

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Γεωμορφομετρικά Χαρακτηριστικά των Υδρολογικών Λεκανών της Ελλάδας

Διπλωματική εργασία του φοιτητή
Ιωάννη Πασπαλλή

Υπό την επίβλεψη του Αν. Καθηγητή
Δημήτρη Κουτσογιάννη

Αθήνα
Απρίλιος 2003

*Κ' έλεγα μέσα μου: δε φτάνει το τραπέζι,
μήτε κάμποσος παράς στην τσέπη,
μήτε το ψωμί και το φιλί, — δε φτάνει.
Ο άνθρωπος είναι πιο τρανός
απ' την καθημερινή την έγνοια του.*

Από το ποίημα *Αποχαιρετισμός*
του Γιάννη Ρίτσου

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, φτάνω στο τέλος της φοιτητικής μου πορείας και νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τα πρόσωπα εκείνα που με βοήθησαν να διανύσω το δύσκολο αυτό μονοπάτι.

Ευχαριστώ,

τον αγαπητό καθηγητή μου Δημήτρη Κουτσογιάννη για το χρόνο, τη διάθεση, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς και για όσα με δίδαξε άμεσα ή έμμεσα·

τους Νίκο Μαμάση και Αντώνη Κουκουβίνο για την πολύτιμη συνεργασία τους, τις πρακτικές συμβουλές τους, τις παραινέσεις τους·

τους Αντώνη Χριστοφίδη και Θοδωρή Κάργα για την πρόθυμη βοήθειά τους σε θέματα υπολογιστών·

το Βαγγέλη, τη Μαρώ, τον Περικλή, την Όλγα για την όμορφη παρέα τους στο εργαστήριο·

τους φίλους μου Στέφανο—για πάρα πολλά πράγματα και ιδιαίτερα για την ευγένεια, την υπομονή, την καλοσύνη του—Δαβίδ, Χαρά, Αλέξανδρο, Θάνο, Μηνά, Αλεξία για το ζεστό ενδιαφέρον τους·

όλους όσους με βοήθησαν με το δικό τους τρόπο, χωρίς να το αντιληφθώ, και πιστεύω ότι είναι αρκετοί.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου Ιάσωνα και Διονυσία και την αδελφή μου Κλέλια για όλα όσα έχουν κάνει για μένα.

Περίληψη

Στην εργασία αυτή, εξετάζουμε τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά των υδρολογικών λεκανών και του υδρογραφικού δικτύου της Ελλάδας, με τη βοήθεια συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιγράφουν τη δομή και τη διάταξη του υδρογραφικού δικτύου καθώς και το σχήμα, τη μορφή και το ανάγλυφο των λεκανών. Από τη διαθέσιμη υψομετρική πληροφορία, παράγουμε το υδρογραφικό δίκτυο ανά υδατικό διαμέρισμα, υπολογίζουμε τις λεκάνες απορροής και αναλύουμε κάθε λεκάνη χωριστά. Εξετάζουμε συνολικά 140 λεκάνες με εμβαδό μεγαλύτερο των 100 km² και τις κατατάσσουμε σύμφωνα με το σύστημα αρίθμησης κατά Strahler. Τα αποτελέσματα, τα πινακοποιούμε ανά υδατικό διαμέρισμα και ανά τάξη λεκάνης και τα συγκρίνουμε με αυτά που έχουν προκύψει από μια αντίστοιχη εξέταση των μεγάλων λεκανών όλης της γης. Εφαρμόζουμε ακόμα τη θεωρία του γεωμορφολογικού στιγμιαίου μοναδιαίου υδρογραφήματος, σε δύο συγκεκριμένες λεκάνες για τις οποίες έχουμε τα αντίστοιχα μοναδιαία υδρογραφήματα που έχουν προέλθει από μετρήσεις. Από τη συνολική εξέταση και τη στατιστική επεξεργασία των τιμών, εξάγουμε ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα για την υδρολογική συμπεριφορά μεμονωμένων λεκανών και των υδατικών διαμερισμάτων της χώρας.

Abstract

In this thesis we explore the geomorphometric characteristics of the system of river networks and drainage basins in Greece. We quantify several geomorphometric attributes using a geographical information system. These attributes describe the organization of river systems, as well as the shape and relief of basins. We find the drainage network and drainage basins for each water district from a digital elevation model and we examine each drainage system separately. We analyze totally 140 basins each one having an area over 100 km² and we classify them using the classification system of Strahler. Also, we tabulate the results for each water district and for each basin order and we compare these results with that derived for the large basins of the global system of rivers. In addition, we apply the theory of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph in two watersheds in Greece for which we have the unit hydrographs derived by measures. Finally, we derive some useful conclusions about the hydrologic response of the watersheds and generally for the water districts.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Περίληψη	iii
Περιεχόμενα	v
1. Εισαγωγή	1
1.1 Γενικότερο πλαίσιο.....	1
1.2 Η ιστορία	2
1.3 Ο ρόλος των συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας	3
1.4 Αντικείμενο της Διπλωματικής εργασίας.....	4
1.5 Διάρθρωση της εργασίας.....	5
2. Μεθοδολογία	7
2.1 Εκκίνηση	7
2.2 Εύρεση του υδρογραφικού δικτύου.....	10
2.2.1 Εύρεση της διεύθυνσης ροής κάθε κυττάρου	10
2.2.2 Συγκέντρωση ροής.....	11
2.2.3 Εύρεση των κυττάρων με απροσδιόριστη διεύθυνση ροής	11
2.2.4 Γέμισμα των κοιλοτήτων	12
2.2.5 Δημιουργία δικτύου ποταμών	12
2.2.6 Κατάταξη των υδατορευμάτων κατά Strahler	14
2.2.7 Μετατροπή των υδατορευμάτων σε γραμμικό θεματικό επίπεδο και υπολογισμός του μήκους κάθε τμήματος	14
2.3 Εύρεση των υπολεκανών και των λεκανών απορροής.....	15
2.3.1 Προετοιμασία για την εύρεση των υπολεκανών.....	15
2.3.2 Εύρεση των υπολεκανών	16
2.3.3 Εύρεση των λεκανών επιλέγοντας την έξοδό τους.....	16
2.3.4 Διαδικασία για την μεταφορά του εμβαδού των υπολεκανών και στα γραμμικά τμήματα	16
2.4 Ορισμός, χρησιμότητα και εύρεση των χαρακτηριστικών.....	19
2.4.1 Υδρογραφικό δίκτυο	20
2.4.2 Γεωμετρία λεκάνης	24
2.4.3 Ανάγλυφο	25
3. Αποτελέσματα	27
3.1 Γενικά	27
3.2 Υδρογραφικό δίκτυο.....	27
3.2.1 Αριθμός υδατορευμάτων.....	31
3.2.2 Εμβαδό υπολεκανών	33
3.2.3 Μήκη υδατορευμάτων	36

3.3 Υδρολογικές λεκάνες.....	37
3.3.1 Αριθμός υδρολογικών λεκανών	37
3.3.2 Εμβαδό λεκανών	41
3.3.3 Μήκος κύριου υδατορεύματος.....	41
3.3.4 Σχέση μήκους κύριου υδατορεύματος και εμβαδού λεκάνης – Δείκτης σχήματος και λόγος Schumm	41
3.3.5 Μέση κλίση – Υψομετρική καμπύλη.....	43
3.4 Ειδικά παραδείγματα	44
4. Κατάρτιση μοναδιαίου υδρογραφήματος.....	49
4.1 Βασικές υδρολογικές έννοιες	49
4.2 Γεωμορφολογικό στιγμιαίο μοναδιαίο υδρογράφημα.....	51
4.3 Εύηνος – θέση Πόρος Ρηγανίου	53
4.4 Πηνειός Θεσσαλίας – θέση Σαρακήνα	54
5. Σύνοψη και συμπεράσματα	57
5.1 Σύνοψη διαδικασίας	57
5.2 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις	58
Αναφορές	61

1. Εισαγωγή

*Αεί, ο Θεός ο μέγας γεωμετρεί
το κύκλου μήκος ίνα ορίση διαμέτρω
παρήγαγεν αριθμόν απέραντον
και ον φευ!
Ουδέποτε όλον θνητοί θα εύρωσι.¹*

N. I. Χατζηδάκης² (1872-1942)

1.1 Γενικότ ερο πλαίσιο

Απαραίτητο στοιχείο για τη διαστασιολόγηση διαφόρων υδραυλικών έργων πολιτικού μηχανικού (έργα προστασίας από υδρολογικούς κινδύνους, έργα ανάπτυξης και αξιοποίησης υδατικών πόρων) είναι οι μετρήσεις, και μάλιστα για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, της παροχής των υδατορευμάτων. Οι μετρήσεις αυτές αποτελούν και την πρωτεύουσα υδρολογική πληροφορία. Η μέτρηση όμως της παροχής ενός ποταμού είναι μια δύσκολη και δαπανηρή επιχείρηση και στην Ελλάδα αυτή η πληροφορία είναι συνήθως ελλιπής ή και ανύπαρκτη. Οι υδρολόγοι, λοιπόν, καταφεύγουν στη δευτερεύουσα πληροφορία η οποία περιλαμβάνει τις μετρήσεις των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Δεδομένου ότι οι μετρήσεις αυτές μπορούν να γίνουν πολύ πιο εύκολα και φθηνά, στην Ελλάδα υπάρχει ένα σχετικά πυκνό δίκτυο σημειακών μετρήσεων βροχής με μακρύτερες ιστορικές χρονοσειρές από αυτές της απορροής. Έτσι, καταβάλλεται προσπάθεια να συνδεθούν τα κατακρημνίσματα (αιτία) με την απορροή (αποτέλεσμα), για την εκτίμηση των παροχών σε μια λεκάνη. Την τριτεύουσα πληροφορία αποτελούν οι μετρήσεις των υπόλοιπων υδρομετεωρολογικών μεταβλητών όπως θερμοκρασία, υγρασία του αέρα, ηλιοφάνεια, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση ή και την απευθείας εκτίμηση της κύριας ή δευτερεύουσας πληροφορίας.

Μια ξεχωριστή κατηγορία πληροφοριών, που δεν εντάσσεται στη συστηματική μέτρηση των μετεωρολογικών μεταβλητών και η οποία είναι εξίσου απαραίτητη για τις υδρολογικές μελέτες και για την βελτίωση των μοντέλων βροχής-απορροής, αποτελούν

¹ Ο αριθμός των γραμμάτων κάθε λέξης, αντιστοιχεί και σε ένα από τα 23 πρώτα ψηφία του ασύμμετρου υπερβατικού αριθμού π. ($\pi = 3,14\ 15\ 92\ 65\ 35\ 89\ 79\ 32\ 38\ 46\ 26$)

² Ο Νικόλαος Χατζηδάκης υπήρξε ένας από του θεμελιωτές των Μαθηματικών στην Ελλάδα του 20ου αιώνα μαζί με τον Παναγιώτη Ζερβό και Γεώργιο Ρεμούνδο. Ένα σύντομο βιογραφικό του, βρίσκεται στη διεύθυνση: <http://gym-peir-irakl.ira.sch.gr/20cent/nea16641&m=N14&aa=1.htm>

τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά των υδρολογικών λεκανών, τα οποία χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες:

- Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά (μορφή, ανάγλυφο, υδρογραφικό δίκτυο)
- Εδαφολογικά χαρακτηριστικά (μηχανικές ιδιότητες, χημική σύσταση)
- Χρήσεις γης – Φυτοκάλυψη (είδη χλωρίδας και χωρική διάταξή της).

Η πρώτη υποκατηγορία χαρακτηριστικών είναι αυτή που θα μας απασχολήσει σε αυτήν την εργασία.

1.2 Η ιστορία

Η γεωμετρία των λεκανών και η δομή του υδρογραφικού δικτύου άρχισε να απασχολεί από πολύ νωρίς τους ερευνητές, οι οποίοι παρατηρώντας τα διάφορα φυσικά φαινόμενα θέλησαν να τα ποσοτικοποιήσουν και να τα περιγράψουν με φυσικούς νόμους. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του John Playfair ο οποίος το 1802 διατύπωσε τον εξής νόμο: “κάθε ποταμός εμφανίζεται να αποτελείται από ένα κύριο τμήμα το οποίο τροφοδοτείται από διάφορα μικρότερα τμήματα που το καθ’ ένα σχηματίζεται από μια λεκάνη ανάλογη με το μέγεθός του. Όλες οι λεκάνες συνδέονται μεταξύ τους και με την κύρια λεκάνη με μια αξιοθαύμαστη συνέχεια στο κατάλληλο υψόμετρο, ούτε πολύ ψηλά ούτε πολύ χαμηλά. Ένα γεγονός που δεν θα συνέβαινε αν οι λεκάνες αυτές δεν ήταν αποτέλεσμα ενός και μόνο ποταμού που απορρέει σε αυτές.”

Πρωτοπόρος στη μελέτη της δομής και οργάνωσης των υδατορευμάτων ήταν ο Horton (1932, 1945) ο οποίος άλλαξε την περιγραφή των υδρολογικών λεκανών και του υδρογραφικού δικτύου από την καθαρά ποιοτική και επαγωγική μελέτη, σε μια ποσοτικοποιημένη επιστήμη ικανή να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες στους υδρολόγους επιστήμονες. Σε αυτόν οφείλονται οι περίφημοι νόμοι που ισχύουν για κάθε λεκάνη (νόμος διακλαδώσεων, νόμος μηκών και νόμος εμβαδών) οι οποίοι παρουσιάζονται στο δεύτερο κεφάλαιο και από τους οποίους προέρχονται οι αντίστοιχοι λόγοι, γνωστοί πάλι ως λόγοι του Horton.

Στη συνέχεια ο Stahler (1950, 1952, 1956, 1957) μελέτησε τη μορφολογία των λεκανών, τη διάβρωση που υφίστανται σε σχέση με την κλίση τους, μελέτησε τη μορφή των υψομετρικών καμπυλών και εισήγαγε ένα σύστημα κατάταξης των υδατορευμάτων. Ο Schumm (1956) διατύπωσε τους λόγους που προκύπτουν από τους νόμους του Horton και εισήγαγε μερικά νέα γεωμορφομετρικά μεγέθη. Παράλληλα με αυτές τις εργασίες, ο Edson (1951) συνέδεσε την παροχή αιχμής και τον χρόνο για την παροχή αιχμής, με τις διαστάσεις των λεκανών και οι Taylor και Schwarz (1952), συνέδεσαν τα ίδια χαρακτηριστικά με το εμβαδόν της λεκάνης, την απόσταση της εξόδου από το κέντρο βάρους της, το μήκος και τη μέση κλίση του κύριου υδατορεύματος.

Τις δύο τελευταίες δεκαετίες, υπήρξε μια μεγάλη ενασχόληση των ερευνητών πάνω στη σύνδεση των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών με την υδρολογική απόκριση των λεκανών και συγκεκριμένα με το στιγμιαίο μοναδιαίο υδρογράφημα³ (ΣΜΥ). Πρωτοπόροι σε αυτήν την προσπάθεια υπήρξαν οι Rodriguez-Iturbe και Valdes (1979)

³ Αντίστοιχος αγγλικός όρος: Instantaneous Unit Hydrograph (IUH).

οι οποίοι χρησιμοποίησαν τους λόγους του Horton, το μήκος του κύριου υδατορεύματος και μια μέση ταχύτητα ροής για όλα τα υδατορεύματα. Τον ορισμό του ΣΜΥ καθώς και κάποιες εφαρμογές της μεθόδου θα δούμε στο τέταρτο κεφάλαιο. Χαρακτηριστικά, ο Maidment (1993, σ. 1.10), κατατάσσει την εργασία αυτή ως μια από τις σημαντικές ανακαλύψεις στην υδρολογία και στην κλίμακα των ετών από το 1930 μέχρι το 1980, όπου μπορεί κανείς να μιλήσει για ιστορία, αποτελεί το τελευταίο σκαλοπάτι κατάκτησης. Συνέχεια αυτής της εργασίας αποτέλεσε η δουλειά των Gupta *et al.*, (1980) οι οποίοι προσέγγισαν το ΣΜΥ χρησιμοποιώντας την κινηματική θεωρία, σε συνδυασμό με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά. Εργασίες στο ίδιο αντικείμενο όπου μπορεί ο αναγνώστης να ανατρέξει είναι: Wang *et al.*, (1981), Rodriguez-Iturbe *et al.*, (1982a,b), Rosso (1984), Keith Beven *et al.*, (1988), Franchini και Enda O'Connell (1996), Hall *et al.*, (2001).

1.3 Ο ρόλος των συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας

Η μελέτη των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής, έχει ενισχυθεί σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία χρόνια με την άνθιση των συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας⁴ (ΣΓΠ). Τα συστήματα αυτά, διαχειρίζονται με τη χρήση των υπολογιστών την τοπογραφική και άλλη γεωγραφικά κατανεμημένη πληροφορία. Προσομοιώνουν στοιχεία του γεωγραφικού χώρου όπως αυτά διατάσσονται πραγματικά με χρήση συντεταγμένων, και συνδέουν αυτή τη γεωγραφική πληροφορία με διάφορες άλλες βάσεις δεδομένων.

Ιδιαίτερα στον ελλαδικό χώρο και στην επιστήμη του υδραυλικού μηχανικού, τα ΣΓΠ έχουν χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση και επεξεργασία των υδρολογικών μεταβλητών, για την κατάρτιση μοναδιαίου υδρογραφήματος μιας λεκάνης (Λαζαρίδου και Μίχας, 1994), για την αποτύπωση δικτύων κοινής ωφέλειας (Νηστικάκη, 1997), για την ανάπτυξη μοντέλου υδατικού ισοζυγίου για μια λεκάνη (Μαντούδη, 2000), για την αποτύπωση της χωρικά κατανεμημένης φυσιογραφικής πληροφορίας (χρήσεις γης, φυτοκάλυψη, εδαφολογικά χαρακτηριστικά) καθώς και για την εύρεση των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών που μας ενδιαφέρουν (Κουμούλη, 2001).

Ο σκοπός της παρούσης εργασίας, θα ήταν εξαιρετικά δύσκολος να επιτευχθεί χωρίς τη βοήθεια των ΣΓΠ. Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα γεωγραφικής πληροφορίας που χρησιμοποιήθηκε είναι το ArcView 3.2 της εταιρίας ESRI μαζί με την επέκταση spatial analyst (χωρικός αναλυτής). Η επέκταση αυτή, μας επιτρέπει τη διαχείριση δεδομένων σε κανναβική μορφή. Ο κάνναβος (grid) είναι ένα επίπεδο γεωγραφικής πληροφορίας που προσομοιώνει raster δεδομένα. Τα raster δεδομένα προσομοιώνουν τη γεωγραφική μεταβλητότητα, διαιρώντας το χώρο σε διακριτά τετράγωνα που ονομάζονται κύτταρα (cells). Κάθε επίπεδο γεωγραφικής πληροφορίας, έχει και έναν πίνακα χαρακτηριστικών που το συνοδεύει. Κάθε κύτταρο λοιπόν, λαμβάνει μια τιμή (value) η οποία αντιστοιχεί και σε μια εγγραφή στον πίνακα αυτόν. Ο πίνακας των χαρακτηριστικών του θεματικού επιπέδου, μπορεί να περιέχει επιπλέον πληροφορίες που περιγράφουν τα κύτταρα.

⁴ Αντίστοιχος αγγλικός όρος: Geographical Information Systems (GIS)

Έτσι με τη χρήση των καννάβων, έχουμε τη δυνατότητα να διαμερίσουμε τις υδρολογικές λεκάνες σε κύτταρα τετραγωνικού σχήματος δεδομένης διάστασης. Η προσέγγιση αυτή των λεκανών ως διαμερισμένων σε πολλά μικρά κύτταρα, είναι γνωστή ως κατανεμημένη προσέγγιση.

Ο κάνναβος που χρησιμοποιείται σαν εκκίνηση για την εξαγωγή των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών, ανήκει στην κατηγορία των ψηφιακών μοντέλων υψομέτρων⁵. Κάθε κύτταρο του καννάβου αυτού, λαμβάνει μια ακέραια τιμή υψομέτρου. Το πρόγραμμα ArcView διαθέτει ενσωματωμένες εντολές με τις οποίες μπορούμε από τον κάνναβο υψομέτρων, να παράγουμε (σταδιακά) το υδρογραφικό δίκτυο, τις λεκάνες απορροής, καθώς και να υπολογίσουμε διάφορα χαρακτηριστικά των λεκανών όπως τη μέση κλίση τους. Για μερικές όμως διαδικασίες δεν υπάρχουν έτοιμες εντολές και γι' αυτό καταφεύγουμε στη σύνταξη προγραμμάτων στην ενσωματωμένη γλώσσα προγραμματισμού Avenue.

1.4 Αντικείμενο της Διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η εξαγωγή των βασικών γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής και του υδρογραφικού δικτύου για όλη την Ελλάδα. Η Ελλάδα, λόγω του πολυσχιδούς αναγλύφου της, χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό πολλών υδρολογικών λεκανών μικρού σχετικά μεγέθους. Για το λόγο αυτό, οι λεκάνες ομαδοποιούνται σε περιοχές. Με κριτήρια κλιματικής, υδρολογικής και φυσικής ομογένειας έχει θεσμοθετηθεί η υποδιαίρεση της χώρας σε 14 υδατικά διαμερίσματα.

Αναλύθηκε λοιπόν ξεχωριστά κάθε υδατικό διαμέρισμα εκτός από τα νησιά Αιγαίου που δεν εξετάστηκαν για λόγους που αναφέρονται στο 3^ο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα για κάθε διαμέρισμα υπολογίστηκε το υδρογραφικό δίκτυο, οι λεκάνες απορροής, και στη συνέχεια εξετάστηκε κάθε λεκάνη χωριστά. Τα χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- χαρακτηριστικά υδρογραφικού δικτύου
- χαρακτηριστικά σχήματος λεκάνης
- χαρακτηριστικά αναγλύφου

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι λόγοι του Horton (λόγος διακλαδώσεων, λόγος μηκών, λόγος εμβαδών), το μήκος και η κλίση του κύριου υδατορεύματος, η πυκνότητα και η συχνότητα του υδρογραφικού δικτύου και η μέση απόσταση από τον υδροκρίτη μέχρι το υδατόρευμα. Μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να θεωρηθούν ότι ανήκουν και στις άλλες κατηγορίες αφού τις περιγράφουν έμμεσα.

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν το εμβαδόν και η περίμετρος της λεκάνης, ο δείκτης κυκλικότητας, ο δείκτης συμπαγούς, ο δείκτης επιμήκυνσης, ο δείκτης σχήματος λεκάνης και ο λόγος Schumm. Στην τρίτη κατηγορία, εντάσσονται το μέσο υψόμετρο των λεκανών και η μέση κλίση τους. Για μερικές λεκάνες μάλιστα υπολογίστηκαν οι υψομετρικές καμπύλες.

Έναυσμα για αυτήν την εργασία στάθηκε η δουλειά των Vörösmarty *et al.*, (2000) οι οποίοι υπολόγισαν τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά των μεγάλων λεκανών

⁵ Αντίστοιχος αγγλικός όρος: Digital Elevation Model (DEM).

απορροής όλης της γης. Με διάσταση κυττάρου μισής γεωγραφικής μοίρας⁶ εξέτασαν 6 200 λεκάνες και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι λεκάνες με εμβαδόν μεγαλύτερο από 25 000 km², αναπαριστούνται με καλή ακρίβεια για αυτή τη διάσταση κυττάρου. Για την στατιστική επεξεργασία των χαρακτηριστικών, χώρισαν τη γη σε έξι διαμερίσματα (ανά ήπειρο) και εξέτασαν χωριστά τους μέσους όρους και τις διασπορές των τιμών τους για κάθε διαμέρισμα. Στην παρούσα εργασία, έχει ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία επεξεργασίας των αποτελεσμάτων ώστε να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους.

Σημειώνεται ότι στην Ελλάδα, έχει πραγματοποιηθεί μια συναφής εργασία η οποία είχε ως αντικείμενο τη μελέτη των γεωμορφολογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών των λεκανών της χώρας, με σκοπό τον επαναπροσδιορισμό των υδατικών διαμερισμάτων από 14 σε 7 (Κουμούλη, 2001). Η εργασία όμως αυτή, δεν επεκτάθηκε σε ορισμένα χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου (λόγοι Horton).

Τα στοιχεία λοιπόν που υπολογίζονται πρώτη φορά για τις ελληνικές λεκάνες είναι οι λόγοι του Horton οι οποίοι έχουν συσχετισθεί όπως αναφέραμε με το ΣΜΥ μιας λεκάνης. Υπολογίζεται ακόμα η σχέση που συνδέει το μήκος κύριου υδατορεύματος με το εμβαδό της λεκάνης στην οποία απορρέει (δύο μεγέθη με μεγάλη συσχέτιση), εφαρμόζεται η μέθοδος του γεωμορφολογικού στιγμιαίου μοναδιαίου υδρογραφήματος⁷ (ΓΣΜΥ) σε δύο λεκάνες και συγκρίνεται, μετά από κατάλληλες αναγωγές, με τα αντίστοιχα μοναδιαία υδρογραφήματα των λεκανών που προέκυψαν από μετρήσεις.

1.5 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται συνολικά από πέντε κεφάλαια, τις αναφορές και τρία παραρτήματα.

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εύρεση των χαρακτηριστικών. Παρουσιάζεται βήμα-βήμα η διαδικασία με την οποία υπολογίστηκαν το υδρογραφικό δίκτυο και οι λεκάνες απορροής. Ορίζονται τα χαρακτηριστικά που μελετήθηκαν, περιγράφεται ο τρόπος εύρεσής τους καθώς και η χρησιμότητά τους.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν ύστερα από στατιστική επεξεργασία των χαρακτηριστικών. Υπολογίζονται οι μέσες τιμές τους ανά υδατικό διαμέρισμα, ανά τάξη λεκάνης και συνολικά: παρουσιάζονται οι σχέσεις που συνδέουν μερικά από αυτά και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που εξήγαγαν οι Vörösmarty *et al.*, (2000) για όλη τη γη. Παρατηρείται μια μεγάλη ομοιότητα σε παγκόσμια και τοπική κλίμακα στις τιμές των λόγων Horton και επαληθεύονται για τις ελληνικές λεκάνες οι ομώνυμοι νόμοι. Ακόμα, εξετάζονται κάποιες αντιπροσωπευτικές λεκάνες των οποίων τα χαρακτηριστικά συγκρίνονται και γίνονται μερικές χρήσιμες διαπιστώσεις.

Στο κεφάλαιο 4 εφαρμόζεται η μεθοδολογία που εισήγαγε ο Rosso (1984) για την εύρεση του ΓΣΜΥ σε δύο λεκάνες της Ελλάδας, όπου έχουμε δύο αντίστοιχα μοναδιαία υδρογραφήματα που έχουν προέλθει από μετρήσεις. Η πρώτη, είναι μια υπολεκάνη του Ευήνου ανάντη της θέσης Πόρος Ρηγαίου και η δεύτερη, μια υπολεκάνη του Πηνειού Θεσσαλίας ανάντη της θέσης Σαρακίνα.

⁶ Αντιστοιχεί σε εμβαδόν 2 176 km² για γεωγραφικό πλάτος 45° και 3 091 km² στον ισημερινό.

⁷ Αντίστοιχος αγγλικός όρος: Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH).

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα σημεία που συνοψίζουν την εργασία και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη αυτή.

Στο Παράρτημα Α' απεικονίζονται τα υδατικά διαμερίσματα της χώρας με τις λεκάνες απορροής, το υδρογραφικό δίκτυο και τις ονομασίες των κυριοτέρων υδατορευμάτων.

Στο Παράρτημα Β' περιέχονται συγκεντρωτικά για όλη την Ελλάδα τα χαρακτηριστικά των λεκανών που υπολογίστηκαν, καθώς και τα επιμέρους στοιχεία κάθε λεκάνης που χρησίμευσαν για την εξαγωγή των λόγων του Horton.

Στο Παράρτημα Γ' παραθέτονται τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία, με κάποιες επεξηγήσεις για τη σύνταξη και τη λειτουργία των εντολών.

