

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΓΕΩΧΗΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ



“ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΟΧΘΗΣ
ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΟΙΛΙΑΡΗ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ
ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ”

Διπλωματική Εργασία
Της
Κρητίδου Ελένης

Εξεταστική επιτροπή:
Καθ. Ν. Νικολαΐδης (Επιβλέπων)
Καθ. Γ. Καρατζάς
Δρ. Μ. Λιλλή

Χανιά, Οκτώβριος 2018

*Αφιερώνεται στους γονείς μου
Μελίνα και Γιώργο*

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους αυτούς που έβαλαν την δική τους πινελιά κατά την διάρκεια των καλύτερων και χειρότερων στιγμών που υπήρξαν το τελευταίο διάστημα.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Νικόλαο Νικολαΐδη που μου εμπιστεύτηκε την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής και μου έδωσε την ευκαιρία να βάλω γαλότσες και να αντιμετωπίσω ένα πραγματικό περιβαλλοντικό πρόβλημα. Επίσης, για την συνεχή καθοδήγηση και αφοσίωση του και για την προσπάθεια του με διδάξει Χημεία παρά την συνεχή μου άρνηση. Την επιστημονική συνεργάτη, Μαρία Λιλλή για την καθοδήγηση της όλο αυτό το διάστημα και την βοήθεια που μου πρόσφερε σχετικά με την εκμάθηση του μοντέλου BSTEM και την γενικότερη συνεισφορά της με την οργάνωση της εργασίας αυτής. Τέλος, τον καθηγητή Γεώργιο Καρατζά, ο οποίος λίγο «απ' εδώ» και λίγο «απ' εκεί» μέσα από την διδασκαλία του αποτέλεσε ένας από τους σημαντικότερους καθηγητές του τμήματος.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διονύση Ευσταθίου και την Σοφία Νερατζάκη, μεταπτυχιακούς φοιτητές του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος για την πολύτιμη βοήθεια τους σε διάφορα σημεία της εργασίας. Τον Γιώργο Μαργογιαννάκη και τον Αχιλλέα Τριπολιτισιώτη, Τοπογράφους Μηχανικούς που συνεργάστηκαν μαζί μου κατά τις εργασίες πεδίου, που με εμπιστεύτηκαν και που αποτέλεσαν μια ευχάριστη παρέα.

Κατόπιν, να ευχαριστήσω όλους μου τους φίλους ξεχωριστά και με αλφαβητική σειρά προς αποφυγή γκρίνιας. Τον Κωστάκη που ό,τι και να του έλεγα είχε μία θετική απάντηση και μου έδειχνε ότι μπορώ να τα καταφέρω ακόμα και όταν όλα έδειχναν «μαύρα». Την Κλειώ, που ρωτώντας με συνέχεια το ίδιο πράγμα με έκανε να γελάω και στο τέλος να αψηφώ την ύπαρξη του προβλήματος και που με την ευσυγκίνητη φύση της με έκανε να δίνω βαρύτητα στις στιγμές που περνάνε. Την Δέσποινα, που δεν έπαψε ούτε λεπτό να πιστεύει στις δυνάμεις και στους στόχους μου και να μου το αποδεικνύει με τα μάτια της αλλά και που αποτέλεσε την «τράκα» μου στις δύσκολες στιγμές. Την Ελένη που με έμαθε με τον τρόπο της να αποδέχομαι το πρόβλημα και αφού δεν μπορώ να το λύσω, να βγαίνω για μια μπύρα. Τον Άγγελο, που με λίγες κουβέντες προσπαθούσε να δώσει πάντα μία άλλη οπτική των πραγμάτων και που με έμαθε “the eyes Chico.. they never lie”. Τέλος, τον Γιώργο που όσα λιγότερα καταλάβαινε τόσο περισσότερο ήθελε να με στηρίζει.

Συγχρόνως, να ευχαριστήσω την Αλέκα, την Ελένη, την Μαρία και την Κατερίνα που με ένα τηλεφώνημα τους ένιωθα ήδη ξαλαφρωμένη. Η άγνοια τους στην φύση των προβλημάτων μου δεν ήταν ποτέ εμπόδιο στο να με ακούσουν και να με ενθαρρύνουν να συνεχίσω την πορεία μου.

Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για όσα μου προσέφερε. Την μητέρα μου Μελίνα και τον πατέρα μου Γιώργο για την ψυχολογική, ηθική και οικονομική στήριξη, για το ότι με έκαναν να γελάω που δεν ξεχώριζαν την διπλωματική από την πρακτική, που δεν αμφέβαλλαν στιγμή για εμένα και που επαινούσαν κάθε μικρή μου προσπάθεια, όταν κανείς άλλος δεν το έκανε. Τον αδερφό μου Χρήστο που με ενθάρρυνε συνεχώς να κόψω το διάβασμα, γιατί αν μη τι άλλο, ήταν και αυτό απαραίτητο.

Περίληψη διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται η εκτίμηση της αστοχίας ενός τμήματος εδάφους μεταβλητής γεωμετρίας και της διάβρωσης της όχθης του ποταμού λόγω της ροής του νερού. Η εκτίμηση αυτή πραγματοποιείται με το μοντέλο BSTEM (Bank Stability and Toe Erosion Model) στην περιοχή του ποταμού Κοιλιάρη και συγκεκριμένα, στον Μανταμά. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πεδίου σε επιλεγμένα σημεία. Η επεξεργασία των μετρήσεων κατέδειξε την ύπαρξη διάβρωσης της παρόχθιας ζώνης του ποταμού Κοιλιάρη αλλά και αστάθεια του πρανούς.

Συγκεκριμένα, κατά την εκπόνηση της εργασίας πραγματοποιήθηκε μελέτη της ευρύτερης περιοχής του ποταμού με σκοπό τον προσδιορισμό της φυσικής λειτουργίας του και όλων των υδατορευμάτων που συνεισφέρουν σε αυτόν. Πραγματοποιήθηκε λήψη εδαφικού δείγματος και εργαστηριακή ανάλυση με σκοπό την εύρεση του είδους και των ιδιοτήτων του. Τα σημεία της δειγματοληψίας, αποτελούν σημεία με έντονη διάβρωση. Η φυτοκάλυψη της περιοχής αρχικά καταγράφηκε εμπειρικά και στη συνέχεια ταυτοποιήθηκε το είδος κάθε φυτού μέσω της βιβλιογραφίας. Έγινε τοπογραφική καταγραφή της περιοχής και συγκεκριμένα εύρεση των συντεταγμένων σε διάφορα σημεία, έτσι ώστε να είναι δυνατή η απεικόνιση του προφίλ της όχθης. Ιδιαίτερα, στο πρόγραμμα BSTEM εισήχθησαν τα δεδομένα που αφορούν το διαβρωμένο τμήμα του ποταμού. Στο πρόγραμμα Surfer (2018) εισήχθησαν οι συντεταγμένες όλου του τμήματος μελέτης με αποτέλεσμα την τρισδιάστατη αποτύπωση του.

Τέλος, προτείνονται μέτρα αποκατάστασης και προστασίας του παρόχθιου δάσους του ποταμού Κοιλιάρη. Τα μέτρα αποκατάστασης προτείνονται με κύριο γνώμονα την δυνατότητα εφαρμογής τους στην περιοχή μελέτης, το κόστος, το χρόνο ζωής τους και τον κίνδυνο αστοχίας τους.

Abstract

In this diploma thesis, it is estimated the failure of a variable's geometry part of the soil and the erosion of the river bank due to the water flow. This assessment is carried out using the Bank Stability and Toe Erosion Model (BSTEM) in the Kiliaris River basin, in particular, in Mantamas area. For this purpose, field measurements were performed at selected points. Data processing of the measurements showed the presence of erosion of the riparian zone of the Kiliaris river, as well as instability of the slopes.

Specifically, during the elaboration of the study a study of the wider river area was carried out in order to determine its physical functioning and all the watercourses that contribute to it. Soil sample was taken and laboratory analysis was carried out in order to find the species and its properties. Sampling points are signs of intense erosion. The plant cover of the area was initially recorded empirically and then the species of each plant was identified through the literature review. Also, topographic mapping of the area was made. In particular, there were found the coordinates at various points, so that the profile of the bank could be visualized. In particular, the data on the eroded part of the river was the

input data of the BSTEM program. In the Surfer program (15), the coordinates of the entire study section were input, resulting in three-dimensional imprinting.

Finally, measures are being taken to rehabilitate and protect the Kiliaris riparian forest. Rehabilitation measures are proposed with a focus on their applicability in the study area, their cost, their lifetime and their risk of failure.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	4
Περίληψη διπλωματικής εργασίας.....	5
Abstract.....	5
Οδηγός Διαγραμμάτων-Πινάκων-Σχημάτων-Χαρτών.....	8
Διαγράμματα.....	8
Πίνακες.....	9
Σχήματα.....	10
Χάρτες.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: “ΕΙΣΑΓΩΓΗ”.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: “ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ” Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
2.1 ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	18
2.1.1 Διάβρωση λόγω νερού: Παράγοντες.....	18
2.1.2 Αποτελέσματα της διάβρωσης.....	20
2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: “ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ BSTEM”.....	45
3.1 Δομή και περιεχόμενο του μοντέλου.....	46
3.2 Διαδικασία χρήσης του μοντέλου.....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: “ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ”.....	61
4.1 Γεωγραφική θέση-Έκταση-Διοικητική Υπαγωγή.....	62
4.2 Χάρτες της περιοχής μελέτης.....	62
4.3 Περιγραφή περιβάλλοντος.....	65
4.3.1 Κλιματολογικά και μετεωρολογικά χαρακτηριστικά:.....	65
4.3.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά.....	67
4.3.3 Υδρολογικά χαρακτηριστικά.....	70
4.3.4 Μορφολογικά χαρακτηριστικά.....	71
4.3.5 Παρόχθιο δάσος, Χλωρίδα και Πανίδα.....	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο : “ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ”.....	74
5.1 Λήψη των δεδομένων της γεωμετρίας της όχθης.....	80
5.2 Εργαστηριακή Ανάλυση Δειγμάτων Εδάφους.....	80
5.3 Στατιστική επεξεργασία δεδομένων.....	81
5.3.1 GUMBEL ΜΕΘΟΔΟΣ για μοντελοποιημένα Δεδομένα (με το SWAT) με χρήση ετήσιων μεγίστων.....	83
5.3.2 LOG PEARSON TYPE 3 ΜΕΘΟΔΟΣ για μοντελοποιημένα δεδομένα (με το SWAT), με AM μέθοδο.....	83
5.4 Εύρεση του ύψους ροής με βάση την πλημμυρική παροχή.....	84

5.5 Εισαγωγή Δεδομένων στο BSTEM.....	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο : “ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ”	86
6.1 Συλλογή Δεδομένων Πεδίου.....	87
6.2 Εργαστηριακή Ανάλυση.....	87
6.3 Στατιστική Ανάλυση.....	88
6.4 Ύψος ροής με βάση την πλημμυρική παροχή.....	90
6.5 Μοντέλο BSTEM	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ^ο : “ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΠΑΡΟΧΘΙΟΥ ΔΑΣΟΥΣ”	101
Βιβλιογραφία	105

Οδηγός Διαγραμμάτων-Πινάκων-Σχημάτων-Χαρτών

Διαγράμματα

4.1 Μέσες τιμές της βροχόπτωσης για την περίοδο 1958-1997.....	66
4.2 Κατανομή της μέσης βροχόπτωσης για το έτος 2007.....	85
6.1 Παροχή επαναφοράς κατά Gumbel συναρτήσει χρόνου και ετήσια μέγιστη παροχή συναρτήσει χρόνου.....	88
5.1 Ύψος όψθης συναρτήσεις μήκους όχθης για το σημείο Σ1.....	85
6.2 Παροχή επαναφοράς κατά Log Pearson συναρτήσει χρόνου και ετήσια μέγιστη παροχή συναρτήσει χρόνου.....	89
6.3 Παροχή επαναφοράς κατά Gumbel συναρτήσει ετήσιας μέγιστης παροχής.....	89
6.4 Παροχή επαναφοράς κατά Log Pearson συναρτήσει ετήσιας μέγιστης παροχής.....	90
6.5 Ποιοτικά αποτελέσματα υπομοντέλου διάβρωσης για το σημείο 1 σύμφωνα με το σενάριο Α: Προφίλ Διάβρωσης.....	94
6.6 Ποιοτικά αποτελέσματα υπομοντέλου αστοχίας για το σημείο 1, σύμφωνα με το σενάριο Α: Πλάνο Αστοχίας.....	94

Πίνακες

6.1	Είδος και D_{50} δειγμάτων $\Delta 1$, $\Delta 2$, $\Delta 3$	87
6.2	Πίνακες αποτελεσμάτων και σφαλμάτων των μεθόδων Gumbel & Log Pearson.....	88
6.3	Δεδομένα μήκους και ύψους των σημείων $\Sigma 1$ και $\Sigma 2$	90
6.4	Δεδομένα εισαγωγής στο πρόγραμμα BSTEM για τα σημεία 1 και 2.....	91
6.5	Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας με αρχικό σενάριο απουσίας βλάστησης.....	93
6.6	Ποσοτικά Αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας με αρχικό σενάριο ύπαρξης βλάστησης.....	93
6.7	Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας σύμφωνα με το σενάριο προσθήκης μέτρου προστασίας (Rip-Rap).....	95
6.8	Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας σύμφωνα με το σενάριο της εξομάλυνσης της κλίσης και τοποθέτησης μεθόδου προστασίας	
6.8	Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας σύμφωνα με το σενάριο της αλλαγής του υλικού και της εξομάλυνσης....	95
6.9	Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας με αρχικό σενάριο απουσίας βλάστησης.....	96
6.10	Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας σύμφωνα με το σενάριο ύπαρξης βλάστησης.....	96
6.11	Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας σύμφωνα με το σενάριο προσθήκης μέτρου προστασίας (Rip-Rap).....	97
6.12	Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας σύμφωνα με το σενάριο της αλλαγής της κλίσης και προσθήκης μέτρου προστασίας (RipRap).....	97
6.13	Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας σύμφωνα με το σενάριο της αλλαγής του υλικού και της εξομάλυνσης της κλίσης.....	97
6.13		

Σχήματα

3.1 Προφίλ της όχθης πέντε διαφορετικών στρωμάτων.....	47
3.2 Μορφές αστοχίας πρανούς στο πεδίο.....	48
3.3 Διαίρεση του τμήματος αστοχίας σε κατακόρυφες λωρίδες.....	51
3.4 Κατάτμηση των τοπικών περιοχών ροής του πρανούς και των υδραυλικών ακτίνων.....	53
5.1 Μεθοδολογία εκτίμησης της διάβρωσης και αστοχίας του πρανούς του ποταμού Κοιλιάρη.....	76

Χάρτες

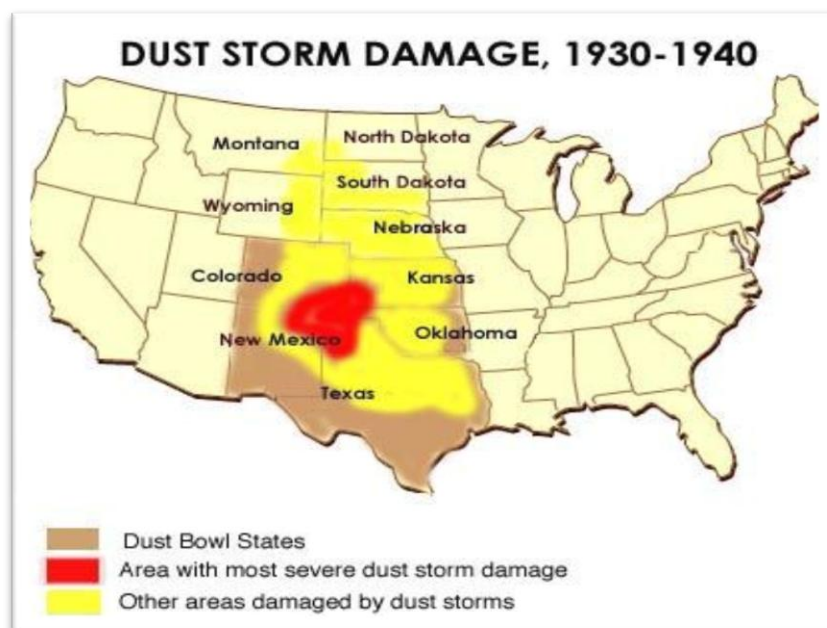
4.1 Γεωγραφική θέση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.....	62
4.2 Απεικόνιση του ποταμού Κοιλιάρη και των υδατορευμάτων μέσω αεροφωτογραφίας.....	63
4.3 Υψόμετρα Νομού Χανίων.....	63
4.4 Κλίσεις Νομού Χανίων.....	64
4.5 Τοπογραφικές κλίσεις στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.....	64
4.6 Ισοϋψείς καμπύλες στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.....	65
4.7 Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.....	68

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: “ΕΙΣΑΓΩΓΗ”

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρούνται αυξανόμενες πιέσεις στο υδάτινο περιβάλλον οι οποίες προέρχονται από την αύξηση του πληθυσμού, τον τουρισμό, την εντατική καλλιέργεια και την άρδευση αλλά και την ανεξέλεγκτη ρύπανση που πρόρχεται από τις βιομηχανικές ενέργειες. Έτσι, ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων καθίσταται αναγκαία. Παράλληλα, τα φαινόμενα κλιματικής αλλαγής έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού παρατήρησης ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως είναι και οι έντονες βροχοπτώσεις. Η διάβρωση του εδάφους αποτελεί ένα φαινόμενο που εμφανίστηκε από τότε που η Γη στερεοποιήθηκε και από τότε συνεχίζεται με ρυθμό ακατάπαυστο (Στουρνάρας και Σταυροπούλου, 2010). Ωστόσο, με τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις η διάβρωση γίνεται εντονότερη, η δομή του εδάφους καταστρέφεται και έτσι το πρόβλημα της προστασίας των εδαφών από την διάβρωση αποκτά όλο και περισσότερη σημασία. Η διάβρωση συναντάται σε διάφορα σημεία της Γης και οι αιτίες και τα αποτελέσματα αυτής ποικίλουν. Τρία από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα των τελευταίων δεκαετιών έχουν ως κύριο γνώμονα το φαινόμενο της διάβρωσης του εδάφους και είναι τα εξής:

- Dust Bowl (Αμερική, δεκαετία του 1930)
- Virgin Land Campaign (Ρωσία, 1953-1963)
- Loess Plateau (Κίνα)

Την περίοδο της δεκαετίας του 1910-1920 οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούσαν στην Αμερική ήταν ευνοϊκές, με ήπιους χειμώνες και τον απαραίτητο ρυθμό βροχοπτώσεων. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την αυξημένη ζήτηση για σιτάρι από τις χώρες της Ευρώπης οδήγησε στην αποψίλωση εκατομμυρίων εκταρίων που ήταν φυτεμένα με χόρτα και την καλλιέργεια αυτών με άλλα είδη βλάστησης όπως το σιτάρι. Το 1931 ξεκίνησε μία μακρά περίοδος ξηρασίας, η οποία διήρκησε περίπου 10 χρόνια. Έτσι, το έδαφος χωρίς το βαθύ ριζικό σύστημα, από το οποίο χαρακτηριζόταν πριν τις γεωργικές παρεμβάσεις, (West, 2017) είχε μετατραπεί σε ιδιαίτερα εύθραυστο και διαβρώσιμο. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την δημιουργία μαζικών καταιγίδων σκόνης (**Dust Bowl**) οι οποίες επεκτάθηκαν στις περιοχές: Οκλαχόμα, Κάνσας, Τέξας, Κολοράντο, Μεξικό, Καλιφόρνια και Ουάσινγκτον (West, 2017) και οι οποίες φαίνονται στον Χάρτη 1.1 και στην εικόνα 1.2.



Εικόνα 1. 1: Χάρτης των περιοχών που πλήχθηκαν από το φαινόμενο “Dust Bowl” (Πηγή <https://gr.pinterest.com>)



Εικόνα 1.2a Μαύρα σύννεφα σκόνης στο Τέξας (1936)



Εικόνα 1. 2b Μεγάλα σύννεφα σκόνης στο Τέξας (1935) (Πηγή: wikipedia)

Σχετικά με το **Virgin Land Campaign**, αποτελεί μία μεγάλη οικολογική καταστροφή που ξεκίνησε το 1953 με απόφαση της Σοβιετικής κυβέρνησης να καλλιεργήσει τις άγονες εκτάσεις που βρίσκονταν στο βόρειο Καζακστάν και ανατολικά της λίμνης Aral Sea. Στην εικόνα 1.3 φαίνεται η λίμνη Aral Sea και οι ποταμοί (Amu Darya και Syr Darya) από τους οποίους τροφοδοτούνταν και οι οποίοι εκτράπηκαν με σκοπό να τροφοδοτούν με νερό εκτάσεις αποτελούμενες από στέρφα αλλά και εδάφη που βρίσκονταν σε αγρανάπαυση. Έτσι, η λίμνη Aral Sea που ήταν από τις τέσσερις μεγαλύτερες λίμνες της Ρωσίας, μειώθηκε σταδιακά σε έκταση (Crighton et al, 2003). Σήμερα, η θάλασσα καλύπτει περίπου το ένα τρίτο της έκτασης που κάλυπτε το 1960 και η αλατότητα του νερού έχει από 10g/l στα 35g/l (Glantz, 1999; Glazovsky, 1995). Το έδαφος είχε

αρχίσει σταδιακά να διαβρώνεται και από μελέτη που πραγματοποιήθηκε το 2000 (O'Hara and colleagues, 2000), βρέθηκε πως οι ρυθμοί εναπόθεσης της αερομεταφερόμενης σκόνης ήταν μεταξύ των υψηλότερων στον κόσμο. Η σκόνη περιείχε υψηλά ποσοστά τοξινών και άλλων χημικών ουσιών που οφείλονταν σε παρασιτοκτόνα και λιπάσματα. Στην φωτογραφία 1.4 απεικονίζεται η λίμνη Aral Sea μετά την σταδιακή μείωση της έκτασής της.



Εικόνα 1.3 Λίμνη Aral Sea και οι ποταμοί τροφοδότησης της Amu Darya και Syr Darya (Πηγή: <http://www.columbia.edu/~tmt2120/introduction.htm>)



Εικόνα 1.4 Περιοχή της λίμνης Aral Sea, αφού έχει στερέψει και επιφανειακές ποσότητες αλατιού (Πηγή: Justin Abel et al)

Η περιοχή **Loess Plateau** βρίσκεται στην Κίνα και συγκεκριμένα στην μέση και προς τα ανάντη του ποταμού Yellow River. Η έκταση που καταλαμβάνει είναι 624.000km^2 και χαρακτηρίζεται από υψηλά ποσοστά αιολικού ιζήματος, το loess. Οι λόγοι εμφάνισης του ιζήματος αυτού είναι φυσικοί, γεωλογικοί, κλιματικοί αλλά ανθρωπογενείς. Το Loess Plateau διακρίνεται από μικρή φυτοκάλυψη και βρίσκεται σε ξηρή, ημί-ξηρή κλιματική ζώνη, με αστάθεια στις βροχοπτώσεις και περιόδους υψηλής έντασης καταιγίδων (Shi And Shao, 1999). Έτσι, η αδυναμία των κατοίκων να κατανοήσουν τις ιδιότητες του εδάφους οδήγησε στην αποψίλωση, υπερβόσκηση και σταδιακή ερημοποίηση της περιοχής μέσω ακατάλληλων γεωργικών εφαρμογών. Αυτός είναι ο

κυριότερος λόγος εμφάνισης της διάβρωσης (από νερό και κυρίως από ανέμους) που υπέστη το έδαφος και της απώλειας των θρεπτικών (Fu et al., 2000).



Εικόνα 1. 3 Περιοχή Loess Plateau, Κίνα (Πηγή: wikipedia)

Είναι, λοιπόν, κατανοητό ότι πολλά από τα περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως είναι και η διάβρωση, προκύπτουν από την αγνόηση των εδαφικών συνθηκών ή από αποτυχία εκτίμησης της επιδράσεως των γνωστών εδαφικών συνθηκών σε κάποια περιοχή. Στην Ελλάδα, η διάβρωση του εδάφους πλήττει 3,3 εκατομμύρια εκτάρια, αριθμός που αντιστοιχεί στο 26,5% της συνολικής έκτασης της χώρας (Μήτσιος κ.α., 1995).

Σημαντικό πρόβλημα υπάρχει όταν η διάβρωση λαμβάνει χώρα σε φυσικά πρηνή και ιδιαίτερα σε πρηνή ποταμών. Σε ένα φυσικό πρηνές η ευστάθεια δεν είναι πάντοτε εξασφαλισμένη καθώς μπορεί να αστοχήσει υπό την επίδραση γεωλογικών, γεωτεκτονικών ή φυσικών παραγόντων. Φαινόμενα όπως η διάβρωση, η μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα, οι σεισμοί κ.α. μπορούν να προκαλέσουν την αστοχία του φυσικού πρηνούς (Σακελλαρίου Μ., 2009). Στην περίπτωση που η αστοχία ενός φυσικού πρηνούς έχει επιπτώσεις στο κοινωνικό σύνολο, τότε το πρηνές πρέπει να προστατευτεί και να ενισχυθεί. Η ευστάθεια ενός τεχνητού πρηνούς εξασφαλίζεται με την χρησιμοποίηση έργων αντιστήριξης π.χ. τοίχοι αντιστήριξης, διαφράγματα από πασσάλους/αγκυρώσεις, οπλισμένη γη – γεωυφάσματα κ.α. (Σακελλαρίου Μ., 2009). Εξ αιτίας της κάθετης εξέλιξης του φαινομένου σε σχέση με τον άξονα της ροής του νερού, η πρηνική διάβρωση παρουσιάζει τοπικό χαρακτήρα και τα υλικά που απάγονται και διακινούνται στην κοίτη είναι διαφόρων μεγεθών με μεγαλύτερη συμμετοχή μέσου μεγέθους και λεπτόκοκκων υλικών (Μουλόπουλος, 1968). Οι φωτογραφίες 1.4a και b αποτελούν παραδείγματα αστοχίας των πρηνών λόγω της διάβρωσης.



Εικόνα 1.4a: Απώλεια τμήματος παρόχθιου πρανούς με αποτέλεσμα την εμφάνιση του ριζικού συστήματος δέντρου (Πηγή: <http://thirstyinsuburbia.com>)



Εικόνα 1.4b: Αστοχία πρανούς λόγω της υποσκάπτουσας διάβρωσης από την ροή του ποταμού (Πηγή: <http://www.lincolnsbcd.org>)

Με όμοιο τρόπο δρουν οι δυνάμεις της διάβρωσης και στον ποταμό Κοιλιάρη που βρίσκεται στον Νομό Χανίων, στην Κρήτη. Έτσι, η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην ανάπτυξη μεθοδολογίας για την εκτίμηση του κινδύνου της διάβρωσης και της σταθερότητας ή μη του πρανούς του ποταμού Κοιλιάρη. Για να επιτευχθεί η μελέτη αυτή πραγματοποιείται εργασία πεδίου με σκοπό την λήψη δεδομένων από την περιοχή μελέτης, επεξεργασία και μοντελοποίηση αυτών μέσω του προγράμματος BSTEM και εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Σκοπός είναι η εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων για τις περιοχές που πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία, που αφορούν τη διάβρωση και την αστοχία της όχθης καθώς επίσης και η πρόταση μέτρων προστασίας στα σημεία όπου το πρανές παρουσιάζει “ευαισθησία” απέναντι στην διάβρωση. Με την γνώση των ποσοτικών αυτών αποτελεσμάτων είναι εφικτή η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της παρόχθιας ζώνης και γενικότερα των υδάτινων συστημάτων όπως είναι τα ποτάμια σε γεγονότα πλημμυρικών φαινομένων. Οπότε, είναι κατανοητό πως η λήψη έγκυρων αποτελεσμάτων εξαρτάται από την εγκυρότητα των δεδομένων εισόδου και είναι καθοριστική για πρόταση των κατάλληλων μεθόδων αποκατάστασης. Τέλος η ανάγκη για ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων, και ειδικότερα των φυσικών πρανών, είναι επιτακτική και πρέπει να αποτελεί χρέος όλων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: “ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ”

2.1 ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η διάβρωση του εδάφους αποτελεί το φαινόμενο της φυσικής απομάκρυνσης του επιφανειακού εδάφους και της εναπόθεσης αυτού σε άλλα σημεία της γήινης ή υδατικής επιφάνειας. Οι συνηθέστεροι λόγοι οι οποίοι προκαλούν το φαινόμενο της διάβρωσης είναι το νερό, ο αέρας, ο πάγος και οι ανθρώπινες δραστηριότητες. Η διάβρωση περιλαμβάνει την απόσπαση του λεπτόκοκκου υλικού από την μάζα του εδάφους και την μεταφορά των αδιάλυτων σωματιδίων (άμμος, λάσπη και οργανικό υλικό) σε άλλα σημεία (UK Essays, 2003). Όταν δεν παρέχεται ικανή ποσότητα ενέργειας για την μεταφορά τότε πραγματοποιείται η τρίτη φάση, που είναι η απόθεση (Morgan, 1986). Υπάρχουν τέσσερις βασικές πηγές ενέργειας (R.Lal, 2001):

- Φυσική (π.χ. νερό και ο αέρας)
- Χημική (π.χ. χημικές αντιδράσεις)
- Ανθρωπογενής (π.χ. όργωμα εδάφους)
- Βαρύτητα

Η διάβρωση λαμβάνει χώρα στο έδαφος όταν επικρατούν συνθήκες όπου η βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη από την διηθητικότητα του εδάφους. Ή σε διαφορετική περίπτωση, όταν η βροχόπτωση πέφτει σε ένα κορεσμένο με νερό έδαφος εξαιτίας προγενέστερων συνθηκών υγρασίας ή λόγω αυξημένης υπόγειας στάθμης νερού. Επομένως, το νερό παραμένει στην επιφάνεια του εδάφους και χαμηλότερα, δεδομένου πως υπάρχει εδαφική κλίση και συμπαρασέρνει το έδαφος (Μισοπολινός, 1992).

2.1.1 Διάβρωση λόγω νερού: Παράγοντες

Το τρέχων στην επιφάνεια του εδάφους νερό είναι ο κύριος παράγοντας που οδηγεί στην διάβρωση. Οι παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται το φαινόμενο αυτό είναι οι κλιματικοί παράγοντες, η διαβρωσιμότητα του εδάφους, η κλίση του εδάφους, η βλάστηση της περιοχής και οι ανθρώπινοι παράγοντες. Κάθε ένας από αυτούς τείνει είτε να εντείνει είτε να μειώνει το ποσοστό της διαβρωμένης επιφάνειας. Αναλυτικότερα:

Κλιματικοί παράγοντες: Η βροχή και τα χαρακτηριστικά αυτής αποτελούν τον κυριότερο κλιματικό παράγοντα. Όταν εξετάζεται το πρόβλημα της διάβρωσης η ένταση της βροχόπτωσης και η επιφανειακή απορροή διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο. Μεταξύ άλλων, οι παρακάτω παράμετροι φαίνονται να ανταποκρίνονται καλύτερα στις ανάγκες για την μελέτη της διάβρωσης (Wischmeier, 1962): ετήσιο ύψος βροχόπτωσης, μέση ένταση (συμπεριλαμβανομένων και της ανομβρίας), μέση ένταση (της πραγματικής περιόδου βροχοπτώσεων) καθώς και η μέση και συνολική ένταση των ραγδαίων βροχοπτώσεων. Σε βροχοπτώσεις που χαρακτηρίζονται από μεγάλη ένταση και χαμηλή διάρκεια, η απομάκρυνση του εδαφικού επιφανειακού υλικού είναι εντονότερη. Ωστόσο, επιφανειακή απορροή εμφανίζεται όταν το νερό της βροχόπτωσης δεν είναι δυνατό να απορροφηθεί από το έδαφος και να διεισδύσει μέσα στους πόρους αυτού και έτσι απορρέει επιφανειακά.

Ειδικότερα, όταν υπάρχει βροχόπτωση, οι σταγόνες που πέφτουν στην επιφάνεια του εδάφους προκαλούν το σπάσιμο των συσσωματωμάτων του εδάφους και το υλικό τους διασκορπίζεται. Ελαφρύτερα συσσωματώματα, όπως

αυτά που αποτελούνται από λεπτόκοκκη άμμο ή άργιλο συμπαρασύρονται ευκολότερα από τις σταγόνες της βροχής και την επιφανειακή απορροή. Αντίθετα, τα συσσωματώματα που αποτελούνται από χονδρόκοκκη άμμο ή χαλίκι απαιτούν μεγαλύτερη ενέργεια για να απομακρυνθούν

Διαβρωσιμότητα: Η διαβρωσιμότητα του εδάφους εκφράζει την “ευαισθησία” του εδάφους απέναντι στην διάβρωση (Yang et al, 2005). Είναι, δηλαδή, η ικανότητα που έχει κάθε έδαφος, βάσει των φυσικών χαρακτηριστικών του να αντιστέκεται στην διάβρωση. Οι ιδιότητες του εδάφους που καθορίζουν τη διαβρωσιμότητα του είναι η διηθητικότητα, η διαπερατότητα, η υδατοικανότητα και η σταθερότητα των συσσωματωμάτων (Lilli, 2011):

- Διηθητικότητα: αποτελεί το φαινόμενο κατά το οποίο το νερό που προέρχεται από την βροχόπτωση ή από άρδευση διεισδύει στην μάζα του εδάφους μέσω της επιφάνειας αυτού. Συνήθως, η διηθητικότητα είναι ταχεία κατά την έναρξη της παροχής νερού, βαθμιαία όμως το επιφανειακό έδαφος γίνεται κορεσμένο σε νερό και η διηθητικότητα μειώνεται μέχρι μια σταθερή τιμή. Αν διακοπεί η παροχή νερού, η διηθητικότητα μειώνεται κι άλλο και μηδενίζεται όταν απορροφηθεί όλο το νερό από την επιφάνεια. Η διηθητικότητα εξαρτάται κυρίως από τη μηχανική σύσταση του εδάφους και τη δομή του, αλλά και από το ύψος της στάθμης του νερού που συσσωρεύεται στην επιφάνεια (λόγω της υδροστατικής πίεσης).
- Διαπερατότητα: εκφράζει το πόσο διαπερατό είναι το έδαφος, δηλαδή το πόσο εύκολα ή δύσκολα κινείται το νερό μέσα σε αυτό. Εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό, την κατανομή και το μέγεθος των πόρων, αλλά αυξάνεται και λόγω υδροστατικής πίεσης όταν η επιφάνεια είναι καλυμμένη από νερό.
- Υδατοϊκανότητα: ορίζεται η υγρασία που συγκρατεί ένα ομοιογενές και βαθύ έδαφος μετά από την απομάκρυνση του ελεύθερου νερού από το έδαφος. Είναι δηλαδή το ποσό του νερού από συγκρατείται στο έδαφος ενάντια στις δυνάμεις της βαρύτητας. Αναλυτικότερα, Όταν σε ένα έδαφος ξεκινάει η στράγγιση, η υγρασία του εδάφους μειώνεται και ακολουθεί μείωση της ακόρεστης υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους. Μετά την παρέλευση χρόνου η τιμή αυτή γίνεται πολύ μικρή με αποτέλεσμα η κίνηση του νερού στο έδαφος να θεωρείται πρακτικά ανύπαρκτη. Η υγρασία στο σημείο αυτό αντιστοιχεί στην υδατοικανότητα.
- Σταθερότητα των συσσωματωμάτων: Τα εδαφικά κλάσματα δεν βρίσκονται στο έδαφος μεμονωμένα αλλά συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας εδαφικά συσσωματώματα. Η ύπαρξη των εδαφικών συσσωματωμάτων οφείλεται στις δυνάμεις συνοχής και συνάφειας του εδάφους. Οι δυνάμεις συνοχής οφείλονται στην έλξη μεταξύ των ορυκτών της αργίλου, ενώ οι δυνάμεις συνάφειας οφείλονται στην έλξη μεταξύ του νερού και των εδαφικών κόκκων, στις επιστρώσεις οργανικής ύλης στην άργιλο και στις συγκολλήσεις μεταξύ τους.

Κλίση: Σε αυτήν την περίπτωση κύριο ρόλο παίζει ο βαθμός και το μήκος της κλίσης. Ισχύει πως όσο πιο απότομη είναι η κλίση της όχθης, τόσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητα της επιφανειακής απορροής καθώς η βαρύτητα έχει μεγαλύτερη επίδραση στην μετακίνηση των σωματιδίων του εδάφους, όσο αυξάνεται η κλίση και έτσι αυξάνεται η ποσότητα του υλικού το οποίο απομακρύνεται από το επιφανειακό στρώμα του εδάφους. Ενώ, Σε ότι αφορά

τον βαθμό της κλίσης έχει βρεθεί πειραματικά ότι για κλίσεις μικρότερες του 10%, ο διπλασιασμός τους (π.χ. από 4% σε 8%) συνεπάγεται σχεδόν τον διπλασιασμό της απώλειας του εδάφους, ενώ κλίσεις μεγαλύτερες από 10% αποτελούν το κυριότερο εμπόδιο για την καλλιέργεια της γης (Συλλαίος, 1990). Για τον παραπάνω λόγο, συνίσταται σε κάποιες περιπτώσεις η εξομάλυνση της κλίσης της παρόχθιας ζώνης.

Βλάστηση: Η ύπαρξη της βλάστησης βοηθά στην μείωση της διάβρωσης του εδάφους. Όταν υπάρχουν φυτά στην όχθη του ποταμού, μειώνεται η επιφάνεια του εδάφους που είναι εκτεθειμένη στις σταγόνες της βροχής. Έτσι, μόνο ένα μικρό ποσοστό συσσωματωμάτων μπορεί να επηρεαστεί από την ενέργεια των σταγονιδίων της βροχής και διαλυθεί. Παράλληλα, ύπαρξη βλάστησης συντελεί στη μείωση της ταχύτητας του νερού απορροής αλλά και στη μείωση της υγρασίας του εδάφους λόγω της εξάτμισης, με αποτέλεσμα να εισδύει περισσότερο νερό στο έδαφος στην επόμενη βροχόπτωση (Lilli, 2011). Επίσης, η ύπαρξη ριζικού συστήματος ενισχύει την σταθερότητα του εδάφους, και συγκεκριμένα στις παρόχθιες ζώνες η φύτευση αποτελεί μια σημαντική μέθοδο προστασίας από την διάβρωση.

