

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ

**ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΣΤΟΥΣ ΦΥΣΙΚΟΥΣ
ΠΟΡΟΥΣ**

**«ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ
ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ»**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΗΜΟΥ Π. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ

Επιβλέπων

Καλύβας Διονύσιος, Επίκουρος Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ 2010

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ
ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ»**

ΤΗΣ

ΔΗΜΟΥ Π. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Επίκουρος Καθηγητής, Καλύβας Διονύσιος

Καθηγήτρια, Κόλλια – Κουσουρή Βασιλική

Καθηγητής, Κοσμάς Κωνσταντίνος

ΑΘΗΝΑ 2010

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση γεωστατιστικών μεθόδων για τη βελτίωση της χαρτογράφησης εδαφικών ιδιοτήτων έχει μέχρι σήμερα εφαρμοσθεί σε αρκετές περιπτώσεις. Οι γεωστατιστικές μέθοδοι ordinary kriging, isotopic cokriging, heterotopic cokriging, καθώς και τρεις παραλλαγές της μεθόδου regression-kriging (model I, model II, model III) μαζί με τη μη γεωστατιστική μέθοδο της πολλαπλής παλινδρόμησης εφαρμόστηκαν σε δεδομένα επιφανειακής αργίλου, ιλύος και άμμου σε περιοχή της Δυτικής Μεσσηνίας. Σε όλες τις μεθόδους εκτός από την ordinary kriging στις επεξεργασίες εισήχθησαν τοπογραφικές ιδιότητες που ελήφθησαν από το Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρου (Digital Elevation Model) της περιοχής. Η μέθοδος cross-validation καθώς επίσης και ένα ανεξάρτητο σύνολο σημείων χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της ακρίβειας των αποτελεσμάτων των μεθόδων πρόβλεψης. Η αξιολόγηση των μεθόδων στηρίχθηκε στις τιμές του δείκτη Root Mean Square Error (RMSE). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρησιμοποίηση τοπογραφικών ιδιοτήτων βελτίωσε τη χωρική παρεμβολή ενώ η μέθοδος regression-kriging (model II) αξιολογήθηκε ως η καλύτερη.

Λέξεις - κλειδιά: Γεωστατιστική, kriging, cokriging, regression-kriging, Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρου, τοπογραφικές ιδιότητες

Abstract

The spatial correlation between surface clay, sand and silt content and terrain attributes was used for the improvement of the prediction of the surface clay, sand and silt content in a region of West Messinia prefecture. The geostatistical methods ordinary kriging, isotopic cokriging, heterotopic cokriging, regression-kriging model I, regression-kriging model II, regression-kriging model III and multi linear regression were applied to surface clay, silt and sand content data in the area of West Messinia. The terrain attributes were derived from the Data Elevation Model (DEM) of the area which was produced for the needs of this work. The effectiveness of the methods was compared using the cross-validation method as well as using an independent set of points. The accuracy of the results produced was based on the calculation of the Root Mean Square Error index. The results showed that the Regression-kriging model II method surpasses the others in the prediction accuracy.

Keywords: Geostistical methods, kriging, cokriging, regression-kriging, Data Elevation Model, terrain attributes, profile curvature, plan curvature

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική μελέτη εκπονήθηκε στην Ερευνητική Μονάδα Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Εφαρμογές της Γεωπληροφορικής στους Φυσικούς Πόρους» του τμήματος Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής.

Αντικείμενο της μελέτης αποτέλεσε η εφαρμογή γεωστατιστικών μεθόδων στην εκτίμηση εδαφικών ιδιοτήτων σε γεωργικά εδάφη με τη χρήση Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή μου στις προπτυχιακές και μεταπτυχιακές σπουδές κ. Καλύβα Διονύσιο τόσο για την ανάθεση του θέματος και την εμπιστοσύνη του στο πρόσωπο μου όσο και για την καθοδήγηση και αμέριστη βοήθεια του στην εκπόνηση της παρούσας μελέτης. Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής κα. Κόλλια – Κουσουρή Βασιλική, Καθηγήτρια Γ.Π.Α. και τον κ. Κοσμά Κωνσταντίνο, Καθηγητή Γ.Π.Α. για τη βοήθεια τους και για το χρόνο που αφιέρωσαν στη διόρθωση και βαθμολόγηση της μελέτης.

Τέλος ευχαριστώ ιδιαίτερα την οικογένεια μου για τη συμπαράσταση και κατανόηση καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Δήμου Παρασκευή

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	7
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	11
2.1. ΜΕΘΟΔΟΙ – ΘΕΩΡΙΑ	11
2.1.1. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΕΣ – ΜΗ ΧΩΡΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	11
2.1.2. ΧΩΡΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	14
2.1.3. ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ – ΧΩΡΙΚΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ	16
2.1.4. ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ Kriging - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	26
2.1.5. ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ – ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	39
2.2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	44
2.2.1. ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΝ ΥΛΙΚΟ.....	44
2.2.2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	44
2.2.3. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΕΔΑΦΩΝ	47
2.2.4. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΔΑΦΩΝ	49
2.2.5. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	51
2.2.6. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ	52
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	53
3.1. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	53
3.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	58
3.2.1. Άργιλος %	59
3.2.2. Ίλύς (%).....	70

3.2.3. Άμμος (%)	81
4. ΣΥΣΜΕΡΑΣΜΑΤΑ	92
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	96
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΛΕΞΙΚΟ ΟΡΩΝ	103

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1. Κανονική κατανομή.	14
Εικόνα 2.2. Τυπικό πειραματικό βαριόγραμμα.	20
Εικόνα 2.3. Εκθετικό μοντέλο.	23
Εικόνα 2.4. Σφαιρικό μοντέλο.	24
Εικόνα 2.5. Gaussian μοντέλο.	25
Εικόνα 2.6. Γραμμικό μοντέλο.	26
Εικόνα. 2.7. Μαθηματικός ορισμός της καμπυλότητας (Curvature).	40
Εικόνα 2.8. Υπολογισμός τοπογραφικών ιδιοτήτων από DEM.	41
Εικόνα 2.9. Τοπογραφικές ιδιότητες αναγλύφου.	42
Εικόνα 2.10. Περιοχή μελέτης.	45
Εικόνα 2.11. Τοπογραφικός χάρτης περιοχής μελέτης.	46
Εικόνα 2.12. Χάρτης θέσεων δειγματοληψίας.	48
Εικόνα 2.13. Τρίγωνο Μηχανικής Ανάλυσης.	51
Εικόνα 3.1. Χάρτης υψομέτρου περιοχής μελέτης.	53
Εικόνα 3.2. Χάρτης κλίσεων της περιοχής μελέτης.	54
Εικόνα 3.3. Χάρτης έκθεσης – προσανατολισμού της περιοχής μελέτης.	55
Εικόνα 3.4. Χάρτης απόστασης από τα υδατορέματα της περιοχής μελέτης.	56
Εικόνα 3.5. Χάρτης καμπυλότητας αναγλύφου της περιοχής μελέτης.	57
Εικόνα 3.6. Χάρτης κυρτότητας αναγλύφου της περιοχής μελέτης.	57
Εικόνα 3.7. Τιμές αργίλου (%) σημείων δειγματοληψίας.	59
Εικόνα 3.8. Ιστόγραμμα Αργίλου (%).	60
Εικόνα 3.9. Επιφάνεια πρόβλεψης της OK μεθόδου της Αργίλου (%).	64
Εικόνα 3.10. Επιφάνεια πρόβλεψης της ICK μεθόδου της Αργίλου (%).	65
Εικόνα 3.11. Επιφάνεια πρόβλεψης της HCK μεθόδου της Αργίλου (%).	65

Εικόνα 3.12. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-I μεθόδου της Αργίλου (%).	66
Εικόνα 3.13. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-II μεθόδου της Αργίλου (%).	67
Εικόνα 3.14. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-III μεθόδου της Αργίλου (%).	67
Εικόνα 3.15. Επιφάνειες πρόβλεψης Αργίλου (%) με χρήση γεωστατιστικών μεθόδων.....	68
Εικόνα 3.16. Τιμές ιλύος (%) σημείων δειγματοληψίας.	70
Εικόνα 3.17. Ιστόγραμμα Ιλύος (%).	71
Εικόνα 3.18. Επιφάνεια πρόβλεψης της OK μεθόδου της Ιλύος (%).	75
Εικόνα 3.19. Επιφάνεια πρόβλεψης της ICK μεθόδου της Ιλύος (%).	75
Εικόνα 3.20. Επιφάνεια πρόβλεψης της HCK μεθόδου της Ιλύος (%).	76
Εικόνα 3.21. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-I μεθόδου της Ιλύος (%).	77
Εικόνα 3.22. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-II μεθόδου της Ιλύος (%).	78
Εικόνα 3.23. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-III μεθόδου της Ιλύος (%).	78
Εικόνα 3.24. Επιφάνειες πρόβλεψης Ιλύος (%) με χρήση γεωστατιστικών μεθόδων.	79
Εικόνα 3.25. Τιμές άμμου (%) σημείων δειγματοληψίας.	81
Εικόνα 3.26. Ιστόγραμμα Άμμου (%).	82
Εικόνα 3.27. Επιφάνεια πρόβλεψης της OK μεθόδου της Άμμου (%).	86
Εικόνα 3.28. Επιφάνεια πρόβλεψης της ICK μεθόδου της Άμμου (%).	86
Εικόνα 3.29. Επιφάνεια πρόβλεψης της HCK μεθόδου της Άμμου (%).	87
Εικόνα 3.30. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-I μεθόδου της Άμμου (%).	88
Εικόνα 3.31. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-II μεθόδου της Άμμου (%).	88
Εικόνα 3.32. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-III μεθόδου της Άμμου (%).	89
Εικόνα 3.33. Επιφάνειες πρόβλεψης Ιλύος (%) με χρήση γεωστατιστικών μεθόδων.	89

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1. Κατηγορίες εδαφικών κλασμάτων.	49
Πίνακας 2.2. Κλάσεις κοκκομετρικής σύστασης εδάφους.	50
Πίνακας 3.1. Κλάσεις υψομέτρου περιοχής μελέτης.	53
Πίνακας 3.2. Κλάσεις κλίσης (%) περιοχής μελέτης.	54
Πίνακας 3.3. Κλάσεις έκθεσης - προσανατολισμού περιοχής μελέτης.	55
Πίνακας 3.4. Στατιστικά μεγέθη Αργίλου (%).	60
Πίνακας 3.5. Έλεγχος κανονικότητας Αργίλου (%).	61
Πίνακας 3.6. Συντελεστές συσχέτισης Αργίλου (%) και τοπογραφικών ιδιοτήτων. ...	61
Πίνακας 3.7. Συντελεστές πολλαπλής παλινδρόμησης Αργίλου (%).	62
Πίνακας 3.8. Παράμετροι θεωρητικών βαριογραμμμάτων της Αργίλου (%).	63
Πίνακας 3.9. Δείκτες cross-validation των μεθόδων OK, ICK και HCK της Αργίλου (%).....	63
Πίνακας 3.10. Τιμές του δείκτη RMSE των μεθόδων πρόβλεψης της Αργίλου (%). 69	
Πίνακας 3.11. Στατιστικά μεγέθη Ιλύος (%).	71
Πίνακας 3.12. Έλεγχος κανονικότητας Ιλύος (%).	72
Πίνακας 3.13. Συντελεστές συσχέτισης Ιλύος (%) και τοπογραφικών ιδιοτήτων.	72
Πίνακας 3.14. Συντελεστές πολλαπλής παλινδρόμησης Ιλύος (%).	73
Πίνακας 3.15. Παράμετροι θεωρητικών βαριογραμμμάτων της Ιλύος (%).	73
Πίνακας 3.16. Δείκτες cross-validation των μεθόδων OK, ICK και HCK της Ιλύος (%).....	74
Πίνακας 3.17. Τιμές του δείκτη RMSE των μεθόδων πρόβλεψης της Ιλύος (%).	80
Πίνακας 3.18. Στατιστικά μεγέθη Άμμου (%).	82
Πίνακας 3.19. Έλεγχος κανονικότητας Άμμου (%).	83
Πίνακας 3.20. Συντελεστές συσχέτισης Άμμου (%) και τοπογραφικών ιδιοτήτων. ...	83
Πίνακας 3.21. Συντελεστές πολλαπλής παλινδρόμησης Άμμου (%).	84

Πίνακας 3.22. Παράμετροι θεωρητικών βαριογραμμάτων της Άμμου (%).	84
Πίνακας 3.23. Δείκτες cross-validation των μεθόδων OK, ICK και HCK της Άμμου (%).	85
Πίνακας 3.24. Τιμές του δείκτη RMSE των μεθόδων πρόβλεψης της Άμμου (%). ...	91
Πίνακας 4.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.	92

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Το έδαφος αποτελεί τον εξωτερικό φλοιό της ξηράς του Πλανήτη Γη και θεωρείται το θεμέλιο της ζωής μας αφού είναι ουσιαστικά η βάση όλων των ανθρώπινων γεωργικών δραστηριοτήτων. Παρέχει το μέσο στο οποίο αναπτύσσονται οι ρίζες των φυτών, συγκρατεί αρκετό νερό για τα φυτά και τα διαθέσιμα σε αυτά θρεπτικά, στοιχεία απαραίτητα για την υποστήριξη της ζωής. Προσφέρει κατοικία στους αναρίθμητους μικροοργανισμούς που πραγματοποιούν βιοχημικές μετατροπές (από τη δέσμευση του ατμοσφαιρικού αζώτου έως την αποσύνθεση της οργανικής ουσίας) καθώς και στα μικροσκοπικά ζώα κ.α. Είναι απόλυτα κατανοητό ότι το έδαφος αποτελεί θεμελιώδη φυσικό πόρο, αφού δρα ως συνδετικός κρίκος μεταξύ ατμόσφαιρας, λιθόσφαιρας, υδρόσφαιρας και βιόσφαιρας.

Η γνωστή εξίσωση (Jenny's 1941) συγκεντρώνει τους πέντε σημαντικούς εδαφογενετικούς παράγοντες του εδαφολογικού σχηματισμού, δηλαδή το κλίμα (CLimate), οργανισμοί (Organisms), ανάγλυφο (Relief), μητρικό υλικό (Parent material) και χρόνος (Time):

$$S = f(CL, O, R, P, T) \quad (1)$$

Οι πέντε αυτοί παράγοντες περιγράφονται πιο αναλυτικά παρακάτω:

- το κλίμα, το οποίο επιδρά στη βλάστηση με τη θερμοκρασία και τις βροχοπτώσεις, αλλά και σε άλλους παράγοντες εδαφογένεσης
- οι ζώντες οργανισμοί, δηλαδή φυτικοί οργανισμοί, μικροοργανισμοί, μεγάλοι οργανισμοί και άνθρωποι που χρησιμοποιούν τη γη για αγροτικές, δασικές, κτηνοτροφικές, οικιστικές και βιομηχανικές δραστηριότητες
- η τοπογραφία – ανάγλυφο της περιοχής, δηλαδή η μορφή της επιφάνειας της γης
- το μητρικό υλικό, το οποίο είναι σχετικά χαλαρό υλικό, το προερχόμενο από την αποσάθρωση των πετρωμάτων και από το οποίο με την επίδραση και των άλλων παραγόντων της εδαφογένεσης, σχηματίζεται το έδαφος και
- ο χρόνος, δηλαδή η διάρκεια διαδικασίας σχηματισμού του εδάφους που είναι πολύ μεγάλη.

Οι διεργασίες μέσω των οποίων σχηματίζεται το έδαφος είναι φυσικές (αποσάθρωση των επιφανειακών πετρωμάτων της γης που συντελείται με την επίδραση του νερού,

ανέμου, θερμότητας, βαρύτητας), χημικές (ανταλλαγές χημικών στοιχείων στα συστατικά του εδάφους) και βιολογικές (αποικοδόμηση των φυτικών υπολειμμάτων από οργανισμούς).

Η διακύμανση των εδαφικών ιδιοτήτων και στις τρεις διαστάσεις του χώρου αποτελεί επομένως αποτέλεσμα της επίδρασης όλων των παραγόντων που επιδρούν στην εδαφογένεση (Heuvelink G.B.M., Webster R., 2001). Οι διαφορές αυτές δυνητικά μπορεί να είναι πολύ μεγάλες ακόμη και σε κοντινές αποστάσεις.

Από πλευράς διαθεσιμότητας πληροφοριών, ο συμβατικός εδαφολογικός χάρτης περιορίζεται στην εμφάνιση μόνο των πληροφοριών που είναι απαραίτητες για τη διάκριση των χαρτογραφικών μονάδων και δεν έχει τη δυνατότητα αποτύπωσης της διακύμανσης των τιμών μιας εδαφικής ιδιότητας. Οι σύγχρονες απόψεις για τις γεωργικές δραστηριότητες διέπονται από την αειφορία στη χρήση των εδαφικών πόρων, και κατά συνέπεια απαιτείται η λεπτομερής γνώση της ποιότητας, της έκτασης και της γεωγραφικής κατανομής των εδαφών κάθε περιοχής. Τέλος η ακριβής χαρτογράφηση των ιδιοτήτων του εδάφους μιας περιοχής είναι σημαντική για τη διαχείριση των φυσικών πόρων (Lin et al., 2005) καθώς και για την εφαρμογή Γεωργίας Ακριβείας (Precision Agriculture ή Precision Farming) που αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια σε πολλές καλλιέργειες όπως π.χ. τις αμπελοκαλλιέργειες. Η Γεωργία Ακριβείας είναι η διαδικασία εκμετάλλευσης των αγρών και των γεωργικών εκτάσεων λαμβάνοντας υπόψη την παραλλακτικότητα των ιδιοτήτων και συνθηκών (π.χ. pH, περιεκτικότητες θρεπτικών στοιχείων, κοκκομετρική σύσταση, στράγγιση κ.λπ.) που παρατηρούνται από τη μία θέση στην άλλη και επηρεάζουν τη γεωργική παραγωγή.

Δεδομένου ότι οι εδαφικές ιδιότητες διαφέρουν από σημείο σε σημείο (Webster and Burgess, 1983) η δειγματοληψία με έναν πεπερασμένο αριθμό θέσεων δεν είναι επαρκής για την πλήρη απεικόνιση της υφιστάμενης κατάστασης των εδαφικών συνθηκών. Η συλλογή δειγμάτων σε πολλές θέσεις, τις περισσότερες φορές, είναι απαγορευτική λόγω του υψηλού κόστους αλλά και του χρόνου που απαιτείται τόσο για τη δειγματοληψία όσο και για την ανάλυση των εδαφικών ιδιοτήτων. Οι παραπάνω περιοριστικοί παράγοντες οδηγούν στην ανάγκη πρόβλεψης των εδαφικών ιδιοτήτων σε άγνωστες θέσεις. Με τον όρο πρόβλεψη εννοούμε την οποιαδήποτε

υπόθεση σχετικά με τις τιμές των εδαφικών ιδιοτήτων σε άλλες θέσεις πέραν των γνωστών.

Κάτω από τη σύγχρονη επιστημονική αντίληψη είναι αποδεκτό ότι οι θεμελιώδεις φυσικοχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την εδαφογένεση είναι τόσο περίπλοκες ώστε να είναι αδύνατη η προσέγγισή τους με μαθηματικά μοντέλα, τα οποία να μην εμπεριέχουν αβεβαιότητα στην εξαγωγή των συμπερασμάτων. Για την πρόβλεψη ιδιοτήτων του εδάφους απαιτείται η δημιουργία μοντέλων που να προσομοιώνουν την πραγματική κατάσταση του εδάφους.

Με βάση την εξίσωση της εδαφογένεσης μπορούμε να προβλέψουμε τις εδαφικές ιδιότητες σε συγκεκριμένες μόνο θέσεις στο χώρο χωρίς να εξετάζουμε το έδαφος σαν μία συνεχή επιφάνεια όπου οι ιδιότητες κάθε θέσης εξαρτώνται από αυτές των γειτονικών θέσεων. Το γεγονός αυτό λαμβάνεται όμως υπόψη και χρησιμοποιείται από τη γεωστατιστική προσέγγιση κατά την οποία είναι δυνατό να προβλεφθούν οι εδαφικές ιδιότητες μιας δεδομένης θέσης από γνωστές τιμές γειτονικών παρατηρήσεων. Η Γεωστατιστική είναι μέθοδος χωρικής παρεμβολής και είναι η στατιστική προσέγγιση κατά την οποία το έδαφος θεωρείται συνεχής επιφάνεια και οι εδαφικές ιδιότητες αντιμετωπίζονται ως χωρικές μεταβλητές (regionalized variables). Σύμφωνα με τη θεωρία των χωρικών – περιφερειακών μεταβλητών τα διαθέσιμα δειγματοληπτικά δεδομένα είναι αποτέλεσμα μίας τυχαίας διεργασίας ή εκφράσεις μίας τυχαίας συνάρτησης, εισάγοντας έτσι ένα βαθμό αβεβαιότητας για την εκτίμηση μιας εδαφικής ιδιότητας (Cressie N.A.C., 1993).

Η Γεωστατιστική εισήχθη στην επιστήμη της εδαφολογίας στις αρχές της δεκαετίας '80 ως εναλλακτική λύση της εδαφολογικής ταξινόμησης για την αποτύπωση της εδαφικής διακύμανσης. Οι Burgess και Webster (1980) ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν πρακτικά τη μέθοδο Kriging στην εδαφολογία. Το παράδειγμά τους ακολούθησαν στην πορεία αρκετοί άλλοι (Goovaerts, 1997, 1999a, 1999 b, Webster and Oliver, 2001).

Η χωρική παρεμβολή με γεωστατιστικές μεθόδους καλείται kriging. Στη γεωστατιστική μέθοδο kriging εξετάζεται μόνο η χωρική αυτοσυσχέτιση της εξεταζόμενης παραμέτρου για την πρόβλεψη των τιμών της σε μη μετρημένες θέσεις (Li et al., 2006). Στη μέθοδο co-kriging λαμβάνεται υπόψη, παράλληλα με τη χωρική αυτοσυσχέτιση, και η συσχέτιση της εξεταζόμενης μεταβλητής με άλλες μεταβλητές.

Αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει τις σχέσεις των τοπογραφικών μεταβλητών και του εδάφους και τις έχουν χρησιμοποιήσει για την πρόβλεψη εδαφικών ιδιοτήτων σε σημεία στα οποία δεν υπάρχουν μετρήσεις (Odeh et al., 1994, 1995; Knotters et al., 1995, McKenzie et al., 1999, Thompson et al., 2001). Συνήθης πηγή για τοπογραφικές μεταβλητές είναι τα ψηφιακά μοντέλα υψομέτρου (Digital Elevation Model = DEM) της περιοχής, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ποσοτική εκτίμηση της επίδρασης των εδαφογενετικών παραγόντων στη διαμόρφωση των εδαφικών ιδιοτήτων. Παρόμοιες προσπάθειες εφαρμογής co-kriging μεθόδου χωρικής παρεμβολής έχουν γίνει και σε περιοχές της Ελλάδας για την εκτίμηση μηχανικών κλασμάτων χρησιμοποιώντας ως βοηθητική μεταβλητή το υψόμετρο σε μικρής έκτασης περιοχή με ομοιόμορφο μητρικό υλικό (Καλύβας κ.α., 2000) ή την απόσταση από γειτονικό ποτάμι το οποίο συνέβαλε μέσω των πλημμυρών στη διαμόρφωση της μηχανικής σύστασης των γειτονικών εδαφών (Kalivas et al. 2002).

Τα τελευταία χρόνια, είναι αυξημένο το ενδιαφέρον για τη χρήση μεθόδων χωρικής παρεμβολής που συνδυάζουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση και χαρτογράφηση της χωρικής μεταβλητότητας: (α) παρεμβολή στις μετρημένες τιμές των σημείων παρατήρησης και (β) παρεμβολή σε τιμές που έχουν προκύψει από παλινδρόμηση με βοηθητικές ιδιότητες. Αρκετές μελέτες έχουν αποδείξει ότι οι μέθοδοι αυτές μπορούν να δώσουν καλύτερες προβλέψεις (Knotters et al., 1995, Bishop and McBratney, 2001, Bourennane and King, 2003, Lloyd, 2005, Yemefack et al., 2005).

Στόχος της εργασίας είναι η σύγκριση επτά μεθόδων χωρικής παρεμβολής, από τις οποίες έξι στηρίζονται στη γεωστατιστική θεωρία, των τιμών των τριών κλασμάτων της μηχανικής σύστασης σε περιοχή της Δυτικής Μεσσηνίας. Με τη χρήση των γεωστατιστικών μεθόδων θα επιχειρήσουμε να εκτιμήσουμε τις τιμές των εδαφικών ιδιοτήτων σε θέσεις που δεν έχουμε λάβει δείγματα βασισμένοι στις ήδη υπολογισμένες τιμές των εδαφικών ιδιοτήτων στις θέσεις δειγματοληψίας καθώς επίσης και σε μορφολογικά - τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής μας. Τα σημαντικότερα από αυτά τα χαρακτηριστικά που θα χρησιμοποιηθούν είναι το υψόμετρο, η κλίση, η έκθεση - προσανατολισμός, η κυρτότητα και η καμπυλότητα που θα υπολογιστούν από το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο μέσα σε περιβάλλον Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΜΕΘΟΔΟΙ – ΘΕΩΡΙΑ

2.1.1. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΕΣ – ΜΗ ΧΩΡΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Μια από τις βασικές παραδοχές στη γεωστατιστική είναι ότι τα δεδομένα προέρχονται από έναν ομοιογενή πληθυσμό. Έτσι κρίνεται απαραίτητη η στατιστική επεξεργασία πριν την εφαρμογή της χωρικής παρεμβολής. Ο σκοπός της στατιστικής είναι να μας παρέχει ένα ακριβή και συστηματικό τρόπο για την περιγραφή των δεδομένων, να μπορούμε δηλαδή να περιγράψουμε αποτελεσματικά τα βασικά χαρακτηριστικά των δεδομένων μας. Με τον όρο χαρακτηριστικά ενός συνόλου δεδομένων εννοούμε την κεντρική τάση, τη διασπορά και το σχήμα της κατανομής των συχνοτήτων (Κόλλια – Κουσουρή Β., 2006).

Οι μετρήσεις της κεντρικής τάσης αφορούν την εύρεση μιας τιμής αντιπροσωπευτικής ενός δείγματος. Σε όλα τα δεδομένα η διερεύνηση της κεντρικής τάσης υλοποιήθηκε με υπολογισμό μονομεταβλητών αναλύσεων όπως μέσος όρος, μέγιστη και ελάχιστη τιμή. Η διασπορά των δεδομένων ελέγχθηκε με τον υπολογισμό της διακύμανσης, της τυπικής απόκλισης και του συντελεστή παραλλακτικότητας (Coefficient of variation).

Επίσης πραγματοποιήθηκε έλεγχος της κανονικότητας των τιμών με υπολογισμό της κύρτωσης (kurtosis) και ασυμμετρίας (skewness), με μελέτη των ιστογραμμάτων και σύγκριση αυτών με το διάγραμμα της κανονικής κατανομής καθώς και με εφαρμογή του Kolmogorov –Smirnov ελέγχου (K-S test).

Η ασυμμετρία (skewness) μετρά το βαθμό στον οποίο ο μεγάλος όγκος των μετρήσεων σε μια κατανομή ευρίσκεται προς το ένα ή το άλλο μέρος του μέσου όρου. Εάν οι τιμές είναι μικρότερες από το μέσο όρο λέμε ότι έχει θετική ασυμμετρία και στην αντίθετη περίπτωση αρνητική. Η ασυμμετρία υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$skewness = \frac{\sum(x - \bar{x})^3}{n\sigma^3} \quad (2)$$

όπου, \bar{x} ο μέσος όρος, σ η τυπική απόκλιση και n ο αριθμός των παρατηρήσεων. Όταν τα δεδομένα ακολουθούν κανονική κατανομή ο βαθμός skewness παρουσιάζει

στο σχήμα του μία συμμετρία ως προς την κεντρική τιμή και η τιμή του παίρνει κυμαίνεται κοντά στο μηδέν. Μεγάλος βαθμός σημαίνει ότι τα δεδομένα δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή ενώ θετική ή αρνητική τιμή δείχνει αντίστοιχα θετικά (δεξιά) ή αρνητικά (αριστερή) λοξή κατανομή συχνοτήτων.

Η κύρτωση (kurtosis) μετρά το βαθμό με τον οποίο οι τιμές μαζεύονται σε μια κατηγορία μιας κατανομής συχνοτήτων. Εάν μια ομάδα από γειτονικές κατηγορίες σε μια κατανομή συχνοτήτων περιέχει ένα μεγάλο ποσοστό των τιμών τότε λέμε ότι η κατανομή έχει μεγάλο βαθμό κύρτωσης. Η μέτρηση της κύρτωσης δίνεται από τον τύπο:

$$kurtosis = \frac{\sum(x - \bar{x})^4}{n\sigma^4} \quad (3)$$

όπου, \bar{x} ο μέσος όρος, σ η τυπική απόκλιση και n ο αριθμός των παρατηρήσεων.

Η κύρτωση δίνει πολύτιμες πληροφορίες για τα γεωγραφικά δεδομένα. Η κύρτωση της κανονικής κατανομής είναι ίση με 0. Αρνητικές τιμές σημαίνουν ότι η κατανομή πλατύκυρτη ενώ θετικές τιμές ότι είναι λεπτόκυρτη. Πολλές γεωγραφικές μεταβλητές έχουν μεγάλο βαθμό κύρτωσης που σημαίνει ότι δεν προέρχονται από έναν κανονικά κατανομημένο πληθυσμό.

Τέλος ο μη παραμετρικός έλεγχος Kolmogorov – Smirnov (K-S test) χρησιμοποιείται για να διερευνήσουμε εάν η κατανομή των δεδομένων μας διαφέρει σημαντικά από την κανονική κατανομή (normal distribution). Η διαδικασία βασίζεται σε μια σύγκριση της αθροιστικής κατανομής του δείγματος με την υποθετική (κανονική) αθροιστική κατανομή. Σύμφωνα με το K-S test γίνεται εξέταση των τιμών κάθε ιδιότητας εάν προέρχονται από κανονική κατανομή με μέσο όρο και τυπική απόκλιση που υπολογίζονται από το δείγμα. Ο έλεγχος των αποτελεσμάτων γίνεται από την υπολογιζόμενη τιμή Z του τεστ και από το επίπεδο σημαντικότητας (2-tailed P test). Το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας ορίζεται συνήθως ίσο με 0.05 ή 5%. Εάν το επίπεδο σημαντικότητας είναι μεγαλύτερο του 0,05 τότε ότι η κατανομή των δεδομένων δεν διαφέρει σημαντικά από την κανονική.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους σχετίζονται δύο μεταβλητές. Μπορεί να σχετίζονται θετικά, δηλαδή αυξανόμενων των τιμών της μίας να αυξάνονται και οι τιμές της άλλης, μπορεί να σχετίζονται αρνητικά, δηλαδή αυξανόμενων των τιμών

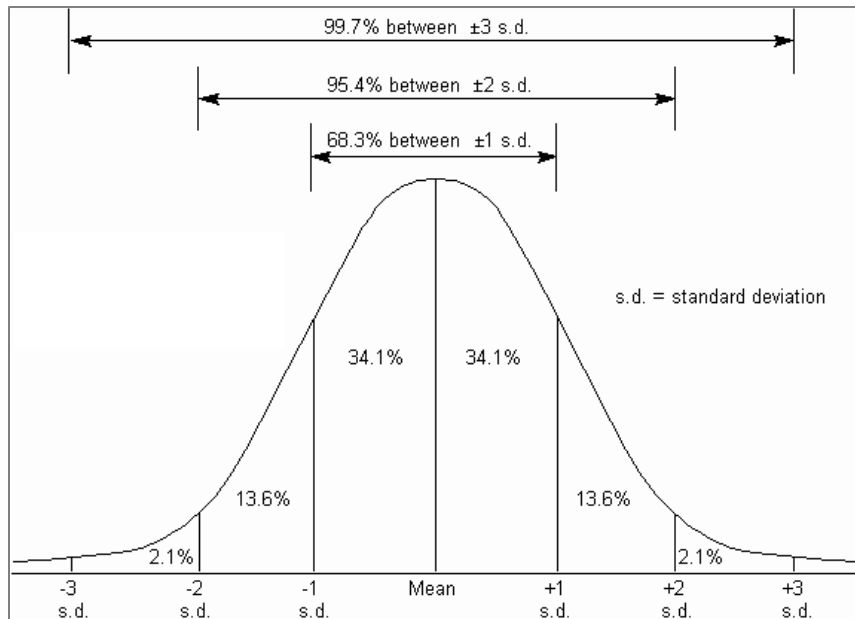
της μιας να μειώνονται οι τιμές της άλλης, ή τέλος μπορεί να μην έχουν καμία σχέση μεταξύ τους. Η εύρεση της συσχέτισης στα δεδομένα έγινε με τον υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης, ο οποίος ορίζεται ως η περιγραφή της γραμμικής σχέσης μεταξύ δυο μεταβλητών μετρημένων σε ένα κοινό δείγμα. Μετρά το βαθμό και διεύθυνση της σχέσης δύο μεταβλητών. Ο συντελεστής συσχέτισης παίρνει τιμές από -1 έως +1. Ο συντελεστής συσχέτισης που χρησιμοποιήθηκε στα δεδομένα μας ήταν ο συντελεστής Pearson ο οποίος καλείται r και δίνεται από τον τύπο:

$$r = \frac{cov_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(N - 1)\sigma_x \sigma_y} \quad (4)$$

όπου, \bar{x} ο μέσος όρος, σ_x η τυπική απόκλιση και x_i οι τιμές της μεταβλητής X , \bar{y} ο μέσος όρος, σ_y η τυπική απόκλιση και y_i οι τιμές της μεταβλητής Y αντίστοιχα και τέλος N ο αριθμός των παρατηρήσεων.

Η τιμή -1 δείχνει μια στενή αρνητική σχέση μεταξύ των δυο μεταβλητών ενώ η τιμή +1 μια σημαντική θετική συσχέτιση. Τέλεια έλλειψη συγγένειας αποδεικνύεται με ένα συντελεστή συσχέτισης μηδέν.

Τέλος τον κύκλο των μη χωρικών επεξεργασιών κλείνει η εύρεση μη χωρικών ακραίων τιμών. Μια μη χωρική ακραία τιμή (non-spatial outlier) είναι μία τιμή που διαφέρει σημαντικά από την κύρια τάση των παρατηρήσεων και έχει σημαντικό αντίκτυπο στον υπολογισμό του βαριογράμματος και κατά συνέπεια, την εκτίμηση (R. Kerry and M.A. Oliver, 2007). Η κανονική κατανομή είναι συμμετρική και μεσόκυρτη κατανομή, άρα ισχύει ότι η διάμεσος, η επικρατούσα τιμή και η μέση της τιμή ταυτίζονται. Η εύρεση μη χωρικών ακραίων τιμών βασίστηκε στο γεγονός ότι στην κανονική κατανομή: το 68% περίπου των παρατηρήσεων βρίσκεται στο διάστημα ($\mu - \sigma$, $\mu + \sigma$), το 95% περίπου των παρατηρήσεων βρίσκεται στο διάστημα ($\mu - 2\sigma$, $\mu + 2\sigma$) και το 99,7% περίπου των παρατηρήσεων βρίσκεται στο διάστημα ($\mu - 3\sigma$, $\mu + 3\sigma$), όπου μ ο μέσος όρος και σ η τυπική απόκλιση (Εικόνα 2.1). Επομένως κάθε τιμή που είναι εκτός του ορίου ($\mu - 3\sigma$, $\mu + 3\sigma$) μπορεί να χαρακτηριστεί ως μη χωρική ακραία τιμή.



Εικόνα 2.1. Κανονική κατανομή.

Αν διαπιστωθεί ακραία παρατήρηση, πρέπει πρώτα να ερευνηθεί αν οφείλεται σε λανθασμένη μέτρηση, αν αυτό συμβαίνει, πρέπει να παραληφθεί από το δείγμα. Η γενική αρχή που πρέπει να τηρούμε είναι ότι ποτέ δεν απορρίπτουμε μια ακραία παρατήρηση αν δεν είμαστε βέβαιοι ότι πρόκειται για λάθος. Έγκυρες ακραίες παρατηρήσεις μπορεί να αποδειχθούν ότι οφείλονται πιθανόν σε ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν στο συγκεκριμένο σημείο.

Όλες οι παραπάνω στατιστικές επεξεργασίες πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου SPSS 17.0.

2.1.2. ΧΩΡΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η βασική αρχή της γεωστατιστικής είναι η ύπαρξη χωρικής αυτο-συσχέτισης η οποία αποτελεί και το βασικό κριτήριο της εφαρμογής μεθόδων χωρικής παρεμβολής. Η χωρική αυτο-συσχέτιση εκφράζει τη φυσική τάση που παρουσιάζουν οι εδαφικές ιδιότητες, να είναι παρόμοιες ή να μεταβάλλονται λιγότερο όταν παρατηρούνται σε σημεία που απέχουν μεταξύ τους μικρές αποστάσεις, δηλαδή γενικά όσο πιο κοντά είναι δυο σημεία στο χώρο τόσο πιο όμοιες θα είναι και οι εδαφικές ιδιότητες που σχετίζονται με αυτά.

Οι δείκτες μέτρησης της χωρικής αυτο-συσχέτισης είναι ολικοί (global) και τοπικοί (local). Η ολική μέτρηση της χωρικής αυτο-συσχέτισης είναι μια μοναδική μέτρηση για ολόκληρη την περιοχή. Οι τοπικοί δείκτες μέτρησης της χωρικής αυτο-

συσχέτισης προσπαθούν να εντοπίσουν τοπικές μεταβολές μέσα σε σχηματισμούς χωρικής εξάρτησης και είναι χρήσιμοι διότι αποκαλύπτουν χωρικές σχέσεις που σε άλλη περίπτωση δεν θα μπορούσαν να γίνουν αντιληπτές (Anselin, 1995).

Ο τοπικός δείκτης Moran's I χρησιμοποιείται για τη μελέτη των χωρικών σχηματισμών της χωρικής συσχέτισης, δηλαδή την εύρεση τοπικών αμάδων (clusters) και χωρικά ακραίων τιμών (spatial outliers). Ο τοπικός Moran's I δίδεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I = \frac{X_i - \bar{X}}{S_i^2} \sum_{j \neq i, j \neq i}^n W_{i,j} (X_i - \bar{X}) \quad (5)$$

όπου S_i^2 η τυπική απόκλιση της μεταβλητής x , \bar{X} ο μέσος όρος της εδαφικής ιδιότητας και W_{ij} ο συντελεστής βαρύτητας ανάλογος της απόστασης μεταξύ των θέσεων i και j . Για τον υπολογισμό των βαρών χρησιμοποιείται συνήθως η συνάρτηση αντίστροφης απόστασης των θέσεων.

Μία μεγάλη θετική τιμή τοπικού Moran's I σημαίνει ότι η εξεταζόμενη θέση έχει παρόμοια τιμή (χαμηλή ή υψηλή) με τα γειτονικά της σημεία (clusters) ενώ μία μεγάλη αρνητική τιμή σημαίνει ότι η τιμή στο σημείο που μελετάμε διαφέρει σημαντικά από τις τιμές των γειτονικών σημείων και αποτελεί μία χωρική ακραία τιμή (spatial outlier) (Lalor and Zhang, 2001). Εάν τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή τότε ο τοπικός δείκτης Moran's I μπορεί να τυποποιηθεί σε ένα Z-score (Anselin, 1995; Levine, 2004). Το στατιστικό Z-score έχει κανονική κατανομή με μέσο όρο μηδέν και τυπική απόκλιση ίση με ένα ($\mu=0$, $\sigma^2=1$).

Ως κρίσιμη τιμή του Z-score ορίζεται το 1,96 με επίπεδο σημαντικότητας p ίσο με 0,05. Επομένως με επίπεδο σημαντικότητας 0,05 (95% βεβαιότητα), εάν η Z-score τιμή του τοπικού Moran's I είναι μικρότερη από -1,96 τότε το σημείο θεωρείται χωρικά ακραία τιμή. Αντίστοιχα εάν η Z-score είναι μεγαλύτερη από +1,96 τότε το εξεταζόμενο σημείο ομαδοποιείται με τα γειτονικά του σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05.

Η διερεύνηση της ύπαρξης χωρικά ακραίων τιμών (spatial outliers), μπορεί να οδηγήσει στην εξαίρεση ορισμένων τιμών από τον πληθυσμό των δειγμάτων, συμβάλλοντας έτσι σε μία σαφέστερη εικόνα για την ύπαρξη ή όχι χωρικής συσχέτισης στις εδαφικές ιδιότητες που εξετάζονται. Οι χωρικά ακραίες τιμές είναι

αυτές που αντιβαίνουν στη βασική υπόθεση της γεωστατιστικής προσέγγισης, με αποτέλεσμα να προκύπτουν μεγάλες μεταβολές στις εδαφικές ιδιότητες σε μικρές όμως παρατηρούμενες αποστάσεις.

