



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Προσδιορισμός διάβρωσης στα πρηνή ποταμού με τη χρήση
του μοντέλου της Λογιστικής Παλινδρόμησης»**



Φοιτήτρια: Ιωαννίδου Ελένη

Εξεταστική επιτροπή:

Καρατζάς Γεώργιος (Καθηγητής-Επιβλέπων)

Νικολαΐδης Νικόλαος (Καθηγητής)

Δρ. Βαρουχάκης Εμμανουήλ

Χανιά

Σεπτέμβριος, 2014

Αφιερωμένη στην οικογένειά μου.

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής διατριβής θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Γεώργιο Καρατζά για την εμπιστοσύνη και τη στήριξη που μου έδειξε σε όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων και κυρίως κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον καθηγητή Νικόλαο Νικολαΐδη για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφερε.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Δρ. Εμμανουήλ Βαρουχάκη για την αμέριστη στήριξη, υπομονή και διάθεση των ακαδημαϊκών του γνώσεων καθώς και για την πολύ καλή συνεργασία για την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας .

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πολύ καλό μου φίλο και υποψήφιο διδάκτωρ Ιωάννη Παλόγο για την πολύτιμη βοήθειά του σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάζεται η επίδραση μορφολογικών μεταβλητών στη διάβρωση της όχθης του Ποταμού Κουιάρη, στο νομό Χανίων, και στη σταθερότητα ή μη των πρανών του. Για το σκοπό αυτό αναπτύσσεται ένα στατιστικό μοντέλο που βασίζεται στη μεθοδολογία της Λογιστικής Παλινδρόμησης (Logistic Regression). Το μοντέλο αντλεί πληροφορία από τις τιμές των παραπάνω μεταβλητών που έχουν μετρηθεί σε συγκεκριμένα σημεία της όχθης και προσδιορίζει την πιθανότητας διάβρωσης σε επιλεγμένα σημεία ενδιαφέροντος. Αρχικά περιγράφεται το πρόβλημα το οποίο προσεγγίζει η παρούσα εργασία, και παρουσιάζονται οι στόχοι της εργασίας. Στη συνέχεια, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τη διάβρωση των εδαφών, τη διάβρωση στις όχθες ποταμών και την ευστάθεια των πρανών. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία περιγραφή της περιοχής μελέτης και περιλαμβάνει τα κλιματολογικά, γεωλογικά, υδρογεωλογικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του Ποταμού Κουιάρη. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των μεθοδολογιών που εφαρμόστηκαν. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται η μέθοδος της Λογιστικής Παλινδρόμησης, η οποία εκφράζει τη συσχέτιση μιας εξαρτημένης δυαδικής (0 και 1) μεταβλητής, η οποία ουσιαστικά εκφράζει την απουσία ή μη της διάβρωσης στο συγκεκριμένο πρόβλημα, με δύο ανεξάρτητες μεταβλητές που δύναται να επηρεάσουν την διάβρωση των πρανών, τη γωνία κλίσης των πρανών και το πλάτος της διατομής του ποταμού. Στόχος της μεθόδου είναι η ποσοτικοποίηση της πιθανότητας διάβρωσης των πρανών βάσει γεωμορφολογικών μεταβλητών που την επηρεάζουν. Στη συνέχεια περιγράφεται η μεθοδολογία της Τοπικά Σταθμισμένης Παλινδρόμησης η οποία συνδυάζεται με τη Λογιστική Παλινδρόμηση (Τοπικά Σταθμισμένη Λογιστική Παλινδρόμηση) για την εφαρμογή της μεθόδου λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική εξάρτηση των ανεξάρτητων μεταβλητών διερευνώντας τη βελτίωση των εκτιμήσεων. Περιγράφεται επίσης και η μεθοδολογία του "G. Statistic" η οποία είναι ένα μέτρο που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του μοντέλου καθώς και της σημαντικότητας των ανεξάρτητων μεταβλητών που εξετάζονται.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν βάσει της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε με σκοπό τον προσδιορισμό της πιθανότητας διάβρωσης και της αστοχίας των πρανών, στις όχθες του ποταμού Κοιλιάρη καθώς και η ανταπόκριση των μορφολογικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση του προβλήματος. Τα αποτελέσματα της Λογιστικής Παλινδρόμησης έδειξαν ότι από τα οχτώ σημεία που επιλέχθηκαν στο πεδίο ως σημεία επιβεβαίωσης του μοντέλου υπάρχει απόκλιση μόνο σε δύο σημεία. Προκειμένου να βελτιωθούν τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων χρησιμοποιήθηκε η Λογιστική Παλινδρόμηση σε συνδυασμό με την Τοπικά Σταθμισμένη Παλινδρόμηση εξετάζοντας δύο συναρτήσεις αντιστάθμισης, την εκθετική και την τρικυβική συνάρτηση για τον προσδιορισμό τοπικών εξαρτήσεων των ανεξάρτητων μεταβλητών. Η εκθετική συνάρτηση έδωσε παρόμοια αποτελέσματα με αυτά της απλής Λογιστικής Παλινδρόμησης, όμως με την εφαρμογή της τρικυβικής συνάρτησης υπήρξε αξιοσημείωτη βελτίωση των προβλέψεων καθώς επικυρώθηκε η απουσία ή ύπαρξη διάβρωσης σε όλες τις μετρημένες θέσεις. Επίσης από την εφαρμογή του "G. Statistic" παρατηρήθηκε ότι για τη μέθοδο της Λογιστικής Παλινδρόμησης πιο σημαντική παράμετρος μπορεί να χαρακτηριστεί η ανεξάρτητη μεταβλητή του πλάτους της διατομής σε σχέση με τη γωνία κλίσης. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα του συγκεκριμένου θέματος.

Abstract

Riverbank erosion affects the river morphology and the local habitat and results in riparian land loss, damage to property and infrastructures, and ultimately weakening flood defences. An important issue concerning riverbank erosion is the identification of the areas vulnerable to erosion, which is related to stream management and restoration. One way to predict the erosion vulnerable areas is to determine the erosion probability by identifying the underlying relations between riverbank erosion and the geomorphological and/or hydrological variables that prevent or enhance erosion. In this work, a statistical model for evaluating the probability of erosion based on a series of independent local variables and by using logistic regression is developed. The main variables affecting erosion are vegetation index (stability), presence or absence of meanders, bank material (classification), stream power, bank height, river bank slope, riverbed slope, cross section width and water velocities.

In statistics, logistic regression is a type of regression analysis used for predicting the outcome of a categorical dependent variable, e.g. binary response, based on one or more predictor variables (continuous or categorical). The probabilities of the possible outcomes are modelled as a function of independent variables using a logistic function. Logistic regression measures the relationship between a categorical dependent variable and, usually, one or several continuous independent variables by converting the dependent variable to probability scores. Then, a logistic regression is formed, which predicts success or failure of a given binary variable (e.g. 1 = “presence of erosion” and 0 = “no erosion”) for any value of the independent variables. The regression coefficients are estimated by using maximum likelihood estimation. The erosion occurrence probability can be calculated in conjunction with the model deviance regarding the independent variables tested.

The developed statistical model is applied to the Koiliaris River Basin on the island of Crete, Greece. The aim is to determine the probability of erosion along the Koiliaris’ riverbanks considering a series of independent geomorphological and/or hydrological variables. Data for the river bank slope and for the river cross section width are available at 12 locations along the river. The riverbank has indications of erosion at 8 of the 12 locations while 4 have remained stable. Based on a recent

work, measurements for the two independent variables and data regarding bank stability are available at eight different locations along the river. These locations were used as validation points for the proposed statistical model. The results show a very close agreement between the observed erosion indications and the statistical model as the probability of erosion was accurately predicted at 6 out of the 8 locations. Next, in order to improve the model's predictions a combination of the logistic regression methodology with the locally weighted regression method was applied to examine the local spatial dependence of the independent variables at the measured locations. Two spatial dependence functions were examined, the exponential and the tricubic. The results show a significant improvement when the tricubic function was applied as the probability of erosion was accurately predicted at all (8) validation locations. The model both in its simple and composite form also is applied to predict the erosion probability at unmeasured riverbank locations where information of the independent variables is available comparing the prediction results. This statistical model is a useful tool that provides a quantified measure of the erosion probability along the riverbanks and it could be used to assist managing erosion and flooding events.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract	5
Περιεχόμενα χαρτών	8
Περιεχόμενα πινάκων	9
Περιεχόμενα διαγραμμάτων.....	10
Περιεχόμενα εικόνων.....	10
Περιγραφή του προβλήματος.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-Βιβλιογραφική ανασκόπηση	12
1. Διάβρωση	12
1.2. Τύποι διάβρωσης	13
1.3. Αιτίες της διάβρωσης	16
1.4. Διάβρωση στις όχθες.....	18
1.4.1. Προσδιορισμός των παραγόντων που επηρεάζουν το ρυθμό και την κατανομή της διάβρωσης της όχθης.....	18
1.5. Ευστάθεια πρανών	19
1.5.1. Σταθεροποίηση πλαγιάς	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Περιοχή μελέτης: Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη	21
2.1 Γεωγραφική θέση και διοικητική υπαγωγή	21
2.2 Μορφολογικά χαρακτηριστικά	23
2.3 Γεωλογικές συνθήκες	24
2.4 Υδρογεωλογία	25
Χάρτης 6. Υπόγειοι υδροφορείς περιοχής λεκάνης απορροής του Κοιλιάρη και η ροή των υπόγειων υδάτων (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)	26
2.5 Κλιματικά χαρακτηριστικά	27
2.6 Χρήσεις Γης.....	29
2.7 Περιβαλλοντικές πιέσεις	30
2.8 Χημική Κατάσταση	31
2.9 Οικολογική Κατάσταση	35
2.10 Υδρολογία.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Διαθεσίμη πληροφορία και περιγραφή μεθοδολογίας.....	39
3.1. Μοντέλο BSTEM-Προσομοίωση της διάβρωσης και της αστοχίας του πρανούς του ποταμού Κοιλιάρη	39
3.2. Ανάλυση λογιστικής παλινδρόμησης.....	41
3.2.1. Μετασχηματισμός Logit	44

3.3. Υπολογισμός της απόκλισης (G. Statistic)	47
3.4. Μέθοδος Τοπικά Σταθμισμένης Παλινδρόμησης	48
3.4.1. Μέτρα απόστασης.....	50
3.4.2. Συναρτήσεις αντιστάθμισης.....	51
3.4.3. Πρότυπα Συναρτήσεων Αντιστάθμισης	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Αποτελέσματα	58
4.1. Αποτελέσματα μοντέλου της λογιστικής παλινδρόμησης και σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου BSTEM.....	58
4.1.1 Παραλλαγές του μοντέλου λογιστικής παλινδρόμησης	63
4.2. Αποτελέσματα της διάβρωσης με τη χρήση των τοπικά σταθμισμένων συναρτήσεων	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- Συμπεράσματα	73
Βιβλιογραφία	76

Περιεχόμενα χαρτών

Χάρτης 1. Δήμοι στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Χατζηθεοχάρους, 2005)....	22
Χάρτης 2. Χωρική απεικόνιση των οικισμών και το οδικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του Κοιλιάρη (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)	22
Χάρτης 3. Τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)	23
Χάρτης 4. Τοπογραφικές κλίσεις της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Χατζηθεοχάρους, 2005)	23
Χάρτης 5. Γεωλογικοί σχηματισμοί της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)	25
Χάρτης 6. Υπόγειοι υδροφορείς περιοχής λεκάνης απορροής του Κοιλιάρη και η ροή των υπόγειων υδάτων (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)	26
Χάρτης 7. Χρήσεις γης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Χατζηθεοχάρους, 2005).....	29

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1.Βροχομετρικά δεδομένα της περιοχής του Ποταμού Κουλιάρη	37
Πίνακας 2.Ποσοτικά αποτελέσματα αστοχίας (Λιλλή, 2011)	40
Πίνακας 3.Δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο της Λογιστικής Παλινδρόμησης.....	60
Πίνακας 4.Μεταβλητές εισόδου	61
Πίνακας 5.Αποτελέσματα πιθανότητας διάβρωσης σύμφωνα με το μοντέλο της Λογιστικής Παλινδρόμησης και αστοχίας ή μη της όχθης σύμφωνα με το μοντέλο BSTEM, Fs.	62
Πίνακας 6.Δεδομένα εισαγωγής στον κώδικα της Λογιστικής Παλινδρόμησης	64
Πίνακας 7.Παράμετροι μοντέλου Λογιστικής Παλινδρόμησης και υπολογισμός απόκλισης αποτελεσμάτων D "G. Statistic" στην περίπτωση όπου λαμβάνεται υπόψη μόνο η αποτέμνουσα	65
Πίνακας 8.Παράμετροι μοντέλου Λογιστικής Παλινδρόμησης και υπολογισμός απόκλισης αποτελεσμάτων D "G. Statistic" στην περίπτωση όπου λαμβάνονται υπόψη η αποτέμνουσα, η γωνία κλίσης και το πλάτος της διατομής	65
Πίνακας 9.Παράμετροι μοντέλου Λογιστικής Παλινδρόμησης και υπολογισμός απόκλισης αποτελεσμάτων D "G. Statistic" στην περίπτωση όπου λαμβάνονται υπόψη η αποτέμνουσα και η γωνία κλίσης.....	66
Πίνακας 10.Παράμετροι μοντέλου Λογιστικής Παλινδρόμησης και υπολογισμός απόκλισης αποτελεσμάτων D "G. Statistic" στην περίπτωση όπου λαμβάνονται υπόψη η αποτέμνουσα και το πλάτος της διατομής.....	66
Πίνακας 11.Παράμετροι μοντέλου Λογιστικής Παλινδρόμησης και υπολογισμός απόκλισης αποτελεσμάτων D "G. Statistic" στην περίπτωση όπου λαμβάνεται υπόψη μόνο η γωνία κλίσης	66
Πίνακας 12.Παράμετροι μοντέλου Λογιστικής Παλινδρόμησης και υπολογισμός απόκλισης αποτελεσμάτων D "G. Statistic" στην περίπτωση όπου λαμβάνεται υπόψη μόνο το πλάτος της διατομής.....	67
Πίνακας 13.Παράμετροι μοντέλου Λογιστικής Παλινδρόμησης και υπολογισμός απόκλισης D "G. Statistic" στην περίπτωση όπου λαμβάνονται υπόψη η γωνία κλίσης και το πλάτος της διατομής.....	67
Πίνακας 14.Αποτελέσματα της πιθανότητας διάβρωσης σύμφωνα με την εκθετική συνάρτηση.....	68
Πίνακας 15.Αποτελέσματα της πιθανότητας διάβρωσης σύμφωνα με την τρι-κυβική συνάρτηση.....	69
Πίνακας 16.Αποτελέσματα της πιθανότητας διάβρωσης και του G. Statistic για την εκθετική συνάρτηση.....	69
Πίνακας 17.Αποτελέσματα της πιθανότητας διάβρωσης και του G. Statistic για την τρι-κυβική συνάρτηση.....	70

Περιεχόμενα διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Μέγιστες, Μέσες και Ελάχιστες τιμές της θερμοκρασίας (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)	28
Διάγραμμα 2. Μέσες τιμές βροχόπτωσης (1958-1997) (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010) ...	28
Διάγραμμα 3. Μέσες τιμές βροχόπτωσης το 2007 (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).....	28
Διάγραμμα 4. Μεταβολή του pH του νερού του ποταμού Κοιλιάρη στις δειγματοληψίες στην κοίτη και στη γέφυρα (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)	31
Διάγραμμα 5. Μεταβολή θερμοκρασίας στον ποταμό Κοιλιάρη (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).....	32
Διάγραμμα 6. Μεταβολή της αγωγιμότητας του νερού του ποταμού Κοιλιάρη στις δειγματοληψίες στην κοίτη και στη γέφυρα (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)	32
Διάγραμμα 7. Μεταβολή της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίων του νερού του ποταμού Κοιλιάρη στις δειγματοληψίες στην κοίτη και στη γέφυρα (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)	33
Διάγραμμα 8. Μεταβολή της συγκέντρωσης PO ₃ -P του νερού του ποταμού Κοιλιάρη (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)	33
Διάγραμμα 9. Ημερήσιο υδρογράφημα του ποταμού Κοιλιάρη (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).....	36
Διάγραμμα 10. Γραφική απεικόνιση του μοντέλου της Λογιστικής Παλινδρόμησης	65
Διάγραμμα 11. Γραφική απεικόνιση του μοντέλου της Λογιστικής Παλινδρόμησης	67
Διάγραμμα 12. Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της εκθετικής συνάρτησης	70
Διάγραμμα 13. Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της τρι-κυβικής συνάρτησης	71

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1. Επιφανειακή διάβρωση εδάφους	14
Εικόνα 2. Αυλακωτή διάβρωση εδάφους	14
Εικόνα 3. Χαραδρωτική διάβρωση εδάφους	15
Εικόνα 4. Υπόγεια διάβρωση εδάφους	16
Εικόνα 5. Πιθανότητα ενός γεγονότος συναρτήσει των ανεξάρτητων μεταβλητών σύμφωνα με το μοντέλο της λογιστικής παλινδρόμησης (Hosmer and Lemeshow, 2014; Atkinson et al., 2003; Menard, 2001)	42
Εικόνα 6. Αλγόριθμος της Λογιστικής Παλινδρόμησης	46
Εικόνα 7. Αλγόριθμος της Τοπικά Σταθμισμένης Λογιστικής Παλινδρόμησης	55
Εικόνα 8. Αλγόριθμος της χαρτογράφησης της Τοπικά Σταθμισμένης Λογιστικής Παλινδρόμησης	57
Εικόνα 9. Το υπό μελέτη μέρος του ποταμού Κοιλιάρη. Τα κίτρινα σημεία αντιπροσωπεύουν τις μετρούμενες θέσεις, ενώ τα κόκκινα σημεία τις θέσεις επιβεβαίωσης	59

Περιγραφή του προβλήματος

Η προστασία των εδαφών από τη διάβρωση αποκτά ιδιαίτερη σημασία με το πέρασμα των χρόνων γιατί επιδρά αρνητικά στο φυσικό περιβάλλον. Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά τη διάβρωση στα πρηνή των ποταμών και πιο συγκεκριμένα επικεντρώνεται στον υπολογισμό της πιθανότητας διάβρωσης στην όχθη του ποταμού Κουλιάρη. Οι κύριες μεταβλητές που επηρεάζουν τη διάβρωση των όχθων είναι η παρουσία μαϊάνδρων, η υπάρχουσα βλάστηση, το εδαφικό υλικό της όχθης, το ύψος της και η κλίση της όχθης. Επίσης ως κύριες μεταβλητές θεωρούνται το πλάτος της διατομής του ποταμού καθώς επίσης και η κινητικότητα του καναλιού. Οι συνέπειες που προκύπτουν από αυτό το φαινόμενο είναι η απώλεια της γόνιμης φυτικής γης που έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του εδάφους. Ακόμη, προκαλεί μεταβολές στη μορφολογία της περιοχής και διαταράσσει τη βιολογική ισορροπία του οικοσυστήματος. Τέλος, μπορεί να έχει καταστροφικά αποτελέσματα στα αντιπλημμυρικά έργα της περιοχής, με άμεσο αντίκτυπο στις καλλιέργειες των κατοίκων. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση του προβλήματος, είναι η μέθοδος της Λογιστικής Παλινδρόμησης. Ο λόγος για τον οποίο επιλέγεται η συγκεκριμένη μέθοδος είναι διότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία της Λογιστικής Παλινδρόμησης συνδέει παραμέτρους που σχετίζονται με την διάβρωση, όπως είναι η κλίση των πρηνών και το πλάτος της διατομής μετατρέποντας τη συσχέτιση αυτή σε πιθανότητα διάβρωσης. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων διαφέρουν για κάθε θέση. Ένας διαφορετικός τρόπος προσέγγισης του προβλήματος θα ήταν μέσω υδραυλικής μελέτης. Όμως μια υδραυλική μελέτη, σε σύγκριση με ένα στατιστικό στοχαστικό μοντέλο, αναλύει κατά πόσο η παροχή που διοχετεύεται στην κοίτη του ποταμού, με βάση τη διατομή του, μπορεί να προκαλέσει διάβρωση. Επίσης απαιτεί περισσότερες παραμέτρους υπολογισμού, όπως προσδιορισμό της παροχής, τη μέτρηση της διατομής, τη μέτρηση της κλίσης των πρηνών και την κλίση του αγωγού, τον προσδιορισμό της διατμητικής τάσης και της υδραυλικής αγωγιμότητας. Αυτό που επιτυγχάνεται με τη χρήση του μοντέλου της Λογιστικής Παλινδρόμησης είναι η προσέγγιση του προβλήματος με έναν εναλλακτικό τρόπο που βασίζεται στη συσχέτιση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη διάβρωση με την πιθανότητα διάβρωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-Βιβλιογραφική ανασκόπηση

1. Διάβρωση

Με τον όρο διάβρωση εννοούμε την προοδευτική αποσύνθεση των υλικών των εδαφών με την πάροδο του χρόνου υπό την επίδραση παραγόντων του περιβάλλοντος, όπως ο άνεμος, το νερό, ο πάγος οι ζωντανοί οργανισμοί (βιοδιάβρωση), αλλά και διάβρωση εξαιτίας χημικών αντιδράσεων (Parazoglou, 2014).

Η διάβρωση, ως γεωλογικό φαινόμενο, είναι μια φυσική διαδικασία που όμως μπορεί να επιταχυνθεί από τον άνθρωπο λόγω δυσμενών τεχνικών χρήσεων της γης. Η διάβρωση λόγω της ανθρωπογενούς δραστηριότητας, χαρακτηρίζεται ως «επιταχυνόμενη διάβρωση». Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να εξεταστεί το ποσοστό στο οποίο εμφανίζεται η διάβρωση του εδάφους, ειδικά σε σύγκριση με τις καιρικές συνθήκες και τα ποσοστά διεύδυσης του εδάφους. Είναι σαφές ότι σε πολλά σημεία, τα ποσοστά διάβρωσης του εδάφους είναι υψηλότερα από τα ποσοστά καιρικών συνθηκών και με την πάροδο του χρόνου ένα μεγάλο ποσό του εδάφους θα χαθεί (Rens Van Beek et al., 2008).

