



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Τοπογραφίας
Εργαστήριο Χαρτογραφίας

ΓΕΩΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΔΟΜΗ GRID
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑ ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σαριδάκης Χαράλαμπος



Αθήνα, Μάρτιος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τομέας Τοπογραφίας
Εργαστήριο Χαρτογραφίας

Διπλωματική Εργασία

Σαριδάκης Χαράλαμπος

ΓΕΩΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ
ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΔΟΜΗ GRID - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑ ΧΩΡΙΚΗ
ΑΝΑΛΥΣΗ

Τριμελής Επιτροπή:

Νάκος Βύρωνας, Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)

Ιωαννίδης Χαράλαμπος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ναλμπάντης Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα έρευνα εκπονήθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής μου εργασίας στη σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Με την ολοκλήρωσή της, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Νάκο Βύρωνα , καθηγητή του Ε.Μ.Π για την σπουδαία βοήθειά του με παροχή του απαραίτητου υλικού, γνώσεων καθώς και σωστή καθοδήγησης καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας μου και αποτέλεσε καταλυτικό παράγοντα για την επίτευξή της. Θα ήθελα δε να τον ευχαριστήσω για την υπομονή, την εμπιστοσύνη και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με τον σπουδαίο τομέα της Χαρτογραφίας.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Τζελέπη Νικόλαο, για την βοήθειά του σε τεχνικά και θεωρητικά προβλήματα που συνάντησα στο ξεκίνημα εκπόνησης της εργασίας και τον Σαρρή Νικόλαο για την τεχνική υποστήριξη σε θέματα προγραμματισμού.

Τελευταίο και κυριότερο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο και συμφοιτητή Λαβδάκη Ιωάννη για την άριστη συνεργασία κατά την εκπόνηση των διπλωματικών μας εργασιών, καθώς και όλους όσους μου συμπαραστάθηκαν και με βοήθησαν σε αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ	9
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	12
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	13
ABSTRACT	13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	17
1.1. Γεωμορφομετρία	17
1.2. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους.....	20
1.3 Δομές αναπαράστασης των ψηφιακών μοντέλων υψομέτρων	22
1.3.1 Το δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων (TIN).....	24
1.3.2 Το δίκτυο τετραγωνικού πλέγματος	27
1.3.3 Δίκτυο με μορφή πλέγματος	28
1.4. Η ποιότητα και η ακρίβεια των δεδομένων	30
1.4.1. Έλεγχος της ποιότητας του Ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων	32
1.4.2. Πηγές σφαλμάτων.....	33
1.5. Κλίμακα και ψηφιακά μοντέλα εδάφους.....	33
1.6. Δεδομένα LiDAR	35
1.6.1. Περιοχές εφαρμογής των LiDAR δεδομένων	35
1.6.2 Χαρακτηριστικά των LiDAR δεδομένων	36
1.6.3. Αλγόριθμοι ταξινόμησης των LiDAR δεδομένων	37
1.6.4. Αξιολόγηση των LiDAR δεδομένων	37
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	43
2.1. Κριτήρια επιλογής περιοχής μελέτης	43
2.2. Ποταμός Γιάκιμα.....	44
2.3. Φαράγγι ποταμού Γιάκιμα	47
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	49
3.1. Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε δομή grid	49
3.1.1. Επιλογή της μεθόδου χωρικής παρεμβολής.....	50

3.1.2. Μέθοδος αντιστρόφου απόστασης (inverse distance weighted)	50
3.2. Προ-επεξεργασία Ψηφιακού Μοντέλου Υψομέτρων	51
3.2.1 Φίλτρο εξομάλυνσης Gauss (Gaussian Filter)	51
3.2.2. Συμπλήρωση κενών (Fill Gaps)	52
3.3. Εξαγωγή μορφομετρικών χαρακτηριστικών.....	53
3.3.1 Πρωτεύοντα τοπογραφικά χαρακτηριστικά.....	54
3.3.2 Μέθοδος υπολογισμού τοπογραφικών χαρακτηριστικών.....	56
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ	65
4.1. Λογισμικό εφαρμογής	65
4.2 Δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων Υψομέτρων από δεδομένα LiDAR σε δομή grid	66
4.3. Σύγκριση των μοντέλων	68
4.3.1. Παραγωγή μοντέλων γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών	68
4.3.2. Μεθοδολογία σύγκρισης μοντέλων γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών	68
4.3.3. Στατιστικά στοιχεία	69
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	71
5.1. Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων	71
5.1.1. Κλίση.....	71
5.1.2. Διεύθυνση μέγιστης κλίσης.....	73
5.1.3. Καμπυλότητα.....	75
5.2. Επίδραση της χωρικής ανάλυσης στα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά	77
5.2.1. Κλίση.....	77
5.2.2. Διεύθυνση μέγιστης κλίσης.....	82
5.2.3. Γενική Καμπυλότητα	87
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	93
6.1. Κλίση	94
6.2. Διεύθυνση της μέγιστης κλίσης	94
6.3. Γενική καμπυλότητα.....	95
6.4. Συζήτηση	95
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	97
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	101

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Η γεωμορφομετρία και η σύνδεση της με άλλες επιστημονικές εφαρμογές.....	18
Εικόνα 2: Διαγραμματική απεικόνιση των σταδίων της γεωμορφομετρικής ανάλυσης	19
Εικόνα 3: Οι κυριότερες εργασίες που σχετίζονται με το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους	20
Εικόνα 4: Μέθοδοι δημιουργίας DEM: a) square grid network, b) triangular irregular network, c) contour based network	23
Εικόνα 5: Το μέγεθος των τριγώνων του TIN σε σχέση με την πυκνότητα των δεδομένων.....	24
Εικόνα 6: Επίπεδα τρίγωνα 1) στις κορυφογραμμές λόγω έλλειψης γραμμών αλλαγής κλίσης, 2) στην κορυφή ενός υψώματος λόγω έλλειψης υψομετρικού σημείου, 3) στις μισγάγγειες λόγω έλλειψης γραμμών αλλαγής κλίσης.	25
Εικόνα 7: Η δημιουργία επιπέδων τριγώνων κατά μήκος των ισοϋψών λόγω της μεγάλης πυκνότητας των κορυφών επηρεάζει τη μορφή των υψομετρικών ζωνών και τον υπολογισμό των κλίσεων. Οι μηδενικές κλίσεις αποδίδονται με κόκκινη απόχρωση.....	26
Εικόνα 8: Παράδειγμα ΨΜΥ σε μορφή κανάβου.	27
Εικόνα 9: Ψηφιακό Μοντέλο υψομέτρων δομής GRID.	29
Εικόνα 10: Ψηφιακό Μοντέλο υψομέτρων δομής TIN.	29
Εικόνα 11: Ομάδα παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητα του DEM και οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Η ποιότητα του DEM αποτελείται από την ακρίβεια και την καταλληλότητα του.	30
Εικόνα 12: Το φάσμα της χωρικής κλίμακας.	34
Εικόνα 13: Σημεία ελέγχου στις επικαλυπτόμενες λωρίδες.....	39
Εικόνα 14: Τρισδιάστατη εικόνα αφιλτράριστων δεδομένων.....	40
Εικόνα 15: Τρισδιάστατη εικόνα φιλτραρισμένων δεδομένων.....	40
Εικόνα 16: Ψηφιακό μοντέλο επιφανείας.	41
Εικόνα 17: Χάρτης των Η.Π.Α. με την περιοχή μελέτης.....	44
Εικόνα 18: Χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Yakima	45
Εικόνα 19: Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής μελέτης	47
Εικόνα 20: Το φαράγγι του ποταμού Yakima	48
Εικόνα 21: Παράδειγμα εφαρμογής φίλτρου Gauss με αυξανόμενη τυπική απόκλιση.....	52
Εικόνα 22: Παράδειγμα επίδρασης αλγορίθμου πλήρωσης κενών	53
Εικόνα 23: Κλίση.....	54
Εικόνα 24: Κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης.	55
Εικόνα 25. Γενική καμπυλότητα.	56
Εικόνα 26. Το μοντέλο των Zevenbergen & Thorne (1987).....	57
Εικόνα 27: Αναπαράσταση της κλίσης (Slope) και της διεύθυνσης της κλίσης (Aspect).....	59
Εικόνα 28: Οι βασικές ορθογώνιες συνιστώσες της καμπυλότητας.....	60
Εικόνα 29: Καμπυλότητα κάθετη στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, θετική, αρνητική και μηδενική.....	60

Εικόνα 30: Καμπυλότητα παράλληλη στη διεύθυνση της μέγιστης κλίσης Πηγή ESRI	61
Εικόνα 31: Γενική καμπυλότητα	61
Εικόνα 32: Καμπυλότητα παράλληλα στην διεύθυνση κλίσης	62
Εικόνα 33: Καμπυλότητα κάθετα στην διεύθυνση κλίσης	63
Εικόνα 34: Ερμηνεία των τιμών της καμπυλότητας, α) θετική plan cur, b) αρνητική plan cur, c) θετική profile cur, d) αρνητική profile cur.	63
Εικόνα 35: Κατανομή της διαφοράς μέσω υψομέτρων από το μοντέλο αναφοράς συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	67
Εικόνα 36: Μέση τιμή της γωνίας κλίσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης	72
Εικόνα 37: Τυπική απόκλιση της γωνίας κλίσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	73
Εικόνα 38: Μέση τιμή της γωνίας διεύθυνσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης	74
Εικόνα 39: Τυπική απόκλιση της γωνίας διεύθυνσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	74
Εικόνα 40: Μέση τιμή της καμπυλότητας των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης	76
Εικόνα 41: Τυπική απόκλιση της καμπυλότητας των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	76
Εικόνα 42: Μέση τιμή των διαφορών της γωνίας κλίσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	78
Εικόνα 43: Τυπική απόκλιση των διαφορών της γωνίας κλίσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	78
Εικόνα 44: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 5m από το μοντέλο αναφοράς	80
Εικόνα 45: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 10m από το μοντέλο αναφοράς	80
Εικόνα 46: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 25m από το μοντέλο αναφοράς	81
Εικόνα 47: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 50m από το μοντέλο αναφοράς	81
Εικόνα 48: Μέση τιμή των διαφορών της γωνίας διεύθυνσης μέγιστης κλίσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	83
Εικόνα 49: Τυπική απόκλιση των διαφορών της γωνίας διεύθυνσης μέγιστης κλίσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης	83
Εικόνα 50: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας διεύθυνσης μέγιστης κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 5m από το μοντέλο αναφοράς	85
Εικόνα 51: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας διεύθυνσης μέγιστης κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 10m από το μοντέλο αναφοράς	85

Εικόνα 52: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας διεύθυνσης μέγιστης κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 25m από το μοντέλο αναφοράς	86
Εικόνα 53: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας διεύθυνσης μέγιστης κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 50m από το μοντέλο αναφοράς	86
Εικόνα 54: Μέση τιμή των διαφορών της καμπυλότητας των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	88
Εικόνα 55: Τυπική απόκλιση των διαφορών της καμπυλότητας των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης.....	88
Εικόνα 56: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της καμπυλότητας μοντέλου χωρικής ανάλυσης 5m από το μοντέλο αναφοράς	90
Εικόνα 57: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της καμπυλότητας μοντέλου χωρικής ανάλυσης 10m από το μοντέλο αναφοράς	90
Εικόνα 58: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της καμπυλότητας μοντέλου χωρικής ανάλυσης 25m από το μοντέλο αναφοράς	91
Εικόνα 59: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της καμπυλότητας μοντέλου χωρικής ανάλυσης 50m από το μοντέλο αναφοράς	91
Εικόνα 60: Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων δομής grid 1m	102
Εικόνα 61: Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων δομής grid 5m	103
Εικόνα 62: Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων δομής grid 10m	103
Εικόνα 63: Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων δομής grid 25m	104
Εικόνα 64: Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων δομής grid 50m	104
Εικόνα 65: Μοντέλο κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 1m	105
Εικόνα 66: Μοντέλο κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 5m	106
Εικόνα 67: Μοντέλο κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 10m	106
Εικόνα 68: Μοντέλο κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 25m	107
Εικόνα 69: Μοντέλο κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 50m	107
Εικόνα 70: Μοντέλο διεύθυνσης κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 1m.....	108
Εικόνα 71: Μοντέλο διεύθυνσης κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 5m.....	109
Εικόνα 72: Μοντέλο διεύθυνσης κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 10m.....	109
Εικόνα 73: Μοντέλο διεύθυνσης κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 25m.....	110
Εικόνα 74: Μοντέλο διεύθυνσης κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 50m.....	110
Εικόνα 75: Μοντέλο καμπυλότητας δομής grid χωρικής ανάλυσης 1m	111
Εικόνα 76: Μοντέλο καμπυλότητας δομής grid χωρικής ανάλυσης 5m	112
Εικόνα 77: Μοντέλο καμπυλότητας δομής grid χωρικής ανάλυσης 10m	112
Εικόνα 78: Μοντέλο καμπυλότητας δομής grid χωρικής ανάλυσης 25m	113
Εικόνα 79: Μοντέλο καμπυλότητας δομής grid χωρικής ανάλυσης 50m	113
Εικόνα 80: Διαφορές διευθύνσεων μέγιστης κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 5m με το μοντέλο αναφοράς. Στην πρώτη εικόνα με μαύρο χρώμα τονίζονται τα σημεία με τιμή κοντά στις 360 ⁰ , ενώ στη δεύτερη απεικονίζεται το μοντέλο όπως εξάγεται από το SAGA.....	114

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Μέσο υψόμετρο των ΨΜΥ και διαφορά από μοντέλο αναφοράς.....	67
Πίνακας 2: Στατιστικά στοιχεία των μοντέλων για τη γωνία κλίσης	71
Πίνακας 3: Στατιστικά στοιχεία των μοντέλων για τη γωνία διεύθυνσης μέγιστης κλίσης	73
Πίνακας 4: Στατιστικά στοιχεία των μοντέλων για την καμπυλότητα	75
Πίνακας 5: Στατιστικά στοιχεία της διαφοράς των γωνιών κλίσης του μοντέλου αναφοράς με τα παράγωγα μοντέλα.....	77
Πίνακας 6: Στατιστικά στοιχεία της διαφοράς των γωνιών διεύθυνσης μέγιστης κλίσης του μοντέλου αναφοράς με τα παράγωγα μοντέλα.....	82
Πίνακας 7: Στατιστικά στοιχεία της διαφοράς της καμπυλότητας του μοντέλου αναφοράς με τα παράγωγα μοντέλα.....	87

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη της φυσικής γήινης επιφάνειας αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι για τον τομέα της τοπογραφίας και ειδικότερα της χαρτογραφίας. Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας συνεπάγεται την ανάγκη για ανάπτυξη νέων μεθόδων επεξεργασίας τοπογραφικών δεδομένων, καθώς και βελτιστοποίηση των ήδη υπάρχουσών. Μία τέτοια μέθοδος αφορά στη δημιουργία και επεξεργασία των ψηφιακών μοντέλων υψομέτρων. Ειδικότερα, η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ασχολείται με την αξιοποίηση LiDAR δεδομένων για την εξαγωγή ψηφιακών μοντέλων υψομέτρων, τα οποία παρουσιάζουν ποιοτικότερα αποτελέσματα σε σχέση με τις παλιότερες μεθόδους. Τα παραγόμενα ψηφιακά μοντέλα υψομέτρων αξιολογήθηκαν με βάση τα πρωτεύοντα τοπογραφικά χαρακτηριστικά και τη συμπεριφορά τους σε συνάρτηση με τη χωρική ανάλυση, ορίζοντας ένα μοντέλο υψηλής ανάλυσης ως μοντέλο αναφοράς και η επεξεργασία τους πραγματοποιήθηκε σε δομή τετραγωνικού κανάβου (grid). Σκοπό της εργασίας αποτέλεσε η μελέτη των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών και η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων με τη βοήθεια στατιστικών στοιχείων και οπτικοποιημένων μοντέλων μειώνοντας τη χωρική ανάλυση. Με αυτό τον τρόπο, επιδιώκεται η αξιολόγηση της καταλληλότητας των μοντέλων χαμηλότερης χωρικής ανάλυσης σε μελλοντικές μελέτες που αφορούν την επεξεργασία των πρωτευόντων τοπογραφικών χαρακτηριστικών.

ABSTRACT

The study of the natural earth surface is an integral part of the field of topography and cartography in particular. The continuous progress of technology implies the need to develop new topographic data processing methods and improve the existing ones. One such method involves the creation and processing of digital elevation models. In particular, this diploma thesis deals with the use of LiDAR data for the extraction of digital elevation models, which present better results than the previous methods. The produced digital elevation models were evaluated on the basis of the primary topographic features and their behavior in relation to spatial resolution, defining a high resolution model as the reference model and processing them in a grid structure. The purpose of the diploma thesis was to study the geomorphometric features and to come to useful conclusions using statistical data and visualized models by reducing the spatial resolution. In this way, the intention is to evaluate the suitability of lower spatial resolution models in future studies concerning the processing of primary topographic features.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι τεχνολογικές εξελίξεις καθώς και η ανάπτυξη των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών, έχουν επεκτείνει σημαντικά τις δυνατότητες των ψηφιακών μοντέλων εδάφους για χρήση σε τοπογραφικές και υδρολογικές μελέτες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την δυνατότητα εξαγωγής πρωτευόντων τοπογραφικών χαρακτηριστικών από Ψ.Μ.Υ. διαφορετικών χωρικών αναλύσεων. Η διερεύνηση των αποτελεσμάτων θα γίνει σε μία περιοχή μελέτης με έντονο ανάγλυφο. Η πρωτογενής πληροφορία για την δημιουργία των Ψ.Μ.Υ. προέρχεται από δεδομένα LiDAR (LIght Detection And Ranging), τα οποία αποδίδουν με υψηλή ακρίβεια την μορφολογία της Φυσικής Γήινης Επιφάνειας και τα οποία μειώνουν τους φυσικούς και οικονομικούς περιορισμούς των συμβατικών τοπογραφικών μετρήσεων. Η παρούσα μελέτη αποτελείται από έξι κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο αναπτύσσεται όλο το θεωρητικό υπόβαθρο με σκοπό να γίνει κατανοητή η διαδικασία της γεωμορφομετρικής ανάλυσης, της δημιουργίας Ψ.Μ.Υ. και η επίδραση της κλίμακας στην ποιότητα των τελικών προϊόντων. Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται μερικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης καθώς και για τα κριτήρια που έπαιξαν ρόλο στην επιλογή της. Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται μια προσπάθεια προσέγγισης της μεθοδολογίας για την δημιουργία και την προεπεξεργασία των ψηφιακών μοντέλων εδάφους, καθώς και για την εξαγωγή των πρωτευόντων τοπογραφικών χαρακτηριστικών προς μελέτη. Ακολουθώντας, στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η εφαρμογή όλων των παραπάνω στα επιλεγμένα λογισμικά εφαρμογής. Επίσης, περιγράφεται και η διαδικασία σύγκρισης των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών μέσω των στατιστικών στοιχείων των μοντέλων διαφορετικών χωρικών αναλύσεων. Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα στατιστικά στοιχεία της σύγκρισης των παράγωγων μοντέλων μικρότερης χωρικής ανάλυσης με το μοντέλο αναφοράς, καθώς και μοντέλα που περιέχουν οπτικοποιημένες τις διαφορές των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών. Τέλος, στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη και συγκεντρωτική καταγραφή των συμπερασμάτων, ενώ ακολουθεί παράρτημα με εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην εξαγωγή των παραπάνω συμπερασμάτων.

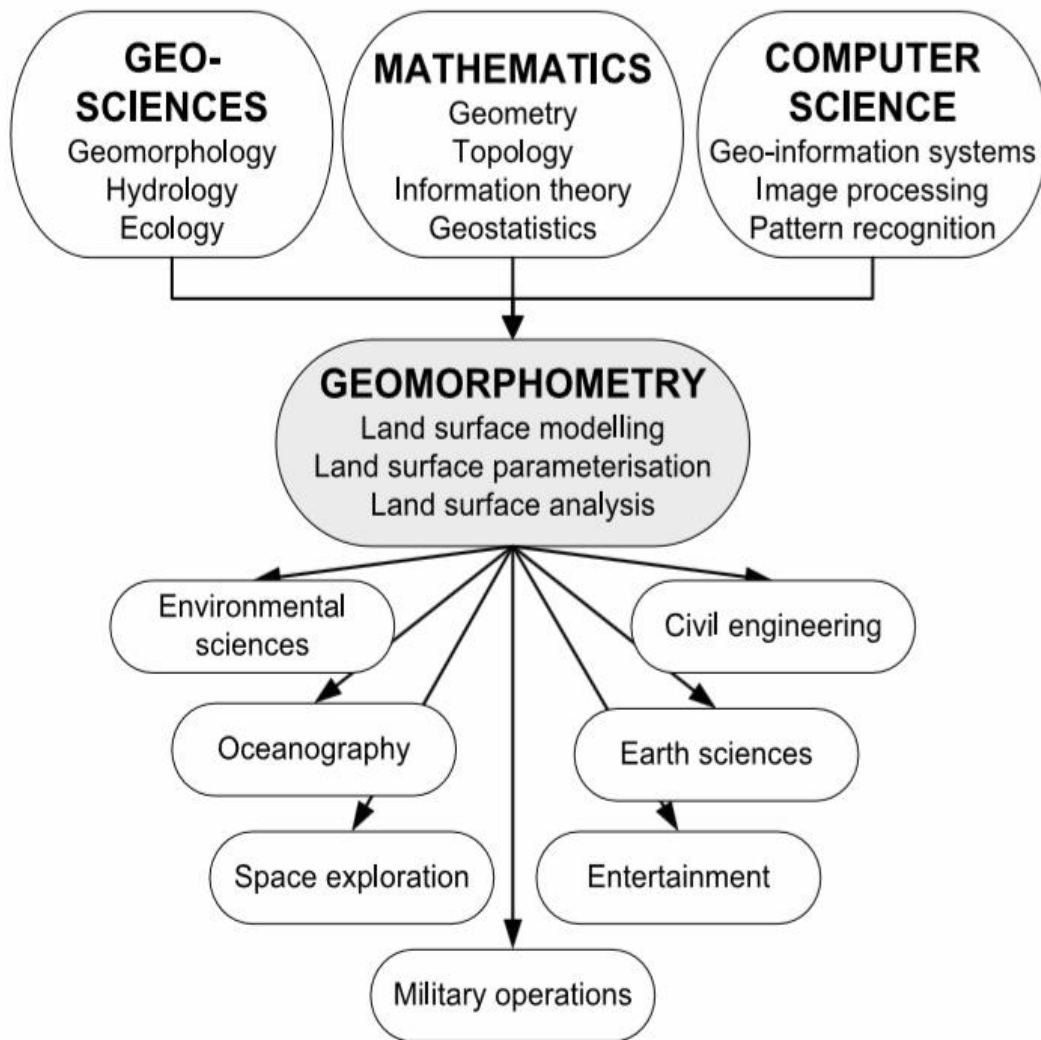
1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο σημαντικών θεμάτων της διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα θα αναλυθεί η ευρύτερη έννοια της γεωμορφομετρίας, του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και της εξέλιξης του με την πάροδο του χρόνου. Επίσης θα μελετηθούν οι βασικές δομές αναπαράστασης και θα αναπτυχθεί ο τρόπος λήψης δεδομένων για την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους με εκτενέστερη αναφορά στα δεδομένα LIDAR που θα μας απασχολήσουν στην παρούσα εργασία. Τέλος θα δοθεί η έννοια της κλίμακας στη ψηφιακή ανάλυση του εδάφους και θα γίνει προσπάθεια να αποσαφηνίσουμε τις έννοιες της χωρικής ανάλυσης και της κλίμακας.

1.1. Γεωμορφομετρία

Γεωμορφομετρία είναι η επιστήμη της ποσοτικής ανάλυσης της γήινης επιφάνειας, μέσω της εξαγωγής παραμέτρων και αντικειμένων από ψηφιακά μοντέλα εδάφους (Pike R. , 2000) (Rasemann Stefan, 2004). Είναι μια σύγχρονη αναλυτική χαρτογραφική προσέγγιση για την αναπαράσταση της τοπογραφίας του εδάφους μέσω της διαχείρισης της υψομετρικής πληροφορίας σε περιβάλλον υπολογιστή. Οι παράμετροι (κλίση, καμπυλότητα κ.λπ.) αποτελούν τα περιγραφικά χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας και αποδίδονται ως συνεχείς μεταβλητές υπό ψηφιδωτή μορφή (raster maps), ενώ τα αντικείμενα είναι διακριτά χωρικά χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας (αποστραγγιστικό δίκτυο κτλ) τα οποία εμφανίζονται σε διανυσματική μορφή (vector maps) (R.J. Pike, 2008).

Η γεωμορφομετρία είναι ένα διεπιστημονικό πεδίο που έχει εξελιχθεί από την επιστήμη των μαθηματικών, τις γεωεπιστήμες και τα τελευταία χρόνια από την επιστήμη των υπολογιστών. Παρόλο που θεωρήθηκε σαν δραστηριότητα μεταξύ περισσότερων εδραιωμένων πεδίων, από την γεωγραφία και την γεωμορφολογία μέχρι τις επιστήμες του εδάφους και της στρατιωτικής μηχανικής (εικόνα 1), δεν είναι πλέον απλά μια συλλογή από αριθμητικές τεχνικές αλλά μια επιστήμη με διακριτά αντικείμενα απασχόλησης (Pike R. E., 2009).



Εικόνα 1: Η γεωμορφομετρία και η σύνδεση της με άλλες επιστημονικές εφαρμογές

Πηγή: (Pike R. E., 2009)

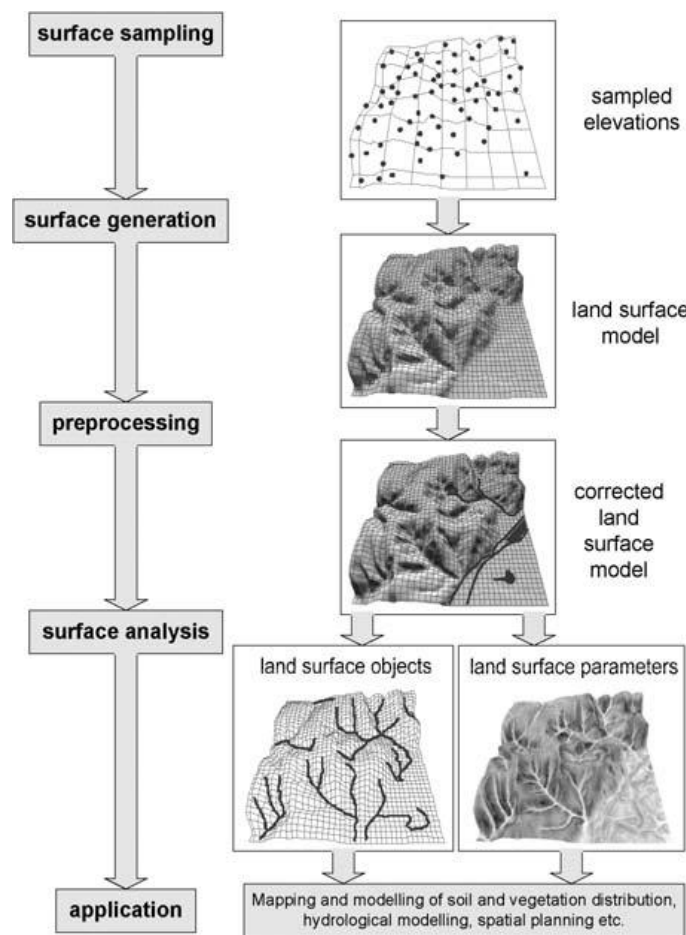
Οι δύο κύριοι κλάδοι της γεωμορφομετρικής ανάλυσης όπως διατυπώθηκαν από τον Evans (1972), είναι η ειδική γεωμορφομετρία που αντιμετωπίζει διακριτά επιφανειακά χαρακτηριστικά και αντικείμενα και η γενική γεωμορφομετρία που αναφέρεται στην μέτρηση και ανάλυση χαρακτηριστικών της συνεχούς γήινης επιφάνειας.

Η βασική εργασία στην γεωμορφομετρία είναι η εξαγωγή παραμέτρων και αντικειμένων από ψηφιακά μοντέλα εδάφους τα οποία είναι τα βασικά στοιχεία εισαγωγής στην μορφομετρική ανάλυση. Στα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών ένα DEM (Digital Elevation Model) είναι απλά ένας συνεχής ή διανυσματικός χάρτης που δείχνει το υψόμετρο της επιφάνειας της γης πάνω από την μέση στάθμη της θάλασσας.

Η γεωμορφομετρία συνήθως υλοποιείται σε πέντε στάδια (Εικόνα 2):

1. Δειγματοληψία της γήινης επιφάνειας (μετρήσεις υψομέτρων)
2. Παραγωγή μοντέλου της επιφάνειας από τα μετρημένα υψόμετρα
3. Διόρθωση των σφαλμάτων και των αντικειμένων στο μοντέλο της επιφάνειας
4. Εξαγωγή των επιφανειακών παραμέτρων και αντικειμένων
5. Αξιολόγηση και εφαρμογή των αντικειμένων και των παραμέτρων που προέκυψαν

Οι γεωμορφομετρικές παράμετροι συνήθως ταξινομούνται ως πρωτεύουσες και δευτερεύουσες ανάλογα με το αν προκύπτουν απευθείας από το DEM ή αν χρειάζεται να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία (Wilson, 2000). Οι πρωτεύουσες παράμετροι περιγράφουν την μορφολογία του εδάφους (κλίση, διεύθυνση κλίσης, καμπυλότητα κτλ.) ενώ οι δευτερεύουσες προκύπτουν ως συνδυασμός των πρωτευουσών (τοπογραφικός δείκτης υγρασίας, δείκτης ροής ενέργειας, συντελεστής ανάγλυφου κτλ.). Στην παρούσα εργασία θα γίνει μελέτη μόνο των πρωτευόντων τοπογραφικών χαρακτηριστικών και την επίδραση που έχει η χωρική ανάλυση σε αυτά.

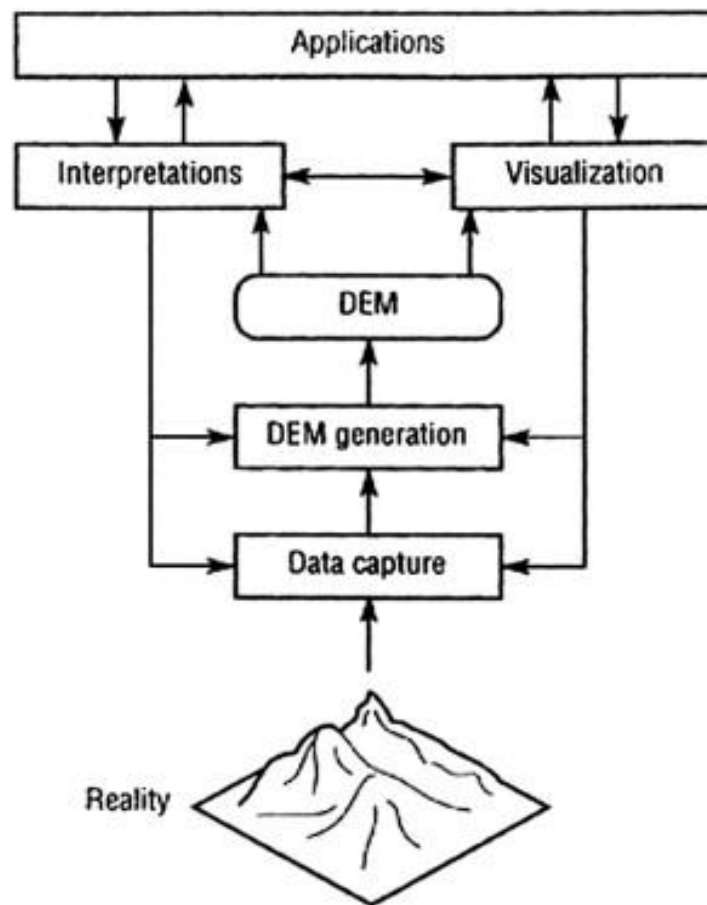


Εικόνα 2: Διαγραμματική απεικόνιση των σταδίων της γεωμορφομετρικής ανάλυσης

Πηγή: (R.J. Pike, 2008)

1.2. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους

Το ανάγλυφο της φυσικής γήινης επιφάνειας είναι ένα τρισδιάστατο συνεχές χωρικό φαινόμενο, το οποίο στους χωρικούς χάρτες αναπαρίσταται συνήθως με την μορφή ισούψων καμπυλών, σκίασης, κ.α. και ανάλογα με τον τρόπο αναπαράστασης, μπορεί να είναι δυνατή η εξαγωγή αποτελεσμάτων για την τιμή του υψομέτρου. Η επεξεργασία του ανάγλυφου σε ψηφιακό περιβάλλον, γίνεται μέσω του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DTM) που εξασφαλίζει την αναπαράσταση της φυσικής γήινης επιφάνειας με διάφορες δομές και αλγόριθμους παρεμβολής (Τσούλος Λ. , 2008). Οι περισσότερες εφαρμογές της γεωμορφομετρίας βασίζονται στα ψηφιακά μοντέλα εδάφους για την αναπαράσταση της γήινης επιφάνειας και οι τεχνικές της τοπογραφικής ανάλυσης και οπτικοποίησης εξελίσσονται συνεχώς. Οι κυριότερες εργασίες που συνδέονται με τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους φαίνονται στην (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Οι κυριότερες εργασίες που σχετίζονται με το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους

Πηγή: (Hutchinson, 2000)

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους από την εισαγωγή του το 1958 από τους Miller και Laflamme, έχει αποτελέσει τη βάση για ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών στον τομέα της τοπογραφίας, της φωτογραμμετρίας, στον σχεδιασμό και την διαχείριση πόρων, για στρατιωτικούς σκοπούς κ.α. Ακόμα βρίσκει σημαντικές εφαρμογές σε μελέτες περιβάλλοντος και υδρολογικές εφαρμογές όπως υδραυλικές μελέτες, έλεγχος πλημυρών κ.τ.λ. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους είναι ένα μαθηματικό μοντέλο της γήινης επιφάνειας και για πρώτη φορά ορίστηκε από τους Miller και Laflamme ως εξής:

«το ψηφιακό μοντέλο εδάφους αποτελεί μια στατιστική απεικόνιση της συνεχούς επιφάνειας του εδάφους από έναν μεγάλο αριθμό επιλεγμένων σημείων με γνωστές τις συντεταγμένες τους σε ένα αυθαίρετο σύστημα αναφοράς» (Li, 2005).

Συγκρινόμενο με παραδοσιακές μεθόδους απεικόνισης, ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά (Li, 2005).

- 1) *Μια ποικιλία μορφών αναπαράστασης:* Σε ψηφιακή μορφή είναι δυνατό να παραχθούν εύκολα ποικίλες μορφές αναπαράστασης όπως τοπογραφικοί χάρτες, εγκάρσιες και κάθετες τομές, τρισδιάστατες αναπαραστάσεις κ.α.
- 2) *Δεν υπάρχει απώλεια της ακρίβειας των δεδομένων με τον χρόνο:* Με την πάροδο του χρόνου αλλοιώνεται το σχήμα των αναλογικών χαρτών, ενώ ένα DTM μπορεί να μείνει αναλλοίωτο στο χρόνο.
- 3) *Μεγαλύτερη εφικτότητα αυτοματισμού και επεξεργασίας πραγματικού χρόνου:* Σε ψηφιακή μορφή η ενσωμάτωση και η αναβάθμιση δεδομένων είναι πολύ πιο ευέλικτη σε σχέση με την αναλογική μορφή.
- 4) *Ευκολότερη αναπαράσταση σε διάφορες κλίμακες:* Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες αναλύσεις, που αντιστοιχούν σε αναπαραστάσεις σε διαφορετικές κλίμακες

Η συλλογή δεδομένων για την δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις παρακάτω τεχνικές:

- 1) Αποτύπωση πεδίου με χρήση τοπογραφικών οργάνων μεγάλης ακρίβειας
- 2) Με φωτογραμμετρικές μεθόδους, χρησιμοποιώντας φωτογραμμετρικά όργανα, στερεοζεύγη αεροφωτογραφιών ή δορυφορικών εικόνων κ.α.
- 3) Χαρτογραφική ψηφιοποίηση σε υφιστάμενους τοπογραφικούς χάρτες
- 4) Χρήση δεδομένων από συστήματα τηλεπισκόπησης
- 5) Με υπολογιστική προσομοίωση (π.χ. κλασματική γεωμετρία) (Νάκος, 1990).

Ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους μπορεί να περιέχει σύνολα πληροφοριών όπως γεωμορφές, χαρακτηριστικά του εδάφους, στοιχεία για φυσικούς πόρους και το περιβάλλον ακόμα και κοινωνικοοικονομικά δεδομένα.

- ❖ Οι γεωμορφές αναφέρονται σε πληροφορίες που έχουν να κάνουν με τα υψόμετρα, την κλίση του εδάφους, την καμπυλότητα και γενικά με γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά
- ❖ Στα χαρακτηριστικά του εδάφους περιλαμβάνονται υδρογραφικά χαρακτηριστικά (ποτάμια, λίμνες κλπ.), δίκτυα μεταφοράς (δρόμοι, σιδηρόδρομοι κλπ.) αστικές περιοχές, οριοθετημένες περιοχές κ.α.
- ❖ Ένα DTM για τους φυσικούς πόρους και το περιβάλλον μπορεί να περιέχει δεδομένα για το έδαφος, τη βλάστηση, τη γεωλογία, το κλίμα κ.α.
- ❖ Ένα DTM για τα κοινωνικοοικονομικά δεδομένα μπορεί να περιλαμβάνει πληροφορίες για την κατανομή του πληθυσμού, τις χρήσεις και αξίες γης και για άλλα χαρακτηριστικά της περιοχής που απεικονίζει.

Ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους αποδίδει την κατανομή της χωρικής πληροφορίας από ένα καθορισμένο σύνολο σημειακών δεδομένων και έτσι βοηθά στην μοντελοποίηση, την ανάλυση και κατόπιν την παρουσίαση φαινομένων που σχετίζονται με την τοπογραφία και άλλες επιστήμες.

1.3 Δομές αναπαράστασης των ψηφιακών μοντέλων υψομέτρων

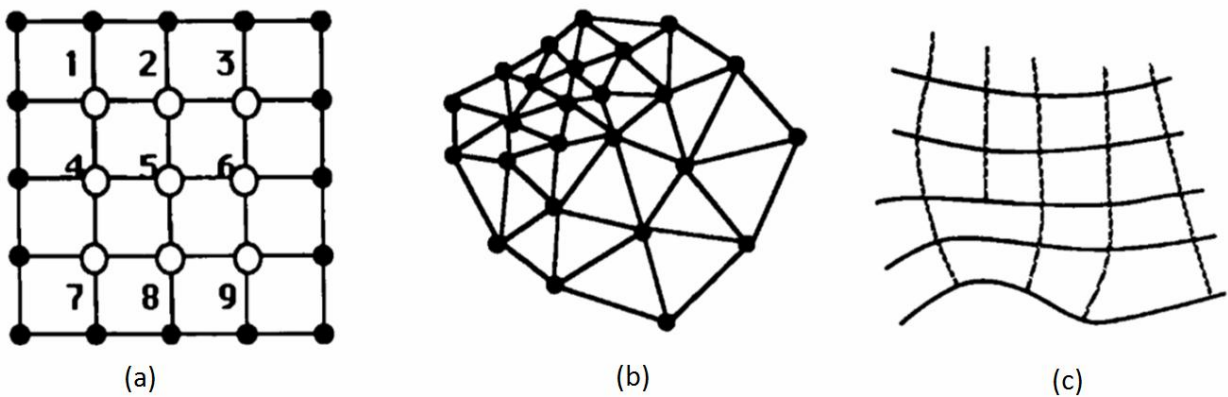
Ο όρος έδαφος είναι πολύ γενικός και μπορεί να ορίζει διαφορετικά πράγματα σε διαφορετικές ειδικότητες επιστημόνων. Σχετίζεται όχι μόνο με το γυμνό έδαφος (την φυσική γήινη επιφάνεια) αλλά και με υδρολογικά χαρακτηριστικά, βλάστηση, με όρια περιοχών ακόμα και με κοινωνικοοικονομικές πτυχές μιας περιοχής, αντικείμενα τα οποία δεν σχετίζονται με την φυσική γήινη επιφάνεια. Για να ελαχιστοποιήσουμε λοιπόν την σύγχυση που δημιουργείται με τον όρο ψηφιακό μοντέλο εδάφους, θα ορίσουμε το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων (Pike R. E., 2009).

Το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων (Digital Elevation Model) (ΨΜΥ) (DEM) είναι μια διατεταγμένη σειρά αριθμών, που αναπαριστά την χωρική κατανομή των υψομέτρων, τα οποία αναφέρονται σε ένα σύστημα αναφοράς. Αποτελεί ένα υποσύνολο των ψηφιακών μοντέλων εδάφους, τα οποία αναπαριστούν διάφορα χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας (Moore et al), όπως προαναφέρθηκε.

