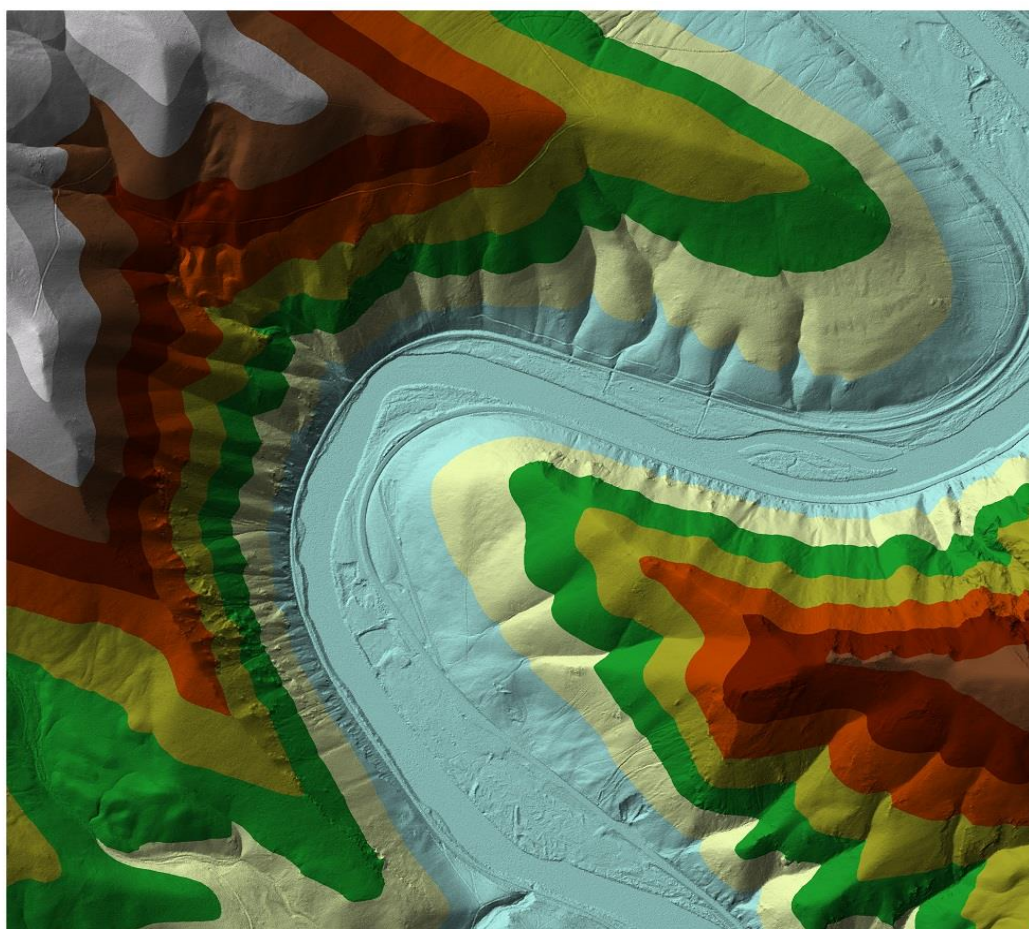




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΟ  
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών  
Τομέας Τοπογραφίας  
Εργαστήριο Χαρτογραφίας

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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΛΑΒΔΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ



Αθήνα, Μάρτιος 2018





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

**Διπλωματική Εργασία**

Λαβδάκης Ιωάννης

ΓΕΩΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ  
ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΔΟΜΗ ΤΙΝ - 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





## **Προλογικό Σημείωμα**

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Βύρωνα Νάκο για την συνεχή καθοδήγηση και στήριξη που μου προσέφερε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να αναφερθώ στις χρήσιμες συμβουλές του κ. Ν. Τζελέπη σε όλες τις δυσκολίες που αντιμετώπισα και στην συνδρομή του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και φίλου Νικολάου Σαρρή, για την θεωρητική αλλά και τεχνική υποστήριξη που προσέφερε σε θέματα προγραμματισμού.

Τέλος, ξεχωριστά θα ήθελα να αναφερθώ στην άριστη συνεργασία με τον συμφοιτητή και φίλο Χαράλαμπο Σαριδάκη σε όλη την διάρκεια της εκπόνησης των διπλωματικών μας εργασιών και στην σημαντική στήριξη που μου προσέφερε.

Λαβδάκης Ιωάννης



## 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 .....	27
1.1. 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 Γιακίμα .....	44
2.3 Φαράγγι ποταμού Γιακίμα .....	47
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....	49
3.1 Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε δομή TIN .....	49
3.1.1 Προσεγγίσεις για την δημιουργία ενός TIN .....	50
3.2 Προεπεξεργασία Ψηφιακού Μοντέλου Υψομέτρων .....	54
3.2.1 Φίλτρο εξομάλυνσης Gauss (Gaussian Filter) .....	54
3.3 Εξαγωγή μορφομετρικών χαρακτηριστικών .....	55
3.3.1 Πρωτεύοντα τοπογραφικά χαρακτηριστικά.....	55

3.3.2 Μέθοδος υπολογισμού τοπογραφικών χαρακτηριστικών .....	58
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ .....	65
4.1. Λογισμικά εφαρμογής.....	65
4.2 Δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων Υψομέτρων από δεδομένα LIDAR σε δομή TIN ..	65
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 εδάφους.....	71
5.1.1. Κλίση .....	71
5.1.2. Διεύθυνση μέγιστης κλίσης .....	74
5.1.3. Καμπυλότητα .....	76
5.2. Επίδραση της χωρικής ανάλυσης των μοντέλων στα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά.....	78
5.2.1. Κλίση .....	78
5.2.2. Διεύθυνση της μέγιστης κλίσης .....	85
5.2.3 Γενική καμπυλότητα .....	92
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	99
6.1. Κλίση .....	100
6.2. Κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης .....	100
6.3. Γενική καμπυλότητα .....	101
6.4. Σύζήτηση – προοπτικές.....	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	103
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1.....	105
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2.....	107

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 1. Η ΓΕΩΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ Η ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΗΣ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ .....	18
ΕΙΚΟΝΑ 2. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΤΗΣ ΓΕΩΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	19
ΕΙΚΟΝΑ 3. ΟΙ ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ .....	20
ΕΙΚΟΝΑ 4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ DEM: Α) SQUARE GRID NETWORK, Β) TRIANGULAR IRREGULAR NETWORK, Γ) CONTOUR BASED NETWORK .....	23
ΕΙΚΟΝΑ 5. ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΩΝ ΤΡΙΓΩΝΩΝ ΤΟΥ TIN ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	24
ΕΙΚΟΝΑ 6. ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΡΙΓΩΝΑ 1) ΣΤΙΣ ΚΟΡΥΦΟΓΡΑΜΜΕΣ ΛΟΓΩ ΕΛΛΕΙΨΗΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΚΛΙΣΗΣ, 2) ΣΤΗΝ ΚΟΡΥΦΗ ΕΝΟΣ ΥΨΩΜΑΤΟΣ ΛΟΓΩ ΕΛΛΕΙΨΗΣ ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ, 3) ΣΤΙΣ ΜΙΣΓΑΓΤΕΙΕΣ ΛΟΓΩ ΕΛΛΕΙΨΗΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΑΛΛΑΓΗΣ ΚΛΙΣΗΣ .....	25
ΕΙΚΟΝΑ 7. Η ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΤΡΙΓΩΝΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΩΝ ΙΣΟΨΩΝ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΚΟΡΥΦΩΝ ΕΠΗΡΕΑΖΕΙ ΤΗ ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΖΩΝΩΝ ΚΑΙ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΚΛΙΣΕΩΝ. ΟΙ ΜΗΔΕΝΙΚΕΣ ΚΛΙΣΕΙΣ ΑΠΟΔΙΔΟΝΤΑΙ ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΗ ΑΠΟΧΡΩΣΗ.....	26
ΕΙΚΟΝΑ 8 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΨΜΥ ΣΕ ΜΟΡΦΗ ΚΑΝΑΒΟΥ. ....	27
ΕΙΚΟΝΑ 9. ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΨΟΜΕΤΡΩΝ ΔΟΜΗΣ GRID.....	29
ΕΙΚΟΝΑ 10. ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΨΟΜΕΤΡΩΝ ΔΟΜΗΣ TIN.....	29
ΕΙΚΟΝΑ 11. ΟΜΑΔΑ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ DEM ΚΑΙ ΟΙ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ. Η ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ DEM ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΕ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ.....	30
ΕΙΚΟΝΑ 12. ΤΟ ΦΑΣΜΑ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ.....	34
ΕΙΚΟΝΑ 13 ΣΗΜΕΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΙΣ ΕΠΙΚΑΛΥΠΤΟΜΕΝΕΣ ΛΩΡΙΔΕΣ.....	38
ΕΙΚΟΝΑ 14 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΙΚΟΝΑ ΑΦΙΛΤΡΑΡΙΣΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	39
ΕΙΚΟΝΑ 15 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΙΚΟΝΑ ΦΙΛΤΡΑΡΙΣΜΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	40
ΕΙΚΟΝΑ 16 ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	41
ΕΙΚΟΝΑ 17: ΧΑΡΤΗΣ ΤΩΝ Η.Π.Α. ΜΕ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	44
ΕΙΚΟΝΑ 18: ΧΑΡΤΗΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΥΑΚΙΜΑ .....	45
ΕΙΚΟΝΑ 19: ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	47
ΕΙΚΟΝΑ 20: ΤΟ ΦΑΡΑΓΓΙ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΥΑΚΙΜΑ .....	48
ΕΙΚΟΝΑ 21. ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ VORONOI ΕΝΟΣ ΣΥΝΟΛΟΥ ΣΗΜΕΙΩΝ (ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ) ΚΑΙ Ο ΤΡΙΓΩΝΙΣΜΟΣ DELAUNAY (ΜΕ ΜΑΥΡΟ).....	50
ΕΙΚΟΝΑ 22 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ TIN.....	51
ΕΙΚΟΝΑ 23 ΤΡΙΓΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΟ ΙΔΙΟ ΣΥΝΟΛΟ ΣΗΜΕΙΩΝ (Α)...	51
ΕΙΚΟΝΑ 24. Η ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΚΕΝΟΥ ΠΕΡΙΓΕΓΡΑΜΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ.....	52
ΕΙΚΟΝΑ 25 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΤΟΠΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΡΙΤΗΡΙΟΥ LOCAL EQUIANGULARITY (Α) ΠΡΙΝ ΚΑΙ (Β) ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΝΑΛΛΑΓΗ ΤΩΝ ΔΙΑΓΩΝΙΩΝ.....	53
ΕΙΚΟΝΑ 26: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ.....	54
ΕΙΚΟΝΑ 27. ΚΛΙΣΗ.....	56
ΕΙΚΟΝΑ 28. ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ.....	56
ΕΙΚΟΝΑ 29. ΓΕΝΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ.....	57
ΕΙΚΟΝΑ 30. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ ZEVENBERGEN & THORNE (1987).....	58
ΕΙΚΟΝΑ 31 ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ (SLOPE) ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ (ASPECT).....	60
ΕΙΚΟΝΑ 32 ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΘΡΟΦΩΝΙΕΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ.....	61
ΕΙΚΟΝΑ 33: ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΚΑΘΕΤΗ ΣΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ, ΘΕΤΙΚΗ, ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΜΗΔΕΝΙΚΗ.....	61
ΕΙΚΟΝΑ 34: ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΠΗΓΗ ESRI.....	62
ΕΙΚΟΝΑ 35: ΓΕΝΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ .....	62
ΕΙΚΟΝΑ 36: ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΚΛΙΣΗΣ .....	63
ΕΙΚΟΝΑ 37: ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΚΑΘΕΤΑ ΣΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΚΛΙΣΗΣ.....	64
ΕΙΚΟΝΑ 38: ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ, Α) ΘΕΤΙΚΗ PLAN CUR, Β) ΑΡΝΗΤΙΚΗ PLAN CUR, Γ) ΘΕΤΙΚΗ PROFILE CUR, Δ) ΑΡΝΗΤΙΚΗ PROFILE CUR.....	64

ΕΙΚΟΝΑ 39: ΟΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΩΝ ΜΕΣΩΝ ΥΨΟΜΕΤΡΩΝ ΩΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	67
ΕΙΚΟΝΑ 40: ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΤΟΥΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	72
ΕΙΚΟΝΑ 41: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΤΟΥΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	73
ΕΙΚΟΝΑ 42: ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΦΑΤΝΙΟΥ .....	75
ΕΙΚΟΝΑ 43: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΦΑΤΝΙΟΥ ..	75
ΕΙΚΟΝΑ 44: ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ .....	77
ΕΙΚΟΝΑ 45: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ .....	77
ΕΙΚΟΝΑ 46: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	79
ΕΙΚΟΝΑ 47: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΩΝ ΚΛΙΣΕΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	79
ΕΙΚΟΝΑ 48: ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 5Μ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	81
ΕΙΚΟΝΑ 49: : ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 10Μ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	82
ΕΙΚΟΝΑ 50: ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 25Μ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	83
ΕΙΚΟΝΑ 51: ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 50Μ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ. ....	84
ΕΙΚΟΝΑ 52: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ. ....	86
ΕΙΚΟΝΑ 53: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ. ....	86
ΕΙΚΟΝΑ 54: ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 5Μ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ. ....	88
ΕΙΚΟΝΑ 55: ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 10Μ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	89
ΕΙΚΟΝΑ 56: ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 25Μ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	90
ΕΙΚΟΝΑ 57: ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 50Μ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	91
ΕΙΚΟΝΑ 58: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ. ....	93
ΕΙΚΟΝΑ 59: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ. ....	93
ΕΙΚΟΝΑ 60: ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 5Μ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	95
ΕΙΚΟΝΑ 61: ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 10Μ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	96
ΕΙΚΟΝΑ 62: ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 25Μ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	97
ΕΙΚΟΝΑ 63: ΟΠΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 50Μ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	98
<i>ΕΙΚΟΝΑ 64: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΨΟΜΕΤΡΩΝ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 1Μ.....</i>	<i>107</i>
ΕΙΚΟΝΑ 65: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΨΟΜΕΤΡΩΝ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 5Μ.....	108
ΕΙΚΟΝΑ 66: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΨΟΜΕΤΡΩΝ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 10Μ.....	108
ΕΙΚΟΝΑ 67: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΨΟΜΕΤΡΩΝ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 25Μ.....	109
ΕΙΚΟΝΑ 68: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΨΟΜΕΤΡΩΝ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 50Μ.....	109
ΕΙΚΟΝΑ 69: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΛΙΣΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 1Μ .....	110

ΕΙΚΟΝΑ 70: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΛΙΣΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 5Μ .....	111
ΕΙΚΟΝΑ 71: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΛΙΣΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 10Μ .....	111
ΕΙΚΟΝΑ 72: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΛΙΣΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 25Μ .....	112
ΕΙΚΟΝΑ 73: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΛΙΣΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 50Μ .....	112
ΕΙΚΟΝΑ 74: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 1Μ .....	113
ΕΙΚΟΝΑ 75: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 5Μ .....	114
ΕΙΚΟΝΑ 76: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 10Μ .....	114
ΕΙΚΟΝΑ 77: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 25Μ .....	115
ΕΙΚΟΝΑ 78: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 5Μ .....	115
ΕΙΚΟΝΑ 79: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 1Μ.....	116
ΕΙΚΟΝΑ 80: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 5Μ.....	117
ΕΙΚΟΝΑ 81: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 10Μ.....	117
ΕΙΚΟΝΑ 82: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 25Μ.....	118
ΕΙΚΟΝΑ 83: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΝΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ ΔΟΜΗΣ ΤΙΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 50Μ.....	118
ΕΙΚΟΝΑ 84: Η ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ. ΜΕ ΠΡΑΣΙΝΟ ΚΑΙ ΜΑΥΡΟ ΧΡΩΜΑ ΦΑΙΝΟΝΤΑΙ ΤΑ ΚΕΛΙΑ ΣΤΟ ΟΠΟΙΑ ΟΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΕΙΝΑΙ ΜΙΚΡΟΤΕΡΕΣ ΤΩΝ 30 <sup>0</sup> . .....	119

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΜΕΣΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΚΑΘΕ ΨΜΥ ΚΑΙ Η ΔΙΑΦΟΡΑ ΤΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΛΙΣΗΣ .....	71
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΧΑΜΗΛΟΤΕΡΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	73
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ .....	74
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ .....	76
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΜΕ ΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΨΜΥ .....	78
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	85
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΚΑΙ ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ .....	92



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τοπογραφία του εδάφους διαδραματίζει σημαντικό ρόλο σε πολλούς τομείς που σχετίζονται με την μορφολογία της φυσικής γήινης επιφάνειας. Πλέον η αυτοματοποιημένη εξαγωγή των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών από Ψηφιακά Μοντέλα Υψομέτρων, είναι ευρέως διαδεδομένη και αναγνωρίζεται ως μια από τις πλέον επιτυχημένες εναλλακτικές λύσεις σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους μετρήσεων. Ο λόγος είναι η αυξημένη ποιότητα και πυκνότητα κάλυψης που παρέχουν. Ιδίως μετά την ανάπτυξη της τεχνικής LiDAR, η οποία επιτρέπει την λήψη νεφών σημείων πολύ μεγάλης πυκνότητας, υψηλής οριζοντιογραφικής και υψομετρικής ακρίβειας σε μικρό χρονικά διάστημα και σε περιοχές που άλλες τεχνικές αποτυγχάνουν ή απαιτούν πολύ χρόνο και χρήμα, η μέθοδος της εξαγωγής πληροφοριών από Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους έχει γίνει ιδιαίτερα ανταγωνιστική. Στην παρούσα διπλωματική θα γίνει προσπάθεια να αξιολογηθούν οι δυνατότητες και οι περιορισμοί των Ψ.Μ.Υ. που προέρχονται από δεδομένα LiDAR στην εξαγωγή γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται σύγκριση μίας σειράς Ψ.Μ.Υ. δομής ακανόνιστων τριγωνικών δικτύων, διαφόρων χωρικών αναλύσεων με ένα Ψ.Μ.Υ. αναφοράς δομής τετραγωνικού κανάβου υψηλής ανάλυσης, με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της κλίμακας στην εξαγωγή των πρωτεύοντων τοπογραφικών χαρακτηριστικών.

## ABSTRACT

Soil topography plays an important role in many areas related to the morphology of the natural earth surface. Nowadays, the automated extraction of geomorphometric features from Digital Terrain Models is widespread and recognized as one of the most successful alternatives to traditional measurement methods. The main reason is the increased quality and density of coverage they provide. Especially after the development of the LiDAR technique, which allows to obtain point clouds with very high point density, high horizontal and altitude accuracy over a short period of time and in areas where other techniques fail or require a lot of time and money, the method of extracting geomorphometric information from Digital Terrain Models has become highly competitive. In this diploma thesis, an attempt will be made to evaluate the capabilities and constraints of D.T.Ms. derived from LiDAR data in the extraction of geomorphometric features. More specifically, a series of various spatial resolution TIN DTMs, is compared with a base high resolution Grid DTM, in order to study the effect of the scale on the extraction 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 εφαρμογές. 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, στην περιοχή Γιάκιμα και η οποία διαρρέεται από το ομώνυμο ποτάμι. Η πρωτογενής πληροφορία για την δημιουργία των Ψ.Μ.Ε. προέρχεται από δεδομένα LiDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging), τα οποία αποδίδουν με υψηλή ακρίβεια την μορφολογία της Φυσικής Γήινης Επιφάνειας και τα οποία μειώνουν τους φυσικούς και τους 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. Ακολούθως, 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 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 ως προς κάθε γεωμορφομετρικό χαρακτηριστικό και καταγράφονται κάποιες σκέψεις και προτάσεις ως προς την φύση της εργασίας.



## 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

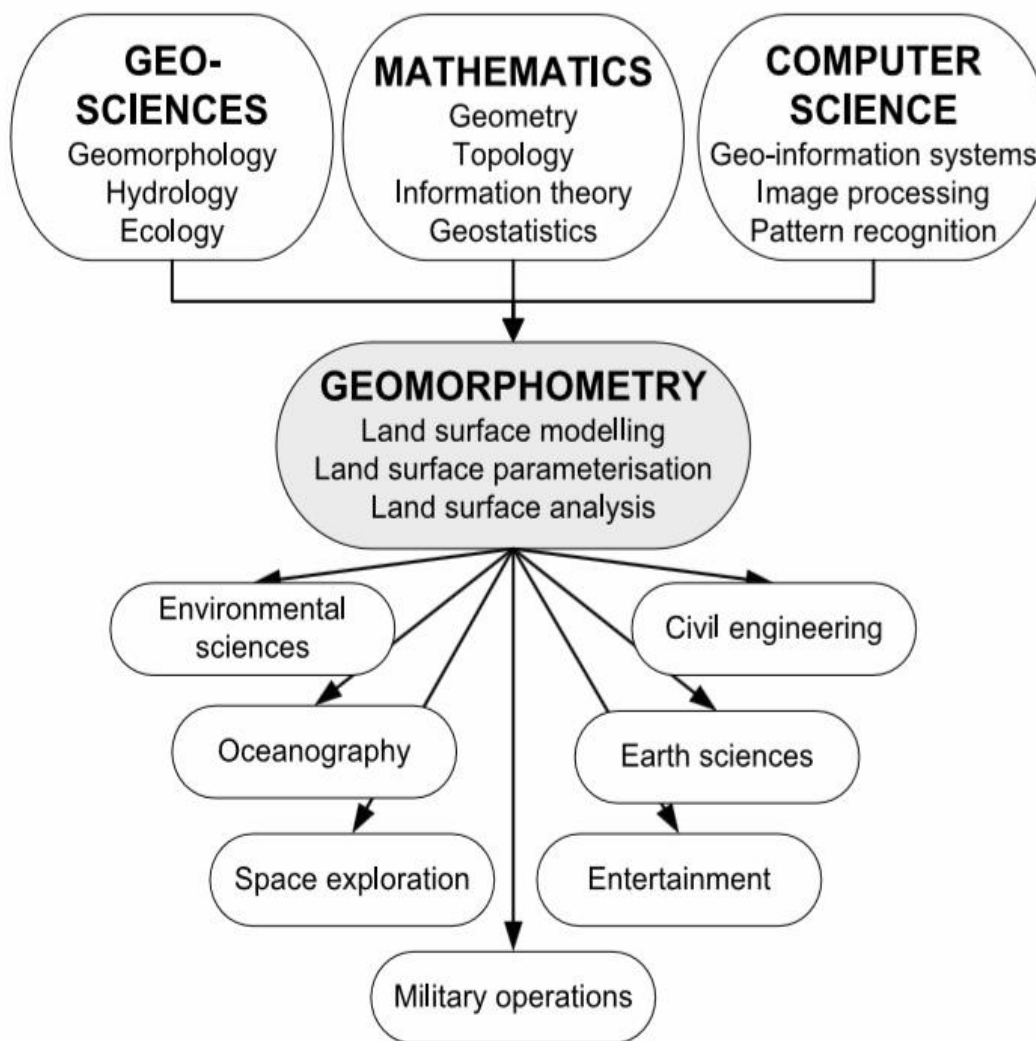
Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο σημαντικών θεμάτων της διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα θα αναλυθεί η ευρύτερη έννοια της γεωμορφομετρίας, του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και της εξέλιξης του με την πάροδο του χρόνου. Επίσης θα μελετηθούν οι βασικές δομές αναπαράστασης και θα αναπτυχθεί ο τρόπος λήψης δεδομένων για την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους με εκτενέστερη αναφορά στα δεδομένα LIDAR τα οποία 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 (R. Pike 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, τα οποία κυμαίνονται 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 (R. E. Pike 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.



εικόνα 1. Η γεωμορφομετρία και η σύνδεση της με άλλες επιστημονικές εφαρμογές

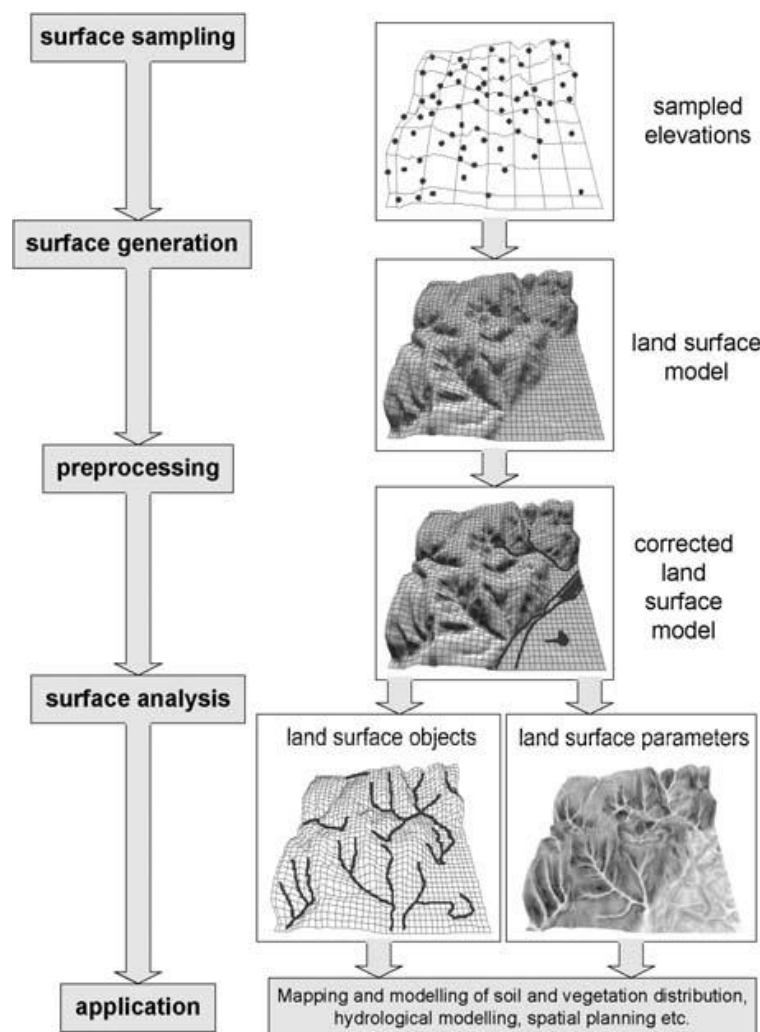
Πηγή: (R. E. Pike 2009).

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 σε 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 αναγλύφου κτλ.). Στην παρούσα εργασία θα γίνει μελέτη μόνο των πρωτευόντων τοπογραφικών χαρακτηριστικών και την επίδραση που έχει η χωρική ανάλυση σε αυτά.



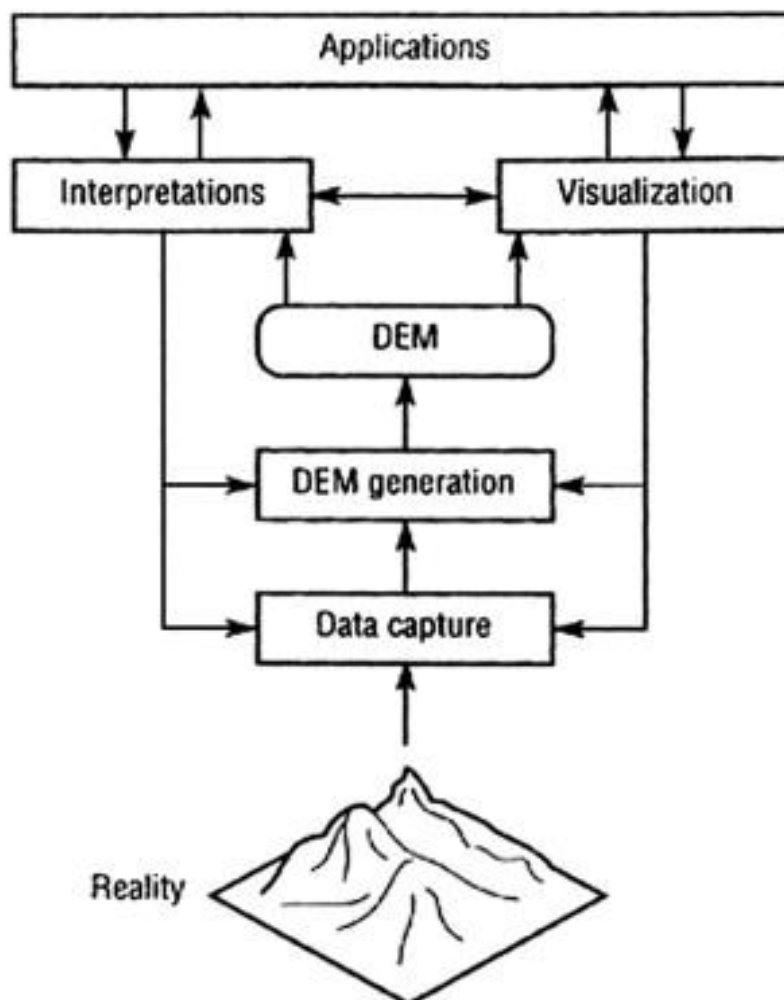
εικόνα 2. Διαγραμματική απεικόνιση των σταδίων της γεωμορφομετρικής ανάλυσης.

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 ισοϋψών 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 (Λ. Τσούλος 2008).

Οι περισσότερες εφαρμογές της γεωμορφομετρίας βασίζονται στα ψηφιακά μοντέλα εδάφους για την αναπαράσταση της γήινης επιφάνειας και σταθερά οι τεχνικές της τοπογραφικής ανάλυσης και οπτικοποίησης εξελίσσονται. 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 πλημμυρών 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 και δορυφορικών εικόνων, συστήματα LiDAR 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 τις αξίες γης και για άλλα χαρακτηριστικά της περιοχής που απεικονίζει.

Έτσι, ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους αποδίδει την κατανομή της χωρικής πληροφορίας από ένα καθορισμένο σύνολο σημειακών δεδομένων και με τον τρόπο αυτό 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 (R. E. Pike 2009).

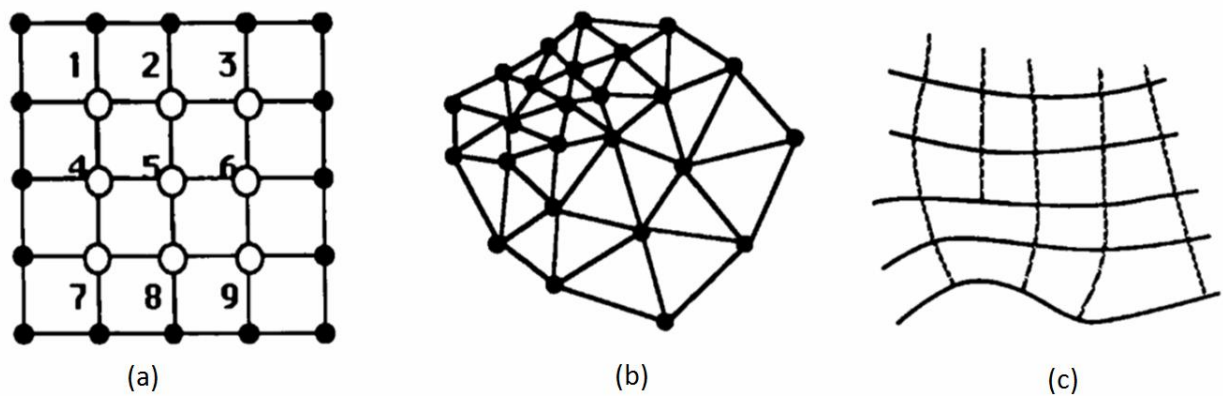
Το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων (Digital Elevation Model) (ΨΜΥ) (DEM) είναι μια διατεταγμένη σειρά αριθμών, που αναπαριστά την χωρική κατανομή των υψομέτρων, τα οποία αναφέρονται σε ένα σύστημα αναφοράς. Αποτελεί ένα υποσύνολο των ψηφιακών μοντέλων εδάφους, τα οποία αναπαριστούν διάφορα χαρακτηριστικά της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

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 (R. E. Pike 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)



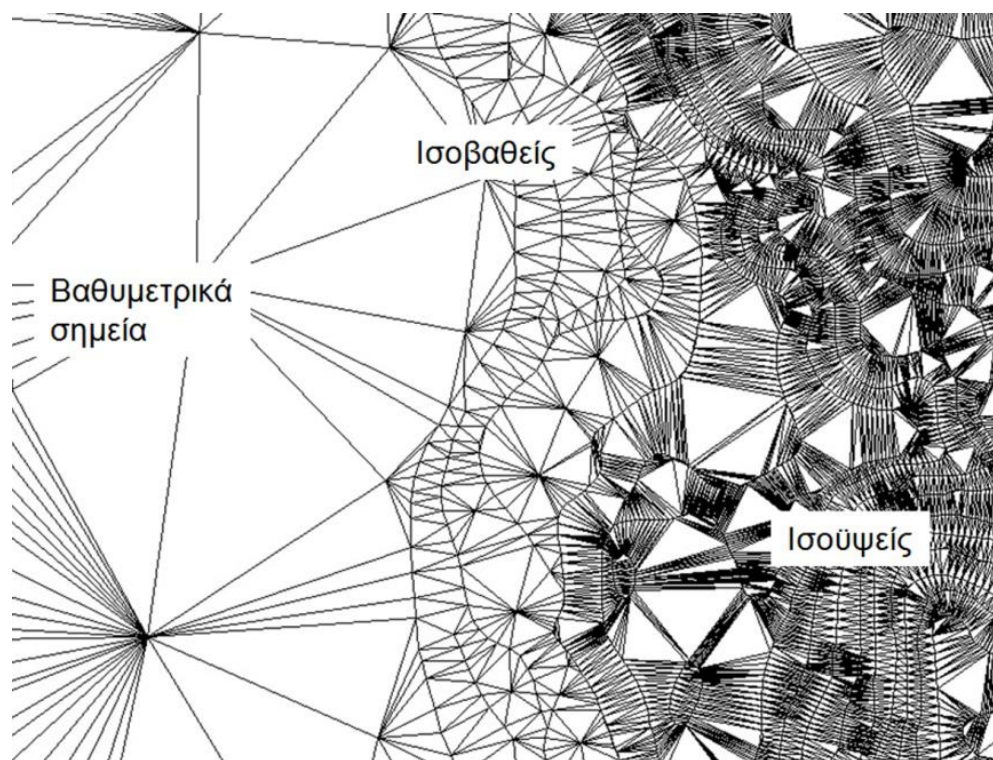
εικόνα 4. Μέθοδοι δημιουργίας DEM: a) square grid network, b) triangular irregular network, c) contour based network

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 (Λ. Τσούλος 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 ισοϋψείς 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. (Λ. Σ. Τσούλος 2015)



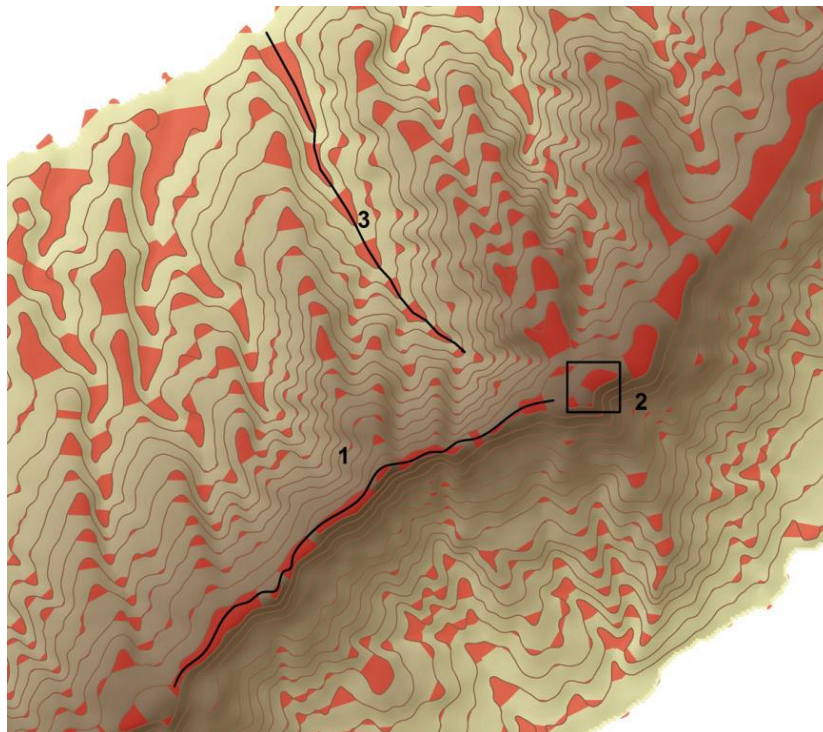
εικόνα 5. Το μέγεθος των τριγώνων του TIN σε σχέση με την πυκνότητα των δεδομένων.