Ανθρώπινος Παράγοντας: Οι ανθρώπινες δραστηριότητες συμβάλλουν σημαντικά στην διάβρωση του εδάφους. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

- Υπερβόσκηση: καθώς τα ζώα καταστρέφουν την επιφάνεια του εδάφους τρώγοντας την βλάστηση που υπάρχει ή συμπιέζοντας το έδαφος με τις σπλές τους.
- Υπερβολική καλλιέργεια: σε αυτήν την περίπτωση γίνεται λόγος για όλες τις δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα σε μια καλλιέργεια, όπως το όργωμα και γενικότερα η χρήση μηχανημάτων η οποία επηρεάζει το πορώδες του εδάφους.
- Αποψίλωση: διότι καταστρέφεται η βιοποικιλότητα, τα οικοσυστήματα των δασών καθώς επίσης επέρχεται σταδιακή ξηρασία.
- Δασικές πυρκαγιές: διότι η σύσταση του εδάφους καταστρέφεται σε μεγάλο ποσοστό και έπειτα αδυνατεί να διαχειριστεί τις βροχοπτώσεις.

2.1.2 Αποτελέσματα της διάβρωσης

Ανεξαρτήτως της πηγής προέλευσης της, η διάβρωση προκαλεί ποικίλες συνέπειες στο περιβάλλον μερικές από τις οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών: Όταν το έδαφος τα θρεπτικά συστατικά που βρίσκονται στην επιφάνεια του απομακρύνονται μαζί με την απομάκρυνση του λεπτόκοκκου υλικού. Έτσι, τα φυτά αντιμετωπίζουν δυσκολίες στην ανάπτυξη τους και η καλλιεργήσιμη έκταση μειώνεται. Παράλληλα, υποβαθμίζεται η ποιότητα των καλλιεργειών καθώς υπάρχει έλλειψη βασικών για την ανάπτυξη τους συστατικών (Kazmeyer, 2017)

Βάθος ριζών και σταθερότητα: Η διάβρωση προκαλεί αλλαγές στο βάθος του εδάφους. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση του ποσοστού του εδάφους που είναι διαθέσιμο για την ανάπτυξη και επέκταση του ριζικού συστήματος. Ιδιαίτερο πρόβλημα παρουσιάζεται στα είδη φυτών που διαθέτουν ευρύ ριζικό σύστημα (Kazmeyer, 2017). Ιδιαίτερα, στις όχθες των ποταμών η διάβρωση υποσκάπτει

το πόδι της όχθης δημιουργώντας συνθήκες αστάθειας, οι οποίες μπορούν να έχουν σαν αποτέλεσμα την κατολίσθηση της πλαγιάς.

Νερό: Το υλικό το οποίο απομακρύνεται από την επιφάνεια του εδάφους όταν λαμβάνει χώρα η διάβρωση καταλήγει σε ρυάκια, ποτάμια ή ακόμα και κόλπους. Αυτό έχει την δυνατότητα να αλλάξει το βάθος του ποταμού και έτσι να αλλάξει την πορεία της ροής του νερού. Σε κάποιες περιπτώσεις, με την πάροδο του χρόνου είναι δυνατή ακόμα και η δημιουργία νέου “μονοπατιού” ροής. Επίσης, όταν η διάβρωση συμβαίνει σε καλλιεργήσιμες περιοχές, το επιφανειακό λεπτόκοκκο υλικό είναι πλούσιο σε λιπάσματα που περιέχουν νιτρικά. Τα νιτρικά όταν έρχονται σε επαφή με άλλα θρεπτικά που υπάρχουν στο νερό ενός ποταμού ευνοούν την ανάπτυξη του φυτοπλαγκτόν (M.Kazmeyer, 2017).

2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ

Με την πάροδο των χρόνων η κλιματική αλλαγή φαίνεται να αποτελεί ένα σοβαρό πρόβλημα το οποίο οδηγεί στην παρουσία ακραίων καιρικών φαινομένων, μεταξύ αυτών και οι πλημμύρες. Για αυτό, λοιπόν, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν και να χρησιμοποιηθούν τεχνικές για την αντιμετώπιση της διάβρωσης στα ποτάμια συστήματα αλλά και για την επίτευξη της σταθερότητας αφού η διάβρωση οδηγεί πολλές φορές στην αστοχία των πρηνών. Αποτελεί ένα φαινόμενο το οποίο επηρεάζει την μορφολογία του ποταμού και το οικοσύστημα της περιοχής του ποταμού. Έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια εδάφους, ζημιές σε ιδιοκτησίες κατοίκων και υποδομές αλλά και αδυναμία αποτροπής και διαχείρισης πλημμυρικών φαινομένων (Varouchakis et al, 2015). Οι επιπτώσεις που επιφέρει η διάβρωση παρουσιάζονται στον φυσικό, οικολογικό και κοινωνικοοικονομικό τομέα. Εξαρτάται άμεσα από την σχέση μεταξύ των υδραυλικών συνθηκών του καναλιού και των φυσικών ιδιοτήτων της όχθης, χαρακτηριστικά τα οποία είναι μεταβλητά στην φύση (Varouchakis et al, 2015). Έτσι, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι αποκατάστασης των ποταμών που αποσκοπούν στην δημιουργία μιας σταθερής όχθης η οποία θα μπορεί να δεχθεί τις μεγάλες παροχές μιας πλημμύρας, ενώ συγχρόνως δεν επιβαρύνουν την περιβαλλοντική ισορροπία.

Συγκεκριμένα, κατά την διαδικασία της αποκατάστασης των ποταμών, γίνεται προσπάθεια μέσω διαφόρων τεχνικών να επανέλθει το ποτάμι στην φυσική του κατάσταση και έτσι να επιτευχθεί η επαναφορά και διατήρηση της βιοποικιλότητας. Η δομή του καναλιού αλλάζει και έτσι παρέχονται κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες για τους έμβιους οργανισμούς. Στόχος είναι η ύπαρξη ενός υγιούς οικοσυστήματος το οποίο με την πάροδο του χρόνου, θα επανέρχεται σταδιακά στην αρχική, φυσική του κατάσταση.

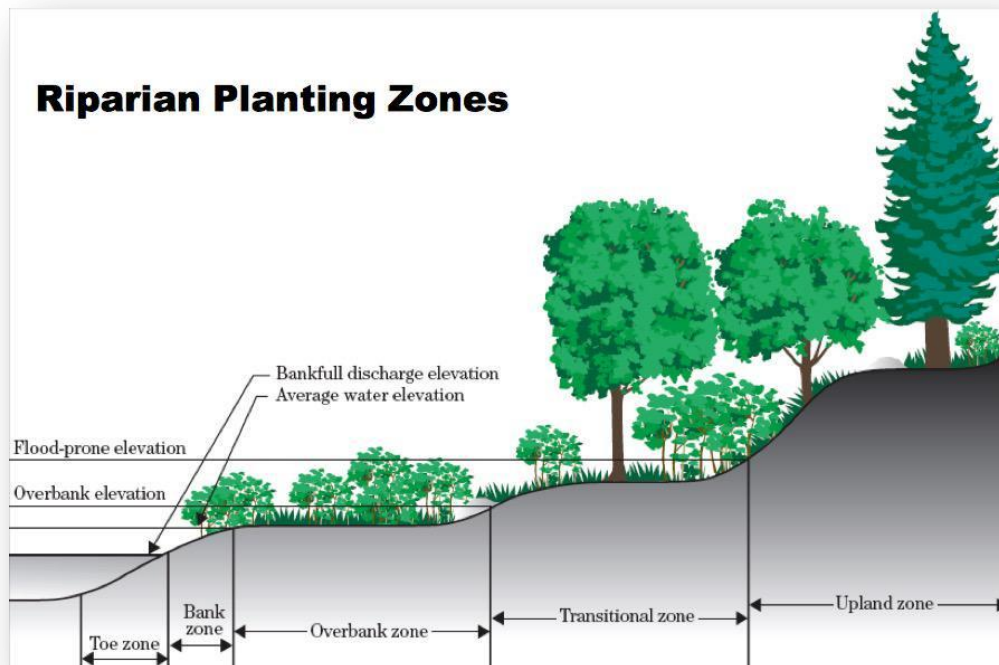
Οι ζώνες αποκατάστασης ενός ποταμού διακρίνονται σε δύο τμήματα:

- A) Αποκατάσταση της παρόχθιας περιοχής (Restoration of the riparian zone)
- B) Αποκατάσταση του καναλιού του ποταμού (River channel restoration)

Για κάθε ένα από τα προαναφερόμενα τμήματα ενδείκνυνται διαφορετικές τεχνικές αντιμετώπισης της διάβρωσης, οι οποίες αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω.

A) Αποκατάσταση παρόχθιας ζώνης

Η παρόχθια ζώνη αποτελεί την διεπιφάνεια μεταξύ του γήινου και υδατικού οικοσυστήματος και συχνά αλλάζει κάτω από διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες. Ουσιαστικά, παρόχθιες ζώνες “συνορεύουν” με ποτάμια, καθώς και με άλλα συστήματα επιφανειακών υδάτων. Χωρίζεται σε περαιτέρω ζώνες σύμφωνα με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά που επικρατούν όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1 που ακολουθεί.



Εικόνα 2.1: Διαχωρισμός ζωνών της παρόχθιας περιοχής (Πηγή: USDA's Natural Resources Conservation)

Ανάλογα, λοιπόν, στις διάφορες ζώνες στις οποίες χωρίζεται η παρόχθια περιοχή ενός ποταμού, είναι δυνατή και η ταξινόμηση των μεθόδων αντιμετώπισης της διάβρωσης που λαμβάνει χώρα.

Προστασία του ποδιού (Protection of Toe Zone)

1) Live plantings

Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει την φύτευση των κατάλληλων ειδών βλάστησης στην όχθη του ποταμού και μπορεί να εφαρμοσθεί σε όλη την περιοχή της

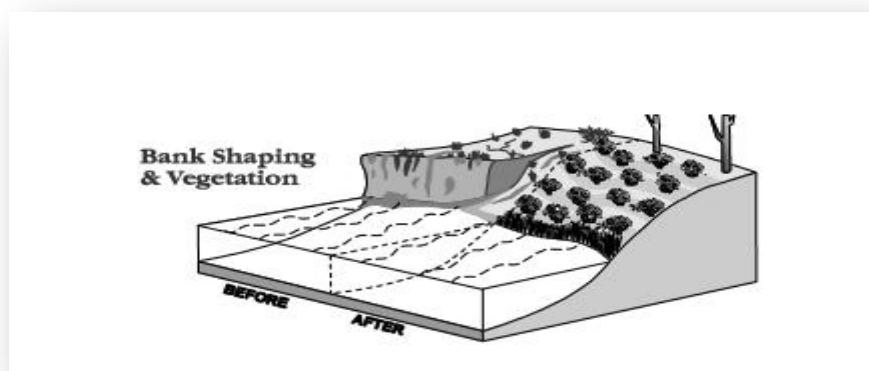
όχθης από την κορυφή έως το πόδι της όχθης. Με τέτοιου είδους τεχνικές επιτρέπεται στην φύση να αποκαταστήσει η ίδια το έδαφος που έχει υποστεί διάβρωση.

✓ Τοποθέτηση φυτών ή φύτευση σπόρων

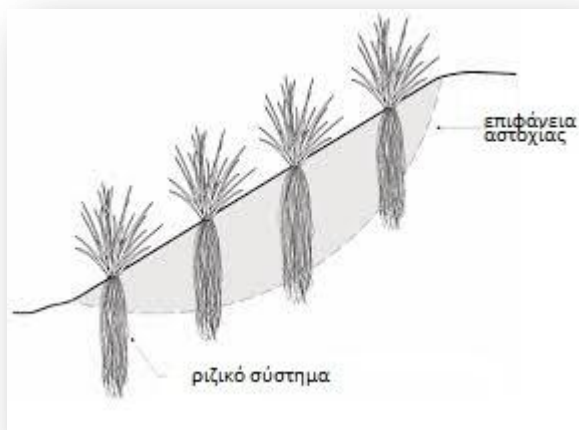
Συγκεκριμένα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σπόροι ή δένδρα μικρής ηλικίας. Στην περίπτωση που φυτευτούν σπόροι, είναι μέγιστης σημασίας να αποτελούν κάποιο είδος βλάστησης το οποίο είναι χαρακτηριστικό της περιοχής έτσι ώστε να είναι «συμβατό» με την γεωμορφολογία του εδάφους. Ωστόσο, δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει μόνο ένα είδος βλάστησης, αντιθέτως, ενδείκνυται η ύπαρξη ποικιλομορφίας. Ενδείκνυνται η διαμόρφωση της πλαγιάς και η εξομάλυνση της κλίσης της, έτσι ώστε στην συνέχεια να φυτευτούν με ευκολία τα δενδρύλλια. Έτσι, όταν δημιουργηθεί το ριζικό σύστημα των φυτών, το έδαφος θα αποκτήσει σταδιακά σταθερότητα. Η ικανότητα του επάνω μέρους των φυτών να μειώνει την ταχύτητα της ροής σε περιόδους εμφάνισης μεγάλων παροχών βοηθά στην αποφυγή περαιτέρω διάβρωσης αλλά και στην αποκατάσταση της διαβρωμένης περιοχής του παραποτάμιου συστήματος. Στην εικόνα 2.2 παρουσιάζεται η αλλαγή που πρόκειται να επέλθει στην παρόχθια περιοχή η οποία έχει διαβρωθεί μετά από διαμόρφωση του σχήματος και φύτευση αυτής.

Το προφίλ της όχθης παρουσία φυτών παρουσιάζεται στην εικόνα 2.3. Το ριζικό σύστημα αυτών συμβάλλει στην σταθερότητα της ζώνης αυτής.

Οι εικόνες 2.4 α και β αφορούν τον ποταμό Big Sioux που βρίσκεται στην Αμερική. Στην πρώτη φωτογραφία απεικονίζεται η διαβρωμένη όχθη του ποταμού, ενώ στην δεύτερη βλέπουμε την πυκνή βλάστηση που έχει δημιουργηθεί για την αντιμετώπιση αυτής. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν ήταν αρκετή για την επίτευξη της σταθερότητας και αυτός είναι ο λόγος που έχουν τοποθετηθεί μεγάλοι μεγέθους πέτρες κατά μήκος της παρόχθιας περιοχής και κάτω από την περιοχή της φύτευσης.



Εικόνα 2.2: Παρόχθια ζώνη πριν και μετά την χρήση βλάστησης (Πηγή: “Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices”, Federal Interagency Stream Restoration Working Group)



Εικόνα 2.3: Προφίλ της όχθης μετά την προσθήκη βλάστησης (Πηγή: F.S. R. Holanda and I. P. Rocha, 2011)



Εικόνα 2.4α) Ποταμός Big Sioux με διαβρωμένη παρόχθια ζώνη, Ιούνιος 2009 b) Παρόχθια ζώνη ποταμού Big Sioux με τοποθέτηση πετρών και βλάστησης στην παρόχθια περιοχή για την αντιμετώπιση της διάβρωσης, Ιούλιος 2010 (Πηγή: East Dakota Water Development District)

Πλεονεκτήματα:

1. Τα φυτά που τοποθετούνται έχουν την ικανότητα να κατακρατούν, εκτός από το ίζημα, και τους υδάτινους ρύπους και έτσι να διατηρούν την ποιότητα του νερού.
2. Διατηρείται η θερμοκρασία του οικοσυστήματος στα επιθυμητά επίπεδα λόγω της σκιάς που παρέχεται στους ποταμούς. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς σε υψηλές θερμοκρασίες το νερό του ποταμού δεν υπερθερμαίνεται και έτσι δεν δημιουργείται πρόβλημα στους υδάτινους οργανισμούς.

Μειονεκτήματα :

1. Ύπαρξη ενός μεσοδιαστήματος μέχρι να αναπτυχθούν τα φυτά και το ριζικό τους σύστημα. Αυτό σημαίνει πως αυτή η μέθοδος δεν έχει άμεσα αποτελέσματα στην επίτευξη της σταθερότητας.
2. Τις πλείστες των περιπτώσεων χρησιμοποιείται συνδυαστικά με κάποια άλλη μέθοδο και ειδικότερα σε περιοχές που το φαινόμενο της διάβρωσης είναι έντονο.

2) Hard Armoring

Στην κατηγορία του “Hard Armoring” περιλαμβάνονται τεχνικές οι οποίες στηρίζονται στην χρήση πέτρας, σκυροδέματος ή άλλων δομικών στοιχείων. Η προεργασία της τεχνικής αυτής περιλαμβάνει την εξομάλυνση της κλίσης (Duncan, 2003). Οι τεχνικές που μπορούν να εφαρμοστούν είναι ποικίλες καθώς η πέτρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με πολλούς τρόπους, μερικοί από τους οποίους αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω.

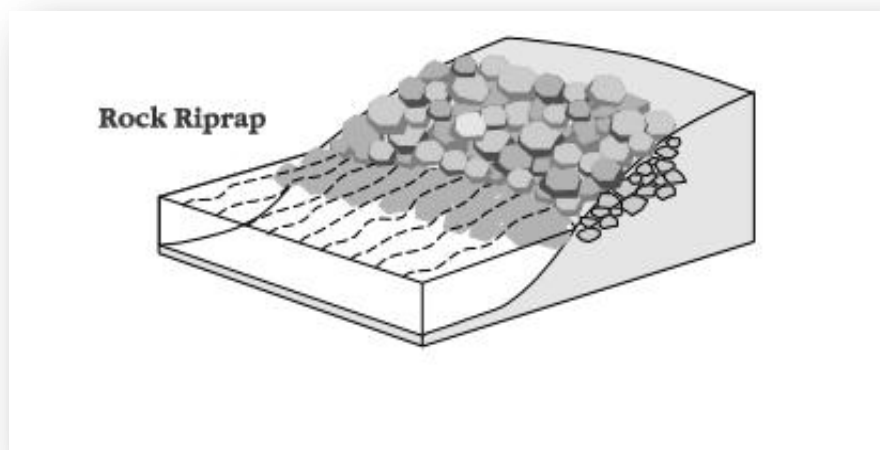
✓ Χρήση πέτρας (Riprap)

Ο μηχανισμός στον οποίο στηρίζεται η μέθοδος αυτή είναι η «θωράκιση» της πλαγιάς με πέτρες μεγάλου όγκου. Μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που πρέπει να εξετασθούν σε αυτήν την περίπτωση είναι το μέγεθος των πετρών οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν (Transportation Association of Canada, 2001). Σύμφωνα με την Transportation Association of Canada υπάρχουν τρεις μέθοδοι καθορισμού του μεγέθους αυτού:

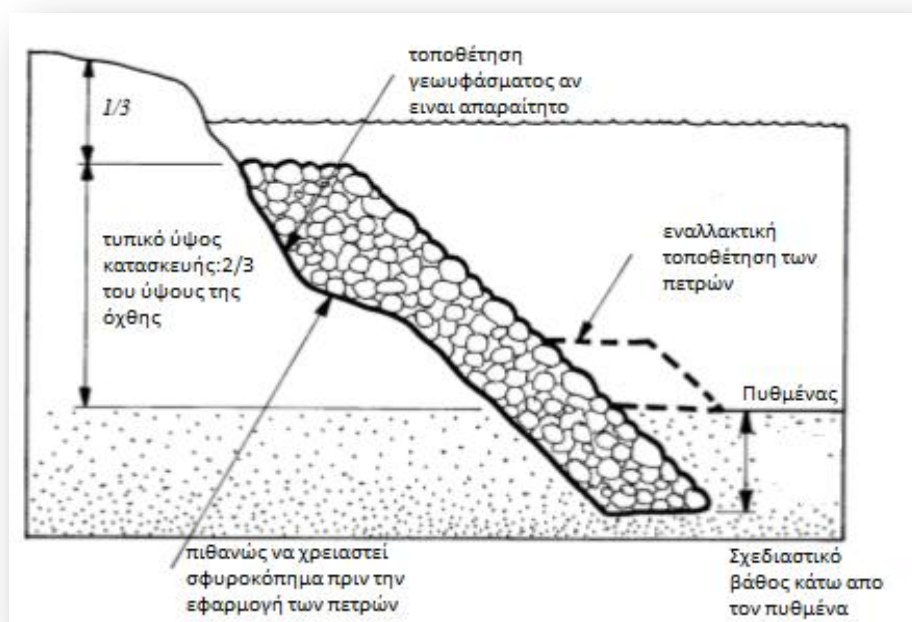
1. Εμπειρία σχετικά με την περιοχή. Αυτό σημαίνει πως για προγενέστερη μελέτη σχετικά με την παραποτάμια περιοχή χρησιμοποιήθηκαν πέτρες συγκριμένου μεγέθους και είχαν τα επιθυμητά αποτελέσματα.
2. Εμπειρικοί οδηγοί οι οποίοι αναφέρουν όρια, τα οποία συχνά λαμβάνονται από τις τοπικές αρχές κάθε περιοχής.
3. Υδραυλικές εξισώσεις και σχέσεις οι οποίες στηρίζονται σε αριθμητικά μοντέλα, αναλυτικές σχέσεις και πειραματικές μελέτες οι οποίες αναπτύσσονται. Τέτοιου είδους σχέσεις αναπτύσσονται συνέχεια και σκοπό έχουν την σύνδεση του μεγέθους των πετρών και των τοπικών υδραυλικών χαρακτηριστικών.

Μία ακόμα παράμετρος που κατέχει σημαντικό ρόλο για τον σχεδιασμό είναι το υλικό της πέτρας. Όσον αφορά το είδος του πετρώματος από το οποίο θα αποτελείται η ογκώδης πέτρα, συνήθως προτιμώνται μαγματογενή υλικά όπως είναι ο γρανίτης καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλή ανθεκτικότητα στην φθορά και κατ' επέκταση στην διάβρωση.

Στην εικόνα 2.5 φαίνεται η τυπική διαμόρφωση της τεχνικής αυτής στην παρόχθια περιοχή και στην εικόνα 2.6 το προφίλ αυτής.



Εικόνα 2.5: Απεικόνιση της παρόχθιας περιοχής μετά την τοποθέτηση πετρών για την αντιμετώπιση της διάβρωσης (Η εικόνα λήφθηκε από “Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices” του Federal Interagency Stream Restoration Working Group)



Εικόνα 2.6 Προφίλ και σχεδιαστικά χαρακτηριστικά παρόχθιας περιοχής μετά την τοποθέτηση πετρών (Πηγή: Water and Rivers Commission, Report No RR10, 200)

Φωτογραφίες από την εφαρμογή της μεθόδου αυτής σε ποταμό στην Βρετανική Κολομβία του Καναδά παρουσιάζονται παρακάτω



Εικόνα 2.7: Τοποθέτηση ογκωδών πετρών στην παρόχθια περιοχή στην Βρετανική Κολομβία (Πηγή: «Riprap Design and Construction Guide», Province of British Columbia Ministry of Environment, Lands and Parks, March 2000)

Τέλος, παρουσιάζονται τα θετικά και τα αρνητικά που αφορούν στην μέθοδο αυτή.

Πλεονεκτήματα:

1. Με τον σωστό σχεδιασμό, η τεχνική αυτή είναι ικανή να παρέχει προστασία από την διάβρωση σε μακροπρόθεσμη κλίμακα και σε μεγάλες παροχές.
2. Παρέχει άμεσα αποτελέσματα χωρίς να χρειαστεί να μεσολαβήσει κάποιο χρονικό διάστημα.

Μειονεκτήματα:

1. Στις όχθες στις οποίες τοποθετούνται λιθοδομές υπάρχει σχεδόν μηδενική υποστήριξη βλάστησης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την έλλειψη πολλών βασικών συστατικών τα οποία είναι απαραίτητα για τα οργανισμούς που ζουν κάτω από την επιφάνεια του νερού του ποταμού.
2. Η κατασκευή αυτή τείνει να αυξάνει την ταχύτητα του νερού μετά το πέρας της ζώνης που αποκαθίσταται διότι το νερό δεν συναντά στην πορεία ροής του κάποιο σημείο με το οποίο θα αναπτυχθεί τριβή. Οπότε δημιουργούνται προβλήματα ροής κατάντη του καναλιού.

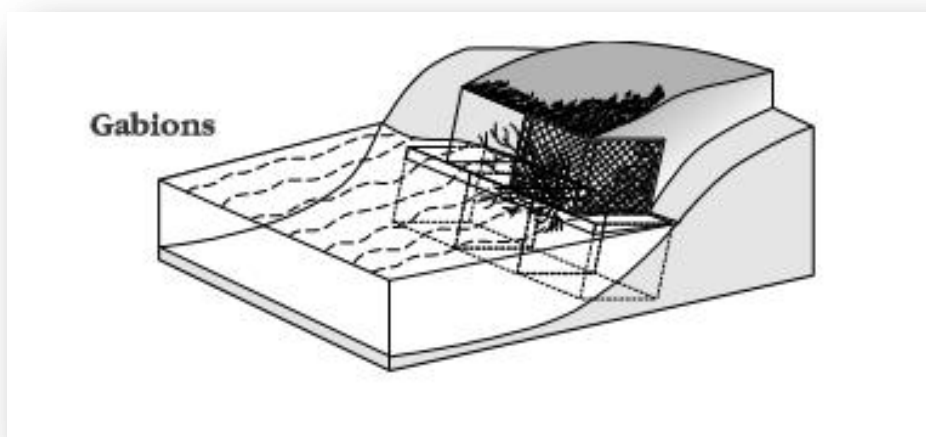
✓ Λιθοπληρωμένα συρμάτινα κιβώτια-Σαρζανέτ (Gabions)

Ως σαρζανέτ ορίζεται το μεγάλου μεγέθους συρμάτινο κιβώτιο (ορθογωνικής ή τετραγωνικής μορφής) το οποίο στο εσωτερικό του περιέχει πέτρες, όπως φαίνεται στην φωτογραφία 2.8.

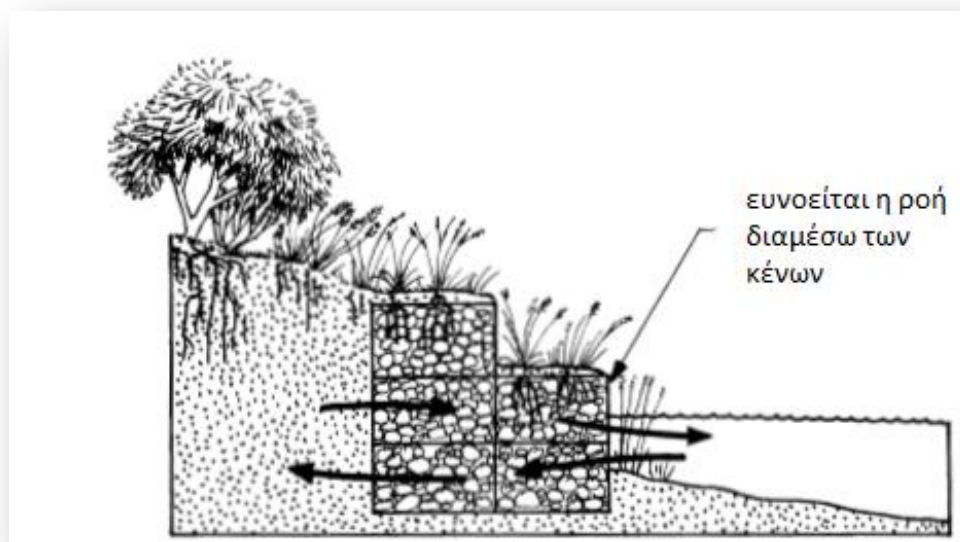


Εικόνα 2.8: Λιθοπληρωμένα συρματίνα κιβώτια (Πηγή: “SEPT”, <http://natural-stone.setp.fr>)

Τα συρματοκιβώτια χρησιμοποιούνται συνήθως σε ρυάκια και στον πυθμένα των ποταμών. Τοποθετούνται κατά μήκος της όχθης δημιουργώντας ένα σταθερό τοίχωμα. Συμβάλλουν σημαντικά στην μείωση της ροής του νερού καθώς επίσης και στην προστασία από περαιτέρω διάβρωση. Όπως έχει προαναφερθεί το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται οι πέτρες είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό απέναντι στην διάβρωση. Τα συρματίνα αυτά κιβώτια είναι διαθέσιμα σε διάφορα μεγέθη τα οποία κυμαίνονται από 1m έως 4m μήκος και 0,5-1m ύψος. Μπορούν να γίνουν ακόμη πιο ανθεκτικά, προσθέτοντας περαιτέρω πλέγμα χωρίζοντας τα σε μικρότερα κομμάτια.



Εικόνα 2.9: Απεικόνιση εφαρμογής συρματινών κιβωτίων στην παρόχθια ζώνη για την αντιμετώπιση της διάβρωσης (Πηγή: “Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices”, Federal Interagency Stream Restoration Working Group)



Εικόνα 2.10: Απεικόνιση του προφίλ της παρόχθιας ζώνης μετά την εφαρμογή των συρμάτινων κιβωτίων (Πηγή: “Stream stabilization” , Waters and Rivers Commission, February 2011, Report



Εικόνα 2.11: α) Εφαρμογή συρμάτινων κιβωτίων σε ρυάκι στο Torrens Park, Αυστραλία



β) Εφαρμογή συρμάτινων κιβωτίων σε ρυάκι στο Sterney, Αυστραλία (Πηγή: Prospect Contractors PTY LTD)

Πλεονεκτήματα:

1. Τα κενά που υπάρχουν ανάμεσα στις πέτρες επιτρέπουν την ανάπτυξη ιζήματος και έτσι ευνοείται η εγκατάσταση βλάστησης.
2. Η κατασκευή αυτή έχει την δυνατότητα να μειώνει την ταχύτητα ροής και έτσι υπάρχει αποτελεσματική πτώση της ενέργειας, χαρακτηριστικό το οποίο είναι μεγίστης σημασίας ιδιαίτερα σε περιστατικά πλημμύρας.

Μειονεκτήματα:

1. Τα συρμάτινα πλέγματα μπορεί να υποστούν φθορές ή να σπάσουν σε περιστατικά μεγάλων ταχυτήτων ροής.
2. Για τον λόγο που προαναφέρθηκε , τα σαρζανέτ θα πρέπει να ελέγχονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα και κυρίως μετά από περιόδους πλημμυρικών φαινομένων. Έτσι, δεν θα υπάρχει αμφιβολία για την σταθερότητα τους.

3) Bioengineering (Βιολογική Μηχανική)

Οι τεχνικές οι οποίες ανήκουν στην κατηγορία της βιολογικής μηχανικής αποτελούν μια σύνθεση βιολογικών, μηχανικών αλλά και οικολογικών μεθόδων, που εφαρμόζονται με σκοπό την καταπολέμηση της διάβρωσης του εδάφους στην παρόχθια περιοχή ενός ποταμού. Αναλυτικότερα, κατά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής πραγματοποιείται ο συνδυασμός τόσο της χρήσης δομικών υλικών, όσο και της βλάστησης (“Using Stabilization Techniques”, Erie County Soil and Water Conservation District). Παραδείγματα εφαρμογής της βιολογικής μηχανικής παρατίθενται παρακάτω.

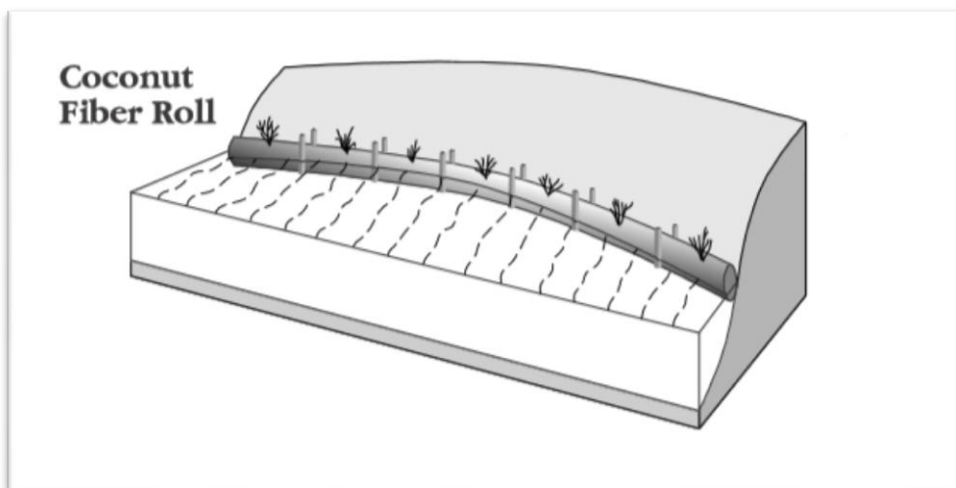
✓ Χρήση μεγάλων κυλίνδρων κατασκευασμένων από ίνες καρύδας (Coconut Fiber Roll)

Σε αυτήν την περίπτωση, οι ίνες από το εξωκάρπιο σκέλος της καρύδας συλλέγονται και δημιουργείται ένας κύλινδρος ή αλλιώς «ρολό» το οποίο καλύπτεται εξωτερικά με πλέγμα από σχοινί ή σπάγκο έτσι ώστε να παραμένει σταθερό το υλικό στο εσωτερικό.



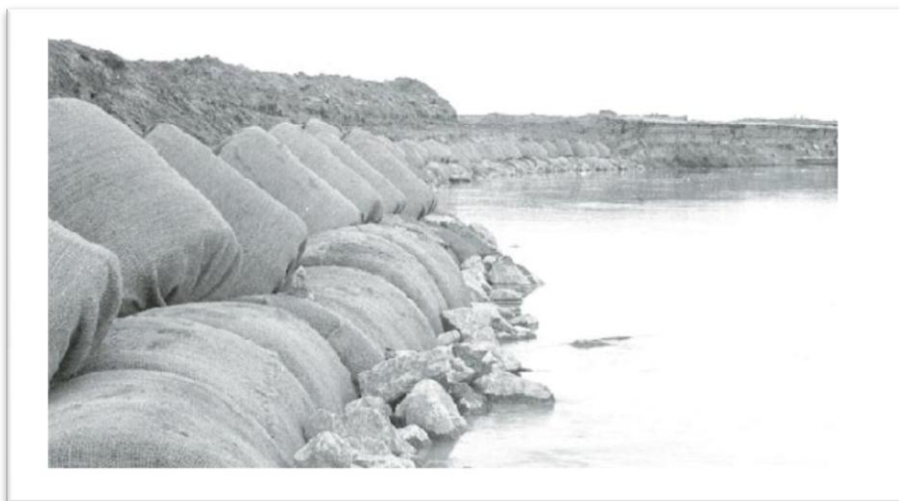
Εικόνα 2.12: Απεικόνιση ρολού κατασκευασμένου από ίνες καρύδας (Πηγή: www.salixrw.com)

Το υλικό αυτό χαρακτηρίζεται από μεγάλη ικανότητα να κατακρατά το ίζημα στο εσωτερικό του κυλίνδρου με αποτέλεσμα να ευνοείται η ανάπτυξη της βλάστησης και κατ'επέκταση η σταθερότητα της όχθης του ποταμού. Αυτός είναι ο κυριότερος λόγος για τον οποίο προτιμάται η τεχνική αυτή.



Εικόνα 2.13: Εφαρμογή ρολών από ίνες καρύδας στην παρόχθια περιοχή για την αντιμετώπιση της διάβρωσης (Πηγή: “Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices”, Federal Interagency Stream Restoration Working Group)

Ένα παράδειγμα εφαρμογής αυτής της τεχνικής πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της Ομάχα στην Αμερική και συγκεκριμένα στον ποταμό Μισσούρη. Θα πρέπει βέβαια να σημειωθεί πως έγινε συγχρόνως τοποθέτηση μεγάλων, ογκωδών λίθων (συγκεκριμένα 1,5 ton/ft) όπως ακριβώς φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.



Εικόνα 2.14: παρόχθια ζώνη του ποταμού Μισσούρη μετά την τοποθέτηση των ρολών από ίνες καρύδας

Πλεονεκτήματα:

1. Λόγω της υψηλής ικανότητας του υλικού να κατακρατά το ίζημα, ευνοείται η ανάπτυξη της βλάστησης ακόμα και μέσα στο ίδιο το ρολό.
2. Σε ρηχές όχθες αποτρέπεται σε υψηλό ποσοστό η πτώση της πλαγιάς, ενώ συγχρόνως αποτρέπεται η υποσκάπτουσα διάβρωση.

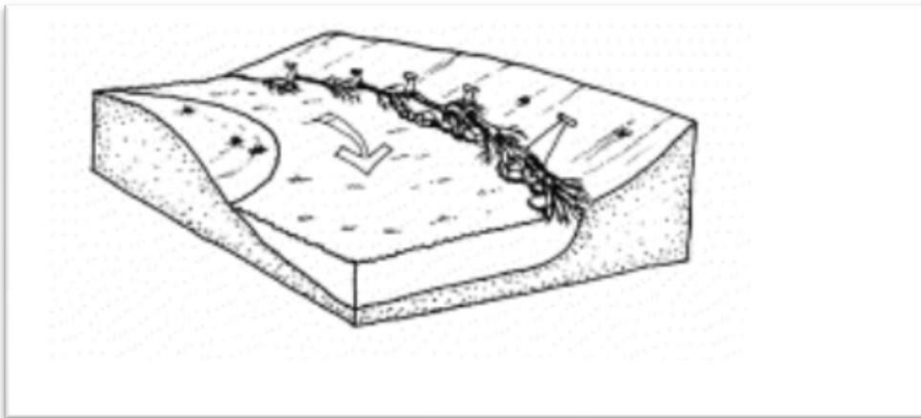
Μειονεκτήματα:

1. Τα ρολά αυτά χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένο χρόνο ζωής. Αναλυτικότερα, μπορούν να προσφέρουν προστασία από την διάβρωση για χρονικό ορίζοντα μεταξύ 5 και 10 ετών.
2. Συγκρινόμενη με άλλες μεθόδους έχει πιο υψηλό κόστος λόγω του υλικού από το οποίο αποτελείται.

✓ Επένδυση με δέντρα (Tree revetments)

Στην παρούσα μέθοδο χρησιμοποιούνται κομμένα δέντρα (συνήθως κέδρα) τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους και τοποθετημένα σε σειρά κατά μήκος της όχθης. Η διαφορά από προηγούμενες μεθόδους είναι προφανώς πως σε αυτήν την περίπτωση τα δένδρα δεν είναι προς φύτευση δηλαδή το ριζικό τους σύστημα δεν είναι σε θέση να αναπτυχθεί ακόμα και αν τοποθετηθεί μέσα στο έδαφος.

Με την τοποθέτηση των δέντρων, επιτυγχάνεται η μείωση της ταχύτητας της ροής, γεγονός το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις πλημμύρας. Έτσι, γίνεται εφικτή η επιτυχία της σταθερότητας στην όχθη. Παράλληλα, το ίζημα παγιδεύεται με αποτέλεσμα την δημιουργία του υποστρώματος που ευνοεί την ανάπτυξη της βλάστησης, η οποία όπως προαναφέρθηκε συμβάλλει σημαντικά στην αντιμετώπιση της διάβρωσης. Κατόπιν, στην φωτογραφία 2.16 παρουσιάζεται η εφαρμογή δέντρων και συγκεκριμένα κέδρων σε ποταμό στην Ανόκα, στις Ηνωμένες Πολιτείες



Εικόνα 2.15: Παρόχθια ζώνη μετά την τοποθέτηση δέντρων κατά μήκος αυτής. (Πηγή: “Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices”, Federal Interagency Stream Restoration Working Group)



Εικόνα 2.16: Απεικόνιση της επένδυσης κέδρων στην άκρη της παρόχθιας ζώνης σε ποταμό της Ανόκα της Αμερικής (Πηγή: “Cedar Tree Retyvments” ,Isanti Soil and Water Conservation District)

Πλεονεκτήματα:

1. Η επένδυση με δέντρα επιτρέπει την εναπόθεση της λάσπης του ποταμού, από την οποία δημιουργείται υπόστρωμα κατάλληλο για την ανάπτυξη της παρόχθιας βλάστησης.
2. Αποτελεί μια φυσική μέθοδο, η οποία δεν έχει αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και προσφέρει σταθερότητα ακόμα και υπό συνθήκες υψηλών παροχών.