Η περιοχή της Μεσογείου είναι μία από τις περιοχές στις οποίες το φαινόμενο της διάβρωσης είναι αρκετά έντονο, φτάνοντας σε μη αναστρέψιμα επίπεδα υποβάθμισης του εδάφους. Η απώλεια της γόνιμης φυτικής γης από τη διάβρωση οδηγεί σε επιδείνωση της ποιότητας του εδάφους. Αυτό έχει μια σημαντική επίδραση στην παραγωγή βιομάζας, η οποία θα οδηγήσει σε απώλεια της φυτικής παραγωγής (Rens Van Beek et al., 2008). Τουλάχιστον το 75% των καλλιεργούμενων εδαφών παγκοσμίως έχουν υποβαθμιστεί ή επηρεαστεί από τη διεργασία της διάβρωσης. Το μεγαλύτερο ποσοστό σήμερα εμφανίζεται στις γεωργικές και στις εκχερσωμένες περιοχές. Στις περιπτώσεις εμφάνισης φαινομένων διάβρωσης, μπορεί να προκληθούν πλημμύρες και ζημιές εκτός του πεδίου εμφάνισης του φαινομένου, όπως σε κατώτερες πεδινές περιοχές (Imeson and Curfs, 2014).

1.2. Τύποι διάβρωσης

Η διάκριση που μπορεί να γίνει όσον αφορά τα είδη των διεργασιών διάβρωσης είναι η **αιολική** και η **υδατική διάβρωση**. Υπάρχει επίσης η διάβρωση που προκαλείται από τα ζώα και τις ανθρώπινες δραστηριότητες χρήσης της γης, οι οποίες χαρακτηρίζονται, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω ως μορφές επιταχυνόμενης διάβρωσης (Imeson and Curfs, 2014).

Η **αιολική διάβρωση** αφορά την πίεση που ασκείται στο έδαφος λόγω της ταχύτητας του ανέμου, με αποτέλεσμα την απόσπαση τεμαχίων συγκεκριμένου μεγέθους (χονδρόκοκκη ιλύς και άμμος). Όταν αυτά τα τεμάχια δε συγκρατούνται ισχυρά με την παρουσία οργανικής ουσίας των ριζών ή της αργίλου, διαβρώνονται εύκολα (Imeson and Curfs, 2014).

Η **υδατική διάβρωση** είναι η κύρια αιτία καταστροφής της γεωργικής γης και πιο συχνή στις Μεσογειακές συνθήκες. Είναι πιο επιβλαβής τύπος διάβρωσης σε σύγκριση με την αιολική διάβρωση, λόγω του εύρους της περιοχής στην οποία επιδρά (Imeson and Curfs, 2014). Είναι ένα αυξανόμενο πρόβλημα που επηρεάζει όλες τις Ευρωπαϊκές χώρες (Rens Van Beek et al., 2008). Οι πιο συνηθισμένοι τύποι υδατικής διάβρωσης είναι (Imeson and Curfs, 2014):

- Η **διάβρωση διασποράς**, είναι η αποκόλληση και η απομάκρυνση με εκτόξευση μικρών εδαφικών τεμαχιδίων που προκαλείται από την πτώση των σταγόνων της βροχής στο έδαφος.
- Η **επιφανειακή διάβρωση ή διάβρωση κατά στρώσεις**, είναι η αφαίρεση ενός σχετικά ομοιόμορφου στρώματος εδάφους εξαιτίας των βροχοπτώσεων και της επιφανειακής απορροής.



Εικόνα 1. Επιφανειακή διάβρωση εδάφους

- Η **αυλακωτή διάβρωση**, είναι μια διεργασία διάβρωσης σε επικλινείς περιοχές, στις οποίες σχηματίζονται συνήθως μερικών εκατοστών αυλάκια, κυρίως στα πρόσφατα καλλιεργημένα εδάφη.



Εικόνα 2. Αυλακωτή διάβρωση εδάφους

- **Η χαραδρωτική διάβρωση,** είναι μια διεργασία διάβρωσης κατά την οποία το νερό συγκεντρώνεται σε χαράδρες, απομακρύνοντας το έδαφος σε σύντομο χρονικό διάστημα. Το βάθος μιας τυπικής χαραδρωτικής διάβρωσης μπορεί να φτάσει μέχρι τα 30 μέτρα. Οι χαράδρες συχνά συγκεντρώνουν το νερό αποστράγγισης από τις γειτονικές περιοχές, γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα ασταθείς.



Εικόνα 3. Χαραδρωτική διάβρωση εδάφους

- **Η υπόγεια διάβρωση,** εμφανίζεται σε εδάφη που είναι επιρρεπή στη δημιουργία υπόγειων διόδων νερού. Τα εδάφη αυτά είναι συνήθως πλούσια σε άργιλο, τα οποία συστέλλονται όταν ξηραίνονται και διαστέλλονται όταν υγραίνονται, ή στρώσεις με έδαφος το οποίο υφίσταται διασπορά στο νερό κατά τη διάρκεια των βροχοπτώσεων.



Εικόνα 4. Υπόγεια διάβρωση εδάφους

1.3. Αιτίες της διάβρωσης

Η διάβρωση του εδάφους από τον άνεμο ή κυρίως από το νερό είναι ένα φυσικό φαινόμενο που είναι σε ισορροπία με το τοπίο και τη δυναμική των οικοσυστημάτων. Η Ανθρώπινη ανάπτυξη διαταράσσει αυτή την ισορροπία αυξάνοντας συνήθως το βαθμό της διαδικασίας (Rens Van Beek et al., 2008).

Το μέγεθος της διάβρωσης του εδάφους εξαρτάται από:

- **Κλίμα**, κυρίως λόγω των χαρακτηριστικών των βροχοπτώσεων (ένταση, ύψος, κλπ). Υψηλής έντασης βροχοπτώσεις σε συνδυασμό με σπάνια ή απύουσα κάλυψη βλάστησης, αυξάνει τον αντίκτυπο της διάβρωσης.
- **Αρχικές συνθήκες υγρασίας του εδάφους της φυτικής γης**. Όταν η φυτική γη είναι (σχεδόν) κορεσμένη, η επιφανειακή απορροή μπορεί να εντείνει το αποτέλεσμα των διεργασιών διάβρωσης.
- **Τύπος του εδάφους**, του οποίου τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά καθορίζουν την αντοχή στη διάβρωση.
- **Απορροή και η ενέργειά της**, είναι υπεύθυνη για την απομάκρυνση και τη μεταφορά σωματιδίων του εδάφους εφόσον προηγουμένως έχουν αποσπαστεί από την καταστροφή των αδρανών του εδάφους που προκαλούνται από την επίδραση της βροχής.

- **Μορφολογία πρηνών, η κλίση και το μήκος.** Πιο απότομη ή μεγαλύτερη πλαγιά, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια της απορροής και τις δυνατότητές του από την αφαίρεση του εδάφους, την αύξηση του δυναμικού της διάβρωσης.
- **Ανθρώπινη δράση, μέσω αλλαγών στην κάλυψη της βλάστησης** και των γεωργικών πρακτικών (πρακτικές της αποψίλωσης των δασών, ακατάλληλη προετοιμασία και διαχείριση της γης, κλπ) ή την άμεση δράση στο έδαφος (συμπίεση από τα βαρέα μηχανήματα, υποδομές, κλπ), είναι οι κύριες αιτίες της υποβάθμισης του εδάφους και αύξησης της διάβρωσης .
- **Η έλλειψη της αμειψισποράς,** που σημαίνει εναλλαγή καλλιεργειών στο ίδιο χωράφι, που οδηγεί σε απώλεια της ποιότητας του εδάφους.
- **Υπερβόσκηση και συνωστισμός από τα ζώα** μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την φυτοκάλυψη και να αυξήσει τα ποσοστά διάβρωσης του εδάφους.
- **Δασικές πυρκαγιές** μειώνουν επίσης την κάλυψη της βλάστησης και η απομάκρυνση των καμένων ξύλινων στελεχών οδηγεί σε αύξηση της διάβρωσης του εδάφους (Rens Van Beek et al., 2008).

1.4. Διάβρωση στις όχθες

Η διάβρωση στις όχθες ποταμών ή λιμνών είναι ένα σύνηθες φαινόμενο. Η πρόβλεψη της θέσης και η έκταση της διάβρωσης της όχθης του ποταμού εξακολουθεί να είναι δύσκολη, παρά τις δοκιμές από μια σειρά προσεγγίσεων και μεθόδων. Μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση είναι αυτή που περιγράφεται από τον Graf (1984), ο οποίος ανέπτυξε μια μέθοδο για την εκτίμηση του κινδύνου διάβρωσης με βάση τη χωρική θέση των περιοχών πλημμυρών σε σχέση με το κανάλι του ποταμού και το άθροισμα των περιόδων επιστροφής πλημμύρας για κάθε ετήσια πλημμύρα που συμβαίνει μέσα σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα (Winderbotton and Gilvear, 2000).

1.4.1. Προσδιορισμός των παραγόντων που επηρεάζουν το ρυθμό και την κατανομή της διάβρωσης της όχθης

Μια σειρά από χαρακτηριστικά στις όχθες των ποταμών ή των παραγόντων που μπορεί να έχουν επίδραση στη διάβρωση της όχθης είναι οι εξής (Winderbotton and Gilvear, 2000) :

- Το ύψος της όχθης, όπως ορίζεται από τη διαφορά ύψους μεταξύ της κορυφής της όχθης και το επίπεδο του νερού σε χαμηλή ροή
- το ύψος των χαμηλότερων σημείων της όχθης
- η κλίση της όχθης του ποταμού (σε μοίρες από το οριζόντιο επίπεδο),
- ο τύπος των φερτών υλικών και η δομή τους στην όχθη του ποταμού
- η βλάστηση στην όχθη του ποταμού
- η κλίση του καναλιού
- παρουσία των παρακείμενων αναχωμάτων δίπλα στην όχθη του ποταμού
- η κινητικότητα των καναλιών περιορίζεται από βραχώδες υπόστρωμα
- η παρουσία μαιάνδρων
- το εδαφικό υλικό της όχθης
- το πλάτος της διατομής του καναλιού
- η ροή του ρεύματος και η ταχύτητα ροής του νερού
- η παροχή του ποταμού

Σύμφωνα με το μοντέλο Graf (1994), υπάρχει ένας νέος, πιο σημαντικός παράγοντας σχετικά με την πιθανότητα διάβρωσης όχθης και είναι η σύνθεση της όχθης. Πιο συγκεκριμένα, όχθες με εσωτερική στρωμάτωση συνεκτικών και μη συνεκτικών ιζημάτων έχουν υποστεί τη μεγαλύτερη διάβρωση, ενώ εκείνες που αποτελούνται εξ ολοκλήρου από μη συνεκτικά χαλίκια έχουν επίσης αρκετά υψηλά ποσοστά διάβρωσης. Σε αντίθεση, η διάβρωση των όχθων που αποτελούνται από συνεκτική με απανωτές στρώσεις ιλύς είναι γενικά πολύ χαμηλή (Winderbotten and Gilvear, 2000).

1.5. Ευστάθεια πρανών

Γενικά, ως πρανή ορίζονται οι κεκλιμένοι φυσικοί ή τεχνητοί σχηματισμοί εδάφους ή βράχων. Σε κάθε πρανές η διαφορά στάθμης και η κλίσεις που το χαρακτηρίζουν δημιουργούν δυνάμεις βαρύτητας οι οποίες, σε συνδυασμό με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται από την παρουσία νερού στο έδαφος δημιουργούν διατμητικές τάσεις στο εσωτερικό του πρανούς. Στις διατμητικές αυτές τάσεις, οι οποίες τείνουν να μετακινήσουν τη μάζα του πρανούς έτσι ώστε να εξομαλυνθεί το έδαφος, αντιτίθεται η διατμητική αντοχή του εδάφους, και στην περίπτωση που αυτές την υπερβούν, τότε οδηγούν σε θραύση του πρανούς (Λιλλή, 2011).

Είναι επιτακτική η ανάγκη να δοθεί η δέουσα προσοχή στην ευστάθεια των πρανών πριν από οποιαδήποτε δραστηριότητα ή ανάπτυξη ενός τεχνικού έργου. Η ευστάθεια των πρανών εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ των κινητήριων δυνάμεων και των δυνάμεων αποκατάστασης που δρουν σε μια δυνητικά ασταθή μάζα του εδάφους. Οι κινητήριες δυνάμεις ενεργώντας σε υλικό πλαγιάς, συμπεριλαμβανομένης και της βαρύτητας, οδηγεί σε μια τάση διάτμησης, τ , που πρέπει να αντιμετωπισθεί με τη διαθέσιμη διατμητική αντοχή. Η έννοια αυτή αποτελεί τη βάση του συντελεστή ασφαλείας, FOS, που ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης διαθέσιμης αντοχής διατμήσεως πάνω από την τάση διάτμησης. Εάν αυτός ο λόγος είναι μεγαλύτερος της μονάδας, η κλίση μπορεί να θεωρηθεί σταθερή (Rens Van Beek et al., 2008). Ο συντελεστής ασφαλείας αντιπροσωπεύει μόνο μια εκτίμηση βασισμένη στην καλύτερη επιλογή της εισαγωγής δεδομένων από τον

μηχανικό για τους υπολογισμούς. Οι σημαντικές συνεισφορές στην αβεβαιότητα της ευστάθειας προέρχονται από την αβεβαιότητα σχετικά με μελλοντικά γεγονότα ή φορτία, την αβεβαιότητα σχετικά με τις ιδιότητες των υλικών, και την αβεβαιότητα σχετικά με τα αναλυτικά μοντέλα (Wu, 1995).

1.5.1. Σταθεροποίηση πλαγιάς

Η βλάστηση έχει χρησιμοποιηθεί για τη σταθεροποίηση των πρανών, καθώς οι ρίζες των δέντρων χρησιμεύουν ως ενίσχυση του εδάφους και αυξάνουν την αντίσταση, κάτω από ορισμένες συνθήκες. Η επιλογή της βλάστησης δεν βασίζεται πάντοτε αποκλειστικά στην ευστάθεια των πρανών και στην επιβίωση των φυτών, αλλά συχνά απαιτείται και η εξέταση της οικολογίας της εκάστοτε περιοχής (Wu, 1995). Όμως η βλάστηση πολλές φορές από μόνη της δεν μπορεί να ελέγξει τη διάβρωση που προκαλείται από το νερό (Morgan and Rickson, 1995).

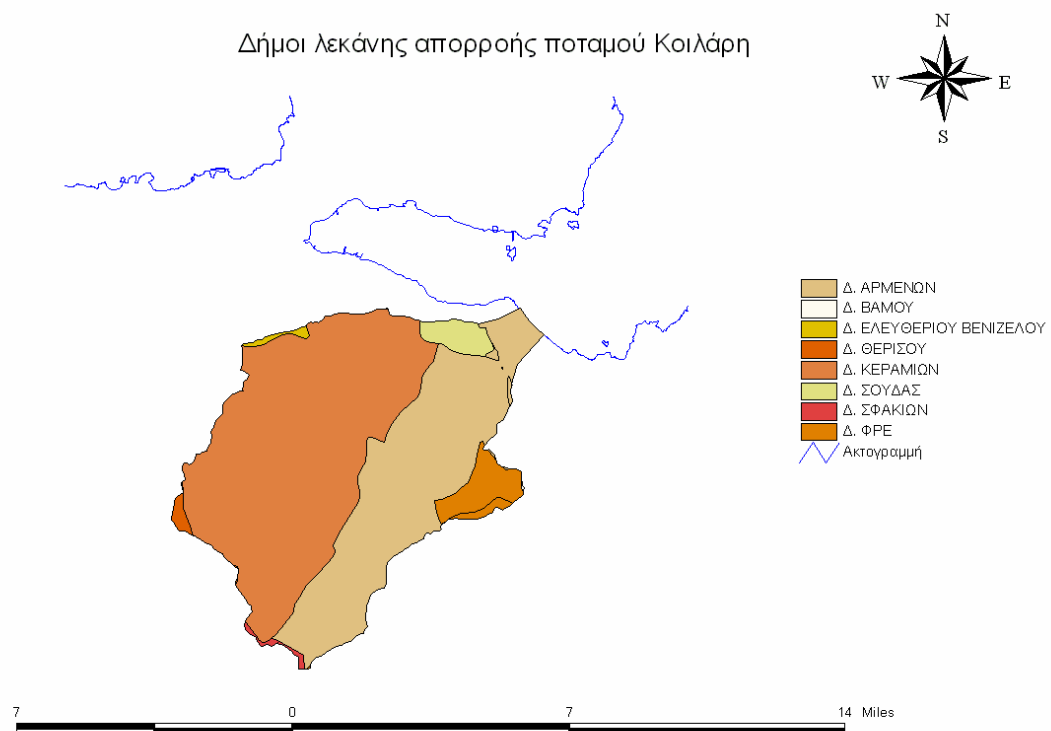
Όμως αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι οι αποτυχίες των πρανών μπορούν να αποδοθούν στην απώλεια των ριζών των δέντρων ως ενίσχυση του χώματος, καθώς η βλάστηση μειώνει την περιεκτικότητα σε νερό και αυξάνει την αναρρόφηση της υγρασίας του εδάφους (Wu, 1995). Για το λόγο αυτό η σταθεροποίηση των πρανών με βλάστηση απαιτεί συνετή επιλογή του είδους της βλάστησης. Για τη σταθερότητα, τα είδη θα πρέπει να έχουν ριζικό σύστημα που εκτείνεται σε αρκετό βάθος. Σε υγρές περιοχές τα φυτά με υψηλή διαπνοή θα μειώσουν την υγρασία του εδάφους και την πίεση των πόρων (Wu, 1995).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Περιοχή μελέτης: Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κουλιάρη

2.1 Γεωγραφική θέση και διοικητική υπαγωγή

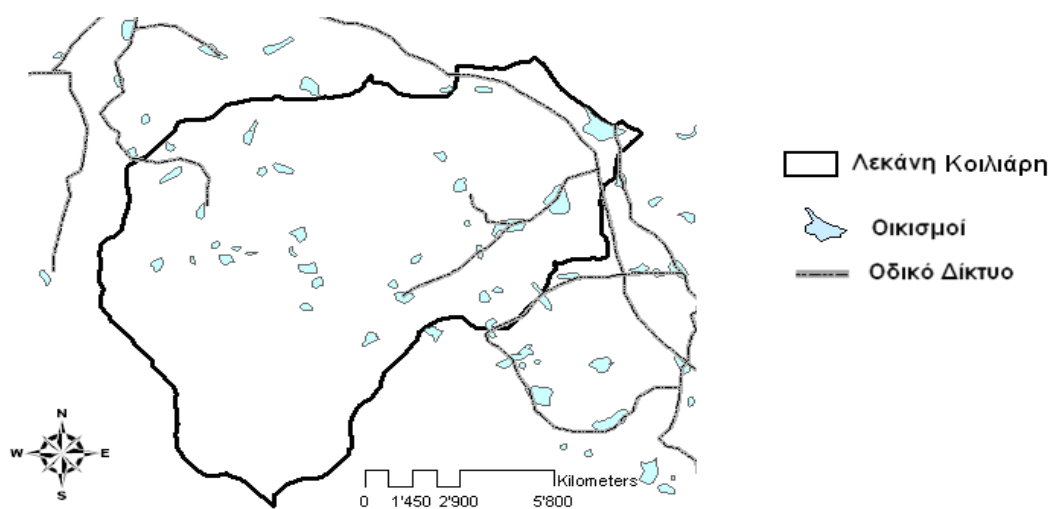
Η Υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κουλιάρη βρίσκεται 15 km ανατολικά της πόλης των Χανίων και υπάγεται στον Νομό Χανίων. Το μεγαλύτερο κομμάτι της λεκάνης ανήκει στο Δήμο Αρμένων και στο Δήμο Κεραμίων, αλλά συνολικά σε όλη της την έκταση περιλαμβάνει 17 κοινότητες εκ των οποίων οι 8 είναι πεδινές, 2 ημιορεινές και 7 ορεινές. Εκτείνεται από τους πρόποδες των Λευκών Όρεων μέχρι την παράκτια ζώνη του Δήμου Αρμένων και το τελευταίο χωριό που περιλαμβάνεται στη λεκάνη, το οποίο βρίσκεται στο μεγαλύτερο υψόμετρο, είναι οι Καρές. Το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου του ποταμού Κουλιάρη είναι 36km και η έκταση της λεκάνης ανέρχεται σε 130 km². Ο ποταμός Κουλιάρης τροφοδοτείται, όπως και οι περισσότερες λεκάνες απορροής του Νομού Χανίων, από ποσότητες υδάτων όπου προέρχονται από τα Λευκά όρη. Οι άλλοι δύο παραπόταμοι που συμβάλλουν στον ποταμό Κουλιάρη είναι: ο Μυλαυλακός και ο Μανταμάς και έχουν μόνιμη ροή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και για αυτό χαρακτηρίζονται ω μόνιμα υδατορέματα (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Οι δήμοι που περιλαμβάνονται στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κουλιάρη παρουσιάζονται στον **Χάρτη 1** που δημιουργήθηκε από το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (G.I.S.).



