



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ψηφιακή απεικόνιση
χαρτογραφικών φαινομένων
βασισμένη στη θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας
εφαρμογή στο τοπογραφικό αναγλυφο με ψηφιακά μοντέλα

βυρωνας νακος
διδακτορική διατριβή

αθηνά 1990

Εισηγητική επιτροπή

Γ. Βέης, καθηγητής Ε. Μ. Π.
Χ. Μπιλλήρης, αναπληρωτής καθηγητής Ε. Μ. Π.
Χ. Μητσακάκη, λέκτορας Ε. Μ. Π.

ψηφιακή απεικόνιση
χαρτογραφικών φαινομένων
βασισμένη στη θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας
εφαρμογή στο τοπογραφικό αναγλυφο με ψηφιακά μοντέλα

βυρωνας νακος

διδακτορική διατριβή

που υποβλήθηκε στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων
Μηχανικών του Ε. Μ. Πολυτεχνείου το Μάρτιο του 1990

αθηνά 1990

" Η έγκριση διδακτορικής διατριβής από τη Σχολή
Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.,
δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα "

(Ν. 5343/1932, άρθρο 202)

Πρόλογος

Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει επηρεάσει σημαντικά το αντικείμενο και τις αρχές της χαρτογραφίας. Η αυτοματοποίηση των διαδικασιών συνέβαλε θετικά ως προς την ταχύτητα, ακρίβεια και αξιοπιστία των παραγόμενων χαρτών. Για μια επιστήμη-τεχνική, όπως είναι η χαρτογραφία, απαιτούνται στη διαδικασία σύνθεσης του χάρτη και ορισμένες υποκειμενικές διεργασίες. Οι υποκειμενικές αυτές διεργασίες αποτελούν καθοριστικό παράγοντα δημιουργίας αποτελεσματικών χαρτών. Για παράδειγμα, υποκειμενική διεργασία αποτελεί η προσπάθεια του χαρτογράφου να σχεδιάσει μια πολύπλοκη ακτογραμμή, κατά τη διαδικασία της γενίκευσης, διατηρώντας εκείνες τις λεπτομέρειες που είναι αναγκαίες για την κλίμακα του χάρτη, τα όρια της οπτικής αντίληψης, τον σκοπό του χάρτη αλλά, κυρίως, για τη διατήρηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της "φυσιογνωμίας" της ακτογραμμής. Η προσπάθεια να προσομοιωθούν οι υποκειμενικές λειτουργίες σε περιβάλλον Η/Υ είναι πολύ δύσκολη.

Η προτεινόμενη από τον Mandelbrot θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας προσφέρει ένα κατάλληλο θεωρητικό μοντέλο προσέγγισης της δομής των φυσικών αντικειμένων, σε αντιδιαστολή με την κλασσική γεωμετρία που προσφέρει μια πρώτη προσέγγιση των δομών των φυσικών αντικειμένων μέσα από απλουστευμένη μορφή.

Η θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν θεωρητικό εργαλείο, δημιουργώντας κλασματικά μοντέλα χαρτογραφικών διεργασιών με τα οποία είναι δυνατή η ποσοτική έκφραση ορισμένων από τις υποκειμενικές διεργασίες. Η ποσοτική αυτή έκφραση στηρίζεται στην παραδοχή ότι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των συμβόλων των χαρτογραφικών φαινομένων περιγράφονται από έναν αριθμό, την κλασματική διάσταση.

Στην διατριβή αυτή αποδεικνύεται με πειραματικές εφαρμογές ότι τα σύμβολα των χαρτογραφικών φαινομένων αποτελούν κλασματικά σύνολα σημείων του χώρου και προτείνονται κλασματικά μοντέλα γενίκευσης και συμπίεσης.

Είναι γνωστό ότι το τοπογραφικό ανάγλυφο αποτελεί τη σημαντικότερη και μεγαλύτερη σε όγκο πληροφορία που απεικονίζεται στους χάρτες. Στα υπάρχοντα

συστήματα διαχείρισης του τοπογραφικού ανάγλυφου, χρησιμοποιώντας δεδομένα προερχόμενα από ψηφιοποίηση υπαρχόντων χαρτών, δημιουργούνται αρχεία με τιμές υψομέτρων σημείων διατεταγμένων σε κανονικές θέσεις (ΨΜΥ). Η μορφή αυτή παρουσιάζει σημαντική γενίκευση της πληροφορίας του τοπογραφικού ανάγλυφου. Τα ψηφιοποιημένα αυτά δεδομένα χρησιμοποιούνται συχνά σε περιπτώσεις, όπου τα υπάρχοντα ΨΜΥ δεν ικανοποιούν την απαιτούμενη για τις εκάστοτε εφαρμογές πυκνότητα πληροφορίας. Έτσι, παράλληλα, με τα υλοποιημένα ΨΜΥ, διατηρούνται και μεγάλου όγκου αρχεία που περιέχουν τις συντεταγμένες των ψηφιοποιημένων σημείων των υψομετρικών καμπύλων.

Στη διατριβή αυτή προτείνεται ένα σύστημα, όπου τα δεδομένα του ανάγλυφου, μετά από επεξεργασία με το κλασματικό μοντέλο συμπίεσης, μετατρέπονται σε μορφή ψηφιακού μοντέλου. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του προτεινόμενου συστήματος είναι ότι περιλαμβάνει γεωμετρικά και στατιστικά μεγέθη, που περιγράφουν την μορφολογία του τοπογραφικού ανάγλυφου και προκύπτουν άμεσα από τα πρωτογενή δεδομένα. Τα μεγέθη αυτά συνιστούν ένα Ψηφιακό Μοντέλο Τοπογραφικού Ανάγλυφου (ΨΜΤΑ), που χαρακτηρίζεται από μικρό σχετικά όγκο πληροφορίας, ταχύτητα ανάκτησης και, κυρίως, διατήρηση των ιδιαιτεροτήτων της μορφολογίας του ανάγλυφου.

Για τις απεικονίσεις των εφαρμογών που έγιναν, με τη μορφή χαρτών υψομετρικών καμπύλων ή τρισδιάστατων αποδόσεων χρησιμοποιήθηκαν έτοιμα σχεδιαστικά πακέτα προγραμμάτων προσαρμοσμένα στις ανάγκες της εργασίας αυτής.

Η διατριβή αποτελείται από τέσσερα μέρη, δώδεκα κεφάλαια και ένα παράρτημα.

Οι αριθμήσεις των σχέσεων, σχημάτων και πινάκων έχουν γίνει ώστε να προηγείται ο αριθμός του κεφαλαίου και να ακολουθεί ο αύξοντας αριθμός που αντιστοιχεί μέσα στο κεφάλαιο.

Στο κείμενο γίνεται συχνή αναφορά σε βιβλιογραφία για την αποφυγή επαναλήψεων και για να δίνεται η δυνατότητα στον αναγνώστη για λεπτομερέστερη πληροφόρηση και εμβάθυνση.

Ο συμβολισμός έγινε με σύμβολα της διεθνούς βιβλιογραφίας που επεξηγούνται μέσα στο κείμενο, στις παραγράφους που συναντώνται.

Τέλος, καταβλήθηκε προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν οι καταλληλότεροι τεχνικοί όροι στη θέση αυτών που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Μάρτιος 1990

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Γ. Βέη για το συνεχές ενδιαφέρον και τη συμπαράσταση που μου προσέφερε σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας, παράλληλα με την ουσιαστική του βοήθεια, επίβλεψη και καθοδήγηση.

Θέλω να ευχαριστήσω, επίσης, τον αναπληρωτή καθηγητή Χ. Μπιλλήρη για τη βοήθεια και συμπαράσταση που μου προσέφερε.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στην Χ. Μητσακάκη για το ενδιαφέρον, τη συμπαράσταση και την ουσιαστική βοήθεια που μου προσέφερε, ιδιαίτερα μέσα από τις συνεχείς, αναλυτικές και διεξοδικές συζητήσεις.

Ευχαριστώ, ακόμη, θερμά το λέκτορα Δ. Παραδείση για την ουσιαστική βοήθεια και ενθάρρυνση, ιδιαίτερα κατά την τελική διαμόρφωση του κειμένου της εργασίας αυτής. Θερμές ευχαριστίες οφείλω στη συνάδελφο Β. Φιλιππακοπούλου για το ενδιαφέρον και τη βοήθεια που μου παρείχε, κυρίως κατά τις συζητήσεις γύρω από τα ερωτήματα που διατυπώνονταν στη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω, ακόμα, στο συνάδελφο και φίλο Μ. Κονταράτο, για την ενθάρρυνση και βοήθεια που μου προσέφερε, αλλά και για τις εξαντλητικές συζητήσεις γύρω από το αντικείμενο αυτής της εργασίας.

Ευχαριστώ, επίσης, τους συναδέλφους Δ. Τάκο και Γ. Χάλλαρη από την Γ.Υ.Σ. για τους χάρτες που μου παραχώρησαν.

Θερμές ευχαριστίες, τέλος, οφείλω στην Ε. Γυφτοδήμου για την επιμελημένη μορφή του εξωφύλλου.

Σε όλη τη διάρκεια της εργασίας μου υπήρξαν πάρα πολλές στιγμές από αυτές που χαρακτηρίζουμε «δύσκολες» ή «ευχάριστες», η ενθάρρυνση, συμπαράσταση και συμμετοχή που μου προσέφερε η Γιούλι και στις δύο ήταν αμέριστη, την ευχαριστώ πολύ.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	i
Ευχαριστίες	iii
Περιεχόμενα	v
Σχήματα	ix
Πίνακες	xiii
Συντμήσεις	xv
Περίληψη	xvii
English Summary	xxi
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
E.1 Τοπογραφικό ανάγλυφο και χάρτης	1
E.2 Ψηφιακά δεδομένα τοπογραφικού ανάγλυφου	2
E.3 Χαρτογραφική γενίκευση και κλασματική γεωμετρία	3
E.4 Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (ΨΜΕ)	4
E.5 Στόχοι της διατριβής	5
ΜΕΡΟΣ 1 ^ο (ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ)	7
<i>Κεφάλαιο 1</i>	9
1. Κλασματική γεωμετρία	9
1.1 Ορισμένα στοιχεία από την γεωμετρία	10
1.1.1 Διάσταση Hausdorff-Besicovitch	10
1.1.2 Μετασχηματισμός ομοιότητας	12
1.1.3 Ομοπαράλληλος μετασχηματισμός	12
1.2 Θεμελιακές αρχές της κλασματικής γεωμετρίας (κλασματική διάσταση, αυτο-ομοιότητα και αυτο-ομοπαράλληλία)	13
1.3 Μέθοδοι προσδιορισμού κλασματικής διάστασης	17

1.3.1 Μέθοδος συσχέτισης μήκους γραμμής με βήμα μέτρησης	18
1.3.2 Μέθοδος φασματικής ανάλυσης	19
1.3.3 Μέθοδος συνάρτησης μεταβλητότητας	20
1.3.4 Μέθοδος συσχέτισης εμβαδού-περιμέτρου	23
<i>Κεφάλαιο 2</i>	25
2. Κλασματική γεωμετρία και χαρτογραφία	25
2.1 Χαρτογραφική γενίκευση	29
2.1.1 Αυτοματοποιημένη γενίκευση	29
2.1.2 Ποσοτική απλοποίηση - "αρχές της επιλογής"	31
2.2 Κλασματικό μοντέλο γενίκευσης	32
2.3 Κλασματικό μοντέλο συμπίεσης χαρτογραφικών δεδομένων	34
<i>Κεφάλαιο 3</i>	37
3. Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρων (ΨΜΥ)	37
3.1 Παρεμβολή και ΨΜΥ	38
3.2 Υφιστάμενες μέθοδοι δημιουργίας ΨΜΥ από χάρτες	40
3.2.1 Μέθοδος παρεμβολής κατά τις κύριες διευθύνσεις	40
3.2.2 Μέθοδος παρεμβολής με πεπερασμένα στοιχεία	40
3.2.3 Μέθοδος παρεμβολής κατά τη μεγαλύτερη κλίση	41
3.2.4 Μέθοδος παρεμβολής κατά διευθύνσεις	42
3.3 Κριτική ανασκόπηση των μεθόδων	43
ΜΕΡΟΣ 2 ^ο (ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ)	45
<i>Κεφάλαιο 4</i>	47
4. Μεθοδολογία εφαρμογής της κλασματικής γεωμετρίας στη χαρτογραφία	47
4.1 Επιβεβαίωση κλασματικού χαρακτήρα των χαρτογραφικών συμβόλων	47
4.2 Μεθοδολογία κλασματικού μοντέλου γενίκευσης και συμπίεσης	49
<i>Κεφάλαιο 5</i>	53
5. Ψηφιακά δεδομένα	53
5.1 Ταξινόμηση ψηφιακών δεδομένων	53
5.2 Δομή ψηφιακών δεδομένων	54
5.3 Αποθήκευση ψηφιακών δεδομένων	56

<i>Κεφάλαιο 6</i>	57
6. Επεξεργασία ψηφιακών δεδομένων πινακοποιημένης δομής	57
6.1 Βασικές αρχές επεξεργασίας δεδομένων πινακοποιημένης δομής	58
6.2 Συμπύεση γραμμικών δεδομένων ψηφιακής εικόνας	59
6.3 Διαδικασία εκλέπτυνσης ψηφιακής εικόνας	60
6.3.1 Αλγόριθμος εκλέπτυνσης των Stefanelli and Rosenfeld	62
6.4 Εξαγωγή διανυσμάτων ψηφιακής εικόνας	63
6.4.1 Αλγόριθμοι εξαγωγής διανυσμάτων ψηφιακής εικόνας	64
6.5 Τελική επεξεργασία ψηφιακής εικόνας	67
<i>Κεφάλαιο 7</i>	69
7. Γεωγραφική προσαρμογή συντεταγμένων	69
7.1 Ομοπαράλληλος μετασχηματισμός	70
7.2 Αλγόριθμος γεωγραφικής προσαρμογής	71
<i>Κεφάλαιο 8</i>	77
8. Ψηφιακό Μοντέλο Τοπογραφικού Ανάγλυφου (ΨΜΤΑ)	77
8.1 Παράθυρο παρεμβολής	79
8.2 Μέθοδοι παρεμβολής	81
8.2.1 Μέθοδος κινητής μέσης τιμής	81
8.2.2 Μέθοδος κινητής επιφάνειας	84
8.3 Τα μεγέθη του ΨΜΤΑ	85
8.3.1 Μέση τιμή υψομέτρου	86
8.3.2 Τυπική απόκλιση υψομέτρου	87
8.3.3 Ελάχιστο και μέγιστο υψόμετρο	88
8.3.4 Μέγιστη κλίση τοπογραφικού ανάγλυφου	90
8.3.5 Καμπυλότητα τοπογραφικού ανάγλυφου	91
ΜΕΡΟΣ 3 ^ο (ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ)	93
<i>Κεφάλαιο 9</i>	95
9. Ψηφιακή διαχείριση υψομετρικών καμπύλων	95
9.1 Περιγραφή του λογισμικού του συστήματος	96
9.1.1 Πρόγραμμα <i>INMAP</i>	97
9.1.2 Πρόγραμμα <i>SCANGAL</i>	98
9.1.3 Πρόγραμμα <i>READTIF</i>	99
9.1.4 Πρόγραμμα <i>FASTHIN</i>	100

9.1.5 Πρόγραμμα <i>VECTOR</i>	101
9.1.6 Πρόγραμμα <i>EDITMAP</i>	103
9.2 Παράδειγμα εφαρμογής του συστήματος	104
<i>Κεφάλαιο 10</i>	107
10. Εφαρμογές κλασματικής συμπίεσης και γενίκευσης	107
10.1 Περιγραφή του συστήματος κλασματικής επεξεργασίας	108
10.2 Επιβεβαίωση του κλασματικού χαρακτήρα του τοπογραφικού ανάγλυφου	109
10.2.1 Κλασματικός χαρακτήρας υψομετρικών καμπύλων	109
10.2.2 Κλασματικός χαρακτήρας ΨΜΥ	114
10.3 Εφαρμογή κλασματικού μοντέλου συμπίεσης χαρτογραφικών δεδομένων	117
10.4 Εφαρμογή κλασματικού μοντέλου γενίκευσης χαρτογραφικών δεδομένων	121
<i>Κεφάλαιο 11</i>	125
11. Εφαρμογές Ψηφιακού Μοντέλου Τοπογραφικού Ανάγλυφου	125
11.1 Περιγραφή του συστήματος δημιουργίας ΨΜΤΑ	126
11.2 Παράδειγμα δημιουργίας ΨΜΤΑ	127
ΜΕΡΟΣ 4 ^ο (ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ)	143
<i>Κεφάλαιο 12</i>	145
11. Γενική θεώρηση συμπερασμάτων	145
12.1 Συμπεράσματα ψηφιακής διαχείρισης υψομετρικών καμπύλων	146
12.2 Συμπεράσματα από την εφαρμογή στη χαρτογραφία της κλασματικής γεωμετρίας	146
12.3 Συμπεράσματα προτεινόμενου συστήματος ΨΜΤΑ	148
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	151
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	159
A.1 Αρχεία TIFF	159
A.2 Γενική δομή αρχείων TIFF	161

Σχήματα

Σχήμα 1.1 Προσδιορισμός μήκους καμπύλης γραμμής	10
Σχήμα 1.2 Μήκος ακτογραμμών ως προς το βήμα μέτρησης	14
Σχήμα 1.3 Δημιουργία κλασματικής γραμμής	15
Σχήμα 1.4 Γραμμική παλινδρόμηση φάσματος μηκοτομής	20
Σχήμα 1.5 Γραμμική παλινδρόμηση συνάρτησης μεταβλητότητας	21
Σχήμα 1.6 Γραμμική παλινδρόμηση εμβαδού-περιμέτρου	23
Σχήμα 3.1 Οι τέσσερις διευθύνσεις παρεμβολής	41
Σχήμα 3.2 Παρεμβολή κατά την διεύθυνση της μεγαλύτερης κλίσης	42
Σχήμα 6.1 Τα οκτώ γειτονικά ενός στοιχείου εικόνας	58
Σχήμα 6.2 Ψηφιακή εικόνα γραμμής	59
Σχήμα 6.3 Μεγεθυνημένη εικόνα γραμμών χαρτών	60
Σχήμα 6.4 Αρχική (α) και εκλεπτυσμένη (β) ψηφιακή εικόνα	61
Σχήμα 6.5 Χαρακτηριστικές περιπτώσεις άκρων	65
Σχήμα 6.6 Χαρακτηριστικές περιπτώσεις κόμβων	65
Σχήμα 6.7 (α) Αρχική εκλεπτυσμένη ψηφιακή εικόνα (β) Η τοπολογικά μετασηματισμένη ψηφιακή εικόνα	66
Σχήμα 7.1 Ακρίβεια ψηφιοποίησης σαν συνάρτηση του αριθμού σημείων γεωγραφικής προσαρμογής	74
Σχήμα 8.1 Οργάνωση των μεγεθών του προτεινόμενου ΨΜΤΑ	78
Σχήμα 8.2 Παράθυρο παρεμβολής	80
Σχήμα 8.3 Προσαρμογή των δεδομένων του παράθυρου παρεμβολής με συνάρτηση επιφάνειας α' βαθμού	84
Σχήμα 8.4 Προσαρμογή των δεδομένων του παράθυρου παρεμβολής με συνάρτηση επιφάνειας β' βαθμού	85
Σχήμα 8.5 Μέση τιμή υψομέτρου	86

Σχήμα 8.6 Τυπική απόκλιση υψομέτρου	88
Σχήμα 8.7 Ελάχιστο υψόμετρο των δεδομένων που περιλαμβάνονται στο παράθυρο παρεμβολής	89
Σχήμα 8.8 Μέγιστο υψόμετρο των δεδομένων που περιλαμβάνονται στο παράθυρο παρεμβολής	89
Σχήμα 8.9 Ομαδοποίηση των 9 κατηγοριών προσανατολισμού μέγιστων κλίσεων, με τις αντίστοιχες τιμές της μεταβλητής <i>AspSlope</i>	91
Σχήμα 9.1 Διάγραμμα ροής του συστήματος συλλογής και επεξεργασίας της ψηφιακής εικόνας	97
Σχήμα 9.2 Τμήμα εικόνας υψομετρικών καμπύλων ψηφιοποιημένη με σαρωτή	99
Σχήμα 9.3a Διαδικασία εκλέπτυνσης, ψηφιακή εικόνα εισόδου	101
Σχήμα 9.3b Διαδικασία εκλέπτυνσης, ψηφιακή εικόνα εξόδου	102
Σχήμα 9.4 Χωρισμός της περιοχής μελέτης σε 12 τμήματα	105
Σχήμα 10.1 Διάγραμμα ροής συστήματος κλασματικής επεξεργασίας	108
Σχήμα 10.2 Διαγράμματα εμβαδού-περιμέτρου υψομετρικών καμπύλων Ιθάκης	110
Σχήμα 10.3 Διαγράμματα εμβαδού-περιμέτρου υψομετρικών καμπύλων Κεφαλληνίας	111
Σχήμα 10.4 Κλασματική διάσταση και ζώνη τυπικής απόκλισης για την περίπτωση της Ιθάκης	113
Σχήμα 10.5 Κλασματική διάσταση και ζώνη τυπικής απόκλισης για περίπτωση της Κεφαλληνίας	113
Σχήμα 10.6 Περιοχή μελέτης για την διαπίστωση του κλασματικού χαρακτήρα του τοπογραφικού ανάγλυφου από ΨΜΥ. (Κλίμακα 1:10.000, ισοδιάσταση 20 m)	114
Σχήμα 10.7 Διαγράμματα συνάρτησης μεταβλητότητας ΨΜΥ	115
Σχήμα 10.8 Ψηφιοποιημένη ακτογραμμή Ιθάκης. (Κλίμακα 1:100K)	118
Σχήμα 10.9 Ακτογραμμή της Ιθάκης ύστερα από κλασματική συμπίεση	119
Σχήμα 10.10 Διάγραμμα συσχέτισης μήκους με βήμα μέτρησης της ακτογραμμής της Ιθάκης	120
Σχήμα 10.11 Ακτογραμμή της Ιθάκης σε κλίμακα 1:250K. (a) Με το κλασματικό μοντέλο γενίκευσης (b) Με παραδοσιακή γενίκευση (c) Γενικευμένη με τις "αρχές της επιλογής"	121
Σχήμα 10.12 Ακτογραμμή της Ιθάκης σε κλίμακα 1:500K. (a) Με το κλασματικό μοντέλο γενίκευσης (b) Με παραδοσιακή γενίκευση (c) Γενικευμένη με τις "αρχές της επιλογής"	122

Σχήμα 10.13 Ακτογραμμή της Ιθάκης σε κλίμακα 1:1M. (a) Με το κλασματικό μοντέλο γενίκευσης (b) Με παραδοσιακή γενίκευση (c) Γενικευμένη με τις "αρχές της επιλογής"	122
Σχήμα 11.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση τοπογραφικού ανάγλυφου περιοχή μελέτης (ΑΣΤΑΚΟΣ)	127
Σχήμα 11.2 Τμήμα του τοπογραφικού χάρτη που απεικονίζει την περιοχή μελέτης	128
Σχήμα 11.3 Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων ($w = 1/r^2$)	129
Σχήμα 11.4 Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων ($w = \text{EXP}(-20r^2)$)	130
Σχήμα 11.5 Ψηφιακού μοντέλου μέσης τιμής υψομέτρων	131
Σχήμα 11.6 Ψηφιακό μοντέλο τυπικής απόκλισης υψομέτρων	132
Σχήμα 11.7 Ψηφιακό μοντέλο ελάχιστων υψομέτρων	133
Σχήμα 11.8 Ψηφιακό μοντέλο μέγιστων υψομέτρων	134
Σχήμα 11.9 Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων (<i>MSURF1</i>)	135
Σχήμα 11.10 Ψηφιακό μοντέλο μέγιστων κλίσεων (<i>MSURF1</i>)	136
Σχήμα 11.11 Ψηφιακό μοντέλο προσανατολισμού μέγιστων κλίσεων (<i>MSURF1</i>)	137
Σχήμα 11.12 Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων (<i>MSURF2</i>)	138
Σχήμα 11.13 Ψηφιακό μοντέλο μέγιστων κλίσεων (<i>MSURF2</i>)	139
Σχήμα 11.14 Ψηφιακό μοντέλο καμπυλότητας (<i>MSURF2</i>)	140
Σχήμα A.1 Διάγραμμα αρχείου τύπου TIFF	159

Πίνακες

Πίνακας 5.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα πινακοποιημένων μεθόδων διαχείρισης δεδομένων	55
Πίνακας 5.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διανυσματικών μεθόδων διαχείρισης δεδομένων	55
Πίνακας 7.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα ψηφιοποίησης	73
Πίνακας 7.2 Ακρίβεια προσδιορισμού θέσης κατά την ψηφιοποίηση χαρτών ($\sigma = \pm \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}$)	74
Πίνακας 8.1 Ανηγμένες τιμές διαφορών συναρτήσεων βάρους	82
Πίνακας 9.1 Στοιχεία της ψηφιακής επεξεργασίας των δεδομένων της πειραματικής εφαρμογής κατά περιοχές	106
Πίνακας 10.1 Αποτελέσματα παλινδρόμησης για το τοπογραφικό ανάγλυφο της Ιθάκης	112
Πίνακας 10.2 Αποτελέσματα παλινδρόμησης για το τοπογραφικό ανάγλυφο της Κεφαλληνίας	112
Πίνακας 10.3 Αποτελέσματα παλινδρόμησης για το τοπογραφικό ανάγλυφο του ΨΜΥ	116
Πίνακας 10.4 Κλασματική διάσταση υπο-περιοχών ΨΜΥ	116
Πίνακας 10.5 Αριθμός σημείων από τα οποία αποτελούνται οι ακτογραμμές της Ιθάκης	123
Πίνακας A.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αρχείων TIFF	160
Πίνακας A.2 Οι κυριότερες διευθύνσεις των αρχείων TIFF	161

Συντμήσεις

Γ.Υ.Σ.	Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού
Μ.Ε.Τ.	Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων
Ψ.Μ.Ε.	Ψηφιακό μοντέλο Εδάφους
Ψ.Μ.Μ.Υ.	Ψηφιακό Μοντέλο Μέγιστων Υψομέτρων
Ψ.Μ.Τ.Α.	Ψηφιακό Μοντέλο Τοπογραφικού Ανάγλυφου
Ψ.Μ.Υ.	Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρων
D.E.M.	Digital Elevation Model
D.T.M.	Digital Terrain Model
F.F.T.	Fast Fourier Transform
G.T.M.	Graz Terrain Model
J.G.R.	Journal of Geophysical Research
P.E. & R.S.	Photogrammetric Engineering and Remote Sensing
T.I.F.F.	Tagged Image File Format

Περίληψη

Στη διατριβή αυτή αναπτύσσεται μια μεθοδολογία με την οποία ενσωματώνεται η θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας στις χαρτογραφικές διεργασίες. Παράλληλα, προτείνεται ένας νέος τρόπος ολοκληρωμένης ψηφιακής αναπαράστασης του τοπογραφικού ανάγλυφου.

Όσο αφορά τον πρώτο στόχο της διατριβής, προηγείται η προτεινόμενη διαδικασία διαπίστωσης του κλασματικού χαρακτήρα των συμβόλων των χαρτογραφικών φαινομένων και ακολουθεί η διαμόρφωση των κλασματικών μοντέλων γενίκευσης και συμπίεσης.

Ο δεύτερος στόχος, η ψηφιακή αναπαράσταση του τοπογραφικού ανάγλυφου, ικανοποιείται με την έκφραση σε μορφή ψηφιακών μοντέλων ορισμένων από τα χαρακτηριστικά γεωμετρικά και στατιστικά μεγέθη της μορφολογίας του (ΨΜΤΑ). Τα δεδομένα προέρχονται από την ψηφιοποίηση υψομετρικών καμπύλων υπαρχόντων τοπογραφικών χαρτών.

Στα πλαίσια της εργασίας, για τις ανάγκες της ψηφιακής επεξεργασίας των δεδομένων, δημιουργήθηκε ένα πακέτο προγραμμάτων που μεταξύ άλλων περιλαμβάνει και την μετατροπή της δομής των δεδομένων από πινακοποιημένη σε διανυσματική.

Η αξιολόγηση των συμπερασμάτων και η αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων μεθοδολογιών στηρίζονται σε εκτεταμένες εφαρμογές.

Η διατριβή χωρίζεται σε τέσσερα μέρη.

Το πρώτο μέρος περιλαμβάνει τρία κεφάλαια, όπου αναπτύσσονται οι βασικές θεωρητικές έννοιες της κλασματικής γεωμετρίας, η χαρτογραφική γενίκευση και τα ψηφιακά μοντέλα υψομέτρων (ΨΜΥ).

Ορίζονται καταρχήν, η διάσταση Hausdorff-Besicovitch και οι μετασχηματισμοί ομοιότητας και ομοπαράλληλίας της γεωμετρίας. Στη συνέχεια, ορίζονται οι θεμελιακές αρχές της κλασματικής γεωμετρίας, δηλαδή, η κλασματική διάσταση (D) και οι ιδιότητες της αυτο-ομοιότητας και αυτο-ομοπαράλληλίας. Τέλος, αναλύονται οι μέθοδοι προσδιορισμού της κλασματικής διάστασης. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στις συσχετίσεις του μήκους με το βήμα

μέτρησης, της ισχύος του φάσματος με το μήκος κύματος, της συνάρτησης μεταβλητότητας με το μήκος συσχέτισης και του εμβαδού με τη περίμετρο.

Στο επόμενο κεφάλαιο συνοψίζονται οι υφιστάμενες εφαρμογές της κλασματικής γεωμετρίας σε χαρτογραφικές διεργασίες. Διατυπώνονται, ακόμα, οι κυριότερες διεργασίες της γενίκευσης, όπως αντιμετωπίζονται μέχρι σήμερα με συμβατικό και αυτοματοποιημένο τρόπο. Ειδικότερα, συνοψίζονται οι βασικότεροι αλγόριθμοι της αυτοματοποιημένης γενίκευσης. Στο σημείο αυτό επισημαίνεται το σημαντικό μειονέκτημα των υπάρχοντων αλγορίθμων γενίκευσης που οφείλεται στην αδυναμία να αντιμετωπιστούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των πολύπλοκων χαρτογραφικών γραμμών. Στη συνέχεια, αναλύονται οι "αρχές της επιλογής", που αναφέρονται στην διεργασία της απλοποίησης, και αποτελούν το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο στηρίζονται οι περισσότεροι αλγόριθμοι γενίκευσης. Τέλος, θεμελιώνονται και διατυπώνονται τα κλασματικά μοντέλα γενίκευσης και συμπίεσης. Με τα κλασματικά μοντέλα προσδιορίζεται ο κατάλληλος αριθμός σημείων των χαρτογραφικών γραμμών συναρτήσει του λόγου των κλιμάκων και της κλασματικής διάστασης (D), ώστε να διατηρείται ο ιδιαίτερος χαρακτήρας των γραμμών.

Στο τελευταίο κεφάλαιο του πρώτου μέρους διατυπώνονται οι κυριότερες αρχές που διέπουν τα ΨΜΥ, όπου αναλύεται η διαδικασία της παρεμβολής. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι υφιστάμενες μέθοδοι δημιουργίας ΨΜΥ, με δεδομένα ψηφιοποιημένες υψομετρικές καμπύλες.

Το δεύτερο μέρος της διατριβής περιλαμβάνει πέντε κεφάλαια στα οποία αναπτύσσονται οι μεθοδολογίες υλοποίησης των δύο στόχων της εργασίας.

Η μεθοδολογία εφαρμογής της κλασματικής γεωμετρίας στη χαρτογραφία ολοκληρώνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο διαπιστώνεται ο κλασματικός χαρακτήρας των συμβόλων των χαρτογραφικών φαινόμενων. Στο δεύτερο στάδιο εφαρμόζεται το κλασματικό μοντέλο γενίκευσης ή συμπίεσης.

Στη συνέχεια, περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των ψηφιακών δεδομένων με έμφαση στην ταξινόμηση, δομή και αποθήκευσή τους.

Η επεξεργασία των δεδομένων πινακοποιημένης δομής αποτελεί αντικείμενο του επόμενου κεφαλαίου. Η μετατροπή της δομής των ψηφιακών δεδομένων από πινακοποιημένη σε διανυσματική αποτελεί τη σημαντικότερη λειτουργία, η οποία ολοκληρώνεται σε τρία στάδια. Το πρώτο είναι η εκλέπτυνση, το δεύτερο το χτίσιμο της τοπολογίας και το τρίτο στάδιο η εξαγωγή των διανυσμάτων.

Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται η γεωγραφική προσαρμογή των συντεταγμένων των χαρτογραφικών δεδομένων. Παράλληλα, αξιολογείται ως προς την ακρίβεια και αξιοπιστία η συλλογή των ψηφιακών δεδομένων με χειροκίνητη ή αυτόματη ψηφιοποίηση.

Στα πλαίσια της προτεινόμενης μεθοδολογίας αναπαράστασης του τοπογραφικού ανάγλυφου περιγράφεται καταρχήν ένας νέος τρόπος καθορισμού του παράθυρου παρεμβολής. Στη συνέχεια, αναλύονται οι χρησιμοποιούμενες

μέθοδοι παρεμβολής. Η μορφολογία του τοπογραφικού ανάγλυφου καταγράφεται ψηφιακά από έναν συνδυασμό γεωμετρικών (υψόμετρο, μέγιστη κλίση, προσανατολισμός μέγιστης κλίσης και καμπυλότητα) και στατιστικών (μέση τιμή υψόμετρου, τυπική απόκλιση, ελάχιστο και μέγιστο υψόμετρο) μεγεθών.

Το τρίτο μέρος της διατριβής περιλαμβάνει τρία κεφάλαια στα οποία περιγράφονται τα πακέτα προγραμμάτων που σχεδιάστηκαν για τις ανάγκες της εργασίας σε συνδυασμό με τις πειραματικές εφαρμογές που έγιναν.

Με την πρώτη εφαρμογή εξετάζεται η αποτελεσματικότητα του συστήματος διαχείρισης των ψηφιακών δεδομένων και αφορά την ψηφιοποίηση των υψομετρικών καμπύλων ενός τοπογραφικού χάρτη κλίμακας 1:5.000, με σαρωτή.

Με τη δεύτερη ομάδα εφαρμογών εξετάζεται η διαπίστωση του κλασματικού χαρακτήρα του τοπογραφικού ανάγλυφου, όπως απεικονίζεται στους χάρτες. Η διαπίστωση αναφέρεται σε δεδομένα που αντιπροσωπεύουν υψομετρικές καμπύλες και ΨΜΥ. Στη συνέχεια, αξιολογείται το κλασματικό μοντέλο συμπίεσης με εφαρμογή σε ακτογραμμή από χάρτη κλίμακας 1:100K. Τα αποτελέσματα κρίνονται πολύ θετικά, γιατί μειώνεται σημαντικά ο όγκος των σημείων, που αντιπροσωπεύουν την ακτογραμμή, ενώ διατηρούνται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της. Τέλος, η ίδια ακτογραμμή γενικεύεται με το κλασματικό μοντέλο σε κλίμακες 1:250K, 1:500K και 1:1M. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται οπτικά με ακτογραμμές που προέρχονται από αναλογικούς χάρτες με αντίστοιχες κλίμακες και έχουν υποστεί χειροκίνητη γενίκευση.

Με την τελευταία εφαρμογή δημιουργείται το ΨΜΤΑ από δεδομένα προερχόμενα από την ψηφιοποίηση ενός τμήματος τοπογραφικού χάρτη κλίμακας 1:50.000. Με την εφαρμογή αυτή διαπιστώνεται η ταχύτητα της επεξεργασίας της προτεινόμενης μεθόδου για τη δημιουργία του ΨΜΤΑ καθώς και η ακρίβεια και αξιοπιστία της ψηφιακής του αναπαράστασης σε σύγκριση με τον αρχικό χάρτη.

Στο τέταρτο μέρος της διατριβής δίνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διδακτορική διατριβή.

Τα συμπεράσματα συνοψίζονται στα παρακάτω:

(α) Ως προς την διαχείριση των ψηφιακών δεδομένων.

(α.1) Το πακέτο των προγραμμάτων που σχεδιάστηκε συνδυάζει ταχύτητα, ακρίβεια και αξιοπιστία, με κύρια συνεισφορά ως προς την αποτελεσματικότητά του στη διαδικασία της αυτοματοποιημένης ψηφιοποίησης που έχει ακολουθηθεί.

(α.2) Παρουσιάζει ευελιξία προσαρμογής σε μελλοντική επέκταση του συστήματος.

(α.3) Επιτυγχάνει διατήρηση της ιδιότητας της συνεκτικότητας με εξασφάλιση της δυνατότητας χρήσης και για άλλου τύπου χωρικές πληροφορίες ανάλογου χαρακτήρα.

(β) Ως προς τα κλασματικά μοντέλα γενίκευσης και συμπίεσης.

(β.1) Διαπιστώνεται ότι τα σύμβολα των χαρτογραφικών δεδομένων εμφανίζουν την ιδιότητα της στατιστικής αυτο-ομοιοτητας.

(β.2) Η γενίκευση και συμπίεση των συμβόλων γίνεται έτσι, ώστε να διατηρούνται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους.

(β.3) Η γενίκευση και συμπίεση γίνεται με απλούς και γρήγορους αλγορίθμους.

(β.4) Η εικόνα των γενικευμένων γραμμών ομοιάζει σημαντικά με αυτήν που προέρχεται από παραδοσιακή γενίκευση, φαίνεται δηλαδή ότι η μεθοδολογία επιτυγχάνει να εκφράσει με ποσοτικό τρόπο ορισμένες από τις υποκειμενικές διεργασίες της χαρτογραφίας.

(γ) Ως προς το ΨΜΤΑ.

(γ.1) Επιτυγχάνεται δραστική μείωση του όγκου της πληροφορίας.

(γ.2) Απαιτείται μικρή χρονική διάρκεια επεξεργασίας με ταυτόχρονη εξασφάλιση ακρίβειας και αξιοπιστίας.

(γ.3) Τα μεγέθη του ΨΜΤΑ περιγράφουν τα γεωμετρικά και στατιστικά χαρακτηριστικά της μορφολογίας του.

(γ.4) Όλα τα μεγέθη του ΨΜΤΑ προσδιορίζονται άμεσα από τα δεδομένα.

Digital Representation of Cartographic Phenomena Based on Fractal
Geometry Theory.
Application on Terrain's Relief Using Digital Models

Byron Nakos

Thesis submitted for the Degree of Doctor of Engineering at the National
Technical University of Athens, School of Rural and Surveying Engineering.

Summary

This thesis deals with a methodology for the introduction of Fractal Geometry theory to cartographic processes. Also, a new integrated digital representation of topographic relief is proposed.

The first objective of the thesis is accomplished, since the fractal character of symbols representing cartographic phenomena is tested and fractal models for generalization and compression are developed.

The second objective of the thesis is satisfied by the development of digital models for several geometric and stochastic variables that describe relief morphology. The data needed to form these digital models are obtained by the digitization of existing topographic maps.

Additionally, a digital processing procedure is developed that includes raster to vector conversion techniques.

Extensive applications were carried out in order to evaluate the various results and to derive reliable conclusions.

The thesis is divided into four parts.

The first part consists of three chapters, in which the basic theoretical concepts of Fractal Geometry theory, cartographic generalization and digital elevation models (DEM), are described.

Initially, the Hausdorff-Besicovitch dimension, similarity transformation and affine transformation according to geometry are defined, as well as the fractal dimension (D) and the properties of self-similarity and self-affinity. Also, the four methods for the determination of fractal dimension are reviewed. These methods are based on correlations between: the length and the step size, the power spectral density and the wave length, the variance and the correlation length and, finally, the correlation between area and perimeter.

Existing applications of fractal geometry on cartographic processes are reviewed. The cartographic generalization is reviewed, with emphasis given to the numerical processes. The fundamental existing algorithms of numerical

generalization are discussed. Most of them are characterized by a critical omission, due to the difficulty to describe the special character of complex cartographic lines. Furthermore, the "Principles of Selection", on which the various algorithms are based, are extensively discussed. These "Principles of Selection" referred to the most significant process of numerical generalization: the simplification. Finally, the fractal models for numerical generalization and compression are stated. Under these fractal models the representative number of points for the description of cartographic lines is determined with respect to the scales ratio and fractal dimension (D). Thus the special character of cartographic lines is preserved.

The last chapter of the first part deals with the basic concepts of DEM. The interpolation procedure is analysed and the existing methods of DEM creation are reviewed. Data required are contour lines digitized from existing maps.

The second part of this thesis consisting of five chapters, deals with developing the methodology for these two objectives.

The proposed methodology of fractal geometry in cartography may be distinguished in two parts. At first, the fractal character of cartographic symbols is examined. Secondly, the fractal models of numerical generalization and compression are applied.

Furthermore, the characteristics of digital data are described with emphasis given to the data classification, structure and storage.

The processing of raster data is developed in the following chapter. The most important procedure, the raster to vector conversion, is accomplished in three steps. The first one is thinning, the second one is topology detection and the third one is the vector formation.

Also, a model for the registration procedure is analysed and the accuracy and reliability of digitization, using digitizer or scanner, are evaluated.

The basic concepts of the proposed digital terrain model (DTM) are presented. A new definition for the data window and the interpolation methods related to it are described. The morphology of topographic relief is recorded by digital models of geometrical (elevation, maximum slope, aspect of maximum slope and curvature) and stochastic (mean elevation, standard deviation, minimum and maximum elevation) variables.

In the third part of this thesis, consisting of three chapters, the software developed in order to carry out the experiments is described.

The first application deals with the effectiveness of the proposed digital data manipulation system. Contour lines of a topographic map with scale 1:5,000 are scanned by this system.

The second group of applications tests the fractal character of topographic relief as this is represented in maps. The verification is achieved for contour lines and DEM as well. Also, the fractal model of compression is tested by an

application to a coastline derived by a 1:100K map. The results are considered successful, since the volume of cartographic data is decreased considerably. Further, the compressed data representing the coastline preserve its special characteristics. Finally, the same coastline is generalized by the fractal model for scales 1:250K, 1:500K and 1:1M, with satisfactory results. These generalized coastlines are compared with their respective ones from existing maps of relevant scales.

The last application refers to the creation of the proposed DTM determined from data digitized from a map with scale 1:50,000. The short processing time needed, the accuracy as well as the reliability of the proposed DTM with respect to the source map, are verified by this last application.

The fourth part of the thesis, deals with the conclusions and proposals.

The conclusions are as follows:

(a) Regarding the digital data manipulation.

(a.1) The software developed combines speed, accuracy and reliability. Its effectiveness is caused mainly by the scanning procedure followed.

(a.2) The software is flexible to future extensions of the hardware.

(a.3) The property of connectivity of digital lines is preserved, so that it may be used for other data of relevant character.

(b) Regarding fractal models of numerical generalization and compression.

(b.1) The symbols of cartographic phenomena are statistically self-similar.

(b.2) The special character of cartographic symbols is preserved.

(b.3) The algorithms designed are simple and quick.

(b.4) The images of generalized cartographic lines are considerably similar to those derived by the standard procedures. Therefore, it appears that the specific methodology succeeds to quantify the subjective procedures of cartography.

(c) Regarding the proposed DTM.

(c.1) Drastic information compression is accomplished.

(c.2) Processing time is comparatively short while the necessary level of accuracy and reliability are obtained.

(c.3) The DTM variables describe the geometrical and statistical characteristics of its morphology.

(c.4) All DTM variables are determined directly from the raw data.

Εισαγωγή

Ε.1 Τοπογραφικό ανάγλυφο και χάρτης

Η γεωμετρική μορφή της γήινης επιφάνειας, το τοπογραφικό ανάγλυφο, αποτελεί την πιο σημαντική και μεγαλύτερη σε όγκο πληροφορία που απεικονίζεται στους χάρτες.

Αν αναφερθεί κανείς στο σύστημα ταξινόμησης των χαρτογραφικών φαινομένων που έχει επικρατήσει στη χαρτογραφία (Robinson *et al.* 1984), το τοπογραφικό ανάγλυφο είναι ένα συνεχές τρισδιάστατο φαινόμενο ενταγμένο στην κατηγορία της κλίμακας διαστήματος.

Η χαρτογραφική απόδοση ενός συνεχούς ποσοτικού τρισδιάστατου δεδομένου σ' ένα διδιάστατο μέσο, όπως είναι ο αναλογικός χάρτης, είναι δύσκολο να γίνει στην ολότητά του (Keates 1973). Ο καταλληλότερος τρόπος απόδοσης τέτοιων γεωγραφικών φαινομένων γίνεται με την ισαριθμική απεικόνιση (Cuff and Mattson 1982). Κατά την ισαριθμική απεικόνιση σχεδιάζονται στο επίπεδο του χάρτη οι ορθές προβολές των διαδοχικών τομών της επιφάνειας του τοπογραφικού ανάγλυφου με ισοχωροσταθμικές επιφάνειες (υψομετρικές καμπύλες). Η απόδοση του τοπογραφικού ανάγλυφου μέσω των υψομετρικών καμπύλων με σταθερή ισοδιάσταση, διευκολύνει τον χρήστη του χάρτη σε δύο βασικές λειτουργίες της "ανάγνωσης" του τοπογραφικού ανάγλυφου. Τον προσδιορισμό του υψομέτρου τυχαίων σημείων ύστερα από παρεμβολή μεταξύ των διαδοχικών υψομετρικών καμπύλων αφενός, και την οπτική αναπαράσταση της μορφολογίας του τοπογραφικού ανάγλυφου αφετέρου, από τη μορφή που έχουν οι υψομετρικές καμπύλες (για παράδειγμα, οι πυκνές καμπύλες συμβολίζουν μια περιοχή με μεγάλη κλίση, ενώ οι αραιές καμπύλες μια περιοχή με μικρή κλίση).

Ε.2 Ψηφιακά δεδομένα τοπογραφικού ανάγλυφου

Οι σύγχρονες εξελίξεις των Η/Υ επιτρέπουν, ή και επιβάλλουν, ακόμα, για την καλύτερη αξιοποίηση τους, τη μετατροπή της αναλογικής πληροφορίας του τοπογραφικού ανάγλυφου, δηλαδή των υψομετρικών καμπύλων, σε ψηφιακή μορφή. Η μετατροπή αυτή -ψηφιοποίηση- γίνεται είτε με χειροκίνητη διαδικασία (ψηφιοποιητής - digitizer), είτε με αυτόματη (σαρωτής - scanner), καταγράφοντας τις συντεταγμένες των σημείων κάθε υψομετρικής καμπύλης. Οι συντεταγμένες των σημείων των υψομετρικών καμπύλων, όπως και κάθε άλλη πληροφορία που ψηφιοποιείται από τον χάρτη, υφίστανται την διαδικασία της γεωγραφικής προσαρμογής με σκοπό να εκφραστούν στο σύστημα απεικόνισης του χάρτη. Ειδικότερα εάν η ψηφιοποίηση έχει γίνει με αυτόματη διαδικασία είναι απαραίτητο να μετατραπούν τα δεδομένα από πινακοποιημένη σε διανυσματική δομή.

Τα ψηφιακά δεδομένα του τοπογραφικού ανάγλυφου που συλλέγονται κατά την ψηφιοποίηση με αυτόματη διαδικασία, λόγω της πολύ υψηλής τιμής της διακριτικής ανάλυσης των σαρωτών, έχουν εν γένει ένα μεγάλο ποσοστό πλεονάζουσας πληροφορίας. Η πλεονάζουσα αυτή πληροφορία απαλείφεται με τη διαδικασία της συμπίεσης των ψηφιακών δεδομένων. Τις περισσότερες φορές τα ψηφιακά δεδομένα που αντιπροσωπεύουν τις υψομετρικές καμπύλες αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων (database). Στις περισσότερες εφαρμογές τα ψηφιακά δεδομένα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενός χάρτη μικρότερης κλίμακας. Είναι απαραίτητο, λοιπόν, τότε να υποστούν την διαδικασία της χαρτογραφικής γενίκευσης.

Η καταγραφή του τοπογραφικού ανάγλυφου με ψηφιακές διεργασίες, όπως περιγράφηκαν, αναπαράγει τον αναλογικό τρόπο αντιμετώπισης του φαινομένου σε ψηφιακό περιβάλλον. Η απόδοση, όμως, του τοπογραφικού ανάγλυφου με την ισαριθμική απεικόνιση διευκολύνει την διαχείρισή του σε αναλογικό περιβάλλον, αλλά τη δυσχεραίνει σημαντικά σε ψηφιακό περιβάλλον. Είναι πολύ δύσκολος, για παράδειγμα, ο προσδιορισμός του υψομέτρου ενός τυχαίου σημείου που πρέπει να εντοπιστεί στο σύνολο των ψηφιακών δεδομένων μιας βάσης δεδομένων.

Ο καταλληλότερος τρόπος διαχείρισης του τοπογραφικού ανάγλυφου σε ψηφιακό περιβάλλον είναι αυτός της δημιουργίας ενός Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (ΨΜΕ). Με το ΨΜΕ, εν γένει, καλύπτεται ολόκληρη η περιοχή του χάρτη από έναν δισδιάστατο κάναβο, στις κορυφές του οποίου καταγράφεται η τιμή του υψομέτρου, (Doyle 1978). Το ΨΜΕ είναι, δηλαδή, ένας δισδιάστατος πίνακας, τα στοιχεία του οποίου αποτελούνται από τις τιμές των υψομέτρων.

Το ΨΜΕ αποτελεί μια εναλλακτική μορφή ψηφιακών δεδομένων του τοπογραφικού ανάγλυφου και μπορεί να δημιουργηθεί με επίγειες αποτυπώσεις (ταχυμετρία), φωτογραμμετρικές αποτυπώσεις (αναλυτικά όργανα), διαστημικές

αποτυπώσεις (σαρωτές-αλτίμετρα σε δορυφόρους) και με την ψηφιοποίηση υπαρχόντων αναλογικών χαρτών.

Ε.3 Χαρτογραφική γενίκευση και κλασματική γεωμετρία

Αντικείμενο της χαρτογραφίας είναι η περιγραφή, καταγραφή και αναπαράσταση της γεωγραφικής πραγματικότητας με τη βοήθεια του χάρτη. Με τον όρο γεωγραφική πραγματικότητα υποδηλώνονται όλες εκείνες οι πληροφορίες που ανήκουν στον γεωγραφικό χώρο και αποτελούν αντικείμενο απεικόνισης στους χάρτες. Η συσχέτιση του μεγέθους και της ποσότητας της γεωγραφικής πραγματικότητας με το περιορισμένο μέγεθος ενός χάρτη είναι εφικτή μόνον ύστερα από σμίκρυνση. Το αναγκαίο μέγεθος της σμίκρυνσης καθορίζεται κάθε φορά από την κλίμακα του χάρτη.

Το σύνολο των διεργασιών της απαραίτητης σμίκρυνσης των θέσεων και των διαστάσεων των γεωγραφικών πληροφοριών μπορεί να προσομοιωθεί σχηματικά, με μια διαδικασία μετασχηματισμού ομοιότητας, με λόγο ομοιότητας την κλίμακα του χάρτη.

Η απαραίτητη αφαίρεση της πληροφορίας, που συνοδεύει την απαιτούμενη σμίκρυνση ανάλογα με τον σκοπό και την κλίμακα του χάρτη, διατηρώντας την οπτική ευκρίνεια της εικόνας του, αποδίδεται με τον όρο γενίκευση. Η παραδοσιακή γενίκευση ολοκληρώνεται ύστερα από μια σειρά αντικειμενικών και υποκειμενικών λειτουργιών. Η προσπάθεια αυτοματοποίησης των διεργασιών της γενίκευσης δυσχεραίνεται από τις υποκειμενικές λειτουργίες. Με τον όρο υποκειμενικές λειτουργίες υπονοείται η συνολική εμπειρία των χαρτογράφων καθώς προσπαθούν να διατηρήσουν, κατά την γενίκευση, τα ειδικότερα χαρακτηριστικά των γεωγραφικών φαινομένων.

Η πιο σημαντική από τις διεργασίες της γενίκευσης είναι η απλοποίηση. Από τους Töpfer and Pillewizer (1966), έχει προταθεί ένας εμπειρικός νόμος ποσοτικής έκφρασης της απλοποίησης που ονομάζεται "αρχές της επιλογής". Με τον νόμο αυτό καθορίζεται ο αριθμός των στοιχείων του γεωγραφικού φαινομένου που απαιτείται να απεικονιστούν στον γενικευμένο χάρτη.

Η αφαίρεση της πλεονάζουσας πληροφορίας των ψηφιακών δεδομένων γίνεται με αλγορίθμους βασισμένους σε γεωμετρικά κριτήρια, (White 1985; McMaster 1987, 1989a). Χρησιμοποιώντας τις "αρχές της επιλογής", μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές των παραμέτρων των αλγορίθμων απλοποίησης.

Η αυτοματοποιημένη γενίκευση βασίζεται στις "αρχές της επιλογής". Η σχέση με την οποία εκφράζονται οι "αρχές της επιλογής", συναρτά τον απαιτούμενο αριθμό στοιχείων του γεωγραφικού φαινομένου με γραμμική εξάρτηση από τον λόγο των κλιμάκων του αρχικού και του γενικευμένου χάρτη.

Αυτό σημαίνει ότι δύο γεωγραφικά φαινόμενα με διαφορετική πολυπλοκότητα ως προς τη μορφή τους αντιμετωπίζονται με όμοιο τρόπο.

Οι Jones and Abraham (1987) και ο Müller (1987a), διατυπώνουν την ιδέα της διερεύνησης της ποσοτικής έκφρασης της πολυπλοκότητας των χαρτογραφικών γραμμών από την κλασματική διάσταση. Η κλασματική διάσταση αποτελεί γενίκευση της έννοιας τοπολογική διάσταση και εντάσσεται στο περιεχόμενο της κλασματικής γεωμετρίας (fractal geometry), η οποία έχει προταθεί από τον Mandelbrot (1982a).

Αντικείμενο της κλασματικής γεωμετρίας είναι η μελέτη συνόλων σημείων, των οποίων τα επιμέρους τμήματα είναι όμοια προς το όλο, (Feder 1988). Η χαρακτηριστική αυτή ιδιότητα των κλασματικών σχημάτων ονομάζεται αυτο-ομοιότητα.

Στα πλαίσια της χαρτογραφίας έχουν ερευνηθεί από τη σκοπιά της κλασματικής γεωμετρίας ορισμένες βασικές διεργασίες μεταξύ των οποίων η γενίκευση (Beckett 1977; Müller 1986, 1987a, 1987b), η ενίσχυση των λεπτομερειών (Dutton 1981), και η προσομοίωση (Fournier *et al.* 1982; Clarke 1987, 1988). Βασική προϋπόθεση για τις εργασίες αυτές είναι η διαπίστωση του κλασματικού χαρακτήρα των συμβόλων των χαρτών.

Στις εργασίες αυτές αντιμετωπίζονται οι επιμέρους χαρτογραφικές διεργασίες με την βοήθεια της θεωρίας της κλασματικής γεωμετρίας, χωρίς να αναπτύσσεται μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία εφαρμογής της κλασματικής γεωμετρίας στη χαρτογραφία.

E.4 Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (ΨΜΕ)

Από τη δεκαετία του '70 η έννοια Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (ΨΜΕ) για την ψηφιακή καταγραφή του τοπογραφικού ανάγλυφου, περιλαμβάνει πέρα από την τιμή του υψομέτρου και άλλα μεγέθη (Linkwitz 1970), με σκοπό την πληρέστερη περιγραφή της μορφολογίας του.

Έχει επικρατήσει, όμως, η ψηφιακή καταγραφή του τοπογραφικού ανάγλυφου να γίνεται με την μορφή Ψηφιακών Μοντέλων Υψομέτρων (ΨΜΥ), (Doyle 1978; Burrough 1986). Ο κυριότερος λόγος οφείλεται στο γεγονός ότι στα περισσότερα συστήματα δημιουργίας ΨΜΥ, η συλλογή γίνεται με μεθόδους της Φωτογραμμετρίας, με τις οποίες είναι αδύνατος ο άμεσος προσδιορισμός των υπολοίπων μεγεθών, όπως είναι η κλίση, η καμπυλότητα κ.ο.κ.

Με την τεχνολογική εξέλιξη των συσκευών ψηφιοποίησης είναι δυνατή, σήμερα, η δημιουργία ΨΜΥ από υπάρχοντες τοπογραφικούς χάρτες με ικανοποιητική ακρίβεια και αξιοπιστία για σημαντικές χαρτογραφικές εφαρμογές, με χαμηλό κόστος. Σήμερα, είναι γνωστά μια σειρά από συστήματα (Gottschalk 1975; Ebner and Reiss 1978; Leberl and Olsen 1982; Clarke *et al.* 1982; Douglas

1983; Oswalt and Raetzsch 1984; Yoeli 1986; Legate and Willmott 1986), με τα οποία δημιουργούνται ΨΜΥ με δεδομένα προερχόμενα από την ψηφιοποίηση υπαρχόντων τοπογραφικών χαρτών. Στα συστήματα αυτά προσδιορίζεται η τιμή του υψομέτρου σε μορφή ψηφιακού μοντέλου, αλλά δεν προσδιορίζονται, άμεσα από τα δεδομένα, σε μορφή ψηφιακού μοντέλου και οι τιμές άλλων μεγεθών του τοπογραφικού ανάγλυφου.

Ε.5 Στόχοι της διατριβής

Αντικείμενο της διατριβής αυτής αποτελεί η επίτευξη δύο βασικών στόχων. Ο πρώτος αφορά την ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για την εφαρμογή της κλασματικής γεωμετρίας στη χαρτογραφία. Ο δεύτερος στόχος αναφέρεται στη δημιουργία ενός συστήματος παραγωγής, σε μορφή ψηφιακών μοντέλων, όλων των χαρακτηριστικών μεγεθών της μορφολογίας του τοπογραφικού ανάγλυφου, χρησιμοποιώντας χαρτογραφικά δεδομένα που έχουν υποστεί κλασματική επεξεργασία.

Η επιβεβαίωση του κλασματικού χαρακτήρα των συμβόλων των χαρτογραφικών φαινομένων οδηγεί στην ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας εφαρμογής της κλασματικής γεωμετρίας στις χαρτογραφικές διεργασίες και βασίζεται στα αποτελέσματα των εργασιών που έχουν δημοσιευτεί στον τομέα αυτό στην διεθνή βιβλιογραφία, αλλά και στις πειραματικές εφαρμογές που έγιναν στα πλαίσια της διατριβής αυτής.

Η μεθοδολογία βασίζεται στην διαπίστωση της ιδιότητας της στατιστικής αυτο-ομοιότητας ή αυτο-ομοπαλληλίας των συμβόλων των χαρτογραφικών φαινομένων με στατιστικούς ελέγχους πολύ υψηλών επιπέδων εμπιστοσύνης. Στη συνέχεια στα πλαίσια της μεθοδολογίας προτείνονται ένα κλασματικό μοντέλο γενίκευσης και ένα κλασματικό μοντέλο συμπίεσης των συμβόλων των χαρτογραφικών φαινομένων.

Με το κλασματικό μοντέλο γενίκευσης, αφενός μεν ερμηνεύεται θεωρητικά ο νόμος των "αρχών της επιλογής", αφετέρου δε εκφράζεται η απλοποίηση με σχέση μη γραμμικά εξαρτώμενη από την πολυπλοκότητα των συμβόλων των χαρτογραφικών φαινομένων. Στη σχέση αυτή η κλασματική διάσταση περιγράφει την πολυπλοκότητα των γεωγραφικών φαινομένων.

Το κλασματικό μοντέλο γενίκευσης συμβάλλει στην ποσοτική έκφραση ορισμένων από τις υποκειμενικές διεργασίες της παραδοσιακής γενίκευσης, ειδικότερα αυτές που αφορούν το χαρακτήρα των χαρτογραφικών συμβόλων. Οι υποκειμενικές αυτές διεργασίες έχουν πολύ μεγάλη σημασία ιδιαίτερα στα πλαίσια της αυτοματοποιημένης γενίκευσης.

Το κλασματικό μοντέλο συμπίεσης είναι βασισμένο στις ίδιες αρχές. Οι δημιουργούμενες με αυτό ψηφιακές βάσεις χαρτογραφικών δεδομένων

υφίστανται σημαντική μείωση του όγκου τους με διατήρηση των απαραίτητων χαρακτηριστικών των χαρτογραφικών φαινομένων.

