

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Διαδικασία λήψης αποφάσεων κατασκευής ή μη  
αντιπλημμυρικού έργου σε ποτάμι με βάση τη μεθοδολογία  
Bayes Risk»**

**ΦΛΩΡΗ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων)**  
**Επ. Καθηγητής Παρανυχιανάκης Νικόλαος**  
**Δρ. Βαρουχάκης Εμμανουήλ**

**Χανιά**  
**Σεπτέμβριος 2014**

*Αφιερώνεται στους γονείς μου,  
Μανώλη κι Αρχοντούλα*

## **Ευχαριστίες**

*Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής διατριβής αισθάνομαι την υποχρέωση να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Καθηγητή Γεώργιο Καρατζά για την πολύτιμη συνεργασία, τη σημαντικότερη προσφορά των γνώσεων και της εμπειρίας του καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να προχωρήσω στη μελέτη ενός πολύ χρήσιμου εργαλείου σε προβλήματα λήψης αποφάσεων, το οποίο βασίζεται στη στατιστική θεωρία του Bayes.*

*Ιδιαίτερες ευχαριστίες πρέπει να δοθούν στο Δρ. Βαρουχάκη Εμμανουήλ για την καθοδήγησή του ,τις ιδέες και τις προτάσεις του καθ 'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής Διατριβής , αλλά και για την πολύ χρήσιμη κι αρμονική συνεργασία.*

*Ευχαριστώ επίσης τους καθηγητές της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής για τις γνώσεις που μου μετέφεραν μέσα από τη διδασκαλία τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου.*

*Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον πολύ καλό μου φίλο και υποψήφιο Διδάκτορα κ. Παλόγο Ιωάννη για την υποστήριξη και πολύτιμη βοήθεια του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.*

## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα εικόνων .....	4
Περιεχόμενα Πινάκων .....	5
Περίληψη .....	6
Abstract.....	8
Εισαγωγή-Περιγραφή του Προβλήματος.....	9
1 Η λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη-Περιγραφή της Περιοχής Μελέτης.....	11
1.1 Γεωγραφική θέση και διοικητική υπαγωγή .....	11
1.2 Μορφολογικά χαρακτηριστικά .....	13
1.3 Γεωλογικές συνθήκες .....	14
1.4 Υδρογεωλογία.....	16
1.5 Κλιματικά χαρακτηριστικά.....	17
1.6 Χρήσεις Γης.....	20
1.7 Περιβαλλοντικές πιέσεις .....	21
Υπολογισμός ρυπαντικών φορτίων .....	21
1.8 Χημική Κατάσταση.....	22
1.9 Οικολογική Κατάσταση .....	26
Χλωρίδα .....	26
Πανίδα.....	27
1.10 Υδρολογία .....	27
2 Αντιπλημμυρικά έργα .....	30
2.1 Πλημμύρες στην Ελλάδα.....	31
2.2 Αντιπλημμυρική προστασία .....	32
2.2.1 Μείωση της παροχής αιχμής της πλημμύρας .....	33
2.2.2 Ολοκληρωμένο σχέδιο διαχείρισης αντιπλημμυρικής προστασίας.....	33
2.2.3 Έργα διευθέτησης των ποταμών.....	34
3 Η διάβρωση Γενικά .....	37
3.1 Υδατική Διάβρωση.....	39
3.2 Διάβρωση σε Ποταμούς .....	43
4 Εφαρμογή της Στατιστικής Θεωρίας Λήψης Αποφάσεων Κατά Bayes για την περίπτωση Πλημμύρας στον Ποταμό Κοιλιάρη .....	46
4.1 Εισαγωγή .....	46
4.2 Βασικές έννοιες στη Θεωρία Λήψης Αποφάσεων.....	46
4.3 Διαδικασία Λήψης Αποφάσεων.....	47
Θεώρημα Bayes.....	47
4.4 Η Στατιστική Θεωρία Λήψης Αποφάσεων Κατά Bayes.....	48
4.5 Η Διαδικασία Λήψης Αποφάσεων κατά Bayes .....	49

4.6	Το Πρόβλημα κατασκευής ή μη ενός τεχνικού αντιπλημμυρικού έργου υπό το πρίσμα της Διαδικασίας Λήψης Αποφάσεων κατά Bayes .....	50
5	Μαθηματική Ανάλυση για γεγονότα πλημμύρας.....	51
5.1	Κατανομή Poisson.....	51
5.2	Διαμόρφωση της συνάρτησης απώλειας .....	52
5.3	Συνάρτηση επιδίωξης.....	52
5.4	Συνάρτηση επικινδυνότητας Bayes.....	54
5.4.1	Η πιθανότητα γεγονότος πλημμύρας ως άγνωστη παράμετρος .....	54
5.4.2	Δεδομένα βροχοπτώσεων.....	55
5.4.3	Η περιγραφή της συνάρτησης πυκνότητας-πιθανότητας της προγενέστερης πληροφορίας.....	55
5.4.4	Υπολογισμός των παραμέτρων της προγενέστερης κατανομής για ενδεχόμενο γεγονός πλημμύρας στον Ποταμό Κοιλιάρη. ....	56
5.5	Υπολογισμός της Συνάρτησης Επικινδυνότητας του Bayes για το ενδεχόμενο γεγονός πλημμύρας στον ποταμό Κοιλιάρη.....	57
5.6	Εφαρμογή του μοντέλου του Bayes για παραβολική συνάρτηση απώλειας	58
5.7	Αριθμητικό παράδειγμα Εφαρμογής της Θεωρίας του Bayes για Αντιπλημμυρικά Έργα.....	59
5.7.1	Σενάριο 1 <sup>ο</sup> εφαρμογή της θεωρίας του Bayes για βροχομετρικά δεδομένα .....	59
5.7.2	Σενάριο 2 <sup>ο</sup> εφαρμογή της θεωρίας του Bayes για δεδομένα ημερήσιων παροχών .....	60
5.7.3	Σενάριο 3 <sup>ο</sup> εφαρμογή της θεωρίας του Bayes σε περίπτωση όπου δεν υπάρχουν δεδομένα βροχόπτωσης ή παροχής (υδρολογικό ρίσκο). ....	62
5.8	Παράδειγμα με βάση την κοστολόγηση του αντιπλημμυρικού έργου και των επισκευών. ....	66
6	Συμπεράσματα.....	68
	Βιβλιογραφία .....	70

## Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1. Δήμοι στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.[1] .....	12
Εικόνα 2. Χωρική απεικόνιση των Οικισμών και το οδικό δίκτυο της Λεκάνης Απορροής του Κοιλιάρη.[1] .....	12
Εικόνα 3. Τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. 1	13
Εικόνα 4. Τοπογραφικές κλίσεις λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. [2] .....	14
Εικόνα 5. Γεωλογικοί σχηματισμοί της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.[1] .....	15
Εικόνα 6. υπόγειοι υδροφορείς λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη και η κατεύθυνση της ροής των υπογείων υδάτων.[1].....	17
Εικόνα 7. Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες της περιοχής (2007).[1].....	18
Εικόνα 8. Μέσες τιμές Βροχόπτωσης για τα έτη 1958-97.[1].....	19

Εικόνα 9. Μέσες τιμές Βροχόπτωσης για το έτος 2007.[1] .....	19
Εικόνα 10. Χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.[1] .....	21
Εικόνα 11. μεταβολή του pH του νερού του ποταμού Κοιλιάρη σε δύο σημεία δειγματοληψίας (Κοίτη και γέφυρα).[1].....	23
Εικόνα 12. Μεταβολή της Θερμοκρασίας στον ποταμό Κοιλιάρη.[1] .....	23
Εικόνα 13. Μεταβολή της αγωγιμότητας του νερού του ποταμού Κοιλιάρη σε δύο σημεία δειγματοληψίας (Κοίτη και γέφυρα).[1].....	24
Εικόνα 14. Μεταβολή της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου του νερού του ποταμού Κοιλιάρη σε δύο σημεία δειγματοληψίας (Κοίτη και γέφυρα).[1] .....	24
Εικόνα 15. Μεταβολή της συγκέντρωσης του $\text{PO}_3\text{-P}$ στα νερά του ποταμού Κοιλιάρη [1]. .....	25
Εικόνα 16. Ημερήσιο υδρογράφημα του ποταμού Κοιλιάρη [1].....	28
Εικόνα 17. Κατανομή καταστροφών στην Ελλάδα.[4].....	31
Εικόνα 18. Τοίχοι Συγκράτησης.[4].....	34
Εικόνα 19. Διοχετεύσεις.[4] .....	35
Εικόνα 20. Υπερχειλιστές.[4] .....	35
Εικόνα 21. Τεχνικοί Αποθηκευτήρες.[4].....	36
Εικόνα 22. Φράγματα συγκράτησης φερτών υλικών.[4] .....	36
Εικόνα 23. Διάβρωση εδάφους. [H.2].....	39
Εικόνα 24. Υδάτινη Διάβρωση. [H.3].....	41
Εικόνα 25. Διάβρωση στον Κορινθιακό κόλπο. [H.4].....	42
Εικόνα 26. Η διάβρωση που έχει υποστεί ο ποταμός Φοίνικας στην Αχαΐα . [H. 5]..	45
Εικόνα 27. Γραφική αναπαράσταση των συναρτήσεων επιδίωξης για τις αποφάσεις $A(0)$ και $A(1)$ [9] .....	53
Εικόνα 28. Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Κατανομής Γάμμα δεδομένων βροχόπτωσης.....	56

## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1. Βροχομετρικά δεδομένα της περιοχής του Ποταμού Κοιλιάρη. ....	29
Πίνακας 2. Σύνολο Αποζημιώσεων στη Χώρα λόγω πλημμύρας .....	31
Πίνακας 3. Τιμές των συναρτήσεων $I$ για διάφορες χρονικές περιόδους αναβολής του έργου σε περίπτωση γραμμικής ( $I1(N)$ ) και παραβολικής συνάρτησης απώλειας ( $I2(N)$ ) αντίστοιχα.....	60
Πίνακας 4. Τιμές των συναρτήσεων $I(N)$ για τα δεδομένα παροχής σε περίπτωση γραμμικής ( $I3(N)$ ) και παραβολικής συνάρτησης απώλειας ( $I4(N)$ ) αντίστοιχα...	61
Πίνακας 5. Υδρολογικό ρίσκο $r(i, j)$ για διάφορες οικονομικές ωφέλειες του έργου και διάφορες περιόδους επαναφοράς .....	64
Πίνακας 6. Τιμές του δείκτη $Nr$ για την περίπτωση της γραμμικής συνάρτησης απώλειας με τη μέθοδο του υδρολογικού ρίσκου. ....	64
Πίνακας 7. Τιμές του δείκτη $Nr(1 + Nr)$ για την περίπτωση της παραβολικής συνάρτησης απώλειας με τη μέθοδο του υδρολογικού ρίσκου. ....	65

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την εφαρμογή της θεωρίας λήψης αποφάσεων κατά Bayes για αντιπλημμυρικά έργα. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή της περιοχής μελέτης, της λεκάνης απορροής του Ποταμού Κοιλιάρη, όπου βρίσκεται και το υπό μελέτη τεχνικό έργο. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται τα διάφορα είδη αντιπλημμυρικών έργων, ενώ στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται γενικά το φαινόμενο της διάβρωσης και ειδικά της διάβρωσης στις όχθες ποταμού καθώς και η σύνδεση του με τις πλημμύρες.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η εφαρμογή της στατιστικής θεωρίας λήψης αποφάσεων κατά Bayes για την κατασκευή ή την αναβολή αντιπλημμυρικού έργου στον ποταμό Κοιλιάρη. Περιγράφεται εκτενώς η μεθοδολογία λήψης αποφάσεων κατά Bayes και τα βασικά στάδια.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής μαθηματική ανάλυση των δεδομένων που μπορούν να προκαλέσουν γεγονότα πλημμύρας. Ορίζονται οι αποφάσεις για κατασκευή του έργου (απόφαση  $A(1)$ ) ή αναβολής του για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα  $N$  (απόφαση  $A(0)$ ) υπό τον κίνδυνο στο διάστημα αυτό να έχουμε  $Y$  γεγονότα πλημμύρας. Η μαθηματική έκφραση του συγκεκριμένου προβλήματος περιγράφεται από τη στατιστική κατανομή Poisson. Οι συναρτήσεις απώλειας κάθε απόφασης είναι το κόστος κατασκευής του αντιπλημμυρικού έργου για την απόφαση  $A(1)$  και το κόστος μερικής αποκατάστασης των ζημιών, ανάλογο με το συνολικό αριθμό των γεγονότων πλημμύρας. Εφαρμόστηκαν δύο σενάρια για το κόστος μερικής αποκατάστασης, η γραμμική και η παραβολική μεταβολή του με βάση την πιθανότητα πλημμύρας από βροχομετρικά δεδομένα και δεδομένα παροχής. Η κατανομή Γάμμα εκφράζει την κατανομή πιθανότητας και στις δύο περιπτώσεις. Οι παράμετροι της κατανομής Γάμμα (παράμετροι μορφής ( $\alpha$ ) και κλίμακας ( $\beta$ )) υπολογίστηκαν  $\alpha=1,05$  και  $\beta=81,82$  στην πρώτη περίπτωση και  $\alpha=0,56$  και  $\beta=8,88$  στην δεύτερη αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου για το λόγο του κόστους κατασκευής ( $K$ ) του έργου προς το κόστος για μερική αποκατάσταση ( $B$ ) έδειξαν για το πρώτο σενάριο ότι η  $A(0)$  είναι προτιμητέα όταν ο λόγος  $K/B$  είναι μεγαλύτερος του  $I_1$  και  $I_2$ . Όπου  $I_1(N)$  και  $I_2(N)$  είναι τιμές του δείκτη πλημμυρικής επικινδυνότητας για γραμμική και παραβολική συνάρτηση απώλειας αντίστοιχα και οι οποίοι είναι ανάλογοι της περιόδου αναβολής,  $N$ , του έργου υποδεικνύοντας ότι για να είναι βέλτιστη η

απόφαση  $A(0)$  πρέπει το  $B$  να είναι αντιστρόφως ανάλογο του  $N$ . Στο δεύτερο σενάριο οι αντίστοιχοι δείκτες είναι  $I_3(N)$  και  $I_4(N)$ .

Στη συνέχεια γίνεται εφαρμογή της μεθόδου με βάση το υδρολογικό ρίσκο,  $r$ , για διάφορες τιμές της ωφέλιμης ζωής του έργου  $n$ , της περιόδου επαναφοράς πλημμύρας  $T$  και της περιόδου αναβολής  $N$ . Σε αυτή την περίπτωση η βέλτιστη απόφαση βασίζεται στη μέθοδο κόστους-οφέλους και εξαρτάται από τις παραδοχές που παίρνει ο μελετητής του υπό κατασκευή έργου σύμφωνα με τις παραπάνω παραμέτρους.

## Abstract

During the last 50 years many extreme flood events occurred in the Koiliaris River basin, especially in the downstream region. The basin is characterized by flooding events of low frequency but of high intensity. Bank Erosion has been detected in some parts of the river which is one of the main factors that can cause flooding. In this thesis the construction of a flood protection work or its postponement, based on the construction cost, is examined at the downstream area of Koiliaris River. The dilemma is considered and examined as a decision-making problem. The methodology that is followed to provide the optimal decision is known as «Bayesian Statistical Decision Theory». According to this methodology the optimal decision or action is the one that maximizes the expected utility or minimizes the expected loss.

The likelihood of damage related to flooding events, in the study area, is directly linked to precipitation or stream flow data. The Bayesian Statistical Decision Theory is based on prior information and on the loss function that sets the decision dilemma. The prior information impacts significantly on the decision-making process. In the present application the Gamma distribution is the appropriate form of statistical distribution density function to express prior information for the precipitation as well as for stream flow data. In addition two different types of loss functions are implemented. The first loss function has a linear form while the second one has a parabolic form regarding the postponement of the construction work and its substitution by temporal restoration works at specific time periods. Finally, a similar methodology can be applied when precipitation data or stream flow data are not available. In such a case a hydrological risk model can be applied to substitute the prior information. The model estimates the probability of flooding based on the effective life of the construction work and the flood return period. The results of the Bayes method for the three applied scenarios are presented in tabular form providing the calculated risk indices for different time periods of the construction work postponement. This is called a 'decision uncertainty' table that applies as a decision-making tool for the users.

## Εισαγωγή-Περιγραφή του Προβλήματος

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 50 χρόνων πολλά ακραία πλημμυρικά γεγονότα συνέβησαν στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, ειδικότερα στην κατάντη περιοχή του. Η λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη χαρακτηρίζεται από πλημμυρικά φαινόμενα χαμηλής συχνότητας, αλλά μεγάλου μεγέθους κι έντασης.

Το Φεβρουάριο του 2014 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε σημεία της όχθης του ποταμού όπου μετρήθηκαν, διατομές και υψόμετρο για την δημιουργία ενός στατιστικού μοντέλου σημειακού προσδιορισμού πιθανής διάβρωσης των πρανών. Το μοντέλο βασίστηκε στη θεωρία της λογιστικής και της τοπικά ζυγισμένης παλινδρόμησης. Ως κύριες παράμετροι για τον προσδιορισμό της διάβρωσης χρησιμοποιήθηκαν η γωνία κλίσης του πρανούς και η διατομή του ποταμού (ενδεικτικοί παράγοντες διάβρωσης ποταμών). Η εφαρμογή του μοντέλου έγινε σε περιβάλλον Matlab και προσδιόρισε αρκετά τρωτά σημεία κατά μήκος του κατάντη μέρους του ποταμού Κοιλιάρη τα οποία και επιβεβαιώθηκαν από επιτόπια επιθεώρηση.

Εφόσον λοιπόν εντοπίστηκαν σημεία στο ποτάμι που έχουν υποστεί διάβρωση ή είναι τρωτά, τα οποία και αποτελούν ένα βασικό αίτιο πλημμύρας αποφασίστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία να εξεταστεί το ενδεχόμενο κατασκευής ή μη ενός αντιπλημμυρικού έργου, βασιζόμενοι στο κόστος κατασκευής του και την πιθανότητα πλημμύρας, στην κατάντη περιοχή του ποταμού Κοιλιάρη. Για την προσέγγιση του συγκεκριμένου προβλήματος χρησιμοποιείται η μεθοδολογία λήψης αποφάσεων κατά Bayes, η οποία ονομάζεται «Στατιστική Θεωρία Λήψης Αποφάσεων κατά Bayes». Υπό το πρίσμα της συγκεκριμένης προσέγγισης, ως βέλτιστη απόφαση είναι αυτή που μεγιστοποιεί την αναμενόμενη χρησιμότητα ή, αντίστοιχα, ελαχιστοποιεί την αναμενόμενη απώλεια. Ως περιοχή μελέτης ορίζουμε το τμήμα του ποταμού που λόγω της τάσης του στο φαινόμενο της διάβρωσης είναι πιθανότερο να σημειωθεί πλημμύρα που θα προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στις παρακείμενες καλλιέργειες.

Το ενδεχόμενο να εμφανιστεί καταστροφή λόγω πλημμύρας στην περιοχή μελέτης σχετίζεται άμεσα με τα βροχομετρικά δεδομένα και τα αντίστοιχα δεδομένα των ημερήσιων παροχών. Η προγενέστερη πληροφορία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, για αυτό χρησιμοποιείται η κατάλληλη μορφή της στατιστικής κατανομής που εκφράζει τα δεδομένα. Στην προκειμένη περίπτωση

εξετάζεται και χρησιμοποιείται η κατανομή Γάμμα στα βροχομετρικά δεδομένα και στα δεδομένα των ημερήσιων ογκομετρικών παροχών. Επίσης εφαρμόζονται δύο διαφορετικές συναρτήσεις απώλειας, η πρώτη είναι γραμμικής μορφής και η δεύτερη παραβολικής μορφής για να εκφράσουν το κόστος της μερικής αποκατάστασης των ζημιών κατά την διάρκεια των περιόδων αναβολής του έργου. Τέλος εφαρμόζεται η ίδια μεθοδολογία για την περίπτωση όπου δεν υπάρχουν δεδομένα βροχόπτωσης ή παροχής με την εφαρμογή του υδρολογικού ρίσκου, το οποίο εκτιμά την πιθανότητα πλημμύρας βάση της ωφέλιμης ζωής του υπό μελέτη έργου και της περιόδου επαναφοράς πλημμύρας. Τα αποτελέσματα της μεθόδου Bayes παρουσιάζονται υπό μορφή πινάκων «αβεβαιότητας» παρέχοντας ένα εργαλείο λήψης αποφάσεων.