Πηγή: (Λ. Σ. Τσούλος 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):

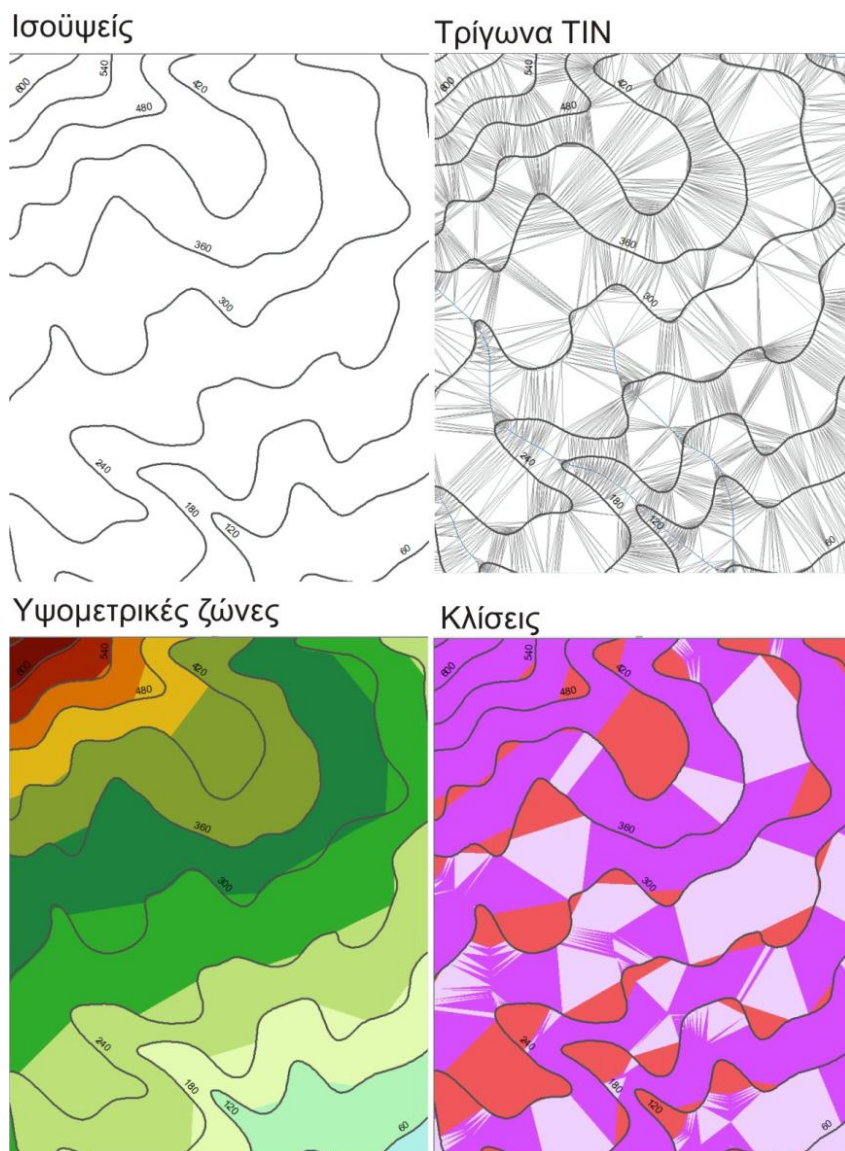
- Η εμφάνιση επίπεδων τριγώνων κατά μήκος των ισοϋψών καμπυλών, προκύπτει όταν και οι τρεις κορυφές του τριγώνου ανήκουν στην ίδια ισοϋψή. Αντιμετωπίζεται με την απαλοιφή ορισμένων κορυφών με την εφαρμογή ενός αλγόριθμου απλοποίησης των γραμμών. Η ύπαρξη τέτοιων τριγώνων επηρεάζει τον σωστό σχεδιασμό υψομετρικών ζωνών και τον υπολογισμό των κλίσεων.
- Η εμφάνιση τους στην περιοχή τοπικών ακροτάτων 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: (Α. Σ. Τσούλος 2015)





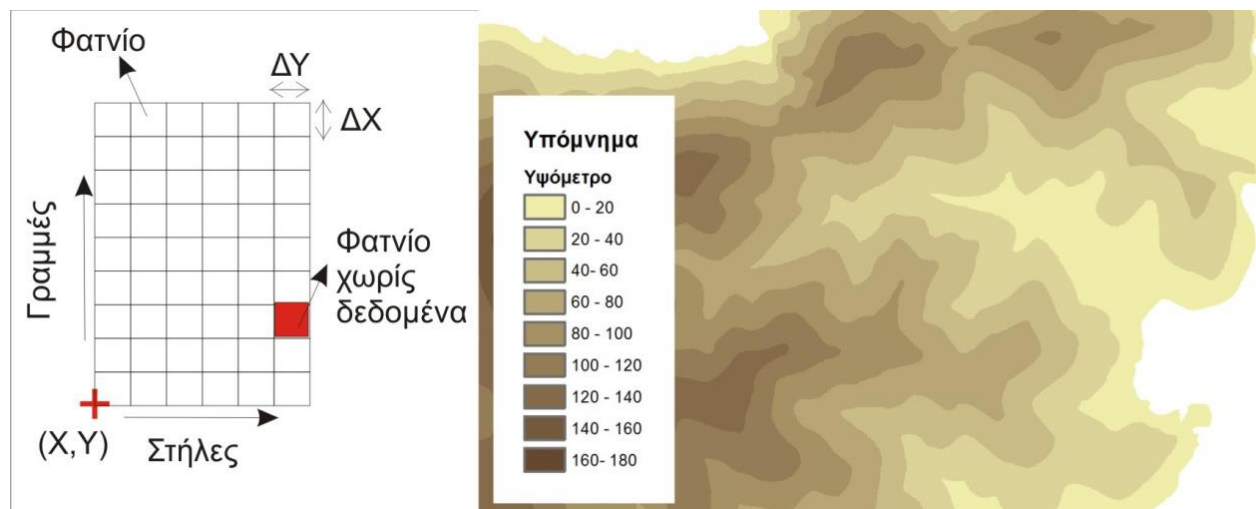
εικόνα 7. Η δημιουργία επιπέδων τριγώνων κατά μήκος των ισοϋψών λόγω της μεγάλης πυκνότητας των κορυφών επηρεάζει τη μορφή των υψομετρικών ζωνών και τον υπολογισμό των κλίσεων. Οι μηδενικές κλίσεις αποδίδονται με κόκκινη απόχρωση.

Πηγή: (Α. Σ. Τσούλος 2015)

Σε ένα TIN ο εντοπισμός των επιπέδων 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 (Α. Σ. Τσούλος 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 υψομέτρου σε σημεία που δεν υπάρχει υψομετρική πληροφορία 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 αναγλύφου 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 (Λ. Τσούλος 2008).



εικόνα 8 Παράδειγμα ΨΜΥ σε μορφή κανάβου.

Πηγή: (Λ. Σ. Τσούλος 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 εύρηστη 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 βαράθρων και εξογκωμάτων (βραχονησίδων, κλπ.)

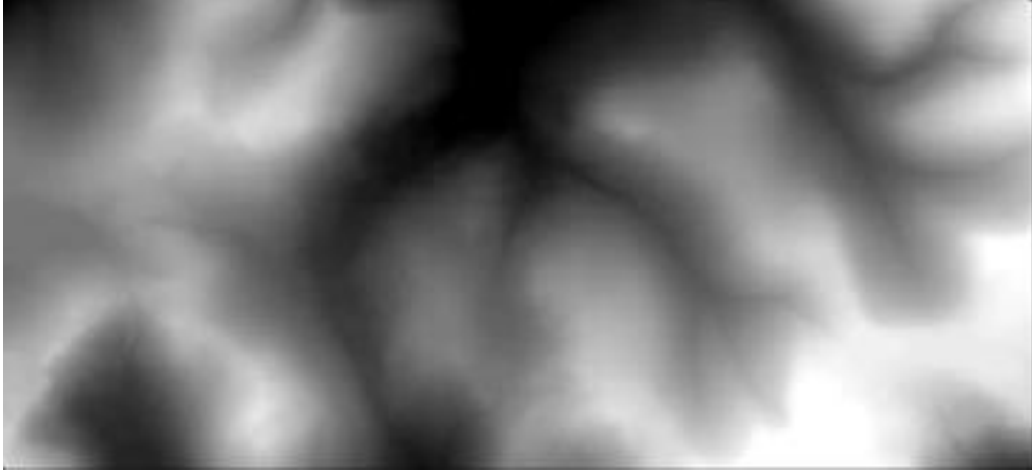
#### Πλεονεκτήματα της δομής ακανόνιστων τριγώνων

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

#### Μειονεκτήματα της δομής ακανόνιστων τριγώνων

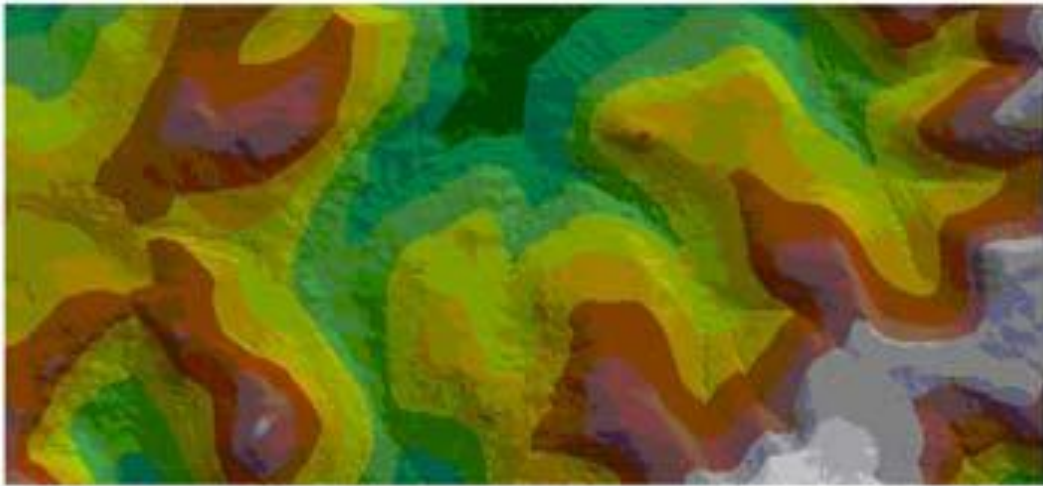
- Μπορεί να εισάγει μια τριγωνική διακριτικότητα η οποία να παρεμποδίζει ορισμένες μορφές χωρικής ανάλυσης
- Δεν έχουν ακόμα αναπτυχθεί αλγόριθμοι για την δημιουργία παράγωγων μοντέλων από τα ψηφιακά μοντέλα υψομέτρων (καμπυλοτήτων κ.α.) .





*εικόνα 9. Ψηφιακό Μοντέλο υψομέτρων δομής GRID.*

*Πηγή: (Cadell 2002)*

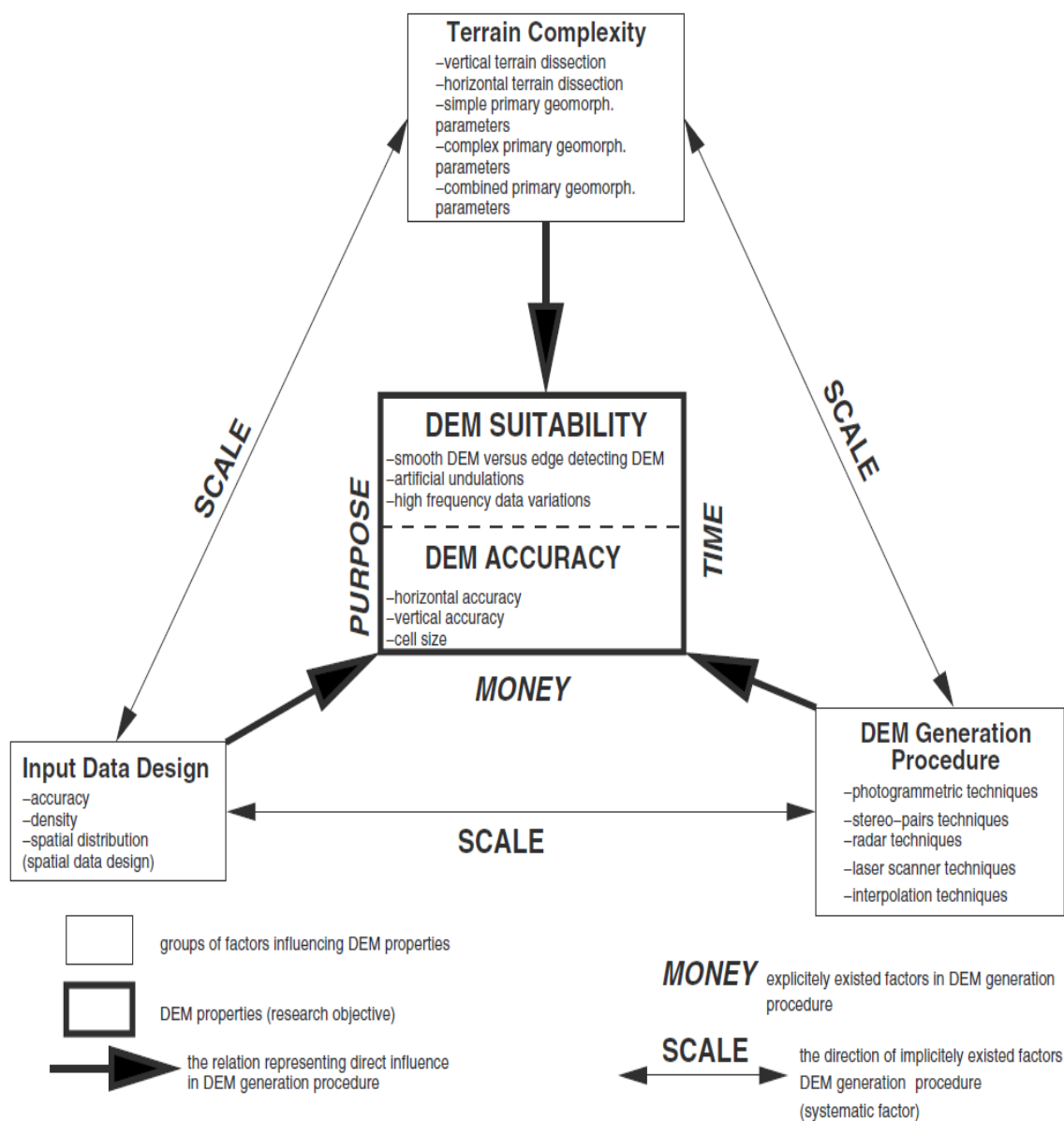


*εικόνα 10. Ψηφιακό Μοντέλο υψομέτρων δομής TIN.*

*Πηγή: (Cadell 2002)*

### 1.1. 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 καταλληλότητάς 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 καταλληλότητάς του.

Επιπρόσθετα, η ποιότητα του ψηφιακού μοντέλου υψομέτρων δεν επηρεάζεται μόνο από τις τιμές των παραμέτρων, αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο αυτές 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.

Στην 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 ισούψεις (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 εξομαλυσμένα 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 γίνεται αναπαράσταση
- 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 είναι 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 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:

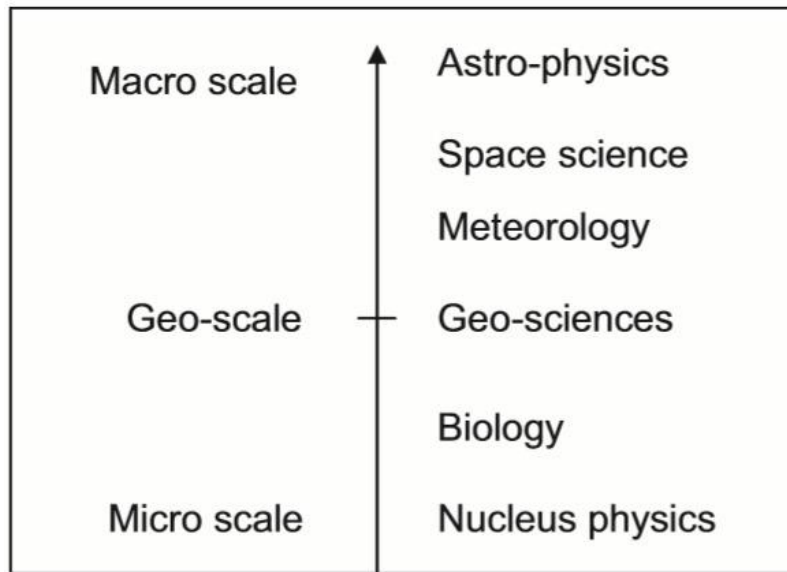
- Από σφάλματα στα υλικά που συμμετέχουν στις μετρήσεις (π.χ. σφάλματα των αεροφωτογραφιών που οφείλονται στην διαστροφή του φακού της κάμερας λήψης)
- Από τα σφάλματα των μετρητικών οργάνων που χρησιμοποιούνται για την λήψη των δεδομένων
- Από τα ανθρώπινα λάθη που υπεισέρχονται στην διαδικασία λήψης των δεδομένων
- Από 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 στα 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 μέτρησης 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 (Λ. Τσούλος 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 ένας 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 είναι υπερβολικά ακριβή 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 της γήινης επιφάνειας, από αντικείμενα που βρίσκονται πάνω από αυτή (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 αναφέρθηκε παραπάνω, 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

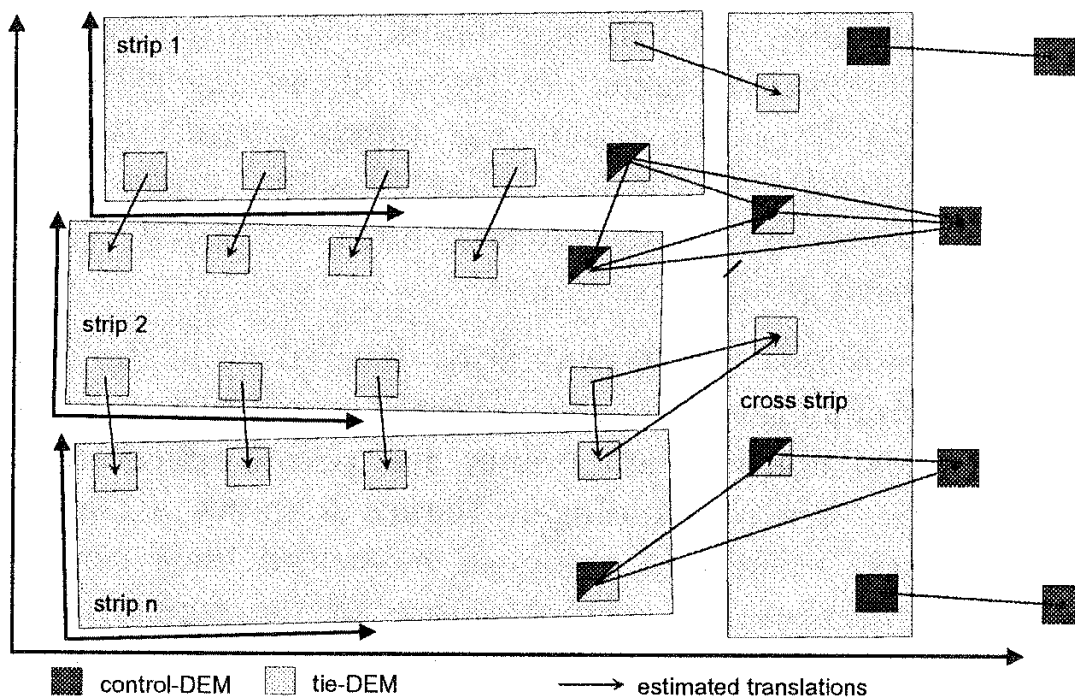
Κατά την προ επεξεργασία, λαμβάνονται οι επίπεδες συντεταγμένες από τα μη επεξεργασμένα σημεία που παρέχονται από τον σαρωτή laser και τους αισθητήρες προσανατολισμού. Οι μετρήσεις από τους διάφορους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται πρέπει να συγχρονιστούν ώστε να καθοριστεί η θέση κάθε μέτρησης. Ακολούθως 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

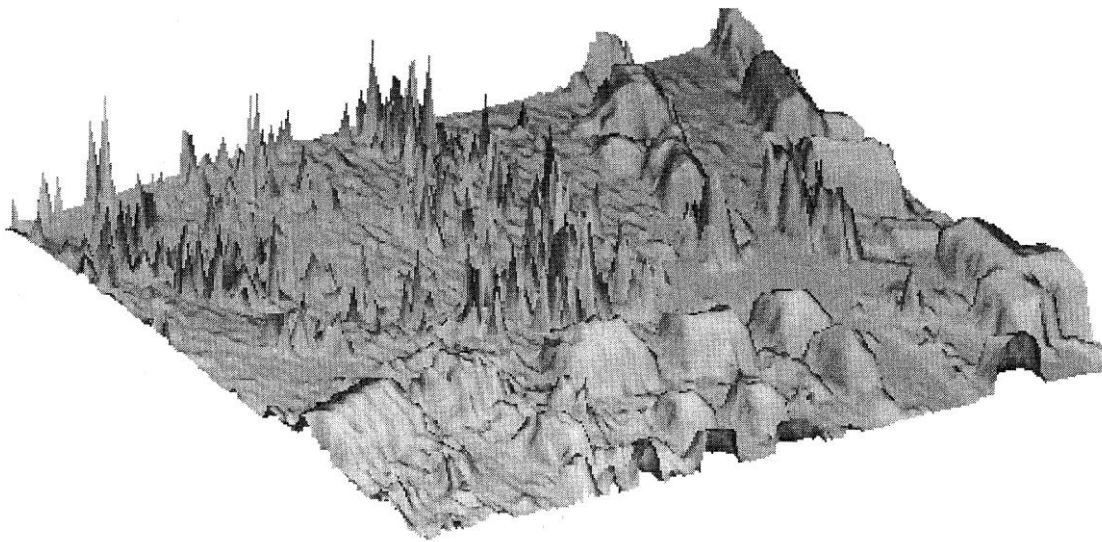
Ειδικά σε δασικές περιοχές και περιοχές με πυκνή δόμηση τα συστήματα ALS υπερέχουν των υπόλοιπων μεθόδων για την λήψη τρισδιάστατων δεδομένων. Σε περιοχές με βλάστηση, σε κάθε εκπεμπόμενο παλμό laser μια συγκεκριμένη ποσότητα από την εκπεμπόμενη ακτίνα ανακλά στο φύλλωμα των δένδρων, ενώ ένα άλλο κομμάτι 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 προαναφέρθηκε 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.

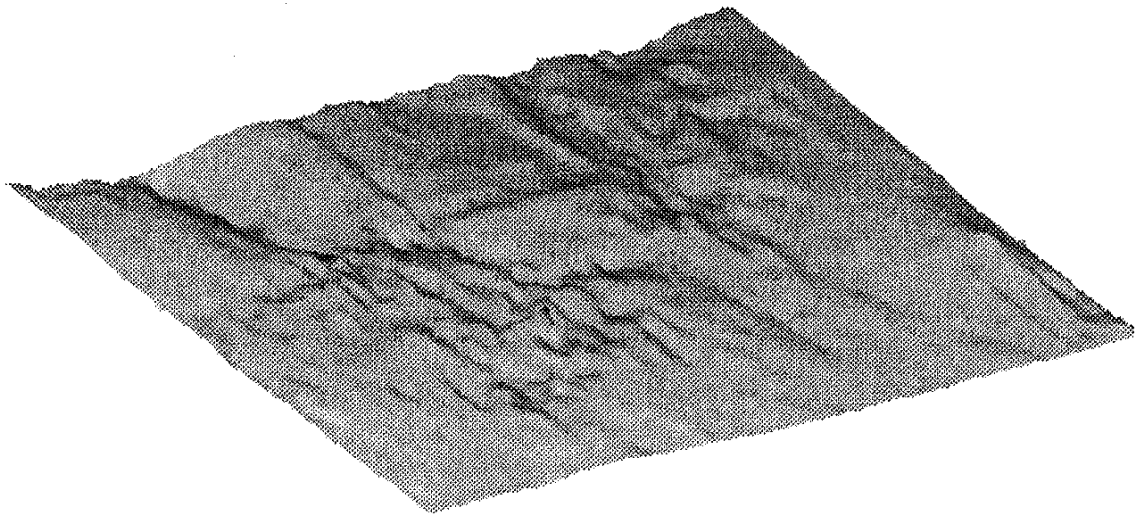
- Απόκτηση των προσεγγιστικών τιμών για τα σημεία της επιφάνειας του εδάφους
- Φιλτράρισμα των μετρημένων σημείων και μοντελοποίηση της επιφάνειας του εδάφους

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



εικόνα 14 Τρισδιάστατη εικόνα αφιλτράριστων δεδομένων.

Πηγή: (Kilian 1996)



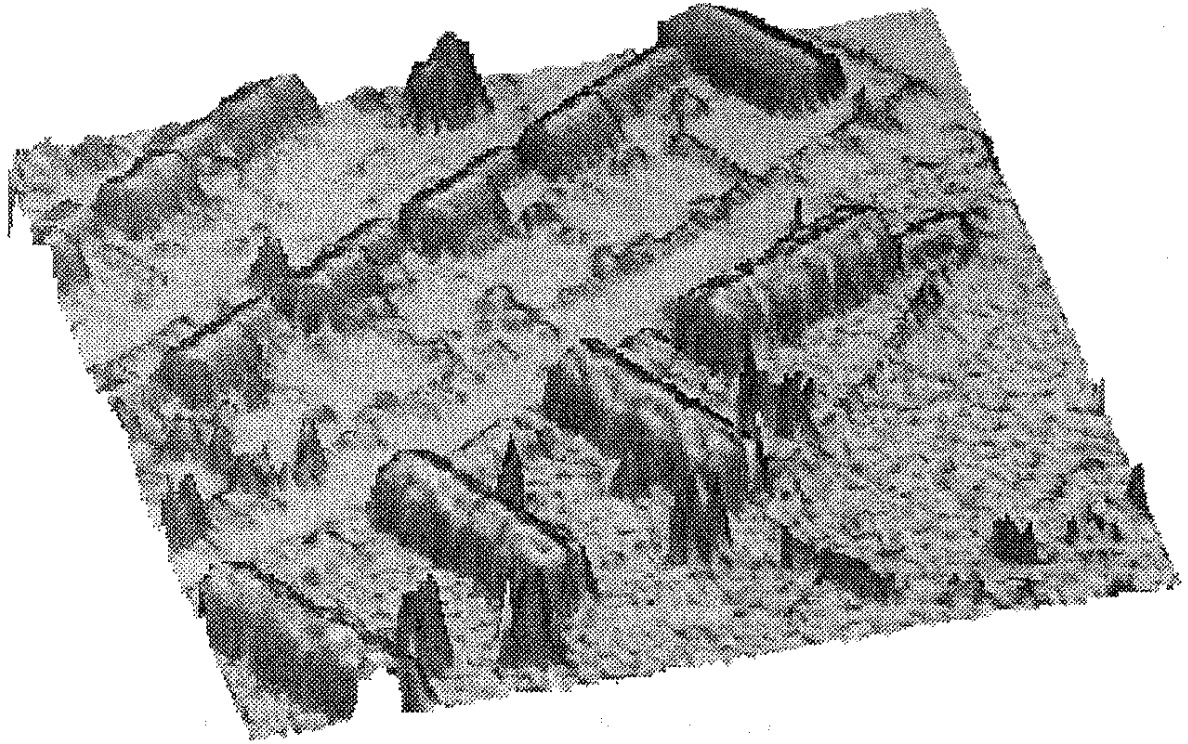
*εικόνα 15 Τρισδιάστατη εικόνα φιλτραρισμένων δεδομένων.*

*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 αναφέρθηκαν παραπάνω 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 τύπου 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.

## Karte Yakima



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

Πηγή: (Stepmap n.d.)

### 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 1,9 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 m<sup>3</sup>/s με μέγιστη τιμή 1682 m<sup>3</sup>/s και ελάχιστη τιμή 6 m<sup>3</sup>/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. (Wikipedia n.d.)



Εικόνα 18: Χάρτης της λεκάνης απορροής του ποταμού Yakima

Πηγή: (Wikipedia n.d.)

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 n.d.) Το USGS (United States Geological Survey) έχει τοποθετήσει τέσσερις μετρητές ροής στον ποταμό. Η υψηλότερη μέση παροχή που καταγράφηκε, 100,3 m<sup>3</sup>/s, βρίσκεται ψηλότερα από το μέσο του ποταμού. Οι δύο μετρητές στο κάτω μέρος του ποταμού δείχνουν μειωμένες μέσες ροές. (USGS n.d.)

Η μεγαλύτερη μερίδα ιδιοκτησίας γης στην κοιλάδα περιλαμβάνει τις ομοσπονδιακές και κρατικές υπηρεσίες και την ιδιάνικη φυλή Yakama. Η ιδιωτική ιδιοκτησία ανέρχεται σε 5045,69 km<sup>2</sup>. Η αμερικανική δασική υπηρεσία διαχειρίζεται 3611,86 km<sup>2</sup> και η φυλή Yakama κατέχει 3600,84 km<sup>2</sup> εντός της λεκάνης. Οι δασωμένες περιοχές στα βόρεια και δυτικά τμήματα της λεκάνης καταλαμβάνουν περίπου 5700 km<sup>2</sup> και χρησιμοποιούνται ως περιοχές αναψυχής, βιότοποι άγριας πανίδας, υλοτομία, βόσκηση και για τοπικές πολιτιστικές δραστηριότητες. Τα λιβάδια εκτείνονται σε περίπου 7.500 km<sup>2</sup> 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, καγιάκ, ψάρεμα και πεζοπορία κατά τη θερινή περίοδο καθώς και αγροτουρισμό. (Wikipedia n.d.)

### 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 n.d.)

Οι μεγάλες ροές βασάλτη της λεκάνης, σε κάποιες περιοχές πάχους πάνω από 5000 μέτρα, έχουν πτωχθεί 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. Από το φαινόμενο αυτό, το οποίο συνεχίζεται μέχρι και σήμερα, αναμένεται αυτές οι κορυφογραμμές να εξακολουθούν να ανυψώνονται, ενώ στην περιοχή προβλέπεται να υπάρξει εντονότερη σεισμική δραστηριότητα. (Central Washington University n.d.)

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 n.d.) 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 n.d.)



*Εικόνα 20: Το φαράγγι του ποταμού Yakima*

*Πηγή: (DDesignPlus n.d.)*

### 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 TIN και ακολούθως την εξαγωγή όλων των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών που θα χρησιμοποιηθούν για την σύγκριση της συγκεκριμένης δομής με την δομή grid.

#### 3.1 Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους σε δομή TIN

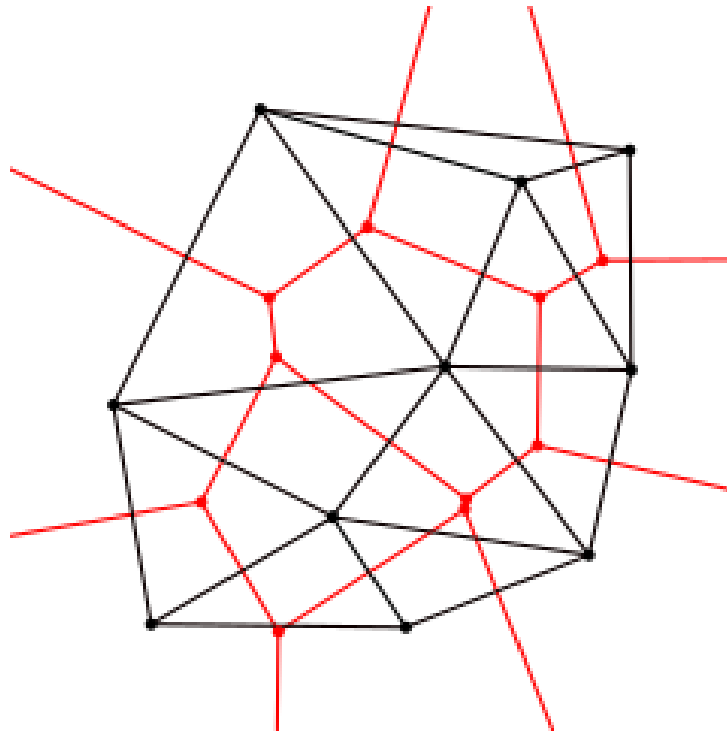
Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο η πρωτογενής πληροφορία για την δημιουργία του DEM είναι ένα νέφος από σημεία τα οποία έχουν ληφθεί με την μέθοδο LiDAR ( Light Detection And Ranging).

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 TIN θα ασχοληθούμε στην παρούσα διπλωματική.

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές απαιτήσεις για την δημιουργία ενός δικτύου ακανόνιστων τριγώνων.

- Για ένα σύνολο σημείων το παραγόμενο TIN πρέπει να είναι μοναδικό εφόσον χρησιμοποιείται ο ίδιος αλγόριθμος, ανεξάρτητα από το σημείο εκκίνησης της δημιουργίας του ( το κέντρο βάρους, κάποια γωνία ή κάποιο άλλο σημείο).
- Οι γεωμετρικοί σχηματισμοί των σχηματιζόμενων τριγώνων είναι οι βέλτιστοι, έτσι κάθε τρίγωνο είναι σχεδόν ισόπλευρο εκτός και αν υφίσταται κάποια συγκεκριμένη συνθήκη που να ορίζει διαφορετικά.
- Κάθε τρίγωνο σχηματίζεται με σημεία του εγγύτερου γείτονα έτσι το άθροισμα των τριών κορυφών του τριγώνου είναι το ελάχιστο.

Υπάρχουν αρκετοί διαθέσιμοι αλγόριθμοι για την δημιουργία ενός TIN, ωστόσο ο πιο διαδεδομένος είναι ο τριγωνισμός Delaunay. Την μέθοδο αυτή χρησιμοποιεί και το λογισμικό ArcGIS για την δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους δομής TIN. Ο τριγωνισμός Delaunay έχει επικρατήσει των υπόλοιπων μεθόδων μιας και πληροί και τις τρεις παραπάνω απαιτήσεις και είναι σχετικά απλός στην επίλυση του. Ένας τέτοιος τριγωνισμός είναι μια σειρά από συνδεδεμένα αλλά μη αλληλοκαλυπτόμενα τρίγωνα, ο περιγεγραμμένος κύκλος κάθε ενός από αυτά δεν πρέπει να περικλείει άλλο σημείο, αφού αυτή είναι η βασική συνθήκη του τριγωνισμού Delaunay. Ο τριγωνισμός Delaunay μπορεί να προκύψει και ως παράγωγο διάγραμμα του διαγράμματος Voronoi (εικόνα 21).



εικόνα 21. Το διάγραμμα Voronoi ενός συνόλου σημείων (με κόκκινο) και ο τριγωνισμός Delaunay (με μαύρο)

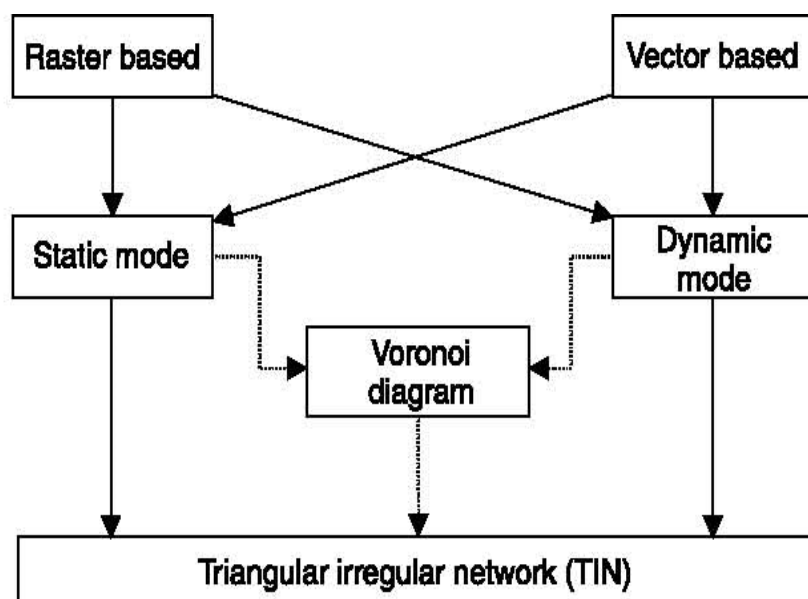
Ο τριγωνισμός Delaunay δημιουργείται δομώντας τρίγωνα ενώνοντας τρία γειτονικά σημεία, των οποίων οι αντίστοιχες περιοχές Voronoi έχουν μια κοινή κορυφή η οποία είναι και το κέντρο του περιγεγραμμένου κύκλου του τριγώνου που δημιουργείται.

### 3.1.1 Προσεγγίσεις για την δημιουργία ενός TIN

Για την δημιουργία ενός τριγωνικού ακανόνιστου δικτύου, δύο είναι οι διαθέσιμες προσεγγίσεις.