Στο δεύτερο μέρος του αντικείμενου της διατριβής, προτείνεται ένα σύστημα παραγωγής Ψηφιακών Μοντέλων Τοπογραφικού Ανάγλυφου (ΨΜΤΑ). Με το σύστημα αυτό δημιουργούνται με την μορφή ψηφιακού μοντέλου μεγέθη του τοπογραφικού ανάγλυφου χρήσιμα για την ανάλυση της μορφολογίας του, άμεσα από τα δεδομένα της ψηφιοποίησης υπαρχόντων τοπογραφικών χαρτών. Τα ψηφιοποιημένα δεδομένα των υπαρχόντων χαρτών έχουν υποστεί προηγουμένως την κλασματική επεξεργασία (συμπίεση ή γενίκευση ανάλογα) και χαρακτηρίζονται από τον μικρό τους όγκο αφενός, αλλά και από την αξιοπιστία στην αντιπροσώπευση των χαρακτηριστικών του τοπογραφικού ανάγλυφου αφετέρου.

Τα μεγέθη αφορούν γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μορφολογίας του τοπογραφικού ανάγλυφου (τιμή μέγιστης κλίσης, προσανατολισμός μέγιστης κλίσης, καμπυλότητα) ή στατιστικά χαρακτηριστικά (μέση τιμή υψομέτρου, τυπική απόκλιση υψομέτρου, μέγιστο-ελάχιστο υψόμετρο, αναφερόμενα σε μία πεπερασμένη περιοχή).

Για τις ανάγκες του συστήματος σχεδιάστηκε ένας νέος τρόπος ορισμού του παράθυρου των δεδομένων, με το οποίο προσδιορίζεται η παρεμβλλόμενη τιμή σε κάθε θέση. Με το παράθυρο αυτό μειώνονται δραστικά οι χρόνοι επεξεργασίας χωρίς να μειωθεί η απαραίτητη ακρίβεια και αξιοπιστία του παραγόμενου ΨΜΤΑ, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των πειραματικών εφαρμογών που έγιναν. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό αν ληφθεί υπόψη ο μεγάλος όγκος των ψηφιακών δεδομένων που συλλέγονται από την ψηφιοποίηση υπαρχόντων χαρτών. Στο σύστημα χρησιμοποιούνται για τις παρεμβολές η μέθοδος της κινητής μέσης τιμής και οι μέθοδοι της κινητής επιφάνειας α' και β' βαθμού.

Τέλος, οι ανάγκες της διαχείρισης της ψηφιακής πληροφορίας του τοπογραφικού ανάγλυφου όπως απεικονίζεται στους τοπογραφικούς χάρτες, επέβαλλαν την ανάπτυξη ενός συστήματος υλοποίησής της. Το σύστημα αυτό είναι κατάλληλο για την αντιμετώπιση των σταδίων της χειροκίνητης ή αυτόματης ψηφιοποίησης, της αναγκαίας επεξεργασίας και οργάνωσης των χαρτογραφικών δεδομένων του τοπογραφικού ανάγλυφου. Ειδικότερα, το στάδιο της επεξεργασίας περιλαμβάνει μεταξύ άλλων την γνωστή μετατροπή της δομής των δεδομένων από πινακοποιημένη σε διανυσματική και τη γεωγραφική προσαρμογή των συντεταγμένων.

Για τις ανάγκες του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν μετά από αξιολόγηση υπάρχοντες αλγόριθμοι και σχεδιάστηκαν ορισμένοι νέοι. Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι κατάλληλοι για χαρτογραφικά δεδομένα και συνδυάζουν απλότητα και ταχύτητα κατά την επεξεργασία.

ΜΕΡΟΣ 1^ο

(ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ)

Κεφάλαιο 1

1. ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Η θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας (fractal geometry) έχει προταθεί από τον B.B. Mandelbrot, για να περιγράψει γεωμετρικούς νόμους που διέπουν την φύση και να ερμηνεύσει ορισμένα από τα μαθηματικά παράδοξα που ενέχουν οι νόμοι αυτοί.

Η κλασματική γεωμετρία της φύσης είναι διατυπωμένη σε τρία βιβλία του Mandelbrot (1975a, 1977, 1982a), και σε μία εκτεταμένη συλλογή από δημοσιεύσεις, που περιλαμβάνεται στις αναφορές του τελευταίου βιβλίου.

Πρωταρχικό αντικείμενο της κλασματικής γεωμετρίας (Mandelbrot *et al.* 1984) αποτελεί η περιγραφή των φυσικών εκείνων δομών που χαρακτηρίζονται από ακανόνιστη, τραχεία ή τεμαχισμένη μορφή. Οι ανωμαλίες των δομών αυτών ποικίλουν ως προς το μέγεθος και χαρακτηρίζονται από μια ειδική σχέση μεταβολής της κλίμακας. Η κλασματική γεωμετρία χαρακτηρίζει τη δομή ενός συνόλου σημείων του χώρου με έναν αριθμό D , ο οποίος ονομάζεται κλασματική διάσταση (fractal dimension).

Η θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας αν και πολύ πρόσφατη βρίσκει εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών αντικειμένων (Barnsley 1988; Feder 1988). Το φάσμα αυτό εκτείνεται από την οικονομία (κλασματικό μοντέλο μεταβολής τιμών και κατανομής μισθών) και τη στατιστική (σφάλματα σε τηλεφωνικά μηνύματα), ως την φυσική (κρυσταλλογραφία), τη Βιολογία (μοριακή βιολογία), και τη χαρτογραφία (γενίκευση).

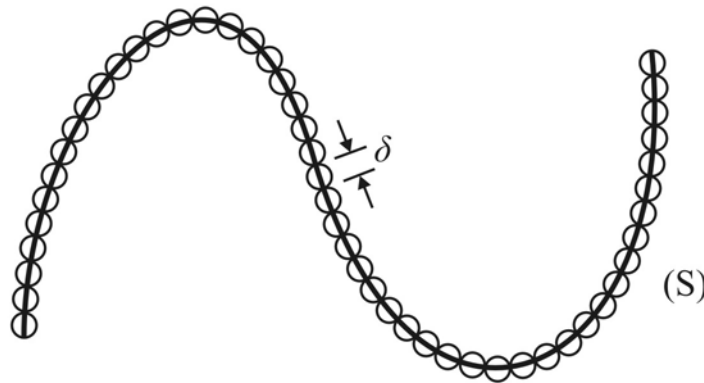
Παρόλο το γενικό χαρακτήρα της θεωρίας της κλασματικής γεωμετρίας –το τελευταίο βιβλίο του Mandelbrot (1982a) διαπνέεται από έντονο μαθηματικό και φιλοσοφικό πνεύμα– η θεωρία χρησιμοποιείται σε πρακτικές εφαρμογές των οποίων βασική αναφορά αποτελεί το βιβλίο αυτό. Πεποίθηση του συγγραφέα είναι ότι η θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας μπορεί να αποτελέσει θεωρητικό μοντέλο ορισμένων λειτουργιών της χαρτογραφίας. Ένας από τους σκοπούς της διδακτορικής αυτής διατριβής είναι να τεκμηριώσει την πεποίθηση αυτή με

επιστημονική διαδικασία. Η διεθνής χαρτογραφική κοινότητα, άλλωστε, φαίνεται να αποδέχεται τη θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας (Goodchild 1980; Dutton 1981; Buttenfield 1985, 1989; Müller 1986, 1987a, 1987b).

Για την καλύτερη κατανόηση των θεμελιακών αρχών της θεωρίας της κλασματικής γεωμετρίας αναπτύσσονται καταρχήν ορισμένα στοιχεία από το αντικείμενο της γεωμετρίας. Στην συνέχεια, ορίζονται η έννοια της κλασματικής διάστασης και οι ιδιότητες της αυτο-ομοιότητας και αυτο-ομοπαλληλίας, που αποτελούν τις θεμελιακές αρχές της κλασματικής γεωμετρίας. Στη θεωρητική αυτή εισαγωγή στηρίζεται η ανάπτυξη της μεθοδολογίας ένταξης της κλασματικής γεωμετρίας στις λειτουργίες της χαρτογραφίας. Η μεθοδολογία αναφέρεται στη χαρτογραφική γενίκευση και στη συμπίεση των ψηφιοποιημένων χαρτογραφικών δεδομένων.

1.1 Ορισμένα στοιχεία από την γεωμετρία

Στην ενότητα αυτή διατυπώνονται η έννοια της διάστασης Hausdorff-Besicovitch (Hurewicz and Wallman 1948), και οι μετασχηματισμοί ομοιότητας και ομοπαλληλίας της γεωμετρίας για την καλύτερη κατανόηση των θεμελιακών αρχών της κλασματικής γεωμετρίας.



Σχήμα 1.1 Προσδιορισμός μήκους καμπύλης γραμμής.

1.1.1 Διάσταση Hausdorff-Besicovitch

Ο ορισμός της κλασματικής διάστασης, όπως προτείνεται από τον Mandelbrot, προϋποθέτει τον ορισμό της διάστασης Hausdorff-Besicovitch. Η διάσταση Hausdorff-Besicovitch στη γεωμετρία σχετίζεται άμεσα με τη διαδικασία

μέτρησης του μεγέθους ενός συνόλου σημείων του χώρου. Το μέγεθος μιας γραμμής, για παράδειγμα, είναι το μήκος της γραμμής, μιας επιφάνειας το εμβαδόν κ.ο.κ.

Αν θεωρηθεί ότι ζητείται να μετρηθεί το μέγεθος, δηλαδή, το μήκος της καμπύλης S , που απεικονίζεται στο σχήμα 1.1, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Η καμπύλη καλύπτεται από εφαπτόμενους μεταξύ τους μικρούς κύκλους διαμέτρου δ . Το μήκος της γραμμής υπολογίζεται από το άθροισμα του αριθμού των κύκλων και την διάμετρό τους (δ).

Γενικεύοντας τη διαδικασία που περιγράφηκε για τη μέτρηση του μήκους της καμπύλης, που απεικονίζεται στο σχήμα 1.1, ο προσδιορισμός του μεγέθους ενός συνόλου σημείων του χώρου S , γίνεται καλύπτοντας το σύνολο S με εφαπτόμενα μεταξύ τους στοιχειώδη γεωμετρικά σχήματα. Το μέγεθος του στοιχειώδους γεωμετρικού σχήματος εκφράζεται από μία θετική συνάρτηση $h(\delta)$, η οποία ονομάζεται συνάρτηση ελέγχου (test function) (Mandelbrot 1982a; Feder 1988) και έχει τη μορφή:

$$h(\delta) = \gamma \delta^d . \quad (1.1)$$

Ο γεωμετρικός συντελεστής γ εκφράζει τη συμμετοχή είδους του στοιχειώδους γεωμετρικού σχήματος στο μέγεθός του. Συγκεκριμένα αν το στοιχειώδες γεωμετρικό σχήμα είναι ευθύγραμμο τμήμα, τετράγωνο ή κύβος, τότε έχουμε: $\gamma = 1$. Αν είναι δίσκος, τότε: $\gamma = \pi/4$ ή σφαίρα, τότε: $\gamma = \pi/6$. Η παράσταση δ_d εκφράζει τη συμμετοχή των διαστάσεων του στοιχειώδους γεωμετρικού σχήματος στο μέγεθός του.

Το μέγεθος του συνόλου S των σημείων του χώρου προκύπτει από την άθροιση της συνάρτησης ελέγχου σε ολόκληρη την έκταση του συνόλου S και ονομάζεται μετρική M_d (measure), (Mandelbrot 1982a; Feder 1988):

$$M_d = \sum h(\delta) = \sum \gamma \delta^d . \quad (1.2)$$

Ο εκθέτης d ονομάζεται διάσταση της μετρικής M_d .

Θεωρώντας τις διαστάσεις του στοιχειώδους γεωμετρικού σχήματος να τείνουν στο μηδέν, δηλαδή $\delta \rightarrow 0$, η μετρική M_d παίρνει είτε την τιμή μηδέν είτε την τιμή άπειρο, εξαρτώμενη από την επιλογή της τιμής της διάστασης d της μετρικής M_d .

Η διάσταση Hausdorff-Besicovitch (D) του συνόλου S είναι η κρίσιμη εκείνη τιμή της διάστασης d κατά την οποία η μετρική M_d περνάει από την τιμή μηδέν στο άπειρο, (Mandelbrot 1982a, σ. 364; Feder 1988, σ. 14):

$$M_d = \sum \gamma \delta^d = \gamma N(\delta) \delta^d, \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} \begin{cases} 0, & \text{όταν } d > D, \\ \infty, & \text{όταν } d < D. \end{cases} \quad (1.3)$$

Όπου, $N(\delta)$: είναι ο αριθμός των στοιχειωδών γεωμετρικών σχημάτων με τα οποία καλύπτεται το σύνολο S .

Η μετρική M_d για $d = D$ συνήθως έχει πεπερασμένη τιμή, αλλά είναι δυνατό να έχει και τις τιμές μηδέν ή άπειρο.

Επειδή η διάσταση Hausdorff-Besicovitch (D) ορίζεται με τη βοήθεια ενός ορίου, όταν οι διαστάσεις των στοιχειωδών γεωμετρικών σχημάτων τείνουν στο μηδέν ($\delta \rightarrow 0$), εκφράζει μια τοπική ιδιότητα των συνόλων του χώρου (Feder 1988).

Στις συνηθισμένες περιπτώσεις συνόλων του χώρου η διάσταση Hausdorff-Besicovitch παίρνει τις τιμές $D = 1$ για γραμμές, $D = 2$ για επίπεδα και επιφάνειες και $D = 3$ για σφαίρες και άλλους πεπερασμένους όγκους. Όπως θα αποδειχθεί στη συνέχεια υπάρχουν σύνολα σημείων του χώρου για τα οποία η διάσταση Hausdorff-Besicovitch δεν έχει ακέραια τιμή. Τα σύνολα αυτά είναι τα κλασματικά σύνολα.

1.1.2 Μετασχηματισμός ομοιότητας

Στον ευκλείδιο χώρο R_E για κάθε πραγματικό θετικό λόγο r ορίζεται ένας μετασχηματισμός που ονομάζεται μετασχηματισμός ομοιότητας (similarity transformation). Σύμφωνα με τον μετασχηματισμό ομοιότητας κάθε σημείο $x = (x_1, \dots, x_E)$ μετασχηματίζεται στο σημείο $r(x) = (r x_1, \dots, r x_E)$, και κατ' επέκταση κάθε σύνολο σημείων S στο σύνολο $r(S)$, (Mandelbrot 1982a; Feder 1988).

1.1.3 Ομοπαράλληλος μετασχηματισμός

Στον ευκλείδιο χώρο R_E για κάθε συλλογή από πραγματικούς θετικούς λόγους $r = (r_1, \dots, r_E)$ ορίζεται ένας μετασχηματισμός που ονομάζεται ομοπαράλληλος μετασχηματισμός (affine transformation). Σύμφωνα με τον ομοπαράλληλο μετασχηματισμό κάθε σημείο $x = (x_1, \dots, x_E)$ μετασχηματίζεται στο σημείο $r(x) = (r_1 x_1, \dots, r_E x_E)$, και κατ' επέκταση κάθε σύνολο σημείων S στο σύνολο $r(S)$, (Mandelbrot 1982a; Feder 1988).

1.2 Θεμελιακές αρχές της κλασματικής γεωμετρίας (κλασματική διάσταση, αυτο-ομοιότητα και αυτο-ομοπαράλληλία)

Η εισαγωγή στις βασικές έννοιες και αρχές της θεωρίας της κλασματικής γεωμετρίας υποβοηθείται από την διατύπωση του προβλήματος προσδιορισμού του μήκους μιας γραμμής.

Ας θεωρηθεί ότι ζητείται να μετρηθεί το μήκος μιας ακτογραμμής από έναν χάρτη. Για λόγους απλούστευσης στη φάση αυτή αγνοούνται οι παραμορφώσεις που τυχόν έχει υποστεί το μέγεθος του μήκους στο χάρτη από το σύστημα απεικόνισης. Εάν επιθυμείται η μέτρηση να γίνει με παραδοσιακό τρόπο, χρησιμοποιείται διαστημόμετρο του οποίου το άνοιγμα ορίζεται ως βήμα μέτρησης ε . Το μήκος $L(\varepsilon)$ της ακτογραμμής προσδιορίζεται από τον αριθμό των βημάτων $N(\varepsilon)$ που απαιτούνται για τη σάρωση της ακτογραμμής, από την αρχή μέχρι τέλους της, με το διαστημόμετρο.

$$L(\varepsilon) = N(\varepsilon) \varepsilon. \quad (1.4)$$

Σε περίπτωση που επιθυμείται να ακολουθηθεί αυτόματη διαδικασία (π.χ. μέτρηση του μήκους, με ψηφιοποίηση της ακτογραμμής από σαρωτή), οι απαιτούμενες εργασίες είναι απόλυτα αντίστοιχες με τη διαφορά ότι το βήμα ε θα ορίζεται από τη διακριτική ανάλυση του σαρωτή.

Είναι γεγονός ότι κάθε μέτρηση με διαφορετικό βήμα θα δίνει και διαφορετικό μήκος ακτογραμμής. Το μήκος, δηλαδή, εξαρτιέται κάθε φορά από το βήμα με το οποίο προσδιορίζεται. Όσο το βήμα μικραίνει και επομένως αυξάνεται η κλίμακα παρατήρησης του φαινομένου, τόσο το μετρημένο μήκος της ακτογραμμής θα μεγαλώνει, καθώς θα επιτρέπεται η παρακολούθηση όλο και περισσότερων λεπτομερειών.

Η διαδικασία αυτή ερευνήθηκε από τον Richardson (1961), ο οποίος διατύπωσε την παρακάτω εμπειρική σχέση του μήκους ορισμένων γραμμών συναρτήσει του βήματος με το οποίο μετρήθηκαν.

$$L(\varepsilon) = k \varepsilon^{1-D}. \quad (1.5)$$

Όπου $k > 0$ και $D \geq 1$, σταθερές για κάθε γραμμή.

Η σταθερά D , αν και δεν σχολιάστηκε περισσότερο από τον Richardson, έχει μεγάλη σημασία για τον Mandelbrot. Προσδιορίζοντας την τιμή της σταθεράς D για διάφορες γραμμές (Mandelbrot 1967), παρατηρείται ότι, όσο περισσότερο πολύπλοκο είναι το σχήμα της γραμμής τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του D . Η πολύπλοκη ως προς το σχήμα της δυτική ακτογραμμή της νήσου Βρετανίας έχει $D = 1,25$, η λιγότερο πολύπλοκη συνοριακή γραμμή μεταξύ Ισπανίας και

Πορτογαλίας έχει $D = 1,14$ η ομαλή ως προς το σχήμα της ακτογραμμή της Νοτίου Αφρικής έχει $D = 1,02$, και τέλος ένας κύκλος (απόλυτα ομαλή γραμμή) έχει $D = 1,00$. Στο σχήμα 1.2 απεικονίζεται σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα το μήκος των μετρημένων ακτογραμμών ως προς το βήμα του διαστημόμετρου.



Σχήμα 1.2 Μήκος ακτογραμμών ως προς βήμα μέτρησης (Mandelbrot 1982a).

Σύμφωνα με τον Mandelbrot (1982a, σ.15) ορίζεται ως κλασματικό σύνολο (fractal set) κάθε σύνολο του οποίου η διάσταση Hausdorff-Besicovitch (D) έχει τιμή μεγαλύτερη από αυτήν της τοπολογικής διάστασης (D_T). Η κλασματική διάσταση ενός κλασματικού συνόλου ταυτίζεται με την τιμή της διάστασης Hausdorff-Besicovitch.

Η κλασματική διάσταση των γραμμών κυμαίνεται μεταξύ της τοπολογικής (D_T) και της ευκλείδειας διάστασης (D_E), δηλαδή ισχύει: $D_T = 1 < D < 2 = D_E$. Ανάλογα, για την κλασματική διάσταση των επιφανειών ισχύει: $D_T = 2 < D < 3 = D_E$. Η κλασματική διάσταση D εκφράζει τον βαθμό με τον οποίο μια γραμμή "γεμίζει" το ευκλείδιο επίπεδο, και αντίστοιχα, μια επιφάνεια τον ευκλείδιο χώρο (Mandelbrot 1982a).

Για μια μη αυστηρά διατυπωμένη μαθηματική περιγραφή, προτεινόμενη από τον Mandelbrot, τα κλασματικά σύνολα είναι σχήματα των οποίων τα επί μέρους τμήματα είναι όμοια προς το όλο, σύμφωνα με μια ορισμένη διαδικασία (Feder

1988).

Η θεμελιακή αυτή ιδιότητα των κλασματικών συνόλων ονομάζεται αυτο-ομοιότητα. Ένας αυστηρότερος ορισμός των αυτο-όμοιων συνόλων δίνεται στη συνέχεια. Ο λόγος ομοιότητας $r(N)$ για τα κλασματικά σύνολα ικανοποιεί τη σχέση (Mandelbrot 1982a):

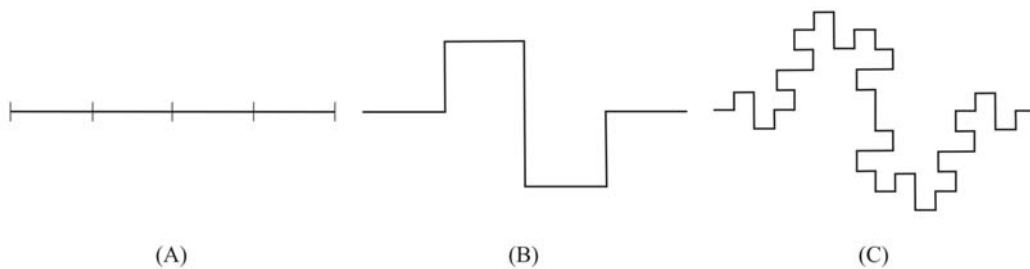
$$r(N) = \left(\frac{1}{N}\right)^{\frac{1}{D}}. \quad (1.6)$$

Όπου το N εκφράζει τον αριθμό των μη επικαλυπτόμενων τμημάτων, προερχομένων από το λόγο ομοιότητας $r(N)$, από τα οποία αποτελείται το κλασματικό σύνολο.

Από την σχέση (1.6) προκύπτει η χαρακτηριστική σχέση για την κλασματική διάσταση D , η οποία εκφράζει την ιδιότητα της αυτο-ομοιότητας:

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{r(N)}}. \quad (1.7)$$

Στο σχήμα (1.3) απεικονίζονται οι διαδοχικές φάσεις δημιουργίας μιας κλασματικής γραμμής. Αρχικά (σχήμα 1.3A) θεωρείται ένα μοναδιαίο ευθύγραμμο τμήμα, το οποίο διαχωρίζεται με λόγο ομοιότητας $r(N) = 1/4$, η κλασματική γραμμή αποτελείται από $N = 8$ τμήματα (σχήμα 1.3B). Στη συνέχεια, επαναλαμβάνεται η διαδικασία με λόγο ομοιότητας $r(N) = 1/16$, οπότε η κλασματική γραμμή αποτελείται από $N = 64$ τμήματα (σχήμα 1.3C).



Σχήμα 1.3 Δημιουργία κλασματικής γραμμής.

Η κλασματική διάσταση της γραμμής αυτής είναι $D = 1.50$. Ο Mandelbrot (1982a) την ονομάζει τετραγωνική νήσο του Koch (quadratic Koch island), θεωρώντας ότι μπορεί να αποτελέσει ένα μοντέλο ακτογραμμής. Τα μήκη των

γραμμών (β) και (γ) είναι αντίστοιχα $L(1/4) = 8(1/4) = 2$ και $L(1/16) = 64(1/16) = 4$. Φαίνεται έτσι, ότι τα μήκη της κλασματικής γραμμής ακολουθούν την εμπειρική σχέση (1.5) του Richardson δεδομένου ότι, $L(1/4) = (1/4)^{1-1.5} = 2$ και $L(1/16) = (1/16)^{1-1.5} = 4$.

Παρατηρείται επιπλέον ότι, η ιδιότητα της αυτο-ομοιότητας χαρακτηρίζει τις κλασματικές γραμμές που δημιουργούνται από τομές μιας κλασματικής επιφάνειας με οριζόντια επίπεδα. Εάν οι κλασματικές γραμμές δημιουργηθούν από τομές κατακόρυφων επιπέδων με την κλασματική επιφάνεια, τότε η ιδιότητα που ισχύει για τις γραμμές αυτές είναι η αυτο-ομοπαράλληλία, (Mandelbrot 1982a, 1985). Η αυτο-ομοπαράλληλία αποτελεί γενίκευση της ιδιότητας της αυτο-ομοιότητας δεδομένου ότι προϋποθέτει στρεβλή κλίμακα.

Ας θεωρηθεί, για παράδειγμα, η επιφάνεια του τοπογραφικού ανάγλυφου. Συμπεραίνεται, πράγματι, ότι οι οριζόντιες τομές είναι "ισότροπες", εμφανίζεται δηλαδή κλίμακα κατά τις διευθύνσεις X και Y των τομών. Οι κατακόρυφες τομές, αντίθετα, είναι "ανισότροπες", εμφανίζονται δηλαδή διαφορετικές κλίμακες κατά τις διευθύνσεις X (ή Y) και Z των τομών. Υπενθυμίζεται, χαρακτηριστικά, η σχεδίαση των διαγραμμάτων των μηκοτομών σε στρεβλή κλίμακα, με λόγο συνήθως 1:10, για την καλύτερη αναπαράσταση των κλίσεων, στις μελέτες οδοποιίας.

Παράδειγμα αυτο-ομοπαράλληλης κλασματικής γραμμής αποτελεί η καταγραφή της κλασματικής συνάρτησης Brown ως προς το χρόνο, (Mandelbrot 1982a). Η συνάρτηση αυτή περιγράφει το ίχνος της χαρακτηριστικής κίνησης Brown ενός σωματιδίου.

Οι ορισμοί των χαρακτηριστικών αυτών ιδιοτήτων, που αφορούν κλασματικά σύνολα σημείων, είναι:

Κάθε φραγμένο σύνολο σημείων S ονομάζεται αυτο-όμοιο (self-similar), ως προς έναν λόγο r , αν το σύνολο S αποτελείται από την ένωση N διακριτών υποσυνόλων, κάθε ένα από τα οποία είτε ταυτίζεται άμεσα είτε μετά από στροφή ή και μετάθεση με το σύνολο $r(S)$, που προέρχεται από το S ύστερα από μετασχηματισμό ομοιότητας με λόγο r .

Κάθε φραγμένο σύνολο σημείων S ονομάζεται αυτο-ομοπαράλληλο (self-affine), ως προς έναν διανυσματικό λόγο $r = (r_1, \dots, r_E)$, αν το σύνολο S αποτελείται από την ένωση N διακριτών υποσυνόλων, κάθε ένα από τα οποία είτε ταυτίζεται άμεσα είτε μετά από στροφή ή και μετάθεση με το σύνολο $r(S)$, που προέρχεται από το S ύστερα από ομοπαράλληλο μετασχηματισμό με λόγο το διάνυσμα r , (Mandelbrot 1982a; Feder 1988).

Οι ορισμοί των αυτο-όμοιων και αυτο-ομοπαράλληλων κλασματικών συνόλων μπορούν να επεκταθούν (γενικευθούν) και για μη φραγμένα σύνολα, δεν κρίνεται όμως αναγκαίο κάτι τέτοιο γιατί, στα πλαίσια της διατριβής αυτής θα μελετηθούν πεπερασμένες διακριτές αναπαραστάσεις των σχημάτων των χαρτογραφικών συμβόλων.

Η θεμελίωση των βασικών αρχών της κλασματικής γεωμετρίας, που αναπτύχθηκε, είναι χρήσιμη για θεωρητικά προβλήματα της γεωμετρίας, καθώς επιτρέπει την διαχείριση ιδεατών συνόλων σημείων. Με τον ορισμό, όμως, των στατιστικά αυτο-όμοιων ή αυτο-ομοπαράλληλων συνόλων επιτρέπεται η εφαρμογή της θεωρίας σε πραγματικά σύνολα σημείων όπως είναι για παράδειγμα οι χαρτογραφικές γραμμές.

Κάθε φραγμένο σύνολο σημείων S ονομάζεται στατιστικά αυτο-όμοιο (statistical self-similar), ως προς έναν λόγο r , αν το σύνολο S αποτελείται από την ένωση N διακριτών υποσυνόλων, κάθε ένα από τα οποία ταυτίζεται ως προς όλες τις στατιστικές εκτιμήτριες με το σύνολο $r(S)$, που προέρχεται από το S ύστερα από μετασχηματισμό ομοιότητας με λόγο r , (Mandelbrot 1982a; Feder 1988).

Κάθε φραγμένο σύνολο σημείων S ονομάζεται στατιστικά αυτο-ομοπαράλληλο (statistical self-affine), ως προς έναν διανυσματικό λόγο $r = (r_1, \dots, r_E)$, αν το σύνολο S αποτελείται από την ένωση N διακριτών υποσυνόλων, κάθε ένα από τα οποία ταυτίζεται ως προς όλες τις στατιστικές εκτιμήτριες με το σύνολο $r(S)$, που προέρχεται από το S ύστερα από ομοπαράλληλο μετασχηματισμό με λόγο το διάνυσμα r , (Mandelbrot 1982a; Feder 1988).

1.3 Μέθοδοι προσδιορισμού κλασματικής διάστασης

Σημαντικό βήμα στη διαπίστωση και μελέτη του κλασματικού χαρακτήρα γραμμών ή επιφανειών αποτελεί ο προσδιορισμός της κλασματικής διάστασης D . Σε ορισμένες μεθόδους ο προσδιορισμός της κλασματικής διάστασης επιφάνειας γίνεται έμμεσα από την τιμή της κλασματικής διάστασης χαρακτηριστικών γραμμών-τομών της επιφάνειας με κατακόρυφα (π.χ. μηκοτομές) ή οριζόντια (π.χ. ισαριθμικές καμπύλες) επίπεδα. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση που συνδέει τις δύο τιμές των κλασματικών διαστάσεων, της επιφάνειας (D_S) με τις αντίστοιχες με αυτήν γραμμές (D_L), (Mandelbrot *et al.* 1984):

$$D_S = D_L + 1. \quad (1.8)$$

Για τα κλασματικά σύνολα σημείων που χαρακτηρίζονται από την ιδιότητα της αυτο-ομοιότητας ο προσδιορισμός της κλασματικής διάστασης μπορεί να γίνει με τις μεθόδους της συσχέτισης του μήκους γραμμής ως προς το βήμα μέτρησης και της συσχέτισης εμβαδού-περιμέτρου. Αντίστοιχα, για τα κλασματικά σύνολα σημείων που χαρακτηρίζονται από την ιδιότητα της αυτο-ομοπαράλληλίας ο προσδιορισμός της κλασματικής διάστασης μπορεί να γίνει με τις μεθόδους της φασματικής ανάλυσης και της συνάρτησης μεταβλητότητας. Οι

τέσσερεις αυτές μέθοδοι αναλύονται παρακάτω.

Ειδικότερα για την περίπτωση των αυτο-ομοπαράλληλων γραμμών διακρίνεται η ολική (global) και η τοπική (local) κλασματική διάσταση, (Mandelbrot 1985). Η τιμή της ολικής κλασματικής διάστασης είναι πάντοτε ίση με την μονάδα. Η ολική κλασματική διάσταση εκφράζει τις "μακροσκοπικές" ιδιότητες της γραμμής, δηλαδή "μακροσκοπικά" η αυτο-ομοπαράλληλη γραμμή δεν έχει κλασματικές ιδιότητες, ενώ η τοπική κλασματική διάσταση εκφράζει "μικροσκοπικές" ιδιότητες των αυτο-ομοπαράλληλων γραμμών, (Mandelbrot 1985).

Κάθε μέθοδος προσδιορισμού της κλασματικής διάστασης βασίζεται στον υπολογισμό διαφορετικών εκτιμητριών στατιστικών συναρτήσεων που αφορούν δείγματα των γραμμών ή των επιφανειών. Τα δείγματα αυτά πρέπει να προέρχονται από όσο το δυνατόν ευρύτερο φάσμα κλιμάκων. Η διαδικασία υπολογισμού των εκτιμητριών πρέπει να ακολουθεί αυστηρά τους στατιστικούς κανόνες για να προκύπτουν αξιόπιστα και ανεπηρέαστα αποτελέσματα.

Σε κάθε μέθοδο η διαδικασία προσδιορισμού της κλασματικής διάστασης καταλήγει στον υπολογισμό της μιας ευθείας που προσαρμόζεται στα δεδομένα ενός διπλού λογαριθμικού διαγράμματος. Η ευθεία προσδιορίζεται εφαρμόζοντας την μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης (MET). Με την ίδια ακριβώς διαδικασία διαπιστώνεται και ο κλασματικός χαρακτήρας των γραμμών ή επιφανειών. Η επιβεβαίωση της διαπίστωσης του κλασματικού χαρακτήρα, στις πειραματικές εφαρμογές που έγιναν, τεκμηριώνεται με τους στατιστικούς ελέγχους των παραμέτρων της ευθείας παλινδρόμησης, με πολύ υψηλό επίπεδο εμπιστοσύνης.

Τα δείγματα έχουν την δομή των δεδομένων που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5, δηλαδή, είτε αποτελούνται από σημειοσειρές, όταν πρόκειται για γραμμές (διανυσματικά δεδομένα), είτε από στοιχεία ενός πίνακα, για επιφάνειες (ψηφιακά μοντέλα). Η συλλογή των δεδομένων από αναλογικά μέσα γίνεται με ψηφιοποίηση.

1.3.1 Μέθοδος συσχέτισης μήκους γραμμής με βήμα μέτρησης

Η μέθοδος αυτή αναπαριστά την διαδικασία των πειραμάτων του Richardson (1961) για τη μέτρηση του μήκους ακανόνιστων γραμμών και στηρίζεται στην ιδιότητα της στατιστικής αυτο-ομοιότητας.

Σύμφωνα με τον Mandelbrot (1967) η κλασματική διάσταση γραμμών εξαρτάται από την κλίση (b_1) της ευθείας (σχήμα 1.2) που προσαρμόζεται στο διπλό λογαριθμικό διάγραμμα του μήκους μιας γραμμής ως προς το βήμα, με το οποίο μετριέται το μήκος, από τη σχέση:

$$D = 1 - b_1. \quad (1.9)$$

Η οριακή τιμή της κλίσης της ευθείας για τις ευκλείδειες γραμμές είναι $b_1 = 0$, όπως η περίπτωση του κύκλου που απεικονίζεται στο σχήμα 1.2.

Στον καθορισμό των βημάτων λαμβάνονται υπόψη, αφενός η αντιπροσώπευση του ευρύτερου δυνατού φάσματος κλιμάκων, αφετέρου η επιδίωξη τα μεγέθη των βημάτων να ακολουθούν γεωμετρική πρόοδο. Οι Shelberg *et al.* (1983) προτείνουν ο αριθμός των βημάτων να είναι μεγαλύτερος του πέντε. Όσο πιο κοντά στις μετρήσεις βρίσκεται η ευθεία που προσαρμόζεται στο λογαριθμικό διάγραμμα τόσο περισσότερο έντονος είναι ο κλασματικός χαρακτήρας των γραμμών. Η τιμή της κλίσης της ευθείας είναι πάντοτε αρνητική και επομένως η προσδιοριζόμενη κλασματική διάσταση D είναι πάντα μεγαλύτερη της μονάδας ($D > 1$).

1.3.2 Μέθοδος φασματικής ανάλυσης

Η δεύτερη μέθοδος προσδιορισμού της κλασματικής διάστασης βασίζεται στην φασματική ανάλυση των δεδομένων μιας επιφάνειας που προέρχονται από μηκοτομές της επιφάνειας αυτής, (Mandelbrot *et al.*, 1984). Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην ιδιότητα της στατιστικής αυτο-ομοπαράλληλίας του ίχνους της μηκοτομής.

Ο υπολογισμός της ισχύος του φάσματος μπορεί να γίνει με το γνωστό αλγόριθμο FFT (Fast Fourier Transform) (Newland 1975).

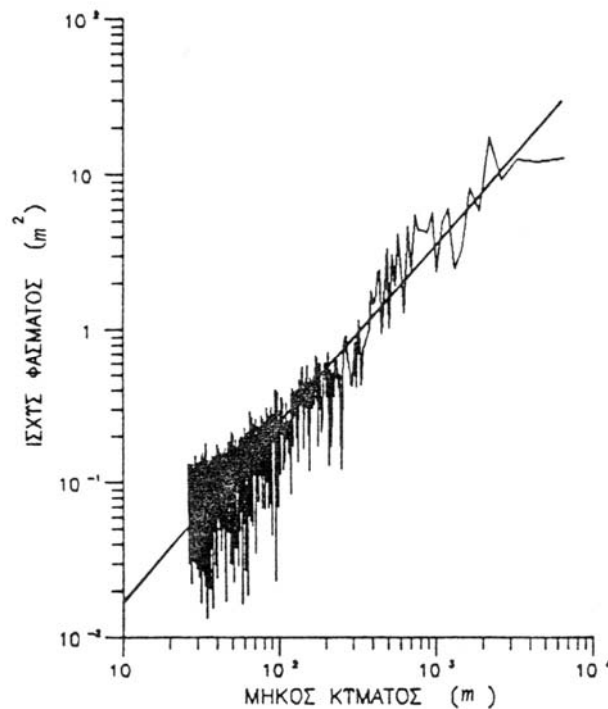
Η κλασματική διάσταση της επιφάνειας εκφράζεται ως συνάρτηση της κλίσης (b_2) της ευθείας (σχήμα 1.4), που προσαρμόζεται στο λογαριθμικό διάγραμμα της ισχύος του φάσματος ως προς το μήκος κύματος, από τη σχέση (Mandelbrot *et al.* 1984):

$$D = 3 - \frac{b_2}{2}. \quad (1.10)$$

Στο σχήμα 1.4 απεικονίζεται η φασματική μιας μηκοτομής του τοπογραφικού ανάγλυφου, τα δεδομένα της οποίας προέρχονται από την ψηφιοποίηση ενός τοπογραφικού χάρτη (Φιλίππου 1988).

Η μέθοδος της φασματικής ανάλυσης εμφανίζει έντονες αποκλίσεις των σημείων του φάσματος στα πολύ μικρά και στα πολύ μεγάλα μήκη κύματος. Οι αποκλίσεις αυτές εντοπίζονται και από τους Mandelbrot *et al.* (1984), όπου αποδίδονται σε εγγενείς αδυναμίες της μεθόδου της φασματικής ανάλυσης, δεδομένου ότι επηρεάζεται έντονα από διακυμάνσεις τοπικού χαρακτήρα.

Μπορεί, λοιπόν, να τεθεί ένα πάνω και κάτω κατώφλι στις τιμές που θα μετέχουν στην προσαρμογή της ευθείας. Απαιτείται μεγάλη προσοχή στον εντοπισμό των μηκών κύματος κατά τα οποία η κλασματική διάσταση περνά από την τοπική στην ολική της τιμή.

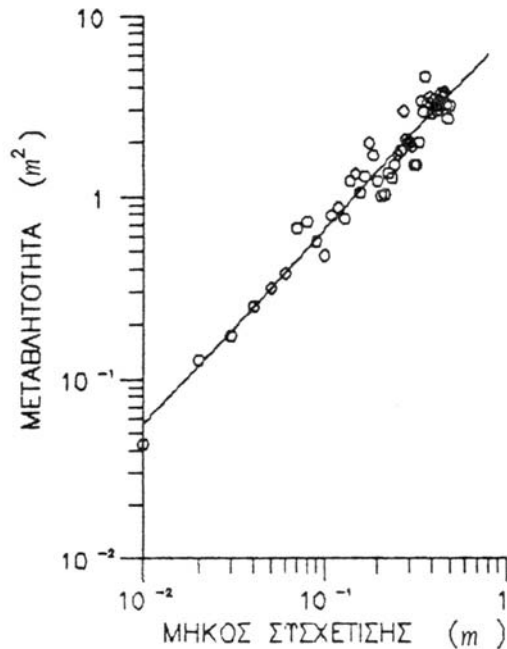


Σχήμα 1.4 Γραμμική παλινδρόμηση του φάσματος μηκοτομής.

Η κλίση της ευθείας κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $0 < b_2 < 2$. Επομένως η προσδιοριζόμενη τιμή της κλασματικής διάστασης επιφανειών βρίσκεται μεταξύ των τιμών $2 < D < 3$. Για τις ευκλείδειες επιφάνειες η οριακή τιμή της κλίσης της ευθείας είναι: $b_2 = 2$.

1.3.3 Μέθοδος συνάρτησης μεταβλητότητας

Η συνάρτηση μεταβλητότητας αποτελεί συνάρτηση στατιστικού χαρακτήρα που εκφράζει τον βαθμό συσχέτισης των σημείων μιας γραμμής ή επιφάνειας ως προς την απόσταση που τα συνδέει. Η συνάρτηση μεταβλητότητας έχει χρησιμοποιηθεί στον σχεδιασμό βέλτιστων μεθόδων παρεμβολής όπως είναι η μέθοδος Kriging, (Burrough 1986).



Σχήμα 1.5 Γραμμική παλινδρόμηση συνάρτησης μεταβλητότητας.

Η συνάρτηση μεταβλητότητας ορίζεται από την σχέση:

$$V(d) = E\{(Z_i - Z_j)^2\}, \quad (1.11)$$

όπου τα Z εκφράζουν τις τιμές των "υψομέτρων" των γραμμών (μηκοτομές) ή των επιφανειών, οι δείκτες: i και j εκφράζουν τα σημεία που απέχουν κατά το μήκος συσχέτισης (d). Με το σύμβολο $E\{\cdot\}$ δηλώνεται η αναμενόμενη τιμή, της οποίας η εκτιμήτρια για τα διακριτά δεδομένα ενός δείγματος προσδιορίζεται από τη μέση τιμή (Σακελλαρίου κ.ά. 1989):

$$V(d) = \frac{\sum (Z_i - Z_j)^2}{n}. \quad (1.11')$$

Η μέθοδος της συνάρτησης μεταβλητότητας αναφέρεται, επίσης, στην ιδιότητα της στατιστικής αυτο-ομοπαράλληλίας του ίχνους των μηκοτομών. Η κλασματική διάσταση της γραμμής (μηκοτομή) προσδιορίζεται από την κλίση (b_{31}) της ευθείας (σχήμα 1.5) του διπλού λογαριθμικού διαγράμματος των τιμών της συνάρτησης μεταβλητότητας ως προς τις αντίστοιχες τιμές των μηκών συσχέτισης από την σχέση (Burrough 1981):

$$D = 2 - \frac{b_{31}}{2}. \quad (1.12)$$

Αντίστοιχα για την κλίση (b_{32}) στην περίπτωση προσδιορισμού της κλασματικής διάστασης επιφάνειας, θα ισχύει η σχέση (Berry and Lewis 1980; Mark and Aronson 1984):

$$D = 3 - \frac{b_{32}}{2}. \quad (1.12')$$

Οι κλίσεις κυμαίνονται μεταξύ των τιμών $0 \div 2$ ($0 < b_{31}, b_{32} < 2$). Επομένως οι προσδιοριζόμενες τιμές της κλασματικής διάστασης D μεταβάλλονται μεταξύ των τιμών $1 \div 2$ ($1 < D < 2$) για τις γραμμές, και μεταξύ των τιμών $2 \div 3$ ($2 < D < 3$) για τις επιφάνειες, αντίστοιχα. Οι οριακές τιμές για τις ευκλείδειες γραμμές και επιφάνειες της κλίσης της ευθείας είναι: $b_{31} = b_{32} = 2$.

Προβλήματα απόκλισης των τιμών της συνάρτησης μεταβλητότητας από την ευθεία προσαρμογής του λογαριθμικού διαγράμματος εμφανίζονται σε μεγάλα μήκη συσχέτισης. Τα προβλήματα αυτά αποδίδονται στον επηρεασμό των τιμών της συνάρτησης από τις διευθύνσεις και τα διαστήματα δειγματοληψίας (Burrrough 1981; Roy *et al.* 1987), καθώς επίσης στη μείωση της αντιπροσωπευτικότητας του δείγματος στις πολύ μεγάλες αποστάσεις. Τα προβλήματα αυτά μπορούν να αντιμετωπιστούν με τους παρακάτω τρόπους (Roy *et al.* 1987):

1. Καθορισμός του μέγιστου μήκους συσχέτισης στο 1/4 της μέγιστης διάστασης του δείγματος.
2. Οι τιμές της συνάρτησης μεταβλητότητας να υπολογίζονται στις τέσσερις βασικές διευθύνσεις.
3. Οι τιμές των μηκών συσχέτισης να ακολουθούν γεωμετρική πρόοδο.

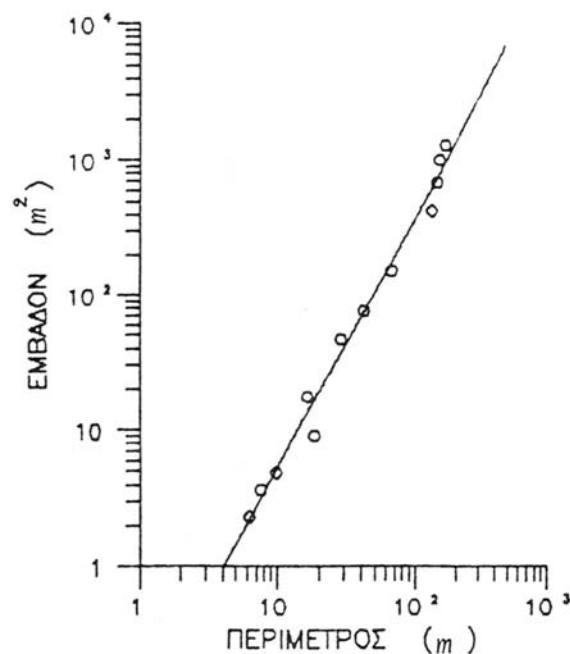
Μια επιπρόσθετη ερμηνεία των προβλημάτων της απόκλισης των τιμών της συνάρτησης μεταβλητότητας από ευθεία γραμμή οφείλεται στο γεγονός της εμφάνισης στο διάγραμμα των δύο περιοχών που αντιπροσωπεύουν την ολική και τοπική κλασματική διάσταση. Το τμήμα του διαγράμματος που αντιπροσωπεύει την ολική κλασματική διάσταση απομονώνεται με σχετική ευκολία γιατί εμφανίζει κλίση ίση με την τιμή 2, η οποία αντιστοιχεί σε τιμή κλασματικής διάστασης ίση με τη μονάδα.

1.3.4 Μέθοδος συσχέτισης εμβαδού-περιμέτρου

Με τη μέθοδο αυτή προσδιορίζεται η κλασματική διάσταση κλειστών γραμμών για τις οποίες ισχύει η ιδιότητα της στατιστικής αυτο-ομοιότητας. Κλαστική περίπτωση τέτοιων γραμμών αποτελούν οι τομές επιφανειών με οριζόντια επίπεδα (π.χ. ισαριθμικές καμπύλες). Η σχέση του εμβαδού ως προς την περίμετρο ενός συνόλου κλειστών γραμμών μιας κλασματικής επιφάνειας, μετρημένων με το ίδιο βήμα, απεικονίζεται σε λογαριθμικό διάγραμμα με ευθεία γραμμή. Από την κλίση (b_4) της ευθείας (σχήμα 1.6) προσδιορίζεται η κλασματική διάσταση των γραμμών με τη σχέση, (Mandelbrot 1982a) :

$$D = \frac{2}{b_4}. \quad (1.13)$$

Η οριακή τιμή για ευκλείδειες γραμμές της κλίσης της ευθείας είναι: $b_4 = 2$.



Σχήμα 1.6 Γραμμική παλινδρόμηση εμβαδού-περιμέτρου.

Η μέθοδος αυτή φαίνεται να εμφανίζει την μεγαλύτερη σταθερότητα και τα καλύτερα αποτελέσματα απ' όλες τις προηγούμενες (Mandelbrot *et al.* 1984; Σακελλαρίου κ.ά. 1989).

Κεφάλαιο 2

2. ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΑ

Η θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας αποτελεί σήμερα ένα θέμα έρευνας στην χαρτογραφία. Στην ενότητα αυτή γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των κυριότερων εργασιών που ερευνούν χαρτογραφικές λειτουργίες προσανατολισμένες προς τη σκοπιά της κλασματικής γεωμετρίας.

Ο Beckett (1977) διατυπώνοντας το πρόβλημα της μείωσης του μήκους των γραμμικών συμβόλων (δρόμων, ακτών, ποταμών) των χαρτών, όσο η κλίμακα μικραίνει, τονίζει ότι η μείωση αυτή εξαρτάται από την γενίκευση και την πολυπλοκότητα των γραμμών. Η προσπάθειά του βασίζεται στη δυνατότητα διατύπωσης ενός απλού νόμου με τον οποίο να προσδιορίζεται η απαιτούμενη διόρθωση του μήκους γραμμών μετρημένων από χάρτη. Χρησιμοποιώντας μια σχέση παρόμοια με την εμπειρική σχέση του Richardson, (1.5), σε εφαρμογές με χάρτες κλίμακας 1:2.500 ως 1 : 2.000.000 προσδιορίζεται για το οδικό δίκτυο της Μ. Βρετανίας η τιμή της σταθεράς $D = 1,017$. Στα συμπεράσματα τονίζεται ότι είναι αδύνατο να προσδιοριστούν σε παγκόσμια κλίμακα οι τιμές των σταθερών k και D της σχέσης (1.2), και προτείνεται ο προσδιορισμός τους να γίνεται σε κάθε ιδιαίτερη περίπτωση.

Στον Goodchild (1980) διαπιστώνεται ότι η σταθερή τιμή της κλασματικής διάστασης D γεωγραφικών γραμμών ισχύει για ένα περιορισμένο εύρος κλιμάκων. Το συμπέρασμα αυτό όμως, συνδέεται άμεσα με το γεγονός ότι, σε χάρτες διαφορετικών κλιμάκων ενσωματώνεται και διαφορετικός βαθμός γενίκευσης κάθε φορά, ο οποίος επηρεάζει τη μορφή και την ποσότητα των λεπτομερειών τους. Διατυπώνεται επίσης η άποψη ότι, γνωρίζοντας την τιμή της κλασματικής διάστασης (D) μπορούν να προσδιοριστούν κατάλληλα διαστήματα δειγματοληψίας κατά την ψηφιοποίηση, ανάλογα με την πολυπλοκότητα των γεωγραφικών γραμμών.

Στον Dutton (1981) διαπιστώνεται ότι, για τις γεωγραφικές γραμμές φαίνεται να ισχύουν οι δύο βασικές ιδιότητες της κλασματικής γεωμετρίας. Οι ισχυρισμοί

αυτοί αποδεικνύονται από το ότι οι περισσότερες γεωγραφικές γραμμές έχουν διάσταση μεταξύ των τιμών 1 και 2 και οι ακτογραμμές φαίνονται όμοιες αν ειδωθούν σε διαφορετικές κλίμακες. Η πρώτη ιδιότητα αναφέρεται στην κλασματική διάσταση και η δεύτερη στην αυτο-ομοιότητα.

Το πρόβλημα των αδρών γραμμών, αποτέλεσμα της ψηφιοποίησης χαρτών ή της μεγέθυνσης ορισμένων γραμμών για να απεικονιστούν σε θεματικούς κυρίως χάρτες, αντιμετωπίζεται στην χαρτογραφία με την αύξηση των λεπτομερειών των γραμμών (enhancement). Προτείνεται στην εργασία αυτή, (Dutton 1981), ένας επαναληπτικός αλγόριθμος αύξησης των λεπτομερειών των γραμμών βασισμένος στην ιδιότητα της αυτο-ομοιότητας. Η εφαρμογή της θεωρίας της κλασματικής γεωμετρίας στο χαρτογραφικό αυτό πρόβλημα επιτρέπει την μεγέθυνση ορισμένων από τα χαρακτηριστικά των γραμμών, την ένταξη στις γραμμές λεπτομερειών με χαρακτηριστικά μικρότερου μεγέθους καθώς επίσης και την απαλοιφή ορισμένων χαρακτηριστικών. Οι συντεταγμένες των σημείων που αποτελούν την γραμμή μετασχηματίζονται ως προς τέσσερις παραμέτρους : (α) την ημιτονική διάσταση (SD), (β) το συντελεστή ομοιομορφίας (UC), (γ) το όριο ευθυγραμμίας (ST), και (δ) το όριο εξομάλυνσης (SM). Ο αλγόριθμος του Dutton διατηρεί τον χαρακτήρα των γραμμών δημιουργώντας λεπτομέρειες με χαρακτηριστικά μικρότερου μεγέθους, δεν αναφέρεται όμως σε οδηγίες για την επιλογή των τιμών των τεσσάρων παραμέτρων που χρησιμοποιεί (Buttenfield 1985).

Γύρω από το ίδιο θέμα, στον Müller (1986) ερευνάται η επίδραση της χαρτογραφικής γενίκευσης στην κλασματική διάσταση γεωγραφικών γραμμών. Στην εργασία αυτή διαπιστώνεται ότι η κλασματική διάσταση των γεωγραφικών γραμμών δεν διατηρείται σταθερή στις διάφορες κλίμακες, λόγω της μη διατήρησης γενικά αποδεκτών προτύπων κατά τη διαδικασία της χαρτογραφικής γενίκευσης.

Σε διαφορετική εργασία του ίδιου συγγραφέα (Müller 1987b) διερευνάται η διατήρηση της κλασματικής διάστασης για τους επτά περισσότερο χρησιμοποιούμενους αλγόριθμους γενίκευσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι κανένας από τους αλγόριθμους αυτούς δεν διατηρεί με συνεπή τρόπο την κλασματική διάσταση των γραμμών που γενικεύονται. Ενσωματώνοντας τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της κλασματικής διάστασης σε μια διαδικασία γενίκευσης, προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος γενίκευσης, με τον οποίο διατηρείται η τιμή της κλασματικής διάστασης. Τα αποτελέσματα της γενίκευσης γραμμών με την χρησιμοποίηση του συγκεκριμένου αλγόριθμου βρίσκονται πολύ κοντά στα καλύτερα αποτελέσματα των άλλων αλγορίθμων γενίκευσης.

Σε τρίτη εργασία του ίδιου συγγραφέα (Müller 1987a) η κλασματική γεωμετρία χρησιμοποιείται στον καθορισμό του απαιτούμενου μέγιστου αριθμού σημείων που χρειάζονται για τη σχεδίαση μιας γραμμής από ένα αυτόματο μέσο

(π.χ. αυτόματος σχεδιαστής-plotter). Δεδομένα αποτελούν η ελάχιστη απόσταση μεταξύ διακριτών σημείων της γραμμής και η κλασματική διάσταση. Παράλληλα, προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος γενίκευσης γραμμών (Müller 1987b), για τις οποίες ισχύει η ιδιότητα της αυτο-ομοιότητας. Στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων διατυπώνεται το γνωστό πρόβλημα της αυτοματοποιημένης γενίκευσης γραμμών, της απαίτησης δηλαδή κατά την διαδικασία αυτή να υπάρχει κάποια "ευφυΐα", ικανή να εξομοιώνει στον H/Y τις γνώσεις των χαρακτηριστικών μορφών των γεωγραφικών γραμμών ενός έμπειρου χαρτογράφου. Με την υλοποίηση του στόχου αυτού οι πολύπλοκες χαρτογραφικές γραμμές θα γενικεύονται αυτόματα χωρίς το ανεπιθύμητο φαινόμενο της αλληλοεπικάλυψης των διαφόρων τμημάτων τους.

Μια άλλη χαρακτηριστική χαρτογραφική ομάδα εφαρμογών αφορά τη δυνατότητα απεικόνισης μέσω του H/Y εικόνων που προσομοιώνουν το ανάγλυφο. Οι πρώτες εφαρμογές προσομοίωσης του ανάγλυφου με εικόνες από H/Y στηρίζονται σε αιτιοκρατικά μοντέλα. Η αποτελεσματικότητα των εφαρμογών αυτών σε περιπτώσεις προσομοίωσης φυσικών φαινομένων είναι περιορισμένη ως προς την αξιοπιστία και την ακρίβεια. Ένα βασικό πρόβλημα της προσομοίωσης είναι η ανάγκη ύπαρξης μεγάλου όγκου δεδομένων (Fuchs *et al.* 1977). Ένα δεύτερο βασικό πρόβλημα, είναι ο ίδιος ο χαρακτήρας των φυσικών αυτών δεδομένων που προσδιορίζεται από την τραχύτητά τους. Η τραχύτητα των δεδομένων παρακολουθείται με μεγάλη δυσκολία από έναν αιτιοκρατικό νόμο. Εφαρμόζοντας ένα στοχαστικό μοντέλο η προσομοίωση των φυσικών δεδομένων μπορεί να γίνει σύμφωνα με τη θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας. Στα πλαίσια της συλλογιστικής αυτής έχει προταθεί ένα στοχαστικό μοντέλο για την προσομοίωση εικόνων φυσικών φαινομένων σε H/Y, (Fournier *et al.* 1982). Στην εργασία αυτή τονίζεται ότι κάθε μοντέλο προσομοίωσης εικόνων σε H/Y πρέπει να στηρίζεται σε πρότυπα για τα οποία να ισχύουν δύο ιδιότητες: η εσωτερική και η εξωτερική συνοχή. Με την εσωτερική συνοχή εξασφαλίζεται η αναπαραγωγή του πρότυπου σε κάθε θέση και σε κάθε επίπεδο λεπτομερειών. Με την εξωτερική συνοχή εξασφαλίζεται η συνέχεια των γειτονικών προτύπων στην εικόνα. Βασικός στόχος του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι να δημιουργείται μια σειρά από νέα σημεία της γραμμής διατηρώντας την ιδιότητα της αυτο-ομοιότητας. Η δημιουργία των νέων σημείων γίνεται με μια επαναληπτική διαδικασία. Στο ενδιάμεσο κάθε ευθύγραμμου τμήματος της γραμμής ορίζεται ένα νέο σημείο μετατοπισμένο κατά την αναλογία μιας τυχαίας μεταβλητής Gauss (με μέση τιμή 0 και μεταβλητότητα 1) ως προς τον βαθμό της τραχύτητας της γραμμής. Ο συντελεστής με τον οποίο εκφράζεται ο βαθμός της τραχύτητας προέρχεται από την κλασματική διάσταση της γραμμής. Ο αλγόριθμος αυτός, που ονομάζεται "στοχαστικός αλγόριθμος παρεμβολής" επεκτείνεται και σε διδιάστατες εφαρμογές. Στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τονίζεται ότι στις εφαρμογές οι εικόνες παρουσιάζουν φυσικές και συμπαγείς περιγραφές των

φαινόμενων, σε πολύ σύντομα χρονικά διαστήματα σε σύγκριση με άλλες μεθόδους.

Σε μια κριτική του αλγορίθμου από τον Mandelbrot 1982b), διατυπώνονται σοβαρές διαφωνίες στο γεγονός της διατήρησης της κλασματικής διάστασης των γραμμών από τον προτεινόμενο αλγόριθμο.

Σε μεταγενέστερη προσπάθεια προσομοίωσης του ανάγλυφου (Clarke 1987, 1988) προτείνεται ένα σύστημα βασισμένο και σε αιτιοκρατικό αλλά και κλασματικό μοντέλο. Τα εξαρτώμενα από την κλίμακα χαρακτηριστικά του ανάγλυφου περιγράφονται από το αιτιοκρατικό μοντέλο μέσω σειρών Fourier, ενώ τα ανεξάρτητα από την κλίμακα χαρακτηριστικά από ένα μοντέλο βασισμένο στην κλασματική γεωμετρία. Ο κλασματικός χαρακτήρας της προσομοίωσης εξασφαλίζεται από τον επανακαθορισμό των συντελεστών Fourier από την κλασματική διάσταση. Η προσομοίωση πραγματοποιείται από την αντιστροφή του μετασχηματισμού Fourier.

Τέλος, η τελευταία εφαρμογή αναφέρεται στο αντικείμενο της Φωτοερμηνείας. Η ανάλυση των ταξινομημένων περιοχών ψηφιακών εικόνων από δορυφόρους μπορεί να μελετηθεί με τη θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας (De Cola 1989), λόγω της μορφής και του μεγέθους που παρουσιάζουν οι περιοχές αυτές. Στις δασικές περιοχές εμφανίζεται μεγάλη τιμή κλασματικής διάστασης, όπως επίσης και στις αστικές περιοχές, ενώ στις γεωργικές εκτάσεις η κλασματική διάσταση εξαρτάται αντίστροφα ως προς την ένταση της καλλιέργειας. Η κλασματική διάσταση προσδιορίζεται από την συσχέτιση εμβαδού-περιμέτρου.