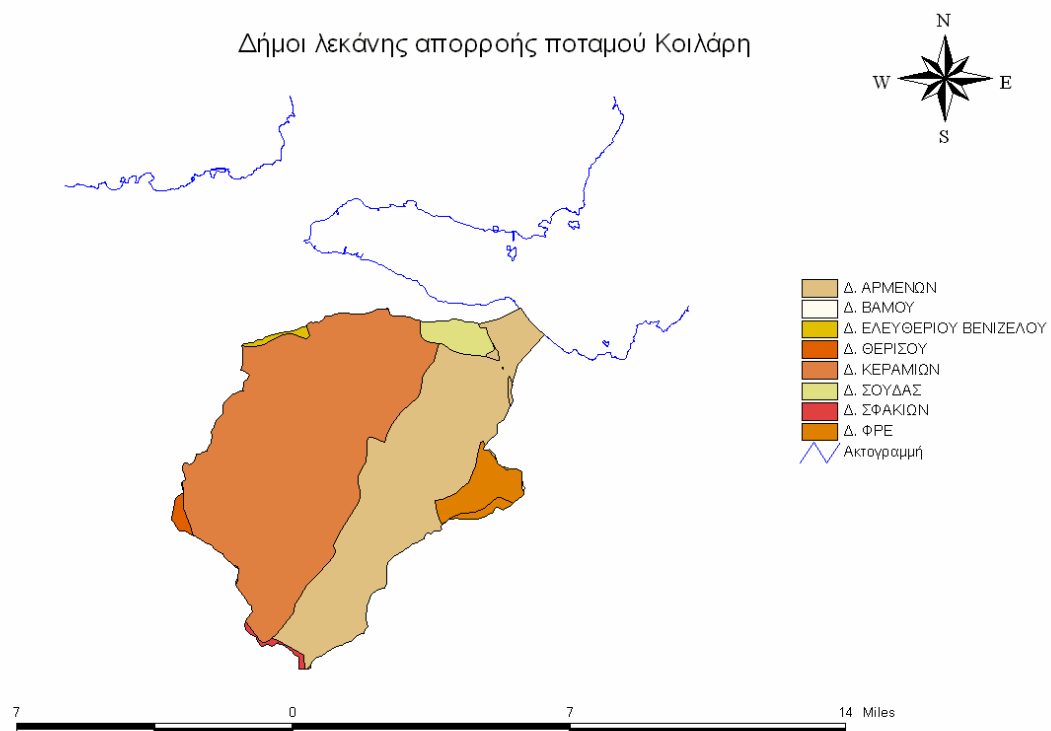
# **1 Η λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη-Περιγραφή της Περιοχής Μελέτης**

## **1.1 Γεωγραφική θέση και διοικητική υπαγωγή**

Η Υδρολογική λεκάνη του ποταμού Κοιλιάρη 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 Κεραμιών, 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 Ορέων μέχρι την παράκτια ζώνη του Δήμου Αρμένων και το τελευταίο χωριό που περιλαμβάνεται στη λεκάνη, το οποίο βρίσκεται στο μεγαλύτερο υψόμετρο, είναι οι Καρές. *(Από το κεφάλαιο Περιγραφή λεκανών απορροής των ποταμών Κερίτη-Θερίσου και Κοιλιάρη).*[1]

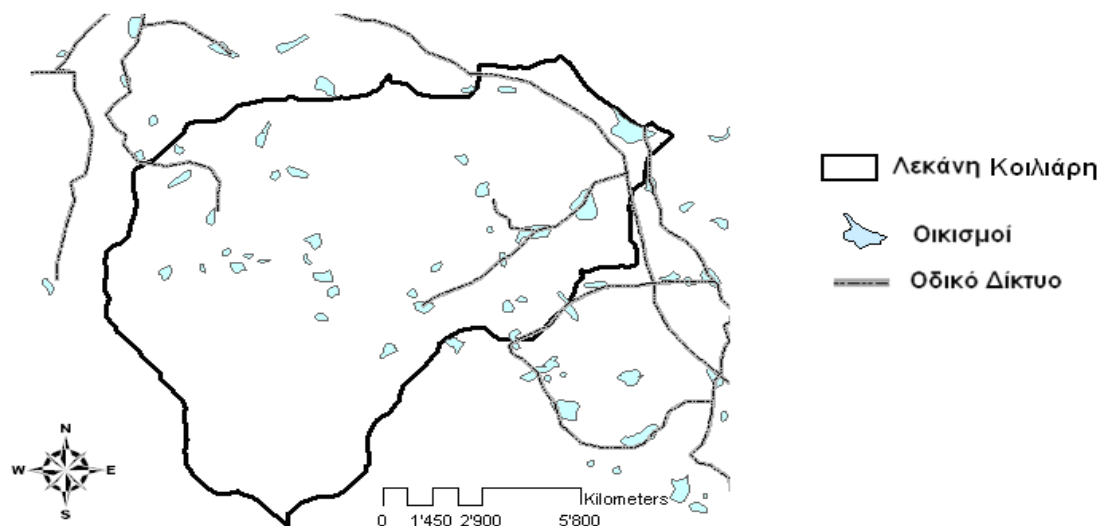
Το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου του ποταμού Κοιλιάρη είναι 36 km και η έκταση της λεκάνης ανέρχεται σε 130 km<sup>2</sup>. Ο ποταμός Κοιλιάρης τροφοδοτείται, όπως και οι περισσότερες λεκάνες απορροής του Νομού Χανίων, από ποσότητες υδάτων όπου προέρχονται από τα Λευκά όρη. Οι άλλοι δύο παραπόταμοι συμβάλλουν στον ποταμό Κοιλιάρη είναι: ο Μυλαυλακός και ο Μανταμάς και έχουν μόνιμη ροή κατά τη διάρκεια του έτους και για αυτό χαρακτηρίζονται ω μόνιμα υδατορέματα.[1]

Οι δήμοι που περιλαμβάνονται στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη παρουσιάζονται στον χάρτη της εικόνας 1 που δημιουργήθηκε από το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (G.I.S.).



**Εικόνα 1. Δήμοι στην λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλάρη.[1]**

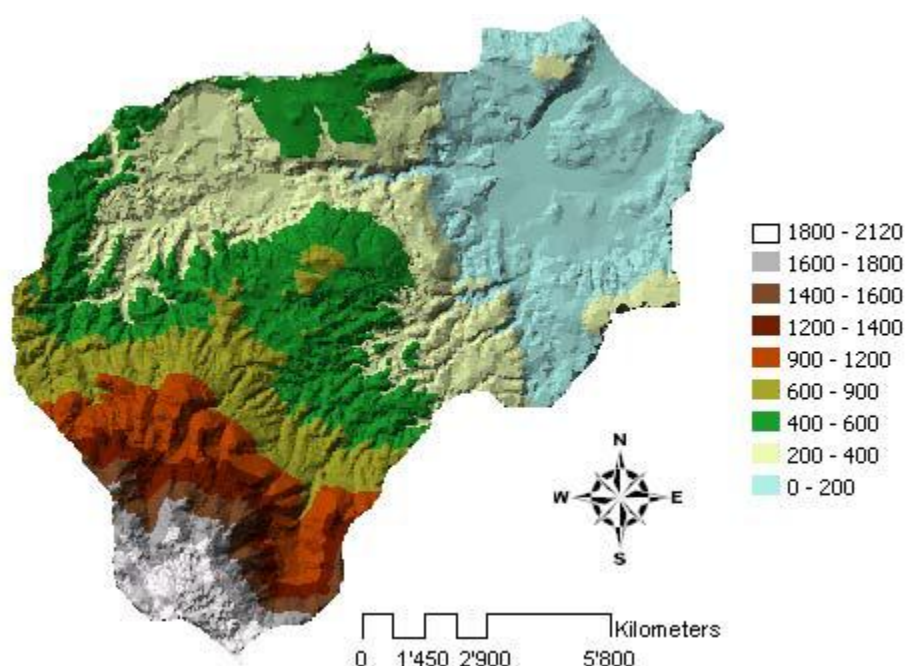
Η γεωγραφική έκταση των παραπάνω κοινοτήτων, καθώς και το οδικό δίκτυο της περιοχής ενδιαφέροντος φαίνεται στην εικόνα 2.



**Εικόνα 2. Χωρική απεικόνιση των Οικισμών και το οδικό δίκτυο της Λεκάνης Απορροής του Κοιλάρη.[1]**

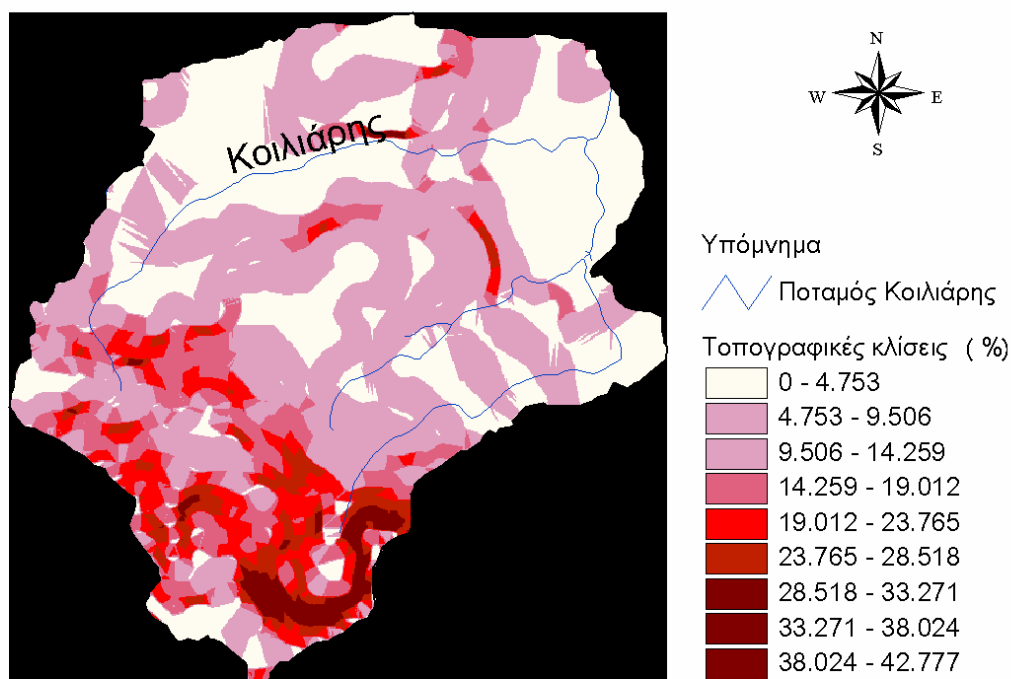
## 1.2 Μορφολογικά χαρακτηριστικά

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 Ορέων, μιας και η λεκάνη απορροής εκτείνεται μέχρι και το υψόμετρο των +2041 m. (εικόνα 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%. [1]



Εικόνα 3. Τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. [1]

Στον χάρτη της εικόνας 4 παρουσιάζονται και οι ισοϋψείς καμπύλες των 100m στην περιοχή μελέτης.



Εικόνα 4. Τοπογραφικές κλίσεις λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. [2]

### 1.3 Γεωλογικές συνθήκες.

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

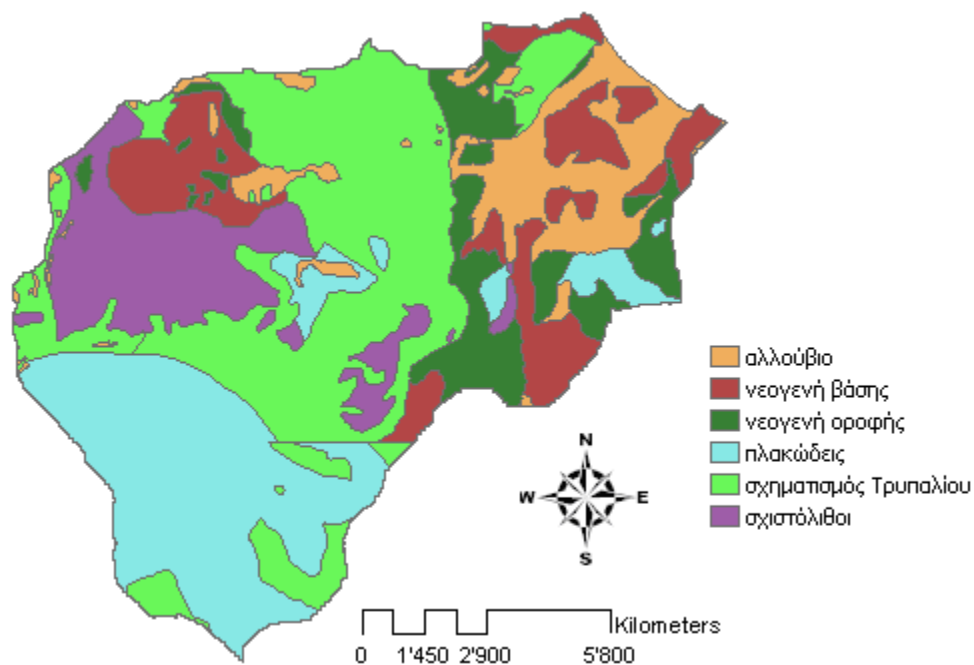
**Ανθρακικά πετρώματα (σχηματισμοί Τρυπαλίου και πλακώδεις):** Καρστικοί σχηματισμοί αποτελούμενοι κυρίως από ανθρακικά πετρώματα. Στη λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη εντοπίζονται ανθρακικά πετρώματα στο νότιο τμήμα και στο βόρειο-κεντρικό τμήμα της λεκάνης. Τα καρστικά πετρώματα είναι έντονα υδατοπερατά, αποτελούνται από ασβεστολιθικά και δολομιτικά πετρώματα. [1]

**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.[1]

**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.[1]

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 κώνικοκορημάτων. Οι αλλουβιακές προσχώσεις αναπτύσσονται ανατολικά των πηγών και επεκτείνονται μέχρι τη θάλασσα.[2]. Ο γεωλογικός χάρτης της λεκάνης του ποταμού Κοιλιάρη παρουσιάζεται στην **εικόνα 5**.



**Εικόνα 5. Γεωλογικοί σχηματισμοί της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.[1]**

## 1.4 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 Ορέων τροφοδοτούνται ακόμη οι πηγές του ποταμού Κοιλιάρη. (Από το κεφάλαιο *Χαρακτηριστικά Υδατικού Συστήματος*). [1]

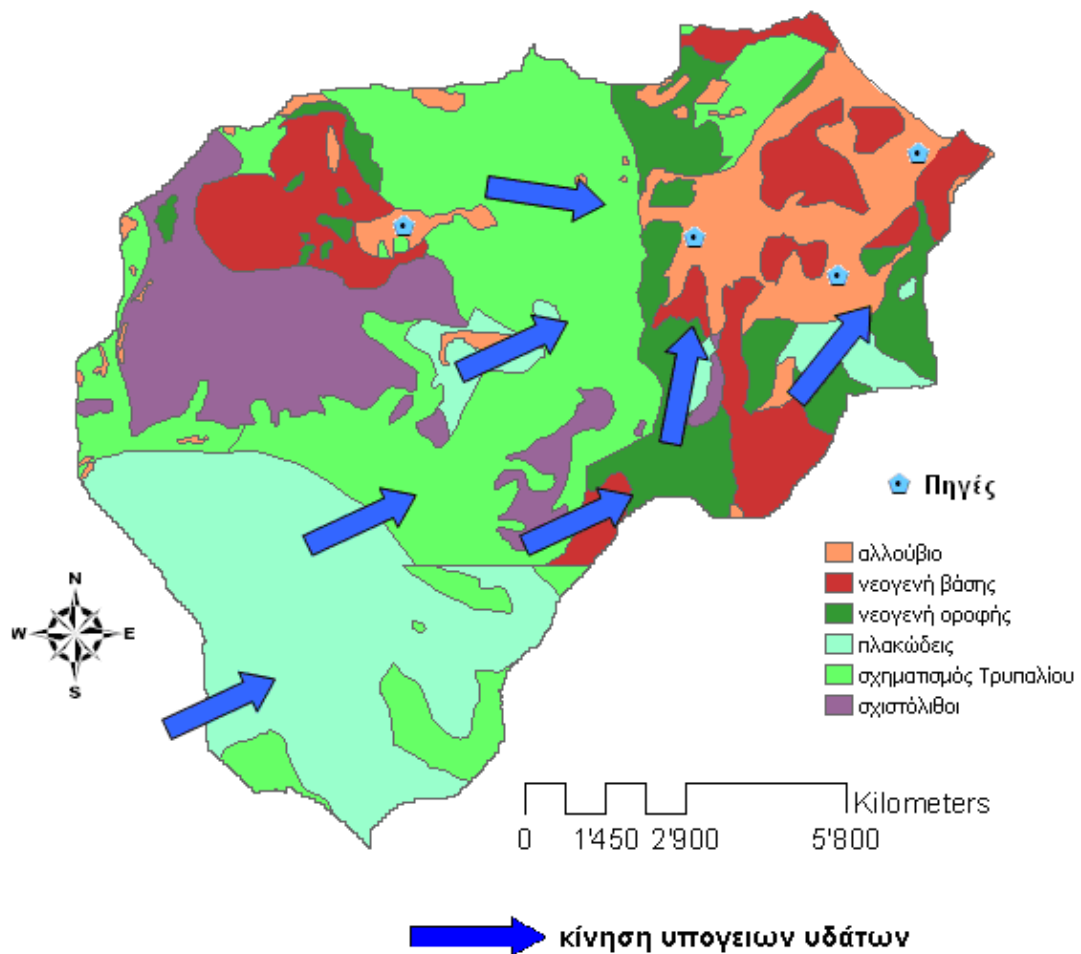
Η περατότητα των πετρωμάτων σε συνδυασμό με την γενική δομή των Λευκών Ορέων συντελούν στην ανάπτυξη υπόγειων υδροφοριών με πολύ μεγάλο υδατικό δυναμικό. Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι τα πλούσια μετεωρολογικά κατακρημνίσματα που δέχεται το ορεινό συγκρότημα (βροχές και χιόνια) διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην πλούσια υδροφορία της περιοχής. [1]

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. [2]

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.

Οι υδροφορείς της περιοχής και η ροή των υδάτων παρουσιάζονται στην εικόνα 6.

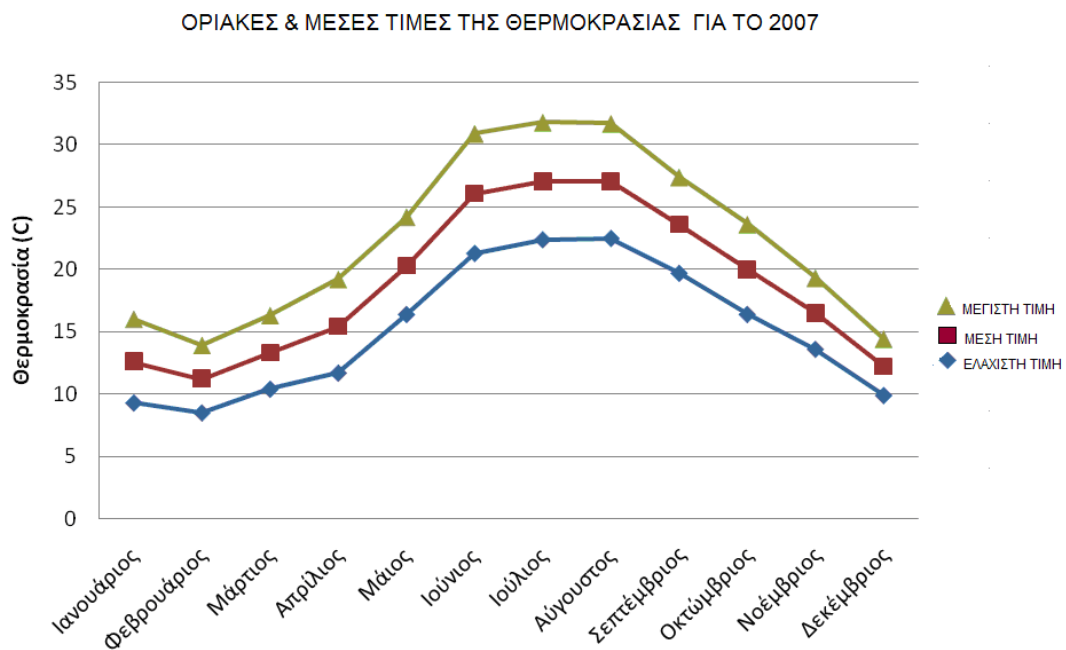


Εικόνα 6. υπόγειοι υδροφορείς λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλάρη και η κατεύθυνση της ροής των υπογείων υδάτων.[1]

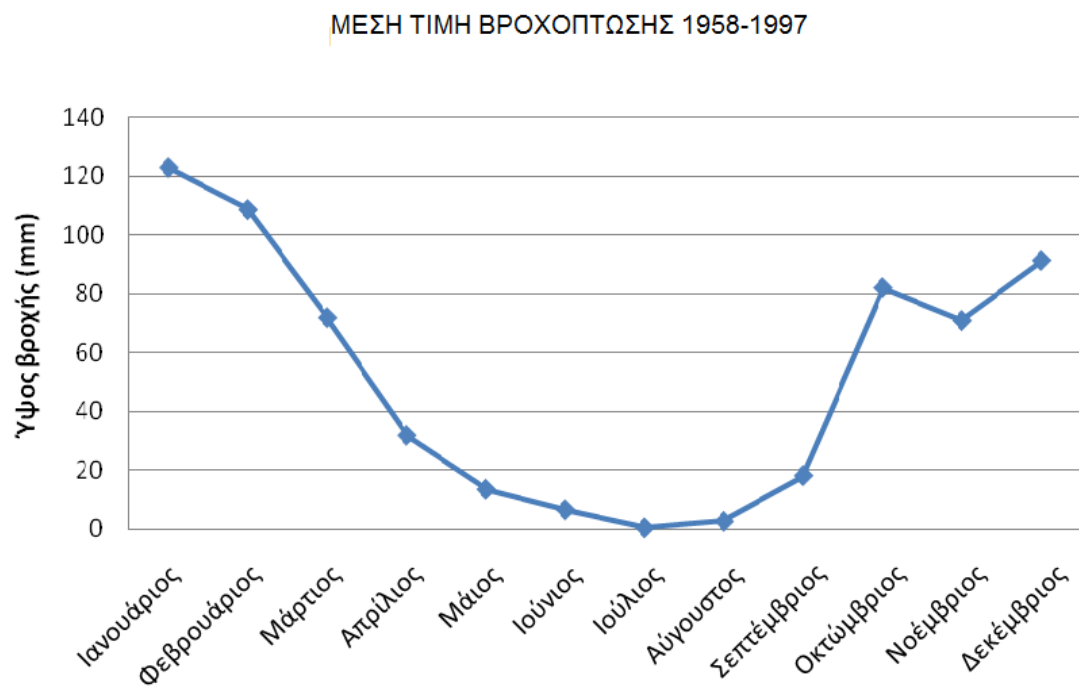
## 1.5 Κλιματικά χαρακτηριστικά

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.