2. Μεθοδολογία

2.1 Εκκίνηση

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε ένα έτοιμο ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων για όλη την Ελλάδα. Το υπόβαθρο αυτό, προέρχεται από το διαδίκτυο στην διεύθυνση των αμερικάνων Γεωλόγων¹, όπου υπάρχει κάτι αντίστοιχο για όλη τη γη. Το υπόβαθρο αποτελείται από τετραγωνικά κύτταρα που το κάθε ένα παίρνει μια ακέραια τιμή υψομέτρου (raster αρχείο). Το μέγεθος των κυττάρων είναι 250 μέτρα. Το μοντέλο αυτό, χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με ψηφιοποιημένα δεδομένα από διάφορα ερευνητικά προγράμματα και συγκεκριμένα από το έργο: “Ταξινόμηση ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των υδατικών πόρων με βάση τις αποδελτιωμένες μελέτες του ΥΒΕΤ, με χρήση συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας (1996)”. Τα δεδομένα που λήφθηκαν υπόψη είναι:

1. Οι *ισοϋψείς καμπύλες* οι οποίες δίνονται με ισοδιάσταση των 100 μέτρων και όπου η κλίση του εδάφους είναι μικρότερη από 5%, με ισοδιάσταση των 20 μέτρων.
2. Η *φυσική ακτογραμμή* η οποία μας χρησίμευσε ως ισοϋψή καμπύλη με μηδενικό υψόμετρο.
3. Οι *φυσικές κορυφές* ως σημεία με γνωστή τιμή υψομέτρου.
4. Τα *φυσικά βυθίσματα* ως σημεία που έχουν το χαμηλότερο υψόμετρο από τη γειτονική τους περιοχή.
5. Τα *φυσικά ποτάμια* με τις ασυνέχειες που έχουν λόγω ελλιπούς απεικόνισης στους χάρτες.
6. Οι *φυσικές λίμνες* όπου απεικονίζονται.
7. Το *φυσικό σύνορο – υδροκρίτη* της περιοχής που μελετάται, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το όριο κάθε υδατικού διαμερίσματος.

Ο γεωγραφικός χώρος, απεικονίζεται με επίπεδα πληροφορίας καθένα από τα οποία αποτελεί μια ξεχωριστή γεωγραφική ενότητα μέσα στο σύστημα. Οι ενότητες αυτές ονομάζονται coverages. Οι βασικές γεωγραφικές οντότητες με τις οποίες απεικονίζονται τα επίπεδα πληροφορίας είναι τα σημεία (points), οι γραμμές (lines) και τα πολύγωνα (polygons). Για παράδειγμα, τα θεματικά επίπεδα που απεικονίζουν τις ισοϋψείς καμπύλες και τα ποτάμια αποτελούνται από γραμμές: αυτά που απεικονίζουν την ακτο-

¹ Η διεύθυνση των αμερικάνων Γεωλόγων είναι: <http://mcmcweb.er.usgs.gov/drg/>

γραμμή, τις λίμνες και το φυσικό σύνορο από πολύγωνα· αυτά που απεικονίζουν τις κορυφές και τα βυθίσματα από σημεία. Κάθε επίπεδο πληροφορίας, περιέχει λοιπόν μια μόνο μορφή γεωγραφικών οντοτήτων.

Κάθε γεωγραφική οντότητα, συνοδεύεται από έναν πίνακα χαρακτηριστικών (attribute data). Ο πίνακας αυτός αποτελείται από πεδία (fields) που αποτελούν τις στήλες του και από στοιχεία (records) που αποτελούν τις γραμμές του. Στοιχεία ενός πίνακα, καλούνται τα κύτταρα ή οι ομάδες κυττάρων που έχουν την ίδια τιμή (value) και κοινά τα υπόλοιπα πεδία. Τα στοιχεία τοποθετούνται σε κατακόρυφη στήλη με αύξουσα σειρά.

Στην έκδοση του ArcInfo 8 περιέχεται ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, μέσα στο “ArcInfo Workstation”, το *Arc*, το οποίο έχει την δυνατότητα να επεξεργάζεται διάφορα θεματικά επίπεδα με ποικίλους αλγορίθμους. Η σύνταξη των εντολών γίνεται σε περιβάλλον command line (γραμμή εντολών). Μια από αυτές τις εντολές είναι και η *Topogrid*. Αυτή, μας δίνει τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων (κάνναβο υψομέτρων), δίνοντας ως στοιχεία εισόδου τα παραπάνω θεματικά επίπεδα. Ο αλγόριθμος έχει εισαχθεί από τον Hutchinson (1989) και εκτελεί πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση λαμβάνοντας υπόψη του όλα τα εισαγόμενα στοιχεία. Μια απλή περιγραφή της σύνταξης της εντολής δίνεται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Σύνταξη της εντολής Topogrid και εισαγωγή των δεδομένων.

Εντολες	Λειτουργία
<i>w</i> u:\paspallis\epexergasia	ορισμός περιοχής εργασίας (working directory) του φακέλου: epexergasia που βρίσκεται στο δίσκο u:\.
<i>Topogrid</i> dem250 250	dem250 είναι το όνομα του καννάβου που θα παραχθεί και θα αποθηκευτεί στον ενεργό φάκελο και το 250 είναι η διάσταση του τετραγωνικού κυττάρου που θέλουμε να παραχθεί (σε μέτρα).
<i>Contour</i> u:\paspallis\contour z	εισαγωγή του θεματικού επιπέδου των ισοϋψών (contour) και προσδιορισμός του πεδίου με τις τιμές των υψομέτρων τους (πεδίο με όνομα z στο πίνακα των χαρακτηριστικών του θεματικού επιπέδου).
<i>Contour</i> u:\paspallis\coastline z	εισαγωγή του θεματικού επιπέδου της ακτογραμμής και ορισμός του πεδίου με τις τιμές των μηδενικών υψομέτρων.
<i>Point</i> u:\paspallis\elevpoints z	εισαγωγή του θεματικού επιπέδου των σημειακών κορυφών και καθορισμός του πεδίου με τις τιμές των υψομέτρων.
<i>Sink</i> u:\paspallis\sinkpoints\ z	εισαγωγή των φυσικών βυθισμάτων.
<i>Stream</i> u:\paspallis\rivers	εισαγωγή των ποταμών.
<i>Lake</i> u:\paspallis\lakes	εισαγωγή των λιμνών.
<i>End</i>	ξεκινάει ο υπολογισμός.

Στη χρήση αυτού του αλγορίθμου, τα δεδομένα που εισάγονται έχουν κάποιες ιδιαιτερότητες και συγκεκριμένα:

1. Σε μερικά θεματικά επίπεδα, για παράδειγμα στο επίπεδο των κορυφών, στο πεδίο των υψομέτρων, εμφανίζεται για μερικά σημεία η τιμή: 29 999 m που είναι μια μη φυσική τιμή. Τα σημεία αυτά υπάρχουν αλλά δεν είναι γνωστό το υψόμετρό τους και γι' αυτό δεν πρέπει να ληφθούν υπόψη. Χρειάζεται λοιπόν πριν από την εκτέλεση της εντολής `topogrid` να απαλειφθούν αυτές οι τιμές από τα συγκεκριμένα επίπεδα. Ένας τρόπος για αυτήν την απαλειφή είναι ο εξής: Επιλέγουμε τα σημεία αυτά, αντιστρέφουμε την επιλογή και μετατρέπουμε το θεματικό επίπεδο σε `shapfile`². Θα μετατραπούν μόνο τα επιλεγμένα σημεία. Στη συνέχεια πρέπει το καινούργιο `shapfile` να μετατραπεί σε θεματικό επίπεδο – coverage ώστε να μπορούμε να το επεξεργαστούμε με την εντολή `topogrid`. Η μετατροπή αυτή γίνεται μέσα από το περιβάλλον *Arc* ως εξής: Αφού βρεθούμε στο `directory` που είναι αποθηκευμένο το `shapfile` εισάγουμε την εντολή:

```
Shapearc elevpnew elevpn point
```

όπου `elevpnew` είναι το όνομα του `shapfile` που δημιουργήσαμε, `elevpn` είναι το όνομα του καινούργιου coverage που θέλουμε να δημιουργηθεί και με το `point` καθορίζουμε το είδος του θέματος (σημεία).

2. Σε μερικά υδατικά διαμερίσματα, το θεματικό επίπεδο του φυσικού συνόρου έχει κάποιες ατέλειες. Συγκεκριμένα, στα υδατικά διαμερίσματα της Κρήτης και του Έβρου λείπει από μία λεκάνη απορροής. Για να διορθώσουμε λοιπόν τα όρια αυτά εργαζόμαστε ως εξής: μετατρέπουμε το θεματικό επίπεδο των λεκανών απορροής σε `shapfile`. Στο νέο θεματικό επίπεδο, δημιουργούμε ένα καινούργιο πεδίο (`field`) και δίνουμε μία τιμή ίδια για όλα τα στοιχεία του θέματος. Στη συνέχεια από το μενού `view`, επιλέγοντας `geoprocessing wizard` και το εργαλείο `merge` συνενώνουμε τα στοιχεία του θέματός μας, όπου εδώ είναι οι λεκάνες απορροής, με βάση την τιμή που έχουν στο πεδίο που δημιουργήσαμε. Αφού σε όλες τις λεκάνες δώσαμε την ίδια τιμή, θα δημιουργηθεί ένα νέο θεματικό επίπεδο με ένα μόνο στοιχείο που θα απεικονίζει το σύνολο των λεκανών. Δηλαδή θα έχουμε ένα πολύγωνο που θα συμπίπτει με το σύνορο του διαμερίσματος. Για να χρησιμοποιήσουμε το καινούργιο `shapfile` με την εντολή `topogrid` πρέπει να το μετατρέψουμε σε coverage. Όπως εργαστήκαμε προηγουμένως, αφού βρεθούμε στο `directory` που είναι αποθηκευμένο το `shapfile` μας, εισάγουμε τις εντολές:

```
Shapearc boundary bndnew
```

όπου `boundary` είναι το όνομα του `shapfile` και `bndnew` το όνομα του coverage που θέλουμε να δημιουργήσουμε, και στη συνέχεια:

```
Clean bndnew
```

για να δημιουργηθεί (κτισθεί) το καινούργιο coverage.

Αφού παραχθεί ο κάρναβος υψομέτρων, μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία εύρεσης των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών.

² Το `shapfile` είναι ένα επίπεδο πληροφορίας και μπορεί να αποτελείται από σημεία, γραμμές ή πολύγωνα. Είναι κάτι αντίστοιχο με το θεματικό επίπεδο coverage αλλά περιέχει λιγότερες πληροφορίες και στερείται γεωαναφοράς.

2.2 Εύρεση του υδρογραφικού δικτύου

Με τον όρο υδρογραφικό δίκτυο, περιγράφουμε το σύνολο των φυσικών υδατορευμάτων σε μια μεριοχή. Ο όρος φυσικά υδατορεύματα, περιλαμβάνει όλο το φάσμα που μπορεί να συναντήσει κανείς στη φύση, από τα πιο μικρά ρυάκια μέχρι τον πιο μεγάλο ποταμό που είναι ο Αμαζόνιος. Το σύνολο των υδατορευμάτων σε μια λεκάνη αποτελεί το υδρογραφικό της δίκτυο.

Το πρόγραμμα ArcView, διαθέτει ενσωματωμένες εντολές που επιτρέπουν την χάραξη του υδρογραφικού δικτύου, την εύρεση των λεκανών απορροής, καθώς και την εξαγωγή ορισμένων μορφολογικών χαρακτηριστικών των λεκανών. Οι εντολές αυτές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσα σε προγράμματα που συντάσσονται στην γλώσσα προγραμματισμού Avenue³ ή να συνταχθούν απευθείας στο εργαλείο MapCalculator.

2.2.1 Εύρεση της διεύθυνσης ροής κάθε κυττάρου

Το πρώτο βήμα για την εύρεση του υδρογραφικού δικτύου είναι ο καθορισμός της διεύθυνσης απορροής κάθε κυττάρου. Η σύνταξη της εντολής είναι:

$$\text{FlowGrid} = \text{ElevGrid}.\text{FlowDirection}(\text{False})^4$$

Το FlowGrid είναι ο κάνναβος της διεύθυνσης ροής, το ElevGrid είναι ο κάνναβος των υψομέτρων, και με την επιλογή False, η απορροή των κυττάρων που βρίσκονται στο σύνορο (στην περιφέρεια) διοχετευτεί στην διεύθυνση με την μεγαλύτερη θετική κλίση (μπορεί και στο εσωτερικό της επιφάνειας). Αν η υψομετρική διαφορά είναι μηδενική ή αρνητική, τότε η απορροή θα διοχετευτεί έξω από την επιφάνειά. Αντίθετα, με την επιλογή True, όλα τα περιμετρικά κύτταρα απορρέουν έξω από την επιφάνεια του καννάβου.

Η διαδικασία έχει ως εξής: Για κάθε κύτταρο ελέγχεται η κλίση που δημιουργεί με τα οκτώ γειτονικά του και επιλέγεται η διεύθυνση με τη μέγιστη κλίση. Η κλίση μεταξύ δύο κυττάρων υπολογίζεται από το λόγο της μεταβολής του υψομέτρου τους με την οριζόντια απόσταση των κέντρων των δύο κυττάρων. Δηλαδή αν για δύο κύτταρα, οριζόντια ή κατακόρυφα, η απόστασή τους είναι ίση με τη μονάδα, για δυο κύτταρα διαγώνια η απόστασή τους είναι ίση με $2^{1/2}$. Ανάλογα λοιπόν με την διεύθυνση ροής που επιλέγεται, δίδεται στο κύτταρο και μια ακέραια τιμή. Προς τα δεξιά: 1, προς κάτω-δεξιά: 2, προς κάτω: 4, προς κάτω-αριστερά: 8, προς αριστερά: 16, προς πάνω-αριστερά: 32, προς πάνω: 64 και προς πάνω-δεξιά: 128. Σε περίπτωση που έχουμε ίδια κλίση προς δύο ή περισσότερες κατευθύνσεις, η διεύθυνση απορροής εξάγεται με έναν αλγόριθμο ο οποίος λαμβάνει υπόψη του την διεύθυνση απορροής των γειτονιών κυττάρων και δίνει στο εξεταζόμενο κύτταρο την πιο πιθανή από αυτές.

Τα κύτταρα τα οποία έχουν υψόμετρο μικρότερο από όλα τα γειτονικά τους, λαμβάνουν σαν τιμή το ελάχιστο γειτονικό υψόμετρο και έτσι η ροή μπορεί να διοχετευτεί και να συνεχίσει ομαλά την πορεία της. Αν όμως υπάρχουν δύο ή περισσότερα γειτονικά κύτταρα τα οποία έχουν το ίδιο ελάχιστο υψόμετρο, το βυθισμένο κύτταρο κρατάει την

³ Η γλώσσα Avenue, είναι μια γλώσσα ενσωματωμένη στο ArcView 3.2 και στην καινούργια έκδοσή του έχει αντικατασταθεί από τη Visual Basic.

⁴ Η σύνταξη της εντολής στο εργαλείο Map Calculator είναι: `ElevGrid.FlowDirection(False)` χωρίς δηλαδή το όρισμα (=). Ομοίως και για τις υπόλοιπες εντολές που θα δούμε στη συνέχεια.

αρχική τιμή υψομέτρου του και η διεύθυνση απορροής δεν προσδιορίζεται. Η διαφορετική αντιμετώπιση που λαμβάνει η πρώτη περίπτωση είναι για να φιλτράρονται μερικά βυθισμένα κύτταρα που ίσως αποτελούν θόρυβο (όχι σωστά αλλά πλασματικά).

2.2.2 Συγκέντρωση ροής

Το επόμενο βήμα, αφού προσδιοριστεί ο κάρναβος διεύθυνσης της απορροής, είναι η εύρεση του αριθμού των ανάντη κυττάρων τα οποία συμβάλλουν με την απορροή τους σε κάθε κύτταρο. Η σύνταξη της εντολής είναι:

```
AccumGrid = FlowGrid.FlowAccumulation(nil)
```

AccumGrid είναι ο κάρναβος συγκέντρωσης ροής, FlowGrid είναι ο κάρναβος διεύθυνσης ροής και με την επιλογή nil, δίνουμε ως κάρναβο βάρους ένα μηδενικό κάρναβο. Θα μπορούσαμε για παράδειγμα να δώσουμε έναν κάρναβο με τα ύψη βροχής και σαν αποτέλεσμα να πάρουμε την απορροή που θα προέκυπτε από το συγκεκριμένο επεισόδιο. Τα κύτταρα που έχουν απροσδιόριστη διεύθυνση απορροής, μπορούν να λάβουν την απορροή των ανάντη κυττάρων αλλά δεν μπορούν να τη διοχετεύσουν πουθενά. Αυτά δε που λαμβάνουν την τιμή μηδέν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση του υδροκρίτη.

2.2.3 Εύρεση κυττάρων με απροσδιόριστη διεύθυνση ροής

Τα κύτταρα τα οποία έχουν απροσδιόριστη διεύθυνση ροής ονομάζονται sinks. Όπως είδαμε στην παράγραφο 2.2.1 δεν χαρακτηρίζονται όλα τα κύτταρα που αποτελούν μέρη κοιλοτήτων ως sinks μα μόνο μερικά από αυτά. Η σύνταξη της εντολής η οποία τα ξεχωρίζει είναι:

```
SinkGrid = FlowGrid.Sink
```

Το SinkGrid είναι ο κάρναβος που περιέχει αυτά τα κύτταρα, και το FlowGrid είναι ο κάρναβος διεύθυνσης ροής που δημιουργήσαμε προηγουμένως. Τα κύτταρα αυτά, μπορεί να είναι φυσικές κοιλοότητες ή να δημιουργούνται από λανθασμένα δεδομένα.

Σε περίπτωση που ένα κύτταρο έχει απροσδιόριστη διεύθυνση ροής λαμβάνει ως ακέραια τιμή, κατά την εκτέλεση της εντολής FlowDirection, το άθροισμα των τιμών που αντιστοιχούν σε κάθε πιθανή διεύθυνση. Δηλαδή αν η κλίση (αρνητική πάντα) προς τα δεξιά και προς τα αριστερά είναι ίδια, η τιμή που θα πάρει το κύτταρο είναι $1 + 16 = 17$. Αυτό έχει ως συνέπεια ότι η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει ένα κύτταρο είναι 255, που προκύπτει από το άθροισμα των τιμών όλων των διευθύνσεων. Η γεωμετρική αύξηση λοιπόν των ακέραιων τιμών που λαμβάνουν τα κύτταρα, όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, επιτρέπει την μονοσήμαντη σήμανσή τους, οποιοσδήποτε και αν είναι ο συνδυασμός των πιθανών διευθύνσεών τους.

Παρατηρήθηκε ότι τα κύτταρα με τιμή 255 είναι κατά πολύ περισσότερα από τα υπόλοιπα με απροσδιόριστη διεύθυνση ροής. Για την Πελοπόννησο συγκεκριμένα, ο αριθμός των κυττάρων με απροσδιόριστη ροής είναι 3 190 σε σύνολο 345 625, ένα ποσοστό 0.923%. Από αυτά, τα 1 738 έχουν την τιμή 255, ποσοστό 54.5%. Το σύνολο των κυττάρων που αποτελούν μέρη κοιλοτήτων είναι 3 740, ένα ποσοστό 1.08%. Δηλαδή έχουμε και 550 κύτταρα τα οποία αποτελούν μέρη κοιλοτήτων χωρίς να έχουν απροσδιόριστη ροή.

2.2.4 Γέμισμα των κοιλοτήτων

Όπως διαπιστώσαμε προηγουμένως, μερικά βυθίσματα σταματούν τη ομαλή ροή ενός ποταμού. Αυτό που θέλουμε λοιπόν είναι να αυξήσουμε το υψόμετρο αυτών των κυττάρων μέχρι την ελάχιστη γειτονική τιμή υψομέτρου ώστε η ροή να μπορεί να συνεχίσει την πορεία της. Για να το επιτύχουμε αυτό χρησιμοποιούμε την εντολή Fill η οποία δεν μπορεί να συνταχθεί απευθείας στο εργαλείο Map Calculator αλλά πρέπει να συμπεριληφθεί σε έναν ολοκληρωμένο κώδικα.

Το γέμισμα όμως αυτό των βυθισμάτων, μπορεί να δημιουργήσει καινούργιες κοιλοότητες που και αυτές με τη σειρά τους πρέπει να γεμίσουν. Έτσι γίνεται επανάληψη του πρώτου και τρίτου βήματος (παρ. 2.2.1 και 2.2.3) στο καινούργιο πλέον μοντέλο εδάφους, αυτό που προέκυψε από το βήμα 4 (παρ. 2.2.4). Εδώ πρέπει να προσεχθεί πότε θα σταματήσει η επανάληψη έτσι ώστε να προκύψουν ποτάμια σύμφωνα με τις λεκάνες απορροής που έχουμε (λεκάνες που έχουν σχεδιαστεί με το χέρι). Αν, για παράδειγμα, σε ένα υδατικό διαμέρισμα υπάρχουν εσωτερικές λεκάνες⁵ απορροής, με μια πλήρη επαναληπτική διαδικασία όλες οι εσωτερικές λεκάνες θα απορρεύσουν στην θάλασσα, πράγμα ανεπιθύμητο. Εδώ, φαίνεται μια αδυναμία του προγράμματος το οποίο δεν πρέπει να θεωρηθείται πανάκεια για την εύρεση των λεκανών απορροής. Απαραίτητη είναι η γνώση των πραγματικών λεκανών καθώς και των φυσικών βυθισμάτων.

Με μια πλήρη επαναληπτική διαδικασία, στον καινούργιο υπολογισμό της διεύθυνσης ροής οι τιμές που λαμβάνουν τα κύτταρα είναι: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 και 128. Δεν υπάρχουν δηλαδή κύτταρα με απροσδιόριστη ροή. Για το διαμέρισμα της Βόρειας Πελοποννήσου, χρειάστηκαν τρεις επαναληπτικές διαδικασίες για την πλήρη εξαίλιση των κυττάρων αυτών. Οι διαφορές του αρχικού υποβάθρου με το τελευταίο μπορούν να φανούν με αφαίρεση των δύο επιπέδων με το εργαλείο Map Calculator. Για την βόρεια Πελοπόννησο, η μέγιστη διαφορά υψομέτρου που παρατηρείται, είναι 323 μέτρα και εμφανίζεται στην κλειστή λεκάνη Φενεού, που βρίσκεται κοντά στη λίμνη της Στυμφαλίας. Η κλειστή αυτή λεκάνη, μελετήθηκε ύστερα από μία επαναληπτική διαδικασία. Αντίθετα, για την εύρεση του υδρογραφικού δικτύου στη λεκάνη του Βουραϊκού (Βορεια Πελοπόννησος), χρειάστηκαν τρεις επαναλήψεις ώστε το κύριο υδατόρευμα να εκβάλλει στη θάλασσα.

2.2.5 Δημιουργία δικτύου ποταμών

Για να δημιουργηθεί το υδρογραφικό δίκτυο, πρέπει να ορισθεί ο αριθμός των κυττάρων που χρειάζεται να συμβάλλουν με την απορροή τους, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ο πρώτος υπολογίσιμος κλάδος του δικτύου. Αυτόν τον αριθμό τον ονομάζουμε κατώφλι (threshold). Συντάσσουμε λοιπόν έναν κώδικα, με τον οποίο ζητάμε όσα από τα κύτταρα του καννάβου συγκέντρωσης έχουν τιμή μεγαλύτερη ή ίση από το κατώφλι που θέσαμε, να πάρουν την τιμή 1 και όλα τα υπόλοιπα να χαρακτηριστούν ως no data. Έτσι

⁵ Ο όρος εσωτερικές λεκάνες, χρησιμοποιείται για τις περιοχές όπου παρατηρείται το φαινόμενο του ενδορείσιμου. Υπάρχει δηλαδή μέσα σε μια ευρύτερη λεκάνη ένας εσωτερικός υδροκρίτης και το νερό απορρέει στο βαθύτερο σημείο αυτής της λεκάνης σχηματίζοντας μια λίμνη ή ένα έλος ή/και συνεχίζει την πορεία του υπόγεια, τροφοδοτώντας τους υπόγειους υδροφορείς.

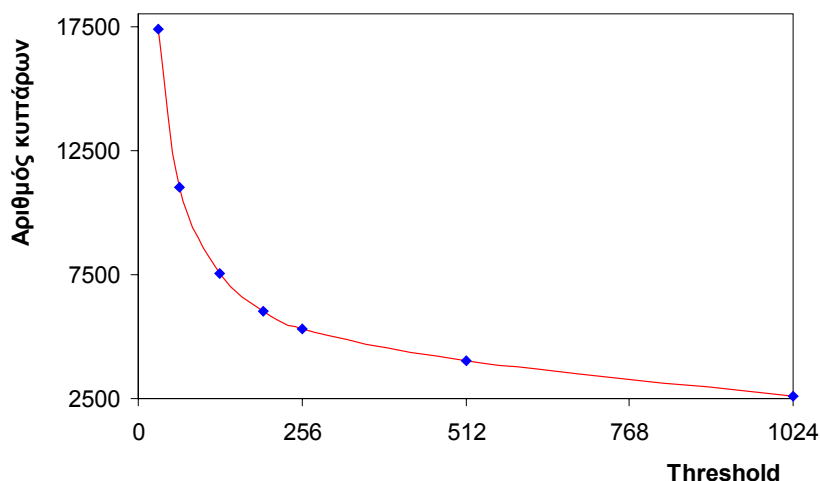
δημιουργείται ένας νέος κάρναβος που η μορφή του απεικονίζει το σύστημα του υδρογραφικού δικτύου.

Το μέγεθος του threshold φάνηκε να μην επηρεάζει ουσιαστικά τα χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου. Επιλέχθηκε η τιμή 256 με τα εξής κριτήρια:

1. να προκύπτουν αρκετές λεκάνες από αυτές που μας ενδιαφέρουν –δηλαδή με εμβαδόν πάνω από 100 km^2 – τάξης 3 και πάνω
2. να εμφανίζονται τα ποτάμια που διακρίνονται σε χάρτες κλίμακας 1 : 500 000.

Για την τάξη των ποταμών και αντίστοιχα των λεκανών θα γίνει λόγος στην επόμενη παράγραφο. Η χρησιμότητα του πρώτου περιορισμού θα φανεί στον ορισμό των λόγων Horton. Έτσι θεωρούμε ότι τα κύτταρα στα οποία απορρέει έκταση από 16 km^2 και πάνω⁶, αποτελούν τμήματα ποταμού.

Εξάλλου, σχεδιάζοντας τη γραφική παράσταση της τιμής threshold που θέτουμε, συναρτήσει του αριθμού των κυττάρων που λαμβάνουν την τιμή 1, δηλαδή των κυττάρων που αποτελούν το υδρογραφικό δίκτυο, προκύπτει μια καμπύλη υπερβολικού σχήματος που φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Σαν εύλογες τιμές κατωφλιού, για ικανοποιητικό συμβιβασμό μεταξύ ακρίβειας και υπολογισμών, προκύπτει το διάστημα μεταξύ 200 και 250 όπου βρίσκεται πολύ κοντά η τιμή 256 που επιλέγη.



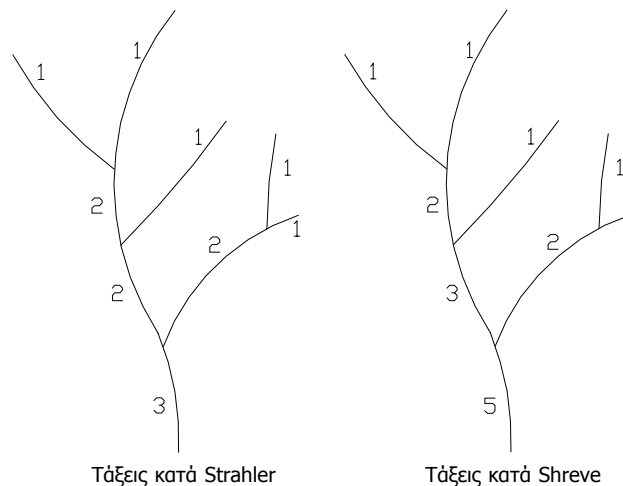
Σχήμα 2.1: Σχέση threshold με αριθμό κυττάρων που αποτελούν το υδρογραφικό δίκτυο.

Εδώ να παρατηρηθεί ότι μπορούμε να έχουμε την εικόνα της μορφής του υδρογραφικού δικτύου –ώστε να επιλέξουμε την τιμή του κατωφλιού που μας ικανοποιεί ή να σταματήσουμε την επανάληψη του γεμίσματος των βυθισμάτων– από τον κάρναβο συγκέντρωσης ροής, πριν ακόμα τεθεί κάποιο κατώφλι. Από την καρτέλα του θέματος, έχουμε τη χρωματική διαφοροποίηση των κυττάρων ανάλογα με την κλάση που βρίσκονται. Μπορούμε λοιπόν να μεταβάλλουμε τα όρια των κλάσεων και έτσι να εμφανιστούν τα κύτταρα με τις τιμές που μας ενδιαφέρουν.

⁶ Το 16 προκύπτει από το γινόμενο $256 \times 0,0625 \text{ km}^2$ όπου 0,0625 είναι το εμβαδόν ενός κυττάρου διάστασης 250 m.

2.2.6 Κατάταξη των υδατορευμάτων κατά Strahler

Υπάρχουν γενικά δύο συστήματα κατάταξης των τμημάτων ενός ποταμού. Το σύστημα κατά Shreve και το σύστημα κατά Strahler. Τα αρχικά ανάντη τμήματα ενός ποταμού καλούνται τάξης 1. Σύμφωνα με το πρώτο σύστημα, όταν δύο κλάδοι τάξης μ και ν αντίστοιχα συναντώνται, δημιουργείται ένας κλάδος τάξης $\mu + \nu$. Σύμφωνα με το δεύτερο, διατηρείται η μεγαλύτερη τάξη των δύο τμημάτων και μόνο όταν συμβάλλουν δύο τμήματα ίδια τάξης, έχουμε αύξηση του νέου τμήματος κατά μία τάξη. Σχηματικά τα δύο συστήματα φαίνονται στο Σχήμα 2.2



Σχήμα 2.2: Τρόπος κατάταξης των υδατορευμάτων κατά Strahler και κατά Shreve.

