

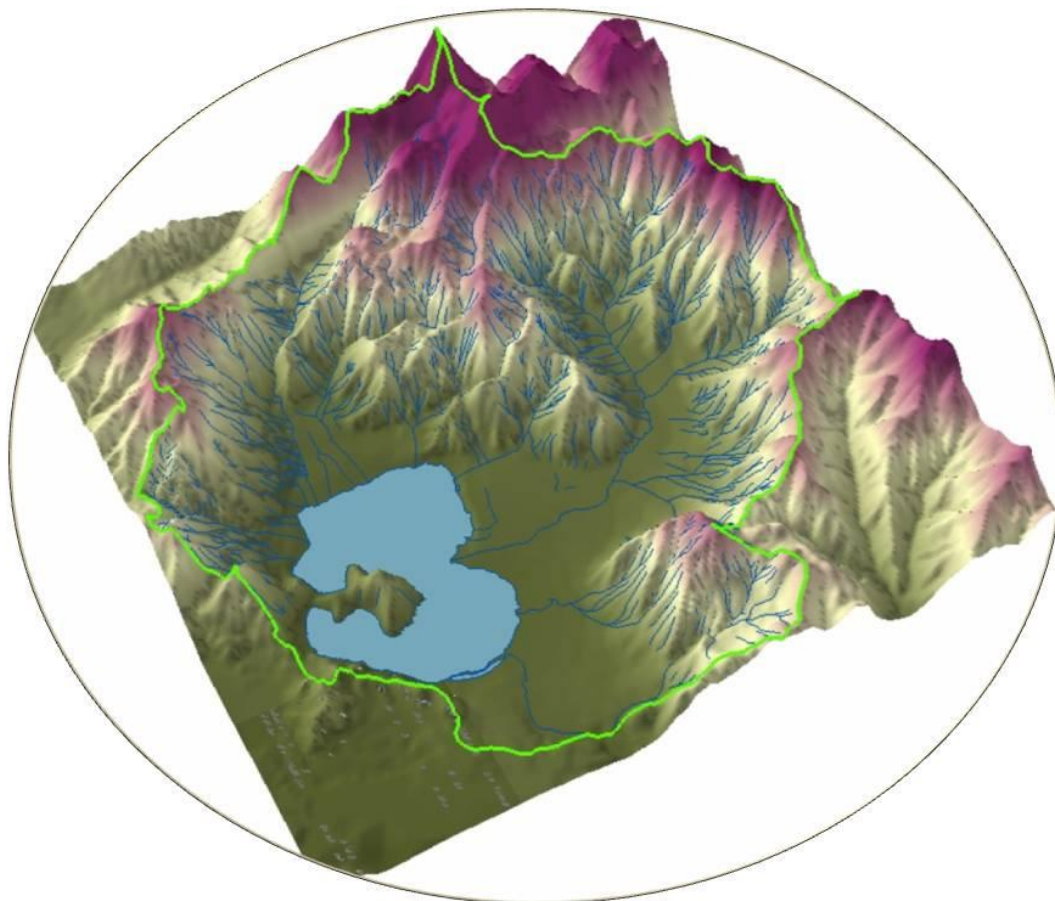
 ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΣΕΡΡΩΝ ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ 
ΔΙ-ΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΠΡΟΛΗΨΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ»	

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΤΙΤΛΟΣ : « *Η λεκάνη απορροής της λίμνης Καστοριάς- Διερεύνηση
πλημμυρικών φαινομένων- Κίνδυνοι, με τη χρήση των Γ.Σ.ΤΤ* »

ΧΑΤΖΗΜΙΧΑΗΛ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ

Μηχανικός Γεωπληροφορικής & Τοπογραφίας Τ.Ε



ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Μιγκίρος Γεώργιος
Λέκκας Ευθύμιος
Λόζιος Στυλιανός

Καθηγητής Γ.Π.Α (Επιβλέπων)
Καθηγητής, ΕΚΠΑ
Επ. Καθηγητής, ΕΚΠΑ

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΝΙΟΣ 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω πραγματικά τον κ.Μιγκίρο Γεώργιο, καθηγητή του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, που μου ανέθεσε την εργασία αυτή και την άψογη συνεργασία που είχαμε μέχρι την περάτωσή της. Επίσης ευχαριστώ θερμά τον κ.Λέκκα Ευθύμιο, καθηγητή του Ε.Κ.Τ.Α καθώς και τον κ. Λόζιο Στυλιανό Επ. καθηγητή Ε.Κ.Τ.Α, με τους οποίους συνεργάστηκα και οι οποίοι δέχτηκαν να αποτελούν μέλη της τριμελούς επιτροπής μου.

Φυσικά από τις ευχαριστίες δεν θα μπορούσαν να λείπουν οι γονείς μου οι οποίοι μου έδωσαν την ευκαιρία, μέσα από την οικονομική και ψυχολογική τους στήριξη, να πραγματοποιήσω τις σπουδές αυτές.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους του φίλους μου Νουρ Γιούνες, Μαρία Στογιάννου, Βαρβαρήγο Γιώργο, Μπάτσιο Χρήστο, Αργύρη Μπόγλη, Γιώργο Κοτζιά και την αδερφή μου Μαριάννα για την στήριξή τους όλο αυτό το διάστημα και για τις όμορφες στιγμές που περάσαμε....

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η περιοχή μελέτης μας αφορά την λεκάνη απορροής της λίμνης Καστοριάς. Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε με αφορμή τις πλημμύρες που συνέβησαν στο ανατολικό τμήμα της υπό μελέτης περιοχής στις 17/2/2010 αλλά και στην μόνιμη εμφάνιση τέτοιων φαινομένων στο κέντρο της πόλης και στο παραλίμνιο τμήμα της λόγω της υπερχείλισης της λίμνης τα τελευταία χρόνια.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη των παραγόντων του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής μελέτης μας με τη χρήση μικρού αριθμού μεταβλητών έχοντας ως στόχο, ακόμη και με τα λίγα διαθέσιμα δεδομένα που υπάρχουν, να εκτιμηθούν και να προσδιοριστούν οι επιρρέπεις περιοχές προς τα πλημμυρικά φαινόμενα και τα φαινόμενα παραγωγής φερτών υλικών τα οποία προσχώνονται στην λίμνη μειώνοντας έτσι την έκτασή της και το βάθος της με αποτέλεσμα να υπερχειλίζει.

Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή μελέτης μας, μελετήθηκε ως προς τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της, την γεωλογία και το υδάτινο δυναμικό της οι οποίοι συντελούν και επηρεάζουν στην εκδήλωση τέτοιων φαινομένων.

Έτσι με τη βοήθεια των Γ.Σ.Π αναπτύξαμε ένα μοντέλο πολυπαραγοντικής ανάλυσης για την εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας. Το μοντέλο αυτό αποτελεί ένα κατανεμημένο μοντέλο εννοιολογικής- φυσικής βάσης στο οποίο οι παράγοντες που έλαβαν μέρος αφορούν τις κλίσεις της περιοχής, την υδρογεωλογία, την μορφολογία, τις χρήσεις γης και την υδρομετεωρολογία οι οποίοι υπολογίστηκαν με τη βοήθεια εμπειρικών τύπων λόγω έλλειψης δεδομένων όπως οι μετρήσεις παροχών. Επίσης υπολογίστηκε η εδαφική απώλεια και ο όγκος των φερτών υλικών και εντοπίστηκαν οι ευαίσθητες περιοχές ως προς τον πλημμυρικό κίνδυνο.

Λέξεις κλειδιά : Λεκάνη απορροής, Καστοριά, πλημμυρικός κίνδυνος, φερτά υλικά, Γ.Σ.Π.

SUMMARY

The present study was carried out not only because of the importance of the floods that took place in the eastern part of basin of Kastoria lake in the middle of February 2010, causing numerous damages. It was also done mostly because of the permanent situation of similar flooding incidents that occur in the city of Kastoria.

The main purpose of this work is to study the factors of water balance in the basin of Kastoria lake, using a small number of variables in order to identify flooding areas and determining the volume of sediment products ending up into the lake, thus leading to the reduction of its size and depth and to the morphological evolution of the lake.

More specifically, the basin was studied taking into account its morphometric characteristics, geology and water balance that control and influence the occurrence of such events. Using the technology of GIS a multi-decision model assessing flood risk was developed. This is a distributed, conceptual- physics based model in which the factors that participate (slopes, hydrogeological, morphological, land use and hydrometeorological characteristics) were calculated using empirical methods because of lack of measurements data such as water supply. Finally, both soil loss and volume of sediments were calculated and sensitive areas prone to flood risk were identified.

Keywords : Basin of Kastoria lake, flood risk, sediment products, G.I.S.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦ.1° ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
ΚΕΦ.2° ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ Ν.ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ	13
2.1 Γεωγραφικά - Πληθυσμιακά στοιχεία του Ν.Καστοριάς	13
2.2 Ανθρώπινη δραστηριότητα	14
ΚΕΦ.3° ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΗΣ Λ.ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ	15
3.1 Ανάγλυφο	15
3.2 Η λίμνη της Καστοριάς	19
3.3 Νομικό καθεστώς της Λ.Καστοριάς	20
3.4 Υφιστάμενη κατάσταση	21
3.5 Φυτοκάλυψη της λεκάνης	22
ΚΕΦ.4° ΓΕΩΛΟΓΙΑ	26
4.1 Τεκτονική.....	26
4.2 Σεισμικότητα της περιοχής.....	29
4.3 Γεωλογικοί σχηματισμοί.....	30
4.4 Γεωμορφολογία	33
ΚΕΦ.5° ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ	35
5.1 Ορισμοί.....	35
5.2 Μορφομετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης	35
5.3 Μορφομετρικά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου	38
5.3.1 Σχηματισμός του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης	38
5.3.2 Χαρακτηριστικά υδρογραφικού δικτύου	39
5.4 Υδρομορφολογία της περιοχής	42
5.4 Υδρολιθολογία της περιοχής	48

5.5.1 Επιμήκη Προφίλ	50
ΚΕΦ. 6^ο ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ	59
6.1 Κατακρημνίσματα	59
6.1.1 Ορισμός	59
6.1.2 Μέθοδοι μέτρησης βροχόπτωσης	59
6.1.3 Χαρακτηριστικά βροχόπτωσης	60
6.2 Επεξεργασία βροχομετρικών δεδομένων	61
6.3 Κατανομή -Αναγωγή βροχοπτώσεων	64
6.3.1 Μέθοδος άμεσης ολοκλήρωσης-κατανομής	64
6.3.2 Μέθοδοι Προσαρμογής Επιφάνειας	66
6.4 Επεξεργασία υδρολογικής πληροφορίας στη λεκάνη απορροής της Λ.Καστοριάς ...	68
6.4.1 Το κλίμα της περιοχής Καστοριάς	68
6.4.2 Πρωτογενή Δεδομένα	68
6.4.4 Κατανομή Κατακρημνισμάτων στην Λ. Απορροής	74
6.4.4.1 Όγκος ατμοσφαιρικών κατά κρημνισμάτων (Vp)	77
6.5 Υπολογισμός & κατανομή έντασης(i) στη λεκάνη απορροής	79
6.6 Θερμοκρασία	82
6.6.1 Σχέση Υψομέτρου – Θερμοκρασίας	82
6.6.2 Αναγωγή υψομέτρου σε χάρτη μέσης ετήσιας θερμοκρασίας	83
ΚΕΦ. 7^ο ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ-ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	89
7.1 Ο Υδρολογικός Κύκλος	89
7.1.1 Υδατικό ισοζύγιο	90
7.2 Επιφανειακή απορροή	91
7.2.1 Ορισμοί	91
7.2.2 Παράγοντες	91
7.2.3 Μορφές απορροής	92

7.2.4 Μέθοδοι υπολογισμού απορροής.....	93
7.3 Εξατμισοδιαπνοή.....	94
7.3.1 Ορισμός.....	94
7.3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή	95
7.3.3 Εκτίμηση εξατμισοδιαπνοής (E)	95
7.3.3.1 Μέθοδο Συνδυασμού	96
7.3.3.1 Εμπειρικές μέθοδοι.....	99
7.4 Κατείσδυση.....	102
7.4.1 Ορισμός.....	102
7.4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τον συντελεστή κατείσδυσης.....	102
7.4.3 Μέθοδοι Υπολογισμού Κατείσδυσης.....	103
ΚΕΦ.8° ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ-ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΩΝ.....	105
8.1 Ορισμοί	105
8.2 Στάδια ανάπτυξης υδρολογικών μοντέλων	106
8.3 Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων	106
8.3.1 Πεδίο εφαρμογής	107
8.3.2 Χωρική κλίμακα	107
8.3.3 Χρονική κλίμακα	109
8.3.4 Μαθηματική δομή.....	110
8.3.5 Επιφανειακά μοντέλα.....	111
8.3.6 Μοντέλα υπόγειας ροής.....	112
8.4 Χαρακτηριστικά υδρολογικών μεταβλητών.....	113
8.4.1 Προσδιορισμός Υδρολογικών Μεταβλητών.....	113
8.4.2 Συλλογή και επεξεργασία υδρολογικής πληροφορίας.....	114
8.4.3 Κριτήρια επιλογής μεθοδολογίας	115
8.5 Μοντέλα προσομοίωσης υδατικού ισοζυγίου	117
8.5.1 Τεχνικές προσομοίωσης.....	117

8.5.2 Φάσεις προσομοίωσης.....	118
8.5.3 Προσομοίωση του μετασχηματισμού «βροχόπτωση-απορροή».....	119
8.5.4 Συνοπτική επισκόπηση υδρολογικών μοντέλων	119
8.5.4.1 Μοντέλα και περιοχή δοκιμής	124
8.5.4.2 Βαθμονόμηση και σύγκριση των μοντέλων	125
8.6 Σύγκριση και συμπεράσματα μοντέλων	126
ΚΕΦ.9^ο ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΣΤΗΝ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΗΣ Λ.ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ ...	129
9.1 Υπολογισμός πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (E _p)	129
9.2 Υπολογισμός κατείδυσης (I)	132
9.3 Υπολογισμός επιφανειακής απορροής(R) & παροχής (Q)	136
9.4 Υδατικό ισοζύγιο-Συμπεράσματα.....	140
ΚΕΦ.10^ο ΠΛΗΜΜΥΡΕΣ	145
10.1 Οδηγία 2007/60	145
10.2 Ορισμοί	147
10.2.2 Κατηγορίες πλημμυρών	150
10.2.3 Κύρια μεγέθη πλημμυρών	151
10.4 Εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας & Γ.Σ.Π στην περιοχή μελέτης μας - Πολυπαραγοντική ανάλυση	153
10.4.1 Ανάπτυξη Μεθοδολογίας.....	153
10.4.2 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.....	155
10.4.3 Επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων με την χρήση των Γ.Σ.Π.....	155
10.4.3.1 Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου (DEM)	156
10.4.3.2 Παράγωγα ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου	158
10.5 Υπολογισμοί παραμέτρων πλημμυρικού κινδύνου	161
10.5.1 Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας (Topographic Wetness Index)	161
10.5.2 Λιθολογία- Υδροπερατότητα (Permeability)	163
10.5.3 Κάλυψη γης- Τραχύτητα (Roughness).....	164

10.5.4	Κλίσεις -Επικινδυνότητα.....	165
10.5.5	Ενέργεια Χειμάρρου (<i>Stream Power</i>).....	167
10.5.5.1	Υπολογισμοί παραμέτρων ρυθμού εκτόνωσης ενέργειας χειμάρρων	168
10.6	Ιστορικό πλημμυρών στην περιοχή μελέτης μας	174
10.7	Κατασκευή χάρτη εκτίμησης πλημμυρικής επικινδυνότητας-Συμπεράσματα	177
ΚΕΦ.11°	ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΕΔΑΦΩΝ & ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	179
11.1	Εισαγωγή.....	179
11.2	Εκτίμηση εδαφικής απώλειας της λεκάνης απορροής της Λ. Καστοριάς (RUSLE)...	180
11.2.2	Υπολογισμοί παραμέτρων <i>Rusle</i>	181
11.3	Χάρτης εδαφικής απώλειας της λεκάνης απορροής	187
11.4	Στερεοπαροχή στη λεκάνη απορροής Καστοριάς.....	188
11.4.1	Υπολογισμοί Παραμέτρων <i>GAVRILOVIC</i>	189
11.4.2	Χάρτης όγκουφερτών υλικών στην λεκάνη απορροής.....	191
11.4.3	Μείωση έκτασης της λίμνης.....	192
11.4.4	Τρόποι πρόσχωσης της λίμνης –Υφιστάμενα έργα	193
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	195
	ΕΠΙΛΟΓΟΣ	201
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	202

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΡΤΩΝ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΗΣ Λ.ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ

1) ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ	16
2) ΧΑΡΤΗΣ ΚΛΙΣΕΩΝ	18
3) ΧΑΡΤΗΣ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ.....	18
4) ΧΑΡΤΗΣ ΧΡΗΣΕΩΝ ΓΗΣ	22
5) ΧΑΡΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ	27
6) ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ	31
7) ΧΑΡΤΗΣ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ	41
8) ΧΑΡΤΗΣ ΤΑΞΗΣ ΡΕΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ STRAHLER.....	42
9) ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ	49
10) ΧΑΡΤΗΣ ΠΡΟΦΙΛ Ρ.ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΥ	52
11) ΧΑΡΤΗΣ ΠΡΟΦΙΛ Ρ.ΒΥΣΣΙΝΙΑΣ	53
12) ΧΑΡΤΗΣ ΠΡΟΦΙΛ Ρ.ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	54
13) ΧΑΡΤΗΣ ΠΡΟΦΙΛ Ρ.ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗ	55
14) ΧΑΡΤΗΣ ΠΡΟΦΙΛ Ρ.ΤΟΙΧΙΟΥ	55
15) ΧΑΡΤΗΣ ΠΡΟΦΙΛ Ρ.ΪΣΤΑΚΟΥ	56
16) ΧΑΡΤΗΣ ΠΡΟΦΙΛ Ρ.ΦΩΤΕΙΝΗΣ	57
17) ΧΑΡΤΗΣ ΠΡΟΦΙΛ Ρ.ΑΠΟΣΚΕΠΟΥ	57
18) ΧΑΡΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΑΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ(P_{mean}) (1961-1994).....	77
19) ΧΑΡΤΗΣ ΜΕΣΟΥ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΟΥ ΟΓΚΟΥ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ (VP_{mean}).....	78
20) ΧΑΡΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΑΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΒΡΟΧΗΣ(i_{mean}) (1961-1994)	81
21) ΧΑΡΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΑΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (1961-1994)	85
22) ΧΑΡΤΗΣ ΜΕΣΟΥ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΟΥ ΟΓΚΟΥ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ(VEp_{mean})	131
23) ΧΑΡΤΗΣ ΜΕΣΟΥ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΟΥ ΟΓΚΟΥ ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗΣ (VI_{mean}).....	135
24) ΧΑΡΤΗΣ ΜΕΣΟΥ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΟΥ ΟΓΚΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ (VR_{mean})	138
25) ΧΑΡΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΑΣ ΠΑΡΟΧΗΣ(Q_{mean}) ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ	139
26) ΧΑΡΤΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗΣ ΡΟΗΣ (FLOW ACCUMULATION).....	160

27) ΧΑΡΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΛΗΜΜΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΒΑΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ.....	165
28) ΧΑΡΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΛΗΜΜΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΒΑΣΗ ΤΩΝ ΧΡΗΣΕΩΝ ΓΗΣ ΚΑΤΑ STRICKLER.....	167
29) ΧΑΡΤΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΛΗΜΜΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΒΑΣΗ ΤΩΝ ΚΛΙΣΕΩΝ	168
30) ΧΑΡΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΧΕΙΜΑΡΡΩΝ.....	174
31) ΧΑΡΤΗΣ ΟΛΙΚΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ	174
32) ΧΑΡΤΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΣ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ	175
33) ΧΑΡΤΗΣ ΡΥΘΜΟΥ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	175
34) ΧΑΡΤΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ.....	179
35) ΧΑΡΤΗΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΤΗΤΑΣ(R) (RUSLE)	184
36) ΧΑΡΤΗΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ(K) (RUSLE).....	185
37) ΧΑΡΤΗΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΕΙΚΤΗ (LS) (RUSLE).....	186
38) ΧΑΡΤΗΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΦΥΤΟΚΑΛΥΨΗΣ (C) (RUSLE)	188
39) ΧΑΡΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ.....	189
40)ΧΑΡΤΗΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ Χ ΓΙΑ ΤΟΝ ΟΓΚΟ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ(ΓΑΒΡΙΛΟΝΙC)..	191
41)ΧΑΡΤΗΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ Υ ΓΙΑ ΤΟΝ ΟΓΚΟ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ(ΓΑΒΡΙΛΟΝΙC)...	192
42)ΧΑΡΤΗΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ Φ ΓΙΑ ΤΟΝ ΟΓΚΟ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ(ΓΑΒΡΙΛΟΝΙC) ..	192
43)ΧΑΡΤΗΣ ΜΕΣΟΥ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΟΥ ΟΓΚΟΥ ΦΕΡΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ..	193

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

σελ.

Πίνακας 1: Μορφομετρικά χαρακτηριστικά υπολεκανών.....	44
Πίνακας 2: Μορφομετρικά χαρακτηριστικά υ/δ.....	45
Πίνακας 3: Καταγραφείσες τιμές βροχόπτωσης κατά τα έτη 1961-1994.....	71
Πίνακας 7: Καταγραφείσες τιμές θερμοκρασίας κατά τα έτη 1961-1994.....	87
Πίνακας 12: Τιμές υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς..	143

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη των υδρολογικών και γεωλογικών χαρακτηριστών της λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς με τη χρήση των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών για την μελέτη του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής. Οι παράγοντες οι οποίοι μελέτηθηκαν και αποτελούν την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου είναι η εξατμισοδιαπνοή της λεκάνης απορροής, η υπόγεια κατείσδυση, τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και η επιφανειακή απορροή.

Η μελέτη των παραγόντων του υδατικού ισοζυγίου και το μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε, αποτελούν την βάση της εργασίας αυτής με στόχο την εκτίμηση πλημμυρικών φαινομένων στην περιοχή μελέτης μας, και σε συνδυασμό με την διάβρωση του εδάφους θα μελετήσουμε την παραγωγή των φερτών υλών και του φυσικού φαινομένου ιζηματογένεσης στην λίμνη.

Στο 2^ο κεφάλαιο περιγράφονται τα γεωγραφικά, οικονομικά και πληθυσμιακά στοιχεία του Ν. Καστοριάς. Στο 3^ο κεφάλαιο αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μορφολογία της λεκάνης απορροής όπως το υψόμετρο και οι κλίσεις, καθώς και οι χρήσεις γης στην περιοχή. Στο 4^ο κεφάλαιο αναλύεται η γεωλογία και η τεκτονική της περιοχής.

Στο 5^ο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η δημιουργία και εξέλιξη του υδρογραφικού δικτύου, το σχήμα της λεκάνης απορροής της και γενικότερα η υδρομορφολογία και υδρολιθολογία της περιοχής.

Το 6^ο κεφάλαιο αφορά τη μελέτη των υδρομετεωρολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής και των υπολεκάνων όπως ο υπολογισμός της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας και μέσου ετήσιου ύψους βροχής για μια σειρά 33 υδρολογικών ετών.

Στο 7^ο & 8^ο κεφάλαιο περιγράφονται και αναλύονται η έννοια του υδρολογικού κύκλου, τα υδρολογικά μοντέλα καθώς και οι απώλειες της απορροής λόγω εξατμισοδιαπνοής, κατακράτησης και διήθησης μέσω του υπολογισμού της υπόγειας απορροής και της εξατμισοδιαπνοής για κάθε μια από τις υπολεκάνες απορροής της λίμνης Καστοριάς και όλης της λεκάνης.

Στο 9^ο κεφάλαιο αναλύεται το υδατικό ή υδρολογικό ισοζύγιο της λεκάνης και τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από την όλη μελέτη. Στο 10^ο κεφ. περιγράφεται η μεθοδολογία εκτίμησης πλημμυρικού κινδύνου και στο 11^ο η εδαφική απώλεια στην περιοχή μελέτης και ο υπολογισμός όγκου φερτών υλικών.

2.1 Γεωγραφικά - Πληθυσμιακά στοιχεία του Ν.Καστοριάς

Ο Ν.Καστοριάς με έκταση 1.720Km², χωροθετείται στο βορειοδυτικό τμήμα της Δυτικής Μακεδονίας. Πρόκειται για παραμεθόριο Νομό ο οποίος συνορεύει δυτικά με την Αλβανία, βορειοανατολικά με το Ν.Φλώρινας, ανατολικά με το Ν.Κοζάνης και νότια με το Ν.Γρεβενών. Η Καστοριά χαρακτηρίζεται ορεινός νομός διότι περιβάλλεται από τους ορεινούς όγκους της Πίνδου, του Βοίου, του Τρικαλαρίου, του Βαρνούντα, του Βέρνου και αποτελεί φυσικό σύνορο με το Ν.Φλώρινας. Εντός των γεωγραφικών ορίων της κυριαρχεί το ορεινό σύμπλεγμα του Γράμμου ως η βορειότερη προέκταση της Πίνδου στα ελληνοαλβανικά σύνορα. Σύμφωνα με την απογραφή του 2001, ο πληθυσμός του νομού υπολογίζεται σε 53.483 κατοίκους.



Ο νομός της Καστοριάς μαγεύει κάθε φυσιολάτρη. Ο πλούτος της σε μνημεία της φύσης προσελκύει πλήθος επισκεπτών. Τα κύρια συστατικά του τοπίου της είναι οι υδάτινοι πόροι και οι ορεινές εκτάσεις. Τόσο τα υδατικά όσο και τα δασικά οικοσυστήματα αποτελούν καταφύγιο για μια μεγάλη ποικιλία ειδών. Ανάμεσα στους οργανισμούς που φιλοξενούνται εμφανίζονται και αρκετά απειλούμενα είδη και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο κάποιες εκτάσεις έχουν χαρακτηριστεί προστατευόμενες.

Σημαντικά οικοσυστήματα της περιοχής είναι το Απολιθωμένο δάσος ηλικίας περίπου 20 εκατομμυρίων χρόνων, τα ιαματικά λουτρά της Αμμουδάρας που φημίζονται για τις θεραπευτικές τους ιδιότητες, η λίμνη της Καστοριάς η οποία είναι ο πολυτιμότερος θησαυρός της πόλης καθώς αποτελεί το στολίδι της και την προσέλκυση των επισκεπτών ως τόπο αναψυχής, το όρος Γράμμος το οποίο αποτελεί δείγμα του μεγαλείου της φύσης καθώς και καταφύγιο πολλών άγριων ζώων που απειλούνται με εξαφάνιση.

2.2 Ανθρώπινη δραστηριότητα

Τα οικονομικά χαρακτηριστικά του νομού αναφέρονται στον πρωτογενή, δευτερογενή και τριτογενή τομέα. Στον πρωτογενή τομέα η γεωργία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τομείς της παραγωγής στον οποίο απασχολείται ή υποαπασχολείται ένας σημαντικός αριθμός κατοίκων. Βασικά γεωργικά προϊόντα αποτελούν τα δημητριακά, τα φασόλια, τα μήλα και τα κηπευτικά. Σημαντική όμως είναι και η κτηνοτροφία με την εμπορία κτηνοτροφικών προϊόντων όπως το γάλα, το μαλλί και η φέτα.

Στον δευτερογενή τομέα ανήκει η βιοτεχνία που αναπτύσσεται στην Καστοριά με την εμπορία δέρματος - γούνας των μικρών οικογενειακών επιχειρήσεων ενώ, ο τριτογενής τομέας αφορά τον τουρισμό του νομού και εμφανίζεται δυναμικός χωρίς όμως να έχουν αξιοποιηθεί όλοι οι διαθέσιμοι πόροι.

Η Καστοριά είναι ένας νομός με πλούτο φυσικών πόρων διότι διαθέτει αλουμίνιο, ενώ στην περιοχή βρίσκεται η εξορυκτική εταιρεία Larco. Ενεργειακές πηγές δεν υπάρχουν, ωστόσο οι ανάγκες του νομού καλύπτονται επαρκώς με την τροφοδότηση ηλεκτρικής ενέργειας από την Πτολεμαίδα και την Κοζάνη. Στους φυσικούς της πόρους όμως περιλαμβάνονται και τα φυσικά οικοσυστήματα, η χλωρίδα και η πανίδα καθώς και η πρωτογενής παραγωγή που αναφέρθηκε παραπάνω.

3.1 ΑΝΑΓΛΥΦΟ

Ο υδροκρίτης της λεκάνης οριοθετείται ανατολικά από τις κορυφές Μηλιά(1236 μ) και Πύργος(1413 μ) της ορεινής περιοχής " Μορίκι" του Άσκιου Όρους, Βόρεια των στενών Κλεισούρας όπου αναπτύσσεται ο ορεινός όγκος του όρους Βέρνου, στη συνέχεια διέρχεται από τις κορυφές Δούκου(1623 μ), Κρόνοι(1680 μ), Βίτσι (2128 μ) και Σπυριδάκη (1488 μ) και έπειτα ακολουθεί νοτιοδυτική κατεύθυνση απ' όπου διέρχεται από την κορυφή Καζάνι(1367 μ), στρέφεται νοτιοανατολικά περνώντας από τη ράχη Πετρώδες(802 μ) και καταλήγει νότια της λίμνης Καστοριάς.

Η λεκάνη απορροής έχει έκταση 231,98 Km² συμπεριλαμβανομένου και του εμβαδού της λίμνης (28.48 Km²) , μέσο υψόμετρο 948.48 m και μέση κλίση 26.93 %. Στους χάρτες που ακολουθούν παρουσιάζεται ο μορφολογία της περιοχής μελέτης μας, οι μορφολογικές κλίσεις καθώς και ο προσανατολισμός των πρανών. Η μέγιστη τιμή υψόμετρου που εμφανίζεται στην λεκάνη απορροής είναι τα 2120 m στο βόρειο τμήμα ενώ η ελάχιστη τα 620 m στο πεδινό τμήμα και παραλιακά της λίμνης.

Γενικότερα η μορφολογία της περιοχής οφείλεται στην τεκτονική δράση, στη γεωλογική δομή και τη διάβρωση του εδάφους λόγω φυσικών και χημικών παραγόντων.

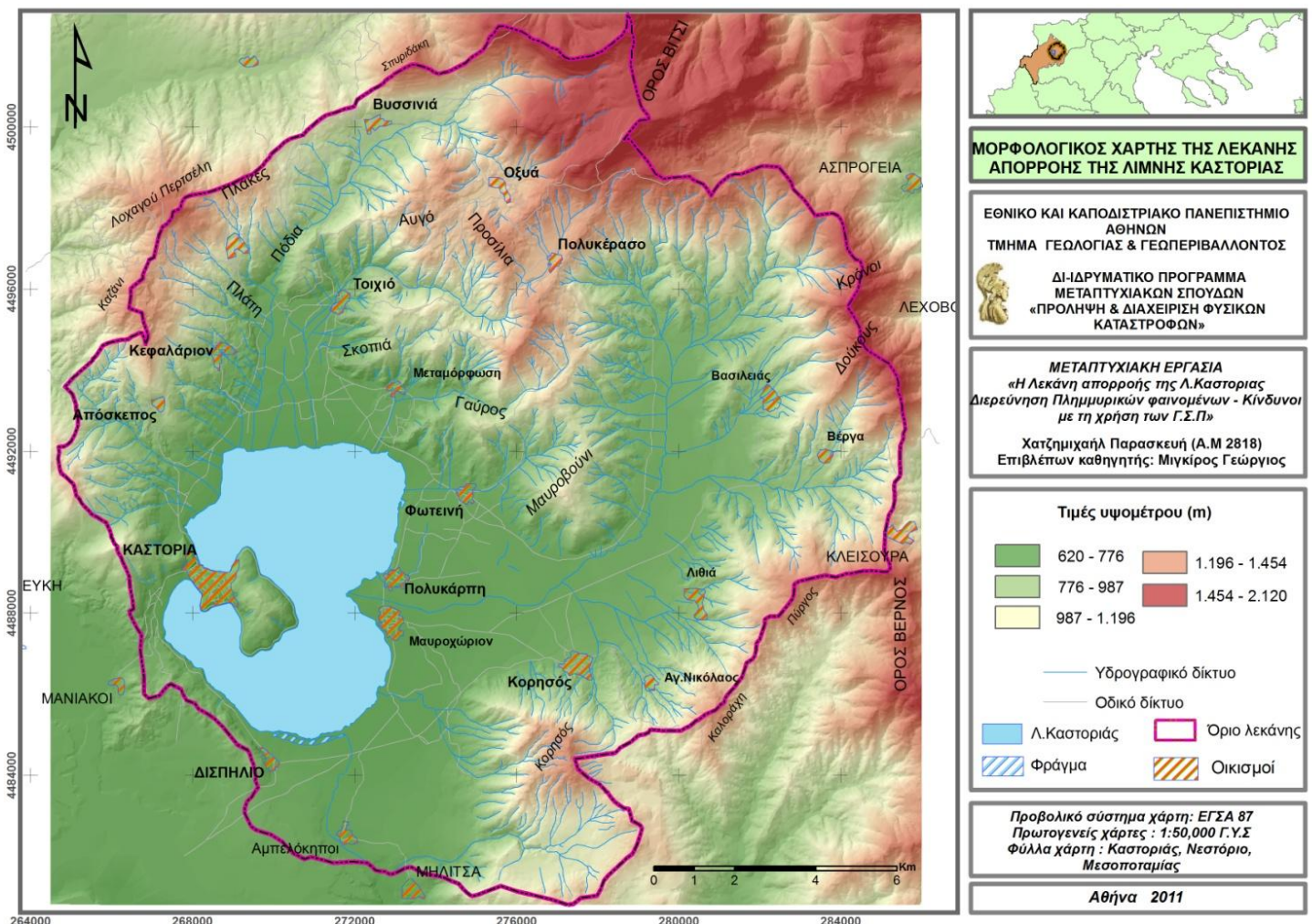
Ο Dicaud (1989) ασχολήθηκε με την ταξινόμηση του αναγλύφου και χώρισε το γήινο ανάγλυφο σε τέσσερις (4) επί μέρους γεωμορφολογικές ενότητες ή τύπους αναγλύφου και δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Ύψος από επιφάνεια θάλασσας	Χαρακτηρισμός
<150	Πεδινές περιοχές
150 - 600	Λοφώδεις περιοχές
600 - 900	Ημιορεινές περιοχές
>900	Ορεινές περιοχές

Από μορφολογικής άποψης η λεκάνη απορροής της λίμνης Καστοριάς διακρίνεται σε 2 περιοχές:

- ☞ Την ορεινή περιοχή η οποία αναπτύσσεται κυκλικά γύρω από τη λίμνη, καταλαμβάνει συνολική έκταση 203 km² και χαρακτηρίζεται από σχετικά πυκνό υδρογραφικό δίκτυο. Ορεινές περιοχές χαρακτηρίζονται αυτές με υψόμετρο > 900 μ. Συγκροτείται από τις αντίστοιχες υπολεκάνες της με έκταση > 5 km².
- ☞ Την πεδινή περιοχή η οποία αναπτύσσεται στην παραλίμνια περιοχή κυρίως μεταξύ Απόσκεπου, Μαυροχωρίου και Δισπηλιού, καταλαμβάνει έκταση 43,65 km² και περιλαμβάνει ιζηματογενή εδάφη.

Η λεκάνη απορροής χαρακτηρίζεται από μεγάλα υψόμετρα, απότομες κλίσεις και έντονες κλιματικές συνθήκες όπως οι ραγδαίες βροχοπτώσεις, όπως θα δούμε σε επόμενα κεφάλαια, καθιστώντας έτσι την περιοχή μας ευπαθής στα πλημμυρικά φαινόμενα. Ο συνδυασμός των πλημμυρικών φαινομένων με την έλλειψη φυτοκάλυψης και την πυρκαγιά του 2001, όπου σύμφωνα με στοιχεία της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας Καστοριάς κάηκαν 200 στρ.δάσους στο δασικό σύμπλεγμα Πολυκέρασου-Οξυάς Βιτσιού τα αίτια της οποίας δεν αναφέρονται, έχει ως αποτέλεσμα την έντονη διάβρωση και απόπλυση εδαφών, όπου μέσω της κίνησης των φερτών υλικών προς την λίμνη, επιτείνουν την χερσοποίησης της.



Όσων αφορά τους οικισμούς αυτοί είναι κτισμένοι σε υψόμετρο 680-800 m περίπου ενώ το οδικό δίκτυο δεν είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένο αφού αποτελείται κατά το μεγαλύτερο μέρος του από χωματόδρομους.

ΚΛΙΣΕΙΣ - ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΠΡΑΝΙΩΝ

Η ταξινόμηση των κλίσεων του αναγλύφου που πρότεινε ο Demek (1972), η οποία υιοθετήθηκε στη συνέχεια από την Επιτροπή Γεωμορφολογικής Έρευνας και Χαρτογράφησης (Commission on Geomorphological Survey and Mapping) της Διεθνούς Γεωγραφικής Ένωσης (IGU - International Geographical Union) είναι η ακόλουθη.

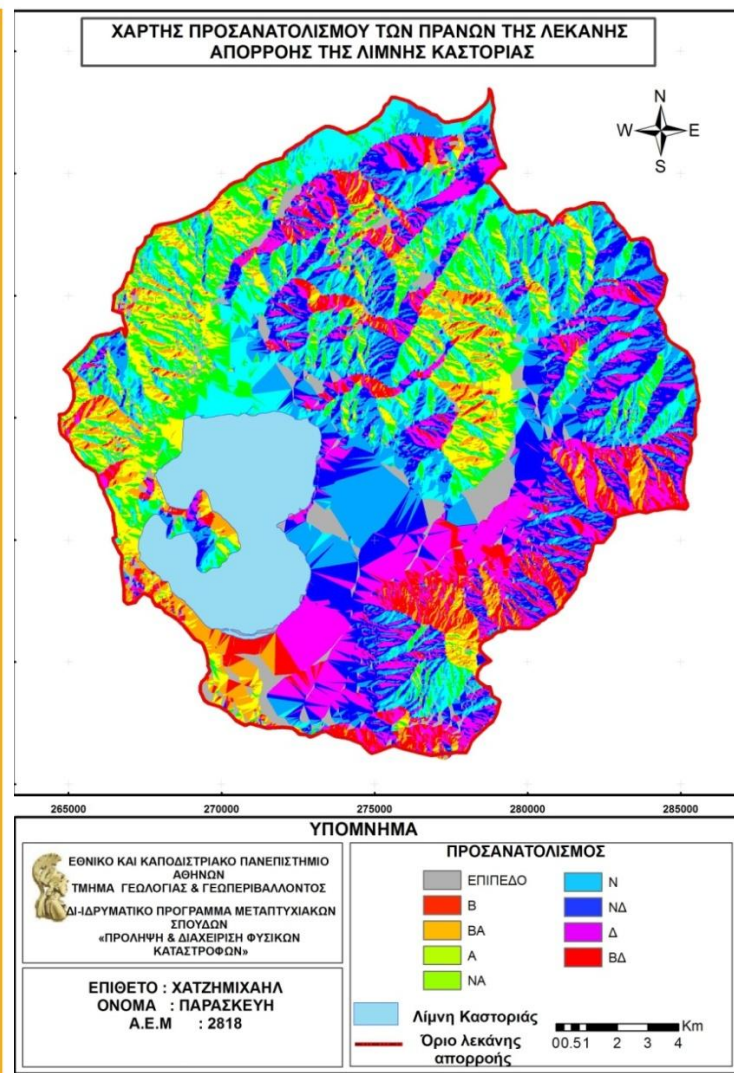
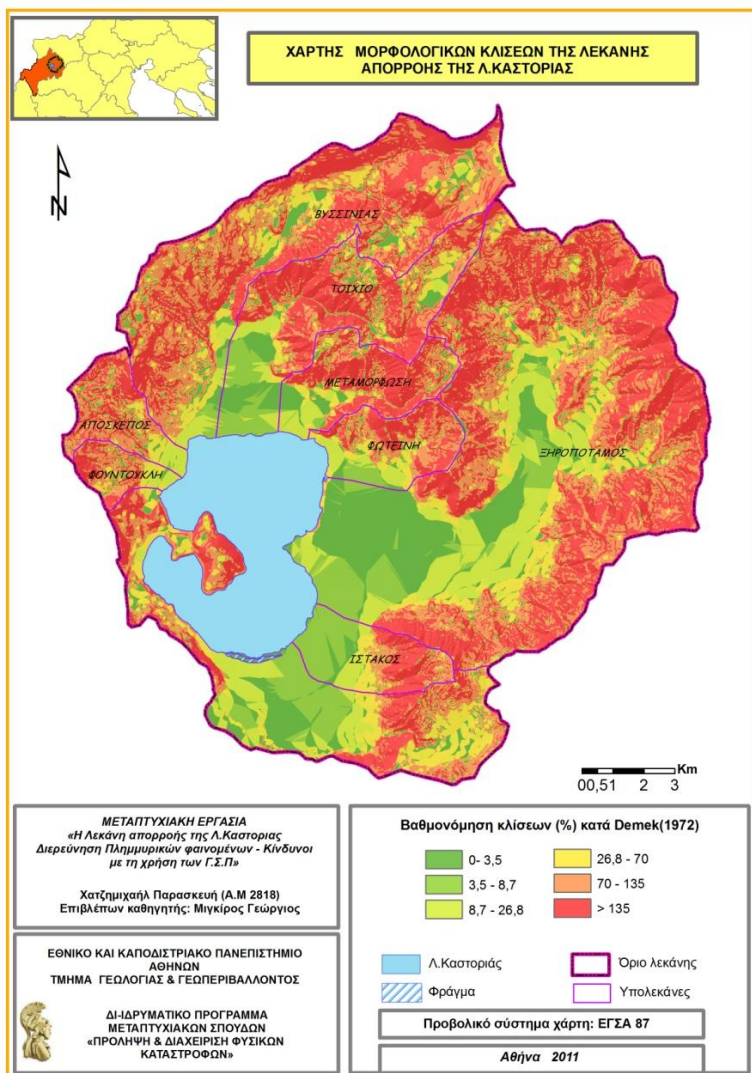
- **Κλίση 0° - 2° (0% - 3,5%):** επίπεδο έως ελαφρώς κεκλιμένο ανάγλυφο (πλημμυρικά πεδία (0° - 30°), επιφάνειες επιπέδωσης, αναβαθμίδες). Έναρξη διάβρωσης τύπου καλύμματος. Απουσία προβλημάτων στις ανθρώπινες δραστηριότητες (μεταφορές, οικοδόμηση, γεωργία, υλοτομία).
- **Κλίση 2° - 5° (3,5% - 8,7%):** ελαφρώς κεκλιμένο ανάγλυφο (πρόποδες κοιλάδων, περιοχές τελικών μοραίνων, κλιτύες θινών). Διάβρωση καλύμματος και έναρξη αυλακωτής διάβρωσης. Σε περιοχές φυτοκάλυψης παρατηρείται έναρξη ερπυσμού εδαφών. Μέτρα προστασίας του εδάφους στις καλλιεργούμενες περιοχές. Ελαφριά δυσκολία στη μετακίνηση των οχημάτων, δυνατότητα εποίκισμού και λειτουργίας βιομηχανιών. Καλλιέργεια δυνατή με τη χρήση μηχανημάτων. Προτεινόμενη η καλλιέργεια κατά τις ισοϋψείς.
- **Κλίση 5° - 15° (8,7% - 26,8%):** ισχυρώς κεκλιμένο ανάγλυφο (κλιτύες κοιλάδων, τεκτονικές αναβαθμίδες.). Κινήσεις μαζών, ισχυρή διάβρωση τύπου καλύμματος και αυλακωτή, έντονες διαβρωτικές διεργασίες σε περιοχές μειωμένης φυτοκάλυψης αλλά έναρξη τους και σε περιοχές έντονης φυτοκάλυψης. Πιθανές ολισθήσεις εδάφους και ερπυσμός. Στις 150 (26,8%) βρίσκεται η κρίσιμη γωνία για το σχηματισμό πλήρους εδαφικού ορίζοντα. Σημαντικές δυσκολίες στην κατασκευή δρόμων και στη μετακίνηση οχημάτων. Αδύνατη η καλλιέργεια δίχως τη χρήση αναβαθμίδων. Δυσκολίες στη χρήση γεωργικών μηχανημάτων.
- **Κλίση 15° - 35° (26,8% - 70%):** απότομο (150 - 250) έως εξαιρετικά απότομο (25° - 35°) ανάγλυφο (κλιτύες κοιλάδων μεσαίων ορέων). Έντονες διεργασίες απογύμνωσης πάσης φύσεως, ερπυσμοί εδαφών, λασπορροές, πολύ έντονη αυλακωτή και γραμμική διάβρωση τόσο σε γυμνές όσο και σε καλυμμένες (δάση) περιοχές. Δυνατή η μετακίνηση μόνο με ερπυστριοφόρα μηχανήματα. Αδύνατη η καλλιέργεια, δυσχερής η υλοτομία. Περιοχή δασών και βοσκοτόπων.
- **Κλίση 35° - 55° (70% - 135%):** απόκρημνο ανάγλυφο (απότομες κλιτύες κοιλάδων υψηλών ορέων, κλιτύες σχηματισμών hogbacks, κλιτύες ασβεστολιθικών φαραγγιών). Πολύ λεπτό, ασυνεχές στρώμα εδάφους, έντονη απογύμνωση του μητρικού πετρώματος, ισχυρότατη έκθεση στους παράγοντες

της διάβρωσης και της βαρύτητας. Αδύνατη η προσπέλαση. Περιοχή δασών, όριο εκμετάλλευσης της υλοτομίας.

- **Κλίση > 55° (>135%)**: κάθετο ανάγλυφο (κάθετες κλιτύες σε περιοχές ψαμμιτικών και ασβεστολιθικών ορέων). Απουσία εδάφους. Απογύμνωση των εκτεθειμένων πετρωμάτων, κατάρρευση βραχών. Αδύνατη η οικονομική εκμετάλλευση. Αναρρίχηση. Κίνδυνος πτώσης βράχων στα κατάντη (Demek, 1972).

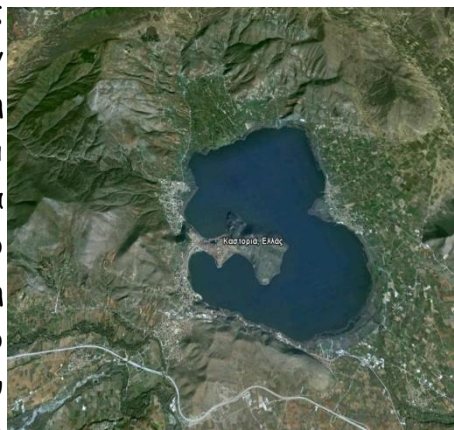
Όπως παρατηρούμε από τον ακόλουθο χάρτη των μορφολογικών κλίσεων οι μεγαλύτερες κλίσεις εμφανίζονται στο ορεινό τμήμα της περιοχής με μεγαλύτερες αυτές των 40ο και οι μικρότερες εμφανίζονται στο πεδινό τμήμα με τιμή μικρότερη των 10ο όπου η τοπογραφία είναι σχεδόν επίπεδη.

Δεξιά εμφανίζεται ο χάρτης προσανατολισμού των πρηνών ο οποίος μας δείχνει το προς τα πού κλίνουν τα πρηνή. Με γκρι χρώμα απεικονίζονται οι επιφάνειες επιπέδωσης και οι οποίες περιλαμβάνουν την πεδινή έκταση. Από τον συνδυασμό των δύο αυτών χαρτών μπορούμε να πάρουμε μια πρώτη εικόνα για την δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής.



3.2 Η λίμνη της Καστοριάς

Η λίμνη περιβάλλεται από πολλά όρη και λόφους που αποτελούν διακλαδώσεις διαφόρων ορεινών συγκροτημάτων. Αποτελεί τον φυσικό αποδέκτη των ρεμάτων που την περιβάλλουν, βρίσκεται ανάμεσα στα όρη Βέρνο, Άσκιο, Κορησός και Βίγλα σε υψόμετρο 620 m και εντάσσεται στο οροπέδιο των λιμνών ΒΔ Μακεδονίας. Διαιρείται από τη χερσόνησο "Κορίτσα" σε δύο τμήματα, το βόρειο με επιφάνεια 15,13 km² και το νότιο ή κάτω τμήμα με επιφάνεια 11,47 km². Το παραλίμνιο πεδινό τμήμα που σχηματίζεται έχει μικρό



Εικόνα 2: Λίμνη Καστοριάς (πηγή: google earth)

σχετικά πλάτος ανάπτυξης και περιορισμένη έκταση: εμφανίζεται μόνο στο βορειοανατολικό τμήμα της περιμέτρου της λίμνης (από τον Απόσκεπο μέχρι περίπου το Γκιάλε).

Στη λίμνη εκβάλλουν 9 υδατορεύματα εκ των οποίων το μεγαλύτερο είναι το ρέμα Ξηροποτάμου που βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης απορροής και εκβάλλει στη λίμνη ανάμεσα στις κοινότητες Μαυροχωρίου και Πολυκάρπης και στο δήμο Μακεδνών. Στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης υπάρχουν επίσης τα ρέματα Ίστακου και Φωτεινής, στο δυτικό τμήμα υπάρχουν τα ρέματα Αποσκέπου και Φουντουκλή ενώ στο βόρειο τμήμα τα ρέματα Μεταμόρφωσης, Τοιχιού, Αγ. Αθανασίου και Βυσσινιάς (Βαφειάδης 1983). Το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης στη λίμνη είναι 606 mm, ενώ αυτό σε όλη τη λεκάνη απορροής ανέρχεται σε 729 mm.

Το σχήμα της είναι νεφροειδές το οποίο οφείλεται στην εισχώρηση της λοφώδους χερσονήσου "Βουνού". Η λίμνη αποτελεί κατάλοιπο παλιάς εκτεταμένης λίμνης με έκταση 164 τετρ. χιλιομ και μέγιστο βάθος μεγαλύτερο από 50 μέτρα (Τεταρτογενές). Πρόκειται για λίμνη τεκτονικής προέλευσης με καρστικά στοιχεία και υπολογίζεται ότι σχηματίστηκε πριν από 10.000.000 έτη (Μειόκαινο).

Σήμερα η έκτασή της είναι περίπου 28 τετρ. χιλιομ. και το μέγιστο βάθος του περίπου 9,5 μέτρα. Οι γεωγραφικές της συντεταγμένες στο κέντρο είναι, γεωγραφικό πλάτος 40° 31' Β και γεωγραφικό μήκος 21° 18' Α.

Η λίμνη τροφοδοτείται εκτός από τα ρέματα και το νερό της βροχής και από πολλές υπολίμνιες πηγές. Στο νότιο τμήμα μια διώρυγα (ρέμα Γκιάλι) συνδέει τη λίμνη με τον ποταμό Αλιάκμονα στον οποίον παροχετεύεται η περίσσεια των νερών της με χρήση ηλεκτρικού θυροφράγματος που πρόσφατα εκσυγχρόνισε ο δήμος Καστοριάς. Ο όγκος των νερών της είναι περίπου 100.000.000 κυβικά μέτρα και το ανάπτυγμα των ακτών της 30,8 χιλιόμετρα.

Η λίμνη της Καστοριάς έχει ορεινό χαρακτήρα, είναι αλπικού τύπου και ανήκει στην κατηγορία των λιμνών με μεσοαλπικό χαρακτήρα. Η υπολίμνια επιφάνεια καλύπτεται από ιζήματα, τα οποία προέρχονται από κλαστικά και βιοχημικά υλικά. Τα πρώτα οφείλονται στην έντονη διάβρωση του περιλίμνιου χώρου και εισέρχονται στο εσωτερικό της λίμνης ως φερτά υλικά των διαφόρων ρεμάτων που την τροφοδοτούν. Τα δεύτερα αποτελούν φυσικά υπολείμματα, λήμματα παραλίμνιων οικισμών και κτηνοτροφικών μονάδων κλπ. (Τσαυλόπουλος και άλλοι, 2009).

3.3 ΝΟΜΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ

Λόγω της ιδιαιτερότητας της και του καταφύγιου που προσφέρει σε πολλά είδη, προστατεύεται από εθνικά και διεθνή θεσμικά πλαίσια που αναφέρονται ακολούθως:

- Έχει χαρακτηριστεί από το Υπουργείο Πολιτισμού (1974) ως Μνημείο ιδιαίτερου Φυσικού Κάλλους και έχει ενταχθεί στο Ευρωπαϊκό Δίκτυο "Φύση 2000" καταχωρημένη με τον κωδικό GR 1320001.
- Σε όλη της την έκταση αλλά και στις περιοχές των καλαμώνων και του παραλίμνιου δάσους απαγορεύεται το κυνήγι και η Ελληνική Ορνιθολογική Εταιρεία την έχει συμπεριλάβει στον κατάλογο των σημαντικών περιοχών για τα πουλιά της Ελλάδας και της Ευρώπης (SPA) και το 2001 έγινε αποδεκτή η πρόταση από το ΥΠΕΧΩΔΕ.
- Από τη σύμβαση της Βέρνης (1979), που αφορά σπάνια και απειλούμενα φυτά και ζώα για την προστασία των οποίων θα πρέπει να λάβει μέριμνα η χώρα μας
- Από τη σύμβαση της Βόννης (1979), που αφορά την προώθηση της προστασίας μεταναστευτικών ειδών που δεν προστατεύονται από άλλες συμβάσεις ή εθνικές νομοθεσίες.
- Από την κοινοτική οδηγία 79/409, που αφορά στην προστασία σπάνιων και απειλούμενων πουλιών του ευρύτερου χώρου της Ευρωπαϊκής Ένωσης.
- Από την κοινοτική οδηγία 92/43, που αφορά στην προστασία των φυσικών οικοτόπων και της άγριας πανίδας και αυτοφυσούς χλωρίδας

Τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει σήμερα το περιβάλλον της λίμνης της Καστοριάς είναι:

- η ποιότητα του νερού, που παρά την εφαρμογή του βιολογικού καθαρισμού της πόλης και των παραλίμνιων κοινοτήτων, δεν είναι ικανοποιητική. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη ποσότητα φωσφόρου που υπάρχει στα νερά και κυρίως στα ιζήματα που προέρχονταν κατά κύριο λόγο από τα λύματα της πόλης πριν την λειτουργία του βιολογικού καθαρισμού
- μέρος της ρύπανσης που προέρχεται από τις αποθέσεις διαφόρων ουσιών(μπαζώματα-σκουπίδια) στις όχθες της λίμνης και στην λεκάνη απορροής της
- η φόρτιση με θρεπτικά άλατα από τις απορροές των γύρω από τη λίμνη καλλιεργούμενων περιοχών, όπου χρησιμοποιούνται λιπάσματα και φυτοφάρμακα
- οι αποθέσεις φερτών υλικών από τα επιφανειακά ρέματα
- σταδιακή συρρίκνωση των εκτάσεων του δάσους γύρω από τις όχθες της λίμνης, ως αποτέλεσμα των αποψιλώσεων και του λαθραίου κοψίματος των δέντρων
- η ανεξέλεγκτη βόσκηση στα υγρά λιβάδια στις παρυφές της λίμνης, η οποία τα καταστρέφει
- η τουριστική ανάπτυξη που οδηγεί στην καταπάτηση των οικοτόπων της περιοχής αλλά και στην υπερεκμετάλλευση των υδάτινων πόρων

Όσο αφορά στη βιολογική της κατάσταση είναι μια ευτροφική λίμνη με παραλίμνιο δάσος, πλούσια σε αλιεύματα και ορνιθοπανίδα. Η πόλη και οι κοινότητες που είναι χτισμένες στις όχθες της και η λεκάνη απορροής της έχουν επιβαρύνει τα νερά της λίμνης σε μεγάλο βαθμό. Από το 1990 λειτουργεί μονάδα β/θμίου βιολογικού καθαρισμού των λυμάτων της πόλης και των παραλίμνιων χωριών, με αποτέλεσμα την σταδιακή αναβάθμιση της ποιότητας του νερού αλλά και της ζωής του υγρότοπου. Όμως τα λιπάσματα και φυτοφάρμακα που χρησιμοποιούνται ακόμη σε μεγάλη κλίμακα στις γεωργικές καλλιέργειες στην παραλίμνια ζώνη, ρυπαίνουν το έδαφος και τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα έχοντας σαν τελικό αποδέκτη τη λίμνη. Η κατάσταση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση του φαινομένου του ευτροφισμού της λίμνης Καστοριάς.

Η λίμνη τώρα έχει μειωθεί αρκετά καταλαμβάνοντας 26-28 km² από τα 164 περίπου km² , η περίμετρος της είναι 31 km και βρίσκεται σε μέσο υψόμετρο 630 m. Η τροφοδοσία της γίνεται διαμέσου των όμβριων νερών(επιφανειακά, υπόγεια, πηγαία), τα οποία πέφτουν στους γύρω ορεινούς όγκους και οριοθετούν τη λεκάνη

απορροής της λίμνης. Ο λιμναίος χώρος εμφανίζει κατά την 50ετία 1932-1982 μια προοδευτική συρρίκνωση η οποία εκφράζεται σε όλα τα μεγέθη του και ιδίως σε ό,τι αφορά την έκταση, το μέσο βάθος και τον όγκο της λίμνης (Τσαυλόπουλος et al. 2009, Βαφειάδης 1984).

3.5 ΦΥΤΟΚΑΛΥΨΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ

Στο χάρτη που παρατίθενται στην επόμενη σελίδα, μπορούμε να διακρίνουμε πως μέσα στην έκταση της λεκάνης της λίμνης εμφανίζονται 17 διαφορετικές κατηγορίες των χρήσεων γης. Ο χάρτης των χρήσεων γης προέκυψε από τα πρωτογενή δεδομένα του Corine 2002.

Το μεγαλύτερο ποσοστό της λεκάνης της λίμνης της Καστοριάς, αποτελείται από δασικές εκτάσεις πλατυφύλλων, μεταβατικές δασώδεις - θαμνώδεις εκτάσεις, καθώς και φυσικούς βοσκοτόπους. Επίσης, ένα μεγάλο ποσοστό της έκτασης ανήκει στη μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη, σε αντίθεση με το κομμάτι της αγροτικής δασικής έκτασης που μόλις φτάνει το 1/3 της προηγούμενης κατηγορίας.

Γεωργική γη που καλύπτεται με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης δεν παρατηρείται σε μεγάλο ποσοστό, αλλά ούτε και οι εκτάσεις με αραιή βλάστηση μπορούμε να πούμε ότι είναι σημαντικές. Αντίθετα η σκληροφυλλική βλάστηση καταλαμβάνει ένα μεγάλο κομμάτι της συνολικής βλάστησης.

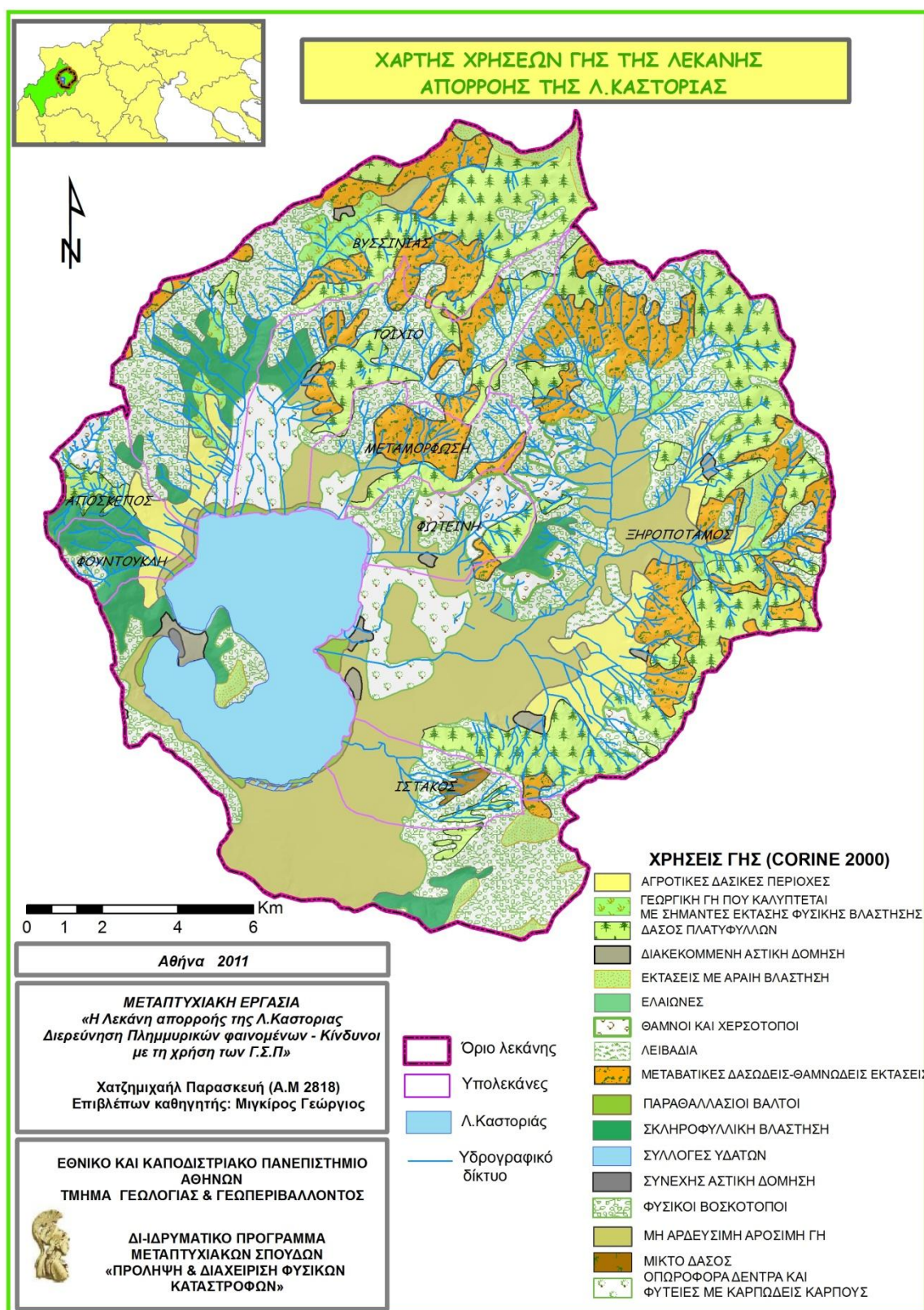
Μικρότερη έκταση καταλαμβάνουν τα οπωροφόρα δέντρα και οι φυτείες με καρπώδεις καρπούς, τα οποία συναντώνται κύρια στο βόρειο τμήμα της λίμνης, ενώ εμφάνιση των θαμνών και των χερσοτόπων υπάρχει σε πολύ μικρότερο βαθμό. Σχεδόν ανύπαρκτοι μοιάζουν οι ελαιώνες, τα λιβάδια καθώς και η έκταση του μικτού δάσους.

Αξιοσημείωτο θα μπορούσε να θεωρηθεί το γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος της λίμνης περιβάλλεται από παραθαλάσσιους βάλτους.

Όσον αφορά στην αστική δόμηση, μπορούμε να παρατηρήσουμε πως η διακεκομμένη δόμηση κυριαρχεί της συνεχούς, η οποία εμφανίζεται μόνο στον κεντρικό αστικό ιστό της πόλης.

Η έκταση της περιοχής που αποτελείται από ένα σημαντικό ποσοστό μεταβατικών δασώδων- θαμνώδων εκτάσεων, δάσος πλατύφυλλων εμφανίζονται σε περιοχές με μεγάλο υψόμετρο και σχετικά μεγάλες κλίσεις. Σημαντική έκταση καταλαμβάνουν και τα σύνθετα συστήματα καλλιέργειας καθώς και οι καλλιέργειες οπωροφόρων

δέντρων και φυτειών στο νότιο- νοτιοανατολικό κυρίως τμήμα της περιοχής που μελετάμε. Οι χρήσεις γης σε συνδυασμό με τις μεγάλες κλίσεις επηρεάζουν τον παράγοντα διάβρωση και συνεπώς το φαινόμενο της παραγωγής φερτών υλικών και πλημμυρικών φαινομένων.



Όσον αφορά το υδρογραφικό δίκτυο, η μεγαλύτερη τάξη αυτού εμφανίζεται πάνω σε σύνθετα συστήματα καλλιέργειας, ενώ η συχνότητα των μικρότερων κλάσεων (1ης, 2ης, 3ης) εμφανίζεται πάνω σε μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις καθώς και βοσκοτόπων και πάνω σε αδιαπέρατα κυρίως πετρώματα. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την χρήση των βοσκοτόπων από ανθρωπογενείς παράγοντες, το υδρογραφικό δίκτυο και την γεωλογία της περιοχής, καταστούν την περιοχή αυτή περισσότερο επιρρεπή προς διάβρωση.

Αντίθετα στις εκτάσεις που αποτελούνται από δάσος πλατύφυλλων δεν παρατηρείται μεγάλη ανάπτυξη υδρογραφικού δικτύου, γεγονός που μας οδηγεί ότι στις περιοχές αυτές έχουμε μεγάλη εξατμισοδιαπνοή λόγω βλάστησης, μικρή κατείδυση λόγω του ότι η βλάστηση αυτή εμφανίζεται πάνω σε αδιαπέρατα πετρώματα και η μικρή επιφανειακή απορροή είναι μικρή. Οι περιοχές αυτές είναι λιγότερο επιρρεπείς προς το φαινόμενο της διάβρωσης και συνεπώς της παραγωγής μεγάλου όγκου φερτών υλικών.

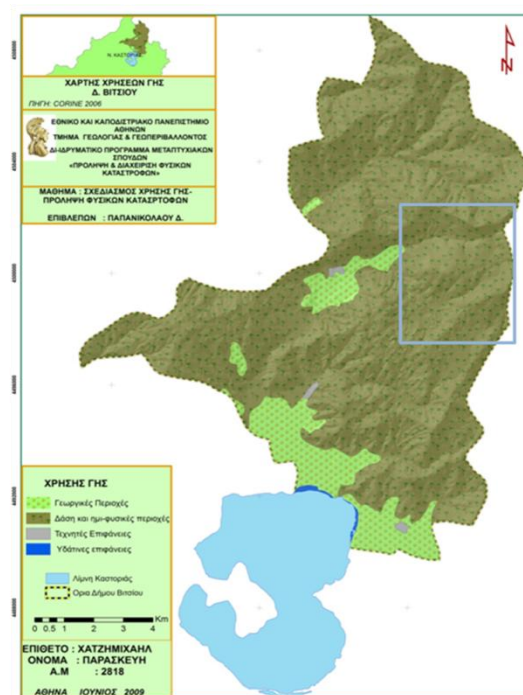
Δασικό Σύμπλεγμα του Δ. Βιτίσιου

Στην περιοχή μελέτης μας ανήκει το Δασικό Σύμπλεγμα του Δ. Βιτίσιου και το οποίο συνορεύει:

- Ανατολικά: Περιοχή Περικοπής Φλώρινας
- Δυτικά: Περιοχή Δημοσίου δάσους Βυssινιάς
- Βόρεια: Περιοχή Δ.Δ Βυssινιάς και Οξυάς
- Νότια: Περιοχή Δ.Δ Πολυκεράσου

Διοικητικά υπάγεται:

- Στο Δ.Βιτίσιου
- Στα Δ.Δ Βασιλειάδος-Μελισσοτόπου
- Στην Νομαρχία Καστοριάς
- Στην περιφέρεια Δ. Μακεδονίας



Από φυτογεωγραφική άποψη το δασικό σύμπλεγμα εμπίπτει στην ευρύτερη περιοχή του Θεσσαλό-μακεδονικού Δρυμού που απλώνεται στον ορεινό όγκο της κεντρικής και Δυτικής Μακεδονίας.

Στο δασικό αυτό σύμπλεγμα συναντάται την διάπλαση των φυλλοβούνων κατά το χειμώνα πλατύφυλλων, η οποία επικρατεί σε όλο το δασικό σύμπλεγμα όπου επικρατούν 2 φυτοκοινωνικές ενώσεις:

1. Την ένωση των φυλλοβόλων δρυών και
2. Την ένωση της Οξυάς

Μια άλλη διάπλαση που συναντάτε είναι αυτή των ψυχοβριών κωνοφόρων με κύρια φυτοκοινωνική ένωση την Μαύρη και Τραχεία πεύκη σε συστάδες προερχόμενες από τεχνητές αναδασώσεις που πραγματοποιήθηκαν παρελθόντα έτη προκειμένου να προστατευτεί το έδαφος και να διευθετηθούν οι χείμαρροι αλλά και για αισθητικούς και οικονομικούς λόγους. Στην περιοχή απαντώνται διάφορα είδη υποδάσους όπως κρανά, λεπτοκαρυά ενώ αξιόλογη είναι η ποικιλία της ποώδους χορτολιβαδικής βλάστησης και συναντάται στις μερικώς δασοσκεπείς και χορτολιβαδικές εκτάσεις. Η υποβάθμιση των δασών αυτών οφείλεται στην μέχρι τώρα κακομεταχείριση, την έλλειψη φροντίδας και τις λαθροϋλοτομίες.

4.1 Τεκτονική

Η περιοχή μελέτης μας βρίσκεται πάνω σε προαλπικό και αλπικό υπόβαθρο και μετααλπικούς σχηματισμούς. Το προαλπικό υπόβαθρο περιλαμβάνει την ενότητα Καστοριάς η οποία διακρίθηκε από την ενότητα Φλάμπουρου λόγω των ιδιομορφιών της στη στρωματογραφία και την τεκτονική θέση (ΡΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ & ΣΤΟJΑΝΟV, 1983). Στο χώρο της βόρειας Πελαγονικής ο Μουντράκης (1983, 1984) διακρίνει αντίστοιχα τις ενότητες Βέρνου και Βόρα.

Στην κολώνα της ενότητας Καστοριάς διακρίνονται από πλευράς λιθολογίας δύο ομάδες, μια υποκείμενη από γρανίτες, γνεύσιους, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους κ.α και μια ανώτερη από σχετικά μικρού βαθμού μεταμόρφωσης μετακλαστικά πετρώματα από φυλλίτες, χαλαζίτες, σερικιτικούς - χλωριτικούς σχιστόλιθους και μετά-τόφους.

Χαρακτηριστικό της ενότητας Καστοριάς είναι η εμφάνιση γρανίτη και όχι μιας φάσης (ΚΙΛΙΑΣ, 1980, ΚΑΤΕΡΙΝΟΠΟΥΛΟΣ 1983). Έχουμε δηλαδή διαδοχικές φάσεις γρανιτικών διεισδύσεων που δημιουργούν αντίστοιχες μεταμορφώσεις επαφής με κερατίτες κ.α. (ΚΙΛΙΑΣ, 1980). Έτσι διακρίνουμε γρανίτες παλιούς και νεότερους, σχιστοποιημένους και μη που βάση ραδιοχρονολογικών δεδομένων ανήκουν εν μέρει στο παλαιοζωϊκό (ΜΑΡΑΚΗΣ 1968, ΚΙΛΙΑΣ 1980, ΜΟΥΝΤΡΑΚΗΣ 1984).



Εικόνα 3: Απόσπασμα γεωτεκτονικού χάρτη Ελλάδος, Παπανικολάου Δ., 1989

Πηγή:Εργαστήριο μελέτης & διαχείρισης φυσικών καταστροφών, τμήμα γεωλογίας & γεωπεριβάλλοντος
Ε.Κ.Π.Α

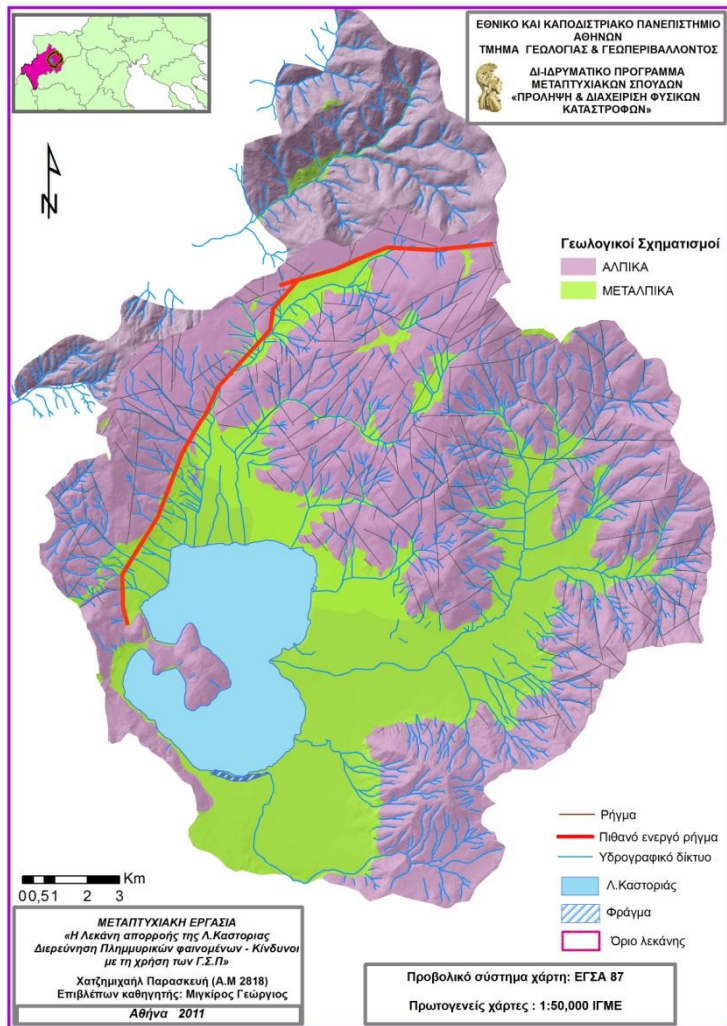
Στους αλπικούς σχηματισμούς συναντάμε την ενότητα οφιολιθικού συμπλέγματος Αξιού. Στην ενότητα αυτή περιλαμβάνονται εμφανίσεις οφιολίθων που βρίσκονται επωθημένοι στα μάρμαρα της ενότητας Αλμωπίας.

Η μεγάλη λιθολογική ποικιλία των μεταμορφωμένων πετρωμάτων που συνιστούν την ορεινή μάζα Βέρνου-Βαρνούντα, με εξαίρεση τους ορθογνεύσιους - γνευσιωμένους γρανίτες, δείχνει ότι πρόκειται για παλιά ιζήματα τα οποία δέχθηκαν πιθανόν πιο παλιές ορογενέσεις από τις Αλπικές όπως τις Ερκύνιες και Καληδονικές (ΚΙΛΙΑΣ, 1980).

Στη λεκάνη απορροής ρήγματα εμφανίζονται κυρίως στους σχηματισμούς του πελαγονικού υποβάθρου και κατά μεγάλο ποσοστό στους γρανιτογενείς Δ.Μακεδονίας με κατεύθυνση Β-ΒΑ, Α-ΝΑ και σε με κατεύθυνση Β-ΒΔ, Ν-ΝΔ. Μικρό ποσοστό όμως των ρηγμάτων αυτών θεωρούνται ενεργά. Η γενική κλίση των στρωμάτων είναι ΒΑ με μέγιστη κλίση 40° και ελάχιστη 10°.

(Νεοτεκτονικός χάρτης της Ελλάδος, φύλλο Γρεβενά, κλίμακα 1:100.000, Ευρωπαϊκό Κέντρο Πρόληψης & Πρόγνωσης Σεισμών Ο.Α.Σ.Π., η χαρτογράφηση έγινε 1995-1996 και η έκδοση το 1999.)

Μετά την παρατήρηση του αναγλύφου στο βόρειο τμήμα της περιοχής και σε υπέρθεση με το υδρογραφικό δίκτυο και την υδρολιθολογία, εκτιμήσαμε ότι στην περιοχή μας υπάρχει ενεργό ρήγμα και είναι αυτό που ουσιαστικά διαμόρφωσε και χώρισε σε 2 επιμέρους τμήματα το υδρογραφικό δίκτυο με διαφορετικά χαρακτηριστικά το κάθε τμήμα. Το ρήγμα αυτό υπήρχε σχεδιασμένο στο γεωλογικό χάρτη κατά το 1/5 και χαρακτηρισμένο ως ανενεργό. Εκτιμώντας όλα τα παραπάνω σχεδιάσαμε το ρήγμα αυτό το οποίο παίρνει την ακόλουθη μορφή όπως φαίνεται παρακάτω με έντονο κόκκινο χρώμα.

