προκειμένου να εκτιμηθεί ο συντελεστής Manning στις θέσεις των διατομών χρησιμοποιείται το θεματικό επίπεδο των χρήσεων γης. Το θεματικό επίπεδο κατασκευάζεται με την εντολή Create RAS Layers-Land Use στο οποίο επικολλώνται από το αρχικό επίπεδο χρήσεων γης της υδρολογικής ανάλυσης τα πολύγωνα εκείνα που τέμνουν τις σχεδιασμένες διατομές. Για κάθε πολύγωνο αποδίδονται τιμές του συντελεστή Manning μέσω της εντολής RAS Geometry-Manning N Values-Create LU Manning table, σύμφωνα με τον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Τιμές συντελεστή Manning για διάφορες χρήσεις γης

Κωδικός Corine Land Cover	Περιγραφή	Τιμή Manning_n
122	Οδικό Δίκτυο	0.013
124	Αεροδρόμιο	0.013
221	Αμπελώνες	0.08
222	Οπωροφόρα δένδρα	0.08
223	Ελαιώνες	0.08
242	Σύνθετες καλλιέργειες	0.04
243	Καλλιεργήσιμη γη με φυσική βλάστηση	0.05
311	Δάσος πλατύφυλλων	0.1
312	Δάσος κωνοφόρων	0.1
313	Μικτό δάσος	0.1
321	Φυσικοί Βοσκότοποι	0.035
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	0.05
324	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	0.06

Τελικά, με την εντολή RAS Geometry-Manning N Values-Extract N values εξάγονται οι τιμές που αφορούν κάθε διατομή σε έναν νέο πίνακα.

6.1.6 Σύνθεση θεματικών επιπέδων και κατασκευή αρχείου εισόδου του HEC-RAS

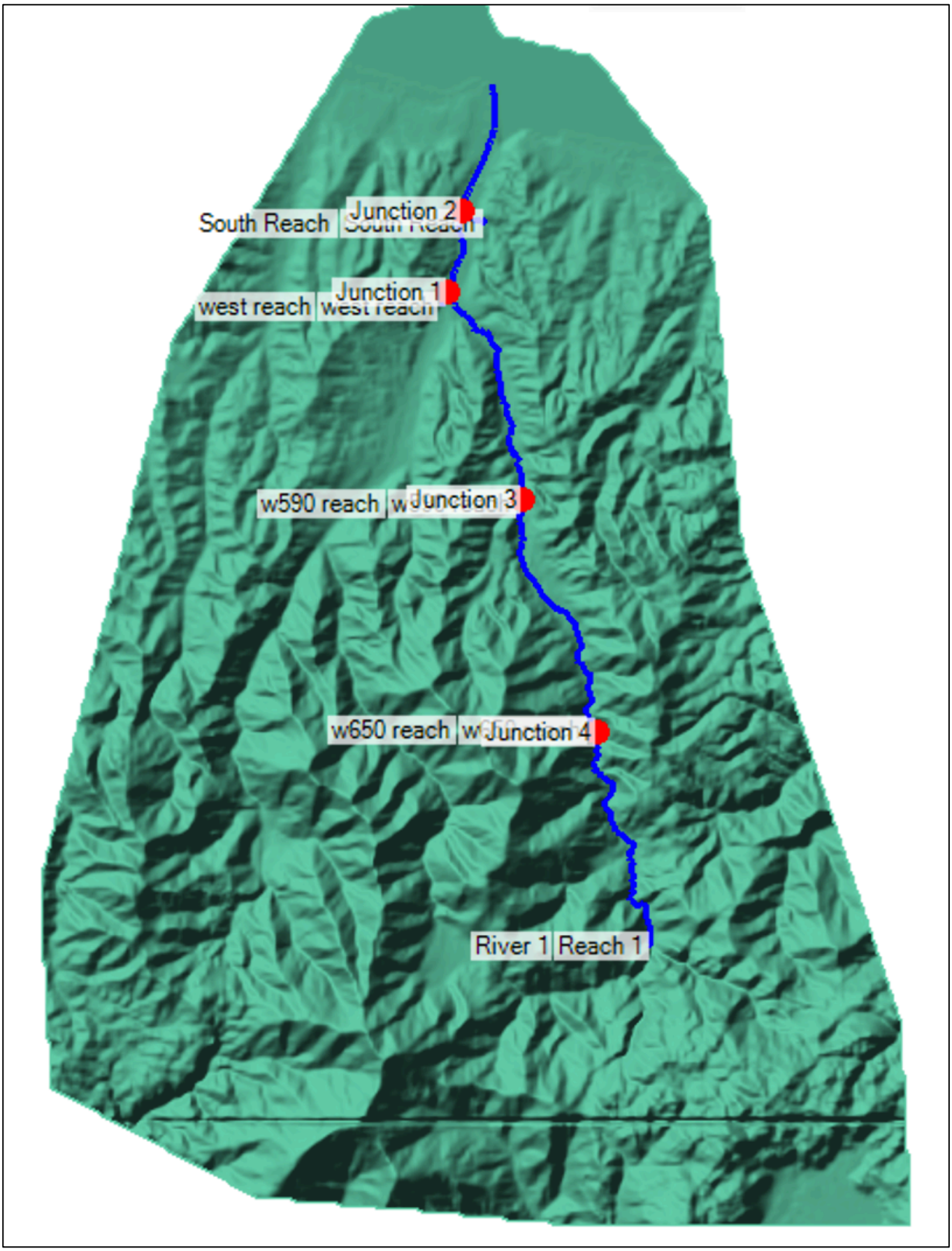
Για την παραγωγή του τελικού γεωμετρικού αρχείου εισόδου στο πρόγραμμα HEC-RAS είναι απαραίτητη η σύνθεση των θεματικών επιπέδων που δημιουργήθηκαν και του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Η σύνθεση αυτή πραγματοποιείται με την εντολή Layer setup και η εξαγωγή του αρχείου γίνεται με την εντολή Extract GIS data.

Στην Εικόνα 6.1 παρουσιάζονται η γραμμές ροής του ποταμού και τα σημεία των κόμβων. Στην Εικόνα 6.2 φαίνονται οι διατομές όπως προέκυψαν μετά την τελική επεξεργασία τους. Στην Εικόνα 6.3 παρουσιάζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση των διατομών, της γραμμής ροής και των οχθών του υπολογιστικού πεδίου.

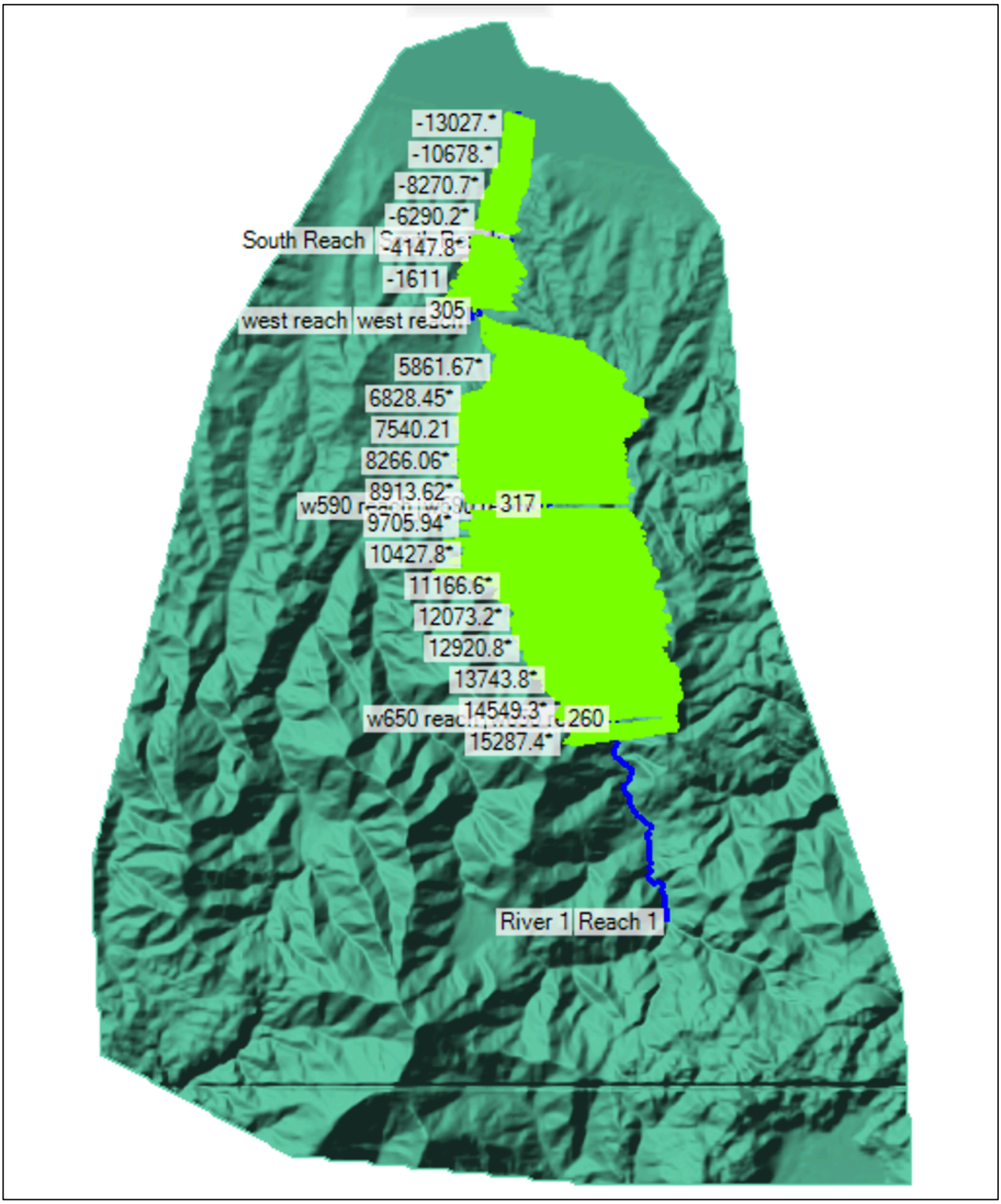
6.2 Ορισμός Project και Επεξεργασία Γεωμετρικού Αρχείου

Ολοκληρώνοντας τη δημιουργία του γεωμετρικού αρχείου στο HEC-GeoRAS, ακολουθεί η κατασκευή του μοντέλου για την υδραυλική προσομοίωση.

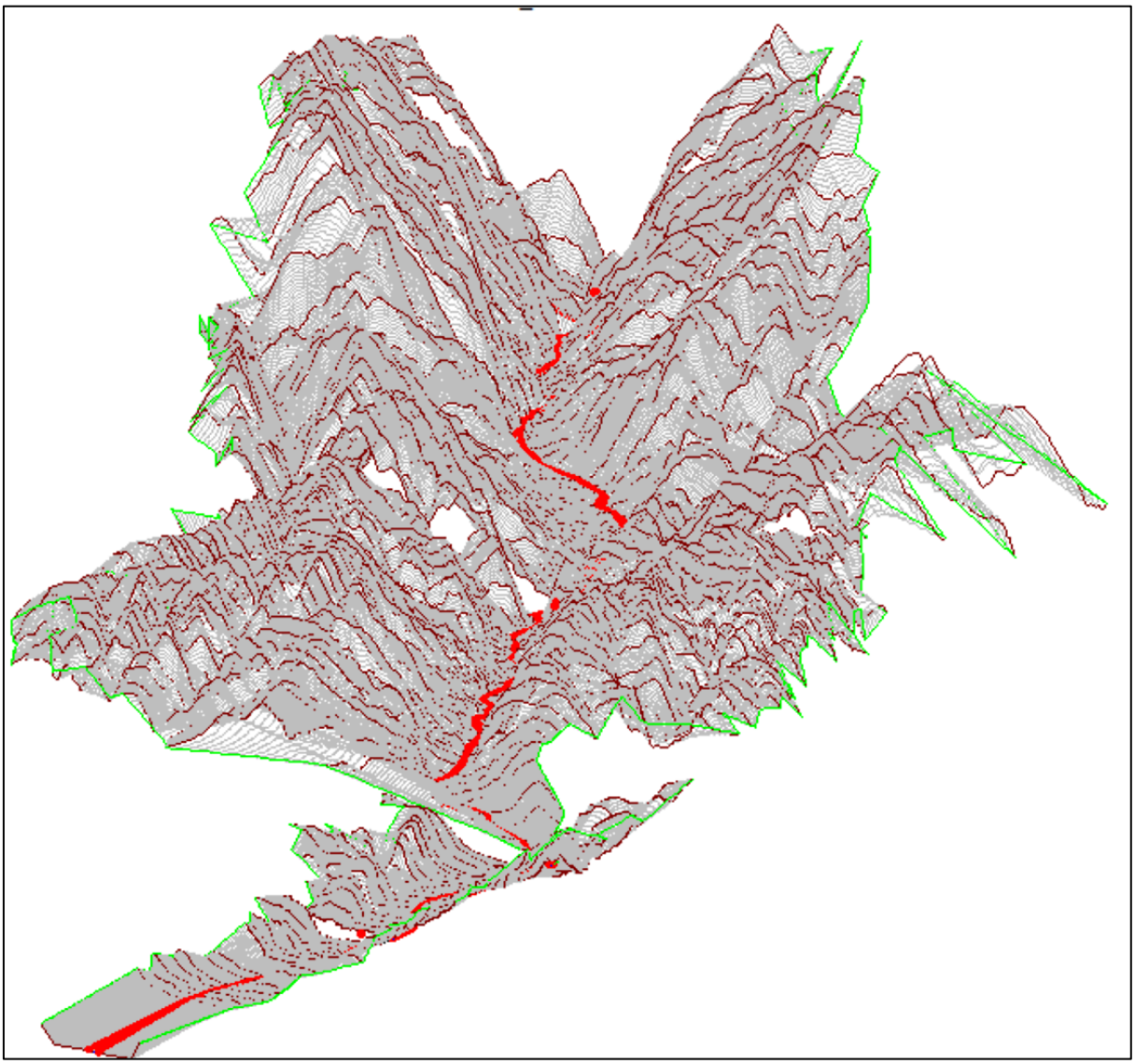
Στο λογισμικό HEC-RAS ορίζεται ένα νέο project και επιλέγεται από το κεντρικό μενού του προγράμματος το μετρητικό σύστημα SI σε ότι αφορά τις μονάδες μέτρησης. Στη συνέχεια, γίνεται η εισαγωγή του αρχείου που δημιουργήθηκε στο HEC-GeoRAS. Στο αρχείο αυτό, ο χρήστης μπορεί να επέμβει στα στοιχεία που έχουν κατασκευαστεί. Σημαντικό στοιχείο είναι οι διατομές οι οποίες δίνουν τη πλήρη εικόνα του σχήματος του πυθμένα του ποταμού. Προκειμένου η προσομοίωση να δώσει όσο το δυνατό πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, χρησιμοποιήθηκε το μενού Edit Cross Section για να οριστούν με ακρίβεια οι όχθες του ποταμού όπως προκύπτουν από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Εικόνα 6.4). Στην περίπτωση της προσομοίωσης μεταφοράς φερτών, που αφορά την παρούσα εργασία, οι όχθες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο, αφού από αυτές ορίζεται η περιοχή αποκόλλησης φερτών.



Εικόνα 6.1: Κόμβοι υδατορευμάτων υπολογιστικού πεδίου υδραυλικών προσομοιώσεων



Εικόνα 6.2: Διατομές υδατορευμάτων υπολογιστικού πεδίου υδραυλικών προσομοιώσεων

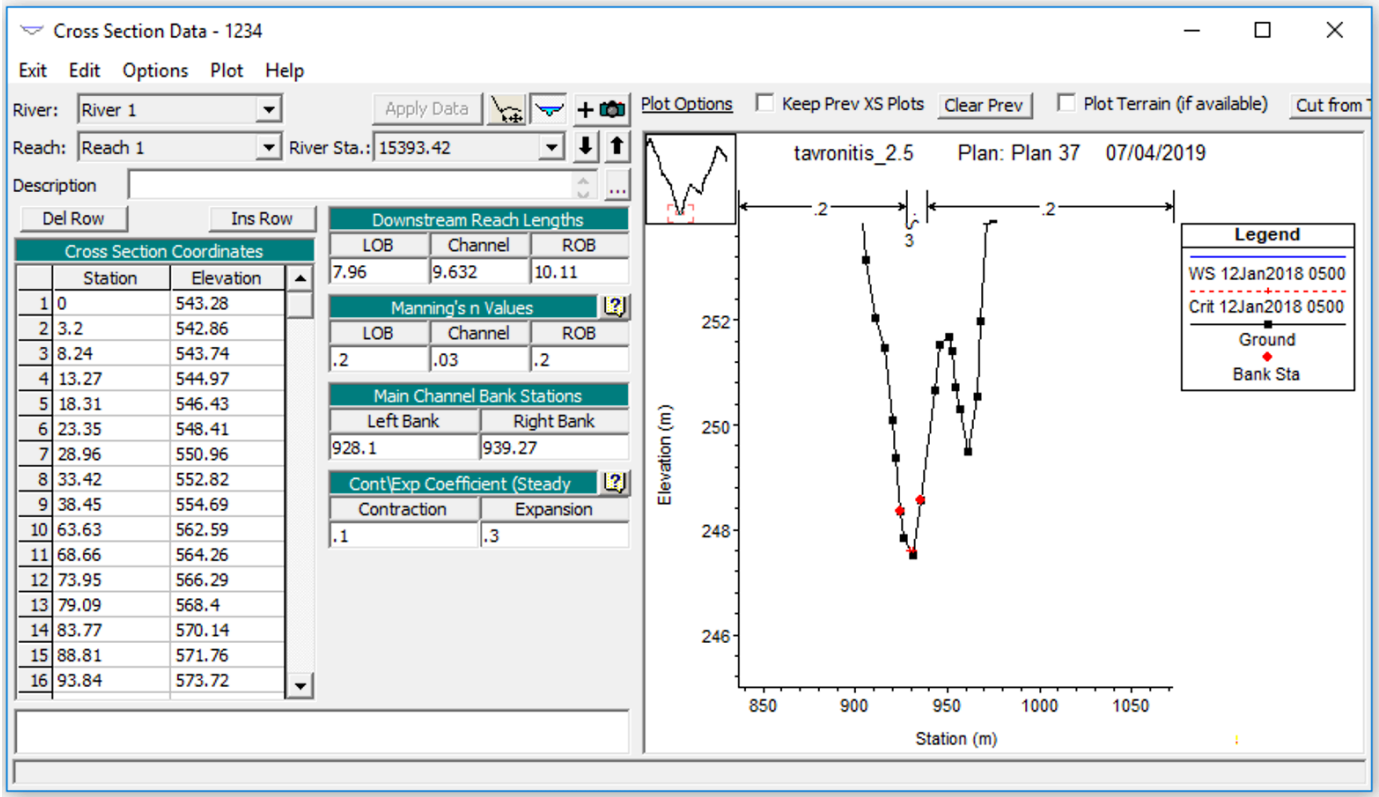


Εικόνα 6.3: Τρισδιάστατη απεικόνιση υπολογιστικού πεδίου

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε για τον πυθμένα του ποταμού να δοθεί σταθερή τιμή του συντελεστή Manning ίση με n=0.03 s/m$^{1/3}$ όπως προκύπτει από τον μέσο όρο των τιμών του πυθμένα.