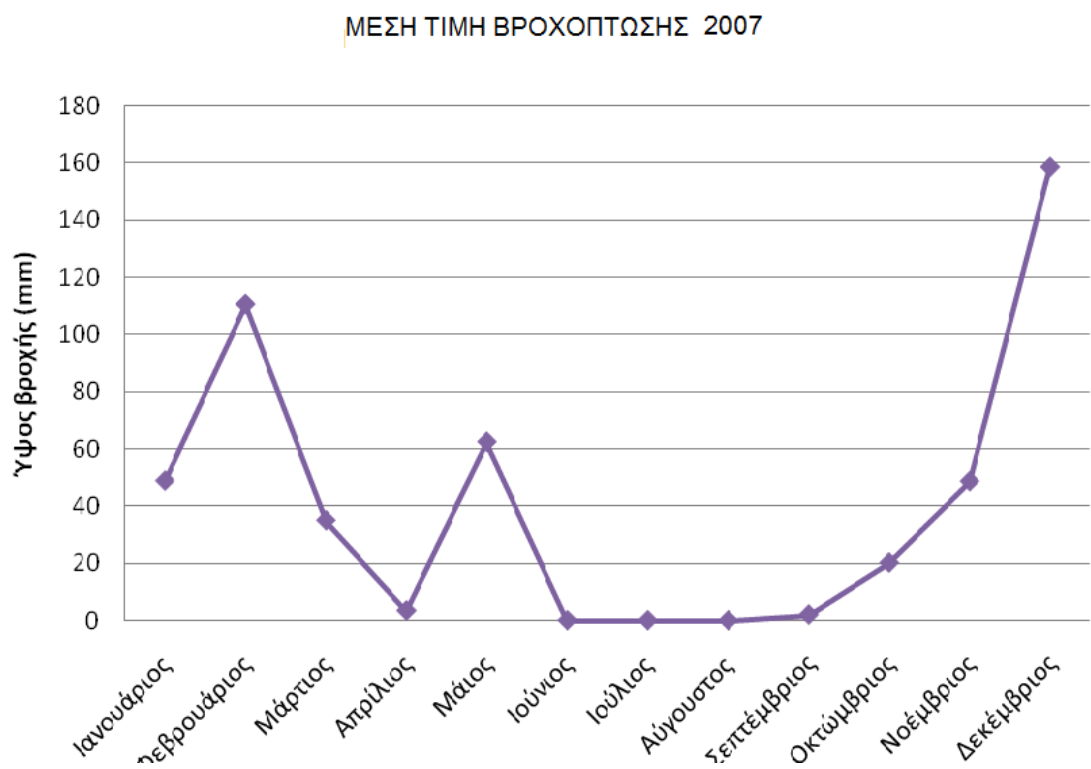
Το σύνολο των κατακρημνίσεων λαμβάνει χώρα μεταξύ των μηνών Οκτωβρίου-Μαρτίου, ενώ οι πιο ξηροί μήνες χαρακτηρίζονται οι Ιούλιος-Αύγουστος. Τα πρώτα χιόνια πέφτουν στα Λευκά Όρη από τα μέσα Νοεμβρίου Στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής δεν παρατηρούνται χιονοπτώσεις λόγω του μικρού σχετικά υψομέτρου της. 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 +50 μ., σε γεωγραφικό μήκος 240 9' και γεωγραφικό πλάτος 350 25'. Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα με στοιχεία για τη θερμοκρασία (εικόνα 7) και το ύψος των βροχοπτώσεων (εικόνα 8 και 9 αντίστοιχα) τα οποία δόθηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό της Σούδας (ύψους +150 m).[1]



**Εικόνα 7. Μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες της περιοχής (2007).[1]**



Εικόνα 8. Μέσες τιμές Βροχόπτωσης για τα έτη 1958-97.[1]



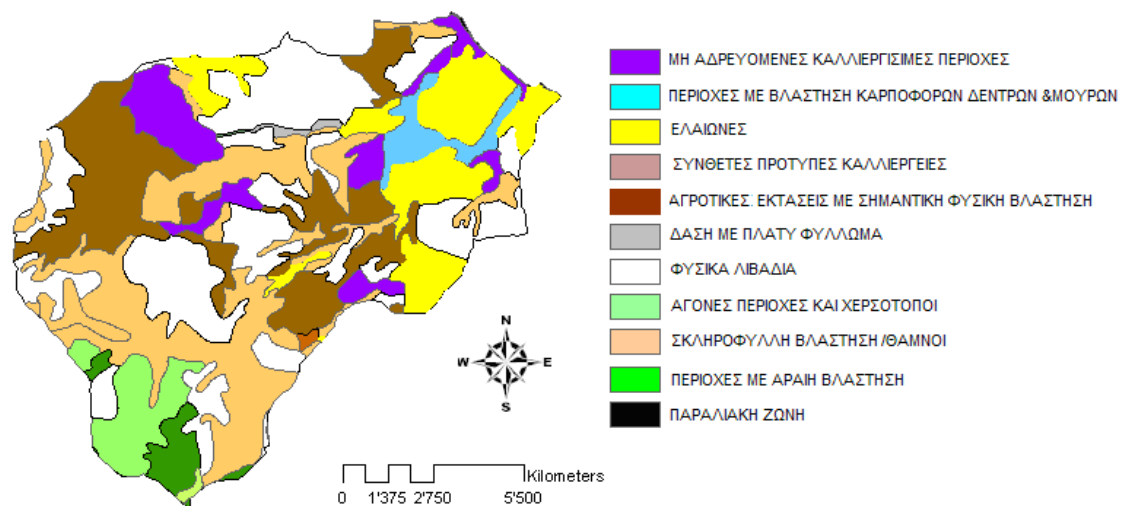
Εικόνα 9. Μέσες τιμές Βροχόπτωσης για το έτος 2007.[1]

## 1.6 Χρήσεις Γης

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

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 & 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.[2]

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 (εικόνα 10).[8]



**Εικόνα 10. Χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.[1]**

## 1.7 Περιβαλλοντικές πιέσεις

Τα φορτία στην λεκάνη απορροής του ποταμού έχουν διαχωριστεί σε δύο κατηγορίες:

- Τα σημειακά φορτία
- Και τα μη-σημειακά φορτία. [2]

### 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). (Από το κεφάλαιο *Περιβαλλοντικές Πιέσεις*)[1]

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.[1]

Τα συνολικά αστικά φορτία για την ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη είναι:

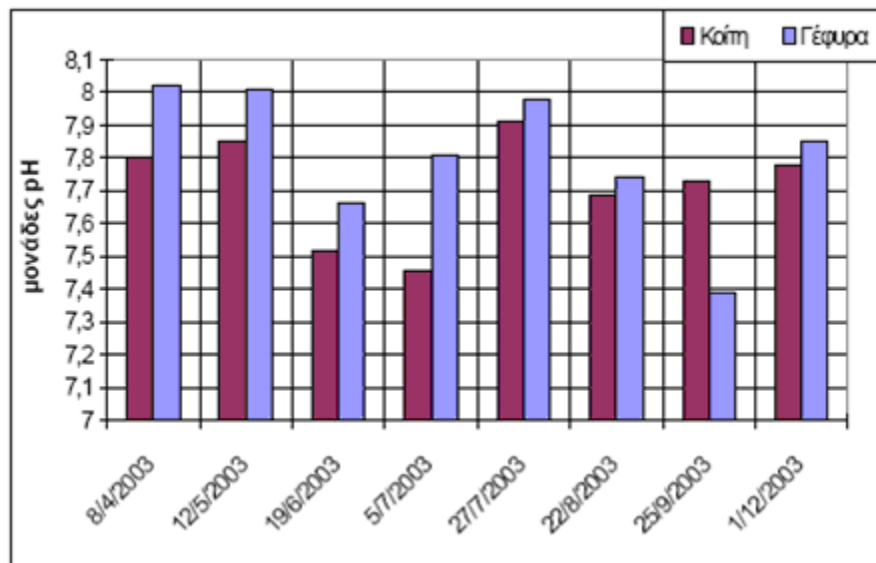
- ολικό άζωτο 19476 Kg/year και
- ολικός φώσφορος 3895.2 Kg/year .[2]

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.[2]

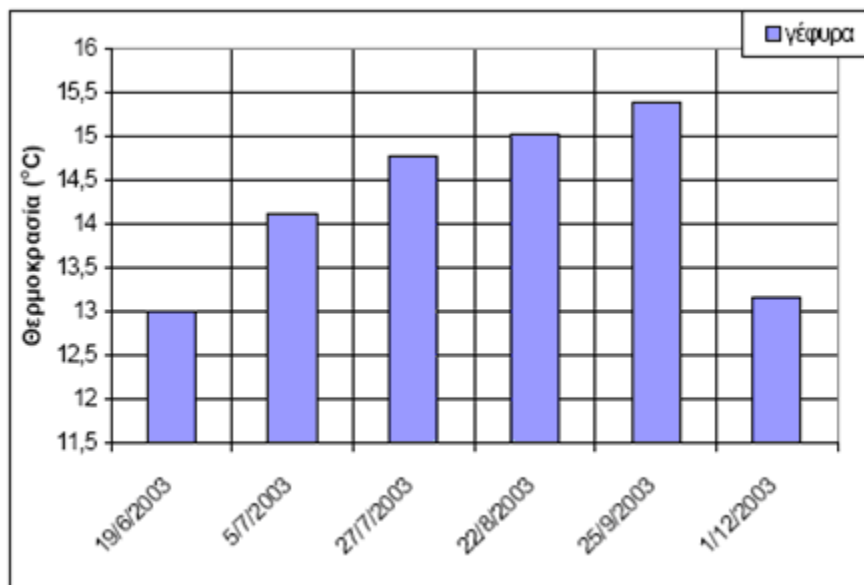
## **1.8 Χημική Κατάσταση**

Παρουσιάζονται διαγράμματα από αποτελέσματα μετρήσεων που διεξήχθησαν στο Τ.Ε.Ι Χανίων (εικόνες 11 έως 15) για τις εξής παραμέτρους:

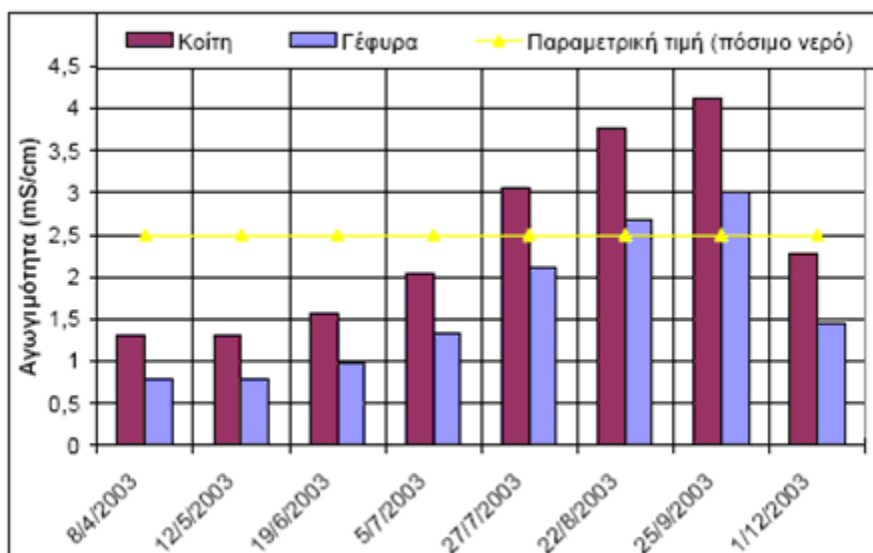
- pH
- θερμοκρασία
- αγωγιμότητα
- χλωριόντα
- φωσφορικά(Από το κεφάλαιο *Χημική Κατάσταση στις λεκάνες απορροής*)[1]



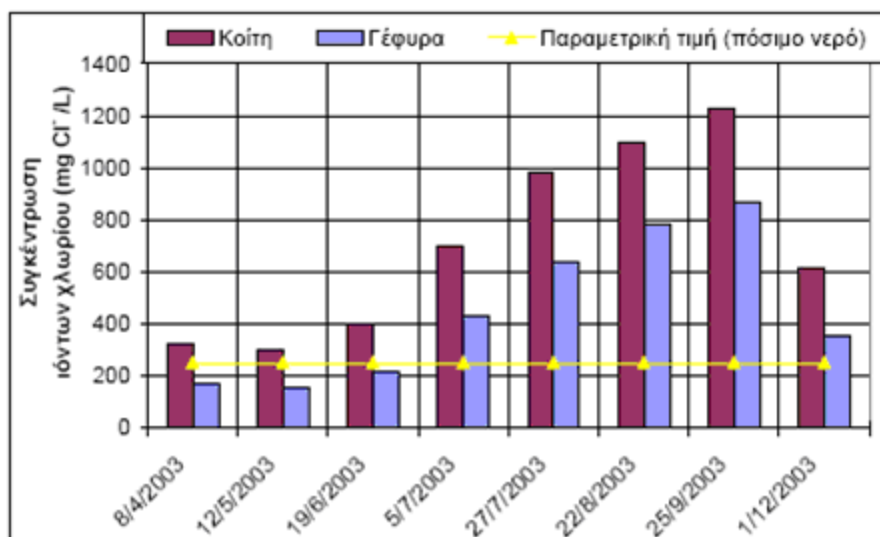
**Εικόνα 11. μεταβολή του pH του νερού του ποταμού Κοιλάρη σε δύο σημεία δειγματοληψίας (Κοίτη και γέφυρα).[1]**



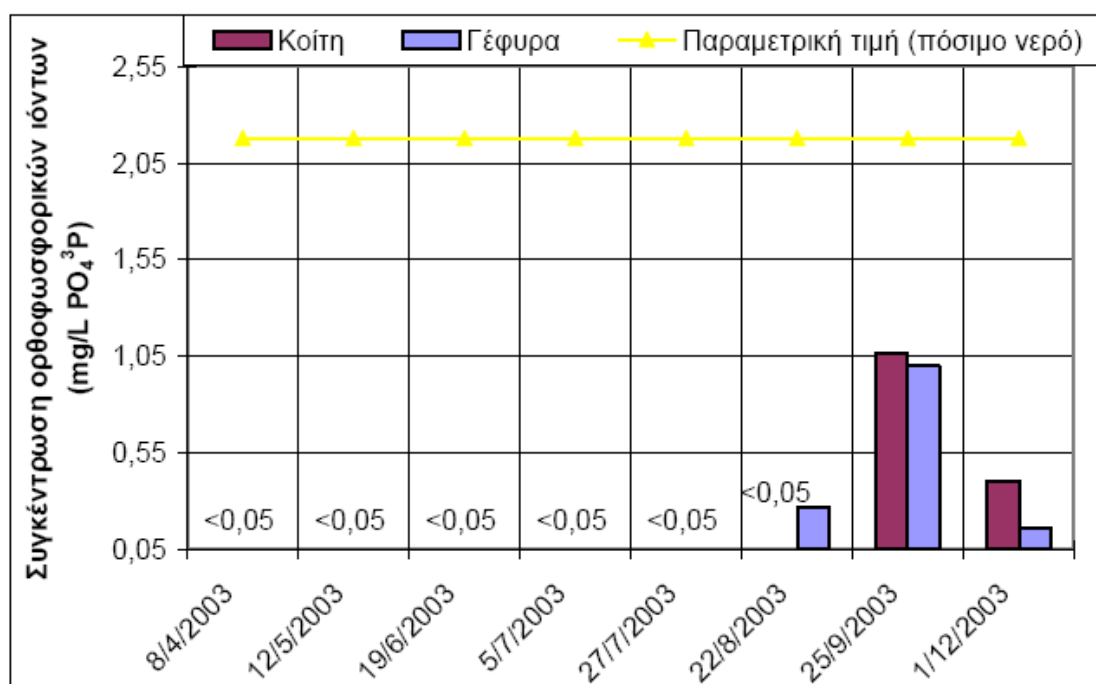
**Εικόνα 12. Μεταβολή της Θερμοκρασίας στον ποταμό Κοιλάρη.[1]**



Εικόνα 13. Μεταβολή της αγωγιμότητας του νερού του ποταμού Κοιλιάρη σε δύο σημεία δειγματοληψίας (Κοίτη και γέφυρα).[1]



Εικόνα 14. Μεταβολή της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου του νερού του ποταμού Κοιλιάρη σε δύο σημεία δειγματοληψίας (Κοίτη και γέφυρα).[1]



Εικόνα 15. Μεταβολή της συγκέντρωσης του PO<sub>3</sub>-P στα νερά του ποταμού Κοιλιάρη [1].

Από τα αποτελέσματα παρατηρούμε υπερβάσεις στην αγωγιμότητα και χλωριόντα λόγω της υφαλμύρισης του ποταμού προς την θάλασσα.[1]

Πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις σε επιλεγμένα σημεία των τριών λεκανών απορροής, με σκοπό τη λεπτομερή μελέτη της χημικής ποιότητας των επιφανειακών και 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.

Οι χημικές αναλύσεις των παραπάνω δειγμάτων αφορούσαν τον έλεγχο όσο αφορά τη συγκέντρωση SO<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, 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.[1]

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.[1]

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.[1]

## 1.9 Οικολογική Κατάσταση

Η παρόχθια ζώνη του Κοιλιάρη, 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 Κοιλιάρη, 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 “Θέρμο- 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*). (Από το κεφάλαιο *Οικολογική Κατάσταση του ποταμού Κοιλιάρη*)[1]

## 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 καθώς χαρακτηρίζονται ως κινδυνεύοντα.[1]

## Πανίδα

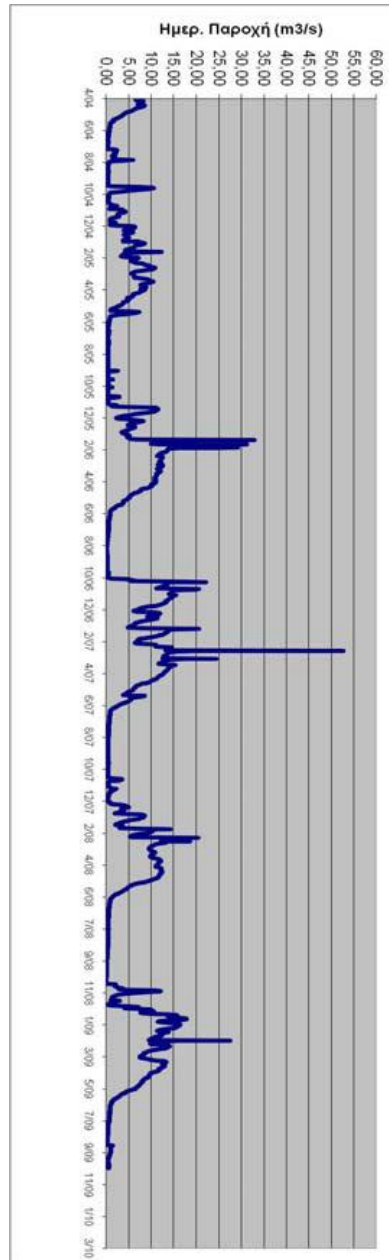
Αποτελείται από στοιχεία με ετερόκλητη ζωογεωγραφική προέλευση, αλλά και ενδημικά είδη. Η Κρήτη συγκεντρώνει μια ιδιόζουσα πανίδα λόγω της γεωγραφικής της θέσης και της παλαιογεωγραφικής και γεωλογικής της εξέλιξης. Σε όλο μήκος του ποταμού Κοιλιάρη, που χαρακτηρίζεται ως ‘‘γραμμικό’’ ποτάμιο οικοσύστημα, 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.[1]

### 1.10 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 στην **Εικόνα 16**.

- 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  $13725 \text{ m}^3/\text{hr}$ .
- Οι ετήσιες απορροές κυμάνθηκαν από 45 ως 230 εκατομμύρια κυβικά μέτρα (Από το κεφάλαιο *Υδρολογική Ανάλυση Καρστικού Υδροφορέα*).[1]



Εικόνα 16. Ημερήσιο υδρογράφημα του ποταμού Κοιλιάρη [1].