Χάρτης 1. Δήμοι στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλάρη (Χατζηθεοχάρους, 2005)

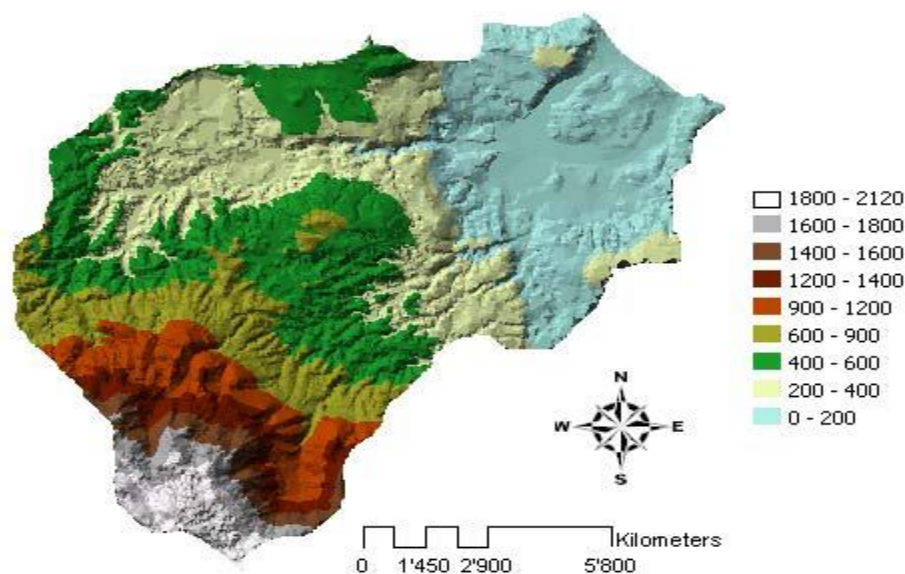
Η γεωγραφική έκταση των παραπάνω κοινοτήτων, καθώς και το οδικό δίκτυο της περιοχής ενδιαφέροντος φαίνεται στον **Χάρτη 2**.



Χάρτης 2. Χωρική απεικόνιση των οικισμών και το οδικό δίκτυο της λεκάνης απορροής του Κοιλάρη (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)

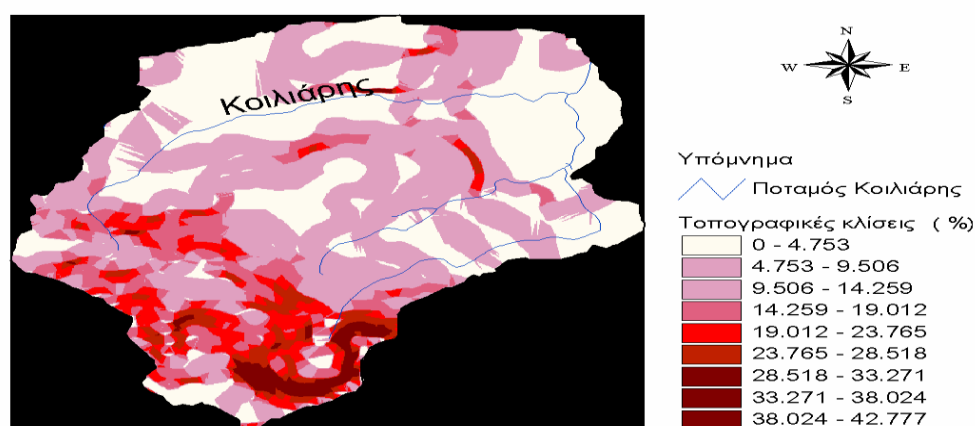
2.2 Μορφολογικά χαρακτηριστικά

Το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής χαρακτηρίζεται ως ομαλό με μικρές τοπογραφικές κλίσεις της τάξης του 12%. Η μέγιστη τοπογραφική κλίση 43% εμφανίζεται στους πρόποδες των Λευκών Όρεων, μιας και η λεκάνη απορροής εκτείνεται μέχρι και το υψόμετρο των +2041 m (**Χάρτης 3**). 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% (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).



Χάρτης 3. Τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)

Στον **Χάρτη 4** παρουσιάζονται και οι ισοϋψείς καμπύλες των 100m στην περιοχή μελέτης.



Χάρτης 4. Τοπογραφικές κλίσεις της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Χατζηθεοχάρους, 2005)

2.3 Γεωλογικές συνθήκες.

Οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαρτίζουν τη λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη είναι οι εξής:

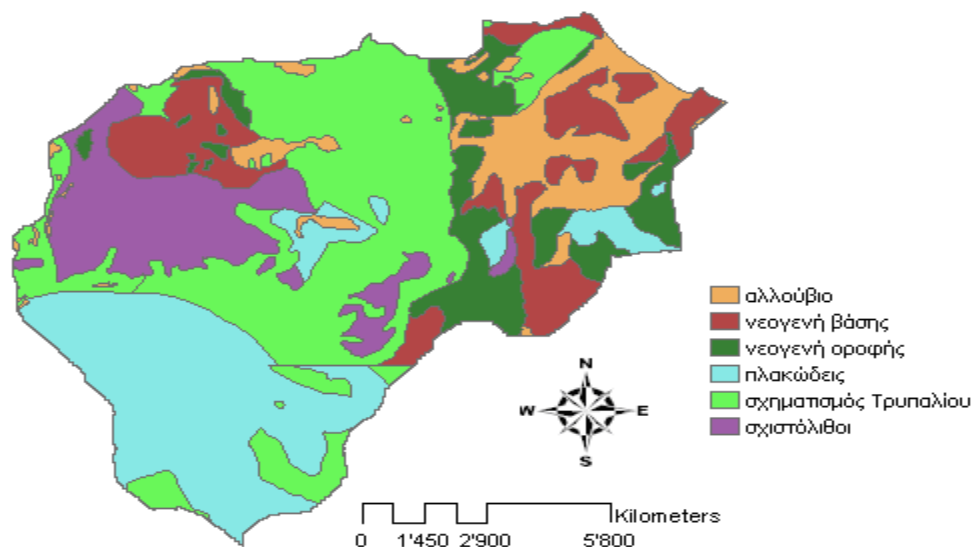
Ανθρακικά πετρώματα (σχηματισμοί Τρυπαλίου και πλακώδεις): Καρστικοί σχηματισμοί αποτελούμενοι κυρίως από ανθρακικά πετρώματα. Στη λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη εντοπίζονται ανθρακικά πετρώματα στο νότιο τμήμα και στο βόρειο-κεντρικό τμήμα της λεκάνης. Τα καρστικά πετρώματα είναι έντονα υδατοπερατά, αποτελούνται από ασβεστολιθικά και δολομιτικά πετρώματα (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Φλύσχης Σχιστόλιθοι: Απαντώνται στο δυτικό τμήμα της λεκάνης. Τα κύρια πετρώματα της ακολουθίας του φλύσχη είναι ο ψαμμίτης, ο αργιλικός σχιστόλιθος, καθώς και ο ιλυόλιθος, ωστόσο μπορούν να εμφανιστούν άργιλοι, ασβεστόλιθοι κ.α. Γενικά χαρακτηρίζονται ως μη υδατοπερατοί σχηματισμοί (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Νεογενείς και τεταρτογενείς σχηματισμοί: εμφανίζονται στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, στο βορειοδυτικό τμήμα και στο βόρειο τμήμα, παραλιακά της λεκάνης απορροής και είναι υδατοπερατοί σχηματισμοί (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Οι αλλουβιακές προσχώσεις, πηλοί, άργιλοι, άμμοι και χάλικες, εμφανίζονται σε όλο το πεδινό τμήμα του ποταμού Κοιλιάρη. Σε μικρότερη κλίμακα απαντώνται μάργες, πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων. Οι αλλουβιακές προσχώσεις αναπτύσσονται ανατολικά των πηγών και επεκτείνονται μέχρι τη θάλασσα (Χατζηθεοχάρους, 2005).

Ο γεωλογικός χάρτης της λεκάνης του ποταμού Κοιλιάρη παρουσιάζεται στον **Χάρτη 5**.



Χάρτης 5. Γεωλογικοί σχηματισμοί της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)

2.4 Υδρογεωλογία

Από τα ανθρακικά πετρώματα της ζώνης Τρυπαλίου και τους πλακώδεις ασβεστόλιθους τροφοδοτείται κατά κύριο λόγο το όλο σύστημα του ποταμού Κοιλιάρη. Σε μικρότερη κλίμακα από τους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους του Νεογενούς, οι οποίοι βρίσκονται σε τεκτονική επαφή με το παλαιότερο καρστικό σύστημα. Από το καρστικό ασβεστολιθικό σύστημα των Λευκών Όρεων τροφοδοτούνται ακόμη οι πηγές του ποταμού Κοιλιάρη (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Η περατότητα των πετρωμάτων σε συνδυασμό με την γενική δομή των Λευκών Όρεων συντελούν στην ανάπτυξη υπόγειων υδροφοριών με πολύ μεγάλο υδατικό δυναμικό. Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι τα πλούσια μετεωρολογικά κατακρημνίσματα που δέχεται το ορεινό συγκρότημα (βροχές και χιόνια) διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην πλούσια υδροφορία της περιοχής (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Δευτερεύοντα ρόλο στο υδατικό δυναμικό παίζουν και οι άμεσες απορροές των μετεωρολογικών κατακρημνισμάτων λόγω των μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Αποτέλεσμα αυτών των υδροφοριών είναι οι αναβλύσεις πηγών σημαντικής

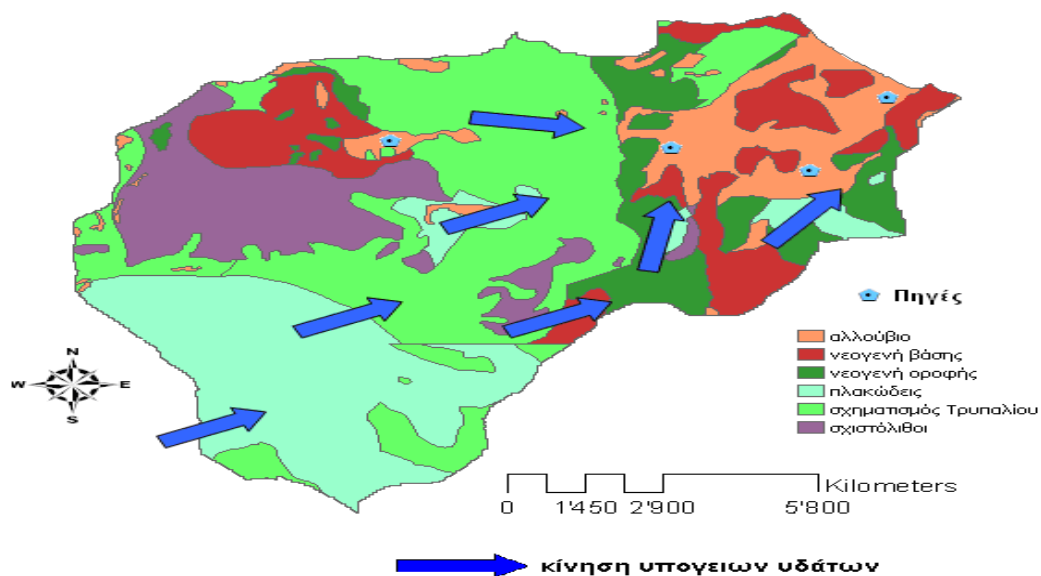
παροχής σε ορισμένες ζώνες στη βάση του ορεινού όγκου. Ανάλογα λοιπόν με τις συνθήκες των διαφόρων τμημάτων του ορεινού συγκροτήματος διοχετεύεται το νερό σε περιφερειακές υπόγειες υδροφορίες σε χαμηλότερο υψόμετρο και στη συνέχεια τροφοδοτούνται γνωστές πηγές και γεωτρήσεις μερικές από τις οποίες βρίσκονται και στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Χατζηθεοχάρους, 2005).

Οι κύριοι υδροφορείς της περιοχής είναι:

α) Ο καρστικός υδροφορέας που ευρίσκεται στο νότιο τμήμα της λεκάνης (Λευκά Όρη).

β) Ο προσχωματικός υδροφορέας που εκτείνεται στο βόρειο τμήμα της λεκάνης σχηματίζοντας ένα φρεάτιο ορίζοντα στον ποταμό Κοιλιάρη (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Οι υδροφορείς της περιοχής και η ροή των υδάτων παρουσιάζονται στον **Χάρτη 6**.

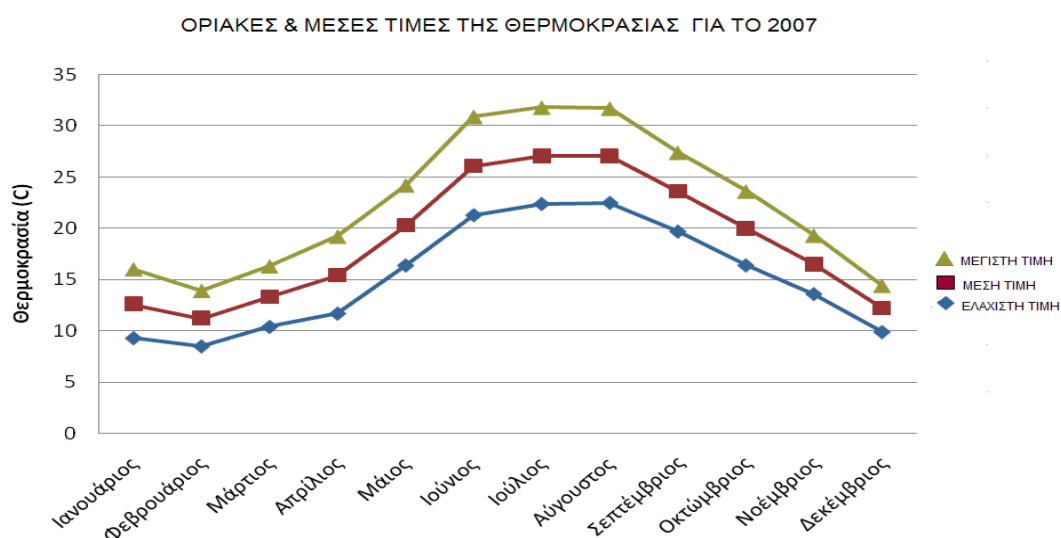


Χάρτης 6. Υπόγειοι υδροφορείς περιοχής λεκάνης απορροής του Κοιλιάρη και η ροή των υπόγειων υδάτων (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)

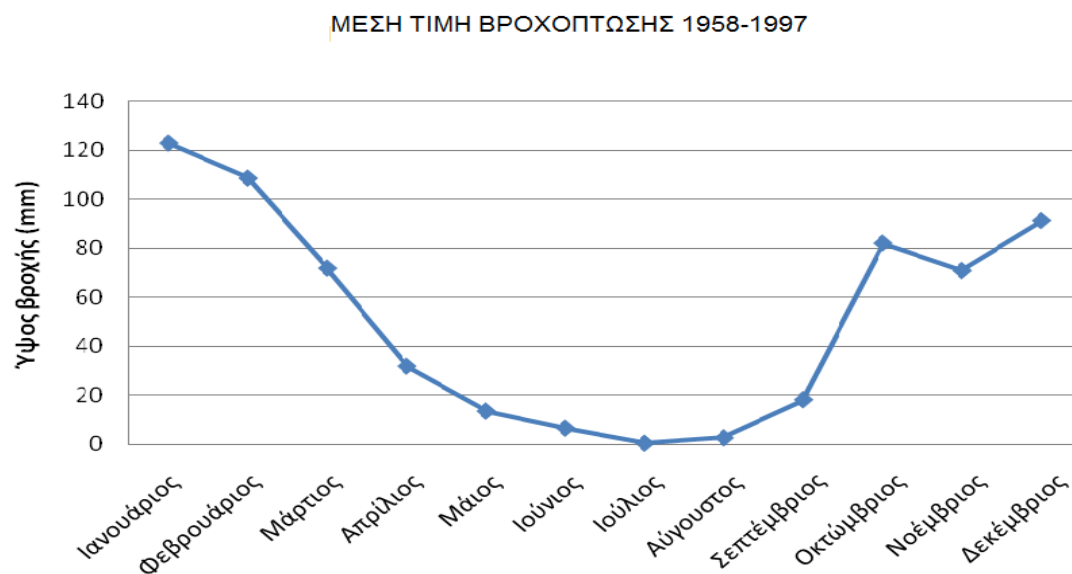
2.5 Κλιματικά χαρακτηριστικά

Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό με θερμό και ξηρό καλοκαίρι και βροχερό και ήπιο χειμώνα. Στη διαμόρφωση του κλίματος της περιοχής επιδρούν σημαντικά: το Κρητικό Πέλαγος, όπου πνέουν βόρειοι άνεμοι ισχυροί κατά το χειμώνα και ασθενείς κατά το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, και το Ιόνιο Πέλαγος, κυρίως ως προς τη βροχερότητα, αφού από εκεί καταφθάνουν τα βροχερά νέφη. Από το Μάιο μέχρι το Σεπτέμβριο, το κλίμα είναι υπέρξηρο.

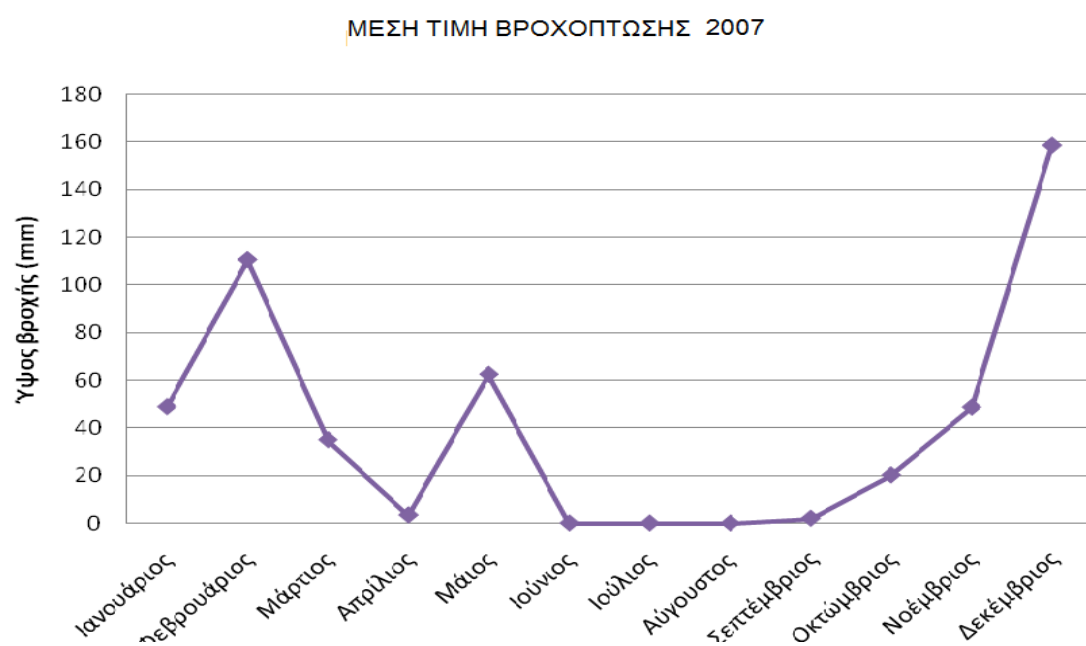
Το σύνολο των κατακρημνίσεων λαμβάνει χώρα μεταξύ των μηνών Οκτωβρίου-Μαρτίου, ενώ οι πιο ξηροί μήνες χαρακτηρίζονται οι Ιούλιος-Αύγουστος. Τα πρώτα χιόνια πέφτουν στα Λευκά Όρη από τα μέσα Νοεμβρίου. Στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής δεν παρατηρούνται χιονοπτώσεις λόγω του μικρού σχετικά υψομέτρου της. Ολικοί παγετοί ουδέποτε εμφανίζονται στην περιοχή. Χαλάζι πέφτει σπάνια, το μέγεθός του είναι συνήθως μικρό και οι ζημιές επομένως που προκαλεί θεωρούνται ασήμαντες. Για τη μελέτη των κλιματολογικών συνθηκών της περιοχής χρησιμοποιούνται τα μετεωρολογικά στοιχεία του Σταθμού των Αρμένων (λειτουργεί από το 1978), ο οποίος βρίσκεται σε υψόμετρο +50m, σε γεωγραφικό μήκος 240 9' και γεωγραφικό πλάτος 350 25'. Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα με στοιχεία για τη θερμοκρασία (**Διάγραμμα 1**) και το ύψος των βροχοπτώσεων (**Διάγραμμα 2** και **Διάγραμμα 3**) τα οποία δόθηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό της Σούδας (ύψους +150m) (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).



Διάγραμμα 1. Μέγιστες, Μέσες και Ελάχιστες τιμές της θερμοκρασίας (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)



Διάγραμμα 2. Μέσες τιμές βροχόπτωσης (1958-1997) (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)



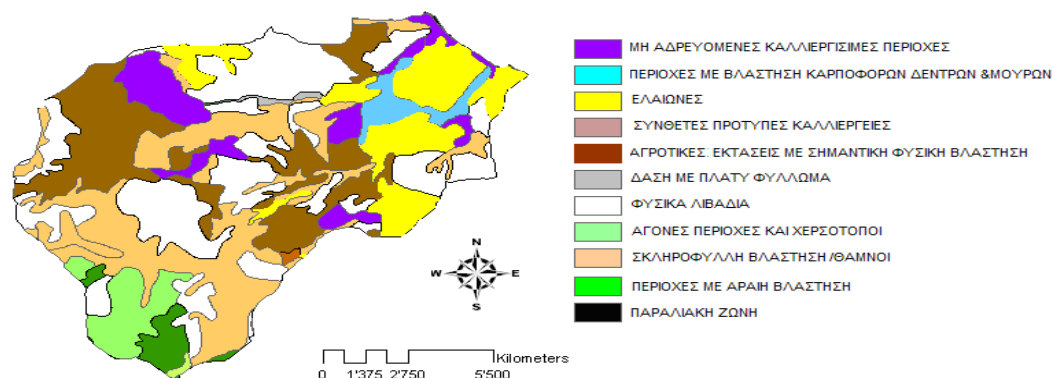
Διάγραμμα 3. Μέσες τιμές βροχόπτωσης το 2007 (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)

2.6 Χρήσεις Γης

Όπως έχει υπολογιστεί και σε παλαιότερη μελέτη από στοιχεία του Υπουργείου Γεωργίας, έχει εκτιμηθεί ότι: το 58% (101km²) των συνολικών χρήσεων γης των κοινοτήτων της λεκάνης απορροής χαρακτηρίζεται ως βοσκότοποι (δημόσιοι ή ιδιωτικοί), το 29,4% (51km²) ως καλλιεργούμενες εκτάσεις, το 2,8% (5km²) οικιστικές περιοχές και δρόμοι, 8,5% (14,8km²) δάση, το 0,6% (1km²) υδατικές επιφάνειες και το 0,7% (0,9km²) άλλες χρήσεις (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Στο πεδινό τμήμα της λεκάνης απορροής που διασχίζει ο ποταμός Κοιλιάρης εκτιμήθηκε ότι το 46% των συνολικών χρήσεων χρησιμοποιούνται ως βοσκότοποι. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι στη λεκάνη απορροής δεν λειτουργούν μεγάλες βιομηχανίες, ενώ υπάρχει ένας μικρός αριθμός βιοτεχνιών και ελαιοτριβείων που στην πλειοψηφία τους δεν διαθέτουν σύστημα διαχείρισης υγρών αποβλήτων, αλλά τα εναποθέτουν σε δεξαμενές εξάτμισης. Στην περιοχή της λεκάνης απορροής του Κοιλιάρη αν και υπάρχει βιολογικός καθαρισμός δεν υπάρχει ολοκληρωμένο αποχετευτικό δίκτυο και ο βιολογικός δεν λειτουργεί. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ένα μέρος των οικισμών να έχουν στεγανοποιημένους βόθρους ενώ ένα μεγάλο ποσοστό κατοικιών να διαθέτουν απορροφητικούς βόθρους (Χατζηθεοχάρους, 2005).