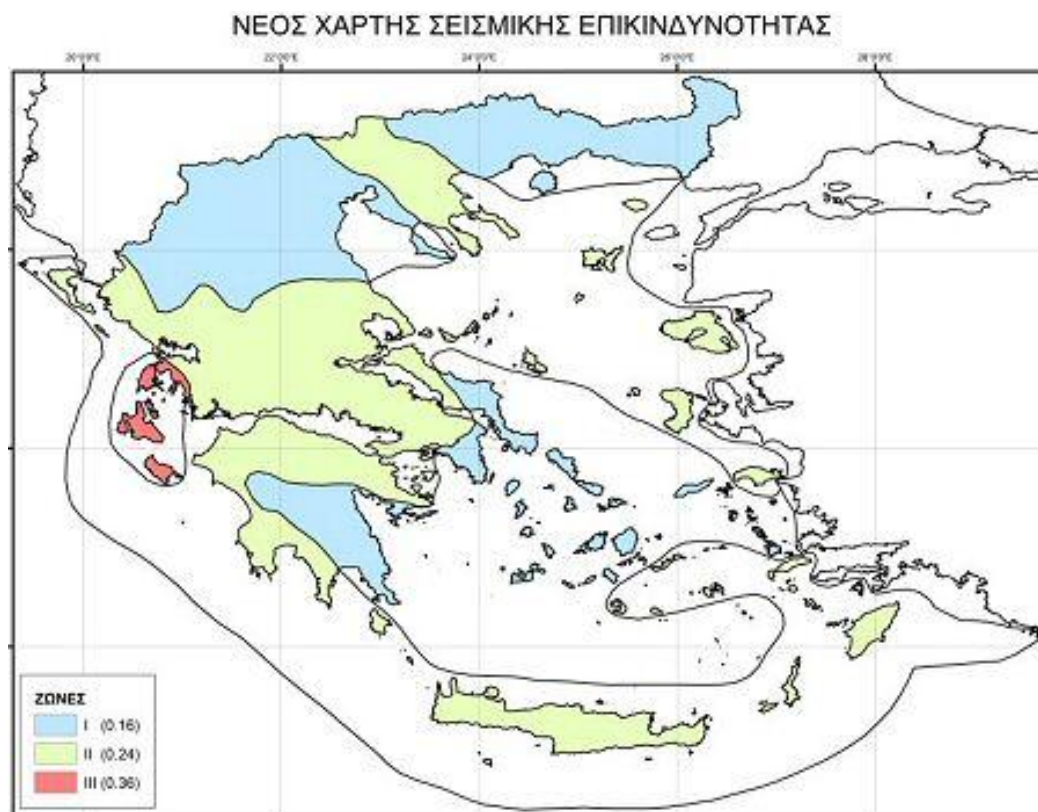


Το ρήγμα αυτό θεωρούμε ότι είναι πιθανό ενεργό διότι οριοθετεί αλπικούς και μεταλπικούς σχηματισμούς και εντοπίζονται δύο ρηξιγενείς ζώνες με διεύθυνση ανατολή-δύση και Β-ΒΔ, Ν-ΝΑ. Είναι φανερό το πώς έχει διαμορφώσει τα όρια ανάμεσα στους αλπικούς και μεταλπικούς σχηματισμούς ενώ παράλληλα το μέτωπο του ρήματος δημιουργεί ασυνέχεια η οποία δεν έχει εξομαλυνθεί γεγονός που αποδεικνύει την επιρροή της τεκτονικής δράσης σε αυτά τα σημεία. Το ρήγμα αυτό έχει προκαλέσει την ανύψωση του πάνω τεμάχους και την καταβύθιση του κάτω τεμάχους διαμορφώνοντας έτσι τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

Το ρήγμα αυτό δικαιολογεί και τον έντονο τεκτονισμό στο βόρειο τμήμα της λεκάνης που είναι σημαντικός με αρκετές διακλαδώσεις, ρωγμώσεις και ασυνέχειες πράγμα που ευνοεί την αποσάθρωση. Στις εκτάσεις που συγκροτούνται από ανθρακικά πετρώματα εμφανίζονται έντονα καρστικά φαινόμενα και αραιό υδρογραφικό δίκτυο.

4. 2 ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Σύμφωνα με τον χάρτη του ΟΑΣΠ, ο Καστοριάς ανήκει στις ασθενώς σεισμόπληκτες περιοχές και κατατάσσεται στην κατηγορία Ι.



Σχήμα 5: Ο Χάρτης Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας της Ελλάδας που ισχύει σήμερα σχεδιάστηκε την περίοδο 1986-1989, στα πλαίσια σχετικού προγράμματος που είχε αναθέσει ο Ο.Α.Σ.Π. σε σεισμολογικούς φορείς της χώρας (Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, Ι.Τ.Σ.Α.Κ., Παν. Αθήνας, Παν. Θεσ/νίκης), και άρχισε να εφαρμόζεται μαζί με τον νέο αντισεισμικό κανονισμό (NEAK) το 1995.

Σεισμοί ιστορικοί που έχουν επηρεάσει την περιοχή αναφέρονται τα ακόλουθα έτη (πηγή: Ελευθεροτυπία) είναι:

- ❖ 1709 , Μέγεθος 6
- ❖ 1812 , Μέγεθος 6,5
- ❖ 1995 ,Μέγεθος 5,5: Ο σεισμός αυτός είχε επίκεντρο τα Γρεβενά Κοζάνης και επηρέασε και τον Ν.Καστοριάς με ζημιές όχι μεγάλου μεγέθους.

Για το πιθανό ενεργό ρήγμα που υπάρχει στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης μας δεν έχουν βρεθεί στοιχεία για το αν έχει δώσει κάποιο σεισμό, το μέγεθος και το επίκεντρό του. Πιθανότατα να έδρασε κάποτε και ανά πάσα στιγμή μπορεί να προκαλέσει κάποιο σεισμικό γεγονός.

Η περιοχή μελέτης ανήκει στο μεγαλύτερο μέρος της στην Πελαγονική Ζώνη, ενώ η δυτική πλευρά της αντιπροσωπεύει τμήμα της Υποπελαγονικής Ζώνης και της Μεσοελληνικής Αύλακας (Brunn 1956).

Γενικότερα στα πετρώματα της περιοχής στα πετρώματα της περιοχής περιλαμβάνονται προαλπικά μεταμορφωμένα, κρυσταλλοσχιστώδη, ημι-μεταμορφωμένα, φυλλιτικά και πλουτωνικά, αλπικά τριαδοϊουρασικά ανθρακικά ιζήματα και μεταλπικά μολασσικά ιζήματα της Μεσοελληνικής Αύλακας, πλειοκαινικά, πλειοπλειστοκαινικά και λιμνοποτάμια ιζήματα, και τέλος χαλαροί τεταρτογενείς σχηματισμοί.

Τα κρυσταλλοσχιστώδη και πλουτωνικά πετρώματα της Πελαγονικής Ζώνης αναπτύσσονται στο ΒΑ τμήμα της περιοχής, τα μολασσικά ιζήματα στο ΝΔ τμήμα, ενώ μεταξύ των κρυσταλλοσχιστωδών και μολασσικών πετρωμάτων αναπτύσσονται οι ημιμεταμορφωμένοι Ανωπαλαιοζωικοί σχηματισμοί και τα ανθρακικά και οφειολιθικά πετρώματα του Μεσοζωικού (Brunn 1956).

Πιο αναλυτικά τα πετρώματα που εμφανίζονται στην περιοχή είναι τα εξής:

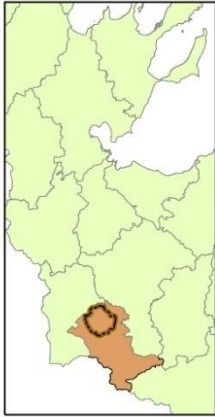
1. Τα κρυσταλλοσχιστώδη και πυριγενή πετρώματα τα οποία αποτελούνται από μεταμορφωμένα και ημιμεταμορφωμένα πετρώματα όπως οι αρκόζες, οι φυλλίτες, οι χαλαζίτες, οι σχιστόλιθοι και οι μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι και εμφανίζονται στο μεγαλύτερο τμήμα της ορεινής περιοχής της Καστοριάς.
2. Τα ανθρακικά πετρώματα τα οποία αποτελούνται από κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, ασβεστόλιθους και δολομιτικούς ασβεστόλιθους και αναπτύσσονται νοτιοανατολικά της λίμνης Καστοριάς.
3. Τα ιζήματα του τριτογενούς τα οποία αποτελούνται κατά το μεγαλύτερο μέρος τους από μολασσικά ιζήματα (ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, ψαμμιτικούς ασβεστόλιθους, κυανές μάργες και κατά τόπους ιλυομιγείς) και λιγότερο από λιμναίες αποθέσεις με την μεγαλύτερη εμφάνισή τους στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής.
4. Οι χαλαρές τεταρτογενείς αποθέσεις οι οποίες καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση νότια της λίμνης και στις οποίες αναπτύσσονται οι σύγχρονες χερσαίες και παλαιότερες αναβαθμίδες με τη μορφή χαλαρών προσχώσεων κοιλάδων, οι κώνοι και τα ριπίδια των χειμάρρων, τα κορήματα κλιτύων, τα αποσαθρώματα πετρωμάτων και τα λιμναία ιζήματα περιμετρικά της λίμνης και τέλος οι αλλουβιακές αποθέσεις που εκτείνονται στην πεδινή έκταση περιμετρικά της λίμνης.

Ο Βαφειάδης Π.(1983) αντίστοιχα κατατάσσει τα πετρώματα στις ακόλουθες κατηγορίες:

1. Μεταμορφωμένα, ημιμεταμορφωμένα και πλουτωνικά πετρώματα της Τελαγονικής Ζώνης, παλαιοζωικής ηλικίας. Εκτείνονται στο μεγαλύτερο μέρος της ορεινής περιοχής και καλύπτουν το βορειοδυτικό, βόρειο και ανατολικό τμήμα της λεκάνης απορροής. Η υδρολιθολογική συμπεριφορά των διαφόρων αυτών σχηματισμών θεωρείται ότι είναι ενιαία.
2. Ανθρακικά πετρώματα, μεσοζωικής (τριαδικής-ιουρασικής) περιόδου. Καταλαμβάνουν σχετικά μεγάλη έκταση με δυο κύριες περιοχές εμφάνισης. Η μια βρίσκεται στη ΝΑ περιοχή της λίμνης (υψώματα Κορησού, προφήτη Ηλία) και η δεύτερη, εκτεινόμενη προς τα Δ της λίμνης Καστοριάς, αρχίζει από το ύψωμα Κορίτσα, εντός της λίμνης, και συνεχίζεται προς τα Δ - ΒΔ στην ορεινή ζώνη της Αγίας Τριάδας, καθώς και στην περιοχή του υψώματος Καζάνι (1.367 μέτρα).
3. Τριτογενείς σχηματισμοί, συνιστάμενοι κατά το μεγαλύτερο μέρος από μολασσικά ιζήματα της Μεσοελληνικής Αύλακας (Μειοκαινικής Περιόδου) και κατά μικρότερο ποσοστό από Πλειο-Πλειστοκαινικές λιμνοποτάμιες αποθέσεις. Τα μολασσικά ιζήματα εκτείνονται στη ΝΔ περιοχή της λίμνης και συνίστανται από μαργαϊκά στρώματα με ζώνες κροκαλοπαγών ψαμμιτών και ψαμμιτικών ασβεστόλιθων, ενώ υψηλότερα επικρατούν κυανές μάργες. Οι λιμνοποτάμιες αποθέσεις εμφανίζονται Ν-ΝΑ της λίμνης Καστοριάς και εκτείνονται μεταξύ του ρεύματος Γκιόλε και των ασβεστολιθικών πετρωμάτων κατά μήκος των οικισμών Μηλίτσας και Κωσταραζίου. Αποτελούνται από χαλαρά κροκαλοπαγή, αργίλους και χαλαρούς ψαμμίτες.
4. Τεταρτογενείς αποθέσεις συνιστάμενες από σύγχρονες χαλαρές προσχώσεις κοιλάδων και ιδιαίτερα του Αλιάκμονα, από παλαιότερες αναβαθμίδες, χειμαρρώδεις κώνους, ριπίδια, κορήματα και τέλος λιμναία ιζήματα περιμετρικά της λίμνης. Οι τεταρτογενείς αλλουβιακές αποθέσεις εκτείνονται σε όλη την πεδινή περιοχή γύρω από τη λίμνη της Καστοριάς και αποτελούνται από άμμους, ιλυώδεις άμμους και ιλύες με χαρακτηριστικές δομές διασταυρούμενης στρώσης κατά θέσεις.

Στον ακόλουθο χάρτη παρατίθενται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται στην περιοχή μελέτης μας.

ΥΠΟΜΝΗΝΑ



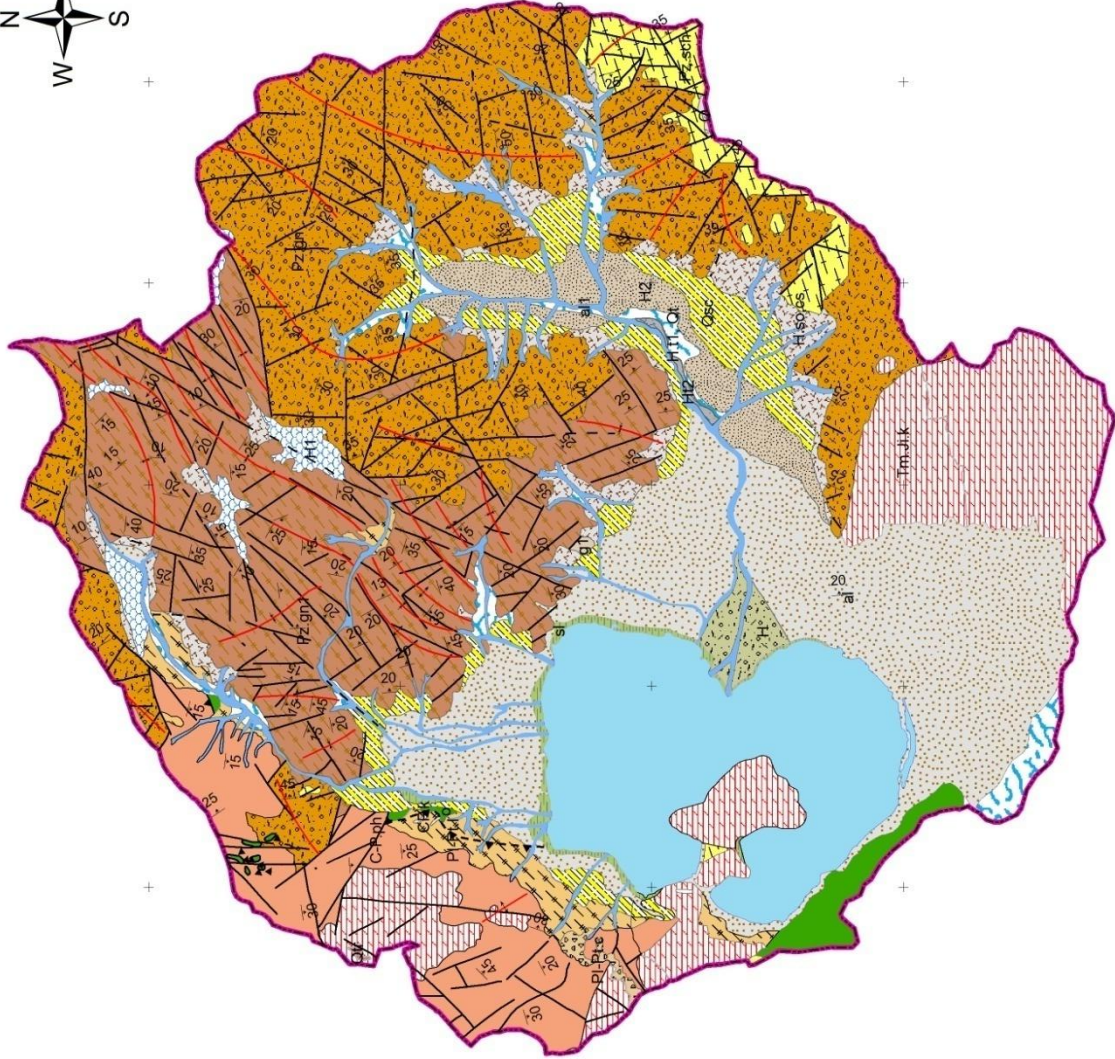
ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

- Αλλουβιακές αποθέσεις στις κοίτες ποταμών και χειμάρρων
- Αλλουβιακές αποθέσεις, υλικά προσχώσεων, ερυθρογαίες, άμμοι
- Ανώτερος ορίζοντας έντονα μεταμορφωμένου συστήματος-Σχιστόλιθοι
- Ελώδες περιοχές
- Ερυθρογαίες
- Καστανοκίτρινοι άμμοι, ιλύχοι άμμοι, αμμουχές (λύς)
- Κροκαλοπαγοί, ψαμμίτες, άμμοι
- Μεταβασικά πετρώματα-σερπεντίνιτες
- Παρεμβολές ερυθρών Ασβεστόλιθων
- Πλευρικά κορήματα, κώνοι κορημάτων
- Ποτάμιες Αναβαθμιδές
- Ποτάμιες και λιμναίες αποθέσεις
- Προσχύσεις Δελταϊκές
- Προσχύσεις μικρών λεκανών με υλικά από περιβάλλοντα πετρώματα
- Συσώρευση διαφόρων τύπων χονδροκλαστικών υλικών
- Σχηματιζόμενες ποτάμιες αναβαθμιδές

ΠΕΛΑΓΟΝΙΚΗ ΖΩΝΗ

- Ασβεστόλιθοι-Δολομιτικοί Ασβεστόλιθοι
- Οφιόλιθοι

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΛΙΜΝΗΣ ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ



ΠΕΛΑΓΟΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

- Λιθρακατέριμο-Κατώτερο Τριαδικό: Μετακροκαλοπαγοί, μεταψαμμίτες, φυλλίτες
- Κατώτερος ορίζοντας έντονα μεταμορφωμένου συστήματος: γνεύσαιο
- Γρανιτογενέσαιο Δ.Μακεδονίας

ΠΛΟΥΤΩΝΙΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

- Αμφιολιτικός-βασικός γρανίτης-γρανодиόρτης

ΡΗΓΜΑΤΑ

- Ορατό
- Πιθανό

Κλίσεις στρωμάτων

- Επώθηση
- Πιθανή Επώθηση

Άξονας Αντικλίνου

Άξονας Συγκλίνου

- Λίμνη Καστοριάς

- Όριο λεκάνης απορροής

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΘΗΝΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΡΟΛΗΨΗ & ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Η Λεκάνη απορροής της Λ.Καστοριάς
Διερεύνηση Πλημμυρικών φαινομένων - Κίνδυνος
με τη χρήση των Γ.Σ.Π.»

Χατζημυχαήλ Παρασκευή (Α.Μ 2818)

Επιβλέπων καθηγητής: Μιγκίριος Γεώργιος

Προβολικό σύστημα χάρτη: ΕΓΣΑ 87
Προηγούμενες χάρτες : 1:50.000 ΙΓΜΕ
Φύλλα χάρτη : Καστοριάς, Νεστόριο,
Μεσοσταμίας

ΑΘΗΝΑ 2011

Η μορφολογία της περιοχής είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού της πρόσφατης τεκτονικής δράσης, της γεωλογίας της περιοχής και της διάβρωσης του εδάφους που μέσω της κίνησης του νερού, μεταφέρει τα αποσπασμένα πετρώματα εναποθέτοντάς τα στις χαμηλότερες πεδινές περιοχές προκαλώντας έτσι την εξομάλυνση του γήινου αναγλύφου.

Με βάση λοιπόν την γεωλογική δομή και τη σύσταση των πετρωμάτων, όπως φαίνονται και στον ακόλουθο γεωλογικό χάρτη, το τοπογραφικό ανάγλυφο διακρίνεται σε 3 διαφορετικές ζώνες (Παυλόπουλος κ.α):

☞ **Ζώνη ορεινού ανάγλυφου (γρανιτογενεσίων-πλουτώνιων πετρωμάτων)**

:Η ζώνη αυτή περιλαμβάνει την ορεινή, κρυσταλλοσχιστώδη και πλουτωνική μάζα του όρους Βέρνου, η οποία κατεβαίνει μέχρι τη λίμνη της Καστοριάς. Το ανάγλυφο της ζώνης αυτής παρουσιάζει έντονο κατακόρυφο διαμελισμό και έντονα φαινόμενα κατά βάθος διάβρωσης.

☞ **Καρστικό ανάγλυφο (ανθρακικών πετρωμάτων)**

Περιλαμβάνει την ασβεστολιθική ανάπτυξη του μεσοζωικού καλύμματος που εκτείνεται από τα υψώματα Κορησού και Πύργου του Ασκιού όρους, μέσω του "Πετρώδους" υψώματος και της χερσονήσου "Κοριτσάς" της Καστοριάς, μέχρι το Τρικλάριο όρος βορειοδυτικά. Τα ανθρακικά πετρώματα γενικά παρουσιάζουν ανάγλυφο μορφής προχωρημένης καρστικοποίησης και πιο συγκεκριμένα ρωγμές, έγκοιλα, μικροσπήλαια, δολίνες και επιφάνειες επιπέδωσης. Το υδρογραφικό δίκτυο είναι αραιό και εμφανίζει εποχική απορροή. Η απορροή συντελείται κατά κύριο λόγο με εσωτερική στράγγιση. Τα υδατορεύματα παρουσιάζουν ροή μόνο σε περίπτωση μεγάλης εντάσεως και παρατεταμένων βροχών.

☞ **Το ανάγλυφο χαμηλών περιοχών:** Οι περιοχές αυτές συμπίπτουν με την παραλίμνια πεδινή έκταση και τη νότια ημιπεδινή περιοχή που καταλήγει στην κοιλάδα του ποταμού Αλιάκμονα και η οποία αποτελείται από ιζήματα της Μεσοελληνικής Αύλακας, πλειοπλειστοκαινικές και ολοκαινικές αποθέσεις. Στις χαμηλές περιοχές των τριτογενών και τεταρτογενών γεωλογικών σχηματισμών, το ανάγλυφο είναι γενικότερα ήπιο και ομαλό, με μικρές εδαφικές εξάρσεις και με μικρή κλίση. Στην κατηγορία αυτοί περιλαμβάνονται επίσης οι αλλουβιακοί κώνοι και τα ριπίδια που σχηματίζονται στις εξόδους των χειμάρρων και προς την πεδινή περιοχή, οι παλαιές ποτάμιες αποθέσεις στην περιοχή νότια της λίμνης και οι οποίες χαρακτηρίζονται από λοφώδες και κυματοειδές τοπογραφικό ανάγλυφο και τέλος η πεδινή παραλίμνια έκταση που χαρακτηρίζεται από οριζόντια σχεδόν επίπεδη τοπογραφία. Στην πεδινή αυτή παραλίμνια επίπεδη περιοχή και περιμετρικά της λίμνης,

εμφανίζονται σύγχρονες δελταϊκές αποθέσεις εις βάρος της λίμνης, που διακιολογεί και την σταδιακή μείωση της έκτασής της, οι οποίες προκαλούνται από την συνεχιζόμενη διάβρωση του ορεινού αναγλύφου. Χαρακτηριστικές είναι οι αναβαθμίδες που εμφανίζονται κατά μήκος του ρέματος Γκίολε και τα αμέτωπα των κρημνών στις Μεσοπλειστοκαινικές αποθέσεις.

5.1 ΟΡΙΣΜΟΙ

Ως υδρογραφικό δίκτυο ορίζεται το σύνολο των επιφανειακών ρευμάτων νερού (ποταμών, χειμάρρων, κτλ) που συνδέονται μεταξύ τους με καθορισμένο τρόπο και αποστραγγίζουν μια λεκάνη απορροής (Σωτηριάδης, 1984).

Λεκάνη απορροής για ένα ορισμένο σημείο της διαδρομής ενός υδατορεύματος, συνήθως φυσικού αλλά και τεχνητού, είναι η επιφάνεια S μιας υδρολογικής λεκάνης της οποίας η απορροή καταλήγει στο ορισμένο σημείο του υδατορεύματος. Η υδρολογική λεκάνη αποτελεί τον φυσικό αποδέκτη των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και δρα με όλα τα μορφολογικά, εδαφολογικά και φυσικά χαρακτηριστικά της σαν ένα σύστημα μετασχηματισμού των παραγόντων αυτών ορισμένο στο χώρο της λεκάνης απορροής (Ξανθόπουλος, 1989).

Ο υδροκρίτης είναι το όριο, το οποίο ορίζει την έκταση που καταλαμβάνει η λεκάνη απορροής ανάντη μιας δεδομένης διατομής A υδατορεύματος. Στο κυριότερο γεωμετρικό χαρακτηριστικό της λεκάνης απορροής είναι το εμβαδόν της SA . Αν και το σχήμα της λεκάνης απορροής είναι πάντα πολύπλοκο, έχουν προταθεί διάφοροι αδιάστατοι δείκτες που κωδικοποιούν το σχήμα της λεκάνης.

5.2 ΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ

Οι διάφορες διεργασίες του υδατικού ισοζυγίου που λαμβάνουν χώρα σε μια λεκάνη απορροής επηρεάζονται και από το μορφομετρικά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου τα οποία είναι αποτέλεσμα της τεκτονικής δράσης της περιοχής.

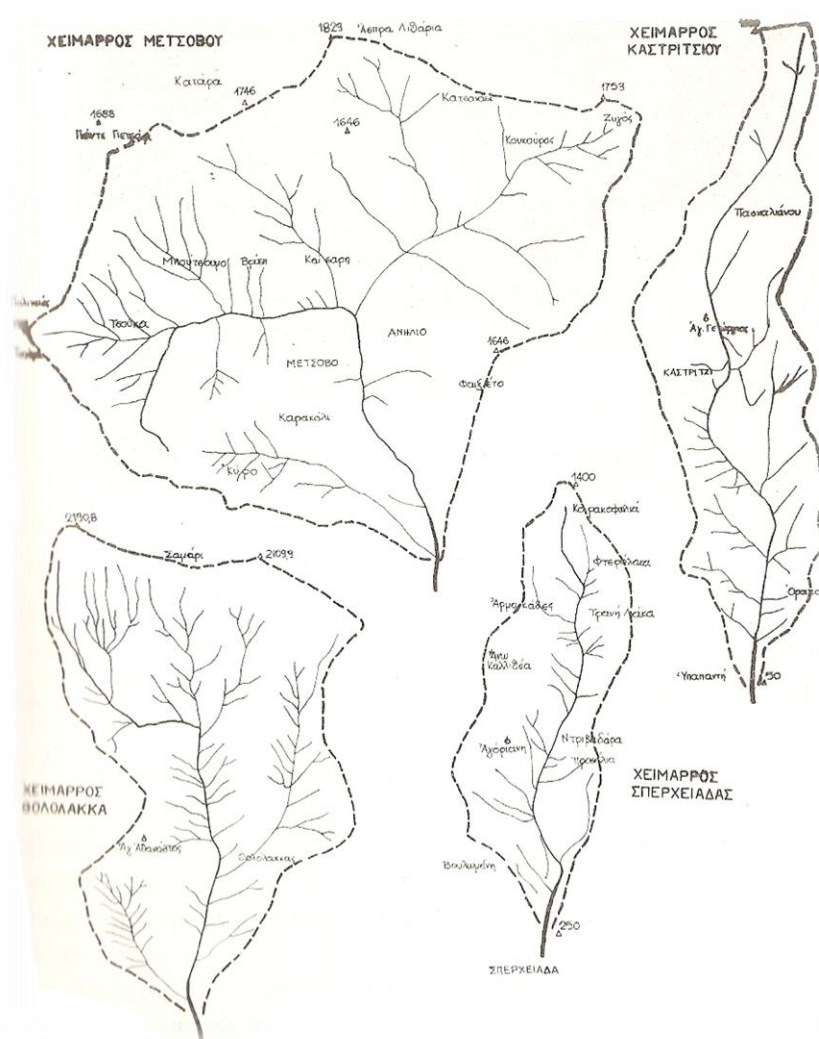
Παρακάτω δίνονται τα χαρακτηριστικά που συντελούν στη μορφολογία της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου (υδρογραφικά χαρακτηριστικά).

1) Χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής

- ✓ Το μέγεθος της λεκάνης : Εκφράζεται συνήθως σε km^2 και πολλαπλασιαζόμενο με τις παραμέτρους του υδατικού ισοζυγίου μας δίνει την ποσότητά τους εκφρασμένη σε όγκο και συνεπώς την δραστηριότητα του στο

υδάτινο δυναμικό της περιοχής με οφέλη ως προς την εκμετάλλευσή του αλλά και την κατασκευή έργων με στόχο την πρόληψη της περιοχής από τυχόν πλημμυρικά φαινόμενα κ.α

- ✓ Το σχήμα της λεκάνης : Το σχήμα της λεκάνης επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την ταχύτητα συγκέντρωσης της απορροής. Λεκάνες στρογγυλόμορφες έχουν ως αποτέλεσμα την γρήγορη μορφή συγκέντρωσης του νερού και επομένως μεγαλύτερη υδατοπαροχή, ενώ οι επιμήκεις λεκάνες χρειάζονται περισσότερο χρόνο συγκέντρωσης του νερού γι' αυτό εμφανίζουν μικρότερες υδατοπαροχές (Δ. Κ. Κωτούλας, Διευθετήσεις Χειμαρρικών Ρευμάτων, 1985, σελ. 25).



Σχήμα 6: Μορφές λεκανών απορροής στα διάφορα χειμαρρικά ρεύματα της Ελλάδας (πηγή: Κωτούλας Κ.Δ, Διευθετήσεις χειμαρρικών ρευμάτων, Μέρος Ι, Θεσ/νίκη 1985).

Η εκτίμηση του σχήματος της λεκάνης, η οποία μας δίνει το βαθμό στρογγυλομορφίας της, δίνεται από την σχέση E/L όπου E : το εμβαδό της επιφάνειας της λεκάνης σε Km^2 και L η περίμετρος της λεκάνης σε Km .

Το σχήμα της λεκάνης αντίστοιχα ορίζεται από τον:

- Ο δείκτης κυκλικότητας (circularity) ορίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας της λεκάνης προς την επιφάνεια κύκλου με περίμετρο ίδια με αυτή της λεκάνης (P_A):

$$\text{όπου } E_C = S_A / (P_A^2 / 4\pi)$$

- Ο δείκτης επιμήκυνσης (elongation) ορίζεται ως ο λόγος της πλευράς ενός τετραγώνου με επιφάνεια ίδια με αυτή της λεκάνης, προς ένα χαρακτηριστικό μήκος της λεκάνης L_A (π.χ. το μήκος από την έξοδο μέχρι το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης):

$$\text{όπου } E_L = (S_A)^{0.5} / L_A$$

- ✓ Το υψόμετρο: Αφορά το μέγιστο, μέσο και ελάχιστο υψόμετρο της λεκάνης που πλέον υπολογίζεται με την χρήση των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών.
- ✓ Τις κλίσεις εδάφους: Αντίστοιχα αφορά τη μέγιστη, μέση και ελάχιστη κλίση της λεκάνης.

Άλλα χαρακτηριστικά

- ✓ Γεωγραφική θέση
- ✓ Έδαφος/διηθητικότητα κ.α : Το σύμπλοκο εδάφους - φυτοκάλυψης ο οποίος αντιπροσωπεύει τον τύπο του εδάφους από υδρολογική άποψη και την κατηγορία φυτοκάλυψης και χρήσης γης ο οποίος εκφράζεται με τον αριθμό καμπύλης απορροής CN (Curve Number) (Τσακίρης, 1995) .

Η μέση τιμή του αριθμού καμπύλης απορροής CN υπολογίζεται από τον τύπο:

$$CN = \sum \left(\frac{A_i}{A} \right) * CN_i$$

όπου CN : Ο ζυγισμένος αριθμός καμπύλης της λεκάνης απορροής A_i (km^2): Η επιφάνεια που αντιστοιχεί στην κάθε κατηγορία χρήσης γης A (km^2): Η

επιφάνεια της λεκάνης απορροής A_i/A : Στο ποσοστό κάθε χρήσης γης CN_i : Ο αριθμός καμπύλης για κάθε κατηγορία χρήσης γης.

Οι κατηγορίες εδάφους από υδρολογική άποψη είναι τέσσερις.:

Κατηγορία Α: Εδάφη με υψηλή βασική διηθητικότητα και υψηλή διαπερατότητα. Συνήθως αμμώδη ή χαλικιώδη εδάφη.

Κατηγορία Β: Εδάφη με μέτρια βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα που αποτελούνται από μέσης μέχρι ελαφράς σύστασης εδάφη.

Κατηγορία Γ: Εδάφη με μικρή βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Περιλαμβάνουν εδάφη μέσης μέχρι βαριάς σύστασης.

Κατηγορία Δ: Εδάφη με πολύ μικρή βασική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Περιλαμβάνουν κυρίως αργιλώδη εδάφη, εδάφη με υψηλή στάθμη υπόγειου νερού ή με αδιαπέρατο στρώμα. Οι τιμές του αριθμού καμπύλης απορροής CN ανά κατηγορία χρήσης γης και υδρολογικού τύπου εδάφους βρίσκονται από τον πίνακα (Wanielista, 1978).

5.3 ΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

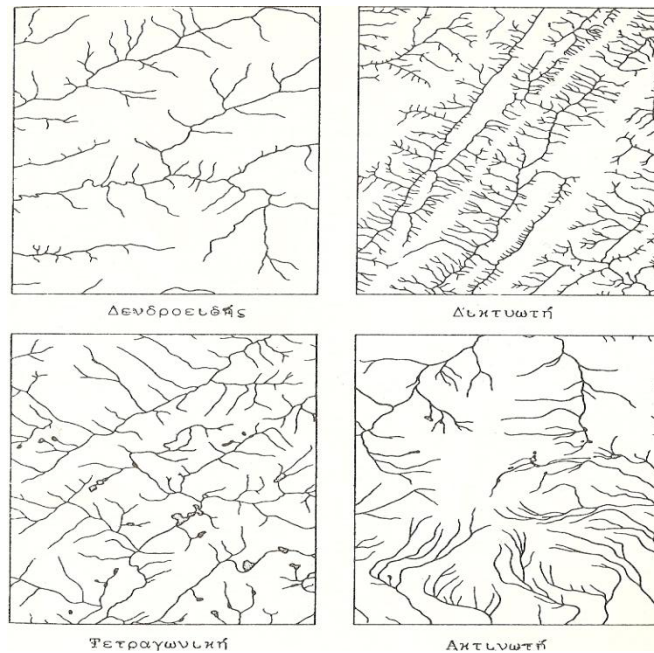
5.3.1 Σχηματισμός του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης

Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής αποτελείται από τα μισγάγγεια (τα μικρότερα ρεύματα), τα εμβρυώδη ρεύματα και τον κύριο βραχίονα. Η εξέλιξη και αρχική μορφή του υδρογραφικού δικτύου ακολουθεί δύο φάσεις και είναι οι ακόλουθες:

- 1) Αρχικά σχηματίζεται το σύστημα των κλιτύων και των μισγαγγείων τα οποία διαμορφώνονται με την επίδραση των αρχικών γεωτεκτονικών μεταβολών που λαμβάνουν χώρα στη συνέχεια. Μπορούμε να πούμε λοιπόν ότι η αρχική διαμόρφωση του αναγλύφου της λεκάνης απορροής των ρευμάτων οφείλεται κυρίως στην ορογέννηση.
- 2) Η μετέπειτα μορφολογική εξέλιξη των λεκανών είναι συνάρτηση του τρόπου δράσεως του νερού που απορρέει πάνω στα πετρώματα της λεκάνης απορροής. Όταν η παρασύρουσα δύναμη του νερού είναι μεγαλύτερη της αντίστασης που προβάλλουν τα πετρώματα τότε αρχίζουν οι διαβρώσεις στο χώρο της λεκάνης απορροής και έτσι αναπτύσσεται το υδρογραφικό της δίκτυο, το οποίο ανάλογα με την αντίσταση των

πετρωμάτων(ευδιάβρωτα ή όχι), σχηματίζεται πολυκλαδικό με τη μορφή δέντρου.

Στα ευδιάβρωτα πετρώματα π.χ στα ιζηματογενή έχουμε σχηματισμό πυκνού υδρογραφικού δικτύου ενώ στα ανθεκτικά πετρώματα π.χ γρανιτικά ο σχηματισμός του υδρογραφικού δικτύου είναι αραιός.



Σχήμα 7: Μορφές υδρογραφικού δικτύου (πηγή: Κωτούλας Κ.Δ, Διευθετήσεις χειμαρρικών ρεμάτων, Μέρος Ι, Θεσ/νίκη 1985).

5.3.2 Χαρακτηριστικά υδρογραφικού δικτύου

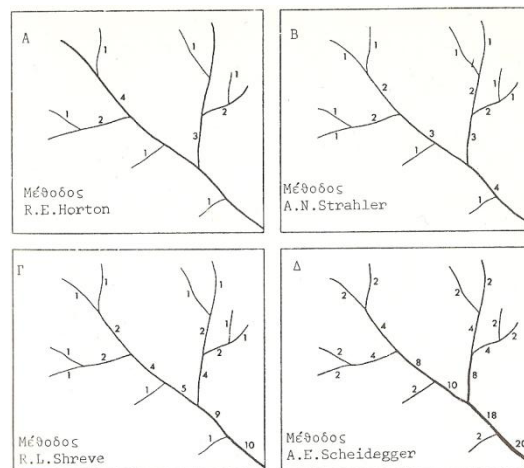
Οι αγωγοί ενός υδρογραφικού δικτύου διακρίνονται σε τάξεις¹ ανάλογα με τη θέση τους στο χώρο, το μέγεθός τους και τη σημασία τους. Η τάξη του υδρογραφικού δικτύου αντανακλά το βαθμό διακλαδώσεως των ρευμάτων μέσα στη λεκάνη και εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Τον αριθμό των φυσικών αγωγών που υπάρχουν
- Το μήκος των κοιτών τους
- Την έκταση της λεκάνης που αποστραγγίζει κάθε φυσικός αγωγός

¹ Τάξη ενός φυσικού αγωγού είναι η θέση του στην ιεραρχία του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης απορροής.

- ✓ Η τάξη του υδρογραφικού δικτύου : Για την αρίθμηση του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιούνται 4 μοντέλα (Strahler, Horton, Shreve, Scheidegger). Η πιο γνωστή είναι η μέθοδος Strahler.

Στο μοντέλο Strahler ορίζονται 1^η τάξης ρεύματα τα μικρότερα του υδρογραφικού δικτύου τα οποία δεν έχουν κανένα άλλο συμβάλλοντα, 2ης τάξης αυτά τα οποία έχουν σαν συμβάλλοντες τα ρεύματα 1^η τάξης και ακολουθούν αναλόγως και τα ρεύματα 3^η, 4^η .. n^η τάξης. Η κεντρική κοίτη για μια λεκάνη ή υπολεκάνη απορροής παίρνει τον αριθμό της μεγαλύτερης τάξης ενώ στην περίπτωση που έχουμε τη συμβολή δύο αγωγών, συμβάλλοντας θεωρείται εκείνος που έχει τι μικρότερο μήκος ή στραγγίζει τη μικρότερη επιφάνεια. Τα μοντέλα Shreve και Scheidegger περιγράφουν με λεπτομέρειες όλο το υδρογραφικό δίκτυο σε σχέση με το μέγεθος απορροής τους. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται τα τέσσερα μοντέλα ταξινόμησης ενός υδρογραφικού δικτύου.



Σχήμα 8: Μοντέλα αρίθμησης υδρογραφικών δικτύων (πηγή: Κωτούλας Κ.Δ, Διευθετήσεις χειμαρρικών ρεμάτων, Μέρος Ι, Θεσ/νίκη 1985).

- ✓ Η πυκνότητα : Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου D_A , ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού μήκους του υδρογραφικού δικτύου ΣL_A προς την επιφάνεια της λεκάνης S_A :

$$D_A = \Sigma L_A / S_A \quad \text{και έχει διαστάσεις } [L^{-1}].$$

- ✓ Η συχνότητα υδρογραφικού δικτύου (F): όπου είναι ο λόγος του συνόλου των ρευμάτων (ΣN) προς την έκταση της λεκάνης (A) σε αριθμό ρευμάτων/km².

$$F_A = \Sigma N_A / S_A.$$

- ✓ Η γεωμετρία του κύριου ρεύματος: Αφορά τη μέση απόσταση από τον υδροκρίτη μέχρι το υδατόρευμα είναι:

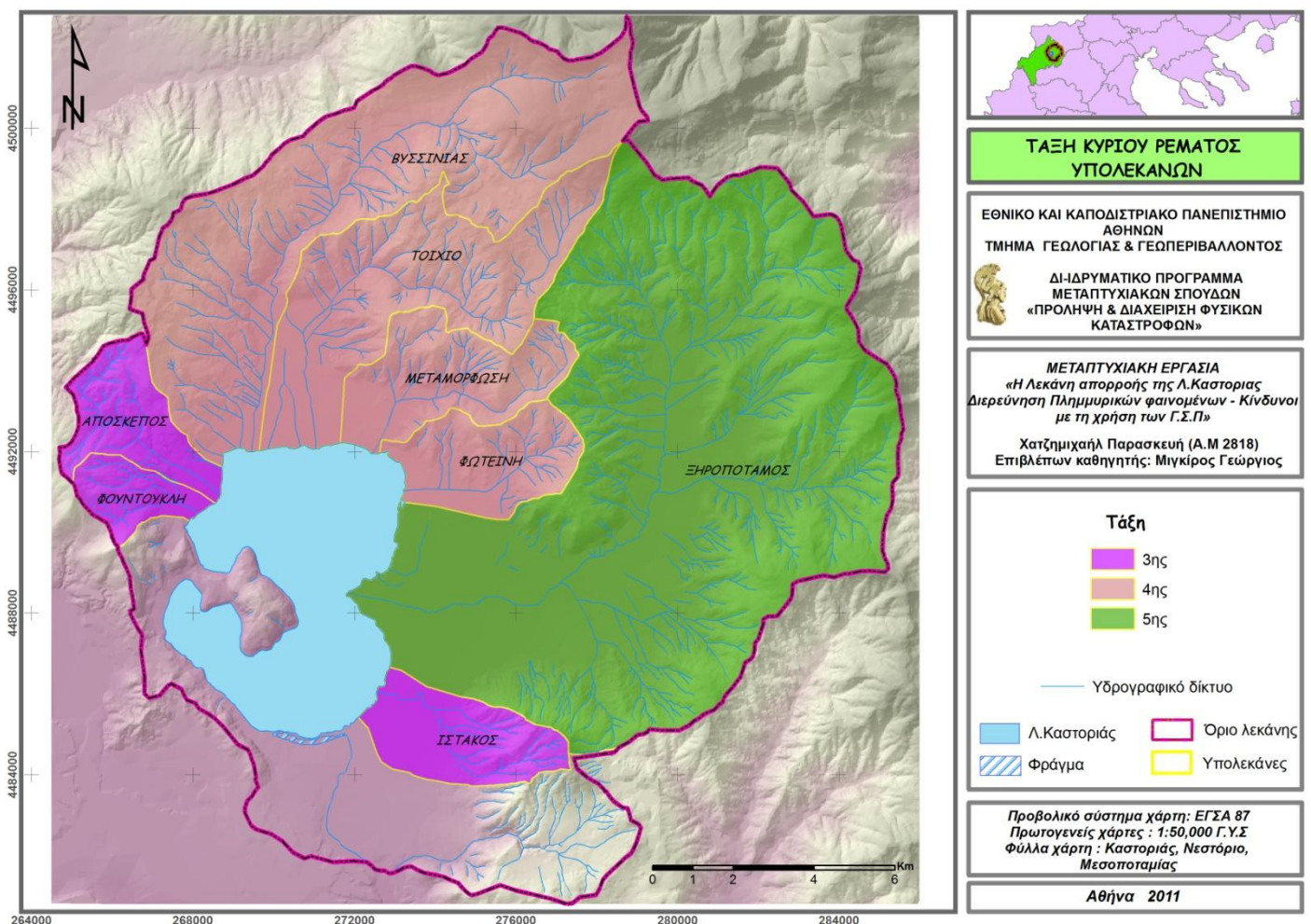
$$X_A = 1/(2 D_A). \quad (1.12) \quad \text{και}$$

Τη μέση διαδρομή μιας σταγόνας σε συνθήκες επίγειας ροής, μέχρι να φτάσει στο υδρογραφικό δίκτυο είναι:

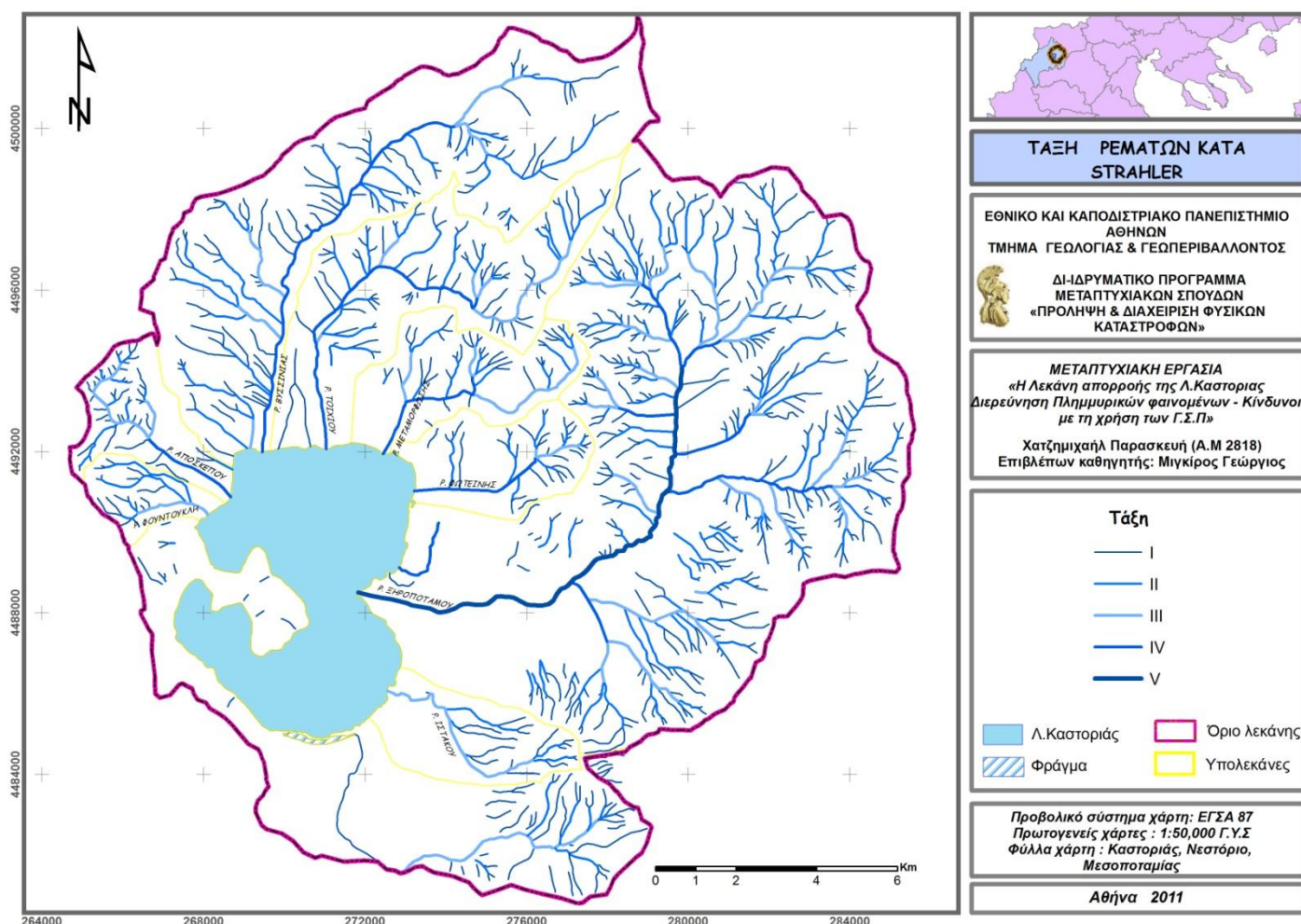
$$Y_A = X_A / 2 = (1/4 D_A).$$

Η μορφολογική ανάλυση των λεκανών και των υδρογραφικών τους δικτύων, παρέχει χρήσιμα εργαλεία για την ερμηνεία της συμπεριφοράς των ποτάμιων συστημάτων τόσο στις κανονικές συνθήκες, όσο και σε ακραία καιρικά φαινόμενα. Όπως είδαμε οι παράμετροι που συντελούν στη μορφολογία της λεκάνης είναι το σχήμα της λεκάνης, η υψομετρική της πληροφορία, η κλίση κ.α.

Η λεκάνη απορροής της λίμνης Καστοριάς έχει έκταση 231.993 Km² με μέσο υψόμετρο 948.48 m και μέση κλίση 26.93%. Διαιρείται σε 8 υπολεκάνες όπως φαίνεται και στον ακόλουθο χάρτη και στις οποίες υφίστανται φυσικά υδατορεύματα με τελικό αποδέκτη τη λίμνη Καστοριάς.



Όπως μπορούμε να δούμε από τον παραπάνω χάρτη, η μεγαλύτερη τάξη υπολεκάνης αποτελεί ο Ξηροπόταμος. Οι υπολεκάνες Βυssινιάς, Τοιχιού, Μεταμόρφωσης είναι 4^{ης} τάξης, ενώ 3^{ης} τάξης αποτελούν αυτές του Απόσκεπου, Φουντουκλή και Ίστακου και που όπως θα δούμε και στα επόμενα κεφ. Αποτελούν μικρότερης σημασίας υπολεκάνες όσων αφορά την εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων.



Στον παραπάνω χάρτη παρουσιάζεται η τάξη του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής μελέτης μας ταξινομημένο κατά Strahler.

Στον ακόλουθο πίνακα για τις οποίες δίνονται αναλυτικά οι τιμές που αφορούν την μορφομετρία τους και βάση των οποίων υπολογίστηκε ο δείκτης κυκλικότητας E_c για κάθε μια από αυτές ξεχωριστά.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ

A/A	Υπολεκάνες	Εμβαδό(km ²)	Περιμ.(Km)	Max Elev.	Mean Elev.	Max Slope(o)	Mean Slope(o)	Ec
1	ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗΣ	4,16	9.275	1228,689	855,625	55,967	14,413	0,6078
2	ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	7,76	14.716	1299,99	900,013	51,241	15,066	0,45
3	ΒΥΣΣΙΝΙΑΣ	48,91	42.830	2120	1126,819	58,875	16,854	0,3348
4	ΤΟΙΧΙΟΥ	25,81	32.259	1849,939	982,317	52,544	14,166	0,3115
5	ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	12,33	18.049	1420	908,445	55,6	16,447	0,47533
6	ΦΩΤΕΙΝΗΣ	9,69	14.015	1186,02	663,35	48,379	13,417	0,6197
7	ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΥ	113,98	53.180	1860,96	918,892	56,466	13,756	0,506
8	ΙΣΤΑΚΟΣ	9,34	13.563	1382,77	800,927	56,636	10,81	0,6377
ΛΕΚΑΝΗ	SUM	231,98	197.887,00					3,94283
ΑΠΟΡΡΟΗΣ	MEAN				927,57686		14,366125	
	Max			2120		58,875		0,6377
	Min							0,3115

Παρακάτω δίνονται τα χαρακτηριστικά των χειμάρρων και ρεμάτων συνδυασμένα με το γεωλογικό καθεστώς της περιοχής.(Pavloroulos et all. , Ερευνητικό 2000):

1. Ρ.Φουντουκλή: Πρόκειται για έναν πολύ μικρό χείμαρρο που έχει μετατραπεί ουσιαστικά σε υπόγειο αγωγό όπου η κοίτη του έχει διευθετηθεί στα 2 περίπου km. Στη μικρή λεκάνη απορροής του υπάρχουν 2 ξενοδοχεία και μερικά σπίτια. Η παροχή του είναι γενικά πολύ μικρή και μεγαλώνει μετά από μια βροχόπτωση.
2. Ρ.Απόσκεπος: Ο χείμαρρος αυτός αποτελεί έναν αρκετά μεγάλο σκουπιδότοπο στον οποίον απορρίπτονται ακόμη και μπάζα.
3. Ο χείμαρρος του Απόσκεπου (Σιούτιστας) εκχύνεται αυτοτελώς στο λιμναίο χώρο. Ο κώνος πρόσχωσής του φθάνει σχεδόν μέχρι τις όχθες της λίμνης γι' αυτό και ταυτίζεται με το δέλτα του.
4. Βυσσινιάς : Ο χείμαρρος αυτός δέχεται μεγάλη ποσότητα νερού από μεγάλη την υδρολογική του λεκάνη, με αποτέλεσμα να έχει αρκετό νερό. Μια περιοχή της κοίτης του χρησιμοποιείται ως σημείο πρόσβασης σε παρακείμενα χωράφια.
5. Τοιχίο: Το υπόστρωμα του είναι πετρώδες και συγκεντρώνει τα νερά μιας επίσης αρκετά μεγάλης υδρολογικής λεκάνης.
6. Μεταμόρφωση: Εδώ υπάρχουν συχνά αφρίζοντα νερά και σπάνια παρουσία νεκρών ψαριών.

7. Φωτεινή: Το ρέμα αυτό σπάνια έχει νερό ενώ σχεδόν δίπλα του βρίσκεται μια αποθήκη συλλογής και εκφόρτωσης μήλων.
8. Ξηροποτάμος: Καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του ανατολικού τμήματος της λεκάνης απορροής και εκβάλλει στη λίμνη ανάμεσα στις κοινότητες Μαυροχωρίου και Πολυκάρπης του Δήμου Μακεδονών. Πρόκειται για την μεγαλύτερη και πιο παλιά υπολεκάνη της περιοχής η οποία δέχεται μεγάλη ποσότητα νερού με το αμμώδες υπόστρωμα της. Ο ποταμοχείμαρρος του Ξηροποτάμου έχει μεγάλη σημασία για τη λίμνη της Καστοριάς, γιατί αποτελεί τον κυριότερο τροφοδότη της λίμνης, με νερό (περίπου 350lt/sec σε μέση ετήσια βάση), αλλά και με άφθονα φερτά υλικά τα οποία προσχώνουν τη λίμνη. Με τις προσχώσεις του στο ανατολικό τμήμα της λίμνης έχει μειώσει πολύ το βάθος της στο σημείο της εκβολής του (Βαφειάδης, 1983)
9. Ίστακος : Πρόκειται για ένα ρέμα με πολύ μικρή ροή ενώ στην περιοχή υπάρχει πλούσια βλάστηση.

Στον ακόλουθο πίνακα αντίστοιχα δίνονται οι τιμές των μορφομετρικών χαρακτηριστικών του υδρογραφικού δικτύου των υπολεκανών ξεχωριστά οι οποίες αφορούν το μήκος της κεντρικής κοίτης , την τάξη του υδρογραφικού δικτύου κατά Strahler, την πυκνότητα DA και την συχνότητα FA.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 : ΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

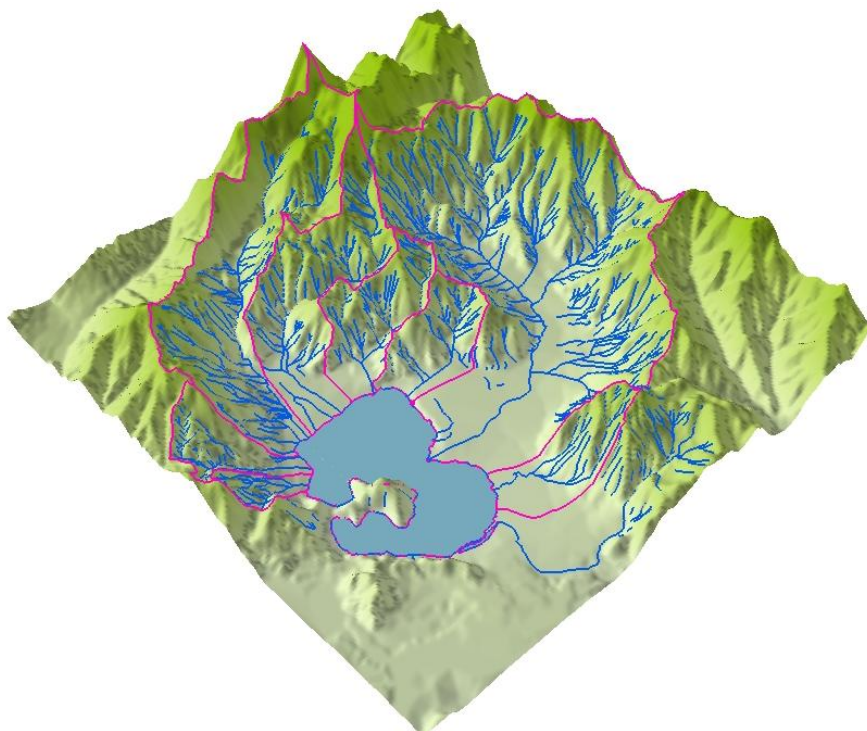
A/A	Υ/Δ	Μήκος(km)	Τάξη Υ/Δ	DA(πυκνότητα)	FA(συχνότητα)
1	Ρ.ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗ	3,11	3 ^{ης}	3,283	5,2834
2	Ρ.ΑΠΟΣΚΕΠΟΥ	6,22	3 ^{ης}	3,103	7,8612
3	Ρ.ΒΥΣΣΙΝΙΑΣ	15,45	4 ^{ης}	2,1299	3,292
4	Ρ.ΤΟΙΧΙΟΥ	13,47	4 ^{ης}	2,5253	4,417
5	Ρ.ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	7,47	4 ^{ης}	2,482	4,9475
6	Ρ.ΦΩΤΕΙΝΗΣ	4,67	4 ^{ης}	2,355	4,8489
7	Ρ.ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΥ	18,6	5 ^{ης}	2,3965	4,5797
8	Ρ.ΙΣΤΑΚΟΣ	6,35	3 ^{ης}	2,067	2,462
ΛΕΚΑΝΗ	SUM				
	Max			3,283	7,8612
	Min			2,067	2,462

Από τα παραπάνω μπορούμε να πούμε πως το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής μας παρουσιάζει έντονη ανάπτυξη και στη γενική του μορφή παίρνει την μορφή δεντρίτικού τύπου. Η στρογγυλομορφία της λεκάνης μας παραπέμπει σε μεγάλη ποσότητα συγκέντρωσης νερού και συνεπώς επιφανειακής απορροής. Για το λόγο αυτό θα πρέπει κάθε υπολεκάνη να αναλυθεί ως προς την μορφή της με στόχο την σύνδεση της μορφολογίας της, της επιφανειακής απορροής και της έντασης της βροχοπτώσης έναντι των πλημμυρικών φαινομένων.

Παρατηρώντας στο χάρτη τις υπολεκάνες και το υδρογραφικό δίκτυο, παρατηρούμε πως στο βόρειο τμήμα της λεκάνης (αποτελούμενη από τις υπολεκάνες Βυσσινιάς (Λάκκου), Τοιχίου και Μεταμόρφωσης), οι χείμαρροι αναπτύσσονται της ημιπεδινές διαδρομές τους σε παράλληλη έως συγκλίνουσα διάταξη και σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους, δίνοντας έτσι την εικόνα ενιαίου συνόλου στρογγυλόμορφης λεκάνης από τις επιμέρους επιμήκεις που την αποτελούν. Τα υδατορεύματα αυτά είναι 4^{ης} τάξης κατά Strahler και σχηματίζουν τους αλλουβιακούς κώνους πρόσχωσής τους σε σημαντική απόσταση από τις λιμναίες όχθες, στις οποίες δημιουργούν τα δελταϊκά τους ριπιδία.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και από το σκιασμένο ανάγλυφο, λόγω της τεκτονικής της περιοχής, το υδρογραφικό δίκτυο διαμορφώθηκε σε δύο περιοχές όπου τα 4 φυσικά υδατορεύματα έχουν κατεύθυνση βορρά-νότο και τελικό αποδέκτη τη λίμνη Καστοριάς ενώ τα υπόλοιπα 2 που βρίσκονται στο βόρειο τμήμα και με κατεύθυνση ανατολή-δύση, επεκτείνονται, με τελικό αποδέκτη τον ποταμό Αλιάκμονα. Το γεγονός αυτό ίσως να συνδέεται με την εμφάνιση ρήγματος στην περιοχή εκείνη και το οποίο έχει κατεύθυνση ανατολή-δύση (βλ. κεφ. 4.1 Τεκτονική).

Σχήμα 9: Τα ρέματα και οι υπολεκάνες της λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς σε υπέρθεση με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους



Ο Παλαιοπόταμος (Ξηροπόταμος) εμφανίζει αυτοτελή ανάπτυξη, είναι 5^{ης} τάξης και παίρνει τη μορφή δενδριτικού τύπου. Κάθε κλάδος του διαμορφώνει αυτοδύναμο κώνο απόθεσης. Στη θέση εκβολής του χειμάρρου στη λίμνη σχηματίζεται ένα δελταϊκό ριπίδιο το οποίο αναπτύσσεται με κατεύθυνση δυτική προς το "Βουνό".

Τα υδατορεύματα που τροφοδοτούν τη λίμνη της Καστοριάς διακρίνονται από άποψη μεγέθους των λεκανών απορροής τους σε τρεις κατηγορίες (Τσαυλόπουλος):

- Μέσου μεγέθους υδατορεύματα: Σε αυτά ανήκει ο Ξηροπόταμος με λεκάνη απορροής $E = 113,98 \text{ km}^2$, η οποία καταλαμβάνει τα 51,29% της λεκάνης απορροής της λίμνης, για αυτό και ασκεί καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία της. Ο Παλαιοπόταμος (Ξηροπόταμος) εμφανίζει αυτοτελή ανάπτυξη. Κάθε κλάδος του διαμορφώνει αυτοδύναμο κώνο απόθεσης. Στη θέση εκβολής του χειμάρρου στη λίμνη σχηματίζεται ένα σαφές, δελταϊκό ριπίδιο, το οποίο αναπτύσσεται με κατεύθυνση δυτική προς το "Βουνό".
- Μικρού μεγέθους υδατορεύματα: Εδώ υπάγονται όλα τα λοιπά ρέματα που τροφοδοτούν τη λίμνη, με λεκάνες απορροής $E > 5 \text{ km}^2$. Πρόκειται για τους χείμαρρους Απόσκεπου (Σιούτιστας), Βυσσινιάς (Λάκκου), Τοιχίου, Μεταμόρφωσης και Φωτεινής. Καταλαμβάνουν συνολικά έκταση $E = 113,84 \text{ km}^2$, η οποία αντιστοιχεί στα 35,23% της λεκάνης απορροής της λίμνης, για αυτό και μπορούν να ασκούν ως σύνολο σημαντική επίδραση στην όλη λειτουργία της λίμνης.
- Ενδιάμεσες επιφάνειες απορροής: Αποτελούν οι επιφάνειες που παρεμβάλλονται μεταξύ των ορεινών λεκανών των ρεμάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, καθώς και οι επιφάνειες ρεμάτων με $E < 5 \text{ km}^2$. Η συνολική έκτασή τους ανέρχεται σε $13,5 \text{ km}^2$ (13,48%), για αυτό και η σημασία τους παραμένει περιορισμένη ως ασήμαντη.

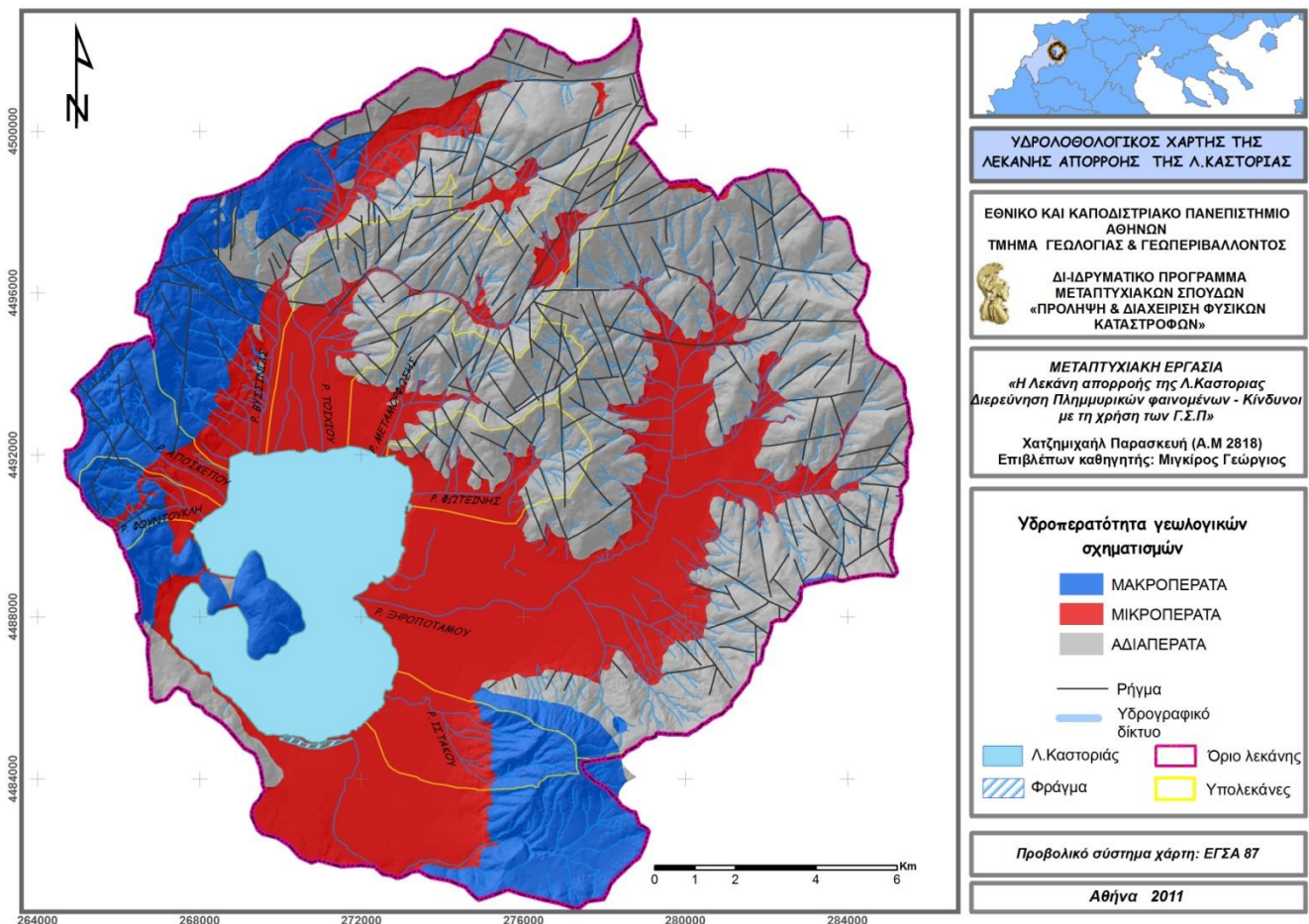
Οι εκβολές των χειμαρρικών υδατορευμάτων στον λιμναίο χώρο συγκεντρώνονται στο ΒΑ τέταρτο της λιμναίας περιμέτρου και εκτείνονται σε μήκος ακτών 10 km, που αρχίζει από τα ανάντη της Καστοριάς και καταλήγει στο Μαυροχώρι (απέναντι από "Βουνό"). Μεταξύ των εκβολών των ρεμάτων μεσολαβούν αποστάσεις από 1.200 έως 4.400 m.

Οι συνθήκες ροής του υδρογραφικού δικτύου εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως η λιθολογία της περιοχής, η τεκτονική, η κλίση του γήινου αναγλύφου, το κλίμα και οι ανθρώπινες επεμβάσεις. Κάθε γεωλογικός σχηματισμός έχει συγκεκριμένη υδρολιθολογική συμπεριφορά η οποία εξαρτάται από την πετρολογική σύσταση, την κοκκομετρική σύνθεση, το βαθμό διαγενέσεως, την τεκτονική καταπόνηση και το βαθμό διάρρηξης και αποσάθρωσης των πετρωμάτων.

Η υδροπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών αποτελεί και αυτή με τη σειρά της έναν σημαντικό παράγοντα που συμβάλλει στο φαινόμενο της διάβρωσης. Εντατικές διαβρώσεις εμφανίζονται στις περιοχές όπου καλύπτονται από αδιαπέρατους σχηματισμούς λόγω του ότι η επιφανειακή απορροή σε αυτά τα σημεία είναι μεγάλη, η κατείδυση μικρή και συνεπώς ο συντελεστής ερημοποίησης αυξάνεται.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής μελέτης μας χωρίστηκαν σε 3 κατηγορίες βάση της ικανότητάς τους αποθήκευσης και διακίνησης του υπόγειου νερού και έχουν ως εξής:

1. Μακροπερατοί: Το νερό κυκλοφορεί διαμέσου των πόρων που επικοινωνούν μεταξύ τους όπως στους ψαμμίτες, τα κροκαλοπαγή κ.α
2. Μικροπερατοί: Το νερό κυκλοφορεί διαμέσου των ρωγμών και ασυνεχειών όπως συμβαίνει στους ασβεστόλιθους και τα μάρμαρα.
3. Αδιαπέρατοι: Στην κατηγορία αυτή ανήκουν όσα έχουν αργιλική σύσταση (πηλίτες, μάργες, σχιστόλιθοι κ.α) και δεν επιτρέπουν την διέλευση του νερού .



Στην περιοχή μελέτης μας και βάση του υδρολιθολογικού χάρτη που κατασκευάστηκε, οι αδιαπέρατοι σχηματισμοί εμφανίζονται στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής και πιο συγκεκριμένα βόρεια και κεντρικά αυτής όπου έχουμε και τη μεγαλύτερη διάβρωση.

Μικροπερατοί σχηματισμοί εμφανίζονται κατά μικρότερο ποσοστό σε κάποια τμήματα βόρεια της περιοχής, ενώ μεγαλύτερη έκταση καταλαμβάνουν στο ανατολικό και νότιο-νοτιοδυτικό κομμάτι. Τέλος η έκταση που καταλαμβάνουν οι μακροπερατοί σχηματισμοί είναι πολύ μικρή και εμφανίζονται στο νοτιανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης μας.

Το πιθανό ενεργό ρήγμα στο βόρειο τμήμα της λεκάνης (βλ. κεφ. Τεκτονική) δικαιολογεί και τον έντονο τεκτονισμό της είναι σημαντικός με αρκετές διακλαδώσεις, ρωγμώσεις και ασυνέχειες πράγμα που ευνοεί την αποσάθρωση. Στις εκτάσεις αυτές όπου συγκροτούνται από ανθρακικά πετρώματα, εμφανίζονται έντονα καρστικά φαινόμενα και αραιό υδρογραφικό δίκτυο.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και από τον παραπάνω χάρτη, οι μεγαλύτερες τάξεις του υδρογραφικού δικτύου (4ης και πάνω) εμφανίζονται σε μικροπερατούς σχηματισμούς σε αντίθεση με τις μικρότερες τάξεις οι οποίες εμφανίζονται στο ορεινό τμήμα της περιοχής και πάνω σε αδιαπέρατους σχηματισμούς.

Η λεκάνη απορροής της λίμνης Καστοριάς αποτελείται κατά το μεγαλύτερο ορεινό μέρος της από γνευσιογρανιτικά και μεταμορφωμένα σχιστολιθικά πετρώματα τα οποία ανήκουν στην κατηγορία των αδιαπέρατων σχηματισμών. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να λειτουργεί υπέρ της επιφανειακής απορροής γεγονός το οποίο μαρτυρά και το έντονο υδρογραφικό δίκτυο αλλά και βλάστησης στις περιοχές αυτές.

Σε αντίθεση με τα παραπάνω, τα ασβεστολιθικά πετρώματα που εμφανίζονται βόρεια της λεκάνης, λειτουργούν υπέρ της κατείσδυσης λόγω της καρστικοποίησής τους και του βαθμού διάρρηξης τους.

Οι εμφανίσεις των ασβεστολιθικών πετρωμάτων παρουσιάζουν ιδιαίτερο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον διότι συνδέονται με την εκδήλωση αξιόλογων καρστικών πηγών εκ των οποίων κάποιες ρυθμίζουν τη δίαιτα της λίμνης Καστοριάς και άλλες τροφοδοτούν ορισμένους υδροφόρους γεωλογικούς σχηματισμούς της παραλίμνιας περιοχής. Κατά κανόνα τα ανθρακικά αυτά πετρώματα είναι διερρηγμένα και καρστικοποιημένα σε σημαντικό βαθμό και εμφανίζουν αραιό υδρογραφικό δίκτυο (Pavlopoulos et al.).

Στο πεδινό τμήμα της λεκάνης και περιμετρικά της λίμνης εμφανίζονται οι τεταρτογενείς χαλαροί σχηματισμοί οι οποίοι επιδρούν σημαντικά στην επιφανειακή απορροή.

Ο χείμαρρος του Απόσκεπου (Σιούτιστας) εκχύνεται αυτοτελώς στο λιμναίο χώρο. Ο κώνος πρόσχωσής του φθάνει σχεδόν μέχρι τις όχθες της λίμνης γι' αυτό και ταυτίζεται με το δέλτα του.

Τα υδατορεύματα των χειμάρρων Βυσσινιάς (Λάκκου), Τοιχίου και Μεταμόρφωσης που όπως είδαμε δίνουν μια ενιαία εικόνα, σχηματίζουν τους αλλουβιακούς κώνους πρόσχωσής τους σε σημαντική απόσταση από τις λιμναίες όχθες, στις οποίες δημιουργούν τα δελταϊκά τους ριπίδια.

Στη λίμνη παρατηρούνται οι ακόλουθες κινήσεις υδάτων(Παυλόπουλος et al. 2009):

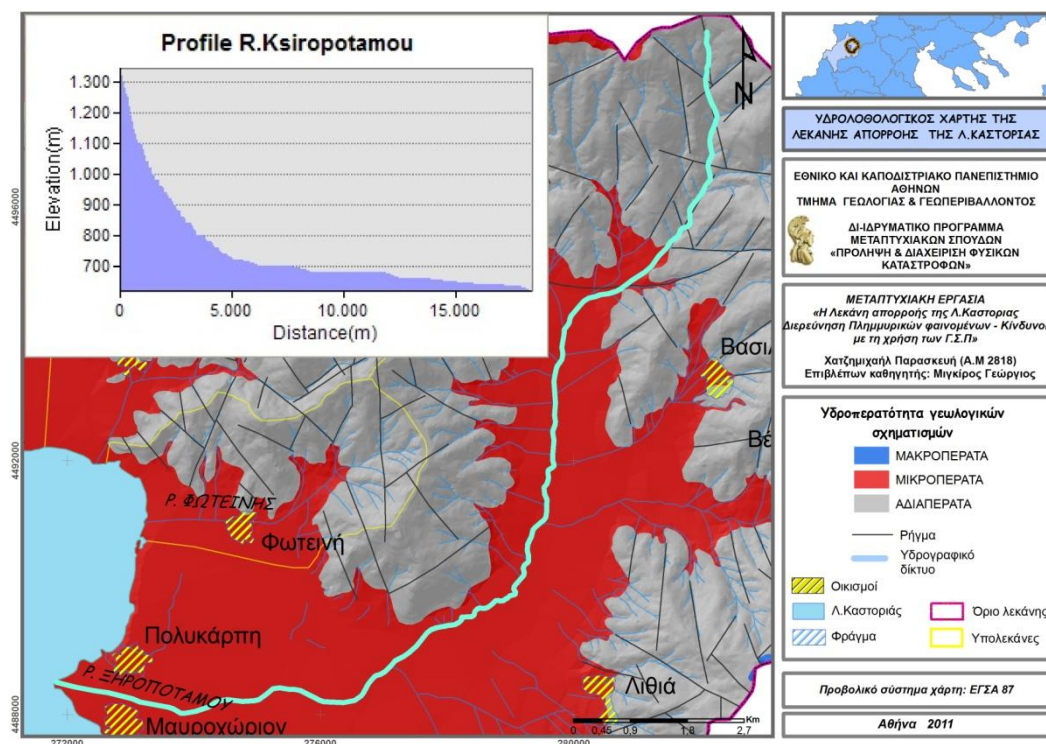
- Μια γενική, βραδεία, μόνιμη ροή από το άνω τμήμα της λίμνης, στο οποίο εισρέουν νερά διαφόρων χειμαρρικών ρεμάτων, προς το κάτω τμήμα, όπου αυτά εκρέουν διαμέσου της διώρυγας στη θέση "Γκιόλε".
- Ροές, που οφείλονται στους διάφορους πνέοντες ανέμους και δευτερευόντως στη μεταβολή της πυκνότητας των νερών λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της λίμνης.
- Ροές στο υπολίμνιο, που σχηματίζονται κατά τις πλημμυρικές παροχές των χειμαρρικών ρεμάτων.

5.5.1 Επιμήκη Προφίλ

Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των ποταμών ελέγχονται από πάρα πολλούς παράγοντες όπως είναι η κλίση της κοίτης, η απομόνωση που παρουσιάζει το υδρογραφικό δίκτυο, τα υδρολογικά χαρακτηριστικά και η πλημμυρική ιστορία, ο τύπος των φερτών υλικών και η ποσότητα αυτών, η βλάστηση και ο ανθρώπινος παράγοντας. Σε γενικές γραμμές οι πρώτοι τρεις από αυτούς τους παράγοντες αλλάζουν συστηματικά κατά μήκος της κοίτης, από τα ανάντη στα κατόντη, σε κάθε ποταμοχειμάρριο σύστημα. Η κλίση μειώνεται, η παροχή αυξάνεται (σε υγρά περιβάλλοντα) και το υδρογραφικό δίκτυο γίνεται λιγότερο απομονωμένο καθώς τα ποτάμια εισέρχονται στα παραθαλάσσια ή αλλουβιακά τους πεδία. Παρόλο που οι γεωλογικοί παράγοντες επιφέρουν σημαντικές τοπικές μεταβολές σ' αυτές τις γενικές τάσεις, κάτι που είναι φανερό στα επιμήκη προφίλ, κατά κύριο λόγο είναι οι αλλαγές αυτών των μεταβλητών που αναφέρθηκαν πιο πάνω, κατά μήκος της κοίτης, που προκαλούν τις σημαντικές αλλαγές στη μορφολογία που είναι εμφανής σε όλα τα ποταμοχειμάρρια συστήματα (Knighton, 1999).

