

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Γεωστατιστική ανάλυση λιγνιτικών δεδομένων
απο το Ορυχείο Καρδιάς του Λιγνιτικού Κέντρου
Δυτικής Μακεδονίας.

Ματενίδης Παναγιώτης

Εξεταστική Επιτροπή:

Καθ. Χριστόπουλος Διονύσιος (Επιβλέπων)

Δρ. Ρούμπος Χρήστος (ΔΕΗ, Γενική Διεύθυνση Ορυχείων)

Δρ. Παυλίδης Ανδρέας

9 Νοεμβρίου 2017, Χανιά

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό την χωρική μοντελοποίηση λιγνιτικού κοιτάσματος (αποθέματα λιγνίτη και θερμικό περιεχόμενο), καθώς και της θερμογόνου δύναμης με τη χρήση γεωστατιστικών μεθόδων. Στα πλαίσια της μοντελοποίησης πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση του κοιτάσματος ως προς την κατανομή του πάχους λιγνίτη, τη βαριογραφία και την ανισοτροπία. Η περιοχή μελέτης αποτελεί τμήμα του Ορυχείου Καρδιάς, το οποίο βρίσκεται στο Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας (Λ.Κ.Δ.Μ.). Η εκτίμηση των αποθεμάτων αναφέρεται σε οριοθετημένο τμήμα του Ορυχείου Καρδιάς, το οποίο αποτελεί περιοχή του απομένοντος κοιτάσματος.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε μέσω της γλώσσας προγραμματισμού R, η οποία παρέχει τη δυνατότητα στατιστικής ανάλυσης δεδομένων και παρουσίασης αποτελεσμάτων μέσω γραφημάτων. Για τη διεξαγωγή της γεωστατιστικής ανάλυσης αναπτύχθηκε κατάλληλος υπολογιστικός κώδικας βασισμένος σε εντολές και συναρτήσεις της R.

Στα πλαίσια της γεωστατιστικής ανάλυσης, αρχικά πραγματοποιήθηκε υπολογισμός των στατιστικών στοιχείων και κατασκευή ιστογράμματος για το σύνολο των δεδομένων (πάχος στρωμάτων λιγνίτη, κατώτερη θερμογόνος δύναμη και ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας). Στη συνέχεια έγινε εφαρμογή μετασχηματισμού Box-Cox στα δεδομένα λιγνίτη και ενεργειακής πυκνότητας, καθώς και αφαίρεση των χωρικών τάσεων, όπου αυτό κρίθηκε αναγκαίο (δεδομένα λιγνίτη). Έπειτα πραγματοποιήθηκε έλεγχος της χωρικής εξάρτησης των δεδομένων (στην ουσία των υπολοίπων μετά την αφαίρεση της τάσης) με τη χρήση του εμπειρικού βαριογράμματος για τα τρία σύνολα χωρικών δεδομένων. Κατόπιν σύγκρισης του τετραγωνικού σφάλματος που προκύπτει από την χρήση τριών θεωρητικών μοντέλων βαριογράμματος (εκθετικό, γκαουσιανό, σφαιρικό), έγινε επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου για προσαρμογή στο εμπειρικό βαριόγραμμα. Στα δεδομένα για το πάχος λιγνίτη και την θερμογόνο δύναμη, την καλύτερη προσαρμογή είχε το γκαουσιανό μοντέλο, ενώ για την ενεργειακή πυκνότητα έγινε επιλογή του εκθετικού. Επίσης πραγματοποιήθηκε έλεγχος ανισοτροπίας ο οποίος δεν κατέδειξε σημαντική ανισοτροπία για κανένα από τα εξεταζόμενα μεγέθη.

Βάσει των ανωτέρω χωρικών μοντέλων, εφαρμόστηκε η στοχαστική μέθοδος χωρικής παρεμβολής Κανονικού Kriging για την εκτίμηση του πάχους των στρωμάτων λιγνίτη σε διδιάστατο κάναβο. Ομοίως η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για την εκτίμηση των αποθεμάτων θερμικού περιεχομένου και της θερμογόνου δύναμης. Η εκτίμηση των αποθεμάτων λιγνίτη με εφαρμογή της μεθόδου Kriging ανέρχεται σε 164 Mt. Ωστόσο, ο έλεγχος της εκτίμησης αποκαλύπτει σημαντικό συστηματικό σφάλμα που αντιστοιχεί σε υποεκτίμηση των αποθεμάτων, δεδομένης της υψηλής αρνητικής τιμής του μέσου σφάλματος. Ο υπολογισμός των αποθεμάτων θερμικού περιεχομένου πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Κανονικού Kriging και οδήγησε σε εκτίμηση 278Pcal ή 240.917 GWh. Η εκτίμηση των αποθεμάτων θερμικού περιεχομένου με τη μέθοδο Kriging αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο για την εκμετάλλευση, καθώς παρέχει στοιχεία για περαιτέρω αξιολόγηση του κοιτάσματος.

Η παρουσία συστηματικού σφάλματος οδηγεί σε προτάσεις για μελλοντική έρευνα, όπως η εφαρμογή υπέρθεσης χωρικών μοντέλων βαριογράμματος η οποία μπορεί να βελτιώσει την εκτίμηση και να μειώσει τόσο το συστηματικό όσο και το στατιστικό σφάλμα, η επιλογή μη στάσιμων χωρικών μοντέλων και μεθόδων εκτίμησης, και τέλος η δημιουργία χωρικού μοντέλου σε τριδιάστατο κάναβο με δυνατότητα ανάλυσης διαφορετικών βαθμίδων.

Ευχαριστίες

Για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας οφείλω να απευθύνω θερμές ευχαριστίες σε όσους με βοήθησαν με την υποστήριξη και την καθοδήγησή τους. Αρχικά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Διονύσιο Χριστόπουλο για την άψογη συνεργασία, τις πολύτιμες συμβουλές του, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς την παρούσα εργασία και την ευκαιρία να μελετήσω το πεδίο της γεωστατιστικής. Επίσης ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Δρ. Ρούμπο Χρήστο Διευθυντή Κλάδου Μεταλλευτικών Μελετών της ΔΕΗ για την συνεργασία, την παροχή των απαραίτητων πληροφοριών, τις χρήσιμες υποδείξεις και παρατηρήσεις του, καθώς και για την γενικότερη συμβολή του στην εκπόνηση της εργασίας. Η βιομηχανική του εμπειρία συνέβαλε αποφασιστικά στη διευκρίνιση σημαντικών θεμάτων της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ανδρέα Παυλίδη για την πολύτιμη βοήθεια που παρείχε καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής. Την κ. Βασιλική Άγου και όλα τα μέλη του εργαστηρίου γεωστατιστικής για τη βοήθειά τους στην εκμάθηση της γλώσσας R και τη συμβολή τους στην επίλυση των ζητημάτων που προέκυψαν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου παρείχε τα χρόνια των σπουδών μου καθώς και τους φίλους που ήταν κοντά μου.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας	1
1.2	Γαϊάνθρακας	2
1.2.1	Γαϊάνθρακες στην Ελλάδα	4
1.2.2	Εκμετάλλευση Γαϊανθράκων	4
1.3	Περιγραφή του Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας	6
1.3.1	Περιγραφή Ορυχείου Καρδιάς	7
1.3.2	Λιγνιτικά Αποθέματα Λ.Κ.Δ.Μ.	9
1.3.3	Μέθοδος Εκμετάλλευσης-Εξόρυξης στο Λ.Κ.Δ.Μ.	10
1.4	Ποιοτικά Χαρακτηριστικά Λιγνιτών.	13
2	Θεωρητικό Υπόβαθρο	14
2.1	Βασικές Έννοιες Τυχαίων Πεδίων	14
2.1.1	Τυχαιότητα	14
2.1.2	Τυχαία Μεταβλητή - Τυχαίο Πεδίο	15
2.1.3	Στατιστική Ομοιογένεια	16
2.1.4	Στατιστική Ισοτροπία	16
2.1.5	Μέση Τιμή	17
2.1.6	Διασπορά	17
2.1.7	Τυπική Απόκλιση	18
2.1.8	Κατηγορίες Σφαλμάτων	18
2.2	Συνάρτηση Συνδιασποράς	18
2.2.1	Μοντέλα Συνδιασποράς	19
2.2.2	Βασικές Παράμετροι Συνδιασποράς	20
2.2.3	Κριτήρια Αποδοχής	20
2.3	Χωρική Εξάρτηση	21
2.3.1	Βαριόγραμμα	21
2.3.2	Βαριόγραμμα σε Στάσιμο ή Μη Πεδίο	22
2.3.3	Μοντέλα Βαριόγραμματος	23
2.3.4	Κριτήρια Αποδοχής	24
2.4	Εκτίμηση Τυχαίου Πεδίου (kriging)	25
2.4.1	Απλό Kriging	26
2.4.2	Κανονικό Kriging	28
2.4.3	Επιλογή Γειτονιάς Συσχέτισης	30

2.5	Επιβεβαίωση Χωρικών Μοντέλων	30
2.6	Μετασχηματισμός Box-Cox	31
2.7	Θερμικό περιεχόμενο	32
2.8	Υπολογισμός Λιγνιτικών Αποθεμάτων	32
3	Γεωστατιστική Ανάλυση Δεδομένων	33
3.1	Στατιστική Ανάλυση Δεδομένων	34
3.2	Θέσεις Γεωτρήσεων στον Χώρο	38
3.3	Εμπειρικό Βαριόγραμμα	39
3.3.1	Αφαίρεση Τάσεων	39
3.4	Προσαρμογή Θεωρητικών Μοντέλων	42
3.5	Έλεγχος Ανισοτροπίας	48
3.6	Επιβεβαίωση Χωρικού Μοντέλου	52
3.7	Εκτίμηση Αποθεμάτων με τη μέθοδο του kriging	53
3.8	Υπολογισμός Λιγνιτικών Αποθεμάτων	54
3.9	Υπολογισμός Αποθεμάτων θερμικού περ. με kriging	56
3.10	Χωρική παρεμβολή (kriging) στα δεδομένα της θερμογόνου	59
4	Συμπεράσματα-Προτάσεις	61
	Παράρτημα - Κώδικας στη γλώσσα προγραμματισμού R	63

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Χάρτης με την τοποθεσία του Λ.Κ.Δ.Μ. και τα όρια του Ορυχείου Καρδιάς . . .	7
1.2	Χάρτης δραστηριοτήτων ανα περιοχή στο Ορυχείο Καρδιάς	8
3.1	Ιστόγραμμα των δεδομένων του πάχους λιγνίτη πριν/μετά το Box-Cox . . .	34
3.2	Ιστόγραμμα των δεδομένων του θερ. περιεχομένου πριν/μετά το Box-Cox . .	35
3.3	Ιστόγραμμα των δεδομένων της θερμογόνου	36
3.4	Γράφημα με τις θέσεις των γεωτρήσεων.	38
3.5	Διάγραμμα κανονικής πιθανότητας πριν και μετά την αφαίρεση της τάσης, για να εξετασθεί αν τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή. Οι κύκλοι αντιστοιχούν στις τιμές των δεδομένων, οι οποίες απεικονίζονται στο άξονα y . Στον άξονα x απεικονίζονται οι θεωρητικές τιμές της κατανομής. Η ευθεία γραμμή του διαγράμματος αντιστοιχεί στην κανονική κατανομή	39
3.6	Απεικόνιση του εμπειρικού βαριόγραμματος πριν την αφαίρεση τάσης, Στον άξονα x απεικονίζεται η απόσταση σε km και στον άξονα y το πάχος μετά την αφαίρεση της τάσης σε m	40
3.7	Απεικόνιση του εμπειρικού βαριόγραμματος μετά την αφαίρεση της τάσης, Στον άξονα x απεικονίζεται η απόσταση σε km και στον άξονα y το πάχος του λιγνίτη σε m	41
3.8	Απεικόνιση των τριών δοκιμών που έγιναν για το πάχος του λιγνίτη για την προσαρμογή κατάλληλου θεωρητικού μοντέλου (σφαιρικό, γκαουσιανό, εκθετικό). Το διάγραμμα των θεωρητικών προτύπων ξεκινάει ακριβώς πάνω στον άξονα των y , στον οποίο αντιστοιχούν οι τιμές του πάχους του λιγνίτη σε m. Στον άξονα x απεικονίζονται οι αποστάσεις, που υπολογίζεται το βαριόγραμμα σε km.	43
3.9	Απεικόνιση των τριών δοκιμών που έγιναν για τη θερμογόνο για την προσαρμογή κατάλληλου θεωρητικού μοντέλου (σφαιρικό, γκαουσιανό, εκθετικό). Το διάγραμμα των θεωρητικών προτύπων ξεκινάει ακριβώς πάνω στον άξονα των y , στον οποίο αντιστοιχούν οι τιμές της θερμογόνου σε ϵ (kcal/kg) ² . Στον άξονα x απεικονίζονται οι αποστάσεις, που υπολογίζεται το βαριόγραμμα σε km.	45

3.10 Απεικόνιση των τριών δοκιμών που έγιναν για το θερμικό περιεχόμενο για την προσαρμογή κατάλληλου θεωρητικού μοντέλου (σφαιρικό, γκαουσιανό, εκθετικό). Το διάγραμμα των θεωρητικών προτύπων ξεκινάει ακριβώς πάνω στον άξονα των y , στον οποίο αντιστοιχούν οι τιμές του θερμικού περιεχομένου σε $(\text{Gcal/m}^2)^2$. Στον άξονα x απεικονίζονται οι αποστάσεις, που υπολογίζεται το βαριόγραμμα σε km.	47
3.11 Διάγραμμα με τα κατευθυντικά βαριογράμματα, που υπολογίστηκαν για τον έλεγχο της ανισοτροπίας στο λινγίτη στις κατευθύνσεις 0° , 45° , 90° , 135°	48
3.12 Διάγραμμα με τα κατευθυντικά βαριογράμματα, που υπολογίστηκαν για τον έλεγχο της ανισοτροπίας στη θερμογόνο στις κατευθύνσεις 0° , 45° , 90° , 135°	50
3.13 Διάγραμμα με τα κατευθυντικά βαριογράμματα, που υπολογίστηκαν για τον έλεγχο της ανισοτροπίας στη θερμικό στις κατευθύνσεις 0° , 45° , 90° , 135°	51
3.14 Χάρτης kriging με τις εκτιμήσεις του πάχους από τον οποίο γίνεται ο υπολογισμός των αποθεμάτων λινγίτη	55
3.15 Χάρτης με τα σφάλματα των εκτιμήσεων του kriging για το πάχος του λινγίτη	56
3.16 Χάρτης kriging με τις εκτιμήσεις του θερμικού περιεχομένου που γίνεται ο υπολογισμός των αποθεμάτων	58
3.17 Χάρτης με τα σφάλματα των εκτιμήσεων του kriging για το θερμικό περιεχόμενο	58
3.18 Χάρτης kriging με τις εκτιμήσεις της θερμογόνου	59
3.19 Χάρτης με τα σφάλματα των εκτιμήσεων του kriging για τη θερμογόνο . . .	60

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Ανάπτυξη Ορυχείων Πτολεμαΐδας και αντίστοιχα εκμεταλλεύσιμα λιγνιτικά αποθέματα.	9
1.2	Χαρακτηριστικά επιφανειακής μεθόδου εκμετάλλευσης.	10
1.3	Ποιοτικά Χαρακτηριστικά Ελληνικού λιγνίτη ανα τοποθεσία.	13
3.1	Στατιστικά για το πάχος (m) του λιγνίτη στο Ορυχείο Καρδιάς	37
3.2	Στατιστικά για τη θερμογόνο ((kcal/kg) ²) στο Ορυχείο Καρδιάς	37
3.3	Στατιστικά για το θερμικό περιεχόμενο ((Gcal/m ²) ²) στο Ορυχείο Καρδιάς .	37
3.4	Στατιστικά μεγέθη γεωτρήσεων	38
3.5	Τιμές των συντελεστών του μοντέλου τάσης.	41
3.6	Τιμές των τετραγωνικών σφαλμάτων για το πάχος του λιγνίτη, που υπολογίστηκαν για την επιλογή του κατάλληλου θεωρητικού μοντέλου, ώστε να προσαρμοστεί στο εμπειρικό βαριόγραμμα	42
3.7	Τιμές των παραμέτρων που προκύπτουν από την προσαρμογή του γκαουσιανού θεωρητικού μοντέλου στο εμπειρικό βαριόγραμμα, όπως υπολογίστηκε από το πάχος του λιγνίτη	44
3.8	Τιμές των τετραγωνικών σφαλμάτων για τη θερμογόνο που υπολογίστηκαν για την επιλογή του κατάλληλου θεωρητικού μοντέλου, ώστε να προσαρμοστεί στο εμπειρικό βαριόγραμμα	44
3.9	Τιμές των παραμέτρων που προκύπτουν από την προσαρμογή του γκαουσιανού θεωρητικού μοντέλου στο εμπειρικό βαριόγραμμα, όπως υπολογίστηκε για τη θερμογόνο	46
3.10	Τιμές των τετραγωνικών σφαλμάτων για το θερμικό περιεχόμενο που υπολογίστηκαν για την επιλογή του κατάλληλου θεωρητικού μοντέλου, ώστε να προσαρμοστεί στο εμπειρικό βαριόγραμμα	46
3.11	Τιμές των παραμέτρων που προκύπτουν από την προσαρμογή του εκθετικού θεωρητικού μοντέλου στο εμπειρικό βαριόγραμμα, όπως υπολογίστηκε για το θερμικό περιεχόμενο	47

3.12 Τιμές των παραμέτρων που προκύπτουν από την προσαρμογή του γκαουσιανού θεωρητικού μοντέλου στα εμπειρικά κατευθυντικά βαριογράμματα για το πάχος του λιγνίτη	49
3.13 Τιμές των παραμέτρων που προκύπτουν από την προσαρμογή του γκαουσιανού θεωρητικού μοντέλου στα εμπειρικά κατευθυντικά βαριογράμματα για τη θερμογόνο	49
3.14 Τιμές των παραμέτρων που προκύπτουν από την προσαρμογή του εκθετικού θεωρητικού μοντέλου στα εμπειρικά κατευθυντικά βαριογράμματα για το θερμικό περιεχόμενο	50
3.15 Τιμές των μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν για γίνει η επαλήθευση της μεθόδου του βαριογράμματος για το πάχος του λιγνίτη. Τα μεγέθη είναι το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (Root Mean Square Error (RMSE)), το Μέσο Σφάλμα (Mean Error (ME)), το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error (MAE)) και ο Συντελεστής Συσχέτισης Pearson(Pearson's Correlation Coefficient (ρ))	52
3.16 Τιμές των μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν για γίνει η επαλήθευση της μεθόδου του βαριογράμματος για τη θερμογόνο. Τα μεγέθη είναι το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (Root Mean Square Error (RMSE)), το Μέσο Σφάλμα (Mean Error (ME)), το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error (MAE)) και ο Συντελεστής Συσχέτισης Pearson(Pearson's Correlation Coefficient (ρ))	53
3.17 Τιμές των μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν για γίνει η επαλήθευση της μεθόδου του βαριογράμματος για το θερμικό περιεχόμενο. Τα μεγέθη είναι το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (Root Mean Square Error (RMSE)), το Μέσο Σφάλμα (Mean Error (ME)), το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error (MAE)) και ο Συντελεστής Συσχέτισης Pearson(Pearson's Correlation Coefficient (ρ)).	53

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Η διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό την χωρική μοντελοποίηση λιγνιτικού κοιτάσματος (αποθέματα λιγνίτη και θερμιδικό περιεχόμενο), και της θερμογόνου δύναμης με τη χρήση γεωστατιστικών μεθόδων. Στο σκοπό περιλαμβάνεται επίσης η διερεύνηση του κοιτάσματος ως προς τη κατανομή του πάχους λιγνίτη, τη βαριογραφία και την ανισοτροπία. Παράλληλα, στους γενικότερους στόχους της διπλωματικής, εντάσσεται η εκμάθηση της γλώσσας προγραμματισμού R σε συνδυασμό με την απόκτηση ικανότητας για εφαρμογές στατιστικής ανάλυσης δεδομένων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο της σημαντικής συνεργασίας του Εργαστηρίου Γεωστατιστικής με τις Υπηρεσίες και το ερευνητικό προσωπικό της Γενικής Διεύθυνσης Ορυχείων της Δ.Ε.Η.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνουν στοιχεία γεωτρήσεων από την ευρύτερη περιοχή του τμήματος μελέτης του Ορυχείου Καρδιάς, το οποίο ανήκει στο Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας (Λ.Κ.Δ.Μ.). Το οριοθετημένο τμήμα, αποτελεί περιοχή του απομένοντος κοιτάσματος. Τα στοιχεία αποτελούνται από τρία σύνολα δεδομένων και αφορούν το πάχος λιγνίτη του κοιτάσματος, την θερμογόνο δύναμη και τη περιεχόμενη ενέργεια (θερμικό περιεχόμενο). Η εκτίμηση των αποθεμάτων περιεχόμενης ενέργειας (θερμικό περιεχόμενο) στο οριοθετημένο τμήμα μελέτης αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο για την εκμετάλλευση, καθώς δίνει την απαραίτητη γνώση για περαιτέρω αξιολόγηση του κοιτάσματος.

Για την διεξαγωγή γεωστατιστικής ανάλυσης και την επεξεργασία των δεδομένων, αναπτύχθηκε κατάλληλος υπολογιστικός κώδικας βασισμένος σε εντολές και συναρτήσεις της γλώσσας προγραμματισμού R. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με διάφορα πακέτα εντολών (automap, geoR, gstat) με τελικό στόχο την επιλογή του βέλτιστου πακέτου για περαιτέρω έρευνα. Απ' την επιλογή των πακέτων, το μεγαλύτερο μέρος της ανάλυσης εκτελέστηκε με το RGeostats, που δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των βαριογραμμάτων και του κανονικού kriging.

1.2 Γαιάνθρακας

Ο γαιάνθρακας είναι απο τις πιο σημαντικές ενεργειακές πρώτες ύλες σε παγκόσμιο επίπεδο. Κατά την εκμετάλλευσή του παρουσιάζονται περιβαλλοντικά προβλήματα, αλλά λόγω του χαμηλού κόστους που παρουσιάζει, προκαλεί έντονο ενδιαφέρον. Η επιστήμη της γεωστατιστικής έχει κυρίαρχο ρόλο στην εύρεση λύσεων των προβλημάτων αυτών, με την εκτίμηση των ποιοτικών τους χαρακτηριστικών όπως, περιεχόμενο σε θειούχα και τέφρα. Έτσι δίνεται η δυνατότητα να εφαρμοστούν τα κατάλληλα μέτρα για την αντιμετώπιση των προβλημάτων. Ακόμη είναι εύκολο να εκτιμηθεί η περιεκτικότητα ενός κοιτάσματος σε χρήσιμο συστατικό και με βάση αυτό, να υπολογιστεί η οικονομική του αξία.

Στην πρώτη φάση η φυτική ύλη υπέστη την αποσυνθετική δράση αναερόβιων μικροοργανισμών και μετατράπηκε σε τύρφη. Η τύρφη με τις προσχώσεις βρέθηκε στα βάθη της γης και λόγω των πιέσεων και των θερμοκρασιών που επικρατούν στα βάθη αυτά μετατράπηκε σταδιακά στις διάφορες μορφές του γαιάνθρακα. Υπο τις μορφές αυτές εξορύσσεται σήμερα σε ανοικτά ή υπόγεια ανθρακωρυχεία [1].

Η ταξινόμηση των γαιανθράκων είναι πολύ σημαντική για τις διεργασίες μετατροπής και παρέχει ένα χρήσιμο τρόπο αξιολόγησης της καταλληλότητας τους για συγκεκριμένες τελικές χρήσεις. Οι γαιάνθρακες μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τον τύπο, την τάξη και τον βαθμό. Οι διάφοροι τύποι γαιανθράκων ή η πετρογραφική τους ταξινόμηση, βασίζεται σε μακροσκοπικές και μικροσκοπικές παρατηρήσεις που αναγνωρίζουν διαφορές στη σύνθεση των γαιανθράκων, εξ' αιτίας των μεταβολών των αναλογιών και της κατανομής των διαφορών ενώσεων που περιέχουν.

Η ταξινόμηση κατά τάξη βασίζεται στον βαθμό ενανθράκωσης ή ωριμότητας των γαιανθράκων, που προκλήθηκε απο τη δράση της πίεσης και της θερμότητας,κατα το γεωχημικό στάδιο σχηματισμού τους. Κατα συνέπεια,η τάξη αντανakλά το βαθμό μεταμόρφωσης της φυτικής προέλευσης ουσιών των γαιανθράκων. Δεδομένου ότι η ενανθράκωση είναι ο σταδιακός εμπλουτισμός του γαιάνθρακα σε οργανικά συνδεδεμένο άνθρακα, όλοι οι γαιάνθρακες μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την περιεκτικότητα τους σε στοιχειακό άνθρακα σε μια ανιούσα κλίμακα σύμφωνα με την ακόλουθη σειρά : [1]

- **Τύρφη** έχει προκύψει από μικρή ενανθράκωση ποωδών φυτών, ελωδών περιοχών. Το χρώμα της ποικίλλει, ανάλογα με το pH του περιβάλλοντος ενανθράκωσης.
- **Λιγνίτες** περιέχουν μέχρι και 30% (C). Είναι καστανόμαυροι, με ξυλώδη υφή,στερούνται λάμψης και έχουν πολλά πτητικά.
- **Βιτουμενιούχοι γαιάνθρακες** περιέχουν μέχρι και 85% (C). Το χρώμα τους είναι μαύρο, με υαλώδη λάμψη και αποβάφουν στα δάκτυλα.
- **Άνθρακίτες** περιέχουν 92-95% (C) και 5-8% πτητικά συστατικά. Έχουν λάμψη, κογχοειδή θραύση και δεν αποβάφουν στα δάκτυλα.
- **Γραφίτης** είναι σχεδόν καθαρός άνθρακας (C) και προέρχεται από διαδικασίες μεταμόρφωσης. Έχει μικρή σκληρότητα (H=2, στην κλίμακα Mohs), λιπαρώδη υφή και γκριζόμαυρο χρώμα. Τα πτητικά του συστατικά <5%.

Με τη μετάβαση από την τύρφη στον ανθρακίτη αυξάνεται η θερμογόνος ικανότητα των ανθράκων, με συνέπεια να αυξάνεται η ποιότητά τους ως πηγή ενέργειας.

Σε τομή ενός κοιτάσματος, οι γαϊάνθρακες εμφανίζονται ως ενστρώσεις, ποικίλου πάχους (μερικά εκατοστά έως και μερικές δεκάδες μέτρα), οι οποίες εναλλάσσονται με ενστρώσεις, πλούσιες σε αργιλικά ιζήματα, ψαμμίτες και μάργες όπως παρουσιάζεται στην Εικ.1 και Εικ.2. Οι άνθρακες με χαμηλό βαθμό ενανθράκωσης, άρα πλούσιοι σε πτητικά συστατικά, καίγονται με καπνογόνο φλόγα και αντίστοιχα οι άνθρακες με υψηλό βαθμό ενανθράκωσης, καίγονται με φλόγα δίχως καπνό.



Εικ. 1

Οι φωτογραφίες είναι από το λιγνιτικό πεδίο της Πτολεμαΐδας. Διακρίνονται οι χαρακτηριστικές ενστρώσεις λιγνιτών, ποικίλου πάχους, οι οποίες εναλλάσσονται με ενστρώσεις, πλούσιες σε αργιλικά ιζήματα, ψαμμίτες και μάργες.