Μειονεκτήματα:

1. Απαιτείται επιλογή συγκεκριμένου είδους δέντρων (συνήθως κέδρα) για να υπάρχει αποτελεσματικότητα. Δεν είναι εφικτή η χρήση οποιουδήποτε είδους δένδρου.
2. Απαιτείται συγκεκριμένος σχεδιασμός και θα πρέπει να ακολουθηθούν διαφορετικές τεχνικές για τα διαφορετικά είδη εδαφών από τα οποία μπορεί να αποτελείται η όχθη.

Προστασία της όχθης (Upper Bank Protection)

Στο παρόν σκέλος του κεφαλαίου αυτού θα αναλυθούν μερικές από τις πιο βασικές τεχνικές που αφορούν στην προστασία της όχθης ενός ποταμού. Συγκεκριμένα, μελετάται η ζώνη της όχθης η οποία ξεκινά από την επιφάνεια του νερού και συνεχίζει προς τα επάνω. Δεν υπάρχει, δηλαδή, κάποια τεχνική που θα εφαρμοστεί στο σκέλος του επιφανειακού νερού, αλλά από αυτό και προς τα επάνω όπως ακριβώς απεικονίζεται στην πρώτη φωτογραφία του κεφαλαίου. Ομοίως, θα εξεταστούν τεχνικές αποκατάστασης σύμφωνα με τις μεθόδους: Live Planting, Hard Armoring και Bioengineering.

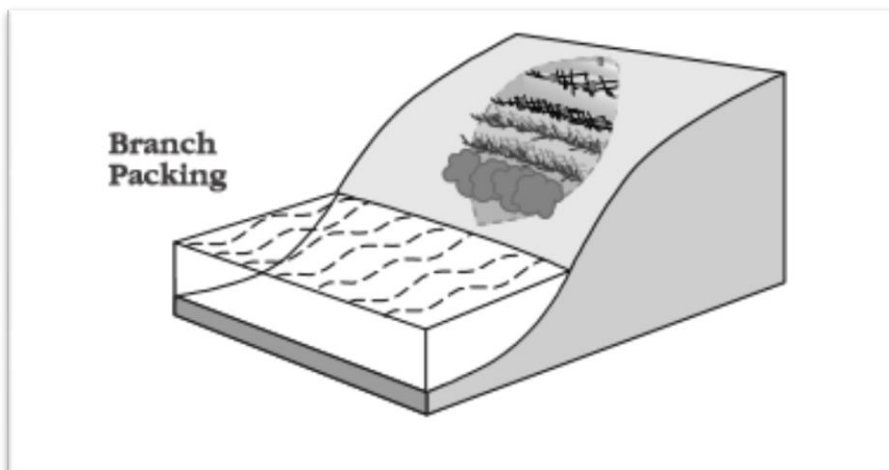
1) Live plantings

Υπάρχει πληθώρα από τεχνικές που περιλαμβάνουν την χρήση ζωντανών φυτών ως τρόπο αποκατάστασης των διαβρωμένων περιοχών.

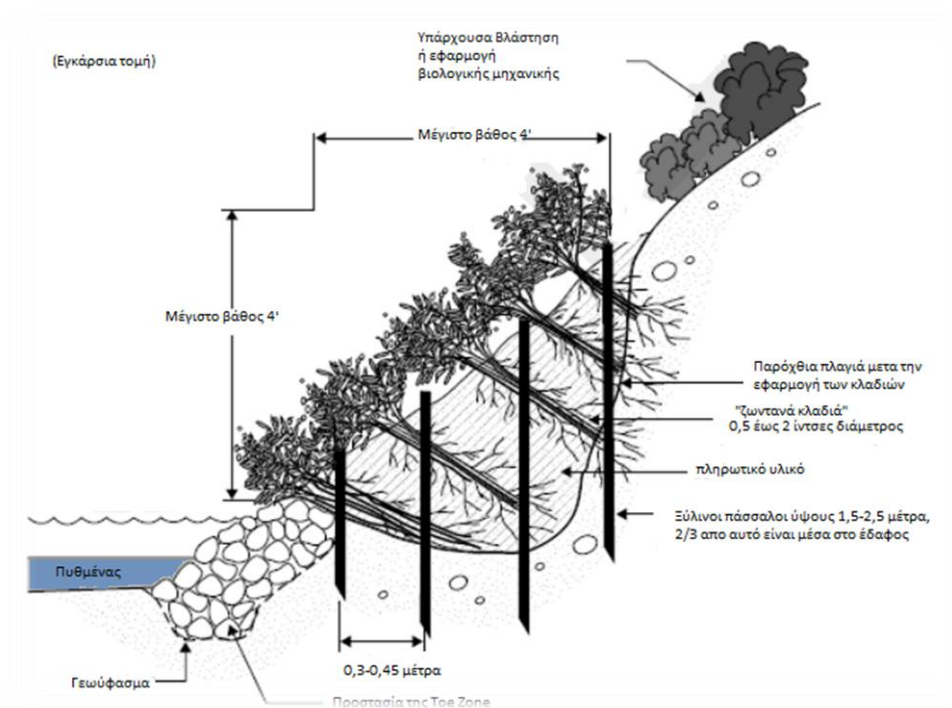
✓ **Τοποθέτηση κλαδιών (Branch Packing)**

Κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου κλαδιά τα οποία είναι “ζωντανά” τοποθετούνται κατά μήκος της επικλινούς πλαγιάς δημιουργώντας στρώσεις όπως ακριβώς φαίνεται στις φωτογραφίες 2.17, 2.18. “Ζωντανά” θεωρούνται τα κλαδιά τα οποία έχουν κοπεί 2-3 ημέρες πριν την χρήση τους και τα οποία δεν έχουν ξεραθεί, δηλαδή δεν έχουν χάσει την υγρασία τους. Κατόπιν, παρουσιάζεται η εγκάρσια τομή παρόχθιας ζώνης. Σε αυτήν έχουν εφαρμοστεί παραπάνω από μία μέθοδοι αποκατάστασης και αυτό γιατί, όπως προαναφέρθηκε, η παρόχθια ζώνη χωρίζεται σε περαιτέρω τμήματα. Έτσι, για την προστασία της άκρης της όχθης που βρίσκεται σε επαφή με το επιφανειακό νερό έχουν εφαρμοστεί πέτρες. Ενώ για την προστασία της πλαγιάς έχει εφαρμοστεί η μέθοδος του εξετάζεται, το πακετάρισμα, δηλαδή, των κλαδιών

(Rella and Miller, 2012). Συνήθως χρησιμοποιείται κάποιο πληρωτικό υλικό έτσι ώστε να γίνεται ευκολότερη η εφαρμογή των κλαδιών και των πασσάλων μέσα σε αυτό. Στην συνέχεια, στην φωτογραφία 2.19 απεικονίζεται ένας μικρής έκτασης ποταμός (ρυάκι) στον οποίο εφαρμόστηκε η μέθοδος αυτή και βρίσκεται στην Πενσιλβάνια.



Εικόνα 2.17: Παρόχθιο σύστημα μετά το πακετάρισμα των “ζωντανών” κλαδιών (Πηγή: “Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices” του Federal Interagency Stream Restoration Working Group)



Εικόνα 2.18: Εγκάρσια τομή της παρόχθιας ζώνης στην οποία έχουν εφαρμοστεί κλαδιά σε συνδυασμό με πέτρες για την προστασία αυτής από την διάβρωση (“Engineered Approaches for Limiting Erosion along Sheltered Shorelines: A Review of Existing Methods”, Stevens Institute of Technology, 2009).



Εικόνα 2.19: Κλαδιά τοποθετημένα στην όχθη του ποταμού East Branch Wallenprauack Creek, Pennsylvania (Πηγή: F.X. Browne, Inc.)

Ωστόσο, για να ολοκληρωθεί η αναφορά στην τεχνική αυτή θα πρέπει να αναφερθούν τόσο τα πλεονεκτήματα όσο και τα μειονεκτήματα αυτής.

Πλεονεκτήματα:

1. Με την πάροδο του χρόνου τα κλαδιά που έχουν τοποθετηθεί βλασταίνουν και αναπτύσσονται. Το ριζικό σύστημα αυτών σε συνδυασμό με τα ίδια τα κλαδιά που βρίσκεται στο εσωτερικό του εδάφους προσδίδουν σταθερότητα στην όχθη του ποταμού και έτσι αποτρέπονται πιθανές πτώσεις αυτής.
2. Σαν αποτέλεσμα των προαναφερόμενων, δεν υπάρχει ανάγκη για εγκατάσταση περαιτέρω βλαστικού συστήματος. Οπότε, υπάρχει συνδυασμός τόσο την σταθερότητας της όχθης όσο και της ανάπτυξης των φυτών, χωρίς παραπάνω εργασίες και σπατάλη χρημάτων.

Μειονεκτήματα:

1. Δεν αποτελεί μέθοδο η οποία ενδείκνυται σε μεγάλους ποταμούς. Αντιθέτως, προτιμάται η χρήση αυτής σε μικρής έκτασης ποτάμια, με μικρότερες παροχές ή σε ρυάκια.
2. Δεν θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε διαβρωμένες πλαγιές με βάθος και πλάτος μεγαλύτερο των 4 ft , όπως άλλωστε απεικονίζεται και στην εικόνα

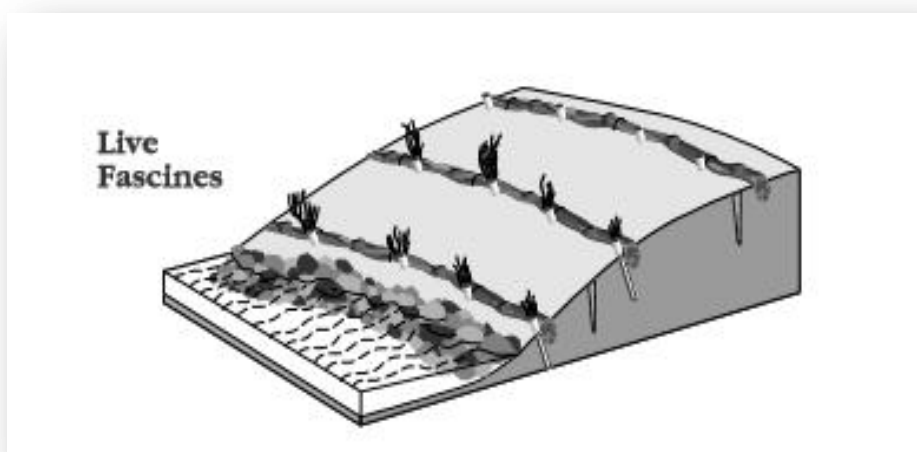
✓ Δέσμες από “ζωντανά” κλαδιά(Live Fascines)

Και σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούνται κλαδιά δέντρων για την προστασία της παρόχθιας ζώνης. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός πως στην παρούσα τεχνική τα κλαδιά συλλέγονται, τοποθετούνται μαζί και δένονται μεταξύ τους έτσι ώστε να δημιουργούν δεσμίδες. Η διάταξη αυτή απεικονίζεται στις εικόνες 2.20, 2.21. Σχετικά με τα κλαδιά τα οποία δημιουργούν τις δεσμίδες, θα πρέπει να σημειωθεί πως δεν πρέπει να έχει μεσολαβήσει χρονικό διάστημα

μεγαλύτερο των 2 ημερών από την κοπή έως την χρήση τους, καθώς η υγρασία η οποία κρατούν είναι πολύ σημαντική για την επιτυχία της κατασκευής. Αυτός είναι, άλλωστε, ο λόγος για τον οποίο χαρακτηρίζονται “ζωντανά”. Οι δέσμες τοποθετούνται κατά μήκος της όχθης και παράλληλα με την ροή του νερού. Πρακτικά, λόγω αυτής τους της εφαρμογής χωρίζουν την όχθη σε μικρότερα τμήματα και έτσι υπάρχει διαβάθμιση σε αυτήν. Η κλίση καθενός από τα κομμάτια αυτά γίνεται μικρότερη από την αρχική. Εν συνεχεία, απεικονίζεται η εφαρμογή των δεσμών αυτών που πραγματοποιήθηκε στον ποταμό Tajiguas Creek που βρίσκεται στην Santa Barbara της Καλιφόρνια. Αναλυτικότερα, οι δέσμες αυτές αποτελούνταν από ξύλο ιτιάς, που αποτελεί την πιο συχνή επιλογή σε τέτοιου τύπου προβλήματα.



Εικόνα 2.20: Δέσμη κλαδιών (Πηγή: “Salix”)



Εικόνα 2.21: Παρόχθιο σύστημα μετά την εφαρμογή των δεσμών κλαδιών (Πηγή: “Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices” του Federal Interagency Stream Restoration Working Group)



Εικόνα 2.22: Εγκατάσταση δεσμών από ζωντανά κλαδιά στον ποταμό Tajiguas Creek στην Καλιφόρνια (Πηγή: Michael Love and Associates, Inc. (MLA))

Πλεονεκτήματα:

1. Λόγω της υφιστάμενης διαβάθμισης της όχθης η ενέργεια του επιφανειακού νερού που καταφθάνει στην πλαγιά μειώνεται σημαντικά (**“Ohio Stream Management Guide”, Guide No 14**).
2. Οι υπό κλίση δεσμίδες έχουν την ικανότητα να δημιουργούν μονοπάτια αποστράγγισης του νερού (**“Ohio Stream Management Guide”, Guide No 14**).

Μειονεκτήματα:

1. Η μέθοδος παρέχει ικανοποιητικό αποτέλεσμα όταν τελείται υπό συνδυασμό με άλλες τεχνικές όπως η χρήση κλαδιών και πασσάλων αλλά και πέτρες (**“How to control erosion”, Iowa State University, Institute of Transportation**)
2. Ο σχεδιασμός είναι ιδιαίτερα απαιτητικός. Η όχθη θα πρέπει να έχει κλίση τουλάχιστον 2ft οριζόντια προς 1ft κάθετα (2Ο:1Κ) για να υποστηρίξει μια τέτοια εφαρμογή. Επίσης, χρειάζεται επαρκής ποσότητα κλαδιών και ιδιαίτερα σε μεγάλες όχθες.

2) Hard Armoring

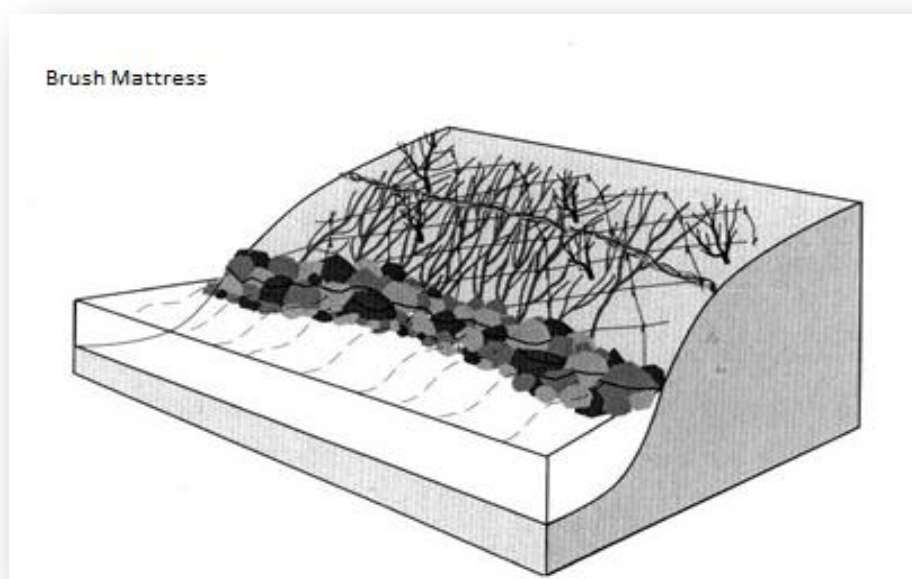
Οι τεχνικές που περιλαμβάνονται στην κατηγορία αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξίσου σε όλη την όχθη. Αυτό συμβαίνει κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και συνδυασμό.

3) Bioengineering (Βιολογική Μηχανική)

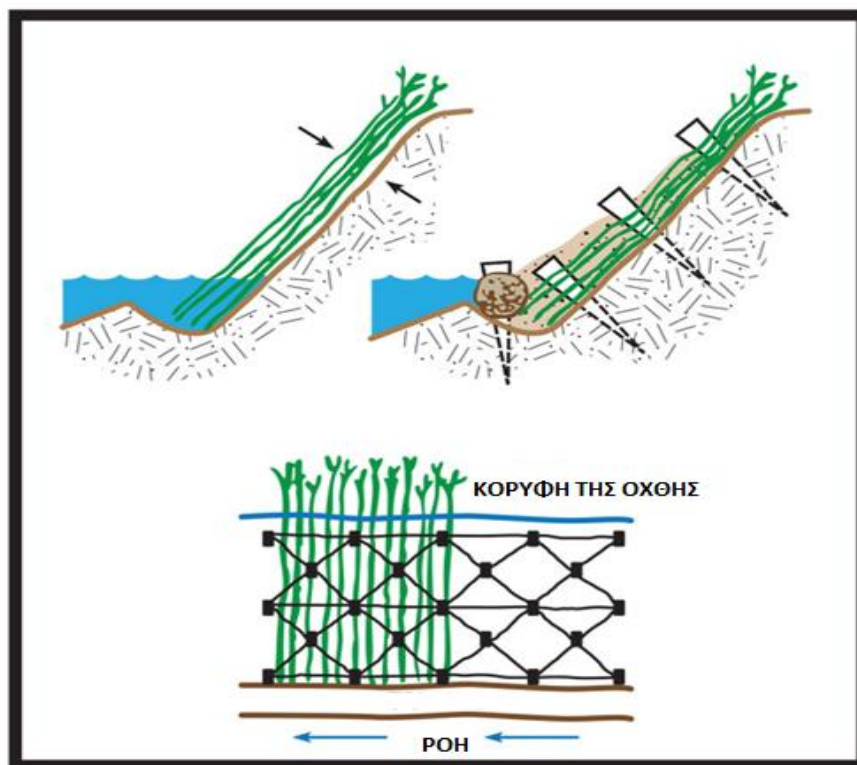
✓ Στρώσεις από θάμνους (Brush mattresses)

Η παρούσα μέθοδος είναι πανομοιότυπη με αυτήν της τοποθέτησης κλαδιών. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός πως οι θαμνώδεις αυτή ξυλεία δεν εμφυτεύεται μέσα στο έδαφος αλλά τοποθετείται πάνω σε αυτό. Συγκεκριμένα, τοποθετούνται παράλληλα με την διεύθυνση της κλίσης δημιουργώντας μια στρώση από κομμένους θάμνους. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή αποτελεί έναν συνδυασμό από “ζωντανούς” (δηλαδή που έχουν κοπεί πρόσφατα) πασσάλους, κλαδιά αλλά και θάμνους (Clean Water Toolkit, Geosyntec). Ο στόχος αυτής της κατασκευής είναι η δημιουργία της δομικής προστασίας της παρόχθιας ζώνης, η οποία τελικά θα ριζώσει και έτσι θα υπάρξει σταθερότητα λόγω βλάστησης (Scheuler). Παρακάτω (Εικόνα 2.23) φαίνεται μια τυπική διάταξη στρώσης θάμνων σε παρόχθια ζώνη. Στην εικόνα 2.24 φαίνεται το προφίλ και η κάτοψη της όχθης.

Τα είδη των φυτών τα οποία κόβονται και τοποθετούνται σε αυτές τις εφαρμογές είναι συνήθως ιτιά, κρανά ή σκλήθρα (Allen and Fischenich, 2001). Παρακάτω, λοιπόν, απεικονίζεται μια εφαρμογή ξυλείας από ιτιά που έλαβε χώρα σε ποταμό στην Αγγλία. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή παρατηρούνται και κορμοί δέντρων αλλά και δέσμες από κλαδιά στην άκρη της παρόχθιας ζώνης, τα οποία τοποθετούνται εκεί για να σταθεροποιήσουν την κατασκευή



Εικόνα 2.23: Παρόχθια ζώνη έπειτα από την εφαρμογή θαμνώδους ξυλείας (σε συνδυασμό με πέτρες, πασσάλους και κλαδιά) (Πηγή: “Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices” του Federal Interagency Stream Restoration Working Group)



Εικόνα 2.24: Προφίλ και κάτοψη της παρόχθιας ζώνης έπειτα από την εφαρμογή της θαμνώδους ξυλείας (Πηγή: “ERNST SEED”)



Εικόνα 2.25: Εγκατάσταση ξύλων ιτιάς, πασσάλων και δεσμών σε παρόχθια ζώνη ποταμού στην Αγγλία (Πηγή: “Salix”)

Πλεονεκτήματα:

1. Αποτελεί μία φυσική μέθοδο η οποία με την πάροδο του χρόνου παρέχει ακόμη περισσότερη προστασία στην όχθη λόγω της ανάπτυξης του ριζικού συστήματος.
2. Όταν η ανάπτυξη των βλαστών φτάσει στο ύψος μερικών δεκάδων εκατοστών, παρέχεται σκιά στον ποταμό, γεγονός που βοηθά στην μη αύξηση του νερού σε ανεπιθύμητα επίπεδα.

Μειονεκτήματα:

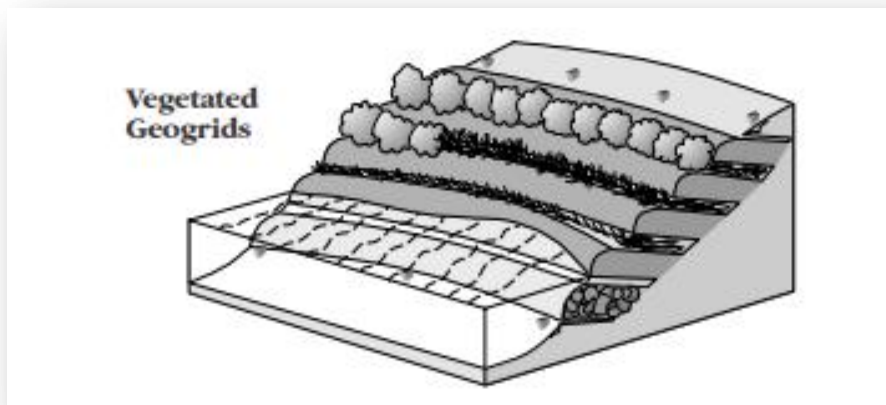
1. Χρειάζεται χρόνος για την πλήρη αποκατάσταση της πλαγιάς και την παροχή σταθερότητας. Τα αποτελέσματα, δηλαδή, δεν είναι άμεσα και στηρίζονται στο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ανάπτυξη των ριζών.
2. Η επιλογή των φυτών θα πρέπει να είναι η κατάλληλη, δηλαδή τα φυτά να είναι “συμβατά” με τον τύπο του εδάφους. Αν δεν πραγματοποιηθεί η σωστή επιλογή είναι πιθανό να χρειάζεται αντικατάσταση τους.

✓ Vegetated Geogrids (Γεωυφάσματα)

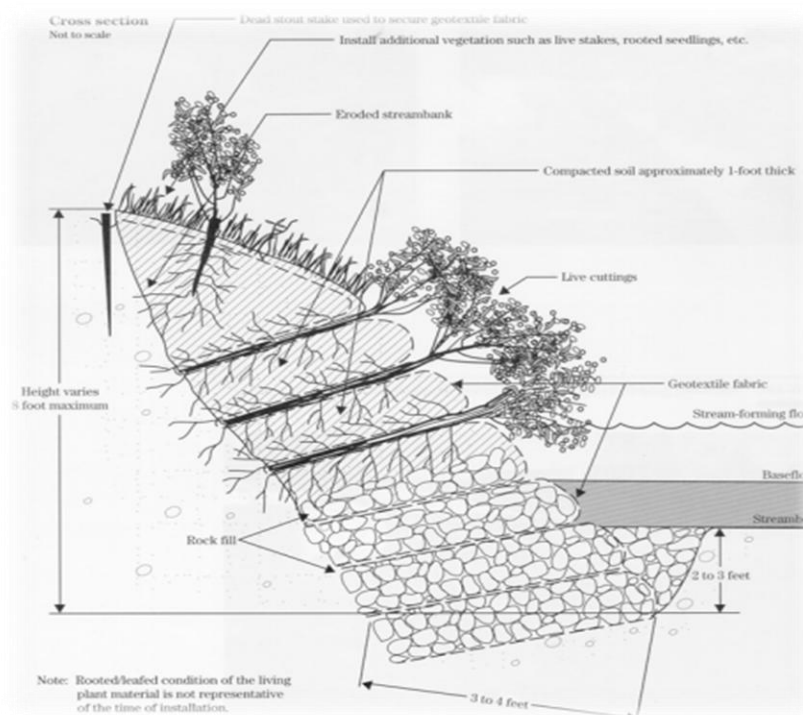
Στην παρούσα μέθοδο γίνεται χρήση γεωυφάσματος. Το γεωύφασμα αποτελεί ένα πλέγμα από φυσικές ή τεχνητές ίνες το οποίο τοποθετείται μέσα στο χώμα της όχθης δημιουργώντας ένα εδαφικό τοίχος το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλή διαπερατότητα. Στο εσωτερικό του γεωυφάσματος το χώμα είναι συμπιεσμένο έτσι ώστε να υπάρχει η βέλτιστη δυνατή αποφυγή παραγόντων οι οποίοι αποσταθεροποιούν την κατασκευή (π.χ. εδαφικά κενά). Τυπικά παραδείγματα αποτελούν οι ίνες από πολυπροπυλένιο ή πολυεστέρα. Τα γεωυφάσματα τοποθετούνται σε στρώσεις ανάμεσα στις οποίες φυτεύονται κλαδιά και έτσι παρέχεται υψηλή σταθερότητα στην παρόχθια ζώνη. Όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με το εδαφικό χώμα έχουν την δυνατότητα να διαχωρίζουν αλλά και να φιλτράρουν το νερό του ποταμού. Στην άκρη της όχθης, στην ζώνη της διεπιφάνειας με το νερό τοποθετούνται πέτρες με σκοπό την σταθεροποίηση της κατασκευής (Indiana General Assembly, Information Bulletin #71, April 1, 2012). Υπάρχει, λοιπόν, αναγκαιότητα συνδυασμού της μεθόδου αυτής με άλλες. Μία τυπική διάταξη της μεθόδου παρουσιάζεται στην εικόνα, ενώ η εγκάρσια τομή του εδάφους αυτού μετά την τοποθέτηση γεωυφασμάτων, λιθοδομής και βλάστησης παρουσιάζεται στην εικόνα 2.27.

Η κατασκευή ενσωματώνεται σύμφωνα με την κλίση της όχθης και πως το ύψος της αυτής θα πρέπει να είναι το μέγιστο 8ft ($\approx 2,4\text{m}$). Η τοποθέτηση των πασσάλων είναι απαραίτητη για την στερέωση και σταθεροποίηση του γεωυφάσματος. Κάθε στρώμα έχει πάχος συμπιεσμένου χώματος περίπου 1ft ($\approx 0,3\text{m}$) και ανάμεσά τους τοποθετούνται δένδρύλλια. Η υπό κλίση ενσωμάτωση της λιθοδομής λαμβάνει χώρα σε βάθος μεταξύ 2 και 3ft (0,6m-0,9m) κάτω από τον πυθμένα του ποταμού.

Στην εικόνα 2.28 φαίνεται η χρήση γευφασμάτων για αντιμετώπιση της διάβρωσης στον ποταμό Cottonwood Creek που βρίσκεται στην περιοχή Hutchins του Texas.



Εικόνα 2.26: Χρήση γευφασμάτων σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους (rock riprap and live stakes) σε παρόχθια ζώνη ποταμού (Πηγή: “Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices” του Federal Interagency Stream Restoration Working Group).



Εικόνα 2.27: Εγκάρσια τομή του εδάφους έπειτα από την τοποθέτηση γεωυφασμάτων, λιθοδομής και βλάστησης (Πηγή: “Vegetated Geogrids”, Erosion Control, Iowa Department of Natural Resources).



Εικόνα 2.28: Εφαρμογή γευφασμάτων στην παρόχθια ζώνη του ποταμού Cottonwood Creek, στην περιοχή Hutchins στο Texas (Ming-Han, 2006).

Εν κατακλείδι, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που χαρακτηρίζουν την τεχνική αυτή.

Πλεονεκτήματα:

1. Η ύπαρξη της βλάστησης ενδιάμεσα των γεωυφασμάτων μειώνει την ενέργεια του νερού αλλά και την διατμητική τάση στην επιφάνεια της όχθης (Miller and Rella, 2009).
2. Δυνατότητα εφαρμογής σε όχθες με απότομη κλίση. Αυτό σημαίνει πως ακόμα και σε περιπτώσεις που η εξομάλυνση της κλίσης δεν είναι δυνατή, η τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί (Miller and Rella, 2009).

Μειονεκτήματα:

1. Ο σχεδιασμός και η πλήρης εφαρμογή της μεθόδου είναι ιδιαίτερα απαιτητική διότι αποτελεί μια σύνθεση μεθόδων (μεταξύ των οποίων είναι και η λιθοδομή, η οποία απαιτεί χρήση μηχανημάτων) (Miller and Rella, 2009).
2. Απαιτούνται μεγάλες ποσότητες τόσο πετρών όσο και χώματος για την διεκπεραίωση του έργου (Miller and Rella, 2009).

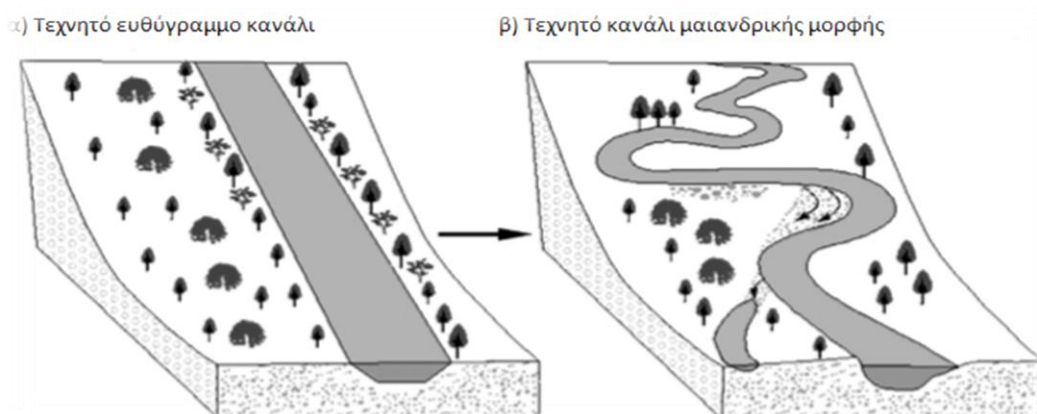
B) Αποκατάσταση του καναλιού

Στο σκέλος αυτό του κεφαλαίου θα εξεταστούν τεχνικές που αφορούν στην αποκατάσταση του καναλιού του ποταμού και όχι μόνο της παρόχθιας ζώνης. Οι τεχνικές αυτές αφορούν τόσο στην σταθεροποίηση της ροής όσο και του πυθμένα του ποταμού.

✓ Αποκατάσταση της μαιανδρικής ροής του ποταμού

Η αύξηση της μαιανδρικής μορφής της ροής σε ένα ποτάμι έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της κλίσης και επομένως την μείωση της ταχύτητας ροής και της ικανότητας του ιζήματος να μεταφέρεται (B.Pan et al, 2016). Η τεχνική αυτή είναι εφικτό να εφαρμοστεί είτε δημιουργώντας την μορφή των μαιάνδρων εξ ολοκλήρου είτε συνενώνοντας κομμάτια τα οποία ακολουθούν αυτήν την μορφή ροής (“Individual NWRM Re-meandering”, Natural Water Retention Measures). Ωστόσο, συναντάται συνήθως σε τεχνητά ευθύγραμμα κανάλια κ σπανιότερα σε φυσικά. Η αποκατάσταση των μαιάνδρων μπορεί να αυξήσει την ποιότητα και την ποσότητα των οικοσυστημάτων (Wang et al., 2012). Εάν με την εφαρμογή της μαιανδρικής ροής το κανάλι δεν πληροί τις προϋποθέσεις για την αντιμετώπιση ενός πλημμυρικού φαινομένου τότε, μπορούν να δημιουργηθούν κανάλια εκτροπής (Brookes & Shields, 1996).

Σε εκτενέστερη μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Nakano and Nakamura (2008) στον ποταμό Shibetsu River στην Ιαπωνία, βρέθηκε πως κατά την διάρκεια της διαδικασίας αποκατάστασης του καναλιού ο αριθμός των μακροασπόνδυλων οργανισμών αυξήθηκε γεγονός που φανερώνει την θετική επίδραση της μαιανδρικής ροής στους πληθυσμούς των οικοσυστημάτων. Στην εικόνα 2.30 α και β παρουσιάζεται το κανάλι πριν αλλά και μετά την εφαρμογή της παρούσας τεχνικής.



Εικόνα 2.29: Διαγραμματικά σκίτσα απεικόνισης της διαμόρφωσης μαιανδρικής μορφής από ένα ευθύγραμμο κανάλι (Pan et al, 2016)



Εικόνα 2.30: α)Κανάλι του ποταμού Shibetsu πριν την εφαρμογή της μαιανδρικής ροής (Nakano and Nakamura, 2008)

β)Κανάλι του ποταμού Shibetsu έπειτα από την αποκατάσταση σου με την εφαρμογή της μαιανδρικής ροής (Nakano and Nakamura, 2008).

Πλεονεκτήματα:

1. Με την επαναφορά των μαιάνδρων σε κανάλια που είχαν ευθυγραμμιστεί, επαναφέρεται το παραποτάμιο υποβαθμισμένο οικοσύστημα στην αρχική του κατάσταση. (http://www.appropedia.org/In-river_flood_management).
2. Δυνατότητα μείωσης της εξάπλωσης της πλημμυρικής παροχής στα κατάντη και κατ'επέκταση μείωση της πιθανότητας πλημμυρικού φαινομένου.

Μειονεκτήματα:

1. Συχνά απαιτούνται μεγάλες, γειτονικές, εδαφικές εκτάσεις οι οποίες το πιο πιθανό είναι να χρησιμοποιούνται ήδη προς καλλιέργεια.

Έχοντας, πλέον, αναλύσει ποικίλες τεχνικές που αφορούν στην αποκατάσταση και εξυγίανση τόσο της παρόχθιας ζώνης όσο και αυτής ολόκληρου του καναλιού, συμπεραίνεται πως ενδείκνυται η συνύφανση τεχνικών και ιδιαίτερα σε πολύ υποβαθμισμένα εδάφη. Όπως έχει προαναφερθεί ένα ποσοστό τεχνικών εφαρμόζεται κατά κόρον σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους με σκοπό την επίτευξη της μέγιστης σταθερότητας την όχθης και αποφυγής της διάβρωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: “ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ BSTEM”

Το BSTEM (Bank Stability and Toe Erosion Model) αποτελεί ένα μοντέλο το οποίο βασίζεται στο πρόγραμμα Microsoft Excel Office. Αναπτύχθηκε από το Εθνικό Εργαστήριο Ιζηματοποίησης (National Sedimentation Laboratory) του υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ (US Department of Agriculture) με σκοπό την πρόγνωση της διάβρωσης των ποταμών (Toe Erosion Model) και της γεωτεχνικής αστοχίας (Bank Stability Model). Κατά την χρήση του μοντέλου μελετώνται δύο διαφορετικές διαδικασίες: η αστοχία του μεταβλητούς γεωμετρίας πρηνούς του ποταμού και η διάβρωση της όχθης του ποταμού λόγω της ροής του νερού. Αποτελείται συνολικά από δέκα καρτέλες εργασίας. Οι τρεις πρώτες από αυτές παρέχουν ένα θεωρητικό υπόβαθρο και οδηγίες για την ανάπτυξη και χρήση του μοντέλου. Το BSTEM μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για την εκτίμηση της υδραυλικής διάβρωσης της όχθης ποταμού και χρησιμοποιείται ευρέως σε παρόχθιες περιοχές όπου η διάβρωση «απειλεί» τη σταθερότητα των πρηνών.

3.1 Δομή και περιεχόμενο του μοντέλου

Κάθε καρτέλα που υπάρχει στο μοντέλο αποτελεί ένα διαφορετικό θεωρητικό ή πρακτικό σκέλος. Όπως προαναφέρθηκε οι τρεις πρώτες καρτέλες είναι θεωρητικές και παρέχουν στον χρήστη το απαραίτητο υπόβαθρο σχετικά με τις εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο. Οι επόμενες τρεις απαιτούν την εισαγωγή δεδομένων, ενώ οι τελευταίες είναι οι καρτέλες των αποτελεσμάτων. Αναλυτικότερα:

1.Εισαγωγική καρτέλα (Introduction): περιλαμβάνει ένα γενικό θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με την σταθερότητα της όχθης και την διάβρωση του ποδιού. Συγκεκριμένα, αναλύονται τα εξής:

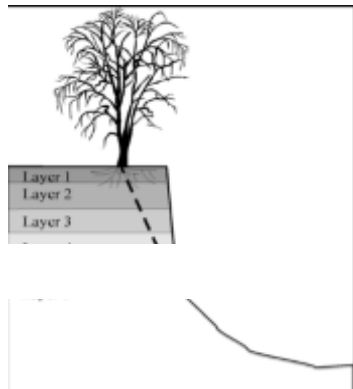
Μοντέλο σταθερότητας όχθης

Το μοντέλο σταθερότητας της όχθης συνδυάζει τρία οριακά μοντέλα σταθερής μεθόδου (Limit Equilibrium-method models), με βάση τα οποία υπολογίζεται ο παράγοντας ασφαλείας (F_s) για όχθες πολλαπλών στρωμάτων και συγκεκριμένα έως και πέντε εδαφικά στρώματα. Οι μέθοδοι προσομοίωσης είναι οριζόντια στρώματα (Simon et al., 2000), κάθετα κομμάτια με τάση θραύσης (Morgenstern and Price, 1965) και αστοχίες προβόλων (Thorne and Tovey, 1981). Το μοντέλο μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί ώστε να ενσωματώσει τα αποτελέσματα γεωφασμάτων ή άλλων μέτρων σταθεροποίησης πρηνών που συμβάλλουν στην εδαφική αντοχή. Έπειτα από το τρέξιμο του μοντέλου και τον υπολογισμό του δείκτη F_s , μπορεί να κριθεί η ύπαρξη ή όχι σταθερότητας στην όχθη. Όταν η τιμή του δείκτη F_s είναι μεγαλύτερη του 1.3 η όχθη θεωρείται σταθερή. Για τιμές μεταξύ του 1 και 1.3 η όχθη θεωρείται «υπό όρους σταθερή», ενώ όταν ο παράγοντας ασφαλείας είναι μικρότερος του 1, τότε η όχθη θεωρείται ασταθής. Στην παρούσα έκδοση του μοντέλου (BSTEM 5.4) γίνεται υπόθεση πως επικρατούν υδροστατικές συνθήκες κάτω από τη στάθμη του νερού και γραμμική παρεμβολή της μύζησης επάνω από τη στάθμη νερού (εκτός αν χρησιμοποιούνται τα στοιχεία πίεσης πόρου-ύδατος από τον χρήστη). Το μοντέλο μπορεί είτε να χρησιμοποιήσει τα κατ' εκτίμηση δεδομένα εισόδου όπου κανένα στοιχείο πεδίου δεν είναι διαθέσιμο ή ως πρώτη λύση, είτε μπορεί να ρυθμιστεί κατάλληλα έτσι ώστε να

χρησιμοποιούνται τα στοιχεία του χρήστη. Τα δεδομένα του χρήστη μπορούν να προστεθούν στα άσπρα κιβώτια.