- **Βροχοπτώσεις**

Η μηνιαία και ετήσια μεταβολή των βροχοπτώσεων στο σταθμό Καλυβών στο κατάντη μέρος της υδρολογικής λεκάνης του ποταμού Κοιλιάρη παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 1. Βροχομετρικά δεδομένα της περιοχής του Ποταμού Κοιλιάρη.**

<b>ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΙΣ ΣΕ mm</b>													
<b>ΥΔΡ.ΕΤΟΣ</b>	<b>ΣΕΠ.</b>	<b>ΟΚΤ.</b>	<b>ΝΟΕ.</b>	<b>ΔΕΚ.</b>	<b>ΙΑΝ.</b>	<b>ΦΕΒ.</b>	<b>ΜΑΡ.</b>	<b>ΑΠΡ.</b>	<b>ΜΑΙ.</b>	<b>ΙΟΥΝ.</b>	<b>ΙΟΥΛ.</b>	<b>ΑΥΓ.</b>	<b>ΣΥΝ.</b>
<b>1973-74</b>					183,0	68,0	156,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
<b>1974-75</b>	32,0	15,0	150,0	59,0	126,0	209,0	6,0	22,0	2,0	0,0	0,0	0,0	<b>621,0</b>
<b>1975-76</b>	0,0	106,0	71,0	148,0	168,2	52,0	207,0	83,0	0,0	7,0	0,0	0,0	<b>842,2</b>
<b>1976-77</b>	0,0	85,9	120,7	158,0	42,0	42,0	115,0	26,6	0,0	0,0	1,3	0,0	<b>591,5</b>
<b>1977-78</b>	42,0	54,3	20,9	191,7	159,4	67,6	123,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>660,4</b>
<b>1978-79</b>	20,6	58,8	24,2	54,6	97,6	254,9	134,6	22,1	0,0	52,9	0,0	0,0	<b>720,3</b>
<b>1979-80</b>	10,4	184,8	145,0	132,8	127,0	254,9	134,6	35,4	7,2	0,0	0,0	0,0	<b>1032,1</b>
<b>1980-81</b>	0,0	95,6	0,0	115,1	487,0	122,9	27,4	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>873,0</b>
<b>1981-82</b>	0,0	0,4	131,4	77,6	100,2	247,9	122,0	56,4	50,6	0,0	0,0	0,0	<b>786,5</b>
<b>1982-83</b>	0,0	0,6	73,6	131,2	104,4	87,0	58,4	8,4	5,0	50,4	0,0	13,2	<b>532,2</b>
<b>1983-84</b>	31,5	195,6	161,6	122,5	88,0	217,8	78,4	47,9	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>943,3</b>
<b>1984-85</b>	0,0	50,4	256,4	241,8	190,5	58,6	53,4	23,0	3,2	0,0	0,0	0,0	<b>877,3</b>
<b>1985-86</b>	0,0	83,5	27,0	160,2	56,7	88,9	46,0	0,0	46,2	0,0	0,0	0,0	<b>508,5</b>
<b>1986-87</b>	131,0	70,4	98,8	169,9	94,0	59,4	110,0	186,3	2,2	0,0	0,0	0,0	<b>922,0</b>
<b>1987-88</b>	0,0	15,5	92,9	81,4	84,0	106,7	66,0	12,6	15,0	0,0	0,0	0,0	<b>474,1</b>
<b>1988-89</b>	0,0	102,4	105,6	114,2	115,2	16,7	218,4	0,0	18,8	0,0	0,0	0,0	<b>691,3</b>
<b>1989-90</b>	0,0	108,4	249,4	22,8	58,6	42,0	7,6	15,8	0,0	0,0	0,0	14,2	<b>518,8</b>
<b>1990-91</b>	20,4	24,9	68,4	70,4	119,5	78,2	44,9	45,7	17,0	0,0	0,0	8,5	<b>497,9</b>
<b>1991-92</b>	0,0	72,0	104,6	197,6	42,5	126,1	128,7	20,0	7,2	6,4	0,0	0,0	<b>705,1</b>
<b>1992-93</b>	0,0	0,0	46,7	142,3	149,9	133,4	39,8	14,7	48,2	12,0	0,0	0,0	<b>587,0</b>
<b>1993-94</b>	0,0	13,2	184,4	27,2	218,5	83,0	23,6	17,8	5,0	0,0	0,0	0,0	<b>572,7</b>
<b>1994-95</b>	0,0	146,8	150,8	74,0	67,6	28,2	68,0	18,0	3,6	0,0	3,4	0,0	<b>560,4</b>
<b>1995-96</b>	6,3	12,1	56,3	29,4	161,4	182,3	180,3	13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>641,6</b>
<b>1996-97</b>	73,2	114,7	73,5	279,0	112,0	66,0	262,1	25,8	0,0	14,4	0,0	0,0	<b>1020,7</b>
<b>1997-98</b>	4,8	84,3	162,4	64,2	82,0	24,0	124,3	17,5	35,6	0,0	0,0	0,0	<b>599,1</b>
<b>1998-99</b>	0,0	44,8	88,1	260,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>393,1</b>
<b>1999-00</b>	41,7	0,0	152,0	225,8	220,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>640,0</b>
<b>2000-01</b>	0,0	11,4	103,9	150,0	336,8	144,7	4,0	79,6	22,0	0,0	0,0	0,0	<b>852,4</b>
<b>2001-02</b>	5,0	0,0	201,5	275,2	126,4	30,0	38,3	50,3	0,0	0,0	10,6	5,0	<b>742,3</b>
<b>2002-03</b>	73,3	37,0	82,0	145,0	82,0	307,0	257,0	100,0	13,0	0,0	0,0	0,1	<b>1096,4</b>
<b>2003-04</b>	1,8	0,0	84,0	245,0	141,0	38,9	21,3	47,0	10,0	0,0	0,0	0,0	<b>589,0</b>
<b>2004-05</b>	0,0	1,2	145,8	90,9	82,4	52,0	32,0	40,0	18,0	0,0	0,0	0,0	<b>462,3</b>
<b>2005-06</b>	0,0	33,0	37,7	59,0	258,0	168,2	30,3	10,8	0,0	24,0	0,0	0,0	<b>621,0</b>
<b>2006-07</b>	0,0	241,4	97,0	56,0	63,0	145,0	56,0	7,6	49,0	0,0	0,0	0,0	<b>715,0</b>
<b>2007-08</b>	0,0	51,0	40,0	219,0	72,0	106,0	20,0	38,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>546,0</b>
<b>Μεγ. ύψος</b>	<b>131,0</b>	<b>241,4</b>	<b>256,4</b>	<b>279,0</b>	<b>487,0</b>	<b>307,0</b>	<b>262,1</b>	<b>186,3</b>	<b>50,6</b>	<b>52,9</b>	<b>10,6</b>	<b>14,2</b>	<b>1096,4</b>
<b>Ελ. Ύψος</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>22,8</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>393,1</b>
<b>Μ.Ο</b>	<b>14,5</b>	<b>62,2</b>	<b>106,1</b>	<b>135,0</b>	<b>131,9</b>	<b>106,0</b>	<b>85,6</b>	<b>31,8</b>	<b>10,8</b>	<b>4,8</b>	<b>0,4</b>	<b>1,2</b>	<b>689,3</b>

## 2 Αντιπλημμυρικά έργα

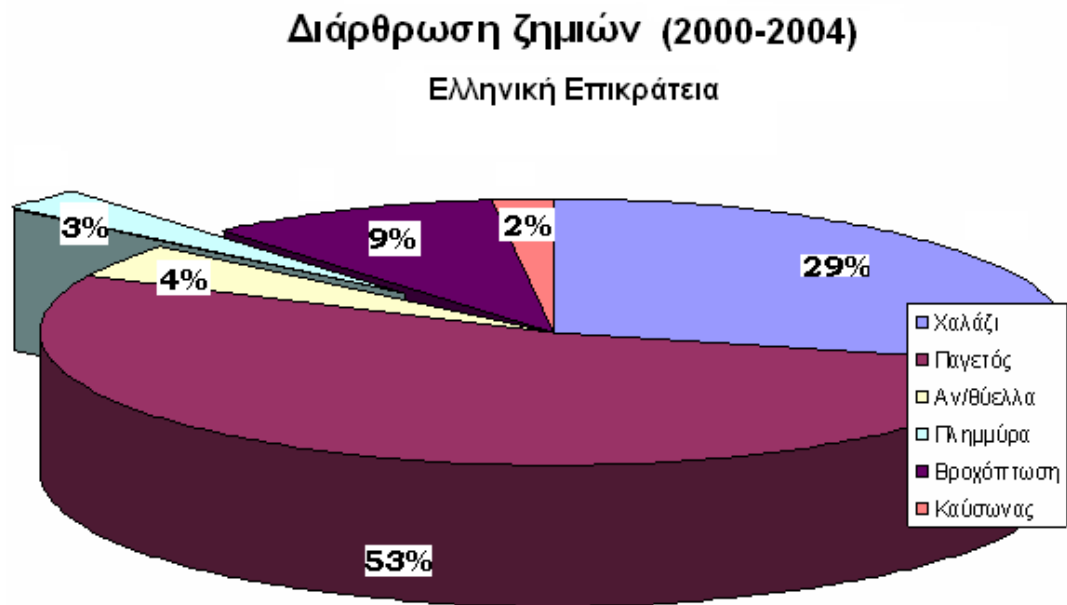
Είναι τα έργα εκείνα που έχουν σκοπό την όσο το δυνατόν καλύτερη προστασία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος του από τις δυσμενείς συνέπειες του φαινομένου της πλημμύρας. Επειδή το κόστος (περιβαλλοντικό και οικονομικό) είναι τεράστιο απόλυτη προστασία από τις πλημμύρες δεν είναι δυνατή.[3]

Πλημμύρα είναι το φαινόμενο, κατά το οποίο η κοίτη ενός ποταμού δεν επαρκεί για την παροχέτευση μιας αυξημένης παροχής νερού στις παρακείμενες περιοχές με καταστρεπτικές συνέπειες (Τα πλημμυρικά νερά λόγω των μεγάλων ταχυτήτων και της μεγάλης συρτικής τους δύναμης μεταφέρουν μεγάλους όγκους φερτών υλών).[3]  
Η τεχνική υδρολογία με την ανάλυση των βροχοπτώσεων και των απορροών μπορεί να προσδιορίσει τις περιοχές που κινδυνεύουν να κατακλυσθούν κατά τη διάρκεια μιας πλημμύρας σε συνάρτηση με την περίοδο επαναφοράς της πλημμύρας.[3]

Γενικά τα μέτρα που χρησιμοποιούνται για την προστασία από τις πλημμύρες έχουν σκοπό τη μείωση των ζημιών και όχι την απόλυτη προστασία από αυτές, διότι τα απαιτούμενα έργα όπως τεράστια αναχώματα και τοιχία μπορεί να δημιουργήσουν περιβαλλοντικά προβλήματα όπως επίσης και το οικονομικό κόστος είναι τεράστιο.[3]

Στους μεγάλους ποταμούς οι πλημμύρες μπορεί να εμφανιστούν αρκετό χρόνο μετά τη βροχόπτωση και να διαρκέσουν ημέρες, εβδομάδες ή ακόμα και μήνες. Σε μικρότερα ποτάμια είναι δυνατόν να εμφανιστούν στιγμιαίες πλημμύρες (flashfloods) που συνήθως οφείλονται σε πολύ έντονη τοπική βροχόπτωση. Αυτές είναι λιγότερο προβλέψιμες και μπορεί να προκαλέσουν εκτεταμένες καταστροφές. Δεδομένου ότι συμβαίνουν ξαφνικά και με ελάχιστη προειδοποίηση είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες για τους ανθρώπους.[3]

## 2.1 Πλημμύρες στην Ελλάδα



Πηγή: ΕΛΓΑ

Εικόνα 17. Κατανομή καταστροφών στην Ελλάδα.[4]

Πίνακας 2. Σύνολο Αποζημιώσεων στη Χώρα λόγω πλημμύρας

Σύνολο Αποζημιώσεων από πλημμύρες					
Ζημιογόνο αίτιο	2000	2001	2002	2003	2004
σε €	826.181	1.251.916	9.211.822	13.944.546	3.063.895
Δένδρα	10.790.537	17.786.964	15.492.604	26.051.80	27.799.226
Στρέμματα	675.403	459.647	1.829.889	1.195.83	2.705.848

**Αιτίες που προκαλούν πλημμύρες είναι:**

- Κλιματολογικές αλλαγές
- Αλλαγές χρήσης γης
- Άλλες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις όπως αστική ανάπτυξη και στεγανοποίηση της επιφάνειας του εδάφους, διαστάσεις και μικρό ύψος γεφυρών ,μερική ή ολική κάλυψη των κοιτών των χειμάρρων, κατασκευή μεγάλων έργων, καθιζήσεις σε πεδινές περιοχές.[4]

## 2.2 Αντιπλημμυρική προστασία

Η ανεπάρκεια της κοίτης ενός ποταμού ,που είναι η αιτία της πλημμύρας μπορεί να οφείλεται

- Στο μέγεθος της διατομής
- Στη μικρή κλίση
- Στην τραχύτητα του πυθμένα.[3]

Θεωρούμε τη ροή ομοιόμορφη κατά τη διάρκεια μιας πλημμύρας για τον υπολογισμό των στοιχείων ροής κατά τη διάρκεια μιας πλημμύρας. Φυσικά στην περίπτωση της πλημμύρας η ροή απέχει πολύ από την ομοιόμορφη, από την εξίσωση όμως μπορεί να προκύψει πως είναι δυνατόν να επιτευχθεί αντιπλημμυρική προστασία μιας περιοχής με επέμβαση στους όρους που επιδρούν στην επιδείνωση της πλημμύρας. Για την ομοιόμορφη ροή η παροχή δίνεται από την εξίσωση του Manning:[3]

**Συγκεκριμένα για τον ποταμό Κοιλιάρη που εξετάζουμε:**

Για να υπολογίσουμε τη μέγιστη παροχή που αντέχει το ποτάμι για την κανονική ροή θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση του Manning:

$$Q = \frac{A}{n} R_h^{2/3} I_0^{1/2}$$

όπου

$n$ : συντελεστής τραχύτητας (για ποτάμια με φυσική κοίτη,  $n = 0,025$ ).

$I_0$ : κλίση πυθμένα αγωγού, στην περίπτωση μας του ποταμού Κοιλιάρη(θεωρούμε ένα μέσο όρο από τις κλίσεις της λεκάνης απορροής του ποταμού μας ,δηλαδή  $I_0 = 6\%$ ).

$A$ : διατομή ποταμού σε  $m^2$  από τον τον τύπο:

$$A = \frac{b+B}{2} h = \frac{9,88+12}{2} \cdot 0,76 = 8,31 m^2$$

$y$ : μέσο ύψος όχθης ( $y = h = 0,76 m$ ).

$b$ : μέσο πάχος τμημάτων όχθης ( $b = 9,88 m$ ).

$n = 0,025$ .

$R_h$ : υδραυλική ακτίνα ( $R_h = A/P$ , με  $P = b + (2 * y\sqrt{1 + (\tan\theta^2)})$ ).

Όπου  $\theta = 58,3125$  (μέσος όρος από τις μετρήσεις της bank anle)

Καταλήγουμε λοιπόν κάνοντας αντικατάσταση στα μεγέθη για τον ποταμό Κοιλιάρη

$$Q = 64,87 \text{ m}^3/\text{sec}$$

### 2.2.1 Μείωση της παροχής αιχμής της πλημμύρας

Η μείωση της παροχής αιχμής επιτυγχάνεται κυρίως με την προστασία της ορεινής ζώνης της λεκάνης απορροής από τη διάβρωση. Είναι η σημαντικότερη επέμβαση σε κάθε υδατόρεμα ώστε να μειώνεται η αιχμή του πλημμυρικού κύματος που δημιουργείται ύστερα από κάθε ραγδαία βροχόπτωση. Η διάβρωση οδηγεί στην έκπλυση των εδαφών με συνέπεια την αύξηση των ταχυτήτων ροής, την ερημοποίηση της ορεινής ζώνης και τη μεταφορά φερτών υλών προς τα κατάντη με συνέπεια τη μείωση της διοχετευτικής ικανότητας του ποταμού. Τρόποι προστασίας της ορεινής ζώνης από τη διάβρωση είναι:

- δημιουργία αναβαθμών
- φυτοκάλυψη
- κατάλληλη χρήση καλλιεργήσιμων εδαφών
- Κατασκευή ανασχέσεων ή αποθηκείσεως.
- Κατασκευή παραλλήλων προς την κύρια κοίτη διόδων ανακούφισης πλημμύρων.[3]

### 2.2.2 Ολοκληρωμένο σχέδιο διαχείρισης αντιπλημμυρικής προστασίας

Χωρίζεται σε δύο μέρη :

- Ανάλυση Επικινδυνότητας, στην οποία γίνεται αξιολόγηση των πηγών κινδύνου, προσδιορισμός επικίνδυνων περιοχών και εκτίμηση τρωτότητας.

- Στρατηγική διαχείρισης πλημμυρών που περιλαμβάνει προ-πλημμυρικά μέτρα (Τεχνικά, Ρυθμιστικά, Οικονομικά κι επικοινωνιακά), διαχείριση γεγονότος πλημμύρας, μετά-πλημμυρικά έργα.[4]

Σχεδιασμός των έργων αντιπλημμυρικής προστασίας πρέπει να βασίζεται στη μελέτη με πραγματικά δεδομένα των μηχανισμών απορροής και κυρίως σε υδρο-μετεωρολογικά δεδομένα επί μεγάλο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε να περιλαμβάνει συνήθεις και ακραίες συνθήκες. [4]

### 2.2.3 Έργα διευθέτησης των ποταμών

Διακρίνονται σε εγκάρσια και παράλληλα έργα.