Για παράδειγμα, μια περιοχή μελέτης μπορεί να έχει διάφορα ψηφιακά μοντέλα εδάφους όπως για παράδειγμα ΨΜΕ για την κλίση του εδάφους ή άλλα παράγωγα του υψομέτρου, για την δενδροκάλυψη, για τα κτήρια και πολλά χαρακτηριστικά του εδάφους ακόμα. Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους που δημιουργούνται μεταξύ άλλων με δεδομένα LiDAR, με τα οποία θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία, μπορεί να απεικονίζουν περισσότερες από μία ανακλάσεις, ανάλογα με την διεισδυτικότητα των ακτινών του laser scanner. Για παράδειγμα σε περιοχές με βλάστηση, για ένα σημείο έχουμε πολλαπλές ανακλάσεις. Αυτές οι ανακλάσεις πρέπει να φιλτραριστούν ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή ενός ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων (Pike R. E., 2009)

Ένα ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων μπορεί να δημιουργηθεί με μια από τις ακόλουθες μεθόδους (Εικόνα 4):

- ❖ Με δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων (triangular irregular network – TIN)
- ❖ Με δίκτυο τετραγωνικού πλέγματος (square grid network)
- ❖ Με δίκτυο υπό μορφή περιγράμματος (contour based network)



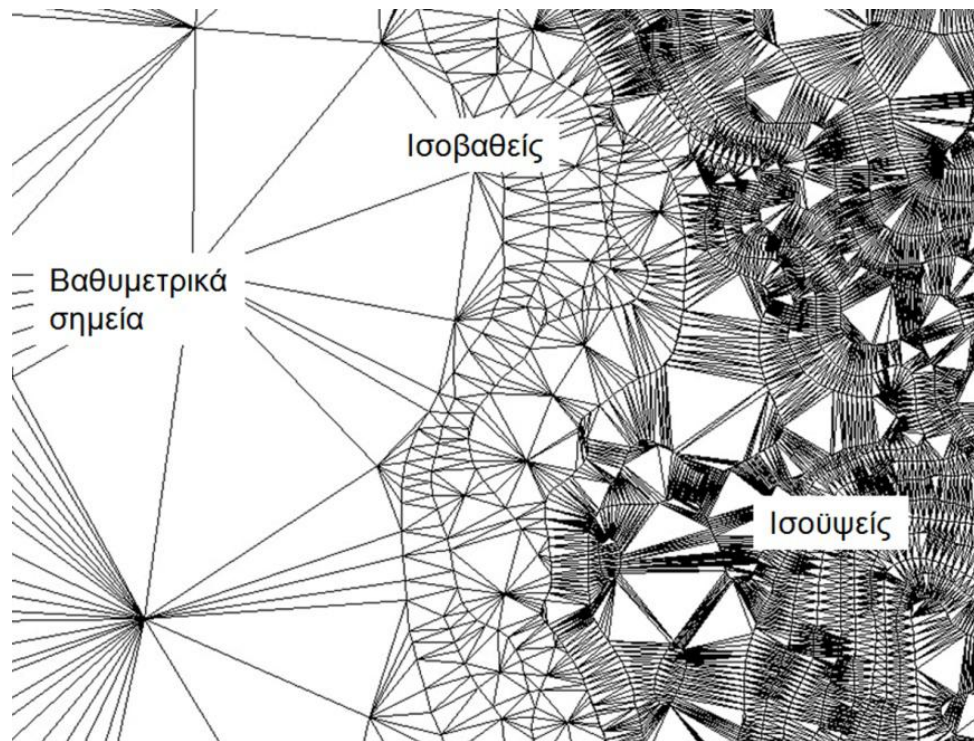
Εικόνα 4: Μέθοδοι δημιουργίας DEM: a) square grid network, b) triangular irregular network, c) contour based network

Πηγή: (Moore, 1991)

1.3.1 Το δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων (TIN)

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους με βάση τη δομή δικτύου ακανόνιστων τριγώνων, είναι μια αναπαράσταση του ανάγλυφου με ένα σύνολο τριγωνικών επιφανειών των οποίων οι κορυφές ταυτίζονται με τις θέσεις των σημείων των δεδομένων εισόδου (Τσούλος Λ. , 2008). Για κάθε κορυφή του τριγώνου αποθηκεύεται το υψόμετρο. Οι αρχικές οντότητες που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία του μοντέλου παραμένουν στην ίδια θέση ως κόμβοι ή ως ακμές, έτσι το TIN διατηρεί την ακρίβεια των δεδομένων εισόδου. Η κατανομή των κόμβων στο χώρο δεν είναι κανονική και έτσι το TIN είναι πιθανό να έχει μεγαλύτερη πυκνότητα σε ορισμένες περιοχές όπου το ανάγλυφο μεταβάλλεται έντονα όπως σε περιοχές που καλύπτονται από ισούψεις καμπύλες και τα δεδομένα εισόδου είναι πιο λεπτομερή ενώ ταυτόχρονα μπορεί να έχει χαμηλότερη πυκνότητα σε περιοχές που τα αρχικά δεδομένα είναι αραιά όπως σε περιοχές με βαθυμετρικά στοιχεία (Εικόνα 5).

Επομένως η προσεκτική επιλογή των στοιχείων εισόδου από τα οποία θα δημιουργηθεί το μοντέλο των υψομέτρων μέσω ενός δικτύου ακανόνιστων τριγώνων, είναι καθοριστική για την ακρίβεια και την αναπαράσταση του. Πρέπει να επιλέγονται με τέτοιο τρόπο, που να μπορούν να καταγράψουν ρεαλιστικά τις περιοχές που υπάρχουν σημαντικές αλλαγές στην μορφολογία του εδάφους όπως τα τοπικά ακρότατα, τις κορυφογραμμές κ.α. (Τσούλος Λ. Σ., 2015)



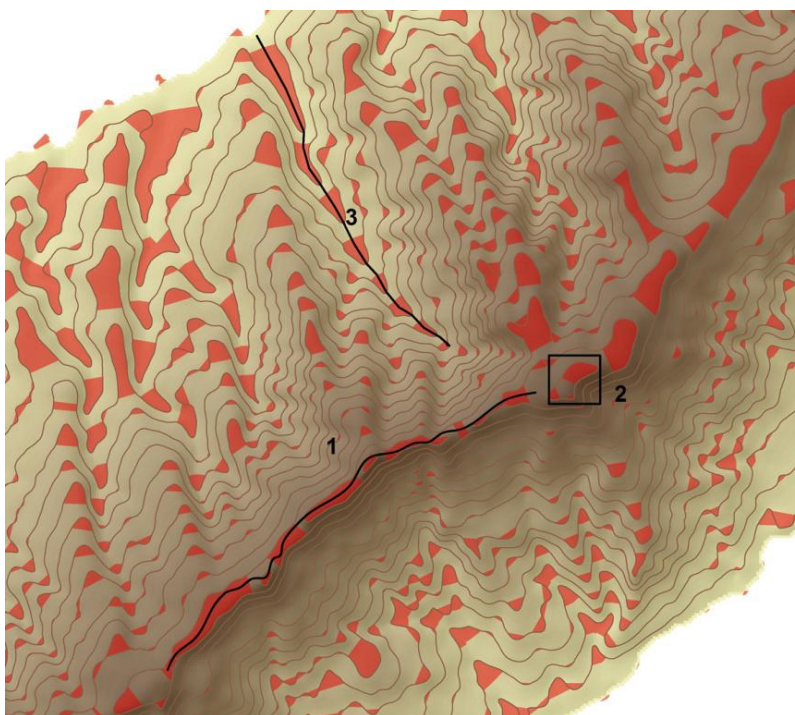
Εικόνα 5: Το μέγεθος των τριγώνων του TIN σε σχέση με την πυκνότητα των δεδομένων.

Πηγή: (Τσούλος Λ. Σ., 2015)

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί μια αδυναμία που εμφανίζουν μοντέλα εδάφους με την μορφή TIN, τα επίπεδα τρίγωνα.

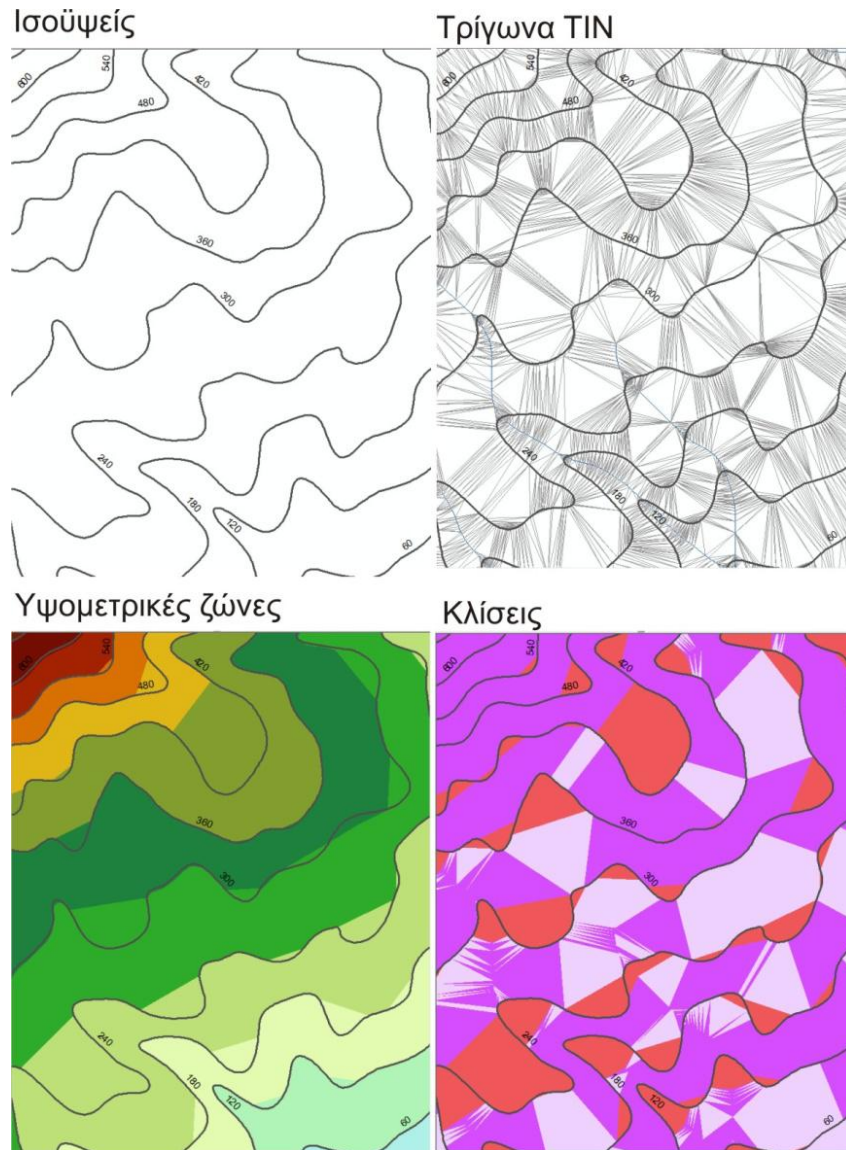
Ως επίπεδα χαρακτηρίζονται τα τρίγωνα του δικτύου τα οποία έχουν την ίδια τιμή υψομέτρου και στις τρεις κορυφές που τα ορίζουν, με αποτέλεσμα να έχουν μηδενική κλίση. Η ύπαρξη αυτών των τριγώνων αποτελεί αδυναμία του μοντέλου να περιγράψει την αληθινή μορφή του φυσικού γήινου ανάγλυφου, εκτός από μεμονωμένες περιπτώσεις. Η ύπαρξη τέτοιων τριγώνων μπορεί να αποφευχθεί με διάφορους τρόπους ανάλογα με την θέση εμφάνισής τους (Εικόνα 6):

- ❖ Η εμφάνιση επίπεδων τριγώνων κατά μήκος των ισοϋψών καμπυλών, προκύπτει όταν και οι τρεις κορυφές του τριγώνου ανήκουν στην ίδια ισοϋψή. Αντιμετωπίζεται με την απαλοιφή ορισμένων κορυφών με την εφαρμογή ενός αλγόριθμου απλοποίησης των γραμμών. Η ύπαρξη τέτοιων τριγώνων επηρεάζει τον σωστό σχεδιασμό υψομετρικών ζωνών και τον υπολογισμό των κλίσεων.
- ❖ Η εμφάνιση τους στην περιοχή τοπικών ακρότατων του μοντέλου όπως για παράδειγμα στην κορυφή ενός υψώματος, μπορεί να αποφευχθεί απλά με την προσθήκη μεμονωμένων υψομετρικών σημείων.
- ❖ Τέλος η εμφάνιση τέτοιων τριγώνων σε περιοχές ειδικών σχηματισμών όπως είναι ένας αυχένας ή μια μισγάγγεια, μπορεί να αποφευχθεί με την προσθήκη γραμμών αλλαγής κλίσης (break lines).



Εικόνα 6: Επίπεδα τρίγωνα 1) στις κορυφογραμμές λόγω έλλειψης γραμμών αλλαγής κλίσης, 2) στην κορυφή ενός υψώματος λόγω έλλειψης υψομετρικού σημείου, 3) στις μισγάγγειες λόγω έλλειψης γραμμών αλλαγής κλίσης.

Πηγή: (Τσούλος Α. Σ., 2015)



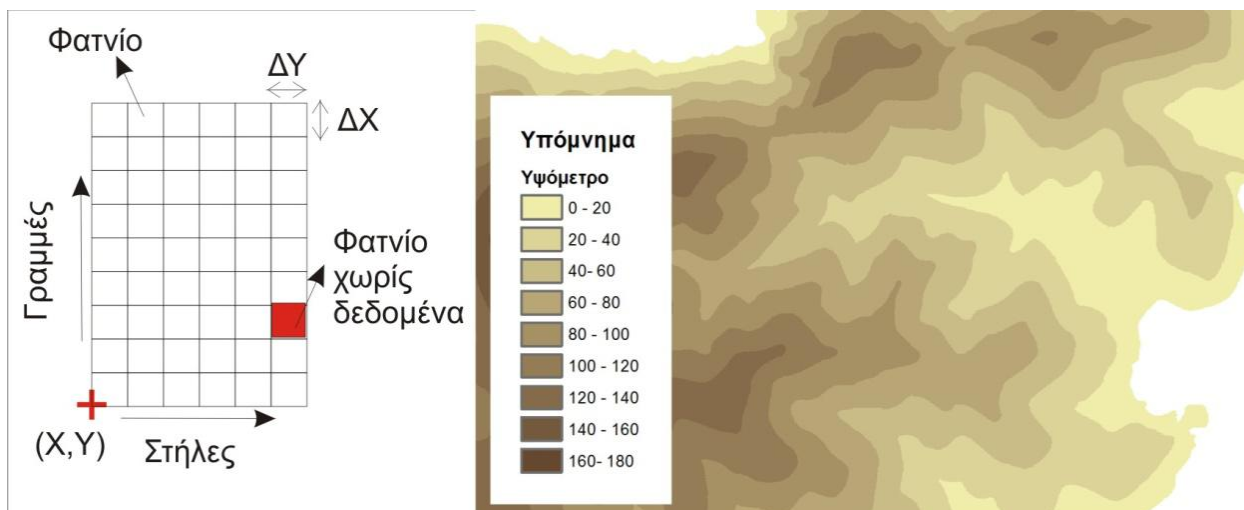
Εικόνα 7: Η δημιουργία επιπέδων τριγώνων κατά μήκος των ισοϋψών λόγω της μεγάλης πυκνότητας των κορυφών επηρεάζει τη μορφή των υψομετρικών ζώνων και τον υπολογισμό των κλίσεων. Οι μηδενικές κλίσεις αποδίδονται με κόκκινη απόχρωση.

Πηγή: (Τσούλος Α. Σ., 2015)

Σε ένα TIN ο εντοπισμός των επίπεδων τριγώνων μπορεί να βασιστεί στον προσδιορισμό των κλίσεων των τριγώνων (Εικόνα 7) και στην επιλογή των τριγώνων των οποίων η κλίση είναι μηδενική. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η οπτικοποίηση τους και ο εντοπισμός των περιοχών που απαιτείται επέμβαση από τον χρήστη με την παραπάνω μεθοδολογία (Τσούλος Α. Σ., 2015).

1.3.2 Το δίκτυο τετραγωνικού πλέγματος

Στο δίκτυο τετραγωνικού πλέγματος τα δεδομένα αποθηκεύονται ως συντεταγμένες Z , σε διαδοχικά σημεία, κατά μήκος ενός προφίλ, με καθορισμένο το σημείο εκκίνησης και την απόσταση του πλέγματος. Για τον προσδιορισμό του υψόμετρου στα ενδιάμεσα χρησιμοποιούνται τεχνικές παρεμβολής. Η περιοχή μελέτης καλύπτεται από ένα κανάβο με φατνία καθορισμένου μεγέθους, για τα οποία το υψόμετρο καθορίζεται με την εκάστοτε επιλεγμένη μέθοδο παρεμβολής (Εικόνα 8: Παράδειγμα ΨΜΥ σε μορφή κανάβου). Για την αξιόπιστη αναπαράσταση του ανάγλυφου σε σχέση με την κλίμακα και την πυκνότητα των δεδομένων πρέπει να επιλεγεί και το σωστό μέγεθος φατνίου που καθορίζει και την ανάλυση του κανάβου (Τσούλος Λ. , 2008).



Εικόνα 8: Παράδειγμα ΨΜΥ σε μορφή κανάβου.

Πηγή: (Τσούλος Λ. Σ., 2015)

1.3.3 Δίκτυο με μορφή πλέγματος

Το δίκτυο αυτό απαρτίζεται από ψηφιακές γραμμές περιγράμματος καθορισμένου υψομέτρου, των οποίων τα δεδομένα αποθηκεύονται ως ζεύγη συντεταγμένων X,Y. Η μέθοδος αυτή απαιτεί μεγάλο όγκο πληροφοριών και μπορεί να προσφέρει κάποια πλεονεκτήματα σε περιοχές όπου είναι απαραίτητη η μελέτη του τρόπου ροής του ύδατος στην επιφάνεια του εδάφους. Γενικά, δεν είναι ιδιαίτερα εύχρηστη μέθοδος και για τον λόγο αυτό δεν θα αναλυθεί περαιτέρω.

Επιγραμματικά αναφέρονται μερικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο κυριότερων μορφών αναπαράστασης (Cadell, 2002):

Πλεονεκτήματα της δομής Grid

- ❖ Είναι σε μορφή κανάβου (raster) και για τον λόγο αυτό υπάρχει εξοικείωση με την δομή δεδομένων του
- ❖ Μπορεί εύκολα να γίνει επεξεργασία πινάκων σε περιβάλλον ηλεκτρονικού υπολογιστή

Μειονεκτήματα δομής grid

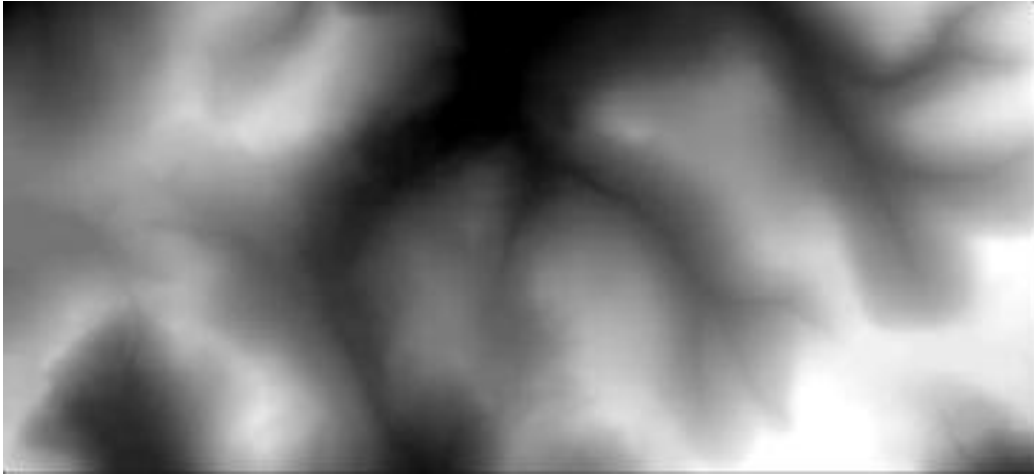
- ❖ Μεγάλη ποσότητα πλεονασμού δεδομένων σε περιοχές με ομοιόμορφο έδαφος
- ❖ Αδυναμία προσαρμογής σε περιοχές που η περιπλοκότητα του ανάγλυφου διαφέρει, χωρίς αλλαγή του μεγέθους του κανάβου
- ❖ Μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα στον εντοπισμό βυθισμάτων και εξογκωμάτων

Πλεονεκτήματα της δομής ακανόνιστων τριγώνων

- ❖ Πολύ μικρός πλεονασμός δεδομένων
- ❖ Αποτελεσματική αποθήκευση δεδομένων
- ❖ Δεν χρειάζεται να προβλεφθούν πιθανά βυθίσματα και εξογκώματα

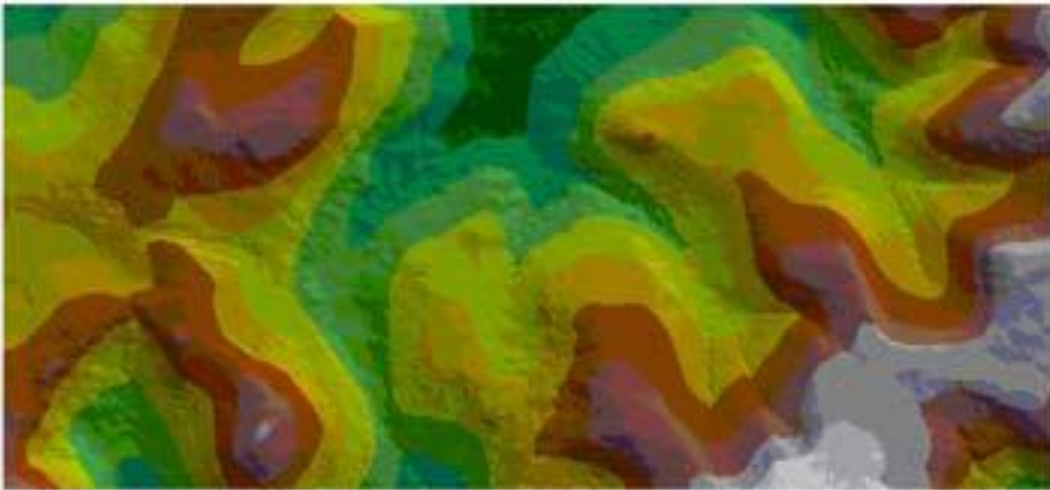
Μειονεκτήματα της δομής ακανόνιστων τριγώνων

- ❖ Μπορεί να εισάγει μια τριγωνική διακριτικότητα, η οποία να παρεμποδίζει ορισμένες μορφές χωρικής ανάλυσης
- ❖ Δεν έχουν ακόμα αναπτυχθεί αλγόριθμοι για την δημιουργία παράγωγων μοντέλων από τα ψηφιακά μοντέλα υψομέτρων (καμπυλοτήτων κ.α.) .



Εικόνα 9: Ψηφιακό Μοντέλο υψομέτρων δομής GRID.

Πηγή: (Cadell, 2002)

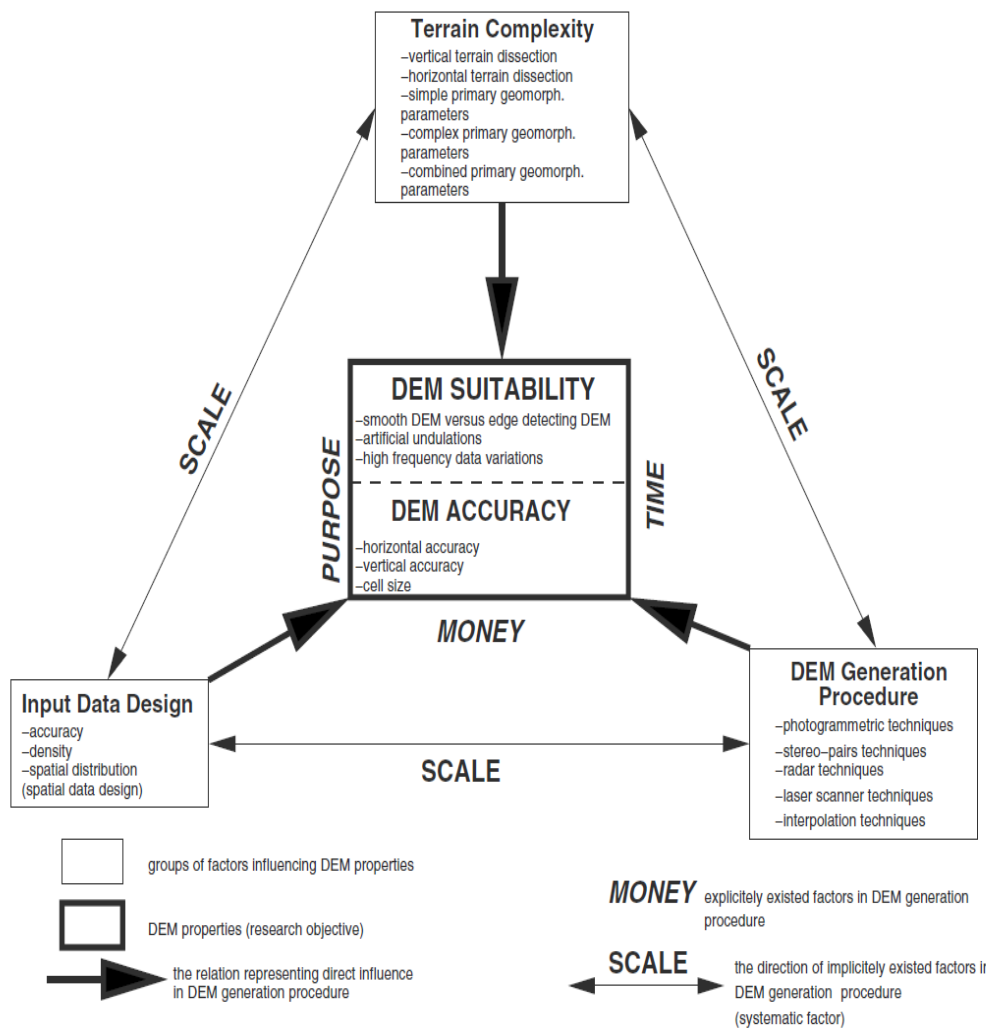


Εικόνα 10: Ψηφιακό Μοντέλο υψομέτρων δομής TIN.

Πηγή: (Cadell, 2002)

1.4. Η ποιότητα και η ακρίβεια των δεδομένων

Η διαδικασία της αξιοποίησης ενός ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων, περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητα του, όπως η κατανομή των δεδομένων εισόδου, η πολυπλοκότητα του ανάγλυφου και η μέθοδος παρεμβολής που χρησιμοποιείται κατά την δημιουργία του αλλά και για τα διάφορα τελικά προϊόντα που μπορεί να εξαχθούν από αυτό (Εικόνα 11: Ομάδα παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητα του DEM και οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Η ποιότητα του DEM αποτελείται από την ακρίβεια και την καταλληλότητα του.).



Εικόνα 11: Ομάδα παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητα του DEM και οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Η ποιότητα του DEM αποτελείται από την ακρίβεια και την καταλληλότητα του.

Επιπρόσθετα, η ποιότητα του ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων δεν επηρεάζεται μόνο από τις τιμές των παραμέτρων, αλλά και τον τρόπο που διακυμαίνονται εσωτερικά. Για παράδειγμα, η κατανομή των δεδομένων εισαγωγής για την δημιουργία ενός DEM δεν καθορίζεται μόνο από το χωρικό τους μοτίβο, αλλά και από τον ίδιο τον αριθμό των σημείων. Η διαδικασία παρεμβολής που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των DEM δεν καθορίζεται μόνο από την επιλογή της μεθόδου παρεμβολής, αλλά και από την μεταβολή των εσωτερικών παραμέτρων της ίδιας της παρεμβολής.

Στη συστηματική έρευνα, για να μελετηθεί η επίδραση ενός παράγοντα στην ακρίβεια του μοντέλου, οι υπόλοιποι πρέπει να διατηρηθούν αμετάβλητοι. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι από πρακτικής και μεθοδολογικής σκοπιάς είναι σημαντικό να κατανοηθεί ότι η ποιότητα ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους είναι ένας συνδυασμός της ακρίβειας και της καταλληλότητας του. Ενώ η ακρίβεια του DEM αναφέρεται στο πόσο ρεαλιστικά αντιπροσωπεύει το πραγματικό ανάγλυφο, η καταλληλότητα του αναφέρεται στο πόσο κατάλληλο είναι για τον σκοπό που πρόκειται να εξυπηρετήσει (π.χ. Υδρολογικά σωστό DEM) (Peckham, 2007).

Το σχέδιο των δεδομένων εισαγωγής, μπορεί να οριστεί σαν μία χωρική κατανομή και σαν ένας αριθμός εισαγόμενων υψομετρικών δεδομένων, που χρησιμοποιούνται από τεχνικές παρεμβολής για την παραγωγή της συνεχούς γήινης επιφάνειας. Υπάρχουν διάφορες κατανομές ωστόσο η πιο γνωστή είναι αυτή στην οποία τα δεδομένα εισόδου τοποθετούνται γύρω από τις ισοϋψείς (Bonk, 2003). Κάθε κατανομή συνδυασμένη με τον αριθμό των σημείων των δεδομένων, επηρεάζει την ποιότητα της εξαγόμενης επιφάνειας του εδάφους. Ειδικότερα κάθε κατανομή είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ιεραρχική κατάταξη των τοπογραφικών χαρακτηριστικών που εκπροσωπεί (Dikau, 1999) (Jozef Minár, 2008).

Χαμηλής πυκνότητας δειγματοληψία, παράγει μόνο εξομαλυμένα χαρακτηριστικά του εδάφους και δεν μπορεί να καλύψει λεπτομέρειες της τοπογραφίας ή μικρές μεταβολές της επιφάνειας του εδάφους. Και παρόλο που η μεγάλη πυκνότητα μιας δειγματοληψίας μπορεί να καλύψει το πρόβλημα με τα λεπτά τοπογραφικά χαρακτηριστικά, συχνά μπορεί να υπερεκτιμήσει τον αριθμό των δεδομένων που απαιτούνται για την κάλυψη κάποιων συγκεκριμένων τύπων εδάφους. Τέλος είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι μεγαλύτερος αριθμός δεδομένων δεν σημαίνει αυτόματα και καλύτερη ακρίβεια του παραγόμενου υψομετρικού μοντέλου εδάφους (Li, 2005).

Κατά τους (Thompson, 2000) η ακρίβεια ενός DEM και των παραγόντων του εξαρτάται από:

- ❖ Την πηγή των υψομετρικών δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη και τις τεχνικές με τις οποίες μετρήθηκαν, την τοποθεσία από την οποία έχει εκληφθεί το δείγμα και την πυκνότητα του δείγματος.
- ❖ Την μέθοδο παρεμβολής η οποία χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων από τα υψομετρικά δεδομένα
- ❖ Τον τρόπο αναπαράστασης των δεδομένων στο ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων (δομή Grid ή TIN)
- ❖ Την οριζοντιογραφική ανάλυση αλλά και την υψομετρική ακρίβεια με την οποία τα δεδομένα έχουν αναπαρασταθεί στο μοντέλο
- ❖ Την πολυπλοκότητα του τοπογραφικού πεδίου που αναπαρίσταται
- ❖ Τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται

1.4.1. Έλεγχος της ποιότητας του Ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων

Ο έλεγχος της ποιότητας του ψηφιακού μοντέλου εδάφους είναι αρκετά περίπλοκος. Για την δημιουργία ενός υψηλής ποιότητας DEM κρίνεται απαραίτητο κάθε διαδικασία κατά την παραγωγή του να εκπονείται με μεγάλη προσοχή, ώστε να ελαχιστοποιούνται κατά το δυνατόν περισσότερο τα σφάλματα που εισάγονται σε κάθε μία από αυτές τις διαδικασίες.

Μια απλή στρατηγική είναι η παρακάτω:

1. Να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα κατά τη συλλογή των δεδομένων
2. Να εφαρμοστούν διαδικασίες για την απαλοιφή των σφαλμάτων και την ελάττωση της επίδρασης τους
3. Ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων που εισάγονται κατά την διαδικασία της μοντελοποίησης της μετρημένης επιφάνειας

1.4.2. Πηγές σφαλμάτων

Τα δεδομένα τα οποία έχουν ληφθεί με μετρήσεις, θα περιέχουν πάντα σφάλματα, ανεξάρτητα από την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη τους. Τα σφάλματα αυτά προέρχονται από:

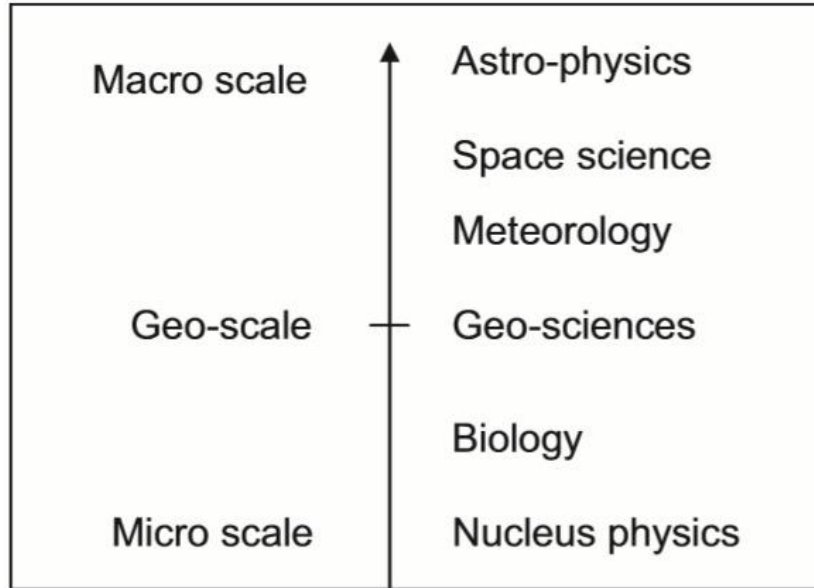
- ❖ Σφάλματα στα υλικά που συμμετέχουν στις μετρήσεις (π.χ. τα σφάλματα των αεροφωτογραφιών που οφείλονται στην διαστροφή του φακού της κάμερας λήψης)
- ❖ Σφάλματα των μετρητικών οργάνων που χρησιμοποιούνται για την λήψη των δεδομένων
- ❖ Ανθρώπινα λάθη που υπεισέρχονται στην διαδικασία λήψης των δεδομένων
- ❖ Σφάλματα στους μετασχηματισμούς συντεταγμένων και γενικά σφάλματα που εμπεριέχονται σε όλες τις διαδικασίες της επεξεργασίας των δεδομένων.

1.5. Κλίμακα και ψηφιακά μοντέλα εδάφους

Η μοντελοποίηση της επίδρασης της κλίμακας ή αλλιώς η χωρική ανάλυση του μοντέλου έχει ιδιαίτερη σημασία στον τομέα της ψηφιακής ανάλυσης του ανάγλυφου. Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι η εξής (Wilson, 2000):

- ❖ Αναπαράσταση των αρχικών υψομετρικών δεδομένων σε μία σειρά από ψηφιακά μοντέλα διαφορετικών χωρικών αναλύσεων
- ❖ Εξαγωγή παραμέτρων και αντικειμένων από τα μοντέλα
- ❖ Σύγκριση των αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό της σχέσης ανάμεσα στην χωρική ανάλυση και τα παράγωγα της γεωμορφομετρικής ανάλυσης
- ❖ Εύρεση της βέλτιστης κλίμακας

Οι έννοιες της χωρικής ανάλυσης και τις κλίμακας στο ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων διαφέρουν. Η κλίμακα είναι μια συγκεχυμένη έννοια, συχνά πολύπλοκη, που ενδέχεται να σημαίνει διαφορετικά πράγματα, ανάλογα με το πλαίσιο και την οπτική γωνία που εξετάζεται (Li, 2005). Η κλίμακα μπορεί να είναι χωρική ή χρονική. Στον τομέα των γεωεπιστημών ωστόσο εξετάζεται η χωρική μόνο κλίμακα και ειδικότερα η γεωγραφική. (Εικόνα 12: Το φάσμα της χωρικής κλίμακας).



Εικόνα 12: Το φάσμα της χωρικής κλίμακας.

Πηγή: (Li, 2005)

Η γεωγραφική έννοια της κλίμακας αφορά κυρίως τους παραδοσιακούς τοπογραφικούς χάρτες, όπου η κλίμακα ορίζεται για να δείξει την αναλογία του μήκους στο χάρτη με το πραγματικό μήκος. Όπως και οι τοπογραφικοί χάρτες έτσι και το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων συνδέεται με την έννοια της κλίμακας, παρά το γεγονός ότι αρκετοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι δεν υφίσταται κλίμακα στα σύνολα ψηφιακών δεδομένων αλλά σε αυτά μπορεί μόνο να οριστεί η χωρική ανάλυση (Li, 2005).

Στα ψηφιακά μοντέλα εδάφους η διάσταση του φατνίου, περιγράφει την έννοια της χωρικής ανάλυσης, καθώς είναι η βασική μονάδα για την μέτρηση και την αναπαράσταση της επιφάνειας, αποδίδοντας το επίπεδο της λεπτομέρειας του χάρτη. Η χωρική ανάλυση μπορεί να θεωρηθεί ως η μικρότερη απόσταση μέσα στην οποία μπορεί να καταγραφεί μεταβολή (Τσούλος Λ. , 2008). Η χωρική ανάλυση λοιπόν δεν ταυτίζεται με την κλίμακα, αλλά παρέχει μια ένδειξη της, αφού είναι ένα μέτρο της περιεχόμενης πληροφορίας του χάρτη. Η επιλογή της ανάλυσης του ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων, είναι ζωτικής σημασίας καθώς μπορεί να προσαρμόζει την πραγματικότητα με το περιεχόμενο των δεδομένων και να ελαχιστοποιεί τα σφάλματα στην αναπαράσταση του ανάγλυφου. Το θέμα της οριζόντιας ανάλυσης σήμερα είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές όπου η τοπογραφική έρευνα στο πεδίο δεν είναι εφικτή, και το ψηφιακό μοντέλο είναι το βασικό στοιχείο εισόδου.

Τέλος, ο καθορισμός της βέλτιστης κλίμακας επιτυγχάνεται μέσω της διεξαγωγής πειραμάτων ή μέσω θεωρητικής εξέτασης, όπου κατόπιν της σύγκρισης ψηφιακών μοντέλων εδάφους διαφορετικής ανάλυσης, προκύπτει η βέλτιστη ανάλυση για την απόδοση κάθε εφαρμογής.

1.6. Δεδομένα LiDAR

Η τεχνολογία Laser scanner έχει καταστήσει εφικτή την ταχεία και ανέξοδη μέτρηση, σε υψηλή χωρική ανάλυση, της τοπογραφίας μεγάλων περιοχών. Η τεχνολογία ALS, μία ενεργή φωτογραμμετρική τεχνολογία, προσδιορίζει την απόσταση από τον αερομεταφερόμενο αισθητήρα στην ανακλώμενη επιφάνεια, μετρώντας τον χρόνο που ταξιδεύει ο εκπεμπόμενος παλμός Laser (Wichmann, 2011).

Μια βασική εργασία που επιλύθηκε με την χρήση των LiDAR δεδομένων, είναι η δημιουργία ψηφιακών μοντέλων υψομέτρων υψηλής ανάλυσης. Ειδικά σε περιοχές με πυκνή βλάστηση όπου έχει την ικανότητα να διεισδύει μέσα στο φύλλωμα των δένδρων, έχει σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους φωτογραμμετρίας και έχει καταγράψει πολύ καλά αποτελέσματα (Kraus, 2004). Η διαδικασία φιλτραρίσματος, συνήθως αντιμετωπίζεται σαν μία τοπική διαδικασία σε δεδομένα που έχουν ληφθεί σε περιοχές με συνεχή επιφάνεια. Ωστόσο, προβλήματα μπορούν να δημιουργηθούν σε περιοχές με έντονο και ασυνεχές ανάγλυφο (πυκνοδομημένες περιοχές, περίπλοκα εργοτάξια κ.α.).

1.6.1. Περιοχές εφαρμογής των LiDAR δεδομένων

Τα κύρια πεδία εφαρμογής των συστημάτων αερομεταφερόμενων αισθητήρων laser, είναι περιοχές όπου οι συμβατικές μέθοδοι μετρήσεων είναι χρονοβόρες ή αντιμετωπίζουν προβλήματα (Kilian, 1996).

Τέτοιες περιοχές είναι:

1. Δασικές περιοχές, όπου η ταχυμετρία έχει μεγάλο κόστος και η φωτογραμμετρία αποτυγχάνει λόγω της αδυναμίας προσδιορισμού του εδάφους στις αεροφωτογραφίες.
2. Σε υγρότοπους και παράκτιες περιοχές, όπου η ταχυμετρία αποτυγχάνει λόγω των παλιρροιών και η φωτογραμμετρία αντιμετωπίζει αρκετά προβλήματα για προφανείς λόγους.
3. Σε υπαίθριες περιοχές, όταν τα αποτελέσματα των μετρήσεων απαιτούνται σε μικρό χρονικό διάστημα.
4. Σε αστικές περιοχές, όπου οι τεχνικές αντιστοίχισης εικόνων αντιμετωπίζουν αρκετά προβλήματα λόγω της πυκνής δόμησης και των πολλών ασυνεχειών ύψους.