Στην εργασία αυτή, επιλέγη το σύστημα κατάταξης κατά Strahler διότι μας επιτρέπει να εξαγάγουμε τους λόγους του Horton όπως θα δούμε στη συνέχεια. Η σύνταξη της εντολής με την οποία γίνεται η κατάταξη είναι:

```
OrderGrid = StreamGrid.StreamOrder(FlowGrid, False)
```

OrderGrid είναι ο καινούργιος κάρναβος όπου κάθε κύτταρό του έχει λάβει την τιμή της τάξης του τμήματος του οποίου ανήκει, StreamGrid είναι ο κάρναβος του δικτύου των ποταμών όπως προέκυψε από το βήμα 5 (παρ. 2.2.5), FlowGrid ο κάρναβος της διεύθυνσης ροής, και με την επιλογή false η κατάταξη γίνεται κατά Strahler. Αντίστοιχα με την επιλογή true η κατάταξη θα γινόταν κατά Shreve.

Η τάξη του τμήματος εξόδου ενός υδατορεύματος, που είναι και η μεγαλύτερη δυνατή για το συγκεκριμένο δίκτυο, χαρακτηρίζει την τάξη του υδατορεύματος καθώς και την τάξη της λεκάνης.

2.2.7 Μετατροπή των υδατορευμάτων σε γραμμικό θεματικό επίπεδο και υπολογισμός του μήκους κάθε τμήματος

Το δίκτυο των ποταμών που παράγεται στο βήμα 5, είναι σε μορφή κάρναβου (grid). Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τα μήκη των τμημάτων καθώς και να το επεξεργαστούμε κατάλληλα, πρέπει να το μετατρέψουμε σε γραμμικό θεματικό επίπεδο. Δηλαδή, το σύνολο των κυττάρων που αποτελούν ένα τμήμα ενός ποταμού πρέπει να

αντικατασταθεί από ένα γραμμικό τμήμα. Το τμήμα αυτό, μπορεί να επιλεγεί να ενώνει τα κέντρα των κυττάρων ή να περνά κοντά από αυτά, με έναν αλγόριθμο ομαλοποίησης, εξομαλύνοντας τις γωνίες που δημιουργούνται. Η σύνταξη της εντολής που εκτελεί αυτή τη μετατροπή είναι:

```
theFTab = c.StreamToPolyLineFtab(a, FlowGrid,
    True, prj.MakeNull)
```

όπου *c* είναι ο κάρναβος του καταταγμένου υδρογραφικού δικτύου (παρ. 2.2.6), *a* το αρχείο που θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα, *FlowGrid* είναι ο κάρναβος της διεύθυνσης ροής. Με την επιλογή *True* εφαρμόζεται ο αλγόριθμος ομαλοποίησης ενώ με την επιλογή *False* ενώνονται απλά τα κέντρα των κυττάρων. Τέλος με το *prj.MakeNull* επιλέγουμε να εμφανιστεί το αποτέλεσμα στο τωρινό *project*.

Καθώς δημιουργείται το γραμμικό θεματικό επίπεδο, μεταφέρονται και οι τάξεις των τμημάτων των ποταμών από τα κύτταρα στα γραμμικά τμήματα. Στη συνέχεια μπορούμε να υπολογίσουμε τα μήκη των τμημάτων από κόμβο σε κόμβο. Κόμβος καλείται το σημείο τομής δύο ή περισσότερων τμημάτων, η αρχή ή το πέρας ενός τμήματος. Για τον υπολογισμό του μήκους συντάσσουμε κώδικα στη γλώσσα Avenue στον οποίο περιλαμβάνουμε και την αναθερμήσα εντολή. Το καινούργιο θεματικό επίπεδο το ονομάζουμε *RiverLine.shp*.

2.3 Εύρεση των υπολεκανών και των λεκανών απορροής

Όπως είναι γνωστό, ως λεκάνη απορροής ή υδρολογική λεκάνη για μια διατομή *A* ενός υδατορεύματος, ορίζεται η γεωγραφική περιοχή επιφάνειας S_A που τα νερά της συνεισφέρουν στην απορροή που περνά από τη δεδομένη διατομή. Για κάθε σημείο λοιπόν ενός υδατορεύματος, ορίζεται και μια διαφορετική λεκάνη απορροής. Για τις ανάγκες της εργασίας, χρειάζεται να βρεθούν οι υπολεκάνες απορροής για κάθε τμήμα ενός υδατορεύματος,⁷ χρειάζεται όμως να μελετηθούν και οι συνολικές λεκάνες απορροής. Στη συνέχεια, ακολουθεί η διαδικασία με την οποία υπολογίζονται οι υπολεκάνες και οι λεκάνες που μας ενδιαφέρουν.

2.3.1 Προετοιμασία για την εύρεση των υπολεκανών

Για να υπολογίσουμε τις υπολεκάνες, πρέπει τα ξεχωριστά κύτταρα από τα οποία αποτελούνται τα τμήματα των υδατορευμάτων, τα οποία παράχθηκαν στο βήμα 5 (παρ. 2.2.5), να ενωθούν και να πάρουν μία χαρακτηριστική τιμή. Αυτή η τιμή θα περάσει στη συνέχεια σαν χαρακτηριστική τιμή (*Id*) και στις υπολεκάνες. Δυστυχώς, η σειρά με την οποία αριθμούνται, δεν είναι η ίδια με την αρίθμηση των τμημάτων καθώς μετατρέπονται σε γραμμικά τμήματα (παρ. 2.2.7). Έτσι δεν μπορούμε με μια επικόλληση των πινάκων των χαρακτηριστικών τους, να περάσουμε τις τάξεις των τμημάτων των ποταμών, που έχουμε υπολογίσει, και στις υπολεκάνες που θα δημιουργήσουμε ή το

⁷ Λέγοντας τμήμα, στη συγκεκριμένη περίπτωση, εννοούμε κάθε γραμμικό κομμάτι από κόμβο σε κόμβο.

αντίστροφο (το εμβαδόν των υπολεκανών, στα γραμμικά τμήματα). Στη συνέχεια, θα δούμε πως ξεπερνάται αυτό το πρόβλημα.

Η σύνταξη της εντολής με την οποία γίνεται αυτή η διαδικασία είναι:

```
LinkGrid = OrderGrid.StreamLink(FlowGrid)
```

όπου το LinkGrid είναι ο νέος κάρναβος που θα δημιουργηθεί, ο οποίος περιλαμβάνει τα τμήματα των ποταμών αριθμημένα, το OrderGrid είναι ο κάρναβος που μας δίνει την τάξη των τμημάτων και το FlowGrid ο κάρναβος της διεύθυνσης ροής. Αντί για τον κάρναβο OrderGrid μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο κάρναβος StreamGrid αφού έτσι κι' αλλιώς οι τάξεις των κυττάρων δεν μεταφέρονται και στα τμήματα. Ο νέος κάρναβος θα χρησιμοποιηθεί σαν πηγή δεδομένων (source grid) για την επόμενη εντολή με την οποία θα βρεθούν οι υπολεκάνες.

2.3.2 Εύρεση των υπολεκανών

Η σύνταξη της εντολής είναι:

```
WatershedGrid = FlowGrid.Watershed(LinkGrid)
```

Με αυτήν την εντολή δημιουργούνται οι υπολεκάνες και ταυτόχρονα στον πίνακα των χαρακτηριστικών του νέου καννάβου, δημιουργείται ένα πεδίο που μας δίνει τον αριθμό των κυττάρων που αποτελούν την κάθε υπολεκάνη. Έτσι έχουμε κατευθείαν και το εμβαδό των υπολεκανών.

2.3.3 Εύρεση των λεκανών επιλέγοντας την έξοδό τους

Για να εξετάσουμε τις λεκάνες ως ενιαίες οντότητες, πηγή δεδομένων (source grid) για τον υπολογισμό των λεκανών δίνουμε το σημείο εξόδου της λεκάνης που μας ενδιαφέρει. Έτσι, παίρνουμε έναν κάρναβο που αποτελείται από κύτταρα με τις ίδιες τιμές στα πεδία value (τιμή υψομέτρου του τελευταίου κυττάρου στην έξοδο της λεκάνης) και count (συνολικός αριθμός κυττάρων που αποτελούν την λεκάνη).

Η τιμή του υψομέτρου λαμβάνεται αν ενεργό θεματικό επίπεδο είναι το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων (κάρναβος υψομέτρων). Σε περίπτωση που ενεργός είναι ο κάρναβος κατάταξης των ποταμών (StreamOrder) ως τιμή value λαμβάνεται η τάξη του κυττάρου εξόδου, δηλαδή η τάξη της λεκάνης. Η τιμή δηλαδή στο πεδίου value, του κυττάρου που επιλέγεται ως έξοδος της λεκάνης, μεταφέρεται και στα κύτταρα που αποτελούν τη λεκάνη απορροής, στο αντίστοιχο πεδίο.

Για τον υπολογισμό κάθε λεκάνης, εκτελούμε τον αντίστοιχο κώδικα στη γλώσσα Avenue.

2.3.4 Διαδικασία για την μεταφορά του εμβαδού των υπολεκανών και στα γραμμικά τμήματα

Ο πίνακας χαρακτηριστικών, του καννάβου που προκύπτει με την εντολή SreamOrder αποτελείται από τόσα στοιχεία, όσα και οι διαφορετικές τάξεις των τμημάτων. Αν η μέγιστη τάξη των ποταμών που μελετάμε είναι η τάξη 4 τότε θα έχουμε τέσσερα διαφορετικά στοιχεία. Τα πεδία είναι δύο. Το ένα πεδίο με τίτλο value, μας δίνει την τιμή της τάξης και το άλλο με τίτλο count, μας δίνει τον αριθμό των κυττάρων που έχουν την

ίδια τιμή value. Ο πίνακας των χαρακτηριστικών, του καννάβου που προκύπτει με την εντολή Watershed, αποτελείται από τόσα στοιχεία όσα και τα διαφορετικά τμήματα του υδρογραφικού δικτύου (αντίστοιχες υπολεκάνες). Τα πεδία είναι πάλι δύο. Το πρώτο με τίτλο value, μας δίνει τη σειρά αρίθμησης των τμημάτων όπως υπολογίστηκαν στην παρ. 2.3.1 και αντιπροσωπεύει την σειρά με την οποία υπολογίζονται οι υπολεκάνες. Το δεύτερο, με τίτλο count, μας δίνει τον αριθμό των κυττάρων που αποτελούν την κάθε υπολεκάνη, δηλαδή το εμβαδόν τους.

Εμείς θέλουμε είτε να δημιουργήσουμε ένα καινούργιο πεδίο στον πίνακα χαρακτηριστικών του WatershedGrid, το οποίο να περιέχει την τάξη κάθε υπολεκάνης (τάξη του αντίστοιχου τμήματος του ποταμού), είτε να δημιουργήσουμε ένα πεδίο στον πίνακα χαρακτηριστικών του γραμμικού θεματικού επιπέδου του υδρογραφικού δικτύου, το οποίο να περιέχει τον αριθμό των κυττάρων της υπολεκάνης που αντιστοιχεί σε κάθε τμήμα. Η δεύτερη επιλογή είναι και η προτιμότερη. Δηλαδή θέλουμε για κάθε γραμμικό τμήμα ενός ποταμού να έχουμε και το εμβαδόν της υπολεκάνης του.

Ύστερα από αρκετή προσπάθεια, ο τρόπος με τον οποίο έγινε κατορθωτό αυτό είναι ο εξής:

1. *Μετατρέπουμε σε θεματικό επίπεδο τον κάνναβο StreamLink.*
Αυτό γίνεται από το μενού theme και επιλέγοντας convert to shapefile αφού πρώτα έχουμε κάνει ενεργό τον κάνναβο StreamLink. Το θεματικό επίπεδο που θα δημιουργηθεί θα αποτελείται από πολύγωνα. Τα κύτταρα θα αντικατασταθούν από πολύγωνα τα οποία θα καλύπτουν κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο το σχήμα του δικτύου. Για κάθε τμήμα θα δημιουργηθούν αρκετά πολύγωνα τα οποία θα έχουν κοινό gridcode, το οποίο θα ταυτίζεται με την τιμή value που έχουν τα αντίστοιχα κύτταρα στον κάνναβο προέλευσης, αλλά διαφορετικό Id.
2. *Ένωση των πολυγώνων με ίδιο gridcode*
Για να ενώσουμε τα στοιχεία που έχουν το ίδιο gridcode, από το μενού view επιλέγουμε geoprocessing wizard και στη συνέχεια επιλέγουμε dissolve features based on an attribute. Μετά επιλέγουμε με βάση ποιο χαρακτηριστικό θα γίνει η συνένωση. Το νέο θέμα το ονομάζουμε DissolveStreamLink.shp.
3. *Δημιουργία πολυγώνων που να περικλείουν τα γραμμικά τμήματα*
Στη συνέχεια από το μενού theme επιλέγουμε create buffers και ορίζουμε την διάσταση (buffer distance) με την οποία θέλουμε μεγαλώσουμε τα πολύγωνα που δημιουργήσαμε στο προηγούμενο βήμα. Δηλαδή, δημιουργούμε νέα πολύγωνα τα οποία περικλείουν τα πρώτα και κάθε σημείο στην περίμετρό τους, απέχει το λιγότερο, την απόσταση που ορίζουμε από την αρχική περίμετρο. Το νέο θέμα το ονομάζουμε BufferStreamLink.shp.
4. *Προετοιμασία του πίνακα χαρακτηριστικών για το επόμενο βήμα*
Ο πίνακας του BufferStreamLink.shp περιέχει μόνο ένα πεδίο και αυτό είναι το πεδίο της απόστασης που δώσαμε (ίδια τιμή για όλα τα στοιχεία). Εμείς θέλουμε να προσθέσουμε και ένα πεδίο με το σύνολο των κυττάρων που αντιστοιχούν σε κάθε πολύγωνο (εμβαδόν αντίστοιχης υπολεκάνης) ώστε με το spatial join του επόμενου βήματος να πάρουμε το εμβαδόν των υπολεκανών, σαν χαρακτηριστικό των γραμμικών τμημάτων του υδρογραφικού δικτύου.

Για να γίνει αυτό, πρέπει πρώτα να δημιουργήσουμε ένα πεδίο που να περιλαμβάνει την αρίθμηση των πολυγώνων, ώστε το πεδίο με το εμβαδόν των υπο-

λεκανών από τον πίνακα WatershedsGrid, να συνδεθεί με απλό join στον πίνακα του BufferStreamLink.shp, με κοινή βάση το πεδίο αρίθμησης. Εδώ να παρατηρήσουμε ότι:

- Η σειρά υπολογισμού των στοιχείων στον πίνακα χαρακτηριστικών του θεματικού επιπέδου BufferStreamLink.shp είναι ακριβώς αντίθετη με την σειρά αρίθμησης και υπολογισμού των στοιχείων του DissolveStreamLink.shp και κατά συνέπεια με την σειρά των στοιχείων του πίνακα WatershedsGrid. Έτσι η αρίθμηση των στοιχείων στον πρώτο πίνακα πρέπει να γίνει αντίστροφα, και
- Η αρίθμηση πρέπει να γίνει με το χέρι⁸ αφού δεν υπάρχει τρόπος να επικολληθεί μια στήλη, χωρίς να γίνει join, από άλλον πίνακα.

Η δημιουργία του νέου πεδίου γίνεται ως εξής: με την επιλογή start editing από το μενού theme προσθέτουμε ένα καινούργιο πεδίο και εισάγουμε τους αριθμούς με φθίνουσα σειρά. Για να αποθηκεύσουμε τα νέα δεδομένα επιλέγουμε stop editing και save editings. Στη συνέχεια, με απλό join συνδέουμε το πεδίο του εμβადού από τον πίνακα WatershedsGrid και μετατρέπουμε το τροποποιημένο θέμα σε ένα καινούργιο θεματικό επίπεδο με convert to shapefile, ώστε τα δανεισμένα χαρακτηριστικά να μονιμοποιηθούν και να μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε σαν πηγή για το spatial join του επόμενου βήματος.

5. Σύνδεση χαρακτηριστικών με ικανοποίηση χωρικής σχέσης

Από το μενού view επιλέγουμε πάλι geoprocessing wizard και αυτή τη φορά διαλέγουμε assign data by location (spatial join). Με αυτήν την επιλογή μπορούμε να συνδέσουμε τιμές χαρακτηριστικών από ένα θέμα στο άλλο. Λέγοντας “σύνδεση” εννοούμε τη μεταφορά χαρακτηριστικών από έναν πίνακα σε άλλον, χωρίς να γίνονται κτήμα του δέκτη. Απλά ο δέκτης δανείζεται αυτά τα χαρακτηριστικά και κατά συνέπεια δεν μπορεί να τα δανείσει σε άλλον.

Για να γίνει αυτός ο δανεισμός, πρέπει να υπάρχει μια κοινή βάση (απλό join) ή να ικανοποιείται μια χωρική σχέση μεταξύ των δύο θεμάτων (spatial join). Κοινή βάση θεωρείται ένα πεδίο με στοιχεία τα οποία έχουν ίδιες χαρακτηριστικές τιμές. Χωρική σχέση έχουμε όταν ικανοποιείται μια από τις παρακάτω συνθήκες:

σημείο κοντά σε σημείο	γραμμή κοντά σε σημείο
σημείο κοντά σε γραμμή	γραμμή που τέμνεται με γραμμή
σημείο μέσα σε πολύγωνο	γραμμή μέσα σε πολύγωνο
πολύγωνο μέσα σε πολύγωνο	

Πάντα το πρώτο είναι το θέμα που θα πάρει τις νέες τιμές, ενώ το δεύτερο το θέμα από το οποίο θα παρθούν οι τιμές. Η δικιά μας περίπτωση ανήκει στην κα-

⁸ Στην έκδοση ArcView 8.1, τα στοιχεία του θέματος BufferStreamLink.shp αριθμούνται. Έτσι αποφεύγουμε την αρίθμηση με το χέρι. Μπορούμε ακόμα να εισαγάγουμε το θέμα που δημιουργήσαμε στο ArcView 3.1, στη νεότερη έκδοση του προγράμματος και τότε τα στοιχεία μας αριθμούνται ξανά, ξεκινώντας από το μηδέν. Εμείς δημιουργούμε μια επιπλέον στήλη και θέτουμε σαν τιμή των νέων κελιών: $\tau = \sigma - \alpha$ όπου σ είναι ο συνολικός αριθμός των στοιχείων (σταθερός αριθμός) και α η αρίθμηση των στοιχείων από το πρόγραμμα (αρχική στήλη). Έτσι παίρνουμε την αντίστροφη αρίθμηση των στοιχείων το οποίο και επιθυμούμε.

τηγορία: γραμμή μέσα σε πολύγωνο. Έτσι σαν πρώτο θέμα επιλέγουμε το RiverLine.shp και σαν δεύτερο το BufferStreamLink.shp. Δηλαδή, θέλουμε όσα γραμμικά τμήματα βρίσκονται μέσα στα πολύγωνα που έχουμε δημιουργήσει στο βήμα 3, να πάρουν επιπλέον τις τιμές των πολυγώνων, δηλαδή να προστεθούν τα πεδία του δεύτερου θέματος στο πρώτο.

Αφού συνδεθεί στα στοιχεία του πίνακα RiverLine.shp το πεδίο του εμβαδού, μετατρέπουμε το θέμα μας σε ένα καινούργιο θεματικό επίπεδο, ώστε να μονιμοποιηθούν οι νέες τιμές.

Σε αυτό το σημείο να διευκρινιστεί ότι η διεύρυνση των πολυγώνων (βήμα 3), εφαρμόζεται διότι τα γραμμικά τμήματα του υδρογραφικού δικτύου δεν βρίσκονται μέσα στα αρχικά πολύγωνα. Έτσι διευρύνονται τα όριά τους, όπως αναφέρθηκε, ώστε να ισχύει ένα από τα χωρικά κριτήρια για την εφαρμογή του spatial join. Μια τιμή για αυτή την διεύρυνση ώστε να περιλαμβάνονται όλα τα τμήματα είναι τα 177 μέτρα. Η τιμή αυτή προκύπτει ως ο αμέσως μεγαλύτερος ακέραιος από το μισό της διαγωνίου του κυττάρου. Για διάσταση κυττάρου 250 μέτρα η διαγώνιος είναι: $250 \times 2^{1/2} = 353,6$ m. Η τιμή αυτή, προκύπτει εποπτικά (δοκιμάζοντας διάφορες τιμές) και πρέπει να επαληθεύεται από τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα για την εξαγωγή του γραμμικού δικτύου.

Μπορεί όμως μερικά τμήματα (λίγα σχετικά) να βρίσκονται μέσα σε δύο πολύγωνα συγχρόνως. Σε αυτήν την περίπτωση, το γραμμικό τμήμα λαμβάνει τις τιμές του πολυγώνου που βρίσκεται πρώτο στη λίστα στον πίνακα των χαρακτηριστικών. Γι' αυτό, χρειάζεται ένας έλεγχος ώστε να διορθωθούν τυχόν λάθη. Μια γρήγορη επαλήθευση, μπορεί να γίνει υπολογίζοντας το συνολικό άθροισμα των εμβαδών των τμημάτων και συγκρίνοντάς το με το άθροισμα των εμβαδών των λεκανών. Για να δούμε ποια τμήματα έχουν λάθος τιμές, βάζουμε δίπλα-δίπλα τους δύο πίνακες, γραμμικών τμημάτων και λεκανών, κατατάσσουμε με αύξουσα σειρά τα στοιχεία τους και εξετάζουμε μία προς μία τις διαφορές.

2.4 Ορισμός, χρησιμότητα και εύρεση των χαρακτηριστικών

Τα χαρακτηριστικά που θα μας απασχολήσουν χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες.

- Χαρακτηριστικά που σχετίζονται με το υδρογραφικό δίκτυο (μονοδιάστατη εξέταση). Αυτή η κατηγορία, εξετάζει καθαρά τη δομή και τη διάταξη του υδρογραφικού δικτύου θεωρώντας τα ποτάμια ως γραμμικά τμήματα.
- Χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη γεωμετρία της λεκάνης (διδιάστατη εξέταση). Αυτή η κατηγορία, εξετάζει το σχήμα της λεκάνης προβαλλόμενο σε οριζόντιο επίπεδο.
- Χαρακτηριστικά που σχετίζονται με το ανάγλυφο της λεκάνης (τριδιάστατη εξέταση). Αυτή η κατηγορία, εξετάζει τη λεκάνη στο χώρο.

2.4.1 Υδρογραφικό δίκτυο

Όπως είδαμε στην παράγραφο 2.2, οι κλάδοι των φυσικών υδατορευμάτων που αποχετεύουν τα νερά της επιφανειακής απορροής, αποτελούν ένα οργανωμένο δίκτυο, το υδρογραφικό δίκτυο. Οι κλάδοι αυτοί παρουσιάζουν ποικιλία χαρακτηριστικών με διατομές που προοδευτικά αυξάνονται, ξεκινώντας από τα τελευταία μικρορυάκια του αναγλύφου και καταλήγοντας στο υδατόρευμα που συγκεντρώνει την απορροή του συνόλου της λεκάνης. Όλοι οι κλάδοι συνδέονται μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο ώστε οι πιο κατάντη, να δέχονται την απορροή των πιο ανάντη. Μια εξαίρεση σε αυτόν τον κανόνα, η οποία είναι αρκετά συνηθισμένη μορφολογική ανωμαλία για μια λεκάνη απορροής, είναι ο ενδορείσμος ενός τμήματός της όπως είδαμε στην παράγραφο 2.2.4 όπου μιλήσαμε για εσωτερικές λεκάνες.

Κύρια χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου αποτελούν οι λόγοι Horton. Οι λόγοι αυτοί παρουσιάζονται στη συνέχεια.

2.4.1.1 Λόγος διακλαδώσεων

Ο λόγος διακλαδώσεων (bifurcation ratio), ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των τμημάτων τάξης i ενός ποταμού, προς τον αριθμό των τμημάτων τάξης $i + 1$.

$$R_B = N_i / N_{i+1} \quad (2.1)$$

Αν θέσουμε Ω την μέγιστη τάξη που φτάνει ο κάθε ποταμός, τότε το i λαμβάνει τιμές από 1 μέχρι $\Omega - 1$. Ο Horton έδειξε ότι για κάθε λεκάνη απορροής, ο λόγος αυτός παραμένει πρακτικώς σταθερός.

Διευκρινίσουμε, ότι ένα τμήμα τάξης $i > 1$ μπορεί να αποτελείται από αρκετά επιμέρους τμήματα ίδιας τάξης (τμήματα με την περιορισμένη έννοια, από κόμβο σε κόμβο). Δηλαδή ο όρος “τμήμα” στον παραπάνω ορισμό, έχει την ευρύτερη έννοια ενός τμήματος τάξης i που ξεκινάει από κάπου και τελειώνει όταν συναντήσει ένα τμήμα ίδιας ή μεγαλύτερης τάξης.

Αν η λεκάνη είναι σχετικά μικρή, μπορούμε να μετρήσουμε εύκολα τον αριθμό των τμημάτων του υδρογραφικού δικτύου και να επιλέξουμε κατευθείαν τα τμήματα που μας ενδιαφέρουν από το γραμμικό θεματικό επίπεδο που δημιουργήσαμε στο βήμα 7 (παρ. 2.2.7).

Αν όμως η λεκάνη είναι αρκετά μεγάλη, για να υπολογίσουμε το λόγο αυτό, καθώς και τους επόμενους που θα δούμε, χρειάζεται να απομονώσουμε το υδρογραφικό δίκτυο κάθε λεκάνης που μας ενδιαφέρει. Για να το κάνουμε αυτό, υπολογίζουμε πρώτα την λεκάνη που μας ενδιαφέρει όπως είδαμε στην παράγραφο 2.3.3 και στη συνέχεια τη μετατρέπουμε σε shapefile. Έπειτα, με την επιλογή geoprocessing wizard και διαλέγοντας την διαδικασία clip, “κόβουμε” το θεματικό επίπεδο του γραμμικού υδρογραφικού δικτύου με το πολυγωνικό θεματικό επίπεδο της λεκάνης απορροής που δημιουργήσαμε. Έτσι, παίρνουμε ένα γραμμικό θεματικό επίπεδο που περιέχει το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης που θέλουμε να μελετήσουμε. Ανοίγουμε λοιπόν τον πίνακα χαρακτηριστικών του καινούργιου μας επιπέδου (από το μενού theme επιλέγουμε table) και από το μενού table επιλέγουμε query. Με αυτό το εργαλείο, μπορούμε να αναζητήσουμε στοιχεία από τον πίνακα, που ικανοποιούν ορισμένους περιορισμούς. Εμείς ζητάμε να επιλεγούν τα στοιχεία που το gridcode τους (όνομα του πεδίου που αντιστοιχεί στην τάξη των τμημάτων) ισούται με 1. Στη συνέχεια επιλέγουμε το πεδίο του πίνακα

που μας ενδιαφέρει π.χ. μήκος ή εμβαδό και από το μενού field επιλέγουμε statistics. Αμέσως έχουμε τον αριθμό των τμημάτων τάξης 1, το συνολικό μήκος τους και διάφορα άλλα στατιστικά χαρακτηριστικά των στοιχείων αυτών.

Για τμήματα μεγαλύτερης τάξης, η αρίθμησή τους, γίνεται εποπτικά αφού με τον τρόπο που περιγράψαμε έχουμε τον αριθμό των τμημάτων με τη στενή έννοια (από κόμβο σε κόμβο), ενώ χρειάζεται ο αριθμός των τμημάτων με την ευρύτερη έννοια.

2.4.1.2 Λόγος μηκών

Ο λόγος των μηκών (length ratio), ορίζεται ως ο λόγος του μέσου συνολικού μήκους των τμημάτων τάξης $i + 1$, προς το μέσο συνολικό μήκος των τμημάτων τάξης i .

$$R_L = \bar{L}_{i+1} / \bar{L}_i \quad (2.2)$$

όπου το μέσο συνολικό μήκος των τμημάτων τάξης i δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{L}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} L_{j,i} \quad (2.3)$$

όπου N_i ο αριθμός των τμημάτων τάξης i . Και αυτός ο λόγος παραμένει πρακτικώς σταθερός για μια συγκεκριμένη λεκάνη.

Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι ως $L_{j,i}$ συμβολίζουμε το μήκος του τμήματος τάξης i μετρούμενο από το αρχικό ανάντη τμήμα του υδρογραφικού δικτύου. Από το κατάντη πέρας του τμήματος που μας ενδιαφέρει προχωράμε ανάντη, ακολουθώντας το τμήμα με τη μέγιστη κάθε φορά τάξη, μέχρι το πιο απομακρυσμένο τμήμα τάξης 1. Σε μερικά βιβλία (Maidment, 1993· Κουτσογιάννης, 1999) δεν ακολουθείται αυτός ο ορισμός αλλά ως $L_{j,i}$ λαμβάνεται μόνο το μήκος του τμήματος τάξης i . Αυτό ακολουθήθηκε στην αρχή, αλλά αποδείχθηκε αδόκιμο αφού με τον πρώτο τρόπο οι συντελεστές συσχέτισης προκύπτουν αισθητά μεγαλύτεροι και το εύρος διακύμανσης των λόγων πιο μικρό. Πάντως στο επόμενο κεφάλαιο παραθέτονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν και με τους δύο τρόπους για συγκριτικούς λόγους.

2.4.1.3 Λόγος εμβαδών

Ο λόγος των εμβαδών (area ratio), που προτάθηκε από τον Schumm (1956) ορίζεται ως ο λόγος του μέσου συνολικού εμβαδού των υπολεκανών τάξης $i + 1$, προς το μέσο συνολικό εμβαδόν υπολεκανών τάξης i .

$$R_A = \bar{A}_{i+1} / \bar{A}_i \quad (2.4)$$

όπου το μέσο συνολικό εμβαδόν των υπολεκανών τάξης i δίνεται από την σχέση:

$$\bar{A}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_i} A_{j,i} \quad (2.5)$$

Και αυτός ο λόγος είναι πρακτικώς σταθερός για μία λεκάνη απορροής.

Για $i = 1$, το συνολικό εμβαδό υπολογίζεται όπως και το συνολικό μήκος που είδαμε στην παράγραφο 2.4.1.1· για $i > 1$ πρέπει να λάβουμε υπόψη μας και τα ανάντη τμήματα των υπολεκανών που συμβάλλουν με την απορροή τους στα τμήματα που εξετάζουμε. Αυτό μπορούμε να το βρούμε απλά επιλέγοντας το κύτταρο του καννάβου συγκέντρω-

σης στην έξοδο της υπολεκάνης που μας ενδιαφέρει (υπενθυμίζουμε ότι ο κάρναβος συγκέντρωσης μας δίνει για κάθε κύτταρο, τον αριθμό των ανάντη κυττάρων που συμβάλλουν με την απορροή τους σε αυτά).

Σύμφωνα με τους Chow *et al.*, (1988, σ. 169) οι λόγοι του Horton, έχουν τις ίδιες τιμές τόσο στη συνολική υδρολογική λεκάνη ενός ποταμού, όσο και στις υπολεκάνες του. Οι Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος (1999, σ. 307) συμπληρώνουν με μια παρατήρηση τους, ότι το γεγονός αυτό αντανακλά τη γεωμετρική ομοιότητα⁹ των υδρολογικών λεκανών.

Εδώ να εξηγήσουμε τη χρησιμότητα του κριτηρίου που διατυπώσαμε στην παράγραφο 2.2.5. Η εκτίμηση των λόγων Horton, είναι πιο αξιόπιστη για λεκάνες τάξης τρία και πάνω διότι οι λόγοι αυτοί προκύπτουν από γραμμική παλινδρόμηση με τρία σημεία τουλάχιστον. Σε λεκάνες τάξης δύο, οι λόγοι αυτοί προκύπτουν απλά από μία διαίρεση.

2.4.1.4 Λοιπά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου

– Πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου

Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού μήκους των τμημάτων του δικτύου, προς το εμβαδόν της λεκάνης.

$$D_A = \Sigma L / A \quad (2.6)$$

Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου ορίστηκε από τον Horton (1932). Ο Strahler (1964, σ. 4-52), έδειξε ότι χαμηλές τιμές της πυκνότητας, συναντώνται σε περιοχές με υλικά υψηλής απορροφητικότητας, πυκνή βλάστηση και ήπιο ανάγλυφο. Αντίθετα περιοχές με υλικά χαμηλής απορροφητικότητας, λιγοστή βλάστηση και απότομο ανάγλυφο, παρουσιάζουν μεγάλες τιμές πυκνότητας.

Εδώ αξίζει να τονίσουμε την παρατήρηση του Mandelbrot (1983, σ. 111) ότι το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου δεν είναι ανάλογο ενός χαρακτηριστικού μήκους της λεκάνης (π.χ. του μεγίστου άξονά της) αλλά περίπου ανάλογο της επιφάνειας της λεκάνης. Η παρατήρηση αυτή δένει με την τελευταία υποσημείωση, ότι δηλαδή η διάσταση του συνολικού μήκους του υδρογραφικού δικτύου δεν είναι μονάδα (μήκος), αλλά πλησιάζει στην τιμή δύο (εμβαδόν).

– Μέση απόσταση από τον υδροκρίτη μέχρι το υδατόρευμα

⁹ Οι Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος (1999, σσ. 307-308) παρατηρούν: “Ο όρος *ομοιότητα* χρησιμοποιείται εδώ με στατιστικό περιεχόμενο και όχι με την αυστηρή ευκλείδεια έννοιά του. Άλλωστε, οι λεκάνες απορροής δεν αποδίδονται με τα απλούστερα σχήματα της ευκλείδειας γεωμετρίας.” Όπως παρατηρεί ο Mandelbrot (1983, σ. 1), “... τα βουνά δεν είναι κώνοι και οι ακτογραμμές δεν είναι κύκλοι...”. Και συνεχίζουν: “Τέτοια αντικείμενα της φύσης περιγράφονται καλύτερα ως κλασματομορφικά (fractal) αντικείμενα με μια γεωμετρία διαφορετικής λογικής από την ευκλείδεια. Έτσι, η διάσταση αυτών των αντικειμένων δεν είναι 1, 2 ή 3, όπως αυτών της ευκλείδειας γεωμετρίας, αλλά μπορεί να είναι ένας κλασματικός αριθμός, κάτι που έχει παράδοξες συνέπειες για τις έννοιες του μήκους, της επιφάνειας ή του όγκου. Για παράδειγμα, το μήκος του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης, εξαρτάται από το βήμα ΔL που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση της πολύπλοκης καμπύλης του δικτύου. Θεωρητικά, όταν το βήμα μέτρησης τείνει στο μηδέν, το συνολικό μήκος τείνει άπειρο και κατά συνέπεια δεν ορίζεται το μήκος με την αυστηρή ευκλείδεια έννοια.”

Μέση απόσταση από τον υδροκρίτη μέχρι το υδατόρευμα ορίζεται το μέγεθος:

$$X_A = \frac{1}{2D_A} \quad (2.7)$$

Συνεπώς η μέση διαδρομή που κάνει μια σταγόνα για να φτάσει στο πλησιέστερο υδατόρευμα, είναι ίση με το μισό αυτής της απόστασης:

$$Y_A = \frac{X_A}{2} = \frac{1}{4D_A} \quad (2.8)$$

– *Συχνότητα υδρογραφικού δικτύου*

Η συχνότητα του υδρογραφικού δικτύου είναι ο λόγος του συνολικού αριθμού των τμημάτων του δικτύου –τμήμα με την στενή έννοια– προς το εμβαδό της λεκάνης.

$$F_A = \Sigma N / A \quad (2.9)$$

Η συχνότητα, ορίσθηκε και αυτή από τον Horton (1932). Είναι ένα αντίστοιχο μέγεθος με την πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου και σχετίζεται άμεσα με αυτήν, όπως έδειξε ο Melton (1958, σ. 36), με τη σχέση:

$$F_A = 0.694D_A^2 \quad (2.10)$$

– *Μήκος κύριου υδατορεύματος*

Ως κύριο υδατόρευμα, λαμβάνεται ο κλάδος με το μεγαλύτερο μήκος και τάξη. Ξεκινώντας από το κατάντη πέρας του υδατορεύματος, προχωράμε προς ανάντη επιλέγοντας κάθε φορά τη διαδρομή που θα μας οδηγήσει στο πιο απομακρυσμένο σημείο του δικτύου. Το μήκος του κύριου υδατορεύματος L_j είναι ένα πολύ σημαντικό φυσιογραφικό χαρακτηριστικό και συσχετίζεται εμπειρικά με το χρόνο συγκέντρωσης της λεκάνης (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 309). Η επιλογή του έγινε εποπτικά, επιλέγοντας τα τμήματα από κατάντη προς τα ανάντη που οδηγούσαν στο πιο απομακρυσμένο σημείο¹⁰.

– *Κλίση κύριου υδατορεύματος*

Η κλίση του κύριου υδατορεύματος, προκύπτει από το λόγο της υψομετρικής διαφοράς του μέγιστου από το ελάχιστο υψόμετρο που παρατηρείται σε μια λεκάνη, με το μήκος του κύριου υδατορεύματος.

$$S_j = \Delta Z / L_j \quad (2.11)$$

Πιο σωστά, ως μέγιστο υψόμετρο πρέπει να λαμβάνεται το υψόμετρο στο οποίο ξεκινά το κύριο υδατόρευμα. Αφού ο υπολογισμός όμως έγινε με τον ίδιο τρόπο για όλα τα δίκτυα, τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους.

¹⁰ Υπάρχει περίπτωση (σπάνια βέβαια) το μέγιστο μήκος να μην συμπίπτει με τη μέγιστη τάξη των τμημάτων. Δηλαδή, καθώς προχωράμε ανάντη και βρισκόμαστε σε ένα τμήμα τάξης i μπορεί να συναντήσουμε ένα τμήμα τάξης $i - 2$ με συνολικό μήκος μεγαλύτερο από το συνολικό μήκος τμήματος τάξης $i - 1$. Εμείς επιλέξαμε να ακολουθήσουμε το μέγιστο μήκος.

Κατά μια άλλη εκδοχή, η μέση κλίση υπολογίζεται από το λόγο της υψομετρικής διαφοράς στις θέσεις μήκους 10% και 85% του κύριου υδατορεύματος, με το 75% του μήκους του.

2.4.2 Γεωμετρία λεκάνης

Το κύριο γεωμετρικό χαρακτηριστικό μιας λεκάνης απορροής είναι το εμβαδόν της S_A . Το σχήμα της είναι πάντα πολύπλοκο και δεν μοιάζει με κανένα απλό γεωμετρικό σχήμα. Συνεπώς δεν μπορούμε να το περιγράψουμε με ακρίβεια με μικρό αριθμό παραμέτρων. Ωστόσο, έχουν προταθεί διάφοροι αδιάστατοι δείκτες, που συγκεντρώνουν κάποια πληροφορία για το σχήμα της λεκάνης. Ίσως ο πιο σημαντικός είναι ο δείκτης σχήματος λεκάνης S_B που θα δούμε στη συνέχεια.

Την περίμετρο της λεκάνης την υπολογίζουμε με την εκτέλεση ενός κώδικα στη γλώσσα Avenue (βλ. παράρτημα Γ').

- *Δείκτης κυκλικότητας*

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

$$E_C = \frac{S_A}{P_A^2 / 4\pi} \quad (2.12)$$

- *Δείκτης συμπαγούς*

Ο δείκτης συμπαγούς, ορίζεται ως ο λόγος της περιμέτρου της λεκάνης, προς την περίμετρο κύκλου με επιφάνεια ίδια με αυτή της λεκάνης:

$$E'_C = \frac{P_A}{\sqrt{4\pi S_A}} = \frac{1}{\sqrt{E_C}} \quad (2.13)$$

- *Δείκτης επιμήκυνσης*

Ο δείκτης επιμήκυνσης ορίζεται ως ο λόγος της πλευράς ενός τετραγώνου με επιφάνεια ίδια με αυτή της λεκάνης, προς ένα χαρακτηριστικό μήκος της λεκάνης L_A . Το μήκος αυτό μπορεί να μετρηθεί από την έξοδο της λεκάνης, μέχρι το πιο απομακρυσμένο σημείο της ή το σημείο με το μέγιστο υψόμετρο. Στην παρούσα εργασία ως χαρακτηριστικό μήκος επιλέχθηκε το μήκος κύριου υδατορεύματος.

$$E_L = \frac{\sqrt{S_A}}{L_A} \quad (2.14)$$

- *Δείκτης σχήματος λεκάνης*

Ως δείκτης σχήματος λεκάνης, ορίζεται ο λόγος του μήκους του κύριου υδατορεύματος, προς τη ρίζα του εμβαδού της λεκάνης:

$$S_B = \frac{L_J}{\sqrt{S_A}} \quad (2.15)$$

Ο δείκτης σχήματος, έχει συσχετιστεί με το μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης (U.S. Army Corps of Engineers, 1954). Για ψηλές τιμές του δείκτη έχουμε μια πιο επιμήκη λεκάνη, ενώ για χαμηλές τιμές, μια πιο κυκλική μορφή.

– *Λόγος Schumm*

Ο λόγος Schumm, (Schumm, 1956), ορίζεται ως το πηλίκο της διαμέτρου (D) κύκλου με εμβαδόν ίδιο με αυτό της λεκάνης, προς το μήκος του κύριου υδατορεύματος.

$$E_r = \frac{D}{L_1} \quad (2.16)$$

Οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ 0.6 και 1.0 και για περιοχές με ήπιο ανάγλυφο βρίσκονται κοντά στη μονάδα, ενώ για περιοχές με έντονο ανάγλυφο και απότομες κλίσεις, οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0.6 και 0.8.

2.4.3 Ανάγλυφο

Η γενική εικόνα του αναγλύφου αποδίδεται από την *υψομετρική* (ή *υπογραφική*) *καμπύλη* της λεκάνης. Η καμπύλη αυτή μας δίνει για κάθε δεδομένη τιμή υψομέτρου z , το ποσοστό της επιφάνειας της λεκάνης $F(z)$ που έχει υψόμετρο μεγαλύτερο ή ίσο της δεδομένης τιμής.

Η μορφή της υψομετρικής καμπύλης, αποκαλύπτει αρκετά ποιοτικά χαρακτηριστικά του αναγλύφου της λεκάνης. Η μεγάλη κλίση σε κάποιο τμήμα της, υποδηλώνει ισχυρές κλίσεις στο ανάγλυφο. Έτσι, μπορούμε να εξάγουμε μερικά ποιοτικά συμπεράσματα για την αναμενόμενη μορφή του πλημμυρογραφήματος και για τους χαρακτηριστικούς χρόνους του. Μπορούμε επίσης να έχουμε μια κλιμακωτή εκτίμηση των μεγεθών της βροχόπτωσης, της εξάτμισης και του χιονιού, τα οποία μεταβάλλονται με το υψόμετρο, καθώς και το είδος της φυτοκάλυψης. Χαρακτηριστικά ο Langbein (1947, σ. 141· βλ. και Strahler, 1964 σ. 4-69) αναφέρει: "... το ύψος του χιονιού και το ισοδύναμο μέγεθος του νερού, αυξάνει με την αύξηση του υψομέτρου· μια σχέση εμβαδού-ύψους για μια λεκάνη αποτελεί ένα μέσο για την εκτίμηση του μέσου ύψους του χιονιού ή της ισοδύναμης ποσότητας νερού που του αντιστοιχεί."

Οι Vörösmarty *et al.*, (2000) παρατηρούν ότι η μορφή της υψομετρικής καμπύλης μπορεί να φανεί χρήσιμη και για την εκτίμηση της πηγής και απόθεσης των φερτών υλικών. Μια υψομετρική καμπύλη που στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω, υποδηλώνει μια υψηλή κινητοποίηση εδαφικού υλικού στην περιφέρεια της λεκάνης και εναπόθεση του ιζήματος σε περιοχές με ηπιότερο ανάγλυφο. Αυτό το γεγονός δικαιολογεί και κάποιες εκτεταμένες πλημμύρες που συμβαίνουν σε ορισμένες περιοχές, σύμφωνα με τον Walling (1983). Οι λεκάνες αυτές, φανερώνουν το μεγάλο χρονικό διάστημα κατά το οποίο υφίστανται τα φαινόμενα διάβρωσης και εναπόθεσης. Σε αντίθεση, οι υψομετρικές καμπύλες που στρέφουν τα κοίλα προς τα πάνω, φανερώνουν λεκάνες ευπρόσβλητες σε διάβρωση από το ξεκίνημα των ποταμών, με λιγότερες περιοχές για απόθεση των φερτών υλικών και μεταφορά των τελευταίων, στην έξοδο της λεκάνης.

2.4.3.1 Μέσο υψόμετρο

Χαρακτηριστικά υψόμετρα μιας λεκάνης είναι το μέγιστο, το ελάχιστο (στην έξοδο) και το μέσο. Το μέσο υψόμετρο μιας λεκάνης ισοδυναμεί με το εμβαδόν της υψομετρικής της καμπύλης και ορίζεται από τη σχέση:

$$z_s = \int_0^1 z dF(z) \approx \sum_r \frac{z_r + z_{r-1}}{2} \Delta F_r \quad (2.17)$$

όπου το πεδίο μεταβολής του F (ποσοστό επιφάνειας) έχει διαιρεθεί σε υποδιαστήματα μήκους ΔF_r και οι τιμές του υψομέτρου z που αντιστοιχούν στα άκρα του υποδιαστήματος ΔF_r είναι z_r και z_{r-1} .

Ο υπολογισμός του μέσου υψομέτρου για μια λεκάνη γίνεται ως εξής: Έχοντας υπολογίσει τη λεκάνη απορροής επιλέγοντας την έξοδο της, με το εργαλείο map calculator προσθέτουμε τον κάρναβο της λεκάνης με τον αρχικό κάρναβο υψομέτρων και παίρνουμε ένα νέο κάρναβο υψομέτρων για τη λεκάνη που μας ενδιαφέρει. Εμφανίζοντας την καρτέλα του καννάβου με την ομαδοποίηση των κυττάρων και επιλέγοντας statistics παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των κυττάρων, η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή τους, η οποία ισοδυναμεί με το μέσο υψόμετρο, και διάφορα άλλα στατιστικά χαρακτηριστικά.

2.4.3.2 Μέση κλίση

Η μέση κλίση αποτελεί ένα άλλο χρήσιμο χαρακτηριστικό του αναγλύφου. Ορίζεται από τη σχέση:

$$i_s = \frac{1}{S_A} \int_{S_A} i dS \approx \frac{1}{S_A} \sum_r i_r \Delta S_r \quad (2.18)$$

Εδώ, έχει υποθεθεί ότι η συνολική έκταση της λεκάνης έχει υποδιαιρεθεί σε τμήματα ΔS_r που το καθένα έχει περίπου σταθερή κλίση i_r . Η υποδιαίρεση αυτή αυτοματοποιείται με το ArcView αφού υπάρχει έτοιμη ρουτίνα η οποία υπολογίζει για κάθε κύτταρο μια τιμή κλίσης (μέση τιμή σε σχέση με τα οκτώ γειτονικά κύτταρα). Από το μενού surface, επιλέγουμε derive slope και με τον ίδιο τρόπο που περιγράψαμε προηγουμένως, βρίσκουμε την μέση τιμή όλων των κυττάρων που ισοδυναμεί με τη μέση κλίση. Τα αποτελέσματα είναι σε μοίρες. Ένας εναλλακτικός τρόπος για τον υπολογισμό του καννάβου κλίσης είναι με το εργαλείο map calculator και με την σύνταξη της εντολής:

```
ElevGrid.slope (Nil, True)
```

όπου το ElevGrid είναι ο κάρναβος των υψομέτρων, Nil είναι ένας μηδενικός κάρναβος όπου τη θέση του μπορεί να λάβει η σχέση που συνδέει τις διαστάσεις x,y με την διάσταση z του χάρτη και με την επιλογή True ο υπολογισμός της κλίσης γίνεται σε επί τις εκατό (%) ενώ με την επιλογή False σε μοίρες.

3. Αποτελέσματα

3.1 Γενικά

Με τους περιορισμούς που τέθηκαν και το κατώφλι που επιλέχθηκε, προέκυψαν 140 λεκάνες με συνολική έκταση 97 181 km² για όλη την Ελλάδα. Δεν εξετάστηκαν τα νησιά του Αιγαίου και Ιονίου πελάγους, γιατί λόγω της μικρής έκτασής τους χρήζουν διαφορετικής αντιμετώπισης με αλλαγή μεγέθους κυττάρου και κατωφλιού. Η παραπάνω συνολική έκταση, αντιπροσωπεύει το 80% του ηπειρωτικού εμβαδού της χώρας. Ειδικά για τα διαμερίσματα της Αττικής και της Κρήτης, το κατώφλι που τέθηκε ήταν το μισό από αυτό που χρησιμοποιήθηκε για τα υπόλοιπα διαμερίσματα¹: δηλαδή, υπολογίσιμο ποτάμι δημιουργείται από τη στιγμή που συμβάλλουν με την απορροή τους 128 κύτταρα¹.

Μερικές υδρολογικές λεκάνες με μεγάλη έκταση (Πηνειός Θεσσαλίας, Αχελώος), εξετάστηκαν τόσο στο σύνολό τους, όσο και ξεχωρίζοντας τις σημαντικές υπολεκάνες που τις αποτελούν. Για παράδειγμα στον Αχελώο εξετάσαμε τις υπολεκάνες του Μέγδοβα, Τρικεριώτη, Ίναχο, Αγραφιώτη καθώς και τη λεκάνη ανάντη του ταμιευτήρα των Κρεμαστών. Στις λίμνες, όπου μπορεί να απορρέουν δύο ή τρεις λεκάνες, εξετάστηκε η μεγαλύτερη σε έκταση λεκάνη που απορρέει σε αυτές.

Όπως προαναφέρθηκε, οδηγός για τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων στάθηκε η εργασία των Vörösmarty *et al.*, (2000) οι οποίοι έκαναν κάτι αντίστοιχο για όλη τη γη. Αφού υπολογίσαμε τα χαρακτηριστικά, τα πινακοποιήσαμε ανά υδατικό διαμέρισμα και ανά τάξη λεκάνης και τα συγκρίναμε με αυτά που προέκυψαν από την προαναφερθείσα εργασία. Τέλος εξετάσαμε χωριστά, με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, μερικά υδρογραφικά δίκτυα με τις αντίστοιχες λεκάνες τους, για συγκριτικούς και συμπερασματικούς λόγους.

3.2 Υδρογραφικό δίκτυο

Ως κύρια χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου εξετάζουμε τους λόγους του Horton. Η εξαγωγή των λόγων αυτών, προϋποθέτει για κάθε λεκάνη χωριστά, την εύρεση του αριθμού των υδατορευμάτων κάθε τάξης (λόγος διακλαδώσεων), το εμβαδό των υπολεκανών κάθε τάξης (λόγος εμβαδών) και τα μήκη των υδατορευμάτων για κάθε

¹ Για διάσταση κυττάρου 250 m η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε εμβαδό 8 km².

Πίνακας 3.1: Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου της Ελλάδας καταταγμένα ανά υδατικό διαμέρισμα.

	Δ. Πελοπ	Β. Πελοπ	Α. Πελοπ	Δ. Στερεά	Ήπειρος	Α. Στερεά	Θεσσαλία	
(α) Αριθμός υδατορευμάτων								
Τάξη:	1	86	64	81	190	135	137	276
	2	23	21	26	43	36	40	69
	3	3	3	5	11	10	11	15
	4	1	-	1	3	3	2	4
	5	-	-	-	1	-	-	1
Σύνολο		113	88	113	248	184	190	365
(β) Μέσες τιμές του λόγου διακλαδώσεων (R_B)								
Τάξη:	2	3,20	2,85	2,86	3,67	4,00	3,38	2,75
	3	3,61	2,94	2,98	3,65	3,47	2,65	3,64
	4	4,09		3,42	2,97	2,82	3,37	3,50
	5				3,16			3,72
Μέση τιμή		3,38	2,86	2,94	3,52	3,49	3,12	3,24
(γ) Μέσες τιμές εμβαδού υπολεκανών (km²)								
Τάξη:	1	37,4	35,6	42,0	37,2	42,0	36,4	37,7
	2	157,1	151,1	161,6	163,9	190,5	163,4	152,9
	3	993,3	576,1	399,2	735,3	725,9	427,3	770,0
	4	3500,3		1752,8	1592,7	1482,4	2083,4	2254,1
	5				5891,0			10776,6
(δ) Μέσες τιμές του λόγου εμβαδών (R_A)								
Τάξη:	2	4,33	4,48	4,80	6,67	5,86	4,73	4,04
	3	5,08	3,68	3,38	4,65	4,52	3,14	4,62
	4	5,26		3,72	3,80	3,41	3,92	3,74
	5				3,55			4,15
Μέση τιμή		4,57	4,33	4,32	5,11	4,71	4,08	4,21
(ε) Μέσες τιμές μηκών υδατορευμάτων (km)								
Τάξη:	1	5,6	5,3	6,7	4,5	5,8	5,3	5,9
	2	20,3	19,8	21,8	18,2	19,2	19,8	18,0
	3	59,1	47,3	30,3	54,2	51,2	34,7	54,4
	4	128,3		87,3	96,8	99,8	87,9	78,2
	5				209,5			197,4
(ζ) Μέσες τιμές του λόγου μηκών (R_L)								
Τάξη:	2	4,60	4,89	4,39	7,02	4,97	4,25	4,51
	3	2,67	2,64	2,37	3,70	3,20	2,38	3,10
	4	2,95		2,47	3,05	2,75	2,55	2,46
	5				2,44			2,36
Μέση τιμή		4,09	4,47	3,66	4,59	3,72	3,40	3,57

Πίνακας 3.1 (συνέχεια): Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου της Ελλάδας καταταγμένα ανά υδατικό διαμέρισμα.

	Δ. Μακεδ	Κ. Μακεδ	Α. Μακεδ	Θράκη	Κρήτη *	Αττική *	Ελλάδα	
(α) Αριθμός υδατορευμάτων								
Τάξη:	1	219	87	214	122	135	44	1790
	2	58	24	58	30	33	11	472
	3	13	8	13	7	10	3	112
	4	3	1	4	2	1	-	25
	5	-	-	1	-	-	-	3
Σύνολο		293	120	290	161	179	58	2402
(β) Μέσες τιμές του λόγου διακλαδώσεων (R_B)								
Τάξη:	2	4,00	5,00	2,50	6,14	4,56	7,00	3,78
	3	3,15	3,12	2,45	2,00	3,01	3,46	3,14
	4	3,22	2,97	3,71	3,36	2,46		3,23
	5			3,28				3,38
Μέση τιμή		3,53	3,57	3,02	5,17	3,75	4,35	3,48
(γ) Μέσες τιμές εμβαδού υπολεκανών (km²)								
Τάξη:	1	36,0	36,9	41,4	32,1	21,2	16,5	34,7
	2	165,6	220,8	175,5	260,6	105,9	110,6	165,1
	3	567,9	607,4	450,1	382,2	253,6	279,9	536,3
	4	2532,9	1625,0	2731,0	1918,2	537,5		2064,3
	5			5648,5				7438,7
(δ) Μέσες τιμές του λόγου εμβαδών (R_A)								
Τάξη:	2	5,74	9,11	3,91	9,96	6,03	9,89	5,71
	3	3,75	3,98	3,11	2,79	3,59	4,47	3,89
	4	3,78	3,58	4,04	4,16	2,89		3,81
	5			3,68				3,79
Μέση τιμή		4,62	5,21	3,78	8,08	4,77	5,82	4,81
(ε) Μέσες τιμές μηκών υδατορευμάτων (km)								
Τάξη:	1	5,4	5,9	5,9	5,0	4,5	3,2	5,35
	2	20,6	24,5	20,6	29,9	15,7	16,6	20,20
	3	37,8	44,8	29,7	29,2	23,6	24,2	39,42
	4	118,2	107,1	89,4	85,7	35,4		94,16
	5			120,0				175,64
(ζ) Μέσες τιμές του λόγου μηκών (R_L)								
Τάξη:	2	4,28	7,45	5,14	7,23	4,35	7,38	5,04
	3	2,78	2,68	1,66	2,66	2,45	3,02	2,76
	4	2,61	2,63	2,32	2,71	1,92		2,60
	5			2,10				2,30
Μέση τιμή		3,40	3,87	3,11	5,87	3,37	4,11	3,90

* Η Αττική και η Κρήτη εξετάστηκαν με κατώφλι 128 (το μισό απ' ότι τα υπόλοιπα διαμερίσματα).

Πίνακας 3.2: Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά υδρογραφικού δικτύου σε παγκόσμια κλίμακα. Πηγή: *Vörösmarty et al., (2000)*.