- Εγκάρσια έργα είναι οι αναβαθμοί και τα φράγματα, τα οποία κατασκευάζονται από λιθοδομή, από σκυρόδεμα ή από συρματοκιβώτια.
- Παράλληλα έργα, τα οποία διακρίνονται σε μονολιθικά (όπως τοίχοι από λιθοδομή ή σκυρόδεμα) και παραμορφούμενα (όπως συρματοκιβώτια ή προκατασκευασμένες πλάκες).[3]

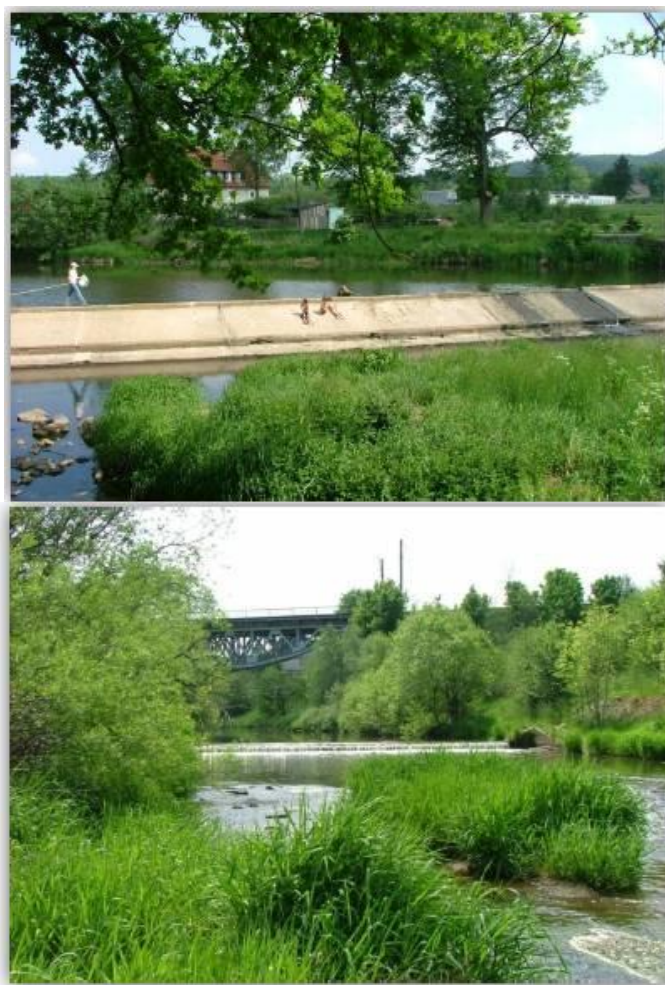
Χαρακτηριστικά αντιπλημμυρικά έργα παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 18. Τοίχοι Συγκράτησης.[4]



**Εικόνα 19. Λιοχετεύσεις.[4]**



**Εικόνα 20. Υπεργειλιστές.[4]**



**Εικόνα 21. Τεχνηκοί Αποθηκευτήρες.[4]**



**Εικόνα 22. Φράγματα συγκράτησης φερτών υλικών.[4]**

### **3 Η διάβρωση Γενικά**

Ο όρος διάβρωση αναφέρεται συνήθως στη γεωλογική διάβρωση (erosion) και αφορά κυρίως σε μηχανική απομάκρυνση υλικού:

#### **1. Υδατική και Αιολική Διάβρωση**

#### **2. Προοδευτική αποσύνθεση των υλικών των εδαφών. [5]**

Η διάβρωση του εδάφους είναι ένα φυσικό φαινόμενο, η εξέλιξη του οποίου έχει επιπτώσεις στη σταθερότητα των οικοσυστημάτων προκαλώντας την υποβάθμιση ή και την αμετάκλητη απώλεια εδάφους. Φυσικοί παράγοντες όπως το κλίμα, η τοπογραφία, η κάλυψη του εδάφους και συγκεκριμένα εδαφολογικά χαρακτηριστικά έχουν σημαντικές επιπτώσεις στις διαδικασίες της εδαφικής διάβρωσης. Όμως οι περισσότερες ανησυχίες σχετίζονται με την επιταχυνόμενη διάβρωση, όπου το ποσοστό εμφάνισης της έχει αυξηθεί σημαντικά από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Τα γεγονότα της επιταχυνόμενης εδαφικής διάβρωσης συνδέονται με ακραία γεγονότα όπως οι καταιγίδες, οι οποίες είναι ετερόκλητες σε χρόνο και σε διάστημα. Συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της βροχής όπως το ύψος βροχής η ένταση και η συχνότητα, αποτελούν παράγοντες γένεσης της διάβρωσης. [5]

Με δεδομένη την πολύ αργή διαδικασία σχηματισμού εδάφους 0,05 – 0.5 mm ανά έτος, οποιαδήποτε εδαφική απώλεια περισσότερου από 1 t/ha ανά έτος μπορεί να θεωρηθεί ως αμετάκλητη μέσα σε μια χρονική διάρκεια 50–100 ετών. Το έδαφος μπορεί επομένως να θεωρηθεί ως μη ανανεώσιμος πόρος.

Η επιφανειακή ροή μπορεί να αφήσει στην επιφάνεια του εδάφους χαρακτηριστικά ίχνη. Ανάλογα με τα ίχνη που αφήνει χαρακτηρίζεται και ο τύπος της επιφανειακής διάβρωσης. Σε μια κεκλιμένη εδαφική επιφάνεια δεν εμφανίζεται πάντα μόνο ένας τύπος διάβρωσης, συνήθως συνυπάρχουν περισσότεροι. [Η. 1]

Οι 3 τύποι είναι:

### Διάβρωση κατά στρώσεις

Ο τύπος αυτός της διάβρωσης μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι το πρώτο στάδιο της επιφανειακής διάβρωσης. Προκαλεί μετακίνηση λεπτόκοκκων εδαφικών συστατικών από τον επιφανειακό ορίζοντα ή σε εντονότερη μορφή την απομάκρυνση ολόκληρου του ορίζοντα.

### Διάβρωση με αυλακώσεις

Η αυλακωτή διάβρωση που είναι μη επιλεκτική στη μεταφορά υλικών, θεωρητικά αρχίζει να δρα όταν μεταφερθούν όλα τα λεπτόκοκκα υλικά του επιφανειακού στρώματος του εδάφους, εφόσον βέβαια η κλίση και η ταχύτητα ροής έχουν κρίσιμες τιμές. Σε εδάφη με πηλώδη σύσταση οι κριτικές τιμές είναι 4 – 5 % κλίση και 3 cm/sec ταχύτητα ροής. Κρίσιμος παράγοντας η άροση κατά την κλίση του εδάφους οπότε τα αυλάκια της άροσης προκαλούν συγκέντρωση ροής με αποτέλεσμα να γίνεται επιλεκτική μεταφορά υλικών

### Διάβρωση με χαραδρώσεις

Εάν στη διάβρωση με αυλακώσεις δεν ληφθεί κανένα μέτρο για την προστασία του εδάφους τότε η αυλάκωση εξελίσσεται σε μέγεθος με το σκάψιμο των πρανών και του πυθμένα και δημιουργείται χαράδρα. Η διάβρωση με χαραδρώσεις είναι δυνατόν να δημιουργηθεί εξ' αρχής στο έδαφος και να μην αποτελεί εξελικτικό στάδιο της διάβρωσης με αυλακώσεις σε περιοχές που ο χειμώνας είναι πολύ βροχερός και το καλοκαίρι θερμό και ξηρό. [H. 1]

Πρανή ορίζονται κεκλιμένοι φυσικοί ή τεχνητοί σχηματισμοί εδάφους ή βράχου. Η κλίση αυτή του πρανούς το καθιστά «ασταθή» σε σχέση με έναν οριζόντιο σχηματισμό εδάφους λόγω της παρουσίας διατμητικών τάσεων. Το φυσικό πρανές μπορεί να αστοχήσει υπό την επίδραση γεωλογικών, γεωτεκτονικών ή φυσικών παραγόντων. Φαινόμενα όπως η διάβρωση, η μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα, οι σεισμοί κ.α μπορούν να προκαλέσουν την αστοχία του φυσικού πρανούς.[6]

Οι παράγοντες που επιδρούν σε ένα φυσικό πρανές είναι κυρίως εκείνοι της γεωλογικής δομής, των υδρογεωλογικών συνθηκών, καθώς και εκείνοι των μηχανικών χαρακτηριστικών.

Ο αποτελεσματικός έλεγχος της εδαφικής διάβρωσης επιτυγχάνεται με την εφαρμογή των αρχών του βιώσιμου προγραμματισμού στη χρήση του εδάφους θέτοντας κριτήρια για την απόδοση του εδάφους για καλλιέργεια ή προστασία.[6]



**Εικόνα 23. Διάβρωση εδάφους. [H.2]**

### **3.1 Υδατική Διάβρωση**

Η διάβρωση, που προκαλεί το νερό, χωρίζεται σε διάφορες κατηγορίες. Μπορεί να είναι η επιφανειακή, που προκαλείται μετά τη βροχή όταν η επιφάνεια της γης δεν καλύπτεται από καμιά βλάστηση. Η διάβρωση αυτή γίνεται σ' όλη την επιφάνεια της γης που δέχεται τη βροχή.[5]

Υπάρχει κατόπιν η διάβρωση που γίνεται σε μέρη, όπου υπάρχουν ή σχηματίζονται μετά από μια βροχή μικρά ρυάκια. Τα ρυάκια αυτά δεν είναι πάντα μόνιμα, αλλά κάθε φορά μπορεί να γίνονται και σε κάποιο άλλο σημείο, ανάλογα με τη διαμόρφωση που έχει το έδαφος.[5]

Υπάρχει ακόμη η διάβρωση που προκαλούν οι χείμαρροι και τα μόνιμα μικρά ποταμάκια που μπορεί να έχουν μόνιμη κοίτη. Η καταστροφή στην επιφάνεια της γης, που μπορεί να προκληθεί από τον τύπο αυτό της διάβρωσης, είναι διαφορετική και εξαρτάται από το είδος του εδάφους, (τα αμμώδη εδάφη διαβρώνονται πολύ πιο εύκολα από ότι τα αργιλώδη) εξαρτάται ακόμη από την κλίση του εδάφους (όσο πιο επίπεδο είναι το έδαφος, τόσο πιο μικρή είναι η ταχύτητα του νερού και τόσο πιο μικρή είναι και η διάβρωση που προκαλεί).[5]

Ακόμη η έκταση της διάβρωσης εξαρτάται από την έκταση της κάλυψης της επιφάνειας της γης από διάφορα φυτά, ακόμη και από το είδος των φυτών κλπ. Τα αραιά φυτά πολύ λίγο εμποδίζουν τη διάβρωση, καθώς επίσης και τα φυτά εκείνα που έχουν πολύ μικρές ρίζες και ιδιαίτερα όταν αυτές βρίσκονται πολύ κοντά στην επιφάνεια.[5]

Αντίθετα η κάλυψη της επιφάνειας από πυκνή καλλιέργεια που μάλιστα έχει ρίζες που προσχωρούν βαθιά μέσα στο χώμα, η κάλυψη με δάση μιας επιφάνειας, εμποδίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό ή ακόμη σταματά τελείως οποιαδήποτε διαβρωτική δράση του νερού. Ο τύπος αυτός της διάβρωσης είναι γνωστός σε ολόκληρο τον κόσμο και απειλεί με καταστροφή πολλές χιλιάδες στρέμματα καλλιεργήσιμης γης κάθε χρόνο. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η διάβρωση στην πατρίδα μας, που στερείται από δάση, αλλά και από κάλυψη με βλάστηση, ιδιαίτερα των βουνών.[5]

Φυσικά η διάβρωση που προκαλεί το νερό μπορεί σε μια περιοχή ή σε μια γωνιά να προκαλεί τεράστιο κακό και να την απειλεί κυριολεκτικά με αφανισμό, ενώ σε άλλη να προκαλεί μεγάλο καλό. Μια μικρή απόδειξη, στη χώρα μας, της δράσης της διάβρωσης του νερού αποτελεί και ο σημερινός κάμπος κοντά στις Θερμοπύλες.[7]

Η υδατική διάβρωση είναι μία φυσική διαδικασία, οι κύριες αιτίες της οποίας είναι οι σφοδρές βροχοπτώσεις, η τοπογραφία, το χαμηλό σε οργανική ουσία περιεχόμενο του εδάφους, το ποσοστό και ο τύπος φυτοκάλυψης.[5]

Ωστόσο, η υδατική διάβρωση εντείνεται και επιταχύνεται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως ακατάλληλες τεχνικές καλλιέργειας και πρακτικές συγκομιδής, αλλαγές στις υδρολογικές συνθήκες, αποψίλωση και περιθωριοποίηση ή εγκατάλειψη της γης. Η ακατάλληλη διαχείριση της γης αποτελεί το κύριο αίτιο της συμπίκνωσης

του εδάφους. Ο υπερβολικά μεγάλος αριθμός ζώων για συγκεκριμένα μεγέθη αγροτεμαχίων, η ακατάλληλη χρήση βαρέων μηχανημάτων στη γεωργία και το όργωμα όταν το έδαφος είναι πολύ υγρό είναι παραδείγματα ακατάλληλης διαχείρισης. Τα υγρά εδάφη δεν είναι αρκετά δυνατά για να προσφέρουν αντίσταση στο βάρος γεγονός που προκαλεί τη συμπίκνωσή τους.[7]



**Εικόνα 24. Υδάτινη Διάβρωση. [Η.3]**

***Τι ζημιά προκαλεί η διάβρωση;***

Έχει εκτιμηθεί ότι 115 εκατομμύρια εκτάρια – ένα όγδοο της συνολικής χερσαίας ζώνης της Ευρώπης υπόκεινται σε υδατική διάβρωση, και 42 εκατομμύρια εκτάρια επηρεάζονται από αιολική διάβρωση. [7]

#### **Άμεση ζημιά λόγω υδατικής διάβρωσης**

- απώλεια οργανικής ουσίας
- Υποβάθμιση της δομής του εδάφους
- Συμπύκνωση της επιφάνειας του εδάφους

- Μειωμένη διήθηση νερού
- Μειωμένη παροχή νερού στον υδροφόρο ορίζοντα
- απώλεια εδάφους στην επιφάνεια
- αφαίρεση των θρεπτικών ουσιών
- αύξηση του κλάσματος των χονδροειδών των εδαφών
- Δημιουργία ρυακίων και χαντακιών
- Εκρίζωση φυτών
- Μείωσης της παραγωγικότητας Εδάφους [7]

#### **Έμμεση ζημιά λόγω υδατικής διάβρωσης**

- Ρύπανση των υδάτων
- Ευτροφισμός των υδάτων
- Πλημμύρες
- Διείσδυση της υποδομής στο έδαφος
- Παρεμπόδιση των στραγγιστικών δικτύων
- Αλλαγές στο σχήμα των υδάτινων οδών
- Κάλυψη των πλωτών οδών και των λιμένων με ιλύ [7]



**Εικόνα 25. Διάβρωση στον Κορινθιακό κόλπο. [Η.4]**

### 3.2 Διάβρωση σε Ποταμούς

Σε ένα ποτάμι διακρίνουμε τρία τμήματα. Το ανώτερο, με μεγάλη κλίση κοίτης και ανώμαλο πυθμένα, που το νερό τρέχει με μεγάλη ταχύτητα και η διατομή της κοίτης του έχει σχήμα V. Στο τμήμα αυτό δημιουργούνται και καταρράκτες. Το μεσαίο τμήμα, στο οποίο η ταχύτητα ροής ελαττώνεται, η κοίτη διευρύνεται και η διατομή της γίνεται ημικυκλική και αρχίζουν να δημιουργούνται μαίανδροι. Το κατώτερο τμήμα είναι σχεδόν επίπεδο, η κοίτη μπορεί να καταλαμβάνει κατά διαστήματα όλο το πλάτος της λεκάνης, η ταχύτητα ροής είναι πολύ μικρότερη απ' ό,τι στα άλλα τμήματα και σχηματίζονται συχνά μαίανδροι. Στην περιοχή αυτή σχηματίζεται το πεδίο πλημμύρας.[8]

Η διάβρωση, η αποσάθρωση και οι κινήσεις μαζών που προκαλούνται από τη δράση των ποταμών, δεν προκαλούν μόνο μεταφορά και απόθεση ιζημάτων, αλλά διαμορφώνουν την επιφάνεια και δημιουργούν συστήματα κοιλάδων. Η μορφολογία αυτή έχει δημιουργηθεί από τη διαβρωτική δράση των ίδιων των ποταμών που τις διασχίζουν ή ποταμών που μπορεί ήδη να τις έχουν εγκαταλείψει. Κάθε ποταμός ή κάθε σύνολο ποταμού με τους παραποτάμους του έχει τη δική του λεκάνη απορροής, που αποτελείται από τη συνολική περιοχή που τα νερά αποστραγγίζονται σ' αυτόν τον ποταμό. Η λεκάνη απορροής λέγεται επίσης υδρογραφική ή υδρολογική λεκάνη. Αν συνδέσουμε τα υψηλότερα σημεία που περιβάλλουν τη λεκάνη απορροής, προκύπτει μια νοητή γραμμή που καθορίζει τα όρια της λεκάνης. Η γραμμή αυτή λέγεται υδροκρίτης. Κάθε κύριος κλάδος μιας ομάδας παραποτάμων καθορίζει τη δική του λεκάνη απορροής, που ανήκει στην ευρύτερη λεκάνη απορροής του ποτάμιου συστήματος στο οποίο ανήκει και ο παραπόταμος.[8]

Η διάβρωση των ποταμών είναι κυρίως μηχανική και προκαλείται με απορρίνιση, διάβρωση εκσκαφής, μηχανική υδραυλική δράση, σμίκρυνση, λείανση και τέλος με χημική διάλυση. Οι ποταμοί διαβρώνουν την πλαγιά πάνω στην οποία ρέουν, σκάβοντας την κοίτη τους και μεταφέροντας τα κατάλοιπα της αποσάθρωσης. Πλαταίνουν τις κοιλάδες γιατί με την εκβάθυνση της κοίτης προκαλούνται κινήσεις μαζών και επεκτείνουν το υδρογραφικό τους δίκτυο προς τη θάλασσα, όπου εκβάλλουν. Επίσης διαβρώνουν την επιφάνεια κατά την αντίθετη φορά της ροής τους, δηλαδή ανάντη προς τις πηγές. Η διάβρωση αυτή λέγεται οπισθοδρομούσα και είναι

εντονότερη όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση του ανάγλυφου. Έχει δε σαν αποτέλεσμα τη διάβρωση υψηλότερων περιοχών και μεγαλύτερη ανάπτυξη του υδρογραφικού συστήματος. Με τη διαβρωτική τους δράση καταστρέφουν το ανάγλυφο και με τη μεταφορά και απόθεση του υλικού συντελούν στην ιζηματογένεση, με αποτέλεσμα, αν συνεχίζονταν αυτές οι διεργασίες θα επέφεραν επιπέδωση της περιοχής. Συνήθως όμως η σειρά αυτή διακόπτεται από άλλους παράγοντες που οφείλονται σε ενδογενείς δυνάμεις.[8]

Οι ποταμοί, με τη μεταφορά νερού από την ξηρά προς τη θάλασσα, έχουν βασική συμμετοχή στον υδρολογικό κύκλο και με τη μεταφορά υλικού στον πετρολογικό κύκλο. Βασικό επίπεδο είναι το κατώτερο επίπεδο μέχρι το οποίο ο ποταμός μπορεί να διαβρώσει την κοίτη του και αντιστοιχεί στη στάθμη της θάλασσας ή της λίμνης όπου εκβάλλει. Η στάθμη της θάλασσας χαρακτηρίζεται σαν απόλυτο βασικό επίπεδο, ενώ η στάθμη λίμνης ή ποταμού που εκβάλλει ένας παραπόταμος, σαν τοπικό βασικό επίπεδο.[8]

Η παρουσία της κοίτης μπορεί να προκαλέσει ένα σύνολο φαινομένων κατολίσθησης τόσο κατά μήκος της όχθης του ποταμού όσο και κατά μήκος των κλίσεων που προεξέχουν από την κοίτη. [8]

Οι εναλλαγές ανάδυσης και κατάδυσης από το νερό μπορούν να προκαλέσουν το χωρισμό των βράχων που υπόκεινται στους επαναλαμβανόμενους κύκλους της ύγρυνσης και της αποξήρανσης. Αυτές και άλλες διαδικασίες μπορούν να μειώσουν την αντίσταση του βράχου και τη δημιουργία κοιλότητας ποταμών ή να οδηγήσουν σε έναν πραγματικό τεμαχισμό με την επακόλουθη παραγωγή συντριμμίων που αποσυντίθεται εκ νέου και αφαιρούνται από το ρεύμα υπό μορφή διάβρωσης. Οι διαδικασίες διάβρωσης ποταμού – αναχώματος μπορούν να επιταχύνουν και να προκαλέσουν τα φαινόμενα υποβιβασμού των κλίσεων, όπως οι μαζικές μετακινήσεις υλικού ή να προκαλέσουν τους όρους ανισορροπίας. [8]

Οι διαβρωσιγενείς διαδικασίες ποταμών που πραγματοποιούνται μέσα σε έναν δεδομένο χρόνο, συμπεριλαμβανομένων των μέγιστων και ελάχιστων φάσεων ροής, μπορούν να συνοψιστούν με τον ακόλουθο τρόπο: στην αρχή της περιόδου της

υψηλής στάθμης ο ποταμός και τα κατώτατα θραυσματογενή συντρίμια υλικά υπόκεινται στην αναδιοργάνωση και τη διάβρωση με την προοδευτική αύξηση του όγκου του νερού και του φορτίου των μορίων ενώ η ταχύτητα στο κατώτατο σημείο του ποταμού μειώνεται. [8]

Κατά συνέπεια, η κατώτατη διάβρωση υπό μια έννοια σταματάει, ενώ η αποξύρωση (abrasion) και ο υποβιβασμός μπορούν να εμφανιστούν κατά μήκος των αναχωμάτων, με την επακόλουθη διάβρωση τους και τον πιθανό υποβιβασμό των κλίσεων. Αντίθετα, η μείωση μιας σημαντικής ροής προκαλεί την ιζηματογένεση των υλικών κατά μήκος όλης της πλημμυρισμένης κοίτης.[8]

Τέλος όταν επανέρχεται η ροή στα κανονικά επίπεδα και η κοίτη φορτώνεται πλέον με συντρίμια, η κατώτατη διάβρωση επαναλαμβάνεται έχοντας επιπτώσεις στο πρόσφατα κατατεθειμένο υλικό. [8]

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την αστοχία (διάβρωση) των πρανών στο κατάντη μέρος του ποταμού Κοιλιάρη που οφείλεται στην εποχιακή μεταβολή της στάθμης του και σε πλημμυρικά γεγονότα.