6.3 Εισαγωγή Υδρολογικών Δεδομένων

Στην περίπτωση που πρόκειται να πραγματοποιηθεί προσομοίωση της μεταφοράς φερτών ενός υδατορεύματος, επιλέγεται το υπο-μοντέλο υδραυλικής προσομοίωσης quassi-unsteady simulation και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα



Εικόνα 6.4: Επεξεργασία διατομών ποταμού

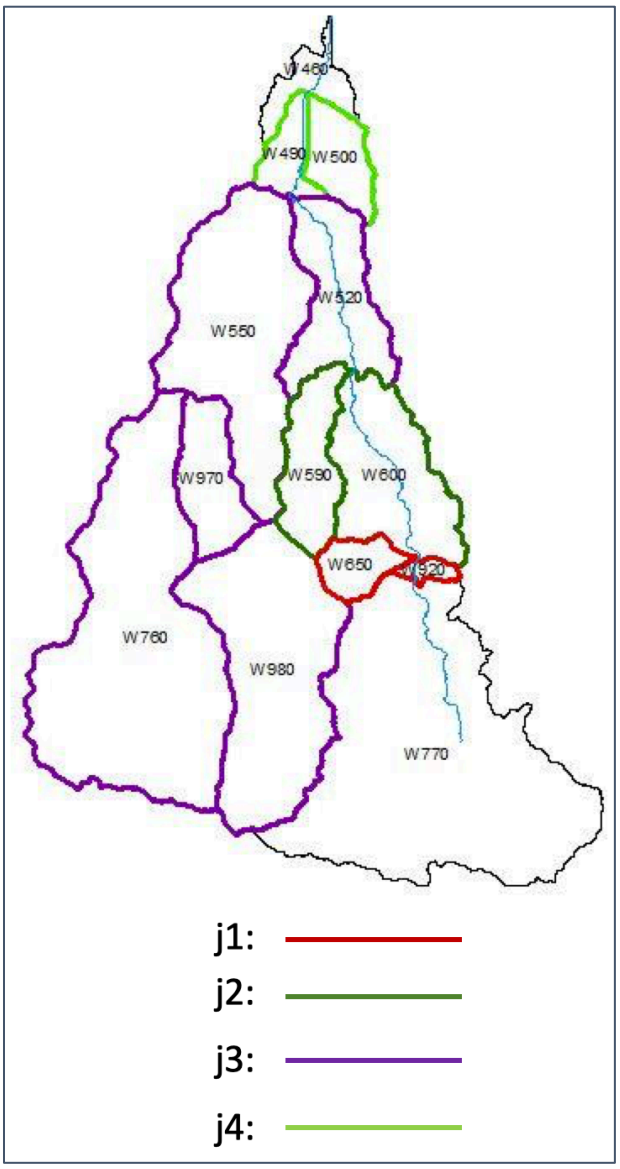
εργασία. Το υπο-μοντέλο, αυτό, λειτουργεί θεωρώντας μόνιμη ροή η οποία μεταβάλλεται ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Μέσω του μενού Edit Quassi Unsteady Data εισάγονται οι οριακές συνθήκες της υδραυλικής προσομοίωσης. Ο χρήστης ανάλογα την περίπτωση και τα διαθέσιμα δεδομένα μπορεί να διαλέξει ανάμεσα σε επτά οριακές συνθήκες:

- Flow series: Πρόκειται για την ανάντη οριακή συνθήκη για την οποία υπάρχουν χρονοσειρές ροής. Ορίζονται η ημερομηνία και ώρα εκκίνησης της χρονοσειράς, το χρονικό βήμα υπολογισμών και η τιμή της απορροής.
- Lateral flow series: Αυτή η οριακή συνθήκη χρησιμοποιείται για την προσθήκη πλευρικών εισροών σε οποιαδήποτε διατομή επιλέξει ο χρήστης. Ακολουθείται παρόμοια διαδικασία με αυτή των απλών χρονοσειρών.
- Uniform Lateral Flow: Σε αυτή την περίπτωση οι οριακές συνθήκες εκφράζουν τις πλευρικές εισροές σε περισσότερες από μια διατομές ταυτόχρονα.

- Gate Time Series: Στην περίπτωση που υπάρχουν κατασκευές με πύλες κατά μήκος του ποταμού, χρησιμοποιείται η οριακή συνθήκη για ελεγχόμενες χρονοσειρές εξόδου.
- Stage Time Series: Χρησιμοποιείται για τις κατάντη οριακές συνθήκες στην περίπτωση που υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για τη στάθμη του ποταμού.
- Rating Curve: Η οριακή συνθήκη προϋποθέτει την εισαγωγή ζευγών τιμών στάθμης-παροχής. Από την καμπύλη αυτή υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή το πιεζομετρικό φορτίο για την αντίστοιχη παροχή.
- Normal Depth: Αποτελεί κατάντη οριακή συνθήκη στην οποία εισάγεται η κλίση της γραμμής ενέργειας με βάση την οποία υπολογίζεται το ομοιόμορφο βάθος με την εξίσωση Manning.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν ως προς τις ανάντη οριακές συνθήκες οι χρονοσειρές. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.1 υπάρχουν πέντε σημεία τα οποία απαιτούν ανάντη συνθήκες. Αυτά είναι το σημείο εκκίνησης του υπολογιστικού πεδίου κατάντη του προτεινόμενου φράγματος και οι τέσσερις παραπόταμοι που ενώνονται στον κεντρικό χείμαρρο. Οι χρονοσειρές που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα υδρογραφήματα εκροής που έχουν προκύψει από την υδρολογική προσομοίωση στο HEC-HMS. Για την οριακή συνθήκη κατάντη του φράγματος χρησιμοποιήθηκε το υδρογράφημα της λεκάνης W770. Για τον παραπόταμο του κόμβου 4 χρησιμοποιήθηκαν τα υδρογραφήματα των υπολεκανών W490 και W500. Επίσης, για τον παραπόταμο που συμβάλει στον κόμβο 3, συμβάλει το ποτάμι που αντιστοιχεί στους παραποτάμους Σεμπρενιώτη και Ρουματιανό και στις κατάντη λεκάνες αυτών. Συνεπώς, η χρονοσειρά που χρησιμοποιήθηκε ως οριακή συνθήκη ήταν το διοδευμένο στην έξοδο της λεκάνης W550 πλημμυρογράφημα συνδυασμένο με το υδρογράφημα εξόδου της λεκάνης W520. Για τον παραπόταμο που συμβάλει στον κόμβο 2 τα υδρογραφήματα W590 και W600 και στον κόμβο 1, τα υδρογραφήματα των υπολεκανών W650 και W920.. Οι υπολεκάνες και τα υδρογραφήματα που αντιστοιχούν σε κάθε κόμβο παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.5.



Εικόνα 6.5: Ορισμός κόμβων υπολογιστικού πεδίου υδραυλικών προσομοιώσεων

Δημιουργήθηκαν έξι αρχεία quassi unsteady data για κάθε μια από τις επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς. Κάθε αρχείο περιλαμβάνει τα αντίστοιχα υδρογραφήματα που προέκυψαν από την υδρολογική μελέτη.

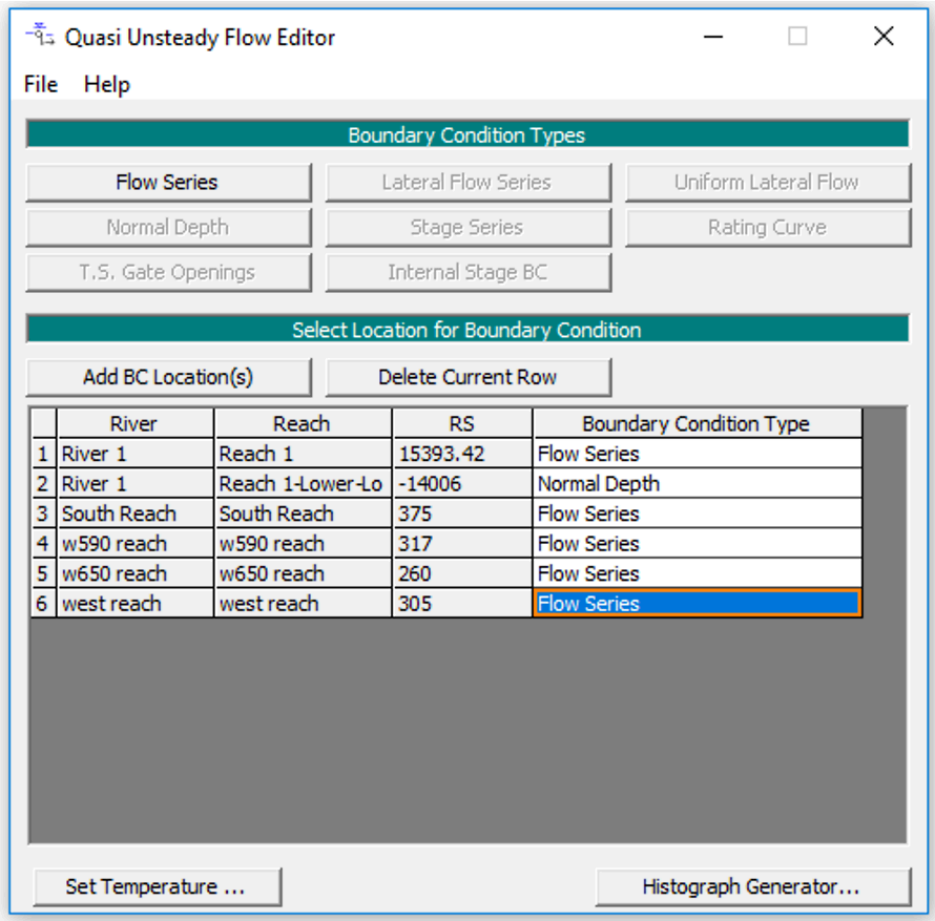
Ακόμη, δημιουργήθηκαν επιπλέον έξι αρχεία quassi unsteady data για τις προσομοιώσεις στις οποίες γίνεται η παραδοχή ότι υπάρχει το φράγμα Παπαδιανών. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει διαφοροποίηση στην ανάντη οριακή συνθήκη στο κυρίως υδατόρευμα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται για κάθε περίοδο

επαναφοράς τα υδρογραφήματα εκροής του υπερχειλιστή όπως έχουν διοδευθεί μέσω του ταμιευτήρα από τις υδρολογικές προσομοιώσεις του HEC-HMS.

Για τις κατάντη οριακές συνθήκες λόγω έλλειψης παρατηρημένων δεδομένων στην έξοδο της λεκάνης χρησιμοποιήθηκε το ομοιόμορφο βάθος. Γενικά, η κλίση της γραμμής ενέργειας προσδιορίζεται κατά προσέγγιση ως η μέση κλίση της κύριας κοίτης του υδατορεύματος. Έτσι, όπως προέκυψε από την επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους δόθηκε η τιμή 0.02.

Τέλος, ένα ακόμη δεδομένο για τις υδραυλικές προσομοιώσεις με τη μέθοδο quassi-unsteady data είναι η θερμοκρασία της περιοχής κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η τιμή των 13° C.

Στην παρακάτω Εικόνα 6.6 παρουσιάζεται το μενού των οριακών συνθηκών για quassi-unsteady simulation του μοντέλου HEC-RAS.



Εικόνα 6.6: Οριακές συνθήκες Quassi-Unsteady Simulation

6.4 Εισαγωγή Δεδομένων Στερεομεταφοράς

Η εισαγωγή των παραμέτρων και των δεδομένων που αφορούν την προσομοίωση μεταφοράς ιζημάτων πραγματοποιείται στην καρτέλα Sediment Data (Εικόνα 6.7).

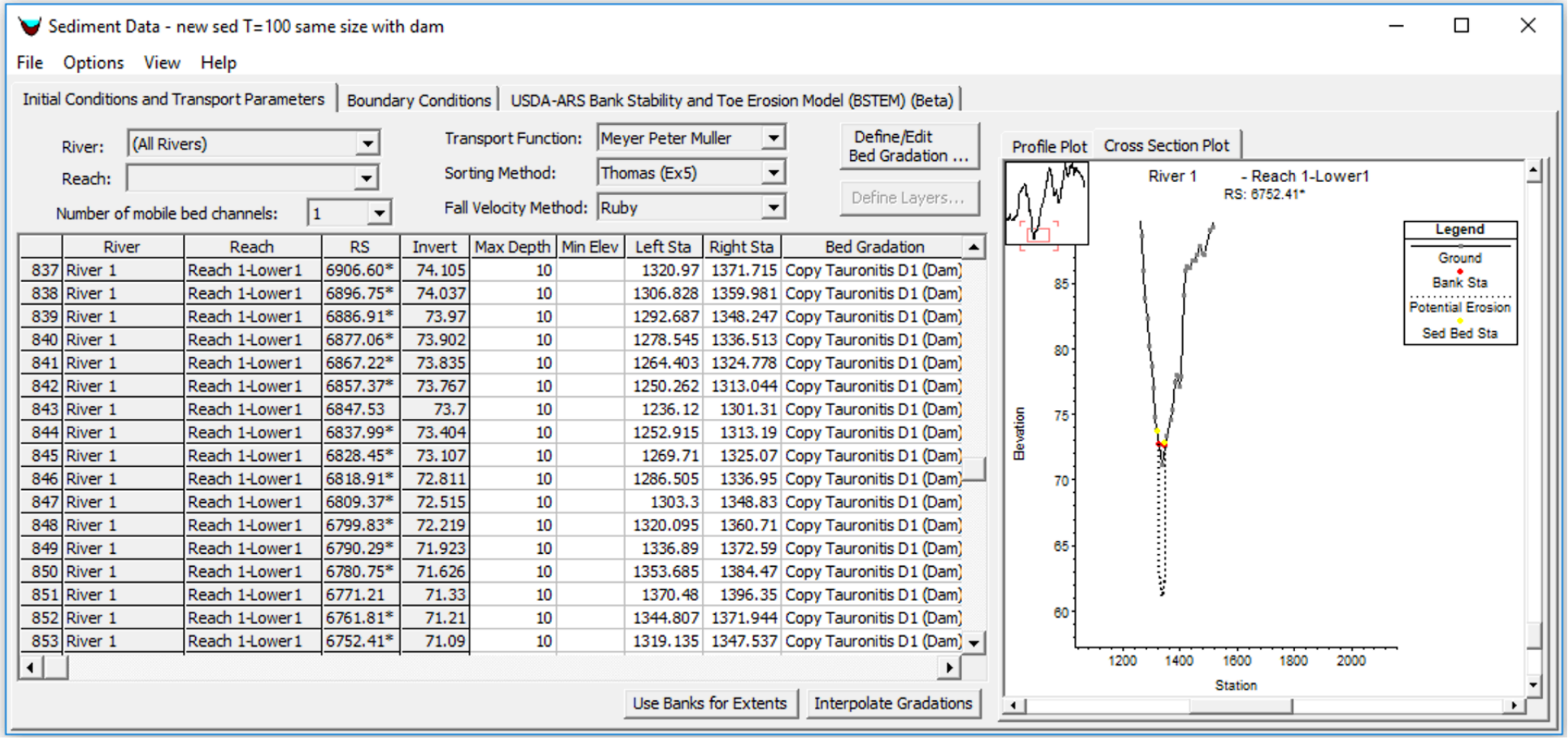
6.4.1 Επιλογή εξισώσεων στερεομεταφοράς

Αρχικά, επιλέγονται οι εξισώσεις στερεομεταφοράς και ταχύτητας καθίζησης. Στην εργασία αυτή, η εξίσωση στερεομεταφοράς που επιλέχθηκε ήταν η Meyer Peter Muller (Meyer-Peter & Muller, 1948) καθώς είναι από τις πιο αποτελεσματικές, ευρέως διαδεδομένες και ανταποκρίνεται πολύ ικανοποιητικά για χαλικώδη υλικά. Σε ότι αφορά την ταχύτητα καθίζησης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Rubey (Rubey, 1933).

6.4.2 Ιδιότητες διατομών

Οι επόμενες παράμετροι που πρέπει να οριστούν αφορούν τις διατομές του ποταμού. Αρχικά, επιλέγεται το μέγιστο βάθος από το οποίο μπορεί να προκύψει αποκόλληση ιζημάτων. Η τιμή που χρησιμοποιήθηκε ήταν τα 10 m με στόχο να μην περιοριστεί η δυνατότητα αποκόλλησης του πλημμυρικού κύματος. Ακόμα, επιλέγεται το πλάτος της περιοχής αποκόλλησης και εναπόθεσης ιζημάτων, το οποίο λήφθηκε ίσο με το πλάτος του πυθμένα από την αριστερή στη δεξιά όχθη. Σχετικά, με την εναπόθεση των ιζημάτων, το HEC-RAS δίνει τη δυνατότητα, τα παραπάνω όρια να είναι μεταβλητά. Συγκεκριμένα, από το μενού Bed Change Options χρησιμοποιήθηκε η επιλογή Allow deposition outside of the movable bed limits. Με την επιλογή αυτή αποτρέπεται η φραγή των διατομών από τα μεταφερόμενα ιζήματα επιτρέποντας, με αυτό τον τρόπο, το νερό να περνάει.