- Ο στατικός τριγωνισμός ο οποίος συμπεριλαμβάνει εξ αρχής όλα τα σημεία στην δημιουργία του δικτύου.
- Ο δυναμικός τριγωνισμός στον οποίο επιτρέπεται η προσθήκη και η απομάκρυνση σημείων κατά την διαδικασία της δημιουργίας των τριγώνων και καλείται δυναμική καθώς μπορούν να γίνουν τροποποιήσεις στην δομή του δικτύου χωρίς κάθε φορά να χρειάζεται ανακατασκευή του.

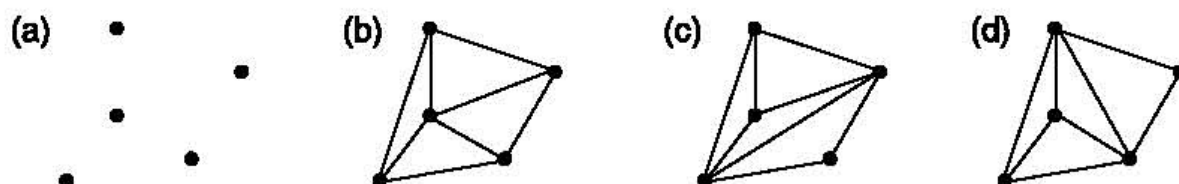
Τα χωρικά δεδομένα απαντώνται είτε σε διανυσματική είτε σε σημειακή μορφή έτσι και ο τριγωνισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί με την αντίστοιχη αφετηρία. Επίσης τα δεδομένα μπορούν να μετατραπούν από την μία μορφή στην άλλη (εικόνα 22).



εικόνα 22 Προσεγγίσεις για τον σχηματισμό TIN.

Πηγή: (Zhilin Li 2005)

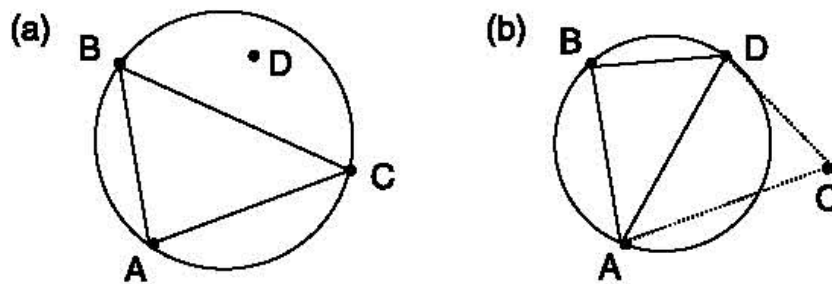
Από τυχαία κατανομημένα δεδομένα υπάρχουν αρκετοί εναλλακτικοί τρόποι για την δημιουργία του ακανόνιστου δικτύου τριγώνων (εικόνα 23).



εικόνα 23 τριγωνικά δίκτυα με διαφορετική διάταξη σχηματισμένα από το ίδιο σύνολο σημείων (α).

Πηγή: (Zhilin Li 2005)

Γεννάται λοιπόν το ερώτημα ποιο είναι ορθότερο να επιλεχθεί. Όπως προαναφέρθηκε, η βασική αρχή του τριγωνισμού Delaunay είναι να μην περιέχεται κανένα σημείο εντός του περιγεγραμμένου κύκλου κάθε τριγώνου του δικτύου κατά τη δημιουργία ενός TIN. Όπως φαίνεται και στην εικόνα (εικόνα 24) το σημείο D είναι εντός του κύκλου που δημιουργείται από το τρίγωνο ABC (περίπτωση a). Για τον λόγο αυτό ως τρίγωνο για τον τριγωνισμό επιλέγεται το τρίγωνο ABD το οποίο δεν περιλαμβάνει κανένα σημείο εντός του περιγεγραμμένου του κύκλου (περίπτωση B).



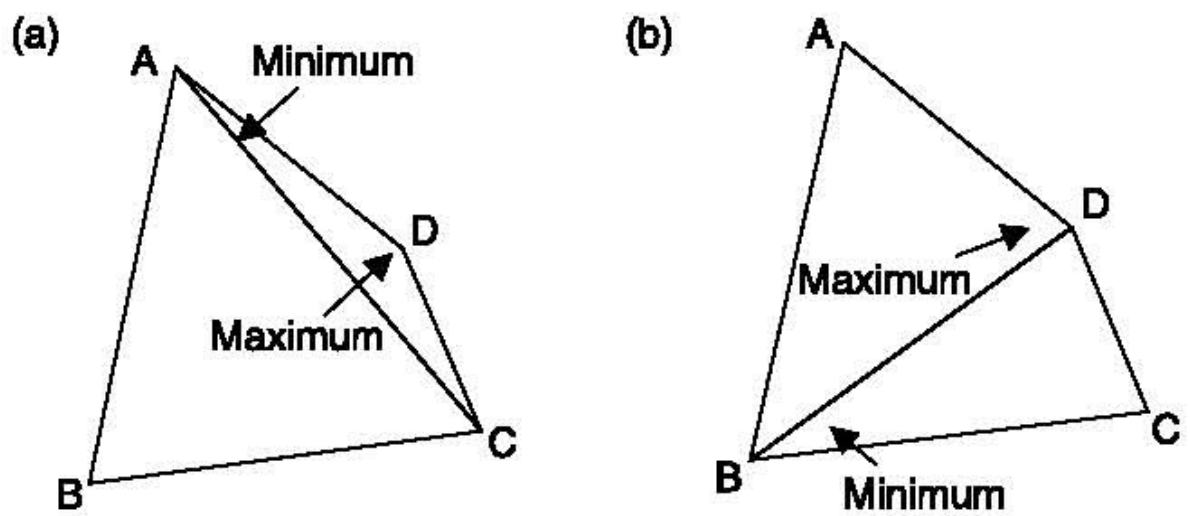
εικόνα 24. Η αρχή του κενού περιγεγραμμένου κύκλου.

Πηγή: (Zhilin Li 2005)

Μία άλλη αρχή για τον τριγωνισμό Delaunay, είναι αυτή της τοπικής ισότητας των γωνιών (local equiangularity) την οποία πρότεινε αρχικά ο Lawson το 1972 (Tsai 1993). Το κριτήριο αυτό εφαρμόζεται αφού δημιουργηθούν τα τρίγωνα με το κριτήριο του κενού περιγεγραμμένου κύκλου και από το λογισμικό ArcGIS με το οποίο δημιουργήθηκαν όλα τα TIN.

Το κριτήριο αυτό αναφέρει ότι το δίκτυο είναι βέλτιστο αν για κάθε κυρτό τετράπλευρο που σχηματίζεται από δύο γειτονικά τρίγωνα, η ανταλλαγή των διαγώνιων δεν θα επιφέρει μείωση στην ελάχιστη εσωτερική γωνία και ταυτόχρονα δεν θα αυξήσει την μέγιστη. Αν αυτό συμβαίνει τότε πρέπει να γίνει εναλλαγή στην διαγώνιο του τετράπλευρου καθώς με αυτόν τον τρόπο η μικρότερη γωνία μεγιστοποιείται και η μεγαλύτερη ελαχιστοποιείται (εικόνα 25). Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διαδικασία τοπικής βελτιστοποίησης (Tsai 1993)





εικόνα 25 Εφαρμογή της διαδικασίας τοπικής βελτιστοποίησης του κριτηρίου *local equiangularity* (α) πριν και (β) μετά την εναλλαγή των διαγώνιων.

Πηγή: (Zhilin Li 2005)

Σύμφωνα με τα παραπάνω ο σχηματισμός (b) είναι ο βέλτιστος. (Zhilin Li 2005). Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να μην εμβαθύνουμε περισσότερο στην διαδικασία κατασκευής ενός TIN καθώς δεν είναι το βασικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας.

### 3.2 Προεπεξεργασία Ψηφιακού Μοντέλου Υψομέτρων

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι επειδή οι δυνατότητες για την επεξεργασία του DEM σε μορφή TIN είναι ακόμα πολύ περιορισμένες, όλα τα μοντέλα TIN μετατράπηκαν σε μορφή τετραγωνικού κανάβου με γραμμική παρεμβολή ώστε να μην δημιουργηθούν σημεία με διαφορετικά υψόμετρα και ως εκ τούτου τα νέα μοντέλα να διαφέρουν από τα μητρικά (TIN). Συγκεκριμένα, από τα μοντέλα TIN μπορεί να εξαχθεί μόνο η πληροφορία της κλίσης και της κατεύθυνσης της κλίσης ενώ κανένα λογισμικό δεν περιλαμβάνει αλγόριθμο για την εξαγωγή μοντέλου καμπυλοτήτων.

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 όταν μιλάμε για TIN και άλλα.

#### 3.2.1 Φίλτρο εξομάλυνσης Gauss (Gaussian Filter)



εικόνα 26: η επίδραση της τυπικής απόκλισης

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 26.

Τα μοντέλα υψομέτρων δομής TIN λόγω του τρόπου κατασκευής τους δεν χρειάζονται επιπλέον προεπεξεργασία.

### 3.3 Εξαγωγή μορφομετρικών χαρακτηριστικών

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει 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

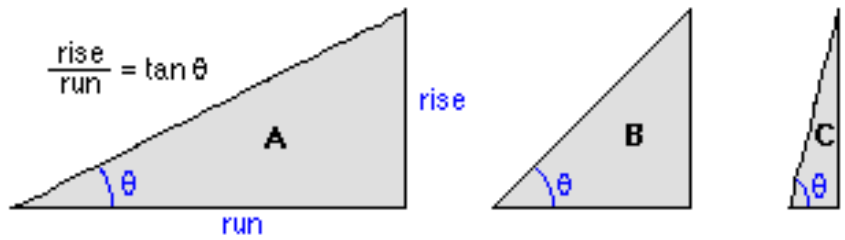
Τα πρωτεύοντα τοπογραφικά χαρακτηριστικά είναι παράμετροι που εξάγονται άμεσα από ένα ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων, χωρίς να χρειάζεται προσθήκη επιπλέον δεδομένων. Τα χαρακτηριστικά τα οποία θα μας απασχολήσουν στην παρούσα εργασία είναι:

- **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 27). 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 =  $\theta$

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



Degree of slope =

30

45

76

Percent of slope =

58

100

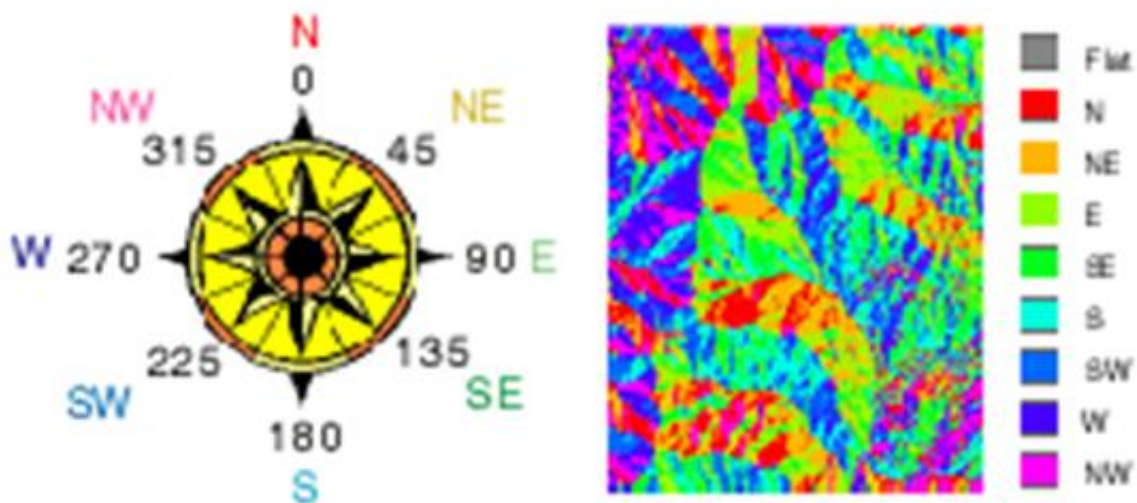
373

εικόνα 27. Κλίση.

Πηγή (Wikipedia n.d.)

- 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 28. Κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης. Η διεύθυνση της μέγιστης κλίσης καθορίζει κυρίως την κατεύθυνση της ροής.

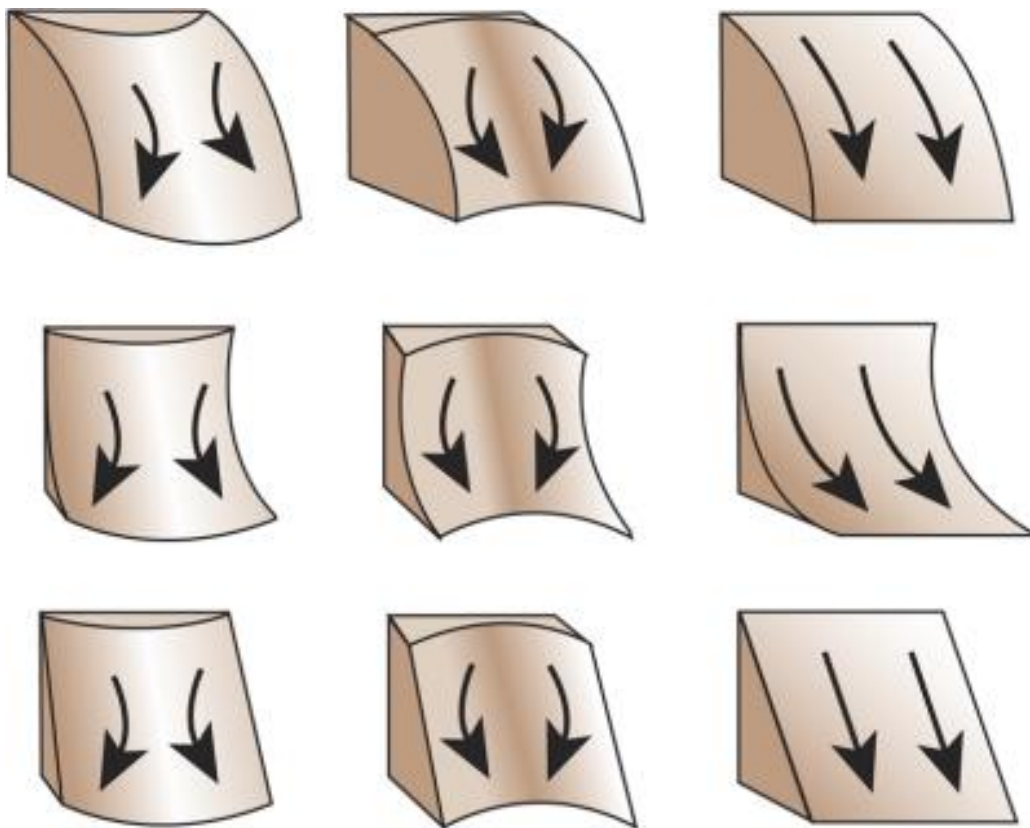


εικόνα 28. Κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης.

Πηγή (Wikipedia n.d.)

- **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.



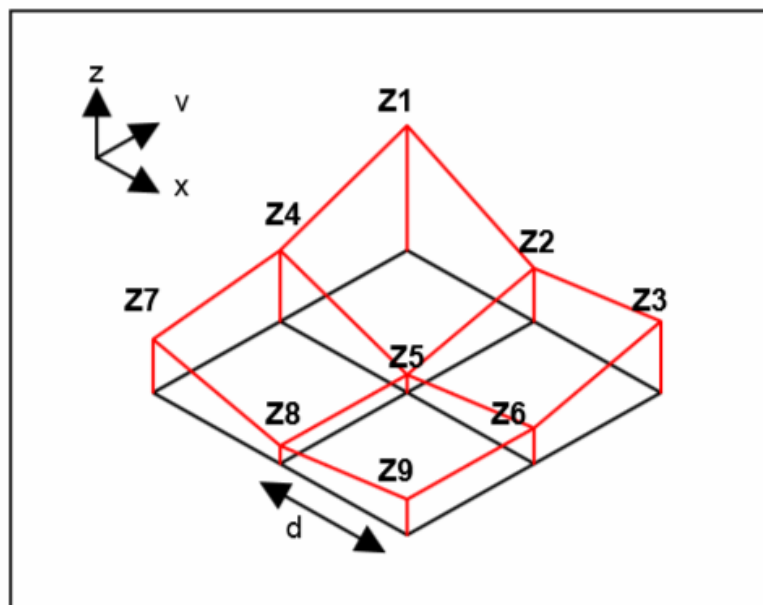
εικόνα 29. Γενική καμπυλότητα.

Πηγή (Wikipedia n.d.)

### 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 (Zevendrgen 1987), καθώς παρέχει ακρίβεια και ταχύτητα στον υπολογισμό. Ο αλγόριθμος αυτός, γνωστός και ως αλγόριθμος μέσου όρου, 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 αναγλύφου, από τα υψόμετρα των γειτονικών ψηφίδων του παραθύρου 3X3 (εικόνα 30). Η αναπαράσταση της επιφάνειας γίνεται με την χρήση της μερικής τετραγωνικής εξίσωσης:

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



εικόνα 30. Το μοντέλο των Zevenbergen & Thorne (1987)

Πηγή: (Zevendrgen 1987)

Οι εννέα παράμετροι της πολωνυμικής εξίσωσης υπολογίζονται από τις τιμές των ισάριθμων κόμβων του παραθύρου, βάσει των πολωνύμων 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 (Zevendrgen 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 παραγώγιση 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:

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

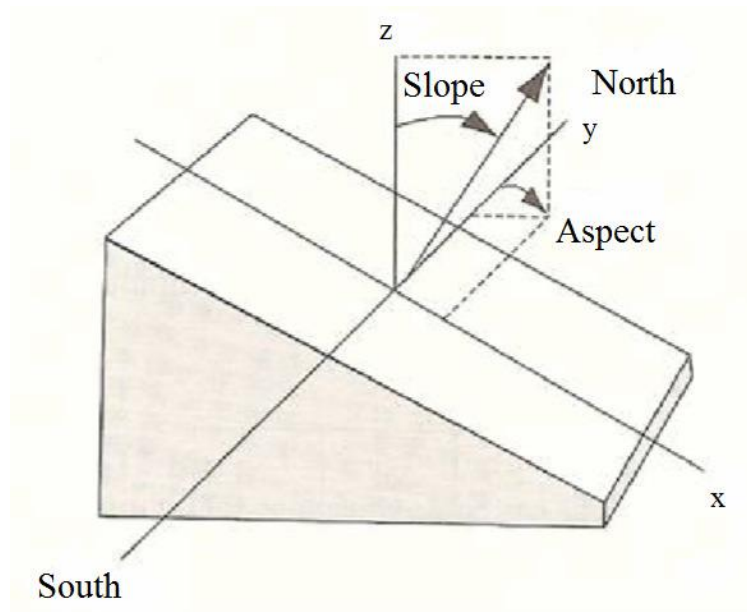
Όμως εξ ορισμού ισχύει:

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

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 μετριέται σε μονάδες γωνιών δεξιόστροφα, με αφετηρία τον βορρά (εικόνα 31). Υπολογίζεται σε κάθε φαντίο 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 31 Αναπαράσταση της κλίσης (Slope) και της διεύθυνσης της κλίσης (Aspect)

Πηγή: (Kang-tsung Chang 1991)

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

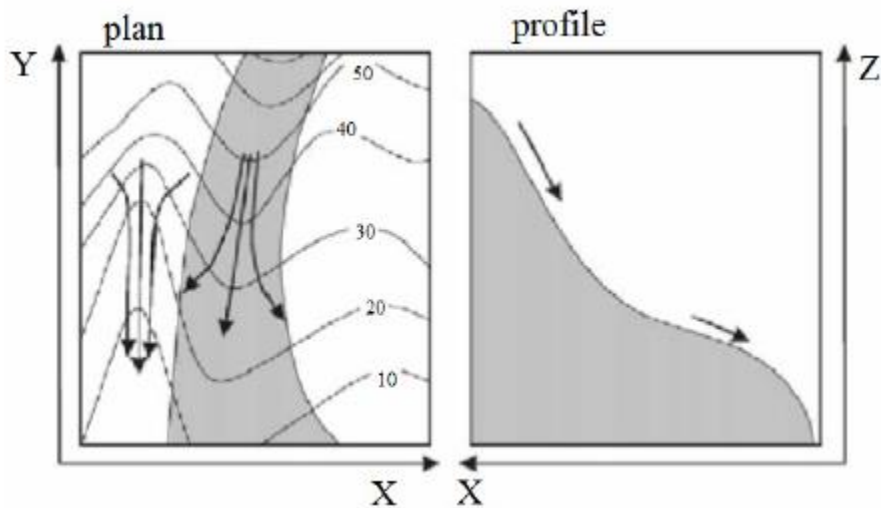
$$\frac{\partial Slope}{\partial \theta} = -G \sin \theta + H \cos \theta = 0 \quad (14)$$

$$\text{ή } \theta = \arctan(-H / -G) \quad (15)$$

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



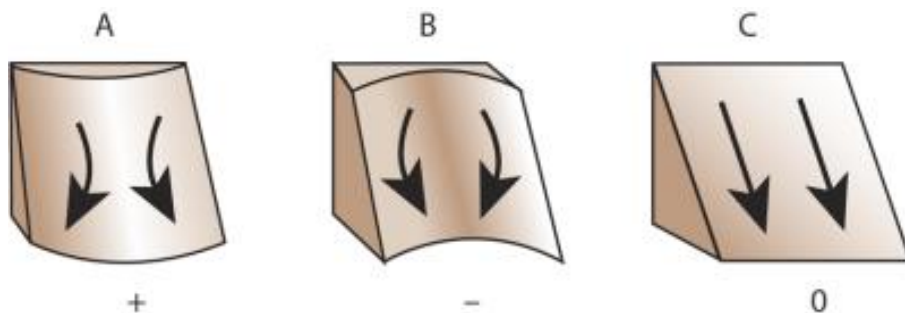
Τελευταίο από τα πρωτεύοντα τοπογραφικά χαρακτηριστικά που θα μελετηθούν, είναι η καμπυλότητα. Η καμπυλότητα αποτελεί την πρώτη παράγωγο της κλίσης (δεύτερη παράγωγο της συνάρτησης των υψομέτρων). Η καμπυλότητα μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικές συνιστώσες, την κάθετη στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (plan curvature) και την παράλληλη στη διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (profile curvature)(εικόνα 32).



εικόνα 32 Οι βασικές ορθογώνιες συνιστώσες της καμπυλότητας.

Πηγή: (ESRI n.d.)

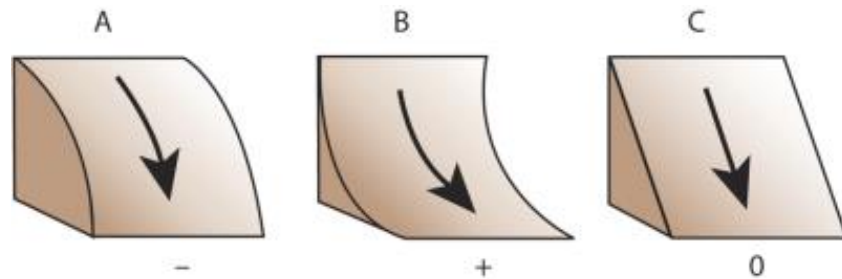
Η καμπυλότητα κάθετα στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης (Plan curvature), αναφέρεται στον ρυθμό με τον οποίο μεταβάλλεται το αζιμούθιο κατά μήκος μιας γραμμής περιγράμματος και μετρά την τοπογραφική σύγκλιση και απόκλιση και ως εκ τούτου δείχνει την τάση του νερού να συγκεντρώνεται και να σχηματίζει 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 33)



εικόνα 33: Καμπυλότητα κάθετη στην διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, θετική, αρνητική και μηδενική.

Πηγή: (ESRI n.d.)

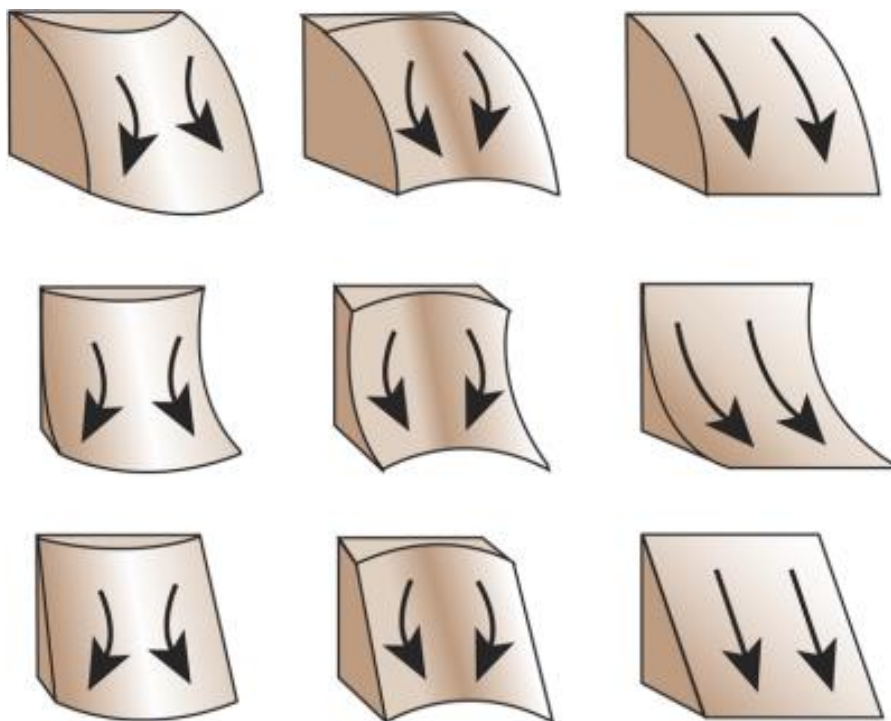
Η καμπυλότητα παράλληλα στην διεύθυνση μέγιστης κλίσης (Profile curvature) αποτελεί το ρυθμό μεταβολής της κλίσης στο κάθετο επίπεδο μιας γραμμής ροής και υπολογίζει τον ρυθμό μεταβολής του βαρυντικού δυναμικού οπότε είναι χρήσιμη στην εύρεση αλλαγών της ταχύτητας ροής. Επίσης οι τιμές της επηρεάζουν την επιτάχυνση και την επιβράδυνση της ροής οπότε είναι ένας κρίσιμος δείκτης για την διεύθυνση των υδατορευμάτων. Θετικές τιμές δείχνουν επιτάχυνση της ροής των υδάτων (εικόνα 34).



εικόνα 34: Καμπυλότητα παράλληλη στη διεύθυνση της μέγιστης κλίσης Πηγή ESRI.

Πηγή: (ESRI n.d.)

Η γενική καμπυλότητα με την οποία θα ασχοληθούμε σε αυτή την εργασία, συνδυάζει τις δύο συνιστώσες της καμπυλότητας και είναι σημαντική για να κατανοηθεί με περισσότερη ακρίβεια ο τρόπος ροής των υδάτων και η μεταφορά φερτών υλικών σε μία επιφάνεια (εικόνα 35).



εικόνα 35: Γενική καμπυλότητα

Πηγή: (ESRI n.d.)

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

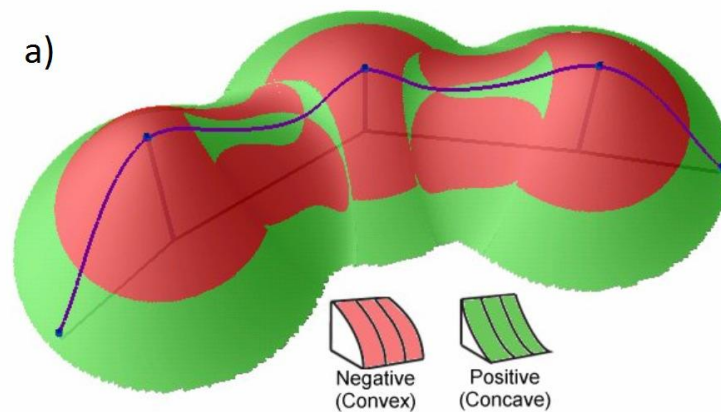
$$Curvature = \frac{\partial^2 Z}{\partial S^2} = 2(D \cos^2 \varphi + E \sin^2 \varphi + F \cos \varphi \sin \varphi) \quad (16)$$

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

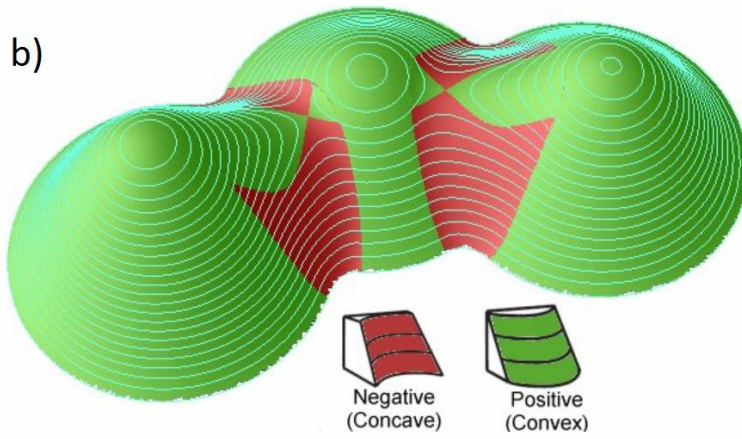
$$\begin{aligned} PROFC &= -2(D \cos^2 \theta + E \sin^2 \theta + F \cos \theta \sin \theta) \\ &= -2(DG^2 + EH^2 + FGH) / (G^2 + H^2) \quad (17) \end{aligned}$$

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

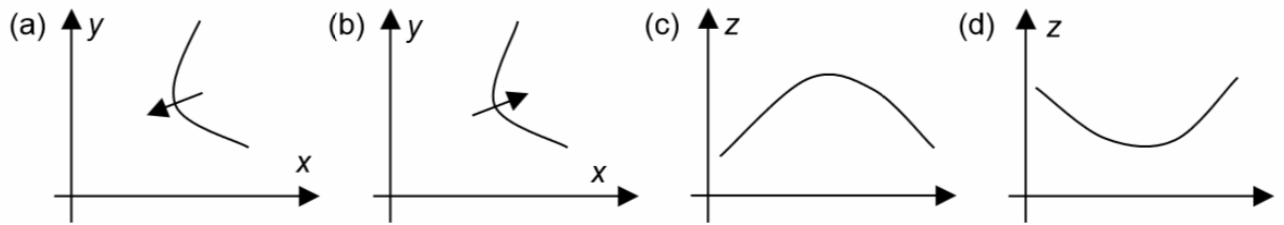
Παρακάτω παρατίθενται δύο ακόμα εικόνες για να βοηθήσουν στην κατανόηση της έννοιας της καμπυλότητας (εικόνα 36, εικόνα 37, εικόνα 38).



εικόνα 36: καμπυλότητα παράλληλα στην διεύθυνση κλίσης



εικόνα 37: Καμπυλότητα κάθετα στην διεύθυνση κλίσης



εικόνα 38: 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 TIN χωρικών αναλύσεων 5-10-25-50 μέτρων σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μοντέλα δομής grid ως προς τα υπολογιζόμενα τοπογραφικά χαρακτηριστικά. Όλα τα μοντέλα θα συγκριθούν με ένα μοντέλο δομής GRID 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. Λογισμικά εφαρμογής

Εδώ θα δοθούν ορισμένα γενικά στοιχεία για το λογισμικό SAGA GIS και το λογισμικό ArcGIS

- SAGA GIS: 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 χρησιμοποιούσαν 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 n.d.).
- Το λογισμικό ArcGIS: Το λογισμικό αυτό αναπτύχθηκε από την εταιρία ESRI και παρέχει την υποδομή για την κατασκευή χαρτών και την διαχείριση γεωγραφικών πληροφοριών.

### 4.2 Δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων Υψομέτρων από δεδομένα LIDAR σε δομή TIN

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 πραγματοποιείται μέσω του τριγωνισμού Delaunay στο λογισμικό ArcGIS, με δεδομένα εισόδου τα νέφη σημείων. Το λογισμικό έχει την δυνατότητα επιλογής αλγόριθμων για την αραίωση του αρχικού νέφους σημείων όπως επιλογή αριθμού τριγώνων του τελικού TIN, επιλογή αριθμού κορυφών κ.α., καθώς και επιλογή αλγόριθμου για τον τρόπο αραίωσης του νέφους. Εδώ επιλέχθηκε να γίνει επιλογή του αριθμού κορυφών κάθε μοντέλου και η αραίωση να πραγματοποιηθεί με τυχαία επιλογή σημείων. Η πυκνότητα των σημείων σε κάθε μοντέλο TIN είναι τέτοια ώστε ο αριθμός των κορυφών των τριγώνων να είναι περίπου ίσος με τον αριθμό των κορυφών του κανάβου του μοντέλου GRID με την αντίστοιχη ισοδιάσταση (1m, 5m, 10m, 25m, 50m).

Επομένως ο αριθμός των κορυφών του κάθε TIN είναι:

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

Οι αλγόριθμοι για εξαγωγή μορφομετρικών χαρακτηριστικών από ΨΜΕ δομής TIN είναι περιορισμένοι και πιο συγκεκριμένα, δεν υπάρχει σε κανένα διαθέσιμο λογισμικό αλγόριθμος για τον υπολογισμό της καμπυλότητας. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε όλα τα ΨΜΕ δομής TIN να μετατραπούν με χρήση του αλγόριθμου TINtoRASTER του λογισμικού ArcMap σε δομή GRID. Στις επιλογές του αλγόριθμου, επιλέχθηκε η λειτουργία γραμμικής παρεμβολής έτσι ώστε κατά την δημιουργία του κανάβου να μην υπάρξει μεγάλη τροποποίηση των μοντέλων, αλλά να χρησιμοποιηθούν κατά το δυνατόν περισσότερα σημεία της επιφάνειας του TIN. Για κάθε επανάληψη του αλγόριθμου χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου κάθε ένα από τα παραπάνω μοντέλα TIN και για το παραγόμενο GRID επιλέγεται η αντίστοιχη ισοδιάσταση κανάβου.

Τα ΨΜΥ που δημιουργήθηκαν εισάγονται στο SAGA GIS για την περαιτέρω επεξεργασία τους και την σύγκριση τους με το αντίστοιχο ΨΜΥ δομής GRID 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 να ταυτίζονται, ώστε η σύγκριση να είναι εφικτή.

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.

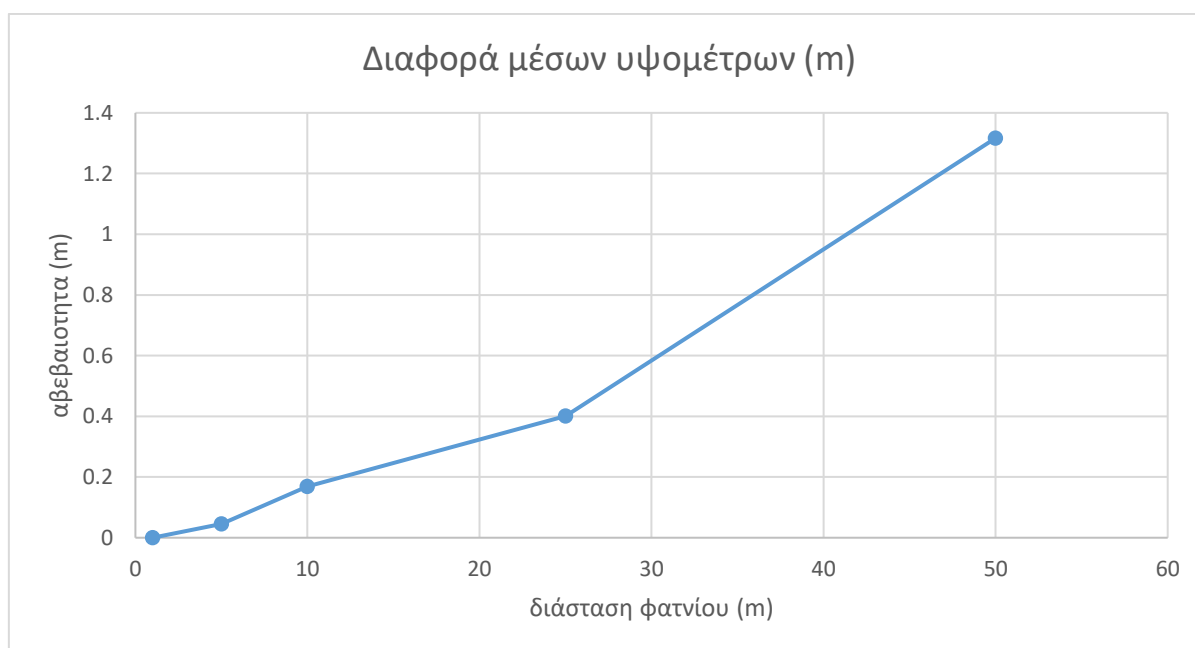
Μία ακόμα παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η ακρίβεια της μεθόδου δημιουργίας των μοντέλων διαφορετικών χωρικών αναλύσεων. Για τον λόγο αυτό ως αληθές μέσο υψόμετρο θεωρήθηκε το μέσο υψόμετρο που προκύπτει από το μοντέλο Grid 1m.