2.1.3. ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ – ΧΩΡΙΚΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ

Χωρική παρεμβολή (interpolation) καλείται η διαδικασία με την οποία προβλέπονται οι τιμές συγκεκριμένων χαρακτηριστικών σε θέσεις στις οποίες δεν έχει πραγματοποιηθεί δειγματοληψία, χρησιμοποιώντας τιμές των χαρακτηριστικών αυτών σε σημεία στα οποία υπάρχουν δεδομένα. Η χωρική παρεμβολή χρησιμοποιείται για τη μετατροπή δεδομένων από σημειακές παρατηρήσεις σε συνεχείς επιφάνειες, έτσι ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη ιδιοτήτων σε μη μετρημένα σημεία. Η λογική βάση της χωρικής παρεμβολής είναι η πολύ κοινή παρατήρηση ότι οι τιμές σημείων που βρίσκονται κοντά είναι πιο πιθανό να είναι παρόμοιες απ' ό,τι των σημείων που βρίσκονται αρκετά μακριά. Γενικά, δύο σημεία παρατήρησης μερικά μέτρα μακριά είναι περισσότερο πιθανό να έχουν την ίδια συμπεριφορά σε σχέση με σημεία μερικά χιλιόμετρα μακριά.

Δυο βασικές υποθέσεις στηρίζουν τη διαδικασία της χωρικής παρεμβολής. Πρώτον, ότι η επιφάνεια που εκφράζει το υπό εξέταση χαρακτηριστικό είναι συνεχής και, επομένως, η τιμή σε κάθε θέση μπορεί να υπολογιστεί αν υπάρχουν ικανοποιητικά στοιχεία για την επιφάνεια αυτή. Η σαφής αυτή υπόθεση είναι εκείνη που επιτρέπει τη δημιουργία των μεθόδων παρεμβολής. Η δεύτερη υπόθεση είναι έμμεση, αφού αναφέρεται στη χωρική εξάρτηση των τιμών του υπό εξέταση χαρακτηριστικού, αλλά είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί επιτρέπει την τεκμηρίωση των μεθόδων αυτών.

Όσον αφορά τις μεθόδους χωρικής παρεμβολής, αυτές μπορούν να διαφοροποιηθούν σε τρεις κατηγορίες: τις μεθόδους τοπικών εκτιμήσεων (local estimation), τις μεθόδους γενικευμένων προσεγγίσεων (global approximation) και τις γεωστατιστικές μεθόδους χωρικής συσχέτισης (kriging). Οι δυο πρώτες μέθοδοι είναι σχετικά απλές και απαιτούν τη γνώση στοιχειωδών αιτιοκρατών ή στατιστικών μεθόδων. Στη γενική χωρική παρεμβολή για την πρόβλεψη της τιμής σε ένα σημείο χρησιμοποιούνται όλες οι τιμές των υπαρχόντων δεδομένων της περιοχής. Στην τοπική, η πρόβλεψη της τιμής της μεταβλητής προκύπτει από τα υπάρχοντα δεδομένα των γειτονικών σημείων. Τέλος η τρίτη κατηγορία απαιτεί μια καλή αντίληψη της έννοιας της χωρικής συσχέτισης και γι' αυτό εξετάζεται ως διαφορετική κατηγορία.

Μέθοδοι Τοπικών Εκτιμήσεων

Οι μέθοδοι αυτοί αναφέρονται στην εκτίμηση της τιμής ενός χαρακτηριστικού σε μια συγκεκριμένη θέση, με βάση στοιχεία τα οποία προέρχονται από σημεία που βρίσκονται στην άμεση γειτονική περιοχή του. Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτών των προσεγγίσεων είναι ότι η εκτίμηση βασίζεται σε πληροφορίες που αφορούν περιοχές κοντά στο υπό εκτίμηση σημείο και επομένως αντανακλούν διαφοροποιήσεις στη γειτονιά του. Από την άλλη μεριά, βέβαια, βασικό μειονέκτημα αποτελεί η ανάγκη καθορισμού αυτής της περιοχής εκτίμησης που θεωρείται ως γειτονιά.

Γενικές μέθοδοι χωρικής παρεμβολής

Όταν η μεταβολή ενός χαρακτηριστικού σε μια περιοχή γίνεται ομοιόμορφα, είναι πιθανό οι τιμές του να μπορούν να μοντελοποιηθούν μέσω μιας ομαλής μαθηματικής επιφάνειας. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να γίνει κάτι τέτοιο αλλά όλοι σχεδόν προσαρμόζουν κάποιο είδος πολυωνυμικής εξίσωσης στις παρατηρήσεις των σημείων δειγματοληψίας, έτσι ώστε οι τιμές σε θέσεις που δεν υπάρχουν δεδομένα να μπορούν να υπολογιστούν από τις συντεταγμένες τους.

Γεωστατιστικές μέθοδοι παρεμβολής

Η γεωστατιστική αποτελεί κλάδο της εφαρμοσμένης Στατιστικής που ασχολείται με φαινόμενα που μεταβάλλονται στο χώρο (Olea, 1991). Στηρίζεται στη βάση της θεωρίας των πιθανοτήτων και τη στατιστική. Η χωρική παρεμβολή με γεωστατιστικές μεθόδους καλείται kriging.

Καμία από τις μη γεωστατιστικές μεθόδους χωρικής παρεμβολής δεν μπορεί να μας δώσει απευθείας εκτιμήσεις για την ποιότητα της πρόβλεψης, καθώς επίσης και για το αν η επιλογή των τιμών των παραμέτρων είναι η καλύτερη δυνατή ή αν το μέγεθος της περιοχής αναζήτησης είναι το κατάλληλο.

Επιπλέον, καμία μέθοδος από αυτές που αναφέρθηκαν δεν παρέχει πρακτικές πληροφορίες για:

- Τον αριθμό των σημείων που χρειάζονται για να υπολογίσουμε τον τοπικό μέσο όρο.
- Το μέγεθος, τον προσανατολισμό και το σχήμα των γειτονικών σημείων από τα οποία έχουν υπολογιστεί.

- Την ύπαρξη καλύτερων τρόπων εκτίμησης των βαρών από μια απλή συνάρτηση της απόστασης.
- Τα λάθη που σχετίζονται με τις τιμές που υπολογίστηκαν με την παρεμβολή.

Επίσης οι μη γεωστατιστικές μέθοδοι χωρικής παρεμβολής δεν λαμβάνουν υπ' όψη τους τη χωρική εξάρτηση των τιμών των μεταβλητών. Η επιστήμη της γεωστατιστικής όμως βασίζεται στη θεωρία των χωρικών – περιφερειακών μεταβλητών (regionalized variables) σύμφωνα με την οποία τα διαθέσιμα δειγματοληπτικά δεδομένα είναι αποτέλεσμα μίας τυχαίας διεργασίας ή εκφράσεις μίας τυχαίας συνάρτησης, εισάγοντας έτσι ένα βαθμό αβεβαιότητας για την εκτίμηση μιας εδαφικής ιδιότητας (Cressie N.A.C., 1993).

Οι γεωστατιστικές μέθοδοι χωρικής παρεμβολής παρέχουν μηχανισμούς για να αντιμετωπιστούν οι περιορισμοί – μειονεκτήματα των προηγούμενων μεθόδων χωρικής παρεμβολής και επιτυγχάνουν τις βέλτιστες προβλέψεις τιμών σε μη μετρημένες θέσεις. Βασίζονται στις έννοιες των χωρικών μεταβλητών, των τυχαίων συναρτήσεων και της σταθερότητας (Stationary).

Ορίζοντας μια εδαφική ιδιότητα ως μία χωρική μεταβλητή $z(x)$ που παίρνει διαφορετικές τιμές z σύμφωνα με τη θέση της x μέσα σε μία περιοχή τότε αν θεωρηθούν όλες οι τιμές της $z(x)$ σε όλες τις θέσεις μέσα στην περιοχή, η εδαφική μεταβλητή γίνεται μέλος ενός απείρου συνόλου τυχαίων μεταβλητών $Z(x)$ της περιοχής. Ένα τέτοιο σύνολο καλείται τυχαία κατανομή γιατί συνδέει μία τυχαία μεταβλητή Z με κάθε θέση x (Huizbregts, 1975).

Η θεώρηση της περιφερειακής μεταβλητής $z(x)$ ως μία έκφραση της τυχαίας κατανομής $Z(x)$ έχει λειτουργική σημασία μόνο όταν αναφέρεται σε όλο ή σε μέρος του νόμου πιθανότητας που αποκλειστικά καθορίζει την τυχαία συνάρτηση (Journel and Huizbregts, 1978). Ενώ η σύλληψη αυτής της πραγματικότητας φαίνεται λογική είναι προφανής η έλλειψη αδυναμίας για τον καθορισμό του νόμου πιθανότητας από μία μόνο έκφραση της τυχαίας κατανομής $Z(x)$. Απαιτούνται λοιπόν πολλές $z_1(x)$, $z_2(x)$, ..., $z_k(x)$ της τυχαίας κατανομής $Z(x)$.

Επειδή στη πράξη έχουμε δυνατότητα μόνο ενός συνόλου τιμών $z(x_i)$ στις θέσεις x_i εμφανίζεται ένα εμπόδιο που αντιμετωπίζεται με μερικές αναγκαίες υποθέσεις. Αυτές οι υποθέσεις εισάγουν διάφορους βαθμούς ομοιογένειας στο χώρο και συνθέτουν τη

γενική υπόθεση της εσωτερικής σταθερότητας (intrinsic stationary) η οποία αποτελείται από δυο επιμέρους τάξεις, την πρώτη και δεύτερη τάξη σταθερότητας (first and second order stationary) και τυγχάνει ευρείας εφαρμογής στο έδαφος (Burgess T.M., Webster R., 1980).

Μία τυχαία συνάρτηση $Z(x)$ καλείται σταθερά πρώτης τάξης (first order stationary) εάν η αναμενόμενη τιμή της είναι η ίδια για όλες τις θέσεις της υπό εξέτασης περιοχής.

$$E[Z(x)] = m \quad (6)$$

όπου, m είναι ο μέσος όρος της κλασσικής στατιστικής.

Επομένως και η αναμενόμενη διαφορά μεταξύ οποιονδήποτε δύο θέσεων x και $x+h$ που απέχουν ένα διάστημα απόστασης h θα είναι μηδενική.

$$E[Z(x) - Z(x + h)] = 0 \quad (7)$$

όπου, $Z(x)$ και $Z(x+h)$ είναι οι τιμές της τυχαίας μεταβλητής Z στις θέσεις x και $x+h$.

Μία τυχαία συνάρτηση $Z(x)$ καλείται σταθερά δεύτερης τάξης (second order stationary) εάν η διακύμανση των τιμών της Z εξαρτάται από το h και όχι από το x , δηλαδή από τις μεταξύ τους αποστάσεις και όχι από τη θέση τους στο χώρο, και δίνεται από την εξίσωση:

$$var[Z(x) - Z(x + h)] = E\{[Z(x) - Z(x + h)]^2\} = 2\gamma(h) \quad (8)$$

όπου $2\gamma(h)$ καλείται βαριόγραμμα (variogram).

Η ποσότητα $\gamma(h)$ στη γεωστατιστική καλείται ημιδιακύμανση (semi-variance) και δίνεται από τη σχέση:

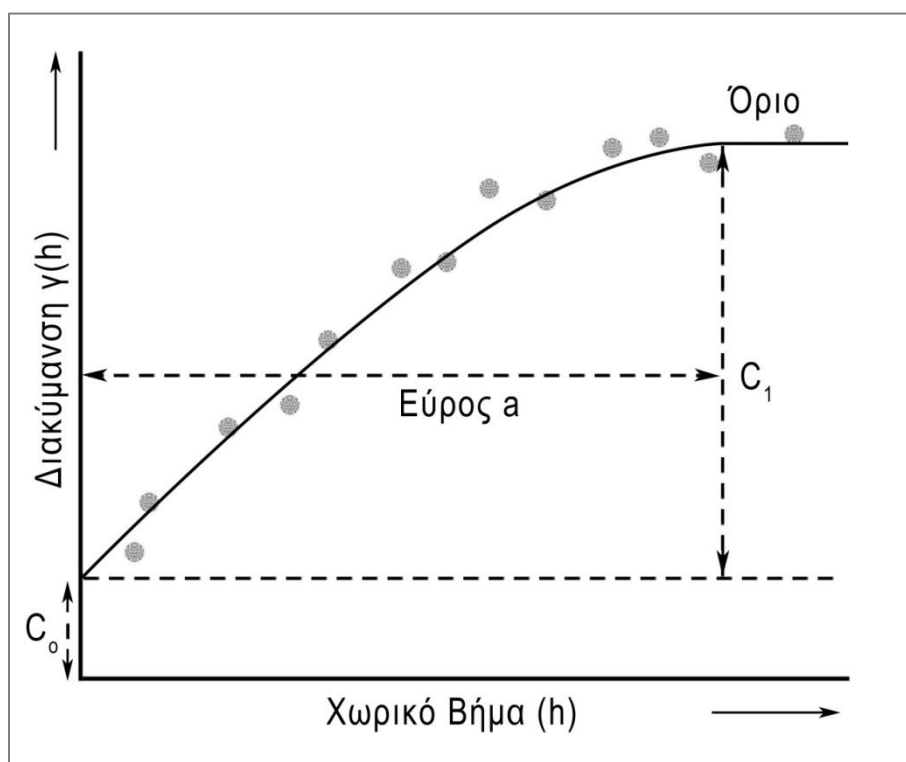
$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (9)$$

όπου, N είναι ο αριθμός των ζευγών των σημείων δειγματοληψίας της μεταβλητής Z που απέχουν μεταξύ τους απόσταση h , η οποία είναι γνωστή και ως **χωρικό βήμα** (lag distance). Η ημιδιακύμανση μεταξύ δύο θέσεων εξαρτάται μόνο από την απόσταση και τη διεύθυνση και όχι από τη γεωγραφική τους θέση.

Η γραφική παράσταση της $\gamma(h)$ ως προς το h καλείται πειραματικό βαριόγραμμα (experimental variogram). Το πειραματικό βαριόγραμμα (Εικόνα 2.2) είναι το πρώτο

βήμα για την ποσοτική περιγραφή της χωρικής μεταβολής (Olea. R.A., 2006). Το βαριόγραμμα περιέχει χρήσιμη πληροφορία για τη χωρική παρεμβολή. Συγκεκριμένα μας παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη συσχέτιση μεταξύ των τιμών μίας τυχαίας συνάρτησης και των μεταξύ τους αποστάσεων στο χώρο. Εάν μία τέτοια συσχέτιση υφίσταται, είναι δυνατή η εφαρμογή θεωρητικού μοντέλου στο πειραματικό ημιβαριόγραμμα με μία συνάρτηση αυτο-συσχέτισης.

Το σχήμα του πειραματικού βαριογράμματος έχει πολλές μορφές που εξαρτώνται από τα δεδομένα και την απόσταση δειγματοληψίας.



Εικόνα 2.2. Τυπικό πειραματικό βαριόγραμμα.

Οι πληροφορίες που αποκαλύπτονται από το ημιβαριόγραμμα είναι οι εξής:

Η παράμετρος **nugget** (C_0) είναι η χωρική διακύμανση που οφείλεται στο συστηματικό λάθος μέτρησης και δειγματοληψίας, σε μικρομεταβολές δηλαδή της ιδιότητας που δεν μπορούν να ανιχνευθούν στην κλίμακα δειγματοληψίας ή σε άλλες ανεξήγητες πηγές. Η παράμετρος (C_1) ονομάζεται **structural variance** και αποτελεί τη χωρική δομή της διακύμανσης που οφείλεται στη διαφοροποίηση της τυχαίας συνάρτησης Z στο χώρο, έτσι όπως καταγράφηκε από τις παρατηρήσεις. Το άθροισμα των (C_0+C_1) ονομάζεται **όριο (sill)**, και θεωρητικά ισούται με τη

διακύμανση του πληθυσμού των δειγμάτων σε μεγάλες αποστάσεις διαχωρισμού εάν απουσιάζουν τοπικές τάσεις. Πρακτικά εισάγει τη σκέψη ότι σε μεγάλες αποστάσεις η συμπεριφορά της εξεταζόμενης μεταβλητής είναι τυχαία και δεν υπάρχει εξάρτηση -σχέση της τιμής σε μια θέση από την τιμή που εμφανίζεται σε κάποιο άλλο σημείο.

Αν το nugget είναι περίπου ίδιο με το sill, αυτό σημαίνει την απουσία χωρικής συσχέτισης και την τυχαία διακύμανση της Z , φαινόμενο γνωστό και ως **nugget effect** (Cressie N.A.C., 1993). Η διαφορά ανάμεσα στο sill και nugget φανερώνει το μέγεθος της χωρικής διακύμανσης (Isaaks και Srivastava, 1989), την οποία μπορούμε εύκολα να αξιολογήσουμε υπολογίζοντας το λόγο τους (nugget/sill x 100). Εάν ο λόγος παίρνει τιμές μικρότερες ή ίσες με 25% τότε υπάρχει ισχυρή χωρική εξάρτηση, 26-75% σχετική χωρική εξάρτηση και τέλος πάνω από 75% ασθενή χωρική συσχέτιση (Cambardella C A. et al., 1994, Chien et al., 1997).

Η παράμετρος **a**, ονομάζεται **εύρος (range)** της χωρικής συσχέτισης, και είναι το τμήμα του ημιβαριογράμματος που δείχνει συνεχή αύξηση της ημιδιακυμάνσεως αυξανόμενης της απόστασης της δειγματοληψίας h . Το εύρος προσδιορίζει τη ζώνη επίδρασης ενός δείγματος, δηλαδή σημεία που απέχουν μεταξύ τους απόσταση μεγαλύτερη από αυτήν, δεν παρουσιάζουν καμία χωρική συσχέτιση, κάτι που μπορεί να έχει μεγάλη σημασία στο σχεδιασμό δειγματοληπτικών μεθόδων (Lark R.M., 2000, Groenigen J.W., 2000). Μέσα στα όρια του εύρους οι κοντινές μεταξύ τους θέσεις είναι οι πιο όμοιες, δηλαδή χωρικά εξαρτημένες, ενώ σημεία που τα χωρίζουν αποστάσεις μεγαλύτερες από το εύρος δεν είναι χωρικά εξαρτημένα γιατί η ημιδιακύμανση ισούται με s^2 που συνεπάγεται τυχαία μεταβολή. Το εύρος ορίζει τη μεγαλύτερη ακτίνα από την οποία γειτονικά δείγματα λαμβάνονται για τη χωρική παρεμβολή. Προφανώς αν η απόσταση που χωρίζει ένα μη μετρημένο σημείο από ένα σημείο δεδομένων είναι μεγαλύτερη από το εύρος τότε η συνεισφορά του σημείου δεδομένων δεν είναι σημαντική γιατί είναι πολύ μακριά. Το εύρος των βαριογραμμμάτων εξαρτάται από την κλίμακα παρατήρησης και τις χωρικές αλληλεπιδράσεις των εδαφικών διεργασιών που επηρεάζουν κάθε εδαφική ιδιότητα στην κλίμακα δειγματοληψίας που χρησιμοποιείται.

Μετά από τον υπολογισμό των πειραματικών βαριογραμμμάτων απαιτείται η προσαρμογή κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων που να περιγράφουν με τη μεγαλύτερη δυνατή σαφήνεια τη χωρική διακύμανση της εδαφικής ιδιότητας που

εξετάζεται. Η επιλογή του πιο κατάλληλου μοντέλου στηρίζεται σε πλήρως αυτοματοποιημένες αριθμητικές μεθόδους, έως την υποκειμενική εφαρμογή συναρτήσεων στα πειραματικά ημιβαριογράμματα, με γραφικό τρόπο. Στην ουσία ο σκοπός της όλης προσπάθειας είναι η δημιουργία ενός μοντέλου που να προσεγγίζει με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια τη χωρική διακύμανση των εξεταζόμενων εδαφικών ιδιοτήτων.

Από τους ευρέως γνωστούς τρόπους αξιολόγησης της προσαρμογής των βαριογραμμάτων είναι η μείωση του αθροίσματος των τετραγώνων των υπολοίπων (R) καθώς και η χρήση του κριτηρίου AIC (Akaike Information Criterion). Το AIC κριτήριο είναι ένας ικανοποιητικός τρόπος αξιολόγησης της προσαρμογής ενός μοντέλου και δίνεται από τον τύπο:

$$A = n \ln R + 2p \quad (10)$$

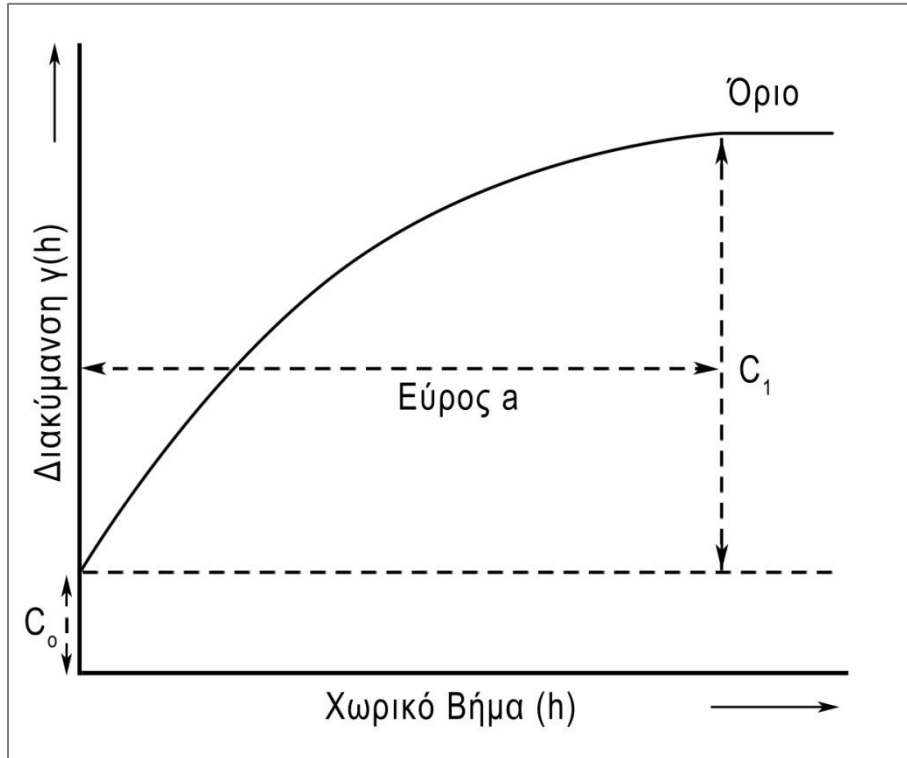
όπου, n είναι ο αριθμός των πειραματικών σημείων στο βαριόγραμμα, R είναι το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων και p είναι ο αριθμός των παραμέτρων που ενσωματώνονται στο μοντέλο. Το μοντέλο που έχει τη μικρότερη τιμή A είναι και το μοντέλο με την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα μας (Webster R. and McBratney B., 1989). Είναι προφανές ότι εάν όλα τα μοντέλα έχουν τον ίδιο αριθμό παραμέτρων τότε το κριτήριο AIC δεν διαφέρει σε τίποτα από την ελαχιστοποίηση του R .

Τα θεωρητικά μοντέλα που εφαρμόζονται συνήθως στις εδαφικές μεταβλητές είναι το εκθετικό (exponential), το σφαιρικό (spherical), το γραμμικό και το Gaussian.

Εκθετικό

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-\frac{|h|}{r}} \right] \quad \text{για } |h| > 0 \quad (11)$$

$$\gamma(h) = 0$$



Εικόνα 2.3. Εκθετικό μοντέλο.

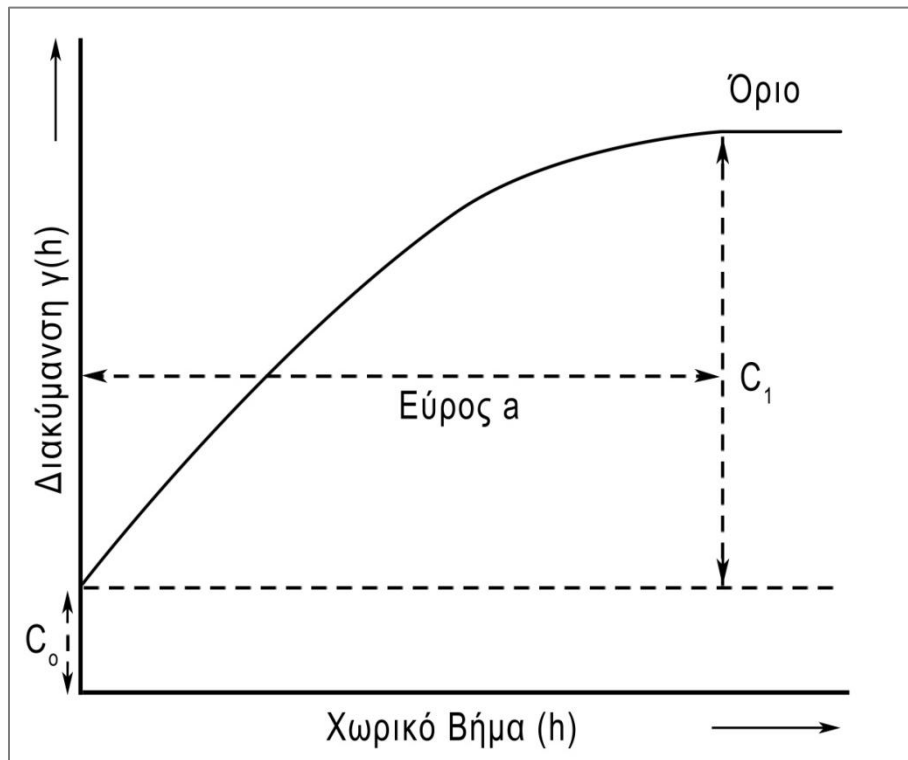
Όπου, $\gamma(h)$ είναι η ημιδιακύμανση, h είναι το lag, C_0 η nugget διακύμανση και $(C_0 + C_1)$ είναι το sill και προσεγγίζεται ασυμπτωτικά από το παραπάνω ομοίωμα. Το r είναι μια παράμετρος απόστασης που ελέγχει την ακτίνα ή το εύρος της χωρικής διακύμανσης. Εφόσον το εκθετικό μοντέλο πλησιάζει ασυμπτωτικά την οριακή τιμή, το 'δραστικό' εύρος (**effective range**) ορίζεται συμβατικά να είναι $a=3r$ και είναι η απόσταση αυτή για την οποία το όριο (sill) προσεγγίζει την τιμή $C_0+0.95C_1$, για την περίπτωση του εκθετικού ομοιώματος (το βαριόγραμμα είναι στο 95% της οριακής τιμής σε αυτήν την απόσταση). Το εκθετικό μοντέλο κατέχει ξεχωριστή θέση στη γεωστατιστική διότι παριστά την έννοια της τυχαιότητας στο χώρο, και έχει αποδειχτεί ότι περιγράφει βαριόγραμματα για ένα πλήθος εδαφολογικών ιδιοτήτων (Oliver, 1984).

Σφαιρικό

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1,5 \frac{|h|}{a} - 0,5 \left(\frac{|h|}{a} \right)^3 \right] \quad \text{για } 0 < |h| < a \quad (12)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad \text{για } |h| > a$$

$$\gamma(h) = 0$$



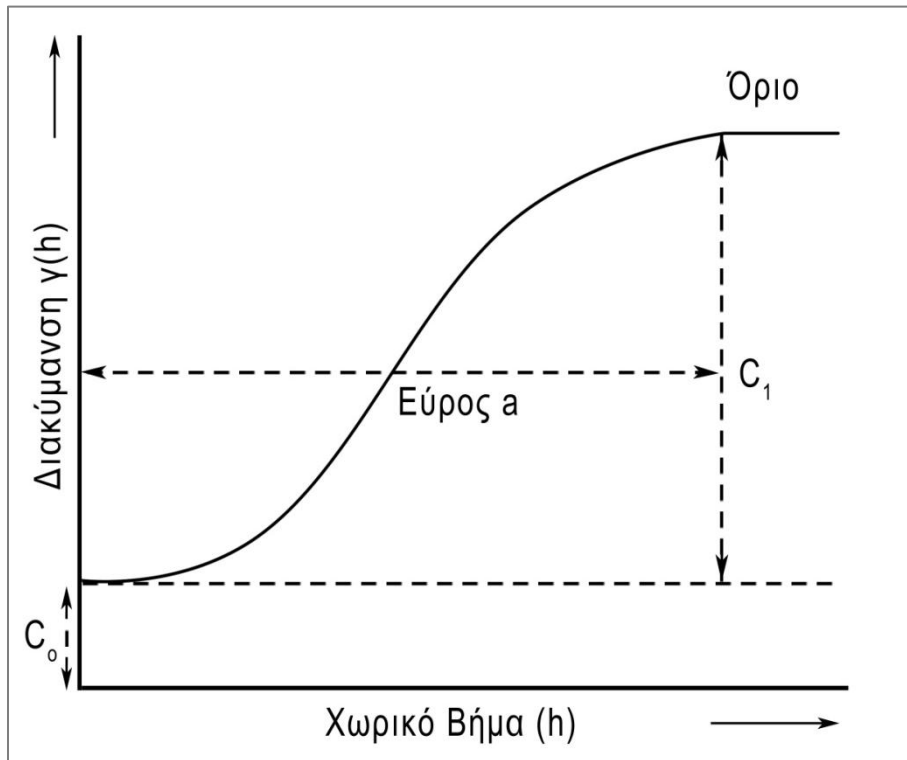
Εικόνα 2.4. Σφαιρικό μοντέλο.

Όπου, $\gamma(h)$ είναι η ημιδιακύμανση, h είναι το lag, C_0 η nugget διακύμανση και $(C_0 + C_1)$ είναι το όριο και a είναι η παράμετρος που ορίζει το εύρος της χωρικής εξάρτησης. Είναι το μοντέλο που ανταποκρίνεται περισσότερο στα ημιβαριογράμματα των περισσότερων εδαφολογικών ιδιοτήτων.

Gaussian

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-\frac{|h|^2}{r^2}} \right] \quad (13)$$

$$\gamma(0) = 0$$



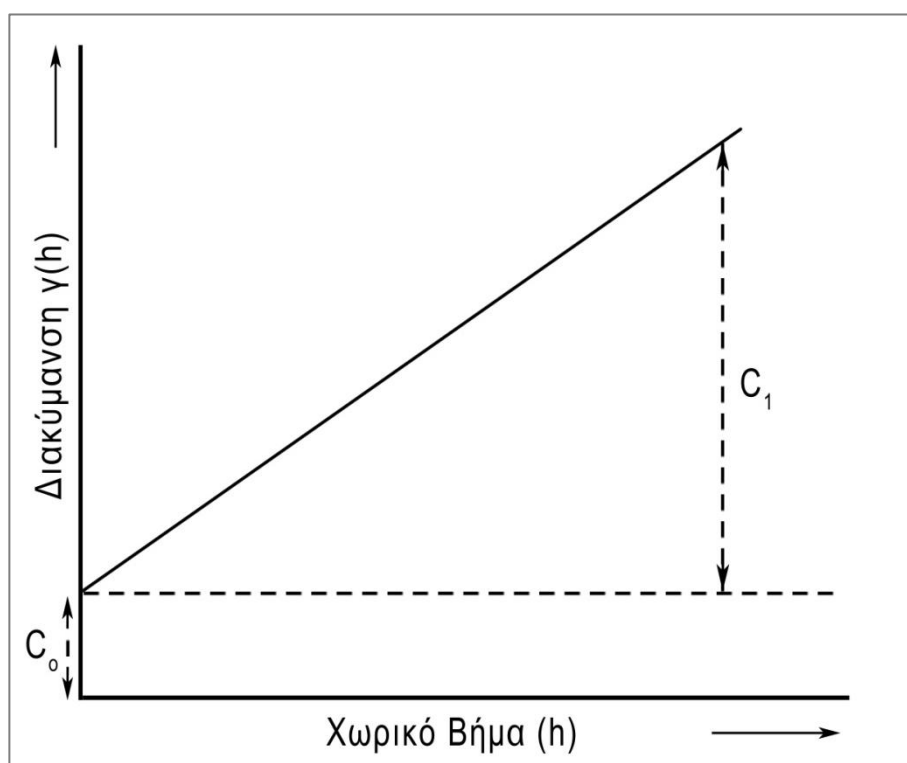
Εικόνα 2.5. Gaussian μοντέλο.

Όπου, $\gamma(h)$ είναι η ημιδιακύμανση, h είναι το lag, C_0 η nugget διακύμανση και $(C_0 + C_1)$ είναι το όριο και προσεγγίζεται ασυμπτωτικά από το παραπάνω ομοίωμα, όπως και με το εκθετικό μοντέλο το r είναι μια παράμετρος απόστασης που ελέγχει την ακτίνα ή το εύρος της χωρικής διακύμανσης. Το effective range για το μοντέλο Gaussian είναι $a=1.73r$ και είναι πάλι η απόσταση αυτή στην οποία το μοντέλο φτάνει το 95% της οριακής τιμής. Το Gaussian αντιπροσωπεύει υπερβολικά συνεχή συμπεριφορά στην αρχή και συνήθως εφαρμόζεται σε πολύ ομαλές, συνεχείς μεταβλητές όπως η τοπογραφία.

Όλα τα παραπάνω μοντέλα καλούνται μεταβατικά βαριογράμματα (transitive variogramms) γιατί η δομή της χωρικής συσχέτισης μεταβάλλεται με το h . Τα μη μεταβατικά βαριογράμματα (non-transitive) δεν έχουν όριο μέσα στην περιοχή δειγματοληψίας και μοντελοποιούνται με το γραμμικό μοντέλο.

Γραμμικό

$$\gamma(h) = C_0 + bh \quad (14)$$



Εικόνα 2.6. Γραμμικό μοντέλο.

Όπου, $\gamma(h)$ είναι η ημιδιακύμανση, h είναι το lag, C_0 η nugget διακύμανση και b είναι η κλίση της καμπύλης.

2.1.4. ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ Kriging - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Ordinary Kriging (OK)

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η χωρική παρεμβολή με γεωστατιστικές μεθόδους καλείται *kriging*. Ο όρος *kriging* αποδόθηκε από τον G. Matheron, του Centre de Geostatistique στο Fontainebleau, προς τιμή του Νότιο-Αφρικανού μηχανικού ορυχείων D.G. Krige ο οποίος πρωτοπόρησε στη χρήση στατιστικών μεθόδων για την εκτίμηση αποθεμάτων μετάλλων στη Νότια Αφρική κατά τη δεκαετία του '50. Το *kriging* χρησιμοποιείται εκτενώς από τις αρχές του 1970, αρχικά στις μεταλλευτικές βιομηχανίες της Δυτικής Ευρώπης και της Νότιας Αφρικής. Σήμερα το *kriging* χρησιμοποιείται από πολλές μεταλλευτικές εταιρείες στη Βόρεια και Νότια Αμερική, την Αυστραλία, την Αφρική και την Ασία. Η χρήση του επίσης

διαδόθηκε και σε μη-μεταλλευτικά πεδία (πετρέλαιο, περιβάλλον, εδαφολογία, υδρολογία, κλπ.).

Η μέθοδος αυτή της χωρικής παρεμβολής είναι εξαιρετικά απλή στη σύλληψη της και επιτυγχάνει εκτίμηση των τιμών των μεταβλητών σε θέσεις που δεν ελήφθησαν δείγματα, χρησιμοποιώντας το αρχικό σύνολο των τιμών και τις πληροφορίες που μας παρέχει το βαριόγραμμα (Burrough and McDonnell, 1998).

Οι ιδιότητες του kriging συχνά δίνονται περιληπτικά με το ακρωνύμιο **BLUE** (**B**est **L**inear **U**nbiased **E**stimator), δηλαδή βέλτιστος γραμμικός αμερόληπτος εκτιμητής. Το kriging είναι ο 'βέλτιστος' με την έννοια ότι έχει το ελάχιστο μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα, δηλαδή η αναμενόμενη τετραγωνισμένη διαφορά μεταξύ της εκτίμησης $Z^*(x_0)$ και της πραγματικής τιμής $Z(x_0)$ στη θέση x_0 :

$$E[Z^*(x_0) - Z(x_0)]^2 \quad (15)$$

είναι η ελάχιστη για όλους τους πιθανούς γραμμικούς εκτιμητές.

Το kriging είναι γραμμικός εκτιμητής αφού ανήκει σε εκείνους που σχηματίζονται με γραμμική ζύγιση των διαθέσιμων δειγμάτων, δηλαδή:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (16)$$

Όπου τα λ_i είναι τα βάρη, και η εκτίμηση $Z^*(x_0)$ είναι ένα ζυγισμένο άθροισμα όλων των δεδομένων τιμών $Z(x_i)$ σε κάθε σημείο x .

Επιπλέον το kriging είναι αμερόληπτος αφού ισχύει η συνθήκη αμεροληψίας η οποία καθορίζει ότι το αναμενόμενο σφάλμα $E[Z^*(x_0) - Z(x_0)]$ είναι ίσο με μηδέν.

Τέλος επειδή δεν μπορούμε να γνωρίζουμε την πραγματική περιεκτικότητα σε ένα άγνωστο σημείο, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κάποια μέθοδο για να την εκτιμήσουμε. Επομένως, το kriging είναι ο βέλτιστος γραμμικός αμερόληπτος εκτιμητής της ποσότητας που εκτιμάται. Ουσιαστικά τις ιδιότητες αυτές το kriging τις πληροί γιατί προσδίνει στα δείγματα που συμμετέχουν στην εκτίμηση, βάρη σχεδιασμένα ώστε να υπολογίζεται μια εκτίμηση με το ελάχιστο μέσο τετραγωνισμένο σφάλμα. Αυτό που κάνει το Kriging να διαφέρει από τους άλλους εκτιμητές είναι ότι στηρίζεται σταθερά στο μοντέλο βαριογράμματος ως συνάρτηση

βάρους. Εξαιτίας αυτού, τα βάρη του Kriging αποδίδονται κατά τρόπο που να αντικατοπτρίζουν το χωρικό συσχετισμό των ίδιων των δειγμάτων.

Η κανονική μέθοδος Kriging (Ordinary Kriging - OK), βασίζεται στη χωρική συνάρτηση:

$$Z(x) = \mu + \delta(x) \quad (17)$$

όπου, μ ο μέσος όρος και $Z(x)$ τυχαία συνάρτηση με τα χαρακτηριστικά της εσωτερικής σταθερότητας (intrinsic stationarity) και βαριόγραμμα:

$$2\gamma(h) = \text{var}[z(x) - z(x+h)] \quad (18)$$

Σύμφωνα λοιπόν με τη θεωρία των περιφερειακών μεταβλητών, η τιμή μιας συνεχούς χωρικής μεταβλητής δίνεται από το άθροισμα δυο συνισταμένων, μιας πρώτης και μιας δεύτερης τάξης. Αν θεωρήσουμε ότι η συνισταμένη πρώτης τάξης είναι ο γενικευμένος (για ολόκληρη την περιοχή μελέτης) μέσος όρος $\mu(x)$, ο οποίος είναι σταθερός και δεν χρειάζεται να εκτιμηθεί από τις παρατηρηθείσες τιμές (μια τέτοια παραδοχή είναι απόλυτα αποδεκτή στατιστικά, Cressie, 1991). Τότε αν η τιμή αυτή αφαιρεθεί από τις παρατηρούμενες τιμές σε κάθε σημείο του δείγματος τα υπόλοιπα δίνουν τις τιμές $V(x)$ με γνωστή διακύμανση σ^2 .

Λόγω του τρόπου που η στατιστική αντιμετωπίζει τα διάφορα προβλήματα είναι απολύτως κατανοητό να θεωρηθεί ότι οι παραπάνω εκτιμήσεις αποτελούν ένα γραμμικό, με βάρη, συνδυασμό των παρατηρούμενων τιμών των περιφερειακών μεταβλητών (υπόλοιπα), που παίρνει τη μορφή:

$$V^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i V(x_i) \quad (19)$$

όπου, $V(x_0)$ η εκτιμηθείσα τιμή στη θέση x_0 , $V(x_i)$ η παρατηρηθείσα τιμή στο σημείο x_i , λ_i είναι τα βάρη που αντιστοιχούν σε κάθε σημείο του δείγματος x_i , δηλαδή εξαρτώνται από τη θέση τους σε σχέση με την υπό εκτίμηση θέση x_0 .

Τα βάρη λ_i επιλέγονται έτσι ώστε η εκτίμηση $V(x_0)$ να τηρεί τον όρο της μη-προκατάληψης (αμεροληψίας - unbiased) και η εκτιμηθείσα διακύμανση να είναι μικρότερη από κάθε άλλο γραμμικό συνδυασμό των παρατηρούμενων τιμών.