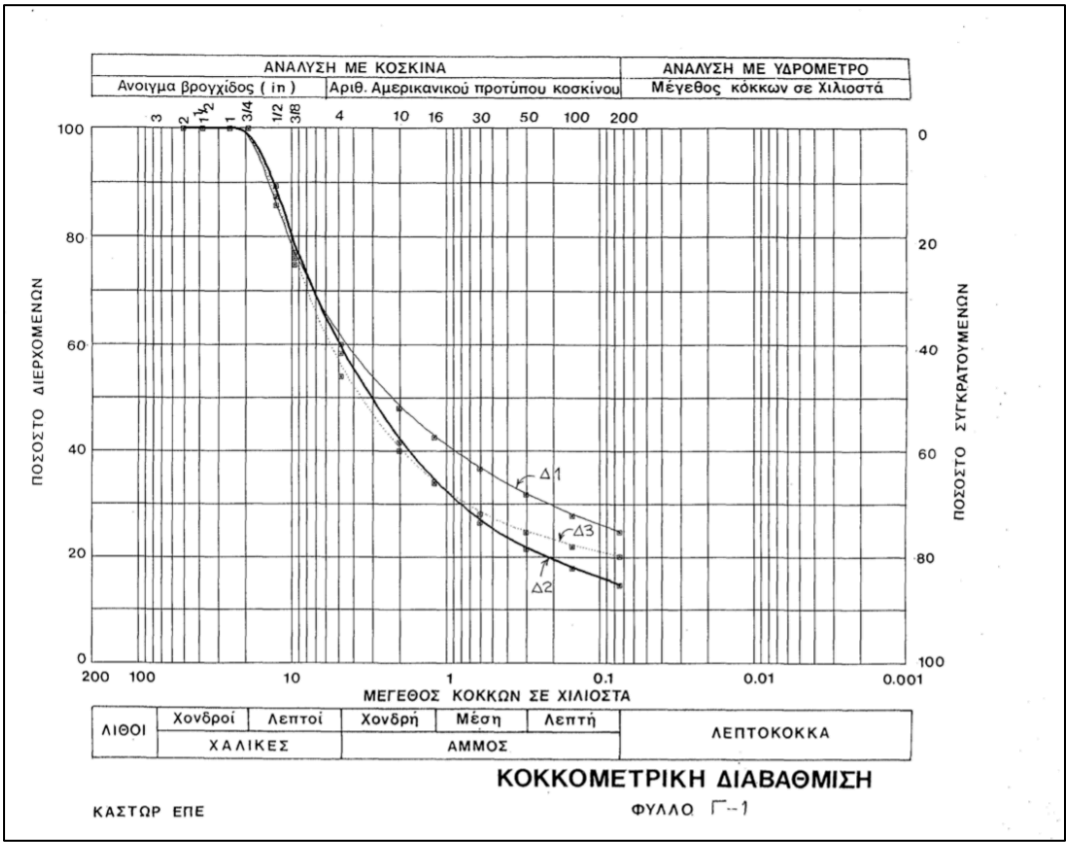
Για κάθε διατομή ορίζεται μια κοκκομετρική καμπύλη του υλικού πυθμένα. Οι κοκκομετρικές καμπύλες ορίζονται στο μενού Define/Edit Bed Gradation και υπάρχει δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές καμπύλες σε κάθε διατομή. Στην εργασία αυτή, αρχικά, χρησιμοποιήθηκε η ίδια κοκκομετρική καμπύλη πυθμενικού υλικού. Η καμπύλη προέκυψε από δειγματοληψία κόκκων στη προτεινόμενη θέση



	River	Reach	RS	Invert	Max Depth	Min Elev	Left Sta	Right Sta	Bed Gradation
837	River 1	Reach 1-Lower1	6906.60*	74.105	10		1320.97	1371.715	Copy Tauronitis D1 (Dam)
838	River 1	Reach 1-Lower1	6896.75*	74.037	10		1306.828	1359.981	Copy Tauronitis D1 (Dam)
839	River 1	Reach 1-Lower1	6886.91*	73.97	10		1292.687	1348.247	Copy Tauronitis D1 (Dam)
840	River 1	Reach 1-Lower1	6877.06*	73.902	10		1278.545	1336.513	Copy Tauronitis D1 (Dam)
841	River 1	Reach 1-Lower1	6867.22*	73.835	10		1264.403	1324.778	Copy Tauronitis D1 (Dam)
842	River 1	Reach 1-Lower1	6857.37*	73.767	10		1250.262	1313.044	Copy Tauronitis D1 (Dam)
843	River 1	Reach 1-Lower1	6847.53	73.7	10		1236.12	1301.31	Copy Tauronitis D1 (Dam)
844	River 1	Reach 1-Lower1	6837.99*	73.404	10		1252.915	1313.19	Copy Tauronitis D1 (Dam)
845	River 1	Reach 1-Lower1	6828.45*	73.107	10		1269.71	1325.07	Copy Tauronitis D1 (Dam)
846	River 1	Reach 1-Lower1	6818.91*	72.811	10		1286.505	1336.95	Copy Tauronitis D1 (Dam)
847	River 1	Reach 1-Lower1	6809.37*	72.515	10		1303.3	1348.83	Copy Tauronitis D1 (Dam)
848	River 1	Reach 1-Lower1	6799.83*	72.219	10		1320.095	1360.71	Copy Tauronitis D1 (Dam)
849	River 1	Reach 1-Lower1	6790.29*	71.923	10		1336.89	1372.59	Copy Tauronitis D1 (Dam)
850	River 1	Reach 1-Lower1	6780.75*	71.626	10		1353.685	1384.47	Copy Tauronitis D1 (Dam)
851	River 1	Reach 1-Lower1	6771.21	71.33	10		1370.48	1396.35	Copy Tauronitis D1 (Dam)
852	River 1	Reach 1-Lower1	6761.81*	71.21	10		1344.807	1371.944	Copy Tauronitis D1 (Dam)
853	River 1	Reach 1-Lower1	6752.41*	71.09	10		1319.135	1347.537	Copy Tauronitis D1 (Dam)

Εικόνα 6.7: Μενού εισαγωγής δεδομένων στερεομεταφοράς

του φράγματος Παπαδιανών που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της αρχικής μελέτης του φράγματος το 1992 (ΥΔΡΟ-ΣΥΣΤΗΜΑ, 1992). Η κοκκομετρική καμπύλη παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.8 και συμβολίζεται με τον κωδικό Δ1.



Εικόνα 6.8: Κοκκομετρική διαβάθμιση πυθμένα χειμάρρου Ντεριανού

6.4.3 Οριακές συνθήκες

Όπως και στα υδρολογικά δεδομένα, απαιτούνται οριακές συνθήκες για τη μεταφορά των ιζημάτων. Στο HEC-RAS υπάρχουν τρία κύρια διαθέσιμα είδη οριακών συνθηκών.

- Equilibrium Load: αποτελεί μια ανάντη οριακή συνθήκη στην οποία η ποσότητα ιζημάτων υπολογίζεται από το υλικό του πυθμένα και την μεταφορική ικανότητα του υδατορεύματος.
- Rating Curve: η οριακή συνθήκη προϋποθέτει την εισαγωγή ζευγών τιμών στάθμης-στερεομεταφοράς. Από την καμπύλη αυτή υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή η παροχή ιζημάτων για κάθε προσομοιωμένη παροχή

- Sediment Load Series: αφορά την οριακή συνθήκη στην οποία εισάγονται χρονοσειρές παροχής ιζημάτων.

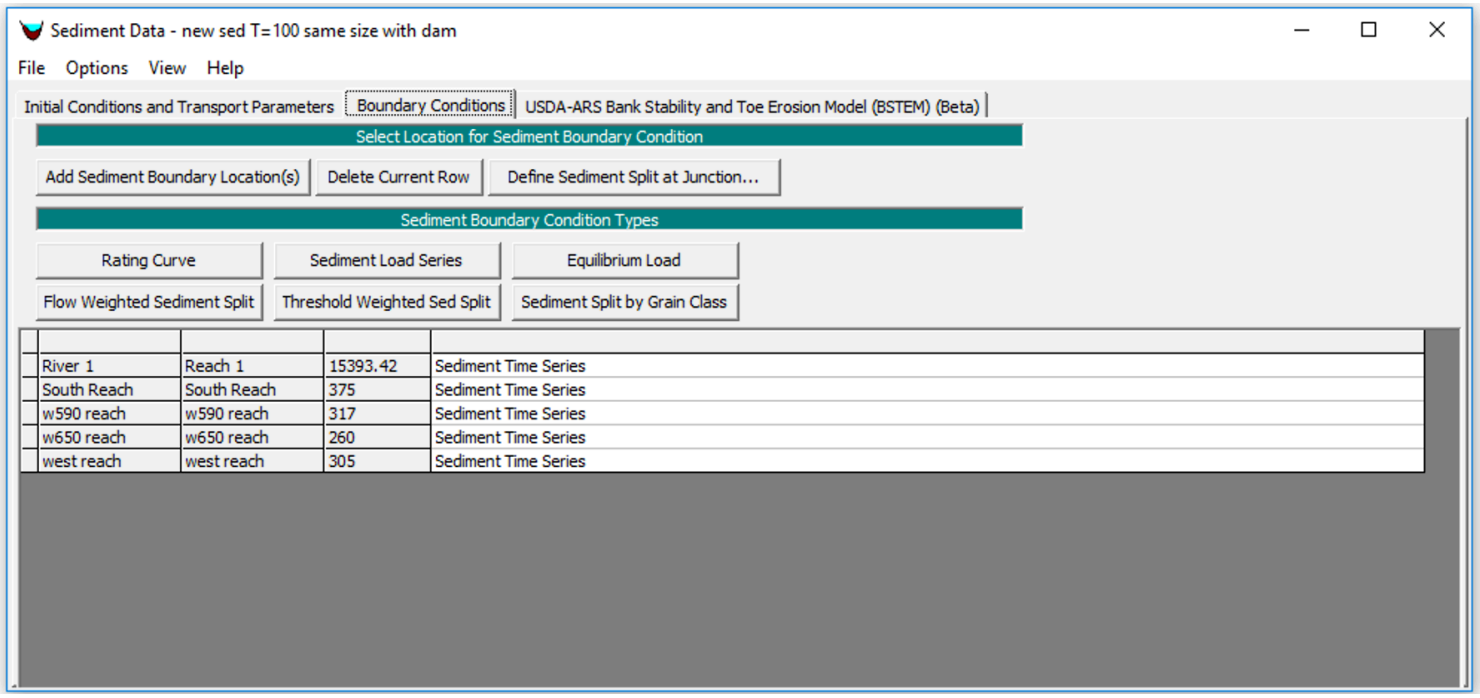
Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η οριακή συνθήκη Sediment Load Series. Οι χρονοσειρές φερτών που χρησιμοποιήθηκαν προκύπτουν από τις υδρολογικές προσομοιώσεις με το μοντέλο HEC-HMS. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της μεθόδου MUSLE. Η κατανομή της συνολικής ποσότητας ιζημάτων στο χρόνο προκύπτει ανάλογη με την απορροή της κάθε λεκάνης. Τα σημεία στα οποία χρησιμοποιήθηκαν οριακές συνθήκες ήταν τα ίδια με αυτά των υδρολογικών δεδομένων και οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν είναι ανάλογοι με αυτούς που περιγράφονται στην Εικόνα 6.5. Στην περίπτωση του κόμβου 1 όπου αποτελεί τη συμβολή των παραποτάμων Ρουματιανού και Σεμπρενιώτη, χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά ιζημάτων όπως αυτά διοδεύτηκαν στην έξοδο της λεκάνης W550. Στην Εικόνα 6.9 φαίνεται το μενού εισαγωγής των οριακών συνθηκών δεδομένων ιζηματομεταφοράς του HEC-RAS.

Στις προσομοιώσεις όπου γίνεται η παραδοχή ότι υπάρχει το φράγμα Παπαδιανών αλλάζει η οριακή συνθήκη του κυρίου υδατορεύματος. Συγκεκριμένα, καθώς ο ταμιευτήρας λειτουργεί ως «παγίδα ιζήματος» εισάγεται χρονοσειρά ιζημάτων με τη τιμή 0 για όλα τα χρονικά βήματα.

Τελικά, δημιουργήθηκαν δώδεκα αρχεία δεδομένων ιζημάτων. Τα έξι πρώτα αφορούν τις προσομοιώσεις χωρίς το φράγμα για τις επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 χρόνων. Τα υπόλοιπα έξι περιλαμβάνουν τις οριακές συνθήκες με την παραδοχή ότι υπάρχει φράγμα.

6.5 Εκτέλεση Προσομοιώσεων Μεταφοράς Φερτών

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία εισαγωγής και επεξεργασίας των παραμέτρων, πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις ανάλυσης μεταφοράς ιζημάτων. Μέσω του μενού Sediment Transport Analysis επιλέγονται το γεωμετρικό αρχείο, το αρχείο υδρολογικών δεδομένων Quassi Unsteady Flow και το αρχείο δεδομένων ιζημάτων.

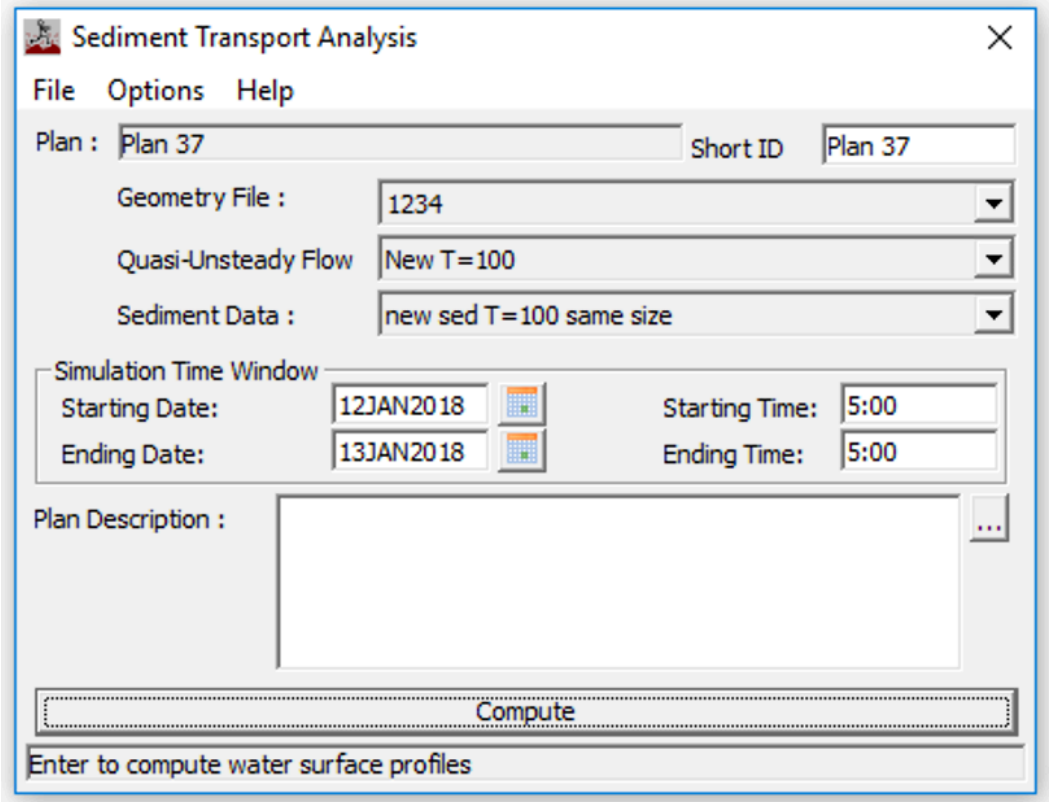


Εικόνα 6.9: Μενού οριακών συνθηκών στερεομεταφοράς

Επιπλέον, ορίζεται η χρονική περίοδος των προσομοιώσεων. Στην εργασία αυτή η χρονική διάρκεια ορίστηκε ίση με 24 ώρες με χρονικό βήμα υπολογισμών τα 15 λεπτά, έτσι ώστε να συμπίπτει με τα δεδομένα εισόδου από την υδρολογική προσομοίωση. Στην Εικόνα 6.10 παρουσιάζεται η καρτέλα προσομοίωσης της στερεομεταφοράς.

Συνολικά εκτελέστηκαν δώδεκα προσομοιώσεις οι οποίες ανταποκρίνονται στα δυο σενάρια. Οι έξι πρώτες αφορούν το σενάριο χωρίς το φράγμα με τα υδρογραφήματα περιόδων επαναφοράς 2, 5, 10, 25, 50 και 100 χρόνων. Οι υπόλοιπες έξι αφορούν προσομοιώσεις με υδρογραφήματα των ίδιων περιόδων επαναφοράς με την παραδοχή ότι υπάρχει φράγμα.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μεταφοράς ιζημάτων του ποταμού δίνονται είτε για κάθε διατομή, είτε κατά μήκος της μηκοτομής του ποταμού. Ακόμη, είναι διαθέσιμα τόσο σε γραφική μορφή, όσο και σε πίνακες.



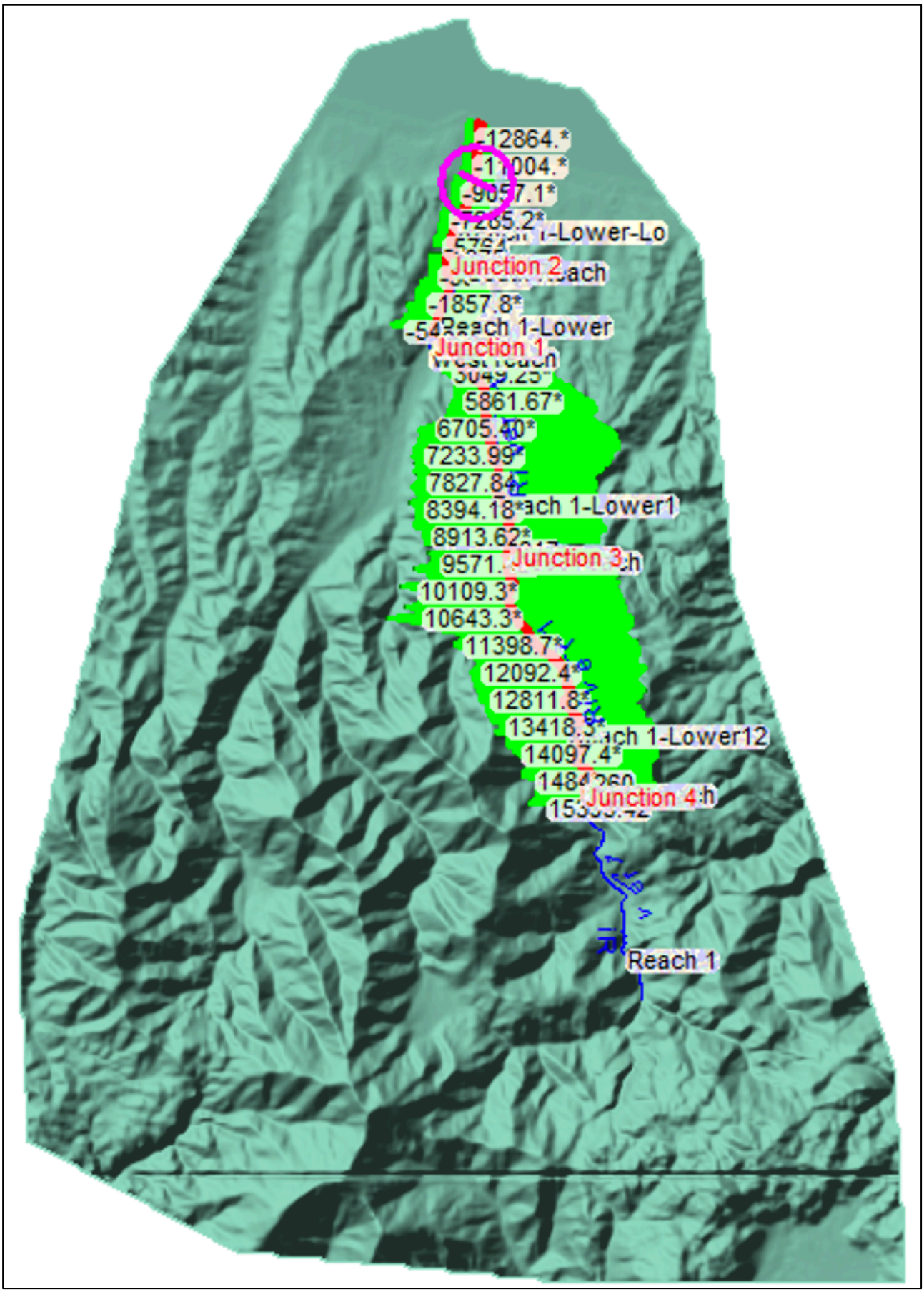
Εικόνα 6.10: Μενού ανάλυσης μεταφοράς ιζημάτων του HEC-RAS

Στην εργασία αυτή ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην ποσότητα ιζημάτων που μεταφέρονται στην παράκτια ζώνη. Συνεπώς, το μέγεθος που εξετάζεται είναι η συνολική ποσότητα ιζημάτων που καταλήγουν σε μια αντιπροσωπευτική διατομή της παράκτιας περιοχής, την XS: -10287 (Εικόνα 6.11).