Μοντέλο διάβρωσης ποδιού

Το μοντέλο διάβρωσης του ποδιού του πρανούς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο για την εκτίμηση της υδραυλικής διάβρωσης του πρανούς και του ποδιού του πρανούς από την υδραυλική διατμητική τάση. Τα αποτελέσματα της προστασίας από τη διάβρωση στο πρανές και το πόδι του μπορούν να ενσωματωθούν για να παρουσιάσουν τα



αποτελέσματα των μέτρων ελέγχου διάβρωσης. Το πρότυπο υπολογίζει την οριακή διατμητική

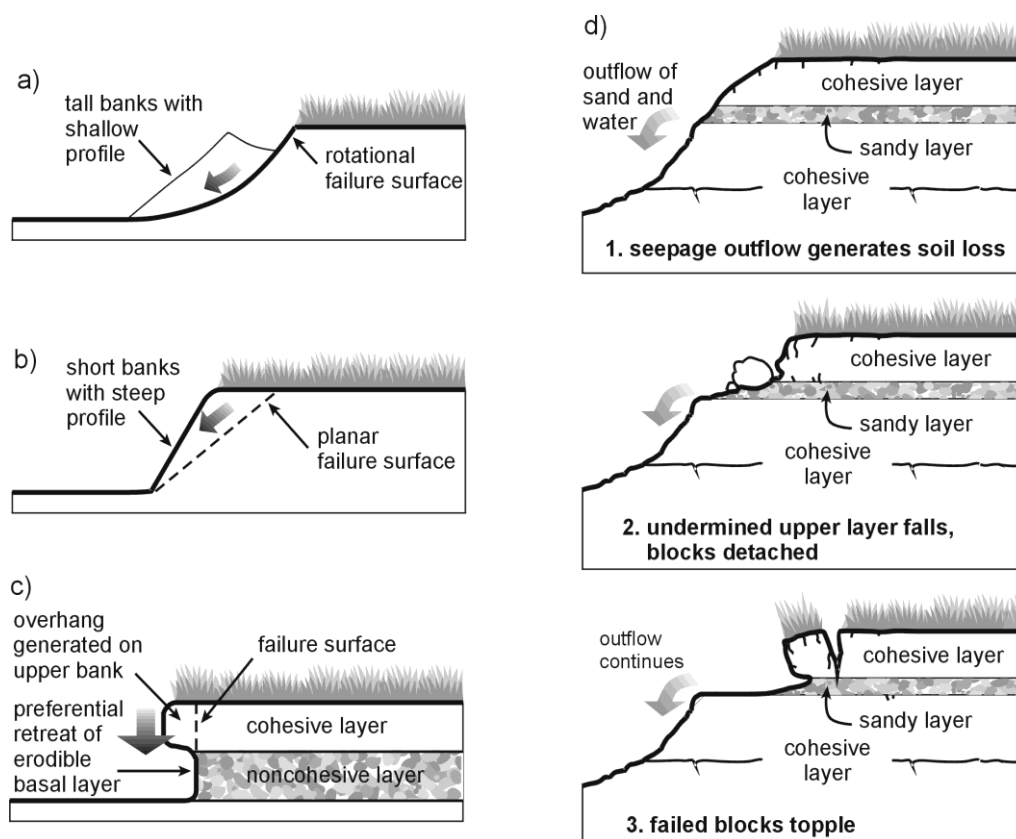
Σχήμα 3.1: Προφίλ όχθης πέντε εδαφικών στρωμάτων (N. Bankhead and L. Klimetz, 2012)

τάση από τη γεωμετρία του καναλιού, και θεωρεί την κρίσιμη διατμητική τάση και το συντελεστή διάβρωσης σε δύο χωριστές ζώνες με ενδεχομένως διαφορετικά υλικά, το πρανές και το πόδι του πρανούς. Αυτό είναι επειδή το μοντέλο υποθέτει ότι η διάβρωση δεν είναι περιορισμένη μεταφορά και δεν ενσωματώνει, σε καμία περίπτωση, προσομοίωση μεταφοράς ιζημάτων.

2. Καρτέλα τεχνικού υπόβαθρου (Tech Background), η οποία παρέχει τις εξισώσεις για την ανάλυση ευστάθειας οι οποίες περιλαμβάνουν τις αρνητικές και θετικές πιέσεις πόρων— ύδατος, τις επιδράσεις της βλάστησης και τέλος μια εισαγωγή για την διάβρωση του ποδιού.

Είδη αστοχίας πρανούς

Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί με τους οποίους εμφανίζεται η αστοχία του πρανούς, συμπεριλαμβανομένων των αστοχιών προβόλων ανασκαμμένων αναχωμάτων, της ανατροπής κάθετων πλακών και της περιστροφικής κατάρρευσης (Thorne et al., 1981). Ο τύπος της αστοχίας απεικονίζει το βαθμό ανασκαφής από την επίδραση ποτάμιων ή άλλων μηχανισμών υποσκαφής και τη φύση των υλικών των πρανών.



Σχήμα 3. 2 Μορφές αστοχίας του πρανούς στο πεδίο (Simon et al., 2000)

Το μοντέλο ευστάθειας της όχθης προσομοιώνει τους τύπους (b) και (c) καθώς επίσης και μια τροποποίηση του τύπου (b). Στην τροποποίηση αυτή δημιουργείται μια εφελκυστική ρωγμή την στιγμή της αστοχίας. Οι περιπτώσεις αυτές αποτελούν αστοχίες διάτμησης που εμφανίζονται όταν η δύναμη της τάσης υπερβαίνει τη δύναμη αντίστασης.

Σταθερότητα της όχθης

Η διατμητική τάση αστοχίας του κορεσμένου εδάφους αποδίδεται από το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb:

$$\tau_f = c' + (\sigma - \mu_w) \tan \phi' \quad (1)$$

Όπου:

- τ_f [kPa]: διατμητική τάση στην επιφάνεια αστοχίας (soil shear strength stress)
- c' [kPa]: ενεργός συνεκτικότητα, δηλαδή το τμήμα του άξονα διατμητικής αντοχής που αποκόπτεται όταν η ενεργός ορθή τάση και η μύζηση είναι μηδενική (effective cohesion),
- σ [kPa]: ορθή τάση (normal stress),
- μ_w [kPa]: πίεση των πόρων νερού κατά την αστοχία (pore-water pressure),
- ϕ' [μοίρες]: ενεργός γωνία εσωτερικών τριβών (effective angle of internal friction)

Σε ξηρές ή ημί-ξηρές περιοχές, όπου μεγάλο κομμάτι της όχθης μπορεί να βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, επικρατούν ακόρεστες συνθήκες. Η αρνητική πίεση πόρων-νερού, δηλαδή η μύζηση πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της συνεκτικότητας του εδάφους. Η μύζηση είναι η δύναμη με την οποία συγκρατείται το νερό στο έδαφος, η έλξη δηλαδή του νερού προς την στερεή φάση και για αυτό εκφράζεται ως αρνητική πίεση. Η εξίσωση.. περιγράφει την αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους με την αύξηση της αρνητικής πίεσης νερού-πόρων (Fredlund et al. (1978)). Αρνητική πίεση πόρων-νερού (θετική μύζηση, ψ) στην ακόρεστη ζώνη έχει σαν αποτέλεσμα η καθαρή συνεκτικότητα να είναι σε υψηλότερα επίπεδα και έτσι να υπάρχει μεγάλη διατμητική αντοχή (A. Simon et al, (2003)).

$$C_a = c' + (\mu_a - \mu_w) \tan \varphi^b = c' + \psi \tan \varphi^b \quad (2)$$

Όπου:

- c_a [kPa]: καθαρή συνεκτικότητα (apparent cohesion),
- μ_a [kPa]: πίεση πόρων-αέρα (pore-air pressure),
- ψ [kPa]: μύζηση (matric suction)

Η παράμετρος φ^b κυμαίνεται μεταξύ 10° και 20° με μέγιστη τιμή αυτήν της γωνίας φ' κάτω από κορεσμένες συνθήκες (Fredlund and Rahardjo, 1993). Αλλάζει ανάλογα τον τύπο του εδάφους και την υγρασία αυτού. Δεδομένα για την παράμετρο αυτή βρίσκονται συνήθως σε έλλειψη. Ωστόσο αν είναι γνωστή ή υποθεθεί τότε η καθαρή συνεκτικότητα και η ενεργός συνεκτικότητα μπορούν να υπολογιστούν μετρώντας την μύζηση με τενσιόμετρα ή άλλα μηχανήματα.

Μηχανικά αποτελέσματα της βλάστησης στην όχθη

Η ύπαρξη ή όχι βλάστησης στο πρηνές του ποταμού είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την εκτίμηση της διάβρωσης. Βασικό χαρακτηριστικό του εδάφους είναι πως είναι σχετικά ανθεκτικό στην συμπίεση (θλίψη) και πιο ευαίσθητο στην τάση. Αντίθετα, το ριζικό σύστημα των φυτών χαρακτηρίζεται από αντοχή στην τάση και ευαισθησία στην συμπίεση. Οι ρίζες που διεισδύουν στο έδαφος δημιουργούν ένα σύνθετο υλικό το οποίο έχει αυξημένη αντοχή (Thorne, 1990). Η εξίσωση (3) υπολογίζει την εδαφική αντοχή (C_r) σε συνάρτηση με την τάνυση (εφελκυστική δύναμη) των ριζών, την πυκνότητα του αέρα αλλά και την παρομόρφωση που επέρχεται στις ρίζες λόγω της διατμητικής τάσης (Wu et al. (1979, after Waldron, 1977)).

$$C_r = \frac{1}{A} \sum_{n=1}^{n-N} (A_r T_r)_n [\sin(90 - \zeta) + \cos(90 - \zeta) \tan \varphi'] \quad (3)$$

Όπου:

- C_r [kPa]: συνεκτικότητα λόγω των ριζών (cohesion due to roots),
- T_r [kPa]: τάνυση ριζών (tensile strength of roots),
- A_r : επιφάνεια ριζών στο επίπεδο της επιφάνειας διάτμησης (area of the shear surface),
- φ' [μοίρες]: γωνία τριβής εδάφους (friction angle of soil)

- N [-]: συνολικός αριθμός ριζών οι οποίες διέρχονται από το επίπεδο διάτμησης (total number of roots),
- Δείκτης n: νιοστή ρίζα (n^{th} root),
- Δείκτης ζ: $\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{1}{\tan \theta + \cot \chi} \right)$, όπου θ[μοίρες]: γωνία διατμητικής παραμόρφωσης και χ [μοίρες]: αρχική γωνία προσανατολισμού της ίνας της ρίζας σχετικά με το επίπεδο αστοχίας

Αλγόριθμοι σταθερότητας της όχθης

Οριζόντια στρώματα:

Η μέθοδος οριζόντιων στρωμάτων είναι μια περαιτέρω ανάπτυξη του τύπου αστοχίας σφηνών που αναπτύχθηκε από τους Simon και Curini (1998) και Simon et al (2000). Το μοντέλο είναι μια ανάλυση ισορροπίας ορίου στην οποία το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb χρησιμοποιείται για το κορεσμένο τμήμα της σφήνας και το κριτήριο χρησιμοποιείται για το ακόρεστο τμήμα. Εκτός από τη θετική και αρνητική πίεση πόρων-ύδατος, το πρότυπο ενσωματώνει στρωματοποίηση του εδάφους, αλλαγές στο μοναδιαίο βάρος του εδάφους σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία αλλά και την εξωτερική πίεση περιορισμού. Το μοντέλο διαιρεί το προφίλ του πρανούς σε στρώματα, τα οποία ορίζονται από τον χρήστη, με μοναδικές γεωτεχνικές ιδιότητες. Η σχέση για τον συντελεστή ασφαλείας είναι η εξής:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^I (c'_i L_i + (\mu_a - \mu_w)_i L_i \tan \varphi_i^b + [W_i \cos \beta - \mu_{a_i} L_i + P_i \cos(\alpha - \beta)] \tan \varphi_i')}{\sum_{i=1}^I (W_i \sin \beta - P_i \sin(\alpha - \beta))} \quad (4)$$

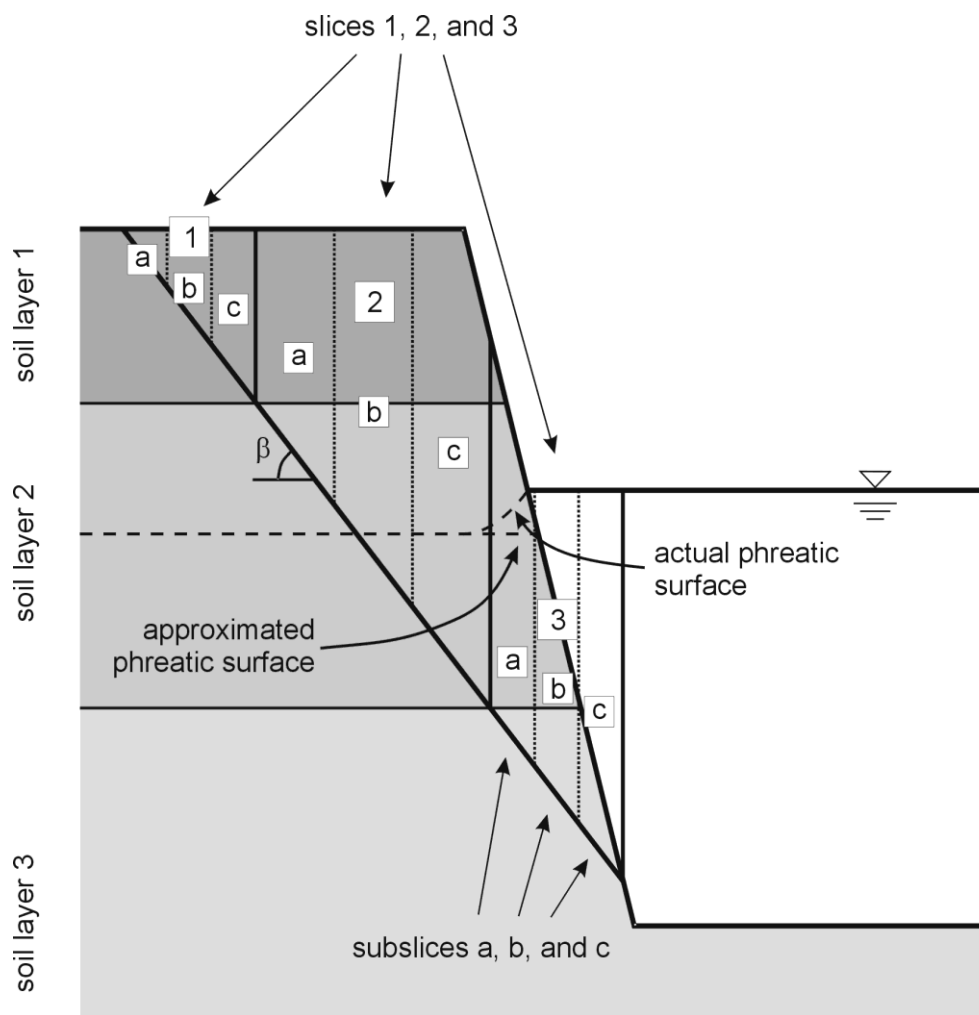
Όπου:

- F_s [-]: συντελεστής ασφαλείας (Factor of safety),
- c'_i [kPa]: ενεργός συνεκτικότητα του i-στου στρώματος (effective cohesion),
- L_i [m]: μήκος του επιπέδου αστοχίας μέσα στο i-στο στρώμα (length of failure),
- W_i [kN]: βάρος του i-στου στρώματος (weight of i^{th} layer),
- P_i [$\frac{kN}{m}$]: υδροστατική πίεση λόγω της στάθμης του νερού (hydrostatic-confining force),
- β [μοίρες]: γωνία κλίσης του επιπέδου αστοχίας (failure-plane angle),
- φ_i^b : ο ρυθμός αύξησης της διατμητικής τάσης λόγω της απορρόφησης στο υλικό του κάθε τμήματος της όχθης,
- $\mu_{a_i} L_i = U_i \left[\frac{kN}{m} \right]$: υδροστατική δύναμη άνωσης στο κορεσμένο τμήμα της επιφάνειας αστοχίας,
- $(\mu_a - \mu_w)_i L_i = S_i \left[\frac{kN}{m} \right]$: η δύναμη που παράγεται από την μύζηση στο ακόρεστο τμήμα της επιφάνειας αστοχίας

Κατακόρυφες λωρίδες:

Σε αυτήν την περίπτωση η όχθη διαχωρίζεται σε κατακόρυφα στρώματα. Όπως και στη μέθοδο οριζόντιων στρωμάτων, ακολουθείται η ανάλυση οριακής

ισορροπίας. Εκτός από τις δυνάμεις που ενσωματώνονται στη μέθοδο οριζόντιων στρωμάτων, η μέθοδος κάθετων κομματιών υπολογίζει τις κανονικές και ενεργές δυνάμεις διάτμησης στα τμήματα αστοχίας. Στο Σχήμα φαίνεται πως γίνεται η διαίρεση ενός τμήματος αστοχίας σε κομμάτια. Όσον αφορά τον διαχωρισμό, στα κάθετα κομμάτια υπάρχει ένας ίσος αριθμός J κομματιών και στρωμάτων.



Σχήμα 3. 3 Διαίρεση του τμήματος αστοχίας σε κατακόρυφες λωρίδες (Langedoen, 2000)

Κάθε τμήμα υποδιαιρείται, έπειτα, σε τρία ακόμη κομμάτια (a,b,c) ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια των υπολογισμών του F_s . Για τον υπολογισμό του δείκτη ασφαλείας F_s ακολουθείται μία επαναληπτική διαδικασία τεσσάρων βημάτων: (1) οι κάθετες δυνάμεις που ενεργούν σε ένα κομμάτι αθροίζονται για να καθορίσουν την κανονική δύναμη που επιδρά στη βάση ενός κομματιού, N_j (2) οι οριζόντιες δυνάμεις που ενεργούν σε ένα κομμάτι αθροίζονται για να καθορίσουν την ορθή δύναμη διεπιφάνειας I_{nj} , (3) η διατμητική δύναμη διεπιφάνειας, I_{sj} υπολογίζεται από το I_{nj} χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Morgenstern και Price (1965) και (4) οι οριζόντιες δυνάμεις αθροίζονται σε όλα

τα κομμάτια για να υπολογιστεί το F_s . Κατά την πρώτη επανάληψη, η ορθή και διατμητική δύναμη διεπιφάνειας αγνοούνται.

Η ορθή δύναμη N_j δίδεται από τον εξής τύπο:

$$N_j = W_j \cos \beta \quad (5)$$

Όπου:

- W_j [kN]: το βάρος του j-οστού κομματιού

Μετά την εκτέλεση της πρώτης επανάληψης, έχει υπολογιστεί το συνηθισμένο F_s . Οι ορθές δυνάμεις διεπιφάνειας (Εξίσωση 6) καθορίζονται από:

$$I_{nj} = I_{n_{j-1}} - \left(c'_j L_j + (\mu_a - \mu_w)_j L_j \tan \varphi_j^b - \mu_{a_j} L_j \tan \varphi_j' \right) \frac{\cos \beta}{F_s} + N_j (\sin \beta - \frac{\cos \beta \tan \varphi_j'}{F_s}) \quad (6)$$

Οι διατμητικές δυνάμεις διεπιφάνειας (Εξίσωση 7) δίδονται από τον εξής τύπο:

$$I_{sj} = 0,4 I_{n_j} \sin \left(\frac{\pi L_j}{\sum L_j} \right) \quad (7)$$

Έπειτα από την ολοκλήρωση της πρώτης επανάληψης, η ορθή δύναμη, N_j ισούται με:

$$N_j = \frac{W_j + I_{s_{j-1}} - I_{sj} - \sin \beta \left(\frac{c'_j L_j + S_j \tan \varphi_j^b - U_j \tan \varphi_j'}{F_s} \right)}{\cos \beta + \frac{\tan \varphi_j' \sin \beta}{F_s}} \quad (8)$$

Έτσι, ολοκληρώνεται η δεύτερη επανάληψη. Συχνά, οι υπολογισμένες ορθές δυνάμεις διεπιφάνειας είναι αρνητικές (εφελκυσμός) κοντά στην κορυφή του τμήματος αστοχίας. Λαμβάνοντας υπόψη την ιδιότητα του εδάφους να είναι ανίκανο να αντισταθεί στις μεγάλες εκτατές πιέσεις, υποτίθεται ότι διαμορφώνεται μια εφελκυστική ρωγμή στο τελευταίο όριο διεπιφάνειας με τον εφελκυσμό. Ο συντελεστής ασφάλειας (Εξίσωση 7) καθορίζεται από την ισορροπία των δυνάμεων στην οριζόντια και κάθετη διεύθυνση για κάθε κομμάτι και στην οριζόντια διεύθυνση σε ολόκληρο το τμήμα αστοχίας.

$$F_s = \frac{\cos \beta \sum_{j=1}^j (c'_j L_j + S_j \tan \varphi_j^b + [N_j - U_j] \tan \varphi_j')}{\sin \beta \sum_{j=1}^j (N_j) - P_j} \quad (9)$$

Η επαναληπτική μέθοδος θα συνεχιστεί μέχρι η τιμή του F_s να φτάσει κοντά στην επιθυμητή, δηλαδή η μέθοδος να συγκλίνει.

Διατμητική αστοχία του προβόλου

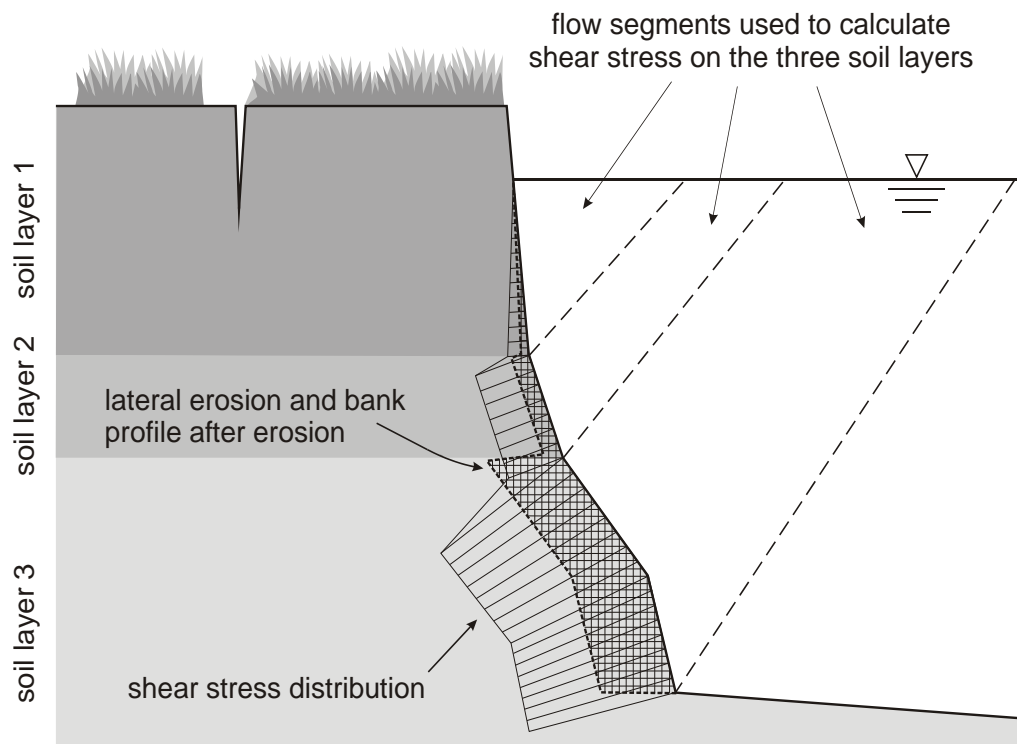
Ο αλγόριθμος διατμητικής αστοχίας προβόλου είναι μια περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου που υιοθετείται στο πρότυπο CONCEPTS (Langendoen, 2000). Ουσιαστικά, η αναλογία της διατμητικής τάσης αστοχίας του εδάφους προς το

βάρος του προβόλου ισούται με τον συντελεστή ασφαλείας F_s . Εάν η όχθη είναι μερικώς ή ολικώς βυθισμένη, τότε τα βάρη των στρωμάτων τα οποία επηρεάζονται από το νερό μειώνονται, ανεξάρτητα από την γεωμετρία της επιφάνειας της βάσης που προεξέχει. Αντικαθιστώντας όπου $\beta=90^\circ$ στην εξίσωση 4 έχουμε:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^I (c'_j L_j + S_j \tan \phi_j^b - U_i \tan \phi_i'')}{\sum_{i=1}^I (W_i - P_i)} \quad (10)$$

Μοντέλο διάβρωσης του ποδιού

Υπολογισμός της μέσης οριακής διατμητικής τάσης, τ_0 :



Σχήμα 3. 4 Κατάτμηση των τοπικών περιοχών ροής του πρηνούς και των υδραυλικών ακτινών (BSTEM: Tech Background)

Για κάθε κόμβο των διαφορετικών εδαφικών υλικών της όχθης η μέση οριακή διατμητική τάση (τ_0), υπολογίζεται:

$$\tau_0 = \gamma_w R S \quad (11)$$

Όπου:

- τ_0 [Pa]: μέση οριακή διατμητική τάση (average boundary shear stress),
- γ_w [$9.81 \frac{kN}{m^3}$]: ειδικό βάρος νερού (unit weight of water),
- R [m]: τοπική υδραυλική ακτίνα που υπολογίζεται από το βάθος ύδατος (local hydraulic radius),
- S [m/m]: κλίση καναλιού (channel slope)

Για να υπολογιστεί η οριακή διατμητική τάση που ασκείται λόγω της ροής του νερού σε κάθε κόμβο πραγματοποιείται διαίρεση της περιοχής που διαβρέχεται σε τμήματα. Τα τμήματα αυτά επηρεάζονται μόνο από την τραχύτητα που χαρακτηρίζει την όχθη. Στην συνέχεια γίνεται περαιτέρω υποδιαίρεση για να καθοριστεί η περιοχή ροής που επηρεάζεται από την τραχύτητα του κάθε κόμβου. Σε κάθε ξεχωριστό τμήμα, η υδραυλική ακτίνα αποτελεί την περιοχή του τμήματος (A) που διαιρείται με την βρεχόμενη περίμετρο του τμήματος (P_n). Η διατμητική τάση του υγρού σύμφωνα με τις διαχωριστικές γραμμές δεν λαμβάνεται υπόψη κατά τον προσδιορισμό της βρεχόμενης περιμέτρου. Στο Σχήμα 3.4 φαίνεται η γραμμή που διαιρεί τα τμήματα της όχθης που επηρεάζονται από την ροή.

Διαβρωσιμότητα και κρίσιμη διατμητική τάση

Από τον Hanson (1990) αναπτύχθηκε μία συσκευή μελέτης η οποία ονομάζεται jet-test. Είναι βυθισμένη στο νερό και διεξάγει επιτόπιες δοκιμές διάβρωσης εδάφους. Η λειτουργία της βασίζεται στην γνώση των υδραυλικών χαρακτηριστικών ενός jet και των χαρακτηριστικών της διαβρωσιμότητας κάθε εδαφικού υλικού. Η εξίσωση (12) αναπτύχθηκε με την χρήση αυτής της συσκευής από τους Hanson και Simon (2001). Η σχέση συνδέει κρίσιμη διατμητική τάση (τ_c) και του συντελεστή διάβρωσης (k) για ιλύ με συνεκτικότητα και άργιλο:

$$k=2 \cdot 10^{-7} \cdot \tau_c^{-0.5} \quad (11)$$

Ρυθμοί και όγκος διάβρωσης

Αντίστοιχα, για κάθε κόμβο, κάνοντας προσέγγιση μιας ακραίας διατμητικής τάσης υπολογίζεται ο μέσος ρυθμός διάβρωσης σε m/s (Partheniades, 1965). Ο ρυθμός αυτός ολοκληρώνεται, στην συνέχεια, ως προς τον χρόνο και προκύπτει η μέση απόσταση διάβρωσης, η οποία δίδεται από την εξίσωση (12):

$$E=k \cdot \Delta t \cdot (\tau_0 - \tau_c) \quad (12)$$

Όπου:

- E [m]: απόσταση διάβρωσης (erosion distance),
- $k[\frac{m^3}{Ns}]$: συντελεστής διάβρωσης (erodibility coefficient),
- Δt [s]: χρονικό βήμα (time step)
- τ_0 [Pa]: μέση οριακή διατμητική τάση αστοχίας (average boundary shear stress),
- τ_c [Pa]: κρίσιμη διατμητική αντοχή (critical shear stress)

Με εξαίρεση στο ότι η διάβρωση υποτίθεται ότι εμφανίζεται κανονικά στην τοπική γωνία της όχθης και όχι οριζόντια, η μέθοδος αυτή είναι παρόμοια με αυτήν που υιοθετήθηκε στο μοντέλο CONCEPTS (Langendoen, 2000).

3. Καρτέλα χρήσης του μοντέλου και συχνών ερωτήσεων, η οποία περιλαμβάνει την μεθοδολογία για την εφαρμογή των χαρακτηριστικών του μοντέλου, συμπεριλαμβάνοντας και κάποιες αναφορές σχετικές με την γεωμετρία των πρηνών, την επιλογή της διατμητικής επιφάνειας, τα στρώματα του εδάφους, τη στάθμη του υδροφορέα από την επιφάνεια, τη βλάστηση και τη διάβρωση του ποδιού. Επίσης, είναι σημαντικό πως για να «τρέξει» το μοντέλο θα πρέπει να έχουν συλλεχθεί τα κατάλληλα δεδομένα από το πεδίο και να εισαχθούν στα σωστά κελιά του προγράμματος. Η διαδικασία αυτή της συλλογής των δεδομένων δεν είναι πάντα εφικτή. Ακόμη, ο μηχανισμός με τον οποίο λαμβάνει χώρα η αστοχία του πρηνούς είναι πιθανό να μην ταιριάζει ακριβώς με κάποιο από τα μοντέλα. Τότε το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένας προσεγγιστικός ή σχετικός δείκτης σταθερότητας της όχθης, με τρόπο όμοιο με αυτόν του BEHI (Bank Erosion Hazard Index) που βασίζεται σε μεθόδους με δείκτες. Στο σημείο αυτό αναφέρεται πως η γεωμετρία της όχθης είναι δυνατό να εισαχθεί με δύο τρόπους (Option A, Option B).

Στην πρώτη επιλογή, εισάγονται οι μεταβλητές της κλίσης (π.χ. υψόμετρο, απόσταση σημείου) που έχουν μετρηθεί στο πεδίο με σκοπό την ανάλυση τους. Στην έκδοση αυτή μπορεί να εισαχθεί ένας μέγιστος αριθμός 23 σημείων και το λιγότερο 5 σημεία. Τα πέντε αυτά σημεία που είναι απαραίτητα για να τρέξει η επιλογή A είναι: το σημείο της κοίτης του ποταμού, η κορυφή της όχθης, η κορυφή του ποδιού, ο πυθμένας του ποδιού και ο πυθμένας του καναλιού. Στην καρτέλα αυτή υπάρχει ένα κουτί το οποίο θα πρέπει να επιλεγεί από τον χρήστη και το οποίο δείχνει ποιο σημείο είναι αυτό που αντιστοιχεί στην κορυφή του ποδιού της όχθης. Το μοντέλο βασίζεται στις παρεμβολές και προσθέτει σημεία ανάμεσα σε αυτά που έχουν εισαχθεί και έτσι δημιουργείται η εικόνα της όχθης. Για να περιγραφεί η γεωμετρία της όχθης χρησιμοποιούνται το μέγιστο 17 σημεία και αντίστοιχα, για να περιγραφεί η γεωμετρία του ποδιού, χρειάζονται το μέγιστο 6 σημεία.

Εναλλακτικά, στην επιλογή B δημιουργείται το προφίλ της όχθης βάση της δοσμένης γωνίας της όχθης, του ύψους της όχθης, της γωνίας του ποδιού και του μήκους αυτού. Στην περίπτωση της επιλογής B, αυτομάτως η όχθη κλιμακώνεται έτσι ώστε το πλάτος της κορυφής της όχθης να είναι 1m πλατύτερο από την σφήνα της αστοχίας.

4. Καρτέλα εισαγωγής της γεωμετρίας (Input Geometry). Στο δεξί κομμάτι της καρτέλας παρουσιάζεται ένα τυπικό προφίλ όχθης και τα βασικά σημεία από τα οποία αποτελείται. Υπάρχουν οι επιλογές A και B που αναφέρθηκαν παραπάνω. Έτσι, ο χρήστης καλείται να εισάγει όλες τις ζητούμενες παραμέτρους μεταξύ των οποίων είναι οι συντεταγμένες για το προφίλ της όχθης (πρηνές), το πάχος του στρώματος της όχθης και οι διάφορες παράμετροι ροής. Σχετικά με τις παραμέτρους, το μήκος του καναλιού χρησιμοποιείται από το μοντέλο ως παράμετρος για τον υπολογισμό του φορτίου του ιζήματος που εισάγεται στο ποτάμι. Η διάρκεια της ροής χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της διάβρωσης που προκαλείται από τη ροή του νερού. Η στάθμη του νερού χρησιμοποιείται από το μοντέλο της σταθερότητας της όχθης για τον υπολογισμό της πίεσης του νερού, ενώ από το

μοντέλο της διάβρωσης για τον υπολογισμό της διατμητικής τάσης. Για την εκτίμηση της διατμητικής τάσης λαμβάνεται υπόψη και η κλίση του καναλιού

5. Καρτέλα εισαγωγής του υλικού της όχθης (Bank Material), στην οποία ο χρήστης καλείται να επιλέξει το εδαφικό υλικό από το οποίο αποτελείται καθένα από τα στρώματα της όχθης. Για κάθε στρώμα υπάρχει στο πρόγραμμα μία λίστα από εδαφικά υλικά όπως: άμμος ή άργιλος. Ωστόσο, αντί για τις προεκλεγμένες επιλογές μπορεί να εισαχθούν και διαφορετικές παράμετροι (Select your own data). Επίσης, εισάγονται δεδομένα για τη διαβρωσιμότητα του ποδιού του πρανούς με σκοπό τον υπολογισμό της διατμητικής τάσης και του συντελεστή διάβρωσης.

6. Καρτέλα εισαγωγής της βλάστησης και προστασίας (Bank Vegetation and Protection). Στην καρτέλα αυτή λαμβάνεται υπόψη η μηχανική και υδραυλική αντίσταση η οποία οφείλεται στο ριζικό σύστημα των φυτών. Η βλάστηση μπορεί να είναι προϋπάρχουσα αλλά μπορεί να οφείλεται και σε κάποιο μέτρο προστασίας το οποίο έχει πραγματοποιηθεί στην περιοχή με σκοπό την αντιμετώπιση της διάβρωσης. Η παρούσα, λοιπόν, καρτέλα του BSTEM δίνει την δυνατότητα επιλογής μεθόδων προστασίας όπως: Ρολά από ίνες καρύδας (Coir fiber), γεωυφάσματα (geotextile), λιθοδομή (Rip Rap) αλλά και άλλες.

7. Καρτέλα αποτελεσμάτων του μοντέλου της όχθης (Bank Model Output) και

8. Καρτέλα αποτελεσμάτων του μοντέλου του ποδιού

Όταν το τρέξιμο του μοντέλου έχει τελειώσει τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην καρτέλα "Calculations". Έτσι, για κάθε χρονικό βήμα προκύπτει: ο συντελεστής ασφαλείας, η μέση και μέγιστη οριακή διατμητική τάση, οι όγκοι της γεωτεχνικής και υδραυλικής διάβρωσης και οι μάζες των ιζημάτων. Σε μία ξεχωριστή καρτέλα, το προφίλ της όχθης πριν και μετά εμπλέκονται και προκύπτουν οι παραπάνω παράμετροι στην συνολική διάρκεια του χρόνου αλλά και το τμήμα της ροής στην συνολική διάρκεια του χρόνου, η συνολική διάβρωση για κάθε χρονικό βήμα και η ολική διάβρωση στην συνολική διάρκεια του χρόνου.

3.2 Διαδικασία χρήσης του μοντέλου

Βήμα 1: Ανοίγοντας το μοντέλο BSTEM, πρώτο είναι το φύλλο της εισαγωγής όπου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω μπορούμε να βρούμε διάφορες πληροφορίες σχετικά με το μοντέλο.

Βήμα 2: Μεταβαίνοντας στην καρτέλα εισαγωγής της γεωμετρίας ("Input Geometry") πρέπει να επιλέξουμε μία από τις δύο επιλογές. Στην παρούσα εργασία επιλέγεται επιλογή Α, οπότε θα εισαχθούν οι συντεταγμένες (απόσταση και υψόμετρο) των σημείων αλλά και συγκεκριμένες παράμετροι της ροής και των καναλιών. όσον αφορά τις παραμέτρους του καναλιού και της ροής, απαιτείται η εισαγωγή του μήκους του καναλιού, της κλίσης αυτού, της

στάθμης του νερού και της διάρκειας της ροής. Πιο συγκεκριμένα, η στάθμη του νερού και η διάρκεια της ροής εκτιμάται βάσει ενός πλημμυρικού φαινομένου και συγκεκριμένα επιλέγεται η μέγιστη στάθμη κατά τη διάρκεια των ημερών όπου η δύναμη της ροής (stream power, w) παίρνει τις μέγιστες τιμές. Η δύναμη της ροής υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τις παροχές.

Input bank geometry and flow conditions

Work through all 4 sections then hit the "Run Bank Geometry Macro" button.