Η συνθήκη της αμεροληψίας συνεπάγεται ότι:

$$E[V^*(x_0) - V(x_0)] = 0 \quad (20)$$

$$E \left[\left\{ \sum_{i=1}^N \lambda_i V(x_i) \right\} - V(x_0) \right] = 0 \quad (21)$$

Εάν η $V(x)$ είναι στάσιμη, η προσδοκία για το $V(x)$ είναι ίση με το μέσο:

$$E[V(x_i)] = \mu \quad (22)$$

Και επίσης η προσδοκία για την πραγματική περιεκτικότητα $V(x_0)$ είναι ίση με το μέσο:

$$E[V(x_0)] = \mu \quad (23)$$

Έτσι, εάν η $V(x)$ είναι στάσιμη οι αναμενόμενες τιμές για την πραγματική τιμή και κάθε τιμή μετρημένου δείγματος είναι ίσες και οι δυο με το μέσο, και μπορούμε να γράψουμε τη συνθήκη της αμεροληψίας ως εξής:

$$\begin{aligned} E \left[\left\{ \sum_{i=1}^N \lambda_i V(x_i) \right\} - V(x_0) \right] &= 0 \\ E \left[\sum_{i=1}^N \lambda_i V(x_i) \right] - E[V(x_0)] &= 0 \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i \mu - \mu &= 0 \end{aligned} \quad (24)$$

Μπορούμε να παραγοντοποιήσουμε την τελευταία έκφραση λαμβάνοντας την τιμή μ ως κοινό παράγοντα:

$$\mu \left(\sum_{i=1}^N \lambda_i - 1 \right) = 0$$

Διαιρώντας και τις δυο πλευρές δια μ έχουμε:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i - 1 = 0 \quad (25)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (26)$$

Με βάση τα παραπάνω, η απαίτηση για βέλτιστη πρόβλεψη οδηγεί στην ελαχιστοποίηση της ποσότητας Q (η αναμενόμενη εις το τετράγωνο διαφορά μεταξύ εκτιμώμενης και πραγματικής τιμής) ως εξής:

$$Q = E[\{(V(x_0) - V^*(x_0))\}^2] = E\left[\left(V(x_0) - \sum_{i=1}^N V(x_i)\right)^2\right] \quad (27)$$

Που μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$Q = E\left[\left\{(V(x_0) - \mu) - \sum_{i=1}^N \lambda_i (V(x_i) - \mu)\right\}^2\right] \quad (28)$$

Με ύψωση στο τετράγωνο η σχέση γίνεται:

$$Q = E[(V(x_0) - \mu)^2 - \left\{\sum_{i=1}^N \lambda_i (V(x_i) - \mu)\right\}^2 - 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i (V(x_i) - \mu)(V(x_0) - \mu)] \quad (29)$$

Ο μεσαίος όρος της παραπάνω σχέσης μπορεί να γραφεί:

$$\begin{aligned} \left\{\sum_{i=1}^N \lambda_i (V(x_i) - \mu)\right\}^2 &= \left\{\sum_{i=1}^N \lambda_i (V(x_i) - \mu)\right\} \left\{\sum_{j=1}^N \lambda_j (V(x_j) - \mu)\right\} \\ &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j (V(x_i) - \mu)(V(x_j) - \mu) \end{aligned} \quad (30)$$

Με βάση την παραπάνω εξίσωση η (27) γίνεται:

$$Q = E[(V(x_0) - \mu)^2] + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j E[(V(x_i) - \mu)(V(x_j) - \mu)] - 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i (V(x_i) - \mu)(V(x_0) - \mu)$$

Από τους τρεις όρους, ο πρώτος είναι η διασπορά της τυχαίας συνάρτησης δηλαδή $C(x_0, x_0)$, στο μεσαίο όρο η αναμενόμενη ποσότητα είναι η συνδιασπορά των μεταβλητών στις θέσεις x_i, x_j , δηλαδή $C(x_i, x_j)$, ενώ στον τρίτο όρο η αναμενόμενη ποσότητα είναι η συνδιασπορά της μεταβλητής που θέλουμε να προβλεφθεί και της μεταβλητής στη θέση x_i , δηλαδή $C(x_i, x_0)$, επομένως:

$$Q = C(x_0, x_0) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j C(x_i, x_j) - 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i C(x_i, x_0) \quad (31)$$

$$= \gamma(x_0, x_0) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i, x_j) - 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i, x_0) \quad (32)$$

Σύμφωνα με τη θεωρία για την ελαχιστοποίηση της τιμής μιας συνάρτησης (Q) από λ_i χρειάζεται να θέσουμε τις μερικές παραγώγους ως προς τα λ_i να είναι μηδέν. Όταν υπάρχει σταθερά (C=0) η αρχή Lagrange αναφέρει ότι πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η $\Phi=Q+2gC$, όπου g είναι ο συντελεστής Lagrange.

Με βάση τις εξισώσεις (25) και (32) η Φ παίρνει τη μορφή:

$$\Phi = \gamma(x_0, x_0) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i, x_j) - 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i, x_0) + 2g \left(\sum_{i=1}^N \lambda_i - 1 \right) \quad (33)$$

Όπως αναφέρθηκε οι βέλτιστοι παράμετροι που ελαχιστοποιούν την Q προκύπτουν από το μηδενισμό των μερικών πρώτων παραγώγων της Φ ως προς λ και g, επομένως:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_i} = 0 \Rightarrow \sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + g = \gamma(x_0, x_i) \quad j = 1, 2, 3, \dots, N$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial g} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N$$

Οι παραπάνω αποτελούν και το σύστημα εξισώσεων της κανονικής μεθόδου kriging (Ordinary Kriging – OK), η επίλυση του οποίου μας δίνει τους βέλτιστους σταθμικούς συντελεστές για την πρόβλεψη $z^*(x_0)$. Γράφοντας το σύστημα ως

$$A X = B \text{ ή } X=B/A$$

Όπου,

$$[X] = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ 1 \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} \gamma(x_0, x_1) \\ \gamma(x_0, x_2) \\ \vdots \\ \gamma(x_0, x_N) \\ 1 \end{bmatrix}, [A] = \begin{bmatrix} 0 & \gamma(x_1, x_2) & \dots & \gamma(x_1, x_N) & 1 \\ \gamma(x_2, x_1) & 0 & \dots & \gamma(x_2, x_N) & 1 \\ \gamma(x_3, x_1) & \gamma(x_3, x_2) & \dots & \gamma(x_3, x_N) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_N, x_1) & \gamma(x_N, x_2) & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Αφού υπολογιστούν οι συντελεστές λ υπολογίζεται η Q ενώ από την (19) προσδιορίζεται η ζητούμενη τιμή $V^*(x_0)$.

Cokriging (CK)

Στη μέθοδο cokriging επεκτείνεται η αρχή της καλύτερης εκτίμησης μέσω της θεωρίας των περιφερειακών μεταβλητών (regionalized variables) σε περιπτώσεις που υπάρχουν δύο ή περισσότερες μεταβλητές που οι τιμές τους εμφανίζουν χωρική εξάρτηση και καλούνται συνχωρικές (co-regionalized) (McBratney and Webster, 1983). Έτσι παρέχεται η δυνατότητα εκτίμησης της χωρικής μεταβολής των τιμών μίας ιδιότητας για την οποία υπάρχει μικρός αριθμός δεδομένων, από τη χωρική μεταβολή μίας συ-μεταβλητής της για την οποία υπάρχουν επαρκή δεδομένα. Βασική προϋπόθεση είναι η ύπαρξη στατιστικά σημαντικής συσχέτισης μεταξύ των δύο μεταβλητών.

Θεωρούμε δύο σύνολα τιμών Y και V χωρικά εξαρτημένων τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πληροφορίες για τη χωρική διακύμανση της V για να βελτιώσουμε την πρόβλεψη της Y . Η cokriging τιμή της μεταβλητής Y υπολογίζεται ως η σταθμισμένη μέσω κατάλληλων συντελεστών, μέση τιμή των τιμών από γνωστές θέσεις μεταβλητών Y και V . Στην εκτίμηση συνυπολογίζονται μόνο όσες τιμές υπάρχουν μέσα σε προκαθορισμένη απόσταση από το εκτιμώμενο σημείο. Εάν υπάρχουν v μεταβλητές $v=1,2,\dots,V$ και κάθε μια έχει μετρηθεί σε n_v θέσεις $x_{ik}=1,2,\dots,n_k$, τότε η τιμή της μεταβλητής Y στο x_0 εκτιμάται ως:

$$z_Y^*(x_0) = \sum_{k=1}^V \sum_{i=1}^{n_v} \lambda_{ik} z(x_{ik}) \quad (34) \quad \text{για όλα τα } V_k$$

Για να έχουμε όσο το δυνατόν πιο ικανοποιητικές εκτιμήσεις και να αποφύγουμε την εισαγωγή λαθών θα πρέπει οι σταθμικοί συντελεστές να ικανοποιούν τις παρακάτω συνθήκες:

$$\sum_{i=1}^{n_v} \lambda_{ik} = 1 \quad \text{για } Y = V$$

και

$$\sum_{i=1}^{n_v} \lambda_{ik} = 0 \quad \text{για } Y \neq V$$

Υπάρχει μία εξίσωση για κάθε συνδυασμό θέσης δειγματοληψίας και μεταβλητής. Έτσι για να υπολογίσουμε την τιμή της μεταβλητής j στη θέση x_0 η εξίσωση για την g θέση δειγματοληψίας της k μεταβλητής είναι:

$$\sum_{j=1}^V \sum_{i=1}^{n_V} \lambda_{ij} \gamma_{ij}(x_{ij}, x_{gk}) + m_k = \gamma_{YV}(x_0, x_{gk}) \quad (35)$$

Για όλα τα g από 1 έως n_V και για όλα τα k από το 1 έως το V , όπου m_k είναι ο συντελεστής Lagrange.

Η μελέτη της ύπαρξης της χωρικής εξάρτησης γίνεται μέσω του συν-βαριογράμματος (cross-variogram) το οποίο υπολογίζεται από τα δεδομένα σύμφωνα με τον τύπο :

$$\gamma_{YV}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z_Y(x_i) - z_Y(x_i + h)][z_V(x_i) - z_V(x_i + h)] \quad (36)$$

όπου, $n(h)$ ο αριθμός των ζευγών δεδομένων στις θέσεις x_i και x_i+h σε δεδομένη απόσταση και διεύθυνση h .

Isotopic cokriging (Ισοτοπικό cokriging - ICK)

Στη γεωστατιστική μέθοδο του ισοτοπικού cokriging χρησιμοποιούνται οι τιμές της εδαφικής ιδιότητας στα σημεία δειγματοληψίας καθώς επίσης και η υπολογισμένη στα ίδια σημεία τοπογραφική ιδιότητα με την ισχυρότερη συσχέτιση (Wackernagel H., 1994, Odeh et al, 1995). Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος ICK δίνει σχετικά ίδια αποτελέσματα με την OK αφού στην ουσία χρησιμοποιείται ο ίδιος αριθμός σημείων (Burrough and Mc Donell, 1998).

Heterotopic cokriging (Ετεροτοπικό cokriging – HCK)

Στη γεωστατιστική μέθοδο του ετεροτοπικού cokriging χρησιμοποιούνται οι τιμές της εδαφικής ιδιότητας στα σημεία δειγματοληψίας καθώς επίσης και η τοπογραφική ιδιότητα (με την ισχυρότερη συσχέτιση) της οποίας τιμές υπάρχουν και σε άλλα σημεία εκτός των θέσεων δειγματοληψίας του εδάφους (Wackernagel H., 1994, Odeh et al, 1995).

Regression kriging model I (RK-I)

Το μοντέλο αυτό εισήγαγαν στην εδαφολογική επιστήμη οι Knotters κ.α. (1995) και είναι βασισμένο στην κλασική παλινδρόμηση που ακολουθείται από ordinary kriging των εκτιμούμενων, βάσει των εξισώσεων-μοντέλων παλινδρόμησης, τιμών (Tomislav Hengl et al, 2007).

Η μέθοδος Regression Kriging βασίζεται στη χωρική εξίσωση:

$$Z(x) = \mu(x) + \delta(x)$$

όπου,

$$\mu(x) = \sum_{k=0}^K \alpha_k f_k(x) \quad (37)$$

ο μέσος όρος δεν είναι πλέον σταθερός όπως στο ordinary kriging αλλά συνάρτηση π.χ. των συντεταγμένων των χωρικών σημείων $x(\chi, \psi)$, ή χωρική τάση, συνήθως πολυωνυμική 1^{ου} ή 2^{ου} βαθμού, όπως η

$$\mu(x) = \mu(\chi, \psi) = \alpha_0 + \alpha_1\chi + \alpha_2\psi + \alpha_3\chi^2 + \alpha_4\psi^2 + \alpha_5\chi\psi \quad (38)$$

η οποία είναι αποτέλεσμα της γενικής μορφής:

$$\mu(x) = \sum_k^K \alpha_k f_k(x)$$

$$\text{με} \quad f_0 = 1, f_1 = \chi, f_2 = \psi, f_3 = \chi^2, f_4 = \psi^2, f_5 = \chi\psi, \quad k = 0, 1, \dots, 5$$

Γενικότερα, η έκφραση αυτή του μέσου όρου $\mu(x)$ μπορεί να είναι συνάρτηση όχι μόνο των συντεταγμένων των χωρικών σημείων $x(\chi, \psi)$, αλλά και οποιασδήποτε εξωγενούς μεταβλητής όπως στην παρούσα μελέτη οι τοπογραφικές ιδιότητες, και υπολογίζεται από το μοντέλο παλινδρόμησης, ενώ η υπολειμματική διακύμανση $\delta(x)$ εκτιμάται από το σύστημα εξισώσεων της μεθόδου OK. Τελικά το άθροισμα των δύο εκτιμήσεων $Z(x) = \mu(x) + \delta(x)$ μας δίνει της εκτίμηση της υπό εξέταση εδαφικής μεταβλητής. Οι Odeh και McBratney (1995) απέδειξαν την ανωτερότητα της μεθόδου Kriging σε συνδυασμό με παλινδρόμηση (RK) έναντι άλλων μεθόδων Kriging, και της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Regression kriging model II (RK – II) / Regression kriging model III (RK – III)

Αυτά τα μοντέλα περιλαμβάνουν πολλαπλή παλινδρόμηση που ακολουθείται από ordinary kriging στις εκτιμούμενες από την παλινδρόμηση τιμές (όπως στο προηγούμενο - model I) καθώς και στα υπόλοιπα αυτής (model II) ή παλινδρόμηση σε σημεία που γνωρίζουμε μόνο τις τοπογραφικές ιδιότητες και στη συνέχεια πραγματοποιείται ordinary kriging στα υπόλοιπα της παλινδρόμησης (model III) (Odeh et al, 1995). Και στα δύο μοντέλα εφαρμόζεται OK στα υπόλοιπα της παλινδρόμησης και γίνεται προσπάθεια έτσι μείωσης της αβεβαιότητας στην ακρίβεια της πρόβλεψης. Στο Regression kriging model II μελετάται ουσιαστικά η δυνατότητα βελτίωσης της Regression-kriging model I, ενώ τέλος στη Regression-kriging model III γίνεται προσπάθεια εφαρμογής της παλινδρόμησης σε όλη την περιοχή μελέτης και όχι μόνο στα σημεία δειγματοληψίας. Αυτό επιτυγχάνεται από την εφαρμογή των συντελεστών του μοντέλου παλινδρόμησης σε σημεία της περιοχής που είναι γνωστά τα τοπογραφικά δεδομένα. Επομένως η ακρίβεια πρόβλεψης εξαρτάται και από την προσαρμογή του μοντέλου παλινδρόμησης.

Πολλαπλή παλινδρόμηση - Multi linear regression (MLR)

Στη μέθοδο αυτή περιλαμβάνεται η εφαρμογή της κλασσικής διαδικασίας πολλαπλής παλινδρόμησης κατά την οποία τα μοντέλα παλινδρόμησης παρήχθησαν με εξαρτημένη μεταβλητή την εδαφική ιδιότητα και ανεξάρτητες τις τοπογραφικές. Εξαρτημένη μεταβλητή είναι εκείνη στην οποία αντανακλάται το αποτέλεσμα των μεταβολών στις ανεξάρτητες. Με την ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis) εξετάζουμε τη σχέση μεταξύ δύο ή περισσότερων μεταβλητών με σκοπό την πρόβλεψη των τιμών της μιας, μέσω των τιμών της άλλης (ή των άλλων) (Michelle Sergent et al., 1995). Αν θεωρήσουμε δύο μεταβλητές X , Y οι οποίες συνδέονται με μια σχέση της μορφής $Y = f(X)$ μέσω της οποίας για κάθε τιμή της X μπορούμε να προβλέψουμε ακριβώς την τιμή της Y .

Ο υπολογισμός της ευθείας που προσεγγίζει καλύτερα τα σημεία μας γίνεται με τη μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων (Least Squares). Αντίθετα από άλλες μεθόδους προσαρμογής που πρέπει να διέρχονται από όλα τα σημεία του διαγράμματος, η βέλτιστη ευθεία συχνά δεν περιλαμβάνει κανένα από τα σημεία του διαγράμματος. Είναι όμως η μοναδική ευθεία που ικανοποιεί το κριτήριο των ελαχίστων τετραγώνων το οποίο απαιτεί το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων όλων των σημείων

από αυτή να είναι το ελάχιστο δυνατό. Η επιλογή των μοντέλων παλινδρόμησης με την καλύτερη προσαρμογή γίνεται με βάση το συντελεστή προσδιορισμού (**coefficient of determination**) R^2 ο οποίος παίρνει τιμές στο κλειστό διάστημα **[0, 1]** και δίνεται από τον τύπο:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (39)$$

όπου, x_i η παρατηρούμενη τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής, x_i^* η εκτιμώμενη τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής και \bar{x} ο μέσος όρος των πραγματικών – παρατηρούμενων τιμών.

Μικρές τιμές του R^2 δείχνουν ότι το μοντέλο παλινδρόμησης δεν έχει καλή προσαρμογή, ενώ τιμές του R^2 κοντά στο 1 δηλώνουν αντίστοιχα την καλή προσαρμογή του μοντέλου παλινδρόμησης. Ο συντελεστής προσδιορισμού φανερώνει το ποσοστό της μεταβλητότητας των δεδομένων που εξηγείται από το γραμμικό μοντέλο που προσαρμόσαμε. Ο συντελεστής προσδιορισμού μας βοηθά επομένως να καθορίσουμε ποιο μοντέλο είναι καλύτερο για να το επιλέξουμε για τη συνέχεια των διαδικασιών μας.

Το μοντέλο παλινδρόμησης χρησιμοποιείται για διερεύνηση των συσχετίσεων μεταξύ των εδαφικών και τοπογραφικών μεταβλητών, που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω μεθόδους, καθώς επίσης για να προβλέψουμε τις εδαφικές ιδιότητες στις θέσεις όπου οι μόνοι οι τοπογραφικές ιδιότητες έχουν καθοριστεί (Regression Kriging Model III).

Εκτίμηση σφάλματος – Αξιολόγηση πρόβλεψης

Ένα από τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής γεωστατιστικών μεθόδων για την πρόβλεψη ιδιοτήτων, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι ότι εμπεριέχει την αβεβαιότητα, με την έννοια ότι επιδιώκει την ελαχιστοποίηση της. Παρόλα αυτά διαφόρων ειδών σφάλματα υπεισέρχονται στη διαδικασία της πρόβλεψης. Το σφάλμα της πρόβλεψης υπολογίζεται από τις κανονικές εξισώσεις Kriging αλλά δεν είναι ικανό από μόνο του για τη συνολική αξιολόγηση της γεωστατιστικής μεθόδου (Cressie N.A.C., 1993).

Ένας άλλος προσδιορισμός του σφάλματος είναι η μέθοδος Jack-knifing ή Cross Validation (διασταύρωση επαλήθευσης) που είναι ευρέως διαδεδομένη στην αξιολόγηση της ακρίβειας των διαφόρων γεωστατιστικών μεθόδων (Voltz and Webster, 1990, Webster and Olive, 2001). Η μέθοδος αυτή πραγματοποιείται με εξαίρεση της τιμής ενός σημείου και υπολογισμό αυτής από τις τιμές των υπολοίπων. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για το σύνολο των τιμών μας και στη συνέχεια ακολουθεί σύγκριση μεταξύ της πραγματικής και εκτιμούμενης τιμής για κάθε σημείο. Η μέθοδος αυτή είναι εξαιρετικά χρήσιμη για τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών μεθόδων. Μέθοδοι με μικρότερο σφάλμα στα γνωστά σημεία, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποδίδουν καλύτερα παντού, έτσι με βάση την Cross Validation μπορεί να επιλεγεί το μοντέλο βαριογράμματος με τη μεγαλύτερη ακρίβεια πρόβλεψης. Επιπλέον, όμως, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την ακρίβεια των αρχικών παραδοχών και την ποιότητα των δεδομένων. Εφαρμογή της Cross Validation πραγματοποιείται με υπολογισμό διάφορων δεικτών από τις πραγματικές και εκτιμούμενες τιμές. Οι δείκτες αυτοί περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z^*(x_i)] \quad (40)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z^*(x_i) - z(x_i)]^2} \quad (41)$$

$$ASE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma^2(x_i)} \quad (42)$$

$$MSPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ME}{\sigma^2(x_i)} \quad (43)$$

$$RMSS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{ME}{\sigma^2(x_i)} \right)^2} \quad (44)$$

όπου, n είναι ο αριθμός των σημείων δειγματοληψίας, $z^*(x_i)$ είναι η εκτιμώμενη τιμή στο σημείο x_i και $z(x_i)$ είναι η μετρημένη τιμή στο σημείο x_i και $\sigma^2(x_i)$ είναι το τυπικό σφάλμα της πρόβλεψης στο σημείο x_i (Krauchenko and Bullock, 1999, Johnston et al., 2001, Webster and Oliver, 2001).

Εάν η μέθοδος παρεμβολής είναι αμερόληπτη τότε το μέσο σφάλμα Mean Error - ME (40) πρέπει να είναι μηδέν. Ο δείκτης ME αν και μετρά την ακρίβεια πρόβλεψης δεν αποτελεί γενικά ένα ισχυρό διαγνωστικό μέσο για την αξιολόγηση της πρόβλεψης γιατί είναι ευαίσθητος στα σφάλματα του βαριογράμματος. Αν διαιρέσουμε το ME με το $\sigma^2(x_i)$ τότε προκύπτει ο δείκτης Mean Standardized Predicted Error – MSPE (43). Μία μέθοδος χαρακτηρίζεται ακριβής αν ο δείκτης MSPE είναι κοντά στη μονάδα. Επίσης αξιόπιστη θεωρείται μια μέθοδος όταν ο δείκτης Root Mean Squared Error – RMSE (41) (παίρνει όσο το δυνατόν μικρότερες τιμές) είναι ίσος με το $\sigma^2(x_i)$, άρα και ο δείκτης Root Mean Square Standardized Prediction Error – RMSS (44) που προκύπτει από το λόγο τους πρέπει να είναι ίσο με 1. Εάν ο RMSS είναι μεγαλύτερος από 1, τότε έχουμε υποεκτιμήσει τις τιμές της μεταβλητής που μας ενδιαφέρει, και αντίστροφα. Επιπλέον ο δείκτης Average Standardized Error – ASE (42) που εκφράζεται από το λόγο της εκτιμώμενης προς την πραγματική διακύμανση πρέπει να είναι κοντά στη μονάδα, εάν είναι μικρότερος από τον RMSP τότε έχουμε επίσης υποεκτιμήσει τις τιμές των μεταβλητών που μας ενδιαφέρουν, και αντίστροφα (Wackernagel, 1995, Johnston et al., 2001, Webster and Oliver, 2001).

Εκτός από τη μέθοδο Cross Validation προτείνεται από αρκετούς ερευνητών (Burgess T.M. and Webster R., 1980, Goovaerts P., 1998, Robinson and Metternicht, 2005) η δημιουργία ενός ανεξάρτητου συνόλου δεδομένων από το σύνολο των σημείων που θα παραμείνει εκτός της διαδικασίας πρόβλεψης και θα αποτελέσει ένα ακόμα μέτρο αξιολόγησης της απόδοσης των μεθόδων πρόβλεψης. Ο δείκτης Root Mean Square Error RMSE (41) υπολογίστηκε για όλες τις μεθόδους και αποτέλεσε το μέτρο σύγκρισης αυτών. Η χρήση ανεξάρτητου συνόλου σημείων αποτελεί ίσως το μοναδικό αμερόληπτο τρόπο ελέγχου των αποτελεσμάτων όλων των μεθόδων αφού όπως προαναφέρθηκε τα σημεία επαλήθευσης (validation points) δεν έλαβαν μέρος στην αρχική χωρική εκτίμηση.

2.1.5. ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ – ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Σε όλες τις μεθόδους χωρικής παρεμβολής, εκτός από την ordinary kriging, στις επεξεργασίες εισήχθησαν τοπογραφικές - μορφολογικές ιδιότητες που ελήφθησαν από το Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρου (Digital Elevation Model - DEM) της περιοχής. Από το DEM δημιουργήθηκαν τα επίπεδα της κλίσης (slope), της έκθεσης (aspect) ως προς τον ορίζοντα καθώς επίσης και η καμπυλότητα (plan curvature) και κυρτότητα (profile curvature) του αναγλύφου.

Κλίση (slope)

Η κλίση των σημείων του αναγλύφου εκφράζει το βαθμό αλλαγής του υψομέτρου και επηρεάζει άμεσα την ταχύτητα κίνησης του επιφανειακού νερού. Επηρεάζει με τον τρόπο αυτό την απορροή των επιφανειακών υδάτων, όπως επίσης τη μεταφορά ιζημάτων, τη συνεκτικότητα των εδαφικών οριζόντων καθώς επίσης και χαρακτηριστικά της φυτοκάλυψης. Μετράται τόσο σε μοίρες (degrees) όσο και σε εκατοστιαίο ποσοστό (%).

Έκθεση – Προσανατολισμός (aspect)

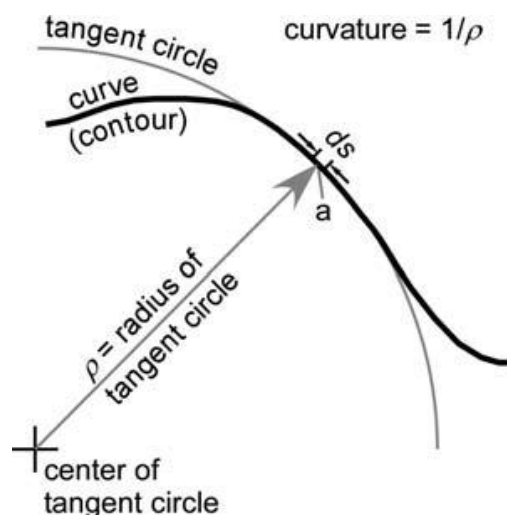
Σε συνδυασμό με το βαθμό αλλαγής του υψομέτρου, ο προσανατολισμός των κλίσεων του αναγλύφου επηρεάζει την έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία και κατ' επέκταση και την εξατμισοδιαπνοή. Η έκθεση εκφράζει τον προσανατολισμό της επιφάνειας του εδάφους ως προς τα τέσσερα σημεία του ορίζοντα, πρακτικά προς ποιο σημείο του ορίζοντα θα «βλέπει» η επιφάνεια του εδάφους. Για το λόγο αυτό επηρεάζει την κατανομή της εδαφικής υγρασίας στο ανάγλυφο, άρα και εδαφικές ιδιότητες όπως η συνεκτικότητα των οριζόντων, καθώς και ιδιότητες των φυτών. Η έκθεση είναι κυκλική μεταβλητή και μετράται δεξιόστροφα από το βορρά προς μία συγκεκριμένη διεύθυνση σε μοίρες (φ) και παίρνει τιμές από 0 έως 360. Εκθέσεις π.χ. βορειοανατολικές σημαίνει ότι η επιφάνεια του εδάφους έχει προσανατολισμό βορειοανατολικά.

Καμπυλότητα ή κυρτότητα αναγλύφου (curvature)

Η καμπυλότητα του αναγλύφου εκφράζεται τόσο ως οριζόντια (Horizontal or Plan curvature) όσο και ως κάθετη (Vertical or Profile curvature) και οι δυο διαμορφώνουν τη δυναμική της κίνησης του νερού στην επιφάνεια του εδάφους, άρα και ιδιότητες

του όπως η περιεχόμενη εδαφική υγρασία, το pH, η συνεκτικότητα των εδαφικών οριζόντων, η περιεχόμενη οργανική ουσία κ.ά.. Η μονάδα μέτρησής τους είναι μ^{-1} .

Από μαθηματική άποψη, η καμπυλότητα ορίζεται ως η αλλαγή στη γωνία κλίσης κατά μήκος ενός πολύ μικρού τόξο ds της καμπύλης (Εικόνα 2.7) (Thomas, 1968). Η καμπυλότητας είναι το αντίστροφο της ακτίνας ενός κύκλου που εφάπτεται πάνω σε αυτό το μικρό τόξο ds της καμπύλης (Kerpr, 1969).

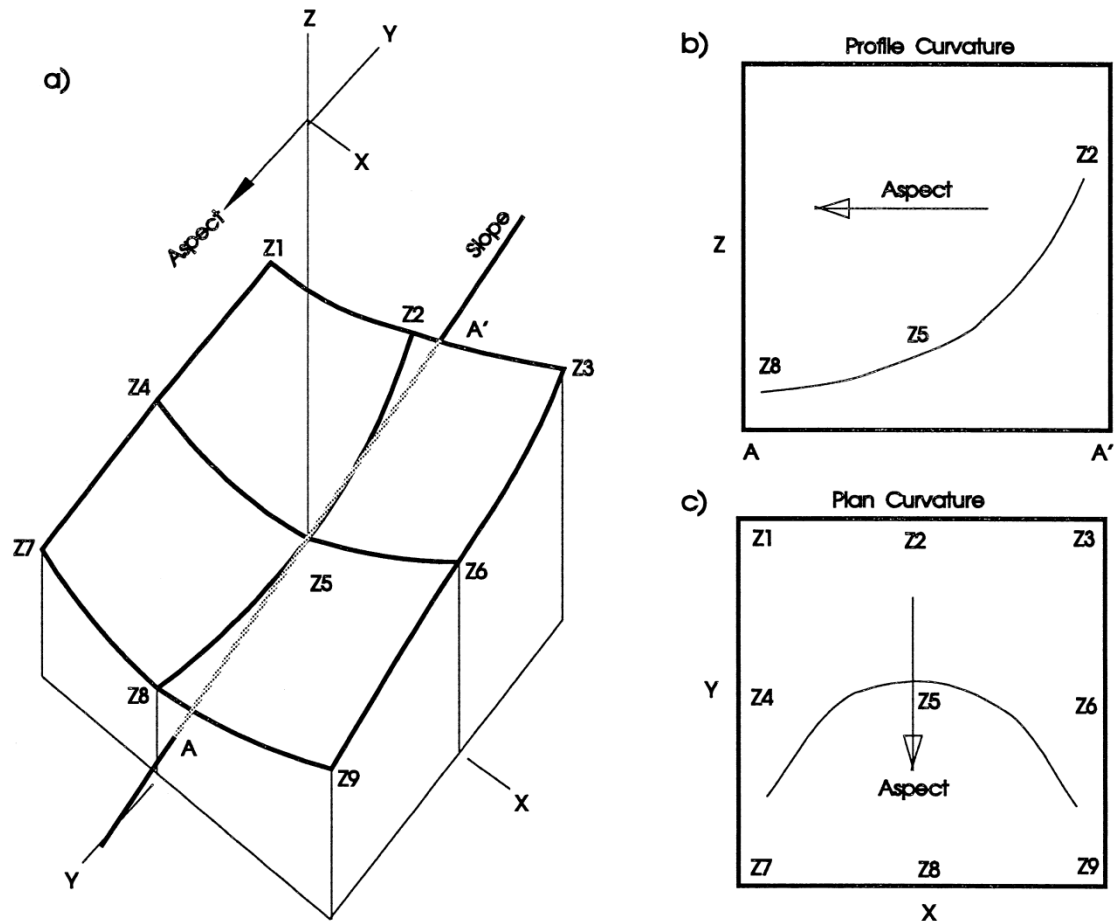


Εικόνα. 2.7. Μαθηματικός ορισμός της καμπυλότητας (Curvature).

Η κάθετη κυρτότητα (profile curvature) είναι ένα μέτρο εκτίμησης της σχετικής επιβράδυνσης ή επιτάχυνσης της επιφανειακής απορροής σε περιοχές του αναγλύφου. Θετικές τιμές της υποδεικνύουν σχετική επιτάχυνση της απορροής σε σημεία του αναγλύφου (κυρτό προφίλ), αρνητικές τιμές υποδεικνύουν επιβράδυνση αντίστοιχα (κοίλο προφίλ). Το profile curvature είναι η καμπυλότητα κατά μήκος μιας γραμμής που σχηματίζεται κατά τη διχοτόμηση του αναγλύφου από μία εικονική κάθετη επιφάνεια (Ohlmacher G.C., 2007). Η επιφάνεια του profile curvature δείχνει το ποσοστό μεταβολής της κλίσης σε κάθε κελί, είναι ουσιαστικά η καμπυλότητα / κυρτότητα του αναγλύφου κατά τη διεύθυνση της κλίσης (Εικόνα 2.8).

Η οριζόντια καμπυλότητα (plan curvature) είναι ένα μέτρο εκτίμησης της σχετικής απόκλισης ή σύγκλισης της επιφανειακής απορροής σε περιοχές του αναγλύφου. Θετικές τιμές της υποδεικνύουν απόκλιση των υδάτων απορροής, ενώ αρνητικές τιμές σύγκλιση-συγκέντρωσή τους σε σημεία του αναγλύφου. Το plan curvature είναι

η καμπυλότητα κατά μήκος μιας γραμμής που σχηματίζεται κατά τη διχοτόμηση του αναγλύφου από μία εικονική οριζόντια επιφάνεια (Ohlmacher, G.C., 2007). Η επιφάνεια του plan curvature παρουσιάζει ουσιαστικά την καμπυλότητα του αναγλύφου κάθετα στη διεύθυνση της κλίσης (Εικόνα 2.8)

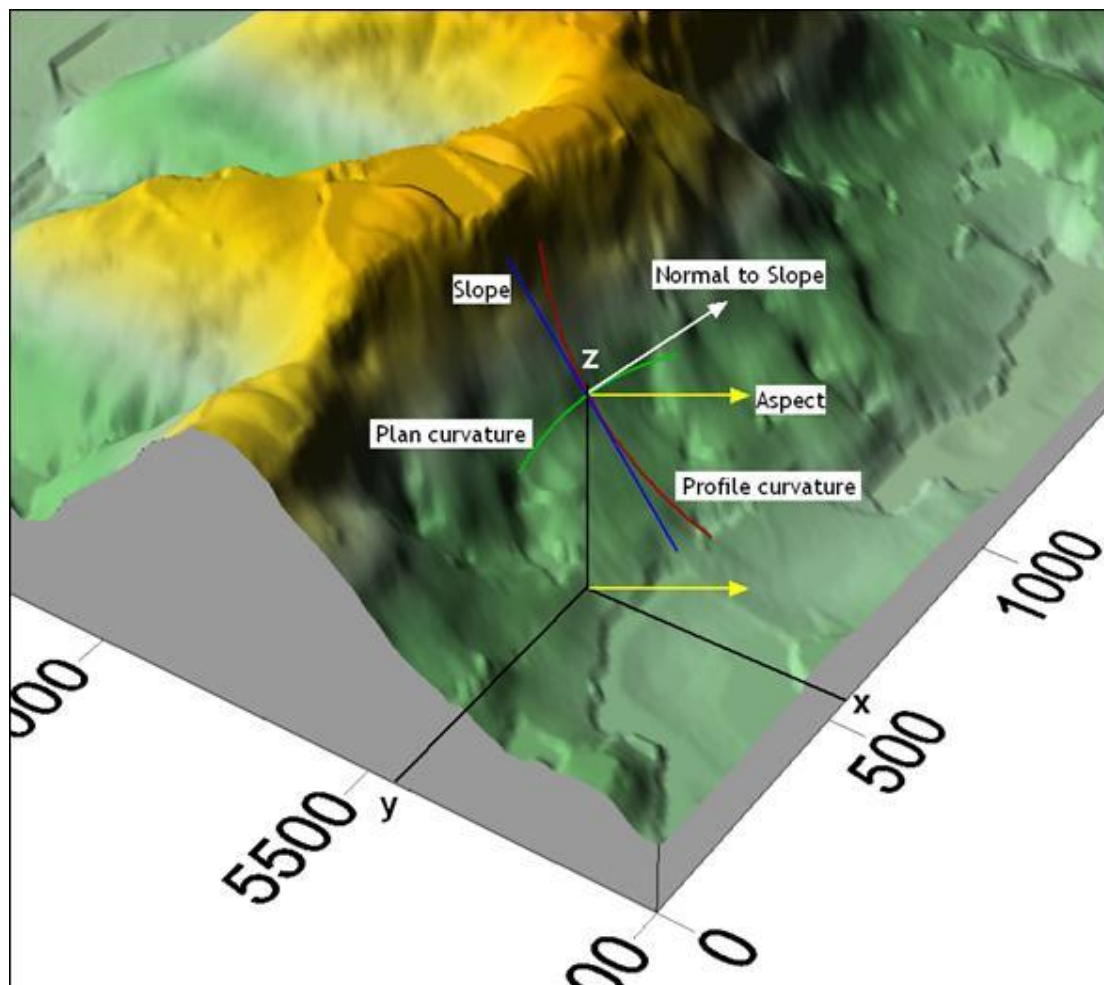


Εικόνα 2.8. Υπολογισμός τοπογραφικών ιδιοτήτων από DEM.

(Πηγή: Zevenbergen, L.W., Thorne, C.R., 1987)

Ο μέσος όρος των δύο παραπάνω παραμέτρων είναι η μέση καμπυλότητα αναγλύφου (Mean curvature), η οποία εκφράζει τόσο την επιβράδυνση-επιτάχυνση όσο και τη σύγκλιση-απόκλιση των υδάτων της επιφανειακής απορροής.

Όλες οι τοπογραφικές ιδιότητες του αναγλύφου παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στην Εικόνα 2.9.



Εικόνα 2.9. Τοπογραφικές ιδιότητες αναγλύφου.

(Πηγή: Smith, M.I., Goodchild, M.F., Longley, P., 2007)

Αρκετές μελέτες στο παρελθόν έχουν αποδείξει ότι η συσχέτιση μεταξύ μορφολογικών και εδαφικών ιδιοτήτων επηρεάζεται από το μέγεθος της κυψελίδας (cell size) των συνεχών επιφανειών των μορφολογικών ιδιοτήτων (Zhang and Montgomery, 1994, Thompson et al., 2001; Wei Wu et al., 2008). Διαφορετικά μεγέθη πλέγματος έχουν σαν αποτέλεσμα διαφορετικό εύρος τιμών των μορφολογικών ιδιοτήτων, έτσι η ίδια μορφολογική ιδιότητα προερχόμενη από πλεγματικά επίπεδα με κυψελίδες διαφορετικών διαστάσεων μπορεί να παρουσιάσει διαφορές στις τιμές της. Η διαφοροποίηση των τιμών τείνει να είναι πιο ομαλομοιογενής όταν έχουμε μεγάλο μέγεθος κυψελίδας (Zhang and Montgomery, 1994). Όλα τα παραπάνω συνεπάγονται τη μείωση του εύρους των τιμών και την απώλεια

σημαντικών τοπικών διακυμάνσεων με πιθανά ανακριβή αποτελέσματα για την περιοχή μελέτης. Επομένως, είναι σημαντικό να επιλέξουμε το κατάλληλο μέγεθος πλέγματος για την περιοχή μελέτης και για κάθε ιδιότητα. Στην παρούσα μελέτη δημιουργήθηκαν συνεχείς επιφάνειες για όλες τις τοπογραφικές - μορφολογικές ιδιότητες του ανάγλυφου με μέγεθος κυψελίδας 5x5, 10x10, 15x15 και τέλος 20x20 μέτρα.