Εικ. 2

1.2.1 Γαιάνθρακες στην Ελλάδα

Η Ελλάδα διαθέτει σημαντικές ποσότητες λιγνιτικών κοιτασμάτων που η μέχρι σήμερα αξιοποίησή τους συμβάλλει αποφασιστικά στην ενεργειακή ανάπτυξη της χώρας μας. Οι γαιάνθρακες στην Ελλάδα όπως η τύρφη και ο λιγνίτης αποτελούν την κυριότερη πηγή της εγχώριας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο λιγνίτης είναι γαιάνθρακας χαμηλού βαθμού ενανθράκωσης. Η χρήση των λιγνιτών ως στερεή καύσιμη ύλη προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αντικατοπτρίζει τη σπουδαιότητα της άφθονης λιγνιτοφορίας στον Ελλαδικό χώρο. Όλοι οι γαιάνθρακες (τύρφη - λιγνίτης - υποβιτουμενιούχοι άνθρακες) που απαντούν είναι Καινοζωικής ηλικίας και αποτέθηκαν σε ενδοπαιρωτικές ή παράκτιες λεκάνες. Οι σπουδαιότερες λεκάνες στην Ελλάδα είναι εκείνες της Πτολεμαΐδας (Πτολεμαΐδα, Κομνηνά, Αγ.Χριστόφορος, Περδίκια) όπου εκεί βρίσκεται η περιοχή μελέτης. [19]

Η πρώτη εκμετάλλευση λιγνίτη στην χώρα μας άρχισε στο Αλιβέρι (Ευβοία) το 1873, αλλά μόνο μετά το 1950 έγινε εντατική εκμετάλλευσή του για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών.[18] Στη σημερινή εποχή, τα συνολικά γεωλογικά βεβαιωμένα αποθέματα λιγνίτη στη χώρα ανέρχονται σε 4,6 δις τόνους από τα οποία 2,9 δις τόνους εκτιμώνται ως εκμεταλλεύσιμα για την παραγωγή ενέργειας. Τα πιο σημαντικά λιγνιτικά αποθέματα βρίσκονται στο Βόρειο τμήμα της χώρας, στην περιοχή Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου και στη Φλώρινα. Τα δικαιώματα εκμετάλλευσης ανήκουν αποκλειστικά στη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.). [26]

Τα εκμεταλλεύσιμα λιγνιτικά αποθέματα στη συγκεκριμένη περιοχή ανέρχονται σε 1,5 δις τόνους, τα οποία συμβάλουν στο 80% της συνολικής παραγωγής στη χώρα. Επίσης στην περιοχή της Δράμας και της Ελλασόνας τα αποθέματα ανέρχονται σε 900 εκ. τόνους και 170 εκ. τόνους αντίστοιχα. Εκμεταλλεύσιμα λιγνιτικά αποθέματα απαντώνται και Νότια της χώρας στην περιοχή της Μεγαλόπολης όπου ανέρχονται σε 225 εκ. τόνους. Η ποιότητα του λιγνίτη χαρακτηρίζεται από τη Κατώτερη Θερμογόνο Δύναμη και στην Ελλάδα οι τιμές που περιέχει κυμαίνονται μεταξύ 900-1200 kcal/kg για την περιοχή της Μεγαλόπολης, 1800-2300 kcal/kg για την περιοχή της Φλώρινας και Ελλασόνας, καθώς και 1250- 1500 kcal/kg για τα λιγνιτωρυχεία της Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου. [26]

Μέχρι σήμερα έχει εξαντληθεί μόνο το 30% των λιγνιτικών αποθεμάτων και υπολογίζεται ότι επαρκούν για πάνω από 40 χρόνια. Το βάθος των αποθεμάτων λιγνίτη κατά μέσο όρο στον Ελλαδικό χώρο κυμαίνεται μεταξύ 150-200 m και η περιεκτικότητά τους σε θείο είναι χαμηλή.

Σήμερα ο λιγνίτης καλύπτει το 46,1% της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Το υπόλοιπο 53,9% καλύπτεται από πετρέλαιο (10,8%), φυσικό αέριο (13,6%), υδροηλεκτρική ενέργεια (11,7%), ανανεώσιμες πηγές (9,5%) και βιομάζα (0,5%). [26]

1.2.2 Εκμετάλλευση Γαιανθράκων

Η εκμεταλλευσιμότητα των λιγνιτικών κοιτασμάτων εκφράζεται κατά βάση με οικονομικά κριτήρια. Επηρεάζεται όμως και από άλλες παραμέτρους οι οποίες λαμβάνονται υπόψη στη λήψη ανάλογων αποφάσεων όπως η ασφάλεια και υγεία των εργαζομένων και η συμμόρφωση στην εκάστοτε ισχύοντα περιβαλλοντική νομοθεσία. Η ιδιομορφία των Ελληνικών λιγνιτικών κοιτασμάτων (εναλλαγές λιγνιτικών στρωμάτων ποικίλου πάχους με στρώματα στείρων υλικών), σε συνδυασμό με τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τη μέθοδο εκμετάλλευσης, οδήγησε στη θέσπιση και εφαρμογή συγκεκριμένων κανόνων αξιολόγησης κατά το στάδιο της κοιτασματολογικής μελέτης αυτών, που βασίζονται κυρίως στα στοιχεία που προκύπτουν από τη γεωτρητική έρευνα.

Για την αξιολόγηση, χρησιμοποιούνται οι όροι: **απολήψιμος λιγνίτης, τεχνικά υπερκείμενα, λιγνίτης εκμετάλλευσης και λιγνίτης τροφοδοσίας**. [3] . Παρακάτω δίνονται οι ορισμοί αυτών των όρων [8],[7].

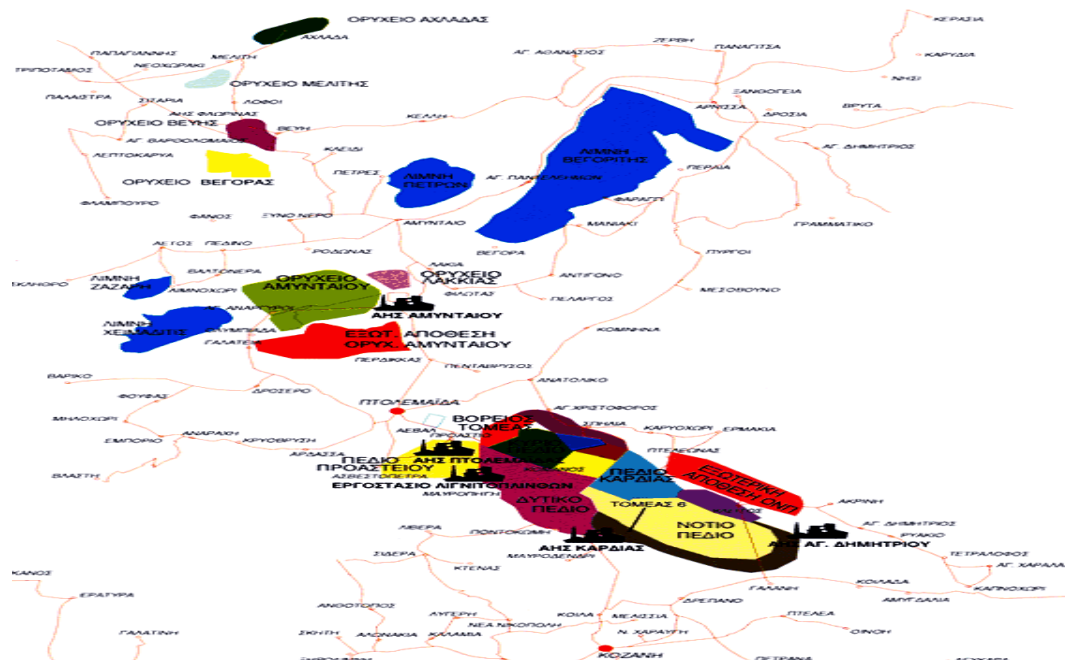
- **Φυσικός λιγνίτης** είναι ο γεωλογικός λιγνίτης που αναγνωρίζεται μακροσκοπικά στους πυρήνες των γεωτρήσεων και στα μέτωπα εκσκαφής.
- **Απολήψιμος λιγνίτης** ονομάζεται ο λιγνίτης που προκύπτει μετά την ενοποίηση διακεκριμένων λιγνιτικών στρωμάτων με ενδιάμεσες στείρες ή ανθρακομιγείς στρώσεις, προκειμένου να διαμορφωθούν τα προς εξόρυξη τμήματα, λαμβάνοντας υπόψη τη μέθοδο εκμετάλλευσης και την τεχνολογία εξόρυξης
- **Τεχνικό δάπεδο** είναι η επιφάνεια του τελευταίου (βαθύτερου) απολήψιμου λιγνιτικού στρώματος.
- **Εκμεταλλεύσιμη στοιβάδα** είναι η στοιβάδα που βρίσκεται ανάμεσα στην τεχνική οροφή και στο τεχνικό δάπεδο.
- **Λιγνίτης τροφοδοσίας** είναι το προϊόν που σχηματίζεται με την απόθεση λιγνίτη από περισσότερα πιθανόν του ενός ορυχεία στις αυλές των ατμοηλεκτρικών σταθμών ενώ το πραγματικό προϊόν της εξόρυξης είναι ο λιγνίτης εκμετάλλευσης.
- **Τεχνικά υπερκείμενα** ονομάζονται τα προς απόρριψη στείρα υλικά ή και τα μη απολήψιμα λιγνιτικά στρώματα, που βρίσκονται πάνω από την τεχνική οροφή.

Υπάρχουν δύο τρόποι εκμετάλλευσης γαιανθράκων, ανάλογα με το βάθος στο οποίο απαντάται το κοίτασμα: [6]

- **Επιφανειακή εκμετάλλευση:** Διενεργείται είτε με τη χρήση συμβατικού εξοπλισμού ασυνεχούς λειτουργίας, είτε με συνεχή συστήματα εξόρυξης, μεταφοράς και απόθεσης. Η μέθοδος συνεχούς εκμετάλλευσης ενδείκνυται για οριζόντια κοιτάσματα μεγάλης επιφανειακής εξάπλωσης που βρίσκονται σε μικρό σχετικά βάθος από την επιφάνεια και οι γεωλογικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως εύκολα εξορύξιμοι. Επίσης θεωρείται οικονομικός τρόπος εκμετάλλευσης.
- **Υπόγεια εκμετάλλευση:** Στις περιπτώσεις που το κοίτασμα βρίσκεται σε βάθος, απαιτείται η εφαρμογή μεθόδων υπόγειας εκμετάλλευσης, όπως του επιμήκους μετώπου, των θαλάμων και στύλων, και των διαδοχικών ορόφων.

Στο Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Πτολεμαΐδας (Λ.Κ.Δ.Μ) λειτουργούν σήμερα τέσσερα λιγνιτωρυχεία: Το Ορυχείο Νοτίου Πεδίου, το Ορυχείο Καρδιάς, το Ορυχείο Κύριου Πεδίου (Μαυροπηγή) και το Ορυχείο Αμυνταίου. Πρόκειται για το μεγαλύτερο λιγνιτικό κέντρο των Βαλκανίων. Κατέχει την δεύτερη θέση μεταξύ των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης και την έκτη θέση παγκοσμίως. Με την εκμετάλλευση του λιγνίτη απο τα ορυχεία Πτολεμαΐδας τροφοδοτούνται 6 ατμοηλεκτρικοί σταθμοί με 18 μονάδες συνολικής ισχύος 4.388 MW. [9]

Λόγω της ανάγκης πραγματοποίησης ανατινάξεων και στη συνέχεια απομάκρυνσης των υλικών με συμβατικό εξοπλισμό, το Λ.Κ.Δ.Μ. αποτελεί τον μεγαλύτερο καταναλωτή εκρηκτικών υλών στη χώρα. [9]

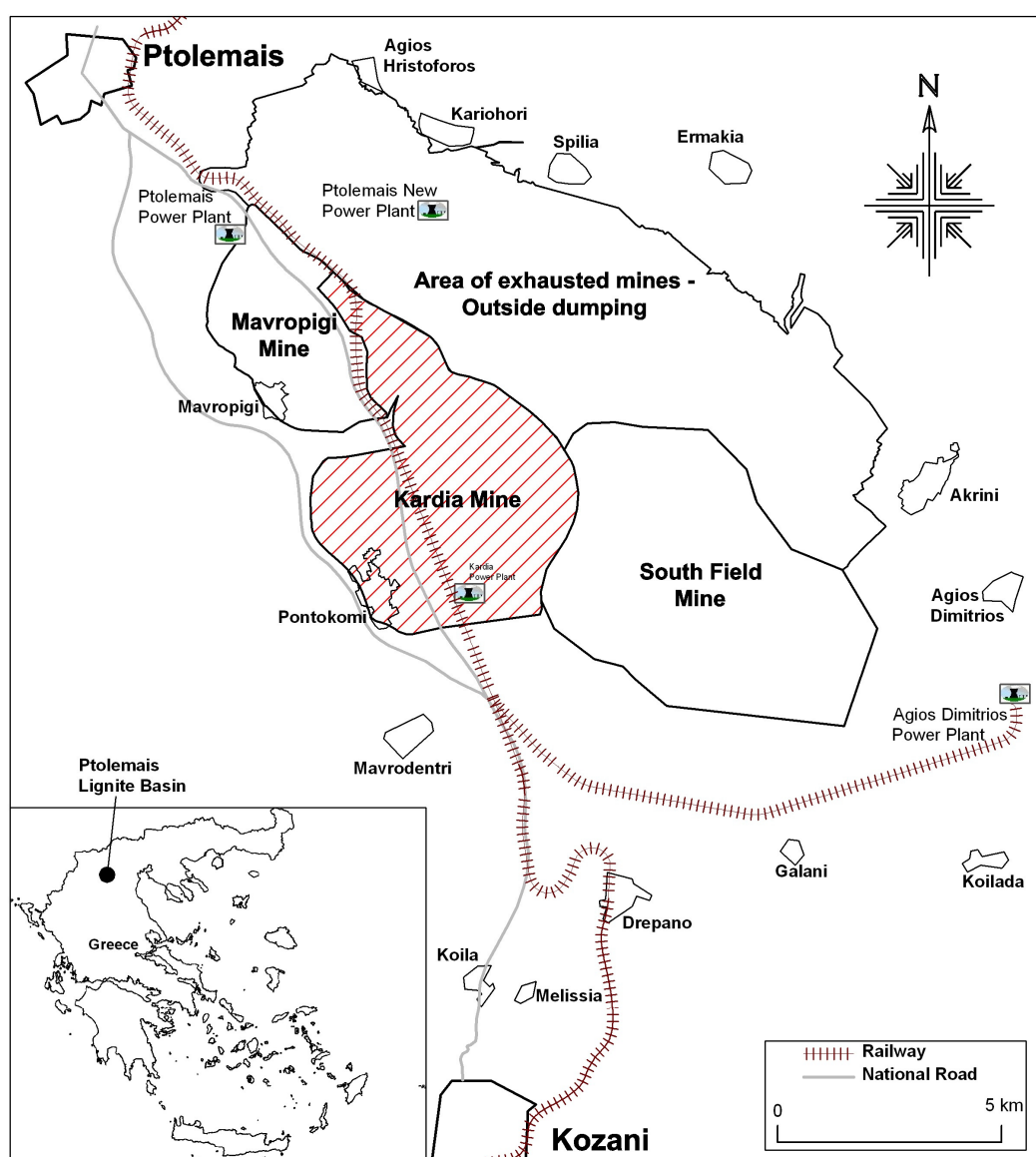


Εικ. 3: Ορυχεία και ΑΗΣ της ευρύτερης περιοχής (ΔΕΗ)

1.3.1 Περιγραφή Ορυχείου Καρδιάς

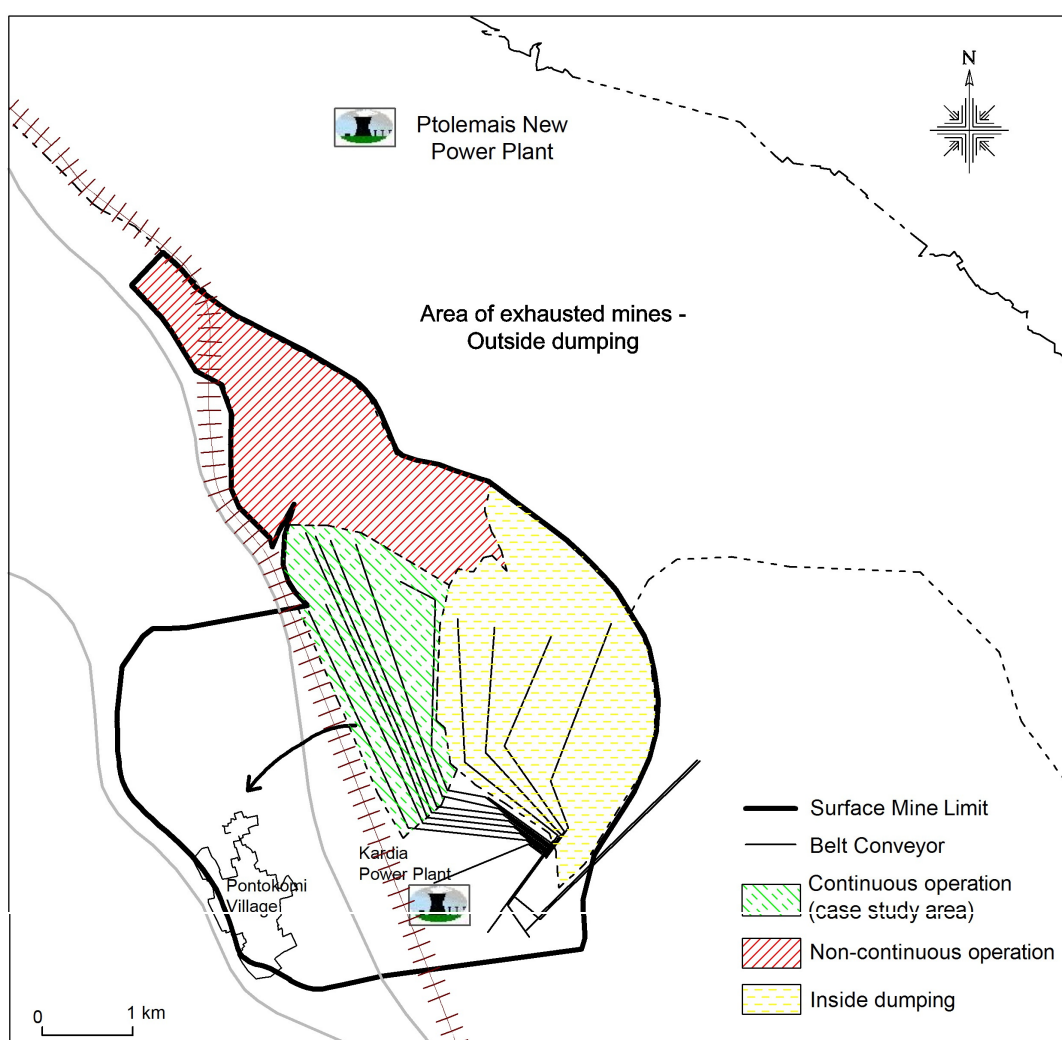
Το λιγνιτωρυχείο Καρδιάς βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα του Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1 και η έκταση του είναι περίπου 20km². [14]

Ξεκίνησε τη λειτουργία του το 1971 και περιλαμβάνει εκτός απο την εκμετάλλευση του Ορυχείου Νοτιοδυτικού Πεδίου-Υψηλάντη και την εκμετάλλευση του κοιτάσματος του Ορυχείου Οικισμού Κομάνου.



Σχήμα 1.1 : Χάρτης με την τοποθεσία του Λ.Κ.Δ.Μ. και τα όρια του Ορυχείου Καρδιάς.

Τα αποθέματα εξορύξιμου λιγνίτη ανέρχονται σε 300 Mt. Ο κύριος εξοπλισμός του Ορυχείου Καρδιάς περιλαμβάνει 7 καδοφόρους εκσκαφείς και 4 αποθέτες. Τα υπερκείμενα πάχη στρώματος είναι μεταξύ 20 και 60 m και η παραγωγή λιγνίτη από το Ορυχείο Καρδιάς κυμαίνεται μεταξύ 10-12 Mt ετησίως. Στο Σχήμα 1.2 διακρίνεται η περιοχή εκμετάλλευσης, τα τελικά όρια του Ορυχείου και οι δραστηριότητες στην κάθε περιοχή του Ορυχείου (υφιστάμενη κατάσταση 2014). [14]



Σχήμα 1.2: Χάρτης διαφορετικών δραστηριοτήτων ανα περιοχή στο Ορυχείο Καρδιάς

1.3.2 Λιγνιτικά Αποθέματα Λ.Κ.Δ.Μ.

Για τα Ορυχεία της Πτολεμαΐδας τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα ανέρχονται σε 926×10^6 t. Η έναρξη των εκσκαφών έγινε το έτος 1957 στο Ορυχείο Κύριου πεδίου. Απο την έναρξη της εκμετάλλευσης έως τέλος του 2010 οι συνολικές εκσκαφές ανήλθαν σε $4.931,86 \times 10^6$ t και η παραγωγή λιγνίτη σε $1.189,89 \times 10^6$ t έως το τέλος του 2010. Τα συνολικά αποθέματα στην περιοχή των Ορυχείων Πτολεμαΐδας προβλέπεται να καλύψουν μέρος των αναγκών του προγραμματισμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τη ΔΕΗ Α.Ε. της χώρας έως το 2050. [7]

Στον Πίνακα 1.1, παρουσιάζονται ανά λιγνιτικό πεδίο των Ορυχείων Πτολεμαΐδας συγκεντρωτικά η παραγωγή λιγνίτη, καθώς και οι απομένουσες εκσκαφές και αποθέματα λιγνίτη μέχρι εξάντλησής τους (2010-2050). Επίσης συμπεριλαμβάνονται οι αντίστοιχες σχέσεις εκμετάλλευσης και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των απομένοντων αποθεμάτων λιγνίτη.

Ορυχείο	Εκμεταλλεύσιμα Αποθέματα Λιγνίτη (10^6 t)	Εκσκαφές (10^6 m ³)	Σχ. Εκμετάλλευσης (m ³ /t)	Μέση Κατ. Θερμογ. Δ. (kcal/kg)
Πεδίο Μαυροπηγής	174,1	831	3,9	1280
Ορυχείο Κομάνου	5,0	34	6,0	1239
Σύνολο Κύριου πεδίου	179,1	865	4,0	1279
Νοτιοδυτικό Πεδίο - Υψηλάντη	324,0	2051	5,5	1410
Οικισμός Κομάνου	15,0	77,0	4,3	1330
Σύνολο Πεδίου Καρδιάς	339,0	2128,0	5,4	1406
Ορυχείο Νότιου πεδίου	407,9	2910,0	6,3	1300
Σύνολο Ορυχείων Πτολεμαΐδας	926,0	5903,0	5,5	1335

Πίνακας 1.1 : Ανάπτυξη Ορυχείων Πτολεμαΐδας και αντίστοιχα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα λιγνίτη με αντίστοιχες σχέσεις εκμετάλλευσης και ποιοτικά χαρακτηριστικά λιγνίτη, ανά λιγνιτικό πεδίο. [7]

1.3.3 Μέθοδος Εκμετάλλευσης - Εξόρυξης στο Λ.Κ.Δ.Μ.

Από την έναρξη της εξορυκτικής δραστηριότητας στην περιοχή και στο πλαίσιο των μελλοντικών εκμεταλλεύσεων εφαρμόζεται η **μέθοδος επιφανειακής εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων με την εφαρμογή της συνεχούς εκσκαφής, μεταφοράς και απόθεσης με σύστημα πολλαπλών βαθμίδων**. Η μέθοδος αυτή συνδυάζει τη χρησιμοποίηση ηλεκτροκίνητων μηχανημάτων μεγάλης δυναμικότητας και συνεχούς λειτουργίας, τόσο κατά την εκσκαφή (καδοφόροι εκσκαφείς), όσο και κατά τη μεταφορά (ταινιόδρομοι) και την απόθεση (αποθέτες) τόσο του λιγνίτη όσο και των αγόνων (υπερκειμένων και λιγνιτικών ενδιάμεσων αγόνων ενστρώσεων). [13],[12]

Η μέθοδος εφαρμόζεται με επιτυχία για περισσότερα από 50 έτη στη λειτουργία των ορυχείων της περιοχής. Αξίζει να αναφερθεί πως η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται συστηματικά και σε ευρεία κλίμακα, στις εκμεταλλεύσεις λιγνιτών της Γερμανίας, αλλά και άλλων χωρών της Ευρώπης. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος συνεχούς εξόρυξης αναπτύχθηκε στα ορυχεία της Γερμανίας και γι' αυτό είναι γνωστή και ως «γερμανική μέθοδος» [12],[22]

Η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκει εφαρμογή στις επιφανειακές εκμεταλλεύσεις μαλακών πολυστρωματικών κοιτασμάτων μεγάλης οριζόντιας εξάπλωσης και μεγάλου πάχους, που καλύπτονται από νεότερους γεωλογικά υπερκειμένους σχηματισμούς μεγάλου πάχους. Παράλληλα οι σχηματισμοί αυτοί είναι χαλαρά συνδεδεμένοι έτσι ώστε να είναι δυνατή η εξόρυξή τους με μηχανικά μέσα (καδοφόρους εκσκαφείς συνεχούς λειτουργίας) καθώς και η μεταφορά τους με ταινιοδρόμους. Στις περιπτώσεις αυτές τα άγονα υπερκείμενα και ενδιάμεσα, μεταφέρονται και αποτίθενται είτε σε εξωτερικό χώρο (εξωτερική απόθεση) κατά τα πρώτα χρόνια λειτουργίας του ορυχείου, ή στον εξοφλημένο κενό χώρο του ορυχείου (εσωτερική απόθεση αγόνων σε κοιλότητες, όταν έχει δημιουργηθεί επαρκής χώρος για την υποδοχή τους). [10]

Η παραγωγική διαδικασία της εκμετάλλευσης των ορυχείων περιλαμβάνει τις εξής δραστηριότητες : [7]

1. **Αποκάλυψη του κοιτάσματος :** Η αποκάλυψη του κοιτάσματος γίνεται με την εκσκαφή υπερκειμένων αγόνων κυρίως με πάγιο εξοπλισμό (καδοφόροι εκσκαφείς) και υποβοηθητικά
2. **Διακίνηση των αγόνων προς τους χώρους απόθεσης :** Η διακίνηση αυτή από τους καδοφόρους εκσκαφείς προς τους αποθέτες γίνεται με μεταφορικές ταινίες. Όταν η εκσκαφή διενεργείται με συμβατικό εξοπλισμό η διακίνηση αγόνων γίνεται με χωματουργικά αυτοκίνητα.
3. **Εκλεκτική εξόρυξη του λιγνίτη** από τα ενδιάμεσα άγονα υλικά, ώστε να πληρούνται τα ποιοτικά κριτήρια του καυσίμου.
4. **Μεταφορά και αποθήκευση** σε Υπαίθριες Αποθήκες (Αυλές).
5. **Τροφοδοσία των Ατμοηλεκτρικών Σταθμών** από τις Αυλές.

Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της επιφανειακής μεθόδου εκμετάλλευσης συνεχούς εξόρυξης, μεταφοράς και απόθεσης, με σύστημα βαθμίδων, που εφαρμόζεται στα Λιγνιτωρυχεία της Πτολεμαΐδας. [7]

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΕΞΟΡΥΞΗΣ, ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΜΕ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΒΑΘΜΙΔΩΝ	
Πεδίο Εφαρμογής	Κοιτάσματα πολυστρωματικά μεγάλης οριζόντιας εξάπλωσης για τα οποία απαιτείται εκλεκτική εξόρυξη
Ανάπτυξη του Ορυχείου-διακινήσεις Υλικών	<ol style="list-style-type: none"> 1. Μετατόπιση της τάφρου εκμετάλλευσης διαχρονικά. 2. Μετά το στάδιο της απόθεσης σε κοιλότητες άλλων εξοφλημένων ορυχείων ή σε περιοχές εξωτερικής απόθεσης απόθεση των αγόνων εσωτερικά, παράλληλα προς τη τάφρο εκμετάλλευσης
Χαρακτηριστικά ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού	<p>Ο εξοπλισμός εξασφαλίζει :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Την εκλεκτική απόληψη των κοιτασμάτων 2. Τη συνεχή ροή του εξορυσσόμενου υλικού
Βασικά μηχανήματα	<ul style="list-style-type: none"> • ΚΑΔΟΦΟΡΟΣ ΕΚΣΚΑΦΕΑΣ (εξόρυξη και φόρτωση αγόνων και λιγνίτη) • ΤΑΙΝΙΟΔΡΟΜΟΣ (μεταφορά αγόνων και λιγνίτη) • ΑΠΟΘΕΤΗΣ (απόθεση αγόνων)

Πίνακας. 1.2 : Χαρακτηριστικά επιφανειακής μεθόδου εκμετάλλευσης

Η απόθεση των αγόνων διενεργείται μέσω των αποθετών, με κατάλληλο σχεδιασμό, έτσι ώστε να εναρμονίζεται με το γενικότερο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής. Αρχικά, κατά την απόθεση αγόνων εκτός του ορυχείου, επιλέγονται κενοί χώροι (κοιλότητες) άλλων εξοφλημένων ορυχείων ή άλλες κατάλληλες περιοχές, ενώ στη συνέχεια, όταν δημιουργείται κενός χώρος εντός του ορυχείου, η απόθεση διενεργείται εσωτερικά, έτσι ώστε η απόσταση μεταξύ εκσκαφής και απόθεσης να είναι η ελάχιστη δυνατή. Η εσωτερική απόθεση αγόνων ακολουθεί τις εκσκαφές του ορυχείου για λόγους ευστάθειας των πρανών, αλλά και για λόγους κατάλληλης περιβαλλοντικής αποκατάστασης παράλληλα με την εξέλιξη της εκμετάλλευσης. [10],[13]

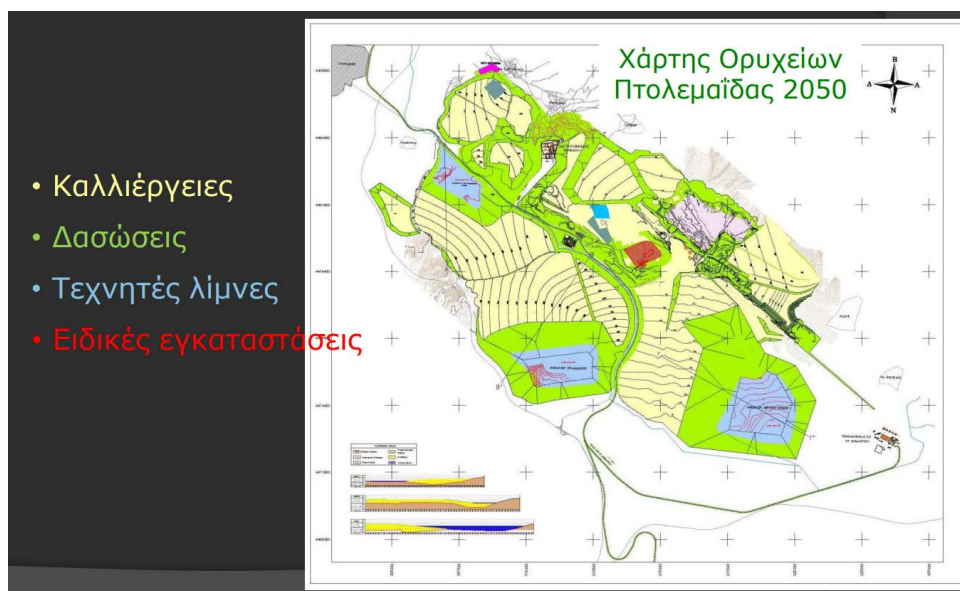
Το 95% της εξορυσσόμενης ποσότητας αγόνων υλικών αποτίθεται εντός των κοιλοτήτων των εξαντλημένων Ορυχείων. Στις εσωτερικές αποθέσεις μαζί με τα άγονα για λόγους ενίσχυσης της γεωτεχνικής ευστάθειας και περιορισμού της κατάληψης των αδιατάρακτων περιοχών συναποτίθενται τέφρα.