	Αφρική	Ασία	Αυστραλία	Ευρώπη	Βόρ. Αμερική	Νότ. Αμερική	Παγκόσμια *	
(α) Αριθμός υδατορευμάτων								
Τάξη:	1	4433	10074	1370	2825	6260	2574	27673
	2	839	1615	249	438	864	443	4456
	3	187	330	59	81	152	97	906
	4	41	65	10	14	26	20	176
	5	9	13	2	4	7	3	38
	6	-	1	-	-	-	1	2
Σύνολο		5509	12098	1690	3362	7309	3138	33251
(β) Μέσες τιμές του λόγου διακλαδώσεων (R_B)								
Τάξη:	2	3,15	3,37	3,38	3,70	3,48	3,36	3,41
	3	3,41	3,67	3,49	3,96	3,70	3,24	3,62
	4	3,82	4,00	3,15	4,44	3,75	3,94	3,90
	5	3,96	4,06	3,55	3,45	4,17	4,40	3,96
	6		3,78				3,82	3,80
Μέση τιμή (τάξεις 3-6)		3,57	3,78	3,45	3,97	3,75	3,49	3,70
(γ) Μέσες τιμές εμβαδού υπολεκανών (10^3 km^2)								
Τάξη:	1	4,4	3,0	3,8	2,5	2,5	4,6	3,2
	2	22,6	16,3	19,5	14,0	14,9	24,5	18,0
	3	98,3	75,0	79,5	62,4	73,8	105,2	82,0
	4	399,0	354,0	278,0	273,0	305,0	554,0	369,0
	5	1970,0	1350,0	1000,0	634,0	1370,0	2330,0	1490,0
	6		2420,0				5850,0	4140,0
(δ) Μέσες τιμές του λόγου εμβαδών (R_A)								
Τάξη:	2	4,90	5,19	5,05	5,77	5,54	5,42	5,32
	3	4,28	4,59	4,43	5,00	4,75	4,15	4,57
	4	4,44	4,69	3,74	5,13	4,45	4,62	4,57
	5	4,42	4,56	4,06	3,88	4,55	4,97	4,43
	6		4,11				4,18	4,15
Μέση τιμή (τάξεις 3-6)		4,33	4,61	4,32	4,91	4,69	4,31	4,55
(ε) Μέσες τιμές μηκών υδατορευμάτων (km)								
Τάξη:	1	91	76	84	72	71	92	79
	2	281	238	245	222	228	304	249
	3	637	563	565	507	551	704	586
	4	1240	1340	1110	1030	1220	1630	1300
	5	2860	2860	1410	1640	2770	2930	2645
	6		4387				4330	4360
(ζ) Μέσες τιμές του λόγου μηκών (R_L)								
Τάξη:	2	3,06	3,11	3,02	3,26	3,26	3,27	3,17
	3	2,53	2,57	2,55	2,72	2,68	2,52	2,60
	4	2,38	2,48	2,32	2,64	2,51	2,59	2,48
	5	2,28	2,41	2,02	2,13	2,42	2,34	2,32
	6		2,30				2,12	2,21
Μέση τιμή (τάξεις 3-6)		2,47	2,53	2,49	2,65	2,63	2,52	2,55

* Τα αποτελέσματα στην Παγκόσμια στήλη περιλαμβάνουν και πολλά νησιά.

τάξη (λόγος μηκών). Στη συνέχεια περιγράφουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν και παραθέτουμε τους συγκεντρωτικούς πίνακες των μέσων τιμών τους ανά υδατικό διαμέρισμα καθώς και ορισμένες γραφικές παραστάσεις που τα περιγράφουν καλύτερα.

3.2.1 Αριθμός υδατορευμάτων

Ο αριθμός των υδατορευμάτων μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της τάξης τους. Έχουμε συνολικά 1790 τμήματα τάξης ένα, 472 τμήματα τάξης δύο, 112 τμήματα τάξης τρία, 25 τμήματα τάξης τέσσερα και 3 τμήματα τάξης πέντε. Η μείωση αυτή καθώς και η κυριαρχία των τμημάτων τάξης ένα, παρατηρείται σε όλα τα υδατικά διαμερίσματα και σε όλες τις λεκάνες. Χαρακτηριστικά οι ποταμοί: Πηνειός Θεσσαλίας, Αχελώος και Στρυμόνας² προκύπτουν τάξης πέντε³, ο Αλιάκμονας, ο Αλφειός, ο Βοιωτικός Κηφισός (μεταξύ άλλων 18 συνολικά), τάξης τέσσερα και ο Εύηνος, Μόρνος, Ευρώτας (μεταξύ άλλων 47) τάξης τρία.

Για να παραστήσουμε τη μεταβολή του αριθμού των τμημάτων με την τάξη τους, σχεδιάζουμε τη γραφική παράσταση της τάξης, συναρτήσει του λογάριθμου του αριθμού τους, για κάθε λεκάνη χωριστά. Παρατηρούμε ότι οι παραστάσεις που προκύπτουν είναι ευθείες. Στο Σχήμα 3.1 εξετάζουμε 14 χαρακτηριστικές λεκάνες, εκ των οποίων 3 είναι τάξης πέντε, 7 τάξης τέσσερα και 4 τάξης τρία. Οι ευθείες αυτές φανερώουν την εσωτερική ομοιότητα των υδρογραφικών δικτύων, ανεξαρτήτως διαμερίσματος ή τάξης. Έστω ότι η εξίσωση της προσεγγιστικής ευθείας είναι:

$$\log_{10} N_w = a + b_B w \quad (3.1)$$

όπου N_w είναι ο αριθμός των τμημάτων τάξης w και b_B η κλίση της ευθείας. Για δύο διαδοχικές τάξεις αν αφαιρέσουμε κατά μέλη παίρνουμε:

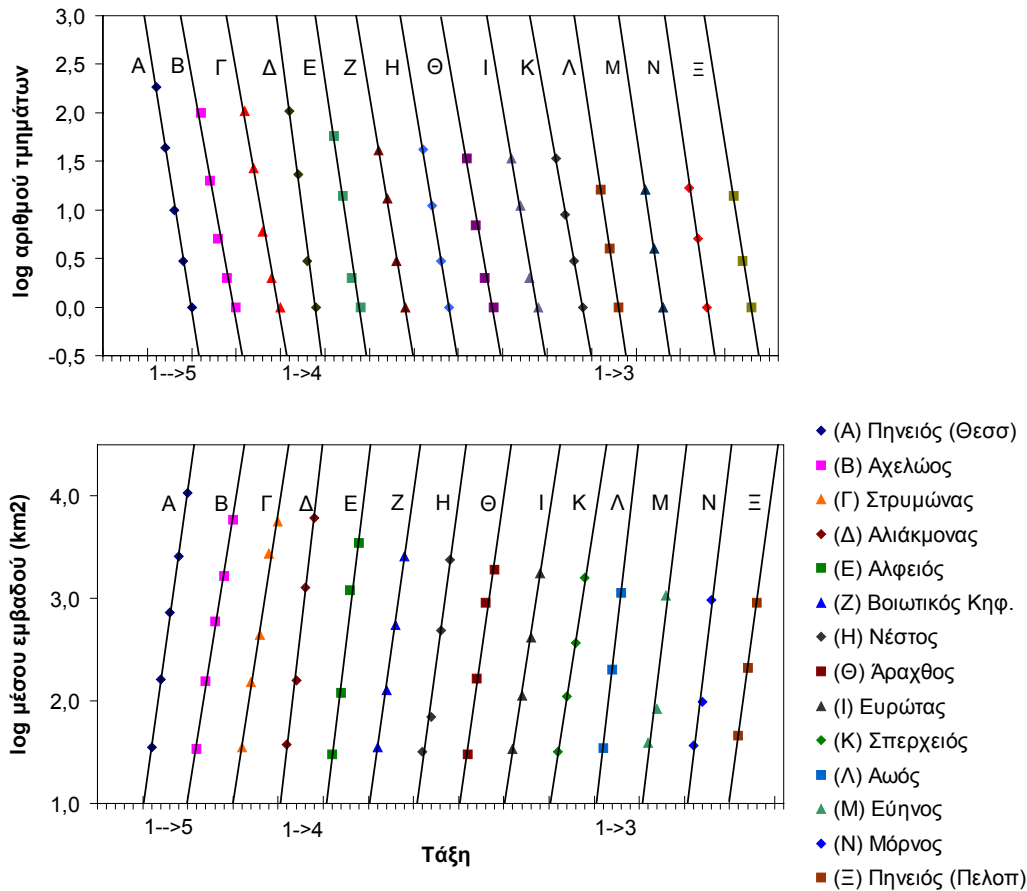
$$\log_{10} N_w - \log_{10} N_{w+1} = b_B (w - (w+1)) \Rightarrow \log_{10} \frac{N_w}{N_{w+1}} = -b_B \Rightarrow R_B = 10^{-b_B} \quad (3.2)$$

Συγκεκριμένα, για αυτές τις λεκάνες η μέση τιμή του συντελεστή R^2 είναι 0.988 που φανερώνει πόσο καλά ταιριάζουν οι ευθείες που προέρχονται από γραμμική παλινδρόμηση στα σημεία μας.

Συνολικά για όλη την Ελλάδα, η μέση τιμή του λόγου διακλαδώσεων προκύπτει $R_B = 3.48$. Παρατηρείται μια μικρή αύξηση στην τιμή του με την αύξηση της τάξης, μη λαμβάνοντας υπόψη τη μέση τιμή του για λεκάνες τάξης δύο. Δηλαδή, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1β, η μέση τιμή του λόγου για λεκάνες τάξης δύο είναι 3.78, για λεκάνες τάξης τρία 3.14, για λεκάνες τάξης τέσσερα 3.23 και για λεκάνες τάξης πέντε 3.38. Τα τυπικά όρια διακύμανσης του λόγου αυτού σύμφωνα με τους Vörösmarty *et al.*, (2000) είναι από 3.0 έως 4.5 και οι ίδιοι βρίσκουν για όλη τη γη την τιμή 3.70 μη λαμβάνοντας υπόψη τις λεκάνες τάξης δύο. Η μέση τιμή του λόγου για όλη την Ελλάδα μη λαμβάνοντας υπόψη τις λεκάνες τάξης 2 προκύπτει: 3.17. Γενικά, οι μέσες τιμές του λόγου αυτού κυμαίνονται μεταξύ 2.86 για το διαμέρισμα της Βόρειας Πελοποννήσου και 5.17

² Ο Στρυμόνας δεν μελετήθηκε ολόκληρος αλλά μόνο το τμήμα του που βρίσκεται σε ελληνικό έδαφος. Ομοίως και ο Αξιός.

³ Σύμφωνα με το κατώφλι που επιλέξαμε και το σύστημα κατάταξης κατά Strahler.

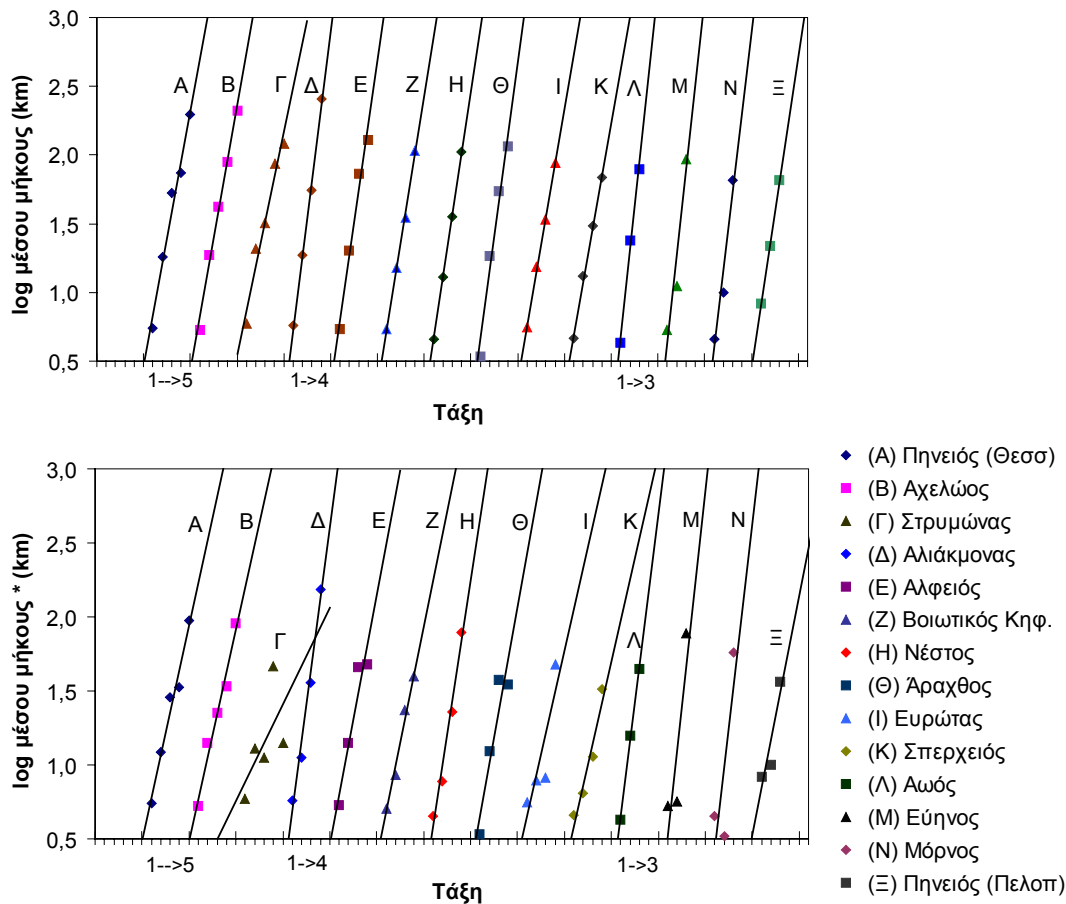


Σχήμα 3.1: Σχέση τάξης υδατορευμάτων (κατά Strahler) με τον αριθμό τους (πάνω) και το μέσο εμβαδόν των αντίστοιχων υπολεκανών τους (κάτω), για ορισμένες αντιπροσωπευτικές λεκάνες στη Ελλάδα. Οι λεκάνες είναι: Α-Γ τάξης πέντε, Δ-Κ τάξης τέσσερα και Λ-Ξ τάξης τρία.

για το διαμέρισμα της Θράκης⁴. Τα αποτελέσματα των Vörösmarty *et al.*, (2000) τα παραθέτουμε για σύγκριση στον Πίνακα 3.2.

Για να έχουμε μια καλύτερη αίσθηση της μεταβλητότητας του λόγου σε σχέση με την τάξη των λεκανών, απεικονίζουμε τη διασπορά των αποτελεσμάτων, ανά τάξη, με τη συχνότητα που εμφανίζονται. Για να το κάνουμε αυτό, χωρίζουμε το εύρος στο οποίο κυμαίνονται οι τιμές του λόγου R_B σε κλάσεις. Συγκεκριμένα, επιλέγουμε επτά κλάσεις με διαφορά μονάδας μεταξύ τους. Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον αριθμό των λεκανών που αντιστοιχούν σε κάθε κλάση και τυποποιούμε τη συχνότητα εμφάνισής

⁴ Οι μέσες τιμές που εμφανίζονται στους πίνακες των χαρακτηριστικών (για την Ελλάδα και Παγκόσμια), δεν αντιπροσωπεύουν τη μέση τιμή κάθε στήλης ή γραμμής του πίνακα. Έχουν προκύψει από την εξέταση όλων των λεκανών μαζί. Για παράδειγμα, η μέση τιμή του λόγου διακλαδώσεων για λεκάνες τάξης 2, για την Ελλάδα, προκύπτει από τη μέση τιμή των λόγων όλων των λεκανών και των 72. Αντίστοιχα, η μέση τιμή του ίδιου λόγου για το διαμέρισμα της δυτικής Πελοποννήσου, προκύπτει σαν μέση τιμή όλων των λεκανών του διαμερίσματος. Ομοίως υπολογίζουμε και τις μέσες τιμές των εμβαδών των υπολεκανών. Δηλαδή για την πρώτη τάξη, εξετάζουμε το εμβαδό των υπολεκανών τάξης 1 και των 140 λεκανών. Ομοίως και για τα μήκη.



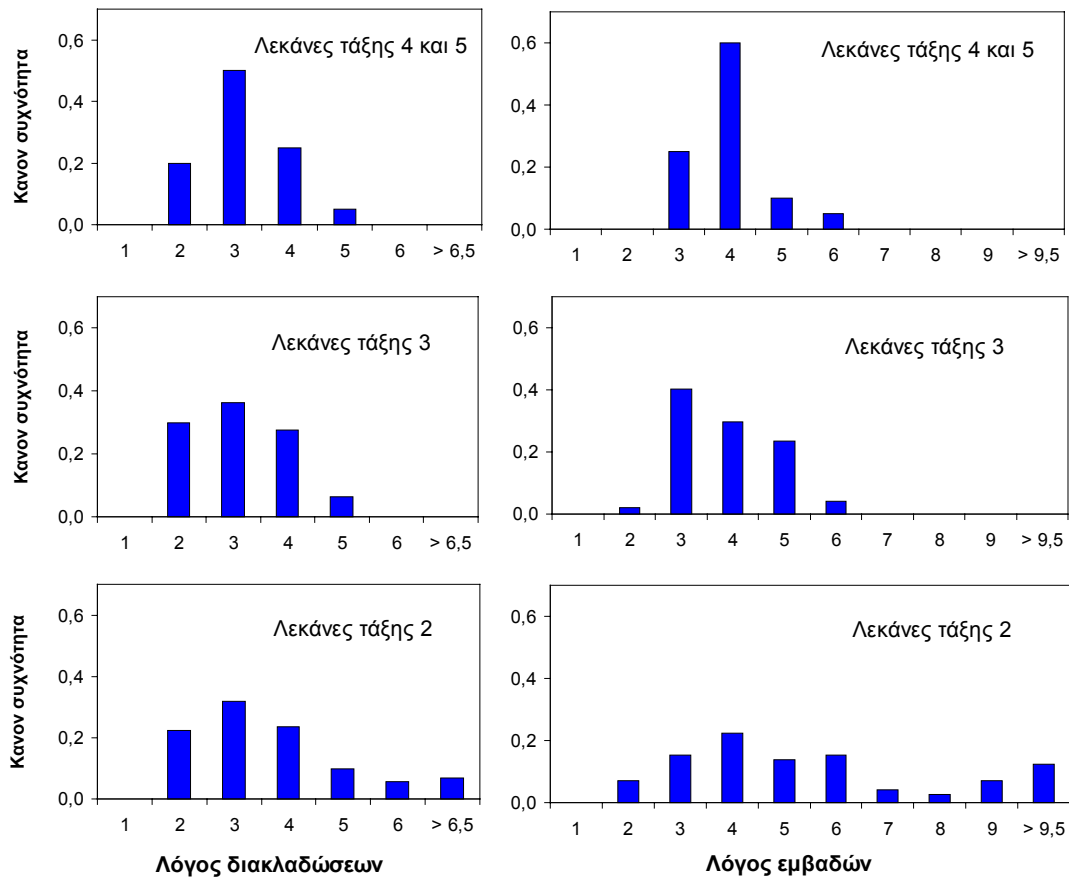
Σχήμα 3.2: Σχέση τάξης υδατορευμάτων (κατά Strahler) με το μέσο μήκος τους για διάφορες λεκάνες της Ελλάδας. Η κάτω παράσταση δείχνει τα αποτελέσματα που προέκυψαν με το δεύτερο τρόπο υπολογισμού του μέσου μήκους ενός υδατορευματος τάξης $i > 1$, χωρίς να λογαριάζονται τα μήκη των ανάντη τμημάτων μικρότερης τάξης.

τους ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα. Τα ραβδογράμματα που προκύπτουν φαίνονται στο Σχήμα 3.3.

Η διασπορά του R_B για τάξεις λεκανών τέσσερα και πέντε είναι γενικά μικρή με πιο συχνό το εύρος από 2.5 έως 3.5 ($2.5 < E \leq 3.5$). Αντίθετα για λεκάνες τάξης δύο και τρία, έχουμε μεγαλύτερη μεταβλητότητα και εύρος τιμών αντίστοιχα.

3.2.2 Εμβαδό υπολεκανών

Η εκθετική σχέση που παρατηρήθηκε μεταξύ της τάξης των υδατορευμάτων και του αριθμού τους, ισχύει και με το μέσο εμβαδό των υπολεκανών αλλά με ανάλογο τρόπο: αύξηση τάξεων συνεπάγεται εκθετική αύξηση του μέσου εμβαδού των υπολεκανών. Αυτή η σχέση παρατηρείται και στα διαμερίσματα και στις επιμέρους λεκάνες, ανεξαρτήτως τάξης. Οι μέσες τιμές των εμβαδών φαίνονται στον Πίνακα 3.1γ. Παρατηρούμε ότι η μέση τιμή του εμβαδού, για μία συγκεκριμένη τάξη υπολεκάνης, έχει ένα μεγάλο



Σχήμα 3.3: Κανονικοποιημένη συχνότητα διασποράς των μέσων τιμών των λόγων διακλαδώσεων και των λόγων εμβαδών για διάφορες τάξεις λεκανών. Αυτές οι τιμές έχουν βρεθεί εξετάζοντας συνολικά όλες τις λεκάνες που προέκυψαν.

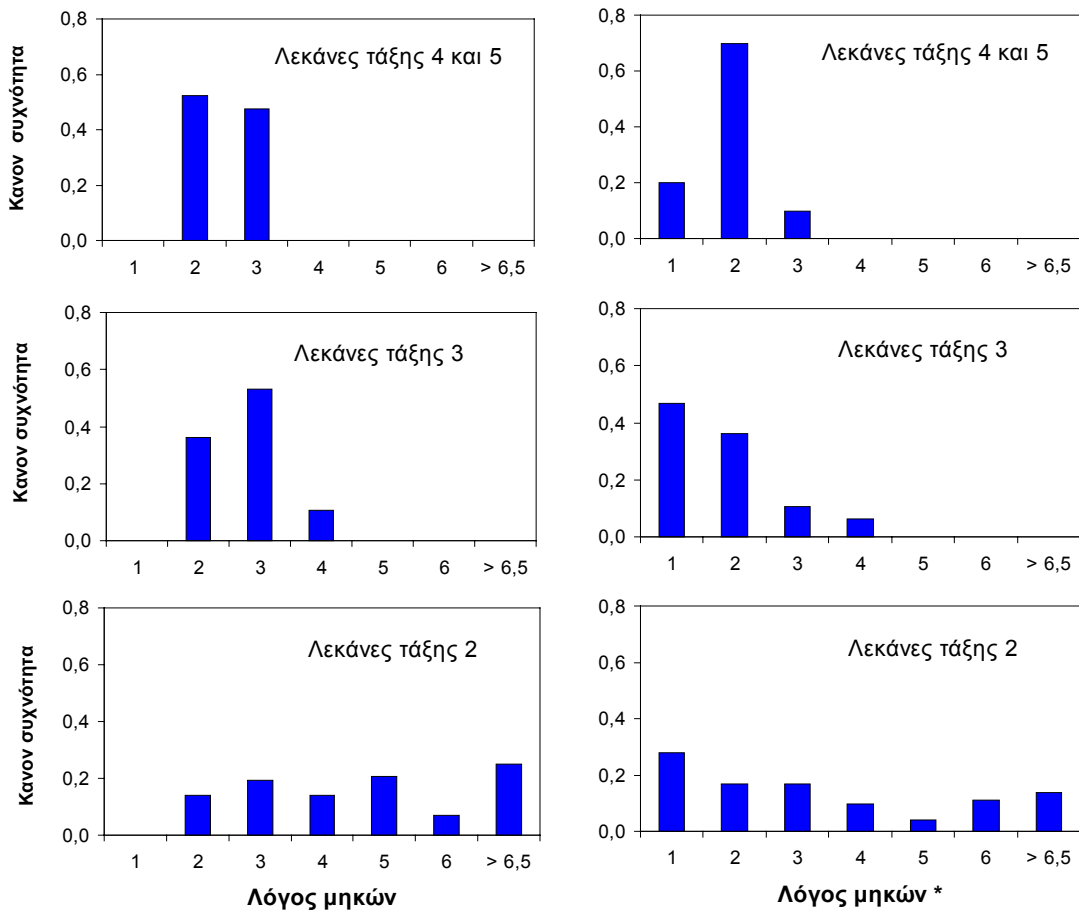
εύρος διακύμανσης στα διάφορα διαμερίσματα και συνεπώς δεν μπορούμε να συμπεράνουμε το μέγεθος του εμβαδού μιας υπολεκάνης γνωρίζοντας την τάξη της.

Παρόλο αυτό το μεγάλο εύρος γεωγραφικών διαφορών που παρατηρείται (στην Ελλάδα και Παγκόσμια), εξετάζοντας χωριστά τις υδρολογικές λεκάνες θα διαπιστώσουμε ότι υπάρχει μια αξιοθαύμαστη ομοιομορφία, για κάθε λεκάνη, μεταξύ του μέσου εμβαδού των υπολεκανών της και της τάξης τους. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται καθαρά αυτή η σχέση και στις 14 υπό εξέταση λεκάνες. Στον άξονα των x , έχουμε την τάξη που ανακυκλώνεται συνεχώς και στον άξονα των y , το λογάριθμο του μέσου εμβαδού⁵.

Έστω η εξίσωση που προκύπτει από τη γραμμική παλινδρόμηση των δεδομένων σημείων είναι:

$$\log_{10} A_w = a + b_A w \quad (3.3)$$

⁵ Για παράδειγμα, το μέσο εμβαδό των υπολεκανών τάξης δύο, σε μία λεκάνη, προκύπτει από το λόγο του συνολικού εμβαδού των υπολεκανών τάξης δύο προς τον αριθμό των υπολεκανών τάξης δύο κ.ο.κ.



Σχήμα 3.4: Κανονικοποιημένη συχνότητα διασποράς των μέσων τιμών του λόγου μηκών, για διάφορες τάξεις λεκανών. Ο αστερίσκος (*) υποδηλώνει τα αποτελέσματα που προέκυψαν με το δεύτερο τρόπο υπολογισμού του μέσου μήκους (χωρίς να λογαριάζονται τα ανάντη τμήματα μικρότερης τάξης).

όπου A_w είναι το μέσο εμβαδό των υπολεκανών τάξης w και b_A η κλίση της ευθείας. Για δύο διαδοχικές τάξεις αν αφαιρέσουμε κατά μέλη παίρνουμε:

$$\log_{10} A_{w+1} - \log_{10} A_w = b_A (w+1 - w) \Rightarrow \log_{10} \frac{A_{w+1}}{A_w} = b_A \Rightarrow R_A = 10^{b_A} \quad (3.4)$$

Η μέση τιμή του R^2 για τις 14 λεκάνες προκύπτει: 0.983 που φανερώνει πόσο καλά προσεγγίζονται τα σημεία μας.

Συνολικά για όλη την Ελλάδα, η μέση τιμή του λόγου εμβαδών προκύπτει 4.81 και ανάμεσα στα διαμερίσματα κυμαίνεται από 4.1 για το διαμέρισμα της Ανατολικής Στερεάς μέχρι 8.1 για το διαμέρισμα της Θράκης (Πίνακας 3.1δ). Αντίστοιχα, για όλο τον κόσμο η μέση τιμή του λόγου είναι 4.55 και κυμαίνεται από 4.3 για την Αυστραλία μέχρι 4.9 για την Ευρώπη (Πίνακας 3.2δ). Παρατηρούμε δηλαδή, μια πολύ καλή συμφωνία σε παγκόσμιο και τοπικό επίπεδο. Το τυπικό εύρος διακύμανσης του λόγου είναι από 3.5 έως 6.0.

Με τον ίδιο τρόπο που περιγράψαμε προηγουμένως, εκφράζουμε αυτή τη διακύμανση των τιμών του λόγου R_A και της συχνότητας εμφάνισής τους, ανά τάξη λεκανών (Σχήμα 3.3). Παρατηρούμε και εδώ ένα μεγάλο εύρος διακύμανσης των τιμών για λεκάνες τάξης δύο. Για λεκάνες τάξης τρία έχουμε μια δραστική μείωση αυτού του εύρους και στις λεκάνες τάξης τέσσερα και πέντε έχουμε ένα εύρος τεσσάρων κλάσεων με την περιοχή από 3.5 έως 4.5 ($3.5 < E \leq 4.5$) να λαμβάνει ποσοστό 60%.⁶

3.2.3 Μήκη υδατορευμάτων

Σαν μήκος υδατορεύματος τάξης w ή i ορίσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο το συνολικό μήκος τμήματος τάξης w , λαμβάνοντας υπόψη και τα μήκη των ανάντη τμημάτων μικρότερης τάξης. Ξεκινάμε δηλαδή από το κατάντη πέρας του τμήματος που μας ενδιαφέρει και προχωράμε ανάντη επιλέγοντας κάθε φορά το υδατόρευμα με την αμέσως μικρότερη τάξη, σαν πρώτη προτεραιότητα, και το μεγαλύτερο μήκος σαν δεύτερη. Για κάθε λεκάνη υπολογίζουμε το συνολικό αριθμό των τμημάτων κάθε τάξης και το συνολικό μήκος τους. Για να βρούμε τα μέσα μήκη, διαιρούμε κάθε φορά το συνολικό μήκος των τμημάτων τάξης w προς τον αριθμό των τμημάτων ίδιας τάξης. Έτσι εξαγάγουμε και το λόγο των μηκών R_L όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.4.1.2.

Τα μέσα μήκη των υδατορευμάτων αυξάνουν ανάλογα με την αύξηση της τάξης τους και μάλιστα διπλασιάζονται κάθε φορά από την τάξη τρία και πάνω. Για τμήματα τάξης ένα, το μέσο μήκος τους για όλη την Ελλάδα προκύπτει περίπου 5 km, για τμήματα τάξης δύο σχεδόν 20 km, τάξης τρία 40 km, τάξης τέσσερα 94 km και τάξης πέντε 175 km. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 3.1ε. Μάλιστα, συγκρίνοντας τα μέσα μήκη των τάξεων δύο και τρία στα διάφορα διαμερίσματα, παρατηρούμε ότι το εύρος διακύμανσής τους είναι πολύ μικρό σε αντίθεση με το εύρος διακύμανσης των μηκών μεγαλύτερων τάξεων.