2.2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ

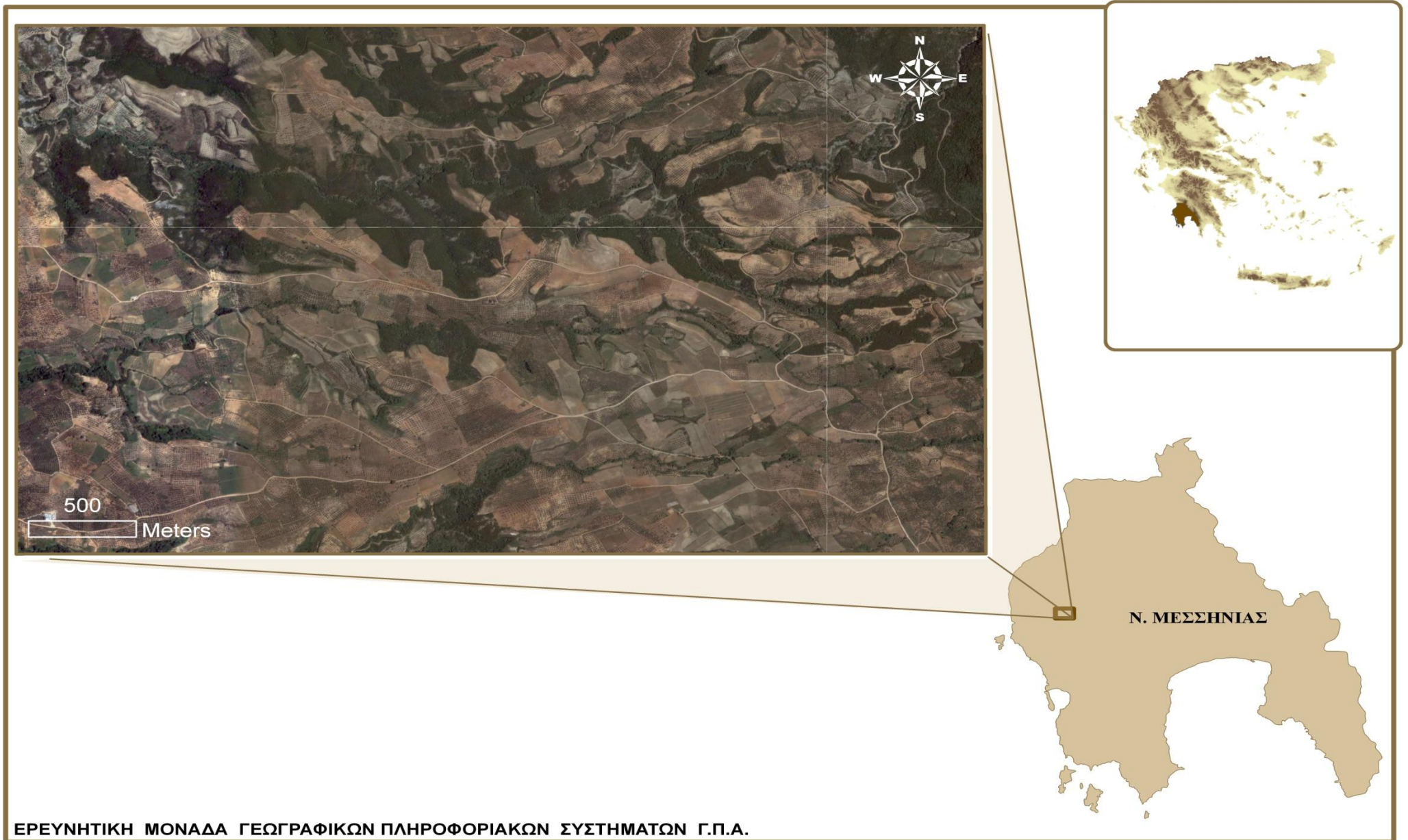
2.2.1. ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΝ ΥΛΙΚΟ

Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκε το εξής χαρτογραφικό υλικό, α/φ, μελέτες και δεδομένα, το οποίο προμηθευτήκαμε από τις αρμόδιες υπηρεσίες:

1. Τοπογραφικός χάρτης (Φύλλο χάρτου ΦΙΛΙΑΤΡΑ) της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) κλίμακας 1: 50000.
2. Τοπογραφικός χάρτης (αρ. 7234/8) της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) κλίμακας 1: 5000. Αποτελέσει τη βασική πηγή υψομέτρου για την ευρύτερη περιοχή μελέτης.
3. Δορυφορική εικόνα λήψης της περιοχής μελέτης (QuickBird έτους 2007) με ανάλυση 60 cm.
4. Ορθοφωτοχάρτες της περιοχής Γαργαλιάνων – Μουζακίου κλίμακας 1:5.000.

2.2.2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

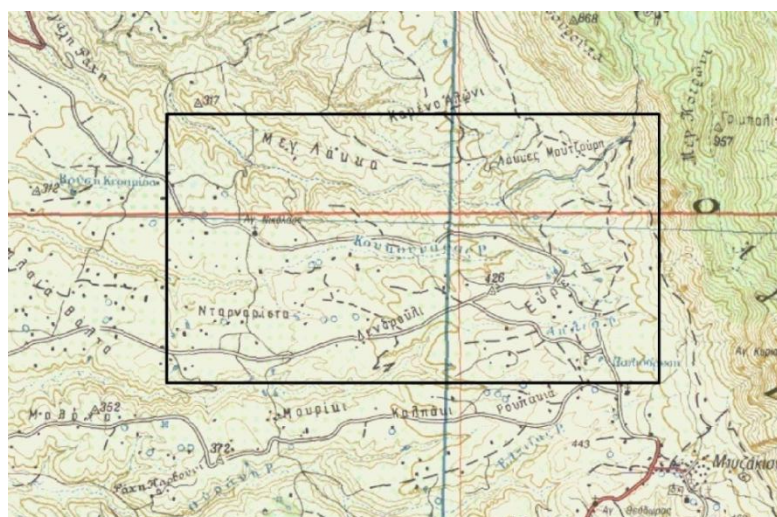
Η περιοχή μελέτης (Εικόνα 2.10) βρίσκεται στην κοινότητα Μουζακίου του Νομού Μεσσηνίας που ανήκει διοικητικά στο Δήμο Γαργαλιάνων. Ο Δήμος Γαργαλιάνων βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα της Πελοποννήσου, απλώνεται στο Δυτικό άξονα του Νομού Μεσσηνίας και αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους Δήμους του Νομού με συνολική έκταση 122.680 στρέμματα. Το ανάγλυφο της περιοχής ποικίλει και χαρακτηρίζεται πεδινό από τις παραθαλάσσιες περιοχές δυτικά του Δήμου, την πόλη των Γαργαλιάνων μέχρι και την κοινότητα του Πύργου, ενώ ανατολικά δεσπόζει το όρος Αιγάλεω στους πρόποδες του οποίου βρίσκεται η κοινότητα Μουζακίου.



ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ Γ.Π.Α.

Εικόνα 2.10. Περιοχή μελέτης.

Πιο συγκεκριμένα η περιοχή μελέτης εκτείνεται στο βορειοδυτικό τμήμα της κοινότητας Μουζακίου και έχει έκταση περίπου 8.300 στρέμματα. Ξεκινά από τους πρόποδες – δυτικές πλαγιές του όρους Αιγάλεω (1219 μ.) και εκτείνεται ανατολικά του όρους σε μια ευθεία μήκους περίπου 4 χιλιομέτρων. Το όρος Αιγάλεω (1219 μ.) αποτελεί νοτιοδυτική προέκταση των Ορέων Κυπαρισσίας. Στον τοπογραφικό χάρτη της περιοχής (Εικόνα 2.11), που είναι σημειωμένη και η θέση της ευρύτερης περιοχής μελέτης, διακρίνεται ότι η φυσιογραφία της μελετώμενης περιοχής είναι ένα πλάτωμα με μέσο υψόμετρο 350-400 μ. Στο δυτικό όριο της υψώνονται απότομα οι κορυφές (από βόρεια προς νότια): Κουτρορούπα (868 μ.), Μεγ. Κοτρώνη (957 μ.), Αγ. Κυριακή (1066 μ.), Ανάληψη (885 μ.). δημιουργώντας ένα μεγάλο φυσικό εμπόδιο 400 – 500 μ. που σαφώς επηρεάζει τις μικροκλιματικές συνθήκες της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 2.11. Τοπογραφικός χάρτης περιοχής μελέτης.

Τα νερά των υψωμάτων απορρέουν μέσω ενός δικτύου δυο επιφανειακών ρεμάτων, τα οποία ξεκινάνε ακριβώς μέσα από την περιοχή μελέτης δίνοντας ένα πολυσχιδές ανάγλυφο με ξεχωριστά πλατώματα μεταξύ των ρεμάτων στα οποία βρίσκονται αγροτεμάχια κυρίως με αμπέλια και ελιές. Το φυσικό τοπίο της περιοχής μελέτης συμπληρώνουν δασικές εκτάσεις. Τα επιφανειακά νερά καταλήγουν μέσω των ρεμάτων σε δύο μεγαλύτερους υδάτινους αποδέκτες που εκβάλουν στη θάλασσα. Τα νότια τμήματα της περιοχής μελέτης καταλήγουν στον Λαγκουβάρδο ενώ μικρότερη έκταση προς βορρά απορρέει στο ρέμα Ευαγγελίστρα. Στον τοπογραφικό χάρτη φαίνεται επίσης ότι υπάρχει ένα καλό αγροτικό οδικό δίκτυο παράλληλα των ρεμάτων που εξυπηρετεί ικανοποιητικά τις αγροτικές εργασίες.

Το κλίμα του Νομού χαρακτηρίζεται ασθενές μεσογειακό (ξηροθερμικό - εύκρατο) έως υποτροπικό. Ο χειμώνας είναι ήπιος, ενώ το καλοκαίρι εκτεταμένο και θερμό. Η ψυχρή περίοδος διαρκεί από το Νοέμβριο έως τον Απρίλιο και η θερμή από το Μάιο έως τον Οκτώβριο. Το μέσο ετήσιο ύψος των βροχοπτώσεων φτάνει τα 750 - 800 περίπου mm/έτος. Ο ξηρότερος μήνας είναι ο Ιούλιος (5,9 mm), ενώ ο πιο βροχερός θεωρείται ο Νοέμβριος (161,7 mm). Η μέση ετήσια σχετική υγρασία φτάνει το 67,7% με ξηρότερο μήνα τον Ιούλιο (58%) και υγρότερο το Νοέμβριο (74%). Όσο αφορά τη μέση μηνιαία θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του έτους, η ελάχιστη παρουσιάζεται τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο με περίπου 10°C και η μέγιστη τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο με 25°C. Οι ώρες ηλιοφάνειας στο Νομό είναι περίπου 3000 ώρες το χρόνο. Οι μετρήσεις είναι από 2 σταθμούς της Δ/σης Γεωλογίας – Υδρολογίας του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων, που βρίσκονται στην περιοχή των Γαργαλιάνων και το Μουζάκι και αφορούν την περίοδο 1982-2007.

Τα εδάφη της περιοχής μελέτης χαρτογραφήθηκαν και ταξινομήθηκαν σύμφωνα με το Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975) σε δύο τάξεις, Inceptisols και Alfisols. Τα Alfisols καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη έκταση περίπου το 66,2% της περιοχής μελέτης και ακολουθούν τα Inceptisols με 33,8%. Στην περιοχή μελέτης αναγνωρίστηκαν εδάφη στην πλειοψηφία τους, μητρικού υλικού από αλλουβιακές αποθέσεις καθώς επίσης και από κροκαλοπαγή και φλύσχη (Κοσμάς κ.α., 2010).

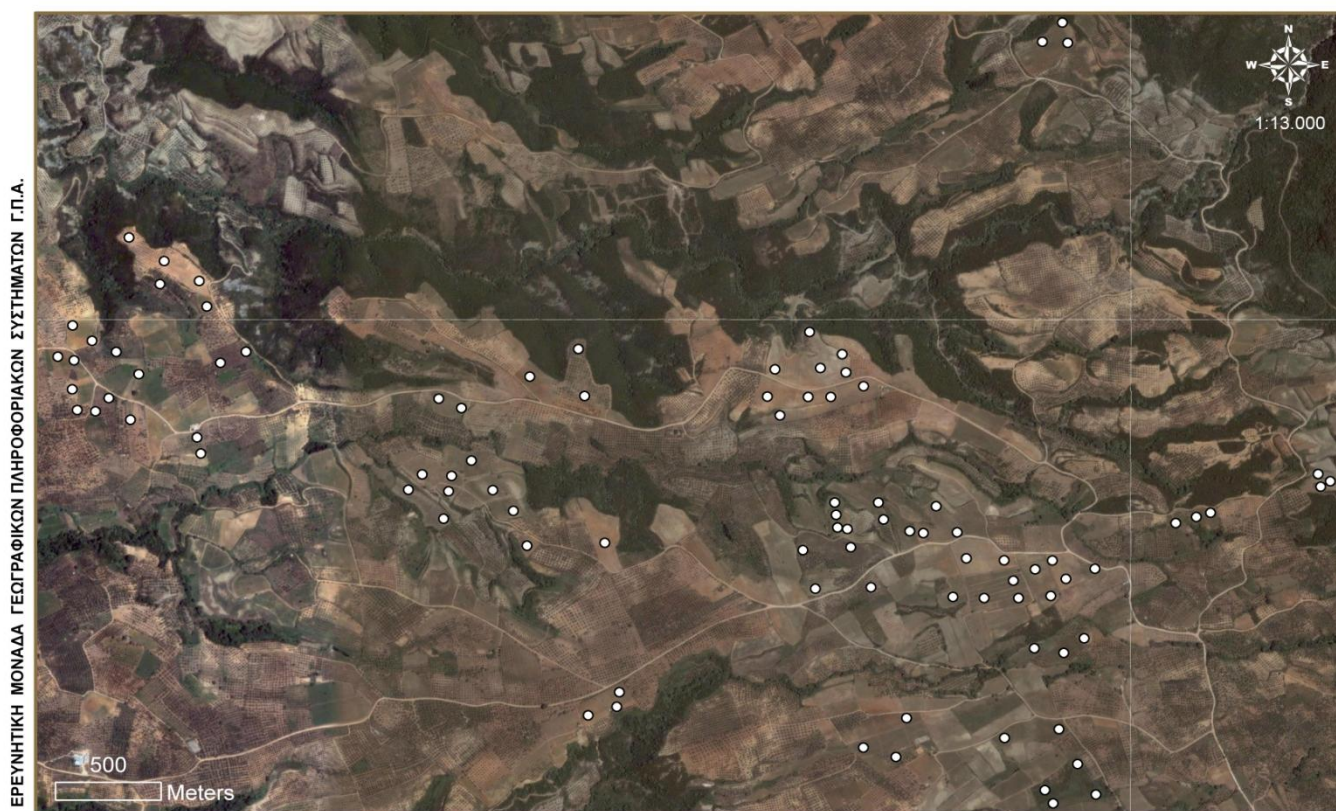
2.2.3. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΕΛΑΦΩΝ

Η διαδικασία που εφαρμόζεται για τη μελέτη των εδαφικών συνθηκών σε μια εξεταζόμενη περιοχή περιλαμβάνει εξέταση των εδαφικών συνθηκών με προκαταρτικές αναγνωριστικές επισκέψεις, μελέτη χαρτών, δορυφορικών εικόνων και ορθοφωτοχαρτών και τέλος δειγματοληψία βάσει συγκεκριμένου σχεδίου. Οι πριν τη δειγματοληψία εργασίες είναι απαραίτητες για τη διάκριση φυσιογραφικών μονάδων και γενικά περιοχών ομοιόμορφων από άποψη εδαφογενετικών συνθηκών ώστε τελικά να οδηγηθούμε στο σχεδιασμό μιας σωστής δειγματοληψίας μειώνοντας το κόστος της καθιστώντας παράλληλα τα αποτελέσματα των αναλύσεων των εδαφικών δειγμάτων αντιπροσωπευτικά των εδαφών από τα οποία προέρχονται.

Οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν το έτος 2007, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος με τίτλο «Αξιολόγηση εδαφικών, τοπογραφικών και κλιματικών συνθηκών εκτάσεων της κοινότητας Μουζακίου Ν. Μεσσηνίας για την καλλιέργεια

ποικιλιών αμπέλου για οινοποίηση» που πραγματοποιήθηκε στην Ερευνητική Μονάδα Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων του Γ.Π.Α. Οι θέσεις δειγματοληψίας επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν τα αμπελοτεμάχια της περιοχής μελέτης. Η πυκνότητα δειγματοληψίας προσδιορίστηκε τόσο από το μέγεθος του αγροτεμαχίου όσο και από τις ιδιαίτερες συνθήκες και παραλλακτικότητες που επικρατούσαν σε κάθε αγροτεμάχιο.

Η δειγματοληψία των εδαφικών δειγμάτων έγινε σε 94 θέσεις στο επιφανειακό στρώμα (0-30 εκατοστά). Η μέση απόσταση δειγματοληψίας ήταν 290μ. Στα δείγματα που συλλέχθηκαν έγινε η αναγκαία προετοιμασία (αεροζήρανση, λειοτρίβιση, κοσκίνισμα) και στη συνέχεια προσδιορίστηκε η κοκκομετρική σύσταση. Στην Εικόνα 2.12 φαίνονται σημειωμένες οι ενενήντα τέσσερις (94) θέσεις από τις οποίες πάρθηκαν τα δείγματα εδάφους.



Εικόνα 2.12. Χάρτης θέσεων δειγματοληψίας.

2.2.4. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΔΑΦΩΝ

Τα προϊόντα της φυσικής αποσάθρωσης των πετρωμάτων αποτελούνται από τα μηχανικά κλάσματα βράχων διαφόρων διαστάσεων. Το μέγεθος των μηχανικών θραυσμάτων επιδρά στις φυσικές ιδιότητες του εδάφους όπως είναι η στράγγιση, η ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί νερό για τις ανάγκες των φυτών και η ευκολία με την οποία το έδαφος μπορεί να υποστεί κατεργασία. Επιπλέον, το μέγεθος των μηχανικών κλασμάτων του εδάφους επιδρά στις χημικές ιδιότητες του εδάφους εξαιτίας των ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν τις επιφάνειες των μικρών εδαφικών σωματιδίων. Οι κατηγορίες των εδαφικών κλασμάτων φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1. Κατηγορίες εδαφικών κλασμάτων.

Κατηγορία μηχανικών κλασμάτων		Σχετική διάμετρος (mm)
Βράχοι	Σκελετικά υλικά	: > 600
Λίθοι		: 600 - 200
Πέτρες		: 200 - 75
Χαλίκια		: 75 - 2
Άμμος	Λεπτή γη	: 2 - 0,02 (2000 - μm)
Ίλύς		: 0,002 - 0,002 (20 - 2 μm)
Αργίλος		: < 0,002 (< 2 μm)

Οι αναλύσεις των εδαφικών δειγμάτων πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Εδαφολογίας και Γεωργικής Χημείας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Στα δείγματα που συλλέχθηκαν έγινε αρχικά η αναγκαία προετοιμασία τους (αεροζήρανση, λειοτρίβιση, κοσκίνισμα) και στη συνέχεια προσδιορισμός επί τοις εκατό του ποσοστού της άμμου, της ιλύος και της αργίλου με τη μέθοδο Βουγιούκου. Από κάθε εδαφικό δείγμα, αφού αυτό είχε αφεθεί να ξεραθεί, κοσκίνιστηκε μια ποσότητα εδάφους με κόσκινο διαστάσεων οπών 2 mm (παραλαβή του τμήματος του εδάφους που ονομάζεται λεπτή γη- Πίνακας 2.1) από την οποία ζυγίστηκαν 100 gr. Η ποσότητα αυτή αφέθηκε να διασπαρεί (αφού ομογενοποιήθηκε με χρήση μηχανικού αναδευτήρα και διασπορικού) σε στήλη ύδατος σε ειδικό κύλινδρο.

Η πυκνότητα του αιωρήματος εδάφους – ύδατος μετρήθηκε, σε δύο προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, από ειδικά βαθμολογημένο πυκνόμετρο που δίνει απ' ευθείας την εκατοστιαία αναλογία των ευρισκομένων σε αιώρηση στερεών εδαφικών κόκκων.

Επειδή, σύμφωνα με το νόμο του Stokes, τα χονδρόκοκκα υλικά καθιζάνουν γρηγορότερα από τα λεπτόκοκκα, οι χρόνοι μέτρησης της πυκνότητας αντιστοιχούν ο πρώτος στην καθίζηση της άμμου και ο δεύτερος στην καθίζηση της άμμου και της ιλύος. Τα αποτελέσματα ανάγονται τελικά επί τοις εκατό, ενώ με τη χρήση του ειδικού τριγώνου μηχανικής ανάλυσης το κάθε δείγμα χαρακτηρίζεται και εντάσσεται, με βάση την επί τοις εκατό αναλογία σε άργιλο, άμμο και ιλύ, σε μία από τις ακόλουθες 12 κλάσεις μηχανικής σύστασης (Πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.2. Κλάσεις κοκκομετρικής σύστασης εδάφους.

ΚΛΑΣΕΙΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

1. Αμμώδης	S	Sand	χονδρόκοκκα
2. Πηλοαμμώδης	LS	Loamy Sand	

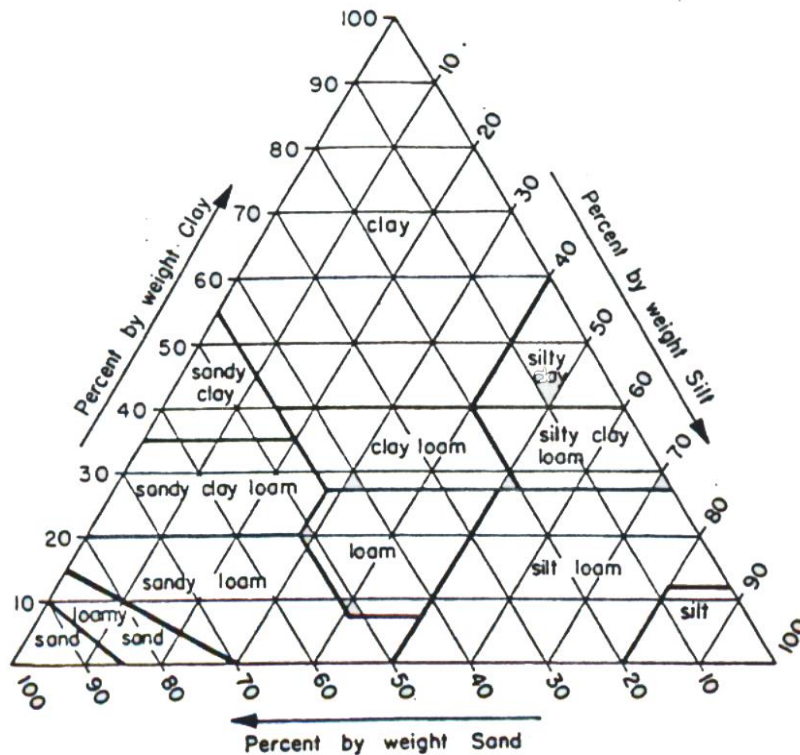
3. Αμμοπηλώδης	SL	Sandy Loam	μετρίως χονδρόκοκκα

4. Πηλώδης	L	Loam	
5. Ιλοπηλώδης	SiL	Silty Loam	μέσα
6. Ιλώδης	Si	Silt	

7. Αμμοαργιλοπηλώδης	SCL	Sandy Clay Loam	
8. Αργιλοπηλώδης	CL	Clay Loam	μετρίως λεπτόκοκκα
9. Ιλοαργιλοπηλώδης	SiCL	Silty Clay Loam	

10. Αμμοαργιλώδης	SC	Sandy Clay	
11. Ιλοαργιλώδης	SiC	Silty Clay	λεπτόκοκκα
12. Αργιλώδης	C	Clay	

Οι 12 αυτές κλάσεις εδαφών καταλαμβάνουν ορισμένη θέση και χώρο σε ένα ισόπλευρο τρίγωνο το οποίο ονομάζεται τρίγωνο μηχανικής σύστασης εδαφών (Εικόνα 2.13). Οι πλευρές των τριγώνων μηχανικής ανάλυσης φέρουν διαιρέσεις σε ποσοστά από 1- 100 % που αντιστοιχούν στα τρία μηχανικά κλάσματα (άμμος, ιλύς, άργιλος).



Εικόνα 2.13. Τρίγωνο Μηχανικής Ανάλυσης.

Σημειώνεται ότι η άργιλος έχει μεγάλη επίδραση στη δομή του εδάφους. Ένα έδαφος με 40 % άργιλο φέρει ιδιότητες της αργίλου, ενώ απεναντίας για να αποδοθούν στο έδαφος οι ιδιότητες της άμμου ή της ιλύος, τα μηχανικά κλάσματα της άμμου και της ιλύος πρέπει να ανέρχονται σε ποσοστά 87 % και 80% αντίστοιχα. Όσο το ποσοστό της αργίλου αυξάνει τόσο αυξάνει και η ενεργός επιφάνεια της στερεής φάσης του εδάφους που έρχεται σε επαφή με την υγρή και την αέρια φάση του εδάφους. Με την αύξηση της επιφάνειας των συστατικών του εδάφους αυξάνονται και οι χημικές δραστηριότητες που παρατηρούνται στα συστατικά αυτά.

Θα μπορούσε λοιπόν να θεωρηθεί ότι η γονιμότητα του εδάφους αυξάνει με την αύξηση της επιφάνειας των συστατικών αυτών. Η γονιμότητα του εδάφους δεν εξαρτάται μόνο από το ποσοστό του εδάφους σε άργιλο, αλλά εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως π.χ. φυσικές ιδιότητες, κακός αερισμός, κακή στράγγιση κ.λπ. που μειώνουν ή και επηρεάζουν αρνητικά τη γονιμότητα.

2.2.5. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για τις ανάγκες της μελέτης αναπτύχθηκε, μετά από ειδική ανάλυση και σχεδιασμό, Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών ArcGIS 9.3 στο οποίο εισήχθησαν (μέσω

διαδικασιών γεωαναφοράς και ψηφιοποίησης) και αποθηκεύθηκαν πληροφορίες από τους χάρτες και τη δορυφορική εικόνα. Συγκεκριμένα καταχωρήθηκαν δεδομένα όπως: θέσεις δειγματοληψίας, ισοΰψεις, αγροτικοί δρόμοι, υδρογραφικό δίκτυο καθώς επίσης και τα αποτελέσματα των αναλύσεων των εδαφικών δειγμάτων. Ψηφιακά δεδομένα όπως: βασικό οδικό δίκτυο, θέσεις οικισμών, θέσεις μετεωρολογικών σταθμών και όρια διοικητικών διαιρέσεων παραχωρήθηκαν από την Ερευνητική Μονάδα Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

2.2.6. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΝΑΓΛΥΦΟΥ

Η γεωγραφική βάση επέτρεψε, μέσω ειδικών επεξεργασιών, τη δημιουργία νέων επιπέδων πληροφοριών όπως του Ψηφιακού Μοντέλου Υψομέτρου (DEM), στο οποίο έχει υπολογισθεί το υψόμετρο σε κάθε σημείο της επιφάνειας του εδάφους. Η δημιουργία του DEM έγινε από το ψηφιακό αρχείο των ισοΰψων γραμμικής τοπολογίας και από τριγωνομετρικά σημεία υψομέτρου. Οι ισοΰψεις της περιοχής ψηφιοποιήθηκαν από αναλογικά τοπογραφικά διαγράμματα κλίμακας 1:5000, ισοδιάστασης 4μ., της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού. Η δημιουργία ενός ρεαλιστικού μοντέλου αναγλύφου είναι ουσιαστικής σημασίας για την ενσωμάτωση τοπογραφικών πληροφοριών στην πρόβλεψη εδαφικών ιδιοτήτων με μεθόδους παρεμβολής.

Από το DEM δημιουργήθηκαν τα επίπεδα της κλίσης (slope), της έκθεσης (aspect) ως προς τον ορίζοντα καθώς επίσης και η καμπυλότητα (plan curvature) και κυρτότητα (profile curvature) του αναγλύφου. Τέλος υπολογίστηκε και η απόσταση των σημείων δειγματοληψίας από τα υδατορέμματα της περιοχής. Μετά το τέλος των επεξεργασιών όλα τα γεωγραφικά ψηφιακά αρχεία των τοπογραφικών ιδιοτήτων μετατράπηκαν σε πλεγματικές επιφάνειες με μέγεθος κυψελίδας 5x5, 10x10, 15x15 και τέλος 20x20 μ.

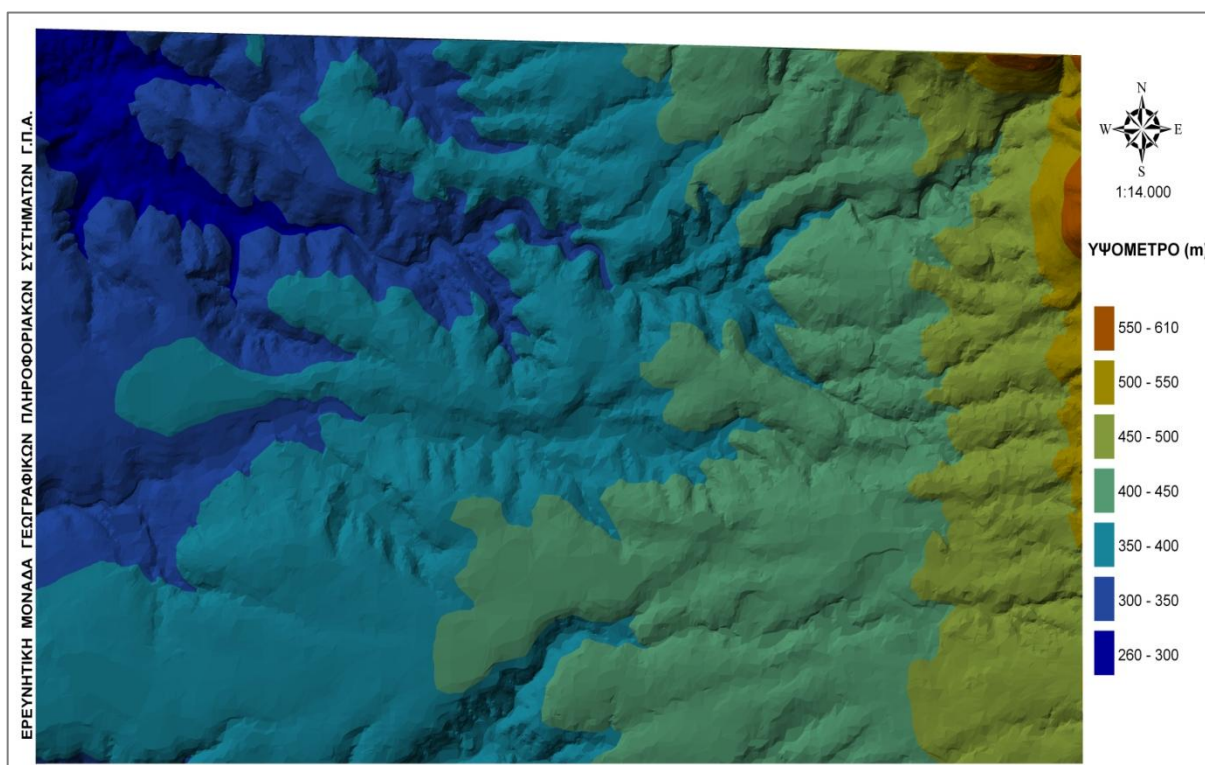
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η περιοχή μελέτης παρουσιάζει υψόμετρο που κυμαίνεται από 260 έως 610 μ., με μέση τιμή τα 392,7 μ. Το μεγαλύτερο ποσοστό (36,26 %) της περιοχής μελέτης παρουσιάζει υψόμετρο μεταξύ 350-400 μ. ενώ ακολουθούν οι κλάσεις 300-350 και 400-450 με 17,86 % και 27,97% αντίστοιχα. Στον Πίνακα 3.1 περιγράφονται αναλυτικά οι κλάσεις υψομέτρου και τα αντίστοιχα ποσοστά έκτασης που καταλαμβάνουν, ενώ στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται ο χάρτης υψομέτρου της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 3.1. Κλάσεις υψομέτρου περιοχής μελέτης.

Υψόμετρο (m)	Ποσοστό έκτασης (%)
260-300	3,39
300-350	17,86
350-400	36,26
400-450	27,97
450-500	12,06
500-550	2,04
550-610	0,41

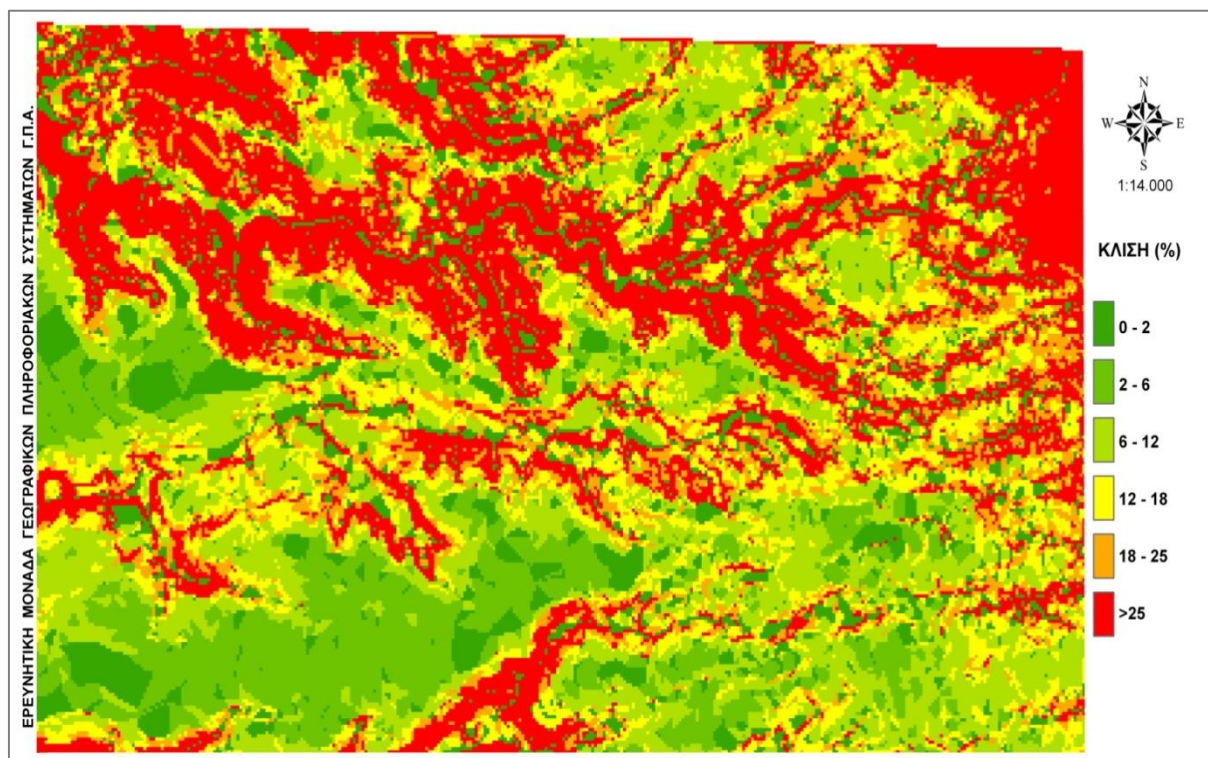


Εικόνα 3.1. Χάρτης υψομέτρου περιοχής μελέτης.

Σχετικά με τις κλίσεις που επικρατούν στην περιοχή μελέτης παρατηρούμε (Πίνακας 3.2) ότι 28,44 % της περιοχής μελέτης εμφανίζει απότομες κλίσεις πάνω από 25% ενώ ακολουθεί η μέτρια κεκλιμένη (κλίση 6-12 %) με ποσοστό 20,65%. Οι κλίσεις (%) της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.2.

Πίνακας 3.2. Κλάσεις κλίσης (%) περιοχής μελέτης.

Κλίση (%)	Περιγραφή	Ποσοστό έκτασης (%)
0-2	Επίπεδα	12,02
2-6	Ελαφρά κεκλιμένη	11,59
6-12	Μέτρια κεκλιμένη	20,65
12-18	Ισχυρά κεκλιμένη	15,39
18-25	Πολύ ισχυρά κεκλιμένη	11,92
>25	Ελαφρά έως ισχυρά απότομη	28,44

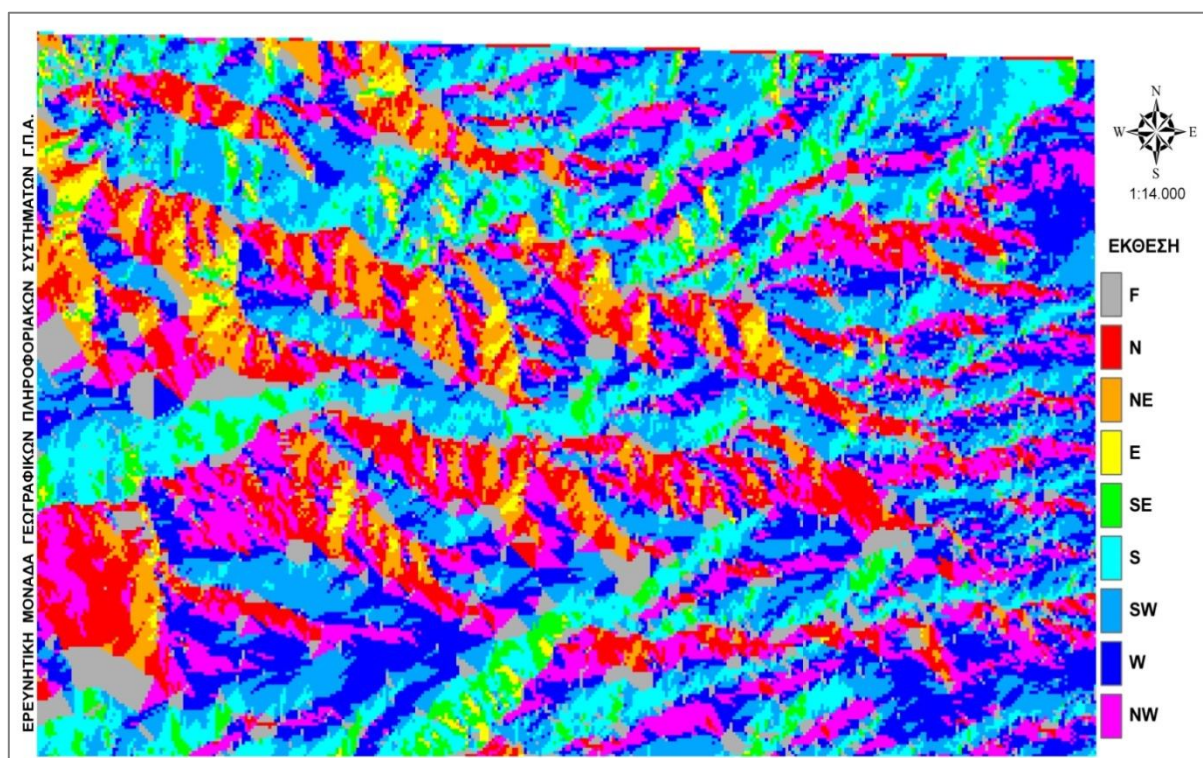


Εικόνα 3.2. Χάρτης κλίσεων της περιοχής μελέτης.

Οι δυτικές και βορειοδυτικές εκθέσεις είναι αυτές που κυριαρχούν στην περιοχή μελέτης (Πίνακας 3.3). Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζεται ο χάρτης έκθεσης – προσανατολισμού.

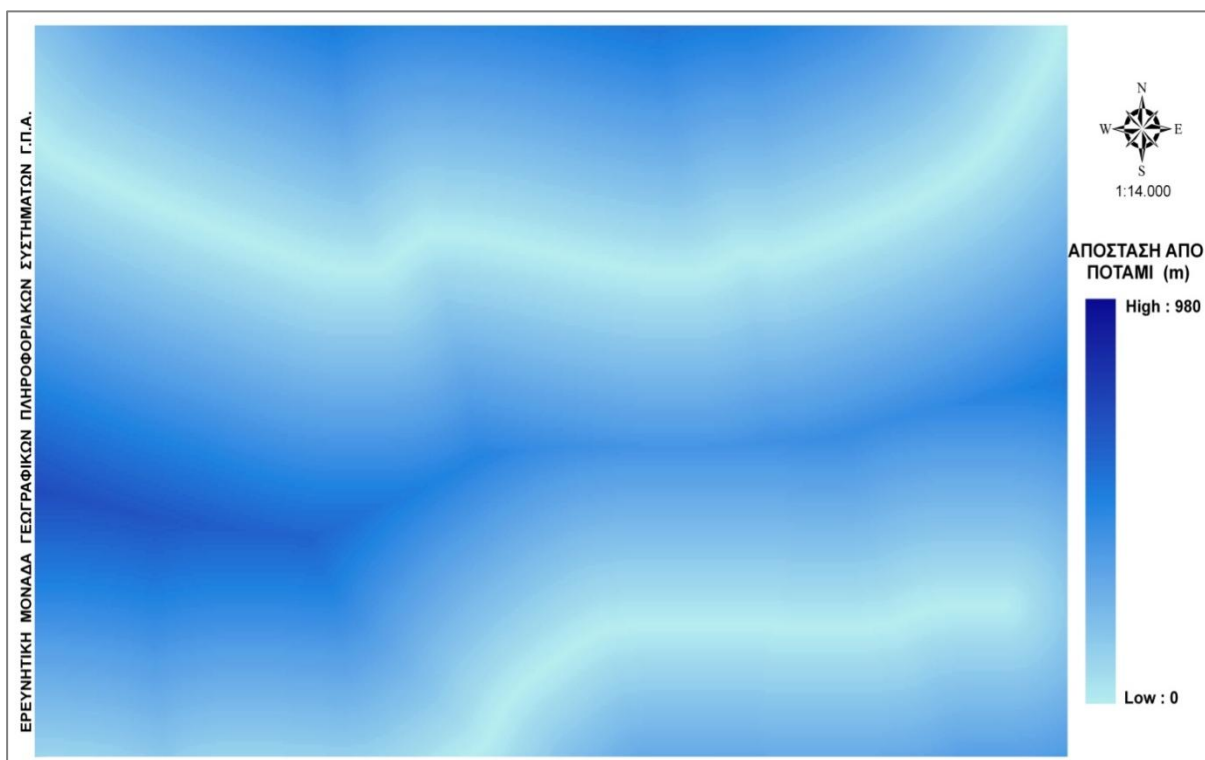
Πίνακας 3.3. Κλάσεις έκθεσης - προσανατολισμού περιοχής μελέτης.