Το 5% των παραγόμενων αγόνων των Ορυχείων Πτολεμαΐδας αποτίθενται στις εγκαταστάσεις - εξωτερικές αποθέσεις όπου αποτίθενται τα εξορυκτικά απόβλητα. [27], [7]



Εικ. 4: Επιφανειακό λιγνιτωρυχείο με καδοφόρους εκσκαφείς. Δεξιά είναι το κοίτασμα λιγνίτη και αριστερά οι αποθέσεις στείρων.

Οι εκτάσεις γής που δεσμεύονται για την ανάπτυξη του ορυχείου, ελευθερώνονται σταδιακά με την πρόοδο της εκμετάλλευσης. Οι νέες εκτάσεις που προκύπτουν είτε αποδίδονται για γεωργικές ή κτηνοτροφικές εκμεταλλεύσεις, είτε αποτελούν τον βασικό χώρο για την ανάπτυξη δασών και λιμνών. Παρακάτω στην Εικ. 7, φαίνεται χαρακτηριστικά η μελλοντική περιβαλλοντική αποκατάσταση των ορυχείων του Λιγνιτικού Κέντρου Πτολεμαΐδας έως το 2050 σύμφωνα με την αντίστοιχη Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων. [25]



Εικ. 5: Μελλοντική περιβαλλοντική αποκατάσταση Ορυχείων Πτολεμαΐδας

Αξίζει να αναφερθεί ότι η Δ.Ε.Η. σχεδιάζει σημαντική επέκταση των χρήσεων γής που αφορούν αποκατεστημένες καλλιεργήσιμες και δασικές επιφάνειες στην περιοχή των ορυχείων, δημιουργία τεχνητών λιμνών και μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. [7]

1.4 Ποιοτικά Χαρακτηριστικά Λιγνιτών

Η **Θερμογόνος Δύναμη** ορίζεται ως το ποσόν της ενέργειας που εκλύεται ανά μονάδα βάρους του γαιάνθρακα. Υπολογίζεται από δύο τιμές : την **Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη** (ΑΘΔ) και την **Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη** (ΚΘΔ). Η πρώτη εκφράζεται ως το ποσόν της θερμότητας που εκλύεται κατά την καύση μιας μονάδας βάρους υπό σταθερό όγκο, μέσα στο θερμιδόμετρο και ορίζεται σε kcal/kg. Η ΚΘΔ, ορίζεται υπολογιστικά αφαιρώντας από την ΑΘΔ τη λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης των υδρατμών που παράγονται κατά την καύση του λιγνίτη, το οποίο είναι ενωμένο με τον άνθρακα υπό τη μορφή υδρογονανθράκων. Η ΚΘΔ έχει βιομηχανική σημασία, επειδή οι υδρατμοί απομακρύνονται από τους λέβητες καύσης χωρίς να υγροποιηθούν. [1]

Η Θερμογόνος Δύναμη είναι καθοριστικό μέγεθος για τη λειτουργία των Ατμοηλεκτρικών Σταθμών (Α.Η.Σ.) αφού προσδιοριστεί ο βαθμός φόρτισης των μονάδων για την επίτευξη συγκεκριμένης ισχύος και κατ'επέκταση επηρεάζει και τον τρόπο αλλά και την περιοχή εκμετάλλευσης. Στη συνέχεια παρατίθεται ο πίνακας 2.1 με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των Ελληνικών λιγνιτών.

Περιοχή	Υγρασία (% κ.β.) ¹	Τέφρα (% κ.β.) ²	Κατ. Θ.Δ. (kcal/kg) ¹
Πτολεμαίδα-Κοζάνη	52-88	30-36	1270-1300
Αμύνταιο	49-54	37-40	1145
Φλώρινα	40	34	1800-2500
Κόμνηνα	40-45	32	1500-1850
Μεγαλόπολη	56-60	38-45	950-1000
Δράμα	60	39	1000
Ελασσόνα	42	28	2300

Πίνακας 1.3 : Ποιοτικά Χαρακτηριστικά Ελληνικού λιγνίτη ανα τοποθεσία (¹ ως έχει ² επι ξηρού).[28]

Η **τέφρα** είναι το ανόργανο υπόλειμμα που απομένει μετά την καύση του γαιάνθρακα. Τα προβλήματα από την ύπαρξη υψηλού ποσοστού τέφρας στους λιγνίτες συνοψίζονται στο ότι η παρουσία της αυξάνει το κόστος εξόρυξης και διακίνησης του υλικού, επιβαρύνει τις εγκαταστάσεις προθράυσης και άλεσης, προξενεί φθορές στους μύλους, αυξάνει την απαιτούμενη λεπτότητα άλεσης για αποδοτική καύση, απάγει θερμότητα από τις εστίες καύσης, συμπαρασύρει άκαυστα σωματίδια άνθρακα προς τη βάση της εστίας και δημιουργεί ανάλογα με τη σύστασή της τοπικές επικαθίσεις εντός των κλιβάνων και σωλήνων εναλλαγής. [1]

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η επιστήμη της γεωστατιστικής έχει ως βάση τη Στατιστική και τη Θεωρία των Πιθανοτήτων. Στηρίζεται στη βασική μαθηματική έννοια του τυχαίου πεδίου και μέσω των γεωστατιστικών μεθόδων διεξάγεται η ανάλυση και πρόβλεψη χωρικών ιδιοτήτων. Οι μέθοδοι γεωστατιστικής ανάλυσης οδηγούν στον προσδιορισμό της χωρικής κατανομής μεταβλητών σε σημεία περιοχής, όπου οι μεταβλητές αυτές δεν είναι γνωστές και οι οποίες χαρακτηρίζουν μεγέθη με οικονομική ή περιβαλλοντική σημασία. [20],[17]

Μερικές από τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται σήμερα η γεωστατιστική περιλαμβάνουν, την έρευνα κοιτασμάτων (εκτίμηση πάχους κοιτάσματος, περιεχόμενης ενέργειας, θερμογόνο δύναμη), τον χαρακτηρισμό της ποιότητας βιομηχανικών προϊόντων, την ανάλυση βροχοπτώσεων και την εκτίμηση περιβαλλοντικού κινδύνου. [15],[8]

2.1 Βασικές Έννοιες Τυχαίων Πεδίων

2.1.1 Τυχειότητα

Μέσω της τυχειότητας εξετάζονται φαινόμενα κατά τα οποία μια κατάσταση δεν μπορεί να αποδοθεί με απόλυτη ακρίβεια. Οι αιτίες που μπορεί να συνεισφέρουν σε αυτό είναι είτε εγγενείς, δηλαδή να υπάρχει έντονη χωρική και χρονική μεταβλητότητα ενός φαινομένου, είτε να προέρχονται από πειραματική διαδικασία, όπως τυχαία σφάλματα ή περιορισμένη διακριτική ικανότητα. [4]

2.1.2 Τυχαία Μεταβλητή - Τυχαίο Πεδίο

Μια τυχαία μεταβλητή X , μπορεί να πάρει τιμές απο ένα σύνολο πιθανών τιμών.

Ορίζεται διακριτή, όταν παίρνει τιμές x_i όπου $i = 1, 2, \dots, N$, σε ένα αριθμήσιμο σύνολο. Ακόμα όταν παίρνει τιμές απο ένα συνεχές σύνολο ονομάζεται συνεχής μεταβλητή. Επίσης μια μεταβλητή X προσδιορίζεται απο τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας όταν η πιθανότητά της παίρνει τιμές απο ένα απειροελάχιστο διάστημα γύρω απο το x . [21],[17]

Η μέση τιμή ή αναμενόμενη τιμή μιας τυχαίας μεταβλητής X για το σύνολο των καταστάσεων συμβολίζεται με $E[X]$. Εάν η κατανομή πιθανοτήτων των X ακολουθεί μία συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητάς (pdf) $f(x)$, τότε η αναμενόμενη τιμή είναι :

$$E[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx. \quad (2.1)$$

Η συλλογή τυχαίων μεταβλητών είναι μια στοχαστική διαδικασία που αντιπροσωπεύει την εξέλιξη κάποιου συστήματος των τυχαίων τιμών με την πάροδο του χρόνου. Σ'αυτή τη διαδικασία υπάρχουν πολλές κατευθύνσεις προς τις οποίες μπορεί να εξελιχθεί η συγκεκριμένη διαδικασία. Η συλλογή τυχαίων τιμών, είναι ένα τυχαίο πεδίο $X(s)$ οι οποίες κατανέμονται στο χώρο με το διάνυσμα s να αντιστοιχεί στη θέση του κάθε σημείου στην περιοχή μελέτης. Σε περιπτώσεις όπου το τυχαίο πεδίο είναι διακριτό, τότε περιλαμβάνει μία λίστα τυχαίων αριθμών όπου οι δείκτες τους χαρτογραφούνται σε ένα χώρο n διαστάσεων.

Οι μαθηματικές ιδιότητες, με τις οποίες περιγράφονται οι τυχαίες μεταβλητές, επεκτείνονται όταν οι τυχαίες μεταβλητές κατανέμονται στο χώρο. Ένα τυχαίο πεδίο αποτελείται από ένα σύνολο τυχαίων μεταβλητών που περιγράφουν την χωρική αλλαγή, σε μία από τις μαθηματικές ιδιότητές της. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι ένα τυχαίο πεδίο αποτελεί μία πολυδιάστατη τυχαία μεταβλητή. Επίσης λόγω της αλληλεξάρτησης των φυσικών μεγεθών στο χώρο σε διαφορετικές θέσεις, τα τυχαία πεδία έχουν μοναδικές μαθηματικές ιδιότητες που τα κάνει να ξεχωρίζουν από ένα σύνολο ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών [16],[4].

Η διακύμανση του τυχαίου πεδίου $X(s)$, είναι ένα τυχαίο πεδίο $X'(s)$ του οποίου οι τιμές είναι διακυμάνσεις των τιμών των $X(s)$, γύρω από την αναμενόμενη τιμή σε αυτές τις θέσεις.

$$X'(s) = X(s) - E[X(s)] \quad (2.2)$$

Τα τυχαία πεδία μπορούν να αναπαρασταθούν ως $X(s) = m_x(s) + X'(s)$, όπου $m_x(s)$ είναι η συνάρτηση τάσης με τις ντετερμινιστικές χωρικές συσχετίσεις μεταξύ των στοιχείων, δηλαδή αφορά τις αργές μεταβολές του πεδίου.[20]

2.1.3 Στατιστική Ομοιογένεια

Μια πιο αποτελεσματική γεωστατιστική ανάλυση μπορεί να είναι αποτέλεσμα παραδοχών που θέτουν περιορισμούς στις ιδιότητες ενός τυχαίου πεδίου. Η στατιστική ομοιογένεια ή στασιμότητα κατά την ασθενή έννοια, είναι μια ευρέως χρησιμοποιημένη απλούστερη παραδοχή, η οποία αποτελεί επέκταση του κλασικού ορισμού της ομοιογένειας. Στατιστικώς ομοιογενές λέγεται ένα τυχαίο πεδίο $X(s)$, αν η μέση τιμή είναι σταθερή, $m_x(s) = m_x$, η διασπορά του πεδίου είναι σταθερή σε όλο το πεδίο $\sigma(s) = \sigma$, η συνάρτηση συνδιασποράς ορίζεται και εξαρτάται αποκλειστικά από το διάνυσμα της απόστασης $\mathbf{r} = \mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2$ μεταξύ των δύο σημείων και όχι από την θέση τους

Ωστόσο, η στατιστική ομοιογένεια υφίσταται ως έννοια όταν, οι στατιστικές ιδιότητες ενός τυχαίου πεδίου δεν εξαρτώνται από τις χωρικές συντεταγμένες των σημείων και είναι ανεξάρτητες από το σύστημα αναφοράς. Ακόμα η στατιστική ομοιογένεια προϋποθέτει δεν υπάρχουν συστηματικές τάσεις, με αποτέλεσμα η μεταβολή των τιμών του πεδίου μπορεί να αποδοθεί σε διακυμάνσεις γύρω από μια σταθερή στάθμη ίση με την μέση τιμή [4], [17].

2.1.4 Στατιστική Ισοτροπία

Η στατιστική ισοτροπία είναι μια ιδιότητα που μπορεί να χαρακτηριστεί χρήσιμη στην γεωστατιστική ανάλυση ενός τυχαίου πεδίου. Στατιστικώς ισοτροπικό θεωρείται ένα πεδίο όταν είναι στατιστικώς ομοιογενές και συγχρόνως, η συνάρτηση συνδιασποράς εξαρτάται μόνο από το μέτρο, αλλά όχι από την κατεύθυνση του διανύσματος απόστασης \mathbf{r} . Πρακτικά αυτό είναι σημαντικό διότι υπάρχει διευκόλυνση στον προσδιορισμό της χωρικής εξάρτησης. Στην περίπτωση που μια συνάρτηση συνδιασποράς είναι στατιστικώς ισοτροπική, είναι στάσιμη και στατιστικώς ομοιογενής.

Με τον όρο ανισοτροπία αναφέρεται ότι η χωρική μεταβλητότητα εξαρτάται από την κατεύθυνση. Η συνδιασπορά ενός ανισοτροπικού τυχαίου πεδίου εξαρτάται τόσο από την κατεύθυνση του διανύσματος όσο και από την απόσταση \mathbf{r} . Όταν οι κατευθυντικές συνδιασπορές έχουν διαφορετικές τιμές τόσο στην διασπορά αλλά και στο μήκος συσχέτισης το τυχαίο πεδίο είναι ανισοτροπικό [5], [15].

Στην περίπτωση στατιστικώς ισοτροπικών πεδίων οι πιο σημαντικές παράμετροι είναι η διασπορά $\sigma_x^2 = c_x(0)$ και το μήκος συσχέτισης ξ . Το μήκος συσχέτισης κανονικοποιεί την απόσταση μέσα στη συνάρτηση που ορίζεται από το λόγο r/ξ . Η διασπορά αποτελεί μέτρο του πλάτους των διακυμάνσεων. Ωστόσο, στην πράξη βρίσκονται δύο τύποι ανισοτροπίας, η γεωμετρική ανισοτροπία και η ανισοτροπία ζώνης.

2.1.5 Μέση Τιμή

Η μέση τιμή για μία τυχαία μεταβλητή X και ορίζεται από τον τύπο :

$$m_x(s) = E[X(s)] \quad (2.3)$$

όπου $X(s)$ είναι το τυχαίο πεδίο και $E[X]$ είναι η μέση τιμή ως προς το σύνολο των καταστάσεων, δηλαδή,

$$E[X(s)] = \int d(x) f_x(x;s)x \quad (2.4)$$

όπου x είναι οι τιμές που αντιστοιχούν σε μία κατάσταση.

Τα όρια του ολοκληρώματος καθορίζονται από το διάστημα μέσα στο οποίο είναι ορισμένο το τυχαίο πεδίο. Από την Σχέση 2.4 παρατηρείται ότι μπορεί να υπάρχει εξάρτηση μεταξύ της μέσης τιμής και της θέσης s .

2.1.6 Διασπορά

Η διασπορά ορίζεται ως η μέση τιμή του τετραγώνου της διακύμανσης και δίνεται από τον τύπο :

$$\sigma_x^2(s) = E[(X(s) - m_x(s))^2] = E[X'^2(s)]. \quad (2.5)$$

Η διασπορά μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο, αν όμως το πεδίο είναι στατιστικά ομοιογενές τότε παραμένει σταθερή σε όλα τα σημεία.

2.1.7 Τυπική Απόκλιση

Με την τυπική απόκλιση μπορεί να προσδιοριστεί ποσοτικά η απόκλιση της κατανομής από τη μέση τιμή της. Η τυπική απόκλιση σ_x είναι η τετραγωνική ρίζα της διασποράς. Το εύρος της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας για συμμετρικές κατανομές είναι ανάλογο προς την τυπική απόκλιση. Η τυπική απόκλιση χρησιμοποιείται για να εκφραστεί το πιθανό σφάλμα πειραματικών μετρήσεων και το σφάλμα εκτίμησης παραμέτρων μιας κατανομής πιθανότητας από ένα πεπερασμένο δείγμα.

2.1.8 Κατηγορίες Σφαλμάτων

Μέσω του σφάλματος μπορεί να αξιολογηθεί η ακρίβεια της μέτρησης σε σχέση με την πραγματική της τιμή. Η ακρίβεια της μέτρησης που σχετίζεται με την επαναληψιμότητα, είναι ο βαθμός στον οποίο οι επαναλήψεις των μετρήσεων που πραγματοποιούνται στις ίδιες συνθήκες, παράγουν το ίδιο αποτέλεσμα [16]. Τα σφάλματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα τυχαία και τα συστηματικά. Τα τυχαία σφάλματα προκαλούνται από μη ελεγχόμενες διακυμάνσεις και επηρεάζουν τις μετρήσεις με έναν τυχαίο τρόπο. Το τυχαίο σφάλμα του μέσου όρου μπορεί να μειωθεί κατά την τετραγωνική ρίζα του πλήθους των μετρήσεων, με την επανάληψη των μετρήσεων. Τα συστηματικά σφάλματα προέρχονται από ατέλειες των μεθόδων, οπότε και οι μετρήσεις των σφαλμάτων αυτών είναι ανακριβείς και μεροληπτικές. Τα τυχαία σφάλματα προκαλούνται από διακυμάνσεις οι οποίες δεν είναι ελεγχόμενες και επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων κατά ένα τυχαίο τρόπο. Σ'αυτές τις περιπτώσεις η ανακρίβεια οφείλεται σε τυχαίες διακυμάνσεις και όχι σε ατέλειες της μεθόδου [4].

2.2 Συνάρτηση Συνδιασποράς

Η συνάρτηση συνδιασποράς $c_x(s_1, s_2)$ ενός τυχαίου πεδίου $X(s)$, εκφράζει την επιρροή που ασκεί η διακύμανση του τυχαίου πεδίου στο σημείο s_1 στη διακύμανση του τυχαίου πεδίου στο σημείο s_2 . Η κεντρική συνάρτηση συνδιασποράς ορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$c_x(s_1, s_2) = E[X(s_1)X(s_2)] - E[X(s_1)]E[X(s_2)] \quad (2.6)$$

Γύρω από τη μέση τιμή στο σημείο s_1 το τυχαίο πεδίο αντιστοιχεί στη διακύμανση σύμφωνα με τον τύπο :

$$X'(s_1) = X(s_1) - m_x(s_1) \quad (2.7)$$

Γίνεται κατανοητό ότι η κεντρική συνάρτηση συνδιασποράς περιγράφει ποσοτικά την εξάρτηση των διακυμάνσεων σε δύο διαφορετικά σημεία [4].

Σχέση Συνδιασποράς και Διασποράς

Όταν δύο σημεία συμπίπτουν στο τυχαίο πεδίο, τότε η τιμή της συνδιασποράς είναι ίση με τη διασπορά του πεδίου στο συγκεκριμένο σημείο

$$c_x(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_1) = \sigma_x^2(\mathbf{s}_1) \quad (2.8)$$

2.2.1 Μοντέλα Συνδιασποράς

Τα μοντέλα συνδιασποράς που είναι ισοτροπικά, εξαρτώνται μόνο από την απόσταση και συγκεκριμένα από το ευκλείδειο μέτρο της απόστασης $|\mathbf{r}|$. Τα πλέον γνωστά και ευρέως χρησιμοποιούμενα ισοτροπικά μοντέλα είναι οι εξισώσεις που ακολουθούν, όπου το \mathbf{r} αντιστοιχεί στην διασπορά, το r είναι η απόσταση και το ξ είναι το μήκος συσχέτισης όπως αυτά ορίστηκαν στην παράγραφο 2.1.4.

1. Γκαουσιανό Μοντέλο

$$c_x(\mathbf{r}) = \sigma_x^2 \exp\left(-\frac{r^2}{\xi^2}\right). \quad (2.9)$$

2. Εκθετική Συνδιασπορά

$$c_x(\mathbf{r}) = \sigma_x^2 \exp\left(-\frac{\|\mathbf{r}\|}{\xi}\right). \quad (2.10)$$

3. Σφαιρικό Μοντέλο

$$c_x(\mathbf{r}) = \sigma_x^2 \left[1 - 1,5 \left(\frac{\|\mathbf{r}\|}{\xi} \right) + 0,5 \left(\frac{\|\mathbf{r}\|}{\xi} \right)^3 \right] \vartheta(\xi - \|\mathbf{r}\|) \quad (2.11)$$

όπου $\vartheta(\xi - \|\mathbf{r}\|)$ είναι η βηματική συνάρτηση

4. Γενικευμένο εκθετικό

$$c_x(\mathbf{r}) = \sigma_x^2 \exp\left(-\frac{\|\mathbf{r}\|^\nu}{\xi^\nu}\right), \quad 0 < \nu < 2. \quad (2.12)$$

5. Matérn

$$c_x(\mathbf{r}) = \frac{\sigma_x^2}{2^{(\nu-1)}\Gamma(\nu)} \left(\frac{2\sqrt{\nu}}{R} \|\mathbf{r}\| \right)^\nu K_\nu \left(\frac{2\sqrt{\nu}}{R} \|\mathbf{r}\| \right) \quad (2.13)$$

όπου $\Gamma(\nu)$ συμβολίζει τη συνάρτηση Γάμμα, K_ν είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel.

6. Φαινόμενο πυρήνα ή κόκκου (nugget effect)

$$c_x(\mathbf{r}) = \begin{cases} 0, & \text{αν } r = 0 \\ c_0, & \text{αν } r \neq 0 \end{cases}. \quad (2.14)$$

7. Δυναμονομικό – αλγεβρικό Μοντέλο

$$\lim_{\|\mathbf{r}\| \rightarrow \infty} c_x(\mathbf{r}) \propto \|\mathbf{r}\|^{2\alpha}, \quad -1 < \alpha < 0. \quad (2.15)$$

2.2.2 Βασικές Παράμετροι Συνδιασποράς

Τα βασικά χαρακτηριστικά της συνάρτησης συνδιασποράς χωρίζονται σε δύο περιπτώσεις, στην περίπτωση στατιστικά ομοιογενών και ιστροπικών πεδίων και στη δεύτερη περίπτωση της ανιστροπικής εξάρτησης. Στην πρώτη περίπτωση οι πιο σημαντικές παράμετροι είναι :

1. η διασπορά $\sigma_x^2 = c_x(0)$, που υπολογίζει το πλάτος των μεταβολών του πεδίου και
2. το μήκος συσχέτισης, το οποίο κανονικοποιεί την απόσταση (η απόσταση μέσα στην συνάρτηση ορίζεται από το λόγο r/ξ).

Στις περισσότερες περιπτώσεις, θεωρείται πως το διάστημα μέσα στο οποίο υπάρχει σημαντική αλληλεξάρτηση μεταξύ των τιμών του πεδίου ορίζεται από το μήκος συσχέτισης. Δηλαδή η τιμή του πεδίου σε ένα σημείο επηρεάζεται από την τιμή του σε ένα άλλο. Στην δεύτερη περίπτωση, σε κάθε μία από τις κύριες διευθύνσεις ανιστροπίας υπάρχει και ένα διαφορετικό μήκος συσχέτισης.

2.2.3 Κριτήρια Αποδοχής

Η αλληλεξάρτηση των σημείων του πεδίου στο χώρο, δηλώνεται μέσω της συνάρτησης συνδιασποράς η οποία είναι μια αιτιοκρατική συνάρτηση μεταξύ δύο σημείων . Ωστόσο, δεν ισχύει πως μία αιτιοκρατική συνάρτηση μπορεί να θεωρηθεί και συνάρτηση συνδιασποράς. Για να θεωρηθεί θα πρέπει να πληρεί ορισμένους περιορισμούς.

Σε γεωστατιστικές αναλύσεις η πειραματική χωρική εξάρτηση βρίσκει προσαρμογή σε κατάλληλο μοντέλο, το οποίο επιλέγεται από τα αποδεκτά μοντέλα που αναφέρθηκαν παραπάνω. Για αυτό θα πρέπει οι συνθήκες που αντιπροσωπεύουν τα θεωρητικά πρότυπα να είναι γνωστές.

Μέσω του θεωρήματος Bochner καθορίζονται οι συνθήκες αποδοχής της συνάρτησης συνδιασποράς προκειμένου να γίνει αποδεκτή. Το θεώρημα του Bochner εκφράζεται μέσω της φασματικής πυκνότητας συνδιασποράς, που δίνεται από τον μετασχηματισμό Fourier. Ο μετασχηματισμός αυτός παριστάνει την συνάρτηση συνδιασποράς στο χώρο της χωρικής συνέχειας, που υπολογίζεται με το κυματόνισμα k . [11]

Ο μετασχηματισμός Fourier δίνεται από το παρακάτω ολοκλήρωμα:

$$\tilde{c}_x(\mathbf{k}) = \int d\mathbf{r} e^{-i\mathbf{k}\mathbf{r}} c_x(\mathbf{r}). \quad (2.16)$$

Το θεώρημα του Bochner αναφέρει ότι:

Μία συνάρτηση $c_x(\mathbf{r})$ είναι αποδεκτή ως συνάρτηση συνδιασποράς αν ισχύουν οι προϋποθέσεις:

1. υπάρχει η φασματική πυκνότητα ισχύος $\tilde{c}_x(k)$,
2. είναι μη αρνητική σε όλο το πεδίο συχνοτήτων και
3. το ολοκλήρωμα της $\tilde{c}_x(k)$ σε ολόκληρο το πεδίο συχνότητας είναι φραγμένο.

Πρακτικά για να ελεγχθεί αν μία συνάρτηση είναι αποδεκτή ως συνάρτηση συνδιασποράς, είναι απαραίτητο να γίνει προσδιορισμός του μετασχηματισμού Fourier της συνάρτησης.

2.3 Χωρική Εξάρτηση

Οι πληροφορίες σχετικά με την κατανομή των τιμών σε όλα τα σημεία του τυχαίου πεδίου, δίνονται από την κοινή κατανομή πιθανότητας. Οι συσχετίσεις μεταξύ διαφορετικών σημείων αφορούν την χωρική εξάρτηση, έτσι ώστε η πιθανότητα να πάρει το πεδίο την τιμή $X(s) = A$ σε ένα σημείο s , να εξαρτάται από τις τιμές των γειτονικών σημείων του s . Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η χωρική συσχέτιση είναι ο υπολογισμός του ημιβαριογράμματος [4].

2.3.1 Βαριόγραμμα

Σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο προσδιορίζεται το βαριόγραμμα ενός τυχαίου πεδίου:

$$\gamma_x(\mathbf{s}, \mathbf{r}) = \frac{1}{2} E[\{X(\mathbf{s}+\mathbf{r}) - X(\mathbf{s})\}^2]. \quad (2.17)$$

Σε σχέση με ένα ζεύγος σημείων, το βαριόγραμμα ορίζεται με τη βοήθεια της μέσης τιμής του τετραγώνου της διαφοράς $\delta X(\mathbf{s};\mathbf{r}) = X(\mathbf{s}+\mathbf{r}) - X(\mathbf{s})$. Το βήμα της απόστασης r ορίζεται από το πεδίο της διαφοράς $\delta X(\mathbf{s};\mathbf{r})$. Από τη σχέση του ορισμού γίνεται κατανοητό ότι για αρχική τιμή είναι $r=0$, η τιμή του βαριογράμματος μηδενίζεται.

Στην περίπτωση που έχουμε στατιστικά ομοιογενές πεδίο $X(\mathbf{s})$, τότε το βαριόγραμμα συνδέεται άμεσα με τη συνάρτηση συνδιασποράς, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\gamma_x(\mathbf{r}) = \sigma_x^2 - c_x(\mathbf{r}). \quad (2.18)$$

Έτσι είναι κατανοητό ότι, όσο το r τείνει στο άπειρο, το $c_x(r)$ τείνει στο μηδέν. Ως αποτέλεσμα αυτών προκύπτει ότι το βαριόγραμμα ενός στάσιμου τυχαίου πεδίου έχει ως άνω φράγμα την διασπορά του τυχαίου πεδίου. Στην πράξη το βαριόγραμμα μπορεί να δείξει ασυνέχεια ίση με c_0 , η οποία αντιπροσωπεύει το φαινόμενο πυρήνα (nugget effect). Το μήκος συσχέτισης καθορίζει το διάστημα μέσα στο οποίο η τιμή ενός σημείου επηρεάζει την τιμή ενός άλλου μέσα στο τυχαίο πεδίο και είναι παράμετρος κανονικοποίησης της απόστασης r [15],[17].