1) Select EITHER Option A or Option B for Bank Profile and enter the data in the relevant box-cells in the alternative option are ignored in the simulation and may be left blank if desired.

2) Enter bank material layer thicknesses (if bank is all one material it helps to divide it into several layers).

3) If bank is submerged then select the appropriate channel flow elevation to include confining pressure and calculate erosion amount; otherwise set to an elevation below the bank toe.

To ensure bank profile is correct you can view it by clicking the View Bank Geometry button.

Option A - Draw a detailed bank profile using the boxes below

☒ Option A

Point	Station (m)	Elevation (m)	Top of toe?
A			
B			
C			
D			
E			
F			
G			
H			
I			
J			
K			
L			
M			
N			
O			
P			
Q			
R			
S			
T			
U			
V			
W			

Shear emergence elev

Shear surface angle

Option B - Enter a bank height and angle, the model will generate a bank profile

☐ Option B

a) Input bank height (m)

b) Input bank angle (°)

c) Input bank toe length (m)

d) Input bank toe angle (°)

Input shear surface angle

Bank layer thickness (m)

Elevation of layer base

Top Layer (m)

Layer 1 #TIMH#

Layer 2 #TIMH#

Layer 3 #TIMH#

Layer 4 #TIMH#

Layer 5 #TIMH#

Bottom Layer

Parallel layers, starting from point B

Channel and flow parameters

Input reach length (m)

Input reach slope (m/m)

Input elevation of flow (m)

Input duration of flow (hrs)

Definition of points used in bank profile

A - bank top; place beyond start of shear surface

B - bank edge

C-P - breaks of slope on bank (if no breaks of slope place as intermediary points)

Q - top of bank toe

R-U - breaks of slope on bank toe (if no breaks of slope then insert as intermediary points)

V - base of bank toe

W - end point (typically mid-point of channel)

Notes:

Bank profile may overhang

If the bank profile is fully populated, the shear surface emergence point should be anywhere between points B and Q.

The shear surface emergence point must not be on a horizontal section - the elevation of this point must be unique, otherwise an error message will display.

View Bank Geometry

Run Bank Geometry Macro

Εικόνα 3. 1 Καρτέλα "Input Geometry" (Φωτογραφία από το πρόγραμμα BSTEM)

Βήμα 3: Αφού έχουμε εισάγει όλα τα δεδομένα στο φύλλο γεωμετρίας, επιλέγουμε να προβληθεί η γεωμετρία της όχθης και τρέχουμε τη μακροεντολή της γεωμετρίας του πρσανούς.

Βήμα 4: Έπειτα, πραγματοποιείται η μετάβαση στην καρτέλα: "Bank Material", στην οποία επιλέγεται για κάθε στρώμα της όχθης, το είδος του εδάφους το οποίο το χαρακτηρίζει. Εισάγεται η διάμετρος που αντιστοιχεί στο 50% των κόκκων και έτσι υπολογίζεται η κρίσιμη διατμητική τάση και ο συντελεστής διάβρωσης.

Select material types (or select "own data" and add values below)

Bank Material: Layer 1, Layer 2, Layer 3, Layer 4, Layer 5, Bank Toe Material

Bank and bank-toe material data tables.

These are the default parameters used in the model. Changing the values or descriptions will change the values used when selecting soil types from the list boxes above. Add your own data using the white boxes.

Material Descriptors		Bank Model Input Data					Groundwater Model Input Data					Toe Model Input Data			
Bank material type	Description	Mean grain size, D_{50} (m)	Friction angle ϕ^0 (degrees)	Cohesion c^0 (kPa)	Saturated unit weight γ_{sat} (kN/m ³)	e^0 (degrees)	Chemical concentration n (kg/kg)	Hydraulic Conductivity K_{sat} (m/s)	Bulk Modulus (Pa)	Porosity	Residual water content	van Genuchten m (1/ta)	van Genuchten n	τ_c (Pa)	k (cm ² /Ns)
1	Boulders	0.512	42.0	0.0	20.0	15.0	-	1.745E-03	6.589E+08	0.280	0.090	3.5237	2.3288	488	0.004
2	Cobbles	0.128	42.0	0.0	20.0	15.0	-	1.745E-03	6.589E+08	0.280	0.090	3.5237	2.3288	124	0.009
3	Gravel	0.0113	36.0	0.0	20.0	15.0	-	3.105E-03	1.35E+07	0.71	0.153	3.5237	2.3288	11.0	0.030
4a and 4b	Angular sand	0.00035	32.3	0.4	18.5	15.0	-	7.439E-05	1.35E+07	0.71	0.153	3.5237	2.3288	Coarse (0.71 mm) or	
5a and 5b	Rounded sand	0.00035	28.3	0.4	18.5	15.0	-	1.130E-05	6.059E+07	0.338	0.033	3.5237	2.3288	Fine (0.18 mm)	
6a, 6b and 6c	Silt	-	28.6	4.3	18.0	15.0	-	5.004E-06	1.049E+07	0.483	0.050	0.8577	1.8788	Erodible (0.100 Pa),	
7a, 7b and 7c	Soft clay	-	25.4	8.2	17.7	15.0	-	9.473E-07	1.354E+06	0.442	0.040	1.5812	1.4159	Moderate (5.00 Pa), or	
8a, 8b and 8c	Stiff clay	-	21.1	12.6	17.7	15.0	-	1.708E-05	5.417E+05	0.459	0.038	1.4952	1.2531	Resistant (50.0 Pa)	
9	Own data layer 1														
	Own data layer 2														
	Own data layer 3														
	Own data layer 4														
	Own data layer 5														
	Own data Bank Toe														

Need to know the critical shear stress (τ_c) ? (mm) Critical Shear Stress τ_c (Pa)

Need to know the erodibility coefficient (k) ? Input critical shear stress τ_c (Pa) Erodibility Coefficient (cm²/Ns)

Εικόνα 3. 2 Καρτέλα “Bank Material” (Φωτογραφία από το πρόγραμμα BSTEM)

Βήμα 5: Η επόμενη καρτέλα ονομάζεται “Bank Vegetation and Protection”. Αυτή παρέχει μία λίστα φυτών. Ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει σε τι ποσοστό, δηλαδή τι ποσοστό καλύπτει και ηλικία βρίσκεται το κάθε είδος βλάστησης. Έτσι υπολογίζεται η συνεκτικότητα της όχθης λόγω του ριζικού συστήματος.

Simulate the mechanical effects of bank top vegetation on bank stability using a root-reinforcement model

RipRoot (Pollen and Simon, 2005) is a global load-sharing fiber-bundle model. It explicitly simulates both the snapping of roots and the slipping of roots through the soil matrix, by determining the minimum applied load required to either break each root or pull each root out of the soil matrix. As the strength of each root is removed from the fiber bundle, the load is redistributed to the remaining roots according to the ratio of the diameter of each root to the sum of the diameters of all the intact roots. RipRoot builds on earlier work by Waldron (1977), Wu *et al.* (1979) and Waldron and Dakessian (1981).

Run Root-Reinforcement Model

Root-Reinforcement Model Output

List of Species
Percent of Assemblage

Added cohesion due to roots, c_r kPa

Protect the bank and/or bank-toe against hydraulic erosion by adding treatments (or select "own data" and add values below)

Protection: Bank Protection, Bank Toe Protection

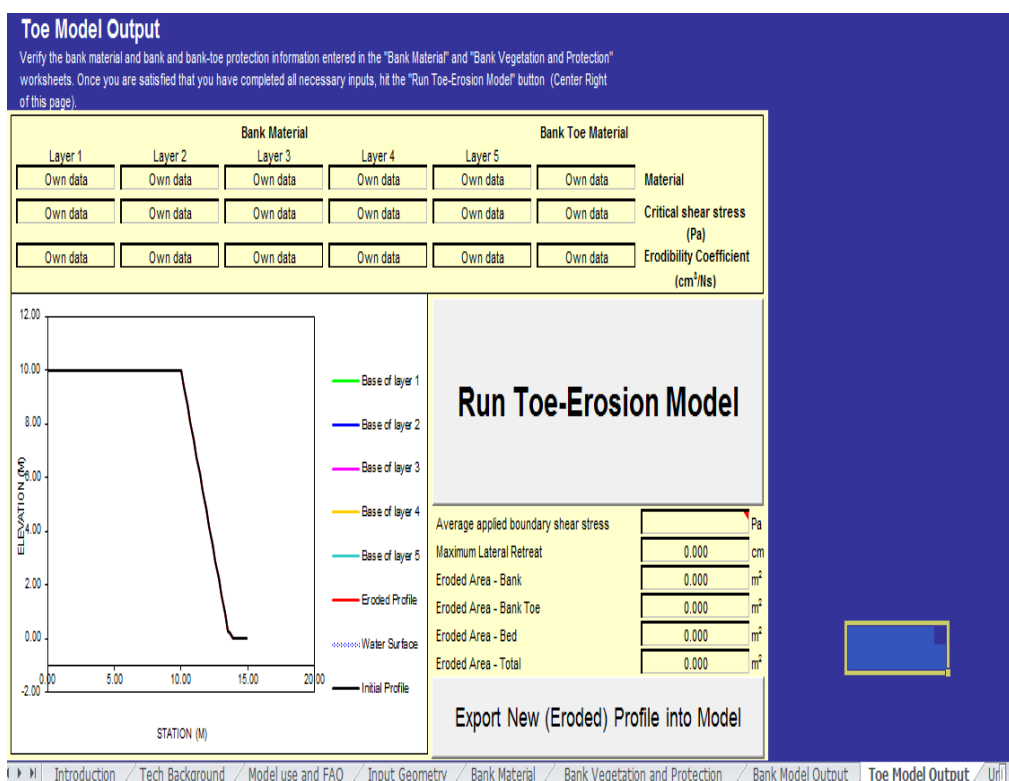
Bank and bank-toe protection data table

These are the default parameters used in the model. Changing the values or descriptions will change the values used when selecting soil types from the list boxes above. Add your own data using the white box.

Protection type	Description	Permissible shear stress (Pa)
1	No protection	-
2	Coir fiber	108
3	Geotextile (synthetic)	144
4	Jute net	22
5	Large Woody Debris	192
6	Live fascine	100
7	Plant cuttings	17
8	Rip Rap (D_{50} 0.256 m)	204
9	-	-
10	-	-
11	-	-
12	-	-
13	Own Data	<input type="text"/>

Εικόνα 3. 3 Καρτέλα “Bank Vegetation Protection” (Φωτογραφία από το πρόγραμμα BSTEM)

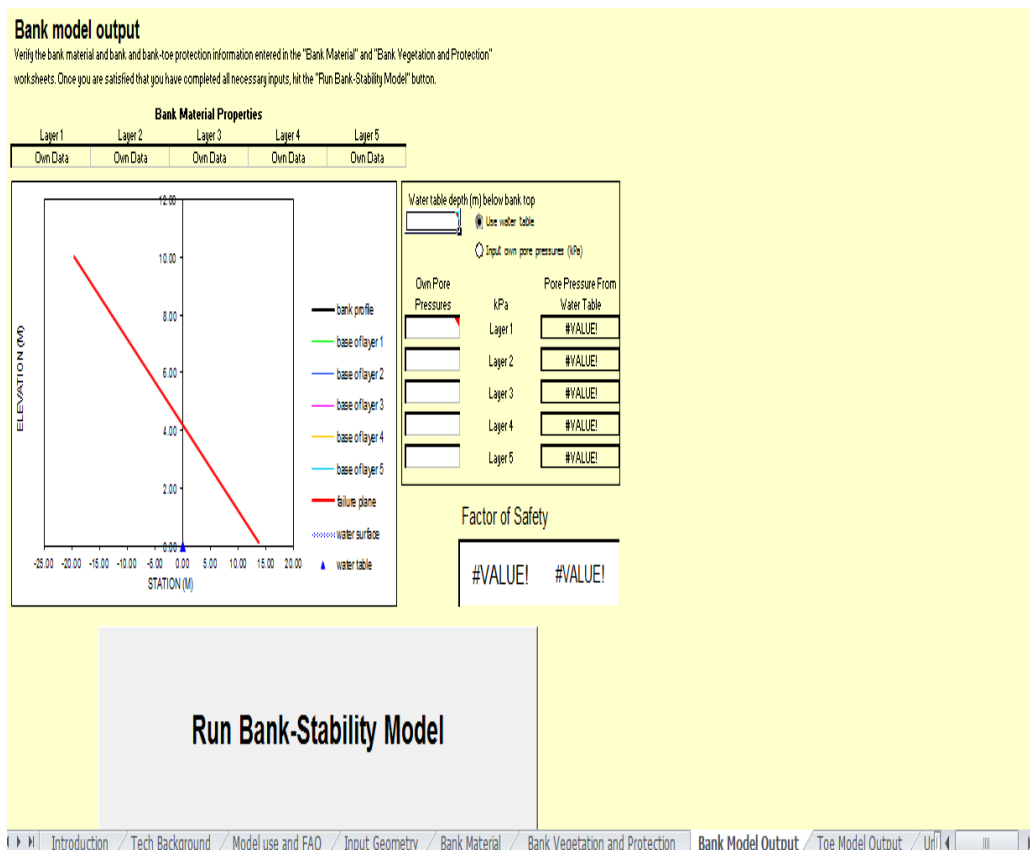
Βήμα 6: Συνεχίζοντας στην Καρτέλα: “Toe Model Output”, το υπομοντέλο της διάβρωσης υπολογίζει τη διατμητική τάση και το ποσό της διάβρωσης που θα υποστεί η όχθη βάσει των δεδομένων εισαγωγής. Σαν αποτέλεσμα δίδεται το προφίλ της όχθης που θα υποστεί διάβρωσης μέσω ενός γραφήματος.



Εικόνα 3. 4 Καρτέλα “Toe Model Output” (Φωτογραφία από το πρόγραμμα BSTEM)

Βήμα 7: Έχει δημιουργηθεί πλέον το νέο προφίλ της όχθης, δηλαδή της διαβρωμένης. Αυτό εισάγεται ξανά στο μοντέλο με σκοπό αυτή τη φορά να εξεταστεί από πλευράς σταθερότητας του πρανούς. Αυτό γίνεται στην καρτέλα “Input Geometry” όπου τα νέα δεδομένα εισάγονται στην επιλογή A και επιλέγεται να προβληθεί η γεωμετρία της όχθης.

Βήμα 8: Έπειτα, μεταβαίνοντας στην καρτέλα “Bank model Output”, εισάγεται η στάθμη του υδροφορέα (τιμή μετρημένη από την επιφάνεια) και από το μοντέλο της σταθερότητας της όχθης υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας (Fs) καθώς επίσης και το πλάτος και ο όγκος της αστοχίας και το φορτίο του ιζήματος. Τέλος, δίνεται γραφικά το πλάνο της αστοχίας.



Εικόνα 3. 5 Καρτέλα “Bank Model Output” (Φωτογραφία από το πρόγραμμα BSTEM)

Βήμα 9: Το τελευταίο βήμα της διαδικασίας είναι η μετάβαση στην καρτέλα “Bank Model Output”. Σύμφωνα με όλα τα δεδομένα που εισήχθησαν, λαμβάνεται ο τελικός συντελεστής ασφαλείας F_s , το πλάτος, ο όγκος της αστοχίας αλλά και το φορτίο του ιζήματος. Ωστόσο, δίνεται γραφικά και το πλάνο αστοχίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: “ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ”

4.1 Γεωγραφική θέση-Έκταση-Διοικητική Υπαγωγή

Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας βρίσκεται στην Κρήτη, στην περιφερειακή ενότητα Χανίων. Ο Νομός Χανίων βρίσκεται στο δυτικό κομμάτι της Κρήτης. Ανατολικά του Νομού Χανίων σε ακτίνα 15km ($350^{\circ}26'E$, $240^{\circ}08'N$) βρίσκεται η υδρολογική λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη η οποία διέρχεται από τον Δήμο Αρμένων και τον Δήμο Κεραμιών. Η συνολική έκταση της λεκάνης εκτιμάται πως είναι 130km^2 , περιλαμβάνει συνολικά 17 κοινότητες μεταξύ των οποίων είναι: 8 πεδινές, 2 ημιορεινές και 7 ορεινές (Χατζηθεοχάρους, 2005) και καταλήγει στην παράκτια ζώνη, στις Καλύβες.

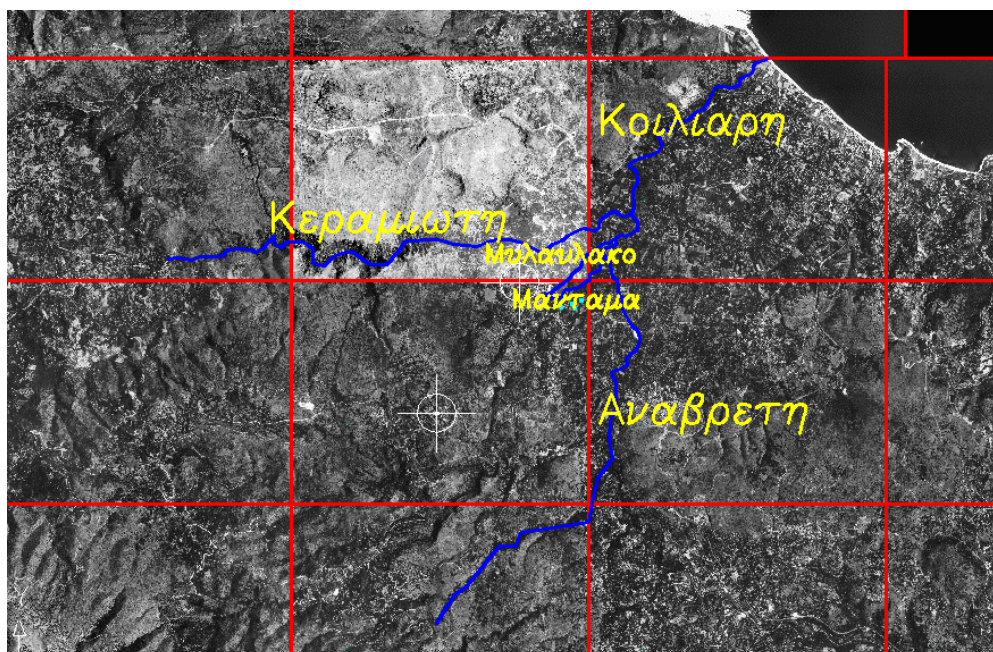
4.2 Χάρτες της περιοχής μελέτης

Γενικοί χάρτες που απεικονίζουν την ευρύτερη περιοχή είναι οι 4.1, 4.2, 4.3.

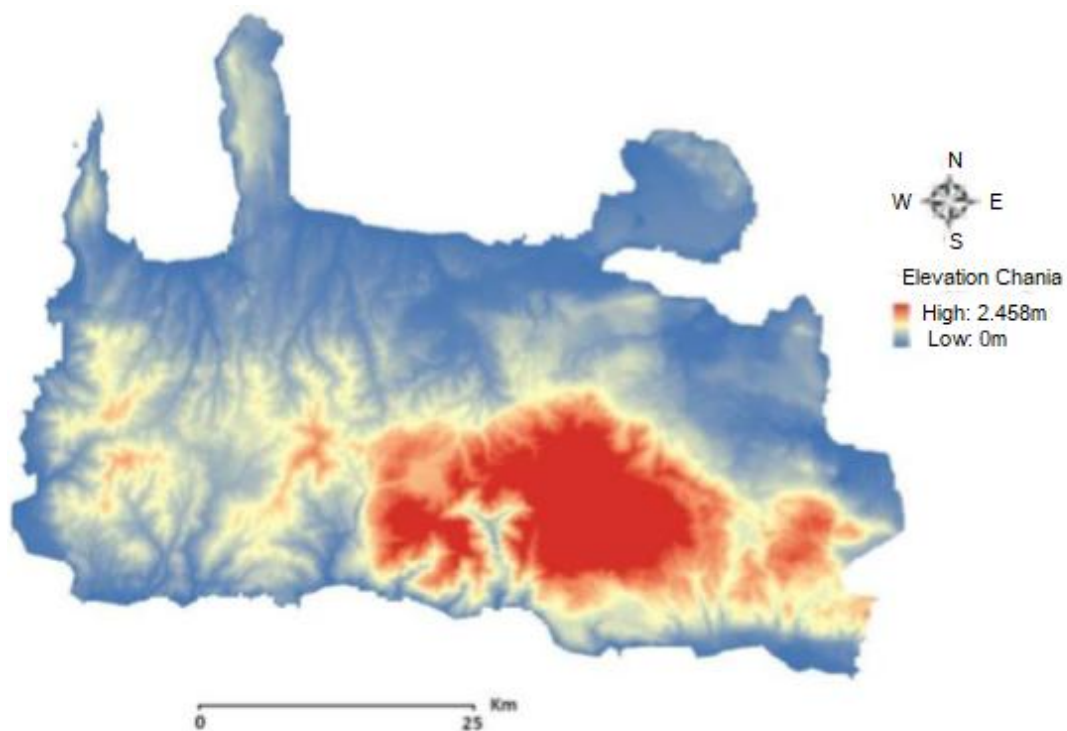


Χάρτης 4. 1 Γεωγραφική θέση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Χατζηθεοχάρους, 2005)

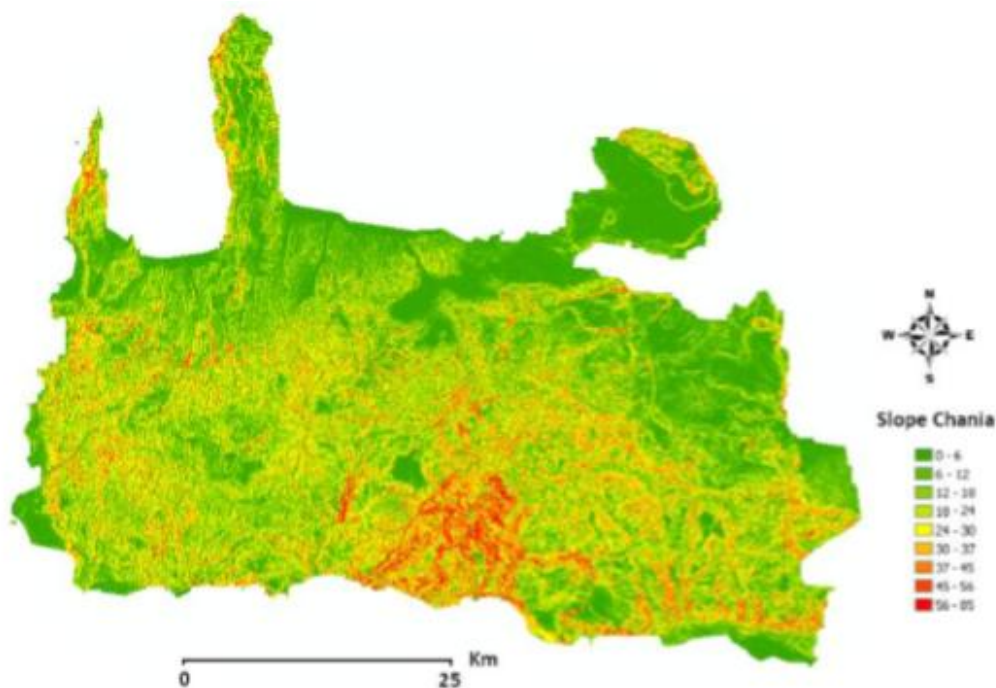
Στον αμέσως επόμενο χάρτη διακρίνεται ο ποταμός Κοιλιάρης αλλά και τα υδατορεύματα τα οποία συνεισφέρουν σε αυτόν (χάρτης 4.2). Ο χάρτης 4.3 αποτελεί χάρτη υψομέτρων τη ευρύτερης περιοχής του Νομού Χανίων, στον οποίο φαίνεται πως το υψηλότερο υψόμετρο είναι 2.458m και συναντάται στα Λευκά Όρη από τα οποία τροφοδοτείται με ποσότητες υδάτων ο ποταμός Κοιλιάρης. Στον χάρτη 4.4 απεικονίζονται οι κλίσεις της αντίστοιχης περιοχής.



Χάρτης 4. 2 Απεικόνιση του ποταμού Κοιλιάρη και των υδατορευμάτων μέσω αεροφωτογραφίας (Λιλλή, 2011)

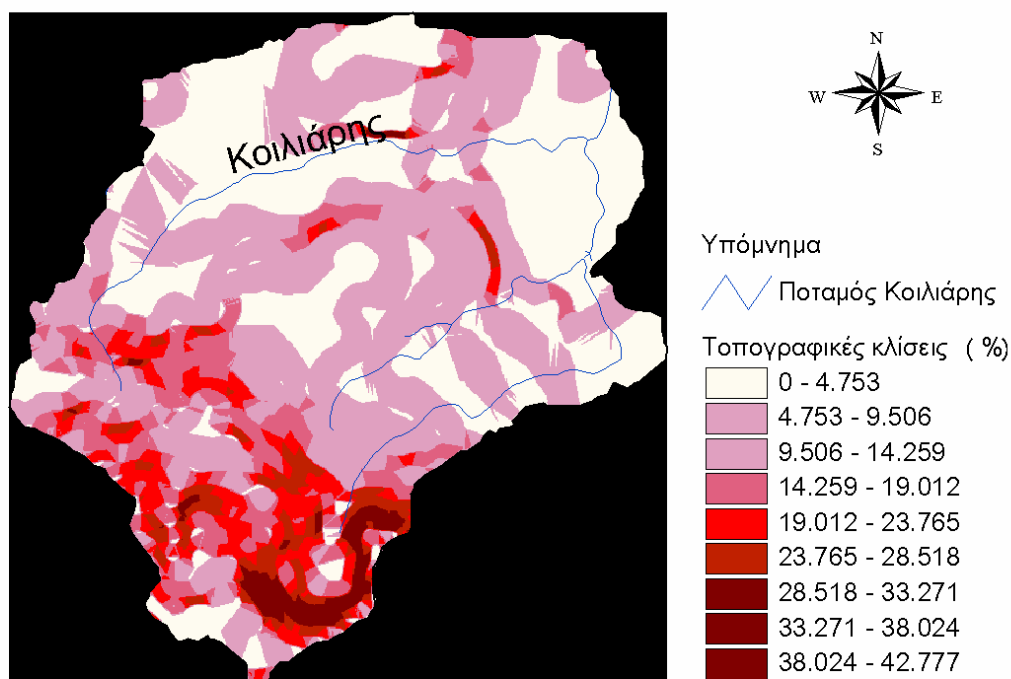


Χάρτης 4. 3 Χάρτης υψομέτρων του Νομού Χανίων



Χάρτης 4. 4 Χάρτης κλίσεων του Νομού Χανίων (Χατζηθεοχάρους, 2005)

Όσον αφορά την λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, οι κλίσεις φαίνονται στον χάρτη 4.4 (Χατζηθεοχάρους, 2005) ενώ οι ισοϋψείς καμπύλες στον χάρτη 4.5 (Λιλλή Μ.Α., 2011).



Χάρτης 4. 5: Τοπογραφικές κλίσεις στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Λιλλή, 2011).



Χάρτης 4. 6: Ισοϋψείς καμπύλες στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Λιλλή Μ.Α., 2011).

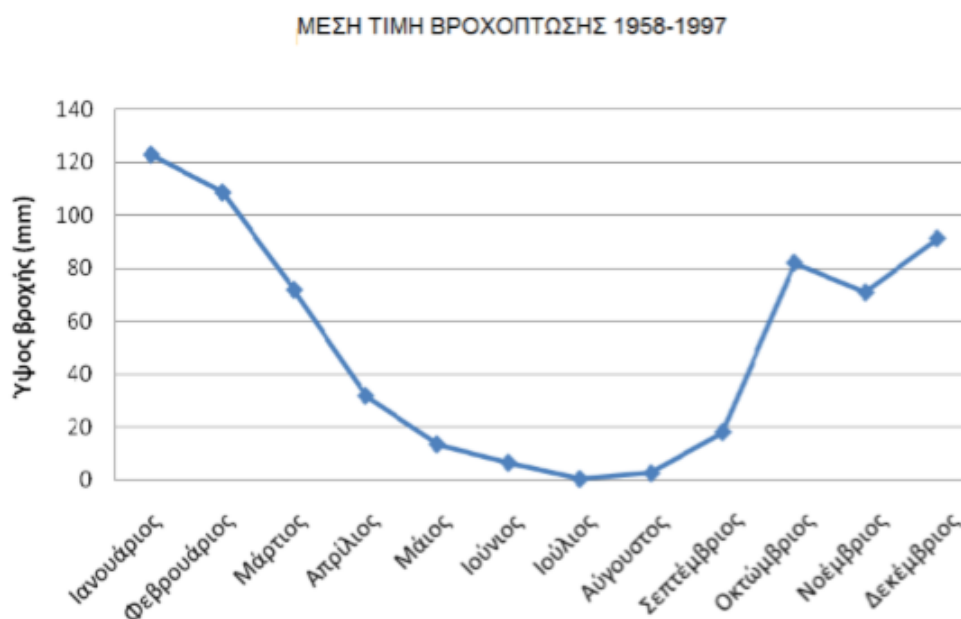
4.3 Περιγραφή περιβάλλοντος

4.3.1 Κλιματολογικά και μετεωρολογικά χαρακτηριστικά:

Η περιοχή μελέτης ανήκει στην κατηγορία της χερσαίας μεσογειακής ζώνης. Το κλίμα είναι εύκρατο, θαλάσσιο και οι θερμοκρασίες δεν έχουν μεγάλες διακυμάνσεις. Το καλοκαίρι είναι θερμό και ξηρό ενώ τον χειμώνα ήπιο και βροχερό. Από κλιματολογική άποψη η περιοχή είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή καθώς τους περισσότερους μήνες του έτους υπάρχει ηλιοφάνεια η οποία βοηθά ιδιαίτερα στην ανάπτυξη της βλάστησης και την ύπαρξη διάφορων ειδών πανίδας. Οι καταιγίδες δεν είναι ένα συχνό καιρικό φαινόμενο όμως παρουσιάζεται σχεδόν όλους του μήνες, με μεγαλύτερη ένταση και συχνότητα κατά την διάρκεια του χειμώνα. Ο συνολικός αριθμός ημερών στην διάρκεια του χρόνου με καταιγίδα είναι 24,2 για την περιοχή του Ν. Χανίων. Σπάνια έχουν καταγραφεί περιστατικά χιονόπτωσης, εκτός από τα χιόνια που πέφτουν στα Λευκά Όρη από τα μέσα Νοεμβρίου και περίπου στα μέσα Δεκεμβρίου καλύπτουν τα πρανή και υπερκείμενα υψώματα της περιοχής. Η νέφωση είναι περιορισμένη ακόμα και τους χειμερινούς μήνες. Η μέση ετήσια θερμοκρασία ανέρχεται στους 17,2 °C, η μέση σχετική υγρασία αγγίζει το 61,8% και το ετήσιο ύψος βροχής φθάνει τα 687,99mm (Μελέτη για την αναθεώρηση-επικαιροποίηση του Περιφερειακού Σχεδιασμού Διαχείρισης Στερεών

Αποβλήτων, Περιφέρεια Κρήτης). Οι επικρατέστεροι άνεμοι είναι υδατικοί και βόρειοι και δεν υπερβαίνουν τα 9 Beaufort.

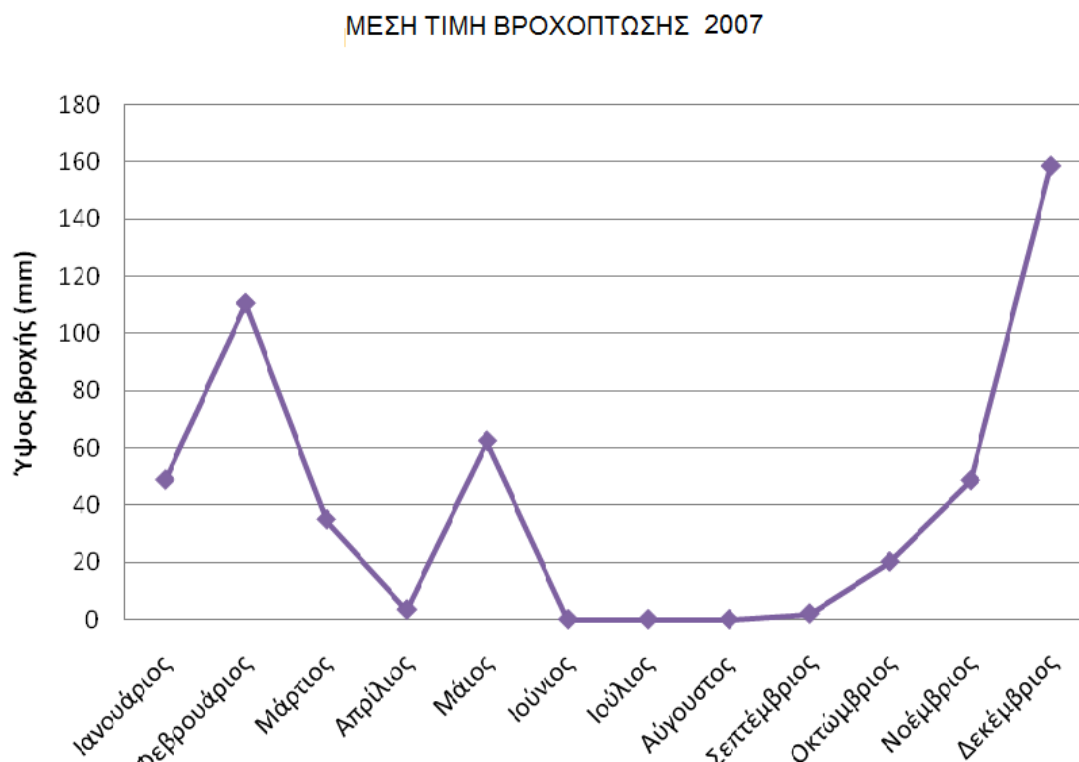
Τα ακόλουθα στοιχεία για την εκτίμηση των κλιματολογικών συνθηκών της περιοχής(Σχήματα 4.1 και 4.2), προέρχονται από το μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται εγκατεστημένος στα Χανιά (Υψόμετρο: +150m, Γεωγραφικό Μήκος: 24ο 7', Γεωγραφικό Πλάτος: 35ο 29') και αναφέρονται στην περίοδο 1958-1997 (Νικολαΐδης, 2010).



Διάγραμμα 4.1: Μέσες τιμές της βροχόπτωσης για την περίοδο 1958-1997 (Νικολαΐδης, 2010)

Ο λιγότερο βροχερός μήνας είναι ο Ιούλιος, ενώ αντίθετα οι πιο βροχεροί μήνες είναι ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος με μέση τιμή 122,9 και 108,6 mm αντίστοιχα. Το σύνολο των κατακρημνίσεων συναντάται μεταξύ του Οκτώβρη και του Μάρτη. Στην περιοχή έχουν εγκατασταθεί βροχομετρικοί σταθμοί από το εργαστήριο Υδρογεωχημικής μηχανικής και Αποκατάστασης εδαφών του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Και για το έτος 2007:



Διάγραμμα 4.2: Κατανομή της μέσης βροχόπτωσης για το έτος 2007 (Νικολαΐδης, 2010)

Όσον αφορά τις θερμοκρασίες, γενικά η περιοχή παρουσιάζει το καλοκαίρι υψηλές σχετικά θερμοκρασιακές συνθήκες και το χειμώνα η διακύμανση των θερμοκρασιών είναι ομαλή. Η μέση ελάχιστη θερμοκρασία εμφανίζεται τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο της τάξης των 9,2ο C, ενώ η μέση μέγιστη εμφανίζεται το μήνα Ιούλιο και φθάνει τους 30,3ο C (Μελέτη για την αναθεώρηση-επικαιροποίηση του Περιφερειακού Σχεδιασμού Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων, Περιφέρεια Κρήτης.)

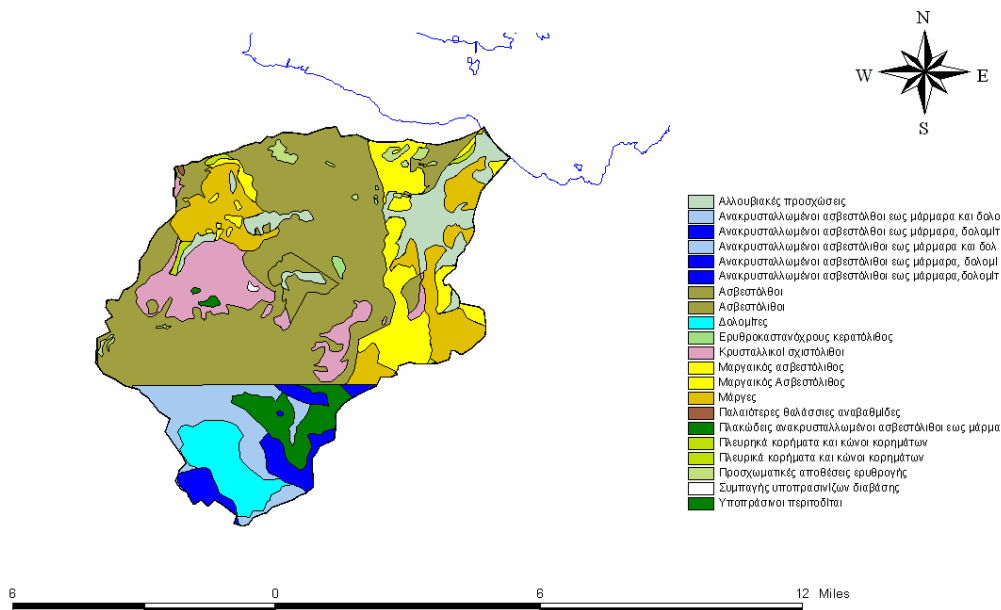
4.3.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά

Ο ποταμός Κοιλιάρης τροφοδοτείται από το καρστικό σύστημα των Λευκών Ορέων. Γενικότερα, οι καρστικοί σχηματισμοί μπορεί να είναι:

- Υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας: Ασβεστόλιθοι, δολομίτες, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, μάρμαρα υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας.
- Μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας: Περιλαμβάνονται οι ασβεστόλιθοι της ζώνης της Πίνδου, οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Ιουρασικής - Ηωκαινικής ηλικίας (Plattenkalk) της Ιονίου ζώνης και οι μικρότερες ανθρακικές εμφανίσεις των εσωτερικών καλυμμάτων
- Μειοκαινικά ασβεστολιθικά λατυποκροκαλοπαγή Τοπολίων, μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας: Παρουσιάζουν τόσο πρωτογενές όσο και δευτερογενές πορώδες και φιλοξενούν σημαντικές υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω αξιόλογων πηγών

Η τροφοδοσία του ποταμού Κοιλιάρη γίνεται από τα ανθρακικά πετρώματα της ζώνης Τρυπαλίου και τους πλακώδεις ασβεστολιθικούς και σε μικρότερο βαθμό από τους μαργαικούς ασβεστόλιθους του Νεογενούς, οι οποίοι έρχονται σε επαφή με το παλαιότερο καρστικό σύστημα. Χάρτες κλίμακας 1:50.000 ψηφιοποιήθηκαν σε περιβάλλον GIS και μετά την ενοποίηση τους μελετήθηκε η γεωλογία όλης της λεκάνης απορροής του Κοιλιάρη (Λιλλή, 2011). Παρατίθεται ο γεωλογικός χάρτης (Χάρτης 4.6).

Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη



Χάρτης 4. 7 Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Λιλλή, 2011)

Οπότε σύμφωνα με τα αποτελέσματα, στην λεκάνη απορροής εμφανίζονται με χρονολογική σειρά οι εξής γεωλογικοί σχηματισμοί:

- Ενότητα των πλακωδών ασβεστόλιθων: όπου υπάρχουν ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι που κατά θέσεις έχουν μεταμορφωθεί σε μάρμαρα χρώματος τεφρού έως τεφρόμαυρου. Εμφανίζονται σε πάγκους, εκ των οποίων οι κατώτεροι είναι παχυστρωματώδεις. Παρουσιάζουν πυριτολιθικές παρεμβολές (κυρίως χαλαζία), η συχνότητα των οποίων είναι μεγάλη στα μεσαία μέλη και γίνεται μικρότερη στα ανώτερα και κατώτερα στρώματα.
- Ενότητα μαρμάρων - ασβεστόλιθων - δολομιτικών μαρμάρων – δολομιτών: όπου υπάρχουν πετρώματα αβαθούς θάλασσας, μεσοκρυσταλλικά, λεπτοστρωματώδη έως μεσοστρωματώδη ή άστρωτα. Οι ανθρακικοί σχηματισμοί που υπάρχουν έχουν υποστεί τεκτονισμό και έτσι εμφανίζονται διαρρηγμένοι με ζώνες λατυποπαγών ιζηματογενούς προέλευσης. Πολλές φορές φέρουν φακούς πυριτικού υλικού. Τα ανώτερα μέλη της ενότητας αυτής αποτελούνται από ασβεστολιθικά μάρμαρα με λίγο πυριτικό υλικό.
- Τεκτονικό κάλυμμα φυλλιτικής - χαλαζιτικής ζώνης: Στην ενότητα αυτή επικρατούν ανθρακικοί ασβεστόλιθοι σεριτικοί - χλωριτικοί φυλλίτες και

χαλαζιακοί μεταψαμμίτες (χαλαζίτες). Τα πετρώματα αυτά διασχίζονται από αδροκρυσταλλικές φλέβες χαλαζία και φλέβες κατακερματισμένων ασβεστόλιθων.

- Τεκτονικό κάλυμμα ζώνης Τρίπολης: Στην λεκάνη απορροής συναντώνται ασβεστόλιθοι που ανήκουν στη ζώνη αυτή. Ειδικότερα, οι ανθρακικοί σχηματισμοί του καλύμματος αυτού βρίσκονται πάνω στην ενότητα των «πλακωδών ασβεστόλιθων», είτε στους σχηματισμούς της «φυλλιτικής-χαλαζιτικής» ενότητας, με αποτέλεσμα στη βάση τους να παρουσιάζονται αρκετά κερματισμένοι λόγω τεκτονισμού. Τα κατώτερα μέρη αποτελούνται από δολομίτες και δολομιτικούς ασβεστόλιθους με σπηλαιώδη υφή. Τα ανώτερα στρώματα των ασβεστόλιθων παρουσιάζουν μικρολατυποπαγή υφή.

Σε όλο σχεδόν το τμήμα της υδρολογικής λεκάνης απορροής που είναι πεδινό εμφανίζονται αλλουβιακές προσχώσεις, πηλοί, άργιλοι, και σε μικρότερο ποσοστό μέργες. Στο κέντρο της λεκάνης και προς τα δυτικά υπάρχουν σε μεγάλο ποσοστό ασβεστόλιθοι οι οποίοι προέρχονται από την ζώνη Τριπόλεως. Υπάρχουν επίσης μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι. Στην ύπαρξη αυτών οφείλονται πιθανά και ορατά ρήγματα στα οποία εκφορτίζονται υφάλμυρες πηγές, ένα ποσοστό των οποίων εκφορτίζεται και στο ποταμό Κοιλιάρη. Για παράδειγμα οι πηγές του Στύλου θεωρούνται από τα βασικότερα σημεία εκφόρτισης του καρστικού συστήματος και μία από τις κυριότερες πηγές τροφοδοσίας του ποταμού Κοιλιάρη (Νικολαΐδης & Καρατζάς, 2010). Στα ανατολικά, εμφανίζονται τριτογενείς σχηματισμοί όπως οι μάργες και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι. Ενώ στην νότια μεριά της λεκάνης απορροής συναντώνται σε μικρή έκταση πλακώδεις ασβεστόλιθοι και κρυσταλλικοί σχιστόλιθοι (Χατζηθεοχάρους, 2005). Βόρεια των πηγών του Στύλου παρατηρούνται μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι και μάργες που επεκτείνονται μέχρι τα Λευκά Όρη, ενώ σε μικρότερη κλίμακα εμφανίζονται δολομιτικοί ασβεστόλιθοι παλαιοζωικής έως και μεσοζωικής ηλικίας.

Οι αλλουβιακές προσχώσεις, πηλοί, άργιλοι, άμμοι και χάλικες, εμφανίζονται σε όλο το πεδινό τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη (Λιλλή, 2011). Οι αλλουβιακές προσχώσεις αναπτύσσονται ανατολικά των πηγών και επεκτείνονται μέχρι τη θάλασσα, το πάχος των οποίων είναι από μερικά εκατοστά έως μερικά μέτρα (Λιλλή, 2011). Βόρεια των πηγών του Στύλου παρατηρούνται μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι και μάργες που επεκτείνονται μέχρι τα Λευκά Όρη, ενώ σε μικρότερη κλίμακα εμφανίζονται δολομιτικοί ασβεστόλιθοι παλαιοζωικής έως και μεσοζωικής ηλικίας. Στην περιοχή των Λευκών Ορέων συναντώνται γεωλογικοί σχηματισμοί οι οποίοι ανήκουν στην κατηγορία της αυτόχθονης σειράς Ιονίου ζώνης, όπως επίσης και σχηματισμοί από τις αλλόχθονες σειρές, Ανώτερο Τριαδικό (Λιάσιο) και Μέσο-Ανώτερο (Μειόκαινο).

Όσον αφορά την Ιόνιο ζώνη, από αυτήν την κατηγορία εμφανίζονται γεωλογικοί σχηματισμοί όπως πλακώδεις ανακρυσταλλωμένοι ασβεστόλιθοι έως μάρμαρα με πυριτόλιθους. Από τις αλλόχθονες σειρές που προαναφέραμε παρατηρούνται οι περισσότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί και περιλαμβάνουν (Λιλλή, 2011): Ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους έως μάρμαρα, δολομίτες, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι, ραούβακες και ανθρακικά κροκαλλοπαγιοί, μάργες και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι σε μικρότερη κλίμακα.

4.3.3 Υδρολογικά χαρακτηριστικά

Όπως προαναφέρθηκε η συνολική έκταση της υδρολογικής λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη είναι 130km². Το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου ανέρχεται στα 36km. Η λεκάνη περιλαμβάνει σε μεγάλο ποσοστό καλλιεργούμενες εκτάσεις. Ο ποταμός Κοιλιάρης κατά τη διαδρομή του στην κοιλάδα δέχεται νερά από τους χείμαρρους Αναβρετή και Κεραμιώτη ή Κεραμειανό, αλλά και από το Μυλαύλακα και το Μανταμά. Από αυτούς οι δύο πρώτοι αποτελούν προσωρινά υδατορεύματα δεδομένου ότι κατά την θερινή περίοδο παρατηρείται ξήρανση της κοίτης τους (Χατζηθεοχάρους, 2005), ενώ όσον αφορά τον Μυλαύλακα και τον Μανταμά, χαρακτηρίζονται από μόνιμη ροή καθ' όλη την διάρκεια του έτους και για αυτό ονομάζονται μόνιμα υδατορεύματα. Τα υδατορεύματα αυτά και οι πηγές επηρεάζουν άμεσα την διακύμανση της επιφανειακής απορροής του ποταμού. Έτσι, λοιπόν, το Καλοκαίρι ο ποταμός Κοιλιάρης τροφοδοτείται αποκλειστικά από τα νερά των πηγών Στύλου και Βλυχάδων, αφού τα προσωρινά υδατορεύματα δεν συνεφέρουν σε αυτόν. Κατά την χειμερινή περίοδο, οι κατακρημνίσεις αυξάνονται με συνέπεια οι επιφανειακές απορροές των χείμαρρων και των ρεμάτων να είναι αυξημένες και να δημιουργούνται πλημμυρικά φαινόμενα. Συμπερασματικά, η ύπαρξη πηγών επηρεάζει την επιφανειακή απορροή του ποταμού. Κοντά στις πηγές που εκφορτίζονται στον Κοιλιάρη, το βάθος του νερού είναι 1.0 - 1.5 m, όμως υπάρχουν κατά μήκος της κοίτης του τμήματα με 2.5 m βάθος, ενώ πριν από την εκβολή του το βάθος αυξάνεται απότομα στα 5 m και μειώνεται προοδευτικά μέχρι την εκβολή, όπου φτάνει τα 0.5m (Νικολαΐδης & Καρατζάς, 2010). Οι κυριότερες πηγές που βρίσκονται στην περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη είναι οι εξής (Νικολαΐδης & Καρατζάς, 2010):

- Πηγές Στύλου: Αυτή η ομάδα πηγών βρίσκεται στο χωριό Στύλος σε απόλυτο υψόμετρο 17m. Οι σπουδαιότερες πηγές είναι στις θέσεις Κάραβος και Καβούσι και έχουν συνεχή λειτουργία, ενώ η πηγή που βρίσκεται στην Βρύση εμφανίζεται μόνο τη χειμερινή περίοδο. Το νερό των πηγών Στύλου καταλήγει μέσω του ποταμού Κοιλιάρη στη θάλασσα.
- Πηγές Αρμένων: Βρίσκονται στο χωριό Αρμένοι και το υψόμετρο αυτών είναι 18m. Οι σπουδαιότερες πηγές είναι στις θέσεις: Παναγιά, Πλάτανος, Πηγαδάκι. Η λειτουργία των πηγών μοιάζει με εκείνη των πηγών Στύλου. Οι πηγές Αρμένων εκφορτίζονται στο Μεσοπόταμο.
- Πηγές Ζούρμπου: Οι πηγές αυτές χαρακτηρίζονται ως υφάλμυρες καθώς αναμιγνύονται με θαλασσινό νερό. Βρίσκονται κοντά στις εκβολές του Μεσοπόταμου σε απόλυτο υψόμετρο 1-2 m. Το νερό των πηγών είναι υφάλμυρο λόγω της διείσδυσης-ανάμειξης του θαλασσινού
- Πηγές Βλυχάδων: Χαρακτηρίζονται από συνεχή ροή και είναι και αυτές υφάλμυρες. Βρίσκονται 1000m ανάντη των εκβολών του ποταμού Κοιλιάρη μέσα στον οποίο και εκφορτίζονται.
- Πηγές Αναβρέτης: Αποτελούν προσωρινές πηγές αφού η ροή τους διακόπτεται το θέρος. Τοποθετούνται στις παρυφές του Νέου Χωριού σε απόλυτο υψόμετρο 24m.

4.3.4 Μορφολογικά χαρακτηριστικά

Ομαλό χαρακτηρίζεται το τοπογραφικό ανάγλυφο της υδρολογικής λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. Οι τοπογραφικές κλίσεις είναι γενικά χαμηλής τάξης και ειδικότερα στην πεδινή έκταση της λεκάνης απορροής, και κυμαίνονται στην τάξη του 4,8%. Ωστόσο, φτάνουν έως και 12% σε κάποια σημεία. Η μεγαλύτερη τοπογραφική κλίση συναντάται στους πρόποδες των Λευκών Ορέων και είναι 43% (Χάρτης 4.4). Παρατηρώντας τον χάρτη 4.4 φαίνεται πως στα βόρεια οι κλίσεις είναι χαμηλότερες σε σχέση με το Νότιο τμήμα, με εξαίρεση κάποια σημεία στα οποία παρατηρούνται κλίσεις μεγάλης τάξης. Ωστόσο, σε βορειότερο τμήμα του ποταμού, στην περιοχή του Αγίου Γεωργίου, όπου βρίσκεται η συμβολή όλων των ποταμών και παραποτάμων του Κοιλιάρη, η κλίση υπολογίστηκε 0,6% (Λιλλή, 2011).

4.3.5 Παρόχθιο δάσος, Χλωρίδα και Πανίδα

Στις όχθες του ποταμού Κοιλιάρη αναπτύσσεται το παρόχθιο δάσος. Αποτελεί ένα τμήμα της παρόχθιας ζώνης και εκεί τα φυτά αναπτύσσουν βαθύ ριζικό σύστημα προς το υδροφόρο ορίζοντα. Η ύπαρξη βλάστησης στις όχθες του ποταμού είναι σημαντική καθώς συνεισφέρει στην σταθερότητα της πλαγιάς και στην αντιμετώπιση των πλημμυρικών φαινομένων που ενδέχεται να εμφανίζονται κατά την χειμερινή περίοδο. Τα παρόχθια δάση που εξαρτώνται αποκλειστικά από το επιφανειακό νερό του ποταμού αντιδρούν άμεσα όταν μεταβάλλονται οι υδρολογικές συνθήκες του ποταμού και έτσι αποτελούν δείκτες των υδρολογικών μεταβολών (π.χ. κλιματική αλλαγή, ανομβρία, απολήψεις νερού). Στον ποταμό Κοιλιάρη η παρόχθια ζώνη, συμπεριλαμβανομένου του παρόχθιου δάσους βρίσκεται συνήθως σε ισορροπία με το υδάτινο περιβάλλον (επιφανειακά και υπόγεια νερά), μεταβάλλεται από τις πλημμύρες, επανέρχεται στην προηγούμενη κατάσταση ισορροπίας, ενώ επηρεάζεται σημαντικά από τις εκεί ανθρώπινες δραστηριότητες (Νικολαΐδης & Καρατζάς, 2010). Οι περισσότεροι δασικοί οικότοποι του ποταμού Κοιλιάρη, συναντώνται στο ημιορεινό και ειδικότερα στο πεδινό του τμήμα με “Δάση ανατολικής πλατάνου”, αλλά και πλησίον των εκβολών του με “Θερμο-Μεσογειακές παραποτάμιες στοές”.

Χλωρίδα:

Σε γενικότερα πλαίσια η Κρήτη αποτελεί ένα μέρος με πλούσια χλωρίδα. Υπάρχουν περίπου 1600 είδη και υποείδη από τα οποία τα 210 περίπου είναι ενδημικά. Σύμφωνα με το «The red data book of rare and threatened plants of Greece» (Κόκκινο βιβλίο για τα απειλούμενα φυτά της Ελλάδας) (Phitos et al, 1995), έχουν καταγραφεί 67 απειλούμενα φυτά στην Κρήτη, από τα οποία τα 30 βρίσκονται στην περιοχή των Λευκών Ορέων. Αυτό είναι ένα αποτέλεσμα της ανθρωπογενούς δραστηριότητας και της όλο και μεγαλύτερης επιβάρυνσης του φυσικού περιβάλλοντος. Λόγω, λοιπόν, της ύπαρξης του ποταμού Κοιλιάρη και των υδατορευμάτων με τα οποία συνδέεται η βλάστηση αποτελείται από ψηλά πλατάνια, θάμνους αλλά και καλάμια. Συγκεκριμένα, στα βόρεια της περιοχής και στις εκβολές του ποταμού οι θάμνοι πυκνώνουν και τα καλάμια στις όχθες είναι το βασικό είδος βλάστησης. Στην ευρύτερη πεδιάδα που περιβάλλει τον

ποταμό υπάρχουν διάφορα είδη καλλιεργειών όπως ελιές, λεμονιές, πορτοκαλιές, βερικοκιές, αχλαδιές, καρυδιές, αμπέλια, συκιές αλλά και καλλιέργειες λαχανικών.

Πανίδα:

Όπως συμβαίνει και με την χλωρίδα της περιοχής, έτσι και η πανίδα του ποταμού Κοιλιάρη απειλείται από την προοδευτική καταστροφή των βιοτόπων. Σύμφωνα με το Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τις Λεκάνες Απορροής των Ποταμών Κερίττη-Θερίσου και Κοιλιάρη (Νικολαΐδης, Καρατζάς, 2010) τα είδη ζώων που συναντώνται στην συγκεκριμένη περιοχή είναι τα εξής:

- **Αρθρόποδα:** Στην περιοχή μελέτης υπάρχουν διάφορα είδη αρθρόποδων και ζούνε προνύμφες εντόμων και άλλων ασπόνδυλων με μεγάλο ποσοστό ενδημικών ειδών όπως η λιβελούλα *Boyeria cretensis* ή η ψείρα του νερού *Echinogammarus kretensis* (Dijkstra & Lewington, 2006).
- **Μαλάκια**
- **Σπονδυλόζωα:** Τα οποία φιλοξενούνται σε διάφορες σπηλιές της περιοχής. Η σημαντικότερη κατηγορία είναι αυτή των χειρόπτερων στην οποία ανήκει η νυχτερίδα.
- **Ερπετά & Αμφίβια:** Στην περιοχή συναντώνται σχεδόν όλα τα ερπετά της Κρήτης. Ξεχωρίζει η περίπτωση της σαύρας *Podarcis erhardii leukaorii* (κ.ν., Λιακόνι), ενδημικού υποείδους των Λευκών Ορέων, ενώ τα άλλα ερπετά (π.χ. *Elaphe situla*, *Mauromys caspica rivulata* και το νερόφιδο *Natrix tessellate*) στην Κρήτη γενικά εμφανίζουν πολύ μικρούς και αραιούς πληθυσμούς. Όσον αφορά τα αμφίβια, παρουσιάζονται οι βάτραχοι και φρύνοι αλλά και χερσαίες και υδρόβιες χελώνες. Όσον αφορά τους βάτραχους, κατά την περίοδο την περίοδο παρατηρείται ένας αυξημένος αριθμός μικρών βατράχων.
- **Ιχθυοπανίδα:** Κυρίως στις εκβολές διαβιούν κέφαλοι, μαυράκι (*Liza ramada*), ψηλότερα πέστροφες (*Oncorhynchus mykiss*) και χέλια (*Anguilla anguilla*), αλλά και ποταμοσαλιάρες (*Blennius fluviatilis*), ενώ σε απομονωμένους νερόλακκους και σε στάσιμα και αργά κινούμενα νερά το κουνουπόψαρο (*Gampousia affinis*).
- **Θηλαστικά:** Στην περιοχή υπάρχουν πολλά είδη θηλαστικών, τα οποία είναι κυρίως κτηνοτροφικής φύσεως. Υπάρχουν κοπάδια από αιγοπρόβατα, βοοειδή αλλά και σε μικρότερο ποσοστό όνοι. Η ευρύτερη περιοχή στα μεγάλα υψόμετρα και στις απομονωμένες περιοχές, συγκεντρώνει σποραδικά πληθυσμούς του Κρητικού Αίγαγρου (Αγρίμι). Υπάρχουν επίσης αλεπούδες, κουνάβια, νυφίτσες, λαγοί αλλά και σκαντζόχοιροι.
- **Ορνιθοπανίδα:** Στην περιοχή υπάρχει μεγάλη ποικιλία πτηνών λόγω της πλούσιας βλάστησης που διαθέτει ο ποταμός Κοιλιάρης, καθώς και στη γεωγραφική θέση που κατέχει αυτός, η οποία συμπίπτει με τη μεταναστευτική διαδρομή αρκετών ειδών. Εξίσου σημαντική είναι η γεινίαση της περιοχής με τη λίμνη του Κουρνά και τον υγρότοπο του Αλμυρού και της Γεωργιούπολης. Εκτός από τα κατοικίδια πτηνά, όπως είναι οι όρνιθες και οι γαλοπούλες, συναντώνται τα εξής είδη (Νικολαΐδης Π.Ν. & Καρατζάς Γ., 2010): **θαλασσοπούλια** (*Gaviidae*, *Procellariidae*, *Phalacrocoracidae* και *Laridae* (συνολικά 5 είδη)), **αρπακτικά** (*Accipitridae*, *Falconidae*, *Tytonidae* και *Strigidae* (συνολικά 22 είδη)), **στρουθιόμορφα** (*Alaudidae*, *Hirundinidae*,

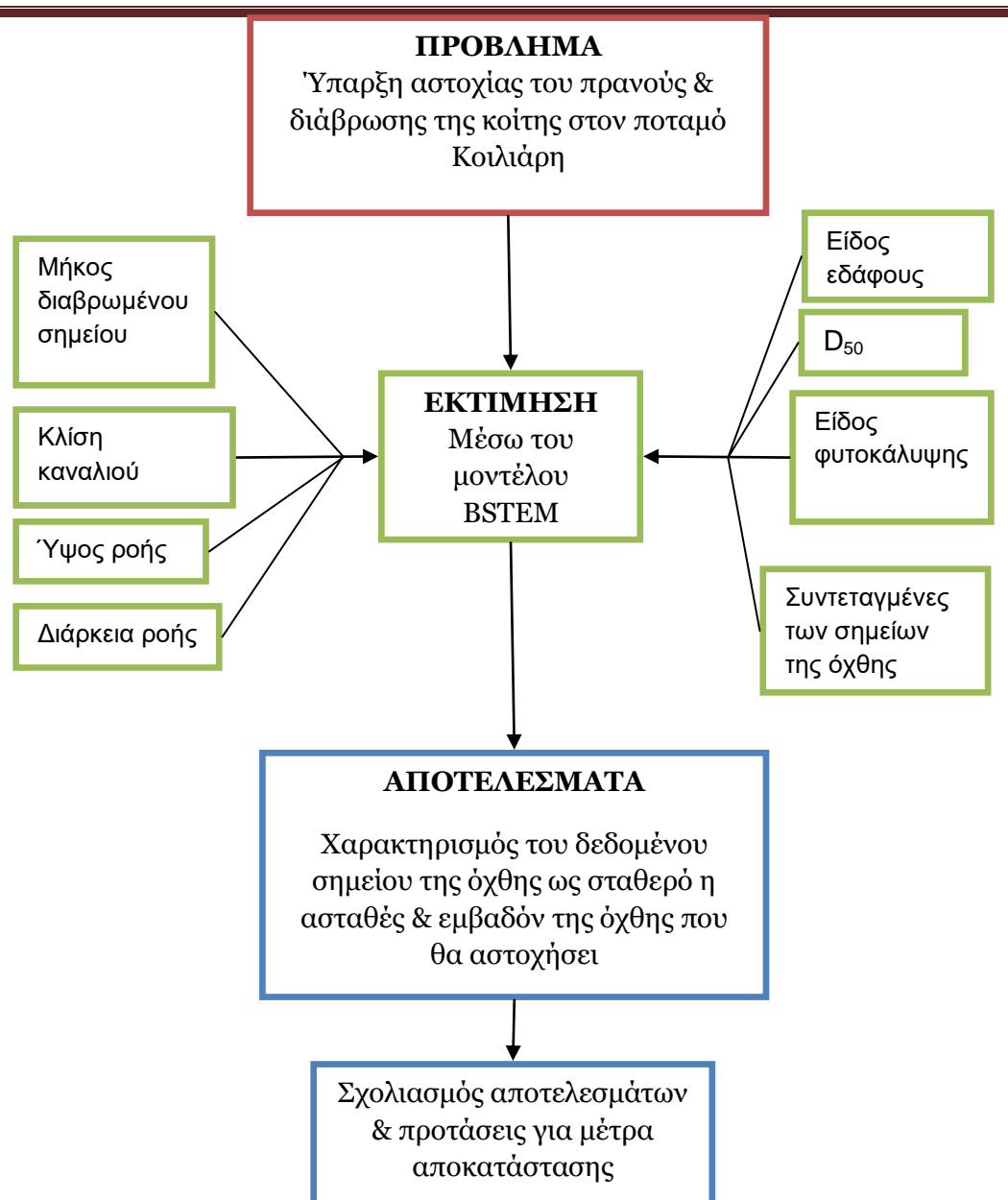
Motacillidae, Cinclidae, Troglodytidae, Prunellidae, Turdidae, Sylviidae, Muscicapidae, Paridae, Certhidae, Oriolidae, Laniidae, Corvidae, Sturnidae, Passeridae, Fringillidae και Emberizidae (70 συνολικά είδη) και **μη στρουθιόμορφα είδη** (Ardeidae, Phasianidae, Columbidae, Cuculida e Caprimulgidae, Apodidae, Alcedinidae, Meropidae, Picidae (17 είδη συνολικά)). Εμφανίζονται επίσης: **όρνιο** (*Gyps fulvus*), γερακίνα (*Buteo buteo*), αετομάχος (*Lanius colluris*), μαυρογύπας (*Aegypius monachus*), **συκοφάγος** (*Orioles orioles*), **τσίφτης** (*Milvus migrans*), **σκεπαρνας** (*Apus melba*), **αλκυόνα** (*Alcedo atthis*), **μυγοχάφτης** (*Muscicapa striata*), **ψευτοσηδόνι** (*Cettia cetti*), **μελισσοφάγος** (*Merops apiaster*), **ποταμότρυγγας** (*Actitis hypoleucos*), **κοτσύφια** (*Turdus merula*), **σπουργίτια** (*Passer domesticus*), **χελιδόνια** (*Hirundo rustica*), **ταλαπετεινός** (*Upupa epops*), **μπεκάτσες**, **τρυγόνια**, **ερωδιοί**, **κύκνοι**, **μαυρόκοτες**.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: “ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ”

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η εκτίμηση της αστοχίας του πρηνούς και της διάβρωσης της κοίτης του ποταμού Κοιλιάρη. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το μοντέλο BSTEM, το οποίο για να «τρέξει» χρειάζεται την συμπλήρωση των καρτελών εισαγωγής: γεωμετρίας, υλικού της όχθης και βλάστησης/προστασίας. Έτσι, για την εύρεση των δεδομένων εισόδου, ακολουθήθηκε η εξής μεθοδολογία:

- **Συλλογή δεδομένων πεδίου.** Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε λήψη εδαφικού δείγματος, φωτογραφική απεικόνιση της περιοχής με σκοπό την εύρεση του είδους της φυτοκάλυψης. Τέλος, τοπογραφική αποτύπωση της κοίτης κατά μήκος του ποταμού Κοιλιάρη έτσι ώστε να υπάρχει πλήρης εικόνα της γεωμετρίας της διατομής σε όλα τα σημεία αλλά και γνώση της κλίσης της όχθης.
- **Εργαστηριακή ανάλυση** των εδαφικών δειγμάτων με σκοπό την εύρεση της σύστασης του εδάφους και της διαμέτρου του 50% των κόκκων (D_{50}) στα διαβρωμένα σημεία της κοίτης.
- **Στατιστική επεξεργασία** ημερήσιων δεδομένων παροχών 57 ετών με σκοπό την εύρεση της παροχής επαναφοράς 50 ετών (Q_{50}). Με την χρήση της εξίσωσης του Manning, βρέθηκε το ύψος ροής που θα επιφέρει η παροχή Q_{50} .
- **Μοντελοποίηση** με βάση την υπάρχουσα κατάσταση και με βάση το σενάριο αποκατάστασης όχθης. Η αλλαγή έγκειται στην καρτέλα εισόδου βλάστησης και προστασίας, όπου το σενάριο αποκατάστασης επιλέγεται να υπάρχει προστασία στην παρόχθια ζώνη. Τέλος, σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Τα παραπάνω βήματα μπορούν να συνοψιστούν στο σχήμα 5.1 που ακολουθεί.



Σχήμα 5.1 Μεθοδολογία εκτίμησης διάβρωσης και αστοχίας του πρανούς του ποταμού Κοιλιάρη

Αναλυτική περιγραφή των βημάτων και των μέσων που χρησιμοποιήθηκαν ακολουθεί παρακάτω.

- **Συλλογή δεδομένων από την περιοχή μελέτης.**

Αρχικά, παρατηρήθηκε η ευρύτερη περιοχή του ποταμού Κοιλιάρη και συγκεκριμένα η περιοχή του Μανταμά, όπου υπάρχει μια μικρή γέφυρα. Κατά μήκος της κοίτης και για περίπου 100 μέτρα παρατηρήθηκε το φαινόμενο της διάβρωσης σε έντονο βαθμό. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκαν δύο σημεία για να εξεταστούν. Το ένα βρίσκεται πριν από την γέφυρα (Σημείο 1) και το δεύτερο μετά από αυτήν (Σημείο 2). Στις φωτογραφίες 5.1 έως 5.4 απεικονίζεται η ευρύτερη περιοχή κάθε σημείου υπό εξέταση και στην εικόνα 5.5 απεικονίζεται τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη το οποίο περπατήθηκε κατά την διάρκεια των εργασιών πεδίου. Παράλληλα, στην εικόνα 5.5 φαίνεται η

Αναβρετή, ο Κεραμιανός καθώς και ένα τεχνητό κανάλι, υδατορεύματα τα οποία συμβάλλουν στο βασικό κομμάτι ροής του ποταμού.

Περιοχή πριν την γέφυρα:

Στην φωτογραφία 5.2 φαίνονται δέντρα τα οποία έχουν πέσει μέσα στον ποταμό Κοιλιάρη. Το γεγονός αυτό είναι σημάδι της αστοχίας του πρανούς που προκαλείται λόγω της διάβρωσης. Στην φωτογραφία 5.2 απεικονίζεται η επίδραση της διάβρωσης στην παρόχθια ζώνη του σημείου 1 και συγκεκριμένα οι ρίζες των δέντρων οι οποίες δεν καλύπτονται από έδαφος.



Εικόνα 5. 1 Κοίτη του ποταμού Κοιλιάρη στο σημείο πριν από την γέφυρα



Εικόνα 5. 2 Ριζικό σύστημα παρόχθιας ζώνης γύρω από το σημείο 1

Παρακάτω απεικονίζεται το σημείο από το οποίο λήφθηκε το δείγμα εδάφους. Λόγω εδαφικής ομοιομορφίας λήφθηκε ένα δείγμα το οποίο θεωρήθηκε αντιπροσωπευτικό της επικρατούσας κατάστασης.



**5. 3 α) Σημείο 1 δειγματοληψίας εδάφους
προσωρινή αποθήκευση**



β) Λήψη δείγματος εδάφους &

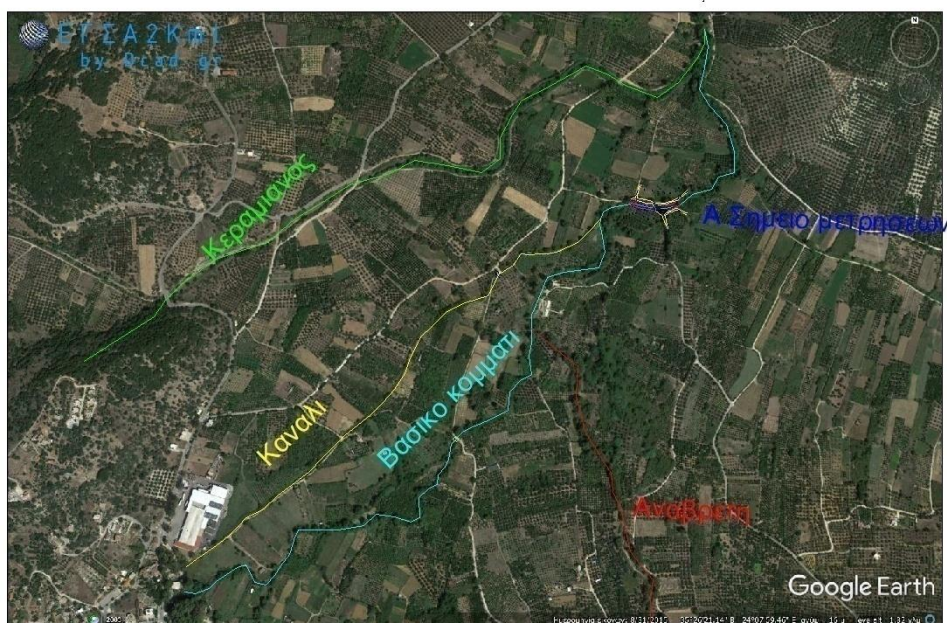


Εικόνα 5. 4 Κοίτη του ποταμού Κοιλιάρη στο σημείο μετά την γέφυρα

Από την περιοχή αυτή λήφθηκε δείγμα από δύο διαφορετικά στρώματα αφού παρατηρήθηκε διαφορά στο εδαφικό υλικό. Στην φωτογραφία 5.4 φαίνονται τα δύο αυτά σημεία (Σ2 και Σ3).



Εικόνα 5. 4 Σημεία 2 και 3 δειγματοληψίας εδάφους



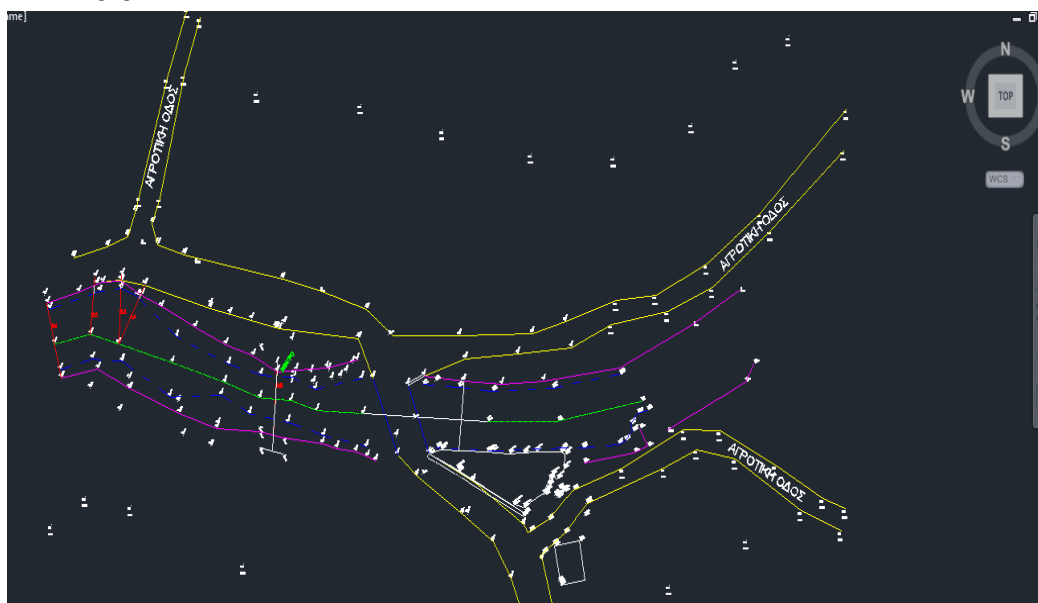
Εικόνα 5.5 Περιοχή μελέτης του ποταμού Κουλιάρη (Πηγή: Γιώργος Μαργκογιαννάκης)

Στην συνέχεια, με διεξαγωγή επιτόπιων παρατηρήσεων και βιβλιογραφική έρευνα εκτιμήθηκε η βλάστηση της παρόχθιας περιοχής. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία στον ποταμό Κοιλιάρη κυριαρχούν οι φτελιές (*Ulmus Spp.*), οι ιτιές (*Salix Spp.*) και τα πλατάνια (*Platanus orientalis*). Τα δέντρα της περιοχής μελέτης ανήκουν στην κατηγορία που προσεγγίζει αυτή των Willow Geyer's, με μέσο όρο ηλικίας δέντρων 100 χρόνια και ποσοστό φυτοκάλυψης 100%, τιμές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εισαγωγή δεδομένων στο μοντέλο

5.1 Λήψη των δεδομένων της γεωμετρίας της όχθης

Με την βοήθεια του Εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και αποκατάστασης εδαφών λήφθηκαν οι συντεταγμένες πολλών σημείων, από την αρχή της όχθης έως το κεντρικό σημείο του ποταμού.

Τα δεδομένα εισήχθησαν στο πρόγραμμα Surfer (2015) και δημιουργήθηκε η γενικότερη εικόνα της περιοχής μελέτης, αλλά και το προφίλ της εγκάρσιας διατομής του ποταμού για τα δύο σημεία μελέτης (Εικόνα 5.8 και 5.9). Επίσης, εισήχθησαν στο πρόγραμμα AutoCad από τα μέλη του εργαστηρίου Γιώργο Μαρκαντωνάκη και Αχιλλέα Τριπολιτσιώτη. Το αποτέλεσμα απεικονίζεται στην εικόνα 5.6.

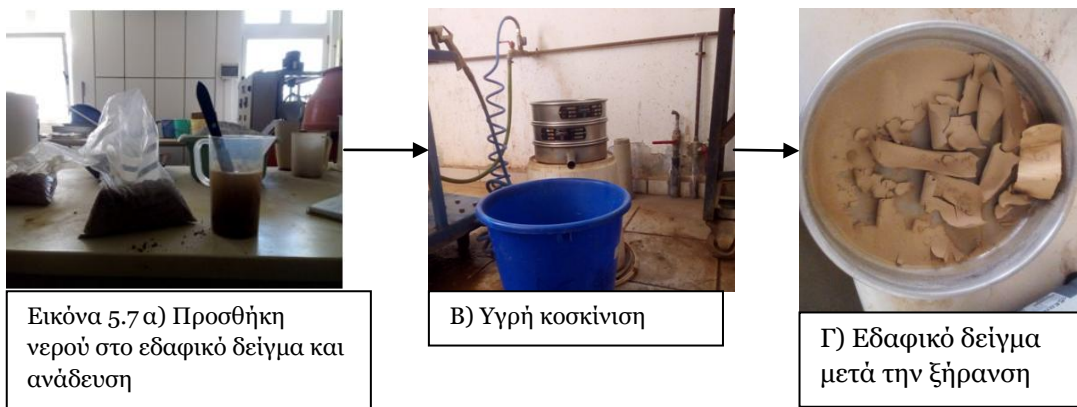


Εικόνα 5.6 Αποτύπωση της περιοχής μελέτης μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος Autocad (Πηγή Γ.Μαρκογιαννάκης & Α. Τριπολιτσιώτης)

5.2 Εργαστηριακή Ανάλυση Δειγμάτων Εδάφους

Μετά την συλλογή τους τα τρία δείγματα επεξεργάστηκαν στο εργαστήριο. Λήφθηκε ποσότητα 100 και 150 gr για τα δείγματα Δ1 και Δ2, Δ3 αντίστοιχα, η οποία πέρασε από υγρή κοσκίνιση βρέθηκε το μέρος του δείγματος που ήταν $>0,075\text{mm}$ και $<0.075\text{mm}$. Η μέθοδος της υγρής κοσκίνισης επιλέχθηκε διότι με την ένωση του νερού και χώματος διασπώνται τα συσσωματώματα που πιθανώς έχουν δημιουργηθεί και τα οποία θα αποτελούσαν λανθασμένη ένδειξη κατά την επεξεργασία.