Έκθεση (σε μοίρες)	Περιγραφή	Ποσοστό έκτασης (%)
-1	Επίπεδη (F)	11,83
0-22,5 και 337,5-360	Βόρεια (N)	11,77
22,5-67,5	Βορειοανατολική (NE)	6,20
67,5-112,5	Ανατολική (E)	1,90
112,5-157,5	Νοτιοανατολική (SE)	3,84
157,5-202,5	Νότια (S)	12,73
202,5-247,5	Νοτιοδυτική (SW)	19,16
247,5-292,5	Δυτική (W)	17,59
292,5-337,5	Βορειοδυτική (NW)	14,97



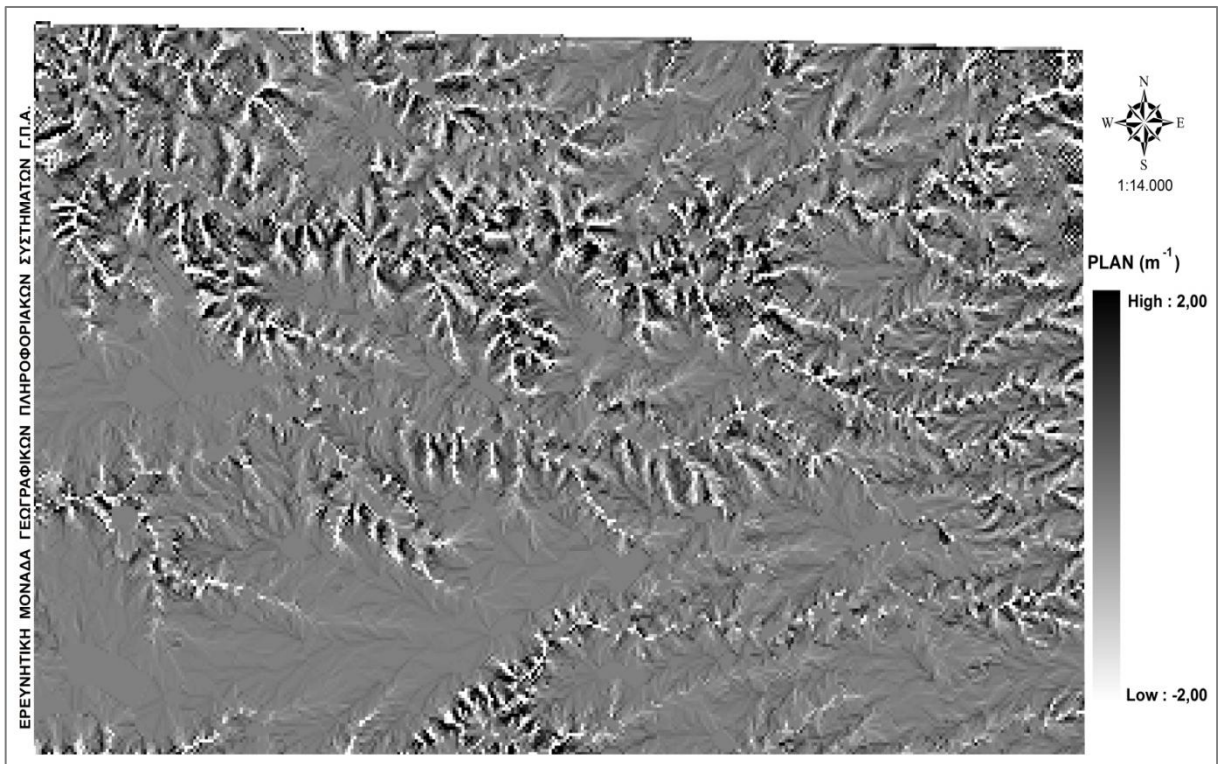
Εικόνα 3.3. Χάρτης έκθεσης – προσανατολισμού της περιοχής μελέτης.

Η απόσταση από τα δυο υδατορέγματα της περιοχής, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.4, κυμαίνεται από 0 έως και 980 μ.

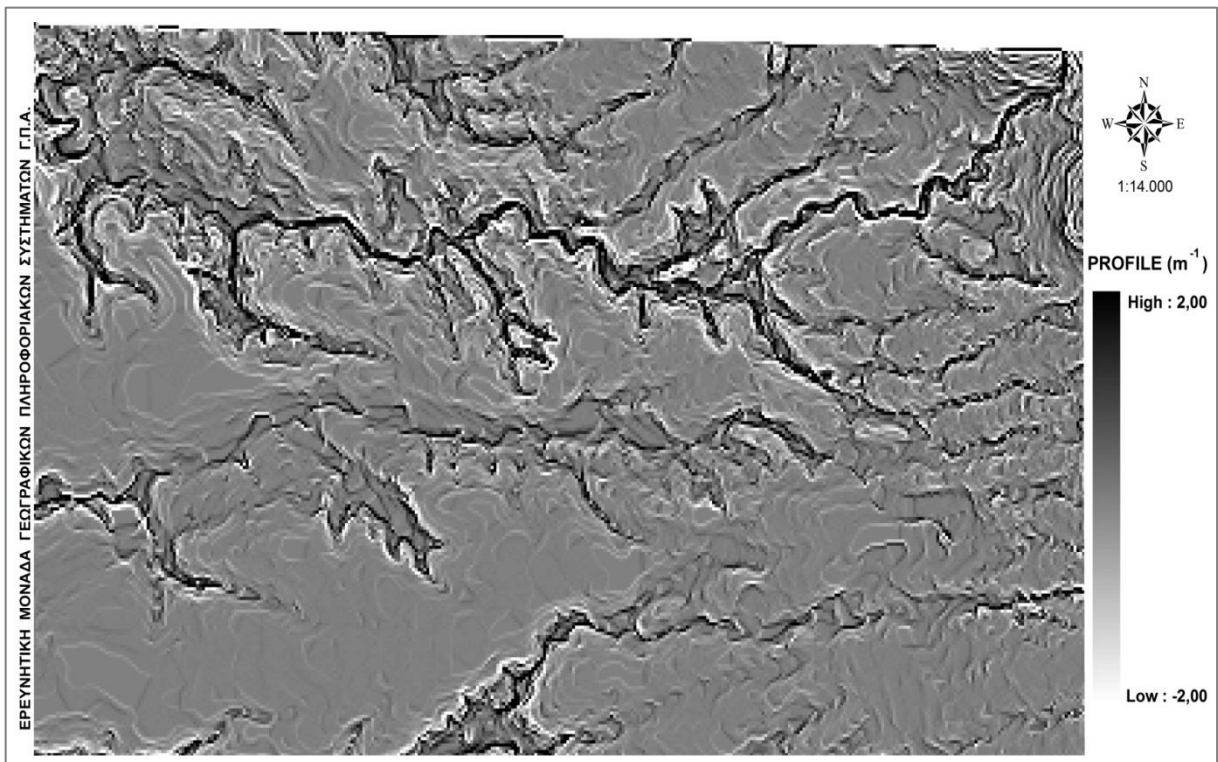


Εικόνα 3.4. Χάρτης απόστασης από τα υδατορέγματα της περιοχής μελέτης.

Στις Εικόνες 3.5 και 3.6 παρατίθενται αντίστοιχα ο χάρτης καμπυλότητας και ο χάρτης κυρτότητας της περιοχής μελέτης. Η καμπυλότητα παίρνει τιμές από 2 έως $-2 \mu^{-1}$ με μέση τιμή $0,043 \mu^{-1}$, ενώ τέλος η κυρτότητα παίρνει τιμές από 2 έως $-2 \mu^{-1}$ με μέση τιμή $-0,074 \mu^{-1}$.



Εικόνα 3.5. Χάρτης καμπυλότητας αναγλύφου της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 3.6. Χάρτης κυρτότητας αναγλύφου της περιοχής μελέτης.

3.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Για κάθε εδαφική ιδιότητα εξετάζεται αρχικά η κατανομή των συχνοτήτων και η ύπαρξη μη χωρικών και χωρικών ακραίων τιμών οι οποίες και εξαιρούνται από το σύνολο των σημείων.

Στη συνέχεια δημιουργείται ένα ανεξάρτητο σύνολο σημείων που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της πρόβλεψης. Το ανεξάρτητο σύνολο σημείων προκύπτει από τον τυχαίο διαχωρισμό των αρχικών σημείων σε δύο σύνολα. Ο διαχωρισμός πραγματοποιείται με το εργαλείο Create Subset του Geostatistical Analyst σε περιβάλλον ArcMap. Ένα σημείο που θα πρέπει να δώσουμε ιδιαίτερη προσοχή για την αξιοπιστία αυτή της μεθόδου αξιολόγησης είναι ότι το ανεξάρτητο σύνολο δεδομένων θα πρέπει να προέρχεται από τον ίδιο πληθυσμό με το εξαρτημένο σύνολο. Η διερεύνηση αυτής της απαίτησης πραγματοποιείται με σύγκριση των μέσων όρων των δύο συνόλων σημείων.

Ακολουθεί μη χωρική επεξεργασία των τιμών των τριών εδαφικών ιδιοτήτων με στατιστικές επεξεργασίες που μελετούν την κεντρική τάση και τη διασπορά.

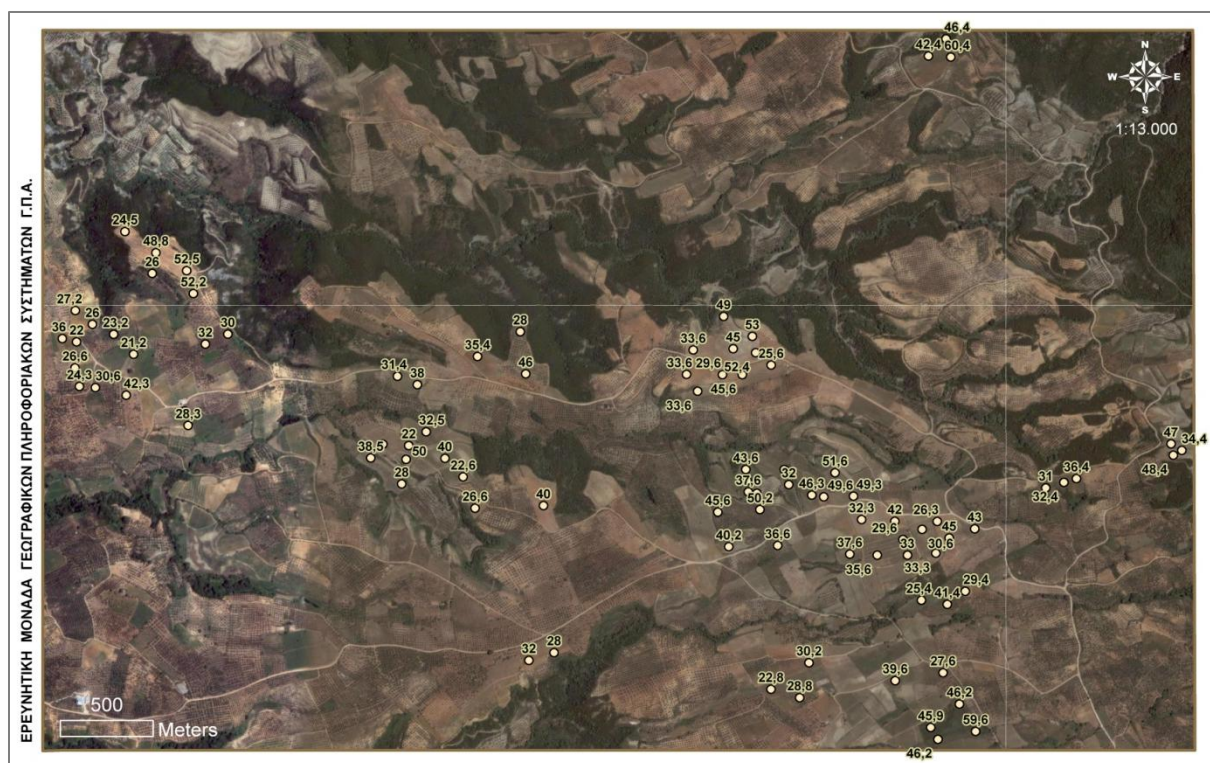
Σε δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται διερεύνηση των πιθανών συσχετίσεων των εδαφικών ιδιοτήτων με τις μορφολογικές - τοπογραφικές παραμέτρους του ανάγλυφου.

Τέλος εφαρμόζονται στις τιμές των τριών κλασμάτων της μηχανικής σύστασης πολλαπλή παλινδρόμηση καθώς και οι έξι γεωστατιστικές μέθοδοι χωρικής παρεμβολής (Ordinary Kriging, Isotopic Co-kriging, Heterotopic Co-kriging, και οι τρεις παραλλαγές του Regression kriging). Η εφαρμογή των γεωστατιστικών μεθόδων πραγματοποιήθηκε μέσα σε περιβάλλον ArcMap και συγκεκριμένα με το Geostatistical Wizard του εργαλείου Geostatistical Analyst. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται με τη χρήση των σχετικών δεικτών αξιολόγησης τόσο για τα σημεία που συμμετέχουν στη χωρική παρεμβολή όσο και για τα σημεία επαλήθευσης.

Η εφαρμογή των ανωτέρω επεξεργασιών παρατίθενται στη συνέχεια αναλυτικά για κάθε μία εδαφική ιδιότητα ξεχωριστά.

3.2.1. Αργίλος %

Η κατανομή των τιμών αργίλου (%) στα σημεία δειγματοληψίας της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.7.



Εικόνα 3.7. Τιμές αργίλου (%) σημείων δειγματοληψίας.

Για τις τιμές του επί τοις εκατό ποσοστού της αργίλου δεν βρέθηκαν μη χωρικά ακραίες τιμές ενώ οι 5 χωρικά ακραίες τιμές που βρέθηκαν με τον υπολογισμό του τοπικού δείκτη Local Moran's I αφαιρέθηκαν από το σύνολο των σημείων δειγματοληψίας.

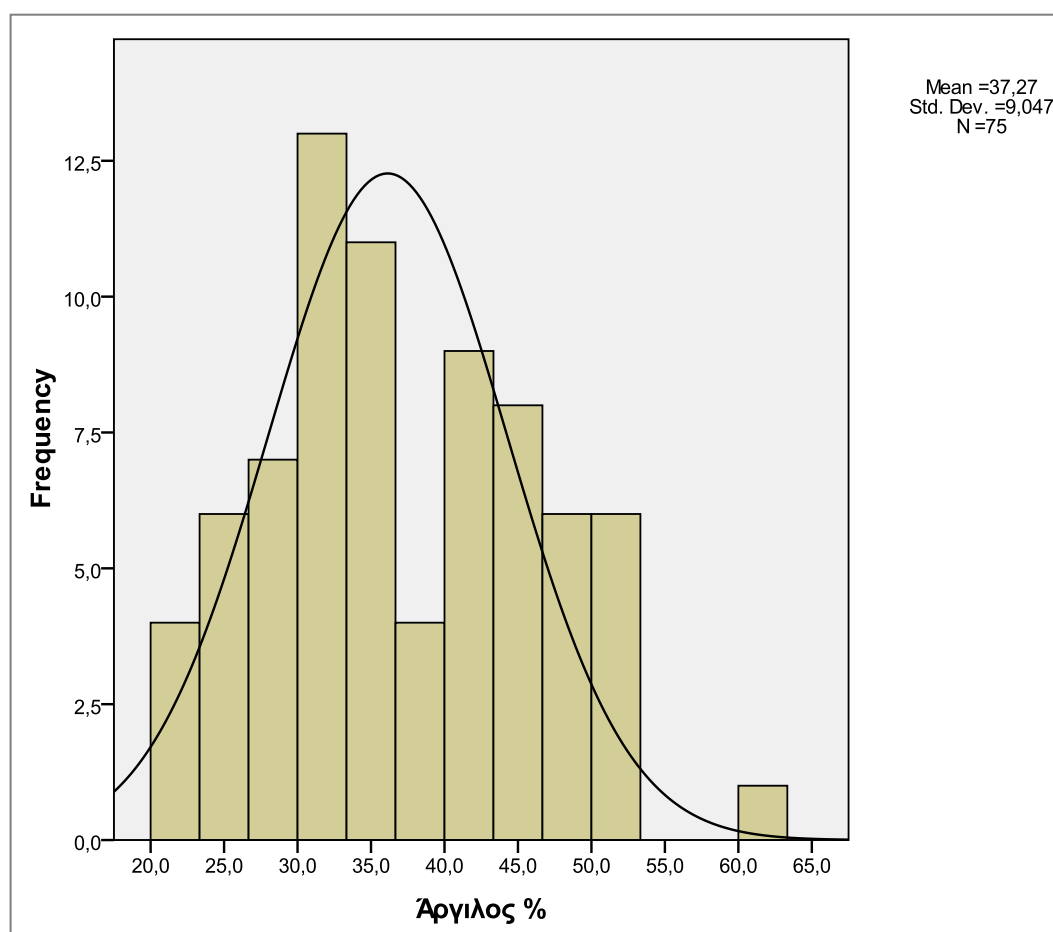
Από τα εναπομείναντα 89 σημεία αφαιρέθηκαν με τυχαίο τρόπο 14 σημεία δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των μεθόδων πρόβλεψης. Τα δύο σύνολα δεδομένων που προκύπτουν πρέπει να ανήκουν στον ίδιο πληθυσμό, ο έλεγχος της παραπάνω προϋπόθεσης έγινε με τη χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS και συγκεκριμένα με την επεξεργασία Compare Means. Μέτα τη διαπίστωση ότι τα δυο σύνολα σημείων ανήκουν στον ίδιο πληθυσμό προχωράμε στις επόμενες διαδικασίες.

Τα βασικά στατιστικά μεγέθη της αργίλου % των 75 (training_points) και των 14 (test_points) σημείων που χρησιμοποιήθηκαν στις μεθόδους παρεμβολής καθώς και στον έλεγχο των αποτελεσμάτων, αντίστοιχα, δίνονται στον Πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4. Στατιστικά μεγέθη Αργίλου (%).

Αργίλος %	training_points	test_points
N (πλήθος δειγμάτων)	75	14
Ελάχιστη τιμή	21,20	22,00
Μέγιστη τιμή	60,40	59,60
Μέσος όρος	37,27	34,36
Τυπική απόκλιση	9,05	11,30
Διακύμανση	81,84	127,75
Συντελεστής παραλλακτικότητας (CV %)	24,27	32,89

Στα 75 σημείων δειγματοληψίας ο έλεγχος της κατανομής των συχνοτήτων των τιμών της αργίλου % πραγματοποιήθηκε με τη μελέτη του ιστογράμματος (Εικόνα 3.8) και με τον υπολογισμό των συντελεστών κύρτωσης και ασυμμετρίας (Πίνακας 3.5). Τα αποτελέσματα των παραπάνω επιβεβαιώθηκαν με εφαρμογή του παραμετρικού Kolmogorov – Smirnov τεστ (Πίνακας 3.5).



Εικόνα 3.8. Ιστόγραμμα Αργίλου (%).

Από την Εικόνα 3.8 του ιστογράμματος παρατηρούμε ότι οι τιμές της αργίλου % δεν φαίνεται να διαφέρουν αρκετά από την κανονική κατανομή. Ο υπολογισμός της κύρτωσης και ασυμμετρίας ενδυναμώνει αυτή μας την υπόθεση αφού και οι τιμές των δυο αυτών συντελεστών φανερώνουν την κανονική κατανομή των τιμών. Τέλος η σχετικά μεγάλη τιμή σημαντικότητας δηλώνει ότι η κατανομή των τιμών της αργίλου (%) δεν διαφέρει σημαντικά από την κανονική.

Πίνακας 3.5. Έλεγχος κανονικότητας Αργίλου (%).

Έλεγχος κανονικότητας Αργίλου %	
Συντελεστής ασυμμετρίας (skewness)	0,31
Συντελεστής κύρτωσης (kurtosis)	-0,75
Kolmogorov - Smirnov Z	0,959
Asymp. Sig. (2-tailed)	0,316

Για την εφαρμογή των δυο παραλλαγών της μεθόδου Co-kriging αρχικά προσδιορίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των τιμών της αργίλου και των τοπογραφικών ιδιοτήτων, οι τιμές του οποίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6.

Πίνακας 3.6. Συντελεστές συσχέτισης Αργίλου (%) και τοπογραφικών ιδιοτήτων.

Αργίλος (%)		Elevation				Slope			
	Cell size (m ²)	5x5	10x10	15x15	20x20	5x5	10x10	15x15	20x20
	Pearson Correlation	0,485	0,485	0,485	0,482	0,194	0,236	0,215	0,197
	Sig. (2-tailed)	0	0	0	0	0,075	0,03	0,048	0,071
		Aspect				Plan			
	Cell size (m ²)	5x5	10x10	15x15	20x20	5x5	10x10	15x15	20x20
	Pearson Correlation	0,147	0,065	0,146	0,234	-0,05	0,13	0,235	0,149
	Sig. (2-tailed)	0,179	0,553	0,183	0,031	0,676	0,235	0,03	0,174
		Profile				Distance_river			
	Cell size (m ²)	5x5	10x10	15x15	20x20	5x5	10x10	15x15	20x20
Pearson Correlation	0,158	-0,03	-0,15	-0,253	-0,07	-0,07	-0,07	-0,073	
Sig. (2-tailed)	0,149	0,76	0,162	0,061	0,514	0,509	0,527	0,54	

Παρατηρώντας τον Πίνακα 3.6 διαπιστώνουμε ότι η συσχέτιση της αργίλου (%) με την ίδια τοπογραφική ιδιότητα παρουσιάζει διαφοροποιήσεις ανάλογα με το μέγεθος της κυψελίδας. Παρά το γεγονός ότι οι συντελεστές συσχέτισης δεν είναι αρκετά μεγάλοι ώστε να φανερώσουν ξεκάθαρα την ύπαρξη μιας ισχυρής σχέσης μεταξύ των μεταβλητών θα χρησιμοποιήσουμε τις πληροφορίες του υψομέτρου, με μέγεθος κυψελίδας 15x15 μ., στις γεωστατιστικές μεθόδους χωρικής παρεμβολής Isotopic Co-kriging και Heterotopic Co-krigng. Η θετική συσχέτιση της αργίλου με το υψόμετρο επιβεβαιώνει τη διαφορετικότητα μητρικού υλικού που παρατηρείται στην περιοχή μελέτης. Σε περιοχές με χαμηλότερο υψόμετρο έχουν αποτεθεί με μεταφορά υλικά αλλουβιακά ή κροκαλοπαγή ενώ στα ανώτερα έχει παραμείνει το αυτόχθονο μητρικό υλικό (κυρίως αργιλικές μάργες) το οποίο έχει μεγαλύτερο ποσοστό αργίλου (Κοσμάς κ.α., 2010).

Πολλαπλή παλινδρόμηση

Η επιλογή του καλύτερου μοντέλου πολλαπλής παλινδρόμησης έγινε στο περιβάλλον του στατιστικού πακέτου SPSS και η εφαρμογή του με τη βοήθεια του ArcGIS 9.3 με την εντολή Ordinary Least Squares από το Spatial Analyst Tools. Το μοντέλο που επιλέχθηκε είχε συντελεστή προσδιορισμού R^2 0,137 και τα χαρακτηριστικά δίνονται στον Πίνακα 3.7.

Πίνακας 3.7. Συντελεστές πολλαπλής παλινδρόμησης Αργίλου (%).

	Elevation (15x15)	Profile (20x20)	Constant
Coefficient	0,064525	-6,623684	9,967104
Significance	0,008	0,037	0,306

Οι παράμετροι όλων των βαριογραμμμάτων που προσαρμόστηκαν στις γεωστατιστικές μεθόδους δίνονται στον Πίνακα 3.8. Παρατηρούμε ότι σε όλα τα βαριογράμματα ο λόγος nugget/sill είναι κοντά στο 24-47 % γεγονός που αποδεικνύει την ισχυρή έως μέτρια χωρική εξάρτηση της εξεταζόμενης ιδιότητας.

Πίνακας 3.8. Παράμετροι θεωρητικών βαριογραμμμάτων της Αργίλου (%).

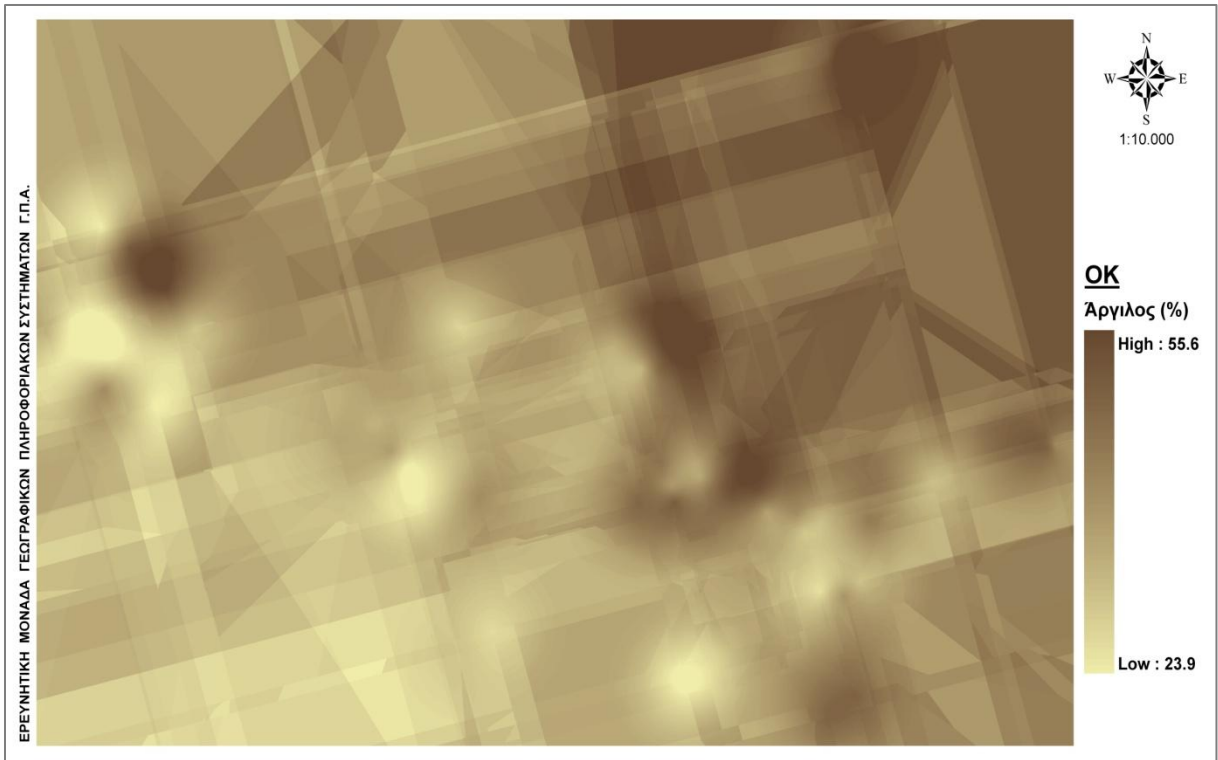
	Θεωρητικό Μοντέλο	Nugget	Όριο (Sill)	Εύρος (Range)	Nugget/Sill x100
OK	Spherical	14,985	61,565	2091,509	24,34
ICK	Spherical	21,564	88,084	2233,43	24,48
HCK	Exponential	23,547	76,423	2073,9	30,81
RK-I / II (regressed values)	Exponential	2,744	8,390	2233,43	32,71
RK-II /III (residuals)	Exponential	18,551	39,591	2097,67	46,86

Kriging – Co-kriging

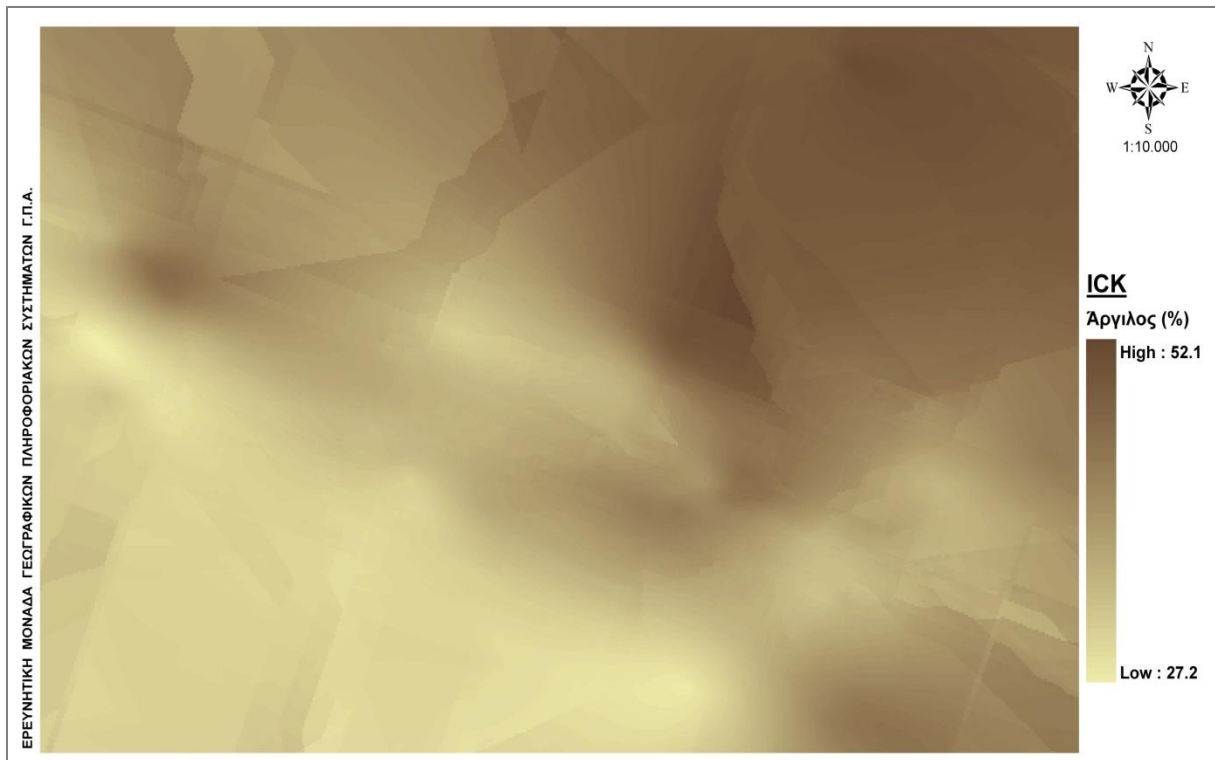
Στη μέθοδο του Ordinary Kriging και των δυο παραλλαγών του Co-kriging χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη της τιμής σε κάθε σημείο οι τιμές 12 μέχρι 20 γειτονικών σημείων. Στη μέθοδο ICK και HCK, χρησιμοποιήθηκε επίσης η πληροφορία του υψομέτρου. Στη συνέχεια παρατίθενται συγκεντρωτικά οι δείκτες αξιολόγησης της πρόβλεψης που προέκυψαν από το cross validation (Πίνακας 3.9) καθώς και οι επιφάνειες πρόβλεψης της μεθόδου OK (Εικόνα 3.9), ICK (Εικόνα 3.10) και HCK (Εικόνα 3.11) αντίστοιχα.

Πίνακας 3.9. Δείκτες cross-validation των μεθόδων OK, ICK και HCK της Αργίλου (%).

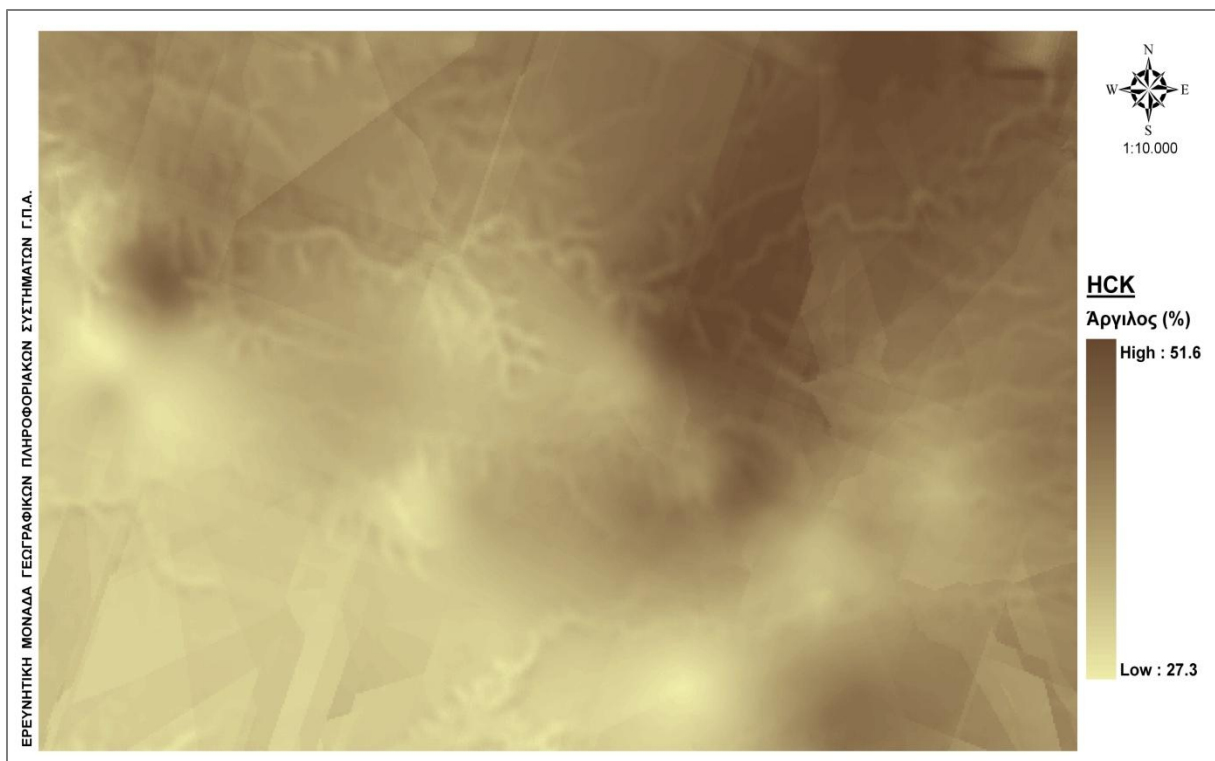
	ME	RMSE	ASE	MSPE	RMSS
OK	-0,1411	7,156	7,375	-0,0126	0,9848
ICK	-0,0258	7,496	5,892	-0,0030	1,275
HCK	-0,0165	7,388	6,347	0,0009	1,167



Εικόνα 3.9. Επιφάνεια πρόβλεψης της OK μεθόδου της Αργίλου (%).



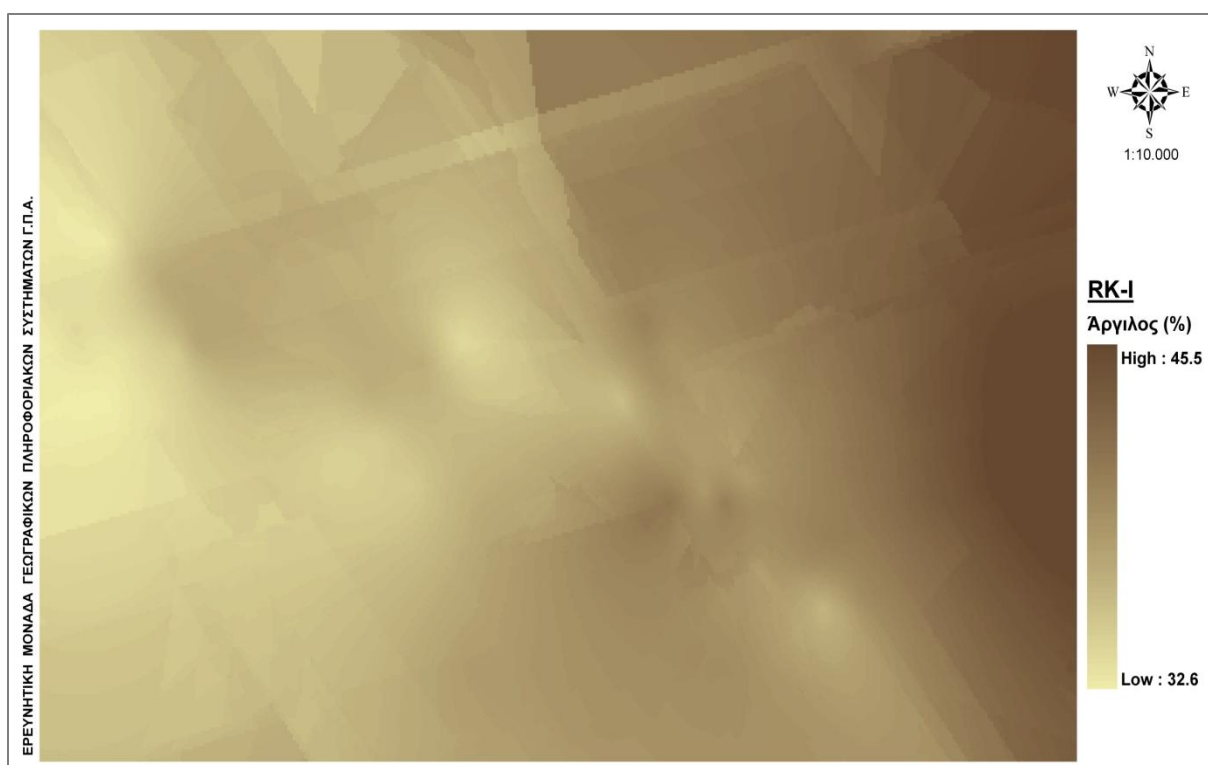
Εικόνα 3.10. Επιφάνεια πρόβλεψης της ICK μεθόδου της Αργίλου (%).



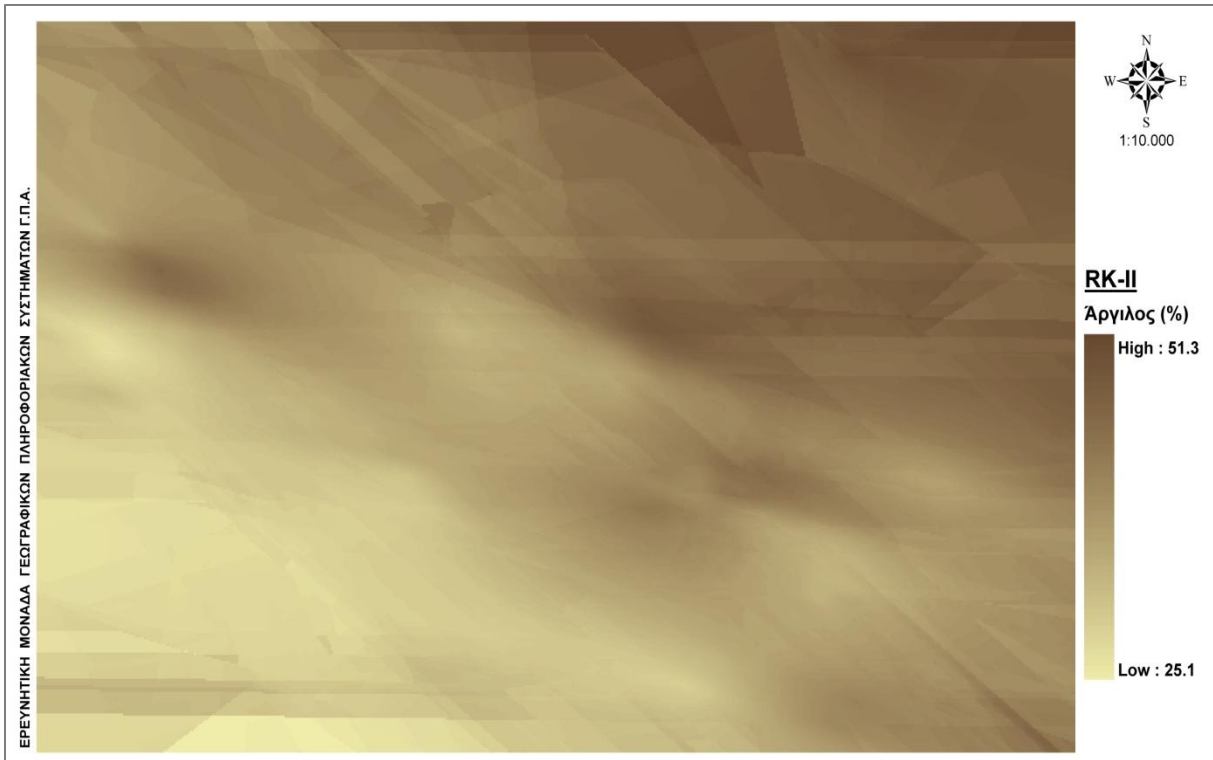
Εικόνα 3.11. Επιφάνεια πρόβλεψης της HCK μεθόδου της Αργίλου (%).