Η χωρική εξάρτηση των τιμών του πεδίου σε δύο γειτονικά σημεία, καθορίζεται από τις παραμέτρους του βαριογράμματος. Όπως προκύπτει και από τη Σχέση 2.17 το βαριόγραμμα είναι ημιθετικά ορισμένο, δηλαδή $\gamma_x(r) \geq 0$. Ωστόσο, δεν ισχύει το αντίστροφο, δηλαδή μία ημιθετικά ορισμένη συνάρτηση, δεν αποτελεί απαραίτητα συνάρτηση βαριογράμματος.

2.3.2 Βαριόγραμμα σε Στάσιμο Πεδίο

Στην περίπτωση του στατιστικά ομοιογενούς πεδίου, με ισοτροπική χωρική εξάρτηση, το βαριόγραμμα υπολογίζεται από τις εξής παραμέτρους: το μήκος συσχέτισης και το άνω φράγμα.

Πιο συγκεκριμένα η τιμή του βαριογράμματος για πολύ μεγάλες αποστάσεις r τείνει ασυμπτωτικά προς ένα άνω φράγμα, ίσο με την διασπορά του τυχαίου πεδίου. Αυτή η ιδιότητα βασίζεται στη Σχέση 2.18 και στο ότι η τιμή της συνάρτησης συνδιασποράς σε μεγάλες αποστάσεις τείνει στο μηδέν. Το μήκος συσχέτισης προσδιορίζει την ταχύτητα του βαριογράμματος που θα φθάσει στο άνω φράγμα, καθώς και την ακτίνα μέσα στην οποία δύο σημεία είναι συσχετισμένα. Στη περίπτωση που το βαριόγραμμα είναι ισοτροπικό, οι ισοϋψείς καμπύλες (ο τόπος των διανυσμάτων απόστασης r , για τα οποία $\gamma_x(r) = c_i$), είναι κυκλικές.

Αν το βαριόγραμμα είναι ανισοτροπικό, το άνω φράγμα είναι ανεξάρτητο της κατεύθυνσης, αλλά η ταχύτητα προσέγγισης (δηλαδή το μήκος συσχέτισης) εξαρτάται από τη διεύθυνση.

Το βαριόγραμμα εκφράζεται σαν συνάρτηση $\gamma_x \left(\frac{r_1}{\xi_1}, \dots, \frac{r_d}{\xi_d} \right)$ των αδιάστατων αποστάσεων $\left(\frac{r_1}{\xi_1}, \dots, \frac{r_d}{\xi_d} \right)$, όπου τα μήκη ξ_1, \dots, ξ_d είναι τα μήκη συσχέτισης στις αντίστοιχες διευθύνσεις. Δεδομένου ότι στην περίπτωση αυτή το βαριόγραμμα περιέχει περισσότερα από ένα μήκη συσχέτισης τα οποία είναι διαφορετικά, ο προσδιορισμός της ανισοτροπίας πραγματοποιείται με παραπάνω παραμέτρους.

Για την ανισοτροπία ζώνης, το άνω φράγμα εξαρτάται από την χωρική κατεύθυνση, οπότε το βαριόγραμμα εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$\gamma_x(\mathbf{r}) = \gamma_{x,1}(r) + \gamma_{x,2}(\hat{\mathbf{r}}) \quad (2.19)$$

το $\gamma_{x,1}(r)$ είναι η ιστροπική εξάρτηση και το $\gamma_{x,2}(\hat{\mathbf{r}})$ είναι η ανισοτροπική εξάρτηση του άνω φράγματος από την κατεύθυνση του μοναδιαίου διανύσματος $\hat{\mathbf{r}}$.

2.3.3 Μοντέλα Βαριόγραμματος

Οι εξισώσεις που ακολουθούν, αποτελούν αποδεκτά ιστροπικά μοντέλα βαριόγραμματος τα οποία είναι γνωστά και ευρέως χρησιμοποιούμενα, το ξ είναι το μήκος συσχέτισης, το r είναι η απόσταση και το σ_x^2 αντιστοιχεί στην διασπορά [4],[2], [17].

1. Γκαουσιανό Μοντέλο

$$\gamma_x(r) = \sigma_x^2 \left[1 - \exp \left(-\frac{\|\mathbf{r}\|^2}{\xi^2} \right) \right] \quad (2.20)$$

2. Εκθετικό Μοντέλο Ημιβαριόγραμματος

$$\gamma_x(r) = \sigma_x^2 \left[1 - \exp \left(-\frac{\|\mathbf{r}\|}{\xi} \right) \right] \quad (2.21)$$

3. Σφαιρικό Μοντέλο

$$\gamma_x(r) = \begin{cases} \sigma_x^2 \left[1.5 \left(\frac{\|\mathbf{r}\|}{\xi} \right) - 0.5 \left(\frac{\|\mathbf{r}\|}{\xi} \right)^3 \right] & \text{αν } \|\mathbf{r}\| \leq \xi \\ \sigma_x^2 & \text{αν } \|\mathbf{r}\| \geq \xi \end{cases} \quad (2.22)$$

4. Γενικευμένο Εκθετικό Μοντέλο

$$\gamma_x(\|\mathbf{r}\|) = \sigma_x^2 \left[1 - \exp \left(-\frac{\|\mathbf{r}\|^\nu}{\xi^\nu} \right) \right], \quad 0 < \nu < 2 \quad (2.23)$$

5. Φαινόμενο Πυρήνα

$$\gamma_X(r) = \begin{cases} 0, & \text{αν } r = 0 \\ c_0, & \text{αν } r \neq 0 \end{cases} \quad (2.24)$$

6. Βαριόγραμμα Matérn

$$\gamma_X(r) = \sigma_X^2 \left[1 - \frac{1}{2^{(\nu-1)}\Gamma(\nu)} \left(\frac{2\sqrt{\nu}}{R} \| \mathbf{r} \| \right)^\nu K_\nu \left(\frac{2\sqrt{\nu}}{R} \| \mathbf{r} \| \right) \right] \quad (2.25)$$

όπου $\Gamma(\nu)$ συμβολίζει τη συνάρτηση Γάμμα, K_ν είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel δευτέρου είδους τάξης ν . Ισχύει ότι $K_\nu(0) = 2^{(\nu-1)}\Gamma(\nu)$

2.3.4 Κριτήρια Αποδοχής

Ενα βαριόγραμμα είναι αποδεκτό όταν είναι υπό συνθήκη αρνητικά ορισμένο, δηλαδή για οποιοδήποτε γραμμικό συντελεστή λ_α που ικανοποιεί την συνθήκη 2.26 πρέπει να ισχύει η ανισότητα 2.27.

$$\sum_{\alpha=1}^n \lambda_\alpha = 0, \quad (2.26)$$

$$- \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n \lambda_\alpha \lambda_\beta \gamma_X(\mathbf{s}_\alpha - \mathbf{s}_\beta) \geq 0. \quad (2.27)$$

Πρακτικά ο έλεγχος της ανισότητας δεν είναι εφικτός για κάθε δυνατό συνδυασμό των συντελεστών λ_α . Έτσι το κριτήριο αποδοχής εκφράζεται με τη βοήθεια του θεωρήματος Bochner σε πιο περιεκτική μορφή.

Συγκεκριμένα, το θεώρημα Bochner αναφέρει ότι: Η συνάρτηση $\gamma_X(\mathbf{r})$ είναι αποδεκτό βαριόγραμμα σε d διαστάσεις αν ισχύουν τα εξής [4]:

1. $\gamma_X(0) = (0)$
2. υπάρχει ο γενικευμένος μετασχηματισμός Fourier $\tilde{\gamma}_X(\mathbf{k})$,
3. $\tilde{\gamma}_X(\mathbf{k})$, ικανοποιεί την ανισότητα: $-k^2 \tilde{\gamma}_X(\mathbf{k}) \geq 0$ και
4. $\lim_{r \rightarrow \infty} \gamma_X(\mathbf{r})/r^2 = 0$.

Αν η συνάρτηση αντιπροσωπεύει ένα αποδεκτό βαριόγραμμα τότε η συνάρτηση $c_X(\mathbf{r}) = \sigma_X^2 - \gamma_X(\mathbf{r})$ είναι αποδεκτή συνάρτηση συνδιασποράς και το αντίστροφο [4]

2.4 Εκτίμηση Τυχαίου Πεδίου (kriging)

Η εκτίμηση του τυχαίου πεδίου μπορεί να χωριστεί σε δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη μπορεί να είναι σημειακή όταν πρόκειται για τιμή του πεδίου σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Η δεύτερη είναι χωρική όταν αναφέρεται στον υπολογισμό μιας χαρακτηριστικής τιμής για μια ολόκληρη περιοχή. Προυπόθεση για να γίνει η εκτίμηση του πεδίου είναι ότι θα πρέπει να υπάρχει ένα πρότυπο χωρικής εξάρτησης, ώστε η τιμή της ιδιότητας σε κάθε σημείο να επηρεάζεται από τα γειτονικά της. Σαν αποτέλεσμα αυτό δίνει τη δυνατότητα να γίνει εκτίμηση του πεδίου σε σημεία που δεν υπάρχουν μετρήσεις βάσει των γνωστών τιμών σε γειτονικά σημεία. Η εκτίμηση τις περισσότερες φορές δεν γίνεται για μεμονωμένα σημεία αλλά για μια μεγαλύτερη περιοχή, που εφαρμόζεται σε όλα τα σημεία ενδιαφέροντος με επανάληψη της σημειακής εκτίμησης.

Οι μέθοδοι οι οποίες είναι πλέον διαδεδομένες ονομάζονται kriging και βασίζονται σε γραμμική παρεμβολή, σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του τετραγωνικού σφάλματος της εκτίμησης. Στην διαδικασία εκτίμησης με μεθόδους kriging, προσδιορίζεται μία γειτονιά συσχέτισης $\omega(u)$ του σημείου u , η οποία περιλαμβάνει $n(u) \leq N$ σημεία από τα $s_i (i = 1, \dots, N)$. Το μήκος συσχέτισης προσδιορίζει το μέγεθος της γειτονιάς. Μέσω του παρακάτω γραμμικού συνδυασμού προσδιορίζεται η διακύμανση του πεδίου στο σημείο εκτίμησης : [2],[17]

$$X(u) - m_X(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha} [X(s_{\alpha}) - m_X(s_{\alpha})], \quad (2.28)$$

λ_{α} είναι τα γραμμικά βάρη. Η παραπάνω εξίσωση δίνει τη διακύμανση στο σημείο εκτίμησης σαν συνάρτηση διακύμανσης στα υπόλοιπα σημεία της γειτονιάς εκτίμησης. Μέσω του τύπου 2.29 και του τύπου 2.18 παρακάτω δίνεται η εκτιμώμενη τιμή του πεδίου.

$$\hat{X}(u) = m_X(u) + \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha} [X(s_{\alpha}) - m_X(s_{\alpha})]. \quad (2.29)$$

Επειδή η εκτιμήτρια \hat{X} αποτελείται από ένα γραμμικό συνδυασμό τιμών ενός τυχαίου πεδίου, είναι μία τυχαία μεταβλητή που το σφάλμα εκτίμησης $\varepsilon(u) = X(u) - \hat{X}(u)$ είναι και αυτό μία τυχαία μεταβλητή. Οι μέθοδοι kriging χρησιμοποιούν τα βάρη τα οποία ελαχιστοποιούν τη διασπορά του σφάλματος της εκτίμησης, οπότε και υπολογίζεται η βέλτιστη τιμή.

Αναλόγως την μέση τιμή του πεδίου, τον τρόπο χειρισμού της τάσης $m_X(s)$ και της διακύμανσης στην ανάλυση του πεδίου, υπάρχουν διαφορετικά είδη kriging :

- **Κανονικό kriging (ordinary kriging)** όταν η μέση τιμή του πεδίου θεωρείται σταθερή στη γειτονιά συσχέτισης $\omega(u)$ του σημείου εκτίμησης, αλλά η τιμή της $m_x(s)$ μπορεί να μεταβάλλεται από γειτονιά σε γειτονιά .
- **Απλό kriging (simple kriging)** όταν η μέση τιμή του πεδίου είναι γνωστή σε όλη την περιοχή Ω .
- **Καθολικό kriging (universal kriging)** όταν η τάση ενσωματωθεί στο πεδίο προς εκτίμηση.
- **Kriging με παλινδρόμηση (regression kriging)** όταν η τάση διαχωριστεί από τις διακυμάνσεις και το kriging εφαρμοστεί στις τελευταίες.
- **Kriging στο πεδίο δεικτών (indicator kriging)** όταν η τιμή της μέσης τιμής κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1.

Σφάλμα Εκτίμησης

Το σφάλμα της εκτίμησης ορίζεται ως η διαφορά ανάμεσα στην πραγματική και την εκτιμώμενη τιμή του πεδίου και είναι τυχαία μεταβλητή [2].

$$\varepsilon(\mathbf{u}) = X(\mathbf{u}) - \hat{X}(\mathbf{u}). \quad (2.30)$$

2.4.1 Απλό Kriging

Το απλό kriging εφαρμόζεται όταν η μέση τιμή του πεδίου είναι γνωστή σε όλη την περιοχή. Επίσης, αν η μέση τιμή του πεδίου είναι σταθερή δηλαδή $E[X(s)] = m_x$, η εκτιμήτρια $\hat{X}(u)$ προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$\hat{X}(\mathbf{u}) = \sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_{\alpha} X(\mathbf{s}_{\alpha}) - m_x \left[\sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_{\alpha} X(\mathbf{s}_{\alpha}) - 1 \right]. \quad (2.31)$$

Οι γραμμικοί συντελεστές (δηλαδή τα βάρη), λ_{α} υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τη συνθήκη ελαχιστοποίησης του τετραγωνικού σφάλματος. Η συνθήκη αμεροληψίας ικανοποιείται υπολογίζοντας τη μέση τιμή $E[\hat{X}(u)]$ από την Σχέση 2.31. [2]

Η διασπορά του σφάλματος δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_{E,S,K}^2(\mathbf{u}) = Var[X(\mathbf{u}) - \hat{X}(\mathbf{u})] = Var[\hat{X}(\mathbf{u}) - m_x - X'(\mathbf{u})]. \quad (2.32)$$

Γραμμικά Βάρη

Η γραμμική εξίσωση

$$\sum_{\beta=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_{\beta} c_X(\mathbf{s}_{\alpha} - \mathbf{s}_{\beta}) = c_X(\mathbf{s}_{\alpha} - \mathbf{u}), \quad \alpha = 1, \dots, n(\mathbf{u}), \quad (2.33)$$

μπορεί να εκφραστεί ως

$$\mathbf{C}_{\alpha, \beta} \lambda_{\beta} = \mathbf{C}_{\alpha, u}. \quad (2.34)$$

Ο πίνακας $\mathbf{C}_{\alpha, \beta}$ αντιπροσωπεύει τον πίνακα συνδιασποράς με στοιχεία $\mathbf{C}_{\alpha, \beta} = c_X(\mathbf{s}_{\alpha} - \mathbf{s}_{\beta})$. Το διάνυσμα $\mathbf{C}_{\alpha, u}$ αντιπροσωπεύει τις τιμές της συνάρτησης συνδιασποράς των σημείων του δείγματος και του σημείου εκτίμησης $\mathbf{C}_{\alpha, u} = c_X(\mathbf{s}_{\alpha} - \mathbf{u})$.

Αν λάβουμε υπόψη την εξίσωση $c_X(0) = \sigma_X^2$ το γραμμικό σύστημα γράφεται με τη μορφή πινάκων:

$$\begin{bmatrix} \sigma_X^2 & \dots & \dots & c_X(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_n) \\ c_X(\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_1) & \dots & \dots & c_X(\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_X(\mathbf{s}_n - \mathbf{s}_1) & \dots & \dots & \sigma_X^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_X(\mathbf{s}_1 - \mathbf{u}) \\ c_X(\mathbf{s}_2 - \mathbf{u}) \\ \vdots \\ c_X(\mathbf{s}_n - \mathbf{u}) \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Η λύση του γραμμικού συστήματος δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\lambda_{\beta} = \mathbf{C}_{\beta, \alpha}^{-1} \mathbf{C}_{\alpha, u} \quad (2.36)$$

για κάθε $\beta=1, \dots, n(\mathbf{u})$.

Τα στοιχεία του πίνακα συνδιασποράς υπολογίζονται από το βέλτιστο πρότυπο βαριογράμματος, χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$c_X(\mathbf{s}_{\alpha}, \mathbf{s}_{\beta}) = \sigma_X^2 - \gamma_X(\mathbf{s}_{\alpha}, \mathbf{s}_{\beta}). \quad (2.37)$$

Αν η συνάρτηση συνδιασποράς είναι αποδεκτή και δεν χρησιμοποιούνται πολλαπλές μετρήσεις στο ίδιο σημείο, το γραμμικό σύστημα έχει λύση για τους συντελεστές λ_{β} . Οι τιμές των γραμμικών βαρών είναι ανεξάρτητες από το άνω φράγμα του βαριογράμματος και εξαρτώνται από το πρότυπο συνδιασποράς.

Σφάλμα Εκτίμησης

Για να μπορέσει να κριθεί η αξιοπιστία της εκτίμησης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η τετραγωνική ρίζα της διασποράς του σφάλματος εκτίμησης. Η διασπορά του σφάλματος του απλού kriging $\sigma_{E,SK}^2(\mathbf{u})$ είναι ταυτόσημη, με το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα Εκτίμησης, και υπολογίζεται με βάση την επόμενη εξίσωση: [2]

$$\sigma_{E,SK}^2(\mathbf{u}) = \sigma_X^2 - \sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \sum_{\beta=1}^{n(\mathbf{u})} C_{u,\alpha} C_{\alpha,\beta}^{-1} C_{\beta,u}. \quad (2.38)$$

Όπως φαίνεται και από τη Σχέση 2.38 το σφάλμα αυξάνεται αναλογικά προς την τυπική απόκλιση σ_X . Αν τα βάρη λ_α έχουν θετικές τιμές, τότε το σφάλμα αυξάνεται όσο μειώνεται η απόσταση $|\mathbf{u} - \mathbf{s}_\alpha|$ μεταξύ του σημείου εκτίμησης και των σημείων του δείγματος, γιατί τότε η συσχέτιση $\rho_{u,\alpha}$ τείνει στη μονάδα [2].

2.4.2 Κανονικό Kriging (OK)

Στο κανονικό kriging η μέση τιμή είναι σταθερή μέσα σε κάθε γειτονιά συσχέτισης, μπορεί όμως να μεταβάλλεται από γειτονιά σε γειτονιά. Η τιμή της μέσης τιμής δεν είναι απαραίτητα γνωστή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η μέση τιμή δεν υπολογίζεται απλά από το μέσο όρο των τιμών των δειγμάτων, αλλά υπολογίζεται η βέλτιστη μέση τιμή, αρκεί να είναι γνωστή η συνάρτηση συνδιασποράς. Όμως για να γίνει εκτίμηση της συνάρτησης συνδιασποράς θα πρέπει να είναι γνωστή η μέση τιμή, το οποίο οδηγεί σε ένα αναδρομικό πρόβλημα που μπορεί να αποφευχθεί χρησιμοποιώντας κανονικό kriging. Η εκτίμηση υπολογίζεται από τις παρακάτω εξισώσεις: [2]

$$\hat{X}(\mathbf{u}) = \sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_\alpha X(\mathbf{s}_\alpha), \quad (2.39)$$

και

$$\sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_\alpha = 1. \quad (2.40)$$

Η συνθήκη αμεροληψίας εκφράζεται μέσω της Σχέσης 2.40 Στο κανονικό kriging το μέσο τετραγωνικό σφάλμα πρέπει να υπολογιστεί με τον περιορισμό που επιβάλλει η συνθήκη αμεροληψίας στις τιμές των βαρών.

Γραμμικά Βάρη

Οι εξισώσεις για τον υπολογισμό των γραμμικών βαρών είναι οι εξής :

$$\sum_{\beta=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_{\beta} c_X(\mathbf{s}_{\alpha} - \mathbf{s}_{\beta}) + \mu = c_X(\mathbf{s}_{\alpha} - \mathbf{u}), \quad \alpha = 1, \dots, n(\mathbf{u}), \quad (2.41)$$

όπου μ είναι ο συντελεστής *Lagrange* και

$$\sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_{\alpha} = 1. \quad (2.42)$$

Το γραμμικό σύστημα των Σχέσεων 2.41 και 2.42 μπορεί να γραφεί με την μορφή πινάκων, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{bmatrix} \sigma_X^2 & c_X(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2) & \dots & c_X(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_n) & 1 \\ c_X(\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_1) & \sigma_X^2 & \dots & c_X(\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ c_X(\mathbf{s}_n - \mathbf{s}_1) & c_X(\mathbf{s}_n - \mathbf{s}_2) & \dots & \sigma_X^2 & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_X(\mathbf{s}_1 - \mathbf{u}) \\ c_X(\mathbf{s}_2 - \mathbf{u}) \\ \vdots \\ c_X(\mathbf{s}_n - \mathbf{u}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Εκτίμηση Σφάλματος

Η εξίσωση για τον υπολογισμό του μέσου τετραγωνικού σφάλματος για το κανονικό kriging είναι η εξής :

$$\sigma_{E,OK}^2(\mathbf{u}) = \sigma_X^2 - \sum_{\alpha=1}^n (\mathbf{u}) \lambda_{\alpha} c_X(\mathbf{u}, \mathbf{s}_{\alpha}) - \mu. \quad (2.44)$$

Η τιμή μ του συντελεστή *Lagrange* είναι πάντα αρνητική. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αβεβαιότητα της εκτίμησης του κανονικού kriging να υπερβαίνει την εκτίμηση του απλού. Αυτό συμβαίνει γιατί το κανονικό kriging δεν λαμβάνει υπόψη του τη μέση τιμή του πεδίου, γι' αυτό και έχει μεγαλύτερη αβεβαιότητα [15],[2].

2.4.3 Επιλογή Γειτονιάς Συσχέτισης

Ο προσδιορισμός της ακτίνας της γειτονιάς του Kriging γίνεται από την ανάλυση του βαριογράμματος με σχετικά μεγάλη αβεβαιότητα. Η μέγιστη ακτίνα $\omega(\mathbf{u})$ δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το μήκος συσχέτισης του πεδίου. Σε περίπτωση που η ακτίνα της γειτονιάς είναι μεγαλύτερη από το μήκος συσχέτισης του πεδίου, τότε η γραμμική παρεμβολή λαμβάνει υπόψη μετρήσεις οι οποίες δεν έχουν σημαντική συνεισφορά στο σημείο εκτίμησης. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση του αριθμητικού κόστους του Kriging. Μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται με τη διερεύνηση διαφορετικών σε μέγεθος ακτίνων στις γειτονιές. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ελεγχθεί η δυνατότητα απεικόνισης τοπικών μεταβολών της μέσης τιμής από γειτονιά σε γειτονιά. [2]

2.5 Επιβεβαίωση Χωρικών Μοντέλων

Η αξιολόγηση της απόδοσης διαφόρων χωρικών μοντέλων με τη βοήθεια των στατιστικών παραμέτρων επιτυγχάνεται με την διασταυρωτική επιβεβαίωση. Οι μέθοδοι που περιλαμβάνει μετρούν την ικανότητα πρόβλεψης του μοντέλου, το οποίο είναι βασισμένο στα διαθέσιμα μοντέλα.

Έστω ένα τυχαίο πεδίο $X(s)$ με γνωστές τιμές στις θέσεις $s_i, i = 1, 2, \dots, N$. Στη διασταυρωτική επιβεβαίωση με τη μέθοδο της αφαίρεσης ενός σημείου εκ περιτροπής (Leave-One-Out Cross-Validation) η τιμή του $x(s_i)$ αφαιρείται από τα δεδομένα και εκτιμάται το $\hat{x}(s_i)$ με βάση τα υπόλοιπα δεδομένα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα δεδομένα. Η επαλήθευση γίνεται μεταξύ του $x(s_i)$ και του $\hat{x}(s_i)$ για $i = 1, \dots, N$, σύμφωνα με τα σφάλματα αξιολόγησης τα οποία είναι το Μέσο Σφάλμα (Mean Error (ME)), το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error(MAE)), τη Ρίζα του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (Root Mean Square Error (RMSE)), και τον Συντελεστή Συσχέτισης του Pearson (Pearson's Correlation Coefficient (ρ)).

Μέσο Σφάλμα (ME)

Το μέσο σφάλμα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{x}(s_i) - x(s_i)] . \quad (2.45)$$

Το μέσο σφάλμα υπολογίζει τη μεροληψία της εκτίμησης. Υψηλές θετικές ή αρνητικές τιμές του σφάλματος υποδεικνύουν ότι υπάρχει συστηματικό σφάλμα και οδηγεί σε ανακρίβεια.

Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (MAE)

Το μέσο απόλυτο σφάλμα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{x}(\mathbf{s}_i) - x(\mathbf{s}_i)|. \quad (2.46)$$

Με το μέσο απόλυτο σφάλμα υπολογίζεται η ορθότητα και η ακρίβεια της εκτίμησης. Όλες οι μεμονωμένες διαφορές έχουν την ίδια βαρύτητα με το μέσο απόλυτο σφάλμα.

Ρίζα του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (RMSE)

Το RMSE υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{x}(\mathbf{s}_i) - x(\mathbf{s}_i)]^2}. \quad (2.47)$$

Το RMSE υπολογίζει όπως και το μέσο απόλυτο σφάλμα, την ορθότητα και την ακρίβεια της εκτίμησης. Επειδή τα σφάλματα έχουν υψωθεί στο τετράγωνο χωρίς την απόλυτη τιμή, η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος δίνει υψηλότερο βάρος σε μεγαλύτερα σφάλματα.

Συντελεστής Συσχέτισης του Pearson (ρ)

Ο συντελεστής συσχέτισης ρ εκτιμά την σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\bar{\rho}_{X,\hat{X}} = \frac{\sum_{i=1}^N [x(\mathbf{s}_i) - \overline{x(\mathbf{s}_i)}] [\hat{x}(\mathbf{s}_i) - \overline{\hat{x}(\mathbf{s}_i)}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [x(\mathbf{s}_i) - \overline{x(\mathbf{s}_i)}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N [\hat{x}(\mathbf{s}_i) - \overline{\hat{x}(\mathbf{s}_i)}]^2}}. \quad (2.48)$$

Ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson δίνει την τιμή της γραμμικής σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών. Η σχέση αυτή μπορεί να επεξηγηθεί με ένα διάγραμμα διασποράς. Αν το $\rho = +1$ το διάγραμμα διασποράς είναι μία ευθεία γραμμή με θετική κλίση. Αν $\rho = -1$ τότε το διάγραμμα της διασποράς είναι μία ευθεία γραμμή με αρνητική κλίση. Για $|\rho| < 1$ τα σημεία στο διάγραμμα απεικονίζονται ως ένα σύννεφο, το οποίο γίνεται πιο διάχυτο όσο το $|\rho|$ μειώνεται από το 1 στο 0. [5]

2.6 Μετασχηματισμός Box-Cox

Πολλές στατιστικές διαδικασίες στηρίζονται στην υπόθεση της κανονικότητας των δεδομένων. Στις περιπτώσεις όπου η κανονικότητα εκλείπει χρησιμοποιούνται μετασχηματισμοί κανονικοποίησής τους. Ο μετασχηματισμός Box-Cox είναι ένας απ' αυτούς, ο οποίος δίνεται από τη σχέση :

$$tr_{BC}(x) = \begin{cases} \frac{x^\lambda - 1}{\lambda}, & \alpha \nu \lambda \neq 0 \\ \log(x), & \alpha \nu \lambda = 0 \end{cases} \quad (2.49)$$

όπου $tr_{BC}(x)$ είναι η μεταχηματισμένη τυχαία μεταβλητή x και λ ο συντελεστής μετασχηματισμού δύναμης. [20] , [24]

2.7 Θερμικό περιεχόμενο

Το θερμικό περιεχόμενο εκφράζει την παραγόμενη ενέργεια μετά την καύση μιας ποσότητας λιγνίτη σε Gcal και δίνεται από τη σχέση :

$$R_{LEC}(w) = A_{cell} \sum_{i=1}^N LEC(i) \quad (2.50)$$

Όπου A_{cell} είναι το εμβαδόν του κάθε κελιού σε m^2 , $LEC(i)$ οι τιμές της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας σε Gcal/ m^2 , w είναι η περιοχή μελέτης, N είναι ο αριθμός των τιμών της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας.