Ένα σημαντικό συμπέρασμα των χαρτογραφικών εφαρμογών που αναλύθηκαν αφορά το γεγονός ότι αποτελούν, είτε διαδικασία γενίκευσης, είτε την ακριβώς αντίστροφη διαδικασία (αύξηση λεπτομερειών, προσομοίωση). Παρόλο ότι διατυπώνονται ορισμένες επιφυλάξεις όσο αφορά την διαπίστωση του κλασματικού χαρακτήρα των γεωγραφικών φαινόμενων, δηλαδή δεν διαπιστώνεται η ίδια τιμή της κλασματικής διάστασης σε ένα ευρύ φάσμα κλιμάκων (Goodchild 1980; Müller 1986), σε μια εκτεταμένη σειρά μελετών (Mandelbrot 1967, 1975b; Sayles and Thomas 1978; Burrough 1981; Mark and Aronson 1984; Kubik and Leberl 1986; Σακελλαρίου κ.ά. 1989; De Cola 1989; Huang and Turcotte 1989) επιβεβαιώνεται ο κλασματικός χαρακτήρας των γεωγραφικών φαινόμενων. Τα περισσότερα από τα γεωγραφικά φαινόμενα με επιβεβαιωμένο τον κλασματικό τους χαρακτήρα αφορούν το τοπογραφικό ανάγλυφο.

2.1 Χαρτογραφική γενίκευση

Σύμφωνα με το Πολύγλωσσο Λεξικό Τεχνικών Όρων της χαρτογραφίας (Multilingual Dictionary of Technical Terms in Cartography), η χαρτογραφική γενίκευση ορίζεται ως (White 1985):

" η επιλογή και απλοποιημένη αναπαράσταση των λεπτομερειών που κρίνονται κατάλληλες ως προς την κλίμακα ή και τον σκοπό του χάρτη. "

Η γενίκευση επιτυγχάνεται με την επιλεκτική αφαίρεση της πληροφορίας που αντιστοιχεί είτε στην πραγματικότητα, είτε σε έναν χάρτη μεγαλύτερης κλίμακας. Η επιλεκτική αυτή αφαίρεση της πληροφορίας υλοποιείται μέσα από διεργασίες, οι οποίες αν επιχειρηθεί να ομαδοποιηθούν, μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις ομάδες (Robinson *et al.* 1984). Οι ομάδες αυτές είναι:

- (α) η απλοποίηση,
- (β) η ταξινόμηση,
- (γ) ο συμβολισμός και
- (δ) η επαγωγή.

Δεδομένου ότι, η πληροφορία που απεικονίζεται στο χάρτη χαρακτηρίζεται από δύο συνιστώσες, τη θέση και τη σημασία, η γενίκευση, ως διαδικασία, επιδρά και στις δύο συνιστώσες (Keates 1973).

Το αποτέλεσμα της γενίκευσης, επομένως, είναι προϊόν αντικειμενικών (αφαίρεση) αλλά και υποκειμενικών (εκλεκτική αφαίρεση) λειτουργιών. Η εμπειρία των χαρτογράφων έχει καταγράψει με κατηγορηματικό τρόπο ότι, η σημασία των υποκειμενικών λειτουργιών είναι τόσο μεγάλη, ώστε να καθορίζει αυτή, σε μεγάλο βαθμό, την δημιουργία επιτυχημένων χαρτών. Για να είναι το αποτέλεσμα της γενίκευσης από διαφορετικούς χαρτογράφους ομοιόμορφο, χωρίς να είναι διαφοροποιημένη οπτικά η εικόνα των χαρτογραφικών χαρακτηριστικών, δημιουργούνται ανάλογα με τον σκοπό και την κλίμακα του χάρτη, κοινά αποδεκτοί κανόνες-προδιαγραφές.

2.1.1 Αυτοματοποιημένη γενίκευση

Με την εισαγωγή του H/Y ως "χαρτογραφικού εργαλείου" στις διεργασίες της παραδοσιακής γενίκευσης διαμορφώθηκε στο χαρτογράφο, σε μεγάλο βαθμό, μια διαφορετική αντίληψη για τη γενίκευση. Ήδη από τη δεκαετία του '70 είχε απορριφθεί η αντίληψη που επικρατούσε στη χαρτογραφική κοινότητα, ότι η

γενίκευση είναι μια διαδικασία που δεν μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί, (Tobler 1989). Σημαντικό βάρος στην εξέλιξη αυτή είχε η εμφάνιση του αλγόριθμου των Douglas and Peucker (1973). Το περιεχόμενο της γενίκευσης με τη βοήθεια H/Y αποδίδεται με τον όρο αυτοματοποιημένη γενίκευση.

Η χρήση H/Y είναι απόλυτα κατάλληλη για τις αντικειμενικές λειτουργίες της γενίκευσης. Συνήθως οι λειτουργίες αυτές απαιτούν επαναλαμβανόμενες πράξεις μεγάλου όγκου δεδομένων. Για τις υποκειμενικές, όμως, λειτουργίες της γενίκευσης το πρόβλημα της αυτοματοποίησης της διαδικασίας είναι περισσότερο σύνθετο. Σήμερα, υπάρχει η αντίληψη ότι, οι λειτουργίες αυτές υποβοηθούνται με τη χρήση H/Y.

Στο χαρτογράφο διατίθεται, συνήθως, ένα σύστημα με το οποίο είναι δυνατή η επιλογή των κατάλληλων αλγορίθμων γενίκευσης για όσες από τις υποκειμενικές λειτουργίες της γενίκευσης έχει επιτευχθεί να εκφραστούν ποσοτικά. Το σύστημα αυτό τις περισσότερες φορές βρίσκεται σε περιβάλλον αλληλοεπιδρούσης επικοινωνίας του χρήστη με τον H/Y.

Ο ισχυρισμός, σύμφωνα με τον οποίο μπορεί να υπάρξει ο ιδανικός εκείνος αλγόριθμος, κατάλληλος για την οποιαδήποτε περίπτωση γενίκευσης είναι αδύνατος.

Η αναλογία της γραμμικής πληροφορίας στους χάρτες είναι της τάξης του 80% (Thara 1988). Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι η αυτοματοποιημένη γενίκευση, κατά βάση, είναι προσανατολισμένη στη δημιουργία αλγορίθμων γενίκευσης γραμμών.

Σύμφωνα με τον McMaster (1987) οι τέσσερις πιο σημαντικές διαδικασίες που απαιτούνται για την αυτοματοποιημένη γενίκευση των γραμμών σε διανυσματική δομή είναι:

- (α) η απλοποίηση,
- (β) η εξομάλυνση,
- (γ) η μετάθεση και
- (δ) η αύξηση λεπτομερειών.

Το συμπέρασμα της διερεύνησης (McMaster 1987), ενός μεγάλου αριθμού αντιπροσωπευτικών αλγορίθμων γενίκευσης, οι περισσότεροι από τους οποίους είναι αλγόριθμοι απλοποίησης στηριγμένοι σε γεωμετρικού χαρακτήρα κριτήρια, καταλήγει στο ότι ο αλγόριθμος των Douglas and Peucker συγκεντρώνει τα περισσότερα πλεονεκτήματα. Μεταξύ των κριτηρίων της αξιολόγησης των αλγορίθμων αναφέρεται η ελαχιστοποίηση των μεταθέσεων που υφίστανται οι γενικευμένες γραμμές, δηλαδή η ελαχιστοποίηση της αλλοίωσης της πληροφορίας κατά τη γενίκευση. Στην περίπτωση αυτή, το αποτέλεσμα της γενίκευσης παρουσιάζει την καλύτερη οπτικά εικόνα, δηλαδή διατηρούνται τα ίδια χαρακτηριστικά σημεία που θα επέλεγε και ο χαρτογράφος.

Παραμένει, όμως, για τον αλγόριθμο των Douglas and Peucker το σημαντικό μειονέκτημα να είναι απαγορευτικός για μεγάλες μεταβολές μεταξύ της κλίμακας του αρχικού και του γενικευμένου χάρτη (Thara 1988).

Τέλος, διατυπώνεται (McMaster 1987) μια σειρά ερωτημάτων σχετικά με τα ανοικτά ζητήματα της αυτοματοποιημένης γενίκευσης γραμμών. Τα ερωτήματα αυτά αφορούν τον επηρεασμό της γενίκευσης από την πολυπλοκότητα των γραμμών, τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να μετρηθεί η πολυπλοκότητα και τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να συσχετιστούν μεταξύ τους οι τέσσερις διαδικασίες της αυτοματοποιημένης γενίκευσης γραμμών.

Το πρόβλημα των αλγορίθμων απλοποίησης σε μεγάλες μεταβολές μεταξύ της κλίμακας του αρχικού και του γενικευμένου χάρτη αφενός, και τα ερωτήματα που διατυπώνονται από τον McMaster, και αφορούν ανοικτά ζητήματα της αυτοματοποιημένης γενίκευσης αφετέρου, μπορούν να αντιμετωπιστούν θετικά με την υιοθέτηση ενός μοντέλου γενίκευσης βασισμένου στην κλασματική γεωμετρία.

2.1.2 Ποσοτική απλοποίηση - "αρχές της επιλογής"

Με τη διεργασία της απλοποίησης καθορίζονται τα σημαντικά χαρακτηριστικά των χαρτογραφικών φαινομένων που πρόκειται να απεικονιστούν στον γενικευμένο χάρτη, με παράλληλη αφαίρεση των ανεπιθύμητων λεπτομερειών (Robinson *et al.* 1984).

Ο εμπειρικός νόμος των Töpfer and Pillewizer (1966), γνωστός ως "αρχές της επιλογής", αποτελεί την πιο βασική ποσοτική έκφραση της διεργασίας της απλοποίησης στη χαρτογραφική γενίκευση.

Ο εμπειρικός αυτός νόμος συναρτά τον αριθμό N των στοιχείων της πληροφορίας ενός φαινομένου του γενικευμένου χάρτη κλίμακας $1 : m$, με τον αντίστοιχο αριθμό, N_0 του αρχικού χάρτη κλίμακας $1 : m_0$ σύμφωνα με τη σχέση:

$$N = c_E c_F N_0 \sqrt{\frac{m_0}{m}}. \quad (2.1)$$

Τα C_E και C_F αποτελούν σταθερές. Η πρώτη, C_E , ονομάζεται σταθερά της μεγέθυνσης του συμβολισμού και η δεύτερη, C_F , σταθερά της μορφής του συμβολισμού.

Στην περίπτωση γενίκευσης γεωγραφικών φαινομένων που απεικονίζονται με ίσου πάχους γραμμικά σύμβολα στον αρχικό και το γενικευμένο χάρτη (όπως για παράδειγμα είναι οι υψομετρικές καμπύλες, οι ακτογραμμές κ.λπ.), η σταθερά της μεγέθυνσης του συμβολισμού έχει την τιμή μονάδα ($C_E = 1$), ενώ η σταθερά της

μορφής του συμβολισμού παίρνει την τιμή $C_F = (m_0 / m)^{1/2}$. Τότε, η σχέση που εκφράζει τις "αρχές της επιλογής" απλοποιείται στην παρακάτω μορφή (Jones and Abraham 1987):

$$N = N_0 \frac{m_0}{m}. \quad (2.1')$$

Με τον εμπειρικό νόμο των Töpfer and Pillewizer προσδιορίζεται αποκλειστικά ο αριθμός των στοιχείων του χαρτογραφικού φαινομένου που περιλαμβάνονται στο γενικευμένο χάρτη. Απαντά, δηλαδή, στο ερώτημα πόσα στοιχεία του γεωγραφικού φαινομένου θα απαλειφθούν, δεν απαντά όμως στο ερώτημα ποια, (McMaster 1989a). Για την επιλογή των συγκεκριμένων στοιχείων απαιτείται μια ανεξάρτητη διαδικασία. Στην περίπτωση γενίκευσης γραμμών η επιλογή αυτή, μπορεί να γίνει με παράλληλη χρήση ενός αλγορίθμου στηριγμένου σε γεωμετρικού χαρακτήρα κριτήρια.

Για τον εμπειρικό αυτό νόμο υπάρχει μια σημαντική παρατήρηση. Κατά τη γενίκευση των χαρτογραφικών φαινομένων λαμβάνεται υπόψη, από τις σχέσεις (2.1 και 2.1'), η μεταβολή μεταξύ της κλίμακας του αρχικού και του γενικευμένου χάρτη (m_0 / m), και δεν λαμβάνεται υπόψη η πολυπλοκότητα ή τραχύτητα του χαρτογραφικού φαινομένου.

2.2 Κλασματικό μοντέλο γενίκευσης

Η χαρτογραφική γενίκευση μπορεί να ειπωθεί ως μια διαδικασία μετασχηματισμού ομοιότητας της οποίας ο λόγος ομοιότητας καθορίζεται από τον λόγο των κλιμάκων του αρχικού και του γενικευμένου χάρτη.

Το κλασματικό μοντέλο γενίκευσης εμπλουτίζει τις χαρτογραφικές διεργασίες με την έννοια της κλασματικής διάστασης (D) και την ιδιότητα της στατιστικής αυτο-ομοιότητας.

Με το κλασματικό μοντέλο γενίκευσης εξασφαλίζεται η δυνατότητα της ποσοτικής έκφρασης ορισμένων από τις υποκειμενικές λειτουργίες της παραδοσιακής γενίκευσης, οπότε ικανοποιείται η απαραίτητη προϋπόθεση της αυτοματοποίησης της διαδικασίας της γενίκευσης. Η ποσοτική έκφραση μπορεί να επιτευχθεί με την παραδοχή ότι η πολυπλοκότητα ή η τραχύτητα των χαρτογραφικών φαινομένων χαρακτηρίζεται από την κλασματική διάσταση (D). Εξ' άλλου στο αποτέλεσμα της γενίκευσης εξασφαλίζεται η ίδια με την αρχική πολυπλοκότητα στα χαρτογραφικά φαινόμενα, εφόσον η ιδιότητα της στατιστικής αυτο-ομοιότητας ενταχθεί στη διαδικασία της γενίκευσης.

Το πρώτο βήμα υλοποίησης του κλασματικού μοντέλου γενίκευσης αποτελεί η διαπίστωση του κλασματικού χαρακτήρα του σχήματος με το οποίο απεικονίζεται στο χάρτη το γενικευμένο χαρτογραφικό φαινόμενο. Δηλαδή, εξετάζεται αν ο χρησιμοποιούμενος συμβολισμός μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί κλασματικό σύνολο.

Η διαπίστωση του κλασματικού χαρακτήρα γίνεται με μία από τις τέσσερις μεθόδους υπολογισμού της κλασματικής διάστασης που αναφέρονται στην ενότητα 1.3. Ο κλασματικός χαρακτήρας θα διαπιστώνεται κάθε φορά που το διπλό λογαριθμικό διάγραμμα προσεγγίζει την ευθεία γραμμή, μετά από στατιστικό έλεγχο με υψηλό επίπεδο εμπιστοσύνης.

Στις περιπτώσεις που το χαρτογραφικό φαινόμενο απεικονίζεται στο χάρτη με ανοικτές γραμμές (ακτογραμμές, δρόμοι κλπ.) η αποτελεσματικότερη μέθοδος προσδιορισμού της κλασματικής διάστασης είναι η μέθοδος της συσχέτισης του μήκους της γραμμής με το αντίστοιχο βήμα ψηφιοποίησης (ενότητα 1.3.1). Εάν το χαρτογραφικό φαινόμενο απεικονίζεται με κλειστές γραμμές (υψομετρικές καμπύλες), αποτελεσματικότερη μέθοδος προσδιορισμού της κλασματικής διάστασης είναι η μέθοδος της συσχέτισης του εμβαδού με την περίμετρο (ενότητα 1.3.4).

Η χρησιμοποίηση των μεθόδων της φασματικής ανάλυσης (ενότητα 1.3.2) και της συνάρτησης μεταβλητότητας (ενότητα 1.3.3) πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας προσεκτικά υπόψη τα προβλήματα και τις αδυναμίες που εμφανίζονται στις μικρές και μεγάλες συχνότητες και στις μικρές και μεγάλες αποστάσεις συσχέτισης αντίστοιχα. Άλλωστε, οι μέθοδοι αυτοί αφορούν γραμμές που εμφανίζουν την ιδιότητα της στατιστικής αυτο-ομοπαράλληλίας.

Για τα χαρτογραφικά δεδομένα με διαπιστωμένο κλασματικό χαρακτήρα ισχύει η σχέση (1.6) που εκφράζει την ιδιότητα της αυτο-ομοιότητας των κλασματικών συνόλων. Γράφοντας την σχέση (1.6) ως προς τον αριθμό των σημείων N , που αποτελούν μια ψηφιοποιημένη γραμμή, η οποία απεικονίζει το χαρτογραφικό φαινόμενο, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$N = r^{-D}. \quad (2.2)$$

Αν εκφραστεί η σχέση (2.2) ώστε να περιγράψει τις δύο καταστάσεις του χαρτογραφικού φαινομένου, στον αρχικό χάρτη με λόγο ομοιότητας r_0 και σημεία N_0 , και στον γενικευμένο χάρτη με λόγο ομοιότητας r και σημεία N , θα προκύψει η παρακάτω σχέση:

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-D}. \quad (2.3)$$

Είναι γνωστό, όμως, ότι το αντίστροφο του λόγου ομοιότητας ($1/r$) εκφράζει την απόσταση μεταξύ του αρχικού και τελικού σημείου της γραμμής μετρημένης με μονάδα μήκους ίση με το βήμα ψηφιοποίησης (Mandelbrot 1967; Muller 1987a). Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι οι λόγοι ομοιότητας μιας κλασματικής γραμμής κατά την γενίκευση θα είναι ανάλογοι με τους παρονομαστές των κλιμάκων των χαρτών. Εάν θεωρηθεί ότι ο χάρτης έχει κλίμακα $1 : m_0$ και ο γενικευμένος $1 : m$, ο συλλογισμός αυτός οδηγεί στην παρακάτω σχέση:

$$\frac{r}{r_0} = \frac{m_0}{m} \quad (2.4)$$

Επομένως, η σχέση με την οποία θα εκφράζεται ποσοτικά η απλοποίηση στα πλαίσια ενός κλασματικού μοντέλου γενίκευσης είναι η παρακάτω:

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{m_0}{m}\right)^{-D} \quad (2.5)$$

Η σχέση (2.5) γενικεύει τον εμπειρικό νόμο των Töpfer and Pillewizer (1966) όπως εκφράζεται από τις σχέσεις (2.1 και 2.1'), ενσωματώνοντας την πολυπλοκότητα ή την τραχύτητα των χαρτογραφικών φαινομένων μέσω της κλασματικής διάστασης (D).

Η ίδια σχέση (2.5) συνιστάται και από τον Müller (1987a) για τη γενίκευση γραμμών, χωρίς όμως να συζητείται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο προκύπτει.

Είναι διαπιστωμένο ότι η γενίκευση της γραμμικής πληροφορίας επιφέρει μείωση του μήκους των γραμμών (Keates 1973; Robinson *et al.* 1984). Η μείωση του μήκους των γραμμών σε κανένα από τους υφιστάμενους αλγορίθμους γενίκευσης δεν εξαρτάται από την πολυπλοκότητα των γραμμών που γενικεύονται. Με το κλασματικό μοντέλο η μεταβολή, που υφίστανται τα μήκη των γραμμών κατά την γενίκευση, εξαρτάται από την μεταβολή της κλίμακας αφενός και την πολυπλοκότητα ή την τραχύτητα των γραμμών αφετέρου.

Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κλασματικό μοντέλο, στα πλαίσια της αυτοματοποιημένης γενίκευσης εξασφαλίζει την ομοιόμορφη αντιμετώπιση των υποκειμενικών λειτουργιών της παραδοσιακής γενίκευσης.

2.3 Κλασματικό μοντέλο συμπίεσης χαρτογραφικών δεδομένων

Κατά την ψηφιοποίηση των γραμμικών χαρτογραφικών δεδομένων, από υφιστάμενους χάρτες, το κυρίαρχο πρόβλημα που παρουσιάζεται εστιάζεται στο

μεγάλο όγκο των δεδομένων (Boyle 1980). Ένα μεγάλο μέρος από τα δεδομένα αυτά στην πραγματικότητα είναι πλεονάζοντα για την μελλοντική χαρτογραφική επεξεργασία και επιβαρύνουν άσκοπα τις ψηφιακές βάσεις των χαρτογραφικών δεδομένων. Ο κυριότερος λόγος της δημιουργίας του μεγάλου όγκου των δεδομένων οφείλεται αφενός είτε στο συνδυασμό της υψηλής διακριτικής ανάλυσης και της συνεχούς λειτουργίας κατά την ψηφιοποίηση με ψηφιοποιητή (stream mode digitizing), είτε στην υψηλή διακριτική ανάλυση του σαρωτή κατά την αυτόματη ψηφιοποίηση αφετέρου. Είναι προφανές ότι η εξέλιξη της τεχνολογίας στην κατασκευή περιφερειακών μονάδων με υψηλή διακριτική ανάλυση δεν θεωρείται μειονέκτημα, αλλά απλά διαπιστώνεται το μέγεθος του όγκου των δεδομένων που συσσωρεύει η χρήση τους.

Ο προσδιορισμός, κάθε φορά, του ελάχιστου εκείνου αριθμού σημείων των ψηφιοποιούμενων χαρτογραφικών δεδομένων, με τα οποία και θα τηρούνται οι απαιτούμενες ακρίβειες στην παραγόμενη ψηφιακή βάση χαρτογραφικών δεδομένων και δεν θα αλλοιώνεται ο χαρακτήρας των χαρτογραφικών φαινομένων αποτελεί διέξοδο για το πρόβλημα που αναλύθηκε. Αυτό επιτυγχάνεται με τις τεχνικές της συμπίεσης που υφίστανται τα ψηφιακά δεδομένα.

Χαρακτηριστική τεχνική συμπίεσης για ψηφιακά δεδομένα σε πινακοποιημένη δομή είναι η μέθοδος της κωδικοποιημένης αλυσίδας (Freeman 1961), που περιγράφεται στην ενότητα 6.2. Πέρα από τις παρατηρήσεις που διατυπώνονται από τον Wilf (1981) και αναφέρονται στην παραπάνω ενότητα, με την μέθοδο της κωδικοποιημένης αλυσίδας δεν λαμβάνεται υπόψη κατά την συμπίεση ο χαρακτήρας των χαρτογραφικών γραμμών.

Εάν θεωρηθεί ότι η διαδικασία της ψηφιοποίησης αποτελεί έναν μετασχηματισμό ομοιότητας από τον ψηφιοποιούμενο χάρτη στην ψηφιακή βάση των χαρτογραφικών δεδομένων, μπορεί να δομηθεί ένας τρόπος συμπίεσης των ψηφιακών χαρτογραφικών δεδομένων βασισμένος στην κλασματική γεωμετρία. Η συμπίεση αυτή ονομάζεται κλασματικό μοντέλο συμπίεσης και η διαχείριση των χαρτογραφικών γραμμών γίνεται με βάση την ιδιότητα της αυτο-ομοιότητας. Ο λόγος ομοιότητας εξαρτάται από το κατάλληλο βήμα ψηφιοποίησης της ψηφιακής βάσης των χαρτογραφικών δεδομένων και το μήκος μεταξύ του αρχικού και τελικού σημείου της γραμμής.

Επειδή το αντίστροφο του λόγου ομοιότητας εκφράζει την απόσταση μεταξύ του αρχικού και τελικού σημείου με μονάδα μήκους ίση με το βήμα ψηφιοποίησης (Mandelbrot 1967; Müller 1987a), προκύπτει:

$$\frac{1}{r} = \frac{d_{A,T}}{m\beta} \quad (2.6)$$

όπου r : ο λόγος ομοιότητας, $d_{A,T}$: η απόσταση μεταξύ του αρχικού και τελικού σημείου της γραμμής ως προς το σύστημα απεικόνισης του χάρτη, m : ο παρονομαστής της κλίμακας του χάρτη και β : το βήμα ψηφιοποίησης.

Αντικαθιστώντας το λόγο ομοιότητας με τη σχέση που εκφράζει την ιδιότητα της αυτό-ομοιότητας (σχέση 1.6), ο αριθμός των απαιτούμενων σημείων N για την ψηφιοποιούμενη χαρτογραφική γραμμή, θα είναι:

$$N = \left(\frac{d_{A,T}}{m\beta} \right)^D \quad (2.7)$$

Η διαπίστωση του κλασματικού χαρακτήρα των χαρτογραφικών γραμμών καθώς και ο προσδιορισμός της κλασματικής διάστασης γίνεται με την ίδια μεθοδολογία που ακολουθείται και στην κλασματική γενίκευση.

Η επιλογή του βήματος ψηφιοποίησης εξαρτάται από το είδος της χαρτογραφικής πληροφορίας που ψηφιοποιείται, την ακρίβεια που απαιτείται κατά την διαχείρισή της και το πάχος της γραμμής με το οποίο συμβολίζεται. Κατά συνέπεια το βήμα ψηφιοποίησης καθορίζεται από την ψηφιακή βάση των χαρτογραφικών δεδομένων και δεν είναι ίδιο για όλα τα χαρτογραφικά δεδομένα. Ο Müller (1987a) ορίζει το βήμα ψηφιοποίησης διπλάσιο του πάχους της γραμμής με την οποία πρόκειται να απεικονιστεί το χαρτογραφικό φαινόμενο στο χάρτη.

Κεφάλαιο 3

3. ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΨΟΜΕΤΡΩΝ (ΨΜΥ)

Τα διαθέσιμα δεδομένα του τοπογραφικού ανάγλυφου αναφέρονται, κυρίως, σε δύο μορφές: (α) σε τοπογραφικούς χάρτες και (β) σε ψηφιακά δεδομένα προερχόμενα από την ψηφιοποίηση υπαρχόντων τοπογραφικών χαρτών.

Η κάλυψη των δεδομένων αυτών σε παγκόσμια έκταση εξαιρουμένων της Ευρώπης και Β. Αμερικής, σε κλίμακες μεγαλύτερες από 1:100.000, είναι σημαντικά περιορισμένη, (NASA 1988). Παράλληλα, τα υπάρχοντα ψηφιακά δεδομένα του τοπογραφικού ανάγλυφου εμφανίζουν ανάλογους περιορισμούς στην έκτασή τους, ώστε η καλύτερη υπάρχουσα παγκόσμια ψηφιακή βάση δεδομένων να έχει οριζοντιογραφική διάταξη σημείων ανά 18 km, (NASA, 1988).

Για την κάλυψη των απαραίτητων αναγκών σε ψηφιακά δεδομένα του τοπογραφικού ανάγλυφου, έχει προταθεί ένα πρόγραμμα, (NASA 1988), με το οποίο προβλέπεται η δημιουργία μιας παγκόσμιας ψηφιακής βάσης υψομέτρων, χρησιμοποιώντας αποκλειστικά διαστημικές μεθόδους συλλογής, σε τρία επίπεδα κλιμάκων:

- (α) Παγκόσμιο (Global): με οριζοντιογραφική διάταξη σημείων ανά 1 km και υψομετρική ακρίβεια ± 10 m.
- (β) Περιφερειακό (Resional): με οριζοντιογραφική διάταξη σημείων ανά 100 m και ακρίβεια υψομέτρων ± 1 m και
- (γ) Τοπικό (Local) : με οριζοντιογραφική διάταξη σημείων ανά 10 m και υψομετρική ακρίβεια ± 0.1 m.

Η αναγκαιότητα της δημιουργίας ψηφιακών βάσεων δεδομένων του τοπογραφικού ανάγλυφου, όπως καταγράφεται από τη διεθνή εμπειρία, αλλά και η σημαντική έλλειψη που παρουσιάζεται στον τομέα αυτόν ειδικά στην χώρα μας, επιβάλλουν την ανάπτυξη τεχνολογίας, για την γρήγορη και αξιόπιστη δημιουργία ψηφιακών βάσεων υψομέτρων.

Η ψηφιακή διαχείριση του τοπογραφικού ανάγλυφου έχει καθιερωθεί να περιγράφεται με τον όρο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους - ΨΜΕ (Digital Terrain Model - DTM). Μια ολοκληρωμένη διατύπωση ενός ορισμού για το ΨΜΕ αποδίδεται στον Linkwitz (1970):

" Το ΨΜΕ αποτελείται από:

- (1) Ένα σύνολο αντιπροσωπευτικών σημείων της επιφανείας του εδάφους αποθηκευμένων στη μνήμη ενός Η/Υ.
- (2) Έναν αλγόριθμο (-ους) ικανό να παρεμβάλλει την τιμή του υψομέτρου, ή άλλων μεγεθών, οποιουδήποτε άλλου σημείου όταν δίνεται η θέση του σημείου αυτού."

Βασικά, η πληροφορία που περιέχεται σε ένα ΨΜΕ αναφέρεται στο υψόμετρο της επιφάνειας του εδάφους. Για το λόγο αυτό έχει επικρατήσει ο όρος Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρων - ΨΜΥ, (Digital Elevation Model - DEM), (Doyle 1978; Burrough 1986). Η αναπαράσταση του τοπογραφικού ανάγλυφου με τη μορφή ΨΜΥ σε περιβάλλον Η/Υ επιτρέπει την έκφραση μιας σειράς μεγεθών χρήσιμων για την ανάλυση της μορφολογίας του.

3.1 Παρεμβολή και ΨΜΥ

Το τοπογραφικό ανάγλυφο είναι συνεχές φαινόμενο, του οποίου η ψηφιοποίηση δεν μπορεί να γίνει παρά μόνον σε διακριτές θέσεις, δηλαδή να προσδιοριστεί σε ευδιάκριτη για Η/Υ μορφή η τιμή του υψομέτρου ορισμένων θέσεων. Ο γενικός αυτός κανόνας οφείλεται στην ίδια την υφή της ψηφιακής πληροφορίας, η οποία έχει σαν χώρο αναφοράς τον Η/Υ (διακριτός χώρος), σε σχέση με την αναλογική πληροφορία, η οποία έχει ως χώρο αναφοράς την πραγματικότητα (συνεχής χώρος). Είναι γεγονός, βέβαια, ότι η διάταξη των διακριτών αυτών θέσεων έχει να κάνει κυρίως με την μεθοδολογία της ψηφιοποίησης της πληροφορίας, ή καλύτερα της συλλογής της πληροφορίας.

Στην περίπτωση που η συλλογή γίνεται με ταχυμετρική αποτύπωση οι θέσεις αυτές δεν έχουν καμιά συστηματική διάταξη, αλλά αποτελούν σημεία τοπικών μέγιστων ή ελάχιστων ή σημεία μεταβολής της κλίσης του εδάφους. Τότε ο πλέον ενδεδειγμένος τρόπος διαχείρισης της πληροφορίας βασίζεται στη θεώρηση ότι ανήκει σε ένα δίκτυο τριγώνων (Peucker *et al.* 1978).

Εάν η μεθοδολογία συλλογής είναι η φωτογραμμετρική απόδοση, είναι εφικτό οι διακριτές αυτές θέσεις της διάταξης της πληροφορίας να αποτελούν τις κορυφές ενός κανονικού κανάβου (ορθογωνικού, εξαγωνικού, τριγωνικού).

Η τελευταία περίπτωση συλλογής, η οποία αφορά μια καθαρά χαρτογραφική διαδικασία, είναι η ψηφιοποίηση των υψομετρικών καμπύλων χαρτών. Οι

διακριτές θέσεις τότε αναφέρονται σε θέσεις με σταθερή τιμή υψομέτρου, ή άλλων χαρακτηριστικών γραμμών του ανάγλυφου όπως είναι οι μισγάγγειες κλπ.

Στο περιβάλλον του Η/Υ οποιαδήποτε επεξεργασία της ψηφιακής πληροφορίας που αφορά ένα συνεχές φαινόμενο διευκολύνεται, εάν η πληροφορία είναι διατεταγμένη στις κορυφές ενός κανονικού ορθογωνικού κανάβου. Το γεγονός αυτό δεν απαγορεύει την δυνατότητα της ψηφιακής επεξεργασίας δεδομένων διατεταγμένων σε δίκτυο τριγώνων, αλλά την δυσχεραίνει.

Η διαδικασία, λοιπόν, υπολογισμού των τιμών ενός φαινομένου σε θέσεις, στις οποίες δεν περιλαμβάνονται δεδομένα, ονομάζεται παρεμβολή. Η παρεμβολή, στις περισσότερες περιπτώσεις, καθορίζεται από ένα μαθηματικό νόμο, ο οποίος θεωρείται ότι περιγράφει τοπικά το φαινόμενο στο γεωγραφικό χώρο.

Η διαδικασία της παρεμβολής αποτελεί βασικό τμήμα ενός συστήματος παραγωγής ΨΜΥ και είναι αναπόσπαστα συνδεδεμένη με τη δημιουργία των ΨΜΥ μέσα από το σύστημα αυτό. Η χρησιμότητα όμως της παρεμβολής δεν σταματά με την φάση της δημιουργίας των ΨΜΥ, αλλά είναι αναγκαία σε οποιαδήποτε χρήση του ΨΜΥ από το σύστημα. Παρατηρείται, όμως, ότι το μεγαλύτερο βάρος της έρευνας, που αφορά το αντικείμενο της παρεμβολής, είναι προσανατολισμένο στην φάση της δημιουργίας του ΨΜΥ, ενώ οι υπόλοιπες λειτουργίες της παρεμβολής αντιμετωπίζονται τις περισσότερες φορές, ικανοποιητικά, με τη γραμμική παρεμβολή (π.χ. σχεδίαση υψομετρικών καμπύλων).

Ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του '70 η διεθνής βιβλιογραφία έχει καλύψει σε μεγάλη έκταση το αντικείμενο της παρεμβολής για τις ανάγκες των ΨΜΥ. Σε ένα μεγάλο αριθμό δημοσιεύσεων (Hardy 1971; Kraus and Mikhail 1972; Junkins *et al.* 1973; Jancaitis and Junkins 1973; Ebner and Reiss 1978; Kratky 1978; Masson D' Autume 1979; Segu 1985) αναλύονται οι περισσότεροι γνωστές μέθοδοι παρεμβολής, που χρησιμοποιούνται στα ΨΜΥ. Επιπλέον στις δημοσιεύσεις των Leberl (1973, 1975), Schut (1974, 1976), Hardy (1981) και Lam (1983) γίνεται συγκριτική αναφορά και ανασκόπηση των μεθόδων παρεμβολής. Μια μάλιστα από αυτές (Schut 1976) αποτελεί την πλέον ολοκληρωμένη συνθετική ανασκόπηση στο αντικείμενο αυτού. Σημαντική ανάλυση και εκτενής βιβλιογραφία των μεθόδων παρεμβολής περιλαμβάνεται επίσης στα βιβλία των Monmonier (1982) και Burrough (1986) από την οπτική της ψηφιακής χαρτογραφίας και των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών, αντίστοιχα.

Αν και η μέθοδος παρεμβολής δεν αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα της ακρίβειας του παραγόμενου ΨΜΥ, έχει μεγάλη σημασία για το σχεδιασμό του ΨΜΥ, γιατί καθορίζει τον μηχανισμό με τον οποίο γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων. Ο χρόνος και το κόστος της επεξεργασίας των παραγόμενων ΨΜΥ

επηρεάζονται από την εκάστοτε μέθοδο παρεμβολής που έχει υιοθετηθεί. Επομένως, η μέθοδος παρεμβολής καθορίζει την αποτελεσματικότητα ενός συστήματος παραγωγής ΨΜΥ. Η ακρίβεια και αξιοπιστία των παραγόμενων ΨΜΥ είναι συνάρτηση (Schut 1976) των χαρακτηριστικών του φαινομένου, της μεθόδου συλλογής και της μεθόδου παρεμβολής αφενός, αλλά και του διαστήματος δειγματοληψίας αφετέρου.

3.2 Υφιστάμενες μέθοδοι δημιουργίας ΨΜΥ από χάρτες

Στην ενότητα αυτή γίνεται συνοπτική ανάλυση τεσσάρων χαρακτηριστικών μεθόδων δημιουργίας ΨΜΥ με δεδομένα προερχόμενα από το αποτέλεσμα της ψηφιοποίησης των υψομετρικών καμπύλων χαρτών. Τα ΨΜΥ, που δημιουργούνται σε κάθε περίπτωση, αποτελούν δισδιάστατους πίνακες, τα στοιχεία των οποίων είναι διατεταγμένα σε τετραγωνικό κানাβο.

3.2.1 Μέθοδος παρεμβολής κατά τις κύριες διευθύνσεις

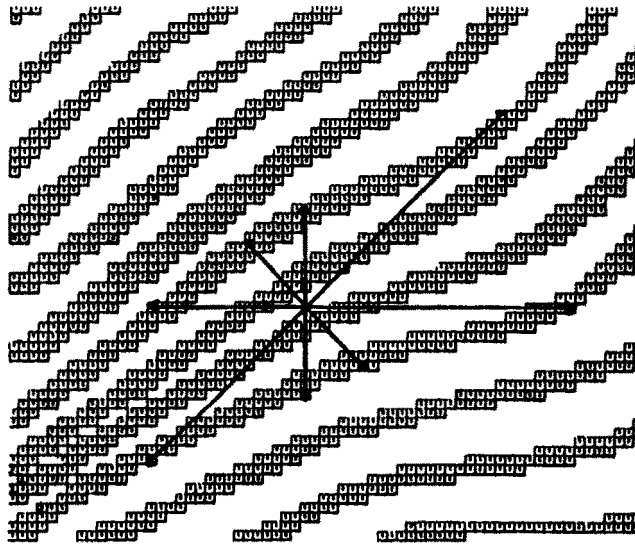
Τα δεδομένα της μεθόδου (Gottschalk 1975), προέρχονται από την ψηφιοποίηση υψομετρικών καμπύλων χαρτών με σαρωτή. Οι τιμές των υψομέτρων μεταφέρονται σε όλα τα δεδομένα, δηλαδή τα στοιχεία της ψηφιακής εικόνας, με την βοήθεια ενός προγράμματος σύνταξης εικόνας. Η παρεμβολή γίνεται σύμφωνα με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (Lauer 1972) λαμβάνοντας υπόψη τις 16 τιμές των τομών κατά τις τέσσερις βασικές διευθύνσεις από το σημείο με τα κοντινότερα στοιχεία της ψηφιακής εικόνας, που αντιπροσωπεύουν οι ανά δύο □□εκατέρωθεν διαδοχικές υψομετρικές καμπύλες, (σχήμα 3.1). Στην περίπτωση που το σημείο αντιστοιχεί σε στοιχείο της ψηφιακής εικόνας, ή γειτονικό, το οποίο ανήκει σε υψομετρική καμπύλη δεν γίνεται παρεμβολή αλλά απλά λαμβάνεται η συγκεκριμένη τιμή του υψομέτρου.

3.2.2 Μέθοδος παρεμβολής με πεπερασμένα στοιχεία

Τα δεδομένα σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, (Ebner and Reiss 1978), προέρχονται από την ψηφιοποίηση υψομετρικών καμπύλων με ψηφιοποιητή.

Η μέθοδος παρεμβολής που χρησιμοποιείται είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων. Κατά τη συγκεκριμένη μέθοδο, διαμορφώνονται συνθήκες συνέχειας για την επιφάνεια, που προσδιορίζεται με την παρεμβολή, διατηρώντας τα μεγέθη της κλίσης και καμπυλότητας στο σύνορο. Εάν θεωρηθεί ότι το παραγόμενο ΨΜΥ αποτελείται από m γραμμές και n στήλες, ο προσδιορισμός των υψομέτρων

απαιτεί την επίλυση ενός συστήματος $m \times n$ κανονικών εξισώσεων. Η επίλυση του συστήματος γίνεται είτε με τις άμεσες μεθόδους βασισμένες στους αλγορίθμους Gauss ή Cholesky, είτε με επαναληπτικούς αλγόριθμους (π.χ. εφαρμογή του αλγορίθμου conjugate gradient). Η διαδικασία της επίλυσης υποβοηθείται εάν διαιρεθεί η περιοχή σε μικρότερες επικαλυπτόμενες ζώνες των οποίων η επίλυση γίνει χωριστά.

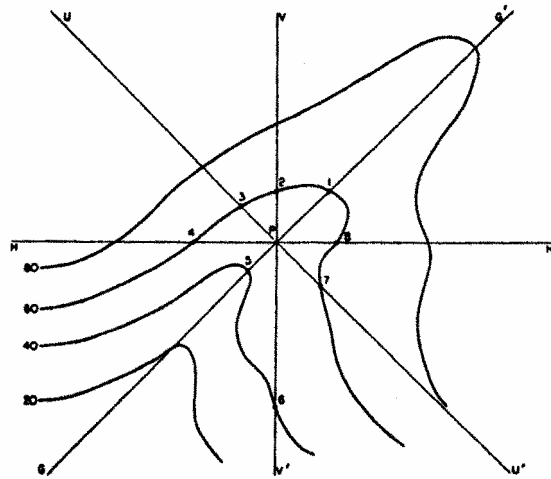


Σχήμα 3.1 Οι τέσσερις διευθύνσεις παρεμβολής, (Gottschalk 1975).

3.2.3 Μέθοδος παρεμβολής κατά την μεγαλύτερη κλίση

Τα δεδομένα της μεθόδου αυτής, (Leberl and Olsen 1982), προέρχονται από την ψηφιοποίηση υψομετρικών καμπύλων χαρτών είτε με ψηφιοποιητή είτε με σαρωτή. Στην δεύτερη περίπτωση οι ψηφιοποιούμενες υψομετρικές καμπύλες μετατρέπονται από πινακοποιημένη σε διανυσματική δομή και με τη βοήθεια ενός προγράμματος σύνταξης ψηφιακής εικόνας προστίθεται η πληροφορία για την τιμή του υψομέτρου.

Για κάθε σημείο του παραγόμενου ΨΜΥ προσδιορίζονται οι τομές των τεσσάρων βασικών διευθύνσεων με τις κοντινότερες υψομετρικές καμπύλες, (σχήμα 3.2). Στην συνέχεια η τιμή του υψομέτρου του σημείου προσδιορίζεται με γραμμική παρεμβολή κατά τη διεύθυνση της μεγαλύτερης κλίσης (GG'), διαδικασία που προσομοιώνει στον H/Y τον παραδοσιακό τρόπο παρεμβολής όπως γίνεται από τον άνθρωπο. Ο αλγόριθμος μοιάζει με τον αλγόριθμο που προτείνει ο Lauer (1972). Το αποτέλεσμα είναι πολύ καλύτερο εάν ψηφιοποιηθούν και χαρακτηριστικές γραμμές του ανάγλυφου.



Σχήμα 3.2 Παρεμβολή κατά την διεύθυνση της μεγαλύτερης κλίσης, (Leberl and Olsen 1982).

Οι Clarke *et al.* (1982) ακολουθούν και αυτοί την παρεμβολή κατά την διεύθυνση της μεγαλύτερης κλίσης. Χρησιμοποιούν αντί για γραμμική παρεμβολή συναρτήσεις τρίτου βαθμού, επιτυγχάνοντας πολύ καλά αποτελέσματα.

Το ίδιο πλαίσιο βασικών αρχών ακολουθεί και η μέθοδος που προτείνει ο Douglas (1983).

Σε παρόμοια, επίσης, διαδικασία στηρίζεται και η μέθοδος του συστήματος δημιουργίας ΨΜΕ του Πανεπιστημίου του Graz (Graz Terrain Model - GTM), (Oswald and Raetzsch 1984).

Σε πειραματικές εφαρμογές που έγιναν στο σύστημα GTM, για την υιοθέτηση μη γραμμικών μεθόδων παρεμβολής, τα αποτελέσματα δεν ήταν καθόλου ικανοποιητικά. Το γεγονός αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις διαπιστώσεις των Clarke *et al.* (1982).

3.2.4 Μέθοδος παρεμβολής κατά διευθύνσεις

Τα δεδομένα για τη δημιουργία των ΨΜΕ προέρχονται από την ψηφιοποίηση υψομετρικών καμπύλων χαρτών. Εάν η ψηφιοποίηση έχει γίνει με σαρωτή απαιτείται η διαδικασία μετατροπής των δεδομένων σε διανυσματική δομή καθώς και η προσθήκη των τιμών των υψομέτρων.

Ο μηχανισμός της παρεμβολής (Yoeli 1986) βασίζεται στη δημιουργία διατομών κατά την διεύθυνση των γραμμών, των στηλών και των διαγώνιων από τα δεδομένα των υψομετρικών καμπύλων. Οι διατομές δημιουργούνται με την βοήθεια συναρτήσεων splines και η τιμή του υψομέτρου για κάθε σημείο του

ΨΜΥ προκύπτει από την διατομή με γραμμική παρεμβολή. Μαζί με το υψόμετρο του σημείου ως προς την κάθε διατομή, αποθηκεύονται και δύο τιμές βάρους, ίσες με το αντίστροφο της απόστασης του σημείου από τις εκατέρωθεν υψομετρικές καμπύλες. Στην συνέχεια, προσδιορίζεται η τελική τιμή του υψομέτρου κάθε σημείου του ΨΜΥ, από την μέση τιμή των υψομέτρων των διατομών, χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα βάρη. Η μέθοδος επιτρέπει τον εύκολο προσδιορισμό του τυπικού σφάλματος της μονάδας βάρους κάθε παρατήρησης, καθώς και το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής ενός υψομέτρου. Η μέση τιμή των τυπικών σφαλμάτων για ολόκληρο το ΨΜΥ μπορεί να αποτελέσει κριτήριο ποιότητας του παραγόμενου ΨΜΥ.

Στην ίδια λογική στηρίζεται και η μέθοδος των Legate and Willmott (1986). Η παρεμβολή σύμφωνα με την μέθοδο αυτή γίνεται μόνο κατά την διεύθυνση των γραμμών και στηλών. Η διαφοροποίηση υφίσταται στις συναρτήσεις παρεμβολής, όπου για την συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιούνται οι "ερμιτιανές συναρτήσεις splines" (Bidirectional Hermitian Splines). Η χρήση των συναρτήσεων αυτών εξασφαλίζει την συνέχεια της καμπύλης που παρεμβάλλεται για κάθε διατομή, διατηρώντας ίδια την κλίση στα τμήματα της καμπύλης. Ο αριθμητικός προσδιορισμός της κλίσης γίνεται με τη βοήθεια ειδικών συναρτήσεων που ονομάζονται τμηματικές συναρτήσεις (piecewise functions). Οι συναρτήσεις αυτές αποτελούνται από πολυώνυμα γ' βαθμού, (Akima 1970, 1972).

3.3 Κριτική ανασκόπηση των μεθόδων

Ο όγκος της πληροφορίας των υψομετρικών καμπύλων στον χάρτη είναι πολύ μεγάλος. Χαρακτηριστικά, η ψηφιοποίηση των υψομετρικών καμπύλων με ψηφιοποιητή, από ένα χάρτη κλίμακας 1:25.000, μιας περιοχής διαστάσεων 10 km x 10 km με σχετικά ομαλές κλίσεις εδάφους, είναι της τάξης των 500.000 σημείων, (Breward 1972). Είναι δε προφανές ότι αν η ψηφιοποίηση γίνει με σαρωτή ο αριθμός αυτός θα είναι ακόμη μεγαλύτερος.

Ο χρόνος επεξεργασίας του τεράστιου όγκου της πληροφορίας, ο οποίος συγκεντρώνεται κατά την ψηφιοποίηση, επιδρά καθοριστικά στην αποτελεσματικότητα του συστήματος δημιουργίας ΨΜΥ, ιδιαίτερα αν το σύστημα αυτό λειτουργεί σε περιβάλλον μικροϋπολογιστή. Μια γενική, λοιπόν, διαπίστωση είναι ότι οι μέθοδοι που αναλύθηκαν είναι σημαντικά χρονοβόρες.

Μια άλλη διαπίστωση αφορά το γεγονός ότι, παρόλο που ο ορισμός του Linkwitz (1970) για το ΨΜΕ φαίνεται να είναι αρκετά γενικός, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται δεν παράγουν και άλλα μεγέθη σε μορφή ΨΜΕ κατευθείαν από τα πρωτογενή δεδομένα, όπως είναι η κλίση του εδάφους, η καμπυλότητα κλπ. Οι δύο αυτές διαπιστώσεις θα αναλυθούν παρακάτω.

Οι τέσσερις χαρακτηριστικές μέθοδοι παρεμβολής που αναλύθηκαν μπορούν να διακριθούν σε δύο ομάδες. Στην πρώτη ομάδα (πρώτη και τρίτη μέθοδος), η χρονική διάρκεια της επεξεργασίας καθορίζεται από την διαδικασία εντοπισμού, για κάθε στοιχείο του πίνακα που αποτελεί το ΨΜΥ, των τομών των τεσσάρων βασικών διευθύνσεων με τις κοντινότερες υψομετρικές καμπύλες. Η διαδικασία αυτή είναι σημαντικά χρονοβόρα γιατί επιβάλλει την σάρωση του αρχείου των δεδομένων (ψηφιοποιημένες υψομετρικές καμπύλες) $m \times n$ φορές, αν θεωρήσουμε ότι το ΨΜΥ αποτελείται από m γραμμές και n στήλες.

Η δεύτερη ομάδα (δεύτερη και τέταρτη μέθοδος), επειδή ακριβώς διαμορφώνει τις συνθήκες συνέχειας για την επιφάνεια ή τις γραμμές (διατομές) που παρεμβάλλει, πολλαπλασιάζει τον αριθμό των απαιτούμενων επεξεργασιών για κάθε στοιχείο του πίνακα. Έτσι και στην περίπτωση αυτή η επεξεργασία είναι χρονικά επιβαρυνόμενη.

Τέλος μια άλλη διαπίστωση, για όλες τις μεθόδους πλην της δεύτερης, είναι η αδυναμία να συμπεριληφθούν στα δεδομένα, σημεία τοπικών μέγιστων και ελάχιστων (π.χ. τριγωνομετρικά σημεία), ακριβώς γιατί οι μέθοδοι στηρίζονται στον προσδιορισμό της τομής μιας διεύθυνσης με τις υψομετρικές καμπύλες (τομή δύο γραμμών). Τα σημεία αυτά, αν και δεν έχουν παρά ελάχιστες απαιτήσεις σε όγκο μνήμης προσφέρουν πολύ σημαντική πληροφορία για το ανάγλυφο.

ΜΕΡΟΣ 2^ο
(ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ)

Κεφάλαιο 4

4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η μεθοδολογία με την οποία προτείνεται να εφαρμοστεί η κλασματική γεωμετρία στην χαρτογραφία. Με την μεθοδολογία αυτή αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο τα χαρτογραφικά σύμβολα μπορούν να θεωρηθούν ως κλασματικά σύνολα σημείων, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να εφαρμοστούν τα κλασματικά μοντέλα γενίκευσης και συμπίεσης των συμβόλων των χαρτογραφικών φαινομένων.

4.1 Επιβεβαίωση του κλασματικού χαρακτήρα των χαρτογραφικών συμβόλων

Η επιβεβαίωση του κλασματικού χαρακτήρα των χαρτογραφικών συμβόλων αποτελεί το πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας και περιλαμβάνει τις απαραίτητες διαδικασίες με τις οποίες τα χαρτογραφικά σύμβολα αποδεικνύεται ότι είναι κλασματικά σύνολα σημείων.

Όπως αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 1, τα κλασματικά σύνολα σημείων χαρακτηρίζονται από την ιδιότητα της αυτο-ομοιότητας ή της αυτο-ομοπαράλληλης. Η ιδιότητα της αυτο-ομοιότητας των κλασματικών συνόλων σημείων εκφράζεται από την γραμμική εξάρτηση είτε της συσχέτισης του μήκους με το βήμα μέτρησης ή του εμβαδού με την περίμετρο. Η ιδιότητα της αυτο-ομοπαράλληλης των κλασματικών συνόλων σημείων εκφράζεται, αντίστοιχα, από την γραμμική εξάρτηση είτε της ισχύος του φάσματος με το μήκος κύματος ή της συνάρτησης μεταβλητότητας με το μήκος συσχέτισης. Σημειώνεται δε ότι, όλα τα μεγέθη στη γραμμική αυτή εξάρτηση είναι εκφρασμένα με λογαριθμικές τιμές.

Για τα χαρτογραφικά σύμβολα απαιτείται η επιβεβαίωση των ιδιοτήτων της στατιστικής αυτο-ομοιότητας ή αυτό-ομοπαράλληλίας μέσω των εκτιμητριών των μεγεθών που αναφέρθηκαν. Όσο πιο ισχυρή είναι η γραμμική εξάρτηση των εκτιμητριών των μεγεθών, τόσο πιο έντονος είναι και ο κλασματικός χαρακτήρας των χαρτογραφικών συμβόλων. Για το λόγο αυτό προτείνεται η επιβεβαίωση του κλασματικού χαρακτήρα των χαρτογραφικών συμβόλων να γίνεται με μια σειρά στατιστικών ελέγχων των παραμέτρων της ευθείας παλινδρόμησης των τεσσάρων μεθόδων προσδιορισμού της κλασματικής διάστασης (ενότητα 1.3), οι οποίοι να χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλό επίπεδο εμπιστοσύνης. Οι προτεινόμενοι στατιστικοί έλεγχοι έχουν ως στόχο να εξασφαλίζουν την ισχυρή γραμμική εξάρτηση, την επιβεβαίωση ότι τα χαρτογραφικά σύμβολα δεν είναι ευκλείδια σχήματα, καθώς επίσης την σημαντικότητα και την ακρίβεια της προσδιοριζόμενης τιμής της κλασματικής διάστασης. Οι στατιστικοί αυτοί έλεγχοι είναι τρεις και αφορούν, αντίστοιχα, τον συντελεστή της γραμμικής συσχέτισης, την αποφυγή τιμών της κλίσης αντιστοίχων με αυτές ευκλείδιων σχημάτων και την στατιστική σημαντικότητα της τιμής της κλίσης της ευθείας παλινδρόμησης.

Με τον πρώτο στατιστικό έλεγχο διατυπώνεται η μηδενική υπόθεση: ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης της ευθείας παλινδρόμησης έχει την τιμή μηδέν. Για την απόρριψη της μηδενικής αυτής υπόθεσης και αποδοχή, επομένως, της εναλλακτικής υπόθεσης: να υφίσταται η γραμμική συσχέτιση, λαμβάνεται 99% επίπεδο εμπιστοσύνης.

Με το δεύτερο στατιστικό έλεγχο διατυπώνεται η μηδενική υπόθεση: η τιμή της κλίσης της ευθείας παλινδρόμησης έχει την αντίστοιχη οριακή τιμή των ευκλείδιων σχημάτων ή επιφανειών. Οι οριακές αυτές τιμές είναι $b = 0$ για τη μέθοδο συσχέτισης του μήκους με το βήμα μέτρησης, $b = 2$ για τις μεθόδους συνάρτησης μεταβλητότητας και συσχέτισης εμβαδού-περιμέτρου και $b = -2$ για τη μέθοδο της φασματικής ανάλυσης. Για την απόρριψη της μηδενικής αυτής υπόθεσης και αποδοχή, επομένως, της εναλλακτικής υπόθεσης: να είναι η τιμή της κλίσης διαφορετική από την οριακή των ευκλείδιων σχημάτων ή επιφανειών, λαμβάνεται 95% επίπεδο εμπιστοσύνης.

Τέλος, με τον τρίτο στατιστικό έλεγχο διατυπώνεται η μηδενική υπόθεση: η τιμή της κλίσης της ευθείας παλινδρόμησης έχει την τιμή μηδέν, δηλαδή, η παράμετρος b είναι στατιστικά ασήμαντη. Για την απόρριψη της μηδενικής αυτής υπόθεσης και αποδοχή, επομένως, της εναλλακτικής υπόθεσης: να είναι η τιμή της κλίσης της ευθείας παλινδρόμησης διάφορη του μηδενός, δηλαδή, η παράμετρος b να είναι στατιστικά σημαντική, λαμβάνεται 99% επίπεδο εμπιστοσύνης.

Οι δύο πρώτοι στατιστικοί έλεγχοι αναφέρονται στην διαπίστωση του κλασματικού χαρακτήρα, ενώ ο τρίτος στην αξιοπιστία προσδιορισμού της τιμής της κλασματικής διάστασης.

Ειδικότερα, η ακρίβεια της προσδιοριζόμενης τιμής της κλασματικής διάστασης εκφράζεται από τη μεταβλητότητα της κλασματικής διάστασης (σ_D^2) που προσδιορίζεται από τη μεταβλητότητα της κλίσης της ευθείας παλινδρόμησης (σ_b^2), εφαρμόζοντας το νόμο μετάδοσης των σφαλμάτων στις σχέσεις που συνδέουν την κλίση με την κλασματική διάσταση.

Για τη μέθοδο της συσχέτισης του μήκους με το βήμα μέτρησης η μεταβλητότητα της κλασματικής διάστασης λόγω της σχέσης (1.9) ταυτίζεται με την μεταβλητότητα της κλίσης της ευθείας παλινδρόμησης, δηλαδή:

$$\sigma_D^2 = \sigma_b^2. \quad (4.1)$$

Για τις μεθόδους της φασματικής ανάλυσης και συνάρτησης μεταβλητότητας, η μεταβλητότητα της κλασματικής διάστασης, λόγω των σχέσεων (1.10) και (1.12) ή (1.12') αντίστοιχα, είναι:

$$\sigma_D^2 = \frac{1}{4} \sigma_b^2. \quad (4.2)$$

Τέλος, για την μέθοδο της συσχέτισης εμβαδού-περιμέτρου η μεταβλητότητα της κλασματικής διάστασης, λόγω της σχέσης (1.13), είναι:

$$\sigma_D^2 = \frac{4}{b^4} \sigma_b^2. \quad (4.3)$$

Στις σχέσεις (4.2) και (4.3) η κλίση της ευθείας παλινδρόμησης συμβολίζεται με b .

4.2 Μεθοδολογία κλασματικού μοντέλου γενίκευσης και συμπίεσης

Όπως έχει αναφερθεί στις ενότητες 2.2 και 2.3 τα κλασματικά μοντέλα γενίκευσης και συμπίεσης αναφέρονται σε γραμμικά χαρτογραφικά δεδομένα και βασίζονται στην ιδιότητα της στατιστικής αυτο-ομοιότητας.

Ύστερα από την διαδικασία επιβεβαίωσης του κλασματικού χαρακτήρα των γραμμών των χαρτογραφικών συμβόλων και προσδιορισμού της κλασματικής

τους διάστασης, το κλασματικό μοντέλο γενίκευσης και συμπίεσης υλοποιείται με έναν απλό αλγόριθμο απαλοιφής σημείων της χαρτογραφικής γραμμής.

Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 1, οι μέθοδοι συσχέτισης του μήκους με το βήμα μέτρησης και συσχέτισης εμβαδού-περιμέτρου, αναφέρονται στην ιδιότητα της αυτό-ομοιότητας. Από τις δύο αυτές μεθόδους η πρώτη είναι κατάλληλη για ανοικτές χαρτογραφικές γραμμές, ενώ η δεύτερη για κλειστές. Η μέθοδος συσχέτισης του μήκους με το βήμα μέτρησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για κλειστές γραμμές, τεμαχίζοντας την χαρτογραφική γραμμή σε δύο ή περισσότερα τμήματα και εφαρμόζοντας τις διαδικασίες της προτεινόμενης μεθοδολογίας για κάθε τμήμα ανεξάρτητα.

Σύμφωνα με το κλασματικό μοντέλο γενίκευσης ο αριθμός των απαιτούμενων σημείων της χαρτογραφικής γραμμής προσδιορίζεται από την κλασματική της διάσταση (D), την μεταβολή της κλίμακας του αρχικού και του τελικού χάρτη και του αριθμού των σημείων της αρχικής γραμμής εφαρμόζοντας την σχέση (2.5), που αναφέρεται στην ενότητα 2.2. Αντίστοιχα, σύμφωνα με το κλασματικό μοντέλο συμπίεσης ο αριθμός των απαιτούμενων σημείων της χαρτογραφικής γραμμής προσδιορίζεται από την κλασματική της διάσταση (D), την κλίμακα του χάρτη, το μήκος μεταξύ αρχικού και τελικού σημείου της γραμμής και το βήμα ψηφιοποίησης εφαρμόζοντας τη σχέση (2.7), η οποία αναφέρεται στην ενότητα 2.3. Χρησιμοποιώντας τον αριθμό των σημείων, που ορίζεται από τις δύο αυτές σχέσεις, η τελική χαρτογραφική γραμμή επιτυγχάνεται να είναι στατιστικά αυτο-όμοια με την αρχική.

Τα κλασματικά μοντέλα γενίκευσης και συμπίεσης υλοποιούνται, λοιπόν, με μια διαδικασία αφαίρεσης σημείων. Μια διαδικασία αφαίρεσης σημείων από μόνη της, εν γένει, δεν εξασφαλίζει θετικά αποτελέσματα για τη γενίκευση και συμπίεση των χαρτογραφικών γραμμών. Με τη διατήρηση όμως κατάλληλου αριθμού σημείων, το μέγεθος των οποίων ορίζεται βάσει της κλασματικής γεωμετρίας, εξασφαλίζονται θετικά αποτελέσματα. Θα μπορούσε, δηλαδή, η τελική γραμμή να αποτελείται από λιγότερα ή περισσότερα σημεία, όμως, και στις δύο αυτές περιπτώσεις οι δύο γραμμές δεν θα είναι στατιστικά αυτο-όμοιες με την αρχική, επομένως, δεν θα εμφανίζονται στην τελική γραμμή τα ίδια «χαρακτηριστικά» με την αρχική.