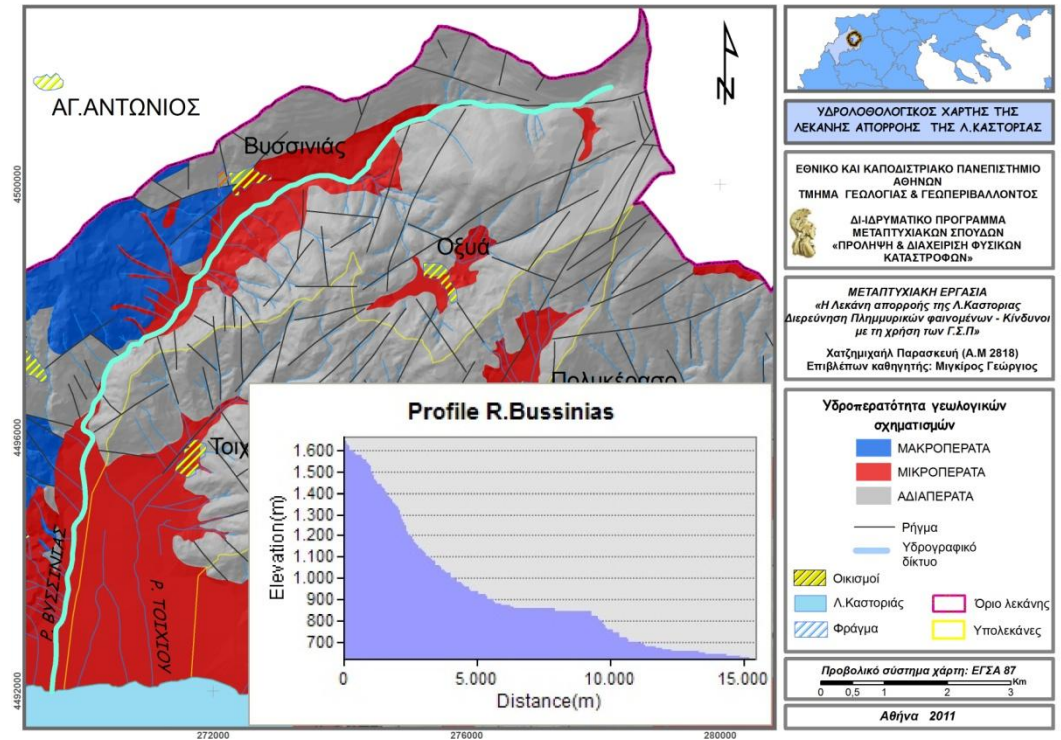
Τα επιμήκη προφίλ μας δίνουν μια εικόνα για την εξέλιξη του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής όπου σε συνδυασμό με την γεωμορφολογία και τοπογραφία της περιοχής μπορούν να εντοπιστούν πιθανές περιοχές που είναι ευαίσθητες σε πλημμυρικά φαινόμενα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα επιμήκη προφίλ των 8 ρεμάτων της περιοχής μελέτης μας.

ΠΡΟΦΙΛ ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΥ



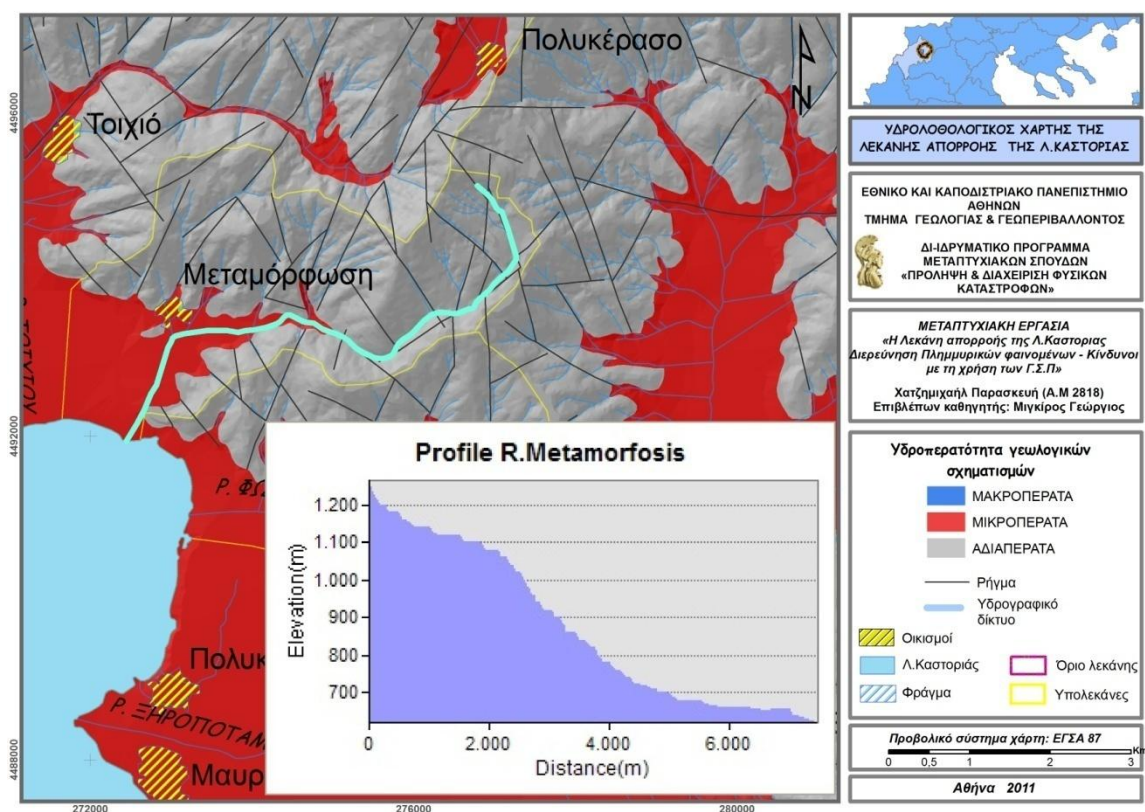
Η επιμήκης τοπογραφική τομή του ρέματος Ξηροποτάμου έχει μήκος 18.5 km και αρχίζει σε υψόμετρο 1300 m. Από τα 1300 m μέχρι τα 700 διασχίζει αδιαπέρατους σχηματισμούς ενώ από τα 700 - 620 m διασχίζει μικροπερατούς σχηματισμούς. Απότομες αλλαγές στην κλίση εμφανίζονται σε υψόμετρο 700 m σε απόσταση 5 Km, στο σημείο δηλαδή όπου γίνεται εναλλαγή αδιαπέρατων και μικροπερατών σχηματισμών. Μέχρι και αυτό το σημείο το ρέμα τέμνεται από ρήγματα ενώ από τα 1300 μέχρι τα 1100 περίπου ένα ρήγμα έχει περίπου την ίδια διεύθυνση με το ρέμα. Από τα 700 m και μετά και σε απόσταση 5 - 18.5 km η κλίση του ρέματος ομαλοποιείται και ελαττώνεται. Στο σημείο αυτό υπάρχει και η πιθανότητα εκδήλωσης πλημμυρικού φαινομένου σε συνάρτηση με μια ραγδαία βροχόπτωση.

ΠΡΟΦΙΛ Ρ. ΒΥΣΣΙΝΙΑΣ



Η επιμήκης τοπογραφική τομή του ρέματος Βυσσινιάς έχει μήκος 15 km και ξεκινά σε υψόμετρο 1600 m. Απότομη αλλαγή κλίσης εμφανίζεται σε υψόμετρο 900 m. Από τα 900 m και σε μια απόσταση από τα 5 - 10 km η κλίση ελαττώνεται και στο σημείο αυτό υπάρχει συσσώρευση υδάτινου όγκου που έρχεται από τα ψηλότερα σημεία. Μέχρι τα 1160 m και απόσταση περίπου 3 Km το ρέμα διασχίζει αδιαπέρατους σχηματισμούς. Στην απόσταση αυτή το ρέμα διέρχεται σχεδόν πάνω από ένα ρήγμα. Από τα 1160 - 840 m το ρέμα διασχίζει μικροπερατούς σχηματισμούς. Στα 840 - 700 m παρατηρείται μια ακόμη αλλαγή κλίσης. Στο σημείο αυτό η έκταση των μικροπερατών σχηματισμών από όπου διέρχεται το ρέμα είναι πολύ μικρή ενώ δεξιά και αριστερά αυτού παρεμβάλλονται αδιαπέρατοι σχηματισμοί ενώ ταυτόχρονα σημαντική είναι και η εμφάνιση των ρηγμάτων που τέμνουν το ρέμα. Από τα 700 m και μετά η κλίση ελαττώνεται και ομαλοποιείται. Στο σημείο αυτό εκτιμάται η εμφάνιση πλημμύρας σε συνδυασμό με την βροχοπτώση.

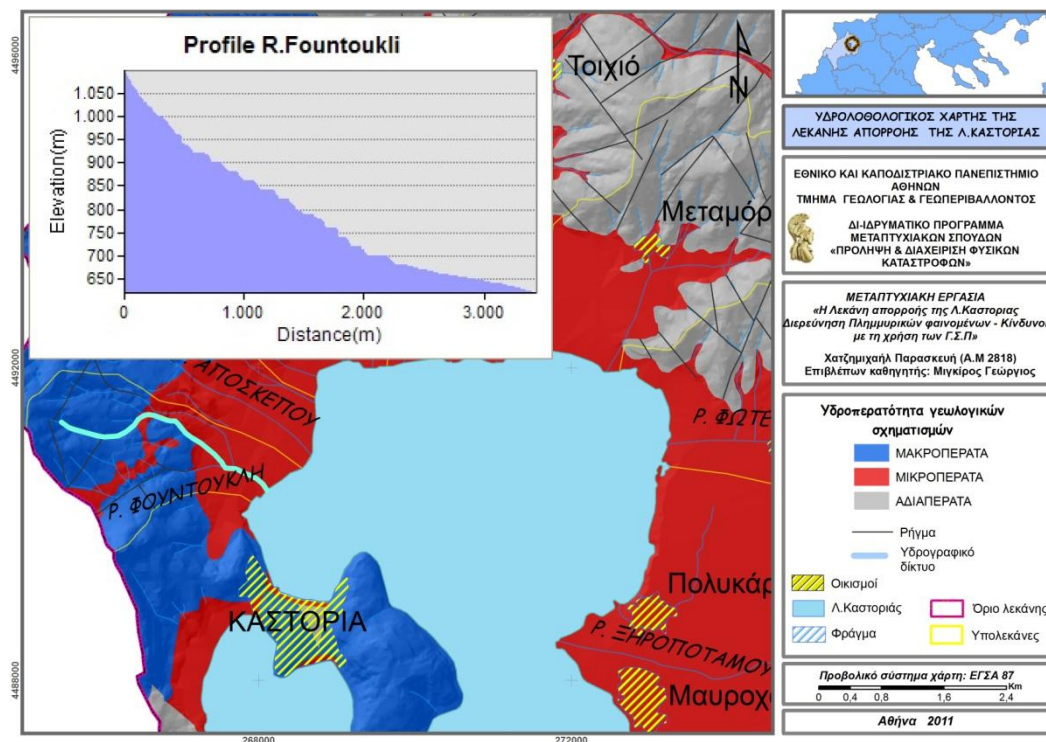
ΠΡΟΦΙΛ Ρ.ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ



Η τοπογραφική τομή του ρέματος Μεταμόρφωσης έχει μήκος 7 km και ξεκινάει σε υψόμετρο 1300 m. Από τα 1300 μέχρι τα 700 m διασχίζει αδιαπέρατους σχηματισμούς. Από τα 1100 m μέχρι τα 700 και σε απόσταση περίπου 2 Km παρατηρείται απότομη αλλαγή κλίσης καθώς το ρέμα διέρχεται από ρήγματα κάθετα σε αυτό. Από τα 700 m και έπειτα η κλίση ομαλοποιείται, το ρέμα διέρχεται από μικροπερατούς σχηματισμούς και στο σημείο αυτό υπάρχει πιθανότητα εκδήλωσης πλημμυρικού φαινομένου.

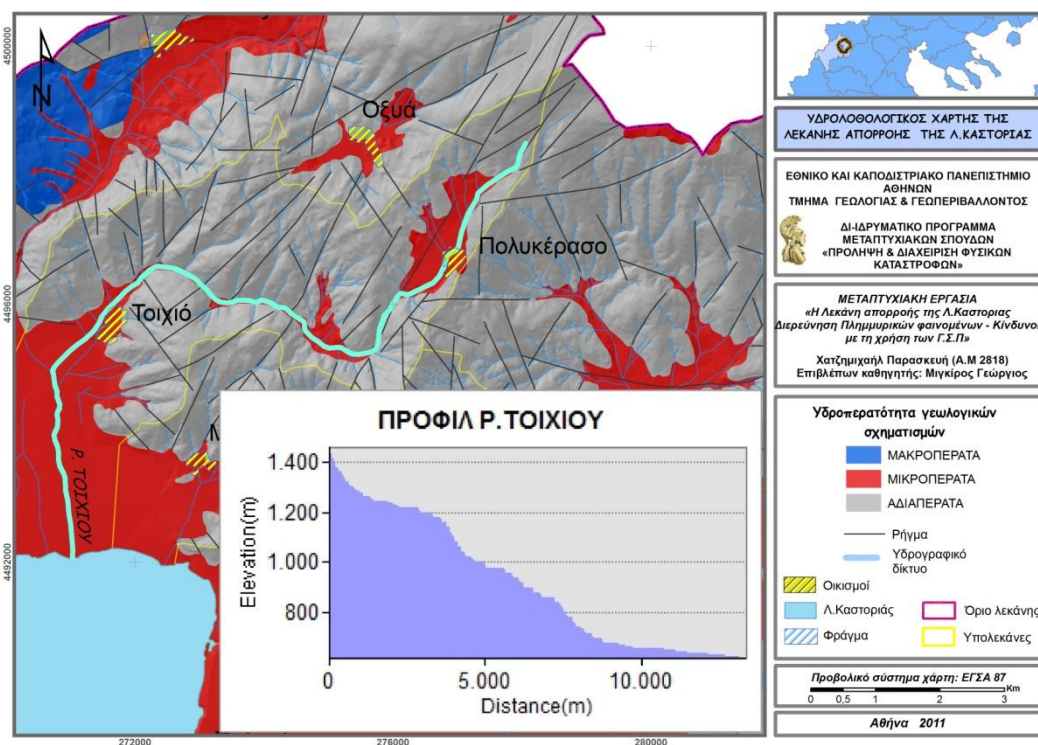
ΠΡΟΦΙΛ Ρ.ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗ

Η επιμήκης τοπογραφική τομή του ρέματος Φουντουκλή έχει μήκος 3.6 Km και ξεκινά σε υψόμετρο 1100 m. Μέχρι τα 820 m και σε απόσταση 1 Km το ρέμα διέρχεται από μακροπερατούς σχηματισμούς και από τα 820 - 620 m από μικροπερατούς. Σε υψόμετρο 1020 m ένα ρήγμα τέμνει το ρέμα στα 880- 840 m το ρέμα διέρχεται από ένα δεύτερο ρήγμα. Σε σύγκριση με τα προηγούμενα προφίλ η κλίση του ρέματος αυτού είναι πιο ομαλοποιημένη χωρίς να υπάρχουν έντονες αλλαγές. Μια μικρή αλλαγή κλίσης παρατηρείται σε υψόμετρο περίπου 650 m όπου και η κλίση αρχίζει να μειώνεται.

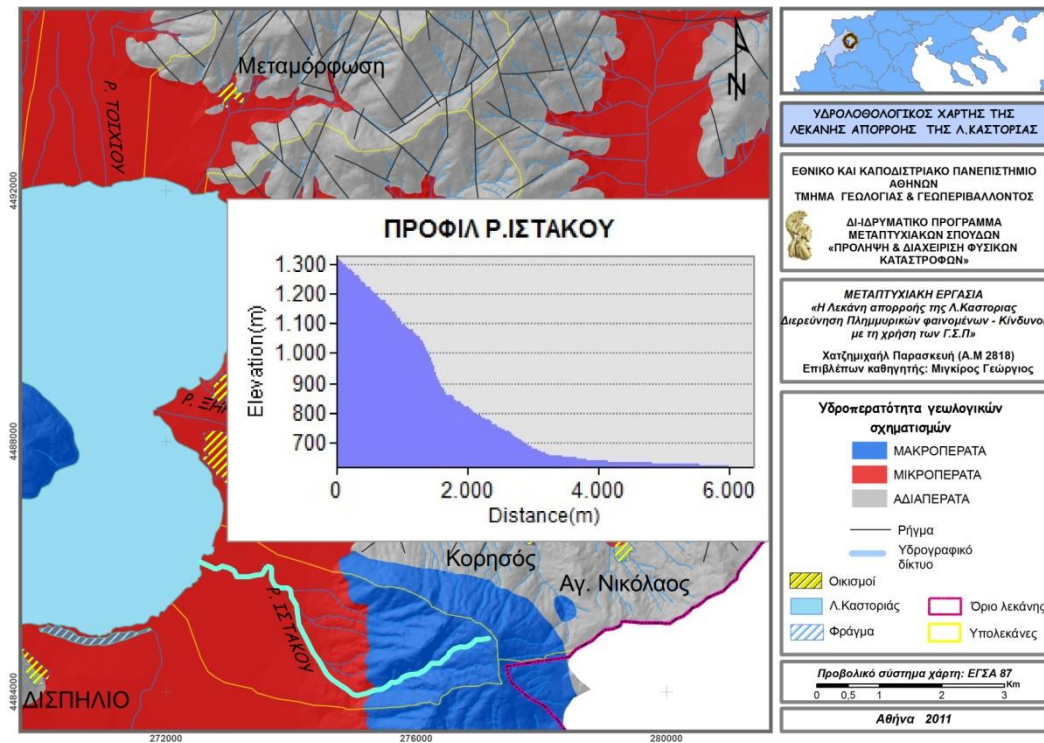


ΠΡΟΦΙΛ Ρ. ΤΟΙΧΙΟΥ

Το προφίλ του ρέματος Τοιχίου εμφανίζει αλλαγή στην κλίση του στα 640 m περίπου υψόμετρο όπου καθιστά τις περιοχές αυτές ευαίσθητες προς τον πλημμυρικό κίνδυνο.



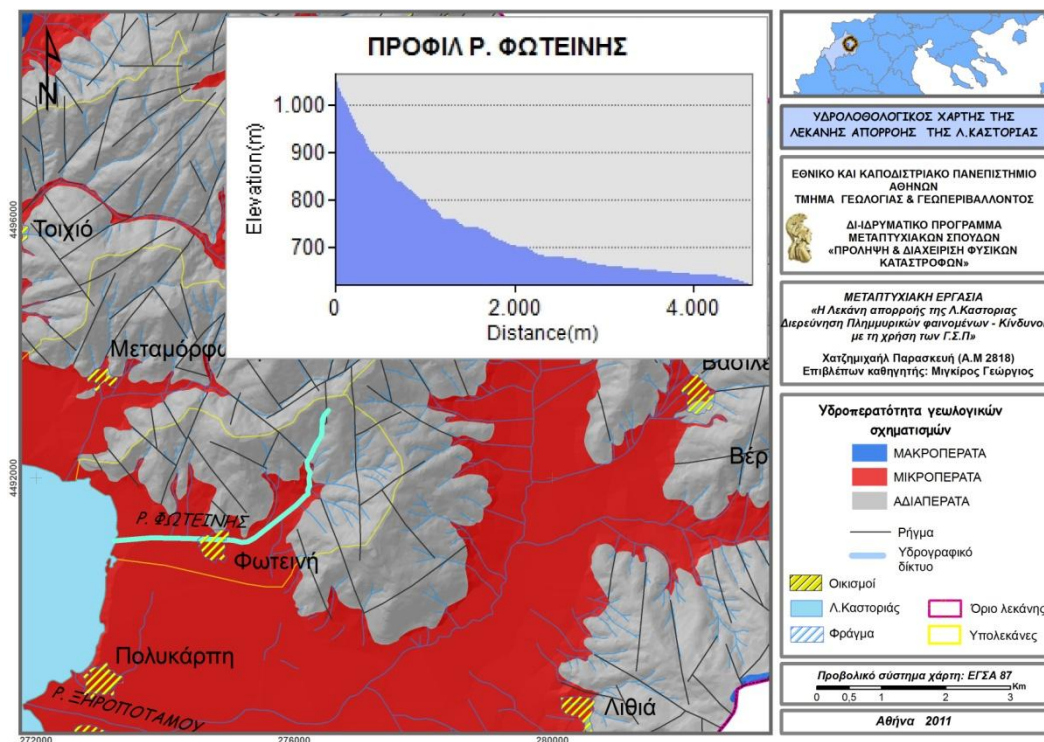
ΠΡΟΦΙΛ Ρ. ΪΣΤΑΚΟΥ



Το προφίλ του ρέματος αυτού εμφανίζει απότομη αλλαγή κλίσεις στα 700 m περίπου υψόμετρο, δικαιολογώντας έτσι και την εμφάνιση μεγάλης δυναμικής ενέργειας στο στόμιο του όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο, η οποία συνδυασμένη με άλλα χαρακτηριστικά της περιοχής όπως η υγρασία κ.α, καθιστούν τις περιοχές αυτές επιρρεπής προς την εμφάνιση πλημμύρας.

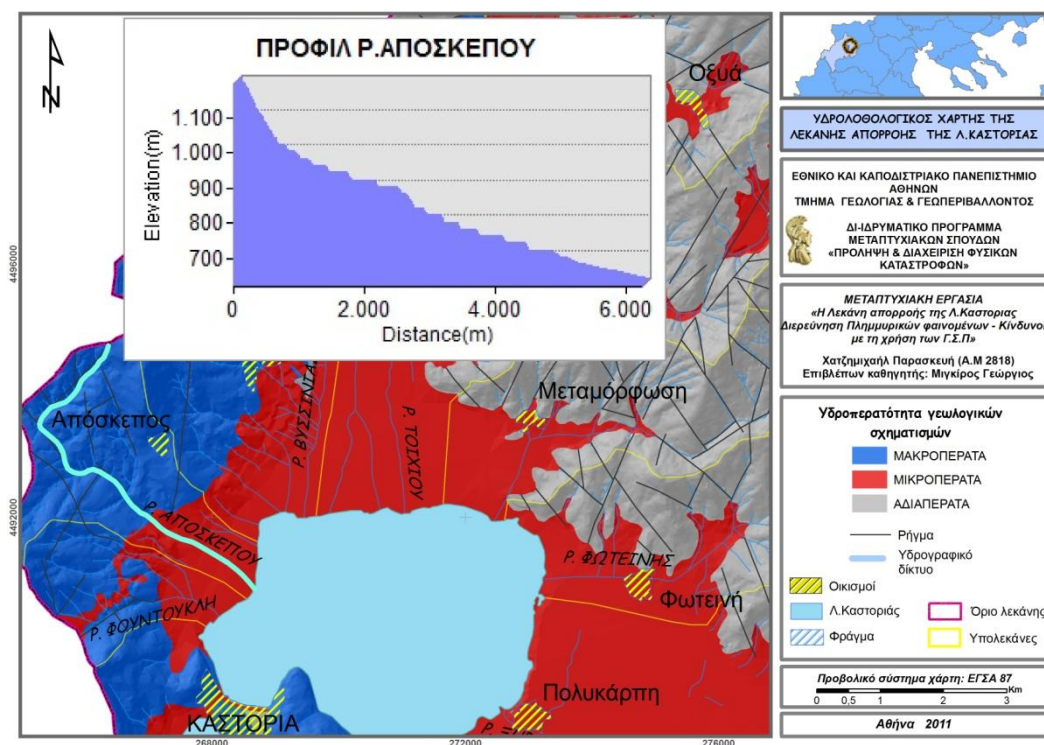
ΠΡΟΦΙΛ Ρ. ΦΩΤΕΙΝΗΣ

Η επιμήκης τοπογραφική τομή του ρέματος Φωτεινής είναι σχετικά ομαλοποιημένη και η αλλαγή της κλίσης της εμφανίζεται στα 750 m περίπου. Το μήκος του ρέματος φτάνει τα 4 km.



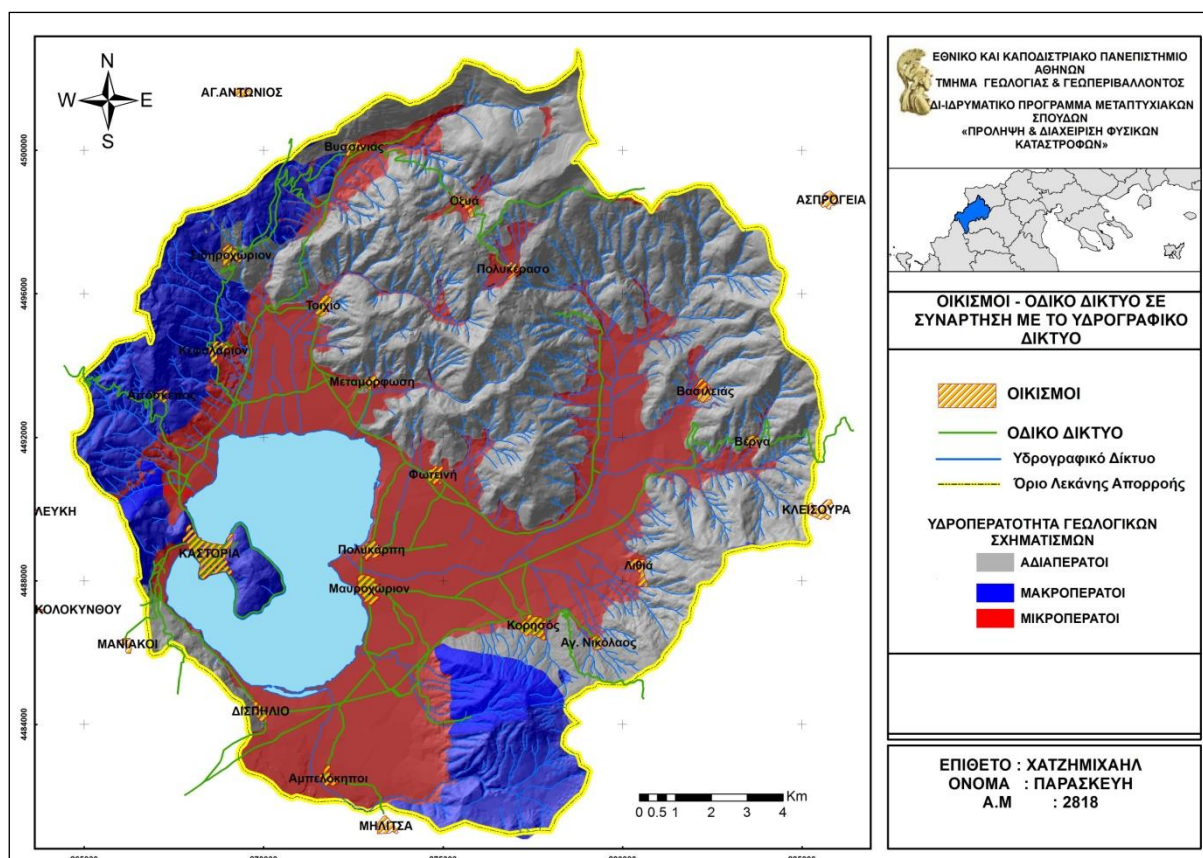
ΠΡΟΦΙΛ Ρ. ΑΠΟΣΚΕΠΟΥ

Το επιμήκη προφίλ του ρέματος Απόσκεπου είναι πιο ομαλό συγκριτικά με τα υπόλοιπα. Το μήκος του κύριου ρέματος φθάνει τα 6.22 Km και παρουσιάζει αλλαγή κλίσης στα 1000 m περίπου υψόμετρο και στη συνέχεια ομαλοποιείται.



Γενικότερα από τα επιμήκη προφίλ μπορούμε να δούμε την εξέλιξη του υδρογραφικού δικτύου σε συνδυασμό με την τοπογραφία, την τεκτονική και την υδρογεωλογική συμπεριφορά των πετρωμάτων. Στην περιοχή μελέτης μας ρήγματα εμφανίζονται στο ορεινό τμήμα και κατά κύριο λόγο σε αδιαπέρατους σχηματισμούς και στα σημεία αυτά αρχίζει να υφίσταται το υδρογραφικό δίκτυο.

Εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων εμφανίζεται στα κατάντη του ρέματος εκεί που υπάρχει απότομη αλλαγή κλίσης. Στο χάρτη που ακολουθεί φαίνονται οι οικισμοί σε συνάρτηση με το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής.



Από τον παραπάνω χάρτη παρατηρούμε ότι οι οικισμοί αναπτύσσονται σε περιοχές όπου το υδρογραφικό δίκτυο είναι εμφανές. Αυτό είναι πολύ λογικό μιας και ο άνθρωπος αναζητούσε πάντα περιοχές κοντά σε ρέματα και ποτάμια για λόγους επιβίωσης.

Τα περισσότερα χωριά είναι χτισμένα σε υψόμετρο 800 - 700 m πάνω σε μικροπερατούς σχηματισμούς και πιο συγκεκριμένα στα όρια αδιαπέρατων-μικροπερατών σχηματισμών. Βάση των τοπογραφικών τομών των ρεμάτων που αναφέρθηκαν μπορούμε να πούμε ότι οι οικισμοί Μαυροχώριο και Πολυκάρπη που περιλαμβάνονται στην υπολεκάνη Ξηροποτάμου είναι πιο επιρρεπής όσον αφορά την εμφάνιση πλημμυρικού κινδύνου βάση υδρολιθολογίας και τοπογραφίας της περιοχής και αυτό διότι βρίσκονται κοντά στο ρέμα Ξηροποτάμου (5ης τάξης) και στο σημείο

εκτόνωσης του. Βέβαια στην προαναφερθήσα εκτίμηση δεν λάβαμε υπόψη και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν τον πλημμυρικό κίνδυνο όπως είναι η βροχόπτωση, η φυτοκάλυψη της περιοχής καθώς και παραμέτρους όπως είναι η ενέργεια του χειμάρρου, η επιφανειακή απορροή, η κατείδυση, η θερμοκρασία κ.α και οι οποίοι θα συμπεριληφθούν σε επόμενα κεφάλαια για τον τελικό χάρτη πλημμυρικής επικινδυνότητας.

6.1 ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΜΑΤΑ

6.1.1 Ορισμός

Με τον όρο κατακρημνίσματα εννοούνται οι μετρήσιμες ποσότητες νερού που διέρχονται στην επιφάνεια του εδάφους μέσω της διαδικασίας του φαινομένου της βροχόπτωσης, του χιονιού και του χαλαζιού. Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα συνδέονται με τη πρόγνωση των πλημμυρών και την εκτίμηση μέγιστης πιθανής βροχόπτωσης.

Η βροχή αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μετεωρολογικά και κλιματικά στοιχεία με άμεση επίδραση στο φυσικό όπως οι πλημμύρες και ανθρωπογενές περιβάλλον.

6.1.2 Μέθοδοι μέτρησης βροχόπτωσης

Το ύψος βροχής μετριέται με ειδικά όργανα τα οποία ονομάζονται βροχόμετρα στην περίπτωση που πρόκειται για όργανα άμεσης μέτρησης και βροχογράφοι αν πρόκειται για αυτογραφικά όργανα.

Στα πιο γνωστά βροχόμετρα ανήκουν το απλό βροχόμετρο, το δεκαπλασιαστικό και το αθροιστικό βροχόμετρο ενώ στους βροχογράφους ανήκουν ο σιφωνοειδής βροχογράφος και ο βροχογράφος δια ζυγού.

Η επιλογή της τοποθεσίας καθώς και η τοποθέτηση των οργάνων αυτών θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να προστατεύονται από την απώλεια λόγω εξάτμισης ή αναπήδησης των σταγόνων καθώς και από την ρίψη διαφόρων αντικειμένων μέσα σε αυτό(π.χ κλαδιά, φύλλα κ.α) αλλά και την καταστροφή του από τον ανθρώπινο παράγοντα.

6.1.3 Χαρακτηριστικά βροχόπτωσης

Στο φυσικό φαινόμενο βροχόπτωση μετράμε το ποσό βροχής και την ένταση(i).

Α) Ποσότητα βροχής (h): Είναι το ποσό το οποίο υπολογίζεται από το ύψος στάθμης νερού που πέφτει σε ορισμένη επιφάνεια και εκφράζεται σε χιλιοστά(mm) και όγκο(m³). Για την μέτρηση του χρησιμοποιούνται διάφορα όργανα μέτρησης τα βροχόμετρα ή βροχογράφους αλλά και πιο σύγχρονες μέθοδοι όπως τα radar με τη μόνη διαφορά ότι αυτά μετρούν ουσιαστικά άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την βροχόπτωση όπως π.χ το ποσοστό νέφωσης αντανάκλασης και εξάγουν το ύψος βροχής μέσω αυτών των παραγόντων.

Β) Ένταση(i): Ορίζεται ως το ύψος βροχής προς τη μονάδα του χρόνου και μετριέται σε m³/sec, m³/hour. Δίνεται από τη σχέση

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Η τιμή της έντασης που ορίζεται από την παραπάνω εξίσωση, αποτελεί χρονικά τη μέση τιμή η οποία εξαρτάται από το διάστημα μεταβολής Δt. Η αλληλουχία διαδοχικών μετρήσεων αποτελεί μια χρονοσειρά. Η χρονική διάρκεια Δt καθορίζεται από την χρονική διακριτότητα του οργάνου και την ακολουθούμενη πρακτική μέτρησης. Για τις υδρολογικές μελέτες είναι χρήσιμη η μετατροπή της έντασης από μικρότερη χρονική κλίμακα σε μεγαλύτερη (π.χ μήνα, έτος).

Στην τυπικότερη μαθηματική της αναπαράσταση, κάθε στοιχείο μιας χρονοσειράς ύψους βροχής(κάθε μερικό σύνολο του Δh) θεωρείται ως η πραγματοποίηση μιας συνεχούς τυχαίας μεταβλητής. Αντίστοιχα όλη η χρονοσειρά αποτελεί στοχαστική εξέλιξη αφού η πραγματοποίηση της γίνεται μέσω μιας συνεχής ακολουθία τυχαιών μεταβλητών. Αυτού του είδους η μαθηματική αναπαράσταση παραπέμπει στη θεωρία των πιθανοτήτων και στατιστικής καθώς επίσης και στη θεωρία στοχαστικών μεθόδων. Ειδικότερα οι στοχαστικές μέθοδοι αποτελούν πλέον το απαραίτητο εργαλείο για τη μελέτη της πλήρους χρονοσειράς και είναι αναγκαία στην περίπτωση όπου τα διαδοχικά στοιχεία της χρονοσειράς είναι εξαρτημένα στοχαστικά.

Η εξάρτηση των διαδοχικών τιμών που απαρτίζουν την χρονοσειρά εξαρτάται από την χρονική κλίμακα. Για παράδειγμα σε μικρές κλίμακες (π.χ μερικών ωρών) και βάση άλλων μελετών, δεν υπάρχει ισχυρή εξάρτηση των διαδοχικών τιμών σε αντίθεση με τη μεγάλη χρονική κλίμακα (π.χ έτος) και η οποία είναι σημαντική για την μελέτη υδάτινων πόρων.

Σε αυτή την περίπτωση της μεγάλης χρονικής κλίμακας, η ετήσια περιοδικότητα που οφείλεται στην εναλλαγή των εποχών εξαφανίζεται από τη χρονοσειρά και επομένως οι διαδοχικοί όροι της χρονοσειράς μπορούν να θεωρηθούν ως διαδοχικές

πραγματοποιήσεις μιας και μοναδικής τυχαίας μεταβλητής η οποία αναπαριστά το ετήσιο ύψος βροχής. Σε αυτή την περίπτωση αλλά και σε βροχοπτώσεις διαδοχικών, όπως στη δικιά μας, επαρκή μια απλή μαθηματική τυπική ανάλυση μιας μεταβλητής.

Συμπερασματικά θα λέγαμε λοιπόν ότι η διαμόρφωση της απορροής και γενικά το υδρολογικό ισοζύγιο επηρεάζεται από το ύψος και επομένως από την ποσότητα βροχής αλλά και από τη διάρκεια, την έκταση, την ραγδαιότητα καθώς και από τον τρόπο κατανομής της. Όσο μειώνεται η διάρκεια και η έκταση της βροχής, τόσο αυξάνει η έντασή της και αντίστροφα.

Βροχές με μέτρια ή μικρή ένταση με μεγάλη όμως διάρκεια ή συνεχείς επαναλήψεις, μπορούν να προκαλέσουν ζημιές σε λεκάνες με ευολίσθητα γεωλογικά αποθέματα όπως ο φλύσχος και αυτό γιατί οδηγούν σε έντονο διαποτισμό των γεωμαζών. Έτσι επέρχεται αύξηση του βάρους και μείωση των εσωτερικών τριβών των εδαφών πράγμα που διευκολύνει την κινητικότητά τους και οδηγεί σε μαζικές γεωλισθήσεις με έντονες τοπικές καταστροφές (Κωτούλας 1985, σελ 56).

6.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Οι μέθοδοι συμπλήρωσης των βροχομετρικών δεδομένων υπάγονται σε δύο γενικές κατηγορίες, τις εμπειρικές και τις στατιστικές. Οι στατιστικές μέθοδοι είναι κατάλληλες και για την επέκταση δειγμάτων (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999). Και οι δύο μέθοδοι αναλύονται παρακάτω.

Α) ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ:

Οι εμπειρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου οι έλλειψεις των τιμών του ύψους βροχής είναι σποραδικές και αφορούν μικρές χρονικές κλίμακες (π.χ για μερικές μέρες ή μήνες) και είναι οι εξής:

Μέθοδος του αριθμητικού μέσου: Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται με την προϋπόθεση ότι οι μέσες ετήσιες βροχοπτώσεις των γειτονικών σταθμών δεν διαφέρουν από την αντίστοιχη του σταθμού Υ διαφορετικά χρησιμοποιεί την μέθοδο των κανονικών λόγων (Linsley et.al, 1975, σελ.80). Αποτελεί μια απλή μέθοδο σύμφωνα με την οποία η τιμή του ύψους βροχής που λείπει στον σταθμό Υ(π.χ μηνιαία ή ετήσια), εκτιμάται ως ο μέσος όρος των αντίστοιχων υψών τριών τουλάχιστον γειτονικών σταθμών, κανονικά διατεταγμένων και περιμετρικά του σταθμού Υ. Η μέση τιμή της ελλείπουσας βροχόπτωσης δίνεται από την σχέση

$$h_y = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^k h_i$$

όπου k : το πλήθος των γειτονικών σταθμών και h_i : το ύψος της βροχής σε καθέ έναν από αυτούς.

- Μέθοδος της αντίστροφης απόστασης: Αποτελεί μια γενίκευση της μεθόδου του αριθμητικού μέσου με τη διαφορά ότι εδώ λαμβάνονται υπόψη τα αντίστροφα των αποστάσεων των γειτονικών σταθμών (συνήθως χρησιμοποιούνται >4) για την στάθμιση των επιμέρους υψών βροχής και υπολογίζονται από τη σχέση:

$$h_y = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^k w_i * h_i$$

όπου $w_i = \frac{d_i^{-b}}{\sum_{i=1}^k d_i^{-b}}$, d_i : είναι η απόσταση του σταθμού I από τον σταθμό Y και b : είναι η σταθερά που κατά κανόνα λαμβάνεται ίση με 2 χωρίς να αποκλείονται και άλλες τιμές.

- Μέθοδος των κανονικών λόγων: Και αυτή η μέθοδος αποτελεί μια γενίκευση της αριθμητικής μεθόδου, και στην οποία τα ύψη βροχής των γειτονικών σταθμών σταθμίζονται βάση των αναλογιών των μέσων ετήσιων βροχοπτώσεων μέσα από τη σχέση

$$\sum_{i=1}^k \frac{H_y}{H_i} h_i$$

όπου H_y, H_i οι μέσες ετήσιες βροχοπτώσεις του σταθμού Y και I αντίστοιχα

Β) ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι στατιστικές μέθοδοι περιλαμβάνουν μια σειρά από μεθόδους αξιοποιώντας τις πληροφορίες των γειτονικών σταθμών και λαμβάνοντας υπόψη τους τις πλήρεις σειρές μετρήσεων στον υπό συμπλήρωση σταθμό εκτιμώντας την κάθε τιμή με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα εκτίμησης. Η πιο απλή από αυτές τις μεθόδους περιλαμβάνει την απλή γραμμική παλινδρόμηση και αναλύεται παρακάτω.

Γραμμική παλινδρόμηση ή αριθμητική μέθοδος: Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η τιμή $y=h_y$ που πρέπει να συμπληρωθεί, εκτιμάται από την αντίστοιχη τιμή $x=h_x$ του γειτονικού σταθμού x για την ίδια χρονική περίοδο με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$y = a + bx$$

όπου a, b : οι παράμετροι που εκτιμώνται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί το τετραγωνικό σφάλμα της εκτίμησης και υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

όπου n : ο αριθμός του δείγματος και $\bar{y}, \bar{x}$ οι μέσες τιμές των y_i και x_i και δίνονται από τους τύπους

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \text{ και } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

Για την αξιοπιστία της παραπάνω μεθόδου υπολογίζεται ο βαθμός καταλληλότητας ο οποίος δείχνει ουσιαστικά το κατά πόσο καλά είναι συσχετισμένα τα δεδομένα και εκφράζεται από τον συντελεστή συσχέτισης r που δίνεται από την σχέση:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Οι τιμές του r κυμαίνονται στο διάστημα $[-1, 1]$. Όταν η τιμή αυτή βρίσκεται κοντά στα θετικά όρια του διαστήματος τότε η συσχέτιση είναι ισχυρότερη. Για να είναι σημαντική η τιμή του r θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη στιγμή $r_c \approx 2/\sqrt{n}$. Όταν όμως η τιμή του είναι αρνητική δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται. Στην καθημερινή πρακτική και από βιβλιογραφικές πληροφορίες έχει επικρατήσει η οριακή τιμή $r_c = 0.7$.

Η μέθοδος αυτή ενδείκνυται για τη συμπλήρωση ετήσιων και μηνιαίων τιμών ύψους βροχής μεγάλης χρονικής διάρκειας με την προϋπόθεση η τιμή του r να είναι ικανοποιητική και θετική. Σε αντίθετη περίπτωση και σε μικρή χρονική κλίμακα δεν θεωρείται κατάλληλη αφού ο συντελεστής συσχέτισης παίρνει χαμηλές τιμές.

Για την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου θα πρέπει να γίνει κατανομή των βροχοπτώσεων στο σύνολο της επιφάνειας της λεκάνης απορροής που μελετάται. Στην περίπτωση όπου τα βροχομετρικά δεδομένα έχουν παρθεί από διαφορετικούς σταθμούς και αποτελούν σημειακή πληροφορία, υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες για την αναγωγή τους σε όλη την επιφάνεια που μελετάμε. Η κατανομή τους λοιπόν μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τις δύο παρακάτω κατηγορίες μεθοδολογίας (Μαμάσης Ν., Κουτσογιάννης Δ., 1999).

- ❖ Μέθοδος άμεσης ολοκλήρωσης-κατανομής
- ❖ Μέθοδος προσαρμογής επιφάνειας

6.3.1 Μέθοδος άμεσης ολοκλήρωσης-κατανομής

Πρόκειται για μια απλή μέθοδο στην οποία γίνεται άμεση χρήση των σημειακών μετρήσεων, δηλαδή του ύψους βροχής στον σταθμό. Μέσω αυτών των μεθόδων εκτιμάται η επιφανειακή βροχόπτωση ως γραμμικός συνδυασμός των σημειακών βροχοπτώσεων στα σημεία των βροχομετρικών σταθμών που βρίσκονται κοντά του με την σχέση

$$hs = \sum_{i=1}^k w_i * h_i$$

όπου hs : το επιφανειακό ύψος βροχής κάθε σταθμού ($h_1, h_2 \dots h_k$) και w_i : ο συντελεστής βάρους για τον σταθμό i . Για το υπολογισμό w_i υπάρχουν πολλές μέθοδοι υπολογισμού που αναλύονται παρακάτω.

- 1) Μέθοδος μέσου όρου: Αποτελεί μια απλή μέθοδο σύμφωνα με την οποία τα βάρη όλων των σταθμών λαμβάνονται ίσα όπου $w_i = 1/k$. Η ακρίβεια που προσφέρει είναι ανεκτή όταν η περιοχή είναι σχετικά επίπεδη, οι σταθμοί και τα ύψη τους είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι στο χώρο και δεν διαφέρουν πολύ από τον σταθμό.
- 2) Μέθοδος Thiessen: Αποτελεί μια από τις δημοφιλέστερες μεθόδους λόγω της εύκολης χρήσης του και των αξιόπιστων εκτιμήσεων που δίνει συνήθως σε ετήσια ή υπερετήσια κλίμακα. Η ακρίβεια της μεθόδου αυτής εξαρτάται και από την πυκνότητα του δικτύου και της μεγάλης χρονικής κλίμακας, όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η εξάρτηση τόσο ακριβέστερα θα είναι και τα

αποτελέσματά της. Ο συντελεστής βάρους σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ανάλογος του εμβαδού της ζώνης επιρροής του σταθμού και εκφράζεται μέσα από την σχέση:

$$w_i = \frac{S_i}{S}$$

- 3) Μέθοδος 2 αξόνων του Bethlamy: Πρόκειται για μια πρόσφατη μέθοδο η οποία προτάθηκε από τον Bethlamy, εξ'ού και η ονομασία της μεθόδου. Σύμφωνα με αυτή, οι συντελεστές βάρους είναι ανάλογοι των γωνιών επιρροής με τις οποίες οι σταθμοί καλύπτουν την λεκάνη. Οι γωνίες αυτές ορίζονται με τη χάραξη ενός κύριου άξονα της λεκάνης με τέτοιο τρόπο ώστε να αποκόπτουν το μεγαλύτερο δυνατό μήκος ευθύγραμμου τμήματος επί του κύριου άξονα. Έπειτα χαράσσεται η μεσοκάθετος του ευθύγραμμου τμήματος που ορίστηκε παραπάνω και αποτελεί τον δευτερεύοντα άξονα της λεκάνης. Κατ' αυτόν τον τρόπο ορίζονται 4 σημεία στον υδροκρίτη, 2 επί του κυρίου άξονα και 2 επί του δευτερεύοντα. Τέλος από κάθε θέση του σταθμού χαράσσονται 2 ευθείες εκ των οποίων η μία ενώνει τη θέση του σταθμού με τα απομακρυσμένα σημεία που βρίσκονται στον υδροκρίτη και η δευτερεύουσα που ενώνει τη θέση του σταθμού με το πιο απομακρυσμένο από τα σημεία(B1,B2) καταφέροντας με αυτό τον τρόπο να μετρηθεί η γωνία επιρροής α_i από τις ευθείες και είναι μικρότερη των 90ο. Ο συντελεστής βάρους σε αυτή την περίπτωση δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$w_i = \frac{\frac{\alpha_i}{k}}{\sum_{i=1}^k \alpha_i}$$

Η μέθοδος αυτή δεν είναι και τόσο καλά θεμελιωμένη όσο η μέθοδος Thiessen αλλά θεωρείται ικανοποιητικής ακρίβειας (Court & Bare, 1984). Ένα από τα πλεονεκτήματά της αποτελεί η γωνία επιρροής κάθε σταθμού η οποία δεν επηρεάζεται από γειτονικούς. Γι' αυτό το λόγο δεν χρειάζεται ο επαναπροσδιορισμός της σε περίπτωση προσθήκης ή αφαίρεσης κάποιον σταθμών όπως συμβαίνει στην περίπτωση των πολυγώνων Thiessen.

- 4) Μέθοδος βέλτιστης ολοκλήρωσης: Ανήκει στη γενικότερη κατηγορία των γεωστατιστικών μεθόδων(Matheron, 1971). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι η χωρική διακύμανση μιας μεταβλητής(π.χ βροχόπτωση) είναι τυχαία, οπότε χρησιμοποιεί στατιστική προσέγγιση για να εκτιμήσει τις τις όποιες πληροφορίες από τις σημειακές μετρήσεις της μεταβλητής. Μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτή είναι η ικανότητά της να ποσοτικοποιεί και

τελικά να ελαχιστοποιεί το σφάλμα εκτίμησης το οποίο δεν συμβαίνει με τις παραπάνω μεθόδους που αναφέρθηκαν. Αντίθετα η μέθοδος αυτή είναι αρκετά πολύπλοκη ως προς την εφαρμογή της και γι' αυτό χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της κατάλληλα υπολογιστικά προγράμματα όπως π.χ το λογισμικό πακέτο των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών(Γ.Σ.Π).

6.3.2 Μέθοδοι Προσαρμογής Επιφάνειας

Υπάρχουν 2 κατηγορίες για την απεικόνιση των τιμών του ύψους βροχής στην επιφάνεια που μελετάτε και είναι οι εξής:

- 1) Η μέθοδος των ισοϋετών καμπυλών
- 2) Η μέθοδος της ψηφιδωτής διαμέρισης (raster distribution) : Σύμφωνα με τη μέθοδο ψηφιδωτής απεικόνισης της βροχόπτωσης, η περιοχή μελέτης διαχωρίζεται σε ισομεγέθη κύτταρα με την εφαρμογή ενός τριγωνικού καννάβου. Στη συνέχεια για κάθε κύτταρο υπολογίζεται η τιμή του ύψους βροχής η οποία αντιστοιχεί στο κέντρο του κυττάρου και θεωρείται σταθερή για όλη την επιφάνειά του. Η τιμή h_s προκύπτει ως ο μέσος όρος των τιμών όλων των κυττάρων και δίνεται από την σχέση:

$$h_s = \sum_r \frac{h_r + h_{r-1} * \frac{Fr}{S}}{2}$$

Η μέθοδος raster περιλαμβάνει μια σειρά μεθόδων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση βροχόπτωσης σε κάθε κύτταρο, τις λεγόμενες μεθόδους παρεμβολής(Interpolation) ή εξομάλυνσης(smoothing).

Οι μέθοδοι παρεμβολής περιλαμβάνουν:

- ✓ Τη μέθοδο γραφικής χάραξης των ισοϋετών: Αποτελεί μια συνηθισμένη μέθοδο στην οποία οι ισοϋέτιες χαράζονται γραφικά πάνω στο χάρτη αφού έχει γίνει πρώτα η καταγραφή της θέσης και του ύψους βροχής κάθε σταθμού. Για την χάραξη των καμπυλών χρησιμοποιεί κατά βάση γραμμική παρεμβολή πάνω στα ευθύγραμμα τμήματα που ορίζονται από τις θέσεις των γειτονικών σταθμών.
- ✓ Μέθοδος υπολογιστικής γραμμικής παρεμβολής ή μέθοδος βροχοβαθμίδας: Θεωρείται μια εύκολη μέθοδο σε συνδυασμό με την χρήση του υπολογιστή και όχι του μελετητή.
- ✓ Μέθοδος της αντίστροφης απόστασης: Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί λόγω της μαθηματικής της απλότητας για την εκτίμηση του

ύψους βροχής σε οποιοδήποτε σημείο της περιοχής και πέρα από τη θέση του βροχομετρικού σταθμού.

- ✓ Μέθοδος πολυτετραγωνικής παρεμβολής(multiquantric interpolation): Όπως και η παραπάνω μέθοδος έτσι και αυτή χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό του ύψους βροχόπτωσης σε κάποιο σημείο της επιφάνειας, τις αποστάσεις των γειτονικών σταθμών. Η εξίσωση βροχόπτωσης στην επιφάνεια προκύπτει από το άθροισμα των επιρροών των γειτονικών σταθμών όπου κάθε επιρροή περιγράφεται από μια ορθή κωνική επιφάνεια με κατακόρυφο άξονα τοποθετημένο στη θέση κάθε σταθμού (Shaw & Lyhn1 1972, Shaw 1994 pag.212).
- ✓ Μέθοδος πολυωνύμων Lagrange: Στη μέθοδο αυτή ο αριθμός των πολυωνυμικών όρων ισούται με τον αριθμό των βροχομετρικών σταθμών. Επομένως η πολυωνυμική της έκφραση διέρχεται από τα σημεία με γνωστό ύψος βροχής με αποτέλεσμα η μέθοδος να χρησιμοποιεί παρεμβολή και όχι εξομάλυνση. Λόγω όμως του μεγάλου αριθμού του πολυωνύμου μπορούν να προκληθούν αδικαιολόγητα μεγάλες τιμές βροχόπτωσης σε κάθε σημείο.
- ✓ Μέθοδος προσαρμογής splines: Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται τυπικές πολυωνυμικές εξισώσεις παρεμβολής μικρού βαθμού, αντί μιας ενιαίας, και αποφεύγεται έτσι το πρόβλημα υψηλών διακυμάνσεων τιμών στην επιφάνεια μελέτης όπως συμβαίνει με τη μέθοδο πολυωνύμων Lagrange.

Οι μέθοδοι εξομάλυνσης περιλαμβάνουν:

- ✓ Τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων με πολυώνυμα: Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην επιλογή ενός πολυωνυμικού δεδομένου βαθμού ο οποίος εκφράζει το ύψος βροχόπτωσης σε συνάρτηση με την τοπογραφία της περιοχής. Η εκτίμηση των συντελεστών του πολυωνύμου γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα προσαρμογής στα γνωστά σημεία ύψους βροχής και γι'αυτό το λόγο ανήκει στην κατηγορία της μεθόδου εξομάλυνσης.
- ✓ Μέθοδος βέλτιστης παρεμβολής(kringing): Η μέθοδος αυτή μοιάζει με τη μέθοδο βέλτιστης ολοκλήρωσης και είναι ίσως η πιο αξιόπιστη σε σχέση με τις υπόλοιπες, αλλά αρκετά πολύπλοκη στην εφαρμογή της η οποία διευκολύνεται μέσω των κατάλληλων λογισμικών πακέτων όπως είναι τα Γ.Σ.Π. Εδώ η μεταβολή του ύψους βροχής θεωρείται τυχαία και βρίσκει το άγνωστο ύψος βροχής για κάθε σημείο ως γραμμική έκφραση των γνωστών υψών βροχής των βροχομετρικών σταθμών και χρησιμοποιεί στατιστικές μεθόδους για να εκτιμήσει τους συντελεστές της γραμμικής έκφρασης (Dingman ,1994).

6.4.1 Το κλίμα της περιοχής Καστοριάς

Η περιοχή που μελετάμε βρίσκεται στη Δυτική Μακεδονία. Σύμφωνα με βιβλιογραφικά δεδομένα, το κλίμα της Δυτικής Μακεδονίας είναι ενδιάμεσο ή μεταβατικό μεταξύ μεσογειακού και ηπειρώτικου κλίματος. Λόγω της ορεινής του θέσης (περικλείεται μεταξύ των γεωγραφικών πλατών $40^{\circ} 09'$ και $40^{\circ} 45'$ και των μηκών $20^{\circ} 46'$ και $21^{\circ} 31'$), λόγω του υψομέτρου του αναγλύφου του εδάφους (μέσο υψόμετρο 948.48 m), το κλίμα είναι ιδιαίτερα βαρύ το χειμώνα ενώ χαρακτηρίζεται ως ημίυγρο αποκλίνον προς υγρό με μέτρια έλλειψη νερού κατά το θέρος.

Ο λόγος για τον οποίο θα αναλύσουμε παρακάτω τα κλιματικά στοιχεία της περιοχής έγκειται στο γεγονός ότι τα κλιματικά αυτά στοιχεία παίζουν το βασικό ρόλο στη διαμόρφωση του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής που μελετάμε.

Άλλα χαρακτηριστικά του κλίματος της περιοχής Καστοριάς αποτελούν οι ανοιξιάτικοι παγετοί και οι χαλαζοπτώσεις που προκαλούν ζημιές στις δενδροκαλλιέργειες της περιοχής. Οι χιονοπτώσεις αυξάνονται κυρίως τους μήνες Ιανουάριου-Φεβρουάριο ενώ μικρότερες εντάσεις έχουμε τους μήνες Δεκέμβριο-Μάρτιο. Οι βροχές είναι συνήθως μεγάλης διάρκειας και οι τιμές του ετήσιου βροχομετρικού ύψους κυμαίνονται από 500-900 mm/έτος. Μεγάλη ατμοσφαιρική υγρασία παρατηρείται κατά τους χειμερινούς μήνες, μέτρια την άνοιξη και μικρή κατά το θέρος.

6.4.2 Πρωτογενή Δεδομένα

Για τη μελέτη και κατανομή της βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης μας, χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία 6 βροχομετρικών σταθμών για μια χρονική περίοδο 33 υδρολογικών ετών από το 1961/62-1993/94 από το ερευνητικό έργο του Α.Π.Θ «Εκτίμηση εισροής φερτών υλικών στην λίμνη Καστοριάς». Ως υδρολογικό έτος ορίζεται η χρονική περίοδος η οποία είναι ίση προς το ημερολογιακό έτος με τέτοια ημερομηνία έναρξης ώστε η αρχή του υδρολογικού έτους να συμπίπτει με την έναρξη της βροχερής χρονικής περιόδου η οποία στον ελλαδικό χώρο ξεκινά από την 1η Οκτωβρίου και λήγει στις 30 Σεπτεμβρίου.

Όπως είδαμε υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου εμφανίζονται ελλείψεις καταγραφής ύψους βροχής στους βροχομετρικούς σταθμούς οι οποίες οφείλονται είτε σε βλάβη του οργάνου είτε σε κωλυόμενη κατάσταση του υπευθύνου των μετρήσεων. Στις περιπτώσεις αυτές, τα βροχομετρικά δεδομένα για να χρησιμοποιηθούν και να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα θα πρέπει πρώτα να συμπληρωθούν με βάση τις μεθόδους που αναλύθηκαν στο αντίστοιχο κεφ. Με τη συμπλήρωση των ελλειπούσων τιμών ύψους βροχής. Στην εργασία μας χρησιμοποιησάμε τα βροχομετρικά δεδομένα συμπεριλαμβανομένου και των ελλειπούσων τιμών από τη μελέτη Υδατικού Ισοζυγίου στην Καστοριά (Ξανθόπουλος, 1994). Η διαδικασία με την οποία συμπληρώθηκαν οι ελλειπούσες τιμές περιγράφεται παρακάτω.

Για τη συμπλήρωση των ελλειπούσων τιμών χρησιμοποιήθηκε μια νεώτερη μέθοδος βασιζόμενη στην χρησιμοποίηση των γειτονικών σταθμών όπου ως κριτήριο επιλογής λήφθηκε υπόψη ο συντελεστής συσχέτισης r ανάμεσα στα ήδη υπάρχον κοινά δεδομένα του θεωρούμενου σταθμού και των γειτονικών του. Κάθε σταθμός συνδέεται με τους υπόλοιπους και προσδιορίζει τον αντίστοιχο συντελεστή συσχέτισης ο οποίος πρέπει να τείνει όσο το δυνατόν πιο κοντά στην τιμή 1, σε περίπτωση που είναι αρνητικός τα αποτελέσματα δεν θεωρούνται αξιόπιστα. Τότε οι αντίστοιχες τιμές των 2 σταθμών βρίσκονται σε μια ευθεία πάνω στο διάγραμμα (γραμμική παλινδρόμηση).

Όσο η τιμή του συντελεστή συσχέτισης απομακρύνεται από την μονάδα τόσο και οι τιμές των 2 σταθμών απομακρύνονται από την ευθεία. Για να συμπληρωθούν οι ελλειπούσες μηνιαίες τιμές των βροχομετρικών σταθμών κάθε υδρολογικού έτους, χρησιμοποιήθηκαν 5 γειτονικοί σταθμοί με τους μεγαλύτερους συντελεστές συσχέτισης.

Όταν ένας από τους σταθμούς είχε ελλιπή μηνιαία τιμή για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο και η οποία έπρεπε να συμπληρωθεί, τότε μέσω του προγράμματος που κατασκευάστηκε στον υπολογιστή για τη συγκεκριμένη μελέτη, είχε την δυνατότητα να χρησιμοποιήσει τον επόμενο σταθμό με τον αμέσως μικρότερο συντελεστή συσχέτισης εφόσον ο σταθμός είχε τις ίδιες τιμές βροχόπτωσης για την ίδια χρονική περίοδο.

Το πρόγραμμα το οποίο καταρτίστηκε (Ξανθόπουλος, 1994), διαβάζει τις μηνιαίες τιμές κάθε υδρολογικού έτους, προσδιορίζει τον αριθμό των μηνών για τους οποίους υπάρχουν μετρήσεις και υπολογίζει την ετήσια τιμή βροχόπτωσης κάθε έτους ξεχωριστά. Μετά υπολογίζει για κάθε μήνα την μέση μηνιαία τιμή και τον αριθμό των ετών για τα οποία υπάρχουν μηνιαίες τιμές. Έπειτα υπολογίζει το μέσο λόγο της

μέσης τιμής του κάθε μήνα προς τη μέση τιμή βροχόπτωσης. Τέλος, και με τη μέθοδο συσχέτισης r , συμπληρώνονται οι ελλειπούσες μηνιαίες τιμές των σταθμών.

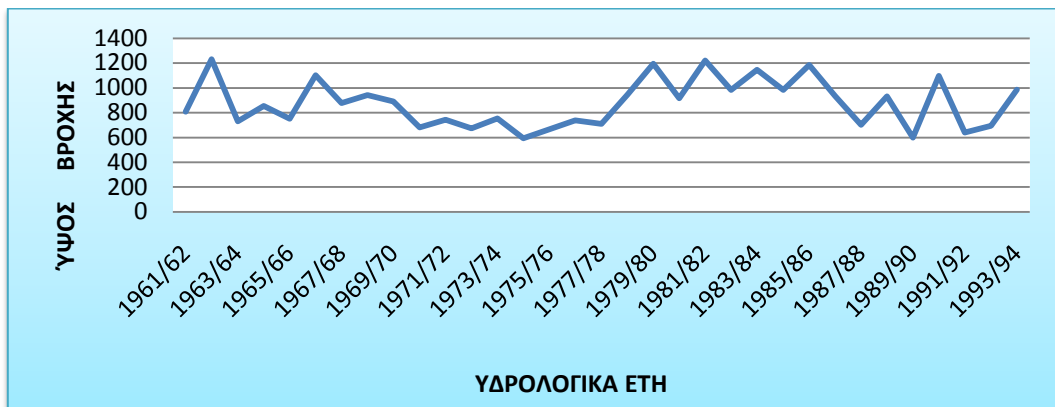
Εμείς και βάση της συμπλήρωσης ύψους βροχής, χρησιμοποιήσαμε τα νέα πλέον βροχομετρικά δεδομένα και προσδιορίσαμε την νέα ετήσια τιμή για κάθε έτος καθώς και του μέσους όρους κάθε σταθμού για την χρονική περίοδο 33 υδρολογικών ετών. Έπειτα τα δεδομένα ύψους βροχής τα διαμερίσαμε σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης, με τη μέθοδο της ψηφιδωτής διαμέρισης (raster distribution) και της γραμμικής παλλινδρόμησης ή μέθοδος του αριθμητικού μέσου η οποία θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο, και υπολογίσαμε τις τιμές ύψους βροχής εκφρασμένες σε όγκο για το σύνολο της λεκάνης αλλά και των υπολεκανών ξεχωριστά.

Οι σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν και οι τιμές αυτών δίνονται στους ακόλουθες πίνακες. Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι οι τιμές βροχόπτωσης για κάθε σταθμό αναφέρονται στις νέες συμπληρωμένες τιμές όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

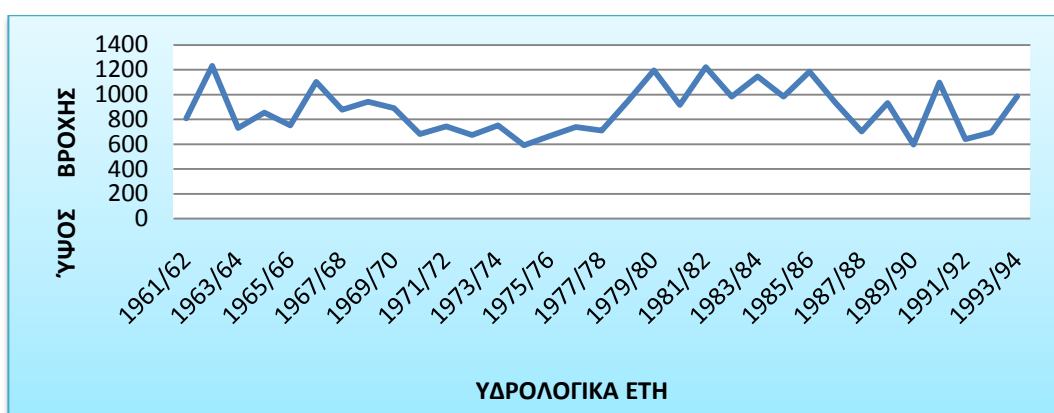
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΙΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΒΡΟΧΩΠΤΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ(mm)							
		ΚΛΕΙΣΟΥΡΑΣ	ΑΡΓΟΣ ΟΡΕΣΤΙΚΟΥ	ΒΟΓΑΤΣΙΚΟΥ	ΒΥΣΣΙΝΙΑΣ	ΔΡΟΣΟΠΗΓΗ	ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ (ΥΔΕ)
A/A	YEARS	ΥΨΟΣ ΒΡΟΧΗΣ					
1	1961/62	808.5	576.7	526.8	681.4	718.2	539
2	1962/63	1230.2	899.9	851	1118.8	1087.9	946.7
3	1963/64	730.5	539.5	531.3	613.1	650.7	455.6
4	1964/65	853.6	650.3	528.6	684	731	635.4
5	1965/66	750.4	514	500.3	621.6	660.4	538.6
6	1966/67	1101.7	786	803.3	917.3	957.1	736.3
7	1967/68	878.3	664.1	541.9	757.3	779.7	663.9
8	1968/69	943.1	704.6	650.9	862.4	874.2	645.9
9	1969/70	890.9	663.8	548.1	629.7	720.7	589.2
10	1970/71	680.7	692.5	640.3	766.2	775.8	607.7
11	1971/72	742.8	698.9	718.4	958.2	891.6	683.7
12	1972/73	674.2	709.5	504	714.8	751.4	663.1

13	1973/74	752.3	785.2	687.1	863.1	722.9	588.6
14	1974/75	592.4	488.8	359	625.4	777.8	461.9
15	1975/76	666.8	506.2	410.6	584.4	763	491.2
16	1976/77	738	512.1	459.9	645.9	684	535.7
17	1977/78	710.3	573.1	578.4	679.6	686.5	598.3
18	1978/79	944.5	515.7	536.3	842.1	945.9	644.9
19	1979/80	1196.1	676	751.2	782.3	751.8	651.4
20	1980/81	916.6	691.2	555.9	930.4	908.8	690
21	1981/82	1221.9	784.6	477.9	770.5	989.7	667
22	1982/83	983	772.8	385.6	812.6	890	712
23	1983/84	1145.8	652.6	410.4	642	817.6	597.7
24	1984/85	983.9	464.9	267.6	507.2	577.2	646.4
25	1985/86	1184.4	826.8	779.6	876	918.1	829.4
26	1986/87	933.4	598.7	583.6	546.3	637.4	539.3
27	1987/88	702.8	487.6	461.8	528.7	576.7	442.2
28	1988/89	932.1	465.8	681.6	597.7	675.7	439.6
29	1989/90	597.6	376.4	453.9	586.3	530.7	433.9
30	1990/91	1098.1	822.2	894.7	933.4	935.9	708.1
31	1991/92	640.1	400.5	403.6	405	593.1	386.6
32	1992/93	694.7	495.5	452.5	585.2	616.9	378.7
33	1993/94	985.9	696.6	631.6	815.4	871.2	683.1
MEAN/33		875.927	627.063	562.657	723.766	771.806	600.942

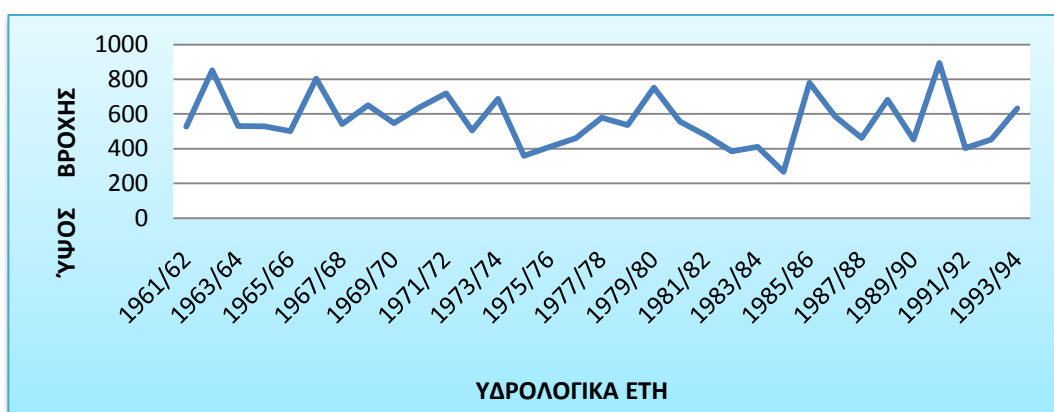
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διάγραμμα μέσου ύψους βροχής για κάθε υδρολογικό έτος που προκύπτει από τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα και των βροχομετρικών σταθμών.



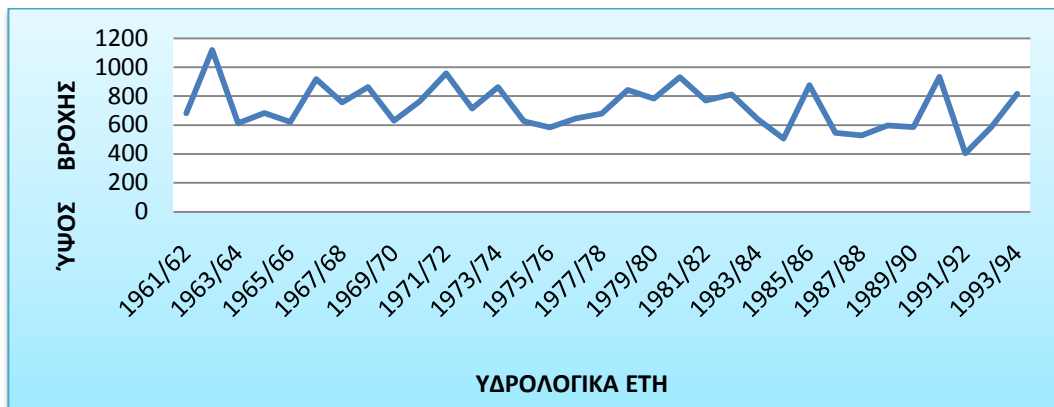
Διάγραμμα 1: Κατανομή ετήσιων κατακρημνισμάτων του σταθμού **Κλεισούρας**



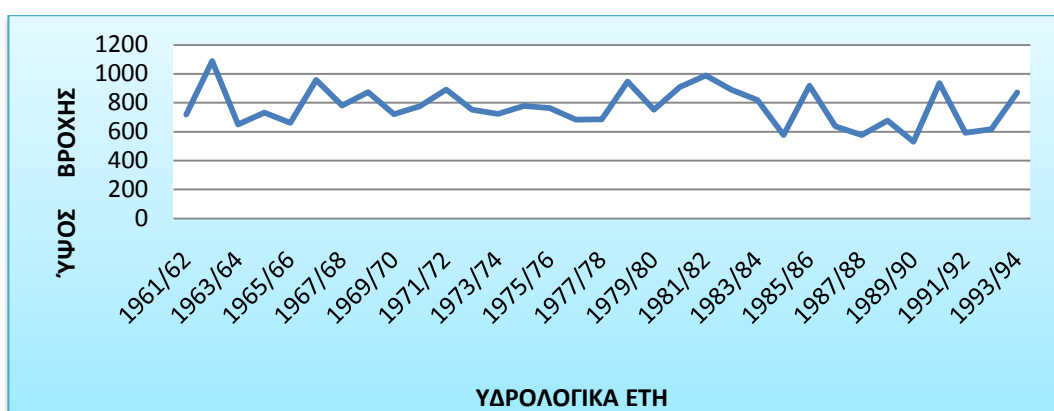
Διάγραμμα 2: Κατανομή ετήσιων κατακρημνισμάτων του σταθμού **Άργος Ορεστικό**



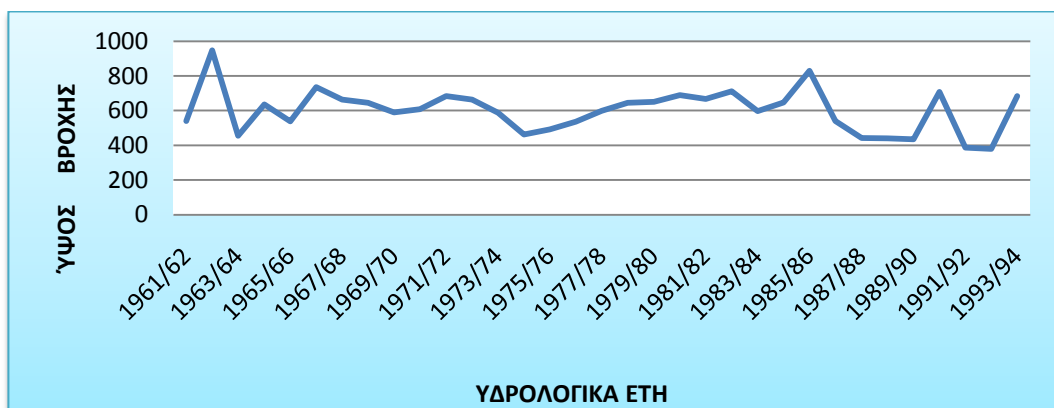
Διάγραμμα 3: Κατανομή ετήσιων κατακρημνισμάτων του σταθμού **Βογατσικού**



Διάγραμμα 4: Κατανομή ετήσιων κατακρημνισμάτων του σταθμού **Βυσιινιάς**



Διάγραμμα 5: Κατανομή ετήσιων κατακρημνισμάτων του σταθμού **Δροσσοπηγής**



Διάγραμμα 6: Κατανομή ετήσιων κατακρημνισμάτων του σταθμού **Καστοριάς(ΥΔΕ)**

6.4.4 Κατανομή Κατακρημνισμάτων στην Λ. Απορροής

Ο υπολογισμός και η κατανομή κατακρημνισμάτων στην περιοχή μελέτης μας έγινε βάσει του βροχομετρικού χάρτη που κατασκευάσαμε. Για την κατασκευή του βροχομετρικού χάρτη χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο γραμμικής παρεμβολής ή αριθμητική μέθοδο και η οποία αναλύεται παρακάτω.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ: Η αριθμητική μέθοδος ανταποκρίνεται περισσότερο στην πραγματικότητα λόγω του ότι παραβλέπει μερικούς παράγοντες που επιδρούν στην κατανομή των κατακρημνισμάτων και λαμβάνει υπόψη της ουσιαστικά μόνο το υψόμετρο. Κάτι τέτοιο μας βοηθά ιδιαίτερα στον υπολογισμό ύψους κατακρημνισμάτων όταν πρόκειται κυρίως για μικρές λεκάνες όπου η επίδραση των άλλων παραγόντων δεν είναι πολύ σημαντική. Η σχέση που συνδέει το ύψος κατακρημνισμάτων $y(mm)$ με το υψόμετρο $x(mm)$ βάση των ελαχίστων τετραγώνων είναι η εξής:

$$y = ax + b \quad \text{όπου}$$

a: ο συντελεστής κατεύθυνσης και ο οποίος υπολογίστηκε για την περιοχή μελέτης μας με την ακόλουθη εξίσωση

$$a = \frac{(x_1 - \bar{x})(y_1 - \bar{y}) + (x_2 - \bar{x})(y_2 - \bar{y}) + \dots + (x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y})}{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2} = 0.41881742$$

όπου x_n : η μέση ετήσια βροχόπτωση κάθε σταθμού για τα 33 υδρολογικά ετή, y_n : το υψόμετρο κάθε σταθμού και $\bar{x}$, $\bar{y}$ η μέση ετήσια βροχόπτωση και το μέσο υψόμετρο των σταθμών αντίστοιχα.

b: σταθερή τιμή του y για $x=0$ και ορίζεται με την εξίσωση

$$b = \bar{y} - a\bar{x} \rightarrow b = 693.6939394 - (0.41881742 \cdot 863) = 332.2545058$$

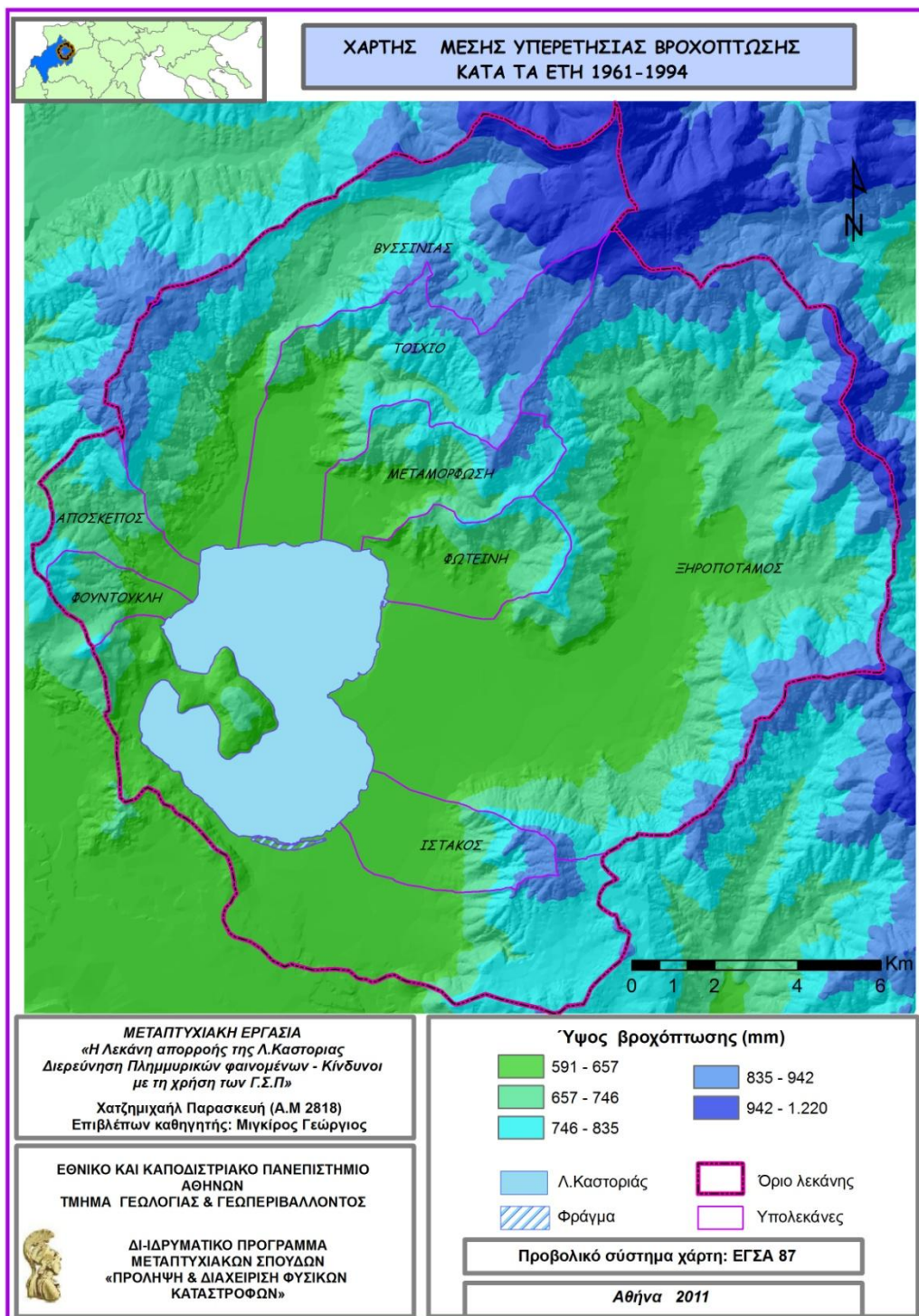
Για να είναι όμως δεκτά τα αποτελέσματα της εξίσωσης της αριθμητικής μεθόδου πρέπει να υπάρχει και ένας βαθμός συσχέτισης (r) στα ζεύγη τιμών των x και y μεγαλύτερος από 0.6 όπως ορίστηκε και στο κεφ. 6.2. Ο βαθμός συσχέτισης στην δικιά μας περίπτωση είναι αποδεκτός με τιμή $r=0.86$ και δόθηκε από τον τύπο

$$r = \frac{(x_1 - \bar{x})(y_1 - \bar{y}) + (x_2 - \bar{x})(y_2 - \bar{y}) + \dots + (x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y})}{\sqrt{[(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2] \cdot [(y_1 - \bar{y})^2 + (y_2 - \bar{y})^2 + \dots + (y_n - \bar{y})^2]}}$$

Σύμφωνα λοιπόν με τα αποτελέσματα της εξίσωσης της μεθόδου αυτής και με τη χρήση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Dem) και της εργαλειοθήκης spatial analyst-raster calculator του λογισμικού ArcMap, κατασκευάσαμε το χάρτη μέσης ετήσια βροχόπτωσης από τα στοιχεία 33 υδρολογικών ετών των βροχομετρικών σταθμών τα στοιχεία των οποίων δίνονται στο κεφάλαιο 6.3. Με τη μέθοδο αυτή και τη χρήση του Dem αναγάγαμε το υψόμετρο σε ύψος βροχής από το οποίο μπορούμε πλέον να πάρουμε πληροφορία για το πόσο ύψος βροχής δέχεται το παραγόμενο ψηφιδωτό (raster) αρχείο μας με μονάδα χωρικής αναφοράς το εικονοστοιχείο διαστάσεων 10 x 10 m. Στο χάρτη που ακολουθεί φαίνεται η μέγιστη, μέση και ελάχιστη τιμή της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης.

