

ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Τμήμα Γεωγραφίας

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ GIS**

Πτυχιακή Εργασία του Μωϋσή – Λουκά Μισθού

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006

ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Τμήμα Γεωγραφίας

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ GIS**

Πτυχιακή Εργασία του Μωϋσή – Λουκά Μισθού

Τριμελής Επιτροπή:

Χαλκιάς Χρίστος, Λέκτορας (Επιβλέπων)

Καρύμπαλης Ευθύμιος, Λέκτορας

Στεφανάκης Εμμανουήλ, Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
SUMMARY	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
1. ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	6
1.1 Γενικά.....	6
1.2 Προέλευση ρεόντων υδάτων	6
1.2.1 Υδρολογικός κύκλος.....	6
1.3 Προέλευση και Εξέλιξη Ποτάμιων Συστημάτων.....	8
1.3.1 Γενικά	8
1.3.2 Γένεση ποτάμιων κλάδων	9
1.3.3 Κοιλάδες και Ποταμοί	12
1.3.4 Εξέλιξη ποτάμιων κλάδων και ποτάμιων συστημάτων	13
1.4 Σκιαγράφηση λεκάνης απορροής	17
1.4.1 Γενικά	17
1.4.2 Ορισμοί.....	17
1.4.3 Ταξινόμηση ποτάμιων κλάδων και τύποι υδρογραφικών δικτύων	18
2. ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	23
2.1 Γενικά.....	23
2.2 Οι νόμοι του Horton	24
2.3 Μορφομετρικές Παράμετροι	26
2.3.1 Μορφομετρικές παράμετροι των υδρογραφικών δικτύων	28
2.3.1.1 Μετρούμενες Παράμετροι	28
2.3.1.2 Υπολογιζόμενες Παράμετροι	29
2.3.2 Μορφομετρικές παράμετροι λεκανών απορροής.....	30
2.3.2.1 Μετρούμενες Παράμετροι	30
2.3.2.2 Υπολογιζόμενες Παράμετροι.....	33
2.4 Γενικές Μέθοδοι απόκτησης πληροφορίας.....	35
2.4.1 Μετρήσεις και υπολογισμοί.....	35
2.4.2 Οριοθέτηση υδρολογικής λεκάνης.....	36
3. GIS ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	38
3.1. Σκοπός.....	38
3.2 Πηγές τοπογραφικών/ υψομετρικών δεδομένων.....	39
3.3 Δομές Ψηφιακών Δεδομένων Υψομέτρου.....	39
3.3.1 Περιγραφή	40
3.3.2 Σύγκριση.....	41
3.3.3 Μοντελοποίηση	43
3.3.3.1 Γενικά.....	43
3.3.3.2 Τύποι μοντέλων.....	44
3.4 Από τα δεδομένα στην μοντελοποίηση: πλήρως αυτοματοποιημένες μέθοδοι.....	46
3.4.1 Παραγωγή DEM από υψομετρικά δεδομένα	47
3.4.2 Μοντελοποίηση μέσω DEM.....	48
3.5 Χειρωνακτικές Μέθοδοι.....	54

3.6 Ημιαντόματες Μέθοδοι	55
3.7 Σχόλια	56
4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ	
ΑΝΑΛΥΣΗΣ	57
4.1. Περιοχή μελέτης.....	57
4.2 Υδρολογική/ ποσοτική γεωμορφολογική ανάλυση	62
4.2.1 Χειρωνακτική Μέθοδος.....	62
4.2.1.1 Χάραξη του υδρογραφικού δικτύου και οριοθέτηση των υδρολογικών λεκανών	62
4.2.1.2 Καθορισμός μορφομετρικών παραμέτρων.....	66
4.2.1.3 Μετρήσεις (Καθάρων) Αριθμών Μηκών και Εμβαδών (θεωρητικά)	67
4.2.1.3 Μεθοδολογία μετρήσεων στην λεκάνη απορροής του Λυκορρέματος και οργάνωσης των αποτελεσμάτων	67
4.2.1.4 Υπολογισμός των τιμών των μορφομετρικών παραμέτρων και η φυσικογεωγραφική σημασία τους.....	70
4.2.2 Ημιαντόματη Μέθοδος.....	72
4.2.2.1 Δημιουργία επιπέδων πληροφορίας	72
4.2.2.2 Ένταξη σε σύστημα συντεταγμένων	74
4.2.2.3 Ψηφιοποίηση και ανάθεση περιγραφικών ιδιοτήτων	74
4.2.2.4 Εκτίμηση μετρούμενων μεγεθών και ανάθεση γνωρισμάτων χωρικής διάστασης	78
4.2.2.5 Λειτουργίες επικάλυψης ενός GIS	80
4.2.2.5 Υπολογισμός Μορφομετρικών Παραμέτρων και ανάθεση των τιμών τους ως γνωρίσματα θεματικής διάστασης	83
4.2.2.6 Οπτικοποίηση.....	84
4.2.3 Αυτοματοποιημένη Μέθοδος.....	92
4.2.3.1 Γενικά.....	92
4.2.3.2 Παραγωγή DEM	92
4.2.3.3 Ανάπτυξη υδρολογικής λεκάνης	98
4.2.3.4 Ανάδειξη Μορφομετρικών Παραμέτρων	101
4.3 Φυσική σημασία των αποτελεσμάτων	111
4.3.1 Υδρογραφική Συχνότητα και Πυκνότητα	111
4.3.2 Κυκλικότητα	112
4.3.3. Κλίσεις.....	113
5. ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....	114
5.1 Ανάλυση – Σύγκριση μεθόδων.....	114
5.1.1 Γενικά	114
5.1.2 Αξιολόγηση χειρωνακτικής μεθόδου.....	115
5.1.3 Αξιολόγηση Ημιαντόματης Μεθόδου.....	116
5.1.4 Αξιολόγηση Αυτοματοποιημένης Μεθόδου	117
5.2 Ποιότητα Αρχικών Δεδομένων και πηγές σφαλμάτων.....	120
5.3 Ποιότητα παραγόμενων και σφάλματα επεξεργασίας	121
5.4 Μοντελοποίηση	122
5.4.1. Εφαρμογές	122
5.4.2 Κατηγοριοποίηση της Μοντελοποίησης.....	124
6. ΕΠΙΛΟΓΟΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	125
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	132
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	138
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.....	149

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

ΠΙΝΑΚΕΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΕΣ ΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ, ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΕΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΜΕΝΕΣ	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΓΝΩΡΙΣΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΕΣ ΟΝΤΟΤΗΤΕΣ.	73
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΑ ΑΡΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗ DEM.	94
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ. ...	130

ΣΧΗΜΑΤΑ

ΣΧΗΜΑ 1. 1: Ο ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ	7
ΣΧΗΜΑ 1. 2: ΤΥΠΟΙ ΚΟΙΛΑΔΩΝ	13
ΣΧΗΜΑ 1. 3: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΠΟΤΑΜΙΩΝ ΚΛΑΔΩΝ ΚΑΤΑ STRAHLER ΚΑΙ ΚΑΤΑ SHREVE.	20
ΣΧΗΜΑ 1. 4: ΟΙ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΟΙ ΤΥΠΟΙ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....	21
ΣΧΗΜΑ 2. 1: Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ DAVIS.	27
ΣΧΗΜΑ 2. 2: ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΕΝΤΟΣ ΤΗΣ ΟΠΟΙΑΣ ΑΠΟΤΥΠΩΝΟΝΤΑΙ ΟΙ ΜΕΣΟΛΕΚΑΝΩΔΕΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ, ΟΙ ΟΠΟΙΕΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΝΟΥΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΥΔΑΤΑ (ΑΠΟ ΛΕΚΑΝΕΣ 1ΗΣ ΚΑΙ 2ΗΣ ΤΑΞΗΣ) ΚΑΤΕΥΘΕΙΑΝ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΚΟΙΤΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ (3ΗΣ ΤΑΞΗΣ).	32
ΣΧΗΜΑ 2. 3: ΜΙΑ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ 1ΗΣ ΤΑΞΗΣ.	32
ΣΧΗΜΑ 3. 1: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ DEM ΩΣ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΑΠΟ ΤΗ ΦΥΣΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ, ΣΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ.....	44
ΣΧΗΜΑ 3. 2: Η ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΝΟΣ ΚΑΝΝΑΒΟΥ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΡΟΗΣ.....	50
ΣΧΗΜΑ 3. 3: ΤΟ ΣΧΗΜΑ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΩΝ (ΡΟΗΣ) ΤΗΣ ESRI.	51
ΣΧΗΜΑ 3. 4: Η ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΝΟΣ ΚΑΝΝΑΒΟΥ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΟΗΣ.	52
ΣΧΗΜΑ 3. 5: Ο ΚΑΝΝΑΒΟΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΡΟΗΣ (FLOW DIRECTION GRID) ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ 3.4 (Γ).....	53
ΣΧΗΜΑ 4. 1: ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΧΩΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ.	75
ΣΧΗΜΑ 4. 2: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΟΣ ΣΧΕΣΙΑΚΟΥ ΠΙΝΑΚΑ.....	76
ΣΧΗΜΑ 4. 3: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΤΟΜΗΣ.....	82
ΣΧΗΜΑ 4. 4: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΕΝΩΣΗΣ.....	82
ΣΧΗΜΑ 4. 5: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΤΑΥΤΟΤΗΤΑΣ.	83
ΣΧΗΜΑ 4. 6: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΥΠΟΥ QUANTILE ΣΤΟ «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ» ΤΟΥ ARC MAP.	87
ΣΧΗΜΑ 5. 1: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑ – ΟΡΘΟΤΗΤΑ.	115

ΧΑΡΤΕΣ

1) Τοπογραφικός Χάρτης της λεκάνης απορροής του Μεγάλου Ρέματος της Ραφήνας	59
2) Χάρτης υδρογραφικού δικτύου του Μεγάλου Ρέματος της Ραφήνας	60
3) Χάρτης υδρογραφικού δικτύου του Λυκορρέματος	61
4) Χάρτης ταξινόμησης των λεκανών απορροής του Λυκορρέματος	65
5) Χάρτης υδρογραφικής συχνότητας	88
6) Χάρτης υδρογραφικής πυκνότητας	89
7) Χάρτης κυκλικότητας	90
8) Χάρτης κλίσης κλιτύων	91
9) Χάρτης ισοϋψών της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης απορροής του Λυκορρέματος	95
10) Χάρτης υψομετρικών σημείων και υδρογραφικού δικτύου της ευρύτερης περιοχής	96
11) Χάρτης ψηφιακού μοντέλου Εδάφους (DEM) της ευρύτερης περιοχής	97
12) Χάρτης DEM χωρίς τοπικές ταπεινώσεις της ευρύτερης περιοχής	103
13) Χάρτης διέυθυνσης ροής	104
14) Χάρτης συγκέντρωσης ροής	105
15) Χάρτης ταξινόμησης των λεκανών απορροής του Λυκορρέματος (με βάση το DEM)	106
16) Χάρτης υδρογραφικής συχνότητας	107
17) Χάρτης υδρογραφικής πυκνότητας	108
18) Χάρτης κυκλικότητας	109
19) Χάρτης κλίσης κλιτύων	110

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στα πλαίσια της εκπόνησης αυτής της πτυχιακής εργασίας με τίτλο: «Ανάλυση Μορφομετρικών Παραμέτρων Υδρολογικής Λεκάνης με Χρήση GIS», θα ήθελα να εκφράσω την εκτίμησή μου για τους συμμετέχοντες στην τριμελή επιτροπή, οι οποίοι πρόσφεραν τα μέγιστα τόσο σε πρακτικά ζητήματα της ολοκλήρωσης της εργασίας μου, όσο και στον τομέα της ψυχολογικής ενίσχυσής μου. Κατ' αρχήν, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κ. Χρήστο Χαλκιά, Λέκτορα του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου για την συνεπή και ανελλιπή επίβλεψη και την ανεκτίμητη καθοδήγησή του σε γενικά θέματα οργάνωσης της εργασίας, αλλά και σε πιο εξειδικευμένα ζητήματα, καθ' όλη την διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας μου. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Ευθύμιο Καρύμπαλη, Λέκτορα του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου για την ουσιαστική συμβολή του σε κρίσιμες καμπές της εργασίας και για την παροχή χρήσιμου υλικού από μέρους του. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Εμμανουήλ Στεφανάκη, Λέκτορα του Χαροκοπείου Πανεπιστημίου για το ενδιαφέρον και τα ενθαρρυντικά του σχόλια κατά το διάστημα της συγγραφής της εργασίας μου.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω, πέρα από τους Καθηγητές μου, την οικογένειά μου, για την πολύτιμη συμπαράσταση που μου προσέφερε, καθώς και όλους όσους ψυχολογικά ή και έμπρακτα συνέβαλλαν στην επίτευξη της ολοκλήρωσης της εργασίας μου.

«Κάθε φυσική επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί ως μια μονάδα επιφάνειας επί της οποίας εφαρμόζεται ο υδρολογικός κύκλος. Αυτό περιλαμβάνει, για παράδειγμα, ένα απομονωμένο δέντρο, ακόμα και ένα φύλλο ή ένα κλαδάκι ενός αναπτυσσόμενου φυτού, τη στέγη ενός σπιτιού, τη λεκάνη αποστράγγισης ενός ποτάμιου συστήματος ή οποιουδήποτε από τους παραποτάμους του, μια μη αποστραγγισμένη συμπίεση παγετώνα, ένα έλος, έναν παγετώνα, έναν πολικό παγετώνα, μια συστάδα από θίνες, μια λίμνη, έναν ωκεανό, ή τη γη ως σύνολο.»

(R. E. Horton)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται την ανάλυση μορφομετρικών παραμέτρων υδρολογικής λεκάνης με τη χρήση Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων (ΓΠΣ, Geographic Information Systems – GIS). Στο πλαίσιο αυτής της ανάλυσης περιγράφηκε το φυσικογεωγραφικό φαινόμενο της ανάπτυξης και εξέλιξης μιας λεκάνης αποστράγγισης και παρατέθηκαν οι λόγοι δημιουργίας και ανάπτυξης ενός συσχετιζόμενου υδρογραφικού δικτύου που αλληλεπιδρά με μια λεκάνη απορροής, αποστραγγίζοντας τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα που προσπίπτουν σε αυτή. Επιπρόσθετα, αναδείχθηκαν οι κύριοι δείκτες-παράμετροι οι οποίοι διασφαλίζουν μια αποτελεσματική ποσοτική γεωμορφολογική ανάλυση.

Σε μια προσπάθεια να εκτιμηθούν αυτές οι παράμετροι, αναπτύχθηκαν οι μεθοδολογίες ποσοτικής υδρολογικής ανάλυσης, μέσω των οποίων προέκυψαν οι βασικές γεωμορφικές ενότητες αναφοράς, προκειμένου να διενεργηθεί μετέπειτα η απόδοση τιμών των παραμέτρων σε κάθε μία από αυτές. Επίσης, διερευνήθηκε ο ρόλος της μορφολογίας του ανάγλυφου (τοπογραφίας) μιας περιοχής, προκειμένου να επιτευχθεί μια τέτοια ανάλυση. Οι χειρωνακτικές, οι ημιαυτόματες και οι πλήρως αυτοματοποιημένες μέθοδοι αποτέλεσαν τις τρεις διαφορετικές τεχνικές υδρολογικής ανάλυσης. Για κάθε μία από αυτές καταγράφηκε ο λεπτομερής τρόπος απόκτησης δεδομένων, επεξεργασίας και διαχείρισής αυτών ώστε να καθοριστεί ένα υδρογραφικό δίκτυο και να οριοθετηθεί μια υδρολογική λεκάνη.

Στο επόμενο στάδιο, επιλέχθηκε η λεκάνη απορροής επί της οποίας αναπτύχθηκε υδρολογική και ποσοτική γεωμορφολογική ανάλυση. Σε αυτό το σημείο παρουσιάστηκαν με λεπτομέρεια οι συγκεκριμένες ενέργειες και διαδικασίες που έλαβαν χώρα σε κάθε μια από τις τρεις μεθόδους (χειρωνακτικές, ημιαυτόματες και πλήρως αυτοματοποιημένες), δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις δύο τελευταίες, οι οποίες κάνουν χρήση νέων τεχνολογιών και συγκεκριμένα των GIS. Προβαίνοντας σε εκτενείς αναφορές για τον τρόπο οργάνωσης και λειτουργίας σε ένα GIS κατά την υλοποίηση των δύο αυτών μεθόδων προέκυψε η υψηλή σπουδαιότητά και η εξαιρετική χρησιμότητα των GIS στην υπό μελέτη περίπτωση, καθώς και σε ανάλογες εφαρμογές.

Τελικά, εφόσον έλαβαν χώρα οι παραπάνω προσεγγίσεις υδρολογικής και ποσοτικής γεωμορφολογικής ανάλυσης, τα παραγόμενα οπτικοποιήθηκαν σε θεματικούς χάρτες. Κατόπιν, αναπτύχθηκε η φυσικογεωγραφική σημασία των αποτελεσμάτων και

ταυτόχρονα συγκρίθηκαν τα τελευταία ως προς την ορθότητα και ακρίβεια τους σε κάθε μία μέθοδο. Επιπρόσθετα, αποτιμήθηκε η αξιοπιστία της κάθε μεθόδου, όπως και ο συνολικός χρόνος και η φυσική κόπωση που απαιτήθηκαν ώστε να πραγματοποιηθεί ολόκληρη η διαδικασία για κάθε μία μέθοδο. Τέλος, έγινε αναφορά στις πιθανές εφαρμογές μιας τέτοιας ανάλυσης, ενώ αναδείχθηκε το συγκριτικό πλεονέκτημα των αυτοματοποιημένων μεθόδων (με τη χρήση GIS) στη διαδικασία μοντελοποίησης.

SUMMARY

This study treats with the issue of the analysis of morphometric parameters using GIS (Geographic Information Systems) technology. In the context of such an analysis, the physiographic phenomenon of the development and evolution of a drainage basin was described, and the initiation and development of a hydrographic network which interacts with a specific catchment area and dewaters the precipitation that falls on it was reported. Moreover, the main indicators-parameters that ensure an effective quantitative geomorphologic analysis were emerged.

In an attempt to estimate these indicators, the methodologies of hydrologic analysis were developed, through which the fundamental geomorphic units came up, in order to assign values on each of them afterwards. The role of the morphology of the relief was also promoted, so as to attain such an analysis. The manual, semi-automated and the fully automated methods comprised the three different techniques of hydrologic analysis. For each method, the detailed way of retrieving data, processing and management is reported, in order to determine a hydrographic network and delimit a hydrologic basin.

In the next stage, the case study area (Lykorema basin) was chosen. At this point, the specific actions and procedures that took place in each of these three methods (manual, semi-automated and fully-automated methods) were presented in detail and explicitly, emphasizing these that use new technologies. Making a comprehensive reference to the way of organization and function of a GIS, while implementing these two methods, their high importance and exceptional utility came about, both to this case study, and to similar applications.

Finally, after analyzing the approaches described above (hydrological and quantitative geomorphologic analysis), their outputs were portrayed on thematic maps. Later on, the physiographic meaning of the results was developed and a comparison was carried out, discussing the accuracy and precision within each method. Moreover, the reliability of each method was evaluated, as well as the total time and physical fatigue required, in order to accomplish the whole procedure for each method. At the end, there was a reference to the possible applications of this type of analysis, while the comparative advantage of the automated methods emerged, in the procedure of modeling.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό, ως φυσικό στοιχείο επηρεάζει με μια πληθώρα τρόπων τόσο το φυσικό περιβάλλον, όσο και τη ζωή των ανθρώπων. Καθώς λαμβάνει μέρος σε έναν από τους σημαντικότερους κύκλους που επιτελούνται στον πλανήτη μας, εμπλέκεται σε μια σειρά από διαδικασίες που εμπίπτουν στο φάσμα των επιμέρους φάσεων αυτού του κύκλου. Ο κύκλος του νερού ή υδρολογικός κύκλος αποτελεί μια συνεχή διαδικασία που συμπεριλαμβάνει την εξάτμιση των υδάτινων μαζών, την πτώση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στη γήινη επιφάνεια, την κατείσδυση και την επιφανειακή απορροή (Καρύμπαλης και Παυλόπουλος, 2004). Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί η φάση εκείνη του υδρολογικού κύκλου που αφορά στην επιφανειακή απορροή (του νερού).

Η καθοριστική σημασία του υδάτινου στοιχείου για τις κοινωνίες των ανθρώπων καθ' όλους τους αιώνες ως μέσο για τη διατήρηση της ζωής είναι αναμφισβήτητη. Επίσης αναμφισβήτητη είναι η ευεργετική επίδραση της παρουσίας ποταμών στην ευημερία και οικονομική ευρωστία αρχαίων πολιτισμών (π.χ. Αιγύπτιοι – Νείλος) άλλα και σύγχρονων κοινωνιών (π.χ. παραδουνάβιες χώρες). Εκτός όμως από τα οφέλη που αποκομίζει ένα ποτάμιο σύστημα σε μια δεδομένη γεωγραφική περιοχή – και συγκεκριμένα στους βιοτικούς παράγοντες που την απαρτίζουν: χλωρίδα, πανίδα, άνθρωποι – δυνητικά επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις.

Ένα συνηθισμένο φαινόμενο που απαντάται σε παραποτάμιας – παρόχθιας περιοχές και έχει καταστροφικούς αντίκτυπους είναι αυτό των πλημμύρων. Όταν ένα τέτοιο ακραίο συμβάν πλήττει μια περιοχή, είναι εξαιρετικά δύσκολο να αποσοβηθεί. Ο περιβάλλοντας χώρος είναι εξαιρετικά ευπαθής ειδικά αν οι χρήσεις γης του απαρτίζονται από ανθρωπογενείς δομημένες εκτάσεις, ενώ οι ζωές των κατοίκων τίθενται σε κίνδυνο, αλλά και οι περιουσίες τους. Προκειμένου να προληφθούν τέτοια ανεπιθύμητα περιστατικά, είναι δυνατό διαμέσου της γνώσης των μορφομετρικών παραμέτρων της εκάστοτε υδρολογικής λεκάνης, της γενικότερης γεωγραφίας της ευρύτερης περιοχής και σε συνδυασμό με ένα άρτια οργανωμένο Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information System – GIS),* να αναδειχθούν τα τμήματα εκείνα της γήινης επιφάνειας που θα επηρεασθούν σε μεγαλύτερο βαθμό. Σύμφωνα δε με ένα σχετικά ευρύ ορισμό του Goodchild (1985), «GIS είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής, αποθήκευσης,

*Τα ΣΓΠ (Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών) ή ΓΣΠ (Γεωγραφικά Σύστημα Πληροφοριών) θα καταγράφονται από εδώ και επείτα ως GIS.

διαχείρισης, ανάλυσης και απεικόνισης πληροφοριών σχετικών με ζητήματα γεωγραφικής φύσης» .

Όμως, πέρα από τη συμβολή και τη χρησιμότητα των GIS σε τέτοιου είδους εφαρμογές, η δυνατότητα και μόνο της μελέτης της γεωμετρίας και των ιδιοτήτων μιας υδρολογικής λεκάνης ως ανεξάρτητης φυσικογεωγραφικής και γεωμορφικής ενότητας αποτελεί από μόνο του εξαιρετικό αντικείμενο διερεύνησης. Στα κεφάλαια που θα ακολουθήσουν, θα εστιαστεί το ενδιαφέρον μας κύρια στις διάφορες μεθόδους υπολογισμού και αποτύπωσης (όπου αυτό είναι εφικτό) των παραμέτρων μιας τέτοιας ενότητας. Επίσης, θα συγκριθούν τόσο οι ίδιοι οι τρόποι, όσον αφορά την μεθοδολογία που υιοθετήθηκε αλλά και ο χρόνος και η φυσική κόπωση που απαιτήθηκε. Σε τελική φάση θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα ως προς την ορθότητα και την ακρίβειά τους και θα εξαχθούν τελικά συμπεράσματα.

Στα πλαίσια λοιπόν της συγγραφής αυτής της εργασίας γίνεται προσπάθεια να συνδυασθεί η θεωρητική γνώση που αναφέρεται σε ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά ποτάμιων συστημάτων υπό το πρίσμα μιας βασικής υδρολογικής και γεωμορφολογικής ανάλυσης. Μετέπειτα, επιλέγεται συγκεκριμένη λεκάνη αποστράγγισης ως μελέτη περίπτωσης, της οποίας τις παραμέτρους θα επεξεργαστούμε εναλλακτικά με τη χρήση GIS. Κατά αυτόν τον τρόπο αναδεικνύονται μη μετρήσιμες και υπολογίζονται μετρήσιμες μορφολογικές παράμετροι, εκμαιεύοντας επί μέρους συμπεράσματα. Κατόπιν, παρατίθενται πίνακες όπου καταγράφονται οι τιμές των παραμέτρων που προηγουμένως εκτιμήθηκαν και χάρτες, επί των οποίων οπτικοποιείται η κατανομή αυτών των δεικτών στην περιοχή της λεκάνης και εξάγονται επιμέρους συμπεράσματα. Ύστερα από την ανάλυση των μορφομετρικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την (υπαρκτή) λεκάνη επιλογής μας, αναζητούμε τις πηγές πιθανών σφαλμάτων που επηρέασαν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μας, ενώ ταυτόχρονα αναδύονται τα δυνατά και αδύνατα σημεία κάθε μεθόδου. Τέλος γίνεται αναφορά σε ενδεχόμενες εφαρμογές που μπορούν να φανούν χρήσιμες τέτοιες μέθοδοι, όπως η αποτίμηση πλημμυρικού κινδύνου.

1. ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

1.1. Γενικά

Πρωταρχικό μέλημα της εργασίας αποτέλεσε η συγκέντρωση των απαραίτητων θεμελιωδών βιβλιογραφικών πληροφοριών προκειμένου να πραγματοποιηθεί η καταγραφή όλων εκείνων των προσδιοριστικών χαρακτηριστικών μιας υδρολογικής λεκάνης. Για την εξέταση του φυσικογεωγραφικού φαινομένου της ανάπτυξης λεκάνης απορροής, αρχικά περιγράφεται ο υδρολογικός κύκλος και εκτίθενται συνοπτικά οι παράγοντες δημιουργίας αυτής. Έπειτα, γίνονται αναφορές γενικών περιγραφών και συγκεκριμένων ορισμών που αφορούν μια τέτοια υδρολογική λεκάνη, ένα υδρογραφικό δίκτυο που απορρέει εντός αυτής και ενός υδροκρίτη που την «περιορίζει» χωρικά. Τελικά παρουσιάζονται μέθοδοι καθορισμού της τάξης μεγέθους των κλάδων ενός ποτάμιου συστήματος επιφανειακής απορροής, και ταξινομούνται διαφορετικά είδη υδρογραφικών δικτύων ανάλογα με τη μορφή τους.

1.2. Προέλευση ρεόντων υδάτων

1.2.1 Υδρολογικός κύκλος.

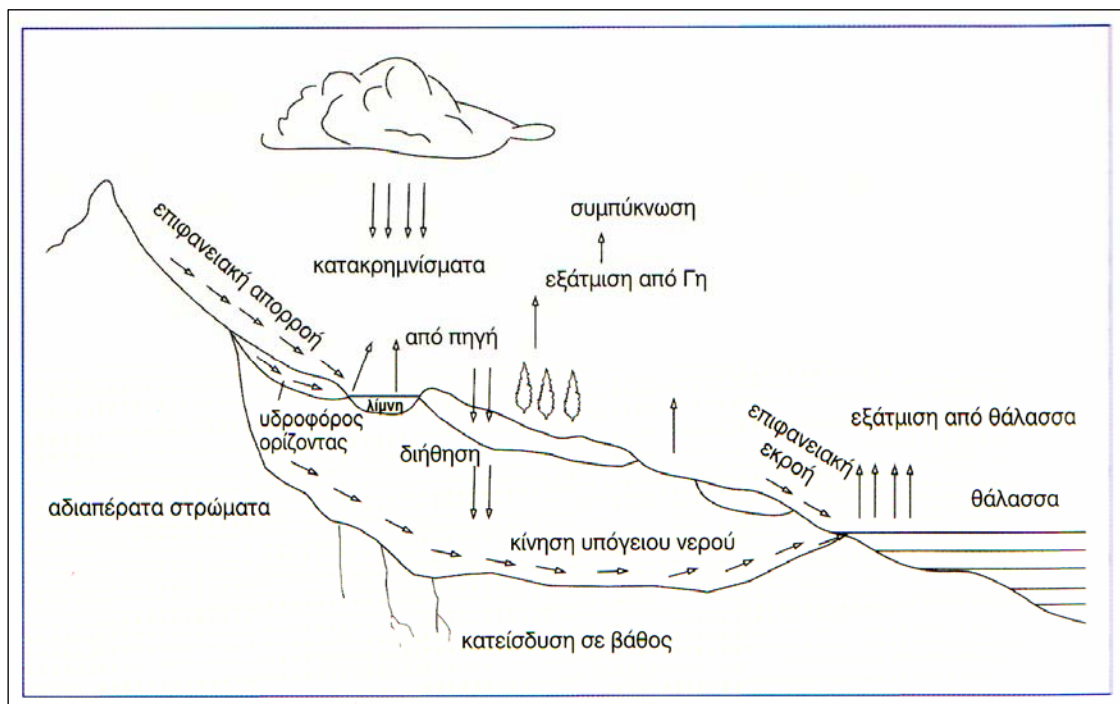
Ο κύριος παράγοντας δημιουργίας ενός υδρογραφικού δικτύου είναι η ενεργός διαβρωτική δράση του νερού το οποίο προέρχεται από την πτώση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Αυτή η θεώρηση αναδύθηκε κατά τον 15^ο αιώνα με μείζονες εκφραστές τον Leonardo Da Vinci και τον Bernard Palissy (Adams 1938, Biswas 1970). Σε προηγούμενες ιστορικές περιόδους δεν είχε αναπτυχθεί μια ορθολογική ερμηνεία των διεργασιών που διέπει τον υδρολογικό κύκλο του νερού και έτσι πολλοί αρχαίοι Έλληνες φιλόσοφοι όπως ο Θαλής, ο Αναξαγόρας ο Αριστοτέλης κ.α., είχαν επινοήσει ευφάνταστους μηχανισμούς (Dingman 2002).

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, ως υδρολογικός κύκλος νοείται η ατελείωτη κίνηση του νερού στην ατμόσφαιρα, τη γήινη επιφάνεια και το υπέδαφος της. Οι υδρατμοί που συγκεντρώνονται από τη διαδικασία της εξάτμισης επιφανειακών υδάτινων μαζών και υπό κατάλληλες συνθήκες συμπυκνώνονται, δυνητικά συνιστούν τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Αυτά τα τελευταία φτάνουν στη γήινη επιφάνεια

(ηπειρωτική/ χερσαία ή θαλάσσια) υπό διάφορες μορφές – βροχή, χιόνι, χαλάζι, δροσιά, πάχνη – με επικρατέστερη αυτή της βροχόπτωσης ή της χιονόπτωσης. Ένα ιδιαίτερα μικρό ποσοστό του συνόλου των κατακρημνισμάτων εξατμίζεται πριν φτάσει στη γήινη επιφάνεια ενώ ο κύριος όγκος αυτών τελικά αποτίθεται στη γήινη επιφάνεια, σε χερσαίους ή υδάτινους αποδέκτες . Όταν ο αποδέκτης είναι υδάτινος (ωκεανός, θάλασσα, λίμνη), τότε το νερό ολοκληρώνει άμεσα τον κύκλο του. Όταν όμως τα κατακρημνίσματα προσπίπτουν στην ξηρά τότε υφίστανται τρεις εκδοχές: είτε το νερό να κατεισδύσει (δηλ. να διεισδύσει) στο υπέδαφος και να εμπλουτίσει τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, είτε να συνεχίσει τον κύκλο του διαμέσου της επιφανειακής απορροής, είτε, τέλος, να απορροφηθεί από την υπάρχουσα βλάστηση διαμέσου του ριζικού συστήματος των φυτών και μέρος αυτού να απελευθερωθεί ξανά στην ατμόσφαιρα με τη διαδικασία της διαπνοής (Σχ. 1.1). Η διαπνοή και η εξάτμιση αποδίδονται με ένα μέγεθος, αυτό της Εξατμισοδιαπνοής, ενώ η κατείσδυση και η απορροή αποδίδονται με ανεξάρτητα. Γενικά, αυτό που αναπτύχθηκε παραπάνω, διατυπώνεται και μαθηματικά με την εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου:

$$P = E + I + R$$

όπου P : Precipitation (Ατμοσφαιρικά Κατακρημνίσματα), E : Evapotranspiration (Εξατμισοδιαπνοή), I : Infiltration (Κατείσδυση) και R : Runoff (Επιφανειακή Απορροή).



Σχήμα 1. 1: Ο Υδρολογικός Κύκλος
Πηγή: Κατσίκης, 2004

Όπως προαναφέρθηκε, στην προκειμένη περίπτωση μας αφορά η «επίγεια» φάση (land phase) του νερού που σύμφωνα με τον Dingman (2002), αυτή ορίζεται ως: *«Η κίνηση της υδάτινης ουσίας πάνω και κάτω από την χερσαία γήινη επιφάνεια, οι φυσικές και χημικές αλληλεπιδράσεις με τα γήινα υλικά που συνοδεύουν αυτή την κίνηση, και οι βιολογικές διαδικασίες που διεξάγουν αυτή την κίνηση.»* Πιο συγκεκριμένα, η χερσαία επιφανειακή απορροή – που διενεργείται πάνω από τη χερσαία γήινη επιφάνεια – επιτελείται οφειλόμενη σε δύο αιτίες: Είτε στην πλήρωση και υπέρβαση της χωρητικής ικανότητας των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων, είτε στον κορεσμό του εδάφους με νερό. Στην εξέλιξη αυτής της διαδικασίας, η διαπερατότητα του εδάφους και η ένταση της βροχόπτωσης αποτελούν σημαντικούς παράγοντες για την σχετική επικράτηση του ενός ή του άλλου τύπου εξάρτησης της επιφανειακής απορροής (Bridge, 2003). Η πρώτη εκδοχή επιφανειακής απορροής (Saturation overland flow) προκύπτει από τον εμπλουτισμό με νερό στο υπερκείμενο έδαφος από υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες στην ήδη εμποτισμένη με νερό περιοχή, ενώ η δεύτερη (Hortonian overland flow) προκαλείται από την παρουσία αδιαπέρατων επιφανειακών στρωμάτων (Dingman, 2002). Η κύρια διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι ο κορεσμός από νερό εντείνει την τάση χαλαρών σωματιδίων να μετακινηθούν προς τα κατάντη εξ' αιτίας της επιπρόσθετης «ώθησης» από (μικρό)διαρροές (Bloom, 1998).

1.3. Προέλευση και Εξέλιξη Ποτάμιων Συστημάτων

1.3.1. Γενικά

Από τη στιγμή που το νερό το οποίο προέρχεται από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα – κυρίως της βροχόπτωσης – φτάνει στην χερσαία επιφάνεια της γης, δεν σχηματίζεται άμεσα αλλά ούτε και πάντοτε αντίστοιχο υδρογραφικό δίκτυο (ρυάκια, ρεύματα, χείμαρροι, ποταμοί). Συγκεκριμένα, η συγκεντρωμένη (ποτάμια) ροή έπεται της υδροστρωματορροής (sheetflow).^{*} Έτσι, σε πρώιμα στάδια, η επιφανειακή απορροή συντελείται κατά στρώσεις (Α. Παπαπέτρου – Ζαμάνη 1995 σ.128).

^{*} Σε «γυμνές», ήπια κεκλιμένες επιφάνειες, το (λασπώδες) νερό μπορεί να ρέει «διασκορπισμένο», σαν ένα λεπτό κινούμενο επιφανειακό στρώμα. Η κίνηση αυτή ονομάζεται υδροστρωματορροή.

Για την καλύτερη κατανόηση της ανάπτυξης ενός ποτάμιου συστήματος, πριν προβούμε στην περιγραφή των διαδικασιών, επεξηγούμε τον όρο υδρογραφικό ή αποστραγγιστικό δίκτυο. Σύμφωνα με τους Leopold et al. (1964), ένα αποστραγγιστικό δίκτυο είναι το πρότυπο που αποτελείται από κύρια (ποτάμια) ρεύματα και παραποτάμους, και θεωρητικά συμπεριλαμβάνει έως και τα ρεύματα εποχιακής ροής και τις «μικροαυλακώσεις» του εδάφους. Στην πράξη, το είδος και το μέγεθος των ρευμάτων που διαφαίνεται να εμπεριέχονται σε μια περιοχή συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, που ονομάζεται λεκάνη αποστράγγισης εξαρτάται από την λεπτομέρεια και επομένως από την κλίμακα του χρησιμοποιούμενου (τοπογραφικού) χάρτη.

Προτού το νερό της βροχής συγκεντρωθεί σε κάποια υποτυπώδη κοίτη, διανύει κάποια απόσταση που, κατά τον Horton (1945), εξαρτάται από δύο παράγοντες: την ικανότητα διήθησης (δηλ. την ικανότητα διείσδυσης στο υπέδαφος) και τη σχέση μεταξύ της ποσότητας του νερού και του ρυθμού της επιφανειακής απορροής. Η ικανότητα διήθησης προσδιορίζεται από μια σειρά χαρακτηριστικών του εδάφους όπως η δομή του, η υφή του, η υγρασία, η παρουσία μικροοργανισμών, η κάλυψη με βλάστηση ή όχι, η προσωρινή ή και μόνιμη κατάσταση του, και ενδεχομένως η θερμοκρασία του.

Θεωρώντας την παροχέτευση ύδατος άνωθεν επαρκή για την δημιουργία συγκεντρωμένης ροής, αρκεί οι παράγοντες που περιγράφηκαν παραπάνω να είναι κατάλληλοι. Στην περίπτωση που οι συνθήκες κρίνονται πρόσφορες, παρατηρείται ο σχηματισμός συγκεντρωμένης ροής, η οποία εν δυνάμει θα αποτελέσει την πρωτογενή γενεσιουργό δύναμη για την «ίδρυση» και περαιτέρω διαμόρφωση υδρογραφικού δικτύου.

1.3.2 Γένεση ποτάμιων κλάδων

Η αλληλένδετη δράση τεκτονικών δυνάμεων και εξωγενών διεργασιών* επί του ανάγλυφου της γης έχει πολλές φορές ως αποτέλεσμα την δημιουργία υδρογραφικών δικτύων. Καθώς η ξηρά ανυψώνεται τεκτονικά, το νερό που συσσωρεύεται στην γήινη

* Τεκτονικές δυνάμεις ονομάζονται οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στο φλοιό της γης ως αποτέλεσμα της κίνησης και σύγκρουσης των λιθοσφαιρικών πλακών. Αντίθετα, ως εξωγενείς διεργασίες νοούνται όλες εκείνες που «έξωθούνται» από τις συνθήκες του περιβάλλοντος, όπως η κίνηση του αέρα, του νερού, η μεταβολή της θερμοκρασίας κ.α., και η διαβρωτική επενεργειά τους.

επιφάνεια επιτελεί την διαβρωτική δράση του έπ' αυτής τείνοντας να ταπεινώσει το γήινο ανάγλυφο έως την επιφάνεια της θάλασσας (απόλυτο βασικό επίπεδο).*

Η επενέργεια της ροής των επιφανειακών υδάτων και η διαβρωτική τους δράση αντικατοπτρίζεται στο γήινο ανάγλυφο. Ως εκ τούτου, η παρουσία υδρογραφικού δικτύου σε μια περιοχή είναι συνυφασμένη με την ύπαρξη κοιλάδων. Πέραν από μια ευρύτερη χρησιμοποίηση του όρου (κοιλάδα) για την απόδοση μορφών του εδάφους, σε ένα αδιαφιλονίκητο ορισμό του όρου υπεισέρχεται και η ροή του νερού. Έτσι, με ασφάλεια μπορεί να λεχθεί πως: «Οι κοιλάδες είναι ταπεινώσεις (του γήινου ανάγλυφου) διαφορετικής μορφής και μεγέθους που διελαύνονται από ποταμούς συνεχούς, περιοδικής ή διακεκριμένης ροής.» (Παπαπέτρου – Ζαμάνη 1995).

Όμως προτού στρέψουμε την προσοχή μας στους τρόπους με τους οποίους η επιφανειακή απορροή του νερού μεταλλάσσει το γήινο ανάγλυφο και προκαλεί τη δημιουργία γεωμορφών όπως οι κοιλάδες, ας επικεντρώσουμε το ενδιαφέρον μας στις πρωταρχικές εκείνες συνθήκες που θα καταστήσουν ικανή την ανάπτυξη υδρογραφικού δικτύου.

Εγκαταλείποντας εν μέρει παραμέτρους που εμπίπτουν στην εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου, όπως π.χ. το ετήσιο ύψος βροχής μιας περιοχής, προβαίνουμε στην εξέταση παραγόντων που αναφέρονται στην τοπογραφία και μορφομετρία του γήινου ανάγλυφου. Έτσι, κατ' αρχήν, απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί, για την έναρξη (και μετέπειτα συνέχισης) της ροής, μια προϋπάρχουσα κλίση πρανών, έστω και μικρή. Η δύναμη της βαρύτητας, η επενέργεια της δυναμικής ενέργειας δηλαδή, κατέχει πρωταρχικό ρόλο στη διαδικασία καθορισμού της ροής ενός (ποτάμιου) ρεύματος. Ένας άλλος εξίσου κρίσιμος παράγοντας για τη ροή που θα ακολουθήσει εν συνεχεία ένας ποτάμιος κλάδος επαφίεται στη δομή του υποκείμενου πετρώματος (Παυλόπουλος και Καρύμπαλης, 2003). Η υφή του – λιθολογική σύσταση και ιδιότητες – σε συνδυασμό με την τεκτονική του – ύπαρξη πτυχώσεων, διακλάσεων ή ρηγμάτων θα αποτελέσουν εν δυνάμει καθοριστικούς παράγοντες για την δημιουργία κοιτών επιφανειακής απορροής και συνεπώς κοιλάδων.

Για τη διαδικασία έναρξης της δημιουργίας αυλακώσεων στην επιφάνεια της γης οι οποίες μελλοντικά θα διαρρέονται από νερό (αυλάκια) και θα σχηματίσουν δυνητικά ποτάμιους κλάδους, απαιτείται επαρκής ποσότητα ύδατος, μια κρίσιμη επιφάνεια λεκάνης

* Εκτός από το απόλυτο βασικό επίπεδο, σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται το τοπικό βασικό επίπεδο ως το χαμηλότερο όριο της ταπεινώσεως της χέρσου. Αυτό μπορεί να συμπίπτει με τον πυθμένα της κεντρικής κοίτης ενός ποταμού ή μιας τοπογραφικής επιφάνειας που συνίσταται από αδιαπέρατο λιθολογικό σχηματισμό.

(απορροής) και τοπογραφική κλίση. Μόνον τότε το επιφανειακό νερό θα αρχίσει να διαβρώνει, αρχικά σε τοπικό επίπεδο, και να μεταφέρει τμήματα του επιφανειακού εδάφους. (Το νερό αυτό μπορεί να παροχετεύεται είτε από την χερσαία ροή είτε από την υποεπιφανειακή ροή μικρού βάθους). Η αρχική πρόκληση του φαινομένου οφείλεται ενδεχομένως στην συγκεντρωμένη εκφόρτιση ύδατος λόγω της μορφολογίας του εδάφους αλλά και στην μεγάλη διαπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών οι οποίοι υπόκεινται. Επιπρόσθετα, η απότομη αύξηση της τοπογραφικής κλίσης τοπικά, ενισχύει την γένεση «σχηματισμού» συγκεντρωμένης ροής. Η συνέχιση της διαβρωτικής δράσης του νερού θα εξαρτηθεί από την γενικότερη τοπογραφία της περιοχής και τις συνθήκες και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του εδάφους: υφή του εδάφους (μέγεθος και σχήμα κόκκων), ύπαρξη βλάστησης και τη λιθολογία του υποεπιφανειακού στρώματος (Bridge, 2003).

Θα πρέπει όμως να ξεπεραστεί ένα κατώφλι (κατώτατο όριο) μεταφορικής και διαβρωτικής ενέργειας του νερού το οποίο υφίσταται σε συνάρτηση με ποικίλους παράγοντες, όπως η ένταση της βροχόπτωσης, η κλίση των πρανών, το μέγεθος των κόκκων του εδάφους, το μικροανάγλυφο, η χωρητική ικανότητα των υπόγειων οριζόντων, ώστε να καταστεί εφικτή η έναρξη της δημιουργίας αυλακώσεων του εδάφους (rills)* (Dunne and Aurbay, 1986), μέσω των οποίων δυνητικά θα «ιδρυθούν» μελλοντικά κανάλια συγκεντρωμένης ροής, σε αντίθεση με την προηγούμενη κίνηση του νερού διαμέσου της υδροστρωματορροής. Και ενώ πρωτύτερα, πριν υπερβούμε κάποιες κρίσιμες παραμέτρους, η ροή κατά στρώσεις ήταν αυτή που κυριαρχούσε, έπειτα, το νερό τείνει να συγκλίνει σε κάποια τοπική ταπείνωση του εδάφους και να διαβρώνει με σφοδρότητα (Montgomery and Dietrich, 1994, Dunne et al., 1995).

Εκτός όμως από τη διάβρωση που υποκινείται εκ της επιφανειακής ροής του νερού, οι τοπικές (μικρό)διαρροές από υπόγεια ύδατα και οι επιφανειακές κατολισθήσεις που προκαλούν τη δημιουργία ανώμαλων τοπογραφικών επιφανειών τοπικά (υψηλές κλίσεις), απογυμνώνουν τα εδάφη και τα καταστούν ακόμη πιο επιρρεπή στο φαινόμενο της διάβρωσης. Στην πράξη, καμία από αυτές τις διαδικασίες δεν υφίσταται ανεξάρτητα από τις άλλες. Αντιθέτως, ο βαθμός στον οποίο κάθε διαδικασία επενεργεί, παρέχει και διαφορετικές συνθήκες, μεταβάλλοντας ταυτόχρονα και τις απαιτήσεις για να πραγματοποιηθεί το φαινόμενο της έναρξης συγκεντρωμένης ροής (initiation of a channel) (Bridge, 2003).

* Οι αυλακώσεις του εδάφους διακρίνονται σε rills (μικροαυλακώσεις) και σε gullies (μικροχαλαδρώσεις) με τη διαφορά ότι οι τελευταίες έχουν πιο διακριτές όχθες

1.3.3 Κοιλάδες και Ποταμοί

Όπως είδαμε και προηγουμένως, η ροή ενός αυλακίου, ρεύματος, χείμαρρου ή ποταμού στη (χερσαία) γήινη επιφάνεια «αποτυπώνεται» σε αυτήν σχηματίζοντας ευρύτατα διαδεδομένες μορφές διάβρωσης όπως οι χαράδρες, τα φαράγγια και τα κάνυον που γενικά ονομάζονται κοιλάδες.* Ανάλογα με τη μορφή που τους προσδίδει η ενεργός διαβρωτική δράση του νερού λαμβάνουν διάφορες ονομασίες (Σχ. 1.3). Ωστόσο, προφανώς, η διαμόρφωση μιας κοιλάδας δεν εξαρτάται αποκλειστικά και μόνον από την ποτάμια δράση. Σ' αυτό το σημείο έχει προταθεί μια ταξινόμηση η οποία διαχωρίζει τις κοιλάδες με βάση τη διατήρηση ή όχι της αρχικής κλίσης της επιφάνειας του ανάγλυφου, γνωστή ως γενετική ταξινόμηση.

Έτσι, σε περιπτώσεις που η διεύθυνση της κοιλάδας ταυτίζεται ή είναι παράλληλη προς την αρχική τοπογραφική κλίση, η κοιλάδα που σχηματίζεται ονομάζεται *προκύπτουσα*. Όμως, δεν μπορεί πάντοτε να ειπωθεί με ασφάλεια ότι μια τέτοια κοιλάδα είναι όντως προκύπτουσα, εξαιτίας μόνον και μόνον της διατήρησης της κύριας διεύθυνσης.

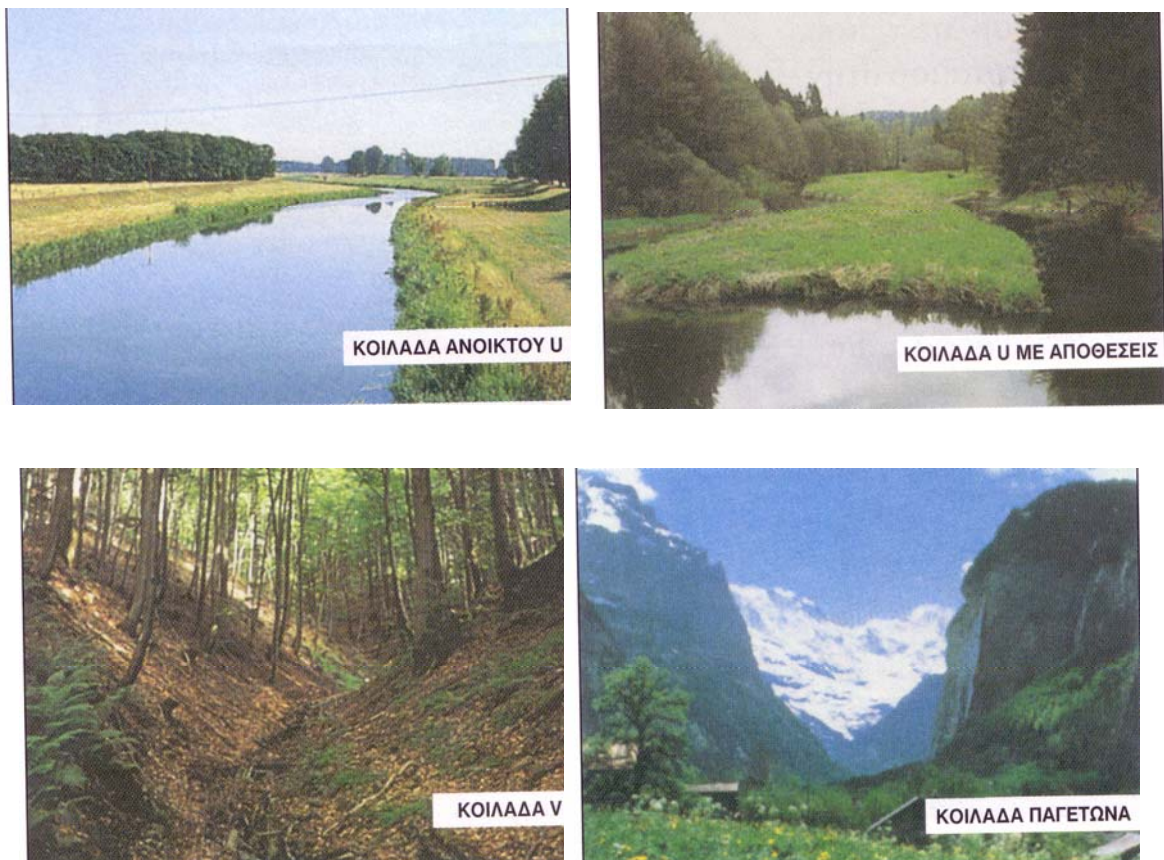
Σε λοιπές περιπτώσεις, όταν δηλαδή η κοιλάδα που δημιουργείται εμφανίζεται μετατοπισμένη σε σχέση με αυτή που θα περίμενε κανείς να προκύψει εξ' αιτίας της δεδομένης μορφολογίας του εδάφους, τότε λέμε πως μια *επακόλουθη κοιλάδα* έχει σχηματιστεί. Ως επί τω πλείστο, οι επακόλουθες κοιλάδες διευρύνονται προς τις ζώνες λιγότερο ανθεκτικών πετρωμάτων. Η λιθολογική σύσταση (διαπερατά – μη διαπερατά πετρώματα) και η γεωλογική δομή (ύπαρξη διακλάσεων, ρηγμάτων) αποτελούν κύριους «εκφραστές» της ανθεκτικότητας των υφιστάμενων σχηματισμών. Έτσι λοιπόν η συγκεντρωμένη ροή βρίσκει πλέον διέξοδο διαμέσου ευκολότερων διόδων, μιας και η αρχική κλίση αποδεικνύεται λιγότερο κρίσιμος παράγων εν προκειμένω.

Τέλος, αρκετές φορές εμφανίζονται κοιλάδες που δεν τοποθετούνται σε κάποια από αυτές τις δύο κατηγορίες και θεωρούνται *ανεξάρτητες*. Εδώ, δεν διακρίνονται συγκεκριμένοι παράγοντες τέτοιοι οι οποίοι να έδρασαν καθοριστικά προς των σχηματισμό των παραγόμενων κοιλάδων (Παπαπέτρου – Ζαμάνη, 1995).

Γενικά, τα αποστραγγιστικά δίκτυα που εμπεριέχουν τέτοιες κοιλάδες είναι δυναμικά συστήματα, των οποίων η διαμόρφωση μεταβάλλεται στο χρόνο. Δυνάμεις όπως

*Βλ. στο Παράρτημα II για τους όρους αναλυτικά

ο τεκτονισμός, η διάβρωση και η απόθεση συνδράμουν να επιφέρουν δραστικές μεταβολές. (Bridge, 2003). Ακόμη, δανειζόμενοι τα λόγια των Leopold et al. (1964) μπορεί να ειπωθεί ότι: «Ένα ποτάμι ή μια λεκάνη αποστράγγισης θα μπορούσε καλύτερα να θεωρηθεί πως έχει ένα «κληροδοτήμα» παρά μια προέλευση. Είναι σαν μια οργανική μορφή, το προϊόν μιας συνεχούς εξελικτικής σειράς στο χρόνο». Γι' αυτό πολλές φορές, η ταξινόμηση με βάση αυτό το κριτήριο είναι αμφιλεγόμενη είναι αδύνατο να αποδειχτεί ότι έχει γενική ισχύει. Παρ' όλ' αυτά, μια σύντομη περιγραφή αυτής της μεθόδου ταξινόμησης κρίθηκε ενδεδειγμένη.



Σχήμα 1. 2: Τύποι κοιλάδων
Πηγή: Κατσίκης, 2004.

1.3.4 Εξέλιξη ποτάμιων κλάδων και ποτάμιων συστημάτων

Έπειτα από την έναρξη της συγκεντρωμένης ροής του νερού εντός των αρχικών κοιτών, ένα ποτάμιο σύστημα (και προφανώς οι ποτάμιοι κλάδοι του) τείνει να διευρύνεται. Η διεύρυνση αυτή λαμβάνει χώρα και στις τρεις διαστάσεις του χώρου. Η εκβάθυνση, η διαπλάτυνση και η επιμήκυνση αποτελούν τις τρεις διαφορετικές πτυχές αυτής

της επέκτασης. Σε αυτό το σημείο, προκειμένου να καταδείξουμε πώς εξελίσσεται η ανάπτυξη ενός υδρογραφικού συστήματος, μας αφορά ιδιαιτέρως ο τρόπος εξάπλωσης των κλάδων ενός ποταμού στην γήινη επιφάνεια. Συμπερασματικά, προέχει η ανάλυση της επιμήκυνσης των ποτάμιων κλάδων.

Αρχικά, οι πρωτοεμφανιζόμενες θεωρίες διατείνονταν ότι οι παραπόταμοι συνενώνονται με τέτοιο τρόπο που να δημιουργούν κλάδους μεγαλύτερης τάξης καθώς το νερό ρέει κατάντη στα πρηνή των κοιλάδων με μια διαδικασία που ονομάζεται *μικροπειρατεία*. Όπως επεξηγεί ο Horton (1945), μικροπειρατεία είναι η «συγχώνευση» δυο γειτονικών ρευμάτων η οποία συντελείται με την κατάρρευση μιας κορυφογραμμής. Ειδικότερα, στις αρχικές φάσεις σχηματισμού ενός υδρογραφικού δικτύου, σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση, μικρά σε μέγεθος (μήκος, πλάτος, βάθος) παράλληλα διατεταγμένα ρεύματα (ακόμη και αυτά που δημιουργούνται από ακραία καιρικά φαινόμενα ή οι εποχιακοί χείμαρροι) είναι δυνατό να συνενωθούν από την επίδραση μιας καταγίδας π.χ. Σε αυτήν την περίπτωση, το ρεύμα με το μεγαλύτερο μήκος και ταυτόχρονα το μεγαλύτερο βάθος θα προσλάβει μεγαλύτερη ικανότητα διάβρωσης, εφόσον «κατεδαφιστεί» ένα μέρος του υδροκρίτη που προηγουμένως διαχώριζε τα δύο παράλληλα ρεύματα με μια διαδικασία που ονομάζεται εγκάρσια κλιμάκωση (cross-grading). Κατά αυτόν τον τρόπο, το μικρότερο σχετικά ρεύμα τροφοδοτεί το μεγαλύτερο και βαθύτερο, βρίσκοντας δίοδο μέσω του σπασμένου τμήματος του επιμέρους υδροκρίτη. Έτσι δημιουργείται ένα νέο ρεύμα, που αποτελεί παραπόταμο στο μεγαλύτερο ρεύμα (master rill). Και επειδή αυτή η δημιουργία του συντελείται εγκάρσια στην κύρια κλίση της δεδομένης επιφάνειας, αυτή η διαδικασία ονομάζεται εγκάρσια κλιμάκωση (Leopold et al., 1964)

Άλλες, μεταγενέστερες, σύμφωνες με την διατύπωση ότι η επιμήκυνση και η εξέλιξη των αυλακιών διενεργείται διαμέσου της *οπισθοδρομούσας διάβρωσης* (*headward elongation/ headward branching*) και της ανάπτυξης (ποτάμιων) κλάδων (που καταδεικνύεται από πειραματικές μελέτες και μελέτες πεδίου), όπως αυτή του Dunne (1980, 1990), υποστηρίζουν πως η επιμήκυνση και η δημιουργία παραποτάμων είναι αποτέλεσμα της διάβρωσης εξ' αιτίας της ροής ενός αρχικού καναλιού. Επεξηγηματικά, οι παραπόταμοι «ιδρύονται» ως αποτέλεσμα της διαβρωτικής ενέργειας σε «επιρρεπείς» (ευάλωτες) ζώνες στις κλιτύες των κοιλάδων, ενώ η συνέχιση της δημιουργίας νέων παραποτάμων εξαρτάται από την «ικανότητα» της λεκάνης απορροής συνολικά να εκφορτίσει επιπλέον ποσότητες ύδατος που θα αποτελέσουν το «ένανσμα» για επιπρόσθετη διαβρωτική διενέργεια (Bridge, 2003).

Πάνω σε αυτή τη θεώρηση έχουν αναπτυχθεί ορισμένα μοντέλα *στοχαστικά και ντετερμινιστικά*.^{*} Ενδεικτικά αναφέρουμε το ντετερμινιστικό μοντέλο που ανέπτυξε ο Willgoose (1991a, b, c) όπου η επιμήκυνση (headward extension) και η δημιουργία παραποτάμων συνεχίζεται έως ότου κάποιος δείκτης που σχετίζεται με την κλίση του εδάφους και της εκροής υδάτων μειωθεί περισσότερο (κάτω) από ένα ορισμένο κατώφλι (threshold). Άλλα στοχαστικά μοντέλα εμπεριέχουν και ένα χαρακτήρα τυχαιότητας κατά τον υπολογισμό του κατωφλιού και άλλων παραμέτρων.

Ακόμη, από την οπτική της απαιτούμενης ενέργειας προς τη μεταφορά του νερού και των ιζημάτων, και επειδή τα ποτάμια συστήματα είναι ενεργειακά αποδοτικά, δηλαδή τείνουν να ελαχιστοποιούν την απαιτούμενη ενέργεια εντός αυτών, έχουν αναπτυχθεί άλλες θεωρήσεις βασιζόμενες σε τέτοιες προσεγγίσεις. Βάσει αυτών, η δημιουργία μικρού αριθμού μεγάλων ρευμάτων-αυλακιών (συγκεντρωμένη ροή – channel flow) είναι προτιμητέα, έναντι της απλής απορροής εντός πολλών αυλακώσεων στο έδαφος, εφόσον έτσι ελαχιστοποιείται η αντίσταση στη ροή του νερού λόγω της μειωμένης τριβής (Bridge, 2003). Σ' αυτή τη λογική, οι Rodriguez-Iturbe et al. (1992) και Rinaldo et al. (1992, 1998) χαρακτηριστικά αναφέρουν ότι τα αποστραγγιστικά δίκτυα αναπτύσσονται κατά τέτοιο τρόπο που η δαπάνη ενέργειας σε κάθε τμήμα ρεύματος (stream segment) αλλά και του συστήματος εξ' ολοκλήρου να ελαχιστοποιείται.