Σχεδιάζοντας τη γραφική παράσταση της τάξης των υδατορευμάτων συναρτήσει του λογάριθμου του μέσου μήκους τους και για τις 14 λεκάνες που εξετάσαμε προηγουμένως, παρατηρούμε μια ακόμα επαλήθευση του νόμου των μηκών. Στο Σχήμα 3.2 φαίνονται οι παραστάσεις που προέκυψαν και με τους δύο τρόπους και από απλή παρατήρηση διαπιστώνεται η υπεροχή της πρώτης μεθόδου. Για την εξαγωγή του λόγου εγαζόμαστε με τον ίδιο τρόπο. Έστω ότι η εξίσωση που περιγράφει τη γραμμική τάση που προσεγγίζει καλύτερα τα σημεία μας έχει τη μορφή:

$$\log_{10} L_w = a + b_L w \quad (3.5)$$

όπου L_w είναι το μέσο μήκος των υδατορευμάτων τάξης w και b_L η κλίση της γραμμής. Για δύο διαδοχικές τάξεις, αν αφαιρέσουμε κατά μέλη παίρνουμε:

$$\log_{10} L_{w+1} - \log_{10} L_w = b_L (w+1 - w) \Rightarrow \log_{10} \frac{L_{w+1}}{L_w} = b_L \Rightarrow R_L = 10^{b_L} \quad (3.6)$$

Η μέση τιμή του R^2 για τις υπό εξέταση λεκάνες προκύπτει 0.979 για την πρώτη περίπτωση και 0.857 για τη δεύτερη.

Η μέση τιμή του λόγου για όλη την Ελλάδα προκύπτει 3.90 που είναι μια σχετικά υψηλή τιμή λαμβάνοντας υπόψη τα συνήθη (μέσες τιμές) όρια διακύμανσης του λόγου

⁶ Αυτό φυσικά σημαίνει ότι το 60% των λεκανών τάξης τέσσερα και πέντε έχουν λόγο εμβαδών που κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 3.5 και 4.5.

που κυμαίνονται μεταξύ 2.0 και 3.5. Ειδικά για τις λεκάνες τάξης δύο η μέση τιμή είναι αρκετά μεγάλη (5.04) – με τιμές που κυμαίνονται από 1.6 για τη λεκάνη Κομποτά Ηπείρου, μέχρι 13.7 για τη λεκάνη Ξηρορέμματος στη Θράκη– ενώ για λεκάνες τάξης τρία είναι 2.76, τάξης τέσσερα 2.6 και τάξης πέντε 2.3· παρατηρείται δηλαδή μια μικρή μείωση του λόγου με την αύξηση της τάξης. Αν δεν λάβουμε υπόψη τις λεκάνες τάξης δύο, η μέση τιμή του λόγου προκύπτει 2.69, μια τιμή πολύ κοντά στη μέση τιμή για όλο τον κόσμο που είναι 2.55 (εκτός των λεκανών τάξης δύο και εδώ). Οι μέσες τιμές που προκύπτουν για τα διαμερίσματα ποικίλουν από 3.40, για την Ανατολική Στερεά και τη Δυτική Μακεδονία, μέχρι 5.87 για τη Θράκη.

Οι αυξημένες τιμές και των τριών λόγων ειδικά στο διαμέρισμα της Θράκης, φανερώνουν έναν ιδιαίτερο γεωμορφολογικό χαρακτήρα της περιοχής ο οποίος περιγράφεται στην παράγραφο 3.3.3.

Όσον αφορά τη διασπορά των τιμών του R_L , στο Σχήμα 3.4 διαπιστώνεται (όπως και για τους δύο προηγούμενους λόγους) ένα μεγάλο εύρος για λεκάνες τάξης δύο, για τις λεκάνες τάξης τρία έχουμε ένα εύρος τριών κλάσεων με τιμές από 1.5 έως 4.5 και για λεκάνες τάξης τέσσερα και πέντε ένα εύρος δύο τάξεων από 1.5 έως 3.5. Στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται και η διασπορά των τιμών που προκύπτουν με το δεύτερο τρόπο. Εδώ παρατηρούμε ένα μεγαλύτερο εύρος τιμών σε όλες τις τάξεις, πράγμα που φανερώνει ένα ακόμα μειονέκτημα της δεύτερης θεώρησης.

3.3 Υδρολογικές λεκάνες

Σαν κύρια χαρακτηριστικά των υδρολογικών λεκανών εξετάζονται ο αριθμός τους ανά τάξη, το εμβαδόν τους, τα μήκη των κύριων υδατορευμάτων τους, ο δείκτης σχήματος λεκάνης S_B , ο λόγος Schumm E_T καθώς και η μέση κλίση τους. Εδώ να παρατηρήσουμε ότι σε αυτήν την ενότητα εξετάζουμε τις λεκάνες συνολικά, χωρίς να ενδιαφερόμαστε για την εσωτερική δομή τους την οποία την εξετάσαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Ακόμα, εξετάζουμε τη σχέση που υπάρχει μεταξύ του εμβαδού των λεκανών και του μήκους του κύριου υδατορεύματος που απορρέει σε αυτές. Τα αποτελέσματα τα πινακοποιούμε ανά υδατικό διαμέρισμα.

3.3.1 Αριθμός υδρολογικών λεκανών

Συνολικά, ο αριθμός των λεκανών που εξετάσαμε είναι 140 εκ των οποίων οι 72 είναι τάξης δύο, 47 τάξης τρία, 18 τάξης τέσσερα και 3 τάξης πέντε. Οι περισσότερες λεκάνες μη λαμβάνοντας υπόψη το διαμέρισμα της Κρήτης⁷ εμφανίζονται στη Δυτική Μακεδονία (16 στον αριθμό) και οι λιγότερες στη Δυτική Πελοπόννησο (7). Παρατηρούμε ότι ο αριθμός τους μειώνεται πολύ γρήγορα με την αύξηση της τάξης. Τα αποτελέσματά μας, φαίνονται στον Πίνακα 3.3β και αντίστοιχα των Vörösmarty *et al.*, στον Πίνακα 3.4β.

⁷ Όπως αναφέραμε, η Κρήτη και η Αττική αντιμετωπίστηκαν διαφορετικά. Έτσι, αρκετές λεκάνες που θα προέκυπταν τάξης ένα και δεν θα εξετάζονταν, προέκυψαν τάξης δύο.

Πίνακας 3.3: Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής της Ελλάδας καταταγμένα ανά υδατικό διαμέρισμα και ανά τάξη λεκάνης.

	Δ. Πελοπ	Β. Πελοπ	Α. Πελοπ	Δ. Στερεά	Ήπειρος	Α. Στερεά	Θεσσαλία
(α) Συνολική έκταση λεκανών (km²)							
Όλες οι τάξεις	6362,7	5647,9	6349,3	9392,9	8961,9	9549,9	12372,1
(β) Αριθμός λεκανών							
Τάξη:	2	5	13	7	3	4	8
	3	1	3	3	4	4	5
	4	1	-	1	1	3	2
	5	-	-	-	1	-	-
Όλες οι τάξεις	7	16	11	9	11	15	9
(γ) Μέσες τιμές εμβαδού (km²)							
Τάξη:	2	175,5	148,2	190,6	237,3	244,2	153,0
	3	775,1	576,1	394,8	806,1	825,5	415,0
	4	3500,3		1752,8	1538,2	1482,4	2083,4
	5				5891,0		10776,6
(δ) Μέσες τιμές μήκους κύριου υδατορεύματος (km)							
Τάξη:	2	21,21	20,52	26,87	25,4	22,19	20,03
	3	58,00	47,27	29,28	60,6	55,16	35,56
	4	123,43		87,66	104,5	103,81	92,61
	5				210,4		197,40
(ε) Μέσες τιμές δείκτη σχήματος (S_B)							
Τάξη:	2	1,61	1,67	1,97	1,62	1,43	1,60
	3	2,08	1,99	1,48	2,10	1,88	1,77
	4	2,09		2,09	2,66	2,76	2,01
	5				2,74		1,90
Μέση τιμή		1,75	1,73	1,85	2,07	1,96	1,71
(ζ) Μέσες τιμές λόγου Schumm (E_R)							
Τάξη:	2	0,71	0,70	0,60	0,72	0,80	0,75
	3	0,54	0,58	0,77	0,56	0,63	0,66
	4	0,54		0,54	0,42	0,41	0,58
	5				0,41		0,59
Μέση τιμή		0,66	0,68	0,64	0,58	0,63	0,70
(η) Μέσες τιμές μέσης κλίσης (%)							
Τάξη:	2	19,73	18,68	15,26	20,71	18,71	12,88
	3	12,99	15,41	15,24	26,75	20,66	16,16
	4	16,09		13,70	28,35	18,41	14,32
	5				21,49		9,63
Μέση τιμή		18,23	18,07	15,12	24,31	19,34	14,16

Πίνακας 3.3 (συνέχεια): Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής της Ελλάδας καταταγμένα ανά υδατικό διαμέρισμα και ανά τάξη λεκάνης.

	Δ. Μακεδ	Κ. Μακεδ	Α. Μακεδ	Θράκη	Κρήτη *	Αττική *	Ελλάδα	
(α) Συνολική έκταση λεκανών (km²)								
Όλες οι τάξεις	12544,6	8475,8	6958,8	9399,6	6652,3	2332,6	105000,4	
(β) Αριθμός λεκανών								
Τάξη:	2	7	2	2	7	9	1	72
	3	6	5	1	1	8	3	47
	4	3	1	2	2	1	-	18
	5	-	-	1	-	-	-	3
Όλες οι τάξεις	16	8	6	6	10	18	4	140
(γ) Μέσες τιμές εμβαδού (km²)								
Τάξη:	2	212,9	281,8	176,1	335,1	133,1	227,8	191,3
	3	528,9	651,9	485,3	231,5	253,7	279,9	534,0
	4	2533,4	1625,0	2730,7	1918,2	537,5		1999,4
	5			5648,5				7438,7
(δ) Μέσες τιμές μήκους κύριου υδατορεύματος (km)								
Τάξη:	2	24,32	29,29	21,71	37,40	18,32	33,90	23,55
	3	36,45	46,96	22,56	20,37	24,97	27,43	40,06
	4	118,24	107,11	90,99	85,65	35,44		96,48
	5			120,00				175,94
(ε) Μέσες τιμές δείκτη σχήματος (S_B)								
Τάξη:	2	1,64	1,76	1,65	2,07	1,59	2,25	1,71
	3	1,68	1,85	1,02	1,34	1,62	1,67	1,77
	4	2,31	2,66	1,74	1,94	1,53		2,19
	5			1,60				2,08
Μέση τιμή		1,78	1,93	1,57	1,98	1,60	1,82	1,80
(ζ) Μέσες τιμές λόγου Schumm (E_R)								
Τάξη:	2	0,74	0,64	0,69	0,56	0,72	0,50	0,69
	3	0,69	0,64	1,10	0,84	0,70	0,68	0,67
	4	0,53	0,42	0,65	0,59	0,74		0,54
	5			0,71				0,57
Μέση τιμή		0,68	0,61	0,75	0,59	0,71	0,64	0,66
(η) Μέσες τιμές μέσης κλίσης (%)								
Τάξη:	2	12,33	8,67	16,11	8,32	17,59	13,77	15,44
	3	13,08	5,49	11,22	8,75	14,40	7,75	14,05
	4	13,76	4,72	10,07	12,19	12,10		14,27
	5			9,81				13,60
Μέση τιμή		12,88	6,18	12,22	9,14	15,86	9,25	14,78

* Η Αττική και η Κρήτη εξετάστηκαν με κατώφλι 128 (το μισό απ' ό,τι τα υπόλοιπα διαμερίσματα).

Πίνακας 3.4: Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής σε παγκόσμια κλίμακα.
Πηγή: *Vörösmarty et al., (2000)*.

	Αφρική	Ασία	Αυστραλία	Ευρώπη	Βόρ. Αμερική	Νότ. Αμερική	Παγκόσμια *
(α) Συνολική έκταση λεκανών (10⁶ km²)							
Όλες οι τάξεις	30,1	44,4	7,8	10,1	22,4	17,9	133,1
(β) Αριθμός λεκανών							
Τάξη:							
1	326	1470	209	621	1591	331	4663
2	152	355	74	138	302	94	1123
3	39	86	32	33	54	21	265
4	10	27	5	5	9	9	65
5	9	11	2	4	7	1	34
6	-	1	-	-	-	1	2
Όλες οι τάξεις	536	1950	322	801	1963	457	6152
(γ) Μέσες τιμές εμβαδού (10³ km²)							
Τάξη:							
1	5,0	3,1	4,5	2,4	2,1	4,4	3,0
2	20,2	15,6	17,9	13,9	12,8	21,7	16,0
3	81,8	78,3	79,7	64,7	58,3	81,1	73,4
4	444,0	336,0	191,0	400,0	270,0	464,0	355,0
5	1970,0	1460,0	1000,0	634,0	1370,0	2660,0	1490,0
6		2420,0				5850,0	4140,0
(δ) Μέσες τιμές μήκους κύριου υδατορεύματος (km)							
Τάξη:							
1	107	80,2	98,4	75,7	71,5	95,0	80,2
2	260	227	220	221	214	278	231
3	584	553	554	531	512	580	549
4	1316	1290	984	1372	1188	1535	1296
5	2846	2951	1378	1630	2767	3072	2641
6		4387				4327	4357
(ε) Μέσες τιμές δείκτη σχήματος (S_B)							
Τάξη:							
1	1,48	1,49	1,43	1,60	1,68	1,41	1,56
2	1,83	1,89	1,64	1,92	1,95	1,89	1,88
3	2,06	2,04	2,01	2,16	2,15	2,09	2,08
4	2,09	2,26	2,27	2,19	2,38	2,35	2,25
5	2,01	2,48	1,37	2,12	2,42	1,88	2,22
6		2,82				1,79	2,30
Μέση τιμή (τάξεις 3 - 6)	2,06	2,13	2,01	2,16	2,21	2,15	2,12
(ζ) Μέσες τιμές λόγου Schumm (E_R)							
Τάξη:							
1	0,82	0,84	0,86	0,79	0,81	0,85	0,82
2	0,65	0,64	0,73	0,64	0,65	0,63	0,65
3	0,58	0,59	0,58	0,54	0,55	0,56	0,57
4	0,55	0,56	0,51	0,53	0,49	0,49	0,53
5	0,59	0,51	0,88	0,54	0,48	0,6	0,55
6		0,40				0,63	0,52
Μέση τιμή (τάξεις 3 - 6)	0,58	0,57	0,59	0,54	0,54	0,54	0,56
(η) Μέσες τιμές μέσης κλίσης (m/km)							
Τάξη:							
1	3,40	3,33	3,00	2,94	2,87	5,83	3,2
2	3,77	3,52	1,70	2,47	2,63	6,00	3,28
3	2,61	3,11	0,93	2,03	2,28	3,27	2,49
4	1,05	2,66	0,66	2,21	2,10	2,23	2,17
5	1,34	2,72	0,8	0,52	2,2	1,59	2,19
6		1,83				1,73	1,97
Μέση τιμή (τάξεις 3 - 6)	1,75	2,81	1,27	1,84	2,36	2,74	2,38

* Τα αποτελέσματα στην Παγκόσμια στήλη περιλαμβάνουν και πολλά νησιά.

3.3.2 Εμβαδό λεκανών

Όπως παρατηρήσαμε και στο εμβαδόν των υπολεκανών, έχουμε μια προοδευτική αύξηση με την αύξηση της τάξης. Η μέση τιμή για λεκάνες τάξεις δύο είναι 190 km^2 , τάξης τρία 534 km^2 , τάξης τέσσερα 2000 km^2 και για λεκάνες τάξης πέντε 7440 km^2 . Παρόμοια με τις υπολεκάνες, το εύρος των τιμών είναι μεγάλο ανάμεσα στα διαμερίσματα και φανερώνει τις φυσιογραφικές διαφορές που επικρατούν (Πίνακας 3.3γ).

3.3.3 Μήκος κύριου υδατορεύματος

Οι μέσες τιμές των μηκών των κύριων υδατορευμάτων, βρίσκονται πολύ κοντά στις μέσες τιμές των μηκών των υδατορευμάτων που εξετάσαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Για όλη την Ελλάδα οι τιμές κυμαίνονται από 23.5 km για λεκάνες τάξης δύο, μέχρι 176 km για λεκάνες τάξης πέντε (Πίνακας 3.3δ). Ειδικά στα διαμερίσματα της Θράκης και της Αττικής, τα μήκη των κύριων υδατορευμάτων τάξης τρία είναι μικρότερα από αυτά των τάξεων δύο. Η Αττική έχει τρεις λεκάνες τάξης τρία και μια λεκάνη τάξης δύο, τον Σαρανταπόταμο, το μήκος του οποίου τυγχάνει να είναι μεγαλύτερο από τα μήκη των άλλων υδατορευμάτων ($L_J = 34 \text{ km}$). Η Θράκη έχει δύο λεκάνες τάξης τέσσερα, μια λεκάνη τάξης τρία και επτά λεκάνες τάξης δύο με αρκετά αυξημένα μήκη. Είναι χαρακτηριστικό ότι δύο δίκτυά της τάξης δύο, έχουν μήκη κύριου υδατορεύματος που υπερβαίνουν κατά πολύ τη μέση τιμή των δικτύων τάξης τρία που είναι τα 40 km (Ξηρόρεμμα 58 km και Ρέμα Ξάνθης 56 km). Αυτό το παράδοξο, ερμηνεύει και τις μεγάλες τιμές των λόγων που παρατηρήθηκαν προηγουμένως. Στην επόμενη ενότητα, θα έχουμε την ευκαιρία να συγκρίνουμε μερικές χαρακτηριστικές λεκάνες.

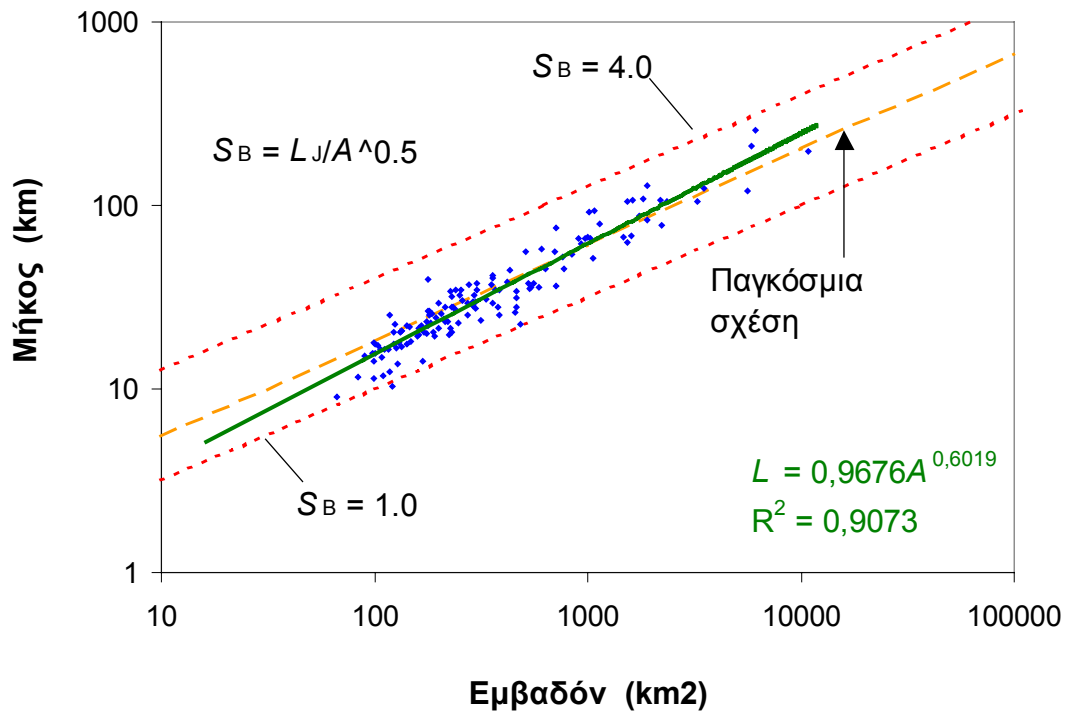
3.3.4 Σχέση μήκους κύριου υδατορεύματος και εμβαδού λεκάνης – Δείκτης σχήματος και λόγος Schumm

Το μήκος του κύριου υδατορεύματος συσχετίζεται πολύ καλά με το εμβαδόν της λεκάνης που του αντιστοιχεί. Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται καθαρά αυτή η σχέση. Τα 140 σημεία μας προσεγγίζονται αρκετά καλά από μία συνάρτηση δύναμης η οποία έχει εξίσωση:

$$L = 0.9676 A^{0.6019} \quad (3.7)$$

όπου L και A είναι σε μονάδες km και km^2 αντίστοιχα. Ο συντελεστής R^2 έχει τιμή 0.9073 που δείχνει την πολύ καλή προσέγγιση που υπάρχει. Οι Vörösmarty *et al.*, (2000) καταλήγουν σε μια ανάλογη σχέση $L = 1.64A^{0.523}$ με $R^2 = 0.87$ η οποία όπως χαρακτηριστικά λένε υποεκτιμά τα μήκη καθώς η κλίμακα μήκους που χρησιμοποίησαν είναι αρκετά μεγάλη⁸ και δεν λαμβάνει υπόψη την ελικοειδή μορφή των τμημάτων.

⁸ Υπενθυμίζουμε ότι σαν μέγεθος κυττάρου επιλέγη η επιφάνεια που αντιστοιχεί κάθε φορά σε γεωγραφικό πλάτος και μήκος μισής μοίρας. Στον ισημερινό, η έκταση αυτή αντιστοιχεί σε $3\,091 \text{ km}^2$ ενώ για γεωγραφικό πλάτος 45° σε $2\,176 \text{ km}^2$. Κατέληξαν λοιπόν στο συμπέρασμα ότι οι λεκάνες με εμβαδόν μεγαλύτερο των $25\,000 \text{ km}^2$ περιγράφονται με ικανοποιητική ακρίβεια, περιορισμός που ικανοποιείται από 522 λεκάνες σε σύνολο $6\,200$ που εξετάσανε. Βέβαια, το κατώφλι που ορίσανε ισούται με μονάδα, δηλαδή το υδρογραφικό δίκτυο περνάει από όλα τα κύτταρα.



Σχήμα 3.5: Σχέση εμβαδού λεκάνης με το μήκος του κύριου υδατορεύματος.

Το εύρος διακύμανσης των σημείων που παρατηρείται στο Σχήμα 3.5, οφείλεται στις διαφορές σχήματος των επιμέρους λεκανών. Ένας συντελεστής που συνδέει τα δύο μεγέθη (κύριο μήκος και εμβαδόν), όπως είδαμε στο 2^ο κεφάλαιο, είναι ο δείκτης σχήματος λεκάνης ($S_B = L_J/A^{0.5}$). Μεγάλες τιμές αυτού του συντελεστή υποδηλώνουν ένα πιο επιμήκες δίκτυο. Στον Πίνακα 3.3ε φαίνονται οι μέσες τιμές που προκύπτουν για τα διάφορα διαμερίσματα και ανά τάξη λεκάνης. Η μέση τιμή για όλη την Ελλάδα είναι 1.80 και για τη γη 2.12 μη λαμβάνοντας υπόψη τις λεκάνες τάξης δύο. Γενικά, παρατηρείται μια μικρή αύξηση των τιμών με την αύξηση της τάξης. Για λεκάνες τάξης δύο η μέση τιμή είναι 1.71, τάξης τρία 1.77, τάξης τέσσερα 2.19 και τάξης πέντε 2.08. Ανάμεσα στα διαμερίσματα, οι τιμές κυμαίνονται από 1.57 για την Ανατολική Μακεδονία (πιο κυκλικές λεκάνες), μέχρι 2.07 για τη Δυτική Στερεά (πιο επιμήκεις λεκάνες). Τα σημεία μας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5, περικλείονται από τις ευθείες που αντιστοιχούν σε $S_B = 1$ και $S_B = 4$.

Ένας άλλος δείκτης ο οποίος περιγράφει το σχήμα μιας λεκάνης είναι ο λόγος που προτάθηκε από τον Schumm ($E_T = \text{διάμετρος κύκλου με εμβαδό ίδιο με αυτό της λεκάνης} / L_J$). Αυτός ο λόγος αντιπροσωπεύει πόσο πλησιάζει μια λεκάνη το κυκλικό σχήμα. Υψηλές τιμές σχετίζονται με μια πιο κυκλική λεκάνη. Γενικά, ο λόγος κυμαίνεται μεταξύ 0.6 και 1.0. Η μέση τιμή για την Ελλάδα είναι 0.66 και παρατηρείται μια ελαφρά μείωση με την αύξηση της τάξης (Πίνακας 3.3ζ). Για λεκάνες τάξης δύο είναι 0.69, τάξης τρία 0.67, τάξης τέσσερα 0.54 και τάξης πέντε 0.57. Αντίστοιχα για την υδρόγειο (Πίνακας 3.4ζ), η μέση τιμή του λόγου προκύπτει 0.56 (μη λαμβάνοντας υπόψη τις λεκάνες τάξης δύο). Ανάμεσα στα διαμερίσματα, η μικρότερη τιμή παρατηρείται στη Δυτική Στερεά 0.58 (λεκάνη που παρατηρείται και ο μεγαλύτερος δείκτης σχήματος) και η μεγαλύτερη στην Ανατολική Μακεδονία 0.75 (μικρότερος δείκτης σχήματος).

Αξιοπρόσεκτο είναι ακόμα το γεγονός ότι μια λεκάνη στο διαμέρισμα της Ανατολικής Μακεδονίας, η κλειστή λεκάνη Οχυρού λαμβάνει τις τιμές $E_T = 1.10$ και $S_B = 1.02$. Η λεκάνη αυτή, είναι μια εσωτερική λεκάνη τάξης τρία και θα μελετηθεί στην επόμενη ενότητα.

3.3.5 Μέση κλίση – Υψομετρική καμπύλη

Οι τιμές της μέσης κλίσης ποικίλουν ανάμεσα στα διαμερίσματα και στις λεκάνες. Η μέση τιμή για την Ελλάδα προκύπτει 14.8 % και διαπιστώνεται μια μικρή μείωση στην τιμή με την αύξηση της τάξης. Για λεκάνες τάξης δύο είναι 15.5, τάξης τρία 14.1, τάξης τέσσερα 14.3 και τάξης πέντε 13.6 %. Ανάμεσα στα διαμερίσματα οι τιμές κυμαίνονται από 6.2 για την Κεντρική Μακεδονία (έλλειψη ψηλών βουνών, ήπιο ανάγλυφο) μέχρι 24.3 % για τη Δυτική Στερεά, όπου η οροσειρά της Πίνδου παίζει καθοριστικό ρόλο (Πίνακας 3.3η). Από το πρόγραμμα υπάρχει η δυνατότητα, όπως είδαμε στο τέλος του προηγούμενου κεφαλαίου, ο κάνναβος των κλίσεων να υπολογιστεί σε μοίρες ή σε ποσοστό επί τις εκατό. Η τάξη των τιμών που προέκυψαν ελέγχθηκε και αναλυτικά. Εξετάστηκαν οι κλίσεις μεμονωμένων κυττάρων συγκρίνοντας τις υψομετρικές διαφορές που επικρατούν με τα γειτονικά τους κύτταρα. Εντύπωση πάντως προκαλεί το γεγονός ότι για την υδρόγειο, οι αντίστοιχες τιμές μέσης κλίσης είναι τάξεις μεγέθους χαμηλότερες. Η παγκόσμια μέση τιμή της κλίσης προκύπτει 2.38 m/km ή 0.238 %. Η μεγάλη αυτή διαφορά ίσως οφείλεται στη διαφορά μεγέθους κυττάρου όπου για γεωγραφικό πλάτος 45° έχουμε 35 000 φορές διαφορά στο εμβαδόν και για τον ισημερινό 50 000 φορές.

Για να έχουμε μια καλύτερη εικόνα του αναγλύφου μιας λεκάνης σχεδιάζουμε την υψομετρική καμπύλη της. Στον άξονα των x έχουμε το σχετικό εμβαδόν (εμβαδό υπολεκάνης που βρίσκεται πάνω από ένα συγκεκριμένο υψόμετρο / συνολικό εμβαδόν λεκάνης) και στον άξονα των y το σχετικό υψόμετρο (υψόμετρο σε μια συγκεκριμένη θέση / μέγιστο υψόμετρο). Η επιλογή των σχετικών μεγεθών στους δύο άξονες έγινε ώστε να έχουμε κοινή βάση αναφοράς και να μπορούμε να συγκρίνουμε τη μορφή αυτών των καμπυλών για διάφορες λεκάνες (τυποποίηση).