Η ενεργειακή επιφανειακή πυκνότητα (lignite energy content) σε Gcal/ m^2 ή οποία μας δείχνει την ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από τη σχέση :

$$LEC(s_p) = \rho_i \sum_{i=1}^{N(s_p)} z_i E_i, \quad (2.51)$$

Όπου E_i είναι η κατώτερη θερμογόνο δύναμη (Gcal/t) του λιγνιτικού στρώματος i , ρ_i είναι το ειδικό βάρος του λιγνίτη ($1,21t/m^3$), z_i είναι το πάχος του λιγνίτη σε m και $N(s_p)$ είναι ο αριθμός των λιγνιτικών στρωμάτων στην γεώτρηση, s_p είναι οι θέσεις των γεωτρήσεων. [5]

2.8 Υπολογισμός αποθεμάτων Λιγνίτη

Ο υπολογισμός των αποθεμάτων λιγνίτη δίνεται από το τύπο :

$$R(w) = \rho_i A_{cell} \sum_{i=1}^N z_i \quad (2.52)$$

Όπου ρ_i είναι το ειδικό βάρος του λιγνίτη $1,21t/m^3$, A_{cell} είναι το εμβαδόν του κάθε κελιού σε m^2 , z_i το πάχος του λιγνίτη σε m, w είναι η περιοχή μελέτης και N είναι ο αριθμός των τιμών του πάχους λιγνίτη.

Κεφάλαιο 3

Γεωστατιστική Ανάλυση Δεδομένων

Εισαγωγή

Η ανάλυση των δεδομένων κατα την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιείται με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού R. Για την διεξαγωγή υπολογισμών και κατασκευή γραφημάτων, αναπτύχθηκε κατάλληλος υπολογιστικός κώδικας βασισμένος σε εντολές και συναρτήσεις της γλώσσας προγραμματισμού R. Στο κεφάλαιο αυτό, με τη χρήση γεωστατιστικών μεθόδων πραγματοποιείται ανάλυση στα δεδομένα λιγνίτη, της θερμογόνου και της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας. Τα δεδομένα προέρχονται από τμήμα του Ορυχείου Καρδιάς, ενός εκ των τεσσάρων Ορυχείων που ανήκουν στο Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας (Λ.Κ.Δ.Μ.) όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1.3. Τα δεδομένα λιγνίτη αναφέρονται στον απολήψιμο λιγνίτη και έχουν υπολογισθεί έως το τεχνικό δάπεδο του κοιτάσματος όπως αναρτήθηκε στην ενότητα 1.2.2. Τα δεδομένα της θερμογόνου αναφέρονται στην κατώτερη θερμογόνο δύναμη όπως αναλύεται στο Κεφάλαιο 1.4.

Αρχικά υπολογίστηκαν τα στατιστικά μεγέθη για το σύνολο των δεδομένων. Στη συνέχεια έγινε εφαρμογή μετασχηματισμού Box-Cox στα δεδομένα λιγνίτη και της περιεχόμενης ενέργειας σύμφωνα με τη Σχέση 2.49. Έπειτα έγινε ο υπολογισμός των εμπειρικών βαριογραμμάτων όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.3.1 και ο έλεγχος παρουσίας τάσης για το σύνολο των δεδομένων. Στα δεδομένα λιγνίτη εφαρμόστηκε δευτέρου βαθμού αφαίρεση τάσης.

Στο Κεφάλαιο 3.4 πραγματοποιείται η προσαρμογή των θεωρητικών μοντέλων στο εμπειρικό βαριόγραμμα για το σύνολο των δεδομένων. Η δοκιμή προσαρμογής για τα τρία μοντέλα (γκαουσιανό, εκθετικό, σφαιρικό) έγινε σύμφωνα με τις Σχέσεις 2.20, 2.21 και 2.22 αντίστοιχα. Στη συνέχεια του Κεφαλαίου εφαρμόζεται ο έλεγχος ανισοτροπίας και γίνεται παρουσίαση των κατευθυντικών βαριογραμμάτων, καθώς και των πινάκων που προκύπτουν. Έπειτα στο Κεφάλαιο 3.6 πραγματοποιείται η επιβεβαίωση χωρικού μοντέλου και ο έλεγχος αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων σύμφωνα με τις σχέσεις του Κεφαλαίου 2.5.

Η εκτίμηση των αποθεμάτων λιγνίτη και της περιεχόμενης ενέργειας (θερμικό περιεχόμενο) πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Κανονικού Kriging χρησιμοποιώντας τη Σχέση 2.40. Στη συνέχεια από τη μέθοδο χωρικής παρεμβολής και σύμφωνα με τη Σχέση 2.44 προκύπτει ο χάρτης σφαλμάτων της εκτίμησης. Έπειτα έγινε ο υπολογισμός των αποθεμάτων λιγνίτη και θερμικού περιεχομένου με τη χρήση του τύπου 2.50 και 2.52 αντίστοιχα. Ο υπολογισμός των αποθεμάτων λιγνίτη έχει υπολογισθεί ως το τεχνικό δάπεδο του κοιτάσματος όπως φαίνεται στην ενότητα 1.2.2.

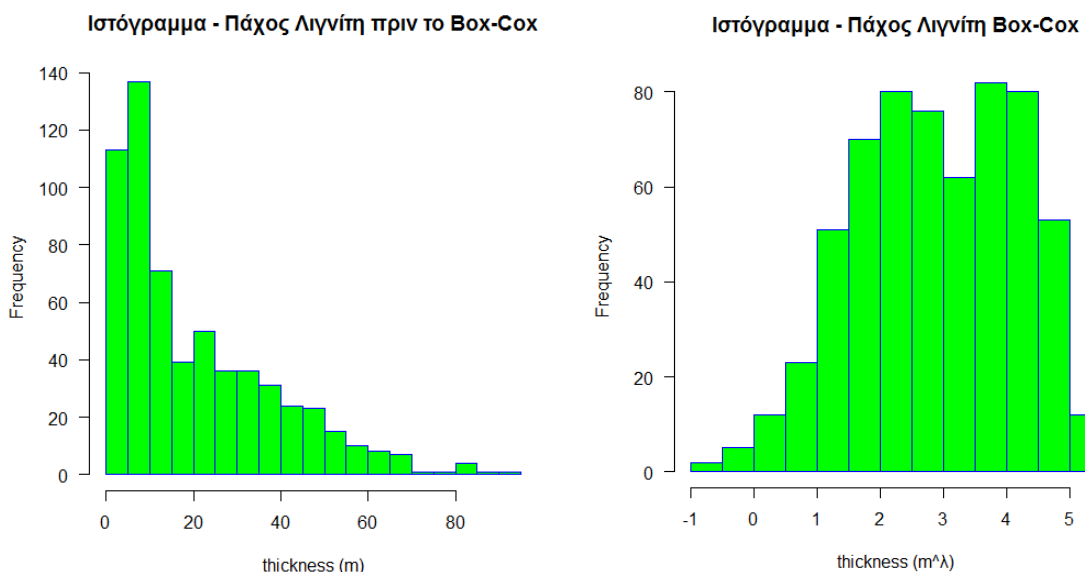
3.1 Στατιστική Ανάλυση Δεδομένων

Απαραίτητο για να ξεκινήσει μια στατιστική ανάλυση είναι η συλλογή δεδομένων και ο υπολογισμός των στατιστικών μεγεθών του δείγματος. Στατιστικά μεγέθη είναι η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, η διάμεσος, το ελάχιστο, το μέγιστο καθώς και το μέγεθος του δείγματος. Στα στατιστικά μεγέθη περιλαμβάνεται και το ιστόγραμμα το οποίο αποτελεί μέθοδο παρουσίασης ενός συνόλου δεδομένων. Με την κατανομή συχνότητας ή ιστόγραμμα μπορεί να γίνει έλεγχος της κατανομής των δεδομένων. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης ο έλεγχος γίνεται στο σύνολο των δεδομένων για το **σύνολο** των γεωτρήσεων με σκοπό να παρατηρηθεί αν το δείγμα ακολουθεί την κανονική κατανομή.

Στις περιπτώσεις που το ιστόγραμμα αποκλίνει κατά πολύ από την καμπύλη κανονικής κατανομής κρίνεται απαραίτητος ο μετασχηματισμός των δεδομένων. Στο κεφάλαιο αυτό εφαρμόζεται μετασχηματισμός Box-Cox σύμφωνα με τη Σχέση 2.49 στα δεδομένα λιγνίτη και ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας.

Επίσης το μέγεθος του δείγματος για το κάθε σύνολο δεδομένων διαφέρει καθώς έχουν αφαιρεθεί οι μηδενικές τιμές των αρχικών δεδομένων σε συγκεκριμένες συντεταγμένες. Το πλήθος των δεδομένων για το πάχος λιγνίτη είναι 608, για τη θερμογόνου 326, ενώ για την επιφανειακή ενεργειακή πυκνότητα 324.

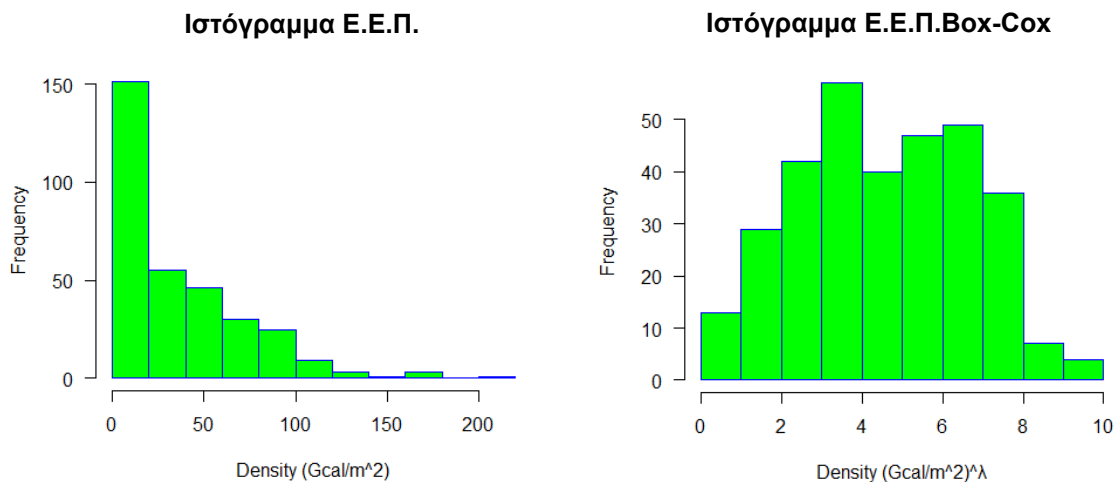
Για τα δεδομένα του λιγνίτη στον άξονα Y (Frequency), προβάλεται η συχνότητα εμφάνισης του πάχους, ενώ στον άξονα X προβάλεται το πάχος σε m. Στο Σχήμα 3.1 παρατηρείται ότι τα δεδομένα απέχουν αρκετά από την καμπύλη της κανονικής κατανομής. Για το λόγο αυτό, έγινε εφαρμογή μετασχηματισμού Box-Cox με τη χρήση του τύπου 2.49 και μετασχηματισμό δύναμης $\lambda = 0,08$. Η τιμή του λ υπολογίστηκε μέσα από κώδικα βελτιστοποίησης του πακέτου {car} της γλώσσας προγραμματισμού R.



Σχήμα 3.1: Ιστόγραμμα των δεδομένων πάχους λιγνίτη για το σύνολο των γεωτρήσεων πριν και μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού Box-Cox σε m και m^λ αντίστοιχα, όπου $\lambda = 0,08$.

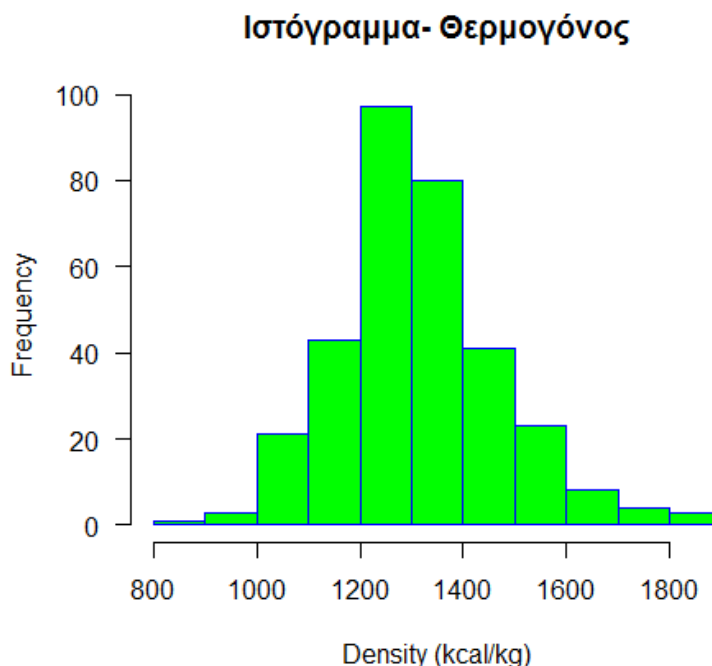
Στο Σχήμα. 3.1 μετά τον μετασχηματισμό παρατηρείται σημαντική βελτίωση στα δεδομένα, καθώς ακολουθούν σε ικανοποιητικό βαθμό την καμπύλη κανονικής κατανομής.

Στα δεδομένα της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας, οι ενδείξεις του αρχικού ιστογράμματος ήταν παρόμοιες με τα δεδομένα λιγνίτη. Έτσι ακολουθήθηκε ομοίως η διαδικασία της προσαρμογής των δεδομένων, με μετασχηματισμό Box-Cox σύμφωνα με τη Σχέση 2.49 και με συντελεστή δύναμης $\lambda = 0.21$. Στους άξονες του Σχήματος 3.2 & 3.2.2, προβάλεται η συχνότητα εμφάνισης, σε σχέση με τη περιεκτικότητα της επιφανειακής πυκνότητας σε Gcal/m^2 και $(\text{Gcal/m}^2)^\lambda$ αντίστοιχα. Η διαφορά στα δύο ιστογράμματα είναι εμφανής, με το τελικό μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού να ακολουθεί σε ικανοποιητικό βαθμό την καμπύλη της κανονικής κατανομής.



Σχήμα 3.2 : Ιστόγραμμα των δεδομένων επιφανειακής ενεργειακής πυκνότητας πριν και μετά την εφαρμογή μετασχηματισμού Box-Cox σε Gcal/m^2 και $(\text{Gcal/m}^2)^\lambda$ αντίστοιχα για το σύνολο των γεωτρήσεων .

Στο σύνολο δεδομένων της θερμογόνου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.3, το ιστόγραμμα ακολουθεί επαρκώς την καμπύλη κανονικής κατανομής. Για τον λόγο αυτόν, δεν κρίθηκε απαραίτητο να γίνει μετασχηματισμός των δεδομένων. Στον άξονα X βρίσκονται οι τιμές της θερμογόνου σε kcal/kg και στον άξονα Y η συχνότητα εμφάνισης.



Σχήμα 3.3: Ιστόγραμμα των δεδομένων της θερμογόνου σε kcal/kg

Στη συνέχεια παρατίθενται οι πίνακες με τα στατιστικά μεγέθη για το σύνολο των δεδομένων. Τα στατιστικά μεγέθη αναφέρονται στο **σύνολο** των γεωτρήσεων για την ευρύτερη περιοχή του ορυχείου Καρδιάς. Στις περιπτώσεις του πάχους λιγνίτη και της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας οι πίνακες 3.1 & 3.2 αντίστοιχα, έχουν συμπληρωθεί με τα στατιστικά μεγέθη πριν και μετά την εφαρμογή μετασχηματισμού Box-Cox.

Στατιστικά Μεγέθη	Πάχος Λιγνίτη	Πάχος Λιγνίτη Box- Cox
Μέση τιμή (m)	20,47	2,89
Διάμεσος (m)	13,46	2,88
Τυπική Απόκλιση (m)	18,08	1,26
Ελάχιστο (m)	0,56	-0,98
Μέγιστο (m)	90,18	5,41
Μέγεθος δείγματος	608	608

Πίνακας 3.1: Στατιστικά μεγέθη για το πάχος λιγνίτη απο το σύνολο των γεωτρήσεων που προέρχονται απο την ευρύτερη περιοχή του ορυχείου Καρδιάς, πριν και μετά την εφαρμογή μετασχηματισμού Box-Cox. Ο πίνακας με την εφαρμογή μετασχηματισμού Box-Cox είναι σε m^λ , όπου $\lambda = 0,08$.

Ομοίως μετρήθηκαν τα στατιστικά μεγέθη για την θερμογόνο δύναμη και για τη ενεργειακή επιφανειακή πυκνότητα, όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.2 και 3.3 αντίστοιχα.

Στατιστικά Μεγέθη		Θερμογόνος Δ.
Μέση τιμή	(kcal/kg)	1316,8
Διάμεσος	(kcal/kg)	1298
Τυπική Απόκλιση	(kcal/kg)	158.32
Ελάχιστο	(kcal/kg)	882
Μέγιστο	(kcal/kg)	1883
Μέγεθος δείγματος		326

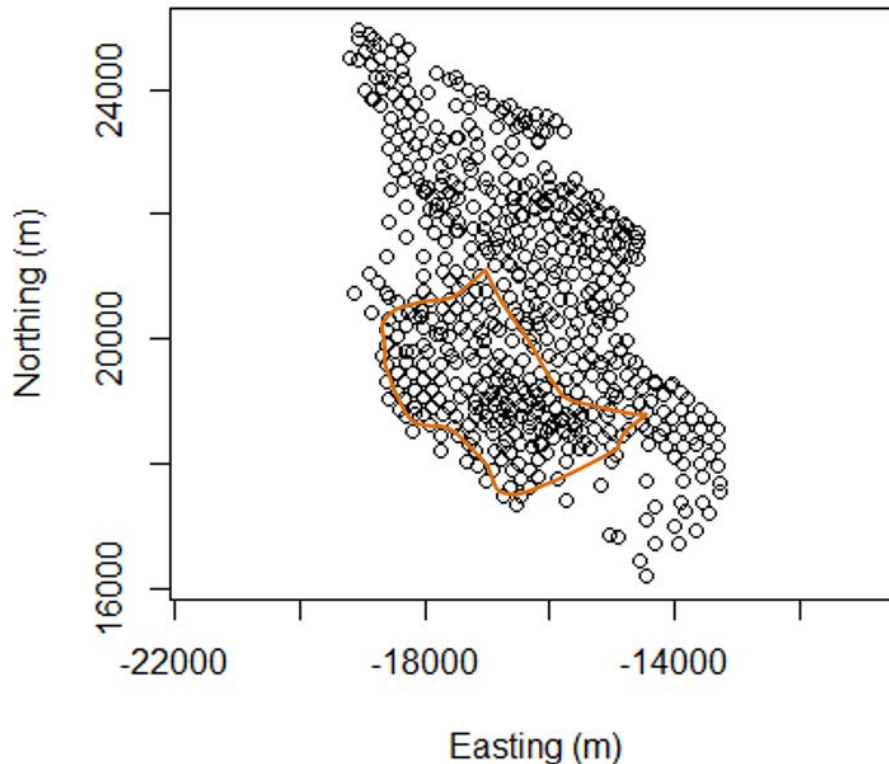
Πίνακας 3.2: Στατιστικά μεγέθη για τη θερμογόνο (kcal/kg) για το σύνολο των γεωτρήσεων της ευρύτερης περιοχής του ορυχείου Καρδιάς

Στατιστικά Μεγέθη	Ε. Ε. Πυκνότητα	Ε. Ε. Πυκνότητα Box-Cox
Μέση τιμή (Gcal/m ²)	36,61	4,58
Διάμεσος (Gcal/m ²)	24,26	4,54
Τυπική Απόκλιση (Gcal/m ²)	34,78	2,1
Ελάχιστο (Gcal/m ²)	1,181	0,169
Μέγιστο (Gcal/m ²)	205,46	9,8
Μέγεθος δείγματος	324	324

Πίνακας 3.3: Στατιστικά μεγέθη για την ενεργειακή επιφανειακή πυκνότητα σε (Gcal/m²) από τη ευρύτερη περιοχή του Ορυχείου Καρδιάς. Ο πίνακας με την εφαρμογή μετασχηματισμού Box- Cox είναι σε (Gcal/m²)^λ.

3.2 Θέσεις Γεωτρήσεων στον Χώρο

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι θέσεις των γεωτρήσεων στο χώρο, μέσω του χάρτη που κατασκευάστηκε. Συγκεκριμένα δείχνει τις ακριβείς θέσεις των γεωτρήσεων σύμφωνα με τις συντεταγμένες της κάθε γεώτρησης. Οι συντεταγμένες των γεωτρήσεων για τον άξονα X είναι μεταξύ -13,27 km και 19,18 km, για τον άξονα Y είναι μεταξύ 16,18 km και 24,94 km. Το τμήμα του Ορυχείου μελέτης ορίζεται μεταξύ του -18,68 km και -14,44 km στον άξονα X, ενώ στον άξονα Y μεταξύ 17,38 km και 21,06 km. Το πολύγωνο που κατασκευάστηκε για την οριοθέτηση του τμήματος μελέτης του Ορυχείου αντιστοιχεί στο μέσο πρηνές της περιοχής του Νοτιοδυτικού Πεδίου, δηλαδή αντιστοιχεί στη μέση απόσταση που έχει το φρύδι του πρηνούς των λιγνιτικών βαθμίδων από το πόδι (μεταξύ τεχνικής οροφής και τεχνικού δαπέδου του κοιτάσματος). Το τμήμα μελέτης του Ορυχείου αποτελεί περιοχή του απομένοντος κοιτάσματος στο Ορυχείο Καρδιάς. Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται τα στατιστικά μεγέθη των γεωτρήσεων.



Σχήμα 3.4: Κάτοψη με τις θέσεις των γεωτρήσεων

Στατιστικά Μεγέθη Γεωτρήσεων	Τιμές Μεγεθών
Μέση ελάχιστη απόσταση (m)	148,2
Διάμεσος (m)	151,3
Τυπική Απόκλιση (m)	62,2
Διακύμανση (m ²)	3,8 10 ³
Κύρτωση	5,7
Ασυμμετρία	0,71
Σύνολο Γεωτρήσεων	608

Πίνακας 3.4: Στατιστικά μεγέθη γεωτρήσεων

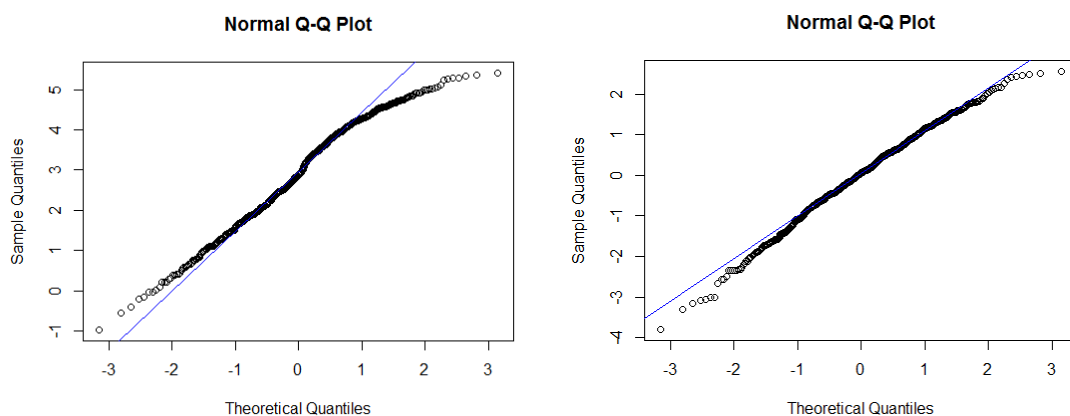
3.3 Εμπειρικό Βαριόγραμμα

Στο κεφάλαιο αυτό, θα παρουσιαστούν τα βαριογράμματα που υπολογίστηκαν πριν και μετά την αφαίρεση τάσης, το διάγραμμα κανονικής πιθανότητας (normplot) και η αφαίρεση τάσεων.

Το βαριόγραμμα υπολογίστηκε σύμφωνα με την Σχέση 2.17 με βήμα $h=0.3$ km (300 m) σε απόσταση 3 km για το πάχος του λιγνίτη. Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2.3.1 το βαριόγραμμα δείχνει τη χωρική εξάρτηση των σημείων.

Ως κύρια παρατήρηση μέσω των διαγραμμάτων από το Σχήμα 3.5 είναι η διαφορά που παρουσιάζουν τα δεδομένα πριν αλλά και μετά την αφαίρεση τάσης. Έτσι λοιπόν από τα δυο διαγράμματα είναι εμφανές ότι μετά την αφαίρεση τάσης, η απόκλιση από την κανονική κατανομή είναι μικρότερη από αυτήν που παρουσιάζει πριν αφαιρεθεί.

Στο σύνολο δεδομένων της θερμογόνου και της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας, οι τιμές δείχνουν πως ακολουθούν σε ικανοποιητικό βαθμό την ευθεία της κανονικής κατανομής. Μετά από έλεγχο για την ύπαρξη τάσεων με την ανάλυση των συντελεστών τάσης και των διακύμανσης, προέκυψε πως δεν υπάρχουν ισχυρές τάσεις στα συγκεκριμένα σύνολα δεδομένων.



1. Διάγραμμα κανονικής πιθανότητας πριν αφαιρεθεί η τάση στα δεδομένα του λιγνίτη
2. Διάγραμμα κανονικής πιθανότητας αφού αφαιρεθεί η τάση στα δεδομένα του λιγνίτη

Σχήμα 3.5: Διάγραμμα κανονικής πιθανότητας για το πάχος του λιγνίτη πριν και μετά την αφαίρεση της τάσης, για να εξετασθεί αν τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή. Οι κύκλοι αντιστοιχούν στις τιμές των δεδομένων, οι οποίες απεικονίζονται στον άξονα y. Στον άξονα x απεικονίζονται οι θεωρητικές τιμές της κατανομής. Η ευθεία γραμμή του διαγράμματος αντιστοιχεί στην κανονική κατανομή.

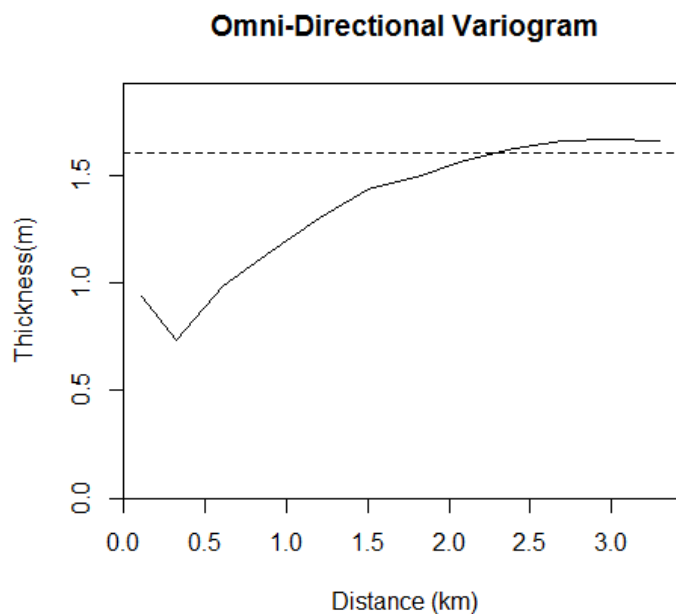
3.3.1 Αφαίρεση Τάσεων

Τα τυχαία πεδία μπορούν να αναπαρασταθούν ως $X(s) = m_x(s) + X'(s)$. Η συνάρτηση $m_x(s)$ είναι η συνάρτηση τάσης που αντιπροσωπεύει τις ντετερμινιστικές χωρικές συσχετίσεις μεταξύ των στοιχείων, δηλαδή αφορά τις αργές μεταβολές του πεδίου.

Στις περισσότερες εφαρμογές που περιλαμβάνουν δεδομένα γεωτρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί εντός κοιτασμάτων, δεν υπάρχουν στοιχεία που να υποδεικνύουν ένα συγκεκριμένο τύπο μοντέλου τάσης. Έτσι η έννοια της τάσης m_x συνδέεται συνήθως με ομαλά μεταβαλλόμενες συνιστώσες της μεταβλητότητας των $X(s)$ στο διάστημα, συνήθως μοντελοποιείται με πολυώνυμα χαμηλής τάξης [5].

Ο έλεγχος για την ύπαρξη τάσης έγινε μέσω των τιμών των συντελεστών της τάσης. Η ένδειξη για τον βαθμό της τάσης δόθηκε από τον συντελεστή του Pearson. Τιμή του r μεγαλύτερη του 30 % θεωρείται πως είναι επαρκής εξάρτηση για την ύπαρξη τάσης.

Παρακάτω στο Σχήμα 3.6 φαίνεται το εμπειρικό βαριόγραμμα για το πάχος του λιγνίτη πριν αφαιρεθεί η τάση. Το βαριόγραμμα είναι σε απόσταση 3 km με βήμα $h=0,3$ km.



Σχήμα 3.6. Εμπειρικό βαριόγραμμα του πάχους λιγνίτη πριν την αφαίρεση τάσης.