Εκτός από αυτές τις επικρατούσες θεωρίες που φαίνεται να έχουν γενική ισχύ, η επέκταση ενός υδρογραφικού δικτύου μπορεί να επιτευχθεί μέσω της οπισθοδρομούσας διάβρωσης ή και δια της αύξησης της καμπυλότητας των μαιάνδρων, όπου αν ο ποταμός έχει μαιάνδρους μπορεί μέσω της επιμήκυνσης αυτών να αυξήσει και το μήκος του (Παπαπέτρου – Ζαμάνη, 1995). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση που η διεργασία της οπισθοδρομούσας διάβρωσης – επιμήκυνση της κοιλάδας κατ' αντίθετη διεύθυνση της ροής του ύδατος – επιφέρει την προσάρτηση ενός άλλου υδρογραφικού δικτύου και δη μιας νέας λεκάνης αποστράγγισης μέσω της συνένωσης ενός ή περισσότερων ποτάμιων κλάδων που άλλοτε ανήκαν σε ανεξάρτητα υδρογραφικά δίκτυα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *πειρατεία υδρογραφικής λεκάνης* σε βάρος κάποιας άλλης και δύναται να νοηθεί ως διαδικασία εξέλιξης και εξάπλωσης ποτάμιων συστημάτων.

^{*} Η συμπεριφορά ενός πραγματικού συστήματος στη φύση μπορεί να λάβει τη μορφή μοντέλου μέσω ενός συνόλου διαδικασιών που αναφέρονται στην «προσομοίωση». Τέτοια μοντέλα διαχωρίζονται σε ντετερμινιστικά και στοχαστικά: Στα πρώτα δεν συμπεριλαμβάνονται πιθανοτικά στοιχεία – η έξοδος των αποτελεσμάτων είναι καθορισμένη για δεδομένα στοιχεία εισόδου. Αντίθετα, ως στοχαστικά ορίζουμε τα μοντέλα εκείνα που περιέχουν κάποια τμήματά (τουλάχιστον) «τυχαία» εισόδου στοιχείων.

Συμπερασματικά, μπορεί να λεχθεί πως κατά τη διαδικασία ανάπτυξης ενός υδρογραφικού δικτύου το νερό τείνει να ακολουθεί λίγα και μεγάλα κανάλια, ούτως ώστε να απορρέει με τη μικρότερη δυνατή ανάγκη για ενέργεια. Η εξάπλωσή του επιτυγχάνεται μέσω της δυναμικής ενέργειας με την ταυτόχρονη δράση της διάβρωσης. Καθώς το νερό βρίσκει διέξοδο σε ζώνες υψηλών τοπογραφικών κλίσεων ή/ και λιγότερο ανθεκτικών στη διάβρωση γεωλογικών σχηματισμών σχηματίζει παραποτάμους έως ότου η εκφόρτιση των υδάτων εντός μιας υδρογραφικής λεκάνης κριθεί ανεπαρκής, και η τοπογραφική κλίση ήπια για να «τροφοδοτήσουν» επιπροσθέτως τη διαβρωτική δράση των υδάτων.

Σ' αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει μια εγγενής αδυναμία να παρατηρήσουμε το φαινόμενο της προέλευσης και εξέλιξης ποτάμιων συστημάτων, καθόσον καμία μακράς διάρκειας παρατήρηση δεν είναι επαρκής για την αποσαφήνιση και πλήρη κατανόηση τέτοιων μακροχρόνιων διαδικασιών (όπως η δημιουργία ποτάμιου συστήματος). Γενικά, το αν ένα δεδομένο δίκτυο έχει σχηματιστεί και εξελιχθεί μέσω της οπισθοδρομούσας διάβρωσης με συνεχείς διακλαδώσεις, ή μέσω της συνένωσης επιμέρους μικρότερων αυλακώσεων προς τα κατάντη, δεν είναι δυνατό να εξακριβωθεί. Η (ποσοτική) ποτάμια γεωμορφολογία αποτελεί ιδανικό «εργαλείο» περιγραφής και πρόβλεψης αποστραγγιστικών δικτύων αλλά αποδεικνύεται ανεπαρκής όταν πρόκειται για την ερμηνεία του τρόπου που ένα τέτοιο (δίκτυο) εξελίχθηκε (Bloom, 1998). Εξ' άλλου, όπως αναδεικνύεται και από τις μελέτες των Hack and Goodlet (1960), καταστροφικές βροχοπτώσεις και πλημμύρες μπορούν να δημιουργήσουν νέα ποτάμια κανάλια σε κάθε τέτοιο καταστροφικό επεισόδιο. Άρα, αντιλαμβανόμαστε ότι η διαδικασία σχηματισμού ποτάμιων συστημάτων μπορεί να είναι ζήτημα μερικών ημερών ή ακόμη και ωρών και επομένως η διαδικασία επεξήγησης είναι, υποθετικά διαφορετική από την επικρατούσα.

Καθώς λοιπόν δεν είναι εφικτή η εξέταση αυτής της εξέλιξης σε πραγματικές συνθήκες, περιοριζόμαστε σε πειραματικές μελέτες, χρήση χαρτών και δορυφορικών εικόνων διαφορετικών χρονικών περιόδων όπου αποδίδεται η διαχρονική πορεία εξέλιξης υδρογραφικών δικτύων και ανάπτυξη θεωρητικών προσεγγίσεων που πιθανόν να μην αναπαριστούν την πραγματικότητα ή απλώς να αποδίδουν αποσπασματικά τμήματα αυτής.

1.4 Σκιαγράφηση λεκάνης απορροής

1.4.1 Γενικά

Όσο μικρή είναι η βεβαιότητά μας όταν μελετούμε την προέλευση και εξέλιξη ποταμίων συστημάτων, άλλο τόσο μεγάλη γίνεται όταν ερχόμαστε να εξετάσουμε ένα υδρογραφικό σύστημα στη σημερινή του μορφή στα πλαίσια μιας φυσικογεωγραφικής ενότητας που έχει ονομαστεί λεκάνη απορροής, λεκάνη αποστράγγισης, ή υδρολογική λεκάνη.* Όπως προαναφέρθηκε, η περιγραφή είναι το δυνατό σημείο της ποτάμιας γεωμορφολογίας. Η ύπαρξη σαφών ορισμών σε πρώτη φάση σπεύδει να υποστηρίξει κάτι τέτοιο.

1.4.2. Ορισμοί

Καθώς ένα υδρογραφικό δίκτυο διευρύνεται και εξελίσσεται με συνενώσεις κλάδων, δημιουργία παραποτάμων και άλλες διαδικασίες που δεν έχουν αποσαφηνιστεί πλήρως, καταλήγει να λαμβάνει μια τελική μορφή στο χώρο όσον αφορά τόσο τους ίδιους τους ποτάμιους κλάδους του όσο και το περιβάλλον ανάγλυφο του. Το υδρογραφικό σύστημα ως σύνολο αλλά και κάθε κλάδος αυτού του συστήματος μπορεί να διακριθεί από μια γεωγραφική περιοχή – στην οποία κατατμείται ο ενιαίος γεωγραφικός χώρος – με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, που φαίνεται να το «περιβάλλει» (το υδρογραφικό δίκτυο). Μια τέτοια περιοχή ονομάζεται λεκάνη απορροής.

Στο φυσικό περιβάλλον, τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα καταλήγουν σε μια ενιαία περιοχή. Το νερό που δεν κατεισδύει και δεν εξατμίζεται, είναι πιθανόν να δημιουργήσει τελικά κανάλια-κοίτες και να απορρέει μέσω αυτών. Η επιφάνεια λοιπόν που βρίσκεται ανάντη (πιο ψηλά) από την κοίτη από την οποία δέχεται νερό και υλικά (ιζήματα) ονομάζεται λεκάνη απορροής (Bloom, 1998).

Επεξηγηματικά, ως λεκάνη απορροής ορίζεται η περιοχή που φαίνεται βάσει της τοπογραφίας της περιοχής να συγκεντρώνει (αποστραγγίζει) επιφανειακά το νερό των κατακρημνισμάτων που καταλήγουν στην κοίτη ενός ποτάμιου κλάδου. Επιπλέον, η νοητή γραμμή που οριοθετεί αυτή τη λεκάνη απορροής και τη διαχωρίζει από μια γειτονική της ονομάζεται *υδροκρίτης (divide)*. Επειδή όμως μια τέτοια λεκάνη εκτείνεται στον

* Στο Παράρτημα II παρέχονται άλλοι όροι αντί της λεκάνης απορροής, μεταφρασμένοι και στα αγγλικά

τρισδιάστατο χώρο, και η αποτύπωση τέτοιων (λεκανών) γίνεται στο επίπεδο (δισδιάστατο χώρο) – με εικόνες, χάρτες κ.α. – κρίνεται σκόπιμη και η εισαγωγή του όρου της *περιοχής αποστράγγισης (drainage area)*. Η τελευταία δεν αντιπροσωπεύει τίποτε άλλο παρά την οριζόντια προβολή του χώρου μιας λεκάνης αποστράγγισης (Dingman, 2002). Για λόγους απλοποίησης, στην πράξη ταυτίζεται με τη λεκάνη απορροής.

Η επιφανειακή απορροή των επιφανειακών υδάτων λαμβάνει χώρα πάντοτε μέσα σε μια αντίστοιχη λεκάνη και για αυτό δίκτυο και λεκάνη θα πρέπει να εξετάζονται πάντοτε ως ενιαίο σύστημα. Καθώς λοιπόν μια αποστραγγιστική λεκάνη «ενσωματώνει» ένα – απαραίτητο για την ύπαρξή της – υδρογραφικό δίκτυο, διαμορφώνεται από αυτό αλλά ταυτόχρονα καθορίζει και τα χαρακτηριστικά του. Η πορεία της ροής των κλάδων του, η πυκνότητά του, η ποιότητα του επιφανειακού και υπόγειου νερού καθώς και άλλα ποσοτικά χαρακτηριστικά του καθορίζονται από παραμέτρους όπως η γεωλογία, η τοπογραφία και η κάλυψη γης της λεκάνης (Dingman 2002). Έτσι, έστω και αν το δίκτυο καταλαμβάνει ένα χαμηλό ποσοστό της συνολικής επιφάνειας της λεκάνης, της τάξης του 1% - 5% (Kirkby 1993), η σπουδαιότητά του στη διαμόρφωση της λεκάνης λόγω της διάβρωσης και μεταφοράς υλικών είναι υψηλή.

Μια λεκάνη αποστράγγισης αποτελεί βασική ενότητα γεωμορφολογικής ανάλυσης επειδή παρέχει διευρυμένη αποστράγγιση σε πολλά στοιχεία (νερό, χαλίκια, λάσπη, οργανικό υλικό) του γήινου ανάγλυφου. Αποτελεί δηλαδή μια ενότητα – μονάδα εντός της οποίας είναι δυνατό να εντοπιστούν χαρακτηριστικές γεωμορφές (μορφές διάβρωσης και απόθεσης), να καταμετρηθεί και να εκτιμηθεί το ισοζύγιο εισροής και εκροής νερού (υδρολογικό ισοζύγιο) αλλά και ενέργειας (Leopold et al. 1964).

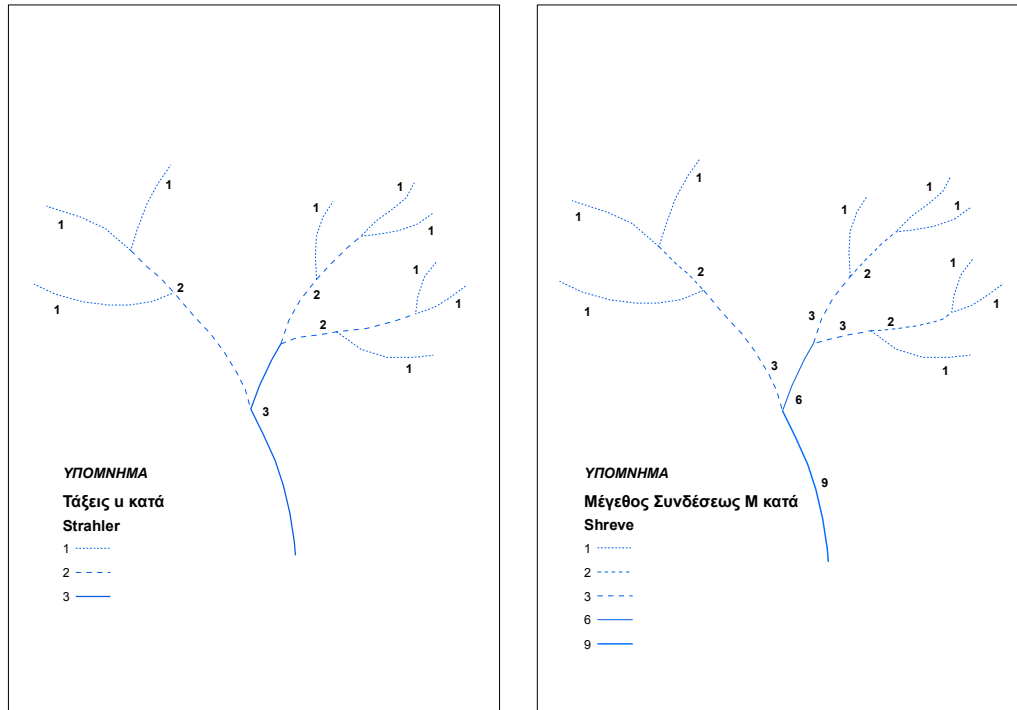
1.4.3 Ταξινόμηση ποτάμιων κλάδων και τύποι υδρογραφικών δικτύων

Η εξέταση μιας τέτοιας φυσικογεωγραφικής μονάδας όπως η λεκάνη απορροής ενός υδρογραφικού δικτύου μας παραπέμπει άμεσα, σε πρώτη φάση, στη μελέτη των ποτάμιων κλάδων του. Έτσι, σε ένα τυπικό ποτάμιο σύστημα* που οριοθετείται από έναν υδροκρίτη και εκβάλλει σε μια θάλασσα ή σε μια λίμνη, η καταμέτρηση και ταξινόμηση των κλάδων του αποτελεί το πρώτο και βασικό στάδιο για την περαιτέρω αξιολόγησή του.

* «Το ποτάμιο σύστημα είναι ο όρος που χρησιμοποιείται εδώ για το σύστημα των ποτάμιων καναλιών σε μια λεκάνη αποστράγγισης. Η λεκάνη αποστράγγισης ή λεκάνη απορροής είναι η περιοχή που εισφέρει (συγκεντρώνει) νερό και ιζήματα και περιορίζεται (οριοθετείται) από έναν υδροκρίτη.» (Bridge, 2003)

Συγκεκριμένα, ο Horton (1945) και αργότερα ο Strahler (1957) εισήγαγαν ένα σύστημα ταξινόμησης των ποτάμιων κλάδων σε τάξεις μεγέθους. Η λογική που διέπει τη διαβάθμιση των κλάδων είναι η εξής: Οι ανώτεροι (υψομετρικά-τοπογραφικά) παραπόταμοι ανήκουν σε 1^η τάξη μεγέθους και δεν δέχονται νερό από άλλους (παραπόταμους). Καθώς συνενώνονται με άλλους ίδιας τάξης μεγέθους (παραπόταμους) αποδίδουν κλάδους 2^{ης} τάξης κ.ο.κ. Γενικά, κάθε κλάδος (ρεύμα) που είναι αποδέκτης υδάτων άλλων – συνήθως δύο – παραποτάμων διατηρεί την τάξη μεγέθους του μεγαλύτερου παραποτάμου που συμβάλλει μαζί με έναν άλλο για να «δημιουργήσουν» τον πρώτο. Στην περίπτωση που οι συμβάλλοντες παραπόταμοι ανήκουν στη ίδια οικογένεια κλάδων ως προς την διαβάθμιση, τότε ο κλάδος που θα σχηματιστεί θα είναι κατά μια τάξη μεγαλύτερος. Για παράδειγμα, η συμβολή ενός κλάδου 2^{ης} σε ένα κλάδο 3^{ης} τάξης θα αποδώσει κλάδο επίσης 3^{ης} τάξης (δεν θα μεταβάλλει δηλ. την τάξη μεγέθους του μεγαλύτερου κλάδου), ενώ η συνένωση δύο κλάδων 4^{ης} τα θα επιφέρει τη «σύσταση» ενός κλάδου 5^{ης} τάξης (Παυλόπουλος και Καρύμπαλης, 2003).

Μια άλλη, εναλλακτική μέθοδος ταξινόμησης είναι αυτή που πρότεινε ο Shreve. Σύμφωνα με αυτή, η τάξη μεγέθους αντικαθίσταται από το μέγεθος συνδέσεως M , και κάθε φορά που συμβάλλουν δύο κλάδοι, αντικατοπτρίζει τον αριθμό (αδιακλάδωτων) κοιτών 1^{ης} τάξης. Π.χ., κατά τη συνένωση δύο κλάδων 1^{ης} τάξης, προκύπτει ένας κλάδος 2^{ης} τάξης. Αν δε αυτός ο τελευταίος συμβάλει με έναν άλλο 2^{ης} τάξης θα προκύψει ρεύμα 4^{ης} τάξης κ.ο.κ. (Αστάρας, 1980). Έτσι, αν ένα ποτάμιο σύστημα έχει μέγεθος $M - M$ κλάδους 1^{ης} τάξης – τότε ο συνολικός αριθμός των κλάδων του θα είναι ίσος με $2M-1$ (Bridge, 2003). Γενικά πάντως σε εργασίες σχετικές με νόμους υδρογραφικής συνθέσεως προτιμάται η αρίθμηση κατά Strahler. Οι δύο τρόποι ταξινόμησης φαίνονται στο Σχήμα 1.3.

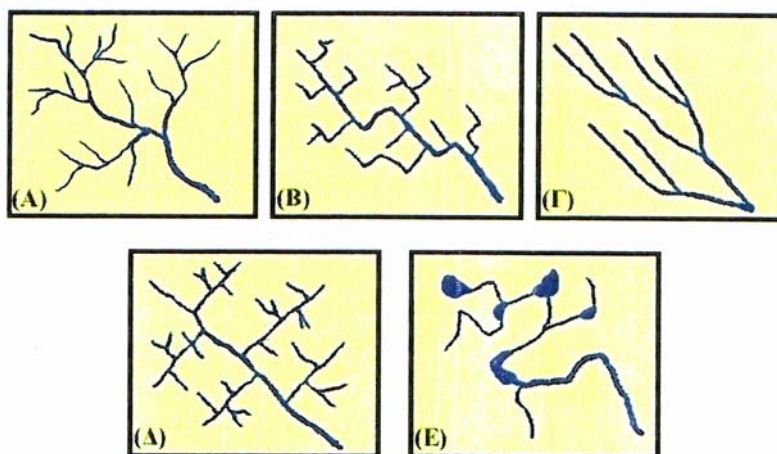


Σχήμα 1. 3: Ταξινόμηση ποτάμιων κλάδων κατά Strahler και κατά Shreve.

Εκτός από την ταξινόμηση των κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου, ένα τέτοιο δίκτυο, ως σύνολο, κατηγοριοποιείται ανάλογα με τη μορφή του. Σύμφωνα λοιπόν και με έναν ορισμό, όπου ένα υδρογραφικό δίκτυο ορίζεται ως ένα «πλέγμα» συγκεκριμένου σχήματος αποτελούμενο από επιμέρους ανεξάρτητους ποταμούς οι οποίοι συνδέονται με ιδιαίτερο τρόπο μεταξύ τους (Παπαπέτρου – Ζαμάνη, 1995), το σχήμα μιας τέτοιας φυσικογεωγραφικής οντότητας καθορίζει και τον τύπο της. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα τύπων υδρογραφικών δικτύων. Εδώ, θα αναφερθούμε στους πέντε τύπους που θεωρούμε ως σημαντικότερους και που απαντώνται συχνότερα. Φυσικά, οι διαφορετικές μορφές που παρουσιάζουν οι διαφορετικοί τύποι δικτύων εξαρτώνται άμεσα από το γεωλογικό και τεκτονικό καθεστώς της περιοχής, καθώς και η τοπογραφία του ανάγλυφου.

- Ο πλέον διαδεδομένος τύπος είναι ο *δενδριτικός*. Το δίκτυο σε αυτήν την περίπτωση παίρνει μια ακανόνιστη μορφή, και οι κλάδοι του προσομοιάζουν τα κλαδιά ενός δέντρου. Αναπτύσσεται υπό διάφορες γωνίες, καθώς η γεωλογική υφή είναι ενιαία και επομένως η διαβρωτική δράση του νερού συντελείται σχετικά ομοιόμορφα (Σχ. 1.4 Α).

- Σε περιοχές οι οποίες είναι «καταπονημένες» από ρήγματα ή διακλάσεις, το σύστημα αυτών (των ρηγμάτων και διακλάσεων) ασκεί τέτοια επίδραση ώστε οι παραπόταμοι να συμβάλλουν με τους κύριους κλάδους σε ορθή γωνία, «παράγοντας» δίκτυα *ορθογώνιου* τύπου (Σχ. 1.4 Β).
- Η ύπαρξη εμφανούς τοπογραφικής κλίσης προς μια συγκεκριμένη διεύθυνση, σε συνδυασμό με την παρουσία χαλαρών σχηματισμών «υποχρεώνουν» το νερό να απορρέει επιφανειακά σε κανονικά διαστήματα σχεδόν παράλληλης μορφής. Σε τέτοιες περιπτώσεις παρατηρείται ο *παράλληλος* τύπος (Σχ. 1.4 Γ).
- Ο *κλιμακωτός* τύπος παρατηρείται εκεί που ενώ οι πρωτεύοντες παραπόταμοι συμβάλλουν στον κύριο κλάδο υπό ορθές γωνίες, βαίνοντας παράλληλα με τις τεκτονικές, λιθολογικές δομές (διεύθυνση ρηγμάτων, διακλάσεων, διεύθυνση πετρωμάτων) και τοπογραφικές δομές. Οι δευτερεύοντες παραπόταμοι τέμνουν τους πρωτεύοντες υπό γωνίες επίσης ορθές όντας παράλληλοι προς τον κύριο κλάδο (Σχ. 1.4 Δ).
- Πολλές φορές, διαφορά υδρογραφικά δίκτυα κατατάσσονται στα ανώμαλου τύπου, καθώς στερούνται συγκεκριμένης μορφής ή συγκεντρώνουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά δύο ή και άνω τύπων υδρογραφικών δικτύων. Το ήπιο ανάγλυφο και οι χαλαρές δομές υλικών της λεκάνης απορροής αποτελούν παράγοντες εμφάνισης τέτοιων τύπων δικτύων (Σχ. 1.4 Ε).



Σχήμα 1. 4: Οι σημαντικότεροι τύποι υδρογραφικών δικτύων. (Α) Δενδριτικός, (Β) Ορθογώνιος, (Γ) Παράλληλος, (Δ) Κλιμακωτός, (Ε) Ανώμαλος.

Πηγή: Παυλόπουλος και Καρύμπαλης, 2003.

Αυτές οι αρχικές παρατηρήσεις και κατηγοριοποιήσεις αποτελούν το προκαταρτικό στάδιο μιας λεπτομερέστερης και βαθύτερης μελέτης και κατανόησης άλλων, πιο σύνθετων γνωρισμάτων και παραμέτρων ενός υδρογραφικού δικτύου και γενικότερα μιας λεκάνης απορροής. Τα τελευταία, «απομακρύνονται» από την ονομαστική ή την ταξινομική κλίμακα που αναφέρεται σε ποιοτικά χαρακτηριστικά, και εμπίπτουν στο φάσμα των ποσοτικών. Αυτές οι ποσοτικά μετρήσιμες παράμετροι (αλλά και οι ποιοτικά) υπαγορεύονται από μορφομετρικούς νόμους (morphometric laws) και αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

2. ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Σε άμεση συνάρτηση με τα προηγούμενα, βασιζόμενοι στη βιβλιογραφία και αξιοποιώντας επεξεργασμένα δεδομένα από μελέτες πεδίου θα επιχειρηθεί η ανάδειξη κατάλληλων δεικτών στα πλαίσια μιας πιο ενδεδειγμένης περιγραφής των πιθανών παραμέτρων που διακρίνουν έναν τέτοιο φυσικογεωγραφικό χώρο. Αυτοί οι δείκτες, στην βιβλιογραφία φέρουν το όνομα μορφομετρικές παράμετροι, διακρίνονται στις παραμέτρους των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου και των λεκανών απορροής, και εξάγονται διαμέσου της ποσοτικής γεωμορφολογικής ανάλυσης

Γενικά, η ποσοτική γεωμορφολογική ανάλυση είναι μια μεθοδολογία μελέτης/ ανάλυσης των ποτάμιων συστημάτων που περιλαμβάνει τη μελέτη και στατιστική επεξεργασία των (μορφομετρικών) χαρακτηριστικών και δεικτών και τη συσχέτισή τους με τους γεωλογικούς, τεκτονικούς και κλιματικούς παράγοντες (της λεκάνης απορροής) (Παυλόπουλος και Καρύμπαλης, 2003). Τέτοιου τύπου αναλύσεις εμπίπτουν στο φάσμα της ποσοτικής γεωγραφίας (quantitative geography). Η ποσοτική γεωγραφία απαρτίζεται από την ανάλυση αριθμητικών χωρικών δεδομένων, την ανάπτυξη θεωρίας του χώρου και την δημιουργία και έλεγχο μαθηματικών μοντέλων που προκύπτουν από χωρικές διαδικασίες, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των τελευταίων (Fortertingham et al., 2000).

2.1 Γενικά

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκε ένα υποθετικό σενάριο προέλευσης και εξέλιξης ποτάμιων συστημάτων καθώς και η διαμόρφωση λεκάνης απορροής ως αποτέλεσμα της προϋπάρχουσας λιθολογίας, τεκτονικής και τοπογραφίας της περιοχής, (και της δυναμικής αυτών στο χρόνο) αλλά και την ενεργής διαβρωτικής επίδρασης των υδάτων εξ' αιτίας της επιφανειακής απορροής. Η ανάπτυξη υδρογραφικού δικτύου που επηρεάζει και επηρεάζεται από τον περιβάλλοντα χώρο – δηλ. μια αποστραγγιστική λεκάνη – είναι πάντοτε συνυφασμένος με αυτό το δίκτυο και συντελείται με την πάροδο του χρόνου. Όπως είδαμε και παραπάνω, η επέκταση δια της «ιδρύσεως» παραποτάμων, από την οπτική της περίσσειας ύδατος που εκφορτίζεται από ένα ρεύμα και επενεργείται η διαβρωτική διαδικασία επί ευάλωτων-επιρρεπών ζωνών εντός της σχετικής λεκάνης απορροής, και η προσέγγιση της ελάχιστης απαιτούμενης ενέργειας προκειμένου να

μεταφερθεί το νερό και τα ιζήματα, αποτελούν «δικλίδες» και «οδηγούς» του φυσικού κόσμου που καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο εξάπλωσης της συγκεντρωμένης επιφανειακής απορροής σε μια περιοχή.

Αυτές οι θεωρητικές προσεγγίσεις και οι πειραματικές-εργαστηριακές παρατηρήσεις εξώθησαν στην νοητική σύλληψη πως υφίστανται ορισμένοι νόμοι που ενδεχομένως υπαγορεύουν αυτή την εξάπλωση. Γενικεύοντας για όλη την περιοχή «ευθύνης» οποιασδήποτε υδρολογικής λεκάνης, αναδείχθηκαν μορφομετρικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν μια τέτοια φυσικογεωγραφική ενότητα.

Διάφοροι μελετητές ασχολήθηκαν με το ζήτημα της ποσοτικής γεωμορφολογικής ανάλυσης υδρολογικής λεκάνης όπως ο H. Gravelius (1914), που πρώτος υπέδειξε έναν τρόπο αρίθμησης ποτάμιων κλάδων. Αργότερα, ο προαναφερθείς R.E. Horton (1945) εντύπωσε εκτός από την ανάδειξη μεθόδου διαβάθμισης ρευμάτων υδρογραφικού δικτύου, στην ποσοτικοποίηση των λοιπών χαρακτηριστικών των κλάδων και των αντιστοίχων λεκανών απορροής τους και μαζί με τον W. Lagbein (1947) διεξήγαγαν τις πρώτες ποσοτικές γεωμορφολογικές εργασίες. Άλλοι, μεταγενέστεροι ερευνητές, όπως ο A. Strahler (1957), ο D. Coates (1958), η M. Morisawa (1958, 1962), ο R. Shreve (1964, 1966) κ.α. εφήρμοσαν σε συγκεκριμένες λεκάνες και δίκτυα, ποσοτικής γεωμορφολογικής φύσεως αναλύσεις.

2.2 Οι νόμοι του Horton

Σε αυτό το σημείο θεωρούμε βασικό να αναφερθούμε σε ορισμένες διατυπώσεις νόμων που προτάθηκαν από τον Horton ο οποίος υποστήριξε πως η ανάπτυξη κάθε υδρογραφικού δικτύου υπάγεται σε ορισμένους φυσικούς νόμους. Έχοντας ως κύριο σκοπό να απλοποιήσει τα σύνθετα υδρολογικά φαινόμενα σε λίγα μετρούμενα μεγέθη που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν και να υπολογίσουν την επιφανειακή απορροή δημιούργησε ταυτόχρονα μια ικανή θεωρητική βάση για την υδρολογική προσέγγιση υποστηρίζοντας ότι υπάρχουν κάποια αμετάβλητα χαρακτηριστικά υδρολογικών λεκανών που συσχετίζονται με την υδρολογική απόκριση τους. (Peter C. Patton, 1998). Το αποτέλεσμα αυτών των απλοποιήσεων περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω με τους τρεις νόμους του Horton που σήμερα θεωρούνται κλασικοί και προσδιορίζουν παραμέτρους αποστράγγισης υδρογραφικού δικτύου:

Ο 1^{ος} νόμος του Horton αναφέρεται στον αριθμό των κλάδων κάθε τάξης ενός υδρογραφικού δικτύου και διατυπώνεται ως εξής:

«Ο αριθμός των διαδοχικά μικρότερης τάξης κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου, τείνει να σχηματίσει μια αύξουσα γεωμετρική ακολουθία, της οποίας πρώτος όρος είναι η μονάδα και λόγος, ο λόγος διακλάδωσης (R_b)»

Με μαθηματική έκφραση:

$$R_b = N_u / N_{u+1} \qquad N_u = R_b^{(K-u)}$$

Όπου N_u : το πλήθος των κλάδων τάξης u

K : η μέγιστη τάξη

Ο 2^{ος} νόμος του Horton αναφέρεται στο μέσο μήκος των κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου με την ακόλουθη διατύπωση:

«Τα μέσα μήκη των διαδοχικά μεγαλύτερης τάξης κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου, τείνουν να σχηματίσουν μια αύξουσα γεωμετρική ακολουθία, της οποίας πρώτος όρος είναι το μέσο μήκος των κλάδων πρώτης τάξης και λόγος, ο λόγος του μήκους (R_L)»

Και διατυπώνεται μαθηματικά:

$$R_L = L_u / L_{u-1} \qquad L_u = L_1 * R_L^{(u-1)}$$

Όπου L_u : το μέσο μήκος των κλάδων τάξης u

L_1 : το μέσο μήκος των κλάδων 1^{ης} τάξης

Ο 3^{ος} νόμος του Horton αναφέρεται στη σχέση που παρατηρείται μεταξύ του μέσου εμβαδού των λεκανών των κλάδων διαφόρων τάξεων. Σύμφωνα με αυτόν:

«Το μέσο εμβαδόν των διαδοχικά μεγαλύτερης τάξης λεκανών απορροής κλάδων ενός υδρογραφικού δικτύου, τείνει να σχηματίζει μια αύξουσα γεωμετρική ακολουθία, της οποίας πρώτος όρος είναι το μέσο εμβαδόν των λεκανών πρώτης τάξης και λόγος, ο λόγος του εμβαδού»

Μαθηματικά έχει ως εξής:

$$R_A = A_u / A_{u-1} \quad A_u = A_1 * R_A^{(u-1)}$$

Όπου A_u : το μέσο εμβαδόν των λεκανών των κλάδων τάξης u

A_1 : το μέσο εμβαδόν των λεκανών των κλάδων 1^{ης} τάξης

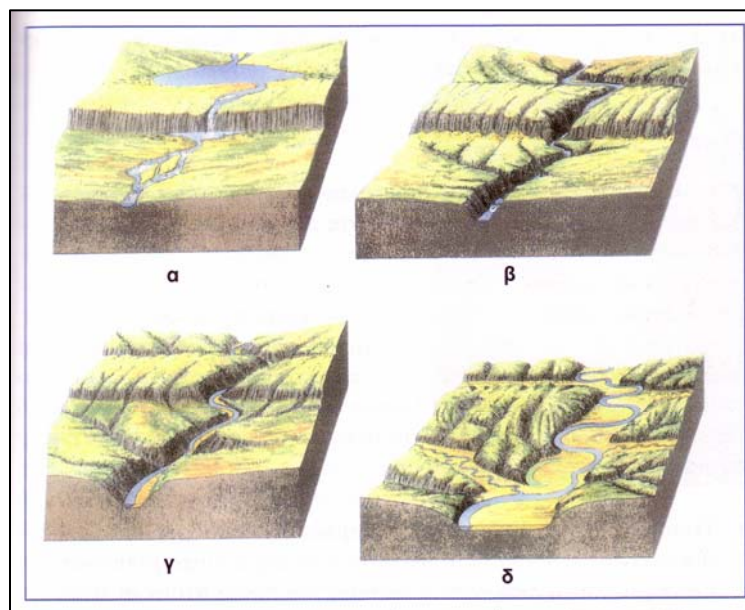
Οι νόμοι αυτοί δεν είναι τίποτε παραπάνω από μια εκτίμηση ιδανικών τιμών στην αναλογία και τη σχέση του αριθμού των κλάδων, του μέσου μήκους τους και της μέσης επιφάνειας των λεκανών για διαδοχικές τάξεις. Κατά τη μέτρηση, ή/ και τον υπολογισμό αυτών η παρουσία αποκλίσεων των πραγματικών από τις ιδεατές τιμές φανερώνουν μη ενιαία (κατακερματισμένη) λιθολογική σύσταση, την επενέργεια τεκτονισμού στην περιοχή ή και διαφοροποιούμενες (μη σταθερές) κλιματολογικές συνθήκες. (Παυλόπουλος και Καρύμπαλης, 2003). Η παράθεση αυτών θεωρήθηκε αναγκαία, έστω και αν δεν πρόκειται να «συμβάλλουν» αυτοί στην ανάλυση που θα ακολουθήσει.

2.3 Μορφομετρικές Παράμετροι

Η ανάδειξη δεικτών και παραμέτρων που σχετίζονται με την τοπογραφία και τη μορφομετρία των λεκανών απορροής – που αντιμετωπίζονται ως ανοικτά φυσικά συστήματα* – έχουν συνεισφέρει στην «αποτύπωση» του γεωμορφολογικού προφίλ μιας υπό μελέτη υδρογραφικής λεκάνης, στην νοητική σύλληψη της γεωμορφολογικής εξέλιξης της περιοχής και τον καθορισμό του σταδίου εξέλιξης του ανάγλυφου, όπως αυτό έχει προταθεί από τον W. Davis (1899) (Σχ.2.1).

* Βλ. Αστάρας Α. Θεόδωρος, 1980. Διδακτορική Διατριβή: *Ποσοτική Γεωμορφολογική Μελέτη Τμήματος Των Δ. Πλευρών Του Όρους Βέρτισκον (Κ. Μακεδονία)*, Θεσσαλονίκη σ. 37

Στην προκειμένη εργασία έχουμε ως σκοπό να παρουσιάσουμε αυτούς τους μορφομετρικούς δείκτες, αρχικά σε θεωρητικό επίπεδο, και μετέπειτα να εστιάσουμε στην ανάλυση αυτών των μορφομετρικών παραμέτρων σε συγκεκριμένη υδρολογική λεκάνη, ως συνάρτηση της τοπογραφίας του αναγλύφου, εξετάζοντας επικουρικά και τους συναφείς παράγοντες (γεωολογικούς, τεκτονικούς και κλιματικούς). Έτσι, σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμη η παράθεση και περιγραφή των κυριοτέρων από αυτούς τους δείκτες, έτσι ώστε να κατανοηθεί η χρησιμότητά τους και να δημιουργηθεί πρόσφορο έδαφος για τον αποχαρακτηρισμό της λεκάνης επιλογής μας και της ευρύτερης περιοχής μελέτης ως προς τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της και την εύρεση ερμηνευτικών παραγόντων που εξωθούν στην «απόκτηση» ενός τέτοιου προφίλ.



Σχήμα 2. 1: Ο κύκλος του Davis.

Σημείωση: Στην α εικόνα το ποτάμι βρίσκεται στο στάδιο νεότητας και διαμορφώνει την κοίτη του μέσω της οπισθοδρομούσας διάβρωσης. Στη β και γ διανύει το στάδιο ωριμότητας, και σιγά – σιγά (από το β στη γ) οι μορφές του αναγλύφου χάνουν τον οξύληκτο χαρακτήρα τους και εμφανίζονται αποστρογγυλεμένες. Η απώλεια της μεταφορικής ενέργειας του ποταμού λόγω κλιματολογικών και τεκτονικών μεταβολών αποτελούν βασικούς παράγοντες για αυτήν την τάση. Στην δ, τέλος, το ανάγλυφο έχει εξομαλυνθεί αρκετά, ενώ το ποτάμιο σύστημα ρέει σε πλατιές κοιλάδες, δημιουργώντας μαιάνδρους.

Πηγή: Κατσίκης, 2004.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί μια σειρά δεικτών προκειμένου να αναδειχθούν επιμέρους παράμετροι που συντελούν στην ποσοτική γεομορφολογική παρατήρηση. Αυτοί οι δείκτες, που ονομάζονται και τοπογραφικές ή μορφομετρικές παράμετροι διακρίνονται:

1. Στις μορφομετρικές παραμέτρους των υδρογραφικών δικτύων και
2. Στις μορφομετρικές παραμέτρους λεκανών απορροής

2.3.1 Μορφομετρικές παράμετροι των υδρογραφικών δικτύων

Σε ένα ποτάμιο σύστημα (υδρογραφικό δίκτυο) είναι δυνατόν να μετρήσουμε και να υπολογίσουμε παραμέτρους μηδενικής (καθαρούς αριθμούς) ή μιας διαστάσεως (μήκη) που το χαρακτηρίζουν και αναδεικνύουν υφιστάμενες σχέσεις μεταξύ των κλάδων του. Σε μια προσπάθεια βελτιωμένης κατανόησης τους, οι μορφομετρικές παράμετροι τόσο των υδρογραφικών δικτύων όσο και των λεκανών απορροής διαχωρίζονται και σε μια άλλη υποκατηγορία: στις μετρούμενες και τις υπολογιζόμενες. Οι πρώτες απορρέουν άμεσα από κάποια μέτρηση με κάποιο όργανο ή με κάποια μέθοδο, ενώ οι δεύτερες περικλείουν κάποιον υπολογισμό προκειμένου να ευρεθούν. Ξεκινώντας από τις άμεσα μετρούμενες, για ένα υδρογραφικό δίκτυο, έχουμε τις εξής:

2.3.1.1 Μετρούμενες Παράμετροι

1. Τάξη κοίτης ρεύματος (u): Η αρίθμηση και ταξινόμηση των κλάδων ενός ποτάμιου συστήματος, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έχει μεγάλη σημασία, καθώς διαφορετικών τάξεων κοίτες ρεύματος χαρακτηρίζονται από διαφορετικής υφής υδρολογικά και μορφομετρικά γνωρίσματα.
2. Αριθμός τμημάτων κοιτών (N_u) τάξης u : Είναι ο συνολικός αριθμός κλάδων τάξης u . Η αρίθμηση των κλάδων γίνεται από αριστερά προς τα δεξιά, όπως περιγράφεται και παραπάνω (αρίθμηση κατά Strahler).
3. Μήκος τμήματος (L) τάξης u : Είναι η απόσταση κατά μήκος μιας κοίτης ρεύματος. Είναι δυνατό να μετρηθεί χειρονακτικά (μηκόμετρο) ή/ και αυτοματοποιημένα η απόσταση μεταξύ δύο επιλεγμένων σημείων της κοίτης.
4. Συνολικό μήκος τμημάτων κοιτών (L_u): Είναι το άθροισμα τμημάτων κοιτών τάξης u .*
5. Μέσο μήκος τμημάτων κοιτών (L_u): Ορίζεται ως ο λόγος L_u/N_u , δηλ. είναι το κλάσμα του συνολικού μήκους τμημάτων κοιτών προς τον αριθμό τμημάτων κοιτών που αντιστοιχούν σε τάξη u .

* Συνήθως το L_u αντιστοιχεί στο συνολικό μήκος της κοίτης και όχι σε τμήματά της

6. Συνολικό μήκος τμημάτων κοιτών όλων των τάξεων (ΣL_u): Είναι το άθροισμα του συνολικού μήκους των τμημάτων κοιτών κάθε τάξης.
7. Κλίση κοίτης τάξης u : Η κλίση της κοίτης ρεύματος σε ένα σημείο P (της δειγματοληψίας). Έχοντας πληροφορίες περί των υψομέτρων που «κείνται» επί σημείων της κοίτης του ρεύματος είναι εφικτός ο υπολογισμός συγκεκριμένων τμημάτων κοίτης ως το κλάσμα της κατακόρυφης απόστασης προς την οριζόντια απόσταση ανάμεσα σε δύο σημεία της κοίτης.
8. Αζιμούθιο ή διεύθυνση της κοίτης (α): Αποτελεί τη (δεξιόστροφη) γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του γεωγραφικού βορρά και της (γενικής) διεύθυνσης της κοίτης, με φορά προς την κατεύθυνση ροής του ρεύματος. Εκτιμάται είτε με χειρονακτικές είτε με αυτοματοποιημένες μεθόδους.*

2.3.1.2 Υπολογιζόμενες Παράμετροι

Οι υπολογιζόμενες είναι οι ακόλουθες:

1. Συντελεστής ή λόγος διακλαδώσεως (R_b): Αποτελεί τη ποσοτική έκφραση που ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ του αριθμού των κοιτών (ρευμάτων) δεδομένης τάξης προς τον αριθμό των κοιτών της διαδοχικά μεγαλύτερης τάξης. Είναι: $R_b = N_u / N_{u+1}$. Μπορεί να λάβει τιμές από κοντινές στο 0 έως και πολύ μεγαλύτερες.
2. Λόγος του μήκους των κοιτών των ρευμάτων (R_L): Ορίζεται ως ο λόγος του μέσου μήκους των κοιτών των ρευμάτων ορισμένης τάξης προς το μέσο μήκος των κοιτών της αμέσως προηγούμενης τάξης. Υπολογίζεται από τον τύπο: $R_L = L_u / L_{u-1}$.

Οι δύο παραπάνω δείκτες είναι άμεση απόρροια του 1^{ου} και του 2^{ου} νόμου του Horton. Γνωρίζοντας λοιπόν τον αριθμό των κοιτών ή το μήκος των κοιτών για κάθε τάξη μεγέθους u , είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε μια τυπική τιμή για τον λόγο διακλαδώσεως και για τον λόγο μήκους κλάδων: τον μέσο λόγο διακλάδωσης και το μέσο λόγο μήκους. Αυτές οι τιμές, όπως θα επεξηγήσουμε και παρακάτω θα

* Χρησιμοποιείται ο όρος κοίτη αντί του όρου ρεύματος επειδή επιθυμούμε (ειδικά στη περίπτωση των κλάδων 1^{ης} τάξης) να διακρίνουμε το βαθύτερο σημείο του πυθμένα ενός ρεύματος που θα μας αποσαφηνίσει τους κλάδους των μικρότερων τάξεων.

χρησιμέψουν για την εκτίμηση του αναμενόμενου αριθμού και μήκους κλάδων υπό ιδανικές συνθήκες.

2.3.2 Μορφομετρικές παράμετροι λεκανών απορροής

Εκτός από εκείνες τις παραμέτρους που αναφέρονται στο υδρογραφικό δίκτυο, στα χαρακτηριστικά και στις σχέσεις μεταξύ των κλάδων του, έχουν αναδειχθεί ορισμένες άλλες οι οποίες σχετίζονται με την λεκάνη απορροής ως ενιαία οντότητα. Ως τέτοιες, απαιτούν μετρήσεις επιφανειών και υψομετρικών διαφορών. Και αυτές διαχωρίζονται παραπέρα σε μετρούμενες και υπολογιζόμενες.

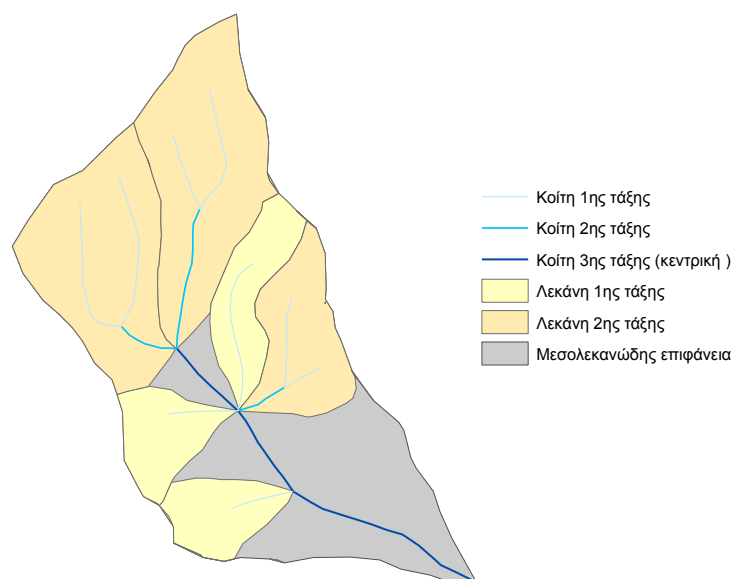
2.3.2.1 Μετρούμενες Παράμετροι

1. Εμβαδόν επιφάνειας αποστράγγισης της λεκάνης απορροής (A_u): Αποτελεί το συνολικό εμβαδόν επιφάνειας του εδάφους που αποστραγγίζει το νερό των βροχοπτώσεων που καταλήγει στους διάφορους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου. Είναι δυνατό να μετρηθεί απ' ευθείας σε μελέτη πεδίου, χειρωνακτικά από υφιστάμενους χάρτες, ορθοφωτοχάρτες, γεωμετρικά διορθωμένες δορυφορικές εικόνες, είτε αυτοματοποιημένα σε ένα κατάλληλο υπολογιστικό σύστημα. Πρακτικά, χρησιμοποιείται η προβολή της επιφάνειας αποστράγγισης στο οριζόντιο επίπεδο, αν και οι σύγχρονες τεχνολογίες παρέχουν τη δυνατότητα μέτρησης πραγματικών επιφανειών.
2. Εμβαδόν μεσολεκανώδους επιφάνειας (A_o): Είναι η συνολική μεσολεκανώδους επιφάνεια που προβάλλεται στο οριζόντιο επίπεδο και απαρτίζεται από τις επιμέρους μεσολεκανώδεις επιφάνειες (A_{o_u}). Κάθε μία από αυτές είναι τραπεζοειδούς ή τριγωνικής μορφής επιφάνειες αποστράγγισης στις οποίες η επιφανειακή απορροή συγκεντρώνεται απευθείας στην κοίτη του ρεύματος της αμέσως επόμενης τάξης (Σχήμα 2.2). Οι μεσολεκανώδεις επιφάνειες τάξης u μπορούν να εκτιμηθούν αν γνωρίζουμε το συνολικό εμβαδόν επιφάνειας αποστράγγισης της λεκάνης απορροής και τα επιμέρους εμβαδά όλων των λεκανών τάξης u .
3. Μέγιστη κλίση στις πλευρικές κλιτύες της λεκάνης απορροής: Ορίζεται ως η μεγαλύτερη κλίση των κλιτύων μιας λεκάνης (κατά μήκος της ορθογώνιας

κατατομής) που ξεκινά από τον υδροκρίτη και καταλήγει στην παρακείμενη κοίτη ρεύματος.

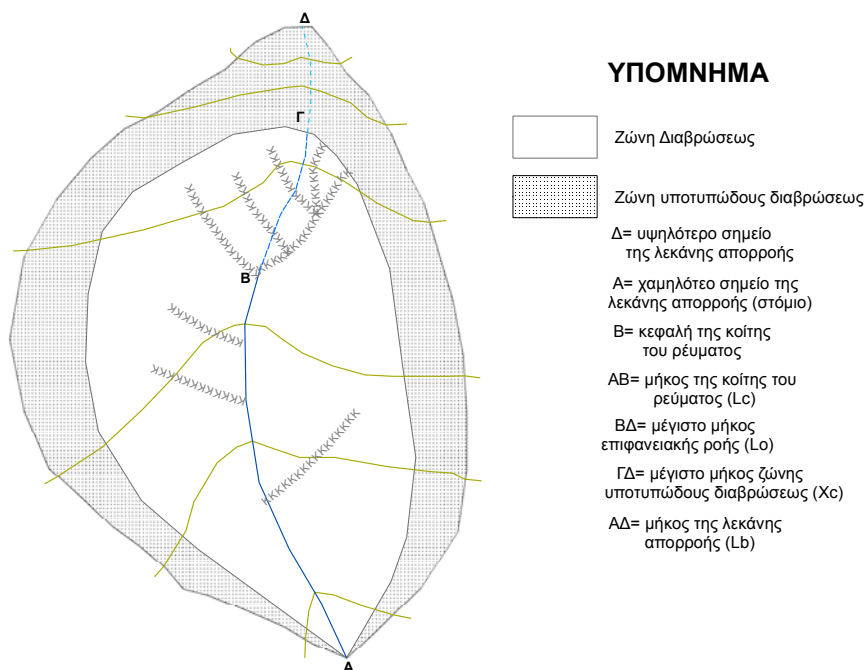
4. Προσανατολισμός των πλευρικών κλιτύων της λεκάνης (valley-side slope aspect) (β): Ορίζεται ως η διεύθυνση μέγιστης κλίσης ως προς την κοίτη του ρεύματος και εκφράζεται με την οριζόντια γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της διεύθυνσης μέγιστης κλίσης και του γεωγραφικού βορρά.
5. Μέγιστη κλίση των κλιτύων στην κεφαλή της λεκάνης 1^{ης} τάξης ($\Theta_{\max}$): Είναι η μεγαλύτερη κλίση των κλιτύων στην κεφαλή της λεκάνης.
6. Μήκος της λεκάνης απορροής (Lb): Είναι το μήκος του κλάδου της κοίτης προεκτεινόμενου έως τον υδροκρίτη* (Σχ. 2.3).
7. Ζώνη μη διαβρώσεως (ή ζώνη υποτυπώδους διαβρώσεως) και οριακή απόσταση X_c : Η απόσταση από τον υδροκρίτη μέχρι το σημείο εκείνο που η ικανότητα διαβρώσεως του νερού υπερβαίνει την ανθεκτικότητα των υλικών του εδάφους αποτελεί την οριακή απόσταση X_c . Μεταξύ του υδροκρίτη, και του γεωμετρικού τόπου των σημείων οριακής ή κρίσιμης απόστασης δημιουργείται μία περιοχή εντός της οποίας δεν επενεργεί η διάβρωση, που ονομάζεται ζώνη μη διαβρώσεως ή ζώνη υποτυπώδους διαβρώσεως (Σχ. 2.3).
8. Μήκος της επιφανειακής ροής του εδάφους (length of overland flow) ή μήκος κλιτύος (L_g): Αυτή η παράμετρος περιγράφει την ροή του νερού σε μικροαυλακώσεις (rills), προτού γίνει συγκεντρωμένη. Το μέγιστο μήκος της επιφανειακής ροής λαμβάνεται από μετρήσεις μέγιστης ένδειξης ροής από τον υδροκρίτη έως την κεφαλή του ρεύματος (Σχ. 2.3).
Η σημασία του μήκους L_g είναι υψηλή καθώς, σύμφωνα με τον Horton (1945), αυτό σε σχέση με την οριακή απόσταση X_c , επιδρά στην υδρολογική και γεωμορφολογική ανάπτυξη και εξέλιξη ενός υδρογραφικού συστήματος και συνεπώς μιας λεκάνης απορροής.
9. Μέγιστο τοπικό ανάγλυφο της λεκάνης απορροής: Αποδίδεται από τη διαφορά μεταξύ του υψηλότερου υψομετρικού σημείου (στον υδροκρίτη) και του χαμηλότερου (στο στόμιο της λεκάνης) κατά μήκος της μεγαλύτερης διάστασής της, η οποία είναι παράλληλη προς τον κύριο κλάδο της λεκάνης.

* Για τις λεκάνες πρώτης τάξης είναι απλώς το μήκος της κοίτης του ρεύματος.



Σχήμα 2. 2: Λεκάνη απορροής εντός της οποίας αποτυπώνονται οι μεσολεκανώδεις επιφάνειες, οι οποίες συγκεντρώνουν επιφανειακά ύδατα (από λεκάνες 1ης και 2ης τάξης) κατευθείαν στην κεντρική κοίτη της λεκάνης (3ης τάξης).

Πηγή: Αστάρας 1980 (Τροποποίηση)



Σχήμα 2. 3: Μια λεκάνη απορροής 1ης τάξης.

Πηγή: Αστάρας 1980 (Τροποποίηση)

2.3.2.2 Υπολογιζόμενες Παράμετροι

1. Λόγος του Εμβαδού των λεκανών απορροής (R_A): Είναι ο λόγος του εμβαδού των λεκανών δεδομένης τάξης (km^2) προς το μέσο εμβαδόν των λεκανών της διαδοχικά μικρότερης τάξης. Μαθηματικά εκφράζεται ως εξής: $R_A = A_u / A_{u-1}$. Αυτή η παράμετρος είναι άμεση συνέπεια του 3^{ου} νόμου του Horton, που περιγράφηκε παραπάνω. Σύμφωνα άλλωστε και με τον νόμο των «συνεισφερόμενων εκτάσεων» του Schumm (1956), το μέσο εμβαδόν των λεκανών απορροής κάθε τάξης, αυξάνει εκθετικά σε συνάρτηση με την τάξη των κλάδων των κοιτών των ρευμάτων.
2. Υδρογραφική συχνότητα των κοιτών (channel frequency) (F): Αποτελεί το λόγο του συνολικού αριθμού των κλάδων των κοιτών όλων των τάξεων μιας λεκάνης απορροής προς το εμβαδόν της λεκάνης (km^2) και υπολογίζεται ως εξής: $F_u = \Sigma L_u / A_u$ (Horton, 1945). Η υδρογραφική συχνότητα μαζί με την υδρογραφική πυκνότητα αποτελούν ταυτόχρονα και δύο σπουδαίες παραμέτρους της υφής του ανάγλυφου μιας λεκάνης αποστράγγισης. Οι τιμές αυτής της παραμέτρου κυμαίνονται από πλησίον του 0 έως κάποιες δεκάδες. Η δε μονάδα μέτρησης, είναι τα km^{-2} .
3. Υδρογραφική πυκνότητα ή πυκνότητα αποστράγγισης (drainage density) (D): Είναι ο λόγος του συνολικού μήκους των κλάδων των κοιτών όλων των τάξεων σε μια λεκάνη απορροής προς το εμβαδόν της λεκάνης απορροής ($\Sigma L_u / A_u$). Αυτός ο λόγος αποδίδει τον αριθμό των μονάδων μέτρησης μήκους ρευμάτων (km) που αποστραγγίζονται ανά μονάδα επιφάνειας (km^{-1}) (Horton, 1945). Η διαφοροποίηση της υδρογραφικής πυκνότητας αναδεικνύει χαρακτηριστικά τόσο της μορφολογίας, της λιθολογίας, του τεκτονισμού και της βλάστησης του εδάφους, όσο και του κλίματος του τόπου και άλλων (ανθρωπογενών) δραστηριοτήτων. Γενικά όσο πιο μεγάλη είναι η υδρογραφική πυκνότητα μιας λεκάνης, όσο δηλ. μεγαλύτερο μήκος ρευμάτων διατηρεί μια λεκάνη απορροής, τόσο πιο έντονες βροχοπτώσεις έχει, τόσο πιο αποψιλωμένο είναι το έδαφος από βλάστηση, τόσο πιο αδιαπέρατοι λιθολογικοί σχηματισμοί υπόκεινται κ.α.
4. Σταθερά διατηρήσεως κοίτης ρεύματος (constant of channel maintenance) (C): Αντίστροφα από την υδρογραφική πυκνότητα, η σταθερά διατηρήσεως κοίτης ρεύματος είναι η έκταση σε km^2 η οποία απαιτείται για τη διατήρηση

μήκους κοίτης 1km. Είναι δηλαδή ίση με $1/D$ ή ο λόγος του εμβαδού της λεκάνης απορροής προς το συνολικό μήκος των κλάδων των κοιτών όλων των τάξεων σε μια λεκάνη απορροής.

5. Συχνότητα κοιτών 1^{ης} τάξης (F_1): Είναι ο λόγος του αριθμού των κλάδων των κοιτών 1^{ης} τάξης προς το συνολικό εμβαδόν της λεκάνης απορροής μεγαλύτερης της 1^{ης} τάξης. Με την παράμετρο αυτή είναι δυνατό να διευκρινιστεί αν τυχόν προσ αύξηση της υδρογραφικής πυκνότητας προήλθε από την δημιουργία νέων κοιτών (1^{ης} τάξης) ή απλώς και μόνον από την επιμήκυνση των ήδη υφιστάμενων κοιτών 1^{ης} τάξης (Melton, 1957).
6. Πυκνότητα κοιτών 1^{ης} τάξης (D_1): Είναι ο λόγος του συνολικού μήκους των κλάδων των κοιτών 1^{ης} τάξης προς το συνολικό εμβαδόν της λεκάνης απορροής μεγαλύτερης της 1^{ης} τάξης. Ο υπολογισμός αυτής της παραμέτρου κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμος όταν επιθυμούμε να γνωρίζουμε Κατά πόσον η πυκνότητα (D) μιας υδρολογικής λεκάνης οφείλεται ή όχι στην επιμήκυνση των κοιτών 1^{ης} τάξης προς την κεφαλή (Melton, 1957).
7. Λόγος ανάγλυφου (relief ratio): Υπολογίζεται ως ο λόγος του (μέγιστου) τοπικού ανάγλυφου της λεκάνης απορροής – διαφορά μεταξύ του υψηλότερου υψομετρικού σημείου (στον υδροκρίτη) και του χαμηλότερου (στο στόμιο της λεκάνης) (H) – προς τη μεγαλύτερη διάσταση της λεκάνης (L_{bmax}), η οποία είναι παράλληλη προς την κυρίως κοίτη (υδρογραφική γραμμή) (Schumm 1956). Αυτός ο λόγος συνιστά επί της ουσίας την εφαπτομένη της γωνίας η οποία σχηματίζεται από δύο επίπεδα: του οριζόντιου και εκείνου που διέρχεται από το υψηλότερο σημείο στον υδροκρίτη, τεμνόμενα στο στόμιο της λεκάνης. Θεωρητικά, ο δείκτης παίρνει τιμές εντός του διαστήματος $[0, \infty)$, πρακτικά όμως, από μικρές θετικές τιμές έως τιμές που σπάνια ξεπερνούν το 1.
8. Λόγος επιμηκύνσεως της λεκάνης (elongation ratio) (E_r): Ορίζεται ως ο λόγος ο λόγος της διαμέτρου (d) κύκλου που έχει εμβαδόν ίσο με το εμβαδόν της λεκάνης απορροής προς τη μέγιστη διάσταση της λεκάνης L_{bmax} . Η τιμή που λαμβάνεται από τον υπολογισμό του μαθηματικού τύπου d/L_{bmax} αντικατοπτρίζει αριθμητικά σε γενικές γραμμές το σχήμα της λεκάνης.*

* Ανάλογη μορφομετρική παράμετρος που αναλύεται σε παρακάτω κεφάλαιο είναι αυτή της Κυκλικότητας.