Συμπερασματικά θε λέγαμε λοιπόν ότι η διαμόρφωση της απορροής και γενικά το υδρολογικό ισοζύγιο επηρεάζεται από το ύψος και επομένως από την ποσότητα βροχής αλλά και από τη διάρκεια, την έκταση, την ραγδαιότητα καθώς και από τον τρόπο κατανομής της. Όσο μειώνεται η διάρκεια και η έκταση της βροχής, τόσο αυξάνει η έντασή της και αντίστροφα.

Βροχές με μέτρια ή μικρή ένταση με μεγάλη όμως διάρκεια ή συνεχείς επαναλήψεις, μπορούν να προκαλέσουν ζημιές σε λεκάνες με ευολίσθητα γεωλογικά αποθέματα όπως ο φλύσχης και αυτό γιατί οδηγούν σε έντονο διαποτισμό των γεωμαζών. Έτσι επέρχεται αύξηση του βάρους και μείωση των εσωτερικών τριβών των εδαφών πράγμα που διευκολύνει την κινητικότητά τους και οδηγεί σε μαζικές γεωλισθήσεις με έντονες τοπικές καταστροφές (Κωτούλας, 1985, σελ 56).



Όπως παρατηρούμε από τον παραπάνω χάρτη το μέσο υπερετήσιο ύψος βροχόπτωσης φθάνει τα 1220.11 mm και εμφανίζεται στις ορεινές περιοχές ενώ η ελάχιστη τιμή εμφανίζεται στις πεδινές περιοχές με 591.911 mm. Η υπολεκάνη Ξηροποτάμου δέχεται μικρότερο ύψος βροχής ($P_{Mean}=717.1$ mm) σε σύγκριση με την υπολεκάνη Βυσσινιάς ($P_{Mean}=804.17$ mm), Τοιχιού ($P_{Mean}=743.67$ mm) και Μεταμόρφωσης ($P_{Mean}=743.67$ mm). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο ποσοστό πεδινής έκτασης που καταλαμβάνει ο Ξηροπόταμος και της σχέσης του ύψους βροχής με την υψομετρική πληροφορία της περιοχής.

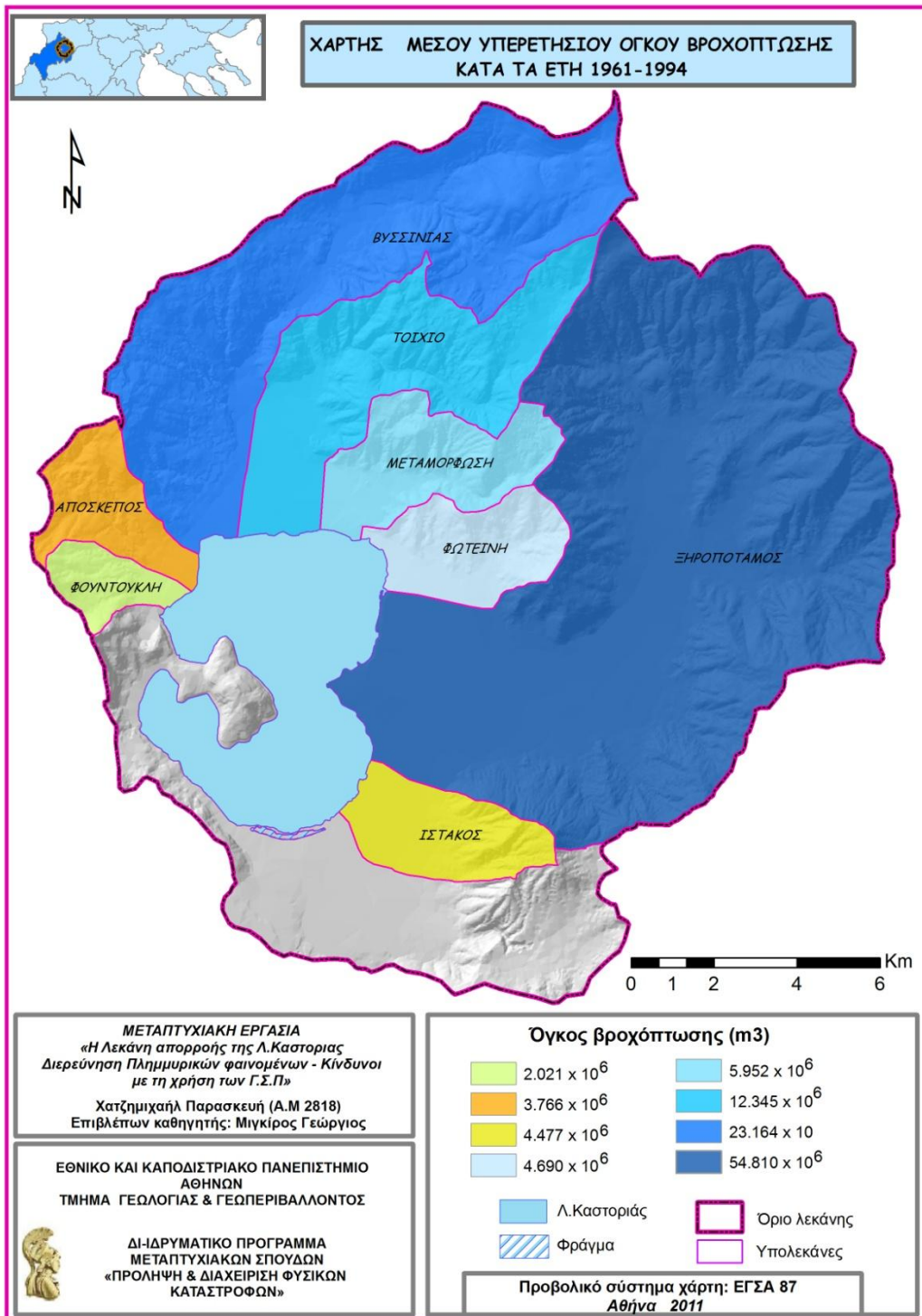
6.4.4.1 Όγκος ατμοσφαιρικών κατά κρημνισμάτων (Vp)

Για τον υπολογισμό μέσου όγκου ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων έπρεπε αρχικά να βρεθεί το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κάθε υπολεκάνης μας. Η μέση τιμή κάθε υπολεκάνης πολλαπλασιαζόμενη με το αντίστοιχο εμβαδόν της μας έδωσε το μέσο όγκο ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων της .

ΠΙΝΑΚΑΣ 4 :ΜΕΣΟΣ ΟΓΚΟΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ 33 ΕΤΩΝ

A/A	Υπολεκάνες	Εμβαδό(m ²)	Mean Elev.	Max P(mm)	Mean P(mm)	Vpmean(m3)
1	ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗΣ	4.163.915,45	855,625	846,972	690,59	2.875.558,37
2	ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	7.759.591,51	900,013	876,690	709,18	5.502.947,10
3	ΒΥΣΣΙΝΙΑΣ	48.906.150,69	1126,819	1220,086	804,17	39.328.859,20
4	ΤΟΙΧΙΟΥ	25.809.162,79	982,317	1107,007	743,67	19.193.500,09
5	ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	12.329.410,89	908,445	926,950	712,70	8.787.171,14
6	ΦΩΤΕΙΝΗΣ	9.692.818,85	790,601	829,561	663,35	6.429.731,38
7	ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΥ	113.979.046,74	918,892	1111,586	717,10	81.734.374,42
8	ΙΣΤΑΚΟΣ	9.341.654,07	800,927	911,125	667,70	6.237.422,42
ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	SUM	231.981.750,99				170.089.564,13
	MEAN		910,454875	978,747	713,56	21.261.195,52
	Max		1126,819	1220,086	804,17	81.734.374,42
	Min		790,601	829,561	663,35	2.875.558,37





6.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΒΡΟΧΗΣ ΣΤΗΝ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Η ένταση αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα της βροχόπτωσης και ο υπολογισμός της είναι απαραίτητος, με την προϋπόθεση ότι υπάρχουν βροχομετρικά δεδομένα, για την εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου μιας και σαν μέγεθος αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την εκδήλωση τέτοιων φαινομένων.

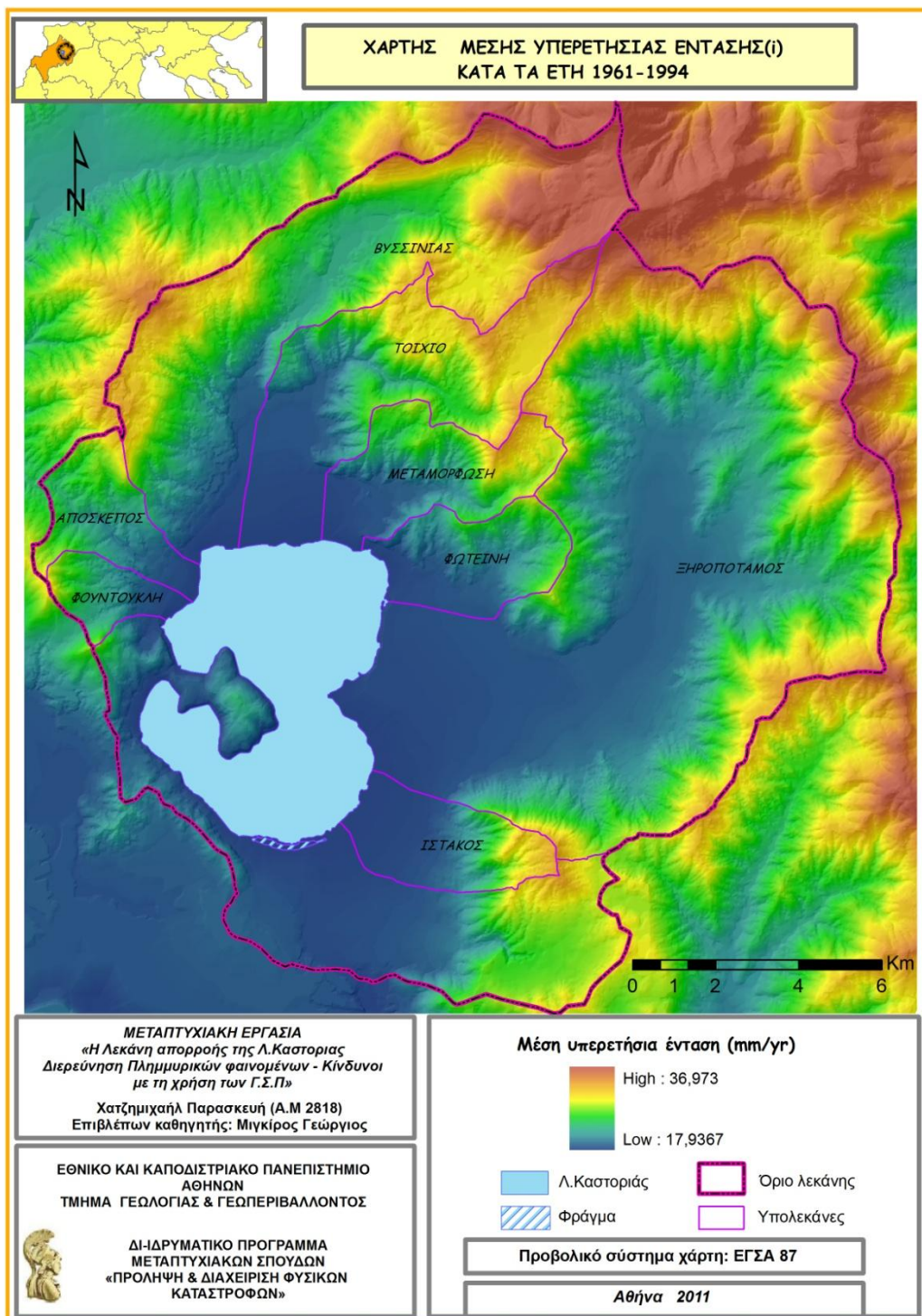
Έχοντας στη διάθεση μας βροχομετρικά δεδομένα για την περιοχή μελέτης μας, από το 1963-1994, αξιοποιήσαμε τα πρωτογενή δεδομένα με στόχο την καλύτερη δυνατή εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου στην λεκάνη απορροής της λίμνης Καστοριάς.

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφ .6.1.3 , η ένταση βροχόπτωσης ορίζεται από την σχέση : $i = \frac{\Delta h}{\Delta t}$.

Η μονάδα μέτρησης στην συγκεκριμένη μελέτη είναι τα mm/yr όπου η μονάδα χρόνου ισούται με τα 33 υδρολογικά έτη για τα οποία είχαμε στοιχεία μετρήσεων ύψους βροχόπτωσης. Σε αυτό το σημείο να υπενθυμίσουμε ότι η μελέτη πλημμυρικού κινδύνου και το υδατικό ισοζύγιο αφορά την εφαρμογή ενός μοντέλου σε σχετικά μεγάλη χρονική κλίμακα οπότε και οι τιμές για κάθε μεταβλητή και παράμετρο αφορούν τις μέσες υπερετήσιες τιμές για το σύνολο των ετών.

Σε συνδυασμό λοιπόν με την κατανομή της βροχόπτωσης και το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής υπολογίστηκαν οι τιμές της μέσης και μέσης μέγιστης έντασης(i) για το σύνολο της λεκάνης απορροής και των επιμέρους υπολεκανών της ξεχωριστά.

Για την κατανομή έντασης της βροχόπτωσης στο σύνολο της λεκάνης χρησιμοποιήθηκε σαν βάση η κατανομή του ύψους βροχόπτωσης μέσω της αριθμητικής μεθόδου η οποία όπως αναλύθηκε και στο κεφ. 6.3.1 , λαμβάνει υπόψη της την υψομετρική πληροφορία της περιοχής. Για το λόγο αυτό και τα αποτελέσματα των τιμών της έντασης θεωρούνται ότι προσεγγίζουν καλύτερα την πραγματικότητα απ'ότι αν κ κατανομή του ύψους βροχής γινόταν με τη μέθοδο Thiessen η οποία δεν λαμβάνει υπόψη της την υψομετρική κατανομή της ευρύτερης περιοχής. Στον ακόλουθο χάρτη παρουσιάζεται η μέση υπερετήσια τιμή έντασης($I_{Mean/max}$).



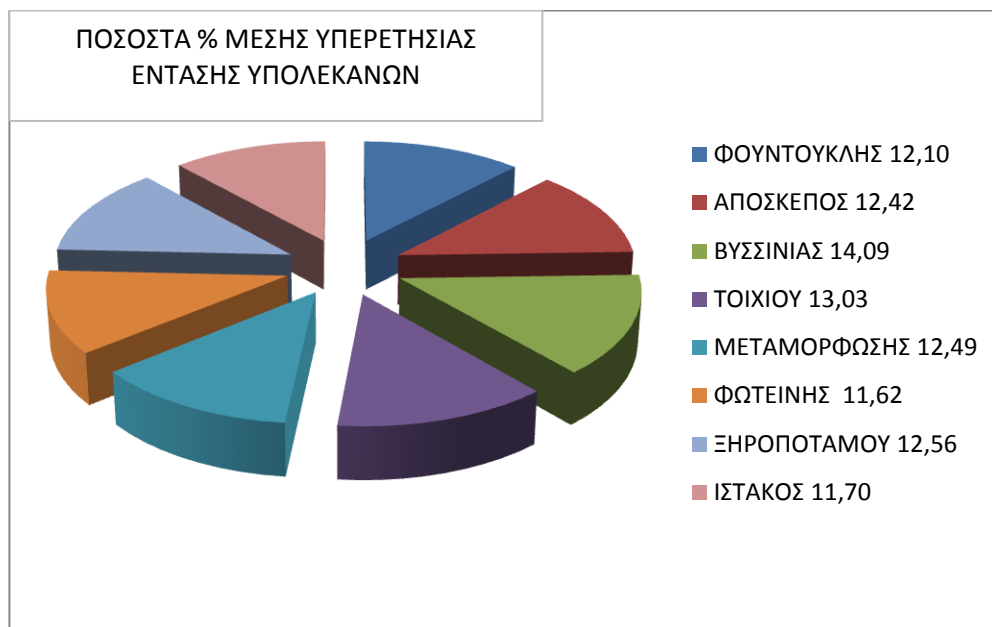
Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες και μέγιστες υπερετήσιες τιμές έντασης σε κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά και στο σύνολό της καθώς και ο αντίστοιχος χάρτης με την κατανομή της έντασης σε όλη την λεκάνη απορροής.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5 :ΕΝΤΑΣΗ(ι) ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ 33 ΕΤΩΝ						
Υπολεκάνες	Εμβαδό(Km ²)	Mean Elev.	Max P(mm)	Mean P(mm)	Μέση i(mm/yr)	Μέση max i(mm/yr)
ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗΣ	4,16	855,625	846,972	690,59	20,927	25,665
ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	7,76	900,013	876,690	709,18	21,49	26,566
ΒΥΣΣΙΝΙΑΣ	48,91	1126,819	1220,086	804,17	24,368	36,972
ΤΟΙΧΙΟΥ	25,81	982,317	1107,007	743,67	22,535	33,545
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	12,33	908,445	926,950	712,70	21,597	28,089
ΦΩΤΕΙΝΗΣ	9,69	790,601	829,561	663,35	20,101	25,138
ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΥ	113,98	918,892	1111,586	717,10	21,730	33,684
ΙΣΤΑΚΟΣ	9,34	800,927	911,125	667,70	20,233	27,609
ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	SUM					
	MEAN		910,454875	978,747	21,623	29,66
	Max	1126,819	1.220,086	804,17	24,368	36,972
	Min	790,601	829,561	663,35	20,101	25,138

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι η μέση μέγιστη ένταση βροχόπτωσης εμφανίζεται στην υπολεκάνη Βυσσινιάς με $i = 36.97 \text{ mm/yr}$. Πρόκειται για τη 2^η μεγαλύτερη σε έκταση, μετά την υπολεκάνη Ξηροποτάμου, και την 1^η σε κατάταξη όσων αφορά το μέσο μέγιστο ύψος βροχής ($P_{\text{Mean/max}}$) 1220,086 mm. Το μέγιστο υψόμετρο της λεκάνης εμφανίζεται σε στη συγκεκριμένη υπολεκάνη με 2120 m το οποίο αποδεικνύει και τις μεγαλύτερες τιμές έντασης και βροχόπτωσης οι οποίες συνδέονται άμεσα με το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής.

Εξίσου σημαντικές τιμές έντασης και ύψους βροχόπτωσης δίνουν οι υπολεκάνες Τοιχιού και Μεταμόρφωσης με μέσες μέγιστες τιμές $i = 33.545 \text{ mm/yr}$ και $i = 28.039 \text{ mm/yr}$ αντίστοιχα και οι οποίες τείνουν να πλησιάσουν αυτή του Ξηροποτάμου ($i_{\text{Mean/max}} = 33.684 \text{ mm/yr}$). Οι υπολεκάνες αυτές αν και έχουν μικρότερη έκταση συγκριτικά με αυτή του Ξηροποτάμου, δίνουν μεγάλες τιμές έντασης και βροχόπτωσης οι οποίες οφείλονται στο έντονο ανάγλυφο που παρουσιάζουν (το υψόμετρο στην υπολεκάνη Τοιχιού φθάνει τα 1850 μ) και στις απότομες κλίσεις του εδάφους.

Για την κατανομή έντασης της βροχόπτωσης στην λεκάνη απορροής χρησιμοποιήθηκε σαν βάση η κατανομή τους ύψους βροχόπτωσης και για την οποία στην συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήσαμε την αριθμητική μέθοδο. Για το λόγο αυτό και δεδομένου ότι η μέθοδος αυτή λαμβάνει υπόψη της το τοπογραφικό ανάγλυφο, τα αποτελέσματα της θεωρούνται ότι προσεγγίζουν περισσότερο την πραγματικότητα σε σύγκριση με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen στην οποία δεν λαμβάνεται υπόψη το υψόμετρο της περιοχής.



6.6 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Τα δεδομένα θερμοκρασίας έχουν ληφθεί από τους 2 μετεωρολογικούς σταθμούς που λειτουργούν στην περιοχή της λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς και είναι οι ακόλουθοι:

- Σταθμός Καστοριάς(ΥΓ) από το έτος 1961-93
- Σταθμός Καστοριάς(ΔΕΗ) << >> 1961-93

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες των μέσων μηνιαίων και ετήσιων θερμοκρασιών των 2 σταθμών. Οι τιμές θερμοκρασίας δίνονται στην τελευταία σελίδα του κεφαλαίου αυτού.

6.6.1 Σχέση Υψομέτρου - Θερμοκρασίας

Τα στοιχεία των 2 σταθμών του παραπάνω πίνακα μας βοηθούν να συνδέσουμε το υψόμετρο με τη μέση ετήσια θερμοκρασία και έμμεσα με τους παράγοντες του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης μας όπως π.χ με τον όγκο των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

Για την αναγωγή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας αέρος(θ) σε ορισμένο υψόμετρο(Z) χρησιμοποιήσαμε τον τύπο 1 (Σαχσαμάνογλου, 1977 σελ.42). Στην προκειμένη περίπτωση, και από τα διαθέσιμα δεδομένα, η μέση ετήσια θερμοκρασία αέρος για τα 33 υδρολογικά έτη των 2 μετεωρολογικών σταθμών είναι 12.479 °C. Ο σταθμός Καστοριάς(ΥΔΕ) έχει υψόμετρο 740 m ενώ ο σταθμός Καστοριάς(ΔΕΗ) 640 m.

$$\theta = \theta_o - \gamma(Z - Z_o) \quad 1 \text{ όπου}$$

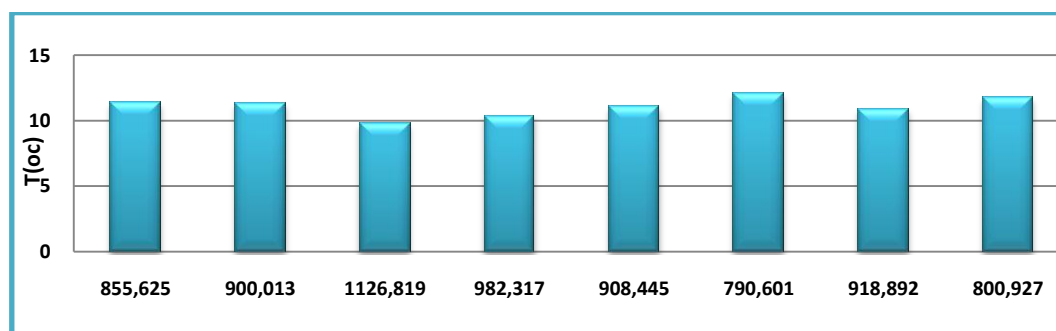
θ_o : η μέση ετήσια θερμοκρασία αέρος(°C)

Z_o : υψόμετρο δεδομένου Μ.Σταθμού

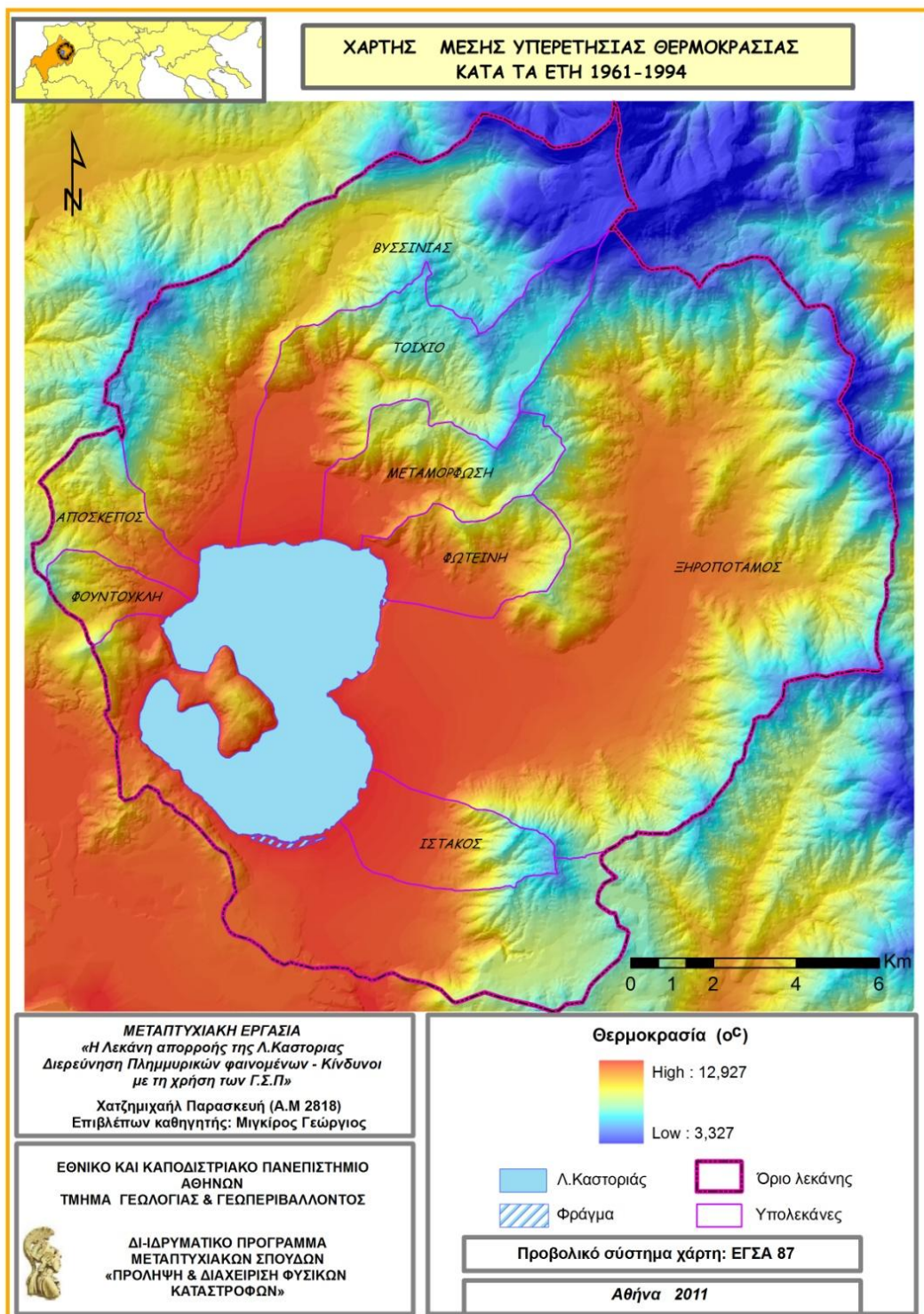
γ : θερμοβαθμίδα. Η τιμή της θερμοβαθμίδας είναι 0,64 °C/100 m $\Rightarrow$ 0,0064 (Flocas 1983).

6.6.2 Αναγωγή υψόμετρου σε χάρτη μέσης ετήσιας θερμοκρασίας

Η αναγωγή του υψόμετρου της λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς σε χάρτη μέσης ετήσιας θερμοκρασίας 33 υδρολογικών ετών έγινε στο λογισμικό ArcMap 9.1 με τη χρήση του *tin* και της εφαρμογής Spatial Analyst - Raster calculator όπως φαίνεται παρακάτω. Η μέση μέγιστη θερμοκρασία της λεκάνης απορροής είναι 12.926 °C και παρατηρείται όπως ήταν αναμενόμενο βάση του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους στα χαμηλότερα υψόμετρα ενώ η μέση ελάχιστη θερμοκρασία είναι 7.015 °C και παρατηρείται στα υψηλότερα υψόμετρα όπως φαίνεται και στον αντίστοιχο χάρτη που ακολουθεί.



Διάγραμμα μέσης υπερετήσιας θερμοκρασίας – μέσου υψόμετρου των υπολεκάνων της λίμνης Καστοριάς 33 υδρολογικών ετών



Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται η μέση ετήσια θερμοκρασία κάθε υπολεκάνης η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της τιμής του L (βλέπε κεφ. 9.1)

ΠΙΝΑΚΑΣ 6 :ΥΨΟΜΕΤΡΟ - ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ

A/A	Υπολεκάνες	Max Elev.	Mean Elev.	Max P(mm)	Mean P(mm)	Mean temp. (°c)	Min temp. (°c)
1	ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗΣ	1228,689	855,625	846,972	690,59	11,42	9,029
2	ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	1299,99	900,013	876,690	709,18	11,13	8,575
3	ΒΥΣΣΙΝΙΑΣ	2120	1126,819	1220,086	804,17	9,683	3,327
4	ΤΟΙΧΙΟΥ	1849,939	982,317	1107,007	743,67	10,61	5,055
5	ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣ ΗΣ	1420	908,445	926,950	712,70	11,08	7,807
6	ΦΩΤΕΙΝΗΣ	1186,02	790,601	829,561	663,35	11,835	9,295
7	ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟ Υ	1860,96	918,892	1111,586	717,10	11,01	4,985
8	ΙΣΤΑΚΟΣ	1382,77	800,927	911,125	667,70	11,77	8,048
ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗ Σ	SUM						
	MEAN	1543,546	910,454875	978,747	713,56	11,07	7,015
	Max	2120	1126,819	1220,086	804,17	11,835	9,295
	Min	1186,02	790,601	829,561	663,35	9,683	3,327

Όπως παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα, η ελάχιστη τιμή μέσης υπερετήσιας θερμοκρασίας εμφανίζεται στην υπολεκάνη Βυσσινιάς με τιμή 9.683 °c , ακολουθεί αυτή στην υπολεκάνη Τοιχιού, Ξηροποτάμου και Μεταμόρφωσης με μεγαλύτερη τιμή στην υπολεκάνη Φωτεινής (11.835 °c). Οι τιμές αυτές αποδεικνύουν την σχέση υψόμετρου-θερμοκρασίας όπου όπως είναι αναμενόμενο οι ελάχιστες τιμές εμφανίζονται σε περιοχές με μεγάλο υψόμετρο όπως συμβαίνει στην υπολεκάνη Βυσσινιάς όπου το μέγιστο υψόμετρό της φθάνει τα 2120 m. Ακόμη είναι εμφανής η σχέση που υπάρχει ανάμεσα στην βροχόπτωση και την θερμοκρασία όπου όπως φαίνεται από τον πίνακα σε περιοχές με μέγιστο μέσο ύψος βροχής παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας (υπολεκάνη Βυσσινιάς).

Από την κατανομή τιμών θερμοκρασίας και τη σχέση υψόμετρου-βροχόπτωσης-θερμοκρασίας μπορούμε να διεξάγουμε έμμεσα συμπεράσματα για το πώς θα κινηθούν οι μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου. Για παράδειγμα σε περιοχές με μικρή τιμή θερμοκρασίας, παρατηρούμε και σε συνάρτηση με άλλους παράγοντες φυσικά όπως το ανάγλυφο, μεγάλες τιμές βροχόπτωσης. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στην περιοχή αυτή αναμένονται μεγάλες τιμές επιφανειακής απορροής.

Η κατανομή θερμοκρασίας στην περιοχή μελέτης μας 33 υδρολογικών ετών, χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της μεταβλητής εξατμισοδιαπνοής του υδατικού ισοζυγίου που περιγράφεται στα επόμενα κεφάλαια.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΙΣ ΤΙΜΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ(ΥΔΕ)

ΜΗΝΕΣ														M.O
A/A	YEARS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	1961/62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	1962/63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	1963/64	-	-	-	0.5	2.2	8.1	11.8	15.3	21.7	22.8	23.6	18.6	13.84
4	1964/65	15	8.4	5.3	4	-0.1	6.8	10.9	15.9	20.6	25.1	23.1	20.4	12.95
5	1965/66	13.5	7.3	5.2	2.7	7.4	8.2	9.9	14.2	20.4	27.1	27.7	17.5	13.43
6	1966/67	11.1	5.2	3.2	0.5	2.2	7.9	11.5	16.2	17	22.2	21.7	19	11.48
7	1967/68	13.6	7.9	3.3	0.8	5.8	6.8	14.6	20.3	19.3	22.9	20.4	15.1	12.57
8	1968/69	12.7	9.3	3.2	1	5.2	5.6	10.9	19.4	20.3	21	22.2	19.5	12.53
9	1969/70	12.1	10.6	4.2	4.7	0.9	7.4	12.3	14.1	21	22.3	23.6	20.4	12.80
10	1970/71	9.3	8.9	3.7	4.3	3.2	4.4	11.4	17.6	19.8	21	22.4	16.1	11.84
11	1971/72	11.9	7.7	4.4	3.3	4.3	8.2	12.5	15.9	22.4	22	21.7	19.6	12.83
12	1972/73	8.9	9.3	1.9	1.8	4.8	3.7	10.9	18.3	20.3	21.9	20.5	19.8	11.84
13	1973/74	13.6	7.4	2.7	3.3	5.4	8	14.4	14.9	19.6	22.5	22.8	18.4	12.75
14	1974/75	12.3	7.1	4.3	5.5	2.7	7.8	10.4	16.6	20	22.9	21.7	20.6	12.66
15	1975/76	14.7	7.5	3.1	3.5	3.2	7	12.1	15.7	19.2	21.3	19.8	19.8	12.24
16	1976/77	11.9	8.3	3.4	3.8	8.5	8.7	9.9	16.5	20.8	23.6	24.4	16.3	13.01
17	1977/78	11.8	10.1	1	0.2	5.4	8	9.4	14.9	20	22.1	20.1	15.6	11.55
18	1978/79	10	3.8	4.4	-0.3	3.2	7.8	6.3	15.4	19.4	21.3	17.5	16.3	10.43
19	1979/80	11.8	7.6	4.1	0.1	3.1	4.8	7.3	12.5	18	21.9	22.2	18.1	10.96
20	1980/81	14	8.7	2.3	-2	2.2	8.2	11.3	13.9	21.3	20.4	20.6	17.7	11.55
21	1981/82	14.2	4.2	3.9	1.8	1.1	5	9.9	10.4	19.8	20.6	20.7	18.5	10.84
22	1982/83	11.9	4	4.3	1.5	0.2	6.5	11.5	16.5	16	20.5	19	16.5	10.70
23	1983/84	10.1	5.3	2.1	2.5	3	4.6	7.8	13.6	18.5	19.8	19.7	17.4	10.37
24	1984/85	14.7	7.6	2.6	1.5	0.8	5.2	12.1	17.8	19.3	22.3	23	18.4	12.11
25	1985/86	12.4	9.3	5	3.9	4.4	6.9	12.7	15.6	19.4	20.4	22.6	19.7	12.69

26	1986/87	14.1	6.6	2.2	3.2	5.7	2.7	11.4	14.3	20.5	24.4	23	22	12.51
27	1987/88	12.3	8.1	4.7	5.2	3.6	7.3	10.9	14.3	20.2	23	24.6	18.5	12.73
28	1988/89	13.5	4.1	2.9	2	5.8	11.1	14.5	14	17.6	22.1	22.4	19.5	12.46
29	1989/90	11	8.7	2.6	0.6	3.1	11.2	10.4	15.8	19.7	23.6	22.8	19.7	12.43
30	1990/91	15.5	8.8	3.2	2	2.1	9.4	9.7	10.6	22.3	22.4	21.6	19.1	12.23
31	1991/92	14.1	8.4	-0.1	2.6	2.2	7.9	12.1	15.4	17.9	20.9	25	19.4	12.15
32	1992/93	17.4	11.1	2.5	1.9	3.4	7.6	12.3	18.1	22.4	25.8	25.6	21.1	14.10
33	1993/94	17.7	4.9	6.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.60
Mean/33														12.13

ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΙΣ ΤΙΜΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΣΤΑΘΜΟ ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ(ΔΕΗ)														
ΜΗΝΕΣ														M.O
A/A	ΈΤΗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	1961/62	-	-	-	-	-	-	-	18.1	20	23.9	26	20.1	21.62
2	1962/63	14	10	1.1	0	2.1	4.9	11.1	14.8	19.1	23.2	24	20.9	12.1
3	1963/64	13.7	12	5.5	1.4	3.6	7.6	12.3	15.1	20.6	22.1	22.1	17.1	12.76
4	1964/65	14.7	9.4	4.5	2.3	1.4	6	9.9	15.7	20	24.1	20.8	19.5	12.13
5	1965/66	13.8	9.4	6	1.1	8.1	6.9	12.7	15.3	19.6	23	23.7	19.4	13.25
6	1966/67	16.8	9.3	5	0.7	2	8	10.3	16.1	18.1	21.9	23.7	18.9	12.57
7	1967/68	15.6	9.3	5	0.7	2	8	10.3	16.1	18.1	21.9	23.7	18.9	12.47
8	1968/69	12.7	9.3	3.2	1	5.2	5.6	10.9	19.4	20.3	21	22.2	19.5	12.53
9	1969/70	13.6	10.3	4.8	5.2	5.6	8.2	12.1	14.7	20.6	22.2	23.3	19.9	13.38
10	1970/71	13.1	9.7	4.4	5	3.9	5.1	11.6	17.4	20.4	20.3	23.2	17	12.59
11	1971/72	12.5	8.3	4.9	2.8	3.7	8.3	12.5	16.1	21.4	21.8	21.5	17.3	12.59
12	1972/73	9.9	10	3.2	1	4.1	3.8	10.2	18.2	20.2	23.2	21.3	20.2	12.11
13	1973/74	14.2	8.1	2.5	3.6	5.2	7.7	9.4	15.2	20.4	22.8	22.9	19.3	12.61

14	1974/75	13.7	8	4.6	2.7	3.5	8.9	12.4	16.9	20.3	23	22.3	21.8	13.18
15	1975/76	14.4	7.9	3.7	3.7	3.4	6.4	11.1	15.8	18.9	21.7	20.4	18	12.12
16	1976/77	15.1	9.1	4	4.2	8.3	10.2	12.7	17.9	20.9	24.3	23.6	17.7	14.00
17	1977/78	13.6	11.6	2.8	1.7	6.1	8.3	11.1	16.2	21.3	23.4	22.6	17.1	12.98
18	1978/79	12.6	6.1	6.5	2.4	5.3	9.2	9.6	16.7	20.9	22.3	21.7	18.6	12.66
19	1979/80	12.4	7.3	4.2	0.7	1.8	4.3	8.5	11.8	17.4	21.3	21.2	17.4	10.69
20	1980/81	12.2	8.4	1.8	-0.5	3.2	9.9	12.1	15.1	22.2	21.3	21.5	18.9	12.18
21	1981/82	15.1	5.8	4.8	1.9	1.2	5.1	9.5	14.7	20.6	20.7	21.2	18.5	11.59
22	1982/83	11.2	3.3	4.4	1.7	0.2	6.6	11.9	16.5	16.6	20.7	19.8	16.5	10.78
23	1983/84	10.2	5.3	1.6	2.5	2.3	4.6	7.9	14	18.4	21.6	19	17.3	10.39
24	1984/85	14.7	8.1	2.7	3	1	7	13.7	17.8	19.3	22.3	23	18.5	12.59
25	1985/86	12.1	9.3	5	3.9	4.5	6.4	12.7	15.9	19.4	22	24.2	39.5	14.58
26	1986/87	14.1	6.6	2	3.2	5.6	2.4	23	14.3	20.6	24	22.8	22	13.38
27	1987/88	12.3	8.1	4.7	5.2	3.7	7.3	21.7	15.9	20.3	25.3	24.6	18.6	13.98
28	1988/89	13.5	4.3	2.9	2	5.7	11.1	14.5	14	17.5	22.1		19.3	11.54
29	1989/90	12.6	8.9	2.6	0.6	8.1	11.2	12.1	15.9	19.7	23.4	22.6	19.4	13.09
30	1990/91	15.2	8.7	3.8	2	2.1	9.4	9.6	12.2	20.7	21.9	21.8	19.1	12.21
31	1991/92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	1992/93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	1993/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M.O/33														12.82

7.1 Ο ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Το νερό αποτελούσε και συνεχίζει να αποτελεί ένα απαραίτητο αγαθό για την επιβίωση του ανθρώπου. Σήμερα το νερό καταλαμβάνει περίπου το 71% της επιφάνειας της γης. Λειτουργεί ως φορέας ενέργειας και ως μεταφορικό μέσο, όχι μόνο των ανθρώπων αλλά και των φερτών υλών που προέρχονται από το έδαφος και το υπέδαφος λόγω της παρασυρτικής του δύναμης.

Η παρασυρτική δύναμη όμως του νερού μπορεί να προκαλέσει πολλές φορές πλημμυρικά φαινόμενα καταστροφικά προς τον άνθρωπο και το περιβάλλον ενώ οι ραγδαίες αλλαγές των κλιματικών αλλαγών (π.χ αύξηση θερμοκρασίας) μπορούν να προκαλέσουν, πέρα από τις πλημμύρες με το λιώσιμο των πάγων, μείωση του υδάτινου όγκου νερού, ξηρασία ακόμη και αφανισμό λιμνών.

Τα τελευταία χρόνια ο πλανήτης μας δέχτηκε μεγάλες κλιματικές αλλαγές και καταστροφές. Σήμερα, η εξέλιξη της επιστήμης δίνει τη δυνατότητα διαχείρισης του υδάτινου όγκου νερού με τη χρήση πολλών εφαρμογών μέσα στις οποίες συμπεριλαμβάνονται και τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών. Πέραν όμως της επιστήμης είναι και δικιά μας ευθύνη η προστασία του περιβάλλοντος και συνεπώς του νερού μιας και εμείς αποτελούμε το σημείο αναφοράς των κλιματικών αλλαγών (ρύπανση ατμόσφαιρας, υδάτων και εδάφους).

Η κυκλοφορία του νερού από τις θάλασσες και τους ωκεανούς στην ατμόσφαιρα της γης, έπειτα στην επιφάνεια της γης και τέλος πίσω στο σημείο αναφοράς τους περιγράφει τον υδρολογικό κύκλο του νερού και χωρίζεται στις εξής φάσεις:

1. Τα κατακρημνίσματα (**P**) ή ύψος βροχής
2. Την εξατμισοδιαπνοή (**E**) δηλαδή την ποσότητα νερού που επανέρχεται στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης και της διαπνοής.
3. Την κατείσδυση (**I**) δηλαδή την ποσότητα νερού που μόλις περάσει την επιφάνεια του εδάφους εισέρχεται στο υδρογραφικό δίκτυο μέσω της υπόγειας απορροής.
4. Την επιφανειακή απορροή (**R**) δηλαδή την ποσότητα νερού που ρέει επιφανειακά στην επιφάνεια της γης.

Παράμετροι υδατικού ισοζυγίου

Οι βασικές συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου είναι η βροχοπτώση, η εξατμισοδιαπνοή, η επιφανειακή απορροή R και η κατείσδυση (I). Σημαντικές επίσης συνιστώσες και ανάλογα με το υδρογεωλογικό περιβάλλον αποτελούν οι πλευρικές τροφοδοσίες, οι παροχές πηγών και χειμάρρων καθώς και η εκμετάλλευση νερού από τον ανθρώπινο παράγοντα για διάφορες χρήσεις όπως άρδευση, ύδρευση κ.α.

Οι 4 φάσεις του υδρολογικού κύκλου του νερού μπορούν να εκτιμηθούν με την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου με την εξής σχέση:

$$P = I + E + R + DW$$

Κάθε ένα από τα στοιχεία που αποτελούν την παραπάνω εξίσωση μπορεί να εκφραστεί σε όγκο (m^3), σε ύψος βροχής (mm) και σε συντελεστή (%).



Σχήμα 10: Απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου (πηγή: USGS)

Οι συνιστώσες που αποτελούν την παραπάνω εξίσωση υδατικού ισοζυγίου επηρεάζονται και ρυθμίζονται από διάφορους παράγοντες όπως οι χρήσεις γης, το κλίμα και η μορφολογία της περιοχής κ.α. Για τον υπολογισμό αυτών των παραμέτρων καταφεύγουμε στη χρήση μοντέλων προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών τα οποία αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια.

7.2.1 ΟΡΙΣΜΟΙ

Με τον όρο απορροή(runoff) νοείται η ροή του νερού ως συνέπεια των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Βασιζόμενοι σε αυτό τον ορισμό, η απορροή αποτελεί την «απάντηση» ή την «έξοδο» μιας υδρολογικής λεκάνης από τη «είσοδο» των κατακρημνισμάτων.

Το μέγεθος της απορροής (R) μπορεί να εκφραστεί σε όγκο νερού (m³), σε χιλιοστά βροχής (mm) και σε ποσοστό (%) βροχής με το συντελεστή απορροής. Ο συντελεστής απορροής εκφράζει το εκατοστιαίο ποσοστό του ύψους βροχής που απορρέει στη επιφάνεια της γης.

7.2.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή διακρίνονται στους φυσιογραφικούς και στους κλιματικούς παράγοντες. Στους φυσιογραφικούς παράγοντες ανήκουν (Σούλιος, 1986):

- Η κλίση του εδάφους: Όσο πιο μεγάλη είναι αυτή τόσο πιο πολύ λειτουργεί υπέρ της επιφανειακής απορροής ενώ σε εδάφη με σχεδόν οριζόντια κλίση τείνει να μηδενίζεται.
- Το υδρογραφικό δίκτυο: Όσο πιο πυκνό είναι το υδρογραφικό δίκτυο τόσο μεγαλύτερη είναι και η τιμή της επιφανειακής απορροής.
- Η βλάστηση: Η έντονη παρουσία της βλάστησης λειτουργεί εις βάρος της επιφανειακής απορροής.

Στους κλιματικούς παράγοντες ανήκουν:

- Η βροχόπτωση που επιδρά με την ένταση βροχής (βροχοπτώσεις με μεγάλη ένταση ευνοούν την επιφανειακή απορροή ενώ το αντίθετο παρατηρείται σε βροχές μικρής έντασης), την κατανομή της βροχής στο υδρολογικό έτος (αραιές βροχοπτώσεις λειτουργούν εις βάρος της επιφανειακής απορροής σε αντίθεση με τις συνεχείς), το συνολικό ετήσιο ύψος κατακρημνισμάτων ή βροχόπτωσης.
- Η θερμοκρασία, ο άνεμος και άλλοι κλιματικοί παράγοντες που επιδρούν στην εξατμισοδιαπονοή και μέσω αυτής έμμεσα στην επιφανειακή απορροή.

Βάσει των αποτελεσμάτων του πίνακα μέσης ετήσιας επιφανειακής απορροής (βλέπε πίνακα 11 σελ. 132) και όσων αφορά τον παράγοντα βλάστηση, μπορούμε πάρουμε μια γενική πληροφορία για την βλάστηση που επικρατεί σε κάθε υπολεκάνη. Για παράδειγμα μπορούμε να πούμε έμμεσα ότι η υπολεκάνη του Ξηροποτάμου και σε συνάρτηση και με τους άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την απορροή (μέση ετήσια βροχόπτωση της υπολεκάνης, κλίση, υδρογραφικό δίκτυο κτλ.) χαρακτηρίζεται από έντονη βλάστηση λόγω κατακράτησης του νερού και συνεπώς μικρότερη τιμή επιφανειακής απορροής. Υπενθυμίζουμε όμως ότι στον παράγοντα βλάστηση ανήκουν και άλλοι παράμετροι πολύ σημαντική για την ύπαρξή της όπως για παράδειγμα η σύσταση και ποιότητα του εδάφους.

7.2.3 ΜΟΡΦΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Το φαινόμενο της απορροής όπως αναλύθηκε προηγουμένως, παρουσιάζεται με συγκεκριμένες μορφές οι οποίες αναλύονται παρακάτω (Ξανθόπουλος, 1989):

- I. Επιφανειακή απορροή: Με τον όρο επιφανειακή απορροή εννοείται η ροή των υδάτων στην εδαφική επιφάνεια και το υδρογραφικό δίκτυο της υδρολογικής λεκάνης και διακρίνεται στις εξής υποκατηγορίες:
 - ☞ Στην βασική ροή η οποία αποτελεί την επιφανειακή απορροή και προέρχεται από την αποφόρτιση επιφανειακών και υπόγειων υδατικών αποθεμάτων η οποία δεν περιλαμβάνει την άμεση συμβολή ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.
 - ☞ Στην πλημμυρική ροή (Q_A) η οποία αποτελεί την επιφανειακή απορροή που προέρχεται μόνο από το τμήμα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (συνήθως βροχοπτώσεων) και απορρέει άμεσα στο τμήμα εξόδου της υδρολογικής λεκάνης.
- II. Υπόγεια απορροή: Δημιουργείται από το υπόβαθρο μη στεγανής λεκάνης και έτσι μια ορισμένη ποσότητα ύδατος οδηγείται έξω από το χώρο εισόδου ενός τμήματος της λεκάνης, όχι από το επιφανειακό τμήμα της λεκάνης αλλά από άλλες υπόγειες διαφυγές. Ειδικότερα, όταν ένα διαπερατό στρώμα βρίσκεται πάνω σε αδιαπέρατο, οδηγεί συχνά σε ενδογενή, ως προς το χώρο του τμήματος εξόδου της λεκάνης, υπόγεια απορροή η οποία επανέρχεται σε άλλο σημείο της επιφάνειας του ίδιου χώρου της λεκάνης, με τη μορφή πηγών.
- III. Υποδερμική απορροή: Παλαιότερα ορισμένοι υδρολόγοι την ονόμασαν έτσι γιατί υποστήριζαν ότι πρόκειται για την απορροή που κινείται με κάποια καθυστέρηση μέσα στη χαλαρή στρώση χώματος και υλικών σε αποσύνθεση πάνω στο κυρίως εδαφικό υλικό. Εκτενέστερη ανάλυση του φαινομένου έδειξε ότι τόσο ο ορισμός όσο και η περιγραφή του είναι ανακριβής. Πρόκειται απλά

για την 1^η στοιβάδα της επιφανειακής απορροής, με βάθος μικρότερο ή ίσο του μέσου ύψους της χαμηλής φυτοκάλυψης και των μικροεξοχών του εδάφους. Οι αντιστάσεις κατά την κίνηση του νερού στη στοιβάδα αυτή χαρακτηρίζονται από έντονη επιφανειακή τραχύτητα και δικαιολογούν την καθυστερημένη άφιξη των υδάτων στο σημείο εξόδου της λεκάνης.

Η 1^η στοιβάδα θα έχει σαφώς μεγαλύτερο χρόνο ανόδου του υδρογραφήματος σε σχέση με το χρόνο ανόδου του κύριου πλημμυρικού υδρογραφήματος, ενώ ο όγκος της είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με τον συνολικό όγκο της επιφανειακής πλημμυρικής απορροής. Όσο περισσότερο αυξάνεται η «επιφανειακή» τραχύτητα (πυκνή, θαμνώδης βλάστηση, εδάφη χονδρόκοκκα) και όσο περισσότερο μειώνεται η κλίση του εδάφους, τόσο καλύτερα γίνεται διακριτή. Κατά τη χάραξη των υδρογραφημάτων δεν θα πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερα υπόψη και να προστίθεται στην υπόλοιπη επιφανειακή απορροή αφού άλλωστε αποτελεί ένα πρώτο τμήμα της.

7.2.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Πολλές φορές για την εκτίμηση του μεγέθους της επιφανειακής απορροής χρησιμοποιείται το μέγεθος της παροχής δηλαδή της ποσότητας του νερού ενός ρεύματος το οποίο διέρχεται στη μονάδα του χρόνου(π.χ m³/hr) από την συγκεκριμένη διατομή της κοίτης του. Η παροχή διακρίνεται στις εξής κατηγορίες(Κωτούλας, 1985) :

- Στη μέγιστη παροχή(q_{max}): Αποτελεί τη μέγιστη τιμή της παροχής η οποία μπορεί να εμφανιστεί στη συγκεκριμένη διατομή του ρεύματος σε διάστημα 50-100 ετών.
- Στη μέγιστη παροχή ορισμένης συχνότητας(q_{maxN}) : Αποτελεί τη μέγιστη παροχή ρεύματος η οποία εμφανίζεται μέσα σε ορισμένο χρονικό διάστημα, συνήθως < 50 ετών.
- Στη μέση παροχή(q_m): Αποτελεί τον μέσο όρο των διάφορων παροχών ορισμένου χρονικού διαστήματος(π.χ μήνας, έτος).
- Στην ελάχιστη παροχή(q_{min}): Αποτελεί την μικρότερη τιμή της παροχής που εμφανίζεται σε κάθε ρεύμα.

Ο καλύτερος τρόπος προσδιορισμού της παροχής όσων αφορά την ακρίβειά του είναι η μέτρησή της. Λόγω όμως του ότι αυτός είναι πολλές φορές πρακτικά αδύνατος χρησιμοποιούνται διάφοροι εμπειρικοί τύποι, ανάλογα με τις ανάγκες μας και τα δεδομένα μας, που προσδιορίζουν έμμεσα την παροχή και πολλές φορές μέσα από την

επίλυση του υδατικού ισοζυγίου όταν είναι γνωστοί όλοι οι άλλοι παράγοντες όπως αυτός υπολογίστηκε για την περιοχή μελέτης μας.

7.3 ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ

7.3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Ο όρος εξατμισοδιαπνοή είναι σύνθετος και προκύπτει από τη σύνθετη διαδικασία της εξάτμισης και της διαπνοής. Γενικώς εξάτμιση είναι το φαινόμενο μέσω του οποίου ένα υλικό μεταπίπτει από την υγρή κατάσταση στην αέρια, ενώ το φαινόμενο της εξάτμισης του νερού που έχει περάσει μέσω ενός φυτού καλείται διαπνοή (Τσακίρης 1999). Η εξατμισοδιαπνοή όπως και οι άλλες φάσεις του υδρολογικού ισοζυγίου μπορεί να εκφραστεί σε όγκο(m^3) ή συντελεστή(%) ή σε ύψος νερού(mm).

Η εξατμισοδιαπνοή διακρίνεται σε δύο καταστάσεις και είναι οι ακόλουθες:

1. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή(E_d) και
2. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή(E_p)

Δυνητική εξατμισοδιαπνοή : Είναι η οριακή εκείνη τιμή την οποία θα μπορούσε να φτάσει η εξατμισοδιαπνοή αν η προσφορά νερού κάλυπτε συνεχώς την απώλεια από την εξάτμιση και τη διαπνοή σε όλη τη διάρκεια του υδρολογικού έτους. Δείχνει δηλαδή το όριο το οποίο θα μπορούσε να φτάσει η πραγματοποιούμενη διαπνοή αν κάτω από τις κλιματικές συνθήκες αν υπήρχε προσφορά νερού.

Πραγματική εξατμισοδιαπνοή : Είναι αυτή που λαμβάνει χώρα κάτω από τις πραγματικές κλιματικές αλλαγές και ειδικά τις συνθήκες προσφοράς νερού. Εκφράζει το πραγματικό μέγεθος της εξατμισοδιαπνοής, επηρεάζεται από τα κατακρημνίσματα και είναι πολύ ή λίγο μικρότερη της δυνητικής. Για τους παραπάνω λόγους είναι αυτή που μας ενδιαφέρει στη μελέτη υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης την οποία μελετάμε.

7.3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή

Η εξάτμιση από το έδαφος και τις ελεύθερες επιφάνειες νερού(λίμνες), καθώς και η διαπνοή μέσω της φυτοκόλυψης, αποτελούν σημαντικές παραμέτρους που περιλαμβάνονται στην εξίσωση υδατικού ισοζυγίου μιας υδρολογικής λεκάνης και μαζί με την κατείσδυση η οποία περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο, αποτελούν τα υδρολογικά ελλείματα. Παρακάτω αναφέρονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τόσο την διαδικασία της εξάτμισης όσο και της διαπνοής.

ΕΞΑΤΜΙΣΗ

Σύμφωνα με το νόμο του Dalton $v=A*(F_k-F_a)/H$, οι παράγοντες που ρυθμίζουν την εξάτμιση είναι οι ακόλουθοι:

- Η ταχύτητα πνοής του ανέμου που απομακρύνει κορεσμένες μάζες αέρα.
- Η θερμοκρασία του νερού, της ατμόσφαιρας και κατ'επέκταση η ηλιοφάνεια που ρυθμίζει την τιμή του F_k (τάση κορεσμένων υδρατμών για την θερμοκρασία της επιφάνειας του υγρού).
- Η ατμοσφαιρική πίεση(H) και κατ'επέκταση το υψόμετρο.
- Η χημική ποιότητα του νερού λόγω του ότι η εξάτμιση μειώνεται μέσω διαλυμένων ουσιών επιδρώντας με το συντελεστή A ο οποίος εξαρτάται από τη φύση του υγρού, την ταχύτητα του ανέμου ή τη μορφολογία του εδάφους(βλάστηση, γεωλογικοί σχηματισμοί, πορώδες) δημιουργώντας έτσι τις επιφάνειες εξάτμισης.

ΔΙΑΠΝΟΗ

Μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν τη διαπνοή και είναι οι εξής:

- Η υγρασία του εδάφους.
- Η πυκνότητα της βλάστησης, το είδος ,η ηλικία των φυτών, το ύψος, το φύλλωμα και
- Οι κλιματικοί παράγοντες.

7.3.3 Εκτίμηση εξατμισοδιαπνοής (E)

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιούνται διάφορα όργανα και συσκευές όπως τα εξατμισίμετρα τα οποία όμως δίνουν προσεγγιστικά αποτελέσματα για το φυσικό αυτό φαινόμενο. Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής και συγκεκριμένα της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (E_p) είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό εκρέοντων νερού για την εκτίμηση της συνολικής απορροής.

Η ακριβής εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής θα επέτρεπε και τον ακριβή υπολογισμό της συνολικής απορροής, δηλαδή του διαθέσιμου υδάτινου δυναμικού. Από τη στιγμή όμως που το φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής είναι πολύπλοκο και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του ανέμου κ.α και δεδομένου ότι τις περισσότερες φορές υπάρχει έλλειψη τέτοιων δεδομένων ακόμη και των πιο βασικών.

Ένα μοντέλο που θα περιλαμβάνει όλες τις διεργασίες της ροής του νερού μέσα από το σύστημα έδαφος-φυτό-ατμόσφαιρα και θα βασίζεται σε καταξιωμένες φυσικές αρχές θα μπορεί να εφαρμόζεται παγκόσμια για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής. Όμως η δημιουργία ενός τέτοιου μοντέλου δεν είναι εφικτή αφ'ενός μεν γιατί όλες οι διεργασίες της ροής του νερού δεν είναι εξ' ολοκλήρου κατανοητές και αφετέρου εάν ήταν κατανοητές η μαθηματική τους παρουσίαση θα απαιτούσε έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων στον υπολογιστή. (Ταπαϊωάννου 1995).

Τα μοντέλα που βασίζονται στις διεργασίες της εξατμισοδιαπνοής και χρησιμοποιούν μεθόδους συνδυασμού δίνουν ακριβέστερα αποτελέσματα σε σχέση με τα πιο απλά εμπειρικά μοντέλα που βασίζονται σε μια ατμοσφαιρική παράμετρο για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής.

Λόγω όμως των παραπάνω δυσκολιών που αναφέρθηκαν εφαρμόζονται κατ'ανάγκη προσεγγιστικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της παραμέτρου αυτής. Οι μέθοδοι αυτοί περιλαμβάνουν μια σειρά συνήθως απλών εμπειρικών σχέσεων, ημι-εμπειρικών και μεθόδων συνδυασμού οι οποίες αναλύονται παρακάτω (Ξανθόπουλος, 1989, σελ.4.7).

7.3.3.1 Μέθοδοι Συνδυασμού

Οι μέθοδοι αυτοί περιλαμβάνουν σύνθετα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιώντας φυσικό υπόβαθρο, αναφέρονται και βασίζονται στις φυσικές διεργασίες που αποτελούν την εξατμισοδιαπνοή. Παρακάτω περιγράφονται οι κυριότεροι και πιο διαδεδομένοι μέθοδοι συνδυασμού.

☞ Μέθοδος Penmann

Ο Penman (1948) ήταν ο πρώτος που έκανε εφικτή την εκτίμηση της εξάτμισης από μετρήσεις θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και ταχύτητας ανέμου σε μία μόνο στάθμη της ατμόσφαιρας, μέσα από το συνδυασμό των δύο γνωστών τρόπων εκτίμησης της (εξίσωση μεταφοράς και εξίσωση ενεργειακού ισοζυγίου). Ως τότε η εκτίμηση της εξάτμισης προϋποθέτει τη μέτρηση όλων αυτών των παραγόντων σε δύο επίπεδα (επιφάνεια και ατμόσφαιρα). Η εξίσωση Penman κανονικά εφαρμόζεται

για την εκτίμηση της εξάτμισης από υδάτινη επιφάνεια. Μια βασική παραδοχή για την ανάπτυξή της, η οποία ευσταθεί για υδάτινη επιφάνεια, είναι ότι οι υδρατμοί κοντά στην επιφάνεια είναι κορεσμένοι. Η παραδοχή αυτή δεν ευσταθεί στην περίπτωση της διαπνοής, όπου οι υδρατμοί δεν είναι κορεσμένοι στην επιφάνεια των φύλλων. Παρόλη την αδυναμία της αυτή, η μέθοδος Penman έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως και για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής από εδαφικές επιφάνειες (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Η εξίσωση του Penman δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E' = (\Delta \cdot R_n) / (\Delta + \gamma) + (\gamma \cdot F(u) \cdot D) / (\Delta + \gamma) \text{ όπου}$$

Δ : η κλίση της καμπύλης της πίεσης κορεσμού υδρατμών

R_n : η ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας

γ : ψυχομετρικός συντελεστής

λ : λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης

D : το έλλειμμα κορεσμού στην ατμόσφαιρα και είναι ίσο με: $D = e^* T_n - e_a$

$F(u)$: η συνάρτηση ανέμου και υπολογίζεται από τη σχέση: $F(u) = 0,13 + 0,14u$.

☞ Μέθοδος Penmann - Monteith

Για να αντιμετωπίσει την παραπάνω αδυναμία της μεθόδου Penman, ο Monteith (1965) αναδιατύπωσε τη μέθοδο εισάγοντας την επιφανειακή αντίσταση των στομάτων (r_s) των φυλλωμάτων στην εξάτμιση. Προέκυψε έτσι η αποκαλούμενη μέθοδος Penman-Monteith, η οποία είναι κατάλληλη για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής των φυτών και ειδικότερα της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς. Η ίδια μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, με τη διαφορά ότι δεν αρκούν πλέον τα τυπικά για τη μέθοδο Penman μετεωρολογικά δεδομένα αλλά χρειάζονται και μετρήσεις της επιφανειακής αντίστασης των φυλλωμάτων. Η χρήση της μεθόδου Penman-Monteith τείνει να γενικευτεί τα τελευταία χρόνια σε εκτιμήσεις εξατμισοδιαπνοής, λόγω της ακριβέστερης περιγραφής του φαινομένου (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Ο Monteith κατέληξε λοιπόν στην τροποποιημένη σχέση Penman, γνωστή ως εξίσωση Penman-Monteith η οποία δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$E' = (\Delta \cdot R_n) / (\Delta + \gamma') + (\gamma \cdot F(u) \cdot D) / (\Delta + \gamma') \text{ όπου}$$

$$F(u) = \frac{\epsilon \cdot \rho_a}{p \cdot r_a}$$

☞ Μέθοδος Priestley and Taylor

Μια αρκετά διαδεδομένη, εύχρηστη και ικανοποιητικά ακριβής μέθοδος χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν λιγότερα πρωτογενή δεδομένα είναι αυτή των Priestley and Taylor (1972) που περιγράφεται από την εξίσωση:

$$E' = a_e \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * \frac{Rn}{\lambda}$$

όπου a_e αριθμητική σταθερά που ισούται με 1.3

Η μέθοδος έχει προταθεί ως εφαρμόσιμη τόσο για την εξάτμιση από υδάτινες επιφάνειες όσο και για τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή εδαφών (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

☞ Μέθοδος Doorenbos and Pruitt

Οι Doorenbos και Pruitt το 1977 πρότειναν κάποιες τροποποιήσεις της μεθόδου Penman έχοντας ως στόχο να την κάνουν καλύτερη για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς και η εξίσωση δίνεται παρακάτω:

$$E' = c \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * \frac{R\alpha}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot F(u) \cdot D \right]$$

Παρατηρούμε ότι μια τροποποίηση στη μέθοδο αυτή είναι η εισαγωγή του συντελεστή αναγωγής c , ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις διαφορές των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν σε ένα τόπο μεταξύ ημέρας και νύχτας. Η μέθοδος Doorenbos-Pruitt αποτέλεσε το διεθνές πρότυπο, γνωστό και ως πρότυπο F.A.O. (Food and Agriculture Organization), εκτίμησης των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών (Θεοδωρακόπουλος Π., 2009). Μια δεύτερη τροποποίηση αφορά στη συνάρτηση ανέμου, η οποία εδώ είναι:

$$F(u) = 0,27(1 + 0,86u)$$

Ως αποτέλεσμα όλων των τροποποιήσεων της μεθόδου Penman, η μέθοδος Doorenbos-Pruitt παρουσιάζει την τάση υπερεκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Πρόκειται για απλά μοντέλα που βασίζονται σε εκτιμήσεις της εξατμισοδιαπνοής με μια μόνο παράμετρο όπως για παράδειγμα η παράμετρος θερμοκρασία. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιο διαδεδομένες από τις εμπειρικές μεθόδους.

☞ Μέθοδος Thornthwaite

Το 1948 ο Thornthwaite περιέγραψε την εξατμισοδιαπνοή από φυσικής και βιολογικής σημασίας. Αποτέλεσμα των προσπαθειών του ήταν η δημιουργία μιας εξίσωσης για την εκτίμηση της μηνιαίας εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ΕΤ_ο) σε mm με μοναδική παράμετρο την θερμοκρασία (Rosenberg, 1983). Η εξίσωση δίνεται ακολούθως:

$$ET_p = 16(10T/I) * (\mu N/360) \text{ όπου}$$

ET_p : η δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm/μήνα

T_a : η μέση θερμοκρασία του μήνα σε °C

μ : ο αριθμός των ημερών του μήνα

N: η μέση αστρονομική διάρκεια ημέρας

I : εμπειρικός συντελεστής (ετήσιος θερμικός δείκτης)

a : εμπειρικός συντελεστής, συνάρτηση του I .

Αντίστοιχα τα I,a υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις

$$I = \sum_{j=1}^{12} j_i \quad : \quad j_i = 0.09 \cdot T_{a_j}^{3/2} \quad \text{και} \quad a = 0.016 \cdot I + 0.5$$

Η μέθοδος Thornthwaite παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα. Η υπολογιζόμενη ΕΤ_ο υποεκτιμάται κατά το χρόνο της μέγιστης ετήσιας ακτινοβολίας το καλοκαίρι, και βρίσκεται έτσι εκτός φάσεως το φθινόπωρο. Ακόμη, η εφαρμογή της για μικρές χρονικές κλίμακες, οδηγεί σε σημαντικά σφάλματα επειδή η μέση θερμοκρασία σε μικρές χρονικές περιόδους δεν αποτελεί κατάλληλο μέτρο της εισερχόμενης ακτινοβολίας. Από την άλλη πλευρα εκτείνεται όσον αφορά το γεγονός ότι τόσο η T_a όσο και η ΕΤ είναι παρόμοιες συναρτήσεις της καθαρής ακτινοβολίας και έτσι αυτοσυσχετίζονται όταν η περίοδος αναφοράς αφορά σχετικά μεγάλη χρονική κλίμακα ενώ ταυτόχρονα για την εκτίμηση της ΕΤ απαιτείται μόνο η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα για τους 12 μήνες του έτους (Pelton et al., 1960).

Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται από τη σχέση που έχει το ύψος βροχής μαζί με το νερό που συνιστά την υγρασία του εδάφους σαν άθροισμα συγκρινόμενο με την δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Αν το άθροισμα αυτό είναι μεγαλύτερο της δυνητικής τότε η πραγματική εξατμισοδιαπνοή ισούται με την δυνητική. Σε αντίθετη περίπτωση η πραγματική ισούται με το άθροισμα της βροχοπτώσεως και της υγρασίας του εδάφους (Thornwaite-Mather, 1955).

☞ Μέθοδος Blaney-Criddle

Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί για την εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών σε πολλές χωρές μέσα στις οποίες συμπεριλαμβάνεται και η Ελλάδα.

Ενώ η αρχική εξίσωση των Blaney-Criddle (1950) απαιτούσε για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής μόνο την ύπαρξη των τιμών θερμοκρασίας αέρα, η βελτιωμένη μορφή της περιέχει και άλλες σχετικά εύκολα μετρούμενες παραμέτρους και παρέχει την δυνητική εξατμισοδιαπνοή(αναφοράς) E_{To} σε mm για το θεωρούμενο χρονικό διάστημα (Παπαζαφειρίου, 1984). Δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_{To} = a + b \cdot F \text{ όπου}$$

$$F = (0.46 \cdot T_a + 8.16) \cdot o \text{ με}$$

T_a : η μέση θερμοκρασία του αέρα για το θεωρούμενο διάστημα ($^{\circ}C$)

o : το ποσοστό ωρών ημέρας του μήνα προς τις ώρες ημέρας του έτους

a, b : συντελεστές που εξαρτώνται από τη μέση ελάχιστη σχετική υγρασία ($RH_{min} \%$), το μέσο κλάσμα ηλιοφάνειας (n/N) και δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις

$$a = 0.0043 \cdot (RH_{min}) - (n/N) - 1.41$$

$$b = a_0 + a_1 \cdot (RH_{min}) + a_2 \cdot (n/N) + a_3 \cdot (U_2) + a_4 \cdot (RH_{min}) \cdot (n/N) + a_5 \cdot (RH_{min}) \cdot (U_2) \text{ όπου}$$

$$a_0 = 0.81917$$

$$a_1 = -0.0040922$$

$$a_2 = 1.705$$

$$a_3 = 0.65649$$

$$a_4 = -0.0059684$$

$$a_5 = -0.0005967$$

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε με μεγάλη ακρίβεια και για πρακτικούς σκοπούς σε πολλές περιοχές και σε κλίματα παρόμοια με αυτά της Ελλάδας. Θα πρέπει παρόλα αυτά να χρησιμοποιείται με επιφύλαξη στις ακόλουθες περιπτώσεις (Παπαζαφειρίου, 1984).

- ✓ Σε μικρά νησιά και σε παράκτιες περιοχές όπου η T_a επηρεάζεται από την θερμοκρασία ενώ η εποχιακή μεταβολή της ακτινοβολίας είναι μικρή.
- ✓ Σε μεγάλα υψόμετρα, μεγαλύτερα των 1000 m, εξαιτίας της σταθερά χαμηλής T_a αν και τα επίπεδα της ακτινοβολίας είναι σχετικά υψηλά.
- ✓ Σε τοπικά κλίματα που παρουσιάζουν ευρεία διακύμανση της ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια των μεταβατικών εποχών άνοιξης και φθινοπώρου.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για χρονική κλίμακα μικρότερη του μήνα.

☞ Μέθοδος Turc

Ο τύπος του Turc (1951) προσδιορίζει την πραγματική εξατμισοδιαπνοή με την ακόλουθη σχέση:

$$E_p = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad \text{όπου}$$

E_p : πραγματική εξατμισοδιαπνοή

P : ύψος ετήσιων κατακρημνισμάτων των βροχομετρικών δεικτών

L : $300 + 25 \cdot T + 0.05 \cdot T^3$

T : η μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα σε βαθμούς $^{\circ}\text{C}$

7.4.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Με τον όρο κατείσδυση (infiltration) εννοούμε το μέρος των κατακρημνισμάτων που φθάνει στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες διαπερνώντας την επιφάνεια του εδάφους και προστίθενται στο υπόγειο νερό. Εκφράζεται με όγκο I_v (m^3) δηλαδή με το συνολικό όγκο νερού που κατείσδυσε σε μια περιοχή για ορισμένο χρόνο, με συντελεστή (συντελεστής κατείσδυσης I_s) δηλαδή με το ποσοστό των κατακρημνισμάτων P που κατείσδυσαν σε μια περιοχή και σε ύψος νερού (mm) κατείσδυσης που αντιστοιχεί στο πάχος νερού που κατείσδυσε (Σούλιος, 1986,σελ.41).

Η κατείσδυση διακρίνεται στην ολική και στην ενεργή κατείσδυση. Η ολική κατείσδυση αναφέρεται σε όλη την ποσότητα κατακρημνισμάτων που διαπερνά την επιφάνεια του εδάφους. Λόγω όμως της εξατμισοδιαπνοής το νερό δεν φθάνει πλήρως στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες ή αν φθάνει δεν παραμένει τελικά εκεί. Για το λόγο αυτό όταν αναφερόμαστε στον όρο «κατείσδυση» θα εννοούμε την ενεργή κατείσδυση.

7.4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τον συντελεστή κατείσδυσης

Μέτρο της κατείσδυσης είναι ο συντελεστής κατείσδυσης, ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του νερού που κατεισδύει σε σχέση με την ολική βροχόπτωση. Η κατείσδυση αποτελεί μια από τις σημαντικότερες διεργασίες για τον καθορισμό της υδροοικονομίας μιας περιοχής μέσω της συμβολή της στην ανανέωση των αποθεμάτων των υπόγειων υδροφορέων.

Αντιπροσωπεύει το μέρος εκείνο των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που διαπερνά την επιφάνεια του εδάφους και φθάνει στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες προστιθέμενο στα αποθέματα των υπόγειων νερών συμμετέχοντας στις κινήσεις του υπόγειου νερού. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον συντελεστή κατείσδυσης είναι οι ακόλουθοι (Σούλιος, 1896):

- i. Τα κατακρημνίσματα και το ύψος αυτών αφού η κατείσδυση αποτελεί ένα ποσοστό αυτών το οποίο αυξάνεται με τα κατακρημνίσματα.

- ii. Η φύση του εδάφους και υπεδάφους που υπεισέρχεται με το «δυναμικό κατείσδυσης» το οποίο ρυθμίζεται από την περατότητά τους και το πορώδες τους δηλαδή από τη λιθολογική τους σύσταση.
- iii. Η κλίση του εδάφους: Οι μεγάλες κλίσεις διευκολύνουν την απομάκρυνση του νερού, συνεπώς την απορροή σε βάρος της κατείσδυσης σε αντίθεση με τις μικρές κλίσεις και συγκεκριμένα τα οριζόντια εδάφη τα οποία ευνοούν την κατείσδυση.
- iv. Η βλάστηση: Όπως είναι γνωστό τα φυτά συγκρατούν το νερό και διευκολύνουν την κατείσδυση σε βάρος της επιφανειακής απορροής. Λόγω όμως της διαπνοής τους είναι αμφιλεγόμενο αν επιδρούν στην ενεργή κατείσδυση.
- v. Οι κλιματικοί παράγοντες (θερμοκρασία, άνεμος) επιδρούν έμμεσα στην κατείσδυση μέσω της εξατμισοδιαπνοής.
- vi. Η υγρασία του εδάφους, η άροση του εδάφους, η πάκτωση αυτού από τον άνθρωπο, τα μηχανήματα και τέλος το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο υδροφόρος ορίζοντας είναι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν και αυτοί με τη σειρά τους την κατείσδυση.

7.4.3 Μέθοδοι Υπολογισμού Κατείσδυσης

Στον υπολογισμό της κατείσδυσης υπεισέρχονται πολλοί παράγοντες όπως το κλίμα, η μορφολογία, λεπτομερή δεδομένα και μετρήσεις όπως παρουσιάστηκαν και στο παραπάνω κεφάλαιο. Για τους λόγους αυτούς που το καθιστά αρκετά δύσκολο να υπολογιστεί, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την εκτίμηση ή προσέγγιση του παράγοντα αυτού που αποτελεί μέρος του υδατικού ισοζυγίου.