Εφαρμόστηκε μοντέλο τάσης δευτέρου βαθμού σύμφωνα με την Σχέση 3.1.

$$m_x = \alpha_0 + \alpha_1 x_i + \alpha_2 x_i^2 + \alpha_3 y_i + \alpha_4 y_i^2 + \alpha_5 x_i y_i, i = 1, \dots, N, \quad (3.1)$$

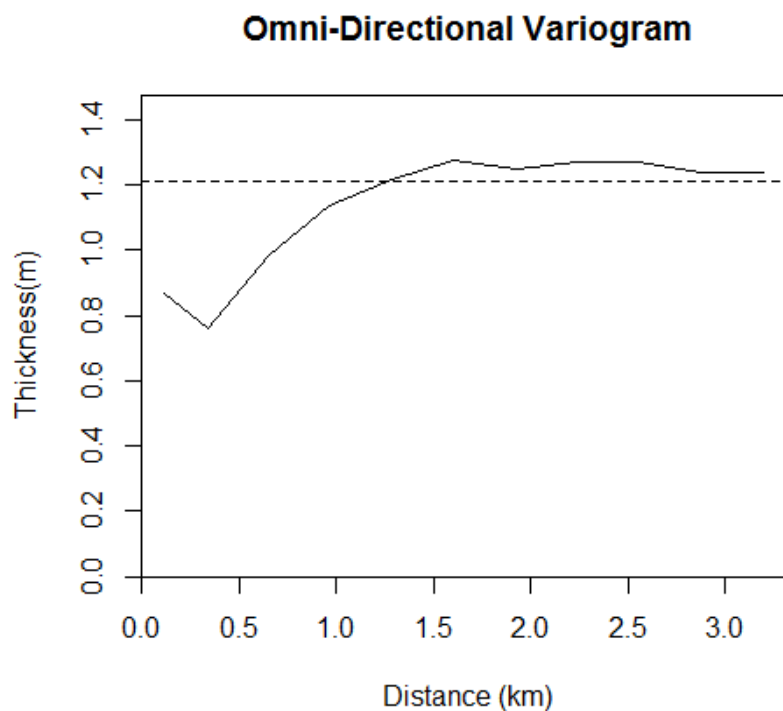
όπου m_x είναι η τάση, N είναι το πλήθος των γεωτρήσεων, x_i, y_i είναι οι συντεταγμένες των γεωτρήσεων.

Μέσω των μοντέλων των τάσεων δημιουργήθηκαν εξισώσεις με γνωστά τα x_i και τα y_i και αγνώστους τα $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$. Έτσι λύνοντας το σύστημα με τους 6 αγνώστους προκύπτουν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4 και το βαριόγραμμα μετά την αφαίρεση τάσης. Οι παράμετροι του βαριογράμματος που χρησιμοποιήθηκαν είναι βήμα $h=0,3$ km σε μέγιστη απόσταση 3 km.

Ο υπολογισμός των συντελεστών τάσης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη Σχέση 3.1. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης για την τάση.

Συντελεστής	Τιμή
α_0	18,07
α_1	2,825
α_2	1,133
α_3	0,118
α_4	0,002
α_5	-0,069

Πίνακας 3.5 : Τιμές των συντελεστών του μοντέλου τάσης



Σχήμα 3.7: Απεικόνιση του βαριογράμματος μετά την αφαίρεση της τάσης, Στον άξονα x απεικονίζεται η απόσταση σε km και στον άξονα y το πάχος του λιγνίτη σε m .

3.4 Προσαρμογή Θεωρητικών Μοντέλων

Μέσω της προσαρμογής του θεωρητικού μοντέλου στο εμπειρικό βαριόγραμμα δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού του βαριογράμματος σε αποστάσεις όπου δεν υπάρχουν σημεία. Επίσης μέσω της προσαρμογής γίνεται πιο ακριβής η εκτίμηση βασικών παραμέτρων όπως η εκτίμηση του φαινομένου πυρήνα (nugget effect) c_0 , που μπορεί να προκύπτει από χαμηλή πυκνότητα δεδομένων ή από σφάλματα μέτρησης. Επομένως στις περιπτώσεις που το εύρος των τάξεων απόστασης αυξάνεται, η διακριτική ικανότητα του πειραματικού βαριογράμματος μειώνεται με αποτέλεσμα να αυξάνεται η φαινόμενη μεταβλητότητα στις μικρές αποστάσεις. Έτσι το βαριόγραμμα αρχίζει από ένα υψηλότερο σημείο στο άξονα y και όχι απ' την αρχή των αξόνων.

Μια ακόμα παράμετρος που εκτιμάται είναι το άνω φράγμα στο βαριόγραμμα σ^2 που προκύπτει από τη προσαρμογή σ' ένα θεωρητικό μοντέλο, το οποίο σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είναι απαραίτητο να ταυτίζεται με τη δειγματική διασπορά s_x^2 . Η διαδικασία αυτή αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση της απόκλισης του θεωρητικού προτύπου από το εμπειρικό για όλες τις αποστάσεις και επομένως δεν αποδίδει με ακρίβεια την πραγματική τιμή της διασποράς. Επίσης μέσω αυτής της διαδικασίας βάσει της προσαρμογής του βαριογράμματος σε ένα θεωρητικό πρότυπο εκτιμάται το μήκος συσχέτισης ξ . Συνήθως όταν το δείγμα είναι αραιό ή όταν υπάρχουν σφάλματα οδηγεί στην υποεκτίμηση της πραγματικής του τιμής.

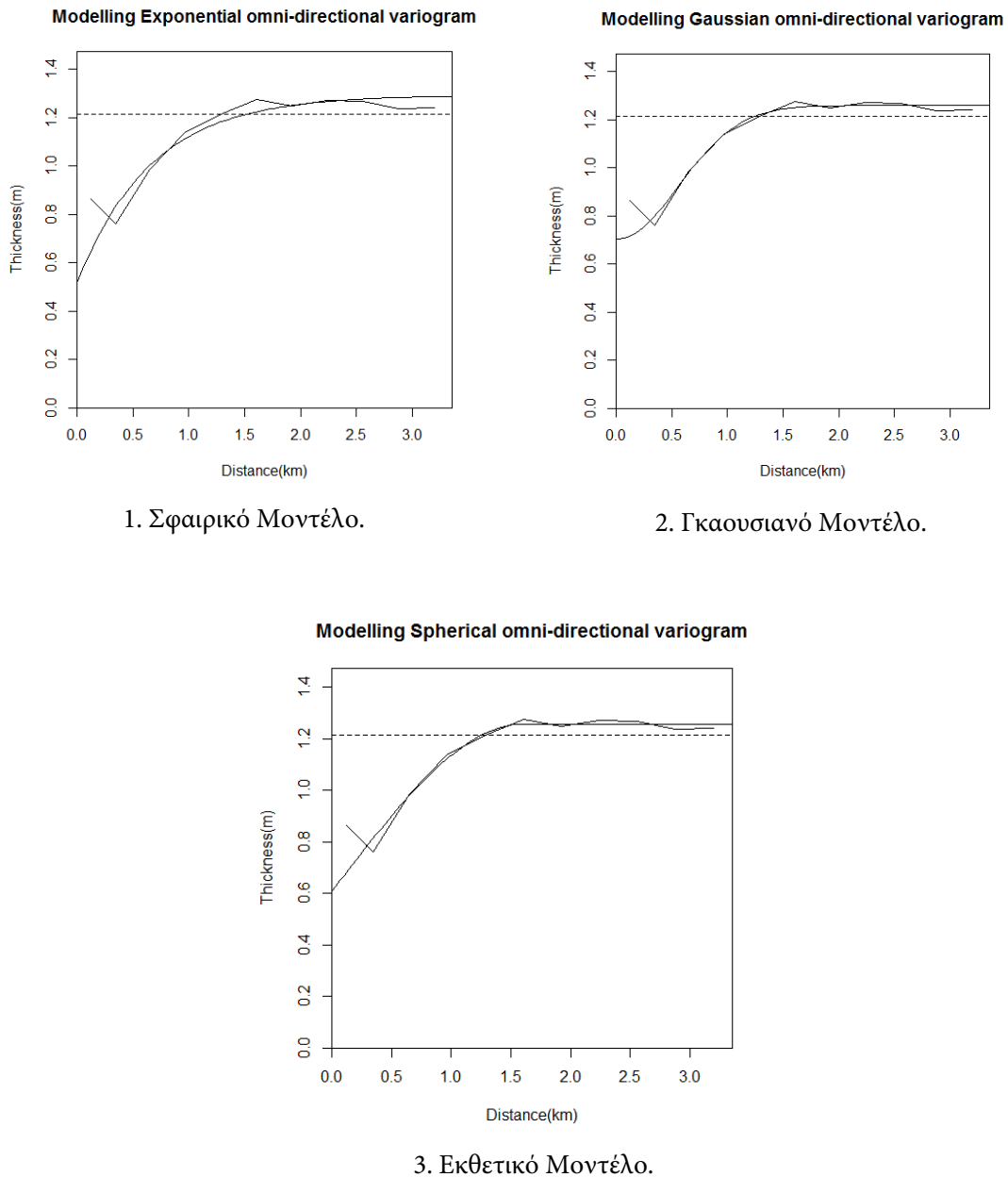
Προσαρμογή Θεωρητικού Μοντέλου - Πάχος Λιγνίτη

Στις μετρήσεις για το πάχος του λιγνίτη δοκιμάστηκαν τρία μοντέλα, το εκθετικό (exponential), το γκαουσιανό (Gaussian) και το σφαιρικό (spherical) τα οποία δίνονται από τις Σχέσεις 2.20, 2.21 & 2.22. Η επιλογή του μοντέλου που θα προσαρμοστεί στο εμπειρικό βαριόγραμμα, έγινε βάσει των γραφικών παραστάσεων και των τετραγωνικών σφαλμάτων των τιμών που δίνεται από τη Σχέση 2.47. Για κάθε ένα από τα θεωρητικά πρότυπα υπολογίστηκαν τα τετραγωνικά σφάλματα βάσει των θεωρητικών τιμών σύμφωνα με τις σχέσεις που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.3.3 και στη συνέχεια αφαιρέθηκαν από τις τιμές του εμπειρικού βαριογράμματος.

Στον Σχήμα 3.8 για το πάχος του λιγνίτη, φαίνονται τα τρία θεωρητικά πρότυπα προσαρμοσμένα στο εμπειρικό βαριόγραμμα και στον Πίνακα 3.5 τα αποτελέσματα των τετραγωνικών σφαλμάτων για το κάθε ένα.

Μοντέλο	Σφάλμα (m^2)
Σφαιρικό	0,088
Εκθετικό	0,125
Γκαουσιανό	0,055

Πίνακας 3.6: Τιμές των τετραγωνικών σφαλμάτων, που υπολογίστηκαν για την επιλογή του κατάλληλου θεωρητικού μοντέλου για τα δεδομένα λιγνίτη, ώστε να προσαρμοστεί στο εμπειρικό βαριόγραμμα.



Σχήμα 3.8: Απεικόνιση των τριών δοκιμών που έγιναν για την προσαρμογή κατάλληλου θεωρητικού μοντέλου (σφαιρικό, γκαουσιανό, εκθετικό).

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα του εκθετικού και του σφαιρικού μοντέλου υπάρχει μεγάλη απόκλιση από την γραφική παράσταση του εμπειρικού βαριογράμματος και διακρίνεται από τα σφάλματα διότι το εκθετικό παρουσιάζει σφάλμα 0,125 και το σφαιρικό 0,088 οπότε και απορρίπτονται. Το γκαουσιανό όπως φαίνεται και από τις γραφικές παραστάσεις προσαρμόζεται καλύτερα. Η τελική επιλογή είναι το γκαουσιανό μοντέλο και γίνεται βάσει των τετραγωνικών σφαλμάτων όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5.

Το μοντέλο που έχει την καλύτερη προσαρμογή είναι το γκαουσιανό μοντέλο που δίνεται από τη Σχέση 2.20. Μέσω της γραφικής παράστασης του γκαουσιανού, υπολογίζονται οι παράμετροι που αναφέρθηκαν, δηλαδή το φαινόμενο πυρήνα (nugget effect), η διασπορά σ^2 και το μήκος συσχέτισης ξ , τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6.

Παράμετροι Γκαουσιανού Μοντέλου	Τιμή
Φαινόμενο Πυρήνα (Nugget Effect) (m^2)	0,7
Διασπορά (σ^2) (m^2)	0,6
Μήκος Συσχέτισης (ξ) (km)	0,8

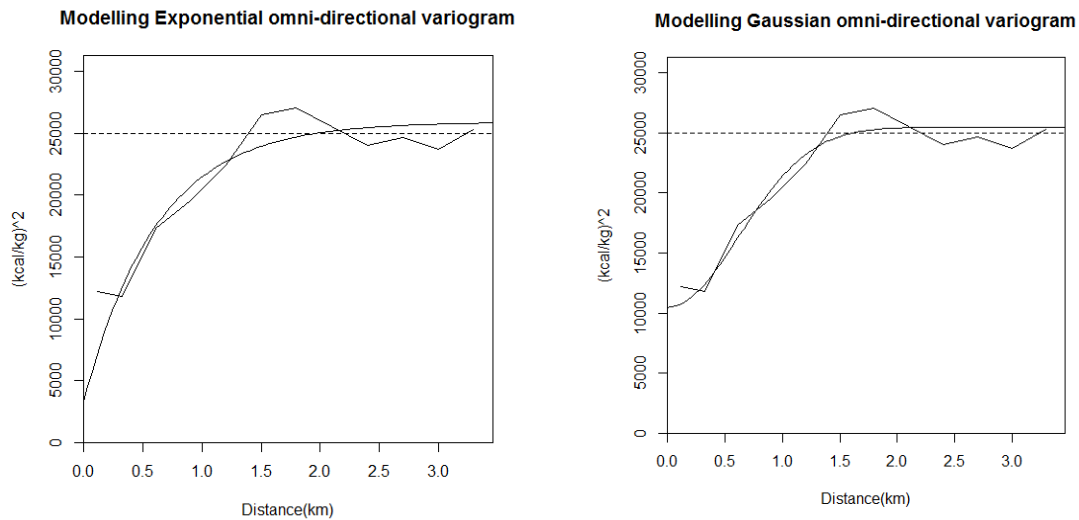
Πίνακας 3.7: Τιμές των παραμέτρων που προκύπτουν από την προσαρμογή του γκαουσιανού θεωρητικού μοντέλου στο εμπειρικό βαριόγραμμα, όπως υπολογίστηκε για τα δεδομένα λιγνίτη.

Προσαρμογή Θεωρητικού Μοντέλου - Θερμογόνος

Η προσαρμογή του θεωρητικού μοντέλου στη θερμογόνο έγινε ομοίως όπως στο πάχος λιγνίτη δοκιμάζοντας τα τρία θεωρητικά μοντέλα (σφαιρικό, εκθετικό, γκαουσιανό). Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της προσαρμογής των τριών θεωρητικών προτύπων στο εμπειρικό βαριόγραμμα, παρουσιάζοντας τα τετραγωνικά σφάλματα για το κάθε πρότυπο σε $(\text{Mcal/kg})^2$ στον Πίνακα 3.7. Επίσης στο Σχήμα 3.9 αποτυπώνονται οι γραφικές παραστάσεις των προτύπων.

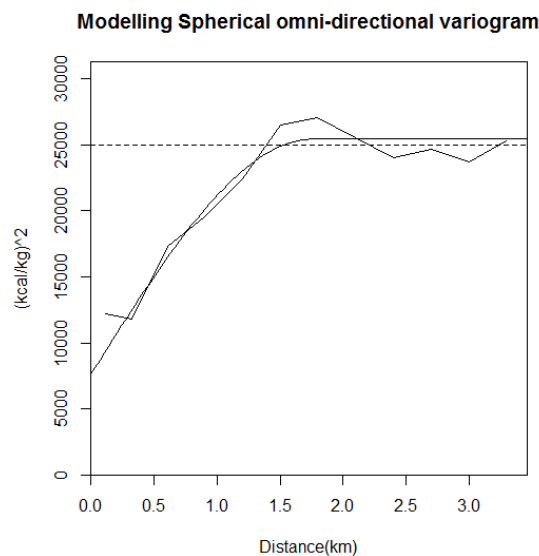
Μοντέλο	Σφάλμα $(\text{Mcal/kg})^2$
Σφαιρικό	20,75
Εκθετικό	46,44
Γκαουσιανό	17,78

Πίνακας 3.8 : Τιμές των τετραγωνικών σφαλμάτων που υπολογίστηκαν για την επιλογή του κατάλληλου θεωρητικού μοντέλου για τη θερμογόνο



1. Εκθετικό Μοντέλο.

2. Γκαουσιανό Μοντέλο.



3. Σφαιρικό Μοντέλο.

Σχήμα 3.9 : Απεικόνιση των τριών δοκιμών που έγιναν για την προσαρμογή κατάλληλου θεωρητικού μοντέλου (σφαιρικό, γκαουσιανό, εκθετικό).

Ομοίως με το πάχος του λιγνίτη, το μοντέλο που προσαρμόζεται σε πιο ικανοποιητικό βαθμό είναι το γκαουσιανό, το οποίο παρατηρείται και απο τα τετραγωνικά σφάλματα των μοντέλων. Στο σφαιρικό το σφάλμα είναι 20,75, στο εκθετικό 46,44, ενώ στο γκαουσιανό το σφάλμα είναι 17,78 (Mcal/kg)². Επίσης οι παράμετροι που υπολογίστηκαν προκύπτουν απο την προσαρμογή του γκαουσιανού θεωρητικού μοντέλου στο εμπειρικό και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.8.

Παράμετροι Γκαουσιανού Μοντέλου		Τιμή
Φαινόμενο Πυρήνα (Nugget Effect) (kcal/kg) ²		10476
Διασπορά (σ ²)	(kcal/kg) ²	15030
Μήκος Συσχέτισης (ξ)	(km)	0,88

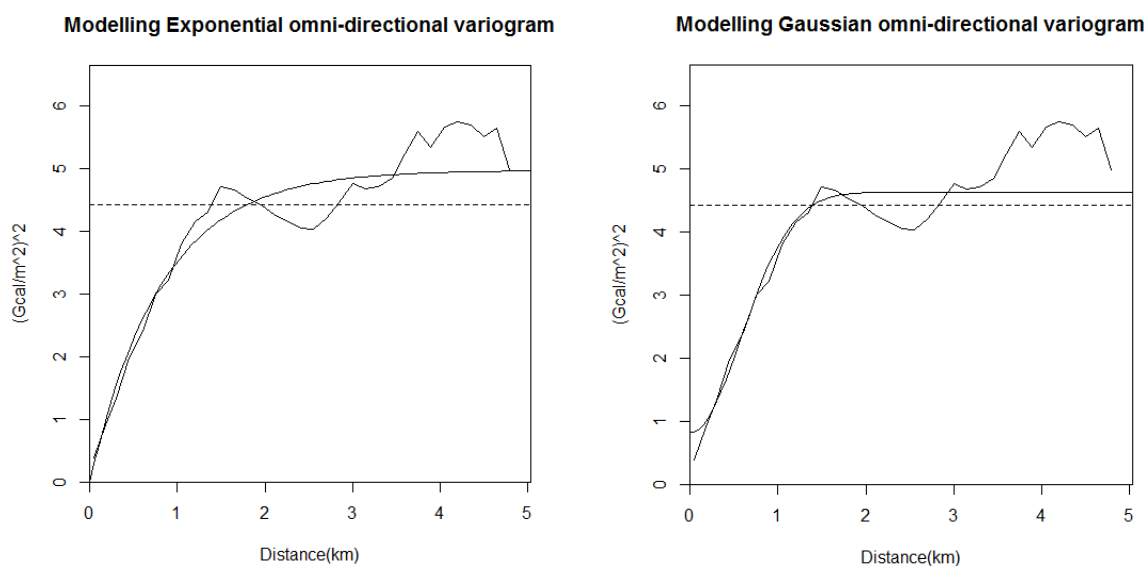
Πίνακας 3.9: Τιμές των παραμέτρων που προκύπτουν από την προσαρμογή του γκαουσιανού θεωρητικού μοντέλου στο εμπειρικό βαριόγραμμα για τη θερμογόνο.

Προσαρμογή Θεωρητικού Μοντέλου - Ενεργ. Επιφανειακή Πυκνότητα

Η προσαρμογή του θεωρητικού μοντέλου στο εμπειρικό βαριόγραμμα για την ενεργειακή επιφανειακή πυκνότητα περιεχόμενο, έγινε ομοίως με τη διαδικασία που πραγματοποιήθηκε στα δεδομένα για το πάχος λιγνίτη και της θερμογόνου. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με τα τρία θεωρητικά πρότυπα και τη προσαρμογή τους στο εμπειρικό βαριόγραμμα σε (Gcal/m²)². Στο Σχήμα 3.10 διακρίνονται οι γραφικές παραστάσεις των μοντέλων προσαρμοσμένα στο εμπειρικό βαριόγραμμα και στον Πίνακα 3.9, οι τιμές των τετραγωνικών σφαλμάτων του κάθε μοντέλου.

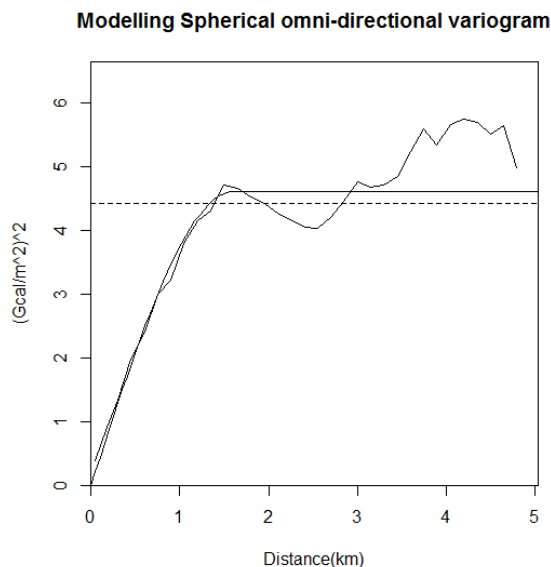
Μοντέλο	Σφάλμα (Gcal/m ²) ²
Σφαιρικό	8,95
Εκθετικό	5,87
Γκαουσιανό	8,89

Πίνακας 3.10 : Τιμές των τετραγωνικών σφαλμάτων, που υπολογίστηκαν για την επιλογή του κατάλληλου θεωρητικού μοντέλου για την ενεργειακή επιφανειακή πυκνότητα, ώστε να προσαρμοστεί στο εμπειρικό βαριόγραμμα.



1. Εκθετικό Μοντέλο.

2. Γκαουσιανό Μοντέλο.



3. Σφαιρικό Μοντέλο.

Σχήμα 3.10: Απεικόνιση των τριών δοκιμών που έγιναν για την προσαρμογή κατάλληλου θεωρητικού μοντέλου (σφαιρικό, γκαουσιανό, εκθετικό). Το διάγραμμα των θεωρητικών προτύπων ξεκινάει ακριβώς πάνω στον άξονα των y, στον οποίο αντιστοιχούν οι τιμές απο την ενεργειακή επιφανειακή πυκνότητα σε $(\text{Gcal}/\text{m}^2)^2$. Στον άξονα x απεικονίζονται οι αποστάσεις, που υπολογίζεται το βαριόγραμμα σε km.

Η επιλογή του μοντέλου για την επιφανειακή ενεργειακή πυκνότητα, πραγματοποιήθηκε με τον έλεγχο των τετραγωνικών σφαλμάτων και της γραφικών παραστάσεων της προσαρμογής στο εμπειρικό βαριόγραμμα. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.9 στο σφαιρικό και γκαουσιανό παρουσιάζεται σφάλμα 8,95 και 8,89 $(\text{Gcal}/\text{m}^2)^2$ αντίστοιχα. Το μοντέλο με την καλύτερη προσαρμογή είναι το εκθετικό που δίνεται απο τη Σχέση 2.21. Μέσω της γραφικής παράστασης του εκθετικού, υπολογίζονται οι παράμετροι. Δηλαδή το φαινόμενο πυρήνα (nugget effect), η διασπορά σ^2 και το μήκος συσχέτισης ξ , τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.10.

Παράμετροι Εκθετικού Μοντέλου		Τιμή
Φαινόμενο Πυρήνα (Nugget Effect) $(\text{Gcal}/\text{m}^2)^2$		0
Διασπορά (σ^2) $(\text{Gcal}/\text{m}^2)^2$		4,9
Μήκος Συσχέτισης (ξ) (km)		0,8

Πίνακας 3.11 : Τιμές των παραμέτρων που προκύπτουν από την προσαρμογή του γκαουσιανού θεωρητικού μοντέλου στο εμπειρικό βαριόγραμμα για την ενεργειακή επιφανειακή πυκνότητα.

3.5 Έλεγχος Ανισοτροπίας

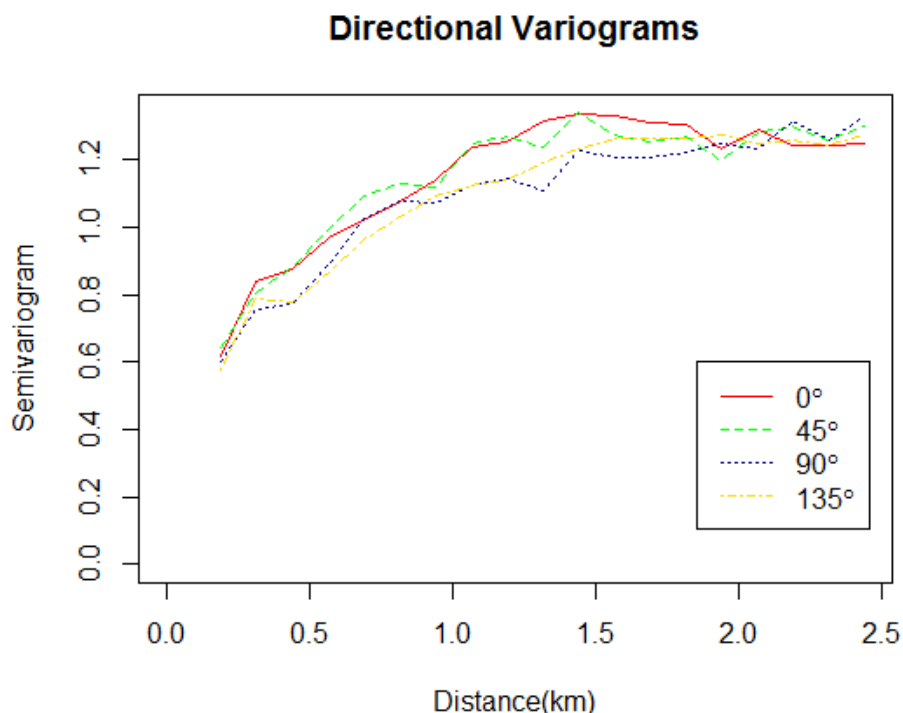
Η ανισοτροπία συσχετίζεται με τον τρόπο σχηματισμού του κοιτάσματος, με τις γενικότερες τεκτονικές κινήσεις και τον τρόπο ιζηματογένεσης.

Η περιοχή μελέτης ελέγχθηκε για γεωμετρική ανισοτροπία με τη χρήση κατευθυντικών βαριογραμμμάτων. Συγκεκριμένα υπολογίστηκαν βαριογραμμμάτα στις κατευθύνσεις 0° , 45° , 90° , 135° για τα τρία σύνολα δεδομένων.

Έλεγχος Ανισοτροπίας - Πάχος Λιγνίτη

Ο έλεγχος ανισοτροπίας για το πάχος του λιγνίτη εξετάστηκε με τη χρήση κατευθυντικών βαριογραμμμάτων. Ο υπολογισμός των κατευθυντικών μοντέλων έγινε σύμφωνα με τις παραμέτρους που δόθηκαν, με βήμα $h=0,3$ km σε μέγιστη απόσταση 2,5 km. Έτσι προκύπτουν τα παρακάτω βαριογράμματα.

Για να βρεθεί αν υπάρχει ανισοτροπία όπως και η κατεύθυνσή της, προϋπόθεση ήταν να γίνει προσαρμογή του γκαουσιανού μοντέλου στα κατευθυντικά βαριογράμματα. Με βάση την προσαρμογή προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.11, καθώς και το διάγραμμα των κατευθυντικών βαριογραμμμάτων στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11: Διάγραμμα με τα κατευθυντικά βαριογράμματα, που υπολογίστηκαν για τον έλεγχο της ανισοτροπίας στις κατευθύνσεις 0° , 45° , 90° , 135° .

Παράμετρος	Τιμή 0°	Τιμή 45°	Τιμή 90°	Τιμή 135°
Φαινόμενο πυρήνα (m ²)	0,6	0,58	0,65	0,57
Μήκος συσχέτισης (ξ) (km)	0,65	0,61	0,86	0,78
Διασπορά (σ ²) (m ²)	0,68	0,69	0,61	0,69

Πίνακας 3.12: Τιμές των παραμέτρων που προκύπτουν από την προσαρμογή του γκαουσιανού θεωρητικού μοντέλου στα εμπειρικά κατευθυντικά βαριογράμματα. Το φαινόμενο πυρήνα (Nugget Effect), τα μήκη συσχέτισης και η διασπορά για την κάθε τιμή.