Παρακάτω φαίνεται το μέσο υψόμετρο κάθε μοντέλου δομής TIN που έχει δημιουργηθεί και η διαφορά του με το αληθές μέσο υψόμετρο του μοντέλου αναφοράς (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Μέσο υψόμετρο κάθε ΨΜΥ και η διαφορά του από το μοντέλο αναφοράς

Μέγεθος φατνίου (m)	Μέσο υψόμετρο (m)	Διαφορά μέσων υψομέτρων (m)
1	476.664	
5	476.619	0.045
10	476.833	-0.169
25	476.263	0.401
50	475.347	1.317

Τέλος στην εικόνα 39 φαίνονται τα παραπάνω αποτελέσματα σε μορφή διαγράμματος. Παρατηρείται ότι η διαφορά των μέσων υψομέτρων των παραγόμενων μοντέλων από το μοντέλο αναφοράς, αυξάνεται γραμμικά όσο αυξάνεται η διάσταση του φατνίου. Σε γενικές γραμμές αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η αύξηση της διάστασης του φατνίου προκαλεί εξομάλυνση του αναγλύφου και λογικά σε χειρότερη ικανότητα εκτίμησης των υψομέτρων.



εικόνα 39: Οι διαφορές των μέσων υψομέτρων ως συνάρτηση 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 συνδυασμό των δυνατοτήτων των προγραμμάτων SAGA, ArcGIS, 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, που έχουν μετατραπεί από TIN σε GRID και με τον αλγόριθμο Zevenbergen & Thorne 1987 παράγονται τα αντίστοιχα μοντέλα κλίσεων, κατεύθυνσης κλίσεως και καμπυλότητας. Τα ψηφιακά μοντέλα που προέκυψαν επισυνάπτονται στο παράρτημα 2 της εργασίας και ένα πρώτο συμπέρασμα από τις οπτικοποιήσεις είναι πως όσο ο αριθμός των τριγώνων του μοντέλου μειώνεται, 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 1. Στο εργαλείο αυτό ως αρχικά δεδομένα εισήχθησαν τα μοντέλα υψομέτρων, κλίσεων, κατεύθυνσης κλίσεως και καμπυλοτήτων δομής Grid διάστασης κανάβου 1m σε μορφή πινάκων οι οποίοι περιείχαν την πληροφορία της τιμής του εκάστοτε γεωμορφομετρικού χαρακτηριστικού κάθε φατνίου 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 επιλεχθεί 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 στατιστική λοιπόν επεξεργασία και την βοήθεια των στατιστικών στοιχείων που εξάγονται μέσω αυτής γίνεται ουσιαστικά ποσοτικοποίηση της διαδικασίας της σύγκρισης των μοντέλων.



## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται με πίνακες και διαγράμματα, τα στατιστικά στοιχεία μέση τιμή και τυπική απόκλιση των υπολογισθεισών παραμέτρων των μοντέλων και πως μεταβάλλονται καθώς η διάσταση κανάβου μεγαλώνει. Επιπλέον γίνεται οπτικοποίηση των διαφορών των τοπογραφικών χαρακτηριστικών των μοντέλων που συγκρίνονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα τους.

### 5.1. Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων εδάφους

#### 5.1.1. Κλίση

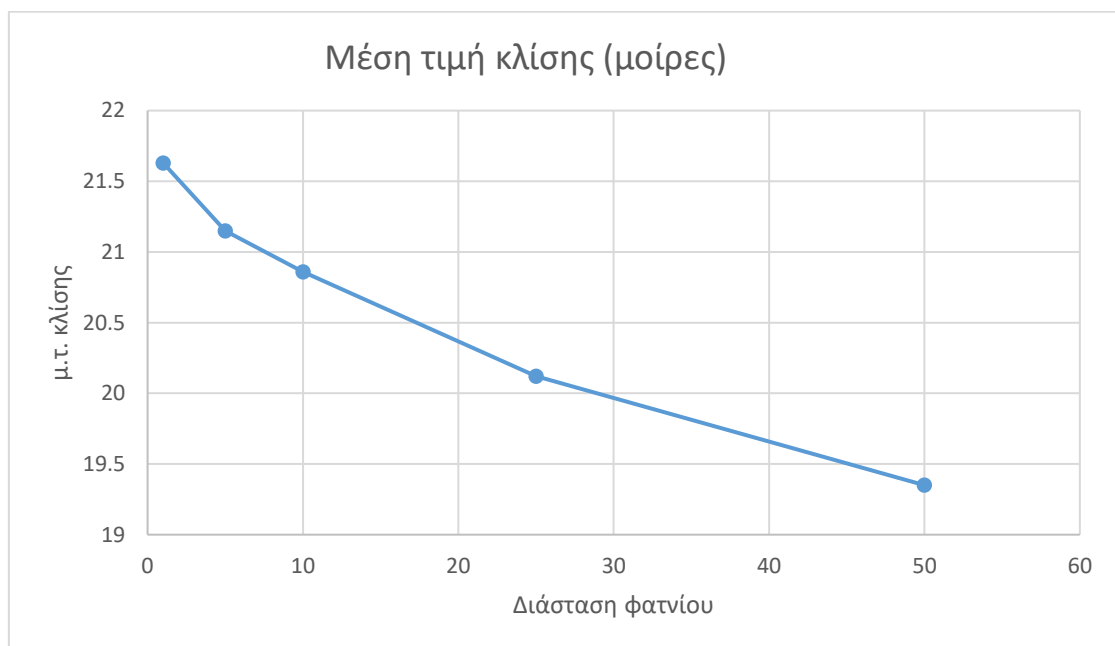
Από τα στατιστικά των μοντέλων για την κλίση (Πίνακας 2), με μία πρώτη ματιά παρατηρούμε ότι καθώς η χωρική ανάλυση του φατνίου αυξάνεται, η μέση τιμή της κλίσης μειώνεται που σημαίνει ότι έχουμε εξομάλυνση της επιφάνειας του εδάφους. Η παραπάνω παρατήρηση είναι αναμενόμενη καθώς όσο η διάσταση του κανάβου μεγαλώνει τόσο περισσότερα χαρακτηριστικά του εδάφους χάνονται και ειδικότερα, στις πλαγιές με μεγάλη κλίση παρατηρείται μείωση κλίσης ενώ σε πλαγιές με ήπιες κλίσης παρατηρείται αύξηση των τιμών των κλίσεων. Το συμπέρασμα αυτό συμφωνεί και με όμοιες μελέτες που έχουν γίνει για μοντέλα δομής Grid (Kang-tsung Chang 1991) (Zhang 1994). Σύμφωνα με τα παραπάνω επειδή στην παρούσα εργασία η περιοχή μελέτης έχει έντονο ανάγλυφο, η μείωση της μέσης τιμής της κλίσης των μοντέλων καθώς η διάσταση κανάβου μεγαλώνει, είναι αναμενόμενη.

Πίνακας 2: Στοιχεία Ψηφιακών μοντέλων κλίσης

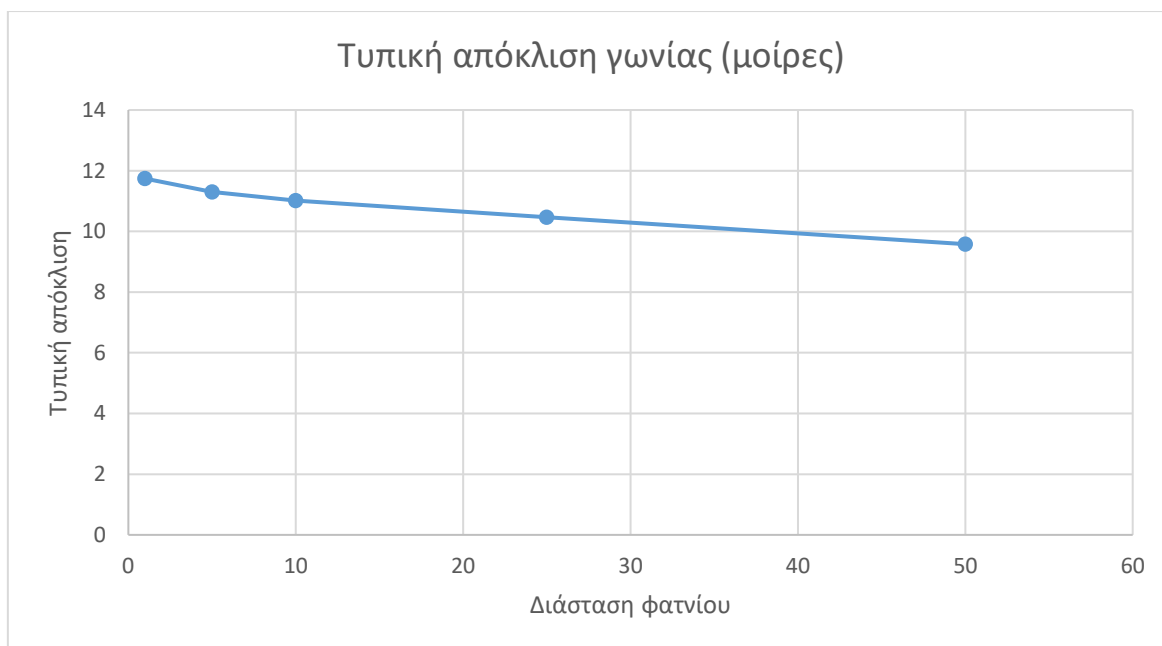
Διάσταση φατνίου (m)	Μέση τιμή κλίσης (μοίρες)	Τυπική απόκλιση γωνίας (μοίρες)
1	21.63	11.74
5	21.15	11.3
10	20.86	11.02
25	20.12	10.47
50	19.35	9.58

Από την εικόνα 41 και την εικόνα 40, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Όσο ελαττώνεται η χωρική ανάλυση τόσο αυξάνεται η ασάφεια του καθορισμού της κλίσης της περιοχής μελέτης
- Όμοια, όσο ελαττώνεται η χωρική ανάλυση οι τιμές των κλίσεων των μοντέλων υποεκτιμώνται καθώς ελάττωση της χωρικής ανάλυσης σημαίνει αύξηση της διάστασης του κανάβου και συνεπώς ομαλοποίηση στο μοντέλο εδάφους.
- Όσο η διάσταση του φατνίου μεγαλώνει η τυπική απόκλιση παρουσιάζει μία ελαφρά μείωση στην τιμή της, το οποίο σημαίνει πώς οι τιμές των κλίσεων του εκάστοτε μοντέλου εμφανίζουν μικρότερη διασπορά και επομένως το εύρος των τιμών των κλίσεων μικραίνει.



εικόνα 40: Μέση τιμή της γωνίας κλίσης των ψηφιακών μοντέλων σε συνάρτηση με την τιμή της χωρικής τους ανάλυσης



εικόνα 41: Τυπική απόκλιση της γωνίας κλίσης των ψηφιακών μοντέλων σε συνάρτηση με την τιμή της χωρικής τους ανάλυσης

Η υποεκτίμηση της μέσης τιμής της κλίσης και γενικότερα η ελάττωση των τιμών των κλίσεων των ψηφιακών μοντέλων όσο η χωρική τους ανάλυση μειώνεται, είναι ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για την περάτωση μελετών και έργων που αφορούν την σταθερότητα πρανών και την διάβρωση του εδάφους κ.α. Παρακάτω επισυνάπτεται ο (Πίνακας 3) που προέκυψε από τα διαγράμματα διασποράς που μπορούν να δημιουργηθούν μέσω του προγράμματος SAGA και δείχνουν την συσχέτιση των τιμών των μοντέλων κλίσης με το μοντέλο αναφοράς. Όπως φαίνεται, όσο αυξάνεται η διάσταση του κανάβου του μοντέλου τόσο μικρότερη συσχέτιση έχουν οι τιμές του με το μοντέλο αναφοράς.

Πίνακας 3: Συσχέτιση των τιμών των μοντέλων χαμηλότερης χωρικής ανάλυσης με τις τιμές του μοντέλου αναφοράς

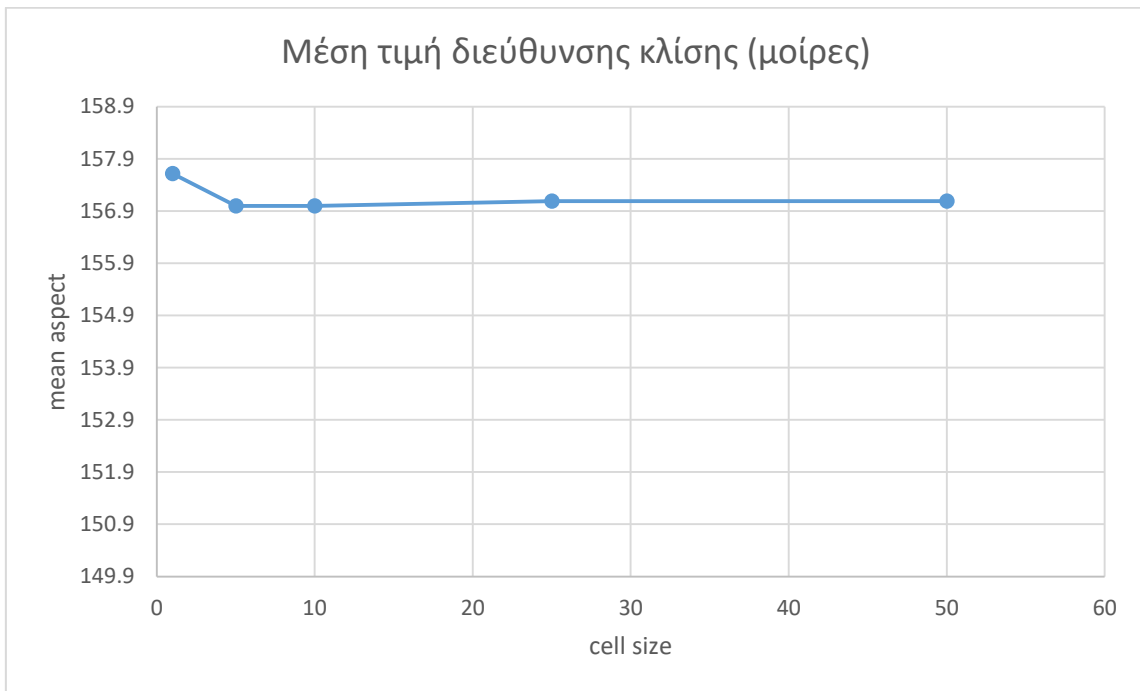
Χωρική ανάλυση (m)	5	10	25	50
Συντελεστής συσχέτισης με το μοντέλο αναφοράς	90.3	83.5	78.6	64

### 5.1.2. Διεύθυνση μέγιστης κλίσης

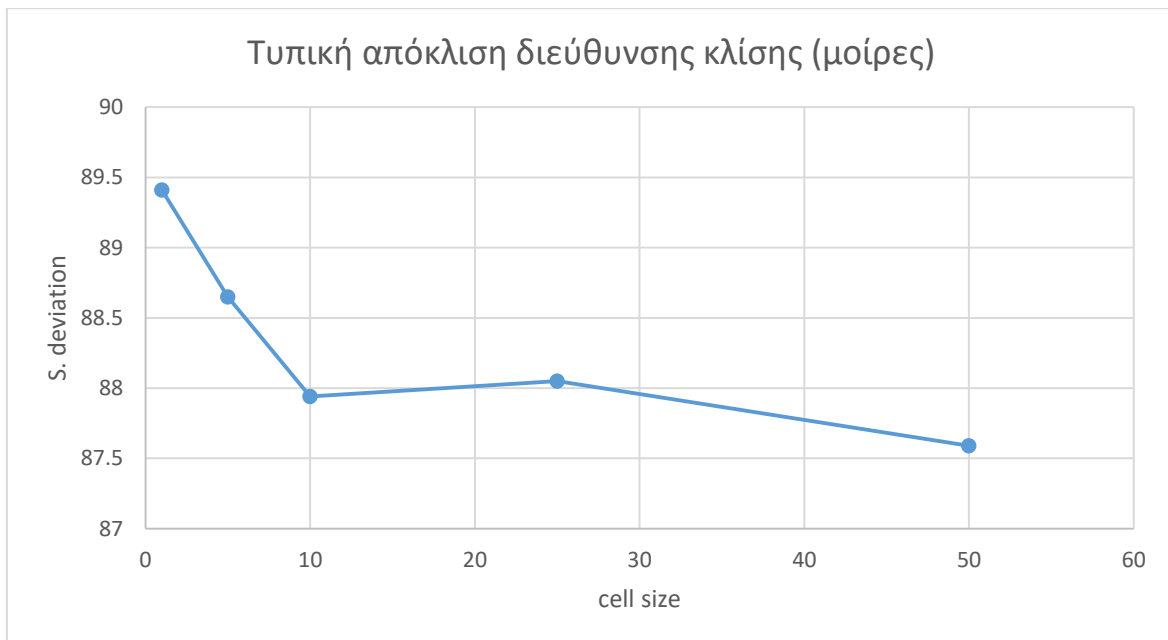
Το επόμενο μορφομετρικό χαρακτηριστικό για το οποίο εξήχθησαν στατιστικά στοιχεία είναι η διεύθυνση της μέγιστης κλίσης. Εδώ (Πίνακας 4) παρατηρείται μια ελαφρά πτώση της μέσης τιμής από το μοντέλο αναφοράς στο μοντέλο χωρικής ανάλυσης 5m. Από εκεί και για τα μοντέλα χαμηλότερης χωρικής ανάλυσης (εικόνα 42) δεν παρατηρείτε κάποια ιδιαίτερη μεταβολή στην τιμή της, αντίθετα είναι σχεδόν σταθερή. Ωστόσο από το διάγραμμα της τυπικής απόκλισης παρατηρείται ότι η συγκέντρωση των τιμών αυξάνεται με την μείωση της χωρικής ανάλυσης των ψηφιακών μοντέλων έως ότου η διάσταση φατνίου γίνεται 10m και από εκεί και πέρα μένει σταθερή (εικόνα 43). Ένα πρώτο λοιπόν συμπέρασμα για την διεύθυνση της μέγιστης κλίσης είναι πως η τιμή της δεν σχετίζεται άμεσα με την χωρική ανάλυση του εκάστοτε μοντέλου και ένα μοντέλο χαμηλής χωρικής ανάλυσης ίσως δίνει αξιόπιστες τιμές για αυτήν. Για την επαλήθευση ωστόσο ενός τέτοιου συμπεράσματος θα πρέπει να γίνει περεταίρω μελέτη και στις οπτικοποιήσεις των διαφορών των παραπάνω μοντέλων με το μοντέλο αναφοράς.

Πίνακας 4: Στατιστικά στοιχεία των ψηφιακών μοντέλων διεύθυνση μέγιστης κλίσης

Διάσταση φατνίου (m)	Μέση τιμή διεύθυνσης κλίσης (μοίρες)	Τυπική απόκλιση (μοίρες)
1	157.62	89.41
5	157	88.65
10	157	87.94
25	157.09	88.05
50	157.09	87.59



εικόνα 42: Μέση τιμή της διεύθυνσης μέγιστης κλίσης σε συνάρτηση με το μέγεθος φατινίου



εικόνα 43: Τυπική απόκλιση της διεύθυνσης μέγιστης κλίσης σε συνάρτηση με το μέγεθος φατινίου

### 5.1.3. Καμπυλότητα

Από τις οπτικοποιήσεις των μοντέλων των καμπυλοτήτων (Παράρτημα 2) προκύπτει ότι η τιμή της καμπυλότητας έχει μεγαλύτερη εξάρτηση με την χωρική ανάλυση των μοντέλων σε σχέση με τους άλλους δύο τοπογραφικούς συντελεστές. Παρατηρώντας την μεταβολή της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης σε σχέση με την μεταβολή της χωρικής ανάλυσης στον Πίνακα 5, γίνεται αντιληπτό ότι όσο η χωρική ανάλυση των μοντέλων μειώνεται γίνεται υποεκτίμηση των τιμών της καμπυλότητας. Το σημαντικότερο στοιχείο που εξάγεται ωστόσο, είναι ότι μειώνεται το εύρος των τιμών της.

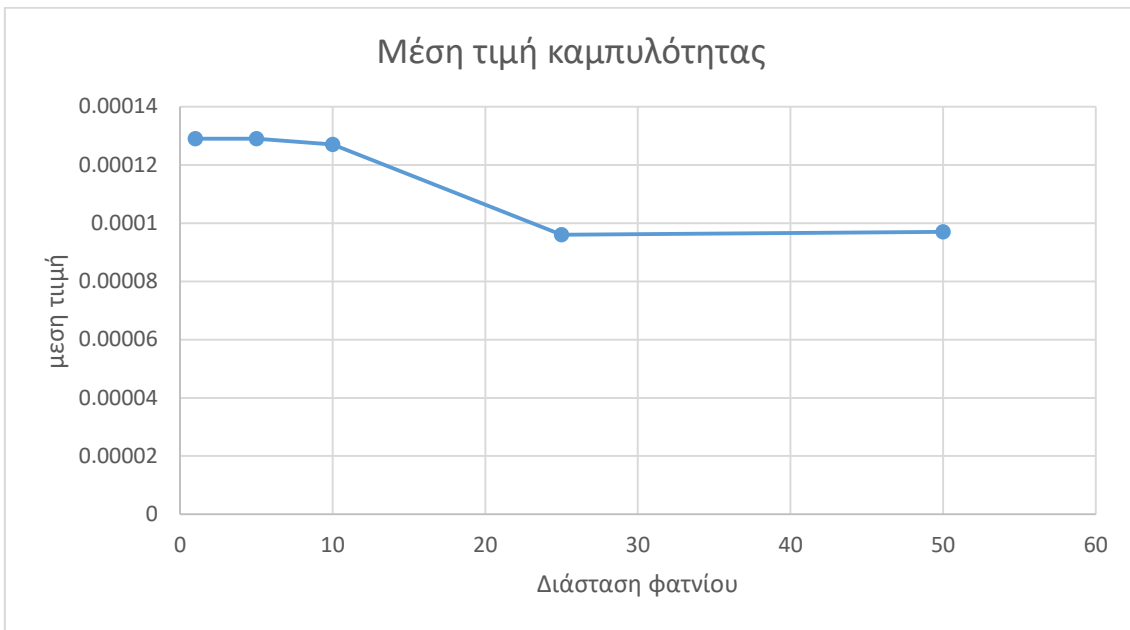
Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι το μοντέλα χωρικής ανάλυσης μικρότερης των 5m (10m 25m, 50m) δεν είναι ενδεδειγμένα για την εξαγωγή της πληροφορίας της καμπυλότητας και συνεπώς δεν είναι κατάλληλα για την διεξαγωγή μελετών για τον έλεγχο καθιζήσεων και μεταφοράς φερτών υλικών, όπως και μελέτες υδρολογικών φαινομένων καθώς ελλοχεύει ο κίνδυνος εσφαλμένης αναπαράστασης της τοπογραφικής σύγκλισης και απόκλισης της επιφάνειας.

Πίνακας 5: Στατιστικά στοιχεία των μοντέλων καμπυλότητας

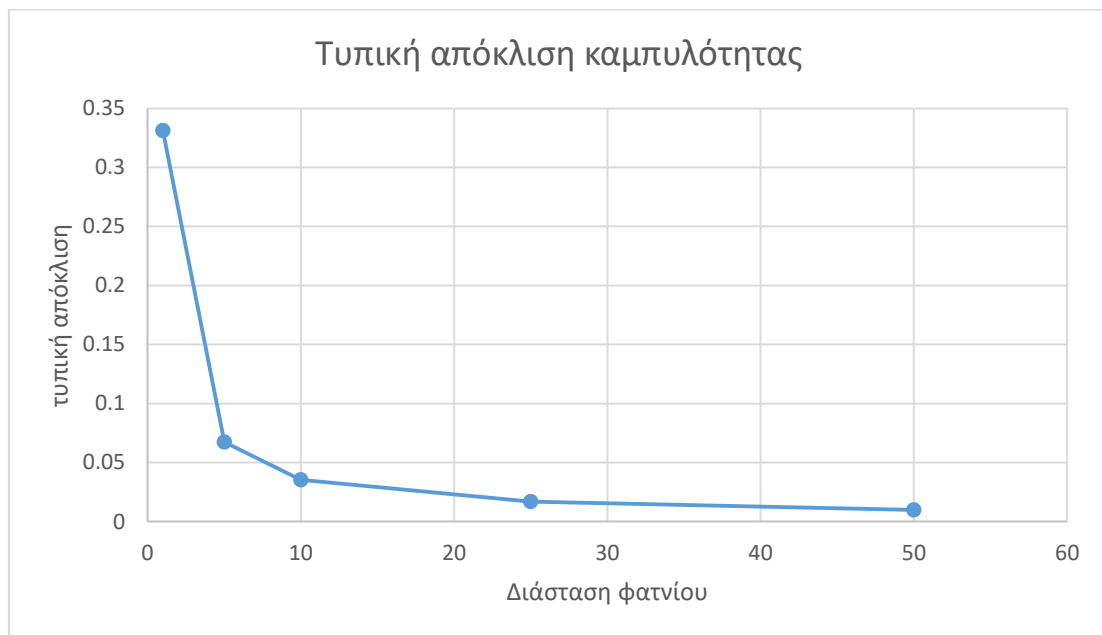
Διάσταση φατνίου (m)	Μέση τιμή της καμπυλότητας	Τυπική απόκλιση καμπυλότητας
1	0.000129	0.3312
5	0.000129	0.0672
10	0.000127	0.0353
25	0.000096	0.0169
50	0.000097	0.0098

Στην εικόνα 44 απεικονίζεται σε γράφημα το παραπάνω συμπέρασμα και διαπιστώνετε επίσης ότι για διάσταση φατνίου 25m και 50m παρουσιάζεται σταθερότητα στη μέση τιμή της καμπυλότητας. Η εικόνα 45, είναι το γράφημα της τυπικής απόκλισης της καμπυλότητας όπου φαίνεται η έντονη μείωση της διασποράς, δηλαδή η μείωση του εύρους των τιμών της καμπυλότητας όσο η διάσταση κανάβου αυξάνεται.





εικόνα 44: Μέση τιμή της γενικής καμπυλότητας σε συνάρτηση με την χωρική ανάλυση των μοντέλων



εικόνα 45: Τυπική απόκλιση της γενικής καμπυλότητας σε συνάρτηση με την χωρική ανάλυση των μοντέλων

## 5.2. Επίδραση της χωρικής ανάλυσης των μοντέλων στα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά.

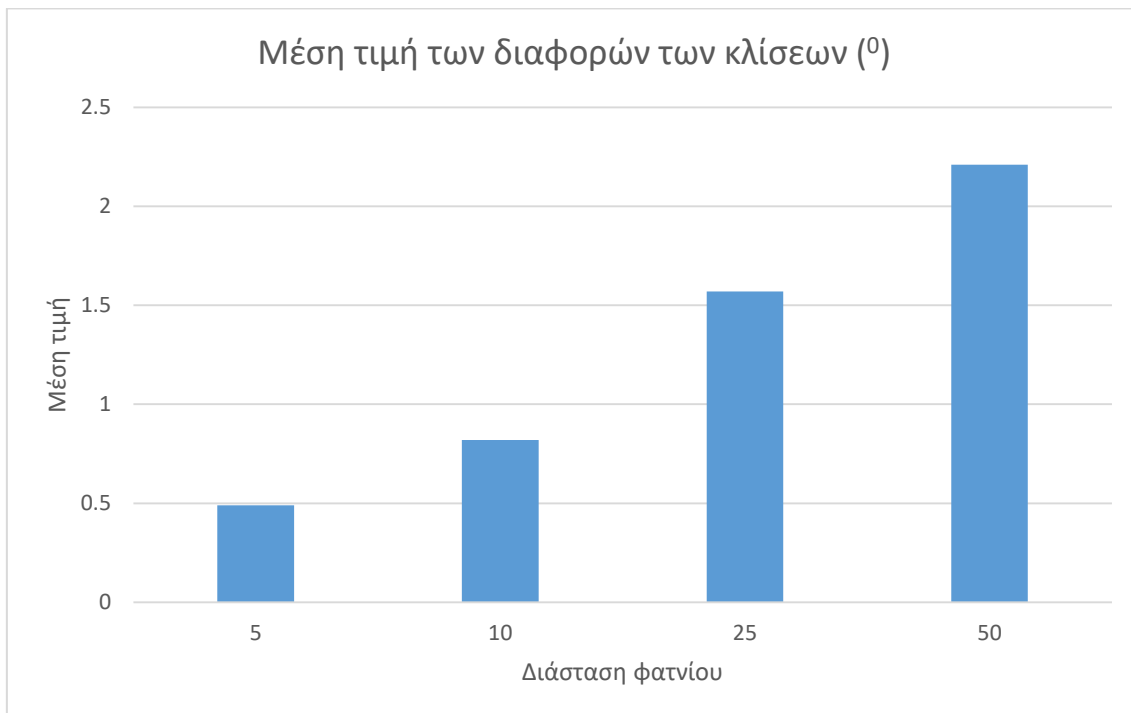
### 5.2.1. Κλίση

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, καθώς η χωρική ανάλυση των μοντέλων μειώνεται, ταυτόχρονα μειώνεται και η μέση τιμή της κλίσης κάτι που αποδεικνύεται στον Πίνακα 6, όπου φαίνονται οι διαφορές της μέσης τιμής της κλίσης του μοντέλου αναφοράς από τα μοντέλα χωρικών αναλύσεων 5, 10, 25, 50m. Επίσης παρατηρείτε ότι η διαφορά είναι θετική και αυξανόμενη κάτι που σημαίνει ότι καθώς η διάσταση φατνίου αυξάνεται η τιμή των κλίσεων τείνει να μειωθεί αφού η επιφάνεια του εδάφους αποδίδεται στα ψηφιακά μοντέλα υψομέτρων ομαλοποιημένη. Επίσης σύμφωνα με την τυπική απόκλιση που εμφανίζεται στα μοντέλα φαίνεται οι τιμές των διαφορών να είναι πιο συγκεντρωμένες όσο η διάσταση φατνίου μειώνεται (εικόνα 46, εικόνα 47) .

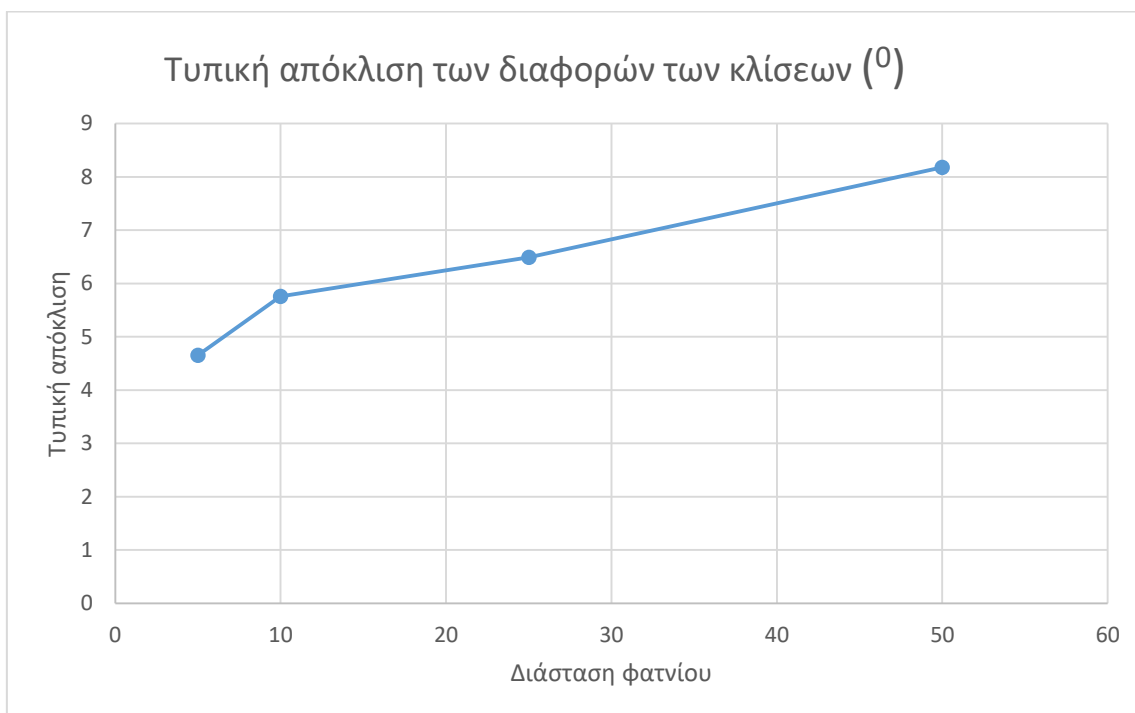
Πίνακας 6: Στατιστικά στοιχεία της διαφοράς των γωνιών κλίσης του μοντέλου αναφοράς με τα παράγωγα ΨΜΥ

Διάσταση φατνίου (m)	Μέση τιμή των διαφορών των κλίσεων	Τυπική απόκλιση των διαφορών των κλίσεων
5	0.49	4.65
10	0.82	5.76
25	1.57	6.49
50	2.21	8.18

Ωστόσο οι διαφορές τόσο της μέσης τιμής των διαφορών όσο και της τυπικής απόκλισης τους είναι μικρής τάξεως κάτι το οποίο συνεπάγεται ότι ο αλγόριθμος υπολογισμού των κλίσεων των Zevenbergen & Thorne (1987) που χρησιμοποιήθηκε, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα ανεξάρτητα από την χωρική ανάλυση των μοντέλων που χρησιμοποιούνται χωρίς να επηρεάζεται ιδιαίτερα από αυτήν.



εικόνα 46: Μεταβολή της μέσης τιμής των διαφορών της γωνίας κλίσης συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

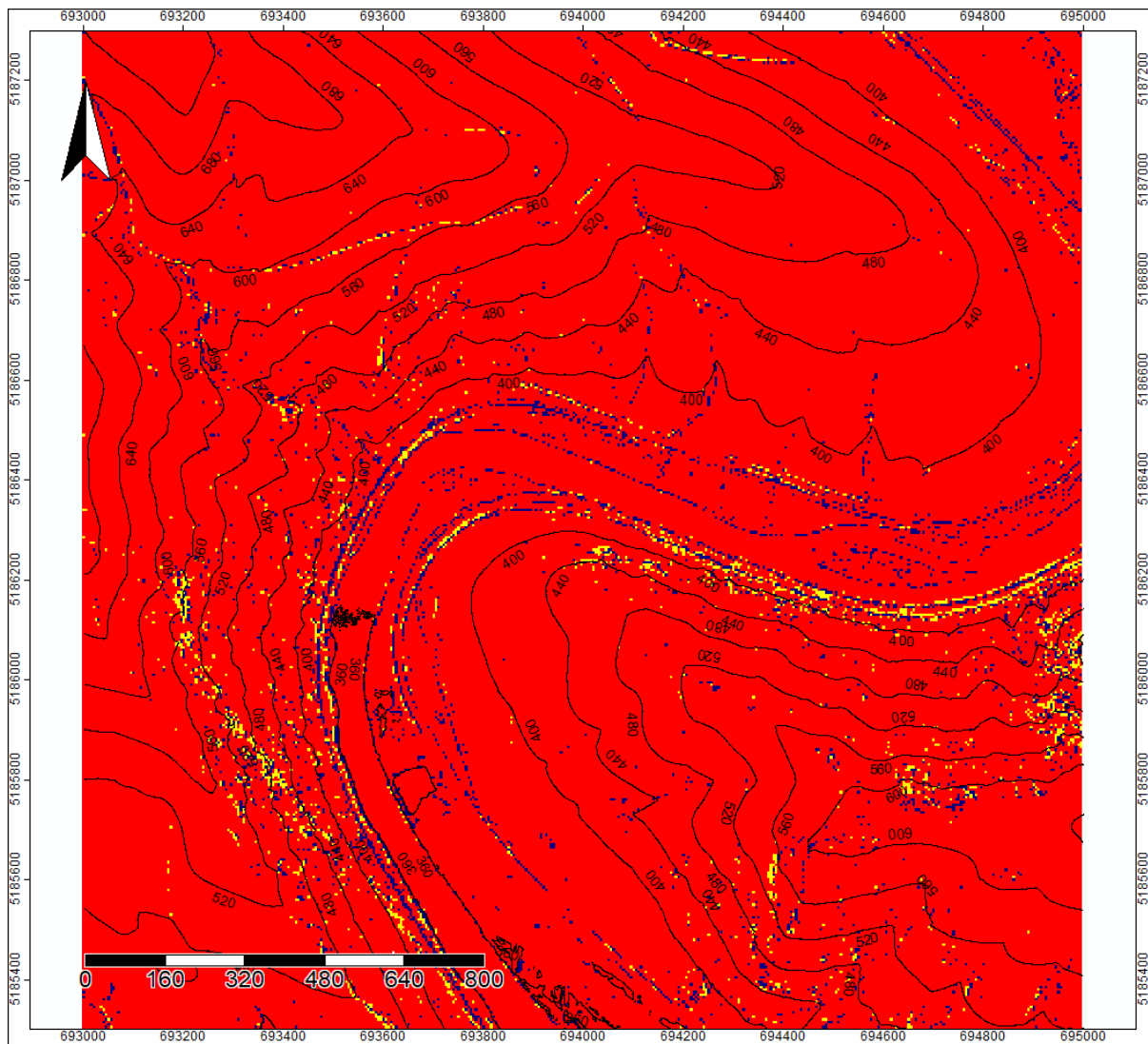


εικόνα 47: Τυπική απόκλιση των διαφορών των κλίσεων συναρτήσει της χωρικής ανάλυσης

Από τις οπτικοποιήσεις των μοντέλων των διαφορών των κλίσεων (εικόνα 48, εικόνα 49, εικόνα 50, εικόνα 51) σε γενικές γραμμές επιβεβαιώνονται τα παραπάνω συμπεράσματα καθώς οι τιμές των διαφορών των μοντέλων ισοδιάστασης 5, 10, 25m, συγκεντρώνονται γύρο από την μέση τιμή του μοντέλου αναφοράς σε ένα εύρος τιμών μικρότερο των  $10^0$  με εξαίρεση μεμονωμένες περιοχές. Το μοντέλο χωρικής ανάλυσης 50m αν και στο μεγαλύτερο μέρος εμφανίζει την ίδια συμπεριφορά με τα υπόλοιπα, φαίνεται ότι αρκετά από τα κελιά του έχουν διαφορές μεγαλύτερες των  $10^0$ , και επειδή η περιοχή μελέτης δεν είναι αρκετά μεγάλη δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για την ποιότητα του υπολογισμού.