Στη διεθνή βιβλιογραφία απαντά μια πληθώρα μεθόδων εκτίμησης της κατείσδυσης. Οι Lerner et al (1990) ταξινόμησαν τις μεθόδους που συνήθως εφαρμόζονται, στις παρακάτω ενότητες:

- Με τη χρήση ειδικών συσκευών ή εγκαταστάσεων όπως τα λυσίμετρα για άμεσες μετρήσεις σε περιοχές με έκταση μέχρι 100 m².
- Εμπειρικές μέθοδοι της μορφής $RCH = f(P)$, που υπολογίζουν την κατακόρυφη τροφοδοσία (RCH) ως συνάρτηση της βροχόπτωσης (P). Η συνάρτηση αυτή μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική και να περιλαμβάνει εύκολα μετρήσιμες μεταβλητές όπως την έκταση της λεκάνης, τον συντελεστή κατείσδυσης των γεωλογικών σχηματισμών κλπ. Στην κατηγορία αυτή των εμπειρικών μεθόδων εντάσσεται και η μέθοδος του Turc (1954).
- Μέθοδοι υδατικού ισοζυγίου: εφαρμόζονται είτε σε μικρή είτε σε μεγάλη κλίμακα. Στην πρώτη περίπτωση πρόκειται συνήθως για υδατικά ισοζύγια εδαφικών κατανομών.

- Προσεγγίσεις μεθόδου Darcy: Βασίζονται σε εξισώσεις της ροής πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια υπογείου νερού στις οποίες εισάγονται μετρήσεις εδαφικής ή φορτίου ακόρεστης ζώνης και επιλύονται ακόμα και με αριθμητικά μοντέλα.
- Με χρήση ιχνηθετών, όπως το τρίτιο και το χλώριο που ακολουθούν την κίνηση του νερού στην εδαφική κατανομή.

8.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Ο όρος υδρολογικό μοντέλο αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που ενδιαφέρουν σε εφαρμογές της πράξης. Τα μοντέλα αυτά είτε περιγράφουν μεμονωμένα γεγονότα (event-type), όπως ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας, είτε περιγράφουν τη διαχρονική εξέλιξη του υδρολογικού κύκλου σε μια πεπερασμένη χωρική ενότητα (π.χ. μια λεκάνη απορροής). Στην πρώτη περίπτωση, η αναπαράσταση του γεγονότος γίνεται μέσω εμπειρικών ή συστηματικών, συνήθως, προσεγγίσεων (π.χ. ορθολογική μέθοδος, μοναδιαίο υδρογράφημα), παραλείποντας τις διεργασίες του υδρολογικού κύκλου που δεν αφορούν στη μελέτη, όπως η εξατμοδιαπνοή και η διήθηση. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση η προσέγγιση διέπεται, εν μέρει έστω, από κάποιο φυσικό ή εννοιολογικό υπόβαθρο, αναπαριστώντας σε συνεχή χρόνο (continuous-time) τις κύριες, τουλάχιστον, διεργασίες που επηρεάζουν τον κύκλο του νερού, με τη χρήση εργαλείων προσομοίωσης (Ευστρατιάδης, 2008).

Η μελέτη των υδρολογικών διεργασιών που αποτελούν την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου θα ήταν εύκολη αν γνωρίζαμε την αποτύπωση κάθε υδρολογικής μεταβλητής σε συνεχή και κατανεμημένο χρόνο και χώρο. Λόγω όμως της πολυπλοκότητας των διεργασιών αυτών όσων αφορά το βάθος χρόνου και της μεγάλης χωρικής κλίμακας που εξελίσσονται, η προσέγγισή τους μελετάτε σε μια χαρακτηριστική χωροχρονική κλίμακα.

Τα μοντέλα προσομοίωσης υδατικού ισοζυγίου δίνουν μια συνολική εικόνα του υδρολογικού κύκλου και των συνιστωσών του για μια συγκεκριμένη χωρική οντότητα όπως είναι η υδρολογική λεκάνη και τα κατακρημνίσματα της οποίας μετατρέπονται σε απορροή (Mantoudi et al., 2004).

Τα υδρολογικά μοντέλα αποσκοπούν στην αναζήτηση των υδάτινων αποθεμάτων και την αξιοποίηση του υδάτινου δυναμικού καθώς επίσης και στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων από την εκδήλωση υδρολογικών φαινομένων όπως οι πλημμύρες και η ξηρασία. Κάθε μοντέλο οφείλει να εξασφαλίζει την προγνωστική ικανότητα της αναπαραγωγής όλων των ιστορικών δεδομένων απορροής της λεκάνης μιας και

μπορεί να συμβάλλει στη σύνταξη μελετών προστασίας από έκτακτα επεισόδια του φυσικού περιβάλλοντος υπέρ του ανθρώπινου δυναμικού και σε συνεργασία με αυτό.

8.2 ΣΤΑΔΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Τα υδρολογικά μοντέλα χρησιμοποιούνται ως εργαλείο για τη διαχείριση υδάτινου όγκου και η επιλογή του καταλληλότερου εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες (Μιμίκου, 1994, σελ.264).

- Από το σκοπό της μελέτης και
- Από τα διαθέσιμα δεδομένα τα οποία αφορούν μετρήσεις των υδρολογικών μεταβλητών όπως το ύψος βροχής.

Η ανάπτυξη ενός υδρολογικού μοντέλου περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια(Beven,2001 pp.3-6)

- ✓ Την επιλογή διεργασιών για την προσομοίωση (perceptual model)
- ✓ Την διατύπωση μαθηματικών εξισώσεων (conceptual model)
- ✓ Την κωδικοποίηση της υπολογιστικής διαδικασίας(procedural model)
- ✓ Τον υπολογισμό παραμέτρων-βαθμονόμηση (model calibration)
- ✓ Την αποτίμηση συνέπειας και ακρίβειας (model validation)

8.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Το 1978 ο Thorntwaite έκανε την πρώτη προσπάθεια προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου αναπτύσσοντας ένα μονοπαραμετρικό μοντέλο υδατικού ισοζυγίου μέσω της εκτιμής της εξατμισοδιαπνοής απλών λεκανών και χωρίς τον υπολογισμό των υπόγειων υδάτων(Dingman, 1994). Στη συνέχεια, οι Thorntwaite and Mather (1955) παρουσίασαν μια τροποποιημένη εκδοχή του αρχικού μοντέλου, η οποία αποτέλεσε τη βάση όλων των μεταγενέστερων μοντέλων υδρολογικής προσομοίωσης και τα οποία λόγω της συνεχόμενης εξέλιξης των υπολογιστών χρησιμοποιούνται εκτεταμένα. Οι Singh and Woolhiser (2002), σε μια εκτενή βιβλιογραφική επισκόπηση, ξεχωρίζουν ένα πλήθος 70 περίπου καταξιωμένων υδρολογικών σχημάτων, τα οποία χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με:

- το πεδίο εφαρμογής τους·

- τη χωρική τους κλίμακα·
- την μαθηματική τους δομή·
- τη χρονική τους διακριτότητα.

8.3.1 ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Κατά κανόνα, και συμπερασματικά από τα παραπάνω, το πεδίο εφαρμογής των υδρολογικών μοντέλων αποτελεί είτε η λεκάνη απορροής είτε ο υδροφορέας. Έτσι λόγω διαφορετικής χωρικής και χρονικής εξέλιξης των φυσικών διεργασιών σε κάθε περιοχή και πρακτικών διαχείρισης, είναι αναγκαία η ανάπτυξη διαφορετικών κατηγοριών μοντέλων.

Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται, συνήθως, σε σχήματα υδατικού ισοζυγίου, που επιδιώκουν συνολική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου σε μια συγκεκριμένη χωρική ενότητα (η ενιαία λεκάνη ή διακριτά τμήματά της), περιγράφοντας τον μετασχηματισμό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σε απορροή (απ' όπου και η παραδοσιακή ορολογία μοντέλα βροχής-απορροής). Η απορροή της λεκάνης είναι η κύρια έξοδος του μοντέλου, αλλά και η μεταβλητή ως προς την οποία ελέγχεται η προσαρμογή του. Η υπόγεια (βασική) ροή θεωρείται συνιστώσα της συνολικής απορροής, και συνήθως εκτιμάται συγκεντρωτικά, με βάση απλοποιημένες παραδοχές (π.χ. θεωρώντας τον υδροφορέα ως γραμμικό ταμιευτήρα, η εκφόρτιση του οποίου τροφοδοτεί την υπόγεια απορροή).

Στην δεύτερη περίπτωση προσομοιώνεται ο μηχανισμός κίνησης του υπόγειου νερού, με την χωρική (ή και χρονική) διακριτότητα της προσομοίωσης να είναι, ως επί το πλείστον, πολύ πιο λεπτομερής σε σχέση με τα μοντέλα επιφανειακής υδρολογίας. Πρόκειται για αριθμητικά σχήματα προσομοίωσης του πεδίου ροής του υδροφορέα, με διακριτοποίησή του σε στοιχειώδη τμήματα που καλούνται κύτταρα (cells). (Ευστρατιάδης κ.α).

8.3.2 ΧΩΡΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ

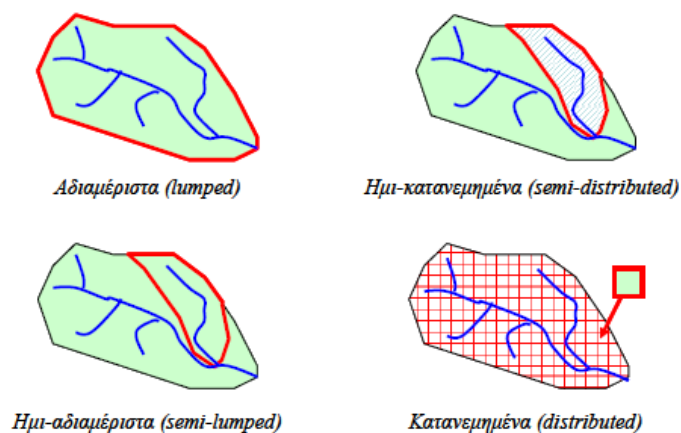
Μια από τις πιο χαρακτηριστικές χωρικές κλίμακες της υδρολογίας αποτελεί η λεκάνη απορροής όπως αναφέρθηκε και ορίστηκε στο κεφ. 5.4. Η κλίμακα αυτή ωστόσο δεν είναι σταθερή μιας και η έκταση από λεκάνη σε λεκάνη ποικίλλει. Ο διαμερισμός της λεκάνης απορροής σε επιμέρους τμήματα, τις υπολεκάνες (sub-basins), έχει περισσότερα πλεονεκτήματα ως προς τη μελέτη μεταβλητότητας των υδρολογικών διεργασιών και κυρίως όταν πρόκειται για τη μελέτη μεγάλων λεκανών

απορροής. Ο διαμερισμός της λεκάνης μπορεί να γίνει με τη βοήθεια ενός καννάβου (grid) ή πλέγματος (lattice) σε κύτταρα (cells) κανονικού γεωμετρικού σχήματος.

Τα υδρολογικά μοντέλα ανάγουν τις σημειακές διεργασίες (point processes) σε επιφανειακές ολοκληρώνοντας έτσι τις υδρολογικές μεταβλητές εισόδου (βροχόπτωση) και εξόδου (εξατμισοδιαπνοή, απορροή, κατείσδυση) καθώς και τις παραμέτρους που περιγράφουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος σε κάποια πεπερασμένη χωρική κλίμακα (Ευστρατιάδης, 2008).

Η χωρική κλίμακα αποτελεί το θεμελιώδες χαρακτηριστικό των υδρολογικών μοντέλων βάση της οποίας τα υδρολογικά μοντέλα σχηματοποιούνται και παραμετροποιούνται στις ακόλουθες κατηγορίες (Gupta et al., 2003):

1. Αδιαμέριστα(Lumped): Τα δεδομένα εισόδου αφορούν όλη την επιφάνεια της λεκάνης για την οποία θεωρούνται ενιαίες τιμές παραμέτρων. Το μοντέλο σε αυτή τη φάση αναπαριστά τις κύριες μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου για το σύνολο της λεκάνης και την εκτίμηση της απορροής σε αυτήν.
2. Ημι-αδιαμέριστα(semi-lumped): Πρόκειται για μια ενδιάμεση μορφή μεταξύ της αδιαμέριστης και της ημικατανεμημένης σχηματοποίησης, στην οποία θεωρούνται διακριτές χωρικές ενότητες που δέχονται διαφορετικές φορτίσεις, ωστόσο οι παράμετροι που εφαρμόζονται είναι κοινές για όλες τις ενότητες (Ajami et al., 2004).
3. Κατανεμημένα (distributed): Το φυσικό σύστημα διαχωρίζεται σε χωρικές ενότητες μικρότερης κλίμακας, σε κύτταρα, τα οποία προκύπτουν είτε από την εφαρμογή ενός ορθογωνικού κανάβου δεδομένης ισοδιάστασης είτε έχουν ακανόνιστο γεωμετρικό σχήμα (π.χ. πεπερασμένα στοιχεία, πεπερασμένοι όγκοι). Σε κάθε περίπτωση, η χωρική διαμέριση δεν έχει γεωγραφικό ή φυσικό νόημα, και τα κύτταρα αντιπροσωπεύουν ομοιογενή και ισότροπα εδαφικά τμήματα, στα οποία αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων.
4. Ημι-κατανεμημένα(semi-distributed): Σε αυτή την περίπτωση η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε διακριτές περιοχές οι οποίες αντιστοιχούν είτε συνήθως σε φυσικές λεκάνες είτε σε χωρικές ενότητες με κοινά υδρογεωμορφολογικά χαρακτηριστικά εκ των οποίων σε κάθε μια από αυτές αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων. Η απορροή(απόκριση) με το τέλος της υπολογιστικής διαδικασίας, «απαντάται» στο σημείο εξόδου της λεκάνης η οποία σε μικρή χρονική κλίμακα προϋποθέτει την εφαρμογή σχημάτων διόδευσης.



Σχήμα 11 : Κατάταξη υδρολογικών μοντέλων βάση χωρικής κλίμακας (πηγή: Ευστρατιάδης, 2008)

8.3.3 Χρονική κλίμακα

Οι μεταβλητές των υδρολογικών διεργασιών πέρα από την χωρική κλίμακα παρουσιάζουν και χρονική εξέλιξη. Η χρονική κλίμακα που ορίζεται εξαρτάται από το πρόβλημα που μελετάτε. Γενικότερα για την παρακολούθηση πλημμυρών η χρονική κλίμακα πρέπει να είναι υποπολλαπλάσιο του χρόνου συγκέντρωσης ή χρόνου συρροής της λεκάνης².

Έτσι λοιπόν η χρονική κλίμακα και ανάλογα με τα δεδομένα και το σκοπό μπορεί να είναι μηνιαία ή ημερήσια ακόμη και ετήσια κυρίως για τα προγνωστικά μοντέλα πλημμυρών και για μακροπρόθεσμες μελέτες διαχείρισης υδάτινων πόρων όπως η κατασκευή αντιπλημμυρικών έργων.

² Ο χρόνος συγκέντρωσης είναι μια διάρκεια χαρακτηριστική της δεδομένης λεκάνης απορροής και ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσει το πλημμυρικό νερό από τα πιο απομακρυσμένα σημεία της λεκάνης στη διατομή της εξόδου. Κατάλληλες για μελέτες καταιγίδων και πλημμυρών είναι οι κλίμακες λεπτών, ώρας και ημέρας ενώ για τα προβλήματα και μελέτη αξιοποίησης υδάτινων πόρων είναι κατά κανόνα επαρκής η μηνιαία ή ετήσια κλίμακα (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999).

Η κατηγοριοποίηση των υδρολογικών μοντέλων οφείλεται στην έντονη χωροχρονική μεταβλητότητα των υδρολογικών μεταβλητών.

Με βάση τη μαθηματική τους δομή και την προσέγγισή τους στο χώρο χωρίζονται σε (Λέκκας 2006 ,Ευστρατιάδης 2008):

1. Μοντέλα φυσικής βάσης (physically based) ή προσδιοριστικά (ντετερμινιστικά) : Τα μοντέλα αυτά βασίζονται σε φυσικούς νόμους που αφορούν την κίνηση του νερού και σε ημι-εμπειρικές σχέσεις που έχουν προκύψει από έρευνες σε πειραματικές λεκάνες. Έτσι λοιπόν και καθώς χρησιμοποιούν μικρή χρονική κλίμακα για την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών ανήκουν στην κατηγορία των κατανεμημένων μοντέλων.

Λόγω της πυκνής χωρικής ανάλυσης των μοντέλων αυτών, το πλήθος των χαρακτηριστικών μεγεθών τους που αφορούν το έδαφος και το υπέδαφος είναι αρκετά μεγάλο. Τα μεγέθη αυτά μπορούν να προσδιοριστούν από τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης(π.χ τοπογραφία, γεωλογία, υδρογεωλογία) χωρίς να είναι απαραίτητες οι μετρήσεις απόκρισης(απορροή) με την προϋπόθεση βέβαια της χωρικής κατανομής των χαρακτηριστικών αυτών.

2. Εννοιολογικά μοντέλα(conceptual model): Πρόκειται για την κατασκευή απλών μοντέλων μέσω της χρησιμοποίησης μικρού αριθμού παραμέτρων για την προσομοίωση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών με έντονη χωρική ανομοιογένεια. Οι παράμετροι αυτοί μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές για τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της χωρικής ενότητας παρόλο που δεν έχουν πλήρη φυσική ερμηνεία. Η χρονική κλίμακα που χρησιμοποιείται στα εννοιολογικά αυτά μοντέλα μπορεί να είναι ωριαία, ημερήσια ή μηνιαία και περιέχει διαφορετικούς βαθμούς πολυπλοκότητας χρησιμοποιώντας 10-20 παραμέτρους και οι οποίοι είναι κατάλληλοι για άνυδρες ή ημιάνυδρες λεκάνες. Μπορούν φυσικά να χρησιμοποιηθούν και λιγότεροι παράμετροι για λεκάνες με πλούσιο υδατικό δυναμικό (Alley, 1984· Makhlouf and Michel, 1994· Ye et al., 1997· Xu and Singh, 1998). Τα εννοιολογικά μοντέλα συνήθως αναφέρονται στα αδιαμέριστα, ημιαδιαμέριστα και ημικατανεμημένα μοντέλα βάση της χωρικής κλίμακας. Αν και η κατανεμημένη σχηματοποίηση ισχύει κυρίως για τα φυσικά μοντέλα, παρόλα αυτά πολλοί επιστήμονες και δεδομένου της δυνατότητας γενίκευσης των σημειακών φυσικών νόμων που ισχύουν για μια μικρή κλίμακα ως προς την προσομοίωση των χωρικά κατανεμημένων διεργασιών, θεωρούν την κατανεμημένη μοντελοποίηση εννοιολογική ως προς την

μονάδα χωρικής διακριτότητας όπου αναφέρεται το μοντέλο και στην οποία το σύστημα θεωρείται ομοιογενές και ισότροπο (Beven 1989).

Σύμφωνα με τους Kuczera and Parent (1998), τα εννοιολογικά υδρολογικά μοντέλα μπορεί να θεωρηθούν ως ενδιάμεσες διατυπώσεις μεταξύ των μοντέλων φυσικής βάσης και των σχημάτων μαύρου κουτιού.

3. Στατιστικά-Στοχαστικά μοντέλα (πιθανοτική προσέγγιση): Τα στατιστικά μοντέλα βασίζονται στην πιθανοτική προσέγγιση των υδρολογικών διεργασιών βάσει της οποίας αντιμετωπίζονται ως τυχαίες μεταβλητές είτε μεμονωμένες είτε ως σύνολο. Πιο συγκεκριμένα, τα στατιστικά μοντέλα χρησιμοποιούν μεθόδους επαγωγικής στατιστικής και είναι κατάλληλα όταν η πραγματοποίηση ενός υδρολογικού φαινομένου όπως είναι η πλημμυρική αιχμή, θεωρείται ή μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη από κάθε άλλη πραγματοποίηση του ίδιου φαινομένου. Η 2^η κατηγορία των στοχαστικών μοντέλων, βασίζεται στη θεωρία των στοχαστικών εξελίξεων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου καθώς λαμβάνει υπόψη τη χρονική αλληλεπίδραση (στοχαστική δομή) των διεργασιών και θεωρείται πλήρης (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, σ. 62, 1999). Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύονται οι τρόποι υπολογισμού παραμέτρων των μοντέλων αυτών.
4. Μοντέλα «Μαύρου Κουτιού» (black box): Ως μοντέλα μαύρου κουτιού αναφέρονται κυρίως τα αποκαλούμενα νευρωνικά δίκτυα, που διατυπώνουν έντονα μη γραμμικούς μετασχηματισμούς των μεταβλητών εισόδου σε εξόδους (Govindaraju and Rao, 2002). Τα μοντέλα αυτά έχουν στόχο τον προσδιορισμό μιας συναρτησιακής μορφής ώστε να εκφράζει τη σχέση ανάμεσα στις μεταβλητές «εισόδου» και «εξόδου» του συστήματος. Αυτή η συναρτησιακή μορφή δεν βασίζεται στην αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών, δηλαδή δεν απαιτείται η κατανόηση του μηχανισμού που συνδέει την είσοδο με την έξοδο του συστήματος, αντίθετα στόχος είναι η βαθμονόμηση ενός αδιαφανούς μηχανισμού που αναλαμβάνει να παράγει την παρατηρημένη έξοδο για μια γνωστή είσοδο γι' αυτό το λόγο έχει μεγάλη εφαρμογή σε προβλήματα που διέπονται πολλοί και διαφορετικοί φυσικοί νόμοι (Ρόζος 2010).

8.3.5 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Τα επιφανειακά μοντέλα ανάλογα με την προσέγγιση που χρησιμοποιούν χωρίζονται σε μοντέλα φυσικής βάσης και σε εννοιολογικά. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα μοντέλα φυσικής βάσης βασίζονται στους φυσικούς νόμους του συστήματος και κατά αυτό τον τρόπο προσομοιώνουν τις υδρολογικές διεργασίες

με σύνθετες και αλληλοεξαρτώμενες μαθηματικές σχέσεις έχοντας ως στόχο τον προσδιορισμό της επιφανειακής απορροής. Από την άλλη πλευρά χρησιμοποιώντας εννοιολογική προσέγγιση για την εφαρμογή επιφανειακού μοντέλου χρησιμοποιούνται απλές και ρητές μαθηματικές σχέσεις για την προσομοίωση φυσικών διεργασιών.

Ανάλογα με την χωρική κλίμακα τα επιφανειακά μοντέλα χωρίζονται σε κατανεμημένα, ημικατανεμημένα και συγκεντρωτικά (Lumded). Στα κατανεμημένα το πεδίο εφαρμογής, συνήθως η λεκάνη απορροής, χωρίζεται σε στοιχειώδης ομογενείς ψηφίδες οι οποίες αντιστοιχούν στα κύτταρα της διακριτοποίησης. Στα κατανεμημένα μοντέλα χρησιμοποιείται αδρομερής διακριτοποίηση σύμφωνα με τη οποία η λεκάνη χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα τα οποία αναπαριστώνται με κύτταρα στα οποία αποδίδονται ίδιες ιδιότητες έχοντας ως στόχο να προσομοιώνουν με επιτυχία το κομμάτι που αναπαριστούν. Τέλος στα συγκεντρωτικά μοντέλα, το σύνολο της λεκάνης προσομοιώνεται με ένα μόνο στοιχείο (Ρόζος 2010).

Τέλος, ανάλογα με τον σκοπό της μελέτης, αν πρόκειται π.χ για πλημμύρα, τα μοντέλα επιφανειακής απορροής χωρίζονται 2 κατηγορίες εκ των οποίων η 1^η περιλαμβάνει τα μοντέλα μοναδικού γεγονότος τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του πλημμυρογραφήματος (Hec-1, USAGE 1998) και στα οποία δεν είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής, και η 2^η κατηγορία η οποία περιλαμβάνει τα μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης τα οποία ολοκληρώνονται με τα μοντέλα υπόγειας ροής για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης. Τέτοια μοντέλα αποτελούν το MIKE-SHE (DHI, 2003), TO WBUDG (Mimίκου, 2000) και το Sacramento (Burnash et al., 1973).

8.3.6 ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ

Τα μοντέλα αυτά από πλευράς προσέγγισης ανήκουν στις κατηγορίες των εννοιολογικών μοντέλων, των μοντέλων φυσικής βάσης και του «μαύρου κουτιού». Τα εννοιολογικά μοντέλα υπόγειας ροής χρησιμοποιούνται για να αποδώσουν μακροπρόθεσμα τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας του υπόγειου ύδατος, ενώ της φυσικής βάσης προσπαθούν να περιγράψουν το σύνολο των υπόγειων υδρολογικών διεργασιών. Τα μοντέλα μαύρου κουτιού χαρακτηρίζονται από έλλειψη αντιστοιχίας της δομής τους με το φυσικό σύστημα.

Στην περίπτωση όπου οι υδρολογικές μεταβλητές υπακούουν σε «αιτιοκρατικούς νόμους» δηλαδή νόμους αιτίου-αποτελέσματος (π.χ βροχή-απορροή), η χρονική μεταβλητή είναι προβλέψιμη ή μη προβλέψιμη οπότε και η εξέλιξη του φαινομένου που μελετάτε θα είναι απρόβλεπτη.

Η ύπαρξη αιτιότητας όμως δεν εγγυάται την προσδιοριστική προβλεψιμότητα των φαινομένων όπως και η τυχαία συμπεριφορά των μεταβλητών στα ντετερμινιστικά ή πιθανοτικά μοντέλα δεν σημαίνει και πλήρη αδυναμία πρόβλεψής τους.

Η δύσκολη προβλεψιμότητα των μεταβλητών πέρα από τους νόμους της κλασικής φυσικής οφείλεται (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999) :

- ✓ Στην μεγάλη πολυπλοκότητα των συστημάτων όπου εξελίσσονται τα υδρολογικά φαινόμενα.
- ✓ Στην ατέλεια της γνώσης και μαθηματικής περιγραφής των συστημάτων και των νόμων που διέπουν τα υδρολογικά φαινόμενα.
- ✓ Στην ημιτελής ή κάποιες φορές στις λανθασμένες μετρήσεις των μεταβλητών.
- ✓ Στην αποκαλούμενη «ευαίσθητη εξάρτηση» από τις αρχικές συνθήκες δηλαδή την μεγέθυνση με την πάροδο του χρόνου έστω και απειροελάχιστων αβεβαιοτήτων γύρω από τις αρχικές συνθήκες, η οποία χαρακτηρίζει τα μη γραμμικά συστήματα.

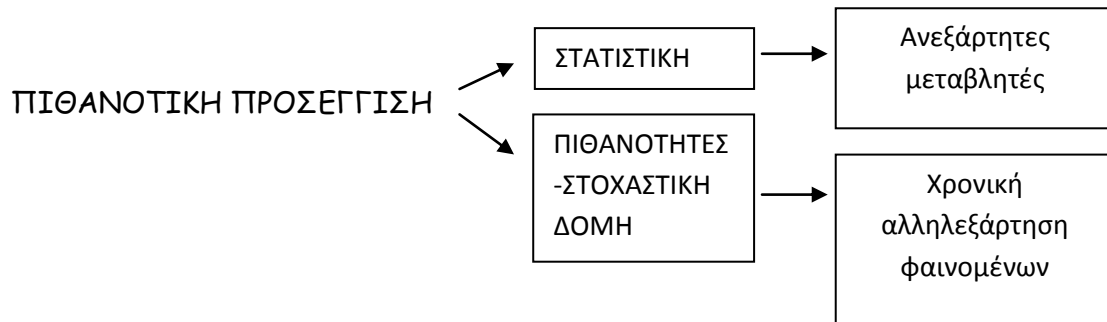
8.4.1 Προσδιορισμός Υδρολογικών Μεταβλητών

Οι προσδιοριστικές μέθοδοι λόγω της αδυναμίας τους στην πλήρη περιγραφή υδρολογικών φαινομένων οδήγησαν στην εναλλακτική θεώρηση των υδρολογικών μεταβλητών ως τυχαίες μεταβλητές και την αντιμετώπιση τους με τη μαθηματική θεωρία των πιθανοτήτων η πρόγνωση της οποίας δίνει διαστήματα μέσα στα οποία αναμένεται να διακυμανθεί η τιμή μιας μεταβλητής με την συγκεκριμένη εφαρμογή πιθανότητας. Έτσι με αυτό τον τρόπο ποσοτικοποιείται η αβεβαιότητα της εξέλιξης των υδρολογικών φαινομένων το οποίο δεν συμβαίνει με τις προσδιοριστικές μεθόδους.

Πιθανοτική προσέγγιση(στατιστικά μοντέλα)

Η πιθανοτική προσέγγιση της εξέλιξης των μεταβλητών γίνεται με 2 διαφορετικές μεθόδους:

- ❖ Η 1^η μεθοδολογία χρησιμοποιεί μεθόδους στατιστικής και είναι κατάλληλη για τη μελέτη ενός φαινομένου του υδρολογικού κύκλου του οποίου η διεργασία είναι ή μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη από κάθε άλλη διεργασία του ίδιου φαινομένου.
- ❖ Η 2^η και πληρέστερη μεθοδολογία βασίζεται σ' ένα σύνθετο κλάδο της θεωρίας των πιθανοτήτων, τη θεωρία των στοχαστικών εξελίξεων μέσω της οποίας μπορεί να ληφθεί υπόψη, για τον προσδιορισμό της μεταβλητής, η χρονική αλληλεξάρτηση των φαινομένων δηλαδή η στοχαστική δομή τους.



Τόσο η προσδιοριστική όσο και η πιθανοτική προσέγγιση πρέπει να συνυπάρχουν για τη μελέτη των υδρολογικών διεργασιών. Και οι δυο προσεγγίσεις έχουν στόχο την πρόγνωση παρόλο που η μεθοδολογία και η φύση της πρόγνωσης είναι διαφορετικές ως προς τη δομή για κάθε μια από αυτές. Κάποιες φορές όμως οι 2 προσεγγίσεις αλληλοσυμπληρώνονται και έτσι τα προσδιοριστικά μοντέλα συμπληρώνονται συχνά με την εισαγωγή τυχαίων μεταβλητών σε αντίθεση με τα στοχαστικά μοντέλα που ενσωματώνουν τις τυχόν προσδιοριστικές μεταβλητές του φαινομένου.

8.4.2 ΣΥΛΛΟΓΗ & ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

Υδρολογική πληροφορία καλείται το σύνολο των πρωτογενών και επεξεργασμένων μετρήσεων των μεταβλητών του υδρολογικού κύκλου. Η πληροφορία αυτή περιλαμβάνει κατά κύρια βάση το ύψος βροχής, η ένταση και η παροχή ως συνάρτησή της.

Οι μετρήσεις παροχής αποτελούν την κύρια υδρολογική πληροφορία. Λόγω όμως της έλλειψης της ή της ανυπαρξίας της. Αποτελεί μια δύσκολη και δαπανηρή διαδικασία. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μαθηματικές εξισώσεις και εμπειρικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό της.

Δευτερεύουσα υδρολογική πληροφορία αποτελούν τα κατακρημνίσματα τα οποία συγκριτικά με τις παροχές έχουν μεγαλύτερο δίκτυο πυκνότητας σημειακών

μετρήσεων και η διάθεση δεδομένων τους είναι πιο εύκολη και λιγότερο δαπανηρή. Έτσι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για την εύρεση παροχών με τη σχέση αιτίου-αποτελέσματος που συνδέει την βροχή με την απορροή.

Η 3^η σε κατάταξη υδρολογική πληροφορία είναι οι μετρήσεις των υπολοίπων υδρομετεωρολογικών μεταβλητών (π.χ υγρασία του αέρα) και χρησιμοποιούνται κατά βάση για την βελτίωση ή συμπλήρωση των κατακρημνισμάτων.

Λόγω της αλλαγής των μεταβλητών μέσα στο χώρο και στο χρόνο, η αποτύπωση τους γίνεται με χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούν όργανα όπως τα βροχόμετρα μετρώντας την υδρολογική μεταβλητή ως σημειακή μέτρηση στα σημεία όπου βρίσκεται και ο σταθμός καθώς επίσης και σύγχρονες μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούν σύγχρονες μεθόδους (π.χ radar) οι οποίες μετρούν κάποιο άλλο μέγεθος πέρα από το ύψος βροχής (π.χ αντανάκλαση νεφών) και το οποίο μετά από υπολογισμό με μαθηματικές εξισώσεις, εξάγει την εκτίμηση του ύψους βροχής καλύπτοντας με αυτό τον τρόπο μόνο την εκτίμηση της βροχόπτωσης σε όλη την επιφάνεια της περιοχής μελέτης.

Η προετοιμασία των στοιχείων είναι το μεγαλύτερο θεμελιώδες μέρος της υδρολογικής μοντελοποίησης. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τη συλλογή των διαφόρων διαθέσιμων υπαίθριων και ψηφιακών στοιχείων, την επεξεργασία και την ενσωμάτωση αυτών στα εκάστοτε μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τις υδρολογικές προσομοιώσεις. Οι πηγές των στοιχείων μπορεί να είναι από διάφορες δημόσιες υπηρεσίες και ιδρύματα. Με τη διαθεσιμότητα της νέας τεχνολογίας, τα επίγεια και τηλεπισκοπικά στοιχεία, καθώς επίσης και τα στοιχεία που συλλέγονται μέσω των παραδοσιακών μεθόδων υπαίθρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υδρολογική μοντελοποίηση (Yu, 2003).

8.4.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Η επιλογή ανάμεσα στην προσδιοριστική ή πιθανοτική προσέγγιση εξαρτάται από τη φύση, τα δεδομένα και τα ζητούμενα του υπό εξέταση προβλήματος. Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα είναι ο χρονικός ορίζοντας της πρόγνωσης του φαινομένου που εξετάζεται.

Σε μικρό χρονικό ορίζοντα (π.χ μερικών ωρών), η κυρίαρχη προσέγγιση που θα χρησιμοποιηθεί είναι η προσδιοριστική και όχι η πιθανοτική. Για την προσδιοριστική προσέγγιση χρειάζονται (Καλλέργης, 1986):

- ✓ Προγνωστικά δεδομένα βροχοπτώσεων τα οποία μπορούν να εξαχθούν από ένα μετεωρολογικό μοντέλο
- ✓ Ένα προσδιοριστικό μοντέλο βροχής - απορροής το οποίο μετασχηματίζει την βροχόπτωση της λεκάνης σε παροχές και διατομές της μισγάγγειας βάση της σχέσης αιτίου - αποτελέσματος. Ο συνδυασμός βροχής και απορροής θα δώσει μια πρώτη εκτίμηση της εξέλιξης της πλημμύρας.

Τις περισσότερες φορές όμως και λόγω των ατελειών των μοντέλων και άλλων παραγόντων, η πρόγνωση της πλημμύρας δεν είναι αντιπροσωπευτική της πραγματικότητας. Σε αυτό ακριβώς το σημείο μπορεί να ποσοτικοποιηθεί η απόκλιση πρόγνωσης-πραγματικότητας με την εισαγωγή τυχαίων συνιστωσών είτε στο προγνωστικό μοντέλο της βροχόπτωσης(μοντέλο πλημμυρών) είτε στο προγνωστικό μοντέλο βροχόπτωσης-απορροής ή και στα δύο.

Συμπερασματικά θα λέγαμε ότι η προσδιοριστική προσέγγιση είναι ικανοποιητική για ένα πρόβλημα με βραχυπρόθεσμη πρόγνωση. Το γεγονός αυτό όμως δεν αποκλείει και την χρήση πιθανοτικών μοντέλων.

Σε μεγάλο χρονικό ορίζοντα(>50 έτη) η πρόγνωση αντιμετωπίζεται καλύτερα με πιθανοτική προσέγγιση απ' ότι με προσδιοριστική και όταν πρόκειται κυρίως για την κατασκευή αντιπλημμυρικών έργων. Για να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο αυτή χρειαζόμαστε το ιστορικό των παροχών της μισγάγγειας που πολλές φορές είναι η πληροφορία αυτή είναι ελλιπής ή απλά δεν υπάρχει καθόλου. Για το λόγο αυτό καταφεύγουμε σε ένα προσδιοριστικό μοντέλο βροχής-απορροής.

Τα δεδομένα βροχόπτωσης που θα χρησιμοποιηθούν στο παραπάνω μοντέλο δεν είναι αποτέλεσμα προσδιοριστικής πρόγνωσης της βροχής για ένα τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα λόγω τις χαοτικής τους εξέλιξης και η ιστορική πληροφορία των παροχών εφόσον υπάρχουν θα πρέπει να συνδεθούν με τις διατομές των ρεμάτων. Συνεπώς η πιθανοτική προσέγγιση χρησιμοποιείται σε μακροπρόθεσμες μελέτες χωρίς όμως να αποκλείεται ο συνδυασμός τους με τις προσδιοριστικές μεθόδους.

Πολλοί ερευνητές ανά τον κόσμο, ανατρέχοντας στην ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία, έχουν πραγματοποιήσει πολλές μελέτες με αντικείμενο εφαρμογής τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου σε διαφορετικές περιοχές μελέτης και χωροχρονικές κλίμακες.

Παρόλο όμως που οι υδρολογικές μεταβλητές, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, αλλάζουν και μεταβάλλονται στο χώρο και το χρόνο, οι περισσότερες από αυτές τις μελέτες αναφέρονται σε συγκεντρωτικά *μοντέλα* τα οποία χαρακτηρίζονται από ένα πλήθος παραμέτρων και απαιτούν μεγάλη εμπειρία για την μοντελοποίηση και βαθμονόμησή τους. Όμως αρκετές σε βάθος διερευνήσεις, έχουν δείξει ότι για την ικανοποιητική μαθηματική αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών αρκεί ένας μικρός αριθμός παραμέτρων (3 έως 5) ενώ αντίθετα η προσθήκη πολλών παραμέτρων έχει χαρακτηριστεί ως «υπερπαραμετροποίηση» των υδρολογικών μοντέλων. (Jakeman & Hornberger, 1993).

Εξάλλου όπως πρόσφατα έχει διαπιστωθεί και πρακτικά σε εφαρμογές υδρολογικών μοντέλων, είναι αρκετή συνήθως, και για ολόκληρη τη λεκάνη, η χρήση ενιαίων τιμών ακόμη και όταν το μοντέλο είναι κατανεμημένο (distributed) ή ημί-κατανεμημένο (semi-distributed) (Gupta et. al, 2003).

8.5.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Η κατασκευή προσομοίωσης για ένα φαινόμενο όπως η προσομοίωση υδατικού ισοζυγίου που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, οφείλει να υπακούει σε γνωστούς προσδιοριστικούς νόμους που συνδέουν το «αίτιο» και το «αιτιατό». Μέσω των προσομοιώσεων είναι δυνατή η πρόβλεψη της κατάστασης που μελετάτε από την επίδραση φυσικών μεταβολών και ανθρώπινης δραστηριότητας και τις χρήσεις γης.

Κατά κανόνα όμως, ακόμη και όταν οι νόμοι που συνδέουν το αίτιο και το αιτιατό είναι γνωστοί, θα πρέπει να προσδιοριστούν οι παράμετροι αυτών των νόμων που μπορούν να εφαρμοστούν στη συγκεκριμένη περίπτωση που μελετάμε. Θα πρέπει λοιπόν σε αυτή τη φάση να ρυθμίσουμε και να οργανώσουμε τους παράγοντες που θα εισαχθούν στην προσομοίωση, δηλαδή να τους καλιμπράρουμε (calibration), με μια λογική σειρά ώστε να έχει κάποιο αποτέλεσμα η προσομοίωση και έπειτα τα αποτελέσματά της και ο προγνωστικός της χαρακτήρας να συγκριθεί με αυτά των παρατηρήσεων στο ύπαιθρο.

Πρέπει σε αυτό το στάδιο, της «φάσης ρύθμισης», οι προσομοιώσεις να αποδείξουν ότι είναι ικανές να αναπαράγουν-μοντελοποιήσουν την τωρινή κατάσταση της περιοχής μελέτης όσο γίνεται πιο πιστά και με τέτοια ακρίβεια ώστε να μπορούμε να εμπιστευτούμε τις προγνώσεις της (Καλλέργης, κεφ.14 σελ.14-2).

Ο τρόπος με τον οποίο θα ρυθμίσουμε την προσομοίωση αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές εργασίες όπου θα στηριχτούν όλες οι υποθέσεις για την διεξαγωγή συμπερασμάτων όπως η γεωμετρία του συστήματος, η φύση των οριακών συνθηκών, οι τιμές των παραμέτρων κ.α (Καλλέργη, κεφ.14 σελ.14-2).

Μέσω της προσομοίωσης μπορεί να γίνει τροποποίηση της αρχικής πρόγνωσης του μοντέλου και των εισαχθέντων παραγόντων ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή πρόγνωση η οποία θα ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν περισσότερο στην πραγματικότητα.

8.5.2 ΦΑΣΕΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ Ή ΦΑΣΗΣ ΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ

Μια ολοκληρωμένη προσομοίωση περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (Καλλέργης, 1986, Μιμίκου 2005):

- ✓ Την αναπαράσταση του φυσικού φαινομένου που εξετάζεται με την επεξεργασία δεδομένων εισόδου(χάρτες κ.α) με μια σειρά συνήθως μαθηματικών εξισώσεων και οι οποίες αποτελούν το γενικό μαθηματικό μοντέλο.
- ✓ Την εισαγωγή και σχηματοποίηση της λεκάνης απορροής(watershed delineation).
- ✓ Την εκτέλεση(run).
- ✓ Την συμπλήρωση παραμέτρων μέσω της αναλυτικής επίλυσης των προαναφερθέντων εξισώσεων, όταν αυτό είναι εφικτό, ή την επίλυση με προσεγγιστικές μεθόδους(προσεγγιστική επίλυση) με τη δημιουργία νέου μαθηματικού τύπου είτε αναλυτικού είτε αριθμητικού με την προϋπόθεση ότι οι λύσεις του και τα αποτελέσματά του θα συγκλίνουν(irritation) προς τις αρχικές του ομοιώματος.
- ✓ Την βαθμονόμηση-ρύθμιση(calibration) της προσομοίωσης και
- ✓ Τον έλεγχο ευστάθειας και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων(evaluation).

8.5.3 Προσομοίωση του μετασχηματισμού «βροχόπτωση-απορροή»

Η συνάρτηση μετασχηματισμού(μοντέλου) της βροχόπτωσης για τον υπολογισμό(προσομοίωση) σε επιφανειακή ή πλημμυρική απορροή είναι στη γενικότερη μορφή της μια συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ των χωροχρονικών κατανεμημένων «εισόδων» της πραγματικής βροχής και του σημείου «εξόδου» στην επιφάνεια της λεκάνης με τη μορφή απορροής.

Μιας και η συνάρτηση μεταφοράς είναι από τη φύση της μη γραμμικό φαινόμενο, είναι αναγκαία η απλούστευσή της μέσω μαθηματικών συναρτήσεων μεταφοράς για τη μελέτη υδρολογικών συστημάτων και του μετασχηματισμού της βροχής σε απορροή. Η συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να προσεγγιστεί και να μελετηθεί με τις μεθόδους και είναι οι ακόλουθες (Ξανθόπουλος, 1989):

- ☞ Αναλυτικές μέθοδοι: Με αυτή τη μέθοδο αναλύονται τα συστήματα μεταφοράς μεταξύ των συναρτήσεων εισόδου-εξόδου δηλαδή του μετασχηματισμού βροχόπτωσης-απορροής το μοντέλο του οποίου κατασκευάζεται με μαθηματικές εξισώσεις και ελέγχεται μέσω των μετρήσεων εισόδου-εξόδου και χωρίς να είναι απαραίτητο οι παράμετροι της συνάρτησης να έχουν ομοιογένεια και φυσική έννοια.
- ☞ Συνθετικές μέθοδοι: Αφορούν τη συνάρτηση μεταφοράς που περιγράφει όσο το δυνατόν καλύτερα τη φυσική διαδικασία του μετασχηματισμού, επομένως οι παράμετροι των μαθηματικών εξισώσεων της θα πρέπει να έχουν διαστατική ομοιογένεια και σαφή φυσική υπόσταση.
- ☞ Συνδυασμός των παραπάνω

8.5.4 Συνοπτική επισκόπηση υδρολογικών μοντέλων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται, συνοπτικά, κάποια από τα υδρολογικά μοντέλα που εφαρμόζονται διεθνώς.

1) Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

Το υπολογιστικό σύστημα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ (Ευστρατιάδης κ.ά., 2006, Efstratiadis et al., 2005) είναι ένα ολοκληρωμένο σχήμα προσομοίωσης, το οποίο υλοποιεί ένα συνδυαστικό (επιφανειακό και υπόγειο) υδρολογικό μοντέλο που αναπαριστά τις διεργασίες στο έδαφος και το υπέδαφος, σε συνδυασμό με ένα σχήμα διαχείρισης συστηματικού προσανατολισμού, το οποίο εκτιμά τις πραγματικές απολήψεις του

υδροσυστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς των τεχνικών έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων.

Ως προς τη χωρική κλίμακα αναπαράστασης των διεργασιών, το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ βασίζεται σε μια ημικατανεμημένη προσέγγιση, εκτιμώντας το ισοζύγιο των υδατικών πόρων σε χαρακτηριστικά σημεία (κόμβοι) του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής. Ως προς τη χρονική κλίμακα, το μοντέλο χρησιμοποιεί μηνιαίο ή ημερήσιο χρονικό βήμα, ενώ σε μελλοντική του έκδοση θα είναι δυνατή η εφαρμογή ακόμα λεπτότερου βήματος, με την ενσωμάτωση διαδικασιών διόδευσης.

Το πρόγραμμα συνεργάζεται με σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας (GIS), για την παραγωγή των δεδομένων εισόδου με γεωαναφορά (Θεματικά επίπεδα). Επιπλέον, χρησιμοποιεί υδρολογικά και διαχειριστικά δεδομένα εισόδου, για την προσαρμογή του μοντέλου στις παρατηρημένες συνθήκες του παρελθόντος (βαθμονόμηση παραμέτρων). Για το σκοπό αυτό, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί μια αυτόματη διαδικασία, που βασίζεται σε πολλαπλά κριτήρια σφάλματος και έναν εύρωστο αλγόριθμο ολικής βελτιστοποίησης.

Το μοντέλο και το σχετικό υπολογιστικό σύστημα έχει αναπτυχθεί στον Τομέα Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ, στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «ΟΔΥΣΣΕΥΣ».

Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ χρησιμοποιεί γεωγραφικά, υδρολογικά και διαχειριστικά δεδομένα εισόδου. Συγκεκριμένα, σε μια ολοκληρωμένη εφαρμογή, ζητούνται οι ακόλουθες κατηγορίες δεδομένων:

- ψηφιακό μοντέλο εδάφους, γεωλογία, κάλυψη γης, σταθμοί μέτρησης
- υδρογραφικό δίκτυο (κόμβοι και κλάδοι υδατορεμάτων), υπολεκάνες, μονάδες υδρολογικής απόκρισης
- κύτταρα υδροφορέα, πηγές, γεωτρήσεις
- κόμβοι απόληξης, υδραγωγεία, ομάδες γεωτρήσεων, αρδευόμενες εκτάσεις, χρήσεις νερού, λειτουργικοί περιορισμοί υδροσυστήματος
- Χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (ανά υπολεκάνη), υδατικές ανάγκες, χρονοσειρές ελέγχου (μετρημένες παροχές ποταμών και πηγών, παρατηρημένες στάθμες υδροφορέα)
- υπολογιστικές συνιστώσες διαδικασιών προσομοίωσης και βαθμονόμησης.

Μια εφαρμογή του μοντέλου έγινε για την μελέτη του υδροσυστήματος της Δυτικής Θεσσαλίας όπου έγιναν οι ακόλουθες εργασίες:

- Ο καθορισμός των θέσεων μέτρησης παροχής σε υδατορέματα
- Ο καθορισμός του κατωφλιού επιφανειακής συγκέντρωσης νερού, που απαιτείται για την αυτόματη χάραξη του υδρογραφικού δικτύου, που επιλέχθηκε ίσο με 24 km²

- Ο καθορισμός των μονάδων υδρολογικής απόκρισης που βασίστηκε στη τομή δύο γεωγραφικών επιπέδων πληροφοριών, της υδρολιθολογίας και των χρήσεων γης του υδροσυστήματος
- Η διακριτοποίηση του υπόγειου υδροφορέα, με βάση τον πιεζομετρικό χάρτη της πεδινής περιοχής
- Η σχηματοποίηση του αρδευτικού δικτύου της περιοχής.

2) Το μοντέλο SWAT

Το SWAT (Soil and Water Assessment Tool) είναι ένα ολοκληρωμένο υδρολογικό μοντέλο φυσικής βάσης, που προβλέπει την επίδραση του υδρολογικού κύκλου στο νερό, τα φερτά υλικά και τη συγκέντρωση των χημικών ουσιών, σε μεγάλες και πολύπλοκες λεκάνες απορροής με ποικίλους τύπου εδαφών και χρήσεων γης. Η ανάπτυξη του μοντέλου ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1990, από την USDA Agricultural Research Service.

Το μοντέλο προσομοίωσης λειτουργεί σε ημερήσια κλίμακα, και απαιτεί τα ακόλουθα δεδομένα εισόδου:

- ψηφιακό μοντέλο εδάφους
- ψηφιακός χάρτης με χρήσεις γης
- ψηφιακό υπόβαθρο υδρογραφικού δικτύου (προαιρετικό)
- ημερήσιες χρονοσειρές βροχόπτωσης, μέγιστης-ελάχιστης θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας
- διάφορα κλιματικά χαρακτηριστικά (προαιρετικά), όπως ύψος βροχόπτωσης για διάρκειες 0.5 και 6 ωρών και περίοδο επαναφοράς 10 ετών, κατανομή βροχόπτωσης, στατιστικά χαρακτηριστικά βροχόπτωσης, διαδοχή υγρών-ξηρών ημερών, μέσες μηνιαίες τιμές μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ηλιοφάνεια, σημείου δρόσου, κλπ.

Το μοντέλο εκτιμά τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή με μία από τις μεθόδους Priestley-Taylor, Penman- Monteith ή Hargreaves.

Οι παράμετροι του μοντέλου είναι:

- παράμετροι καμπυλών SCS (για τη ρύθμιση της επιφανειακής απορροής ανά μονάδα υδρολογικής απόκρισης)
- χρόνος υστέρησης (εφόσον ο χρόνος συρροής είναι μεγαλύτερος της ημέρας)
- δείκτης φυλλικής αγωγιμότητας (επιφάνεια φύλλων που καλύπτουν κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης)
- παράγοντας αντιστάθμισης εξατμισμού εδάφους (λαμβάνει υπόψη την ασυνέχεια των εδαφικών στρωμάτων)

- διαθέσιμη υγρασία εδαφικού στρώματος (όγκος νερού που θα έπρεπε να είναι διαθέσιμος στα φυτά αν το έδαφος βρισκόταν στην υδατοϊκανότητα)
- παράγοντας βασικής απορροής ή συντελεστής αποφόρτισης (~ 1 για ήπιες κλίσεις του καθοδικού κλάδου, ~ 0 για απότομες κλίσεις)
- αρχική αποθήκευση υπόγειου νερού
- κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα
- χαρακτηριστικά μεγέθη αβαθή υδροφορέα (ο χρόνος, σε ημέρες, που χρειάζεται το νερό για να κινηθεί από τη ζώνη ριζοστρώματος στον αβαθή υδροφορέα, ποσοστό νερού που κινείται προς τον αβαθή υδροφορέα, ελάχιστο ύψος νερού που απαιτείται ώστε να υπάρξει κίνηση προς τον αβαθή υδροφορέα, ελάχιστο ύψος που απαιτείται για ροή από το υπέδαφος στο ποτάμι)
- κλάσμα διήθησης υδροφορέα.

Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να παράξει χρονοσειρές "καιρικών συνθηκών", χρησιμοποιώντας τα στατιστικά κλιματικά μεγέθη. Επιπλέον, με βάση τη μέση ημερήσια θερμοκρασία, επιμερίζει τα συνολικά κατακρημνίσματα σε βροχόπτωση και χιονόπτωση. Η τήξη του χιονιού υπολογίζεται συναρτήσει της ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας, της ταχύτητας ανέμου και του σημείου δρόσου. Τέλος, εκτιμά τη θερμοκρασία εδάφους, συναρτήσει της μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα, της φυτοκάλυψης και της χιονοκάλυψης.

Το μοντέλο προσομοιώνει τις ακόλουθες υδρολογικές διεργασίες:

- επιφανειακή απορροή
- ροή μέσω των εδαφικών στρωμάτων (διήθηση)
- ενδιάμεση απορροή
- υπόγεια απορροή
- εξατμισοδιαπνοή (υπολογίζεται χωριστά για το έδαφος και τα φυτά)
- τήξη χιονιού
- απώλειες υδατορεμάτων.

Τέλος, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη του τις κατασκευές συγκράτησης, που είναι έργα αναχαίτισης της απορροής πάνω σε υδατορέματα.

Αν και η προσομοίωση των διεργασιών γίνεται σε ημερήσια κλίμακα, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει σε ημερήσιο, μηνιαίο και ετήσιο χρονικό βήμα. Το χαρακτηριστικό αυτό βοηθά στη βαθμονόμηση του μοντέλου, στην περίπτωση που οι χρονοσειρές απόκρισης είναι αραιότερης χρονικής κλίμακας σε σχέση με την κλίμακα προσομοίωσης (Τέγος, 2005).

3) Το μοντέλο MIKE SHE

Το MIKE SHE (Système Hydrologique Européenne) είναι ένα δυναμικό εργαλείο ολοκληρωμένης προσομοίωσης του επίγειου υδρολογικού κύκλου. Η ανάπτυξη του μοντέλου ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1980, ενώ η ανάπτυξη του λογισμικού υποστηρίζεται από τη Δανέζικη εταιρεία DHI Software και την Γαλλική εταιρία SOGREAH.

Το μοντέλο έχει ένα εξαιρετικά ευρύ φάσμα εφαρμογών σε προβλήματα επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων, καθώς και σε προβλήματα περιβάλλοντος, όπως:

- επιπτώσεις στα επιφανειακά νερά λόγω αντλήσεων
- συνδυασμένη χρήση επιφανειακών και υπόγειων νερών
- διαχείριση και προστασία υδροβιότοπων
- διαχείριση λεκάνης απορροής
- εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- δυναμική επανατροφοδοσία υδροφορέων
- διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων
- μελέτες πλημμυρών
- εκτίμηση επιπτώσεων από αλλαγές στις χρήσεις γης και στο κλίμα
- εκτίμηση επιπτώσεων από γεωργικές πρακτικές.

Το μοντέλο αναπαριστά τις ακόλουθες διεργασίες:

- κατακρήμνιση (βροχόπτωση, χιονόπτωση)
- εξατμισοδιαπνοή, περιλαμβανομένης και της παρεμπόδισης από τη χλωρίδα
- επίγεια απορροή
- ροή σε υδατορέματα ανοιχτούς αγωγούς
- ακόρεστη ροή στο έδαφος
- κορεσμένη υπόγεια ροή.

Για κάθε διεργασία, το MIKE SHE παρέχει εναλλακτικούς τρόπους μαθηματικής περιγραφής, που κυμαίνονται από απλές, συγκεντρωτικές προσεγγίσεις έως εξελιγμένες, κατανεμημένες προσεγγίσεις φυσικής βάσης. Οι εν λόγω προσεγγίσεις μπορούν να συνδυαστούν με μεγάλη ευελιξία, παρέχοντας έτσι στο χρήστη τη δυνατότητα να προσαρμόσει το μοντέλο στο υδρολογικό πρόβλημα που εξετάζεται και στα διαθέσιμα δεδομένα (Τέγος, 2005).

4) 1D και 2D μοντέλα HEC-RAS, LISFLOOD-FP και TELEMAC-2D

Παρακάτω γίνεται εκτενής αναφορά και σύγκριση τριών μονοδιάστατων (1D) και δυοδιάστατων (2D) μοντέλων της υδραυλικής των πλημμυρών που εφαρμόστηκαν σε ακτίνα 60 χλμ του ποταμού Severn, UK.

Η έρευνα που παρουσιάζεται στοχεύει να αξιολογήσει την απόδοση των 1D και των 2D μοντέλων πλημμυρών, και ειδικότερα τη δυνατότητά τους να προβλέψουν την έκταση της πλημμυρικής κοίτης για ένα πλημμυρικό γεγονός όταν αυτά βαθμονομούνται σε άλλο. Αυτό επιτρέπει την αξιολόγηση της καταλληλότητας των μοντέλων για την πρακτική αξιολόγηση του κινδύνου. Τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα απεικονίζουν μια κίνηση των τελευταίων χρόνων από μια 1D προσέγγιση (που αντιπροσωπεύεται από τον αμερικανικό στρατό Σώμα Μηχανικών, μοντέλο HEC-RAS) προς μια 2D (TELEMAC-2D που αναπτύχθηκε από την Electricité de France) και τα μοντέλα που βασίζονται σε αναλογικά (raster) στοιχεία (LISFLOOD-FP). (Horritt & Bates, 2002).

8.5.4.1 Μοντέλα και περιοχή δοκιμής

HEC-RAS

Το μοντέλο HEC-RAS λύνει τις πλήρεις μονοδιάστατες εξισώσεις του St. Venant για την ασταθή ανοικτή ροή των καναλιών. Οι παράμετροι των εξισώσεων που χρησιμοποιεί είναι:

- η συνολική ροή μέσα στα όρια της μελέτης (ακτίνα 60 χλμ),
- οι αποστάσεις κατά μήκος του καναλιού και της πλημμυρικής κοίτης (αυτοί μπορεί να διαφέρουν μεταξύ των διαγώνιων τμημάτων για να επιτρέπεται η στροφή των καναλιών),
- η περιβρεχόμενη περίμετρος,
- η υδραυλική ακτίνα,
- η τιμή της τραχύτητας του Manning και
- η κλίση τριβής.

LISFLOOD-FP

Το μοντέλο LISFLOOD-FP είναι ένα μοντέλο πλημμυρών βασισμένο σε αναλογικά στοιχεία (raster) κατασκευασμένο συγκεκριμένα για την ανάλυση τοπογραφικών στοιχείων υψηλής ανάλυσης. Η παροχή αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας μια μονοδιάστατη προσέγγιση, που είναι σε θέση να συλλάβει την προς τα κατάντη διάδοση του πλημμυρικού κύματος και την συμπεριφορά της επιφανειακής απορροής, η οποία περιγράφεται και υπολογίζεται με εξισώσεις συνοχής και ορμής.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την λειτουργία του μοντέλου είναι:

- η παροχή του υδατορέματος,
- ο διατομικός τομέας της ροής,
- η παροχή από άλλες πηγές (δηλ. από την πλημμυρική κοίτη ή ενδεχομένως από άλλους παραπόταμους),

- η επιφανειακή κλίση,
- ο συντελεστής τριβής,
- η περιβρεχόμενη περίμετρος και
- το βάθος ροής. Σε αυτήν την περίπτωση, το κανάλι λαμβάνεται ως ευρύ και ρηχό, έτσι η περιβρεχόμενη περίμετρος υπολογίζεται από το πλάτος του υδατορέματος.

Η παροχή από την πλημμυρική κοίτη περιγράφεται ομοίως με εξισώσεις συνοχής και ορμής, και δημιουργείται ένα πλέγμα τετραγώνων (κάναβος) που επιτρέπει στο μοντέλο να απεικονίσει σε δύο διαστάσεις (2D) τις πιθανές διατομές παροχής της πλημμυρικής κοίτης. Έτσι λαμβάνει υπόψη και τις παρακάτω παραμέτρους:

- το ελεύθερο ύψος επιφάνειας ύδατος στους κόμβους,
- τις διαστάσεις των πλεγμάτων,
- τον συντελεστή τριβής της πλημμυρικής κοίτης, και την παροχή μεταξύ των πλεγμάτων στις πλημμυρικές κοίτες.

TELEMAC-2D

Το μοντέλο TELEMAC-2D έχει εφαρμοστεί σε διάφορες ποτάμιες πλημμύρες και γεγονότα. Το μοντέλο λύνει τις δυσδιάστατες εξισώσεις ρηχού ύδατος (επίσης γνωστό ως Saint-Venant ή βάθος που υπολογίζεται κατά μέσο όρο) της ελεύθερης επιφανειακής απορροής. Οι παράμετροι που χρησιμοποιεί είναι:

- ένα δυσδιάστατο υπολογισμένο, κατά μέσο όρο, διανυσματικό βάθος ταχύτητας,
- το βάθος ροής,
- το υψόμετρο των επιφανειών επιπέδωσης,
- η επιτάχυνση της βαρύτητας, και
- ο συντελεστής τριβής.

8.5.4.2 Βαθμονόμηση και σύγκριση των μοντέλων

Μετά την βαθμονόμηση των μοντέλων μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα από τα αποτελέσματα εφαρμογής τους στην περιοχή δοκιμής:

- Από την άποψη των προσομοιώσεων όπου το μοντέλο βαθμονομείται έναντι των στοιχείων που προσπαθεί να προβλέψει, το TELEMAC-2D λειτουργεί οριακά καλύτερα από τα άλλα μοντέλα εκτός από τα στοιχεία που αφορούν την πλημμύρα του 2000. Από την άποψη πρόβλεψης συμβάντων, το μοντέλο HEC-RAS αποδίδει οριακά καλύτερα (σε 4 από τις 6 μετρήσεις) από το TELEMAC-2D, το οποίο παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε 2 μετρήσεις και που είναι στη συνέχεια καλύτερος από το LISFLOOD-FP. Το LISFLOOD-FP δεν παράγει την καλύτερη απόδοση για καμία από τις μετρήσεις και τα σύνολα των στοιχείων που εξετάστηκαν. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι

το TELEMAC-2D είναι καλύτερο κατά την πρόβλεψη του κατακλυσμού το 1998 από το HEC-RAS, κατάσταση που αντιστρέφεται για το γεγονός του 2000.

- Το μοντέλο HEC-RAS αποδίδει καλύτερα κατά την πρόβλεψη της πλημμυρισμένης περιοχής όταν βαθμονομείται στην πλημμυρισμένη περιοχή για ένα άλλο γεγονός, όπως και όταν βαθμονομείται σε σχέση με τον χρόνο ταξιδιού του πλημμυρικού κύματος.
- Οι προβλέψεις της περιοχής κατάκλυσης των πλημμυρών από το μοντέλο LISFLOOD-FP είναι σημαντικά φτωχότερες, όταν το μοντέλο βαθμονομείται ως προς το χρόνο ταξιδιού του πλημμυρικού κύματος, σε σύγκριση με την βαθμονόμηση του μοντέλου ως προς την πλημμυρισμένη περιοχή, αν και αυτό είναι σύμφωνο με τους στόχους του σχεδίου και τις προηγούμενες μελέτες ανάλυσης ευαισθησίας αυτής της κατηγορίας μοντέλου.
- Τα αποτελέσματα του μοντέλου TELEMAC-2D δεν εξαρτώνται από τα στοιχεία βαθμονόμησης, δίνοντας παρόμοια αποτελέσματα πρόβλεψης όταν βαθμονομείται ως προς τον χρόνο ταξιδιού και τις πλημμυρισμένες περιοχές.

Το HEC-RAS και το TELEMAC-2D αποδίδουν εξίσου καλά στην πρόβλεψη της πλημμυρισμένης περιοχής, είτε βαθμονομημένα στην πλημμυρισμένη περιοχή του 2000, είτε στο χρόνο ταξιδιού του πλημμυρικού κύματος, ενώ η απόδοση του μοντέλου LISFLOOD-FP εξαρτάται από τα στοιχεία βαθμονόμησης που χρησιμοποιούνται.

8.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Σε όλα τα μοντέλα βελτιστοποίησης υδατικών συστημάτων που εξετάστηκαν, οι μεταβλητές που περιγράφουν τις φυσικές διεργασίες του υδροσυστήματος θεωρούνται γνωστές, και αναζητούνται κάποια τεχνικά (πρόβλημα διαστασιολόγησης) ή λειτουργικά (πρόβλημα διαχείρισης) χαρακτηριστικά, τα οποία αποτελούν τις μεταβλητές ελέγχου του μαθηματικού μοντέλου. Σε κάθε περίπτωση, το πρόβλημα είναι πλήρως ορισμένο, και από την επίλυσή του αναμένεται να προκύψει μία ολική λύση, που βελτιστοποιεί τις μεταβλητές ελέγχου ως προς το συγκεκριμένο μέτρο επίδοσης που ορίζεται. Αντίθετα, στο πρόβλημα βαθμονόμησης οι παράμετροι που περιγράφουν τις εσωτερικές διεργασίες δεν είναι γνωστές, οπότε αυτό που ζητείται δεν είναι η βελτιστοποίηση της απόκρισης του συστήματος ως προς κάποιο εξωτερικό κριτήριο (π.χ. κόστος), αλλά η βελτιστοποίηση της ίδιας της μαθηματικής δομής του, με τρόπο ώστε η προσομοιωμένη απόκριση να προσεγγίζει καλύτερα την παρατηρημένη συμπεριφορά του υδρολογικού συστήματος. Συνεπώς, σε αντιδιαστολή με την ευθεία διατύπωση των προβλημάτων βελτιστοποίησης υδροσυστημάτων, η

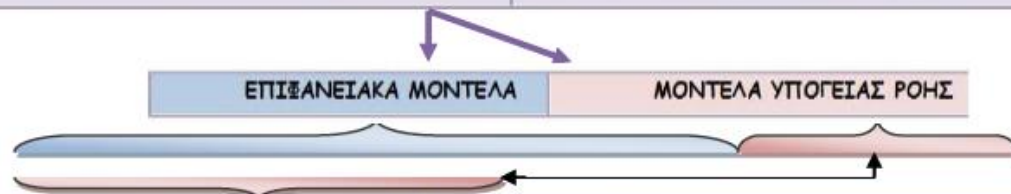
εκτίμηση των παραμέτρων των υδρολογικών μοντέλων είναι γνωστή στη βιβλιογραφία ως αντίστροφο πρόβλημα (inverse problem) (Ευστρατιάδης, 2010).

Η μεθοδολογία που πρόκειται να ακολουθηθεί αφορά την προσομοίωση μοντέλου υδατικού ισοζυγίου και το προγνωστικό μοντέλο πλημμυρικής αιχμής. Γενικότερα η οποιαδήποτε μεθοδολογία θα πρέπει να στηρίζεται στο σκεπτικό του ορισμού ενός υδρολογικού μοντέλου το οποίο κατά κανόνα θα πρέπει να αναπαριστά όσο το δυνατόν καλύτερα τις διεργασίες του φυσικού συστήματος. Τα υδρολογικά μοντέλα και οι κατηγοριοποιήσεις τους ανάλογα με την προσέγγιση τους, την τυχόν βαθμονόμησή τους και τον υπολογισμό παραμέτρων, που αναλύθηκαν εκτενέστερα στο κεφ.... έχουν όλα ως στόχο την εκτίμηση παραμέτρων είτε του υδατικού ισοζυγίου είτε της πλημμυρικής παροχής ή ακόμη και των δύο.

Κάθε ένα από αυτά, χρησιμοποιεί διαφορετικές μεθόδους ως προς την εκτίμηση παραμέτρων (πιθανοτική προσέγγιση, εμπειρικές σχέσεις) για μακροπρόθεσμες ή βραχυπρόθεσμες εφαρμογές. Επίσης για κάθε ένα από τα υδρολογικά μοντέλα και την εφαρμογή τους υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί ως προς τη δομή του μοντέλου όπως για παράδειγμα η χωρική κλίμακα και το πεδίο εφαρμογής που θα χρησιμοποιηθεί, τα διαθέσιμα δεδομένα, η χρονική κλίμακα και τα διαθέσιμα δεδομένα (π.χ για μεγάλες χρονοσειρές υπάρχει έλλειψη μετρήσεων παροχής υδατορευμάτων). Συνεπώς δεν υπάρχει ένα ενιαίο μοντέλο υδατικού ισοζυγίου που να απεικονίζει πιστά την πραγματικότητα για διαφορετικές περιοχές μιας και τα δεδομένα εισόδου χαρακτηρίζονται από έντονη μεταβλητότητα στο χώρο και στο χρόνο. Έτσι για κάθε περιοχή μελέτης και ανάλογα με το σκοπό μελέτης και τα διαθέσιμα δεδομένα θα πρέπει να επιλέγεται η εφαρμογή της δομής ενός μοντέλου το οποίο θα προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα.

Για την πιο ρεαλιστική απεικόνιση των φυσικών διεργασιών θα ήταν ίσως καλύτερο αν συνδυάζονταν οι διάφοροι τύποι μοντέλων ως προς την πιο αξιόπιστη μέθοδο εκτίμησης κάθε φυσικής διεργασίας για κάθε ένα από αυτά και εφόσον μπορεί να υπάρξει βαθμονόμηση.

ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΣΚΟΠΟ ΔΙΑΚΡΙΝΟΝΤΑΙ	
ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ (π.χ MIKE-SHE, SACRAMENTO κ.α)	ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ (π.χ HEC-RAS, LISFLOOD-FP κ.α)



ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ			
ΤΥΠΟΙ			
Μοντέλα φυσικής βάσης (physically based) ή προσδιοριστικά (ντετερμινιστικά)	Εννοιολογικά μοντέλα (conceptual model) -εμπειρικές μέθοδοι	Στατιστικά - Πιθανοτικά μοντέλα	Μοντέλα μαύρου κουτιού (black box) ή μοντέλα χρονοσειρών (data-based)
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ			
• βασίζονται σε φυσικούς νόμους που αφορούν την του νερού και σε ημι-εμπειρικές σχέσεις που έχουν προκύψει από έρευνες σε πειραματικές λεκάνες • χρησιμοποιούν μικρή χρονική κλίμακα για την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών	• απλά μοντέλα μέσω της χρησιμοποίησης μικρού αριθμού παραμέτρων για την προσομοίωση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών με έντονη χωρική ανομοιογένεια • οι παράμετροι αυτοί μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές για τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της χωρικής ενότητας παρόλο που δεν έχουν πλήρη φυσική ερμηνεία • η χρονική κλίμακα που χρησιμοποιείται στα εννοιολογικά αυτά μοντέλα μπορεί να είναι ωριαία, ημερήσια ή μηνιαία • χρησιμοποιούν 10-20 παραμέτρους και οι οποίοι είναι κατάλληλοι για άνδρες ή ημιάνδρες	• βασίζονται στην πιθανοτική προσέγγιση των υδρολογικών διεργασιών βάση της οποίας αντιμετωπίζονται ως τυχαίες μεταβλητές είτε μεμονωμένες είτε ως σύνολο. • χρησιμοποιούν μεθόδους επαγωγικής στατιστικής • κατάλληλα όταν η πραγματοποίηση ενός υδρολογικού φαινομένου όπως είναι η πλημμυρική θεωρείται ή μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη από κάθε άλλη πραγματοποίηση του ίδιου φαινομένου	• αναφέρονται κυρίως τα αποκαλούμενα νευρωνικά δίκτυα, που διατυπώνουν έντονα μη γραμμικούς μετασχηματισμούς των μεταβλητών εισόδου σε εξόδους • έχουν στόχο τον προσδιορισμό μιας συναρτησιακής μορφής ώστε να εκφράζει τη σχέση ανάμεσα στις μεταβλητές «εισόδου» και «εξόδου» του συστήματος • δεν βασίζονται στην αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών • στόχος είναι η βαθμονόμηση ενός αδιαφανούς μηχανισμού που αναλαμβάνει να παράγει την παρατηρημένη έξοδο για μια γνωστή είσοδο • έχει μεγάλη εφαρμογή σε προβλήματα που διέπονται πολλοί και διαφορετικοί φυσικοί νόμοι

ΧΩΡΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ			
Κατηγορίες μοντέλων			
Lumped(αδιαμέριστα)	Semi-lumped(ημιαδιαμέριστα)	Semi-distributed(ημι-κατανεμημένα)	Distributed(κατανεμημένα)
Χαρακτηριστικά			
• Αφορούν όλη την επιφάνεια της λεκάνης • Αναπαριστούν τις κύριες μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου για την εκτίμηση απορροής όλη τη λεκάνη • Οι μεταβλητές αντιπροσωπεύουν τις μέσες τιμές της λεκάνης	• Θεωρούνται διακριτές χωρικές ενότητες με διαφορετικές φορτίσεις • Ίδιοι παράμετροι για όλη τη λεκάνη	• Η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε διακριτές περιοχές οι οποίες αντιστοιχούν είτε συνήθως σε φυσικές λεκάνες είτε σε χωρικές ενότητες με κοινά υδρογεωμορφολογικά χαρακτηριστικά • Διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων	• Διαχωρισμός επιφανείας λεκάνης σε μικρότερα τμήματα κλίμακα είτε από την εφαρμογή ενός ορθογωνικού κανάβου δεδομένης ισοδιάστασης είτε έχουν ακανόνιστο γεωμετρικό σχήμα • Διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων.

9.1 Υπολογισμός πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (E_p)

Μεγαλύτερη επίδραση στον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής όπως είδαμε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο της εξατμισοδιαπνοής, ασκούν η μέση θερμοκρασία αέρος, η υγρασία του εδάφους που συνδέεται με τις βροχοπτώσεις, η φύση του εδάφους καθώς και η φυτοκάλυψη.

Για τον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιήσαμε τον τύπο του L.Turc(1961) σύμφωνα με τον οποίο η πραγματική εξατμισοδιαπνοή ισούται με

$$E_p = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad \text{όπου}$$

E_p: πραγματική εξατμισοδιαπνοή

P : ύψος ετήσιων κατακρημνισμάτων των βροχομετρικών δεικτών

L : $300 + 25 \cdot T + 0.05 \cdot T^3$

T : η μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα σε βαθμούς c°

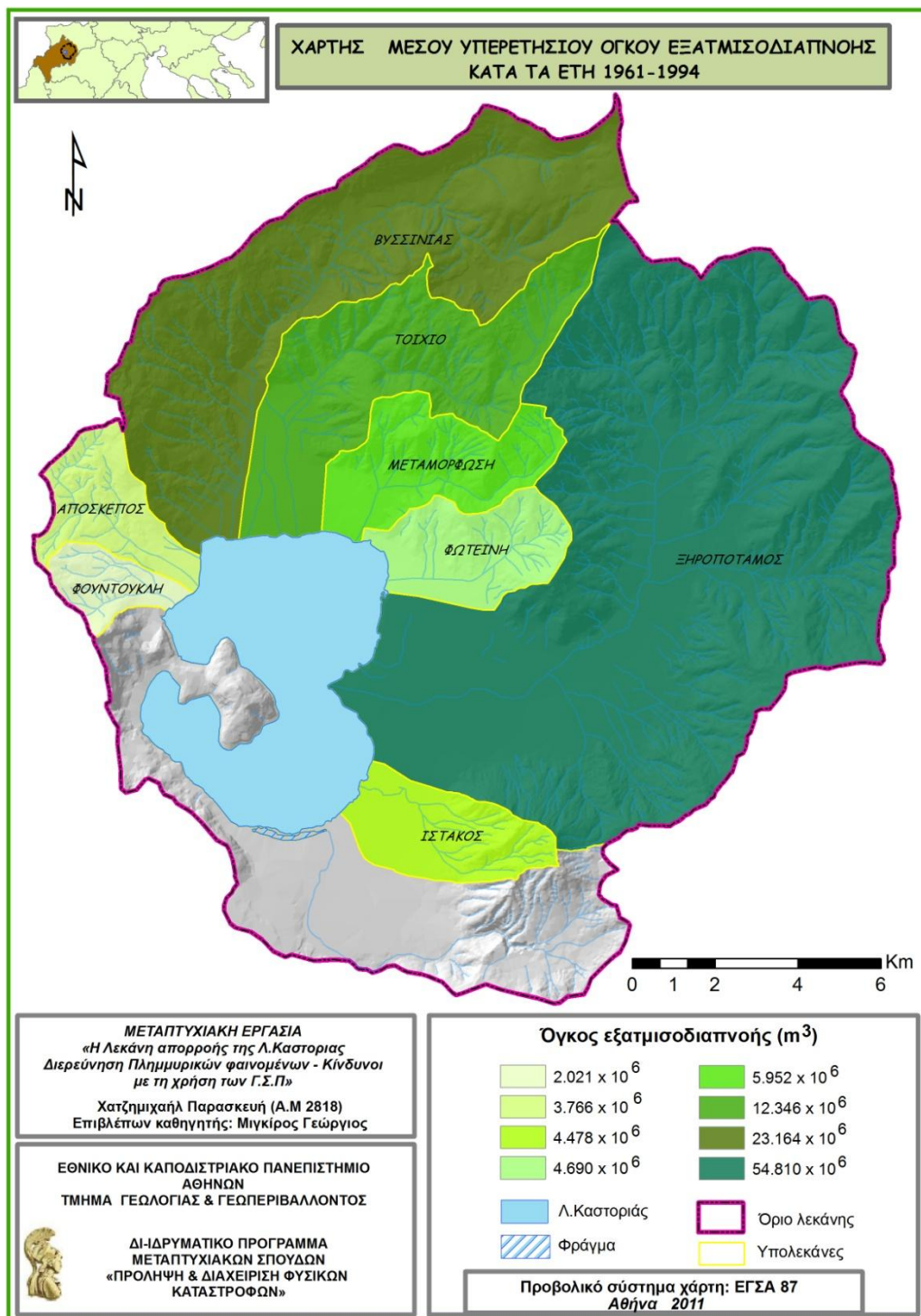
Για την εκτίμηση εξατμισοδιαπνοής, και σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο, λάβαμε υπόψη μας την κατανομή της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης μας. Μεγάλες τιμές θερμοκρασίας συναρτήσει της βροχόπτωσης, οδηγούν σε μεγάλες τιμές τις εξατμισοδιαπνοής.

Πιο συγκεκριμένα, για του υπολογισμό της E_p χρησιμοποιήσαμε το μέσο ετήσιο ύψος κατακρημνισμάτων κάθε υπολεκάνης το οποίο υπολογίστηκε με την αριθμητική μέθοδο (βλέπε κεφ. 6.4.3) καθώς και την μέση τιμή ετήσιας θερμοκρασίας κάθε υπολεκάνης για τα δεδομένα 33 υδρολογικών ετών . Η μέση τιμή θερμοκρασίας εισήχθει στον αντίστοιχο τύπο που δίνεται παραπάνω για τον υπολογισμό της τιμής του L. Η εξατμισοδιαπνοή μπορεί να εκφραστεί και σε όγκο(m³) πολλαπλασιάζουμε με το εμβαδό της υπολεκάνης ή της λεκάνης μας. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε πόσος όγκος νερού εξατμίζεται αντίστοιχα από την λεκάνη μας.