9. Υψομετρικό ολοκλήρωμα (hypsometric integral) (J) – Υψομετρική καμπύλη της λεκάνης απορροής: Είναι πρακτικά η ποσοτική έκφραση του σταδίου απογύμνωσης μιας υδρολογικής λεκάνης. Με την υψομετρική καμπύλη καταδεικνύεται η κατανομή μάζας του ανάγλυφου ανάμεσα σε δύο επίπεδα: στο βασικό επίπεδο και στο επίπεδο που διέρχεται από το ανώτερο σημείο του υδροκρίτη.
10. Βαθμός τραχύτητας του ανάγλυφου (Ruggedness number) (R_n): Υπολογίζεται ως το γινόμενο της υδρογραφικής πυκνότητας (D) με το μέγιστο ανάγλυφο (H) της λεκάνης: $R_n = D \cdot H$. Η τιμή του R_n μεγιστοποιείται όταν οι μορφομετρικές παράμετροι D και H είναι υψηλές, δηλαδή όταν οι κλιτύες έχουν μεγάλο μήκος και ταυτόχρονα είναι απότομες.

Παραπάνω περιγράφηκαν και αναλύθηκαν ως ένα βαθμό μορφομετρικές παράμετροι που έχουν καταγραφεί στην διδακτορική διατριβή του Θ. Α. Αστάρα (1980). Στα επόμενα, δεν πρόκειται ούτε να μετρήσουμε, ούτε να υπολογίσουμε όλες αυτές, παρά μόνο εκείνες που θεωρούμε κατάλληλες και ενδεδειγμένες για την περάτωση της εργασίας μας. Σε αντίθετη περίπτωση, θα έπρεπε να αναλωθούμε σε λεπτομερείς και εξαντλητικές αναλύσεις μιας πληθώρας δεικτών οι οποίες δεν εξυπηρετούν διόλου τον σκοπό της εργασίας ούτε η σε μια περιορισμένης έκτασης πτυχιακή εργασία. Κατ' εξαίρεση όμως, προβαίνουμε στη μέτρηση και των υπολογισμό λιγοστών παραμέτρων οι οποίες δεν αναφέρονται στα προηγούμενα, κρίνονται όμως απαραίτητες για την επιτέλεση των επιμέρους στόχων της εργασίας..

2.4 Γενικές Μέθοδοι απόκτησης πληροφορίας

2.4.1 Μετρήσεις και υπολογισμοί

Όλες οι προαναφερθείσες μορφομετρικές παράμετροι είναι δυνατό να μετρηθούν και να υπολογιστούν με μια πληθώρα μεθόδων: Από τις πλέον άμεσες μεθόδους, όπου τα στοιχεία συλλέγονται απευθείας από τοπογραφικές και άλλες μετρήσεις σε μελέτες/ έρευνες πεδίου, έως τις πιο αυτοματοποιημένες μεθόδους, όπου η ανθρώπινη παρέμβαση και δραστηριότητα περιορίζεται στο ελάχιστο. Ανάμεσα σε αυτές τις «ακραίες» μεθόδους υφίστανται και άλλες, ενδιάμεσες που βασίζονται στην αποκλειστική χρήση

και επεξεργασία αναλογικών χαρτών, ή και στην αξιοποίηση των χαρτών αυτών ως υπόβαθρα μέσα σε κάποιο υπολογιστικό σύστημα.

Παλαιότερα η χρήση τοπογραφικών (αναλογικών) χαρτών, για μια αναλυτική εργασία όπως η ανάλυση μορφομετρικών παραμέτρων, αποτελούσε πανάκεια, καθώς ένας χρήστης δεν είχε τη δυνατότητα να διαχειριστεί και να επεξεργαστεί τα δεδομένα του με άλλο μέσον. Έτσι, οι ισοϋψείς καμπύλες* και η κλίμακα του τοπογραφικού χάρτη π.χ., σε συνδυασμό με κάποια έρευνα πεδίου ήταν οι μοναδικές διέξοδοι του ερευνητή προκειμένου να προβεί σε μετρήσεις και υπολογισμούς. Με την έλευση των GIS και την ευρεία διάδοσή τους έχει δοθεί νέα ώθηση σε τέτοιου είδους αναλύσεις και υπολογισμούς.

Εκτός όμως από την εστίαση σε τέτοιους ποσοτικούς δείκτες, των οποίων η ανάδειξη έπεται, ορισμένα πρωταρχικά ποιοτικά στοιχεία θα πρέπει να παρατεθούν εξ' αρχής. Αυτά είναι η οριοθέτηση της υδρολογικής λεκάνης από τον υδροκρίτη, η κατάτμηση αυτής στις επιμέρους υπολεκάνες, καθώς και η ορθή και ακριβής χάραξη των υδατορεμάτων – κλάδων του υδρογραφικού δικτύου. Μόνο και μόνο εφ' όσον αποτυπωθεί το χωρικό πλαίσιο της φυσικογεωγραφικής ενότητας είναι δυνατόν να λάβουν χώρα μετρήσεις και περαιτέρω υπολογισμοί.

2.4.2 Οριοθέτηση υδρολογικής λεκάνης

Και σε αυτή την πρώτη φάση της χάραξης και οριοθέτησης οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, ποικίλλουν. Έτσι, η πλέον συνήθης διαδικασία αποτύπωσης υδρολογικής λεκάνης βασίζεται στην ανάγνωση τοπογραφικών χαρτών κλίμακας 1: 50.000 ή και μεγαλύτερης – τοπογραφικά διαγράμματα 1: 5.000. Η παρουσία των ισοϋψών, σε συνδυασμό με την ήδη αποτυπωμένη ροή των υδάτων σε τέτοιους χάρτες, αποτελούν τους «οδηγούς» μας προκειμένου να απεικονίσουμε την λεκάνη απορροής συγκεκριμένου ποτάμιου κλάδου τάξης u.

Η υλοποίηση μιας τέτοιας μεθόδου είναι δυνατό να επιτευχθεί με ή χωρίς την παρουσία ενός λογισμικού GIS. Στην πρώτη περίπτωση η χάραξη γίνεται «με το χέρι» απευθείας στον τοπογραφικό χάρτη, ενώ στην δεύτερη – ημιαυτοματοποιημένη – η χάραξη επιτελείται με την ψηφιοποίηση μέσω ενός GIS επί του αντίστοιχου χάρτη ο

* Η τρίτη διάσταση, το ύψος (ή το βάθος) της επιφάνειας του γήινου ανάγλυφου αναπαρίσταται με τη βοήθεια ισοκαμπύλων του υψομέτρου, δηλ. γραμμών οι οποίες διέρχονται από σημεία της επιφάνειας της γης με κοινό υψόμετρο.

οποίος έχει προηγουμένως σαρωθεί. Και στις δύο περιπτώσεις γνώμονα αποτελεί η μορφή και διάταξη των ισοϋψών καμπυλών που θεωρητικά και εμπειρικά «παραπέμπουν» στον σχεδιασμό ενός υδροκρίτη ή ενός υδατορέματος εποχιακής ροής.*

Η εκτενής διάθεση τοπογραφικών και υψομετρικών δεδομένων υπό ψηφιακή μορφή μέσω των DEMs (Digital Elevation Models – Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους/Υψομέτρου), που είναι (ψηφιακά) αρχεία που αποθηκεύουν πληροφορίες υψομέτρων, καθιστά εφικτή τη σκιαγράφηση υδρογραφικών δικτύων και υδροκριτών. Όταν λοιπόν εισάγεται ένα DEM σε ένα κατάλληλο υπολογιστικό σύστημα μπορούν να συναχθούν χρήσιμες πληροφορίες. Τόσο η αποτύπωση των υδρολογικών λεκανών και του υδρογραφικού δικτύου, όσο και η μετέπειτα υδρολογική ανάλυση γίνεται πλέον εφικτή μέσω αυτοματοποιημένων μεθόδων που δυνητικά αντικαθιστούν επίπονες χειρωνακτικές μεθόδους (Dingman, 2002).

Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναπτυχθεί η μεθοδολογία και οι διαδικασίες που συντελούνται σε ένα GIS ώστε, από τη εισαγωγή ενός DEM,** να αποκομίσουμε πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά (τη μορφή, το σχήμα, το μήκος κ.α.) ενός αποστραγγιστικού συστήματος και της αλληλένδετης με αυτό λεκάνης αποστράγγισης. Επίσης θα γίνουν κάποιες συγκρίσεις, σε θεωρητικό επίπεδο τουλάχιστον με τις μέχρι πρόσφατα πιο διαδεδομένες συμβατικές μεθόδους.

* Η διαδικασία θα περιγραφεί σε επόμενη υποενότητα.

** ή και κάποιας άλλης μορφής ψηφιακών δεδομένων

3. GIS ΚΑΙ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Εισαγωγή

Σ' αυτό το στάδιο θα παρουσιαστεί εκτενώς η συμβολή των GIS στη διαδικασία διαχείρισης γεωγραφικών περιοχών που περικλείουν ποτάμια συστήματα. Θα γίνει λόγος για μεθόδους ανάπτυξης κατάλληλων αλγορίθμων που υποστηρίζονται από διάφορα λογισμικά πακέτα και προορίζονται για εκπόνηση υδρολογικής ανάλυσης. Ακόμη, θα περιγραφούν οι αλγόριθμοι που αυτοματοποιούν τις διαδικασίες κατάδειξης υδροκριτών και υδρογραφικού δικτύου που θεωρούνται οι πιο κατάλληλοι για την επίλυση των εκάστοτε προβλημάτων που αναδύονται από την ανάλυση των μορφομετρικών παραμέτρων μιας υδρολογικής λεκάνης. Παράλληλα θα παρουσιασθούν οι τεχνικές υλοποίησης αυτών των αλγορίθμων μοντελοποίησης μέσω του λογισμικού πακέτου Arc View (9.1) της ESRI. Με την κατάδειξη των σχετικών αλγορίθμων και τη συγκριτική ανάλυσή τους με άλλους χειρωνακτικούς θα ολοκληρωθεί αυτή τη φάση της εργασίας.

3.1. Σκοπός

Επειδή η ανάλυσή που λαμβάνει χώρα σε αυτή την εργασία έχει ως σκοπό να καταδείξει τη σχέση μεταξύ (ποσοτικοποιημένων) μορφολογικών χαρακτηριστικών του ανάγλυφου και ανάπτυξης υδρογραφικού δικτύου και υδρολογικής λεκάνης υπό την επενέργεια της διαβρωτικής δράσης του νερού, θεωρούμε ως καθοριστικό παράγοντα προς μελέτη την τοπογραφία και το συναφές με αυτήν υψόμετρο. Σε μια τέτοια προσέγγιση, για λόγους απλοποίησης, δε λάβαμε υπ' όψη άλλες παραμέτρους που συμβάλουν στη διαμόρφωση λεκάνης απορροής όπως η γεωλογία της περιοχής, δηλ. η λιθολογία και η τεκτονική της περιοχής και οι κλιματολογικοί παράγοντες. Από την άλλη, επιδιόμαστε με αφοσίωση στην απόκτηση, αποθήκευση και διαχείριση πληροφορίας υψομέτρων μέσω ενός κατάλληλου GIS. Βεβαίως, για να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα, παραθέτουμε και χειρωνακτικές μεθόδους μέσω των οποίων αποτυπώνεται σε ένα χάρτη μια λεκάνη αποστράγγισης.

Στα πλαίσια μιας αναλυτικής διαδικασίας ενός Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών όπως η Ανάλυση Μορφομετρικών Παραμέτρων Υδρολογικής Λεκάνης, οι πηγές δεδομένων, η μορφοποίηση και επεξεργασία των αρχικών δεδομένων σε

κατάλληλους (αξιοποιήσιμους) τύπους δεδομένων* καθώς και οι διαδικασίες και αλγόριθμοι «μετουσίωσης» των τελευταίων στις επιθυμητές χωρικές ενότητες – υδρολογικές λεκάνες – αποτελούν βασικά στοιχεία που θα μας απασχολήσουν. Η περιγραφή και αποσαφήνιση τους πραγματοποιείται παρακάτω.

3.2 Πηγές τοπογραφικών/ υψομετρικών δεδομένων

Η εισαγωγή χωρικής μορφής δεδομένων (spatial data) σε ένα GIS αποτελεί την πρωταρχική ενέργεια στην οποία θα πρέπει να προβεί ένας χρήστης προκειμένου να ξεκινήσει μια διαδικασία (χωρικής) ανάλυσης. Στην περίπτωση εκπόνησης υδρολογικής ανάλυσης, βασικό στοιχείο που αναλύεται είναι το υψόμετρο του γήινου ανάγλυφου, καθώς όπως προαναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η τοπογραφική κλίση – ως άμεσα παράγωγο του υψομέτρου – επιδρά σημαντικά στην «εγκαθίδρυση» νέων και στον τρόπο επέκτασης ήδη υπάρχοντων κοιτών. Αναπόφευκτα όμως η προέλευση της πληροφορίας θα επηρεάσει την ορθότητα, τη ακρίβεια και την αξιοπιστία του παραγόμενου αποτελέσματος.

Η ανάκτηση πληροφορίας υψομέτρου προέρχεται κατά κύριο λόγο από δεδομένα δορυφορικών εικόνων και αεροφωτογραφιών, τα οποία με στερεοσκοπική κάλυψη και ερμηνεία αποδίδουν πληροφορίες για την τοπογραφία της επιφάνειας της γης. Επιπροσθέτως, η διεξαγωγή επίγειων εργασιών τοπογραφικών αποτυπώσεων για την απόκτηση υψομετρικών σημείων και η ψηφιοποίηση των ισοϋψών γραμμών ήδη υφιστάμενων τοπογραφικών (αναλογικών) χαρτών, παρέχουν επίσης ζωτικής σημασίας πληροφορίες για τις τιμές των υψομέτρων. Η συλλογή δεδομένων υψομέτρου μπορεί να συμπληρωθεί από τη χρήση συσκευών-δεκτών GPS (Global Positioning Systems) ειδικά όταν απαιτείται μεγάλος όγκος πληροφορίας (υψομέτρων) για ειδικό σκοπό (Wilson and Gallant, 2000).

3.3 Δομές Ψηφιακών Δεδομένων Υψομέτρου

Από τη στιγμή που αποκτούμε τέτοιου είδους πληροφορία, είναι δυνατό να την οργανώσουμε σε τριών ειδών ψηφιακές δομές δεδομένων (τουλάχιστον): σε DEM

* σε ένα υπολογιστικό σύστημα

τετραγωνικού καννάβου, σε δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων (TIN – triangulated irregular model), ή σε ένα σύνολο ψηφιοποιημένων ισοϋψών καμπύλων.

3.3.1 Περιγραφή

Ένα DEM, σύμφωνα με τον DeMers (2000a), είναι ένας κάνναβος δειγματοληψίας ή μια ψηφιδωτού τύπου (raster)* αναπαράσταση της συνεχούς τοπογραφικής επιφάνειας. Είναι δηλαδή ένας κάνναβος υψομέτρων που αναπαριστά μια κανονική διάταξη υψομετρικών σημείων (Chang, 2003). Όπως άλλωστε και κάθε άλλο αρχείο καννάβου, ένα DEM αποτελεί ένα τρόπο κατάτμησης του γεωγραφικού χώρου ώστε ο τελευταίος να μπορεί να αναπαρασταθεί σε ένα υπολογιστή (DeMers, 2002). Με την ανάθεση μιας αριθμητική τιμής – της τιμής του αντίστοιχου υψομέτρου – σε κάθε ένα κελί/ φατνίο του καννάβου** (grid) του DEM, λαμβάνουμε πληροφορία υψομέτρων για το σύνολο της περιοχής. Κατά αυτόν το τρόπο καθίσταται εφικτή η αναπαράσταση του γήινου ανάγλυφου

Το δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων ή μοντέλο TIN συντίθεται από μια σειρά μη επικαλυπτόμενων τριγώνων που καλύπτουν εντελώς μια τοπογραφική επιφάνεια (Robinson et al., 2002). Αντίθετα με το μοντέλο DEM, το TIN βασίζεται σε μια μη κανονική κατανομή υψομετρικών σημείων. Ένα TIN δημιουργείται όταν σημεία γνωστού υψομέτρου συνενώνονται ανά τρία, αποτελώντας τις κορυφές αυτών των μη επικαλυπτόμενων τριγώνων. Κατά τη διαδικασία αυτή, στις γεωεπιστήμες, τηρείται η συνθήκη Delauny,*** που οδηγεί σε μοναδικό τριγωνισμό (Στεφανάκης, 2003) μοντέλο αναπαράστασης του ανάγλυφου του εδάφους

Οι ισοϋψείς γραμμές υφιστάμενων τοπογραφικών (αναλογικών) χαρτών αποτελούν έναν ευρύτατα διαδεδομένο τρόπο απεικόνισης τμημάτων της επιφάνειας της γης και μια συνήθη πηγή δεδομένων εδάφους και υψομέτρων. Ανήκουν στην ευρύτερη οικογένεια των ισοκαμπύλων με την ιδιαιτερότητα ότι κάθε μια ισοϋψής χαράσσεται έτσι, ώστε να διέρχεται από σημεία ίδιου υψομέτρου. Οι ψηφιοποιημένες ισοϋψείς γραμμές αποτελούν πολλές φορές τις μοναδικές πηγές ψηφιακών δεδομένων

* Στη διεθνή βιβλιογραφία οι δομές ψηφιακών γεωγραφικών δεδομένων διαχωρίζονται σε ψηφιδωτά (raster) και διανυσματικά (vector) αρχεία. Για επιπρόσθετα, βλ. Στο Παράρτημα II

** συνήθως στο κέντρο του φατνίου

*** Ο τριγωνισμός κατά Delauny οδηγεί στην μεγιστοποίηση της ελάχιστης γωνίας των τριγώνων με έλεγχο, κάθε φορά που σχηματίζεται ένα τρίγωνο, αν εντός του περιγεγραμμένου κύκλου ο οποίος διέρχεται από τις τρεις κορυφές του περικλείεται και άλλο υψομετρικό σημείο.

υψομέτρων, ελλείπει άλλων δεδομένων, ενώ σε άλλες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με διάφορες μεθόδους παρεμβολής.

3.3.2 Σύγκριση

Πέρα από την απλή περιγραφή αυτών των δομών ψηφιακών δεδομένων, θεωρούμε χρήσιμη την βαθύτερη εξέτασή τους, προκειμένου να ανιχνεύσουμε ομοιότητες, διαφορές, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που «εκ φύσεως» ενέχουν, προτού δηλαδή τις εισάγουμε σε ένα GIS. Η εκ των προτέρων θεωρητική αυτή επισκόπησή τους πιθανό να αποφέρει οφέλη για την μετέπειτα επιλογή του πλέον κατάλληλου συνόλου ψηφιακών δεδομένων που θα αξιοποιηθούν στο εργαστηριακό τμήμα της πτυχιακής εργασίας.

Γενικά, ως Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM - DTM) ορίζεται κάθε «ψηφιακή αναπαράσταση της συνεχούς μεταβολής του ανάγλυφου στο χώρο». Ο όρος DTM αναφέρεται ευρέως στην απόδοση οποιουδήποτε χαρακτηριστικού στο χώρο, ενώ ο όρος DEM σχετίζεται αποκλειστικά με την αναπαράσταση του ανάγλυφου (Χαλκιάς 2003). Η κανονικοποιημένη δομή δεδομένων – raster αρχείων – όπως το DEM τετραγωνικού καννάβου χρησιμοποιούνται ευρύτατα λόγω της απλότητας της δομής του και της αμεσότητας στην αποθήκευση και επεξεργασία τους σε έναν υπολογιστή και της συμβατότητάς τους με τερματικές συσκευές υπολογιστών (Robinson et al., 2002). Σε ένα DEM τετραγωνικού καννάβου η συνεχής τοπογραφική επιφάνεια (του ανάγλυφου) καταχωρείται ως διακριτή πληροφορία (τιμή z) στα φατνία του καννάβου (Χαλκιάς, 2003). Σε εφαρμογές αναπαράστασης του ανάγλυφου τα raster αρχεία είναι επίσης πιο εύχρηστα, όμως υπάρχουν κάποια βασικά μειονεκτήματα που αντισταθμίζουν αυτή την ευκολία διαχείρισης. Έτσι, το μέγεθος του φατνίου του καννάβου καθορίζει τον όγκο των διαχειριζόμενων αρχείων και την ποιότητα των αποτελεσμάτων. Μικρό μέγεθος ψηφίδας σημαίνει πιο λεπτομερή ανάδειξη του ανάγλυφου αλλά ταυτόχρονα και αυξημένο όγκο δεδομένων. Ακόμη, απότομες μεταβολές του ανάγλυφου δεν είναι δυνατό να αποδοθούν πάντοτε και σημαντικές πληροφορίες μπορεί να παραλειφθούν σε επίπεδες περιοχές, εξ' αιτίας του σταθερού μεγέθους της ψηφίδας (Wilson and Gallant, 2000).

Το TIN αποτελεί μια μέθοδο αναπαράστασης της γήινης επιφάνειας κατά την οποία το δίκτυο των τριγώνων κατατέμνει τον δισδιάστατο χώρο, ενώ ταυτόχρονα

διατηρεί τις αρχικές τιμές των κορυφών. Ένα TIN μπορεί να καταρτιστεί με βάση το DEM ή αξιοποιώντας υψομετρικά σημεία που έχουν συλλεχθεί από τοπογραφήσεις, δεδομένα από GPS ή και συνδυασμό όλων των παραπάνω. Επειδή τα τρίγωνα μπορούν να ποικίλλουν σε μέγεθος, παρέχεται το συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι του μοντέλου καννάβου υψομέτρου (DEM) της δυνατότητας απεικόνισης του ανάγλυφου σε περιοχές όπου δεν υπάρχει ευχέρεια συλλογής πολλών δεδομένων.

Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει κατά τη δημιουργία TIN χρησιμοποιώντας ως επιφάνεια εισόδου (input surface) ένα DEM. Λόγω της εγγενούς δυνατότητας ανάπτυξης μεταβαλλόμενου μεγέθους τριγώνων, σε αντίθεση με το ψηφιδωτό αρχείο DEM, του οποίου οι ψηφίδες έχουν σταθερό μέγεθος, δεν χρειάζεται να συμπεριλάβουμε όλα τα σημεία υψομέτρου του, αλλά μόνο τα πιο σημαντικά. Για την επιλογή των σημείων αυτών έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι όπως ο VIP και ο maximum z-tolerance.*

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η χάραξη ισοϋψών γραμμών (contouring), δηλ. γραμμών που συνδέουν σημεία ίσου υψομέτρου αποτελεί την πιο συνήθη μέθοδο αναπαράστασης του γήινου ανάγλυφου (terrain mapping). Από το σχήμα και τη διάταξη τους, μπορεί κανείς, ύστερα από εξάσκηση, να συλλάβει και να οπτικοποιήσει την τοπογραφία μιας περιοχής που απεικονίζεται σε έναν (τοπογραφικό) χάρτη. Ακόμη, γνωρίζοντας την ισοδιάσταση των ισοϋψών, δηλ. την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών ισοϋψών και την (οριζόντια) κλίμακα του χάρτη είναι δυνατό να υπολογιστούν κλίσεις πρανών ή έκθεσή τους (προσανατολισμός) κ.α. Όμως η χρήση τους για τέτοιες μετρήσεις αρχίζει να σπανίζει με την έλευση και εκτενή χρήση των GIS (Chang, 2003). Η αναπαράσταση με ισοϋψείς είναι μια κατ' εξοχήν παραστατική μέθοδος παρουσίασης, στερείται όμως καταλληλότητας και εφαρμοσιμότητας σε ποσοτικές αναλύσεις (Χαλκιάς, 2003).

Παρ' όλα αυτά, γίνεται εφικτό μέσα από ένα λογισμικό GIS να «κατασκευάσουμε» με αυτοματοποιημένο τρόπο ισοϋψείς γραμμές από υφιστάμενα ψηφιακά αρχεία αναπαράστασης του υψομέτρου. Ένα καλό παράδειγμα είναι αυτό του μοντέλου TIN που με έναν αλγόριθμο που αξιοποιεί την γραμμική παρεμβολή (linear interpolation) μεταξύ των κορυφών των τριγώνων, αναδεικνύει τελικά τις ισοϋψείς καμπύλες. Σε πρώτη φάση αυτές οι καμπύλες αποτελούνται από επιμέρους ευθύγραμμα τμήματα – τα οποία διέρχονται είτε από τις κορυφές είτε από τις πλευρές των τριγώνων –

* Βλ. Chang, 2003 σελ 247, 248

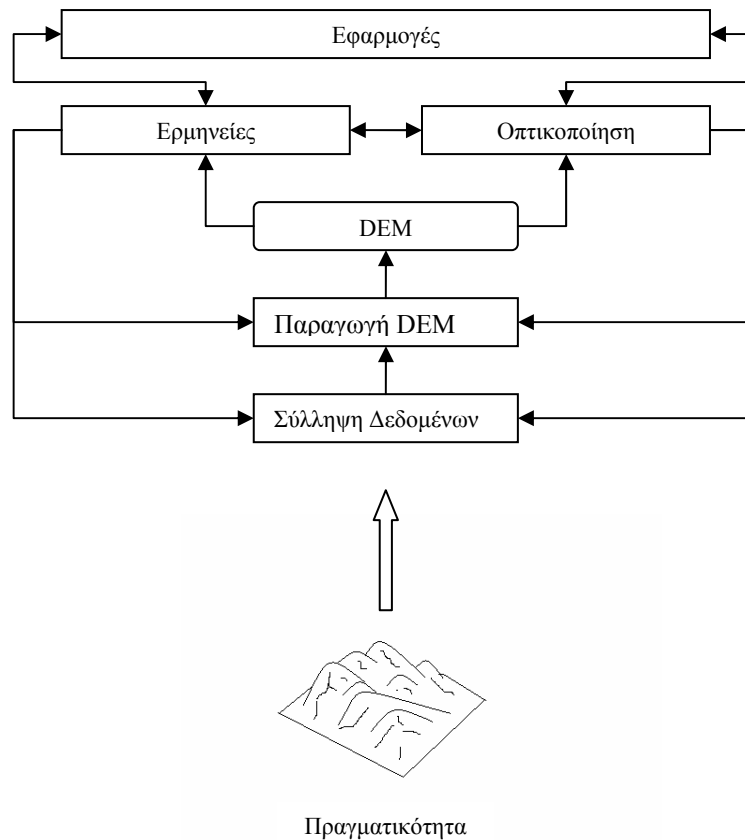
μπορούν όμως να εξομαλυνθούν προσαρμόζοντας κάποιες μαθηματικές εξισώσεις. Επίσης εφικτή είναι η παραγωγή ισοϋψών καμπύλων και από DEM αυτόματα, με την εφαρμογή κατάλληλων αλγόριθμων.

Συνεπώς, από την θεωρητική και μόνο σύγκριση των τριών τύπων ψηφιακών δεδομένων, γίνεται αντιληπτό πως η επιλογή του πλέον κατάλληλου (τύπου) θα εξαρτηθεί από τα διαθέσιμα δεδομένα μας, και τη μέθοδο επεξεργασίας που πρόκειται να εφαρμόσουμε σε αυτά. Σε επόμενες υποενότητες θα αναλυθούν κάποιες από τις «προβλεπόμενες» μεθόδους

3.3.3 Μοντελοποίηση

3.3.3.1 Γενικά

Η αξιοποίηση των υψομετρικών στοιχείων του εδάφους (terrain) – υπό κατάλληλη (ψηφιακή) δομή – ως εισροή σε ένα (υπολογιστικό) σύστημα είναι καθοριστική για την διαχείριση της μορφολογίας της γήινης επιφάνειας και την ανάπτυξη αναλυτικών διαδικασιών που διέπουν την ατμόσφαιρα (π.χ., υδρολογικός κύκλος). Η αναπαράσταση λοιπόν του εδάφους υπό τη μορφή ενός DEM μπορεί να αποτελέσει το συνδετικό κρίκο ανάμεσα στα δεδομένα συλλογής και σε ποικίλες εφαρμογές. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα ροής που έχει αναπαραχθεί από τους Hutchinson and Gallant (1999), η φυσική πραγματικότητα, και συγκεκριμένα το γήινο ανάγλυφο αποδίδεται μέσω ενός DEM, το οποίο είναι «αξιοποιήσιμο» αργότερα σε διάφορες εφαρμογές. Υποστηρίζεται δε από τεχνικές ερμηνείας και οπτικοποίησης, με συνηθέστερη την περίπτωση αξιολόγησης της ποιότητας των δεδομένων και την «τεκμηρίωση» της ερμηνείας του διαμέσου της απεικόνισης-οπτικοποίησης.



Σχήμα 3. 1: Το μοντέλο DEM ως συνδετικό στοιχείο κατά τη μετάβαση από τη φυσική πραγματικότητα, στην υλοποίηση εφαρμογών.
Πηγή: Hutchinson and Gallant, 1999.

3.3.3.2 Τύποι μοντέλων

Όλες οι παραπάνω δομές δεδομένων σε ψηφιακή μορφή, που θα προκύψουν ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία και αξιοποίηση πρωτογενούς προέλευσης δεδομένων, αποτελούν δυνητικά «εισροές» για την ανάπτυξη μοντέλων εδάφους σε ένα GIS – στην περίπτωση που επιλέγουμε να εργαστούμε με μια αυτοματοποιημένη ρουτίνα και όχι με μια ημιαυτόματη ή αμιγώς χειρωνακτική μέθοδο. Όπως αναφέρουν οι Robinson et al. (2002), «ένα σύνολο χωρικών δεδομένων σε ψηφιακή μορφή αναπαριστά ένα μοντέλο της γεωγραφικής πραγματικότητας.» Όμως, ουσιαστικό προαπαιτούμενο για την μοντελοποίηση μέσω ενός GIS αποτελεί μια «χωρική συλλογιστική», δηλ. η ικανότητα της αναγνώρισης, εξακρίβωσης και ερμηνείας γεωγραφικών προτύπων. Επιπροσθέτως, για την περαιτέρω περιγραφή και αποτίμηση του μοντέλου που πρόκειται να δημιουργηθεί σε ένα GIS, απαραίτητες θεωρούνται οι επιτόπιες μελέτες (της

εξεταζόμενης περιοχής), η ανασκόπηση άλλων μελετών, η εξέταση υφιστάμενων χαρτών, αεροφωτογραφιών κ.α.

Η μοντελοποίηση σε ένα GIS , και τα παραγόμενα μοντέλα, σε γενικές γραμμές, είναι δυνατό να διακριθούν σε τρεις επιμέρους κατηγορίες (τουλάχιστον). Παρακάτω τις παραθέτουμε επιγραμματικά, καθώς σκοπός αυτής της εργασίας δεν είναι η εμβάθυνση στους τρόπους μοντελοποίησης. Παρ' όλ' αυτά, σε επόμενο στάδιο της εργασίας, πιθανόν να μας φανεί χρήσιμο διότι θα μπορέσουμε να εντάξουμε το χρησιμοποιούμενο μοντέλο σε κάποιες κατηγορίες. Έτσι, ένα μοντέλο ταξινομείται σε περιγραφικό (descriptive) και κανονιστικό (prescriptive) ανάλογα με το σκοπό, σε στοχαστικό (stochastic) και ντετερμινιστικό (deterministic), με βάση τη μεθοδολογία και σε επαγωγικό (inductive) και παραγωγικό (deductive) με βάση τη λογική που το διέπει (DeMers, 2002).

Η πρώτη ταξινόμηση διαχωρίζει τα μοντέλα που απλά περιγράφουν την υφιστάμενη κατάσταση σε κάποιον χώρο, π.χ. απεικονίζουν την γεωμετρία των δρόμων σε μια πόλη ή την χωροθέτηση μεγάλων βιομηχανιών σε μια χώρα, και αυτά που εκμαιεύουν μια λύση ή μια σειρά εναλλακτικών αξιολογώντας τις υφιστάμενες συνθήκες, π.χ. δίνουν απαντήσεις σε ερωτήματα όπως: ποια είναι η βέλτιστη τοποθεσία χωροθέτησης ενός μεγάλου ξενοδοχείου, ή ποία/ ποιες τοποθεσίες θεωρούνται ως η πιο πιθανές για το χτύπημα ενός σεισμού. Βεβαίως, σε ορισμένες περιπτώσεις δεν αποκλείεται ένα περιγραφικό μοντέλο να περιγράφει υποθετικές μελλοντικές «καταστάσεις», χωρίς όμως να «προτείνει» λύσεις (DeMers, 2002).

Η δεύτερη κατηγοριοποίηση αναφέρεται στη διάκριση μεταξύ στοχαστικών μοντέλων τα οποία έχουν ένα χαρακτήρα τυχαιότητας και είναι συνδεδεμένα με στατιστικά κριτήρια, και ντετερμινιστικών, τα οποία επιτελούν άμεσες και εκ των προτέρων άμεσα καθορισμένες λειτουργίες. Έτσι, σε ένα στοχαστικό μοντέλο, η εισαγωγή των δεδομένων δεν συνεπάγεται μια καθορισμένη έξοδο αποτελεσμάτων. Π.χ. η εμφάνιση συγκεκριμένων μικροοργανισμών στο υπέδαφος υπό την παρουσία συγκεκριμένων εδαφών εμπίπτει σε ένα φάσμα πιθανοτήτων και δεν είναι προκαθορισμένη. Αντίθετα, σε ένα ντετερμινιστικό μοντέλο, υπό τις ίδιες συνθήκες, δηλ. τα ίδια δεδομένα εισόδου, το παραγόμενο αποτέλεσμα θα είναι πάντοτε το ίδιο. Επί παραδείγματι, η μοντελοποίηση της απώλειας εδάφους αξιοποιώντας την παγκόσμια εξίσωση απώλειας εδάφους (Battad, 1993) και η πρόβλεψη της ροής του νερού σε μια υδρολογική λεκάνη (Chase, 1991) αποτελούν περιπτώσεις όπου το περιβάλλον μπορεί να μοντελοποιηθεί κατά τρόπο ντετερμινιστικό.

Στα πλαίσια της τρίτης ταξινόμησης, ένα μοντέλο μπορεί να δομηθεί συλλέγοντας συγκεκριμένα στοιχεία του γενικού συνόλου, σε μια προσπάθεια να «κατασκευάσουμε» το γενικό σύνολο. Σύμφωνα με αυτήν την λογική της επαγωγής «χτίζουμε» γενικά μοντέλα βασιζόμενοι σε μεμονωμένα δεδομένα. Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει στην παραγωγική λογική: ένα γενικό μοντέλο αξιοποιείται ώστε να ευρεθούν ή να προβλεφθούν συγκεκριμένα τμήματα αυτού. Η λογική της επαγωγής λαμβάνει χώρα όταν υπάρχει άγνοια περί των γενικών συνθηκών μιας περιοχής ή όταν επιχειρούμε να δημιουργήσουμε «εκ του μηδενός» ένα μοντέλο. Σε άλλες περιπτώσεις, όταν δηλαδή είμαστε ενήμεροι για τις συνθήκες της περιοχής, τους παράγοντες που επιδρούν και την διαδραστικότητα μεταξύ τους, προτιμάται η πιο σαφής, άμεση και κατανοητή παραγωγική λογική (DeMers, 2002).

Έκτος αυτών των διαχωρισμών, όπως σχεδόν πάντοτε άλλωστε, θα μπορούσαν να γίνουν και άλλοι. Η διάκριση σε στατικά και δυναμικά, σε διακριτά και συνεχή μοντέλα κ.α., αποτελούν επίσης τέτοιους διαχωρισμούς. Η απλή περιγραφή των τριών παραπάνω κατηγοριοποιήσεων επαρκούν για να δώσουμε ένα σαφές «στίγμα» σε αυτήν την πτυχιακή εργασία, δεδομένου ότι σημασία έχει να αντιληφθούμε τον τρόπο και τη μεθοδολογία που εφαρμόζεται όταν «επεξεργαζόμαστε» τα υφιστάμενα δεδομένα αποκομίζοντας πολύτιμες πληροφορίες στα πλαίσια της συγκεκριμένης εφαρμογής που εξετάζουμε και όχι να αναλύσουμε διεξοδικά κάθε δυνατή ταξινόμηση μοντέλων.

3.4 Από τα δεδομένα στην μοντελοποίηση: πλήρως αυτοματοποιημένες μέθοδοι

Ενώ προηγουμένως αναφερθήκαμε στην μοντελοποίηση και ειπώθηκε ότι ένα σύνολο ψηφιακών δεδομένων στα οποία είναι αποθηκευμένη χωρική-γεωγραφική πληροφορία, μέσα σε ένα GIS αποτελούν δυνητικά ένα χωρικό μοντέλο, ας δούμε πώς χρησιμοποιώντας ένα τέτοιο μοντέλο όπως το DEM καθίσταται εφικτή η παραγωγή ενός άλλου μοντέλου, του μοντέλου μιας υδρολογικής λεκάνης με όλα τα συστατικά μέρη που την χαρακτηρίζουν (υδροκρίτες – λεκάνες, πρηνή, κοίτες, ροή κ.α.).

3.4.1 Παραγωγή DEM από υψομετρικά δεδομένα

Θα μπορούσαμε, παρ' όλα αυτά, να ξεκινήσουμε από ένα βήμα πιο πίσω: Θεωρώντας ότι το DEM είναι ένα παραγόμενο, και όχι δεδομένο μοντέλο – όπως άλλωστε παρουσιάστηκε και στο διάγραμμα ροής-σχήμα 3.1 – υπάρχει μια ολόκληρη διαδικασία πριν από την μετατροπή των σημείων υψομέτρου σε ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Προκειμένου λοιπόν να δημιουργήσουμε ένα DEM, μπορούμε να εισάγουμε πληροφορίες για την τοπογραφία του εδάφους, και επομένως για τα υψόμετρα, σε ένα υπολογιστικό σύστημα με διάφορους τρόπους. Ένας από αυτούς επαφίεται στην ψηφιοποίηση των ισοϋψών καμπυλών και στην απόδοση των αντίστοιχων τιμών υψομέτρου σε κάθε μία από αυτές. (Επειδή αξιοποιούμε χάρτες της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) κλίμακας 1:50.000, λαμβάνουμε ισοϋψείς ανά 20μ.). Ακόμη, αυτοί οι χάρτες «εμπεριέχουν» υψομετρικά και τριγωνομετρικά σημεία, πληροφορίες υψομέτρου δηλαδή που επίσης μπορούν να φανούν χρήσιμες.

Εφόσον μας παρέχονται τα προηγούμενα, είναι δυνατό να εφαρμόσουμε μια ρουτίνα/ εντολή μέσα στο περιβάλλον του ArcMap που ονομάζεται Topo to Raster. Με παράλληλη αξιοποίηση των παραπάνω, και συμπληρωματικά την παροχή πληροφορίας από τυχόν υφιστάμενο υδρογραφικό δίκτυο, κάποιος χρήστης είναι σε θέση να «δημιουργήσει» ένα DEM, στα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος.

Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία Topo to Raster είναι μια μέθοδος παρεμβολής που χρησιμεύει για την αναπαραγωγή υδρολογικά ορθών ψηφιακών μοντέλων υψομέτρου – DEM, η οποία έχει βασιστεί στο πρόγραμμα ANUDEM, το οποίο έχει αναπτυχθεί από τον Hutchinson (1988, 1989). Κατά αυτήν την μέθοδο χρησιμοποιείται μια επαναληπτική πεπερασμένη τεχνική παρεμβολής η οποία συνδυάζει κατά βέλτιστο τρόπο τα πλεονεκτήματα της υπολογιστικής αποτελεσματικότητας μιας τοπικά εφαρμόσιμης μεθόδου παρεμβολής (local interpolation method),* χωρίς να υφίσταται απώλειες στην συνεχή κατανομή των επιφανειών, εκμεταλλευόμενη παράλληλα τις γενικευμένες μεθόδους παρεμβολής (global interpolation methods).** Επί της ουσίας, αποτελεί μια τεχνική πολωνυμικής παρεμβολής (Wahba, 1990), κατά την οποία το προσαρμοσμένο DEM μπορεί να ακολουθήσει απότομες μεταβολές του ανάγλυφου όπως τα ποτάμια ρεύματα και οι κορυφογραμμές.

*Όπως η Inverse Distance Weighted interpolation στο ArcMap.

** Όπως η Kriging και η Spline στο ArcMap.

Όπως προκύπτει και από τα προηγούμενα κεφάλαια, το νερό και η διαβρωτική δράση του αποτελούν κυρίαρχο παράγοντα διαμόρφωσης του ανάγλυφου. Αυτή την πρωταρχική γνώση αξιοποιεί ο αλγόριθμος ANUDEM, η λειτουργία του οποίου βασίζεται στον τρόπο ανάπτυξης των υδρογραφικών δικτύων και γενικά στη δομή τους. Έτσι, γνωρίζοντας ότι η μέθοδος παρεμβολής που θα επιτευχθεί θα έχει ως αποτέλεσμα μια συνεκτική διάρθρωση των κλάδων ενός δικτύου (όχι αποκομμένοι κλάδοι μεταξύ τους), επιτρέπει την αναπαραγωγή αξιόπιστων DEM απαιτώντας χαμηλότερη ποσότητα παρεχόμενης πληροφορίας (input data) περί υψομέτρων – από ψηφιοποιημένες ισοϋψείς – από την συνηθισμένη. Η ταυτόχρονη αξιοποίηση του ήδη υφιστάμενου υδρογραφικού δικτύου της περιοχής ως δεδομένο εισροής, υποβοηθάει επιπλέον.

3.4.2 Μοντελοποίηση μέσω DEM

Με τις παραπάνω διεργασίες έγινε σαφές ότι έχουμε πλέον «παράγει» ένα μοντέλο τύπου grid στο οποίο είναι ενσωματωμένη όλη η επιθυμητή τοπογραφική πληροφορία και είμαστε σε θέση να το επεξεργαστούμε. Δεδομένου ότι υφίστανται αλγόριθμοι που για την μοντελοποίηση υδρολογικής λεκάνης απαιτούν μόνο και μόνο δεδομένα υψομέτρου, αρκεί να καταδείξουμε την διαδικασία που λειτουργεί ένας τέτοιος αλγόριθμος.

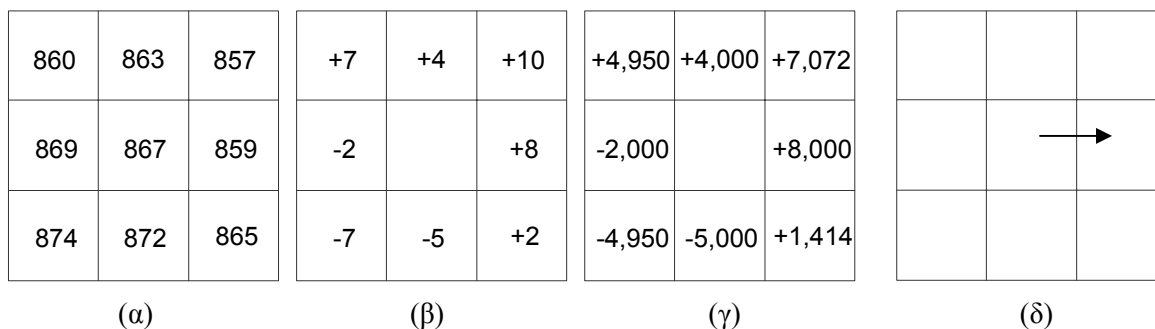
Γενικά, μια ρουτίνα υδρολογικής ανάλυσης (hydrological or watershed analysis) «προσπορίζεται» τοπογραφικά χαρακτηριστικά όπως η λεκάνη απορροής και το υδρογραφικό δίκτυο αξιοποιώντας ψηφιδωτά δεδομένα υψομέτρου (Jenson 1991, Moore 1996). Πρώτο βήμα σε μια τέτοια διαδικασία αποτελεί η πλήρωση του DEM, το οποίο ενδεχομένως παρουσιάζει κάποιες υπέρμετρα μεγάλες τοπικές ταπεινώσεις (depressions/ pits) αναπαριστώμενου ανάγλυφου σε κάποιο ή κάποια φατνία του καννάβου. Επειδή η παρουσία αυτών των τοπικών ταπεινώσεων οφείλεται κυρίως σε σφάλματα και ατέλειες του DEM, τις εξαλείφουμε δημιουργώντας ένα νέο αρχείο καννάβου παρόμοιο με το αρχικό (*filled elevation grid/ filled DEM*) στο οποίο αυτές οι πολύ χαμηλές τιμές υψομέτρου αντικαθίστανται από υψηλότερες, σύμφωνα με εκείνες γειτονικών κελιών

(Jenson and Domingue 1988). Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει με εξαιρετικά μεγάλες τιμές υψομέτρου (peaks).*

Η επόμενη φάση της υδρολογικής ανάλυσης συνίσταται στη δημιουργία ενός grid στο οποίο θα εμπεριέχεται η πληροφορία περί της διεύθυνσης της ροής του νερού (*flow direction grid*). Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας ένα φατνίο του καννάβου του, μέσω του αλγόριθμου του λογισμικού μας (ArcGIS), αρχικά «αναζητούνται» τα οχτώ γειτονικά φατνία – εντός ενός «παραθύρου» 3X3 – που ουσιαστικά το περιβάλλουν. Έπειτα, ελέγχονται οι τιμές υψομέτρου και, όπως είναι προφανές ότι το νερό θα τείνει να ρέει από το σημεία μεγαλύτερου υψομέτρου σε σημεία χαμηλότερου – δηλ. κατά τη διεύθυνση μέγιστης κλίσης –, έτσι και σε αυτή την μοντελοποίηση, με υπόβαθρο το DEM, η διεύθυνση ροής θα γίνεται από το φατνίο με τη μεγαλύτερη τιμή υψομέτρου προς εκείνο με την μικρότερη, συνυπολογίζοντας και την μεταξύ τους απόσταση. Με άλλα λόγια, για το αρχικό φατνίο επιλογής μας υπολογίζονται οι κλίσεις (slopes) προς κάθε ένα από τα λοιπά οχτώ φατνία. Μεταξύ των δύο εκείνων γειτονικών φατνίων για τα οποία η τιμή της κλίσης που υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο μεγιστοποιείται,** αποκαλύπτει και τα δύο εκείνα κελιά στα οποία θα επιτευχθεί η ροή και επομένως φανερώνεται η διεύθυνση ροής (από το φατνίο με τη μεγαλύτερη τιμή υψομέτρου προς εκείνο με την μικρότερη) : **Κλίση** = $\Delta z / \Delta x$, όπου Δz η διαφορά των τιμών υψομέτρου (κατακόρυφη απόσταση) και Δx η απόσταση μεταξύ γειτονικών κελιών (οριζόντια απόσταση). Η απόσταση Δx μετράται από τα κεντροειδή των (τετράγωνων) κελιών και είναι ίση με 1 όταν γειτνιάζουν έχοντας μια πλευρά κοινή και ίση με 1,414 όταν έχουν μια κορυφή κοινή (DeMers, 2002) (Σχ. 3.3).

* Σημειωτέον ότι ορισμένες από αυτές τις ακραίες τιμές υψομέτρου αναπαριστούν πραγματικά σημεία τοπογραφικών επιφανειών όπως π.χ. λατομεία και για αυτό θα πρέπει να προηγείται μια επιτόπια μελέτη, αν αυτό είναι δυνατό ή μια πρώτη αναγνώριση της περιοχής από χάρτες κ.α.

** Η πλέον απότομη κλίση συνεπάγεται μεγαλύτερη δυναμική ενέργεια και επομένως σημαντικότερη διαβρωτική ικανότητα και μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς υλικών.



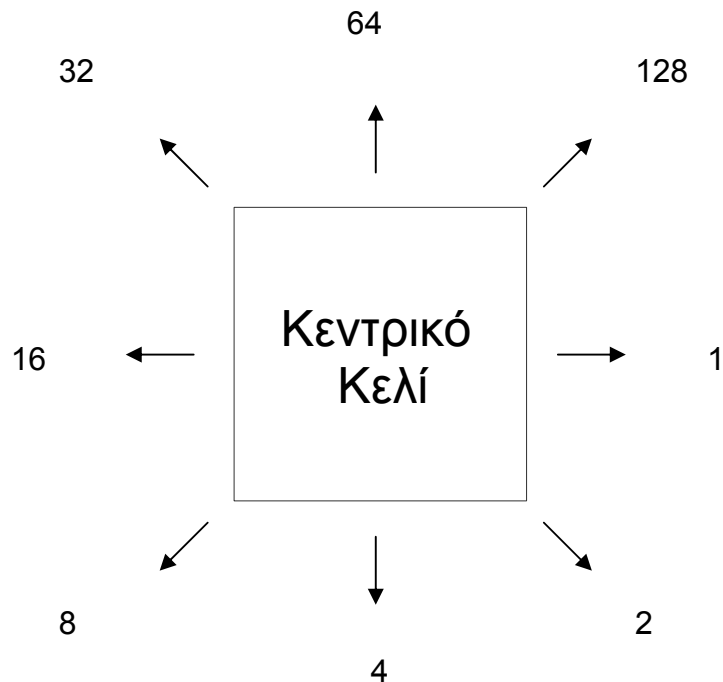
Σχήμα 3. 2: Η διαμόρφωση ενός καννάβου διεύθυνσης ροής.

Σημείωση: Στο (α) παρατηρούμε τον κάνναβο στον οποίο είναι καταχωρημένες οι τιμές του υψομέτρου (filled elevation grid) του κεντρικού κελιού σε σχέση με τις τιμές των 8 γειτονικών του. Η διεύθυνση ροής (flow direction) καθορίζεται κατ' αρχήν από την διαφορά υψομέτρου όπως φαίνεται στο (β), και δευτερευόντως από την κλίση που υπάρχει μεταξύ του κεντρικού με τα λοιπά κελιά (γ). Αυτή η κλίση υπολογίζεται διαιρώντας την υψομετρική διαφορά με 1, για τα άμεσα γειτνιάζοντα, ενώ με 1,414 για τα τέσσερα «γωνιακά» κελιά. Τελικά η ροή έχει διεύθυνση από το κεντρικό κελί προς εκείνο που παρουσιάζει τη μέγιστη κλίση (+8,000) όπως παρουσιάζεται στο (δ).

Πηγή: Chang, 2002. (Τροποποίηση)

Τελικά, εφόσον υπολογιστεί η πλέον «απότομη» κλίση,* η πληροφορία της διεύθυνσης της ροής κωδικοποιείται με διάφορους τρόπους. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο λογισμικό ArcGIS ειδικότερα – με το οποίο πρόκειται να εργαστούμε – η μέθοδος αυτή δεν «επιτρέπει» τη ροή προς πολλά φατνία, αλλά μόνο προς ένα, οπότε η υποτιθέμενη υδατορροή δύναται να ακολουθεί μόνο ορισμένες κύριες κατευθύνσεις (Moore 1996). Οι κύριες κατευθύνσεις και η κωδικοποίησή τους στο Arc View της ESRI φαίνεται στο σχήμα 3.3. Υπάρχουν όμως και άλλοι αλγόριθμοι που ενέχουν ένα χαρακτήρα τυχαιότητας και επιδέχονται κάποια «παρέκκλιση» της ροής σε περισσότερα από ένα γειτονικά κελιά (Wilson and Gallant, 2000).

* Εάν δεν υπολογίζεται μια και μοναδική μέγιστη κλίση για τα οχτώ γειτονικά κελιά, τότε το «παράθυρο» επεκτείνεται έως ότου υπολογιστεί μια τέτοια.



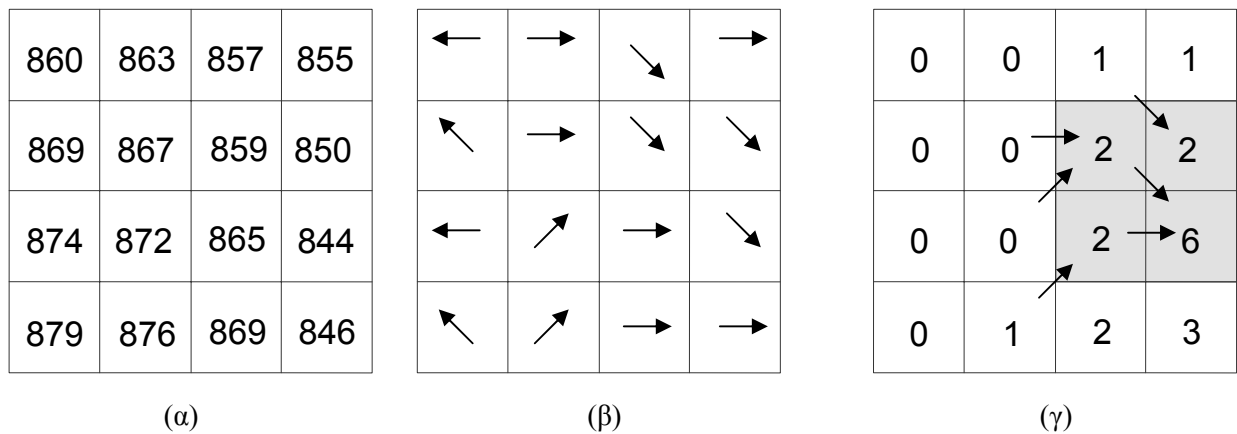
Σχήμα 3. 3: Το σχήμα κωδικοποίησης των διευθύνσεων (ροής) της ESRI.

Σημείωση: Το σύστημα κωδικοποίησης που χρησιμοποιεί η ESRI για να αποδώσει τη διεύθυνση της ροής στα σχετικά κελιά του καννάβου είναι σύμφωνο με την ωρολογιακή φορά. Αποδίδει τιμή 1 (στο κεντρικό κελί) όταν η ροή διεύθυνεται ανατολικά, ενώ οι τιμές διπλασιάζονται καθώς κινούμαστε δεξιόστροφα. Αυτή η μέθοδος (του διπλασιασμού) βοηθάει στο διαχωρισμό του διανύσματος της διεύθυνσης.

Πηγή: DeMers, 2000.

Στη συνέχεια, μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα αρχείο καννάβου, το οποίο να αποτυπώνει πληροφορία περί των κελιών στα οποία συγκεντρώνεται ροή νερού. Το *flow accumulation grid* αποτελεί ένα τέτοιο ψηφιδωτό αρχείο. Σε κάθε ένα φατνίο του καταχωρείται μια τιμή: ο αριθμός των φατνίων διαμέσου των οποίων διέρχεται το νερό. Σε αυτό το στάδιο αξιοποιείται το flow direction grid. Επεξηγηματικά, ο κάνναβος συσσώρευσης ροής (flow accumulation grid) ύστερα από επεξεργασία του καννάβου διεύθυνσης ροής (flow direction grid) φανερώνει από πόσα φατνία (που αναπαριστούν την τοπογραφική επιφάνεια) ανάντη της κοίτης θα μεταβεί το νερό προκειμένου να καταλήξει σε κάθε κελί (Σχ. 3.4). Ως εκ τούτου, οι τιμές που αναμένουμε να πάρουμε για περιοχές κοντά στις κορυφογραμμές, δηλ. στον υδροκρίτη ή για ρεύματα 1^{ης} τάξης (κατά Staller είτε κατά Shreve) είναι κοντά στο 0, ενώ για κεντρικές κοίτες των ποταμών

αναμένουμε πολύ υψηλές τιμές. Θέτοντας, τέλος, ένα κατώφλι (threshold) στην τιμή (συσσωρεύσης), λ.χ. 500 ή 1000, - κάνοντας την παραδοχή ότι για τιμές μικρότερες του 500 ή του 1000 δεν υφίσταται συγκεντρωμένη ροή – απεικονίζουμε ένα αποστραγγιστικό δίκτυο πλήρως συνδεδεμένο. (Chang, 2003). Επιπροσθέτως, αναφέρουμε ότι οι τιμές των κελιών μπορούν να επηρεάζονται και από άλλους παράγοντες, πέραν της διαδοχικής ροής από φατνίο σε φατνίο. Τέτοιοι παράγοντες μπορεί να αφορούν σε συμπληρωματική συγκέντρωση νερού εξ’ αιτίας της πτώσης κατακρημνισμάτων ή λόγω ιδιαίτερης λιθογραφίας που «συγκρατεί» μεγαλύτερες ποσότητες νερού κ.α., οπότε ένας συντελεστής βαρύτητας ανατίθεται σε κάθε κελί. (DeMers, 2002). Συνήθως όμως, για λόγους απλοποίησης, δεν αναθέτουμε ειδικά βάρη στα φατνία του καννάβου.



Σχήμα 3. 4: Η διαμόρφωση ενός κανάβου συγκέντρωσης ροής.

Σημείωση: Παραπάνω απεικονίζονται τρεις κανναβοί: ένας «πληρωμένος» κανναβος υψομέτρων (filled elevation grid) (α), ένας κανναβος διεύθυνσης ροής (flow direction grid) (β) και ένας κανναβος συγκέντρωσης ροής (flow accumulation grid) (γ). Στο (γ), τα σκιασμένα κελιά έχουν λάβει τιμές συγκέντρωσης ροής 2 (τα δύο αριστερά κελιά και το πάνω δεξιά) και 6 (το κάτω δεξιά κελί). Το κάτω αριστερά δέχεται τη ροή από ένα κελί που ήδη έχει τιμή 1, ενώ το πάνω αριστερά αποτελεί αποδέκτη ροής δύο γειτονικών του κελιών με τιμή 0. Το πάνω δεξιά δέχεται τη ροή ενός κελιού το οποίο ήδη έχει αντλήσει από ένα άλλο με μηδενική τιμή. Τέλος το κάτω δεξιά «πηγάζει» από το αριστερό και το διαγώνια πάνω αριστερό του κελί, που και τα δύο έχουν τιμή συγκέντρωσης ροής 2.

Πηγή: Chang, 2002. (Τροποποίηση)

Παρακάτω απεικονίζεται ο τρόπος που, στο ArcGIS της ESRI, καταχωρούνται οι τιμές διεύθυνσης ροής σε ένα «παράθυρο» καννάβου 4x4, προκειμένου να λάβουμε το μεταγενέστερο αρχείο καννάβου συγκέντρωσης ροής (flow accumulation grid), όπως αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4 (γ).

16	1	2	1
32	1	2	2
16	128	1	2
32	128	1	1

Σχήμα 3. 5: Ο κάνναβος διεύθυνσης ροής (flow direction grid) του Σχ 3.4 (γ) σύμφωνα με την κωδικοποίηση που προτάθηκε παραπάνω.

Μια υδρολογική ανάλυση ολοκληρώνεται με την οριοθέτηση της λεκάνης απορροής. Αυτή η σκιαγράφηση μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους. Σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο αναδεικνύονται οι λεκάνες χρησιμοποιώντας ως εισροή (input) το αποστραγγιστικό δίκτυο που έχει «εκμαιευτεί» από τα ψηφιδωτά αρχεία flow accumulation grid και flow direction grid. Το μέγεθος λοιπόν της παραγόμενης λεκάνης θα εξαρτάται από το κατώφλι που έχουμε θέσει, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στο flow accumulation grid. Επόμενο είναι, όσο χαμηλότερο είναι αυτό, τόσο να διευρύνεται το υδρογραφικό δίκτυο και να συμπεριλαμβάνει κλάδους μικρότερης τάξης, ακόμη και ανύπαρκτες κοίτες.* Σχετικά με τον δεύτερο τρόπο, χρησιμοποιείται ένα έτοιμο-δεδομένο ψηφιακό αρχείο που αναπαριστά ένα υδρογραφικό δίκτυο, και όχι κάποιο παραγόμενο αρχείο όπως στην πρώτη περίπτωση. Βασικό κίνητρο για την υιοθέτηση μιας τέτοιας μεθόδου αποτελεί η προσπάθεια αποφυγής σφαλμάτων που προκύπτουν καθώς μεταχειριζόμαστε ένα DEM προκειμένου να ορίσουμε ένα αποστραγγιστικό δίκτυο, ειδικά όταν εξετάζουμε περιοχές χαμηλού ανάγλυφου (Chang, 2003). Στην πράξη βέβαια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά οι δύο αυτοί τρόποι.

* Η παρουσία ή όχι κοιτών δεν είναι ένα ζήτημα που δεν τίθεται υπό αμφισβήτηση. Επειδή η επιφανειακή απορροή είναι ένα φαινόμενο που μεταβάλλεται δυναμικά στον χρόνο, πολλές φορές οι κοίτες 1^{ης} τάξης συγχέονται με μικροαυλακώσεις του εδάφους, και το αντίθετο, χωρίς να υπάρχει πάντοε ένα αντικειμενικό κριτήριο διαχωρισμού τους.