Όπως διαπιστώνεται από το χωρικό πρότυπο των διαφορών μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα για την περιοχή μελέτης:

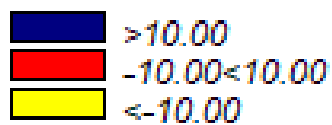
- Οι μεγαλύτερες διαφορές στην κλίση των συγκρινόμενων μοντέλων με το μοντέλο αναφοράς, παρατηρούνται στα σημεία όπου υπάρχει απότομη μεταβολή της κλίσης, δηλαδή στις κορυφογραμμές, στις χαράδρες και στις περιοχές όπου από επίπεδο έδαφος με μηδενική κλίση, η κλίση αυξάνει απότομα σε πλαγιές λόφων και υψωμάτων.
- Όσο πιο απότομη είναι η μεταβολή της κλίσης τόσο μεγαλύτερες είναι και οι διαφορές που παρατηρούνται από το μοντέλο αναφοράς.
- Φαίνεται να υπάρχει έντονη συσχέτιση του αν η διαφορά των κλίσεων των μοντέλων με το μοντέλο αναφοράς είναι θετική ή αρνητική, με την διεύθυνση στην οποία η κλίση μεταβάλλεται και ιδιαίτερα στις περιοχές όπου από μηδενική τιμή, η κλίση αυξάνεται.
- Όσο η χωρική ανάλυση των μοντέλων μειώνεται τόσο η διάσταση των περιοχών με σχετικά μεγάλες διαφορές αυξάνεται.
- Η αύξηση ωστόσο της διάστασης των περιοχών με διαφορές κλίσεων μεγαλύτερες από  $10^0$  όσο η χωρική ανάλυση μειώνεται, δεν είναι τέτοια ώστε να οδηγεί σε συμπέρασμα ότι η μείωση της χωρικής ανάλυσης των μοντέλων επιφέρει σοβαρά σφάλματα στον υπολογισμό των κλίσεων, εκτός και αν περιοχή για την οποία μελετάται η κλίση είναι μία μεμονωμένη γεωμορφή όπως μία κορυφογραμμή ή μία μισγάγγεια κ.α.



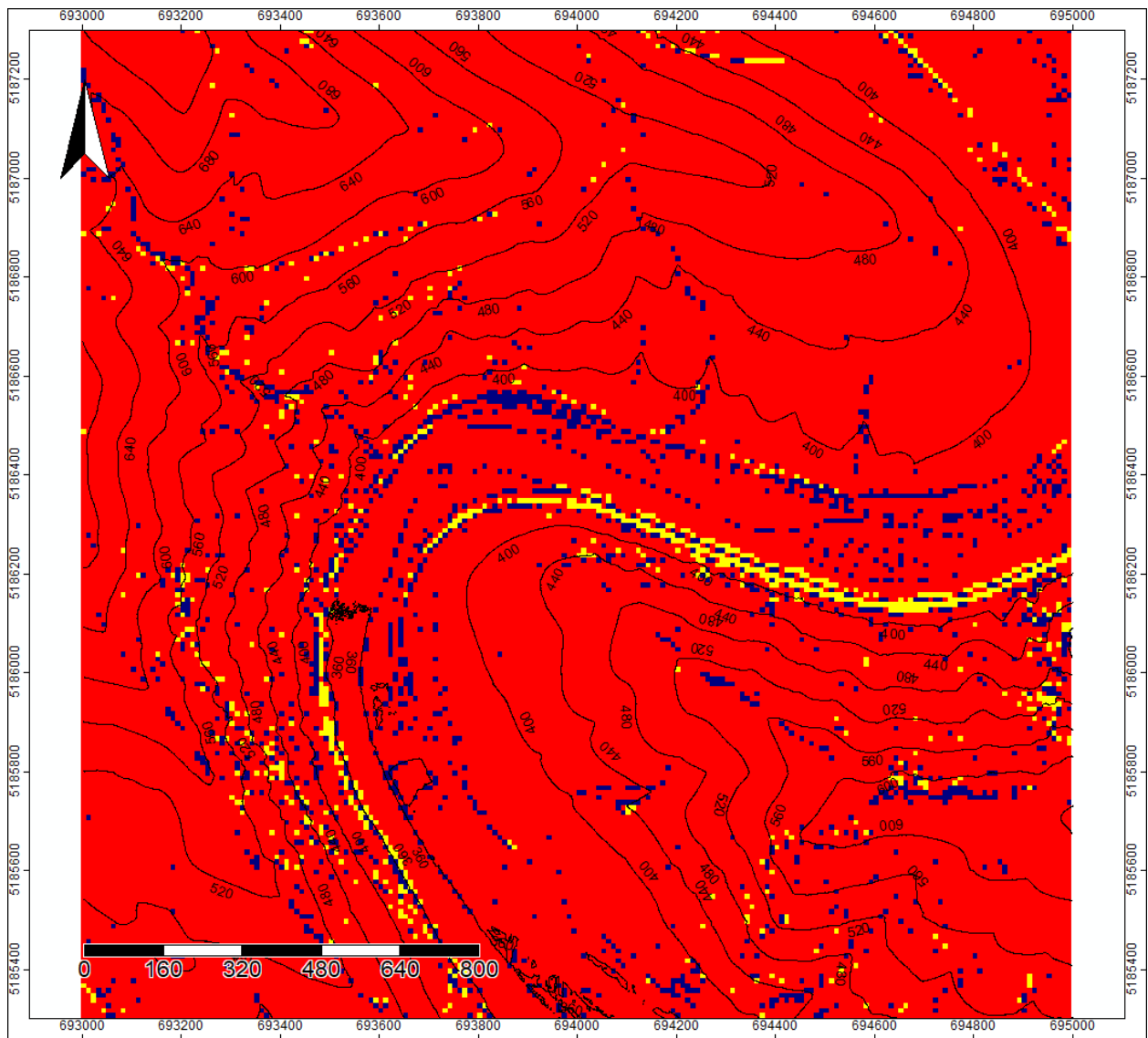
### Elevation contours



### Slope difference 1-5



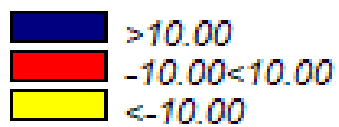
εικόνα 48: μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας κλίσης του μοντέλου χωρικής ανάλυσης 5m από το μοντέλο αναφοράς



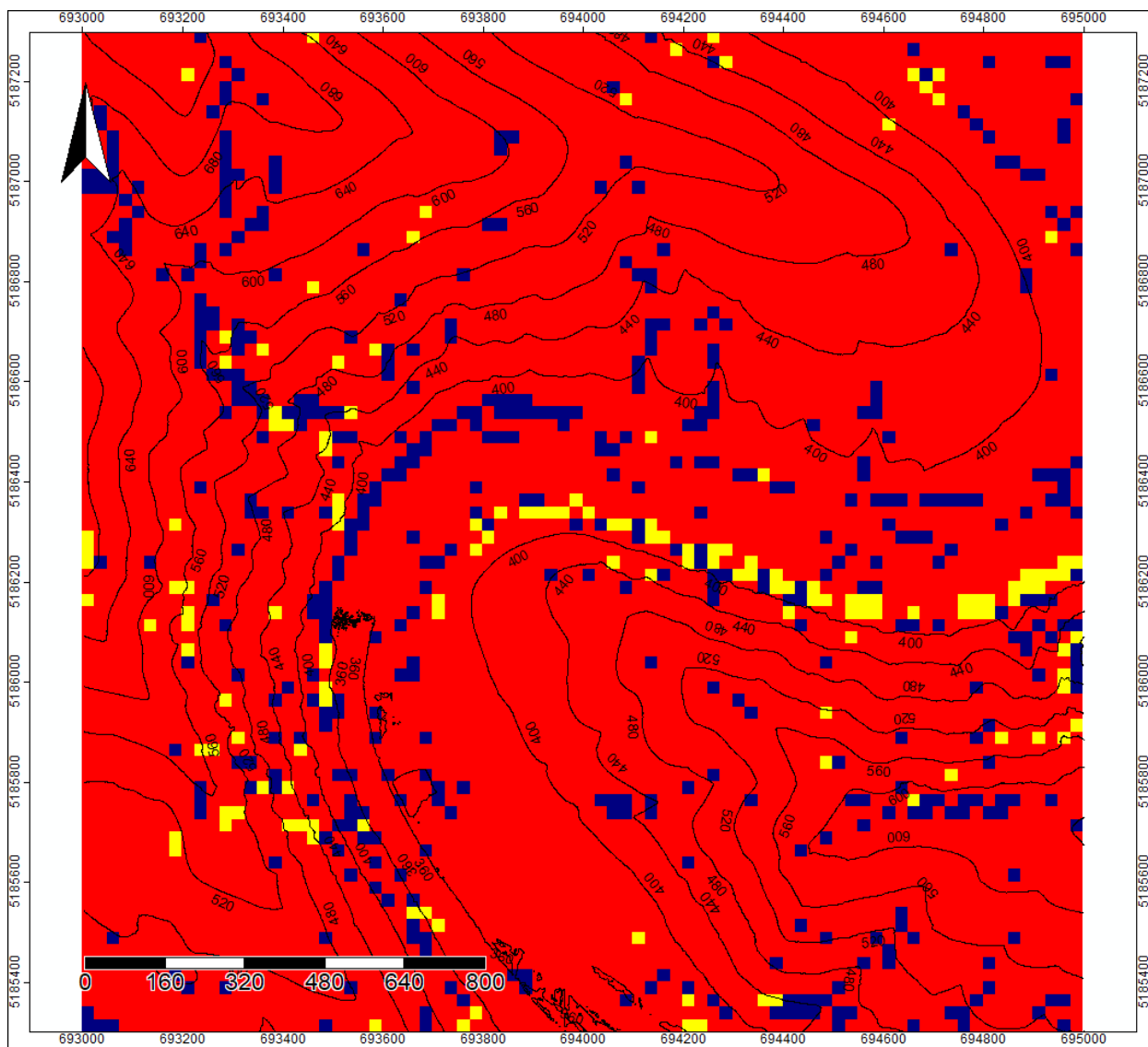
### Elevation contours



### slope difference 1-10



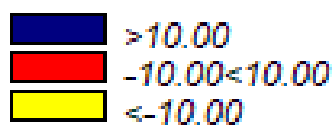
εικόνα 49: : μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας κλίσης του μοντέλου χωρικής ανάλυσης 10m από το μοντέλο αναφοράς



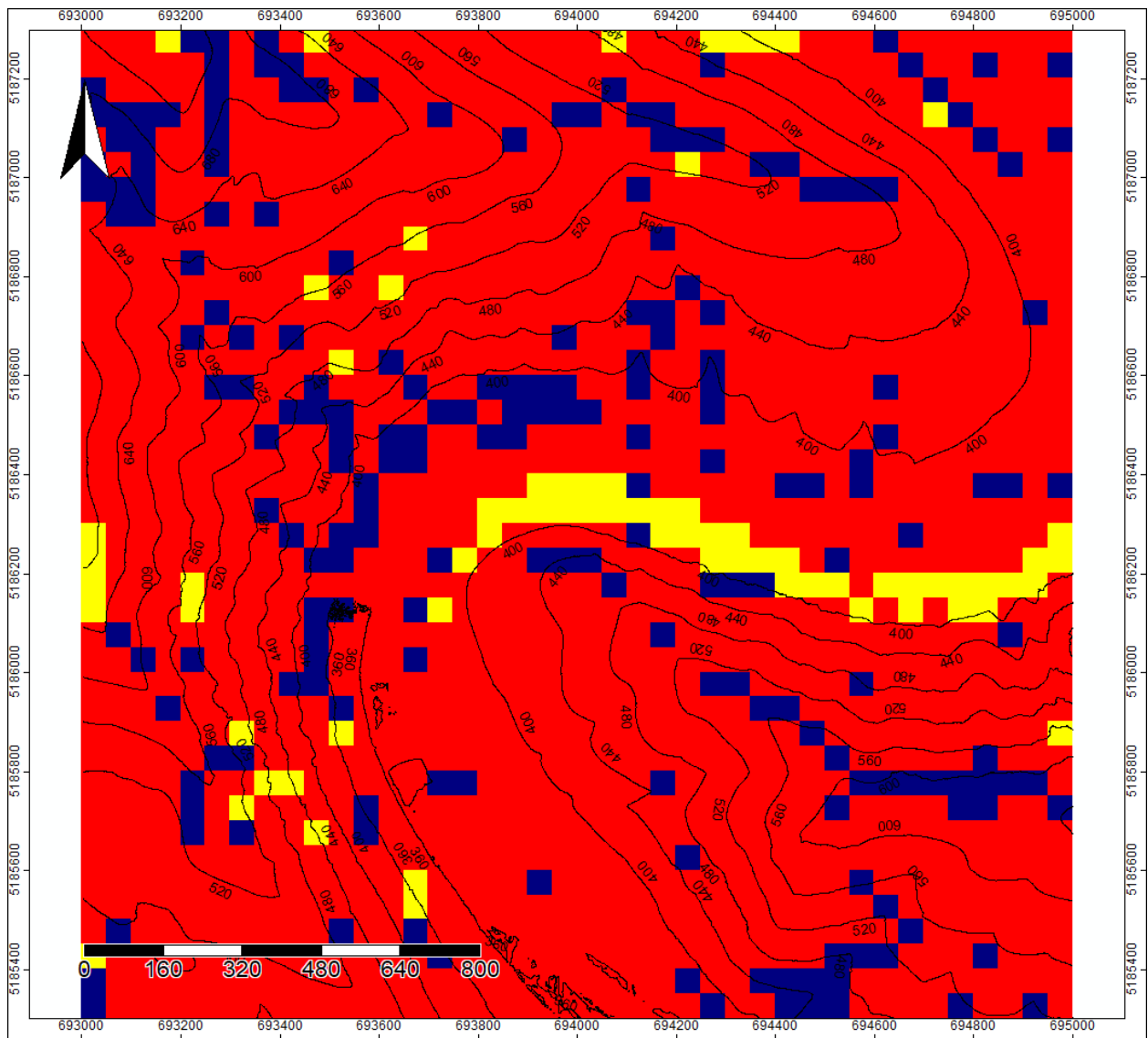
### Elevation contours



### slope difference 1-25



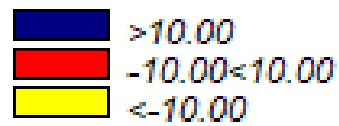
εικόνα 50: μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας κλίσης του μοντέλου χωρικής ανάλυσης 25m από το μοντέλο αναφοράς



### Elevation contours



### slope difference 1-50



εικόνα 51: μοντέλο απεικόνισης των διαφορών της γωνίας κλίσης του μοντέλου χωρικής ανάλυσης 50m από το μοντέλο αναφοράς.

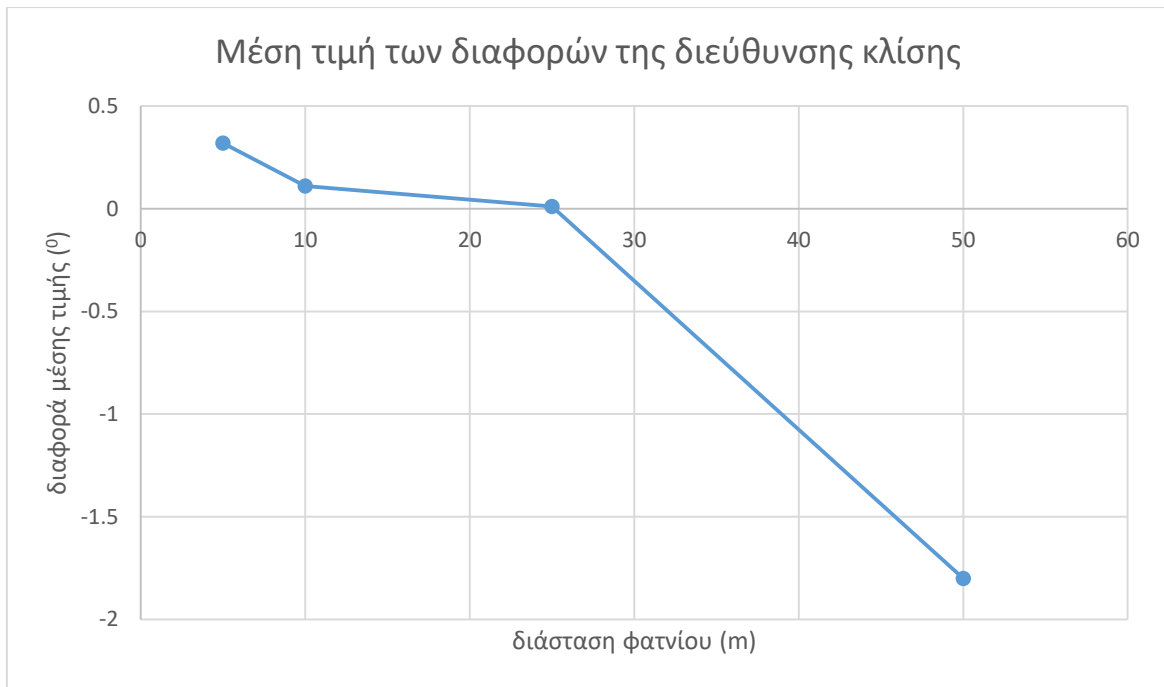


### 5.2.2. Διεύθυνση της μέγιστης κλίσης

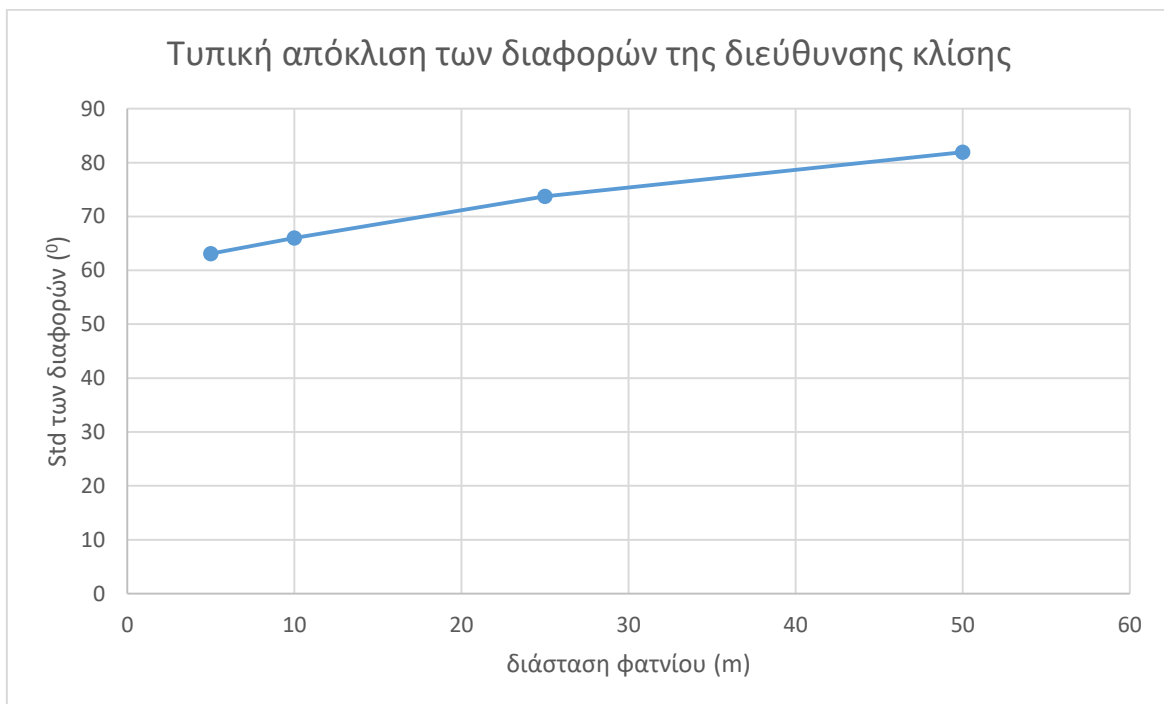
Από τον πίνακα με τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών της διεύθυνσης μέγιστης κλίσης των ψηφιακών μοντέλων εδάφους με το μοντέλο αναφοράς (Πίνακας 7), παρατηρείται ότι οι διαφορές στην μέση τιμή αλλά και στην τυπική απόκλιση των μοντέλων είναι μικρής τάξεως στα μοντέλα χωρικής ανάλυσης 5, 10, 25m, ενώ παρατηρείται μία απότομη πτώση της μέσης τιμής και αύξηση της διαφοράς για το μοντέλο χωρικής ανάλυσης 50m. Αξίζει να σημειωθεί ότι από τα στατιστικά στοιχεία φαίνεται ότι όσο η χωρική ανάλυση μειώνεται μέχρι τη διάσταση κανάβου των 25m, η μέση τιμή των διαφορών μειώνεται (εικόνα 52), κάτι το οποίο συνεπάγεται πως όσο η χωρική ανάλυση μειώνεται τόσο τα μοντέλα ανταποκρίνονται καλύτερα στο μοντέλο αναφοράς. Ωστόσο η εικασία αυτή θα πρέπει να μελετηθεί εκτενέστερα μετά την οπτικοποίηση των μοντέλων των διαφορών. Τέλος, παρατηρείται αύξηση της τυπικής απόκλισης των διαφορών σχεδόν γραμμικά με την αύξηση της διάστασης του φατνίου(εικόνα 53), κάτι που υποδηλώνει ότι όσο η χωρική ανάλυση μειώνεται τόσο αυξάνεται η διασπορά των τιμών των διαφορών με άμεση συνέπεια την αύξηση του εύρους των τιμών των διαφορών.

Πίνακας 7: μέση τιμή και τυπική απόκλιση των διαφορών των μοντέλων διεύθυνσης μέγιστης κλίσης από το μοντέλο αναφοράς

Διάσταση φατνίου (m)	Μέση τιμή των διαφορών της διεύθυνσης (°)	Τυπική απόκλιση των διαφορών της διεύθυνσης(°)
5	0.32	63.12
10	0.11	65.98
25	0.01	73.76
50	-1.8	81.94



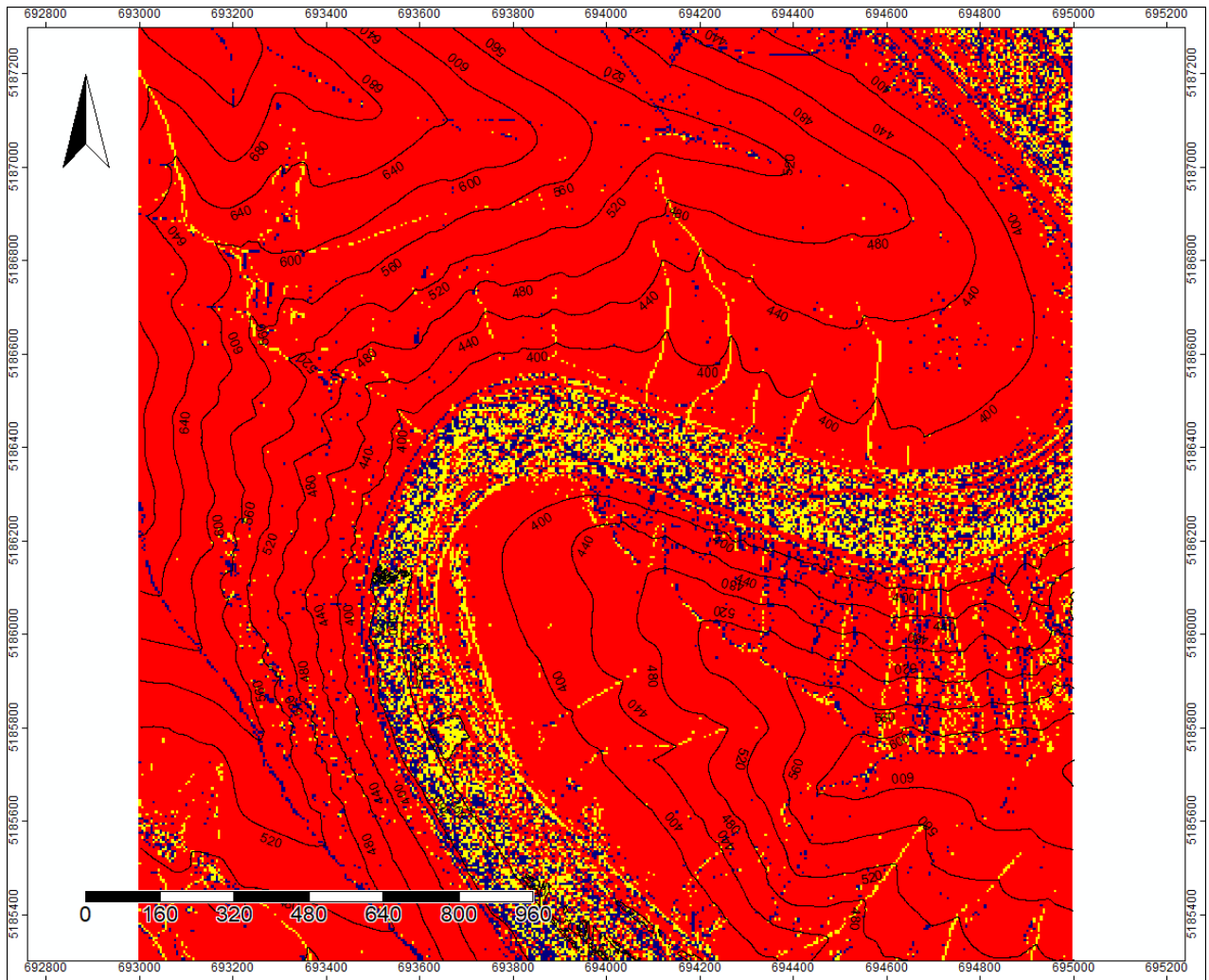
εικόνα 52: Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης τιμής των διαφορών της διεύθυνσης μέγιστης κλίσης των ψηφιακών μοντέλων εδάφους από το μοντέλο αναφοράς.



εικόνα 53: Απεικόνιση της μεταβολής της τυπικής απόκλισης των διαφορών της διεύθυνσης μέγιστης κλίσης των ψηφιακών μοντέλων εδάφους από το μοντέλο αναφοράς.

Στους παρακάτω χάρτες (εικόνα 54, εικόνα 55, εικόνα 56, εικόνα 57), δίνεται μια χωρική κατανομή των διαφορών. Μία πρώτη παρατήρηση είναι ότι το ποτάμι που διασχίζει την περιοχή μελέτης πρέπει να εξαιρεθεί από την μελέτη καθώς τα αποτελέσματα που δίνει η σύγκριση δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Επίσης, ενώ από την σύγκριση των στατιστικών στοιχείων εξήχθη το συμπέρασμα ότι τα μοντέλα μικρότερης χωρικής ανάλυσης προσομοιάζουν αρκετά καλά το μοντέλο αναφοράς, στις οπτικοποιήσεις δεν επιβεβαιώνεται κάτι τέτοιο. Αντίθετα τα εξής συμπεράσματα είναι δυνατόν να εξαχθούν:

- Στα μοντέλα απεικόνισης των διαφορών, διάστασης κανάβου 5, 10, 25m, παρατηρείτε ότι οι περισσότερες διαφορές συγκεντρώνονται σε ένα εύρος τιμών  $30^0$  (εικόνα 54, εικόνα 55, εικόνα 56). Όσο η διάσταση του κανάβου μεγαλώνει τόσο το εύρος τιμών αυξάνεται και μειώνεται η συγκέντρωση των τιμών στην τάξη μεγέθους των  $30^0$ .
- Το μοντέλο διάστασης κανάβου 50m για την συγκεκριμένη περιοχή μελέτης δεν ενδείκνυται για την εξαγωγή πληροφορίας για τις τιμές της κατεύθυνσης της μέγιστης κλίσης.
- Οι σημαντικότερες διαφορές των μοντέλων μικρότερης χωρικής ανάλυσης με το μοντέλο αναφοράς, εμφανίζονται όπως και στα μοντέλα των κλίσεων στις κορυφογραμμές και στις μισγάγγειες.
- Στις πλαγιές με βορειοανατολική κατεύθυνση φαίνεται να υπάρχει μία υποεκτίμηση των τιμών της κατεύθυνσης της μέγιστης κλίσης, καθώς σε αυτές εμφανίζονται οι περισσότερες και οι μεγαλύτερες θετικές διαφορές. Όσο η διάσταση του κανάβου μεγαλώνει, τόσο μεγαλώνει και η επιφάνεια που αυτές καταλαμβάνουν. Ωστόσο οι παραπάνω διαφορές ενδέχεται να οφείλονται στο ότι οι τιμές της διεύθυνσης κλίσης είναι κοντά στις 360 και στις -360 μοίρες και ενώ από το πρόγραμμα οι διαφορές των μοντέλων υπολογίζονται μεγαλύτερες των 30 μοιρών, στην πραγματικότητα είναι πολύ μικρότερου μεγέθους. Ένα μοντέλο με διορθωμένες αυτές τις τιμές φαίνεται στο παράρτημα 2 (εικόνα 84)



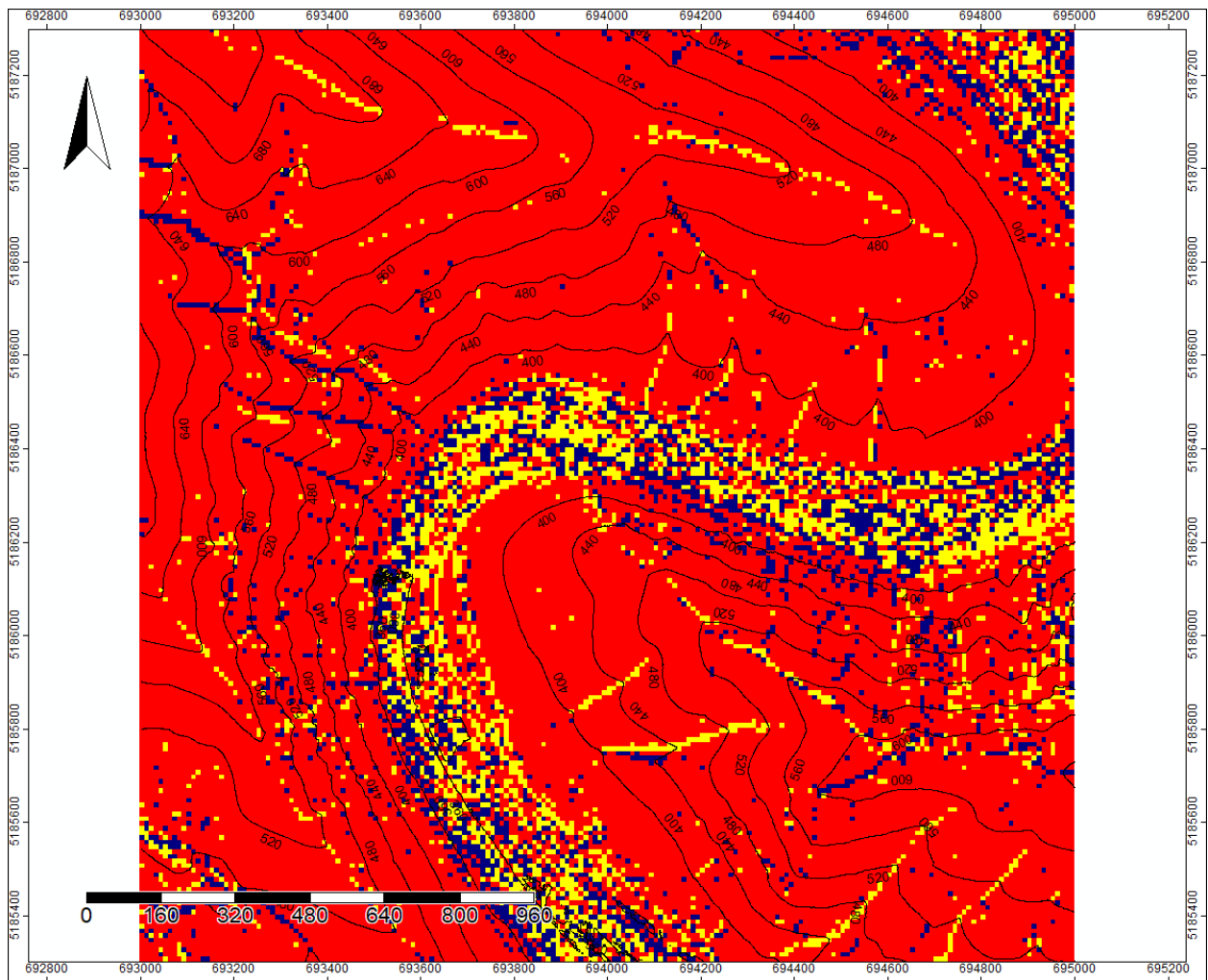
## Elevation contours



## Aspect diff 1-5



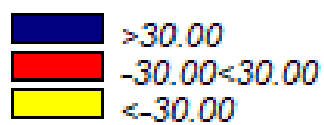
εικόνα 54: Οπτικοποίηση των διαφορών της διεύθυνσης μέγιστης κλίσης του μοντέλου χωρικής ανάλυσης 5m με το μοντέλο αναφοράς.