**Εικόνα 26. Η διάβρωση που έχει υποστεί ο ποταμός Φοίνικας στην Αχαΐα . [Η. 5]**

## **4 Εφαρμογή της Στατιστικής Θεωρίας Λήψης Αποφάσεων Κατά Bayes για την περίπτωση Πλημμύρας στον Ποταμό Κοιλιάρη**

### **4.1 Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια εκτίμηση για τις αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν στο ενδεχόμενο κατασκευής ή μη ενός τεχνικού αντιπλημμυρικού έργου. Η χρήση της στατιστικής θεωρίας λήψης αποφάσεων του Bayes που θα χρησιμοποιηθεί, αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο σε προβλήματα λήψης αποφάσεων. Τα επιμέρους σημεία που θα αναπτυχθούν παρακάτω βασίζονται στην πιο σύνθετη ανάλυση της αβεβαιότητας σε τεχνικά και περιβαλλοντικά προβλήματα, στην επίδραση της συνάρτησης απώλειας στη λήψη αποφάσεων που συσχετίζει την οικονομική αξία της πληροφορίας με το υπό μελέτη πρόβλημα και στην ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) των σχεδιαστικών και κατασκευαστικών επιλογών σε σχέση με τα επιστημονικά και οικονομικά μοντέλα προσομοίωσης της πραγματικότητας.

### **4.2 Βασικές έννοιες στη Θεωρία Λήψης Αποφάσεων**

Η Θεωρία Αποφάσεων (Decision Theory) ασχολείται με το πρόβλημα της λήψης των αποφάσεων. Η Στατιστική Θεωρία Αποφάσεων (Statistical Decision Theory) ασχολείται με την λήψη αποφάσεων, βασισμένη στη στατιστική γνώση που προκύπτει ύστερα από δειγματοληπτική έρευνα και προσδιορίζει ορισμένες αβεβαιότητες που υπεισέρχονται στο υπό ανάλυση πρόβλημα της λήψης αποφάσεων.[9]

Σημαντικό ρόλο, ιδιαίτερα σε προβλήματα μηχανικού, παίζει η Στατιστική Θεωρία Αποφάσεων του Bayes, γιατί χρησιμοποιεί τη ταυτόχρονη χρήση της στατιστικής πληροφορίας και της «ποιοτικής πληροφορίας» για την λήψη αποφάσεων, ενώ συνδυάζει τη στατιστική με το οικονομικό κόστος μέσω της κατασκευής της Συνάρτησης Απώλειας (Loss Function) . Ως «ποιοτική πληροφορία», ορίζεται η μη αυστηρά προσδιορισμένη ποσοτική πληροφορία. Τα βασικά στοιχεία της Θεωρίας Λήψης Αποφάσεων είναι α) η εκτίμηση της κατάστασης πραγματικότητας ( $\theta$ ), β) οι πιθανές αποφάσεις (ενέργειες) και γ) η Συνάρτηση Απώλειας που θα προκύψει.[9]

Η παράμετρος  $\theta$ , η οποία επηρεάζει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων ορίζεται ως η κατάσταση πραγματικότητας. Το σύμβολο  $\Theta$  χρησιμοποιείται για να ορίσει το σύνολο των πιθανών καταστάσεων πραγματικότητας που είναι δυνατές για την παράμετρο  $\theta$  και καλείται παραμετρικός χώρος. Οι αποφάσεις που λαμβάνονται καλούνται ενέργειες ή δράσεις. Συγκεκριμένες ενέργειες συμβολίζονται με  $a$  ενώ ο το σύνολο των δυνατών ενεργειών που μπορεί να ληφθούν συμβολίζεται με  $A$  [9, 13]. Για μια συγκεκριμένη απόφαση,  $a$ , η οποία θα ληφθεί με την αντίστοιχη κατάσταση πραγματικότητας  $\theta$ , η συνάρτηση απώλειας συμβολίζεται ως  $L(a, \theta)$ . Η Συνάρτηση απώλειας  $L(a, \theta)$  ορίζεται για όλα τα  $\theta, a$  που ανήκουν στο διάστημα  $\Theta \times A$ . Ο όρος «απώλεια», είναι συμβατικός και χρησιμοποιείται κυρίως στη Στατιστική.[9, 10]

### 4.3 Διαδικασία Λήψης Αποφάσεων

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων αποτελείται από 2 βασικά στάδια: α) το στάδιο εκτίμησης της κατάστασης πραγματικότητας και β) το στάδιο λήψης αποφάσεων.[16]

Για την εκτίμηση της κατάστασης της πραγματικότητας ακολουθείται η εξής διαδικασία: Αρχικά απαριθμούνται οι πιθανές καταστάσεις πραγματικότητας  $\theta_k$  και έπειτα καθορίζονται οι αντίστοιχες προγενέστερες πιθανότητες για οποιαδήποτε πληροφορία που υπάρχει για τις  $\theta_k$ . Αν υπάρχουν είναι δυνατόν να καθορίσουμε τις δειγματοληπτικές πιθανότητες  $P(Z_M | \theta_k)$ , οι οποίες αντιπροσωπεύουν οποιαδήποτε γνώση υπάρχει σχετικά με το μηχανισμό των μετρήσεων, ο οποίος παράγει τις μετρήσεις  $Z_M$ . Το τέλος της διαδικασίας γίνεται με την εφαρμογή του νόμου του Bayes για την εκτίμηση της μεταγενέστερης πιθανότητας  $P(Z_M | \theta_k, I)$ . Η εκτίμηση της κατάστασης πραγματικότητας μπορεί να γίνει και με την κατασκευή της υποκειμενικής προγενέστερης πληροφορίας (subjective prior pdf) της  $\theta$ , η οποία συμβολίζεται ως  $\pi(\theta)$ . [9, 11, 13]

### Θεώρημα Bayes

Η πιθανότητα επαλήθευσης μιας αρχικής παραδοχής  $M$  για ένα γεγονός δεδομένου ότι έχουμε μια νέα πληροφορία  $L$  για το γεγονός αυτό  $[P(M|L)]$ , δίνεται από το λόγο

(ratio) της άνευ συνθήκης (unconditional) πιθανότητας του να ισχύουν ταυτόχρονα η παραδοχή  $M$  και η πληροφορία  $L$  [ $P(M \cap L)$ ], διά της άνευ συνθήκης πιθανότητας μόνον της πληροφορίας [ $P(M)$ ] [9]. Η παραπάνω περιγραφή του θεωρήματος Bayes δίνεται σε μορφή εξίσωσης ως εξής:  $P(M|L) = \frac{P(M \cap L)}{P(M)}$

Η ανάγκη να χρησιμοποιηθεί και να αποδοθεί ποσοτικά η ποιοτική, προγενέστερη της δειγματοληψίας, πληροφορία δεν είναι αφηρημένη. Κάθε εργαζόμενος μηχανικός γνωρίζει τον κίνδυνο να στηριχθούν οι τεχνικές μελέτες αποκλειστικά και μόνο στις δειγματοληπτικές μετρήσεις πεδίου. Στις περιβαλλοντικές μελέτες οι μετρήσεις είναι συνήθως ελάχιστες σε σχέση με τις ανάγκες προσδιορισμού των πολλαπλών παραγόντων που επιδρούν στην απόδοση ενός τεχνικού έργου. [9]

Η αξιοπιστία των μετρήσεων είναι τις περισσότερες φορές αμφίβολη. Οι μετρήσεις δεν αποκαλύπτουν στοιχεία μόνο του υπό εξέταση φυσικού φαινομένου, αλλά και του τρόπου της τεχνικής που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη και ανάλυση των δειγμάτων. Τώρα η πιθανότητα δεν αποτελεί κάποια φυσική ιδιότητα ενός φαινομένου, η οποία μπορεί να αποκαλυφθεί μετά την επανάληψη πολλαπλών πειραμάτων, αλλά ένα μέτρο του βαθμού της γνώσης μας για το φαινόμενο. Οι έννοιες υποκειμενική, προγενέστερη και μεταγενέστερη πιθανότητα (π.χ. γνώμη των ειδικών) δεν αντικατοπτρίζουν τίποτε άλλο παρά διαφορετικά στάδια στη γνώση ενός φαινομένου, η οποία μπορεί να περιέχει μετρήσεις ή όχι, και η οποία ανανεώνεται μετά την πρόσληψη καινούριας πληροφορίας. [9]

#### **4.4 Η Στατιστική Θεωρία Λήψης Αποφάσεων Κατά Bayes**

Τα μοντέλα λήψης αποφάσεων εμπεριέχουν πληροφορία (γνώση), σε διάφορες μορφές, μέρος της οποίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί από αυτά για την πραγματοποίηση της λήψης, ή όχι, μιας απόφασης. Ένα μοντέλο λήψης αποφάσεων συνδυάζει την πληροφορία μέσα από στατιστική γνώση και το κατάλληλο σύστημα παραγωγής συμπεράσματος ώστε μέσα από μια διαδικασία που είναι βασισμένη σε συναρτήσεις απώλειας (Loss function), χρησιμότητας (Utility function) ή προτίμησης (preference) να πολιτικοποιήσει κάθε εναλλακτική απόφαση και να τη συγκρίνει με τις υπόλοιπες. Η διαδικασία αυτή ορίζεται ως «Στατιστική Θεωρία Λήψης

Αποφάσεων κατά Bayes». Υπό το πρίσμα της συγκεκριμένης προσέγγισης, ως βέλτιστη απόφαση είναι αυτή που μεγιστοποιεί την αναμενόμενη χρησιμότητα ή, αντίστοιχα, ελαχιστοποιεί την αναμενόμενη απώλεια. [10]

#### 4.5 Η Διαδικασία Λήψης Αποφάσεων κατά Bayes

Η διαμόρφωση της δομής του μοντέλου λήψης απόφασης, για την επιλογή της βέλτιστης απόφασης, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα περιλαμβάνει:

1. Τον ορισμό του προβλήματος λήψης αποφάσεων και τον καθορισμό του χώρου των εναλλακτικών λύσεων ή ενεργειών  $A_i \in A$  και των πιθανών καταστάσεων πραγματικότητας κάθε επιλογής  $\theta_i \in \Theta$ .
2. Δημιουργία κατάλληλων συναρτήσεων απώλειας,  $L(A, \theta)$ , για την εκτίμηση των συνεπειών κάθε εναλλακτικής για όλα τα  $A_i, \theta_i$  που ανήκουν στο διάστημα  $\Theta \times A$  (ή αντίστοιχα συναρτήσεων χρησιμότητας). Ο όρος «απώλεια» είναι συμβατικός και χρησιμοποιείται στην στατιστική κυρίως.
3. Ανάπτυξη κατανομών πυκνότητας πιθανότητας, ως προγενέστερη πληροφορία, κάνοντας χρήση της εμπεριεχόμενης γνώσης ή πληροφορίας.
4. Συνδυασμό της προγενέστερης πληροφορίας και της συνάρτησης απώλειας μέσα από τη συνάρτηση επικινδυνότητας του Bayes για τη λήψη της βέλτιστης απώλειας. Δηλαδή παίρνουμε την απόφαση η οποία ελαχιστοποιεί, με κατάλληλα κριτήρια, ένα μέτρο της αναμενόμενης απώλειας για όλες τις μεταγενέστερες πιθανότητες  $\Theta$ .

Το θεώρημα του Bayes χρησιμοποιείται για να ανανεώσει τις προγενέστερες πιθανότητες μετά την καινούρια πληροφορία (τη δειγματοληψία). [9]

#### **4.6 Το Πρόβλημα κατασκευής ή μη ενός τεχνικού αντιπλημμυρικού έργου υπό το πρίσμα της Διαδικασίας Λήψης Αποφάσεων κατά Bayes**

Εξετάζουμε το ενδεχόμενο κατασκευής ή μη ενός αντιπλημμυρικού έργου στην περιοχή του ποταμού Κοιλιάρη και ως περιοχή μελέτης ορίζουμε το τμήμα του ποταμού που λόγω της τάσης του στο φαινόμενο της διάβρωσης είναι πιθανότερο να σημειωθεί πλημμύρα που θα προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στις παρακείμενες καλλιέργειες. Το ενδεχόμενο να εμφανιστεί καταστροφή λόγω πλημμύρας στην περιοχή μελέτης σχετίζεται άμεσα με τα βροχομετρικά δεδομένα.

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα, τα οποία έχουν καταγραφεί σε μηνιαία βάση διαμορφώνεται το εξής πρόβλημα λήψης αποφάσεων: Να γίνονται εργασίες μικροεπισκευών και να δίνονται αποζημιώσεις κάθε φορά που έχουμε ένα πλημμυρικό φαινόμενο ή να κατασκευαστεί ένα τεχνικό αντιπλημμυρικό έργο σε ένα χρονικό διάστημα.

Εφαρμόζεται, λοιπόν, ένα στοχαστικό μοντέλο που μπορεί να προβλέπει, βάσει της προγενέστερης πληροφορίας που ανακτάται από τα βροχομετρικά δεδομένα, αν ένας αριθμός  $Y$  γεγονότων πλημμύρας σε χρονικό διάστημα  $N$  μηνών συμφέρει περισσότερο, από πλευράς κόστους, σε σχέση με το να κατασκευαστεί το έργο μέσα σε αυτό το διάστημα.

Συνοπτικά στο πεδίο της ανάλυσης που θα ακολουθηθεί, οι αποφάσεις που μπορούν να λάβουν οι διαχειριστές μιας κατασκευής αντιπλημμυρικού έργου είναι οι εξής:[16]

**Απόφαση  $A(0)$  : Να μην κατασκευαστεί αντιπλημμυρικό έργο.**

**Απόφαση  $A(1)$  : Να κατασκευαστεί αντιπλημμυρικό έργο.**

## 5 Μαθηματική Ανάλυση για γεγονότα πλημμύρας

Οι υπεύθυνοι για το έργο, όπως αναφέρεται και πιο πάνω, καλούνται να αποφασίσουν αν θα αναβάλλουν την κατασκευή του για κάποιο διάστημα με το ενδεχόμενο να προκύψουν, μέσα στο διάστημα αυτό,  $Y$  ενδεχόμενα γεγονότα πλημμύρας. Η τυχαία μεταβλητή  $Y$  σημαίνει:  $Y$  γεγονότα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, όπου με τον όρο «γεγονός» εννοείται η εμφάνιση πλημμύρας, περιγράφεται μαθηματικά από την Κατανομή *Poisson*. [9, 13, 15]

### 5.1 Κατανομή Poisson

Η κατανομή Poisson είναι μια διακριτή συνάρτηση κατανομής τυχαίας μεταβλητής που περιγράφει τον αριθμό εμφανίσεων ενός γεγονότος σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η κατανομή Poisson έχει ως παράμετρο  $\lambda$  που δηλώνει τη μέση τιμή αριθμού εμφανίσεων ενός γεγονότος, οι οποίες είναι ανεξάρτητες της τελευταίας χρονικής στιγμής εμφάνισης του γεγονότος. Με  $Y$  συμβολίζουμε τον αριθμό των ενδεχομένων γεγονότων που πραγματοποιούνται στη μονάδα του χρόνου. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Poisson είναι η παρακάτω:

$$P_{\lambda}(x = Y) = \frac{\lambda^Y}{Y!} e^{-\lambda}, Y=0,1,2,\dots, n \quad (1)$$

Η αναμενόμενη τιμή και η διασπορά της κατανομής Poisson δίνονται από την εξής σχέση:

$$E[Y] = Var(Y) = \lambda = n\theta \quad (2)$$

Όπου,

$n$  = η περίοδος αναβολής του έργου σε ημέρες

$\theta$  = η πιθανότητα να συμβεί πλημμύρα μια ημέρα

### **Παρατήρηση:**

Στην περίπτωση η πιθανότητα είναι άγνωστη παράμετρος και πρέπει να εκτιμηθεί σύμφωνα με την κατανομή που ακολουθεί η προγενέστερη κατανομή που είναι συζυγής της κατανομής Poisson. [15]

## **5.2 Διαμόρφωση της συνάρτησης απώλειας**

Η συνάρτηση απώλειας εκφράζει το κόστος της κάθε απόφασης σε ένα πρόβλημα λήψης αποφάσεων. Η συνάρτηση απώλειας μπορεί να έχει διάφορες μορφές, όπως γραμμική, παραβολική ή κλιμακωτή. Σε πρώτη φάση εξετάζουμε τη συνάρτηση απώλειας για την κατασκευή του αντιπλημμυρικού έργου, η οποία ισούται με  $K$  €. Οι συναρτήσεις των απωλειών για κάθε απόφαση παρουσιάζονται στην ακόλουθη εξίσωση.[9]

$$L(A, Y) = \begin{cases} BY, & A = A(0) \\ K, & A = A(1) \end{cases} \quad (3)$$

Με την απαρίθμηση των αποφάσεων  $A(0)$  και  $A(1)$  την έκφραση της συνάρτησης απώλειας, ολοκληρώνονται τα δύο πρώτα στάδια για τη διαδικασία της λήψης αποφάσεων. Στη συνέχεια θα γίνει περεταίρω ανάλυση για ποια απόφαση πρέπει να ληφθεί ώστε να ελαχιστοποιείται η αναμενόμενη απώλεια. Η συνάρτηση επικινδυνότητας ή επιδίωξης και η επικινδυνότητα κατά Bayes θα αναπτυχθούν.[9, 10]

## **5.3 Συνάρτηση επιδίωξης**

Η αναμενόμενη τιμή της συνάρτησης απώλειας, σε σχέση με την τυχαία μεταβλητή  $Y$ , αναφέρεται στην κλασική θεωρία λήψης αποφάσεων ως Συνάρτηση επικινδυνότητας (Risk Function) ή Συνάρτηση επιδίωξης (Goal Function).[9, 10]

Για την απόφαση  $A(0)$  η συνάρτηση επικινδυνότητας  $G(A(0), \theta)$  δίνεται από τη σχέση:[9]

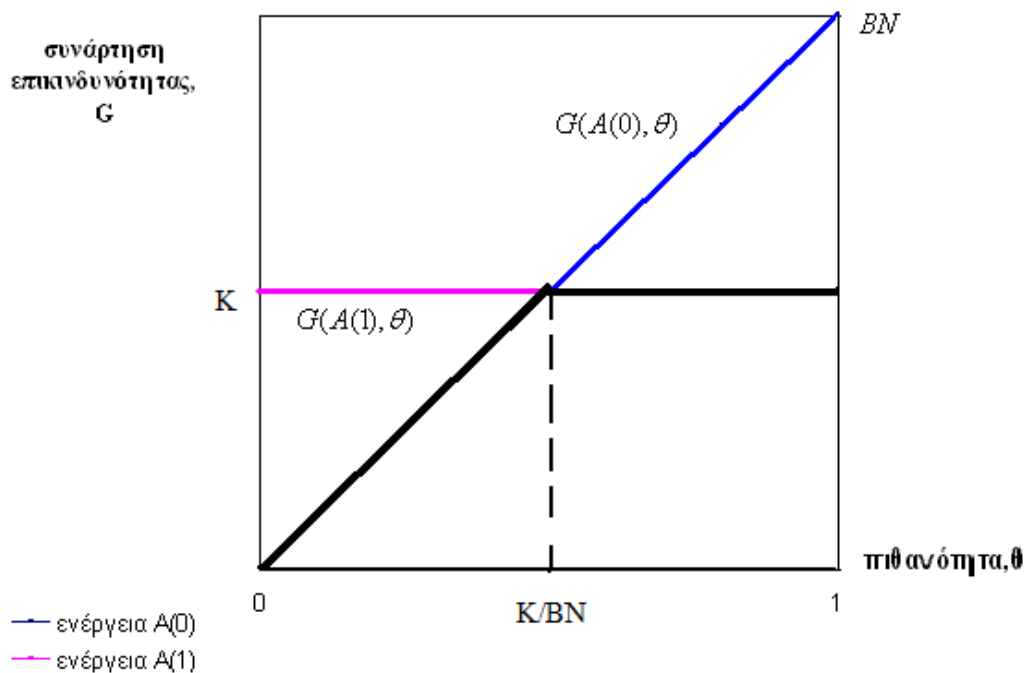
$$G(A(0), \theta) = E[L(A(0), Y)] = E[BY] = BE[Y] = B\lambda = BN\theta \quad (4)$$

Για την απόφαση  $A(1)$  η συνάρτηση επικινδυνότητας  $G(A(1), \theta)$  δίνεται από τη σχέση:[9]

$$G(A(1), \theta) = E[K] = K \quad (5)$$

Οι εξισώσεις (4) και (5) δείχνουν τι απώλεια υπάρχει, κατά μέσο όρο, εάν ληφθούν οι αποφάσεις  $A(0)$  ή  $A(1)$  αντίστοιχα.