Η οριοθέτηση υδρολογικής λεκάνης προϋποθέτει την κατάδειξη ορισμένων σημείων εξόδου (ή έκχυσης) του νερού (pour points/ outlets). Εφόσον τα τελευταία επιλεγθούν, τότε δυνητικά αναπαρίστανται όλες οι «διαδρομές» της ροής του νερού ανάντη των σημείων αυτών (Chang, 2003). Κατ' αυτόν τον τρόπο, με ταυτόχρονη αξιοποίηση του flow direction grid (ψηφιδωτό αρχείο διεύθυνσης ροής), μπορεί να αναπαρασταθεί όλη η επιφάνεια που οριοθετείται από τον υδροκρίτη και το σημείο εξόδου της λεκάνης. Επιπλέον, μπορεί να υπολογιστεί το μήκος της κεντρικής κοίτης και των παραποτάμων ενός αποστραγγιστικού δικτύου, καθώς και η γήινη επιφάνεια η οποία αποστραγγίζεται από την κοίτη στην οποία έχουμε «θέσει» κάποιο σημείο εξόδου. Επομένως μπορεί να σκιαγραφηθεί η λεκάνη αποστράγγισης, οι υπολεκάνες της, και να υπολογιστεί η επιφάνειά και η περίμετρός τους.

3.5 Χειρωνακτικές Μέθοδοι

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μέθοδος αναπαράστασης του ανάγλυφου διαμέσου ισοϋψών γραμμών είναι ιδανική για την οπτική απεικόνιση, παρέχοντας το πλεονέκτημα της άμεσης σύλληψης του ανάγλυφου, δεν ενδείκνυται όμως για ποσοτική γεωμορφολογική ανάλυση. Στις καθαρά χειρωνακτικές μεθόδους που επί του παρόντος εξετάζονται αξιοποιούνται υπόβαθρα τοπογραφικών χαρτών (αναλογικοί), όπου η τρίτη διάσταση της τοπογραφικής επιφάνειας αποδίδεται με την δημιουργία και χάραξη ισοϋψών καμπύλων.

Το θετικό στοιχείο, όταν χρησιμοποιούνται τοπογραφικοί χάρτες, π.χ. της ΓΥΣ κλίμακας 1: 50.000, εκτός από τις ισοϋψείς – και φυσικά άλλες οντότητες οι οποίες χαρτογραφούνται όπως οικισμοί, δρόμοι, σιδηροδρομικές γραμμές κ.α. – χαράσσονται και τα ρεύματα μόνιμης ή και εποχιακής ροής. Φυσικά, η εμπειρία κάποιου ερευνητή μπορεί να συνεπικουρήσει στην νοητική συμπλήρωση τυχόν παραλήψεων στα ρεύματα ενός υδρογραφικού δικτύου από την διάταξη και μόνον των ισοϋψών. Άλλωστε, θα μπορούσε κάποιος να χαράξει ένα ολόκληρο υδρογραφικό δίκτυο, έχοντας ως δεδομένο μόνο τις καμπύλες ίδιου υψομέτρου, με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που μπορεί κανείς να οριοθετήσει μια λεκάνη απορροής, σχεδιάζοντας την υδροκριτική γραμμή.

Ως γενικές αρχές για την χάραξη ενός υδροκρίτη, ορίζονται οι παρακάτω: Αφ' ενός μια υδροκριτική γραμμή διέρχεται από τα υψηλότερα υψομετρικά σημεία της περιοχής στην οποία εντάσσεται μια λεκάνη, αφετέρου δε αυτή η γραμμή άγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να τέμνει κάθετα τις ισοϋψείς. Συνήθως, ο υδροκρίτης τέμνει μία και

μοναδική φορά την ίδια ισοϋψή (εκτός από περιπτώσεις «κλειστών ισοϋψών» σε πολύ κοντινή απόσταση) (Παυλόπουλος και Καρύμπαλης, 2003). Από την άλλη, η χάραξη του αποστραγγιστικού δικτύου εντός μιας σαφώς ορισμένης λεκάνης αποστράγγισης υποβοηθάται από τη διάταξη και τους σχηματισμούς που τείνουν να δημιουργούν οι ισοϋψείς σε ένα χάρτη. Στην πραγματικότητα, ως συνέπεια της ροής και της επακόλουθης διαβρωτικής δράσης του νερού διαμορφώνονται οι κοίτες ενός ποταμού.. Οι κοιλάδες, χαρακτηριστικές μορφές διάβρωσης, άμεσα συσχετιζόμενες με την διέλευση νερού εντός των κοιτών ενός υδρογραφικού δικτύου,* αποτυπώνονται σε ένα χάρτη ως διατάξεις των ισοϋψών – συνήθως σχήματος U ή V.

Μέσω τέτοιων γενικών μεθόδων καθορίζεται η υδροκριτική γραμμή της λεκάνης αποστράγγισης της κύριας κοίτης ενός ποτάμιου συστήματος αλλά και οι υδροκρίτες των επιμέρους υδρολογικών λεκανών. Πέρα όμως από αυτού του είδους τις πληροφορίες – έμμεσες και ποιοτικές – αποκομίζουμε και άμεσα μετρούμενα στοιχεία από την ύπαρξη των ισοϋψών όπως: μήκος ισοϋψών, κατακόρυφη απόσταση, κλίσεις (με κάποια επεξεργασία) κ.α., στοιχεία τα οποία συντελούν στην ποσοτική γεωμορφολογική ανάλυση. Οι διαδικασίες υπολογισμού ποσοτικών γεωμορφολογικών δεικτών και τα αποτελέσματά τους αναπτύσσονται στο επόμενο κεφάλαιο.

3.6 Ημιαυτόματες Μέθοδοι

Ως κύρια διαφορά μεταξύ ημιαυτόματων και πλήρως χειρωνακτικών μεθόδων, θεωρείται η αξιοποίηση – από τις πρώτες – του ψηφιακού χάρτη της περιοχής μελέτης, ο οποίος αποτελεί το πληροφοριακό υπόβαθρο (υψομέτρων και χωρικών-τοπολογικών σχέσεων), και γενικότερα η οργάνωση της πληροφορίας σε ένα λογισμικό GIS. Σε αυτήν την περίπτωση, η ψηφιοποίηση των ισοϋψών, των ποτάμιων ρευμάτων και η οριοθέτηση των λεκανών απορροής εξελίσσεται με παρόμοια διαδικασία των χειρωνακτικών, μόνο που το λογισμικό δίνει επιπλέον διαχειριστικές δυνατότητες μέσω κάποιων εργαλείων. Τέτοιες είναι: η δυνατότητα μεγέθυνσης, η δυνατότητα επίτευξης της ψηφιοποίησης υπό διάφορες παραμέτρους με τη χρήση «εργαλείων» του Arc Map (π.χ. snapping tool, stream tolerance κ.α.). Πέρα από τη φάση της χάραξης και ψηφιοποίησης, στη φάση της διαχείρισης των οντοτήτων, παρέχονται οι λειτουργίες της επικάλυψης και της χαρτογραφικής επίθεσης οι οποίες παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο. Τέλος, στον

* Βλ. Ενότητα 1.3.3

τομέα της μέτρησης μηκών και επιφανειών, ένα GIS παρέχει σχετικά μεγαλύτερη άνεση, ακρίβεια και δυνατότητα ενιαίας διαχείρισης δεδομένων και μετρήσεων.

Στο επόμενο κεφάλαιο αναπτύσσονται με σαφήνεια ο τρόπος με τον οποίο αριθμούνται οι κλάδοι, μετρώνται τα μήκη τους και οι επιφάνειες των λεκανών κ.α. προκειμένου να αναδειχθούν οι υπολογιζόμενες παράμετροι. Είναι προφανές ότι και στις πλήρως αυτοματοποιημένες μεθόδους υφίστανται τα ίδια διαχειριστικά πλεονεκτήματα.

3.7 Σχόλια

Παραπάνω περιγράφηκαν οι διαδικασίες του πρώτου σταδίου μιας υδρολογικής ανάλυσης με τρεις διαφορετικές μεθόδους οι οποίες αφορούν αποκλειστικά στην «χάραξη» του υδρογραφικού δικτύου και την σκιαγράφιση του κύριου και των επιμέρους υδροκριτών και ταυτόχρονα στην ανάδειξη των σχετικών υδρολογικών λεκανών. Ακολούθως, πρόκειται να πραγματοποιηθούν μετρήσεις υπολογισμοί, «μεταβαίνοντας» από μια ποιοτική σε μια συνάμα ποσοτική γεωμορφολογική ανάλυση. Συγκεκριμένα, αναπτύσσονται οι σχετικές μέθοδοι, διαδικασίες και αλγόριθμοι.

4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Εισαγωγικά

Έχοντας προηγουμένως εξεταστεί τα γενικά χαρακτηριστικά και τις μορφομετρικές παραμέτρους μιας οποιασδήποτε αποστραγγιστικής λεκάνης και έχοντας αναδειχθεί ορισμένες αναλυτικές λειτουργίες που αναδύονται μέσω τεχνικών μεθόδων, λαμβάνει χώρα η λεπτομερής μελέτη περιοχής (λεκάνη). Εδώ αναλύονται οι ιδιάζουσες φυσικογεωγραφικές συνθήκες που επικρατούν στη υπό μελέτη λεκάνη. Αρχικά, οριοθετείται το υδρογραφικό της δίκτυο και στη συνέχεια εκπονούνται διαδικασίες εκτίμησης των μετρούμενων και υπολογιζόμενων παραμέτρων λεκάνης απορροής και υδρογραφικού δικτύου. Οι παραπάνω ενέργειες επιτυγχάνονται τόσο με χειρωνακτικές όσο και με ημιαυτοματοποιημένες και πλήρως αυτοματοποιημένες μεθόδους.

4.1. Περιοχή μελέτης

Η λεκάνη αποστράγγισης που επιλέχτηκε τελικά να εξεταστεί είναι αυτή του Μεγάλου Ρέματος Ραφήνας. Τοποθετείται στο ανατολικό τμήμα του νομού Αττικής, καταλαμβάνοντας μια έκταση $114,15 \text{ km}^2$, και οριοθετείται από δύο ορεινούς όγκους του λεκανοπεδίου Αττικής: στα βόρεια και βορειοανατολικά από το Πεντελικό όρος (900 m.) στα δυτικά και νοτιοδυτικά από τον Υμηττό (728 m.) και στα νότια από λόφους μικρού υψομέτρου Μπούρα (300 m.), Πετροκορφή (167 m.).

Εντός αυτής της λεκάνης αποστραγγίζονται 372 ποτάμιοι κλάδοι συνολικά, με την κεντρική κοίτη να υπάγεται – σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης του Strahler – στους κλάδους έκτης τάξης. Η τελευταία διακρίνεται από γενική διεύθυνση ροής στο ορεινό τμήμα από Β προς Ν ενώ στη συνέχεια ρέει από Δ-ΝΔ προς τα Α-ΒΑ εκβάλλοντας στον κόλπο Πεταλιών (Νότιος Ευβοϊκός κόλπος). Το κύριο χαρακτηριστικό του υδρογραφικού δικτύου είναι η ασυμμετρία ώστε η κύρια ανάπτυξή του να είναι βόρεια της κεντρικής κοίτης ενώ νότια αυτής να υπάρχουν λιγостоί μόνο κλάδοι μικρών τάξεων. Οι κυριότεροι παραπόταμοί του είναι τα ρέματα Αγ. Παρασκευής, Λυκόρρεμα και Νέου Βουτζά που αποστραγγίζουν τις νότιες πλαγιές του Πεντελικού όρους. Τέλος, εντός της περιοχής που αποστραγγίζεται το υδρογραφικό δίκτυο, υφίστανται πολλοί οικισμοί όπως η Παλλήνη, ο

Γέρακας, το Ντράφι, τα Γλυκά Νερά κ.α., οι οποίοι γνωρίζουν μεγάλη οικιστική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Παρακάτω παρατίθεται ο τοπογραφικός χάρτης της περιοχής και ο χάρτης του υδρογραφικού δικτύου του Μεγάλου Ρέματος Ραφήνας (Χάρτες 1, 2).

Παρ' όλο που μια τέτοια (υδρολογική) λεκάνη μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί στοιχειώδη γεωμορφική μονάδα, ομοίως είναι δυνατόν και οι υπολεκάνες της (λεκάνες που αποστραγγίζουν κοίτες μικρότερης τάξης) να εκληφθούν ως ενότητες που μπορούν να μελετηθούν και να αναλυθούν. Σε μια τέτοια λογική, επιλέξαμε να αναλύσουμε τις μορφομετρικές παραμέτρους μιας λεκάνης 4^{ης} τάξης, χωρίς να αποκόπτουμε την ίδια και τα χαρακτηριστικά της από την ευρύτερη λεκάνη. Οι λόγοι για τους οποίους επιτελέστηκε μια τέτοια ενέργεια συνίστανται στην απλοποίηση και την διαχείριση μικρότερου όγκου δεδομένων, καθώς η μέτρηση και ο υπολογισμός των διαφόρων δεικτών (παραμέτρων) θα επιτευχθεί διαμέσου τριών διαφορετικών μεθόδων – προσεγγίσεων. Θα εστιάσουμε λοιπόν την προσοχή μας αφ' ενός στην περιγραφή των μετρήσεων, των υπολογισμών αφ' ετέρου δε* στον σχολιασμό των αποτελεσμάτων, τόσο από τη σκοπιά της χρησιμοποιούμενης τεχνικής, όσο και από τη σκοπιά της φυσικής - φυσικογεωγραφικής σημασίας των αποτελεσμάτων.

Η λεκάνη απορροής του Λυκορρέματος – ενός ρέματος 4^{ης} τάξης το οποίο πρόκειται να μελετηθεί – αποστραγγίζεται από 177 κλάδους συνολικά (133 1^{ης}, 33 2^{ης}, 7 3^{ης} και 1 4^{ης}). Η κεντρική κοίτη του (4^{ης} τάξης) εκτείνεται με τέτοιον τρόπο που μεταβάλλει καθ' όλη τη διαδρομή του τη διεύθυνση της ροής της. Ξεκινάει – στα ανάντη του ρου της με μια διεύθυνση ροής από βόρεια-βορειοανατολικά προς νότια-νοτιοδυτικά – και καταλήγει – εκεί όπου συμβάλλει με το ρεύμα Αγ. Παρασκευής – με μια διεύθυνση από δυτικά προς ανατολικά (Χάρτης 3). Η συγκεντρωμένη ροή μέσω των κλάδων 1^{ης} τάξης αρχίζει από υψόμετρα περί τα 820 m, στο βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης αποστράγγισης, εκεί όπου το ποτάμιο σύστημα «πηγάζει» από το όρος Πεντέλη. Στα πλαίσια της περιοχής της λεκάνης απορροής του εντοπίζονται οι διευρυνόμενοι οικισμοί «Πικέρμι» και «Ντράφι», καθώς και άλλοι μικρότεροι σε έκταση οικισμοί.. Χαρακτηριστικό γνώρισμα της τοπογραφίας της λεκάνης, είναι το έντονο ανάγλυφο, που αποδίδεται στον τοπογραφικό χάρτη μέσω των πυκνών ισοϋψών.

* Σε επόμενο κεφάλαιο



Χάρτης 1: Τοπογραφικός χάρτης της λεκάνης απορροής του Μεγάλου Ρέματος της Ραφήνας



2

ΧΑΡΤΗΣ
ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ
ΤΟΥ ΜΕΓΑΛΟΥ ΡΕΜΑΤΟΣ
ΡΑΦΗΝΑΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

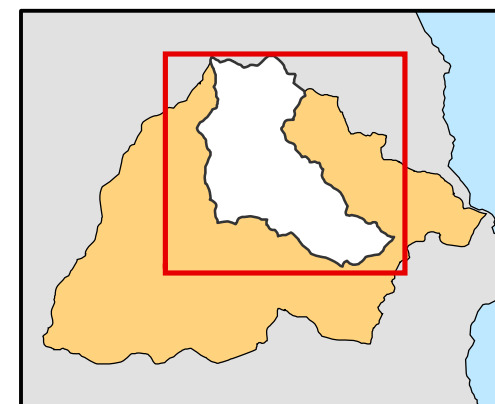
- Κλάδος πρώτης τάξης
- Κλάδος δεύτερης τάξης
- Κλάδος τρίτης τάξης
- Κλάδος τέταρτης τάξης
- Κλάδος πέμπτης τάξης
- Κλάδος έκτης τάξης
- Υδροκρίτης



0 1.000 2.000 4.000
Μέτρα

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

-  Κλάδος πρώτης τάξης
-  Κλάδος δεύτερης τάξης
-  Κλάδος τρίτης τάξης
-  Κλάδος τέταρτης τάξης
-  Ισοϋψείς (20μ.)
-  Ισοϋψείς (100μ.)
-  Λεκάνη Λυκορρέματος



0 500 1.000 2.000
Μέτρα

4.2. Υδρολογική/ ποσοτική γεωμορφολογική ανάλυση

Σε αυτή τη φάση της εργασίας μας επίκειται η εφαρμογή των μεθόδων υδρολογικής ανάλυσης που προαναφέρθηκαν, σε μια πραγματική λεκάνη απορροής: τη λεκάνη του Λυκορρέματος. Παρακάτω γίνεται προσπάθεια να περιγραφούν με σαφήνεια οι ενέργειες που θα συντελεστούν κατά την εφαρμογή της μίας ή της άλλης μεθόδου, ξεκινώντας αυτή τη φορά από την καθαρά χειρωνακτική. Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να τονιστεί, πως ο κύριος στόχος μας ήταν η σύγκριση των διαφόρων μεθόδων «εξαγωγής» μορφομετρικών παραμέτρων, εστιάζοντας στις κύριες και καθοριστικές παραμέτρους, και όχι η λεπτομερής ανάλυση του συνόλου των παραμέτρων που παρουσιάστηκαν προηγούμενα. Για αυτόν τον λόγο, η επιλογή μας έγκειται στην παρουσίαση και συγκριτική αξιολόγηση των μεθοδολογιών υπολογισμού ορισμένων μόνον από αυτές τις παραμέτρους.

4.2.1 Χειρωνακτική Μέθοδος

Ύστερα από τη σάρωση του αναλογικού τοπογραφικού χάρτη «Κηφισιά» της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) κλίμακας 1:50.000, απομονώθηκε* τμήμα του χάρτη το οποίο αναμένουμε να συμπεριλαμβάνει εξ' ολοκλήρου την υδρολογική λεκάνη του Λυκορρέματος. Έπειτα, το πρώτο μέλημά μας συνίσταται στον εντοπισμό του συνόλου του υδρογραφικού δικτύου και έπειτα στην χάραξη του υδροκρίτη και στην ταυτόχρονη αναγνώριση της λεκάνης απορροής της κεντρικής κοίτης του ρέματος (επί του σαρωμένου χάρτη στην ίδια κλίμακα).

4.2.1.1 Χάραξη του υδρογραφικού δικτύου και οριοθέτηση των υδρολογικών λεκανών

Η χάραξη του υδρογραφικού δικτύου αποτελεί μια σχετικά εύκολη διαδικασία. Απαιτούνται όμως εμπειρία, ικανοποιητικές συνθήκες φωτισμού και ιδιαίτερη προσοχή ούτως ώστε να μην παραληφθεί κάποιος κλάδος και να αποτυπωθούν οι κλάδοι σε όλο τους το μήκος. Ο βαθμός στον οποίο θα εφαρμοστεί ορθά και χωρίς παραλήψεις η προηγούμενη διαδικασία, θα επηρεάσει άμεσα και την μετέπειτα ταξινόμηση σε τάξεις μεγέθους και αρίθμηση (κατά Strahler).

* Σε διαστάσεις φύλλου A4

Όσον αφορά στη χάραξη του υδροκρίτη και των επιμέρους υδροκριτών, αυτή αρχίζει με την αναγνώριση σημείων σχετικά μεγάλου υψομέτρου (υψομετρικών σημείων), τα οποία απεικονίζονται με σημειακά σύμβολα στον τοπογραφικό χάρτη και τείνουν να περιβάλλουν το αποστραγγιστικό δίκτυο. Αποτυπώνοντάς τα, δημιουργούμε μια αδρή, νοερή εικόνα του υδροκρίτη. Έπειτα επικεντρωνόμαστε στην μορφή και τη διάταξη των ισοϋψών προκειμένου να αχθούν οι κορυφογραμμές, κατά τρόπο ανάλογο με αυτόν που έχει διατυπωθεί στην 3.4. Γενικά η σχεδίαση ενός υδροκρίτη ξεκινά από το κατώτερο σημείο της κεντρικής κοίτης της λεκάνης, εκεί δηλαδή που ο υπό μελέτη κλάδος συμβάλλει με έναν ίδιας ή μεγαλύτερης τάξης κλάδο. Αφού οριοθετηθεί η λεκάνη σε όλο της το εύρος, η υδροκριτική καμπύλη «κλείνει» καταλήγοντας στο ίδιο σημείο (Παυλόπουλος και Καρύμπαλης, 2003). Φυσικά, εκεί όπου το ανάγλυφο είναι έντονο, και τα υψόμετρα μεγάλα, αυτό είναι σχετικά απλό και μονοσήμαντα καθορισμένο. Σε περιοχές πεδινές (εκβολές ή συμβολές κλάδων μεγάλης τάξης), ο υδροκρίτης μπορεί να εκτείνεται σε πλάτος πολλών μέτρων και επομένως χαράσσεται με μεγαλύτερο βαθμό αβεβαιότητας. Τελικά, η υδροκριτική γραμμή, εφόσον αναπαριστά τα όρια ενός ενιαίου φυσικογεωγραφικού συστήματος, «κλείνει» στο χαμηλότερο σημείο της λεκάνης (στόμιο ή σημείο έκχυσης) όταν αποτελεί υπολεκάνη και τροφοδοτεί το λοιπό υδρογραφικό δίκτυο, ή μπορεί να λαμβάνει μια ιδιαίτερη μορφή καθώς «εγκολπώνει» και σημεία της ακτογραμμής όταν εκβάλλει σε κάποια λίμνη, θάλασσα ή ωκεανό. Η λεκάνη που εξετάζουμε, αποτελεί υπολεκάνη 4^{ης} τάξης και αποστραγγίζει τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα ενός κλάδου ίδιας τάξης, τροφοδοτώντας έναν κλάδο πέμπτης τάξης.

Συνεχίζοντας, επιτελείται η διαδικασία ταξινόμησης των κλάδων και η αρίθμηση κατά Strahler. Η εκκίνηση εφαρμόζεται πάντοτε εξ' αριστερών, εντοπίζοντας τους «εξωτερικούς» κλάδους, δηλ. εκείνους οι οποίοι δεν τροφοδοτούνται από άλλους. Συνεπώς, «προσεγγίζονται» οι υδροκρίτες χαράσσοντας όλους τους κλάδους 1^{ης} τάξης. Έπειτα, εξετάζεται ποιοι κλάδοι που προηγουμένως χαράχθηκαν, συμβάλλουν σε έναν τρίτο. Ταξινομούνται οι τελευταίοι σε 2^{ης} τάξης, και άγονται, έως ότου παρατηρήσουμε ότι διακλαδίζονται με άλλους κλάδους. Αν διακλαδίζονται με κλάδους 1^{ης} τάξης, παραμένουν ως έχουν, ενώ εάν διακλαδίζονται με κλάδους επίσης 2^{ης} τάξης, αποδίδουν κλάδους 3^{ης} τάξης. Τέλος, εάν διακλαδίζονται με κλάδους οι οποίοι δεν έχουν προηγουμένως προσδιοριστεί και ταξινομηθεί, τότε διακόπτουμε τη χάραξή των πρώτων τους, έως ότου οι δεύτεροι προσδιοριστούν. Ολοκληρώνοντας τη διαδικασία, έχει κατηγοριοποιηθεί το υδρογραφικό δίκτυο μιας λεκάνης 4^{ης} τάξης. Επιπροσθέτως, αριθμούμε τους κλάδους κάθε τάξης, από τα αριστερά προς δεξιά, αποδίδοντας χαρακτηριστική κωδικοποίηση για κάθε

έναν κλάδο του υδρογραφικού δικτύου. (Π.χ. ο κλάδος Π 15, ανήκει στους κλάδους της οικογένειας της 2^{ης} τάξης και είναι ο 15^{ος} ξεκινώντας την αρίθμηση των κλάδων 2^{ης} τάξης του υδρογραφικού δικτύου από αριστερά).

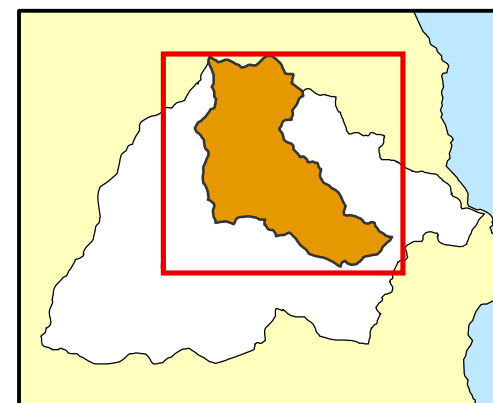
Εφόσον οριοθετήθηκε η λεκάνη και ταξινομήθηκαν οι κλάδοι, καλούμαστε να αποτυπώσουμε τους υδροκρίτες και τις επιμέρους λεκάνες ρευμάτων μικρότερης τάξης. Για να επιτευχθεί αυτό, ακολουθούνται ανάλογες διαδικασίες με αυτήν του καθορισμού του υδροκρίτη της κεντρικής κοίτης. Για πρακτικούς λόγους, πρώτα καθορίζονται οι λεκάνες 3^{ης} τάξης, ύστερα τις 2^{ης} και τέλος τις 1^{ης}. Αν και η περιγραφή της διαδικασίας οριοθέτησης των λεκανών απορροής περατώνεται σε λίγες γραμμές, στην πραγματικότητα αποτελεί μια χρονοβόρα διαδικασία η οποία απαιτεί έντονη προσπάθεια.. Παρακάτω, παρατίθεται χάρτης των λεκανών απορροής ταξινομημένων και αριθμημένων κατά Strahler, σύμφωνα με τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου που αποστραγγίζουν (Χάρτης 4).

4

ΧΑΡΤΗΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- Λεκάνη πρώτης τάξης
- Λεκάνη δεύτερης τάξης
- Λεκάνη τρίτης τάξης
- Λεκάνη τέταρτης τάξης



0 500 1.000 2.000
Μέτρα

4.2.1.2. Καθορισμός μορφομετρικών παραμέτρων

Όπως προαναφέρθηκε, επιλέξαμε να επεκταθούμε στη περαιτέρω ανάλυση ορισμένων μορφομετρικών παραμέτρων. Συγκεκριμένα, η ανάλυση αυτή σχετίζεται με την μέτρηση – των μετρούμενων – και τον υπολογισμό – των παραγόμενων. Εφόσον προσδιοριστούν οι άμεσα μετρούμενες παράμετροι, υπάρχουν οι προϋποθέσεις να εκτιμηθούν και οι υπολογιζόμενες παράμετροι μέσα από μαθηματικές/ αριθμητικές πράξεις. Έτσι, η εκτίμηση των έμμεσα υπολογιζόμενων παραμέτρων συνίσταται στην μέτρηση ορισμένων (μετρούμενων) παραμέτρων. Τέτοιες είναι: το πλήθος των κλάδων, το μήκος κλάδου, το εμβαδόν λεκάνης απορροής, το συνολικό μήκος ισοϋψών καμπυλών, η περίμετρος λεκάνης απορροής. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι επιλεγμένες μετρούμενες και υπολογιζόμενες μορφομετρικές παράμετροι. Αρκεί λοιπόν να πάρουμε μετρήσεις περί αυτών των παραμέτρων και ύστερα μπορούμε να υπολογίσουμε τις ζητούμενες παραμέτρους. Επομένως το κύριο πρόβλημα σχετίζεται με τη μέθοδο μέτρησης μηκών και επιφανειών.

Μετρούμενες Παράμετροι		
Μορφομετρικές Παράμετροι που αφορούν το υδρογραφικό δίκτυο		
Παράμετρος	Συμβολισμός	Μονάδες Μέτρησης
Τάξη Κλάδου	(u)	
Αριθμός κλάδων τάξης	(Nu)	-
Μήκος κλάδου	(Lu)	(km)
Μορφομετρικές Παράμετροι που αφορούν τις λεκάνες απορροής		
Παράμετρος	Συμβολισμός	Μονάδες Μέτρησης
Εμβαδόν Λεκάνης Απορροής	(Au)	(km ²)
Περίμετρος Λεκάνης Απορροής	(Pu)	(km)
Συνολικό μήκος ισοϋψών καμπυλών	(Lcu)	(km)
Υπολογιζόμενες Παράμετροι		
Παράμετρος	Συμβολισμός και	Μονάδες Μέτρησης

	Μαθηματική Έκφραση	
Υδρογραφική Συχνότητα	(Fu), $Fu = Nu / Au$	(km^{-2})
Υδρογραφική Πυκνότητα	(Du), $Du = Lu / Au$	(km^{-1})
Κλίση Κλιτύων	(Su), $Su = (LcuCl) / Au$	(%)
Κυκλικότητα	(Cu), $Cu = 4\pi Au / Pu^2$	-

Πίνακας 1: Επιλεγμένες Μορφομετρικές Παράμετροι, μετρούμενες και υπολογιζόμενες

4.2.1.3 Μετρήσεις (Καθαρών) Αριθμών Μηκών και Εμβαδών (θεωρητικά)

Η πλέον απλή περίπτωση μέτρησης είναι αυτή του πλήθους των ποτάμιων κλάδων μιας τάξης. Βεβαίως, η ευχέρεια καταμέτρησής τους εξαρτάται από την πυκνότητα του δικτύου. Από την άλλη, ο πλέον συνηθισμένος τρόπος μέτρησης μηκών επί χαρτών έγκειται στη χρήση μηκομέτρου (ροδάκι). Καθώς σύρουμε το κυκλικό στέλεχος του οργάνου κατά μήκος μιας γραμμικής οντότητας (π.χ. σε έναν ποτάμιο κλάδο) σε ένα χάρτη, μας αποδίδεται, σε κατάλληλα βαθμονομημένη κλίμακα – επιλέγοντας την κλίμακα στην οποία εργαζόμαστε – το πραγματικό μήκος της οντότητας.

Όσον αφορά την ανεύρεση εμβαδών, η μέθοδος επίθεσης κανναβικού πλέγματος, γνωστών διαστάσεων ψηφίδας, επί της ζητούμενης επιφάνειας αποτελεί μία εκ των δύο χρησιμοποιούμενων διαδικασιών. Καθώς λοιπόν αποθέτουμε ένα διαφανές μιλιμετρέ χαρτί επί της εν προκειμένω εξεταζόμενης λεκάνης απορροής, καταμετρούμε τον αριθμό των τετραγωνικών κελιών τα οποία κείνται εξ' ολοκλήρου εντός της επιφάνειας της λεκάνης. Επιπροσθέτως, μετρούμε και εκείνα τα οποία βρίσκονται κατά ένα ποσοστό, προβαίνοντας ταυτόχρονα σε μια εκτίμηση αυτού. Γνωρίζοντας την διάσταση του κελιού και την κλίμακα (η οποία ταυτίζεται με αυτήν του χάρτη), υπολογίζουμε (προσεγγιστικά) το εμβαδόν της λεκάνης. Εναλλακτικά, μπορεί κανείς να μεταχειριστεί ένα όργανο που ονομάζεται εμβαδόμετρο και, προφανώς, προορίζεται για την εκτίμηση εμβαδών επί χαρτών. Καθώς λοιπόν διατρέχουμε την καμπύλη του υδροκρίτη, και επιστρέφουμε ακριβώς στη θέση εκ της οποίας ξεκινήσαμε τη μέτρηση, το όργανο, σε ένα ηλεκτρονικό καντράν, μας αποδίδει τις πραγματικές τιμές των μετρήσεων (ύστερα από κατάλληλη ρύθμιση της κλίμακας). Σε αυτή την εργασία θα ακολουθήσουμε τον δεύτερο τρόπο εργασίας (με ψηφιακό εμβαδόμετρο), καθώς ο πρώτος θεωρείται απαρχαιωμένος.

4.2.1.3 Μεθοδολογία μετρήσεων στην λεκάνη απορροής του Λυκορρέματος και οργάνωσης των αποτελεσμάτων

Όσον αφορά τις μετρήσεις που διεξάχθηκαν σε μετρούμενες μορφομετρικές παραμέτρους της λεκάνης απορροής του Λυκορρέματος, έχουμε να σχολιάσουμε τα εξής:

- Μέτρηση αριθμού των κλάδων: Η περίπτωση της μέτρησης του πλήθους των κλάδων που αντιστοιχούν σε κάθε κλάση λεκανών αποτελεί την πλέον απλή περίπτωση μετρήσεων. Εκτός λοιπόν από τις λεκάνες 1^{ης} τάξης, οι οποίες αποστραγγίζουν πάντοτε τα κατακρημνίσματα μέσω ενός κλάδου (1^{ης} τάξης), και τη λεκάνη 4^{ης} η οποία αποστραγγίζεται διαμέσου όλων των υφιστάμενων κλάδων, στις λοιπές δύο περιπτώσεις «απομονώσαμε» κάθε μία λεκάνη και καταμετρήσαμε το συνολικό πλήθος των ίδιας και διαφορετικής τάξης κλάδων.
- Μέτρηση μήκους ποτάμιων κλάδων: Η μέτρηση των διαφόρων κλάδων του υδρογραφικού δικτύου του Λυκορρέματος αποτέλεσε μια από τις σχετικά απλές περιπτώσεις μετρήσεων με το μηκόμετρο, λόγω της μικρής έκτασής του (σε σχέση με τις ισοϋψείς) και της μικρής καμπυλότητας τους (εν συγκρίσει με τις περιμέτρους των λεκανών). Παρ' όλα αυτά, συντελέστηκε με αρκετή φυσική κόπωση. Συγκεκριμένα, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε εδώ – όπως άλλωστε και στις λοιπές μετρήσεις – ούτως ώστε το κυκλικό στέλεχος του οργάνου (ροδάκι) να εφάπτεται κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο καθώς διατρέχει τον εγγεγραμμένο τμήμα του δικτύου. Επιπροσθέτως, φροντίσαμε (η διάταξη του οργάνου) να κείται κάθετα στην επιφάνεια εργασίας, τουλάχιστον κατά την έναρξη και το πέρας μέτρησης ενός κλάδου (προκειμένου να μην παραλείπονται τμήματά του, αλλά και να μην καταμετρώνται ανύπαρκτα). Ακόμη, ειδικά σε κλάδους μεγάλου μήκους, επιτελέστηκαν περισσότερες από μια μετρήσεις, εξάγοντας τον αριθμητικό μέσο (μέση τιμή) των μετρήσεων. Τέλος, τα αποτελέσματα καταχωρήθηκαν σε αρχείο Excel, ανάλογα με την τάξη και τον αριθμό του κλάδου προκειμένου να «υποστούν» περαιτέρω επεξεργασία.
- Μέτρηση μήκους περιμέτρου υδρολογικών λεκανών: Στις οριοθετημένες πλέον λεκάνες απορροής, διεξάχθηκαν μετρήσεις περιμέτρων με ανάλογη σπουδή. Μάλιστα, ξεκινούσαμε πάντοτε από το στόμιο της εκάστοτε λεκάνης (κατώτερο σημείο της λεκάνης όπου εκρέει εξ' αυτής το σχετικό υδατόρεμα), και καταλήγουμε σε αυτό προκειμένου να έχουμε ορόσημο υπεράνω αμφιβολίας, και να μην προκύψουν σφάλματα εξ' αιτίας της αδυναμίας εντοπισμού του σημείου έναρξης. Η δυσκολία του να διατρέξουμε τις υφιστάμενες λεκάνες κατά

περίπτωση με την πολυπλοκότητα της μορφής των λεκανών. Όπως ήταν αναμενόμενο, για τους υπολογισμούς στις λεκάνες 1^{ης} τάξης παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη καταπόνηση, καθώς το εμφανώς μικρότερο εμβαδόν τους (ως σύνολο) δε συνοδεύεται προφανώς και από μικρότερη περίμετρο. Επιπροσθέτως, απαιτούνταν συνεχείς και απότομες αλλαγές στην κατεύθυνση κίνησης του μηκομέτρου, γεγονός που αξιώνει «λεπτών» χειρισμών και συνεπώς δυσχεραίνει σημαντικά τη διαδικασία, ιδιαιτέρως αν επιθυμούμε αυτή να αποδώσει ορθά αποτελέσματα. Σε τελική φάση, οι τιμές των μηκών των περιμέτρων όλων των λεκανών καταγράφηκαν σε κατάλληλο αρχείο.

- Μέτρηση μήκους ισοϋψών γραμμών: Το πλήθος και η πυκνότητα των ισοϋψών εντός της λεκάνης του Λυκορρέματος αποτέλεσαν περιοριστικό παράγοντα, και παρεμπόδισαν την σύντομη και αβίαστη μέτρηση των μηκών τους. Γενικά, η μέτρηση των ισοϋψών μιας τυχαίας περιοχής σε έναν τοπογραφικό χάρτη είναι ένα επίπονο πόνημα. Αν αναλογιστούμε το γεγονός της αυξημένης πυκνότητας των ισοϋψών εντός της λεκάνης απορροής του Λυκορρέματος, εξ' αιτίας της ιδιάζουσας ανάπτυξης του υδρογραφικού δικτύου του μεγάλου ρεύματος Ραφήνας, * τότε αντιλαμβανόμαστε πόσο ακόμη πιο χρονοβόρα και επίπονη καθίσταται η διαδικασία. Σημειωτέον ότι αυτή η διαδικασία έλαβε χώρα, εκτός από την λεκάνη απορροής της κεντρικής κοίτης (4^{ης} τάξης) για κάθε μία λεκάνη 1^{ης}, 2^{ης}, και 3^{ης}. Και σε αυτές τις μετρήσεις ακολουθήθηκε η ίδια σοβαρότητα και προσοχή στον τρόπο χειρισμού του μηκομέτρου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων εισήχθησαν επίσης σε αρχείο Excel, σε πλήρη αντιστοιχία με τη συγκεκριμένη λεκάνη εντός της οποίας μετρήθηκαν.
- Μέτρηση εμβαδού υδρολογικών λεκανών: Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε, για την ανεύρεση των εμβαδών της υδρολογικής λεκάνης του Λυκορρέματος και των επιμέρους λεκανών του είναι το ψηφιακό εμβαδόμετρο. Το τελευταίο απαρτίζεται από τα εξής συστατικά μέρη: από ένα κεντρικό στέλεχος επί του οποίου υπάρχει το καντράν όπου εμφανίζονται τα αποτελέσματα των εμβαδομετρήσεων, τον βραχίονα «ιχνηλάτησης», τον φακό ιχνηλάτησης, την πολική πλακέτα, και τον πολικό βραχίονα. Η διαδικασία που ακολουθείται κατά τη διαδικασία διεξαγωγής μιας εμβαδομέτρησης έχει ως εξής: Σταθεροποιείται αρχικά η πολική πλακέτα και ύστερα τοποθετείται ο πολικός βραχίονας που συνδέει το πρώτο με

* Παρατηρείται ασυμμετρία και ανομοιόμορφη ανάπτυξη του δικτύου με εξάπλωση βόρεια της κεντρικής κοίτης (του Μεγάλου Ρέματος) όπου κείται και ο ορεινός όγκος της Πεντέλης

το κεντρικό στέλεχος. Έπειτα, τοποθετείται ο βραχίονας ιχνηλάτησης στου οποίου το «ελεύθερο» άκρο βρίσκεται ο φακός ιχνηλάτησης. Θέτουμε ένα σημείο αναφοράς (αρχή) και διατρέχουμε το όριο της περιοχής που θέλουμε να μετρήσουμε προσπαθώντας ο μικρός δακτύλιος (κύκλος) «στόχευσης» να παρεκκλίνει όσο το δυνατό λιγότερο από αυτό το όριο, έως ότου επιστρέψουμε ακριβώς «πάνω» στο σημείο αναφοράς (πέρας). Σε αυτή την «ιχνηλάτηση» σύρουμε τον φακό ιχνηλάτησης μετακινώντας ταυτόχρονα το σύστημα βραχίονας ιχνηλάτησης – κεντρικό στέλεχος, προσέχοντας να διατηρείται ακίνητη η πολική πλακέτα. Πρακτικά, για να αποφευχθούν συστηματικά σφάλματα του οργάνου, αρχικά «καλιμπράρεται – βαθμονομείται» (επιτελείται δηλ. προτυποποίηση μετρήσεων μετρώντας ήδη γνωστά μεγέθη), ενώ για να ελαχιστοποιηθούν τα ανθρώπινα σφάλματα επιτελούνται δύο ή και τρεις μετρήσεις για κάθε μια λεκάνη, λαμβάνοντας ως τελικό αποτέλεσμα την μέση τιμή των αρχικών μετρήσεων. Να σημειωθεί ότι χρήζει ιδιαίτερης προσοχής η ταύτιση του σημείου έναρξης και του σημείου παύσης των μετρήσεων, καθώς η απόκλιση μεταξύ των δύο προκαλεί σφάλματα. Τέλος, όσον αφορά στην κόπωση, η τελευταία είναι ανάλογη της μέτρησης των περιμέτρων, με τη διαφορά ότι η κίνηση του βραχίονα συντελείται με συγκριτικά μεγαλύτερη άνεση από ότι η κίνηση του κύλινδρου (roller) του μηκομέτρου. Η δε απόκλιση του δακτυλίου μπορεί να ελαχιστοποιηθεί αν δοθεί προσοχή, καθώς το όργανο είναι πιο «εκλεπτυσμένο» και ακριβές από το μηκόμετρο, τόσο στην μέθοδο ιχνηλάτησης ενός περιγράμματος, όσο και στον αριθμό των ψηφίων που αυτό αποδίδει (παρουσίαση σε ψηφιακό καντράν). Και εδώ, τα τελικά αποτελέσματα καταγράφηκαν σε αρχείο Excel.

4.2.1.4 Υπολογισμός των τιμών των μορφομετρικών παραμέτρων και η φυσικογεωγραφική σημασία τους

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, οι μετρήσεις εφαρμόστηκαν σε κάθε μια αποστραγγιστική λεκάνη ξεχωριστά, προκειμένου να ευρεθούν, σύμφωνα με τους μαθηματικούς τύπους του πίνακα 2 οι ζητούμενοι δείκτες. Ειδικότερα, για την εκτίμηση της υδρογραφικής συχνότητας (F), χρειαστήκαμε τον συνολικό αριθμό κλάδων κάθε λεκάνης απορροής, ενώ για τον υπολογισμό της υδρογραφικής πυκνότητας (D), το συνολικό μήκος όλων των κλάδων που αποστραγγίζει κάθε μια τέτοια λεκάνη. Ο λόγος

των αποτελέσματα αυτών των μετρούμενων μεγεθών, προς το εμβαδόν κάθε λεκάνης, μας αποδίδει τις προαναφερθείσες παραμέτρους. Όπως γνωρίζουμε, οι παράμετροι αυτοί συντελούν στην αναγνώριση της υδρογραφικής «υφής» μιας λεκάνης, δηλαδή στο πόσο ένα υδρογραφικό δίκτυο είναι εξαπλωμένο εντός της υδρολογικής λεκάνης που το «φιλοξενεί». Συνοπτικά, οι χαμηλές τιμές φανερώνουν τραχειά υδρογραφική υφή και γλίσχρη αποστράγγισή. Αντίθετα, οι υψηλές τιμές αυτών των παραμέτρων χαρακτηρίζουν λεκάνες με πιο «εκλεπτυσμένη» υδρογραφική υφή (Παυλόπουλος, 1997).

Ο υπολογισμός της κλίσης των κλιτύων (S) αναφέρεται στην μέτρηση του μήκους των ισοϋψών (ισοδιάστασης 20 μ.) εντός κάθε μιας υδρολογικής λεκάνης. Συγκεκριμένα, η τιμή της κλίσης των κλιτύων προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του μήκους των ισοϋψών οι οποίες οριοθετούνται από την υδροκριτική γραμμή, με την αυτή ισοδιάσταση, και με μετέπειτα διαίρεση με το αντίστοιχο εμβαδόν. Οι τιμές που λαμβάνουμε, μας προσδίδουν μια εικόνα της τραχύτητας του ανάγλυφου εντός μιας λεκάνης και φανερώνουν δυνητικά τον βαθμό της ικανότητας διάβρωσης των υφιστάμενων κλάδων. Έτσι, οι χαμηλές τιμές αντικατοπτρίζουν κοιλάδες ήπιας μορφολογίας, ενώ οι υψηλές τιμές αποτελούν έκφραση για απότομο και τραχύ ανάγλυφο.

Τέλος, η παράμετρος της κυκλικότητας (C), η οποία εκφράζει τη σχέση μεταξύ της επιφάνειας που καταλαμβάνει μια λεκάνη και του μήκους της περιμέτρου αυτής, μας αποδίδει χρήσιμες πληροφορίες για το σχήμα και τη μορφή της. Υπολογίζεται δε ως ο λόγος του γινομένου του εμβαδού επί 4π (όπου $\pi=3,14$), προς την περίμετρο (P) «υψωμένη» στο τετράγωνο. Σημειωτέον δε ότι το εύρος των τιμών του δείκτη ανήκει στο διάστημα $(0-1,00]$, (δηλ. οι τιμές κυμαίνονται από 0,00 – 1,00) με την τιμή 1,00 να αντιστοιχεί σε περιπτώσεις λεκάνης κυκλικού σχήματος ενώ όσο η τιμή μειώνεται και οριακά θα προσεγγίζει το 0, τόσο ο σχηματισμός της λεκάνης γίνεται πιο επιμήκης. Ενδιάμεσο «σταθμό» αποτελεί η τιμή 0,79 την οποία λαμβάνουμε σε αυτήν την παράμετρο όταν το σχήμα της λεκάνης είναι τετραγωνικό (Καρύμπαλης, 1996).

Στον πίνακα του Παραρτήματος I παρουσιάζονται συγκεντρωμένες όλες οι επιλεγμένες παράμετροι – μετρούμενες και υπολογιζόμενες – του Λυκορρέματος. Όσον αφορά τις υπολογιζόμενες, από τη στιγμή που καταχωρήθηκαν οι τιμές των προηγούμενων μετρημένων μεγεθών σε περιβάλλον Excel, οι υπολογισμοί υλοποιήθηκαν μαζικά διαμέσου των δυνατοτήτων του λογισμικού.

Το εγχείρημα χαρτογραφικής απεικόνισής των οριοθετημένων λεκανών, του υδρογραφικού δικτύου και των μορφομετρικών παραμέτρων ταξινομημένων σε ανάλογους θεματικούς χάρτες κρίνεται ιδιαίτερα επίπονο και μάλλον άσκοπο, καθώς οι

νέες μέθοδοι που κάνουν χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, έχουν μεταβάλλει και διευκολύνει άρδην αυτές τις διαδικασίες. Ωστόσο, επιγραμματικά αναφέρεται ότι για να επιτευχθεί μια τέτοια διαδικασία χειρωνακτικά, θα έπρεπε να τοποθετηθεί ημιδιαφανές χαρτί και να χαραχθεί «με το χέρι» τόσο το υδρογραφικό δίκτυο, όσο και οι επιμέρους υδροκρίτες. Ύστερα, με μια επίσης χειρωνακτική στατιστική μεθοδολογία θα καθοριζόταν το πλήθος και εύρος των κλάσεων προκειμένου να ομαδοποιηθούν οι τιμές των μορφομετρικών παραμέτρων. Τέλος, με την επιλογή διαφορετικής χρωματικής διαβάθμισης ή με την πιο «προσιτή» μεταβολή του γραμμικού προτύπου, θα αποδιδόταν διαφορετική χαρτογραφική υπόσταση σε κάθε κατηγορία.

4.2.2 Ημιαυτόματη Μέθοδος

Με τον όρο ημιαυτόματες μέθοδοι εννοούμε, σε αυτή την εργασία, την αξιοποίηση τοπογραφικών χαρτών μέσα σε ένα GIS, προκειμένου να διεξάγουμε υδρολογική και ποσοτική γεωμορφολογική ανάλυση. Οι προκαταρκτικές διαδικασίες επαφίονται αρχικά στη σάρωση του επιλεγμένου τοπογραφικού χάρτη («Κηφισιά») υπό κατάλληλες παραμέτρους (300-400 dpi* βάθος χρώματος κατ' ελάχιστον), στην αποθήκευση της εικόνας σε συμβατό αρχείο, και στην μετέπειτα εισαγωγή της στο λογισμικό ArcMap.

4.2.2.1 Δημιουργία επιπέδων πληροφορίας

Δευτερευόντως, δημιουργούμε στο ArcCatalog** τις δομές δεδομένων (αρχεία) που πρόκειται να φιλοξενήσουν τα γνωρίσματα, δηλ τόσο τα χωρικά, όσο και τα περιγραφικά χαρακτηριστικά των γεωγραφικών οντοτήτων που μας αφορούν. Κάθε ένα τέτοιο αρχείο αναπαριστά μια οντότητα ή μια ομάδα (γεωγραφικών) οντοτήτων.*** Έτσι δημιουργώντας διανυσματικού τύπου αρχεία (shapefiles), καθίσταται εφικτή η οργάνωση της πληροφορίας του υδρογραφικού δικτύου, των ισοϋψών καμπύλων και των υδροκριτών-υδρολογικών λεκανών σε διάφορα (θεματικά) επίπεδα πληροφορίας. Επειδή δε στα διανυσματικά μοντέλα οι διάφορες οντότητες αντιπροσωπεύονται από γεωμετρικά σχήματα, αυτό εκ των πραγμάτων συνεπάγεται ότι αυτές θα απεικονίζονται από σημεία, γραμμές ή πολύγωνα

* dots per inch

** Τόσο το ArcMap, όσο και το ArcCatalog, αποτελούν δύο από τα υποπρογράμματα του ArcGIS.

*** Ως (γεωγραφικές) οντότητες νοούνται οι μονάδες ή τα αντικείμενα με φυσική ή εννοιολογική υπόσταση (Στεφανάκης, 2002).

(Κουτσόπουλος, 2002). Παρακάτω (Πιν. 1) παρατίθεται ο τρόπος που οργανώνεται η εκμαιευμένη από έναν χάρτη πληροφορία στους τρεις τύπους βασικών γραφικών στοιχείων* (σημεία, γραμμές ή πολύγωνα) και ο προσδιορισμός των γνωρισμάτων τους (attributes).**

Οντότητα	Βασικό γραφικό στοιχείο/ Μορφή	Attributes
Κλάδοι Υδρογραφικού δικτύου	Γραμμή	• Κωδικός (ID) • Τάξη • Μήκος
Ισοϋψείς καμπύλες	Γραμμή	• Κωδικός (ID) • Υψόμετρο • Μήκος
Υδρολογικές λεκάνες	Πολύγωνο	• Κωδικός (ID) • Περίμετρος • Εμβαδόν • Υδρογραφική Συχνότητα • Υδρογραφική Πυκνότητα • Κλίσεις κλιτύων • Κυκλικότητα
Κορυφές/ υψομετρικά σημεία	Σημείο	• Κωδικός (ID) • Υψόμετρο

Πίνακας 2: Προσδιορισμός γνωρισμάτων στις γεωγραφικές οντότητες.

Σημείωση: Η τρίτη στήλη του πίνακα απαρτίζεται από τα γνωρίσματα των οντοτήτων και δη των διανυσματικών θεματικών επιπέδων. Από αυτά, το ID αναφέρεται στην διάσταση της ταυτότητας, το μήκος, η περίμετρος και το εμβαδόν στην χωρική διάσταση, ενώ η τάξη, το υψόμετρο, η υδρογραφική συχνότητα, η υδρογραφική πυκνότητα, οι κλίσεις των κλιτύων και η κυκλικότητα στην θεματική διάσταση.

* Στην οργάνωση της χωρικής πληροφορίας το στοιχείο αναφοράς καλείται βασικό γραφικό στοιχείο (basic graphic element). Υπάρχουν τρεις τύποι τέτοιων: το σημείο, η γραμμή ή τόξο και το πολύγωνο επιφάνεια (Χαλκιάς 2003).

** Τα γνωρίσματα των γεωγραφικών οντοτήτων, οι οποίες στην περίπτωση που εξετάζουμε ταυτίζονται με τα διανυσματικά αρχεία, σχετίζονται με την ταυτοποίησή και τη θεματική τους διάσταση. Ορισμένα από αυτά εξάγονται με βάση τη χωρική τους διάσταση.

4.2.2.2 Ένταξη σε σύστημα συντεταγμένων

Προκειμένου όμως να διαμορφωθούν κατάλληλα οι διάφορες οντότητες μέσω της διαδικασίας της ψηφιοποίησης και να οργανωθούν σε θεματικά επίπεδα, θα πρέπει τόσο η εικόνα-υπόβαθρο του τοπογραφικού χάρτη, όσο και τα shapefiles να «τεθούν» σε κοινό σύστημα αναφοράς (συντεταγμένων). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εντός ενός GIS με την τεχνική της αγκίστρωσης ή γεωαναφοράς της εικόνας (georeferencing) σε κάποιο (γεωδαιτικό) σύστημα αναφοράς, ούτως ώστε να ληφθούν τιμές πραγματικών συντεταγμένων (από συντεταγμένες οθόνης σε πραγματικές συντεταγμένες). Εφόσον λοιπόν η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην ελληνική επικράτεια, μπορεί να αξιοποιηθεί ανεπιφύλακτα το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (ΕΓΣΑ 87'). Το τελευταίο είναι συμβατό με τις σύγχρονες τεχνολογικές απαιτήσεις και αποτελεί το επίσημο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς της χώρας που διαχειρίζεται από τον Οργανισμό Κτηματολογίου και Χαρτογραφίσεων Ελλάδας (ΟΚΧΕ) (Στεφανάκης, 2003).

4.2.2.3 Ψηφιοποίηση και ανάθεση περιγραφικών ιδιοτήτων

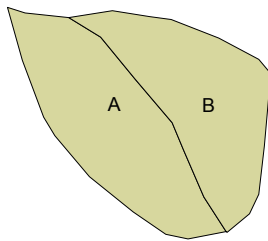
Επόμενο βήμα αποτελεί η ορθή και όσο δυνατό ακριβέστερη* ψηφιοποίηση των διαφόρων οντοτήτων που εντοπίζουμε στον τοπογραφικό χάρτη. Η διαδικασία αυτή επιτελείται με το χέρι, με την μετακίνηση δηλ του ποντικιού (mouse) και την αποτύπωση των διακεκριμένων σημείων – όταν πρόκειται για σημειακές οντότητες – ή μιας διάταξης σημείων – όταν πρόκειται για γραμμικές ή πολυγωνικές οντότητες. Η διαδικασία διευκολύνεται από κάποια εργαλεία που μας παρέχονται στο λογισμικό GIS, όπως η μεγέθυνση και η δυνατότητα διαμόρφωσης ακριβών τοπολογικών σχέσεων τέτοιων όπως η γειτονία, η συνδετικότητα και η περιεκτικότητα (Σχ. 4.1). Επιπροσθέτως, σε αυτό το στάδιο καταχωρούνται στον πίνακα περιγραφών (attribute table), έναν πίνακα (επίπεδο αρχείων εγγραφών) που βασίζεται στο σχεσιακό μοντέλο βάσεων δεδομένων και που διαθέτει κάθε διανυσματικό αρχείο, τα γνωρίσματα της ταυτότητας και της θεματικής διάστασης.

Ένας τέτοιος πίνακας διακρίνεται σε πολύ γενικές γραμμές από εγγραφές και πεδία. Οι εγγραφές (πλειάδες) αποτελούν επί της ουσίας τις γραμμές αυτού του πίνακα και δομούνται από περιγραφές οι οποίες αντιστοιχούν στις στήλες (πεδία) του πίνακα. Κάθε

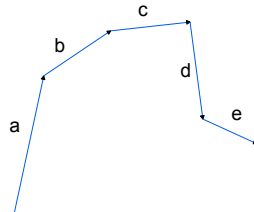
* ελάχιστη δυνατή απόκλιση των ψηφιοποιημένων οντοτήτων από τις υφιστάμενες στον τοπογραφικό χάρτη

πεδίο (field) λοιπόν, αποτελεί μια στήλη του πίνακα, η οποία φιλοξενεί τιμές για ένα συγκεκριμένο γνώρισμα κάθε εγγραφής (πλειάδας), ενώ η επικεφαλίδα κάθε μιας τέτοιας στήλης καλείται γνώρισμα (attribute) (Σχ. 4.2). Έτσι, κάθε φορά που προκύπτει η ανάγκη να καταχωρήσουμε κάποιο γνώρισμα σε μια οντότητα ή σε μια οικογένεια/ κλάση οντοτήτων, αρκεί να προσθέσουμε ένα νέο πεδίο και να εισάγουμε τις επιμέρους τιμές του γνωρίσματος για κάθε εγγραφή.

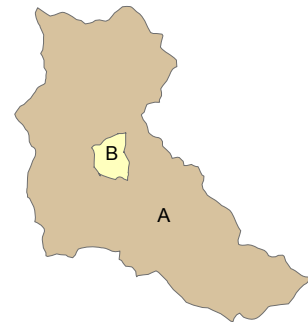
Τοπολογικές Σχέσεις



Γειτονία
(A συνορεύει με B)



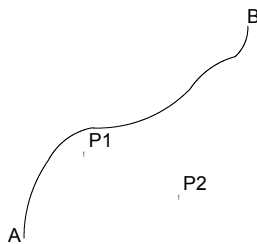
Σύνδεση
(α συνδέεται με β,... με δ)



Περιεκτικότητα
(B περιέχεται στο A)

Σχέση Εγγύτητας

Το σημείο P2 βρίσκεται *μακριά* από τη γραμμή AB σε σχέση με το σημείο P1 το οποίο βρίσκεται *κοντά*.



Σχήμα 4. 1: Κατηγορίες χωρικών συσχετίσεων
Πηγή: Χαλκιάς, 2003. (Τροποποίηση)

Πρωτεύον κλειδί

Γνωρίσματα

Πεδίο

Πλειάδα

πληθικότητα

Τμή Γνωρίσματος

βαθμός

FID	NAME	Shape	AREA	PERIMETER	POP91
0	N. ΔΡΑΜΑΣ	Polygon	3452538000	346686,4	96554
1	N. ΠΕΛΛΑΣ	Polygon	2471114000	324583,3	138761
2	N. ΓΡΕΒΕΝΩΝ	Polygon	2276971000	299977,7	36797
3	N. ΛΑΡΙΣΑΣ	Polygon	5373192000	461972,6	270612
4	N. ΤΡΙΚΑΛΩΝ	Polygon	3364122000	353345	138946
5	N. ΦΘΙΩΤΙΔΑΣ	Polygon	4424314000	608596,8	171274
6	N. ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ	Polygon	1797303000	316945,7	24307
7	N. ΡΕΘΥΜΝΗΣ	Polygon	1488574000	216600,2	70095
8	N. ΖΑΚΥΝΘΟΥ	Polygon	406024550,9	141432,726	32557
9	N. ΧΙΟΥ	Polygon	899261545	289112,1	52184
10	N. ΧΑΛΚΙΔΙΚΗΣ	Polygon	3249114822	702574,09	93653
11	N. ΣΑΜΟΥ	Polygon	781462386	356183,35	42019
12	N. ΠΙΕΡΙΑΣ	Polygon	1521743617	267349,87	116763
13	N. ΜΕΣΣΗΝΙΑΣ	Polygon	2995265092	455254,24	166964
14	N. ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ	Polygon	2623615772,5	772914,218	198434
15	N. ΑΕΥΚΑΔΑΣ	Polygon	354287038,6	224771,099	21111

Σχήμα 4. 2: Χαρακτηριστικά ενός σχεσιακού πίνακα.
Πηγή: Χαλκιάς, 2003. (Τροποποίηση)

Η διαδικασία λοιπόν ξεκίνησε ψηφιοποιώντας αρχικά το υδρογραφικό δίκτυο του Λυκορρέματος, ενός ποτάμιου κλάδου 4^{ης} τάξης που υπάγεται στο ευρύτερο ποτάμιο σύστημα του Μεγάλου ρέματος Ραφήνας. Αφού προβήκαμε σε κατάλληλες μεγεθύνσεις που εξασφαλίζουν την απαιτούμενη ακρίβεια στην ψηφιοποίηση, σχεδιάσαμε κατ' αρχήν την κεντρική κοίτη του ρεύματος. Ύστερα, προβήκαμε στην ψηφιοποίηση των κλάδων 3^{ης} τάξης από αριστερά προς τα δεξιά – όπως απαιτεί η αρίθμηση κατά Strahler – και μάλιστα από τα ανάντη προς τα κατόντη της κοίτης τους, δίνοντας έμφαση στην τοπολογία εκεί όπου οι κλάδοι 3^{ης} τάξης συνενώνονταν με την κεντρική κοίτη. Ακολουθώντας την ίδια λογική χαράξαμε και τους κλάδους 2^{ης} και 1^{ης} τάξης. Παράλληλα με την ψηφιοποίηση, κάθε φορά που ολοκληρώνεται η αποτύπωση κάθε κλάδου-ρεύματος καταχωρούμε στον πίνακα περιγραφών (attribute table) την τάξη του κλάδου και τον αριθμό του (ταξινόμηση και αρίθμηση κατά Strahler). Με την ολοκλήρωση της ψηφιοποίησης λαμβάνουμε ένα

διανυσματικό θεματικό επίπεδο το οποίο εμπεριέχει όλους τους κλάδους, διακεκριμένους ως προς την τάξη μεγέθους, (π.χ. II 24 ή III 5), και μάλιστα με φορά από τα ανάντη προς τα κατόντη.