Οι υψομετρικές καμπύλες δεν πρέπει να συγχέονται με τη μηκοτομή του κύριου υδατορεύματος. Στη δεύτερη περίπτωση, έχουμε απλά τη μορφή με την οποία μεταβάλλεται η κλίση κατά μήκος ενός μόνο τμήματος. Αντίθετα, στην πρώτη περίπτωση έχουμε το ποσοστό της επιφάνειας που συνεισφέρει κάθε φορά με την απορροή της στο κύριο υδατόρρευμα, για κάθε υψόμετρο της λεκάνης. Η μορφή της καμπύλης, είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για το ανάγλυφο της λεκάνης, όπως εξηγήθηκε στο τέλος του προηγούμενου κεφαλαίου, και με τη βοήθεια της μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

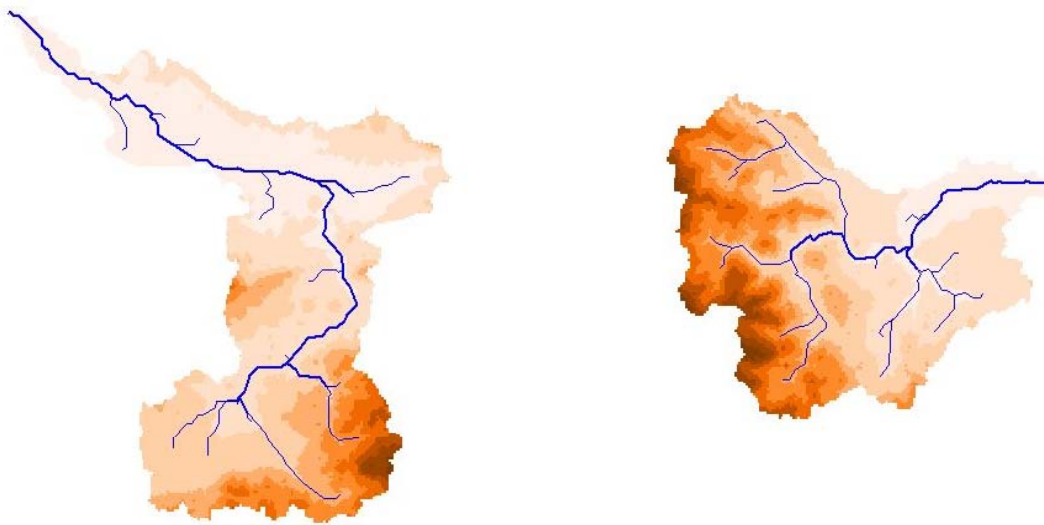
Η συνηθισμένη εικόνα για τις υψομετρικές καμπύλες, είναι να στρέφουν τα κοίλα προς τα κάτω. Αυτό διαπιστώνεται τόσο δε τοπική, όσο και σε παγκόσμια κλίμακα και είναι μια πολύ λογική παρατήρηση. Με το πέρασμα των χρόνων και τη μακρά ιστορία διάβρωσης και εναπόθεσης υλικών, έχουμε διάβρωση των κορυφών και των ψηλών σημείων του ανάγλυφο και μεταφορά των φερτών σε χαμηλότερα υψόμετρα. Υπάρχουν βέβαια και εξαιρέσεις οι οποίες είναι δικαιολογημένες από το γεωλογικό υπόβαθρο των λεκανών. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα θα εξετάσουμε στη συνέχεια.

3.4 Ειδικά παραδείγματα

Στην ενότητα αυτή, θα εξετάσουμε μεμονωμένα ορισμένες λεκάνες των οποίων τα χαρακτηριστικά θα συγκρίνουμε. Συγκεκριμένα, θα εξετάσουμε το σχήμα τους, και πώς αυτό επηρεάζει τις τιμές των χαρακτηριστικών τους, καθώς και το ανάγλυφό τους, με την εύρεση της υψομετρικής τους καμπύλης.

– Σχήμα λεκάνης

Στο Σχήμα 3.6 φαίνονται δύο αντιπροσωπευτικές υπολεκάνες με το υδρογραφικό τους δίκτυο οι οποίες αντιστοιχούν στις λεκάνες Βενέτικου Δυτικής Μακεδονίας (υπολεκάνη Αλιάκμονα) και Ενιπέα Θεσσαλίας (υπολεκάνη Πηνειού). Είναι δύο λεκάνες με συγκρίσιμο εμβαδόν (850 και 1010 km² αντίστοιχα) αλλά διαφορετικής τάξης, σχήματος και αναγλύφου. Το μήκος κύριου υδατορεύματος για τον Ενιπέα είναι σχεδόν το διπλάσιο του Βενέτικου (92 και 54 km αντίστοιχα). Οι δείκτες σχήματος λεκάνης S_B είναι 2.89 για τον Ενιπέα και 1.85 για το Βενέτικο. Αυτή η διαφορά στο σχήμα των λεκανών, συντελεί και στη διαφορά του λόγου διακλαδώσεων παρόλο που τα δύο δίκτυα έχουν τον ίδιο αριθμό τμημάτων (29 τμήματα με την περιορισμένη έννοια). Για τον Ενιπέα έχουμε $R_B = 3.87$ και για το Βενέτικο 2.47.



Σχήμα 3.6: Χαρακτηριστικές υδρολογικές λεκάνες Ενιπέα (αριστερά) και Βενέτικου (δεξιά).

Αυξημένη τιμή του R_B συνεπάγεται και αυξημένο αριθμό τμημάτων μικρής τάξης⁹. Πράγματι, αυτό εξηγείται αν σκεφτεί κανείς ότι λόγω του επιμήκους σχήματος του Ενιπέα συμβάλλουν στο κύριο υδατόρευμα πολλά μικρότερης τάξης τμήματα, τα οποία λόγω της μικρής απόστασης που έχουν από τον υδροκρίτη μέχρι το κύριο υδατόρευμα, δεν προλαβαίνουν να αυξηθούν σε μέγεθος

⁹ Υπενθυμίζεται εδώ, ότι ο λόγος διακλαδώσεων ορίζεται ως $R_B = N_w/N_{w+1}$ όπου N_w ο αριθμός των τμημάτων τάξης w . Συνεπώς μεγάλες τιμές του λόγου φανερώνουν αυξημένο αριθμό τμημάτων μικρής τάξης.

και τάξη. Αυτό έχει σαν συνέπεια, η τάξη του κύριου υδατορεύματος να μην αυξάνεται (συμβάλλουν τμήματα μικρότερης τάξης) και τελικά η λεκάνη του Ενιππέα, που είναι και η μεγαλύτερη σε εμβαδόν, να προκύπτει τάξης τρία ενώ η λεκάνη του Βενέτικου, που είναι αρκετά πιο κυκλική λεκάνη, να προκύπτει τάξης τέσσερα. Τα βασικά χαρακτηριστικά των δύο λεκανών φαίνονται στον Πίνακα 3.5α,β.

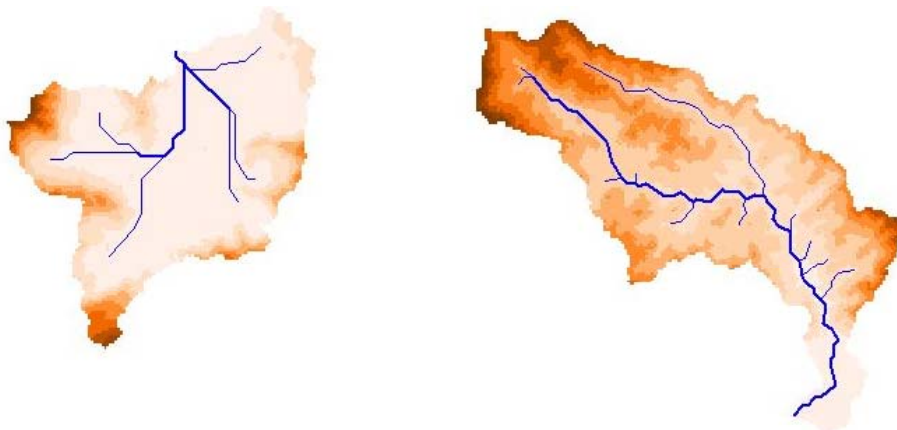
Πίνακας 3.5α: Βασικά χαρακτηριστικά των λεκανών Ενιππέα Θεσσαλίας και Βενέτικου Δ. Μακεδονίας.

Λεκάνη	τάξη	A (km ²)	P (km)	L _J (km)	S _B	R _B	R _L	R _A
Ενιππέας	3	1 013	295	92	2.89	3.87	4.35	5.16
Βενέτικος	4	847	199	54	1.85	2.47	2.30	2.95

Πίνακας 3.5β: Αριθμός τμημάτων για κάθε λεκάνη ανάλογα με την τάξη που εμφανίζονται.

Λεκάνη/τάξη	1	2	3	4
Ενιππέας	15	4	1	-
Βενέτικος	15	5	2	1

Στο Σχήμα 3.7 φαίνονται και δύο άλλες χαρακτηριστικές λεκάνες: η κλειστή λεκάνη Οχυρού στην Ανατολική Μακεδονία και η λεκάνη Ξηρορέματος στη Θράκη. Είναι χαρακτηριστικές, διότι η μεν πρώτη παρουσιάζει το μεγαλύτερο λόγο Schumm (E_T) και αντίστοιχα το μικρότερο δείκτη σχήματος (S_B) (κυκλική μορφή) η δε δεύτερη τους μεγαλύτερους λόγους του Horton και είναι η μεγαλύτερη σε εμβαδό και μήκος κύριου υδατορεύματος, λεκάνη τάξης δύο. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον Πίνακα 3.6.



Σχήμα 3.7: Η κλειστή λεκάνη Οχυρού (αριστερά) και η λεκάνη Ξηρορέματος (δεξιά).

Πίνακας 3.6: Βασικά χαρακτηριστικά των λεκανών Οχυρού Α. Μακεδονίας και Ευρορέμματος Θράκης.

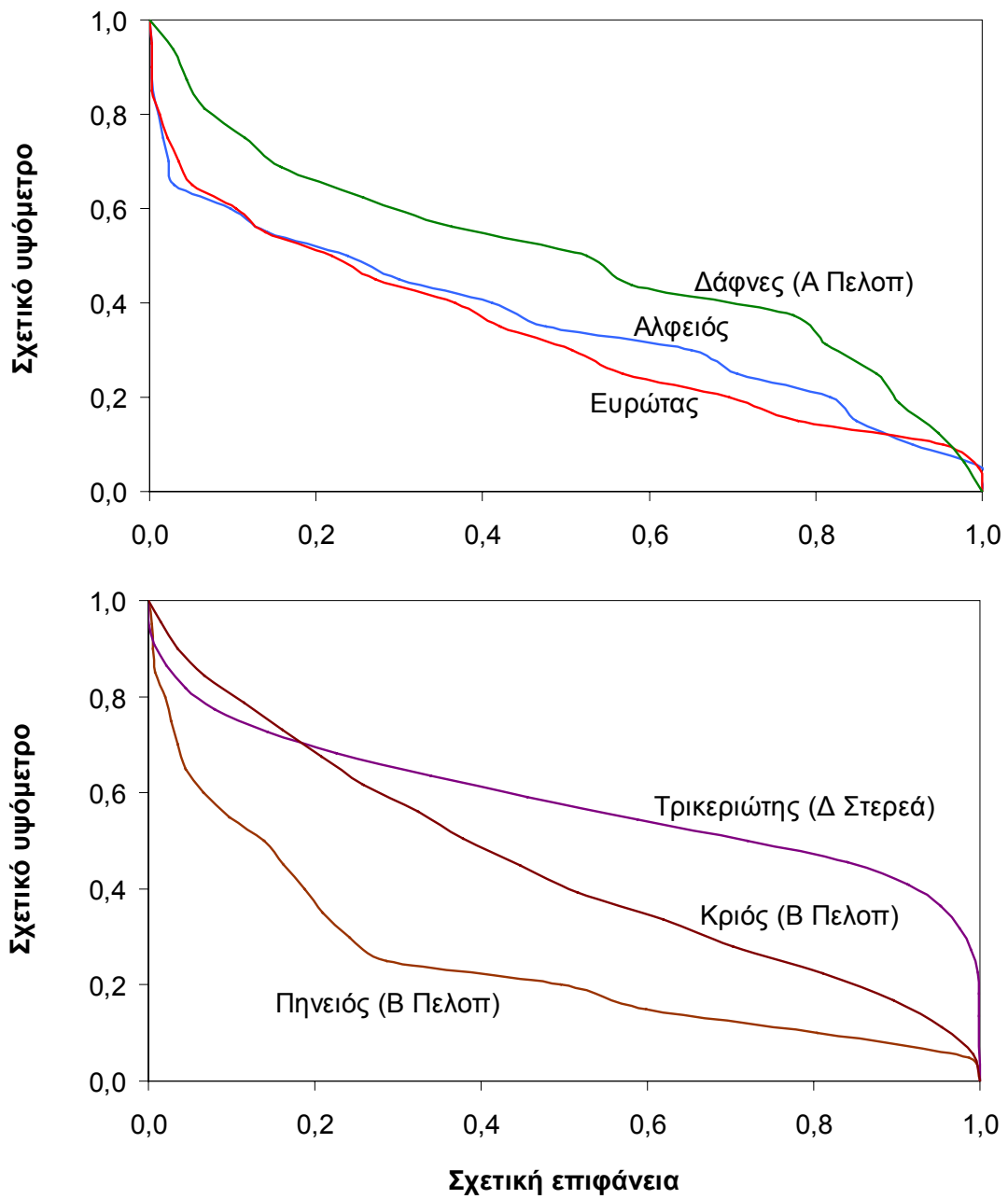
Λεκάνη	τάξη	A (km ²)	P (km)	L _J (km)	S _B	E _T	R _B	R _L	R _A
Κ.Α. Οχυρού	3	485	143	22.5	1.02	1.10	2.45	1.66	3.11
Ξηρορέμματος	2	604	192	58.2	2.37	0.48	11.00	13.69	18.80

– *Ανάγλυφο*

Στο Σχήμα 3.8 φαίνονται μερικές χαρακτηριστικές υψομετρικές καμπύλες για διάφορες υδρολογικές λεκάνες. Χαρακτηριστικά, στο πρώτο γράφημα εξετάζονται οι λεκάνες Αλφειού (Δυτική Πελοπόννησος), Ευρώτα και Δαφνών (Ανατολική Πελοπόννησος) και στο δεύτερο, οι λεκάνες Πηνείου και Κριού (Βόρεια Πελοπόννησος), καθώς και η λεκάνη του Τρικεριώτη (Δυτική Στερεά). Οι τρεις τελευταίες λεκάνες είναι αντιπροσωπευτικές για τις μορφές των καμπυλών που μπορεί να συναντήσει κανείς. Η υψομετρική καμπύλη του Πηνείου στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω, με το 50% της επιφάνειας να βρίσκεται χαμηλότερα από το 20% του μέγιστου υψομέτρου. Αντίθετα, για τη λεκάνη του Τρικεριώτη το 50% της επιφάνειας βρίσκεται πάνω από το 60% του υψομέτρου και μάλιστα το 90% της επιφάνειάς του είναι πάνω από το 40% της μέγιστης υψομετρικής διαφοράς που παρατηρείται σε αυτή τη λεκάνη. Η καμπύλη ξεκινάει στρέφοντας τα κοίλα προς τα κάτω και στην τιμή του 40% για τη σχετική επιφάνεια (σημείο καμπής), στρέφει τα κοίλα προς τα πάνω. Ενδιάμεσα τοποθετείται η καμπύλη του Κριού η οποία είναι αρκετά ομαλή και θα έλεγε κανείς ότι επικρατεί ανάλογη σχέση μεταξύ των δύο σχετικών μεγεθών. Κάτι αντίστοιχο μπορεί να υπωθεί και για τις λεκάνες του Αλφειού και Πηνείου, οι οποίες στην αρχή στρέφουν τα κοίλα προς τα κάτω (το 90% της επιφάνειάς τους βρίσκεται κάτω από το 60 % του μέγιστου υψομέτρου τους) ενώ στη συνέχεια εμφανίζουν μια γραμμική πορεία. Τέλος, η μορφή της καμπύλης για τη λεκάνη των Δαφνών μπορεί να υπωθεί ότι μοιάζει με εκείνη του Τρικεριώτη, αφού αρχικά στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω και στη συνέχεια, από το 50% του εμβαδού που αντιστοιχεί και με το 50% του υψομέτρου, προς τα πάνω. Στον Πίνακα 3.7 παρουσιάζονται τα εμβαδά των λεκανών, το μέγιστο, ελάχιστο και μέσο υψόμετρο καθώς και οι κλίσεις των κύριων υδατορευμάτων I_J και οι μέσες κλίσεις των λεκανών I_S .

Πίνακας 3.7: Βασικά χαρακτηριστικά των λεκανών των οποίων εξετάστηκαν οι υψομετρικές καμπύλες.

Λεκάνες	A (km ²)	Z _{max} (m)	Z _{min} (m)	Z _S (m)	I _J (%)	I _S (%)
Αλφειός	3 500	2 317	0	682	1.88	16.1
Ευρώτας	1 753	2 403	0	646	2.74	13.7
Πηνειός	907	2 080	0	389	3.16	10.1
Τρικεριώτης	560	2 199	197	1 118	5.34	29.1
Δάφνες	384	1 800	0	821	7.09	16.7
Κριός	109	1 780	0	997	11.91	22.7



Σχήμα 3.8: Υψομετρικές καμπύλες χαρακτηριστικών λεκανών.

4. Κατάρτιση μοναδιαίου υδρογραφήματος

4.1 Βασικές υδρολογικές έννοιες

Η απορροή των υδατορευμάτων, μπορεί να εκφραστεί ποσοτικά με εναλλακτικούς τρόπους και συγκεκριμένα σε όρους παροχής, όγκου ή ισοδύναμου ύψους. Η ποσοτική απεικόνιση της μεταβολής της απορροής με το χρόνο, ονομάζεται υδρογράφημα. Ως μοναδιαίο υδρογράφημα διάρκειας d , ορίζεται η χρονική εξέλιξη της παροχής $U_d(t)$ αν η εισροή $I(t)$, που αποτελεί την καθαρή βροχόπτωση στη λεκάνη (ολική βροχή – απώλειες κατακράτησης και διήθησης), θεωρηθεί ένας τετραγωνικός παλμός διάρκειας d και συνολικού ύψους βροχής H_0 (κατά σύμβαση $H_0 = 1 \text{ cm} = 10 \text{ mm}$). Αντίστοιχα, το στιγμιαίο μοναδιαίο υδρογράφημα (ΣΜΥ) ορίζεται ως η χρονική εξέλιξη της παροχής $U(t)$ αν η εισροή $I(t)$ θεωρηθεί ένας στιγμιαίος παλμός συνολικού ύψους H_0 που πραγματοποιείται στο χρόνο $t = 0$. Αν θεωρήσουμε ότι η εισροή $I(t)$ έχει σταθερή ένταση H_0/d για άπειρη διάρκεια, η εξέλιξη της παροχής $S_d(t)$ αποτελεί την καμπύλη S η οποία προέρχεται από την επαλληλία άπειρων μοναδιαίων υδρογραφημάτων διάρκειας d . Η σχέση που συνδέει το στιγμιαίο μοναδιαίο υδρογράφημα με την καμπύλη S είναι:

$$S_d(t) = \frac{1}{d} \int_0^t U(\tau) d\tau \quad (4.1)$$

και η σχέση που συνδέει το μοναδιαίο υδρογράφημα με την καμπύλη S είναι:

$$U_d(t) = S_d(t) - S_d(t-d) \quad (4.2)$$

συνεπώς, το μοναδιαίο υδρογράφημα συνδέεται με το στιγμιαίο με τη σχέση:

$$U_d(t) = \frac{1}{d} \left(\int_0^t U(\tau) d\tau - \int_0^{t-d} U(\tau) d\tau \right) \quad (4.3)$$

Το τυποποιημένο στιγμιαίο μοναδιαίο υδρογράφημα (ΤΣΜΥ) δίνεται από τη σχέση:

$$u(t) = U(t)/V_0 \quad (4.4)$$

όπου V_0 είναι το εμβαδόν του μοναδιαίου υδρογραφήματος, δηλαδή ο όγκος απορροής που ισούται με $H_0 \times A$ (A είναι το εμβαδόν της λεκάνης). Οι μονάδες του είναι (χρόνος)¹ και προφανώς το εμβαδό του τυποποιημένου υδρογραφήματος ισούται με μονάδα. Αντίστοιχα, η τυποποιημένη καμπύλη S προκύπτει:

$$s(t) = \frac{d}{V_0} S_d(t) = \int_0^t u(t) dt \quad (4.5)$$

που είναι μια αδιάστατη συνάρτηση για την οποία ισχύει: $s(0) = 0$ και $s(T_0) = 1$ όπου T_0 η διάρκεια πλημμύρας του ΣΜΥ.

Για την αναλυτική προσέγγιση του τυποποιημένου στιγμιαίου μοναδιαίου υδρογραφήματος, έχουν δοθεί μέχρι σήμερα αρκετές παραμετρικές εκφράσεις του (βλ. Koutsoyiannis και Xanthopoulos, 1989). Η πιο συνηθισμένη από αυτές, είναι η Γάμμα διαπαραμετρική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που εισήγαγε ο Nash (1959) και δίνεται από τη σχέση:

$$u(t) = \frac{(t/\beta)^{\alpha-1} e^{-t/\beta}}{\beta \Gamma(\alpha)} \quad (4.6)$$

(μονάδες: χρόνος⁻¹) όπου α είναι μια παράμετρος σχήματος, β μια παράμετρος κλίμακας και $\Gamma(\alpha)$ η συνάρτηση Γάμμα για τον αριθμό α που δίνεται από τον τύπο:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-u} u^{x-1} du \quad (4.7)$$

Όπως απέδειξε ο Nash, η παράμετρος σχήματος είναι ίση με t_L^2/U_2 όπου t_L είναι ο χρόνος υστέρησης ο οποίος ορίζεται ως η χρονική απόσταση από το κέντρο βάρους του υετογραφήματος μέχρι το κέντρο βάρους του πλημμυρογραφήματος¹ και U_2 είναι η ροπή δεύτερης τάξης (ροπή αδράνειας) της επιφάνειας που περικλείεται από την καμπύλη του τυποποιημένου στιγμιαίου υδρογραφήματος και η παράμετρος κλίμακας είναι ίση με $U_2/t_L = t_L/\alpha$. Με την προϋπόθεση ότι η απόκριση της λεκάνης είναι γραμμική, αποδεικνύεται ότι ο χρόνος υστέρησης t_L είναι σταθερός για κάθε πλημμυρογράφημα μιας λεκάνης.

Η αναλυτική σχέση (4.6), έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά για την εκτίμηση του ΣΜΥ σε λεκάνες όπου δεν υπάρχουν καταγεγραμμένες μετρήσεις παροχής, παρά σε κάποιες γειτονικές τους. Έχουν δηλαδή συσχετισθεί οι παράμετροι της σχέσης (4.6) με διάφορα φυσικά χαρακτηριστικά των λεκανών για τις οποίες έχουμε μετρήσεις και στη συνέχεια, οι συσχετίσεις αυτές χρησιμοποιούνται (αφού ληφθούν υπόψη τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά) και στις υπό εξέταση γειτονικές λεκάνες. Ενώ λοιπόν έχουν βρεθεί καλές συσχετίσεις μεταξύ του χρόνου υστέρησης t_L και των φυσικών παραγόντων που έχουν εξετασθεί, δεν έχει συμβεί το ίδιο με την αδιάστατη παράμετρο σχήματος α . Εκτός αυτού, είναι διαπιστωμένο ότι οι εξισώσεις συσχέτισης (φυσικών χαρακτηριστικών – παραμέτρων) διαφέρουν από λεκάνη σε λεκάνη και ότι ακόμα και στην ίδια λεκάνη, παρουσιάζεται μεταβολή του ΣΜΥ σε σχέση με την ποσότητα της βροχής. Αυτό

¹ Ο χρόνος υστέρησης, ισούται και με την απόσταση του κέντρου βάρους του τυποποιημένου στιγμιαίου υδρογραφήματος από την αρχή των αξόνων.

φυσικά συμβαίνει, διότι δεν ισχύει η αρχή της γραμμικότητας στην απόκριση των λεκανών και γιατί υπεισέρχονται πολλές αβεβαιότητες στις μετρήσεις.

Στη συνέχεια λοιπόν θα αναφερθεί μια διαφορετική προσέγγιση για την εύρεση του ΣΜΥ, η οποία λαμβάνει υπόψη της τη γεωμορφολογία του υδρογραφικού δικτύου και την κίνηση του νερού κατά μήκος των υδατορευμάτων.

4.2 Γεωμορφολογικό στιγμιαίο μοναδιαίο υδρογράφημα

Ορόσημο στη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος αποτελεί η εργασία των Rodriguez-Iturbe και Valdes (1979) οι οποίοι κατάφεραν να συνδέσουν μερικά από τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου, με την υδρολογική απόκριση των λεκανών και συγκεκριμένα με το ΤΣΜΥ.

Τα χαρακτηριστικά τα οποία χρησιμοποίησαν είναι οι λόγοι του Horton (λόγος διακλαδώσεων R_B , λόγος μηκών R_L , λόγος εμβαδών R_A), το μήκος μέγιστης τάξης υδατορεύματος L_J , καθώς και η μέση ταχύτητα ροής κατά μήκος των υδατορευμάτων u . Όπως αναφέρθηκε, το μοναδιαίο υδρογράφημα δεν είναι σταθερό για μια λεκάνη αλλά μεταβάλλεται μέσα στο χρόνο και κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου βροχής και για διάφορα ανεξάρτητα επεισόδια. Αυτή η μη μονοσήμαντη σχέση που συνδέει κάθε λεκάνη με το στιγμιαίο μοναδιαίο υδρογράφημα μπορεί να ληφθεί υπόψη με το μέγεθος της μέσης ταχύτητας ροής u . Έτσι, το γεωμορφολογικό στιγμιαίο μοναδιαίο υδρογράφημα (ΓΣΜΥ) μπορεί να ειπωθεί ότι αποτελείται από δύο συστατικά: το ένα σχετίζεται με τη γεωμορφολογία της λεκάνης και το άλλο με τη υδραυλική θεώρηση και περιγραφή της κίνησης του νερού κατά μήκος των υδατορευμάτων.

Η μελέτη των δύο ερευνητών, βασίστηκε καθαρά σε πιθανοτικά μοντέλα απορροής με τις εξής υποθέσεις:

- ο χρόνος μιας σταγόνας για να διανύσει ένα τμήμα τάξης i είναι ανεξάρτητος από την τάξη του κατάντη τμήματος
- οι χρόνοι κάλυψης των τμημάτων τάξης i ακολουθούν μια εκθετική κατανομή
- η ταχύτητα ροής κατά μήκος των υδατορευμάτων παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως της τάξης τους.

Οι υποθέσεις αυτές, είναι πολύ λογικές και ειδικά για την τελευταία έχει διαπιστωθεί ότι οι αλλαγές στο πλάτος, στο βάθος και στην τραχύτητα κατά μήκος των υδατορευμάτων, αντισταθμίζουν τις αλλαγές της κλίσης που παρουσιάζονται, με αποτέλεσμα η ταχύτητα να παραμένει σταθερή.