Έχοντας υπολογίσει τη μέση ετήσια εξατμισοδιαπνόμενη κάθε υπολεκάνης υπολογίσαμε τον όγκο νερού που εξατμίζεται από την ολική λεκάνη μας και είναι $E_p = 113.14 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι τιμές της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής για τις υπολεκάνες της λίμνης Καστοριάς και για όλη την λεκάνη.

ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΜΕΣΟΣ ΕΤΗΣΙΟΣ ΟΓΚΟΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ(VER) ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ 33 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΤΩΝ							
A/A	Υπολεκάνες	Εμβαδό(km ²)	Μέση θερμ.(°C)	L	P(mm)	E _p (mm)	V _{Ep} (m ³)
1	ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗΣ	4,16	11,42	661,42	690,59	485,37	2021047,97
2	ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	7,76	11,13	649,14	709,18	485,397	3.766.482,44
3	ΒΥΣΣΙΝΙΑΣ	48,91	9,683	592,59	804,17	473,656	23.164.691,71
4	ΤΟΙΧΙΟΥ	25,81	10,61	629,72	743,67	478,36	12.345.942,07
5	ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	12,33	11,08	647,98	712,70	482,81	5.952.738,21
6	ΦΩΤΕΙΝΗΣ	9,69	11,835	680,07	663,35	483,88	4.690.151,49
7	ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΥ	113,98	11,01	646,10	717,10	480,88	54810130,02
8	ΙΣΤΑΚΟΣ	9,34	11,77	679,20	667,70	479,36	4.477.977,93
ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ	Sum	231,98					111.229.161,84
	Mean		11,07	648,28	713,56		
	max	113,98	11,835	680,07	804,17	485,397	54810130,02
	min	4,16	9,683	592,59	663,35	473,656	2021047,97



Όπως μπορούμε να δούμε και από τον παραπάνω πίνακα, η μεγαλύτερη βροχόπτωση $P(mm)$, της οποίας η κατανομή έγινε βάση του τοπογραφικού αναγλύφου, παρατηρείται στην υπολεκάνη Βυσσινιάς ενώ η ελάχιστη τιμή σε αυτήν του Φουντουκλή. Στη Βυσσινιά εμφανίζεται και η μέγιστη τιμή του υψομέτρου σε σχέση με τις υπόλοιπες γεγονός που αποδίδει και την σχέση βροχόπτωσης-υψομέτρου, θερμοκρασίας-υψομέτρου και συνεπώς της μικρής τιμής εξατμισοδιαπνοής σε συνδυασμό με την φυτοκάλυψη της περιοχής.

Η μεγαλύτερη μέση τιμή της εξατμισοδιαπνοής E_p , για τα 33 έτη, εμφανίζεται στην υπολεκάνη Απόσκεπου ενώ η μικρότερη στην υπολεκάνη Βυσσινιάς. Η τιμή βροχόπτωσης στην υπολεκάνη Βυσσινιάς υπερσχύει κατά 100 mm περίπου συγκριτικά με αυτήν του Απόσκεπου. Το ότι η μεγαλύτερη τιμή εμφανίζεται στον Απόσκεπο οφείλεται κατά ένα μέρος και στη φυτοκάλυψη που σε συνδυασμό με την μορφολογία και την μέγιστη θερμοκρασία της περιοχής συγκριτικά με την Βυσσινιά βοηθούν την διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής.

9.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗΣ

Η εκτίμηση της κατείσδυσης μιας επιφάνειας είναι ιδιαίτερα σύνθετη και απαιτεί τη γνώση ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων. Η ουσιαστική έλλειψη όμως συγκεκριμένων παραμέτρων για τη λεκάνη απορροής της λίμνης Καστοριάς μας οδήγησε στο να χρησιμοποιήσουμε βιβλιογραφικά δεδομένα τα οποία αναφέρονται σε τιμές του συντελεστή κατείσδυσης για τους διάφορους τύπους γεωλογικών σχηματισμών που συναντάμε στη περιοχή μελέτης.

Στον ελληνικό χώρο και στα πλαίσια μελετών και ερευνών έχουν γίνει πολλές προσπάθειες εκτίμησης υδατικού ισοζυγίου (Καρράς 1973, Παπαδάκης 1985 κ.α). Σε πρακτικές εφαρμογές και σε συγκεκριμένες υδρολογικές λεκάνες η κατείσδυση υπολογίζεται συνήθως είτε με απλές εμπειρικές μεθόδους είτε με πιο πολύπλοκες όπως αυτή των Thornthwaite-Mather (1955, 1957).

Στην περίπτωση που η επιφανειακή απορροή μας ήταν γνωστή, η κατείσδυση θα μπορούσε να προσδιοριστεί από την εξίσωση υδατικού ισοζυγίου και εφόσον έχουμε υπολογίσει τον παράγοντα εξατμισοδιαπνοή. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή όμως δεν είχαμε μετρήσεις παροχής και έτσι αξιοποιώντας τα δεδομένα που έχουμε, υπολογίστηκε έμμεσα από την παρακάτω εξίσωση βάση βιβλιογραφίας (Σούλιος, 1986).

$$I = \frac{I_1 * E_1 + I_2 * E_2 + \dots I_n * E_n}{E_{ολ}}$$

I : Ο ζητούμενος ενιαίος συντελεστής ή ύψος νερού κατείσδυσης

$I_1, I_2, \dots, I_n$: οι μερικοί κατά πέτρωμα ή σχηματισμοί συντελεστές κατείσδυσης οι οποίοι δίνονται στον πίνακα 4 που ακολουθεί.

$E_1, E_2, \dots, E_n$: οι επιφάνειες εμφάνισης αντίστοιχων πετρωμάτων ή σχηματισμών

$E_{ολ}$: η ολική επιφάνεια της εξεταζόμενης λεκάνης.

Οι τιμές του συντελεστή κατείδυσης κυμαίνονται από 3% (φλύσχης, φυλλίτες, σχιστόλιθοι, γνεύσιοι, ηφαιστειακά πετρώματα) έως 60% (ανθρακικά πετρώματα). Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται το εύρος των τιμών του συντελεστή κατείδυσης που δίνεται για τους γεωλογικούς σχηματισμούς βάση βιβλιογραφίας (Σούλιος 1986, σελ.44).

ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ		
A/A	ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ
1	ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	25-60 %
2	ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ	10-20 %
3	ΟΦΙΟΛΙΘΟΙ	4-8 %
4	ΦΛΥΣΧΗΣ,ΜΑΡΓΕΣ, ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΙ	3-7 %
5	ΜΟΛΑΣΣΕΣ,ΨΑΜΜΙΤΕΣ	15-25 %
6	ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	3-8 %
7	ΠΡΑΣΙΝΟΛΙΘΟΙ,ΓΝΕΥΣΙΟΙ ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΜΕΝΑ	3-7 %

Για να υπολογιστεί η κατείδυση σε κάθε υπολεκάνη έπρεπε αρχικά να γίνει ο διαχωρισμός και η έκταση των πετρωμάτων που καταλαμβάνουν σε κάθε υπολεκάνη με την χρήση των ΓΣΠ και να δωθούν οι αντίστοιχοι συντελεστές κατείδυσης(Ic) για κάθε πέτρωμα. Για κάθε έναν από τους γεωλογικούς σχηματισμούς που απαντώνται στην περιοχή μελέτης μας δόθηκε μια μέση τιμή σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα.

Έχοντας λοιπόν αντιστοιχήσει το εμβαδό του κάθε πετρώματος που λαμβάνει χώρα σε κάθε υπολεκάνη, υπολογίσαμε τον συντελεστή κατείδυσης, σύμφωνα με τον τύπο υπολογισμού κατείδυσης που αναφέρθηκε, κάθε υπολεκάνης μας και πολλαπλασιαζόμενος με το μέσο ετήσιο ύψος νερού(P) και το εμβαδό κάθε υπολεκάνης εκφράστηκε σε όγκο νερού κατείδυσης(Vi). Ο όγκος κατείδυσης κάθε υπολεκάνης φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΜΕΣΟΣ ΥΠΕΡΕΤΗΣΙΟΣ ΟΓΚΟΣ ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗΣ(V_i _Mean) ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ ΤΗΣ
Λ.ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ 33 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΤΩΝ**

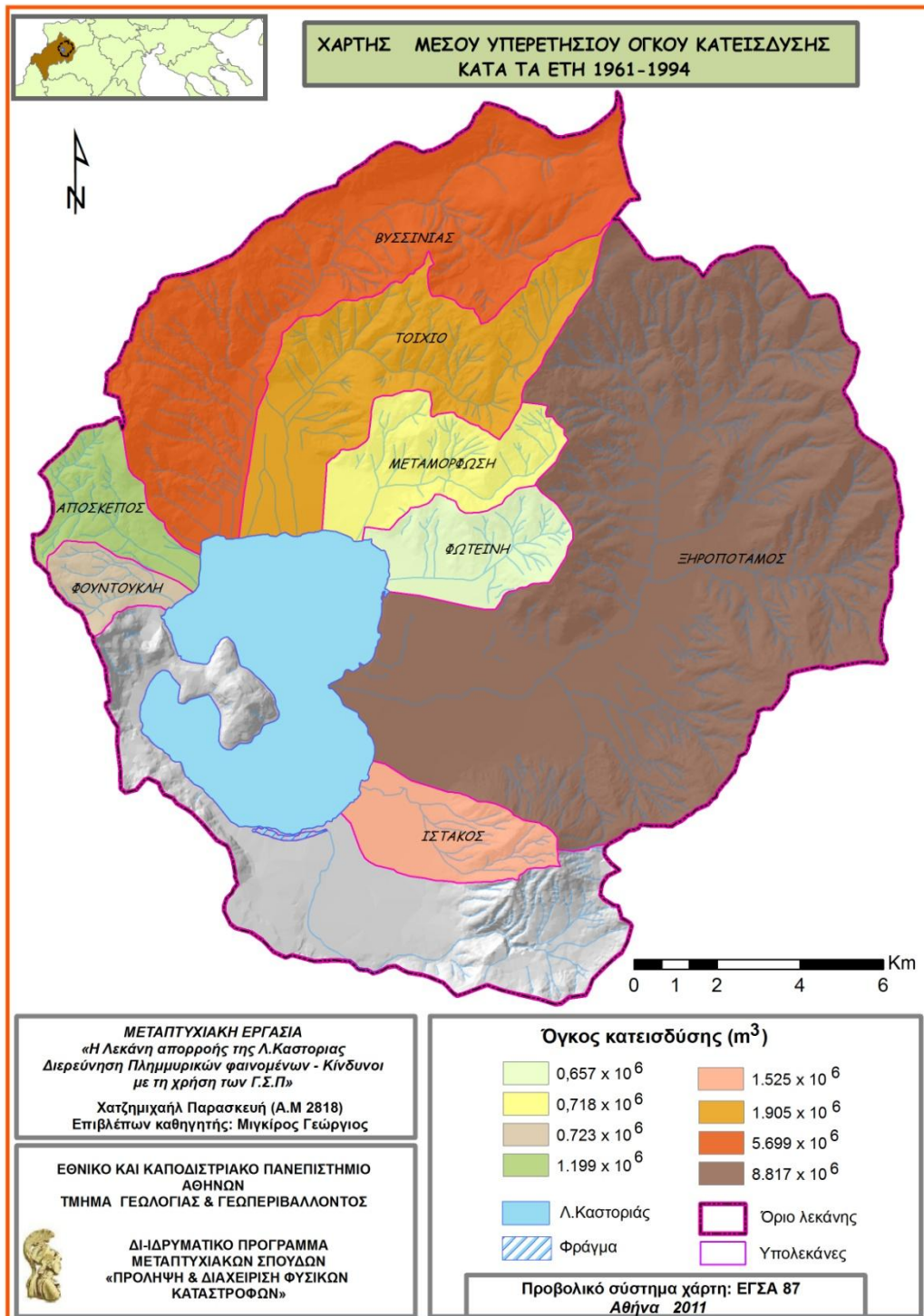
A/A	Υπολεκάνες	Εμβαδό(km ²)	Ic	P(mm)	I(mm)	$V_i(m^3)$
1	ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗΣ	4,16	0,2515	690,59	173,69444	723248,9623
2	ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	7,76	0,2178	709,18	154,52707	1199066,94
3	ΒΥΣΣΙΝΙΑΣ	48,91	0,1449	804,17	116,53223	5699142,801
4	ΤΟΙΧΙΟΥ	25,81	0,0992	743,67	73,836502	1905658,3
5	ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	12,33	0,0817	712,7	58,225636	717887,7906
6	ΦΩΤΕΙΝΗΣ	9,69	0,102214	663,35	67,804382	657215,592
7	ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΥ	113,98	0,10787	717,1	77,358131	8817206,029
8	ΙΣΤΑΚΟΣ	9,34	0,2445	667,7	163,2506	1525030,632
ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟ ΗΣ	Sum	231,98			885,228991	21244457,05
	Mean			713,5575	110,6536239	2655557,131
	max		0,2515	804,17	173,69444	8817206,029
	min		0,0817	663,35	58,225636	657215,592

Μεγαλύτερη κατείσδυση I(mm) εμφανίζεται στην υπολεκάνη Φουντουκλή ενώ η μικρότερη στην υπολεκάνη Μεταμόρφωσης.

Στον υπολογισμό της κατείσδυσης, όπως αναλύθηκε, πήραν μέρος οι συντελεστές της κατείσδυσης που δίνονται για κάθε γεωλογικό σχηματισμό βάση βιβλιογραφίας και η συχνότητα εμφάνισης των πετρωμάτων μέσω της έκτασης που καταλαμβάνουν για το σύνολο της λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς και των επιμέρους υπολεκανών της.

Η μέγιστη τιμή κατείσδυσης σε mm που δίνεται στην υπολεκάνη Φουντουκλή οφείλεται στην εμφάνιση των γεωλογικών σχηματισμών και της έκτασης που καταλαμβάνουν, συντελώντας έτσι την κατακράτηση του νερού με τη μορφή υπόγειας απορροής. Πιο συγκεκριμένα, η υπολεκάνη αυτή βρίσκεται πάνω σε ζώνη καρστικού αναγλύφου όπου εμφανίζονται ανθρακικά πετρώματα που αποτελούν υδροπερατούς σχηματισμούς.

Σε αντίθεση με την κατανομή κατείσδυσης σε mm, ο μεγαλύτερος όγκος κατείσδυσης $V_i(m^3)$ όπως φαίνεται και στον ακόλουθο χάρτη, εμφανίζεται στην υπολεκάνη Ξηροποτάμου ενώ η ελάχιστη τιμή στην υπολεκάνη Φουντουκλή η οποία αποτελεί και την μικρότερη σε έκταση συγκριτικά με τις υπόλοιπες, ενώ 2η σε σειρά έρχεται η υπολεκάνη Φουντουκλή γεγονός που αποδεικνύει την επίδραση της υδρομορφολογίας στον παραγόμενο όγκο κατείσδυσης.



9.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Η επιφανειακή απορροή όπως είδαμε και στο κεφ. 7.2, επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως η βροχόπτωση, η μορφολογία και γεωλογία της περιοχής κ.α ενώ για τον υπολογισμό της υπάρχουν διάφορες εμπειρικές μέθοδοι στην περίπτωση που δεν υπάρχουν παροχές μετρήσεων των ρεμάτων οι οποίες θα ήταν και πιο αντιπροσωπευτικές του φαινομένου.

Στην συγκεκριμένη μελέτη, και δεδομένου ότι δεν υπήρχαν μετρήσεις παροχής για τα 33 υδρολογικά έτη στα ρέματα της λεκάνης, η εκτίμηση της επιφανειακής απορροής έγινε επιλύοντας την γενική εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου έχοντας υπολογίσει αρχικά τους παράγοντες που την αποτελούν, με μοναδική άγνωστη την επιφανειακή απορροή. Οι τιμές της επιφανειακής απορροής για κάθε υπολεκάνη και για το σύνολό της φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

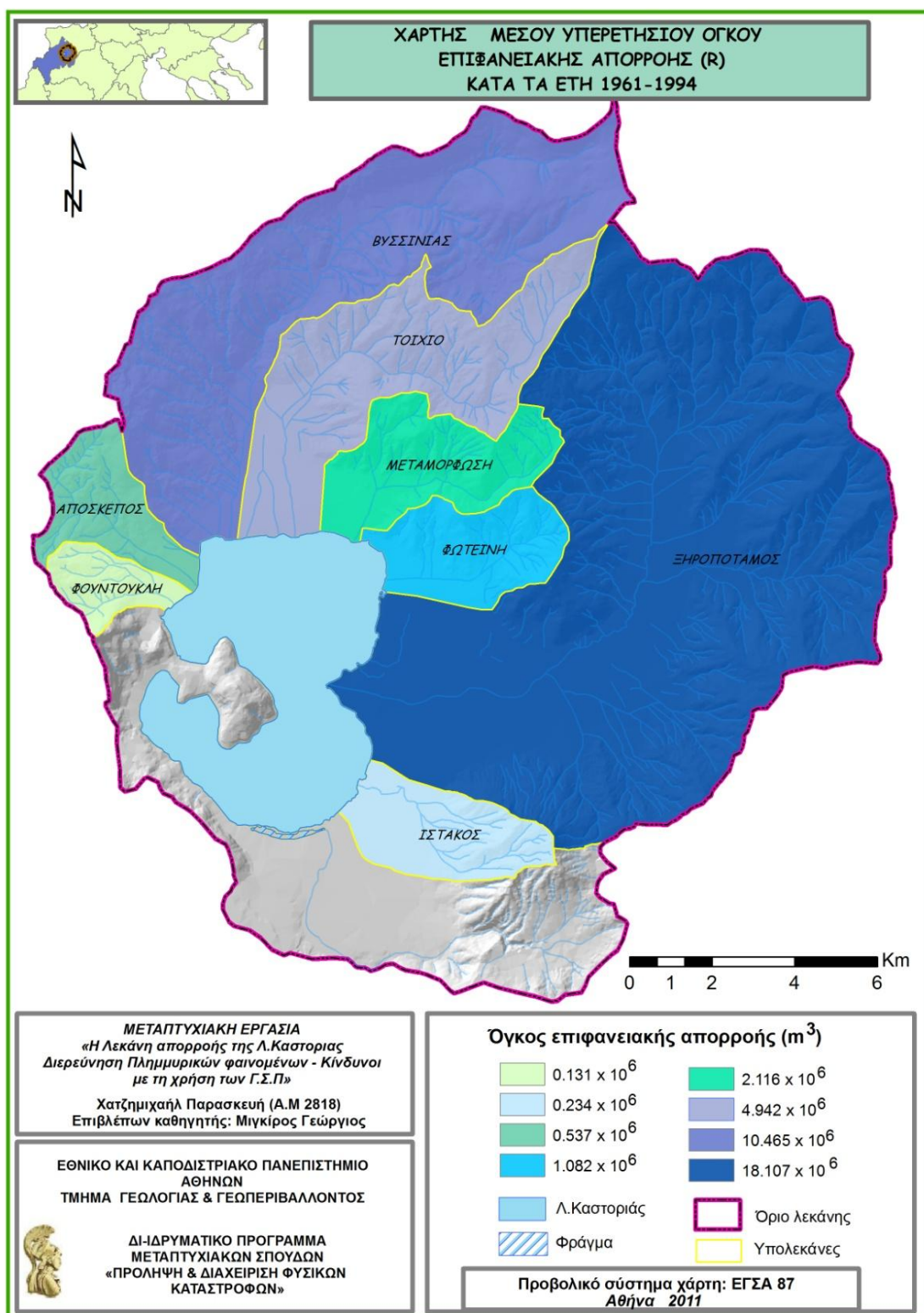
ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΤΙΜΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΥΠΟΛΕΚΑΝΩΝ ΤΗΣ Λ.ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ							
A/A	Υπολεκάνες	Εμβαδό(km ²)	Er(mm)	P(mm)	I(mm)	R(mm)	VR(m ³)
1	ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗΣ	4,16	485,37	690,59	173,69	31,53	131.279,93
2	ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	7,76	485,397	709,18	154,53	69,26	537.397,73
3	ΒΥΣΣΙΝΙΑΣ	48,91	473,656	804,17	116,53	213,98	10.465.024,69
4	ΤΟΙΧΙΟΥ	25,81	478,36	743,67	73,84	191,48	4.941.899,73
5	ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ Σ	12,33	482,81	712,70	58,225	171,67	2.116.552,98
6	ΦΩΤΕΙΝΗΣ	9,69	483,88	663,35	67,80	111,67	1.082.364,30
7	ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΥ	113,98	480,88	717,10	77,36	158,86	18.107.038,37
8	ΙΣΤΑΚΟΣ	9,34	479,36	667,70	163,25	25,09	234.413,86
ΛΕΚΑ ΝΗ ΑΠΟΡ ΡΟΗΣ	Sum	231,98					37.615.971,58
	Mean		481,21	713,56	110,65	121,69	
	max		485,397	804,17	173,69	213,98	18.107.038,37
	min		473,656	663,35	58,225	25,09	131.279,9263

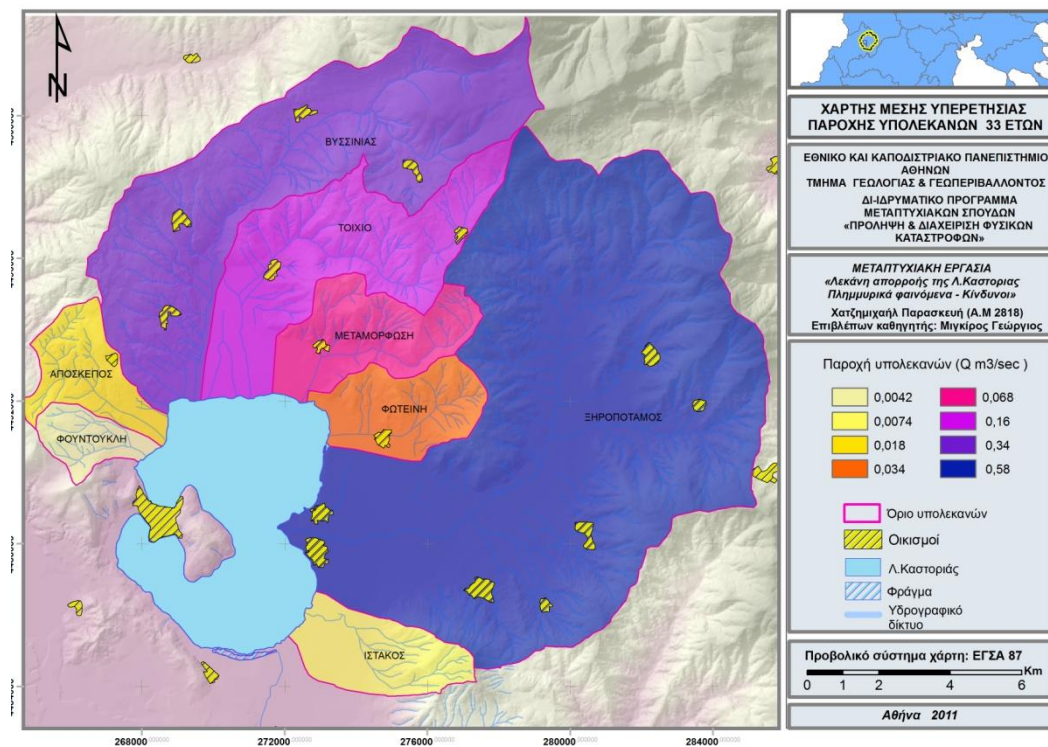
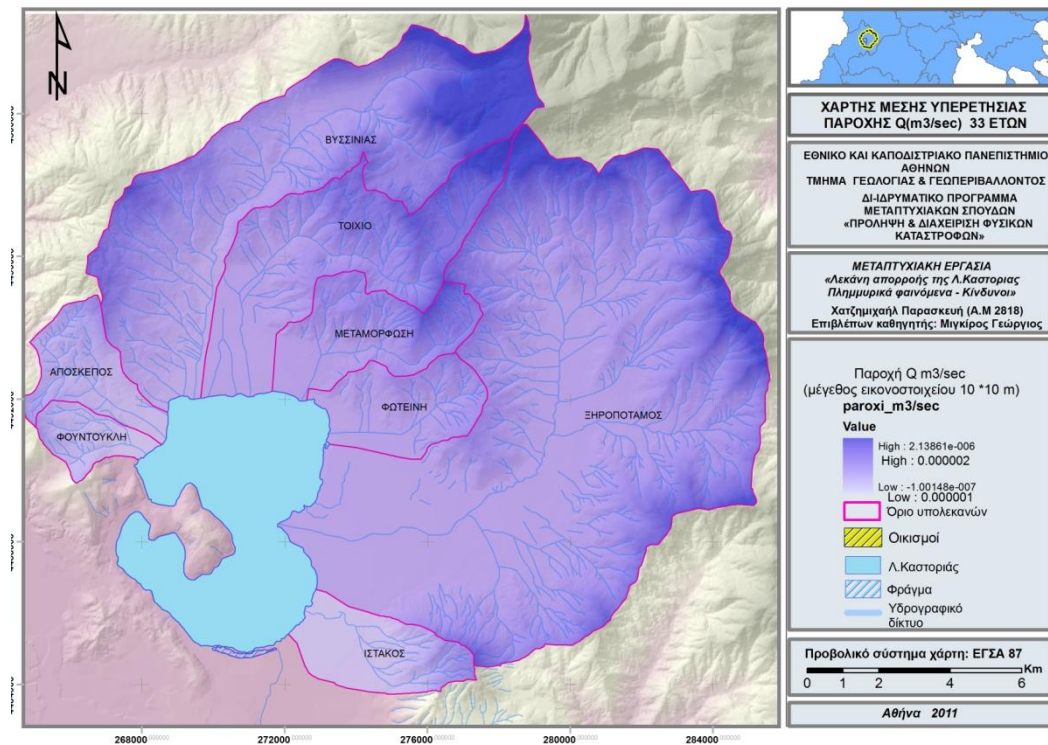
Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και από τον παραπάνω πίνακα, η μεγαλύτερη τιμή επιφανειακής απορροής R σε mm, εμφανίζεται στην υπολεκάνη Βυσσινιάς. Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι στη συγκεκριμένη υπολεκάνη εμφανίζεται και η μέγιστη τιμή βροχόπτωσης σε mm. Η τιμή της εξατμισοδιαπνοής παίρνει την ελάχιστη τιμή με $E_p = 473.656$ mm ενώ η τιμή της κατείδουσας κατατάσσεται σε μια μέτρια κατάσταση ή στην τάδε θέση συγκριτικά με τις υπόλοιπες υπολεκάνες. Η 2^η και 3^η μεγαλύτερη τιμή R εμφανίζεται στην υπολεκάνη Τοιχιού και Μεταμόρφωσης αντιστοίχως.

Οι 3 αυτές υπολεκάνες, όπως είδαμε παρουσιάζουν έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο και τις μεγαλύτερες τιμές επιφανειακής απορροής σε mm. Οι υπολεκάνες αυτές και λόγω του ότι βρίσκονται σε έντονη γεωλογική δραστηριότητα μέσω του πιθανού ενεργού ρήγματος, παρουσιάζουν έντονη βροχόπτωση που σε συνδυασμό με την ελλιπή βλάστηση οδηγούν σε έκτακτα και έντονα πλημμυρικά φαινόμενα καθώς και σε μεγαλύτερη ταχύτητα παραγωγής και εισροής φερτών υλικών προς την λίμνη όπως θα δούμε και στο κεφ. Ιζηματογένεση-Παραγωγή φερτών υλών.

Αντίθετα με την R σε mm, η επιφανειακή απορροή εκφρασμένη σε όγκο $R(m^3)$, εμφανίζεται στην υπολεκάνη Ξηροποτάμου ενώ η ελάχιστη τιμή στην υπολεκάνη Φουντουκλή λόγω του μεγάλου όγκου κατείσδυσης που έχει.

Στη συνέχεια η απορροή αυτή μετατράπηκε σε παροχή η οποία χρησιμοποιήθηκε στην εξίσωση του μοντέλου εκτίμησης πλημμυρικής επικινδυνότητας (βλ.κεφ. 9.7). Στους ακόλουθους χάρτες εμφανίζεται ο όγκος επιφανειακής απορροής και παροχής για κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά.





Όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, η μελέτη του υδατικού ισοζυγίου είναι ένας αρκετά περίπλοκος μηχανισμός και πέρα από τα διαθέσιμα δεδομένα είναι αρκετά δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί επακριβώς μιας και οι παράμετροι που το αποτελούν είναι από μόνες τους φυσικές διεργασίες οι οποίες ως προς το φυσικό μηχανισμό τους είναι απλές και κατανοητές σαν έννοια, αλλά για τον ακριβή υπολογισμό τους υπεισέρχονται πολλοί παράγοντες που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Το γεγονός ότι όλα είναι μέρος του όλου κάνει αρκετά δύσκολο την απομόνωση του κάθε παράγοντα με στόχο να ποσοτικοποιηθεί καλύτερα.

Παρόλα αυτά όμως, και κυρίως όταν μελετάτε κάποιο φαινόμενο ως προς το σύνολο της, το να αναλύσουμε και να περιγράψουμε το υδατικό ισοζύγιο με μεθόδους και μοντέλα εφικτά, και συνάμα κατανοώντας όσο το δυνατόν καλύτερα την αλληλεπίδραση του φυσικού περιβάλλοντος σε κάθε μια από τις παραμέτρους που το αποτελούν με στόχο την καλύτερη δυνατή αντιπροσωπευτικότητα του συστήματος, είναι προτιμότερο να υπάρχει κάποια εκτίμησή του από το να έχουμε πλήρη άγνοια για το τι συμβαίνει στην περιοχή μας.

Η κίνηση του νερού στη φύση ακολουθεί κάποιους κανόνες νομοτέλειας και όλες οι φάσεις του υδρολογικού ισοζυγίου ικανοποιούν την αρχή διατηρήσεως της μάζας η οποία εκφράζεται με τη γενική μορφή (Ward,1975): I_n (είσοδοι νερού σε ορισμένο χρόνο) = $O \pm D_s$ (μεταβολές αποθήκευσης επιφανειακού και υπόγειου νερού).

Η εκτίμηση των φυσικών εισροών και εκροών της λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς σύμφωνα με τα υδρομετεωρολογικά της περιοχής δίνεται από την εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου η οποία όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο κεφ. δίνεται από την εξίσωση και είναι η πιο συνήθης:

$$\text{Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (P)} = \text{Υπόγεια κατείσδυση (I)} + \text{Εξατμισοδιαπνοή (E)} + \text{Επιφανειακή απορροή (R)}$$

Από την παραπάνω εξίσωση, και έχοντας υπολογίσει όλες τις παραμέτρους που την αποτελούν για κάθε μία υπολεκάνη μας, υπολογίσαμε το έλλειμμα απορροής(D) της λεκάνης απορροής μας.

Το έλλειμμα απορροής μας δίνει το σύνολο των κατακρημνισμάτων, τα οποία από τη λεκάνη απορροής, επανέρχονται στην ατμόσφαιρα και συμπεριλαμβάνει τις απώλειες λόγω εξατμισοδιαπνοής, τις απώλειες νερού από τη χρήση και κατανάλωση των

ανθρώπων και τις απώλειες λόγω υπόγειας απορροής. Δίνεται από τον ακόλουθο τύπο και μπορεί να εκφραστεί και αυτό σε ποσοστό(%), ύψος βροχής(mm) και σε όγκο(m³).

$$D = P - Q \text{ όπου}$$

D: το έλλειμα απορροής

P: το ύψος κατακρημνισμάτων και

Q: η ολική απορροή της λεκάνης

Η ολική απορροή (Q) της λεκάνης είναι το σύνολο της επιφανειακής και της υπόγειας απορροής και δίνεται από τον τύπο:

$$Q = R + I \pm dw \text{ όπου}$$

dw: οι μεταβολές των αποθεμάτων από την κατανάλωση των ανθρώπων οι οποίες όπως αναλύεται παρακάτω είναι dw=0

Η υπόγεια απορροή (Ir) είναι το σύνολο της κατείσδυσης (I) και τη μεταβολή των αποθεμάτων (dw) και δίνεται από τον τύπο $I_r = I + dw$. Για μια σειρά αρκετών ετών δεν υπάρχει πρακτικά κατά μέσο όρο μεταβολή αποθεμάτων λόγω του ότι τα ετήσια αθροιζόμενα αποθέματα τείνουν προς το 0 όταν η κατανάλωση του νερού είναι σταθερή ή αμελητέα. Ουσιαστικά λοιπόν η υπόγεια απορροή ισούται με την κατείσδυση ($I_r = I$). (Σούλιος, 1986, σελ.91)

R: το σύνολο της επιφανειακής απορροής

I : το σύνολο της υπόγειας απορροής το οποίο ισούται με την κατείσδυση

Σύμφωνα με τα παραπάνω και βάση του πίνακα 12, η ολική απορροή της λεκάνης μας βρέθηκε ότι είναι $Q = 58.860.402,3 \text{ m}^3$ και το έλλειμα απορροής $D = 111.229.161,8 \text{ m}^3$

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι συγκεντρωτικές τιμές των παραμέτρων του υδατικού ισοζυγίου για την περιοχή μελέτης μας και υποδεικνύονται οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές της υπολεκάνης και των επιμέρους υπολεκάνων της.

ΠΙΝΑΚΑΣ 12: ΤΙΜΕΣ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΗΣ Λ.ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ							P=R-I-EP				Q= VR + VI	D= VP- Q
A/A	Υπολεκάνες	Εμβαδό (km ²)	Ερ(mm)	P(mm)	I(mm)	R(mm)	VR(m ³)	VI(m ³)	VEp(m ³)	VP(m ³)	Qολiko(m ³)	D
1	ΦΟΥΝΤΟΥΚΛΗΣ	4,16	485,372	690,59	173,694	31,523	131261,4385	723248,9623	2021047,97	2875558 ,371	854510,4 008	
2	ΑΠΟΣΚΕΠΟΣ	7,76	485,397	709,18	154,527	69,255	537397,7262	1199066,94	3766482,439	5502947 ,105	1736464, 666	
3	ΒΥΣΣΙΝΙΑΣ	48,91	473,656	804,17	116,532	213,981	10465024,69	5699142,801	23164691,71	3932885 9,2	1616416 7,49	
4	ΤΟΙΧΙΟΥ	25,81	478,355	743,67	73,836	191,478	4941899,726	1905658,3	12345942,07	1919350 0,09	6847558, 026	
5	ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ Σ	12,33	482,808	712,7	58,225	171,666	2116545,138	717887,7906	5952738,213	8787171 ,141	2834432, 928	
6	ΦΩΤΕΙΝΗΣ	9,69	483,879	663,35	67,804	111,666	1082364,3	657215,592	4690151,492	6429731 ,384	1739579, 892	
7	ΞΗΡΟΠΟΤΑΜΟΥ	113,98	480,879	717,1	77,358	158,862	18107038,37	8817206,029	54810130,02	8173437 4,42	2692424 4,4	
8	ΙΣΤΑΚΟΣ	9,34	479,356	667,7	163,250	25,093	234413,8622	1525030,632	4477977,928	6237422 ,422	1759444, 494	
ΛΕΚΑ ΝΗ ΑΠΟΡ ΡΟΗΣ	Sum	231,98	3849,70 2	5708,46	885,228	973,529	37615945,25	21244457,05	111229161,8	1700895 64,1	5886040 2,3	1112291 61,8
	Mean		481,212 75	713,558	110,653	121,691	4701993,156					
	max		485,397	804,17	173,694	213,981	18107038,37	8817206,029	54810130,02	8173437 4,42	2692424 4,4	
	min		473,656	663,35	58,225	25,093	131261,4385	657215,592	2021047,97	2875558 ,371	854510,4 008	

Μελετώντας λοιπόν τις παραμέτρους που συντελούν το υδατικό δυναμικό της περιοχής μας γίνεται αντιληπτό, όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, ότι η κατανομή των μέγιστων και ελάχιστων τιμών σε m για κάθε παράμετρο είναι άνιση ως προς το σύνολο των υπολεκάνων της περιοχής μελέτης μας. Πιο συγκεκριμένα, και όπως αναφέραμε στα αντίστοιχα κεφ. Εκτίμησης των παραμέτρων κατείσδυση, εξατμισοδιαπνοή και επιφανειακή απορροή, παρατηρούμε π.χ πως η μέγιστες και ελάχιστες τιμή της εξατμισοδιαπνοής βρίσκονται σε διαφορετικές υπολεκάνες κάθε φορά και όχι στις ίδιες.

Σε αντίθεση με τις τιμές των παραμέτρων σε m , οι τιμές εκφρασμένες σε m^3 και συγκεκριμένα οι VR, VP και VEP εμφανίζουν την ελάχιστη τιμή στην υπολεκάνη Φουντουκλή ενώ οι μέγιστες τιμές τους στην υπολεκάνη Ξηροποτάμου (Παλαιοποτάμου). Η μοναδική ελαχιστή τιμή που βρίσκεται σε άλλη λεκάνη από την προαναφερθείσα, είναι αυτή της κατείσδυσης η οποία εμφανίζεται στην υπολεκάνη Φωτεινής με ποσοστό 6,8% ενώ η αντίστοιχη τιμή σε m βρίσκεται στην υπολεκάνη Μεταμόρφωσης όπου και έχουμε μεγάλη εδαφική διάβρωση όπως θα δούμε και στο αντίστοιχο κεφ.Φερτά Υλικά.

Μέσω λοιπόν της άνισης κατανομής των τιμών μπορούμε να δούμε και να εκτιμήσουμε ποιος είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας στην εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων και ιζηματογένεσης και σε τι βαθμό το επηρεάζει. Ανάμεσα από τους παράγοντες του υδατικού ισοζυγίου αυτός που έχει μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας για την εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων είναι η επιφανειακή απορροή(R) . Μεγαλύτερη επιφανειακή εκφρασμένη σε όγκο, παρατηρείται στην υπολεκάνη Ξηροποτάμου και μικρότερη στην υπολεκάνη Φουντουκλή. Στην υπολεκάνη Φουντουκλή παρατηρούνται επίσης οι μικρότερες τιμές για την βροχόπτωση και την εξατμισοδιαπνοή εκφρασμένα σε όγκο. Συγκριτικά λοιπόν από τα υδατικά ισοζύγια των 2 αυτών υπολεκάνων πλημμυρικά επεισόδια είναι πιο πιθανόν να συμβούν στην υπολεκάνη Ξηροποτάμου και να δοθεί σε αυτήν περισσότερο έμφαση και να παρθούν μέτρα πρόληψης αποφυγής τέτοιων φαινομένων.

Από την πολυπαραγοντική ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου μπορούμε να δούμε κατά πόσο μια φυσική διεργασία, και σύμφωνα με την χωροχρονική κατανομή της, επηρεάζει την εκδήλωση τέτοιων καταστροφικών φαινομένων καθώς και τον τρόπο με τον οποίο οι μεταβλητές των παραγόντων αυτών επηρεάζουν την χωροχρονική αυτή κατανομή.

Από το παραπάνω πίνακα συγκεντρωτικών τιμών υδατικού ισοζυγίου, γίνεται εμφανής η επίδραση της μορφολογίας(π.χ στογγυλομορφία λεκάνης) και της γεωλογίας(π.χ υδροπερατότητα σχηματισμών) στην εξέλιξη του υδάτινου δυναμικού της περιοχής καθώς και οι συνέπειες τους κατά την εκτόνωση τους όπως για παράδειγμα η ένταση της βροχόπτωσης με αίτιο τα πλημμυρικά φαινόμενα και την παραγωγή φερτών υλικών με την δημιουργία της ιζηματογένεσης.

Συμπερασματικά λοιπόν θα λέγαμε ότι το ισοζύγιο εκφρασμένο σε όγκο βοηθά περισσότερο στην μελέτη υδροοικονομίας της περιοχής. Οι παράμετροι εκφρασμένοι σε όγκο μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές για τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της περιοχής παρόλο που δεν έχουν πλήρη φυσική ερμηνεία εννοώντας με τον όρο αυτόν την αναλυτική ερμηνεία και υπολογισμό των μεταβλητών που υπεισέρχονται για κάθε έναν από τις παραμέτρους (R, I, EP, P) του υδατικού ισοζυγίου. Αποτελεί κάτι σαν την πρώτη επαφή μας με το υδροσύστημα.

Από την άλλη πλευρά όμως, για τη μελέτη έκτακτων φαινομένων όπως οι πλημμύρες που είναι αποτέλεσμα της ραγδαίας βροχόπτωσης, της τοπογραφίας της περιοχής κ.α , είναι αναγκαία ο προσδιορισμός των μεταβλητών αυτών με αναλυτικές μεθόδους εκφρασμένες σε μην και γενικότερα μικρή χρονική κλίμακα(μήνες, έτος, ώρες , λεπτά). Η κατανομή των τιμών των παραμέτρων θα πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να μπορούν να εντοπιστούν ή να εκτιμηθούν οι επιδεκτικές περιοχές προς φαινόμενα όπως οι πλημμύρες υπολογίζοντας τους παράγοντες που προκαλούν αυτό το φαινόμενο σε μικρή κλίμακα όπως είναι η ένταση βροχόπτωσης, η παροχή για την οποία αν δεν υπάρχουν μετρήσεις μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της επιφανειακής απορροής, η τοπογραφία της περιοχής και η γεωλογία.

Ο συνδυασμός των παραγόντων του υδατικού ισοζυγίου με την κατανομή μέγιστων και ελάχιστων τιμών, μας οδηγεί σε έμμεσα συμπεράσματα και κατ' εκτίμηση, για το πού θα κινηθεί η πλημμυρική επικινδυνότητα στην περιοχή μας έχοντας έτσι μια πρώτη ποιοτική εκτίμηση. Χρησιμοποιώντας δε πολυκριτηριακές και στατιστικές μεθόδους, ακόμη και με τη χρήση εμπειρικών τύπων, μπορούμε να κάνουμε ποσοτική πλέον εκτίμηση του φαινομένου πλημμυρών και ιζηματογένεσης για την περιοχή που μελετάμε.

9.1 ΟΔΗΓΙΑ 2007/60

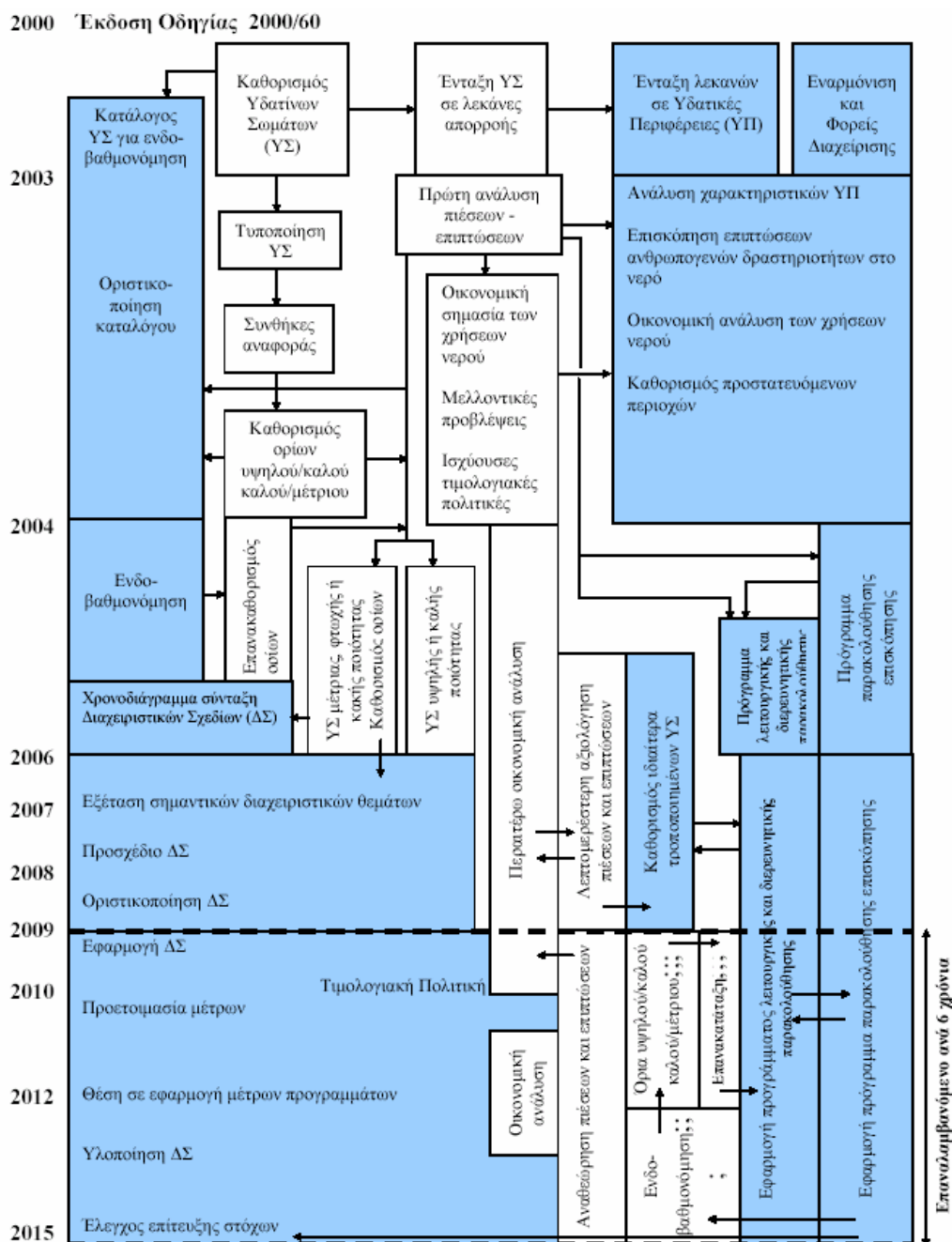
Η Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις πλημμύρες (Οδηγία 2007/60) μπήκε σε εφαρμογή το Νοέμβριο του 2007. Η Οδηγία αποτελεί συμπλήρωμα της Οδηγίας πλαισίου 2000/60 και έχει στόχο τη μείωση της πλημμυρικής διακινδύνευσης στις χώρες μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η Οδηγία αναφέρεται σε όλα τα είδη πλημμύρων (ποταμών, λιμνών, απότομων πλημμύρων, αστικών και παράκτιων πλημμύρων) και απαιτεί από τις χώρες μέλη να αντιμετωπίσουν το θέμα των πλημμύρων με τη μεθοδολογία της εκτίμησης της πλημμυρικής διακινδύνευσης και της διαχείρισης της.

«Η Οδηγία αναφέρεται στην σχέση Κινδύνου-Τρωτότητας-Διακινδύνευσης με ένα ορθολογικό τρόπο που καταλήγει στην αξιολόγηση του πραγματικού κινδύνου δηλαδή της διακινδύνευσης και τελικά τη διαχείρισή του με οργανωμένα εκ των προτέρων σχέδια. Δηλαδή η Οδηγία προτρέπει της χώρες μέλη να αξιολογήσουν τις επιπτώσεις για τα διάφορα σενάρια κινδύνου να αναδείξουν τις περιοχές που κινδυνεύουν περισσότερο (είτε από πλευράς πιθανότητας είτε από την πλευρά διακυβεύματος) και να εκπονήσουν σχέδια προληπτικού σχεδιασμού ώστε να περιορισθούν οι απώλειες και οι πάσης φύσεως ζημιές» (Πηγή: Τσακίρης Π., 2009).

Η εφαρμογή της θα γίνει σε τρία στάδια:

1. Το προκαταρκτικό, το οποίο περιλαμβάνει την εκτίμηση των περιοχών που είναι εκτεθειμένες στον πλημμυρικό κίνδυνο, σε ποιες περιοχές δηλαδή υπάρχει ή θα υπάρξει κίνδυνος πλημμύρας (μέχρι το 2011).
2. Στις περιοχές που έχουν εντοπιστεί, δημιουργία χαρτών κινδύνου και διακινδύνευσης Στις περιοχές αυτές θα πρέπει να γίνει αποτύπωση του ανάγλυφου, απογραφή των κατοίκων, των οικονομικών δραστηριοτήτων και καταγραφή των συνθηκών περιβάλλοντος που βρίσκονται σε δυνητικό κίνδυνο. Οι χάρτες κινδύνου θα δείχνουν την περιοχή που κατακλύζεται και τα πιθανά βάθη κατάκλυσης. Οι χάρτες διακινδύνευσης αναφέρονται (σύμφωνα με την Οδηγία) στις οικονομικές και άλλες ζημιές από τις πλημμύρες (μέχρι το 2013).
3. Δημιουργία Σχεδίων Διαχείρισης της Διακινδύνευσης που θα έχουν σαν στόχο τη μείωση της διακινδύνευσης βασιζόμενοι στην πρόληψη και την προετοιμασία, όπως αναφέρει χαρακτηριστικά η Οδηγία (μέχρι το 2015).

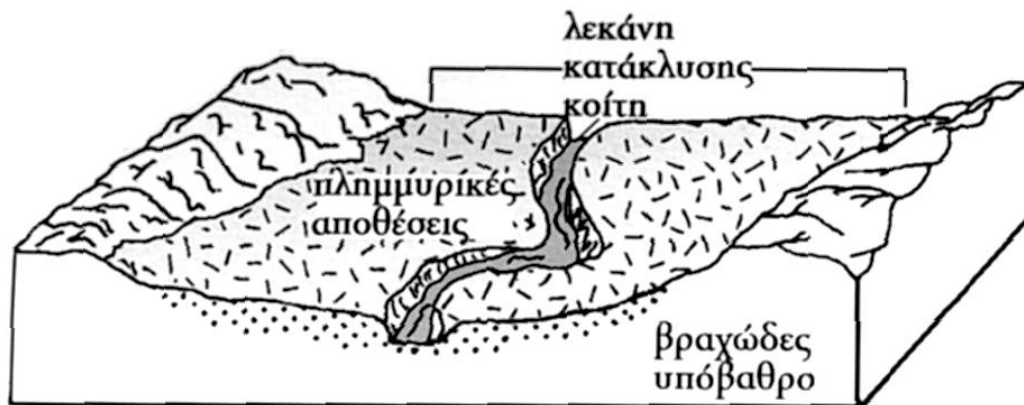
Τα βήματα αυτά πρέπει να επαναλαμβάνονται κάθε 6 έτη, συγχρονισμένα με τα βήματα της Οδηγίας 2000/60 με αρχή το έτος 2009. Το αμέσως επόμενο έτος πρέπει να έχουν οριστεί οι Αρχές που θα υλοποιήσουν την Οδηγία (Τσακίρης Γ., 2009).



Σχήμα 12 : Διαγραμματική απεικόνιση των απαιτούμενων σταδίων για την εφαρμογή της Οδηγίας. (πηγή : Μιμίκου Μ.Α, Φωτόπουλος Φ.Σ, 2004)

Γενικά, ως πλημμύρα ορίζεται κάθε μη συνήθης υψηλή ροή σε ένα ρεύμα (ποτάμι) που υπερβαίνει τις φυσικά διαμορφωμένες όχθες του. Η πλημμύρα αποτελεί ένα φυσικό χαρακτηριστικό των ποταμών. Τα πλημμυρικά πεδία είναι συνήθως ξηρές περιοχές. Αποτελούν ένα αναπόσπαστο τμήμα των υδρογραφικών δικτύων, το οποίο λειτουργεί ως ένα φυσικό ρεζερβουάρ και προσωρινό κανάλι για τα πλημμυρικά νερά. Στις περιπτώσεις που ο όγκος του νερού της βροχής είναι μεγαλύτερος από αυτόν που μπορεί να παροχετευτεί η κοίτη του ποταμού, το νερό θα υπερκαλύψει τις όχθες του ποταμού και θα απλωθεί στο πλημμυρικό πεδίο. Όμως, ο καθοριστικός παράγων για τις καταστροφές, δεν είναι η ποσότητα του νερού που παροχετεύεται, αλλά πόσο υψηλότερα ανεβαίνει η στάθμη του νερού πάνω από τις όχθες και τα αναχώματα. Επιπλέον, οι πλημμύρες μπορούν να δημιουργηθούν και σε περιοχές όπου δεν υπάρχει κοίτη, όπως για παράδειγμα όταν πέσει ασυνήθιστα υψηλή βροχόπτωση σε επίπεδη επιφάνεια και το έδαφος δεν προλαβαίνει να την απορροφήσει και το νερό δεν προλαβαίνει να παροχετευτεί με το ρυθμό που πέφτει (Φουντούλης, 2006).

Το πλημμυρικό πεδίο (floodplain) ενός ποταμού αποτελεί ένα φυσικό χαρακτηριστικό της κοιλάδας του, το οποίο μπορεί να προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια. Πρόκειται για την σχεδόν επίπεδη περιοχή που περιβάλλει το ποτάμι. Ένα πλημμυρικό πεδίο αποτελείται από μία σειρά στρωμάτων που αποτέθηκαν από το ποτάμι όταν αυτό περιοδικά πλημμύριζε τις συνήθεις όχθες του. Στις ορεινές περιοχές όπου οι κοιλάδες είναι απότομες και στενές δεν παρατηρούνται πλημμυρικά πεδία, αλλά ένα μεγάλο σύνθετο σύστημα ρευμάτων που συγκλίνουν σε μία χαμηλή περιοχή, η οποία μπορεί να έχει πλημμυρικό πεδίο πλάτους εκατοντάδων χιλιομέτρων. Στα ποτάμια υπάρχει η φυσική τάση να αποθέτουν ιζήματα μέσα στην κοίτη τους κατά τις περιόδους χαμηλής ροής, έτσι ώστε να εγκατασταθεί μία ισορροπία εκεί όπου το ποτάμι γεμίζει άνετα την κύρια κοίτη του κάτω από συνήθεις συνθήκες. Επομένως, το ποτάμι αυτομάτως θα απλωθεί στο πλημμυρικό πεδίο κατά τις περιόδους όπου παρουσιάζει υψηλή ροή, δηλαδή τα πλημμυρικά πεδία έγιναν από πλημμυρικά επεισόδια (Φουντούλης 2006).



Σχήμα 12 : Στερεοδιάγραμμα που δείχνει τη λεκάνη κατάκλυσης και την κοίτη του ποταμού (από Ε. ΛΕΚΚΑ, 1996).

Κίνδυνος (hazard) είναι μια πηγή ή κατάσταση που μπορεί να προκαλέσει δυνητικά βλάβη ή καταστροφή σε ένα φυσικό, τροποποιημένο ή ανθρώπινο σύστημα. Ο κίνδυνος μπορεί επιστημονικά να περιγραφεί με διάφορους τρόπους όπως η πιθανότητα εκδήλωσης τέτοιων φαινομένων, το διακύβευμα σε περίπτωση που ένα τέτοιο γεγονός συμβεί ή και τα δύο (Tsakiris 2007, Thywissen, 2006).

Στην περίπτωση των πλημμύρων που προέρχονται από την ορεινή ζώνη, η περιγραφή του κινδύνου μπορεί να αναφέρεται στην ποσοτικοποιημένη περιγραφή της πλημμύρας (π.χ. υδρογράφημα εισροής στην πεδινή/παράκτια ζώνη) με παράλληλη εκτίμηση της πιθανότητας δημιουργίας τέτοιας πλημμύρας. Πρέπει να τονιστεί ότι όλα τα φαινόμενα πλημμύρας δεν οφείλονται μόνο σε φυσικούς λόγους, όπως η έντονη διαταραχή της ατμόσφαιρας, που προκαλεί ραγδαίες βροχές. Πολλές φορές ανθρωπογενείς λόγοι (που δεν περιγράφονται από πιθανότητες) αποτελούν δυνητικούς κινδύνους πλημμύρας. Στις περιπτώσεις αυτές η ανάλυση του κινδύνου δεν πρέπει να γίνεται με τον υπολογισμό πιθανοτήτων αλλά με το διακύβευμα.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα στην περιοχή αυτή αποτελεί η ενδεχόμενη θραύση ενός φράγματος ανάντη της πεδινής ζώνης. Στην περίπτωση αυτή η εφαρμογή των πιθανοτήτων μπορεί να λειτουργήσει αποπροσανατολιστικά στην εξασφάλιση ασφαλών συνθηκών διαβίωσης στην πεδινή ζώνη (Tsakiris 2007).

Ένας πολύ σημαντικός όρος στη διαδικασία εκτίμησης της διακινδύνευσης της πεδινής/παράκτιας ζώνης είναι η Τρωτότητα (Vulnerability).

Ως **τρωτότητα** ενός συστήματος εννοείται ο βαθμός που δείχνει πόσο ευάλωτο είναι το σύστημα κατά την έκθεσή του στον φυσικό κίνδυνο. Σύμφωνα με τις εργασίες του Κέντρου Εκτίμησης Φυσικών Κινδύνων και Προληπτικού Σχεδιασμού του Ε. Μ.

Πολυτεχνείου, η τρωτότητα μπορεί μαθηματικά να αποτυπωθεί ως μια συνάρτηση μεταξύ 0 και 1 εξαρτώμενη από μια σειρά παραγόντων που συνοπτικά είναι (Tsakiris, 2007)

(α) η κατάσταση του συστήματος

(β) το μέγεθος του φαινομένου

(γ) ο κοινωνικός παράγοντας (επίπεδο μόρφωσης και διαθέσεις του κοινού)

(δ) η αλληλεξάρτηση των επιμέρους παραγόντων του συστήματος

Συναφής όρος είναι επίσης η έκθεση (exposure) του συστήματος στον κίνδυνο που μπορεί να αυξήσει ή να περιορίσει τις επιπτώσεις από ένα ακραίο γεγονός.

Τέλος, η Διακινδύνευση (risk) ορίζεται ως ο πραγματικός κίνδυνος για ένα σύστημα (ζωές, περιουσίες, υποδομές, περιβάλλον, οικονομικές δραστηριότητες) που προκύπτει με βάση τον κίνδυνο (hazard), την τρωτότητα και την έκθεση του συστήματος σ'αυτόν τον κίνδυνο. Η διακινδύνευση μπορεί να αναφέρεται χωρίς ή με χρονικό όριο.

Όρος στην Οδηγία	Προτεινόμενος δόκιμος όρος	Δόκιμος όρος στην αγγλική γλώσσα
Επικινδυνότητα	Κίνδυνος	Hazard
Κίνδυνος	Διακινδύνευση	Risk
Κίνδυνος	Τρωτότητα	Vulnerability
Κίνδυνος πλημμύρας	Διακινδύνευση πλημμύρας	Flood risk
Χάρτης επικινδυνότητας πλημμύρας	Χάρτης κινδύνου πλημμύρας	Flood hazard map
Χάρτης κινδύνου πλημμύρας	Χάρτης διακινδύνευσης πλημμύρας	Flood risk map
Διαχείριση κινδύνου πλημμύρας	Διαχείριση διακινδύνευσης πλημμύρας	Flood risk management
Σχέδια διαχείρισης κινδύνου πλημμύρας	Σχέδια διαχείρισης διακινδύνευσης πλημμύρας	Flood risk plans
Πλημμυρικές περιοχές	Πεδίο πλημμυρών	Floodplains
Περίοδος επαναληπτικότητας	Περίοδος επαναφοράς	Return period

Πίνακας 13: Προτεινόμενη ορολογία στους όρους της οδηγίας 2007/60 για τα νερά (πηγή: Τσακίρης Γ.)

Οι πλημμύρες σαν φυσικό φαινόμενο, διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τον χώρο στον οποίο συμβαίνουν καθώς και την έκταση και ένταση που καταλαμβάνουν. Οι κατηγορίες έχουν ως εξής:

- ✓ Ποτάμιες Πλημμύρες (River Floods)
- ✓ Παράκτιες Πλημμύρες (Coastal Floods)
- ✓ Πλημμύρες από λιώσιμο χιονιού και πάγου σε ορεινές και πολικές περιοχές
- ✓ Πλημμύρες που οφείλονται σε καταστροφή ή κακή λειτουργία τεχνικών έργων

Υπάρχει και μια ταξινόμηση των ποτάμιων πλημμυρών σ' αυτές που συμβαίνουν στα ανάντη κι αυτές που συμβαίνουν στα κατάντη. Οι πρώτες αφορούν μια μικρή περιοχή και οι δεύτερες επηρεάζουν τεράστιες εκτάσεις. Πάντως αν μια πλημμύρα ελεγχθεί στα ανάντη - μείωση ταχύτητας ροής με διαδοχικά φράγματα - οι συνέπειες στα κατάντη ελαχιστοποιούνται.

Πλημμύρες στα ανάντη (upstream flooding) και αστραπιαίες πλημμύρες (flash floods)

Οι πλημμύρες στα ανάντη (upstream floods) συμβαίνουν στα υψηλά τμήματα της αποστράγγισης και γενικά είναι το αποτέλεσμα έντονων βροχοπτώσεων μικρής διάρκειας πάνω από μια σχετικά μικρή περιοχή. Παρόλο που οι πλημμύρες μπορεί να είναι εντονότερες πάνω από την περιοχή αυτή, γενικά, δεν προκαλούνται από τα μεγαλύτερα ρεύματα με τα οποία ενώνονται.

Αστραπιαίες πλημμύρες (flash floods) συμβαίνουν όταν λαμβάνουν χώρα ισχυρές βροχοπτώσεις σε μικρό χρονικό διάστημα και η διηθητική ικανότητα είναι χαμηλή. Είναι πλημμύρες στα ανάντη με πολύ μικρούς χρόνους καθυστέρησης (οι χρόνοι καθυστέρησης μπορεί να είναι μόνο μερικές ώρες). Οι πλημμύρες αυτές είναι συνηθισμένες σε ξηρά και ημίξερα περιβάλλοντα, σε περιοχές με απότομη τοπογραφία, φτωχή βλάστηση και συνεχόμενες ρωγμές, φράγματα και αναχώματα.

Οι Παραποτάμιες πλημμύρες (Riverine floods) δημιουργούνται από την βροχόπτωση σε μεγάλης έκτασης περιοχές ή από την τήξη του χιονιού που έπεσε σε μία περιοχή κατά το χειμώνα ή και από το συνδυασμό και των δύο. Αυτού του τύπου οι πλημμύρες διαφέρουν από τις Flash floods τόσο ως προς την έκταση όσο και ως προς τη διάρκεια. Έτσι ενώ οι Flash floods είναι μικρής διάρκειας και συμβαίνουν σε μικρά ποτάμια οι κλάδους ποταμών. Οι Παραποτάμιες πλημμύρες λαμβάνουν χώρα σε ποτάμια συστήματα των οποίων οι κλάδοι (παραπόταμοι) μπορεί να αποστραγγίζουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές και να περιλαμβάνουν πολλές ανεξάρτητες

υδρολογικές λεκάνες. Οι πλημμύρες που σχετίζονται με μεγάλα ποτάμια συστήματα μπορεί να συνεχίζουν για περιόδους (χρονικά διαστήματα) που μπορεί να ποικίλουν από λίγες ώρες μέχρι αρκετές ημέρες. Οι πλημμυρικές ροές σε μεγάλα ποτάμια συστήματα δεν είναι τίποτα άλλο παρά η κατανομή της βροχόπτωσης. Η κατάσταση του εδάφους (ποσοστό υγρασίας στο έδαφος, εποχιακές μεταβολές της βλάστησης, πάχος του καλύμματος χιονιού, η μείωση της περατότητας εξαιτίας της αστικοποίησης, κλπ.) είναι κάποιοι από τους παράγοντες που επιδρούν άμεσα στην επιφανειακή απορροή. (Φουντούλης, 2006).

Παρόλο που οι προς τα ανάντη (upstream) πλημμύρες δεν προκαλούν γενικά πλημμύρες στα μεγαλύτερα ρεύματα, συμμετέχουν ωστόσο στη δημιουργία των προς τα κατόντη (downstream) πλημμυρών. Οι πλημμύρες αυτές, εξαιτίας του γεγονότος ότι έρχονται χωρίς προειδοποίηση είναι οι πιο επικίνδυνες για τις ανθρώπινες ζωές.

Πλημμύρες στα κατόντη (downstream flooding)

Οι πλημμύρες στα κατόντη (downstream flooding) καλύπτουν μία ευρεία περιοχή. Συνήθως είναι το αποτέλεσμα μακράς διάρκειας καταιγίδων οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα τον κορεσμό του εδάφους σε νερό και την αυξημένη επιφανειακή απορροή. Οι χρόνοι καθυστέρησης είναι συνήθως μεγαλύτεροι καθώς τα μικρότερα ρέματα αυξάνουν συνεχώς την παροχή στα μεγαλύτερα. Οι πλημμύρες αυτές εκτείνονται σε μεγάλες χρονικές περιόδους και επηρεάζουν τα μεγαλύτερα ρέματα όσο και τα μικρότερα. Μια πλημμύρα αυτού του τύπου χαρακτηρίζεται από την κίνηση του νερού προς τα κατόντη με μεγάλη αυξομείωση της παροχής σε συγκεκριμένες τοποθεσίες (Λέκκας, 1996)

9.2.3 Κύρια μεγέθη πλημμυρών

Τα κύρια μεγέθη της πλημμύρας είναι τα ακόλουθα:

- η παροχή αιχμής και η αντίστοιχη στάθμη στο υδατόρευμα
- ο πλημμυρικός όγκος
- η χρονική διάρκεια

Τα παραπάνω μεγέθη - χαρακτηριστικά των πλημμυρών συνδέονται με τα χαρακτηριστικά των ακόλουθων παραγόντων:

- της βροχόπτωσης (συνολικό ύψος, ένταση, διάρκεια)
- της λεκάνης απορροής (έκταση (A), συντελεστής απορροής (c), χρόνος συρροής, όγκος απορροής V (hm^3): $h \cdot A / 1000$, παροχή αιχμής Q m^3/s) $= 0.278 \cdot c \cdot i \cdot A$)

- των υδατορευμάτων (διατομή, κλίση, τραχύτητα, κατάντη στάθμες)

Οι περισσότερες πλημμύρες είναι αποτέλεσμα δράσης α) της συνολικής ποσότητας και κατανομής της βροχόπτωσης, β) της περατότητας του πετρώματος επηρεάζοντας έτσι την απορροή και συνεπώς την πλημμυρική απορροή και γ) της τοπογραφίας . Μερικές πλημμύρες είναι το αποτέλεσμα της τήξης των πάγων και του χιονιού κατά την άνοιξη, ή σε σπάνιες περιπτώσεις, της καταστροφής ενός φράγματος . Τέλος, η χρήση γης σε μικρές λεκάνες αποστράγγισης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την πλημμύρα. (Νικολαΐδου Μ., 2009).

Σε περιπτώσεις όπου η βροχόπτωση είναι εντονότερη απ' ότι συνήθως σε μια συγκεκριμένη περιοχή και οι τιμές της κατείσδυσης και εξατμισοδιαπνοής είναι χαμηλές, τότε η επιφανειακή απορροή είναι υψηλότερη με επακόλουθο η πιθανότητα πλημμύρας να αυξάνεται. Η ισχυρή βροχόπτωση μπορεί να αποτυπωθεί σε χάρτες ισοϋετείς που περιέχουν καμπύλες ίσης βροχόπτωσης.

Έτσι λοιπόν η ποσοτική εκτίμηση της πλημμύρας συνοδεύεται από την παροχή αιχμής, το ύψος του νερού και τον πλημμυρικό όγκο καθώς επίσης και τις εκτάσεις που κατακλύζονται από τέτοια φαινόμενα. Η διοχέτευση του νερού στο ποτάμιο σύστημα που πολλές φορές κρίνεται ανεπαρκής, με αποτέλεσμα την εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων, εξαρτάται με τη σειρά της από την διατομή του ποταμού, τις μικρές κλίσεις του πυθμένα καθώς και από την τραχύτητα του ποταμού εξαιτίας των παραγόμενων φερτών υλικών .

9.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗΣ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ & Γ.Σ.Π ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΜΑΣ/ΠΟΛΥΠΑΡΑΓΟΝΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

9.4.1 Ανάπτυξη Μεθοδολογίας

Το φαινόμενο της πλημμύρας καθώς και η μελέτη του είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο μιας και για την εκδήλωσή του συμμετέχουν πολλοί παράγοντες π.χ εδαφολογικοί, μετεωρολογικοί, γεωλογικοί, μορφολογικοί, υδρολογικοί και φυσικά οι ανθρωπογενείς παράγοντες. Από βιβλιογραφικές μελέτες και εφαρμογές σε διάφορες περιοχές τόσο της χώρας μας όσο και διεθνώς δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη μεθοδολογία για την εκτίμηση πλημμυρικών φαινομένων. Η γενική μεθοδολογία που ακολουθείται για την εκτίμηση πλημμυρικής επικινδυνότητας και την παραγωγή χαρτών έγκειται στην γνώμη και εμπειρία του μελετητή και στην εκτίμηση του κατά πόσο κάποιος παράγοντας, ο οποίος επιδρά στις πλημμύρες, μπορεί να συμβάλλει στην εκδήλωση τέτοιων φαινομένων. Η επιλογή των παραγόντων γίνεται με καθαρά υποκειμενικά κριτήρια και καθορίζει το στάδιο της εργασίας όπου αποδίδονται διαβαθμίσεις(ratings) και συνεπώς προτεραιότητες.

Η εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου σε μια περιοχή μπορεί να εκτιμηθεί είτε ποιοτικά είτε ποσοτικά (υδρολογικά-υδραυλικά χαρακτηριστικά) ή μέσα από το συνδυασμό ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών για μια δεδομένη λεκάνη απορροής και εξαρτάται φυσικά από τα διαθέσιμα δεδομένα που υπάρχουν.

Ο προσδιορισμός των περιοχών στις οποίες έχει εκδηλωθεί ή υπάρχει πιθανότητα να εκδηλωθεί πλημμύρα μπορεί να γίνει εφικτός με την βοήθεια των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών/ ΓΣΠ (Geographical Information Systems/ GIS). Τα ΓΣΠ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή χάρτη επιδεκτικότητας στις πλημμύρες, ο οποίος καταδεικνύει τις περιοχές που έχουν την μεγαλύτερη πιθανότητα να εκδηλωθούν πλημμύρες.

Αν λάβουμε την πλημμυρά από πλευράς φυσικού πλαισίου, τα κύρια μεγέθη που την χαρακτηρίζουν είναι η παροχή Q m³/sec και η αντίστοιχη στάθμη στο υδατόρευμα, ο πλημμυρικός όγκος και η χρονική διάρκεια(hr, min). Τα παραπάνω όμως μεγέθη συνδέονται με τα χαρακτηριστικά της

- Βροχόπτωσης (συνολικό ύψος , ένταση, διάρκεια)
- Τα υδρομορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής (έκταση, χρόνος συρροής t_c , συντελεστής απορροής c ή CN).
- Τα υδρομορφομετρικά χαρακτηριστικά των υδατορευμάτων (διατομή, κλίση, τραχύτητα.

Αντίστοιχα τα παραπάνω χαρακτηριστικά επηρεάζονται από άλλους παράγοντες όπως η τοπογραφία της περιοχής, η βλάστηση κ.α. Σε περιπτώσεις όπου οι γεωμορφολογικές συνθήκες της περιοχής είναι έντονες και χαρακτηρίζονται από απότομες κλίσεις, ευνοούν την εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων σε συνδυασμό με την κατανομή έντασης της βροχόπτωσης.

Στην παρούσα διατριβή έγινε η προσπάθεια εκτίμησης πλημμυρικής επικινδυνότητας με βάση την αξιοποίηση των διαθέσιμων μετεωρολογικών δεδομένων 33 υδρολογικών ετών και την επίλυση του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής μελέτης μας όπως αναλύθηκε στο κεφ.8 καθώς επίσης και από την επεξεργασία των πρωτογενών χαρτών(τοπογραφικοί, γεωλογικοί, χρήσεις γης) από τους οποίους προέκυψαν και όλα τα επίπεδα πληροφορίας που δημιουργήθηκαν για την εκτέλεση αυτού του μοντέλου. Τα αποτελέσματα του υδατικού ισοζυγίου χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για τον υπολογισμό της παροχής στην λεκάνη απορροής όπως θα δούμε και στα επόμενα κεφάλαια.

Μιας και το φαινόμενο εκδήλωσης πλημμυρικών φαινομένων είναι αλληλοεξαρτώμενο από ένα πλήθος παραγόντων, εξετάσαμε το φαινόμενο αυτό μέσα από την πολυπαραγοντική ανάλυση, αναπτύσσοντας ένα κατανεμημένο εννοιολογικό-φυσικής βάσης υδρολογικό μοντέλο. Θεωρήσαμε έτσι ως σημαντικότερους παράγοντες στην εκδήλωση τέτοιων φαινομένων τις ακόλουθες κατηγορίες:

- Η τοπογραφία και της περιοχής από την οποία υπολογίστηκε ο τοπογραφικός δείκτης υγρασίας
- Οι κλίσεις
- Οι χρήσεις γης από την οποία υπολογίσαμε την τραχύτητα
- Η υδρολιθολογία (Permeability) της περιοχής όπου κατηγοριοποιήθηκαν οι γεωλογικοί σχηματισμοί και δόθηκαν συντελεστές βάση της περατότητάς τους.
- Ο ρυθμός μεταβολής ενέργειας χειμάρου 3^{ης} , 4^{ης} και 5^{ης} τάξης.
- Η μέση υπερετήσια παροχή υπολογισμένη από το υδατικό ισοζύγιο .

9.4.2 Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν

Τα πρωτογενή δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο εκτίμησης πλημμυρικού κινδύνου είναι:

- 4 τοπογραφικοί χάρτες της Γ.Υ.Σ. Τα φύλλα αυτά είναι το φύλλο χάρτη Νεστόριο, Καστοριάς και Μεσοποταμίας
- Οι αντίστοιχοι γεωλογικοί χάρτες του ΙΓΜΕ
- Τα μετεωρολογικά ετήσια δεδομένα (βροχόπτωση και θερμοκρασία) για τα έτη 1961-1994 από 6 βροχομετρικούς σταθμούς και 2 σταθμούς θερμοκρασίας και τα οποία λήφθηκαν από υδρολογική μελέτη που έγινε το 1994 από το Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης .

9.4.3 Επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων με την χρήση των Γ.Σ.Π

Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (Γ.Σ.Π) βασίστηκαν στην εξέλιξη της τεχνολογίας των υπολογιστών, της ψηφιακής χαρτογραφίας, της τηλεπισκόπησης, των βάσεων δεδομένων, των εφαρμοσμένων μαθηματικών και των συστημάτων λήψης αποφάσεων. Τα Γ.Σ.Π αποτελούν σήμερα ένα πολύτιμο εργαλείο διαχείρισης πληροφοριών που μας δίνει τη δυνατότητα να επεξεργαστούμε χωρικά και περιγραφικά δεδομένα αλλά και ψηφιακά δεδομένα μεγάλου όγκου και μέσω κατάλληλων εφαρμογών να συνδυάζουμε τα δεδομένα αυτά σε μικρό χρόνο με στόχο τη σωστή λήψη απόφασης, να τα συγκρίνουμε αλλά και να τα ενημερώνουμε με νέα στοιχεία.

Πιο συγκεκριμένα, τα Γ.Σ.Π μας επιτρέπουν λειτουργίες όπως την επεξεργασία χωρικών δεδομένων (τοπολογία³, αλλαγή προβολικού συστήματος και κλίμακας), την ανάλυση χωρικών δεδομένων (ποσοτική και ποιοτική ανάλυση, σύνθεση ερωτημάτων) και την οργάνωση δεδομένων, την οπτικοποίηση δεδομένων με πίνακες, γραφήματα και τη σύνθεση χαρτών.

Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκε ένα πλήθος καταναμεμένων υδρολογικών μοντέλων που αξιοποιούν την χωρική κατανομή και επεξεργασία των χωρικών δεδομένων με τη χρήση των Γ.Σ.Π λύνοντας με αυτό τον τρόπο το μειονέκτημα που είχαν τα μοντέλα αυτά πριν την εισαγωγή των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών. Με αυτό τον τρόπο, τα καταναμεμένα υδρολογικά μοντέλα, μπορούν να συνδυάσουν πληροφορίες που αφορούν την χωρική μεταβλητότητα της γεωλογίας,

³ Με τη δημιουργία της τοπολογίας εξασφαλίζουμε τη σωστή ψηφιοποίηση των γεωγραφικών και γεωμετρικών δεδομένων μας, δηλαδή την ψηφιοποίηση που δεν περιέχει χωρικά λάθη π.χ την ύπαρξη επιπλέον στοιχείων που δεν πρέπει να υπάρχουν ή την ύπαρξη ελλειπών στοιχείων.

της τοπογραφίας, τον χρήσεων γης, της υδρομετεωρολογίας και άλλων παραμέτρων και μεταβλητών που μπορεί να περιλαμβάνει ένα μοντέλο και να λάβει αποφάσεις με στόχο την καλύτερη δυνατή λύση για το πρόβλημα το οποίο μελετάται.

Για τη διαχείριση και επεξεργασία των δεδομένων μας χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά MapInfo 8.5 και ArcMap 9.1. Ο λόγος που χρησιμοποιήσαμε το MapInfo είναι διότι κατά τη γνώμη μας, μας επιτρέπει ευκολότερη και γρηγορότερη ψηφιοποίηση ψηφιακών δεδομένων καθώς και γρηγορότερο τοπολογικό έλεγχο(δυνατότητα εμφάνισης κόμβων κατά τη διάρκεια της ψηφιοποίησης και διόρθωσης αυτών). Το ArcMap από την πλευρά του και όπως οι περισσότεροι γνωρίζουμε, έχει μια πληθώρα εργαλείων τα οποία διαχειρίζονται τόσο τα περιγραφικά όσο και τα χωρικά δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, οι γεω-επεξεργασίες που εκτελέστηκαν σε κάθε πρόγραμμα έχουν ως εξής:

Η ψηφιοποίηση των ψηφιακών (raster) δεδομένων μας και η μετατροπή τους σε διανυσματικά δεδομένα (vector) και συγκεκριμένα οι ισοϋψείς, τα τριγωνομετρικά σημεία, το υδρογραφικό δίκτυο, ο σχηματισμός των υπολεκανών μας και οι βροχομετρικοί σταθμοί εκτελέστηκαν στο λογισμικό MapInfo. Στη συνέχεια εξήχθησαν σε μορφή shapefile για την εισαγωγή τους στο λογισμικό ArcMap όπου εκεί έγινε η επεξεργασία των παραπάνω(δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους και τα παράγωγά του, χωρικά ερωτήματα, ενημέρωση πεδίων με διάφορα περιγραφικά στοιχεία, οπτικοποίηση αποτελεσμάτων μέσω της χαρτογραφικής σύνθεσης).