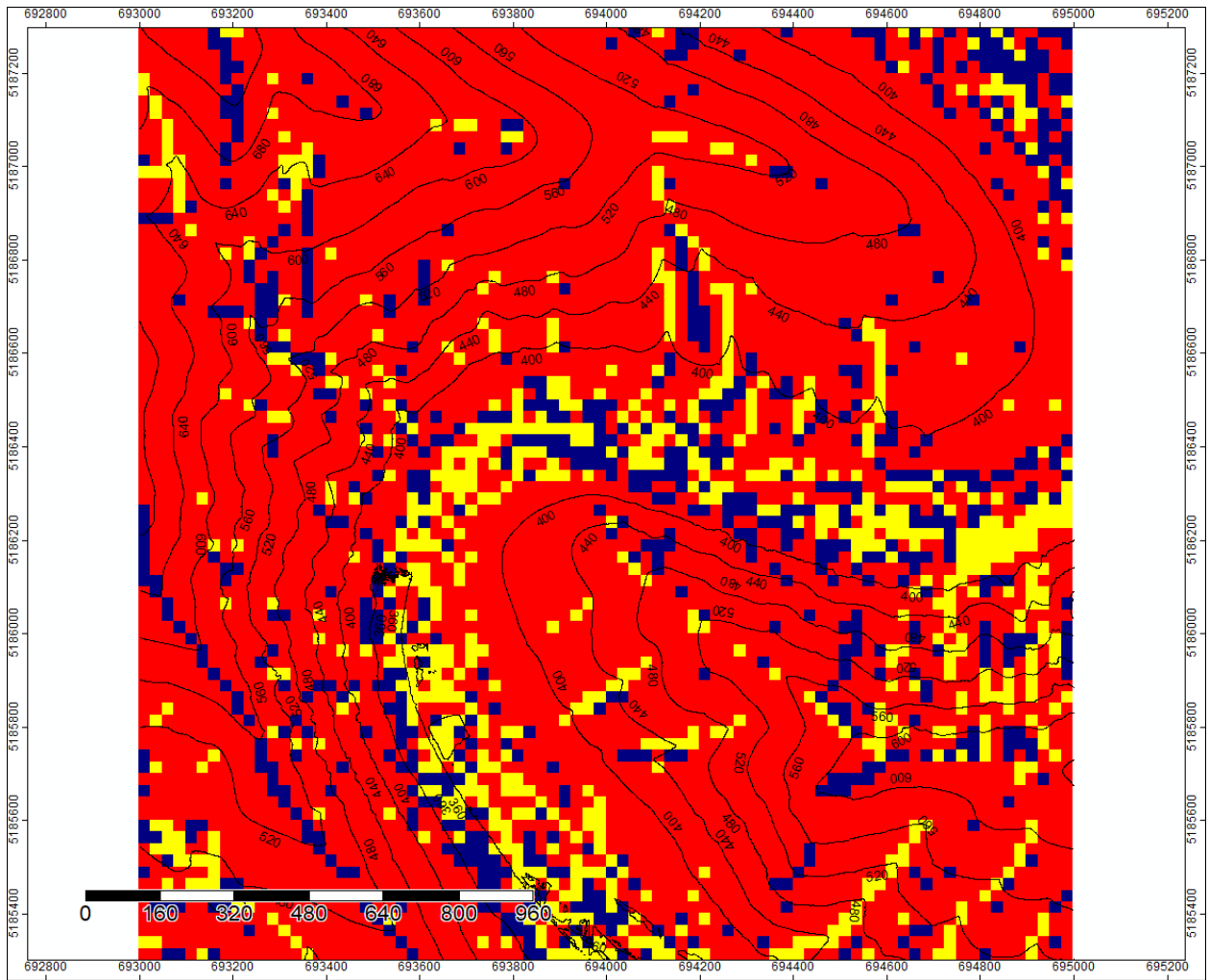
### Elevation contours



### aspect diff 1-10



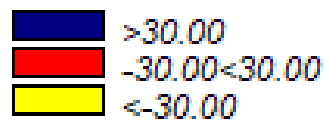
εικόνα 55: Οπτικοποίηση των διαφορών της διεύθυνσης μέγιστης κλίσης του μοντέλου χωρικής ανάλυσης 10m με το μοντέλο αναφοράς



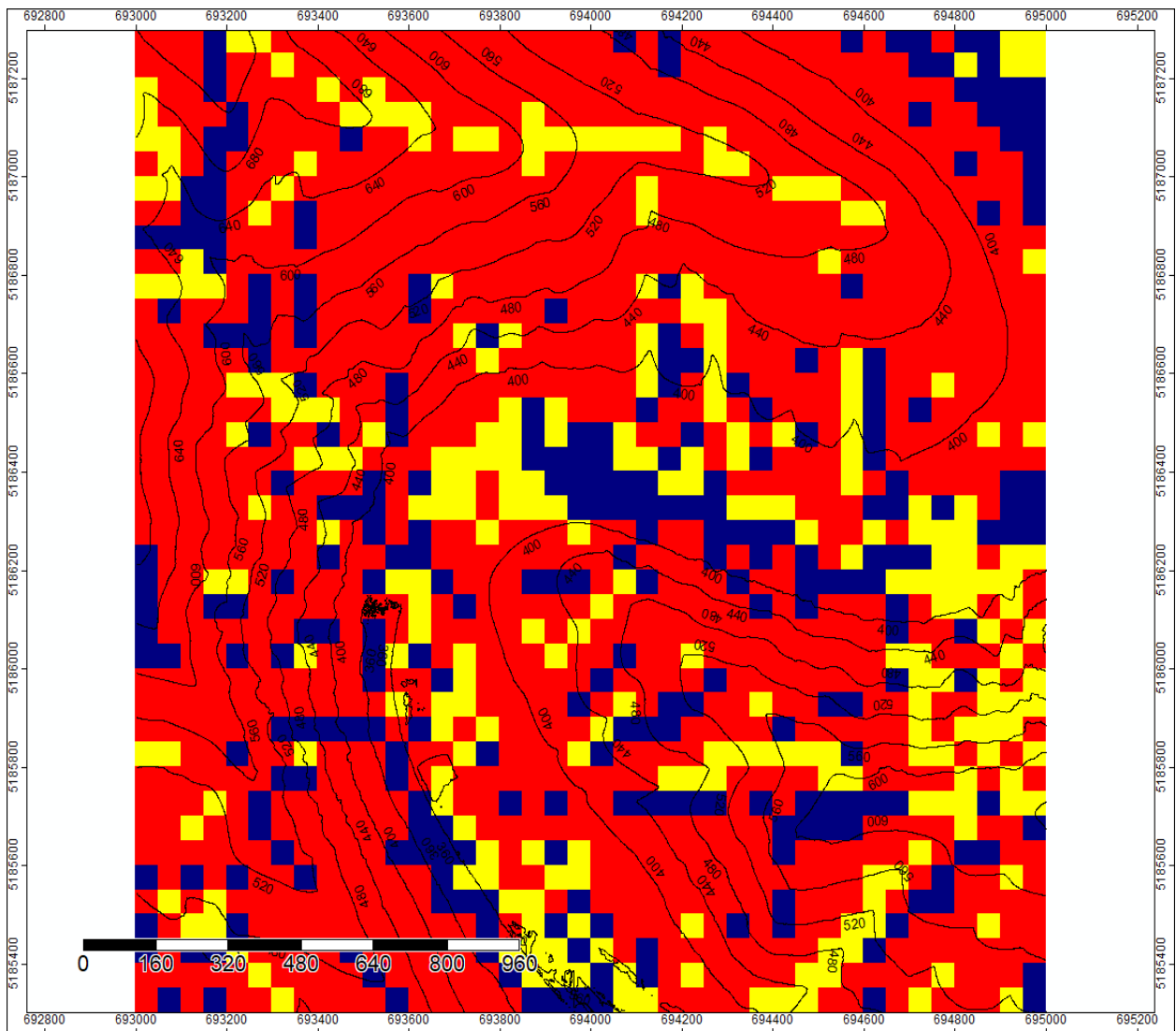
### Elevation contours



### aspect diff 1-25



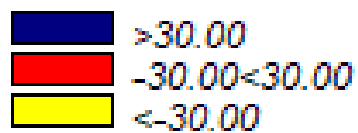
εικόνα 56: Οπτικοποίηση των διαφορών της διεύθυνσης μέγιστης κλίσης του μοντέλου χωρικής ανάλυσης 25m με το μοντέλο αναφοράς



### Elevation contours



### aspect diff 1-50



εικόνα 57: Οπτικοποίηση των διαφορών της διεύθυνσης μέγιστης κλίσης του μοντέλου χωρικής ανάλυσης 50m με το μοντέλο αναφοράς

### 5.2.3 Γενική καμπυλότητα

Για την παράμετρο της καμπυλότητας, από την στατιστική ανάλυση (Πίνακας 8) των διαφορών των καμπυλοτήτων των μοντέλων χωρικής ανάλυσης 5, 10, 25, 50m, με το μοντέλο αναφοράς, φαινομενικά προκύπτουν μικρές διαφορές στις μέσες τιμές μεταξύ των συγκρινόμενων μοντέλων, με ακαθόριστο πρότυπο και πτώση της τυπικής απόκλισης καθώς η χωρική ανάλυση μικραίνει. Το μοντέλο διάστασης κανάβου 10m έχει την μικρότερη απόκλιση από το μοντέλο αναφοράς ενώ το μοντέλο διάστασης κανάβου 50m εμφανίζει σημαντική απόκλιση από το μοντέλο αναφοράς σε σχέση με τα υπόλοιπα και η αρκετά μικρότερη τυπική απόκλιση είναι ένδειξη της ελάττωσης του εύρους τιμών των καμπυλοτήτων. Το παραπάνω συμπέρασμα είναι αναμενόμενο καθώς η διαβάθμιση των τιμών της καμπυλότητας μικραίνει όσο αυξάνεται η διάσταση κανάβου και το έδαφος απεικονίζεται αρκετά ομαλοποιημένο.

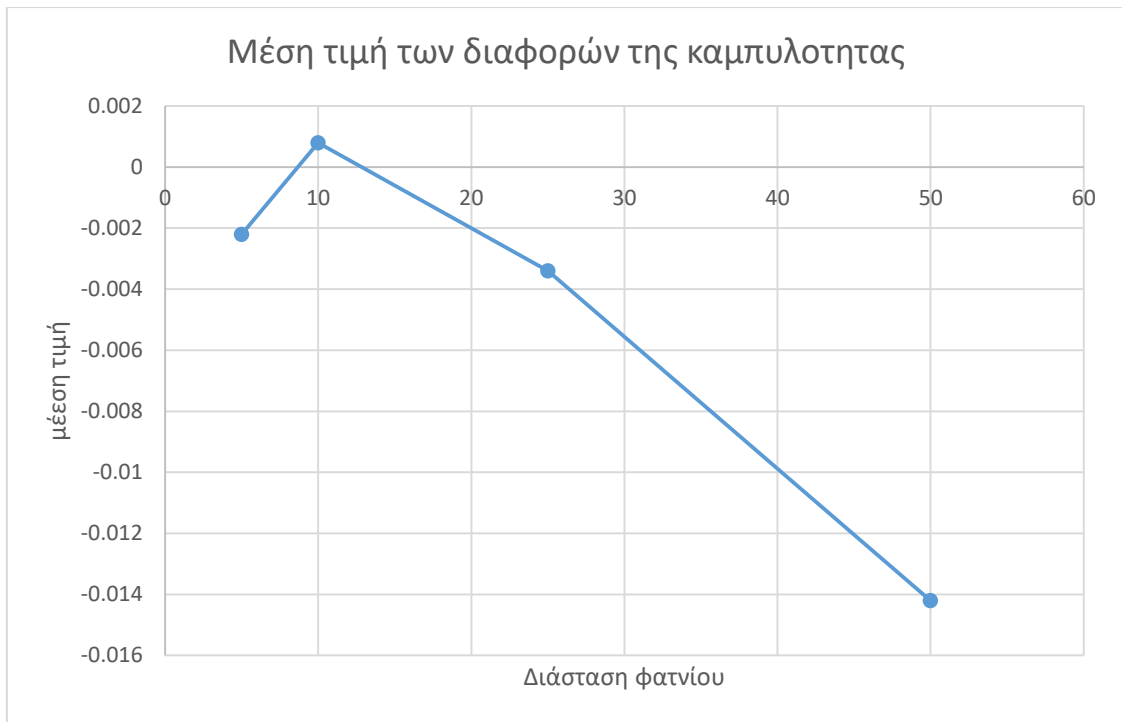
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα που απεικονίζει τον μέσο όρο των διαφορών της καμπυλότητας σε συνάρτηση με την χωρική ανάλυση των μοντέλων (εικόνα 58), εμφανίζεται μία ισορροπία για τα μοντέλα με διάσταση κανάβου 5, 10 και 25m επομένως δεν μπορούν να μελετηθούν με αυτό τον τρόπο σύγκρισης οι διαφορές τους. Αντίθετα, παρατηρείται μία αύξηση της διαφοράς για το μοντέλο χωρικής ανάλυσης 50m, καθώς παρουσιάζεται αύξηση των τιμών των καμπυλοτήτων.

Το διάγραμμα που απεικονίζει την τυπική απόκλιση των διαφορών της καμπυλότητας σε συνάρτηση με την χωρική ανάλυση, εμφανίζει μια χαρακτηριστική σταθερότητα στις τυπικές αποκλίσεις των μοντέλων, με μία πτώση στο μοντέλο των 50m όπως σχολιάστηκε και στα προηγούμενα.

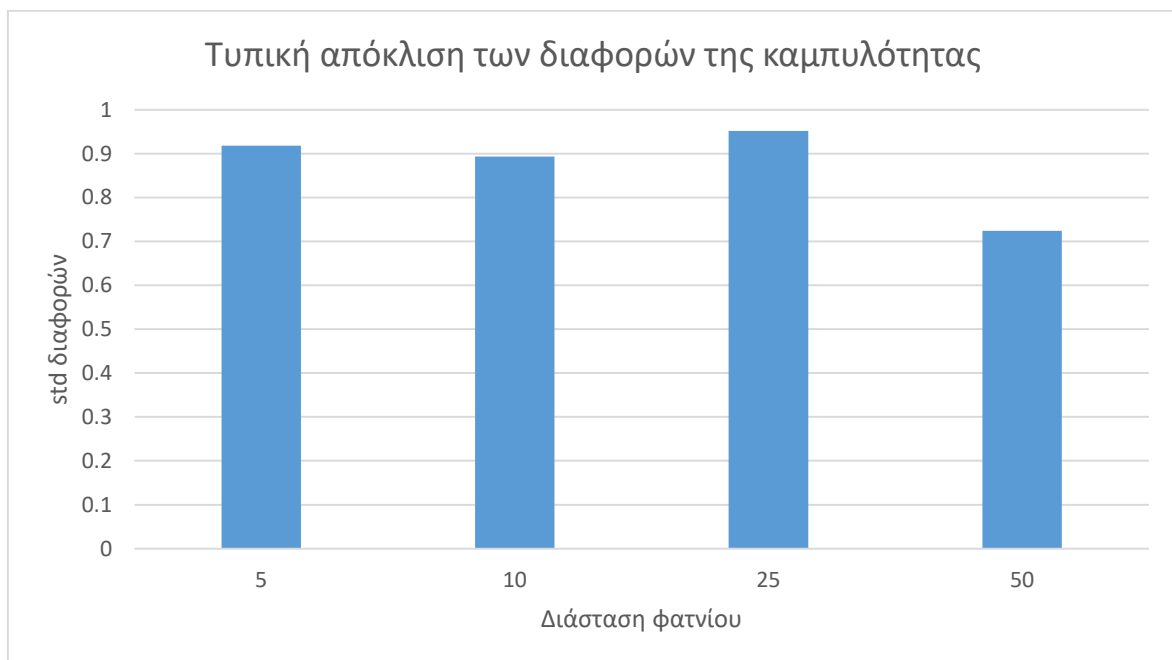
Πίνακας 8: μέση τιμή και τυπική απόκλιση των διαφορών των μοντέλων καμπυλοτήτων από το μοντέλο αναφοράς

Διάσταση φατινίου(m)	Μέση τιμή των διαφορών της καμπυλότητας	Τυπική απόκλιση των διαφορών της καμπυλότητας
5	-0.0022	0.918
10	0.0008	0.893
25	-0.0034	0.952
50	-0.0142	0.724





εικόνα 58: Απεικόνιση της μεταβολής της μέσης τιμής των διαφορών της γενικής καμπυλότητας των ψηφιακών μοντέλων εδάφους από το μοντέλο αναφοράς.



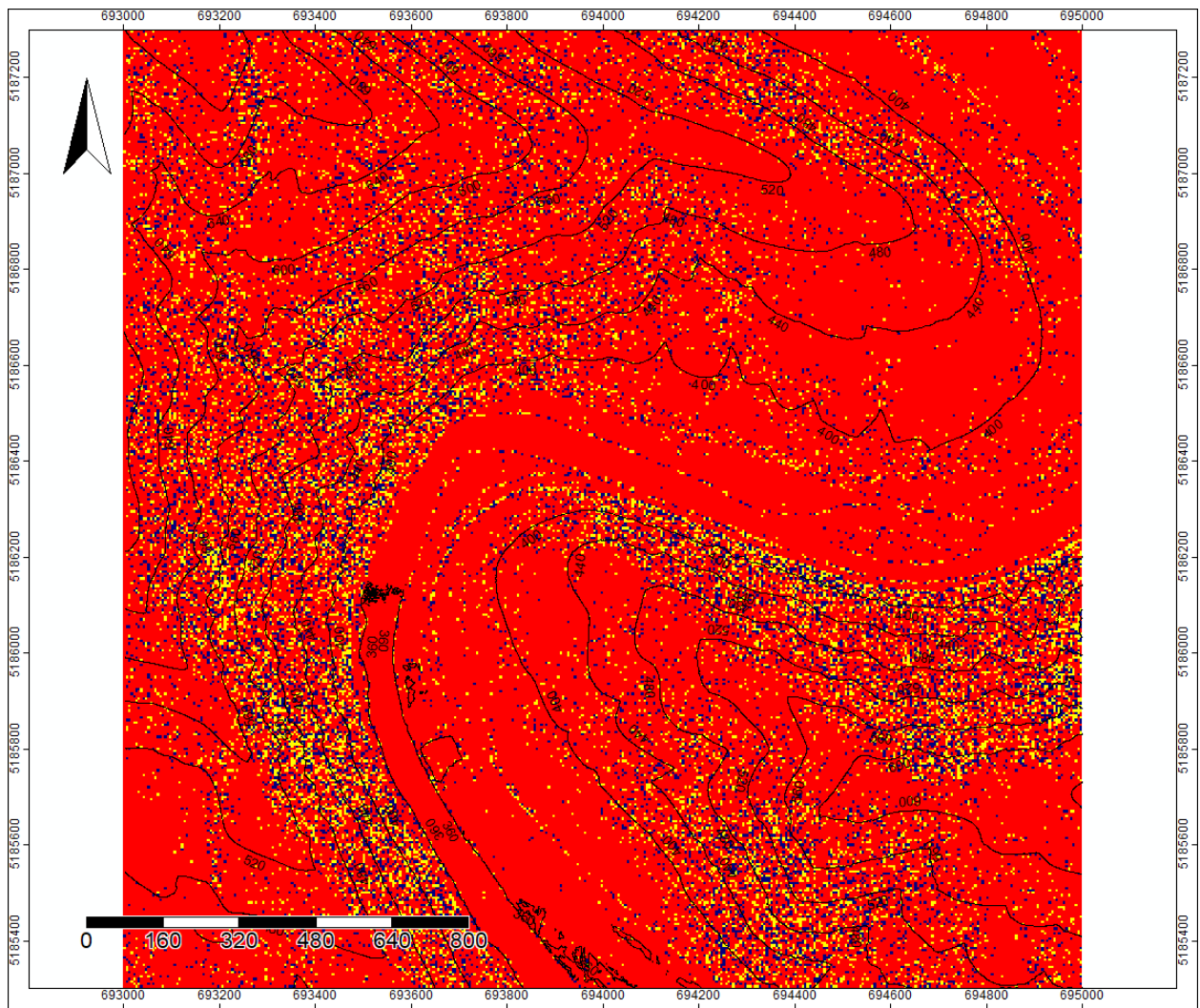
εικόνα 59: Απεικόνιση της μεταβολής της τυπικής απόκλισης των διαφορών της γενικής καμπυλότητας των ψηφιακών μοντέλων εδάφους από το μοντέλο αναφοράς.

Μετά από αρκετές δοκιμές στις οπτικοποιήσεις των μοντέλων απεικόνισης των διαφορών της καμπυλότητας των μοντέλων μικρότερης χωρικής ανάλυσης από το μοντέλο αναφοράς, παρατηρήθηκε ότι οι διαφορές ξεκινάνε να παρουσιάζουν μία συγκέντρωση σε ένα διάστημα  $(-0.8,0.8) \text{ m}^{-1}$  (εικόνα 60, εικόνα 61, εικόνα 62, εικόνα 63). Μετά από μελέτη των ιστογραμμάτων συχνοτήτων όλων των μοντέλων καμπυλοτήτων, παρατηρήθηκε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των τιμών της καμπυλότητας συγκεντρώνεται εντός του διαστήματος  $(-0.3,0.3)$ , ενώ σε κάποια μοντέλα το διάστημα αυτό είναι ακόμα μικρότερο, κάτι το οποίο υποδηλώνει πως οι διαφορές των μοντέλων είναι αρκετά μεγάλες.

Επίσης, από τα διαγράμματα συχνοτήτων των διαφορών της καμπυλότητας των μοντέλων μικρότερης χωρικής ανάλυσης από το μοντέλο αναφοράς, υπολογίστηκε ότι εντός του διαστήματος  $(-0.8,0.8) 1/\text{m}$ , βρίσκεται περίπου το 85% των διαφορών, ποσοστό που για το μέγεθος του διαστήματος δεν είναι αρκετά μεγάλο ώστε τα μοντέλα να θεωρηθούν αξιόπιστα. Ωστόσο, η μείωση της χωρικής ανάλυσης δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα των μοντέλων. Παρότι η διάσταση φατνίου αυξάνεται το ποσοστό των διαφορών που βρίσκεται εντός του παραπάνω διαστήματος παραμένει σταθερό, περίπου στο 85% κάτι που επιβεβαιώνει ότι η ακρίβεια των τιμών των καμπυλοτήτων δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα.

Τα παραπάνω αποτελέσματα ίσως οφείλονται στο ότι το μοντέλο αναφοράς είναι δομής τετραγωνικού κανάβου και προέρχεται απευθείας από τα αρχικά δεδομένα με την μέθοδο της αντιστρόφου απόστασης, ενώ τα συγκρινόμενα μοντέλα έχουν δημιουργηθεί σε δομή ακανόνιστου τριγωνικού δικτύου, με κορυφές τριγώνων όσα και τα φατνία του μοντέλου δομής κανάβου αντίστοιχης χωρικής ανάλυσης και ακολούθως έχουν μετατραπεί σε GRID για την σύγκριση τους.

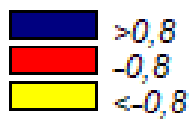
Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, τα μοντέλα δομής TIN χωρικών αναλύσεων 5m, 10m, 25m, 50m, μεταξύ τους δεν εμφανίζουν σημαντικές διαφορές στις τιμές της γενικής καμπυλότητας, ωστόσο εμφανίζουν αρκετά μεγάλες διαφορές σε σχέση με το μοντέλο αναφοράς, δομής GRID.



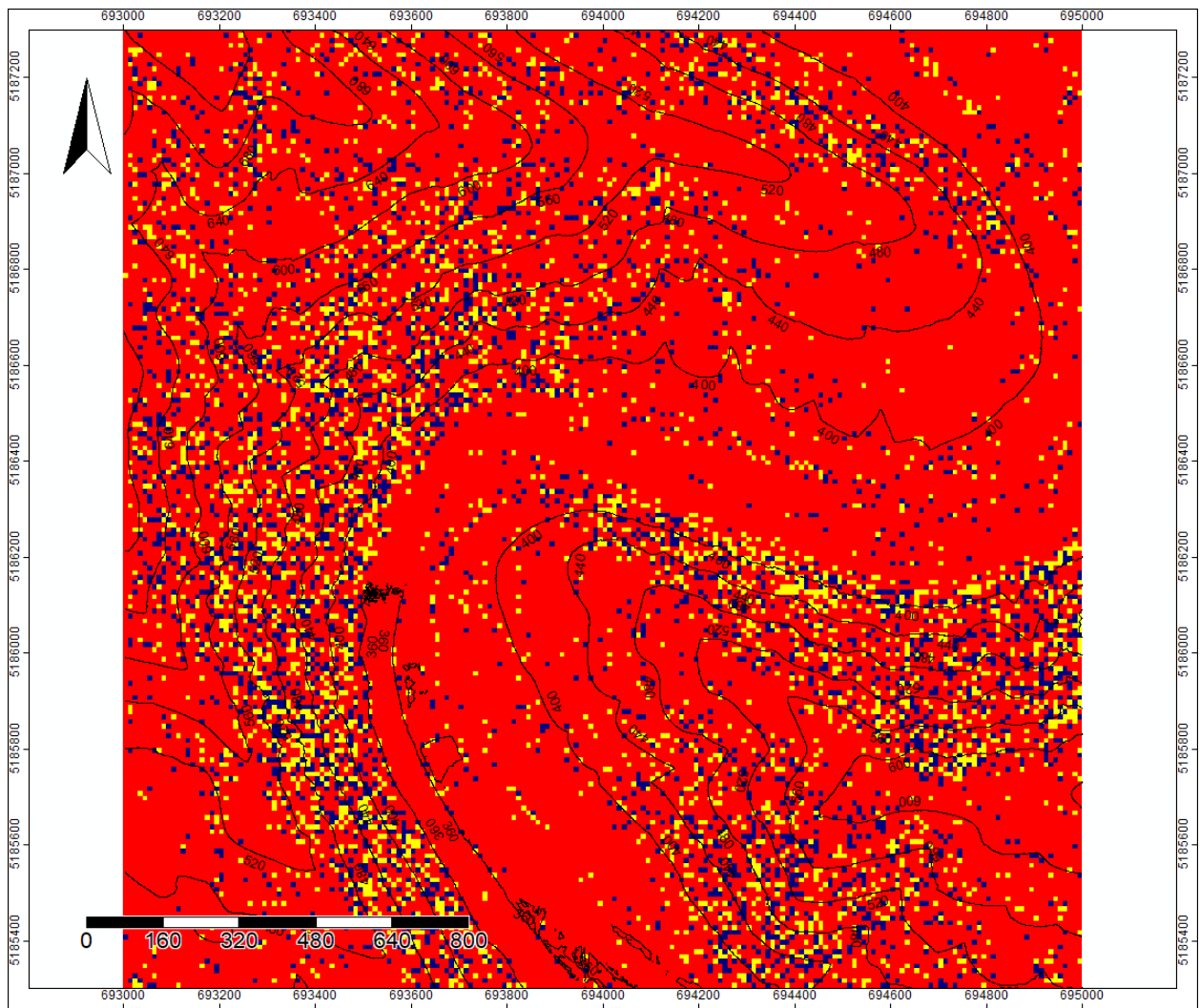
### Elevation contours 1



### curv diff 1-5



εικόνα 60: Οπτικοποίηση των διαφορών της γενικής καμπυλότητας του μοντέλου χωρικής ανάλυσης 5m με το μοντέλο αναφοράς



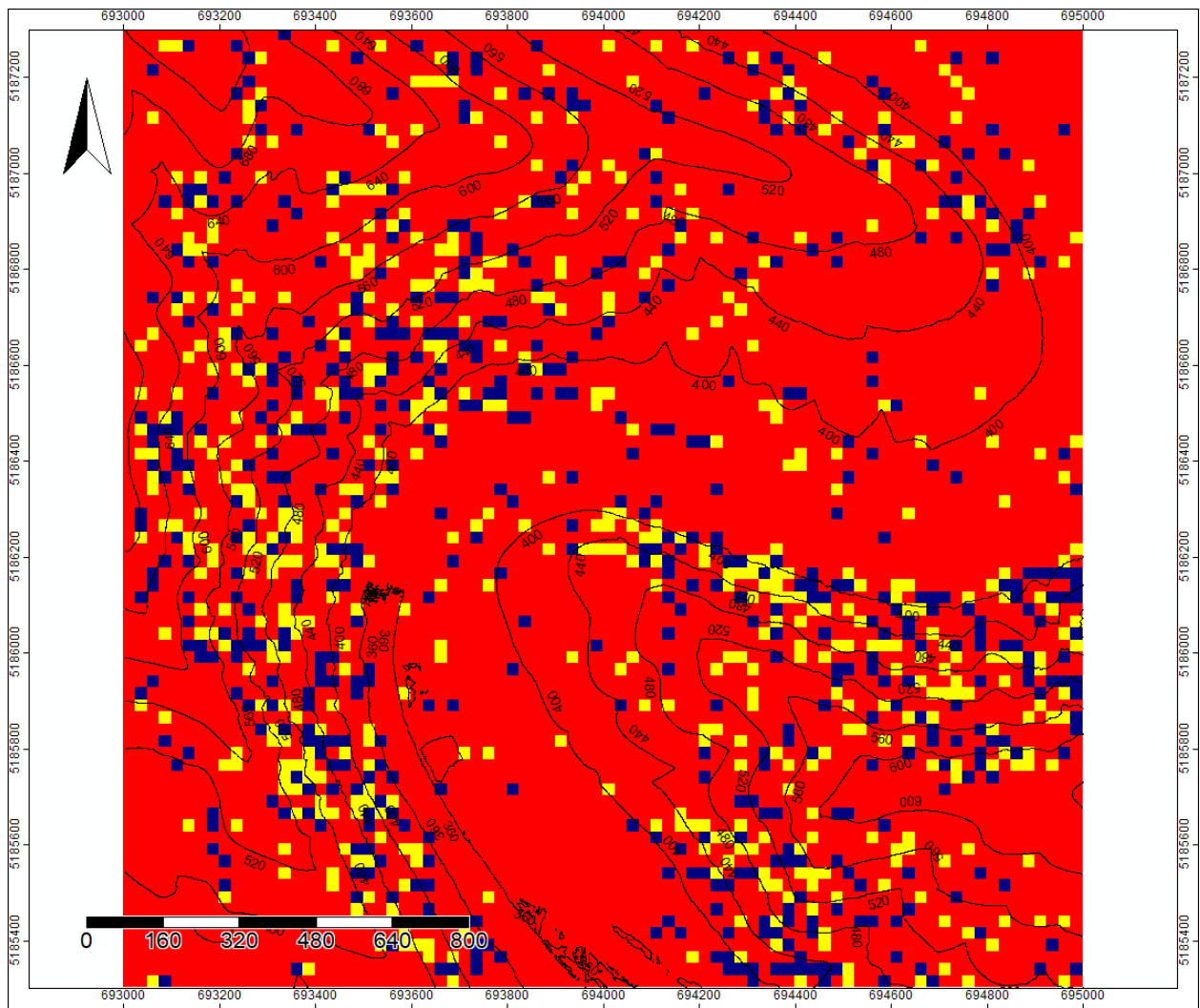
### Elevation contours 1



### Curv diff 1-10



εικόνα 61: Οπτικοποίηση των διαφορών της γενικής καμπυλότητας του μοντέλου χωρικής ανάλυσης 10m με το μοντέλο αναφοράς



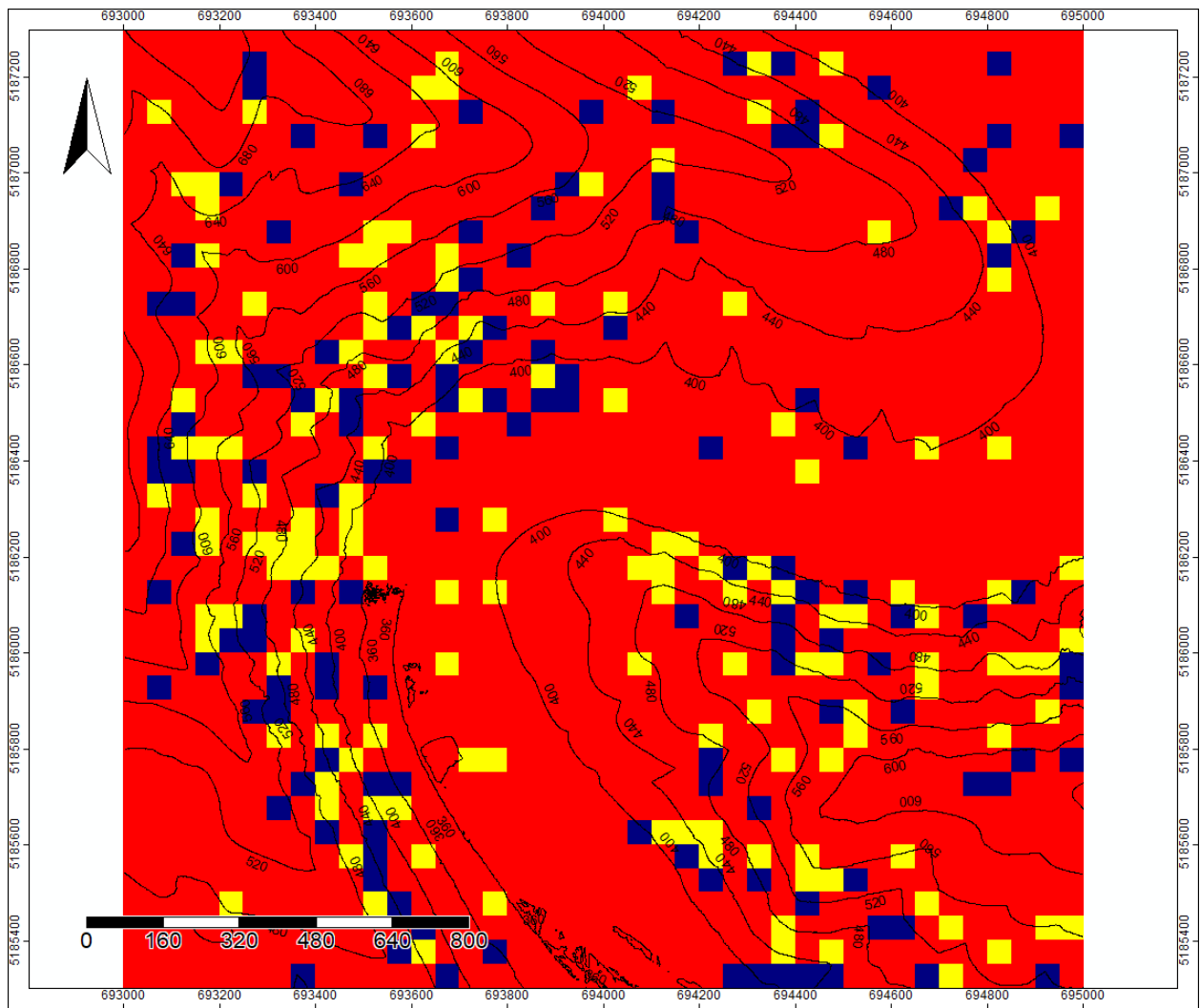
### Elevation contours 1



### Curv diff 1-25



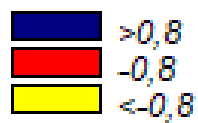
εικόνα 62: Οπτικοποίηση των διαφορών της γενικής καμπυλότητας του μοντέλου χωρικής ανάλυσης 25m με το μοντέλο αναφοράς



### Elevation contours 1



### Curv diff 1-50



εικόνα 63: Οπτικοποίηση των διαφορών της γενικής καμπυλότητας του μοντέλου χωρικής ανάλυσης 50m με το μοντέλο αναφοράς

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο βασικός κορμός της εργασίας αναφέρεται στην αξιοποίηση δεδομένων LiDAR υψηλής ακρίβειας, για την δημιουργία ψηφιακών μοντέλων υψομέτρων δομής TIN, διαφόρων χωρικών αναλύσεων καθώς και στα επιμέρους στάδια που αποτελούν μέρος της γεωμορφομετρικής ανάλυσης και οδηγούν στην εξαγωγή των γεωμορφομετρικών χαρακτηριστικών που αφορούν την παρούσα μελέτη.

Για την παραγωγή των ψηφιακών μοντέλων δομής TIN προτιμήθηκε το λογισμικό ArcGIS καθώς παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία στην κατασκευή και στην επεξεργασία αυτών των μοντέλων, ενώ για την σύγκριση τους επιλέχθηκε το λογισμικό SAGA. 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 μητρικών υψομετρικών μοντέλων εδάφους. Η επιλογή της χωρικής ανάλυσης είναι μείζονος σημασίας καθώς αποτελεί το μέτρο της περιεχόμενης στο μοντέλο πληροφορίας, κάτι το οποίο άμεσα αντικατοπτρίζει το επίπεδο της συσχέτισης του ψηφιακού μοντέλου με την πραγματικότητα. Μελετήθηκε λοιπόν κατά πόσο κάθε ψηφιακό μοντέλο εδάφους διαφορετικής χωρικής ανάλυσης αντικατοπτρίζει την πραγματική μορφολογία της επιφάνειας του εδάφους, αναλόγως με το υπό μελέτη μορφομετρικό 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 και του χρόνου που απαιτείται για την επεξεργασία, καθώς και του απαιτούμενου χώρου αποθήκευσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα των περιορισμών που υπάρχουν από τα λογισμικά εφαρμογής είναι ότι το ArcGIS έχει ανώτατο όριο σημείων από τα οποία δημιουργεί ψηφιακό μοντέλο εδάφους δομής TIN τα 5000000pts. 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 με παρόμοιας τάξης μεγέθους έκταση η χωρική ανάλυση δεν παίζει τόσο μεγάλο ρόλο στην επεξεργασία εκτός και αν τα αρχικά σημεία είναι πάρα πολύ πυκνά ( $>5pt/m^2$ ), ωστόσο σε μεγαλύτερης έκτασης περιοχές, για παράδειγμα όταν απαιτείται η απεικόνιση ολόκληρης χώρας, είναι πιθανόν να απαιτείται η χρήση ψηφιακού μοντέλου εδάφους χωρικής ανάλυσης μικρότερης των 25m. 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 (4km<sup>2</sup>), με έντονο ανάγλυφο και μεγάλες κλίσεις, οπότε τα ακόλουθα συμπεράσματα αφορούν περιοχές με παρόμοια μορφολογικά χαρακτηριστικά.