Το μέρος του κάθε δείγματος που παρέμεινε στα κόσκινα ήταν $>0.075\text{mm}$ και μετά την ξήρανση του πέρασε από κοσκίνιση με δόνηση. Αντίθετα, το ποσοστό του εδαφικού δείγματος που είχε διάμετρο $<0.075\text{mm}$ κατέληξε μαζί με το νερό της υγρής κοσκίνισης σε ένα δοχείο. Το μείγμα αφέθηκε σε ηρεμία έτσι ώστε να καθιζάνει το χώμα και έπειτα ξεράθηκε στον φούρνο. Στις φωτογραφίες 5.7 α,β,γ απεικονίζονται τα στάδια της εργαστηριακής επεξεργασίας:



5.3 Στατιστική επεξεργασία δεδομένων.

Με σκοπό την εύρεση της πλημμυρικής παροχής ή του μεγέθους συχνότητας (ή πιθανότητας) γίνεται ανάλυση συχνότητας ακραίων υδρολογικών γεγονότων. Ως δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα BSTEM θα εισαχθούν τα δυσμενέστερα, έτσι ώστε να εξεταστεί η σταθερότητα του πρσανούς κάτω από τις πιο ακραίες, για την περιοχή, περιβαλλοντικά συνθήκες.

Με την χρήση, λοιπόν, κατανομών πιθανότητας επιδιώκεται να βρεθεί η συσχέτιση ανάμεσα στο μέγεθος του ακραίου υδρολογικού γεγονότος και της συχνότητας πραγματοποίησης του. Ένα ακραίο γεγονός μπορεί να συμβεί αν μια τυχαία μεταβλητή X είναι μεγαλύτερη ή ίση με ένα επίπεδο x_T . Ο χρόνος που απαιτείται ανάμεσα στην πραγματοποίηση των ακραίων γεγονότων ($X \geq x_T$) ονομάζεται διάστημα επανεμφάνισης (recurrence interval), t (Milly et al., 2002). Έτσι, η αναμενόμενη τιμή του t είναι ο μέσος αριθμός των ετών στα οποία θα ξανασυμβεί το γεγονός $X > x_T$ και είναι ίσο με $E(t) = T = \frac{1}{p}$, όπου T η περίοδος επαναφοράς του ακραίου γεγονότος και p η πιθανότητα να συμβεί το ενδεχόμενο $X > x_T$. Άρα, η πιθανότητα εμφάνισης ενός ακραίου γεγονότος για κάθε παρατήρηση είναι το αντίστροφο της περιόδου επαναφοράς του. Ισχύει επομένως ότι $P(X > x_T) = 1/T$. Το γεγονός με T έτη περίοδο επαναφοράς ($X > x_T$) συμβαίνει επομένως κατά μέσο όρο μια φορά στα T χρόνια. Δηλαδή, το μέγεθος του είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας πραγματοποίησης του. Η περίοδος επαναφοράς είναι το αντίστροφο της πιθανότητας υπέρβασης. Προϋποθέσεις για να ισχύουν οι παραπάνω σχέσεις είναι να είναι συνεχής η τυχαία μεταβλητή και να ισχύει η παραδοχή ανεξαρτησίας της προηγούμενης ενότητας, δηλαδή κάθε εμφάνιση να είναι στοχαστικά ανεξάρτητη από τις προηγούμενες και επόμενες της.

Στην ανάλυση της συχνότητας ενός υδρολογικού δεδομένου είναι σημαντικό να υπάρχουν τα απαραίτητα ιστορικά δεδομένα και συνήθως δεδομένα παροχής. Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικά είδη δεδομένων: α) οι χρονοσειρές των ετήσιων μεγίστων ημερήσιων δεδομένων (Annual maximum series (AM)) και β) οι μερικής διάρκειας χρονοσειρές (partial duration series (PD)) ή αιχμές πάνω από ένα κατώφλι (peaks over a threshold, (POT)). Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως όταν εφαρμόζεται η πρώτη μέθοδος και λαμβάνεται υπόψη μόνο η παροχή αιχμής για κάθε έτος, διακινδυνεύεται η πιθανή απώλεια πληροφορίας διότι η δεύτερη ή τρίτη μεγαλύτερη παροχή ενός

έτους μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη παροχή που έχει καταγραφεί κατά την διάρκεια κάποιου άλλου έτους.

Λειτουργία Σταθμών:

Από τους σταθμούς που έχει εγκαταστήσει το εργαστήριο “Υδρογεωχημικής μηχανικής και αποκατάστασης εδαφών” του Πολυτεχνείου Κρήτης, στην ευρύτερη περιοχή του ποταμού Κοιλιάρη γίνεται μέτρηση πίεσης σε δύο σημεία (στην επιφάνεια του ποταμού και στην ατμόσφαιρα). Στο σημείο της διεπιφάνειας η μετρούμενη πίεση συμπεριλαμβάνει και την ατμοσφαιρική για αυτό με την αφαίρεση της μετρημένης ατμοσφαιρικής πίεσης δίδεται την υδροστατική πίεση. Με την εξίσωση 5.1 υπολογίζεται η στάθμη για κάθε δεδομένη πίεση:

$$P = \gamma_w * h \text{ (Εξίσωση 5.1)}$$

Όπου:

- P: η υδροστατική πίεση [kPa]
- γ_w : το ειδικό βάρος του νερού [kN/m^3]
- h: η στάθμη του νερού [m]

Για δεδομένο ύψος ροής, υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης του Manning (Εξίσωση 5.2) η παροχή του νερού. Έτσι, προέκυψαν τα δεδομένα παροχής 58 ετών (1961-2018). Μέχρι το 2004 (23/04/2004) η καταγραφή δεδομένων ήταν μηνιαία και από τις 23/04/2004 μέχρι και σήμερα τα δεδομένα είναι σε ημερήσια βάση. Όμως, οι μηνιαίες μετρήσεις δεν περιέχουν τις μέγιστες παροχές γιατί δεν υπήρχε αυτόματη μέτρηση της παροχής με σταθμηγράφο. Για τον λόγο αυτό, όταν πραγματοποιήθηκε η στατιστική επεξεργασία αυτών, υπήρξαν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ παρατηρημένων και επεξεργασμένων δεδομένων. Οπότε, ήταν απαραίτητη η προεπεργασία αυτών μέσω της μοντελοποίησης της λεκάνης απορροής του ποταμού. Συγκεκριμένα, ο Διονύσης Ευσταθίου και η Σοφία Νερατζάκη, μέλη του εργαστηρίου “Υδρογεωχημικής μηχανικής και αποκατάστασης εδαφών” μοντελοποίησαν τα παρατηρημένα δεδομένα μέσω του μοντέλου SWAT και έτσι πρόέκυψε νέα βάση δεδομένων με ημερήσιες παροχές από το 1961 έως το 2018, οι οποίες έπειτα επεξεργάστηκαν.

Μοντέλο SWAT:

Το μοντέλο SWAT (Arnold et al., 1998) είναι ένα συνεχές, ημι-κατανεμημένο, ντετερμινιστικό μοντέλο υδρολογικής λεκάνης, που αρχικά αναπτύχθηκε για να προβλέπει τη μακροπρόθεσμη επίδραση των κλιματικών και γεωργικών πρακτικών στο νερό, τα ιζήματα και την ποσότητα γεωργικών χημικών σε μεγάλες και σύνθετες λεκάνες. Χρησιμοποιεί την προσέγγιση του υδατικού ισοζυγίου και συγκεκριμένα αυτή υπολογίζεται θεωρώντας τις συνιστώσες του χιονιού, το εδάφους, του ρηχού υδροφορέα και του βαθύ υδροφορέα. Αρχικά, η λεκάνη διαιρείται σε υπολεκάνες και κάθε υπολεκάνη σε «Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης» (Hydrologic Response Units – HRUs) οι οποίες είναι τμήματα υπολεκάνης με συγκεκριμένο συνδυασμό εδάφους, χρήσεως γης και κλίσης. Το SWAT τρέχει σε ημερήσια βάση και οι κύριες συνιστώσες του μοντέλου είναι: ο καιρός, το υδρολογικό ισοζύγιο μάζας, η θερμοκρασία του εδάφους και οι ιδιότητες του εδάφους, η ανάπτυξη των φυτών, ο κύκλος των θρεπτικών ουσιών και η παραγωγή ιζημάτων (Neitsch et al., 2010).

Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με την μέθοδο των ετήσιων μεγίστων (AM Method). Η POT μέθοδος δεν εφαρμόστηκε.

5.3.1 GUMBEL ΜΕΘΟΔΟΣ για μοντελοποιημένα Δεδομένα (με το SWAT) με χρήση ετήσιων μεγίστων

Αφού επιλέχθηκαν οι μέγιστες ετήσιες παροχές των 58 ετών (ημερήσια δεδομένα) ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα προσαρμογής:

- Εύρεση στατιστικών χαρακτηριστικών δείγματος (μέση τιμή \bar{X} και τυπική απόκλιση S_x)
- Υπολογισμός παραμέτρων κλίμακας και θέσης a και c , όπου $a = \frac{1,282}{S_x}$ και $c = \bar{X} - 0,45 \cdot S_x$.
- Προσδιορισμός της περιόδου επαναφοράς για κάθε μία από τις μέγιστες παροχές με χρήση του τύπου $T = \frac{N+1}{m}$, όπου N ο αριθμός ετών των και m αριθμός εμφάνισης των γεγονότων ενδιαφέροντος, δηλαδή των μεγίστων παροχών (έπειτα από ταξινόμηση των παροχών κατά αύξουσα σειρά)
- Υπολογισμός της παροχής επαναφοράς μέσω του τύπου $x = \bar{X} - S_x \cdot \{0,45 + 0,7797 \cdot \ln[\ln T - \ln(T-1)]\}$
- Δημιουργία διαγράμματος παροχής επαναφοράς- περιόδου επαναφοράς και μέγιστης παροχής- περιόδου επαναφοράς.
- Υπολογισμός σφαλμάτων RMSE (Root Mean Square Error), χ^2 και t-test. Τα σφάλματα χ^2 και t-test έπρεπε να συγκριθούν με τιμές από πίνακες που αφορούν τις μεθόδους αυτές και αντιστοιχούν σε βαθμούς ελευθερίας ίσους με τον αριθμό μετρήσεων μείον 1, δηλαδή $58-1=57$ και διάστημα εμπιστοσύνης $\alpha=95\%$.

5.3.2 LOG PEARSON TYPE 3 ΜΕΘΟΔΟΣ για μοντελοποιημένα δεδομένα (με το SWAT), με AM μέθοδο

Αντίστοιχα, τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:

- Υπολογισμός του log κάθε τιμής παροχής
- Εύρεση στατιστικών χαρακτηριστικών του log του δείγματος (μέση τιμή \bar{X} και τυπική απόκλιση S_x και skewness)
- Υπολογισμός του frequency factor, K από πίνακα με βάση το skewness και το P , όπου $P = \frac{1}{T}$ για κάθε τιμή παροχής.
- Υπολογισμός του Q_T από τον τύπο $Q_T = Q_{MEAN} + K \cdot S_x$
- Υπολογισμός των παροχών επαναφοράς 50 χρόνων από τον τύπο $Q_{50} = 10^{Q_T}$
- Δημιουργία διαγράμματος παροχής επαναφοράς- περιόδου επαναφοράς και μέγιστης παροχής- περιόδου επαναφοράς.
- Υπολογισμός σφαλμάτων RMSE (Root Mean Square Error), χ^2 και t-test. Τα σφάλματα χ^2 και t-test έπρεπε να συγκριθούν με τιμές από πίνακες που αφορούν τις μεθόδους αυτές και αντιστοιχούν σε βαθμούς ελευθερίας ίσους με τον αριθμό μετρήσεων μείον 1, δηλαδή $58-1=57$ και διάστημα εμπιστοσύνης $\alpha=95\%$.

POT Μέθοδος

Στην συγκεκριμένη μέθοδο επιλέγονται οι αιχμές επάνω από μία τιμή κατώφλι. Ως κατώφλι ορίζεται μια σχετικά χαμηλή τιμή ώστε να εξασφαλίζεται η επιλογή τουλάχιστον ενός γεγονότος ανά έτος (Kite, 1977). Ωστόσο, όταν οι ακραίες τιμές των δεδομένων επιλέγονται με τον παραπάνω τρόπο υπάρχει το ενδεχόμενο να μην είναι στατιστικά ανεξάρτητες (Chow et al., 1988), γεγονός που αποτελεί περιοριστικό παράγοντα της μεθόδου. Επομένως, η επιλογή της τιμής κατώφλι είναι ένα από τα κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής. Τα δεδομένα παροχής που αντιστοιχούν στην περιοχή μελέτης χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές παροχών και έτσι η επιλογή της τιμής κατώφλι θα απέκλειε αυτομάτως το μεγαλύτερο ποσοστό δεδομένων της χρονοσειράς, ανάμεσα στα οποία θα ήταν και μέγιστες ετήσιες παροχές. Για τον λόγο αυτό δεν χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος POT.

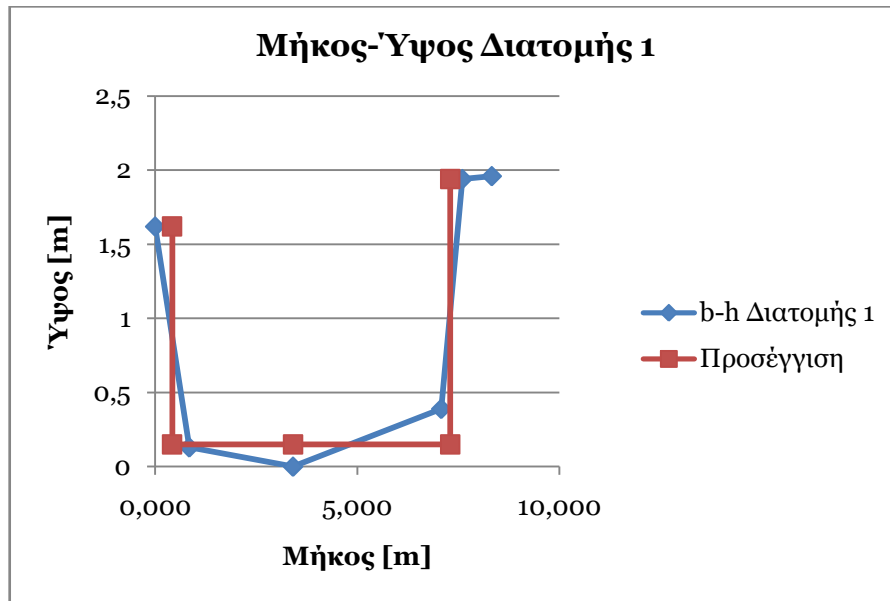
5.4 Εύρεση του ύψους ροής με βάση την πλημμυρική παροχή

Τα ποτάμια αποτελούν ανοικτούς, φυσικούς αγωγούς για αυτό για τον υπολογισμό του ύψους ροής χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Manning η οποία δίδεται παρακάτω:

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Εξίσωση 5.2})$$

Όπου:

- $V = \frac{Q}{A}$, η ταχύτητα ροής [$\frac{m^3}{s}$]
- n , ο συντελεστής τραχύτητας, γνωστός ως συντελεστής Manning, ο οποίος αποτελεί έκφραση της τραχύτητας του στερεού ορίου [$\frac{s}{m^{1/3}}$]
- $R = \frac{A}{P}$, η υδραυλική ακτίνα [m]. Υπολογίζεται για κάθε ένα από τα δύο σημεία μελέτης. Συγκεκριμένα, με βάση τις συντεταγμένες που λήφθηκαν από την περιοχή σχηματίζεται το προφίλ της όχθης, το οποίο για την διατομή 1 φαίνεται στο διάγραμμα με μπλε χρώμα. Με κόκκινο χρώμα έχει δημιουργηθεί το προφίλ της όχθης, με βάση την προσέγγιση ότι είναι ορθογωνικό.



Διάγραμμα 5.1 Ύψος όχθης συναρτήσει μήκους όχθης για το Σημείο 1

- S , η κλίση του ποταμού [-], οποία ομοίως υπολογίστηκε βάση των συντεταγμένων
- A , το εμβαδό της διατομής του ποταμού [m^2]. Υπολογίζεται με χρήση του τύπου: $A=(\text{μήκος}) \times (\text{πλάτος})=b \cdot h$
- Π , η βρεχόμενη περίμετρος της διατομής του ποταμού [m]. Υπολογίζεται με βάση τον τύπο: $\Pi=b+2 \cdot h$
- Q , η παροχή [$\frac{m^3}{s}$]

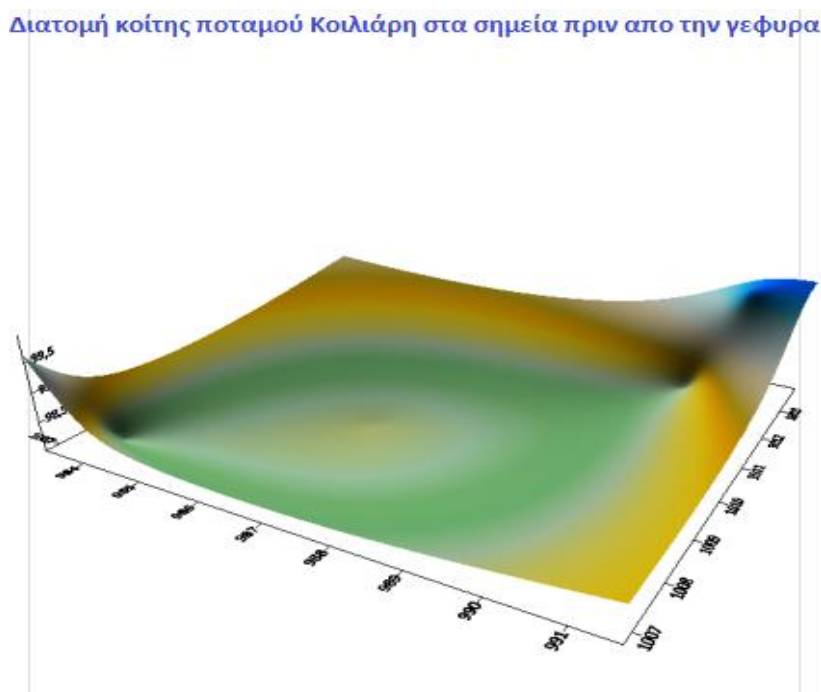
5.5 Εισαγωγή Δεδομένων στο BSTEM

Το τελευταίο βήμα είναι η εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα. Στην καρτέλα εισαγωγής της γεωμετρίας επιλέγεται η επιλογή B. Εκεί ζητείται το ύψος της όχθης το οποίο υπολογίζεται από το AutoCad. Έπειτα, η γωνία της όχθης και η γωνία του ποδιού υπολογίζονται με βάσει τις συντεταγμένες: του σημείου B (αρχικό σημείο της όχθης), Q (κορυφή του ποδιού) και W (κεντρικό σημείο ποταμού). Το μήκος του ποδιού που ζητείται βρέθηκε από επιτόπιες μετρήσεις ίσο με περίπου 0,5 μέτρα. Σε ότι αφορά το κανάλι, το μήκος αυτού που ζητείται, θεωρείται πως είναι ίσο με 3 μέτρα καθώς για τόση απόσταση θεωρείται πως επικρατούν οι συνθήκες διάβρωσης για το κάθε σημείο. Η κλίση έχει υπολογιστεί με βάσει τις αποστάσεις που λαμβάνονται από το AutoCad, μεταξύ του αρχικού και του τελικού σημείου του καναλιού. Τέλος, το μοντέλο θα δοκιμαστεί για πλημμύρες διάρκειας 2,4 και 8 ωρών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: “ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ”

6.1 Συλλογή Δεδομένων Πεδίου

Για την χρήση του προγράμματος Surfer (2015), χρειάστηκαν οι συντεταγμένες της περιοχής. Με βάση αυτές δημιουργείται η τρισδιάστατη απεικόνιση του παρόχθιου δάσους. Στην φωτογραφίες 6.8 απεικονίζεται η διατομή 1 και το τμήμα του ποταμού πριν την γέφυρα αντίστοιχα.



Εικόνα 6.8 Εγκάρσια διατομή όχθης στο σημείο υπό εξέταση πριν την γέφυρα

6.2 Εργαστηριακή Ανάλυση

Τα αποτελέσματα επεξεργάστηκαν στο πρόγραμμα Excel με σκοπό να γίνει γνωστό το είδος του εδάφους και η διάμετρος του 50% (D_{50}) αυτού που είναι δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα BSTEM. Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την κοκκομετρική ανάλυση και τα όρια A.S.T.M. :

Δείγμα	D_{50} (mm)	Είδος
Δ1	0.075	Ιλύς
Δ2	0.5	Άμμος
Δ3	0.075	Ιλύς

Πίνακας 6. 1 Είδος και D_{50} δειγμάτων Δ1, Δ2 και Δ3

Έτσι, σύμφωνα με την παρακάτω τυπολογία υπολογίστηκε η κρίσιμη διατμητική τάση και ο συντελεστής διάβρωσης (Hanson G.J., Simon A., 2001).

- $\tau_c = 0,06 * 16,2 * D_{50}$ για $D_{50} > 2mm$ (Εξίσωση 5.3)
- $\tau_c = 0,044 * 16,2 * D_{50}$ για $D_{50} < 2mm$ (Εξίσωση 5.4)
- $k = 0,1 * \tau_c - 0,5$ (Εξίσωση 5.5)

Όπου:

- D_{50} : η διάμετρος του 50% των κόκκων του υλικού του ποδίου (mm)
- T_c : η κρίσιμη διατμητική τάση (Pa)
- k : ο συντελεστής διάβρωσης (cm^3/Ns)

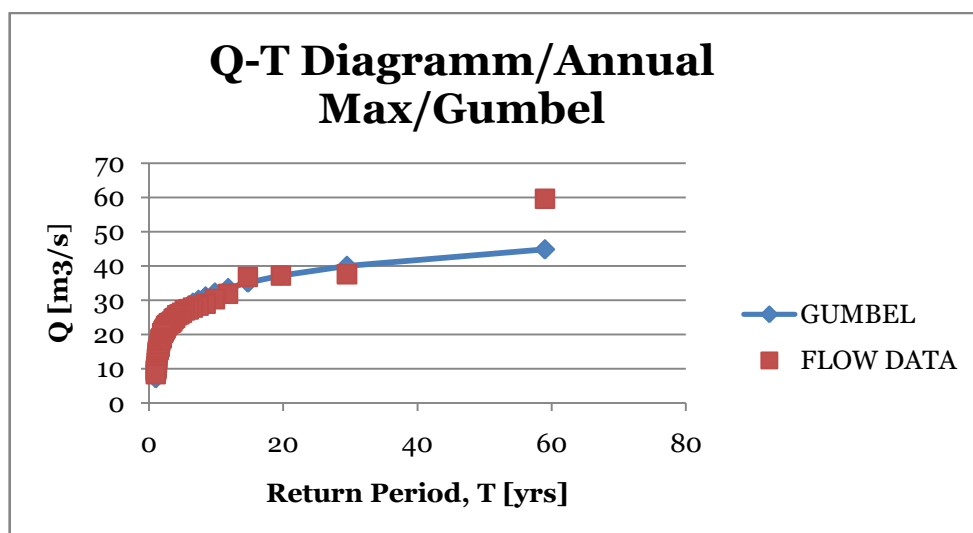
6.3 Στατιστική Ανάλυση

Από την στατιστική ανάλυση των δεδομένων προέκυψαν η παροχές επαναφοράς πενήντα ετών και έπειτα βρέθηκε το ύψος ροής που αντιστοιχεί σε αυτές. Τα αποτελέσματα αυτά σε συνδιασμό με τα αποτελέσματα των σφαλμάτων φαίνονται στο πίνακα

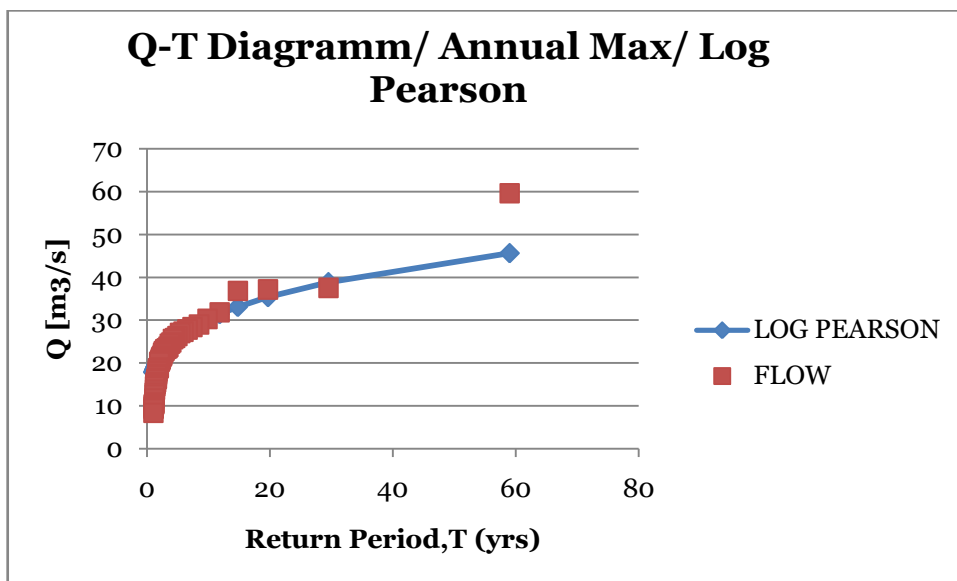
Μέθοδος	$Q_{50} [\frac{\text{m}^3}{\text{s}}]$	RMSE	t-test	χ^2
Gumbel Method	43,68	2,11	0,64	6,77
Log Pearson Type 3 Method	43,75	4,23	3,63	49,79

Πίνακας 6.2 Πίνακας αποτελεσμάτων και σφαλμάτων των μεθόδων Gumbel και Log Pearson

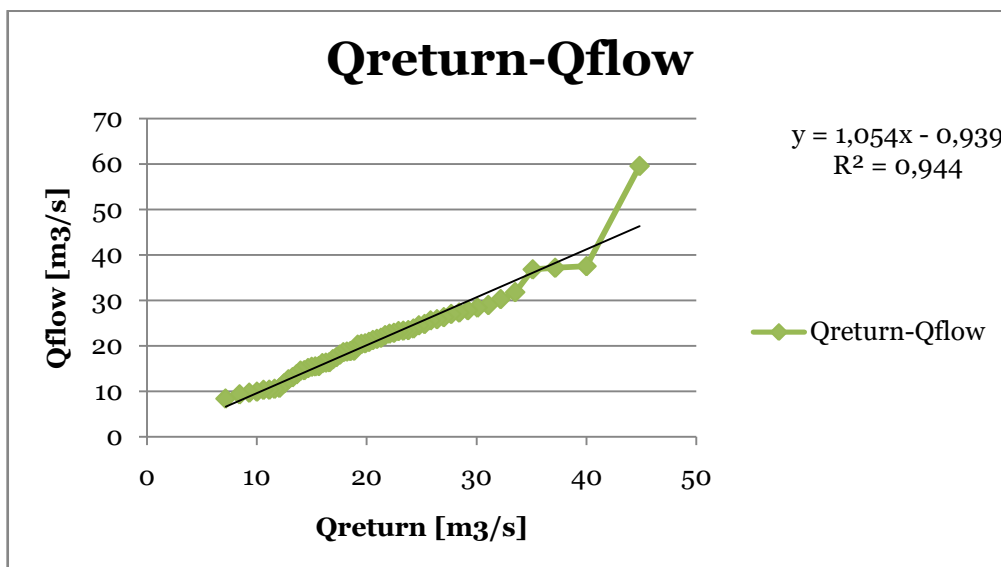
Από τα διαγράμματα παροχής επαναφοράς- περιόδου επαναφοράς και μέγιστης ετήσιας παροχής- περιόδου επαναφοράς (Διάγραμμα 6.1 & 6.2) φαίνεται πως οι μέθοδοι Gumbel και Log Pearson προσεγγίζουν αρκετά καλά τις πραγματικές τιμές παροχών. Ωστόσο, βάσει των υπολογισμών των σφαλμάτων, η Gumbel είναι αυτή που έχει τα μικρότερα σφάλματα, οπότε παρέχει μία αξιόπιστη σειρά αποτελεσμάτων. Παράλληλα, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα παροχής επαναφοράς-ετήσιας μέγιστης παροχής (Διαγράμματα 5.3 & 5.4), στα οποία φαίνεται η βέλτιστη εξίσωση προσαρμογής στα σημεία και το σφάλμα R^2 που παρουσιάζεται πιο ικανοποιητικό για την μέθοδο Gumbel.



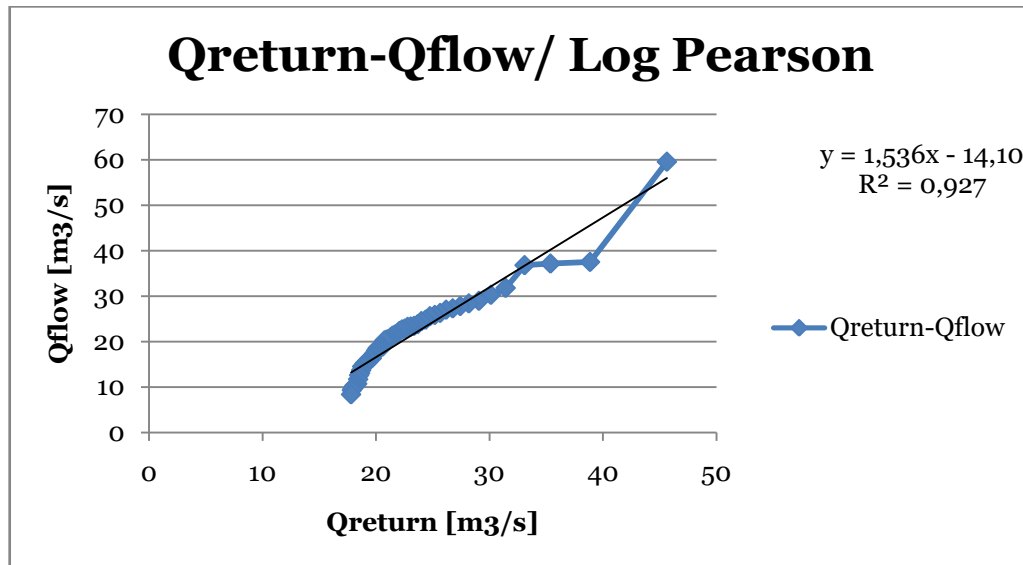
Διάγραμμα 6.1 Παροχή επαναφοράς κατά Gumbel συναρτήσει χρόνου και ετήσια μέγιστη παροχή συναρτήσει χρόνου



Διάγραμμα 6.2 Παροχή επαναφοράς κατά Log Pearson συναρτήσει χρόνου και ετήσια μέγιστη παροχή συναρτήσει χρόνου



Διάγραμμα 6.3 Παροχή επαναφοράς κατά Gumbel συναρτήσει ετήσιας μέγιστης παροχής



Διάγραμμα 6.4 Παροχή επαναφοράς κατά Log Pearson συναρτήσει ετήσιας μέγιστης παροχής

Συμπερασματικά, ως παροχή επαναφοράς 50 ετών χρησιμοποιείται η τιμή $Q_{50}=43,68 \frac{m^3}{s}$, που προκύπτει από την μέθοδο Gumbel.

6.4 Ύψος ροής με βάση την πλημμυρική παροχή

Τα ύψη ροής από την εξίσωση του Manning (5.2) υπολογίζονται για τα δύο σημεία με βάση τα εξής δεδομένα

- $N=0.100$ με βάση την βιβλιογραφία για φυσικούς, ανοιχτούς αγωγούς με πολύ ψηλή και πυκνή βλάστηση
- Κλίση καναλιού $S=1.5\%$, υπολογίστηκε μεταξύ δύο σημείων στο AutoCad
- Το ύψος h και το μήκος b των διατομών υπολογίστηκαν από το Autocad είναι τα εξής
- $Q = Q_{50} = 43,68165 \frac{m^3}{s}$ και

Διατομή σημείου:	B [m]	H [m]
Σ1	8.19	1.79
Σ2	8.97	1.98

Πίνακας 6.3 Δεδομένα μήκους και ύψους των σημείων Σ1 και Σ2

Έτσι, προκύπτει ότι $h_{50_{\Sigma 1}} \approx 3m > h_{\Sigma 1} = 1,79m$ και $h_{50_{\Sigma 2}} \approx 2,8m > h_{\Sigma 2} = 2,06m$.

Στο μοντέλο BSTEM θα εισαχθεί σαν ύψος ροής το $h_{\Sigma 1} = 1,79m$ και $h_{\Sigma 2} = 1,98m$ αντίστοιχα, δηλαδή οι οριακές τιμές καθώς παρατηρείται αδυναμία εξαγωγής αποτελεσμάτων για ύψη ροής μεγαλύτερα του ύψους της όχθης.

6.5 Μοντέλο BSTEM

Τα δεδομένα εισαγωγής συνοψίζονται για τα δύο σημεία μελέτης στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 5.4).

	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΣΗΜΕΙΟ 1	ΣΗΜΕΙΟ 2
ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΗΣ ΟΧΘΗΣ	ΥΨΟΣ ΟΧΘΗΣ [m]	1,79	2,06
	ΓΩΝΙΑ ΟΧΘΗΣ [°]	76,9	73
	ΜΗΚΟΣ ΠΟΔΙΟΥ [m]	0,5	0,5
	ΓΩΝΙΑ ΠΟΔΙΟΥ [°]	2,4	4
	ΠΑΧΟΣ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΟΧΘΗΣ [m]	2	1,06 και 1
ΚΑΝΑΛΙ	ΜΗΚΟΥΣ ΚΑΝΑΛΙΟΥ [m]	3	3
	ΚΛΙΣΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ [m/m]	0,015	0,015
	ΥΨΟΣ ΡΟΗΣ [m]	1,79	2,06
	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΡΟΗΣ [h]	2, 4, 8	2, 4, 8
ΥΛΙΚΟ ΤΗΣ ΟΧΘΗΣ	ΥΛΙΚΟ ΟΧΘΗΣ	Ιλύς	Ιλύς και άμμος
	D_{50} [mm]	0,075	0,075 και 0,5
	ΚΡΙΣΙΜΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (Pa)	0,05	0,40986
	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ $\frac{cm^3}{N * s}$	0,447	0,143
	ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦ. ΝΕΡΟΥ-ΟΧΘΗ [m]	0	0

Πίνακας 6.4 Δεδομένα εισαγωγής στο πρόγραμμα BSTEM για τα σημεία Σ1 και Σ2

Τα αποτελέσματα διακρίνονται σε αυτά που προέρχονται από το υπομοντέλο της διάβρωσης και αυτά από το υπομοντέλο σταθερότητας και είναι ποιοτικής και ποσοτικής φύσεως.

Το μοντέλο δοκιμάστηκε για ποικίλα σενάρια με σκοπό να παρατηρηθεί η ευαισθησία του συντελεστή ευστάθειας στις διάφορες φυσικές παραμέτρους. Τα **σενάρια Α και Β** αφορούν την βλάστηση. Στην πρώτη περίπτωση θεωρείται μηδενική βλάστηση, ενώ στην δεύτερη θεωρείται ύπαρξη βλάστησης (Κατηγορία: Willow Geyer's που περιλαμβάνει πλατάνια). Ο λόγος που πραγματοποιείται η δοκιμή αυτή, είναι το γεγονός πως η βλάστηση της

κατηγορίας αυτή καλύπτει ένα μέρος του τμήματος μελέτης. Στο σημείο 1 δειγματοληψίας υπάρχει ένα πλατάνι σε σχετικά κοντινή απόσταση (βλ. Φωτογραφία 5.3 α) το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ότι συμβάλλει εν μέρει στα σταθερότητα του πρηνούς. Όμως, οι ρίζες του πλατανιού βρίσκονται εκτός του χώματος, γεγονός που δείχνει διάβρωση. Στο σημείο 2 δεν υπάρχει κάποιο δέντρο, του οποίου το ριζικό να συμβάλλει στην ευστάθεια του πρηνούς. Αντίθετα, υπάρχει αραιή βλάστηση από γρασίδι, το οποίο δεν έχει σημαντική συνεισφορά στην ευστάθεια (βλ. Φωτογραφία 5.4). Παράλληλα, με τις δοκιμές των σεναρίων Α και Β μπορεί να γίνει διακριτή η συμβολή του παράγοντα της βλάστησης στην σταθερότητα των πρηνων.

Σχετικά με το **σενάριο Γ**, επιλέγεται δοκιμαστικά η εφαρμογή της μεθόδου **Rip-Rap**, δηλαδή της τοποθέτησης ογκωδών πετρών. Η διάμετρος του 50% των πετρών αυτών είναι καθορισμένη όταν επιλέγεται η εντολή αυτή και ισούται με $D_{50}=0.256m$. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με σκοπό να εξεταστεί η καταλληλότητα εφαρμογής της μεθόδου, με βάση την μορφολογία, στην περιοχή του Κοιλιάρη, δηλαδή να εξεταστεί αν θα επιφέρει σταθερότητα κάτω από συνθήκες που είχαν δείξει αστοχία της όχθης.

Στο σενάριο Δ δεν επιλέγεται κάποια μέθοδος από την καρτέλα της προστασίας της όχθης. Αυτή την φορά επιλέγεται από την καρτέλα του υλικού της όχθης η επιλογή Boulders, δηλαδή ογκόλιθοι (ή βράχια). Για να πραγματοποιηθεί η εφαρμογή τους ως υλικό της όχθης, θα πρέπει πρώτα να υπάρξει προεργασία της κλίσης της όχθης αφού ο Κοιλιάρης χαρακτηρίζεται από όχθες που τείνουν να είναι κάθετες. Ενδεικτικά, με υλικό όχθης τους ογκόλιθους, για διάρκεια πλημμύρας 2 ωρών και καμία αλλαγή στα υπόλοιπα δεδομένα ο συντελεστής ασφαλείας βρέθηκε ίσος με **1,2**, δηλαδή **υπό συνθήκη ευσταθές πρηνές**. Ο κύριος λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η καθετότητα της όχθης. Έτσι, πραγματοποιήθηκε δοκιμή του μοντέλου με νέες προσεγγιστικές τιμές που είναι οι εξής: Κλίση όχθης από $76,9^\circ \rightarrow 50^\circ$ και κλίση ποδιού από $2,4^\circ \rightarrow 10^\circ$.