Οι γεωργικές καλλιέργειες της περιοχής κατά κύριο λόγο είναι ελαιόδεντρα, εσπεριδοειδή (πορτοκάλια κ.α.) και αμπέλια. Ακολουθεί χάρτης με τις χρήσεις γης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, που δημιουργήθηκε με GIS (Χάρτης 7) (Χατζηθεοχάρους, 2005).



Χάρτης 7. Χρήσεις γης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Χατζηθεοχάρους, 2005)

2.7 Περιβαλλοντικές πιέσεις

Τα φορτία στην λεκάνη απορροής του ποταμού έχουν διαχωριστεί σε δύο κατηγορίες (Χατζηθεοχάρους, 2005):

- Τα σημειακά φορτία
- Και τα μη-σημειακά φορτία

Υπολογισμός ρυπαντικών φορτίων

Στην ευρύτερη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη δεν υπάρχουν μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις που θα μπορούσαν να προκαλέσουν τυχόν σημαντική ρύπανση στην ατμόσφαιρα ή στα ύδατα της περιοχής. Οι σημειακές πηγές που φορτίζουν την περιοχή είναι μικρές βιοτεχνίες για την παραγωγή ελαιολάδου και μικροί οικισμοί που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης. Συνολικά στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη υπάρχουν 12 ελαιοτριβεία που λειτουργούν και 5 τα οποία έκλεισαν. Από τα 12 ελαιοτριβεία τα 4 είναι στην κοινότητα Κεραμιών (τα τρία από τα τέσσερα είναι φυγοκεντρικά), τα 3 στην κοινότητα Καλυβών (φυγοκεντρικά), τα 2 στην κοινότητα του Νιο-Χωριού (φυγοκεντρικά) και τέλος 3 στην κοινότητα Παιδοχωρίου (φυγοκεντρικά) (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Για τον υπολογισμό των ρυπαντικών φορτίων θα γίνει υπολογισμός μόνο των θρεπτικών φορτίων του αζώτου και φωσφόρου διότι αυτά παρουσιάζουν την μεγαλύτερη κινητικότητα στο υπέδαφος καθώς και είναι τα μόνα που υπάρχουν αρκετά δεδομένα για τον υπολογισμό τους (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Τα συνολικά αστικά φορτία για την ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη είναι (Χατζηθεοχάρους, 2005):

- ολικό άζωτο 19476 kg/year και
- ολικός φώσφορος 3895.2 kg/year

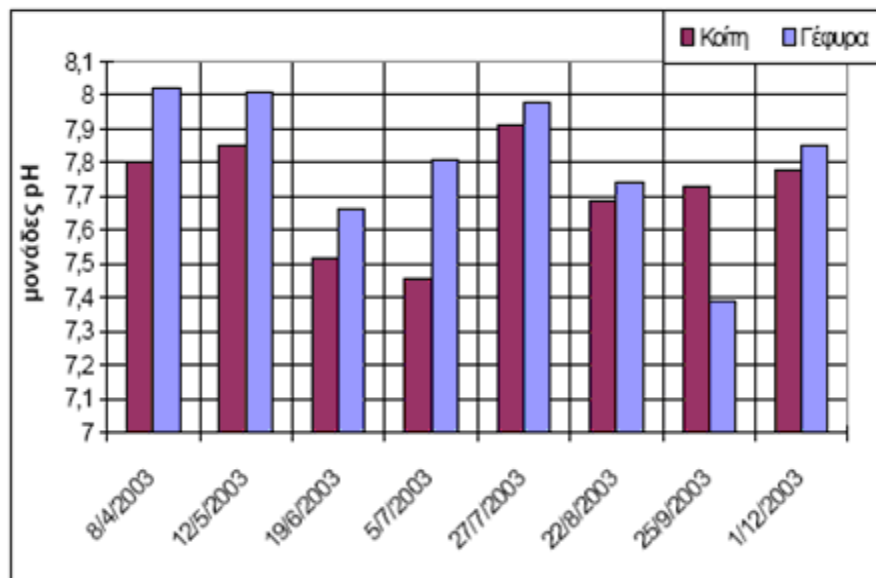
Τα μη σημειακά φορτία για την λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη προέρχονται από τη γεωργία, την κτηνοτροφία και τέλος από την υγρή και ξηρή εναπόθεση (Χατζηθεοχάρους, 2005).

2.8 Χημική Κατάσταση

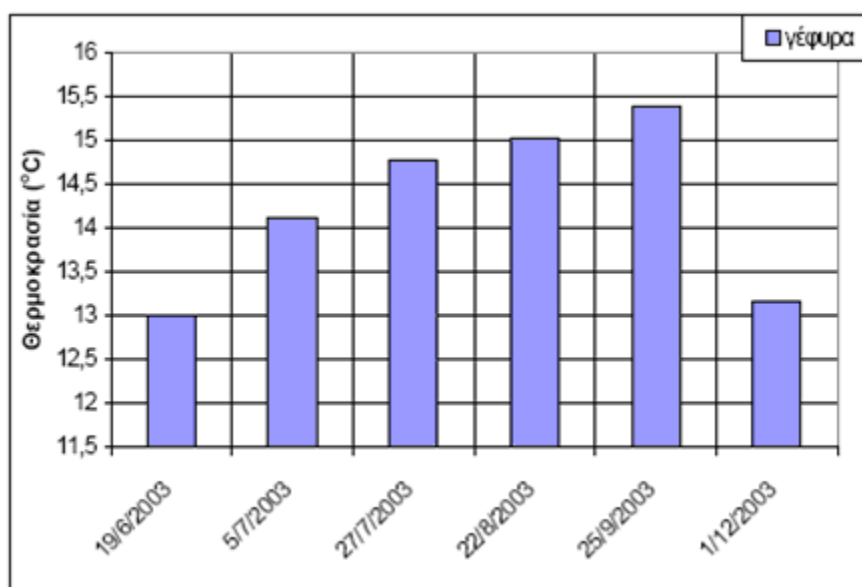
Παρουσιάζονται τα διαγράμματα (από 4 έως 8) από αποτελέσματα των μετρήσεων από το Τ.Ε.Ι Χανίων για τα (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010):

- pH
- θερμοκρασία
- αγωγιμότητα
- χλωριόντα
- φωσφορικά

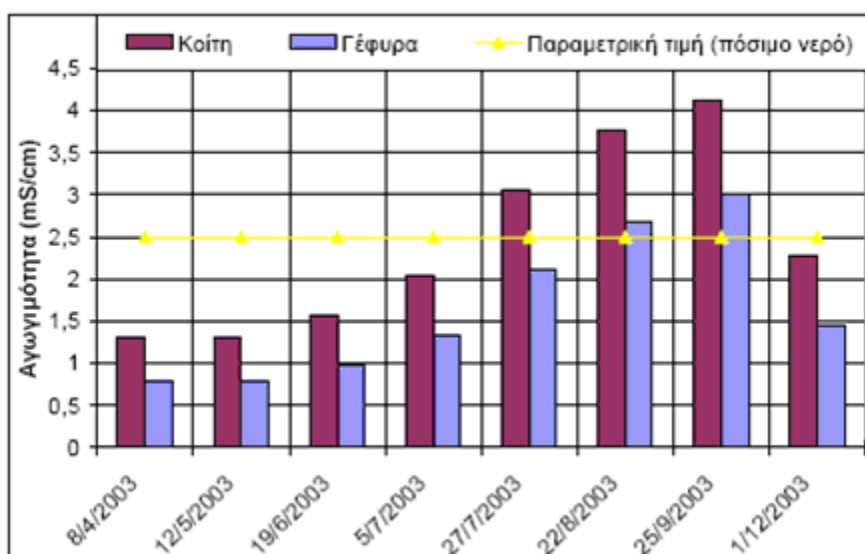
Αποτελέσματα μετρήσεων από το Τ.Ε.Ι Χανίων



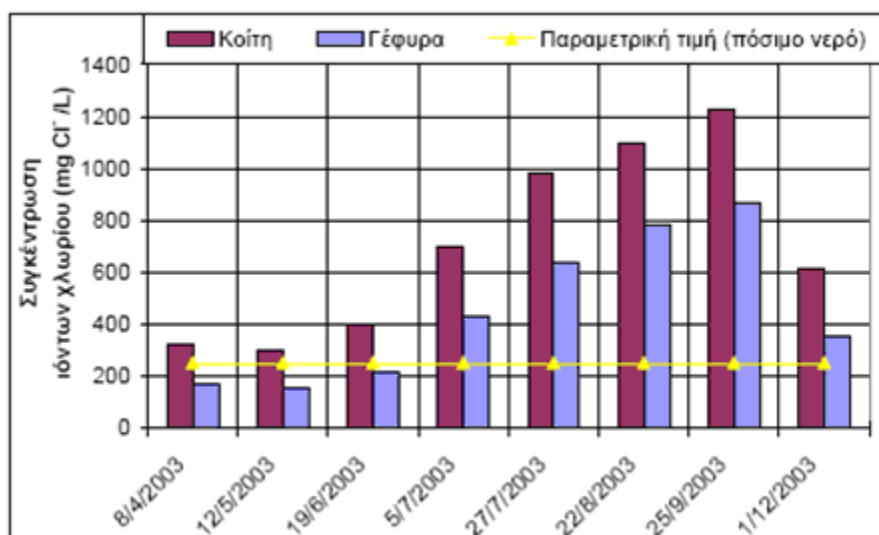
Διάγραμμα 4. Μεταβολή του pH του νερού του ποταμού Κοιλιάρη στις δειγματοληψίες στην κοίτη και στη γέφυρα (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)



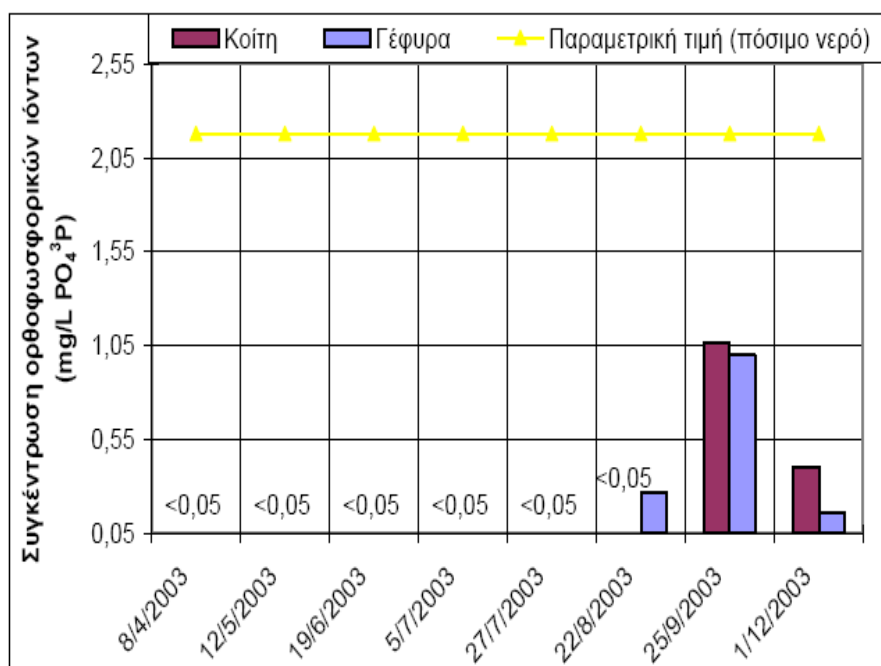
Διάγραμμα 5. Μεταβολή θερμοκρασίας στον ποταμό Κοιλιάρη (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)



Διάγραμμα 6. Μεταβολή της αγωγιμότητας του νερού του ποταμού Κοιλιάρη στις δειγματοληψίες στην κοίτη και στη γέφυρα (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)



Διάγραμμα 7. Μεταβολή της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίων του νερού του ποταμού Κουλιάρη στις δειγματοληψίες στην κοίτη και στη γέφυρα (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)



Διάγραμμα 8. Μεταβολή της συγκέντρωσης PO₃-P του νερού του ποταμού Κουλιάρη (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)

Από τα αποτελέσματα παρατηρούμε υπερβάσεις στην αγωγιμότητα και χλωριόντα λόγω της υφαλμύρινσης του ποταμού προς τη θάλασσα (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις σε επιλεγμένα σημεία των τριών λεκανών απορροής, με σκοπό τη λεπτομερή μελέτη της χημικής ποιότητας των επιφανειακών-υπογείων υδάτων. Το σύνολο των δειγμάτων νερού τα οποία συλλέχθηκαν έφτασαν τα 20 και προήλθαν από γεωτρήσεις – πηγάδια, πηγές εκφόρτισης και επιφανειακά σημεία δειγματοληψίας, στην περιοχή ενδιαφέροντος των τριών λεκανών απορροής (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Οι χημικές αναλύσεις των παραπάνω δειγμάτων αφορούσαν τον έλεγχο όσο αφορά τη συγκέντρωση SO_4 , PO_4 , NH_3 , NO_2 , NO_3 , Cl, TKN (ολικό οργανικό άζωτο) καθώς επίσης και πλήθος χημικών στοιχείων όπως Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Fe, Li, B, Al, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Πραγματοποιήθηκαν επίσης αναλύσεις για την ύπαρξη υπολειμμάτων από οργανοχλωριωμένα φυτοφάρμακα καθώς επίσης και από πολύ-κυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PHA) και πολύ-βρωμιούχους διφαινυλαιθέρες (PBDEs). Ο λόγος που επιλέχθηκαν να αναλυθούν οι παραπάνω χημικές ενώσεις, για την τυχόν εύρεση τους στα δείγματα νερού, προέκυψε από τις πολύ σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις που μπορούν να επιφέρουν στον ανθρώπινο οργανισμό (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Σύμφωνα με τις αναλυτικές χημικές ανάλυσης του Εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών του Πολυτεχνείου Κρήτης η επιφανειακή απορροή του ποταμού στο σημείο δειγματοληψίας της γέφυρας Κοιλιάρη εμφανίζει συγκεντρώσεις Cl και Fe πάνω από τα επιτρεπτά όρια για το πόσιμο νερό (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

2.9 Οικολογική Κατάσταση

Η παρόχθια ζώνη του Κουιάρη, με το παραποτάμιο δάσος του, παρότι περιορισμένης σε πλάτος ανάπτυξης σε πολλές περιοχές, 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. Η πλειονότητα των παραποτάμιων δασικών οικοτόπων του ποταμού Κουιάρη, απαντώνται στο ημιορεινό και ειδικότερα στο πεδινό του τμήμα με «Δάση ανατολικής πλατάνου» (σε αυτό τον τύπο κυριαρχεί το ανατολικό πλατάνι, το οποίο βρίσκεται συνήθως σε μόνιμης ροής ποτάμια), αλλά και πλησίον των εκβολών του με «Θερμο-Μεσογειακές παραποτάμιες στοές» (σε αυτό τον τύπο παραποτάμιου δάσους επικρατούν οι θαμνώδεις σχηματισμοί που δημιουργούν «στοές», κυρίως με τα αρμυρίκια (*Tamarix spp.*), την πικροδάφνη (*Nerium oleander*) και τη λυγαριά (*Vitex agnus-castus*) (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Χλωρίδα

Στην Κρήτη έχει δημιουργηθεί μια εξαιρετικά πλούσια χλωρίδα (1600 περίπου είδη και υποείδη) με μεγάλο βαθμό ενδημισμού (210 περίπου ενδημικά). Από το σύνολο των ενδημικών φυτών της Κρήτης τα 114 συναντώνται στα Λευκά Όρη, ενώ υπάρχουν 22 ενδημικά είδη που απαντώνται αποκλειστικά και μόνο στα Λευκά Όρη. Από αυτά τα 22 ενδημικά, τρία είδη έχουν χαρακτηριστεί ως κινδυνεύοντα, σύμφωνα με την Παγκόσμια Ένωση Προστασίας της Φύσης (IUCN), ενώ άλλα τρία ενδημικά είδη είναι απειλούμενα και δέκα είδη χρειάζονται ειδικά μέτρα προστασίας καθότι χαρακτηρίζονται ως κινδυνεύοντα (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Πανίδα

Αποτελείται από στοιχεία με ετερόκλητη ζωογεωγραφική προέλευση, αλλά και ενδημικά είδη. Η Κρήτη συγκεντρώνει μια ιδιόζουσα πανίδα λόγω της γεωγραφικής της θέσης και της παλαιογεωγραφικής και γεωλογικής της εξέλιξης. Σε όλο το μήκος του ποταμού Κουιάρη, που χαρακτηρίζεται ως «γραμμικό» ποτάμιο οικοσύστημα,

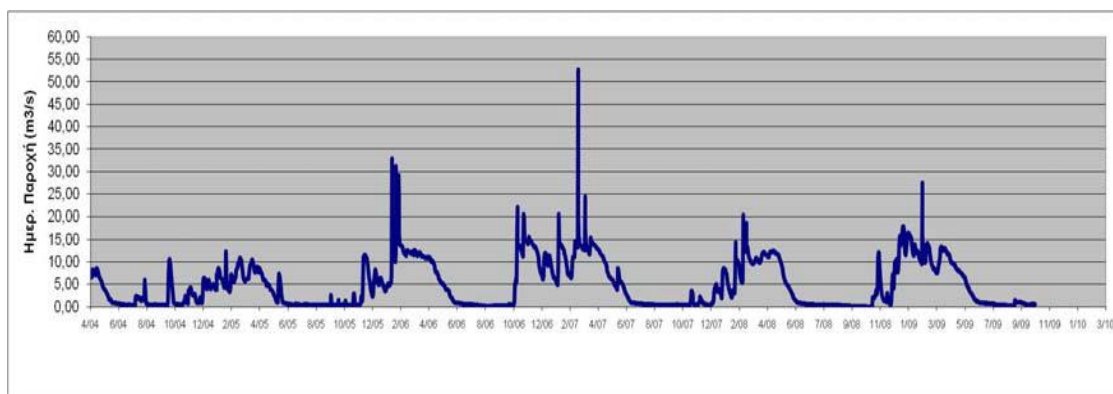
ανάμεσα στην πυκνή βλάστηση, την άνοιξη φωλιάζουν αηδόνια, μαυροπούλια, τρυγόνια, κοτσύφια και τσαλαπετεινοί, ενώ συχνοί «επισκέπτες» της περιοχής, για ξεκούραση και τροφή κατά την αποδημία, είναι οι ερωδιοί, οι κύκνοι, οι πάπιες, οι αλκυόνες και άλλα. Επίσης υδρόβιες χελώνες, βατράχια, χέλια και καβούρια, βρίσκουν τροφή και καταφύγιο στα νερά του ποταμού (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

2.10 Υδρολογία

Υδρογράφημα

Το Εργαστήριο Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών διατηρεί υδρομετρικό σταθμό στον ποταμό Κοιλιάρη (περιοχή Αγ. Γεωργίου) από τον Απρίλιο του 2004 και είναι τα μόνα δεδομένα που υπάρχουν σε συνεχή χρονοσειρά εκτός από τις υδρομετρήσεις της ΥΕΒ που γίνονται μία φορά τον μήνα. Το υδρογράφημα του ποταμού τα τελευταία 5,5 χρόνια παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 9** (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

- Η μέση παροχή του ποταμού Κοιλιάρη ήταν $10902 \text{ m}^3/\text{hr}$.
- Η ελάχιστη παροχή που καταγράφηκε ήταν $619 \text{ m}^3/\text{hr}$ και
- Η μέγιστη παροχή που καταγράφηκε ήταν $13725 \text{ m}^3/\text{hr}$.
- Οι ετήσιες απορροές κυμάνθηκαν από 45 ως 230 εκατομμύρια κυβικά μέτρα



Διάγραμμα 9. Ημερήσιο υδρογράφημα του ποταμού Κοιλιάρη (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010)

- **Βροχοπτώσεις**

Η μηνιαία και ετήσια μεταβολή των βροχοπτώσεων στο σταθμό Καλυβών στο κατάντη μέρος της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κοιλιάρη παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Νικολαΐδης και Καρατζάς, 2010).