### 6.1. Κλίση

Όσο η χωρική ανάλυση μειώνεται, ελαττώνεται ο αριθμός των κορυφών του TIN. Συγκεκριμένα, οι τιμές των κλίσεων υποεκτιμώνται, ιδιαίτερα στις περιοχές με έντονο ανάγλυφο όπως πλαγιές και βουνοκορφές. Παρόλα αυτά, η τάξη μεγέθους της τιμής των διαφορών των μοντέλων ανάλυσης 5m, 10m, 25m με το μοντέλο αναφοράς είναι μικρή και τα μοντέλα αυτά μπορούν να θεωρηθούν αρκετά αντιπροσωπευτικά. Αντίθετα, το μοντέλο των 50m εμφανίζει αρκετά μεγαλύτερες διαφορές και δεν ενδείκνυται για παρόμοιες μελέτες, ωστόσο οι διαφορές αυτές δεν είναι απαγορευτικές. Τέλος ένα ακόμα ενδιαφέρον στοιχείο που προέκυψε από τις οπτικοποιήσεις των διαφορών των μοντέλων των κλίσεων είναι ότι οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται στις περιοχές με απότομες αλλαγές κλίσης όπως κορυφογραμμές και φαράγγια.

### 6.2. Κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης

Στην κατεύθυνση της μέγιστης κλίσης, ένα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει μετά την μελέτη των στατιστικών στοιχείων και των οπτικοποιήσεων των διαφορών των μοντέλων, είναι ότι τα αποτελέσματα τους σε πρώτη εικόνα δείχνουν να διαφέρουν. Ενώ από τα στατιστικά στοιχεία φαίνεται ότι για τα μοντέλα 5m, 10m, 25m όσο η χωρική ανάλυση μειώνεται, τόσο τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους τείνουν να πλησιάζουν στο μοντέλο αναφοράς, από τις οπτικοποιήσεις των διαφορών, φαίνεται ότι όσο η χωρική ανάλυση μειώνεται, οι διαφορές αυξάνονται. Μια παρατήρηση είναι ότι οι περισσότερες διαφορές εμφανίζονται στις πλαγιές με βορειοανατολική κατεύθυνση.

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι τα μοντέλα 5m, 10m, 25m, είναι κατάλληλα για την εξαγωγή τιμών της διεύθυνσης της μέγιστης κλίσης, αναλόγως πάντα με τις απαιτήσεις της μελέτης για την οποία προορίζονται. Αντίθετα το ψηφιακό μοντέλο εδάφους χωρικής ανάλυσης 50m, δεν ενδείκνυται για χρήση σε εφαρμογές που έχουν απαιτήσεις μεσαίας ή μεγάλης ακρίβειας, αλλά είναι εύχρηστα για εργασίες μεγάλης έκτασης 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. Με την μείωση της χωρικής ανάλυσης επέρχεται έντονη μείωση του εύρους τιμών των καμπυλοτήτων και έτσι όσο η χωρική ανάλυση μειώνεται δημιουργούνται περιορισμοί στον χαρακτηρισμό μια περιοχής ως κυρτής ή κοίλης. Ωστόσο, ένα επιπλέον χαρακτηριστικό είναι ότι μεταξύ τους τα μοντέλα πλην του μοντέλου αναφοράς δεν εμφάνισαν ιδιαίτερα μεγάλες διαφορές.

### 6.4. Συζήτηση – προοπτικές

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 ως άμεση συνέπεια 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 είναι δυνατόν να μελετηθούν ως ενιαίες. 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 προ της καταλληλότητας του μόνο από τα αποτελέσματα στατιστικών αναλύσεων, αλλά πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν και ο σκοπός που το μοντέλο αυτό πρόκειται να εξυπηρετήσει.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της εργασίας για ψηφιακά μοντέλα εδάφους σε δομή τετραγωνικού κανάβου (Σαριδάκης 2018) προκύπτουν εν συντομία τα εξής συμπεράσματα για τα πρωτεύοντα τοπογραφικά χαρακτηριστικά:

- Τα παραγόμενα μοντέλα κλίσης δομής TIN δεν ανταποκρίνονται στο μοντέλο αναφοράς τόσο καλά όσο τα αντίστοιχα μοντέλα δομής Grid και έχουν ελαφρώς μικρότερο εύρος τιμών
- Τα παραγόμενα μοντέλα διεύθυνσης μέγιστης κλίσης δομής TIN είναι πλησιέστερα στο μοντέλο αναφοράς με εξαίρεση το μοντέλο χωρικής ανάλυσης 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 των δύο δομών δεν παρουσιάζει καμία αξιοσημείωτη διαφορά.
- 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 παράλληλη παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τα εξαγόμενα πρωτεύοντα τοπογραφικά χαρακτηριστικά στην ίδια περιοχή μελέτης, ώστε να αναδειχθούν οι δυνατότητες και οι περιορισμοί κάθε δομής αναπαράστασης.

Το βασικό πρόβλημα της δομής TIN που αντιμετωπίστηκε στην παρούσα εργασία είναι η έλλειψη αλγόριθμων για την επεξεργασία Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους δομής ακανόνιστων τριγώνων. Ακόμα και σήμερα δεν υπάρχουν αλγόριθμοι για την εξαγωγή των καμπυλοτήτων και ταυτόχρονα υπάρχει έλλειψη κατάλληλων εργαλείων για την εξαγωγή στατιστικών στοιχείων και για την άμεση σύγκριση των μοντέλων μεταξύ τους.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Axelsson, P. *DEM generation from laser scanner data using adaptive tin models*. 2000.
- Bonk, R. *Scale-dependent impact of selected factors on morphometric parameters accuracy and automated geomorphological mapping*. 2003.
- Cadell, William. *Report on the generation and analysis of DEMs for spatial modelling*. 2002. Central Washington University. n.d. <https://www.cwu.edu>.
- DDesignPlus*. n.d. <http://ddesignplus.com/photography/landscape/>.
- Dikau, R., Schmidt, J. *Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models -semantics, methods, future needs*. 1999.
- ESRI*. n.d. <https://www.esri.com/en-us/home>.
- Google*. n.d. <https://www.google.gr/maps>.
- Hutchinson, M.F., Gallant, J.C. «Digital elevation models and representation of terrain shape.» Στο *Terrain Analysis: Principles and Applications*, του/της J.P., Gallant Wilson. 2000.
- Jozef Minár, Ian S. Evans. *Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping*. 2008.
- Kang-tsung Chang, Bor-wen Tsai. *The Effect of DEM Resolution on Slope and Aspect Mapping*. 1991.
- Kilian, J., Haala, N., Englich, M. *Capture and evaluation of airborne laser scanner data*. 1996.
- Kraus, K., Briese, C., Attwenger, M., Pfeifer, M. *QUALITY MEASURES FOR DIGITAL TERRAIN MODELS*. 2004.
- Li, Z., Zhu, Q., Gold, C. *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*. 2005.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., Ladson, A.R. *Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications*. 1991.
- Peckham, R.J., Jordan, G. *Digital Terrain Modelling*. 2007.
- Pike, R.J. *Geomorphometry—diversity in quantitative surface analysis: Progress in Physical*. 2000.
- Pike, R.J., Evans, I.S., Hengl, H.I. «Geomorphometry: a brief guide.» Στο *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*, του/της T., Reuter, H.I. Hengl. 2009.
- R.J. Pike, I.S. Evans, T. Hengl. *Geomorphometry: A Brief Guide*. 2008.
- Rasemann Stefan, Jocken Schmidt, Lothar Schrott, Richard Dikau. «Geomorphometry in mountain terrain.» Στο *Geographic Information Science and Mountain Geomorphology*, του/της John Shroder Jr Michael Bishop. 2004.
- Saga-gis*. n.d. <http://saga-gis.org/en/index.html>.

- Stepmap. n.d. <http://www.stepmap.de>.
- Thompson, J.A., Bell, J.C., Butler, C.A. *Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling*. 2000.
- Tsai, V.J.D. «Delaunay triangulations in TIN creation: an overview and a linear-time algorithm.» *International Journal of GIS*. 1993.
- USGS. n.d. <https://pubs.usgs.gov>.
- Wichmann, V., Rutzinger, M., Vetter M. *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*. 2011.
- Wikipedia. n.d. <https://www.wikipedia.org/>.
- Wilson, J.P., and Gallant, J.C. *Terrain analysis—Principles and Applications*. 2000.
- Zevendrgen, Lyle W., Thorn, Colin R. *QUANTITATIVE ANALYSIS OF LAND SURFACE TOPOGRAPHY*. 1987.
- Zhang, W., Montgomery, D. R. *Digital elevation model grid size, landscape representation and hydrologic simulations*. 1994.
- Zhilin Li, Qing Zhu, Christopher Gold. *DIGITAL TERRAIN MODELING, Principles and Methodology*. 2005.
- Λαβδάκης, Ι. *Γεωμορφομετρική ανάλυση ψηφιακών μοντέλων εδάφους σε δομή TIN - Σύγκριση ανά χωρική ανάλυση*. 2018.
- Νάκος, Β. *Ψηφιακή απεικόνιση χαρτογραφικών φαινομένων βασισμένη στην θεωρία της κλασματικής γεωμετρίας- Εφαρμογή στο τοπογραφικό ανάγλυφο σε ψηφιακά μοντέλα*. 1990.
- Σαριδάκης, Χ. *ΓΕΩΜΟΡΦΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΛΑΦΟΥΣ ΣΕ ΔΟΜΗ GRID - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑ ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ*. Αθήνα, 2018.
- Τσούλος, Α. *Ψηφιακή Χαρτογραφία*. 2. 2008.
- Τσούλος, Α. Σκοπελίτη, Α. Στάμου, Α. *Χαρτογραφική σύνθεση και απόδοση σε ψηφιακό περιβάλλον*. Αθήνα, 2015.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

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')