1.6.2 Χαρακτηριστικά των LiDAR δεδομένων

Ένα σύστημα σαρωτή laser παράγει δεδομένα τα οποία χαρακτηρίζονται ως ένα τυχαία κατανομημένο νέφος σημείων. Τα συγκεκριμένα νέφη, ενδέχεται να περιέχουν περισσότερη πληροφορία από ένα 2.5D μοντέλο επιφάνειας, στο οποίο το υψόμετρο έχει μία μοναδική τιμή Z σε συνάρτηση με το X και το Y . Το παραπάνω σημαίνει ότι κατακόρυφοι τοίχοι εμφανίζονται πραγματικά κατακόρυφοι, μπορούν να μετρηθούν ακόμα και σημεία κάτω από γέφυρες και να εξαχθούν υπολογισμοί του όγκου της βλάστησης. Τα υψομετρικά δεδομένα μπορούν να αποκτηθούν με διαφορετικά χαρακτηριστικά, αναλόγως την εφαρμογή για την οποία γίνεται η λήψη τους και το σύστημα του σαρωτή. Κάποια από αυτά, τα οποία επηρεάζουν τους αλγόριθμους φιλτραρίσματος και μοντελοποίησης των δεδομένων είναι:

- ❖ Η πυκνότητα των σημείων
- ❖ Η καταγραφή των πολλαπλών ανακλάσεων ενός παλμού
- ❖ Η καταγραφή του εύρους της ανάκλασης

Η πυκνότητα των σημείων εξαρτάται από το ύψος πτήσης αλλά και από παράγοντες που εξαρτώνται από το σύστημα του σαρωτή όπως η εμβέλεια της πλατφόρμας, το οπτικό πεδίο και η συχνότητα της δειγματοληψίας.

Το δεύτερο χαρακτηριστικό, οι πολλαπλές ανακλάσεις ενός παλμού του σαρωτή laser, είναι σημαντικό για τους αλγόριθμους φιλτραρίσματος και μοντελοποίησης που έχουν να κάνουν με τον διαχωρισμό των σημείων από αντικείμενα που βρίσκονται πάνω από τη γήινη επιφάνεια (δένδρα, σπίτια, κ.λπ.) και σε ογκομετρήσεις σε δασικές περιοχές.

Το τρίτο χαρακτηριστικό, η καταγραφή του εύρους της ανάκλασης δίνει ραδιομετρική πληροφορία για την τοπογραφούμενη περιοχή. Οι ανακλάσεις μπορεί να χωριστούν σε πολύ στενές ζώνες μηκών κύματος και έτσι να χρησιμοποιηθούν σε αλγόριθμους ταξινόμησης όπως για παράδειγμα τον διαχωρισμό του πλακόστρωτου εδάφους από αυτό που είναι καλυμμένο με γρασίδι (Axelson, 2000).

1.6.3. Αλγόριθμοι ταξινόμησης των LiDAR δεδομένων

Ένα σημαντικό ζήτημα για τα δεδομένα LiDAR είναι η ταξινόμηση τους ως σημεία της επιφάνειας του εδάφους ή σημεία πάνω από αυτή. Ο διαχωρισμός αυτός είναι ζωτικής σημασίας για την δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους ή ακόμη περισσότερο την δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων. Για την επίλυση αυτού του ζητήματος έχουν προταθεί αρκετοί αλγόριθμοι φιλτραρίσματος στους οποίους δεν χρειάζεται να γίνει μεγαλύτερη αναφορά για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Ανεξάρτητα από την μέθοδο φιλτραρίσματος που χρησιμοποιείται, η ταξινόμηση παρουσιάζει πάντα δύο σφάλματα. Το ένα είναι ότι ταξινομεί εσφαλμένα σημεία ως επιφάνεια του εδάφους και το άλλο ότι αφαιρεί εσφαλμένα σημεία από την επιφάνεια του εδάφους. Για να ελαχιστοποιηθούν αυτά τα σφάλματα θα πρέπει να προσδιοριστεί μια βέλτιστη ρύθμιση του φίλτρου που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση. Ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις δεν είναι δυνατόν να βρεθεί μοναδική τέτοια ρύθμιση παραμέτρων για μια περιοχή μελέτης, ειδικά αν περιέχει έντονο ανάγλυφο και δασικές εκτάσεις, στις οποίες το έδαφος και η βλάστηση δίνουν παρόμοια χαρακτηριστικά στα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό (μεγάλες υψομετρικές διαφορές σε μικρές οριζόντιες αποστάσεις) (Wichmann, 2011).

1.6.4. Αξιολόγηση των LiDAR δεδομένων

Συνδυάζοντας τα συστήματα GPS/INS για τον προσδιορισμό του εξωτερικού προσανατολισμού και ένα αισθητήρα laser για την μέτρηση των αποστάσεων όπως προαναφέρθηκε, δημιουργείται ένα ισχυρό σύστημα για τρισδιάστατες μετρήσεις της τοπογραφίας της γης. Για την παραγωγή ωστόσο ενός ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων, χρειάζονται αρκετά μεμονωμένα βήματα αξιολόγησης των σημείων που λαμβάνονται. Χονδρικά, τέσσερα κύρια βήματα μπορούν να διακριθούν κατά την επεξεργασία:

1. Προ-επεξεργασία

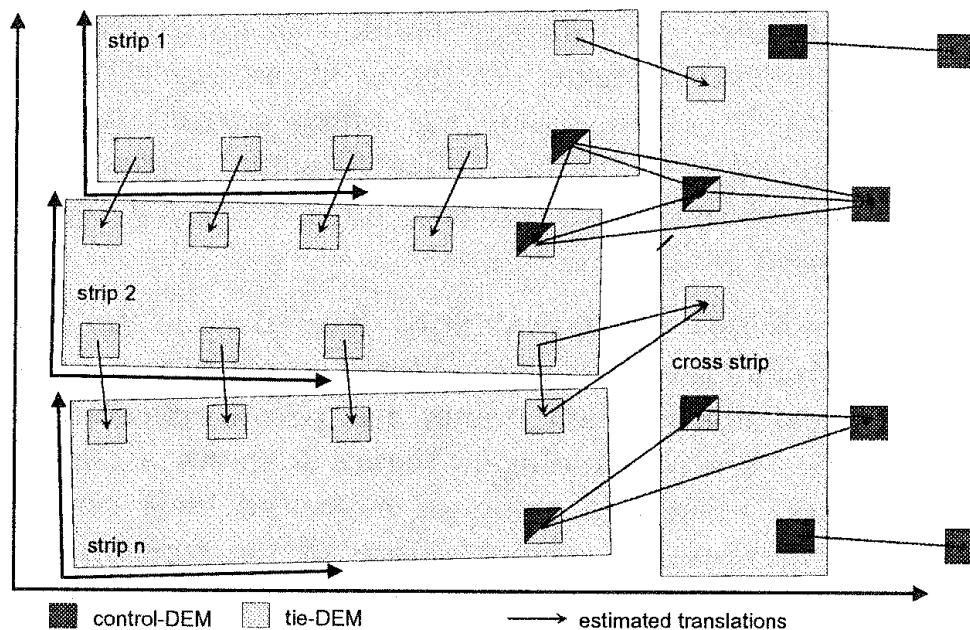
Κατά την προ επεξεργασία, λαμβάνονται οι επίπεδες συντεταγμένες από τα μη επεξεργασμένα σημεία που παρέχονται από τον σαρωτή laser και τους αισθητήρες προσανατολισμού. Οι μετρήσεις από τους διάφορους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται πρέπει να συγχρονιστούν ώστε να καθοριστεί η θέση κάθε μέτρησης. Ακολούθως οι συγχρονισμένες μετρήσεις μπορούν να μετασχηματιστούν σε κάποιο επίπεδο σύστημα συντεταγμένων χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους μετασχηματισμού ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$) και την μετρημένη απόσταση S_L , οι τρισδιάστατες συντεταγμένες (X_L, Y_L, Z_L) ενός συγκεκριμένου ίχνους υπολογίζονται από την σχέση:

$$\begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ S_L \end{bmatrix}$$

2. Η βαθμονόμηση του συστήματος Laser scanner

Για να καλυφθούν περιοχές μεγαλύτερης έκτασης χρειάζονται περισσότερες επικαλυπτόμενες λωρίδες δεδομένων. Λόγω συστηματικών σφαλμάτων των μεμονωμένων αισθητήρων και ειδικά του GPS και του INS, που χρησιμοποιούνται για τον ορισμό της θέσης και του προσανατολισμού του σαρωτή ως προς τις γωνίες εγκατάστασης του αισθητήρα, οι μεμονωμένες επικαλυπτόμενες λωρίδες δεν ταυτίζονται η μία με την άλλη ακριβώς. Για την ταύτιση τους απαιτείται η βαθμονόμηση του συστήματος του αισθητήρα laser. Ο στόχος της βαθμονόμησης είναι ο καθορισμός επιπρόσθετων παραμέτρων μετασχηματισμού, των παραμέτρων βαθμονόμησης, για την ένταξη των μεμονωμένων λωρίδων σε ένα ομοιογενές εξωτερικό σύστημα συντεταγμένων (Εικόνα 13).

Οι επικαλυπτόμενες περιοχές των μεμονωμένων λωρίδων χρησιμοποιούνται για να πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση, ωστόσο για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής δεν κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω ανάλυση της διαδικασίας.



Εικόνα 13: Σημεία ελέγχου στις επικαλυπτόμενες λωρίδες.

Πηγή: (Kilian, 1996)

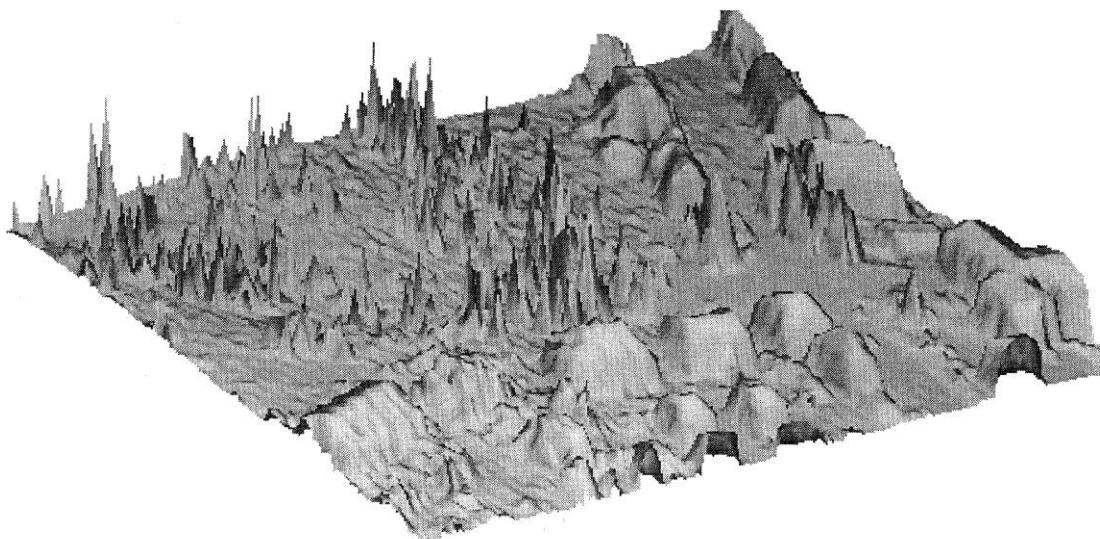
3. Φιλτράρισμα των μετρημένων σημείων

Ειδικά σε δασικές περιοχές και περιοχές με πυκνή δόμηση τα συστήματα ALS υπερέχουν των υπόλοιπων μεθόδων για την λήψη τρισδιάστατων δεδομένων. Σε περιοχές με βλάστηση, σε κάθε εκπεμπόμενο παλμό laser μια συγκεκριμένη ποσότητα από την εκπεμπόμενη ακτίνα ανακλά στο φύλλωμα των δένδρων, ενώ ένα άλλο κομμάτι του παλμού διεισδύει από τα κενά των φυλλωμάτων και φτάνει μέχρι το έδαφος από όπου και ανακλάται. Έτσι η τελευταία ανάκλαση του παλμού αναφέρεται στην επιφάνεια του εδάφους. Παρόλα αυτά ορισμένες φορές η ακτίνα ανακλάται εξολοκλήρου στο φύλλωμα οπότε και δεν υπάρχουν μετρήσεις του εδάφους. Το ποσοστό που διεισδύει εξαρτάται από την εποχή, ωστόσο έχει αποδειχθεί ότι ακόμα και το καλοκαίρι που παρατηρείται η μικρότερη διεισδυτικότητα παρέχονται αρκετές μετρήσεις ώστε να καθοριστεί η τοπογραφία του εδάφους.

Ένα σημαντικό έργο κατά την αξιολόγηση των δεδομένων είναι ο διαχωρισμός των σημείων ως έδαφος ή όχι και όπως αναφέρθηκε παραπάνω αρκετοί επιστήμονες έχουν ασχοληθεί με αυτό. Σε γενικές γραμμές ανεξάρτητα από τον αλγόριθμο και τις παραμέτρους που επιλέγονται κάθε φορά, εφαρμόζεται μια διαδικασία η οποία χωρίζεται σε δύο στάδια.

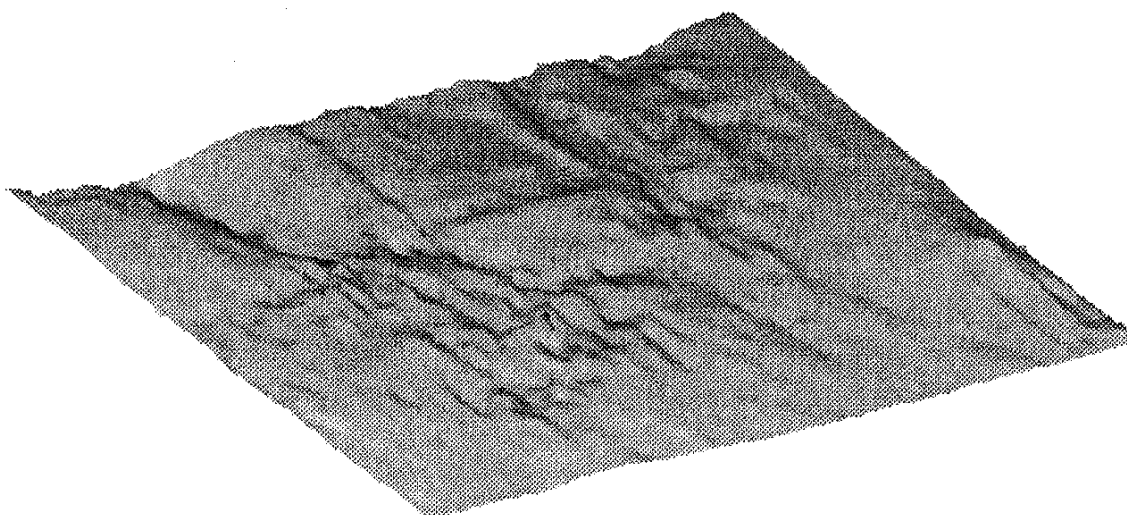
- ❖ Απόκτηση των προσεγγιστικών τιμών για τα σημεία της επιφάνειας του εδάφους
- ❖ Φιλτράρισμα των μετρημένων σημείων και μοντελοποίηση της επιφάνειας του εδάφους

Παρακάτω παρατίθενται παραδείγματα αφιλτράριστων και φιλτραρισμένων δεδομένων (Εικόνα 14, Εικόνα 15).



Εικόνα 14: Τρισδιάστατη εικόνα αφιλτράριστων δεδομένων.

Πηγή: (Kilian, 1996)

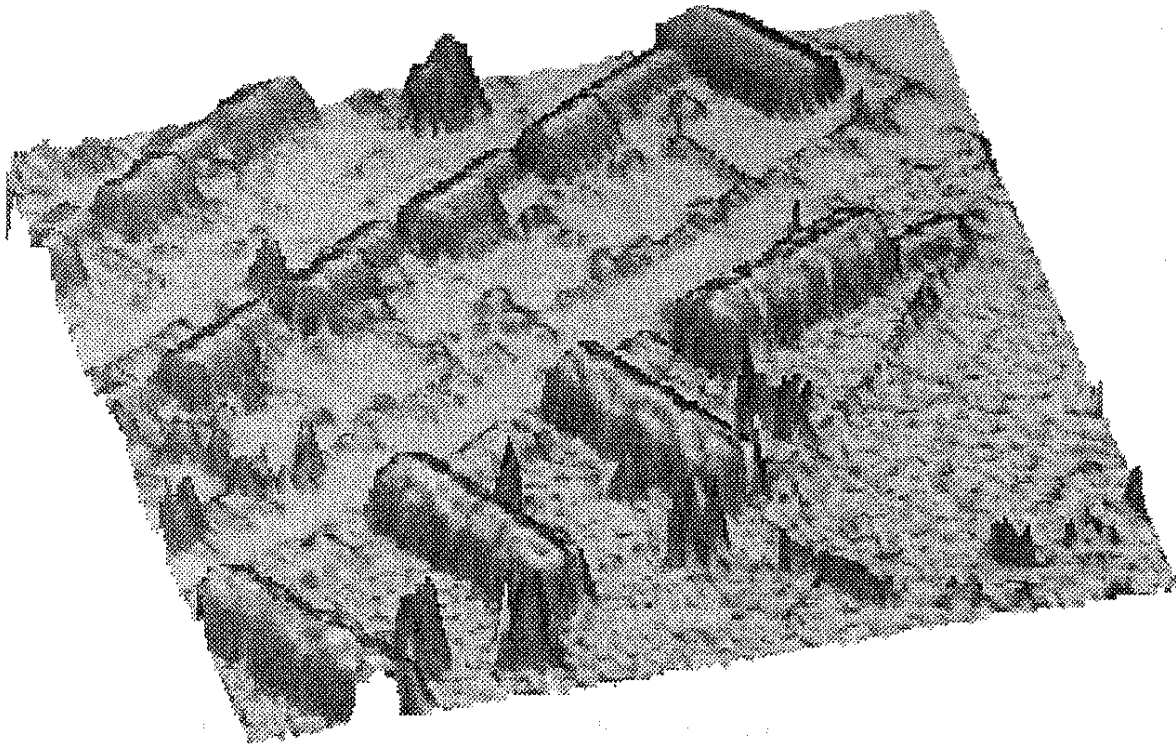


Εικόνα 15: Τρισδιάστατη εικόνα φιλτραρισμένων δεδομένων.

Πηγή: (Kilian, 1996)

4. Παραγωγή περαιτέρω προϊόντων

Μια σημαντική εφαρμογή για τα συστήματα ALS είναι η απόκτηση τρισδιάστατων βάσεων δεδομένων. Χρησιμοποιώντας τους αλγόριθμους φιλτραρίσματος και τις ταξινομήσεις που προαναφέρθηκαν μπορούν να δημιουργηθούν μοντέλα τα οποία απεικονίζουν διαφορετικές εκδοχές της επιφάνειας της επισκοπούμενης περιοχής. Αν για παράδειγμα χρησιμοποιηθούν όλες οι μετρήσεις, θα παραχθεί ένα ψηφιακό μοντέλο επιφανείας (DSM), το οποίο περιλαμβάνει όλα τα αντικείμενα που υπάρχουν στην επιφάνεια του εδάφους (Εικόνα 16). (Kilian, 1996)



Εικόνα 16: Ψηφιακό μοντέλο επιφανείας.

Πηγή: (Kilian, 1996)

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η ενότητα αυτή αφορά την περιοχή μελέτης της εργασίας. Ειδικότερα, γίνεται μία περιγραφή των κριτηρίων βάσει των οποίων έγινε ο καθορισμός της συγκεκριμένης περιοχής καθώς και ενδιαφέροντα γεωγραφικά και ιστορικά στοιχεία για τον ευρύτερο χώρο στον οποίο εντάσσεται.

2.1. Κριτήρια επιλογής περιοχής μελέτης

Η επιλογή της περιοχής μελέτης έγινε μέσα από ένα μεγάλο αριθμό υποψήφιων περιοχών που είχαν αρχικά προκριθεί, ώστε να πληροί κάποιες προϋποθέσεις. Βασική προϋπόθεση είναι η ύπαρξη συγκεκριμένων γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών, τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Για το λόγο αυτό η περιοχή επιλέχθηκε να έχει έντονο ανάγλυφο για μεγαλύτερη ποικιλία κλίσεων, καμπυλότητας και διεύθυνσης κλίσεων του εδάφους. Η συμπεριφορά των γεωμορφομετρικών αυτών χαρακτηριστικών αναλύεται παρακάτω. Εξίσου σημαντικό κριτήριο ήταν ο τρόπος συλλογής δεδομένων αλλά και η διαθεσιμότητα της υψομετρικής πληροφορίας. Για το λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαίο τα δεδομένα υψομετρικής πληροφορίας της περιοχής να διατίθενται εύκολα και άμεσα μέσω της τεχνικής LiDAR (Light Detection And Ranging), η οποία βασίζεται στην εκπομπή παλμικής ακτινοβολίας λέιζερ στην ατμόσφαιρα και ακολούθως, στην καταγραφή της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας λέιζερ. Η συλλογή των δεδομένων LiDAR πραγματοποιήθηκε μέσω του διαδικτυακού τόπου του Open Topography, που δραστηριοποιείται και παρέχει δεδομένα κυρίως στον χώρο των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής. Μέσω του ιστότοπου του Open Topography έγιναν διαθέσιμα νέφη σημείων (point cloud) για την περιοχή από τα οποία δημιουργήθηκαν τα ψηφιακά μοντέλα υψομέτρων που διερευνήθηκαν γεωμορφομετρικά. Για τη μεγαλύτερη ακρίβεια των υψομέτρων η περιοχή προτιμήθηκε να βρίσκεται μακριά από αστική δόμηση και δραστηριότητα καθώς και να έχει χαμηλή βλάστηση, ώστε να μην παρεμβάλλονται άλλα αντικείμενα έως ότου η ακτίνα φτάσει στη φυσική γήινη επιφάνεια.

Για τους παραπάνω λόγους γίνεται αντιληπτό ότι η αναζήτηση της περιοχής μελέτης περιορίστηκε κυρίως στο χώρο των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, λόγω της άμεσης διαθεσιμότητας των LiDAR δεδομένων από το Open Topography και των υφιστάμενων γεωλογικών και χαρτογραφικών μελετών. Πιο συγκεκριμένα η περιοχή που επιλέχθηκε αφορά σε ένα μικρό τμήμα της κοίτης του ποταμού Yakima στην πολιτεία Washington.



Εικόνα 17: Χάρτης των Η.Π.Α. με την περιοχή μελέτης

Πηγή: (Stepmap)

2.2. Ποταμός Γιάκιμα

Ο ποταμός Γιάκιμα (Yakima River) αποτελεί παραπόταμο του ποταμού Κολούμπια (Columbia River) στα νότια, κεντρικά και ανατολικά της πολιτείας Washington στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και έχει ονομαστεί από τις αυτόχθονες φυλές των Yakama. Το μήκος του από την πηγή έως τις εκβολές φτάνει τα 344 χιλιόμετρα με μέση πτώση υψομέτρου 1,87 μέτρα ανά χιλιόμετρο. Πρόκειται για το μεγαλύτερο ποταμό ο οποίος βρίσκεται εξ ολοκλήρου στην πολιτεία Washington.

Πηγάζει από την τεχνητή λίμνη Keechelus (47°19'20"N 121°20'21"W) στην οροσειρά Cascade σε υψόμετρο 746 μέτρων, διαρρέει με νοτιοανατολική κατεύθυνση μέσω των πόλεων Cle Elum, Ellensburg, Yakima, Sunnyside και Richland όπου εκβάλλει στον ποταμό Columbia (46°15'10"N 119°13'51"W) σε υψόμετρο 105 μέτρων. Έχει μέση υδάτινη παροχή στην περιοχή Κίονα 99 m³/s με μέγιστη τιμή 1682 m³/s και ελάχιστη τιμή 6 m³/s. Η λεκάνη απορροής του ποταμού (Εικόνα 18) καταλαμβάνει έκταση 15928 τετραγωνικών χιλιομέτρων και συμπεριλαμβάνει τους παραπόταμους Cle Elum, Teanaway και Naches. Περικλείεται από τις οροσειρές Cascade στα δυτικά, Wenatchee στα βόρεια, Rattlesnake στα ανατολικά και τους λόφους Horse Heaven στα νότια.



Εικόνα 18: Χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Yakima

Πηγή: (Wikipedia)

Περίπου 9 εκατομμύρια χρόνια πριν, ο ποταμός Yakima έρεε κατευθείαν προς τον Ειρηνικό ωκεανό. Το λιώσιμο των πάγων πριν από περίπου 15000 χρόνια προκάλεσε τεράστιες πλημμύρες σε σύντομο χρονικό διάστημα στην περιοχή, οι οποίες με τη σειρά τους έφεραν εδαφικές και υψομετρικές ανακατατάξεις λόγω των ιζηματογενών πετρωμάτων που δημιουργήθηκαν. Κάπως έτσι ο ποταμός Yakima αναγκάστηκε να αλλάξει πορεία και τελικά να βρει δίοδο ώστε να συναντήσει τον ποταμό Columbia. Οι πρώτοι δυτικοί εξερευνητές που επισκέφθηκαν τον ποταμό ήταν ο Lewis και ο Clark στις 17 Οκτωβρίου 1805. Ο ποταμός ήταν τότε γνωστός στους γηγενείς Αμερικανούς ως "Tap Teel", αν και η περιοχή έχει κατοικηθεί από τα προϊστορικά χρόνια.

Ο ποταμός Yakima παρέχει άρδευση για την ξηρή αλλά εύφορη γη στην κοιλάδα και η αρδευόμενη γεωργία είναι η κύρια οικονομική βάση της περιοχής. Η γεωργική γη ανέρχεται σε 2600 τετραγωνικά χιλιόμετρα, συμπεριλαμβανομένων των αρδευόμενων βοσκοτόπων, οπωρώνων, αμπελιών, λυκίσκου και αγρωστωδών. Ένα σημαντικό ποσοστό των μήλων και των κερασιών της πολιτείας καλλιεργούνται στην κοιλάδα, καθώς και το μεγαλύτερο ποσοστό (75%) του λυκίσκου των Ηνωμένων Πολιτειών. Από τα τέλη του 20ου αιώνα, αναπτύχθηκε ταχέως στην περιοχή και η οινοποιία. Ο ποταμός Yakima και οι παραπόταμοι του έχουν μεταβληθεί σημαντικά για τους σκοπούς της γεωργίας με πολλά φράγματα και κανάλια άρδευσης. Το σύστημα άρδευσης στην λεκάνη απορροής του Yakima προκαλεί περιόδους σοβαρής μείωσης της στάθμης ή αυξημένης ροής του ποταμού. Ως αποτέλεσμα, οι στατιστικές για την παροχή του ποταμού επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το αρδευτικό σύστημα (Wikipedia). Το USGS (United States Geological Survey) έχει τοποθετήσει τέσσερις μετρητές ροής στον ποταμό. Η υψηλότερη μέση παροχή που καταγράφηκε, 100,3 m³/s, βρίσκεται ψηλότερα από το μέσο του ποταμού. Οι δύο μετρητές στο κάτω μέρος του ποταμού δείχνουν μειωμένες μέσες ροές. (USGS)

Η μεγαλύτερη μερίδα ιδιοκτησίας γης στην κοιλάδα περιλαμβάνει τις ομοσπονδιακές και κρατικές υπηρεσίες και την ινδιάνικη φυλή Yakama. Η ιδιωτική ιδιοκτησία ανέρχεται σε 5045,69 km². Η αμερικανική δασική υπηρεσία διαχειρίζεται 3611,86 km² και η φυλή Yakama κατέχει 3600,84 km² εντός της λεκάνης. Οι δασωμένες περιοχές στα βόρεια και δυτικά τμήματα της λεκάνης καταλαμβάνουν περίπου 5700 km² και χρησιμοποιούνται ως περιοχές αναψυχής, βιότοποι άγριας πανίδας, υλοτομία, βόσκηση και για τοπικές πολιτιστικές δραστηριότητες. Τα λιβάδια εκτείνονται σε περίπου 7500 km² και χρησιμοποιούνται για στρατιωτική εκπαίδευση, βόσκηση, βιότοπο άγριας πανίδας και τοπικές πολιτιστικές δραστηριότητες.

Εκτός από την αρδευόμενη γεωργία, άλλες κύριες οικονομικές πηγές περιλαμβάνουν τη συγκομιδή και μεταποίηση ξυλείας, τα βοοειδή και τις υπαίθριες δραστηριότητες. Με τη σημαντική μείωση της υλοτομίας σε ομοσπονδιακές εκτάσεις κατά την υλοποίηση του Βορειοδυτικού Δασικού Σχεδίου (Northwest Forest Plan) για την προστασία της απειλούμενης κουκουβάγιας, η οικονομία της ξυλείας έχει πληγεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, παράλληλα όμως έχει παρατηρηθεί μια ταχεία αύξηση της ζήτησης για υπαίθριες δραστηριότητες, όπως ράφτινγκ, καγιακ, ψάρεμα και πεζοπορία κατά τη θερινή περίοδο καθώς και αγροτουρισμό.

2.3. Φαράγγι ποταμού Γιάκιμα

Η περιοχή μελέτης ($46^{\circ}48'38''\text{N}$ $120^{\circ}26'40''\text{W}$) όπως προαναφέρθηκε αποτελεί ένα μικρό τμήμα του ποταμού Yakima για λόγους οικονομίας δεδομένων και χρόνου επεξεργασίας από τα διατιθέμενα λογισμικά. Η περιοχή αυτή βρίσκεται στο φαράγγι του ποταμού Yakima (Yakima River Canyon ή Umtanum Ridge Water Gap) μεταξύ των πόλεων Ellensburg και Yakima, το οποίο ανακηρύχθηκε ως Εθνικό Φυσικό Αξιοθέατο το 1980. Χαρακτηρίζεται από μία σειρά από απότομες ράχες από βασάλτη, οι οποίες διακόπτονται από τον ποταμό.



Εικόνα 19: Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής μελέτης

Πηγή: (Google)

Οι μεγάλες ροές βασάλτη της λεκάνης, σε κάποιες περιοχές πάχους πάνω από 5000 μέτρα, έχουν πτυχωθεί σε κορυφογραμμές και κοιλάδες σε διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, ως αποτέλεσμα μετακίνησης και συμπίεσης των τεκτονικών πλακών σε διεύθυνση ΝΑ-ΒΔ. Στη διαδρομή του να συναντήσει τον ποταμό Κολούμπια, ο ποταμός Yakima αποκόπτει τέσσερις μεγάλες κορυφογραμμές που σχηματίζονται από αυτή τη συμπίεση (Manastash, Umtanum, Yakima και Ahtanum) για να

φτάσει από την κοιλάδα Kittitas προς τα νότια στην κοιλάδα Yakima (Wikipedia). Από το φαινόμενο αυτό, το οποίο συνεχίζεται μέχρι και σήμερα, αναμένεται αυτές οι κορυφογραμμές να εξακολουθούν να ανυψώνονται, ενώ στην περιοχή προβλέπεται να υπάρχει εντονότερη σεισμική δραστηριότητα. (Central Washington University)

Η υψηλότερη κορυφογραμμή την οποία διασχίζει ο ποταμός, η Umtanum, φτάνει τα 983 μέτρα υψόμετρο σε απόσταση μικρότερη του ενός χιλιομέτρου από την κοίτη του ποταμού, ο οποίος βρίσκεται σε υψόμετρο 470 μέτρων στο πλησιέστερο σημείο από την κορυφή εκείνη. Αυτή η ασυνήθιστη αντιπαράθεση (ποτάμια που κόβουν τις κορυφογραμμές αντί να ρέουν μέσα από φαινομενικά πιο ευνοϊκές διαδρομές) είναι ένα παράδειγμα γεωλογικής προτεραιότητας. Ο αρχαίος ποταμός Yakima πιστεύεται ότι προϋπήρχε, ρέοντας προς τα νότια πάνω από τα σχετικά επίπεδα στρώματα βασάλτη. Καθώς τα στρώματα συμπιέστηκαν, ανυψώθηκαν σιγά-σιγά αντίκλινα. Ο ποταμός συνέχισε να ακολουθεί την πορεία του, διαβρώνοντας τον βασάλτη για να διατηρήσει σχετικά το επίπεδο του. Η άποψη αυτή αποδεικνύεται από την πλειάδα των μαιάνδρων που βρίσκονται στο φαράγγι σήμερα (Wikipedia). Η σύγχρονη αυτή γεωλογική άποψη αντιτίθεται στην άποψη που είχαν για πολλά χρόνια οι αυτόχθονες φυλές της περιοχής. Σύμφωνα με το θρύλο, πίστευαν ότι οι κορυφογραμμές προϋπήρχαν του ποταμού στην περιοχή και το φαράγγι δημιουργήθηκε ως αποτέλεσμα της ανελέητης πάλης μεταξύ ενός γιγάντιου κάστορα και ενός γιγάντιου κογιότ που καθώς μάχονταν στην κοιλάδα έπεσαν πάνω στα βράχια και τα συνέθλιψαν επιτρέποντας έτσι στο νερό να περάσει μέσα από τις κορυφογραμμές (Central Washington University).



Εικόνα 20: Το φαράγγι του ποταμού Yakima

Πηγή: (DDesignPlus)

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθεί η μεθοδολογία του κάθε σταδίου της μορφομετρικής ανάλυσης. Τα στάδια αυτά είναι η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων σε δομή grid και ακολούθως την εξαγωγή όλων των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών που θα χρησιμοποιηθούν για την σύγκριση της συγκεκριμένης δομής με την δομή TIN.

3.1. Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε δομή grid

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο η πρωτογενής πληροφορία για την δημιουργία του DEM είναι ένα νέφος από σημεία τα οποία έχουν ληφθεί με την μέθοδο LiDAR (Light Detection And Ranging).

Το νέφος σημείων είναι ένα σύνολο από ακανόνιστα κατανεμημένα σημεία από τα οποία μπορούμε να δημιουργήσουμε ψηφιακά μοντέλα εδάφους είτε σε μορφή τετραγωνικού κανάβου είτε μέσω της δομής τριγωνικού δικτύου – TIN. Με την δημιουργία μοντέλου σε δομή grid θα ασχοληθούμε στην παρούσα διπλωματική.

Η παραγωγή του ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων, για τον υπολογισμό των γεωμορφομετρικών παραμέτρων, επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας της παρεμβολής. Η παρεμβολή είναι μια μαθηματική επεξεργασία, η οποία αξιοποιεί το σύνολο των μετρούμενων σημείων, για την αναπαράσταση της επιφάνειας του εδάφους. Πίσω από την τεχνική της συναντώνται δύο έμμεσες υποθέσεις:

- ❖ Η επιφάνεια του εδάφους εμφανίζει συνέχεια
- ❖ Εντοπίζεται υψηλή συσχέτιση μεταξύ των γειτονικών σημείων

Πρόκειται ουσιαστικά για μία διαδικασία απόδοσης της γεωμετρίας του εδάφους, που πραγματοποιείται μέσα από τη δόμηση της τοπολογίας των διαθέσιμων δεδομένων και την εφαρμογή ενός μοντέλου παρεμβολής, για την εκτίμηση της μορφής των γήινων σχηματισμών. Είναι αξιοσημείωτο ότι η βασική τεχνική της παρεμβολής εμπλέκεται στα διάφορα στάδια της μοντελοποίησης όπως είναι ο ποιοτικός έλεγχος, η ανακατασκευή της επιφάνειας, η αξιολόγηση της ακρίβειας, η ανάλυση του εδάφους και οι εφαρμογές.

3.1.1. Επιλογή της μεθόδου χωρικής παρεμβολής

Σχετικά με τα κριτήρια επιλογής της μεθόδου σημειώνεται ότι η δημιουργία ενός κατάλληλου μοντέλου παρεμβολής, το οποίο θα ακολουθεί τη γεωμετρική συμπεριφορά της γήινης επιφάνειας, εξαρτάται άμεσα από την πολυπλοκότητα του αναγλύφου και την ακρίβεια των δεδομένων καταγραφής. Επομένως για την επιλογή του αλγορίθμου παρεμβολής θεωρείται σημαντική η επίτευξη των παρακάτω:

- ❖ Ανάδειξη των θεμελιωδών χαρακτηριστικών του εδάφους και επαρκής απόδοση της χωρικής κατανομής των δεδομένων, μέσω της συνάρτησης παρεμβολής
- ❖ Ακρίβεια, όπως ορίζεται από την εφαρμογή
- ❖ Ευελιξία και αποτελεσματικότητα στην ερμηνεία του παραγόμενου μοντέλου

3.1.2. Μέθοδος αντιστρόφου απόστασης (inverse distance weighted)

Η μέθοδος αντιστρόφου απόστασης επιλέχθηκε να εφαρμοστεί στα νέφη σημείων, με σκοπό να αποδοθούν οι τιμές στους κόμβους ενός κανάβου με καθορισμένα όρια και μέγεθος πλέγματος. Αναλυτικότερα, ο υπολογισμός της τιμής του υψομέτρου στο ζητούμενο σημείο (σημείο στον κόμβο του κανάβου) δίνεται ως ο μέσος όρος των σημείων, για τα οποία υπάρχουν μετρήσεις και επιπλέον βρίσκονται εντός της γειτονίας του μη μετρούμενου σημείου. Ο μέσος όρος έχει υπολογιστεί από έναν αλγόριθμο, ο οποίος αποδίδει ως συντελεστές βαρύτητας στα σημεία των δεδομένων, το αντίστροφο του τετράγωνου της απόστασής τους, από το μη μετρούμενο. Στο σημείο αυτό υπογραμμίζεται ότι η βασική ιδέα της ανάθεσης του βάρους σε ένα σημείο αναφοράς είναι να εξετάσει την επίδραση του σημείου αναφοράς και για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μια συνάρτηση απόστασης, έτσι ώστε όσο μικρότερη είναι η απόσταση, τόσο μεγαλύτερο να είναι το βάρος. Ο ορθολογικός υπολογισμός της τιμής στην εκάστοτε ζητούμενη θέση πραγματοποιείται μέσω της σχέσης:

$$f(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n w(d_i) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n w(d_i)}$$

Όπου: $f(x, y)$: η εκτιμώμενη τιμή της παραμέτρου στο σημείο (x, y)

$w(d_i)$: η συνάρτηση βάρους ($w(d_i)=1/d_i^r$)

z_i : η τιμή της παραμέτρου που έχει μετρηθεί στο σημείο i

d_i : η απόσταση του σημείου i από το σημείο (x, y)

n : ο αριθμός των σημείων του δείγματος και

r : η δύναμη (εκθέτης) του βάρους του αντιστρόφου της απόστασης ($r=2$)

Στην πραγματικότητα, η τιμή του r ελέγχει την περιοχή επιρροής της κάθε μιας από τις περιοχές δειγματοληψίας. Όσο η τιμή του r αυξάνει, η περιοχή επιρροής μικραίνει, ενώ όταν η τιμή του r τίθεται ίση με μηδέν, η μέθοδος ανάγεται στον απλό υπολογισμό της μέσης τιμής του δείγματος.

3.2. Προ-επεξεργασία Ψηφιακού Μοντέλου Υψομέτρων

Η προεπεξεργασία ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους είναι απαραίτητη καθώς περιλαμβάνει διαδικασίες με τις οποίες η μετέπειτα επεξεργασία του μοντέλου δίνει ορθότερα αποτελέσματα. Η προεπεξεργασία μπορεί να περιλαμβάνει διάφορα στάδια-διαδικασίες όπως η απομάκρυνση του θορύβου, η πλήρωση των βυθισμάτων, η συμπλήρωση κενών περιοχών του μοντέλου, η απομάκρυνση επίπεδων τριγώνων στην περίπτωση της δομής TIN και άλλα.

3.2.1 Φίλτρο εξομάλυνσης Gauss (Gaussian Filter)

Με την χρήση του φίλτρου εξομάλυνσης αποσκοπούμε στην θόλωση του μοντέλου και στην αφαίρεση της πλεονάζουσας λεπτομέρειας και του θορύβου των δεδομένων. Η έννοια του τυχαίου θορύβου ενός μοντέλου είναι άμεσα συνδεδεμένη με την έννοια των τυχαίων σφαλμάτων. Στη θεωρία σφαλμάτων, η μεταβλητότητα των μετρήσεων μιας ενιαίας ποσότητας οφείλεται σε σφάλματα παρατήρησης. Τέτοιου είδους σφάλματα δεν ακολουθούν κανένα αιτιοκρατικό κανόνα, οδηγώντας έτσι στην έννοια των τυχαίων σφαλμάτων. Η διαδικασία του φιλτραρίσματος επιλέχθηκε κατά κύριο λόγο για να μειωθούν οι επιπτώσεις τέτοιων σφαλμάτων. Το φίλτρο Gauss βασίζεται στην λειτουργία συνέλιξης, καθορίζοντας την ακτίνα εφαρμογής και την τυπική απόκλιση. Η επιλεγμένη ακτίνα του κύκλου καθορίζει το μέγεθος της μήτρας του συνόλου κελιών που θα ληφθούν υπόψη και η τυπική απόκλιση ελέγχει την ένταση της εξομάλυνσης. Όσο μεγαλύτερη η ακτίνα τόσο μεγαλύτερος ο αριθμός των γειτονικών σημείων που λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό της νέας τιμής του κεντρικού κελιού και όσο η τυπική απόκλιση μεγαλώνει τόσο αυξάνεται και ο βαθμός εξομάλυνσης. Ένα παράδειγμα στην επίδραση που έχει η τυπική απόκλιση στο αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου φαίνεται στην Εικόνα 21.