Πίνακας 1.Βροχομετρικά δεδομένα της περιοχής του Ποταμού Κοιλιάρη

ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΙΣ ΣΕ mm													
ΥΔΡ.ΕΤΟΣ	ΣΕΠ.	ΟΚΤ.	ΝΟΕ.	ΔΕΚ.	ΙΑΝ.	ΦΕΒ.	ΜΑΡ.	ΑΠΡ.	ΜΑΙ.	ΙΟΥΝ.	ΙΟΥΛ.	ΑΥΓ.	ΣΥΝ.
1973-74					183,0	68,0	156,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
1974-75	32,0	15,0	150,0	59,0	126,0	209,0	6,0	22,0	2,0	0,0	0,0	0,0	621,0
1975-76	0,0	106,0	71,0	148,0	168,2	52,0	207,0	83,0	0,0	7,0	0,0	0,0	842,2
1976-77	0,0	85,9	120,7	158,0	42,0	42,0	115,0	26,6	0,0	0,0	1,3	0,0	591,5
1977-78	42,0	54,3	20,9	191,7	159,4	67,6	123,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	660,4
1978-79	20,6	58,8	24,2	54,6	97,6	254,9	134,6	22,1	0,0	52,9	0,0	0,0	720,3
1979-80	10,4	184,8	145,0	132,8	127,0	254,9	134,6	35,4	7,2	0,0	0,0	0,0	1032,1
1980-81	0,0	95,6	0,0	115,1	487,0	122,9	27,4	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	873,0
1981-82	0,0	0,4	131,4	77,6	100,2	247,9	122,0	56,4	50,6	0,0	0,0	0,0	786,5
1982-83	0,0	0,6	73,6	131,2	104,4	87,0	58,4	8,4	5,0	50,4	0,0	13,2	532,2
1983-84	31,5	195,6	161,6	122,5	88,0	217,8	78,4	47,9	0,0	0,0	0,0	0,0	943,3
1984-85	0,0	50,4	256,4	241,8	190,5	58,6	53,4	23,0	3,2	0,0	0,0	0,0	877,3
1985-86	0,0	83,5	27,0	160,2	56,7	88,9	46,0	0,0	46,2	0,0	0,0	0,0	508,5
1986-87	131,0	70,4	98,8	169,9	94,0	59,4	110,0	186,3	2,2	0,0	0,0	0,0	922,0
1987-88	0,0	15,5	92,9	81,4	84,0	106,7	66,0	12,6	15,0	0,0	0,0	0,0	474,1
1988-89	0,0	102,4	105,6	114,2	115,2	16,7	218,4	0,0	18,8	0,0	0,0	0,0	691,3
1989-90	0,0	108,4	249,4	22,8	58,6	42,0	7,6	15,8	0,0	0,0	0,0	14,2	518,8
1990-91	20,4	24,9	68,4	70,4	119,5	78,2	44,9	45,7	17,0	0,0	0,0	8,5	497,9

1991-92	0,0	72,0	104,6	197,6	42,5	126,1	128,7	20,0	7,2	6,4	0,0	0,0	705,1
1992-93	0,0	0,0	46,7	142,3	149,9	133,4	39,8	14,7	48,2	12,0	0,0	0,0	587,0
1993-94	0,0	13,2	184,4	27,2	218,5	83,0	23,6	17,8	5,0	0,0	0,0	0,0	572,7
1994-95	0,0	146,8	150,8	74,0	67,6	28,2	68,0	18,0	3,6	0,0	3,4	0,0	560,4
1995-96	6,3	12,1	56,3	29,4	161,4	182,3	180,3	13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	641,6
1996-97	73,2	114,7	73,5	279,0	112,0	66,0	262,1	25,8	0,0	14,4	0,0	0,0	1020,7
1997-98	4,8	84,3	162,4	64,2	82,0	24,0	124,3	17,5	35,6	0,0	0,0	0,0	599,1
1998-99	0,0	44,8	88,1	260,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	393,1
1999-00	41,7	0,0	152,0	225,8	220,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	640,0
2000-01	0,0	11,4	103,9	150,0	336,8	144,7	4,0	79,6	22,0	0,0	0,0	0,0	852,4
2001-02	5,0	0,0	201,5	275,2	126,4	30,0	38,3	50,3	0,0	0,0	10,6	5,0	742,3
2002-03	73,3	37,0	82,0	145,0	82,0	307,0	257,0	100,0	13,0	0,0	0,0	0,1	1096,4
2003-04	1,8	0,0	84,0	245,0	141,0	38,9	21,3	47,0	10,0	0,0	0,0	0,0	589,0
2004-05	0,0	1,2	145,8	90,9	82,4	52,0	32,0	40,0	18,0	0,0	0,0	0,0	462,3
2005-06	0,0	33,0	37,7	59,0	258,0	168,2	30,3	10,8	0,0	24,0	0,0	0,0	621,0
2006-07	0,0	241,4	97,0	56,0	63,0	145,0	56,0	7,6	49,0	0,0	0,0	0,0	715,0
2007-08	0,0	51,0	40,0	219,0	72,0	106,0	20,0	38,0	0,0	0,0	0,0	0,0	546,0
Μεγ. ύψος	131,0	241,4	256,4	279,0	487,0	307,0	262,1	186,3	50,6	52,9	10,6	14,2	1096,4
Ελ. Ύψος	0,0	0,0	0,0	22,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	393,1
Μ.Ο	14,5	62,2	106,1	135,0	131,9	106,0	85,6	31,8	10,8	4,8	0,4	1,2	689,3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Διαθεσίμη πληροφορία και περιγραφή μεθοδολογίας

3.1. Μοντέλο BSTEM-Προσομοίωση της διάβρωσης και της αστοχίας του πρηνούς του ποταμού Κοιλιάρη

Το 2011 πραγματοποιήθηκε μελέτη της αστοχίας των πρηνών του ποταμού Κοιλιάρη με χρήση του μοντέλου “Bank Stability and Toe Erosion Model”, το οποίο αποτελεί ένα μοντέλο που αντιπροσωπεύει δύο διαφορετικές διαδικασίες: την αστοχία ενός τμήματος του εδάφους μεταβλητής γεωμετρίας και τη διάβρωση της όχθης λόγω της ροής του νερού. Το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για την εκτίμηση της υδραυλικής διάβρωσης της όχθης ποταμού και προορίζεται κυρίως για χρήση σε μελέτες όπου η διάβρωση «απειλεί» τη σταθερότητα των όχθων (Λιλλή 2011).

Αναπτύχθηκε με σκοπό την πρόγνωση της διάβρωσης των ποταμών και της γεωτεχνικής αστοχίας (Λιλλή, 2011).

Για την εκτίμηση της διάβρωσης και της αστοχίας των πρηνών του ποταμού Κοιλιάρη, μελετήθηκαν τα πιο σημαντικά πλημμυρικά γεγονότα που συνέβησαν στην περιοχή κατά τη χρονική περίοδο 2004-2009. Για κάθε γεγονός υπολογίστηκε ο λόγος V_f/V_R (ο όγκος της πλημμύρας προς τον όγκο της βροχής) ο οποίος εκφράζει την επιφανειακή απορροή. Έγινε χρήση του μοντέλου BSTEM για καθένα από τα πλημμυρικά γεγονότα προκειμένου να υπολογιστεί για κάθε θέση το ποσό της διάβρωσης και ο συντελεστής ασφαλείας (F_s) (Λιλλή, 2011).

Το υπομοντέλο της σταθερότητας ή μη της όχθης (Bank Stability Model) εξάγει αποτελέσματα που αφορούν το συντελεστή ασφαλείας. Στον **Πίνακα 2** παρουσιάζονται ποσοτικά τα αποτελέσματα του υπό-μοντέλου σταθερότητας.

Πίνακας 2. Ποσοτικά αποτελέσματα αστοχίας (Λιλλή, 2011)

Θέση	F_s
Σ1	0,11 Unstable
ΣΑ	0,2 Unstable
ΣΒ	0,37 Unstable
ΣΓ	4,71 Stable
ΣΗ	0,09 Unstable
ΣΔ	0,56 Unstable
ΣΕ	0,72 Unstable
ΣΖ	1,00 Unstable
ΣΖ	0,35 Unstable

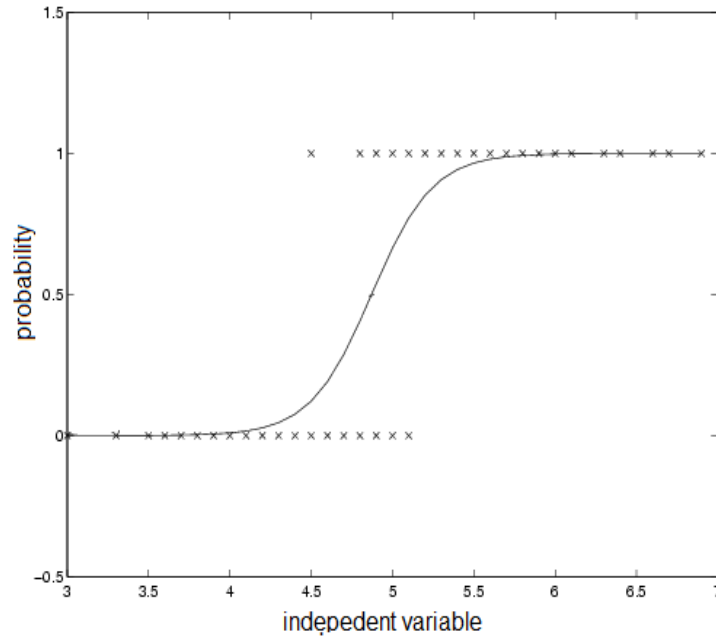
Τα παραπάνω τμήματα του ποταμού που μελετήθηκαν χαρακτηρίζονται ως «κρίσιμα» ως προς τη διάβρωση και την αστοχία του πρανούς. Όταν ο συντελεστής ασφαλείας (F_s) είναι μεγαλύτερος του 1,3 τότε δεν υπάρχει αστοχία του πρανούς στην όχθη του ποταμού. Για το πλημμυρικό γεγονός που μελετήθηκε και που έλαβε χώρα μεταξύ 24/01 και 25/01/2006, η δύναμη της ροής έπαιρνε τις μέγιστες τιμές, η στάθμη του νερού ήταν 1,27m και η διάρκεια της ροής 48 hours (1^ο σενάριο). Για το ανωτέρω πλημμυρικό φαινόμενο μόνο ένα σημείο, το σημείο ΣΓ δεν αστοχεί (Λιλλή, 2011). Τα παραπάνω σημεία μέτρησης θα αποτελέσουν τη βάση για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από την εφαρμογή του μοντέλου που αναπτύχθηκε στηριζόμενο στη μεθοδολογία της Λογιστικής Παλινδρόμησης.

3.2. Ανάλυση λογιστικής παλινδρόμησης

Προκειμένου να εκτιμηθεί η πιθανότητα διάβρωσης στην όχθη του ποταμού Κοιλιάρη, εφαρμόζεται η μέθοδος της λογιστικής παλινδρόμησης. Η μέθοδος αυτή έχει υιοθετηθεί και εφαρμοσθεί για παρόμοιο σκοπό σε αντίστοιχη περίπτωση ποταμού στη Βόρεια Ουαλία (Kapo et al., 2008; Atkinson et al., 2003). Η λογιστική παλινδρόμηση έχει εφαρμοστεί επίσης και σε άλλου κλάδους όπως στο χώρο της υγείας (επιδημιολογία), σε κοινωνικές μελέτες (Χουντής, 2009) αλλά και στην κλωστοϋφαντουργία για τον εντοπισμό της βλάβης του ιμάντα μεταφοράς (Andrejionova et al., 2014). Επίσης η πολυμεταβλητή Λογιστική Παλινδρόμηση έχει χρησιμοποιηθεί για την χαρτογράφηση της υδροθερμικής αλλοίωσης πετρωμάτων μέσω λιθογεωχημικών δεδομένων (Mokhtari, 2014).

Το λογιστικό μοντέλο είναι ένα μη γραμμικό μοντέλο, του οποίου όμως τα σφάλματα δεν ακολουθούν κανονική κατανομή και η μεταβλητή απόκρισης είναι διακριτή. Η μέθοδος της λογιστικής παλινδρόμησης χρησιμοποιείται όταν είναι επιθυμητό να προβλεφθεί η πιθανότητα απουσίας ή παρουσίας ενός χαρακτηριστικού ή ενός συμβάντος. Είναι μια γενίκευση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης για την περίπτωση όπου η εξαρτημένη μεταβλητή (Y) είναι δυαδική παίρνοντας την τιμή 0 όταν απουσιάζει το χαρακτηριστικό ή την τιμή 1 όταν υπάρχει το χαρακτηριστικό (Hosmer and Lemeshow, 2014; Atkinson et al., 2003; Menard, 2001). Είναι ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών εξόδου, δηλαδή της εξαρτημένης μεταβλητής και των μεταβλητών εισόδου που είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους (Andrejionova et al., 2014).

Το μοντέλο που σχηματίζεται είναι μια λογιστική παλινδρόμηση της επιτυχίας ή της αποτυχίας μιας δεδομένης δυαδικής μεταβλητής (για παράδειγμα, την παρουσία ή απουσία της διάβρωσης) σχετικά με τις ανεξάρτητες μεταβλητές (**Εικόνα 5**) (Hosmer and Lemeshow, 2014; Atkinson et al., 2003; Menard, 2001).



Εικόνα 5. Πιθανότητα ενός γεγονότος συναρτήσει των ανεξάρτητων μεταβλητών σύμφωνα με το μοντέλο της λογιστικής παλινδρόμησης (Hosmer and Lemeshow, 2014; Atkinson et al., 2003; Menard, 2001)

Η Λογιστική Παλινδρόμηση είναι μια μαθηματική προσέγγιση μοντελοποίησης που περιγράφει τη σχέση πολλών ανεξάρτητων μεταβλητών με μια διχοτομική εξαρτημένη μεταβλητή (Kleinbaum et al., 2002). Το μοντέλο της λογιστικής παλινδρόμησης βασίζεται στη λογιστική συνάρτηση, μια κοινή σιγμοειδή συνάρτηση, η μαθηματική μορφή της οποίας αναπαρίσταται από την **Εξίσωση 3.1** (Hosmer and Lemeshow, 2014; Atkinson et al., 2003; Menard, 2001).

$$p(x) = \frac{1}{1 + \exp(-f(x))} \quad (3.1)$$

όπου,

$p(x)$: η πιθανότητα (%) ως εξαρτημένη μεταβλητή με $0 \leq p(x) \leq 1$

$$f(x) = \beta_0 + \beta_i x_i$$

β_i : οι συντελεστές παλινδρόμησης οι οποίοι πολλαπλασιάζονται με τις ανεξάρτητες μεταβλητές x_i

$x_i = \{x_1, x_2, \dots, x_K\}$, οι ανεξάρτητες μεταβλητές

Το γεγονός ότι η λογιστική συνάρτηση της πιθανότητας $p(x)$ κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1 είναι ο κύριος λόγος για τη δημοτικότητά του σε μοντελοποίηση πιθανοτήτων. Το μοντέλο της Λογιστικής Παλινδρόμησης, ως εκ τούτου, εξασφαλίζει ότι, ανεξάρτητα από την εκτίμηση του κινδύνου που παίρνουμε, θα είναι πάντα κάποια τιμή μεταξύ 0 και 1 (Kleinbaum et al., 2002).

Στην περίπτωση της πολύ-μεταβλητής λογιστικής παλινδρόμησης, η λογιστική συνάρτηση της πιθανότητας εκδήλωσης ενός γεγονότος εκφράζεται ως (Hosmer and Lemeshow, 2014; Atkinson et al., 2003; Menard, 2001).

$$p(x) = \frac{e^y}{1 + e^y} \quad (3.2)$$

Όπου,

$p(x)$: η πιθανότητα της εκδήλωσης του γεγονότος, όπως περιγράφηκε πιο πάνω

Η παράσταση y είναι ο γραμμικός συνδυασμός των ανεξάρτητων μεταβλητών x_k και των εκτιμώμενων παραμέτρων β_i .

Η έκφραση της y δίνεται σύμφωνα με τα παρακάτω

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i + \dots + \beta_K x_K \quad (3.3)$$

Όπου,

x_i : οι ανεξάρτητες μεταβλητές ($i=1...K$)

β_0, β_i : οι άγνωστες παράμετροι της Λογιστικής Παλινδρόμησης οι οποίες θα πρέπει να εκτιμηθούν από τις παρατηρήσεις του δείγματος.

Η μέθοδος της Λογιστικής Παλινδρόμησης χρησιμοποιεί όλα τα σημεία του δείγματος.

3.2.1. Μετασχηματισμός Logit

Ένας εναλλακτικός τρόπος για να εκφραστεί το μοντέλο της Λογιστικής Παλινδρόμησης είναι με τη χρήση του μετασχηματισμού logit της εξαρτημένης μεταβλητής $p(x)$, δηλαδή ο φυσικός λογάριθμος των πιθανοτήτων να συμβεί το γεγονός x (Hosmer and Lemeshow, 2014; Atkinson et al., 2003; Menard, 2001):

$$\text{logit}(p(x)) = \ln\left(\frac{p(x)}{1-p(x)}\right) = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i x_i \quad (3.4)$$

Στην περίπτωση που η ζητούμενη πιθανότητα προέρχεται από διαφορετικούς πληθυσμούς τότε ο μετασχηματισμός δίνεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση (**Εξίσωση 3.5**) (Hosmer and Lemeshow, 2014; Atkinson et al., 2003; Menard, 2001).

$$\text{logit}(p(x_j)) = \ln\left(\frac{p(x_j)}{1-p(x_j)}\right) = \beta_0 + \sum_{i=1}^K x_{ji} \beta_i \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (3.5)$$

Όπου N είναι ο συνολικός αριθμός των πληθυσμών, $p(x_j)$ η πιθανότητα εμφάνισης του γεγονότος x_j για μια δοσμένη παρατήρηση στον πληθυσμό j^{th} , K ο συνολικός αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών, x_{ji} οι ανεξάρτητες μεταβλητές και β_i οι άγνωστες παράμετροι της λογιστικής παλινδρόμησης οι οποίες θα εκτιμηθούν με βάση τα δεδομένα που λαμβάνονται από τις παρατηρήσεις του δείγματος (Hosmer and Lemeshow, 2014; Atkinson et al., 2003; Menard, 2001).

Ο στόχος της λογιστικής παλινδρόμησης είναι η εύρεση των $K + 1$ άγνωστων παραμέτρων β_K που μεγιστοποιούν τη συνάρτηση πιθανοφάνειας, η οποία παρουσιάζεται στην **Εξίσωση 3.7** (Hosmer and Lemeshow, 2014; Atkinson et al., 2003; Menard, 2001).

$$p(x_j) = \frac{1}{1 + e^{-\sum_{k=0}^K x_{jk} \beta_k}} = \frac{\exp(\beta_0 + \sum_{i=1}^K x_{ji} \beta_i)}{1 + \exp(\beta_0 + \sum_{i=1}^K x_{ji} \beta_i)} \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (3.6)$$

$$L(\beta/y) = \prod_{j=1}^n \frac{n_j!}{y_j! (n_j - y_j)!} p_j^{y_j} (1 - p_j)^{n_j - y_j} \quad (3.7)$$

Όπου για κάθε πληθυσμό j , υπάρχουν $\binom{n_j}{y_j}$ διαφορετικοί τρόποι ώστε να κατατάξουμε τις επιτυχίες y_j μεταξύ των n_j δοκιμών. Η πιθανότητα επιτυχίας για κάθε μία από τις δοκιμές n_j είναι p_j . Η πιθανότητα των y_j επιτυχιών είναι $p_j^{y_j}$. Η πιθανότητα των $(n_j - y_j)$ αποτυχιών είναι $(1 - p_j)^{n_j - y_j}$ (Czerpiel, 2002).

Η μεθοδολογία της Λογιστικής Παλινδρόμησης αναπτύχθηκε σε αλγόριθμο (κώδικα) σε περιβάλλον MATLAB ενώ η επίλυση της του παραπάνω συστήματος πραγματοποιήθηκε αριθμητικά χρησιμοποιώντας την μέθοδο βελτιστοποίησης Newton-Raphson. Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται στην **Εικόνα 6** και δημιουργήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας με χρήση πληροφοριών που αντλήθηκαν από εργασίες των Gordon 2002 και Atkinson et al. 2002 πάνω στη λογιστική παλινδρόμηση.

Ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται παρακάτω περιλαμβάνει τόσο την επιβεβαίωση των εκτιμήσεων σε γνωστά σημεία μέτρησης αλλά και την εκτίμηση με τη μέθοδο της απλής Λογιστικής Παλινδρόμησης της πιθανότητα διάβρωσης σε μη μετρημένα σημεία της όχθης του Ποταμού Κουλιάρη.

```

%% Simple Logistic Regression
load data %% initial auxilliary information
a=data;
load eros %% binary variables
y=eros;
x=[0 0]; % set initial parameters

% process parameters

[n, m] = size(a);

w = ones(n, 1); % weights
% optimisation settings
ridge = 1e-5;
ridgemat = speye(m) * ridge;
param.maxiter = 200;
param.epsilon = 1e-10;

% do the regression

x = zeros(m,1);
oldexpy = -ones(size(y));
for iter = 1:param.maxiter

    adjy = a * x;
    expy = 1 ./ (1 + exp(-adjy));
    deriv = expy .* (1-expy);
    wadjy = w .* (deriv .* adjy + (y-expy));
    weights = spdiags(deriv .* w, 0, n, n);

    x = inv(a' * weights * a + ridgemat) * a' * wadjy;

    if (sum(abs(expy-oldexpy)) < n*param.epsilon)

        fprintf('Converged.\n');

        %return;
    end

    oldexpy = expy;
end

x % predicted parameters

%% Validation
load data_pr % prediction points auxilliary information
z=data_pr;
y=1./(1+exp(-z*x)); % probabilities (assess results)

% Mapping
g=linspace(20,90,15);
d=linspace(6,14,15);
[ TG, SG]=meshgrid(g,d);
xgrid=reshape(TG,15^2,1);
ygrid=reshape(SG,15^2,1);

data=[xgrid ygrid];
z1=data;
y1=1./(1+exp(-z1*x)) % probabilities on the predicted grid points

ZI=reshape(y1,15,15);
surf(TG,SG,ZI)
caxis([0 1]);colorbar

```

Εικόνα 6.Αλγόριθμος της Λογιστικής Παλινδρόμησης

3.3. Υπολογισμός της απόκλισης (G. Statistic)

Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του μοντέλου της Λογιστικής Παλινδρόμησης προσδιορίζεται με τη βοήθεια της μεθόδου G. Statistic. Είναι ένα απλό και αποτελεσματικό μέτρο για τη μελέτη της συμπεριφοράς και της αξιολόγησης του μοντέλου της Λογιστικής Παλινδρόμησης και της αξιοπιστίας της κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής (Rogue Wave Software, Inc, 1999; Hosmer W.; Lemeshow, 2000).