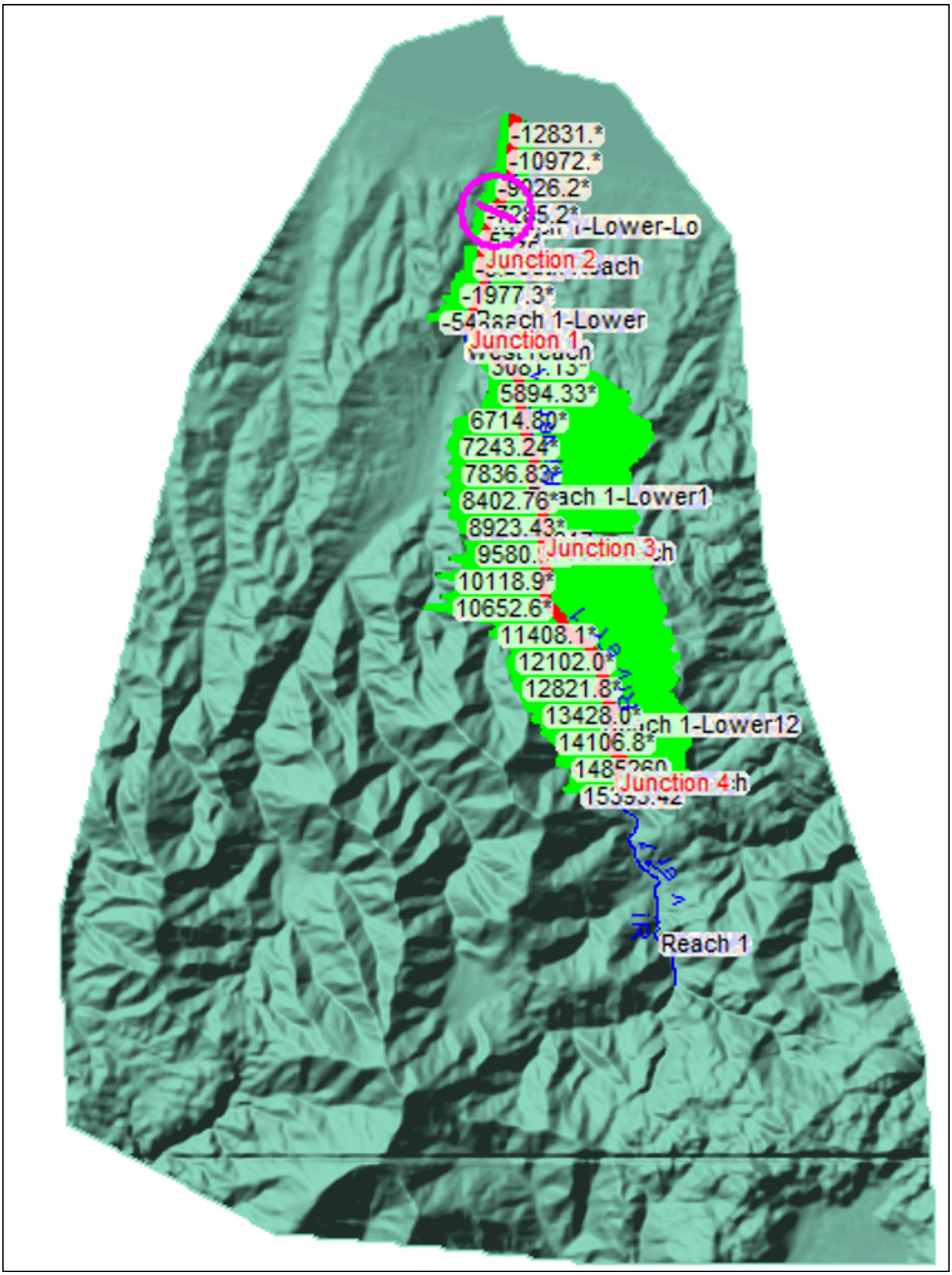
Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δώδεκα προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν. Ακόμη, παρουσιάζεται ο συνολικός όγκος απορροής και η ποσοστιαία μεταβολή αυτού και της συνολικής ποσότητας ιζημάτων που μεταφέρονται στη διατομή -10287.

Επιπλέον, παρουσιάζεται η επίπτωση της μεταφοράς ιζημάτων, όπου οι διεργασίες αποκόλλησης και εναπόθεσης έχουν μεταβάλλει το σχήμα της κοίτης του ποταμού. Τα σημεία που γίνεται ο εν λόγω έλεγχος είναι δυο διατομές στις οποίες υπάρχουν γέφυρες και υπάρχει κίνδυνος υποσκαφής των θεμελίων. Η πρώτη διατομή είναι η -7719 που βρίσκεται περίπου στο σημείο που διέρχεται η Εθνική Οδός (Εικόνα 6.12). Η δεύτερη διατομή ελέγχου είναι η 952.49 στην οποία υπάρχει μια γέφυρα που

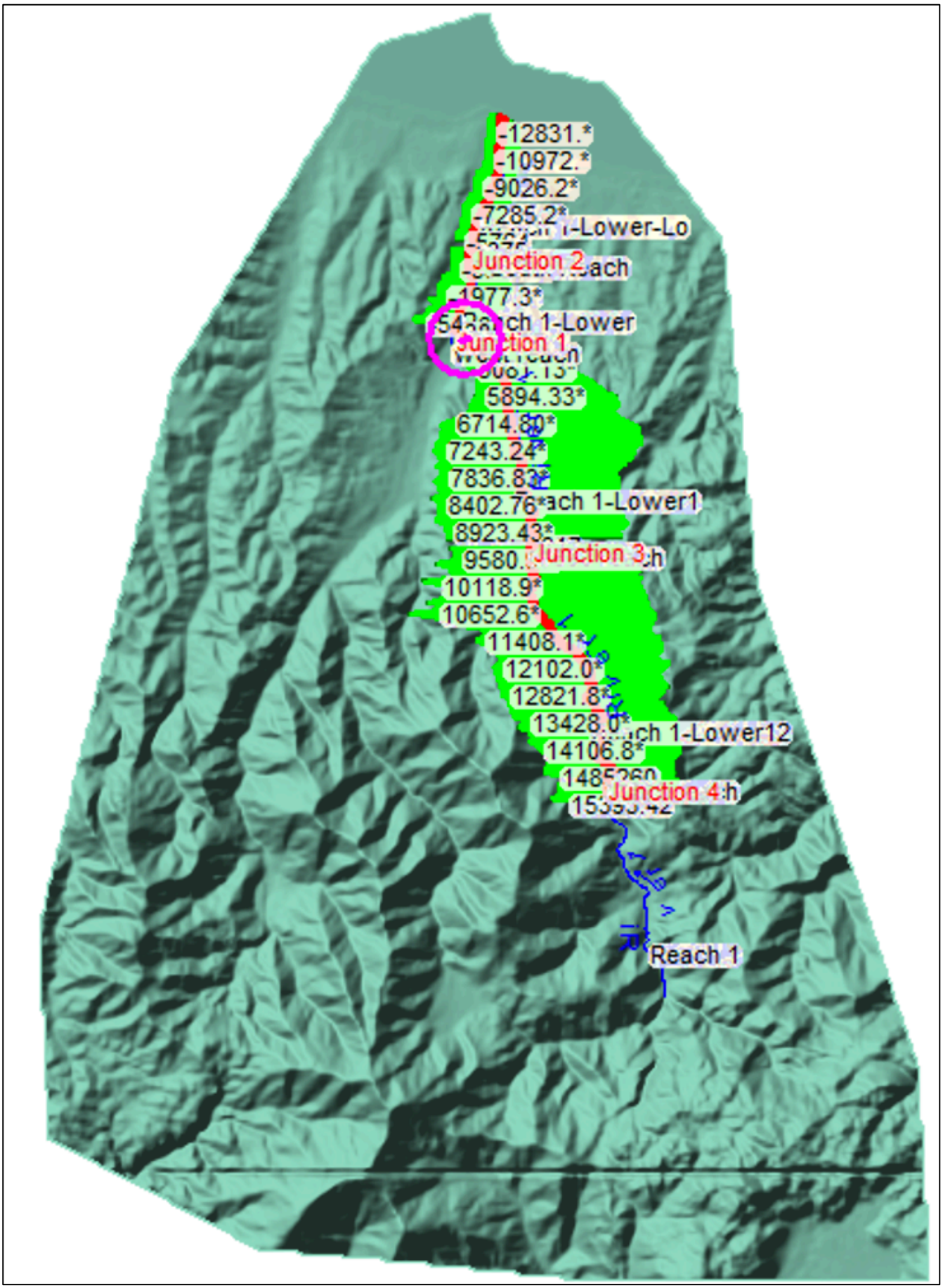
ενώνει το χωριό Συρίλι με το χωριό Μετόχι (Εικόνα 6.13). Στις Εικόνες 6.14 έως 6.17 παρουσιάζεται η μεταβολή του πυθμένα μετά τις προσομοιώσεις. Επίσης, στην Εικόνα 6.18 και 6.19 παρουσιάζονται τα υδρογραφήματα και τα γραφήματα μεταφοράς φερτών για τις προσομοιώσεις με και χωρίς φράγμα αντίστοιχα.



Εικόνα 6.11: Διατομή ελέγχου αποτελεσμάτων



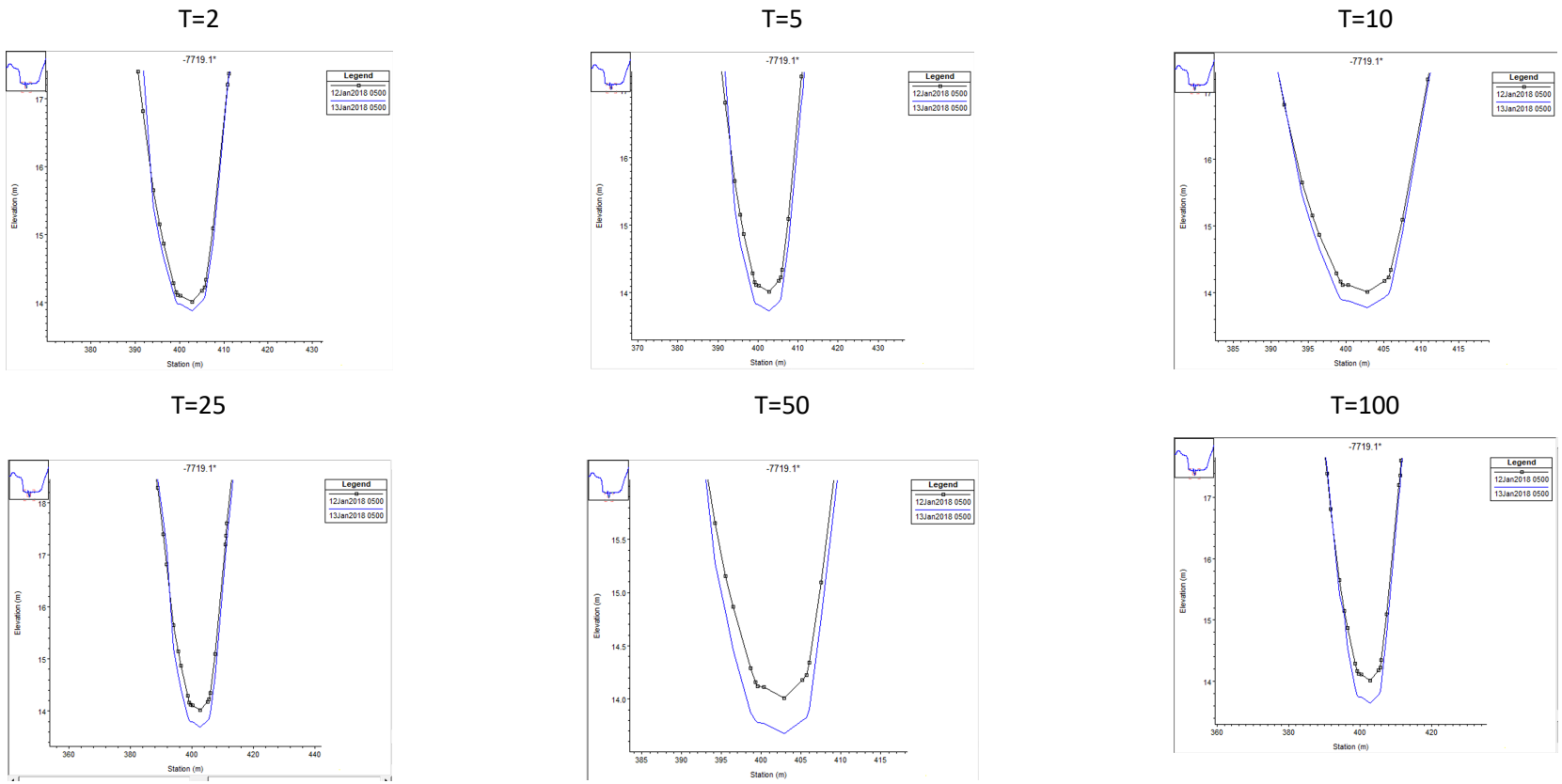
Εικόνα 6.12: Διατομές ελέγχου μεταβολής γεωμετρίας κοίτης ποταμού -7719.1



Εικόνα 6.13: Διατομές ελέγχου μεταβολής γεωμετρίας κοίτης ποταμού 952.49

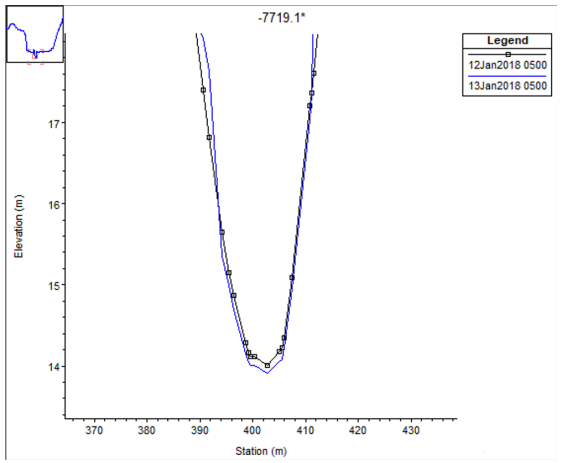
Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης μεταφοράς ιζημάτων

Σενάριο	T=2		T=5		T=10		T=25		T=50		T=100	
	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)
NO DAM	3886.62	4440.97	6579.74	6775.74	8702.27	8066.18	11762.85	10183.67	14309.35	12120.99	17074.09	14511.82
DAM	3885.40	4818.13	6578.08	6874.35	8700.56	8486.90	11761.01	10455.13	14307.32	11967.00	17071.84	13836.11
%	-0.03	7.83	-0.03	1.43	-0.02	4.96	-0.02	2.60	-0.01	-1.29	-0.01	-4.88

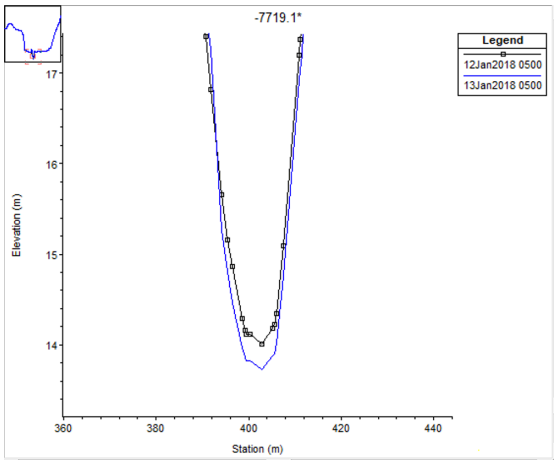


Εικόνα 6.14: Μεταβολή της κοίτης του ποταμού στη διατομή -7719 χωρίς την ύπαρξη φράγματος