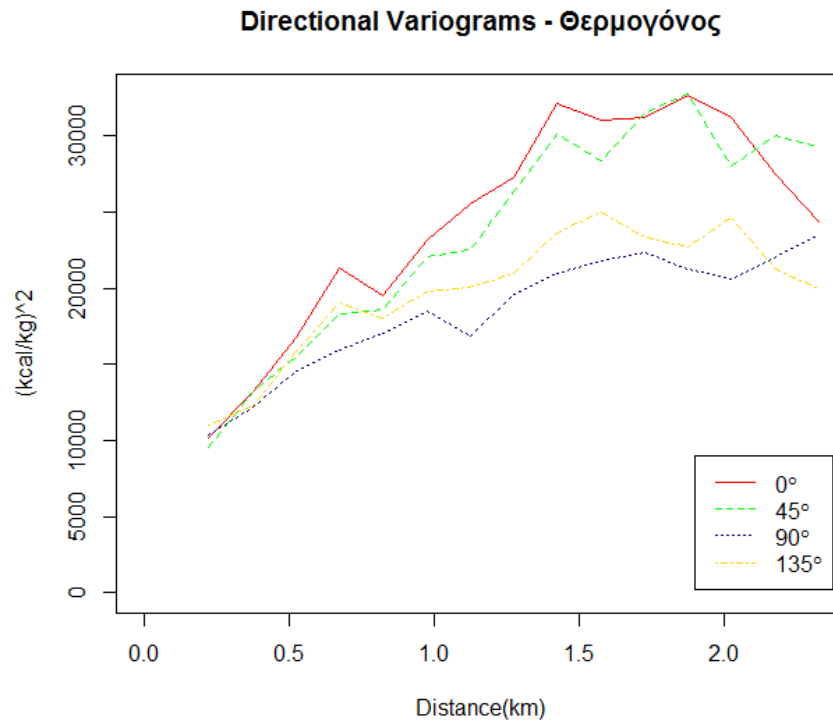
Απο το Σχήμα 3.11 παρατηρείται ότι τα κατευθυντικά ημιβαριογράμματα είναι κοντά μεταξύ τους και αυτό μας δίνει ενδείξεις ότι το πεδίο είναι ισοτροπικό. Επίσης άλλο ένα στοιχείο μη ύπαρξης ανισοτροπίας είναι ότι τα μήκη συσχέτισης όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.11 δεν έχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους. Ωστόσο, οι τιμές που δίνει για τα μήκη συσχέτισης η μαθηματική προσέγγιση δεν είναι ακριβώς πάνω σε έλλειψη λόγω του μικρού αριθμού ζευγών στο κάθε βήμα. Παρ'όλα αυτά το Σχήμα 3.11 και τα εκτιμώμενα μήκη συσχέτισης δεν δείχνουν σημαντική ανισοτροπία. Έτσι τα δεδομένα για το πάχος λιγνίτη είναι ισοτροπικά.

Έλεγχος Ανισοτροπίας - Θερμογόνος

Για τον έλεγχο ανισοτροπίας της θερμογόνου ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία μέσω των κατευθυντικών βαριογραμμάτων. Οι παράμετροι για τον υπολογισμό των κατευθυντικών μοντέλων είναι με βήμα $h=0,3$ km σε απόσταση 3 km. Για την ακριβή τιμή της ανισοτροπίας έγινε προσαρμογή του γκαουσιανού μοντέλου που επιλέχθηκε στα κατευθυντικά βαριογράμματα. Με βάση την προσαρμογή προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα του Πίνακα 3.12, καθώς και το διάγραμμα των κατευθυντικών βαριογραμμάτων στο Σχήμα 3.12.

Παράμετρος	Τιμή 0°	Τιμή 45°	Τιμή 90°	Τιμή 135°
Φαινόμενο πυρήνα (kcal/kg) ²	10346	10213	10370	10328
Μήκος συσχέτισης (ξ) (km)	0,55	0,72	0,94	0,42
Διασπορά (σ ²) (kcal/kg) ²	18075	19809	11715	12472

Πίνακας 3.13: Τιμές των παραμέτρων που προκύπτουν από την προσαρμογή του γκαουσιανού θεωρητικού μοντέλου της θερμογόνου στα εμπειρικά κατευθυντικά βαριογράμματα. Το φαινόμενο πυρήνα (Nugget Effect), τα μήκη συσχέτισης και η διασπορά για την κάθε τιμή.



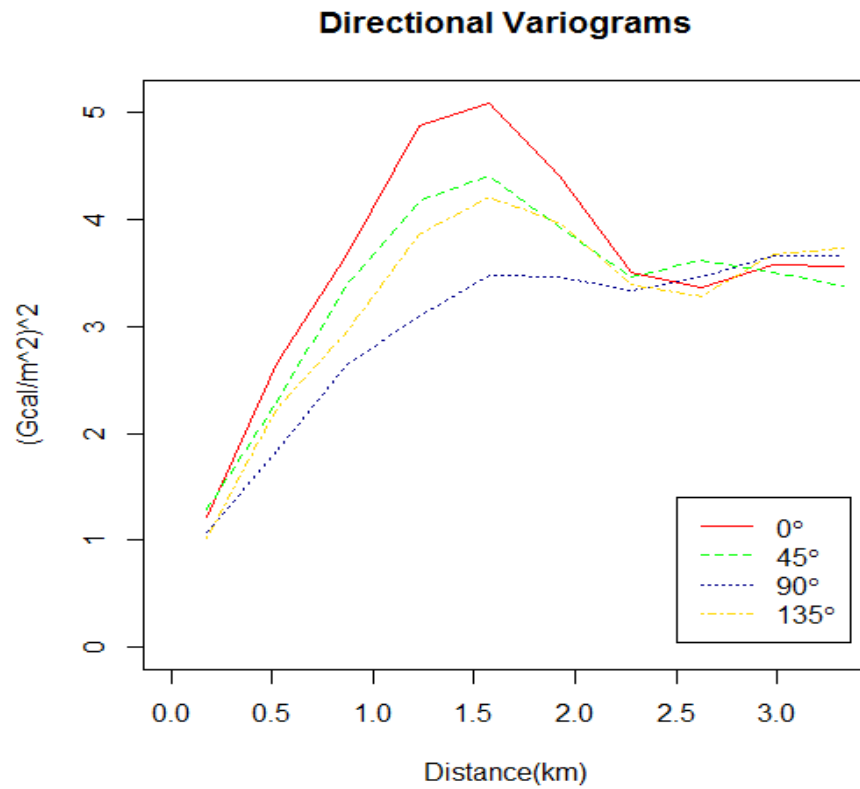
Σχήμα 3.12: Διάγραμμα με τα κατευθυντικά βαριογράμματα, που υπολογίστηκαν για τον έλεγχο της ανισοτροπίας στη θερμογόνο στις κατευθύνσεις 0° , 45° , 90° , 135° .

Έλεγχος Ανισοτροπίας - Ενεργειακή Επιφανειακή Πυκνότητα

Για τον έλεγχο ανισοτροπίας την ενεργειακή επιφανειακή πυκνότητα εφαρμόστηκε η διαδικασία με τη χρήση κατευθυντικών βαριογραμμάτων. Για τον υπολογισμό των κατευθυντικών μοντέλων οι παράμετροι που δόθηκαν είναι με βήμα $h=0,3$ σε απόσταση 3km. Με τη προσαρμογή του εκθετικού μοντέλου που επιλέχθηκε στα κατευθυντικά βαριογράμματα προκύπτει ο Πίνακας 3.13 και η γραφική παράσταση των βαριογραμμάτων στο Σχήμα 3.13

Παράμετρος	Τιμή 0°	Τιμή 45°	Τιμή 90°	Τιμή 135°
Φαινόμενο πυρήνα $(\text{Gcal}/\text{m}^2)^2$	10346	10213	10370	10328
Μήκος συσχέτισης (ξ) (km)	0,55	0,72	0,94	0,42
Διασπορά (σ^2) $(\text{Gcal}/\text{m}^2)^2$	18075	19809	11715	12472

Πίνακας 3.14: Τιμές των παραμέτρων που προκύπτουν από την προσαρμογή του εκθετικού θεωρητικού μοντέλου της επιφανειακής ενεργειακής πυκνότητας στα εμπειρικά κατευθυντικά βαριογράμματα. Το φαινόμενο πυρήνα (Nugget Effect), τα μήκη συσχέτισης και η διασπορά για την κάθε τιμή.



Σχήμα 3.13: Διάγραμμα με τα κατευθυντικά βαριογράμματα, που υπολογίστηκαν για τον έλεγχο της ανισοτροπίας της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας στις κατευθύνσεις 0° , 45° , 90° , 135° .

3.6 Επιβεβαίωση Χωρικού Μοντέλου

Τα αποτελέσματα, πρέπει να ελεγχθούν με τη μέθοδο της διασταυρωτικής επιβεβαίωσης (Cross-Validation) που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2.5 και συγκεκριμένα με τη μέθοδο αφαίρεσης ενός σημείου εκ περιτροπής (Leave-One-Out). Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται διασταυρωτική επιβεβαίωση. Με τον τρόπο αυτό εξετάζεται κατα πόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό των αποθεμάτων λιγνίτη και αποθεμάτων περιεχόμενης ενέργειας (θερμικό περιεχόμενο). Επίσης στην εκτίμηση πραγματοποιήθηκε πρόσθεση της τάσης στην εκτιμώμενη διακύμανση που είχε αφαιρεθεί για το σύνολο δεδομένων του λιγνίτη και πραγματοποιήθηκε αντιστροφή του μετασχηματισμού Box-Cox για τα δεδομένα λιγνίτη και της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας.

Με τη μέθοδο αφαίρεσης ενός σημείου εκ περιτροπής, κάθε φορά αφαιρείται ένα σημείο από το δείγμα εφαρμόζοντας kriging στις τιμές που έχουν διορθωθεί με την τάση, υπολογίζεται εκ νέου η τιμή που έχει αφαιρεθεί. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται για κάθε ένα σημείο του δείγματος, και στο τέλος συγκρίνονται οι εκτιμήσεις με τις αρχικές τιμές της κάθε γεώτρησης.

Ο έλεγχος έγινε με το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (RMSE), το Μέσο Σφάλμα (ME), το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (MAE) και τον Συντελεστή Συσχέτισης Pearson (ρ) τα οποία δίνονται από τις Σχέσεις του Κεφαλαίου 2.5. Η σύγκριση έγινε στην τελική εκτίμηση με αντιστροφή του μετασχηματισμού Box-Cox και της τάσης. Τα αποτελέσματα για το πάχος του λιγνίτη φαίνονται στον Πίνακα 3.14.

Παράμετρος	Πάχος Λιγνίτη
RMSE (m)	11,9
ME (m)	-2,8
MAE (m)	7,8
ρ	0,77

Πίνακας 3.15: Τιμές των μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν για γίνει η επαλήθευση της μεθόδου του βαριογράμματος. Τα μεγέθη είναι το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (RMSE), το Μέσο Σφάλμα (ME), το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (MAE) και ο Συντελεστής Συσχέτισης Pearson (ρ).

Οπως φαίνεται και από τον συντελεστή συσχέτισης, ανάμεσα στην νέα υπολογιζόμενη τιμή και στην αρχική τιμή υπάρχει μία καλή συσχέτιση. Ωστόσο, λόγω της υψηλής τιμής του μέσου σφάλματος υπάρχει ένδειξη για συστηματικό σφάλμα (*bias*) και επομένως υποεκτίμηση του κοιτάσματος.

Για την επιβεβαίωση χωρικού μοντέλου στα δεδομένα της θερμογόνου και στην ενεργειακή επιφανειακή πυκνότητα εφαρμόστηκε η ίδια διαδικασία με τα δεδομένα λιγνίτη. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 3.15 & 3.16.

Παράμετρος	Θερμογόνος Δυναμη
RMSE (kcal/kg)	114,5
ME (kcal/kg)	-0,3
MAE (kcal/kg)	84,1
ρ	0,68

Πίνακας 3.16: Τιμές των μεγεθών για την επαλήθευση της μεθόδου του βαριογράμματος στα δεδομένα της θερμογόνου δύναμης.

Στα δεδομένα της θερμογόνου παρατηρείται πως υπάρχει μια καλη συσχέτιση μεταξύ της αρχικής με την νέα υπολογισμένη τιμή και το μέσο σφάλμα κρίνεται ικανοποιητικό.

Παράμετρος	Ε.Ε.Πυκνότητα
RMSE (Gcal/m ²)	18,3
ME (Gcal/m ²)	-3,6
MAE (Gcal/m ²)	12,2
ρ	0,86

Πίνακας 3.17: Τιμές των μεγεθών για την επαλήθευση της μεθόδου του βαριογράμματος στα δεδομένα για την ενεργειακή επιφανειακή πυκνότητα.

Στα δεδομένα της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας παρατηρείται ότι ενώ η συσχέτιση είναι καλή, η τιμή του μέσου σφάλματος είναι αρνητικά υψηλή και δείχνει την ύπαρξη συστηματικού σφάλματος (*bias*). Κατα ένα ποσοστό οφείλεται στο ότι τα δεδομένα της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας εμπεριέχουν το πάχος του λιγνίτη όπως δίνεται στη Σχέση 2.51 και επηρεάζονται.

3.7 Εκτίμηση Αποθεμάτων με τη Μέθοδο της Χωρικής Παρεμβολής

Για να υπολογιστούν τα αποθέματα λιγνίτη, περιεχόμενης ενέργειας (θερμικο περιεχόμενο) καθώς και η θερμογόνος δύναμη στο ορυχείο Καρδιάς, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του κανονικού kriging (Ordinary Kriging) απο τη Σχέση 2.39.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.4.2 στο Κανονικό Kriging η μέση τιμή παραμένει σταθερή σε κάθε γειτονιά. Το kriging γίνεται με τα διορθωμένα δεδομένα, δηλαδή με τα δεδομένα λιγνίτη που έχει αφαιρεθεί η τάση και έχει εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός Box-Cox και στα δεδομένα περιεχόμενης ενέργειας όπως αναφέρεται στην ενότητα 3.2.1. Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 59 x 88 κελιά, με μέγεθος 96m x 95,6m για τα δεδομένα λιγνίτη, 100m x 97m για τα δεδομένα της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας και 100m x 102m για τα δεδομένα της θερμογόνου δύναμης.

Επιλογή Γειτονιάς Συσχέτισης

Ο προσδιορισμός της ακτίνας της γειτονιάς του Kriging γίνεται από την ανάλυση του βαριογράμματος με σχετικά μεγάλη αβεβαιότητα όπως αναφέρεται στην ενότητα 2.4.3. Η επιλογή της γειτονιάς για το kriging έγινε με σκοπό η κάθε γειτονιά να αποτελείται από σημεία που έχουν ισχυρή συσχέτιση, ώστε ο χρόνος που θα χρειαστεί για να εφαρμοστεί το kriging να μην είναι πολύ μεγάλος. Το μέγεθος της γειτονιάς που επιλέχθηκε είναι 2 km, 2,5 φορές το μήκος συσχέτισης του γκαουσιανού μοντέλου για το σύνολο δεδομένων του λιγνίτη και της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας. Ο ελάχιστος αριθμός δεδομένων στη γειτονιά του εκτιμώμενου σημείου για να γίνει η πρόβλεψη ορίστηκαν τα 3 σημεία. Για λόγους συντόμευσης του χρόνου ορίστηκαν μέγιστο 12 σημεία.

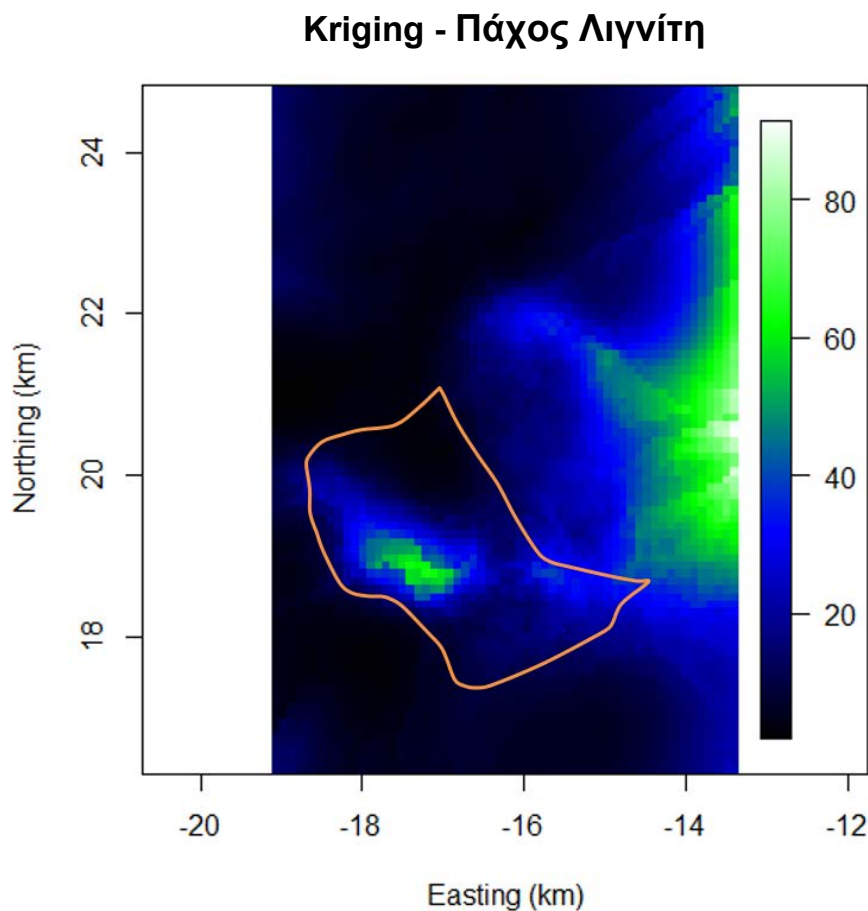
3.8 Υπολογισμός Λιγνιτικών Αποθεμάτων

Λαμβάνοντας υπόψη την γειτονιά συσχέτισης, το θεωρητικό γκαουσιανό μοντέλο που προσαρμόστηκε στο εμπειρικό βαριόγραμμα και τις παραμέτρους που προκύπτουν από το μοντέλο, το μήκος συσχέτισης (ξ), το φαινόμενο πυρήνα, και την διασπορά (σ^2), γίνονται εκτιμήσεις του πάχους για κάθε σημείο του κανάβου με τη μέθοδο του kriging σύμφωνα με τη Σχέση 2.39. Στις εκτιμήσεις που προκύπτουν προστίθεται η τάση που είχε αφαιρεθεί στην ενότητα 3.3.1, γιατί στον τελικό χάρτη που προκύπτει, αλλά και στον υπολογισμό των αποθεμάτων χρειάζεται το πεδίο και όχι η διακύμανση. Επίσης γίνεται και αντιστροφή του μετασχηματισμού Box-Cox. Έτσι ο τελικός χάρτης που προκύπτει φαίνεται στο Σχήμα 3.14.

Στον χάρτη του kriging στο Σχήμα 3.14 έχει οριστεί το τμήμα προς μελέτη του λιγνιτωρυχείου Καρδιάς. Τα όρια στον άξονα X είναι μεταξύ -18,68 και -14,44 km ενώ στον άξονα Y είναι μεταξύ 17,38 και 21,06 km. Απο το Σχήμα 3.14 παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος του λιγνίτη είναι συγκεντρωμένο στην περιοχή του αποθέματος απο το κεντρικό προς το νότιο και δυτικό τμήμα του Ορυχείου. Η εκτίμηση των αποθεμάτων λιγνίτη έχει υπολογισθεί ως το τεχνικό δάπεδο του κοιτάσματος όπως αναρτήθηκε στην ενότητα 1.2.2.

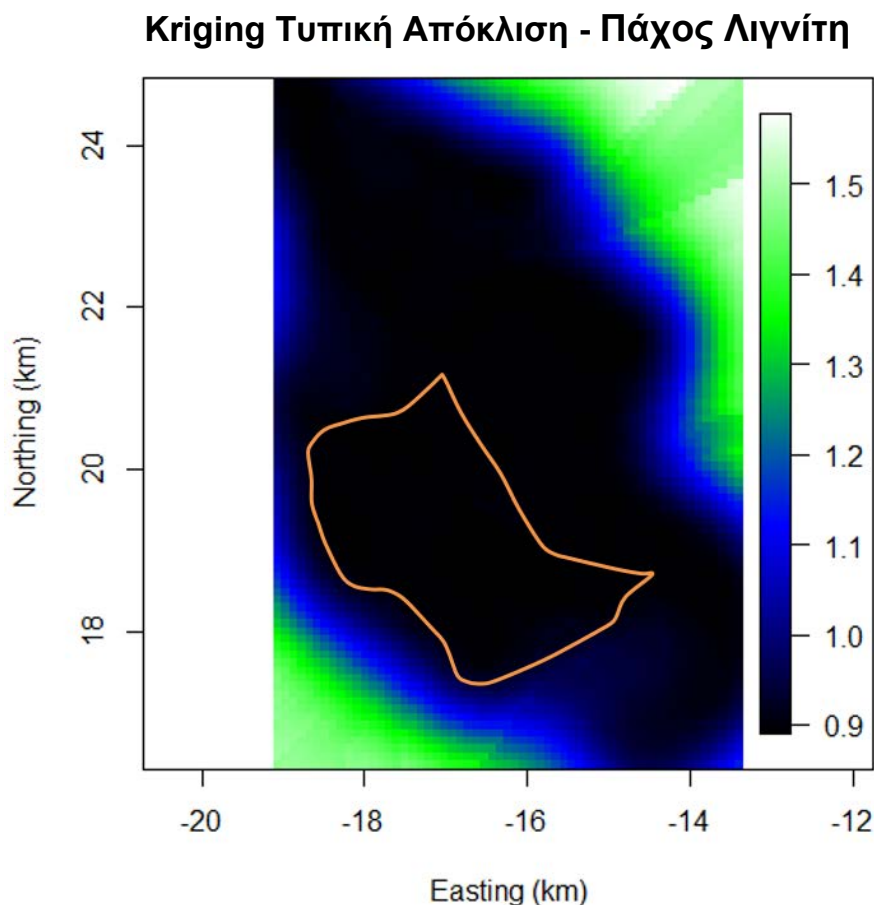
Απο τις εκτιμήσεις του kriging, υπολογίζονται τα αποθέματα λιγνίτη μέσω της σχέσης 2.52. Δεδομένου ότι το μέγεθος του κάθε κελιού είναι 96 m x 95,6 m όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.7, το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει είναι **164 Mt** στο οριοθετημένο τμήμα του ορυχείου Καρδιάς.

Λαμβάνοντας υπόψη τις υψηλές αρνητικές τιμές του μέσου σφάλματος, παρατηρείται ότι υπάρχει συστηματικό σφάλμα (*bias*) που δίνεται από τη Σχέση 2.45 και μπορεί να οδηγήσει σε ανακρίβεια και υποεκτίμηση του κοιτάσματος. Κάνοντας την παραδοχή ότι το μέσο σφάλμα στο τμήμα του Ορυχείου είναι το ίδιο με το μέσο σφάλμα συνολικά της περιοχής και δεδομένου ότι το εμβαδόν του τμήματος του Ορυχείου είναι 7,2 km², εκτιμάται ότι υπάρχει υποεκτίμηση της τάξεως 24 Mt. Η υποεκτίμηση χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση και μελέτη κάτι το οποίο δεν περιλαμβάνεται στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ωστόσο, η εκτίμηση δεν μπορεί να ανταποκρίνεται στα ακριβή όρια που σχεδιάζονται αναλυτικά ανα βαθμίδα.



Σχήμα 3.14: Χάρτης του kriging με τις εκτιμήσεις του πάχους από το οποίο γίνεται ο υπολογισμός των αποθεμάτων λιγνίτη στο τμήμα του Ορυχείου Καρδιάς χρησιμοποιώντας τετραγωνικό πλέγμα με μέγεθος κελιού 96 m x 95,6 m

Για την εκτιμώμενη τυπική απόκλιση του σφάλματος σε κάθε θέση υπολογίστηκε το σφάλμα του kriging σύμφωνα με τη Σχέση 2.44, και κατασκευάστηκε ο αντίστοιχος χάρτης σφαλμάτων, ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15: Χάρτης με τα σφάλματα των εκτιμήσεων του kriging για το πάχος του λιγνίτη.

Απο το χάρτη των σφαλμάτων του kriging, φαίνεται ότι κοντά στις θέσεις των γεωτρήσεων του οριοθετημένου τμήματος του ορυχείου, η αβεβαιότητα είναι μικρή, της τάξεως του 0,9 m³. Αυτό δείχνει πως η εκτίμηση ήταν πιο ακριβής στη περιοχή μελέτης. Καθώς η απόσταση απο την περιοχή των γεωτρήσεων αυξάνεται, στο τμήμα Βορειοδυτικά και Νοτιοανατολικά του χάρτη το σφάλμα αυξάνεται προοδευτικά.

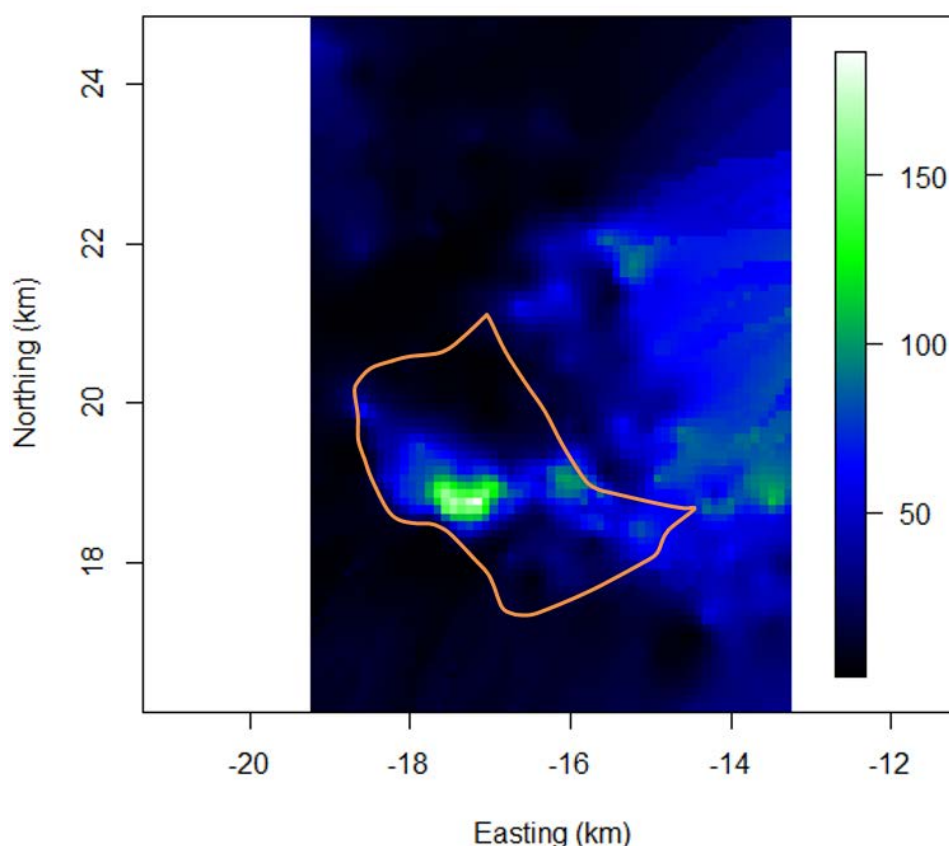
3.9 Υπολογισμός Αποθεμάτων Θερμικού Περιεχομένου με Kriging

Όπως έχει αναφερθεί η ενεργειακή επιφανειακή πυκνότητα δίνεται απο τη Σχέση 2.51 και έχει μονάδα μέτρησης Gcal/m². Λαμβάνοντας υπόψη τη γειτονιά συσχέτισης του Κεφαλαίου 3.7, το θεωρητικό εκθετικό μοντέλο που προσαρμόστηκε στο εμπειρικό βαριόγραμμα απο τη Σχέση 2.21 και τις παραμέτρους που προκύπτουν απο το μοντέλο, το μήκος συσχέτισης (ξ), το φαινόμενο πυρήνα και την διασπορά (σ^2) αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3.4, γίνονται εκτιμήσεις της πυκνότητας για κάθε σημείο του κανάβου με τη μέθοδο Kriging σύμφωνα με τη Σχέση 2.39.

Έτσι προκύπτει ο τελικός χάρτης του Σχήματος 3.16. Απο τις εκτιμήσεις της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας σε κάθε κελί του κανάβου υπολογίζονται τα αποθέματα του θερμικού περιεχομένου μέσω του τύπου 2.51. Το μέγεθος του κάθε κελιού όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.7 είναι 100 m x 97 m . Το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει για τα αποθέματα στο υπο μελέτη τμήμα του Ορυχείου είναι **278 Pcal** που αντιστοιχεί σε **240.917 GWh** .