Regression Kriging Models

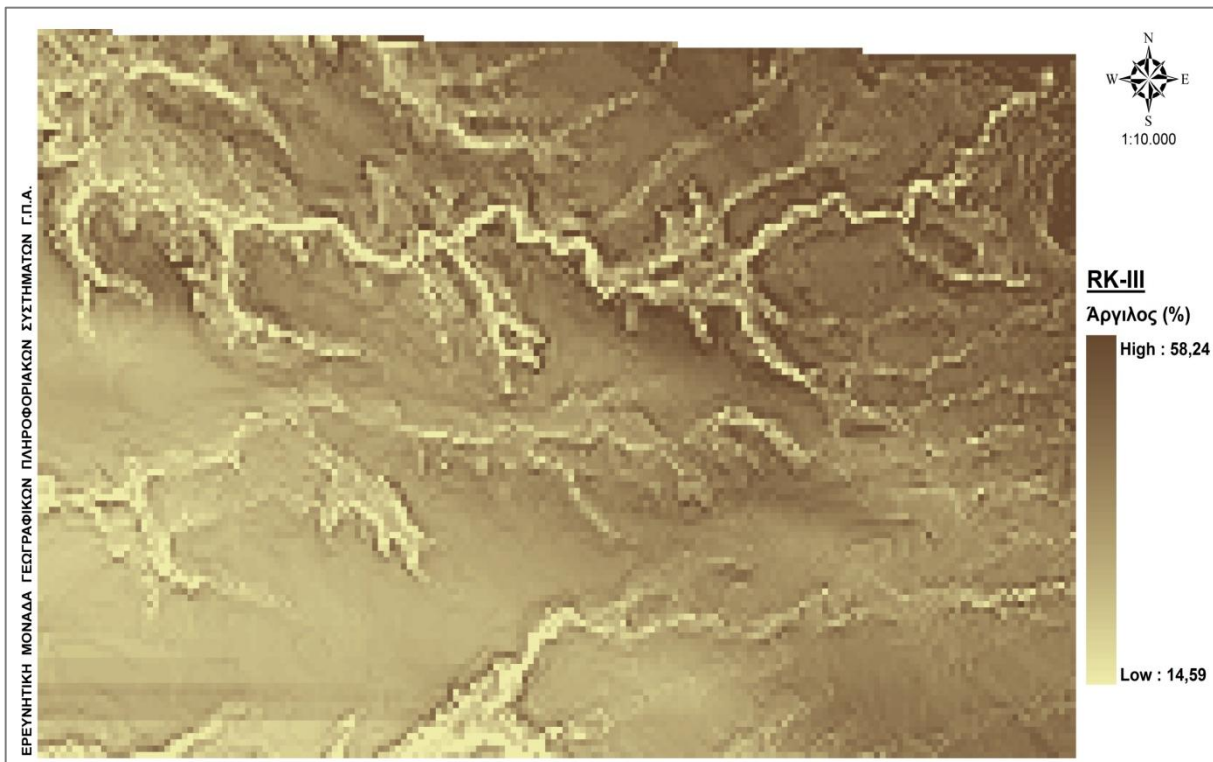
Στη μέθοδο Regression kriging model I πραγματοποιήθηκε ordinary kriging των εκτιμούμενων, βάσει των εξισώσεων-μοντέλων παλινδρόμησης, τιμών. Στην Εικόνα 3.12 παρουσιάζεται η επιφάνεια πρόβλεψης της μεθόδου. Στη μέθοδο Regression kriging model II πραγματοποιήθηκε ordinary kriging στις εκτιμούμενες από την παλινδρόμηση τιμές καθώς και στα υπόλοιπα αυτής. Οι δύο επιφάνειες που προκύψαν από τις παραπάνω μεθόδους προσθέτονται με το εργαλείο Raster Calculator στο περιβάλλον ArcMap. Η τελική επιφάνεια πρόβλεψης της μεθόδου RK-II φαίνεται στην Εικόνα 3.13. Τέλος στη μέθοδο Regression kriging model III με το εργαλείο Raster Calculator στο περιβάλλον ArcMap εφαρμόστηκαν οι συντελεστές που προέκυψαν από το μοντέλο της παλινδρόμησης σε θέσεις της περιοχής μελέτης που δεν υπήρχαν μετρήσεις εδαφικών ιδιοτήτων. Η τελική πρόβλεψη της μεθόδου RK-III δίνεται παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.14.



Εικόνα 3.12. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-I μεθόδου της Αργίλου (%).

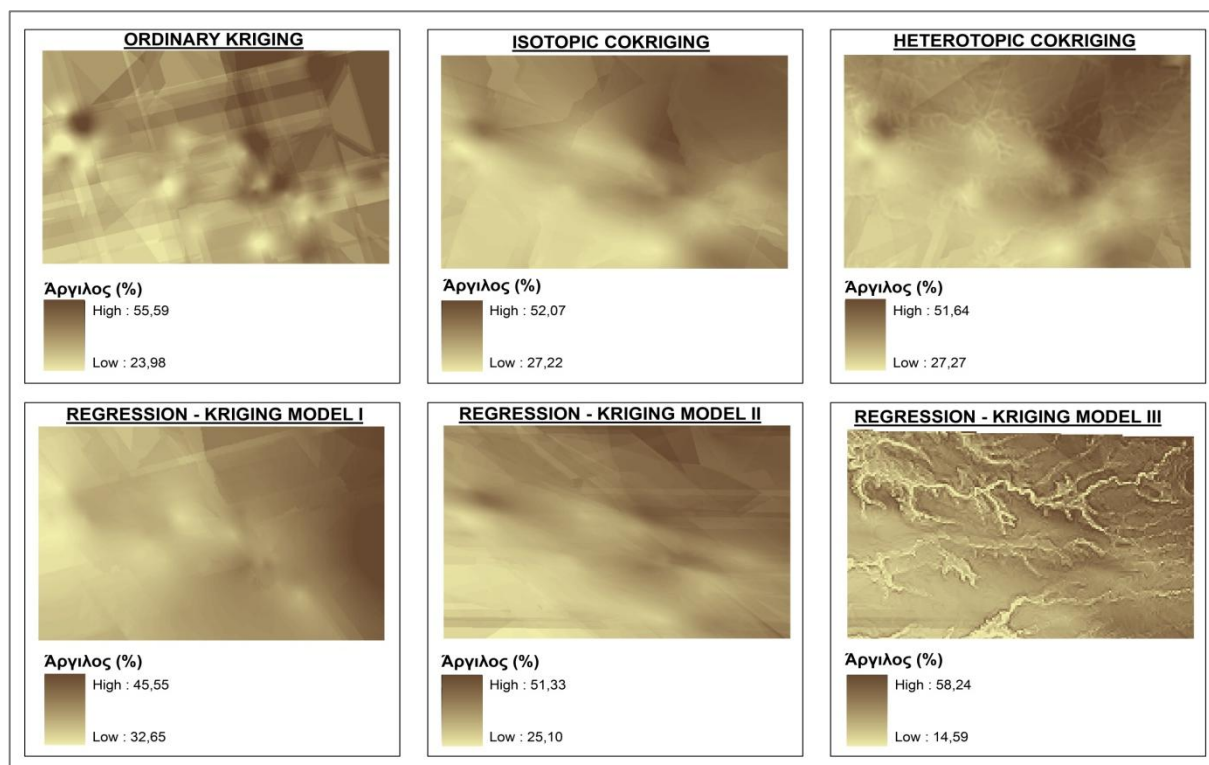


Εικόνα 3.13. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-II μεθόδου της Αργίλου (%).



Εικόνα 3.14. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-III μεθόδου της Αργίλου (%).

Στην Εικόνα 3.15 παρουσιάζονται συνοπτικά οι επιφάνειες πρόβλεψης των έξι γεωστατιστικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν έτσι ώστε να είναι πιο εφικτή η διερεύνηση των διαφορών τους.



Εικόνα 3.15. Επιφάνειες πρόβλεψης Αργίλου (%) με χρήση γεωστατιστικών μεθόδων.

Στην Εικόνα 3.15 παρατηρούμε ότι στην επιφάνεια του ordinary kriging παρουσιάζονται κάποιες μικρές περιοχές που ταυτίζονται με σημεία δειγματοληψίας, με χαμηλές τιμές αργίλου%, στο χώρο. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο και επιβεβαιώνει το χαρακτηρισμό του ordinary kriging ως έναν ακριβή εκτιμητή με την έννοια ότι οι εκτιμημένες τιμές συμπίπτουν με τις τιμές των σημείων δεδομένων. Συγκρίνοντας τις επιφάνειες του cokriging (isotopic και heterotopic) παρατηρούμε ότι είναι παρόμοιες. Και στις δυο επιφάνειες είναι φανερή η θετική συσχέτιση αργίλου και υψομέτρου αφού παρατηρούμε ότι οι υψηλότερες τιμές εστιάζονται στη ΒΑ πλευρά της περιοχής μελέτης που εμφανίζεται και το μεγαλύτερο υψόμετρο. Στην επιφάνεια του ετεροτοπικού cokriging παρατηρούμε ότι υπάρχουν και σε κοντινές αποστάσεις διαφοροποιήσεις τιμών και αυτό γιατί στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιήθηκαν τοπογραφικά δεδομένα από περισσότερα σημεία. Τέλος μελετώντας τις επιφάνειες από τις τρεις παραλλαγές του regression-kriging παρατηρούμε ότι υπάρχει αρκετή διαφοροποίηση μεταξύ τους η οποία βασίζεται στις

αντίστοιχες διαφορές των μεθοδολογιών. Και στις τρεις αυτές επιφάνειες παρατηρούμε αύξηση των τιμών προς τα ΒΑ, στην επιφάνεια όμως του regression-kriging model I η αύξηση αυτή είναι πιο απότομη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μέθοδος περιελάμβανε ordinary kriging μόνο στις εκτιμώμενες από την παλινδρόμηση τιμές και όχι και στα υπόλοιπα αυτής. Η επιφάνεια regression kriging model II εμφανίζει μεγαλύτερη λεπτομέρεια και ομαλή κατανομή των τιμών στην περιοχή μελέτης και αυτό γιατί στη μέθοδο αυτή έχει μειωθεί η αβεβαιότητα πρόβλεψης με τη διαδικασία του Ο.Κ. στα υπόλοιπα της παλινδρόμησης. Τέλος στην επιφάνεια της τρίτης παραλλαγής regression-kriging (model III) η χωρική κατανομή των τιμών της επιφανειακής αργίλου έχει επηρεασθεί έντονα από τις τοπογραφικές παραμέτρους και ιδίως από το υψόμετρο και την έκθεση.

Ο Πίνακας 3.10 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της σύγκρισης των μεθόδων παρεμβολής με το δείκτη Root Mean Square Error (RMSE) που υπολογίστηκε στο ανεξάρτητο σύνολο σημείων (test_ points) που δεν συμμετείχε στις διαδικασίες πρόβλεψης.

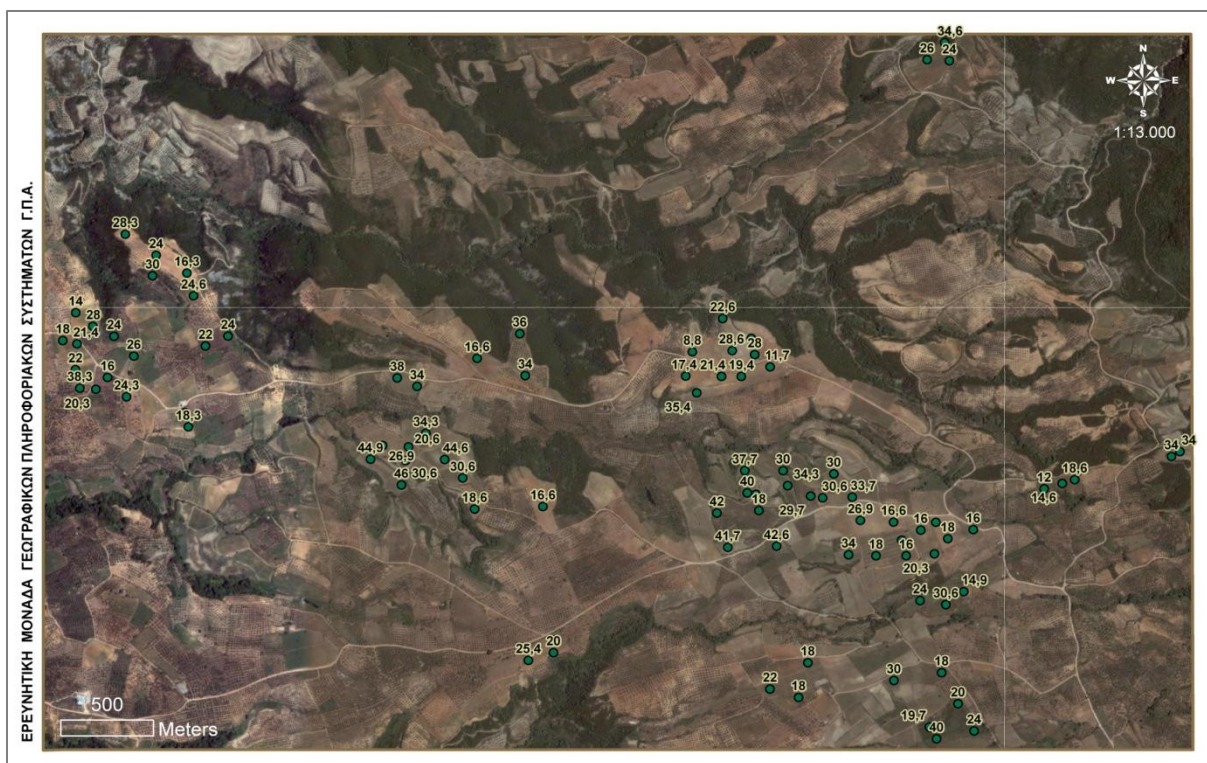
Πίνακας 3.10. Τιμές του δείκτη RMSE των μεθόδων πρόβλεψης της Αργίλου (%).

Test_points	MLR	OK	ICK	HCK	RKI	RKII	RKIII
RMSE	10,02	8,58	8,20	8,20	10,15	4,00	9,14

Παρατηρούμε ότι η χρησιμοποίηση του υψομέτρου στη χωρική εκτίμηση των τιμών της αργίλου βελτίωσε σε ένα ποσοστό τις προβλέψεις με τις γεωστατιστικές μεθόδους isotopic cokriging και heterotopic cokriging. Οι προβλέψεις πιθανόν να ήταν καλύτερες εάν ήταν μεγαλύτερος ο αριθμός των θέσεων στις οποίες υπήρχαν αναλυτικά δεδομένα για την επί τοις εκατό περιεκτικότητα της αργίλου στον επιφανειακό ορίζοντα. Η μέθοδος Regression-kriging model II έχει το μικρότερο δείκτη RMSE. Τα αποτελέσματα που βρέθηκαν από τη γεωστατιστική ανάλυση των δεδομένων δικαιολογούνται από την αναμενόμενη επίδραση των τοπογραφικών ιδιοτήτων του ανάγλυφου σε εδαφικές ιδιότητες όπως η κοκκομετρική σύσταση.

3.2.2. Ίλύς (%)

Η κατανομή των τιμών ίλύος (%) στα σημεία δειγματοληψίας της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.16.



Εικόνα 3.16. Τιμές ίλύος (%) σημείων δειγματοληψίας.

Για τις τιμές του επί τοις εκατό ποσοστού της ίλύος δεν βρέθηκαν μη χωρικά ακραίες τιμές ενώ οι 2 χωρικά ακραίες τιμές που βρέθηκαν με τον υπολογισμό του τοπικού δείκτη Local Moran's I αφαιρέθηκαν από το σύνολο των σημείων δειγματοληψίας.

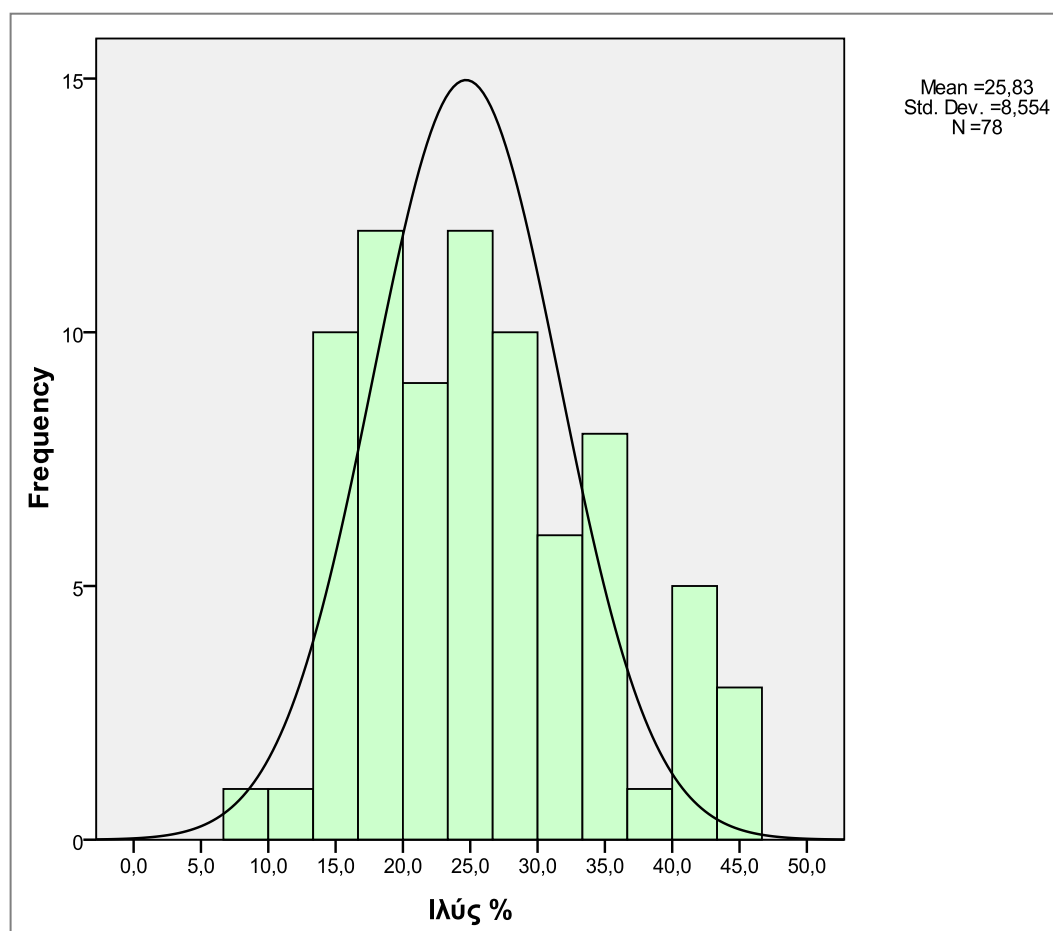
Από τα εναπομείναντα 92 σημεία αφαιρέθηκαν με τυχαίο τρόπο 14 σημεία δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των μεθόδων πρόβλεψης. Τα δύο σύνολα δεδομένων που προκύπτουν πρέπει να ανήκουν στον ίδιο πληθυσμό, ο έλεγχος της παραπάνω προϋπόθεσης έγινε με τη χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS και συγκεκριμένα με την επεξεργασία Compare Means. Μέτα τη διαπίστωση ότι τα δυο σύνολα σημείων ανήκουν στον ίδιο πληθυσμό προχωράμε στις επόμενες διαδικασίες.

Τα βασικά στατιστικά μεγέθη της ίλύος % των 78 (training_points) και των 14 (test_points) σημείων που χρησιμοποιήθηκαν στις μεθόδους παρεμβολής καθώς και στον έλεγχο των αποτελεσμάτων, αντίστοιχα, δίνονται στον Πίνακα 3.11.

Πίνακας 3.11. Στατιστικά μεγέθη Ιλύος (%).

Ιλύς %	training_points	test_points
N (πλήθος δειγμάτων)	78	14
Ελάχιστη τιμή	8,80	12,00
Μέγιστη τιμή	46,00	42,00
Μέσος όρος	25,83	26,94
Τυπική απόκλιση	8,55	10,34
Διακύμανση	73,17	106,86
Συντελεστής παραλλακτικότητας (CV %)	33,10	38,38

Στα 78 σημείων δειγματοληψίας ο έλεγχος της κατανομής των συχνοτήτων των τιμών της ιλύος (%) πραγματοποιήθηκε με τη μελέτη του ιστογράμματος (Εικόνα 3.17) και με τον υπολογισμό των συντελεστών κύρτωσης και ασυμμετρίας (Πίνακας 3.12). Τα αποτελέσματα των παραπάνω επιβεβαιώθηκαν με εφαρμογή του παραμετρικού Kolmogorov – Smirnov τεστ (Πίνακας 3.12).



Εικόνα 3.17. Ιστόγραμμα Ιλύος (%).

Από την Εικόνα 3.17 του ιστογράμματος παρατηρούμε ότι οι τιμές της ιλύος % δεν φαίνεται να διαφέρουν αρκετά από την κανονική κατανομή. Ο υπολογισμός της κύρτωσης και ασυμμετρίας επιβεβαιώνει αυτή μας την υπόθεση αφού και οι τιμές των δυο αυτών συντελεστών φανερώνουν την κανονική κατανομή των τιμών. Τέλος η μεγάλη τιμή σημαντικότητας δηλώνει ότι η κατανομή των τιμών της ιλύος (%) δεν διαφέρει σημαντικά από την κανονική.

Πίνακας 3.12. Έλεγχος κανονικότητας Ιλύος (%).

Έλεγχος κανονικότητας Ιλύος %	
Συντελεστής ασυμμετρίας (skewness)	0,52
Συντελεστής κύρτωσης (kurtosis)	-0,36
Kolmogorov - Smirnov Z	0,86
Asymp. Sig. (2-tailed)	0,45

Για την εφαρμογή των δυο παραλλαγών της μεθόδου Co-kriging αρχικά προσδιορίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των τιμών της ιλύος και των τοπογραφικών ιδιοτήτων, οι τιμές του οποίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.13.

Πίνακας 3.13. Συντελεστές συσχέτισης Ιλύος (%) και τοπογραφικών ιδιοτήτων.

Ιλύς (%)		Elevation				Slope			
	cell_size (m ²)	5x5	10x10	15x15	20x20	5x5	10x10	15x15	20x20
	Pearson Correlation	0,051	0,051	0,048	0,048	0,483	0,611	0,453	0,496
	Sig. (2-tailed)	0,646	0,647	0,666	0,67	0	0	0	0
		Aspect				Plan			
	cell_size (m ²)	5x5	10x10	15x15	20x20	5x5	10x10	15x15	20x20
	Pearson Correlation	0,158	0,209	0,145	0,165	-0,11	-0,045	0,053	-0,217
	Sig. (2-tailed)	0,168	0,044	0,204	0,149	0,337	0,695	0,642	0,06
		Profile				Distance_river			
	cell_size (m ²)	5x5	10x10	15x15	20x20	5x5	10x10	15x15	20x20
Pearson Correlation	0,081	0,082	0,035	-0,022	0,274	0,280	0,278	0,276	
Sig. (2-tailed)	0,482	0,473	0,764	0,851	0,015	0,013	0,014	0,015	

Παρατηρώντας τον Πίνακα 3.13 διαπιστώνουμε την ύπαρξη ισχυρής συσχέτισης της ύψους (%) με την ιδιότητα της κλίσης. Πιο συγκεκριμένα ο συντελεστής συσχέτισης των τιμών της ύψους και της κλίσεως με μέγεθος κυψελίδας 10x10 μ. είναι αρκετά μεγάλος με τιμή 0.611.

Πολλαπλή παλινδρόμηση

Η επιλογή του καλύτερου μοντέλου πολλαπλής παλινδρόμησης έγινε στο περιβάλλον του στατιστικού πακέτου SPSS και η εφαρμογή του με τη βοήθεια του ArcGIS 9.3 με την εντολή Ordinary Least Squares από το Spatial Analyst Tools. Το μοντέλο που επιλέχθηκε είχε συντελεστή προσδιορισμού R^2 0,206 και τα χαρακτηριστικά δίνονται στον Πίνακα 3.14.

Πίνακας 3.14. Συντελεστές πολλαπλής παλινδρόμησης Ύψους (%).

	Slope (10x10)	Plan (20x20)	Distance_River (10x10)	Constant
Coefficient	0,3739	-7,1534	0,0148	17,2218
Significance	0,001	0,038	0,01	0

Οι παράμετροι όλων των βαριογραμμμάτων που προσαρμόστηκαν στις γεωστατιστικές μεθόδους δίνονται στον Πίνακα 3.15, παρατηρούμε ότι σε όλα τα βαριογράμματα ο λόγος nugget/sill είναι κοντά στο 32-47 % γεγονός που αποδεικνύει την ισχυρή έως μέτρια χωρική εξάρτηση της εξεταζόμενης ιδιότητας.

Πίνακας 3.15. Παράμετροι θεωρητικών βαριογραμμμάτων της Ύψους (%).

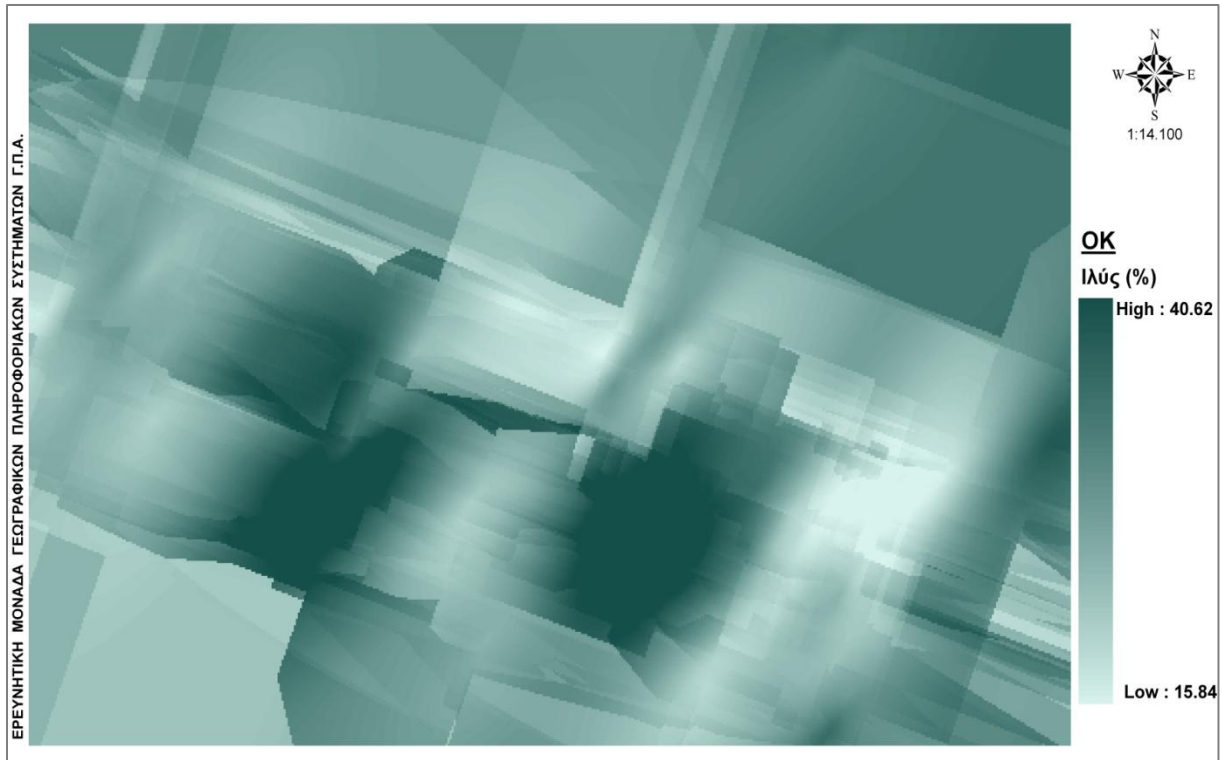
	Θεωρητικό Μοντέλο	Nugget	Όριο (Sill)	Εύρος (Range)	Nugget/Sill x100
OK	Spherical	28,574	61,425	1303,86	46,52
ICK	Exponential	22,614	62,65	2163,55	36,10
HCK	Exponential	23,033	67,656	1798	34,04
RK-I / II (regressed values)	Exponential	4,122	12,837	1540,93	32,11
RK-II / III (residuals)	Exponential	19,966	48,152	1303,86	41,46

Kriging - Cokriging

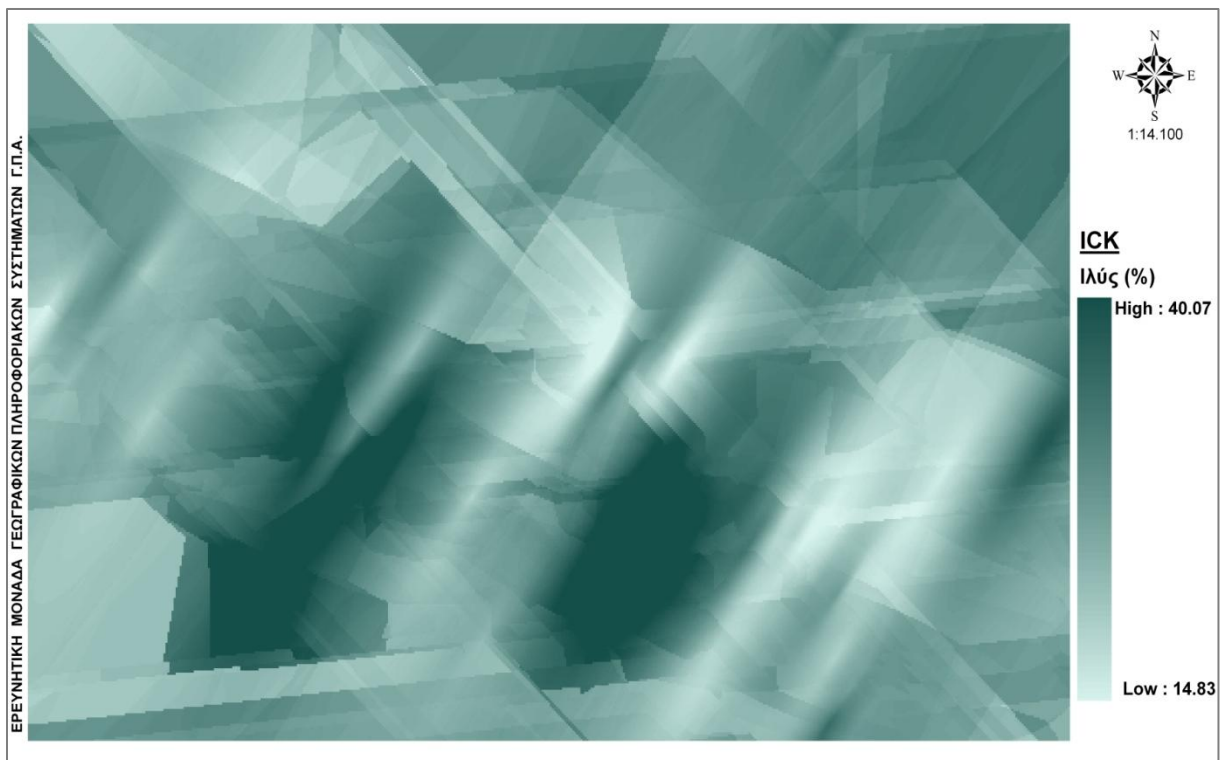
Στη μέθοδο του Ordinary Kriging και των δυο παραλλαγών του Cokriging χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη της τιμής σε κάθε σημείο οι τιμές 12 μέχρι 20 γειτονικών σημείων. Στη μέθοδο ICK και HCK, χρησιμοποιήθηκε επίσης σαν βοηθητική τοπογραφική ιδιότητα η κλίση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι δείκτες αξιολόγησης της πρόβλεψης που προέκυψαν από το cross validation (Πίνακας 3.16) καθώς και οι επιφάνειες πρόβλεψης της μεθόδου OK (Εικόνα 3.18), ICK (Εικόνα 3.19) και HCK (Εικόνα 3.20) αντίστοιχα.

Πίνακας 3.16. Δείκτες cross-validation των μεθόδων OK, ICK και HCK της Ιλύος (%).

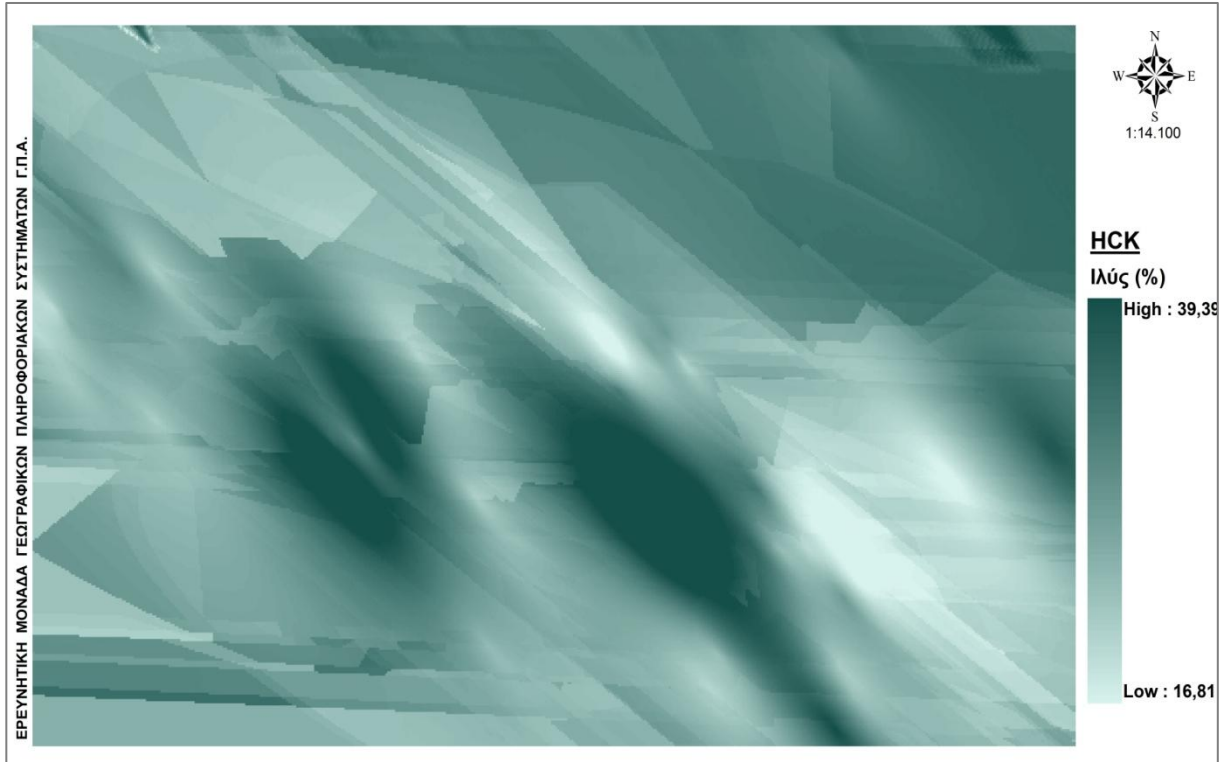
	ME	RMSE	ASE	MSPE	RMSS
OK	0,3088	7,337	7,1	0,03179	1,026
ICK	0,06312	7,116	7,086	-0,00082	1,007
HCK	0,1494	7,147	7,063	0,01133	0,9969



Εικόνα 3.18. Επιφάνεια πρόβλεψης της OK μεθόδου της Ιλύος (%).



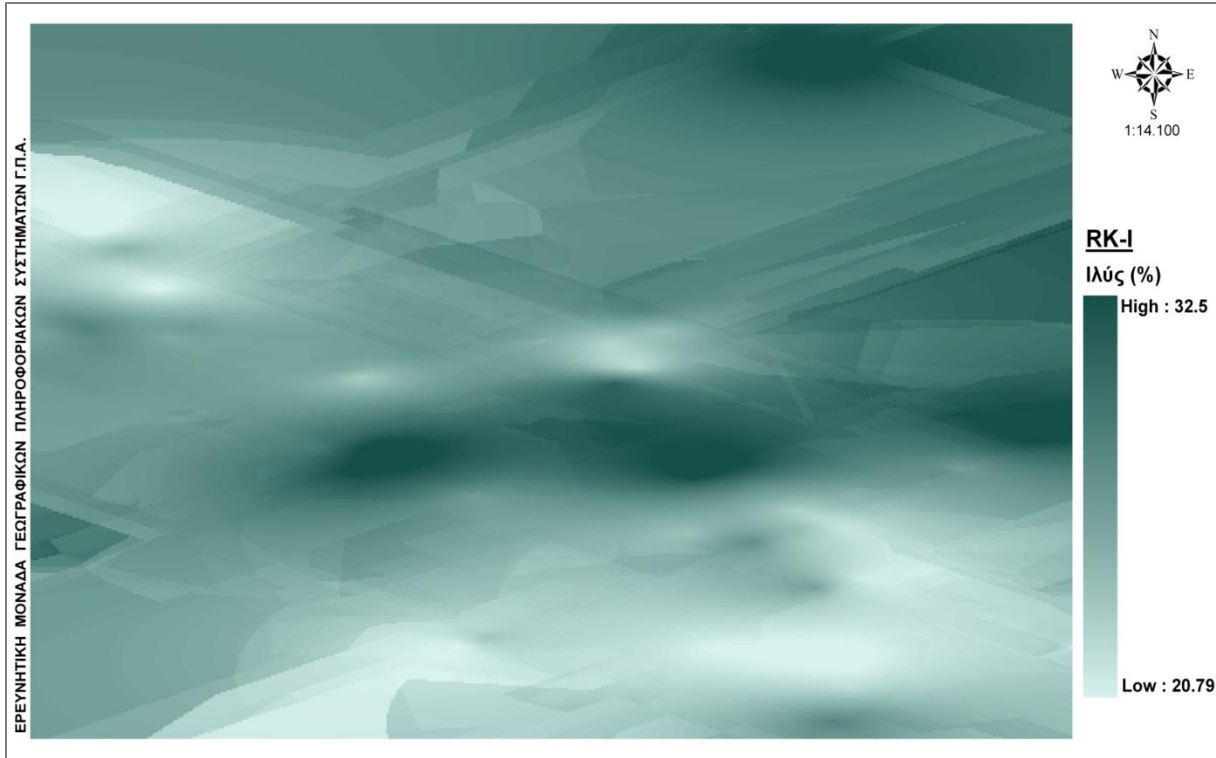
Εικόνα 3.19. Επιφάνεια πρόβλεψης της ICK μεθόδου της Ιλύος (%).



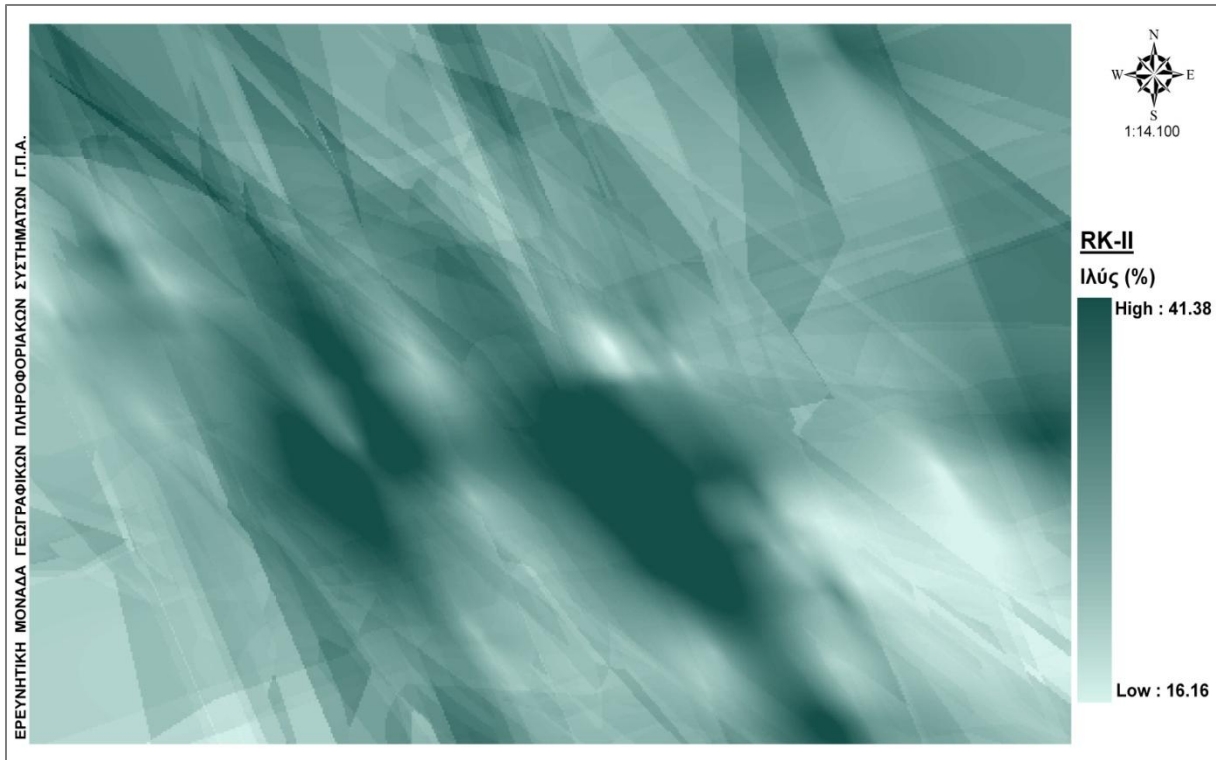
Εικόνα 3.20. Επιφάνεια πρόβλεψης της HCK μεθόδου της Ιλύος (%).