Η κλασική ανάλυση κόστους-οφέλους υπολογίζει ποια απόφαση ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση απώλειας. Αυτό μπορεί να προκύψει εύκολα με τη γραφική απεικόνιση των δυο εκφράσεων  $G(A(0), \theta)$  και  $G(A(1), \theta)$ . Η έκφραση της συνάρτησης επιδίωξης για την απόφαση-ενέργεια  $A(0)$  αναπαρίσταται στο δεξιό κατακόρυφο άξονα, ενώ η αντίστοιχη για την  $A(1)$  στον αριστερό άξονα. Ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει την πιθανότητα  $\theta$ . [9]



Εικόνα 27. Γραφική αναπαράσταση των συναρτήσεων επιδίωξης για τις αποφάσεις  $A(0)$  και  $A(1)$ . [9]

Από την ερμηνεία του γραφήματος, έχουμε ότι η τιμή της πιθανότητας, για την οποία είναι αδιάφορο-από άποψη κόστους- ποια από τις δύο ενέργειες θα προτιμηθεί, δίνεται από τον λόγο  $\lambda = K/BN$ .

- Εάν για την πιθανότητα ρύπανσης,  $\theta$  ισχύει:  $\theta < \lambda \Rightarrow$  Βέλτιστη ενέργεια είναι η  $A(0)$
- Εάν για την πιθανότητα ρύπανσης,  $\theta$  ισχύει:  $\theta > \lambda \Rightarrow$  Βέλτιστη ενέργεια είναι η  $A(1)$ .

Αν γνωρίζουμε την άγνωστη παράμετρο  $\theta$  θα μπορούσαμε εύκολα να επιλέξουμε την βέλτιστη απόφαση-ενέργεια για το συγκεκριμένο πρόβλημα λήψης αποφάσεων.

## 5.4 Συνάρτηση επικινδυνότητας Bayes

### 5.4.1 Η πιθανότητα γεγονότος πλημμύρας ως άγνωστη παράμετρος

Η ανάπτυξη των εξισώσεων (4) και (5) αποτελεί την ολοκλήρωση της κλασικής στατιστικής ανάλυσης κόστους-οφέλους. Η ανάλυση του Bayes αναγνωρίζει ότι η πιθανότητα  $\theta$  δεν είναι γνωστή με βεβαιότητα και επομένως πρέπει να θεωρηθεί ως τυχαία μεταβλητή. Το πρόβλημα τότε συνίσταται στην εκτίμηση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (probability density function), της  $\theta$ . [9, 11, 13]

Η ανάλυση του Bayes αναφέρεται στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν δεδομένα, τα οποία να αφορούν πλημμύρες στο συγκεκριμένο τμήμα του ποταμού, επομένως η πιθανότητα πλημμύρας δεν μπορεί να εκτιμηθεί σε αυτή τη φάση. Επομένως, το παράδειγμα της υπό μελέτη κατασκευής του έργου εμπεριέχει το δίλημμα για το αν πρέπει να κατασκευαστεί ή όχι. Η κατασκευή του αντιπλημμυρικού έργου δεν έχει γίνει ακόμα ώστε να έχουμε την εκτίμηση αν λάβαμε τη σωστή απόφαση ή όχι. [9]

Γενικότερα υπάρχει ένα εύρος τεχνικών έργων, για τα οποία τουλάχιστον σε κάποια φάση της μελέτης τους δεν υπάρχουν δεδομένα για την εκτίμηση της πιθανότητας, ενός γεγονότος πλημμύρας,  $\theta$ . Υπάρχει όμως πληροφορία η οποία στηρίζεται στην εμπειρία από άλλες περιοχές κοντά στην περιοχή μελέτης (soft information). Για την περίπτωση της πλημμύρας βασιζόμαστε σε δεδομένα που αφορούν τη βροχόπτωση της περιοχής ή κοντά στην περιοχή όπου πρόκειται να εξεταστεί η κατασκευή του έργου. [9]

### 5.4.2 Δεδομένα βροχοπτώσεων

Στον Πίνακα 1 που αναφέρεται παραπάνω (στην υδρολογία της περιοχής του ποταμού Κοιλιάρη) παρουσιάζονται τα βροχομετρικά δεδομένα που θα λάβαμε υπόψη για την ποσοτικοποίηση της προγενέστερης πληροφορίας.

### 5.4.3 Η περιγραφή της συνάρτησης πυκνότητας-πιθανότητας της προγενέστερης πληροφορίας

Συνεχίζοντας της ανάλυση προχωράμε στην κατασκευή της υποκειμενικής προγενέστερης πληροφορίας (subjective prior pdf) της  $\theta$ , η οποία συμβολίζεται ως  $\pi(\theta)$ . [9, 10, 11, 13]

Είναι γνωστό από τη θεωρία ότι η συγγενής κατανομή, ως προγενέστερη, στην κατανομή Poisson είναι η κατανομή Γάμμα (Gamma distribution) [15]. Η κατανομή Γάμμα ανήκει στην οικογένεια των συνεχών κατανομών και αποτελεί γενίκευση της εκθετικής κατανομής. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Γάμμα είναι:

$$f(\theta, \alpha, b) = \begin{cases} \frac{\theta^{\alpha-1} e^{-\frac{\theta}{b}}}{b^{\alpha} \Gamma(\alpha)}, & \theta \geq 0 \\ 0, & \theta < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Όπου  $\Gamma(\alpha)$  είναι η συνάρτηση Γάμμα για  $x=\alpha$  με εξίσωση:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} u^{x-1} e^{-u} du, x > 0 \quad (7)$$

Όπως φαίνεται και από την εξίσωση (6) η κατανομή Γάμμα έχει δύο παραμέτρους, την  $\alpha$  και την  $b$ . Η παράμετρος  $\alpha$  ονομάζεται παράμετρος σχήματος (shape parameter), ενώ η  $b$  αποτελεί την παράμετρο κλίμακας (scale parameter). Οι παράμετροι δίνουν τη δυνατότητα στην κατανομή Γάμμα να λάβει πολύ διαφορετικές μορφές και την καθιστούν πολύ ευέλικτη στην προσομοίωση διαφορετικών δεδομένων.

Η αναμενόμενη τιμή και η διασπορά της κατανομής Γάμμα δίνονται από τις εξής σχέσεις:

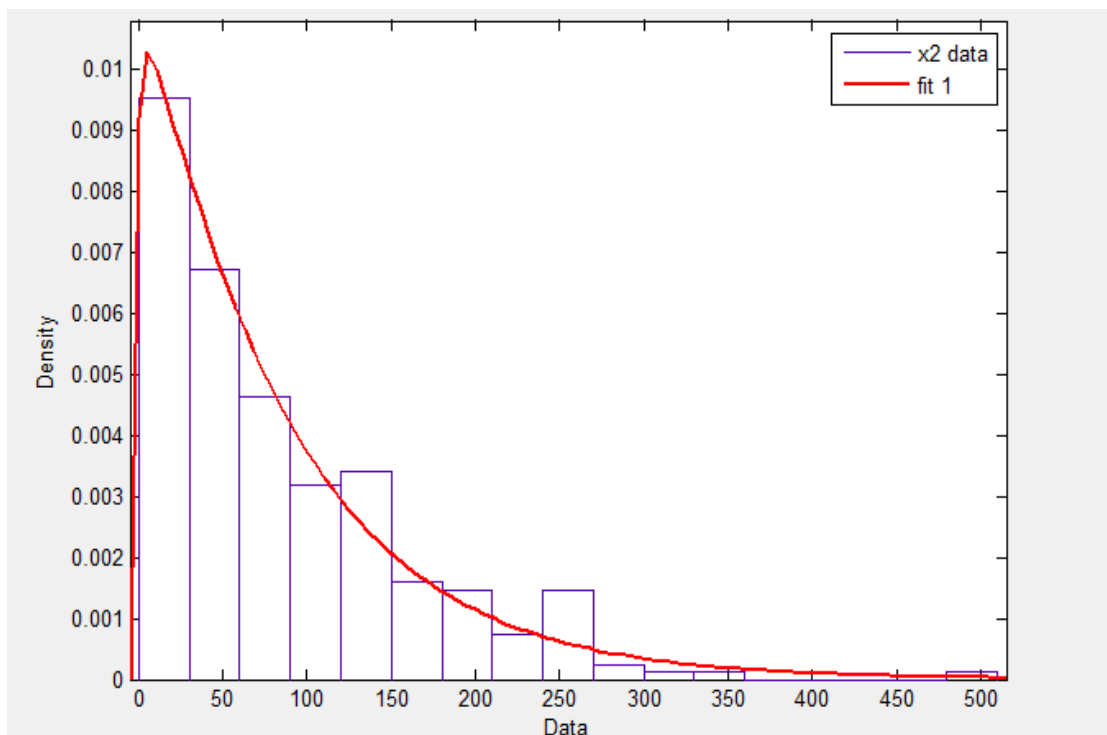
$$E(x) = \alpha b \quad (8)$$

$$Var(x) = \alpha b^2 \quad (9)$$

#### 5.4.4 Υπολογισμός των παραμέτρων της προγενέστερης κατανομής για ενδεχόμενο γεγονός πλημμύρας στον Ποταμό Κοιλιάρη.

Η προσέγγιση της κατανομής για τα δεδομένα βροχόπτωσης αναπαρίσταται στο διάγραμμα της εικόνας 28. Με τη βοήθεια του λογισμικού MATLABR 2010b προέκυψε ότι οι παράμετροι της Γάμμα κατανομής παίρνουν τις εξής τιμές:  $\alpha = 1,05$  και  $b = 81,82$ , οπότε η σχέση (6) θα γίνει ως εξής:

$$f(\theta, \alpha, b) = \pi(\theta) = \frac{\theta^{1,05-1} \exp\left(\frac{-\theta}{81,82}\right)}{81,82^{1,05} \Gamma(1,05)} \quad (10)$$



Εικόνα 28. Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Κατανομής Γάμμα δεδομένων βροχόπτωσης.

## 5.5 Υπολογισμός της Συνάρτησης Επικινδυνότητας του Bayes για το ενδεχόμενο γεγονός πλημμύρας στον ποταμό Κοιλιάρη

Η επικινδυνότητα του Bayes (Bayes Risk),  $R$ , ορίζεται ως η αναμενόμενη τιμή της συνάρτησης επικινδυνότητας ως προς την άγνωστη παράμετρο  $\theta$ . [9]

$$R(A) = E^\pi[G(A, \theta)] = \int_0^1 G(A, \theta)\pi(\theta)d\theta \quad (11)$$

Η έκφραση  $E^\pi[G(A, \theta)]$  συμβολίζει την αναμενόμενη τιμή της συνάρτησης επικινδυνότητας, και το σύμβολο  $\pi$  δε συμβολίζει κάποιον εκθέτη, αλλά υποδεικνύει ότι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας η οποία πρέπει να χρησιμοποιηθεί είναι η προγενέστερη κατανομή  $\pi(\theta)$ .

Η συνάρτηση επικινδυνότητας που προκύπτει για την  $A(0)$  είναι:

$$R(A(0)) = E^\pi[G(A(0), \theta)] = \int_0^1 BN\theta \frac{\theta^{1,05-1} \exp\left(\frac{-\theta}{81,82}\right)}{81,82^{1,05} \Gamma(1,05)} d\theta \quad (12)$$

Η συνάρτηση επικινδυνότητας που προκύπτει για την  $A(1)$  είναι:

$$R(A(1)) = E^\pi[K] = K \quad (13)$$

Η βέλτιστη απόφαση του Bayes (optimal Bayes decision) λαμβάνεται για την ενέργεια, η οποία ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση επικινδυνότητας του Bayes

Το ουδέτερο σημείο, όπου δεν υπάρχει προτίμηση μεταξύ των ενεργειών  $A(0)$  και  $A(1)$  είναι το σημείο όπου ισχύει: [9]

$$R(A(0)) = R(A(1)) \quad (14a)$$

Όταν ισχύει :

$$R(A(0)) < R(A(1)) \Rightarrow B \int_0^1 N\theta \frac{\theta^{1,05-1} \exp\left(\frac{-\theta}{81,82}\right)}{81,82^{1,05} \Gamma(1,05)} d\theta < K \Rightarrow \frac{K}{B} > I_1(N) \quad (14b)$$

με  $I_1(N) = \int_0^1 N\theta \frac{\theta^{1,05-1} \exp\left(\frac{-\theta}{81,82}\right)}{81,82^{1,05} \Gamma(1,05)} d\theta$ , να ορίζεται ως δείκτης επικινδυνότητας και να είναι συνάρτηση της περιόδου αναβολής του έργου,

η απόφαση  $A(0)$  είναι η βέλτιστη, διαφορετικά αν  $\frac{K}{B} < I_1$  ως βέλτιστη απόφαση λαμβάνεται η  $A(1)$ .

## 5.6 Εφαρμογή του μοντέλου του Bayes για παραβολική συνάρτηση απώλειας

Επιστρέφοντας τώρα στο βήμα 2 δημιουργούμε ένα εναλλακτικό σενάριο για τη συνάρτηση απώλειας, αυτό της παραβολικής μεταβολής του κόστους των μικρό-επιδιορθώσεων:[9]

$$L(A, Y) = \begin{cases} BY^2, & A = A(0) \\ K, & A = A(1) \end{cases} \quad (15)$$

Η συνάρτηση επιδίωξης για την παραβολική συνάρτηση θα είναι:

$$G(A(0), \theta) = E[L(A(0), Y)] = E[BY^2] = BE[Y^2] \quad (16)$$

Ισχύει  $E[Y] = N\theta$  και  $\sigma^2 = N\theta$ . Σύμφωνα με τις στατιστικές ιδιότητες για τη μέση τιμή και τη διασπορά ισχύει:

$$E[Y^2] = (E[Y])^2 + \sigma^2 = (N\theta)^2 + N\theta = N\theta(1 + N\theta) \quad (17)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (18) και (19) η συνάρτηση επιδίωξης για την απόφαση  $A(0)$  θα είναι:

$$G(A(0), \theta) = E[L(A(0), Y)] = E[BY^2] = BN\theta(1 + N\theta) \quad (18)$$

Η συνάρτηση επικινδυνότητας του Bayes γίνεται τώρα.

$$R(A(0)) = \int_0^1 BN\theta(1+N\theta) \frac{\theta^{1,05-1} \exp\left(\frac{-\theta}{81,82}\right)}{81,82^{1,05} \Gamma(1,05)} d\theta \quad (19)$$

Όταν ισχύει:

$$R(A(0)) < R(A(1)) \Rightarrow \frac{K}{B} > I_2(N) \quad (20)$$

$$\text{με } I_2(N) = \int_0^1 N\theta(1+N\theta) \frac{\theta^{1,05-1} \exp\left(\frac{-\theta}{81,82}\right)}{81,82^{1,05} \Gamma(1,05)} d\theta,$$

η απόφαση  $A(0)$  είναι η βέλτιστη, διαφορετικά αν  $\frac{K}{B} < I_2(N)$  ως βέλτιστη απόφαση λαμβάνεται η  $A(1)$ .

## 5.7 Αριθμητικό παράδειγμα Εφαρμογής της Θεωρίας του Bayes για Αντιπλημμυρικά Έργα

### 5.7.1 Σενάριο 1<sup>ο</sup> εφαρμογή της θεωρίας του Bayes για βροχομετρικά δεδομένα

Εφαρμόζουμε την ανάλυση επικινδυνότητας κατά Bayes για διάφορες περιόδους αναβολής εκτέλεσης του αντιπλημμυρικού έργου από  $N=6$  έως 60 μήνες. Για όλα τα  $N$  υπολογίζουμε τους δείκτες επικινδυνότητας  $I(N)$  των εξισώσεων (14b) και (20). Στον παρακάτω Πίνακα αναπαριστώνται οι τιμές των συναρτήσεων  $I_1(N)$  και  $I_2(N)$  για γραμμική και παραβολική συνάρτηση απώλειας αντίστοιχα.

**Πίνακας 3. Τιμές των συναρτήσεων  $I$  για διάφορες χρονικές περιόδους αναβολής του έργου σε περίπτωση γραμμικής ( $I_1(N)$ ) και παραβολικής συνάρτησης απώλειας ( $I_2(N)$ ) αντίστοιχα.**

$N$ (μήνες)	$I_1(N)$	$I_2(N)$
6	0,877	106,902
12	1,754	425,855
18	2,632	956,858
24	3,509	1699,911
30	4,386	2655,014
36	5,263	3822,167
42	6,141	5201,371
48	7,018	6792,625
54	7,895	8595,929
60	8,772	10611,283

Για να κατανοήσουμε τον Πίνακα 3 εργαζόμαστε ως εξής. Εάν η τοπική αυτοδιοίκηση αποφάσιζε να αναβάλει την κατασκευή του έργου για ένα χρόνο ( $N=12$  μήνες) τότε ο λόγος του κόστους κατασκευής του αντιπλημμυρικού έργου προς το κόστος μερικής αποκατάστασης θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερος από 1,754 για την περίπτωση της γραμμικής μεταβολής του κόστους με τον αριθμό γεγονότων πλημμύρας και μεγαλύτερο από 425,855 για την περίπτωση της παραβολικής μεταβολής.

### 5.7.2 Σενάριο 2<sup>ο</sup> εφαρμογή της θεωρίας του Bayes για δεδομένα ημερήσιων παροχών

Εφαρμόζοντας την κατανομή Γάμμα για τις ημερήσιες παροχές με τη βοήθεια, πάλι, του λογισμικού MATLAB προέκυψε ότι οι παράμετροι της Γάμμα κατανομής παίρνουν τις εξής τιμές  $\alpha=0,56$  και  $b=8,88$ , οπότε η σχέση (6) θα γίνει ως εξής:

$$f(\theta, \alpha, b) = \pi(\theta) = \frac{\theta^{0,565-1} \exp\left(\frac{-\theta}{8,88}\right)}{8,88^{0,56} \Gamma(0,56)} \quad (21)$$

Η συνάρτηση  $I_3(N)$  για γραμμική μεταβολή θα γίνει:

$$I_3(N) = \int_0^1 N\theta \frac{\theta^{0,56-1} \exp\left(\frac{-\theta}{8,88}\right)}{8,88^{0,56} \Gamma(0,56)} d\theta \quad (22)$$

Ενώ η  $I_4(N)$  θα γίνει:

$$I_4(N) = \int_0^1 N\theta(1 + N\theta) \frac{\theta^{0,56-1} \exp\left(\frac{-\theta}{8,88}\right)}{8,88^{0,56} \Gamma(0,56)} d\theta \quad (23)$$

Εφαρμόζουμε την ανάλυση επικινδυνότητας κατά Bayes για διάφορες περιόδους αναβολής εκτέλεσης του αντιπλημμυρικού έργου από  $N=6$  έως 60 μήνες. Για όλα τα  $N$  υπολογίζουμε το δείκτη  $I(N)$  στις παραπάνω εξισώσεις. Στον παρακάτω Πίνακα αναπαρίστανται οι τιμές των συναρτήσεων  $I_3(N)$  και  $I_4(N)$  για γραμμική και παραβολική συνάρτηση απώλειας αντίστοιχα.

**Πίνακας 4.** Τιμές των συναρτήσεων  $I(N)$  για τα δεδομένα παροχής σε περίπτωση γραμμικής ( $I_3(N)$ ) και παραβολικής συνάρτησης απώλειας ( $I_4(N)$ ) αντίστοιχα.

$N$	$I_3(N)$	$I_4(N)$
6	19,971	2183,294
12	39,941	8693,236
18	59,912	19529,825
24	79,883	34693,061
30	99,853	54182,945
36	119,824	77999,476
42	139,795	106142,654
48	159,765	138612,480
54	179,736	175408,953
60	199,707	216532,073

Για την περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη τα δεδομένα παροχής εργαζόμαστε όπως και στον Πίνακα 3. Εάν η τοπική αυτοδιοίκηση αποφάσιζε να αναβάλει την κατασκευή του έργου για ένα χρόνο ( $N=12$  μήνες) τότε ο λόγος του κόστους κατασκευής του αντιπλημμυρικού έργου προς το κόστος μερικής αποκατάστασης θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερο από 39,941 για την περίπτωση της γραμμικής μεταβολής

του κόστους με τον αριθμό γεγονότων πλημμύρας και μεγαλύτερο από 8.693,24 για την περίπτωση της παραβολικής μεταβολής.

### **5.7.3 Σενάριο 3<sup>ο</sup> εφαρμογή της θεωρίας του Bayes σε περίπτωση όπου δεν υπάρχουν δεδομένα βροχόπτωσης ή παροχής (υδρολογικό ρίσκο).**

Το τρίτο σενάριο που επιλέξαμε δεν περιλαμβάνει στο μοντέλο απόφασης την κατανομή της πιθανότητας γεγονότος πλημμύρας ως άγνωστη μεταβλητή. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται η σχέση του υδρολογικού ρίσκου.[15]

Συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός των αντιπλημμυρικών έργων γίνεται για συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς (μέση ετήσια συχνότητα επανάληψης της πλημμύρας) η οποία εξαρτάται από τη σημασία του έργου. Ο υδρολογικός σχεδιασμός περιλαμβάνει δύο συνιστώσες:[15]

- Εκτίμηση καταιγίδας σχεδιασμού για τη συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς
- Εκτίμηση πλημμύρας, η οποία προκαλείται από την καταιγίδα σχεδιασμού

Συνίσταται στην επιλογή της πλημμύρας σχεδιασμού για αποδεκτή διακινδύνευση, η υδρολογική διακινδύνευση,  $r$ .

$$r = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (24)$$

Όπου,

**T**, η περίοδος επαναφοράς πλημμύρας σχεδιασμού (περίοδος επαναφοράς  $T$  μιας δεδομένης τιμής  $x$  της τυχαίας μεταβλητής  $X$  είναι ο μέσος αριθμός χρονικών διαστημάτων, εν προκειμένω υδρολογικών ετών, που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών εμφανίσεων της τυχαίας μεταβλητής με μέγεθος μεγαλύτερο ή ίσο της δεδομένης τιμής  $x$  )

**n**, η ωφέλιμη ζωή του έργου

Η διακινδύνευση σχεδιασμού εκφράζει την πιθανότητα το έργο να αστοχήσει τουλάχιστον μία φορά εντός της οικονομικής ζωής του, είναι δηλαδή η πιθανότητα  $r$  να πραγματοποιηθεί μέσα σε  $n$  έτη, τιμή που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς  $T$ .