Η εφαρμογή των κλασματικών μοντέλων γενίκευσης και συμπίεσης προϋποθέτει τα στάδια: (α) της επιβεβαίωσης του κλασματικού χαρακτήρα των χαρτογραφικών συμβόλων και προσδιορισμού, ταυτόχρονα, της κλασματικής διάστασης και (β) της αφαίρεσης συγκεκριμένου αριθμού σημείων από την ψηφιοποιημένη γραμμή. Η διαδικασία αυτή μπορεί να ολοκληρωθεί με απλούς και ταχείς αλγόριθμους προσφέροντας ένα αποτελεσματικό «εργαλείο» στη διάθεση της αυτόματης χαρτογραφίας.

Τα θετικά αποτελέσματα των δύο αυτών κλασματικών μοντέλων γενίκευσης και συμπίεσης αναλύονται εκτενέστερα στο τρίτο μέρος της διατριβής, όπου παρουσιάζονται όλες οι εφαρμογές που έγιναν στο πλαίσιο της εργασίας αυτής.

Κεφάλαιο 5

5. ΨΗΦΙΑΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Έχει αναφερθεί με έμφαση ότι, η χαρτογραφία, σήμερα, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την επιστήμη των Η/Υ. Η οργάνωση και δομή της ψηφιακής πληροφορίας, προϊόν της συλλογής, αντιμετωπίζεται ακολουθώντας τις αρχές της επιστήμης των Η/Υ και στη συγκεκριμένη περίπτωση ειδικότερα, δανειζόμενη στοιχεία από τη θεωρία γραφημάτων και επεξεργασία εικόνας. Οπωσδήποτε η συνάφεια αυτή δεν σταματά στο επίπεδο της οργάνωσης και δομής των ψηφιακών δεδομένων, αλλά συναντιέται και στα επόμενα στάδια, δηλαδή, της επεξεργασίας, της απόδοσης κλπ. Ο λόγος της συσχέτισης αυτής είναι προφανής, δεδομένου ότι ο χάρτης είναι μία εικόνα και με αυτή την μορφή καταγράφεται στον ανθρώπινο εγκέφαλο.

5.1 Ταξινόμηση ψηφιακών δεδομένων

Η ταξινόμηση των ψηφιακών δεδομένων μιας εικόνας διευκολύνει την όποια μελλοντική επεξεργασία τους με τον Η/Υ. Τα ψηφιακά δεδομένα μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις ομάδες, (Pavlidis 1982). Η ταξινόμηση αυτή δεν έχει να κάνει με την οπτική αντίληψη της εικόνας, αλλά με τον τρόπο που γίνεται η αναπαράσταση και επεξεργασία των ψηφιακών δεδομένων. Οι ομάδες αυτές, είναι:

- (1) Έγχρωμες εικόνες ή εικόνες με πλήρη διαβάθμιση του γκρι,
- (2) Δυαδικές εικόνες,
- (3) Συνεχείς γραμμές και
- (4) Διακριτά σημεία ή πολύγωνα.

Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει ψηφιακά δεδομένα όπως η συνηθισμένη εικόνα της τηλεόρασης. Η εικόνα αναπαρίσταται με έναν ή περισσότερους πίνακες, των οποίων τα στοιχεία είναι ακέραιοι αριθμοί. Η δεύτερη ομάδα ψηφιακών δεδομένων αφορά πάλι έναν πίνακα, τα στοιχεία του οποίου, τη φορά αυτή, είναι ένας δυαδικός αριθμός, δηλαδή έχουν τις ακέραιες τιμές 0 ή 1. Τα ψηφιακά δεδομένα της τρίτης ομάδας αποτελούν συνεχείς σειρές σημείων που αναπαρίστανται από τις συντεταγμένες τους. Τέλος, η τέταρτη ομάδα αποτελείται από σύνολα διακριτών σημείων. Τα σημεία αυτά καταγράφονται σαν σημειοσειρές συντεταγμένων, που ενώνονται μεταξύ τους είτε με ευθύγραμμα τμήματα, είτε με άλλου τύπου μαθηματικές γραμμές, είτε δεν ενώνονται καθόλου.

Αν θεωρηθεί ότι ένα ΨΜΥ αποτελείται από τις τιμές των υψομέτρων σε κορυφές ενός κανονικού τετραγωνικού κανάβου εκφρασμένες με ακέραιους αριθμούς, τότε τα ψηφιακά αυτά δεδομένα θα ανήκουν στην πρώτη ομάδα. Παράδειγμα ψηφιακών δεδομένων της δεύτερης ομάδας είναι η ψηφιοποίηση των υψομετρικών καμπύλων του χάρτη με σαρωτή. Διατηρώντας το ίδιο παράδειγμα της ψηφιοποίησης των υψομετρικών καμπύλων, τα ψηφιακά δεδομένα που τις αναπαριστούν θα μεταπέσουν στη μορφή της τρίτης ομάδας από την δεύτερη, αν εφαρμοστεί σ' αυτά η διαδικασία της μετατροπής πινακοποιημένων δεδομένων σε διανυσματικά. Η μετατροπή αυτή θα αναλυθεί διεξοδικά σε επόμενες ενότητες. Τέλος, εάν η ψηφιοποίηση των υψομετρικών καμπύλων του χάρτη έχει γίνει με ψηφιοποιητή, τότε τα ψηφιακά αυτά δεδομένα θα ανήκουν στην τέταρτη ομάδα.

5.2 Δομή ψηφιακών δεδομένων

Η ταξινόμηση των ψηφιακών δεδομένων, που προηγήθηκε, καλύπτει δύο βασικές δομές για τα δεδομένα αυτά.

Η πρώτη αφορά την δόμηση των δεδομένων με τη μορφή των στοιχείων ενός πίνακα, δηλαδή τις ομάδες (1) και (2). Η δομή αυτή ονομάζεται πινακοποιημένη, (Pavlidis 1982). Σύμφωνα με την πινακοποιημένη δομή των ψηφιακών δεδομένων, η θέση του φαινομένου καθορίζεται από τη στήλη (τετμημένη X) και τη γραμμή (τεταγμένη Y) και η τιμή του φαινομένου από την τιμή του αντίστοιχου στοιχείου του πίνακα.

Η δεύτερη, αφορά τη δόμηση των δεδομένων με σημειοσειρές συντεταγμένων, δηλαδή τις ομάδες (3) και (4). Η δομή αυτή ονομάζεται διανυσματική (Pavlidis 1982). Τα ψηφιακά δεδομένα των σημειοσειρών συντεταγμένων ονομάζονται διανυσματικά, δεδομένου ότι αν θεωρηθούν δύο διαδοχικά σημεία της σημειοσειράς, το πρώτο αφορά στην αρχή ενός διανύσματος και το δεύτερο στο πέρας του, έτσι, μέσω της σύνθεσης διαδοχικών διανυσμάτων, μπορεί να δομηθεί η ψηφιοποιημένη γραμμή.

Πίνακας 5.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα πινακοποιημένων μεθόδων διαχείρισης δεδομένων, (Burrrough 1986).

Πλεονεκτήματα:

Απλή δομή δεδομένων
 Εύκολη η επίθεση και ο συνδυασμός των απεικονιζόμενων δεδομένων
 Εύκολη η γεωγραφική ανάλυση
 Εύκολη η προσομοίωση
 Αναπτυσσόμενη και χαμηλού κόστους τεχνολογία

Μειονεκτήματα:

Μεγάλου όγκου γραφικά δεδομένα
 Η αύξηση του διαστήματος δειγματοληψίας για την εξοικονόμηση μνήμης συνεπάγεται την απώλεια σημαντικής πληροφορίας
 Μέτριο το αποτέλεσμα της οπτικοποίησης
 Δύσκολη η σύνδεση σε δίκτυο
 Χρονοβόρα η μετατροπή του συστήματος απεικόνισης

Πίνακας 5.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διανυσματικών μεθόδων διαχείρισης δεδομένων, (Burrrough 1986).

Πλεονεκτήματα:

Ποιοτική οπτικοποίηση
 Συμπαγής δομή δεδομένων
 Πλήρης περιγραφή της τοπολογίας με σύνδεση σε δίκτυο
 Γραφικά μεγάλης ακρίβειας
 Δυνατότητα ανάκτησης, ενημέρωσης και γενίκευσης της εικόνας και των χωρικών φαινομένων

Μειονεκτήματα:

Πολύπλοκη δομή δεδομένων
 Δύσκολος ο συνδυασμός χαρτών με διαφορετικά πολύγωνα ή η επίθεση πολυγώνων και πινακοποιημένων χαρτών
 Δύσκολη η προσομοίωση
 Μεγάλου κόστους η απόδοση σε οθόνη και αυτόματο σχεδιαστή
 Υψηλού κόστους τεχνολογία
 Αδύνατη η γεωγραφική ανάλυση και το φιλτράρισμα με τα πολύγωνα.

Αν θεωρηθεί οποιαδήποτε εικόνα καταγραμμένη και με τις δύο βασικές δομές που αναφέρθηκαν, οι πρώτες παρατηρήσεις που προκύπτουν για την πινακοποιημένη μορφή είναι:

- (1) απαιτείται πολύ περισσότερη μνήμη από τη διανυσματική μορφή,
- (2) είναι περισσότερο κατάλληλη για τη διαχείρισή της από H/Y, ενώ η διαχείριση της διανυσματικής μορφής προσφέρεται περισσότερο για τον άνθρωπο.

Η δομή των ψηφιακών δεδομένων καθορίζει και την φιλοσοφία με την οποία γίνεται η επεξεργασία τους, ώστε να έχουν επικρατήσει δύο μέθοδοι διαχείρισης και επεξεργασίας: η πινακοποιημένη και η διανυσματική. Στον Burrough (1986) συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο αυτών μεθόδων στην διαχείριση των ψηφιακών δεδομένων (πίνακες 5.1 και 5.2).

5.3 Αποθήκευση ψηφιακών δεδομένων

Η αποθήκευση μιας εικόνας απαιτεί αρκετά μεγάλη μνήμη γι' αυτό και ακολουθείται κάποια διαδικασία συμπίεσης των ψηφιακών δεδομένων. Η εξοικονόμηση όμως της μνήμης συνεπάγεται επιπλέον υπολογισμούς και κατά την διαδικασία της αποθήκευσης και κατά της ανάκτησης. Στο σημείο αυτό θίγονται απλά ορισμένοι τρόποι συμπίεσης των ψηφιακών δεδομένων, η ανάλυσή τους θα ακολουθήσει στην ενότητα που αφορά στην επεξεργασία. Έτσι, έχει χρησιμοποιηθεί η τυποποιημένη μορφή καταγραφής ψηφιακών δεδομένων με αρχεία τύπου TIFF -Tagged Image File Format- (Hewlett Packard 1987a), τα οποία ανήκουν στην δεύτερη ομάδα. Ο πλέον συνηθισμένος τρόπος αποθήκευσης των ψηφιακών δεδομένων της τρίτης ομάδας είναι σύμφωνα με την μορφή του κώδικα τύπου αλυσίδας -chain code- (Freeman 1961). Για τα ψηφιακά δεδομένα της τέταρτης ομάδας η συμπίεσή τους είναι απαραίτητη μόνο αν η ψηφιοποίησή τους γίνεται σε συνεχή λειτουργία (stream mode). Στο Παράρτημα, περιγράφεται η δομή των αρχείων TIFF, επειδή παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής διαμορφώθηκε μια διαδικασία συμπίεσης ψηφιακών δεδομένων της τέταρτης ομάδας, η οποία διατηρεί τον χαρακτήρα των ψηφιοποιούμενων γραμμών, στηριγμένη στην κλασματική γεωμετρία (ενότητα 2.3). Η διαδικασία αυτή της συμπίεσης μπορεί να εφαρμοστεί και για τα ψηφιακά δεδομένα της τρίτης ομάδας, μετατρέποντάς τα, ταυτόχρονα, ώστε να ανήκουν στην τέταρτη ομάδα.

Κεφάλαιο 6

6. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΙΝΑΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΔΟΜΗΣ

Η επεξεργασία των ψηφιακών δεδομένων, τα οποία προέρχονται από την ψηφιοποίηση με σαρωτή των υψομετρικών καμπύλων υπαρχόντων αναλογικών χαρτών, έχει βασικά τον χαρακτήρα της μετατροπής της δομής των δεδομένων από πινακοποιημένη σε διανυσματική. Η μετατροπή αυτή είναι απαραίτητη για την ένταξη του τμήματος των δεδομένων αυτών στην διαδικασία της παρεμβολής και κατά συνέπεια της δημιουργίας του ΨΜΕ.

Με την επεξεργασία δηλαδή που αναπτύχθηκε, για το τμήμα αυτό της εργασίας, ουσιαστικά αντιμετωπίζεται το γνωστό πρόβλημα της μετατροπής πινακοποιημένης δομής ψηφιακών δεδομένων σε διανυσματική (raster to vector conversion). Το πρόβλημα αυτό είναι προσανατολισμένο στο αντικείμενο της επιστήμης των Η/Υ, ειδικότερα, είναι ενταγμένο στον τομέα που διαπραγματεύεται την αναγνώριση μορφών (pattern recognition). Η συνάφεια της χαρτογραφίας με την επιστήμη των Η/Υ εμπλουτίζει τη συγκεκριμένη μετατροπή αμφίπλευρα. Όσο αφορά στην σημασία της για την Χαρτογραφία, είναι γνωστό ότι από τα προβλήματα της αυτόματης ψηφιοποίησης ένα μικρό μέρος αφορά το σχεδιασμό των σαρωτών και το μεγαλύτερο μέρος την μετατροπή της πινακοποιημένης δομής των ψηφιακών δεδομένων σε διανυσματική (Boyle 1980). Το σύστημα που αναπτύχθηκε είναι, κυρίως, προσαρμοσμένο στις χαρτογραφικές απαιτήσεις της μετατροπής.

Η διαδικασία της μετατροπής των ψηφιακών δεδομένων από πινακοποιημένη σε διανυσματική δομή (Boyle and Peuquet 1984), περιλαμβάνει τρεις βασικές φάσεις επεξεργασίας: την εκλέπτυνση της ψηφιακής εικόνας, τον εντοπισμό των χαρακτηριστικών από τοπολογική άποψη στοιχείων της εικόνας και την καθ' εαυτό μετατροπή σε διανύσματα. Βέβαια οι τρεις αυτές φάσεις επεξεργασίας δεν ολοκληρώνουν τον ζητούμενο στόχο της προετοιμασίας των ψηφιακών

δεδομένων για παρεμβολή, αλλά χρειάζονται ακόμη οι φάσεις: της διόρθωσης της εικόνας (editing), της ένταξης στα αρχεία της εικόνας των τιμών των υψομέτρων (ή των κωδικών των γραμμών), καθώς και της γεωγραφικής προσαρμογής των συντεταγμένων της εικόνας.

Για κάθε μία από τις φάσεις αυτές είτε χρησιμοποιήθηκαν έτοιμοι αλγόριθμοι, είτε σχεδιάστηκαν κατάλληλοι αλγόριθμοι, που τις υλοποιούν. Θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι οι αλγόριθμοι που σχεδιάστηκαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής, έχουν προέλθει ύστερα από διερεύνηση της σχετικής βιβλιογραφίας και χαρακτηρίζονται από τα παρακάτω σημεία:

- είναι όσο το δυνατόν απλοί, για να λειτουργήσουν σε υπολογιστικό περιβάλλον μικροϋπολογιστή (π.χ. δεν προϋποθέτουν ύπαρξη παράλληλων επεξεργαστών - array processors).
- η μετατροπή τους σε κώδικα δεν έγινε εξαντλώντας τις δυνατότητες προγραμματισμού και ανάλυσης, επομένως, μπορούν να βελτιωθούν οι χρονικές τους επιδόσεις.
- επιλέχθηκαν εκείνες οι λύσεις που διευκολύνουν την ψηφιακή διαχείριση μη τεμνόμενων γραμμών (υψομετρικές καμπύλες), χωρίς όμως να χάνουν την δυνατότητα ευρύτερων εφαρμογών.

6.1 Βασικές αρχές επεξεργασίας δεδομένων πινακοποιημένης δομής

Η βασικότερη αρχή της επεξεργασίας των ψηφιακών δεδομένων πινακοποιημένης δομής στηρίζεται στον συσχετισμό της τιμής ενός στοιχείου της ψηφιακής εικόνας με τις τιμές των γειτονικών του στοιχείων. Η συσχέτιση αυτή είναι δυνατή ύστερα από τον ορισμό της έννοιας του γειτονικού στοιχείου και της συνεκτικότητας.

8	7	6
1		5
2	3	4

Σχήμα 6.1 Τα οκτώ γειτονικά στοιχεία ενός στοιχείου εικόνας.

Ο πιο συνηθισμένος ορισμός των γειτονικών ενός στοιχείου (Pavlidis 1982), βασίζεται στην δημιουργία ενός παραθύρου διαστάσεων 3 x 3, με κέντρο το στοιχείο αναφοράς (σχήμα 6.1). Με τον τρόπο αυτό για κάθε στοιχείο της

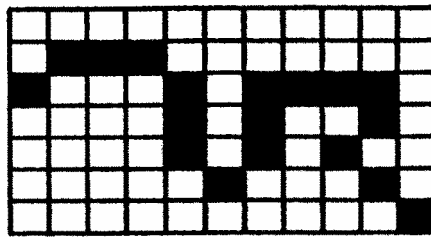
ψηφιακής εικόνας υπάρχουν οκτώ (1, 2, ..., 8) γειτονικά. Σύμφωνα με την κωδικοποιημένη αυτή αρίθμηση τα περιττά γειτονικά στοιχεία (1, 3, 5, 7), που βρίσκονται κατά τις διευθύνσεις του συστήματος αναφοράς της εικόνας, ονομάζονται άμεσα γειτονικά (Pavlidis 1982), και αντίστοιχα, τα άρτια γειτονικά στοιχεία (2, 4, 6, 8), που βρίσκονται κατά τις διαγώνιες διευθύνσεις, ονομάζονται έμμεσα γειτονικά (Pavlidis 1982).

Κάθε γραμμή μιας ψηφιακής εικόνας ονομάζεται *συνεκτική* (Rosenfeld and Pfaltz 1966), εάν για κάθε δύο στοιχεία A και T, της γραμμής, υπάρχει μία σειρά από στοιχεία της, $A = \Sigma_0, \Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_{n-1}, \Sigma_n = T$, τέτοια ώστε το Σ_i να είναι είτε άμεσα είτε έμμεσα γειτονικό του Σ_{i-1} (για $1 \leq i \leq n$).

6.2 Συμπύεση γραμμικών δεδομένων ψηφιακής εικόνας

Ο πιο παραδοσιακός τρόπος συμπύεσης των ψηφιακών γραμμικών δεδομένων μιας εικόνας, είναι η μέθοδος της κωδικοποιημένης αλυσίδας -chain code- (Freeman 1961), που βασίζεται στην έννοια της γειτονιάς ενός στοιχείου της εικόνας όπως ακριβώς ορίστηκε στα προηγούμενα.

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, κάθε γραμμή αποτελείται από το ζευγάρι των συντεταγμένων του αρχικού της σημείου και, στη συνέχεια, τους κωδικούς της διεύθυνσης του κάθε επόμενου, διαδοχικά, σημείου. Αν η γραμμή είναι κλειστή, είναι προφανές, ότι το αρχικό και το τελικό σημείο θα έχουν τις ίδιες συντεταγμένες. Για παράδειγμα η κωδικοποιημένη αλυσίδα (1, 5), 6, 5, 5, 4, 3, 3, 4, 6, 7, 7, 6, 5, 5, 3, 2, 4, 4 αντιστοιχεί στη γραμμή του σχήματος 6.2.



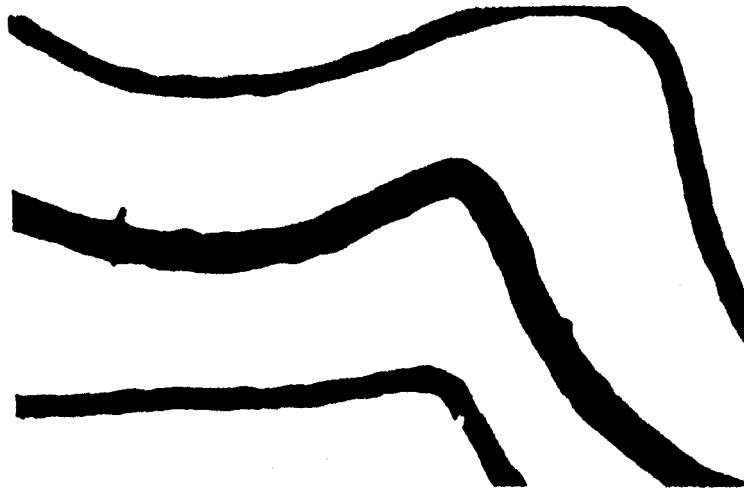
Σχήμα 6.2 Ψηφιακή εικόνα γραμμής.

Η μέθοδος αυτή πολύ εύκολα, μπορεί να περιλάβει και την τιμή του υψομέτρου στην κωδικοποίηση, ώστε να ανταποκρίνεται σε κατάλληλη συμπύεση ψηφιακών δεδομένων υψομετρικών καμπύλων. Παράλληλα, είναι αρκετά αποτελεσματική δεδομένου ότι η χωρητικότητα της μνήμης που απαιτείται για μια ψηφιακή εικόνα είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτήν των αρχείων TIFF.

Η μέθοδος της κωδικοποιημένης αλυσίδας είναι δύσχρηστη σε μετατροπές στροφής και αλλαγές κλίμακας, εμφανίζει ασυνέχειες στην κωδικοποίηση χωρίς να είναι ασυνεχής η γραμμή που αναπαριστά, ενώ η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σημείων δεν είναι σταθερή και η μέθοδος είναι ευαίσθητη στο θόρυβο. Ωστόσο η μέθοδος αυτή συγκεντρώνει τα πλεονεκτήματα της απλής δομής, της συμπαγούς μορφής, της ευκολίας στην κατανόηση, της καταλληλότητας για μαθηματικές πράξεις και τέλος, της χρησιμότητας για την στατιστική αναγνώριση σχημάτων (Wilf 1981).

6.3 Διαδικασία εκλέπτυνσης ψηφιακής εικόνας

Κατά την ψηφιοποίηση με σαρωτή ο συνδυασμός του μεγέθους των γραμμικών συμβόλων της πληροφορίας του χάρτη με τη διακριτική ανάλυση δημιουργεί ψηφιακές εικόνες, όπου οι αντίστοιχες γραμμές καταλαμβάνονται από ζώνες στοιχείων. Λόγω των αντικειμενικών ατελειών σχεδίασης και εκτύπωσης (σχήμα 6.3), οι ζώνες αυτές των στοιχείων δεν έχουν σταθερό εύρος. Η αντιπροσώπευση της γραμμής στην ψηφιακή εικόνα από τέτοιες ζώνες στοιχείων, και μάλιστα μεταβαλλόμενου εύρους, δημιουργεί προβλήματα για την έκφραση της γραμμής σε διανυσματική δομή.

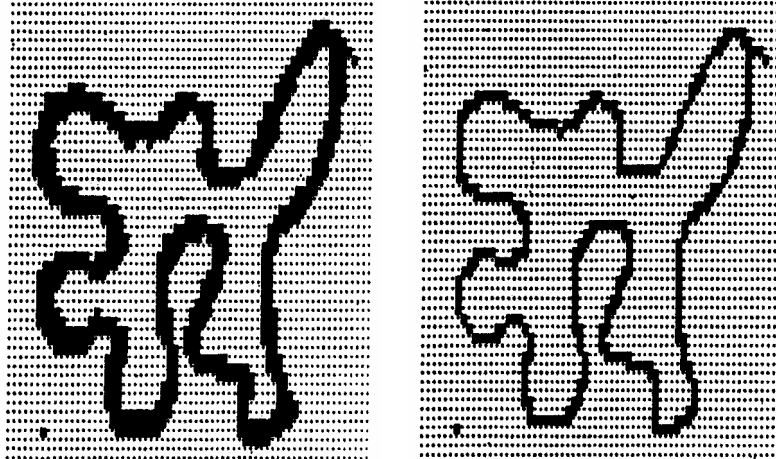


Σχήμα 6.3 Μεγεθυνημένη εικόνα γραμμών χαρτών, (Peuquet and Boyle 1984).

Η φάση της *εκλέπτυνσης* (thinning ή skeletonization) (Pavlidis 1982), της ψηφιακής εικόνας είναι μια πινακοποιημένη επεξεργασία με στόχο, οι ζώνες να

αποκτήσουν εύρος ίσο με την διακριτική ανάλυση του σαρωτή, χωρίς να αλλοιωθεί η συνεκτικότητα των αντίστοιχων γραμμών (σχήμα 6.4).

Το πρόβλημα είναι ανάλογο (Peuquet and Boyle 1984) με τη διαφορά ανάμεσα σε χαρτογραφική και γεωμετρική γραμμή.



Σχήμα 6.4 Αρχική (αριστερά) και εκλεπτυσμένη (δεξιά) ψηφιακή εικόνα.

Οι Peuquet and Boyle (1984) δίνουν έναν παρόμοιο ορισμό για την εκλέπτυνση:

" Η εκλέπτυνση είναι η διαδικασία της αναγωγής των γραμμών των χαρτών, όπως αυτές αναπαρίστανται από την έξοδο του σαρωτή, με μοναδιαίο εύρος ίσο με τη διακριτική του ανάλυση. "

Ο ορισμός όμως αυτός δεν αναφέρεται στην διατήρηση της ιδιότητας της συνεκτικότητας των γραμμών, ώστε να δεσμεύει τη διατήρηση των τοπολογικών ιδιοτήτων των γραμμών και να καθιστά την επεξεργασία περισσότερο αποτελεσματική. Η διατήρηση των τοπολογικών ιδιοτήτων για τη χαρτογραφία έχει μεγαλύτερη ακόμα σημασία, εάν οι ψηφιοποιούμενες πληροφορίες δεν περιορίζονται μόνον στις υψομετρικές καμπύλες. Για να αποδοθεί το σωστό βάρος στις τοπολογικές ιδιότητες, επισημαίνεται ότι, (Pavlidis 1982), η διατήρηση των τοπολογικών ιδιοτήτων αποτελεί αναγκαία συνθήκη, αλλά όχι ικανή για τη διατήρηση των σχημάτων.

Οι Rosenfeld and Pfaltz (1966) επισημαίνουν δύο λογικές στον σχεδιασμό αλγορίθμων επεξεργασίας ψηφιακών δεδομένων πινακοποιημένης δομής. Η πρώτη ονομάζεται παράλληλη επεξεργασία και μπορεί να εφαρμόζεται ταυτόχρονα σε όλα τα στοιχεία που αποτελούν την ψηφιακή εικόνα, χωρίς να

επιηρεάζεται από τις μεταβολές που υφίστανται τα στοιχεία κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Η δεύτερη ονομάζεται εν σειρά επεξεργασία και εφαρμόζεται στα στοιχεία της ψηφιακής εικόνας διαδοχικά σαρώνοντας τα, για παράδειγμα, κατά γραμμές από αριστερά προς τα δεξιά. Σημειώνεται ότι, εάν κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας έχουν υποστεί μεταβολές ορισμένα από τα στοιχεία της ψηφιακής εικόνας, οι μεταβολές αυτές λαμβάνονται υπόψη στην επεξεργασία των υπολοίπων στοιχείων. Η λογική της εν σειρά επεξεργασίας αφορά τους παραδοσιακούς υπολογιστές (εν σειρά υπολογιστές) και προσαρμόζεται στις δυνατότητές τους. Η λογική της παράλληλης επεξεργασίας, ενώ μπορεί να προσομοιωθεί με απλό τρόπο από τους παραδοσιακούς υπολογιστές, αφορά κυρίως σύγχρονους υπολογιστές –υπερ–υπολογιστές– οι οποίοι διαθέτουν παράλληλους επεξεργαστές (parallel ή array processors), με τη δυνατότητα κάθε επεξεργαστή να επεξεργάζεται ένα τμήμα των στοιχείων της ψηφιακής εικόνας, ταυτόχρονα με τους υπολοίπους.

Είναι διαπιστωμένο ότι (Chin *et al.* 1987), για την εκλέπτυνση οι εν σειρά αλγόριθμοι, γενικά, δημιουργούν καλύτερο αποτέλεσμα, ενώ οι παράλληλοι είναι πολύ πιο γρήγοροι.

Για την παράλληλη και εν σειρά επεξεργασία είναι διατυπωμένο το παρακάτω θεώρημα (Rosenfeld and Pfaltz 1966):

" Οποιαδήποτε μετατροπή ψηφιακής εικόνας που μπορεί να επιτευχθεί με παράλληλες επεξεργασίες, μπορεί να επιτευχθεί και με εν σειρά επεξεργασίες και αντίστροφα. "

Μία ακόμη παρατήρηση, αφορά την μορφή του κανονικού κανάβου πάνω στον οποίο είναι διατεταγμένα τα στοιχεία της ψηφιακής εικόνας. Έχουν επινοηθεί αλγόριθμοι, οι οποίοι εκτελούν την διαδικασία της εκλέπτυνσης σε ψηφιακές εικόνες με στοιχεία διατεταγμένα σε κανονικό ορθογωνικό, εξαγωνικό και τριγωνικό δίκτυο (Deutsch 1972). Από την εργασία αυτή προκύπτει το συμπέρασμα ότι το κανονικό εξαγωνικό δίκτυο προσφέρει τη βέλτιστη διάταξη για τα στοιχεία της ψηφιακής εικόνας. Δεδομένου όμως ότι οι περισσότεροι σαρωτές αποδίδουν την ψηφιακή εικόνα σε ορθογωνικό κανάβο, ο αλγόριθμος εκλέπτυνσης που περιγράφεται στα επόμενα αφορά αυτήν την συγκεκριμένη περίπτωση διάταξης.

6.3.1 Αλγόριθμος εκλέπτυνσης των Stefanelli and Rosenfeld

Για την διαδικασία της εκλέπτυνσης στη παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο παράλληλος αλγόριθμος των Stefanelli and Rosenfeld (1971). Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό, η εκλέπτυνση ολοκληρώνεται με διαδοχικές επαναλήψεις.

Η είσοδος του προγράμματος περιλαμβάνει την αρχική ψηφιακή εικόνα και η έξοδος την εκλεπτυσμένη. Θεωρείται ότι τα μαύρα στοιχεία της ψηφιακής εικόνας, δηλαδή οι γραμμές, έχουν την τιμή 1 και τα λευκά την τιμή 0.

Η κωδικοποίηση των γειτονικών ενός στοιχείου, που καθορίστηκε στην ενότητα 6.1, συμπληρώνεται για τη θέση του κεντρικού στοιχείου (σχήμα 6.1) με την τιμή μηδέν.

Ορίζεται η μεταβλητή $A(\Sigma_i)$, ίση με τον αριθμό εμφάνισης των "01" στη διατεταγμένη σειρά των τιμών των στοιχείων των γειτονικών του στοιχείου Σ_i . Ορίζεται, επίσης, η μεταβλητή $B(\Sigma_i)$, ίση με τον αριθμό των μη μηδενικών τιμών των γειτονικών στοιχείων του στοιχείου Σ_i . Τότε κάθε μη μηδενικό στοιχείο Σ_0 θα μετατρέπεται σε μηδέν εάν συντρέχουν και οι τέσσερις παρακάτω συνθήκες (σχήμα 6.1):

$$\begin{aligned}
 (1) & 2 \leq B(\Sigma_0) \leq 6 \\
 (2) & A(\Sigma_0) = 1 \\
 (3) & \Sigma_1 \Sigma_3 \Sigma_7 = 0 \text{ ή } A(\Sigma_1) \neq 1 \\
 (4) & \Sigma_1 \Sigma_3 \Sigma_5 = 0 \text{ ή } A(\Sigma_3) \neq 1
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

Οι συνθήκες ελέγχονται για κάθε μη μηδενικό στοιχείο της ψηφιακής εικόνας εισόδου και μεταφέρονται ύστερα από τις τυχόν αλλαγές, στην ψηφιακή εικόνα εξόδου, με σάρωση όλων των στοιχείων κατά γραμμές από αριστερά προς τα δεξιά.

Ο αλγόριθμος αυτός προτιμήθηκε γιατί είναι αρκετά απλός και γρήγορος, και κυρίως γιατί η εκλεπτυσμένη ψηφιακή εικόνα διατηρεί την ιδιότητα της συνεκτικότητας. Η επεξεργασία σε ομάδες στοιχείων (π.χ. στήλες) μπορεί να γίνεται ταυτόχρονα με χρήση παράλληλων επεξεργαστών (Hord 1987). Το σχήμα 6.4 απεικονίζει την αρχική ψηφιακή εικόνα (α) και την αντίστοιχη εκλεπτυσμένη (β), ύστερα από δύο επαναλήψεις.

6.4 Εξαγωγή διανυσμάτων ψηφιακής εικόνας

Η τρίτη φάση επεξεργασίας, της διαδικασίας μετατροπής των ψηφιακών δεδομένων από πινακοποιημένη σε διανυσματική δομή, είναι η εξαγωγή των διανυσμάτων.

Στα προηγούμενα αναφέρθηκε ότι έχει δοθεί βάρος στον σχεδιασμό των αλγορίθμων, ώστε να προσαρμόζονται στις χαρτογραφικές ανάγκες. Μία βασική χαρτογραφική ανάγκη είναι η γεωγραφική προσαρμογή της ψηφιακής εικόνας. Μελετήθηκε, λοιπόν, ένας αυτοματοποιημένος τρόπος αντιμετώπισης της γεωγραφικής προσαρμογής.

Στην περιοχή της ψηφιοποιούμενης έκτασης σχεδιάζονται σταυροί (+) σε θέσεις με γνωστές συντεταγμένες στο σύστημα αναφοράς του χάρτη. Τα κέντρα των σταυρών μπορούν να εντοπιστούν στην ψηφιακή εικόνα σαν κόμβοι τεμνόμενων γραμμών. Έτσι διαχωρίζονται από την υπόλοιπη πληροφορία της ψηφιακής εικόνας, που αφορά τις υψομετρικές καμπύλες, οι οποίες είναι μη τεμνόμενες γραμμές. Ο εντοπισμός των κόμβων συνεπάγεται και τον προσδιορισμό των συντεταγμένων τους στο σύστημα αναφοράς της ψηφιακής εικόνας.

Ο τρόπος διαχωρισμού των τεμνόμενων και μη τεμνόμενων γραμμών της ψηφιακής εικόνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατάλληλα διευρυμένος για την ψηφιοποίηση γενικότερων γραμμικών πληροφοριών από χάρτες (π.χ. δίκτυα υποδομής κ.ά.).

Η συστηματική και συνεχής εξαγωγή των διανυσμάτων από τα στοιχεία της ψηφιακής εικόνας υποβοηθείται, εάν έχουν προηγουμένως εντοπιστεί τα άκρα των διανυσμάτων.

Ο εντοπισμός των δύο χαρακτηριστικών στοιχείων της ψηφιακής εικόνας (κόμβοι και άκρα), που αναφέρθηκαν, επιβάλλει μια διαδικασία προσδιορισμού τοπολογικών ιδιοτήτων των στοιχείων της, πριν από την καθ' εαυτό εξαγωγή των διανυσμάτων.

Το δεύτερο στάδιο της επεξεργασίας, δηλαδή η ίδια η διαδικασία εξαγωγής των διανυσμάτων είναι μια δισδιάστατη διαδικασία ταξινόμησης, στηριγμένη στην ιδιότητα της συνεκτικότητας, που διατηρείται για κάθε διάνυσμα. Τα παραγόμενα διανύσματα δημιουργούνται με την μορφή της κωδικοποιημένης αλυσίδας (ενότητα 6.2).

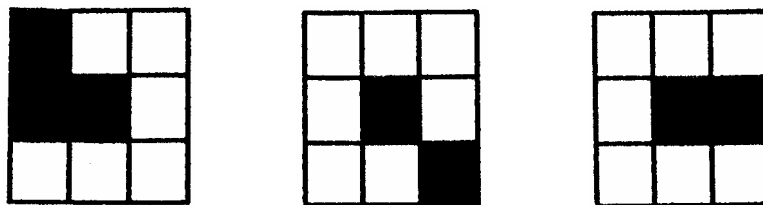
6.4.1 Αλγόριθμοι εξαγωγής διανυσμάτων ψηφιακής εικόνας

Η διαδικασία εξαγωγής των διανυσμάτων, ακολουθώντας την ανάλυση που προηγήθηκε στην ενότητα 6.4, περιλαμβάνει την ανάπτυξη δύο αλγορίθμων, έναν για κάθε στάδιο.

Ο πρώτος αλγόριθμος αναφέρεται στο κτίσιμο των τοπολογικών ιδιοτήτων των στοιχείων της ψηφιακής εικόνας. Ως αρχείο εισόδου δέχεται μια εκλεπτυσμένη ψηφιακή εικόνα. Οι τοπολογικές ιδιότητες αναφέρονται στον εντοπισμό δύο ειδών χαρακτηριστικών στοιχείων, των κόμβων και των άκρων των διανυσμάτων. Το αποτέλεσμα αποθηκεύεται σε βοηθητικό αρχείο, το οποίο περιέχει την τοπολογικά μετασχηματισμένη ψηφιακή εικόνα με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- (1) τα λευκά στοιχεία με την τιμή 0
- (2) τα κανονικά μαύρα στοιχεία με την τιμή 1
- (3) τα άκρα (μαύρα στοιχεία) με την τιμή 2
- (4) τους κόμβους (μαύρα στοιχεία) με την τιμή 3.

Η παράλληλη επεξεργασία, που απαιτείται για τον τοπολογικό μετασχηματισμό της ψηφιακής εικόνας, στηρίζεται στις μεταβλητές $A(\cdot)$ και $B(\cdot)$, όπως ορίστηκαν στην ενότητα 6.3.1.

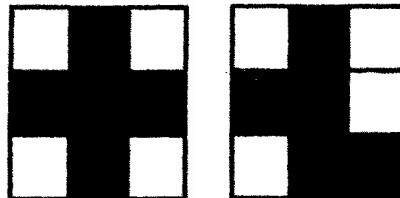


Σχήμα 6.5 Χαρακτηριστικές περιπτώσεις άκρων.

Άκρο (σχήμα 6.5) χαρακτηρίζεται κάθε μη μηδενικό στοιχείο, της αρχικής εκλεπτυσμένης ψηφιακής εικόνας, για το οποίο ισχύει:

$$B(\Sigma_0) = 1 \text{ ή } B(\Sigma_0) = 2 \text{ και } A(\Sigma_0) = 1, \quad (6.2)$$

τότε, το στοιχείο αυτό αποθηκεύεται στο βοηθητικό αρχείο με τιμή 2 ($\Sigma_0 = 2$).



Σχήμα 6.6 Χαρακτηριστικές περιπτώσεις κόμβων.

Κόμβος (σχήμα 6.6) χαρακτηρίζεται κάθε μη μηδενικό στοιχείο, της αρχικής εκλεπτυσμένης ψηφιακής εικόνας, για το οποίο ισχύει:

$$A(\Sigma_0) \geq 3, \quad (6.3)$$

Τότε, το στοιχείο αυτό αποθηκεύεται στο βοηθητικό αρχείο με τιμή 3 ($\Sigma_0 = 3$).

Τα λοιπά μαύρα (κανονικά) και λευκά στοιχεία αποθηκεύονται στο βοηθητικό αρχείο με τις τιμές που έχουν, αντίστοιχα, 1 και 0.

Στο σχήμα 6.7 απεικονίζονται η αρχική εκλεπτυσμένη εικόνα (αριστερά) και η τοπολογικά μετασχηματισμένη (δεξιά) σύμφωνα με τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε.

0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	1	0	0	0	2	1	3	1	1	0	0
0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	2
1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0
0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0

Σχήμα 6.7 Αρχική εκλεπτυσμένη ψηφιακή εικόνα (αριστερά) και τοπολογικά μετασχηματισμένη ψηφιακή εικόνα (δεξιά).

Ο δεύτερος αλγόριθμος έχει σαν αντικείμενο την εξαγωγή των διανυσμάτων. Ο αλγόριθμος είναι βασισμένος στην ιδιότητα της συνεκτικότητας των γραμμών, την οποία διατηρούν οι μέχρι τώρα επεξεργασίες.

Η δισδιάστατη ταξινόμηση για την εξαγωγή των διανυσμάτων ολοκληρώνεται σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση αφορά την εξάντληση των ανοικτών γραμμών, η δε δεύτερη των κλειστών.

Η δισδιάστατη ταξινόμηση χρησιμοποιεί σαν αρχείο εισόδου το βοηθητικό αρχείο και γίνεται με τον παρακάτω τρόπο. Αρχικά εντοπίζεται ένα άκρο (στοιχείο με τιμή 2 για ανοικτή γραμμή ή οποιοδήποτε στοιχείο για κλειστή). Αποθηκεύονται στο αρχείο εξόδου οι συντεταγμένες του στο σύστημα αναφοράς της ψηφιακής εικόνας. Το στοιχείο αυτό αποτελεί σημείο αναφοράς. Στην συνέχεια, ζητείται το μη μηδενικό γειτονικό στοιχείο του σημείου αναφοράς, με πρώτη ιεράρχηση να είναι άμεσα γειτονικό και δεύτερη έμμεσα. Εάν βρεθεί, τότε αποθηκεύεται στο αρχείο εξόδου ο κωδικός της διεύθυνσης (ενότητα 6.2, σχήμα 6.2), το στοιχείο αυτό μετατρέπεται σε σημείο αναφοράς και ενημερώνεται η θέση του στο βοηθητικό αρχείο με την τιμή 0. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το διάνυσμα, δηλαδή να μην υπάρχει γειτονικό στοιχείο για το σημείο αναφοράς.

Η δισδιάστατη ταξινόμηση επαναλαμβάνεται από την αρχή, για το επόμενο διάνυσμα και ολοκληρώνεται όταν μηδενιστούν όλα τα στοιχεία του βοηθητικού αρχείου.

Στο αρχείο εξόδου αποθηκεύονται οι συμπληρωματικές πληροφορίες που αφορούν την ψηφιακή εικόνα (αριθμός στηλών, γραμμών και διακριτική ανάλυση), ο αριθμός και οι συντεταγμένες των σημείων της γεωγραφικής προσαρμογής που εντοπίστηκαν.

6.5 Τελική επεξεργασία ψηφιακής εικόνας

Οι υπόλοιπες φάσεις επεξεργασίας αποτελούνται από την διόρθωση της ψηφιακής εικόνας, την ένταξη των υψομέτρων (ή των κωδικών) και, τέλος, την γεωγραφική προσαρμογή των συντεταγμένων της εικόνας.

Η πλήρως αυτοματοποιημένη ένταξη των υψομέτρων, απόλυτα επιθυμητή, είναι πολύ δύσκολο να γίνει στην πράξη. Η ύπαρξη των βοηθητικών υψομετρικών καμπύλων, των συμβόλων για τις ασυνέχειες του τοπογραφικού ανάγλυφου (π.χ. γκρεμοί), καθώς και άλλοι λόγοι (Leberl and Olson 1982) όπως ο θόρυβος και οι πιθανές συγχύσεις στην ψηφιακή εικόνα, επιβάλλουν την ανθρώπινη συμμετοχή στην διαδικασία αυτή.

Απαραίτητη προϋπόθεση της διαδικασίας αυτής είναι να έχει μετατραπεί η ψηφιακή εικόνα σε διανυσματική δομή και να είναι εκφρασμένη στη συμπιεσμένη μορφή της κωδικοποιημένης αλυσίδας (ενότητα 6.2). Βασικό χαρακτηριστικό της τελικής επεξεργασίας, όπως έχει διαμορφωθεί στην εργασία αυτή, είναι η δυνατότητα να εκτελείται σε αλληλοεπιδρούσα διαδικασία με το χρήστη (interactive).

Κεφάλαιο 7

7. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

Κατά την διαδικασία της ψηφιοποίησης χαρτών, που ανήκει στη φάση συλλογής πληροφοριών, εισάγονται στον Η/Υ συντεταγμένες σημείων. Οι συντεταγμένες ανεξάρτητα από το είδος της μονάδας ψηφιοποίησης (ψηφιοποιητής ή σαρωτής) αποδίδονται σε ένα καρτεσιανό σύστημα αναφοράς, και είναι συνήθως εκφρασμένες σε φυσικές μονάδες της επιφάνειας ψηφιοποίησης (δηλαδή σε mm ή inches). Η πληροφορία, όμως, του χάρτη είναι καταγραμμένη είτε με γεωγραφικές (φ, λ) , είτε με καρτεσιανές (X, Y) συντεταγμένες του συστήματος απεικόνισης. Η μετατροπή των γεωγραφικών συντεταγμένων σε καρτεσιανές του συγκεκριμένου συστήματος απεικόνισης και αντίστροφα αποτελεί αντικείμενο της μαθηματικής χαρτογραφίας. Για τη μετατροπή απαιτούνται μικρά υποπρογράμματα, όσα και τα συστήματα απεικόνισης σε χρήση, με τον αλγόριθμο των σχέσεων $X = f(\varphi, \lambda)$, $Y = g(\varphi, \lambda)$ και των αντιστρόφων τους. Στη συνέχεια πλέον, μπορεί να θεωρηθεί ότι η πληροφορία του χάρτη εκφράζεται πάντα σε καρτεσιανές συντεταγμένες του συστήματος απεικόνισης.

Οι συντεταγμένες των σημείων που ψηφιοποιούνται, εκφρασμένες αποκλειστικά στο σύστημα αναφοράς της μονάδας ψηφιοποίησης, δεν έχουν για προφανείς λόγους ένα γενικότερο χαρτογραφικό ενδιαφέρον. Απαιτείται, λοιπόν, μια διαδικασία που να μετατρέπει τις συντεταγμένες των σημείων από το σύστημα της μονάδας ψηφιοποίησης στο σύστημα απεικόνισης του χάρτη. Η διαδικασία ονομάζεται γεωγραφική προσαρμογή συντεταγμένων. Με την διαδικασία αυτή επιδιώκεται η επίλυση του γεωμετρικού προβλήματος της μετάθεσης και στροφής κατά την τυχαία τοποθέτηση του χάρτη πάνω στην επιφάνεια ψηφιοποίησης. Είναι γνωστό ότι ένας χάρτης, λόγω των ιδιοτήτων του υλικού, παραμορφώνεται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας και υγρασίας. Αλλά και ο τρόπος σύνταξης και αναπαραγωγής του έχει δημιουργήσει παραμορφώσεις σ' αυτόν. Το μοντέλο, λοιπόν, που θα επιλεγεί να επιλύσει το

γεωμετρικό πρόβλημα καλό θα είναι να αφομοιώνει και τις παραμορφώσεις που έχει υποστεί ο χάρτης. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι ο ομοπαράλληλος μετασχηματισμός.

7.1 Ομοπαράλληλος μετασχηματισμός

Ο ομοπαράλληλος μετασχηματισμός είναι ένα πλήρες γραμμικό μοντέλο δισδιάστατου πολυωνυμικού μετασχηματισμού, (Mikhail and Ackermann, 1976). Στην ενότητα 1.1.3 δίνεται ένας γενικότερος ορισμός του ομοπαράλληλου μετασχηματισμού. Ο μετασχηματισμός περιλαμβάνει έξι παραμέτρους που αποτελούν τους αγνώστους του προβλήματος:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b & c \\ e & f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}. \quad (7.1)$$

όπου (X, Y) οι συντεταγμένες του συστήματος απεικόνισης του χάρτη, (x, y) οι συντεταγμένες του συστήματος της μονάδας ψηφιοποίησης και a, b, \dots, f οι έξι παράμετροι του μετασχηματισμού.

Το γεωμετρικό πρόβλημα της γεωγραφικής προσαρμογής των συντεταγμένων μπορεί να περιγραφεί έτσι ώστε να περιλαμβάνει μετάθεση (X_0, Y_0) , διαφορετική κλίμακα κατά $X: m_X$ και $Y: m_Y$, διαφορετική στροφή του άξονα $X: \theta_X$ και $Y: \theta_Y$ και, με τον τρόπο αυτό να αφομοιώνει τις -συστηματικές- παραμορφώσεις όπως αυτές αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Το μοντέλο αποδίδεται από τις σχέσεις:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \theta_X & \sin \theta_Y \\ -\sin \theta_X & \cos \theta_Y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_X \\ m_Y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}. \quad (7.2)$$

Οι σχέσεις (7.1) και (7.2) συγκρινόμενες δίνουν τη μετάθεση, τις στροφές και τις κλίμακες συναρτήσει των έξι παραμέτρων του ομοπαράλληλου μετασχηματισμού:

$$\text{μετάθεση:} \quad \begin{aligned} X_0 &= a \\ Y_0 &= d \end{aligned} \quad (7.3a)$$

$$\text{στροφές:} \quad \begin{aligned} \theta_X &= \arctan (-e/b) \\ \theta_Y &= \arctan (c/f) \end{aligned} \quad (7.3b)$$

$$\begin{aligned} \text{κλίμακες:} \quad m_X &= (b^2 + c^2)^{1/2} \\ m_Y &= (e^2 + f^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (7.3c)$$

7.2 Αλγόριθμος γεωγραφικής προσαρμογής

Έχει λοιπόν προκύψει ότι, για την αντιμετώπιση της γεωγραφικής προσαρμογής, το πρόβλημα ανάγεται στον προσδιορισμό των έξι παραμέτρων του ομοπαράλληλου μετασχηματισμού, σχέση (7.1). Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται με τη βοήθεια σημείων με γνωστές συντεταγμένες στο σύστημα απεικόνισης του χάρτη (σημεία γεωγραφικής προσαρμογής συντεταγμένων). Τα σημεία αυτά, συνήθως, προτιμάται να είναι τομές του κανάβου ή του πλέγματος μεσημβρινών και παραλλήλων. Για κάθε σημείο προκύπτουν δύο εξισώσεις, επομένως ο προσδιορισμός των έξι αγνώστων παραμέτρων απαιτεί να χρησιμοποιηθούν τουλάχιστον 3 σημεία. Στην περίπτωση αυτή η σχέση (7.1) αποτελεί ένα γραμμικό σύστημα έξι εξισώσεων με έξι αγνώστους, και μπορεί εύκολα να επιλυθεί αν η ορίζουσα των συντελεστών των αγνώστων είναι διάφορη του μηδενός.

Επειδή η ψηφιοποιούμενη περιοχή συνήθως είναι εκτεταμένη, αλλά, κυρίως, ο σκοπός της γεωγραφικής προσαρμογής είναι και να αφομοιωθούν οι παραμορφώσεις στην έκταση του χάρτη, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν περισσότερα σημεία κατά την επίλυση. Για n σημεία ($n \geq 4$) σχηματίζονται $2n$ εξισώσεις, και ο προσδιορισμός των έξι παραμέτρων απαιτεί διαδικασία συνόρθωσης. Η συνόρθωση μπορεί να γίνει με τη μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων. Κατά τη συνόρθωση θεωρείται ότι οι συντεταγμένες του χάρτη (X, Y) είναι τιμές σταθερές, δηλαδή δεν έχουν μεταβλητότητα. Αυτό, άλλωστε, είναι γεγονός που ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, δεδομένου ότι στόχος είναι να μετατραπούν οι (x, y) στις συμβατικές (X, Y) . Αν επιπλέον θεωρηθεί ότι και οι συντεταγμένες της μονάδας ψηφιοποίησης (x, y) δεν έχουν μεταβλητότητα, ή ότι η μεταβλητότητά τους είναι ασήμαντη για τις απαιτήσεις ακρίβειας της ψηφιοποίησης, τότε οι παρατηρήσεις που εκφράζονται από την σχέση (7.1) μπορούν να συνορθωθούν με τη μέθοδο των εμμέσων παρατηρήσεων (Μπαλοδήμου 1983) και να προσδιοριστούν οι άγνωστοι παράμετροι. Λόγω της ιδιομορφίας, μάλιστα, των εξισώσεων παρατήρησης δεν χρειάζεται να αντιστραφεί ένας κανονικός πίνακας 6×6 αλλά ένας πίνακας 3×3 . Με τον τρόπο αυτό απλοποιούνται οι υπολογισμοί και μειώνεται ο χρόνος εκτέλεσης των πράξεων. Με τη θεώρηση της επίλυσης όπως αναπτύχθηκε μέχρι το σημείο αυτό αντιμετωπίζεται η γεωγραφική προσαρμογή συντεταγμένων για τρέχουσες εργασίες ψηφιοποίησης χαρτών (Νάκος 1979).

Οι συντεταγμένες, όμως, της μονάδας ψηφιοποίησης (x, y) αποτελούν μετρήσεις και έχουν, επομένως, μεταβλητότητα. Προτείνεται η μεταβλητότητα αυτή να θεωρηθεί σαν συνάρτηση της ακρίβειας της μονάδας ψηφιοποίησης (σ_d) αφενός και της διαχωριστικής ικανότητας του ματιού (σ_μ) του χειριστή (αποκλειστικά για τον ψηφιοποιητή) αφετέρου. Η ακρίβεια της μονάδας ψηφιοποίησης αναφέρεται στα εγχειρίδια των οργάνων και συνήθως κυμαίνεται μεταξύ $\pm 0,025 \div 0,1$ mm. Εκτιμάται ότι, για έναν εξασκημένο χειριστή και λόγω των συνθηκών ψηφιοποίησης (δυνατότητα χρήσης μεγεθυντικού φακού και ενισχυμένου φωτισμού), η διαχωριστική ικανότητα του ματιού είναι $\pm 0,1$ mm. Η ψηφιοποίηση επομένως ενός σημείου -μέτρηση (x, y)- θεωρείται ότι αποτελείται από δύο ανεξάρτητες διαδικασίες (για την περίπτωση του ψηφιοποιητή). Η πρώτη αφορά την αρχή της λειτουργίας του οργάνου, η δεύτερη τη σκόπευση από το χειριστή του συγκεκριμένου σημείου πάνω στο χάρτη. Η μεταβλητότητα επομένως των x και y είναι:

$$\sigma_0^2 = \sigma_d^2 + \sigma_\mu^2. \quad (7.4)$$

Αν η μονάδα ψηφιοποίησης είναι σαρωτής, δηλαδή η ψηφιοποίηση γίνεται αυτόματα χωρίς την επέμβαση χειριστή, η μεταβλητότητα των συντεταγμένων x και y θα εξαρτάται αποκλειστικά από το όργανο:

$$\sigma_0^2 = \sigma_d^2. \quad (7.5)$$

Έτσι, σε κάθε εξίσωση παρατήρησης υπεισέρχονται δύο μετρούμενες μεταβλητές, οι (x, y), με μεταβλητότητες $\sigma_x^2 = \sigma_0^2$ και $\sigma_y^2 = \sigma_0^2$, οπότε η γενικευμένη μέθοδος διευκολύνει τη συνόρθωση (Μπαλοδήμου 1983). Οι προσωρινές τιμές για τις έξι παραμέτρους λαμβάνονται ύστερα από επίλυση σύμφωνα με τη μέθοδο των έμμεσων παρατηρήσεων. Κατά τη συνόρθωση με τη γενικευμένη μέθοδο παρατηρείται ότι δεν χρειάζεται περισσότερη από μία επανάληψη, η διαφοροποίηση ουσιαστικά εμφανίζεται στον πίνακα μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας του αποτελέσματος. Από τον πίνακα αυτόν και την *a posteriori* τυπική απόκλιση προκύπτει η ακρίβεια και αξιοπιστία του συστήματος μοντέλου και μονάδας ψηφιοποίησης για τη γεωγραφική προσαρμογή των συντεταγμένων. Κατά τη συνόρθωση με τη γενικευμένη μέθοδο έχουμε $2n$ παρατηρήσεις - μετρήσεις (τα (x, y) στην σχέση (7.1)), ο αριθμός των ανεξαρτήτων καθοριστικών παραμέτρων του μοντέλου είναι $n + 6$, ο βαθμός ελευθερίας $n - 6$, ο αριθμός των αγνώστων παραμέτρων που ενδιαφέρουν 6 και ο αριθμός των συνθηκών n .

Μεταβλητές εισόδου για τον αλγόριθμο που διαμορφώθηκε αποτελούν ο αριθμός των σημείων γεωγραφικής προσαρμογής, η κλίμακα του χάρτη και τα δύο σύνολα των συντεταγμένων, της μονάδας ψηφιοποίησης και του χάρτη. Μεταβλητές εξόδου είναι οι έξι παράμετροι του μετασχηματισμού, η *a posteriori* τυπική απόκλιση (κυρίως για τον εντοπισμό χονδροειδών λαθών), και εάν έχει επιλεγεί, ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των αγνώστων παραμέτρων, καθώς και ο πίνακας μεταβλητότητας-συμμεταβλητότητας των συντεταγμένων κάθε σημείου που ψηφιοποιείται από τον χάρτη σύμφωνα με τον νόμο μετάδοσης των σφαλμάτων. Οι πράξεις γίνονται με διπλή ακρίβεια και πριν από την επίλυση οι συντεταγμένες του χάρτη υφίστανται προεπεξεργασία απαλοιφής του συστηματικού μέρους της μετάθεσης και της κλίμακας του χάρτη, με σκοπό τον ακριβέστερο προσδιορισμό των παραμέτρων και τη μείωση του σφάλματος στρογγύλευσης κατά την εκτέλεση των πράξεων στον H/Y.

Πίνακας 7.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα ψηφιοποίησης.

<i>Ψηφιοποιητής</i>	<i>Σαρωτής</i>
Ποιότητα χάρτη	Ποιότητα χάρτη
Εξοικείωση χειριστή	Όργανο
Κατανομή σημείων	Μοντέλο
Όργανο	
Μοντέλο	

Στον πίνακα 7.1 συνοψίζονται ιεραρχημένες οι αιτίες που καθορίζουν την ποιότητα και ακρίβεια της ψηφιοποίησης ενός χάρτη. Όπως φαίνεται κυριότερος παράγοντας είναι η ίδια η ποιότητα του χάρτη που πρόκειται να ψηφιοποιηθεί.

Σε περιπτώσεις που η ποιότητα του χάρτη είναι πολύ κακή (π.χ. λόγω παλαιότητας), το μοντέλο του ομοπαράλληλου μετασχηματισμού μπορεί να επαυξηθεί. Για τις περιπτώσεις αυτές ο αλγόριθμος τροποποιείται ως προς τον βαθμό του δισδιάστατου πολυωνυμικού μετασχηματισμού. Δηλαδή, χρησιμοποιείται ο πλήρης δισδιάστατος πολυωνυμικός μετασχηματισμός β' βαθμού με δώδεκα παραμέτρους όπως δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις (Mikhail and Ackermann 1976):

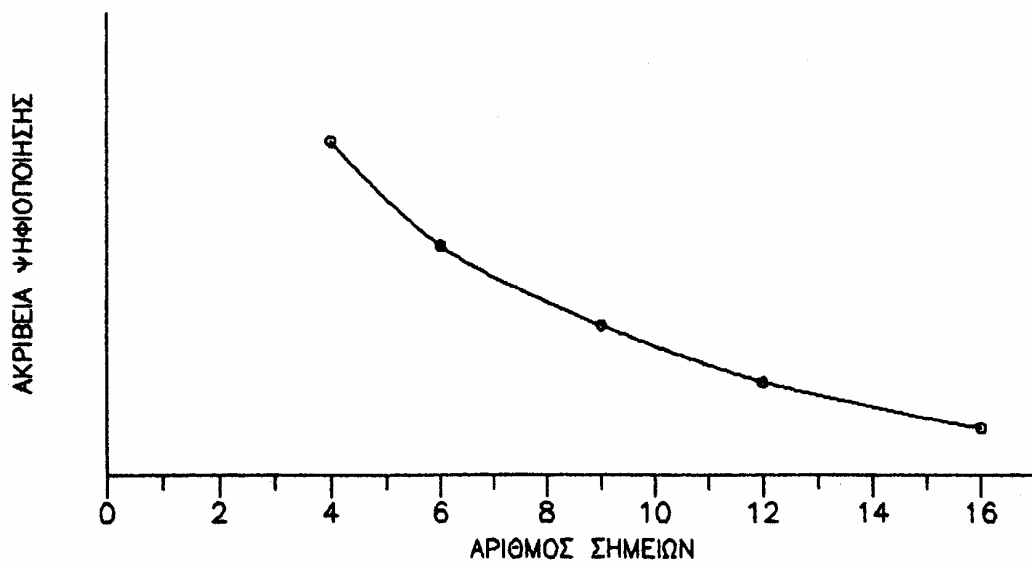
$$\begin{aligned} X &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \\ Y &= b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 \end{aligned} \quad (7.6)$$

Για τις ανάγκες της γεωγραφικής προσαρμογής συντεταγμένων, στην ψηφιοποίηση χαρτών, ο ομοπαράλληλος μετασχηματισμός κρίνεται αρκετά ικανοποιητικός (πίνακας 7.2). Για ίδια ή παρεμφερείς χαρτογραφικές διαδικασίες

έχουν δοκιμαστεί και άλλα μοντέλα μετασχηματισμών (Johannsen 1977; Bahr 1978; Sprinsky 1978; Novakovskiy *et al.* 1986; Παρασκάκης και Φωτίου 1988), που ενισχύουν τον παραπάνω ισχυρισμό.