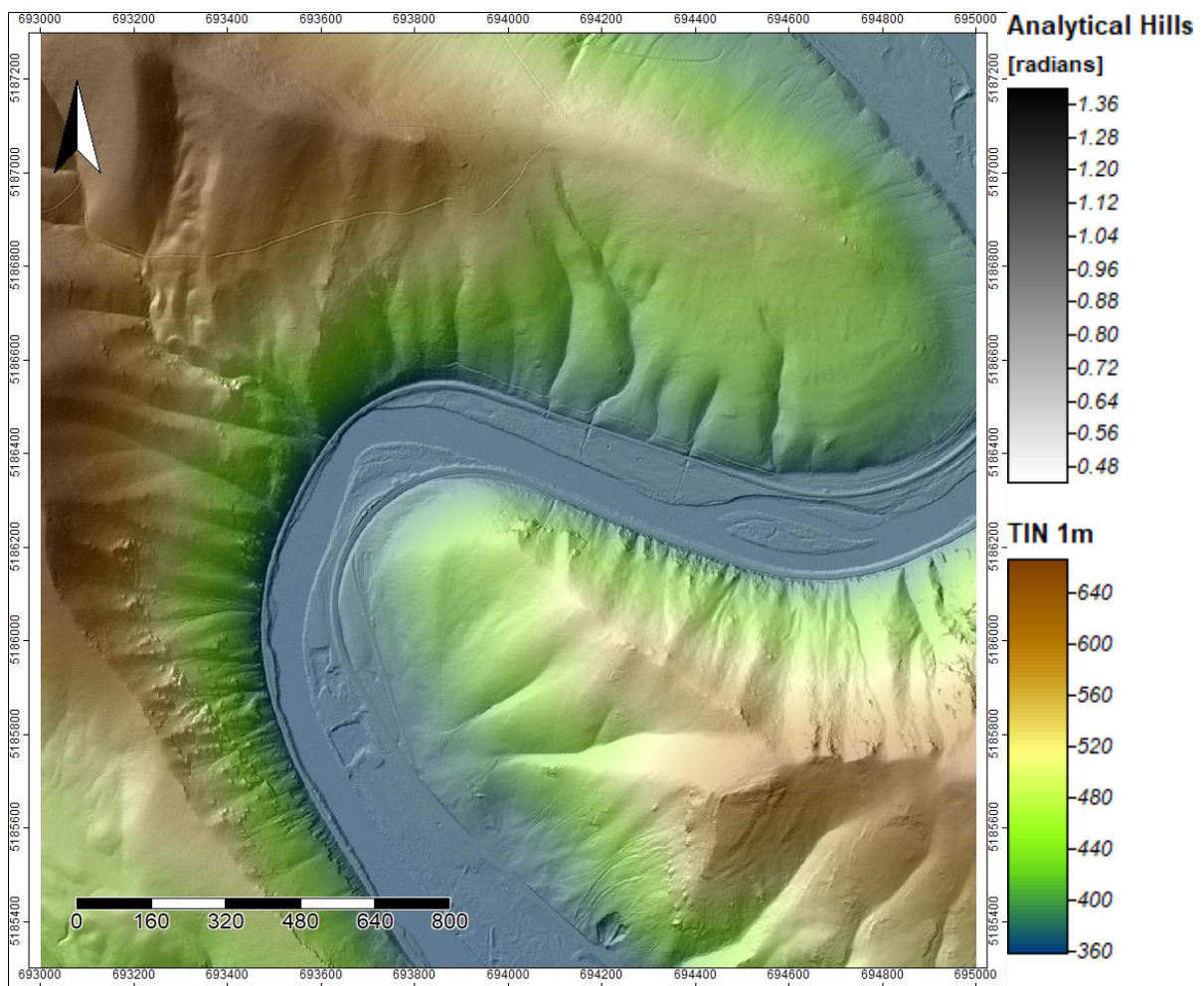
            arr.close()
            for fw,v in files_dict.iteritems():
                v.close()
```



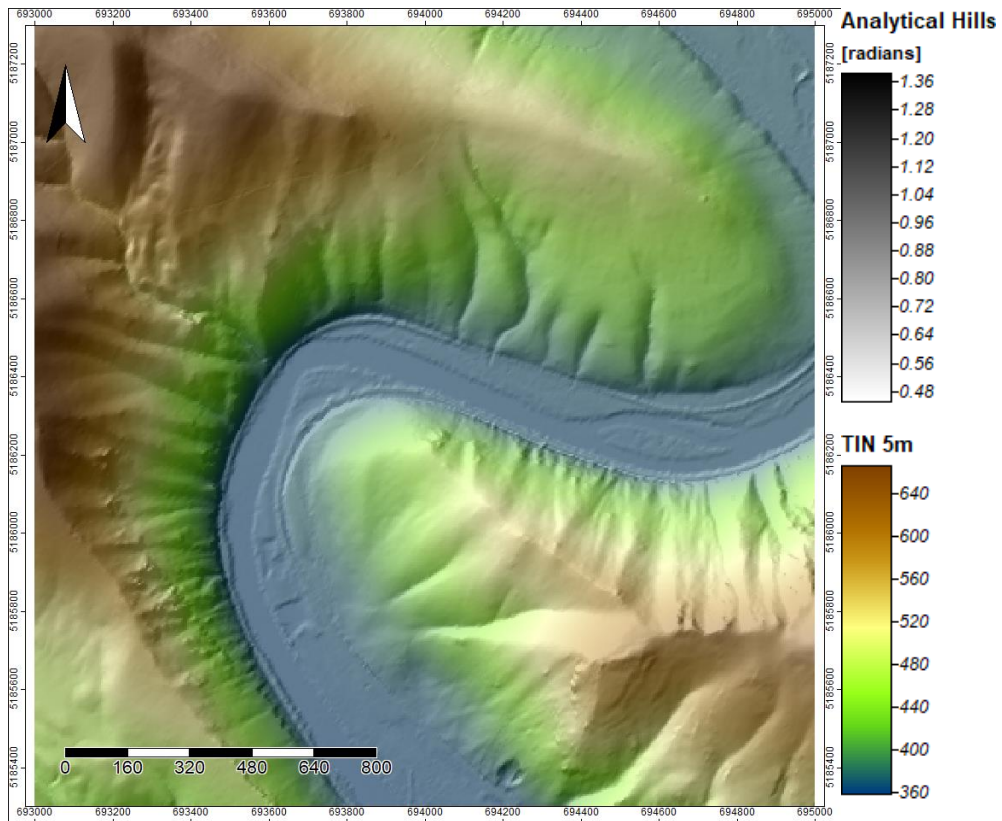
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Παρακάτω προσαρτώνται τα μοντέλα δομής TIN και χωρικών αναλύσεων 1m, 5m, 10m, 25m, 50m, για όλα τα γεωμορφομετρικά χαρακτηριστικά που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

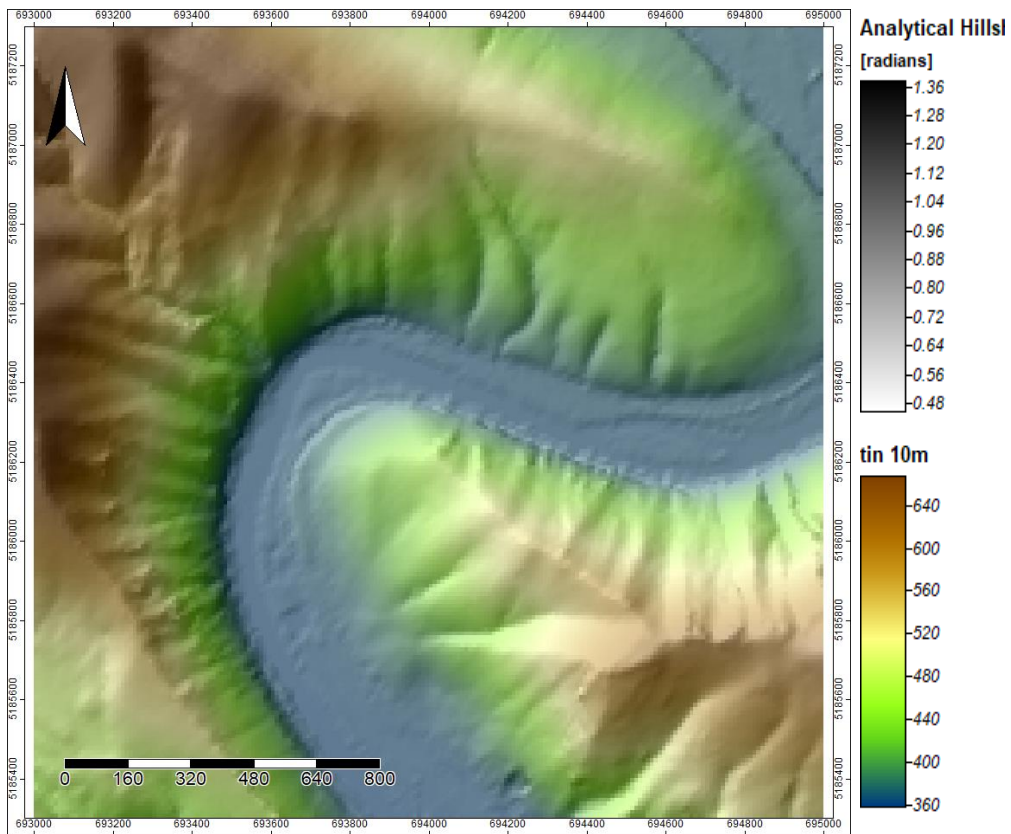
- Ψηφιακά μοντέλα υψομέτρων



εικόνα 64: Το μοντέλο υψομέτρων δομής TIN χωρικής ανάλυσης 1m

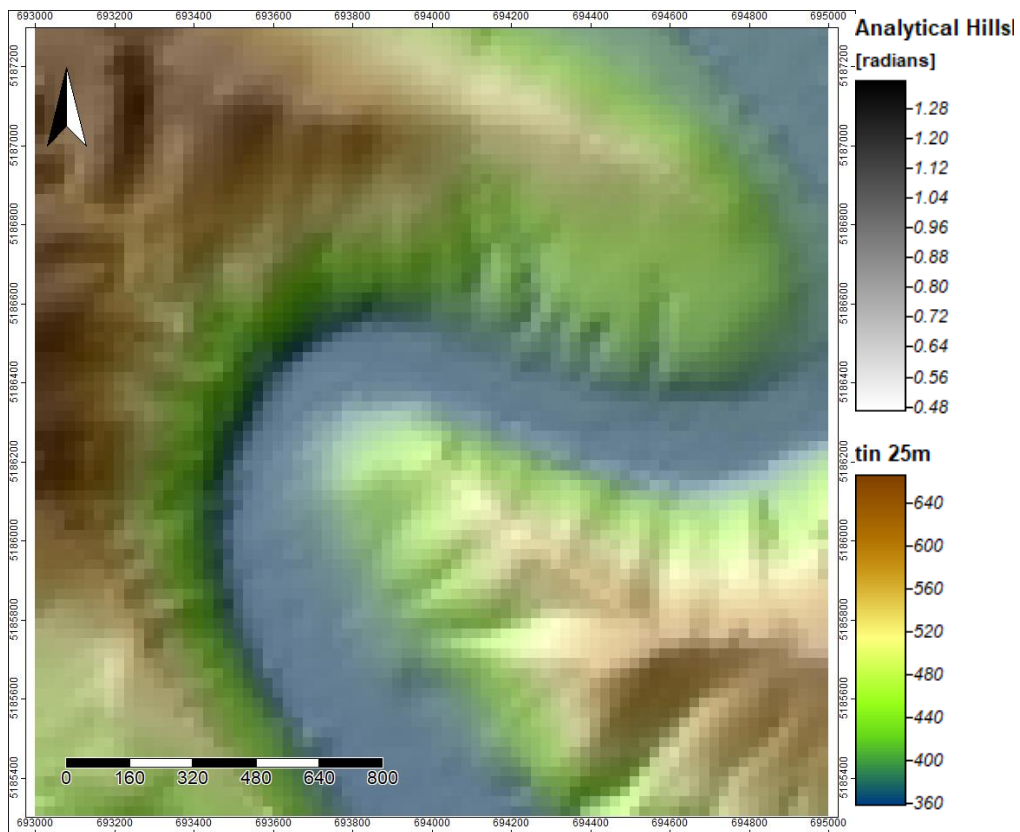


εικόνα 65: Το μοντέλο υψομέτρων δομής TIN χωρικής ανάλυσης 5m

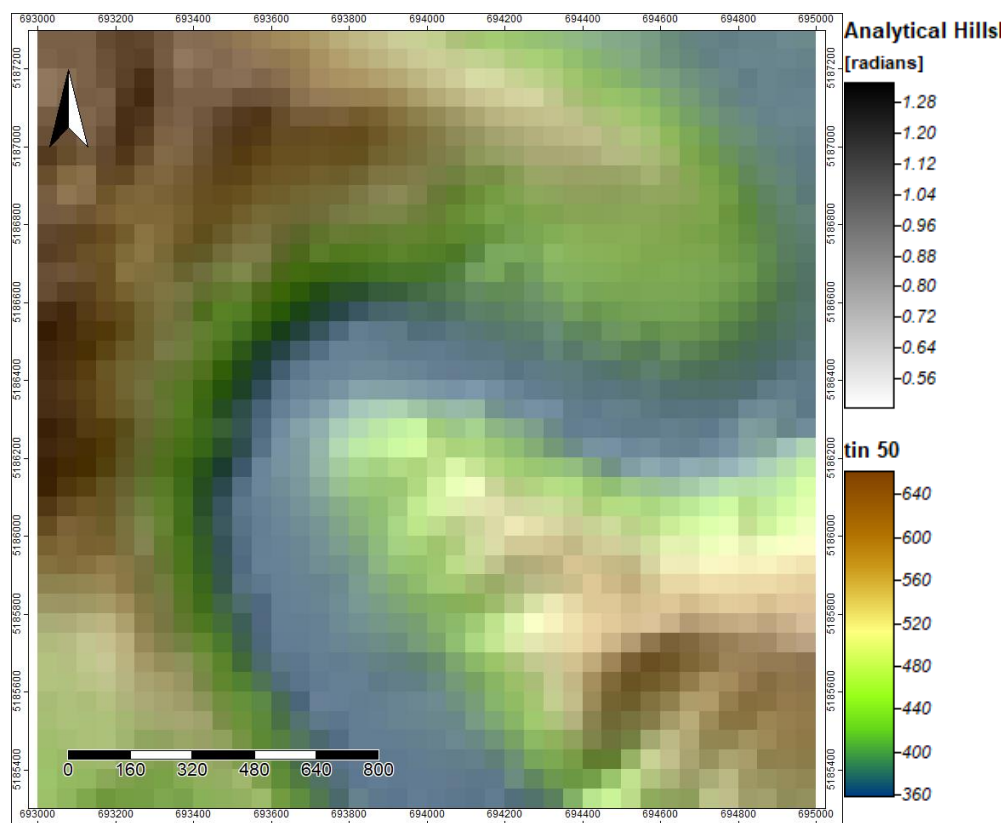


εικόνα 66: Το μοντέλο υψομέτρων δομής TIN χωρικής ανάλυσης 10m



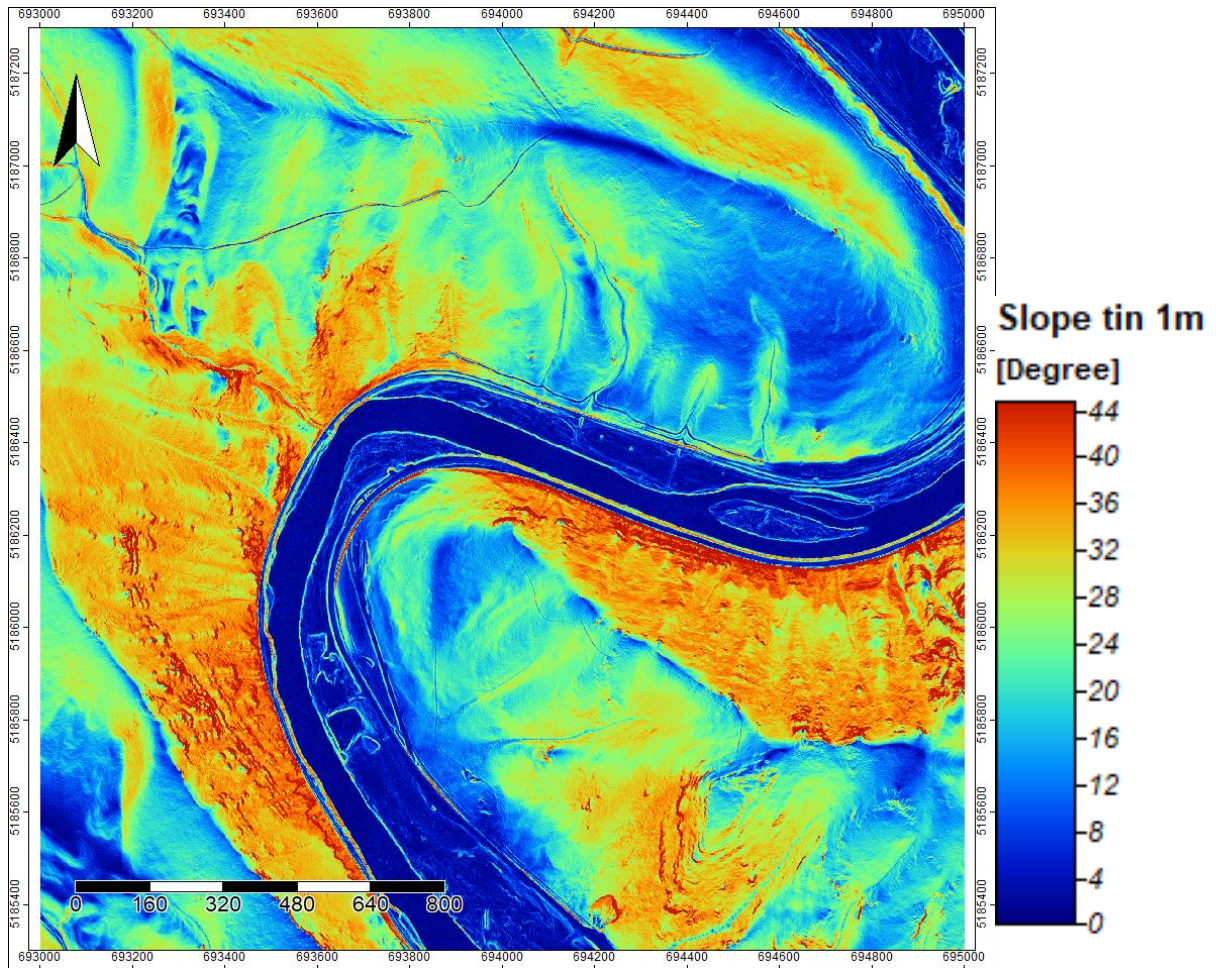


εικόνα 67: Το μοντέλο υψομέτρων δομής TIN χωρικής ανάλυσης 25m



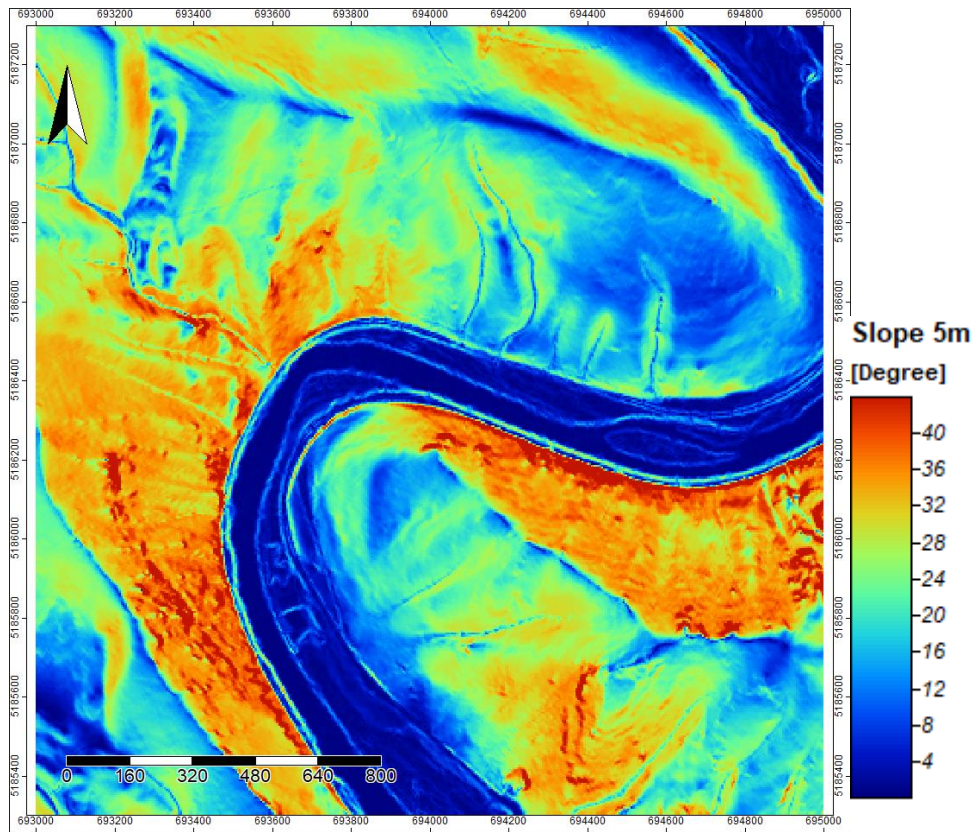
εικόνα 68: Το μοντέλο υψομέτρων δομής TIN χωρικής ανάλυσης 50m

- Ψηφιακά μοντέλα κλίσης

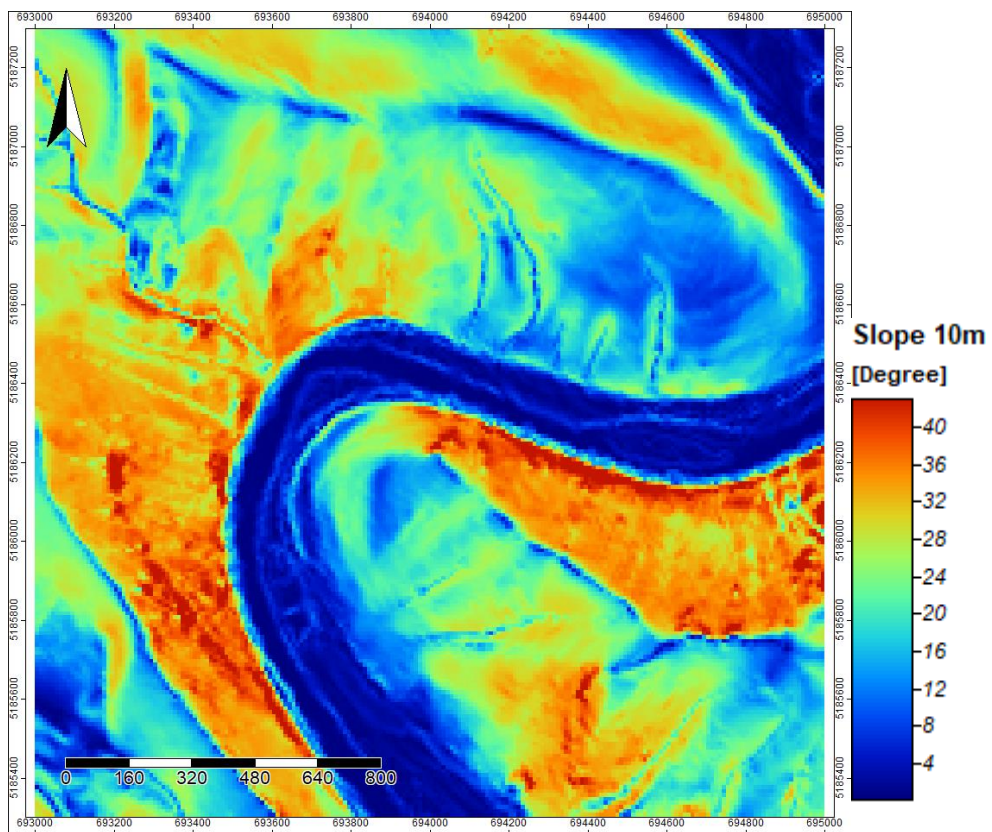


εικόνα 69: Το μοντέλο κλίσης δομής TIN χωρικής ανάλυσης 1m

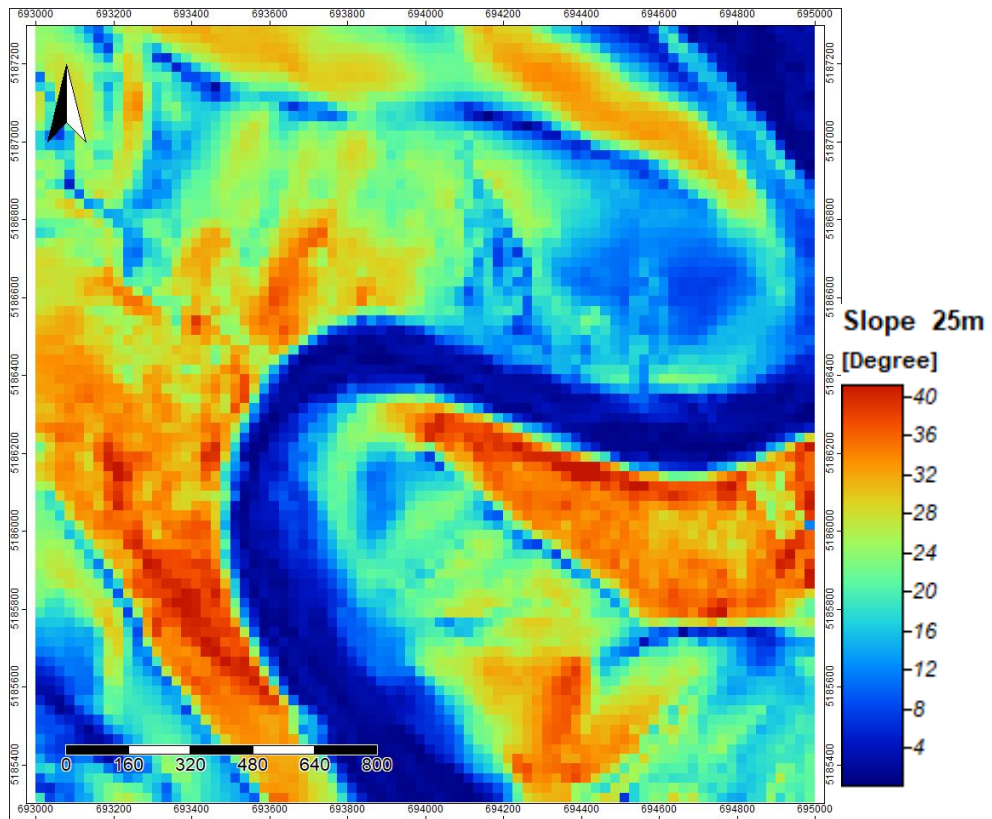




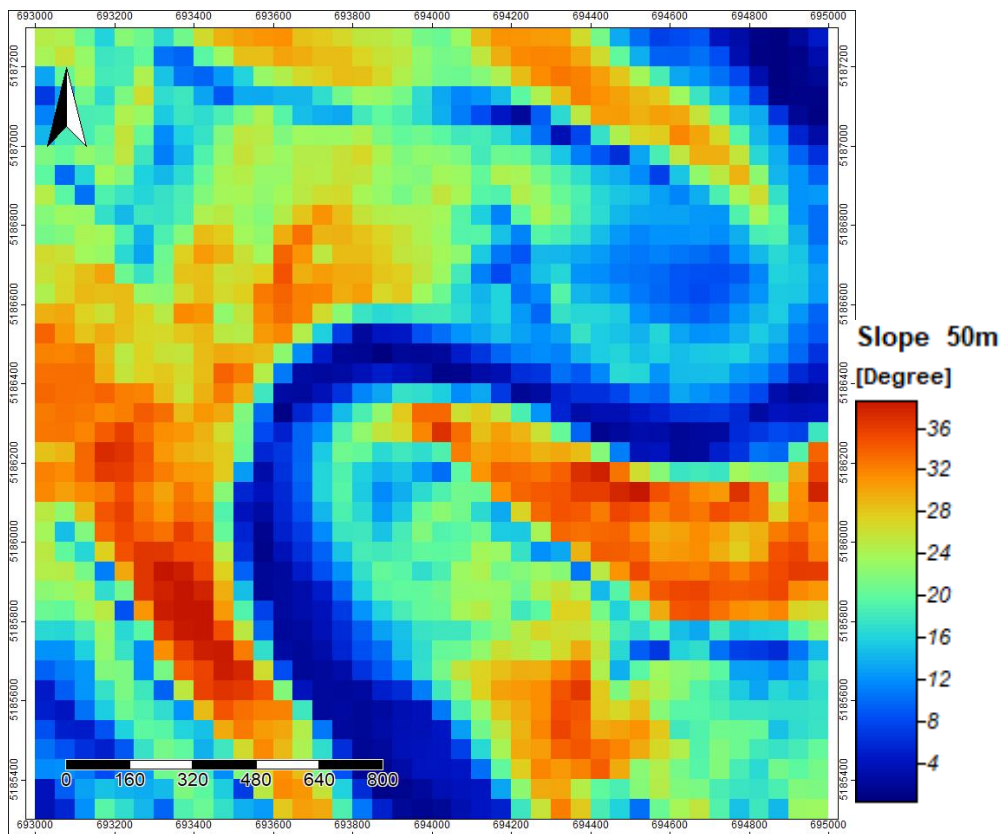
εικόνα 70: Το μοντέλο κλίσης δομής TIN χωρικής ανάλυσης 5m



εικόνα 71: Το μοντέλο κλίσης δομής TIN χωρικής ανάλυσης 10m



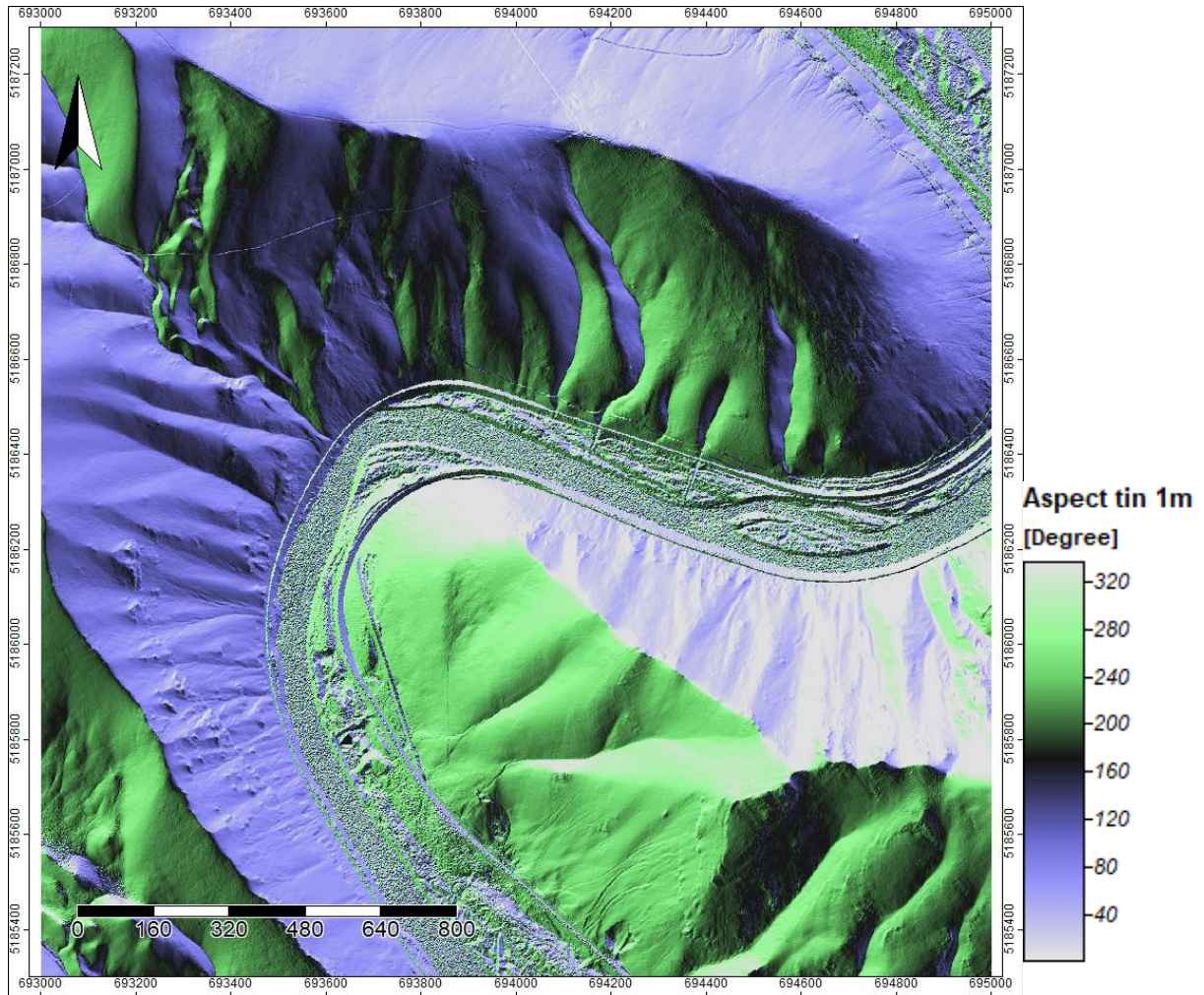
εικόνα 72: Το μοντέλο κλίσης δομής TIN χωρικής ανάλυσης 25m



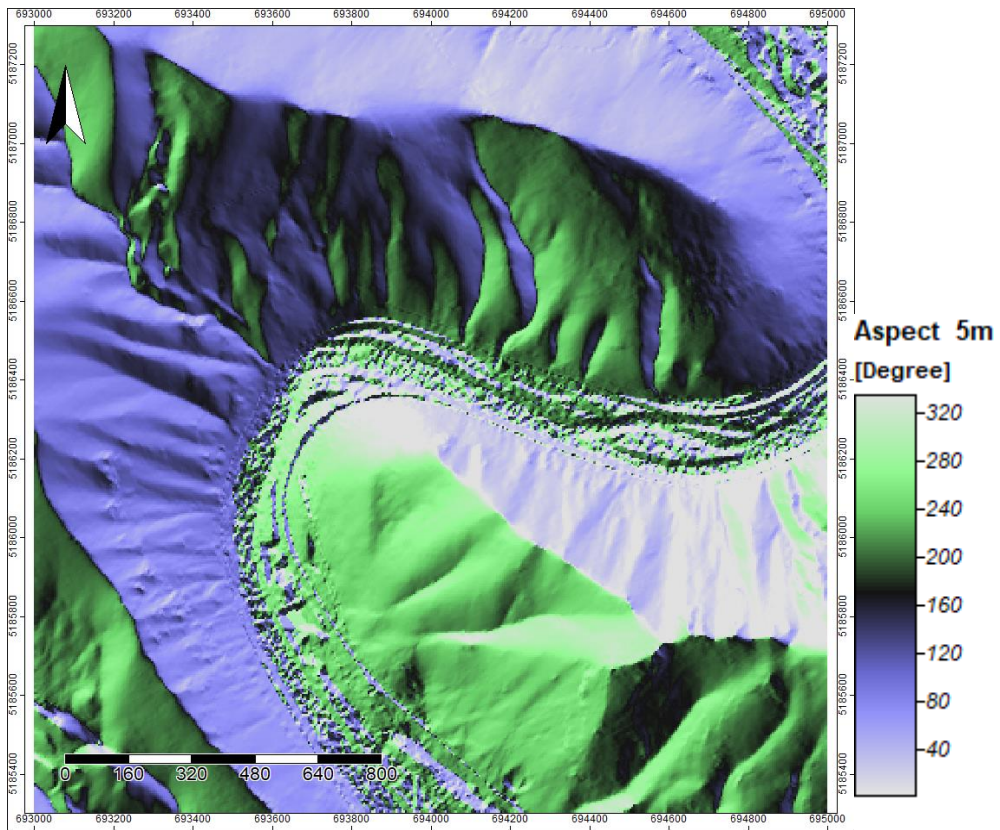
εικόνα 73: Το μοντέλο κλίσης δομής TIN χωρικής ανάλυσης 50m



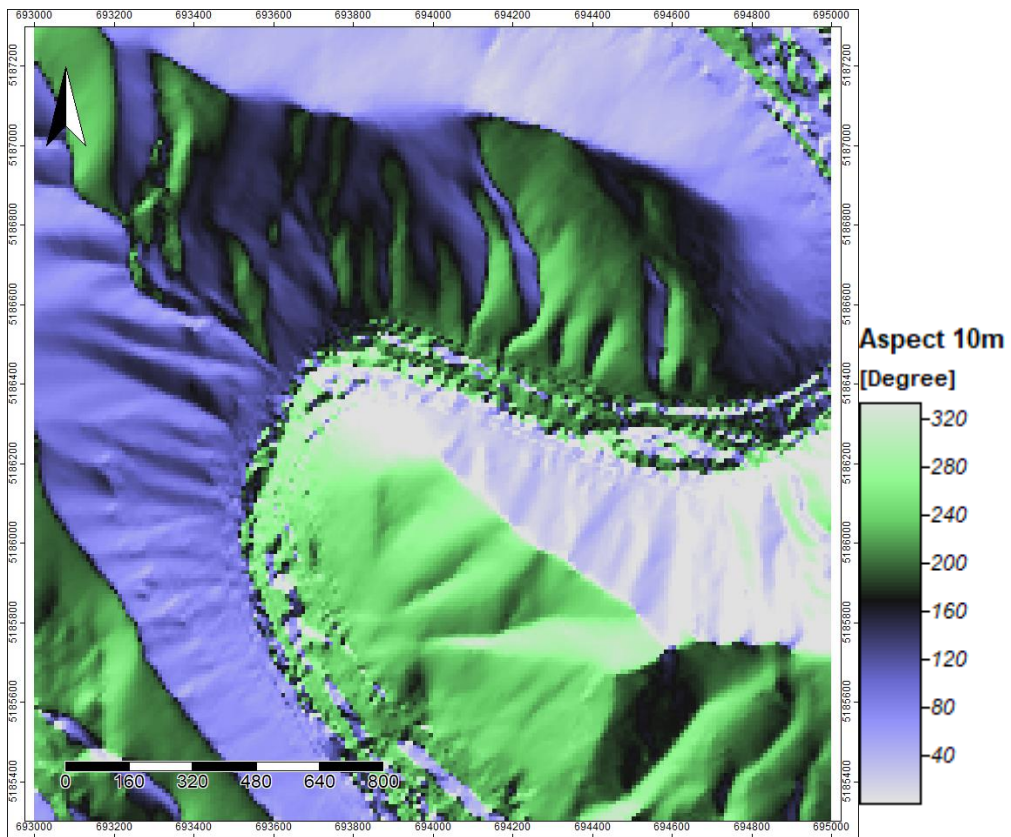
- Ψηφιακά μοντέλα διεύθυνσης μέγιστης κλίσης



εικόνα 74: Το μοντέλο διεύθυνσης μέγιστης κλίσης δομής TIN χωρικής ανάλυσης 1m

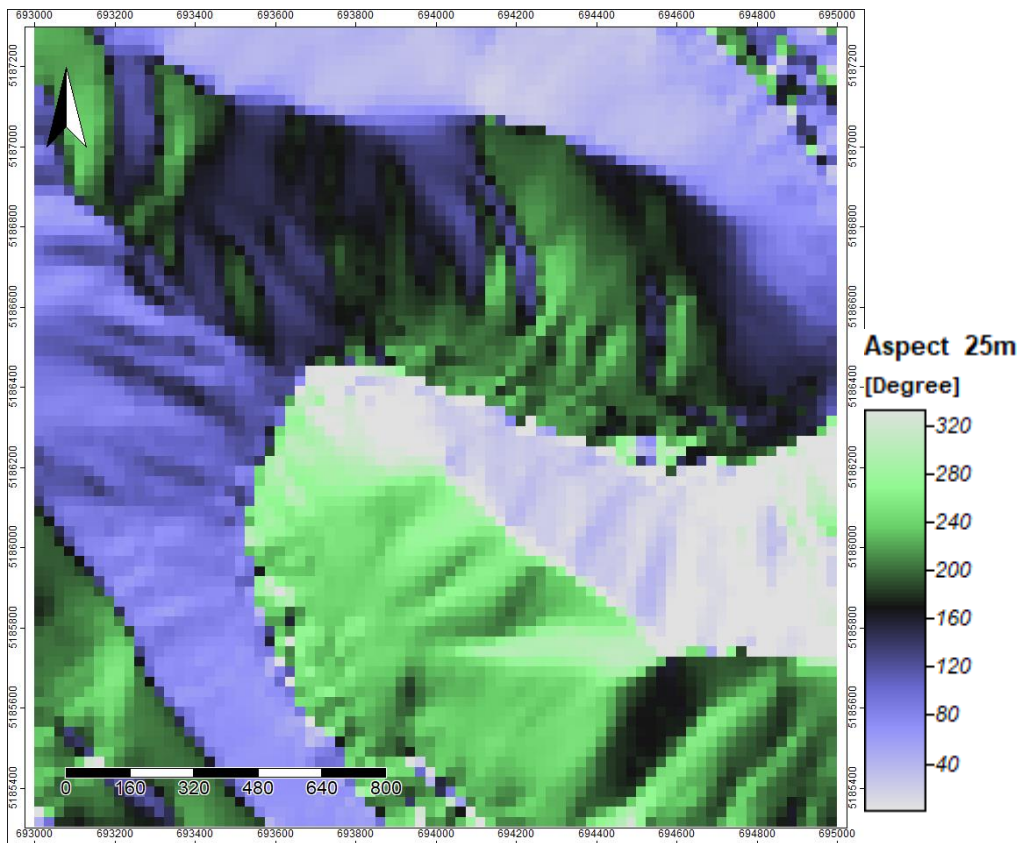


εικόνα 75: Το μοντέλο διεύθυνσης μέγιστης κλίσης δομής TIN χωρικής ανάλυσης 5m

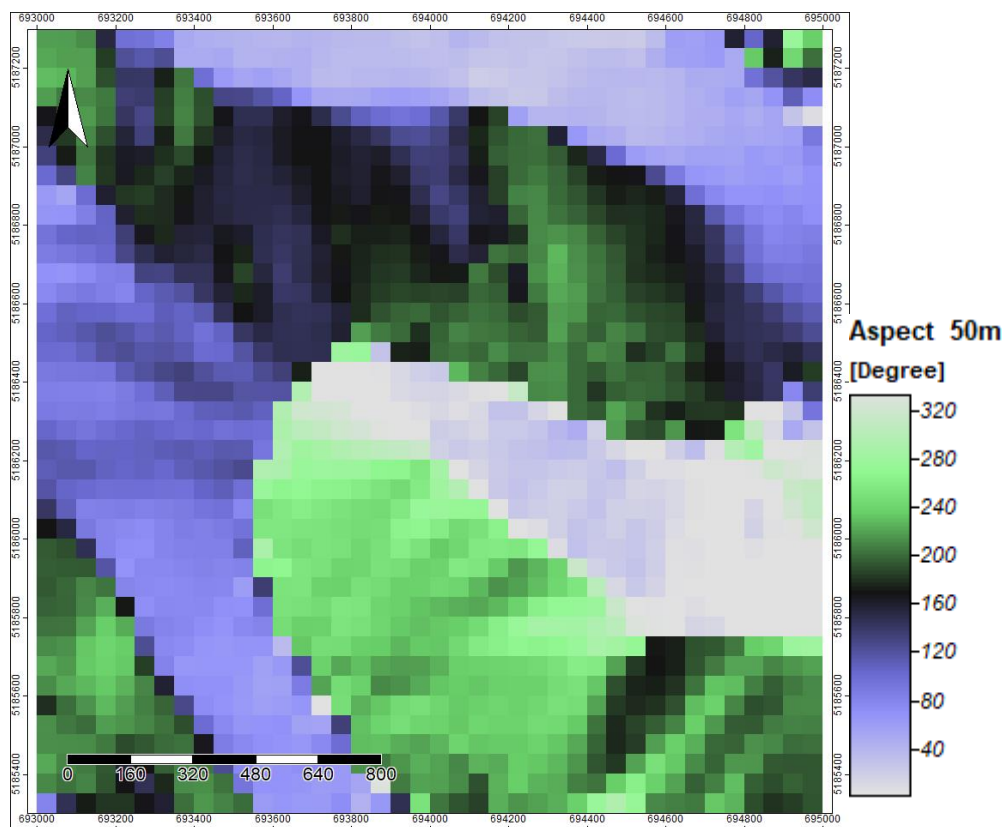


εικόνα 76: Το μοντέλο διεύθυνσης μέγιστης κλίσης δομής TIN χωρικής ανάλυσης 10m



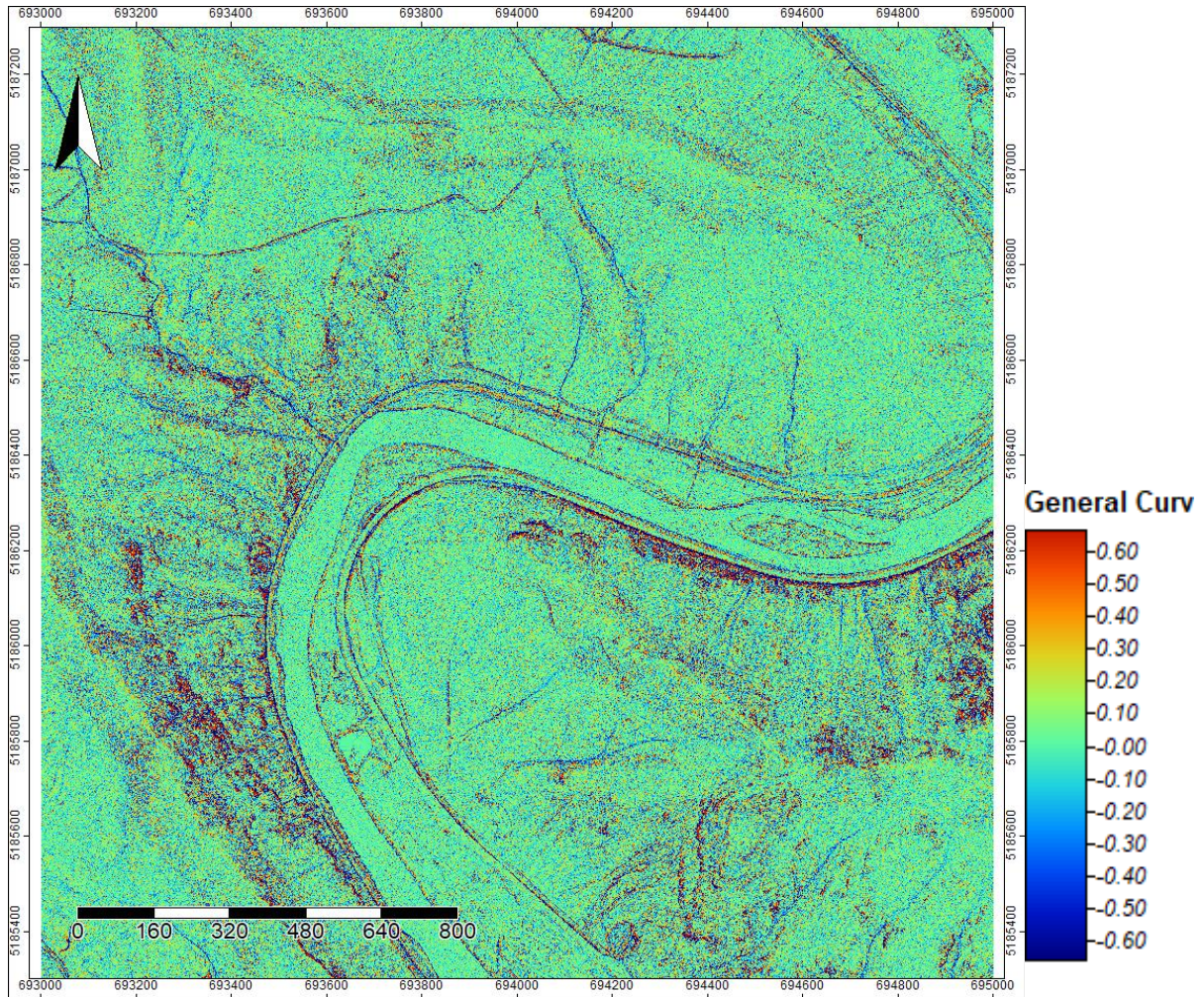


εικόνα 77: Το μοντέλο διεύθυνσης μέγιστης κλίσης δομής TIN χωρικής ανάλυσης 25m



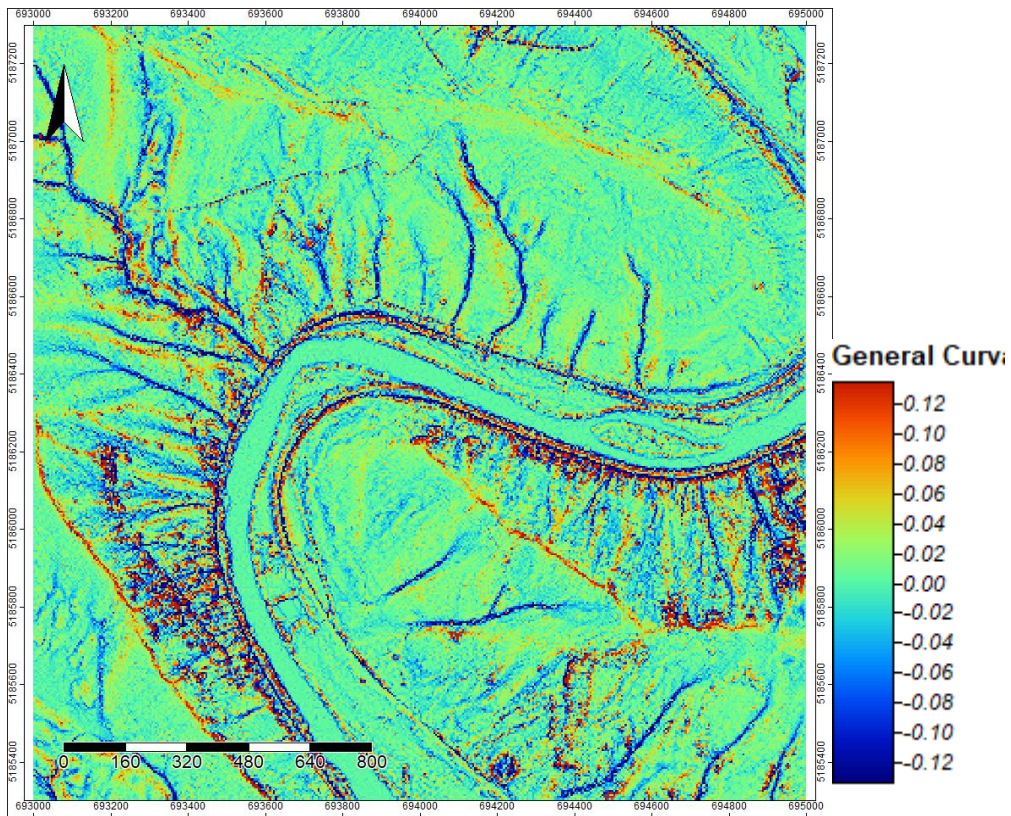
εικόνα 78: Το μοντέλο διεύθυνσης μέγιστης κλίσης δομής TIN χωρικής ανάλυσης 5m

- Ψηφιακά μοντέλα γενικής καμπυλότητας

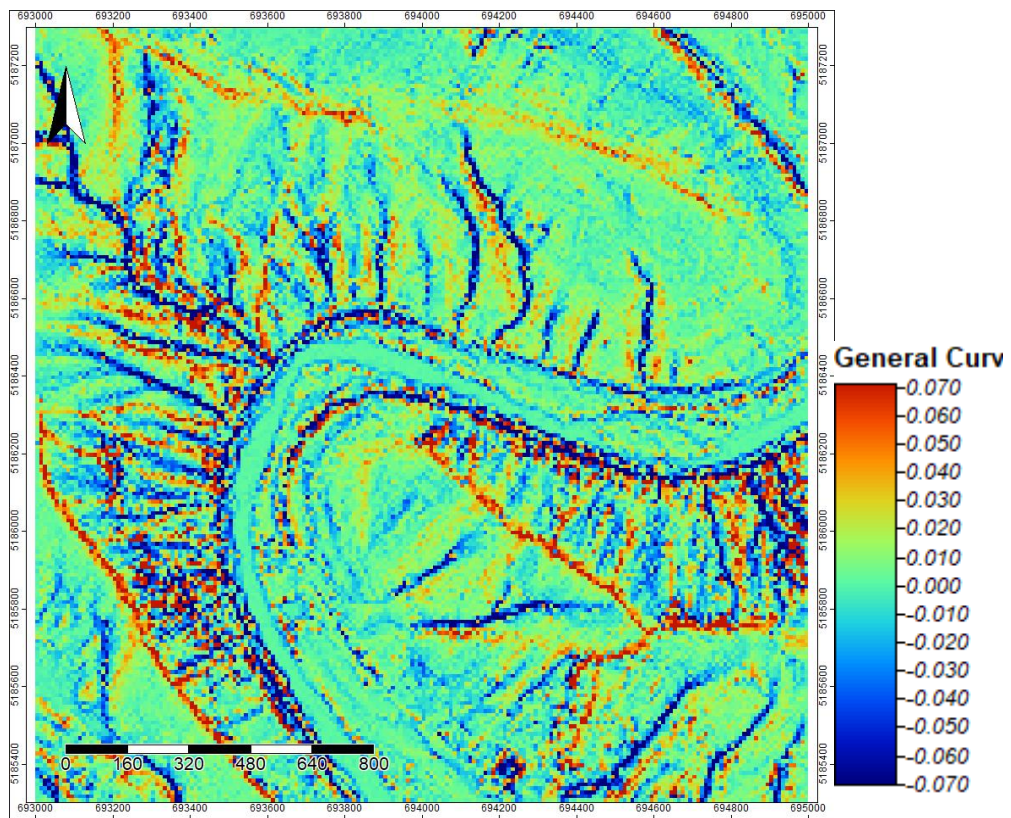


εικόνα 79: Το μοντέλο γενικής καμπυλότητας δομής TIN χωρικής ανάλυσης 1m



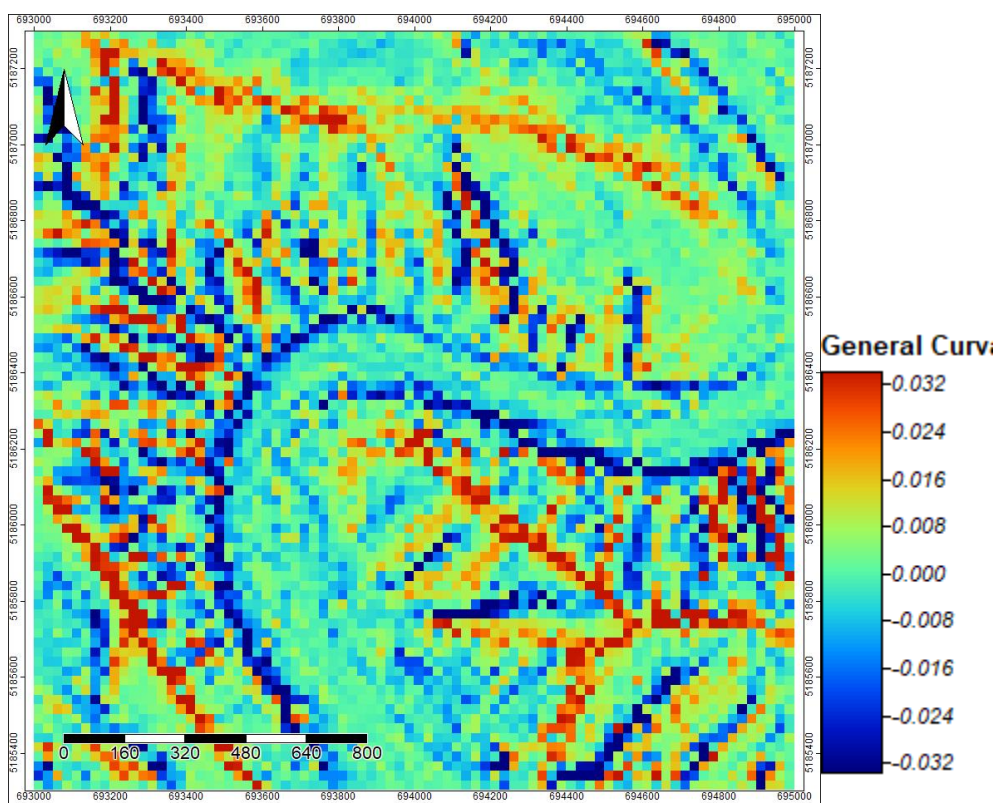


εικόνα 80: Το μοντέλο γενικής καμπυλότητας δομής TIN χωρικής ανάλυσης 5m

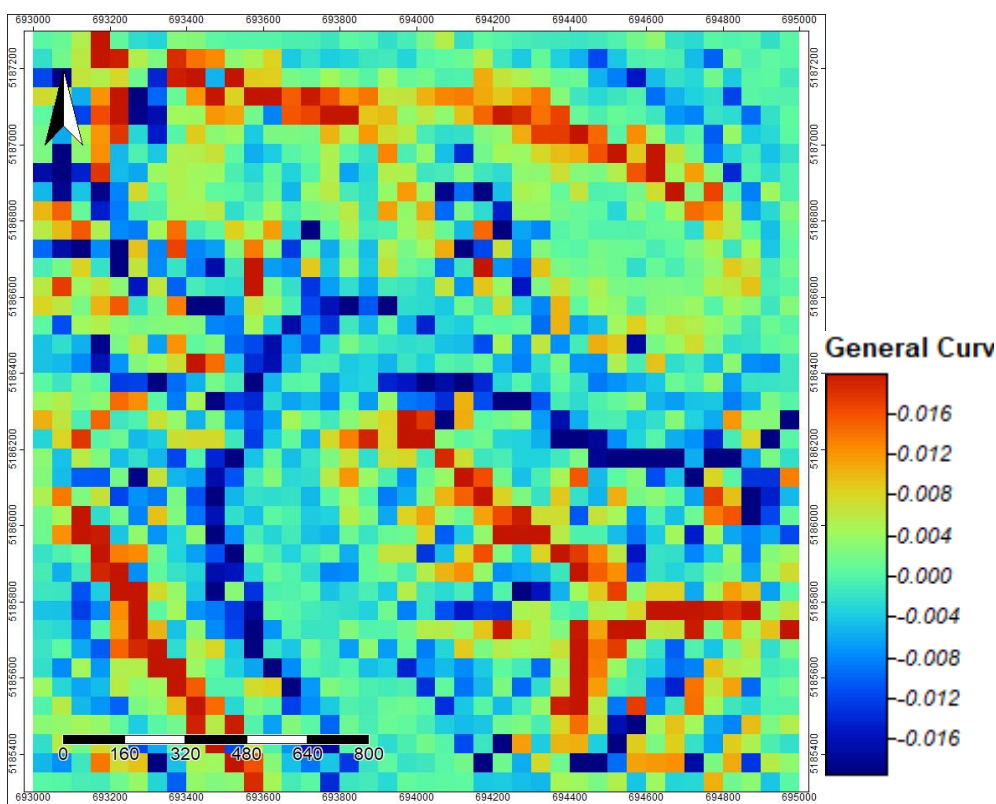


εικόνα 81: Το μοντέλο γενικής καμπυλότητας δομής TIN χωρικής ανάλυσης 10m

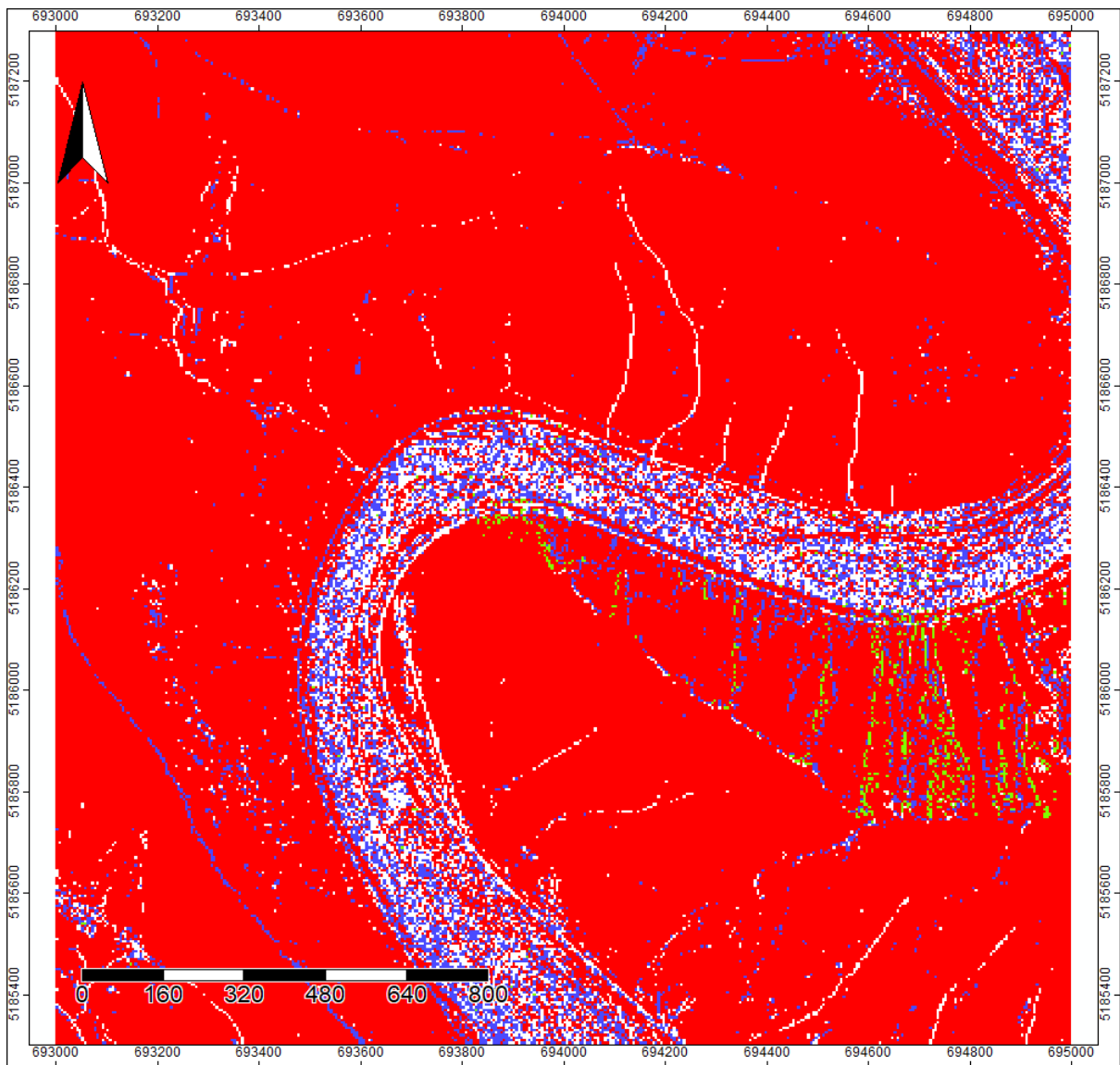




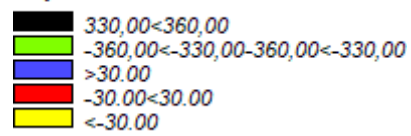
εικόνα 82: Το μοντέλο γενικής καμπυλότητας δομής TIN χωρικής ανάλυσης 25m



εικόνα 83: Το μοντέλο γενικής καμπυλότητας δομής TIN χωρικής ανάλυσης 50m



**Aspect diff 1-5**



εικόνα 84: Η διεύθυνση της μέγιστης κλίσης. Με πράσινο και μαύρο χρώμα φαίνονται τα κελιά στο οποία οι πραγματικές διαφορές είναι μικρότερες των 30°.