Το σύνολο των ισοϋψών καμπυλών, είναι το επόμενο θεματικό επίπεδο που ψηφιοποιήθηκε. Σε αντίθεση με το υδρογραφικό δίκτυο οι ισοϋψείς έχουν περισσότερο εννοιολογική υπόσταση παρά φυσική. Εδώ η ψηφιοποίηση έλαβε χώρα σε μια περιοχή ευρύτερη του υδρογραφικού δικτύου, καθώς αφ' ενός μεν δεν έχει καθοριστεί ακόμη η υδροκριτική γραμμή και δη η λεκάνη απορροής, αφ' ετέρου δε σε επόμενη φάση της εργασίας μας θα χρειαστεί η αποτύπωση του ανάγλυφου μέσω των ψηφιοποιημένων ισοϋψών ως εισροή για την διαδικασία παραγωγής DEM. Έτσι λοιπόν, κάθε φορά που πραγματοποιείται η ψηφιοποίηση μιας κλειστής ισοκαμπύλης (ή και ανοιχτής όταν επεκτείνεται πολύ μακριά από τα όρια της περιοχής μελέτης), αναθέτουμε την τιμή του υψομέτρου που αναπαρίσταται από αυτήν την ισοκαμπύλη. Βέβαια, η διαδικασία αναγνώρισης και ακριβούς αποτύπωσης όλων των ισοϋψών, κύριων και δευτερευόντων,* συνεπάγεται έντονη κόπωση και κατανάλωση μεγάλου χρόνου, της τάξης κάποιων ωρών. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ένα αρχείο ψηφιοποιημένων ισοϋψών, των οποίων τα υψόμετρα είναι καταχωρημένα ως περιγραφικά γνωρίσματα.

Μια εναλλακτική ενέργεια που μπορεί να επιτευχθεί προκειμένου να εξαιρεθεί η διαδικασία της ψηφιοποίησης, έγκειται στην άμεση απόδοση των ισοϋψών σε διανυσματική μορφή. Δεδομένου ότι τα ψηφιακά χαρτογραφικά υπόβαθρα είναι συμβατά με ψηφιδωτού τύπου δομές δεδομένων, υπάρχει η δυνατότητα μετατροπής των ψηφιδών από τις οποίες απαρτίζονται οι ισοϋψείς καμπύλες στον χάρτη, σε διανυσματικά αρχεία. Όμως, η μη διαθεσιμότητα κατάλληλου λογισμικού, και τα ενδεχόμενα σφάλματα από ανακύπτουν από εσφαλμένη μετατροπή ψηφιδωτών σε διανυσματικά αρχεία (raster to vector), αποτελούν αιτίες για την μη υιοθέτηση αυτής της τεχνικής.

Εκτός από τις ισοκαμπύλες του υψομέτρου, στους τοπογραφικούς χάρτες παρουσιάζονται ορισμένες κορυφές ή τριγωνομετρικά σημεία, με αντίστοιχους συμβολισμούς, ενώ αναγράφονται και τα υψόμετά τους. Αυτά τα σημεία είναι δυνατόν να ψηφιοποιηθούν ως σημειακές οντότητες και να τους προσδοθούν οι αντίστοιχες τιμές υψομέτρου.

Η οριοθέτηση των λεκανών απορροής υλοποιήθηκε στην τελική φάση της ψηφιοποίησης, καθότι το ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο, οι ισοϋψείς και τα

* Στους τοπογραφικούς χάρτες 1:50.000 της ΓΥΣ η ισοδιάσταση, δηλ η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κύριων ισοϋψών ισούται με 100 μ., ενώ μεταξύ δύο δευτερευόντων ισούται με 20 μ.

υψομετρικά σημεία αποτελούν δυνητικά οδηγούς για την μετέπειτα χάραξη των υδροκρίτων. Πρώτα χαράσσεται ο υδροκρίτης που αποστραγγίζει τη κεντρική κοίτη του Λυκορρέματος, παράγοντας ταυτόχρονα τη λεκάνη απορροής του. Επειδή, ως γνωστόν, οι λεκάνες απορροής που αποστραγγίζουν κλάδους μικρότερης τάξης (υπολεκάνες), αναπτύσσονται εντός της κύριας λεκάνης, θεωρείται δόκιμο να οργανωθούν οι λεκάνες σε τέσσερα διαφορετικά διανυσματικά θεματικά επίπεδα, όσες είναι και οι τάξεις των κλάδων οι οποίοι αποστραγγίζονται από αυτές. Έτσι, αφού σχεδιαστεί η ευρύτερη λεκάνη απορροής, ψηφιοποιούμε και τις λοιπές σύμφωνα με τον προαναφερόμενο τρόπο οργάνωσης. Κάθε φορά που ολοκληρώνεται η ψηφιοποίηση μιας λεκάνης μιας τάξης μεγέθους, καταχωρείται ταυτόχρονα και ο αριθμός της, όπως έχουν αριθμηθεί άλλωστε και οι αντίστοιχοι κλάδοι, οι εμπεριεχόμενοι σε αυτές (π.χ. I 7 ή III 2 κ.α.). Έτσι, τελικά λαμβάνουμε τέσσερις οικογένειες πολυγωνικών-επιφανειακών οντοτήτων.

4.2.2.4 Εκτίμηση μετρούμενων μεγεθών και ανάθεση γνωρισμάτων χωρικής διάστασης

Εφόσον μορφοποιηθούν και συγκροτηθούν κατάλληλα οι βασικές γεωγραφικές οντότητες που πρόκειται να αξιοποιηθούν, είμαστε σε θέση να προβούμε πλέον στην εκτίμηση άμεσα μετρούμενων μεγεθών. Αυτά τα μεγέθη αφορούν στη γεωμετρία των οντοτήτων και συγκεκριμένα στο μήκος, την περίμετρο και το εμβαδόν τους. Τέτοια γνωρίσματα εμπίπτουν στο φάσμα της χωρικής διάστασης των γεωγραφικών οντοτήτων, σε αντίθεση με τα προηγούμενα τα οποία υπάγονταν στη θεματική διάσταση ή την ταυτότητα. Συμβουλευόμενοι τους Πίνακες 1 και 2 γνωρίζουμε τι είδους μετρήσεις πρέπει να διεξάγουμε. Προκαταρκτικά αναφέρεται πως σε αυτή τη φάση θα γίνει συνοπτική αναφορά στα σαφή πλεονεκτήματα της μεθόδου σε σχέση με την χειροκίνητη.

Το υποπρόγραμμα ArcMap παρέχει τη δυνατότητα αυτοματοποιημένων μετρήσεων μηκών και εμβαδών. Μέσα από συγκεκριμένες εντολές που εκτελούνται στον πίνακα περιγραφών του επιλεγμένου θεματικού επιπέδου και με την βοήθεια της γλώσσας/ του κώδικα VBA, η επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία μέτρησης μηκών περιμέτρων και εμβαδών (μέσω οργάνων) που περιγράφηκε στην προηγούμενη μέθοδο «εκπίπτει» σε μια εξαιρετικά σύντομη και αβίαστη διαδικασία: Αρχικά προστίθενται στον πίνακα περιγραφών τα πεδία εκείνα που θα φιλοξενήσουν τις τιμές των μηκών και των εμβαδών. (μήκη κλάδων για το υδρογραφικό δίκτυο, και περίμετρος και έκταση των λεκανών απορροής). Έστερα, υπολογίζονται τα παραπάνω μεγέθη στο περιβάλλον του πίνακα

περιγραφών κάθε διανυσματικού θεματικού αρχείου, με κατάλληλη χρήση κάποιων scripts της Visual Basic γλώσσας, η οποία είναι συμβατή με το Arc Map, ως εξής:

Για τα μήκη:

Pre-Logic VBA Script Code

```
Dim dblLength as double  
Dim pCurve as ICurve  
Set pCurve = [shape]  
dblLength = pCurve.Length
```

Length=
dblLength

Για τις επιφάνειες:

Pre-Logic VBA Script Code

```
Dim dblArea as double  
Dim pArea as IArea  
Set pArea = [shape]  
dblArea = pArea.area
```

Area=
dblArea

Όπως θα παρουσιαστεί και παρακάτω, «κερδίζουμε» σε ακρίβεια, καθώς με αυτόν τον τρόπο, εφόσον οι υπολογισμοί γίνονται σε μονάδες του συστήματος, όπου παρέχεται δυνατότητα ακρίβειας πολλών δεκαδικών ψηφίων.

Αφού καταγραφεί ο αντίστοιχος κώδικας και ληφθούν οι αναγκαίες τιμές περί των μηκών κάθε κλάδου του υδρογραφικού δικτύου, των μηκών κάθε ισοϋψούς γραμμής,* των περιμέτρων και των εμβαδών για κάθε λεκάνη απορροής, μεταφέρονται άμεσα σε ένα αρχείο τύπου xls (Excel).

* Τα μήκη των ισοϋψών δεν καταχωρούνται ακόμα σε αρχείο Excel διότι κατά τον υπολογισμό της μορφομετρικής παραμέτρου στην οποία εμπλέκονται, ζητείται το συνολικό μήκος τους εντός της λεκάνης, κάτι που μέχρι τώρα δεν έχει υπολογιστεί.

4.2.2.5 Λειτουργίες επικάλυψης ενός GIS

Όπως είδαμε και στην παράγραφο 4.2.1.3, προκειμένου να εκτιμηθούν οι υπολογιζόμενοι δείκτες πρέπει να προβούμε σε συγκεκριμένες μετρήσεις οι οποίες λαμβάνουν χώρα εντός κάθε λεκάνης απορροής. Τέτοιες είναι: Η καταμέτρηση του πλήθους και του συνολικού μήκους των κλάδων, η μέτρηση του συνολικού μήκους των ισοϋψών εντός μιας λεκάνης απορροής, όπως και η μέτρηση της επιφάνειας και της περιμέτρου των λεκανών. Σε αντίθεση με τις χειρωνακτικές μεθόδους όπου οι μετρήσεις υλοποιούνται άμεσα και μία προς μία, εδώ η βελτιστοποίηση της οργάνωσης της πληροφορίας είναι μείζονος σπουδαιότητας, καθώς δυνητικά αποφέρει οφέλη στην εξοικονόμηση χρόνου και την ελαχιστοποίηση του κόπου. Προκειμένου λοιπόν να προχωρήσουμε στον υπολογισμό των επιλεγμένων δεικτών, αξιοποιώντας ταυτόχρονα τα πλεονεκτήματα που μας προσφέρει ένα GIS πρέπει να προβούμε σε ορισμένες διαχειριστικές διαδικασίες των επεξεργασμένων δεδομένων που έχουμε στη διάθεσή μας και ειδικότερα αυτών της επικάλυψης.

Γενικά, οι λειτουργίες επικάλυψης θεωρούνται οι θεμελιωδέστερες όλων καθ' ότι αναφέρονται στην κάλυψη του γεωγραφικού χώρου από διαφορετικά επίπεδα πληροφορίας (θεματικά επίπεδα). Ακόμη, επειδή η διαδικασία της επικάλυψης αποτελεί μια επέκταση της Boolean άλγεβρας,^{*} είναι δυνατό να επιτευχθεί ο συνδυασμός αυτών των επιπέδων ή/και ορισμένων χαρακτηριστικών των οντοτήτων τους κατά ποικίλους τρόπους. Λόγω αυτής της ιδιότητάς τους συνιστούν την πεμπτουσία ενός GIS (Κουτσόπουλος, 2002).

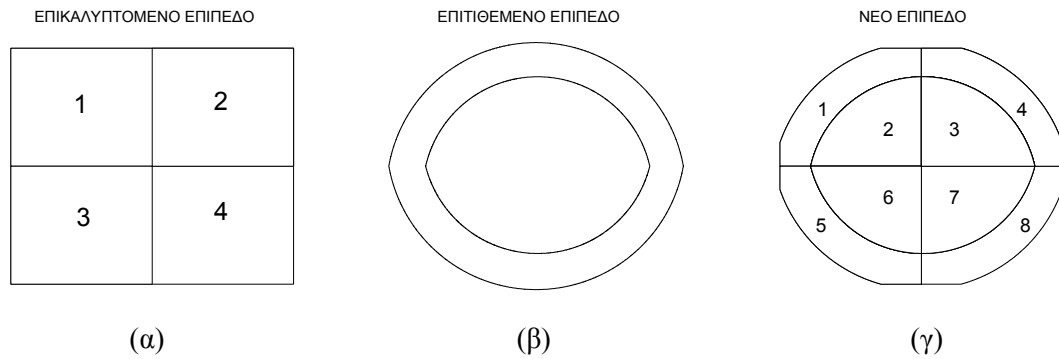
Εφόσον η πληροφορία έως τώρα έχει οργανωθεί σε οικογένειες υδρολογικών λεκανών από τη μία – όλες οι λεκάνες 1^{ης} τάξης αποτελούν ένα shapefile, όλες οι λεκάνες 2^{ης}, ένα άλλο, κ.ο.κ. – και στο υδρογραφικό δίκτυο και τις ισοϋψείς καμπύλες από την άλλη, καθίσταται εφικτό, διαμέσου της λειτουργίας επικάλυψης της *τομής (intersection)* να παράγουμε νέα διανυσματικά θεματικά επίπεδα ενδιαφέροντος. Γνωρίζουμε εκ των προτέρων ότι όλοι οι υπολογισμοί θα υλοποιηθούν έχοντας ως χωρική μονάδα αναφοράς κάθε μία υδρολογική λεκάνη. Ακόμη, έχουμε επίγνωση πως το αποτέλεσμα της τομής δύο θεματικών επιπέδων – του επικαλυπτόμενου που εμπεριέχει πολύγωνα και χαρακτηριστικά και του επιτιθέμενου που ενέχει μόνον πολύγωνα – είναι ένα νέο επίπεδο που εμπεριέχει τα κοινά χαρακτηριστικά (features) τόσο του επικαλυπτόμενου όσο και του επιτιθέμενου (Κουτσόπουλος, 2002). Δημιουργούμε κατ' αυτόν τον τρόπο καινούρια θεματικά επίπεδα,

^{*} Η άλγεβρα Boolean απαρτίζεται από τις τέσσερις γνωστές «λογικές» πράξεις, AND, OR, NOT, XOR.

τα οποία εμπεριέχουν τα χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου και των ισοϋψών (επικαλυπτόμενα επίπεδα) εντός των ορίων των λεκανών ως συνέπεια της τομής τους με τα shapefiles των λεκανών (επιτιθέμενα επίπεδα) (Σχ. 4.1).

Πέρα από την λειτουργία επικάλυψης της τομής, η *ένωση (union)* αποτελεί θεμελιώδη λειτουργία και ταυτόχρονα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την επίτευξη των στόχων μας. Αντίθετα με την τομή, όταν διενεργείται μια τέτοια λειτουργία, έχει ως αποτέλεσμα την «σύσταση» ενός καινούριου επιπέδου το οποίο εμπερικλείει όλα τα χαρακτηριστικά και τα πολύγωνα τόσο του επικαλυπτόμενου όσο και του επιτιθέμενου (Σχ. 4.2). Πρακτικά, καθώς έχουμε συγκροτήσει την μέχρι τώρα πληροφορία σε διακεκριμένες κατηγορίες λεκανών – ανάλογα με την τάξη των ποτάμιων κλάδων που τις αποστραγγίζουν – μέσω αυτής της λειτουργίας μπορούμε να τις ενοποιήσουμε σε ένα και μοναδικό θεματικό επίπεδο και, μετέπειτα να εξετάσουμε τις υπολεκάνες ως επιμέρους οντότητες της κύριας υδρολογικής λεκάνης του Λυκορρέματος.

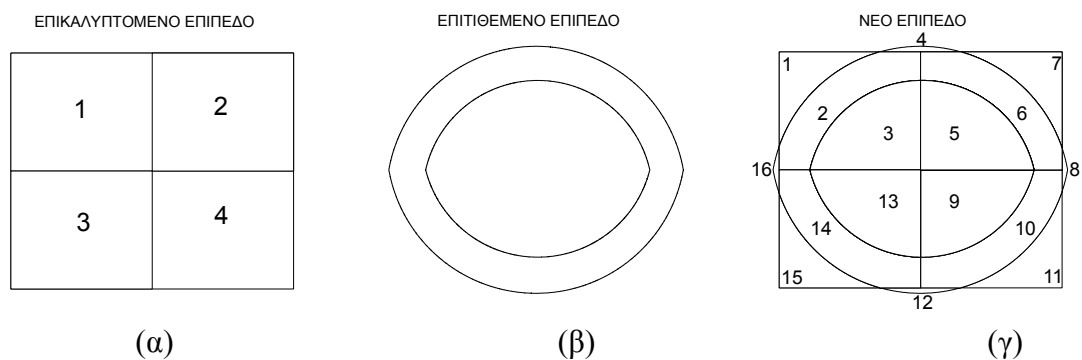
Τέλος, μια άλλη λειτουργία που θα φανεί χρήσιμη, ιδιαίτερα στην ταυτοποίηση όλων των κλάδων που ενυπάρχουν εντός κάθε μιας λεκάνης απορροής, (προκειμένου να υπολογίσουμε μετέπειτα την υδρογραφική συχνότητα και πυκνότητα) είναι αυτή της *ταυτοποίησης (identity)*. Κατά την εφαρμογή αυτής της λειτουργίας επικάλυψης, δύο θεματικά επίπεδα αλληλεπιδρούν (ως συνήθως), το επικαλυπτόμενο και το επιτιθέμενο. Το νέο επίπεδο που δημιουργείται μέσω αυτής της λειτουργίας περιλαμβάνει όλα τα χαρακτηριστικά των αρχικών επιπέδων, όμως τα όριά του συμπίπτουν με τα όρια του επικαλυπτόμενου επιπέδου (Χαλκιάς, 2006), όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 4.3. Επί της ουσίας, τα χαρακτηριστικά του επικαλυπτόμενου επιπέδου (σημεία, γραμμές πολύγωνα), ταυτοποιούνται με βάση το χαρακτηριστικό γνώρισμα το επιτιθέμενου (πολύγωνο), με το παραγόμενο αρχείο να διατηρεί την γεωμετρία των χαρακτηριστικών του. Πρακτικά, αυτό που επιδιώκεται είναι η απόδοση «κοινής ταυτότητας» στο υδρογραφικό δίκτυο που απορρέει εντός κάθε υδρολογικής λεκάνης και των υφιστάμενων ισοϋψών, προκειμένου να επακολουθήσουν σχετικοί υπολογισμοί που αξιοποιούν μετρήσεις τέτοιων χαρακτηριστικών.



Σχήμα 4. 3: Αναπαράσταση της λειτουργίας της τομής.

Σημείωση: Στο (α) παρουσιάζεται ένα επικαλυπτόμενο επίπεδο που εμπεριέχει πολύγωνα και χαρακτηριστικά, στο (β) παρουσιάζεται ένα πολυγωνικό επιτιθέμενο επίπεδο και στο (γ) φαίνεται ένα καινούριο επίπεδο, προϊόν της τομής τους. Ουσιαστικά, η παραπάνω διαδικασία αναφέρεται στην πράξη OR της Boolean άλγεβρας.

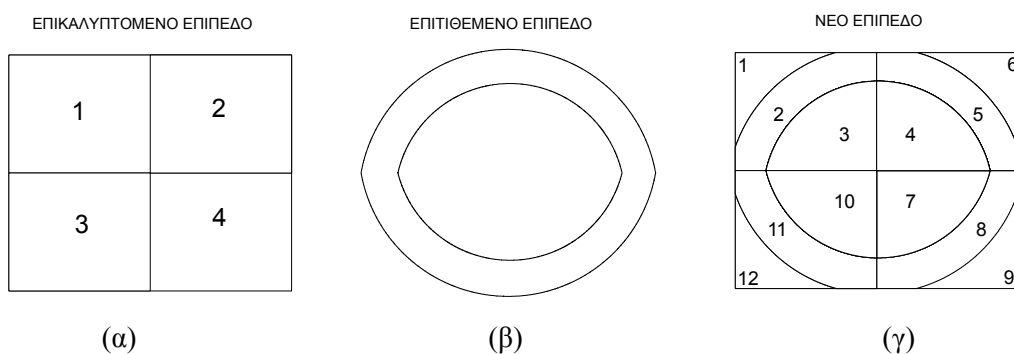
Πηγή: Κουτσόπουλος, 2002.



Σχήμα 4. 4: Αναπαράσταση της λειτουργίας της ένωσης.

Σημείωση: Τα (α) και (β) αναπαριστούν ότι και στο Σχήμα 4.1, ενώ στο (γ) απεικονίζεται ένα νέο επίπεδο που είναι αποτέλεσμα της ένωσης τους. Ουσιαστικά, η παραπάνω διαδικασία αναφέρεται στην πράξη AND της Boolean άλγεβρας.

Πηγή: Κουτσόπουλος, 2002.



Σχήμα 4. 5: Αναπαράσταση της λειτουργίας της ταυτότητας.

Σημείωση: Τα (α) και (β) αναπαριστούν ότι και στο Σχήμα 4.1 και 4.2, ενώ στο (γ) απεικονίζεται ένα νέο επίπεδο που είναι αποτέλεσμα της λειτουργίας της ταυτόποίησης.

Πηγή: Κουτσόπουλος, 2002.

4.2.2.5 Υπολογισμός Μορφομετρικών Παραμέτρων και ανάθεση των τιμών τους ως γνωρίσματα θεματικής διάστασης

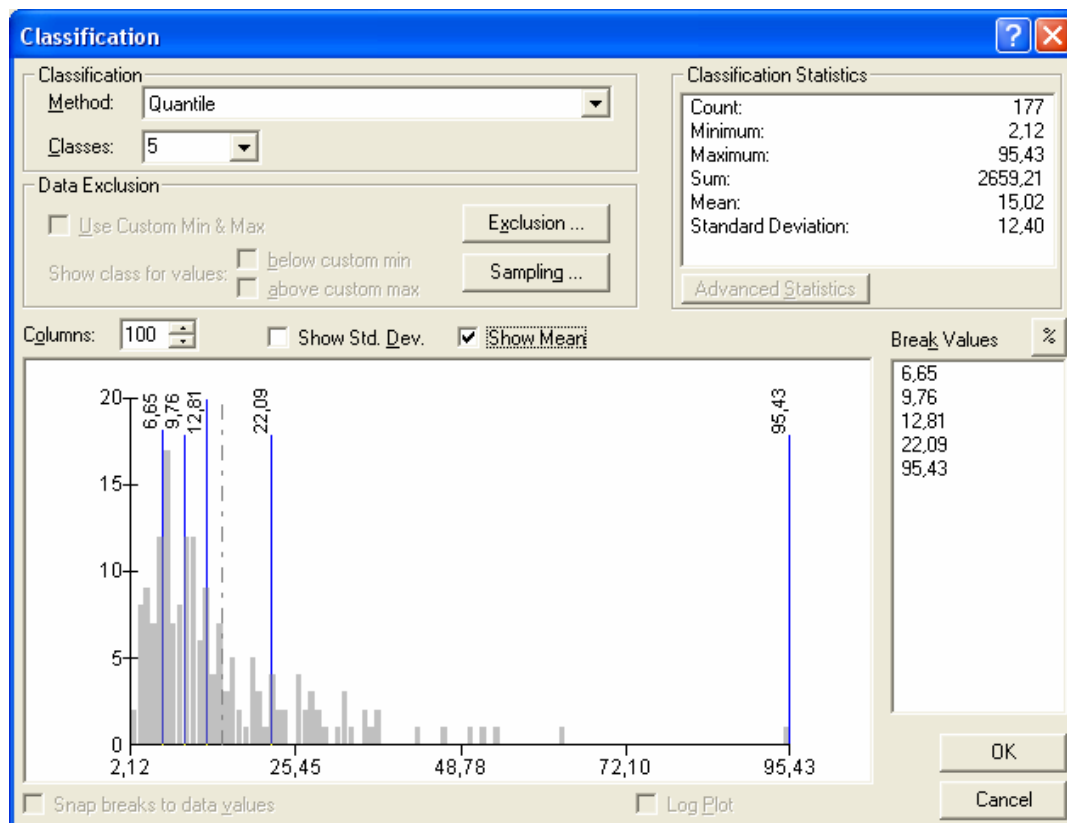
Η διαδικασία υπολογισμού των επιλεγμένων μορφομετρικών παραμέτρων (Πιν. 1), είναι ταυτόσημη με την διαδικασία που ακολουθήθηκε και κατά την εκπόνηση της χειρωνακτικής μεθόδου. Αυτό που διαφέρει εδώ είναι οι μετρούμενες τιμές των μηκών, οι οποίες έχουν προέλθει κατά τον τρόπο που περιγράφηκε στην 4.2.2.5, (με χρήση κώδικα VBA) που επιπλέον είναι πια και «χωρικά περιορισμένες» εντός διακριτών χωρικών ενοτήτων (υδρολογικές λεκάνες). Έχοντας καταχωρήσει τα μετρούμενα μεγέθη-παραμέτρους ένα προς ένα, προβαίνουμε σε μαζικούς υπολογισμούς των υπολογιζόμενων παραμέτρων. Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών διαφέρουν με εκείνα της χειρωνακτικής μεθόδου στον βαθμό που αποκλίνουν και οι αρχικά μετρούμενες τιμές. αναδεικνύονται οι υπολογιζόμενες μορφομετρικές παράμετροι. Στον πίνακα 2 του Παραρτήματος καταχωρούνται όλες οι επιλεγμένες μορφομετρικές παράμετροι – μετρούμενες και υπολογιζόμενες – που έχουν προκύψει από την υδρολογική ανάλυση της υδρολογικής λεκάνης του Λυκορρέματος.

Σε τελικό στάδιο, προκειμένου να οπτικοποιήσουμε στον γεωγραφικό χώρο τα ποσοτικά στοιχεία των παραμέτρων που υπολογίσαμε, καλούμαστε αρχικά να καταχωρίσουμε τις σχετικές τιμές. Προσθέτουμε λοιπόν τόσα νέα πεδία, όσα και οι υπολογιζόμενες παράμετροι, στον πίνακα περιγραφών του θεματικού επιπέδου το οποίο έχει προκύψει από την ένωση των επιπέδων των επιμέρους λεκανών. Εισάγουμε τις τιμές των τεσσάρων παραμέτρων στα αντίστοιχα πεδία για κάθε μία λεκάνη. Τώρα πια, καθίσταται εφικτή η απεικόνιση και παρουσίαση τόσο των χωρικών, όσο και των περιγραφικών χαρακτηριστικών – μορφομετρικών παραμέτρων της λεκάνης απορροής του Λυκορρέματος, μέσω του Arc Map σε αντίστοιχους θεματικούς χάρτες. Κατασκευάζουμε λοιπόν ένα χάρτη για την αναπαράσταση κάθε μορφομετρικής παραμέτρου, δίνοντας έμφαση στην ταξινόμηση των τιμών και στην απόδοση των διαφορετικών κλάσεων με χρωματική διαβάθμιση των πολυγωνικών οντοτήτων των λεκανών (Χάρτες 5 – 8).

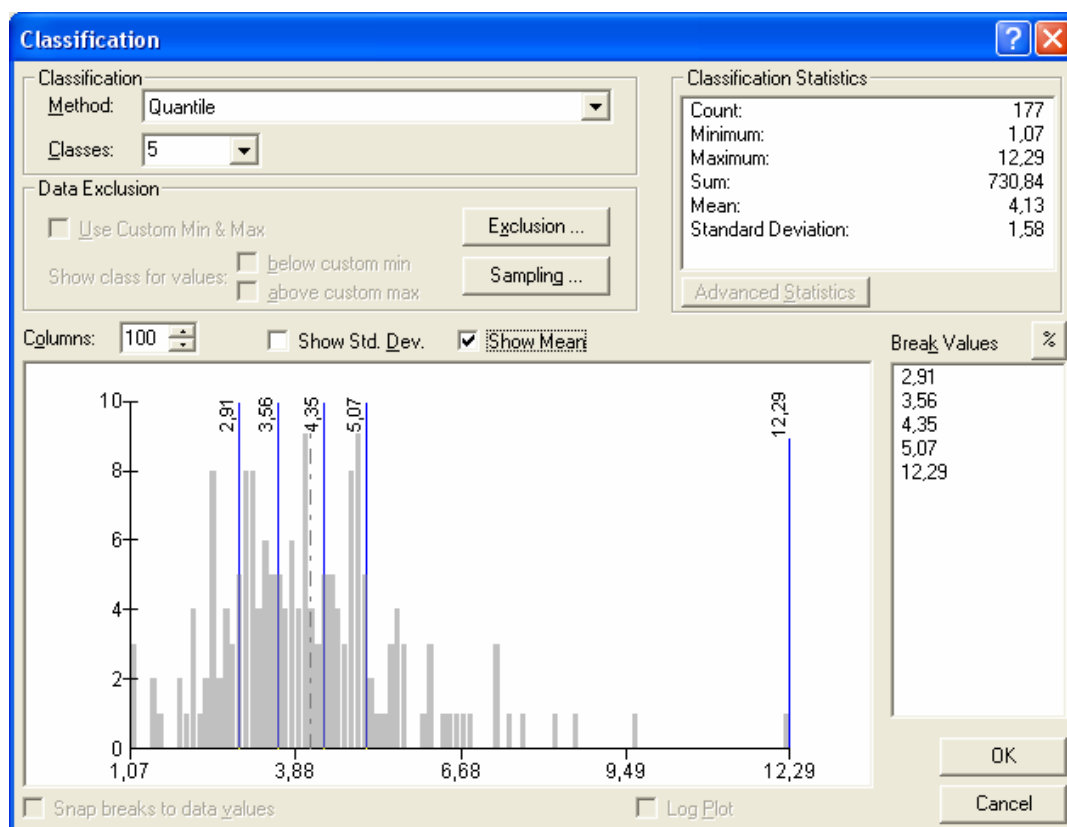
4.2.2.6 Οπτικοποίηση

Συγκεκριμένα, η μέθοδος ταξινόμησης που χρησιμοποιήθηκε στο λογισμικό Arc Map, είναι η *quantile*. Σύμφωνα με αυτόν τον τύπο ομαδοποίησης, κάθε ξεχωριστή κλάση που δημιουργείται εμπεριέχει ίδιο πλήθος γνωρισμάτων. Στην υπό εξέταση περίπτωση, τα επιμέρους γνωρίσματα αντιστοιχούν σε τιμές μορφομετρικών παραμέτρων, και επιλέχθηκε αυτή η μέθοδος έτσι ώστε να επιτυγχάνεται «ισότιμη αντιπροσώπευση» κάθε κλάσης για αποδοτικότερη οπτικοποίηση και βελτιωμένη αισθητική απεικόνιση. Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος αυτή αποφέρει δυνητικά παραπλανητικά αποτελέσματα. Καθώς ο στατιστικός χαρακτήρας της δεν ανταποκρίνεται σε φυσικές-εγγενείς ομαδοποιήσεις, γνωρίσματα με πολύ κοντινές τιμές υπάγονται σε διαφορετικές κατηγορίες και κατά συνέπεια επέρχεται σχετική σύγχυση από την ανάγνωση ενός τέτοιου χάρτη. Βέβαια, κανένας τύπος κατηγοριοποίησης δεν είναι ιδανικός, και για αυτό η ανάγνωση και εξέταση τέτοιων θεματικών χαρτών που εμπεριέχουν ομαδοποιήσεις θα πρέπει να γίνεται σε συνδυασμό με την παράθεση σχετικών πινάκων (στο Παράρτημα Ι), όπου είναι καταχωρημένες οι τιμές των γνωρισμάτων με διακριτό τρόπο.

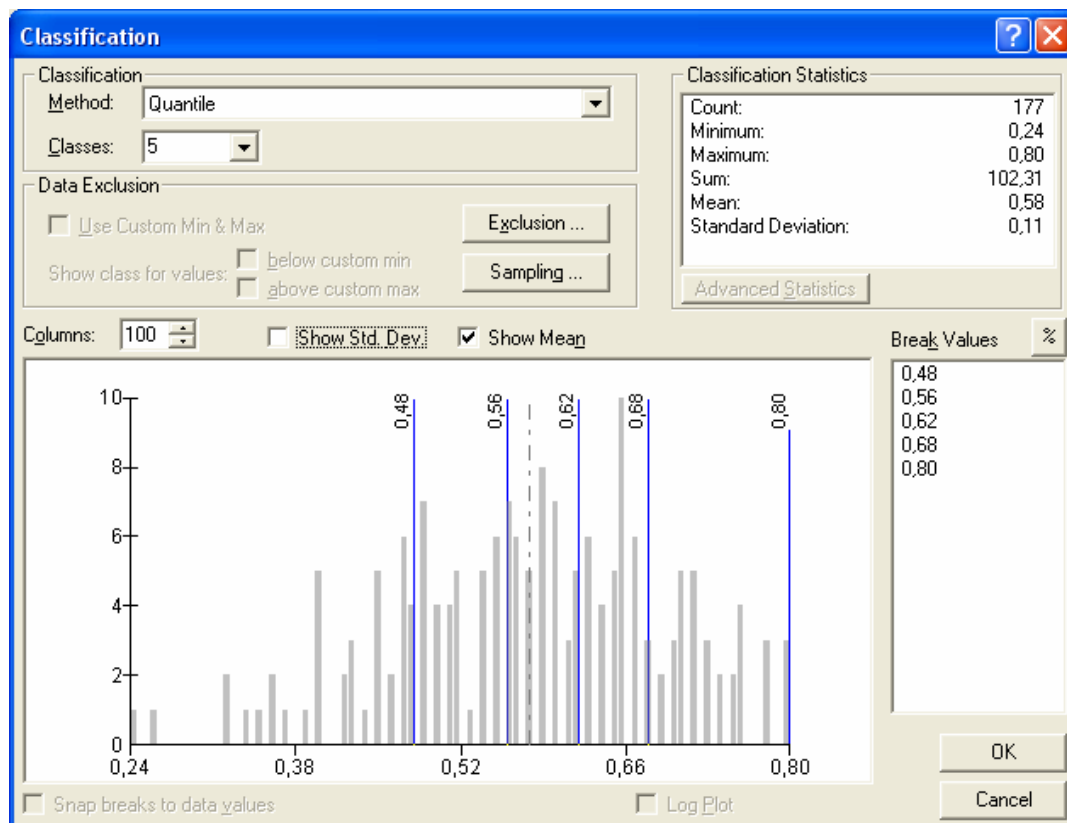
Παρακάτω, παραθέτουμε ενδεικτικά μια «πτυχή» του περιβάλλοντος του Arc Map, που αναφέρεται στο συμβολισμό (Symbology) και ειδικότερα στην ταξινόμηση (Classification) των τιμών των γνωρισμάτων που υπάγονται σε ένα συγκεκριμένο πεδίο του πίνακα περιγραφών του διανυσματικού θεματικού επιπέδου ολόκληρης της διάταξης της λεκάνης του Λυκορρέματος. Γενικά, από την εξέταση του ιστογράμματος συχνοτήτων εμφάνισης των τιμών των γνωρισμάτων, είναι δυνατόν να εξαχθεί η μέθοδος ταξινόμησης. Εδώ όμως, επειδή θέλουμε να αναδείξουμε την κατανομή τεσσάρων διαφόρων δεικτών στις οριοθετημένες λεκάνες, επιλέγουμε την ανεξάρτητα από την διασπορά των τιμών. Τα «παράθυρα» όπου συμβαίνουν αυτές οι επιλογές και επεξεργασίες σε περιβάλλον Arc Map. Ας σημειωθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις η επέμβαση από μέρους μας στον καθορισμό των κλάσεων κρίνεται θεμιτή και με αμελητέες συνέπειες όταν διενεργούνται στρογγυλοποιήσεις στις ακραίες τιμές των κλάσεων. Για αυτό οι τιμές των κλάσεων διαφέρουν ενδεχομένως στους χάρτες και στα ακόλουθα σχήματα. (Σχ. 4.5 – 4.8).



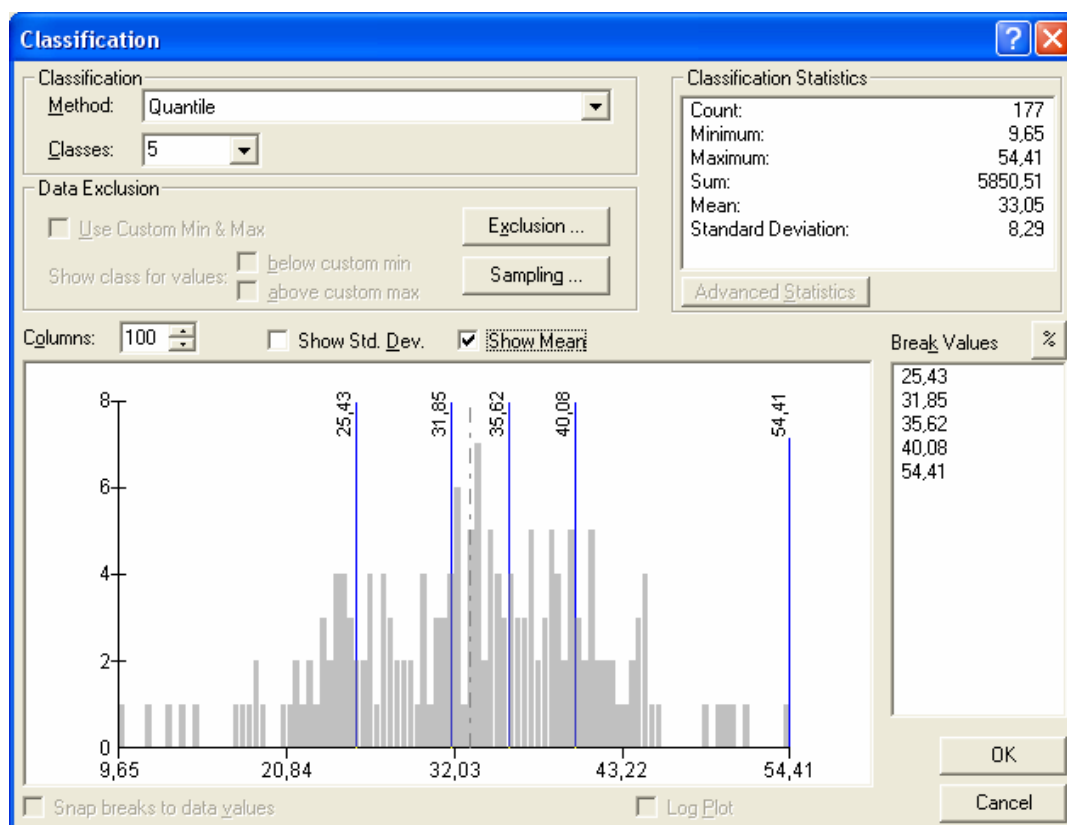
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 4. 6: Ταξινόμηση τύπου Quantile στο «περιβάλλον» του Arc Map.

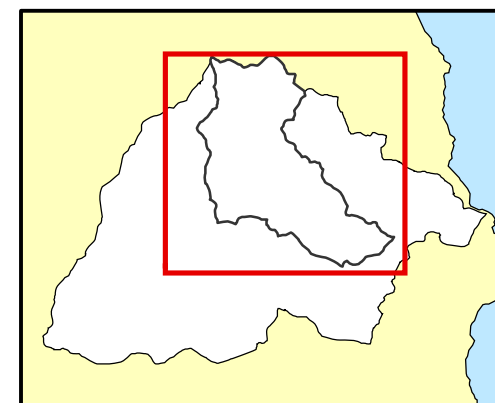
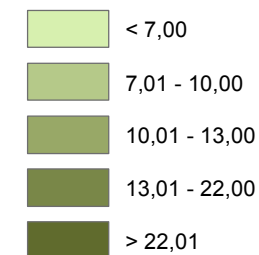
Σημείωση: Στα α, β, γ, δ φαίνεται η κατανομή του ιστογράμματος των σχετικών συχνοτήτων των τιμών των μορφομετρικών παραμέτρων (α-υδρογραφική συχνότητα, β-υδρογραφική πυκνότητα, γ-κυκλικότητα, δ-κλίση κλιτύων), καθώς και η ταξινόμηση των παρατηρούμενων τιμών σύμφωνα με την μέθοδο Quantile.

5

ΧΑΡΤΗΣ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ

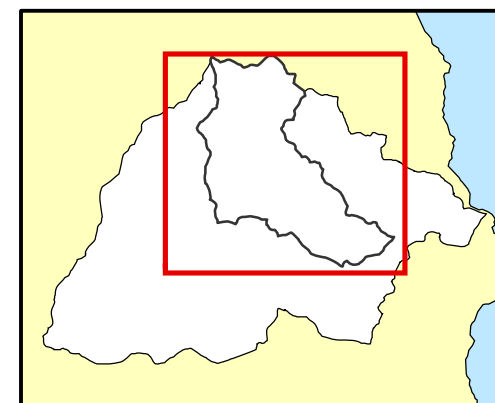
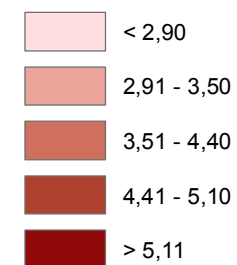


6

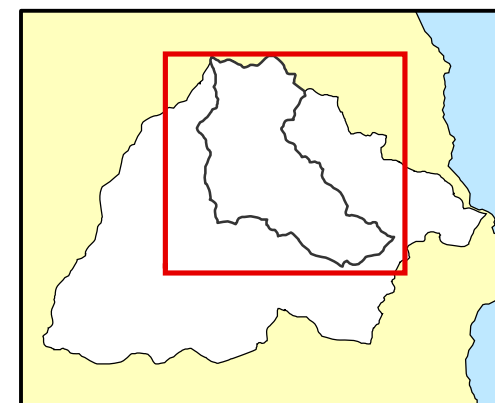
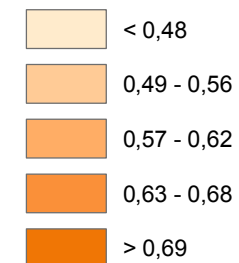
ΧΑΡΤΗΣ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ



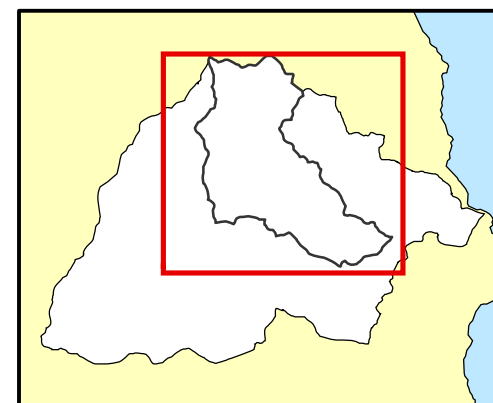
7

**ΧΑΡΤΗΣ
ΚΥΚΛΙΚΟΤΗΤΑΣ****ΥΠΟΜΝΗΜΑ****ΚΥΚΛΙΚΟΤΗΤΑ**

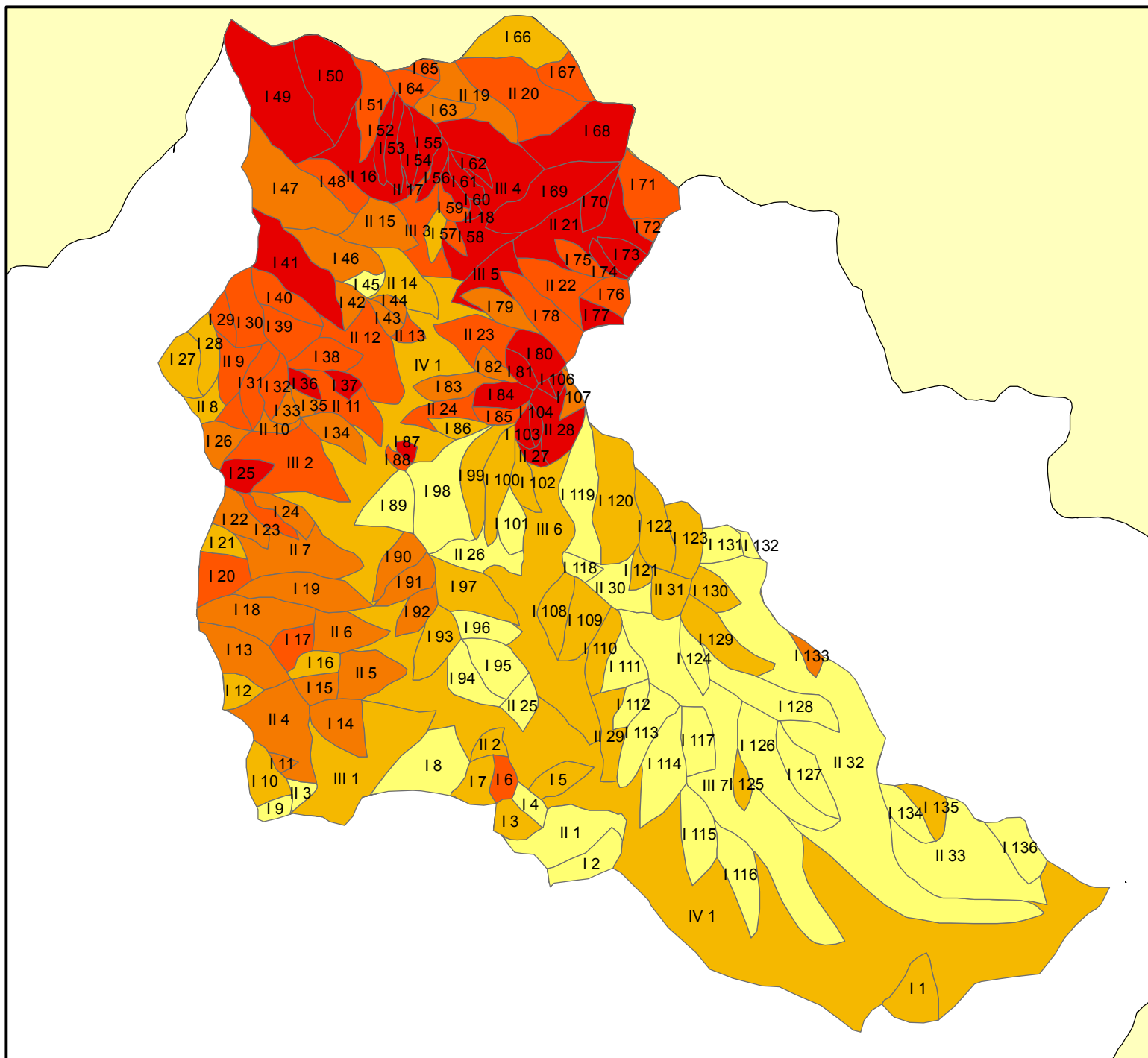
8

**ΧΑΡΤΗΣ
ΚΛΙΣΗΣ ΚΛΙΤΥΩΝ****ΥΠΟΜΝΗΜΑ****ΚΛΙΣΗ ΚΛΙΤΥΩΝ**

	< 25,50
	25,51 - 32,00
	32,01 - 35,50
	35,51 - 40,00
	> 40,01



0 500 1.000 2.000
Μέτρα



4.2.3 Αυτοματοποιημένη Μέθοδος

4.2.3.1 Γενικά

Όπως περιγράφηκε και στο κεφάλαιο 3, γίνεται εφικτό από την αξιοποίηση κατάλληλων ψηφιακών δεδομένων, να αναπαραχθεί η λεκάνη απορροής της κεντρικής κοίτης ενός ποταμού, καθώς και οι υπολεκάνες των δευτερευόντων κλάδων του. Από τη στιγμή που αναδειχθούν οι επιμέρους υδροκρίτες και το επεξεργασμένο υδρογραφικό δίκτυο, με αυτοματοποιημένο τρόπο, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε και τις λοιπές μορφομετρικές παραμέτρους της εκάστοτε υδρολογικής λεκάνης.

4.2.3.2 Παραγωγή DEM

Πρώτο στάδιο για την επίτευξη μιας τέτοιας μεθόδου είναι η δημιουργία ενός (συνεχούς) ψηφιακού μοντέλου αναπαράστασης του ανάγλυφου (DEM), μιας περιοχής ευρύτερης της ήδη οροθετημένης λεκάνης απορροής του Λυκορρέματος.* Στη ρουτίνα της λειτουργίας Topo To Raster οι ψηφιοποιημένες ισοϋψείς (digitized contours) στις οποίες έχουν ανατεθεί τιμές υψομέτρου κατά την εκπόνηση της προηγούμενης μεθόδου, θα αποτελέσουν το βασικό αρχείο υψομέτρων εισροής. Ομοίως, δύνανται να αξιοποιηθούν τα υψομετρικά σημεία (elevation points) που εκμαιεύονται άμεσα από τον τοπογραφικό χάρτη. Επιπλέον η λειτουργία Topo To Raster στο ArcMap του Arc GIS 9 δίνει την δυνατότητα ταυτόχρονης αξιοποίησης του ήδη υφιστάμενου (ψηφιοποιημένου) υδρογραφικού δικτύου (hydrographic network), προς την κατεύθυνση της αναπαραγωγής υδρολογικά ορθότερων ψηφιακών μοντέλων (υψομέτρου) εδάφους. Τέλος, η περιοχή (area) στην οποία πρόκειται να εφαρμόσουμε την λειτουργία μπορεί να καθοριστεί και να περιοριστεί από μια επιφάνεια επιλογής μας.

Ειδικότερα, κατά αυτήν την λειτουργία, εφαρμόζεται μια τεχνική παρεμβολής μέσω του λογισμικού, όπως αυτή περιγράφεται στην ενότητα 3.4.1. Κατ' αρχήν εντοπίζονται περιοχές μέγιστης τοπικής καμπυλότητας/ κυρτότητας σε κάθε μία ισοϋψή και περιοχές με τις πλέον απότομες κλίσεις, δημιουργώντας ένα (δυναμικό) δίκτυο ρευμάτων και κορυφογραμμών (Hutchinson, 1988). Όταν πλέον έχει καθοριστεί μια γενική μορφολογία, «αποσπάται» υψομετρική πληροφορία από τις ψηφιοποιημένες ισοϋψείς η οποία θα

* Με χειροκίνητες και ημιαυτόματες μεθόδους

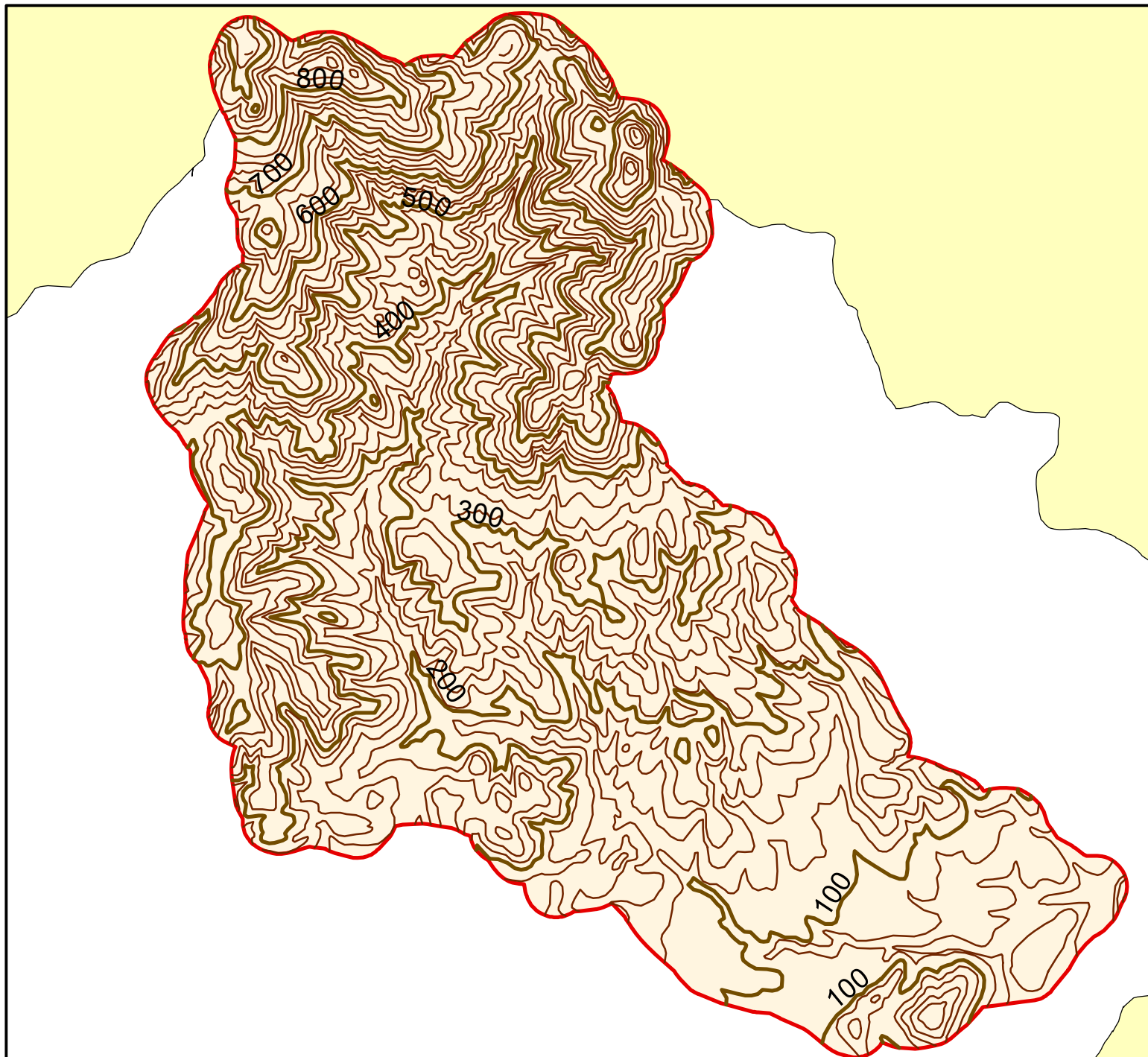
χρησιμοποιηθεί για την παρεμβολή (και ανάθεση) των τιμών υψομέτρου σε κάθε κελί του καννάβου του DEM, με παράλληλη αξιοποίηση και των υψομετρικών σημείων. Από την άλλη, η δυναμική της λειτουργίας αυτής υποβοηθάται ταυτόχρονα, για την πιο κατάλληλη υλοποίηση της παρεμβολής, από την «αναγνώριση» της διάρθρωσης και της διάταξης του υδρογραφικού δικτύου: η ύπαρξη αρχείου ψηφιοποιημένου υδρογραφικού δικτύου διευκολύνει την «ταυτοποίηση» της τοπογραφικής επιφάνειας ανάλογα με την μορφή του υδρογραφικού δικτύου, δεδομένου του τρόπου ανάπτυξης ενός τέτοιου.* Ας σημειωθεί ότι για να διαδραματίσει αποτελεσματικά επικουρικό ρόλο η παράθεση του αρχείου του υδρογραφικού δικτύου, και όχι ανασταλτικό, θα πρέπει η ψηφιοποίηση να έχει γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε η απορροή να συντελείται από τα ανάντη προς τα κατόντη της κοίτης κάθε ενός από τους κλάδους που στο σύνολό τους απαρτίζουν ενιαίο, (και όχι κατακερματισμένο) υδρογραφικό δίκτυο. Όσον αφορά τον περιορισμό της περιοχής στην οποία θα επιτευχθεί η ανάπτυξη του DEM, αρκεί να εισάγουμε ένα αρχείο το οποίο προδιαγράφει τον δισδιάστατο χώρο επί του οποίου θα λάβει χώρα η διαδικασία της παρεμβολής. Αυτή η περιοχή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη/εκτιμώμενη έκταση της λεκάνης, ώστε το παραγόμενο να υπερβαίνει τα όρια της λεκάνης (σε όλο το περίγραμμά της). Επίσης, για να περατωθεί η διαδικασία, πρέπει να επιλεγεί μέγεθος κελιού (cell size) για τον κάνναβο του DEM που θα παραχθεί. Για την περίπτωση που εξετάζουμε, και υπό τις δεδομένες συνθήκες, κρίνουμε κατάλληλο να ορίσουμε το μέγεθος του φατνίου ίσο με 50 μ.

Αυτά που περιγράφηκαν παραπάνω, στο περιβάλλον του ArcMap, υλοποιούνται στα πλαίσια παρεχόμενων επιλογών στο μενού της λειτουργίας Topo To Raster. Παρακάτω, παρατίθεται ένας πίνακας όπου παρουσιάζονται τα αρχεία (διανυσματικά θεματικά επίπεδα πληροφορίας) που δυνητικά χρησιμοποιούνται προς την κατεύθυνση δημιουργίας ενός DEM, τα αντίστοιχα πεδία τους που αξιοποιούνται, και ο τύπος στον οποίο υπάγονται τα τελευταία. Επίσης, παρατίθενται χάρτες – Χάρτες 9, 10 – όπου απεικονίζονται αυτά τα (χαρτογραφικά) δεδομένα εισροής, καθώς και το παραγόμενο DEM (Χάρτης 11).

* Γενικά, οι κλάδοι πρώτης τάξης τείνουν να «τοποθετούνται» σε περιοχές συγκριτικά υψομετρικά υψηλότερες, και πλησίον των υδροκριτών-κορυφογραμμών, καθώς δεν παροχετεύονται από άλλους κλάδους. Αντίθετα οι κλάδοι μεγαλύτερων τάξεων, και ιδιαίτερα ο κύριος κλάδος, επειδή συγκεντρώνει το νερό όλων των παραποτάμων που συμβάλλουν σε αυτόν, νομοτελειακά τείνει να υφίσταται σε περιχές συγκριτικά χαμηλότερου υψομέτρου.

Εισαγόμενο αρχείο-επίπεδο	Πεδίο	Τύπος
Ισοϋψείς καμπύλες	Υψόμετρο	Ισοϋψής
Κορυφές/ υψομετρικά. σημεία	Υψόμετρο	Σημειακό υψόμετρο
Υδρογραφικό δίκτυο	-	Ρέμα
Περιοχή οριοθέτησης	-	Όριο

Πίνακας 3:Χρησιμοποιούμενα αρχεία για την αναπαραγωγή DEM.



9

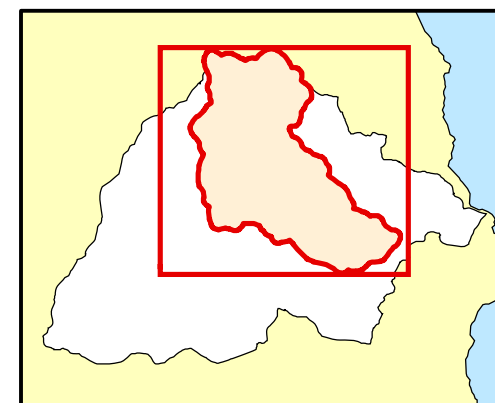
ΧΑΡΤΗΣ ΙΣΟΨΩΝ
ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΤΗΝ
ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ
ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

— ΙσοΨείς 100 μ.

— ΙσοΨείς 20 μ.