Πίνακας 7.2 Ακρίβεια προσδιορισμού θέσης κατά την ψηφιοποίηση χαρτών ($\sigma = \pm \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}$). Για τον ψηφιοποιητή έχει ληφθεί $\sigma_0 = 0,127$ mm, για τον σαρωτή $\sigma_0 = 0,085$ mm.

Ψηφιοποιητής	4	6	9	12	16
Σαρωτής	Σημεία	Σημεία	Σημεία	Σημεία	Σημεία
1:5.000	± 1,1m	± 1,1m	± 1,0m	± 1,0m	± 1,0m
	± 0,7m	± 0,7m	± 0,7m	± 0,7m	± 0,7m
1:25.000	± 5,5m	± 5,4m	± 5,1m	± 5,0m	± 4,9m
	± 3,7m	± 3,5m	± 3,4m	± 3,3m	± 3,3m
1:50.000	± 11,0m	± 10,5m	± 10,1m	± 9,9m	± 9,7m
	± 7,3m	± 7,0m	± 6,8m	± 6,6m	± 6,5m
1:100.000	± 21,9m	± 21,0m	± 20,3m	± 19,8m	± 19,4m
	± 14,7m	± 14,0m	± 13,5m	± 13,3m	± 13,0m



Σχήμα 7.1 Ακρίβεια ψηφιοποίησης ως συνάρτηση του αριθμού σημείων γεωγραφικής προσαρμογής.

Στον πίνακα 7.2 δίνονται αποτελέσματα δοκιμαστικών εφαρμογών για την ακρίβεια της ψηφιοποίησης σε διάφορες κλίμακες, για διαφορετικές μονάδες ψηφιοποίησης και διαφορετικό αριθμό σημείων γεωγραφικής προσαρμογής. Όπως φαίνεται από τον πίνακα αλλά και το σχήμα 7.1 με 9 σημεία γεωγραφικής προσαρμογής επιτυγχάνεται η ικανοποιητική ακρίβεια.

Κεφάλαιο 8

8. ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ (ΨΜΤΑ)

Η αναπαράσταση του τοπογραφικού ανάγλυφου με τη μορφή ενός ΨΜΥ σε περιβάλλον Η/Υ επιτρέπει την έκφραση μιας σειράς μεγεθών χρήσιμων για την ανάλυση της μορφολογίας του. Τα διάφορα παράγωγα μεγέθη, μαζί με ορισμένα άλλα που μέχρι σήμερα δεν έχουν χρησιμοποιηθεί, μπορούν αφ' ενός να παραχθούν άμεσα από τα δεδομένα μαζί με τα υψόμετρα. Το σύνολο αυτών των μεγεθών μπορεί θεωρηθεί ότι αποτελεί μια γενίκευση της έννοιας ΨΜΥ, δηλαδή, ένα Ψηφιακό Μοντέλο Τοπογραφικού Ανάγλυφου - ΨΜΤΑ. Τα μεγέθη του προτεινόμενου ΨΜΤΑ είναι διατεταγμένα στις κορυφές ενός τετραγωνικού κανάβου και αποτελούνται από :

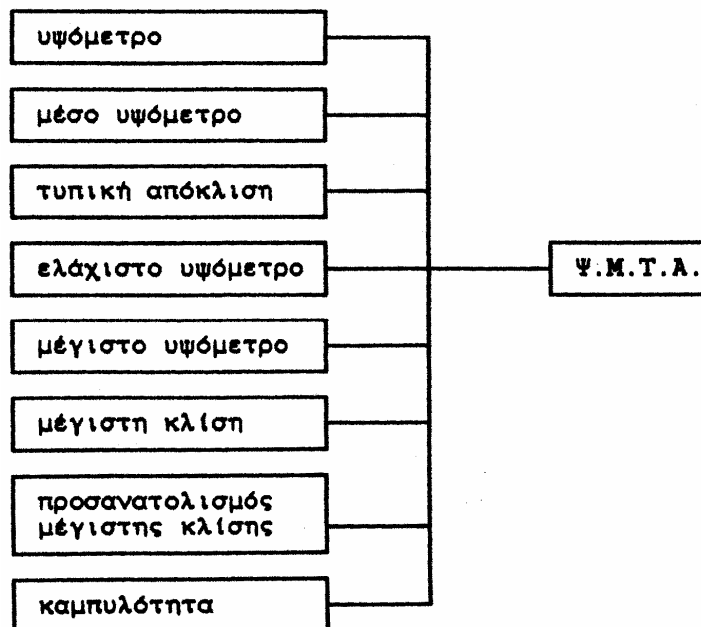
- (1) το υψόμετρο
- (2) τη μέση τιμή του υψομέτρου
- (3) το ελάχιστο υψόμετρο
- (4) το μέγιστο υψόμετρο
- (5) την τυπική απόκλιση του υψομέτρου
- (6) τη μέγιστη κλίση
- (7) τον προσανατολισμό της μέγιστης κλίσης και
- (8) την καμπυλότητα.

Τα μεγέθη (1), (6), (7) και (8) αναφέρονται στη συγκεκριμένη κορυφή του κανονικού κανάβου ενώ τα υπόλοιπα αναφέρονται σε μια τετραγωνική περιοχή γύρω από το σημείο, με κέντρο την κορυφή του κανονικού κανάβου και πλευρά το διάστημα δειγματοληψίας (ισαποχή του κανάβου).

Με το προτεινόμενο ΨΜΤΑ επιτυγχάνεται ο ακριβέστερος προσδιορισμός των κατάλληλων ποσοτικών μεγεθών τα οποία χρησιμεύουν στην ανάλυση της μορφολογίας του τοπογραφικού ανάγλυφου ή οποιουδήποτε άλλου τρισδιάστατου

συνεχούς χαρτογραφικού φαινομένου. Τα μεγέθη του ΨΜΤΑ μπορούν να οργανωθούν σύμφωνα με τον τρόπο που απεικονίζεται στο σχήμα 8.1.

Δεδομένα του παραγόμενου ΨΜΤΑ αποτελούν οι ψηφιοποιημένες υψομετρικές καμπύλες. Οι υψομετρικές καμπύλες εκφράζουν τη γραμμική πληροφορία του χάρτη για το τοπογραφικό ανάγλυφο. Παράλληλα, ψηφιοποιημένες σημειακές πληροφορίες του χάρτη μπορούν να αποτελούν δεδομένα που αφορούν το ανάγλυφο. Οι πληροφορίες αυτές είναι είτε τοπικά μέγιστα και ελάχιστα (π.χ. τριγωνομετρικά σημεία), είτε άλλα σημεία των οποίων το υψόμετρο αναγράφεται στον χάρτη. Τέλος, στα τελευταία δεδομένα (σημειακές πληροφορίες) θεωρούνται ότι ανήκουν σημεία χαρακτηριστικών γραμμών του ανάγλυφου, όπως οι μισγάγγειες.



Σχήμα 8.1 Οργάνωση των μεγεθών του προτεινόμενου ΨΜΤΑ.

Στην περίπτωση κατά την οποία η ψηφιοποίηση των υψομετρικών καμπύλων γίνεται με σαρωτή, τα ψηφιακά δεδομένα απαιτείται να μετατραπούν από πινακοποιημένη σε διανυσματική δομή. Στα δεδομένα αυτά πρέπει να προστεθεί η τιμή των υψομέτρων. Η αναγκαία αυτή επεξεργασία γίνεται με το λογισμικό που αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 9.

Κατά την παρεμβολή χρησιμοποιείται ένας νέος τρόπος δημιουργίας του παράθυρου (ενότητα 8.1) που περιέχει τα δεδομένα από τα οποία προσδιορίζονται οι τιμές των μεγεθών.

Οι κυριότερες εφαρμογές ενός ΨΜΤΑ, όπως διατυπώνονται από τον Burrough (1986), είναι οι ακόλουθες :

1. Δημιουργία ψηφιακών βάσεων δεδομένων με υψόμετρα.
2. Μελέτη και σχεδιασμός συγκοινωνιακών έργων (οδοποιία, σιδηροδρομική, αεροδιάδρομοι).
3. Προσομοίωση του τοπογραφικού ανάγλυφου με τρισδιάστατη απεικόνισή του.
4. Μελέτες ορατοτήτων.
5. Στατιστική ανάλυση και ταξινόμηση του τοπογραφικού ανάγλυφου.
6. Δημιουργία χαρτών, (ισοϋψείς, ισοκλινείς, προσανατολισμοί κλίσεων).
7. Υπόβαθρο για θεματικές απεικονίσεις.

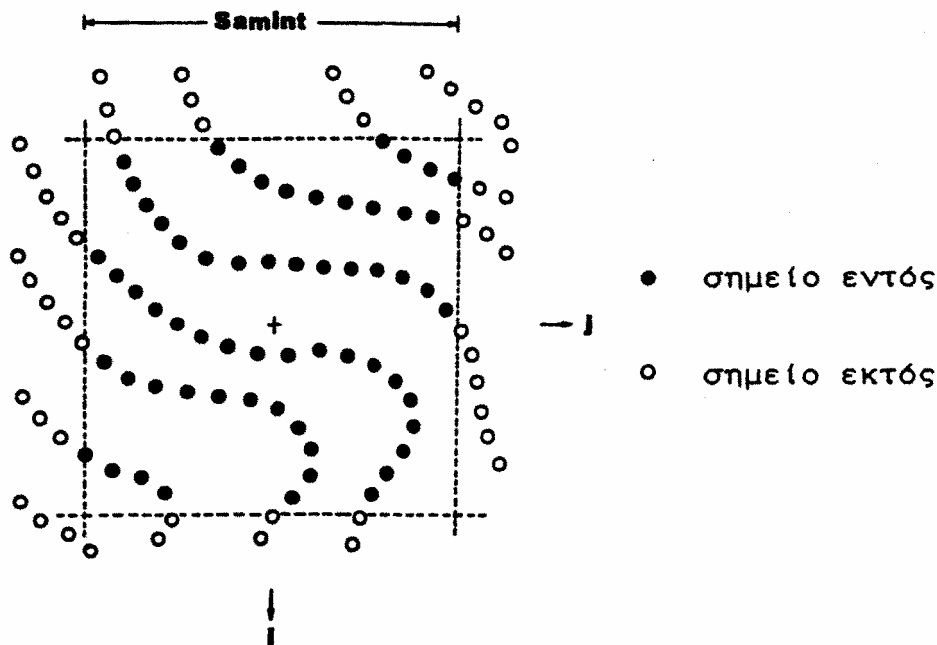
Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται η μεθοδολογία με την οποία δημιουργείται το προτεινόμενο ΨΜΤΑ, με δεδομένα που προέρχονται από το αποτέλεσμα της ψηφιοποίησης υφιστάμενων τοπογραφικών χαρτών.

8.1 Παράθυρο παρεμβολής

Οι ψηφιοποιημένες υψομετρικές καμπύλες του χάρτη ως δεδομένα έχουν δύο βασικές ιδιομορφίες. Η πρώτη είναι ο μεγάλος όγκος της πληροφορίας. Η δεύτερη είναι, η "ανισότροπη" διάταξη της πληροφορίας, δηλαδή υπάρχει μεγάλη πυκνότητα πληροφορίας κατά τις διευθύνσεις των υψομετρικών καμπύλων και μικρή, αναλογικά, πυκνότητα κατά τις κάθετες διευθύνσεις. Εάν ληφθεί υπόψη ότι, στην ανάπτυξη του προτεινόμενου συστήματος δίνεται βάρος να λειτουργεί σε περιβάλλον μικροϋπολογιστή (γεγονός το οποίο δεν συμβαίνει για τις μεθόδους που αναφέρθηκαν), η ευχέρεια και η ταχύτητα της πρόσβασης στον όγκο της πληροφορίας είναι καθοριστική.

Η χρονική επιβάρυνση που διαπιστώθηκε στην ενότητα 3.3 ανάγεται στο ότι, στην πλειοψηφία των μεθόδων για κάθε παρεμβαλλόμενο σημείο απαιτείται να δημιουργηθεί ένα παράθυρο που θα περιέχει τα δεδομένα των υψομετρικών καμπύλων. Με αυτά τα δεδομένα υπολογίζεται η τιμή του υψομέτρου αλλά και των άλλων μεγεθών. Το περιεχόμενο κάθε παραθύρου προσδιορίζεται σαρώνοντας ολόκληρο το αρχείο των δεδομένων. Η σάρωση είναι υποχρεωτική, εν γένει, για κάθε σημείο του ΨΜΤΑ, επειδή τα παράθυρα επικαλύπτονται. Δηλαδή, ορισμένα από τα σημεία των δεδομένων ανήκουν σε περισσότερα από ένα παράθυρα. Εάν ορισθούν οι διαστάσεις του παραθύρου ίσες με το διάστημα

δειγματοληψίας (την απόσταση μεταξύ των σημείων του ΨΜΤΑ), τότε κάθε σημείο των δεδομένων (ψηφιοποιημένες υψομετρικές καμπύλες) θα ανήκει αποκλειστικά σε ένα μόνο παράθυρο. Η κατάλληλη επιλογή του διαστήματος δειγματοληψίας θα επιτρέπει την συγκέντρωση σε κάθε παράθυρο τέτοιου αριθμού σημείων ώστε να κρίνεται ικανοποιητική η πυκνότητα της πληροφορίας των δεδομένων. Το γεγονός αυτό, της μονοσήμαντης σχέσης μεταξύ των σημείων των δεδομένων και των αντίστοιχων παραθύρων, διαμορφώνει πλεονεκτικές συνθήκες για την επεξεργασία. Δημιουργούνται προϋποθέσεις παρεμβολής για ολόκληρο το ΨΜΤΑ με μία μόνο σάρωση του αρχείου των δεδομένων.



Σχήμα 8.2 Παράθυρο παρεμβολής.

Κάθε σημείο του αρχείου των δεδομένων θα συμμετέχει στον προσδιορισμό ενός μόνο στοιχείου του παραγόμενου ΨΜΤΑ. Εάν το σημείο έχει οριζοντιογραφικές συντεταγμένες (X, Y) , το πάνω αριστερά όριο της περιοχής έχει συντεταγμένες (X_{UpLeft}, Y_{UpLeft}) και το διάστημα δειγματοληψίας είναι $SamInt$, τότε οι παρακάτω σχέσεις αποδίδουν την θέση (i, j) του σημείου, σχήμα 8.2, που αποτελεί κέντρο του παραθύρου:

$$i = \text{CINT} ((X - X_{UpLeft}) / SamInt + 1), \quad (8.1a)$$

$$j = \text{CINT} ((Y_{UpLeft} - Y) / SamInt + 1). \quad (8.1b)$$

Με την έκφραση CINT συμβολίζεται η διαδικασία στρογγύλευσης μιας μεταβλητής στην πλησιέστερη ακέραιη τιμή. Τα στοιχεία του πίνακα του ΨΜΤΑ (κορυφές παραθύρων) θεωρείται ότι σαρώνονται κατά γραμμές από πάνω προς τα κάτω και στη γραμμή από αριστερά προς τα δεξιά. Οι σχέσεις (8.1a και 8.1b) αποτελούν τον κορμό του αλγόριθμου δημιουργίας του παράθυρου παρεμβολής.

Εάν το διάστημα δειγματοληψίας ληφθεί αρκετά μικρό σε σχέση με την πυκνότητα των δεδομένων, ενδέχεται εφαρμόζοντας ορισμένες μεθόδους παρεμβολής (π.χ. προσδιορισμός επιφανειών α' , β' ,... βαθμού με τη μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων) να δημιουργηθούν προβλήματα λόγω της ιδιομορφίας της διάταξης των δεδομένων.

Στη συνέχεια ακολουθεί λεπτομερειακή ανάλυση των προτεινόμενων μεθόδων παρεμβολής.

8.2 Μέθοδοι παρεμβολής

Στο προτεινόμενο ΨΜΤΑ έχουν συμπεριληφθεί δύο μέθοδοι παρεμβολής, η μέθοδος της κινητής μέσης τιμής με βάρη και η μέθοδος της κινητής επιφάνειας α' και β' βαθμού.

8.2.1 Μέθοδος κινητής μέσης τιμής

Ο όρος "κινητή" οφείλεται στην μεταφορά της διαδικασίας προσδιορισμού της μέσης τιμής για όλα τα παρεμβαλλόμενα σημεία. Η παρεμβαλλόμενη τιμή μοιάζει με το υψόμετρο ενός οριζόντιου επιπέδου, το οποίο διέρχεται από το σημείο και προσαρμόζεται στα δεδομένα (Schut 1974).

Η παρεμβολή με κινητή μέση τιμή αποτελεί μία από τις παλαιότερες μεθόδους που εφαρμόστηκαν σε H/Y. Οι Watson and Philip (1985) αναφέρουν ότι από τους πρώτους που τη χρησιμοποίησαν είναι οι Krige (1964), οι Surkan *et al.* (1964), ο Weaver (1964), οι Carlson *et al.* (1966) και ο Shepard (1968). Οι δημοσιεύσεις αυτές αφορούν κυρίως προγράμματα σχεδίασης ισαριθμικών καμπύλων.

Στις πρώτες εφαρμογές η μέση τιμή προσδιορίζεται από το σύνολο των δεδομένων. Ο τρόπος αυτός απορρίφθηκε στη συνέχεια γιατί, αφενός ήταν χρονοβόρος, αφετέρου τα απομακρυσμένα δεδομένα από το σημείο παρεμβολής δεν συμμετείχαν ουσιαστικά στην επεξεργασία. Το σύνολο των δεδομένων αντικαταστάθηκε από ένα παράθυρο για κάθε παρεμβαλλόμενο σημείο, που περιέχει ένα υποσύνολο των δεδομένων. Η ιδέα για τη δημιουργία παράθυρου παρεμβολής οφείλεται στον Weaver (1964).

Η σχέση που εκφράζει την παρεμβαλλόμενη τιμή Z , σύμφωνα με τον τρόπο που ορίζει η μέθοδος είναι:

$$Z = \frac{\sum w_i Z_i}{\sum w_i}. \quad (8.2)$$

Η άθροιση γίνεται για όλα τα δεδομένα Z_i που ανήκουν στο παράθυρο παρεμβολής. Τα w_i εκφράζουν τις τιμές των συναρτήσεων βάρους.

Πίνακας 8.1 Ανηγμένες τιμές διαφόρων συναρτήσεων βάρους. Μέρος των στοιχείων του πίνακα προέρχεται από τον Schut (1976).

d	r	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8
0	0	-	-	-	-	-	-	1	1
1	0,02	1	1	1	1	1	1	-	-
4	0,05	0,04	0,16	0,03	0,16	0,16	0,4	0,95	0,97
7	0,1	0,2	0,04	2E-3	0,04	0,04	0,2	0,82	0,87
14	0,2	0,1	0,01	1E-4	0,01	0,01	0,1	0,45	0,57
21	0,3	0,07	4E-3	2E-5	4E-3	4E-3	0,06	0,17	0,28
28	0,4	0,05	3E-3	6E-6	2E-3	2E-3	0,04	0,04	0,11
35	0,5	0,04	2E-3	3E-6	1E-3	1E-3	0,03	7E-3	0,03
42	0,6	0,03	1E-3	1E-6	7E-4	6E-4	0,02	7E-4	6E-3
49	0,7	0,03	8E-4	7E-7	4E-4	3E-4	0,01	6E-5	1E-3
57	0,8	0,03	6E-4	4E-7	2E-4	1E-4	4E-3	3E-6	1E-4
64	0,9	0,02	5E-4	2E-7	9E-5	3E-5	1E-3	9E-8	1E-5
71	1	0,02	4E-4	2E-7	0	0	0	2E-9	8E-7

$w_1=1/r, w_2=1/r^2, w_3=1/r^4, w_4=(1-r^2)/r^2, w_5=(1-r^3)(1-r^2)/r^2, w_6=(1-r^3)(1-r^2)/r, w_7=EXP(-20r^2), w_8=EXP(-14r^2).$

Οι συναρτήσεις βάρους αποτελούν μονότονα φθίνουσες συναρτήσεις της απόστασης του σημείου παρεμβολής από τα δεδομένα. Ο ρυθμός πτώσης της συνάρτησης επηρεάζει τον βαθμό εξομάλυνσης που υφίσταται το παραγόμενο ΨΜΥ (Schut 1974). Όσο πιο ταχύς είναι ο ρυθμός πτώσης της συνάρτησης βάρους τόσο πιο κοντά στις τιμές των πλησιέστερων δεδομένων είναι η παρεμβαλλόμενη τιμή. Αντίθετα, όσο πιο βραδύς είναι ο ρυθμός πτώσης της συνάρτησης βάρους τόσο περισσότερο εξομασλυμένη είναι η παρεμβαλλόμενη τιμή. Δύο κυρίως παράγοντες επηρεάζουν την απαιτούμενη εξομάλυνση που πρέπει να υφίσταται το ΨΜΥ κατά την παρεμβολή. Ο πρώτος είναι τα ίδια τα χαρακτηριστικά του μεγέθους που παρεμβάλλεται και ο δεύτερος ο σκοπός για

τον οποίο δημιουργείται το ΨΜΥ. Στο πίνακα 8.1 αναγράφονται οι τιμές διαφόρων συναρτήσεων βάρους. Τα περισσότερα στοιχεία του πίνακα έχουν ληφθεί από τον Schut (1976), ενώ τα υπόλοιπα υπολογίστηκαν από τις σχέσεις που δίνονται. Το d συμβολίζει την απόσταση του σημείου παρεμβολής από τα δεδομένα, οι συναρτήσεις έχουν εκφραστεί ως προς τη μεταβλητή r που είναι ο λόγος της απόστασης προς τη μέγιστη απόσταση που επιτρέπει το παράθυρο παρεμβολής. Οι τιμές του πίνακα 8.1 αντιστοιχούν σε διάστημα δειγματοληψίας $SamInt = 100m$. Τέλος, για να είναι δυνατή η σύγκριση τους, επειδή οι έξι πρώτες δεν ορίζονται για $r = 0$, έχουν αναχθεί ως προς την τιμή που αντιστοιχεί σε $r = 0,02$. Από τις οκτώ συναρτήσεις βάρους επιλέχθηκαν για το σύστημα οι παρακάτω:

$$w = 1 / r^2, \quad (8.3a)$$

$$w = 1 / r, \quad (8.3b)$$

$$w = EXP(-ar^2), \quad a = \text{σταθερά}, \quad (8.3c)$$

$$\text{με: } r = 1,41d / SamInt. \quad (8.4)$$

Με την έκφραση $EXP(.)$ συμβολίζεται η εκθετική συνάρτηση: $f(x) = e^x$. Εξετάζοντας τις τιμές του πίνακα 8.1, με τη συνάρτηση βάρους w_2 , σχέση (8.3a), διαπιστώνεται ότι το παραγόμενο ΨΜΥ του ΨΜΤΑ πλησιάζει τις τιμές των δεδομένων, ενώ με τη συνάρτηση βάρους w_7 , σχέση (8.3c), πραγματοποιείται ικανοποιητική εξομάλυνση.

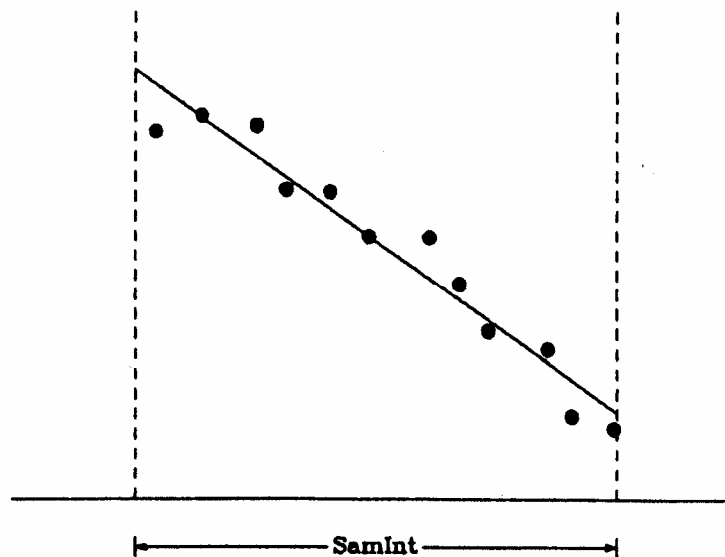
Η μέθοδος της κινητής μέσης τιμής σε συνδυασμό με το παράθυρο παρεμβολής, το οποίο ορίστηκε στην ενότητα 8.1, μπορεί να αποτελέσει έναν ταχύτατο στην επεξεργασία αλγόριθμο. Ως μέθοδος, όμως, παρουσιάζει δύο μειονεκτήματα. Το πρώτο αφορά την άμβλυνση των τοπικών μέγιστων και ελάχιστων. Το δεύτερο την παραμόρφωση που υφίσταται η προσδιοριζόμενη τιμή όταν τα δεδομένα του παράθυρου παρεμβολής βρίσκονται από την μία πλευρά του παρεμβαλλόμενου σημείου. Τα μειονεκτήματα οφείλονται στο ότι κατά την παρεμβολή η προσδιοριζόμενη τιμή βρίσκεται πάντοτε μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης τιμής των δεδομένων. Οι Watson and Philip (1985) τονίζουν πως, αν τα σημεία του παράθυρου παρεμβολής είναι περισσότερα από έξι, και είναι κατανομημένα γύρω από το παρεμβαλλόμενο σημείο, τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι πολύ ικανοποιητικά. Τα μειονεκτήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν με κατάλληλο συνδυασμό της πυκνότητας των δεδομένων και του διαστήματος δειγματοληψίας αφενός, και με εξομάλυνση των τιμών του παραγόμενου ΨΜΥ του ΨΜΤΑ εκ των υστέρων αφετέρου.

8.2.2 Μέθοδος κινητής επιφάνειας

Τα προβλήματα που εντοπίστηκαν στην μέθοδο της κινητής μέσης τιμής αντιμετωπίζονται καλύτερα εάν κατά τη διαδικασία της παρεμβολής αντικατασταθεί ο προσδιορισμός του οριζόντιου επιπέδου από ένα κεκλιμένο επίπεδο ή μια επιφάνεια β' βαθμού.

Η μέθοδος της κινητής επιφάνειας προσαρμόζει στα δεδομένα του παράθυρου παρεμβολής μια επιφάνεια α' ή β' βαθμού από την οποία προσδιορίζεται το υψόμετρο του σημείου παρεμβολής, (σχήματα 8.3 και 8.4). Η μέθοδος αυτή αποτελεί γενίκευση της μεθόδου της κινητής μέσης τιμής (Schut 1974).

Η επιφάνεια α' ή β' βαθμού προσδιορίζεται με δεδομένα τα σημεία που περιέχονται στο παράθυρο παρεμβολής σύμφωνα με τη μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων, (Burrough 1986).

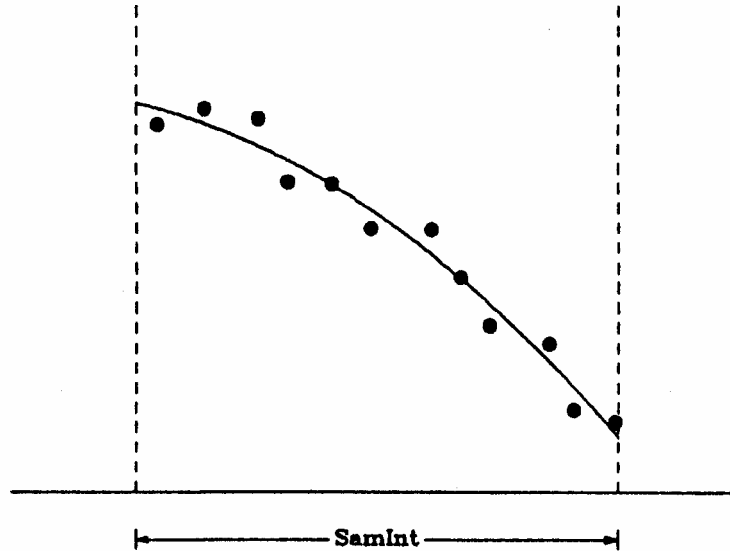


Σχήμα 8.3 Προσαρμογή των δεδομένων του παράθυρου παρεμβολής από συνάρτηση επιφάνειας α' βαθμού.

Εξισώσεις παρατήρησης για κάθε μία επιφάνεια αποτελούν η εξίσωση επιπέδου ή η εξίσωση επιφάνειας β' βαθμού:

$$Z = a_0 + a_1x + a_2y \quad (8.5b)$$

$$Z = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2$$



Σχήμα 8.4 Προσαρμογή των δεδομένων του παράθυρου παρεμβολής από συνάρτηση επιφάνειας β' βαθμού.

Κατά την επεξεργασία χρησιμοποιείται σε κάθε παράθυρο παρεμβολής ορθογώνιο σύστημα αναφοράς (συντεταγμένων x, y) με αφετηρία το παρεμβαλλόμενο σημείο. Τότε το προσδιοριζόμενο υψόμετρο ισούται με το συντελεστή a_0 ή b_0 της εξίσωσης επιφάνειας.

Οι συντεταγμένες (x, y) στο σύστημα αναφοράς του παράθυρου παρεμβολής στη θέση (i, j) ως προς τις συντεταγμένες (X, Y) των σημείων των δεδομένων με πάνω αριστερά όριο περιοχής το σημείο (X_{UpLeft}, Y_{UpLeft}) και διάστημα δειγματοληψίας $SamInt$, προσδιορίζονται από τις σχέσεις:

$$x = X - X_{UpLeft} - (i - 1)SamInt, \quad (8.6a)$$

$$y = Y - Y_{UpLeft} + (j - 1)SamInt. \quad (8.6b)$$

Η υιοθέτηση του παράθυρου παρεμβολής της ενότητας 8.1 επιτρέπει και στην περίπτωση αυτή την επεξεργασία με μεγάλη ταχύτητα.

8.3 Τα μεγέθη του ΨΜΤΑ

Με την βοήθεια των μεθόδων παρεμβολής που αναπτύχθηκαν είναι δυνατός ο προσδιορισμός όλων των μεγεθών του ΨΜΤΑ, με την απλή προσθήκη ορισμένων

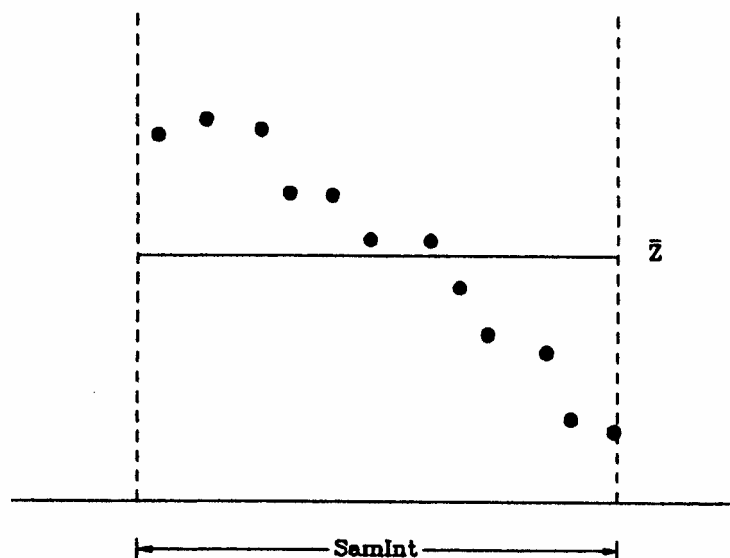
αλγορίθμων. Η περιγραφή του τρόπου με τον οποίο προσδιορίζεται κάθε μέγεθος αναλύεται στις παρακάτω ενότητες.

8.3.1 Μέση τιμή του υψομέτρου

Η μέση τιμή του υψομέτρου αναφέρεται στην έκταση του χώρου που καταλαμβάνει το παράθυρο παρεμβολής και προσδιορίζεται με την μέθοδο της κινητής μέσης τιμής. Με την μέση τιμή του υψομέτρου προσομοιώνεται η επιφάνεια του τοπογραφικού ανάγλυφου για το τμήμα που περιλαμβάνεται στο παράθυρο παρεμβολής με ένα ισοδύναμο οριζόντιο επίπεδο, (σχήμα 8.4). Για τον προσδιορισμό της μέσης τιμής του υψομέτρου δεν χρησιμοποιείται συνάρτηση βάρους, δηλαδή η σχέση (8.2) απλοποιείται ως εξής:

$$Z = \frac{\sum Z_i}{n}. \quad (8.7)$$

Όπου: Z_i : τα υψόμετρα των δεδομένων και n : ο αριθμός των δεδομένων που περιλαμβάνονται στο παράθυρο παρεμβολής.



Σχήμα 8.5 Μέση τιμή υψομέτρου.

Ο λόγος για τον οποίο μπορεί να αιτιολογήσει τη μη χρήση συνάρτησης βάρους οφείλεται στο γεγονός ότι τα δεδομένα έχουν ψηφιοποιηθεί με σταθερό βήμα ψηφιοποίησης. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας προκύπτει ότι το μήκος κάθε υψομετρικής καμπύλης ουσιαστικά αποτελεί με έμμεσο τρόπο το βάρος με το οποίο αυτή συμμετέχει στον υπολογισμό της μέσης τιμής του υψομέτρου.

Η μέση τιμή του υψομέτρου είναι απόλυτα κατάλληλο μέγεθος σε εφαρμογές γεωφυσικής (Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας 1984), υπολογισμούς όγκων κ.ά.

8.3.2 Τυπική απόκλιση υψομέτρου

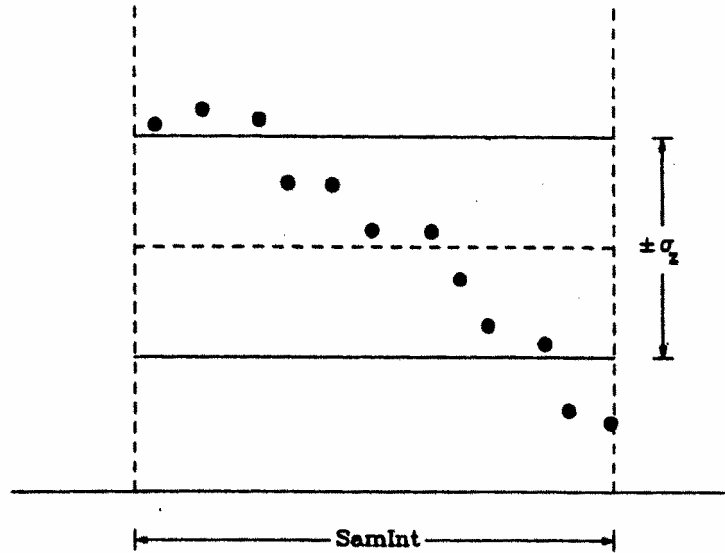
Η τυπική απόκλιση του υψομέτρου (σ), (σχήμα 8.6), αναφέρεται στην έκταση του χώρου που καταλαμβάνει το παράθυρο παρεμβολής και προσδιορίζεται με την προσθήκη μιας απλής διαδικασίας στην μέθοδο της κινητής μέσης τιμής. Η προσθήκη αναφέρεται στη σχέση με την οποία υπολογίζεται η εκτιμήτρια της τυπικής απόκλισης (Walpole and Myers 1978):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (Z_i - \bar{Z})^2}{n-1}} \quad (8.8)$$

Όπου: Z_i τα υψόμετρα των δεδομένων που περιέχονται στο παράθυρο παρεμβολής, Z : η μέση τιμή του υψομέτρου και n : ο αριθμός των δεδομένων. Για τη διευκόλυνση της διαδικασίας της εκτέλεσης των απαιτούμενων πράξεων χρησιμοποιείται η ισοδύναμη σχέση :

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \sum Z_i^2 - (\sum Z_i)^2}{n(n-1)}} \quad (8.8')$$

Η τυπική απόκλιση του υψομέτρου εκφράζει την διασπορά που εμφανίζουν τα υψόμετρα των σημείων των δεδομένων που περιλαμβάνονται στο παράθυρο παρεμβολής. Πιο συγκεκριμένα, εκφράζει την ζώνη των υψομέτρων μέσα στην οποία περιέχεται το 68% των σημείων των δεδομένων. Το μέγεθος αυτό αποτελεί χρήσιμο κριτήριο για την ταξινόμηση του τοπογραφικού ανάγλυφου.



Σχήμα 8.6 Τυπική απόκλιση υψομέτρου.

8.3.3 Ελάχιστο και μέγιστο υψόμετρο

Το ελάχιστο και μέγιστο υψόμετρο αναφέρονται στην έκταση του χώρου που καταλαμβάνει το παράθυρο παρεμβολής και προσδιορίζονται από την μέθοδο της κινητής μέσης τιμής, με την προσθήκη μιας απλής διαδικασίας.

Η διαδικασία αυτή εκφράζεται από τις παρακάτω σχέσεις :

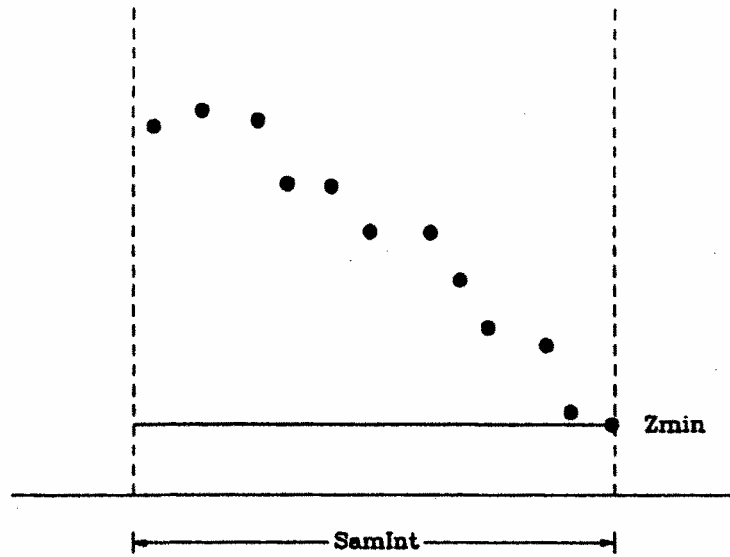
$$Z_{\min} = \text{Min} [Z_i], \quad (8.9)$$

$$Z_{\max} = \text{Max} [Z_i]. \quad (8.10)$$

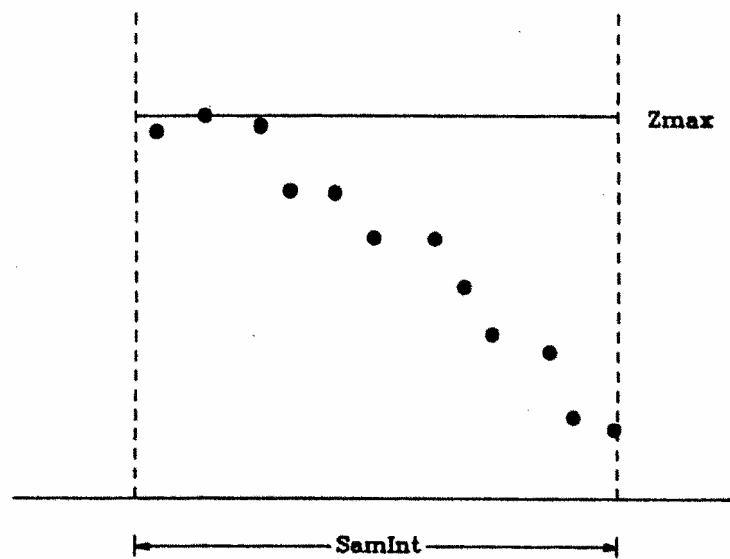
Όπου: τα Z_i εκφράζουν τα υψόμετρα των δεδομένων που βρίσκονται μέσα στο παράθυρο παρεμβολής, (σχήματα 8.7 και 8.8).

Τα δύο αυτά μεγέθη δεν έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν ώστε να αποτελούν μέρος ενός ΨΜΤΑ. Είναι κατάλληλα σε εφαρμογές σχετικές με προβλήματα ορατοτήτων, εντοπισμού επικίνδυνων περιοχών κατά την πλοήγηση σκαφών σε αβαθείς περιοχές αλλά και στον σχεδιασμό τεχνικών έργων.

Στα πλαίσια μιας εφαρμογής προσδιορισμού της περιοχής στην οποία μπορεί να τοποθετηθεί ο διάδρομος ενός αεροδρομίου ανάλογα με την κατηγορία και τις προδιαγραφές, η χρήση ενός ΨΜΥ σε συνδυασμό με το Ψηφιακό Μοντέλο Μεγίστων Υψομέτρων (ΨΜΜΥ) μπορεί να υποβοηθήσει με αποτελεσματικό τρόπο την αυτοματοποίηση της διαδικασίας (Τσολάκης 1989).



Σχήμα 8.7 Ελάχιστο υψόμετρο των δεδομένων που περιλαμβάνονται στο παράθυρο παρεμβολής.



Σχήμα 8.8 Μέγιστο υψόμετρο των δεδομένων που περιλαμβάνονται στο παράθυρο παρεμβολής.

8.3.4 Μέγιστη κλίση τοπογραφικού ανάγλυφου

Η κλίση αποτελεί την δεύτερη πλέον σημαντική πληροφορία για το τοπογραφικό ανάγλυφο μετά το υψόμετρο. Η κλίση του τοπογραφικού ανάγλυφου, εν γένει, σε μία θέση του μεταβάλλεται στις διάφορες διευθύνσεις μεταξύ μιας ελάχιστης και μέγιστης τιμής. Με τον όρο κλίση συνήθως αναφέρεται η τιμή της μέγιστης κλίσης που εμφανίζεται σε μία ορισμένη γωνία διεύθυνσης στην συγκεκριμένη θέση.

Η κλίση του εδάφους διαμορφώνεται σε μορφή ψηφιακού μοντέλου, με στοιχεία την τιμή της μέγιστης κλίσης και τον προσανατολισμό της, με την μέθοδο της κινητής επιφάνειας. Ο προσδιορισμός των δύο αυτών μεγεθών στηρίζεται στην προσομοίωση της επιφάνειας του τοπογραφικού ανάγλυφου με μια επιφάνεια a' ή b' βαθμού.

Η τιμή της μέγιστης κλίσης εκφρασμένη % δίνεται από την παρακάτω σχέση των συντελεστών της επιφάνειας a' ή b' βαθμού αντίστοιχα (σχέσεις 8.5a και 8.5b) (Papo and Geldman 1984):

$$MaxSlope = 100\sqrt{a_1^2 + a_2^2} \quad (8.11a)$$

$$MaxSlope = 100\sqrt{b_1^2 + b_2^2} \quad (8.11b)$$

Από τους ίδιους συντελεστές προσδιορίζεται και η γωνία διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης, a :

$$a = \arctan (a_1 / a_2), \text{ ή} \quad (8.12a)$$

$$a = \arctan (b_1 / b_2). \quad (8.12b)$$

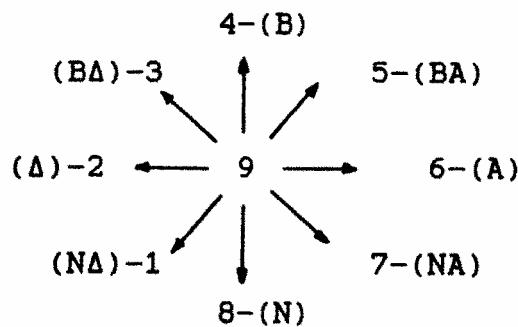
Ο προσανατολισμός της μέγιστης κλίσης του τοπογραφικού ανάγλυφου προσδιορίζεται από την γωνία διεύθυνσης εκφρασμένη σε βαθμούς από την σχέση:

$$AspSlope = CINT (a / 50). \quad (8.13)$$

Με την έκφραση CINT συμβολίζεται η διαδικασία στρογγύλευσης μιας μεταβλητής στην πλησιέστερη ακέραιη τιμή.

Στο σχήμα 8.9 απεικονίζεται η αντιστοιχία μεταξύ των προσανατολισμών αν ομαδοποιηθούν σε οκτώ κατηγορίες - τέσσερες κύριες (B, N, A, Δ) και τέσσερες δευτερεύουσες (BA, BΔ, NA, NΔ) - ως προς τις τιμές της μεταβλητής *AspSlope*. Όπως φαίνεται από το σχήμα 8.9 η τιμή της μεταβλητής *AspSlope* = 9 αντιστοιχεί

σε τιμή μηδενικής μέγιστης κλίσης. Η ένατη αυτή κατηγορία προστίθεται στις υπόλοιπες για την αντιπροσωπευτικότερη αναπαράσταση του φαινομένου, κάτι που δεν συμπεριλαμβάνεται στις υφιστάμενες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στην εφαρμογή των Divenyi and Markus (1985). Με ανάλογη διαδικασία η ομαδοποίηση των προσανατολισμών της μέγιστης κλίσης του τοπογραφικού ανάγλυφου μπορεί να περιλαμβάνει τις τέσσερες κύριες μόνο διευθύνσεις και την οριζόντια.



Σχήμα 8.9 Ομαδοποίηση των 9 κατηγοριών προσανατολισμού μέγιστων κλίσεων, με τις αντίστοιχες τιμές της μεταβλητής *AspSlope*.

Τα μεγέθη, της μέγιστης κλίσης του τοπογραφικού ανάγλυφου και του προσανατολισμού της, εκφρασμένα σε μορφή ψηφιακού μοντέλου, πέρα από την γενικότερη χρήση στην ανάλυση της μορφολογίας του, είναι απόλυτα αναγκαία για δύο σημαντικές χαρτογραφικές διεργασίες. Η πρώτη αφορά την εκτίμηση της αβεβαιότητας του προσδιορισμού του υψομέτρου τυχαίων σημείων ενός τοπογραφικού χάρτη, από παρεμβολή μεταξύ των υψομετρικών καμπύλων, σύμφωνα με την σχέση του Korpe (Imhof 1982). Η δεύτερη εφαρμογή αφορά την σχεδίαση της σκιάς του τοπογραφικού ανάγλυφου ως προς κατάλληλο φωτισμό για την αμεσότερη αντίληψή του στους τοπογραφικούς χάρτες (Horn 1982).

8.3.5 Καμπυλότητα τοπογραφικού ανάγλυφου

Η καμπυλότητα σε ένα σημείο μιας επιφάνειας δίνεται από τις σχέσεις των παραγώγων δεύτερης τάξης της επιφάνειας (Thomas 1952):

$$K_M = \frac{1}{R} + \frac{1}{N} = \frac{ED'' + GD - 2FD''}{EG - F^2} \quad (8.14)$$

$$K_T = \frac{1}{RN} = \frac{DD'' - D'^2}{EG - F^2} \quad (8.15)$$

Όπου K_M είναι η μέση και K_T η ολική καμπυλότητα της επιφάνειας. Τα R και N είναι οι κύριες ακτίνες καμπυλότητας και E, F, G και D, D', D'' είναι αντίστοιχα οι πρώτης και δεύτερης τάξης θεμελιώδεις ποσότητες της επιφάνειας.

Μια διαφορετική μέτρηση καμπυλότητας της επιφάνειας, ευκολότερη στον υπολογισμό, αποτελεί η λαπλασιανή της επιφάνειας (L) που δίνεται από τη σχέση:

$$L = \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} \quad (8.16)$$

Όπου: x, y οι συντεταγμένες των σημείων στο σύστημα του παράθυρου παρεμβολής και Z το υψόμετρο.

Η προσομοίωση της επιφάνειας του τοπογραφικού ανάγλυφου με επιφάνεια β' βαθμού κατά τη μέθοδο παρεμβολής της κινητής επιφάνειας επιτρέπει την δημιουργία, σε μορφή ψηφιακού μοντέλου, της καμπυλότητας της επιφάνειας του τοπογραφικού ανάγλυφου. Η καμπυλότητα του τοπογραφικού ανάγλυφου προσδιορίζεται από τους συντελεστές της σχέσης (8.5b) εκφράζοντας την λαπλασιανή της επιφάνειας β' βαθμού, L :

$$L = 2(b_3 + b_5). \quad (8.17)$$

Οι διαφορές μεταξύ λαπλασιανής (L) και μέσης καμπυλότητας (K_M) σε εφαρμογές ΨΜΥ για εδάφη με κλίσεις μέχρι 40% είναι μικρότερες από 4%, (Papo and Geldman 1984). Επομένως χρήση της σχέσης (8.17) για την εκτίμηση της καμπυλότητας του τοπογραφικού ανάγλυφου κρίνεται αρκετά ικανοποιητική ως προς την τελική ακρίβεια που επιτυγχάνεται.

Το μέγεθος της καμπυλότητας του τοπογραφικού ανάγλυφου εκφρασμένο σε μορφή ψηφιακού μοντέλου πέρα από τη γενικότερη πληροφορία που προσφέρει για τη μορφολογία του τοπογραφικού ανάγλυφου είναι χρήσιμο κυρίως ως κριτήριο για τη διάκρισή του σε κατηγορίες.

ΜΕΡΟΣ 3^ο
(ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ)

Κεφάλαιο 9

9. ΨΗΦΙΑΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται το σύστημα με το οποίο γίνεται η συλλογή και αναγκαία επεξεργασία των ψηφιακών δεδομένων που αφορούν την αναλογική μορφή της πληροφορίας του τοπογραφικού ανάγλυφου, όπως απεικονίζεται στους χάρτες, δηλαδή, τις υψομετρικές καμπύλες.

Η ψηφιοποίηση, εν γένει, των υπαρχόντων χαρτών γίνεται είτε με χειροκίνητο (ψηφιοποιητής), είτε με αυτόματο (σαρωτής) τρόπο. Η ψηφιοποίηση με χειροκίνητο τρόπο είναι κατάλληλη (Boyle 1980) για τις σημειακές πληροφορίες του χάρτη και όσες από τις γραμμικές αφορούν χάρτες μεγάλης κλίμακας με αντικείμενο πολεοδομικού ή χωροταξικού σχεδιασμού. Η βασική πληροφορία, που απεικονίζεται στους χάρτες της κατηγορίας αυτής, αποτελείται από γραμμές των οποίων το διάστημα μεταξύ διαδοχικών χαρακτηριστικών σημείων προσομοιώνεται με μεγάλη ακρίβεια από απλές μαθηματικές συναρτήσεις (ευθείες, τόξα κύκλων κλπ.). Ανάλογα, η αυτόματη ψηφιοποίηση είναι κατάλληλη (Boyle 1980) για τις υπόλοιπες γραμμικές πληροφορίες του χάρτη.

Κατά την ψηφιοποίηση με χειροκίνητη διαδικασία το κόστος του εξοπλισμού είναι σχετικά χαμηλό, όμως τα συλλεγόμενα ψηφιακά δεδομένα περιέχουν σφάλματα που οφείλονται στο χρήστη του οργάνου, ψηφιοποιούνται με αργό ρυθμό και η διαδικασία είναι αρκετά κοπιαστική. Αντίθετα, με την αυτόματη ψηφιοποίηση δεν υπάρχουν τα λάθη του χρήστη, ο ρυθμός συλλογής είναι πολύ μεγάλος, η διαδικασία δεν είναι κοπιαστική, αλλά υπάρχουν δύο σημαντικά προβλήματα. Το υψηλό κόστος αγοράς και η αναγκαιότητα της μετατροπής των ψηφιακών δεδομένων από πινακοποιημένη σε διανυσματική δομή. Η μετατροπή αυτή είναι αναγκαία γιατί, παρόλο ότι υπάρχει ένα μεγάλο πεδίο εφαρμογών βασισμένο σε αλγόριθμους κατάλληλους για δεδομένα πινακοποιημένης δομής, υφίσταται ακόμα ένας αρκετά σημαντικός αριθμός διαδικασιών που αναφέρεται

αποκλειστικά σε δεδομένα διανυσματικής δομής (Peuquet 1979; Pavlidis 1982; Buttough 1986).

Η διαδικασία της διόρθωσης (editing) των συλλεγόμενων ψηφιακών δεδομένων είναι απαραίτητη ανεξάρτητα του τρόπου με τον οποίο γίνεται η συλλογή. Με την διαδικασία αυτή εξαλείφονται τα τυχόντα λάθη της χειροκίνητης ψηφιοποίησης, ή συμπληρώνεται η συλλεγόμενη πληροφορία κατά την αυτόματη ψηφιοποίηση γιατί είναι αδύνατο να ολοκληρωθεί στο σύνολο.

Η πληροφορία που περιλαμβάνεται στους χάρτες και αφορά το τοπογραφικό ανάγλυφο διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες: τις υψομετρικές καμπύλες, τα σημειακά υψόμετρα (π.χ. τριγωνομετρικά σημεία) και τις χαρακτηριστικές γραμμές (π.χ. μισγάγγειες). Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε, καταλληλότερος τρόπος συλλογής για την πρώτη κατηγορία είναι η αυτόματη ψηφιοποίηση, για την δεύτερη η χειροκίνητη ψηφιοποίηση και για την τρίτη και οι δύο τρόποι.

Στην ανάλυση του συστήματος δίνεται μεγαλύτερο βάρος στην αυτόματη ψηφιοποίηση των υψομετρικών καμπύλων, μια και αυτές αποτελούν τον κύριο όγκο της γραμμικής πληροφορίας του χάρτη, που αποδίδει το τοπογραφικό ανάγλυφο, με στόχο τη σημαντική μείωση του χρόνου που απαιτείται για την συλλογή της πληροφορίας.

9.1 Περιγραφή του λογισμικού του συστήματος

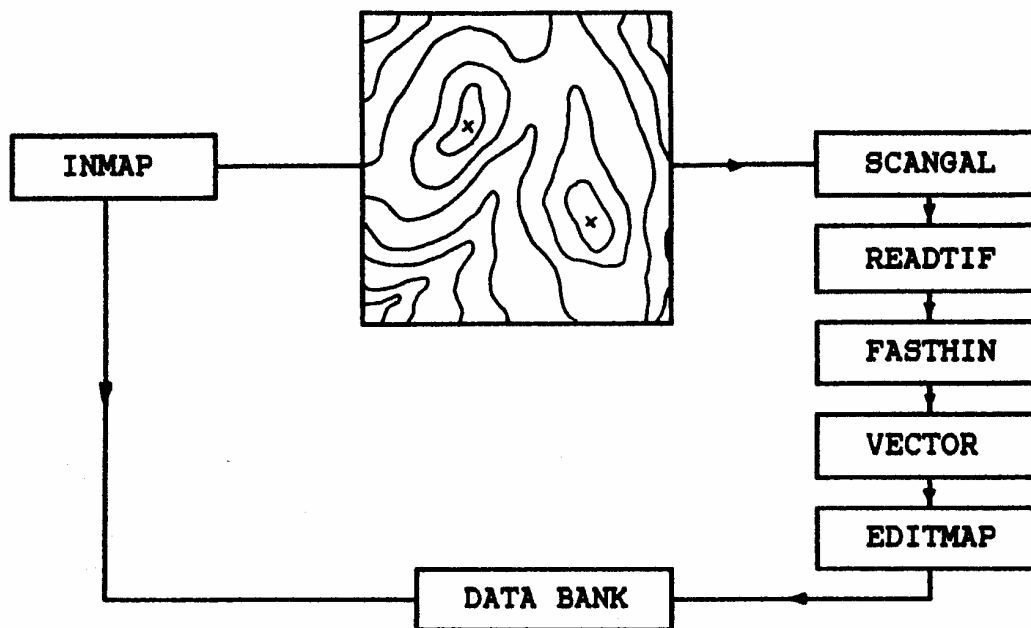
Στην ενότητα αυτή περιγράφεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε για την συλλογή και επεξεργασία της ψηφιακής πληροφορίας του τοπογραφικού ανάγλυφου.

Στο λογισμικό περιλαμβάνονται τα προγράμματα (modules) συλλογής, για χειροκίνητη και αυτόματη ψηφιοποίηση, οι απαραίτητες μετατροπές στην μορφή των ψηφιακών δεδομένων και η διαδικασία της μετατροπής από πινακοποιημένη σε διανυσματική δομή.

Τα προγράμματα συλλογής *INMAP* και *SCANGAL* βασικά εκτελούν την επικοινωνία του H/Y με τις μονάδες ψηφιοποίησης (interfacing). Επειδή η απόδοση των ψηφιακών δεδομένων στην περίπτωση της αυτόματης ψηφιοποίησης (πρόγραμμα *SCANGAL*) γίνεται με τη μορφή των αρχείων τύπου TIF, σχεδιάστηκε το πρόγραμμα *READTIF* για την μετατροπή τους σε αλφαριθμητικά αρχεία, με σκοπό την διευκόλυνση της επεξεργασίας των ψηφιακών δεδομένων.

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, το σύστημα ολοκληρώνεται με την διαδικασία της μετατροπής των ψηφιακών δεδομένων από πινακοποιημένη σε διανυσματική δομή. Τη διαδικασία αυτή υφίστανται τα ψηφιακά δεδομένα που ψηφιοποιούνται αυτόματα. Η διαδικασία ολοκληρώνεται σε τρεις φάσεις, κάθε μια

από τις οποίες αντιστοιχεί και σε ένα πρόγραμμα. Με την πρώτη φάση γίνεται η εκλέπτυνση των δεδομένων της ψηφιακής εικόνας, το πρόγραμμα ονομάζεται *FASTHIN*. Κατά την δεύτερη φάση γίνεται η εξαγωγή των διανυσμάτων της ψηφιακής εικόνας, με το πρόγραμμα *VECTOR*. Κατά την τρίτη φάση γίνεται η διόρθωση και συμπλήρωση των απαραίτητων πληροφοριών στα διανύσματα της ψηφιακής εικόνας, ώστε να αποτελούν ολοκληρωμένα τα ψηφιακά δεδομένα των υψομετρικών καμπύλων των χαρτών.



Σχήμα 9.1 Διάγραμμα ροής του συστήματος συλλογής και επεξεργασίας ψηφιακής εικόνας.

Στο σχήμα 9.1 απεικονίζεται το σύστημα των προγραμμάτων που αναφέρθηκαν, σ' ένα διάγραμμα ροής.

9.1.1 Πρόγραμμα *INMAP*

Με το πρόγραμμα *INMAP* γίνεται η επικοινωνία του H/Y με τη μονάδα της χειροκίνητης ψηφιοποίησης (ψηφιοποιητής). Η λειτουργία του προγράμματος γίνεται σε περιβάλλον αλληλοεπιδρούσης επικοινωνίας του χρήστη με τον H/Y (interactive procedure).

Η επικοινωνία του H/Y με την μονάδα ψηφιοποίησης γίνεται με σειριακή θύρα επικοινωνίας RS-232-C.

Η επικοινωνία ελέγχεται από το πρόγραμμα με κατάλληλο τρόπο ώστε να εξαντλούνται οι δυνατότητες του ψηφιοποιητή. Οι δυνατότητες αναφέρονται στην εναλλαγή του τρόπου λήψης των στοιχείων, δηλαδή, τη διακριτή ψηφιοποίηση (point mode), τη συνεχή ψηφιοποίηση (stream mode), τον καθορισμό της επιθυμητής διακριτικής ανάλυσης, τον ρυθμό λήψης των συντεταγμένων κ.ο.κ.

Στο πρόγραμμα *INMAP* έχει ενταχθεί ο αλγόριθμος της γεωγραφικής προσαρμογής των συντεταγμένων, ώστε η καταγραφή να γίνεται κατευθείαν στο σύστημα απεικόνισης του χάρτη.

Τα παραγόμενα ψηφιακά δεδομένα του τοπογραφικού ανάγλυφου έχουν την μορφή αρχείου, κάθε καταγραφή του οποίου περιλαμβάνει ένα σημείο (X, Y, Z).

9.1.2 Πρόγραμμα *SCANGAL*

Το πρόγραμμα *SCANGAL* συνοδεύεται από την αυτόματη μονάδα ψηφιοποίησης *ScanJet* (σαρωτής), της εταιρίας Hewlett Packard, που χρησιμοποιήθηκε για τις εφαρμογές.

Το πρόγραμμα λειτουργεί σε περιβάλλον αλληλοεπιδρούσης επικοινωνίας του χρήστη με τον H/Y, κάτω από το λογισμικό Windows της Microsoft.

Η επικοινωνία του H/Y με την μονάδα ψηφιοποίησης γίνεται με την παράλληλη θύρα επικοινωνίας HP 88290A (Hewlett Packard 1987b).