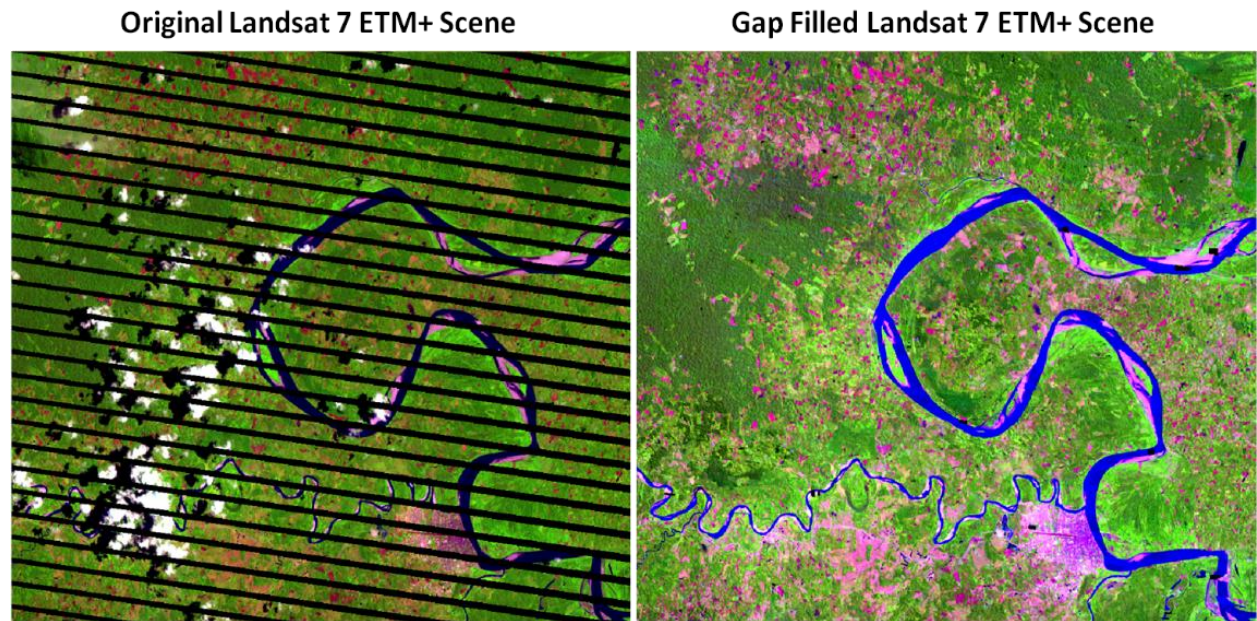


Εικόνα 21: Παράδειγμα εφαρμογής φίλτρου Gauss με αυξανόμενη τυπική απόκλιση

Πηγή: (MathWorks)

3.2.2. Συμπλήρωση κενών (Fill Gaps)

Βασικό στάδιο της προεπεξεργασίας ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους αποτελεί η αναγνώριση και συμπλήρωση των περιοχών όπου δεν υπάρχει υψομετρική πληροφορία. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η συνέχεια της απεικόνισης της φυσικής γήινης επιφάνειας, ώστε να αποφευχθεί η ταύτιση κάποιας κορυφής του κανάβου με ένα τέτοιο σημείο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος πλήρωσης κενών (Close Gaps), ο οποίος βασίζεται στη μέθοδο παρεμβολής εγγύτερου γείτονα. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι τα κελιά χωρίς διατιθέμενες τιμές συμπληρώνονται χρησιμοποιώντας τις τιμές των υψομέτρων των γειτονικών κελιών. Η επίδραση του φίλτρου Close Gaps φαίνεται στην Εικόνα 22.



Εικόνα 22: Παράδειγμα επίδρασης αλγορίθμου πλήρωσης κενών

Πηγή: (GDA Corp)

3.3. Εξαγωγή μορφομετρικών χαρακτηριστικών

Σε αυτή την ενότητα γίνεται προσπάθεια να οριστούν και να αναλυθούν εν συντομία τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά που θα χρησιμοποιηθούν για την μορφομετρική ανάλυση της περιοχής, τα οποία αποδίδουν με άμεσο τρόπο στοιχεία για τις γεωμορφολογικές διαδικασίες του εδάφους.

Τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά περιγράφουν την μορφολογία του εδάφους και αξιοποιούν απευθείας τα ψηφιακά δεδομένα, ελαττώνοντας τους φυσικούς, τους χρονικούς και τους οικονομικούς περιορισμούς που τίθενται από την μέτρηση και την διαχείριση δεδομένων που λαμβάνονται με μετρήσεις στο πεδίο. Γενικότερα η ανάλυση των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών συμβάλλει στην ποσοτική ανάλυση της επιφάνειας του εδάφους. Τα χαρακτηριστικά αυτά χωρίζονται σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά και στην παρούσα ενότητα γίνεται ανάλυση της φυσικής τους βάσης αλλά και μία σύντομη ανάλυση των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό τους.

3.3.1 Πρωτεύοντα τοπογραφικά χαρακτηριστικά

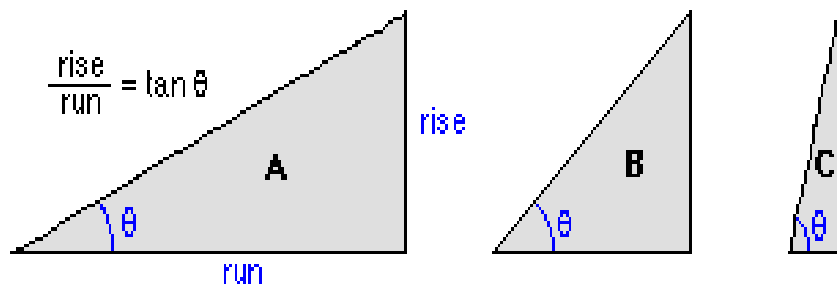
Τα πρωτεύοντα τοπογραφικά χαρακτηριστικά είναι παράμετροι που εξάγονται άμεσα από ένα ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων, χωρίς να χρειάζεται προσθήκη επιπλέον δεδομένων. Τα χαρακτηριστικά τα οποία θα μας απασχολήσουν στην παρούσα εργασία είναι:

❖ Η Κλίση του εδάφους (slope)

Η κλίση ενός φυσικού χαρακτηριστικού, μίας γεωμορφής κ.α. είναι ουσιαστικά η γωνία που σχηματίζει η υποτείνουσα με το οριζόντιο επίπεδο (Εικόνα 23). Για ένα ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων η κλίση προσδιορίζει τον ρυθμό μεταβολής της μέγιστης αλλαγής της τιμής του υψομέτρου κάθε κελιού με τα γειτονικά του. Η κλίση επηρεάζει κυρίως τον συνολικό ρυθμό της κίνησης και μεταφοράς προς την κατωφέρεια.

Degree of slope = θ

Percent of slope = $\frac{\text{rise}}{\text{run}} * 100$



Degree of slope =

30

45

76

Percent of slope =

58

100

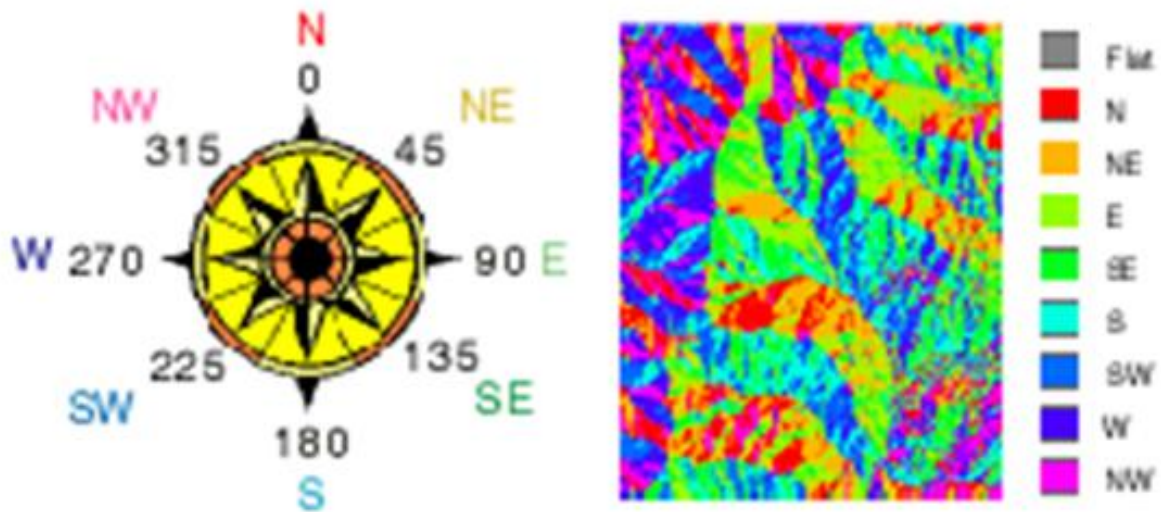
373

Εικόνα 23: Κλίση.

Πηγή (Wikipedia)

❖ Η διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (Aspect)

Στις γεωεπιστήμες, η διεύθυνση της μέγιστης κλίσης είναι η κατεύθυνση της πυξίδας (ως προς τον βορρά) στην οποία έχει μέτωπο η κλίση. Μετριέται σε μονάδες γωνιών και συνήθως ταξινομείται όπως φαίνεται στην Εικόνα 24: Κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης. Η διεύθυνση της μέγιστης κλίσης καθορίζει κυρίως την κατεύθυνση της ροής.

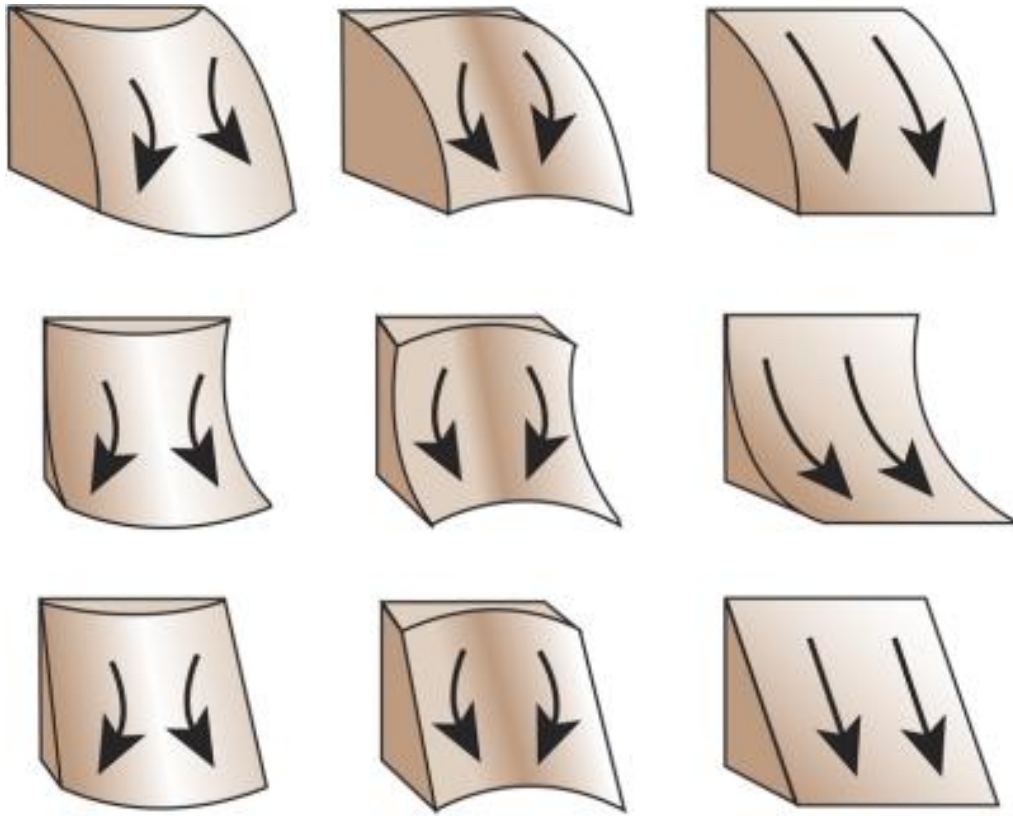


Εικόνα 24: Κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης.

Πηγή (Wikipedia)

❖ Η καμπυλότητα (curvature)

Η καμπυλότητα της επιφάνειας της γης, αποτελείται από δύο συνιστώσες, την καμπυλότητα παράλληλα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης και την καμπυλότητα κάθετα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης. Οι δυο συνιστώσες μαζί ορίζουν την γενική καμπυλότητα. Η παράλληλη καμπυλότητα (Profile curvature) επηρεάζει την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση της ροής και για τον λόγο αυτό καθορίζει την απόθεση και την διάβρωση, ενώ η κάθετη καμπυλότητα επηρεάζει τη συσσώρευση ροής. Ο συνδυασμός των δύο καμπυλοτήτων (γενική καμπυλότητα) επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση της ροής κατά μήκος των επιφανειών.



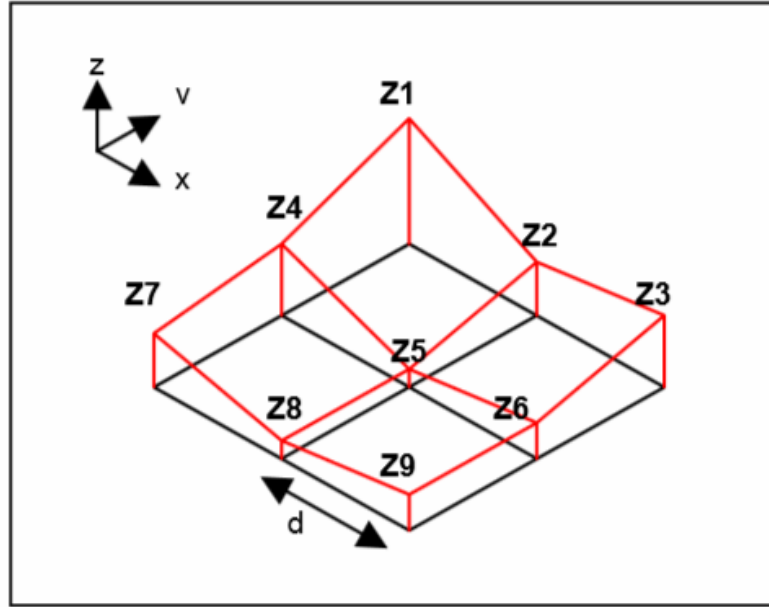
εικόνα 25. Γενική καμπυλότητα.

Πηγή (Wikipedia)

3.3.2 Μέθοδος υπολογισμού τοπογραφικών χαρακτηριστικών

Ο υπολογισμός της κλίσης, της διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης καθώς και της καμπυλότητας έγινε στο πρόγραμμα SAGA GIS με την χρήση του αλγόριθμου Zevenbergen & Thorne 1987 (Zevenbergen, 1987), καθώς παρέχει ακρίβεια και ταχύτητα στον υπολογισμό. Ο αλγόριθμος αυτός, είναι γνωστός και ως αλγόριθμος μέσου όρου, αφού χρησιμοποιεί ένα αριθμό φατνίων (σε μορφή τετραγώνου) προκειμένου να καθορίσει στο κεντρικό φατνίο το χαρακτηριστικό που αναζητείται. Συγκεκριμένα εφαρμόζεται θεωρώντας μία επιφάνεια τετραγωνικής μορφής, η οποία διέρχεται από εννέα σημεία καθορισμένου υψομέτρου, σε ένα πλέγμα φατνίων 3X3. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή του αλγόριθμου περιορίζεται στην τοπική μεταβλητότητα που περιβάλλει το κεντρικό φατνίο, συνεκτιμά δηλαδή την τοπική διακύμανση του ανάγλυφου, από τα υψόμετρα των γειτονικών ψηφίδων του παραθύρου 3X3 (Εικόνα 26). Η αναπαράσταση της επιφάνειας γίνεται με την χρήση της μερικής τετραγωνικής εξίσωσης:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + 1 \quad (2)$$



Εικόνα 26. Το μοντέλο των Zevenbergen & Thorne (1987)

Πηγή: (Zevenbergen, 1987)

Οι εννέα παράμετροι της πολυωνυμικής εξίσωσης υπολογίζονται από τις τιμές των ισάριθμων κόμβων του παραθύρου, βάσει των πολυωνύμων Lagrange. Οι σχέσεις που δίνουν τις παραμέτρους είναι οι ακόλουθες:

$$A = [(Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9) / 4 - (Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8) / 2 + Z_5] / d^4 \quad (3)$$

$$B = [(Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9) / 4 - (Z_2 - Z_8) / 2] / d^3 \quad (4)$$

$$C = [(-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9) / 4 + (Z_4 - Z_6) / 2] / d^3 \quad (5)$$

$$D = [(Z_4 + Z_6) / 2 - Z_5] / d^2 \quad (6)$$

$$E = [(Z_2 + Z_8) / 2 - Z_5] / d^2 \quad (7)$$

$$F = (-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9) / 4d^2 \quad (8)$$

$$G = (-Z_4 + Z_6) / 2d \quad (9)$$

$$H = (Z_2 - Z_8) / 2d \quad (10)$$

$$I = Z_5 \quad (11)$$

Οι τοπογραφικοί δείκτες υπολογίζονται παραγοντοποιώντας την εξίσωση 2 και επιλύοντας την παραγόμενη εξίσωση ως προς το κεντρικό σημείο του υποπίνακα 3X3. Η κλίση, αφού αποτελεί τον ρυθμό μεταβολής του υψομέτρου, κατά μήκος της απόστασης, εκφράζεται μέσω της πρώτης παραγώγου της εξίσωσης 2 (Zevenbergen, 1987). Η κλίση αποτελεί ένα χαρακτηριστικό ιδιαίτερης σημασίας, τόσο στην γεωμορφολογία όσο και για πολλές επιστήμες που ασχολούνται με την επιφάνεια της γης. Για παράδειγμα στην υδρολογία, καθορίζει την ροή του νερού και άλλων υλικών στο έδαφος. Ακόμα επηρεάζει την ταχύτητα της επιφανειακής και της υπεδάφιας ροής, τον ρυθμό της απορροής και κατά συνέπεια την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό και την πιθανότητα διάβρωσης.

Η κλίση υπολογίζεται με παραγωγή της εξίσωσης 2 όπως αναφέρθηκε, ως προς S, όπου S είναι η επιφάνεια η οποία προσαρμόζεται κατά την μέγιστη διεύθυνση της κλίσης, και με επίλυση της για το κεντρικό σημείο του παραθύρου. Έτσι, η σχέση υπολογισμού προκύπτει όπως παρακάτω:

$$Slope = \frac{\partial Z}{\partial S} = G \cos \theta + H \sin \theta \quad (12)$$

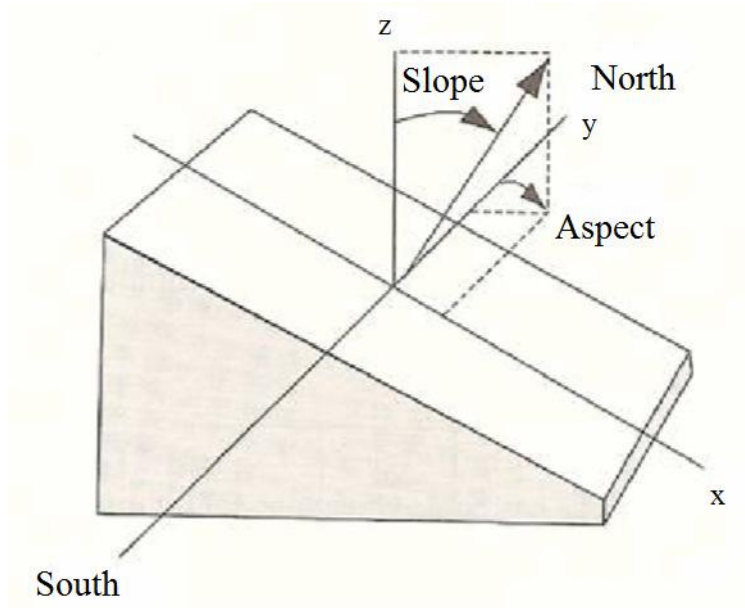
Όμως εξ ορισμού ισχύει:

$$\cos \theta = -G / (G^2 + H^2)^{1/2} \quad , \quad \sin \theta = -H / (G^2 + H^2)^{1/2}$$

Άρα έχουμε την τελική μορφή της:

$$Slope = -(G^2 + H^2)^{1/2} \quad (13)$$

Η διεύθυνση της κλίσης (Aspect) ορίζεται ως η κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης και μετρείται σε μονάδες γωνιών δεξιόστροφα, με αφετηρία τον βορρά (Εικόνα 27). Υπολογίζεται σε κάθε φατνίο από τα οκτώ γειτονικά του. Είναι ένας δείκτης που αποτελεί ένδειξη της κατεύθυνσης της ροής των υδάτων, την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας, την αξιολόγηση και την πρόβλεψη πιθανών κατολισθήσεων κ.α.



Εικόνα 27: Αναπαράσταση της κλίσης (Slope) και της διεύθυνσης της κλίσης (Aspect)

Πηγή: (Kang-tsung Chang, 1991)

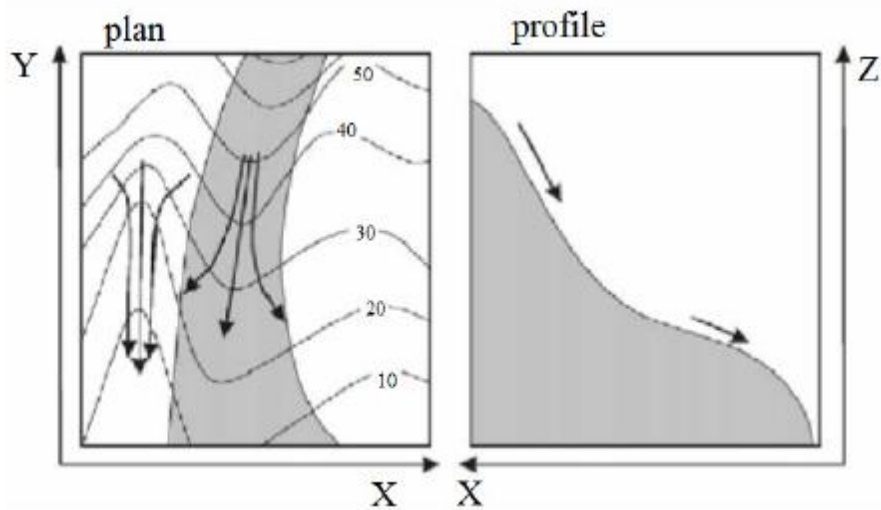
Η κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης θ , υπολογίζεται παραγωγίζοντας την σχέση 12 και ακολούθως βρίσκοντας την ελάχιστη τιμή της παραγόμενης συνάρτησης.

$$\frac{\partial \text{Slope}}{\partial \theta} = -G \sin \theta + H \cos \theta = 0 \quad (14)$$

$$\eta \quad \theta = \arctan(-H / -G) \quad (15)$$

Το πρόσημο του αριθμητή και του παρονομαστή του κλάσματος $-H/-G$ καθορίζει σε ποιο τεταρτημόριο βρίσκεται η γωνία θ .

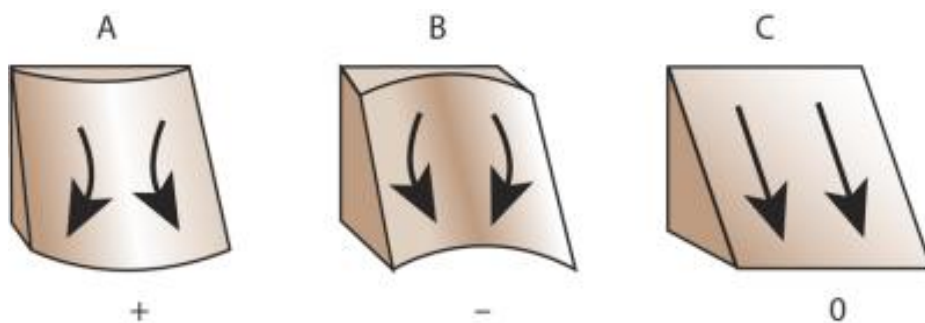
Τελευταίο από τα πρωτεύοντα τοπογραφικά χαρακτηριστικά που θα μελετηθούν, είναι η καμπυλότητα. Η καμπυλότητα αποτελεί την πρώτη παράγωγο της κλίσης (δεύτερη παράγωγο της συνάρτησης των υψομέτρων). Η καμπυλότητα μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικές συνιστώσες, την κάθετη στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (plan curvature) και την παράλληλη στη διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (profile curvature) (Εικόνα 28).



Εικόνα 28: Οι βασικές ορθογώνιες συνιστώσες της καμπυλότητας.

Πηγή: (ESRI)

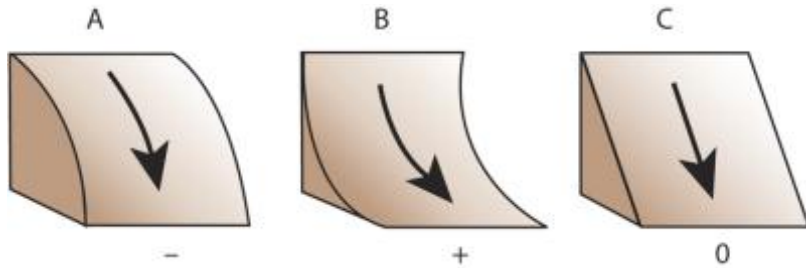
Η καμπυλότητα κάθετα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (Plan curvature), αναφέρεται στον ρυθμό με τον οποίο μεταβάλλεται το αζιμούθιο κατά μήκος μιας γραμμής περιγράμματος και μετρά την τοπογραφική σύγκλιση και απόκλιση και ως εκ τούτου δείχνει την τάση του νερού να συγκεντρώνεται και να σχηματίζει ρέματα κατά την ροή του στην επιφάνεια του εδάφους. Θετικές τιμές δείχνουν απόκλιση, αρνητικές τιμές δείχνουν σύγκλιση ενώ μηδενική τιμή καμπυλότητας δείχνει ότι η επιφάνεια είναι γραμμική (Εικόνα 29)



Εικόνα 29: Καμπυλότητα κάθετη στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, θετική, αρνητική και μηδενική.

Πηγή: (ESRI)

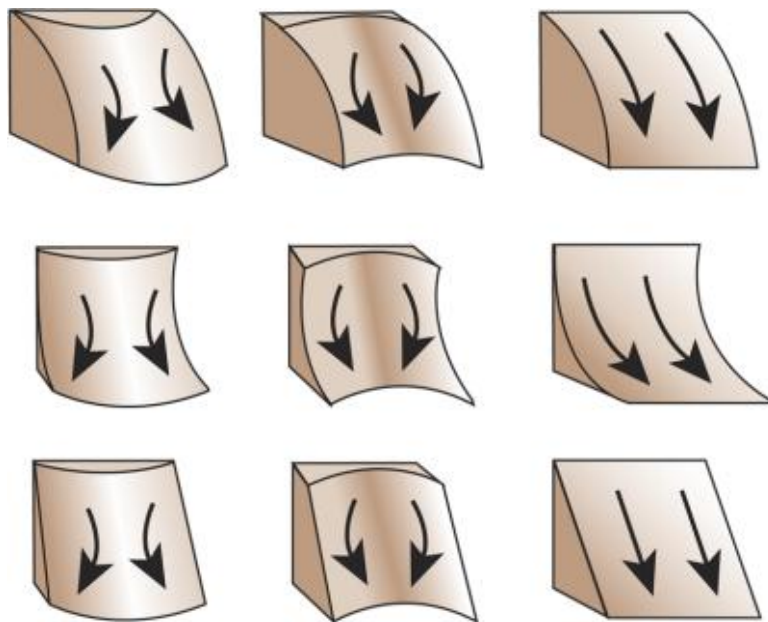
Η καμπυλότητα παράλληλα στην διεύθυνση μέγιστης κλίσης (Profile curvature) αποτελεί το ρυθμό μεταβολής της κλίσης στο κάθετο επίπεδο μιας γραμμής ροής και υπολογίζει τον ρυθμό μεταβολής του βαρυτικού δυναμικού οπότε είναι χρήσιμη στην εύρεση αλλαγών της ταχύτητας ροής. Επίσης οι τιμές της επηρεάζουν την επιτάχυνση και την επιβράδυνση της ροής οπότε είναι ένας κρίσιμος δείκτης για την διευθέτηση των υδατορευμάτων. Θετικές τιμές δείχνουν επιτάχυνση της ροής των υδάτων (Εικόνα 30).



Εικόνα 30: Καμπυλότητα παράλληλη στη διεύθυνση της μέγιστης κλίσης Πηγή ESRI.

Πηγή: (ESRI)

Η γενική καμπυλότητα με την οποία θα ασχοληθούμε σε αυτή την εργασία, συνδυάζει τις δύο συνιστώσες τις καμπυλότητας και είναι σημαντική για να κατανοηθεί με περισσότερη ακρίβεια ο τρόπος ροής των υδάτων και η μεταφορά φερτών υλικών σε μία επιφάνεια(Εικόνα 31).



Εικόνα 31: Γενική καμπυλότητα

Πηγή: (ESRI)

Η καμπυλότητα προς κάθε κατεύθυνση είναι όπως προαναφέρθηκε η δεύτερη παράγωγος της εξίσωσης που δίνει το υψόμετρο και προσδιορίζεται από την σχέση:

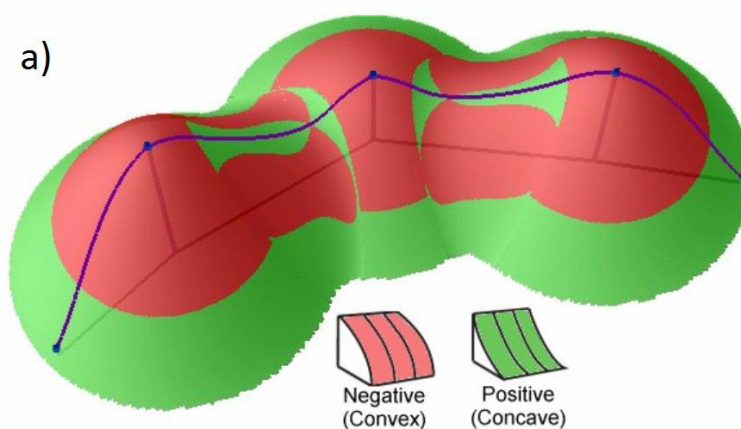
$$Curvature = \frac{\partial^2 Z}{\partial S^2} = 2(D \cos^2 \varphi + E \sin^2 \varphi + F \cos \varphi \sin \varphi) \quad (16)$$

Οι δύο κατευθύνσεις της καμπυλότητας υπολογίζονται για την κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης ($\varphi = \theta$), και στην κατεύθυνση κάθετα σε αυτήν ($\varphi = \theta + (\pi/2)$):

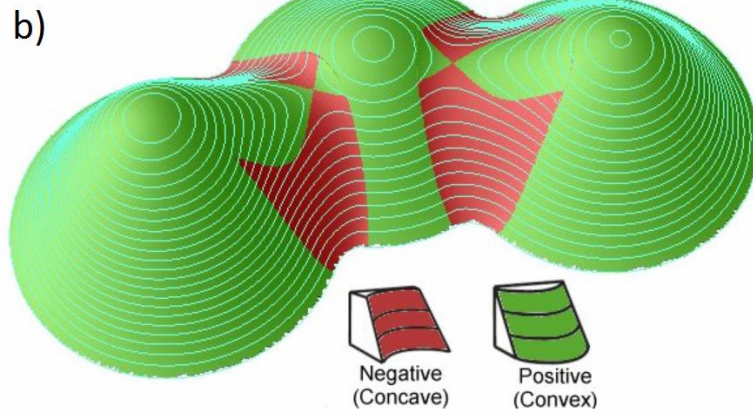
$$\begin{aligned} PROFC &= -2(D \cos^2 \theta + E \sin^2 \theta + F \cos \theta \sin \theta) \\ &= -2(DG^2 + EH^2 + FGH) / (G^2 + H^2) \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} PLANC &= 2(D \sin^2 \theta + E \cos^2 \theta + F \sin \theta \cos \theta) \\ &= 2(DH^2 + EG^2 - FGH) / (G^2 + H^2) \quad (18) \end{aligned}$$

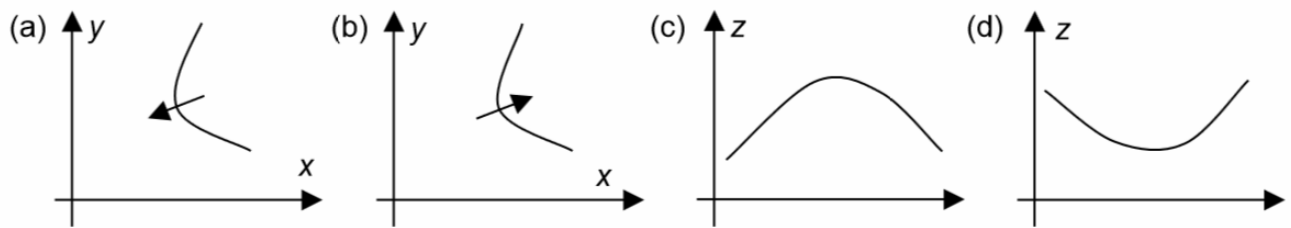
Παρακάτω παρατίθενται δύο ακόμα εικόνες για να βοηθήσουν στην κατανόηση της έννοιας της καμπυλότητας (Εικόνα 32, Εικόνα 33, Εικόνα 34).



Εικόνα 32: Καμπυλότητα παράλληλα στην διεύθυνση κλίσης



Εικόνα 33: Καμπυλότητα κάθετα στην διεύθυνση κλίσης



Εικόνα 34: Ερμηνεία των τιμών της καμπυλότητας, α) θετική plan cur, β) αρνητική plan cur, γ) θετική profile cur, δ) αρνητική profile cur.

Πηγή: (Zhilin Li, 2005)

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας εφαρμογής των μεθόδων που περιγράφηκε παραπάνω, με στόχο να μελετηθεί η ποιότητα των μοντέλων μορφής grid χωρικών αναλύσεων 5, 10, 25 και 50 μέτρων σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μοντέλα δομής TIN ως προς τα υπολογιζόμενα τοπογραφικά χαρακτηριστικά. Όλα τα μοντέλα θα συγκριθούν με το μοντέλο χωρικής ανάλυσης 1μ το οποίο χαρακτηρίζεται και ως μοντέλο αναφοράς, μιας και με την υψηλότερη χωρική ανάλυση επιτυγχάνεται ο μεγαλύτερος βαθμός λεπτομέρειας και επακόλουθα μπορεί να θεωρηθεί ότι ένα τέτοιο μοντέλο προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματικότητα.

4.1. Λογισμικό εφαρμογής

Εδώ θα δοθούν ορισμένα γενικά στοιχεία για το λογισμικό SAGA GIS, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία και την σύγκριση των μοντέλων.

Το όνομα του προέρχεται από τα αρχικά System for Automated Geoscientific Analyses και η ανάπτυξή του ξεκίνησε το 2001 από την επιστημονική ομάδα του πανεπιστημίου του Gottingen, της Γερμανίας. Η ιδέα για την ανάπτυξη του SAGA GIS, εξελίχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 90 κατά την διάρκεια εργασιών πάνω σε διάφορα ερευνητικά προγράμματα στο πανεπιστήμιο του Gottingen. Μία εξειδίκευση της έρευνας ήταν η ανάλυση χωρικών δεδομένων, ιδιαίτερα σε μορφή ψηφιακών μοντέλων υψομέτρων τα οποία χρησίμευαν για την πρόβλεψη ιδιοτήτων του εδάφους, δυναμικών διαδικασιών εξαρτώμενων από την επιφάνεια του εδάφους καθώς και για κλιματικές παραμέτρους. Αυτό απαίτησε την εξέλιξη και την εφαρμογή πολλών νέων μεθόδων χωρικής ανάλυσης και μοντελοποίησης. Επειδή εκείνη την εποχή δεν υπήρχε ικανοποιητική πλατφόρμα για την εξέλιξη τους δημιουργήθηκε το SAGA. Το 2004 δόθηκε στη δημοσιότητα και είναι ένα ελεύθερο και ανοικτού κώδικα πρόγραμμα. Το πρόγραμμα είναι κωδικοποιημένο σε γλώσσα προγραμματισμού C++ και διαθέτει ένα οργανωμένο σύνολο βιβλιοθηκών, παρέχοντας στον χρήστη ένα οικείο περιβάλλον με 48 βιβλιοθήκες που περιλαμβάνουν 300 ενότητες εντολών, αριθμός ο οποίος μέρα με την μέρα αυξάνεται (Saga-gis).

4.2 Δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων Υψομέτρων από δεδομένα LiDAR σε δομή grid

Η πρώτη διαδικασία για την εκπόνηση της εργασίας είναι η αναπαράσταση των αρχικών δεδομένων με μία σειρά μοντέλων υψομέτρων διαφορετικών χωρικών αναλύσεων από τα οποία θα εξαχθούν τα απαραίτητα τοπογραφικά χαρακτηριστικά. Η βάση δεδομένων για την δημιουργία των ΨΜΕ είναι ένα νέφος περίπου 8500000 σημείων μέσης πυκνότητας τριών σημείων ανά τετραγωνικό μέτρο. Τα σημεία λαμβάνονται ήδη φιλτραρισμένα από το Open topography και αποτελούν αποκλειστικά σημεία εδάφους. Η δημιουργία των μοντέλων με ισοδιάσταση κανάβου 1m, 5m, 10m, 25m, 50m πραγματοποιείται με τη μέθοδο της παρεμβολής στο λογισμικό SAGA με δεδομένα εισόδου τα νέφη σημείων από δεδομένα LiDAR. Επιπλέον, για την εφαρμογή της μεθόδου αντιστρόφου απόστασης καθορίστηκε ως ένα κινούμενο παράθυρο ο κύκλος, με ακτίνα τα 20 m και μέγιστο αριθμό σημείων τα 5 σημεία, για κάθε παραγόμενο μοντέλο υψομέτρων.

Ο αριθμός των κορυφών του κάθε grid είναι:

- ❖ 1m : 4000000
- ❖ 5m : 200000
- ❖ 10m: 40000
- ❖ 25m: 6400
- ❖ 50m: 1600

Τα ΨΜΥ που δημιουργήθηκαν συγκρίνονται με το ΨΜΥ χωρικής ανάλυσης 1m που παράγεται απευθείας από το αρχικό νέφος σημείων. Η πρώτη ενέργεια που γίνεται στο SAGA είναι να κοπούν τα άκρα της περιοχής, έτσι ώστε οι διαστάσεις όλων των μοντέλων και οι συντεταγμένες στα όρια του κανάβου να ταυτίζονται, για να είναι εφικτή η σύγκριση.

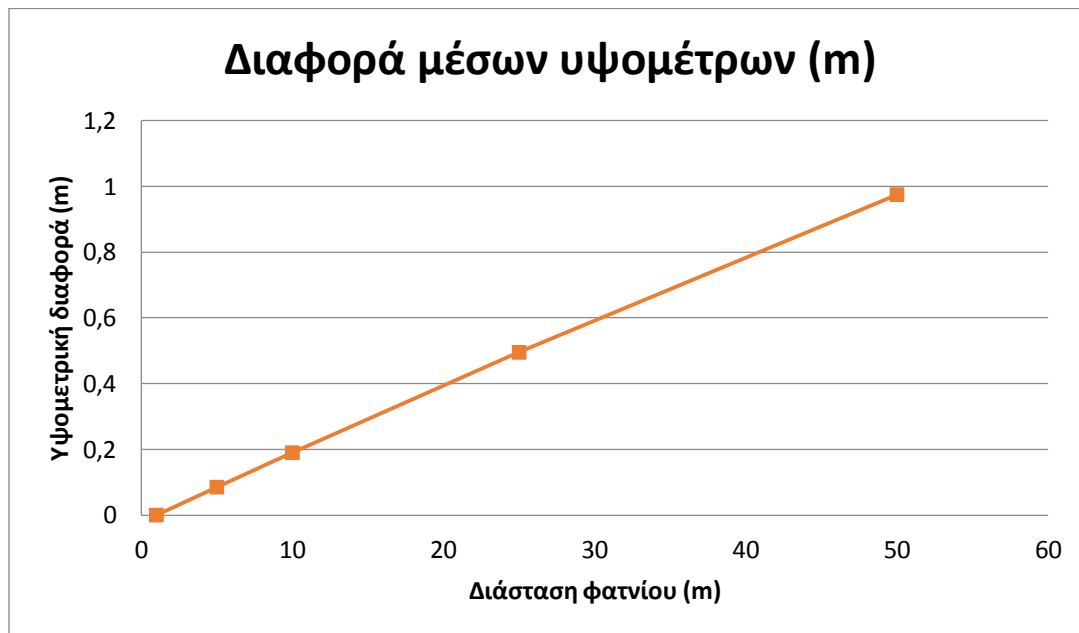
Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει και μία σύντομη σύγκριση μεταξύ των μοντέλων grid – tin αντίστοιχης χωρικής ανάλυσης ως προς την ποιότητα των αποτελεσμάτων που δίνουν σε σχέση με το αρχικό GRID χωρικής ανάλυσης 1m.