Τα σενάρια Γ και Δ δοκιμάζονται απουσία βλάστησης και τα αποτελέσματα συνοψίζονται στους πίνακες 6.7 και 6.8

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι πίνακες των ποσοτικών αποτελεσμάτων για όλα τα σενάρια για το σημείο 1 (Πίνακας 6.5 έως 6.8) καθώς και ορισμένα ποιοτικά αποτελέσματα. Τα ποιοτικά αποτελέσματα είναι σε μορφή διαγραμμάτων, όπου με μαύρο χρώμα φαίνεται το αρχικό προφίλ της όχθης και με κόκκινο η διάβρωση και η αστοχία αντίστοιχα. Το μπλε χρώμα δείχνει την επιφάνεια του νερού. Το διάγραμμα 6.5 είναι το αποτέλεσμα του υπομοντέλου της διάβρωσης, το οποίο εισάγεται σαν δεδομένο εισόδου στο πρόγραμμα και έπειτα υπολογίζεται η αστοχία και εξάγεται το διάγραμμα αστοχίας (Διάγραμμα 6.6).

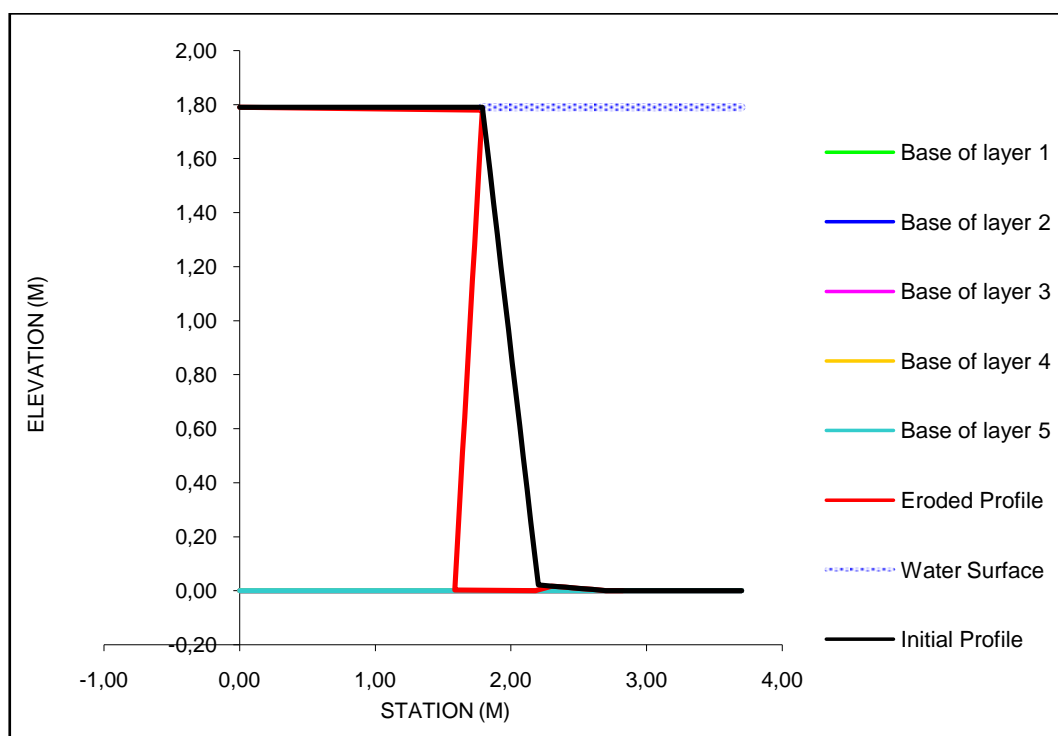
Σενάρια Α & Β: ΑΠΟΥΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ (Σ1)

ΣΕΝΑΡΙΟ Α: ΑΠΟΥΣΙΑ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ							
Σ1	ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ			ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ			
Διάρκεια Ροής (hrs)	Συνολική Οριακή Διατμητική Τάση (Pa)	Διαβρωμένη Περιοχή (m ²)	Όγκος Διάβρωση (m ³)	Πλάτος Αστοχίας [m]	Όγκος αστοχίας [m ³]	Φορτίο Ιζήματος [kg]	Fs
2	135,230	0.556	1.67	-	-	-	1,31 Ευστάθεια
4	135,20	1,031	3,093	2,04	5	9853	0,99 Αστάθεια
8	135,230	1,791	5,373	2,29	5	9808	0,68 Αστάθεια

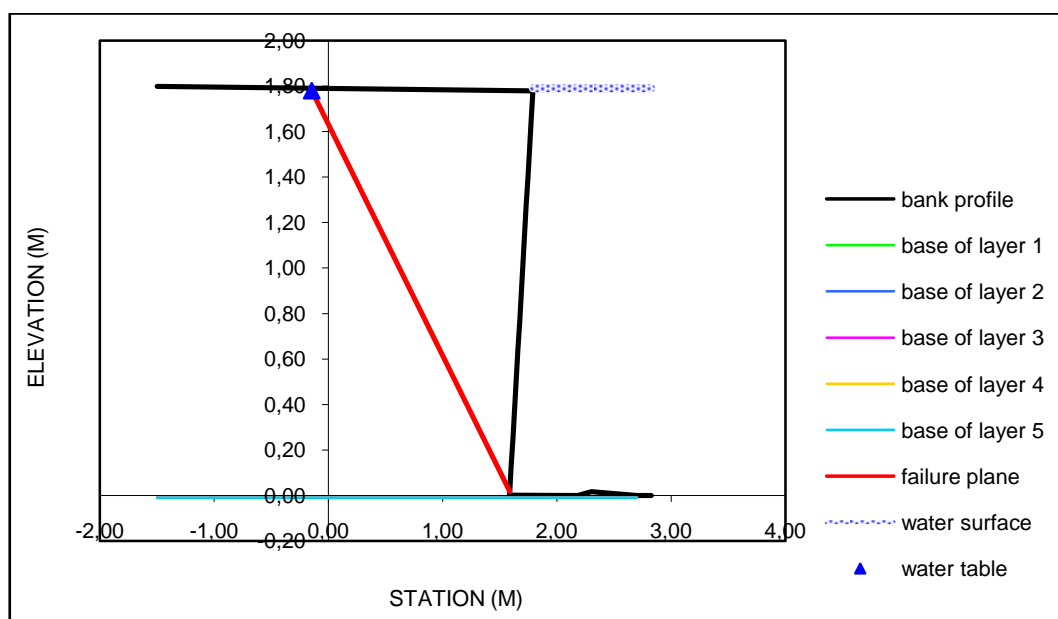
Πίνακας 6.5 Ποσοτικά Αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας με αρχικό σενάριο απουσίας βλάστησης

ΣΕΝΑΡΙΟ Β: ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ							
Σ1	ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ			ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ			
Διάρκεια Ροής (hrs)	Συνολική Οριακή Διατμητική Τάση (Pa)	Διαβρωμένη Περιοχή (m ²)	Όγκος Διάβρωση (m ³)	Πλάτος Αστοχίας [m]	Όγκος αστοχίας [m ³]	Φορτίο Ιζήματος [kg]	Fs
2	135,230	0.556	1.67	-	-	-	4,31 Ευστάθεια
4	135,20	1,031	3,093	-	-	-	4,08 Ευστάθεια
8	135,230	1,791	5,373	-	-	-	4,08 Ευστάθεια

Πίνακας 6.6 Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας σύμφωνα με το σενάριο ύπαρξης βλάστησης



Διάγραμμα 6.5 Ποιοτικά αποτελέσματα υπομοντέλου διάβρωσης για το σημείο 1 σύμφωνα με το σενάριο A: Προφίλ διάβρωσης



Διάγραμμα 6.6 Ποιοτικά αποτελέσματα υπομοντέλου αστοχίας για το σημείο 1, σύμφωνα με το σενάριο A: Πλάνο αστοχίας

Από τους πίνακες αποτελεσμάτων παρατηρείται η διαφορά του συντελεστή ασφαλείας F_s ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις. Αναλυτικότερα, η παρουσία βλάστησης φαίνεται να αυξάνει τον συντελεστή κατά τέσσερις περίπου μονάδες, οι οποίες στις περιπτώσεις αστάθειας είναι αρκετές για να επιφέρουν σταθερότητα στην όχθη και έτσι να μην υπάρξει αστοχία. Οπότε, με δεδομένες τις προαναφερόμενες φυσικές παραμέτρους, η όχθη του σημείου 1 θα αστοχήσει σε ένα πλημμυρικό γεγονός τεσσάρων ωρών η και μεγαλύτερης διάρκειας. Στο

διάγραμμα 5.6 φαίνεται η διάβρωση που έχει υποστεί η παρόχθια ζώνη στην περίπτωση του σεναρίου Α (και για 4 ώρες διάρκεια). Με βάση αυτήν, υπολογίζεται και το πλάνο αστοχίας το οποίο φαίνεται στο διάγραμμα 5.7 και ουσιαστικά απεικονίζει την νέα μορφή της όχθης μετά την πτώση όγκου ίσου με 5m^3 .

ΣΕΝΑΡΙΟ Γ: ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ RIP-RAP (Σ1)

ΣΕΝΑΡΙΟ Γ: ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ RIP-RAP							
Σ1	ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ			ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ			
Διάρκεια Ροής (hrs)	Συνολική Οριακή Διατμητική Τάση (Pa)	Διαβρωμένη Περιοχή (m^2)	Όγκος Διάβρωσης (m^3)	Πλάτος Αστοχίας [m]	Όγκος αστοχίας [m^3]	Φορτίο Ιζήματος [kg]	Fs
2	135,230	0.001	0.003	-	-	-	1.84 Ευστάθεια
4	135,20	0.002	0.006	-	-	-	1.84 Ευστάθεια
8	135,900	0,003	0,009	-	-	-	1.84 Ευστάθεια

Πίνακας 6.7 Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας σύμφωνα με το σενάριο προσθήκης μέτρου προστασίας (Rip-Rap)

ΣΕΝΑΡΙΟ Ε: ΑΛΛΑΓΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΗΣ ΟΧΘΗΣ ΚΑΙ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΚΛΙΣΗΣ (Σ1)

ΣΕΝΑΡΙΟ Δ: ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΚΛΙΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ RIP-RAP							
Σ1	ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ			ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ			
Διάρκεια Ροής (hrs)	Συνολική Οριακή Διατμητική Τάση (Pa)	Διαβρωμένη Περιοχή (m^2)	Όγκος Διάβρωσης (m^3)	Πλάτος Αστοχίας [m]	Όγκος αστοχίας [m^3]	Φορτίο Ιζήματος [kg]	Fs
2	140.580	0.001	0.003	-	-	-	3.83 Ευστάθεια
4	140.580	0.002	0.004	-	-	-	3.83 Ευστάθεια
8	140.580	0.004	0.008	-	-	-	3.83 Ευστάθεια

Πίνακας 6.8 Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας σύμφωνα με το σενάριο της εξομάλυνσης της κλίσης και τοποθέτησης μεθόδου προστασίας

ΣΕΝΑΡΙΟ Ε: ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΚΛΙΣΗΣ ΑΛΛΑΓΗ ΥΛΙΚΟΥ ΟΧΘΗΣ ΣΕ ΟΓΚΟΛΙΘΟΥΣ

Σ1	ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ			ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ			
	Συνολική Οριακή Διατμητική Τάση (Pa)	Διαβρωμένη Περιοχή (m ²)	Όγκος Διάβρωσης (m ³)	Πλάτος Αστοχίας [m]	Όγκος αστοχίας [m ³]	Φορτίο Ιζήματος [kg]	Fs
2	140,580	0	0	-	-	-	6,17 Ευστάθεια
4	140,580	0	0	-	-	-	6,17 Ευστάθεια
8	140,580	0	0	-	-	-	6,17 Ευστάθεια

Πίνακας 6.9 Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας σύμφωνα με το σενάριο της εξομάλυνσης της κλίσης και της αλλαγής του υλικού

Με την επιβολή των ογκωδών πετρών (διαμέτρου του 50% των κόκκων ίση με 0.513m), παρατηρείται σχεδόν μηδενική διάβρωση και η όχθη χαρακτηρίζεται από ευστάθεια με συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1,84 και στις τρεις περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα του σεναρίου Ε παρέχουν μία αύξηση του συντελεστή ασφαλείας στις 6,17 μονάδες. Με σύγκριση των σεναρίων Γ & Ε παρατηρείται πως παρά το γεγονός της ευστάθειας του πρσανούς στο Γ σενάριο, ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος κατά 2,34 μονάδες. Οπότε, συμπεραίνεται πως η προεπεξεργασία της παρόχθιας ζώνης είναι απαραίτητη στην περίπτωση του ποταμού Κοιλιάρη. Οι μεγάλες κλίσεις που τον χαρακτηρίζουν επιφέρουν δυσκολία στην απευθείας εφαρμογή κάποιας μεθόδου προστασίας. Για τον λόγο αυτό, όταν πραγματοποιήθηκε η αλλαγή της κλίσης μέσω του προγράμματος BSTEM, ο συντελεστής έλαβε την μέγιστη τιμή από όλα τα σενάρια. Παράλληλα, παρατηρείται πως στο σενάριο Ε όπου έχουν τοποθετηθεί μεγαλύτερου μεγέθους πέτρες, η ευστάθεια που παρέχεται είναι μεγαλύτερη από ότι αν τοποθετούσαμε τις πέτρες τις μεθόδου προστασίας οι οποίες είναι διαμέτρου $D_{50} = 0.256\text{m}$. Επίσης, η διαφορά έγκειται στο γεγονός πως στο σενάριο Ε αλλάζει το υλικό της όχθης, δηλαδή θεωρείται απομάκρυνση του μεγαλύτερου ποσοστού του υπάρχοντος υλικού (ιλύς) και τοποθέτηση πετρών. Αυτό σημαίνει απομάκρυνση του διαβρωμένου και ασταθές πρσανούς και για αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την υψηλή αυτή τιμή συντελεστή ασφαλείας. Κατόπιν, πραγματοποιήθηκαν οι ίδιες δοκιμές για το σημείο 2 που βρίσκεται μετά την γέφυρα. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στους πίνακες 6.10, 6.11, 6.12 και 6.13.

Σενάρια Α & Β: ΑΠΟΥΣΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ (Σ2)

ΣΕΝΑΡΙΟ Α: ΑΠΟΥΣΙΑ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ							
Σ2	ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ			ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ			
Διάρκεια Ροής (hrs)	Συνολική Οριακή Διατμητική Τάση (Pa)	Διαβρωμένη Περιοχή (m ²)	Όγκος Διάβρωση (m ³)	Πλάτος Αστοχίας [m]	Όγκος αστοχίας [m ³]	Φορτίο Ιζήματος [kg]	Fs
2	156,230	0,705	2,115	1,16	1	1869	0,33 Αστάθεια
4	156,230	1,285	3,855	1,21	1	1766	0,15 Αστάθεια
8	156,230	2,18	6,54	1,25	1	1896	0 Αστάθεια

Πίνακας 6.9 Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας με αρχικό σενάριο απουσίας βλάστησης

ΣΕΝΑΡΙΟ Β: ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ							
Σ2	ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ			ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ			
Διάρκεια Ροής (hrs)	Συνολική Οριακή Διατμητική Τάση (Pa)	Διαβρωμένη Περιοχή (m ²)	Όγκος Διάβρωση (m ³)	Πλάτος Αστοχίας [m]	Όγκος αστοχίας [m ³]	Φορτίο Ιζήματος [kg]	Fs
2	156,230	0,705	2,115	2,36	7	13259	1,27 Υπό συνθήκη ευστάθειας
4	156,230	1,285	3,855	2,36	7	13285	0,95 Αστάθεια
8	156,230	2,189	6,567	2,69	8	15163	0,65 Αστάθεια

Πίνακας 6.10 Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας σύμφωνα με το σενάριο ύπαρξης βλάστησης

ΣΕΝΑΡΙΟ Γ: ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ RIP-RAP (Σ2)

ΣΕΝΑΡΙΟ Γ: ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ RIP-RAP							
Σ2	ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ			ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ			
Διάρκεια Ροής (hrs)	Συνολική Οριακή Διατμητική Τάση (Pa)	Διαβρωμένη Περιοχή (m ²)	Όγκος Διάβρωσης (m ³)	Πλάτος Αστοχίας [m]	Όγκος αστοχίας [m ³]	Φορτίο Ιζήματος [kg]	Fs
2	156,230	0,002	0,006	0,89	1	1330	0,59 Αστάθεια
4	156,230	0,004	0,012	0,89	1	1330	0,59 Αστάθεια
8	156,230	0,009	0,027	0,89	1	1330	0,59 Αστάθεια

Πίνακας 6.11 Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας σύμφωνα με το σενάριο προσθήκης μέτρων προστασίας (Rip-Rap (Λιθοδομή))

ΣΕΝΑΡΙΟ Δ: ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΚΛΙΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ RIP-RAP							
Σ2	ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ			ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ			
Διάρκεια Ροής (hrs)	Συνολική Οριακή Διατμητική Τάση (Pa)	Διαβρωμένη Περιοχή (m ²)	Όγκος Διάβρωσης (m ³)	Πλάτος Αστοχίας [m]	Όγκος αστοχίας [m ³]	Φορτίο Ιζήματος [kg]	Fs
2	160.990	0.003	0.009	-	-	-	1.44 Ευστάθεια
4	160.990	0.005	0.015	-	-	-	1.44 Ευστάθεια
8	160.990	0.011	0.033	-	-	-	1.44 Ευστάθεια

Πίνακας 6.12 Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας σύμφωνα με το σενάριο εξομάλυνσης κλίσης προσθήκης μέτρων προστασίας (Rip-Rap, (Λιθοδομή))

ΣΕΝΑΡΙΟ Ε: ΑΛΛΑΓΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΗΣ ΟΧΘΗΣ ΚΑΙ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΚΛΙΣΗΣ (Σ2)

ΣΕΝΑΡΙΟ Ε: ΑΛΛΑΓΗ ΥΛΙΚΟΥ ΟΧΘΗΣ ΣΕ ΟΓΚΟΛΙΘΟΥΣ & ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΚΛΙΣΗΣ							
Σ2	ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ			ΥΠΟΜΟΝΤΕΛΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ			
Διάρκεια Ροής (hrs)	Συνολική Οριακή Διατμητική Τάση (Pa)	Διαβρωμένη Περιοχή (m ²)	Όγκος Διάβρωσης (m ³)	Πλάτος Αστοχίας [m]	Όγκος αστοχίας [m ³]	Φορτίο Ιζήματος [kg]	Fs
2	160,990	0	0	-	-	-	6,17 Ευστάθεια
4	160,990	0	0	-	-	-	6,17 Ευστάθεια
8	160,990	0	0	-	-	-	6,17 Ευστάθεια

Πίνακας 6.13 Ποσοτικά αποτελέσματα υπομοντέλων διάβρωσης και αστοχίας σύμφωνα με το σενάριο της αλλαγής του υλικού και της εξομάλυνσης της κλίσης

Στο σημείο που βρίσκεται μετά την γέφυρα, το πρανές παρουσιάζεται ευσταθές μόνο στο σενάριο Δ και Ε. Έχει λάβει χώρα η διάβρωση σε βαθμό τέτοιο που το βρίσκεται σε κρίσιμη κατάσταση ως προς την αστοχία. Ακόμα και με την ύπαρξη βλάστησης (Σενάριο Β) ο συντελεστής ευστάθειας ισούται με 1,27 (υπό συνθήκη ευστάθειας) για την μικρότερη χρονική περίοδο (2 ώρες). Σε αντίθεση με το σημείο 1, το οποίο στις συνθήκες του σεναρίου Β ήταν σε κατάσταση ευστάθειας. Η διαφορά αυτή εγκείται στα διαφορετικές παραμέτρους γεωμετρίας και υλικού. Ιδιαίτερα, το υλικό της όχθης και του ποδιού επηρεάζει άμεσα τον συντελεστή ασφαλείας (Fs), δηλαδή το αν θα αστοχήσει το πρανές ή όχι. Συγκεκριμένα, η άμμος (μη συνεκτικό υλικό) είναι υλικό πολύ επιρρεπές στην αστοχία. Ακολουθεί η άργιλος (συνεκτικό υλικό), οι τιμές του συντελεστή αστοχίας της οποίας συνδέονται με υπό συνθήκες σταθερά πρανή και τέλος η ιλύς (συνεκτικό υλικό) η οποία συνδέεται με ιδιαίτερα σταθερά πρανή. Για αυτό, λοιπόν, συγκρίνοντας τα σημεία 1 και 2 κάτω από τις ίδιες συνθήκες, παρατηρείται ευστάθεια και αστάθειας αντίστοιχα λόγω της ύπαρξης του στρώματος άμμου που υπάρχει στο σημείο 2. Έπειτα, το αμμώδες υλικό βρίσκεται στο άνω στρώμα του σημείου 2 και αυτό δεν ευνοεί ιδιαίτερα την ανάπτυξη της βλάστησης, για αυτό και παρατηρούνται οι τιμές αυτές στο σενάριο Β.

Στους πίνακες 6.11, 6.12 και 6.13 φαίνεται πως η τιμή του συντελεστή ευστάθειας παραμένει σταθερή, ενώ η επιφάνεια διάβρωσης αυξάνει ελάχιστα με την αύξηση της και διάρκειας του πλημμυρικού γεγονότος. Σε αντίθεση με το σημείο 1, το σημείο 2 ακόμα και με την επιβολή της μεθόδου προστασίας είναι ασταθές. Στον πίνακα 6.13 φαίνεται όπως έχει επέλθει μία σταθερή τιμή στον συντελεστή με την εξομάλυνση της κλίσης και την αλλαγή του υλικού. Αυτό αποδεικνύει, όπως και για το σημείο 1, την καταλληλότητα της μεθόδου αυτής να εφαρμοστεί στην παρόχθια ζώνη του ποταμού Κοιλιάρη. Αντίθετα, η μέθοδος προστασίας (πέτρες διαμέτρου D₅₀=0.256m) του σεναρίου Γ δεν ενδείκνυται σε

αυτό το σημείο. Θα πρέπει να αφαιρεθεί το υπάρχον υλικό της όχθης και έπειτα να τοποθετηθεί η λιθοδομή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: “ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΠΑΡΟΧΘΙΟΥ ΔΑΣΟΥΣ”

Αρχικά, για την εφαρμογή έργων αποκατάστασης υδάτινων ρευμάτων πραγματοποιείται διεπιστημονική μελέτη η οποία θα πρέπει να εξετάζει τους παρακάτω παράγοντες:

- ❖ Ποιότητα του νερού
- ❖ Υδρολογία της περιοχής
- ❖ Βιολογικές συνθήκες
- ❖ Τεχνικές εφαρμογές
- ❖ Θέματα Νομοθεσίας

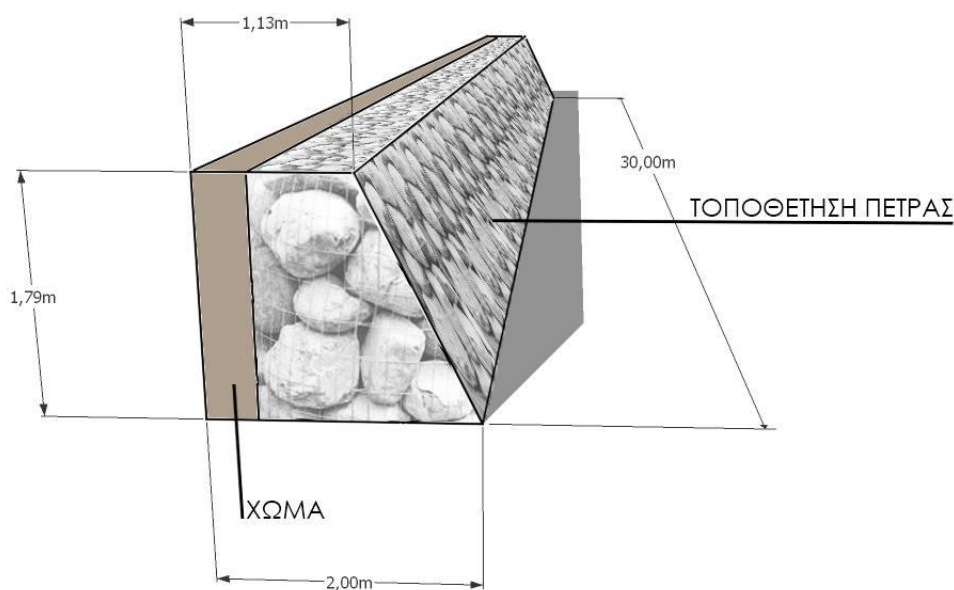
Ερμηνεύοντας τα ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα, συμπεραίνεται πως η διάβρωση των πρηνών αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα που επηρεάζει άμεσα την ισορροπία του παρόχθιου δάσους. Μικρές αλλαγές στις φυσικές παραμέτρους, όπως η γεωμετρία και το είδος του υλικού μπορούν να επιφέρουν μεγάλες διαφορές στην επιφάνεια αστοχίας. Για αυτό τον λόγο πριν την μοντελοποίηση ενός τέτοιου φαινομένου απαιτείται η μελέτη και η κατανόηση της λειτουργίας του οικοσυστήματος της περιοχής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη της ευρύτερης περιοχής του ποταμού Κοιλιάρη με σκοπό την εύρεση των τμημάτων που έχουν υποστεί διάβρωση. Σκοπός ήταν η εκτίμηση της διάβρωσης και της αστοχίας του πρηνούς στα τμήματα αυτά. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε λήψη δεδομένων από το πεδίο που αφορούν την τοπογραφία της περιοχής, την γεωμετρία της όχθης και του καναλιού καθώς επίσης και την βλάστηση. Έπειτα, τα δεδομένα εισήχθησαν το πρόγραμμα BSTEM και πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση τους. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

- ❖ Η ύπαρξη της βλάστησης είναι σημαντικός παράγοντας σταθερότητας της όχθης. Από το σενάριο Α στο σενάριο Β για το σημείο 1 και για χρονική διάρκεια 2 ωρών παρατηρείται μία αύξηση ίση με 335% (από 0,99 → 4,31).
- ❖ Το εδαφικό υλικό από το οποίο αποτελείται η όχθη επηρεάζει την διαβρωσιμότητα του εδάφους και την σταθερότητα της όχθης. Στο σημείο 2 υπάρχει μια στρώση άμμου, η οποία αποτελεί μη συνεκτικό υλικό. Δοκιμάζοντας το σενάριο Γ (επιβολή προστασίας) για τα σημεία 1 και 2 παρατηρούμε μείωση του συντελεστή ασφαλείας από 1,84 → 0,59. Έτσι, η όχθη θα μπορεί να υποστηρίξει την εφαρμογή των ογκόλιθων στο τμήμα πριν την γέφυρα, ενώ στο τμήμα μετά την γέφυρα, όχι.
- ❖ Το μέγεθος και η κοκκομετρία των πετρών που τοποθετούνται αποτελούν έναν βασικό παράγοντα στην σταθερότητα της όχθης. Οι μεγάλης διαμέτρου πέτρες συμβάλλουν περισσότερο στην αύξηση της σταθερότητας συγκριτικά με τις μικρού μεγέθους.
- ❖ Το ποσοστό του εδαφικού υλικού της όχθης που απομακρύνεται είναι ένας απαραίτητος παράγοντας που πρέπει να προσδιορίζεται. Στις περιπτώσεις που υπάρχει διάβρωση σε μεγάλο βαθμό, η απομάκρυνση του εδαφικού υλικού και η εκ νέου τοποθέτηση μεθόδου προστασίας επιφέρει μεγάλους συντελεστές ασφαλείας (Σενάριο Ε και για τα δύο σημεία).
- ❖ Τέλος, η μείωση της κλίσης της όχθης από 76,9° → 50° και αύξηση της κλίσης του ποδιού από 2,4° → 10° συμβάλλει αξιοσημείωτα στην σταθερότητα της

παρόχθιας ζώνης. Ο συντελεστής ασφαλείας λαμβάνει την μεγαλύτερη τιμή του, ίση με 6,17 όταν δοκιμάζεται το σενάριο Ε και για τα δύο σημεία μελέτης.

Έτσι, προτείνεται ως καταλληλότερη μέθοδος αυτή που συνδυάζει την εξομάλυνση της κλίσης της όχθης και έπειτα την εφαρμογή των ογκόλιθων. Λόγω των μεγάλων κλίσεων που επικρατούν κατά μήκος του ποταμού Κοιλιάρη, δεν είναι εφικτή η απευθείας εφαρμογή των πετρών. Μία τέτοια ενέργεια δεν θα είχε το επιθυμητό αποτέλεσμα και αυτό φαίνεται και από τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας στα διάφορα σενάρια. Παράλληλα, θα επέφερε μείωση του μήκους του καναλιού το οποίο συνεπάγεται αύξηση του ύψους ροής, οπότε ακόμα μεγαλύτερη ποσότητα νερού θα υπερχείλιζε της όχθης.

Η μέθοδος προστασίας που επιλέγεται, θα μπορούσε να συνδυαστεί με την τοποθέτηση μικρού αριθμού δέντρων στην κορυφή της πλάγιας. Η τοποθέτηση μπορεί να γίνει μόνο σε σημεία που υπάρχει έλλειψη βλάστησης και μετά από μελέτη που θα εξασφαλίζει της “αποδοχή” του είδους του από το υπάρχον οικοσύστημα. Στο σχήμα 7.1 απεικονίζεται η όχθη στο πρώτο σημείο μελέτης μετά την τοποθέτηση λιθοδομής. Η σχεδιαστική διάμετρος που επιλέχθηκε είναι ίση με 0,7 μέτρα.



Εικόνα 7.1 Προφίλ όχθης στο σημείο 1 μετά την τοποθέτηση ογκόλιθων

Τα θετικά της εφαρμογής της λιθοδομής συνοψίζονται παρακάτω:

- ❖ Παροχή αποτελεσμάτων χωρίς να απαιτεί την μεσολάβηση κάποιου χρονικού διαστήματος.
- ❖ Δυνατότητα παροχής προστασίας από την διάβρωση σε μακροπρόθεσμη κλίμακα.
- ❖ Δυνατότητα παροχής προστασίας σε μεγάλες παροχές.

- ❖ Δημιουργία κενών ανάμεσα στις πέτρες, τα οποία αποτελούν περιοχή εναπόθεσης αυγών των ψαριών.

Αντίθετα, ένα από τα βασικά μειονεκτήματα που αναφέρεται για την μέθοδο αυτή είναι ότι στα σημείο εφαρμογής της υπάρχει σχεδόν μηδενική υποστήριξη βλάστησης και κατ'επέκταση η έλλειψη πολλών βασικών συστατικών τα οποία είναι απαραίτητα για τους οργανισμούς που ζουν κάτω από την επιφάνεια του νερού.

Στην περίπτωση, όμως, του υδάτινου συστήματος του ποταμού Κοιλιάρη δεν υπάρχει αυτός ο κίνδυνος καθώς σε γενικά πλαίσια χαρακτηρίζεται από πυκνή βλάστηση σχεδόν σε όλο το μήκος του. Παράλληλα, η τοποθέτηση των πετρών θα επιφέρει σταθερότητα στην όχθη και έτσι σταδιακά το ριζικό σύστημα των δέντρων που ήταν έξω από το έδαφος, θα βρει ξανά την σταθερότητα του

Συνοψίζοντας, μερικά από τα θετικά που θα επιφέρει η προστασία της παρόχθιας ζώνης του ποταμού Κοιλιάρη από την διάβρωση είναι τα εξής:

- ❖ Καλύτερες φυσικές συνθήκες στο ποτάμι
- ❖ Αποφυγή κινδύνων πλημμύρας και άρα φυσικών καταστροφών στην ευρύτερη περιοχή
- ❖ Αποφυγή της πτώσης των δέντρων μέσα στο ποτάμι, η οποία είχε σαν αποτέλεσμα τόσο την σταδιακή μείωση των δέντρων, όσο και την εμπόδιση της ροής του νερού
- ❖ Βελτίωση της ποιότητας του οικοσυστήματος το οποίο φιλοξενεί ποικίλα είδη χλωρίδας και πανίδας
- ❖ Αύξηση των αποδημητικών πουλιών που κάνουν στάση στον ποταμό κατά την πορεία τους.
- ❖ Αναβάθμιση της περιοχής η οποία αποτελεί χώρο έλξης τόσο για τους κατοίκους του χωριού όσο και για τους τουρίστες

Τέλος, αξίζει να αναφερθούν μερικές προτάσεις για την βελτίωση της λειτουργίας του μοντέλου:

- ❖ Μελέτη της επιρροής της φυτοκάλυψης στην ευστάθεια των πρανών για μεγαλύτερο αριθμό και είδος φυτών. Οι επιλογές που υπάρχουν καλύπτουν ένα ποσοστό ειδών, με αποτέλεσμα όταν εφαρμόζεται σε περιοχές που δεν χαρακτηρίζονται από την δοσμένη βάση δεδομένων, η εξαγωγή αποτελεσμάτων να περιέχει σφάλμα.
- ❖ Δυνατότητα εφαρμογής πολλών διαφορετικών κοκκομετρικών διαβαθμίσεων, στις περιπτώσεις που η όχθη αποτελείται από 2 και περισσότερα στρώματα εδάφους.
- ❖ Δυνατότητα εφαρμογής για ύψη ροής μεγαλύτερα από το ύψος της όχθης.
- ❖ Δυνατότητα εξαγωγής ποιοτικών αποτελεσμάτων για το σύνολο της όχθης και όχι μόνο για το ένα τμήμα αυτής (δεξιά όχθη).
- ❖ Προσθήκη και άλλων φυσικών παραμέτρων που επηρεάζουν την διάβρωση όπως ο άνεμος. Καθώς και προσθήκη της επίδρασης των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων που συμβάλλουν στο φαινόμενο

Βιβλιογραφία

- All Answers Ltd. (November 2017). A Review Of Literature Of Erosion. Retrieved from (<https://www.ukessays.com/essays/environmental-studies/a-review-of-literature-of-erosion.php?vref=1>)
- Allen H. H. and Fischenich C., 2001. Brush Mattresses for Streambank Erosion Control
- Crighton E.J., Elliott S.J., Upshur R., Van Der Merer J., Small I. The Aral Sea disaster and self-rated health. Health Place. 2003 June 9(2): 73-82
- Fredlund D.G., Morgenstern N.R., Widger R.A., 1978. The shear strength of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal

- Fu B., Chen L., Ma K., Zhou H., Wang J., 2000. The relationship between land use and soil conditions in the hilly area of the loess plateau in northern Shaanxi, China. CATENA Volume 39, Issue 1: p.69-78.
- Glantz, M. H. (ed.) (1999). Creeping Environmental Problems and Sustainable Development in the Aral Sea Basin. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hanson G.J., 1990. Surface erodibility of earthen channels at high stresses. Part II - Development of an in situ testing device. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 33 (1): 132-137
- Hanson G.J., Simon A. 2001. Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the midwestern USA. Hydrological Processes 15: 23-38
- Kazmeyer, Milton., 2017. "Effects of Soil Erosion on the Ecosystem." Sciencing
- Lal R., 1994. Soil erosion by wind and water: problems and prospects. In: Lal R (ed) Soil erosion research methods, 2nd edn. Soil and Water Conservation Society, St. Lucie Press, America pp 1–9
- Langendoen E.J., 2000. CONCEPTS-CONservation Channel Evolution and Pollutant Transport System. Research Report 16, US Department of Agriculture Agricultural Research Service National Sedimentation Laboratory, Oxford, MS
- Morgan R. P. C., 1986. Soil erosion and conservation. Davidson, Donald A. Publisher: Essex, New York: Wiley
- Morgenstern N.R., Price V.R., 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces. Geotechnique 15: 79-93
- O'Hara, S. L. (2000). Lessons from the Past: Water management in Central Asia, Water Policy, 2, 365–384.
- O'Hara, S. L. (2004). Central Asians Divided Over Use of Dwindling Water Supply. Local Governance Brief, Summer, 2004.
- Ontario Ministry of Agriculture – Food and Rural Affairs: Written by: OMAFRA Staff; G. Wall - Ontario Institute of Pedology; C.S. Baldwin - Ridgetown College of Agricultural Technology; I.J. Shelton - Ontario Institute of Pedology
- Pan, B., Yuan, J., Zhang, X., Wang, Z., Chen, J., Lu, J., Yang, W., Li, Z., Zhao, N., Xu, M., 2016. A review of ecological restoration techniques in fluvial river. International Journal of Sediment Research 31, 110-119
- Rella, A.J., Miller, J.K., 2012. "Engineered Approaches for Limiting Erosion along Sheltered Sholeries: A review of Existing methods
- Simon A., Bankhead N., Mahacek V., Langendoen E., 2008. Quantifying existing and potential reductions in sediment loads from streambanks. Environmental and Water Resources Institute World Congress Proceedings. Honolulu, HI
- Simon A., Curini A., 1998. Pore pressure and bank stability: The influence of matric suction, In Abt SR, Young- Pezeshk J, Watson CC (eds.), Water Resources Engineering '98, ASCE: Reston, 358-363
- Simon A., Curini A., Darby S.E., Langendoen E.J., 2000. Bank and nearbank processes in an incised channel Geomorphology 35: 183-217.

- Thorne C.R., Tovey N.K., 1981. Stability of composite river banks. *Earth Surface Processes and Landforms*, p. 469-484.
- Varouchakis, E.A., Giannakis, G.V., Lilli, M.A., Nikolaidis, N.P. and Karatzas, G.P., 2016. Development of a statistical tool for the estimation of riverbank erosion probability, *SOIL*, 2, 1–11.
- Yang, S., Lianyou, L., Ping, Y., Tong, C., 2015. A review of soil erodibility in water and wind erosion research, *Journal of Geographical Sciences* 15 (2), 167-176
- Wischmeier W.H., Smith, D.D., 1962. Soil loss estimation as a tool in soil and water management planning. *Int. Assoc. Scient. Hydr. Pub.* 59, p. 148–159
- Shi H. and Shao M., 1999. Soil and water loss from the Loess Plateau in China. *Journal of Arid Environments* (2000), 45: 9-20.

Ελληνική

- Μισοπολινός Ν.Δ., 1992. Γεωλογία-Πετρογραφία. Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη
- Μήτσιος Ι.Κ., Πασχαλίδης Χ.Δ., Παγανιάς Κ.Π., 1995. Διάβρωση των εδαφών, Αντιδιαβρωτικά μέτρα προστασίας. Εκδόσεις ΖΥΜΕΛ, Αθήνα
- Λιλλή Μ.Α., 2011. Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την εκτίμηση της διάβρωσης και αστοχίας του πρηνούς του ποταμού Κοιλιάρη
- Νικολαΐδης Ν.Π., Καρατζάς Γ., 2010. Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τις Λεκάνες Απορροής των Ποταμών Κερίτη-Θερίσου και Κοιλιάρη. Τεχνική Έκθεση. Χανιά
- Μουλόπουλος Χ., 1968. Ορεινή Υδρονομική. Θεσσαλονίκη
- Χατζηθεοχάρους Κ., 2005. Υδρογεωχημική μελέτη του ποταμού Κοιλιάρη. Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Καλλιάνης Γ., Χατζηθεοχάρους Κ., 2003. Υδρολογική ανάλυση λεκάνης απορροής ποταμού Κοιλιάρη-Εκτίμηση ρύπανσης από θρεπτικά, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Στουρνάρας Γ.Κ., Σταυροπούλου Μ.Χ., 2010. Τεχνική Γεωλογία, Εκδόσεις Τζιόλα