Με το πρόγραμμα *SCANGAL* επιτελούνται βασικά δύο λειτουργίες: της συλλογής και διόρθωσης ψηφιακών εικόνων (Hewlett Packard 1987c).

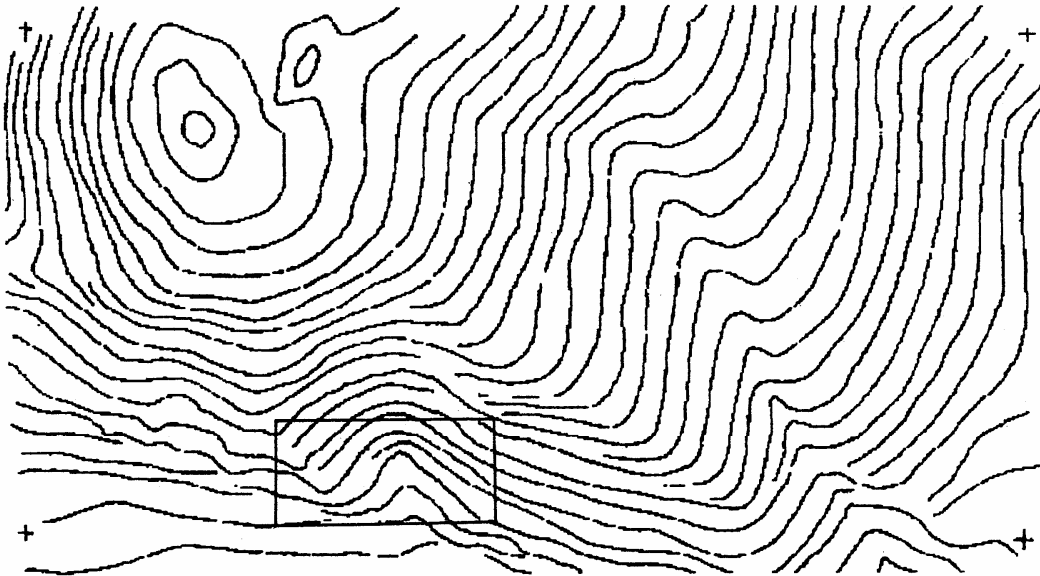
Κατά την ψηφιοποίηση η διακριτική ανάλυση ρυθμίζεται σε επιθυμητό επίπεδο, σε σχέση με το πάχος των γραμμικών συμβόλων, που απεικονίζονται στο χάρτη, και φθάνει την τιμή των 300 dpi (0,08 mm). Η διακριτική ανάλυση προβλέπεται να επιλέγεται διαφορετική κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση, με σκοπό την καλύτερη ποιότητα εκτύπωσης της ψηφιακής εικόνας.

Τα ψηφιοποιούμενα μέσα αποτελούνται από ασπρόμαυρες εικόνες, με διαβαθμίσεις του γκρι και διαγράμματα. Στην πρώτη περίπτωση η ψηφιακή εικόνα ανήκει στην πρώτη ομάδα ψηφιακών δεδομένων της ταξινόμησης που αναλύθηκε στην ενότητα 5.1, με δυνατότητα διάκρισης 16 διαφορετικών διαβαθμίσεων των τόνων του γκρι. Στην δεύτερη περίπτωση η ψηφιακή εικόνα ανήκει στην δεύτερη ομάδα ψηφιακών δεδομένων (δυαδική εικόνα).

Οι λειτουργίες της διόρθωσης επιτρέπουν την διαγραφή και μετακίνηση τμημάτων της ψηφιακής εικόνας καθώς και την απόδοση τμήματος ή του συνόλου της από τον εκτυπωτή.

Η ψηφιακή εικόνα αποθηκεύεται με την συμπιεσμένη μορφή αρχείων τύπου TIFF (Παράρτημα).

Στο σχήμα 9.2 απεικονίζεται ένα τμήμα ψηφιακής εικόνας υψομετρικών καμπύλων όπως ακριβώς δημιουργείται από το πρόγραμμα *SCANGAL*.



Σχήμα 9.2 Τμήμα εικόνας υψομετρικών καμπύλων ψηφιοποιημένη με σαρωτή.

9.1.3 Πρόγραμμα *READTIF*

Από την αναφορά που γίνεται για τα αρχεία τύπου TIFF στο Παράρτημα, συμπεραίνεται ότι πρόκειται για αρκετά συμπυκνωμένη μορφή αποθήκευσης δεδομένων. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται θετικά αλλά και αρνητικά αποτελέσματα για τη χρήση τους. Θετικά με την έννοια ότι η αποθήκευση της ψηφιακής εικόνας απαιτεί πολύ μικρότερο χώρο μνήμης απ' ό,τι άλλοι τύποι αρχείων, όμως η επεξεργασία της εικόνας είναι πολύ δύσκολη. Για τον λόγο αυτό σχεδιάστηκε ο αλγόριθμος του προγράμματος *READTIF*, που μετατρέπει τα αρχεία τύπου TIFF σε απλά αλφαριθμητικά αρχεία, εύκολα στην οποιαδήποτε επεξεργασία.

Ο αλγόριθμος αρχικά επαληθεύει τις μεταβλητές της επικεφαλίδας του συγκεκριμένου αρχείου. Στη συνέχεια, επαληθεύεται το τμήμα των διευθύνσεων του αρχείου και διαμορφώνονται οι μεταβλητές που απαιτούνται για την ορθή ερμηνεία του. Η κυριότερη λειτουργία αφορά την ανάγνωση της ψηφιακής εικόνας, και με την βοήθεια των μεταβλητών που αναφέρθηκαν, γίνεται η

μετάφραση των δεδομένων και η αποθήκευσή της σε αλφαριθμητική μορφή, με ακέραιες μεταβλητές. Η τιμή 0 αντιστοιχεί σε λευκό και η τιμή 1 σε μαύρο στοιχείο της εικόνας. Η σάρωση της αποθήκευσης ξεκινά από το επάνω αριστερό άκρο της ψηφιακής εικόνας και γίνεται κατά γραμμές από επάνω προς τα κάτω. Σε κάθε γραμμή η σάρωση γίνεται από τα αριστερά προς τα δεξιά. Μαζί με την ψηφιακή εικόνα στο αλφαριθμητικό αρχείο είναι αποθηκευμένες και οι παρακάτω πληροφορίες της εικόνας, σε μορφή ακεραίων μεταβλητών:

- (1) Αριθμός στηλών.
- (2) Αριθμός γραμμών.
- (3) Αριθμητής διακριτικής ανάλυσης κατά X .
- (4) Παρονομαστής διακριτικής ανάλυσης κατά X .
- (5) Αριθμητής διακριτικής ανάλυσης κατά Y .
- (6) Παρονομαστής διακριτικής ανάλυσης κατά Y .

Η συλλογή, λοιπόν, των ψηφιακών εικόνων από σαρωτές μπορεί να αποδίδεται σε δομή αρχείων TIFF. Στη συνέχεια, η επεξεργασία των εικόνων μπορεί να γίνεται, εύκολα, ύστερα από τη μετατροπή του αρχείου τύπου TIFF σε αλφαριθμητικό αρχείο χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα *READTIF*.

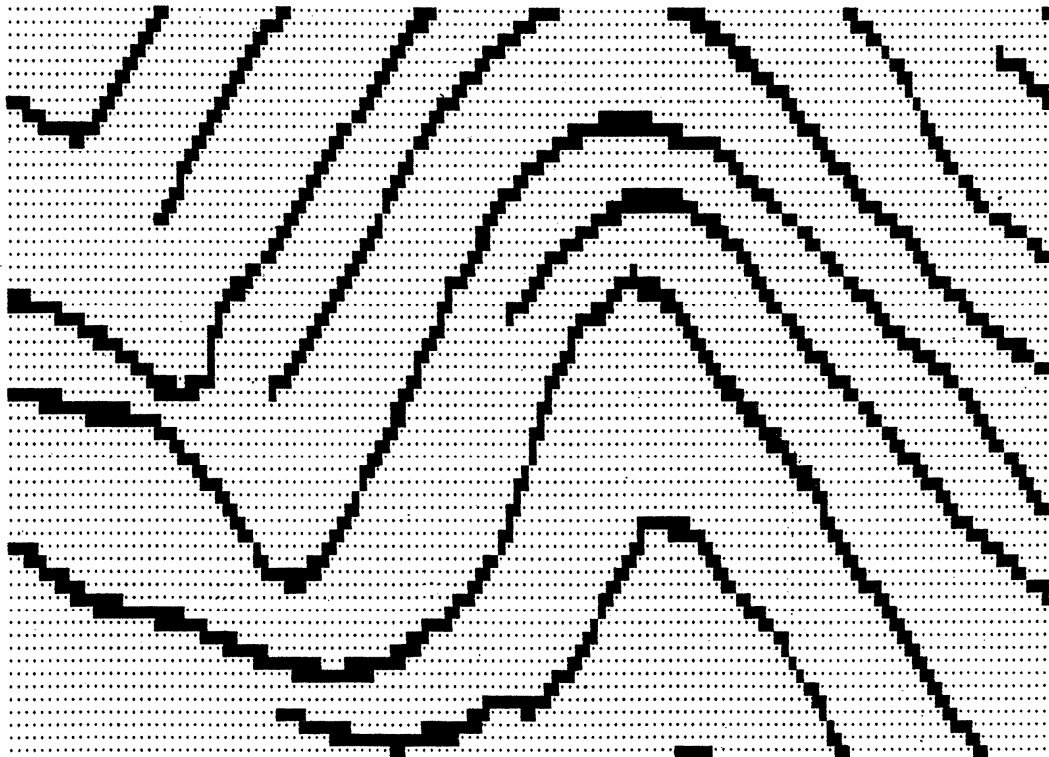
9.1.4 Πρόγραμμα *FASTHIN*

Με το πρόγραμμα *FASTHIN* γίνεται η εκλέπτυνση της ψηφιακής εικόνας με τον παράλληλο αλγόριθμο των Stefanelli and Rosenfeld (1971), όπως αναλύθηκε στην ενότητα 6.3.1.

Τα δεδομένα εισόδου και εξόδου του προγράμματος αποτελούνται από αρχεία της ψηφιακής εικόνας.

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται, η διαδικασία της εκλέπτυνσης ολοκληρώνεται με διαδοχικές επαναλήψεις. Ο αριθμός των επαναλήψεων εξαρτάται από το συνδυασμό της διακριτικής ανάλυσης του σαρωτή και του πάχους των συμβόλων των γραμμών στους αναλογικούς χάρτες. Από τις εφαρμογές που έγιναν, η ολοκλήρωση της εκλέπτυνσης, κατά μέσο όρο, επιτυγχάνεται ύστερα από τρεις επαναλήψεις. Ένας απλός τρόπος διαπίστωσης της ολοκλήρωσης της εκλέπτυνσης, γίνεται με τη σύγκριση, μέσω των εντολών του λειτουργικού συστήματος, των αρχείων εισόδου και εξόδου της ψηφιακής εικόνας. Η εκλέπτυνση θα έχει ολοκληρωθεί εάν τα δύο αυτά αρχεία είναι ταυτόσημα, δεδομένου ότι ο αλγόριθμος δεν θα επιφέρει καμία μεταβολή κατά την επεξεργασία.

Στα σχήματα 9.3a και 9.3b απεικονίζονται για το ίδιο τμήμα της ψηφιακής εικόνας (ορθογώνιο πλαίσιο σχήματος 9.2), η ψηφιακή εικόνα του αρχείου εισόδου και η ψηφιακή εικόνα του τελικού αρχείου εξόδου μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας για την εκλέπτυνσή της, ύστερα από τις απαραίτητες επαναλήψεις.

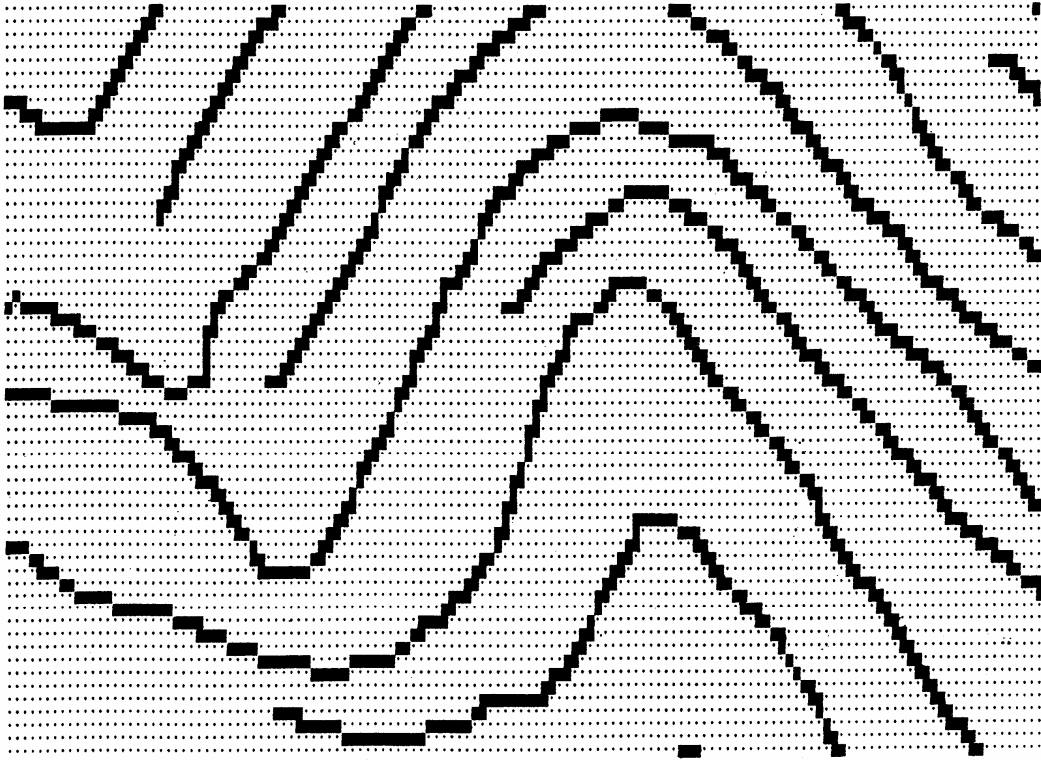


Σχήμα 9.3a Διαδικασία εκλέπτυνσης, ψηφιακή εικόνα εισόδου.

9.1.5 Πρόγραμμα *VECTOR*

Με το πρόγραμμα *VECTOR* γίνεται η εξαγωγή των διανυσμάτων της ψηφιακής εικόνας. Το πρόγραμμα αυτό μαζί με το πρόγραμμα *FASTHIN* αποτελεί την διαδικασία της μετατροπής των δεδομένων μιας ψηφιακής εικόνας από πινακοποιημένη σε διανυσματική δομή (raster to vector conversion).

Η εκλεπτυσμένη ψηφιακή εικόνα αποτελεί αρχείο εισόδου για το πρόγραμμα. Η επεξεργασία των δεδομένων της ψηφιακής εικόνας ακολουθεί τους αλγόριθμους που αναφέρονται στην ενότητα 6.4.



Σχήμα 9.3b Διαδικασία εκλέπτυνσης, ψηφιακή εικόνα εξόδου.

Σε πρώτη φάση σαρώνονται τα δεδομένα της ψηφιακής εικόνας για το χτίσιμο των τοπολογικών σχέσεων με τις οποίες ορίζονται τα άκρα και οι κόμβοι. Η τοπολογικά μετασχηματισμένη ψηφιακή εικόνα καταγράφεται σε βοηθητικό αρχείο.

Σε δεύτερη φάση, ύστερα από τη σάρωση του βοηθητικού αρχείου, καταγράφονται ο αριθμός και οι συντεταγμένες των κόμβων σε ειδικό τμήμα του αρχείου εξόδου, γιατί αποτελούν τα σημεία της γεωγραφικής προσαρμογής των συντεταγμένων της ψηφιακής εικόνας.

Στην τελευταία φάση, ύστερα από σάρωση του βοηθητικού αρχείου, δημιουργούνται τα διανύσματα που περιέχονται στην ψηφιακή εικόνα, εξαντλώντας πρώτα τα ανοικτά (ανοικτές υψομετρικές καμπύλες) και στην συνέχεια τα κλειστά διανύσματα (κλειστές υψομετρικές καμπύλες).

Κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του προγράμματος ο χρήστης ενημερώνεται για τον συνολικό αριθμό των σημείων που περιλαμβάνονται στην ψηφιακή εικόνα, καθώς επίσης για τον αριθμό των δημιουργουμένων διανυσμάτων και τον αριθμό των υπολειπόμενων σημείων προς επεξεργασία.

Τα εξαγόμενα διανύσματα καταγράφονται στο αρχείο εξόδου με τη μορφή της κωδικοποιημένης αλυσίδας, όπως ακριβώς περιγράφεται στην ενότητα 6.2.

9.1.6 Πρόγραμμα *EDITMAP*

Το πρόγραμμα *EDITMAP* είναι ένα πρόγραμμα σύνταξης ψηφιακής εικόνας. Μέσα σ' ένα περιβάλλον αλληλεπιδρούσης επικοινωνίας ο χρήστης μπορεί να διορθώσει, δηλαδή, να απαλείψει τμήματα της ψηφιακής εικόνας ή να προσθέσει το χαρακτηριστικό κωδικό κάθε διανύσματος. Στην περίπτωση των ψηφιακών δεδομένων υψομετρικών καμπύλων ο κωδικός αποτελείται από τα υψόμετρα τους. Επειδή, τέλος, στις μέχρι τώρα επεξεργασίες, τα δεδομένα της ψηφιακής εικόνας αναφέρονται στο σύστημα αναφοράς της, με το πρόγραμμα αυτό γίνεται και η γεωγραφική προσαρμογή.

Το πρόγραμμα *EDITMAP* περιλαμβάνει τις παρακάτω βασικές λειτουργίες:

- (1) Είσοδος αρχείου ψηφιακής εικόνας,
- (2) Απεικόνιση της ψηφιακής εικόνας στην οθόνη,
- (3) Γεωγραφική προσαρμογή,
- (4) Επεξεργασία της εικόνας και
- (5) Εξοδος.

Με την πρώτη επιλογή καθορίζεται το αρχείο της ψηφιακής εικόνας που θα υποστεί την τελική επεξεργασία.

Με τη δεύτερη επιλογή απεικονίζεται η ψηφιακή εικόνα σε ολόκληρη την οθόνη, ώστε ο χρήστης να έχει τη γενική της εποπτεία.

Με την τρίτη επιλογή εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή ο πίνακας των συντεταγμένων -το σύστημα αναφοράς της εικόνας- των σημείων της γεωγραφικής προσαρμογής τα οποία συνοδεύουν την ψηφιακή εικόνα στο αρχείο της. Ζητείται από το χρήστη να πληκτρολογήσει τις αντίστοιχες συντεταγμένες των σημείων, στο σύστημα αναφοράς του χάρτη. Στη συνέχεια, ενεργοποιείται ο αλγόριθμος της γεωγραφικής προσαρμογής (ενότητα 7.2). Στην οθόνη εμφανίζεται η *a posteriori* τυπική απόκλιση κατά X και Y , για να είναι σε θέση ο χρήστης να εντοπίσει πιθανά χονδροειδή λάθη αλλά και να εκτιμήσει την αβεβαιότητα των παραγόμενων δεδομένων. Οι παράμετροι που προσδιορίζονται μετατρέπουν την ψηφιακή εικόνα στο σύστημα αναφοράς του χάρτη.

Με την τέταρτη επιλογή, καθορίζεται από τον χρήστη, το παράθυρο σε συντεταγμένες του συστήματος του χάρτη, στο οποίο επιθυμεί να εργαστεί. Στη συνέχεια εμφανίζεται στην οθόνη η ψηφιακή εικόνα, που αντιστοιχεί στο παράθυρο που επιλέχθηκε, σε κυανή απόχρωση. Ο χρήστης διαθέτει δύο εντολές,

για την επεξεργασία, την *Delete* και την *Label*. Με την εντολή *Delete* διαγράφει το διάνυσμα, ενώ με την εντολή *Label* προστίθεται στο διάνυσμα η αναφορά του υψόμετρου ή ο κωδικός του. Οι δύο αυτές εντολές εκτελούνται καθώς σαρώνονται διαδοχικά όλα τα διανύσματα που περιλαμβάνει η ψηφιακή εικόνα. Το τρέχον διάνυσμα υπό επεξεργασία απεικονίζεται με κόκκινη απόχρωση. Τα διανύσματα των οποίων έχει ήδη ολοκληρωθεί η επεξεργασία απεικονίζονται με πράσινη απόχρωση.

Κατά τη διαδικασία της τελικής επεξεργασίας ο χρήστης έχει προβλεφθεί να υποβοηθείται στον εντοπισμό των λεπτομερειών της ψηφιακής εικόνας, που απεικονίζονται στην οθόνη, από παράλληλη συσχέτιση της ίδιας περιοχής τοποθετημένης σε έναν ψηφιοποιητή. Με τον τρόπο αυτό προβάλλεται πάνω στην ψηφιακή εικόνα ένα σταυρόνημα σε αντίστοιχη ακριβώς θέση με αυτήν που έχει εντοπιστεί στην αναλογική πληροφορία (χάρτης).

Με την έξοδο από την τελική επεξεργασία ο χρήστης έχει στη διάθεσή του ένα αλφαριθμητικό αρχείο της ψηφιακής εικόνας. Το αρχείο περιλαμβάνει στο σύστημα αναφοράς του χάρτη τις συντεταγμένες, των υψομετρικών καμπύλων (ή των διανυσμάτων) που επιθυμεί ο χρήστης, συνοδευμένες από τις τιμές των υψομέτρων (ή τους αντίστοιχους κωδικούς). Κάθε καταγραφή του αρχείου εξόδου περιλαμβάνει ένα σημείο (X, Y, Z).

9.2 Παράδειγμα εφαρμογής του συστήματος

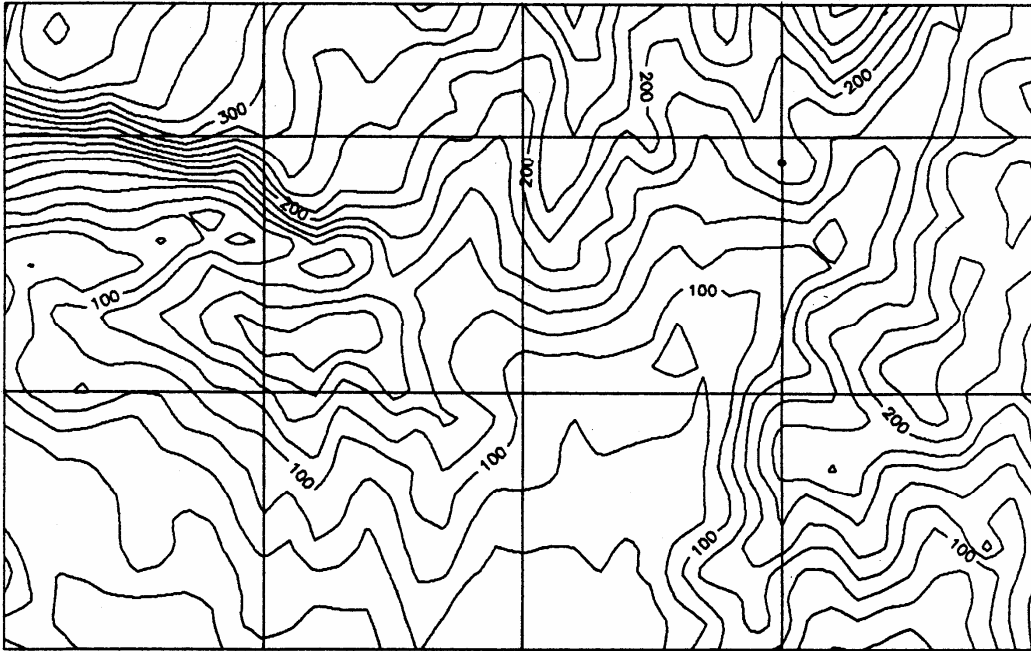
Για την εξαγωγή των συμπερασμάτων της αποτελεσματικότητας του συστήματος ψηφιοποίησης και επεξεργασίας των χαρτογραφικών δεδομένων, που περιγράφηκε, στην ενότητα αυτή δίνεται ένα παράδειγμα αυτόματης ψηφιοποίησης των υψομετρικών καμπύλων ενός χάρτη.

Κατά την αυτόματη ψηφιοποίηση, το μέσο που τοποθετείται στην επιφάνεια του σαρωτή πρέπει να απεικονίζει αποκλειστικά το χαρτογραφικό φαινόμενο που ψηφιοποιείται στην καλύτερη δυνατή ποιότητα. Για την περίπτωση ψηφιοποίησης υψομετρικών καμπύλων, για παράδειγμα, είναι απαραίτητη μια προεργασία με την οποία να εκτυπώνεται αποκλειστικά η μάσκα της απόχρωσης που περιέχει τις υψομετρικές καμπύλες (καφέ). Το προϊόν της εκτύπωσης αποτελεί το μέσο που τοποθετείται στην επιφάνεια του σαρωτή.

Αντικείμενο της εφαρμογής αποτελεί ο χάρτης 1:5.000 της Γ.Υ.Σ. με αριθμό φύλλου 62027 (Μεσολόγγιον) και ισοδιάστασης 4 m. Η περιοχή που καλύπτει ο χάρτης αντιστοιχεί σε έκταση διαστάσεων 4 km x 2,5 km.

Επειδή η διάσταση του μέσου που δέχεται ο σαρωτής είναι περιορισμένη (A4), η περιοχή χωρίζεται σε 12 τμήματα (σχήμα 9.4). Η ψηφιοποίηση και

επεξεργασία έγινε για κάθε τμήμα χωριστά με διακριτική ανάλυση 75 dpi (0,34 mm).



Σχήμα 9.4 Διανομή της περιοχής μελέτης σε 12 τμήματα. (κλίμακα 1:20.000, ισοδιάσταση 20m).

Στον πίνακα 9.1 δίνονται ορισμένες βασικές πληροφορίες για την ψηφιοποίηση και επεξεργασία κάθε τμήματος του χάρτη και στο σχήμα 9.4 απεικονίζεται το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής σε κλίμακα 1:20.000 με ισοδιάσταση 20 m.

Από τον πίνακα 9.1 συμπεραίνεται ότι τα ψηφιακά δεδομένα των υψομετρικών καμπύλων του χάρτη είναι της τάξης των 4×10^6 στοιχείων, από τα οποία περίπου $3,5 \times 10^5$ αποτελούν σημεία των υψομετρικών καμπύλων, που είναι οργανωμένα σε περίπου 1.700 διανύσματα. Η συνολική χρονική διάρκεια της ψηφιοποίησης, των απαραίτητων μετατροπών και επεξεργασιών είναι περίπου 14 ώρες. Για την ολοκλήρωση της εφαρμογής απαιτούνται 5 ώρες ακόμα για τη διόρθωση και πρόσθεση των τιμών των υψομέτρων στο παραγόμενο αρχείο.

Η απαιτούμενη χρονική διάρκεια για την χειροκίνητη ψηφιοποίηση του ίδιου χάρτη εκτιμάται, από εμπειρία (Νάκος 1979; Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας 1984), να είναι της τάξης των 30 ωρών.

Πίνακας 9.1 Στοιχεία της ψηφιακής επεξεργασίας των δεδομένων της πειραματικής εφαρμογής κατά περιοχή.

<i>Τμήμα</i>	<i>Στοιχεία εικόνας</i>	<i>Σημεία</i>	<i>Διανύσματα</i>	<i>Χρόνος</i>
1	618 × 334	16.580	86	40 min
2	617 × 332	17.178	141	43 min
3	617 × 337	18.341	146	43 min
4	619 × 334	15.690	76	43 min
5	627 × 608	32.274	198	77 min
6	621 × 648	30.169	160	72 min
7	621 × 623	31.057	190	81 min
8	621 × 633	33.321	190	82 min
9	638 × 619	33.688	109	80 min
10	634 × 628	39.820	121	85 min
11	629 × 625	32.808	136	103 min
12	627 × 691	46.096	171	85 min
Σύνολα	4.015.177	347.022	1.724	834 min

Το τελικό συμπέρασμα είναι σημαντικά θετικό για την αυτόματη ψηφιοποίηση. Από τις 19 συνολικά ώρες μόνο οι 5 προϋποθέτουν την άμεση παρουσία του χρήστη, σε αντίθεση με τις 30 κοπιαστικές ώρες της χειροκίνητης ψηφιοποίησης.

Για την εφαρμογή αυτή χρησιμοποιήθηκε ένας προσωπικός Η/Υ συμβατός με IBM-AT (επεξεργαστής της *Intel* 80286), εφοδιασμένος με το μαθηματικό συνεπεξεργαστή 80287. Οι χρονικές επιδόσεις της αυτόματης ψηφιοποίησης μειώνονται δραστικά εάν η επεξεργασία γίνει με ισχυρότερο σύστημα.

Το αρχείο (*X, Y, Z*) που δημιουργήθηκε στην εφαρμογή αυτή έχει μέγεθος 8,54 Mb.

Κεφάλαιο 10

10. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΕΥΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η μεθοδολογία με την οποία εφαρμόζεται η κλασματική γεωμετρία στις χαρτογραφικές λειτουργίες της συμπίεσης και γενίκευσης των γραμμικών χαρτογραφικών ψηφιακών δεδομένων.

Η μεθοδολογία στηρίζεται, βασικά, στην περιγραφή του τρόπου επιβεβαίωσης του κλασματικού χαρακτήρα των γραμμικών συμβόλων των χαρτογραφικών φαινομένων αφενός και του προσδιορισμού της κλασματικής τους διάστασης αφετέρου. Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1, η διαπίστωση του κλασματικού χαρακτήρα και ο προσδιορισμός της κλασματικής διάστασης γίνεται με τέσσερις μεθόδους.

Για τις ανάγκες που περιγράφηκαν σχεδιάστηκε ένα σύστημα προγραμμάτων, με τα οποία προσδιορίζονται οι εκτιμήτριες των κατάλληλων μεγεθών για τρεις από τις μεθόδους. Δεν χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της φασματικής ανάλυσης λόγω των μειονεκτημάτων που παρουσιάζονται και αναφέρονται στην αντίστοιχη ενότητα (1.3.2).

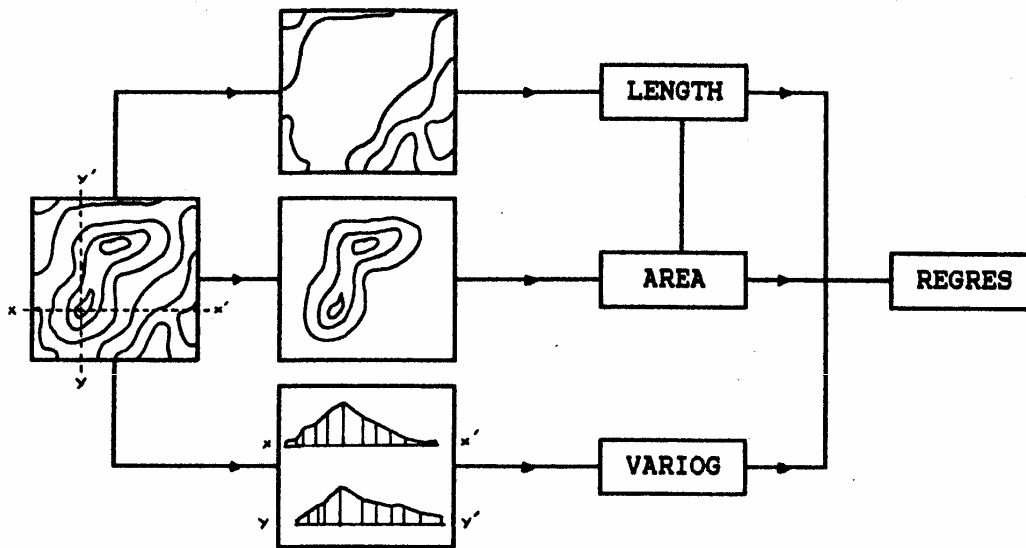
Οι εφαρμογές διακρίνονται σε τρεις διαφορετικές ομάδες. Η πρώτη ομάδα αναφέρεται στην διαπίστωση του κλασματικού χαρακτήρα των συμβόλων με τα οποία απεικονίζεται το τοπογραφικό ανάγλυφο στους χάρτες. Η δεύτερη ομάδα αναφέρεται στην περιγραφή, με παράδειγμα, της μεθοδολογίας της κλασματικής συμπίεσης. Η τελευταία, τρίτη ομάδα, αναφέρεται στην περιγραφή, με παραδείγματα, της μεθοδολογίας της κλασματικής γενίκευσης.

10.1 Περιγραφή συστήματος κλασματικής επεξεργασίας

Βασικό χαρακτηριστικό του συστήματος αποτελεί η αντιμετώπιση των δύο κλασματικών ιδιοτήτων των συμβόλων των χαρτογραφικών φαινομένων, της στατιστικής αυτο-ομοιότητας και αυτο-ομοπαράλληλης.

Οι στατιστικά αυτο-όμοιες κλασματικές γραμμές αντιμετωπίζονται με τις μεθόδους της συσχέτισης του μήκους με το βήμα μέτρησης (ανοικτές γραμμές) και της συσχέτισης εμβαδού-περιμέτρου (κλειστές γραμμές).

Οι στατιστικά αυτο-ομοπαράλληλες κλασματικές γραμμές αντιμετωπίζονται με την μέθοδο της συνάρτησης μεταβλητότητας (μηκοτομές).



Σχήμα 10.1 Διάγραμμα ροής συστήματος κλασματικής επεξεργασίας.

Το σύστημα περιλαμβάνει τέσσερα προγράμματα (σχήμα 10.1). Για την πρώτη μέθοδο, συσχέτιση μήκους με βήμα μέτρησης, απαιτείται η εκτίμηση του μήκους των γραμμικών συμβόλων για διάφορα δείγματα, και η επεξεργασία γίνεται με το πρόγραμμα *LENGTH*. Για τις ανάγκες της δεύτερης μεθόδου, συσχέτιση εμβαδού-περιμέτρου, χρησιμοποιείται το πρόγραμμα *LENGTH* για την εκτίμηση της περιμέτρου και το πρόγραμμα *AREA* για την εκτίμηση του εμβαδού. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα *AREA* αναφέρεται στις γνωστές αναλυτικές σχέσεις προσδιορισμού του εμβαδού ενός πολυγώνου από τις συντεταγμένες των σημείων που το ορίζουν (Maslov *et al.* 1984). Για τις ανάγκες της τρίτης μεθόδου, συνάρτηση μεταβλητότητας, σχεδιάστηκε το πρόγραμμα *VARIOG* με το οποίο προσδιορίζεται η εκτίμηση της τυποποιημένης συνάρτησης

μεταβλητότητας ως προς όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των μηκών συσχέτισης (Σακελλαρίου κ.ά. 1989). Με το πρόγραμμα *VARIOG* προσδιορίζονται οι εκτιμήτριες δειγμάτων της τυποποιημένης συνάρτησης μεταβλητότητας. Τα δείγματα είτε αποτελούνται από γραμμικά (μηκοτομές), είτε από επιφανειακά ψηφιακά δεδομένα (ΨΜΥ). Το σύστημα ολοκληρώνεται από το πρόγραμμα *REGRES* με το οποίο προσδιορίζονται οι απαραίτητες παράμετροι των στοιχείων της ευθείας παλινδρόμησης με τη μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων.

Στο σχήμα 10.1 απεικονίζεται σε διάγραμμα ροής το σύστημα των προγραμμάτων, με το είδος των ψηφιακών δεδομένων που δέχονται στα αρχεία εισόδου.

10.2 Επιβεβαίωση του κλασματικού χαρακτήρα του τοπογραφικού ανάγλυφου

Τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν για την επιβεβαίωση του κλασματικού χαρακτήρα των χαρτογραφικών συμβόλων όπως απεικονίζονται στους χάρτες περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4, στο οποίο αναλύθηκε η μεθοδολογία με την οποία προτείνεται να εφαρμοστεί η κλασματική γεωμετρία στην χαρτογραφία. Η διαδικασία επιβεβαίωσης του κλασματικού χαρακτήρα του τοπογραφικού ανάγλυφου περιγράφεται στην εργασία αυτή με δύο εφαρμογές.

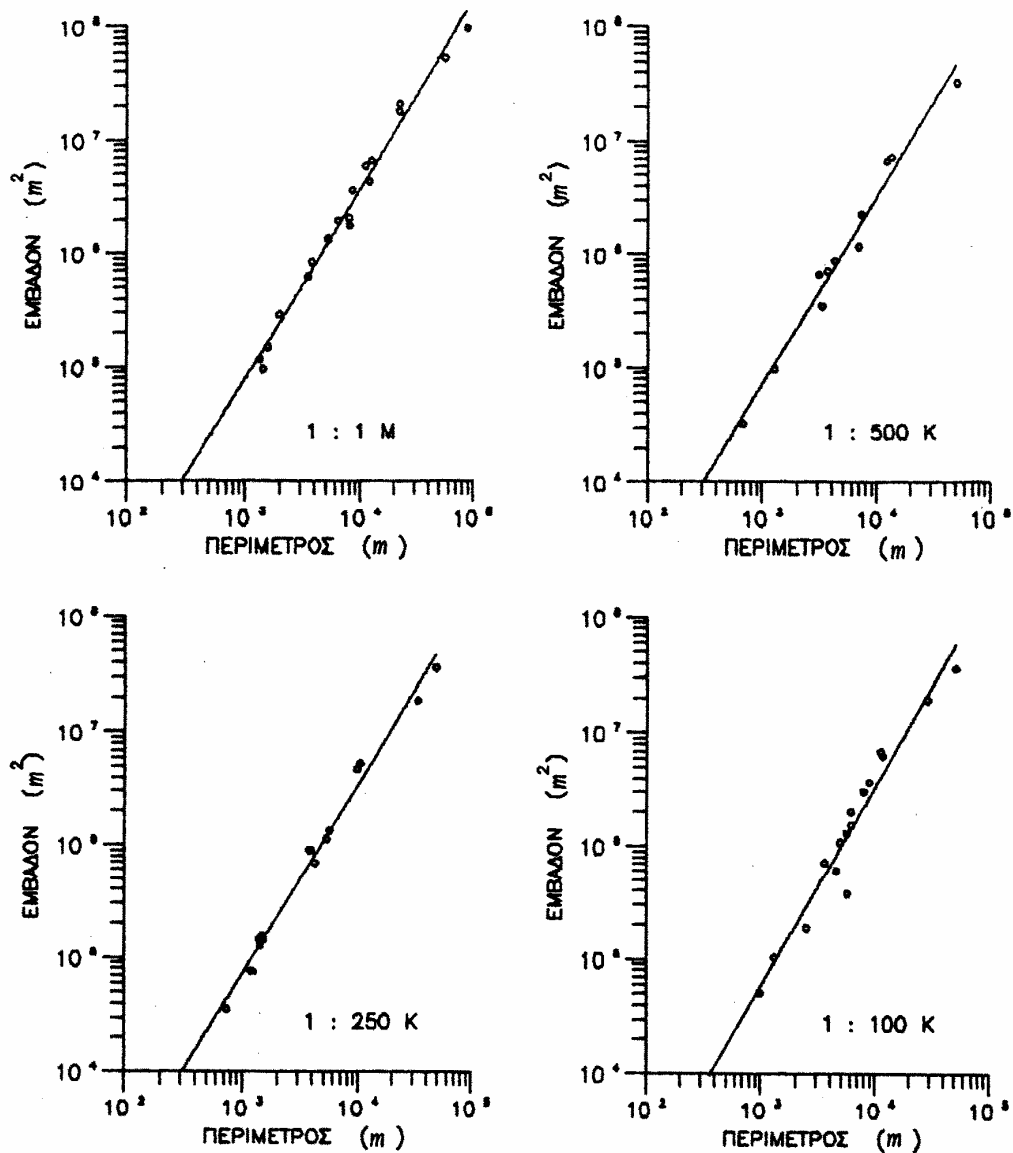
Στην πρώτη εφαρμογή διαπιστώνεται ο κλασματικός χαρακτήρας του τοπογραφικού ανάγλυφου από τις υψομετρικές καμπύλες ενός τοπογραφικού χάρτη. Ειδικότερα περιγράφεται η διαδικασία με την οποία επαληθεύεται η ιδιότητα της στατιστικής αυτο-ομοιότητας των υψομετρικών καμπύλων. Στην εφαρμογή αυτή χρησιμοποιείται η μέθοδος της συσχέτισης εμβαδού-περιμέτρου.

Στη δεύτερη εφαρμογή διαπιστώνεται ο κλασματικός χαρακτήρας του τοπογραφικού ανάγλυφου από ένα ΨΜΥ. Στην περίπτωση αυτή περιγράφεται η διαδικασία με την οποία επαληθεύεται η ιδιότητα της στατιστικής αυτο-ομοπαλληλίας για το ΨΜΥ. Για την εφαρμογή αυτή χρησιμοποιείται η μέθοδος της συνάρτησης μεταβλητότητας.

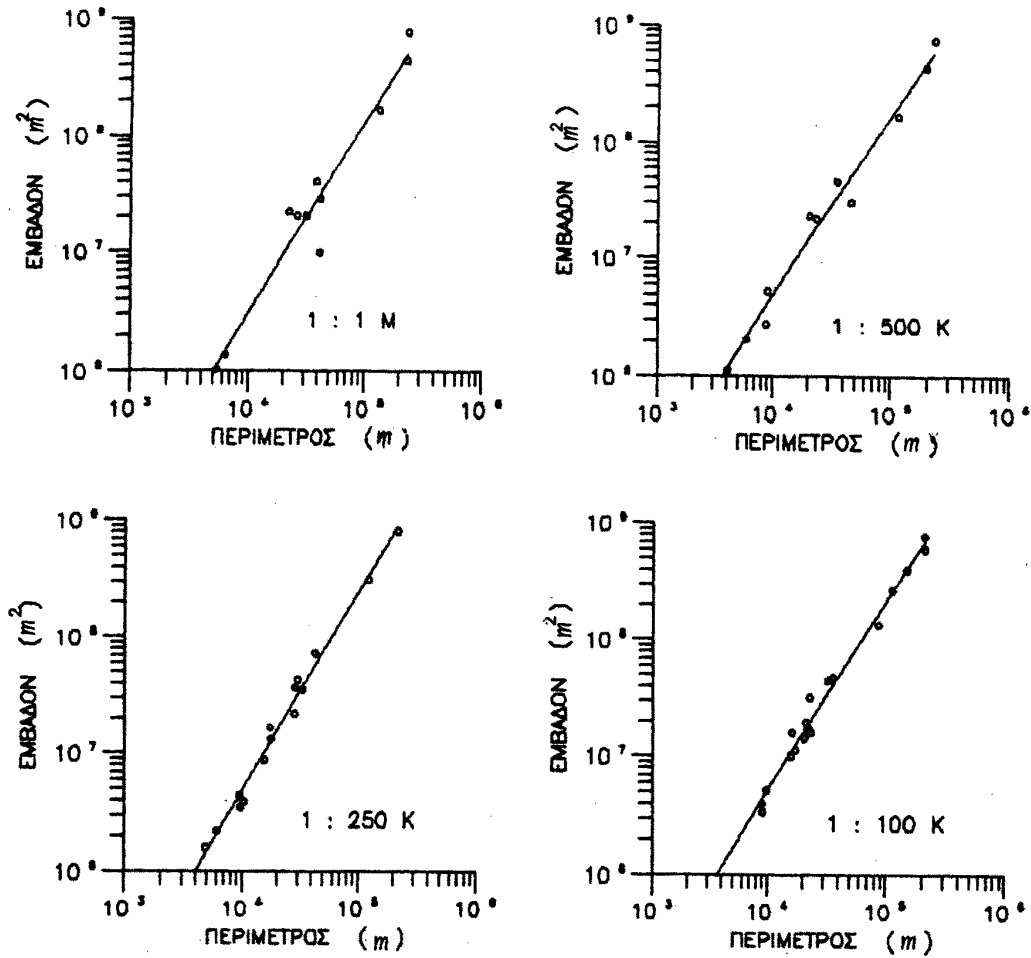
10.2.1 Κλασματικός χαρακτήρας υψομετρικών καμπύλων

Με την εφαρμογή αυτή μελετάται ο κλασματικός χαρακτήρας του τοπογραφικού ανάγλυφου από τις ψηφιοποιημένες υψομετρικές καμπύλες δύο περιοχών, των νήσων Ιθάκης και Κεφαλληνίας, σε ένα ευρύ φάσμα κλιμάκων.

Η συγκεκριμένη επιλογή των περιοχών, να είναι νησιά, οφείλεται στο γεγονός ότι η χρησιμοποιούμενη μέθοδος προϋποθέτει δεδομένα κλειστών γραμμών, για να είναι εφικτός ο υπολογισμός του εμβαδού και της περιμέτρου.



Σχήμα 10.2 Διαγράμματα εμβαδού-περιμέτρου υψομετρικών καμπύλων της Ιθάκης.



Σχήμα 10.3 Διαγράμματα εμβαδού-περιμέτρου υψομετρικών καμπύλων της Κεφαλληνίας.

Για την εφαρμογή αυτή τα δεδομένα πάρθηκαν από τέσσερις χάρτες, που απεικονίζουν τα δύο νησιά, με κλίμακες αντίστοιχα: 1:1M, 1:500K, 1:250K και 1:100K. Με τους χάρτες αυτούς αντιπροσωπεύονται σημαντικά διαφορετικοί βαθμοί γενίκευσης των υψομετρικών καμπύλων.

Η ψηφιοποίηση των υψομετρικών καμπύλων, των δύο νησιών, έγινε με το πρόγραμμα *INMAP* χρησιμοποιώντας ψηφιοποιητή. Για κάθε περίπτωση (περιοχή και κλίμακα) χρησιμοποιώντας τα προγράμματα *LENGTH*, *AREA* και *REGRES* του πακέτου προσδιορίζονται οι ευθείες

παλινδρόμησης του διπλού λογαριθμικού διαγράμματος του εμβαδού ως προς την περίμετρο σχήματα 10.2 και 10.3).

Πίνακας 10.1 Αποτελέσματα παλινδρόμησης για το τοπογραφικό ανάγλυφο της Ιθάκης.

α/α	<i>IΘAKH</i>	b_4	D	ρ
1	1:1M	$1,76 \pm 0,12$	$1,14 \pm 0,08$	0,9706
2	1:500K	$1,68 \pm 0,05$	$1,19 \pm 0,04$	0,9934
3	1:250K	$1,66 \pm 0,09$	$1,21 \pm 0,06$	0,9879
4	1:100K	$1,67 \pm 0,05$	$1,20 \pm 0,04$	0,9923

Στους πίνακες 10.1 και 10.2 καταγράφονται τα αποτελέσματα των γραμμικών παλινδρομήσεων για τις εφαρμογές της Ιθάκης και Κεφαλληνίας αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στον συντελεστή γραμμικής συσχέτισης (ρ), την κλίση της ευθείας παλινδρόμησης (b_4) και την κλασματική διάσταση (D), όπως υπολογίζεται από τη σχέση που αναφέρεται στην ενότητα 1.3.4.

Πίνακας 10.2 Αποτελέσματα παλινδρόμησης για το τοπογραφικό ανάγλυφο της Κεφαλληνίας.

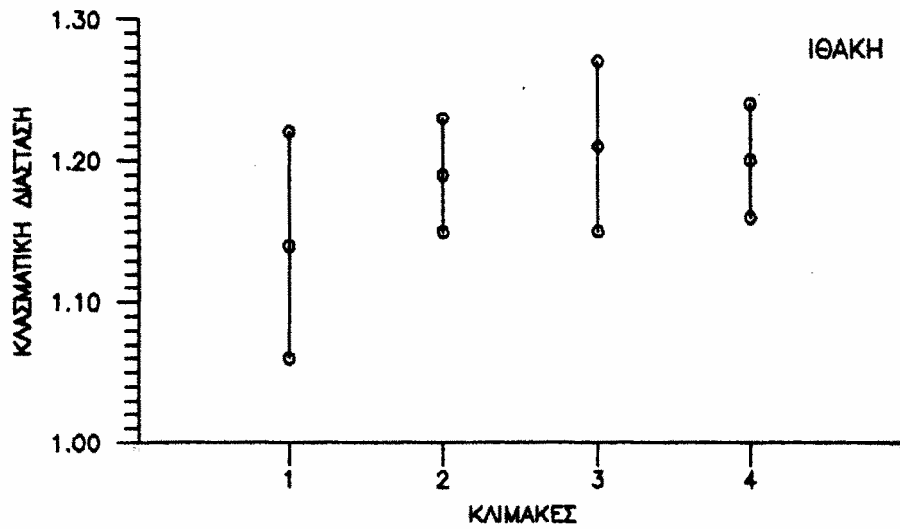
α/α	<i>ΚΕΦΑΛΛΗΝΙΑ</i>	b_4	D	ρ
1	1:1M	$1,62 \pm 0,05$	$1,24 \pm 0,04$	0,9928
2	1:500K	$1,67 \pm 0,07$	$1,20 \pm 0,05$	0,9917
3	1:250K	$1,56 \pm 0,07$	$1,28 \pm 0,06$	0,9905
4	1:100K	$1,63 \pm 0,13$	$1,24 \pm 0,10$	0,9937

Ο κλασματικός χαρακτήρας του τοπογραφικού ανάγλυφου όπως απεικονίζεται με τις υψομετρικές καμπύλες στην εφαρμογή αυτή, διαπιστώνεται με την επαλήθευση των δύο πρώτων στατιστικών ελέγχων (ενότητα 10.2) για 99% και 95% επίπεδα εμπιστοσύνης, αντίστοιχα. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση της Ιθάκης στην κλίμακα 1:1M, όπου ο δεύτερος στατιστικός έλεγχος επαληθεύεται για 90% επίπεδο εμπιστοσύνης. Ο τρίτος στατιστικός έλεγχος, σημαντικότητας της προσδιοριζόμενης τιμής της κλασματικής διάστασης, επαληθεύεται για 99% επίπεδο εμπιστοσύνης.

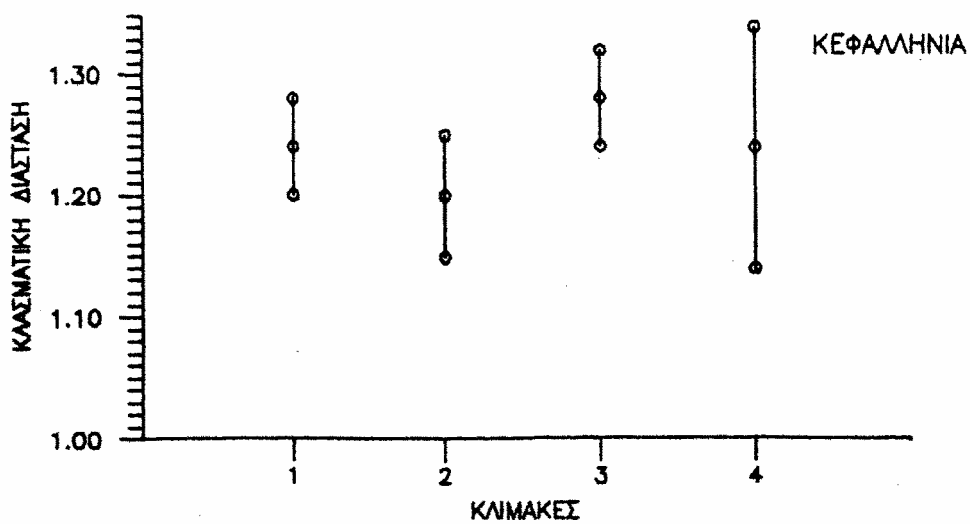
Στα σχήματα 10.4 και 10.5 απεικονίζονται γραφικά οι τιμές της κλασματικής διάστασης με την ζώνη της τυπικής απόκλισης για κάθε περίπτωση.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που καταγράφονται στους πίνακες 10.1 και 10.2 συμπεραίνεται με κατηγορηματικό τρόπο, όσο αφορά τις συμβάσεις που θεωρήθηκαν, ο κλασματικός χαρακτήρας του τοπογραφικού ανάγλυφου, όπως

απεικονίζεται με τις υψομετρικές καμπύλες, για την περίπτωση της Ιθάκης και της Κεφαλληνίας.



Σχήμα 10.4 Κλασματική διάσταση και ζώνη τυπικής απόκλισης για την περίπτωση της Ιθάκης.



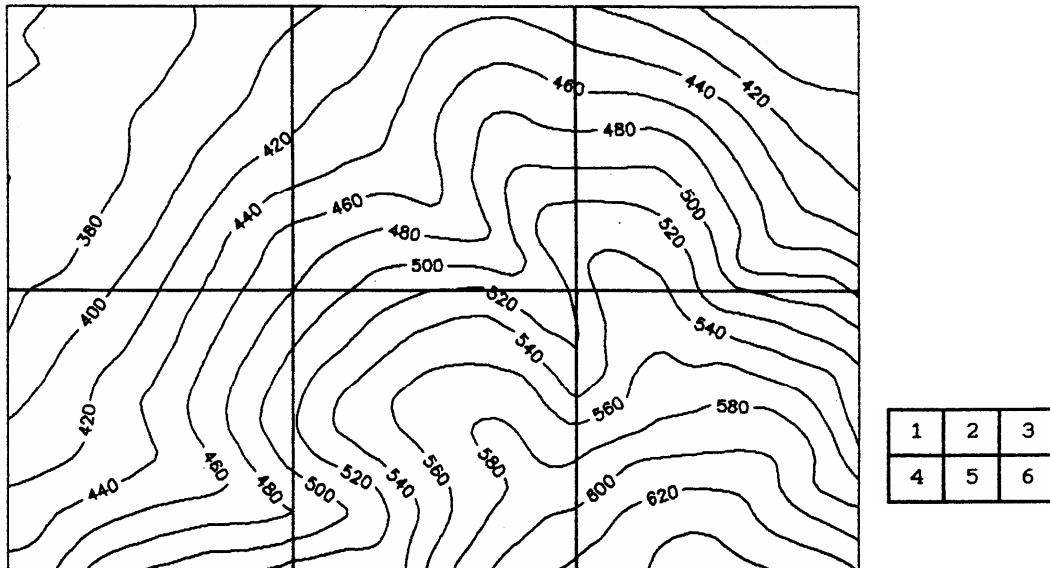
Σχήμα 10.5 Κλασματική διάσταση και ζώνη τυπικής απόκλισης για την περίπτωση της Κεφαλληνίας.

Η τιμή της κλασματικής διάστασης όπως υπολογίζεται από την μέση τιμή των δειγμάτων, χρησιμοποιώντας ως βάρη τα αντίστροφα των μεταβλητοτήτων, για την Ιθάκη είναι: $D = 1,19$ και για την Κεφαλληνία: $D = 1,25$.

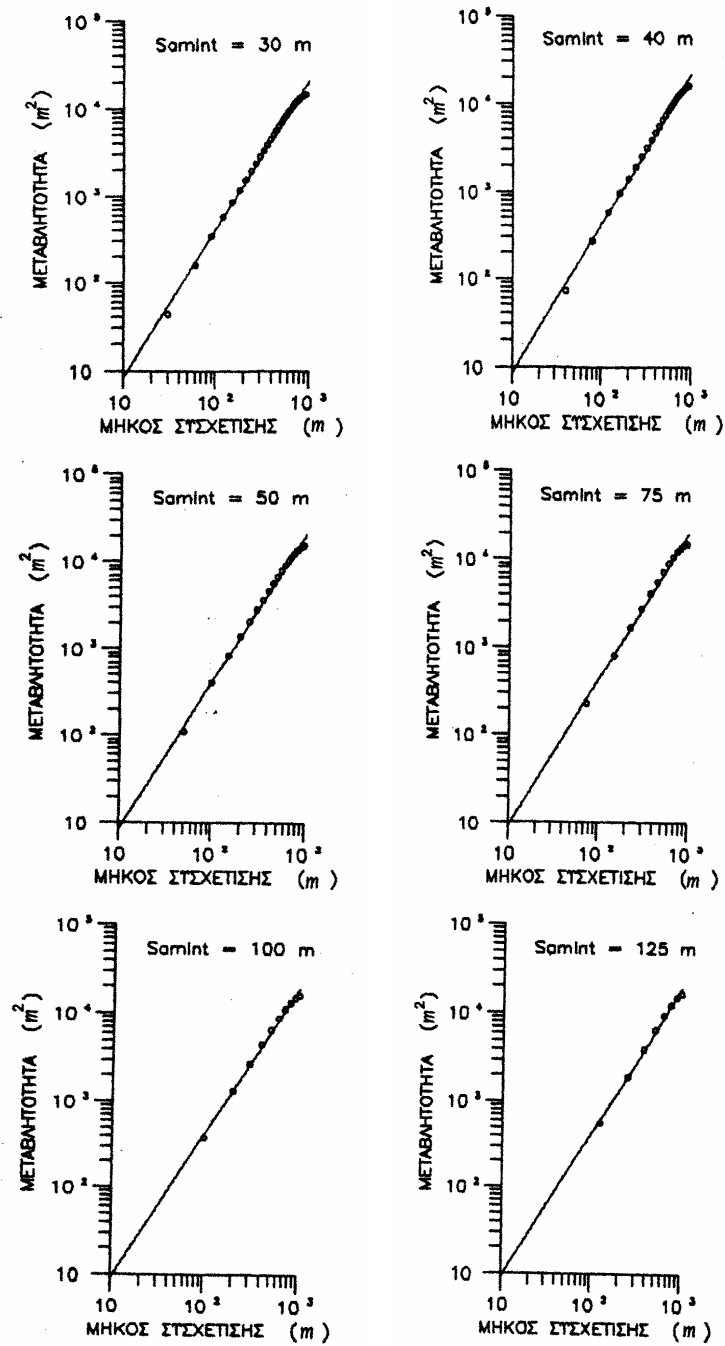
10.2.2 Κλασματικός χαρακτήρας ΨΜΥ

Με την εφαρμογή αυτή μελετάται ο κλασματικός χαρακτήρας του τοπογραφικού ανάγλυφου ΨΜΥ, για ένα ευρύ φάσμα διαστημάτων δειγματοληψίας.

Για ψηφιακά δεδομένα οργανωμένα με την μορφή ψηφιακού μοντέλου μπορεί να θεωρηθεί ότι το διάστημα δειγματοληψίας αποτελεί ισοδύναμη έννοια με την κλίμακα του χάρτη. Τα ΨΜΥ της εφαρμογής δημιουργήθηκαν με το σύστημα που περιγράφεται στο κεφάλαιο 11. Τα δεδομένα ψηφιοποιήθηκαν με χειροκίνητη ψηφιοποίηση, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα *INMAP*, ενός τμήματος του χάρτη της Γ.Υ.Σ., κλίμακας 1:5.000, με αριθμό φύλλου 64367 (Κηφισιά) και ισοδιάστασης 4 m. Το τμήμα αυτό καλύπτει μια έκταση διαστάσεων 1,5 km x 1 km, (σχήμα 10.6). Για την περιοχή, που καλύπτει την εφαρμογή, δημιουργήθηκαν έξι διαφορετικά ΨΜΥ με τα παρακάτω διαστήματα δειγματοληψίας: 30 m, 40 m, 50 m, 75 m, 100 m και 125 m.



Σχήμα 10.6 Περιοχή μελέτης για τη διαπίστωση του κλασματικού χαρακτήρα του τοπογραφικού ανάγλυφου από Ψ.Μ.Υ. (κλίμακα 1:10.000, ισοδιάσταση 20m).



Σχήμα 10.7 Διαγράμματα συνάρτησης μεταβλητότητας ΨΜΥ.

Χρησιμοποιώντας τα προγράμματα *VARIOG* και *REGRES*, του συστήματος, προσδιορίζονται για κάθε ΨΜΥ οι ευθείες παλινδρόμησης του διπλού λογαριθμικού διαγράμματος της τυποποιημένης συνάρτησης μεταβλητότητας ως προς το μήκος συσχέτισης, (σχήμα 10.7).

Πίνακας 10.3 Αποτελέσματα παλινδρόμησης για τοπογραφικό ανάγλυφο του ΨΜΥ.

<i>SamInt</i>	b_{32}	D	ρ
30m	1,70 ± 0,02	2,15 ± 0,01	0,9982
40m	1,69 ± 0,02	2,15 ± 0,02	0,9982
50m	1,69 ± 0,02	2,16 ± 0,02	0,9982
75m	1,66 ± 0,04	2,17 ± 0,03	0,9971
100m	1,66 ± 0,04	2,17 ± 0,03	0,9976
125m	1,66 ± 0,05	2,17 ± 0,03	0,9977

Στον πίνακα 10.3 καταγράφονται τα αποτελέσματα των παλινδρομήσεων. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στον συντελεστή γραμμικής συσχέτισης (ρ), την κλίση της ευθείας παλινδρόμησης (b_{32}) και την κλασματική διάσταση (D), όπως υπολογίζεται από τη σχέση (1.12') που αναφέρεται στην ενότητα 1.3.3.