Μία ακόμα παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η ακρίβεια της μεθόδου δημιουργίας των μοντέλων διαφορετικών χωρικών αναλύσεων. Για τον λόγο αυτό ως αληθές μέσο υψόμετρο θεωρήθηκε το μέσο υψόμετρο που προκύπτει από το μοντέλο grid 1m. Παρακάτω φαίνεται το μέσο υψόμετρο κάθε μοντέλου grid που έχει δημιουργηθεί και η διαφορά του με το αληθές μέσο υψόμετρο του μοντέλου αναφοράς (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Μέσο υψόμετρο των ΨΜΥ και διαφορά από μοντέλο αναφοράς

Διάσταση φατινίου (m)	Μέσο υψόμετρο (m)	Διαφορά μέσω υψομέτρων (m)
1	476,664	0
5	476,749	0,085
10	476,854	0,19
25	477,159	0,495
50	477,639	0,975

Η γνώση της υψομετρικής πληροφορίας είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς παρέχει πληροφορίες σχετικά με το κλίμα, τη βλάστηση, τη δυναμική ενέργεια που εντοπίζεται στην περιοχή μελέτης και αποτελεί την βάση στην εξαγωγή μιας σειράς άλλων παραμέτρων. Τέλος, στην Εικόνα 35 φαίνονται τα παραπάνω αποτελέσματα σε μορφή διαγράμματος. Παρατηρείται ότι η διαφορά των μέσων υψομέτρων αυξάνεται γραμμικά όσο αυξάνεται η διάσταση του φατινίου. Σε γενικές γραμμές αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η αύξηση της διάστασης του φατινίου προκαλεί εξομάλυνση του ανάγλυφου και λογικά σε χειρότερη ικανότητα εκτίμησης των υψομέτρων.



Εικόνα 35: Κατανομή της διαφοράς μέσω υψομέτρων από το μοντέλο αναφοράς συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

4.3. Σύγκριση των μοντέλων

4.3.1. Παραγωγή μοντέλων γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών

Σύμφωνα με την μεθοδολογία που αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, δημιουργούνται τα ψηφιακά μοντέλα διαφορετικών χωρικών αναλύσεων με το πρόγραμμα SAGA GIS και εξάγονται τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά με την βοήθεια της βιβλιοθήκης Terrain analysis – Morphometry του προγράμματος SAGA GIS. Ως δεδομένα εισόδου επιλέγονται τα ψηφιακά μοντέλα υψομέτρων των χωρικών αναλύσεων 5m, 10m, 25m, 50m και με τον αλγόριθμο Zevenbergen & Thorne 1987 παράγονται τα αντίστοιχα μοντέλα κλίσεων, κατεύθυνσης κλίσεως και καμπυλότητας. Τα ψηφιακά μοντέλα που προέκυψαν επισυνάπτονται στο παράρτημα (σελ.101) της εργασίας και από τις οπτικοποιήσεις συμπεραίνεται πως όσο το βήμα κανάβου του μοντέλου αυξάνεται, η κλίμακα απεικόνισης μικραίνει και επομένως η επιφάνεια που απεικονίζεται, εμφανίζεται όλο και πιο γενικευμένη και με εμφανώς λιγότερες λεπτομέρειες σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς.

4.3.2. Μεθοδολογία σύγκρισης μοντέλων γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών

Στη συνέχεια περιγράφεται η μεθοδολογία σύγκρισης των μορφομετρικών χαρακτηριστικών των ψηφιακών μοντέλων χωρικής ανάλυσης 5m, 10m, 25m, 50m με το μοντέλο αναφοράς χωρικής ανάλυσης 1m.

Προκειμένου να υπολογιστούν οι διαφορές των μορφομετρικών χαρακτηριστικών καθώς και οι διαφορές των μοντέλων υψομέτρων από το μοντέλο αναφοράς, δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα σε γλώσσα προγραμματισμού Python το οποίο επισυνάπτεται στο παράρτημα (σελ.101). Στο εργαλείο αυτό ως αρχικά δεδομένα εισήχθησαν τα μοντέλα υψομέτρων, κλίσεων, κατεύθυνσης κλίσεως και καμπυλότητας δομής Grid διάστασης κανάβου 1m σε μορφή πινάκων οι οποίοι περιείχαν την πληροφορία της τιμής του εκάστοτε γεωμορφομετρικού χαρακτηριστικού κάθε φαινομένου των μοντέλων αναφοράς. Από τους πίνακες αυτούς έγινε εξαγωγή των τιμών των κοινών κορυφών με τα αντίστοιχα μοντέλα με διαστάσεις κανάβου (5, 10, 25, 50)m. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκαν νέα μοντέλα τα οποία είναι ίδιων διαστάσεων με τα μοντέλα μικρότερης χωρικής ανάλυσης αλλά περιέχουν την «αληθή» πληροφορία της τιμής του μορφομετρικού χαρακτηριστικού που αντιπροσωπεύουν. Οι παραπάνω πίνακες εισήχθησαν ξανά στο πρόγραμμα SAGA GIS με το οποίο και έγινε η οπτικοποίηση των μοντέλων αλλά και των διαφορών μεταξύ αυτών.

4.3.3. Στατιστικά στοιχεία

Βασικό στάδιο της εργασίας αποτελεί ο υπολογισμός της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης των διαφορών των μοντέλων των τοπογραφικών χαρακτηριστικών που έχει επιλεγεί να συγκριθούν. Η γνώση των παραπάνω στατιστικών στοιχείων δίνει μια γενικότερη εικόνα της τάξης μεγέθους των διαφορών που εμφανίζουν τα μοντέλα ως προς τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά. Με την επεξεργασία των στατιστικών στοιχείων που εξάγονται γίνεται ουσιαστικά ποσοτικοποίηση της διαδικασίας της σύγκρισης των μοντέλων.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η παρουσίαση με πίνακες και διαγράμματα των βασικών στατιστικών στοιχείων (μέση τιμή και τυπική απόκλιση) των μορφομετρικών χαρακτηριστικών και η μεταβολή τους μειώνοντας τη χωρική ανάλυση του μοντέλου. Ακολούθως παρουσιάζονται οπτικοποιημένα μοντέλα των διαφορών των παραπάνω στατιστικών στοιχείων σε σύγκριση με το μοντέλο αναφοράς.

5.1. Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων

5.1.1. Κλίση

Μελετώντας τα στατιστικά στοιχεία για την παράμετρο της κλίσης (Πίνακας 2), παρατηρείται ότι, καθώς η χωρική ανάλυση μειώνεται (αύξηση μεγέθους φατνίου), η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση μειώνονται. Η μείωση της μέσης τιμής είναι αναμενόμενη λόγω του έντονου ανάγλυφου της περιοχής, αφού αυξάνοντας τις διαστάσεις των φατνίων του κανάβου, μειώνεται η ληφθείσα μετρητική πληροφορία. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι οι ακραίες τιμές εξομαλύνονται, δηλαδή στις απότομες πλαγιές οι κλίσεις μειώνονται και αντίστοιχα στις ήπιες πλαγιές αυξάνονται, επηρεαζόμενες από τα γειτονικά φατνία. Η μείωση της τυπικής απόκλισης πιστοποιεί το γεγονός ότι το εύρος τιμών των κλίσεων μειώνεται όσο το μέγεθος των φατνίων αυξάνεται. Τα παραπάνω συμπεράσματα συμφωνούν με παρόμοιες μελέτες (Kang-tsung Chang, 1991) (Zhang, 1994) που έχουν πραγματοποιηθεί επίσης για μοντέλα δομής grid.

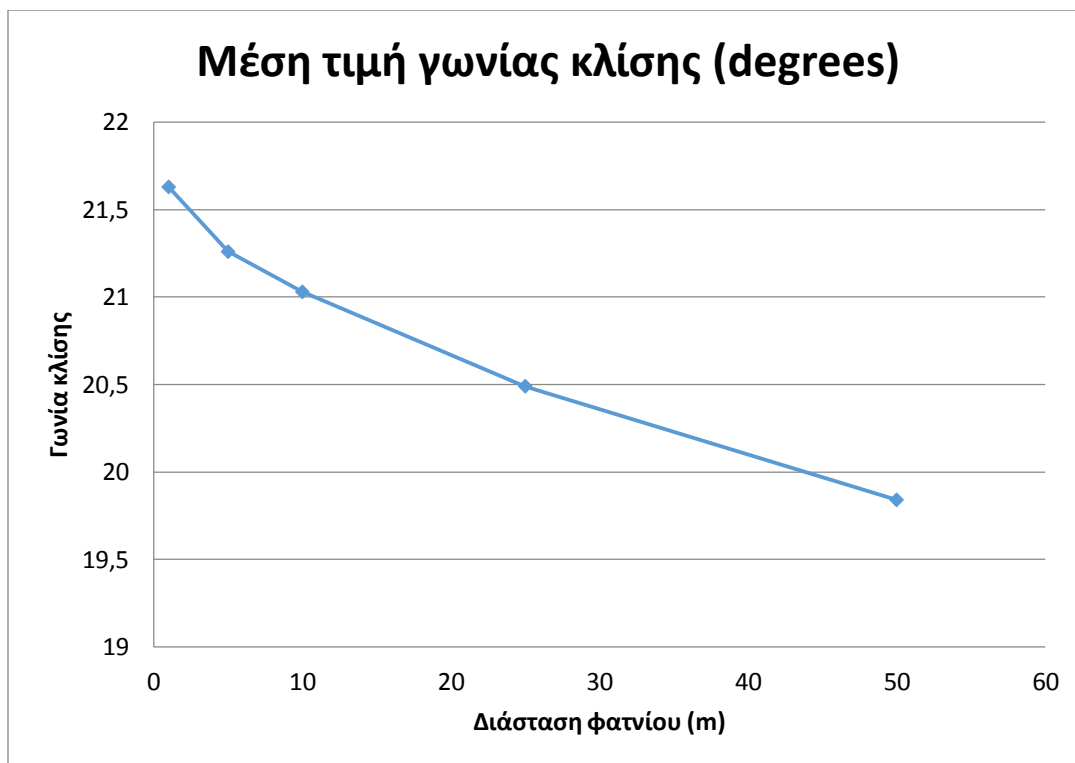
Πίνακας 2: Στατιστικά στοιχεία των μοντέλων για τη γωνία κλίσης

Διάσταση φατνίου (m)	Μέση τιμή γωνίας κλίσης (degrees)	Τυπική απόκλιση γωνίας κλίσης (degrees)
1	21,63	11,73
5	21,26	11,41
10	21,03	11,16
25	20,49	10,69
50	19,84	10,10

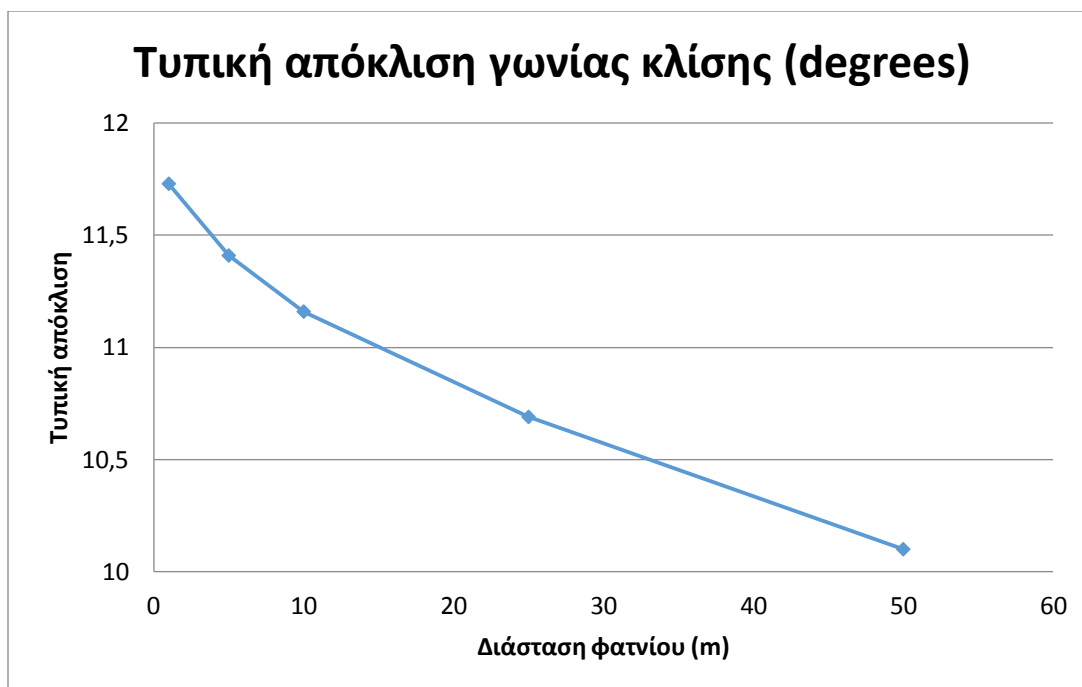
Από τα διαγράμματα μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης (Εικόνα 36,Εικόνα 37) προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- ❖ Η αύξηση της διάστασης του φατνίου επιφέρει υποεκτίμηση της μέσης τιμής της γωνίας κλίσης, γεγονός που προκαλείται από την ομαλοποίηση του εδάφους σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς
- ❖ Η μείωση της ανάλυσης του μοντέλου επιφέρει ασάφεια στον υπολογισμό της γωνίας κλίσης
- ❖ Η αύξηση της διάστασης του φατνίου επιφέρει μείωση της τυπικής απόκλισης της γωνίας κλίσης περίπου ανάλογη με τη μείωση της μέσης τιμής, καθώς τα αντίστοιχα διαγράμματα είναι της ίδιας μορφής. Αυτή η μείωση της τυπικής απόκλισης συνεπάγεται με μείωση του εύρους τιμών, άρα και την ομαλοποίηση του μοντέλου όπως προαναφέρθηκε.

Η υποεκτίμηση της μέσης τιμής της κλίσης όσο η χωρική ανάλυση μειώνεται, θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη σε μελέτες καθορισμού της σταθερότητας των πρανών ή μελέτες διάβρωσης.



Εικόνα 36: Μέση τιμή της γωνίας κλίσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσεως της χωρικής ανάλυσης



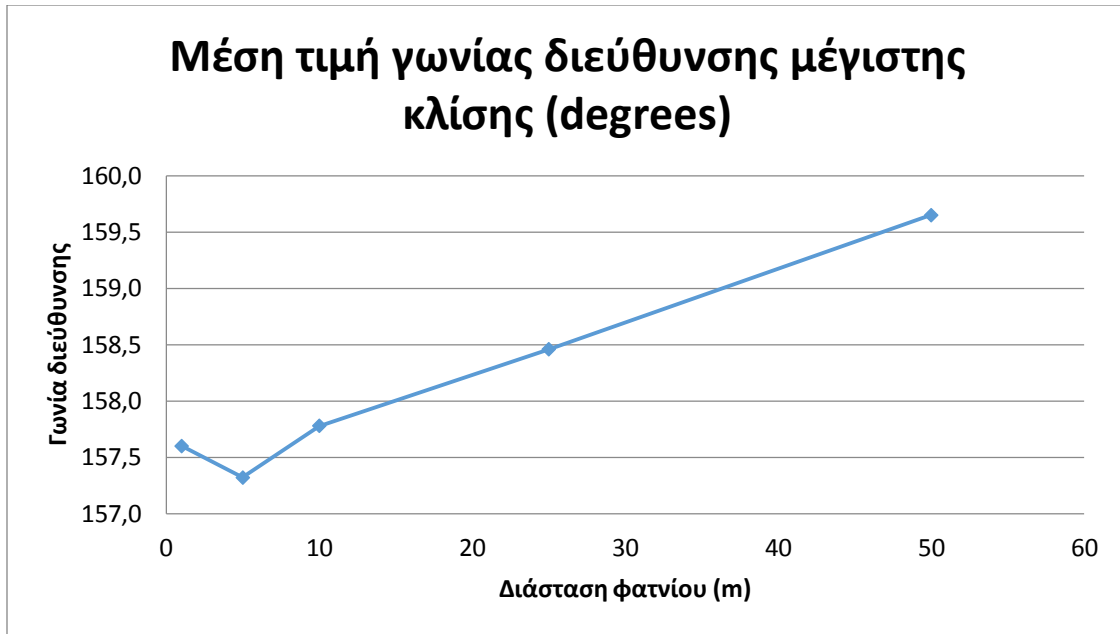
Εικόνα 37: Τυπική απόκλιση της γωνίας κλίσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

5.1.2. Διεύθυνση μέγιστης κλίσης

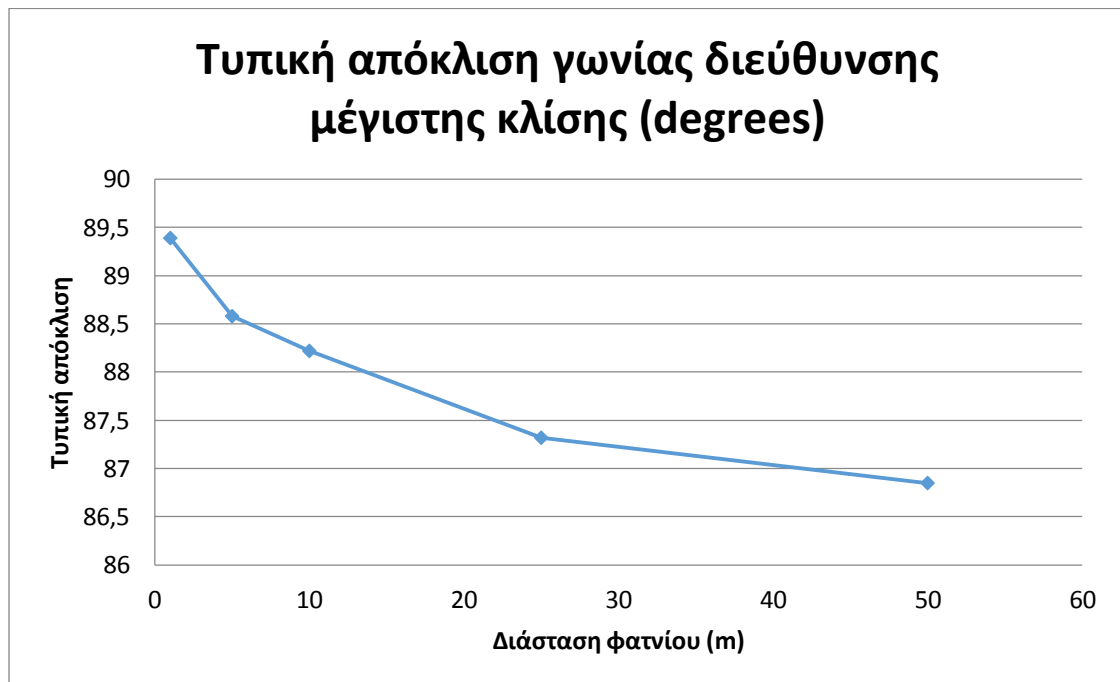
Σε ό,τι αφορά τα στατιστικά στοιχεία και τα διαγράμματα για τη γωνία διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης (Πίνακας 3, Εικόνα 38, Εικόνα 39) παρατηρείται μία σχετική σταθερότητα στη μέση τιμή της μέχρι και το μοντέλο με διάσταση φατνίου 10 μέτρα, με μικρή μείωση στα 5 μέτρα και μικρή αύξηση στα 10 μέτρα, ενώ στα 25 και 50 μέτρα αυξάνεται με σταθερό ρυθμό. Αντίθετα, η τυπική απόκλιση συνεχώς μειώνεται, το οποίο συνεπάγεται με μείωση του εύρους τιμών. Αυτή η συνεχής ελάττωση του εύρους τιμών και η ταυτόχρονη αύξηση της μέσης τιμής από το μοντέλο των 5 μέτρων και έπειτα, πρακτικά σημαίνει ότι με τη μείωση της χωρικής ανάλυσης του μοντέλου εξαλείφονται οι χαμηλότερες κυρίως τιμές της γωνίας διεύθυνσης.

Πίνακας 3: Στατιστικά στοιχεία των μοντέλων για τη γωνία διεύθυνσης μέγιστης κλίσης

Διάσταση φατνίου (m)	Μέση τιμή γωνίας διεύθυνσης μέγιστης κλίσης (degrees)	Τυπική απόκλιση γωνίας διεύθυνσης μέγιστης κλίσης (degrees)
1	157,60	89,39
5	157,32	88,58
10	157,78	88,22
25	158,46	87,32
50	159,65	86,85



Εικόνα 38: Μέση τιμή της γωνίας διεύθυνσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης



Εικόνα 39: Τυπική απόκλιση της γωνίας διεύθυνσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

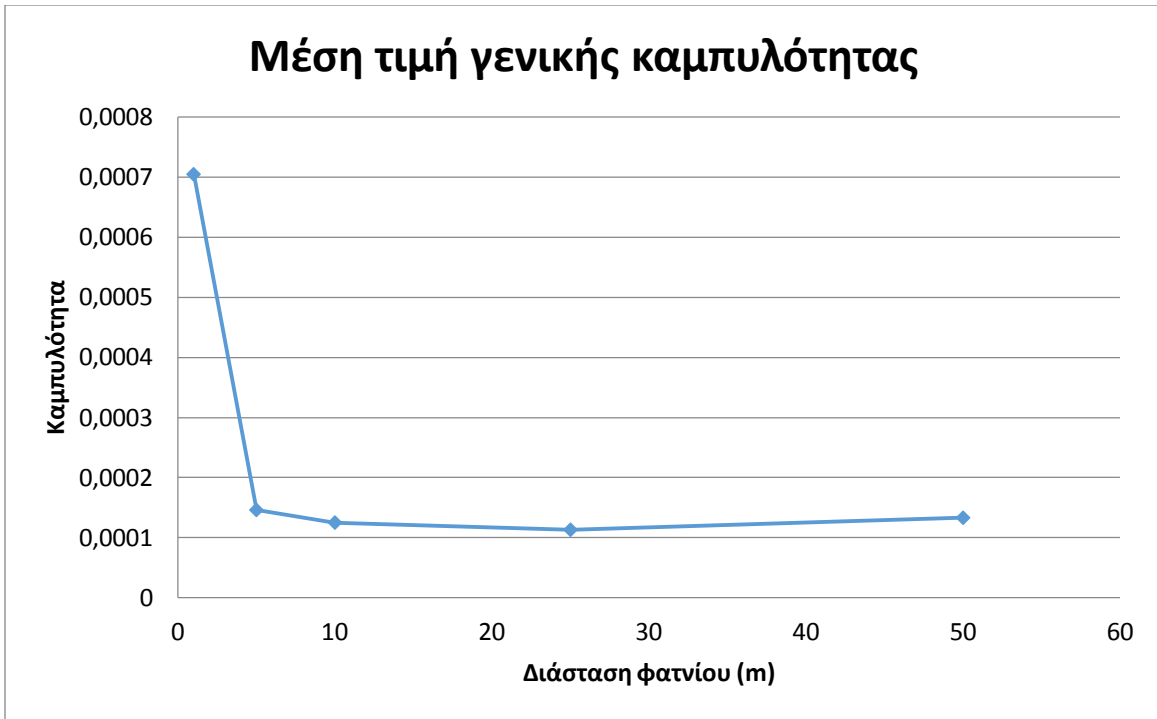
5.1.3. Καμπυλότητα

Από τα στατιστικά στοιχεία και τα διαγράμματα για την καμπυλότητα (Πίνακας 4, Εικόνα 40, Εικόνα 41), παρατηρείται μία απότομη μείωση της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης, αυξάνοντας τη διάσταση φατνίου από το 1 μέτρο (μοντέλο αναφοράς) στα 5 μέτρα. Στη συνέχεια η μέση τιμή παρουσιάζει μικρές ανακατατάξεις για τα 5, 10, 25 και 50 μέτρα παραμένοντας ουσιαστικά σταθερή, ενώ η τυπική απόκλιση εξακολουθεί να μειώνεται με μικρότερο ρυθμό και συμπεριφέρεται αντιστρόφως ανάλογα με το μέγεθος φατνίου.

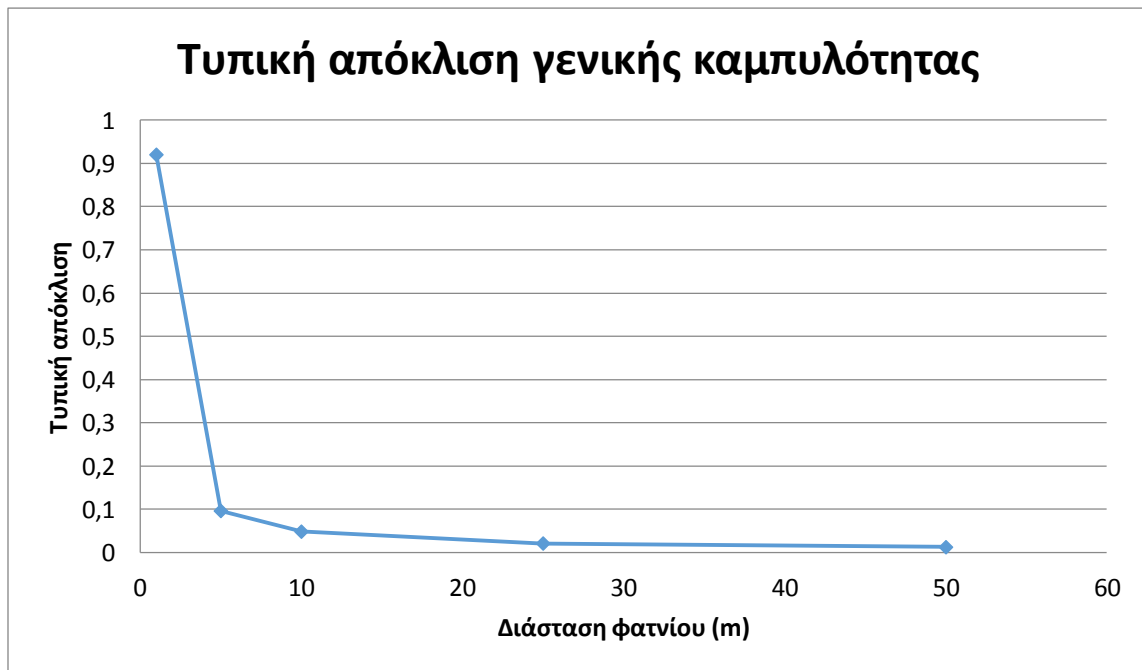
Συνεπώς, όπως και στις προηγούμενες παραμέτρους η μείωση της χωρικής ανάλυσης του μοντέλου προκαλεί μείωση του εύρους τιμών, το οποίο ήταν αναμενόμενο και στη συγκεκριμένη περίπτωση. Η σημαντική υποεκτίμηση των τιμών της καμπυλότητας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα ψηφιακά μοντέλα υψομέτρων με χαμηλή χωρική ανάλυση είναι αναξιόπιστα για μελέτες που αφορούν τις υδρολογικές συνθήκες και τον έλεγχο καθίζησης και μεταφοράς υλικών, καθώς υπάρχει αβεβαιότητα στην αναπαράσταση σύγκλιων και αντικλίνων της επιφάνειας.

Πίνακας 4: Στατιστικά στοιχεία των μοντέλων για την καμπυλότητα

Διάσταση φατνίου (m)	Μέση τιμή γενικής καμπυλότητας	Τυπική απόκλιση γενικής καμπυλότητας
1	0,000705	0,9203
5	0,000146	0,0966
10	0,000125	0,0487
25	0,000113	0,0213
50	0,000133	0,0127



Εικόνα 40: Μέση τιμή της καμπυλότητας των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης



Εικόνα 41: Τυπική απόκλιση της καμπυλότητας των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

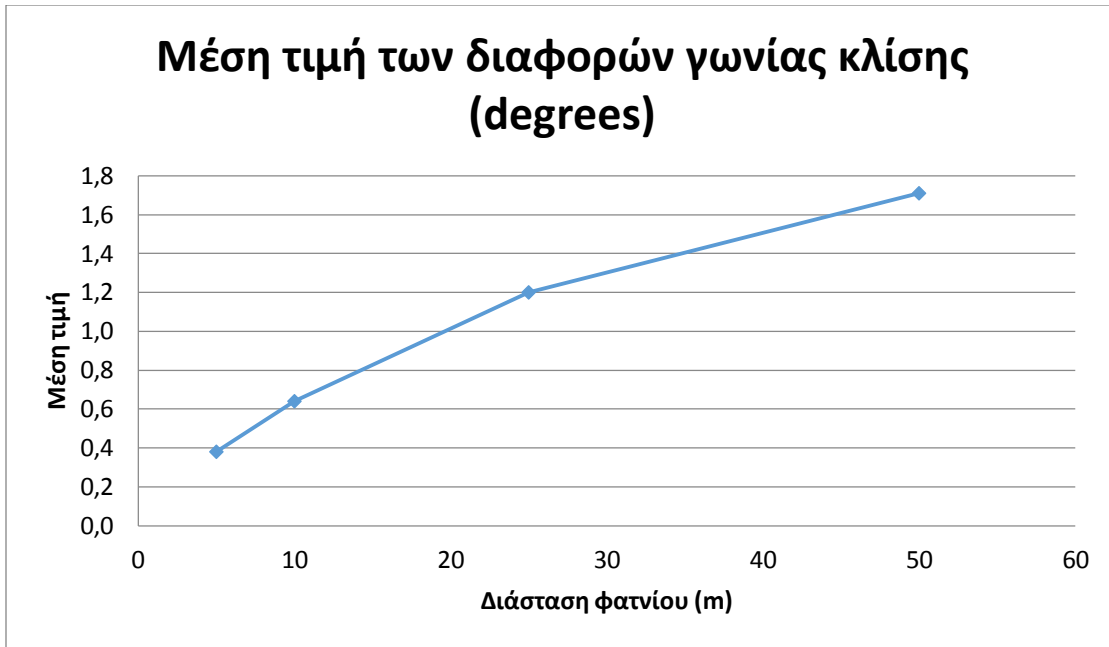
5.2. Επίδραση της χωρικής ανάλυσης στα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά

5.2.1. Κλίση

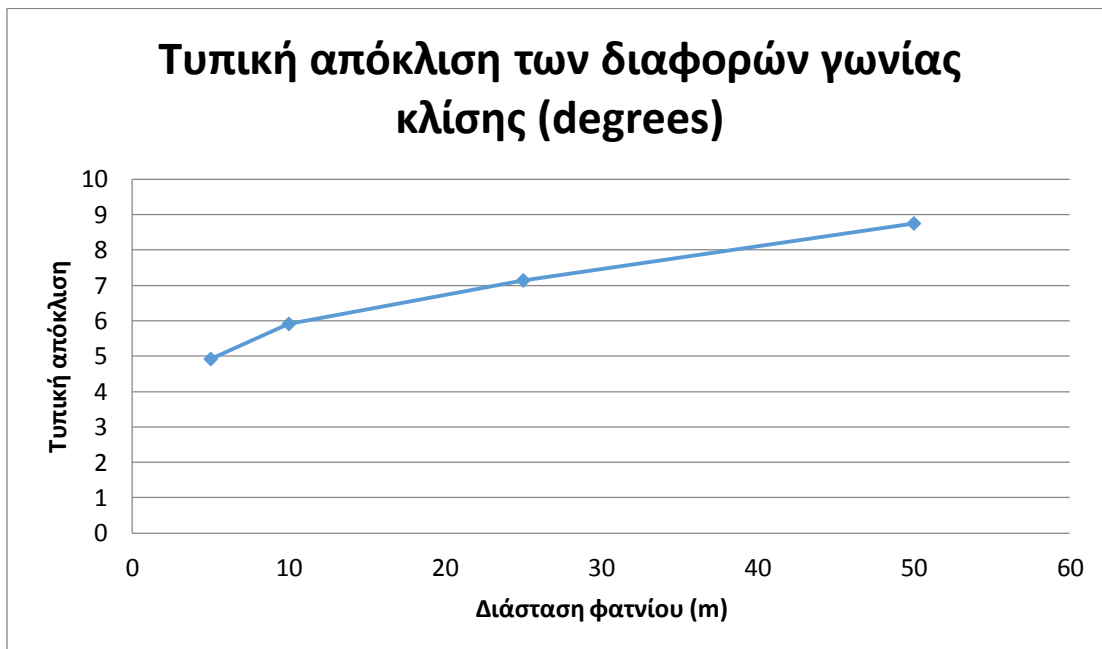
Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η μείωση της χωρικής ανάλυσης του μοντέλου επιφέρει μείωση των τιμών των κλίσεων. Πράγματι από τον πίνακα (Πίνακας 5) παρατηρείται ότι η μέση τιμή των διαφορών γωνίας κλίσης από το μοντέλο αναφοράς στα μοντέλα χαμηλότερης ανάλυσης είναι θετικός και αυξανόμενος αριθμός, γεγονός που πιστοποιεί την ομαλοποίηση του εδάφους. Η μεγαλύτερη μέση τιμή των διαφορών γωνίας κλίσης εντοπίζεται αφαιρώντας από το μοντέλο αναφοράς το μοντέλο με ισοδιάσταση 50 μέτρων και αντιστοιχεί σε 1,71 μοίρες. Ο αριθμός αυτός κρίνεται ιδιαίτερα μικρής τάξεως και ουσιαστικά αποδεικνύει ότι και το μοντέλο των 50 μέτρων δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την παράμετρο της κλίσης. Προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος υπολογισμού των κλίσεων των Zevenbergen & Thorne (1987), δεν επηρεάζεται από την χωρική ανάλυση των μοντέλων που χρησιμοποιούνται. Η αύξηση της τυπικής απόκλισης των διαφορών κρίνεται επίσης μικρής τάξεως σε σύγκριση με το μοντέλο αναφοράς.

Πίνακας 5: Στατιστικά στοιχεία της διαφοράς των γωνιών κλίσης του μοντέλου αναφοράς με τα παράγωγα μοντέλα

Διάσταση φατινίου (m)	Ελάχιστη τιμή της διαφοράς (degrees)	Μέγιστη τιμή της διαφοράς (degrees)	Μέση τιμή των διαφορών γωνίας κλίσης (degrees)	Τυπική απόκλιση των διαφορών γωνίας κλίσης (degrees)
5	-60,32	53,30	0,38	4,92
10	-50,55	54,59	0,64	5,91
25	-43,90	53,25	1,20	7,14
50	-37,58	46,29	1,71	8,75



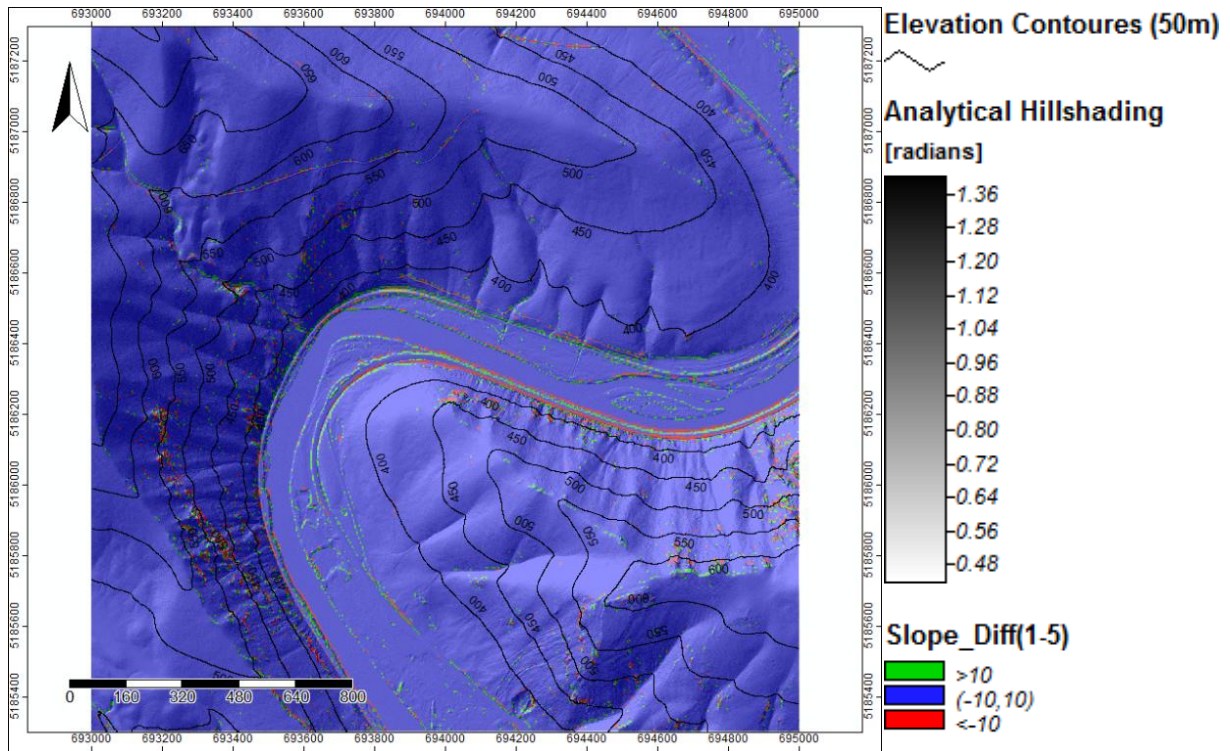
Εικόνα 42: Μέση τιμή των διαφορών της γωνίας κλίσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης



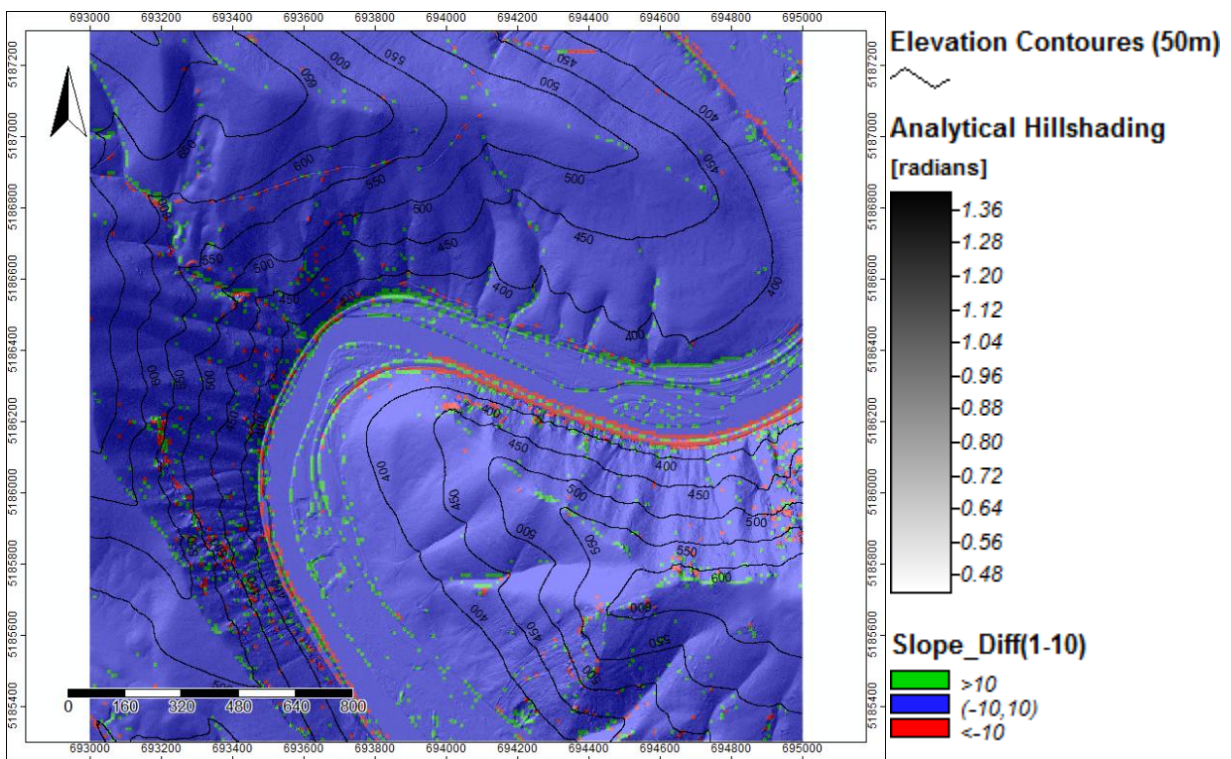
Εικόνα 43: Τυπική απόκλιση των διαφορών της γωνίας κλίσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

Από τις οπτικοποιήσεις των μοντέλων (Εικόνα 44, Εικόνα 45, Εικόνα 46, Εικόνα 47) προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

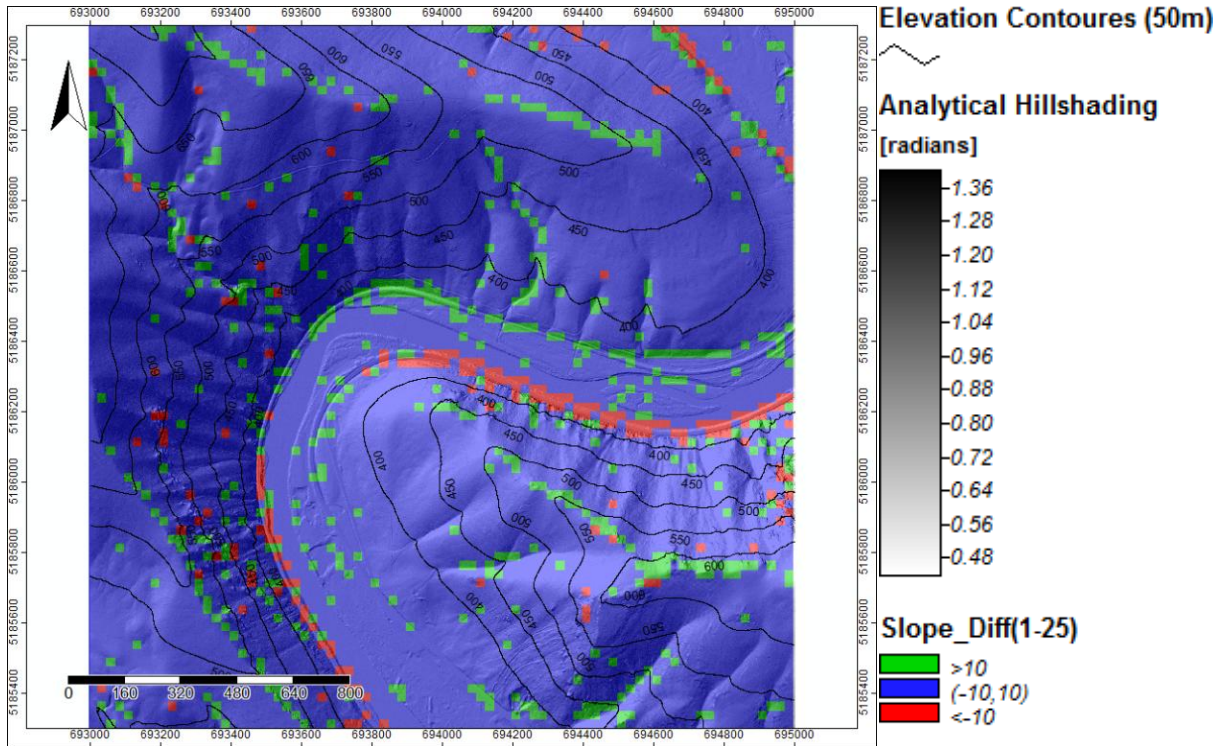
- ❖ Η πλειοψηφία των διαφορών κλίσεων για όλα τα μοντέλα συγκεντρώνεται γύρω από το μηδέν σε ένα εύρος ± 10 μοιρών. Με αυτόν τον τρόπο, αποδεικνύεται ότι όλα τα μοντέλα μας δίνουν επαρκή πληροφορία για την παράμετρο της κλίσης ανεξάρτητα με τη χωρική ανάλυση.
- ❖ Στο μοντέλο των διαφορών των 50 μέτρων απεικονίζονται αρκετά κελιά με μεγαλύτερη τιμή από αυτή που ορίστηκε ως επιθυμητή. Αυτό ίσως οφείλεται στο έντονο ανάγλυφο σε συνδυασμό με το μικρό εμβαδό της περιοχής.
- ❖ Οι μεγαλύτερες διαφορές κλίσης σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς εμφανίζονται σε σημεία με έντονες μεταβολές κλίσης. Παρατηρούνται θετικές κυρίως τιμές (>10 μοίρες) σε κορυφογραμμές και χαράδρες, ενώ διάσπαρτες θετικές και αρνητικές διαφορές εντοπίζονται στις πιο απότομες πλαγιές.
- ❖ Στις όχθες του ποταμού που «βλέπουν» νότια και δυτικά παρατηρούνται θετικές διαφορές, ενώ αντίστοιχα σε αυτές που «βλέπουν» βόρεια και ανατολικά αρνητικές, άρα σχετίζονται και με τη διεύθυνση των κλίσεων. Στα σημεία αυτά υπάρχει έντονη εναλλαγή κλίσης, καθώς από μηδενική στο ποτάμι αυξάνεται απότομα στα πρηνή της όχθης. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι σε αυτές τις περιοχές υπάρχει κεντρικό οδικό δίκτυο και σιδηρόδρομος, που ίσως επηρεάζουν τις τιμές, όπως και ελαφρά βλάστηση γύρω και μέσα στον ποταμό.
- ❖ Όσο πιο έντονη είναι η μεταβολή της κλίσης τόσο μεγαλύτερες είναι και οι διαφορές από το μοντέλο αναφοράς.
- ❖ Στα μοντέλα με χαμηλή χωρική ανάλυση και κυρίως σε αυτό των 50 μέτρων, οι περιοχές με μεγάλες διαφορές κλίσεων απεικονίζονται σε μεγαλύτερες εκτάσεις, λόγω των μεγαλύτερων διαστάσεων των κελιών σε σχέση με τα πιο αναλυτικά μοντέλα. Αυτό ίσως προκαλέσει προβλήματα σε μελέτες που αφορούν μεμονωμένες περιοχές μικρού εμβαδού με έντονες διαφορές κλίσεων, όπως κορυφογραμμές ή μισγάγγειες.