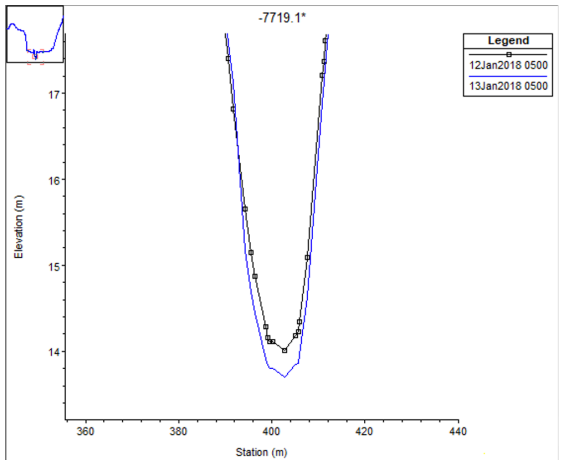
T=2



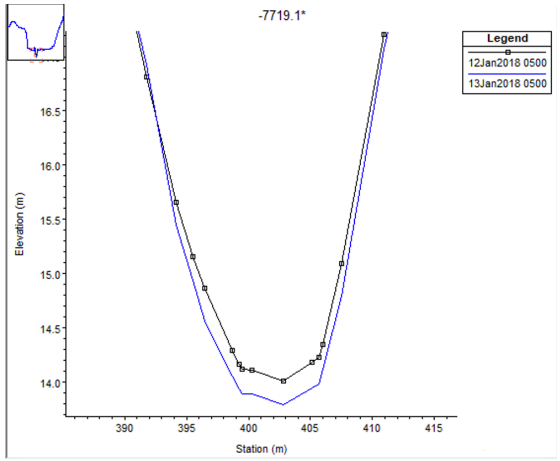
T=5



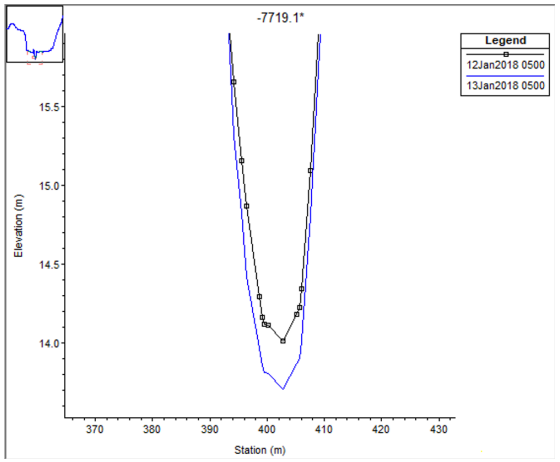
T=10



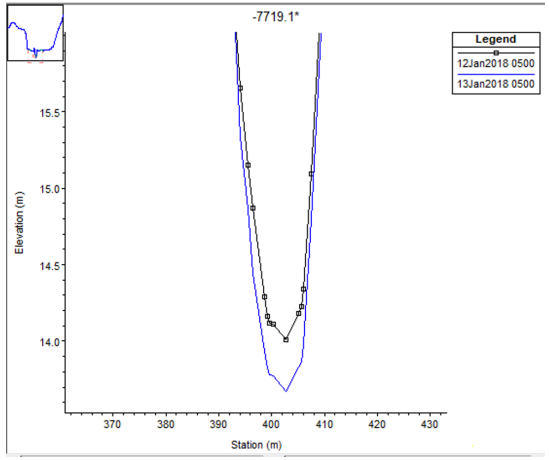
T=25



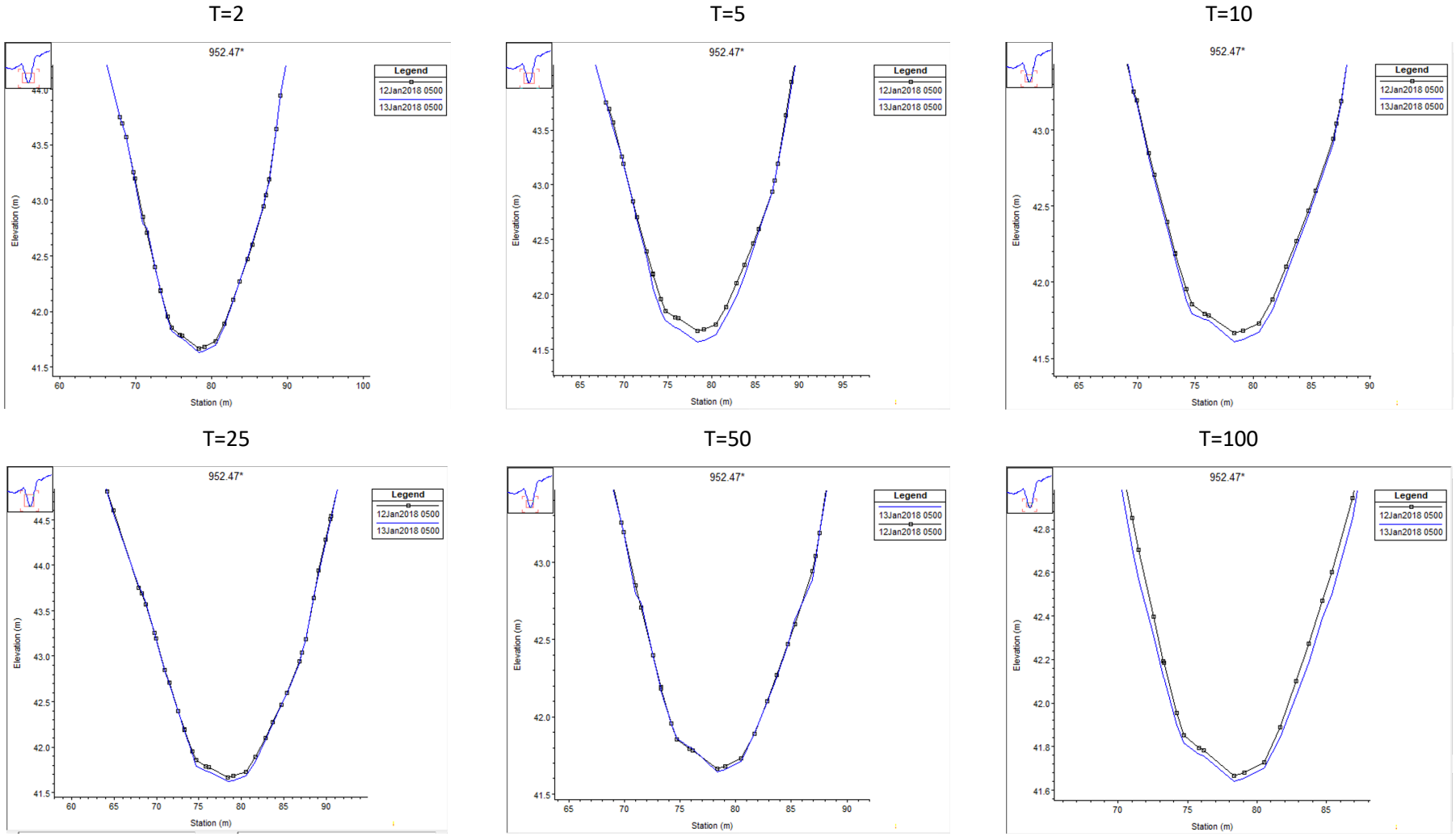
T=50



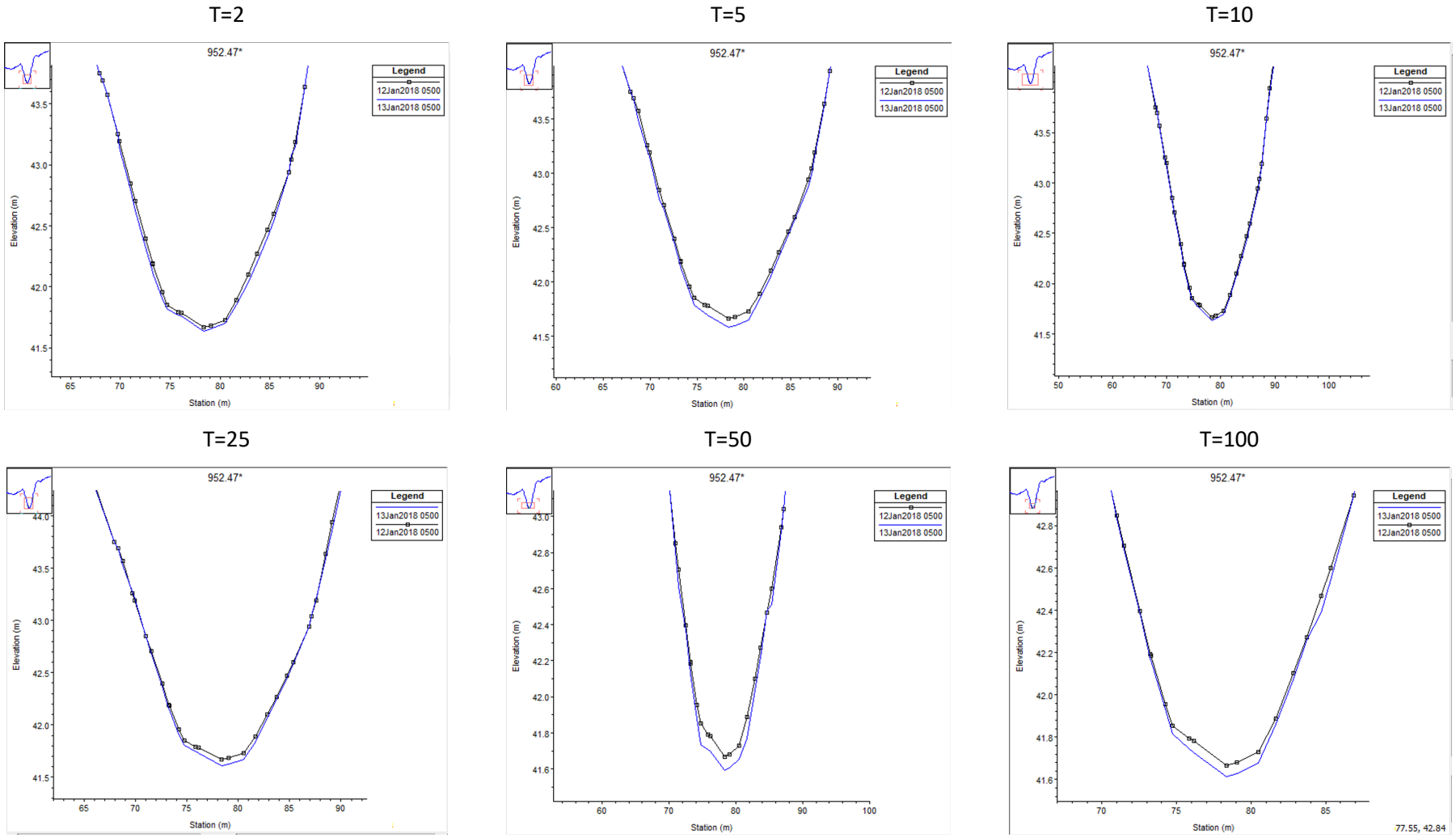
T=100



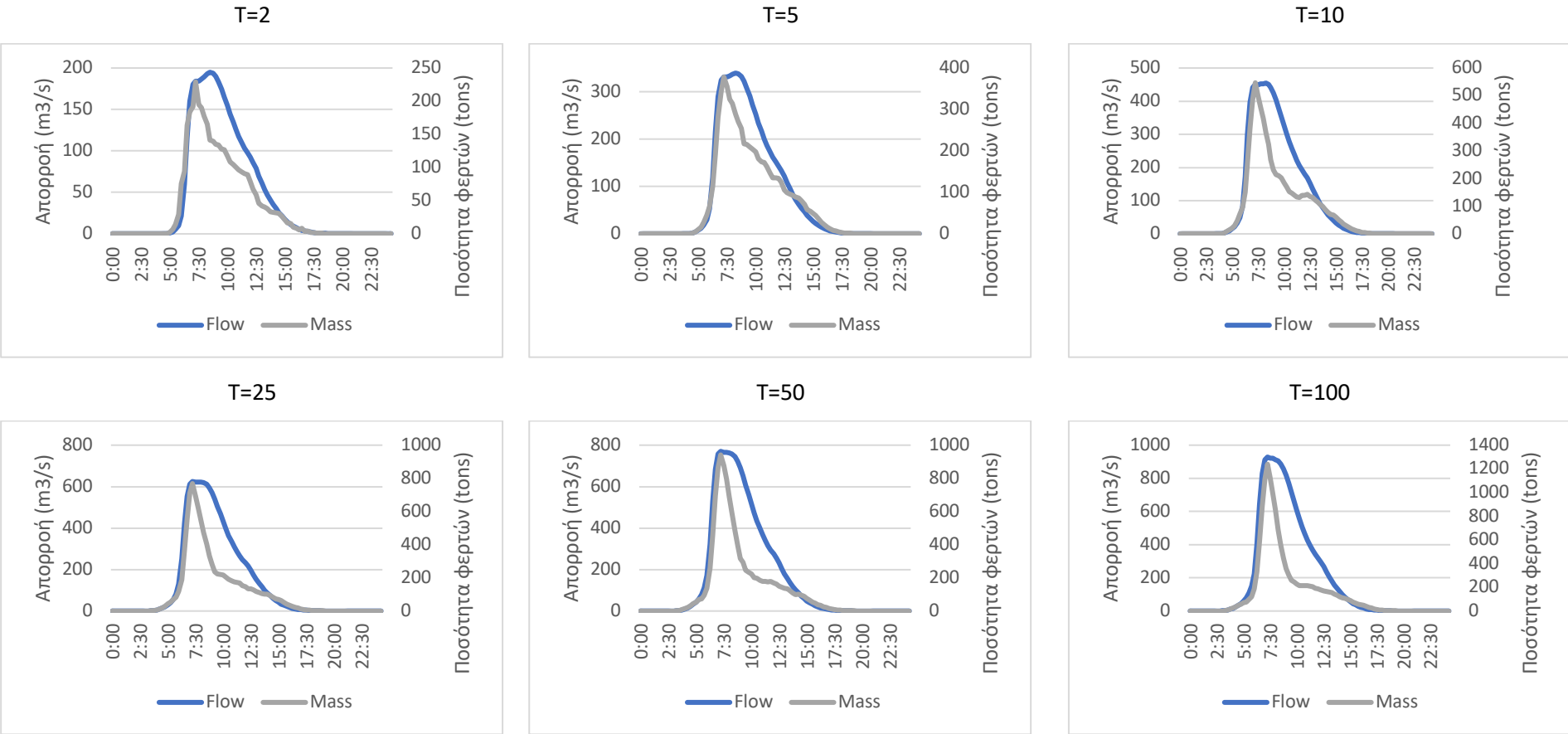
Εικόνα 6.15: Μεταβολή της κοίτης του ποταμού στη διατομή -7719 με την ύπαρξη φράγματος



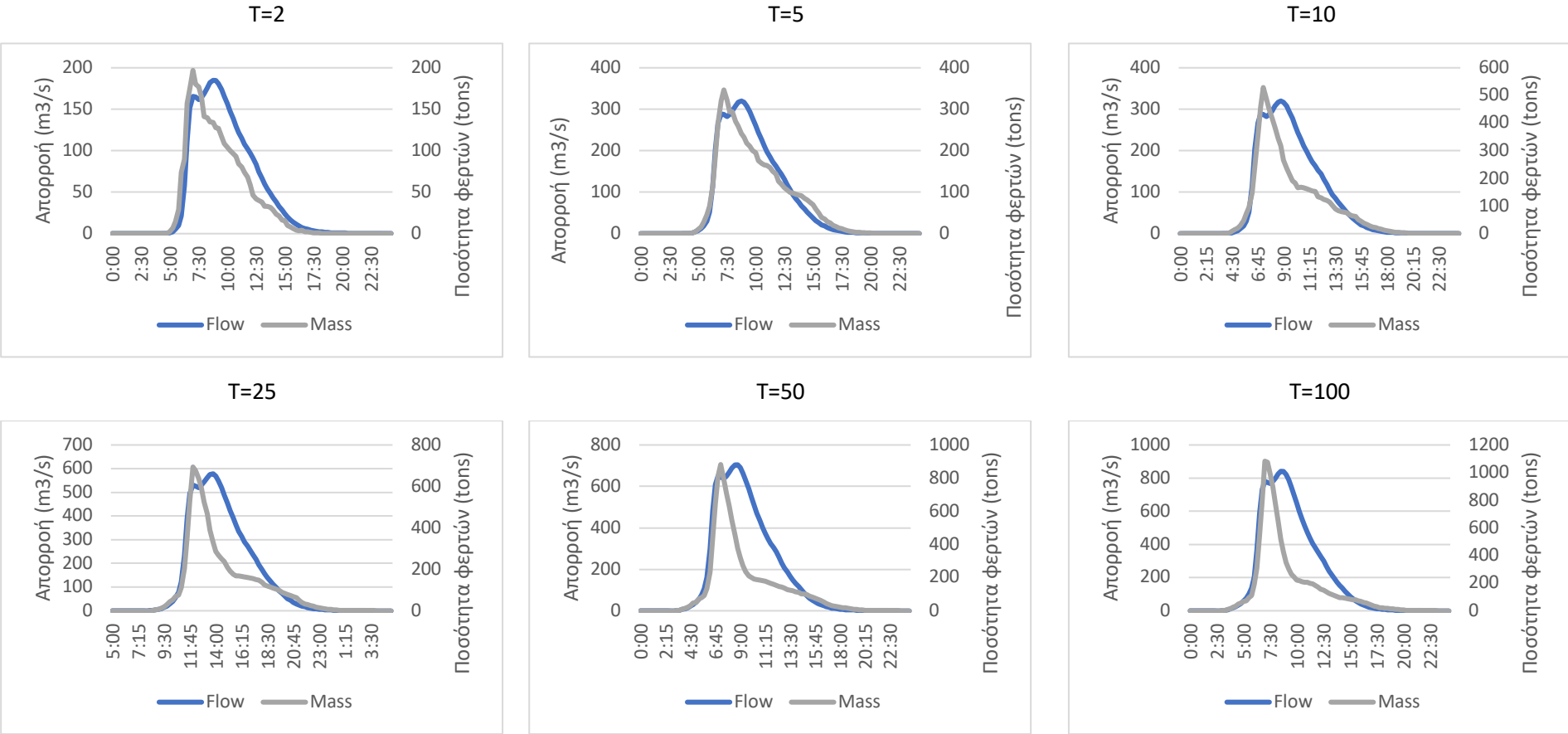
Εικόνα 6.16: Μεταβολή της κοίτης του ποταμού στη διατομή 952.49 χωρίς την ύπαρξη φράγματος



Εικόνα 6.17: Μεταβολή της κοίτης του ποταμού στη διατομή 952.49 με την ύπαρξη φράγματος



Εικόνα 6.18: Υδρογραφήματα και γραφήματα μεταφοράς φερτών στη διατομή XS:-10287 χωρίς την ύπαρξη φράγματος



Εικόνα 6.19: Υδρογραφήματα και γραφήματα μεταφοράς φερτών στη διατομή XS:-10287 με την ύπαρξη φράγματος

Από τις παραπάνω εικόνες διαπιστώνεται, όπως είναι και λογικό, ότι όσο μεγαλώνει η περίοδος επαναφοράς των υδρολογικών δεδομένων, τόσο πιο πολύ αυξάνεται η διάβρωση και τελικά η μεταβολή της κοίτης του ποταμού. Ακόμη, παρατηρείται ότι στη διατομή 7719 η μεταβολή της κοίτης του ποταμού είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με την διατομή 952.49. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πρώτη διατομή βρίσκεται μετά τη συμβολή των παραποτάμων Ρουματιανού και Σεμπρενιώτη και έτσι δέχεται μια μεγάλη ποσότητα απορροής αυξάνοντας έτσι τη διαβρωτική ικανότητα.

6.6 Εναλλακτικά Σενάρια Υδραυλικών Προσομοιώσεων Μεταφοράς Φερτών

Εκτός από τα δυο αρχικά σενάρια προσομοίωσης μεταφοράς ιζημάτων με και χωρίς τον ταμιευτήρα, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για ζεύγη σεναρίων με διαφορετικές παραδοχές

6.6.1 Σενάριο με διαφορετική κοκκομετρική διαβάθμιση πυθμένα

Το σενάριο αυτό επικεντρώνεται στο υλικό του πυθμένα του ποταμού. Στις αρχικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, η κοκκομετρική καμπύλη του πυθμενικού υλικού θεωρήθηκε η ίδια για όλες τις διατομές και συνεπώς για όλη την περιοχή μελέτης. Η καμπύλη αυτή αντιστοιχεί στην περιοχή του φράγματος η οποία είναι ορεινή και αυτό ισοδυναμεί με πιο χονδρόκοκκα υλικά. Συνεπώς, προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση, στο σενάριο αυτό χρησιμοποιήθηκαν περισσότερες από μια διατομές σε διαφορετικά τμήματα του ποταμού.