Στις παρακάτω εξισώσεις που προσδιορίζουν την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου η μεταβλητή Y εκφράζει μια διχοτομική τυχαία μεταβλητή που δηλώνει το αποτέλεσμα κάποιου πειράματος και η μεταβλητή $X = (x_1, x_2, \dots, x_{p-1})$ μια σειρά από ανεξάρτητες μεταβλητές εκτίμησης. Υποδηλώνει την υπό όρους πιθανότητα το αποτέλεσμα να είναι παρόν $P = (Y = 1|x) = p(x)$ όπου η $p(x)$ έχει τη μορφή (Rogue Wave Software, Inc, 1999; Hosmer W.; Lemeshow, 2000):

$$p(x) = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_{p-1} x_{p-1})}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_{p-1} x_{p-1})} \quad (3.8)$$

Για τη Λογιστική Παλινδρόμηση, η απόκλιση των αποτελεσμάτων ορίζεται ως εξής: (Rogue Wave Software, Inc, 1999 ; Atkinson et al., 2013):

$$D = -2 \sum_{i=1}^n \left[Y_i \ln \left(\frac{p_i}{Y_i} \right) + (1 - Y_i) \ln \left(\frac{1 - p_i}{1 - Y_i} \right) \right] \quad (3.9)$$

Στη συνέχεια και αφού έχει προσδιοριστεί η απόκλιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου εφαρμόζεται η στατιστική μέθοδος G. Statistic που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση,

$$G = D(\text{για το μοντέλο χωρίς την ανεξάρτητη μεταβλητή}) - D(\text{για το μοντέλο με τη μεταβλητή}) \quad (3.10)$$

ή

$$G = D_{null} - D_k \quad (3.11)$$

Ο όρος D_{null} αναφέρεται στην απόκλιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου όταν εφαρμόζεται χωρίς ανεξάρτητες μεταβλητές, δηλαδή έχει υπολογιστεί μόνο με το σταθερό όρο, την αποτέμνουσα. Ο όρος D_k αναφέρεται στην απόκλιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου όταν έχουν προστεθεί k μεταβλητές. Η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο τιμών, αναφέρεται συχνά ως ένδειξη καλής προσαρμογής. Όσο πιο μεγάλη είναι αυτή η διαφορά τόσο πιο σημαντική είναι η επίδραση των παραμέτρων εκτίμησης που χρησιμοποιούνται (Hosmer W.; Lemeshow, 2000).

3.4. Μέθοδος Τοπικά Σταθμισμένης Παλινδρόμησης

Η μέθοδος της Τοπικά Σταθμισμένης Παλινδρόμησης αποτελεί μια επέκταση της έννοιας της γενικής παλινδρόμησης. Η διαφορά της Τοπικά Σταθμισμένης Παλινδρόμησης από την Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση έγκειται στο γεγονός ότι στην Τοπικά Σταθμισμένη Παλινδρόμηση οι παρατηρήσεις οι οποίες λαμβάνονται υπόψη στη διαμόρφωση του υποδείγματος σταθμίζονται με βάρος τη γεωγραφική τους θέση. Η παλινδρόμηση είναι δυνατόν να αποδώσει εντελώς διαφορετικά συμπεράσματα ανάλογα με το χωρικό πεδίο αναφοράς της εφαρμογής. Η διατύπωση ότι ο χώρος χαρακτηρίζεται από διαφοροποιήσεις ενισχύει τη μετάβαση της ανάλυσης από το υπερτοπικό επίπεδο (global) στο τοπικό επίπεδο (local) με την εισαγωγή της παραμέτρου (location) (Μηλάκα και Φώτης, 2010).

Για την Τοπικά Σταθμισμένη Παλινδρόμηση ισχύει:

$$y_i = \sum_j x_{ij} \beta_j(s_i) + \varepsilon_i \quad i, j = 1 \dots N \quad (3.12)$$

Όπου y_i υποδηλώνει τη μεταβλητή εκτίμησης, s_i είναι η γεωγραφική θέση της παρατήρησης x_i και ε_i το σφάλμα. Στη συγκεκριμένη μέθοδο, κάθε παράμετρος $\beta_j(s_i)$ του μοντέλου παλινδρόμησης, που συνοπτικά από εδώ και πέρα θα αναφέρεται ως β_{ij} , εκφράζεται συναρτήσει των χωρικών θέσεων των παρατηρήσεων (Μηλάκα και Φώτης, 2010).

Αν σχεδιαστεί ένας κύκλος ακτίνας γύρω από το συγκεκριμένο s_i και προσδιοριστεί ένα μοντέλο παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας μόνο τις παρατηρήσεις μέσα στον κύκλο, τότε το β_{ij} που θα παραχθεί μπορεί να θεωρηθεί ως εκτίμηση των παρατηρήσεων μέσα και γύρω από το s_i . Υπολογίζοντας το β_{ij} για κάθε s_i υπολογίζεται ένα σύνολο εκτιμήσεων των χωρικά διαφοροποιημένων παραμέτρων. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται για τον προσδιορισμό της ακτίνας (Μηλάκα και Φώτης, 2010).

Η τιμή του β_{ij} μεταβάλλεται ανάλογα με το σημείο εκτίμησης και για τον υπολογισμό της χρησιμοποιείται η εξίσωση (Atkinson et al., 2013):

$$\beta_{ij} = (x^t K(j) x)^{-1} x^t K(j) y \quad (3.13)$$

Όπου x είναι οι ανεξάρτητες παράμετροι, x^t ο ανάστροφος πίνακας των ανεξάρτητων μεταβλητών, K το βάρος το οποίο διαφέρει ανάλογα με την τοποθεσία j και y είναι η εξαρτημένη μεταβλητή (Atkinson et al., 2013).

Στη μέθοδο της Τοπικά Σταθμισμένης Παλινδρόμησης (Locally Weighted Regression) σταθμίζεται η απόσταση ανάμεσα στο σημείο εκτίμησης και στα γειτονικά σημεία. Αυτό πραγματοποιείται με την βοήθεια μιας **συνάρτησης αντιστάθμισης**, $K(d_{i,j})$, όπου $d_{i,j}$ είναι η απόσταση δύο σημείων s_i και s_j (Χριστόπουλος, 2005) .

Υπάρχουν δυο τρόποι αντιστάθμισης. Ο πρώτος σταθμίζει τα δεδομένα ανάλογα της απόστασής τους από το σημείο εκτίμησης, και ο δεύτερος σταθμίζει το «σφάλμα» ανάλογα με την απόσταση από το σημείο εκτίμησης (Χριστόπουλος, 2005).

Ένα απλό παράδειγμα της διαφοράς ανάμεσα στους δυο τρόπους αντιστάθμισης είναι να εξετάσουμε τον **σταθμικό μέσο όρο** στο σημείο s_0 , και την εκτίμηση στο ίδιο σημείο βάσει ενός **αντισταθμισμένου κριτηρίου σφάλματος** (Χριστόπουλος, 2005).

Ο σταθμικός μέσος όρος συνεκτιμά τις δειγματικές τιμές ανάλογα της απόστασής τους από το σημείο εκτίμησης, ως εξής (Χριστόπουλος, 2005):

$$\hat{X}(s_0) = \frac{\sum_{i=1}^N X(s_i) K(d_{0,i})}{\sum_{i=1}^N K(d_{0,i})} \quad (3.14)$$

Αντίθετα, η αντιστάθμιση του κριτηρίου σφάλματος οδηγεί σε μια έκφραση για το σφάλμα, στην οποία η διαφορά κάθε δειγματικής τιμής από την εκτίμηση συνυπολογίζεται ανάλογα με την απόσταση, δηλαδή

$$C(s_0) = \sum_{i=1}^N [X(s_i) - \hat{X}(s_0)]^2 K(d_{0,i}) \quad (3.15)$$

Η βέλτιστη εκτίμηση υπολογίζεται από την εξίσωση ελαχιστοποίησης του σφάλματος,

$$\frac{\partial C(s_0)}{\partial \hat{X}(s_0)} = 0 \quad (3.16)$$

Η εξίσωση του σταθμικού μέσου όρου είναι επίσης γνωστή ως **παλινδρόμηση πυρήνα** (Χριστόπουλος, 2005) .

3.4.1. Μέτρα απόστασης

Η απόσταση δύο σημείων είναι δυνατό να εκτιμηθεί με διάφορα μαθηματικά μέτρα. Τα πιο διαδεδομένα είναι:

Ευκλείδεια απόσταση:

$$d_E(s_i, s_j) = \sqrt{\sum_{l=1}^d (s_{i,l} - s_{j,l})^2} \quad (3.17)$$

Απόσταση βάσει μέτρου L^p (μέτρο Minkowski):

$$d_p(s_i - s_j) = \left(\sum_{l=1}^d |s_{i,l} - s_{j,l}|^p \right)^{1/p} \quad (3.18)$$

Ευκλείδεια απόσταση με διαγώνια αντιστάθμιση:

$$d_m(s_i, s_j) = \sqrt{\sum_{l=1}^d m_l^2 (s_{i,l} - s_{j,l})^2} \quad (3.19)$$

Ευκλείδεια απόσταση με πλήρη αντιστάθμιση:

$$d_M(s_i - s_j) = \sqrt{(s_i - s_j)^T M^T M (s_i - s_j)} = d_E(Ms_i, Ms_j) \quad (3.20)$$

Το M αναπαριστά έναν πίνακα διαστάσεων $d \times d$, όπου d είναι η διάσταση του χώρου.

Μέτρο απόστασης L^p με πλήρη αντιστάθμιση:

$$d_{p,M}(s_i - s_j) = d_p(Ms_i, Ms_j) \quad (3.21)$$

Σε ορισμένες περιπτώσεις ενδείκνυται η διαφορετική αντιμετώπιση της απόστασης όσον αφορά σημεία σε διαφορετικές διευθύνσεις. Για παράδειγμα, απόσταση 100 μέτρων ανάμεσα σε δυο σημεία στο κέντρο μιας πεδιάδας έχει πιθανώς διαφορετική επίπτωση όσον αφορά σε κλιματολογικές μεταβολές σε σύγκριση με υψομετρική απόσταση ανάμεσα δύο σημεία στους πρόποδες και στην πλαγιά ενός βουνού. Σε αυτές τις περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται **συντελεστές αντιστάθμισης** (scaling factors), για να υπολογιστεί μια περισσότερο αντιπροσωπευτική έννοια απόστασης (Χριστόπουλος, 2005) .

3.4.2. Συναρτήσεις αντιστάθμισης

Οι συναρτήσεις αντιστάθμισης ικανοποιούν ορισμένες ιδιότητες που προκύπτουν από λογικούς περιορισμούς. Πιο συγκεκριμένα (Χριστόπουλος, 2005) :

- Η συνάρτηση $K(d_{i,j})$ παίρνει τη μέγιστη τιμή της για $d_{i,j} = 0$.
- Η $K(d_{i,j})$ είναι συνεχής συνάρτηση.
- Όσο πιο ομαλή είναι η $K(d_{i,j})$ τόσο πιο ομαλή είναι και η εκτιμώμενη μεταβολή.
- Αν $\lim_{d_{i,j} \rightarrow 0} K(d_{i,j}) = \infty$, η τοπικά σταθμισμένη παλινδρόμηση οδηγεί σε ακριβή παρεμβολή.
- Πεπερασμένες τιμές του $K(d_{i,j} = 0)$ οδηγούν σε εξομάλυνση.
- Η συνάρτηση αντιστάθμισης πρέπει να παίρνει μόνο θετικές τιμές.
- Αν $K(d_{i,j}) = 0$ για $d_{i,j} > d_c$, όπου d_c είναι μια κρίσιμη απόσταση, είναι εφικτές πολύ αποτελεσματικές εφαρμογές της τοπικά σταθμισμένης

παλινδρόμησης. Όμως, τέτοιες συναρτήσεις αντιμετωπίζουν προβλήματα σε περιοχές χαμηλής πυκνότητας δεδομένων.

3.4.3. Πρότυπα Συναρτήσεων Αντιστάθμισης

- Δυναμονομική

$$K(d_{i,j}) = \frac{1}{d_{i,j}^p}, p > 0$$

- Αντίστροφης Απόστασης

$$K(d_{i,j}) = \frac{1}{1 + d_{i,j}^p}$$

- Gaussian

$$K(d_{i,j}) = \exp(-d_{i,j}^2)$$

- Τετραγωνική

$$K(d_{i,j}) = \begin{cases} 1 - d_{i,j}^2, & |d_{i,j}| \leq 1 \\ 0, & |d_{i,j}| > 1 \end{cases}$$

- Ομοιόμορφη

$$K(d_{i,j}) = \begin{cases} 1, & |d_{i,j}| \leq 1 \\ 0, & |d_{i,j}| > 1 \end{cases}$$

- Τριγωνική

$$K(d_{i,j}) = \begin{cases} 1 - |d_{i,j}|, & |d_{i,j}| \leq 1 \\ 0, & |d_{i,j}| > 1 \end{cases}$$

- Τρι-κυβική

$$K(d_{i,j}) = [1 - \left|\frac{d_{i,j}}{h}\right|^3, \left|\frac{d_{i,j}}{h}\right| \leq 1]$$

Όπου h είναι η βέλτιστη απόσταση που καθορίζει την χωρική συσχέτιση των σημείων.

- Εκθετική

$$K(d_{i,j}) = \exp\left(-\frac{d_{i,j}}{\alpha}\right)$$

Όπου α είναι μία μη γραμμική παράμετρος η οποία καθορίζει την απόσταση συσχέτισης των σημείων μέτρησης (Atkinson et al., 2013).

Οι αρχές της Τοπικά Σταθμισμένης Παλινδρόμησης εφαρμόζονται στη μέθοδο της Λογιστικής Παλινδρόμησης για τον προσδιορισμό τοπικών συναρτήσεων εκτίμησης της διάβρωσης, οι οποίες αναπτύσσονται με βάση το πολυώνυμο των ανεξάρτητων μεταβλητών ($y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i + \dots + \beta_K x_K$). Οι συναρτήσεις αντιστάθμισης που εξετάζονται είναι η τρι-κυβική (Χριστόπουλος, 2005) και η εκθετική (Atkinson et al., 2013) καθώς σύμφωνα με την βιβλιογραφία έχουν αποδειχθεί κατάλληλες για τον προσδιορισμό της χωρικής αλληλεπίδρασης μεταβλητών σε περιβαλλοντικές εφαρμογές.

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων αναπτύχθηκε εκ νέου αλγόριθμος σε περιβάλλον MATLAB ο οποίος βασίστηκε σε πληροφορίες που αντλήθηκαν από εργασίες των Gordon 2002, Atkinson et al. 2002 και Χριστόπουλου 2005. Ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες περιλαμβάνει τόσο την επιβεβαίωση των εκτιμήσεων σε γνωστά σημεία μέτρησης αλλά και την εκτίμηση με τη μέθοδο της Τοπικά Σταθμισμένης Λογιστικής Παλινδρόμησης της πιθανότητας διάβρωσης σε μη μετρημένα σημεία της όχθης του Ποταμού Κοιλιάρη. Για κάθε περίπτωση που αναπτύχθηκε υπολογίστηκε επίσης και η απόκλιση των αποτελεσμάτων D .

```

%% Locally weighted Logistic Regression
load data %% initial auxilliary information
a=data;
load eros %% binary variables
y=eros;
x=[0 0]; % set initial parameters
load x_in;% location x
load y_in;%location y
load x_p; %prediction location x
load y_p;%prediction location x

% process parameters

[n, m] = size(a);

%w = ones(n, 1);% weights
% optimisation settings
ridge = 1e-5;
ridgemat = speye(m) * ridge;
param.maxiter = 200;
param.epsilon = 1e-10;

% Calculate local parameters
for i=1:length(x_p)
    x0=x_p(i);
    y0=y_p(i);
    s1=sqrt((x_in-x0).^2+(y_in-y0).^2);

% select a weight function, test variable correlation ranges
% e.g. h= 500m

```

```

[jnb]=find(s1<=h);
s2=s1(jnb);
y=y(jnb);
a=a(jnb);

%tricubic function
%   D=s2/h;
%   kd=(1-D.^3).^3;
%   w=sqrt(kd);

%exponential function
%w=exp(-s2/h)

% do the regression

x = zeros(m,1);
oldexpy = -ones(size(y));

adjy = a * x;
expy = 1 ./ (1 + exp(-adjy));
deriv = expy .* (1-expy);
wadjy = w .* (deriv .* adjy + (y-expy));
weights = spdiags(deriv .* w, 0, n, n);

x = inv(a' * weights * a + ridgemat) * a' * wadjy;

if (sum(abs(expy-oldexpy)) < n*param.epsilon)

    fprintf('Converged.\n');
end

oldexpy = expy;

x% predicted parameters

%% Validation
load data_pr % prediction points auxilliary information
z1=data_pr(i,1)
z2=data_pr(i,2)
z=[z1 z2]

y1(i)=1./(1+exp(-z*x));

end

y1% probabilities (assess results, if not satisfactory try different h)

```

Εικόνα 7.Αλγόριθμος της Τοπικά Σταθμισμένης Λογιστικής Παλινδρόμησης


```

%% Locally weighted Logistic Regression mapping
%% state optimum range h from the validation step

load data %% initial auxilliary information
a=data;
load eros %% binary variables
y=eros;
x=[0 0]; % set initial parameters
load x_in;% location x
load y_in;%location y
h1=h;%% state optimum range from the validation step

% Interpolation of prediction points auxilliary information
L=15
XI=linspace(x_inmin,x_inmax,L);
YI=linspace(y_inmin,y_inmax,L);
[XI,YI] = meshgrid(XI,YI);
ZI=griddata(x_in,y_in,a(:,1),XI,YI);
ZII=griddata(x_in,y_in,a(:,2),XI,YI);

xgrid=reshape(XI,15^2,1);
ygrid=reshape(YI,15^2,1);

data_pr=[ZI ZII];% prediction points auxilliary information

x_p=xgrid;
y_p=ygrid;
% process parameters

[n, m] = size(a);

%w = ones(n, 1);% weights
% optimisation settings
ridge = 1e-5;
ridgemat = speye(m) * ridge;
param.maxiter = 200;
param.epsilon = 1e-10;

% Calculate local parameters
for i=1:length(x_p)
    x0=x_p(i);
    y0=y_p(i);
    s1=sqrt((x_in-x0).^2+(y_in-y0).^2);

% select optimum weight function
[jnb]=find(s1<=h1);
s2=s1(jnb);
y=y(jnb) ;
a=a(jnb);

%tricubic function
D=s2/h1;
kd=(1-D.^3).^3;
w=sqrt(kd);

%exponential function
%w=exp(-s2/h1)

```

```

% do the regression

x = zeros(m,1);
oldexpy = -ones(size(y));

adjy = a * x;
expy = 1 ./ (1 + exp(-adjy));
deriv = expy .* (1-expy);
wadjy = w .* (deriv .* adjy + (y-expy));
weights = spdiags(deriv .* w, 0, n, n);

x = inv(a' * weights * a + ridgemat) * a' * wadjy;

if (sum(abs(expy-oldexpy)) < n*param.epsilon)

    fprintf('Converged.\n');
end

oldexpy = expy;

x% predicted parameters

z1=data_pr(i,1)
z2=data_pr(i,2)
z=[z1 z2] % prediction points auxilliary information

y1(i)=1./(1+exp(-z1*x));
y1% probabilities on the predicted grid points
end

% Mapping
ZIII=reshape(y1,15,15);
surf(XI,YI,ZIII)
caxis([0 1]);colorbar

```

Εικόνα 8.Αλγόριθμος της χαρτογράφησης της Τοπικά Σταθμισμένης Λογιστικής Παλινδρόμησης

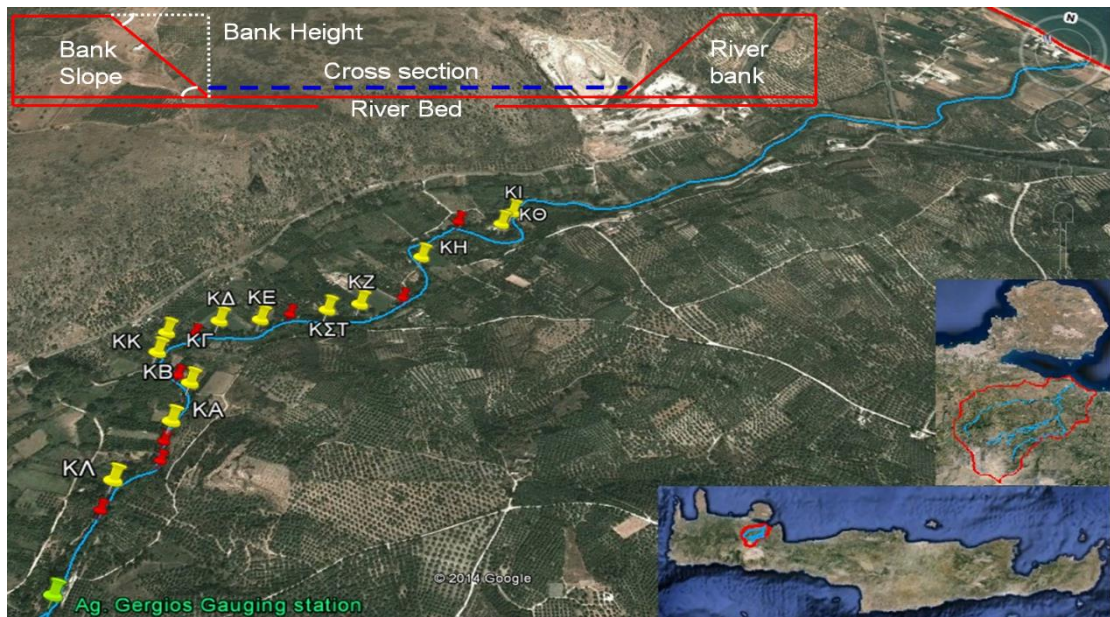
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Αποτελέσματα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3, για την πρόβλεψη της πιθανότητας διάβρωσης στην όχθη του ποταμού Κοιλιάρη. Επίσης πραγματοποιείται και αξιολόγηση των ανεξάρτητων μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν στη Λογιστική Παλινδρόμησης με τη βοήθεια της μεθόδου G. Statistic.