Ευρύτερη Περιοχή



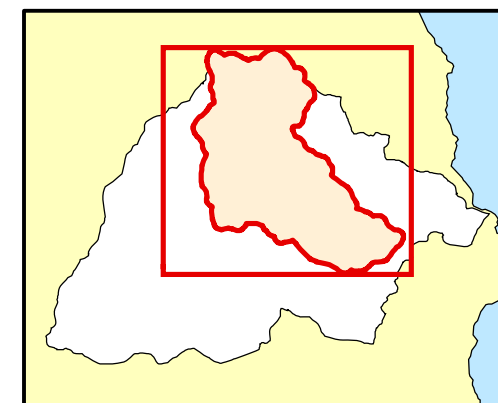
0 500 1.000 2.000
Μέτρα

10

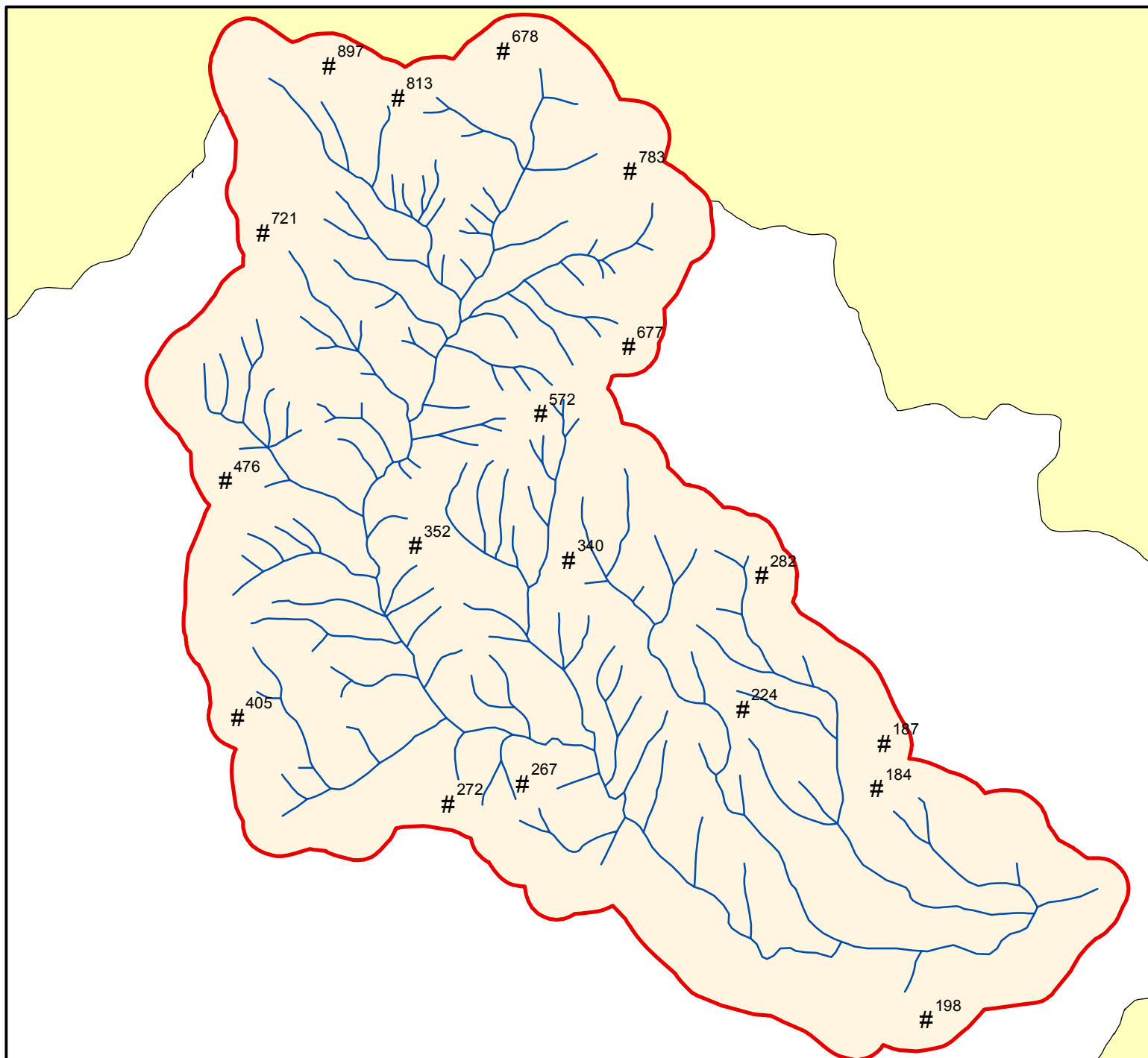
**ΧΑΡΤΗΣ ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΩΝ
ΣΗΜΕΙΩΝ ΚΑΙ
ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ
ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ
ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ**

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- # Υψομετρικά Σημεία
- Υδρογραφικό Δίκτυο
- Ευρύτερη Περιοχή



0 500 1.000 2.000
Μέτρα



11

ΧΑΡΤΗΣ
ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΕΔΑΦΟΥΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)

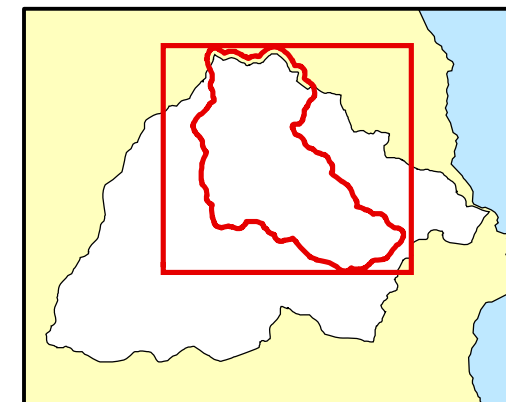


High : 955

Low : 30



Ευρύτερη Περιοχή



0 500 1.000 2.000
Μέτρα

4.2.3.3 Ανάπτυξη υδρολογικής λεκάνης

Παραγωγή DEM χωρίς τοπικές ταπεινώσεις: Όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 3.3.2, η πρώτη ενέργεια που πρέπει να γίνεται, όταν έχει «παρασκευαστεί» ένα DEM, έγκειται στην διαδικασία πλήρωσης του ανάγλυφου. Το πρόσφατα δημιουργημένο εμπεριέχει ενδεχομένως τοπικές ταπεινώσεις, οι οποίες οφείλονται είτε σε μη ορθές ψηφιοποιήσεις και σε εσφαλμένη απόδοση τιμών υψομέτρου, είτε/ και σε σφάλματα του αλγόριθμου της παρεμβολής που οφείλεται σε χωρικά αραιά διεσπαρμένα υψομετρικά δεδομένα. Μέσω του συστήματος, οι τοπικές ταπεινώσεις εξαλείφονται, με μια διαδικασία αντικατάστασης πολύ χαμηλών τιμών υψομέτρου από υψηλότερες, σύμφωνα με εκείνες γειτονικών κελιών του καννάβου του DEM.

Στην περίπτωση μελέτης μας, το αρχικά παραγόμενο DEM, αν και έχει δημιουργηθεί «λαμβάνοντας» πληροφορία από ισοϋψείς, υψομετρικά σημεία και το υδρογραφικό δίκτυο, παρουσιάζει μια τοπική ταπείνωση (pit/ sink). Με την αξιοποίηση του εργαλείου Fill, του Hydrology στο περιβάλλον του λογισμικού του Arc Map, δημιουργούμε ένα νέο DEM χωρίς ταπεινώσεις της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης του Λυκορρέματος (Χάρτης 12).

Δημιουργία αρχείου διεύθυνσης ροής: Αξιοποιώντας το προσφάτως παρασκευασμένο DEM, είμαστε σε θέση να αναπτύξουμε ένα ψηφιδωτό αρχείο της διεύθυνσης ροής. Όπως, εξ' άλλου, έχει διατυπωθεί και παραπάνω, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την εντολή flow direction βασίζεται στην ανεύρεση της πλέον απότομης κλίσης. Έπεται, ο καθορισμός διεύθυνση κίνησης του νερού, προφανώς προς την διεύθυνση μέγιστης κλίσης (προσανατολισμός πρανών).

Κατά την εκτέλεση της εντολής Flow Direction από το εργαλείο Hydrology, τελικά λαμβάνουμε ένα αρχείο καννάβου, του οποίου κάθε ξεχωριστό φατνίο προσλαμβάνει τιμές κωδικοποιημένες κατά ένα πρότυπο της ESRI, οι οποίες αντιστοιχούν σε διάφορες διευθύνσεις* (Χάρτης 13).

Ανάπτυξη ψηφιδωτού αρχείου συγκέντρωσης ροής: Το αρχείο διεύθυνσης ροής, υπό κατάλληλη επεξεργασία μέσω του εργαλείου Hydrology, δυνητικά αποδίδει ένα νέο αρχείο ίδιου τύπου, το οποίο αναπαριστά την συγκεντρωμένη ροή του νερού μέσα σε μια

* Βλ. Σχ 3.4.

υδρολογική λεκάνη, υπό μορφή ενιαίου αποστραγγιστικού δικτύου. Η διεύθυνση ροής χρησιμοποιείται ως οδηγός, προκειμένου το σύστημα να αναγνωρίσει από ποία φατνία θα επιτελείται η απορροή. Εν συνεχεία, τα τελευταία καταμετρώνται και έτσι προκύπτει το αρχείο flow accumulation. Οι τιμές που προσδίδονται στα κελιά του ποικίλλουν ανάλογα με το πλήθος των κελιών μέσω των οποίων έχει διέρθει το νερό.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα στα πραγματικά δεδομένα της περιοχής μελέτης, παρατηρούμε ότι οι τιμές της συγκέντρωσης ροής κυμαίνονται από μηδενικές – στις παρυφές της λεκάνης* – έως και αρκετά υψηλές (περίπου 11000) κοντά στο στόμιο/ σημείο εξόδου της λεκάνης (outlet/ pour point). Το υδρογραφικό δίκτυο που αναπτύσσεται, συμπίπτει, τουλάχιστον ως προς τους κλάδους μεγαλύτερης τάξης, με το υφιστάμενο ψηφιοποιημένο δίκτυο. Ο λόγος που η ταύτισή τους επιτυγχάνεται με μεγάλη ακρίβεια είναι η αξιοποίηση και του υφιστάμενου υδρογραφικού δικτύου ως εισροή για την παραγωγή του αρχικού ψηφιακού μοντέλου εδάφους, στο οποίο άλλωστε στηρίχθηκε η μέχρι τώρα διαδικασία. Σε περίπτωση που δεν συγκαταλέγαμε το (διανυσματικό) αρχείο στα δεδομένα εισροής για την δημιουργία του DEM, το μετέπειτα παραγόμενο το μετέπειτα παραγόμενο ψηφιδωτό επίπεδο συσσώρευσης ροής (flow accumulation grid) θα απέκλινε περισσότερο, από ότι τώρα. (Χάρτης 14).

Ύστερα από την εκτέλεση των παραπάνω εντολών που εφαρμόστηκαν επί του DEM, και την παραγωγή των αντίστοιχων αρχείων καννάβου – τα οποία θεωρούνται προαπαιτούμενα – , καθίσταται απαραίτητη η υλοποίηση της διαδικασίας κατάδειξης των σημείων εξόδου της κύριας λεκάνης, και των επιμέρους λεκανών, σε μια προσπάθεια οριοθέτησής τους. Σύμφωνα με όσα διατυπώθηκαν στο κεφάλαιο 3, από τη στιγμή που τα σημεία αυτά επιλεχθούν, τότε δυνητικά αναπαρίσταται η τοπογραφική επιφάνεια ανάντη των σημείων αυτών (έως τον υδροκρίτη).

Συγκεκριμένα, στο λογισμικό Arc Map, απαιτούνται ως δεδομένα εισροής το flow direction grid και τα pour points. Η τοποθέτηση όμως των σημείων εξόδου επί των ψηφιακών θεματικών επιπέδων είναι μια κρίσιμη ενέργεια, η οποία δεν είναι αυτοματοποιημένη. Προκειμένου να επιλέξουμε κατάλληλες θέσεις για αυτά, θα πρέπει προηγουμένως να έχουμε θέσει ένα κατώφλι στο. Όπως έχει γίνει λόγος και παραπάνω, για τιμές συγκέντρωσης ροής κάτω από αυτό το κατώφλι, θεωρούμε ότι δεν υφίσταται συγκεντρωμένη ροή. Επομένως και η επιλογή αυτού του κατώτερου επιπέδου τιμών

* εκατέρωθεν του υδροκρίτη της λεκάνης του Λυκορρέματος, εφόσον το DEM έχει πιο διευρυμένη χωρική υπόσταση από την λεκάνη.

αναδεικνύεται ζωτικής σημασίας. Σε περιπτώσεις που δεν γνωρίζουμε το υδρολογικό καθεστώς, την ακριβή τοπογραφία (μικροανάγλυφο) κ.α., σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές θεωρείται ότι αρμόζει το 500 ή το 1000. Στην εν λόγω περίπτωση, γνωρίζουμε τον τρόπο εξάπλωσης του υδρογραφικού δικτύου, από τον δεδομένο τοπογραφικό χάρτη. Με επαναληπτικές δοκιμές λοιπόν, ορίζουμε μια τιμή για το κατώφλι που να ταιριάζει κατά «βέλτιστο» τρόπο. Ενδεικτικά, τέθηκε η τιμή 15, η οποία θεωρείται αρκετά χαμηλή τιμή. Κατά αυτόν τον τρόπο, αναδεικνύονται τουλάχιστον όλα τα ρεύματα έως και 2^{ης} τάξης, όπως και αρκετά 1^{ης}. Παράλληλα όμως, κάνουν την εμφάνισή τους «πλασματικές» συγκεντρώσεις ροής νερού που δεν υφίστανται στον τοπογραφικό χάρτη.

Με «οδηγούς», τόσο το ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο, όσο και το αρχείο συγκέντρωσης ροής, τίθενται τα σημεία που υποθετικά αντιστοιχούν στο στόμιο κάθε λεκάνης, προσέχοντας τα πρώτα να κείνται εντός των κελιών του ψηφιδωτού αρχείου συγκέντρωσης ροής. Επιπροσθέτως, γίνεται έλεγχος τις τιμής του κελιού (cell value) στο οποίο εγκαθίσταται κάθε σημείο, ώστε να λαμβάνει τιμές σχετικές με τις αναμενόμενες, ανάλογα με την τάξη της λεκάνης, και κυρίως τον αριθμό των κελιών που «αποστραγγίζονται» διαμέσου αυτού.

Για πιο ευχερή διαχείριση, τα σημεία που τέθηκαν μέσω της ψηφιοποίησης, διαχωρίστηκαν ανάλογα με την λεκάνη στην οποία πρόκειται να αντιστοιχήσουν. Έπειτα, μέσα από την εντολή watershed, αναπαράγονται ομαδοποιημένες οι υδρολογικές λεκάνες σε ψηφιδωτού τύπου αρχεία (raster). Ακολούθως λαμβάνει χώρα η διαδικασία μετατροπής των τελευταίων από ψηφιδωτού (raster) σε διανυσματικού (vector) τύπου αρχεία (conversion from raster to features), ώστε να είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμη η πληροφορία σε διανυσματικά πλέον θεματικά επίπεδα. Έτσι, γίνεται τώρα εφικτός ο υπολογισμός των μηκών και επιφανειών των λεκανών κατά τρόπο άμεσο, αξιοποιώντας τον κώδικα VBA από τις επιλογές του πίνακα περιγραφών των διανυσματικών θεματικών επιπέδων των λεκανών απορροής. Σε επόμενη φάση, μέσα από την προαναφερόμενη λειτουργία επικάλυψης της ένωσης, αναπαράγουμε αρχείο που ενέχει όλες τις διαθέσιμες υπολεκάνες «εντεταγμένες» στην ευρύτερη λεκάνη του Λυκορρέματος.

Εκτός από τις λεκάνες, θα μπορούσε να αναπαραχθεί και το αναμενόμενο υδρογραφικό δίκτυο. Κάτι τέτοιο όμως θεωρείται περιττό και μάταιο, εφόσον αυτό ήδη χρησιμοποιήθηκε ως εισροή για την παραγωγή του DEM. Σε αντίθεση με τις λεκάνες αποστράγγισης, των οποίων τα όρια δεν υφίστανται στους τοπογραφικούς χάρτες, το αποστραγγιστικό τους δίκτυο, απεικονίζεται. Για αυτό και δίνεται έμφαση στην ανάδειξη και οριοθέτηση των λεκανών.

Αυτός άλλωστε είναι και ο λόγος που οι τιμές του πλήθους των κλάδων και του μήκους τους, κατά παραδοχή παρέμειναν οι ίδιες, με αποτέλεσμα οι παράμετροι που συνδέουν το υδρογραφικό δίκτυο με την εκάστοτε λεκάνη αποστράγγισής του, να μεταβάλλονται μόνο σε συνάρτηση με τη μεταβολή του εμβαδού κάθε λεκάνης. Από την άλλη, η παράμετρος της κυκλικότητας υπολογίζεται ανεξάρτητα από το υδρογραφικό δίκτυο, ενώ για τον υπολογισμό της μέσης κλίσης των κλιτύων των λεκανών, αξιοποιήσαμε άμεσα παραγόμενα του DEM, μέσα από μια λειτουργία ζώνης εφαρμόσιμη σε ψηφιδωτά αρχεία.

Να σημειωθεί, τέλος, ότι κατά την προσπάθεια ανάδειξης των επιμέρους λεκανών, καθορίζοντας τα σημεία εξόδου τους, κατέστη γενικά ανέφικτος ο προσδιορισμός των λεκανών 1^{ης} τάξης. Η μικρή συγκέντρωση ροής, εντός αυτών, όπως φαίνεται και από την εξέταση του flow accumulation grid, δεν επέτρεψε την αποσαφήνιση της θέσης όπου θα έπρεπε να εγκατασταθούν τα σημεία εξόδου, ακόμη και αν επιχειρήθηκε συνδυαστική δράση από την εξέταση του υφιστάμενου υδρογραφικού δικτύου, το οποίο απέκλινε αρκετά (ειδικά σε ορισμένες περιπτώσεις) από το ψηφιδωτό αρχείο συγκεντρωμένης ροής. Αυτό πιθανόν να αποτελεί ένδειξη περί της μη ορθής χαρτογράφησης των κλάδων μικρής τάξης. Άλλωστε, όπως προαναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, προτού ξεκινήσει η συγκεντρωμένη ροή, το νερό τείνει να απορρέει διαμέσου μικροαυλακώσεων ή μικροχαλαδρώσεων του εδάφους, οι οποίες ενδεχομένως προκάλεσαν σύγχυση κατά την περίοδο και την εποχή χαρτογράφησης. Άλλα σφάλματα ενδεχομένως να συνδέονται με την εσφαλμένη ψηφιοποίηση, μη επαρκή δεδομένα, ανακριβή τεχνική παρεμβολής, μεγάλο μέγεθος ψηφίδας κ.α. Η περαιτέρω εμβάθυνση σε σφάλματα θα επιτευχθεί στο επόμενο κεφάλαιο, όπου οι πηγές σφαλμάτων θα αναλυθούν με μεγαλύτερη σαφήνεια. Σε αυτό το σημείο αρκεί η παρουσίαση των υδρολογικών λεκανών που αναδεικνύονται κατά αυτόν τον τρόπο (Χάρτης 15).

4.2.3.4 Ανάδειξη Μορφομετρικών Παραμέτρων

Έχει αναπτυχθεί προηγούμενα ότι ο υπολογισμός των μορφομετρικών παραμέτρων (της υδρογραφικής συχνότητας, πυκνότητας, κλίσης κλιτύων και κυκλικότητας) απαιτεί την μέτρηση μηκών, περιμέτρων και εμβαδών. Σύμφωνα με τα παραπάνω, εφόσον ο αριθμός των κλάδων και τα μήκη τους έχουν υπολογιστεί με αυτόματο τρόπο (με τη χρήση Visual Basic γλώσσας) κατά την ημιαυτόματη μέθοδο, υπολογίζουμε κατά όμοιο τρόπο και τα εμβαδά των πρόσφατα δημιουργημένων λεκανών. Για να καταστεί εφικτή μια τέτοια

διαδικασία, ωστόσο, θα πρέπει πρωτίτερα να μετατραπούν τα raster αρχεία των λεκανών σε vector. Με την εντολή Raster to Features του εργαλείου Spatial Analyst, επιτυγχάνεται αυτή η μετατροπή.

Όσον αφορά την υδρογραφική συχνότητα, πυκνότητα και την κυκλικότητα, εφαρμόζουμε μεθόδους υπολογισμού, μεταφέροντας τα σχετικά μεγέθη σε περιβάλλον Excel. Η παράμετρος της κλίσης των κλιτύων όμως, υπολογίζεται δυνητικά άμεσα από την ύπαρξη και μόνον του DEM σε περιβάλλον GIS. Είναι γνωστό ότι η κλίση του ανάγλυφου είναι ένα άμεσα παραγόμενο του DEM. Αν δε, καθοριστεί ως περιοχή εξέτασης, μια δεδομένη λεκάνη κάθε φορά, υπολογίζεται μέσω των λειτουργιών ζώνης (zonal functions) μια σειρά στατιστικών αποτελεσμάτων σχετικών με την κλίση των κλιτύων της λεκάνης αυτής ανά ψηφίδα του DEM. Εμείς επιλέγουμε την οπτικοποίηση τη μέση τιμή (mean) σε ομαδοποιημένες κλάσεις.

Οι παραπάνω δείκτες ανατίθενται ως τιμές γνωρισμάτων στον πίνακα περιγραφών του συνδυασμένου shapefile (αυτού που προέκυψε από την διαδικασία ένωσης) κατά παρόμοιο τρόπο με αυτόν που αναφέρθηκε κατά την ημιαυτόματη μέθοδο, ενώ η μέθοδος ταξινόμησης και η γενικότερη χαρτογραφική παρουσίασης είναι ανάλογη (Χάρτες 16 – 20). Επιπλέον οι τιμές των μορφομετρικών παραμέτρων για κάθε λεκάνη ξεχωριστά υπάρχουν και στον αντίστοιχο πίνακα του Παραρτήματος Ι.

12

ΧΑΡΤΗΣ
ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΕΔΑΦΟΥΣ ΧΩΡΙΣ ΤΟΠΙΚΕΣ
ΤΑΠΕΙΝΩΣΕΙΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)

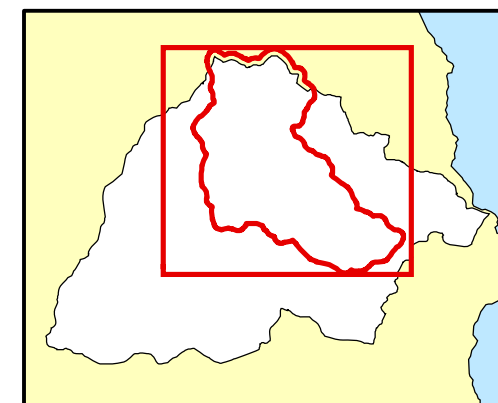


High : 955

Low : 30



Ευρύτερη Περιοχή



0 500 1.000 2.000
Μέτρα

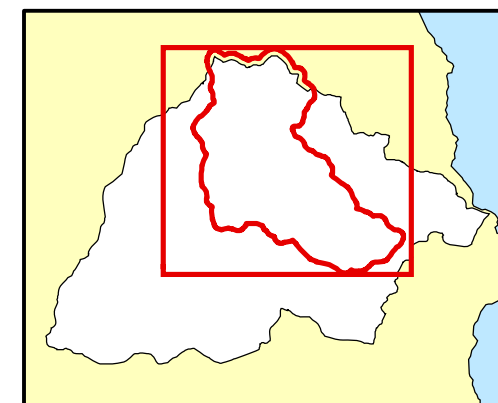
13

ΧΑΡΤΗΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΡΟΗΣ

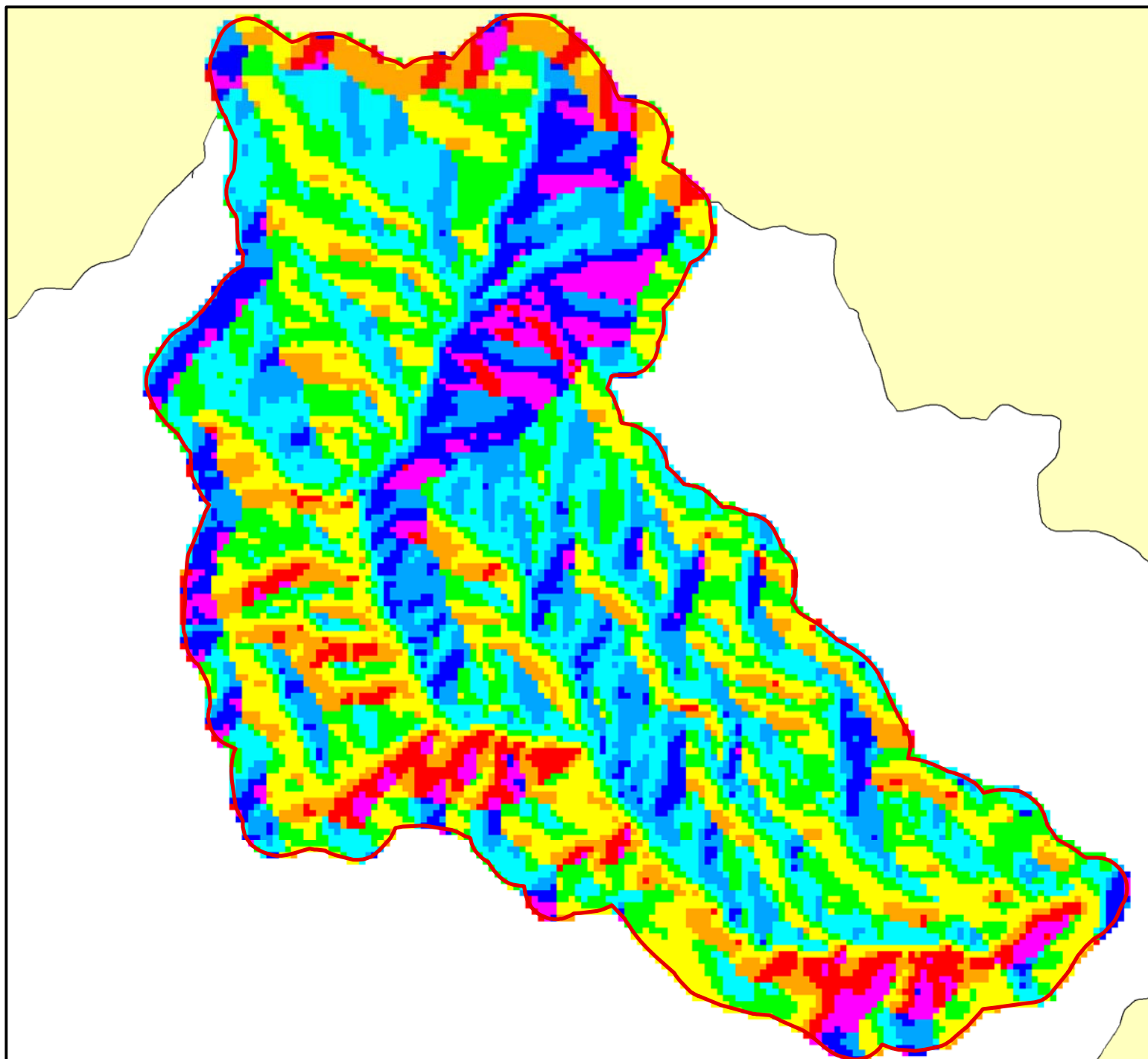
ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΡΟΗΣ

	1
	2
	4
	8
	16
	32
	64
	128



0 500 1.000 2.000
Μέτρα



14

ΧΑΡΤΗΣ
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΟΗΣ

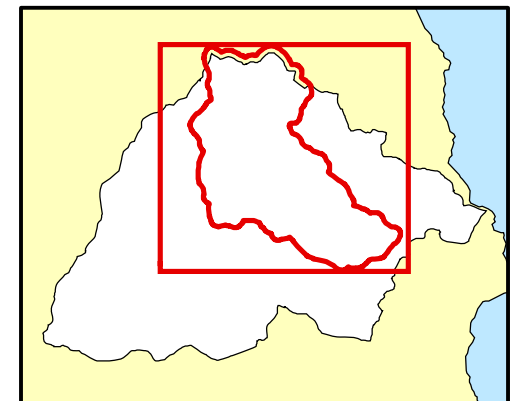
ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΤΙΜΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΟΗΣ



High : 11635

Low : 0



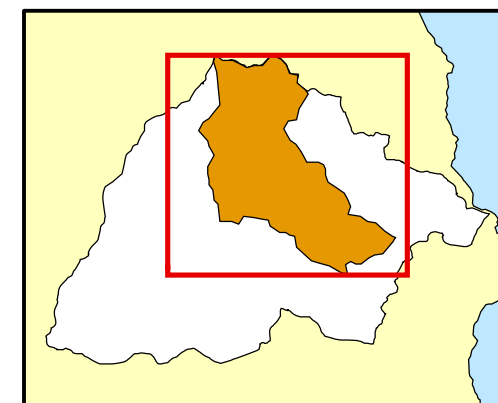
0 500 1.000 2.000
Μέτρα

15

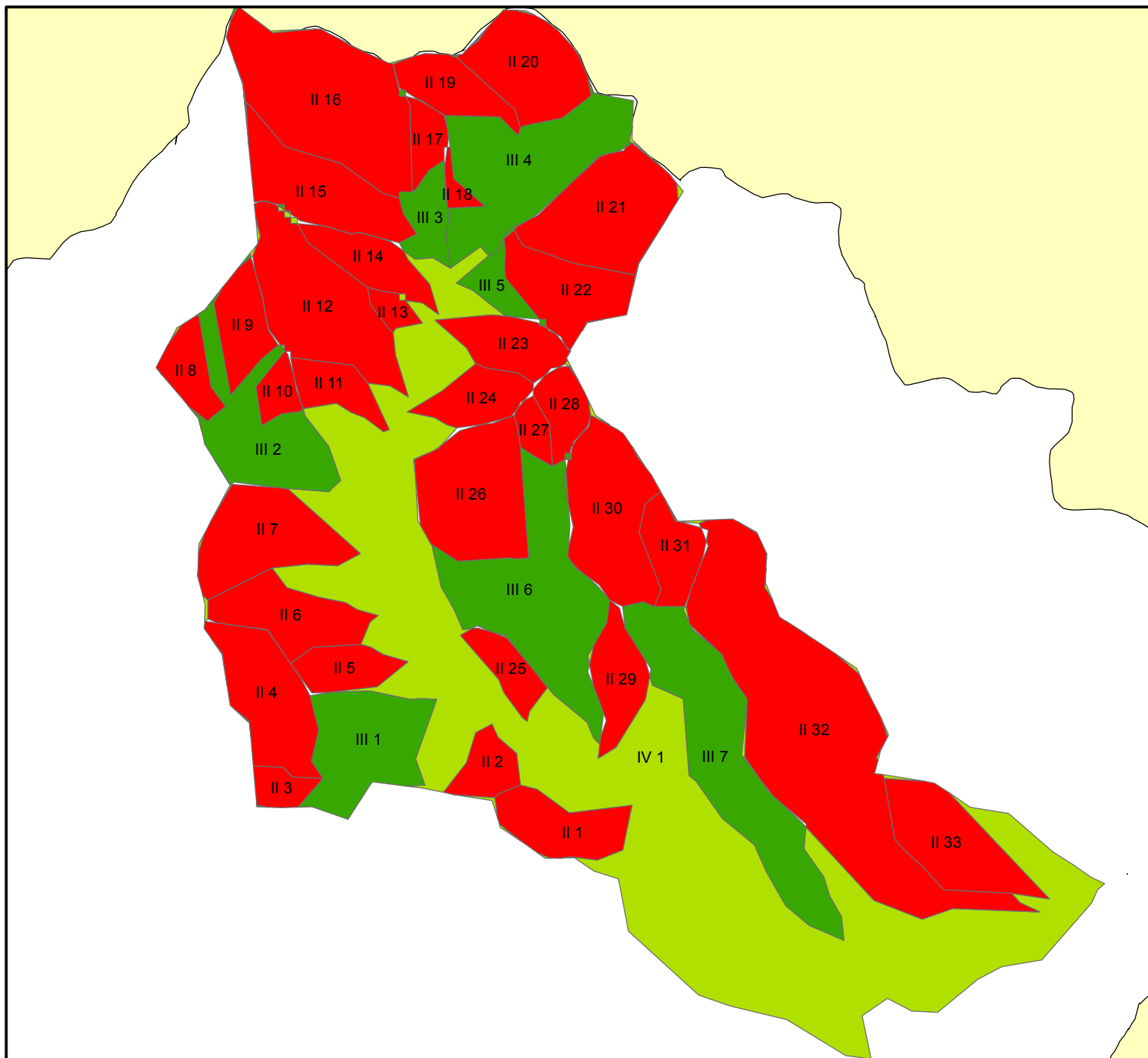
ΧΑΡΤΗΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- Λεκάνη δεύτερης τάξης
- Λεκάνη τρίτης τάξης
- Λεκάνη τέταρτης τάξης



0 500 1.000 2.000
Μέτρα

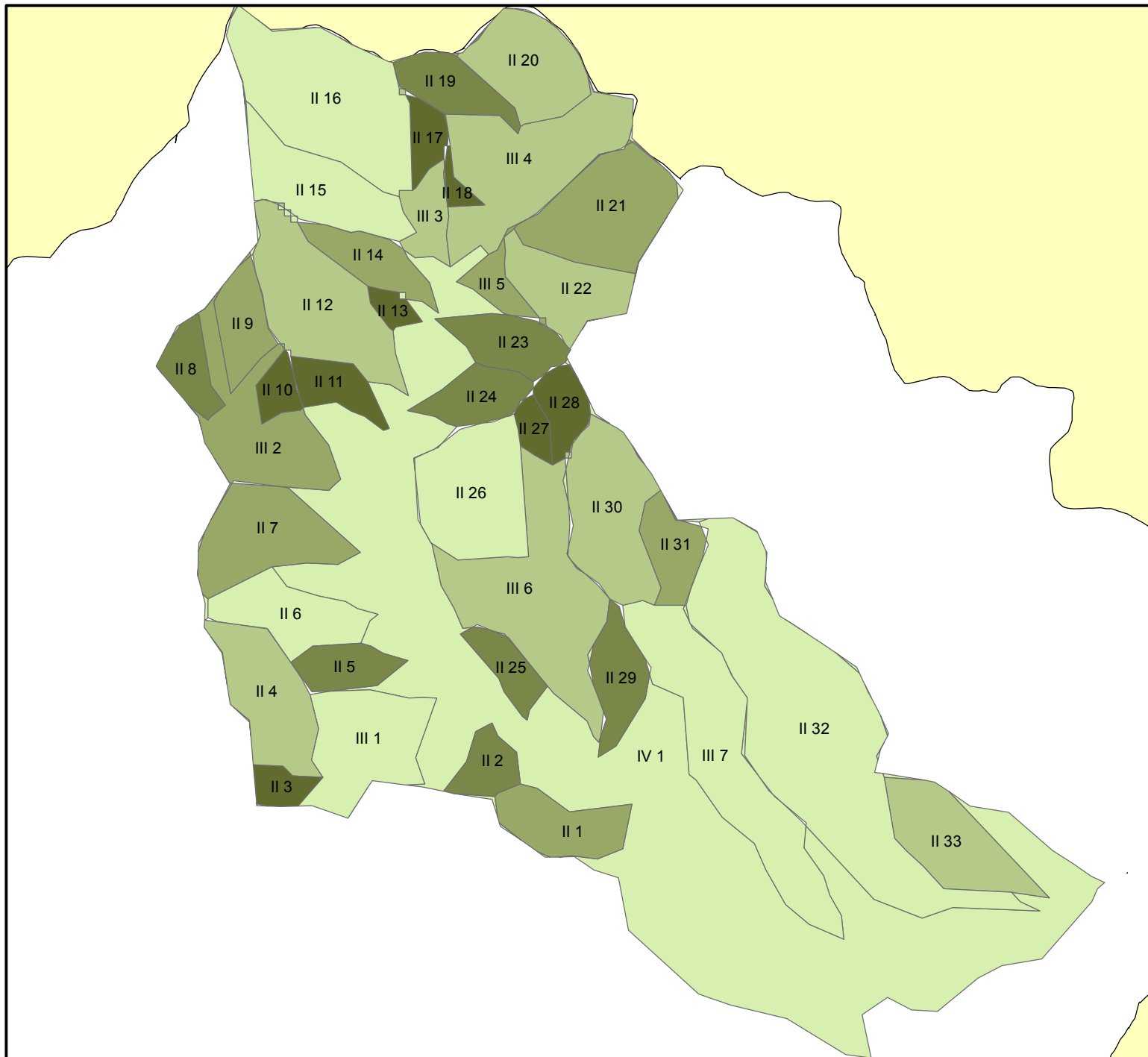
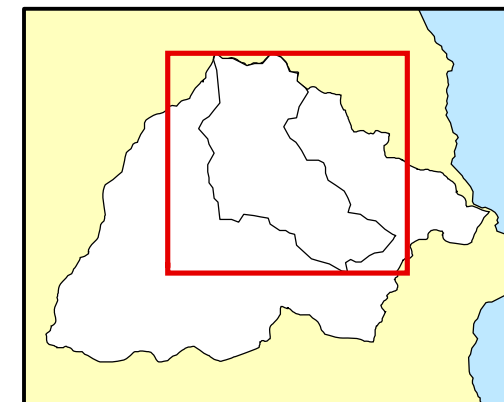
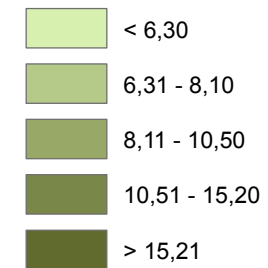


16

ΧΑΡΤΗΣ
ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΗΣ
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ

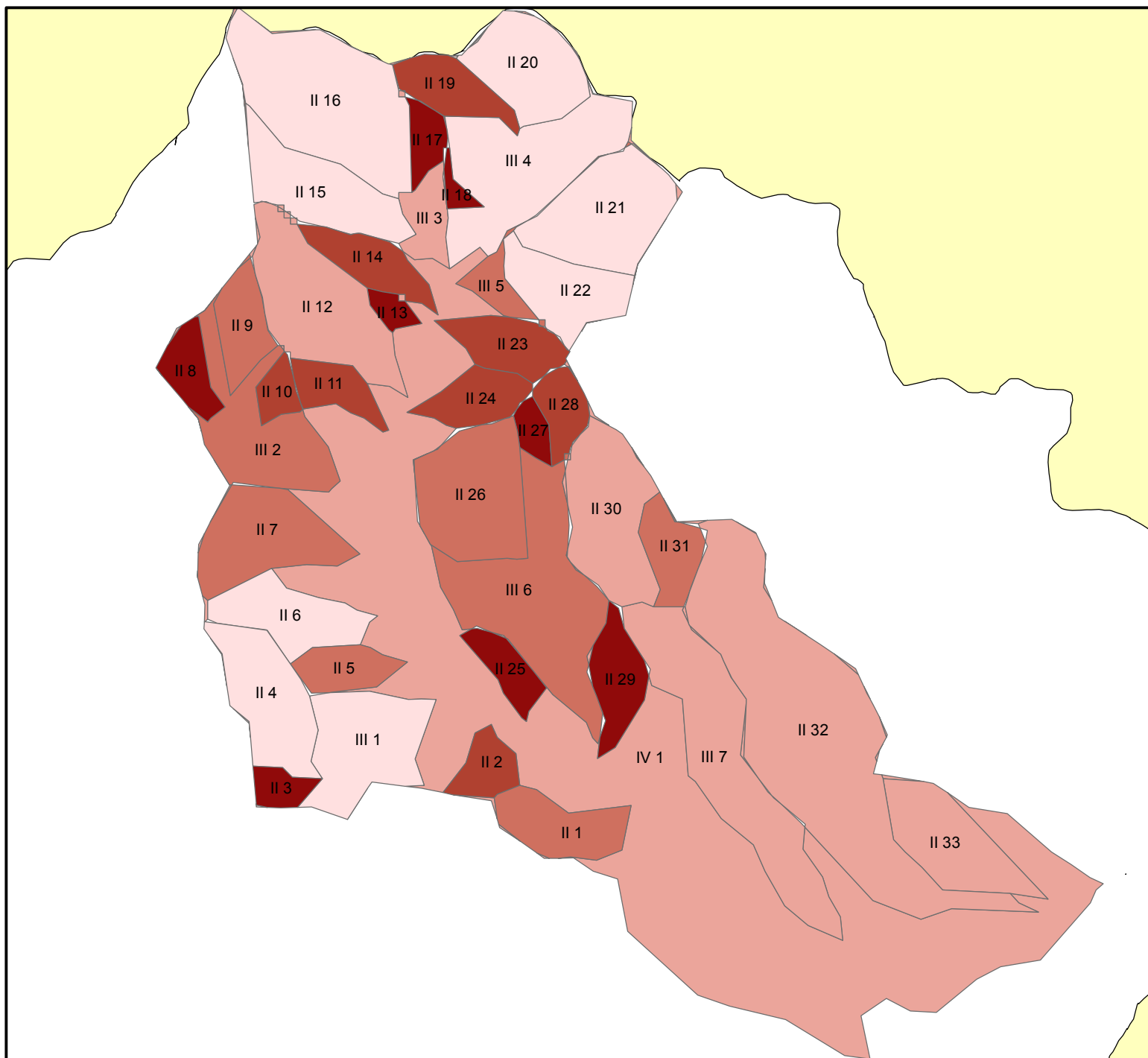
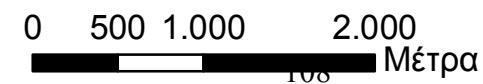
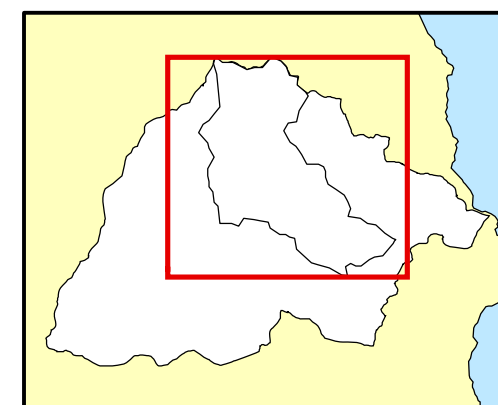
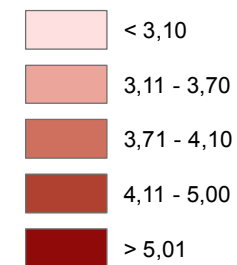


17

ΧΑΡΤΗΣ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ



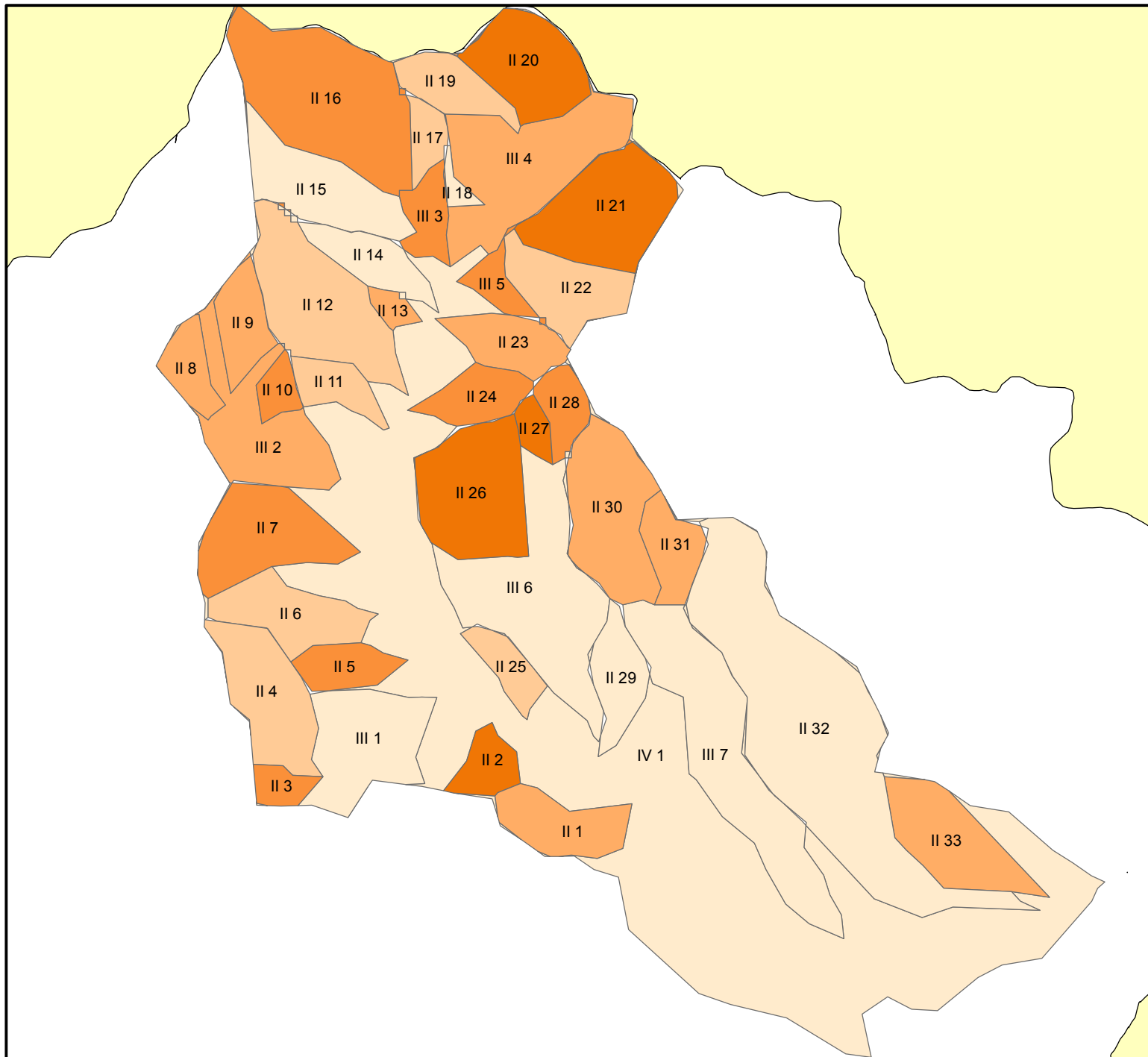
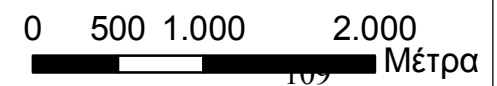
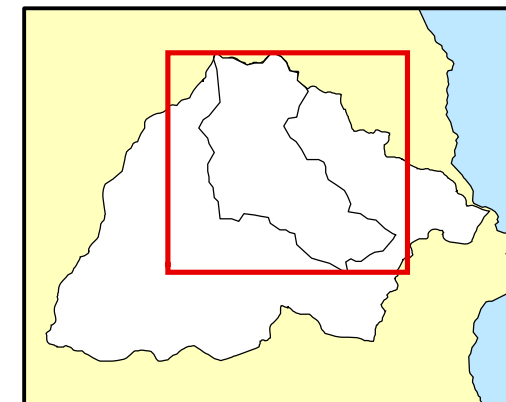
18

ΧΑΡΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΟΤΗΤΑΣ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΚΥΚΛΙΚΟΤΗΤΑ

	< 0,52
	0,53 - 0,58
	0,59 - 0,64
	0,65 - 0,68
	> 0,69



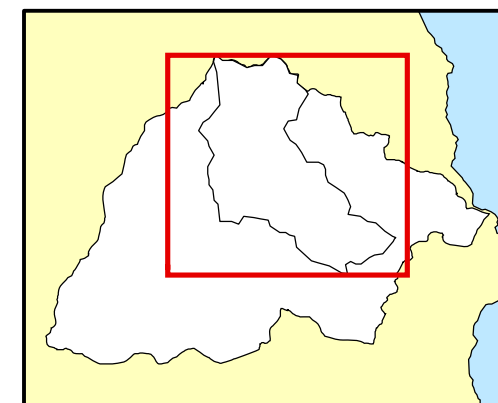
19

ΧΑΡΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΚΛΙΤΥΩΝ

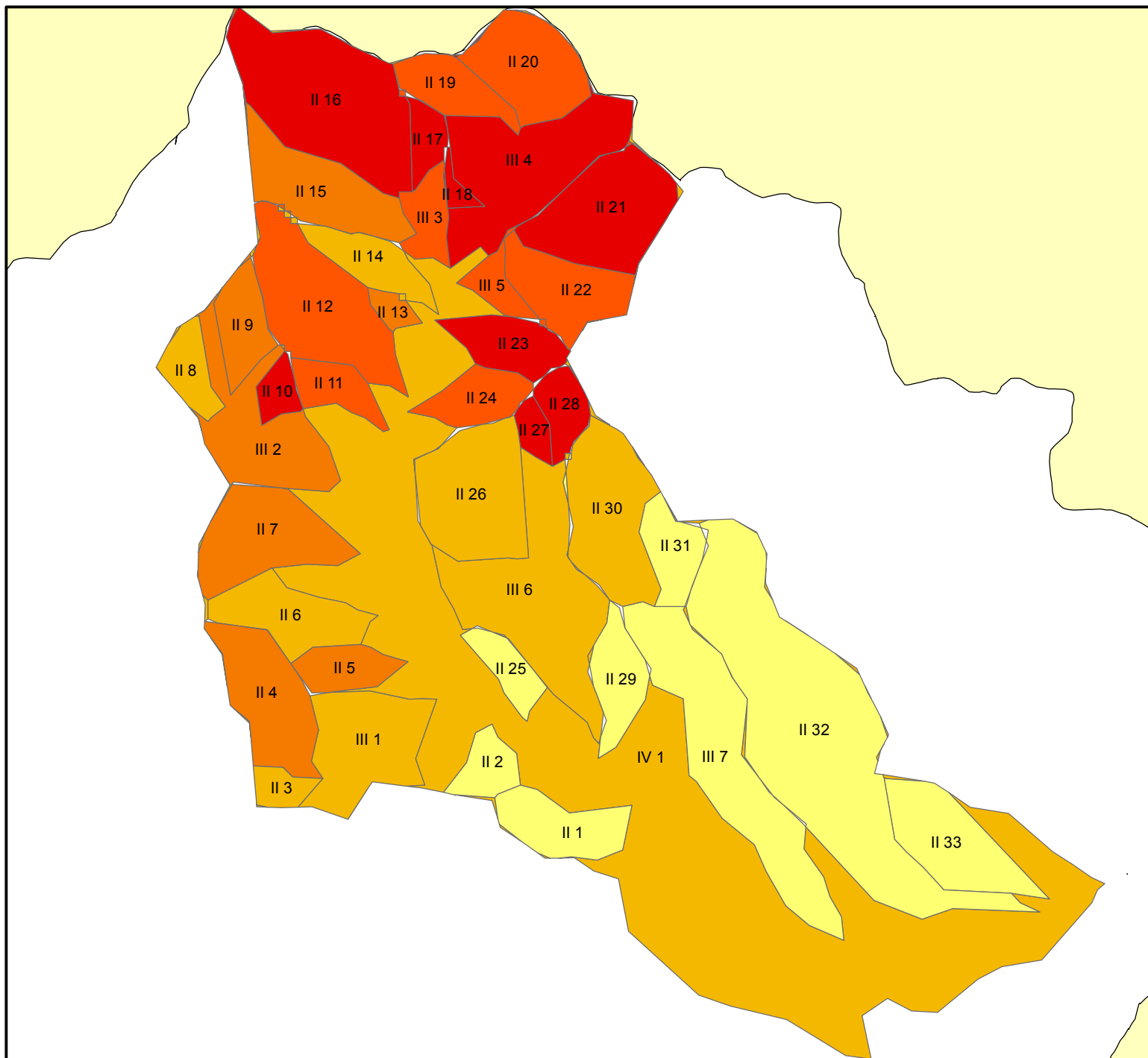
ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΚΛΙΣΗ ΚΛΙΤΥΩΝ

	< 18,60
	18,61 - 22,70
	22,71 - 27,70
	27,71 - 31,10
	> 31,11



0 500 1.000 2.000
Μέτρα



4.3 Φυσική σημασία των αποτελεσμάτων

Σε αυτό το στάδιο εξέλιξης της εργασίας, ύστερα από κατάλληλη χαρτογράφηση των μορφομετρικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν κάθε μια υδρολογική λεκάνη όσον αφορά τον τρόπο ταξινόμησης και ομαδοποίησης τους (οι διακριτές τιμές των οποίων είναι καταγεγραμμένες στους πίνακες του Παραρτήματος), έπεται η ανάλυση της φυσικής σημασίας τους. Μελετώντας τους πίνακες, συνδυαστικά με την ταυτόχρονη παράθεση των σχετικών χαρτών (όταν υπάρχει τέτοια εγγενής δυνατότητα της μεθόδου) παρατηρούμε ότι τιμές των παραμέτρων αποκλίνουν σε κάποιον βαθμό μεταξύ τους, ανάλογα με την μέθοδο που ακολουθήθηκε. Αν και στην χειροκίνητη μέθοδο δεν είναι προτιμητέα η χαρτογραφική αναπαράσταση, και η αυτοματοποιημένη μέθοδος στερείται αξιόπιστης αναπαράστασης λεκανών απορροής 1^{ης} τάξης, σε γενικές γραμμές, η τάξη των μεγεθών των δεικτών διατηρείται σταθερή και η μεταβολή των μέσων τιμών των υπολογιζόμενων παραμέτρων ανά τάξη λεκάνης ακολουθεί την ίδια τάση.

4.3.1 Υδρογραφική Συχνότητα και Πυκνότητα

Για τη λεκάνη απορροής του Λυκορρέματος, είναι άμεσα εμφανές πως σε κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις, οι μέσες τιμές της υδρογραφικής συχνότητας και πυκνότητας αυξάνουν καθώς μειώνεται η τάξη της λεκάνης αποστράγγισης. Κάτι τέτοιο θεωρείται εύλογο να ισχύει, καθώς οι λεκάνες 1^{ης} (αλλά αρκετές 2^{ης} τάξης) καταλαμβάνουν σχετικά μικρή έκταση (με αποτέλεσμα να μειώνεται ο παρανομαστής του κλάσματος υπολογισμού των δεικτών). Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι γενικά, όσο πιο κατακερματισμένος είναι ο χώρος μιας μεγάλης τάξης λεκάνης απορροής σε πολλές υπολεκάνες μικρών τάξεων, τόσο αυξάνει το δυναμικό υψηλών υδρογραφικών συχνοτήτων και πυκνοτήτων στις τελευταίες. Επίσης, παρατηρούμε ότι παρ' ότι οι μέσες τιμές των εξεταζόμενων παραμέτρων είναι υψηλότερες για λεκάνες 1^{ης} τάξης (π.χ. οι λεκάνες 1^{ης} τάξης που εντοπίζονται στο βόρειο τμήμα της ευρύτερης περιοχής αποστράγγισης του Λυκορρέματος όπως οι: I 47, I 49, I 66, I 68 κ.α.), επίσης μεγαλύτερες είναι και οι αποκλίσεις μεταξύ των τιμών που παρουσιάζουν.

Γενικά, οι μορφομετρικές παράμετροι της υδρογραφικής συχνότητας και πυκνότητας εξετάζονται συνδυαστικά, γιατί μαζί, αποτελούν ένδειξη της υδρογραφικής υφής μιας περιοχής. Όσο πιο «λεπτή» είναι η τελευταία, από τόσο πιο μεγάλο πλήθος και μεγάλο μήκος κλάδων γίνεται η αποστράγγιση ανά μονάδα επιφάνειας. Βασικός

παράγοντας που επηρεάζει δραστικά τις τιμές αυτών των δεικτών είναι το λιθολογικό και το κλιματολογικό καθεστώς, όπως και η τοπογραφία. Ως εκ τούτου, εκεί όπου παρουσιάζεται λεπτή υδρογραφική υφή (και είναι πιθανότερο σε λεκάνες 1^{ης} και 2^{ης} τάξης) οι λιθολογικοί σχηματισμοί είναι ευπρόσβλητοι στην διαβρωτική δράση του νερού, οι βροχοπτώσεις κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα, και κυριαρχούν απότομες κλίσεις, καταστάσεις που εντείνουν το φαινόμενο της διάβρωσης και της εύκολης επέκτασης του υδρογραφικού δικτύου.

Ειδικότερα, οι λεκάνες απορροής 1^{ης} τάξης με πολύ μικρό εμβαδόν είναι αυτές που παρουσιάζουν με βεβαιότητα τις μεγαλύτερες τιμές υδρογραφικής συχνότητας και πυκνότητας, διότι οι εκάστοτε κλάδοι 1^{ης} τάξης αποστραγγίζουν τη λεκάνη κατά βέλτιστο τρόπο (π.χ. I 3, I 88, I 133). Για την υδρογραφική συχνότητα ειδικότερα, παρατηρείται πως οι λεκάνες με επίμηκες σχήμα παρουσιάζουν επίσης πολύ υψηλές τιμές, καθώς η κοίτη 1^{ης} τάξης μπορεί να «ακολουθήσει» τη διάταξη της λεκάνης (π.χ. I 52, I 55, I 99, I 100). Αντίθετα, η αύξηση της επιφάνειας των λεκανών 1^{ης} τάξης, μεταβάλλει δραστικά τις τιμές των παραμέτρων προς πολύ χαμηλά επίπεδα.

Όσο αυξάνει η τάξη των κύριων κλάδων που αποστραγγίζουν μια λεκάνη, οι μεταξύ τους αποκλίσεις μετριάζονται, καθώς τα μεγέθη των εμβαδών των λεκανών δεν είναι δυνατό να μεταβληθούν όσο αυτά των 1^{ης} και 2^{ης} τάξης αφ' ενός, αφ' ετέρου το πλήθος και το μήκος των κλάδων μπορούν να ακολουθήσουν τέτοια ανάπτυξη, ώστε η αποστράγγιση να επιτελείται με ανάλογη αποτελεσματικότητα.

Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η λεκάνη του Λυκορρέματος παρουσιάζει αρκετά υψηλές τιμές υδρογραφικής συχνότητας και πυκνότητας, λόγω του έντονου αναγλύφου της (εφόσον στο βόρειο τμήμα της κείται στις πλαγιές του Πεντελικού), και πιθανόν του ευνοϊκού λιθολογικού και κλιματολογικού καθεστώτος. Με μέσες τιμές υδρογραφικής πυκνότητας 6,32 και υδρογραφικής πυκνότητας 3,34 – οι οποίες εξάγονται από τις επιμέρους τιμές που λαμβάνονται από τις τρεις μεθόδους – μπορεί να χαρακτηριστεί ως υδρολογική λεκάνη λεπτής υδρολογικής υφής και υψηλής αποστράγγισης.

4.3.2 Κυκλικότητα

Η μορφομετρική παράμετρος της κυκλικότητας αποτελεί την ειδοποιό ένδειξη περί της μορφής και του σχήματος της λεκάνης. Με τιμές από 0,00 για εντελώς επιμήκεις λεκάνες έως 1,00 για λεκάνες τέλειου κύκλου, η παράμετρος συσχετίζει το εμβαδόν επιφάνειας με το μήκος της περιμέτρου σύμφωνα με τον μαθηματικό τύπο $Cu = 4\pi Au / Pu^2$.

Από το προηγούμενο γίνεται αντιληπτό πόσο εύκολα μπορεί να μεταβληθεί η τιμή αυτού του δείκτη, αν μεταβληθεί έστω και λίγο το μήκος της μετρούμενης περιφέρειας. Ως άμεση απόρροια αυτού, κάτι που είναι πασιφανές και στους πίνακες του Παραρτήματος, οι αποκλίσεις των τιμών κατά την υλοποίηση των διάφορων μεθόδων είναι αυξημένες. Ωστόσο, οι μέσες τιμές που χαρακτηρίζουν κάθε τάξη λεκανών είναι σχεδόν ταυτόσημες, και παρατηρούμε πως ενώ η λεκάνη του Λυκορρέματος θα χαρακτηριζόταν ως επιμήκης, πολλές από τις μικρότερης τάξης λεκάνες τείνουν να λάβουν ένα σχήμα που πλησιάζει το τετράγωνο.