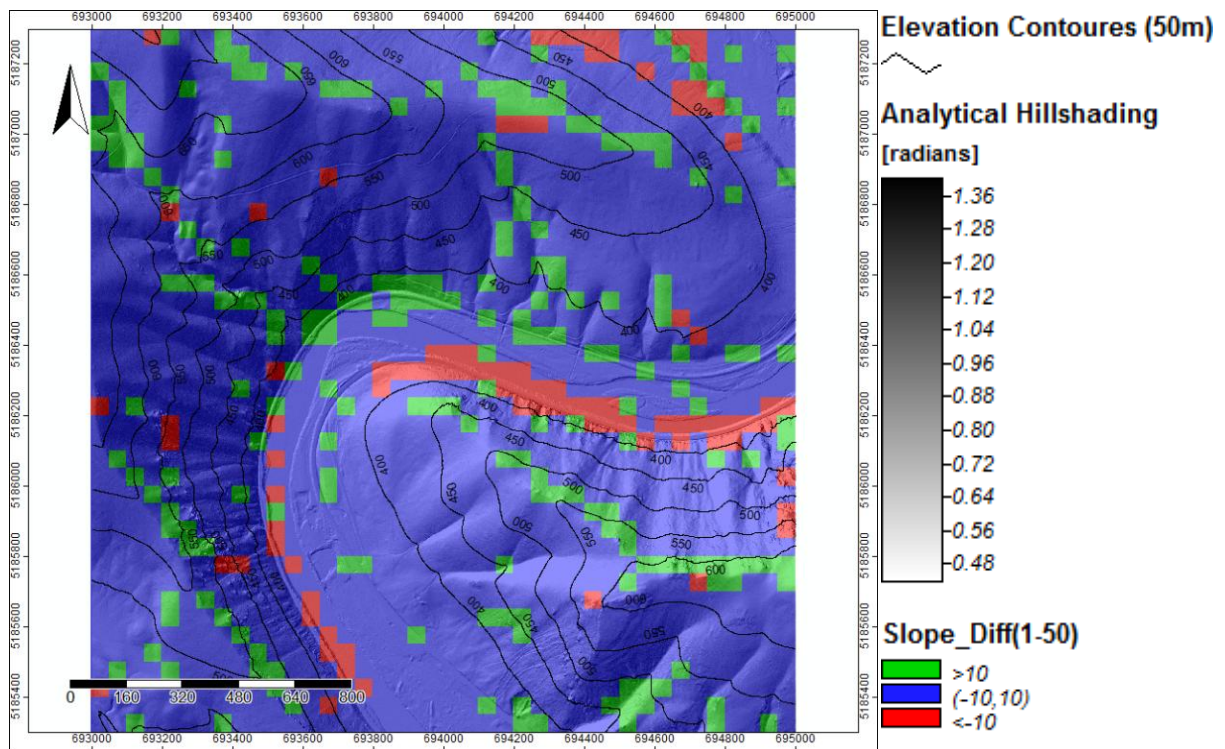
Εικόνα 44: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 5m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 45: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 10m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 46: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 25m από το μοντέλο αναφοράς



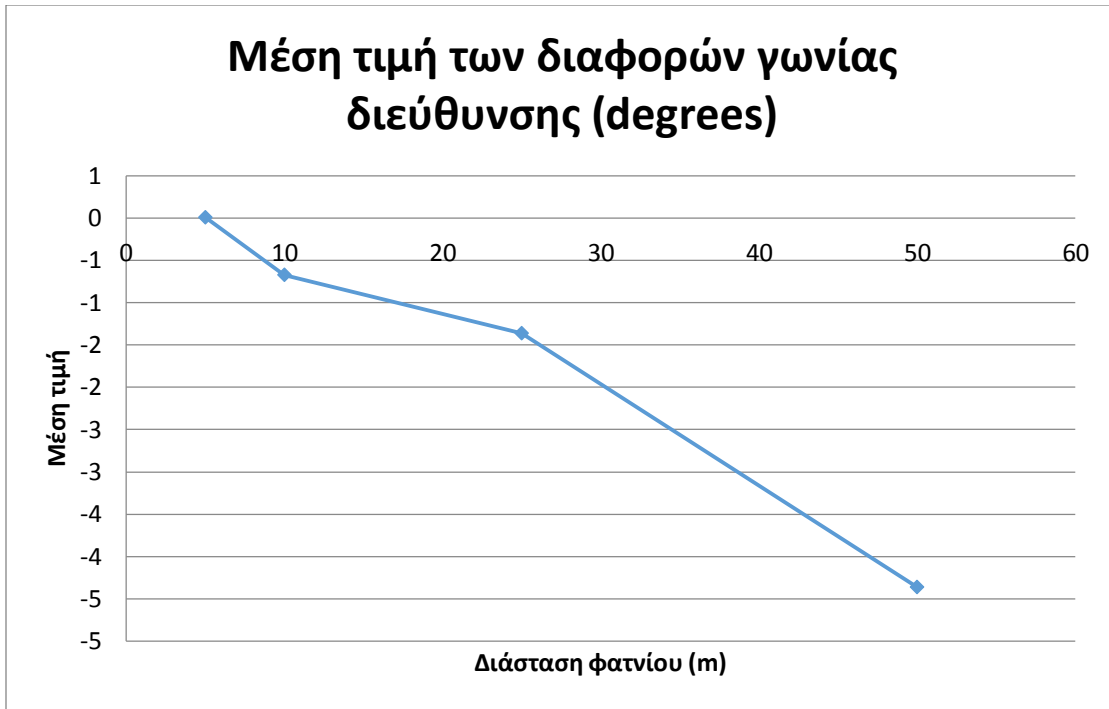
Εικόνα 47: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 50m από το μοντέλο αναφοράς

5.2.2. Διεύθυνση μέγιστης κλίσης

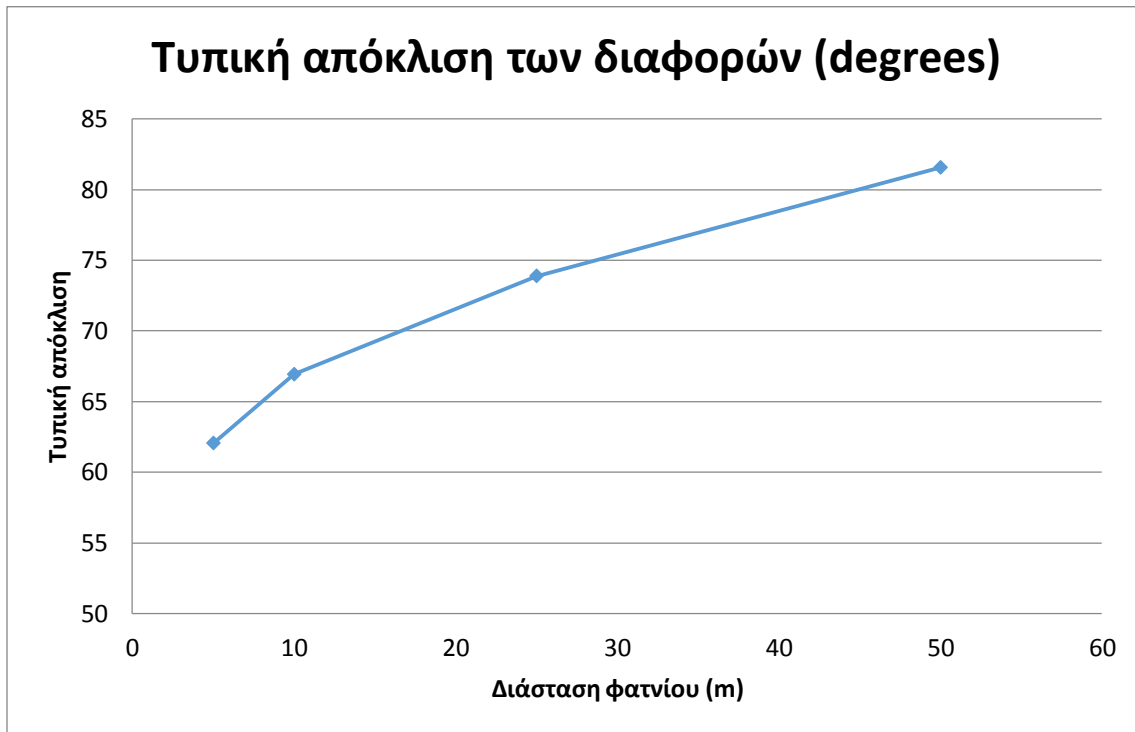
Από τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών των γωνιών διεύθυνσης μέγιστης κλίσης ανάμεσα στο μοντέλο αναφοράς και τα μοντέλα χαμηλότερης χωρικής ανάλυσης (Πίνακας 6) προκύπτει ότι το μοντέλο των 5 μέτρων είναι πολύ κοντά στο αρχικό, καθώς η μέση τιμή είναι σχεδόν μηδενική, ενώ για τα επόμενα μοντέλα αυξάνονται σταδιακά οι τιμές μέχρι τα 25 μέτρα, αφού οι διαφορές είναι αρνητικές και για το μοντέλο των 50 μέτρων αυξάνονται οι τιμές με μεγαλύτερο ρυθμό. Σε ότι αφορά την τυπική απόκλιση των διαφορών παρατηρείται μία σχεδόν αναλογική σχέση με την αύξηση της διάστασης φατνίου, γεγονός που υποδηλώνει αύξηση του εύρους τιμών των διαφορών των γωνιών διεύθυνσης μειώνοντας τη χωρική ανάλυση.

Πίνακας 6: Στατιστικά στοιχεία της διαφοράς των γωνιών διεύθυνσης μέγιστης κλίσης του μοντέλου αναφοράς με τα παράγωγα μοντέλα

Διάσταση φατνίου (m)	Μέση τιμή των διαφορών γωνίας διεύθυνσης (degrees)	Τυπική απόκλιση των διαφορών (degrees)
5	0,01	62,06
10	-0,67	66,93
25	-1,36	73,89
50	-4,36	81,57



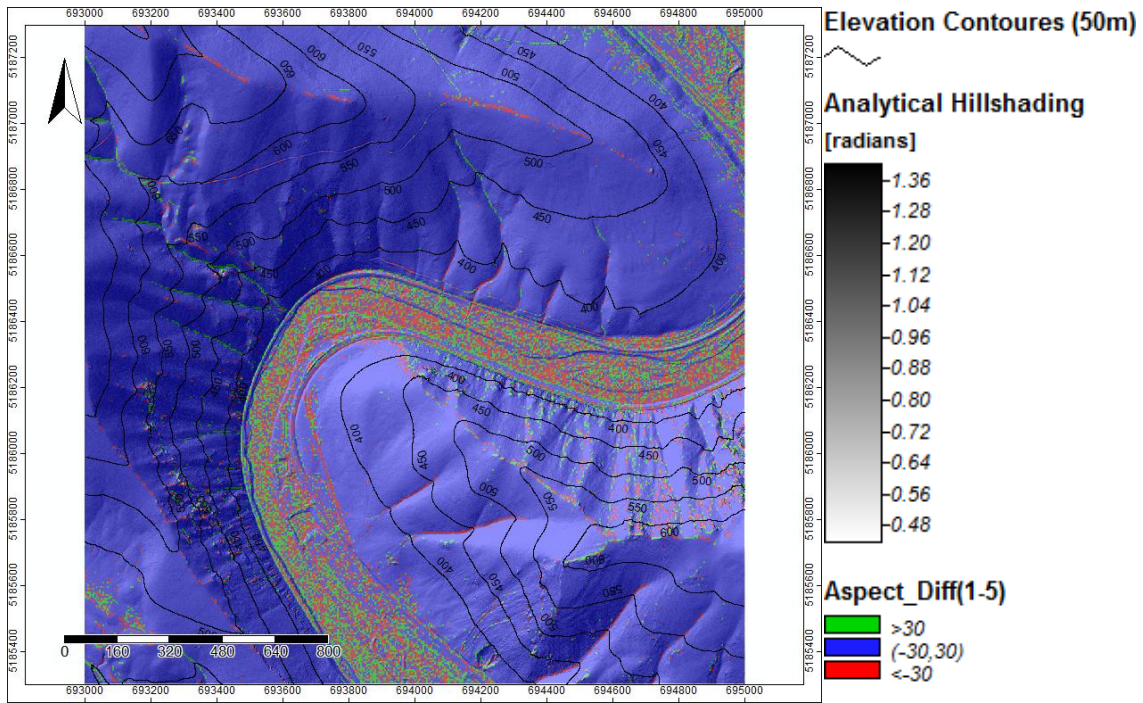
Εικόνα 48: Μέση τιμή των διαφορών της γωνίας διεύθυνσης μέγιστης κλίσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης



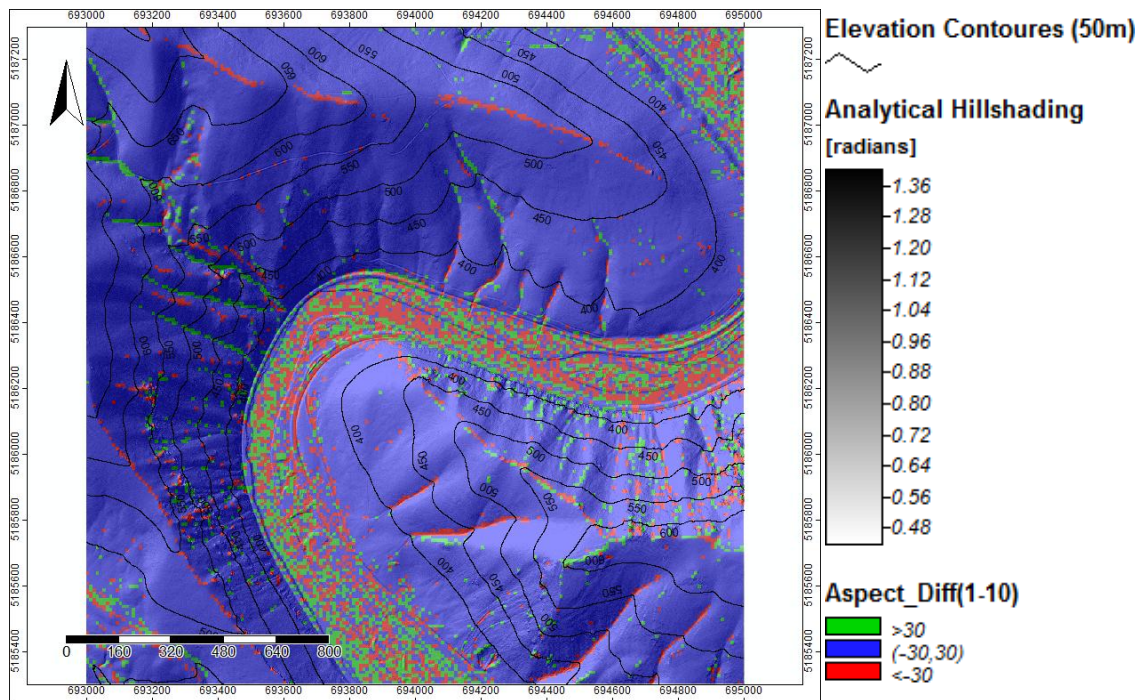
Εικόνα 49: Τυπική απόκλιση των διαφορών της γωνίας διεύθυνσης μέγιστης κλίσης των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

Από τις οπτικοποιήσεις των μοντέλων (Εικόνα 50, Εικόνα 51, Εικόνα 52, Εικόνα 53) προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

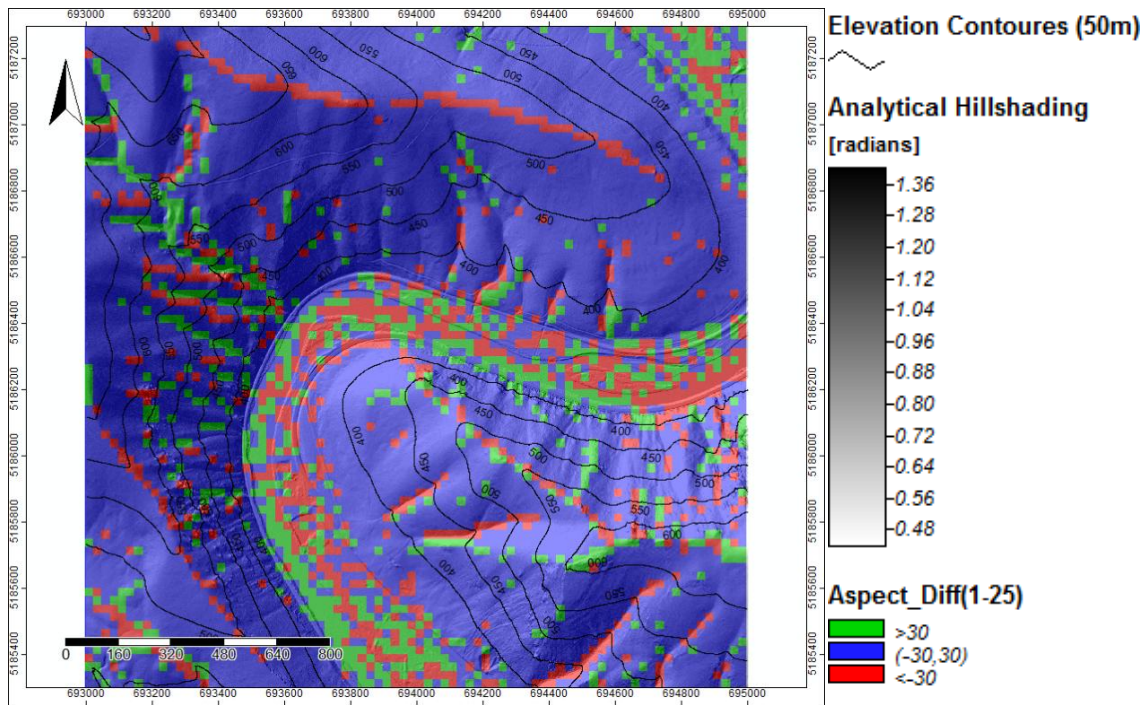
- ❖ Υπάρχει μία πληθώρα σημείων με ακραίες τιμές διαφορών κατεύθυνσης μέγιστης κλίσης εντός του ποταμού, τα οποία προφανώς πρέπει να εξαιρεθούν της διαδικασίας εξαγωγής συμπερασμάτων, αφού οι υδάτινες επιφάνειες δεν προσφέρουν σωστή πληροφορία για τις παραμέτρους που επεξεργάστηκαν.
- ❖ Μέχρι το μοντέλο των 10 μέτρων και οριακά των 25 μέτρων τα μοντέλα μας δίνουν επαρκή πληροφορία για την παράμετρο της διεύθυνσης μέγιστης κλίσης ανεξάρτητα με τη χωρική ανάλυση. Οι τιμές των διαφορών σε σύγκριση με το μοντέλο αναφοράς συγκεντρώνονται ως επί τω πλείστον γύρω από το μηδέν σε ένα εύρος ± 30 μοιρών.
- ❖ Αντίθετα, το μοντέλο των 50 μέτρων κρίνεται ακατάλληλο για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.
- ❖ Οι ακραίες θετικές και αρνητικές τιμές των διαφορών εντοπίζονται όπως και στην παράμετρο της κλίσης κυρίως σε περιοχές με έντονες εναλλαγές κλίσεων, όπως κορυφογραμμές, μισγάγγειες και απότομες πλαγιές.
- ❖ Στις πλαγιές με βόρεια κατεύθυνση υπάρχουν αρκετά σημεία με διαφορές τιμών κοντά στις -360 μοίρες και τις 360 μοίρες. Πρακτικά όμως αυτή η γωνία είναι μηδενική, οπότε οι τιμές με μεγάλη διαφορά σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς σε αυτές τις περιοχές είναι λιγότερες από ότι φαίνονται στα οπτικοποιημένα μοντέλα (Παράρτημα-Εικόνα 80).



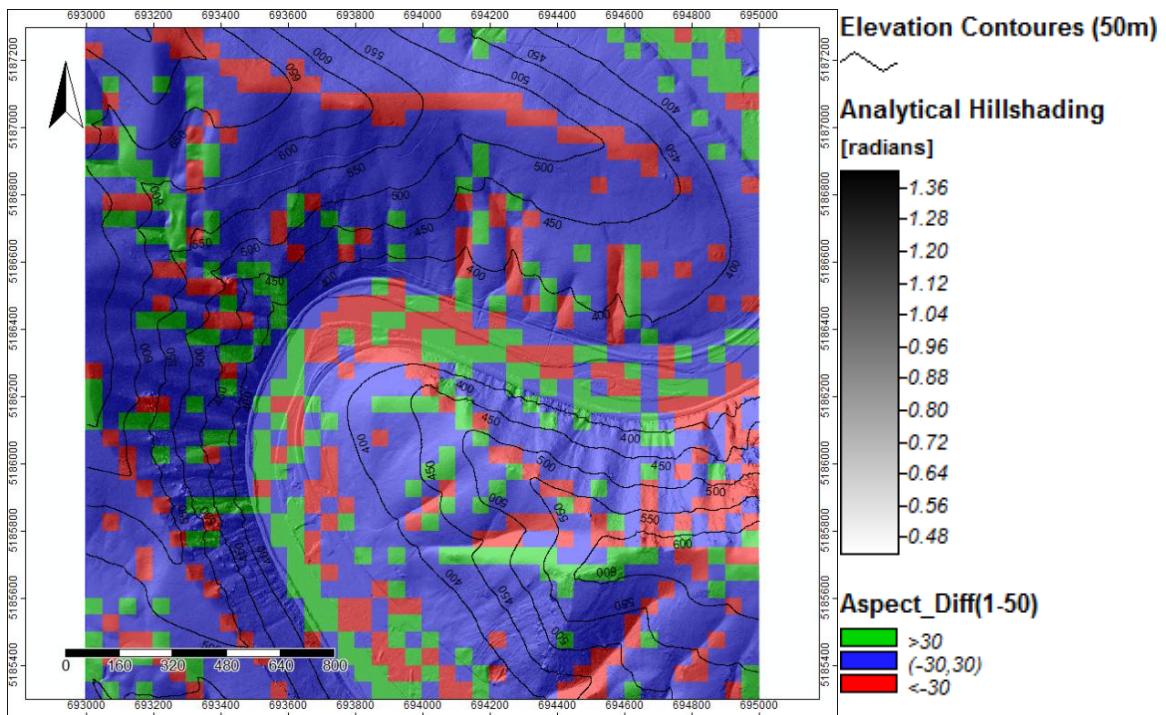
Εικόνα 50: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας διεύθυνσης μέγιστης κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 5m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 51: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας διεύθυνσης μέγιστης κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 10m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 52: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας διεύθυνσης μέγιστης κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 25m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 53: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας διεύθυνσης μέγιστης κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 50m από το μοντέλο αναφοράς

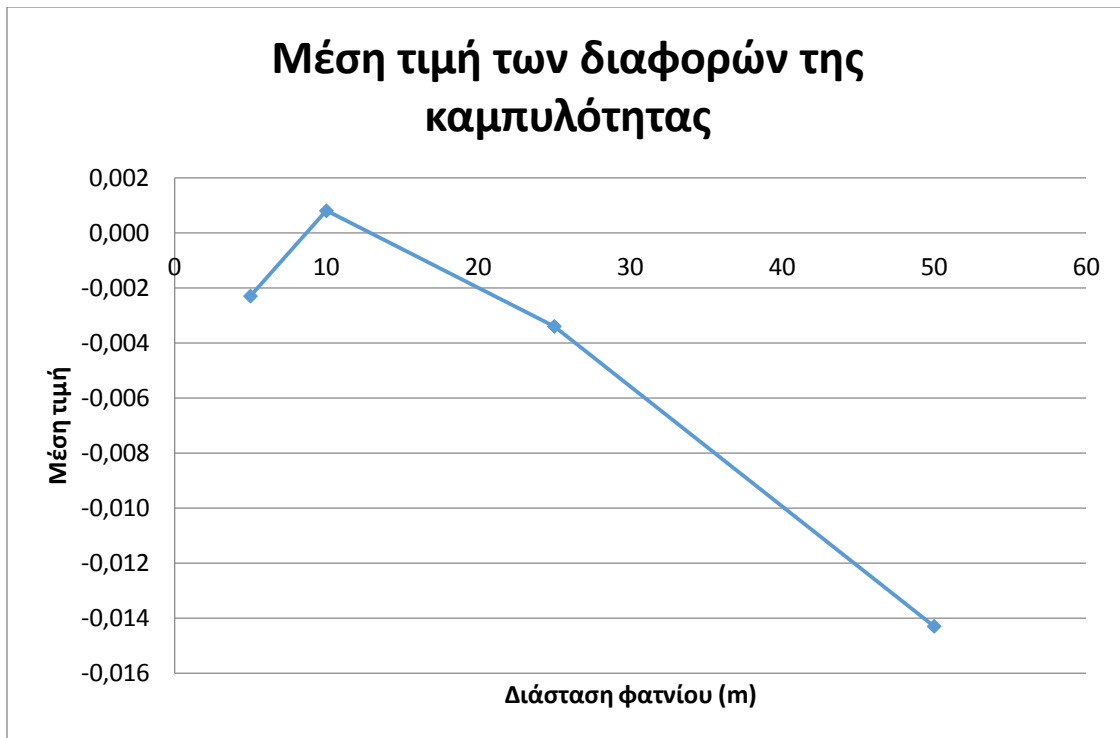
5.2.3. Γενική Καμπυλότητα

Από τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών της γενικής καμπυλότητας ανάμεσα στο μοντέλο αναφοράς και τα παράγωγα μοντέλα χαμηλότερης χωρικής ανάλυσης (Πίνακας 7), παρατηρούνται πολύ μικρές διαφορές, καθώς όλες οι μέσες τιμές είναι σχεδόν μηδενικές, με την τιμή για το μοντέλο των 10 μέτρων να πλησιάζει περισσότερο το μοντέλο αναφοράς. Φαινομενικά αυτό θα μπορούσε να σημαίνει ότι τα μοντέλα δεν χάνουν σε πληροφορία μειώνοντας τη χωρική ανάλυση, όμως αντιτίθεται στα συμπεράσματα από προηγούμενη ενότητα, αφού είχαν παρατηρηθεί πολύ μεγάλες υποεκτιμήσεις από το μοντέλο αναφοράς στα παράγωγα μοντέλα (σελ. 75). Η ομαλοποίηση του εδάφους στα μοντέλα χαμηλότερης χωρικής ανάλυσης επιφέρει, όπως αναμενόταν, μικρότερο εύρος τιμών για τη καμπυλότητα ειδικά στην περίπτωση του μοντέλου των 50 μέτρων.

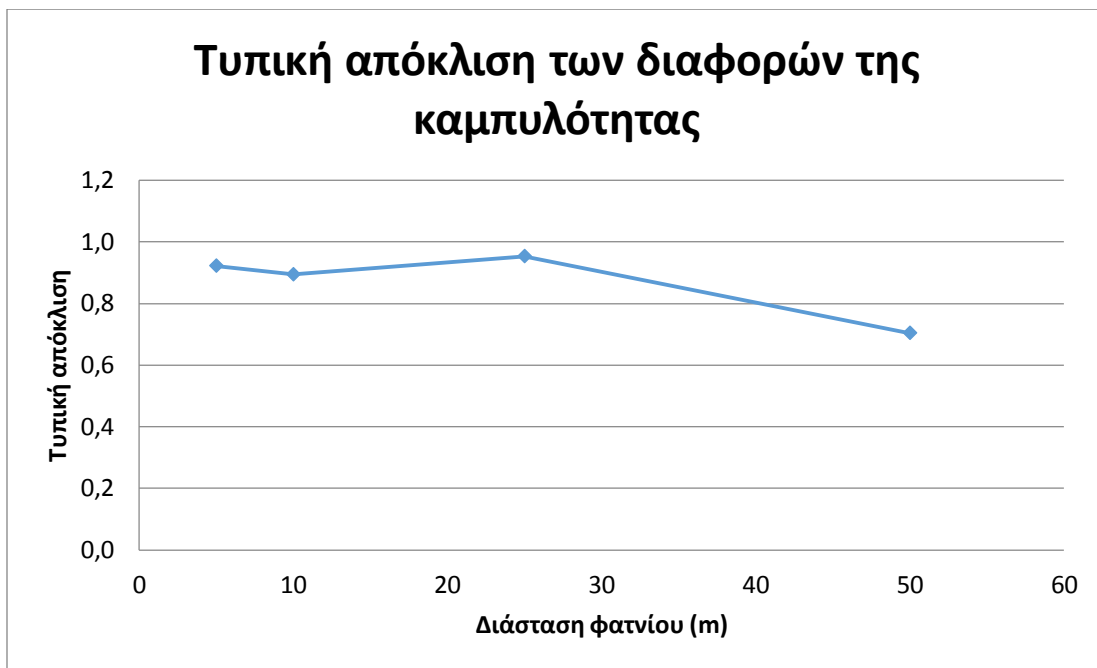
Πίνακας 7: Στατιστικά στοιχεία της διαφοράς της καμπυλότητας του μοντέλου αναφοράς με τα παράγωγα μοντέλα

Διάσταση φαντίου (m)	Ελάχιστη τιμή της διαφοράς	Μέγιστη τιμή της διαφοράς	Μέση τιμή των διαφορών της καμπυλότητας	Τυπική απόκλιση των διαφορών της καμπυλότητας
5	-38,629	40,266	-0,0023	0,922
10	-24,440	27,184	0,0008	0,894
25	-27,130	17,373	-0,0034	0,953
50	-3,687	4,464	-0,0143	0,704

Στα διαγράμματα (Εικόνα 54, Εικόνα 55) απεικονίζονται γραφικά τα παραπάνω αποτελέσματα και παρατηρείται η μείωση της μέσης τιμής των διαφορών για το μοντέλο των 50 μέτρων, ενώ τα μοντέλα χωρικής ανάλυσης έως 25 μέτρων παρουσιάζουν σταθερότητα και είναι πολύ κοντά στο μηδέν. Η τυπική απόκλιση επίσης παρουσιάζει σταθερότητα μέχρι το μοντέλο 25 μέτρων και στη συνέχεια μειώνεται.



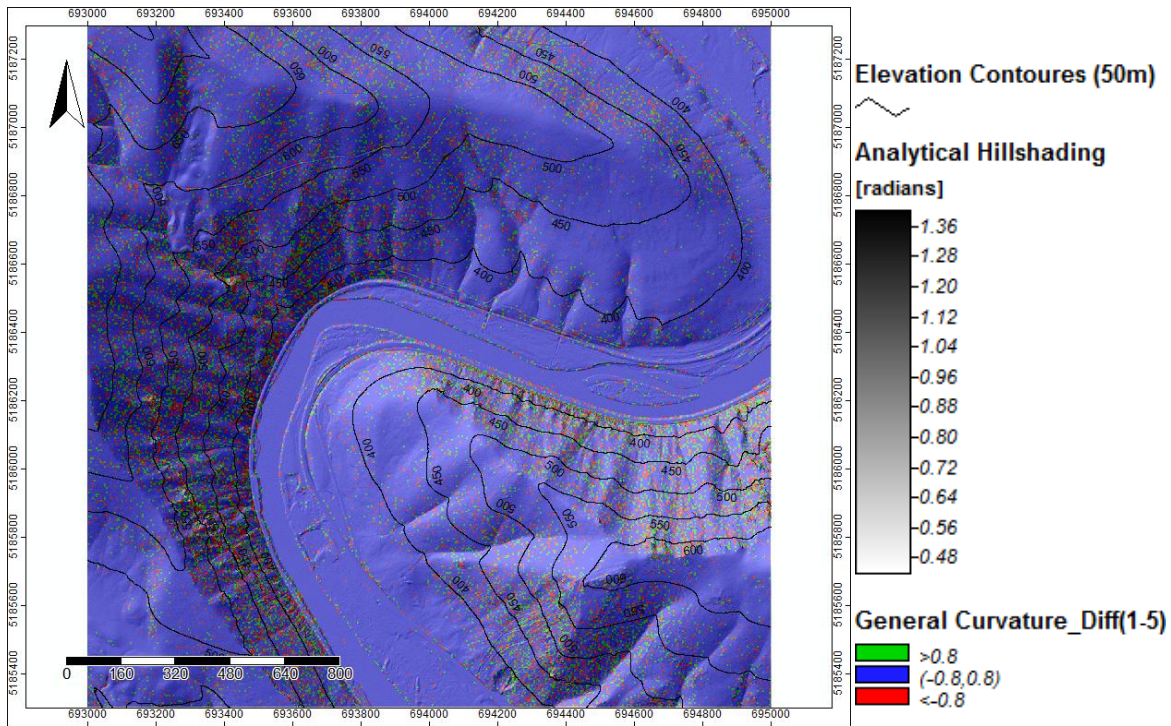
Εικόνα 54: Μέση τιμή των διαφορών της καμπυλότητας των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης



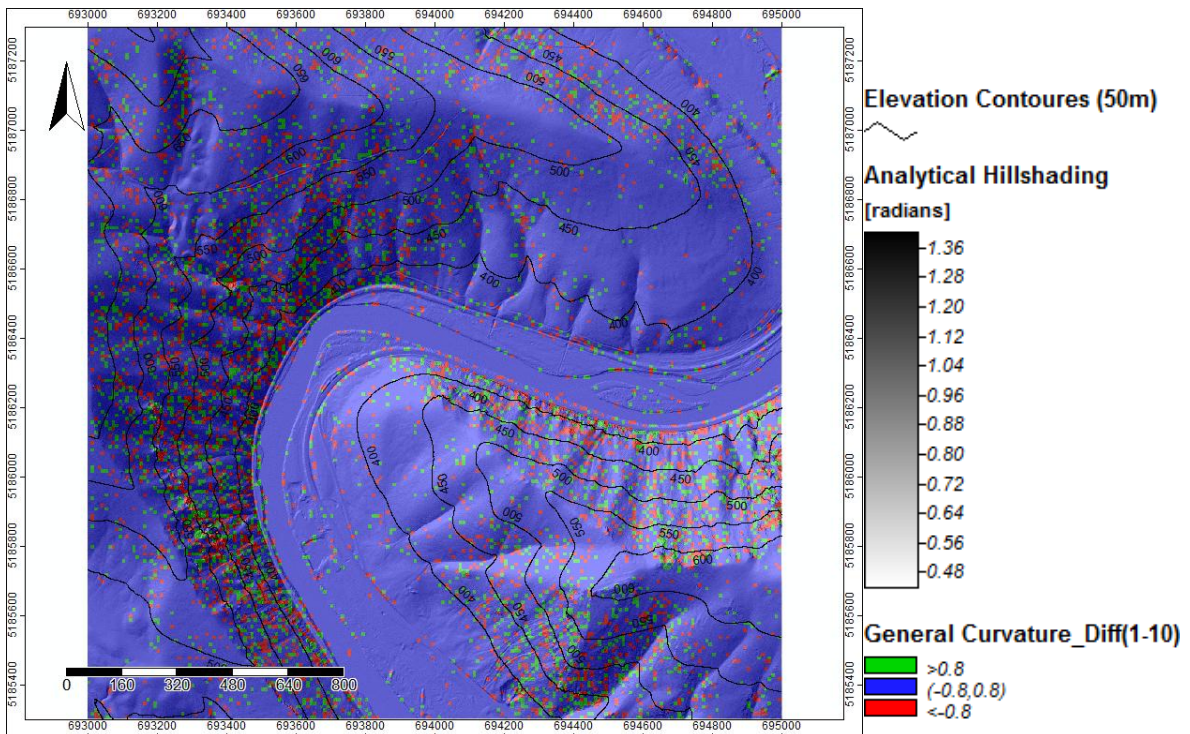
Εικόνα 55: Τυπική απόκλιση των διαφορών της καμπυλότητας των ψηφιακών μοντέλων, συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

Για τις οπτικοποιήσεις των μοντέλων (Εικόνα 56, Εικόνα 57, Εικόνα 58, Εικόνα 59) παρατηρήθηκε μεγαλύτερη συγκέντρωση τιμών στο πεδίο $\pm 0,8 \text{ m}^{-1}$ από το μηδέν και προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

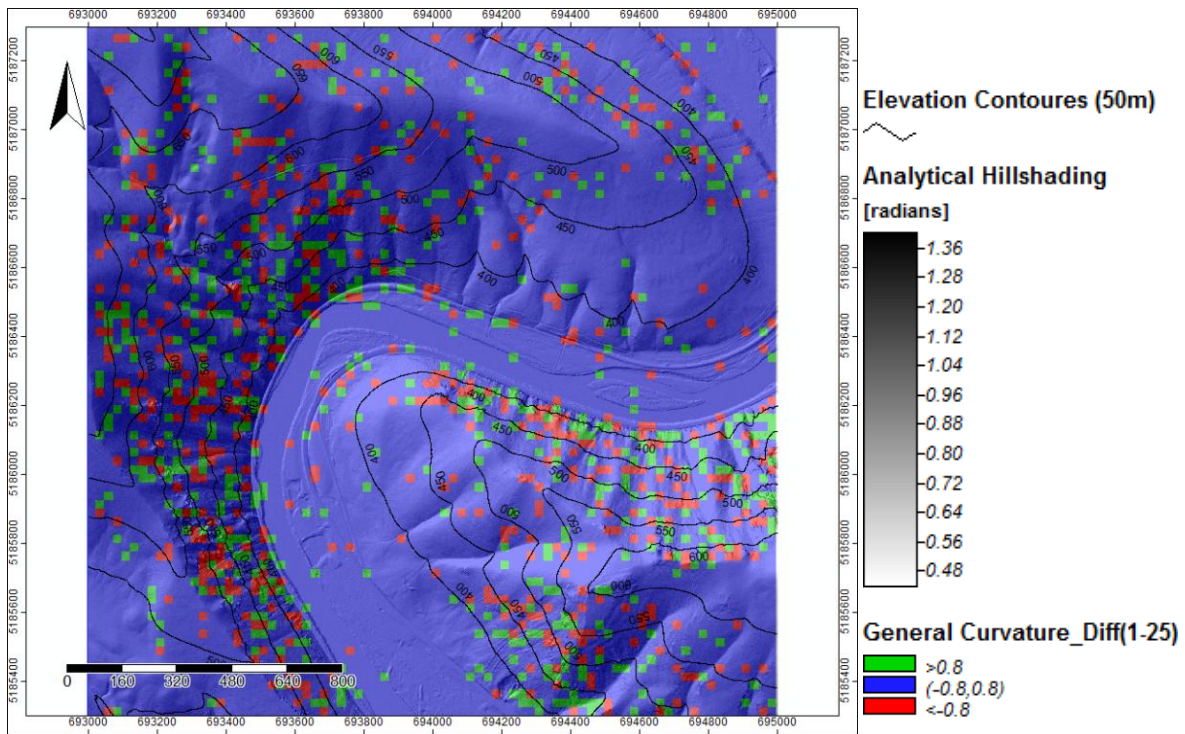
- ❖ Όλα τα παράγωγα μοντέλα έχουν σημαντικές διαφορές σε σύγκριση με το μοντέλο αναφοράς, γεγονός που παρατηρήθηκε μελετώντας τα στατιστικά στοιχεία για τη γενική καμπυλότητα σε προηγούμενη ενότητα. Τα στοιχεία αυτά όπως προαναφέρθηκε δεν επιβεβαιώνονται από τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών των παράγωγων μοντέλων από το μοντέλο αναφοράς.
- ❖ Οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα μοντέλα 5, 10, 25 και 50 μέτρων δεν είναι μεγάλες, άρα δεν χάνεται σημαντική μετρητική πληροφορία μειώνοντας τη χωρική ανάλυση σε αυτές τις διαστάσεις φατνίου, όμως διαφέρουν σημαντικά με το μοντέλο αναφοράς.
- ❖ Η συγκέντρωση τιμών για τη μεσαία κλάση $\pm 0,8$ κρίνεται αρκετά μικρή ώστε να θεωρηθούν αξιόπιστα τα παράγωγα μοντέλα, παρ' όλα αυτά παραμένει σταθερή μειώνοντας τη χωρική ανάλυση.
- ❖ Τα σημεία με τις μεγαλύτερες διαφορές είναι διάσπαρτα σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης, άρα δεν προκύπτει κάποιο συμπέρασμα σχετικά με το που συγκεντρώνονται σε μεγαλύτερη συχνότητα.