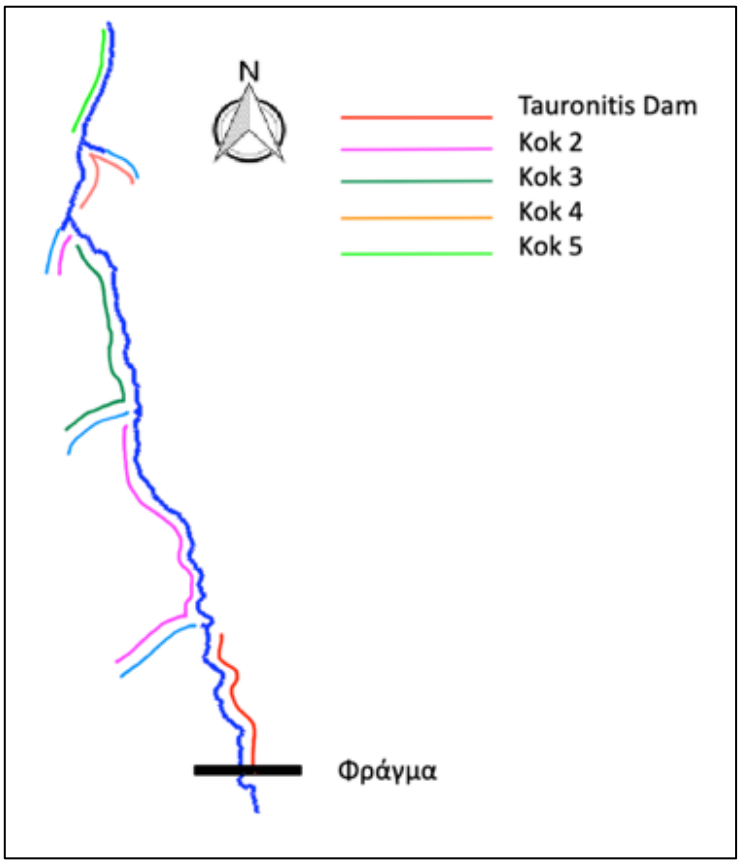
Για την κατασκευή των νέων κοκκομετρικών καμπυλών χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη Δ1 από την δειγματοληψία της μελέτης του 1992 στη θέση του προτεινόμενου φράγματος Παπαδιανών. Συγκεκριμένα, οι νέες αυτές καμπύλες προέκυψαν με σταδιακή μείωση των μεγαλύτερων κόκκων και προσαύξηση των λεπτότερων κόκκων κατά 10, 20, 30 και 40% αντίστοιχα και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3. Τα σημεία

στα οποία χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω κοκκομετρικές καμπύλες παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.20.

Για την εκτέλεση των προσομοιώσεων δημιουργήθηκαν δώδεκα νέα αρχεία δεδομένων ιζημάτων και εκτελέστηκαν δώδεκα προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα του ζεύγους των προσομοιώσεων με και χωρίς φράγμα, με τις νέες κοκκομετρικές καμπύλες, παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.3: Κοκκομετρικές καμπύλες πυθμενικού υλικού

Class	Diam (mm)	Finer (%)				
		Tauronitis DAM	Κοκ 2	Κοκ 3	Κοκ 4	Κοκ 5
Clay	0.004					
VFM	0.008					
FM	0.016					5
MM	0.032			10	13	18.2
CM	00625	24	26.4	31.6	41.1	57.6
VFS	0.125	26	28.6	34.3	44.6	62.4
FS	0.25	31	34.1	40.9	53.1	74.4
MS	0.5	36	39.6	47.5	61.7	86.4
CS	1	42	46.2	55.4	72.0	100
VCS	2	48	52.8	63.3	82.3	
VFG	4	58	63.8	76.5	100	
VF	8	74	81.4	100		
MG	16	95	100			
CG	32	100				
VCG	64					
SC	128					
LC	256					
SB	512					
MB	1024					
LB	2048					



Εικόνα 6.20: Θέσεις χρήσης κοκκομετρικών καμπυλών

6.6.2 Σενάριο με διαφορετικές αρχικές στάθμες του ταμιευτήρα

Το σενάριο αυτό εφαρμόζεται με στόχο την μελέτη των επιπτώσεων του φράγματος για διαφορετική αρχική στάθμη του ταμιευτήρα. Στην βασική προσομοίωση η αρχική στάθμη του ταμιευτήρα πριν το γεγονός βροχόπτωσης ήταν στα 326 μέτρα, δηλαδή στο υψόμετρο της στέψης του υπερχειλιστή. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τα υδρογραφήματα εκροής του ταμιευτήρα να εμφανίζουν υψηλές τιμές παροχής αιχμής και σε σύντομο χρονικό διάστημα. Στο σενάριο αυτό έγιναν προσομοιώσεις για αρχικά άδειο ταμιευτήρα και για αρχική στάθμη του ταμιευτήρα τα 324 μέτρα. Συνεπώς, πραγματοποιήθηκαν εκ νέου υδρολογικές προσομοιώσεις με τα νέα δεδομένα έτσι ώστε να υπολογιστούν τα νέα διοδευμένα υδρογραφήματα εκροής του ταμιευτήρα. Αντίστοιχα, δημιουργήθηκαν νέα αρχεία εισόδου για τα υδρολογικά δεδομένα.

Για το σενάριο αυτό εφαρμόστηκε ταυτόχρονα το σενάριο με τις διαφορετικές κοκκομετρικές καμπύλες στα κατάντη. Στους Πίνακες 6.5 έως 6.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του συνδυασμού των σεναρίων αυτών.

6.6.3 Σενάριο με δυσμενή βροχόπτωση σχεδιασμού και βήμα υπολογισμών 1h

Στα πλαίσια της διερεύνησης των παραμέτρων σχεδιασμού του φράγματος εξετάστηκε ένα σενάριο το οποίο αντιμετωπίζει την περίπτωση μιας σπάνιας βροχόπτωσης σχεδιασμού. Η βροχόπτωση σχεδιασμού για το σενάριο αυτό βασίζεται στη χρήση διαφορετικής μεθόδου χρονικής κατανομής. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της δυσμενέστερης διαδοχής των τμηματικών υψών βροχόπτωσης (US Bureau of Reclamation, 1977) Τα τμηματικά ύψη στη περίπτωση αυτή διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ακολουθούν το τρόπο διάταξης των τεταγμένων του Μοναδιαίου υδρογραφήματος της λεκάνης απορροής W770 που βρίσκεται ανάντη του φράγματος. Με την κατανομή αυτή κατασκευάζεται ένα υετογράφημα σχεδιασμού που προκαλεί τη δημιουργία πλημμυρογραφήματος με πολύ μικρή πιθανότητα εμφάνισης.

Για την ολοκλήρωση του σεναρίου αυτού πραγματοποιήθηκαν εκ νέου προσομοιώσεις με το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS χρησιμοποιώντας τα νέα υετογραφήματα για τις επιλεγμένες περιόδους επαναφοράς. Στο σενάριο αυτό το χρονικό βήμα που επιλέχθηκε ήταν η 1h. Δημιουργήθηκαν νέα αρχεία εισόδου υδρολογικών δεδομένων και εκτελέστηκαν οι προσομοιώσεις. Σημειώνεται ότι και με αυτό το σενάριο χρησιμοποιήθηκαν οι δυο εκδοχές του πυθμενικού υλικού, με ενιαία δηλαδή κοκκομετρική καμπύλη και με διαφορετικές καμπύλες στα κατάντη. Στους Πίνακες 6.9 και 6.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού.

Πίνακας 6.4: Σενάριο με διαφορετικές κοκκομετρικές καμπύλες στα κατάντη. Στάθμη ταμιευτήρα 326m.

Σενάριο	T=2		T=5		T=10		T=25		T=50		T=100	
	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)
NO DAM	3886.62	4869.43	6579.74	8002.44	8702.27	10701.22	11762.85	14098.44	14309.35	17144.15	17074.09	20331.97
DAM	3885.40	4814.62	6578.08	7881.52	8700.56	10594.16	11761.01	13951.60	14307.32	16928.57	17071.84	20015.62
%	-0.03	-1.14	-0.03	-1.53	-0.02	-1.01	-0.02	-1.05	-0.01	-1.27	-0.01	-1.58

Πίνακας 6.5: Σενάριο με αρχικά άδειο ταμιευτήρα και την αρχική κοκκομετρική καμπύλη

Σενάριο	T=2		T=5		T=10		T=25		T=50		T=100	
	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)
NO DAM	3886.62	4440.97	6579.74	6775.74	8702.27	8066.18	11762.85	10183.67	14309.35	12120.99	17074.09	14511.82
DAM	3303.78	4152.93	5457.71	6014.15	7130.57	7519.58	9519.28	8950.49	11491.68	10682.70	13621.55	12491.03
Διαφορά %	-17.64	-6.94	-20.56	-12.66	-22.04	-7.27	-23.57	-13.78	-24.52	-13.46	-25.35	-16.18

Πίνακας 6.6: Σενάριο με αρχικά άδειο ταμιευτήρα και διαφορετικές κοκκομετρικές καμπύλες κατάντη

Σενάριο	T=2		T=5		T=10		T=25		T=50		T=100	
	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)
NO DAM	3886.62	4869.43	6579.74	8002.44	8702.27	10701.22	11762.85	14098.44	14309.35	17144.15	17074.09	20331.97
DAM	3303.78	4191.47	5457.71	6826.14	7130.57	9169.32	9519.28	12078.72	11491.68	14449.45	13621.55	17308.62
%	-17.64	-16.17	-20.56	-17.23	-22.04	-16.71	-23.57	-16.72	-24.52	-18.65	-25.35	-17.47

Πίνακας 6.7: Σενάριο με αρχική στάθμη ταμιευτήρα 324m και την αρχική κοκκομετρική καμπύλη

Σενάριο	T=2		T=5		T=10		T=25		T=50		T=100	
	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)
NO DAM	3886.62	4440.97	6579.74	6775.74	8702.27	8066.18	11762.85	10183.67	14309.35	12120.99	17074.09	14511.82
DAM	3307.66	4155.67	5459.77	5955.19	7132.16	7469.84	9794.17	9513.31	12340.60	11242.99	15105.25	13500.73
%	-17.50	-6.87	-20.51	-13.78	-22.01	-7.98	-20.10	-7.05	-15.95	-7.81	-13.03	-7.49

Πίνακας 6.8: Σενάριο με αρχική στάθμη ταμιευτήρα 324m και διαφορετικές κοκκομετρικές καμπύλες κατάντη

Σενάριο	T=2		T=5		T=10		T=25		T=50		T=100	
	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)
NO DAM	3886.62	4347.45	6579.74	6921.83	8702.27	9279.29	11762.85	12286.04	14309.35	14918.55	17074.09	17634.27
DAM	3307.66	3807.10	5459.77	6086.62	7132.16	8144.07	9794.17	10830.13	12340.60	13456.42	15105.25	16392.81
%	-17.50	-14.19	-20.51	-13.72	-22.01	-13.94	-20.10	-13.44	-15.95	-10.87	-13.03	-7.57

Πίνακας 6.9: Σενάριο δυσμενούς περίπτωσης ανάντη λεκάνης με βήμα 1h με αρχική κοκκομετρική καμπύλη

Σενάριο	T=2		T=5		T=10		T=25		T=50		T=100	
	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)
NO DAM	3897.22	4462.73	6616.61	8229.01	9001.77	11185.18	11960.32	15328.54	14467.04	18471.84	17164.35	22178.90
DAM	3895.45	4361.71	6612.28	7896.61	8882.45	10608.41	11994.43	14631.46	14627.23	17934.66	17461.54	20256.88
%	-0.05	-2.32	-0.07	-4.21	-1.34	-5.44	0.28	-4.76	1.10	-3.00	1.70	-9.49

Πίνακας 6.10: Σενάριο δυσμενούς περίπτωσης ανάντη λεκάνης με βήμα 1h με διαφορετικές κοκκομετρικές καμπύλες

Σενάριο	T=2		T=5		T=10		T=25		T=50		T=100	
	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)	Volume (1000 m^3)	Total Mass (tons)
NO DAM	3897.22	4978.62	6616.61	7858.26	9001.77	10803.23	11960.32	14804.80	14467.04	17462.96	17164.35	20410.63
DAM	3895.45	4889.32	6612.28	7606.28	8882.45	10275.69	11994.43	14357.27	14627.23	17151.94	17461.54	19757.95
%	-0.05	-1.83	-0.07	-3.31	-1.34	-5.13	0.28	-3.12	1.10	-1.81	1.70	-3.30

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα στους Πίνακες 6.3 έως 6.10 προκύπτουν διάφορα αποτελέσματα σχετικά με την επίπτωση του φράγματος στη παράκτια περιοχή. Στην παράκτια περιοχή, συγκεκριμένα στη διατομή ελέγχου -10287 παρατηρείται μείωση της μεταφοράς φερτών λόγω της κατασκευής του φράγματος. Η μείωση αυτή ποικίλλει ανάλογα με το σενάριο που εξετάζεται και την περίοδο επαναφοράς.

Η χρήση διαφορετικών κοκκομετρικών καμπυλών φαίνεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Συγκεκριμένα, η συνολική ποσότητα των ιζημάτων που καταλήγουν στην ακτή φαίνεται να είναι μεγαλύτερη από αυτή με την ενιαία κοκκομετρική καμπύλη. Η διαφορά αυτή κρίνεται λογική καθώς τα λεπτόκοκκα υλικά μπορούν να μεταφερθούν μέσω της επιφανειακής απορροής και της ροής του ποταμού πιο εύκολα και πιο μακριά σε σχέση με τους πιο χονδρόκοκκους κόκκους που ενδέχεται να γίνει εναπόθεση τους στη κοίτη του ποταμού σε ανάντη σημεία.

Τα σενάρια με την διαφορετική στάθμη του ταμιευτήρα έδειξαν αντίστοιχες μεταβολές στην ποσότητα ιζημάτων της ακτής. Όταν η στάθμη του ταμιευτήρα βρίσκεται σε χαμηλότερα επίπεδα, στον ταμιευτήρα συγκρατείται μεγαλύτερη ποσότητα ιζημάτων και έτσι μειώνεται η ποσότητα των υλικών που καταλήγουν στην ακτή. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η ενιαία κοκκομετρική καμπύλη της θέσης του φράγματος οι μεταβολές είναι της τάξης του 7%, ενώ στις προσομοιώσεις που χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες με πιο λεπτόκοκκα υλικά, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν μεταβολή της τάξης του 12%-14%.

Τέλος, το σενάριο με τη δυσμενέστερη βροχόπτωση και το χρονικό βήμα μιας ώρας επέδειξε διαφορετικά αποτελέσματα σε σχέση με το αρχικό σενάριο. Παρατηρείται ότι για όλες τις περιόδους επαναφοράς παρατηρείται μείωση της ποσότητας των φερτών στις προσομοιώσεις με φράγμα. Η διαφορά αυτή έγκειται στη χρονική κατανομή της βροχόπτωσης και, κατά συνέπεια, του υδρογραφήματος καθώς επίσης και στο γεγονός ότι με το χρονικό βήμα της μιας ώρας δεν υπήρχε η ίδια λεπτομέρεια στα δεδομένα.

7. Συμπεράσματα

7.1 Σύνοψη

Αντικείμενο της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας αποτέλεσε ο υπολογισμός των επιπτώσεων της κατασκευής φράγματος σε ένα υδατόρευμα εστιάζοντας στη μεταφορά ιζημάτων στην παράκτια περιοχή. Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίζεται στην πραγματοποίηση υδρολογικών και υδραυλικών προσομοιώσεων. Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε ήταν ο Ταυρωνίτης ποταμός στο νομό Χανίων, της Κρήτης. Το φράγμα που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις προτείνεται να κατασκευαστεί ανάντη του χωριού Παπαδιανών σε υψόμετρο τα 251 μέτρα, με συνολικό ύψος τα 77.3 μέτρα.

Για τις προσομοιώσεις της υδρολογίας της περιοχής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό HEC-HMS. Οι υδρολογικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση συνθετικών δεδομένων βροχόπτωσης που κατασκευάστηκαν με τη χρήση της πιο αντιπροσωπευτικής για την περιοχή όμβριας καμπύλης και για συγκεκριμένες περιόδους επαναφοράς. Επιλέχθηκαν οι κατάλληλες μέθοδοι για τη μοντελοποίηση των υδρολογικών διεργασιών και υπολογίστηκαν οι παράμετροι τους μετά από τη γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση της περιοχής μελέτης. Αποτέλεσμα των υδρολογικών προσομοιώσεων ήταν η εξαγωγή υδρογραφημάτων προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου για τις υδραυλικές προσομοιώσεις. Παράλληλα, μέσω της υδρολογικής προσομοίωσης υπολογίστηκαν οι ποσότητες των ιζημάτων που εισέρχονται στον ποταμό λόγω επιφανειακής διάβρωσης, οι οποίες επίσης, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου για τις επόμενες προσομοιώσεις.

Οι υδραυλικές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού HEC-RAS. Συγκεκριμένα, έγιναν προσομοιώσεις μεταφοράς ιζημάτων θεωρώντας ψευδομόνιμη ροή. Τα αποτελέσματα της υδρολογικής μελέτης χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου για τα δεδομένα υδρολογίας και στερεομεταφοράς. Επιλέχθηκαν οι κατάλληλες εξισώσεις, κατασκευάστηκε το γεωμετρικό μοντέλο της περιοχής μελέτης και εκτελέστηκαν οι προσομοιώσεις με και χωρίς το φράγμα.

Επιπλέον, εξετάστηκαν σενάρια τα οποία βασίζονται σε διαφορετικές παραμέτρους της στερεομεταφοράς και των αρχικών συνθηκών στον ταμιευτήρα.

7.2 Αποτελέσματα

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν εξάγονται διάφορα συμπεράσματα. Η διαφορά στην ποσότητα των φερτών που καταλήγουν στην παράκτια περιοχή μεταξύ των προσομοιώσεων με και χωρίς φράγμα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το φράγμα θα κρατήσει ένα μικρό μέρος της συνολικής ποσότητας αυτών. Από τα σενάρια με τα διαφορετικά αρχικά υψόμετρα για τον ταμιευτήρα παρατηρείται ότι η συγκράτηση των ιζημάτων είναι εντονότερη σε περιόδους χαμηλής στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα σε ποσοστά που φτάνουν μέχρι και το 19%.

Η συγκράτηση φερτών που παρατηρείται ενδέχεται να δημιουργήσει προβλήματα στα κατάντη του ποταμού. Συγκεκριμένα, διαβρώσεις μικρής κλίμακας είναι πιθανό να προκληθούν λόγω της μειωμένης ποσότητας φερτών που εναποτίθενται στον πυθμένα του. Ιδιαίτερη προσοχή θα χρειαστεί να δοθεί σε περιοχές που υπάρχουν τεχνικά έργα με προστατευτικά μέτρα για την πρόληψη της υποσκαφής των θεμελίων. Ακόμη, προβλέπεται να διαβρωθεί ελαφρώς η παράκτια περιοχή καθώς ένα μέρος των φερτών υλικών που θα κατέληγαν σε αυτήν θα συγκρατείται από το φράγμα.

7.3 Προτάσεις για Περεταίρω Μελέτη

Στην εργασία αυτή σημαντικό ρόλο για το μεθοδολογικό πλαίσιο που ακολουθήθηκε διαδραμάτισαν τα διαθέσιμα δεδομένα για την περιοχή μελέτης. Προτείνεται, για την ολοκληρωμένη μελέτη της υδρολογίας και της μεταφοράς φερτών η συλλογή δεδομένων σε διάφορα σημεία. Τα δεδομένα αυτά θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαδικασία της βαθμονόμησης δίνοντας έτσι τη δυνατότητα καλύτερης και ακριβέστερης προσομοίωσης των υπολογισμένων μεγεθών. Επιπλέον, χρήσιμο θα ήταν σε ότι αφορά τα δεδομένα στερεομεταφοράς να γίνει συλλογή δειγμάτων του εδάφους της περιοχής μελέτης σε διάφορα σημεία που βρίσκονται σε πιο πεδινές

περιοχές και να γίνει η κοκκομετρική ανάλυση τους. Με τα δεδομένα αυτά θα μπορεί να πραγματοποιηθεί μια πιο αντιπροσωπευτική κατανομή των κοκκομετρικών καμπυλών στις διατομές και έτσι να προσομοιώνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η ποσότητα φερτών που μεταφέρονται στην παράκτια περιοχή.