4.3.3. Κλίσεις

Όπως είναι άλλωστε αναμενόμενο, οι υψηλές μορφολογικές κλίσεις εμφανίζονται κυρίως στο βόρειο τμήμα της λεκάνης, όπου οι υπολεκάνες 1^{ης}, 2^{ης} και 3^{ης} τάξης έχουν αναπτυχθεί επί των πρανών του Πεντελικού όρους. Εξ' άλλου, η πυκνότητα των ισοϋψών «δικαιολογεί» αυτές τις απότομες κλίσεις. Επιπλέον, μεγάλες κλίσεις παρουσιάζουν οι λεκάνες 1^{ης} και 2^{ης} τάξης που εντοπίζονται στο δυτικό τμήμα της λεκάνης αποστράγγισης του Λυκορρέματος. Αντίθετα, εμφανώς πιο ήπιο ανάγλυφο παρουσιάζεται στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης που αποστραγγίζεται από την κεντρική κοίτη του ποταμού, καθώς και στο ανατολικό και στο νοτιοδυτικό. Στο τελευταίο μάλιστα, η χαμηλές κλίσεις του αναγλύφου εκφράζονται ως μια αδυναμία σαφούς οριοθέτησης του υδροκρίτη κατά την τρίτη μέθοδο. Σε αυτήν την περίπτωση, το ψηφιακό αρχείο διεύθυνσης ροής που παράγεται, δεν παρουσιάζει διαφοροποιήσεις της κλίσης των κλιτύων, ικανές να «προωθήσουν» ένα μονοσήμαντο καθορισμό του υδροκρίτη και ως εκ τούτου ο τελευταίος εκτείνεται πέρα από εκείνον που χαράχθηκε κατά τις δύο πρώτες μεθόδους.

Αξίζει να σημειωθεί, τέλος, πως οι κλίσεις των κλιτύων που υπολογίζονται κατά την Τρίτη μέθοδο, εμφανίζουν τιμές σταθερά χαμηλότερες από ότι στις δύο άλλες μεθοδολογίες. Αυτή η διαφοροποίηση έγκειται στην διαφορετική τεχνική που εφαρμόζεται στην αυτοματοποιημένη μέθοδο, όπου αξιοποιείται άμεσα το DEM, αναπαράγοντας ένα ψηφιακό αρχείο κλίσεων του αναγλύφου. Επίσης, κατά την ανάθεση τιμών εντός των λεκανών, όπου επιτελείται μια λειτουργία ζώνης ψηφιδωτών δεδομένων, εξαιρετική σημασία έχει το «παράθυρο» εντός του οποίου επιτυγχάνεται η διεργασία. Τέλος, το μέγεθος της ψηφίδας (cell size) του DEM παίζει καθοριστικό ρόλο. Εδώ, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιούμε πλευρά ψηφίδας ίση με 50 μ.

5. ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Για να επιτευχθεί μια πιο σφαιρική/ ολιστική ανάλυση, θεωρούμε σκόπιμη την σύγκριση των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν ως προς τον χρόνο και την φυσική κόπωση, τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων ως προς την αξιοπιστία τους, καθώς και τον τρόπο παρουσίασής τους. Επιπροσθέτως, προβαίνουμε σε συζήτηση για τις δυνατότητες της κάθε μεθόδου και για το δυναμικό τους προς την κατεύθυνση της διαχείρισης φαινομένων και περιστατικών, τα οποία είναι σε άμεση συνάρτηση με το φυσικό φαινόμενο της κατάκλισης (τυχαίας) υδρολογικής λεκάνης.

5.1 Ανάλυση – Σύγκριση μεθόδων

5.1.1 Γενικά

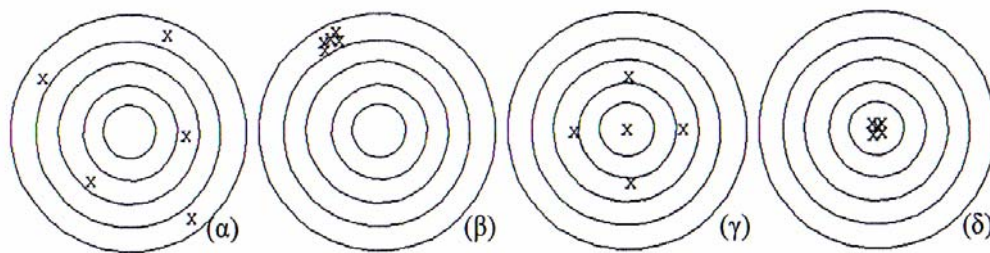
Η υδρολογική ανάλυση που της περιοχής μελέτης, υλοποιήθηκε υπό τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης σε συνδυασμό με την ποσοτική γεωμορφολογική ανάλυση αποδίδονται στους Χάρτες του προηγούμενου κεφαλαίου και τους πίνακες του Παραρτήματος. Γεγονός αποτελεί, πως, παρά τις σχετικά μικρές αποκλίσεις στις τιμές οι μέθοδοι αυτές διαφέρουν ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων τους, η οποία εξαρτάται τόσο από την μέθοδο καθορισμού των λεκανών αποστράγγισης, όσο και από τον τρόπο μέτρησης των επιμέρους μεγεθών και εκτίμησης των υπολογιζόμενων παραμέτρων.

Προτού ξεκινήσει αυτή η ανάλυση θεωρείται σκόπιμο να αποσαφηνιστεί η ακρίβεια, η οποία, παρά το γεγονός ότι η συγχέεται με την ορθότητα χρησιμοποιούμενοι ως όροι συνώνυμοι στην ποιότητα των μετρήσεων-παρατηρήσεων, αναφέρονται σε δύο διαφορετικές έννοιες

Όταν εξετάζονται χαρτογραφικά στοιχεία, η ορθότητα ή πιστότητα είναι ο βαθμός στον οποίο τα αναπαριστώμενα σε ένα χάρτη ή σε μια ψηφιακή βάση δεδομένων προσεγγίζει την πραγματικότητα. Από την άλλη, η ακρίβεια αναφέρεται στο επίπεδο των μετρήσεων σε αυτόν των χάρτη ή τη βάση δεδομένων και στην δυνατότητα καταγραφής θέσεων σε πολύ μικρές μονάδες μέτρησης (Χαλκιάς, 2003). Γενικότερα, στις μετρήσεις, η ορθότητα αναφέρεται στο πόσο «κοντά» στην πραγματική τιμή βρίσκονται οι μετρήσεις ενός μεγέθους, ενώ η ακρίβεια στο πόσο κοντά βρίσκονται οι μετρήσεις μεταξύ τους

(Στεφανάκης, 2002) (Σχ. 5.1). Συμπερασματικά, όπως γίνεται αντιληπτό, αυξημένη ορθότητα δεν συνεπάγεται αναγκαστικά αυξημένη ακρίβεια, ούτε το αντίθετο.

Επιπροσθέτως, επειδή θα γίνει αναφορά στις μετρήσεις και σε σφάλματα που σχετίζονται με αυτές, θεωρείται σκόπιμο να παρατεθούν οι τρεις τύποι αυτών. Έτσι λοιπόν, τα σφάλματα που εξετάζονται διακρίνονται: στα *χονδροειδή* που οφείλονται σε απροσεξία του παρατηρητή, τα *συστηματικά* που οφείλονται σε ατέλειες οργάνων και στα *τυχαία*, αιτία παραγωγής των οποίων αποτελεί η επίδραση εξωτερικών παραγόντων και η ανεπάρκεια των ανθρωπίνων αισθητηρίων οργάνων (Στεφανάκης, 2002).



Σχήμα 5. 1: Παραδείγματα μετρήσεων με διαφορετική ακρίβεια – ορθότητα.

Σημείωση: (α) μικρή ακρίβεια – μικρή ορθότητα, (β) μεγάλη ακρίβεια – μικρή ορθότητα, (γ) μικρή ακρίβεια – μεγάλη ορθότητα, (δ) μεγάλη ακρίβεια – μεγάλη ορθότητα.

Πηγή: Χαλκιάς, 2003.

5.1.2 Αξιολόγηση χειρωνακτικής μεθόδου

Στην πρώτη περίπτωση (χειρωνακτική μέθοδος), αξιοποιήθηκε άμεσα ο αναλογικός χάρτης της ΓΥΣ, με την απ' ευθείας χάραξη και οριοθέτηση του βασικού και των επιμέρους υδροκριτών, καθώς και την άμεση χάραξη του υδρογραφικού δικτύου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η χάραξη του υδρογραφικού δικτύου, αποτελεί διαδικασία απλής «ιχνηλάτησης» του ήδη αναπαριστώμενου υδρογραφικού δικτύου σε έναν τοπογραφικό χάρτη. Αντίθετα, η μέθοδος ανάδειξης των υδροκριτών αποτελεί μια σχετικά «υποκειμενική» διαδικασία, της οποίας το αποτέλεσμα προσεγγίζει την πραγματικότητα* τόσο πιο πιστά όσο πιο έντονο είναι το ανάγλυφο και απότομες οι υψομετρικές μεταβολές (κατά την μετάβαση από μια λεκάνη σε μια γειτονική της). Παράλληλα, χρειάζεται να εξετάζονται με ιδιαίτερη προσοχή τα σημεία από τα οποία πρόκειται να διέρθει η εκάστοτε υδροκριτική γραμμή.

* Εδώ ο όρος πραγματικότητα χρησιμοποιείται καταχρηστικά, καθώς οι υδροκρίτες δεν έχουν τόσο πραγματική υπόσταση, όσο εννοιολογική-σχεδιαστική.

Όσον αφορά στις μετρήσεις, οι οποίες μέσα από υπολογισμούς οδήγησαν στην ανάδειξη μορφομετρικών παραμέτρων, έγινε χρήση συγκεκριμένων οργάνων. Για την μέτρηση μηκών, χρησιμοποιήθηκε το μηκόμετρο, και για τον προσδιορισμό επιφανειών, το ψηφιακό εμβαδόμετρο. Το πρώτο, έχει τέτοια βαθμονόμηση (αναλογικές ενδείξεις), που δεν επιτρέπει ακρίβεια πάνω από το 0,5 του χιλιομέτρου (για την κλίμακα εργασίας). Βέβαια, πρακτικά εκτιμήθηκαν σχεδόν σε όλες τις μετρήσεις, και μικρότερες υποδιαίρεσεις «αυξάνοντας» έτσι την ακρίβεια των μετρήσεων στο 0,2 – 0,1 του χιλιομέτρου. Αυτή όμως η προσπάθεια βελτίωσης της ακρίβειας μέσω υποκειμενικών εκτιμήσεων αντισταθμίστηκε από μειωμένη αξιοπιστία αποτελεσμάτων. Πέρα από αυτό το μειονέκτημά του, το όργανο παρουσιάζει την εγγενή αδυναμία ακριβούς ταύτισης στις γραμμικές οντότητες, λόγω κατασκευής. Τα παραπάνω αντιμετωπίζονται ως συστηματικά σφάλματα. Αντίθετα, το ψηφιακό εμβαδόμετρο, διαθέτει όλα τα χαρακτηριστικά για μετρήσεις αυξημένης ορθότητας και ακρίβειας, τόσο λόγω του επαρκούς πλήθους δεκαδικών ψηφίων, όσο και λόγω παροχής δυνατότητας βελτιστοποίησης της ιχνηλάτησης των περιγραμμάτων με μικρές αποκλίσεις. Παρά τις διαφορές τους στα τεχνικά χαρακτηριστικά, κατά την εκτέλεση μετρήσεων και με τα δύο αυτά όργανα προξενείται ιδιαίτερη κόπωση, καθώς απαιτείται πολύωρη ενασχόληση και αυξημένη προσοχή. Ας σημειωθεί τέλος, ότι για την ελαχιστοποίηση τυχαιών σφαλμάτων οι μετρήσεις διεξάχθηκαν τρεις φορές και καταχωρήθηκε η μέση τιμή αυτών.

5.1.3 Αξιολόγηση Ημιαυτόματης Μεθόδου

Η δεύτερη μέθοδος (ημιαυτόματη) ελάχιστα διαφέρει από την πρώτη στον τρόπο χάραξης των κλάδων του ποταμού και καθορισμού των υδροκριτών.* Βασική διαφοροποίηση αποτελεί η εκτέλεση των διαδικασιών σε ένα GIS. Εδώ επικεντρώνεται το ενδιαφέρον μας στην σχολαστική τήρηση τοπολογικών σχέσεων (ώστε το δίκτυο να είναι πλήρως συνδεδεμένο, να τηρούνται οι σχέσεις γειτονίας μεταξύ των λεκανών), στην απόδοση περιγραφικής πληροφορίας στις γεωγραφικές οντότητες και στην γενικότερη οργάνωση και διαχείριση της πληροφορίας των ψηφιοποιημένων θεματικών επιπέδων. Τα αρχικά στάδια της εκπόνησης αποτελούν επίπονη διαδικασία (αγκίστρωση, ψηφιοποίηση, αναλυτικές λειτουργίες επικάλυψης κ.α.), άλλα με την περάτωσή τους η εκτίμηση μηκών και επιφανειών αποτελεί υπόθεση δευτερολέπτων. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι

* Θεωρούμε ότι οι οντότητες που προκύπτουν από την πρώτη και από τη δεύτερη μεθοδο πρακτικά συμπίπτουν

υψηλή (δυνατότητα εμφάνισης μεγάλου πλήθους δεκαδικών ψηφίων), η ορθότητά τους όμως εξαρτάται την ικανότητα εκτέλεσης του συστήματος πολύπλοκων μαθηματικών υπολογισμών, από την ορθότητα και ακρίβεια της αρχικής ψηφιοποίησης. Τα δύο τελευταία είναι άμεσα συσχετιζόμενα τόσο με την υποκειμενικότητα της μεθόδου οριοθέτησης των λεκανών, όσο και με την ποιότητα των αρχικών δεδομένων. Η αξιολόγησή αυτών των δεδομένων θα παρατεθεί σε επόμενη ενότητα.

5.1.4 Αξιολόγηση Αυτοματοποιημένης Μεθόδου

Η τρίτη μέθοδος, αν και αξιοποιεί όμοια δεδομένα (δευτερογενής πληροφορία σε αναλογικό χάρτη), αντιδιαστέλλεται σαφώς σε σχέση με τις άλλες δύο προς την μεθοδολογία της υδρολογικής ανάλυσης, δηλ. τον τρόπο με τον οποίο προκύπτει η υδρολογική λεκάνη που αποστραγγίζει το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής, και οι επιμέρους λεκάνες εντός των οποίων απορρέει επιφανειακά η συγκεντρωμένη ροή των κλάδων μικρότερης τάξης. Η ορθή αποτύπωση των ισοϋψών, των υψομετρικών σημείων, και η απόδοση των σωστών τιμών υψομέτρου, καθώς και η ψηφιοποίηση του ήδη υφιστάμενου υδρογραφικού δικτύου σε ένα λογισμικό GIS, συντελούν καθοριστικά στην διαδικασία αναπαραγωγής ενός αξιόπιστου DEM, το οποίο αποτελεί δευτερεύον αρχείο εισόδου για την δημιουργία υδρολογικής λεκάνης και υπολεκανών. Με τη δημιουργία διαδοχικών ψηφιακών αρχείων καννάβου, μέσα από τις λειτουργίες υδρολογικής ανάλυσης του λογισμικού, τα οποία έχουν ως βάση το αρχείο καννάβου του DEM της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης που εξετάζεται, καταλήγουμε στην οριοθέτηση της υδρολογικής λεκάνης που αποστραγγίζει τα κατακρημνίσματα που προσπίπτουν εντός των ορίων της. Η κατάδειξη της τελευταίας, προϋποθέτει όμως και την τοποθέτηση του σημείου εξόδου/στομίου της λεκάνης. Προφανώς, κατά τον ίδιο τρόπο, η αποτύπωση και των λοιπών υπολεκανών, απαιτεί ανάλογη διαδικασία.

Όπως έγινε εμφανές κατά την εκτέλεση των σχετικών διαδικασιών στο προηγούμενο κεφάλαιο, η τρίτη μέθοδος απέδωσε διαφορετικά χαρτογραφικά αποτελέσματα, τόσο ως προς το δίκτυο, αλλά κυρίως ως προς τις λεκάνες αποστράγγισης. Συγκεκριμένα, η λεκάνη που αποστραγγίζει τον κλάδο της κεντρικής κοίτης του Λυκορρέματος, εμφανίζεται διαφοροποιημένη ως προς αυτή που αναπτύχθηκε με τις δύο πρώτες μεθόδους (ενώ ο κύριοι κλάδοι σχεδόν ταυτίζονται). Συγκεκριμένα, το νότιο-νοτιοδυτικό τμήμα της επεκτείνεται γεωγραφικά πιο πολύ κατά την τρίτη μέθοδο. Η ερμηνεία για αυτήν την απόκλιση πιθανότητα σχετίζεται με ήπια τοπογραφία αυτού του

τμήματος της λεκάνης. Όπως έχει διατυπωθεί και παραπάνω, όταν το ανάγλυφο είναι ομαλό, (δηλ. οι ισοϋψείς είναι αραιές), η οριοθέτηση των υδροκριτών δεν καθορίζεται με σαφήνεια, καθώς οι τελευταίοι μπορεί να εκτείνονται ακόμη και για αρκετά χιλιόμετρα, σε αντίθεση με περιοχές όπου το ανάγλυφο είναι τραχύ.

Ακόμη, οι λεκάνες απορροής 2^{ης} τάξης, δεν δύνανται να αναδειχθούν πάντοτε και με σαφήνεια, ιδιαίτερα αν υφίστανται γειτονικοί κλάδοι 1^{ης} τάξης μεγάλου μήκους. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η παραγόμενη πληροφορία στο flow accumulation grid, εξωθεί σε συγχώνευση δυο λεκάνες διαφορετικής τάξης σε μια. Επιπλέον, οι λεκάνες 1^{ης} τάξης, εκτός από ορισμένες που αποστραγγίζονται από μεγάλου μήκους κλάδους – και επομένως απορρέουν μέσω πολλών φατνίων – δεν δύνανται να αναπαρασταθούν, ακόμη και αν θέσουμε εξαιρετικά μικρό κατώφλι. Αντίθετα, προκύπτουν άλλοι κλάδοι, οι οποίοι στον αναλογικό χάρτη δεν απεικονίζονται, και με τοποθέτηση των σημείων εξόδου, αποδίδουν εν δυνάμει διαφορετικές λεκάνες από τις υπαρκτές. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται ενδεχομένως στην ακαταλληλότητα της χρησιμοποιούμενης τεχνικής παρεμβολής για την κατάδειξη των κοιτών συγκεντρωμένης ροής οι οποίες δεν τροφοδοτούνται από άλλους κλάδους, και επομένως ενέχουν πολύ μικρή απορροή. Η «πυκνότητα» των ισοϋψών, ως στοιχείο εισροής σε αυτήν την μέθοδο παρεμβολής εμπλέκεται ομοίως στην ορθότητα της αναπαράστασης του κατάλληλου DEM.

Άρα, εδώ εντοπίζεται μια «αδυναμία» και «δυσκαμψία» της αυτοματοποιημένης μεθόδου η οποία οφείλεται στα ελλιπή στοιχεία (υψομετρικές καμπύλες) για αυτήν την περιοχή. Έτσι, εκεί που δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα, το αυτοματοποιημένο σύστημα δυσκολεύεται (και συχνά λαθεύει) στην εκτίμηση των υδροκριτικών γραμμών, κάτι που οι έμπειροι χρήστες διεξάγουν με μεγάλη ευκολία..

Επίσης, εξαιρετικά σημαντική παράμετρος είναι το μέγεθος της ψηφίδας του DEM που αναπαρήχθη από τον αλγόριθμο ANUDEM, το μέγεθος της οποίας, αν και δεν ασκεί σημαντική επίδραση στην αποτύπωση των κύριων κοιτών ενός υδρογραφικού δικτύου, και στην ανάδειξη μεγάλου εύρους λεκανών απορροής, αποτελεί κρίσιμης σημασίας παράγοντα για την απεικόνιση μικρών κλάδων και την οριοθέτηση των λεκανών απορροής τους. Βέβαια, γνωρίζουμε πως η μείωση του μεγέθους της ψηφίδας πέραν ενός ορίου – ανάλογα με την κλίμακα του δεδομένου χάρτη, όχι μόνο δεν επιφέρει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, αλλά εκτός του γεγονότος της ανάγκης διαχείρισης μεγαλύτερου όγκου αρχείων, ενδεχομένως συνεπάγεται και αρνητικές επιπτώσεις στην αξιοπιστία των

παραγόμενων. Επομένως, αυτό που συνίσταται είναι η χρήση μεγαλύτερης κλίμακας χαρτών, ή η εκμετάλλευση άλλων αρχικών πηγών δεδομένων.*

Όμως, ακόμη και η αξιοπιστία των αρχικών δεδομένων τίθεται υπό αμφισβήτηση εφόσον στην περίπτωση που εξετάζεται – όπως και σε ανάλογες περιπτώσεις – , η χαρτογράφηση των κοιτών 1^{ης} τάξης, είναι σχετικά υποκειμενική, καθώς δεν υπάρχει ξεκάθαρη διάκριση ανάμεσα στους κλάδους συγκεντρωμένης ροής και ενδεχομένως επέρχεται σύγχυση. Η εποχή της χαρτογράφησης, η σχολαστικότητα της μελέτης πεδίου, και η εμπειρία του αρμόδιου φορέα χαρτογραφήσεων επιτελούν σημαντικό ρόλο σε τέτοιες εργασίες, ενώ μια άλλη καθοριστική παράμετρος που διέπει την ορθότητα και την ακρίβεια της μεθόδου αυτής, καθώς και των λοιπών μεθόδων, έγκειται στην κλίμακα του χρησιμοποιούμενου χάρτη και επηρεάζει πολλές από τις προηγούμενες παραμέτρους.

Γενικά μπορεί να διατυπωθεί πως η αξιοπιστία της μεθόδου εξαρτάται από την ορθή και ακριβή ψηφιοποίηση των ισοϋψών, των υψομετρικών σημείων και του υδρογραφικού δικτύου (χωρική ορθότητα), καθώς και την σωστή καταγραφή του περιγραφικού χαρακτηριστικού του υψομέτρου τους** (ορθότητα περιεχομένου). Ακόμη, εξαρτάται από την αξιοπιστία της τεχνικής παρεμβολής που χρησιμοποιείται, από τις δυνατότητες του λογισμικού, και όπως πάντα, την ποιότητα των αρχικών δεδομένων. Αυτό το θέμα, εξετάζεται στην παρακάτω ενότητα. Παρά όμως την παρέκκλιση στην αναπαράσταση των μορφών των λεκανών – η οποία μπορεί να εξακριβωθεί από άμεσες τοπογραφήσεις – η υδρολογική ανάλυση μέσω της επεξεργασίας ενός DEM, αποφέρει οφέλη για «άγνωστες» περιοχές, οι οποίες στερούνται τοπογράφησης και δεν διατίθενται χαρτογραφικά υπόβαθρα, και γενικά τα χωρικά δεδομένα που διατίθενται είναι αραιά και σχετικά ανεπαρκή (sparse spatial data). Αξίζει να σημειωθεί, πως σε περιπτώσεις που οι τοπογραφικές αποτυπώσεις δεν μπορούν να επιτευχθούν λόγω ποικίλων περιοριστικών παραγόντων, μπορούν να αξιοποιηθούν ομοίως δεδομένα από GPS, ή και δεδομένα τηλεπισκόπησης (Remote Sensing Images),*** αν υπάρχει τέτοια δυνατότητα. Η δυναμική της μοντελοποίησης υφίσταται τόσο κατά την αξιοποίηση χαρτογραφικών δεδομένων, όσο και τηλεπισκοπικών δεδομένων.

* Βλ. παρακάτω.

** Το υψόμετρο αποτελεί την τρίτη διάσταση του χώρου. Κατά την απεικόνιση στο δισδιάστατο χώρο ανάγεται στη θεματική διάσταση (αντί της χωρικής).

*** Δορυφορικές εικόνες κυρίως.

Αναφορικά με τις μετρήσεις και τους υπολογισμούς, χαρακτηρίζονται από σημαντική ακρίβεια, εφόσον αξιοποιούνται υπολογιστικές μέθοδοι του λογισμικού, όπου παρέχεται η ακρίβεια αρκετών δεκαδικών ψηφίων.

5.2 Ποιότητα Αρχικών Δεδομένων και πηγές σφαλμάτων.

Κάθε φορά που εξετάζεται η ποιότητα ή η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μιας χωρικής ανάλυσης, θα πρέπει, σε αρχικό στάδιο, να αξιολογείται η ποιότητα των αρχικών δεδομένων. Βασικό δεδομένο και στις τρεις διαφορετικές μεθόδους διαμέσου των οποίων υλοποιήθηκε αυτή η υδρολογική και ποσοτική γεωμορφολογική ανάλυση αποτέλεσε ο αναλογικός χάρτης «Κηφισιά» της ΓΥΣ, κλίμακας 1: 50.000. Όπως έχει προαναφερθεί, η ικανότητα κατάδειξης λεπτομερειών σε έναν χάρτη καθορίζεται από την κλίμακά του (Χαλκιάς, 2003). Επομένως, η κλίμακα ενός χάρτη προσδιορίζει έμμεσα και την ποσότητα της περιεχόμενης πληροφορίας, και συνεπώς την πυκνότητα των αποδιδόμενων παρατηρήσεων. Πέρα δε από την λεπτομέρεια του χάρτη, η πυκνότητα των αρχικών παρατηρήσεων εξαρτάται και από το κόστος και χρόνο συλλογής ατά τη διαδικασία χαρτογράφησης, την διαθεσιμότητα και την προσβασιμότητα σε δεδομένα που λαμβάνονται από επιτόπιες έρευνες και άλλες μεθόδους (π.χ. φωτοερμηνεία – τηλεπισκόπηση). Επίσης, η χωρική ορθότητα, δηλ. η απόκλιση των στοιχείων του χάρτη από τις πραγματικές θέσεις, και η ορθότητα περιεχομένου, η οποία σχετίζεται με τη σωστή καταγραφή χαρακτηριστικών επηρεάζουν την αξιοπιστία ενός χάρτη.

Στην περίπτωση μελέτης μας, τα βασικά χαρακτηριστικά της πραγματικότητας που εξετάζουμε είναι το υψόμετρο, και η παρουσία δικτύου αποστράγγισης της επιφανειακής απορροής του νερού. Σε έναν τοπογραφικό χάρτη, το πρώτο αναπαρίσταται με τις ισοκαμπύλες υψομέτρου και τα υψομετρικά σημεία ενώ το δεύτερο με τη χάραξη της γραμμικής οντότητας του (συνδεδεμένου) ποτάμιου συστήματος. Η πυκνότητα των απεικονιζόμενων ισοϋψών είναι 20 μ., επομένως η ακρίβεια αναπαράστασης της τρίτης διάστασης του χώρου περιορίζεται στα 20 μ. Πέρα από την πυκνότητα αναπαράστασης, σημαντικό ζήτημα αποτελεί η μέθοδος και η πυκνότητα συλλογής. Ύστερα από την διεκπεραίωση της τελευταίας, και για να καταστεί βέβαια εφικτή η αναπαράσταση των ισοϋψών σε έναν τοπογραφικό χάρτη, αξιοποιείται κάποια τεχνική κάποιας (διγραμμικής συνήθως) παρεμβολής, προκειμένου να συνενωθούν οι θέσεις κοινού υψομέτρου. Όσον αφορά την αναπαράσταση του υδρογραφικού δικτύου, η αποτύπωση του, όπως και εν γένει η οριοθέτηση φυσικών χαρακτηριστικών-φαινομένων της γης (βλάστηση, δασικές

εκτάσεις, παράκτια ζώνη διάβρωσης κ.α.) επιτελείται με πολύ μικρότερη ορθότητα, λόγω της εγγενούς ανυπαρξίας σαφών ορίων και της συνεχούς αναπαράστασής τους στον χώρο, σε αντίθεση με ανθρωπογενείς κατασκευές οι οποίες είναι διακριτές. Επιπροσθέτως, η χρονική διάσταση της συλλογής των δεδομένων είναι μια παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη, καθώς τα γεωγραφικά δεδομένα μεταβάλλονται χρονικά. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων μεταβολών στην περίπτωση μιας υδρολογικής λεκάνης ενδεχομένως σχετίζονται με την παρουσία ή όχι νερού στις κοίτες των ποτάμιων κλάδων κατά την περίοδο παρατήρησης, ειδικά σε ξηρές περιόδους, και όταν χαρτογραφούνται ρεύματα παροδικής ροής (κλάδοι 1^{ης} και 2^{ης} τάξης).

Γίνεται αντιληπτό λοιπόν, ότι ένας συνδυασμός παραγόντων επιδρά στην αξιοπιστία (ορθότητα) και ακρίβεια των αρχικών δεδομένων. Οι διάφοροι τύποι σφαλμάτων που επιδρούν δεν είναι πάντοτε δυνατό να εξαλειφθούν, και σε ορισμένες περιπτώσεις ούτε να ελαχιστοποιηθούν. Σίγουρα ένα τοπογραφικό διάγραμμα 1: 5.000 θα παρείχε μεγαλύτερη λεπτομέρεια και ακρίβεια, και πιθανότητα ορθότητα για μια τέτοια ανάλυση, όμως το μεγάλο κόστος και η μικρή διαθεσιμότητα σε τόσο μεγάλης κλίμακας δεδομένα καταστούν τη χρήση τους σε πολλές περιπτώσεις απαγορευτική. Ακόμη, θα ήταν ακόμη πιο ενδεδειγμένο και προτιμητέο να αξιοποιηθούν DEM πολύ υψηλής αξιοπιστίας που προέρχονται από επεξεργασία τηλεπισκοπικών δεδομένων, καθώς η εφαρμογή της ρουτίνας ANUDEM δεν αποτελεί «πανάκεια» στην διαδικασία αναπαραγωγής DEMs. Παρ' όλα αυτά, αναλογιζόμενοι την διαθεσιμότητα των δεδομένων μας, η χρήση αυτής της ρουτίνας αποτελεί ικανοποιητική εναλλακτική επιλογή.

5.3 Ποιότητα παραγόμενων και σφάλματα επεξεργασίας

Αν και η ποιότητα των αρχικών δεδομένων αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για την απόδοση αξιόπιστων αποτελεσμάτων, η μετέπειτα επεξεργασία και διαχείρισή τους επιφέρει δυνητικά σφάλματα που συνδέονται με διαδικασίες – επεξεργασίες. Και ενώ κατά την πρώτη μέθοδο, τα προφανή σφάλματα που υπάγονται σε αυτήν την κατηγορία εμπίπτουν κυρίως στο φάσμα λανθασμένων υπολογισμών, στις δύο άλλες μεθόδους παρουσιάζονται μια σειρά ενδεχόμενων σφαλμάτων τα οποία παρατίθενται παρακάτω.

Κατ' αρχήν, τίθεται το ζήτημα της ορθής, και όσο το δυνατόν ακριβέστερης ψηφιοποίησης (σε άμεση συνάρτηση με την κλίμακα ή ακρίβεια), χωρίς τοπολογικά

σφάλματα.* Η εσφαλμένη ψηφιοποίηση και η μη διατήρηση ορθών τοπολογικών σχέσεων επηρεάζει τα παραγόμενα κατά τη διαδικασία χωρικής ανάλυσης. Ακόμη, η καταγραφή και απόδοση ακατάλληλων ή μη υπαρκτών περιγραφικών χαρακτηριστικών στις προηγούμενες ψηφιοποιημένες – έστω και ορθά – γεωγραφικές οντότητες συνιστά επίσης ανασταλτικό παράγοντα στην ορθή απόδοση της παραγόμενης πληροφορίας.

Μια άλλη κατηγορία σφαλμάτων επεξεργασίας εντοπίζεται στη βάση των αναλυτικών λειτουργιών, και προπαντός στην επικάλυψη που αποτελεί το ίδιο των GIS. Συγκεκριμένα, κατά το συνδυασμό (ένωση) θεματικών επιπέδων, προκύπτουν «πλασματικά δεδομένα» όπως τα επιμήκη πολύγωνα (sliver polygons), ως απόρροια εσφαλμένων ψηφιοποιήσεων αλλά και εγγενών δυσλειτουργιών των GIS .

Εκτός αυτών, στο στάδιο της οπτικοποίησης δημιουργούνται εσφαλμένες απεικονίσεις σε θέματα ταξινόμησης και γενίκευσης της παραγόμενης γεωγραφικής πληροφορίας, σφάλματα που εξαρτώνται όμως εν μέρει από τον χρήστη και εν μέρει από το χρησιμοποιούμενο λογισμικό GIS.

Τέλος, «χωρικά σφάλματα» προκαλούνται κατά τη διαδικασία μετατροπής δεδομένων από μια μορφή σε μια άλλη. Χαρακτηριστικά αναφέρεται η περίπτωση μετασχηματισμού από ψηφιδωτή διανυσματική μορφή των αρχείων των λεκανών κατά την διεξαγωγή της τρίτης μεθόδου (αυτοματοποιημένης). Σε αυτήν, όπως και σε παρόμοιες περιπτώσεις, οι παραγόμενες οντότητες παρουσιάζουν αποκλίσεις από τις αρχικές, λόγω της περιορισμένης συμβατότητας της δομής των δύο τύπων αρχείων.

5.4 Μοντελοποίηση

5.4.1. Εφαρμογές

Παρά τα προφανή μειονεκτήματα της τρίτης μεθόδου όσον αφορά την αδυναμία αποτύπωσης μικρής τάξης λεκανών, και των σφαλμάτων επεξεργασίας που προαναφέρθηκαν, η μέθοδος αυτή ενέχει ένα σημαντικό «προτέρημα» που ενδεχομένως αντισταθμίζει έως κάποιου βαθμού τις ανεπάρκειές του.

Η δυνατότητα της αναπαραγωγής DEM από λίγα και αραιά χωρικά δεδομένα, διαμέσου ενδεδειγμένων τεχνικών παρεμβολής αποτελεί κατ' αρχήν μια διαδικασία εύκολης και άμεσης απόκτησης πληροφορίας περί του αναγλύφου μιας περιοχής για το

* Βλ. παράγραφο 4.2.2.

οποίο λίγα είναι γνωστά. Η ουσιαστική όμως συμβολή των GIS έγκειται στην δυνατότητα ανάδειξης της επιφανειακής «έκφρασης» του υδρολογικού καθεστώτος μιας περιοχής σε συνάρτηση με την μορφολογία του εδάφους της. Με άλλα λόγια, από την συλλογή ελάχιστων μόνο υψομετρικών δεδομένων, είναι δυνατό να αναπαρασταθεί η τοπογραφία οποιασδήποτε περιοχής και να αποτυπωθούν οι πιθανές κοίτες ενός ποτάμιου συστήματος και η λεκάνη αποστράγγισής του στη βάση προκαθορισμένων ενεργειών και διαδικασιών. Αυτή η συλλογιστική μας παραπέμπει στην έννοια της μοντελοποίησης, διαδικασίας η οποία μπορεί να διεκπεραιωθεί μέσω ενός ντετερμινιστικού ή ενός στοχαστικού μοντέλου. Η υδρολογική ανάλυση και ποσοτική γεωμορφολογική χαρτογράφηση μπορεί να επιτευχθεί μόνο και μόνο από λίγα υψομετρικά δεδομένα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εισροή για να μοντελοποιήσουν αυτή την πτυχή της πραγματικότητας.

Σε μια πιο επιτηδευμένη εφαρμογή, όπου μας παρέχεται μεγαλύτερο πλήθος πληροφορίας υψηλότερης αξιοπιστίας (πολλά υψομετρικά σημεία, ακριβής τεχνική παρεμβολής, μικρό μέγεθος φατνίων παραγόμενου DEM κ.α.), είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί το εργαλείο της υδρολογικής ανάλυσης στα πλαίσια ενός GIS για να μοντελοποιηθεί το περιστατικό μιας ακραίας περίπτωσης εκδήλωσης ενός πλημμυρικού φαινομένου. Γενικώς, οι παραποτάμιες πλημμύρες λαμβάνουν χώρα όταν ξεπεραστεί η φέρουσα χωρητική ικανότητα ενός ρέματος, με αποτέλεσμα την υπερχείλιση. Σε αυτό το σημείο έρχεται η θεωρία να θεμελιώσει τις διεργασίες δημιουργίας υποτυπωδών κοιτών, σε περιπτώσεις υπέρμετρης παροχής ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Έτσι, μπορούν να αναδειχθούν τμήματα του εν δυνάμει υδρογραφικού δικτύου που «πληρώνονται» με νερό, καθώς και οι εκτάσεις της κεντρικής κοίτης που πλημμυρίζουν (με νερό). Όπως είδαμε και στα προηγούμενα, τα στοχαστικά μοντέλα εμπεριέχουν και ένα χαρακτήρα τυχαιότητας κατά τον υπολογισμό του κατωφλιού και άλλων παραμέτρων όπως η ποσότητα υδάτων που συγκεντρώνονται σε κάθε κελί του DEM, ανάλογα με την δριμύτητα του φαινομένου της βροχόπτωσης, οι οποίες μπορούν να μεταβληθούν. Πρακτικά, η κατ' επιλογήν μεταβολή αυτών των παραμέτρων, αναδεικνύει τις κατακλυζόμενες περιοχές που υπό κανονικές συνθήκες δεν θα καλύπτονταν από το υδάτινο στοιχείο.

Επεκτεινόμενοι προς την κατεύθυνση της πρόβλεψης μιας ενδεχόμενης καταστροφής, αναφέρουμε ότι το αν θα μετεξελιχθεί ένα πλημμυρικό φαινόμενο σε καταστροφικό επεισόδιο (hazard) επαφίεται στην ευπάθεια της εν λόγω περιοχής. Η αποτίμηση της τρωτότητας (vulnerability) και του κινδύνου (risk) σχετίζεται άμεσα με την παρουσία ανθρωπογενών δραστηριοτήτων όπως η κατοίκηση παρόχθιων περιοχών, η

αγροτική εκμετάλλευση τους κ.α. Επομένως, αν μας παρέχονται πληροφορίες περί των χρήσεων γης μιας τέτοιας περιοχής, σε συνδυασμό με δεδομένα υψομέτρου, καθίσταται εφικτή η αποτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου στα πλαίσια της διαχείρισης ενός πλημμυρικού hazard με τη χρήση GIS .

5.4.2 Κατηγοριοποίηση της Μοντελοποίησης

Κατά την υλοποίηση της αυτοματοποιημένης μεθόδου, όπως αυτή περιγράφηκε παραπάνω, αναδύονται επί της ουσίας δύο μοντέλα. Ο σχολιασμός τους θεωρείται σκόπιμος, στα πλαίσια της διασύνδεσης θεωρητικά διατυπωμένων τύπων μοντέλων που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, με υπαρκτά παραδείγματα της εργασίας μας. Από τα δύο αυτά μοντέλα, το ένα αναφέρεται στην αναπαραγωγή DEM από καμπύλες υψομέτρου και σημεία υψομέτρου, ενώ το άλλο στην ανάδειξη του υδρολογικού καθεστώτος της επιφανειακής απορροής και της αντίστοιχης μορφομετρίας επί του εδάφους.

Το μοντέλο της δημιουργίας DEM, σύμφωνα με τις κατηγοριοποιήσεις της παραγράφου 3.3.1 υπάγεται α) στα περιγραφικά ως προς τον σκοπό του, καθώς δεν προτείνει εναλλακτικές λύσεις, απλά περιγράφει την υφιστάμενη κατάσταση, β) στα ντετερμινιστικά ως προς τη μεθοδολογία του, εφόσον για συγκεκριμένα δεδομένα εισόδου θα αποδίδει το ίδιο αποτέλεσμα (DEM), μέσω της ρουτίνας ANUDEM και γ) στα επαγωγικά ως προς τη λογική δημιουργίας του διότι «χτίζεται» με βάση μεμονωμένα δεδομένα προκειμένου να αναπαραχθεί ένα γενικότερο μοντέλο.

Από την άλλη, η μοντελοποίηση με την χρήση του εργαλείου hydrology βασίστηκε σε ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους και παρήγαγε με τρόπο ντετερμινιστικό* το υδρογραφικό δίκτυο και τις υδρολογικές λεκάνες, περιγράφοντας ενδεχομένως υποθετικές μελλοντικές «καταστάσεις», χωρίς όμως να «προτείνει» λύσεις. Ως εκ τούτου, το μοντέλο χαρακτηρίζεται α) παραγωγικό με βάση τη λογική που το διέπει, β) ντετερμινιστικό σε κάποιο βαθμό (άλλα και στοχαστικό) και γ) γενικά περιγραφικό ως προς τον σκοπό δημιουργίας του.

* Στο ArcGIS της ESRI το flow direction grid και το flow accumulation grid παράγονται κατά τρόπο ντετερμινιστικό. Όμως, η συνβολή του ανθρώπινου παράγοντα στην τοποθέτηση των pour points και στον καθορισμό του threshold, προσδίδουν στο μοντέλο ένα στοχαστικό χαρακτήρα.

6. ΕΠΙΛΟΓΟΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Προκειμένου να εξαχθούν τελικά συμπεράσματα, διεξάγουμε μια τελική ανασκόπηση της εργασίας που εκπονήθηκε. Έτσι, εφόσον αναπτύχθηκε αρχικά το θεωρητικό υπόβαθρο, ώστε να καταστούν απτές οι πρωταρχικές έννοιες του υδρογραφικού δικτύου και της υδρολογικής λεκάνης με παράλληλη επεξήγηση του τρόπου ανάπτυξης και εξέλιξης τους, έπειτα έλαβε χώρα η παράθεση μιας πληθώρας ποσοτικοποιημένων δεικτών που ονομάστηκαν μορφομετρικές παράμετροι. Σε επόμενο στάδιο, μελετήθηκαν εναλλακτικές μέθοδοι αποτύπωσης του υδρογραφικού δικτύου και οριοθέτησης των λεκανών απορροής επί χαρτών. Έστερα, αυτή η διαδικασία υλοποιήθηκε σε πραγματική λεκάνη αποστράγγισης, όπου αναλύθηκαν εκτενώς οι διαδικασίες και οι φάσεις ανάδειξης των γεωγραφικών οντοτήτων του ποτάμιου συστήματος και της λεκάνης, καθώς και η ανάδειξη συγκεκριμένων μορφομετρικών παραμέτρων υδρολογικής λεκάνης. Αυτές οι διαδικασίες διεκπεραιώθηκαν στη βάση τριών διαφορετικών μεθόδων με ποικίλα αριθμητικά και χαρτογραφικά αποτελέσματα. Κατά την εκτέλεσή τους προέκυψαν διάφορα σχόλια, προβληματισμοί, δυνατά σημεία και αδυναμίες, τα οποία αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

Έστερα λοιπόν από την επιλογή υδρολογικής λεκάνης, και συγκεκριμένα μιας υπολεκάνης 4^{ης} τάξης του Μεγάλου Ρέματος Ραφήνας, η οποία αποστραγγίζεται από το υδρογραφικό δίκτυο του Λυκορρέματος, επιτελέσθηκαν οι προαναφερθείσες ενέργειες χάραξης, οριοθέτησης και μέτρησης χαρακτηριστικών των επιμέρους λεκανών του (1^{ης}, 2^{ης}, 3^{ης} τάξης), και υπολογισμού ποσοτικοποιημένων δεικτών που αντιστοιχούν σε αυτές. Τα αποτελέσματα αυτών καταχωρήθηκαν σε πίνακες και παρουσιάστηκαν σε χάρτες.

Από την εξέταση των πινάκων όπου καταγράφηκαν οι τιμές των δεικτών, και την μελέτη των χαρτών όπου αναπαρίσταται η χωρική κατανομή των λεκανών στις οποίες προσδίδονται αυτές οι τιμές, προέκυψαν κάποια επιμέρους συμπεράσματα για τη μορφή και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης του Λυκορρέματος. Διαπιστώθηκε λοιπόν, πως η λεκάνη αποστράγγισης του Λυκορρέματος, το οποίο συμβάλλει στο Μεγάλο Ρέμα της Ραφήνας παρουσιάζει αρκετά υψηλή αποστράγγιση και λεπτή υδρογραφική υφή. Οι τιμές των μορφομετρικών παραμέτρων της υδρογραφικής συχνότητας και πυκνότητας είναι αρκετά υψηλές για όλων των τάξεων τις υπολεκάνες του Λυκορρέματος, με αυτές της 1^{ης} τάξης να εμφανίζουν τις υψηλότερες, καθώς και τα μεγαλύτερα εύρη τιμών (για την υδρογραφική συχνότητα κυμαίνονται από 2 – 95 περίπου, ενώ για την υδρογραφική

πυκνότητα 1 – 12 περίπου). Σχετικά με την παράμετρο της κυκλικότητας, αυτό που γίνεται εμφανές είναι το γεγονός ότι αρκετές από τις μικρότερης τάξης λεκάνες τείνουν να λάβουν ένα σχήμα που πλησιάζει το τετράγωνο, ενώ η λεκάνη του Λυκορρέματος χαρακτηρίζεται επιμήκης. Τέλος το ανάγλυφο της περιοχής εμφανίζεται σχετικά έντονο, με τις υψηλές μορφολογικές κλίσεις να παρουσιάζονται κυρίως στο βόρειο τμήμα της λεκάνης, και το ανατολικό «πλήττοντας» λεκάνες 1^{ης} και 2^{ης} τάξης. Η τοπογραφία ολόκληρης της περιοχής της λεκάνης του Λυκορρέματος είναι ελαφρώς πιο ήπια, με τις πιο χαμηλές κλίσεις να εντοπίζονται πλησίον της κεντρικής κοίτης του ρέματος και ιδιαίτερα στο νότιο τμήμα της λεκάνης.

Καθώς όμως αυτές οι ενέργειες μέτρησης και υπολογισμού των μορφομετρικών παραμέτρων επιτελούνταν υπό διαφορετικές μεθόδους, αναδείχθηκαν, εκτός από αυτές, των οποίων η φυσική σημασία αναλύθηκε στην ακριβώς προηγούμενη παράγραφο, ακόμη μεγαλύτερης σημασίας συμπεράσματα. Ως τέτοια θεωρούνται εκείνα τα συμπεράσματα που σχετίζονται με την αποτίμηση των μεθόδων εν γένει, τα οποία ενδεχομένως να είναι γενικεύσιμα για οποιοδήποτε εξεταζόμενη λεκάνη απορροής.

Πιο συγκεκριμένα, μας δόθηκε η ευκαιρία για εμπειρική αξιολόγηση της επίπονης και χρονοβόρας προσπάθειας οριοθέτησης των υδροκριτών μιας λεκάνης 4^{ης} τάξης, καθώς και των επιμέρους υδροκριτών κατά τις δύο πρώτες μεθόδους. Ακόμη πιο έντονη ήταν η φυσική κόπωση όταν επιχειρήσαμε, στην πρώτη μέθοδο, να μετρήσουμε το μήκος των κλάδων και ιδιαίτερα το μήκος των ισοϋψών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο χρόνος που απαιτείται για την μέτρηση των τελευταίων, ανάγεται σε τάξη πολλών λεπτών, ίσως και μερικών ωρών. Κατά την εκτέλεση της χειρωνακτικής μεθόδου, εμπειρευτήκαμε ακόμη την χρήση των οργάνων μέτρησης και αντιληφθήκαμε τις δυσχρηστίες τους και την εξαιρετική (μηκόμετρο), ή και μικρότερη (ψηφιακό εμβαδόμετρο) ανακρίβειά τους. Κατά την εκτέλεση της ημιαυτόματης μεθόδου, αν και η πρώτη φάση της χάραξης και οριοθέτησης ήταν τουλάχιστον το ίδιο χρονοβόρα με αυτή της χειρωνακτικής, καθώς έπρεπε επιπροσθέτως να οργανωθεί κατάλληλα η πληροφορία, καταλάβαμε την ανεκτίμητη συμβολή ενός λογισμικού στην ταχύρυθμη και ακριβή διεκπεραίωση υπολογισμών, στην αποτελεσματική διαχείριση της πληροφορίας και στην δυνατότητα αποδοτικής οπτικοποίησης. Από την άλλη, έγινε αντιληπτή η σπουδαιότητα της εστίασης της προσοχής μας στη διατήρηση ορθών τοπολογικών σχέσεων και στα σφάλματα που προκύπτουν από τυχόν «παραβίαση» τους και από άλλα που προκύπτουν κατά την επιτέλεση λειτουργιών επικάλυψης, μη σωστής καταχώρησης περιγραφικών δεδομένων κ.α. Συνολικά όμως, αυτή η μέθοδος αξιολογήθηκε ως πολύ πιο εύχρηστη, εφόσον μείωσε

το χρόνο των υπολογισμών των μετρούμενων παραμέτρων, από πολύωρες διαδικασίες σε υπόθεση μερικών δευτερολέπτων, έχοντας όμως ως βασική προϋπόθεση την εξ' αρχής άρτια οργάνωση της πληροφορίας, στην οποία θα πρέπει να αφιερωθεί ένα μικρό ποσοστό του χρόνου που «κερδίζουμε».

Και ενώ η πρώτη με τη δεύτερη μέθοδο παρουσιάζουν «επικαλύψεις» στον τρόπο με τον οποίο αποτυπώνονται τα φυσικά όρια των υδροκριτών, τα ποτάμια ρεύματα και οι ισοϋψείς καμπύλες, η δεύτερη με την τρίτη, εμφανίζουν ως κοινό στοιχείο την περάτωσή τους μέσω ενός GIS. Ειδικότερα, η αποκαλούμενη αυτοματοποιημένη μέθοδος, αξιοποιεί ένα DEM το οποίο έχει προκύψει από μια τεχνική παρεμβολής που δέχεται ως εισροή (input) την παρεχόμενη πληροφορία υψομέτρων ψηφιοποιημένων ισοϋψών καμπυλών και υψομετρικών σημείων μιας ευρείας περιοχής, και την πληροφορία της υφιστάμενης υδρογραφίας μέσω του ψηφιοποιημένου υδρογραφικού δικτύου. Έπειτα, το DEM που αναπαράγεται, εμπίπτει σε μια ρουτίνα υδρολογικής ανάλυσης, που με την πραγματοποίηση κάποιων επιμέρους βημάτων-εντολών, επιτυγχάνει την αυτόματη οριοθέτηση του πρωτεύοντος υδροκρίτη και των επιμέρους υδροκριτών. Η τελική ανάδειξη των παραμέτρων γίνεται με τρόπους αντίστοιχους της δεύτερης μεθόδου, πλην της παραμέτρου των κλίσεων των κλιτύων, η οποία εκμαιεύεται άμεσα από το DEM.

Η μέθοδος αυτή διατηρεί τα «παραδοσιακά» συγκριτικά πλεονεκτήματα υλοποίησης σε περιβάλλον GIS, σε όρους χρόνου και φυσικής κόπωσης. Βασικό όμως πλεονέκτημα, και στοιχείο καινοτομίας αυτής της μεθόδου, αποτελεί η άμεση ανάδειξη των υδρολογικών λεκανών από την εκμετάλλευση ενός DEM. Ωστόσο, η ψηφιοποίηση των ισοϋψών και του υδρογραφικού δικτύου συνεχίζει να αποτελεί κυρίαρχο μέλημα, όπως και η επιπρόσθετη ψηφιοποίηση υψομετρικών σημείων με παράλληλη απόδοση τιμών υψομέτρου. Ακόμη, η επιλογή μεγέθους ψηφίδας για το DEM, η ποσότητα της πληροφορίας υψομέτρου και η τεχνική της παρεμβολής, είναι σημεία στα οποία πρέπει να αποδίδεται αυξημένη προσοχή, σε συνδυασμό με κλασικά ζητήματα διαχείρισης και επεξεργασίας της πληροφορίας. Κυρίαρχη ανεπάρκεια της μεθόδου είναι η αδυναμία απόδοσης χαρτογραφικών παραγόμενων υψηλής ακρίβειας. Όπως έγινε αντιληπτό και στην περίπτωση μελέτης μας, η μέθοδος παρουσίασε αδυναμία στην αναπαράσταση κλάδων μη τροφοδοτούμενων από άλλους (1^{ης} τάξης), λόγω της μικρής συγκέντρωσης ροής τους, και συνεπώς των λεκανών απορροής που αποστραγγίζουν. Ακόμη, τέθηκε υπό σχετική αμφισβήτηση η ορθότητα της οριοθέτησης της λεκάνης του Λυκορρέματος, εφόσον απέκλινε αρκετά σε κάποια τμήματά της (νοτιοδυτικό). Παρά όμως τις ανεπάρκειες στην ακριβή απόδοση χαρτογραφικής πληροφορίας, η οποία μπορεί να

βελτιωθεί σημαντικά με την αξιοποίηση «πυκνών» αρχικών δεδομένων μεγάλης κλίμακας, η μέθοδος αυτή δύναται, μέσα από την λήψη λιγοστής και διασπαρμένης χωρικής πληροφορίας, να αποδώσει άμεσα την αδρή εικόνα του δικτύου και των αντίστοιχων επιφανειών αποστράγγισης. Σε αυτή την αμεσότητα απόδοσης χαρτογραφικών αποτελεσμάτων μέσω αυτοματοποιημένων διαδικασιών έγκειται και η δυναμική της μοντελοποίησης αυτής της μεθόδου. Με τον όρο μοντελοποίηση εννοούμε την επεκτασιμότητα, δηλαδή την δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου για οποιαδήποτε περιοχή επιλογής, και την επαναληψιμότητα που αναφέρεται στην δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου για την ίδια περιοχή σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Έχοντας λοιπόν δομήσει μια ρουτίνα που, αξιοποιώντας υψομετρικής φύσης δεδομένα, εξάγονται οι υφιστάμενες λεκάνες και το αντίστοιχο υδρογραφικό δίκτυο, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τα οφέλη της ανάδειξης της μορφομετρίας τόσο σε χαρτογραφικές αναπαραστάσεις, όσο και ποσοτικοποιημένους δείκτες με ελάχιστο κόπο επανάληψης των διαδικασιών της μεθόδου.

Από τα προηγούμενα μπορούμε να συμπεράνουμε πως καμία μέθοδος δεν είναι άψογη, αλλά κάθε μία εμφανίζει ατέλειες και μειονεκτήματα. Συγκριτικά όμως, η πρώτη μέθοδος, λόγω της συνολικής υψηλής κόπωσης και του μεγάλου χρόνου που απαιτεί, χωρίς παράλληλα να διαθέτει κάποιον αυτοματοποιημένο τρόπο οπτικοποίησης, θα μπορούσε να θεωρηθεί ξεπερασμένη, αναντικατάστατη όμως ελλείψει Η/Υ και κατάλληλου λογισμικού (GIS).

Στο άλλο άκρο, η εν δυνάμει πλήρως αυτοματοποιημένη μέθοδος αναπαράγει σε γενικές γραμμές το καθεστώς της επιφανειακής απορροής μιας περιοχής με την δυναμική της επαναληψιμότητας, συρρικνώνοντας τον χρόνο που απαιτείται, αποδίδοντας όμως πιο «παρωχημένη» χαρτογραφική απεικόνιση, εκτός και αν αυξηθεί σημαντικά ο όγκος και η ακρίβεια των αρχικών δεδομένων. Αυτή η μέθοδος θεωρείται εξαιρετική για σχετικά «άγνωστες» περιοχές που δεν έχουν προηγουμένως χαρτογραφηθεί, ή για περιοχές στις οποίες δεν μπορούν να συλλεχθούν με επιτόπια έρευνα (τοπογραφήσεις, λήψη δεδομένων με GPS) επαρκή δεδομένα, λόγω μειωμένης προσβασιμότητας ή άλλων δυσχερειών. Κρίνεται όμως υπερβολική, όταν πρόκειται να εφαρμοστεί για γνωστές περιοχές με παρεχόμενους χάρτες.

Η ημιαντόματη μέθοδος, συνδυάζει την ευέλικτη – χειρωνακτική όμως – σχεδίαση των υδροκριτών και την σχεδόν άμεση αποτύπωση των ισοϋψών και του υδρογραφικού δικτύου, απολαμβάνοντας τα διαχειριστικά οφέλη της οργάνωσης της πληροφορίας σε ένα και την δυνατότητα άμεσης ταξινόμησης και οπτικοποίησης. Όμως εδώ, η ορθή

οριοθέτηση βασίζεται σε υποκειμενικούς παράγοντες, όπως η επαρκής γνώση και εμπειρία χάραξης υδροκριτών του εκπονούντος την εργασία. Έστω όμως και αν κριθούν δεδομένα τα παραπάνω προσόντα, ο χρόνος που απαιτείται παραμένει αυξημένος.

Εν κατακλείδι, αυτό που συμπεραίνεται σε τελική ανάλυση, έγκειται στην ακόλουθη διατύπωση: Σε μια εφαρμογή ανάλυσης μορφομετρικών παραμέτρων υδρολογικής λεκάνης η συνδυασμένη χρήση των παραπάνω μεθόδων, και ιδίως εκείνων που υλοποιούνται με την χρήση GIS, μπορεί να αποφέρει βελτιστοποιημένα χαρτογραφικά αποτελέσματα και συμπεράσματα. Επί παραδείγματι, αναφέρεται το στάδιο οριοθέτησης των λεκανών αποστράγγισης. Η διαδικασία αυτή μπορεί να υποβοηθηθεί από την αυτοματοποιημένη ανάδειξή τους, με περαιτέρω τροποποίησή τους με χειρωνακτικό τρόπο. Ακόμη, τα τελικά αποτελέσματα των υπολογιζόμενων δεικτών μπορούν να υποστούν κάποια συνόρθωση λαμβάνοντας τιμές των δεικτών από την υλοποίηση με όλες τις μεθόδους. Τέλος, δεν θα πρέπει να παραληφθεί η ουσιαστική παράμετρος που αναφέρεται στον σκοπό που επιτυγχάνεται μια τέτοια ανάλυση.* Η διαφορετικότητα του σκοπού εκπόνησης οποιασδήποτε εργασίας ή μελέτης μεταβάλλει και, υποθετικά, μπορεί να αναδείξει νέες. Σε κάθε περίπτωση πάντως, τα χαρακτηριστικά, οι δυνατότητες και οι ατέλειες των τριών μεθόδων ανάλυσης που περιγράφηκαν παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 6.

	ΜΕΘΟΔΟΣ	Χειρωνακτική	Ημιαυτόματα	Αυτοματοποιημένη
ΚΡΙΤΗΡΙΑ				
A. Χρήση GIS		<i>OXI</i>	<i>NAI</i>	<i>NAI</i>
B.Οριοθέτηση Υδροκριτών				
1.Μέθοδος		<i>ΧΕΙΡΩΝΑΚΤΙΚΗ</i>	<i>ΧΕΙΡΩΝΑΚΤΙΚΗ</i>	<i>ΑΥΤΟΜΑΤΗ</i>
2. Φυσική Κόπωση		<i>ΜΕΓΑΛΗ</i>	<i>ΜΕΓΑΛΗ</i>	<i>ΜΙΚΡΗ</i>
3.Χρόνος		<i>ΜΕΓΑΛΟΣ</i>	<i>ΜΕΓΑΛΟΣ</i>	<i>ΜΙΚΡΟΣ</i>
4.Ορθότητα		<i>ΕΞΑΡΤΑΤΑΙ**</i>	<i>ΕΞΑΡΤΑΤΑΙ</i>	<i>ΕΞΑΡΤΑΤΑΙ</i>
5.Ακρίβεια		<i>ΜΕΤΡΙΑ</i>	<i>ΜΕΤΡΙΑ-ΥΨΗΛΗ</i>	<i>ΧΑΜΗΛΗ-ΜΕΤΡΙΑ</i>
Γ. Μετρήσεις Μεγεθών				

* Έτσι, λ.χ. αν σκοπός ήταν η σύγκριση της μορφομετρίας των υδρολογικών λεκανών των μεγαλύτερων ποταμών της Ευρώπης, αναπόφευκτα θα χρησιμοποιούσαμε την τρίτη μέθοδο. Αντίθετα, αν σκοπός ήταν η χωροθετήσουμε μια ηλεκτροπαραγωγική μονάδα θα χρησιμοποιούσαμε ένα συνδυασμό της δεύτερης και της τρίτης κ.ο.κ.