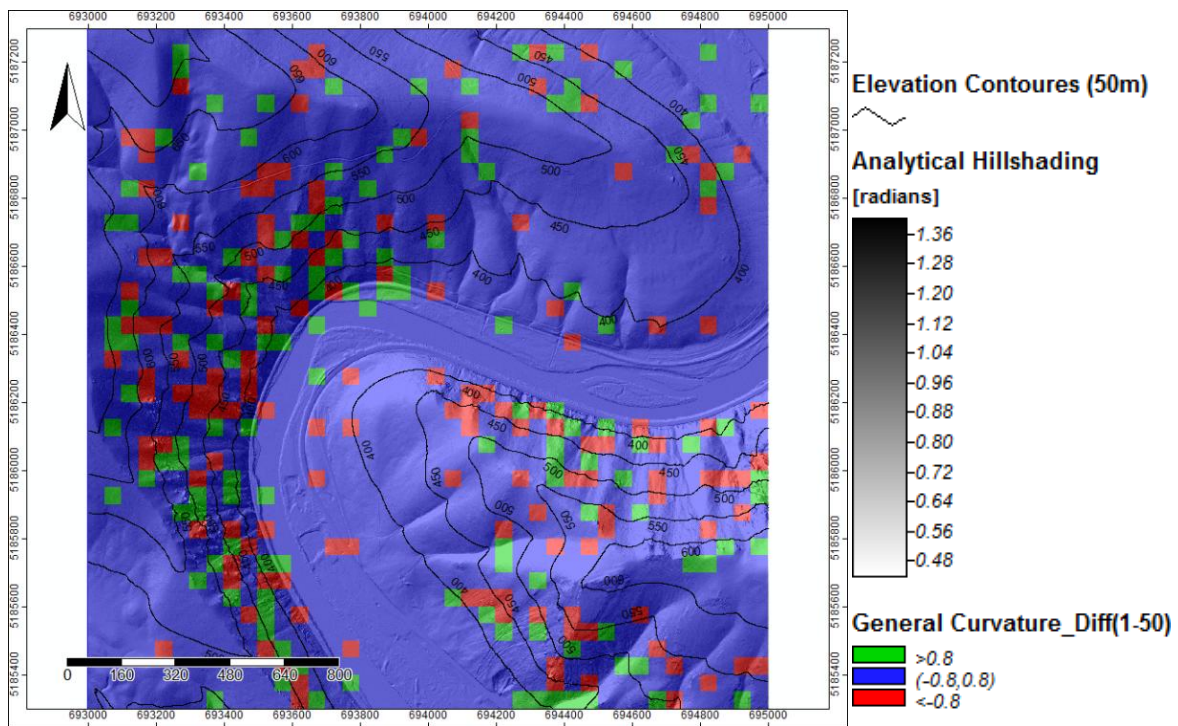
Εικόνα 56: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της καμπυλότητας μοντέλου χωρικής ανάλυσης 5m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 57: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της καμπυλότητας μοντέλου χωρικής ανάλυσης 10m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 58: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της καμπυλότητας μοντέλου χωρικής ανάλυσης 25m από το μοντέλο αναφοράς



Εικόνα 59: Μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της καμπυλότητας μοντέλου χωρικής ανάλυσης 50m από το μοντέλο αναφοράς

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο βασικός κορμός της εργασίας αναφέρεται στην αξιοποίηση δεδομένων LiDAR υψηλής ακρίβειας, για την δημιουργία ψηφιακών μοντέλων υψομέτρων δομής grid, διαφόρων χωρικών αναλύσεων, καθώς και στη γεωμορφομετρική ανάλυση αυτών των μοντέλων που έχει ως αποτέλεσμα την εξαγωγή των πρωτεύοντων τοπογραφικών χαρακτηριστικών που αφορούν την παρούσα μελέτη.

Για την παραγωγή και τη σύγκριση των ψηφιακών μοντέλων δομής grid επιλέχθηκε το λογισμικό SAGA gis το οποίο παρέχει πολλές επιλογές στις παραμέτρους σύγκρισης, εμφανίζει πλεονεκτήματα στην επεξεργασία υψομετρικών δεδομένων, διαθέτει πολύ φιλικό περιβάλλον επεξεργασίας προς τον χρήστη και είναι ανοιχτού κώδικα.

Σε μια τελική σύνοψη λοιπόν, θα γίνει μια προσπάθεια να εξαχθούν ορισμένα συγκεντρωτικά συμπεράσματα, έτσι ώστε να γίνουν αντιληπτές οι δυνατότητες αλλά και οι περιορισμοί στην εξαγωγή τιμών για τα μορφομετρικά χαρακτηριστικά, αναλόγως με την χωρική ανάλυση των ψηφιακών μοντέλων υψομέτρων. Μελετήθηκε λοιπόν κατά πόσο κάθε ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων διαφορετικής χωρικής ανάλυσης αντικατοπτρίζει την πραγματική μορφολογία της επιφάνειας του εδάφους, αναλόγως με το υπό μελέτη γεωμορφομετρικό χαρακτηριστικό.

Η εξαγωγή ενός εμπειριστατωμένου συμπεράσματος, είναι ιδιαίτερης σημασίας καθώς όσο μικρότερη είναι η χωρική ανάλυση των μοντέλων, τόσο μικρότερος είναι ο όγκος δεδομένων που χρειάζονται επεξεργασία, με άμεση συνέπεια την ελάττωση της απαιτούμενης υπολογιστικής δύναμης, του χρόνου που απαιτείται για την επεξεργασία, καθώς και του απαιτούμενου χώρου αποθήκευσης. Η περιοχή μελέτης της εργασίας όταν απεικονίζεται από ψηφιακό μοντέλο εδάφους χωρικής ανάλυσης 1m αποτελείται από 4000000 σημεία εδάφους, ενώ όταν απεικονίζεται σε χωρική ανάλυση 10m αποτελείται από 40000 σημεία, δηλαδή μόλις το 1/100 των αρχικών σημείων. Για περιοχές μικρού εμβαδού η χωρική ανάλυση δεν παίζει τόσο μεγάλο ρόλο στον φόρτο επεξεργασίας εκτός αν το αρχικό νέφος σημείων είναι πολύ πυκνό, ωστόσο σε μεγαλύτερης έκτασης περιοχές, είναι πιθανό να απαιτείται η χρήση ψηφιακού μοντέλου εδάφους χαμηλής χωρικής ανάλυσης. Είναι λοιπόν σημαντικό, ιδιαίτερα όταν οι περιοχές που πρέπει να απεικονιστούν είναι μεγάλης έκτασης, να υπάρχουν τα απαραίτητα στοιχεία ώστε να μπορεί να γίνει επιλογή της ενδεδειγμένης χωρικής ανάλυσης σε συνάρτηση με τον σκοπό της εκάστοτε μελέτης και της έκτασης της υπό μελέτη περιοχής.

Να σημειωθεί εδώ, ότι η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας είναι μικρής έκτασης (4km²), με έντονο ανάγλυφο και μεγάλες κλίσεις, οπότε τα ακόλουθα συμπεράσματα αφορούν περιοχές με παρόμοια γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά.

6.1. Κλίση

Όσο η χωρική ανάλυση μειώνεται, οι τιμές των κλίσεων υποεκτιμώνται, ιδιαίτερα στις περιοχές με έντονο ανάγλυφο όπως μισγάγγειες, πλαγιές και κορυφογραμμές. Παρόλα αυτά, η τάξη μεγέθους της τιμής των διαφορών των μοντέλων ανάλυσης 5m, 10m, 25m και 50m με το μοντέλο αναφοράς είναι μικρή και τα μοντέλα αυτά μπορούν να θεωρηθούν αρκετά αντιπροσωπευτικά. Από τις οπτικοποιήσεις των διαφορών των μοντέλων των κλίσεων προέκυψε ότι οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται στις περιοχές με απότομες αλλαγές κλίσης.

6.2. Διεύθυνση της μέγιστης κλίσης

Για τη γωνία διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης συμπεραίνεται από τη μελέτη των στατιστικών στοιχείων και των οπτικοποιήσεων των διαφορών των μοντέλων ότι το μοντέλο χωρικής ανάλυσης 5m βρίσκεται πολύ κοντά στο μοντέλο αναφοράς. Αντίθετα μειώνοντας περαιτέρω τη χωρική ανάλυση τα αποτελέσματα φθίνουν. Οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται, όπως και για τη γωνία κλίσης, στις περιοχές με έντονη μεταβολή κλίσης, όπως κορυφογραμμές, απότομες πλαγιές και χαράδρες.

Προκύπτει λοιπόν, ότι το μοντέλο 5m είναι κατάλληλο για την εξαγωγή τιμών της διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης, ενώ μέχρι και το μοντέλο 25m τα αποτελέσματα κρίνονται αποδεκτά για την παρούσα εργασία. Η καταλληλότητα τους για παρόμοιες μελέτες εξαρτάται από τα κριτήρια που θα θέσει ο εκάστοτε ερευνητής. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους χωρικής ανάλυσης 50m, δεν ενδείκνυται για χρήση σε εφαρμογές που έχουν απαιτήσεις μεσαίας ή μεγαλύτερης ακρίβειας, αλλά ίσως είναι εύχρηστα για εργασίες μεγάλης έκτασης ή ήπιου ανάγλυφου στις οποίες απαιτείται γενικευμένη απεικόνιση της επιφάνειας του εδάφους.

6.3. Γενική καμπυλότητα

Από την σύγκριση των μοντέλων φαίνεται ότι η γενική καμπυλότητα εμφανίζει την μεγαλύτερη ευαισθησία σε σχέση με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μειώνοντας τη χωρική ανάλυση από το μοντέλο αναφοράς. Παρ' όλα αυτά τα παράγωγα μοντέλα 5, 10, 25 και 50 μέτρων παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες μεταξύ τους. Μάλιστα, τα μοντέλα καμπυλότητας 5 και 10 μέτρων παρουσιάζουν πιο ευδιάκριτες τιμές σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς. Παρατηρώντας τα συγκεκριμένα μοντέλα προκύπτει ότι οι θετικές τιμές γενικής καμπυλότητας εμφανίζονται στις κυρτές περιοχές, όπως οι κορυφογραμμές, ενώ οι αρνητικές στις κοίλες, όπως οι χαράδρες.

6.4. Συζήτηση

Η τεχνολογία LiDAR των σαρωτών laser, δίνει την δυνατότητα για γρήγορες και οικονομικές μετρήσεις περιοχών μεγάλης έκτασης με μεγάλη πυκνότητα σημείων. Τέτοιου είδους μετρήσεις επιτρέπουν την δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους πολύ υψηλής ανάλυσης. Ωστόσο, για την δημιουργία τέτοιων μοντέλων απαιτούνται αρκετά βήματα επεξεργασίας, τα οποία χρειάζονται χρόνο, μεγάλη υπολογιστική δύναμη και έχουν αυξημένο κόστος. Η αποθήκευση των δεδομένων αυτών ως ανεπεξέργαστα δεδομένα (νέφη σημείων), των μοντέλων που δημιουργούνται από αυτά, αλλά και των παραγόμενων από αυτά προϊόντων απαιτεί πολύ μεγάλους χώρους αποθήκευσης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το ζήτημα της ποιότητας σε συνάρτηση με την χωρική ανάλυση των ψηφιακών μοντέλων εδάφους, απαιτεί περαιτέρω αναζήτηση, καθώς μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα των εφαρμογών ως προς την ποιότητα, αλλά και να δημιουργεί περιορισμούς στην έκταση των περιοχών που διερευνώνται. Σύμφωνα με την παρούσα μελέτη, σε γενικές γραμμές προκύπτει το συμπέρασμα ότι όσο η χωρική ανάλυση μειώνεται τόσο η ποιότητα του ελαττώνεται, όμως ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους δεν είναι δυνατό να κριθεί ως προς της καταλληλότητα του μόνο από τα αποτελέσματα στατιστικών αναλύσεων, αλλά πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψιν και ο σκοπός που το μοντέλο αυτό πρόκειται να εξυπηρετήσει.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας με τα αντίστοιχα για ψηφιακά μοντέλα εδάφους σε δομή TIN (Λαβδάκης, 2018) προκύπτουν εν συντομία τα εξής συμπεράσματα:

- ❖ Τα παραγόμενα μοντέλα κλίσης δομής grid είναι πλησιέστερα στο μοντέλο αναφοράς και έχουν μεγαλύτερο εύρος τιμών
- ❖ Τα παραγόμενα μοντέλα διεύθυνσης μέγιστης κλίσης δομής TIN είναι πλησιέστερα στο μοντέλο αναφοράς εκτός από το μοντέλο 5m. Για τη δομή grid οι διαφορές από το μοντέλο αναφοράς είναι ως επί το πλείστον αρνητικές, ενώ για τη δομή TIN θετικές. Το εύρος τιμών είναι παρόμοιο.
- ❖ Η γενική καμπυλότητα συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο και για τις δύο δομές

Σκοπός των δύο αυτών εργασιών δεν είναι να κριθεί ποια μέθοδος από τις δύο είναι καλύτερη, αλλά η ταυτόχρονη παρουσίαση αποτελεσμάτων για τα κύρια τοπογραφικά χαρακτηριστικά στην ίδια περιοχή μελέτης, ώστε να αναδειχθούν οι δυνατότητες κάθε δομής αναπαράστασης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Axelsson, P. (2000). *DEM generation from laser scanner data using adaptive tin models*.
- Bonk, R. (2003). *Scale-dependent impact of selected factors on morphometric parameters accuracy and automated geomorphological mapping*.
- Cadell, W. (2002). *Report on the generation and analysis of DEMs for spatial modelling*.
- Central Washington University. (n.d.). Ανάκτηση από <https://www.cwu.edu>
- Central Washington University. (n.d.). Ανάκτηση από <https://www.cwu.edu>
- DDesignPlus. (n.d.). Ανάκτηση από <http://ddesignplus.com/photography/landscape/>
- Dikau, R. S. (1999). *Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models - semantics, methods, future needs*.
- ESRI. (n.d.). Ανάκτηση από <https://www.esri.com/en-us/home>
- GDA Corp. (n.d.). Ανάκτηση από <http://www.gdacorp.com/projects/gapfill>
- Google. (n.d.). Ανάκτηση από <https://www.google.gr/maps>
- Hutchinson, M. G. (2000). Digital elevation models and representation of terrain shape. Στο J. G. Wilson, *Terrain Analysis: Principles and Applications*.
- Jozef Minár, I. S. (2008). *Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping*.
- Kang-tsung Chang, B.-w. T. (1991). *The Effect of DEM Resolution on Slope and Aspect Mapping*.
- Kilian, J. H. (1996). *Capture and evaluation of airborne laser scanner data*.
- Kraus, K. B. (2004). *QUALITY MEASURES FOR DIGITAL TERRAIN MODELS*.
- Li, Z. Z. (2005). *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*.
- MathWorks. (n.d.). Ανάκτηση από <https://www.mathworks.com>
- Moore, I. G. (1991). *Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications*.

- Peckham, R. J. (2007). *Digital Terrain Modelling*.
- Pike, R. (2000). *Geomorphometry—diversity in quantitative surface analysis: Progress in Physical*.
- Pike, R. E. (2009). Geomorphometry: a brief guide. Στο T. R. Hengl, *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*.
- R.J. Pike, I. E. (2008). *Geomorphometry: A Brief Guide*.
- Rasemann Stefan, J. S. (2004). Geomorphometry in mountai terrai. Στο J. S. Michael Bishop, *Geographic Information Science and Mountain Geomorphology*.
- Saga-gis. (n.d.). Ανάκτηση από <http://saga-gis.org/en/index.html>
- Stepmap. (n.d.). Ανάκτηση από <http://www.stepmap.de>
- Thompson, J. B. (2000). *Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling*.
- Tsai, V. (1993). Delaunay triangulations in TIN creation: an overview and a linear-time algorithm. *International Journal of GIS*.
- USGS. (n.d.). Ανάκτηση από <https://pubs.usgs.gov>
- Wichmann, V. R. (2011). *DIGITAL TERRAIN MODEL GENERATION FROM AIRBORNE LASER SCANNING POINT DATA AND THE EFFECT OF GRID-CELL SIZE ON THE SIMULATION RESULTS OF A DEBRIS FLOW MODEL*.
- Wikipedia. (n.d.). Ανάκτηση από <https://en.wikipedia.org>
- Wikipedia. (n.d.). Ανάκτηση από <https://www.wikipedia.org/>
- Wilson, J. a. (2000). *Terrain analysis—Principles and Applications*.
- Zevenbergen, L. W. (1987). *QUANTITATIVE ANALYSIS OF LAND SURFACE TOPOGRAPHY*.
- ZEVENBERGEN, L. W. (1987). *QUANTITATIVE ANALYSIS OF LAND SURFACE TOPOGRAPHY*.
- Zhang, W. M. (1994). *Digital elevation modelrid size, landscape representation and hydrologic simulations*.
- Zhilin Li, Q. Z. (2005). *DIGITAL TERRAIN MODELING, Principles and Methodology*.

- Λαβδάκης, Ι. (2018). *Γεωμορφομετρική ανάλυση ψηφιακών μοντέλων εδάφους σε δομή TIN - Σύγκριση ανά χωρική ανάλυση.*
- Νάκος, Β. (1990). *Ψηφιακή απεικόνιση χαρτογραφικών φαινομένων βασισμένη στην θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας- Εφαρμογή στο τοπογραφικό ανάγλυφο σε ψηφιακά μοντέλα.*
- Τσούλος, Λ. (2008). *Ψηφιακή Χαρτογραφία* (2 εκδ.).
- Τσούλος, Λ. Σ. (2015). *Χαρτογραφική σύνθεση και απόδοση σε ψηφιακό περιβάλλον.* Αθήνα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παράρτημα αυτό δίνεται ο κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Python, ο οποίος δημιουργεί πίνακες μικρότερων διαστάσεων αφαιρώντας γραμμές και στήλες με βήμα που επιλέγει ο χρήστης. Με τον τρόπο αυτό χρησιμοποιώντας ως πίνακα εισόδου τον πίνακα που εξήχθη από τα μοντέλα χωρικής ανάλυσης 1m, δημιουργήθηκαν πίνακες ίσων διαστάσεων με τους πίνακες που εξήχθησαν από τα Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους μικρότερης χωρικής ανάλυσης και συγκρίθηκαν οι τιμές στα κοινά τους κελιά.

```
import os

if __name__ == "__main__":
    os.chdir('./input')
    files = os.listdir('.')
    files_dict = dict()
    for f in files:
        fbasename = f[:-4]
        for step in [5, 10, 25, 50]:
            files_dict['f'+ str(step)] = open(fbasename + '_' +
str(step) + '.asc', 'w')

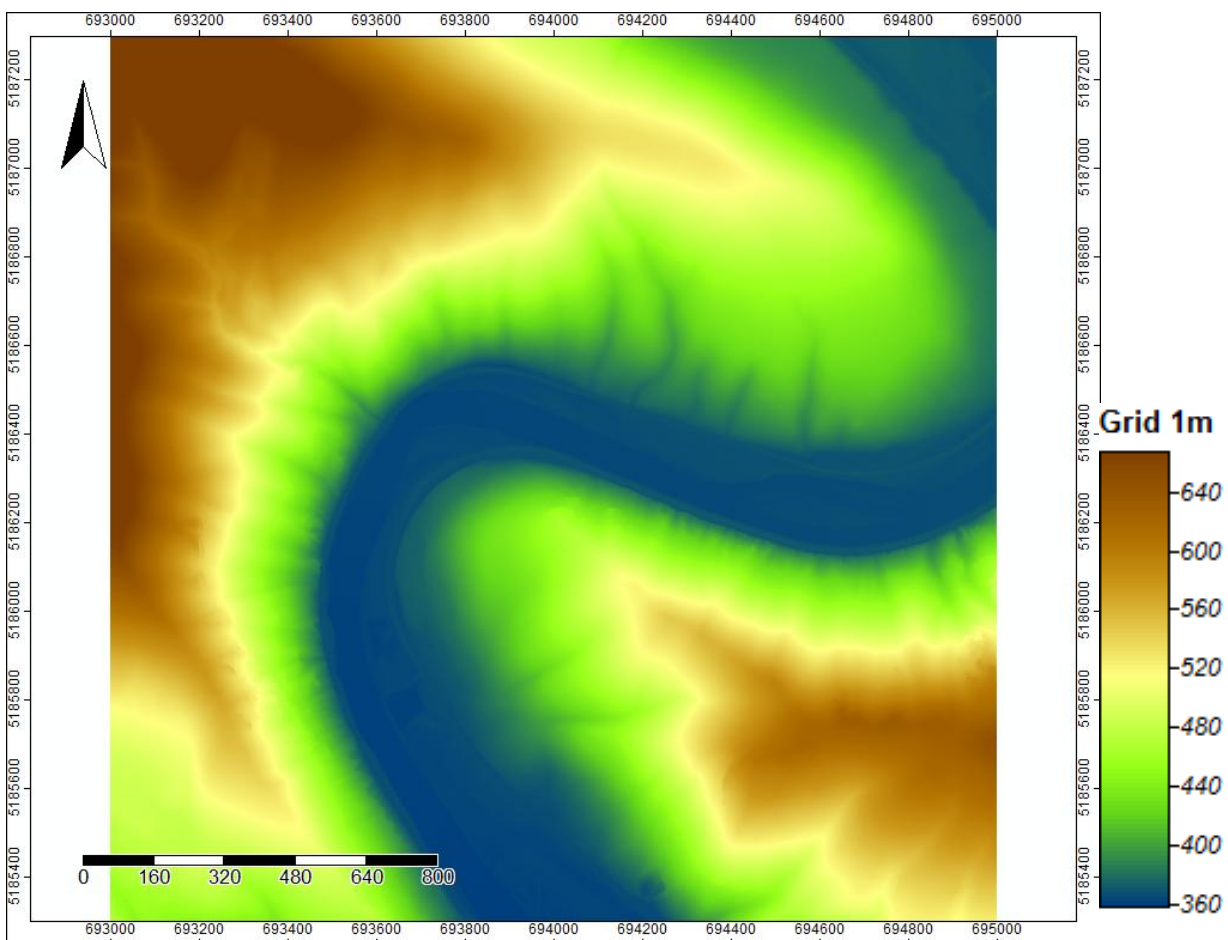
            with open(f, 'r') as arr:
                arr_lines = arr.readlines()
                for step in [5,10,25,50]:
                    for ix, line in enumerate(arr_lines):
                        if ix % step == 0:
                            for iy, element in enumerate(line.split(' ')):
                                if iy % step == 0:

files_dict['f'+str(step)].write(str(element) + ' ')
                                files_dict['f'+str(step)].write('\n')

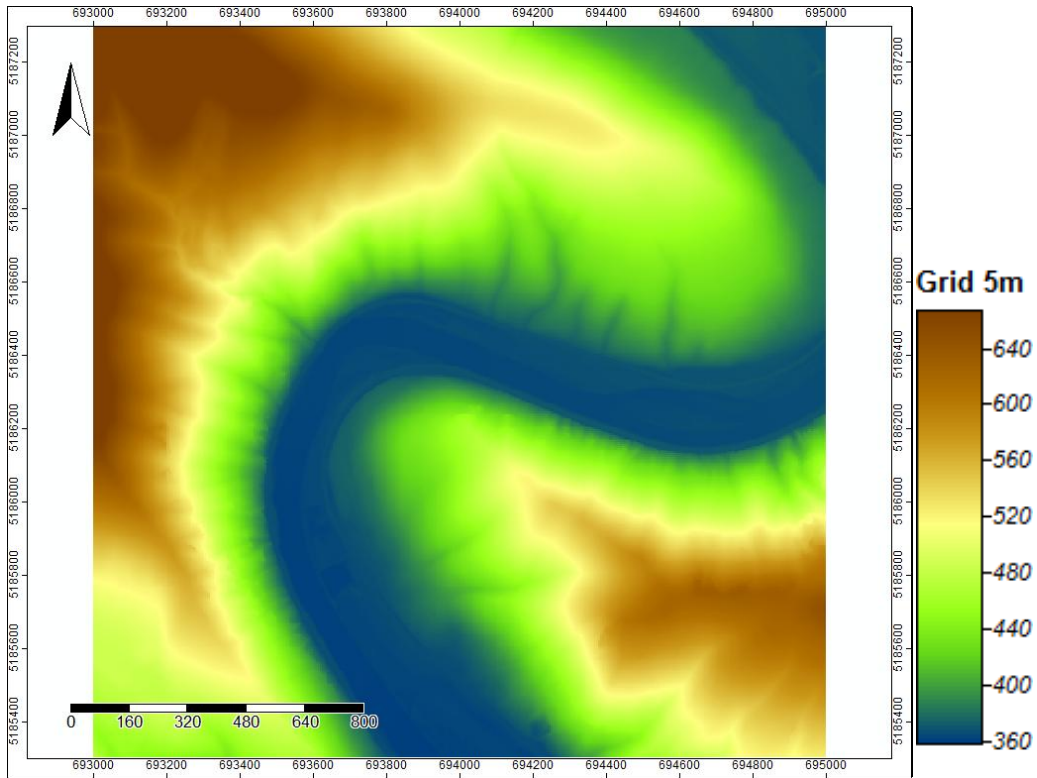
            arr.close()
    for fw,v in files_dict.iteritems():
        v.close()
```

Ακολούθως, οπτικοποιούνται τα μοντέλα δομής grid χωρικών αναλύσεων 1m, 5m, 10m, 25m, 50m, για όλα τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

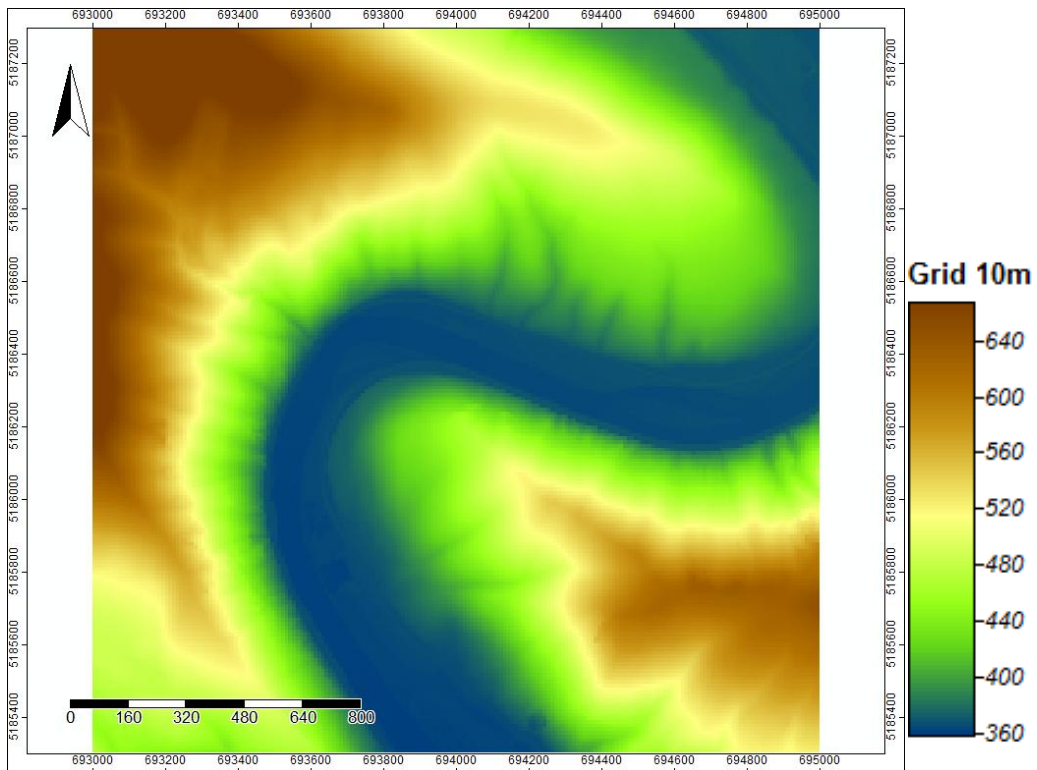
❖ Ψηφιακά Μοντέλα Υψομέτρων



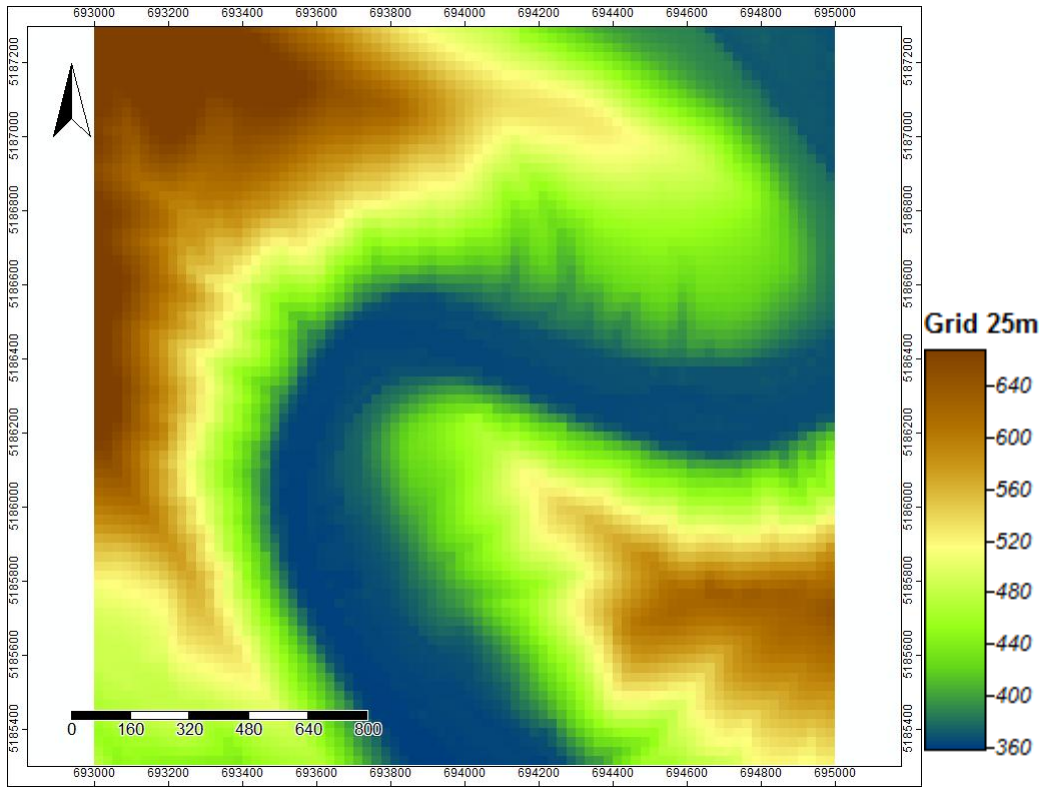
Εικόνα 60: Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων δομής grid 1m



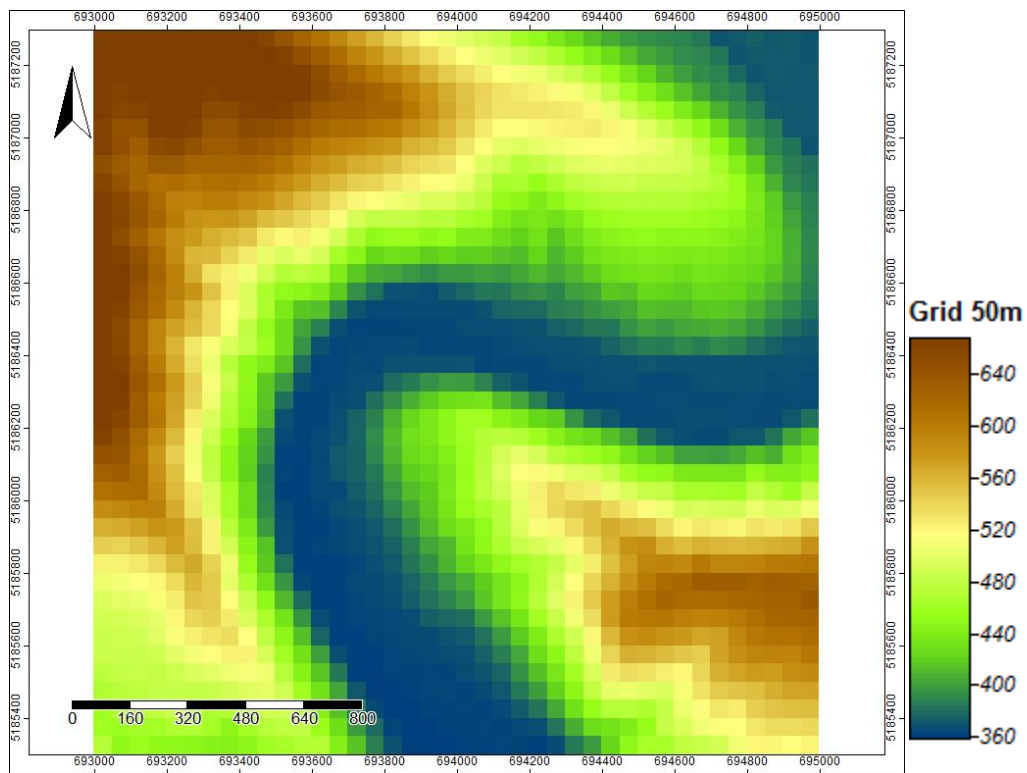
Εικόνα 61: Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων δομής grid 5m