9.4.3.1 Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου αναγλύφου (DEM)

Ένας από τους πιο γνωστούς και συνηθέστερους τρόπους απεικόνισης του αναγλύφου της γήινης επιφάνειας αποτελεί το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (DEM). Πρόκειται για την αναπαράσταση μιας επιφάνειας σε μορφή καννάβου στην οποία αποδίδονται συγκεκριμένες τιμές υψομέτρου μέσα από την εφαρμογή μαθηματικής συνάρτησης που εκφράζει τη συνεχή επιφάνεια του εδάφους.

Κατά την διαδικασία δημιουργίας του Dem, στόχος είναι η καλύτερη δυνατή απεικόνιση της πραγματικής επιφάνειας του εδάφους. Η ακρίβεια αυτή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι για παράδειγμα η αρχική μορφή και εισαγωγή των δεδομένων- αναλογικών χαρτών, ο τρόπος με τον οποίο έγινε η επεξεργασία των χαρτών αυτών (ψηφιοποίηση, γεωαναφορά και σφάλμα rms), η ανάλυση του DEM κ.α.

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Dem) της περιοχής μελέτης μας, με μέγεθος εικονοστοιχείου 10 X 10 m, προήλθε από τη σύνθεση του Tin (triangular irregular network) με τη χρήση της εργαλειοθήκης 3D Analyst - Surface Analysis - Tin to raster του λογισμικού Arcmap. Η δημιουργία του tin προήλθε από τη χρήση της

εργαλειοθήκης 3D Analyst - Create tin - Create tin from features. Για τη δημιουργία του tin λήφθηκαν υπόψη τα παρακάτω δεδομένα:

- ✓ Ισοϋψείς (λόγω της υψομετρικής τους πληροφορίας χαρακτηρίστηκαν ως hard line)
- ✓ Τριγωνομετρικά σημεία (λόγω της υψομετρικής τους πληροφορίας χαρακτηρίστηκαν ως mass point)
- ✓ Λίμνη (δεν είχαμε υψομετρική πληροφορία γι' αυτό χαρακτηρίστηκε ως soft value fill)
- ✓ Υδατορεύματα (δεν είχαμε υψομετρική πληροφορία γι' αυτό χαρακτηρίστηκαν ως soft line)

Πλήρωση του DEM

Το επόμενο βήμα μετά την δημιουργία του dem ήταν η πλήρωσή του με τη χρησιμοποίηση του εργαλείου fill της εργαλειοθήκης Hydrology⁴ του λογισμικού Arcgis. Η πλήρωση αυτή αφορά την εξάλειψη των τυχόν τοπικών ταπεινώσεων (depressions) του αναπαριστώμενου αναγλύφου σε κάποια εικονοστοιχεία (pixels), λόγω σφαλμάτων και του αρχικού dem, με τη δημιουργία ενός νέου καννάβου (filled dem) στο οποίο οι πολύ χαμηλές τιμές υψομέτρου αντικαθίστανται από υψηλότερες σύμφωνα με εκείνες των γειτονικών κελιών. (Jenson and Domingue, 1988).



Σχήμα 13 : α) Προφίλ αρχικού dem που παρουσιάζει την τοπική ταπείνωση ενός κελιού, β) Προφίλ νέου dem (filled dem) στο οποίο οι χαμηλότερες τιμές στα κοιλά έχουν αντικατασταθεί από υψηλότερες. (Πηγή: Advanced GIS Workshop for UCCE, 2007)



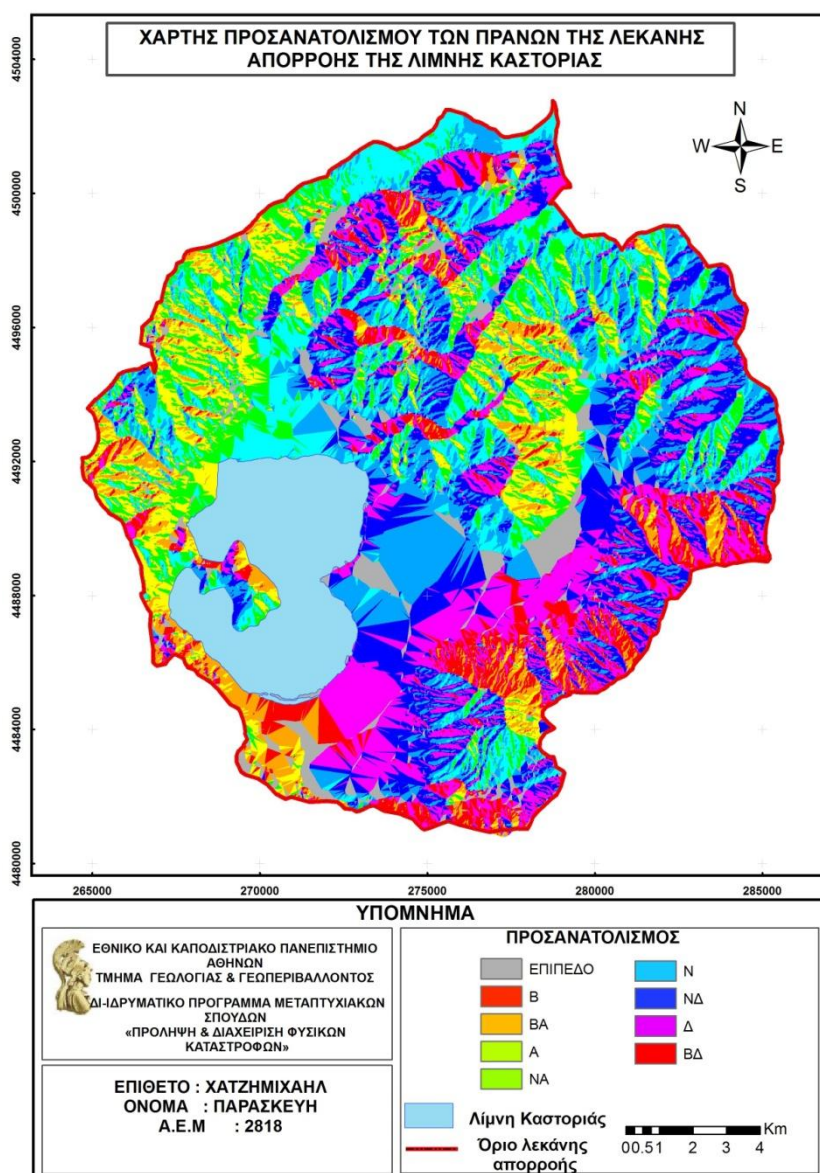
Σχήμα 14 : Απομάκρυνση κοιλωμάτων ενός ΨΜΕ με στόχο την καλύτερη αποτύπωση κίνησης της σταγόνας στην επιφάνεια του εδάφους (Πηγή: Maidment, 2002)

Το νέο αυτό ψηφιακό αρχείο (filled dem) χρησιμοποιήθηκε πλέον ως βάση για όλα τα παραγόμενα raster αρχεία στην παρούσα εργασία. Το dem αυτό χρησιμοποιήθηκε ως βάση για τη σύνθεση του μορφολογικού χάρτη της λεκάνης απορροής μας (βλ. σελ 15).

⁴ Πρόκειται για μια ρουτίνα υδρολογικής ανάλυσης όπου εξαγεί υδρομορφολογικά χαρακτηριστικά όπως το υδρογραφικό δίκτυο, η λεκάνη απορροής και υπολεκάνες μέσω του dem (Jenson, 1994; Moore, 1996).

Κλίσεις εδάφους (SLOPE) - Προσανατολισμός (Aspect)

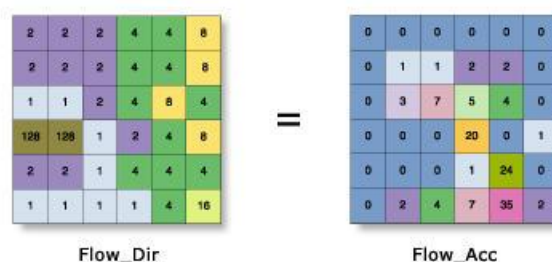
Οι κλίσεις του αναγλύφου αποτελούν ένα τοπογραφικό μέγεθος μεγάλης σημασίας σε κάθε έρευνα και έργο. Ορίζεται ως η μέγιστη μεταβολή του υψομέτρου για κάθε σημείο της επιφάνειας του εδάφους και μπορεί πλέον εύκολα να καθοριστεί μέσα από ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου. Οι κλίσεις της περιοχής μελέτης μας υπολογίστηκαν σε μοίρες με τη χρήση της εφαρμογής Spatial Analyst του Arcgis (βλ. Κεφ.3ο ,χάρτης κλίσεων σελ . 17)



Ο όρος συσσώρευση ροής αναφέρεται στο άθροισμα συσσώρευσης της επιφανειακής απορροής σε μια υδρολογική λεκάνη απορροής.

Τα διάφορα μοντέλα που υπάρχουν για την συσσώρευση ροής είναι ουσιαστικά δευτερογενή προϊόντα που προέρχονται από άλλα μοντέλα κατεύθυνσης ροής τα οποία με τη σειρά τους αποτελούν δευτερογενή προϊόντα μιας και προέρχονται από την κατάλληλη επεξεργασία ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου.

Όταν αναφερόμαστε σε χάρτες συσσώρευσης ροής εννοούμε πλέγματα χαρτών τα οποία αποτελούνται από πολυάριθμες ψηφίδες για τις οποίες έχει αποδοθεί μια ακέραιη τιμή από το σύστημα η οποία έχει αντιστοιχεί με τον αριθμό των ψηφίδων από όπου διέρχεται η διαδρομή ροής(κατεύθυνση ροής/flow direction). Έτσι ουσιαστικά η τιμή της κάθε ψηφίδας συσσώρευσης ροής προέρχεται από το άθροισμα εκείνων που αποστραγγίζονται προς αυτήν.

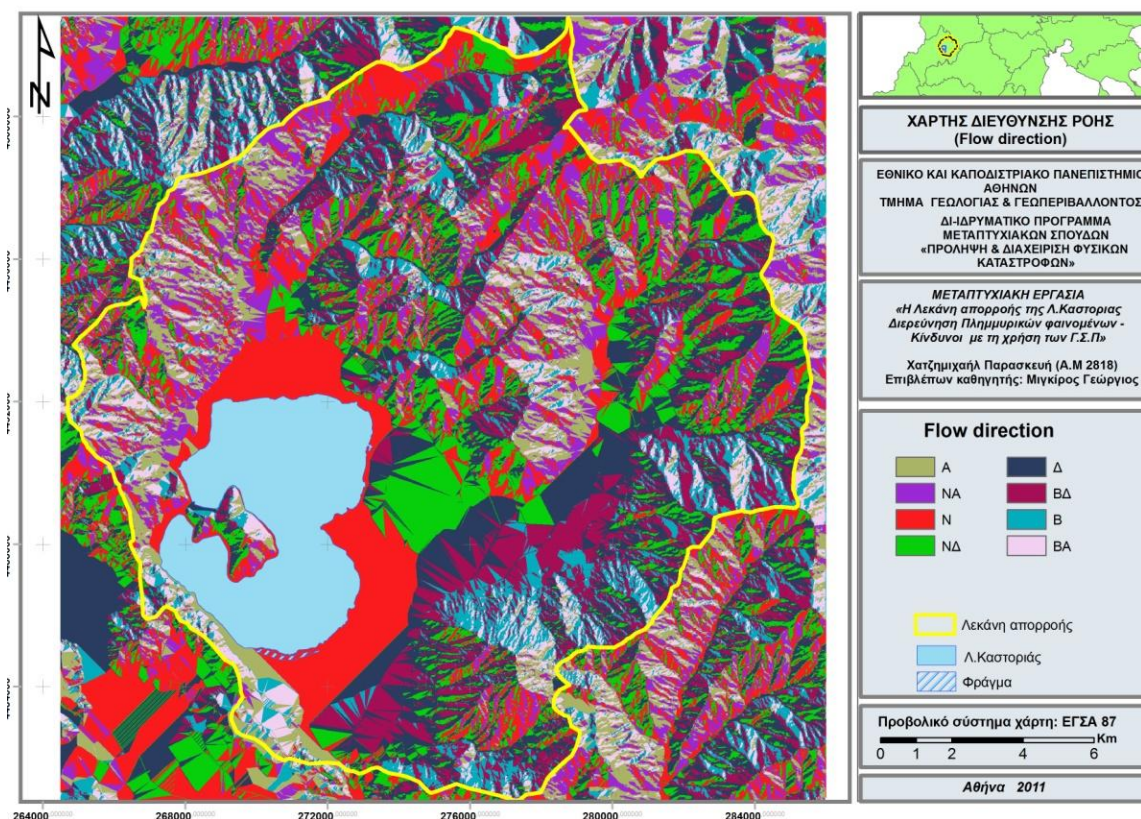


Σχήμα 15 : Αριστερά απεικονίζεται η κατεύθυνση ροής η οποία μετατρέπεται σε κατεύθυνση ροής(δεξιά) με την υπορουτίνα Hydrology του Arcgis. Οι μεγαλύτερες τιμές ψηφίδων του δεύτερου πίνακα δηλώνουν τις περιοχές στις οποίες συγκεντρώνεται το περισσότερο νερό (χάραξη υ/δ) ενώ οι ψηφίδες με μηδενικές τιμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την χάραξη των λεκανών και του υδροκρίτη. (Πηγή: ESRI, 2001).

Η αποτύπωση του υδρογραφικού δικτύου με τη βοήθεια της κατεύθυνσης και της συσσώρευσης ροής (που με τη σειρά τους προήλθαν από το διορθωμένο υδρολογικά DEM) είναι πλέον εφικτή, ορίζοντας ένα αριθμητικό κριτήριο στο επίπεδο πληροφορίας της συσσώρευσης ροής, το οποίο εντοπίζει τα εικονοστοιχεία που έχουν συγκέντρωση ροής πάνω από μία συγκεκριμένη τιμή. Τα σημεία που θα ικανοποιούν το κριτήριο αυτό, όταν ενωθούν, θα αποτελέσουν το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής. Πολύ μεγάλη τιμή σε αυτό το κριτήριο (πολύ μεγάλη ζητούμενη συσσώρευση ροής) θα ικανοποιηθεί μόνο από έναν μικρό αριθμό εικονοστοιχείων, κάτι που θα αποκλείσει πλήθος ρεμάτων μικρής τάξης. Αντίθετα, πολύ μικρή τιμή στο αριθμητικό κριτήριο της συσσώρευσης ροής, θα οδηγήσει σε ένα εξαιρετικά πυκνό υδρογραφικό δίκτυο (το οποίο θα αντιλαμβάνεται ακόμα και την ροή υπό μορφή μανδύα (overland flow) που απαντά στη ζώνη μη διάβρωσης (Horton,1945 και

Ασάρας,1980) ως κομμάτι του υδρογραφικού δικτύου) το οποίο πέρα από δυσανάγνωστο, είναι και μη ρεαλιστικό.(Νικολαΐδου Μ., 2009).

Στην παρούσα εργασία το αρχείο συσσώρευσης ροής αποτελεί το ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο σε μορφή raster για καλύτερη ακρίβεια και απεικόνιση των αποτελεσμάτων, δηλαδή του υδρογραφικού δικτύου μιας και η παραπάνω διαδικασία παραλείπει κάποια ρέματα που υπάρχουν αποτυπωμένα στους τοπογραφικούς χάρτες.



9.5.1 Τοπογραφικός Δείκτης Υγρασίας (Topographic Wetness Index)

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζει την κίνηση του νερού σε μια επιφάνεια αποτελεί η τοπογραφία της περιοχής. Ο τοπογραφικός δείκτης υγρασίας ή δείκτης υγρασίας (wetness index) ή τοπογραφικός δείκτης όπως αλλιώς ονομάζεται, είναι η πιο διαδεδομένη δεύτερη παράγωγος των ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου (DEM).

Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται για να περιγράψει την επίδραση της τοπογραφίας στην κατανομή της υγρασίας του εδάφους σε μια περιοχή. Ο υπολογισμός του βασίζεται στην ιδέα της κίνησης του νερού στα πρανή και της συγκέντρωσης του νερού στη βάση των πρανών. Παρόλο που η προσέγγιση του τοπογραφικού δείκτη είναι απλή, οι υπολογισμοί περιέχουν την τοπογραφία που φαίνεται να κατέχει κύρια θέση ως παράγοντας ρύθμισης της συμπεριφοράς του νερού του εδάφους. (Νικολαΐδου Μ., 2009).

Ο τοπογραφικός δείκτης υγρασίας (TWI) αναπτύχθηκε από τους Beven & Kirkby το 1979 και δίνεται από την σχέση

$$TWI = \ln(a/\tan\beta) \text{ όπου}$$

A: η περιοχή ανάντη ανά μήκος ισούψους και δίνεται από το αρχείο συσσώρευσης ροής που προέκυψε από το filled_dem και

B: η τοπική γωνία κλίσης που δίνεται από το αρχείο κλίσεων του αναγλύφου που προέκυψε από το DEM.

Όσο μεγαλύτερη είναι η έκταση της υδρολογικής λεκάνης και όσο μικρότερη είναι η γωνία κλίσης αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλή τιμή του δείκτη υγρασίας με επακόλουθο έδαφος σε αυτή την περιοχή να χαρακτηρίζεται από έντονη υγρασία. Η χρήση του δείκτη σε αυτή τη μορφή για τον υπολογισμό της χωρικής αποτύπωσης του επιπέδου του υπόγειου υδροφορέα σε μια λεκάνη απορροής βασίζεται στην υπόθεση ότι οι διαδικασίες ροής είναι σταθερές, ο ρυθμός επαναφόρτισης του υπόγειου υδροφορέα είναι ομοιόμορφος, δεν υπάρχουν πλευρικές ροές, η υπόγεια ροή είναι παράλληλη, η γωνία κλίσης του υδροφόρου στρώματος είναι ίση με αυτή της επιφάνειας του εδάφους, η καμπύλη αγωγιμότητας είναι εκθετική και ιδανική σε

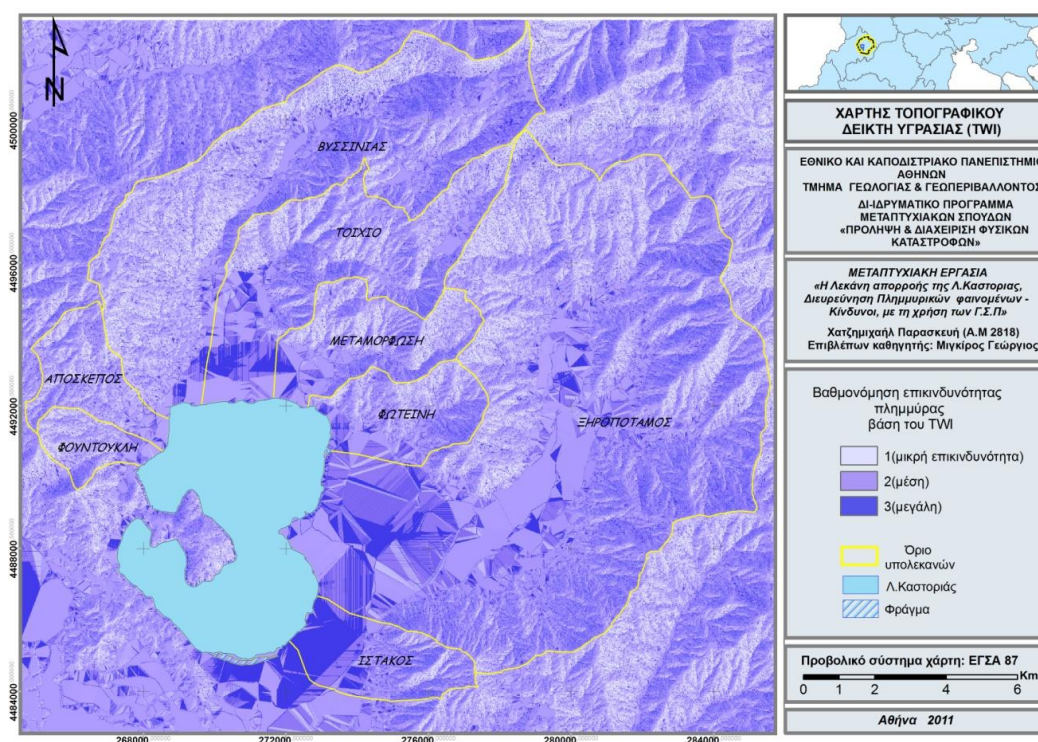
όλη την περιοχή και δεν υπάρχουν εμπόδια ή απορροές στα πρανή. (Beven and Kirkby, 1979, Quinn et al., 1991).

Οι ράχες χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές, ενώ τα χαμηλότερα σημεία των πρανών, ιδιαίτερα οι κοίλες περιοχές και οι βάσεις των κοιλάδων έχουν υψηλές τιμές (Rodhe and Seibert, 1999).

Στην παρούσα εργασία ορίστηκαν 3 κατηγορίες τιμών του δείκτη (μικρή, μέση, μεγάλη) και υπολογίστηκαν το εμβαδό και τα ποσοστά % που αντιστοιχούν στις παραπάνω κατηγορίες σε όλες τις λεκάνες. Η διαβάθμιση που δόθηκε σε κάθε κατηγορία αντιστοιχεί στην επικινδυνότητά της. Αυξημένη τιμή του δείκτη δηλώνει περιοχή περισσότερο επικίνδυνη (διαβάθμιση 3) ενώ αντίθετα μειωμένη τιμή του δείκτη δηλώνει μειωμένη επικινδυνότητα της περιοχής για την εκδήλωση πλημμύρας (διαβάθμιση 1).

ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ	ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ
ΜΕΓΑΛΗ (αυξημένη τιμή του δείκτη twi)	3
ΜΕΣΗ	2
ΜΙΚΡΗ (μικρή τιμή του δείκτη twi)	1

Στον χάρτη που ακολουθεί εμφανίζεται η κατανομή του δείκτη υγρασίας διαβαθμισμένος ως προς την επικινδυνότητά του στην ενίσχυση πλημμυρικών φαινομένων.



9.5.2 Λιθολογία- Υδροπερατότητα (Permeability)

Η λιθολογία αποτελεί και αυτή με τη σειρά της έναν πολύ σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει την επιφανειακή απορροή και συνεπώς την πλημμυρική απορροή αφού λειτουργεί υπέρ της κατείσδυσης. Η υδροπερατότητα (Permeability) κάθε γεωλογικού σχηματισμού καθορίζεται από την σύσταση των πετρωμάτων.

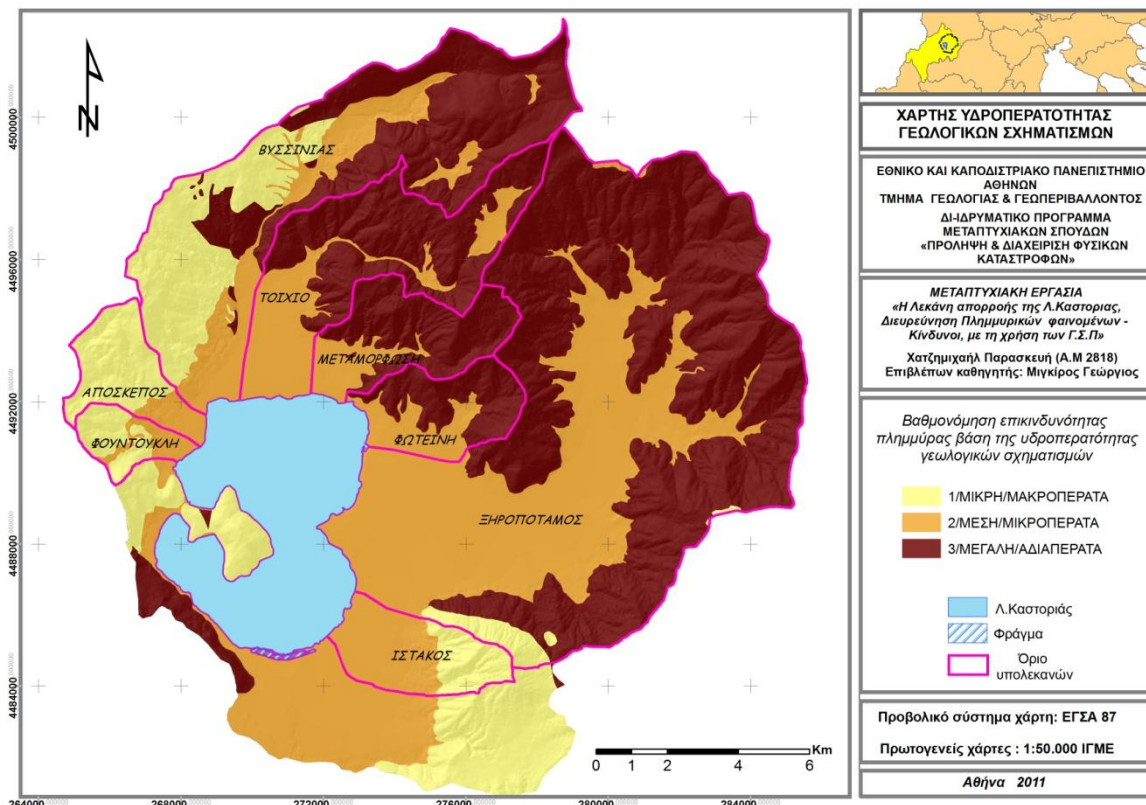
Περατότητα όπως αναφέρθηκε και στο κεφ. Υδρολιθολογία, ονομάζεται η ικανότητα των γεωλογικών σχηματισμών που επιτρέπουν την κίνηση του νερού προς τα βαθύτερα υδροφόρα στρώματα.

Ένα πέτρωμα με μεγάλο συντελεστή περατότητας παρουσιάζει μικρή σχετικά αντίσταση στη ροή του νερού δια μέσου αυτού και έτσι με μικρή σχετικά υδραυλική κλίση άρα με λίγες σχετικά απώλειες φορτίου είναι δυνατό να επιτρέπει μεγάλη ταχύτητα κατείσδυσης. Το αντίθετο ακριβώς συμβαίνει με ένα πέτρωμα που παρουσιάζει μικρή περατότητα, δηλαδή που έχει μικρό συντελεστή περατότητας. Το τελευταίο, παρουσιάζει μεγάλη σχετικά αντίσταση στη ροή του νερού δια μέσου αυτού και με μεγάλη σχετικά υδραυλική κλίση (κατά συνέπεια πολλές σχετικά απώλειες φορτίου) είναι δυνατό να επιτρέπει μεγάλη ταχύτητα ροής διήθησης.

Στις υπολεκάνες που παρατηρούνται μεγάλα ποσοστά αδιαπέρατων σχηματισμών πιθανότατα να υπάρξει εκδήλωση πλημμυρικού επεισοδίου, λόγω της ενίσχυσης επιφανειακής απορροής και σε συνδυασμό με έντονη ή παρατεταμένη βροχόπτωση αφού μεγάλη ποσότητα νερού θα διοχετευθεί προς τα κατάντη.

Η διαβάθμιση που δόθηκε σε κάθε κατηγορία περατότητας στην παρούσα εργασία, αντιστοιχεί στην επικινδυνότητά της. Έτσι λοιπόν διαβάθμιση 1 αντιστοιχεί στα διαπερατά πετρώματα, διαβάθμιση 2 στα ημιπερατά και διαβάθμιση 3 στα αδιαπέρατα πετρώματα.

ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ	ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ
ΜΕΓΑΛΗ (αυξημένη τιμή - αδιαπέρατα)	3
ΜΕΣΑΙΑ (ημιπερατά)	2
ΜΙΚΡΗ (ολοπερατά)	1



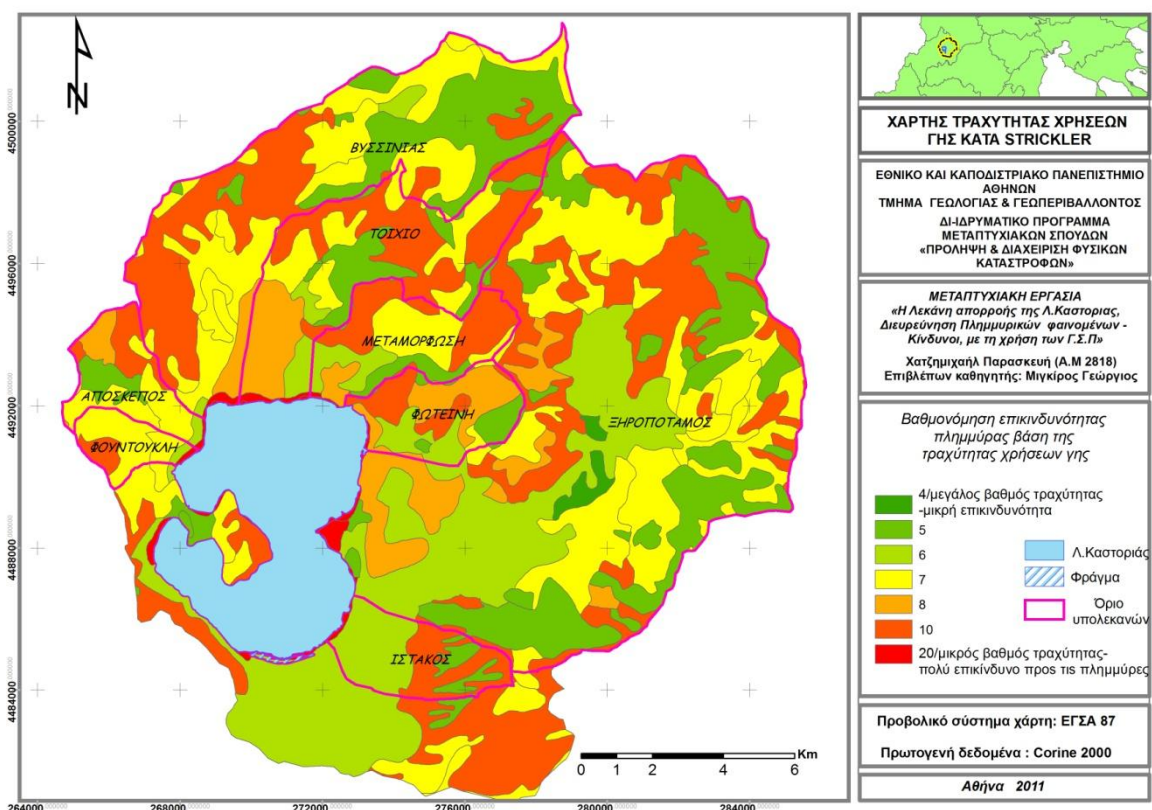
9.5.3 Κάλυψη γης- Τραχύτητα (Roughness)

Σε κάθε χρήση γης της περιοχής μελέτης, δόθηκε μία τιμή ανάλογα με την τραχύτητα (Roughness) που παρουσιάζει η εκάστοτε χρήση. Οι κατηγορίες τραχύτητας ορίστηκαν ως εξής: 4, 5, 6, 7, 8, 10, 20 και παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα. Η τιμή 4 αντιστοιχεί σε επιφάνεια μεγάλης τραχύτητας ενώ καθώς αυξάνουν τα νούμερα μειώνεται ο βαθμός τραχύτητας. Έτσι η τιμή 20 αντιστοιχεί σε λεία επιφάνεια. Οι τιμές αυτές προέκυψαν βασιζόμενες στον συντελεστή Strickler (Strickler coefficient) (e-EcoRisk, 2004), ο οποίος δίνει μία τιμή τραχύτητας σε κάθε χρήση γης του προγράμματος CORINE LAND COVER 2000 (από Νικολαΐδου Μ., 2009).

Μικρή τιμή τραχύτητας σε μία περιοχή (μεγάλη τιμή συντελεστή Strickler) ευνοεί την κίνηση του νερού προς τα κατάντη με αποτέλεσμα να το καθιστά περισσότερο επικίνδυνο. Αντίθετα, όσο αυξάνεται ο βαθμός τραχύτητας (μειωμένη τιμή Strickler) αυξάνεται και η αντίσταση που συναντά το νερό στην κίνηση του με συνέπεια την μείωση της ταχύτητάς του και επομένως και της επικινδυνότητάς του.

Κωδικός κάλυψης γης	112	211	212	231	242	243	311	312	313	321	323	324	331	411
Strickler coefficient	5	8	4	4	6	7	5	5	5	10	7	7	8	20

Κωδικός κάλυψης γης	112	211	212	231	242	243	311	313	321	323	324	331	411
Strickler coefficient	5	8	4	4	6	7	5	5	10	7	7	8	20

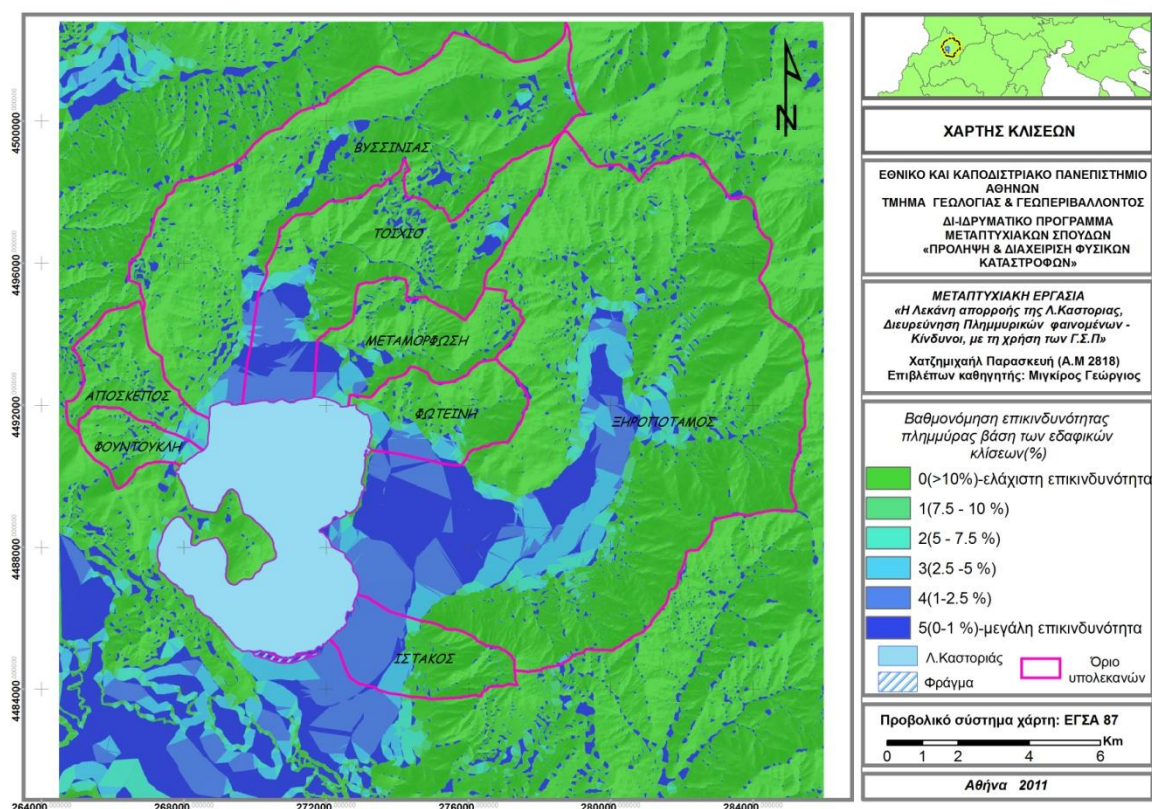


9.5.4 Κλίσεις -Επικινδυνότητα

Για την κατασκευή του χάρτη επικινδυνότητας πλημμυρών συνδυάστηκε και η πληροφορία των κλίσεων του εδάφους. Με το σκεπτικό ότι η εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων ευνοείται στις περιοχές με μικρές μορφολογικές κλίσεις έγινε η βαθμονόμηση των κλίσεων σε 5 κατηγορίες ανάλογα με την επικινδυνότητα ως προς το φαινόμενο πλημμύρα. Οι κατηγορίες αυτές και η βαθμονόμησή τους δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

ΚΛΙΣΕΙΣ %	ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ/ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ
0-1%	5/Πολύ μεγάλη
1-2.5%	4/Μεγάλη
2.5-5%	3/Μέση
5-7.5%	2 /Μέση ελάχιστη
7.5-10%	1/Ελάχιστη
>10%	0/Μηδαμινή

Στο χάρτη βαθμονόμησης κλίσεων του εδάφους εντοπίζονται οι περιοχές, όπου βάση της παραπάνω κατηγοριοποίησης, είναι επιρρεπής προς τον πλημμυρικό κίνδυνο. Τέτοιες περιοχές αποτελούν οι πεδιάδες όπου το νερό φτάνει με μεγάλη ταχύτητα από τις ανάντη περιοχές με απότομες και μεγάλες κλίσεις.



Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν στην εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων αποτελούν οι μορφολογικές κλίσεις της περιοχής μετατρέποντας την δυναμική ενέργεια του νερού σε κινητική προς τις κατάντη περιοχές.

Μια σχετικά πρόσφατη προσέγγιση η οποία μελετά τις μορφολογικές αλλαγές από τα ανάντη στα κατάντη της κοίτης σε ποτάμια συστήματα δόθηκε από τον Knighton (1999). Ο Knighton μοντελοποίησε τις αλλαγές κατά μήκος της κοίτης, όσον αφορά το ολικό δυναμικό του ρέματος, κατά μήκος του επιμήκους προφίλ του ποταμού Trent στο Ηνωμένο Βασίλειο.

Ο Knighton (1999) βασίστηκε πάνω σε παλαιότερες μοντελοποιήσεις της δυναμικής των ρεμάτων, που χρησιμοποίησαν οι Nanson και Hean (1985), Magilligan (1992), Lawler (1992,1995) και Leese (1997), οι οποίοι βασίστηκαν σε σημειακές παρατηρήσεις για να τυποποιήσουν τις τάσεις στα επιμήκη προφίλ, μετρώντας την κλίση της κοίτης σε διαστήματα 0,5 έως 1km από τοπογραφικούς χάρτες, για να βγάλουν ένα πιο ακριβές προφίλ κλίσεων, για τον μήκος 280km ποταμό Trent. Μία πολύ καλώς ορισμένη σχέση μεταξύ της παροχής και του μεγέθους της έκτασης (link Magnitude), (μία μέτρηση σχετική με την τάξη του ποταμού), χρησιμοποιήθηκε για να καθοριστεί η μέση ετήσια απορροή στον υδροκρίτη του ποταμού Trent και να συνδυαστεί με τα δεδομένα των κλίσεων για να υπολογιστεί η ολική δυναμική του ρέματος (Knighton, 1999).

Ο Knighton (1999 σελ.295) υπέθεσε ότι για τον καθορισμό των τάσεων, κατά μήκος της κοίτης, της ενέργειας του ρέματος: «το πρόβλημα της μοντελοποίησης των μεταβολών της κλίσεως από τα ανάντη στα κατάντη της κοίτης έχει να κάνει με την εύρεση μίας κατάλληλης εξίσωσης για τα προφίλ». Το πρόβλημα αυτό δεν είναι ανέφικτο μιας και τα Γ.Σ.Π μπορούν να παράγουν αποτελέσματα για τις κλίσεις των ποταμών ως παράγωγο του DEM(ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου).

Στόχος της ενότητας αυτής είναι να υπολογιστεί η δυναμική ενέργεια των χειμάρρων και ο ρυθμός εκτόνωσης της ενέργειας βασιζόμενη στην μεθοδολογία που αναλύεται παρακάτω καθώς και στα διαθέσιμα και παράγωγα δεδομένα όπως το υδατικό ισοζύγιο για τα έτη 1961-1994 και η αξιοποίηση μορφομετρικών υπολογισμών σχετικά με το ανάγλυφο της περιοχής και την ανάλυση των λεκανών.

Για τον υπολογισμό της ειδικής και ολικής ενέργειας των χειμάρρων προσεγγίστηκαν τα στόμια κάθε υπολεκάνης από 3^{ης} τάξης και άνω ως τα σημεία όπου η δυναμική ενέργεια του νερού που πέφτει σε κάθε υπολεκάνη μετατρέπεται σε κινητική και εκτονώνεται στην έξοδο της. Κάθε υπολεκάνη αντιμετωπίστηκε ως μια

μοναδική οντότητα με διαφορετικά χαρακτηριστικά και μπορεί να περιείχε λεκάνες μικρότερης τάξης($1^{ns}+2^{ns}$) ή να βρισκόταν σε μια μεγαλύτερης τάξης.

Η προσέγγιση αυτή εφαρμόστηκε στην περιοχή του Ν.Λακωνίας σύμφωνα με την οποία προέκυψε ο χάρτης πλημμυρικού κινδύνου εφαρμόζοντας στις θέσεις των στομιών το γινόμενο έκτασης, μέσου υψομέτρου και κλίση λεκάνης και το ολικό ανάγλυφο. Σύμφωνα με την εφαρμογή αυτή, το γινόμενο αυτό δεν αποτελεί το μέτρο του ρυθμού εκτόνωσης της ενέργειας στο στόμιο κάθε λεκάνης, αποτελεί όμως ένα πολύ καλά καθορισμένο ποσοτικό μέτρο σύγκρισης μεταξύ τους.

Το γινόμενο αυτό βασίστηκε στην παραδοχή ότι σε όλα τα σημεία της κοίτης των χειμάρρων που αυξάνει η ενεργός κλίση της κοίτης τους, αυξάνει αντιστοίχως και η ενέργεια των χειμάρρων⁵.

9.5.5.1 Υπολογισμοί παραμέτρων ρυθμού εκτόνωσης ενέργειας χειμάρρων

Ορισμοί

Παρόλο που ο υπολογισμός της ενέργειας των ρεμάτων παρέχει ένα σημαντικό μέτρο ισχύος της αποστράγγισης της λεκάνης απορροής δεν σημαίνει απαραίτητα πως μεγάλη μεταβολή της ενέργειας από δυναμική σε κινητική, θα οδηγήσει και στην εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων στις περιοχές αυτές. Εξάλλου οι περιοχές όπου είναι επιρρεπής προς εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων είναι αποτέλεσμα πολλών παραγόντων όπως της υδρομορφογεωλογίας της περιοχής, της βλάστησης κ.α. Ένα μέγεθος που περιγράφει αντικειμενικά την πλημμυρική επικινδυνότητα αποτελεί ο ρυθμός εκτόνωσης ενέργειας (PE).

Ο ρυθμός με τον οποίο εκτονώνεται η ενέργεια του νερού στο στόμιο της λεκάνης είναι ανάλογη προς το ποσό της δυναμικής ενέργειας(ΔΕ) προς το χρόνο απόκρισης της λεκάνης(ΔΤ) ο οποίος εκφράζεται είτε ως χρόνος συγκέντρωσης του νερού(τc) είτε ως χρόνος διαδρομής και δίνεται ουσιαστικά από τη σχέση:

$$PE = \Delta E / \Delta T \text{ όπου}$$

ΔΕ: συνολικό ποσό ενέργειας

Δt: χρόνος μεταβολής

⁵ Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την συγκεκριμένη μεθοδολογία βλέπε: Μελέτη 4: Εκτίμηση τρωτότητας περιοχών του Ν.Λακωνίας σε πλημμυρικά φαινόμενα, 2007 & Fountoulis et al., "Flood Hazard assessment in the Kladeos river basin(Olympia-Western Peloponnese), 8th International Hydrogeological Congress of Greece, Athens 2008).

Ως δυναμική ενέργεια ορίζεται η ενέργεια που κατέχει ένα σώμα λόγω της θέσεως ή της κατάστασής του, είναι δηλαδή η δυνατότητα του σώματος να παράγει έργο επειδή βρίσκεται μέσα σε κάποιο πεδίο δυνάμεων. Συγκεκριμένα, η δυναμική ενέργεια διακρίνεται σε ενέργεια θέσεως (π.χ. ένα σώμα σε πεδίο βαρύτητας που έχει τη δυνατότητα να κινηθεί σε χαμηλότερη θέση παράγοντας έργο) και ενέργεια μορφής η αλλιώς παραμορφωσης, που εμφανίζεται όταν συστρέφουμε, συμπιέζουμε, τεντώνουμε ή λυγίζουμε ένα υλικό αλλάζοντας τη φυσική του μορφή (π.χ. το παραμορφωμένο ελατήριο ή λάστιχο). Στην περίπτωση αυτή, το σώμα μπορεί να παράγει έργο επανερχόμενο στη "φυσική" του μορφή.

Στην περίπτωση ενός ομογενούς δυναμικού πεδίου, δηλαδή ενός πεδίου όπου η δύναμη είναι σταθερή σε όλη την έκτασή του, η δυναμική ενέργεια ενός σώματος ορίζεται ως το γινόμενο της δύναμης που ασκείται επάνω του επί την απόστασή του από την περιοχή του πεδίου, όπου θεωρούμε ότι η δυναμική ενέργεια έχει μηδενική τιμή:

$$E_{\text{δυν.}} = F \cdot h$$

όπου F = δύναμη του πεδίου που ασκείται στο σώμα,

h = απόσταση από το σημείο με μηδενική δυναμική ενέργεια.

Εάν το πεδίο δεν είναι ομογενές, δηλαδή η δύναμη μεταβάλλεται κατά μέτρο και φορά από σημείο σε σημείο, ο παραπάνω ορισμός ισχύει μόνο τοπικά, δηλαδή μας δίνει τη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας για μια απειροστή μετακίνηση μέσα στο πεδίο, κατά την οποία η δύναμη είναι περίπου σταθερή. Η συνολική μεταβολή της δυν. ενέργειας δίνεται από το άθροισμα τέτοιων απειροστών μετατοπίσεων (ολοκλήρωμα) μεταξύ δύο θέσεων (από τις οποίες η μία μπορεί να είναι το σημείο όπου ορίσαμε μηδενική τη δυναμική ενέργεια). Για να έχει νόημα η δυναμική ενέργεια, πρέπει ο παραπάνω υπολογισμός να μην εξαρτάται από τη διαδρομή που ακολουθήσαμε μεταξύ των δύο σημείων. Ένα δυναμικό πεδίο με την ιδιότητα αυτή ονομάζεται συντηρητικό ή διατηρητικό.

Η Κινητική και η Δυναμική ενέργεια θεωρούνται ως οι δύο μορφές της Μηχανικής ενέργειας. Κατά την κίνηση ενός σώματος ή φορτίου σε συντηρητικό πεδίο δυνάμεων, και εφόσον δεν υπάρχουν τριβές, η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια και το αντίστροφο, το άθροισμά τους όμως είναι πάντα σταθερό και ίσο με τη μηχανική ενέργεια που αρχικά είχε το σώμα (πηγή wikipedia) .

Δύναμη F είναι η αιτία μεταβολής της κινητικής κατάστασης ελεύθερων σωμάτων. Για τα σώματα που παρουσιάζουν δυνάμεις τριβής ή αντιδράσεις στήριξης, δύναμη είναι η αιτία που προκαλεί κίνηση σωμάτων ή κινητικότητα σχετικά με τα σημεία σύνδεσης ή ακόμη και παραμόρφωση αυτών των σωμάτων.

Σύμφωνα με το 2^ο νόμο του Νεύτωνα η συνολική δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα ισούται με τη μάζα του σώματος επί την επιτάχυνση του(α). Μετριέται σε Newton⁶ και υπολογίζεται από την σχέση

$$F=m \cdot a$$

Στην περίπτωση που το επίπεδο είναι κεκλιμένο και δεν υπάρχουν τριβές, η δύναμη δίνεται από την σχέση

$$F = m \cdot g \cdot \sin\theta \quad \text{όπου}$$

M: μάζα σώματος

G: επιτάχυνση βαρύτητας η οποία ισούται με $g = 9.780 \text{ m/sec}^2$ στα σώματα που βρίσκονται σε γεωγραφικό πλάτος 0° (στον Ισημερινό)

Sinθ: το ημίτονο της γωνίας θ που στη συγκεκριμένη περίπτωση δίνεται από το αρχείο κλίσεων.

Εφαρμογή -υπολογισμοί παραμέτρων

Βάση λοιπόν των παραπάνω και έχοντας ως στόχο τον υπολογισμό του ρυθμού μεταβολής της ενέργειας των χειμάρων ακολουθήθηκαν οι εξής διαδικασίες:

- Αρχικά υπολογίσαμε την δύναμη F που ασκείται στο σώμα και στη συγκεκριμένη περίπτωση το νερό από τον τύπο $F = m \cdot g \cdot \sin\theta$. Η δύναμη αυτή, όπως αναφέρθηκε αρχικά, αφορά ξεχωριστά τα στόμια των υπολεκάνων 3^{ης} τάξης και άνω
- Η μάζα του νερού εξαρτάται από την έκταση της λεκάνης, το μέσο υψόμετρο αυτής (λόγω της μεταβολής των βροχοπτώσεων με το υψόμετρο) και την υψομετρική διαφορά από το επίπεδο βάσης, που εκφράζεται με ένα προσεγγιστικό τρόπο από το ολικό ανάγλυφο.

Για τον υπολογισμό της μάζας(m) της βροχόπτωσης χρησιμοποιήσαμε το αρχείο raster της βροχόπτωσης προερχόμενο από την μέθοδο βροχοβαθμίδας όπως αναλύθηκε εκτενέστερα στο κεφ. 6.4.4 και το οποίο αναφέρεται στην μέση υπερετήσια βροχόπτωση 33 υδρολογικών ετών. Το

⁶ 1 newton= 1kg·m/sec² (πηγή: <http://el.wikipedia.org/wiki/>)

αρχείο αυτό με τη βοήθεια των Γ.Σ.Π μετατράπηκε σε μια χωρική κατανομή της μάζας της βροχόπτωσης σε kg (1mm= 0.000001 kg). το ημίτονο της γωνίας θ ($\sin\theta$) που στη συγκεκριμένη περίπτωση δίνεται από το αρχείο κλίσεων slope το οποίο προήλθε από το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου.

- Στη συνέχεια και έχοντας ως γνωστή την παράμετρο F υπολογίσαμε την δυναμική ενέργεια η οποία μετατρέπεται σε κινητική και έπειτα σε δυναμική στα στόμια των υπολεκανών. Η παράμετρος h (απόσταση από το σημείο με μηδενική ενέργεια) υπολογίστηκε από το ολικό ανάγλυφο.

Η τιμή του ολικού αναγλύφου, η οποία αποτελεί μια σημαντική παράμετρο στη μελέτη των λεκανών, ορίζεται ως η διαφορά του μικρότερου υψόμετρου στο στόμιο συνήθως της λεκάνης από το μεγαλύτερο υψόμετρο αυτής. Το ολικό ανάγλυφο υπολογίζεται σε μέτρα (m) και εκφράζεται από τον τύπο:

$$H = Z_{\max} - Z_{\min} \quad \text{όπου}$$

H : ολικό ανάγλυφο

$Z_{\max}$: μέγιστο υψόμετρο λεκάνης

$Z_{\min}$: ελάχιστο υψόμετρο λεκάνης

- Τέλος και στην 2η φάση για την εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου υπολογίσαμε τον χρόνο συρροής (t_c) για κάθε υπολεκάνη 3^{ης} -5^{ης} τάξης. Ο ακριβής υπολογισμός του χρόνου συρροής υπολογίζεται από το υδρογράφημα για ωφέλιμη βροχή σταθερής έντασης και διάρκειας. Όταν όμως δεν υπάρχουν τα απαιτούμενα στοιχεία για την δημιουργία του υδρογραφήματος, υπάρχουν εμπειρικές μέθοδοι που βασίζονται στην ιδιαίτερη γεωμορφολογία της λεκάνης απορροής (Μαμάσης 1999). Για τον υπολογισμό του t_c στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε τον τύπο του Giandotti

$$T_c = 4 \cdot \sqrt{A} + 1.5 \cdot L / 0.8 \cdot \sqrt{H} \quad \text{όπου}$$

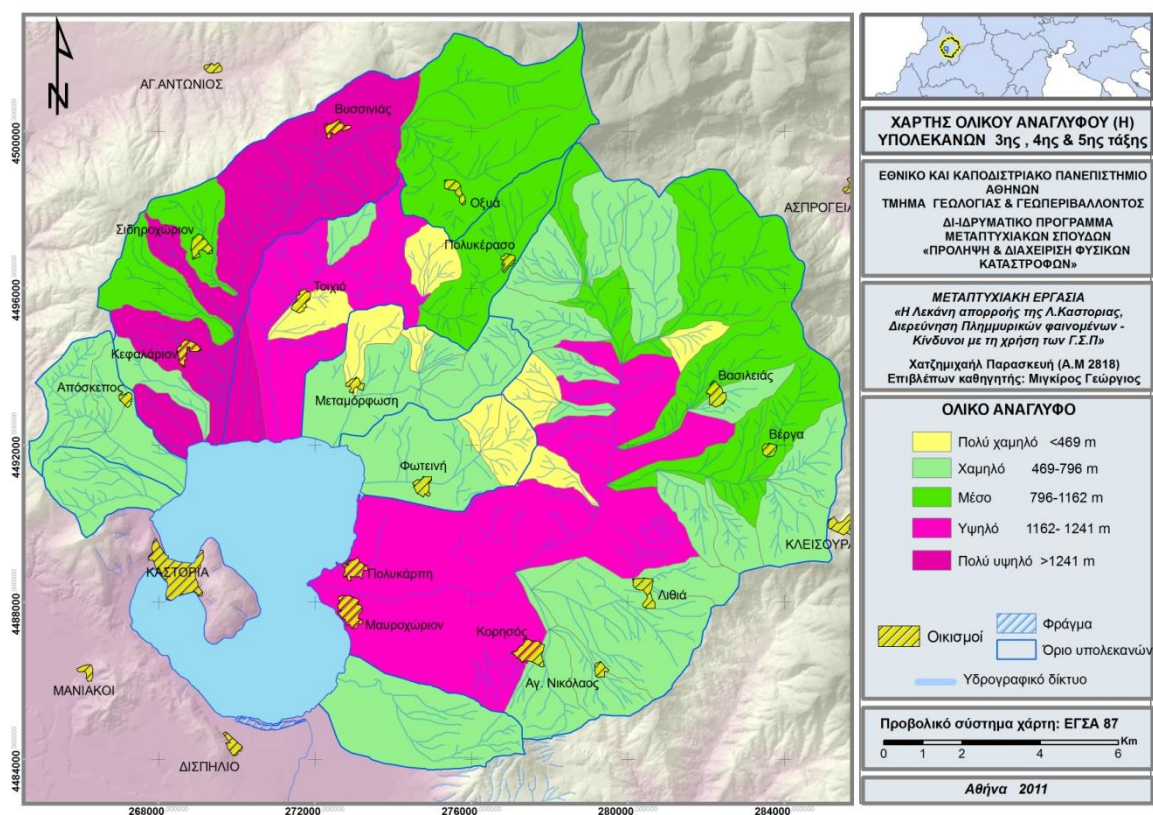
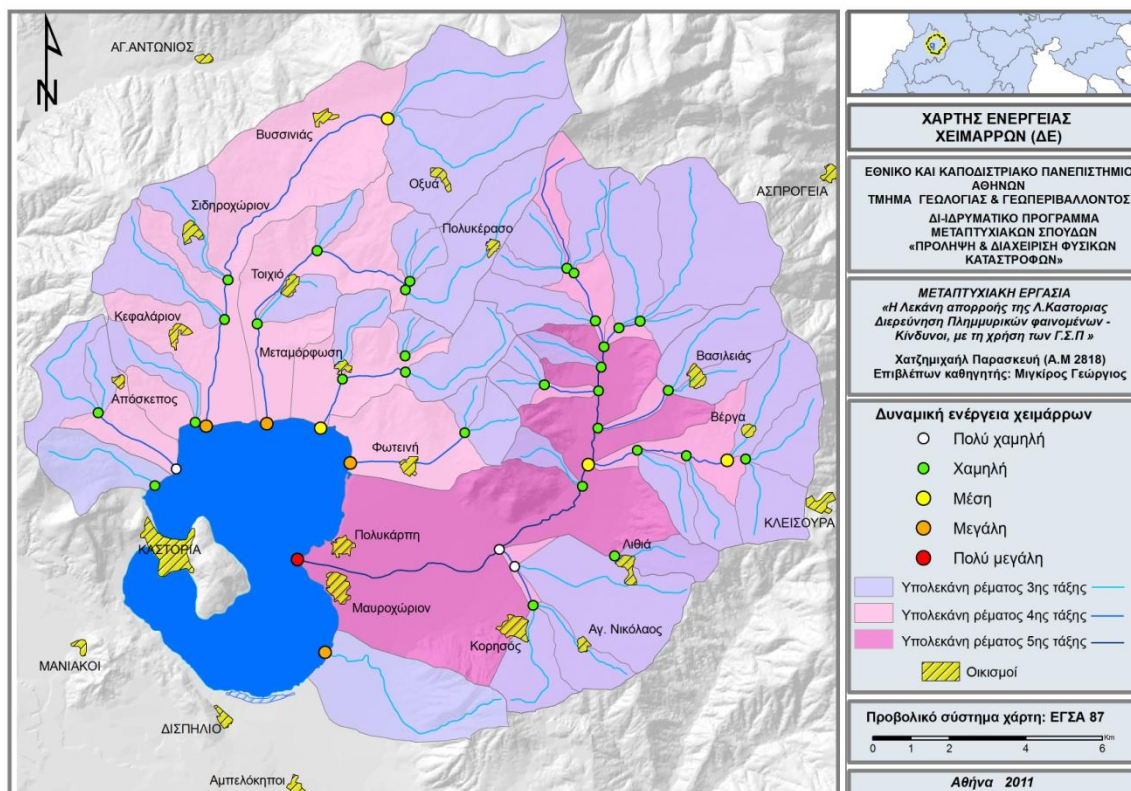
T_c : χρόνος απορροής σε ώρες

A : εμβαδό λεκάνης σε km²

L : το μήκος του ρέματος σε km και

H : η διαφορά του μέσου υψόμετρου της λεκάνης από το υψόμετρο στην εκβολή που στην παρούσα φάση αποτελούν τα στόμια.

Στους παρακάτω χάρτες παρουσιάζεται η δυναμική ενέργεια στα στόμια των υπολεκανών με μεγαλύτερη στην υπολεκάνη Ξηροποτάμου, ο χάρτης ολικού αναγλύφου των υπολεκανών και ο χρόνος απορροής t_c .



Δυστυχώς για την περιοχή μελέτης δεν βρέθηκαν αρκετά ιστορικά στοιχεία πλημμυρών. Παρόλα αυτά όμως είναι πλέον γνωστό το πρόβλημα της υπερχειλίσης της λίμνης προκαλώντας έτσι πλημμυρικά φαινόμενα στο παραλίμνιο τμήμα της. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια πρόσφατα στοιχεία από εφημερίδες και το διαδίκτυο.

29/10/1978 : Η ισχυρή βροχή που διήρκησε 2 μέρες, έπληξε το Ν.Καστοριάς προκαλώντας ανυπολόγιστες καταστροφές κυρίως στη γεωργία, στα κηπευτικά και τις ελιές. Ζημιές είχε υποστεί και η κτηνοτροφία των περιοχών αυτών καθώς και το συγκοινωνιακό δίκτυο όπου διακόπηκε για 2 μέρες .(Νικολαΐδου Μ. κ.α , 1995).

4/12/2010 : Έντονη βροχόπτωση προκάλεσε πολλά προβλήματα στην Καστοριά. Διακόπηκε η υδροδότηση και πλημμύρισαν δρόμοι.(πηγή: www.alpafm.gr)

17/2/2010 : Σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης κηρύχθηκε η παραλίμνια περιοχή της Καστοριάς λόγω της υπερχειλίσης της λίμνης. Η στάθμη των νερών της λίμνης της Καστοριάς ανέβηκε επικίνδυνα με αποτέλεσμα να πλημμυρίσουν οι παραλίμνιοι οικισμοί Δισπηλιό, Μαυροχώρι και Πολυκάρπη του Δήμου Μακεδνών καθώς επίσης η παραλίμνια περιοχή του Δήμου Καστοριάς. Την απόφαση έλαβε η Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας για να μπορέσουν να γίνουν παρεμβάσεις στην περιοχή, δεδομένου ότι προστατεύεται από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Natura.

Πλημμύρισαν καλλιεργήσιμες εκτάσεις και κάποια ισόγεια κατοικιών. Είναι η πρώτη φορά που συμβαίνει υπερχειλίση τις τελευταίες δεκαετίες και η ανησυχία εντείνεται καθώς οι εισροές υδάτων στη λίμνη είναι επταπλάσιες των εκροών και επίκειται το λιώσιμο του χιονιού που έπεσε τις προηγούμενες μέρες στην περιοχή. Η κατάσταση επιδεινώθηκε και από το γεγονός ότι δε λειτούργησε όπως έπρεπε το σύστημα εκροής υδάτων με τις ηλεκτρικές πόρτες. (πηγή: www.eleutherotypia.gr, www.agelioforos.gr).



Φωτ. 1 (4/12/2010) : Πλημμυρισμένος δρόμος Χιλιοδένδρου-Μεσοποταμίας (πηγή: www.alpafm.gr)



Φωτ. 2 (17/2/2010) : Υπερχείλιση της λίμνης στο κέντρο της πόλης Καστοριάς (πηγή: ελευθεροτυπία).



Φωτ. 3 (17/2/2010) : Πλημμυρισμένο το οδικό δίκτυο περιμετρικά της λίμνης (πηγή: www.econews.gr)



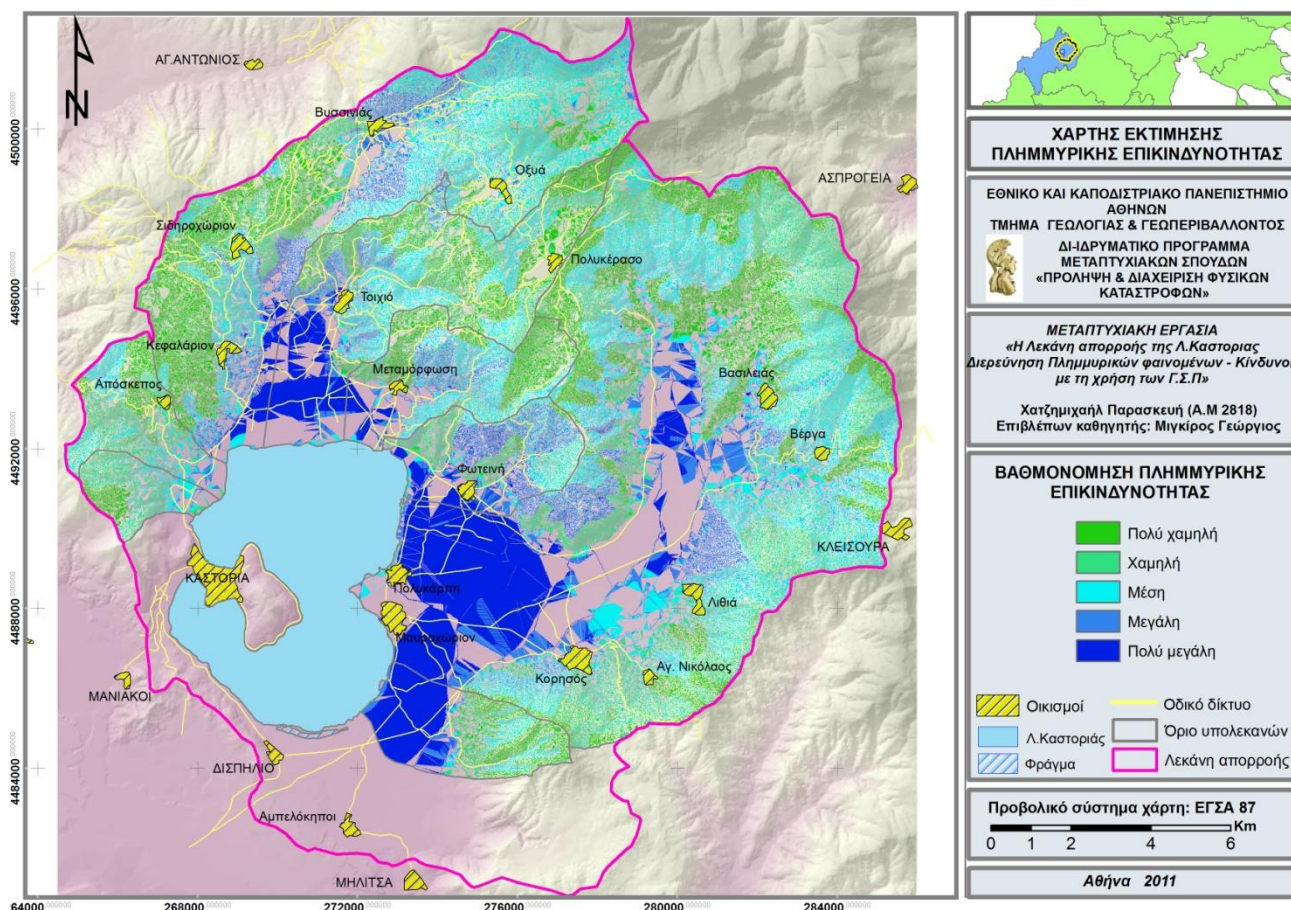
Φωτ. 4 (11/02/2010) : το κέντρο της πόλης, οι παραλιακοί δρόμοι, καταστήματα έχουν καλυφθεί από το νερό. (πηγή : www.rizospastis.gr)

9.7 Κατασκευή χάρτη εκτίμησης πλημμυρικής επικινδυνότητας-Συμπεράσματα

Τα επίπεδα που θεωρήσαμε ως τους σημαντικότερους παράγοντες στην εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων εισήχθηκαν στην ακόλουθη εξίσωση.

Πιθανότητα εκτίμησης πλημμυρικού κινδύνου = τοπογραφικός δείκτης υγρασίας(TWI) + Υδρολιθολογία (Συντελεστής περατότητας) + Τραχύτητα (Χρήσεις γης) + Ρυθμός μεταβολής ενέργειας (ΔΕ/ΔΤ) + Παροχή (Q) + Κλίσεις εδάφους

Στον χάρτη που ακολουθεί εμφανίζεται βαθμονομημένη η πλημμυρική επικινδυνότητα της λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς.



Από τον χάρτη εκτίμησης πλημμυρικής επικινδυνότητας παρατηρούμε πως ο μεγαλύτερος κίνδυνος εμφάνισης πλημμυρών εμφανίζεται στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης απορροής και πιο συγκεκριμένα στην υπολεκάνη Ξηροποτάμου αλλά και στο βόρειο. Στις περιοχές αυτές καλλιεργούνται οπωροφόρα δέντρα.

Τα υδρομορφωγεωλογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης αυτής, η οποία βρίσκεται στο στάδιο γήρανσης, εντείνουν την εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων. Πιο συγκεκριμένα, και συγκριτικά με τις υπόλοιπες υπολεκάνες, έχει τα εξής χαρακτηριστικά.

- Καταλαμβάνει την μεγαλύτερη έκταση και τον μεγαλύτερο αριθμό κλάδων υδρογραφικού δικτύου και υπολεκανών. Η παράμετρος έκταση σχετίζεται με τον όγκο του νερού που θα φτάσει στο στόμιο των λεκανών και σε συνάρτηση με τις κλίσεις θα αποδώσει τις ευαίσθητες περιοχές.
- Κατέχει τον μεγαλύτερο όγκο επιφανειακής απορροής και όγκου βροχόπτωσης μετά από την μελέτη του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής.
- Σε αυτήν υπολογίστηκε και εντοπίστηκε η μεγαλύτερη δυναμική ενέργεια καθώς και ο ρυθμός μεταβολής ενέργειας του χειμάρρου.
- Το προφίλ του ρέματος Ξηροποτάμου ή Παλαιοποτάμου, ενισχύει της περιοχές αυτές.

Οι περιοχές αυτές πλημμύρισαν το Φεβρουάριο του 2010 επιφέροντας πολλές ζημιές σε σπίτια αλλά και καλλιέργειες.

Σύμφωνα με τον χάρτη, πλημμύρες εμφανίζονται και στο βόρειο πεδινό τμήμα της περιοχής και συγκεκριμένα στις υπολεκάνες Βυσσινίας και Τοιχιού. Το υδρογραφικό δίκτυο στις υπολεκάνες αυτές βρίσκονται σε πιο νεαρό στάδιο εξέλιξης με αποτέλεσμα οι κοίτες τους, ιδιαίτερα στα πεδινά τμήματα, να είναι ακόμα υπό διαμόρφωση καθώς συνεχίζεται η τεκτονική της περιοχής.

Η τεκτονική αυτή εξέλιξη ευθύνεται για την εμφάνιση και αλλαγή απότομων μορφολογικών κλίσεων οι οποίες μειώνονται απότομα, και μαζί με αυτές μειώνεται απότομα και η ταχύτητα του νερού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να συγκεντρώνεται μεγάλος όγκος νερού στις κοίτες μόλις εισέλθουν στο πεδινό τμήμα και επειδή δεν μπορούν να απορροφήσουν το νερό αυτό υπερχειλίζουν.

Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε και τις πλημμύρες που λαμβάνουν χώρα, αποτελώντας ένα μόνιμο πρόβλημα, στο παραλίμνιο τμήμα της πόλης της Καστοριάς οι οποίες δεν οφείλονται στα υδρογεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής, γι' αυτό το λόγω δεν αποτυπώθηκαν με την εφαρμογή του μοντέλου εκτίμησης πλημμυρικής επικινδυνότητας. Αντίθετα, συμβαίνουν λόγω της υπερχειλίσης της λίμνης και των φερτών υλικών προς αυτήν για τα οποία θα γίνει ανάλυση στο επόμενο κεφάλαιο.

11.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κίνδυνος διάβρωσης στη χώρα μας είναι ιδιαίτερα αυξημένος λόγω της γεωμορφολογίας και των απότομων κλίσεων του εδάφους. Ο κίνδυνος αυτός σε συνδυασμό με τις ραγδαίες βροχοπτώσεις και τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες (εκμετάλλευση εδάφους, μπάζωμα ρεμάτων κ.α) προκαλούν φυσικές καταστροφές όπως πλημμυρικά φαινόμενα και λασπορροές έχοντας ως αντίκτυπο τον ίδιο τον άνθρωπο.

Οι περιορισμένοι για την πατρίδα μας φυσικοί πόροι, που είναι το έδαφος και το νερό, είναι κεφαλαιώδους σημασίας για την προστασία του περιβάλλοντος και ο μόνος τρόπος για να αποφύγουμε την υποβάθμισή τους είναι η αειφορική τους διαχείριση (Ψιλοβίκος Α., 2005).

Η ανάγκη της κατά το δυνατόν ακριβούς πρόβλεψης και εκτίμησης φερτών υλών σε υδρολογικές λεκάνες, οδήγησε στην ανάπτυξη διαφόρων μοντέλων διάβρωσης διαφορετικού βαθμού ακρίβειας και πολυπλοκότητας. Η ανάγκη αυτή υπαγορεύτηκε τόσο εξαιτίας των σοβαρών συνεπειών της διάβρωσης των εδαφών στα τεχνικά έργα (π.χ προσχώσεις σε ταμιευτήρες φραγμάτων), όσο και από την απαίτηση για τον εντοπισμό περιοχών για λήψη μέτρων αντιδιαβρωτικής προστασίας, ανάλογα με την επικινδυνότητα στη διάβρωση. Όπως είναι γνωστό, η αποτελεσματική προστασία του εδάφους από τη διάβρωση, εξασφαλίζεται από την φυτοκάλυψη και γενικότερα από την βλάστηση στην επιφάνειά του, αναστέλλοντας έτσι σημαντικά το ρυθμό διάβρωσης αφού ενεργεί σαν φέρων σκελετός του εδάφους ενάντια στις διαβρωτικές δυνάμεις. Η μείωση του ρυθμού της διάβρωσης με την κατάλληλη φυτοκάλυψη, μπορεί να φτάσει μέχρι και στο 1% του ρυθμού που παρατηρείται στο γυμνό έδαφος. Η βλάστηση στην επιφάνεια συμβάλλει πολλαπλά στην αντιδιαβρωτική προστασία και συγκεκριμένα οδηγεί στην αύξηση της διηθητικής ικανότητας του εδάφους που συνεπάγεται μείωση της απορροής, καθώς επίσης και στην αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας (μείωση ταχύτητας ροής), όπως και στην απορρόφηση της κινητικής ενέργειας της βροχής από τα φυλλώματα των φυτών και των δέντρων (Τταγώνας Μ., 2009).

Τα διάφορα μοντέλα διάβρωσης που υπάρχουν χωρίζονται σε 2 κατηγορίες, τα εμπειρικά (empirical) και τα εννοιολογικά (conceptual). Τα πρώτα αφορούν την εκτίμηση μέσης εδαφικής απώλειας ανά μονάδα χρόνου (π.χ t/ha/έτος) και επιφάνειας και σε αυτά ανήκουν το Rusle, το μοντέλο Wischmeier & Smith(1978) κ.α. Στην δεύτερη κατηγορία η προσομοίωση εδαφικής απώλειας γίνεται μέσω της

βροχόπτωσης ενός συγκεκριμένου γεγονότος η οποία μετασχηματίζεται σε επιφανειακή απορροή και περιλαμβάνει υδρογραφήματα της απορροής και στερεοπαράροχης. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα μοντέλα SEM, EUROSEM κ.α

11.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΤΗΣ Λ.ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΚΑΣΤΟΡΙΑΣ (RUSLE)

Για την εκτίμηση εδαφικής απώλειας στην περιοχή μελέτης μας χρησιμοποιήσαμε την αναθεωρημένη εξίσωση παγκόσμιας εδαφικής απώλειας (Revised Universal Soil Loss Equation).

Πρόκειται για ένα μοντέλο το οποίο αναθεώρησε το αρχικό μοντέλο USLE που αρχικά αναπτύχθηκε και σχεδιάστηκε για τον υπολογισμό εδαφικής απώλειας στην Αμερική και προσαρμοσμένο στα εκάστοτε δεδομένα. Το αναθεωρημένο μοντέλο καλύπτει πλέον και τις ευρωπαϊκές χώρες, για τις οποίες έχει εφαρμοστεί με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, εκ των οποίων μέσα σε αυτές βρίσκεται και η Ελλάδα.