Σε ότι αφορά τη συνέχεια της εργασίας θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν αναλύσεις ευαισθησίας των μοντέλου και των δομών τους. Πιο αναλυτικά, μια προσέγγιση μπορεί να είναι η αλλαγή ορισμένων παραμέτρων, όπως αυτή του συντελεστή manning έτσι ώστε να φανεί η επίδραση του στη μεταφορά των ιζημάτων στο υδατόρευμα. Ακόμη, μια διαφορετική προσέγγιση θα μπορούσε να υπολογίζει τη μεταφορά των ιζημάτων με διαφορετικές εξισώσεις από τις διαθέσιμες μεθόδους του HEC-RAS.

Τέλος, βαδίζοντας στα μονοπάτια της καινοτομίας και της ανάπτυξης της τεχνητής νοημοσύνης, η μεταφορά ιζημάτων θα μπορεί να υπολογίζεται από ένα υποκατάστατο μοντέλο μηχανικής μάθησης. Συγκεκριμένα, για μια περιοχή στην οποία έχει πραγματοποιηθεί υδρολογική και υδραυλική ανάλυση, μπορεί να κατασκευαστεί ένα μοντέλο το οποίο με δεδομένο εισόδου μια προβλεπόμενη βροχόπτωση θα μπορεί να υπολογίζει την ποσότητα φερτών που θα καταλήγουν σε συγκεκριμένα σημεία. Σε επίπεδο τεχνικών έργων, η πρόβλεψη αυτή μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη καθώς στην περίπτωση πλημμυρικών παροχών που ενδέχεται να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες φερτών, θα μπορεί να γίνει καθαρισμός των φρεατίων, των αυλακιών και των σημείων διόδου του νερού, όπου διαφορετικά θα έφραζαν από τη μεγάλη ποσότητα ιζημάτων που θα κατακάθονταν εκεί.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Ackers, P., & White, W. R. (1973). Sediment transport: New approach and analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2041-2060.

Arekhi, S., Shabani, A., & Rostamizad, G. (2012). Application of the modified universal soil loss equation (MUSLE) in prediction of sediment yield (Case study: Kengir Watershed, Iran). *Arab J Geoscience*, 1259-1267.

Asadi, A., & Boostani, F. (2013). Application of HEC-HMS for the flood forecasting in Kabkian Basin and Delibajak subbasin in Iran. *IOSR J.Eng*, 2250-3021.

Bagnold, A. R. (1966). *An approach to sediment transport problem from general physics.* Washington: United States Government Printing Office.

Belasri, A., & Lakhouili, A. (2016). Estimation of Soil Erosion Risk using the USLE and Geo-Information Technology in Oued El Makhazine Watershed, Morocco. *Journal of Geographic Information System*, 98-107.

Chen, Y., Chen, N., Li, Y., & Hong, H. (2018). Multi-timescale sediment responses across a human impacted river-estuary system. *Journal of Hydrology*, 160-172.

Einstein, A. H. (1950). The bed load function for sediment transportation in open channel flows. *Techincal Bulletin No. 1026, Department of Agriculture, Washington, DC*.

Engelund, F., & Hansen, E. (1967). *A monograph on sediment transport in alluvial streams.* Copenhagen: Teknisk Foriag.

Farajzadeh, S., Salajegheh, A., Ahmadi, H., & Hosseini, S. (2014). Determining the best method for estimating the bed load through HEC-RAS Model (A case study for Taleghan Dam). *Bulleting of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 20-27.

Goldman, R. H., Jackson, K., & Bursztynsky, T. A. (1986). *Erosion and Sediment Control Handbook.* New York: McGraw-Hill Inc.

Hanmaihgari, P., Gompa, N., Pal, D., & Pu, J. (2018). Numerical modelling of the Sakuma Dam reservoir sedimentation. *Natural Hazards*.

Ibanez, C., Prat, N., & Canicio, A. (1996). Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro river and its estuary. *River Research and Applications*, 51-62.

ICOLD. (2014). *Role of dams on the development and management of river basins.* International Commission on Large Dams.

Kirkby, M. J., & Morgan, R. C. (1980). *Soil Erosion.* Chichester, U.K.: Wiley & Sons.

Lane, E. W. (1947). Report of the subcommittee on sediment terminology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 936-938.

Laursen, E. (1958). The total sediment load of streams. *Journal of the Hydraulics Division*, 1-36.

Leclerc, G., & Schaake, J. (1972). *Derivation of hydrologic frequency curves.* Cambridge: Mass. Inst, of Technology.

Meyer, L. D., & Monke, E. J. (1965). Mechanics of soil erosion by rainfall and overflow. *Transactions of the ASCE*, 572-577.

Meyer-Peter, E., & Muller, R. (1948). Formula for bed-load transport. *Second Meeting Internationtal Association for Hydraulic Research.* Stocholm, Sweeden.

Mimikou, M., Baltas, E., & Tsihrintzis, V. (2018). *Hydrology and Water Resource Systems Analysis.* CRC Press.

Mitchell, J. K., & Bubenzer, G. D. (1980). Soil loss estimation. *Soil Erosion. John Wiley & Sons*, 17-62.

Rehman, H., Chaundry, M. A., Naeem, U., & Hashmi, H. N. (2018). Performance evaluation of 1-D numerical model HEC-RAS towards modelling sediment depositions and sediment flushing operations for the reservoirs. *Environmental Monitoring Assessment*.

Rubey, W. W. (1933). Settling velocities of gravel, sand and silt particles. *American Journal of Science*, 325-338.

Sadaoui, M., Ludwig, W., Bourrin, F., & Romero, E. (2018). The impact of reservoir construction on riverine sediment and carbon fluxes to the Mediterranean Sea. *Progress in Oceanography*, 94-111.

Shelley, J., Gibson, S., & Williams, A. (2015). *Unsteady flow and sediment modelling in a large reservoir using HEC-RAS 5.0.* USACE.

Shen, H. W., & Julien, P. Y. (1992). *Erosion and sediment transport.* New York: McGraw-Hill Inc.

Smith, D. D., & Wischmeier, W. H. (1957). Factors affecting sheet and rill erosion. *Transactions American Geophysical Union*, 889-896.

Toffaleti, F. (1969). Definitive Computation of Sand Discharge in Rivers. *Journal of the Hydraulics Division*, 225-248.

US Army Corps of Engineers. (2016). *Hydrologic Modeling System (HMS) User's Manual.* Davis.

US Bureau of Reclamation. (1987). *Design of Small Dams.* United States Department of the Interior.

US Corps of Engineers. (2016). *HEC RAS User's Manual.* Davis.

US Soil Conservation Service. (1972). *SCS National Engineering Handbook .* Sec 4, Hydrology.

Venkatesh, M. (2012). *Creating SCS Curve NumberG Grid using HEC-GeoHMS.* School of Civil Engineering, Purdue University.

Wanielista, M. (1978). *Stormwater Management, Quantity and Quality.* Ann Arbor Science.

Williams, J. R. (1972). Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. *Proceedings of the sediment-yield workshop, USDA Sedimentation Lab*, (σσ. 244-252). Oxford.

Williams, J. R., & Berndt, H. D. (1972). Sediment yield computed with universal equation. *Journal of the Hydraulics Division*, 2087-2098.

Wischeimer, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses-A Guide to Conservation Planning. *Agricultural Handbook* .

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1965). Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East of Rocky Mountains. *Agriculture Handbook No. 282, USDA, Agricultural Research Service*.

Xu, K., & Milliman, J. D. (2009). Seasonal variations of sediment discharge from the Yangtze River before and after impoundment of the Three Gorges Dam. *Geomorphology*, 176-283.

Yang, C. T. (1972). Unit stream power and sediment transport. *Journal of the Hydraulics Division*, 1805-1826.

Zarris, D., & Koutsoyiannis, D. (2005). Estimating suspended sediment yield based on reservoir hydrographic survey, rating relationships and distributed hydrological modelling. *Geophysical Research Abstracts*.

Zarris, D., Lykoudi, E., & Koutsogiannis, D. (2001). *Appraisal of river sediment deposits in reservoirs of hydropower dams.* Athens: National Technical University of Athens.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Ευστρατιάδης, Α., Μίχας, Σ., & Παπανικολάου, Π. (2018). *Υδραυλικές κατασκευές και φράγματα-Περιβαλλοντικά και θεσμικά πλαίσια.* Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Καλογήρου, Μ. (2014). *Εκτίμηση της στερεοπαροχής κατά μήκος του ποταμού Αράχθου και των επιπτώσεων στην παράκτια ζώνης.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Καπερωνης, Σ. (2016). *Μελέτη της ποιότητας των υδάτων του Βολιναίου ποταμού με χρήση του μοντέλου SWAT και προτάσεις διαχείριση για τη μείωση των εξαγόμενων ρύπων.* Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κουτσογιάννης, Δ., & Τάρλα, Κ. (1987). Εκτιμήσεις στερεοαπορροής στην Ελλάδα. *Τεχνικά Χρονικά*, 127-154.

Μιμίκου, Μ., & Μπαλτάς, Ε. (2006). *Τεχνική Υδρολογία.* Αθήνα: Παπασωτηρίου.

Μπαριάμης, Γ. (2013). *Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου hec-hms και εφαρμογή στη λεκάνη του ρέματος Ραφήνας.* Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μπενέκου, Π. (2014). *Εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS στην ορεινή πειραματική λεκάνη Βαρετάδας Αμφιλοχίας.* Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Νικολαΐδης, Ν., & Καρατζάς, Γ. (2012). *Ειδικό Σχεδιο Διαχείρισης των Υδάτικών Πόρων για τη Λεκάνη Απορροής του ποταμού Ταυρωνίτη.* Χανιά: Περιφέρεια Κρήτης.

Παναγούλια, Δ. (2008). *Διάβρωση, Μεταφορά και Απόθεση Φερτών Υλικών.* Αθήνα: Εθνικό Μετσοβιο Πολυτεχνείο.

Παναγούλια, Δ., & Ζαρρής, Δ. (2008). *Διάβρωση, μεταφορά και απόθεση φερτών υλών.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Σκοπελίτη, Α., & Στάμου, Λ. (2013). *Υδρολογική ανάλυση ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε περιβάλλον ΓΣΠ.* Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

ΥΠΕΝ/ΕΓΥ. (2015). *Όμβριες Καμπύλες. Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (GR13), Στάδιο 1, Φάση 1, Παραδοτέο 2, Τεχνική Έκθεση.* Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Ειδική Γραμματεία Υδάτων.

Χρυσανθου, Β., & Πυλιώτης, Α. (1995). Εκτίμηση της εισροής φερτών υλών σε ένα ταμιευτήρα υπό κατασκευή. *6ο Πανελλήνιο Συνέδριο της ΕΥΕ*, (σσ. 355-362). Θεσσαλονική.

Παράρτημα: Πίνακες - Δεδομένα

Πίνακας Στάθμης - Χωρητικότητας ταμιευτήρα

Χωρητικότητα (10^6 m^3)	Στάθμη (m)	Χωρητικότητα (10^6 m^3)	Στάθμη (m)	Χωρητικότητα (10^6 m^3)	Στάθμη (m)
0.00	251.00	3.08	287.00	22.66	323.00
0.01	252.00	3.31	288.00	23.60	324.00
0.02	253.00	3.56	289.00	24.57	325.00
0.03	254.00	3.82	290.00	25.57	326.00
0.05	255.00	4.09	291.00	26.60	327.00
0.06	256.00	4.37	292.00	27.66	328.00
0.08	257.00	4.66	293.00	28.75	329.00
0.11	258.00	4.98	294.00	29.87	330.00
0.13	259.00	5.30	295.00	31.03	331.00
0.16	260.00	5.65	296.00	32.23	332.00
0.19	261.00	6.02	297.00	33.47	333.00
0.22	262.00	6.41	298.00	34.74	334.00
0.25	263.00	6.81	299.00	36.07	335.00
0.29	264.00	7.23	300.00	37.43	336.00
0.33	265.00	7.68	301.00	38.83	337.00
0.37	266.00	8.14	302.00	40.27	338.00
0.41	267.00	8.63	303.00	41.74	339.00
0.46	268.00	9.13	304.00	43.25	340.00
0.52	269.00	9.65	305.00	44.80	341.00
0.57	270.00	10.20	306.00	46.38	342.00
0.64	271.00	10.76	307.00	48.01	343.00
0.72	272.00	11.34	308.00	49.66	344.00
0.82	273.00	11.94	309.00	51.35	345.00
0.93	274.00	12.56	310.00	53.08	346.00
1.04	275.00	13.19	311.00	54.84	347.00
1.16	276.00	13.86	312.00	56.63	348.00
1.29	277.00	14.54	313.00	58.47	349.00
1.43	278.00	15.25	314.00	60.34	350.00
1.58	279.00	15.98	315.00	62.25	351.00
1.74	280.00	16.74	316.00	64.19	352.00
1.90	281.00	17.51	317.00	66.16	353.00
2.08	282.00	18.31	318.00	68.17	354.00
2.26	283.00	19.13	319.00	70.21	355.00
2.45	284.00	19.97	320.00	72.28	356.00
2.65	285.00	20.84	321.00	74.38	357.00
2.86	286.00	21.73	322.00	-	-

Πίνακας Στάθμης – Παροχής Υπερχείλισης

Παροχή Υπερχείλισης (m^3)	Στάθμη (m)	Παροχή Υπερχείλισης (m^3)	Στάθμη (m)	Παροχή Υπερχείλισης (m^3)	Στάθμη (m)
0.00	251.00	0.05	287.00	0.05	323.00
0.00	252.00	0.05	288.00	0.05	324.00
0.00	253.00	0.05	289.00	0.05	325.00
0.00	254.00	0.05	290.00	0.05	326.00
0.00	255.00	0.05	291.00	181.35	327.00
0.00	256.00	0.05	292.00	512.94	328.00
0.00	257.00	0.05	293.00	942.32	329.00
0.00	258.00	0.05	294.00	1450.80	330.00
0.00	259.00	0.05	295.00	2027.55	331.00
0.00	260.00	0.05	296.00	2665.29	332.00
0.00	261.00	0.05	297.00	3358.65	333.00
0.00	262.00	0.05	298.00	4103.48	334.00
0.00	263.00	0.05	299.00	4896.45	335.00
0.00	264.00	0.05	300.00	5734.79	336.00
0.00	265.00	0.05	301.00	6616.17	337.00
0.00	266.00	0.05	302.00	7538.58	338.00
0.00	267.00	0.05	303.00	8500.27	339.00
0.00	268.00	0.05	304.00	9499.69	340.00
0.00	269.00	0.05	305.00	10535.48	341.00
0.00	270.00	0.05	306.00	11606.40	342.00
0.00	271.00	0.05	307.00	12711.33	343.00
0.00	272.00	0.05	308.00	13849.25	344.00
0.00	273.00	0.05	309.00	15019.24	345.00
0.00	274.00	0.05	310.00	16220.44	346.00
0.00	275.00	0.05	311.00	17452.05	347.00
0.00	276.00	0.05	312.00	18713.35	348.00
0.00	277.00	0.05	313.00	20003.65	349.00
0.00	278.00	0.05	314.00	21322.32	350.00
0.00	279.00	0.05	315.00	22668.75	351.00
0.00	280.00	0.05	316.00	24042.39	352.00
0.00	281.00	0.05	317.00	25442.70	353.00
0.00	282.00	0.05	318.00	26869.19	354.00
0.00	283.00	0.05	319.00	28321.39	355.00
0.05	284.00	0.05	320.00	29798.85	356.00
0.05	285.00	0.05	321.00	31301.14	357.00
0.05	286.00	0.05	322.00	-	-

Πίνακας Παροχής Ταμιευτήρα-Χωρητικότητας

Παροχή ταμιευτήρα (m3)	Χωρητικότητα (10^6 m^3)	Παροχή ταμιευτήρα (m3)	Χωρητικότητα (10^6 m^3)	Παροχή ταμιευτήρα (m3)	Χωρητικότητα (10^6 m^3))
0.000	0.000	0.045	3.080	0.045	22.656
0.000	0.005	0.045	3.311	0.045	23.602
0.000	0.016	0.045	3.557	0.045	24.572
0.000	0.030	0.045	3.817	0.045	25.569
0.000	0.046	0.045	4.089	181.350	26.598
0.000	0.065	0.045	4.370	512.935	27.659
0.000	0.085	0.045	4.664	942.322	28.748
0.000	0.107	0.045	4.975	1450.800	29.868
0.000	0.131	0.045	5.303	2027.555	31.027
0.000	0.158	0.045	5.645	2665.290	32.228
0.000	0.187	0.045	6.016	3358.649	33.465
0.000	0.219	0.045	6.408	4103.482	34.744
0.000	0.253	0.045	6.813	4896.450	36.065
0.000	0.289	0.045	7.234	5734.791	37.427
0.000	0.327	0.045	7.675	6616.169	38.828
0.000	0.369	0.045	8.140	7538.578	40.266
0.000	0.415	0.045	8.625	8500.267	41.740
0.000	0.464	0.045	9.129	9499.694	43.251
0.000	0.516	0.045	9.654	10535.483	44.798
0.000	0.572	0.045	10.201	11606.400	46.383
0.000	0.640	0.045	10.764	12711.328	48.005
0.000	0.725	0.045	11.344	13849.252	49.662
0.000	0.821	0.045	11.940	15019.240	51.353
0.000	0.925	0.045	12.556	16220.437	53.079
0.000	1.036	0.045	13.195	17452.052	54.837
0.000	1.158	0.045	13.858	18713.352	56.634
0.000	1.290	0.045	14.543	20003.653	58.472
0.000	1.430	0.045	15.252	21322.318	60.344
0.000	1.579	0.045	15.983	22668.750	62.251
0.000	1.736	0.045	16.736	24042.387	64.191
0.000	1.902	0.045	17.508	25442.701	66.165
0.000	2.076	0.045	18.305	26869.192	68.170
0.000	2.259	0.045	19.128	28321.389	70.208
0.045	2.450	0.045	19.972	29798.846	72.279
0.045	2.651	0.045	20.838	31301.136	74.380
0.045	2.860	0.045	21.733	-	-