Εικόνα 62: Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων δομής grid 10m

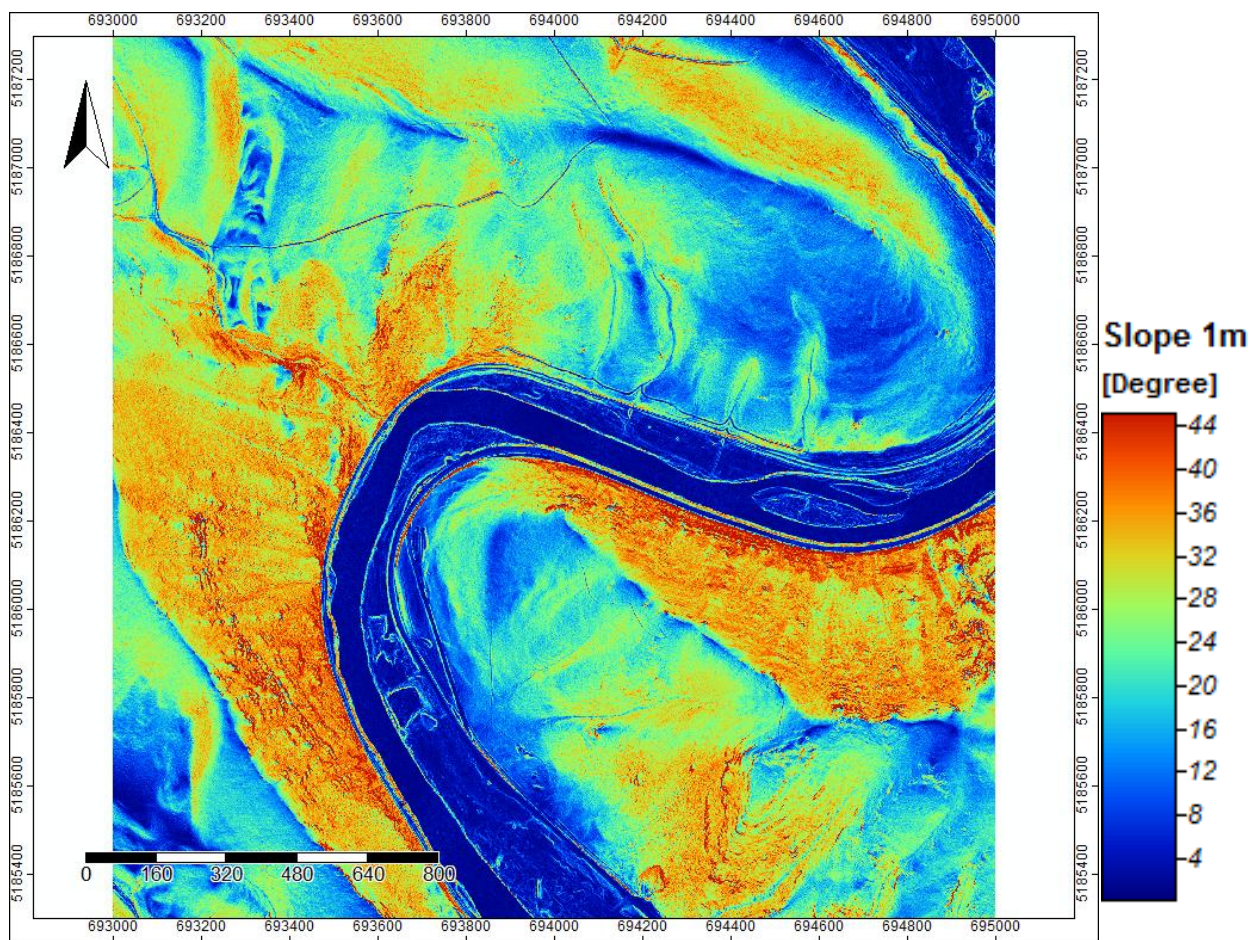


Εικόνα 63: Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων δομής grid 25m

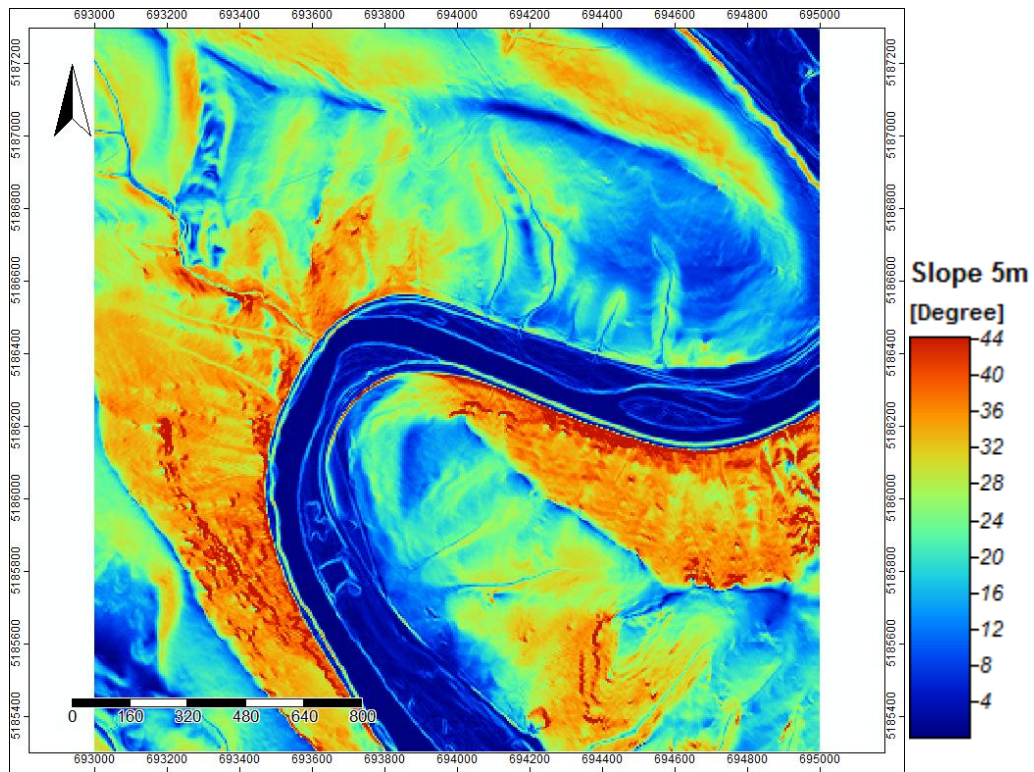


Εικόνα 64: Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων δομής grid 50m

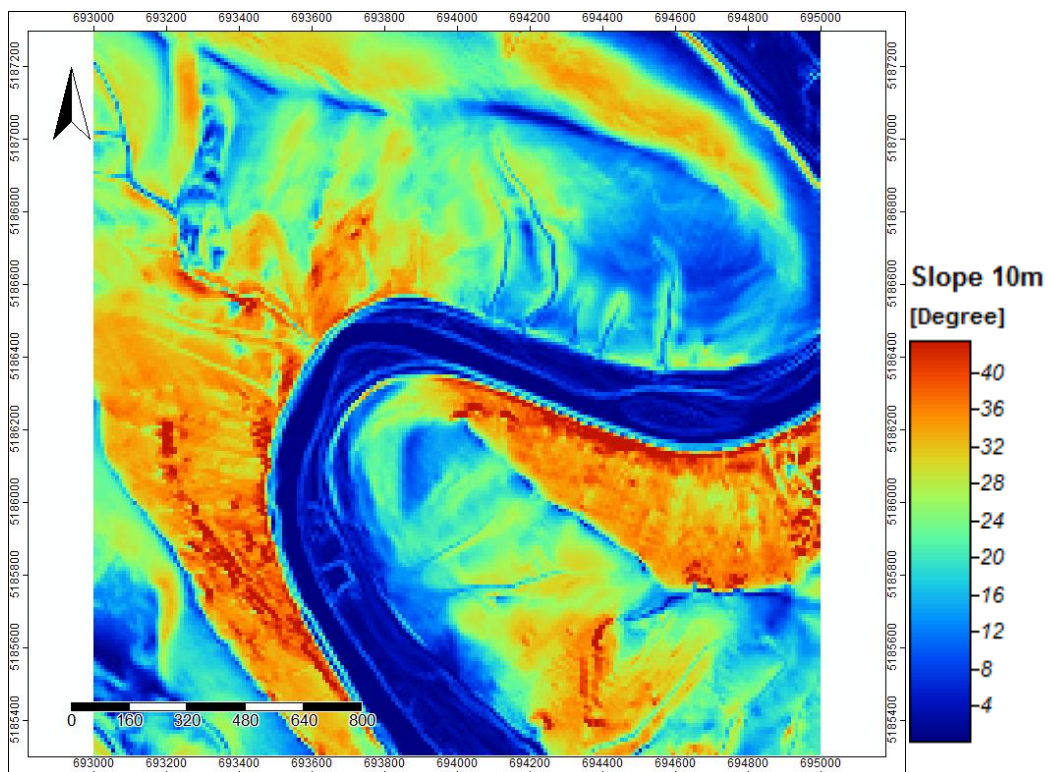
❖ Κλίσεις



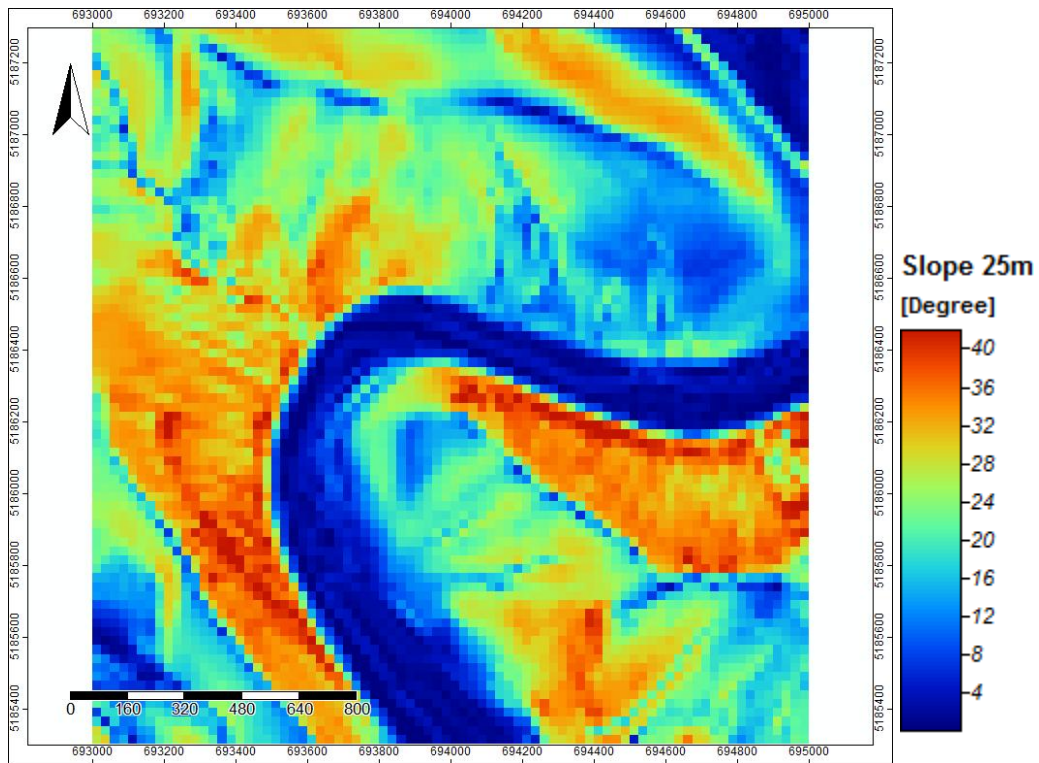
Εικόνα 65: Μοντέλο κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 1m



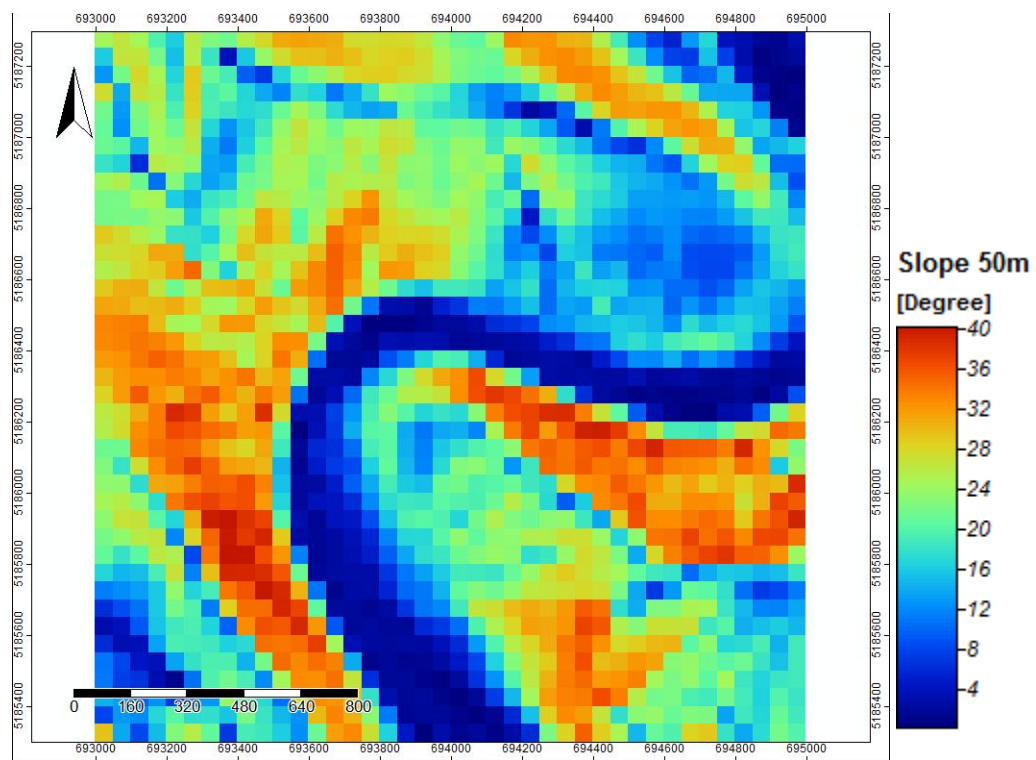
Εικόνα 66: Μοντέλο κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 5m



Εικόνα 67: Μοντέλο κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 10m

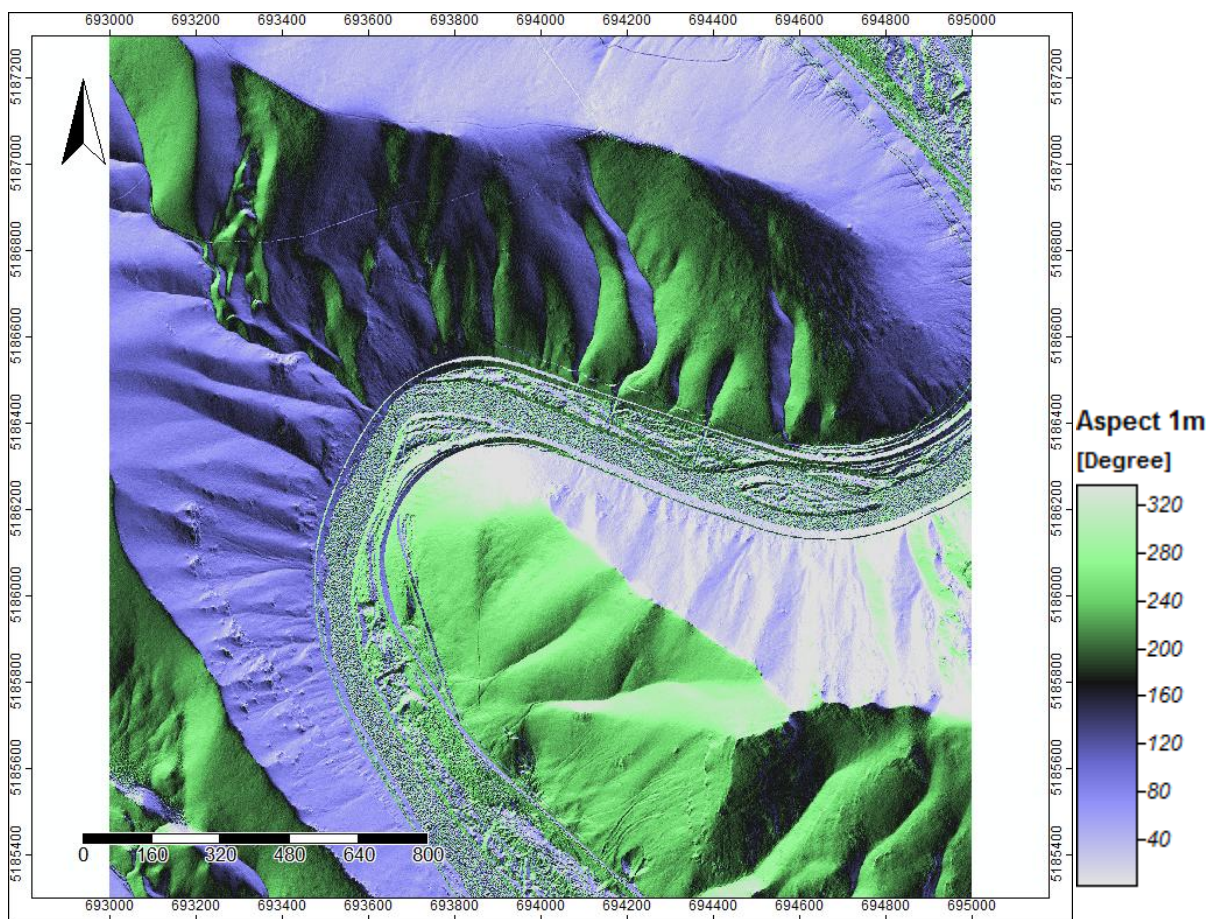


Εικόνα 68: Μοντέλο κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 25m

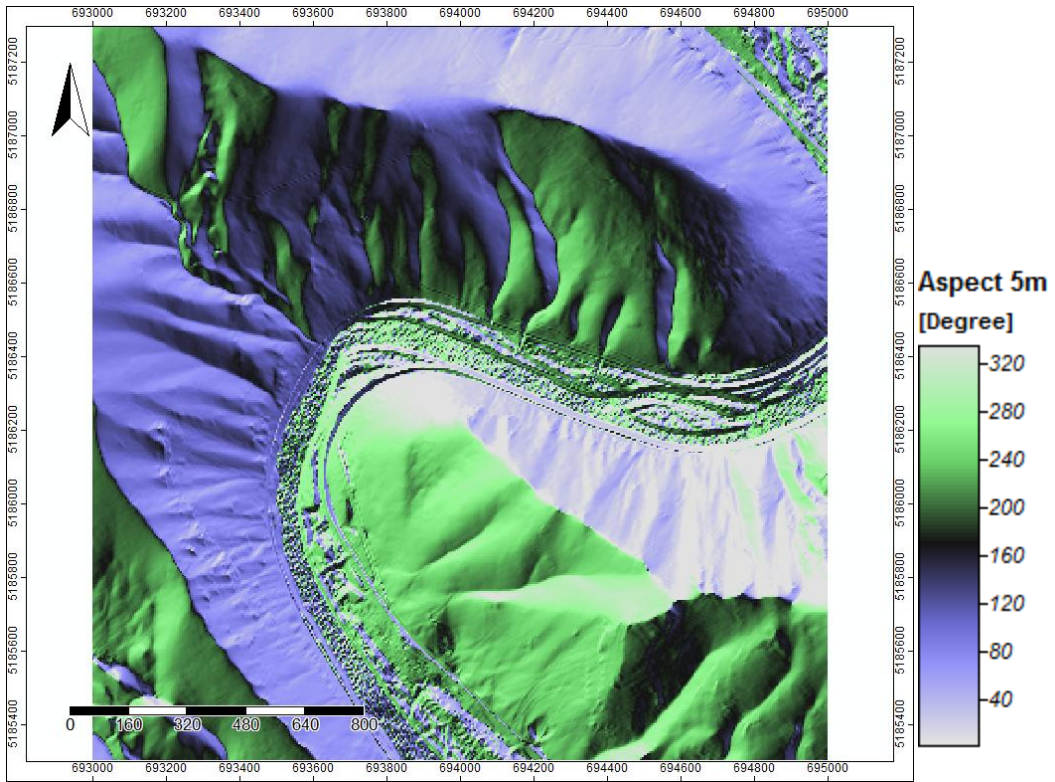


Εικόνα 69: Μοντέλο κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 50m

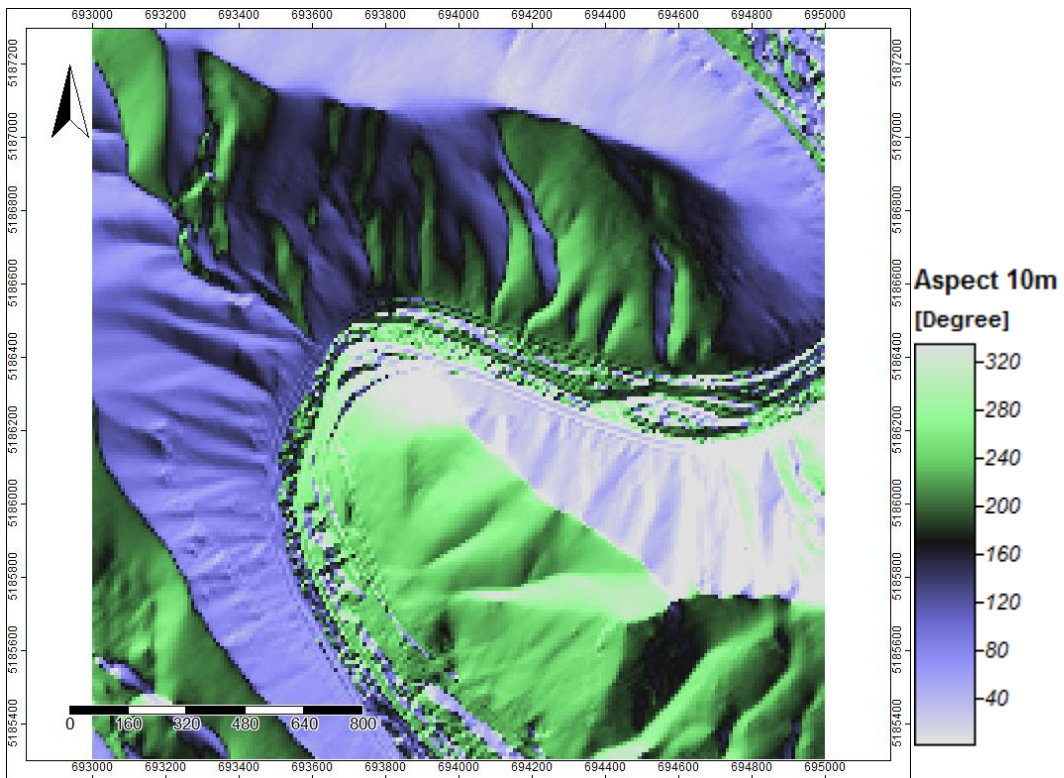
❖ Διευθύνσεις μέγιστης κλίσης



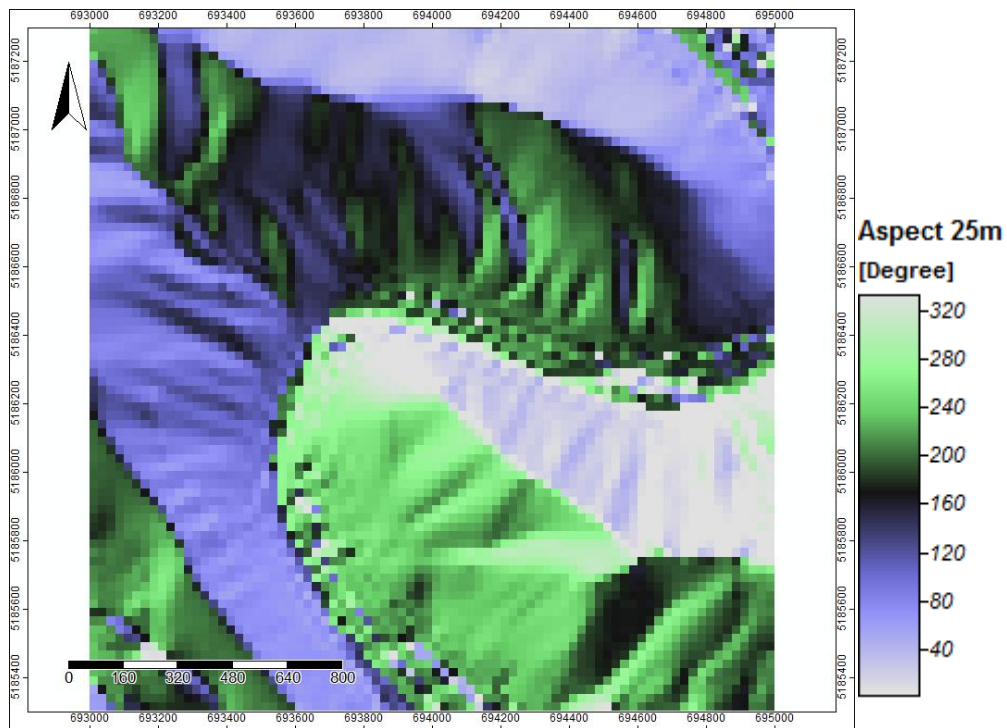
Εικόνα 70: Μοντέλο διεύθυνσης κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 1m



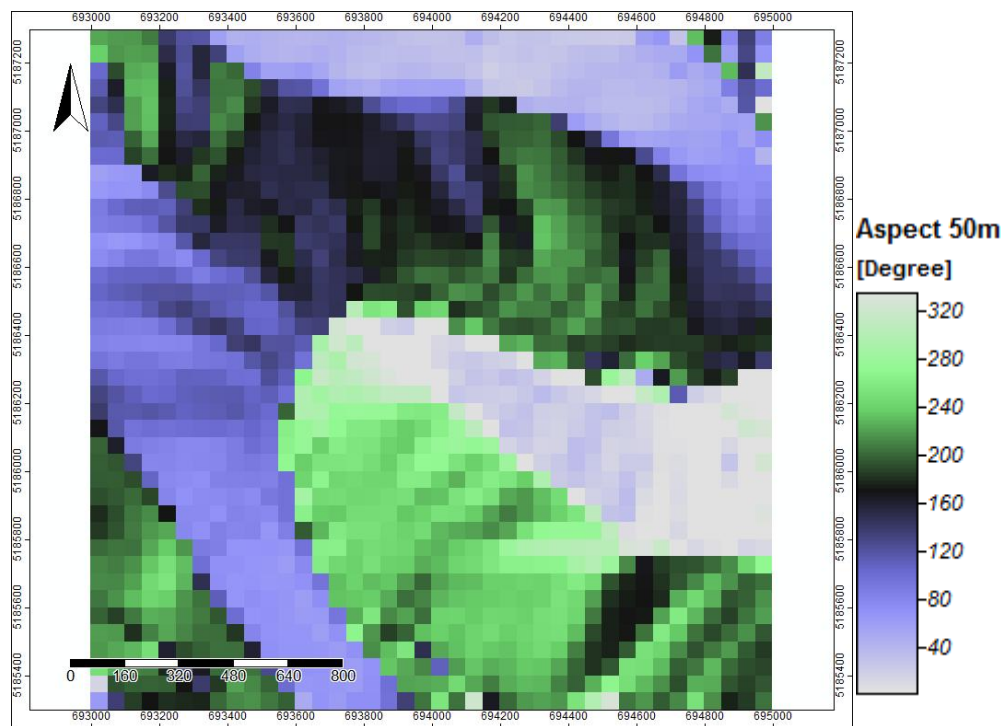
Εικόνα 71: Μοντέλο διεύθυνσης κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 5m



Εικόνα 72: Μοντέλο διεύθυνσης κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 10m

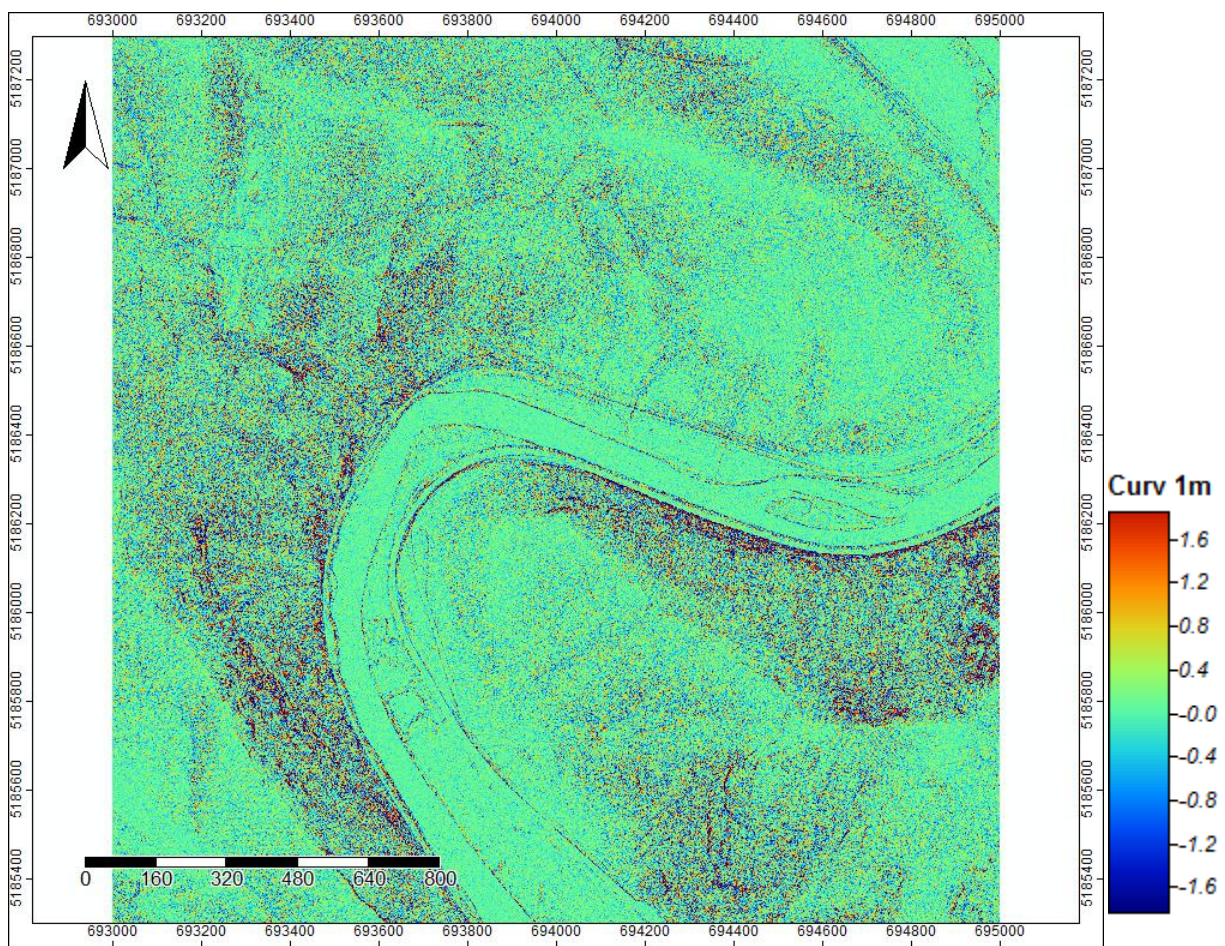


Εικόνα 73: Μοντέλο διεύθυνσης κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 25m

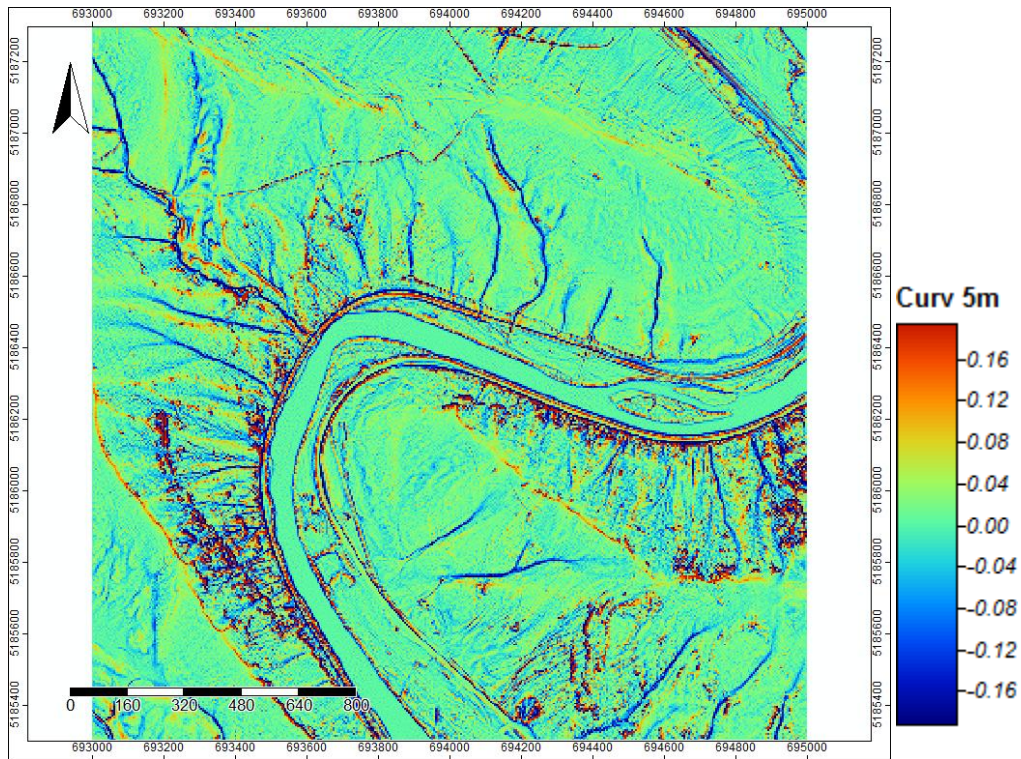


Εικόνα 74: Μοντέλο διεύθυνσης κλίσης δομής grid χωρικής ανάλυσης 50m

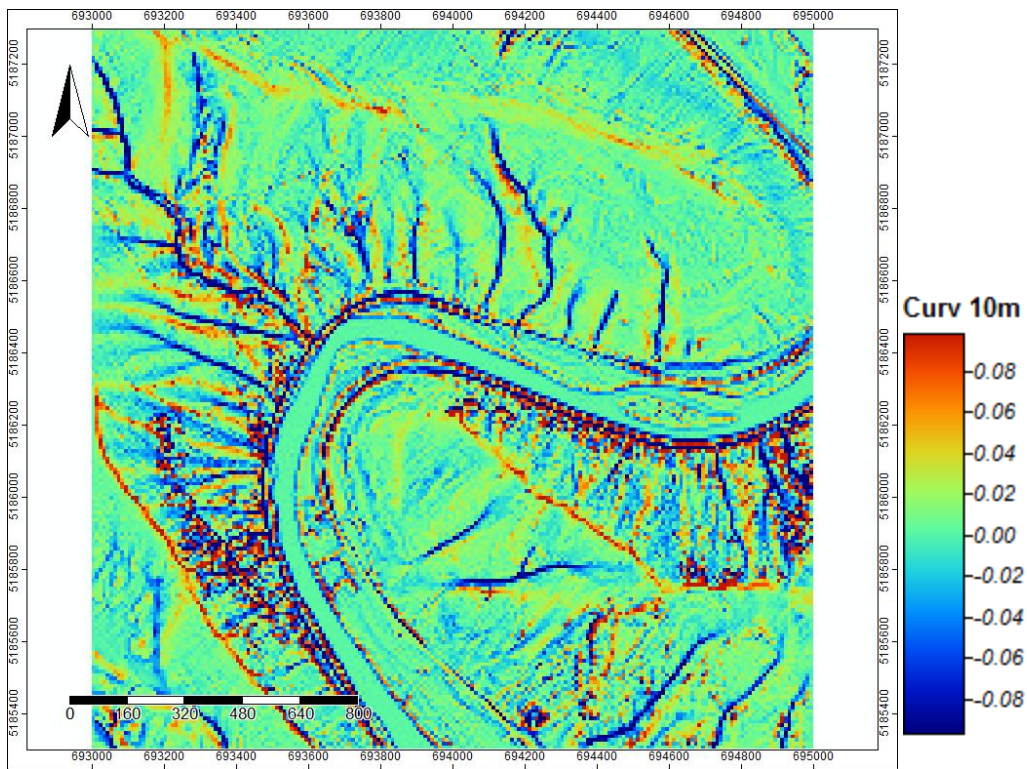
❖ Καμπυλότητες



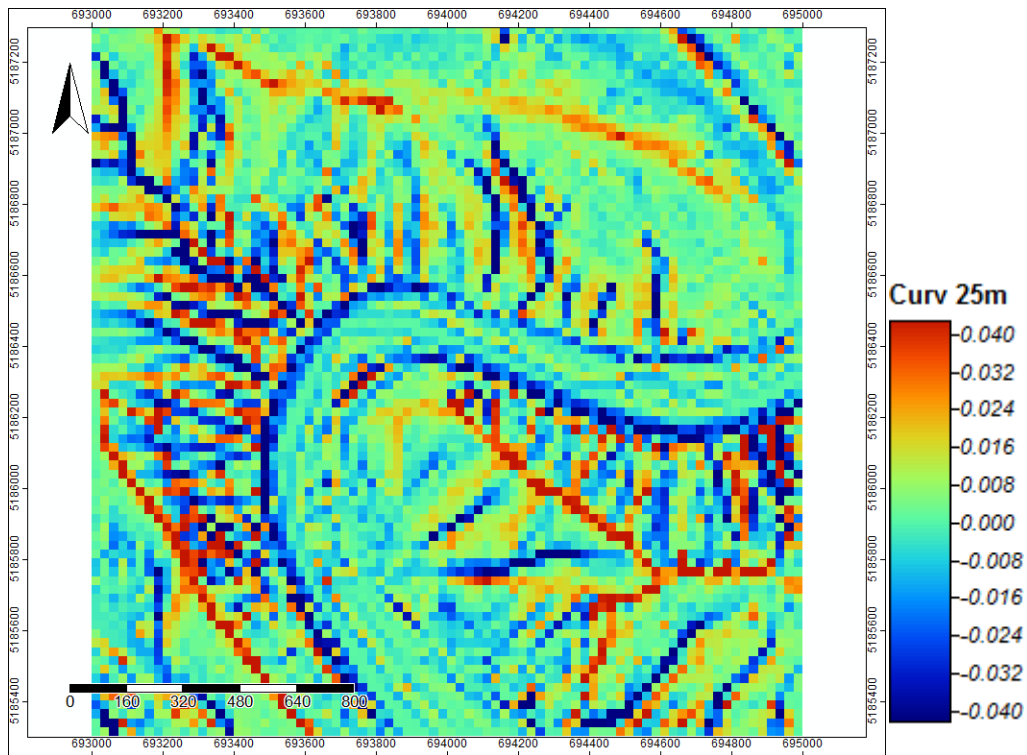
Εικόνα 75: Μοντέλο καμπυλότητας δομής grid χωρικής ανάλυσης 1m



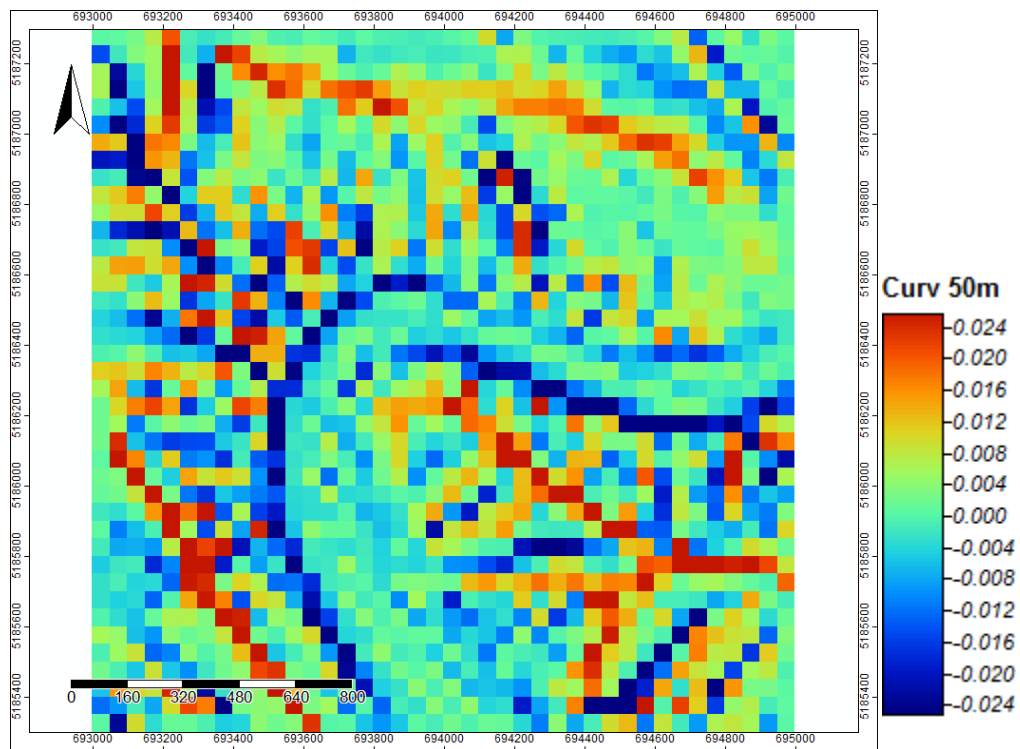
Εικόνα 76: Μοντέλο καμπυλότητας δομής grid χωρικής ανάλυσης 5m



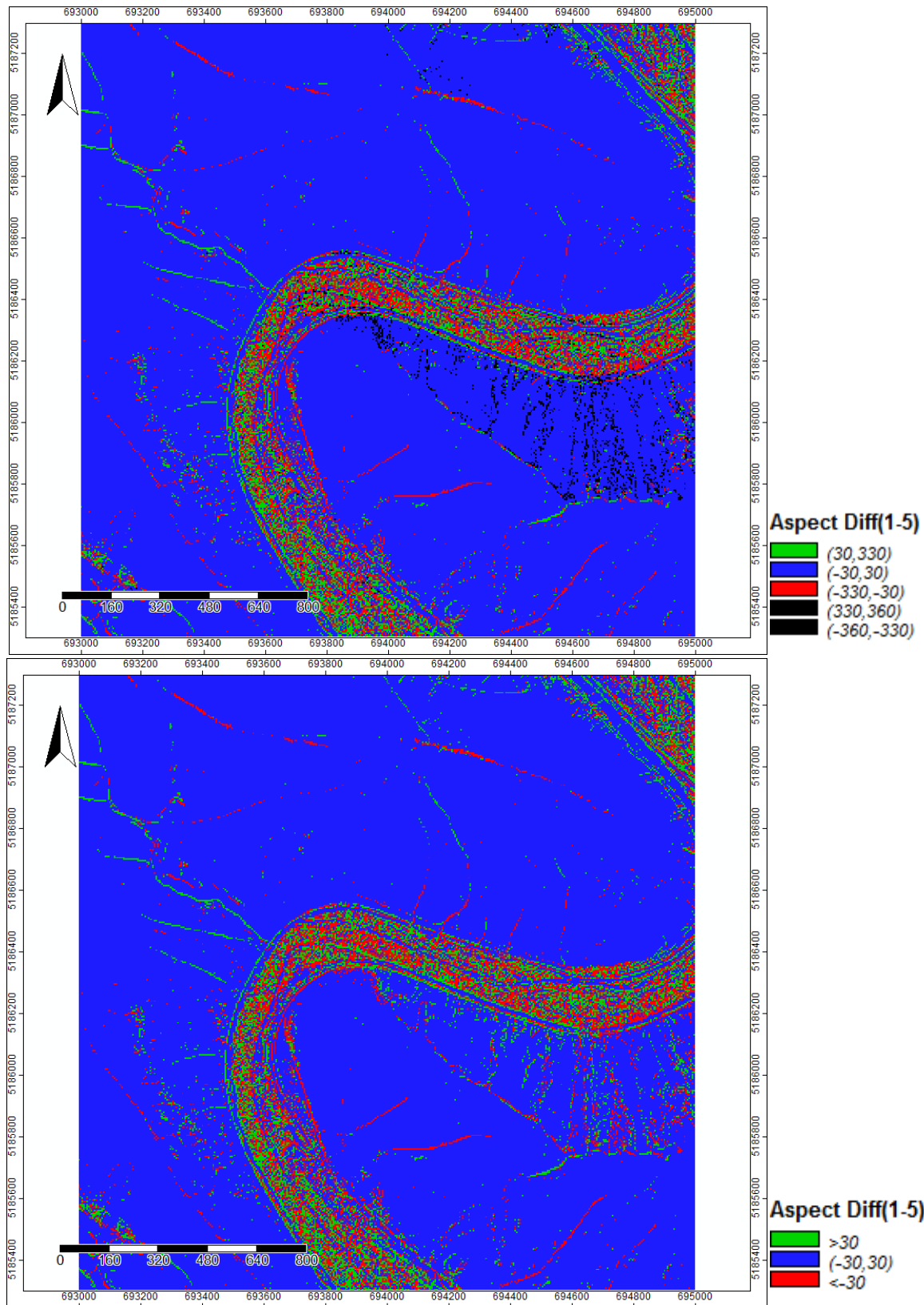
Εικόνα 77: Μοντέλο καμπυλότητας δομής grid χωρικής ανάλυσης 10m



Εικόνα 78: Μοντέλο καμπυλότητας δομής grid χωρικής ανάλυσης 25m



Εικόνα 79: Μοντέλο καμπυλότητας δομής grid χωρικής ανάλυσης 50m



Εικόνα 80: Διαφορές διευθύνσεων μέγιστης κλίσης μοντέλου χωρικής ανάλυσης 5m με το μοντέλο αναφοράς. Στην πρώτη εικόνα με μαύρο χρώμα τονίζονται τα σημεία με τιμή κοντά στις 360°, ενώ στη δεύτερη απεικονίζεται το μοντέλο όπως εξάγεται από το SAGA