Μετά από αρκετούς υπολογισμούς, καταλήγουν σε ορισμένες εξισώσεις ειδικά για λεκάνες τάξης τρία. Η τελική έκφραση της εξίσωσης που μας δίνει το ΓΣΜΥ όπως τη διατύπωσε ο Rosso (1984) είναι:

$$g(t) = (\alpha_\Omega t + b_\Omega) e^{-2ut/L_j} + \sum_{i=1}^{\Omega-1} b_i e^{-2uR_i^{\Omega-1}/L_j} \quad (4.8)$$

(μονάδες χρόνου⁻¹) όπου u είναι η μέση ταχύτητα, L_J το μήκος μέγιστης τάξης υδατορεύματος, α_Ω συνάρτηση των $R_A, R_B, R_L, \lambda_i, \lambda^*$ (R_A, R_B, R_L είναι οι λόγοι του Horton), b_i συνάρτηση των R_A, R_B, R_L, λ_i , ενώ λ_i είναι ο αντίστροφος του μέσου χρόνου παραμονής μιας σταγόνας σε ένα τμήμα τάξης i με μέσο μήκος L_i ($\lambda_i = u/L_i$) και λ^* είναι ο τροποποιημένος αντίστροφος του μέσου χρόνου παραμονής για το τμήμα μέγιστης τάξης. Οι εξισώσεις υπολογισμού των α_Ω και b_i για $i = 1, \dots, \Omega$ για λεκάνη τάξης τρία, δίνονται στην αρχική εργασία (Rodriguez-Iturbe και Valdes, 1979). Επειδή όμως οι αναλυτικές σχέσεις που προκύπτουν είναι πολύπλοκες και δυσχερείς, οι δύο ερευνητές συσχέτισαν τα δυο βασικά μεγέθη που περιγράφουν το ΣΜΥ, την παροχή αιχμής q_p και τον χρόνο για την παροχή αιχμής t_p , με τους λόγους του Horton, το μήκος μέγιστης τάξης υδατορεύματος L_J και τη μέση ταχύτητα ροής u . Οι εξισώσεις που προέκυψαν είναι:

$$q_p = \frac{0.364}{L_J} R_L^{0.43} u \quad (4.9)$$

και

$$t_p = \frac{1.584L}{u} \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^{0.55} R_L^{-0.38} \quad (4.10)$$

(όλα τα μεγέθη σε κοινή βάση μονάδων). Αντίθετα λοιπόν με τη θεωρία του Nash (1959), τα μεγέθη αυτά δεν παραμένουν σταθερά για μια λεκάνη αλλά μεταβάλλονται μέσω του όρου της ταχύτητας u . Από το γινόμενο μάλιστα των δύο μεγεθών προκύπτει ένας καθαρός αριθμός G^* , σταθερός για μια λεκάνη.

$$G^* = q_p t_p = 0.58 \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^{0.55} R_L^{0.05} \quad (4.11)$$

Ο Rosso (1984), προσπαθώντας να εκφράσει τη μορφή του ΓΣΜΥ με τη διπαμετρική αναλυτική έκφραση που διατύπωσε ο Nash (1959), εξίσωσε τη σχέση (4.11) με την αντίστοιχη που προκύπτει από από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (4.6) και η οποία είναι:

$$H^* = q_p t_p = (a-1)^a \frac{e^{1-\alpha}}{\Gamma(\alpha)} \quad (4.12)$$

(μια σχέση που εξαρτάται μόνο από την παράμετρο σχήματος) και υπολόγισε την παράμετρο α συναρτήσε των λόγων Horton. Η εξίσωση που προκύπτει είναι:

$$H^* = G^* = (a-1)^a \frac{e^{1-\alpha}}{\Gamma(\alpha)} = 0.58 \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^{0.55} R_L^{0.05} \quad (4.13)$$

η οποία δεν μπορεί να επιλυθεί αναλυτικά και γι' αυτό δοκιμάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί τιμών με τους λόγους Horton να κυμαίνονται: $2.5 \leq R_B \leq 5.0$, $1.5 \leq R_L \leq 4.1$, $3.0 \leq R_A \leq 6.0$. Τα αποτελέσματα επεξεργάστηκαν κατάλληλα και η εξίσωση που προέκυψε είναι:

$$a = 3.29 \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^{0.78} R_L^{0.07} \quad (4.14)$$

Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε η σχέση που συνδέει τις δυο παραμέτρους $t_p = \beta(\alpha - 1)$, αντικαταστάθηκε από την προηγούμενη εξίσωση η τιμή του α και από την εξίσωση (4.10) η τιμή του t_p και προέκυψε μια σχέση μεταξύ του α και του όρου $\beta u/L_j$. Τέλος, αντικαταστάθηκε η τελευταία έκφραση του α στην εξίσωση (4.13) και η αριθμητική επίλυση της έκφρασης που προέκυψε, για τους ίδιους συνδυασμούς τιμών των λόγων, έδωσε το αποτέλεσμα:

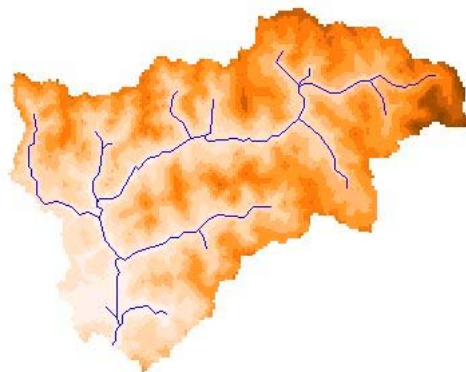
$$\beta = 0.7 \left(\frac{R_A}{R_B R_L} \right)^{0.48} \frac{L_j}{u} \quad (4.15)$$

Το ΓΣΜΥ που προκύπτει από αυτές τις σχέσεις ταυτίζεται σχεδόν με αυτό που προέρχεται από τις αρχικές πολύπλοκες εξισώσεις. Οι σχέσεις αυτές, εφαρμόστηκαν σε δύο ελληνικές λεκάνες όπου υπάρχουν τα αντίστοιχα ΜΥ τα οποία έχουν προέλθει από μετρήσεις. Αυτές τις δύο περιπτώσεις θα δούμε στη συνέχεια.

4.3 Εύηνος – θέση Πόρος Ρηγανίου

Η υπολεκάνη του ποταμού Ευήνου ανάντη της θέσης Πόρος Ρηγανίου φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δίνονται στον Πίνακα 4.1. Εφαρμόζοντας τους τύπους (4.6), (4.14) και (4.15) προκύπτει το τυποποιημένο στιγμιαίο μοναδιαίο υδρογράφημα το οποίο πρώτα το μετατρέπουμε σε τυποποιημένο μοναδιαίο υδρογράφημα σύμφωνα με τη σχέση (4.3) και στη συνέχεια σε μοναδιαίο υδρογράφημα σύμφωνα με τη σχέση (4.4).

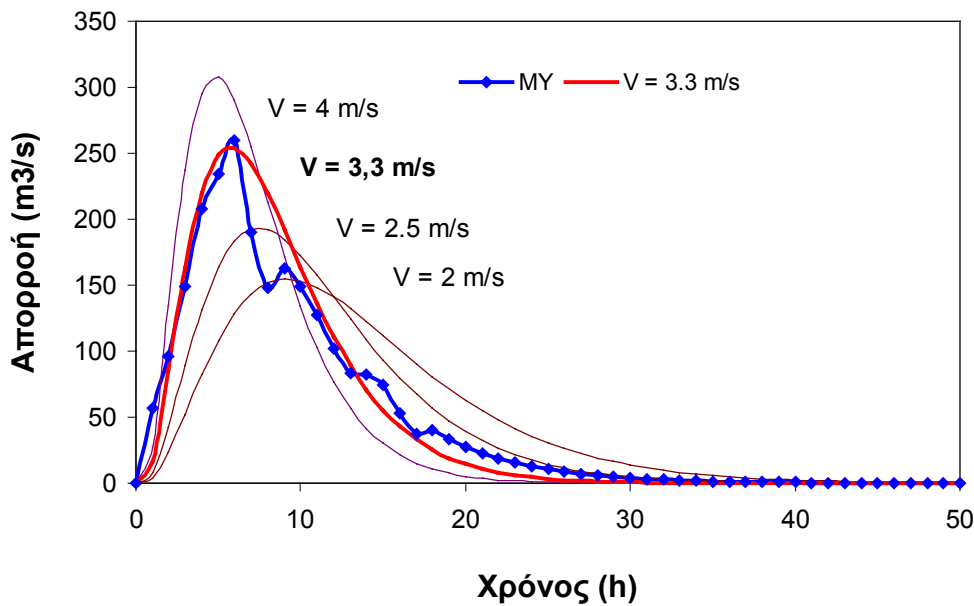
Το μέγεθος της ταχύτητας παίζει καθοριστικό ρόλο στη μορφή του υδρογραφήματος. Γενικά είναι ένα μέγεθος που δύσκολα εκτιμάται και γι' αυτό λαμβάνεται σαν παράμετρος βαθμονόμησης. Δοκιμάζουμε διάφορες τιμές και παρατηρούμε ότι καλύτερη προσέγγιση έχουμε για την τιμή $V = 3.3$ m/s. Τα υδρογραφήματα που προκύπτουν φαίνονται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.1: Η υπολεκάνη στον Εύηνο ανάντη της θέσης Πόρος Ρηγανίου.

Πίνακας 4.1: Βασικά χαρακτηριστικά της υπολεκάνης στον Εύηνο, ανάντη της θέσης Πόρος Ρηγανίου.

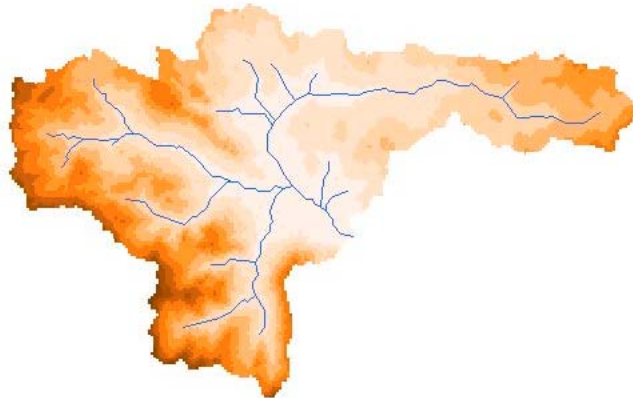
Λεκάνη	τάξη	A (km ²)	P (km)	L _J (km)	S _B	R _B	R _L	R _A	I _s (%)
Πόρος Ρηγανίου	3	860	199	74	2.52	3.74	3.77	4.65	27.5

**Σχήμα 4.2:** Απεικόνιση του γεωμορφολογικού και του μετρημένου μοναδιαίου υδρογραφήματος στον Εύηνο, θέση Πόρος Ρηγανίου.

4.4 Πηνειός Θεσσαλίας – θέση Σαρακήνα

Τα βήματα που περιγράφηκαν προηγουμένως, ακολουθούνται και σε αυτήν την περίπτωση. Η υπολεκάνη του ποταμού Πηνειού στη Θεσσαλία, ανάντη από τη θέση Σαρακήνα φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Τα βασικά χαρακτηριστικά της λεκάνης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Η τιμή της ταχύτητας που προσεγγίζει καλύτερα το μετρημένο μοναδιαίο υδρογράφημα προκύπτει 4 m/s. Τα δύο υδρογραφήματα φαίνονται στο Σχήμα 4.4.

Παρατηρείται μια χρονική υστέρηση στο ΜΥ σε σχέση με το ΓΜΥ. Αν μετακινήσουμε κατά μια ώρα προς τα δεξιά το τελευταίο, συμπίπτει ακριβώς με το ΜΥ.

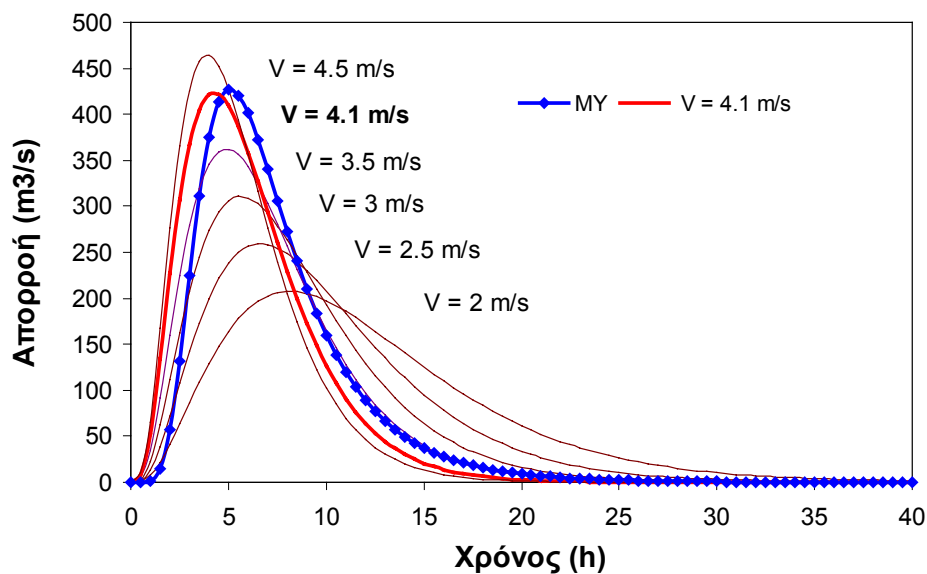


Σχήμα 4.3: Η υπολεκάνη στον Πηνειό Θεσσαλίας ανάντη της θέσης Σαρακίνα.

Πίνακας 4.2: Βασικά χαρακτηριστικά της υπολεκάνης στον Πηνειό Θεσσαλίας, ανάντη της θέσης Σαρακίνα.

Λεκάνη	τάξη	A (km ²)	P (km)	L _J (km)	S _B	R _B	R _L	R _A	I _s (%)
Σαρακίνα	3	1 055	260	63.5	1.96	4.0	3.38	5.06	17.4

Υπολογίζοντας την παροχή αιχμής και το χρόνο για την παροχή αιχμής με τους τύπους (4.9) και (4.10), θα διαπιστώσουμε ότι τα αποτελέσματα συμφωνούν με τις μετρημένες τιμές. Για παράδειγμα, στην πρώτη θέση η παροχή αιχμής είναι 260 m³/s και ο χρόνος για την παροχή αιχμής 6 h· αναλυτικά, η παροχή αιχμής προκύπτει 253 m³/s και ο χρόνος για την παροχή αιχμής 5.3 h. Στη δεύτερη θέση, έχουμε παροχή αιχμής 430 m³/s και χρόνο 5 h ενώ αναλυτικά προκύπτουν αντίστοιχα 411 m³/s και 4 h.



Σχήμα 4.4: Απεικόνιση του γεωμορφολογικού και του μετρημένου μοναδιαίου υδρογραφήματος στον Πηνειό Θεσσαλίας, θέση Σαρακίνα.

5. Σύνοψη και συμπεράσματα

5.1 Σύνοψη διαδικασίας

Στην εργασία αυτή, μελετήσαμε –με τη χρήση συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας– τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά των υδρολογικών λεκανών της Ελλάδας. Από τη μελέτη αυτή, εξαιρέθηκαν τα νησιά του Αιγαίου και του Ιονίου πελάγους τα οποία χρήζουν διαφορετικής αντιμετώπισης. Οι διεθνείς λεκάνες δεν εξετάστηκαν ολόκληρες αλλά μόνο τα τμήματά τους που βρίσκονται σε ελληνικό έδαφος. Συνολικά, εξετάστηκαν 140 λεκάνες με εμβαδό μεγαλύτερο των 100 km². Οι λεκάνες αυτές, καλύπτουν το 80 % της ηπειρωτικής έκτασης της χώρας.

Τις λεκάνες αυτές, τις κατατάξαμε σύμφωνα με το σύστημα αρίθμησης κατά Strahler. Για το κατώφλι που επιλέξαμε προέκυψαν 3 λεκάνες τάξης πέντε, 18 λεκάνες τάξης τέσσερα, 47 λεκάνες τάξης τρία και 72 λεκάνες τάξης δύο. Συγκεκριμένα, τάξης πέντε προκύπτουν οι λεκάνες Πηνειού Θεσσαλίας, Αχελώου και Στρυμόνα. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ο Αλιάκμονας, ο Βοιωτικός Κηφισός και ο Αλφειός προκύπτουν τάξης τέσσερα και ο Εύηνος, ο Μόρνος και ο Ευρώτας τάξης τρία. Μεγαλύτερες σε εμβαδό λεκάνες είναι πρώτα ο Πηνειός Θεσσαλίας, ο Αλιάκμονας, ο Αχελώος, ο Στρυμόνας, ο Αλφειός και μεγαλύτερες σε μήκος είναι πρώτα ο Αλιάκμονας, ο Αχελώος, ο Πηνειός Θεσσαλίας, ο Άραχθος, ο Αλφειός.

Για κάθε λεκάνη, υπολογίστηκαν οι λόγοι του Horton και βρέθηκαν οι μέσες τιμές τους ανά υδατικό διαμέρισμα και ανά τάξη λεκάνης συνολικά. Συγκεκριμένα, οι μέσες τιμές του λόγου διακλαδώσεων (R_B) κυμαίνονται από 2.86 για το διαμέρισμα της Βόρειας Πελοποννήσου μέχρι 5.17 για το διαμέρισμα της Θράκης· ο λόγος μηκών (R_L) από 3.4 για την Ανατολική Στερεά μέχρι 5.87 για τη Θράκη και ο λόγος εμβαδών (R_A) από 4.1 για την Ανατολική Στερεά και τη Δυτική Μακεδονία μέχρι 8.1 για τη Θράκη. Οι αυξημένες τιμές που παρατηρούνται σε όλους τους λόγους για το Θρακικό διαμέρισμα, φανερώνουν τον ιδιόμορφο γεωμορφολογικό χαρακτήρα του.

Εξετάστηκε ακόμα η σχέση μεταξύ του εμβαδού των λεκανών A και του μήκους κύριου υδατορεύματος L_J . Τα δύο αυτά μεγέθη έχουν μια πολύ καλή συσχέτιση με $R^2 = 0.907$. Η παράμετρος που τα συνδέει είναι ο δείκτης σχήματος, $S_B = L_J/A^{0.5}$, ο οποίος για τις ελληνικές λεκάνες κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.0 και 4.0 με μια μέση τιμή 1.8 για το σύνολο της χώρας. Οι μέσες τιμές του για τα υδατικά διαμερίσματα μεταβάλλο-

νται από 1.6 για την Κρήτη (πεπλατυσμένη μορφή λεκανών) μέχρι 2.1 για τη Δυτική Στεριά (στενόμακρη μορφή).

Στην παρούσα εργασία τέλος, έγινε μια εφαρμογή για την κατάρτιση μοναδιαίου υδρογραφήματος σε δύο συγκεκριμένες λεκάνες για τις οποίες έχουμε μετρήσεις παροχής και τα αντίστοιχα μοναδιαία υδρογραφήματα. Για την κατάρτιση αυτή, εφαρμόστηκε η μέθοδος του γεωμορφολογικού στιγμιαίου μοναδιαίου υδρογραφήματος η οποία διατυπώθηκε από τους Rodriguez-Iturbe και Valdes (1979) και συνδέθηκε στη συνέχεια από το Rosso (1984) με την διπαραμετρική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του Nash (1959). Σύμφωνα με τη μέθοδο, οι παράμετροι της συνάρτησης αυτής (παράμετρος σχήματος και παράμετρος κλίμακας), συσχετίζονται με τους λόγους του Horton, το μήκος του κύριου υδατορεύματος και τη μέση ταχύτητα ροής κατά μήκος των υδατορευμάτων.

5.2 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις

Γενικά, μεγάλες τιμές των λόγων του Horton, υποδηλώνουν έναν αυξημένο αριθμό τμημάτων μικρής τάξης για μια λεκάνη. Η παρατήρηση αυτή, εξηγείται και από το σχήμα των λεκανών. Οι λεκάνες της Θράκης για παράδειγμα, χαρακτηρίζονται από μια έντονα επιμήκη μορφή. Η μορφή αυτή υποδηλώνει, ότι η μέση απόσταση του υδροκρίτη από το κύριο υδατόρευμα είναι σχετικά μικρή με αποτέλεσμα, τα υδατορεύματα που σχηματίζονται να μην προλαβαίνουν να αυξηθούν σε μέγεθος και τάξη πριν καταλήξουν στο κύριο υδατόρευμα. Η μορφή αυτή των λεκανών, παίζει έναν καθοριστικό ρόλο και στην υδρολογική τους απόκριση. Λεκάνες με επιμήκη μορφή, παρουσιάζουν μικρή παροχή αιχμής και αντίστοιχα μεγάλο χρόνο για την παροχή αιχμής. Αντίθετα, λεκάνες κυκλικού σχήματος εμφανίζουν μεγάλη παροχή αιχμής με μικρό χρόνο για την παροχή αυτή.

Παρόλη τη μεγάλη ανομοιομορφία που επικρατεί στις τιμές των χαρακτηριστικών ανά υδατικό διαμέρισμα και ανά λεκάνη, εξετάζοντας την εσωτερική δομή του υδρογραφικού δικτύου κάθε λεκάνης, διαπιστώνουμε μια αξιοθαύμαστη συμμετρία και σταθερότητα στην τιμή λόγων του Horton. Για κάθε λεκάνη, έχουμε μια πολύ καλή συσχέτιση της τάξης των υδατορευμάτων με τον αριθμό τους, με το μέσο εμβαδό των υπολεκανών που αντιστοιχεί σε κάθε τάξη και με το μέσο μήκος τους.

Οι μέσες τιμές των χαρακτηριστικών που προέκυψαν, συγκρίθηκαν με αντίστοιχες τιμές των μεγάλων λεκανών όλης της γης και διαπιστώθηκε μια καλή συμφωνία μεταξύ τοπικού και παγκόσμιου επιπέδου, ανεξαρτήτως κλίμακας.

Το μέγεθος κυττάρου του καννάβου υψομέτρων φάνηκε να μην επηρεάζει ουσιαστικά τα αποτελέσματα. Η ανάλυση στην παρούσα εργασία έγινε για διάσταση κυττάρου 250 m. Εξετάστηκαν όμως και οι διαστάσεις 500 και 1000 m για ορισμένες λεκάνες και παρατηρήθηκαν μικρές αυξομειώσεις στις τιμές των λόγων Horton και μια σταδιακή μείωση στα μήκη των υδατορευμάτων και στην περίμετρο των λεκανών που οφείλεται στην αύξηση του βήματος προσέγγισης, η οποία αδυνατεί να ακολουθήσει τη φυσική ελικοειδή μορφή τους. Αν μας ενδιαφέρει η συγκριτική θεώρηση των υδρολογικών λεκανών δεν είναι απαραίτητη η λεπτομερής εξέτασή τους. Αρκεί να υπάρχει μια ενιαία βάση αναφοράς. Συνεπώς, μπορεί να επιλεγεί μια μεγάλη διάσταση κυττάρου με όφελος τη σημαντική μείωση του χρόνου επεξεργασίας και του χώρου

αποθήκευσης των δεδομένων. Για παράδειγμα, αν μεταβούμε από τη διάσταση των 250 m στη διάσταση των 500 m κερδίζουμε 4 φορές περισσότερο χρόνο και μνήμη. Πάντως το μέγεθος των 250 m που επιλέγη, είναι ένας ικανοποιητικός συμβιβασμός μεταξύ ακρίβειας και υπολογισμών.

Δοκιμάστηκαν ακόμη διάφορες τιμές για το κατώφλι δημιουργίας υπολογίσιμου ποταμού, από την τιμή 16 που αντιστοιχεί σε έκταση 1 km² μέχρι την τιμή 1024 που αντιστοιχεί σε 64 km². Μείωση της τιμής του, συνεπάγεται αύξηση της τάξης και του μήκους των υδατορευμάτων που προκύπτουν. Και εδώ παρατηρούνται μικρές αυξομειώσεις στις τιμές των λόγων Horton που όμως γίνονται σε ενιαία κλίμακα με κοινή βάση σύγκρισης. Για τις λεκάνες με εμβαδό μεγαλύτερο των 100 km² η τιμή 256 που αντιστοιχεί σε έκταση 16 km² φάνηκε να περιγράφει καλά το υδρογραφικό δίκτυο απεικονίζοντας τα ποτάμια που εμφανίζονται σε χάρτες κλίμακας 1:500 000 και με τις μισές από τις υπο εξέταση λεκάνες να προκύπτουν τάξης τρία και πάνω.

Από την εφαρμογή του γεωμορφολογικού μοναδιαίου υδρογραφήματος μπορεί να ειπωθεί ότι παρά την αρχική διεθνή αναγνώριση και απήχυσή του, τα αποτελέσματα δεν είναι πολύ ενθαρυντικά, για το λόγο ότι καθοριστικό ρόλο στη μορφή του, παίζει το μέγεθος της ταχύτητας το οποίο δεν μπορεί να υπολογισθεί εύκολα και με ακρίβεια.

Στα πλαίσια της εφαρμογής της οδηγίας 2000/60 της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη χρήση και αξιοποίηση των υδάτων, η συστηματική απογραφή, ανάλυση και πινακοποίηση των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών των σημαντικών λεκανών όλης της Ελλάδας που έγινε στα πλαίσια αυτής της εργασίας, μπορούν να φανούν χρήσιμα τόσο σε επίπεδο υδατικού διαμερίσματος, όσο και σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης. Η φυσιογραφική πληροφορία που παρέχουν, είναι πολύτιμη για την υδρολογική μελέτη των λεκανών και συνδέεται άμεσα με την απόκριση και γενικότερα την υδρολογική συμπεριφορά τους.

Αναφορές

- Κουμούλη, Δ.Β., *Γεωμορφολογική και υδρολογική διερεύνηση για επαναπροσδιορισμό των υδατικών διαμερισμάτων της χώρας*, Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδατικών Πόρων, Αθήνα, 2001.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999 (Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση <http://www.itia.ntua.gr/g/docinfo/115/>).
- Λαζαρίδου, Π.Α., και Σ.Ν. Μίχας, *Κατάρτιση μοναδιαίου υδρογραφήματος με τη βοήθεια συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών*, Διπλωματική εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1994.
- Μαντούδη, Κ., *Ανάπτυξη απλού μοντέλου υδατικού ισοζυγίου με χρήση συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας - Εφαρμογή στη λεκάνη των Κρεμαστών*, Μεταπτυχιακή εργασία, 148 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000.
- Νηστικιάκη, Μ., *Εφαρμογές των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών στα δίκτυα κοινής ωφέλειας του Δήμου Κηφισιάς*, Διπλωματική εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997.
- Beven, K.J., E.F. Wood and M. Sivapalan, On hydrological heterogeneity – Catchment morphology and catchment response, *Journal of Hydrology*, 100, 353-375, 1988.
- Chow, V.T., D.R. Maidment and L.W. Mays, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, 1988.
- Dingman, S.L., *Physical Hydrology*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.
- Edson, C.G., Parameters for relating unit hydrographs to watershed characteristics, *Transactions, American Geophysical Union*, vol. 32, num. 4, 591-596, 1951.
- Franchini, M. and P. Enda O'Connell, An analysis of the dynamic component of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph, *Journal of Hydrology*, 175, 407-428, 1996.
- Gupta, V.K., E. Waymire and C.T. Wang, A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology, *Water Resources Research*, 16, 855-862, 1980.

- Hall, M.J., A.F. Zaki and M.M.A. Shahin, Regional analysis using the Geomorpho-climatic instantaneous unit hydrograph, *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 92-102, 2001.
- Horton, R.E., Drainage basin characteristics, *Trans. Am. Geophys. Union*, 13, 350-361, 1932.
- Horton, R.E., Erosional development of streams and their drainage basins; hydro-physic approach to quantitative morphology, *Bull. Geol. Soc. Am.*, 56, 275-370, 1945.
- Hutchinson, M.F., A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits, *Journal of Hydrology*, 106, 211-232, 1989.
- Koutsoyiannis, D., and T. Xanthopoulos, On the parametric approach to unit hydro-graph identification, *Water Resources Management*, 3, 107-128, 1989.
- Langbein, W.B., Topographic characteristics of drainage basins, *U.S. Geol. Surv.*, Water supply paper 968-C, 1947.
- Mandelbrot, B.B., *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, New York, 1983.
- Melton, M.A., Geometric properties of mature drainage systems and their representation in an E4 phase space, *Journal of Geology*, 66, 35-54, 1958.
- Nash, J.E., The form of the instantaneous unit hydrograph, *IAHS AISH Publ.*, 42, 114-118, 1957.
- Rodriguez-Iturbe, I., and J.B. Valdes, The geomorphometric structure of the hydrologic response, *Water Resources Research*, 15(6), 1409-1420, 1979.
- Rodriguez-Iturbe, I., M.G., Sanabria and R.L., Bras, A geomorphoclimatic theory of the instantaneous unit hydrograph, *Water Resources Research*, 18, 877-886, 1982a.
- Rodriguez-Iturbe, I., M.G., Sanabria and G. Caamano, On the climatic dependence of the IUH: A rainfall-runoff analysis of the Nash Model and the geomorphoclimatic theory, *Water Resources Research*, 18, 887-903, 1982b.
- Rosso, R., Nash model relation to Horton order ratios, *Water Resources Research*, 20, 914-920, 1984.
- Schumm, S.A., Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey, *Bull. Geol. Soc. Am.*, 67, 597-646, 1956.
- Strahler, A.N., Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis, *Am. J. Sci.*, 248, 673-696· 800-814, 1950.
- Strahler, A.N., Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography, *Bull. Geol. Soc. Am.*, 63, 1117-1142, 1952.
- Strahler, A.N., Quantitative analysis of watershed geomorphology, *Transactions, Amer. Geophysical Union*, 38, 913-920, 1957.
- Strahler, A.N., Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks, Section 4-II in *Handbook of Applied Hydrology*, edited by V.T. Chow, McGraw-Hill, New York, 1964.

- Strahler, A.N., Quantitative slope analysis, *Bull. Geol. Soc. Am.*, 67, 571-596, 1956.
- Taylor, A.B., and H.E., Schwarz, Unit hydrograph lag and peak flow related to basin characteristics, *Transactions, American Geophysical Union*, 33(2), 235-246, 1952.
- U.S. Corps of Engineers, *Unit Hydrograph Complications*, Department of the Army, Washington district, Civil works invest., Project CW 153, 1954.
- Vörösmarty, C.J., B.M. Fekete, M. Meybeck and R.B. Lammers, Geomorphometric attributes of the global system of rivers at 30-minute spatial resolution, *Journal of Hydrology*, 237, 17-39, 2000.
- Walling, D.E., The sediment delivery problem, *Journal of Hydrology*, 65, 209-237, 1983.
- Wang, C.T., V.K. Gupta and E. Waymire, A geomorphologic synthesis of nonlinearity in surface runoff, *Water Resources Research*, 17, 545-554, 1981.