Regression Kriging Models

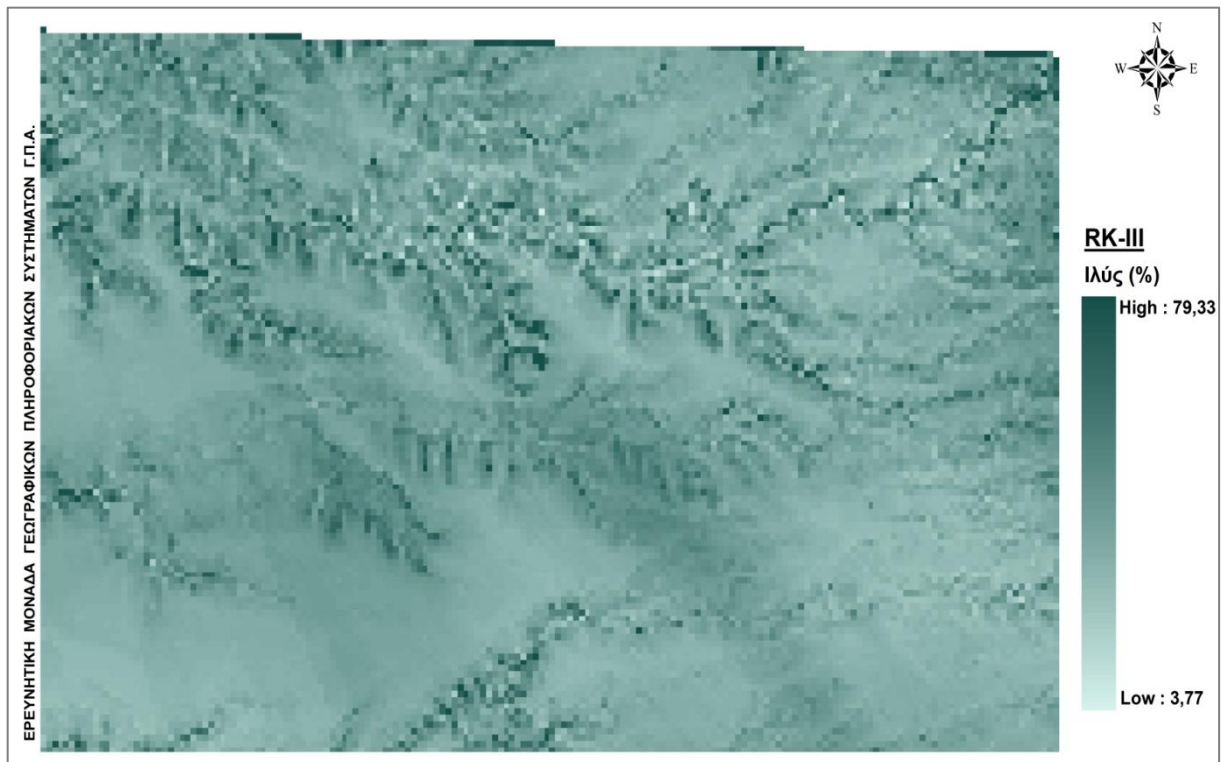
Οι επιφάνειες πρόβλεψης των μεθόδων Regression kriging model I, model II και model III παρουσιάζονται στις Εικόνες 3.21, 3.22 και 3.23 αντίστοιχα.



Εικόνα 3.21. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-I μεθόδου της Ιλύος (%).

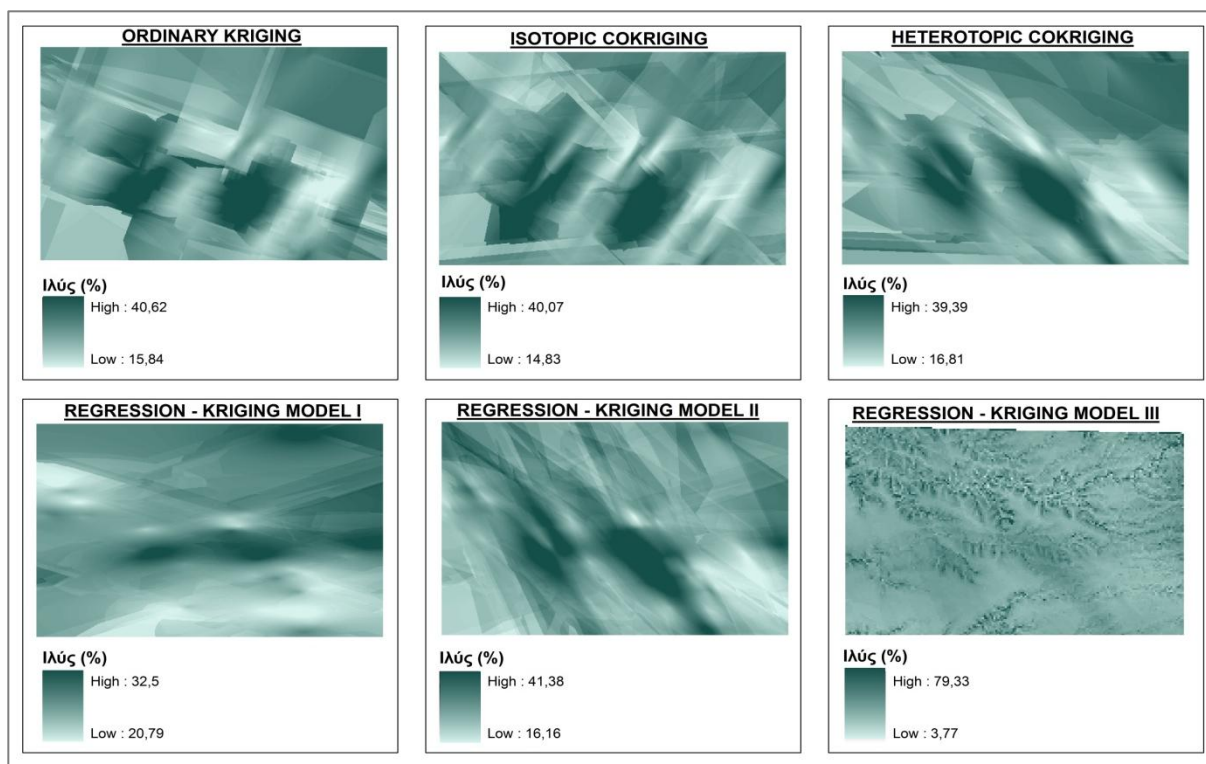


Εικόνα 3.22. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-II μεθόδου της Ιλύος (%).



Εικόνα 3.23. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-III μεθόδου της Ιλύος (%).

Στην Εικόνα 3.24 παρουσιάζονται συνοπτικά οι επιφάνειες πρόβλεψης των έξι γεωστατιστικών μεθόδων.



Εικόνα 3.24. Επιφάνειες πρόβλεψης Ιλύος (%) με χρήση γεωστατιστικών μεθόδων.

Στην Εικόνα 3.24 παρατηρούμε ότι στην επιφάνεια του ordinary kriging είναι εμφανείς κάποιες περιοχές που ταυτίζονται με σημεία δειγματοληψίας, με υψηλές τιμές ιλύος %, στο χώρο. Συγκρίνοντας τις επιφάνειες του cokriging (isotopic και heterotopic) παρατηρούμε ότι είναι παρόμοιες όσον αφορά τη χωρική κατανομή των τιμών της ιλύος (%). Και στις δυο επιφάνειες είναι φανερή η θετική συσχέτιση ιλύος και κλίσης αφού παρατηρούμε ότι οι υψηλότερες τιμές εστιάζονται στη Βόρεια πλευρά της περιοχής μελέτης που εμφανίζει και τις μεγαλύτερες τιμές κλίσεων. Στην επιφάνεια του ετεροτοπικού cokriging παρατηρούμε ότι η κατανομή των τιμών ιλύος (%) στο χώρο σχετίζεται περισσότερο με την κατανομή των τιμών της κλίσης (%) και αυτό γιατί στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιήθηκαν πληροφορίες κλίσης από περισσότερα σημεία. Στην επιφάνεια της Regression kriging model I παρατηρούμε ότι υπάρχει μια ομαλοποίηση των τιμών. Το εύρος των τιμών ιλύος (%) στην επιφάνεια είναι μικρό σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους αφού στη μέθοδο αυτή πραγματοποιείται ordinary kriging μόνο στις εκτιμούμενες από την παλινδρόμηση τιμές. Η επιφάνεια πρόβλεψης της Regression kriging model II εμφανίζει μεγαλύτερη λεπτομέρεια και

ομαλή κατανομή των τιμών στην περιοχή μελέτης διότι στη μέθοδο αυτή έχει μειωθεί η αβεβαιότητα πρόβλεψης με τη διαδικασία του Ο.Κ. στα υπόλοιπα της παλινδρόμησης. Τέλος στην επιφάνεια της τρίτης παραλλαγής regression-kriging (model III) η χωρική κατανομή των τιμών της επιφανειακής αργίλου έχει επηρεασθεί έντονα από τις τοπογραφικές παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν.

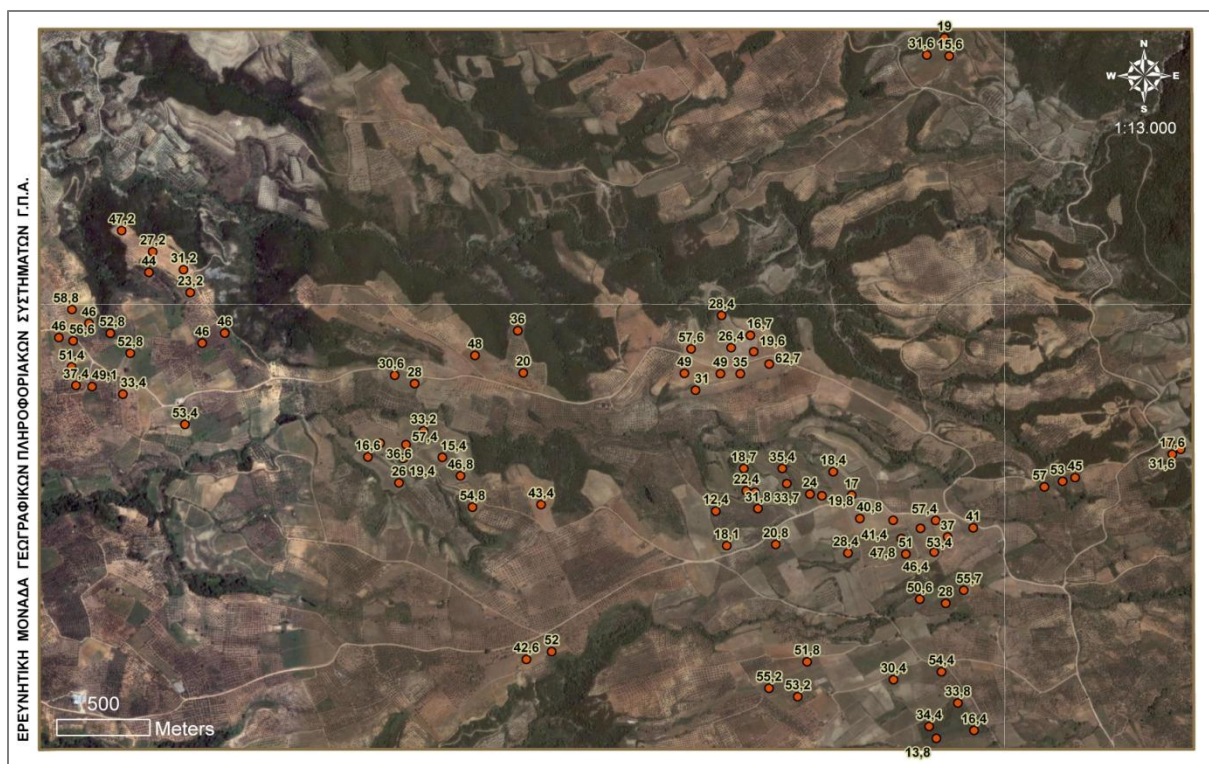
Ο Πίνακας 3.17 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της σύγκρισης των μεθόδων παρεμβολής με το δείκτη Root Mean Square Error (RMSE) που υπολογίστηκε στο ανεξάρτητο σύνολο σημείων (test_ points) που δεν συμμετείχε στις διαδικασίες πρόβλεψης.

Πίνακας 3.17. Τιμές του δείκτη RMSE των μεθόδων πρόβλεψης της Ιλύος (%).

Test_points	MLR	OK	ICK	HCK	RKI	RKII	RKIII
RMSE	10,38	7,054	6,332	6,782	8,9	6,19	6,924

3.2.3. Άμμος (%)

Η κατανομή των τιμών άμμου (%) στα σημεία δειγματοληψίας της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.25.



Εικόνα 3.25. Τιμές άμμου (%) σημείων δειγματοληψίας.

Για τις τιμές του επί τοις εκατό ποσοστού της άμμου δεν βρέθηκαν μη χωρικά ακραίες τιμές ενώ οι 2 χωρικά ακραίες τιμές που βρέθηκαν με τον υπολογισμό του τοπικού δείκτη Local Moran's I αφαιρέθηκαν από το σύνολο των σημείων δειγματοληψίας.

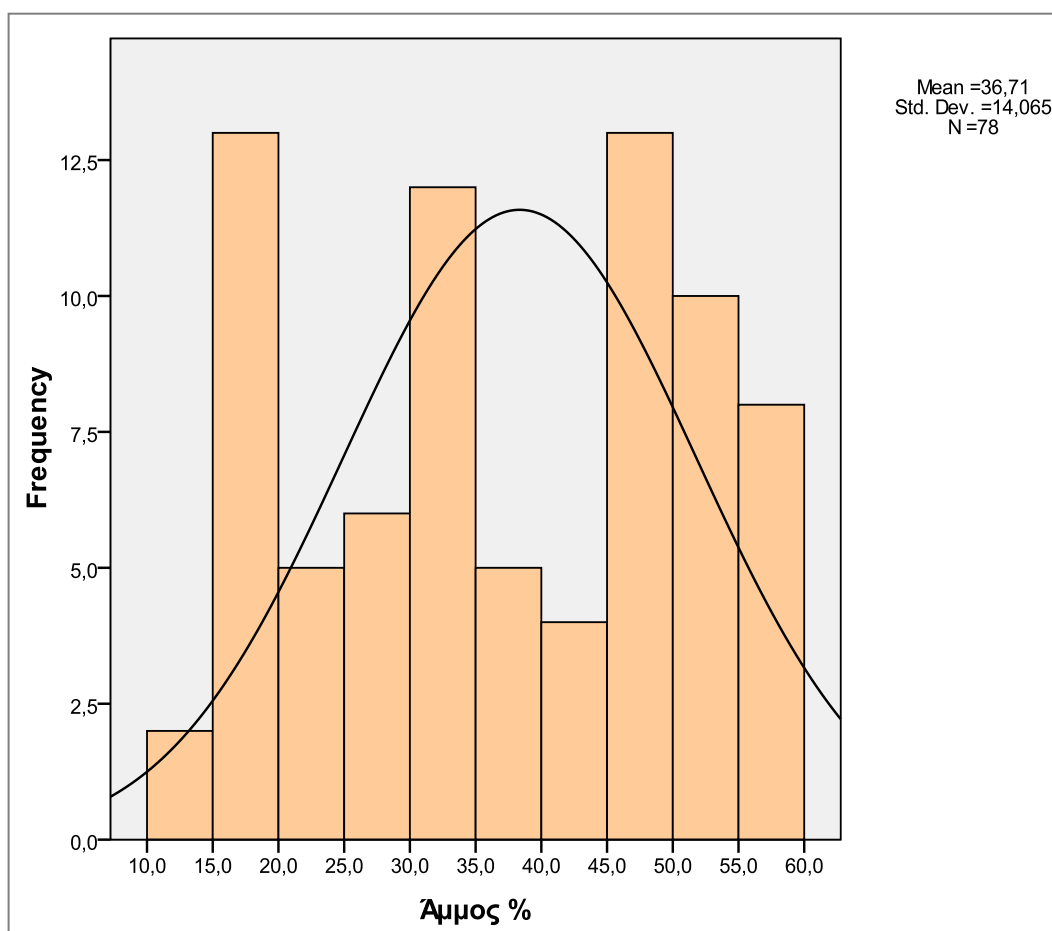
Από τα εναπομείναντα 92 σημεία αφαιρέθηκαν με τυχαίο τρόπο 14 σημεία δειγματοληψίας που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των μεθόδων πρόβλεψης. Τα δύο σύνολα δεδομένων που προκύπτουν πρέπει να ανήκουν στον ίδιο πληθυσμό, ο έλεγχος της παραπάνω προϋπόθεσης έγινε με τη χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS και συγκεκριμένα με την επεξεργασία Compare Means. Μέτα τη διαπίστωση ότι τα δυο σύνολα σημείων ανήκουν στον ίδιο πληθυσμό προχωράμε στις επόμενες διαδικασίες.

Τα βασικά στατιστικά μεγέθη της άμμου % των 78 (training_points) και των 14 (test_points) σημείων που χρησιμοποιήθηκαν στις μεθόδους παρεμβολής καθώς και στον έλεγχο των αποτελεσμάτων, αντίστοιχα, δίνονται στον Πίνακα 3.18.

Πίνακας 3.18. Στατιστικά μεγέθη Άμμου (%).

Άμμος %	training_points	test_points
N (πλήθος δειγμάτων)	78	14
Ελάχιστη τιμή	12,40	18,10
Μέγιστη τιμή	58,80	51,80
Μέσος όρος	36,71	37,05
Τυπική απόκλιση	14,06	12,49
Διακύμανση	197,81	155,96
Συντελεστής παραλλακτικότητας (CV %)	38,30	33,71

Στα 78 σημείων δειγματοληψίας ο έλεγχος της κατανομής των συχνοτήτων των τιμών της άμμου (%) πραγματοποιήθηκε με τη μελέτη του ιστογράμματος (Εικόνα 3.26) και με τον υπολογισμό των συντελεστών κύρτωσης και ασυμμετρίας (Πίνακας 3.19). Τα αποτελέσματα των παραπάνω επιβεβαιώθηκαν με εφαρμογή του παραμετρικού Kolmogorov – Smirnov τεστ (Πίνακας 3.19).



Εικόνα 3.26. Ιστόγραμμα Άμμου (%).

Από την Εικόνα 3.26 του ιστογράμματος δεν είναι τόσο εμφανές αν οι τιμές της άμμου % ακολουθούν την κανονική κατανομή, οι τιμές όμως της κύρτωσης και ασυμμετρίας φανερώνουν την κανονική κατανομή των τιμών. Τέλος, αν και η τιμή της σημαντικότητας του Kolmogorov-Smirnov τεστ δεν είναι αρκετά μεγάλη είναι ικανή όμως να τεκμηριώσει ότι η κατανομή των τιμών της άμμου (%) δεν διαφέρει σημαντικά από την κανονική.

Πίνακας 3.19. Έλεγχος κανονικότητας Άμμου (%).

Έλεγχος κανονικότητας Άμμου %	
Συντελεστής ασυμμετρίας (skewness)	-0,08
Συντελεστής κύρτωσης (kurtosis)	-1,35
Kolmogorov - Smirnov Z	1,15
Asymp. Sig. (2-tailed)	0,142

Για την εφαρμογή των δυο παραλλαγών της μεθόδου Co-kriging αρχικά προσδιορίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των τιμών της ύψος και των τοπογραφικών ιδιοτήτων, οι τιμές του οποίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.20.

Πίνακας 3.20. Συντελεστές συσχέτισης Άμμου (%) και τοπογραφικών ιδιοτήτων.

Άμμος (%)		Elevation				Slope			
	cell_size (m ²)	5x5	10x10	15x15	20x20	5x5	10x10	15x15	20x20
	Pearson Correlation	-0,174	-0,173	-0,172	-0,170	-0,295	-0,353	-0,297	-0,310
	Sig. (2-tailed)	0,094	0,095	0,097	0,100	0,004	0,000	0,004	0,002
		Aspect				Plan			
	cell_size (m ²)	5x5	10x10	15x15	20x20	5x5	10x10	15x15	20x20
	Pearson Correlation	-0,129	-0,110	-0,138	-0,263	0,061	-0,172	-0,202	-0,125
	Sig. (2-tailed)	0,216	0,290	0,183	0,010	0,558	0,098	0,051	0,231
		Profile				Distance_river			
	cell_size (m ²)	5x5	10x10	15x15	20x20	5x5	10x10	15x15	20x20
Pearson Correlation	-0,127	0,009	0,045	0,135	-0,119	-0,119	-0,123	-0,119	
Sig. (2-tailed)	0,222	0,930	0,665	0,194	0,255	0,253	0,239	0,254	

Από τον Πίνακα 3.20 διαπιστώνουμε την ύπαρξη μέτριας συσχέτισης της άμμου (%) με την ιδιότητα της κλίσης. Πιο συγκεκριμένα ο συντελεστής συσχέτισης των τιμών της ύψους και της κλίσεως με μέγεθος κυψελίδας 10x10 μ. είναι αυτός που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στις μεθόδους του Co-kriging.

Πολλαπλή παλινδρόμηση

Η επιλογή του καλύτερου μοντέλου πολλαπλής παλινδρόμησης έγινε στο περιβάλλον του στατιστικού πακέτου SPSS και η εφαρμογή του με τη βοήθεια του ArcGIS 9.3 με την εντολή Ordinary Least Squares από το Spatial Analyst Tools. Το μοντέλο που επιλέχθηκε είχε συντελεστή προσδιορισμού R^2 0,107 και τα χαρακτηριστικά δίνονται στον Πίνακα 3.21.

Πίνακας 3.21. Συντελεστές πολλαπλής παλινδρόμησης Άμμου (%).

	Slope (10x10)	Constant
Coefficient	-0,528226	42,471858
Significance	0,004	0

Οι παράμετροι όλων των βαριογραμμμάτων που προσαρμόστηκαν στις γεωστατιστικές μεθόδους δίνονται στον Πίνακα 3.22, παρατηρούμε ότι σε όλα τα βαριογράμματα ο λόγος nugget/sill κυμαίνεται από 29-35 % γεγονός που αποδεικνύει την ισχυρή έως μέτρια χωρική εξάρτηση της εξεταζόμενης ιδιότητας.

Πίνακας 3.22. Παράμετροι θεωρητικών βαριογραμμμάτων της Άμμου (%).

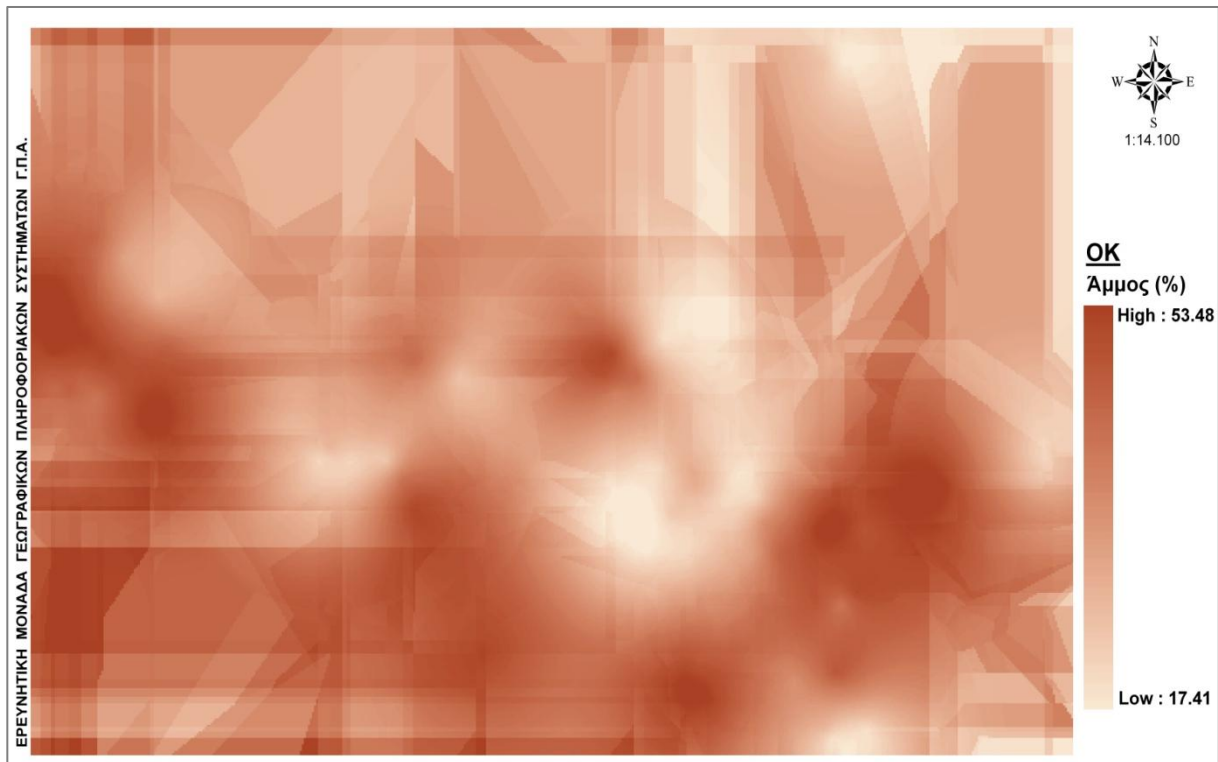
	Θεωρητικό Μοντέλο	Nugget	Όριο (Sill)	Εύρος (Range)	Nugget/Sill x100
OK	Spherical	52,611	153,17	532,878	34,35
ICK	Spherical	52,889	157	558,989	33,69
HCK	Spherical	46,62	161,01	544,382	28,95
RK-I / II (regressed values)	Exponential	5,012	15,683	439,372	31,96
RK-II / III (residuals)	Exponential	42,177	121,1	483,88	34,83

Kriging - Cokriging

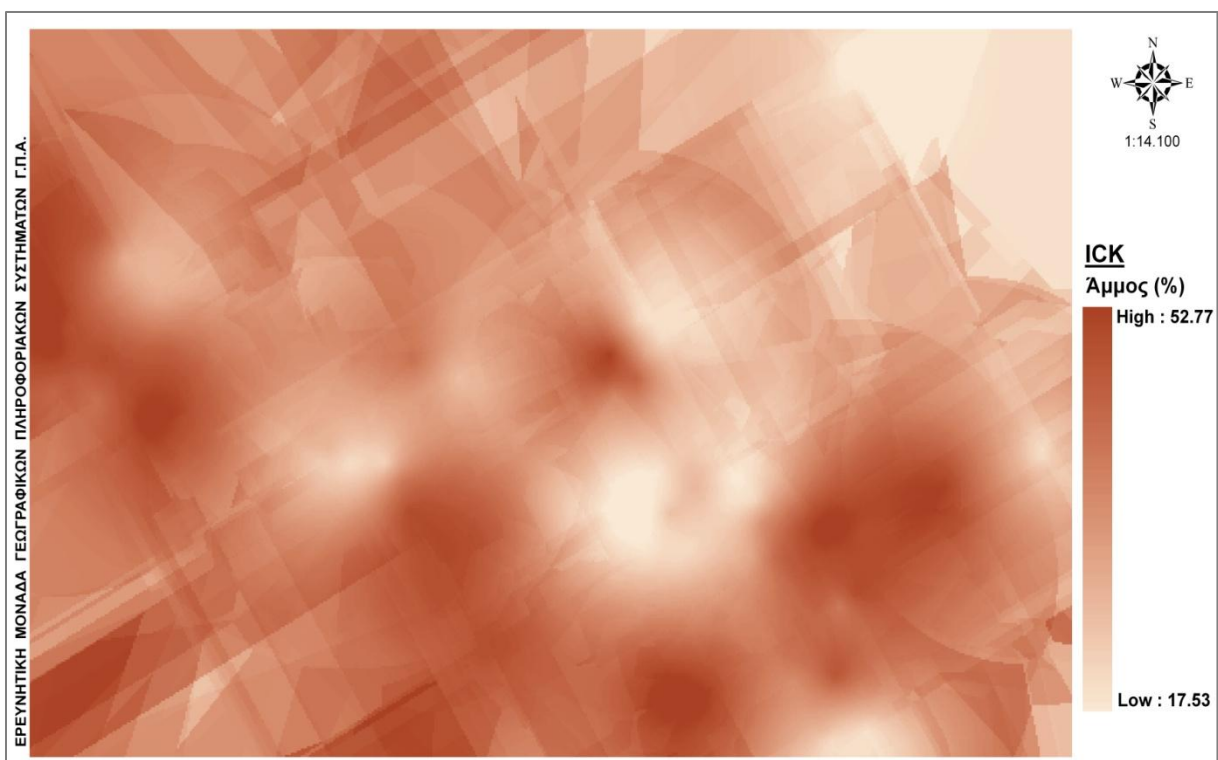
Στη μέθοδο του Ordinary Kriging και των δυο παραλλαγών του Cokriging χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη της τιμής σε κάθε σημείο οι τιμές 12 μέχρι 20 γειτονικών σημείων. Στη μέθοδο ICK και HCK, χρησιμοποιήθηκε επίσης σαν βοηθητική τοπογραφική ιδιότητα η κλίση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι δείκτες αξιολόγησης της πρόβλεψης που προέκυψαν από το cross validation (Πίνακας 3.23) καθώς και οι επιφάνειες πρόβλεψης της μεθόδου OK (Εικόνα 3.27), ICK (Εικόνα 3.28) και HCK (Εικόνα 3.29) αντίστοιχα.

Πίνακας 3.23. Δείκτες cross-validation των μεθόδων OK, ICK και HCK της Άμμου (%).

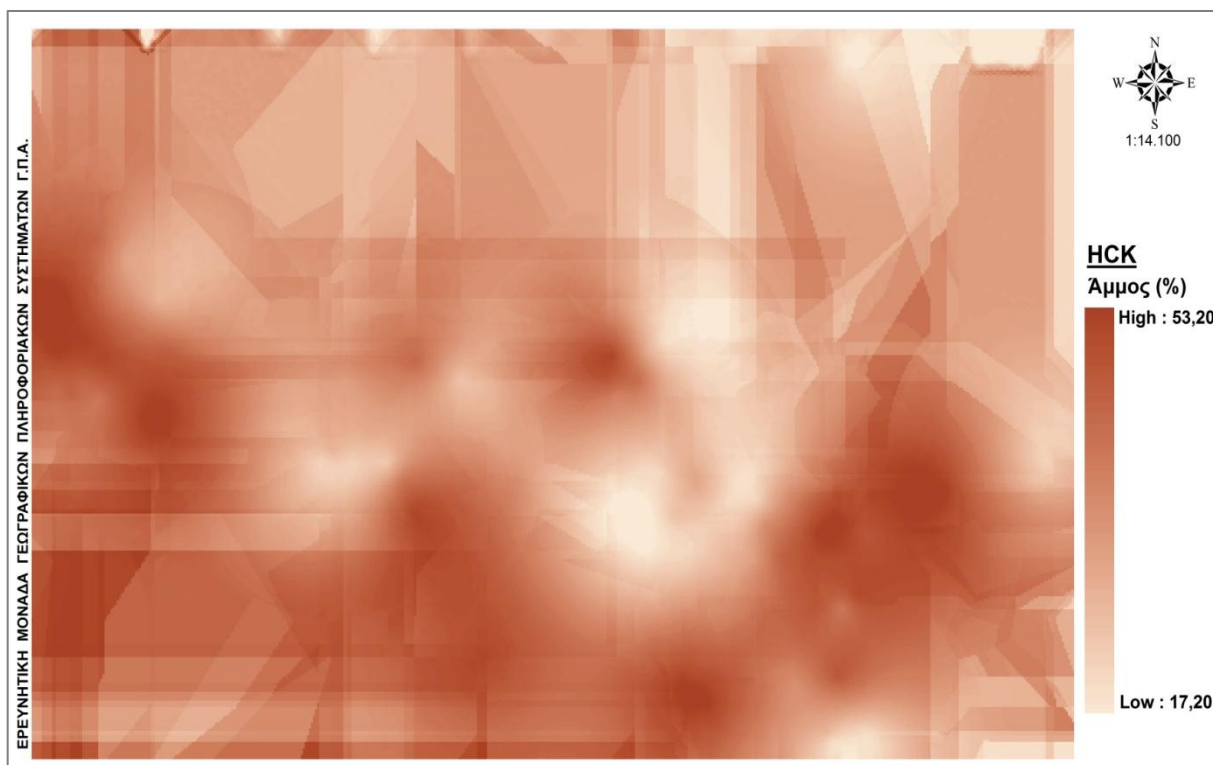
	ME	RMSE	ASE	MSPE	RMSS
OK	-0,04319	10,96	10,79	-0,00438	1,019
ICK	-0,04058	11,01	10,45	-0,00772	1,053
HCK	-0,00419	10,91	10,5	-0,00178	1,045



Εικόνα 3.27. Επιφάνεια πρόβλεψης της OK μεθόδου της Άμμου (%).



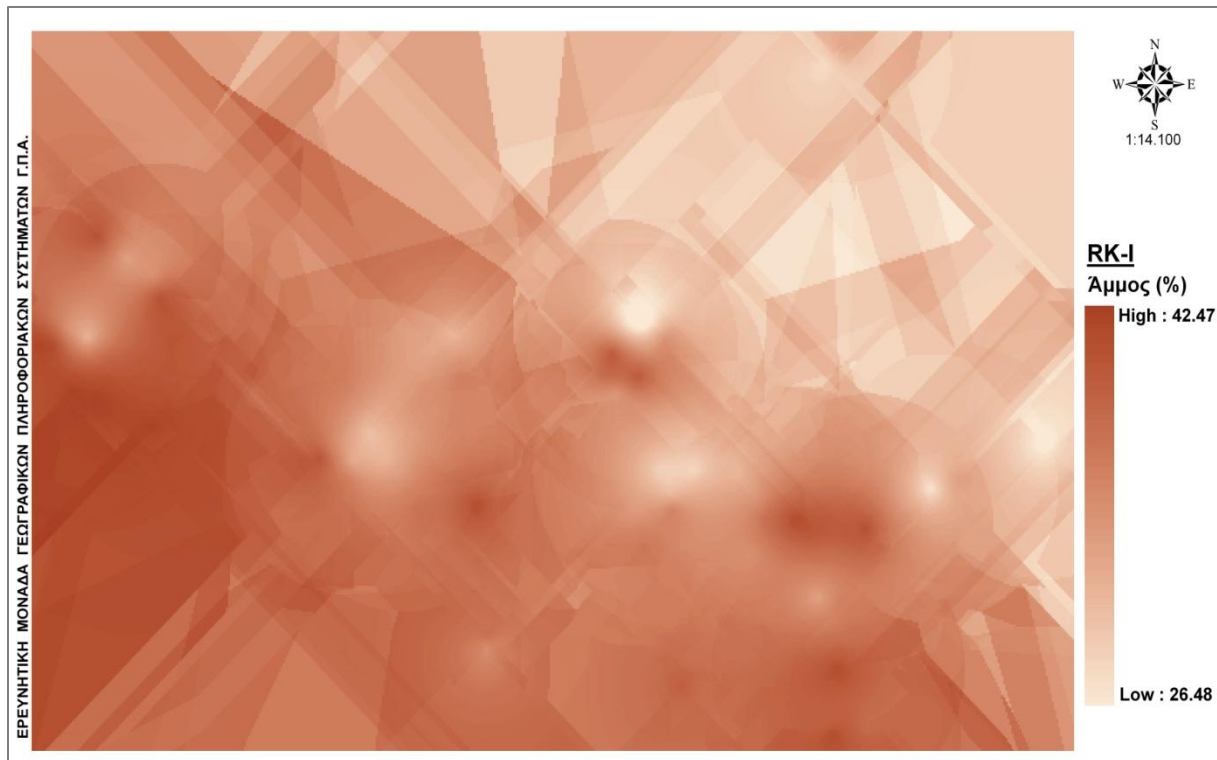
Εικόνα 3.28. Επιφάνεια πρόβλεψης της ICK μεθόδου της Άμμου (%).



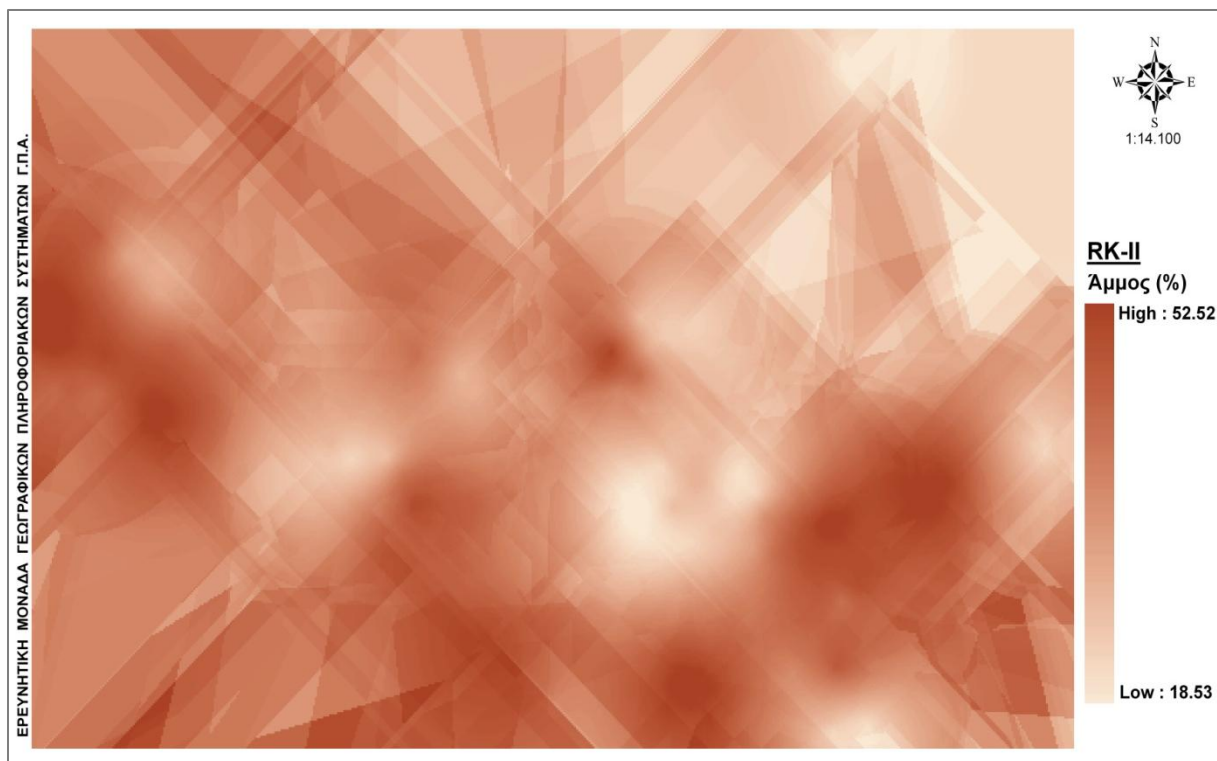
Εικόνα 3.29. Επιφάνεια πρόβλεψης της HCK μεθόδου της Άμμου (%).

Regression Kriging Models

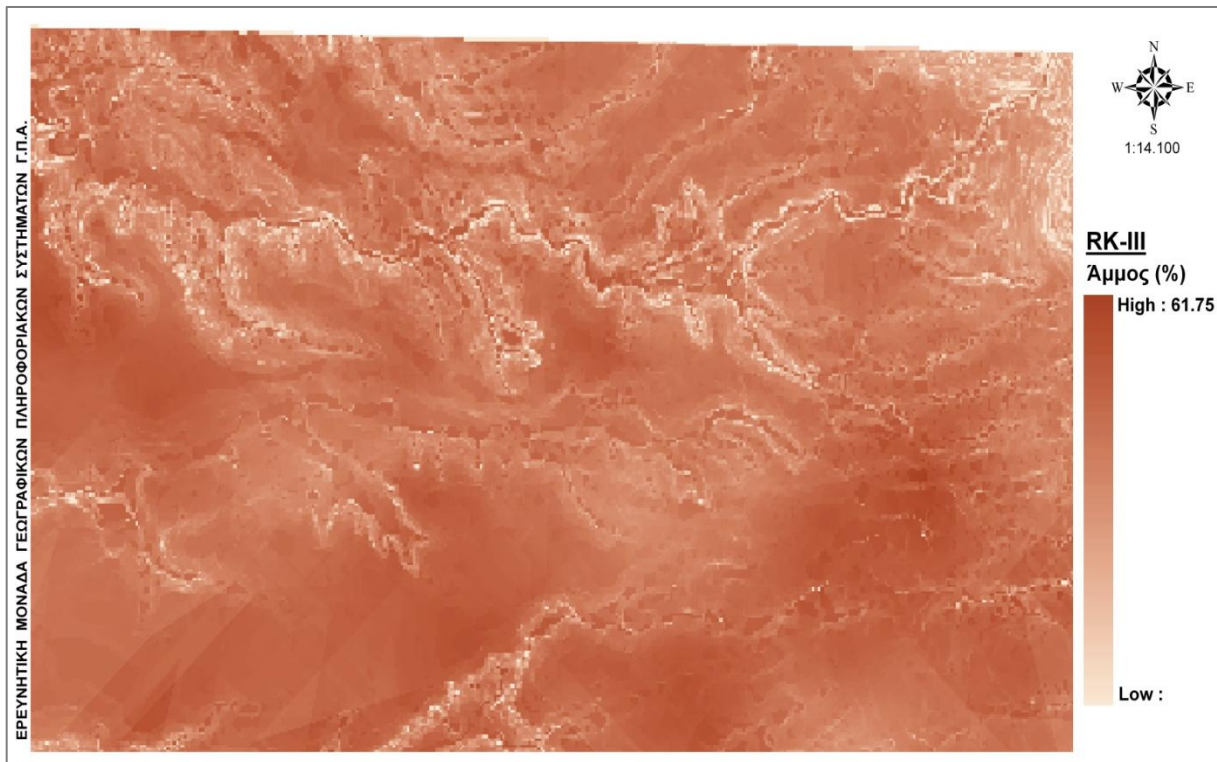
Οι επιφάνειες πρόβλεψης των μεθόδων Regression kriging model I, model II και model III παρουσιάζονται στις Εικόνες 3.30, 3.31 και 3.32 αντίστοιχα.