Ο κλασματικός χαρακτήρας του τοπογραφικού ανάγλυφου της περιοχής, όπως απεικονίζεται με τα ΨΜΥ, διαπιστώνεται με την επαλήθευση των δύο πρώτων στατιστικών ελέγχων (ενότητα 10.2) για 99% και 95% επίπεδα εμπιστοσύνης.

Στο σχήμα 10.6 απεικονίζεται η περιοχή σε κλίμακα 1:10.000 και με ισοδιάσταση 20 m.

Πίνακας 10.4 Κλασματική διάσταση υπο-περιοχών ΨΜΥ.

Υπο-περιοχή	b_{32}	D	ρ
1	1,90 ± 0,01	2,05 ± 0,01	0,9999
2	1,71 ± 0,01	2,15 ± 0,01	0,9997
3	1,91 ± 0,02	2,05 ± 0,01	0,9989
4	1,79 ± 0,02	2,11 ± 0,02	0,9987
5	1,56 ± 0,03	2,22 ± 0,02	0,9974
6	1,76 ± 0,01	2,12 ± 0,01	0,9997

Εάν χωριστεί η περιοχή στις έξι υπο-περιοχές, όπως φαίνεται στο σχήμα 10.6 και προσδιοριστεί η κλασματική διάσταση κάθε υπο-περιοχής, διαπιστώνεται ότι η κλασματική διάσταση ακολουθεί την τραχύτητα του τοπογραφικού ανάγλυφου. Οι τιμές των κλασματικών διαστάσεων που καταγράφονται στον πίνακα 10.4, για κάθε υπο-περιοχή, προσδιορίστηκαν με την ίδια ακριβώς διαδικασία που

αναπτύχθηκε προηγούμενα. Χρησιμοποιήθηκαν για την περίπτωση αυτή ΨΜΥ με διάστημα δειγματοληψίας 50 m.

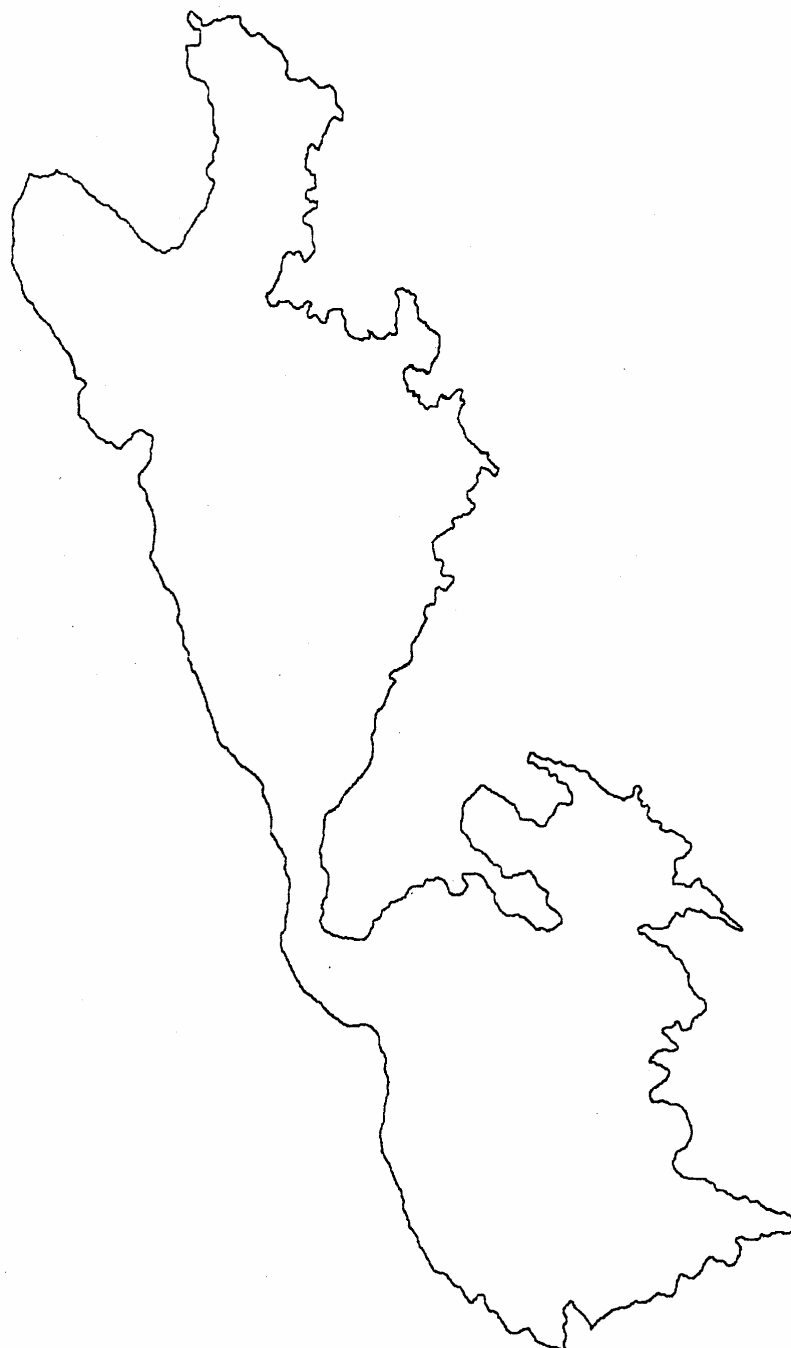
10.3 Εφαρμογή κλασματικού μοντέλου συμπίεσης χαρτογραφικών δεδομένων

Στη ενότητα αυτή δίνεται ένα παράδειγμα εφαρμογής του κλασματικού μοντέλου συμπίεσης γραμμικών ψηφιακών χαρτογραφικών δεδομένων και αξιολογούνται τα αποτελέσματά του. Αντικείμενο της εφαρμογής αποτελεί η συμπίεση της ακτογραμμής της νήσου Ιθάκης.

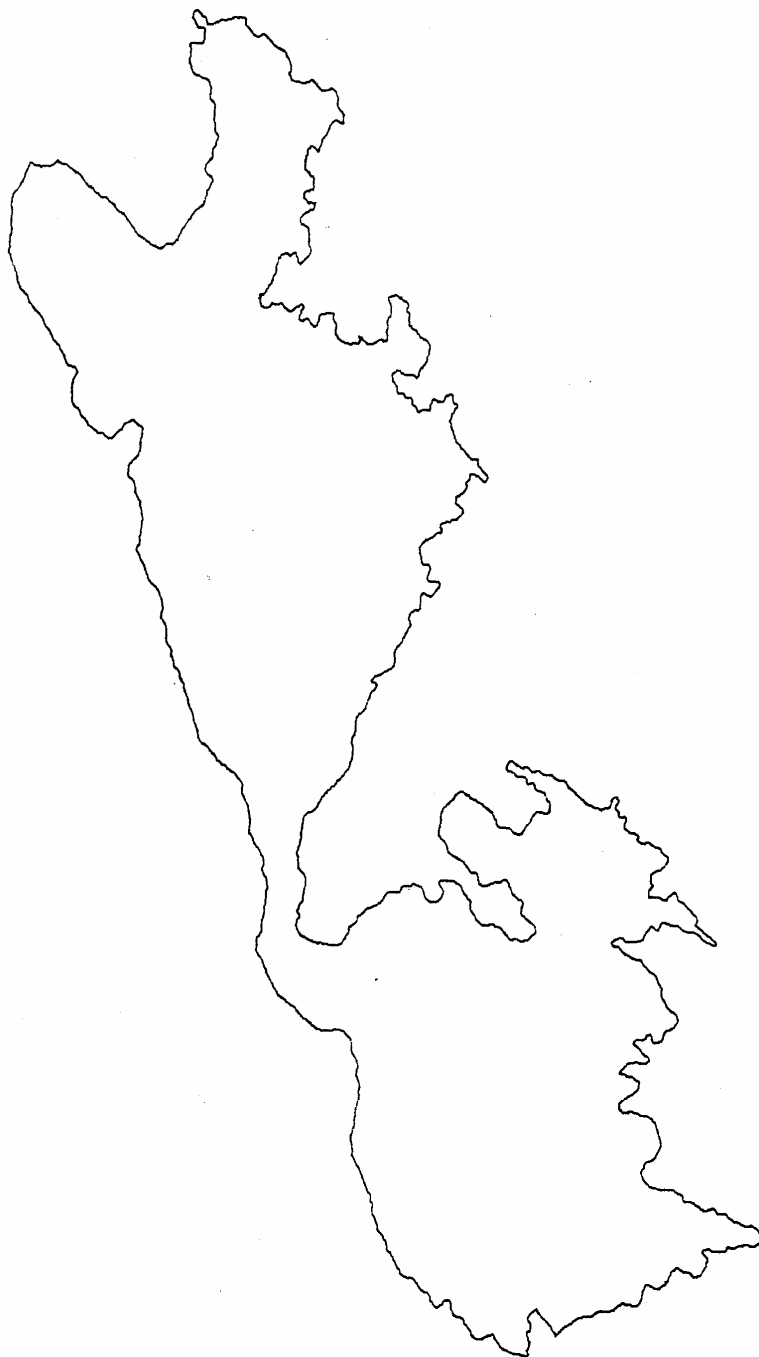
Τα δεδομένα της ακτογραμμής ψηφιοποιήθηκαν από χάρτη κλίμακας 1:100K με σαρωτή. Η διαδικασία της συλλογής και επεξεργασίας των ψηφιακών δεδομένων (μετατροπή από πινακοποιημένη σε διανυσματική δομή) έγινε με το σύστημα που περιγράφεται στην ενότητα 9.1. Η ψηφιοποίηση έγινε με διακριτική ανάλυση ίση με 200 dpi (0,127 mm) και το αποτέλεσμα της ψηφιοποίησης απεικονίζεται στο σχήμα 10.8.

Η επιβεβαίωση του κλασματικού χαρακτήρα και ο προσδιορισμός της κλασματικής διάστασης των ψηφιακών δεδομένων της ακτογραμμής της Ιθάκης γίνεται με τη μέθοδο της συσχέτισης του μήκους ως προς το βήμα μέτρησης. Χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή, τα προγράμματα *LENGTH* και *REGRES* που περιγράφονται στην ενότητα 10.1. Στο σχήμα 10.10 απεικονίζονται σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα οι εκτιμήτριες του μήκους ως προς το βήμα μέτρησης των δειγμάτων της ακτογραμμής, που θεωρούνται ότι αποτελούν τα συλλεγόμενα ψηφιακά δεδομένα. Με τη γραμμική παλινδρόμηση προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα για τις παραμέτρους της ευθείας παλινδρόμησης: ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης έχει την τιμή: $\rho = -0,9765$, και η κλίση της ευθείας την τιμή: $b_1 = -0,090 \pm 0,005$.

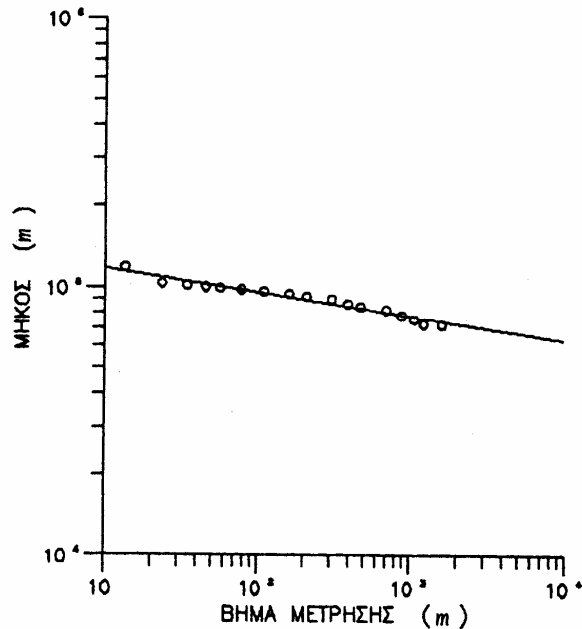
Στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι απαραίτητοι οι δύο πρώτοι στατιστικοί έλεγχοι των παραμέτρων της γραμμικής παλινδρόμησης που καθορίστηκαν στην ενότητα 10.2. Ο πρώτος στατιστικός έλεγχος επιβεβαιώνεται για 99% επίπεδο εμπιστοσύνης και, αντίστοιχα για 95% ο δεύτερος. Τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης επιβεβαιώνουν την ισχυρή γραμμική συσχέτιση και κατ' επέκταση, σύμφωνα με όσα έχουν θεωρηθεί, τον κλασματικό χαρακτήρα της ακτογραμμής της Ιθάκης, όπως απεικονίζεται στον χάρτη. Τα αποτελέσματα, επίσης, επιβεβαιώνουν και την αξιοπιστία της προσδιοριζόμενης τιμής της κλασματικής διάστασης, η οποία είναι: $D = 1,090 \pm 0,005$. Η τιμή της κλασματικής διάστασης D υπολογίζεται από την σχέση (1.9) που αναφέρεται στην ενότητα 1.3.1.



Σχήμα 10.8 Ψηφιοποιημένη ακτογραμμή της Ιθάκης. (Κλίμακα 1:100 Κ – σμίκρυνση εικόνας 78%).



Σχήμα 10.9 Ακτογραμμή της Ιθάκης ύστερα από κλασματική συμπίεση.
(Κλίμακα 1:100 K – σμίκρυνση εικόνας 78%)



Σχήμα 10.10 Διάγραμμα συσχέτισης μήκους με βήμα μέτρησης της ακτογραμμής της Ιθάκης.

Η ψηφιοποιημένη ακτογραμμή της Ιθάκης (σχήμα 10.8) αποτελείται από 8.802 σημεία. Το βήμα ψηφιοποίησης της παραγόμενης ακτογραμμής σύμφωνα με τις ανάγκες της πληροφοριακής βάσης των δεδομένων, στην οποία προορίζεται να αποθηκευτεί, ορίζεται να είναι : $\beta = 0,35$ mm.

Εφαρμόζοντας την σχέση (2.7) που εκφράζει το κλασματικό μοντέλο συμπίεσης γραμμικών δεδομένων και χωρίζοντας την ακτογραμμή σε δύο τμήματα, ο κατάλληλος αριθμός σημείων με τα οποία διατηρείται ο χαρακτήρας της, είναι $N = 2.935$ σημεία.

Στο σχήμα 10.9 απεικονίζεται η ακτογραμμή της Ιθάκης ύστερα από την κλασματική συμπίεση σύμφωνα με την κλίμακα του χάρτη, το βήμα ψηφιοποίησης και την κλασματική της διάσταση. Όπως παρατηρείται από το σχήμα 10.9 διατηρούνται τα χαρακτηριστικά σημεία της ακτογραμμής και εικόνα που παρουσιάζεται είναι απόλυτα οπτικά "ισοδύναμη" με αυτήν του χάρτη πηγή (σχήμα 10.8).

Με το κλασματικό μοντέλο συμπίεσης στο παράδειγμα αυτό επιτυγχάνεται 66,7% εξοικονόμηση στον όγκο της μνήμης των ψηφιακών δεδομένων. Το ποσοστό αυτό της συμπίεσης είναι πολύ σημαντικό, δεδομένου ότι παράλληλα

εξασφαλίζεται σύμφωνα με τη θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας η διατήρηση του χαρακτήρα των ψηφιοποιούμενων χαρτογραφικών δεδομένων.

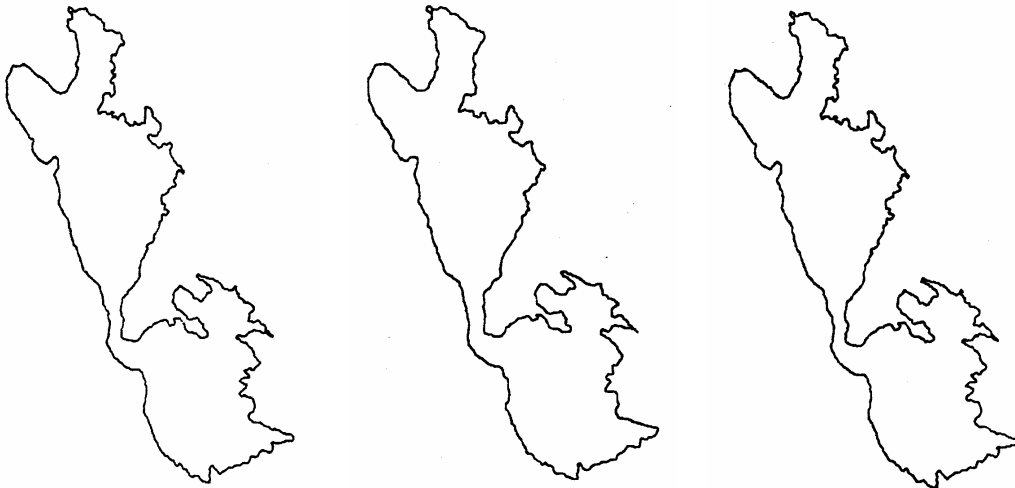
Εάν εφαρμοστεί η διαδικασία του κλασματικού μοντέλου συμπίεσης στα ψηφιακά δεδομένα της εφαρμογής, που περιγράφεται στην ενότητα 9.2, το μέγεθος του τελικού αρχείου θα είναι της τάξης των 2,85 Mb.

Με το παράδειγμα αυτό της εφαρμογής του κλασματικού μοντέλου συμπίεσης προκύπτει το συμπέρασμα, ότι επιτυγχάνεται ένα υψηλό ποσοστό μείωσης του όγκου των ψηφιακών χαρτογραφικών βάσεων δεδομένων, χωρίς να μειωθεί η ακρίβεια και ποιότητα τους.

10.4 Εφαρμογή κλασματικού μοντέλου γενίκευσης χαρτογραφικών δεδομένων

Στη ενότητα αυτή δίνεται ένα παράδειγμα εφαρμογής του κλασματικού μοντέλου γενίκευσης γραμμικών ψηφιακών δεδομένων και αξιολογούνται τα αποτελέσματά του. Αντικείμενο της εφαρμογής αποτελεί η γενίκευση της ακτογραμμής της Ιθάκης με αρχική κλίμακα 1:100K.

Η επιβεβαίωση του κλασματικού χαρακτήρα και ο προσδιορισμός της τιμής της κλασματικής διάστασης των ψηφιακών δεδομένων της ακτογραμμής της Ιθάκης αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, στην ενότητα της εφαρμογής του κλασματικού μοντέλου συμπίεσης.



Σχήμα 10.11 Ακτογραμμή της Ιθάκης σε κλίμακα 1:250 K. Με το κλασματικό μοντέλο γενίκευσης (αριστερά). Με παραδοσιακή γενίκευση (κέντρο). Γενικευμένη με τις "αρχές της επιλογής" (δεξιά). (Σμίκρυνση εικόνας 70%)

Ορίζοντας την κλίμακα του γενικευμένου χάρτη ίση με 1:250K, και εφαρμόζοντας τη σχέση που εκφράζει το κλασματικό μοντέλο γενίκευσης (σχέση 2.5), προκύπτουν για τη γενικευμένη κλίμακα και για την τιμή της κλασματικής διάστασης της ακτογραμμής της Ιθάκης: 1.081 σημεία.



Σχήμα 10.12 Ακτογραμμή της Ιθάκης σε κλίμακα 1:500 K. Με το κλασματικό μοντέλο γενίκευσης (αριστερά). Με παραδοσιακή γενίκευση (κέντρο). Γενικευμένη με τις "αρχές της επιλογής" (δεξιά).

Στο σχήμα 10.8 απεικονίζεται η ψηφιοποιημένη ακτογραμμή της Ιθάκης στην αρχική κλίμακα (1:100K) και στο σχήμα 10.11-αριστερά στην κλίμακα του γενικευμένου χάρτη με το κλασματικό μοντέλο γενίκευσης. Στο σχήμα 10.11-κέντρο απεικονίζεται η ακτογραμμή της Ιθάκης όπως φαίνεται από χάρτη κλίμακας 1:250K. Η εικόνα αυτή εκφράζει τον παραδοσιακό τρόπο γενίκευσης, εμπεριέχοντας επομένως τις υποκειμενικές της λειτουργίες. Στο σχήμα 10.11-δεξιά απεικονίζεται η ίδια ακτογραμμή εφαρμόζοντας την σχέση που εκφράζει τις "αρχές της επιλογής", (σχέση 2.1'). Για να είναι δυνατή η σύγκριση των τριών εικόνων, οι συντεταγμένες των σημείων της ακτογραμμής της Ιθάκης και στις τρεις περιπτώσεις έχουν αναχθεί στο ίδιο σύστημα απεικόνισης.



Σχήμα 10.13 Ακτογραμμή της Ιθάκης σε κλίμακα 1:1 M. Με το κλασματικό μοντέλο γενίκευσης (αριστερά). Με παραδοσιακή γενίκευση (κέντρο). Γενικευμένη με τις "αρχές της επιλογής" (δεξιά).

Τα συμπεράσματα για την αξιολόγηση του κλασματικού μοντέλου γενίκευσης προκύπτουν από την οπτική σύγκριση των τριών εικόνων, θεωρώντας την εικόνα της παραδοσιακά γενικευμένης ακτογραμμής (σχήμα 10.11-δεξιά) ως βάση της σύγκρισης. Η εικόνα της ακτογραμμής της Ιθάκης που έχει γενικευτεί με το κλασματικό μοντέλο (σχήμα 10.11-αριστερά) παρουσιάζει πλησιέστερα το βαθμό γενίκευσης από ότι η εικόνα που έχει γενικευτεί με τις "αρχές της επιλογής" (σχήμα 10.11-δεξιά). Παρατηρείται, επίσης, ότι η εικόνα της γενικευμένης με τις "αρχές της επιλογής" ακτογραμμής, (σχήμα 10.11-δεξιά), έχει "υπερβολικό" επίπεδο λεπτομερειών ακατάλληλων για την κλίμακα του χάρτη. Η υπεροχή αυτή του κλασματικού μοντέλου γενίκευσης οφείλεται στην αξιοποίηση μη γραμμικής σχέσης για τον προσδιορισμό του αριθμού των απαραίτητων σημείων αναπαράστασης, σχέση 2.5). Επίσης, οφείλεται και στην εξάρτηση της σχέσης αυτής από την κλασματική διάσταση (D) της γραμμής, ώστε να δίνεται η δυνατότητα να εκφραστούν από την κλασματική διάσταση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της γραμμής. Το συμπέρασμα αυτό είναι πολύ σημαντικό για την αυτοματοποιημένη γενίκευση, γιατί γίνεται εφικτό να εκφραστούν ποσοτικά ορισμένες από τις υποκειμενικές λειτουργίες της παραδοσιακής γενίκευσης.

Στα σχήματα 10.12 και 10.13 απεικονίζεται η γενικευμένη ακτογραμμή της Ιθάκης σε μεγαλύτερες μεταβολές της κλίμακας του χάρτη (1:500K και 1:1M, αντίστοιχα). Απεικονίζονται, λοιπόν, οι εικόνες της ακτογραμμής ύστερα από την εφαρμογή του κλασματικού μοντέλου γενίκευσης, (σχήμα 10.12-αριστερά και 10.13-αριστερά). Παράλληλα, απεικονίζονται οι εικόνες της ακτογραμμής γενικευμένης σύμφωνα με τον παραδοσιακό τρόπο, σχήμα 10.12-κέντρο και 10.13-κέντρο) και εφαρμόζοντας τις "αρχές της επιλογής", (σχήματα 10.12-δεξιά και 10.13-δεξιά). Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν από τις δύο αυτές περιπτώσεις ως προς την υπεροχή του κλασματικού μοντέλου γενίκευσης και μάλιστα για μεγάλες μεταβολές της κλίμακας του γενικευμένου χάρτη.

Πίνακας 10.5 Αριθμός σημείων από τα οποία αποτελούνται οι ακτογραμμές της Ιθάκης.

<i>Κλίμακα</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1:250K	1.081	3.127	3.521
1:500K	508	1.409	1.760
1:1M	238	640	880

Στον πίνακα 10.5 αναφέρονται οι αριθμοί των σημείων από τα οποία αποτελείται κάθε ακτογραμμή, για τις εφαρμογές της γενίκευσης που παρουσιάζονται. Η στήλη (*a*) αναφέρεται στο κλασματικό μοντέλο γενίκευσης, η στήλη (*b*) στην παραδοσιακή γενίκευση και η στήλη (*c*) στις "αρχές της επιλογής". Από τον πίνακα αυτό φαίνεται, ότι είναι δυνατό με σχετικά μικρό

αριθμό σημείων να διατηρηθούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των χαρτογραφικών γραμμών. Η διαπίστωση αυτή είναι πολύ σημαντική για την ψηφιακή χαρτογραφία, γιατί με την βοήθεια της κλασματικής γεωμετρίας μπορούν να δημιουργηθούν αξιόπιστες ψηφιακές βάσεις χαρτογραφικών δεδομένων με πολύ μικρό όγκο.

Το κλασματικό μοντέλο γενίκευσης, όπως φαίνεται από τις πειραματικές εφαρμογές που παρουσιάστηκαν, δίνει πολύ καλά αποτελέσματα ακόμα και στις περιπτώσεις μεγάλης μεταβολής της κλίμακας.

Κεφάλαιο 11

11. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟΥ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ

Αντικείμενο του κεφαλαίου αυτού αποτελεί η περιγραφή του συστήματος με το οποίο δημιουργούνται τα ΨΜΤΑ, με δεδομένα προερχόμενα από την ψηφιοποίηση υπαρχόντων χαρτών. Παράλληλα, δίνεται ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα εφαρμογής του συστήματος για να εκτιμηθούν οι δυνατότητές του στην ακρίβεια και αξιοπιστία της ψηφιακής καταγραφής της μορφολογίας του τοπογραφικού ανάγλυφου.

Τα ψηφιακά δεδομένα του τοπογραφικού ανάγλυφου συλλέγονται από υπάρχοντες τοπογραφικούς χάρτες με χειροκίνητη ή αυτόματη ψηφιοποίηση. Στο Κεφάλαιο 9 έγινε περιγραφή της διαδικασίας συλλογής και επεξεργασίας που απαιτείται ανάλογα με τον τρόπο ψηφιοποίησης και στο κεφάλαιο 10 έγινε περιγραφή της διαδικασίας με την οποία απαλείφεται η πλεονάζουσα πληροφορία των ψηφιακών δεδομένων σύμφωνα με την κλασματική συμπίεση.

Για την καλύτερη αποτελεσματικότητα του συστήματος δημιουργίας ΨΜΤΑ, τα ψηφιακά δεδομένα του τοπογραφικού ανάγλυφου πρέπει να αποτελούνται από τις υψομετρικές καμπύλες του τοπογραφικού χάρτη πηγής αφενός, αλλά και από χαρακτηριστικά σημεία του τοπογραφικού ανάγλυφου αφετέρου. Τα χαρακτηριστικά σημεία του τοπογραφικού ανάγλυφου αποτελούνται από τοπικά ακρότατα (π.χ. τριγωνομετρικά σημεία) και από σημεία γραμμών έντονης αλλαγής της κλίσης, όπως είναι οι μισγάγγειες. Τα χαρακτηριστικά αυτά σημεία, αν και καταλαμβάνουν πολύ μικρό όγκο ως προς τον συνολικό όγκο των ψηφιακών δεδομένων, συμμετέχουν σε μεγάλο βαθμό στην ακρίβεια και αξιοπιστία των παραγόμενων ΨΜΤΑ.

11.1 Περιγραφή του συστήματος δημιουργίας ΨΜΤΑ

Το προτεινόμενο σύστημα δημιουργίας ΨΜΤΑ περιλαμβάνει τρία εναλλακτικά προγράμματα, κάθε ένα από τα οποία δημιουργεί σε μορφή ψηφιακού μοντέλου ορισμένα από τα μεγέθη που έχουν καθοριστεί (ενότητα 8.3), ανάλογα με την μέθοδο παρεμβολής που χρησιμοποιείται. Τα προγράμματα ονομάζονται *MMEAN*, *MSURF1* και *MSURF2*. Τα τρία αυτά προγράμματα περιλαμβάνουν τον αλγόριθμο δημιουργίας του παράθυρου των ψηφιακών δεδομένων, που περιγράφηκε στην ενότητα 8.1, μειώνοντας δραστικά τον χρόνο επεξεργασίας.

Στο πρόγραμμα *MMEAN* χρησιμοποιείται η μέθοδος παρεμβολής της κινητής μέσης τιμής με βάρη. Οι χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις βάρους αναφέρονται στην ενότητα 8.2.1. Τα προσδιοριζόμενα μεγέθη του προγράμματος *MMEAN* είναι το υψόμετρο, το μέσο υψόμετρο, η τυπική απόκλιση υψομέτρου, το ελάχιστο και μέγιστο υψόμετρο. Με το πρόγραμμα αυτό δεν είναι δυνατό να προσδιοριστούν τα υπόλοιπα μεγέθη, γιατί με την συγκεκριμένη μέθοδο παρεμβολής το τοπογραφικό ανάγλυφο του παράθυρου των ψηφιακών δεδομένων προσομοιώνεται με ένα οριζόντιο επίπεδο.

Στο πρόγραμμα *MSURF1* χρησιμοποιείται η μέθοδος παρεμβολής της κινητής επιφάνειας α' βαθμού. Τα προσδιοριζόμενα μεγέθη είναι το υψόμετρο, η τιμή της μέγιστης κλίσης και ο προσανατολισμός της μέγιστης κλίσης. Με το πρόγραμμα αυτό δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί το μέγεθος της καμπυλότητας, γιατί λόγω της μεθόδου παρεμβολής που χρησιμοποιείται, το τοπογραφικό ανάγλυφο του παράθυρου των ψηφιακών δεδομένων προσομοιώνεται με ένα κεκλιμένο επίπεδο.

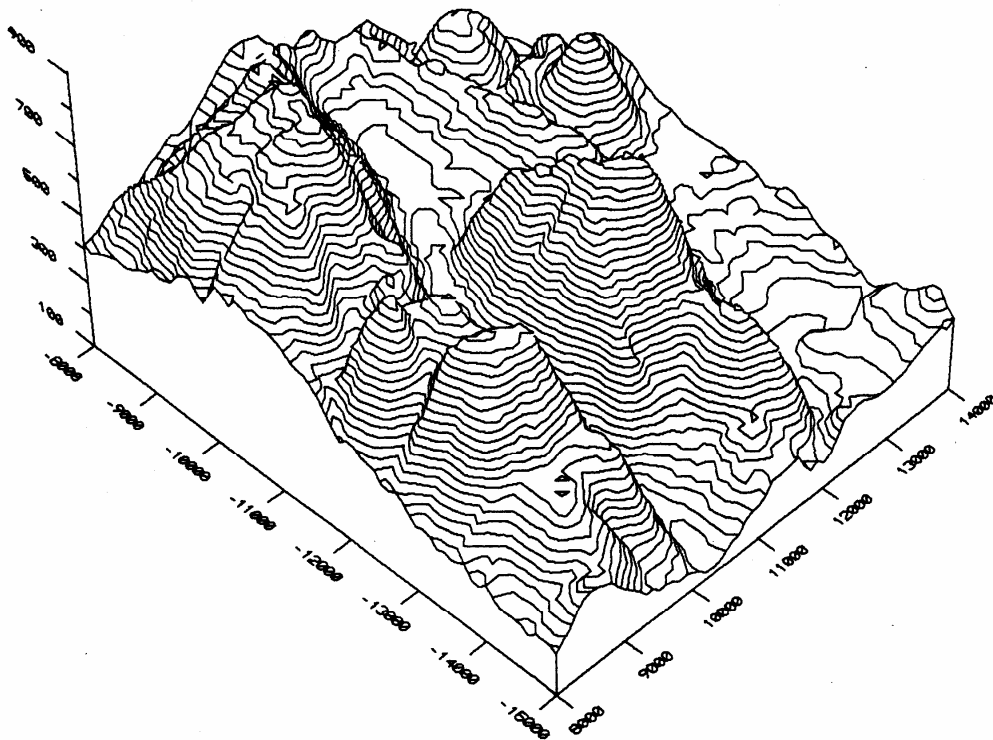
Στο πρόγραμμα *MSURF2* χρησιμοποιείται η μέθοδος παρεμβολής της κινητής επιφάνειας β' βαθμού. Με το πρόγραμμα αυτό προσδιορίζονται το υψόμετρο, η τιμή της μέγιστης κλίσης, ο προσανατολισμός της μέγιστης κλίσης και η τιμή της καμπυλότητας.

Κάθε μέγεθος του παραγόμενου ΨΜΤΑ, που είναι συνεχές και αναφέρεται στο κέντρο του παράθυρου παρεμβολής, μπορεί να απεικονισθεί με υψομετρικές καμπύλες ή άλλης μορφής τρισδιάστατες συνεχείς απεικονίσεις (προοπτικό ή αξονομετρικό). Τα μεγέθη του παραγόμενου ΨΜΤΑ που αναφέρονται σε ολόκληρο το παράθυρο παρεμβολής, δηλαδή, το μέσο υψόμετρο, η τυπική απόκλιση υψομέτρου, το ελάχιστο και μέγιστο υψόμετρο μπορούν να απεικονιστούν με την μορφή της βαθμωτής στατιστικής επιφάνειας, (Cuff and Mattson 1982). Με τον τρόπο αυτό της απεικόνισης διαφυλάσσεται ο χαρακτήρας της ασυνέχειας των τιμών των φαινομένων μεταξύ των γειτονικών παραθύρων. Οι τρισδιάστατες αυτές απεικονίσεις μπορούν να γίνουν χρησιμοποιώντας ένα οποιοδήποτε από τα υπάρχοντα εμπορικά προγράμματα αποδόσεων με το οποίο να έχει προβλεφθεί επικοινωνία.

11.2 Παράδειγμα δημιουργίας ΨΜΤΑ

Αντικείμενο της εφαρμογής αποτελεί η δημιουργία, με την βοήθεια του προτεινόμενου συστήματος, ενός παραδείγματος ΨΜΤΑ μιας αντιπροσωπευτικής ως προς το ανάγλυφο περιοχής.

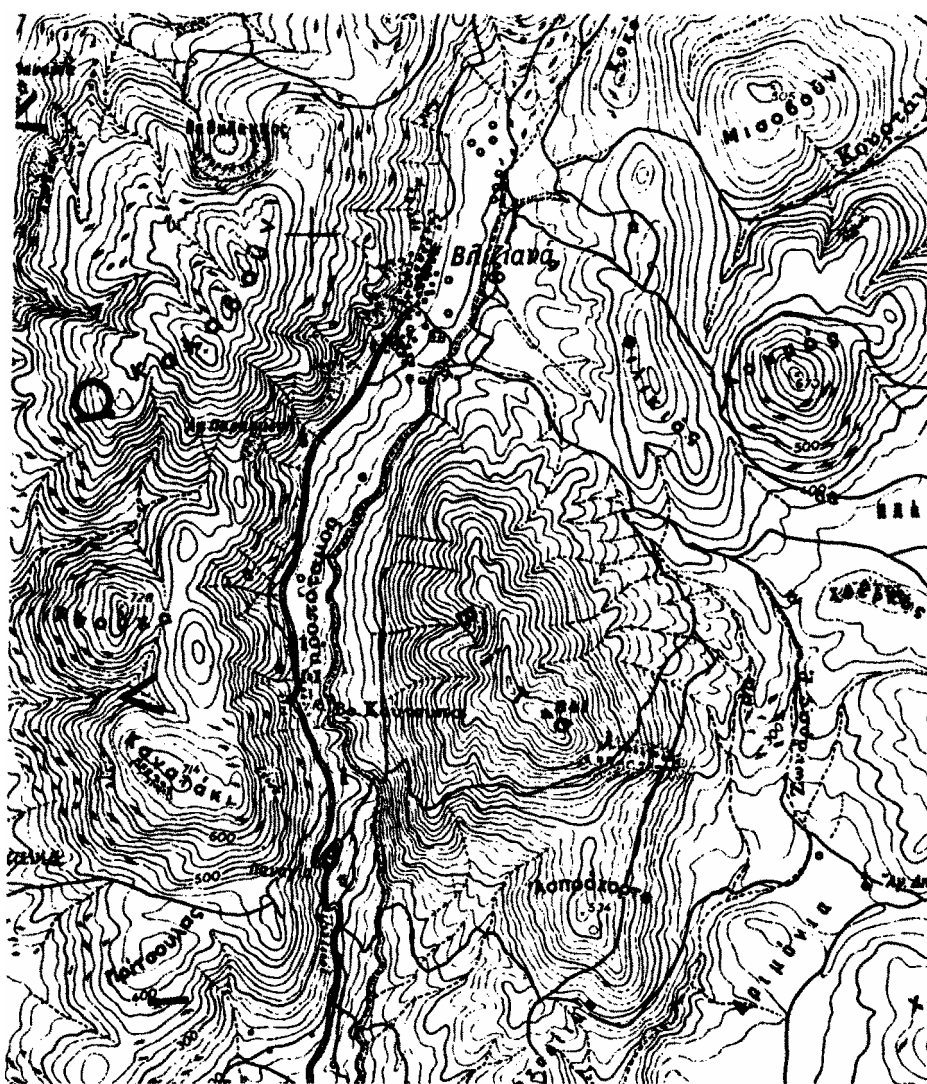
Το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής αποδίδεται σε τρισδιάστατη απεικόνιση στο σχήμα 11.1. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής μελέτης περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα μεταβολών.



Σχήμα 11.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση του ανάγλυφου της περιοχής μελέτης.

Ο χάρτης πηγή που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί τμήμα του τοπογραφικού χάρτη της ΓΥΣ ΑΣΤΑΚΟΣ, κλίμακας 1:50000 και ισοδιάστασης 20 m. Η περιοχή μελέτης καταλαμβάνει έκταση 6 km x 7 km. Στο σχήμα 11.2 απεικονίζεται το τμήμα του χάρτη που χρησιμοποιήθηκε ως πηγή.

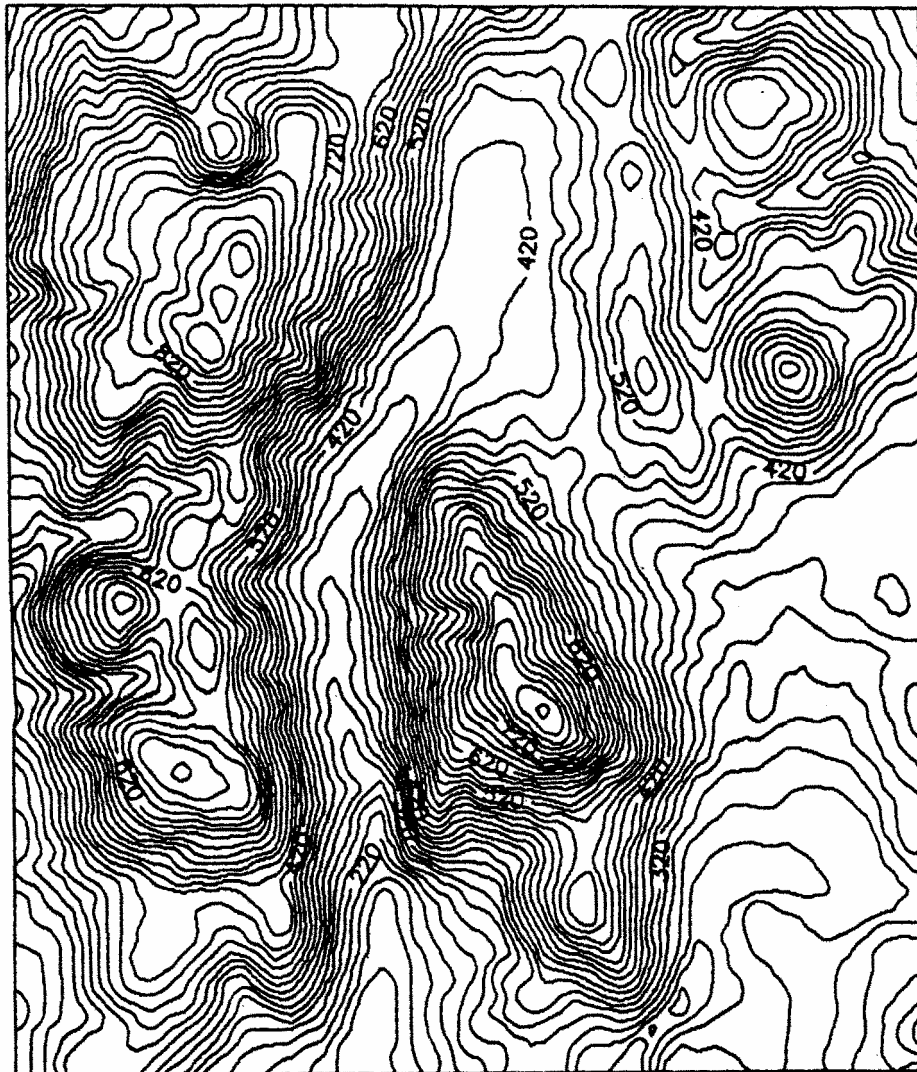
Οι υψομετρικές καμπύλες της περιοχής ψηφιοποιήθηκαν από το χάρτη πηγή με αυτόματη διαδικασία. Η αναγκαία επεξεργασία των ψηφιακών δεδομένων των υψομετρικών καμπύλων έγινε χρησιμοποιώντας το σύστημα που περιγράφεται στην ενότητα 9.



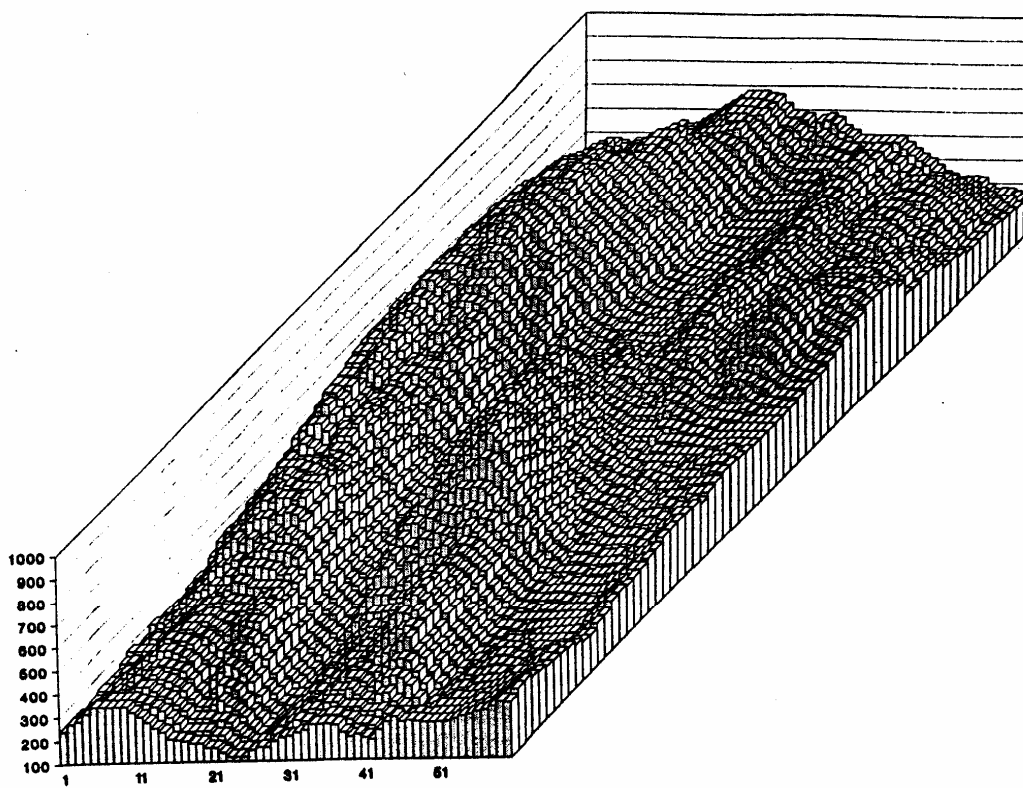
Σχήμα 11.2 Τμήμα του τοπογραφικού χάρτη που απεικονίζει την περιοχή μελέτης. (Κλίμακα: 1:50.000, ισοδιάσταση: 20 m)



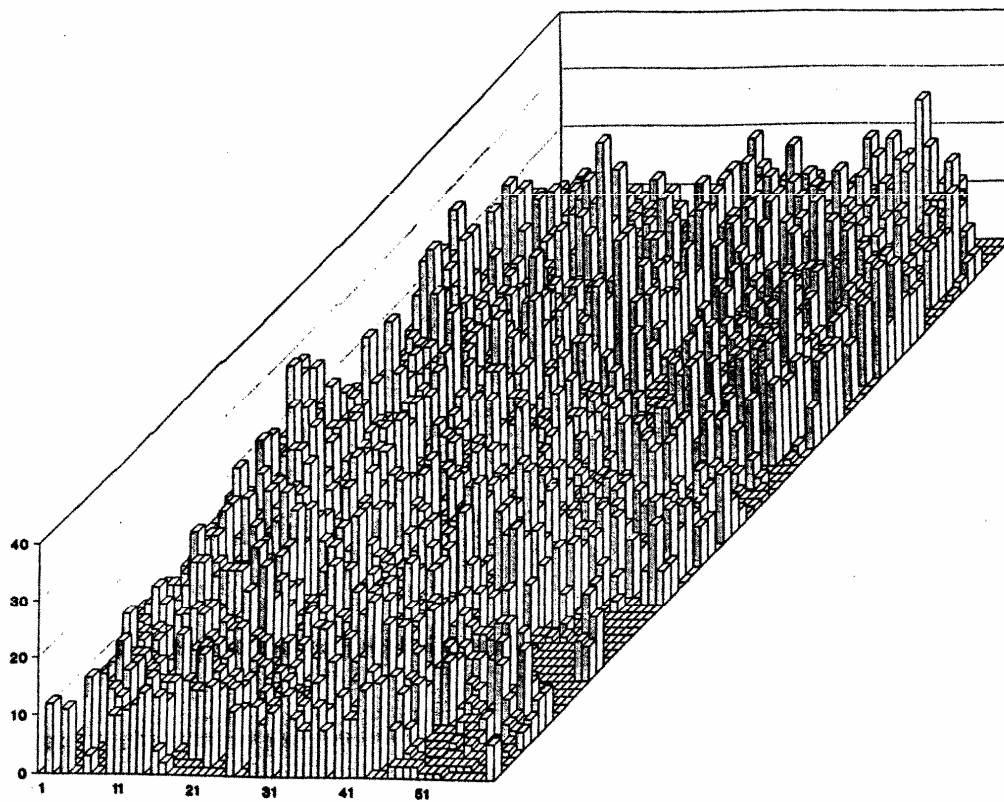
Σχήμα 11.3 Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων. (Συνάρτηση βάρους: $w = 1/r^2$, πρόγραμμα: *MMEAN*, κλίμακα: 1:50.000, ισοδιάσταση: 20 m)



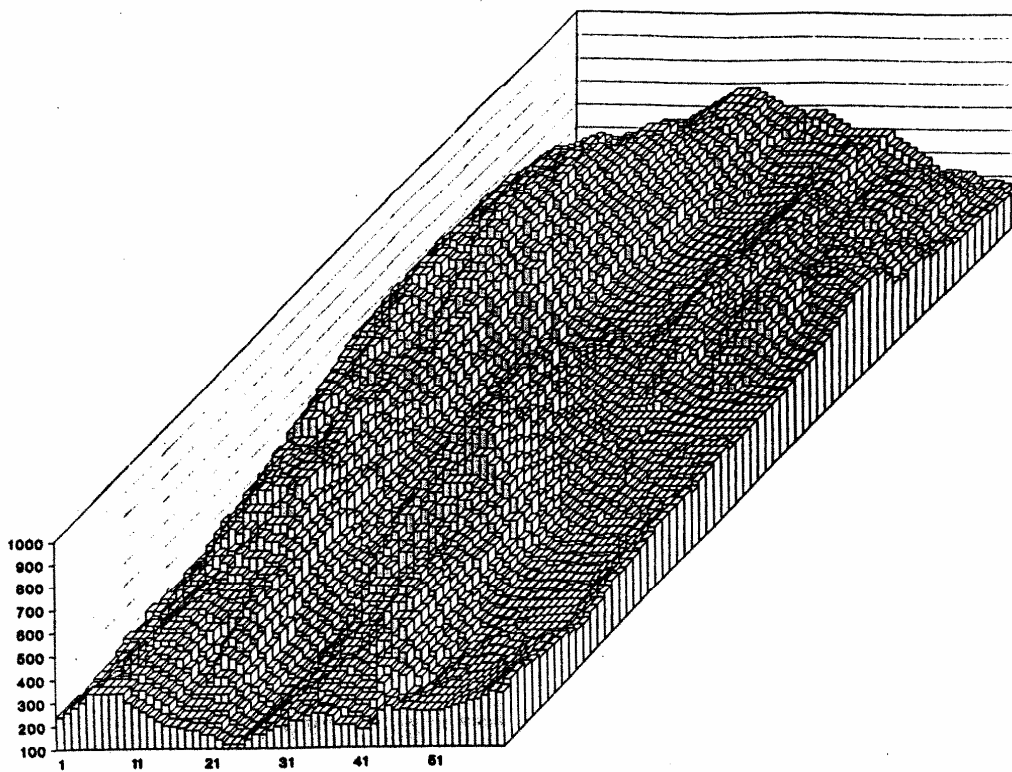
Σχήμα 11.4 Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων. (Συνάρτηση βάρους: $w = \text{EXP}(-20r^2)$, πρόγραμμα: *MMEAN*, κλίμακα: 1:50.000, ισοδιάσταση: 20 m)



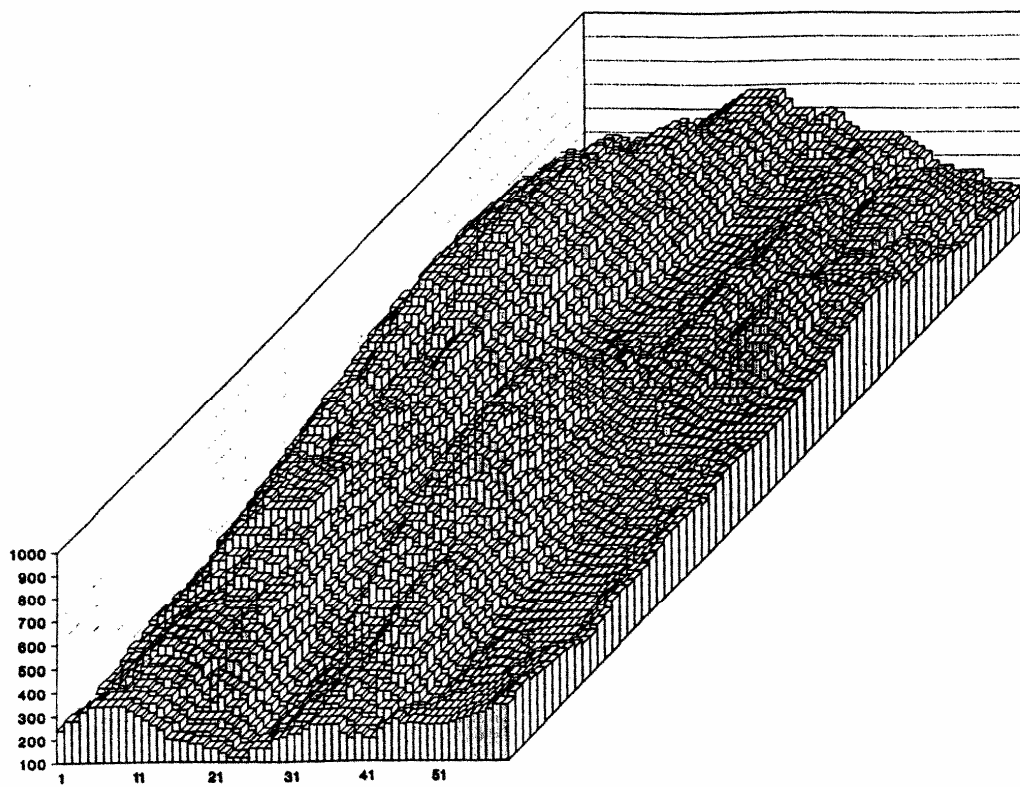
Σχήμα 11.5 Ψηφιακό μοντέλο μέσης τιμής υψομέτρων. (Πρόγραμμα: *MMEAN*)



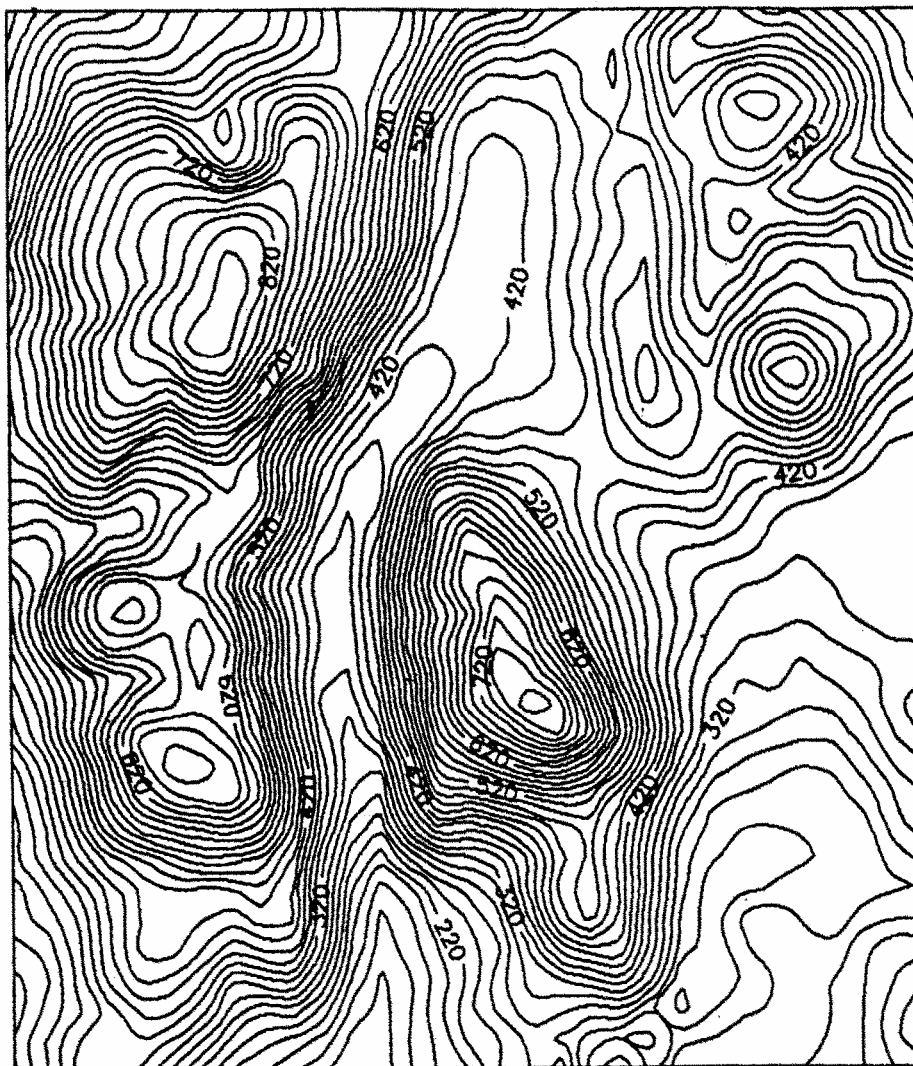
Σχήμα 11.6 Ψηφιακό μοντέλο τυπικής απόκλισης υψομέτρων. (Πρόγραμμα: *MMEAN*)



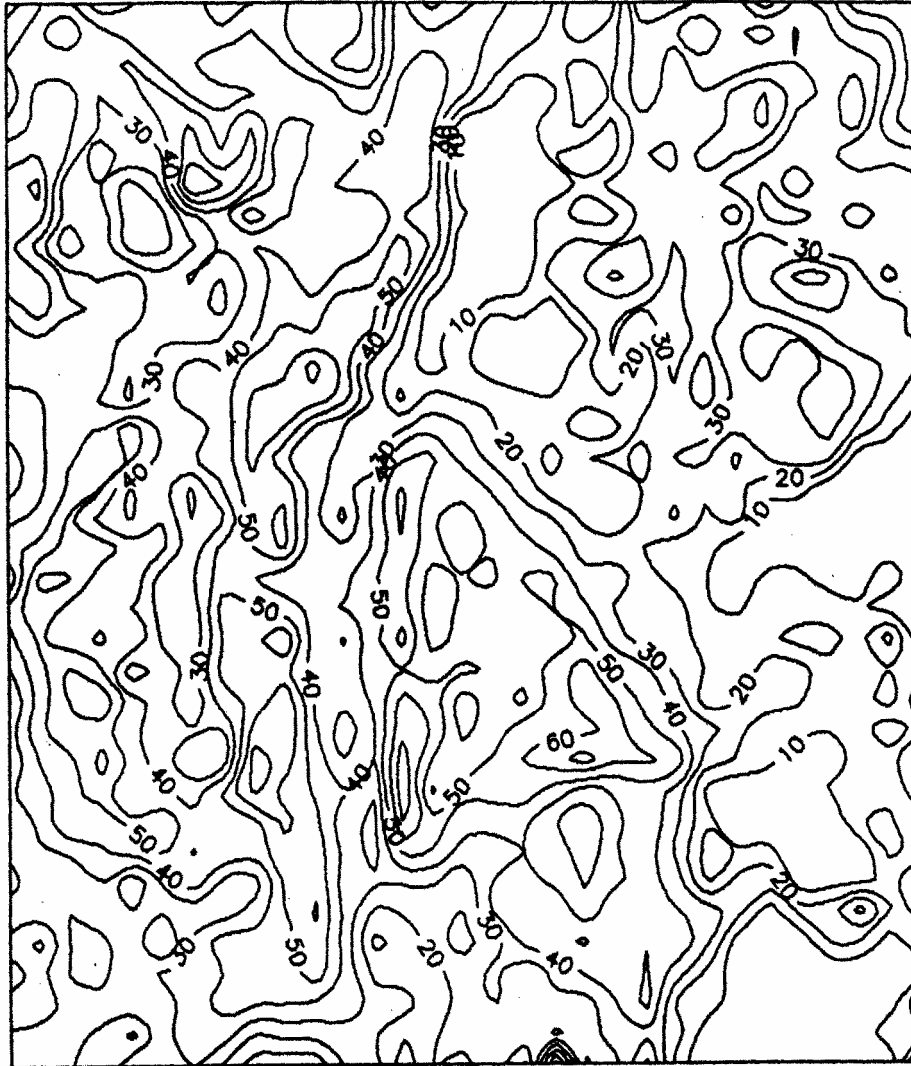
Σχήμα 11.7 Ψηφιακό μοντέλο ελάχιστων υψομέτρων. (Πρόγραμμα: MMEAN)



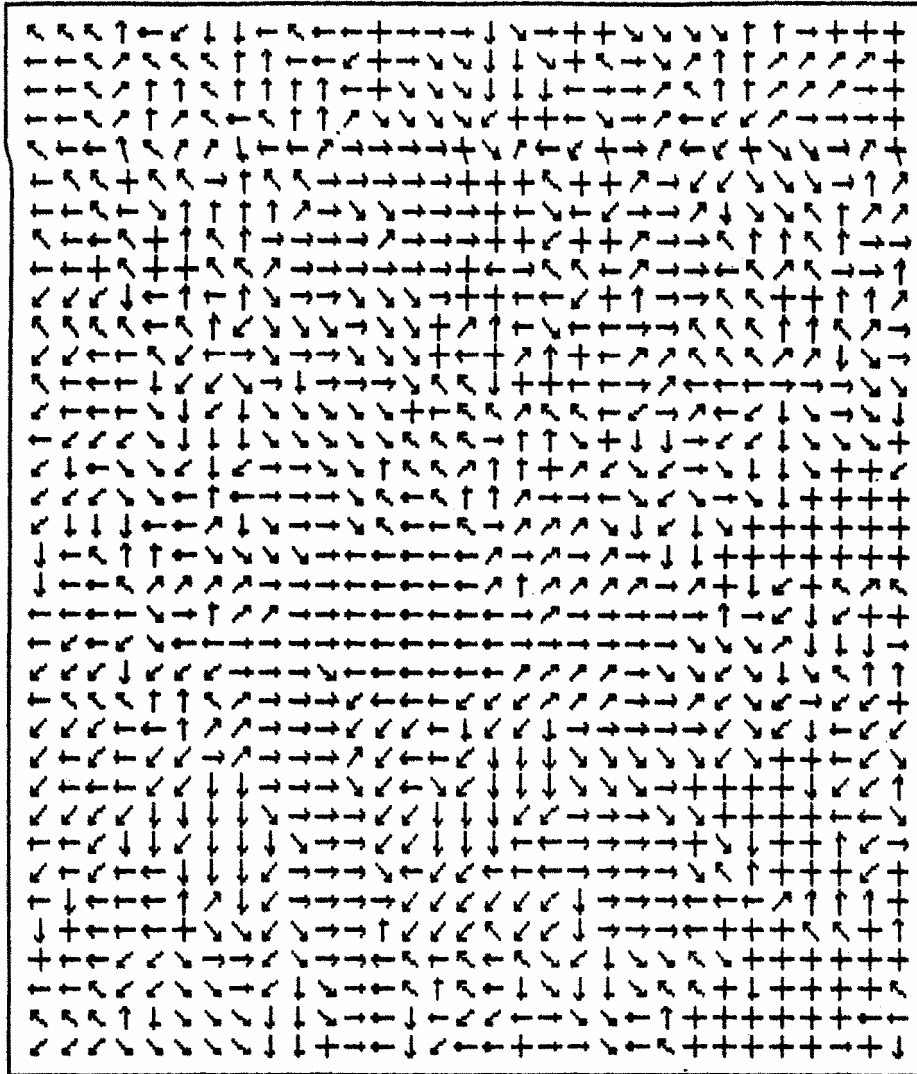
Σχήμα 11.8 Ψηφιακό μοντέλο μέγιστων υψομέτρων. (Πρόγραμμα: *MMEAN*)