4.1. Αποτελέσματα μοντέλου της λογιστικής παλινδρόμησης και σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου BSTEM

Στην **Εικόνα 9** γίνεται ο προσδιορισμός των σημείων της όχθης του ποταμού Κοιλιάρη στα οποία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των ανεξάρτητων μεταβλητών καθώς και έλεγχος διάβρωσης με τη χρήση πασσάλων για το διάστημα Νοέμβριος 2013- Απρίλιος 2014. Παρουσιάζεται επίσης και ο τρόπος που υπολογίστηκε η γωνία κλίσης των πρανών και το πλάτος της διατομής. Αρχικά με τη βοήθεια ενός GPS βρήκαμε τη θέση των σημείων στη βάση του ποταμού και στην όχθη. Έχοντας γνωστό το υψόμετρο υπολογίσαμε τη μεταξύ τους απόσταση. Με τη βοήθεια αυτής της απόστασης καταφέραμε να υπολογίσουμε προσεγγιστικά την εσωτερική γωνία της όχθης και κατ' επέκταση τη γωνία του πρανούς. Το πλάτος της διατομής μετρήθηκε με τη χρήση μεζούρας από τη βάση της μιας όχθης μέχρι τη βάση της απέναντι όχθης.

Στα σημεία που παρουσιάζουν διάβρωση ή ενδείξεις διάβρωσης δίνεται η τιμή 1 ενώ στα σημεία που δεν παρουσιάζουν διάβρωση ή ενδείξεις διάβρωσης δίνεται η τιμή 0.



Εικόνα 9. Το υπό μελέτη μέρος του ποταμού Κοιλιάρη. Τα κίτρινα σημεία αντιπροσωπεύουν τις μετρούμενες θέσεις, ενώ τα κόκκινα σημεία τις θέσεις επιβεβαίωσης

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 3) παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο της λογιστικής παλινδρόμησης και τα σημεία επιβεβαίωσης, με κόκκινο και μαύρο χρώμα αντίστοιχα.

Πίνακας 3.Δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο της Λογιστικής Παλινδρόμησης

<i>Θέση</i>	<i>Συντεταγμένες</i>		<i>Παράμετροι</i>	
	X_Coord	Y_Coord	Γωνία κλίσης (°)	Διατομή (m)
KA	512510,49	3922489,42	60	9
KB	512507,60	3922584,92	75	9,25
ΚΓ	512419,21	3922701,86	65	8,75
ΚΔ	512502,34	3922751,28	55	9
KE	512575,40	3922769,87	85	10,76
ΚΣΤ	512691,29	3922816,23	60	11,55
KZ	512746,71	3922844,04	75	10
ΚΗ	512827,13	3923010,52	65	13,5
ΚΘ	512963,05	3923146,27	60	13,35
KI	512978,12	3923189,42	75	7,6
KK	512421,80	3922649,50	70	13
ΚΛ	512467,61	3922344,57	60	9
Σ1	512476,74	3922122,56	84	9,25
ΣΑ & ΣΕ	512474,98	3922174,33	58	9,05
ΣΒ	512483,26	3922303,20	81	9,35
ΣΓ	512523,83	3922487,10	33	9
ΣΗ	512431,05	3922697,32	82,5	8,75
ΣΔ	512504,39	3922747,35	44	9
Σ2	512481,23	3922333,83	27	9,26
ΣΖ	512487,46	3922618,12	57	9,25

Ως τιμές εισόδου της εξαρτημένης μεταβλητής στα μετρημένα σημεία δίνονται όπως έχει προαναφερθεί οι τιμές 0 και 1 που αντιστοιχούν στην απουσία ή παρουσία διάβρωσης αντίστοιχα και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Στον **Πίνακα 4** παρουσιάζονται επίσης και τα δεδομένα εισαγωγής των ανεξάρτητων μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του μοντέλου της Λογιστικής Παλινδρόμησης.

Πίνακας 4.Μεταβλητές εισόδου

Θέση	Παρουσία ή Απουσία Διάβρωσης	Γωνία κλίσης (°)	Πλάτος διατομής (m)
ΚΑ	1	60	9
ΚΒ	1	75	9,25
ΚΓ	1	65	8,75
ΚΔ	1	55	9
ΚΕ	1	85	10,76
ΚΣΤ	1	60	11,55
ΚΖ	0	75	10
ΚΗ	0	65	13,5
ΚΘ	1	60	13,35
ΚΙ	1	75	7,6
ΚΚ	0	70	13
ΚΛ	0	60	9

Στον **Πίνακα 5** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου της λογιστικής παλινδρόμησης το οποίο εξάγει αποτελέσματα που εκφράζουν την πιθανότητα διάβρωσης στα διάφορα σημεία της όχθης. Τα παρακάτω αποτελέσματα εξήχθησαν από το μοντέλο της λογιστικής παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας τη 2η περίπτωση από τις 7 που εξετάστηκαν και αποτελούν τη βέλτιστη προσέγγιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου BSTEM. Για την εφαρμογή του μοντέλου, λήφθηκαν υπόψη ως ανεξάρτητες μεταβλητές η γωνία κλίσης, το πλάτος της διατομής και η αποτέμνουσα. Επίσης στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της σταθερότητας ή μη της όχθης που προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου BSTEM (Πίνακας 2).

Πίνακας 5.Αποτελέσματα πιθανότητας διάβρωσης σύμφωνα με το μοντέλο της Λογιστικής Παλινδρόμησης και αστοχίας ή μη της όχθης σύμφωνα με το μοντέλο BSTEM, F_s .

Θέση	Πιθανότητα Διάβρωσης	F_s
Σ1	0,8434	Unstable
ΣΑ & ΣΕ	0,6413	Unstable
ΣΒ	0,8219	Unstable
ΣΓ	0,3751	Stable
ΣΗ	0,849	Unstable
ΣΔ	0,4937	Unstable
ΣΖ	0,3033	Unstable
ΣΖ	0,6209	Unstable

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του μοντέλου BSTEM (Λιλλή,2011) με τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης, παρατηρείται ότι σε γενικές γραμμές δεν υπάρχει απόκλιση. Δηλαδή, στα έξι από τα οχτώ σημεία τα οποία εξετάσθηκαν τα αποτελέσματα συμφωνούν, εφόσον δεχόμαστε ότι για πιθανότητα 0,5-1 υπάρχει διάβρωση (αντίστοιχα για το μοντέλο BSTEM, το σημείο χαρακτηρίζεται ως unstable) ενώ για πιθανότητα 0-0,5 δεν υπάρχει (αντίστοιχα για το μοντέλο BSTEM, το σημείο χαρακτηρίζεται ως stable). Αναλυτικότερα τα αποτελέσματα της μεθόδου της λογιστικής παλινδρόμησης συγκλίνουν κατά 75% με αυτά της μεθόδου του BSTEM (Λιλλή, 2011).Τα δύο σημεία στα οποία τα αποτελέσματά δε συγκλίνουν είναι το ΣΔ και το ΣΖ. Στο σημείο ΣΔ δεν παρατηρείται μεγάλη απόκλιση καθώς η τιμή του είναι πολύ κοντά στο κατώτερο όριο της περίπτωσης ύπαρξης διάβρωσης (0,4937). Είναι λογικό να μην παρατηρείται απόλυτη ταύτιση λόγω του ότι η σύγκριση γίνεται μεταξύ των αποτελεσμάτων και όχι των μεθόδων καθώς η ύπαρξη διάβρωσης με τη μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης λαμβάνει υπόψη δύο από τους βασικούς παράγοντες που προκαλούν διάβρωση της όχθης ενός ποταμού (διατομή ποταμού και γωνία κλίσης των πρανών).

4.1.1 Παραλλαγές του μοντέλου λογιστικής παλινδρόμησης

Στα πλαίσια εφαρμογής του μοντέλου λογιστική παλινδρόμησης εξετάζονται 7 διαφορετικές περιπτώσεις που αφορούν τη δομή του πολυωνύμου το οποίο περιλαμβάνει τις ανεξάρτητες μεταβλητές σύμφωνα με τη βιβλιογραφία.

1^η περίπτωση

$$f(x) = \beta_0$$

2^η περίπτωση

$$f(x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$$

3^η περίπτωση

$$f(x) = \beta_0 + \beta_1 x_1$$

4^η περίπτωση

$$f(x) = \beta_0 + \beta_2 x_2$$

5^η περίπτωση

$$f(x) = \beta_1 x_1$$

6^η περίπτωση

$$f(x) = \beta_2 x_2$$

7^η περίπτωση

$$f(x) = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$$

Όπου,

x_1 =γωνία κλίσης

x_2 = πλάτος διατομής

Τα δεδομένα εισαγωγής που χρησιμοποιήθηκαν για όλες τις περιπτώσεις παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6).

Πίνακας 6. Δεδομένα εισαγωγής στον κώδικα της Λογιστικής Παλινδρόμησης

Θέση	Παρουσία ή Απουσία Διάβρωσης	Γωνία κλίσης (°)	Πλάτος διατομής (m)
ΚΑ	1	60	9
ΚΒ	1	75	9,25
ΚΓ	1	65	8,75
ΚΔ	1	55	9
ΚΕ	1	85	10,76
ΚΣΤ	1	60	11,55
ΚΖ	0	75	10
ΚΗ	0	65	13,5
ΚΘ	1	60	13,35
ΚΙ	1	75	7,6
ΚΚ	0	70	13
ΚΛ	0	60	9

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου στον υπολογισμό των παραμέτρων των ανεξάρτητων μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε περίπτωση, της σημαντικότητάς τους στην εκτίμηση της πιθανότητας διάβρωσης “G Statistic” καθώς και σχηματική απεικόνιση των εκτιμήσεων της Λογιστικής Παλινδρόμησης σε μη μετρημένα σημεία της όχθης του ποταμού με τη βέλτιστη και τη δεύτερη καλύτερη προσέγγιση.

1^η περίπτωση

Πίνακας 7. Παράμετροι μοντέλου Λογιστικής Παλινδρόμησης και υπολογισμός απόκλισης αποτελεσμάτων D "G. Statistic" στην περίπτωση όπου λαμβάνεται υπόψη μόνο η αποτέμνουσα

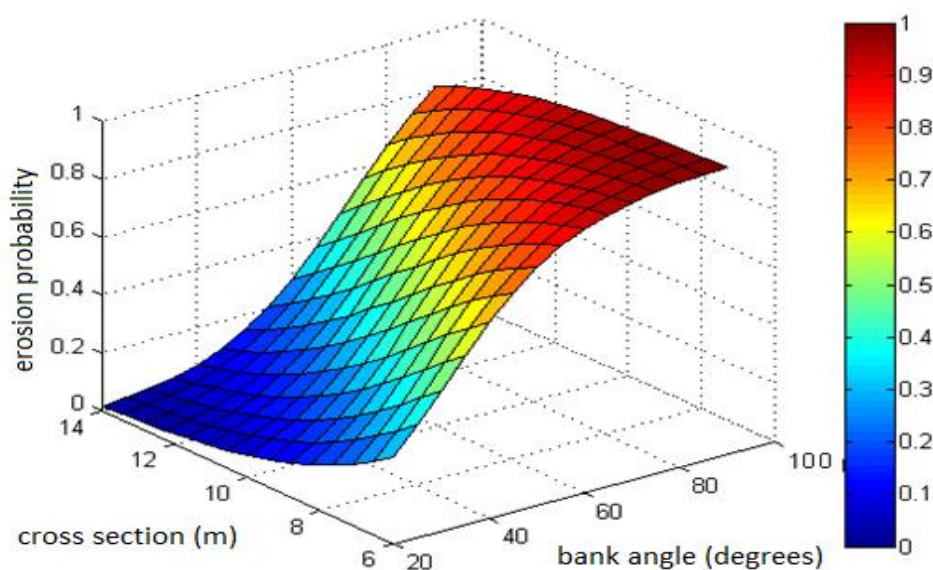
β_0	$G. Statistic (D)$
0,6931	7,8739

2^η περίπτωση

Πίνακας 8. Παράμετροι μοντέλου Λογιστικής Παλινδρόμησης και υπολογισμός απόκλισης αποτελεσμάτων D "G. Statistic" στην περίπτωση όπου λαμβάνονται υπόψη η αποτέμνουσα, η γωνία κλίσης και το πλάτος της διατομής

β_0	$G. Statistic (D)$
3,23	6,14
β_1	
0,085	
β_2	
-0,4178	

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα, για τις τιμές $\beta_0 = 3,23$, $\beta_1 = 0,085$ και $\beta_2 = -0,4178$, που αναπαριστά την εκτίμηση της πιθανότητας βάσει του μοντέλου της Λογιστικής Παλινδρόμησης σε μη μετρημένα σημεία της όχθης, το οποίο προέκυψε από των κώδικα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB.



Διάγραμμα 10. Γραφική απεικόνιση του μοντέλου της Λογιστικής Παλινδρόμησης

Κατά την επαναληπτική διαδικασία προσδιορισμού της πιθανότητάς διάβρωσης στα σημεία εκτίμησης, για το υπερτοπικό μοντέλο (global model) αυτές οι παράμετροι είναι σταθεροί. Σε αυτήν την περίπτωση (**Διάγραμμα 10**) προκειμένου να δοθεί μια απεικόνιση της πιθανότητάς διάβρωσης με βάση την κλίση και το πλάτος της διατομής, χωρίστηκε το εύρος ανάμεσα στη μικρότερη και τη μεγαλύτερη τιμή της κάθε μεταβλητής σε 15 κομμάτια. Αντίστοιχα δημιουργήθηκαν 15 ζευγάρια ανεξάρτητων μεταβλητών και εκφράστηκε η $p(x)$.

3^η περίπτωση

Πίνακας 9. Παράμετροι μοντέλου Λογιστικής Παλινδρόμησης και υπολογισμός απόκλισης αποτελεσμάτων D "G. Statistic" στην περίπτωση όπου λαμβάνονται υπόψη η αποτέμνουσα και η γωνία κλίσης

β_0	$G. Statistic (D)$
1,2669	7,1205
β_1	
0,071	

4^η περίπτωση

Πίνακας 10. Παράμετροι μοντέλου Λογιστικής Παλινδρόμησης και υπολογισμός απόκλισης αποτελεσμάτων D "G. Statistic" στην περίπτωση όπου λαμβάνονται υπόψη η αποτέμνουσα και το πλάτος της διατομής

β_0	$G. Statistic (D)$
5,0329	6,5479
β_2	
-0,4089	

5^η περίπτωση

Πίνακας 11. Παράμετροι μοντέλου Λογιστικής Παλινδρόμησης και υπολογισμός απόκλισης αποτελεσμάτων D "G. Statistic" στην περίπτωση όπου λαμβάνεται υπόψη μόνο η γωνία κλίσης

β_1	$G. Statistic (D)$
0,0101	7,8132

6^η περίπτωση

Πίνακας 12. Παράμετροι μοντέλου Λογιστικής Παλινδρόμησης και υπολογισμός απόκλισης αποτελεσμάτων D "G. Statistic" στην περίπτωση όπου λαμβάνεται υπόψη μόνο το πλάτος της διατομής

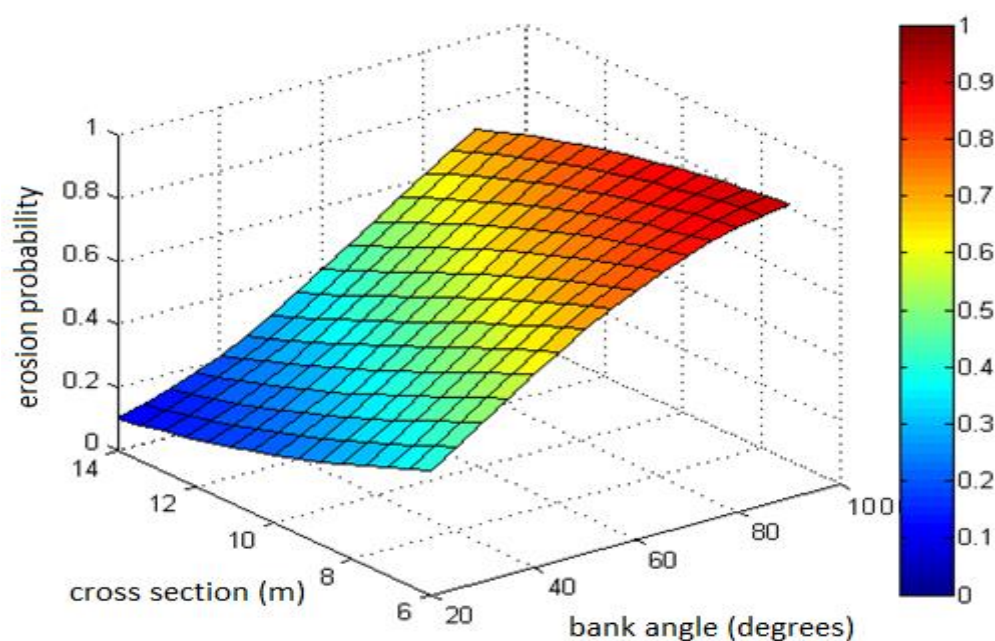
β_2	$G. Statistic (D)$
0,117	7,417

7^η περίπτωση

Πίνακας 13. Παράμετροι μοντέλου Λογιστικής Παλινδρόμησης και υπολογισμός απόκλισης D "G. Statistic" στην περίπτωση όπου λαμβάνονται υπόψη η γωνία κλίσης και το πλάτος της διατομής

β_1	$G. Statistic (D)$
0,074	6,896
β_2	
-0,273	

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση της πιθανότητας διάβρωσης για την 7^η περίπτωση.



Διάγραμμα 11. Γραφική απεικόνιση του μοντέλου της Λογιστικής Παλινδρόμησης

4.2. Αποτελέσματα της διάβρωσης με τη χρήση των τοπικά σταθμισμένων συναρτήσεων

Στη συνέχεια, γίνεται χρήση της Τοπικά σταθμισμένης Παλινδρόμησης για τη βελτίωση των εκτιμήσεων της διάβρωσης, αλλά κυρίως για τη βελτίωση των σημείων ΣΔ και ΣΖ, στα οποία σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου BSTEM υπάρχει διάβρωση, όμως από τα αποτελέσματα της Λογιστικής Παλινδρόμησης προκύπτει το αντίθετο. Οι συναρτήσεις στάθμισης που χρησιμοποιούνται για να εκχωρηθούν τα βάρη στις παρατηρήσεις της Τοπικά Σταθμισμένης Λογιστικής Παλινδρόμησης είναι συνήθως η εκθετική και τρι-κυβική συνάρτηση. Τα βάρη κατανέμονται σε σχέση με την απόσταση του σημείου εκτίμησης από το σημείο μέτρησης. Τα αποτελέσματα της πιθανότητας διάβρωσης μετά τη χρήση αυτών των δύο συναρτήσεων παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (**Πίνακας 14 και Πίνακας 15**).

Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία της διασταυρωμένης επαλήθευσης (cross validation) με τα σημεία μέτρησης υπολογίζεται ότι η μη γραμμική παράμετρος που καθορίζει την απόσταση συσχέτισης των σημείων μέτρησης (α) είναι ίση με 600 m για την εκθετική συνάρτηση.

Πίνακας 14.Αποτελέσματα της πιθανότητας διάβρωσης σύμφωνα με την εκθετική συνάρτηση

	Calibration points	Bank angle (degrees)	Cross section (m)	Erosion logistic	Erosion validation	Erosion probability local (exp) model
Σ1	1	84	9,25	0,8434	U	0,85
ΣΑ & ΣΕ	2	58	9,05	0,6413	U	0,58
ΣΒ	3	81	9,35	0,8219	U	0,75
ΣΓ	4	33	9	0,3751	S	0,27
ΣΗ	5	82,5	8,75	0,849	U	0,81
ΣΔ	6	44	9	0,4937	U	0,54
ΣΖ	7	27	9,26	0,3033	U	0,21
ΣΖ	8	57	9,25	0,6209	U	0,64

Για την τρι-κυβική συνάρτηση, η βέλτιστη απόσταση που καθορίζει τη χωρική συσχέτιση των σημείων (h) είναι ίση με 500m.