Εικόνα 3.30. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-I μεθόδου της Άμμου (%).

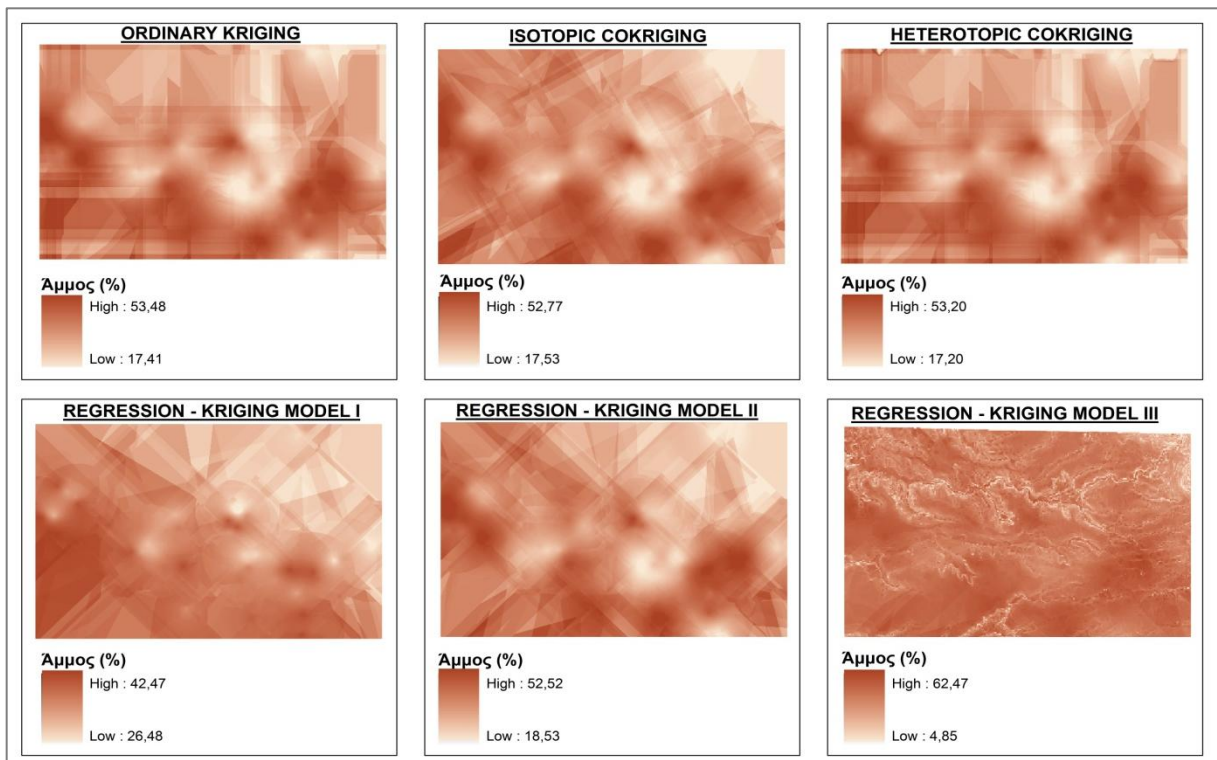


Εικόνα 3.31. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-II μεθόδου της Άμμου (%).



Εικόνα 3.32. Επιφάνεια πρόβλεψης της RK-III μεθόδου της Άμμου (%).

Στην Εικόνα 3.33 παρουσιάζονται συνοπτικά οι επιφάνειες πρόβλεψης των έξι γεωστατιστικών μεθόδων.



Εικόνα 3.33. Επιφάνειες πρόβλεψης Ιλύος (%) με χρήση γεωστατιστικών μεθόδων.

Στην Εικόνα 3.33 παρατηρούμε ότι στην επιφάνεια του ordinary kriging είναι ευδιάκριτες στο χώρο οι περιοχές που ταυτίζονται με σημεία δειγματοληψίας, με υψηλές τιμές και χαμηλές τιμές άμμου (%). Συγκρίνοντας τις επιφάνειες του cokriging (isotopic και heterotopic) παρατηρούμε ότι είναι παρόμοιες όσον αφορά τη χωρική κατανομή των τιμών της άμμου (%), αλλά η επιφάνεια του ετεροτοπικού cokriging είναι πιο λεπτομερής γιατί στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιήθηκαν πληροφορίες κλίσης από περισσότερα σημεία. Και στις δυο επιφάνειες είναι φανερή η αρνητική συσχέτιση άμμου και κλίσης αφού παρατηρούμε ότι οι υψηλότερες τιμές εστιάζονται στη Νότια πλευρά της περιοχής μελέτης που εμφανίζει οι μικρότερες τιμές κλίσης. Τέλος μελετώντας τις επιφάνειες των τριών παραλλαγών του Regression-kriging παρατηρούμε ότι υπάρχει αρκετή διαφοροποίηση μεταξύ τους η οποία βασίζεται στις αντίστοιχες διαφορές των μεθοδολογιών. Στην επιφάνεια της Regression kriging model I παρατηρούμε ότι υπάρχει μια ομαλοποίηση των τιμών, καθώς το εύρος των τιμών της άμμου (%) στην επιφάνεια είναι μικρό σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους αφού στη μέθοδο αυτή πραγματοποιείται ordinary kriging μόνο στις εκτιμούμενες από την παλινδρόμηση τιμές. Η επιφάνεια πρόβλεψης της Regression kriging model II δεν παρουσιάζει αρκετές διαφορές με την προηγούμενη μέθοδο αφού στο μοντέλο παλινδρόμησης που εφαρμόστηκε στις τιμές της άμμου (%) συμπεριλήφθηκε μόνο η ιδιότητα της κλίσης. Επομένως η διαφορά που παρατηρείται στο εύρος των τιμών της άμμου (%) οφείλεται στο ότι στη μέθοδο RK II πραγματοποιήθηκε OK στα υπόλοιπα της παλινδρόμησης. Τέλος στην επιφάνεια της τρίτης παραλλαγής regression-kriging (model III) παρουσιάζεται η μεγαλύτερη λεπτομέρεια και η χωρική κατανομή των τιμών της επιφανειακής άμμου έχει επηρεασθεί έντονα από τις τοπογραφικές παραμέτρους και ιδίως από τις τιμές της κλίσης.

Ο Πίνακας 3.24 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της σύγκρισης των μεθόδων παρεμβολής με το δείκτη Root Mean Square Error (RMSE) που υπολογίστηκε στο ανεξάρτητο σύνολο σημείων (test_ points) που δεν συμμετείχε στις διαδικασίες πρόβλεψης.

Πίνακας 3.24. Τιμές του δείκτη RMSE των μεθόδων πρόβλεψης της Άμμου (%).

Test_points	MLR	OK	ICK	HCK	RKI	RKII	RKIII
RMSE	10,43	6,137	6,027	6,157	10,01	6,148	9,99

4. ΣΥΣΜΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή της γεωστατιστικής ανάλυσης για την πρόβλεψη των επιλεγμένων εδαφικών ιδιοτήτων στην περιοχή μελέτης, μας αποκάλυψε σημαντικές πληροφορίες τόσο για τη χωρική διακύμανση των ιδιοτήτων του εδάφους, όσο και για τις μεθόδους Kriging. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι δείκτες RMSE όλων των μεθόδων και για τις τρεις εξεταζόμενες εδαφικές ιδιότητες.

Πίνακας 4.1. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.

RMSE	MLR	OK	ICK	HCK	RKI	RKII	RKIII
Άργιλος (%)	10,02	8,58	8,20	8,20	10,15	4,00	9,14
Ιλύς (%)	10,38	7,05	6,33	6,78	8,90	6,19	6,92
Άμμος (%)	10,43	6,14	6,15	6,16	10,01	6,03	9,99

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.1 η μέθοδος της Multilinear Regression καταλαμβάνει μία από τις χειρότερες θέσεις στην πρόβλεψη και των τριών ιδιοτήτων. Το γεγονός αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό αν λάβει κανείς υπόψη του ότι η μέθοδος της πολλαπλής παλινδρόμησης δεν ενσωματώνει στους υπολογισμούς της με κάποιο τρόπο το σφάλμα μέτρησης καθώς επίσης και τη χωρική συν-διακύμανση. Το τελευταίο βέβαια ισχύει και για τις Kriging μεθόδους. Τόσο η κανονική μέθοδος OK όσο και η RK παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα τα οποία χαρακτηρίζουν γενικότερα τις μεθόδους παρεμβολής Kriging. Η τοπική διακύμανση της υπό μελέτη εδαφικής ιδιότητας φαίνεται να ομαλοποιείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι μικρότερες τιμές να υπερ-εκτιμούνται και οι μεγαλύτερες τιμές να υπο- εκτιμούνται. Κρίσιμο παράγοντα για την ομαλοποίηση αυτή, αποτελεί η εφαρμογή μοντέλων στη διακύμανση τοπικά, ή αλλιώς η ακρίβεια του θεωρητικού ημιβαριογράμματος στις μικρότερες αποστάσεις του διανύσματος h . Παράλληλα το φαινόμενο αυτό της ομαλοποίησης εξαρτάται από την τοπική κατανομή των δειγματοληπτικών θέσεων στο χώρο (Laslett G.M. et al., 1987, Goovaerts P., 2000). Έτσι είναι μικρότερο στις πλησιέστερες των δειγματοληψιών θέσεις πρόβλεψης, ενώ αυξάνεται όσο η θέση πρόβλεψης απομακρύνεται από τις θέσεις των δεδομένων. Αυτή η ανισοκατανομή στο φαινόμενο της ομαλοποίησης οδηγεί στην εμφάνιση περιοχών με μικρότερη

διακύμανση εκεί όπου η πυκνότητα της δειγματοληψίας είναι μικρή, από ότι στις περιοχές όπου τα δείγματα είναι πιο πυκνά διατεταγμένα στο χώρο. Ως εκ τούτου, δεν εκπλήσσει το γεγονός ότι ένα από τα μοντέλα της RK ήταν αυτό που είχε την καλύτερη απόδοση στην πρόβλεψη και των τριών εδαφικών ιδιοτήτων. Οι μέθοδοι RK λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα λόγω της παλινδρόμησης καθώς και το σφάλμα της μέτρησης.

Η OK είναι μια τυπική μέθοδος που βασίζεται στις παρατηρήσεις των μεταβλητών-στις αντίστοιχες χωρικές τους θέσεις. Η ακρίβεια της εξαρτάται από τη χωρική εξάρτηση που εκφράστηκε από το μοντέλο του βαριογράμματος. Παρατηρώντας τον Πίνακα 4.1 διαπιστώνουμε μείωση του δείκτη RMSE της OK μεταξύ των τριών ιδιοτήτων.

Η μέθοδος CK χρησιμοποιεί τις τοπογραφικές ιδιότητες σαν βοηθητικές πληροφορίες και όπως παρατηρούμε στον Πίνακα 4.1 τόσο το ICK όσο και το HCK βελτιώνουν την πρόβλεψη σε σχέση με την OK μέθοδο. Διαπιστώνουμε επίσης ότι η ακρίβεια των μεθόδων CK βελτιώνεται καθώς αυξάνεται ο συντελεστής συσχέτισης της εδαφικής με την τοπογραφική ιδιότητα. Συγκεκριμένα στην ιλύ (%) που παρουσιάζει το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης με την κλίση (10x10) παρατηρούμε μεγαλύτερη βελτίωση της πρόβλεψης των μεθόδων ICK και HCK σε σχέση με την OK.

Θα περίμενε κανείς ότι οι τιμές του RMSE του HCK θα ήταν μικρότερες σε σχέση με του ICK λόγω των περισσότερων πληροφοριών που χρησιμοποιεί στην παρεμβολή το πρώτο. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στο HCK χρησιμοποιήθηκε πληροφορία της τοπογραφικής ιδιότητας και σε άλλα σημεία εκτός από τα σημεία που είχε μετρηθεί η εδαφική ιδιότητα καθώς και χωρική συν-διακύμανση των μεταβλητών. Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι εμφανές στα δεδομένα μας, πιθανώς εξαιτίας του μικρού ποσοστού συμβολής των τοπογραφικών μεταβλητών στις εδαφικές ιδιότητες.

Συνολικά παρατηρούμε ότι οι μέθοδοι του Regression kriging απέδωσαν καλύτερα όταν οι τοπογραφικές ιδιότητες επηρέαζαν σε μεγαλύτερο ποσοστό τις εδαφικές. Συγκεκριμένα όταν το R^2 ήταν μεγαλύτερο όπως στην ιλύ με τιμή 0,206 (έναντι 0,107 για την άργιλο και 0,137 για την άμμο) τότε ένα μεγαλύτερο μέρος της τιμής της εδαφικής ιδιότητας εξηγείται από τις τιμές των τοπογραφικών ιδιοτήτων με αποτέλεσμα οι μέθοδοι της RK να παρουσιάζουν μια αισθητή βελτίωση στην

πρόβλεψη της υλούς σε σχέση με τις άλλες δυο ιδιότητες. Έτσι οι μέθοδοι RK φάνηκε ότι βελτιώνουν την πρόβλεψη όταν μεγαλύτερο ποσοστό των εδαφικών ιδιοτήτων μπορούν να εξηγηθούν από τις τοπογραφικές ιδιότητες.

Η ακρίβεια της πρόβλεψης της RKI εξαρτάται από την προσαρμογή του μοντέλου παλινδρόμησης. Όπως αποκαλύπτεται από τον Πίνακα 4.1 το RMSE της RKI της υλούς ήταν μικρότερο σε σχέση με τις άλλες δύο ιδιότητες διότι το μοντέλο παλινδρόμησης της υλούς παρουσίαζε μεγαλύτερη προσαρμογή. Ενδεχομένως αν τα μοντέλα παλινδρόμησης παρουσίαζαν καλύτερη προσαρμογή τότε η μέθοδος RKI θα εμφάνιζε καλύτερα αποτελέσματα στην πρόβλεψη των ιδιοτήτων.

Η σύγκριση της RKII σε σχέση με τα άλλα μοντέλα, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 4.1, δείχνει μια σημαντική βελτίωση της πρόβλεψης του συνόλου των εξεταζόμενων εδαφικών ιδιοτήτων. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η πρόβλεψη της εδαφικής ιδιότητας προκύπτει σαν άθροισμα των εκτιμώμενων (Kriged) από την παλινδρόμηση τιμών και των εκτιμώμενων (Kriged) υπολοίπων αυτής (τα οποία θεωρούνται ως αβεβαιότητες). Ο παραπάνω τρόπος υπολογισμού της εκτιμώμενης τιμής αντισταθμίζει τη σχετική έλλειψη ευαισθησίας που παρουσιάζεται τόσο στην πολλαπλή παλινδρόμηση όσο και στις μεθόδους kriging όταν χρησιμοποιούνται χωριστά.

Το πλεονέκτημα της RK II βασίζεται στη δυνατότητα να επεκτείνει τη μέθοδο του kriging σε ένα ευρύτερο φάσμα, αυτών των τεχνικών παλινδρόμησης, και να επιτρέπει τη χωριστή ερμηνεία των δύο συνιστωσών τις οποίες παρεμβάλει. Η RKII, συνδυάζοντας αυτές τις δύο προσεγγίσεις καταφέρνει, με την παλινδρόμηση να ενσωματώσει την αιτία της διακύμανσης των εδαφικών τιμών που οφείλεται στις τοπογραφικές ιδιότητες και με το Ordinary kriging να ενσωματώσει τα υπόλοιπα, δηλαδή την ανεξήγητη διακύμανση των εδαφικών τιμών (Hengl et al., 2004).

Τέλος η μέθοδος RKIII όπως είναι φυσικό παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα από ότι η RKI αφού χρησιμοποιεί περισσότερες τοπογραφικές πληροφορίες, αλλά δεν είναι καλύτερη από την RKII λόγω της μέτρια σχετικά προσαρμογής των μοντέλων παλινδρόμησης (στην υλ με το μεγαλύτερο R^2 παλινδρόμησης έχουμε τις μικρότερες τιμές του RMSE της RKIII).

Σε γενικές γραμμές, οι μέθοδοι που εκμεταλλεύονται τη συσχέτιση μεταξύ των εδαφικών ιδιοτήτων και των τοπογραφικών μεταβλητών είναι πιο ακριβείς στην πρόβλεψη των ιδιοτήτων με μεγάλη συσχέτιση. Οι μέθοδοι αυτοί παρουσιάζουν εξομάλυνση στις προβλεπόμενες τιμές, ελαχιστοποιώντας έτσι την επίδραση του εύρους των τιμών στην απόδοση πρόβλεψη των Kriging μεθόδων που επωφελούνται της χωρικής συσχέτισης. Συγκεκριμένα η εισαγωγή της αβεβαιότητας (RKII) οδήγησε στην εξομάλυνση των προβλεπόμενων τιμών, εξ' ου και η μείωση του RMSE που προκύπτει. Η OK είναι κατώτερη από άποψη επιδόσεων πρόβλεψη σε σύγκριση με τις ICK και HCK, διότι όπως είναι γνωστό είναι πολύ ευαίσθητή στις διακυμάνσεις μικρής εμβέλειας (short-range variation) (Laslett and McBratney, 1990). Το ICK και HCK είχε καλύτερη απόδοση σε εδαφικές ιδιότητες που είχαν μεγαλύτερη συσχέτιση με τις τοπογραφικές ιδιότητες. Ενώ τέλος η RKII γενικά απέδωσε καλύτερα από όλες τις υπόλοιπες μεθόδους καθώς όπως προαναφέρθηκε ενσωματώνει την αβεβαιότητα της πρόβλεψης βελτιώνοντας την ακρίβεια αυτής.

Η χρήση των γεωστατιστικών μεθόδων χωρικής παρεμβολής έδειξε ότι βελτιώνει σημαντικά την πρόβλεψη της χωρικής κατανομής εδαφικών ιδιοτήτων ιδίως όταν λαμβάνονται υπόψη και άλλες μη εδαφολογικές ιδιότητες που επιδρούν όμως σημαντικά στη δημιουργία των εδαφικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης. Μάλιστα η συνδυασμένη χρήση εξισώσεων παλινδρόμησης για την εκτίμηση των τιμών εδαφικών ιδιοτήτων από τοπογραφικές ιδιότητες και της μεθόδου χωρικής παρεμβολής Kriging εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα και πρέπει πάντα να δοκιμάζεται σε ανάλογες περιπτώσεις. Η ακρίβεια των προβλέψεων πιθανόν να ήταν καλύτερη αν υπήρχε μεγαλύτερη συσχέτιση μεταξύ εδαφικών και τοπογραφικών ιδιοτήτων ή αν υπήρχε μεγαλύτερος αριθμός σημείων δειγματοληψίας. Δεν υπάρχει, ωστόσο, καλύτερη μέθοδος για όλες τις μεταβλητές. Κάθε περίπτωση θα πρέπει να εξετασθεί προσεκτικά πριν από τη λήψη απόφασης για την καλύτερη μέθοδο.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

Καλύβας, Δ., 1989. Μελέτη μεταβλητότητας εδαφολογικών ιδιοτήτων με τη βοήθεια της Γεωστατιστικής στην περιοχή Καρδίτσας, Μεταπτυχιακή διατριβή. Αθήνα.

Καλύβας, Δ., Τριαντακωνσταντής, Δ., Κόλλια Β. Χρησιμοποίηση Γεωμορφολογικών Δεδομένων για τη Βελτίωση της Χαρτογράφησης Εδαφικών Παραμέτρων. σελ. 167-177. 8^ο Πανελ. Εδαφολ. Συν., Καβάλα, 21-23 Σεπτεμβρίου 2000.

Καπαγερίδης Ι., 2006. Εισαγωγή στη Γεωστατιστική. Εκδόσεις Ίων. Αθήνα

Κόλλια – Κουσουρή Β, 2006. Γεωγραφικά Πληροφοριακά. Σημειώσεις διδασκαλίας. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Κόλλια – Κουσουρή Β., 2006. Σύγχρονες τεχνικές στην απογραφή των εδαφικών πόρων με χρήση Η/Υ. Σημειώσεις διδασκαλίας. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Κοσμάς, Κ., Δ. Καλύβας, Π. Δήμου, Χρ. Κολοβός, 2010. Χαρτογράφηση εδαφών περιοχών κοινότητας Μουζακίου Μεσσηνίας. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Μήτσιοις Ι., 1999. Εδαφολογία. Εκδόσεις Ζυμη1. Αθήνα.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

Akaike, H., 1969. Fitting autoregressive models for prediction. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*. 21: 243-247.

Akaike, H., 1973. Information theory and an extension of maximum likelihood principle. In *Second International Symposium on Information Theory* (Editors B.N. Petrov & F. Csaki), pp. 267-281. Akademia Kiado, Budapest.

Anselin, L., 1995. Local indicators of spatial association-LISA. *Geographical Anal.* 27: 93–115.

Bishop, T., McBratney, A., 2001. A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. *Geoderma*. 103 (1– 2):149–160.

Bourennane, H., King, D., 2003. Using multiple external drifts to estimate a soil variable. *Geoderma*. 114: 1– 18.

- Burgess, T.M., Webster, R., 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I The semi-variogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science*. 31: 334–341.
- Burrough, P.H., McDonnell, R.A., 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press.
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin, T.B., Karlen, D.K., Turco, R.F., Konopka, A.E., 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1501–1511.
- Chien, Y.L., Lee, D.Y., Guo, H.Y., Houn, K.H., 1997. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. *Soil Science*. 162: 291–297.
- Cliff, A.D., Ord, J.K., 1981. Spatial Processes. Pion, London, UK, 266 pp.
- Cressie, N.A.C., 1993. Statistics for Spatial Data. J.Wiley & Sons Inc.
- Davis, B.M., 1987. Uses and abuses of cross-validation in geostatistics. *Math. Geol.* 19: 241–248
- ERSI, 2008. ArcGIS. Redlands, California, USA
- Isaacs, E.H., Srivastava R.M., 1989. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York, pp 561.
- Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford Univ. Press, New York.
- Goovaerts, P., 1998. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biol. Fertl. Soils*. 27: 315-334.
- Goovaerts, P., 1999a. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*. 89 (1– 2): 1 – 45.
- Goovaerts, P., 1999b. Using elevation to aid the geostatistical mapping of rainfall erosivity. *Catena*. 34 (3–4): 227– 242.
- Goovaerts, P., 2000. Estimation or simulation of soil properties? An optimization problem with conflicting criteria. *Geoderma*. 97: 165-186.

- Graniero, P.A. and Price, J.S., 1999. The importance of topographic factors on the distribution of bog and health in a Newfoundland blanket bog complex. *Catena*. 36: 233-254.
- Groenigen, J.W., 2000. The influence of variogram parameters on optimal sampling schemes for mapping by kriging. *Geoderma*. 97: 223-236.
- Hengl, T., Heuvelink, G., Stein, A., 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression kriging. *Geoderma*. 122 (1–2): 75–93.
- Hengl, T., Heuvelink, G., Rossiter, D., 2007. About regression-kriging: From equations to case studies. *Computers & Geosciences*. 33:1301–1315
- Heuvelink, G.B.M., Webster R., 2001. Modelling soil variation: past, present, and future. *Geoderma*. 100: 269–301.
- Huijbregts, C.J., 1975. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: J.C. Davis and M.J. McCullagh, Editors, *Display and analysis of spatial data*, John Wiley. Pp 38-53
- Jenny, H. 1941. *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill, New York. 109p.
- Johnston, K., Ver Hoef, J.M., Krivoruchko, K., Lucas N., 2001. *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. Environmental Systems Research, Redlands, USA.
- Journel, A.G., Huijbregts, C.J., 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press (London).
- Kalivas, D.P., Kollias, V.J., 1999. Mapping topsoil clay content of a region in central Greece using two empirical methods. *Agr. Med.* 129: 117-127.
- Kalivas, D.P., Triantakostas, D.P., Kollias, V.J, 2002. Spatial prediction of two soil properties using topographic information. *Global Nest*. 4: 41-49.
- Kerry, R, Oliver, M.A., 2007. Determining the effect of asymmetric data on the variogram. II. Outliers. *Computers & Geosciences*. 33, 1233-1260.
- Knotters, M., Brus, D.J., Oude Voshaar, J.H., 1995. A comparison of kriging, cokriging and kriging combined with regression for spatial interpolation of horizon depth with censored observations. *Geoderma*. 67: 227-246.

- Kravchenko, A.N., Bullock, D.G., 1999. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *J. Agronomy*. 91: 393–400.
- Kravchenko, A.N., Robertson, G.P., 2007. Can topographical and yield data substantially improve total soil carbon mapping by regression kriging? *Agron. J.* 99: 12–17.
- Lalor, G., Zhang, C.S., 2001. Multivariate outlier detection and remediation in geochemical databases. *Science of the Total Environment*. 281: 99-109.
- Lark, R.M., 2000. Designing sampling grids from imprecise information on soil variability, an approach based on fuzzy kriging variance. *Geoderma*. 98: 35-39.
- Laslett, G.M., McBratney, A.B., 1990. Further comparison of spatial methods for predicting soil pH. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1553-1558.
- Laslett, G.M., McBratney, A.B., Pahl, P.J., Hutchinson, M.F., 1987. Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *J. Soil Sci.* 38: 325-341.
- Levine, N., 2004. CrimeStat III: a spatial statistics program for the analysis of crime incident locations. Ned Levine & Associates, Houston, TX, and the National Institute of Justice, Washington, DC.
- Li, B.G., Cao, J., Liu, W.X., Shen, W.R., Wang, X.J., Tao, S., 2006. Geostatistical analysis and kriging of Hexachlorocyclohexane residues in topsoil from Tianjin, China. *Environmental Pollution*. 142: 567-575.
- Lin, H.S., Wheeler, D., Bell, J., Wilding, L., 2005. Assessment of soil spatial variability at multiple scales. *Ecol. Model.* 182: 271–290.
- Lloyd, C.D., 2005. Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Greatn Britain. *Journal of Hydrology* 308 (1–4): 128–150.
- McBratney, A.B., Webster, R., 1983. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: V. Co-regionalization and multisampling strategy. *Journal of Soil Science*. 34: 137-162.
- McKenzie, N.J., Ryan, P.J., 1999. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*. 89: 67-94.

- Moore, I.D., Gessler, P.E., Nielsen, G.A., Peterson, G.A., 1993. Soil Attribute Prediction Using Terrain Analysis. *Soil Science .Soc Am.J.* 57: 443-452.
- Moran, P.A.P., 1948. The interpretation of statistical maps. *J. Roy. Statist. Soc. Ser. B* 10, 243–251.
- Odeh, I.O.A., McBratney, A.B., Chittleborough, D.J., 1994. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from digital elevation model. *Geoderma.* 63: 197-214.
- Odeh, I.O.A., McBratney, A.B., Chittleborough, D.J., 1995. Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic co-kriging and regression kriging. *Geoderma.* 67: 215-226.
- Ohlmacher, G.C., 2007. Planar curvature and landslide probability in regions dominated by earth flows and earth slides. *Engineering Geology.* 91: 117-134.
- Olea, R.A., 1991. Geostatistical glossary and multilingual dictionary. International Association for Mathematical Geology, Studies in Mathematical Geology Volume 3. Oxford University Press (New York), p 117
- Olea, R.A., 2006. A six-step practical approach to semivariogram modeling. *Stoch Environ Res Risk Assess.* 20: 307-318.
- Oliver, M.A., 1984. Soil Variation in the Wyre Forest: its Elucidation and Measurement. PhD Thesis, University of Birmingham.
- Ping, J.L., Green, C.J., Zartman, R.E., Bronson, K.F., 2004. Exploring spatial dependence of cotton yield using global and local autocorrelation statistics. *Field Crops Research.* 89: 219–236
- Robinson, T.P., Metternicht, G.I., 2005. Comparing the performance of techniques to improve the quality of yield maps. *Agricultural System* 85: 19–41.
- Sergent, M., Didier, M., Roger, P., Giuliana, D., 1995. Correct and incorrect use of multilinear regression. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems.* 27: 153-162.
- Smith, M.I., Goodchild, M.F., Longley, P., 2007. Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles Techniques and Software Tools. Winchelsea: Winchelsea Press.

- Soil Survey Staff, 1975. Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys, USDA Agriculture Handbook No. 436, Washington, DC
- Thompson, J.A., Bell, J.C., Butler, C.A., 2001. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil– landscape modeling. *Geoderma* 100: 67–89.
- Tiefelsdorf, M., Boots, B.N., 1995. The exact distribution of Moran's I. *Environment and Planning*, 27: 985-999.
- Tiefelsdorf, M., 1998. Some practical applications of Moran's I's exact conditional distribution. *Papers in Regional Science*. 77: 101-129.
- Voltz, M., Webster, R., 1990. A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. *Journal of Soil Science*. 41: 473–490
- Wackernagel, H., 1994. Cokriging versus kriging in regionalized multivariate data analysis. *Geoderma*. 62: 83-92.
- Wackernagel, H., 1995 *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications*. Springer, Berlin.
- Walker, J.P., Willgoose, G.R., 1999. On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology. *Water Resour. Res.* 7: 2259–2268.
- Webster R., McBratney, A.B., 1989. On the Akaike Information Criterion for choosing models for variograms of soil properties. *Journal of Soil Science*. 40: 493-496.
- Webster, R., Burgess, T.M., 1983. Spatial variation in soil and the role of kriging. *Agricultural Water Management*. 6: 111—122
- Webster, R., Oliver, M.A., 2001. *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley and Sons, Brisbane, Australia.
- Wei Wu, Yan Fan, Zhengyin Wang, Hongbin Liu, 2008. Assessing effects of digital model resolutions on soil-landscape correlations in a hilly area. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 126: 209–216.

- Yemefack, M., Rossiter, D.G., Njomgang, R., 2005. Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon. *Geoderma*. 125 (1–2): 117–143.
- Zevenbergen, L.W., Thorne, C.R., 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surf. Proc. and Landforms*. 12: 47–56.
- Zhang, C., Luo, L., Xu, W., Ledwith, V., 2008. Use of local Moran's I and GIS to identify pollution hotspots of Pb in urban soils of Galway, Ireland. *Science of Total Environment*. 398: 212–221.
- Zhang, W., Montgomery, D.R., 1994. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water Resour. Res.* 4: 1019–1028.
- Zhu, Q., Lin, H.S., 2010. Comparing Ordinary Kriging and Regression Kriging for Soil Properties in Contrasting Landscapes. *Pedosphere*. 20: 594–606.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΛΕΞΙΚΟ ΟΡΩΝ

Αλλουβιακές αποθέσεις: Υλικά όπως άμμος, ιλύς ή άργιλος που έχουν αποτεθεί σε μια περιοχή από ρέοντα ύδατα.

Άμμος: Κλάσμα εδάφους με κόκκους διαμέτρου 0,05-2,0 mm. Κύριο συστατικό των κόκκων άμμου είναι ο χαλαζίας. Αμμώδη εδάφη ονομάζονται τα εδάφη που περιέχουν 85% άμμο ή και περισσότερο και όχι περισσότερο από 10% άργιλο.

Ανόργανο έδαφος: Έδαφος που περιέχει κυρίως ανόργανο υλικό και μικρή περιεκτικότητα οργανικής ύλης. Το φαινόμενο ειδικό βάρος είναι μεγαλύτερο από εκείνο του οργανικού εδάφους.

Απορροή: Η βροχόπτωση που απομακρύνεται από μια περιοχή με τα ρυάκια ή τους ποταμούς. Το νερό που απομακρύνεται από την επιφάνεια του εδάφους και δεν εισέρχεται μέσα στο έδαφος ονομάζεται απορροή.

Αποσάθρωση: Όλες οι φυσικές και χημικές μεταβολές που παρατηρούνται σε πετρώματα ή άλλες αποθέσεις στην επιφάνεια ή πλησίον της επιφάνειας της γης από ατμοσφαιρικούς παράγοντες. Αυτές οι μεταβολές καταλήγουν στο διαμελισμό και αποσύνθεση των υλικών.

Αργλικές επικαλύψεις: Μια λεπτή επικάλυψη προσανατολισμένης αργίλου στην επιφάνεια ενός εδαφικού συσσωματώματος ή ενός πόρου.

Άργιλος: Κλάσμα εδάφους με κόκκους διαμέτρου <0,002 mm. Αργιλώδη ονομάζονται τα εδάφη που περιέχουν 40% ή περισσότερη άργιλο, λιγότερο από 45% άμμο και λιγότερο από 40% ιλύ.

Γεωβάση (Geodatabase): είναι μία βάση δεδομένων αποθήκευσης και διαχείρισης και παρουσίασης-εξόδου γεωγραφικών δεδομένων και περιγραφικών δεδομένων με χωρική αναφορά.

Γεωμορφή: Η διαμόρφωση της επιφάνειας της γης.

Γονιμότητα εδάφους: Η ικανότητα ενός εδάφους να προμηθεύσει θρεπτικά στοιχεία των φυτών, σε επαρκείς ποσότητες και σε κατάλληλη αναλογία, για την ανάπτυξη συγκεκριμένων φυτών όταν το φως, η υγρασία, η θερμοκρασία και άλλοι παράγοντες αυξήσεως είναι ευνοϊκοί.

Γ.Π.Σ. (G.I.S.): Είναι ένα ψηφιακό σύστημα για την εισαγωγή, αποθήκευση, έλεγχο, χειρισμό, ανάλυση και παρουσίαση δεδομένων που αναφέρονται σε κάποιο σημείο της Γης ή γενικά που έχουν γεωγραφική αναφορά.

Διαθέσιμη εδαφική υγρασία: Η ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί νερό διαθέσιμο στα φυτά. Συνήθως ορίζεται σαν η διαφορά μεταξύ της ποσότητας του εδαφικού νερού που συγκρατείται στο ισοδύναμο υγρασίας και του εδαφικού νερού στο σημείο μαράνσεως. Συνήθως εκφράζεται σε εκατοστά νερού ανά εκατοστό εδάφους.

Διακύμανση (Variance): ορίζεται ως το πηλίκο του αθροίσματος των τετραγώνων των λαθών (διαφορά μέσου όρου από κάθε τιμή) προς το σύνολο αυτών.

$$\sigma^2 = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{N}$$

Είναι δηλαδή το μέσο λάθος μεταξύ του μέσου όρου και των πραγματικών παρατηρήσεων. Το πρόβλημα με τη διακύμανση είναι ότι μας δίνει τη μέτρηση σε μονάδες στο τετράγωνο.

Διανυσματικά Δεδομένα (vector data): είναι ένα μοντέλο δεδομένων βασισμένο σε συντεταγμένες, το οποίο αναπαριστά τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά ως σημεία, γραμμές και πολύγωνα. Κάθε σημείο καταχωρείται με ένα ζεύγος συντεταγμένων ενώ οι γραμμές και τα πολύγωνα σαν ταξινομημένες λίστες ευθυγράμμων τμημάτων.

Διηθητικότητα: Η κίνηση του νερού μέσα στο επιφανειακό έδαφος σε αντίθεση με τον όρο διαπερατότητα που αναφέρεται στην κίνηση του νερού μέσα στις εδαφικές στρώσεις.

Δομή εδάφους: Η διευθέτηση των πρωτογενών εδαφικών κόκκων σε μεγαλύτερους κόκκους ή συσσωματώματα. Οι κύριες μορφές εδαφικής δομής είναι: η πλακοειδής, η πρισματική, η στυλοειδής, η κυβική και η κοκκώδης. Έδαφος χωρίς δομή είναι είτε το έδαφος που αποτελείται από ασύνδετους εδαφικούς κόκκους (όπως άμμος), είτε συμπαγής (όλοι οι εδαφικοί κόκκοι συνδέονται μεταξύ τους χωρίς ασυνέχεια).

Εδαφικός ορίζοντας: Μια στρώση εδάφους, περίπου παράλληλη προς την επιφάνεια του εδάφους, που έχει ευκρινή χαρακτηριστικά και είναι αποτέλεσμα των διεργασιών εδαφογένεσης.

Εδαφογένεση: Οι διεργασίες ή παράγοντες σχηματισμού του εδάφους από το συμπαγές μητρικό υλικό.

Έδαφος: Ένας φυσικός σχηματισμός που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της γης, από τα προϊόντα αποσάθρωσης των πετρωμάτων με τη μακρόχρονη επίδραση του κλίματος και των ζώντων οργανισμών. Είναι ένα φυσικό, ανοικτό σύστημα που δέχεται επιδράσεις από το περιβάλλον και επιδρά σε αυτό.

Ιλύς: Κλάσμα εδάφους με κόκκους διαμέτρου 0,05-0,002 mm. Ιλυώδη ονομάζονται τα εδάφη με 80% ή περισσότερη ιλύ και λιγότερο από 12% άργιλο.

Κοκκομετρική σύσταση εδάφους (Soil Texture): τα στερεά τεμαχίδια του εδάφους που έχουν διάμετρο μικρότερη των δύο χιλιοστών, διακρίνονται βάσει διαμέτρου σε τρεις κατηγορίες ή κλάσματα: την άμμο, την ιλύ και την άργιλο. Τα ποσοστά επί τοις εκατό κατά βάρος των τριών αυτών κλασμάτων εκφράζουν την κοκκομετρική (ή μηχανική) σύσταση του εδάφους.

Μέσος όρος (Mean): ορίζεται ως το ηλίκο του αθροίσματος των τιμών προς το σύνολο αυτών. Είναι η καλύτερη μέτρηση της κεντρικής τάσης και μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε αριθμητικές μεταβλητές (interval). Εάν έχουμε ένα σύνολο N αριθμητικών δεδομένων xi τότε ο μέσος όρος δίνεται από τον τύπο :

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}$$

Τέλος ο μέσος όρος είναι μια υποθετική τιμή που υπολογίζεται σε κάθε σύνολο δεδομένων και δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει μέσα στο σύνολο.

Μητρικό υλικό: Το ψαθυρό οργανικό και ανόργανο υλικό στο οποίο σχηματίζεται το έδαφος.

Πηλός: Εδαφικό υλικό που περιέχει 7-27% άργιλο, 28-50% ιλύ και λιγότερο από 52% άμμο.

Πλεγματικά Δεδομένα (Raster Data): χωρικό μοντέλο δεδομένων που ορίζει το χώρο σαν ακολουθία κυψελίδων (ή ψηφίδων) ίδιου μεγέθους, τοποθετημένες σε γραμμές και στήλες. Κάθε κυψελίδα περιέχει πληροφορία, μια χαρακτηριστική δηλαδή τιμή μιας ιδιότητας η οποία καταχωρείται μαζί με τις συντεταγμένες του

κέντρου της. Συνήθως κάθε κυψελίδα αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο της οθόνης του υπολογιστή.

Στράγγιση (Drainage): είναι η φυσική ή τεχνητή απομάκρυνση του επιφανειακού ή υπόγειου νερού από την επιφάνεια μιας περιοχής. Πολλά γεωργικά εδάφη χρειάζονται τη στράγγιση για να βελτιώσουν την παραγωγή ή για να διαχειριστούν τις παρεχόμενες ποσότητες νερού.

Συνεκτικότητα εδάφους: Η αίσθηση του εδάφους και η ευκολία με την οποία ένα κομμάτι εδάφους μπορεί να θρυμματισθεί με τα δάχτυλα.

Συντελεστής παραλλακτικότητας (Coefficient of variation): συχνά χρησιμοποιείται για να εκφράσει τη σχετική διαφορά δύο διαφορετικών δειγμάτων και δίνεται από τον τύπο:

$$CV = 100(\sigma/\bar{x})$$

Ταχύτητα διήθησης: Η ταχύτητα με την οποία το νερό διέρχεται από την επιφάνεια του εδάφους σε δεδομένη χρονική στιγμή. Εκφράζεται συνήθως σε cm/h.

Τυπική απόκλιση (Standard deviation): ορίζεται ως το τετράγωνο της διακύμανσης.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{N}}$$

Μας περιγράφει το πόσο καλά ο μέσος όρος περιγράφει τα δεδομένα. Μικρές τυπικές αποκλίσεις, σε σχέση με το μέσο όρο, δείχνουν ότι τα δεδομένα είναι κοντά στο μέσο όρο. Μια μεγάλη τυπική απόκλιση δείχνει ότι οι παρατηρήσεις είναι μακριά από το μέσο όρο.

Χαρτογράφηση εδαφών: Η απεικόνιση των εδαφικών μονάδων σε ένα χάρτη, δηλαδή είναι μια απογραφή της γεωγραφικής κατανομής των διαφόρων κατηγοριών εδαφών.

Χωρική Παρεμβολή (Interpolation): είναι η μέθοδος υπολογισμού τιμών των παραμέτρων σε θέσεις που δεν υπάρχουν μετρήσεις, χρησιμοποιώντας μετρήσεις που έχουν γίνει σε σημεία μέσα στην ίδια την περιοχή.