** Η ορθότητα εξαρτάται από την ποιότητα και ποσότητα των αρχικών δεδομένων.

1.Μέθοδος		<i>ΧΕΙΡΩΝΑΚΤΙΚΗ</i>	<i>ΑΥΤΟΜΑΤΗ</i>	<i>ΑΥΤΟΜΑΤΗ</i>
2.Φυσική Κόπωση		<i>ΜΕΓΑΛΗ</i>	<i>ΜΙΚΡΗ</i>	<i>ΜΙΚΡΗ</i>
3.Χρόνος		<i>ΜΕΓΑΛΟΣ</i>	<i>ΜΙΚΡΟΣ</i>	<i>ΜΙΚΡΟΣ</i>
4.Ορθότητα		<i>ΕΞΑΡΤΑΤΑΙ</i>	<i>ΕΞΑΡΤΑΤΑΙ</i>	<i>ΕΞΑΡΤΑΤΑΙ</i>
5.Ακρίβεια		<i>ΧΑΜΗΛΗ</i>	<i>ΥΨΗΛΗ</i>	<i>ΥΨΗΛΗ</i>
Δ. Τύποι Σφαλμάτων		<i>ΑΡΧΙΚΩΝ</i> <i>ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ,</i> <i>ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗΣ,</i> <i>ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ</i>	<i>ΑΡΧΙΚΩΝ</i> <i>ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ,</i> <i>ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗΣ,</i> <i>ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗΣ,</i> <i>ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ</i>	<i>ΑΡΧΙΚΩΝ</i> <i>ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ,</i> <i>ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗΣ,</i> <i>ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗΣ,</i> <i>ΕΠΙΚΑΛΥΨΗΣ,</i> <i>ΜΕΤΑΤΡΟΠΩΝ</i>
Δ. Μοντελοποίηση				
1.Επεκτασιμότητα		<i>ΟΧΙ</i>	<i>ΟΧΙ</i>	<i>ΝΑΙ</i>
2.Επαναληψιμότητα		<i>ΟΧΙ</i>	<i>ΟΧΙ</i>	<i>ΝΑΙ</i>
Ε. Οπτικοποίηση				
1.Δυνατότητα Παρουσίασης		<i>ΠΙΝΑΚΕΣ*</i>	<i>ΠΙΝΑΚΕΣ/</i> <i>ΧΑΡΤΕΣ</i>	<i>ΠΙΝΑΚΕΣ/ ΧΑΡΤΕΣ</i>
2.Τρόπος Παρουσίασης		-	<i>ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ</i>	<i>ΑΔΡΟΣ</i>

Πίνακας 4: Συνοπτική αποτίμηση χαρακτηριστικών των μεθόδων.

Στα παραπάνω αφέθηκε να εννοηθεί κατά κάποιον τρόπο ότι η ημιαυτόματη μέθοδος αποτέλεσε την πιο προσφιλή, εύχρηστη και με συγκριτικά ακριβέστερα αποτελέσματα μέθοδο. Παρά το αναμφισβήτητο αυτό γεγονός για την υπό μελέτη περίπτωση, η πλήρως αυτοματοποιημένη μέθοδος, πέρα από την υφιστάμενη υπεροχή της σε όρους ελάττωσης του χρόνου και της φυσικής κόπωσης, και της δυνατότητας επαναληψιμότητας και επεκτασιμότητας, ενέχει τη δυναμική επιπρόσθετης ποιοτικής αναβάθμισης. Με την παροχή πιο αξιόπιστων αρχικών δεδομένων, και την αξιοποίηση ακόμη πιο εξειδικευμένων αλγόριθμων οι οποίοι θα διαχειρίζονται ενδεχομένως γεωλογικά και υδρολογικά δεδομένα, εκτός από τοπογραφικά, αναμένεται να αποδοθεί σημαντική προστιθέμενη αξία σε αυτή τη μέθοδο. Με το τελευταίο εννοείται η μείωση του χρόνου, η

* Η χειρωνακτική μέθοδος ενέχει την δυνατότητα οπτικοποίησης σε αναλογικούς χάρτες μέσω χρονοβόρων διαδικασιών οι οποίες όμως σπάνια εφαρμόζονται στις μέρες μας.

οποία συνεπάγεται και μείωση κόστους, εφόσον με την δημιουργία ενός και μόνον αλγόριθμου, καθίσταται δυνητικά εφικτή η δυνατότητα επέκτασης σε οποιαδήποτε συναφή εφαρμογή, χωρίς να χρειάζεται για κάθε ξεχωριστή περίπτωση να διεξάγονται εξειδικευμένες διαδικασίες. Μέχρι σήμερα, η ανθρώπινη εμπειρία και ευελιξία υποβοηθάει σε θέματα χάραξης υδροκριτών μέσω της χειρωνακτικής διαδικασίας, όταν η οριοθέτηση είναι αμφιλεγόμενη. Με την τελειοποίηση των αυτοματοποιημένων μεθόδων όμως, υπάρχει η δυνατότητα να περιοριστούν αυτές οι χρονοβόρες διαδικασίες στο ελάχιστο και τα παραγόμενα να γίνουν σαφώς πιο αξιόπιστα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αστάρας, Α. Θ. (1980), *Διδακτορική Διατριβή: Ποσοτική Γεωμορφολογική Μελέτη Τμήματος των Δυτικών Πλευρών του Όρους Βέρτισκον (Κ. Μακεδονία)*, Θεσσαλονίκη.
- Καρύμπαλης, Ε. (1996), *Διδακτορική Διατριβή: Γεωμορφολογικές Παρατηρήσεις στη Λεκάνη Απορροής του Εύηνου Ποταμού*, Αθήνα.
- Καρύμπαλης, Ε., Παυλόπουλος, Κ. (2004), *Σημειώσεις & Εργαστηριακές Ασκήσεις Υδρολογίας*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Γεωγραφίας Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, Καλλιθέα.
- Κατσίκης, Α. 2004. *Δια-Θεματική Γεωγραφία*. Αθήνα: Εκδόσεις Τυπωθητω.
- Κουτσόπουλος, Κ. (2002), *Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και Ανάλυση Χώρου*, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- Παπαπέτρου – Ζαμάνη, Α. (1995), *Γεωμορφολογία*, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.
- Παυλόπουλος Κ., Καρύμπαλης Ε. (2003). *Σημειώσεις επιλεγμένων Κεφαλαίων του Μαθήματος της Γεωμορφολογίας*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Γεωγραφίας Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, Καλλιθέα.
- Παυλόπουλος Κ., (1997), *Γεωμορφολογική Εξέλιξη της Νότιας Αττικής*, Γαία, Νο 2, Αθήνα.
- Παυλόπουλος, Κ., Καρύμπαλης, Ε. (2003), *Σημειώσεις Φυσικής Γεωγραφίας*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Γεωγραφίας Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, Καλλιθέα.
- Στεφανάκης Ε. (2002), *Φύση και Καταγραφή Γεωγραφικών Δεδομένων* (Συμπληρωματικές Σημειώσεις) Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Γεωγραφίας Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, Καλλιθέα.
- Στεφανάκης, Ε. (2000), *Βάσεις Δεδομένων και Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών*, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

- Χαλκιάς Χ. (2003), *Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών Ι* (Συμπληρωματικές Σημειώσεις), Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Γεωγραφίας Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, Καλλιθέα.
- Χαλκιάς Χ. 2003. *Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών ΙΙ* (Συμπληρωματικές Σημειώσεις), Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Γεωγραφίας Χαροκοπείου Πανεπιστημίου, Καλλιθέα.
- Χαλκιάς Χ. 2006. *Όροι και Έννοιες Επιστήμης Γεωγραφικών Πληροφοριών*, Αθήνα: Εκδόσεις Ίων.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Adams, F. D. (1938), *The Birth and Development of the Geological Sciences*, Baltimore, MD: Williams and Wilkins.
- Baker V. R., Cochlea, R. G., Patton, P. C. (1998), *Flood Geomorphology*, USA, John Willey & Sons, Inc.
- Battad, D. T. (1993), *Integration of Geographic Information Systems with Simulation Models from Watershed Erosion Prediction*, PhD Dissertation, A&M university, DAI, vol. 54-11B p. 54-68.
- Biswas, A. K. (1970), *History of Hydrology*. Amsterdam: North-Holland Publishing Co.
- Bloom, A. L. (1998), *Geomorphology: A Systematic Analysis Of Late Cainozoic Landforms*, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall.
- Bridge, J. S. (2003), *Rivers and Floodplains: Forms, Processes, and Sedimentary Record*, U.K.: Blackwell Publishing Company.
- Chase, S. B. (1991), *The Integration of Hydrologic simulation Models and Geographic Information Systems*, Ph.D. dissertation, University of Rhode Island, DAI, vol 52-08B, p.43-59.
- Coates, D. (1958), *Quantitative Geomorphology of Small Drainage Basin of Southern Indiana*, Tech. Report No 10, Office of Naval Research, George Branch, Depart. of Geology, Columbia University, New York.

- Chang K. (2003), *Introduction to Geographic Information Systems*, International Edition: McGraw-Hill.
- Davis, W. M. (1899), *The Geomorphological Cycle*: Geog. Jour., v. 14, pp 481-504 Reprinted 1954 in Geographical essays. New York: Dover Publications, Inc.
- DeMers N. M. (2000a), *Fundamental of Geographic Information Systems*, New York, John Wiley and Sons.
- DeMers, M. N. (2002), *GIS Modeling In Raster*, New York: John Wiley and Sons.
- Dingman S. Lawrence, (2002), *Physical Hydrology*, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall.
- Dunne, T. (1980), *Formation and Controls of Channel Networks*. Prog. Phys. Geog., 4, 211-39.
- Dunne, T. and Aubry, B. F. (1986), "Evaluation Of Horton's Theory Of Sheet Wash And Rill Erosion On The Basis Of Field Experiments", in Abrahams, A. D., ed. *Hillslope Processes*, Boston: Allen & Unwin, Inc.
- Dunne, T. 1990. "Hydrology, Mechanics and Geomorphic Implication or Erosion by Subsurface Flow" In: Higgins, C. G., Coates, D. R. (eds.), *Groundwater Geomorphology: The Role of Subsurface Water in Earth-surface Processes and Landforms*. Geol. Soc. Am. Spec. Pap 252, 1-28.
- Dunne, T., Whipple, K. X., and Aubry, B. F. (1995), "Microtopography of hillslopes And Initiation By Horton Overland Flow", in Costa, J. E., Miller, A. J., and 2 others, (eds.), *Natural And Anthropogenic Influences In Fluvial Geomorphology: The Wolman Volume*, Am. Geophys. Union, Geophys., Mono, 89, pp. 27-44.
- Fortheringham A. Stewart, Bunsdon Chris, Charlton Martin, (2000), *Quantitative Geography Perspectives on Spatial Data Analysis*, London, Inc California, Pvt Ltd New Delhi: Sage Publications Ltd.
- Goodchild, M. F. (1985), *Geographic Information Systems in Undergraduate Geography: A Contemporary Dilemma*, The Operational Geographer, No 8.
- Gravelius H. (1914), *Flusskunde*, vol 1, 176 pp.Goschenesche-Verlag, Berlin.
- Hack, J. T., and Goodlet, J. C., (1960), *Geomorphology and Forest Ecology Of A Mountain Region in The Central Appalachians*, U.S. Geol. Survey Prof. Paper 347.

- Horton, R. E. (1945), *Erosional Characteristics of Streams and their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology*. Bull. Geol. Soc. America, 56, 275 – 370.
- Hutchinson, M. F. (1988), *Calculation of Hydrologically Sound Digital Elevation Models*. Third International Symposium on Spatial Data. Handling, Sydney, Columbus, Ohio: International Geographical Union.
- Hutchinson, M. F. (1989), *A New Procedure for Gridding Elevation and Stream Line Data with Automatic Removal of Spurious Pits*. Journal of Hydrology:106, 211-232.
- Hutchinson, M. F., and Gallant, J. C. (1999), “Representation of Terrain” In Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., and Rhind, D. W., (eds.), *Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues*, Vol. 1, New York: Wiley.
- Jenson, S. K. and Domingue, J. O. (1988), *Extracting Topographic Structure for Digital Elevation Data for Geographic System Analysis*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54: 1593-1600.
- Jenson, S. K. (1991), “Application of Hydrologic Information Automatically Extracted From Digital Elevation Models” in Bevan, K. J. and Moore, I. D. (eds.), *Terrain Analysis and Distributed Modeling in Hydrology*, Chichester, England: Wiley.
- Kirkby, M. J. (1993), “Network Hydrology and Geomorphology”, In Beven K., and Kirkby M. J., eds., *Channel Network Hydrology*, Chichester, U.K: John Wiley and Sons Ltd.
- Langbein, W. et al. (1947), *Topographic Characteristics of Drainage Basins*. U.S. Geological Survey. Water Supply Paper, 968c, 125-55.
- Leopold L. B., Wolman M. G. and Miller J. P. (1964), *Fluvial Processes in Geomorphology*. Canada, Toronto: General Publishing Company.
- Melton, M. (1960), *An Analysis of the Relations among Elements of Climate, Surface Properties, and Geomorphology*. Office of Naval Research, Technical Report 11, Depart. Of Geology, Columbia University, New York.
- Montgomerie, D. R., and Dietrich, W. E. (1994), “Landscape Dissection and Drainage Area-Slope Thresholds”, in Kirkby, M. J., ed., *Process Models And Theoretical Geomorphology*, Chichester, UK: John Willey & Sons, Ltd.

- Moore, I. D. (1996), “Hydrological Modeling and GIS” in Goodchild, M. F., Steyaert, L. T., Parks, B. O., Johnston, C. Maidment, D., Crane M. and Glendinning, S. (eds.), *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*, Fort Collin, Co: GIS World Books.
- Morisawa, M. (1958), *Measurements of Drainage Basin Outline Form*, J. Geol., 66, 587-91.
- Morisawa, M. E. (1962), *Quantitative Geomorphology of Some Watersheds in the Appalachian Plateau*. n Geol. Soc. Am. Bull. 73, 1025-1046.
- Rinaldo, A., Rodriguez-Iturbe, I., Rigon, R., Bras, R. L., Ijjasz-Vasquez, E. J. and Marani, A. (1992), *Minimum Energy and Fractal Structures of Drainage Networks*. Wat. Res. 28, 2183-95.
- Robinson, H. A, Morisson, L. J., Muehrcke, C. P., Kimerling, A. J. and Guptil, C. S. (2002), *Στοιχεία Χαρτογραφίας*, [μτφρ. Τ. Τσιαντούλας], Αθήνα.: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- Rodriguez-Iturbe, I., Rinaldo, A., Rigon, R., Bras, R. L, Marani, A., Ijjasz Vasquez, E. J. (1992), *Energy Dissipation, Runoff Production and the Three Dimensional Structure of River Basins*. Wat. Resource Res., 28, 1095-103.
- Rodriguez-Iturbe, Rinaldo, A., Rigon, R., (1998), Channel Networks. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 26, 289-327.
- Schumm, S. (1956), *Evolution of Drainage Systems and Slopes in the Badlands at Perth Amboy*, New Jersey. Geol. Soc. Amer. Bull., 67, 597-646.
- Shreve R. (1964), *Analysis of Horton’s Law of Stream Numbers* (Abstract), Trans. Amer. Geophysics. Union, 45, 50-1.
- Shreve R. (1966), *Statistical Law of Stream Numbers*. J. Geol.
- Strahler, A. (1957), *Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology*. Amer. Geophys. Union. Trans. 38(6), 913-20.
- Wahba, G. (1990), *Spline models for Observational data*. CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics, Philadelphia: Soc. Inc. Appl. Maths.
- Willgoose, G. R., Bras, R. L., & Rodriguez-Iturbe, I. (1991a), Results from a New Model of River Basins Evolution. Earth. Surf. Proc. Land, 16, 237-54.
- Willgoose, G. R., Bras, R. L., & Rodriguez-Iturbe, I. (1991b), A Physically-based Coupled Network Growth and Hillslope Evolution Model: 1. Theory. Wat. Resour. Res. 27, 1671-84.

- Willgoose, G. R., Bras, R. L., & Rodriguez-Iturbe, I. (1991c), A Physically-based Coupled Network Growth and Hillslope Evolution Model: 1. Applications. *Wat. Resour. Res.* 27, 1685-96.
- Wilson, J. P. and Gallant, J. C. (2000), *Terrain Analysis*, New York: John Wiley and Sons.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι
(ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ)

ΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

u: Τάξη κλάδου ή λεκάνης

Lu: Μήκος κλάδου σε km

ΣLu: Συνολικό/ αθροιστικό μήκος κλάδου σε km

Au: Εμβαδόν λεκάνης απορροής σε km²

Pu: Περίμετρος λεκάνης απορροής σε km

Fu: Υδρογραφική Συχνότητα λεκάνης απορροής σε km⁻²

Du: Υδρογραφική Πυκνότητα λεκάνης απορροής σε km⁻¹

Cu: Κυκλικότητα λεκάνης απορροής

Su: Κλίση Κλιτύων λεκάνης απορροής σε %

ΧΕΙΡΩΝΑΚΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ										
ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ							ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ			
u	Nu	Lu	ΣLu	Au	Pu	Lcu	Fu	Du	Cu	Su
IV 1	177	11,00	94,60	28,40	29,30	400,00	6,23	3,33	0,42	28,17
III 1	9	1,00	4,00	1,35	6,00	18,70	6,67	2,96	0,47	27,70
III 2	13	1,00	4,70	1,35	5,30	26,2	9,63	3,48	0,60	38,81
III 3	15	0,90	7,40	2,18	6,70	39,5	6,90	3,40	0,61	36,32
III 4	16	1,10	6,30	2,18	6,80	40,3	7,36	2,90	0,59	37,06
III 5	13	0,70	5,10	1,39	5,40	24,6	9,37	3,68	0,60	35,47
III 6	18	2,60	9,60	2,43	8,10	35,1	7,42	3,96	0,46	28,95
III 7	12	3,50	7,80	2,25	10,80	27,5	5,33	3,47	0,24	24,44
Μέσες Τιμές Υπολογιζόμενων Παραμέτρων 3ης Τάξης							7,53	3,41	0,51	32,68
II 1	4	0,80	1,60	0,49	3,00	5,20	8,16	3,26	0,68	21,22
II 2	3	0,20	0,90	0,18	1,90	3,00	16,67	5,00	0,63	33,33
II 3	3	0,20	0,80	0,19	2,00	2,10	16,22	4,32	0,58	22,70
II 4	4	1,00	1,80	0,60	3,70	9,70	6,67	3,00	0,55	32,33
II 5	3	0,50	0,90	0,27	2,20	4,80	11,32	3,40	0,69	36,23
II 6	3	0,80	1,70	0,44	3,60	7,40	6,82	3,86	0,43	33,64
II 7	6	1,00	2,70	0,69	3,80	11,20	8,76	3,94	0,60	32,70
II 8	3	0,20	1,20	0,25	2,00	3,90	12,00	4,80	0,79	31,20
II 9	3	0,50	1,10	0,28	2,60	5,40	10,91	4,00	0,51	39,27
II 10	3	0,10	0,50	0,15	1,50	2,30	20,00	3,33	0,84	30,67
II 11	4	0,70	1,10	0,21	2,20	4,40	19,05	5,24	0,54	41,90
II 12	6	0,90	2,90	0,90	4,80	16,20	6,67	3,22	0,49	36,00
II 13	3	0,20	0,40	0,08	1,20	1,90	37,50	5,00	0,70	47,50
II 14	3	0,50	1,30	0,39	3,30	5,50	7,79	3,38	0,44	28,57
II 15	3	0,60	1,50	0,64	4,00	10,00	4,72	2,36	0,50	31,50
II 16	6	0,70	3,60	1,15	5,00	24,70	5,22	3,13	0,58	42,96
II 17	3	0,10	0,90	0,17	1,90	3,30	17,65	5,29	0,59	38,82
II 18	3	0,10	0,30	0,09	1,50	1,60	33,33	3,33	0,50	35,56
II 19	4	1,00	1,50	0,31	2,70	5,60	12,90	4,84	0,53	36,13
II 20	4	0,90	2,00	0,94	4,00	17,50	4,26	2,13	0,74	37,23
II 21	7	0,90	2,10	0,68	3,80	15,70	10,29	3,09	0,59	46,18
II 22	3	0,50	1,00	0,27	2,40	5,30	11,32	3,77	0,58	40,00
II 23	4	0,50	1,30	0,35	2,50	6,50	11,43	3,71	0,70	37,14
II 24	4	0,60	1,30	0,26	2,50	4,90	15,38	5,00	0,52	37,69
II 25	3	0,30	1,30	0,33	2,10	3,90	9,23	4,00	0,93	24,00
II 26	5	0,40	3,10	0,82	3,90	9,30	6,10	3,78	0,68	22,68
II 27	3	0,20	0,60	0,07	1,20	2,10	42,86	8,57	0,61	60,00
II 28	4	0,60	1,00	0,18	1,80	4,30	22,22	5,56	0,70	47,78
II 29	4	0,80	2,00	0,39	3,30	4,70	10,39	5,19	0,44	24,42
II 30	5	0,40	2,30	0,82	4,00	9,20	6,13	2,82	0,64	22,58
II 31	3	0,30	1,00	0,38	3,00	5,90	7,85	2,62	0,53	30,89
II 32	9	4,70	8,90	2,47	9,90	23,40	3,64	3,60	0,32	18,95
II 33	4	1,00	2,00	0,86	4,00	5,70	4,68	2,34	0,67	13,33
Μέσες Τιμές Υπολογιζόμενων Παραμέτρων 2ης Τάξης							12,97	3,97	0,60	33,79
I 1	1	0,40	0,40	0,14	1,60	2,20	6,62	2,39	0,75	32,59
I 2	1	0,30	0,30	0,10	1,70	1,10	8,37	2,49	0,55	22,00
I 3	1	0,30	0,30	0,08	1,10	1,30	12,73	3,31	0,80	33,10
I 4	1	0,20	0,20	0,05	0,90	0,70	20,75	4,35	0,67	29,05
I 5	1	0,40	0,40	0,09	1,20	1,30	12,35	4,44	0,68	28,89
I 6	1	0,30	0,30	0,06	1,00	1,00	17,10	5,64	0,73	34,21

I 7	1	0,40	0,40	0,10	1,30	1,20	11,38	4,47	0,66	24,00
I 8	1	0,40	0,40	0,27	2,20	2,30	4,05	1,63	0,67	17,36
I 9	1	0,30	0,30	0,03	0,80	0,30	25,50	6,06	0,72	20,00
I 10	1	0,30	0,30	0,11	1,40	1,60	9,24	2,65	0,70	29,09
I 11	1	0,10	0,10	0,02	0,60	0,30	53,52	6,23	0,63	30,00
I 12	1	0,20	0,20	0,07	1,00	0,80	16,25	3,30	0,73	24,62
I 13	1	0,50	0,50	0,19	2,00	3,40	5,17	2,51	0,63	35,79
I 14	1	0,40	0,40	0,15	1,50	2,40	6,89	2,90	0,78	33,10
I 15	1	0,20	0,20	0,06	1,00	1,20	14,91	2,44	0,75	38,71
I 16	1	0,20	0,20	0,07	1,10	1,00	15,47	3,06	0,70	30,77
I 17	1	0,20	0,20	0,09	1,20	1,40	12,58	2,34	0,74	32,94
I 18	1	0,70	0,70	0,19	2,30	3,84	4,61	3,09	0,50	41,52
I 19	1	1,00	1,00	0,20	2,40	3,33	4,88	4,68	0,45	33,25
I 20	1	0,30	0,30	0,14	1,50	2,31	7,84	2,44	0,66	34,18
I 21	1	0,20	0,20	0,05	1,00	0,91	17,31	3,77	0,68	35,15
I 22	1	0,40	0,40	0,10	1,40	1,70	9,98	3,75	0,60	34,04
I 23	1	0,40	0,40	0,04	1,30	0,99	20,09	7,54	0,37	46,00
I 24	1	0,40	0,40	0,08	1,40	1,30	13,52	4,91	0,47	34,67
I 25	1	0,20	0,20	0,09	1,10	1,61	12,81	2,65	0,76	37,33
I 26	1	0,20	0,20	0,08	1,20	1,39	12,37	2,81	0,67	34,31
I 27	1	0,50	0,50	0,11	1,40	1,83	8,25	3,98	0,76	33,22
I 28	1	0,50	0,50	0,10	1,50	1,17	11,07	5,58	0,50	24,72
I 29	1	0,20	0,20	0,05	1,10	0,95	19,69	4,97	0,58	37,92
I 30	1	0,40	0,40	0,12	1,60	2,51	7,64	3,18	0,62	43,60
I 31	1	0,50	0,50	0,11	1,60	1,83	10,03	5,12	0,47	33,27
I 32	1	0,30	0,30	0,08	1,20	1,37	14,27	4,18	0,59	36,48
I 33	1	0,10	0,10	0,03	0,90	0,57	29,28	4,02	0,60	35,38
I 34	1	0,50	0,50	0,09	1,40	1,60	10,47	5,02	0,60	36,80
I 35	1	0,10	0,10	0,03	0,80	0,51	32,00	2,82	0,58	33,87
I 36	1	0,20	0,20	0,04	0,80	0,83	27,64	5,07	0,67	40,39
I 37	1	0,10	0,10	0,04	0,90	0,75	26,87	3,29	0,65	39,53
I 38	1	0,10	0,10	0,10	1,40	1,83	9,76	1,14	0,65	36,68
I 39	1	0,20	0,20	0,12	1,50	2,04	8,74	1,46	0,66	35,46
I 40	1	0,40	0,40	0,11	1,60	2,09	9,28	3,52	0,52	38,65
I 41	1	1,00	1,00	0,26	2,70	5,69	3,71	3,72	0,45	43,07
I 42	1	0,30	0,30	0,06	1,00	0,89	18,89	4,60	0,64	32,18
I 43	1	0,10	0,10	0,03	0,90	0,62	28,68	3,07	0,56	41,20
I 44	1	0,10	0,10	0,03	0,80	0,47	36,45	5,19	0,56	32,07
I 45	1	0,20	0,20	0,04	0,90	0,40	25,72	5,51	0,62	22,74
I 46	1	0,60	0,60	0,19	2,00	2,82	5,95	3,51	0,53	29,68
I 47	1	0,40	0,40	0,42	2,90	6,32	2,67	1,07	0,56	30,47
I 48	1	0,50	0,50	0,10	1,50	1,76	10,15	4,67	0,54	35,52
I 49	1	1,00	1,00	0,45	3,20	9,50	2,12	2,17	0,59	42,70
I 50	1	0,60	0,60	0,28	2,20	5,85	3,58	2,19	0,72	42,22
I 51	1	0,70	0,70	0,13	2,00	2,57	7,38	5,09	0,42	39,58
I 52	1	0,30	0,30	0,06	1,60	1,18	18,99	5,45	0,26	42,80
I 53	1	0,30	0,30	0,07	1,70	1,61	14,08	4,09	0,32	45,97
I 54	1	0,30	0,30	0,06	1,40	1,36	15,07	4,57	0,42	42,47
I 55	1	0,50	0,50	0,08	1,60	1,79	12,44	5,76	0,39	44,10
I 56	1	0,30	0,30	0,04	1,20	0,87	23,79	6,49	0,36	39,55
I 57	1	0,20	0,20	0,04	1,00	0,64	23,58	5,70	0,59	31,27
I 58	1	0,20	0,20	0,03	0,70	0,50	36,98	7,35	0,62	36,74

I 59	1	0,10	0,10	0,04	1,00	0,74	26,16	4,03	0,49	37,90
I 60	1	0,10	0,20	0,04	1,10	0,77	29,13	4,49	0,40	44,00
I 61	1	0,20	0,20	0,05	1,20	1,11	22,63	5,33	0,40	48,13
I 62	1	0,30	0,30	0,04	1,00	0,92	27,45	6,81	0,46	49,73
I 63	1	0,20	0,20	0,06	1,10	1,09	14,79	2,74	0,66	34,03
I 64	1	0,20	0,20	0,07	1,20	1,29	14,43	3,07	0,58	36,97
I 65	1	0,10	0,10	0,03	0,80	0,55	35,70	4,73	0,57	42,54
I 66	1	0,20	0,20	0,21	2,00	3,12	4,95	1,16	0,62	30,13
I 67	1	0,30	0,30	0,09	1,30	1,71	11,03	3,16	0,66	38,09
I 68	1	0,60	0,60	0,32	2,40	6,05	3,41	2,09	0,65	37,81
I 69	1	0,70	0,70	0,26	2,60	5,55	3,82	2,49	0,50	43,53
I 70	1	0,10	0,10	0,08	1,40	1,61	13,40	1,94	0,47	41,26
I 71	1	0,40	0,40	0,17	1,70	3,42	5,78	2,07	0,76	39,79
I 72	1	0,10	0,10	0,03	0,70	0,57	33,83	4,91	0,70	35,69
I 73	1	0,10	0,10	0,06	1,10	1,51	14,71	2,15	0,74	47,06
I 74	1	0,20	0,20	0,03	0,90	0,68	32,77	4,79	0,43	45,20
I 75	1	0,30	0,30	0,06	1,20	1,21	16,41	4,27	0,54	39,10
I 76	1	0,30	0,30	0,08	1,20	1,55	12,89	3,55	0,71	39,11
I 77	1	0,20	0,20	0,05	1,00	1,01	19,84	3,90	0,59	41,22
I 78	1	0,80	0,80	0,17	2,00	3,20	5,97	4,83	0,51	37,23
I 79	1	0,50	0,50	0,10	1,50	1,68	10,09	4,84	0,52	33,84
I 80	1	0,40	0,40	0,11	1,30	2,28	9,61	3,48	0,72	42,92
I 81	1	0,20	0,20	0,04	0,90	0,99	22,00	4,97	0,71	44,91
I 82	1	0,20	0,20	0,05	1,00	0,75	22,09	4,95	0,60	31,96
I 83	1	0,40	0,40	0,09	1,60	1,47	10,93	4,07	0,47	31,59
I 84	1	0,20	0,20	0,08	1,40	1,76	12,42	2,50	0,54	44,03
I 85	1	0,20	0,20	0,05	1,10	0,87	21,71	3,68	0,48	36,21
I 86	1	0,30	0,30	0,05	1,10	0,74	19,15	6,40	0,52	28,19
I 87	1	0,10	0,10	0,02	0,50	0,50	52,04	6,60	0,80	49,60
I 88	1	0,20	0,20	0,02	0,60	0,36	50,65	8,67	0,66	39,67
I 89	1	0,40	0,40	0,15	1,60	1,81	6,95	2,82	0,71	24,90
I 90	1	0,50	0,50	0,10	1,50	1,67	10,30	4,95	0,55	34,06
I 91	1	0,40	0,40	0,09	1,40	1,56	11,02	4,93	0,58	34,60
I 92	1	0,40	0,40	0,08	1,20	1,28	12,95	5,59	0,66	34,21
I 93	1	0,50	0,50	0,13	1,50	2,03	7,70	3,56	0,71	31,52
I 94	1	0,50	0,50	0,11	1,60	1,25	9,10	4,65	0,57	22,71
I 95	1	0,50	0,50	0,15	1,50	1,78	7,03	3,42	0,76	24,24
I 96	1	0,30	0,30	0,09	1,40	0,95	11,15	3,66	0,59	21,30
I 97	1	0,60	0,60	0,19	2,10	2,56	5,36	3,19	0,52	27,28
I 98	1	0,90	0,90	0,32	3,00	2,92	3,23	2,91	0,43	18,01
I 99	1	0,80	0,80	0,14	2,30	1,85	7,16	5,69	0,34	26,63
I 100	1	0,70	0,70	0,13	2,00	2,10	7,34	5,42	0,40	31,50
I 101	1	0,30	0,30	0,08	1,30	0,95	12,28	4,21	0,64	23,80
I 102	1	0,40	0,40	0,07	1,40	0,89	15,06	5,48	0,40	26,42
I 103	1	0,20	0,20	0,03	0,90	0,79	31,44	6,74	0,52	52,60
I 104	1	0,20	0,20	0,02	0,80	0,64	42,84	9,60	0,47	52,92
I 105	1	0,10	0,10	0,01	0,50	0,22	95,43	12,29	0,57	43,40
I 106	1	0,10	0,10	0,02	0,60	0,33	62,97	8,26	0,65	38,59
I 107	1	0,20	0,20	0,04	1,00	0,60	26,93	4,84	0,45	32,22
I 108	1	0,50	0,50	0,11	1,60	1,67	9,16	4,24	0,56	30,49
I 109	1	0,50	0,50	0,14	1,70	2,28	6,98	3,49	0,63	32,15
I 110	1	0,50	0,50	0,10	1,60	1,38	9,86	4,92	0,51	27,68

I 111	1	0,30	0,30	0,10	1,50	1,23	9,87	3,13	0,60	23,83
I 112	1	0,40	0,40	0,06	1,10	0,77	16,49	6,22	0,64	25,43
I 113	1	0,80	0,80	0,16	2,00	1,76	6,34	4,78	0,48	22,18
I 114	1	0,80	0,80	0,20	2,20	1,99	4,64	3,56	0,55	19,49
I 115	1	0,60	0,60	0,16	1,80	1,84	6,32	3,62	0,61	23,60
I 116	1	0,60	0,60	0,16	2,10	0,94	6,19	3,79	0,46	11,51
I 117	1	0,30	0,30	0,12	1,50	1,47	8,31	2,43	0,72	24,44
I 118	1	0,20	0,20	0,04	0,90	0,47	23,83	4,38	0,72	23,35
I 119	1	0,70	0,70	0,24	2,81	2,70	4,35	2,99	0,36	22,50
I 120	1	0,90	0,90	0,32	2,70	3,94	3,26	3,04	0,54	24,91
I 121	1	0,10	0,10	0,04	0,90	0,52	25,75	3,82	0,60	25,80
I 122	1	0,40	0,40	0,16	1,90	2,30	6,27	2,67	0,54	29,25
I 123	1	0,30	0,30	0,13	1,60	1,82	7,64	2,63	0,67	27,64
I 124	1	0,40	0,40	0,07	1,30	0,86	14,14	6,15	0,49	24,20
I 125	1	0,30	0,30	0,05	1,10	0,60	22,88	7,35	0,50	26,44
I 126	1	1,10	1,10	0,31	2,90	2,09	3,54	3,84	0,43	13,40
I 127	1	0,50	0,50	0,15	2,00	0,94	6,80	3,15	0,48	12,90
I 128	1	0,90	0,90	0,23	2,80	2,17	4,38	4,06	0,35	18,53
I 129	1	0,80	0,80	0,17	2,10	2,40	5,78	4,43	0,51	28,05
I 130	1	0,20	0,20	0,08	1,20	1,14	11,90	2,48	0,78	27,68
I 131	1	0,30	0,30	0,08	1,10	1,00	12,56	3,42	0,80	25,32
I 132	1	0,10	0,10	0,02	0,70	0,30	46,81	4,63	0,48	25,00
I 133	1	0,30	0,30	0,04	1,00	0,60	28,10	7,32	0,47	31,58
I 134	1	0,40	0,40	0,09	1,40	1,10	10,97	4,37	0,59	23,66
I 135	1	0,40	0,40	0,08	1,40	1,00	12,21	4,79	0,56	23,81
I 136	1	0,20	0,20	0,13	1,50	0,80	8,08	1,46	0,66	12,70
Μέσες Τιμές Υπολογιζόμενων Παραμέτρων 1ης Τάξης							16,08	4,18	0,58	32,99

ΗΜΙΑΥΤΟΜΑΤΗ ΜΕΘΟΔΟΣ										
ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ							ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ			
u	Nu	Lu	ΣLu	Au	Pu	Lcu	Fu	Du	Cu	Su
IV 1	177	10,70	93,99	27,52	29,46	399,64	6,43	3,42	0,40	29,05
III 1	9	1,12	3,94	1,35	5,86	19,33	6,65	2,91	0,49	28,57
III 2	13	1,28	5,14	1,30	5,32	23,09	10,04	3,97	0,58	35,66
III 3	15	0,81	7,23	2,19	6,62	42,08	6,86	3,31	0,63	38,51
III 4	16	1,22	6,10	2,12	6,71	42,55	7,54	2,88	0,59	40,11
III 5	13	0,64	5,21	1,36	5,39	28,20	9,55	3,83	0,59	41,45
III 6	18	2,48	9,58	2,37	8,09	34,69	7,59	4,04	0,45	29,27
III 7	12	3,38	8,10	2,26	10,84	27,68	5,31	3,58	0,24	24,51
Μέσες Τιμές Υπολογιζόμενων Παραμέτρων 3ης Τάξης							7,65	3,50	0,51	34,01
II 1	4	0,79	1,56	0,49	3,11	5,36	8,18	3,18	0,64	21,90
II 2	3	0,26	0,98	0,19	1,84	3,01	15,56	5,10	0,71	31,20
II 3	3	0,21	0,74	0,18	1,91	2,23	16,74	4,11	0,61	24,89
II 4	4	0,86	1,66	0,55	3,56	9,71	7,21	3,00	0,55	35,03
II 5	3	0,58	0,94	0,28	2,27	4,78	10,57	3,32	0,69	33,68
II 6	3	0,61	1,47	0,44	3,50	7,62	6,90	3,37	0,45	35,04
II 7	6	1,00	2,65	0,66	3,82	10,97	9,07	4,00	0,57	33,19
II 8	3	0,20	1,19	0,27	2,20	3,91	11,31	4,47	0,69	29,49
II 9	3	0,46	1,13	0,28	2,51	5,50	10,62	4,00	0,56	38,95
II 10	3	0,17	0,60	0,13	1,71	2,33	22,50	4,50	0,57	34,88
II 11	4	0,66	1,06	0,24	2,31	4,50	16,50	4,35	0,57	37,10
II 12	6	0,92	2,83	0,89	4,52	16,49	6,75	3,18	0,55	37,09
II 13	3	0,20	0,45	0,09	1,33	1,72	32,22	4,88	0,66	36,96
II 14	3	0,59	1,39	0,36	3,18	5,55	8,40	3,89	0,44	31,07
II 15	3	0,58	1,44	0,63	4,02	10,11	4,76	2,29	0,49	32,11
II 16	6	0,72	3,62	1,18	4,91	24,42	5,10	3,08	0,61	41,52
II 17	3	0,08	0,85	0,15	1,74	3,36	19,97	5,64	0,62	44,70
II 18	3	0,11	0,42	0,08	1,45	1,73	35,41	4,92	0,51	40,79
II 19	4	0,84	1,37	0,32	2,85	5,64	12,55	4,30	0,49	35,40
II 20	4	0,63	1,76	0,91	4,13	17,34	4,38	1,93	0,67	38,00
II 21	7	1,01	2,21	0,70	3,68	15,68	9,95	3,15	0,65	44,58
II 22	3	0,60	1,07	0,28	2,43	5,62	10,64	3,80	0,60	39,88
II 23	4	0,61	1,42	0,34	2,52	6,65	11,69	4,14	0,68	38,83
II 24	4	0,58	1,28	0,26	2,59	4,77	15,29	4,90	0,49	36,47
II 25	3	0,30	1,30	0,32	2,29	3,91	9,28	4,01	0,78	24,20
II 26	5	0,48	3,26	0,80	4,01	9,49	6,24	4,06	0,63	23,69
II 27	3	0,18	0,62	0,08	1,27	1,96	37,31	7,70	0,63	48,78
II 28	4	0,54	0,98	0,20	1,87	4,32	19,63	4,79	0,73	42,37
II 29	4	0,74	1,93	0,38	3,11	4,91	10,58	5,10	0,49	25,99
II 30	5	0,56	2,51	0,75	4,08	9,26	6,71	3,36	0,56	24,83
II 31	3	0,38	1,15	0,39	2,99	5,82	7,71	2,96	0,55	29,89
II 32	9	4,42	8,50	2,47	9,78	23,99	3,65	3,44	0,32	19,44
II 33	4	1,10	2,07	0,82	3,93	5,67	4,91	2,54	0,66	13,92
Μέσες Τιμές Υπολογιζόμενων Παραμέτρων 2ης Τάξης							12,68	3,98	0,59	33,51
I 1	1	0,36	0,36	0,15	1,59	2,38	6,62	2,39	0,75	31,55
I 2	1	0,30	0,30	0,12	1,65	1,06	8,37	2,49	0,55	17,79
I 3	1	0,26	0,26	0,08	1,11	1,17	12,73	3,31	0,80	29,86
I 4	1	0,21	0,21	0,05	0,95	0,52	20,75	4,35	0,67	21,45
I 5	1	0,36	0,36	0,08	1,23	1,28	12,35	4,44	0,68	31,59
I 6	1	0,33	0,33	0,06	1,00	1,14	17,10	5,64	0,73	39,03

I 7	1	0,39	0,39	0,09	1,29	1,22	11,38	4,47	0,66	27,85
I 8	1	0,40	0,40	0,25	2,16	2,17	4,05	1,63	0,67	17,54
I 9	1	0,24	0,24	0,04	0,83	0,48	25,50	6,06	0,72	24,33
I 10	1	0,29	0,29	0,11	1,39	1,48	9,24	2,65	0,70	27,35
I 11	1	0,12	0,12	0,02	0,61	0,32	53,52	6,23	0,63	34,47
I 12	1	0,20	0,20	0,06	1,03	0,87	16,25	3,30	0,73	28,41
I 13	1	0,49	0,49	0,19	1,96	3,11	5,17	2,51	0,63	32,12
I 14	1	0,42	0,42	0,15	1,53	2,43	6,89	2,90	0,78	33,54
I 15	1	0,16	0,16	0,07	1,06	1,16	14,91	2,44	0,75	34,44
I 16	1	0,20	0,20	0,06	1,08	1,03	15,47	3,06	0,70	31,96
I 17	1	0,19	0,19	0,08	1,16	1,45	12,58	2,34	0,74	36,59
I 18	1	0,67	0,67	0,22	2,33	3,84	4,61	3,09	0,50	35,38
I 19	1	0,96	0,96	0,20	2,39	3,33	4,88	4,68	0,45	32,46
I 20	1	0,31	0,31	0,13	1,56	2,31	7,84	2,44	0,66	36,18
I 21	1	0,22	0,22	0,06	1,03	0,91	17,31	3,77	0,68	31,65
I 22	1	0,38	0,38	0,10	1,45	1,70	9,98	3,75	0,60	33,98
I 23	1	0,38	0,38	0,05	1,31	0,99	20,09	7,54	0,37	39,74
I 24	1	0,36	0,36	0,07	1,40	1,30	13,52	4,91	0,47	35,14
I 25	1	0,21	0,21	0,08	1,13	1,61	12,81	2,65	0,76	41,13
I 26	1	0,23	0,23	0,08	1,23	1,39	12,37	2,81	0,67	34,31
I 27	1	0,48	0,48	0,12	1,41	1,83	8,25	3,98	0,76	30,16
I 28	1	0,50	0,50	0,09	1,51	1,17	11,07	5,58	0,50	25,99
I 29	1	0,25	0,25	0,05	1,05	0,95	19,69	4,97	0,58	37,32
I 30	1	0,42	0,42	0,13	1,63	2,51	7,64	3,18	0,62	38,31
I 31	1	0,51	0,51	0,10	1,64	1,83	10,03	5,12	0,47	36,70
I 32	1	0,29	0,29	0,07	1,22	1,37	14,27	4,18	0,59	39,05
I 33	1	0,14	0,14	0,03	0,85	0,57	29,28	4,02	0,60	33,14
I 34	1	0,48	0,48	0,10	1,41	1,60	10,47	5,02	0,60	33,54
I 35	1	0,09	0,09	0,03	0,82	0,51	32,00	2,82	0,58	32,52
I 36	1	0,18	0,18	0,04	0,82	0,83	27,64	5,07	0,67	45,77
I 37	1	0,12	0,12	0,04	0,85	0,75	26,87	3,29	0,65	40,37
I 38	1	0,12	0,12	0,10	1,40	1,83	9,76	1,14	0,65	35,80
I 39	1	0,17	0,17	0,11	1,48	2,04	8,74	1,46	0,66	35,62
I 40	1	0,38	0,38	0,11	1,61	2,09	9,28	3,52	0,52	38,73
I 41	1	1,00	1,00	0,27	2,74	5,69	3,71	3,72	0,45	42,13
I 42	1	0,24	0,24	0,05	1,02	0,89	18,89	4,60	0,64	33,43
I 43	1	0,11	0,11	0,03	0,89	0,62	28,68	3,07	0,56	35,45
I 44	1	0,14	0,14	0,03	0,78	0,47	36,45	5,19	0,56	33,90
I 45	1	0,21	0,21	0,04	0,88	0,40	25,72	5,51	0,62	20,48
I 46	1	0,59	0,59	0,17	1,99	2,82	5,95	3,51	0,53	33,54
I 47	1	0,40	0,40	0,37	2,89	6,32	2,67	1,07	0,56	33,72
I 48	1	0,46	0,46	0,10	1,52	1,76	10,15	4,67	0,54	35,68
I 49	1	1,02	1,02	0,47	3,16	9,50	2,12	2,17	0,59	40,35
I 50	1	0,61	0,61	0,28	2,20	5,85	3,58	2,19	0,72	41,91
I 51	1	0,69	0,69	0,14	2,01	2,57	7,38	5,09	0,42	37,97
I 52	1	0,29	0,29	0,05	1,60	1,18	18,99	5,45	0,26	44,71
I 53	1	0,29	0,29	0,07	1,68	1,61	14,08	4,09	0,32	45,31
I 54	1	0,30	0,30	0,07	1,40	1,36	15,07	4,57	0,42	40,96
I 55	1	0,46	0,46	0,08	1,61	1,79	12,44	5,76	0,39	44,43
I 56	1	0,27	0,27	0,04	1,21	0,87	23,79	6,49	0,36	41,40
I 57	1	0,24	0,24	0,04	0,95	0,64	23,58	5,70	0,59	30,22
I 58	1	0,20	0,20	0,03	0,74	0,50	36,98	7,35	0,62	36,69

I 59	1	0,15	0,15	0,04	0,99	0,74	26,16	4,03	0,49	38,67
I 60	1	0,15	0,15	0,03	1,04	0,77	29,13	4,49	0,40	44,86
I 61	1	0,24	0,24	0,04	1,18	1,11	22,63	5,33	0,40	50,10
I 62	1	0,25	0,25	0,04	1,00	0,92	27,45	6,81	0,46	50,51
I 63	1	0,19	0,19	0,07	1,14	1,09	14,79	2,74	0,66	32,21
I 64	1	0,21	0,21	0,07	1,22	1,29	14,43	3,07	0,58	37,35
I 65	1	0,13	0,13	0,03	0,79	0,55	35,70	4,73	0,57	39,49
I 66	1	0,23	0,23	0,20	2,02	3,12	4,95	1,16	0,62	30,85
I 67	1	0,29	0,29	0,09	1,32	1,71	11,03	3,16	0,66	37,82
I 68	1	0,61	0,61	0,29	2,38	6,05	3,41	2,09	0,65	41,23
I 69	1	0,65	0,65	0,26	2,56	5,55	3,82	2,49	0,50	42,37
I 70	1	0,15	0,15	0,07	1,41	1,61	13,40	1,94	0,47	43,12
I 71	1	0,36	0,36	0,17	1,69	3,42	5,78	2,07	0,76	39,54
I 72	1	0,15	0,15	0,03	0,73	0,57	33,83	4,91	0,70	38,63
I 73	1	0,15	0,15	0,07	1,08	1,51	14,71	2,15	0,74	44,29
I 74	1	0,15	0,15	0,03	0,95	0,68	32,77	4,79	0,43	44,44
I 75	1	0,26	0,26	0,06	1,19	1,21	16,41	4,27	0,54	39,78
I 76	1	0,28	0,28	0,08	1,17	1,55	12,89	3,55	0,71	39,85
I 77	1	0,20	0,20	0,05	1,04	1,01	19,84	3,90	0,59	40,08
I 78	1	0,81	0,81	0,17	2,03	3,20	5,97	4,83	0,51	38,26
I 79	1	0,48	0,48	0,10	1,55	1,68	10,09	4,84	0,52	33,79
I 80	1	0,36	0,36	0,10	1,34	2,28	9,61	3,48	0,72	43,71
I 81	1	0,23	0,23	0,05	0,89	0,99	22,00	4,97	0,71	43,48
I 82	1	0,22	0,22	0,05	0,98	0,75	22,09	4,95	0,60	33,17
I 83	1	0,37	0,37	0,09	1,56	1,47	10,93	4,07	0,47	32,10
I 84	1	0,20	0,20	0,08	1,37	1,76	12,42	2,50	0,54	43,76
I 85	1	0,17	0,17	0,05	1,09	0,87	21,71	3,68	0,48	37,73
I 86	1	0,33	0,33	0,05	1,12	0,74	19,15	6,40	0,52	28,19
I 87	1	0,13	0,13	0,02	0,55	0,50	52,04	6,60	0,80	51,62
I 88	1	0,17	0,17	0,02	0,61	0,36	50,65	8,67	0,66	36,17
I 89	1	0,41	0,41	0,14	1,59	1,81	6,95	2,82	0,71	25,11
I 90	1	0,48	0,48	0,10	1,49	1,67	10,30	4,95	0,55	34,38
I 91	1	0,45	0,45	0,09	1,41	1,56	11,02	4,93	0,58	34,33
I 92	1	0,43	0,43	0,08	1,22	1,28	12,95	5,59	0,66	33,24
I 93	1	0,46	0,46	0,13	1,51	2,03	7,70	3,56	0,71	31,33
I 94	1	0,51	0,51	0,11	1,56	1,25	9,10	4,65	0,57	22,73
I 95	1	0,49	0,49	0,14	1,53	1,78	7,03	3,42	0,76	25,05
I 96	1	0,33	0,33	0,09	1,38	0,95	11,15	3,66	0,59	21,14
I 97	1	0,60	0,60	0,19	2,12	2,56	5,36	3,19	0,52	27,48
I 98	1	0,90	0,90	0,31	3,02	2,92	3,23	2,91	0,43	18,86
I 99	1	0,79	0,79	0,14	2,28	1,85	7,16	5,69	0,34	26,52
I 100	1	0,74	0,74	0,14	2,07	2,10	7,34	5,42	0,40	30,75
I 101	1	0,34	0,34	0,08	1,26	0,95	12,28	4,21	0,64	23,37
I 102	1	0,36	0,36	0,07	1,44	0,89	15,06	5,48	0,40	26,65
I 103	1	0,21	0,21	0,03	0,88	0,79	31,44	6,74	0,52	49,61
I 104	1	0,22	0,22	0,02	0,79	0,64	42,84	9,60	0,47	54,41
I 105	1	0,13	0,13	0,01	0,48	0,22	95,43	12,29	0,57	41,42
I 106	1	0,13	0,13	0,02	0,55	0,33	62,97	8,26	0,65	41,31
I 107	1	0,18	0,18	0,04	1,02	0,60	26,93	4,84	0,45	32,10
I 108	1	0,46	0,46	0,11	1,57	1,67	9,16	4,24	0,56	30,49
I 109	1	0,50	0,50	0,14	1,69	2,28	6,98	3,49	0,63	31,85
I 110	1	0,50	0,50	0,10	1,59	1,38	9,86	4,92	0,51	27,28

I 111	1	0,32	0,32	0,10	1,46	1,23	9,87	3,13	0,60	24,23
I 112	1	0,38	0,38	0,06	1,09	0,77	16,49	6,22	0,64	25,43
I 113	1	0,75	0,75	0,16	2,03	1,76	6,34	4,78	0,48	22,37
I 114	1	0,77	0,77	0,22	2,21	1,99	4,64	3,56	0,55	18,44
I 115	1	0,57	0,57	0,16	1,80	1,84	6,32	3,62	0,61	23,28
I 116	1	0,61	0,61	0,16	2,10	0,94	6,19	3,79	0,46	11,61
I 117	1	0,29	0,29	0,12	1,45	1,47	8,31	2,43	0,72	24,44
I 118	1	0,18	0,18	0,04	0,86	0,47	23,83	4,38	0,72	22,25
I 119	1	0,69	0,69	0,23	2,81	2,70	4,35	2,99	0,36	23,50
I 120	1	0,93	0,93	0,31	2,66	3,94	3,26	3,04	0,54	25,68
I 121	1	0,15	0,15	0,04	0,90	0,52	25,75	3,82	0,60	26,57
I 122	1	0,43	0,43	0,16	1,93	2,30	6,27	2,67	0,54	28,78
I 123	1	0,34	0,34	0,13	1,57	1,82	7,64	2,63	0,67	27,87
I 124	1	0,44	0,44	0,07	1,35	0,86	14,14	6,15	0,49	24,20
I 125	1	0,32	0,32	0,04	1,05	0,60	22,88	7,35	0,50	27,23
I 126	1	1,08	1,08	0,28	2,86	2,09	3,54	3,84	0,43	14,82
I 127	1	0,46	0,46	0,15	1,96	0,94	6,80	3,15	0,48	12,81
I 128	1	0,93	0,93	0,23	2,85	2,17	4,38	4,06	0,35	18,98
I 129	1	0,77	0,77	0,17	2,06	2,40	5,78	4,43	0,51	27,72
I 130	1	0,21	0,21	0,08	1,16	1,14	11,90	2,48	0,78	27,02
I 131	1	0,27	0,27	0,08	1,12	0,94	12,56	3,42	0,80	23,66
I 132	1	0,10	0,10	0,02	0,75	0,23	46,81	4,63	0,48	21,44
I 133	1	0,26	0,26	0,04	0,97	0,59	28,10	7,32	0,47	32,99
I 134	1	0,40	0,40	0,09	1,39	1,12	10,97	4,37	0,59	24,53
I 135	1	0,39	0,39	0,08	1,36	1,08	12,21	4,79	0,56	26,30
I 136	1	0,18	0,18	0,12	1,53	0,60	8,08	1,46	0,66	9,65
Μέσες Τιμές Υπολογιζόμενων Παραμέτρων 1ης Τάξης							16,04	4,20	0,58	32,92

ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ									
ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ						ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ			
u	Nu	Lu	ΣLu	Au	Pu	Fu	Du	Cu	Su
IV 1	177	10,70	93,99	28,15	28,62	6,29	3,34	0,43	20,45
III 1	9	1,12	3,94	1,45	5,91	6,20	2,72	0,52	20,22
III 2	13	1,28	5,14	1,35	5,16	9,65	3,81	0,64	26,77
III 3	15	0,81	7,23	2,23	6,46	6,72	3,24	0,67	30,94
III 4	16	1,22	6,10	1,98	6,47	8,09	3,09	0,59	31,14
III 5	13	0,64	5,21	1,40	5,08	9,30	3,73	0,68	30,77
III 6	18	2,48	9,58	2,37	7,64	7,59	4,04	0,51	20,53
III 7	12	3,38	8,10	2,31	10,19	5,19	3,50	0,28	14,75
Μέσες Τιμές Υπολογιζόμενων Παραμέτρων 3ης Τάξης						7,54	3,45	0,56	23,52
II 1	4	0,79	1,56	0,40	2,81	10,03	3,90	0,63	14,75
II 2	3	0,26	0,98	0,20	1,90	15,06	4,93	0,70	17,05
II 3	3	0,21	0,74	0,13	1,54	23,25	5,71	0,68	18,66
II 4	4	0,86	1,66	0,62	3,67	6,48	2,69	0,58	24,37
II 5	3	0,58	0,94	0,24	2,12	12,41	3,90	0,67	23,51
II 6	3	0,61	1,47	0,48	3,32	6,29	3,08	0,54	22,70
II 7	6	1,00	2,65	0,66	3,50	9,08	4,01	0,68	23,37
II 8	3	0,20	1,19	0,22	2,10	13,46	5,32	0,63	21,50
II 9	3	0,46	1,13	0,30	2,50	10,13	3,82	0,59	26,06
II 10	3	0,17	0,60	0,12	1,54	24,07	4,81	0,66	31,12
II 11	4	0,66	1,06	0,22	2,23	17,90	4,72	0,56	28,27
II 12	6	0,92	2,83	0,89	4,58	6,75	3,19	0,53	27,85
II 13	3	0,20	0,45	0,08	1,24	37,92	5,74	0,64	26,67
II 14	3	0,59	1,39	0,31	2,87	9,70	4,50	0,47	21,10
II 15	3	0,58	1,44	0,61	4,05	4,88	2,35	0,47	26,59
II 16	6	0,72	3,62	1,25	4,83	4,80	2,90	0,67	34,20
II 17	3	0,08	0,85	0,15	1,86	20,06	5,67	0,54	35,37
II 18	3	0,11	0,42	0,06	1,40	53,45	7,43	0,36	34,13
II 19	4	0,84	1,37	0,31	2,64	12,85	4,40	0,56	28,11
II 20	4	0,63	1,76	0,59	3,00	6,84	3,01	0,81	29,19
II 21	7	1,01	2,21	0,77	3,51	9,05	2,86	0,79	33,93
II 22	3	0,60	1,07	0,47	3,19	6,32	2,26	0,58	27,71
II 23	4	0,61	1,42	0,34	2,59	11,88	4,21	0,63	32,02
II 24	4	0,58	1,28	0,28	2,33	14,07	4,51	0,66	28,31
II 25	3	0,30	1,30	0,20	2,08	15,17	6,55	0,58	18,44
II 26	5	0,48	3,26	0,80	3,51	6,24	4,06	0,82	19,20
II 27	3	0,18	0,62	0,10	1,36	29,39	6,06	0,70	35,11
II 28	4	0,54	0,98	0,21	2,00	18,98	4,63	0,66	31,91
II 29	4	0,74	1,93	0,33	2,81	12,13	5,86	0,52	14,38
II 30	5	0,56	2,51	0,78	3,92	6,42	3,22	0,64	18,62
II 31	3	0,38	1,15	0,29	2,40	10,45	4,01	0,63	17,58
II 32	9	4,42	8,50	2,45	9,64	3,67	3,47	0,33	12,95
II 33	4	1,10	2,07	0,60	3,56	6,72	3,48	0,59	10,69
Μέσες Τιμές Υπολογιζόμενων Παραμέτρων 2ης Τάξης						13,82	4,28	0,61	24,71

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II
(ΟΡΟΙ ΠΟΥ ΑΠΑΙΤΟΥΝ ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ Ή/ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΤΗΝ
ΑΓΓΛΙΚΗ)

A. Οι κοιλάδες (valleys, vales, dales, denes) αποτελούν μια γενικότερη κατηγορία γεωμορφών που ανάλογα με την ιδιαιτερότητα της μορφής και του σχηματισμού τους, λαμβάνουν την ονομασία χαράδρες (gorges) φαράγγια (ravines, cloughs, gulches, klooves, notches) και κάνυον (canyons).

B. Η περιοχή ανάντη του σημείου εξόδου (outlet) ενός ποτάμιου ρέματος που συγκεντρώνει το νερό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων ονομάζεται λεκάνη απορροής, λεκάνη αποστράγγισης, ή υδρολογική λεκάνη: catchment area/ basin, drainage area/ basin, hydrological basin.

Το φυσικό όριο που διαχωρίζει δύο γειτονικές λεκάνες ονομάζεται υδροκρίτης (Divide), ή (Υδροκριτική) Λεκάνη (Watershed).

Γ. Ψηφιακά Δεδομένα: Στη διεθνή βιβλιογραφία τα γεωγραφικά δεδομένα (ψηφιακά) δομούνται σε μορφή Διανυσμάτων (Vector format) ή Ψηφίδων (Raster format) προκειμένου να εισαχθούν σε ένα GIS. Τόσο τα διανυσματικά όσο και τα ψηφιδωτά μοντέλα είναι ψηφιακά μοντέλα.

Στην περίπτωση του διανυσματικού μοντέλου ιδιαίτερη σημασία, εκτός από τα ίδια τα γεωγραφικά αντικείμενα έχουν και οι μεταξύ τους σχέσεις, με την γραμμή να αποτελεί τη στοιχειώδη λογική μονάδα με βάση την οποία κωδικοποιείται η θέση ενός αντικειμένου. Κάθε γραμμή παρουσιάζεται με τη μορφή σειράς ζευγών συντεταγμένων των σημείων της, ενώ κάθε πολύγωνο ως μια σειρά γραμμών. Τα σημεία, τέλος, δεν έχουν καμία διάσταση στον χώρο.

Η δημιουργία ενός ψηφιδωτού μοντέλου βασίζεται στην διαίρεση μιας ενιαίας περιοχής μελέτης σε μια σειρά από επιμέρους στοιχειώδεις μονάδες αναφοράς/ χωρικές ενότητες. Αυτές οι μονάδες, λαμβάνουν διάφορα σχήματα (τρίγωνο, πολύγωνο, τετράγωνο – με συνηθέστερη την τελευταία) και, συνδυαζόμενες έχουν τη δυναμική απεριόριστης επέκτασης στο χώρο και τη δυνατότητα συνεχούς υποδιαίρεσης σε μικρότερες μονάδες ίδιου σχήματος.

Οι ονομασίες των παραπάνω όρων ποικίλλουν. Έτσι, τα διανυσματικά μοντέλα ονομάζονται εκτός από vector models και shapefiles. Από την άλλη, τα ψηφιδωτά μοντέλα παίρνουν ενίοτε την ονομασία αρχεία καννάβου – raster models, grids, – ενώ οι δομικές τους ενότητες καλούνται ψηφίδες, κελιά, φατνία – pixels, cells.