Πίνακας Υετογραφημάτων Σχεδιασμού

Ώρα	Υετογραφήματα Σχεδιασμού (mm)					
	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100
0:00	0.67	0.89	1.05	1.26	1.43	1.61
0:15	0.70	0.92	1.08	1.30	1.47	1.65
0:30	0.72	0.95	1.11	1.34	1.52	1.71
0:45	0.74	0.98	1.15	1.38	1.57	1.76
1:00	0.77	1.01	1.19	1.43	1.62	1.83
1:15	0.80	1.05	1.23	1.48	1.68	1.89
1:30	0.83	1.09	1.28	1.54	1.75	1.97
1:45	0.86	1.14	1.33	1.61	1.82	2.05
2:00	0.90	1.19	1.39	1.68	1.90	2.14
2:15	0.94	1.24	1.46	1.75	1.99	2.24
2:30	0.99	1.30	1.53	1.84	2.09	2.35
2:45	1.04	1.37	1.61	1.94	2.20	2.48
3:00	1.10	1.45	1.71	2.05	2.33	2.62
3:15	1.17	1.55	1.82	2.19	2.48	2.79
3:30	1.25	1.66	1.95	2.34	2.65	2.99
3:45	1.35	1.79	2.10	2.52	2.86	3.22
4:00	1.47	1.94	2.28	2.75	3.12	3.51
4:15	1.62	2.14	2.52	3.03	3.43	3.86
4:30	1.82	2.40	2.82	3.39	3.84	4.32
4:45	2.08	2.74	3.22	3.88	4.40	4.94
5:00	2.46	3.24	3.81	4.58	5.20	5.85
5:15	3.07	4.05	4.76	5.72	6.49	7.30
5:30	4.27	5.64	6.62	7.96	9.03	10.16
5:45	8.12	10.72	12.60	15.15	17.18	19.33
6:00	19.64	25.93	30.46	36.63	41.55	46.74
6:15	5.49	7.25	8.51	10.24	11.61	13.06
6:30	3.55	4.69	5.51	6.62	7.51	8.45
6:45	2.72	3.59	4.22	5.08	5.76	6.48
7:00	2.25	2.97	3.49	4.19	4.76	5.35
7:15	1.94	2.56	3.00	3.61	4.10	4.61
7:30	1.71	2.26	2.66	3.19	3.62	4.08
7:45	1.54	2.04	2.39	2.88	3.26	3.67
8:00	1.41	1.86	2.19	2.63	2.98	3.36
8:15	1.30	1.72	2.02	2.43	2.75	3.10
8:30	1.21	1.60	1.88	2.26	2.56	2.88
8:45	1.14	1.50	1.76	2.12	2.40	2.70
9:00	1.07	1.41	1.66	2.00	2.26	2.55
9:15	1.01	1.34	1.57	1.89	2.14	2.41
9:30	0.96	1.27	1.49	1.80	2.04	2.29
9:45	0.92	1.21	1.42	1.71	1.94	2.19
10:00	0.88	1.16	1.36	1.64	1.86	2.09
10:15	0.84	1.11	1.31	1.57	1.78	2.01
10:30	0.81	1.07	1.26	1.51	1.72	1.93
10:45	0.78	1.03	1.21	1.46	1.65	1.86
11:00	0.75	1.00	1.17	1.41	1.60	1.79
11:15	0.73	0.96	1.13	1.36	1.54	1.74
11:30	0.71	0.93	1.10	1.32	1.49	1.68
11:45	0.68	0.90	1.06	1.28	1.45	1.63
12:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Πίνακας πλημμυρογραφημάτων στη θέση του φράγματος

α/α	Πλημμυρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης W770 (m^3/s)					
	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100
1	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
2	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
3	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
4	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
5	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
6	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
7	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
8	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
9	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
10	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
11	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
12	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
13	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
14	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
15	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
16	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
17	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.1
18	0.045	0.045	0.045	0.045	0.1	0.4
19	0.045	0.045	0.045	0.045	0.3	1
20	0.045	0.045	0.045	0.2	0.9	2.3
21	0.045	0.045	0.1	0.7	2	4.5
22	0.045	0.045	0.3	1.8	4.2	8.1
23	0.045	0.2	1.1	4	8	13.6
24	0.1	1.2	3.3	8.7	14.9	23
25	1.5	5.4	10.6	20.8	31.1	43.8
26	4.7	14	24.1	41.8	58.4	77.8
27	10.3	27.5	44.3	71.9	96.8	125.1
28	18.2	44.8	69.4	108.1	142	180.2
29	25.7	60.2	90.9	138	178.8	224.2
30	31.5	70.8	104.9	156.5	200.9	250
31	35.3	76.6	111.8	164.5	209.5	259.1
32	36.8	77.4	111.4	162	205	252.3
33	36.6	74.8	106.4	153.1	192.6	235.8
34	34.7	68.9	96.9	138.1	172.8	210.7
35	32.3	62.7	87.4	123.5	153.8	186.8
36	30.1	57.3	79.3	111.2	137.9	166.9
37	28.1	52.6	72.2	100.7	124.4	150
38	26.3	48.5	66.1	91.6	112.7	135.6
39	24.6	44.7	60.6	83.4	102.3	122.7
40	23.1	41.4	55.8	76.5	93.6	111.9
41	21.8	38.6	51.7	70.5	86	102.7
42	20.5	36	48.1	65.3	79.5	94.7
43	19.5	33.8	45	60.9	73.9	87.8
44	18.5	31.9	42.3	57	69	81.9
45	17.6	30.2	39.9	53.6	64.8	76.8
46	16.9	28.7	37.8	50.7	61.2	72.4
47	16.2	27.4	36	48.1	57.9	68.5
48	15.6	26.2	34.3	45.8	55.1	65
49	14.9	25	32.7	43.5	52.3	61.6

50	14.1	23.6	30.8	40.9	49	57.8
51	13	21.7	28.3	37.5	45	53
52	11.6	19.2	25	33.2	39.8	46.8
53	9.9	16.4	21.3	28.2	33.8	39.8
54	8.1	13.5	17.5	23.2	27.8	32.6
55	6.5	10.7	13.9	18.4	22	25.9
56	5	8.3	10.8	14.3	17.1	20.1
57	3.8	6.3	8.2	10.8	13	15.2
58	2.9	4.8	6.3	8.3	9.9	11.6
59	2.2	3.7	4.8	6.3	7.6	8.9
60	1.7	2.8	3.7	4.9	5.8	6.9
61	1.3	2.2	2.8	3.7	4.5	5.3
62	1	1.7	2.2	2.9	3.4	4
63	0.8	1.3	1.7	2.2	2.6	3.1
64	0.6	1	1.3	1.7	2	2.3
65	0.4	0.7	1	1.3	1.5	1.8
66	0.3	0.6	0.7	1	1.1	1.3
67	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9	1
68	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8
69	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
70	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4
71	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3
72	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
73	0.045	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
74	0.045	0.045	0.1	0.1	0.1	0.1
75	0.045	0.045	0.045	0.045	0.1	0.1
76	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
77	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
78	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
79	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
80	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
81	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
82	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
83	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
84	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
85	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
86	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
87	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
88	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
89	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
90	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
91	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
92	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
93	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
94	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
95	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
96	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
97	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045

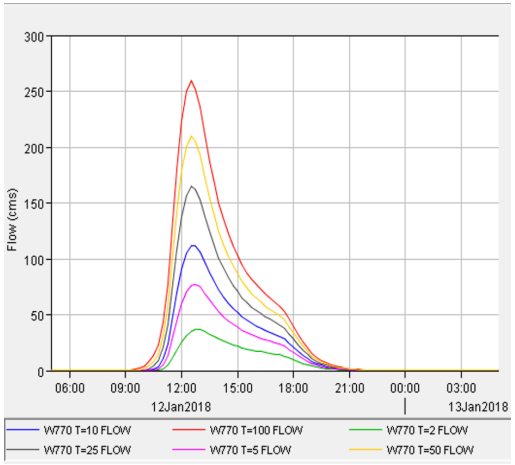
Πίνακας παροχών εκροής ταμιευτήρα

α/α	Παροχές εκροής ταμιευτήρα (m^3/s)					
	T=2	T=5	T=10	T=25	T=50	T=100
1	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
2	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
3	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
4	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
5	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
6	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
7	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
8	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
9	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
10	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
11	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
12	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
13	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
14	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
15	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
16	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
17	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
18	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
19	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
20	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.1
21	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.3
22	0.045	0.045	0.045	0.045	0.2	0.8
23	0.045	0.045	0.045	0.2	0.7	1.6
24	0.045	0.045	0.045	0.6	1.5	2.9
25	0.045	0.045	0.4	1.4	2.9	5.2
26	0.045	0.5	1.3	3.4	5.9	9.3
27	0.5	1.8	3.7	7.5	11.6	16.9
28	1.5	4.6	8.2	14.7	21.3	29.3
29	3.4	9.3	15.3	25.8	35.7	47.4
30	6.1	15.6	24.8	40.1	54	70.2
31	9.4	22.9	35.6	55.8	74	94.7
32	12.9	30.4	46.3	71.2	93.3	118.2
33	16.3	37.3	55.9	84.7	110	138.4
34	19.3	43	63.6	95.4	123.1	153.9
35	21.7	47.2	69.2	102.8	131.8	164.1
36	23.4	49.9	72.6	106.9	136.4	169.2
37	24.6	51.4	74.2	108.5	137.8	170.3
38	25.3	51.9	74.4	108.1	136.8	168.6
39	25.5	51.7	73.6	106.3	134.2	164.8
40	25.5	51	72.1	103.6	130.2	159.5
41	25.3	49.8	70.1	100.1	125.5	153.3
42	24.9	48.4	67.7	96.2	120.3	146.6
43	24.3	46.7	65.1	92	114.7	139.5
44	23.7	45	62.4	87.8	109.1	132.4
45	23	43.2	59.6	83.5	103.6	125.5
46	22.3	41.4	56.9	79.4	98.2	118.7
47	21.5	39.7	54.2	75.4	93	112.2
48	20.8	38	51.7	71.6	88.1	106.1
49	20.1	36.3	49.3	68	83.5	100.3

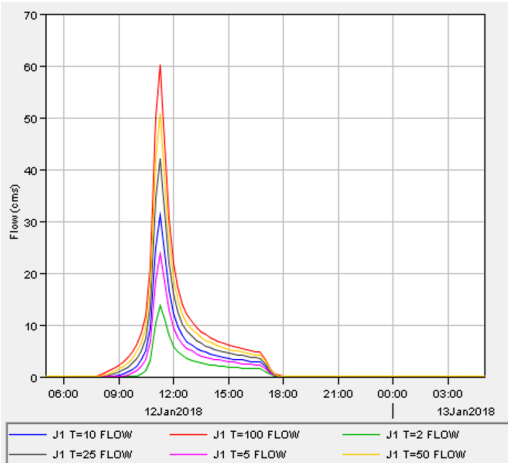
50	19.4	34.8	47	64.5	79.1	94.9
51	18.7	33.2	44.7	61.2	74.9	89.7
52	17.9	31.7	42.5	58	70.8	84.6
53	17.1	30	40.2	54.7	66.6	79.5
54	16.1	28.2	37.7	51.2	62.3	74.2
55	15.1	26.3	35	47.4	57.6	68.6
56	14	24.2	32.2	43.5	52.8	62.8
57	12.8	22	29.2	39.5	47.9	57
58	11.5	19.9	26.3	35.6	43.1	51.2
59	10.3	17.8	23.5	31.7	38.5	45.7
60	9.2	15.8	20.9	28.1	34.1	40.5
61	8.1	13.9	18.4	24.8	30.1	35.7
62	7.2	12.3	16.2	21.8	26.4	31.3
63	6.3	10.7	14.2	19.1	23.1	27.4
64	5.5	9.4	12.4	16.7	20.2	23.9
65	4.8	8.2	10.8	14.5	17.5	20.8
66	4.2	7.1	9.4	12.6	15.2	18
67	3.6	6.1	8.1	10.9	13.2	15.6
68	3.1	5.3	7	9.4	11.4	13.5
69	2.7	4.6	6.1	8.1	9.8	11.6
70	2.3	4	5.2	7	8.5	10
71	2	3.4	4.5	6	7.3	8.6
72	1.7	2.9	3.9	5.2	6.3	7.4
73	1.5	2.5	3.3	4.4	5.4	6.4
74	1.3	2.2	2.8	3.8	4.6	5.5
75	1.1	1.8	2.4	3.3	3.9	4.7
76	0.9	1.6	2.1	2.8	3.4	4
77	0.8	1.4	1.8	2.4	2.9	3.4
78	0.7	1.2	1.5	2	2.5	2.9
79	0.6	1	1.3	1.7	2.1	2.5
80	0.5	0.8	1.1	1.5	1.8	2.1
81	0.4	0.7	0.9	1.3	1.5	1.8
82	0.4	0.6	0.8	1.1	1.3	1.5
83	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3
84	0.3	0.4	0.6	0.8	1	1.1
85	0.2	0.4	0.5	0.7	0.8	1
86	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8
87	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
88	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
89	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5
90	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4
91	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4
92	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3
93	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
94	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
95	0.045	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
96	0.045	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
97	0.045	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Διαγράμματα υδρογραφημάτων στις θέσεις εισόδου του HEC-RAS

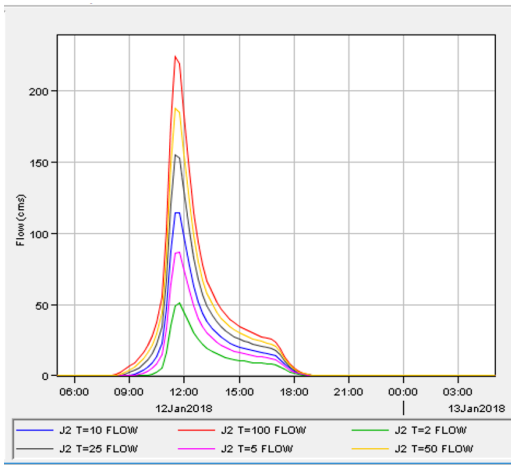
W770



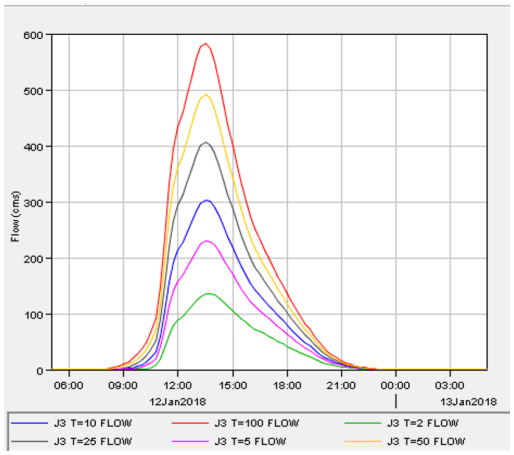
J1



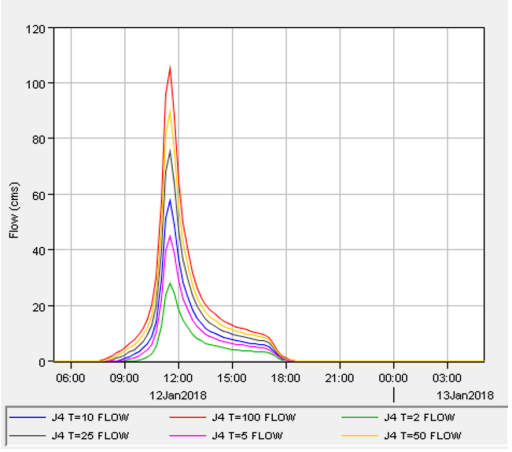
J2



J3

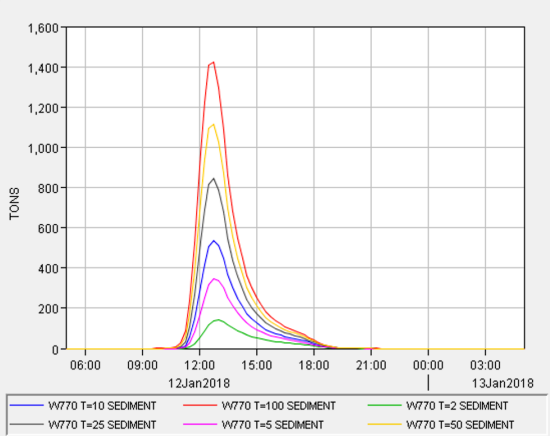


J4

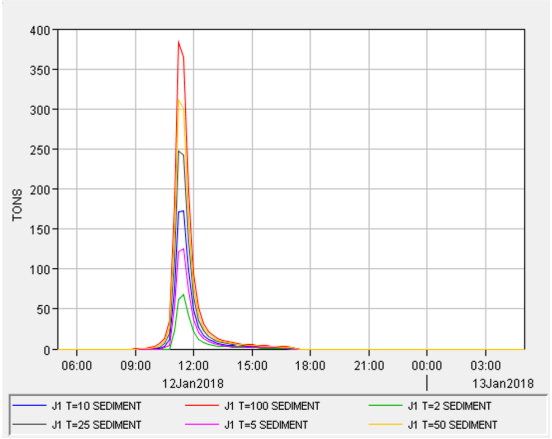


Διαγράμματα χρονοσειρών μεταφοράς ιζημάτων στα σημεία εισαγωγής του HEC-RAS

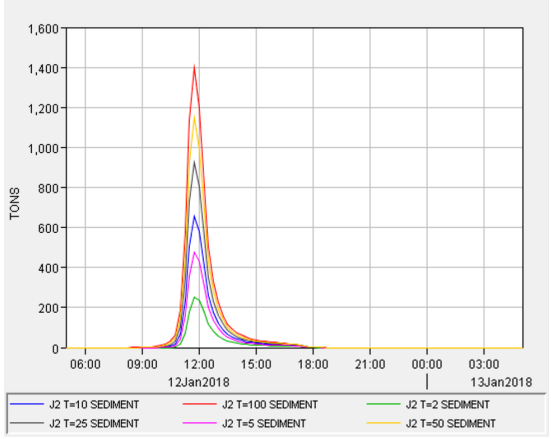
W770



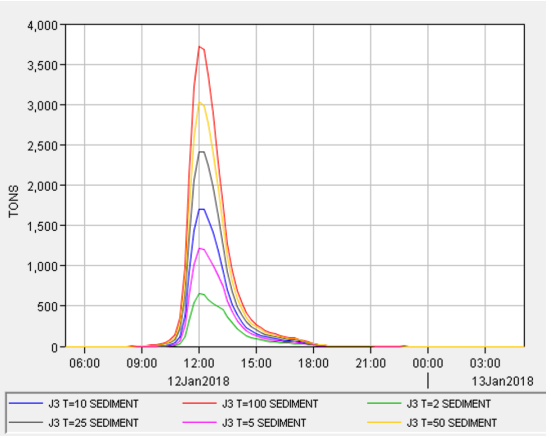
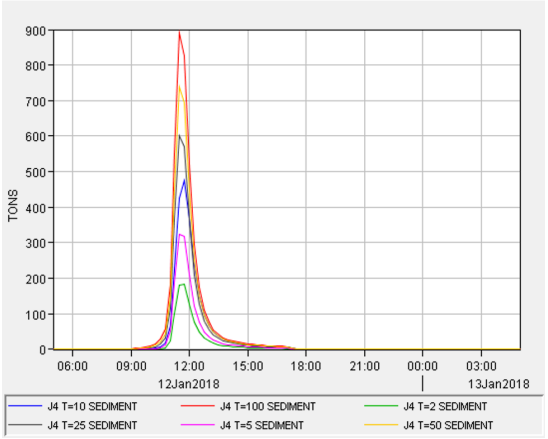
J1



J2



J3



J4