Η τροποποιημένη εξίσωση (Rusle) δίνεται από την σχέση:

$$A = R * K * LS * C * P \quad \text{όπου}$$

R: Συντελεστής διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης

K: Συντελεστής διαβρωσιμότητας

LS : Τοπογραφικός συντελεστής

C : Συντελεστής φυτοκάλυψης

P : Συντελεστής καλλιεργητικών πρακτικών

Υπολογισμός συντελεστή διαβρωτικότητας R

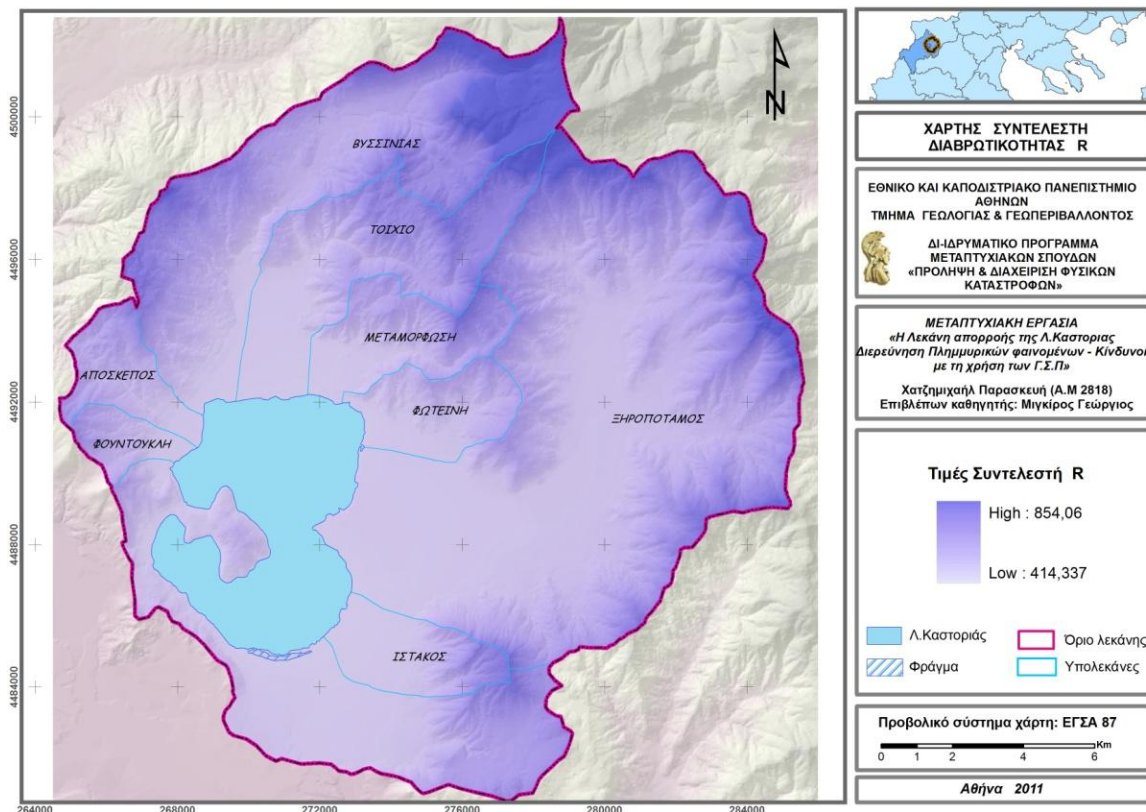
Στην ελληνική βιβλιογραφία δεν υπάρχει κάποια σχέση που να συνδέει το συντελεστή διαβρωτικότητας της βροχόπτωσης με τη μέση ετήσια βροχόπτωση N για τα ελληνικά δεδομένα (Λυκούδη et al.,). Για τον υπολογισμό του R Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε την εξίσωση που αναπτύχθηκε στην Ιταλία (Knijff J.M et al., 2000) όπου ο συγκεκριμένος συντελεστής δίνεται από την σχέση:

$$R = a \cdot P \quad \text{όπου}$$

P: η μέση ετήσια βροχόπτωση (mm). Η μέση υπερετήσια βροχόπτωση (1961-1994) της περιοχής μελέτης μας υπολογίστηκε ίση με 713.56 mm.

a : συντελεστής που προκύπτει από απλή γραμμική παλινρόμηση μεταξύ του συντελεστή R και της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης. Η τιμή του a για κάθε μετεωρολογικό σταθμό που είχε επαρκή στοιχεία για τον υπολογισμό του, καθορίζεται από τον ακόλουθο πίνακα. (Φλαμπούρης, 2008)

a/a	Μετεωρολογικός σταθμός	P	a
1	ΑΓΧΙΑΛΟΣ	492	1,0
2	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ	551	1,3
3	ΑΝΔΡΑΒΙΔΑ	750	1,3
4	ΑΡΓΟΣΤΟΛΙ	782	1,3
5	ΑΡΤΑ	1108	1,3
6	ΕΛΛΗΝΙΚΟ	390	1,3
7	ΗΡΑΚΛΕΙΟ	495	1,1
8	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	419	1,1
9	ΙΩΑΝΝΙΝΑ	995	1,0
10	ΚΑΒΑΛΑ	470	0,7
11	ΚΑΛΑΜΑΤΑ	819	1,4
12	ΚΑΣΤΟΡΙΑ	608	0,7
13	ΚΟΖΑΝΗ	451	0,8
14	ΚΕΡΚΥΡΑ	1076	1,8
15	ΛΑΜΙΑ	549	0,7
16	ΛΑΡΙΣΑ	395	0,8
17	ΜΙΚΡΑ	422	0,8
18	ΠΑΤΡΑ	700	0,9
19	ΣΕΡΡΕΣ	450	0,8
20	ΣΗΤΕΙΑ	468	1,2
21	ΣΟΥΔΑ	586	1,0
22	ΤΡΙΠΟΛΗ	717	0,7
23	Ν.ΦΙΛΑΔΕΛΦΕΙΑ	395	1,0
24	ΦΛΩΡΙΝΑ	635	0,7



Υπολογισμός συντελεστή διαβρωσιμότητας K

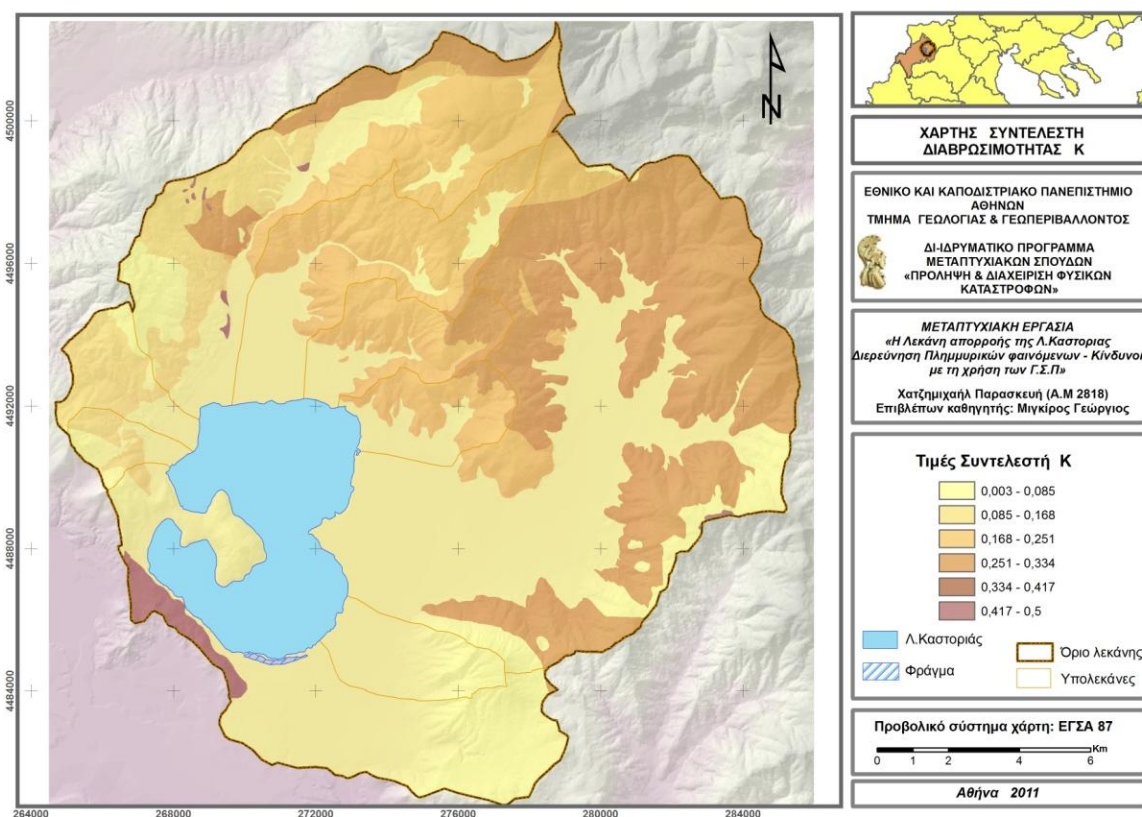
Πρόκειται για έναν συντελεστή που σχετίζεται με το ρυθμό μεταβολής διάβρωσης των εδαφών λόγω των ιδιοτήτων του εδάφους. Ο καλύτερος τρόπος εύρεσης του συντελεστή K είναι η άμεση μέτρηση του. Λόγω όμως της χρονοβόρας και ακριβής αυτής διαδικασίας, ο συντελεστής αυτός μπορεί να προσδιοριστεί προσεγγιστικά μέσα από την αποτύπωση της γεωλογίας.

Οι τιμές του συντελεστή K κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 0.00001 - 0.1 και η βαθμονόμηση των γεωλογικών σχηματισμών προκύπτει βάση των λιθολογικών χαρακτηριστικών τους (Zarnis D. et al., 2002).

Στην παρούσα εργασία οι γεωλογικοί σχηματισμοί που ψηφιοποιήθηκαν, ομαδοποιήθηκαν με βάση την υδροπερατότητά τους και την αποθηκευτική τους ικανότητα και στη συνέχεια αποδόθηκαν χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή K με τη βοήθεια του Arcgis από βιβλιογραφικά δεδομένα (Χρυσάνθου και Πυλιώτης, 1995, Mitchell and Bubenzer, 1980.) Στον πίνακα που ακολουθεί εμφανίζονται οι τιμές K των γεωλογικών σχηματισμών.

Γεωλογικός Σχηματισμός	Συντελεστής K
Αλουβιακές αποθέσεις	0.015
Κατώτερα νεογενή ιζήματα	0.028
Θαλάσσιες και λιμναίες αποθέσεις	0.028
Κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα	0.028
Ασβεστόλιθοι	0.012
Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι	0.012
Ασβεστολιθικά τεμάχη	0.013
Ασβεστόλιθοι εκπλυσιγενείς	0.013
Κερατόλιθοι και αργίλικοί σχιστόλιθοι	0.01
Κλαστικά ιζήματα	0.028
Σχιστόλιθοι	0.01
Δολομίτες-δολομιτικοί ασβεστόλιθοι	0.012
Βωξιτικά κοιτάσματα	0.012
Παράκτιοι σχηματισμοί	0.03
Τόφοι βιοτιτικού δακίτη	0.5

Πίνακας 14 : Τιμές συντελεστή K των αντίστοιχων γεωλογικών σχηματισμών (Mitchell and Bubenzer, 1980; Χρυσάνθου και Πυλιώτης, 1995).



Υπολογισμός τοπογραφικού συντελεστή LS

Ο τοπογραφικός συντελεστής LS χαρακτηρίζει την τοπογραφία της περιοχής και είναι αποτέλεσμα των παραγόντων του μήκους κλιτύος L και του συντελεστή της κλίσης S . Αύξηση των τιμών των δύο συντελεστών επιφέρει σημαντική αύξηση της εδαφικής διάβρωσης, και αυτό διότι οι πιο απότομες κλίσεις (S) παράγουν τις υψηλότερες ταχύτητες ροής και οι μακρύτερες κλίσεις (L) συσσωρεύουν επιφανειακή απορροή από μεγαλύτερες περιοχές με αποτέλεσμα την αύξηση πάλι της ταχύτητας ροής. Αποτέλεσμα των δύο αυτών συντελεστών είναι να οδηγούν στην αυξανόμενη εδαφική διάβρωση της περιοχής (Stefano, et al. 2000).

Βασισμένος λοιπόν στο ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής (Moore et al., 1993).

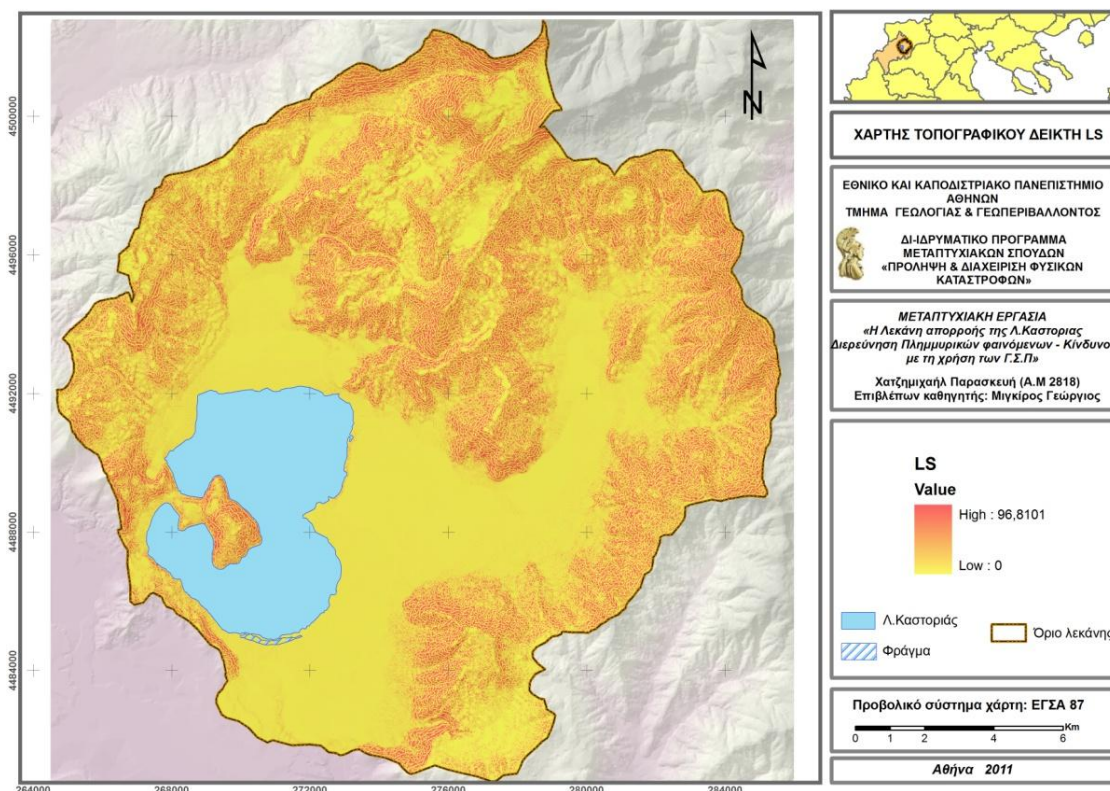
$$L = 1.4 * (A/22.13)^{0.4}$$

$$S = (\sin\beta/0.0896)^{1.3}$$

A : το μήκος το κλιτύων σε m

$\sin\beta$: το ημίτονο των κλίσεων των πρανών

Για το προσδιορισμό του συντελεστή LS στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (dem) και τα παράγωγά του, κλίσεις (slope) και συσσώρευση ροής (flow accumulation), τα οποία εισήλθαν στις παραπάνω εξισώσεις και με τη βοήθεια του raster calculator του λογισμικού Arcgis παρήχθει ο ακόλουθος χάρτης κατανομής του συντελεστή αυτού.



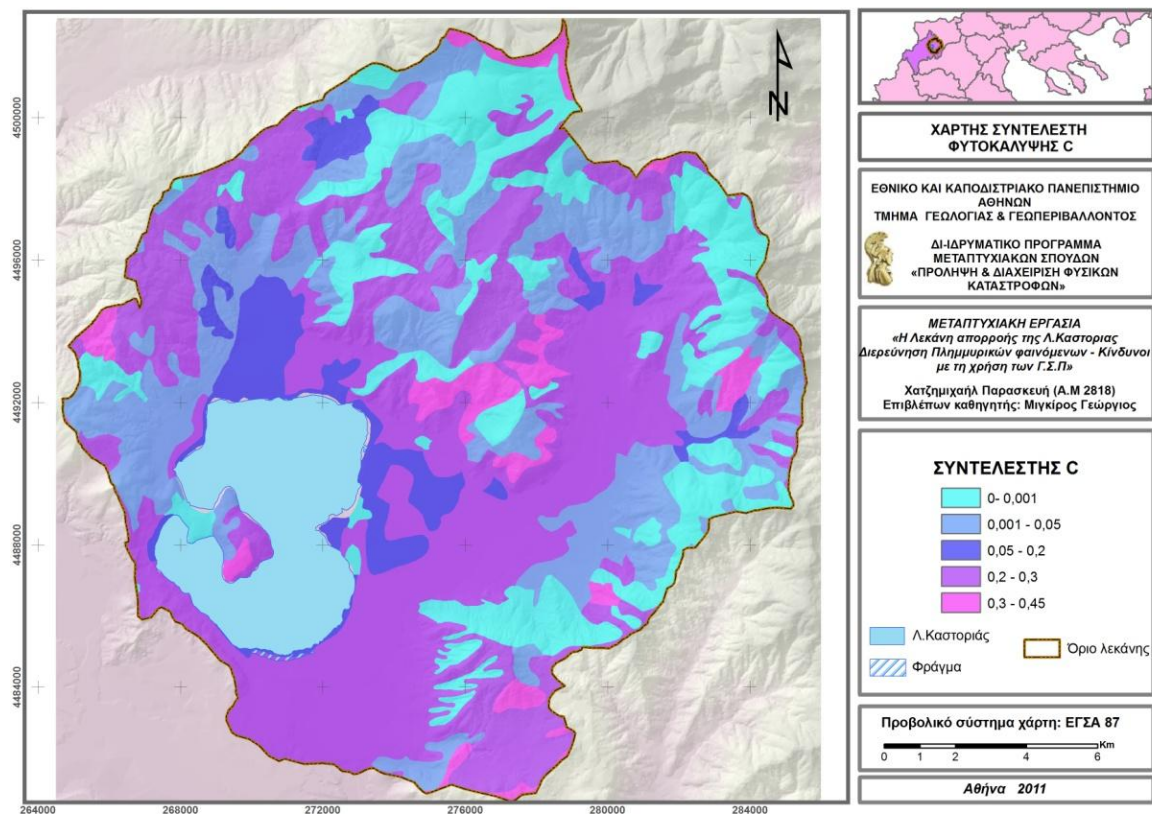
Υπολογισμός Συντελεστή φυτοκάλυψη C

Ο συντελεστής φυτοκάλυψης C εκφράζει το μέτρο της μείωσης της εδαφικής απώλειες που οφείλεται στην βλάστηση της περιοχής που μελετάται.

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή αυτή στην περιοχή μελέτης μας, χρησιμοποιήθηκε το αρχείο χρήσεων γης Corine 2000. Στη συνέχεια, σε κάθε κωδικοποιημένη χρήση γης που απαντάται, αντιστοιχίσαμε μια τιμή του συντελεστή C η οποία προέκυψε αξιοποιώντας τις τιμές από τη διεθνή βιβλιογραφία, προσαρμοσμένες στην περιγραφή των συγκεκριμένων χρήσεων γης (Wischmeier and Smith, 1978; Schwertmann et al., 1990; Χρυσάνθου και Πυλιώτης, 1995).

<i>Περιγραφή Χρήσεων γης κατά corine 2000</i>	<i>Κωδ.</i>	<i>C</i>
Διακεκομμένη αστική δόμηση	112	0.001
Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	211	0.3
Αμπελώνες	221	0.2
Οπωροφόρα δέντρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	222	0.2
Ελαιώνες	223	0.1
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	242	0.18
Γεωργική γη με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	243	0.07
Δάσος κωνοφόρων	312	0.001
Μικτό δάσος	313	0.001
Φυσικοί βοσκότοποι	321	0.3
Σκληροφυλλική βλάστηση	323	0.03
Μεταβατικές δασώδεις -θαμνώδεις εκτάσεις	324	0.02
Παραλίες-αμμόλοφοι-αμμουδιές	331	0.6
Απογυμνωμένοι βράχοι	332	0.02
Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	333	0.45
Καμμένες εκτάσεις	334	0.55
Παραθαλάσσιοι βάλτοι	421	0.15

Πίνακας 15: Χρήσεις γης κατά CORINE 2000 και αντιστοιχία αυτών με τις τιμές του συντελεστή C.

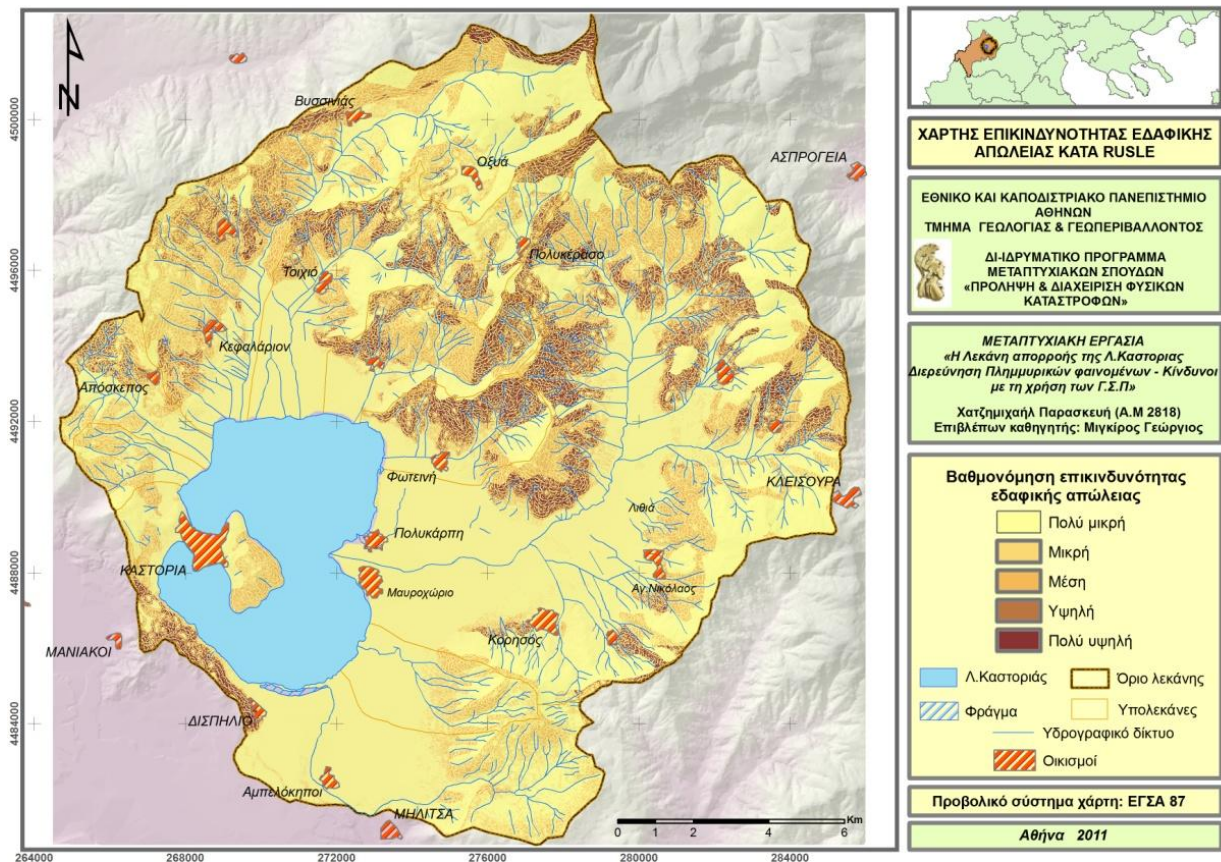


Υπολογισμός Συντελεστή P

Ο συντελεστής P αφορά τα έργα που έχουν γίνει για την αντιμετώπιση της διάβρωσης όπως είναι για παράδειγμα η καλλιέργεια κατά μήκος των ισοϋψών καμπυλών, η δημιουργία αναβαθμίδων κ.α. Οι τιμές που μπορεί να πάρει ο συντελεστής είναι από 0 έως 1 (Wischmeier and Smith, 1978). Στην παρούσα εργασία και λόγω έλλειψης στοιχείων όσων αφορά τα τυχόν έργα στην περιοχή μελέτης μας, ο συντελεστής P παίρνει την τιμή 1 για όλη την περιοχή.

11.3 Χάρτης εδαφικής απώλειας της λεκάνης απορροής

Υπολογίζοντας λοιπόν τους παράγοντες της εξίσωσης RUSLE, κατασκευάσαμε τον ακόλουθο χάρτη επικινδυνότητας εδαφικής απώλειας όπου όπως μπορούμε να



παρατηρήσουμε, μεγαλύτερη επικινδυνότητα εμφανίζεται στο ορεινό τμήμα. Στις περιοχές αυτές εμφανίζονται αδιαπέρατοι σχηματισμοί και συγκεκριμένα γνέυσιοι και γρανιτογνέυσιοι, πετρώματα τα οποία είναι ευπαθή προς την διάβρωση, τα οποία σε συνδυασμό με την έντονη βροχόπτωση στις περιοχές αυτές, το έντονο ανάγλυφο με τις μεγάλες κλίσεις και τις χρήσεις γης όπου κυριαρχούν στα σημεία αυτά οι βοσκότοποι, τα λειβάδια κ.α., εντείνουν το φαινόμενο αυτό.

Μετά την εφαρμογή μοντέλου που αναλύσαμε, παρατηρούμε στο χάρτη ότι οι περισσότεροι επιδεκτικές περιοχές προς το φαινόμενο εδαφικής διάβρωσης βρίσκονται στο βόρειο τμήμα της λεκάνης και συγκεκριμένα στις λεκάνες Βυσσινιάς, Τοιχιού και Μεταμόρφωσης όπου παρατηρείται το μεγαλύτερο μέρος απότομων κλίσεων με γνέυσιους και γρανιτογνέυσιους. Επίσης τέτοιες περιοχές παρατηρούνται και στο ανατολικό κομμάτι όπου βρίσκεται ο μεγαλύτερος και σημαντικότερος ποταμοχείμαρρος της λεκάνης ο Ξηροπόταμος.

Ένας από τους φυσικούς κινδύνους των πλημμυρικών φαινομένων αποτελεί και η παραγωγή φερτών υλικών που σε συνδυασμό με την γεωλογία και την εδαφική διάβρωση, εγκαθίστανται στο πεδινό τμήμα και μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα τόσο στο φυσικό περιβάλλον (απώλεια εδάφους, αλλαγή στη μορφολογία της περιοχής) όσο και στο ανθρώπινο (προβλήματα στο οδικό δίκτυο).

Στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό του όγκου φερτών υλικών τόσο της λεκάνης απορροής όσο και της κάθε υπολεκάνης ξεχωριστά, χρησιμοποιήσαμε τον τύπο του Γανρίλονις σύμφωνα με τον οποίο ισχύει:

$$W = T * h * \pi * \sqrt{z}^3 * F \text{ όπου}$$

W : η μέση υπερετήσια παραγωγή φερτών υλικών στην λεκάνη (m³/έτος)

T: ο συντελεστής θερμοκρασίας ο οποίος δίνεται από τον τύπο

$$T = \sqrt{t^o/10} + 0.1$$

t°: η μέση ετήσια θερμοκρασία σε °c της λεκάνης απορροής

h : το μέσο ετήσιο ύψος βροχής της λεκάνης (mm)

F : η έκταση της λεκάνης σε km²

z : ο συντελεστής διάβρωσης ο οποίος υπολογίζεται από την σχέση

$$z = x * \gamma (\varphi + \sqrt{J}) \text{ όπου}$$

x : συντελεστής που εκφράζει την αντίσταση των γεωλογικών σχηματισμών κατά της διάβρωσης και σε συνάρτηση με την βλάστηση. Δίνεται από πίνακες και οι τιμές του κυμαίνονται από 0,05 - 1.

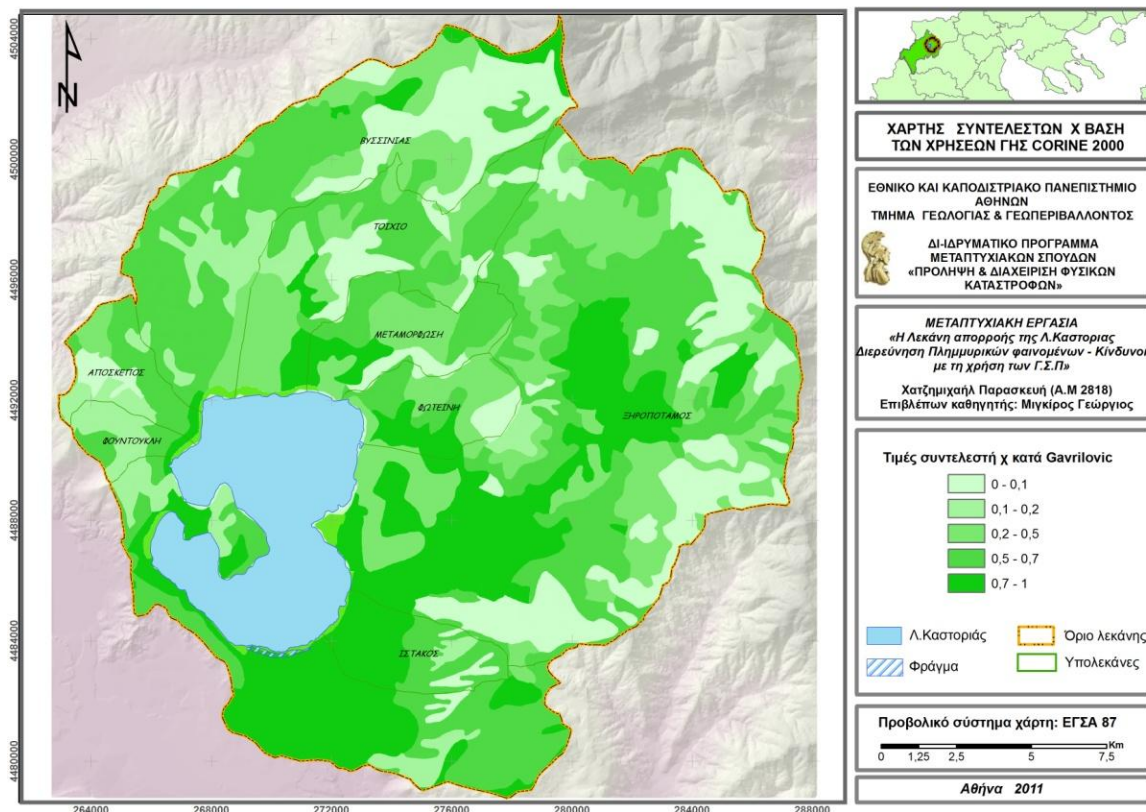
γ : συντελεστής που εκφράζει την διαβρωσιμότητα των γεωλογικών σχηματισμών και εξαρτάται από την πετρολογική και εδαφολογική σύσταση της λεκάνης. Δίνεται από σχετικούς πίνακες και κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,2 - 2. (Κωτούλας Δ., 1994).

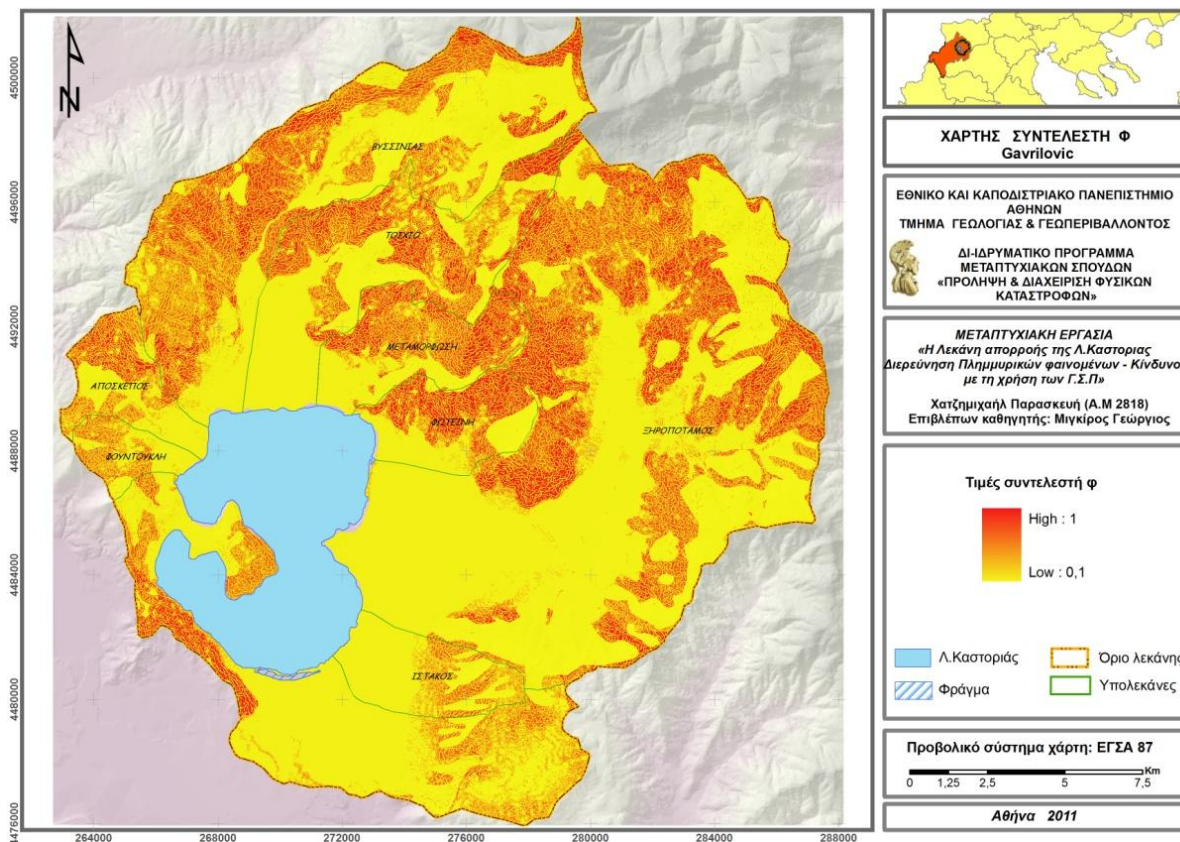
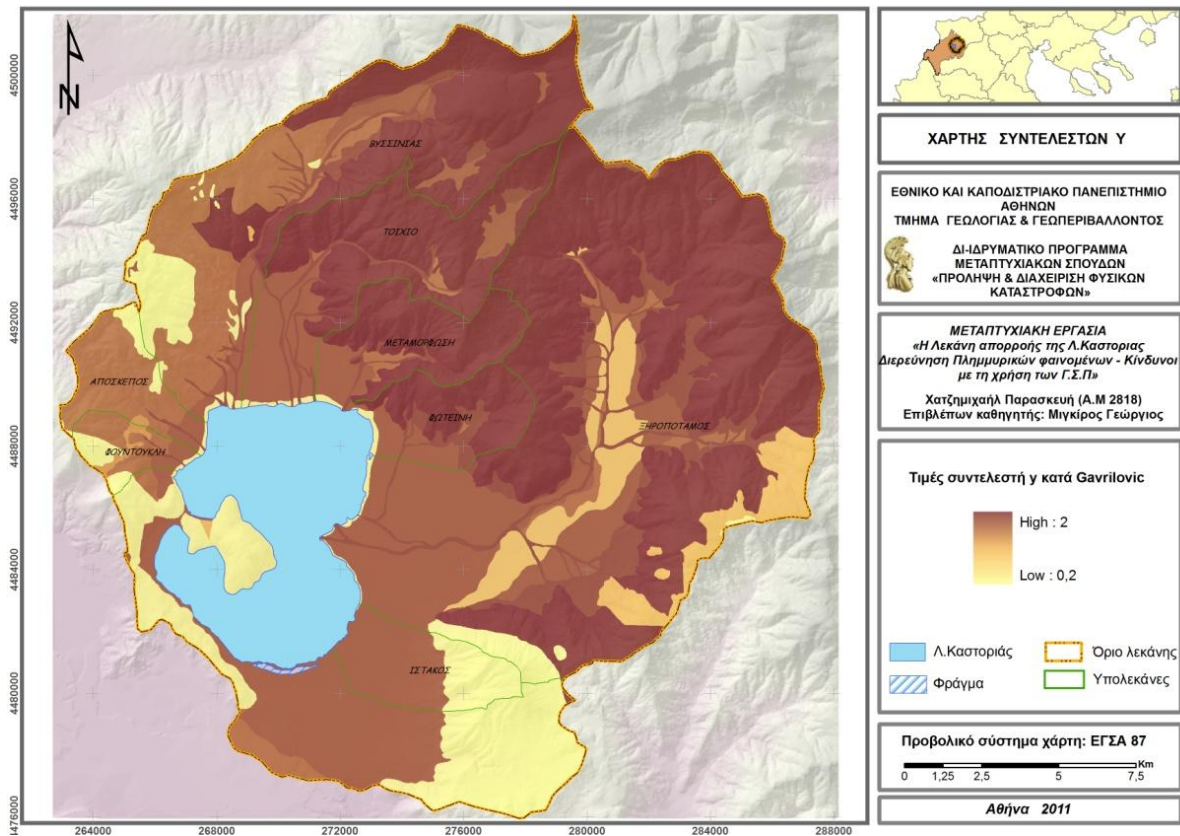
φ : συντελεστής που εκφράζει το είδος και τον βαθμό διάβρωσης και δίνεται από σχετικό πίνακα. Στην παρούσα εργασία η εκτίμηση του συντελεστή αυτού έγινε και με τη βοήθεια του χάρτη εδαφικής απώλειας Rusle ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για να δοθούν οι κατάλληλες τιμές συντελεστών διάβρωσης κάθε εικονοστοιχείου 10*10 m και συνεπώς των υπολεκανών. Οι τιμές αυτές κυμαίνονται από 0,1-1. Τιμή μικρή παίρνουν οι λεκάνες απορροής με ασθενή διάβρωση και μεγάλη τιμή οι πλήρως υποβαθμισμένες από έντονες διαβρώσεις.

J : η μέση εδαφική κλίση της λεκάνης απορροής εκφρασμένη σε ποσοστό(%).

11.4.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΑΝΡΙΛΟΝΙC

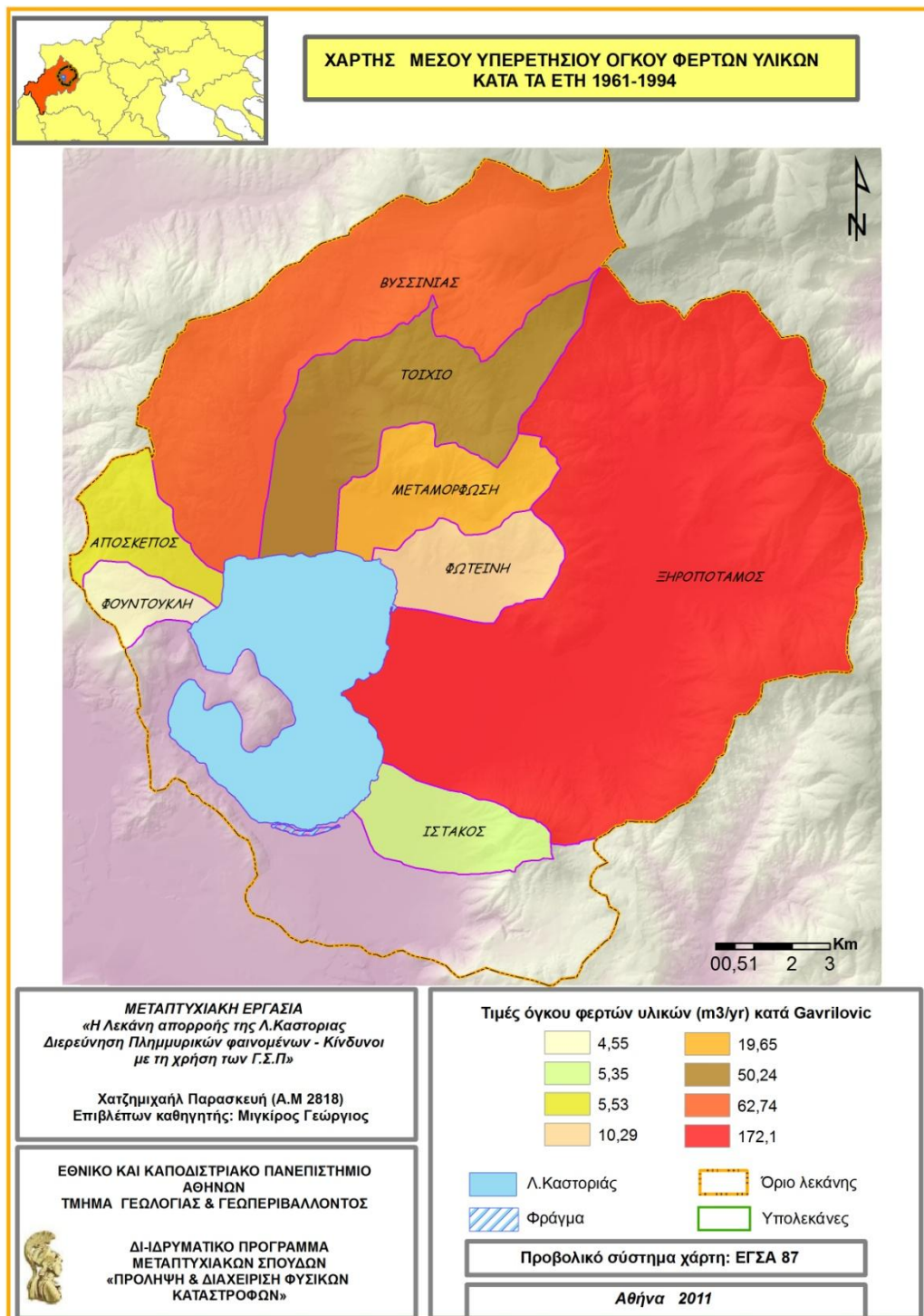
Στους ακόλουθους χάρτες παρουσιάζονται οι υπολογισμοί παραμέτρων της εξίσωσης Γανρίλονιc. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε κάθε εικονοστοιχείο 10*10 m και για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιήσαμε τα raster αρχεία της μέσης υπερετήσιας θερμοκρασίας, της μέσης κλίσης, των γεωλογικών σχηματισμών και των χρήσεων γης κατά Corine όπου δόθηκαν οι αντίστοιχοι συντελεστές όπως ορίζουν οι πίνακες. Στη συνέχεια υπολογίσαμε τον μέσο υπερετήσιο όγκο φερτών υλικών που παράγει κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά.





11.4.2 Όγκος φερτών υλικών στην λεκάνη απορροής

Στον χάρτη που ακολουθεί παρουσιάζονται οι υπολεκάνες με τις αντίστοιχες μέσες υπερετήσιες τιμές όγκου φερτών υλικών εκφρασμένες σε $\text{m}^3/\text{έτος}$.



Για το σύνολο της λεκάνης απορροής ο μέσος υπερετήσιος όγκος φερτών υλικών υπολογίστηκε στα $334 \text{ m}^3/\text{έτος}$. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της εξίσωσης εδαφικής απώλειας κατά Rusle έδειξαν αυξημένη πιθανότητα διάβρωσης στο ορεινό τμήμα της λεκάνης όπου κυριαρχούν οι γνεύσιοι και οι γρανιτογνεύσιοι και σε

συνδυασμό με τα μεγάλα ύψη βροχής στο ορεινό τμήμα παράγουν μεγάλες ποσότητες φερτών υλικών.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και από τον παραπάνω χάρτη, τον μεγαλύτερο όγκο φερτών υλικών παράγει η υπολεκάνη Ξηροποτάμου ($172,1 \text{ m}^3/\text{έτος}$). Ο μεγάλος αυτός όγκος οφείλεται αφενός μεν στην μορφομετρία της αφετέρου δε στην μεγάλη παροχή που έχει συγκριτικά με τις υπόλοιπες όπου σε συνδυασμό με την εδαφική διάβρωση στο ορεινό τμήμα της οδηγεί και σε μεγάλη στερεοπαροχή.

Εξίσου όμως σημαντική διάβρωση εμφανίζεται και στο βόρειο τμήμα των υπολεκανών Βυσσινιάς, Τοιχιού και Μεταμόρφωσης με αρκετά σημαντικές παροχές (βλ. κεφ 9.3). Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τις απότομες κλίσεις και τα μεγάλα ύψη βροχής καθώς και την έλλειψη φυτοκάλυψης, οδηγούν στις μεγαλύτερες στερεοπαροχές μετά τον Ξηροπόταμο. Το σύνολο όγκου των τριών αυτών υπολεκανών τείνει να φτάσει αυτόν του Ξηροποτάμου.

11.4.3 Μείωση έκτασης της λίμνης

Η λίμνη της Καστοριάς αποτελούσε κάποτε μια έκταση 164 Km^2 και σήμερα καταλαμβάνει μόνο 24 Km^2 . Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μορφολογική εξέλιξη και φυσική υποβάθμιση των υπολεκανών από τη μια μεριά και από την άλλη στις αλόγιστες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις.

Σύμφωνα με μελέτη που διεξήχθη από το Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης το 1994, ο λιμναίος χώρος εκφράζει μια προοδευτική συρρίκνωση ως προς την έκταση, το βάθος της και τον όγκο νερού που απορρέει από τα 8 ρέματα που την περιβάλλουν. Το γεγονός δημιουργεί προβληματισμούς για την εξέλιξή της που σε συνδυασμό με τα έντονα πλημμυρικά φαινόμενα και την μεγάλη παραγωγή φερτών υλικών, όπως αυτά αναλύθηκαν στα αντίστοιχα κεφάλαια, εντείνουν το πρόβλημα αυτό και θέτουν τα όρια διχοτόμησής της.

Μιλώντας ουσιαστικά για διχοτόμηση της λίμνης εννοούμε την εισαγωγή φερτών υλικών προς το κέντρο της λίμνης και την αποκοπή της σε δύο τεμάχια. Παρατηρώντας το νεφροειδές σχήμα της στον χάρτη στο σημείο όπου το σχήμα της λεκάνης στενεύει, και σε συνάρτηση με τα παραπάνω μπορούμε να δούμε την μακροπρόθεσμη εξέλιξή της.

Θα μπορούσαμε να πούμε λοιπόν ότι το προσχωτικό πρόβλημα της λίμνης οφείλεται στην προώθηση του δέλτα Ξηροποτάμου η οποία συμβαίνει με σταθερούς και αργούς ρυθμούς και στα δέλτα Βυσσινιάς, Τοιχιού, Μεταμόρφωσης έντονες κλίσεις, μεγάλες στερεοπάροχές οι οποίες εναποτίθενται με ταχύς ρυθμούς στους κώνους πρόσχωσης τους με αποτέλεσμα τα φερτά υλικά λόγω της ταχύτητάς τους να υπερπηδούν τους κώνους αυτούς και τα λεπτόκοκκα υλικά να εναποτίθενται στο εσωτερικό της λίμνης.

Το ανατολικό τμήμα όπου βρίσκεται η υπολεκάνη Ξηροποταμού, βρίσκεται σε στάδιο γήρανσης και μπορούμε να παρατηρήσουμε πως η δραστηριότητα της μορφολογίας και του υδρογραφικού δικτύου εξελίσσεται από το δεξιό τμήμα προς το βόρειο. Η υπολεκάνη αυτή παράγει σημαντική ποσότητα φερτών υλικών τα οποία εναποτίθενται σε όλο το πεδινό ανατολικό τμήμα το οποίο περιλαμβάνει και τη μεγαλύτερη σε έκταση ιζημάτων.

Το βόρειο τμήμα της λεκάνης από την άλλη υπάρχει έντονη παραγωγή φερτών που οφείλεται στην έντονη τεκτονική δραστηριότητα με το πιθανό ενεργό ρήγμα το οποίο ενεργοποιεί όλες τις παραμέτρους (μορφολογία, υδρογραφικό δίκτυο, παροχή κ.α) πλημμυρικών φαινομένων και παραγωγής φερτών υλικών σε συνδυασμό πάντα με το κλίμα της περιοχής και τις έντονες βροχοπτώσεις.

Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την παραγωγή των φερτών υλικών προς το εσωτερικό της λίμνης όπου υπάρχει πιθανότητα διχοτόμησης της σύμφωνα με διάφορες μελέτες, και για τους λόγους που αναφέρθηκαν, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η έκταση και μορφολογία της λίμνης πιθανόν να αναπτυχθεί στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής.

Έτσι έχουμε από τη μια πλευρά την συνεχή με πιο αργούς ρυθμούς μεταφορά ιζημάτων από τον Ξηροπόταμο (Παλαιόποταμος) και από την άλλη την σχετική πρόσφατη σε σχέση με τον Ξηροπόταμο, συνεισφορά σε φερτά υλικά από τα «έν δράση» ρέματα του βόρειου τμήματος.

Αν συνεχιστεί η πρόσχωση της λίμνης τότε θα δημιουργηθούν 2 μικρότερες όπου αυτή στο βόρειο τμήμα θα δέχεται τον όγκο νερού απ' όλα τα ρέματα της λεκάνης εκτός από αυτή του Ξηροποτάμου και Ίστακου τα οποία θα εισέρχονται πλέον στο 2^ο νότιο κομμάτι της λίμνης που πιθανόν υπάρξει μετά την διχοτόμηση. Με το τέλος ανάπτυξης των 2 αυτών ρεμάτων μιας και οι υπολεκάνες τους βρίσκονται σε στάδιο γήρανσης, δεν θα υπάρχει πλέον ούτε το νότιο κομμάτι.

Έτσι θα συνεχίζεται να αναπτύσσεται το υδρογραφικό δίκτυο και η μορφολογία της περιοχής του βόρειου τμήματος της υπολεκάνης και η λίμνη θα περιοριστεί σε αυτό το τμήμα.

Φυσικά σε αυτήν θα συμβάλλει πέρα από τη φυσική εξέλιξη του συστήματος, και οι ανθρώπινες παρεμβάσεις και δραστηριότητες.

Υφιστάμενα έργα

Στην περιοχή μελέτης μας ανατέθηκαν κατά καιρούς διάφορα έργα και μελέτες, από τον δήμο Καστοριάς και την Δασική Υπηρεσία Καστοριάς, για την προστασία της λίμνης από την παραγωγή φερτών υλικών και τα πλημμυρικά φαινόμενα που άλλα κατασκευάστηκαν και άλλα όχι. Τα έργα αυτά αφορούσαν ορεινά υδρονομικά έργα (φυτοτεχνικά και μικρές απλές φραγματικές κατασκευές στερέωσης είτε μεμονομένες είτε κατά ομάδες, για τη βαθμίδωση των κοιτών), τα οποία εκτελέστηκαν σε κάποιες λεκάνες και δεν αποδείχθηκαν κατάλληλα για να ελέγξουν τον όγκο των φερτών υλικών αφού δεν ανταποκρίθηκαν στο βαθμό και την ένταση των χειμαρρικών φαινομένων που παράγουν τα φερτά υλικά.

Επίσης κατασκευάστηκαν αντιπλημμυρικά έργα στο πεδινό τμήμα της περιοχής τα οποία περατώθηκαν το 1592 και μετά τα νέα αυτά έργα εγκοιτώθηκαν οι πεδινές ροές των χειμαρρικών ρεμάτων. Τα χειμαρρικά αυτά ρέματα ρέουν πλέον συγκεντρωμένα και με μεγάλη ταχύτητα προς την λίμνη παρασύροντας όλα τα φερτά υλικά προς τα κατάντη και δεν συντηρούνται σωστά.

Λόγω των φερτών υλικών που συσσωρεύονται τα τελευταία χρόνια στον πυθμένα της λίμνης, ο δήμος Καστοριάς ανέθεσε στο Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ), την διεξαγωγή βυθομετρικών και ιζηματολογικών ερευνών σε δεκάδες σημεία της λίμνης με σκοπό τον καθορισμό της ακριβούς μορφολογίας, της σύνθεσης του ιζήματος στον πυθμένα και των υποστρωμάτων του, αλλά και για την πλήρη χαρτογράφησή του.

Σύμφωνα με δημοσίευμα της εφημερίδας «Ελευθεροτυπία», ο νομάρχης Καστοριάς, Γιάννης Λιάντσης, γνωστοποίησε ότι η νομαρχία υπέγραψε προγραμματική σύμβαση με το ΙΓΜΕ, ύψους 35,000 ευρώ για την μελέτη αυτή. Η μελέτη αυτή ξεκίνησε τον Οκτώβριο του 2010 και τα αποτελέσματα της αναμένονταν τον Ιανουάριο του 2010. Στοιχεία από την μελέτη αυτή δεν μπορέσαμε να συλλέξουμε.

Όπως είδαμε, στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν και συναξιολογήθηκαν πολλοί παράγοντες που συντελούν στην εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων. Πιο συγκεκριμένα αναλύθηκε χωρικά και ποσοτικά η υδρογεωμορφολογία της περιοχής, η μετεωρολογία και υπολογίστηκε το υδατικό ισοζύγιο για το σύνολο της λεκάνης αλλά και κάθε υπολεκάνης ξεχωριστά για τα υδρολογικά έτη 1961-1994. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε ένα μοντέλο εκτίμησης πλημμυρικού κινδύνου καθώς επίσης υπολογίστηκε η εδαφική απώλεια αλλά και ο όγκος φερτών υλικών που παράγει κάθε υπολεκάνη και παρήχθησαν οι αντίστοιχοι χάρτες.

Βάση λοιπόν του χάρτη εκτίμησης πλημμυρικής επικινδυνότητας, περιοχές επιρρεπής στον κίνδυνο αυτό καθορίστηκαν στο ανατολικό(υπολεκάνη Ξηροποτάμου) και βόρειο(υπολεκάνη Βυssινιάς, Τοιχιού, Μεταμόρφωσης) πεδινό τμήμα της περιοχής μας.

Η υπολεκάνη Ξηροποτάμου, η οποία βρίσκεται σε στάδιο γήρανσης, είναι υπεύθυνη για τις πλημμύρες που συμβαίνουν στο ανατολικό πεδινό τμήμα. Έχει τη μεγαλύτερη έκταση συγκριτικά με τις υπόλοιπες, το υδρογραφικό της δίκτυο είναι ανεπτυγμένο και παράγει το μεγαλύτερο όγκο φερτών υλικών που απορρέουν προς τα κατάντη σε συνδυασμό με την μεγάλη παροχή του κύριου ρέματος.

Τα φερτά αυτά υλικά τα οποία εναποτίθενται στο σημείο αυτό δημιουργούν, και σε συνδυασμό με τους άλλους παράγοντες(δείκτης υγρασίας, κλίσεις εδάφους κ.α), ευνοϊκές καταστάσεις για την ανάπτυξη πλημμυρικών φαινομένων.

Οι πλημμύρες στο ανατολικό τμήμα δικαιολογούνται και από την ύπαρξη μεγάλου όγκου φερτών υλικών που εκφορτίζονται στο πεδινό τμήμα οι οποίες σε συνδυασμό με την κακή διαχείριση του υπάρχοντος ρέματος.

Από την άλλη πλευρά, οι ευαίσθητες περιοχές ως προς τις πλημμύρες στο βόρειο πεδινό τμήμα οφείλονται στην δράση των χειμαρρικών ρεμάτων των υπολεκάνων Βυssινιάς, Τοιχιού και Μεταμόρφωσης. Στις υπολεκάνες αυτές παρατηρείται έντονη τεκτονική δραστηριότητα που συμβάλλει στην διαμόρφωση απότομων εδαφικών κλίσεων, στην ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου, στις μεγάλες και έντονες ποσότητες βροχόπτωσης (στην υπολεκάνη Βυssινιάς παρατηρείται το μέγιστο ύψος βροχόπτωσης) με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σημαντικές ποσότητες επιφανειακής απορροής καθώς επίσης και γρήγοροι ρυθμοί παραγωγής φερτών υλικών.

Τα φερτά αυτά υλικά, και λόγω του αναγλύφου των υπολεκάνων, προσπίτουν στο εσωτερικό της λίμνης μέσω της αναπήδησης, εγκαθίστανται στο βυθό της, και μαζί με αυτά της υπολεκάνης Ξηροποτάμου δημιουργούν ένα φυσικό «τείχος» στο κέντρό της

συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο στην συνεχή υποβάθμιση και στην μελλοντική πιθανή διχοτόμησή της. Έτσι ανεβαίνει η στάθμη του νερού της λίμνης κυρίως σε περιόδους με έντονες βροχοπτώσεις, με αποτέλεσμα το νερό να μην μπορεί να διοχετευτεί γρήγορα προς την έξοδο της λίμνης δημιουργώντας έτσι πλημμυρικά φαινόμενα τα οποία είναι πολύ συχνά και κυρίως στο παραλίκνιο τμήμα της πόλης Καστοριάς.

Το σημείο όπου το σχήμα της λεκάνης στενεύει μπορεί να συσχετιστεί με την παραγωγή φερτών υλικών από το βόρειο και ανατολικό τμήμα. Το ανατολικό τμήμα που βρίσκεται σε στάδιο γήρανσης σε σχέση με το βόρειο παράγει σημαντική ποσότητα φερτών υλικών τα οποία εναποτίθενται σε όλο το ανατολικό τμήμα το οποίο περιλαμβάνει και τη μεγαλύτερη σε έκταση, από γεωλογικής πλευράς, ιζημάτων. Από την άλλη πλευρά η πρόσχωση των φερτών υλών στη λίμνη από το βόρειο τμήμα που βρίσκεται σε στάδιο ανάπτυξης(υπάρχει σεισμική δραστηριότητα με το πιθανό ενεργό ρήγμα που βρίσκεται εκεί και χωρίζει την ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου), γίνεται με εντονότερους ρυθμούς όπου σε συνδυασμό με τις κλίσεις και την υδρογεωλογία αλλά και τη γεωμετρία ανάπτυξης του υδρογραφικού δικτύου και συνεπώς τους τρόπους μηχανικής(μέσω αναπήδησης ιζημάτων)ευνοούν την εισροή φερτών υλών προς το κέντρο της λίμνης.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από το μορφολογικό χάρτη το μεγαλύτερο ποσοστό πεδινής περιοχής βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης απορροής, στο σημείο όπου ο μεγαλύτερος σε μήκος χειμαρροπόταμος ο Ξηροπόταμος, εκβάλλει στο ανατολικό τμήμα της λίμνης.

Στο κεφάλαιο μορφολογία αναφέρθηκε ότι η έκταση της λίμνης ήταν περίπου 164 km² ενώ σήμερα καταλαμβάνει μόλις 28 Km. Παρατηρώντας λοιπόν τη μορφολογία της περιοχής και την ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου συμπεραίνουμε ότι η μείωση της έκτασης της λίμνης οφείλεται κατά το μεγαλύτερο μέρος της στην συνεισφορά φερτών υλικών από τον Ξηροπόταμο ή Παλαιοπόταμο(η ονομασία του φανερώνει και την εξέλιξή του).

Πράγματι από τη μελέτη του υδατικού ισοζυγίου στο κεφάλαιο τάδε βλέπουμε ότι η συνεισφορά σε επιφανειακή απορροή είναι μεγαλύτερη στην υπολεκάνη ξηροποταμού και συνεπώς ο όγκος φερτών υλικών όπως αποδείχθηκε στο κεφάλαιο υπολογισμού φερτών υλικών.

Σημαντική όμως είναι και η συνεισφορά τους από το βόρειο τμήμα όπου το υδρογραφικό δίκτυο βρίσκεται σε στάδιο νεότητας, με απότομες κλίσεις, μεγάλα υψόμετρα και το μεγαλύτερο μέρος της με ποσοστό >50% καταλαμβάνεται από ορεινές περιοχές. Το έντονο ανάγλυφο και οι μορφολογικές κλίσεις στις περιοχές αυτές σε συνδυασμό με την ένταση βροχόπτωσης προκαλούν, εκτός από τα πλημμυρικά φαινόμενα, και αυξημένη είσοδο των φερτών υλών σε σχέση με το ανατολικό τμήμα όπου η είσοδος τους γίνεται με πιο αργό ρυθμό .

Η αυξημένη, όσων αναφορά, ταχύτητα εισόδου των υλικών οφείλεται στις αποτόμες κλίσεις με μέγιστη σε αυτό το τμήμα(Βυssινιάς, Τοιχιού, Μεταμόρφωσης) οι οποίες προκαλούν την αναπήδηση των αιωρούμενων υλικών και την εισχώρηση τους στη λίμνη.

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΕΡΓΑ

Έτσι λοιπόν για την προστασία της λίμνης από τις προσχώσεις που οφείλονται στην μεγάλη παραγωγή φερτών υλικών και τα πλημμυρικά φαινόμενα, θα πρέπει να εκτελεστούν κατάλληλα έργα κυρίως στις ορεινές περιοχές, από όπου ξεκινάνε και τα φαινόμενα αυτά, με στόχο την αποτροπή των χειμαρρικών φαινομένων, την στερέωση των εστιών στο ορεινό τμήμα παραγωγής φερτών υλικών και την ορθολογική διαχείριση και διευθέτηση της κεντρικής κοίτης των ρεμάτων.

Τέτοια έργα μπορούν να αποτελούν

- Δενδροφυτεύσεις για την ανάκαμψη της φυτοκάλυψης με σκοπό να προστατευθεί το έδαφος από διαβρώσεις και παραγωγή φερτών υλικών συμβάλλοντας ταυτόχρονα και στη μείωση πλημμυρικών φαινομένων μέσω της κατακράτησης της βροχόπτωσης. Γενικότερα, η βλάστηση αποτελεί μια πολύ καλή ασπίδα προστασίας από την διάβρωση του εδάφους και την εκδήλωση πλημμυρικών φαινομένων. Έλλειψη της βλάστησης οδηγεί σε ένταση τέτοιων καταστροφικών φαινομένων.
- Περιορισμός στην υπερβόσκηση
- Φράγματα για τη στερέωση των κοιτών που να είναι ικανά να αντέξουν τον μεγάλο όγκο φερτών υλικών.
- Καθαρισμός των κοιτών των ρεμάτων και συντήρηση φραγμάτων.
- Συντήρηση βροχομετρικών σταθμών και παρακόλουθηση παροχής των ρεμάτων

Προτεραιότητα φυσικά θα πρέπει να δοθεί στις υπολεκάνες με Ξηροποτάμου, Βυssινιάς, Τοιχιού και Μεταμόρφωσης όπου επικρατούν έντονα πλημμυρικά φαινόμενα και μεγάλη παραγωγή φερτών υλικών στο πεδινό τμήμα και το εσωτερικό της λίμνης.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η μελέτη και εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου μας δίνει τα απαραίτητα και αρχικά στοιχεία ώστε να καταλάβουμε το πώς λειτουργεί το φυσικό περιβάλλον γύρω μας, τις θετικές επιπτώσεις που έχει πάνω μας αλλά και τις αρνητικές, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στην περίπτωση πλημμυρικών φαινομένων. Σε τέτοια καταστροφικά και ακραία φαινόμενα δεν ευθύνεται μόνο το περιβάλλον αλλά κυρίως ο τρόπος με τον οποίο εμείς οι άνθρωποι το εκμεταλλευόμαστε και συμπεριφερόμαστε προς αυτό.

Ο άνθρωπος έχοντας χάσει πλέον το πραγματικό του ενδιαφέρον και νόημα του ευζην καταστρέφει όλο και περισσότερο τους φυσικούς πόρους, μολύνει το περιβάλλον, ενώ για την «επέκτασή» του θυσιάζει στο βωμό του πλασματικού χρήματος δασικές εκτάσεις, συνήθως μέσω και των εκδηλώσεων πυρκαγιάς, ένα φαινόμενο το οποίο έχει πάρει μεγάλη διάσταση παγκοσμίως και φυσικά στη χώρα μας. Καίγοντας δάση χάνεται το έδαφος, το οποίο από τη στιγμή που και αυτό είναι μέρος του όλου, επιφέρει καταστροφικές συνέπειες και σε όλα τα υπόλοιπα. Τέτοιες περιοχές είναι πλέον επιρρεπής σε πλημμυρικά φαινόμενα, παραγωγή φερτών υλικών κ.α που τελικά στρέφονται εναντίον του ανθρώπου ο οποίος προσπαθεί να επιβιώσει πλέον χρησιμοποιώντας ξανά λάθος μεθόδους και χωρίς να κάνει καν την προσπάθεια να φερθεί φιλικά προς το περιβάλλον και να συμβιώσει μαζί του.

Κλείνοντας την εργασία αυτή, θα λέγαμε λοιπόν ότι όσα μοντέλα και προβλέψεις τέτοιων φαινομένων αναπτυχθούν, κανένα δεν θα έχει πραγματικό νόημα και αξία αν εμείς οι ίδιοι οι άνθρωποι δεν τα στηρίξουμε, και αν εμείς οι ίδιοι δεν σεβαστούμε αυτό που θέλουμε να ονομάζουμε φύση. Όλα είναι μέρος του όλου και μέσα σ' αυτό βρισκόμαστε και εμείς....

« Ότι καθιερωθεί γερά δεν ξεριζώνεται.

Ότι κατανοηθεί γερά δεν διαφεύγει.

Θα το τιμούν από γενιά σε γενιά.»

ΛΑΟ ΤΣΕ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

- Τσακίρης Γ. , 1995: Υδατικοί Πόροι- Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα
- Κουτσογιάννης Δ., Μαμάσης Ν., 1999: «Προχωρημένη Υδρολογία- Κατακρημνίσματα και χωρική μεταβλητότητά τους», Τομέας Υδατικών Πόρων, Ε.Μ.Π, Αθήνα.
- Σούλιος Χ. Γεώργιος (1986): Γενική Υδρογεωλογία, Α' Τόμος, Θεσ/νίκη, εκδόσεις University Studio Press.
- Σούλιος Χ. Γεώργιος (1986): Γενική Υδρογεωλογία, Β' Τόμος, Θεσ/νίκη, εκδόσεις University Studio Press.
- Ξανθόπουλος Θ. Σ. (1989): Εισαγωγή στην Τεχνική Υδρολογία, Αθήνα.
- Κωτούλας Κ. Δημήτριος (1985): Διευθετήσεις Χειμαρρικών Ρευμάτων, Μέρος 1, Θεσ/νίκη, εκδόσεις Α.Π.Θ.
- Τσακίρης Γ., (1995), «Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία», Ε.Μ.Π., Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα.
- Θεοδωρακόπουλος Π., 2009 « Εκτίμηση υδατικού ισοζυγίου & Προσομοίωση Υπόγειου παράκτιου υδροφορέα προσχωματικής λεκάνης Ζεφυριάς στη νήσο Μήλο», Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π, Σχολή αγρονόμων τοπογράφων μηχανικών, τομέας έργων υποδομής και αγροτικής ανάπτυξης, Αθήνα, Οκτώβριος 2009
- Κουτσογιάννης Δ. & Ξανθόπουλος Θ., (1999): «Τεχνική Υδρολογία», Ε.Μ.Π., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας υδατικών πόρων, Αθήνα.
- Παπαζαφειρίου, Ζ. : Αρχές και πρακτική των αρδεύσεων. Θεσ/νίκη, 1984, σελ, 156-187.
- Ερευνητικό έργο (2000): « Προσδιορισμός παροχών ,φερτών υλών και ποιότητας του νερού των χειμάρρων-ρεμμάτων της λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς, Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ, Τομέας Υδραυλικής και Τεχνικής Περιβάλλοντος, Θεσ/νίκη.
- Ευστρατιάδης, Α. 2008: «Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδάτινων πόρων με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων», Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π, Σχολή πολιτικών μηχανικών, Τομέας Υδάτινων Πόρων & Περιβάλλοντος, Αθήνα.
- Μαντούδη Κ, Μαμάσης Ν., Κουτσογιάννης Δ. , 2004: «Μοντέλο Ισοζυγίου Υδρολογικής Λεκάνης με χρήση Συστήματος Γεωγραφικής Πληροφορίας», Τεχνικά Χρονικά.
- Μιμίκου, Μ. Α., Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Έκδοση 2, Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1994.
- Λέκκας Δ. 2006: «Θαλάσσια γεωλογία Β'», διδακτικές σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Σχολή Περιβάλλοντος-Τμήμα Επιστήμης της θάλασσας, Μυτιλήνη.
- Καλλέργης Γ.Α (1986): Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία, Τόμος Β', Αθήνα, εκδόσεις Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.

Ρόζος Ε., 2010: «Υδρολογική προσομοίωση της ροής σε υδροφορείς υψηλής αβεβαιότητας», Διατριβή, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π, Αθήνα.

Ξανθόπουλος Θ. Σ. (1989): Εισαγωγή στην Τεχνική Υδρολογία, Αθήνα.

Ευστρατιάδης Α., Α, Κουκουβίνος. Ε. Ρόζος, Α.Τέγος και Ι. Ναλμπάντης, 2006 : Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης των υδρολογικών και υδρογεωλογικών διεργασιών λεκάνης απορροής «ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ», Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ), Ανάδοχος: NAMA, Τεύχος 4α, 103 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων, Ε.Μ.Π, Δεκέμβριος, Αθήνα.

Μαμάσης Ν. & ΚουτσογιάννηςΔ , 1999: «Προχωρημένη Υδρολογία Κατακρημνίσματα και χωρική μεταβλητότητα», Πανεπιστημιακές σημειώσεις , Ε.Μ.Π, Αθήνα

Μαμάσης Ν. & ΚουτσογιάννηςΔ , 1999: «Γεωμορφολογία και απορροή», Πανεπιστημιακές σημειώσεις , Ε.Μ.Π, Αθήνα

Μιμίκου Μ., 2005 : «Υδρολογικά Μοντέλα – Σύγχρονα Εργαλεία Ολοκληρωμένης Προσέγγισης & Διαχείρισης Λεκάνης Απορροής», Ε.Μ.Π, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Υδρολογίας & Αξιοποίησης Υδάτινων πόρων, Σεπτέμβριος, Ιωάννινα

Μιμίκου Μ.Α, Φωτόπουλος Φ.Σ, 2004 : Σημειώσεις στο μεταπτυχιακό μάθημα «Υδατικό Περιβάλλον και Ανάπτυξη», Διεπιστημονικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών Περιβάλλον και Ανάπτυξη, Ε.Μ.Π, Αθήνα.

Μιγκίρος Γ., Σταμάτης Γ., Αντωνίου Β. (1995): Ανάλυση των κύριων παραγόντων που συμβάλλουν στην εμφάνιση πλημμυρών στο ανατολικό τμήμα των Αθηνών και προτάσεις αντιμετώπισής τους. Πρακτικά 2ου Συνεδρίου, με θέμα "Ολοκληρωμένες επεμβάσεις για τη μείωση του κινδύνου από πλημμύρες", της Ελληνικής Επιτροπής για τη Διαχείριση των Υδατικών Πόρων (ΕΕ.ΔΥΠ.), έκδοση ΕΜΠ, Τμήμα Αγρ. Τοπογράφων Μηχανικών, 123-130

Σταμάτης Γ., Αντωνίου Β. & Μιγκίρος Γ. (1994): Υδρογεωλογικές και Γεωτεχνικές συνθήκες Κεντρικής περιοχής Αθηνών. Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Εταιρ., XXX/4, 367-380.

Σωτηριάδης, Λ., Ψιλοβίκος, Α., 1984: Ασκήσεις Γεωμορφολογίας, Α.Π.Θ., Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη.

Σαχσαμάνογλου, Χ. (1977) : Ο ορεινός όγκος του Ολύμπου ως πηγή θερμάνσεως της κατωτέρας τροπόσφαιρας, Διατριβή, Θεσ/νίκη , σελ.149.

Τέγος Α., 2005 : «Συνδυασμένη προσομοίωση υδρολογικών- υδρογεωλογικών διεργασιών και λειτουργίας υδροσυστήματος Δυτικής Θεσσαλίας, Διπλωματική εργασία, 132 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων, Ε.Μ.Π, Σεπτέμβριος, Αθήνα.

Φλαμπούρης Κ.Π., 2008: «Μελέτη της επίδρασης του παράγοντα βροχόπτωσης R στον νόμο RUSLE», Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη.

Χρυσάνθου, Β., Πυλιώτης, Α., 1995: « Εκτίμηση της εισροής φερτών υλών σε έναν ταμιευτήρα υπό κατασκευή», 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο ΕΥΕ, Θεσσαλονίκη.

Ψιλοβίκος Άρης, 2005 : «Αειφορική Διαχείριση Υδάτινων Πόρων», Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Τμήμα Γεωπονίας Ζωικής Παραγωγής & Υδάτινου Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.

Παγώνας Μ., 2009 : «Γεωλογία και διαχείριση των σύγχρονων αποθέσεων και των υδατικών πόρων στους χειμάρρους της ΒΔ/κης Πελοποννήσου», Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Πάτρα.

Νικολαΐδου, Μ., και Ε. Χατζηχρίστου, Καταγραφή και αποτίμηση των καταστροφών από πλημμύρες στην Ελλάδα και την Κύπρο, Διπλωματική εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1995.

Δημητρίου Η., 2007 : Τεχνική έκθεση προς την επιτροπή στρατηγικού σχεδιασμού αντιπλημμυρικής ποροστασίας του Ν.Λακωνίας, Μελέτη 4: «Εκτίμηση τρωτότητας περιοχών του Ν.Λακωνίας σε πλημμυρικά φαινόμενα, ΕΛΚΕΘΕ.

Σακκάς Ι.Γ., 1994 : Μελέτη για εξυγίανση και αξιοποίηση της λίμνης Καστοριάς, θεματική ενότητα 2 «Υδρολογική μελέτη της λεκάνης απορροής της λίμνης Καστοριάς», Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ξάνθη.

Κωτούλας Δ. , 1994 : Μελέτη για εξυγίανση και αξιοποίηση της λίμνης Καστοριάς, θεματική ενότητα 4 «Μελέτη για προστασία της λίμνης από προσχώσεις», Ξάνθη.

Τσακίρης Γ. : «Αντιπλημμυρική προστασία στις παράκτιες περιοχές», Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π, Αθήνα.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Kosmas Pavlopoulos, Athanassios Skentos, Chryssanthi Kotabassi, 2009: “ Geomorphological mapping and evolution of the broader area of Kastoria (Orestias) Lake (NW Greece), Anaskamma, vol.03.

Shaw, E.M, and P.P. Lynn, 1972: “Area rainfall using two surface fitting techniques”, Bull. IAHS, XVII(4), pp.419-433.

Court A., and M.T Bare, 1984: «Basin precipitation estimates by Bethlahmy’s two axis method, Journal of Hydrology, 68, 149-158.

Matheron O.E, 1971: « The theory of Regionalized variables and its applications”, Ecole de Mines, Fontainbleau.

Dingman S.L, 1994 : «Physical Hydrology”, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Rosenberg, N., 1983. Microclimate: The biological environment. J. Wiley, WSA, pp. 243-258.

- Pelton W.I, King K.M. and Tanner C.B, 1960: An evaluation of the thornwaite method for determining potential evapotranspiration, *Agron.J* 52: 387-395.
- Blaney, H.F and Criddle, W.D., 1950 : “Determining water requirement in irrigated areas from climatological and irrigation data”, USDA Soil Conservation Service Tech. Paper No 96., 48 pp.
- Hargreaves, G.H., 1974: “Estimation of potential and crop evapotranspiration”, *Trans. ASAE* 17: 701-704.
- Pelton, W.L, King K.M and Tanner C.B, 1960: “An evaluation of the thornthwaite method for determining potential evapotranspiration”, *Agron.J*, 52: 387-395.
- Turc I., 1961 : Evaluation des besoins en eau d’irrigation, evapotranspiration potentielle, *Ann. Agron.*, 12(1), 13-49.
- Beven, K. J., How far can we go in distributed hydrological modelling?, *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 1-12, 2001.
- Beven, K. J., *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*, Wiley, 2001.
- Gupta H.V, Khodatalab N., Wagener T. and Sorooshian S. , 2003 : Advances in semi-distributed watershed modeling, EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Geophysical Research Abstracts, Vol.5, Nice, April, European Geophysical Union 2003.
- Alley W.M 1984: “On the treatment of evapotranspiration, soil moisture and aquifer in monthly water balance models”, *Water Resources Research*, 20, 1137-1149.
- Makhlouf Z., and Michel C., 1994: “ A two-parameter monthly water balance model for French watersheds”, *Journal of hydrology*, 162, 299-318.
- Xu C.Y and Singh V.P, 1998 : “A review of monthly water balance models for water resources investigations, *Water Resources Management*, 12, 31-50.
- Beven K.J , 1989: “Changing ideas in hydrology – The case of physically- based models”, *Journal of Hydrology*, 105, 157-172.
- Reed S., Koren V., Smith M., Zhang Z., Morel F., Seo D. J. & DMIP Participants, 2004. Overall distributed model intercomparison project results. In: *Journal of Hydrology* 298, Elsevier Science Ltd., pp. 27–60.
- Kuczera G., and Parent E. : “ Monte Carlo assesment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: The Metropolis algorithm”, *Journal of Hydrology*, 211, 69-85.
- Govindaraju R.S, and Rao A.R, 2002: “Artificial Neural Networks in Hydrology”, Kluwer Academic, Boston.
- Mimikou M., 2000 : “Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators”, *Journal of Hydrology*, 234, pp. 95-109.
- DHI, Mike SHE Flow Models, Technical Reference, DHI, 2003.

Yu P.S, Yang T.C and Chen S.J. 2001 : “ Comparison of uncertainty methods for a distributed rainfall- runoff model, *Journal of Hydrology*, 244, 43-59.

Yu Z., 2003. *Hydrology/Modeling and Prediction*. In: *Journal of Hydrology*. Elsevier Science Ltd. p. 980-987.

Burnash R., Ferral R. & M. R.A, 1973 : A generalized streamflow simulation system – conceptual modeling for digital computers”, Technical report, Joint Federal and State River Forecast Center, U.S National Weather Service and California Department of Water Resources, Sacramento, pp. 204.

Jakeman, A. J., and G. M. Hornberger, How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resour. Res.*, 29(8), 2637-2649, 1993.

Gupta, H. V., Khodatalab, N., Wagener, T. and S. Sorooshian, Advances in semi-distributed watershed modeling, EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, Nice, April 2003, European Geophysical Society, American Geophysical Union, 2003.

Efstratiadis A., A.Tegos, I. Nalbantis, Rozos E., A. Koukouvinos, N. Mamassis, S. Papalexiou and D. Koutsogiannis, 2005: “Hydrogeios- an integrated model for simulating hydrographic networks- A case study to West Thessaly region”, 7th Plinius Conference on Mediterranean Storms, Rethymnon, Crete, European Geosciences Union.

Horritt M. S., Bates P.D., 2002. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. In: *Journal of Hydrology* 268, Elsevier Science Ltd., pp. 87–99.

SWAT2000 : Theoretical Documentation, www.brc.tamus.edu/swat, 2000.

Jenson S.K. and Domingue J. O. (1988), “Extracting topographic structure for Digital Elevation data for Geographic System Analysis”, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988

Jenson S.K. (1994), “Application of hydrologic information automatically extracted from Digital Elevation Models”, in Bevan K.J. and Moore I.D. (eds.) „Terrain Analysis and Distributed Modeling in Hydrology” , John Wiley and Sons, Chichester, England 1994

Moore I.D. (1996), “Hydrological modeling and GIS”, in Goodchild M.F., Steyaert L.T., Parks B.O., Johnston C., Maidment D., Crane M. and Glendinnings S. (eds.) „GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues”, Fort Collin, Co: GIS World Books, 1996

J.M.van der Knijff, R.J.A.Jones, L.Montanarella , 2000: «Soil Risk Assessment in Italy». European Commision, European Soil Bureau.

Stefano, C., Ferro, V., Porto, P., 2000: «Length Slope Factors for applying the Revised Universal Soil Loss Equation at Basin Scale in Southern Italy», *J. agric. Engng Res.* 75, 349-364.

Moore I D, A K Turner, J P Wilson, S K Jenson & L E Band, 1993: « GIS and land-surface-subsurface process modeling. In: *Environmental Modeling with GIS*», edited by M F Goodchild, B O Parks and L. T. Steyaert (Oxford University Press, U.K.) 196-230

Tsakiris, G. (2007). «Practical Application of Risk and Hazard Concepts in ProactivePlanning». European Water

WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D., 1978.: « Predicting rainfall erosion losses; A guide to Conservation planning», Agriculture Handbook No. 537, USDA Sci. and Edyc. Admin., Washington D.C.

SCHWERTMANN, U., W. VOGL and M. KAINZ, 1990. Bodenerosion durch Wasser, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

Fountoulis I. Mavroulis S., 2008: “Flood Hazard assessment in the Kladeos river basin (Olympia-Western Peloponnese), 8th International Hydrogeological Congress of Greece, Athens .

Πηγές από internet

<http://news.ert.gr/el/topikes-eidiseis/kozani/43259-ereyna-apo-to-igme-gia-tin-limni-tis-kastorias>

<http://www.tovima.gr/default.asp?pid=2&artid=315675&ct=1&dt=18/02/2010#ixzz17H1PmxBM>

http://kpe-kastor.kas.sch.gr/site%20lake/lake_index.htm

<http://www.eppkas.gr/>

http://europa.eu/legislation_summaries/agriculture/environment/128002b_el.htm

<http://nwis.waterdata.usgs.gov/nwis>

<http://postgrasrv.hydro.ntua.gr/gr/edmaterial/education/index.htm#Mimikou2>

http://itia.ntua.gr/en/documents/?tags=hydrological_models