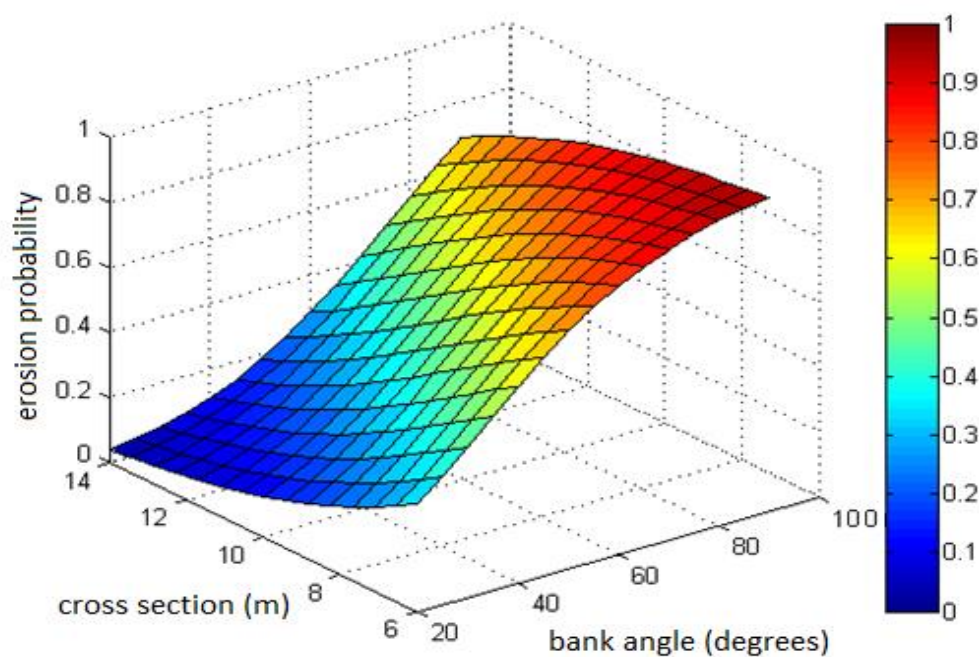
Πίνακας 15.Αποτελέσματα της πιθανότητας διάβρωσης σύμφωνα με την τρι-κυβική συνάρτηση

	Calibration points	Bank angle (degrees)	Cross section (m)	Erosion logistic	Erosion validation	Erosion probability local (3-cubic) model
Σ1	1	84	9,25	0,8434	U	0,8591
ΣΑ & ΣΕ	2	58	9,05	0,6413	U	0,7476
ΣΒ	3	81	9,35	0,8219	U	0,8701
ΣΓ	4	33	9	0,3751	S	0,2500
ΣΗ	5	82,5	8,75	0,849	U	0,8185
ΣΔ	6	44	9	0,4937	U	0,5286
Σ2	7	27	9,26	0,3033	U	0,5241
ΣΖ	8	57	9,25	0,6209	U	0,7394

Παρακάτω παρουσιάζονται αποτελέσματα της πιθανότητας διάβρωσης και του “G. Statistic” για την εφαρμογή της εκθετικής και της τρι-κυβικής συνάρτησης στη Λογιστική Παλινδρόμηση καθώς και σχηματική απεικόνιση της εφαρμογής των μεθόδων σε μη μετρημένα σημεία στις όχθες του ποταμού Κουλιάρη.

Πίνακας 16.Αποτελέσματα της πιθανότητας διάβρωσης και του G. Statistic για την εκθετική συνάρτηση

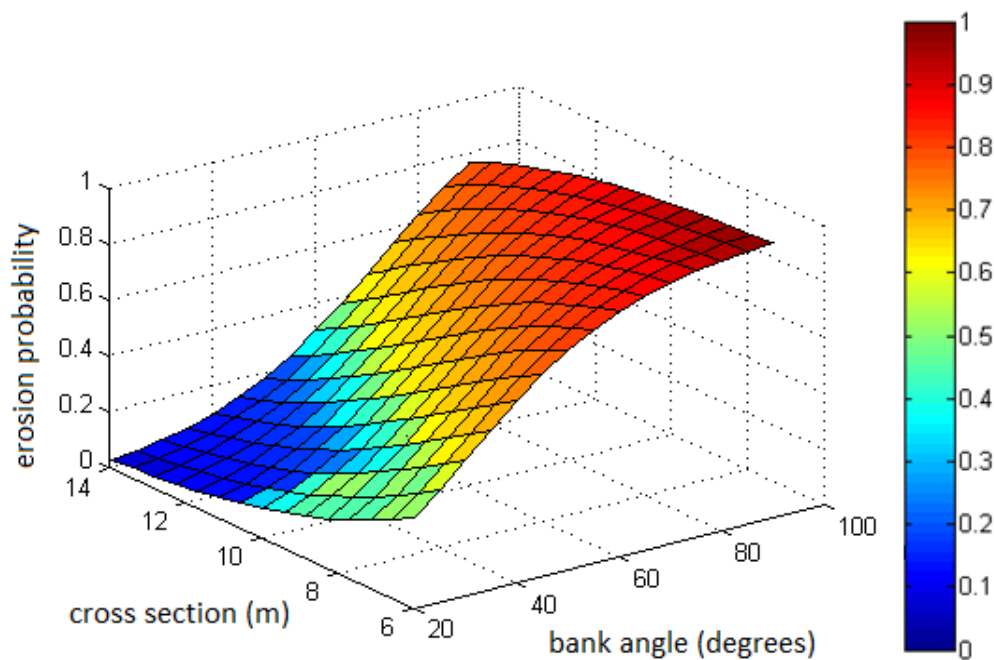
Θέση	$p(x)$	G. Statistic (D)
Σ1	0,85	6,37
ΣΑ & ΣΕ	0,58	
ΣΒ	0,75	
ΣΓ	0,27	
ΣΗ	0,81	
ΣΔ	0,54	
Σ2	0,21	
ΣΖ	0,64	



Διάγραμμα 12. Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της εκθετικής συνάρτησης

Πίνακας 17.Αποτελέσματα της πιθανότητας διάβρωσης και του G . Statistic για την τρι-κυβική συνάρτηση

Σημεία	$p(x)$	G . Statistic (D)
Σ1	0,8591	5,1285
ΣΑ & ΣΕ	0,7476	
ΣΒ	0,8701	
ΣΓ	0,25	
ΣΗ	0,8185	
ΣΔ	0,5286	
ΣΖ	0,5241	
ΣΖ	0,7394	



Διάγραμμα 13. Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της τρι-κυβικής συνάρτησης

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το μοντέλο της Τοπικά Σταθμισμένης Λογιστικής Παλινδρόμησης με χρήση της τρι-κυβικής συνάρτησης στάθμισης των δεδομένων εισόδου ανταποκρίνεται καλύτερα καθώς επιβεβαιώνει την ύπαρξη ή μη διάβρωσης και στα 8 σημεία μέτρησης. Από τα διαγράμματα (**Διάγραμμα 12** και **Διάγραμμα 13**), που προέκυψαν από την εφαρμογή σε μη μετρημένα σημεία φαίνεται ότι το μοντέλο αυτό προσομοιώνει καλύτερα τις εναλλαγές στην κλίση και τη διατομή του ποταμού σε σχέση με τα υπόλοιπα όπως αποδεικνύεται και από τα αποτελέσματα επιβεβαίωσης των εκτιμήσεων. Στα διαγράμματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των συναρτήσεων αντιστάθμισης (**Διάγραμμα 12** και **Διάγραμμα 13**), παρατηρούμε επίσης ότι οι δύο μέθοδοι, σε διαφορετικά σημεία κάθε φορά δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα στο σημείο όπου η κλίση είναι ίση με 60° και το πλάτος της διατομής ίσο με 10 m, για την εκθετική συνάρτηση η πιθανότητα διάβρωσης είναι περίπου ίση με 0,5 - 0,55, ενώ για την τρι-κυβική συνάρτηση είναι περίπου ίση με 0,65 - 0,7. Αυτές οι διαφοροποιήσεις οφείλονται στον τρόπο λειτουργίας της κάθε συνάρτησης.

Κατά την επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού των εκτιμώμενων παραμέτρων (β_{ij}) για τα σημεία εκτίμησης με τις συναρτήσεις αντιστάθμισης αυτές

μεταβάλλονται όπως εκφράζεται και από τη μεθοδολογία της Τοπικά Σταθμισμένης Παλινδρόμησης. Ο συνδυασμός της Λογιστικής Παλινδρόμησης και της Τοπικά Σταθμισμένης Παλινδρόμησης στην εκτίμηση της πιθανότητας διάβρωσης σε μη μετρημένα σημεία προϋποθέτει την γνώση των ανεξάρτητων μεταβλητών στα σημεία αυτά καθώς και την ακριβή θέση τους. Για αυτό το λόγο χωρίστηκε η απόσταση μελέτης του ποταμού (8 km) σε 15 σημεία και με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής προσδιορίστηκε το αντίστοιχο πλάτος της διατομής και η κλίση του κάθε σημείου με βάση τις τιμές των μετρημένων σημείων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- Συμπεράσματα

Η διάβρωση της όχθης ενός ποταμού είναι ένα σύνθετο φαινόμενο το οποίο μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες. Η παρούσα διπλωματική εργασία στόχευσε στην ανάπτυξη μεθοδολογίας για την εκτίμηση του κινδύνου της διάβρωσης ή μη της όχθης του Ποταμού Κοιλιάρη στην περιοχή του νομού Χανίων της Κρήτης. Με τη βοήθεια του μοντέλου της Λογιστικής Παλινδρόμησης επετεύχθη η εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων που αφορούν την πιθανότητα διάβρωσης της όχθης. Στη συνέχεια έγινε υπολογισμός της απόκλισης (D) των αποτελεσμάτων, με χρήση της μεθόδου G. Statistic, για την αξιολόγηση των διαφορετικών λογιστικών μοντέλων που εφαρμόστηκαν σε σχέση με το μοντέλο που χρησιμοποιεί ως μόνη ανεξάρτητη μεταβλητή την αποτέμνουσα καθώς και για την αξιολόγηση της επίδρασης των δύο ανεξάρτητων μεταβλητών στον προσδιορισμό της πιθανότητας διάβρωσης της όχθης του ποταμού.

Αρχικά έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το 1^ο σενάριο εφαρμογής του μοντέλου BSTEM με αυτά που προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου της λογιστικής παλινδρόμησης. Όπως διαπιστώθηκε το μοντέλο που χρησιμοποιεί το πολυώνυμο με τις δύο μεταβλητές και την αποτέμνουσα (σταθερό όρο) δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα καθώς υπάρχει απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων σε δύο μόνο σημεία. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η τιμή της απόκλισης (D) του λογιστικού μοντέλου που χρησιμοποιεί μόνο την αποτέμνουσα (αρχικό μοντέλο) και έπειτα για τα υπόλοιπα μοντέλα που εξετάστηκαν τα οποία χρησιμοποιούν ξεχωριστά και μαζί τις δύο ανεξάρτητες μεταβλητές, γωνία κλίσης και πλάτος της διατομής του ποταμού. Γενικά όσο πιο μεγάλη διαφορά υπάρχει μεταξύ του αποτελέσματος D των μοντέλων που χρησιμοποιούν τις ανεξάρτητες μεταβλητές με αυτό του αρχικού μοντέλου τόσο πιο αξιόλογο είναι το αποτέλεσμα της λογιστικής παλινδρόμησης αλλά και σημαντικές (κατάλληλες) οι ανεξάρτητες μεταβλητές που εξετάστηκαν για τον προσδιορισμό της πιθανότητας διάβρωσης. Με άλλα λόγια, ο συντελεστής απόκλισης (D) δείχνει πόσο καλύτερο είναι το μοντέλο που χρησιμοποιείται όταν προστίθενται ανεξάρτητες μεταβλητές, σε σχέση

με την αποτελεσματικότητα του μοντέλου όταν λαμβάνεται υπόψη μόνο η αποτέμνουσα.

Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο είναι πιο αποδοτικό όταν λαμβάνονται υπόψη και οι δύο παράμετροι καθώς πέρα από τα αποτελέσματα που δίνει έχει και τη μικρότερη τιμή απόκλισης, $D = 6,14$ (άρα τη μεγαλύτερη διαφορά από το αρχικό μοντέλο). Στην περίπτωση όπου εξετασθούν κάθε μία χωριστά, βλέπουμε ότι το πλάτος της διατομής είναι πιο σημαντική παράμετρος, ως προς την εκτίμηση της πιθανότητας ύπαρξης ή μη διάβρωσης, σε σχέση με τη γωνία κλίσης καθώς το συγκεκριμένο μοντέλο έχει τιμή $D=6,54$ σε αντίθεση με αυτό που χρησιμοποιεί τη γωνία κλίσης των πρυνών που έχει τιμή 7,12.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της 2^{ης} περίπτωσης του μοντέλου λογιστικής παλινδρόμησης που εξετάστηκε η οποία ήταν και η πιο ακριβής, παρατηρείται ότι η συσχέτιση της πιθανότητας διάβρωσης με τη γωνία κλίσης είναι θετική, β_1 θετικό, ενώ με το πλάτος της διατομής αρνητική, β_2 αρνητικό. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το Διάγραμμα 10 καθώς βλέπουμε ότι όταν αυξάνεται η γωνία κλίσης, αυξάνεται και η πιθανότητα της διάβρωσης, ενώ αντίθετα όταν αυξάνεται το πλάτος της διατομής μειώνεται η πιθανότητα διάβρωσης. Το ίδιο ισχύει και στην 7^η περίπτωση επιβεβαιώνοντάς το με το Διάγραμμα 11.

Σε επόμενο στάδιο έγινε εφαρμογή του μοντέλου της Τοπικά Σταθμισμένης Λογιστικής Παλινδρόμησης, προκειμένου να βελτιωθούν οι εκτιμήσεις που προκύπτουν από το μοντέλο της Λογιστικής Παλινδρόμησης, κυρίως στα σημεία όπου παρατηρήθηκε απόκλιση σε σχέση με αυτές του BSTEM. Όπως παρατηρείται ότι δεν υπήρχε ιδιαίτερη βελτίωση με τη χρήση της εκθετικής συνάρτησης, η οποία παρέχει παρόμοια αποτελέσματα με αυτά της Λογιστικής Παλινδρόμησης, σε αντίθεση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της τρι-κυβικής συνάρτησης, η οποία βελτιώνει τις εκτιμήσεις καθώς επίσης επικυρώνει την παρουσία ή απουσία διάβρωσης σε όλες τις μετρούμενες θέσεις δίνοντας τέλος και τη μικρότερη τιμή απόκλισης $D=5,12$. Από τα Διαγράμματα 12 και 13, επιβεβαιώνεται για ακόμη μία φορά η θετική συσχέτιση της κλίσης με την

πιθανότητα διάβρωσης και η αρνητική συσχέτιση με το πλάτος της διατομής του ποταμού.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την εφαρμογή της μεθόδου της Λογιστικής Παλινδρόμησης στον προσδιορισμό της πιθανότητας διάβρωσης της όχθης του Ποταμού Κοιλιάρη παρατηρείται ότι θα μπορούσε να δώσει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα αν λαμβάνονταν υπόψη και άλλοι παράμετροι, όπως ο δείκτης βλάστησης στο εκάστοτε σημείο καθώς και υδρολογικές μεταβλητές. Με αυτό τον τρόπο θα εξεταζόταν η αποτελεσματικότητα της μεθόδου έχοντας λάβει υπόψη ένα μεγαλύτερο εύρος ανεξάρτητων μεταβλητών που μπορούν να επηρεάσουν τη διάβρωση στα πρηνή των ποταμών. Επίσης θα μπορούσε να συνδεθεί με άλλα μοντέλα, τα οποία έχουν την δυνατότητα να εκτιμήσουν ζημιές ώστε να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο εργαλείο εκτίμησης της διάβρωσης στις όχθες ποταμού και του κόστους των ζημιών που προκαλούνται.

Ένα από τα μειονεκτήματα στην εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου είναι το μέγεθος του δείγματος. Σχετικά μικρά μεγέθη δειγμάτων μπορεί να οδηγήσουν σε ελλιπή συμπεράσματα, ωστόσο η δημιουργία του κατάλληλου εννοιολογικού και μαθηματικού μοντέλου το οποίο προσεγγίζει το πρόβλημα διευκολύνει την επιλογή των κατάλληλων πληροφοριών (ανεξάρτητων μεταβλητών) και αποτελεί τη βάση για την περαιτέρω μελέτη του με περισσότερα δεδομένα.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

1. Ahmad Reza Mokhtari, 2014, Hydrothermal alteration mapping through multivariate logistic regression analysis of Geochemical Exploration: R.A.Ayuso ,B. De Vivo. Elsevier.
2. Anton Imeson and Michiel Curfs, Land Care In Desertification Affected Areas, From Science Towards Application (Διάβρωση Εδάφους), http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/Leaflets/B1_Leaflet_GR.pdf, last accessed 10/08/2014.
3. Hosmer, David W.; Lemeshow, Stanley (2000). Applied logistic Regression (2nd ed.). Wiley.
4. Katherine E. Kapo, G. Allen Burton Jr., Emma Pemberton, 2008. Understanding ecological impacts in rivers in England and Wales and identifying their possible causes: part 2, The GIS-based weights of Evidence/Weighted Logistic Regression method. Environment Agency, Rio House, Waterside Drive, Aztec West, Almondsbury, Bristol.
5. Menard S., 2001. Applied Logistic Regression Analysis. Sage Publications.
6. Miriam Andrejiova, Anna Grincova, Daniela Marasona, Gabriel Fedorko, Vierslav Molar, 2014, Using logistic regression in tracing the significance of rubber-textile conveyor belt damage, in Wear: eds Ian Hutchings. Elsevier.
7. Panagiotis Papazoglou, Water Erosion Risk Assessment in the basin of Anthemountas, <http://www.lifesos.eu/index.php/erosion>, last accessed 10/07/2014.
8. Peter M. Atkinson, Sally E. German, David A. Sear, Michael J. Clark, 2013. Exploring the Relations Between Riverbank Erosion and Geomorphological Controls Using Weighted Logistic Regression, in Geographical Analysis, Ohio State University
9. R.P.C.Morgan and R.J.Rickson (1995), Water Erosion Control, in Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach: eds R.P.C Morgan and R.J.Rickson. E&FN Spon, London.

10. Rakesh Kumar, S.Nandy, Reshu Agarwal, S.P.S. Kushwaha, 2014, Forest cover dynamics analysis and prediction modeling using logistic regression model, in Ecological Indicators: eds Feller Muller. Elsevier.
11. Rens Van Beek, Erik Cammeraat, Vicente Andreu, Slobodan B.Mickovski, Luuk Dorren (2008), Hillslope processes: Mass Wasting, Slope Stability and Erosion, in Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions: eds Joanne E.Noris, Alexia Stokes, Slobodan B.Mickovski, Erik Cammeraat, Rens van Beek, Bruce C.Nicoll, Alexis Achim. Springer, Dordrecht.
12. Rogue Wave Software, Inc, 1999, Logistic Regression, Chapter 3: Statistical Definition, www.roguewave.com/portals/0/products/legacyhpp/docs/anaug/3-3.html, last accessed 22/09/2014.
13. Sandra J.Winderbottom and David J.Gilvear (2000), A GIS-Based Approach to Mapping Probabilities of River Bank Erosion: Regulated Rivver Tummel, Scotland. Stirling: University Press.
14. T.H.Wu (1995), Slope Stabilization, in Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach: eds R.P.C Morgan and R.J.Rickson. E&FN Spon, London.

Ελληνική Βιβλιογραφία

15. Κυρατσώ Γ.Μηλάκα, Γεώργιος Ν.Φώτης, 2010, Πολυμεταβλητή Ανάλυση της Εξέλιξης Χωρικών Ενοτήτων: Προσδιορισμός Ενόσ Γεωγραφικά Σταθμισμένου Υποδείγματος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Εργαστήριο Χωρικής Ανάλυσης, GIS και θεματικής χαρτογραφίας.
16. Κωνσταντίνος Χατζηθεοχάρους, Ιούνιος 2005, Χανιά, Υδρογεωχημική Μελέτη του ποταμού Κοιλιάρη, Περιγραφή και Περιβαλλοντικές πιέσεις της περιοχής μελέτης.
17. Νικόλαος Νικολαΐδης, Γεώργιος Καρατζάς, Νοέμβριος 2010, Τεχνική έκθεση προς ΟΑΔΥΚ και Ν.Α. Χανίων, Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών πόρων για τις λεκάνες απορροής των ποταμών Κερκίτη-Θέρισσου και Κοιλιάρη, Περιγραφή Λεκανών Απορροής Ποταμών Κερκίτη-Θέρισσου και Κοιλιάρη.

18. Νικόλαος Νικολαΐδης, Γεώργιος Καρατζάς, Νοέμβριος 2010, Τεχνική έκθεση προς ΟΑΔΥΚ και Ν.Α. Χανίων, Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών πόρων για τις λεκάνες απορροής των ποταμών Κερκίτη-Θέρισσου και Κοιλιάρη, Χαρακτηριστικά Υδατικού Συστήματος.
19. Νικόλαος Νικολαΐδης, Γεώργιος Καρατζάς, Νοέμβριος 2010, Τεχνική έκθεση προς ΟΑΔΥΚ και Ν.Α. Χανίων, Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών πόρων για τις λεκάνες απορροής των ποταμών Κερκίτη-Θέρισσου και Κοιλιάρη, Περιβαλλοντικές Πιέσεις.
20. Νικόλαος Νικολαΐδης, Γεώργιος Καρατζάς, Νοέμβριος 2010, Τεχνική έκθεση προς ΟΑΔΥΚ και Ν.Α. Χανίων, Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών πόρων για τις λεκάνες απορροής των ποταμών Κερκίτη-Θέρισσου και Κοιλιάρη, Χημική Κατάσταση στις λεκάνες απορροής.
21. Νικόλαος Νικολαΐδης, Γεώργιος Καρατζάς, Νοέμβριος 2010, Τεχνική έκθεση προς ΟΑΔΥΚ και Ν.Α. Χανίων, Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών πόρων για τις λεκάνες απορροής των ποταμών Κερκίτη-Θέρισσου και Κοιλιάρη, Οικολογική κατάσταση του ποταμού Κοιλιάρη.
22. Νικόλαος Νικολαΐδης, Γεώργιος Καρατζάς, Νοέμβριος 2010, Τεχνική έκθεση προς ΟΑΔΥΚ και Ν.Α. Χανίων, Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών πόρων για τις λεκάνες απορροής των ποταμών Κερκίτη-Θέρισσου και Κοιλιάρη, Υδρολογική ανάλυση καρστικού υδροφορέα.
23. Χουντής Βασίλειος, 2009, Διαχωριστική Ανάλυση-Λογιστική Παλινδρόμηση, Πάτρα: Τμήμα Μαθηματικών, Πανεπιστήμιο Πάτρας.
24. Χριστόπουλος, Δ, 2005, Σημειώσεις Γεωστατιστικής και Ρύπανσης Περιβάλλοντος, Χανιά.: Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.