Η συνάρτηση επικινδυνότητας του Bayes της σχέσης (13), για την απόφαση  $A(0)$  είναι ίση με τη συνάρτηση επιδίωξης και μπορούμε να πούμε ότι έχουμε μια σχέση κόστους-οφέλους,

$$R(A(0)) = G(A(0), \theta) = BN\theta = BNr \quad (25)$$

Όταν ισχύει:

$$R(A(0)) < R(A(1)) \Rightarrow \frac{K}{B} > Nr \quad (26)$$

**η απόφαση  $A(0)$  είναι η βέλτιστη**, διαφορετικά αν  $\frac{K}{B} < Nr$  ως βέλτιστη απόφαση λαμβάνεται η  $A(1)$ .

Ενώ στην περίπτωση της παραβολικής συνάρτησης απώλειας ισχύει:

$$R(A(0)) = G(A(0), \theta) = BNr(1 + Nr) . \quad (27)$$

Όταν ισχύει:

$$R(A(0)) < R(A(1)) \Rightarrow \frac{K}{B} > Nr(1 + Nr) \quad (28)$$

**η απόφαση  $A(0)$  είναι η βέλτιστη**, διαφορετικά αν  $\frac{K}{B} < Nr(1 + Nr)$  ως βέλτιστη απόφαση λαμβάνεται η  $A(1)$ .

Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τις διαφορετικές τιμές του υδρολογικού ρίσκου λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές περιόδους επαναφοράς πλημμύρας και ωφέλιμης ζωής του έργου.

Πίνακας 5. Υδρολογικό ρίσκο  $r(i, j)$  για διάφορες οικονομικές ωφέλειες του έργου και διάφορες περιόδους επαναφοράς

T	50	60	70	80	90	100
n						
10	0,18	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10
20	0,33	0,29	0,25	0,22	0,20	0,18
30	0,45	0,40	0,35	0,31	0,28	0,26

Ο Πίνακας 6 αναπαριστά τις τιμές του δείκτη  $Nr$  για διάφορες τιμές της ωφέλιμης ζωής του έργου, της περιόδου επαναφοράς πλημμύρας και της περιόδου αναβολής της κατασκευής του έργου. Ο δείκτης αυτός καθορίζει πότε μας συμφέρει να επιλέξουμε την απόφαση  $A(0)$  ή την  $A(1)$  σύμφωνα με τη συνθήκη της εξίσωσης 26.

Πίνακας 6. Τιμές του δείκτη  $Nr$  για την περίπτωση της γραμμικής συνάρτησης απώλειας με τη μέθοδο του υδρολογικού ρίσκου.

N	Nr					
6	32,93	27,85	24,12	21,28	19,03	17,21
	59,83	51,39	45,01	40,04	36,05	32,78
	81,81	71,28	63,10	56,58	51,26	46,85
12	65,85	55,69	48,25	42,55	38,06	34,42
	119,66	102,77	90,03	80,07	72,09	65,55
	163,63	142,57	126,21	113,16	102,53	93,71
18	98,78	83,54	72,37	63,83	57,09	51,63
	179,49	154,16	135,04	120,11	108,14	98,33
	245,44	213,85	189,31	169,74	153,79	140,56
36	197,56	167,08	144,74	127,65	114,17	103,27
	358,98	308,32	270,08	240,22	216,28	196,66
	490,88	427,70	378,62	339,48	307,59	281,12
42	230,49	194,93	168,86	148,93	133,20	120,48
	418,81	359,70	315,09	280,26	252,32	229,44
	572,69	498,98	441,72	396,06	358,85	327,98
48	263,42	222,78	192,98	170,21	152,23	137,69
	478,64	411,09	360,10	320,29	288,37	262,21
	654,50	570,27	504,82	452,64	410,12	374,83
54	296,34	250,62	217,10	191,48	171,26	154,90
	538,48	462,48	405,11	360,33	324,42	294,99
	736,32	641,55	567,93	509,22	461,38	421,69
60	11127,46	9410,79	8152,12	7189,99	6430,77	5816,44
	20219,41	17365,66	15211,73	13530,13	12181,69	11076,72
	27648,19	24089,87	21325,25	19120,89	17324,64	15834,03

Για παράδειγμα σε περίπτωση που θέλουμε να κατασκευάσουμε ένα αντιπλημμυρικό έργο με ωφέλιμης ζωή 10 χρόνια για περίοδο επαναφοράς πλημμύρας 50 χρόνια τότε το υδρολογικό ρίσκο είναι  $r=0,18$  (Πίνακας 5). Για να συμφέρει η αναβολή κατασκευής του έργου για ένα χρόνο ( $N=12$ ) θα έπρεπε ο λόγος του κόστους κατασκευής του αντιπλημμυρικού έργου προς το κόστος μερικής αποκατάστασης θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερος από 65,85 για την περίπτωση της γραμμικής μεταβολής του κόστους με τον αριθμό γεγονότων πλημμύρας.

Ο Πίνακας 7 αναπαριστά τις τιμές του δείκτη  $Nr(1 + Nr)$  για διάφορες τιμές της οικονομικής ωφέλειας, της περιόδου επαναφοράς πλημμύρας και της περιόδου αναβολής της κατασκευής του έργου. Ο δείκτης αυτός καθορίζει πότε μας συμφέρει να επιλέξουμε την απόφαση  $A(0)$  ή την  $A(1)$  σύμφωνα με τη συνθήκη της εξίσωσης 28.

**Πίνακας 7. Τιμές του δείκτη  $Nr(1 + Nr)$  για την περίπτωση της παραβολικής συνάρτησης απώλειας με τη μέθοδο του υδρολογικού ρίσκου.**

$N$	$Nr(1 + Nr)$					
<b>6</b>	1117,11	803,31	606,02	473,93	381,13	313,44
	3639,53	2691,92	2071,14	1642,96	1335,39	1107,09
	6775,15	5152,63	4045,07	3257,87	2679,34	2242,14
<b>12</b>	4402,58	3157,55	2375,85	1853,17	1486,48	1219,33
	14438,45	10664,92	8194,53	6491,78	5269,47	4362,82
	26936,98	20467,93	16054,07	12918,33	10614,84	8874,87
<b>18</b>	9856,40	7062,71	5309,49	4137,71	3316,03	2717,67
	32396,76	23918,99	18370,17	14546,45	11802,24	9767,17
	60485,48	45945,93	36027,00	28981,38	23806,48	19898,18
<b>36</b>	39228,06	28083,76	21093,22	16423,18	13149,96	10767,41
	129228,06	95367,64	73210,62	57945,58	46992,69	38872,02
	241451,04	183356,00	143729,40	115586,04	94918,34	79311,60
<b>42</b>	53355,33	38192,63	28682,07	22328,95	17876,36	14635,57
	175823,94	129746,00	99595,27	78823,66	63920,22	52870,89
	328546,25	249484,72	195558,06	157259,44	129134,60	107897,24
<b>48</b>	69650,96	49852,43	37434,73	29140,02	23326,96	19096,17
	229579,22	169405,44	130032,17	102907,59	83446,44	69018,40
	429028,13	325776,13	255350,66	205335,42	168607,01	140873,46
<b>54</b>	88114,95	63063,15	47351,19	36856,41	29501,78	24149,23
	290493,89	214345,95	164521,33	130197,38	105571,35	87314,54
	542896,69	412230,22	323107,18	259813,99	213335,57	178240,26
<b>60</b>	123831519,26	88572314,25	66465143,28	51703129,66	41361175,49	33836771,83
	408844642,00	301583678,62	231411878,70	183078079,64	148405745,52	122704824,52
	764449994,98	580346066,89	454787533,74	365627472,41	300160594,12	250732222,48

Για παράδειγμα σε περίπτωση που θέλουμε να κατασκευάσουμε ένα αντιπλημμυρικό έργο με οικονομική διάρκεια ζωής 10 χρόνια για περίοδο επαναφοράς πλημμύρας 50 χρόνια τότε το υδρολογικό ρίσκο είναι  $r=0,18$  (Πίνακας 5). Για να συμφέρει η αναβολή κατασκευής του έργου για ένα χρόνο ( $N=12$ ) θα έπρεπε ο λόγος του κόστους κατασκευής του αντιπλημμυρικού έργου προς το κόστος μερικής αποκατάστασης θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερος από 4402,58 για την περίπτωση της παραβολικής μεταβολής του κόστους με τον αριθμό γεγονότων πλημμύρας.

### 5.8 Παράδειγμα με βάση την κοστολόγηση του αντιπλημμυρικού έργου και των επισκευών.

Για να γίνει κατανοητή η εφαρμογή των προηγούμενων πινάκων, που μπορούμε να τους χαρακτηρίσουμε ως πίνακες επικινδυνότητας, για την κατασκευή ή μη ενός τεχνικού αντιπλημμυρικού έργου, θα πρέπει να εμπλουτιστεί το αριθμητικό παράδειγμα της προηγούμενης παραγράφου με κάποιες πραγματικές τιμές, όσον αφορά τα κόστη που σχετίζονται με την κατασκευή του ή την έστω μερική αποκατάσταση των ζημιών.

Έχει εκτιμηθεί ότι το κόστος ενός αντιπλημμυρικού έργου ανέρχεται στα 150.000 € και οι επισκευές που γίνονται μετά από κάθε πλημμύρα υπολογίζονται αντίστοιχα στα 5.000€. Οι ανισώσεις (14b) και (20), ώστε να μας συμφέρει να καθυστερήσουμε το έργο, με βέλτιστη απόφαση την  $A(0)$  δίνουν:

$$\frac{K}{B} > I_1(N) \text{ και } \frac{K}{B} > I_2(N)$$

Για  $K=150.000\text{€}$  και  $B=5.000\text{€}$  ισχύει:

$$\frac{K}{B} = 30$$

$5.000 < \frac{150.000}{I} \Rightarrow I(N) < 30$  (Για τη γραμμική και την παραβολική για το πρώτο και δεύτερο σενάριο)

Ομοίως για τη χρήση του υδρολογικού ρίσκου, η απόφαση  $A(0)$  για τις εξισώσεις (27) και (28) είναι προτιμητέα όταν:

$$\frac{K}{B} > Nr \text{ και } \frac{K}{B} > Nr(1 + Nr) \text{ αντίστοιχα}$$

- Με βάση τον Πίνακα 3 (για τα βροχομετρικά δεδομένα) παρατηρείται ότι συμφέρει το διαχειριστή η αναβολή κατασκευής του έργου, αφού για όλες τις περιόδους αναβολής του έργου  $N$  έχω  $I_1(N) < 30$  δηλαδή για γραμμική μορφή της συνάρτησης απώλειας όσο και με παραβολική μορφή ενώ παρατηρώ ότι για κανένα  $I_2(N)$  δεν ισχύει  $I_2(N) < 30$  για παραβολική μεταβολή της συνάρτησης απώλειας.
- Με βάση τον Πίνακα 4 (για τα δεδομένα των ημερήσιων παροχών) και τις τιμές του  $I(N)$  για τη γραμμική συνάρτηση επίσης συμφέρει η αναβολή κατασκευής του έργου για 6 μήνες. Αντίθετα, για την παραβολική μορφή απώλειας, δε μπορεί να αναβληθεί η κατασκευή του έργου. Άρα με βάση τη στοχαστική ανάλυση της επικινδυνότητας του Bayes για δεδομένα παροχών και παραβολική συνάρτηση απώλειας πρέπει να κατασκευαστεί το αντιπλημμυρικό έργο με ελάχιστη αναβολή κατασκευής τους 6 μήνες αν το κόστος αποκατάστασης μεταβάλλεται γραμμικά. Ενώ ενδεχόμενη παραβολικής μορφής μεταβολή του κόστους δεν αφήνει περιθώρια αναβολής.
- Με βάση τον Πίνακα 6 και 7 τώρα (υδρολογικό ρίσκο) συμφέρει να καθυστερήσει το έργο, ανάλογα με την περίοδο οικονομικής ζωής του και την αντίστοιχη περίοδο επαναφοράς πλημμύρας, διαφορετικά συμφέρει να κατασκευαστεί το αντιπλημμυρικό έργο.

## 6 Συμπεράσματα

Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από την ανάλυση επικινδυνότητας είναι ότι: η επιλογή για μια απόφαση ή ενέργεια που φαίνεται «χαμηλού κόστους» αρχικά δεν σημαίνει ότι μπορεί να είναι απαραίτητα και η βέλτιστη επιλογή σε ένα πρόβλημα λήψης αποφάσεων. Η γνώση της πληροφορίας, που προκύπτει από προγενέστερες αντίστοιχες περιπτώσεις ή δειγματοληψία για χρήση δεδομένων, επηρεάζει την ποιοτική πληροφορία που εφαρμόζεται για την «ποσοτικοποίηση» της αβεβαιότητας. Η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας προκύπτει από το συνδυασμό της προγενέστερης πληροφορίας με αντίστοιχες στατιστικές κατανομές. Για παράδειγμα τόσο η χρήση των δεδομένων βροχόπτωσης όσο και η χρήση των ημερήσιων παροχών συνδέονται έμμεσα με την περίπτωση πλημμύρας, όμως παρουσιάζουν διαφορετικά αποτελέσματα, λόγω των διαφορετικών στατιστικών παραμέτρων τους. Ο χρήστης όταν καλείται να επιλέξει ανάμεσα στα βροχομετρικά ή τα δεδομένα παροχής, είναι κατανοητό ότι προτιμά τη δεύτερη περίπτωση εξαιτίας της μεγαλύτερης συσχέτισης τους με αντίστοιχα γεγονότα πλημμύρας. Η συλλογή δεδομένων αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την εκτίμηση μιας κατάστασης αλλά και παράγοντα για ποια απόφαση ή ενέργεια πρέπει να επιλέξουμε.

Η επιτυχία του μοντέλου του Bayes για την εκτίμηση του πόσο «βέλτιστη» είναι μια απόφαση (ή ενέργεια) έγκειται στο γεγονός ότι η ανάλυση του μοντέλου συνδυάζει το ενδεχόμενο κόστος που θα στοιχήσει η κάθε απόφαση (μέσω της συνάρτησης απώλειας), την ενδεχόμενη επιτυχία ή αποτυχία (χρήση της συνάρτησης επικινδυνότητας του Bayes) και την προγενέστερη υποκειμενική πιθανότητα (συλλογή πληροφοριών-δεδομένων).

Η επιλογή της συνάρτησης απώλειας επηρεάζει την παραπάνω ανάλυση, όπως παρουσιάζεται στο σχολιασμό των αποτελεσμάτων. Αυτό σημαίνει ότι μια απόφαση η οποία είναι η βέλτιστη για μια επιλεγμένη συνάρτηση απώλειας, δεν είναι απαραίτητο να είναι εξίσου βέλτιστη όταν αλλάξει η μορφή της συνάρτησης απώλειας. Η βέλτιστη απόφαση είναι αυτή που ελαχιστοποιεί την συνάρτηση επικινδυνότητας και αυτό γίνεται συναρτήσει της μορφής της συνάρτησης απώλειας αλλά και της γνώσης που προκύπτει από την προγενέστερη πληροφορία.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου Bayes μπορούν να αποτελέσουν ένα σημαντικό εργαλείο λήψης αποφάσεων για κατασκευή ή μη τεχνικών έργων αντιπλημμυρικής προστασίας σε περιοχές που αντιμετωπίζουν προβλήματα με τη διάβρωση των πρανών.

Όσον αφορά την εφαρμογή του μοντέλου, αυτό θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε συνδυασμό με μια βάση χωρικών και χρονικών δεδομένων βροχοπτώσεων ή ογκομετρικών παροχών για γενικότερη χρήση του και σε άλλες περιοχές και για διαφορετικά σενάρια εκτίμησης της αποκατάστασης των ζημιών. Για παράδειγμα θα μπορούσε το κόστος αποκατάστασης να μεταβάλλεται γραμμικά ή και παραβολικά με τον αριθμό των γεγονότων πλημμύρας, ακολουθώντας κλιμακωτή μορφή.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ασχολήθηκε κυρίως με το εκτιμώμενο οικονομικό κόστος κάθε δυνατής απόφασης που αφορά την επιλογή ή μη κατασκευής ενός τεχνικού έργου. Στην ανάλυση δεν εμπεριέχεται ένας σημαντικός παράγοντας όπως είναι η εκτίμηση του κόστους λόγω της απώλειας εισοδημάτων από τις καλλιέργειες που ενδεχομένως να καταστραφούν. Η εκτίμηση αυτή είναι μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία καθώς επιπλέον των επιπτώσεων στο φυσικό περιβάλλον έχουμε να εκτιμήσουμε και το κοινωνικό κόστος. Η εκτίμηση της θα επηρέαζε σε σημαντικό βαθμό την τελική απόφαση.

## Βιβλιογραφία

1. Νικολαΐδης Ν., Καρατζάς Γ. Τεχνική Έκθεση προς ΟΑΔΥΚ και Ν.Α Χανίων, Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τις λεκάνες απορροής των ποταμών Κερίτη-Θερίσου και Κοιλιάρη. Νοέμβριος 2010.
2. Χατζηθεοχάρους Κ. Υδρογεωχημική Μελέτη του ποταμού Κοιλιάρη, *Περιγραφή και Περιβαλλοντικές Πιέσεις της Περιοχής Μελέτης*. Χανιά, Ιούνιος 2005.
3. Μπέλλος Κ. Στοιχεία Τεχνικής Υδρολογίας, *Αντιπλημμυρικά Έργα» Προπτυχιακές σημειώσεις*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης. Ξάνθη, 2005.
4. Καρατζάς Γ. *Μακροπρόθεσμη Στρατηγική Διαχείρισης Πλημμυρικών Φαινομένων*. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
5. Μιμίκου Μ.Α, Παναγόπουλος Ι. Υδρολογία και Αξιοποίηση Υδατικών Πόρων, *Διάβρωση και Υφαλμύριση Υπογείων Υδάτων. Προπτυχιακές σημειώσεις*. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα 2010.
6. 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.
7. European Commission JRC. Αειφόρος γεωργία και διατήρηση της ποιότητας των εδαφών, *Διαδικασίες υποβάθμισης του εδάφους*. Μάιος 2009.
8. 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.
9. Παλαιολόγος Ε. Ανάλυση Επικινδυνότητας. *Πανεπιστημιακές Σημειώσεις*, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά 2007
10. Lerche I. and Paleologos E.K. (2001). Environmental Risk Analysis. New York: McGraw-Hill Professional Engineering series: Chemical & Environmental Engineering.
11. Berger J.O. (1985). Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis, 2<sup>nd</sup> Ed. New York: Springer series in Statistics. Springer-Verlag.
12. Paleologos E.K. (2008). The Lost Value of Groundwater and its Influence on Environmental Decision Making. Risk Analysis. 28(4), 939–950.

13. Wolfson L.J., Kadane, J.B. & Small M.J. (1996). Bayesian Environmental Policy Decisions: Two case Studies. *Ecological Applications*, 6(4), 1056-1066.
14. Βαρουχάκης Εμμ. Πιθανοτική Προσέγγιση Υδρολογικών Μεταβλητών. *Προπτυχιακές Σημειώσεις*. Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά 2014.
15. Rice J.A. *Mathematical Statistics and Data Analysis*. 3<sup>rd</sup> edition Thomson Higher Education. Belmont USA 2006.

### Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

- H.1. [http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/Leaflets/B1\\_Leaflet\\_GR.pdf](http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/Leaflets/B1_Leaflet_GR.pdf)
- H.2. [http://spirit16.blogspot.gr/2009\\_11\\_01\\_archive.html](http://spirit16.blogspot.gr/2009_11_01_archive.html)
- H.3. [http://daskalabm4.blogspot.gr/2012/08/4\\_24.html](http://daskalabm4.blogspot.gr/2012/08/4_24.html)
- H.4. <http://www.zougla.gr/greece/article/idatinos-efialtis-502413>
- H.5. <http://www.thebest.gr/news/index/viewStory/138287>