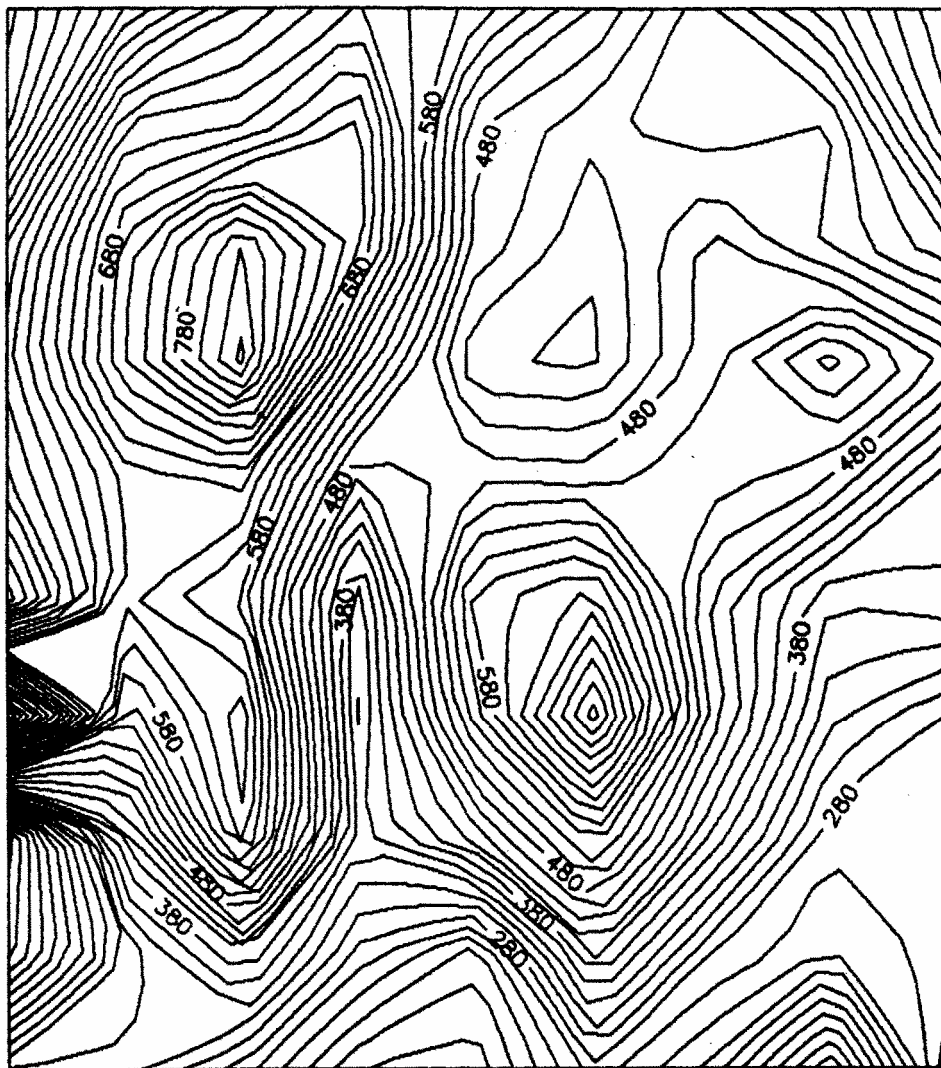
Σχήμα 11.9 Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων. (Πρόγραμμα: *MSURFI*, κλίμακα: 1:50.000, ισοδιάσταση: 20 m)



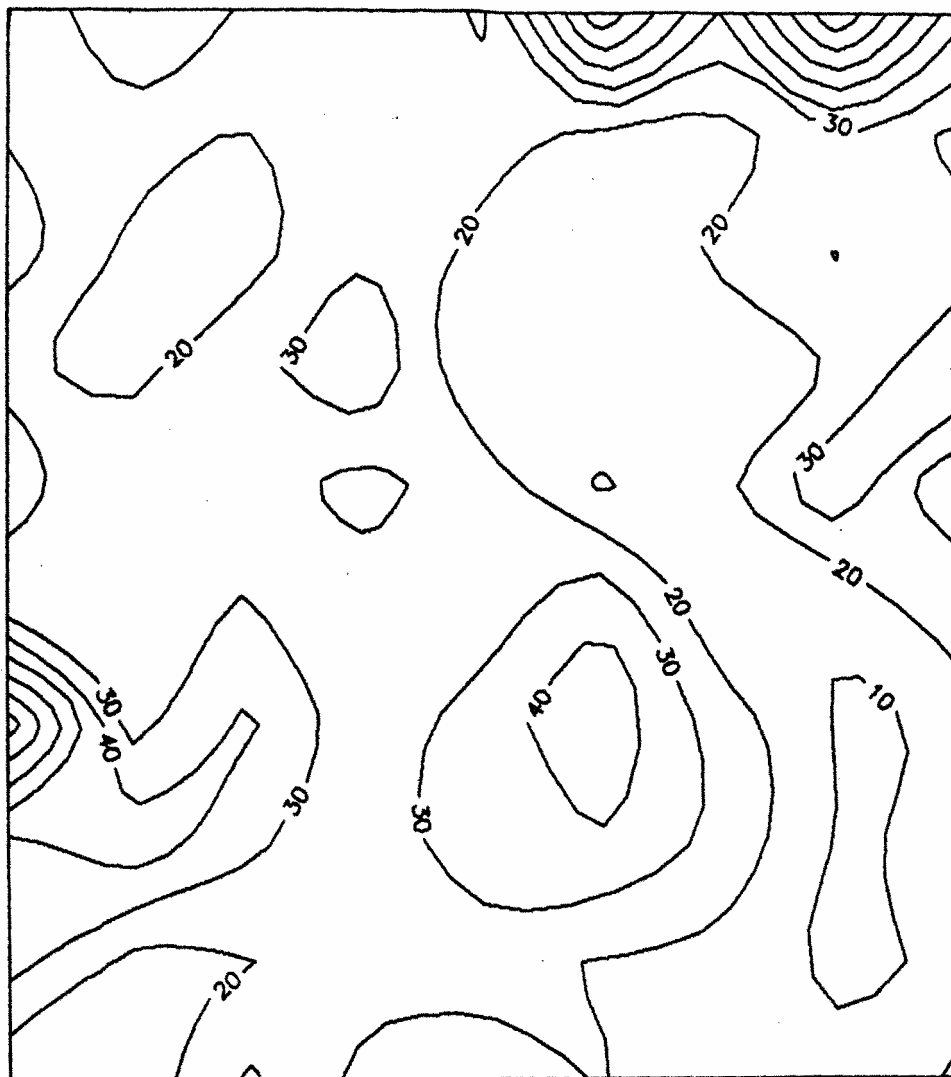
Σχήμα 11.10 Ψηφιακό μοντέλο μέγιστων κλίσεων. (Πρόγραμμα: *MSURFI*, κλίμακα: 1:50.000, ισοδιάσταση: 10%)



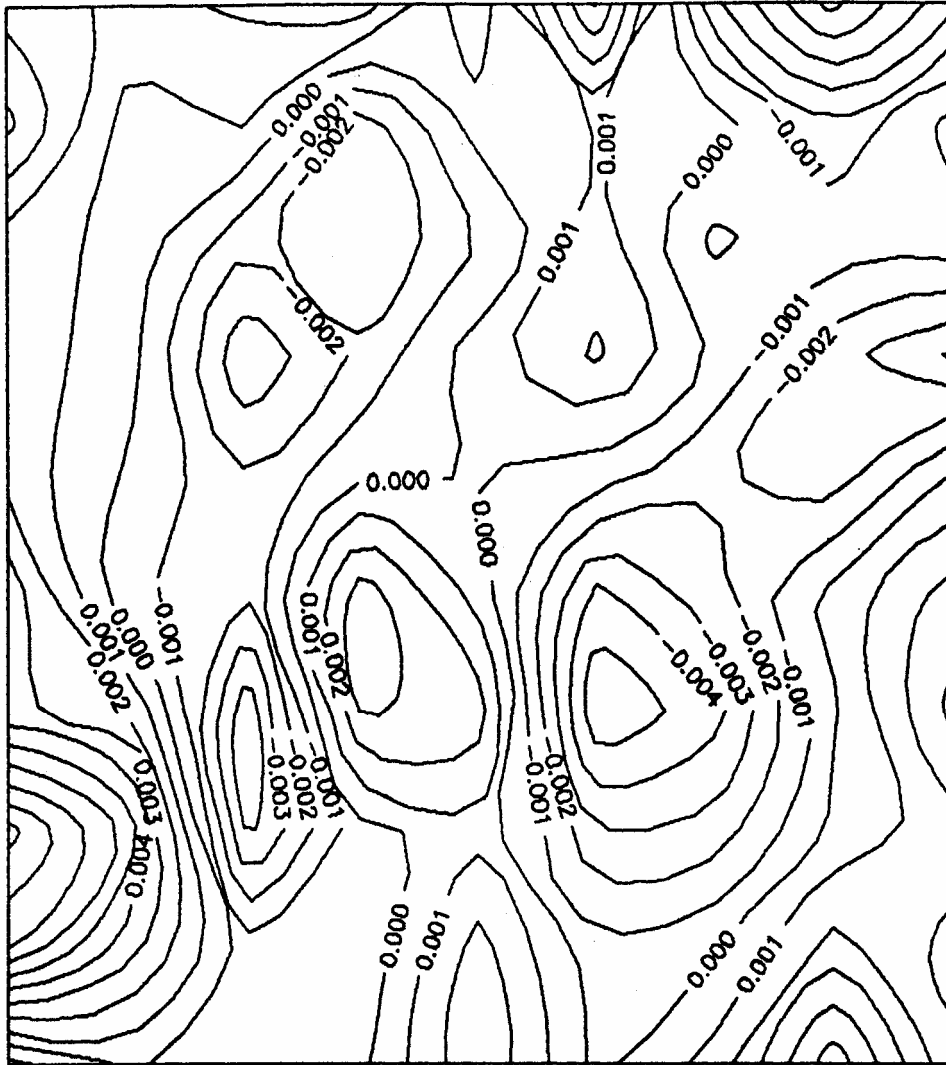
Σχήμα 11.11 Ψηφιακό μοντέλο προσανατολισμού μέγιστων κλίσεων.
(Πρόγραμμα: *MSURF1*, κλίμακα: 1:50.000)



Σχήμα 11.12 Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων. (Πρόγραμμα: *MSURF2*, κλίμακα: 1:50.000, ισοδιάσταση: 20 m)



Σχήμα 11.13 Ψηφιακό μοντέλο μέγιστων κλίσεων. (Πρόγραμμα: *MSURF2*, κλίμακα: 1:50.000, ισοδιάσταση: 10%)



Σχήμα 11.14 Ψηφιακό μοντέλο καμπυλότητας. (Πρόγραμμα: *MSURF2*, κλίμακα: 1:50.000, ισοδιάσταση: 0,001 1/m)

Με το πρόγραμμα *MMEAN* δημιουργήθηκαν δύο ΨΜΥ, με διαφορετικές συναρτήσεις βάρους το κάθε ένα, και όλα τα μεγέθη που μπορούν να εκφραστούν σε μορφή ψηφιακού μοντέλου. Το διάστημα δειγματοληψίας ορίστηκε: $SamInt = 100$ m, δηλαδή κάθε ψηφιακό μοντέλο περιλαμβάνει 61 x 71 σημεία.

Στο σχήμα 11.3 απεικονίζεται το παραγόμενο ΨΜΥ με τη συνάρτηση βάρους $w = 1 / r^2$, ενώ στο σχήμα 11.4 αντίστοιχα με τη συνάρτηση βάρους $w = EXP(-20r^2)$, όπου η έκφραση $EXP(.)$ συμβολίζει την εκθετική συνάρτηση: $f(x) = e^x$. Οι δύο εικόνες του τοπογραφικού ανάγλυφου εμφανίζουν ελάχιστες διαφορές. Η διαπίστωση αυτή ερμηνεύεται με την δυνατότητα επιλογής αρκετά πυκνών διαστημάτων δειγματοληψίας, που επιτρέπει το προτεινόμενο σύστημα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την πυκνότητα των υψομετρικών καμπύλων έχει σαν συνέπεια οι συναρτήσεις βάρους να μην επηρεάζουν σημαντικά τις παρεμβαλλόμενες τιμές. Δεν χρειάζεται, επομένως, κατά τη χρήση του συστήματος να δίδεται μεγάλη έμφαση στην επιλογή των συναρτήσεων βάρους.

Στο σχήμα 11.5 απεικονίζεται το μέγεθος του μέσου υψομέτρου. Στα σχήματα 11.6, 11.7 και 11.8 απεικονίζονται τα μεγέθη της τυπικής απόκλισης, του ελάχιστου και του μέγιστου υψομέτρου.

Με το πρόγραμμα *MSURF1* δημιουργήθηκαν σε μορφή ψηφιακού μοντέλου τα μεγέθη του υψομέτρου, της μέγιστης κλίσης και του προσανατολισμού της μέγιστης κλίσης του τοπογραφικού ανάγλυφου, για την εξεταζόμενη περιοχή. Το διάστημα δειγματοληψίας, για την συγκεκριμένη ομάδα εφαρμογών, ορίστηκε 200 m, δηλαδή κάθε ψηφιακό μοντέλο περιλαμβάνει 31 x 36 σημεία. Το διάστημα δειγματοληψίας είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της προηγούμενης για να προσαρμόζεται καλύτερα το παρεμβαλλόμενο επίπεδο ανάλογα με την πυκνότητα των υψομετρικών καμπύλων.

Στο σχήμα 11.9 απεικονίζεται το ΨΜΥ και στα σχήματα 11.10 και 11.11 η μέγιστη κλίση και ο προσανατολισμός της μέγιστης κλίσης του τοπογραφικού ανάγλυφου. Ο προσανατολισμός της μέγιστης κλίσης του τοπογραφικού ανάγλυφου απεικονίζεται με διανύσματα, τα βέλη των οποίων κατευθύνονται στις οκτώ διευθύνσεις : Β, Β-Α, Α, Ν-Α, Ν, Ν-Δ, Δ και Β-Δ. Όταν η μέγιστη κλίση έχει την τιμή μηδέν, δηλαδή το τοπογραφικό ανάγλυφο του παράθυρου παρεμβολής προσομοιώνεται με οριζόντιο επίπεδο, τότε απεικονίζεται στην θέση αυτή ένας σταυρός (+).

Τέλος με το πρόγραμμα *MSURF2* δημιουργήθηκαν σε μορφή ψηφιακού μοντέλου τα μεγέθη του υψομέτρου, της μέγιστης κλίσης και της καμπυλότητας του τοπογραφικού ανάγλυφου, για την περιοχή μελέτης. Το διάστημα δειγματοληψίας, για την συγκεκριμένη ομάδα εφαρμογών, ορίστηκε: 700 m, δηλαδή κάθε ψηφιακό μοντέλο περιλαμβάνει 9 x 10 σημεία. Το διάστημα δειγματοληψίας είναι ακόμη μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της πρώτης μεθόδου

για να επιτραπεί η προσαρμογή του παρεμβαλλόμενου παραβολοειδούς σε σχέση με την πυκνότητα των υψομετρικών καμπύλων.

Στο σχήμα 11.12 απεικονίζεται το ΨΜΥ και στα σχήματα 11.13 και 11.14 η μέγιστη κλίση και η καμπυλότητα του τοπογραφικού ανάγλυφου.

Για τον προσδιορισμό της ακρίβειας του προτεινόμενου συστήματος στην δημιουργία ΨΜΥ, υπολογίστηκε η μέση τετραγωνική απόκλιση μεταξύ του χάρτη πηγή, (σχήμα 11.2) και του ΨΜΥ που δημιουργήθηκε με το πρόγραμμα *MMEAN*, εφαρμόζοντας την συνάρτηση βάρους $w = 1/r^2$, (σχήμα 11.3).

Για τον έλεγχο χρησιμοποιήθηκαν 100 σημεία, τυχαία κατανεμημένα στην περιοχή μελέτης, των οποίων τα υψόμετρα προσδιορίστηκαν με γραμμική παρεμβολή από τις υψομετρικές καμπύλες. Η τιμή της μέσης τετραγωνικής απόκλισης είναι $\pm 11,1$ m, δηλαδή, ίδιας τάξης μέγεθος με την αβεβαιότητα του τοπογραφικού χάρτη κλίμακας 1:50.000 (το μισό της ισοδιάστασης), που χρησιμοποιήθηκε ως πηγή.

Η χρονική διάρκεια της επεξεργασίας για την δημιουργία των ΨΜΤΑ είναι της τάξης των $3 \div 5$ min, ανάλογα με το πρόγραμμα.

ΜΕΡΟΣ 4^ο
(ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ)

Κεφάλαιο 12

12. ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ

Η εργασία που ολοκληρώνεται με την διατριβή αυτή αναφέρεται στον πρωταρχικό στόχο της Χαρτογραφίας, δηλαδή της περιγραφής, καταγραφής και αναπαράστασης δειγμάτων του γεωγραφικού χώρου που αφορούν το τοπογραφικό ανάγλυφο. Οι ανάγκες μιας επιστήμης-τεχνικής, όπως είναι η Χαρτογραφία, μπορούν να καλυφθούν με την υιοθέτηση ορισμένων υποθέσεων, με τις οποίες μελετάται η περιγραφή, καταγραφή και αναπαράσταση του γεωγραφικού χώρου. Οι υποθέσεις αυτές αποτελούν μια ομάδα συμβάσεων, με τις οποίες ορίζονται οι παρατηρούμενες ποσότητες που αφορούν τον γεωγραφικό χώρο και οι μεταξύ τους σχέσεις. Το σύνολο των υποθέσεων αυτών, με το νόημα που τους αποδόθηκε, έχει επικρατήσει να αποκαλείται "μοντέλο", (Weyl 1949). Η αξία ενός μοντέλου κρίνεται σύμφωνα με τρία κριτήρια (Frederiksen *et al.* 1985): της πληρότητας, της μοναδικότητας και της απλότητας.

Κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση των δύο βασικών στόχων της διατριβής, δηλαδή, της ενσωμάτωσης της θεωρίας της κλασματικής γεωμετρίας στις χαρτογραφικές διεργασίες και της δημιουργίας ενός ολοκληρωμένου ΨΜΤΑ, ικανοποιήθηκαν τα τρία αυτά κριτήρια.

Ειδικότερα, έχει καταβληθεί η προσπάθεια τα προτεινόμενα συστήματα να είναι κατάλληλα και για άλλες χαρτογραφικές πληροφορίες με ιδιότητες ανάλογες των ιδιοτήτων του τοπογραφικού ανάγλυφου. Δηλαδή, για οποιεσδήποτε τρισδιάστατες συνεχείς ποσοτικές πληροφορίες του γεωγραφικού χώρου, ή για γεωγραφικές πληροφορίες που απεικονίζονται με γραμμικά σύμβολα.

Στις ενότητες που ακολουθούν αναλύονται τα επιμέρους συμπεράσματα καθενός από τα προτεινόμενα συστήματα.

12.1 Συμπεράσματα ψηφιακής διαχείρισης υψομετρικών καμπύλων

Η δημιουργία των ψηφιακών βάσεων δεδομένων του τοπογραφικού ανάγλυφου γίνεται με αξιόπιστο τρόπο, σε σύντομο σχετικά χρονικό διάστημα και με μικρό κόστος, με την ψηφιοποίηση με αυτόματη διαδικασία υπαρχόντων τοπογραφικών χαρτών.

Το μεγαλύτερο βάρος στην φάση της ψηφιακής διαχείρισης των δεδομένων κατέχει η διαδικασία της μετατροπής της δομής τους από πινακοποιημένη σε διανυσματική. Για τη διαδικασία αυτή, αφενός χρησιμοποιήθηκαν παράλληλοι αλγόριθμοι, αφετέρου αλγόριθμοι με τους οποίους διατηρείται η σημαντική τοπολογική ιδιότητα της συνεκτικότητας (ενότητα 6.1).

Οι παράλληλοι αλγόριθμοι, σε συνδυασμό με την επέκταση του εξοπλισμού με την προσθήκη παράλληλων επεξεργασιών, συμβάλλουν δραστικά στην μείωση των χρονικών απαιτήσεων της επεξεργασίας. Ειδικότερα, για τον αλγόριθμο των Stefanelli and Rosenfeld, που χρησιμοποιήθηκε, η διαδικασία της εκλέπτυνσης ολοκληρώνεται σε λιγότερες από τρεις επαναλήψεις, αν χρησιμοποιηθεί κατάλληλος συνδυασμός της διακριτικής ανάλυσης με το πάχος των γραμμών που ψηφιοποιούνται.

Με την διατήρηση κατά την επεξεργασία της τοπολογικής ιδιότητας της συνεκτικότητας εξασφαλίζεται η καταλληλότητα του συστήματος στην διαχείριση και άλλου είδους πληροφοριών, για παράδειγμα της ψηφιοποίησης και επεξεργασίας ενός χάρτη πολεοδομικού σχεδιασμού.

Μια σημαντική διαπίστωση αφορά την ποιότητα του ψηφιοποιούμενου μέσου που τοποθετείται στην επιφάνεια του σαρωτή. Η ποιότητα του μέσου ψηφιοποίησης είναι καθοριστική για την χρονική διάρκεια της επεξεργασίας, καθώς επίσης και του κόπου που απαιτείται για την διαδικασία της διόρθωσης των ψηφιακών δεδομένων που θα παραχθούν.

12.2 Συμπεράσματα από την εφαρμογή στην χαρτογραφία της κλασματικής γεωμετρίας

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την υιοθέτηση αυτοματοποιημένων μεθόδων στις διεργασίες της χαρτογραφίας εστιάζεται στην δυσκολία της ποσοτικής έκφρασης των διεργασιών που έχουν έντονο υποκειμενικό χαρακτήρα. Οι διεργασίες με έντονο τον υποκειμενικό χαρακτήρα αντιμετωπίζονται με επιτυχία, κατά την παραδοσιακή χαρτογραφία, από χαρτογράφους οι οποίοι έχουν αποκτήσει σχετικά μεγάλη εμπειρία. Τις περισσότερες φορές οι υποκειμενικής φύσης διεργασίες έχουν άμεση σχέση με

τον χαρακτήρα ή την πολυπλοκότητα του συμβολισμού των χαρτογραφικών φαινομένων.

Παράλληλα, οι χαρτογραφικές διεργασίες αποτελούν διαδικασίες μετασχηματισμού ομοιότητας. Ο λόγος ομοιότητας του μετασχηματισμού καθορίζεται από την κλίμακα σμίκρυνσης των χαρτών.

Το γεγονός ότι, από τις εφαρμογές που έγιναν στην εργασία αυτή, αλλά και από τα συμπεράσματα που έχουν καταγραφεί στην διεθνή βιβλιογραφία, διαπιστώνεται η ιδιότητα της στατιστικής αυτο-ομοιότητας για τον συμβολισμό των χαρτογραφικών φαινομένων, όπως απεικονίζονται στους χάρτες, επιτρέπει την παραδοχή της έκφρασης του χαρακτήρα τους από την κλασματική διάσταση.

Η κλασματική γεωμετρία προσφέρει, επομένως, ένα χρήσιμο θεωρητικό εργαλείο στην πληρέστερη αυτοματοποίηση των χαρτογραφικών διεργασιών για δύο κυρίως λόγους. Ο πρώτος λόγος οφείλεται στην υλοποίηση των κλασματικών μοντέλων συμπίεσης και γενίκευσης με απλούς και γρήγορους αλγορίθμους όπως φαίνεται και στις ενότητες 10.3 και 10.4. Ο δεύτερος στη δυνατότητα ποσοτικής έκφρασης ορισμένων από τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά των συμβόλων των χαρτογραφικών φαινομένων με την κλασματική διάσταση.

Ειδικότερα, αναφερόμενοι στην διεργασία της απλοποίησης κατά την γενίκευση με το κλασματικό μοντέλο, που προτείνεται στην εργασία αυτή, ο συμβολισμός των χαρτογραφικών φαινομένων γενικεύεται με μη γραμμική εξάρτηση από το λόγο των κλιμάκων του αρχικού και του γενικευμένου χάρτη (σχέση 2.5). Δηλαδή, δύο γραμμές με διαφορετικό χαρακτήρα ή πολυπλοκότητα γενικεύονται με τρόπο άμεσα εξαρτώμενο από την κλασματική τους διάσταση.

Με το κλασματικό μοντέλο γενίκευσης, σχέση (2.5), βελτιώνονται σημαντικά τα αποτελέσματα της γενίκευσης σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των "αρχών της επιλογής", δηλαδή, χρησιμοποίηση της σχέσης (2.1) που αναφέρεται στην ενότητα 2.1.2. Τα βελτιωμένα αυτά αποτελέσματα του κλασματικού μοντέλου γενίκευσης διατηρούνται ακόμα και για μεγάλες μεταβολές της κλίμακας του χάρτη.

Επιπλέον, με την υιοθέτηση του κλασματικού μοντέλου γενίκευσης δημιουργούνται προϋποθέσεις αντικειμενικού βαθμού γενίκευσης για όλες τις κλίμακες των χαρτών.

Τα θετικά αποτελέσματα του κλασματικού μοντέλου γενίκευσης σε συνδυασμό με την απλότητα των αλγορίθμων που προϋποθέτει η υλοποίησή του, διαμορφώνουν έναν ισχυρό και γρήγορο τρόπο γενίκευσης με αυτόματη διαδικασία.

Με το κλασματικό μοντέλο συμπίεσης επιτυγχάνεται υψηλό ποσοστό συμπίεσης των χαρτογραφικών ψηφιακών δεδομένων σε συνδυασμό με την διατήρηση του χαρακτήρα του συμβολισμού των χαρτογραφικών φαινομένων. Η υλοποίηση του κλασματικού μοντέλου συμπίεσης προϋποθέτει επίσης

αλγόριθμους, που χαρακτηρίζονται από την απλότητά τους με άμεση συνέπεια την δραστική μείωση της διάρκειας της επεξεργασίας.

Η εφαρμογή, επομένως, του κλασματικού μοντέλου συμπίεσης δημιουργεί αξιόπιστες ψηφιακές βάσεις χαρτογραφικών δεδομένων. Η αξιοπιστία που επιτυγχάνεται κρίνεται κυρίως από την διατήρηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των συμβόλων των χαρτογραφικών φαινομένων. Επιτυγχάνεται, ακόμα, σημαντική μείωση του όγκου των παραγόμενων ψηφιακών βάσεων χαρτογραφικών δεδομένων. Τέλος, μειώνεται δραστικά ο χρόνος συλλογής επεξεργασίας και ανάκτησης των ψηφιακών χαρτογραφικών δεδομένων.

Η μεθοδολογία εφαρμογής της θεωρίας της κλασματικής γεωμετρίας, που αναπτύσσεται στην διατριβή αυτή, είναι κατάλληλη για να εφαρμοσθεί και σε άλλες χαρτογραφικές διεργασίες, που χαρακτηρίζονται από μετασχηματισμό ομοιότητας ή ομοπαράλληλίας.

12.3 Συμπεράσματα προτεινόμενου συστήματος ΨΜΤΑ

Βασικό χαρακτηριστικό του προτεινόμενου συστήματος είναι η καταλληλότητά του για ψηφιακά δεδομένα προερχόμενα από την ψηφιοποίηση υπαρχόντων χαρτών. Η ιδιομορφία των ψηφιακών αυτών δεδομένων εντοπίζεται, κυρίως, στο σχετικά μεγάλο όγκο τους, ακόμα και αν έχουν υποστεί το προτεινόμενο κλασματικό μοντέλο συμπίεσης, με συνέπεια να δημιουργούνται δύο προβλήματα: οι μεγάλες απαιτήσεις σε μνήμη και η μεγάλη χρονική διάρκεια επεξεργασίας.

Τα δύο αυτά προβλήματα αντιμετωπίζονται με σημαντική επιτυχία με τη χρήση του συγκεκριμένου παράθυρου παρεμβολής.

Η αποτελεσματικότητα του συστήματος, πέρα από την πολύ μικρή χρονική διάρκεια επεξεργασίας και τη δυνατότητα λειτουργίας του με απλά υπολογιστικά συστήματα, κρίνεται κυρίως με την ακρίβεια και αξιοπιστία των παραγόμενων ΨΜΤΑ.

Το δεύτερο χαρακτηριστικό του συστήματος αναφέρεται στην δυνατότητα δημιουργίας, σε μορφή ψηφιακών μοντέλων, ορισμένων χαρακτηριστικών γεωμετρικών και στατιστικών μεγεθών της μορφολογίας του τοπογραφικού ανάγλυφου άμεσα από τα ψηφιακά δεδομένα.

Ορισμένα από τα μεγέθη αυτά στα υπάρχοντα συστήματα αποτελούν παράγωγα μεγέθη. Εάν γίνει αποδεκτό το γεγονός ότι, με την μετατροπή μιας ομάδας ψηφιακών δεδομένων ενός μεγέθους σε μορφή ψηφιακού μοντέλου το μέγεθος υφίσταται ένα βαθμό γενίκευσης, τότε τα παραγόμενα από αυτό μεγέθη υφίστανται πάντα σε μεγαλύτερο βαθμό την επίδραση της γενίκευσης. Κατά

συνέπεια, η άμεση παραγωγή σε μορφή ψηφιακών μοντέλων των χαρακτηριστικών μεγεθών του τοπογραφικού ανάγλυφου συνεπάγεται τον προσδιορισμό τους με μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία αφενός, αλλά και οικονομικότερη διαχείριση του χρόνου αφετέρου.

Αποτελεί μελλοντική προσπάθεια η αξιοποίηση των μεγεθών του συστήματος σε χαρτογραφικές εφαρμογές, μεταξύ των οποίων αναφέρονται σαν χαρακτηριστικές η μελέτη ορατοτήτων, η σχεδίαση της σκιάς του τοπογραφικού ανάγλυφου στους χάρτες κ.ο.κ.

Το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου ικανοποιητικά και σε δεδομένα προερχόμενα από διαφορετικές πηγές (από φωτογραμμετρία, ταχυμετρία κ.λπ.), με μία προϋπόθεση, την εξασφάλιση κατάλληλης πυκνότητας των δεδομένων, ώστε να περιλαμβάνεται σε κάθε παράθυρο παρεμβολής ικανός αριθμός σημείων των δεδομένων.

Τέλος, το προτεινόμενο σύστημα είναι κατάλληλο για τη μελέτη και ανάλυση της "μορφολογίας" οποιουδήποτε άλλου χαρτογραφικού φαινομένου με την προϋπόθεση να είναι τρισδιάστατο και συνεχές.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- Akima, H., 1970, "A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures", *Journal of the ACM*, Vol. 17, No. 4, pp. 589-602.
- Akima, H., 1972, "Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures", *Communications of the ACM*, Vol.15, No. 10, pp. 914-918.
- Bahr, H.P., 1978, "Geometrical Analysis and Rectification of LANDSAT MSS Imagery: Comparison of Different Methods", *Nachrichten aus dem Karten und Vermessungswesen*, Series II, No. 36, pp. 25-46.
- Barnsley, M., 1988, *Fractals Everywhere*, Academic Press, Inc., New York, p. 394.
- Beckett, P., 1977, "Cartographic Generalisation", *The Cartographic Journal*, Vol. 14, No. 1, pp. 49-50.
- Berry, M.V. and Z.V. Lewis, 1980, "On the Weierstrass-Mandelbrot fractal function", *Proceedings of Royal Society of London*, A 370, pp. 459-484.
- Boyle, A.R., 1980, "Developments in Equipment and Techniques", in *Computer in Contemporary Cartography*, D. Taylor (ed.), London, John Wiley and Sons, Ltd, pp. 39-57.
- Burrough, P.A., 1981, "Fractal dimensions of landscapes and other environmental data", *Nature*, Vol. 294, pp. 240-242.
- Burrough, P.A., 1986, *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*, Monographs on Soil and Resources Survey, Oxford University Press, New York, p.194.
- Buttenfield, B., 1985, "Treatment of the Cartographic Line", *Cartographica*, Vol. 22, No. 2, pp. 1-26.
- Buttenfield, B., 1989, "Scale-Dependence and Self-Similarity in Cartographic Lines", *Cartographica*, Vol. 26, No. 1, pp. 79-100.
- Carlson, T.R., Erickson J.D., O' Brian D.T. and Pana M.T., 1966, "Computer techniques in mine planning", *Mining Engineering*, May 80, pp. 53-56.

- Chin, R.T., Wan H.K., Stover D.L., and Iverson R.D., 1987, "A One - Pass Thinning Algorithm and Its Parallel Implementation", *Computer Vision Graphics and Image Processing*, Vol. 40, pp 30-40.
- Clarke, A.L., Gruen A. and Loon J.C., 1982, "A Contour Specific Interpolation Algorithm for DEM Generation", Proceedings of the Symposium on *Mathematical Models. Accuracy Aspects and Quality Control*, 7-11 June Helsinki University of Technology, *ISP*, pp. 68-81.
- Clarke, K.C., 1987, "Scale-Based Simulation of Topography", Proceedings of *Auto Carto 8*, Baltimore, Maryland, pp. 680-688.
- Clarke, K.C., 1988, "Scale-Based Simulation of Topographic Relief", *The American Cartographer*, Vol.15, No. 2, pp. 173-181.
- Cuff, D.J. and M.T. Mattson, 1982, *Thematic Maps – Their Design and Production*, Methuen & Co., New York, p.169.
- De Cola, L., 1989, "Fractal Analysis of a Classified LANDSAT Scene", *P.E. & R.S.*, Vol. 55, No. 5, pp. 601-610.
- Deutsch, E.S., 1972, "Thinning Algorithms on Rectangular, Hexagonal, and Triangular Arrays", *Communications of ACM*, Vol. 15, No. 9, pp. 827-837.
- Divenyi, P. and B. Markus, 1985, "Thematic relief mapping by computer", *Mapping Sciences and Remote Sensing*, Vol. 22, No. 1, pp. 53-62.
- Douglas, D.H. and T.K. Peucker, 1973, "Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature", *The Canadian Cartographer*, Vol. 10, No. 2, pp. 112-122.
- Doyle, F.J., 1978, "Digital Terrain Models: An Overview", *P.E. & R.S.*, Vol. 44, No. 12, pp. 1481-1455.
- Dutton, G.H., 1981, "Fractal Enhancement of Cartographic Line Detail", *The American Cartographer*, Vol. 8, No. 1, pp. 23-40.
- Ebner, H. and P. Reiss, 1978, "Hight Interpolation by the Method of Finite Elements", *Informations related to Cartography and Geodesy*, Verlag des Institut fur Angewandte Geodasie, Series II, No. 36, Frankfurt, pp. 79-94.
- Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας, 1984, "Βαρυτομετρική και μαγνητική έρευνα περιοχής Αιτωλοακαρνανίας", Τεχνική Έκθεση, Ε. Μ. Πολυτεχνείο, Αθήνα, σ. 18.
- Feder, J., 1988, *Fractals*, Plenum Press, New York, p. 283.
- Fournier, A., D. Fussell and L. Carpenter, 1982, "Computer Rendering of Stochastic Models", *Communications of the ACM*, Vol. 25, No. 6, pp. 371-384.
- Frederiksen, P., O. Jacobi and K. Kubik, 1985, "A review of current trends in terrain modelling", *The ITC Journal*, Vol. 2, pp. 101-106.

- Freeman, H., 1961, "On the Encoding of Arbitrary Geometric Configurations", *IRE Transactions of Electronic Computers*, Vol. EC-10, 2, June, pp. 260-268.
- Fuchs, H., Z.M. Kedem and S.P. Uselton, 1977, "Optimal Surface Reconstruction from Planar Contours", *Communications of the ACM*, Vol. 20, 10, pp. 693-702.
- Goodchild, M.F., 1980, "Fractals and the Accuracy of Geographical Measures", *Mathematical Geology*, Vol. 12, No. 2, pp. 85-98.
- Gottschalk, H.J., 1975, "The Manipulation of Raster Data", *Informations related to Cartography and Geodesy*, Verlag des Institutes fur Angewandte Geodesie, Series II, No. 32, Frankfurt, pp. 17-26.
- Hardy, R.L., 1971, "Multiquadric Equations of Topography and Other Irregular Surfaces", *J.G.R.*, Vol. 76, No. 8, pp. 1905-1915.
- Hardy, R.L., 1981, "Comparative Studies of Multiquadric Equations and Other Methods of Interpolation and Prediction", Technical Papers of *ASP/ACSM*, Washington D.C., *41th Annual Meeting*, pp. 514-527.
- Hewlett Packard, 1987a, *A Guide to the Tagged Image File Format*, Feb. 4, H.P. Co., 5958-4196, p. 54.
- Hewlett Packard, 1987b, *ScanJet User's Guide*, Apr. 4, H.P. Co., Manual Part No. 09190-90005, p. 51.
- Hewlett Packard, 1987c, *Scanning Gallery User's Guide*, Jan., H.P. Co., Manual Part No. 68357-90001, p. 124.
- Hord, R.M., 1982, "Digital Image Processing of Remotely Sensed Data". In *Notes and Reports in Computer Science and Applied Mathematics*, ed. W. Rheinboldt, Academic Press.
- Horn, B.K.P., 1982, "Hill shading and the reflectance map", *Geo-Processing*, Vol. 2, pp. 65-144.
- Huang, J. and D.L. Turcotte, 1989, "Fractal Mapping of Digitized Images: Application to the Topography of Arizona and Comparisons With Synthetic Images", *J.G.R.*, Vol. 94, No. B6, pp. 7491-7495.
- Hurewicz, W. and H. Wallman, 1948, *Dimension Theory*, Princeton University Press, Princeton, p. 162.
- Imhof, E., 1982, *Cartographic Relief Presentation*, (ed. H.J. Steward), Walter de Gruyter, Berlin, p. 389.
- Jancaitis, J.R. and J.L. Junkins, 1973, "Modelling Irregular Surfaces", *P.E. & R.S.*, Vol. 39, No. 4, pp. 413-420.
- Johannsen, T., 1977, "The Scanner- an Instrument for Quick Digitizing of Detailed Manuscripts", *Nachrichten aus dem Karten-und Vermessungswesen*, Series II, No. 34, pp. 5-23.
- Jones, C.B. and I.M. Abraham, 1987, "Line generalization in a global cartographic database", *Cartographica*, Vol. 24, No. 3, pp. 32-45.

- Junkins, J.L., G.W. Miller and J.R. Jancaitis, 1973, "A Weighting Function Approach to Modelling of Irregular Surfaces", *J.G.R.*, Vol. 78, No. 11, pp. 1794-1803.
- Keates, J.S., 1973, *Cartographic Design and Production*, Longman Inc., New York, p. 240.
- Kratky, V., 1978, "Reflexive Prediction and Digital Terrain Modelling", *P.E. & R.S.*, Vol. 44, No. 5, pp. 569-574.
- Kraus, K. and E.M. Mikhail, 1972, "Linear Least – Squares Interpolation", *P.E. & R.S.*, Vol. 38, No. 10, pp. 1016-1029.
- Krige, D.G., 1964, "Recent developments in South Africa in the application of trend surface and multiple regression techniques to gold ore valuation", *Colorado School of Mines Quarterly*, 59, pp. 795-809.
- Kubik, K. and F. Leberl, 1986, "Fractal Behavior of Terrain Topography", *Technical Papers of ACSM/ASPRS*, Vol. 4, pp. 187-190.
- Lam, N.S., 1983, "Spacial Interpolation Methods A Review", *The American Cartographer*, Vol. 10, No. 2, pp. 129-149.
- Lauer, S., 1972, "Anwendung der Skalaren Prediction auf das Problem des Digitalen Gelandemodells", *Nachrichten aus dem Karten-und Vermessungswesen*, R. I, H. 51, Frankfurt a.M., pp. 105-116.
- Leberl, F., 1973, "Interpolation in square grid DTM", *The I.T.C. Journal*, Vol. 5, pp. 756-807.
- Leberl, F., 1975, "Photogrammetric Interpolation Methods", *P.E. & R.S.*, Vol. 41, No. 5, pp. 603-612.
- Leberl, F.W. and D. Olson, 1982, "Raster Scanning for Operational Digitizing of Graphical Data", *P.E. & R.S.*, Vol. 48, No. 4, pp. 615-627.
- Legates, D.R. and C.J. Willmott, 1986, "Interpolation of Point Values From Isoline Maps", *The American Cartographer*, Vol. 13, No. 4, pp. 308-323.
- Linkwitz, K., 1970, "Digital Gelandemodelle", *Bildmessung und Luftbildwesen*, 38, No. 1.
- Mandelbrot, B.B., 1967, "How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension", *Science*, Vol. 156, No. 3775, pp. 636-638.
- Mandelbrot, B.B., 1975a, *Les Objects Fractals: Forme, Hasard et Dimension*, Flammarion, Paris.
- Mandelbrot, B.B., 1975b, "Stochastic models of the Earth's relief, the shape and the fractal dimension of the coastlines, and the number-area rule for island", *Proceedings of the National Academy of Science of USA*, Vol. 72, pp. 3825-3828.
- Mandelbrot, B.B., 1977, *Fractals: Form, Chance, and Dimension*, W.H. Freeman and Co., San Francisco, p. 365.

- Mandelbrot, B.B., 1982a, *The Fractal Geometry of Nature*, W.H. Freeman and Co., New York, p. 468.
- Mandelbrot, B.B., 1982b, "Comment on Computer Rendering of Fractal, Stochastic Models", *Communications of the ACM*, Vol. 25, No. 8, pp. 581-583.
- Mandelbrot, B.B., 1985, "Self Affine Fractals and Fractal Dimension", *Physica Scripta*, Vol. 32, pp. 257-260.
- Mandelbrot, B.B., D.E. Passoja and A.J. Paullay, 1984, "Fractal Character of fracture surfaces of metals", *Nature*, Vol. 308, 19 April, pp. 721-722.
- Mark, D.M. and P.B. Aronson, 1984, "Scale-Dependent Fractal Dimensions of Topographic Surfaces: An Empirical Investigation, with Applications in Geomorphology and Computer Mapping", *Mathematical Geology*, Vol. 16, No. 7, pp. 671-683.
- Maslov, A.V., A.V. Gordeev and Yu.G. Batrakov, 1984, *Geodetic Surveying*, MIR Publishers, Moscow, p. 652.
- Masson D' Autume, G., 1977, "Surface Modelling by Means of an Elastic Grid", *Photogrammetria*, 35, pp. 65-74.
- McMaster, R. B., 1987, "Automated Line Generalization", *Cartographica*, Vol. 24, No. 2, pp. 74-111.
- McMaster, R.B., 1989a, "Introduction to 'Numerical generalization in Cartography'", *Cartographica*, Vol. 26, No. 1, pp. 1-6.
- McMaster, R.B., 1989b, "The integration of simplification and smoothing algorithms in line generalization", *Cartographica*, Vol. 26, No. 1, pp. 101-121.
- Mikhail, F.M. and F. Ackermann, 1976, *Observations and Least Squares*, T. Y. Crowell Co. Inc., New York, p. 497.
- Monmonier, M.S., 1982, *Computer-Assisted Cartography Principles and Prospects*, Prentice - Hall, Englewood Cliffs, N.J., p. 214.
- Μπαλοδήμου, Α.Μ., 1983, *Ειδικά Θέματα Θεωρίας Σφαλμάτων και Μ.Ε.Τ., Ανώτερη Γεωδαισία και Χαρτογραφία*, Ε. Μ. Πολυτεχνείο, Αθήνα, σ. 16.
- Müller, J.-C., 1986, "Fractal Dimension and Inconsistencies in Cartographic Line Representations", *The Cartographic Journal*, Vol. 23, No. 2, pp. 123-130.
- Müller, J.-C., 1987a, "Optimum Point Density and Compaction Rates for the Representation of Cartographic Lines", *Proceedings of Auto Carto 8*, Baltimore, Maryland, pp. 221-230.
- Müller, J.-C., 1987b, "Fractal and Automated Line Generalization", *The Cartographic Journal*, Vol. 24, No. 1, pp. 27-34.
- Νάκος, Β., 1979, "Αυτόματη Χαρτογράφηση για χάρτες μικρής κλίμακας", *Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας*, Ε. Μ. Πολυτεχνείο, Αθήνα, σ. 81.

- NASA Headquarters, 1988, *Topographic Science Working Group Report to the Land Processes Branch*, Earth Science and Applications Division, Lunar and Planetary Institute, Houston, p. 64.
- Newland, D.E., 1975, *An Introduction to Random Vibration and Spectral Analysis*, Longman Group Ltd., London, p. 285.
- Novasovskiy, B.A., Yu V. Sventek and A.V. Chenyshev, 1988, "Automated Mapping from Scanner Image Interpretation", *Mapping Sciences and Remote Sensing*, Vol. 23, No. 4, pp. 289-294.
- Oswald, H., and H. Raetzsch, 1984, "A System for Generation and Display of Digital Elevation Models", *Geo-Processing*, Vol. 2, pp. 197-218.
- Papo, H.B. and E. Gelbam, 1984, "Digital Terrain Models for Slopes and Curvatures", *P.E. & R.S.*, Vol. 50, No. 6, pp. 695-701.
- Παρασχάκης, Ι. και Α. Φωτίου, 1988, Προβλήματα Μετασχηματισμού Συντεταγμένων στις Ψηφιοποιήσεις Χαρτών", *Ερατοσθένης*, 22, σ. 125-156.
- Pavlidis, T., 1982, *Algorithms for Graphics and Image Processing*, Computer Science Press, Inc., Rockville, Maryland, p. 416.
- Peucker, T.K., R.J. Fowler, J.J. Little and D.M. Mark, 1978, "The Triangular Irregular Network", *Proceedings of the Digital Terrain Models (DTM) Symposium*, St. Louis, Missouri, pp. 516-540.
- Peuquet, D., 1979, "Raster Processing: An Alternative Approach to Automated Cartographic Data Handling", *The American Cartographer*, Vol. 6, No. 6, pp. 129-139.
- Peuquet, D.J. and A.R. Boyle, 1984, *Raster scanning, Processing and Plotting of Cartographic Documents*, SPAD Systems, Ltd, Williamsville, N.Y., p.122.
- Richardson, L.F., 1961, "The Problem of Contiguity: An appendix of statistics of deadly quarrels", *General Systems Yearbook*, 6, pp. 139-187.
- Robinson, A.H., R.D. Sale, J.L. Morrison and P.C. Muehrcke, 1984, *Elements of Cartography*, John Wiley and Sons, New York, p. 544.
- Rosenfeld, A. and J.L. Pfaltz, 1966, "Sequential Operations in Digital Picture Processing", *Journal of the ACM*, Vol. 13, No. 4, pp. 471-494.
- Roy, A.G., G. Gravel and C. Gauthier, 1987, "Measuring the Dimension of Surfaces: A Review and Appraisal of Different Methods", *Proceedings of Auto Carto 8*, Baltimore, Maryland, pp. 68-77.
- Σακελλαρίου, Μ., Β. Νάκος και Χ. Μητσάκακη, 1989, "Η Κλασματική Διάσταση Ασυνεχειών Βράχων - Εφαρμογή στη Γεωφυσική", (Υπό δημοσίευση).
- Sayles, R.S. and T.R. Thomas, 1987, "Surface topography as a nonstationary random process", *Nature*, Vol. 271, 2 February, pp. 431-434.
- Schut, G.H., 1974 "Two Interpolation Methods", *P.E. & R.S.*, Vol. 40, No. 12, pp. 1447-1453.

- Schut, G.H., 1976, "Review of Interpolation Methods for Digital Terrain Models", *The Canadian Surveyor*, Vol. 30, No. 5, pp. 389-412.
- Segu, W.P., 1985, "Terrain Approximation by Fixed Grid Polynomial", *Photogrammetric Record*, 11 (65), pp. 581-591.
- Shelberg, M.C., N. Lam and H. Moellering, 1983, "Measuring the Fractal Dimensions of Surfaces", *Proceedings of Auto Carto 6*, pp. 319-328.
- Shepard, D., 1968, "A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data", *Proceedings of the 23rd National Conference ACM*, pp. 517-524.
- Sprinsky, W.H., 1987, "Transformation of Positional Geographic Data from Paper-Based Map Products", *The American Cartographer*, Vol. 14, No. 4, pp. 359-366.
- Stefanelli, R.S. and A. Rosenfeld, 1971, "Some Parallel Thinning Algorithms for Digital Pictures", *Journal of the ACM*, Vol. 18, pp. 255-264.
- Surkan, A.J., Denny J.R. and J. Batcha, 1964, "Computer contouring new tool for evaluation and analysis of mines", *Engineering of Mining Journal*, 165, pp. 72-76.
- Thapa, K., 1988, "Automatic Line Generalization Using Zero-Crossings", *P.E. & R.S.*, Vol. 54, No. 4, pp. 511-517.
- Thomas, P.D., 1952, *Conformal Projections in Geodesy and Cartography*, U. S. Dep. of Commerce, C. & G.S., Special Publ. No. 251, Washington D. C., p. 142.
- Tobler, W.R., 1989, "An update to 'Numerical map generalization'", *Cartographica*, Vol. 26, No. 1, pp. 7-8.
- Töpfer, F. and W. Pillewizer, 1966, "Principles of Selection", *The Cartographic Journal*, Vol. 3, No. 1, pp. 10-16.
- Τσολάκης Δ., 1989, "Χρήση του DTM στην εύρεση της βέλτιστης θέσης διαδρόμου προσ/απογειώσεων", Πτυχιακή Εργασία, TEI Αθήνας, Τμήμα Τοπογραφίας, Αθήνα, σ. 115.
- Walpole, R.E. and R.H. Myers, 1978, *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, (2nd ed.), McMillan Publishing Co., Inc., New York, p. 580.
- Watson, D.F. and G.M. Philip, 1985, "A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation", *Geo-Processing*, Vol. 2, pp. 315-327.
- Weaver, R.C., 1964, "Relative merits of interpolation and approximating functions in the grade prediction problem", in *Computers in the Mineral Industries*, ed. Parks G. A., Stanford University Publications in the Geological Sciences, pp. 171-185.
- Weyl, H., 1949, *Philosophy of Mathematical and Natural Sciences*, Princeton University Press, Princeton, p. 151.

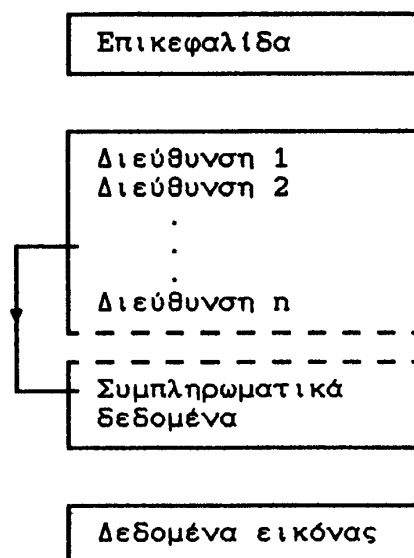
- White, E.R., 1985, "Assessment of Line-Generalization Algorithms Using Characteristic Points", *The American Cartographer*, Vol. 12, No. 1, pp. 17-27.
- Wilf, J.M., 1981, "Chain - code", *Robotics Age*, Vol. 3, No. 2, pp. 143-149.
- Yoeli, P., 1986, "Computer Executed Production of a Regular Grid of Height Points from Digital Contours", *The American Cartographer*, Vol. 13, No. 3, pp. 219-229.
- Φιλίππου, Μ., 1988, "Διερεύνηση κριτηρίων για τη διάκριση σε κατηγορίες του ανάγλυφου", Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Ανώτερης Γεωδαισίας, Ε. Μ. Πολυτεχνείο, Αθήνα, σ. 131.

Παράρτημα

A.1 Αρχεία TIFF

Τα αρχεία TIFF έχουν σχεδιαστεί για τις ανάγκες διαχείρισης δεδομένων σε εκδοτικά προγράμματα για προσωπικούς υπολογιστές (Desktop Publishing). Με τα αρχεία TIFF συνδυάζεται η συνύπαρξη κειμένων με εικόνες εκφρασμένες σε πινακοποιημένη δομή, είτε προέρχονται από αναλογικά σχέδια, ή άλλου είδους αναλογική πηγή.

Τα αρχεία TIFF είναι κατάλληλα για την αποθήκευση ψηφιακών εικόνων, οι οποίες έχουν ψηφιοποιηθεί με σαρωτές. Παράλληλα, περιλαμβάνουν τεχνικές συμπίεσης των δεδομένων και ευελιξία να προστίθενται με ευκολία καινούργια χαρακτηριστικά, με πλήρως ελεγχόμενο τρόπο (Hewlett Packard 1987a).



Σχήμα A.1 Διαγραμματική μορφή της δομής ενός αρχείου τύπου TIFF.

Σε κάθε τυπική μορφή αρχείου TIFF, είναι προκαθορισμένη η οργάνωση και η θέση κάθε μεταβλητής πριν από την ανάγνωση ολόκληρου του αρχείου. Για παράδειγμα, η πληροφορία για τη διακριτική ανάλυση, κατά τη διεύθυνση x της εικόνας, βρίσκεται πάντα αποθηκευμένη στις ίδιες θέσεις. Τα αρχεία τύπου TIFF χρησιμοποιούν μια διαφορετική δομή βασισμένη σε πληροφορίες ενταγμένες σε διευθύνσεις. Η δομή αυτή, άλλωστε, είναι ευρέως διαδεδομένη στο σχεδιασμό της οργάνωσης ψηφιακών βάσεων δεδομένων. Στο σχήμα A.1 απεικονίζεται απόσπασμα διαγράμματος ενός αρχείου TIFF. Κάθε διεύθυνση του αρχείου στην πραγματικότητα είναι και μια επικεφαλίδα. Το πρώτο πεδίο της διεύθυνσης περιέχει τον κωδικό της πληροφορίας. Η διεύθυνση περιλαμβάνει, επίσης, και άλλα πεδία, τα οποία περιέχουν το μήκος και το μέγεθος της πληροφορίας. Η τελευταία μεταβλητή είναι ένας δείκτης, με τον οποίο βρίσκονται τα πραγματικά δεδομένα που αφορούν τη συγκεκριμένη πληροφορία της ψηφιακής εικόνας. Για παράδειγμα, για να διαβαστεί η διακριτική ανάλυση της ψηφιακής εικόνας κατά τη διεύθυνση x, θα πρέπει πρώτα να εντοπιστεί η διεύθυνση: «διακριτική ανάλυση κατά x» διαβάζοντας διαδοχικά τις διευθύνσεις του αρχείου. Στη συνέχεια, η τιμή της διακριτικής ανάλυσης θα βρεθεί σε διαφορετική, ενδεχομένως, θέση του αρχείου, η οποία όμως καθορίζεται από τα πεδία αυτής της διεύθυνσης.

Πίνακας A.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αρχείων τύπου TIFF (Hewlett Packard 1987a).

Πλεονεκτήματα:

Εύκολη προσθήκη νέων δεδομένων
 Κατάλληλα για αποθήκευση εικόνων με πολλαπλές χρήσεις
 Τύπος αρχείων με ευρεία αποδοχή

Μειονεκτήματα:

Δεν υπάρχει τυπικό είδος αρχείου TIFF
 Δεν είναι άμεσα καταληπτός ο τρόπος γραφής
 Απαιτείται επιπρόσθετος προγραμματισμός για τη μετατροπή του αρχείου σε άλλη μορφή

Μια άλλη διαφορά με τα παραδοσιακά αρχεία αποθήκευσης ψηφιακών εικόνων είναι το γεγονός ότι με τα αρχεία τύπου TIFF, είναι εφικτό να προστεθούν και άλλες πληροφορίες, οι οποίες συνήθως δεν περιλαμβάνονται στα προηγούμενα. Τέτοιες πληροφορίες είναι οι τεχνικές συμπίεσης, που τυχόν έχουν υποστεί τα δεδομένα της ψηφιακής εικόνας, διαφορετικές διακριτικές αναλύσεις

για τμήματα της εικόνας, καθώς και διαφορετικού τύπου εικόνες όπως δυαδικές, έγχρωμες κ.ο.κ.

A.2 Γενική δομή αρχείων TIFF

Σε ένα αρχείο TIFF διακρίνονται τρία τμήματα. Τα τμήματα αυτά (σχήμα A.1) είναι η επικεφαλίδα, οι διευθύνσεις και τα δεδομένα της ψηφιακής εικόνας. Κάθε τμήμα αρχείου επιτελεί και διαφορετική λειτουργία.

Πίνακας A.2 Οι κυριότερες διευθύνσεις των αρχείων TIFF (Hewlett Packard 1987a).

<i>α/α</i>	<i>Κωδικός</i>	<i>Περιγραφή</i>
1	255 (0FF)	Καθορισμός υποαρχείων
2	256 (100)	Αριθμός στοιχείων κατά μήκος της εικόνας
3	257 (101)	Αριθμός στοιχείων κατά πλάτος της εικόνας
4	258 (102)	Αριθμός bits στο δείγμα κάθε αρχείου
5	259 (103)	Μέθοδος συμπίεσης δεδομένων εικόνας
6	262 (106)	Φωτομετρική ερμηνεία
7	263 (107)	Διαμόρφωση εικόνας
8	266 (10A)	Διάταξη δεδομένων στο byte
9	273 (111)	Δείκτης της αρχής των δεδομένων της εικόνας
10	274 (112)	Προσανατολισμός εικόνας
11	277 (115)	Αριθμός δειγμάτων ανά στοιχείο εικόνας
12	278 (116)	Αριθμός γραμμών ανά τμήμα εικόνας
13	279 (117)	Αριθμός bytes για το τμήμα της συμπίεσμένης εικόνας
14	280 (118)	Ελάχιστη τιμή δείγματος έγχρωμης εικόνας
15	281 (119)	Μέγιστη τιμή δείγματος έγχρωμης εικόνας
16	282 (11A)	Διακριτική ανάλυση κατά x
17	283 (11B)	Διακριτική ανάλυση κατά y
18	284 (11C)	Περιγραφή δεδομένων έγχρωμης εικόνας

Η επικεφαλίδα παρέχει τη γενική περιγραφή της ερμηνείας της πληροφορίας για ολόκληρο το αρχείο.

Το τμήμα των διευθύνσεων περιγράφει όλες τις αναγκαίες πληροφορίες, που αφορούν τα δεδομένα της ψηφιακής εικόνας. Η δομή των αρχείων επιτρέπει τη χρήση πολλών ομάδων διευθύνσεων αν κρίνεται ότι κάτι τέτοιο είναι χρήσιμο. Πέρα από τη δυνατότητα ευελιξίας που παρέχουν οι διάφορες ομάδες διευθύνσεων, μια εικόνα μπορεί να αποθηκευτεί μέσα στο ίδιο αρχείο TIFF με διαφορετικές διακριτικές αναλύσεις. Η πρώτη για τις ανάγκες εκτύπωσης (ψηλή τιμή διακριτικής ανάλυσης) και η δεύτερη για την οπτικοποίηση σε οθόνη

(χαμηλή τιμή διακριτικής ανάλυσης). Στον πίνακα A.2 αναφέρονται οι κυριότερες διευθύνσεις που παρουσιάζονται στα αρχεία TIFF. Από τις διευθύνσεις αυτές οι 2, 3, 6, 8, 9, 10, 16 και 17 είναι απολύτως απαραίτητες για την αποθήκευση ψηφιακών εικόνων δυαδικής μορφής.

Το τελευταίο τμήμα του αρχείου περιλαμβάνει τα δεδομένα της ψηφιακής εικόνας. Τα δεδομένα είναι καταγραμμένα σε δυαδική μορφή (binary), η οποία είναι οργανωμένη και μπορεί να ερμηνευτεί σύμφωνα με τις οδηγίες που περιγράφονται στο δεύτερο τμήμα του αρχείου.