Λαμβάνοντας υπόψη ότι στα αποθέματα λιγνίτη υπήρξε υποεκτίμηση των αποθεμάτων του κοιτάσματος, κάτι αντίστοιχο παρατηρείται και στα δεδομένα της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας. Αυτό οφείλεται στις υψηλές αρνητικές τιμές του μέσου σφάλματος του Πίνακα 3.16 που μπορεί να οδηγήσει σε ανακρίβεια και στην ύπαρξη συστηματικού σφάλματος (*bias*). Ακολουθώντας κάνοντας την παραδοχή ότι το μέσο σφάλμα στο τμήμα μελέτης του Ορυχείου είναι το ίδιο με το μέσο σφάλμα όλης της περιοχής και λαμβάνοντας υπόψη ότι το εμβαδό της περιοχής μελέτης είναι 7,2 km παρατηρείται ότι υπάρχει υποεκτίμηση της τάξεως 25 Pcal. Όπως αναφέρθηκε η διευρεύνηση της υποεκτίμησης δεν περιλαμβάνεται στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Kriging - Ενεργ. Επιφ. Πυκνότητα Gcal/m²

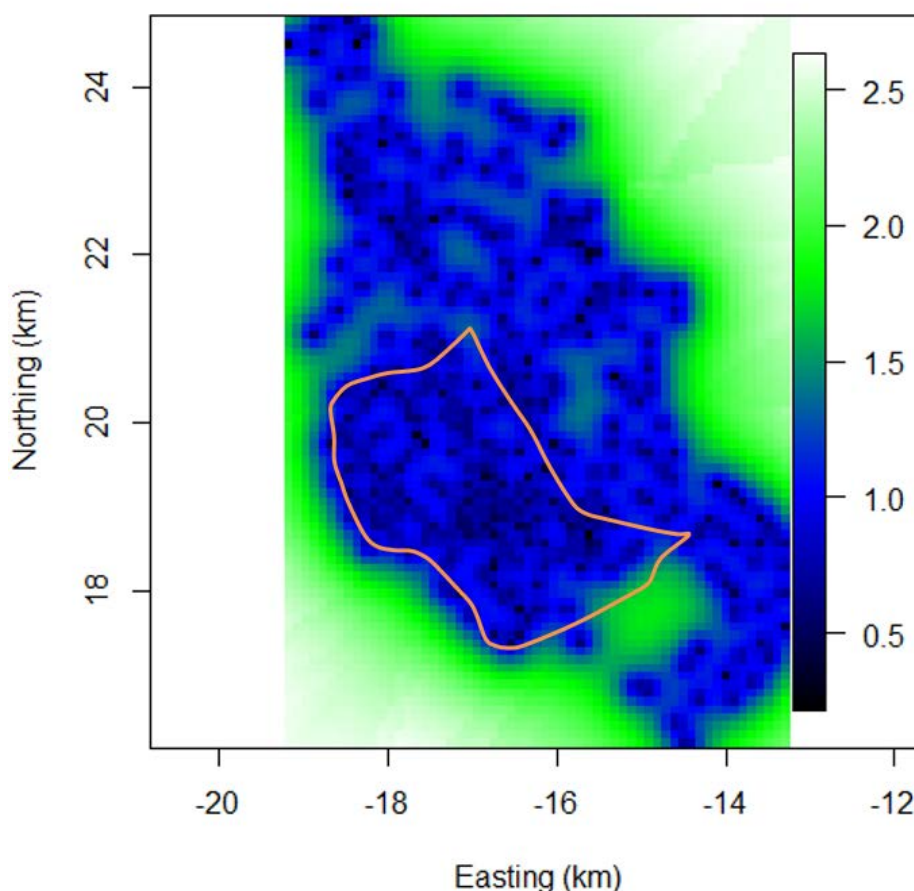


Σχήμα 3.16 : Χάρτης του kriging με τις εκτιμήσεις της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας στο τμήμα του Ορυχείου Καρδιάς χρησιμοποιώντας τετραγωνικό πλέγμα με μέγεθος κελιού 100 m x 97 m.

Απο το Σχήμα 3.16, παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη περιεκτικότητα $Gcal/m^2$ βρίσκεται στο κέντρο και δυτικά της περιοχής μελέτης. Επίσης ικανοποιητικές τιμές περιεκτικότητας υπάρχουν και στο ανατολικό μέρος που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα της περιοχής.

Όμοίως με το πάχος του λιγνίτη, η εκτιμώμενη τυπική απόκλιση του σφάλματος σε κάθε θέση για την ενεργειακή επιφανειακή πυκνότητα, υπολογίστηκε απο το σφάλμα του kriging σύμφωνα με τη Σχέση 2.44 και κατασκευάστηκε ο αντίστοιχος χάρτης σφαλμάτων του Σχήματος 3.17.

Kriging Τυπική Απόκλιση - Ενεργ. Επιφ. Πυκνότητα



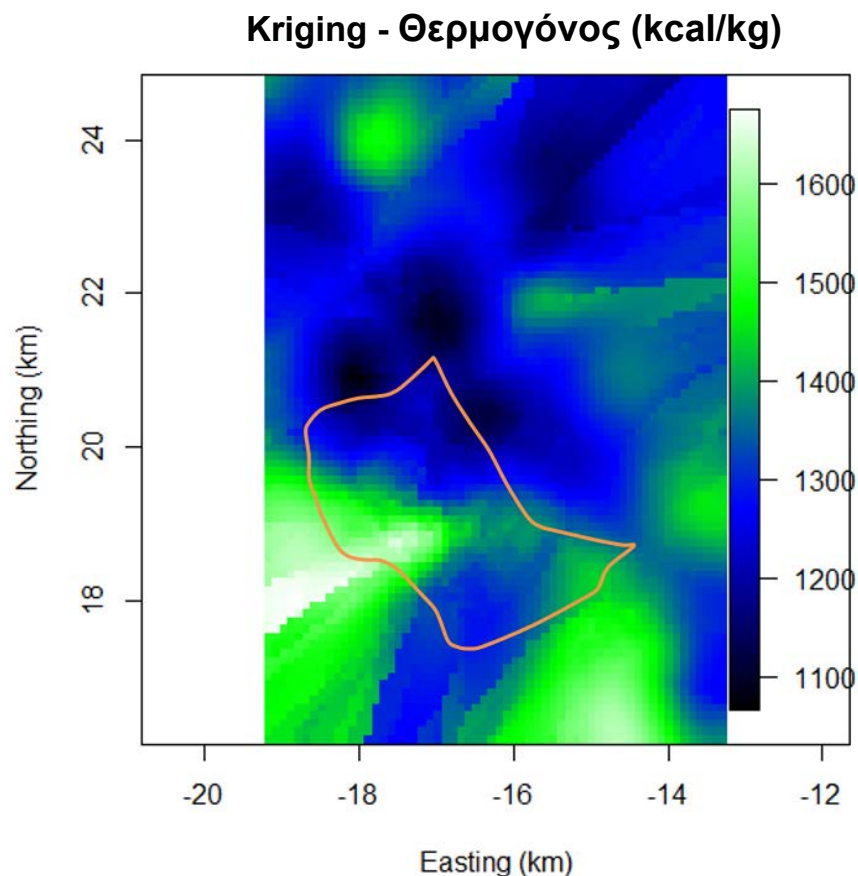
Σχήμα 3.17: Χάρτης με τα σφάλματα των εκτιμήσεων του kriging για την ενεργειακή επιφανειακή πυκνότητα

Στο χάρτη των σφαλμάτων του kriging του Σχήματος 3.17 για την ενεργειακή επιφανειακή πυκνότητα παρατηρείται ότι υψηλές τιμές στα σφάλματα, βρίσκονται στο Βορειοανατολικό και Νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής. Αυτό συμβαίνει διότι στις περιοχές αυτές οι γείτονες έχουν μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους. Ωστόσο, στην κεντρική περιοχή του χάρτη, στο οριοθετημένο τμήμα του Ορυχείου, παρατηρείται ότι το σφάλμα είναι μικρό λόγω του ότι η εύρεση γειτόνων ήταν ευκολότερη και υπήρξε πιο ακριβής εκτίμηση.

3.10 Χωρική παρεμβολή (kriging) στα δεδομένα της θερμογόνου.

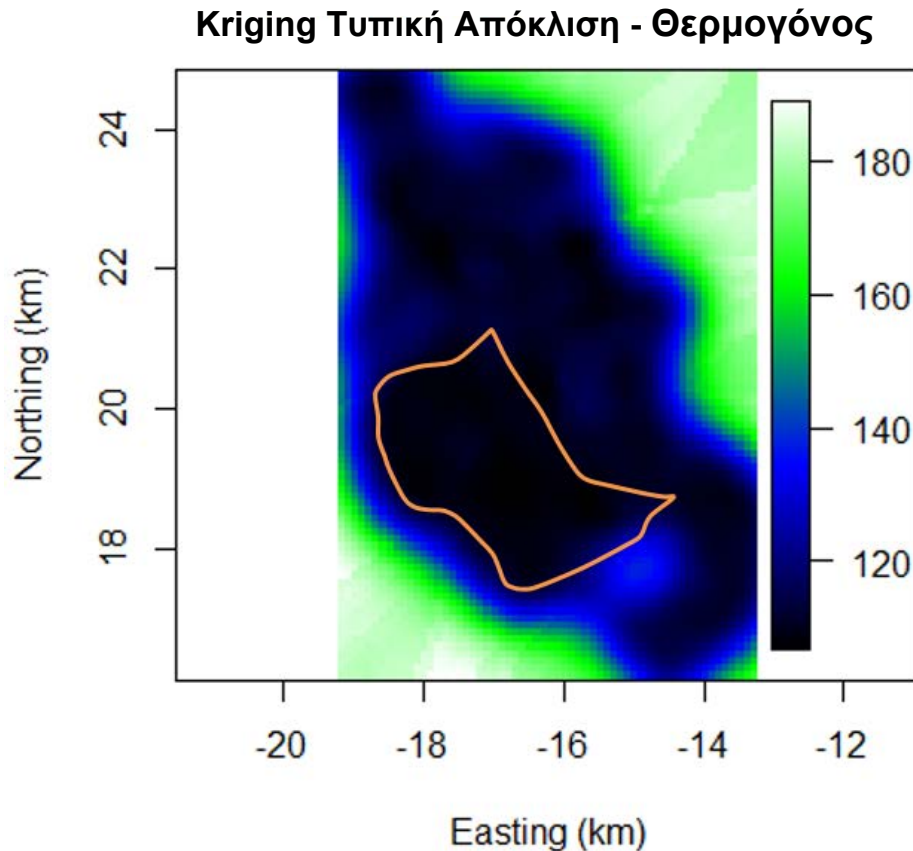
Η θερμογόνος είναι καθοριστικό μέγεθος για την εκμετάλλευση ενός ορυχείου διότι ανάλογα με την τιμή που παρουσιάζει, καθορίζεται και ο βαθμός απόδοσης του λιγνίτη για τη παραγωγή ενέργειας. Η θερμογόνος που αναφέρεται είναι η κατώτερη θερμογόνος δύναμη που δίνεται από το Κεφάλαιο 1.4. Για την εφαρμογή της μεθόδου Kriging λήφθηκε υπόψη η γειτονιά συσχέτισης, το εμπειρικό βαριόγραμμα που προσαρμόστηκε στο γκαουσιανό μοντέλο που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3.4 και οι παραμέτροι που προκύπτουν από το μοντέλο του Πίνακα 3.6. Το μήκος συσχέτισης (ξ), το φαινόμενο πυρήνα (nugget effect), και η διασπορά (σ^2). Στη συνέχεια κατασκευάστηκε ο χάρτης του kriging σύμφωνα με τη Σχέση 2.39 με τις εκτιμήσεις της περιεκτικότητας σε kcal/m². Το μέγεθος του κάθε κελιού είναι 100 m x 102 m όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3.7.

Από το Σχήμα 3.18, παρατηρείται ότι η θερμογόνος δύναμη στην περιοχή μελέτης παρουσιάζει υψηλές τιμές. Στο Νοτιοδυτικό τμήμα του χάρτη παρατηρούνται υψηλές τιμές σε διότι το kriging προσαρμόζει τι μετρήσεις, καθώς στα σημεία αυτά δεν βρίσκονται γεωτρήσεις. Στο δυτικό μέρος του ορυχείου η υψηλές τιμές της συγκέντρωσης καλύπτουν ένα μεγάλο φάσμα και μειώνονται προοδευτικά διασχίζοντας το κέντρο προς το ανατολικό τμήμα.



Σχήμα 3.18 : Χάρτης του kriging με τις εκτιμήσεις της θερμογόνου στο τμήμα του Ορυχείου Καρδιάς χρησιμοποιώντας τετραγωνικό πλέγμα με μέγεθος κελιού 100 m x 102 m.

Η εκτιμώμενη τυπική απόκλιση του σφάλματος σε κάθε θέση για τη θερμογόνο, υπολογίστηκε με το σφάλμα του kriging σύμφωνα με τη Σχέση 2.44 και κατασκευάστηκε ο αντίστοιχος χάρτης σφαλμάτων του Σχήματος 3.19.



Σχήμα 3.19 : Χάρτης με τα σφάλματα των εκτιμήσεων του kriging για τη θερμογόνο

Στον χάρτη σφαλμάτων Kriging για τη θερμογόνο δύναμη παρατηρείται ότι στη περιοχή μελέτης το σφάλμα της εκτίμησης είναι μικρό με υψηλότερη τιμή τα 120 kcal/kg. Ωστόσο, στις περιοχές Νοτιοδυτικά και Βορειοανατολικά του χάρτη τα σφάλματα παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές καθώς λόγω της απόστασης που υπήρξε μεταξύ των γειτόνων, το kriging δεν απέδωσε όσο στο τμήμα διερεύνησης του Ορυχείου Καρδιάς με αποτέλεσμα τα σφάλματα ης εκτίμησης να κυμαίνονται μεταξύ 150 και 190 kcal/kg.

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα-Προτάσεις για Έρευνα

Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας εκπονήθηκε γεωστατιστική ανάλυση σε τρία σύνολα δεδομένων με σκοπό τον υπολογισμό αποθεμάτων λιγνίτη, αποθεμάτων περιεχόμενης ενέργειας (θερμικό περιεχόμενο) και της θερμογόνου δύναμης. Τα δεδομένα προέρχονται από τμήμα του Ορυχείου Καρδιάς, ένα από τα τέσσερα ορυχεία του Λ.Κ.Δ.Μ. Η ανάλυση έγινε με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού R και αναπτύχθηκε υπολογιστικός κώδικας βασισμένος σε εντολές και συναρτήσεις του προγράμματος. Το πακέτο που επιλέχθηκε για το μεγαλύτερο μέρος της γεωστατιστικής ανάλυσης ήταν το RGeostats, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των βαριογραμμάτων και του κανονικού kriging.

Ο υπολογισμός των αποθεμάτων έγινε με τη μέθοδο του Κανονικού Kriging. Στη συγκεκριμένη μέθοδο οι παράμετροι του φαινομένου πυρήνα (Nugget Effect), της διασποράς (σ^2) και του μήκους συσχέτισης (ξ) εκτιμήθηκαν μέσω βαριογραμμάτων. Στο εμπειρικό βαριόγραμμα που υπολογίστηκε έγιναν δοκιμές τριών μοντέλων προσαρμογής, του εκθετικού, του γκαουσιανού και του σφαιρικού. Το κριτήριο επιλογής ήταν το ελάχιστο τετραγωνικό σφάλμα. Για τα δεδομένα λιγνίτη και της θερμογόνου, έγινε επιλογή του γκαουσιανού μοντέλου, το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στη μέθοδο Kriging. Στα δεδομένα της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας την καλύτερη προσαρμογή είχε το εκθετικό. Έπειτα ακολουθήθηκε έλεγχος της αξιοπιστίας του kriging με τη μέθοδο αφαίρεσης ενός σημείου εκ περιτροπής (Leave-One-Out Cross-Validation).

Στα δεδομένα λιγνίτη παρατηρείται πώς ενώ ο συντελεστής συσχέτισης είναι ικανοποιητικός, υπάρχει σημαντική υποεκτίμηση. Επίσης στα δεδομένα της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας παρατηρείται υποεκτίμηση μικρότερης κλίμακας, ενώ στα δεδομένα της θερμογόνου η τιμή του μέσου σφάλματος είναι αρκετά χαμηλή ώστε να επηρεάσει την εκτίμηση.

Για τον υπολογισμό των αποθεμάτων λιγνίτη κατασκευάστηκε χάρτης με τις εκτιμήσεις του παχούς χρησιμοποιώντας πλέγμα μεγέθους 96 m x 95,6 m. Απο τη νέα εκτίμηση του κάθε κελιού πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός στα αποθέματα λιγνίτη για το οριοθετημένο τμήμα του Ορυχείου Καρδιάς σε **164 Mt**. Ωστόσο, λόγω της υψηλής αρνητικής τιμής του μέσου σφάλματος υπήρξε συστηματικό σφάλμα (*bias*), με αποτέλεσμα την υποεκτίμηση των αποθεμάτων λιγνίτη της τάξεως 24 Mt. Επειδή η εκτίμηση δεν ανταποκρίνεται στα ακριβή όρια που σχεδιάζονται αναλυτικά ανα βαθμίδα για τον λόγο αυτόν δεν μπορεί να γίνει προσέγγιση με ακρίβεια στον χώρο του κοιτάσματος.

Στα δεδομένα της ενεργειακής επιφανειακής πυκνότητας κατασκευάστηκε χάρτης με τις εκτιμήσεις χρησιμοποιώντας πλέγμα μεγέθους 100 m x 97 m. Ο υπολογισμός των αποθεμάτων θερμικού περιεχομένου απέδωσε **278 Pcal** που αντιστοιχεί σε **240.917 GWh**. Ομοίως υπήρξε συστηματικό σφάλμα (*bias*) μικρότερης κλίμακας με αποτέλεσμα την υποεκτίμηση των θερμικών αποθεμάτων της τάξεως 25 Pcal.

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η ανάλυση των δεδομένων έδωσε την εκτίμηση του κοιτάσματος του οριοθετημένου τμήματος του Ορυχείου Καρδιάς. Ωστόσο, είναι σημαντικό να γίνουν προσπάθειες για την αντιμετώπιση του συστηματικού σφάλματος για πιο ακριβείς εκτιμήσεις μελλοντικά. Έτσι προτείνεται έλεγχος για το αν ο συνδιασμός θεωρητικών μοντέλων μπορεί να βελτιώσει την εκτίμηση και να ελατώσει το συστηματικό σφάλμα (*bias*). Ακόμα προτείνεται η εφαρμογή καλύτερου μοντέλου τάσης και επιλογή μη στάσιμων μοντέλων και μεθόδων εκτίμησης, ώστε η εκτίμηση στα σημεία υψηλών τιμών πάχους λιγνίτη να είναι πιο ακριβής και να αποφευχθεί το συστηματικό σφάλμα. Επίσης προτείνεται εφαρμογή υπέρθεσης χωρικών μοντέλων βαριογράμματος, δημιουργία χωρικού μοντέλου σε τριδιάστατο κάναβο με δυνατότητα ανάλυσης διαφορετικών βαθμίδων και εφαρμογή μεθόδου προσομοίωσης για την διερεύνηση της αβεβαιότητας των εκτιμήσεων.

```
1 rm(list=ls(all.names=TRUE))
2 graphics.off()
3
4 ##### Thesis Project Start###
5 library(sp)
6 library(gstat)
7 library(Rcpp)
8 library(RGeostats)
9 library(car)
10 library(ggplot2)
11 library(FitAR)
12 library(FNN)
13 library(geoR)
14 library(gtrendsR)
15 library(grid)
16 library(crop)
17 library(maps)
18 library(splines2)
19 library(gdata)
20 library(e1071)
21 library(lattice)
22 library(automap)
23 library(tcltk)
24 library(spam)
25 library(dplR)
26 library(detrendR)
27 library(fields)
28 library(foreign)
29 library(openxlsx)
30 library(MASS)
31
32 setwd("c:\\users\\Dr. MatePc\\Desktop\\Diploma")
33 hpcdata2<- read.xlsx("hpcdata2.xlsx")
34 tableoria<- read.xlsx("tableoria.xlsx")
35 options(max.print=10000)
36 plot(hpcdata2[,1], hpcdata2[,2],xlab="Easting (m)",ylab="Northing (m)",asp=1)
37 ##### Histogram ###
38 hist(hpcdata2[,3], main = "Histogram of Lignite",xlab = "thickness (m)",border "blue",col="green",
39      las=1, breaks =13)
40 ##### Analusi statistikwn stoxeiwn###
41 m=mean(hpcdata2[,3])### mesh timh paxous ligniti
42 m1=median(hpcdata2[,3])
43 min(hpcdata2[,3])
44 max(hpcdata2[,3])
45 sd(hpcdata2[,3])
```

```

46 skewness(hpcdata2[,3])
47 kurtosis(hpcdata2[,3])
48 m1
49 m
50 ##### Box Cox ###
51 lambda=0.08
52 dedomenamou=bcPower(hpcdata2[,3],lambda)
53 m=mean(dedomenamou)
54 m1=median(dedomenamou)
55 min(dedomenamou)
56 max(dedomenamou)
57 sd(dedomenamou)
58 m1
59 m
60 ##### diagramma kanonikis pithanotitas ###
61 hist(dedomenamou, main = "Histogram of Lignite",xlab ="thickness"),border "blue",col="green",
62 las=1, breaks =13)
63 qqnorm(dedomenamou)
64 qqline(dedomenamou,col=("blue"))
65 syntetagmenes=hpcdata2[,1:2]
66 X=syntetagmenes[,1]/1000
67 Y=syntetagmenes[,2]/1000
68 X=matrix(X)
69 Y=matrix(Y)
70 P=dedomenamou
71 datax=cbind(X,Y,P)
72 ##### Empirical variogram (Pre-detrended Data)###
73 data.db=db.create(datax,flag.grid = F,ndim = 2,autoname = F)
74 data.vario<-vario.calc(data.db,lag =0.3,nlag = 12)
75 plot(data.vario,title="Omni-oirectional variogram",xlab="Distance",ylab="Thickness(m)")
76 ##### Afairesi twm tasewn (Detrending data with regression)###
77 XI=XA2
78 YI=YI2
79 XY=X*Y
80 XI=matrix(XI)
81 YI=matrix(YI)
82 XY=matrix(XY)
83 L=cbind ( 1 ,X,Y, XI, YI,XY)
84 A=1 m(P-X+Y+XI+YI+XY)
85 PI=L %>%coef(A)
86 P3=P-PI
87 MAE=mean(abs(P-PI))
88 MaxAE=max(abs(P-PI))
89 SQE=P3/2

```



```

90 RMSE=sqrt(mean(SQE))
91 MAE
92 MaxAE
93 RMSE
94 RTREND=cor(P,PI,use="complete")
95 RTREND
96
97 data.detr.2=cbind(X,Y,P3)
98 data.detr.db=db.create(data.detr.2,flag.grid=FALSE, ndim=2, autoname=FALSE)
99 data.vario.2<-vario.calc(data.detr.db, lag = 0.32,nlag = 11)
100 plot(data.vario.2,title="Omni-Directional Variogram",xlab="Distance",ylab="Thickness(m)")
101 variance.data.detr=var(data.detr.2[,3])
102 qqnorm(data.detr.2[,3])
103 qqline (data.detr.2[,3],col="blue")
104 dev.copy( pdf,"normplot.pdf")
105 ##### omni-directional Empirical variogram (Detrended Data)###
106 geodata=list()
107 geodata$coords = cbind(X,Y)
108 geodata$data = P3
109 nugget.tolerance = 0
110 max.dist = 2.5
111 variogbins = seq(0,max.dist,0.125)
112 data.detr.vario = variog(geodata, coords = geodata$coords, data = geodata$data,
113     uvec = "default", breaks = variogbins, irrend = "cte", lambda = 1,
114     option = "bin", estimator.type = "classical",nugget.tolerance, max.dist,pairs.min bin.cloud =
115     FALSE, direction = "omnidirectional")
116 plot(data.detr.vario,main = "omni-directional",ylab = "Thickness(m)",type = "l") 117
118 ##### Directional variograms ###
119 data.detr.vario4 = variog4(geodata, coords = geodata$coords, data = geodata$data,
120     uvec = "default", breaks = variogbins, trend = "cte", lambda = 1, option =
121     "bin", estimator.type = "classical",
122     nugget.tolerance, max.dist, pairs.min = 130, bin.cloud = FALSE, direction =
123     c(0,45,90,135), tolerance =45,
124     unit.angle = "degrees")
125 data.detr.vario0 = variog(geodata, coords = geodata$coords, data = geodata$data, uvec =
126     "default", breaks = variogbins, trend = "cte", lambda = 1, option = "bin",
127     estimator.type = "classical",
128     nugget.tolerance, max.dist,pairs.min = 150,
129     bin.cloud = FALSE, direction, tolerance = 45, unit.angle = "degrees")

```

```

130 data.detr.vario45 variog(geodata, coords = geodata$coords, data = geodata$data,
131                        uvec = "default", breaks = variogbins, trend = "cte", lambda=1,
132                        option = "bin", estimator.type = "classical",
133                        nugget.tolerance, max.dist,pairs.min = 150,
134                        bin.cloud = FALSE, direction = 45, tolerance = 45, unit.angle = "degrees")
135 data.detr.vario90 variog(geodata, coords = geodata$coords, data = geodata$data,
136                        uvec = "default", breaks = variogbins, trend = "cte", lambda = 1,
137                        option = "bin", estimator.type = "classical",
138                        nugget.tolerance, max.dist,pairs.min = 150,
139                        bin.cloud = FALSE, direction = 90, tolerance = 45, unit.angle = "degrees")
140 data.detr.vario135 variog(geodata, coords = geodata$coords, data = geodata$data,
141                        uvec = "default", breaks = variogbins, trend = "cte", lambda = 1, option =
142                        "bin", estimator.type = "classical",
143                        nugget.tolerance, max.dist,pairs.min = 150,
144                        bin.cloud = FALSE, direction = 135, tolerance = 45, unit.angle = "degrees")
145 plot(data.detr.vario0,main="Directional Variograms",xlab = "oistance(km)",ylab = "semivariogram",type="l",
146      col="red",lty = 1)
147 lines(data.detr.vario45,type="l",col="green",lty = 2)
148 lines(data.detr.vario90,type="l",col="darkblue",lty = 3)
149 lines(data.detr.vario135,type="l",col="gold",lty = 4)
150 legend(1.85,0.6,c(expression(0*degree),expression(45*degree),expression(90*degree),expression(135*degree)),
151      lty = c(1,2,3,4),col = c("red","green","darkblue","gold"))
152
153 ##### Theoretical variogram Model Fitting #####
154 data.detr.variofit0=variofit(data.detr.vario0,ini.cov.pars = c(0.9*max(data.detr.vario0$v),1)
155                        ,"powered.exponential",fix.nugget = FALSE, nugget = 0,
156                        fix.kappa = FALSE,kappa = 1)
157 data.detr.variofit45=variofit(data.detr.vario45,ini.cov.pars = c(0.9*max(data.detr.vario45$v),1)
158                        ,"powered.exponential",fix.nugget = FALSE, nugget = 0,
159                        fix.kappa = FALSE,kappa = 1)
160 data.detr.variofit90=variofit(data.detr.vario90,ini.cov.pars = c(0.9*max(data.detr.vario90$v),1)
161                        ,"powered.exponential",fix.nugget = FALSE, nugget = 0,
162                        fix.kappa = TRUE,kappa = 1.75)
163 data.detr.variofit135=variofit(data.detr.vario135,ini.cov.pars = c(0.9*max(data.detr.vario135$v),1)
164                        ,"powered.exponential",fix.nugget = FALSE, nugget = 0,
165                        fix.kappa = FALSE,kappa = 1)

```



```

166 plot(data.detr.vario0,main="Fitted Exponential Model 0 Degrees",
167       xlab = "Distance(km)",ylab = "semivariogram",type="p",col="ired")
168 lines(data.detr.variofit0)
169 legend(1.25,0.33,c("Empirical semivariogram","Theoretical semivariogram"),col = c("red","black"),
170 plot(data.detr.vario45,main="Fitted Exponential Model 45 Degrees",
171       xlab = "Distance(km)",ylab = "semivariogram",type="p",xlim = c(0,3.1),ylim = c(0,1.6),col="red")
172 lines(data.detr.variofit0)
173 legend(1.25,0.33,c("Empirical semivariogram","Theoretical semivariogram"),col = c("red","black"),
174 plot(data.detr.vario90,main="Fitted Exponential Model 90 Degrees",
175       xlab = "Distance(km)",ylab = "semivariogram",type="p",xlim = c(0,3.1),ylim = c(0,1.6),col="red")
176 lines(data.detr.variofit0)
177 legend(1.25,0.33,c("Empirical semivariogram","Theoretical semivariogram"),col = c("red","black"),
178 plot(data.detr.vario135,main="Fitted Exponential Model 135 Degrees",
179       xlab = "Distance(km)",ylab = "semivariogram",type="p",xlim = c(0,3.1),ylim
180 lines(data.detr.variofit0)
181 legend(1.25,0.33,c("Empirical semivariogram","Theoretical semivariogram"),col = c("red","black"),
182 datademo<-matrix(c(0.0619, 0.0203, 0.4063, 0.10816, 0.0869), ncol=5, byrow=TRUE)
183 colnames(datademo) <- c("o", "45", "90", "135")
184 rownames(datademo) <- c("SE")
185 datademo<- as.table(datademo)
186 ##### Model Gaus spherical Fit####
187 data.modelfit1 = model.auto(data.vario.2,struct=c("spherical","Nugget Effect"),
188                             title="Modelling spherical omni-directional variogram",
189 data.modelfit2=model.auto(data.vario.2,struct =c("Exponential","Nugget Effect"),
190                             title="Modelling Exponential omni-directional variogram",
191 data.modelfit3=model.auto(data.vario.2,struct =c("Gaussian","Nugget Effect"),
192                             title="Modelling Gaussian omni-directional variogram",
193
194 ##### errors montelwn Kriging###
195 sphericalvaluestable=sillspherical*((1.5*abs(r))/rangespherical-((0.5*abs(r))/rangespherical)^3)
196 print(sphericalvaluestable)
197 setwd("c:\\users\\Annastasia\\Desktop\\Diploma")
198 distancevaluevariogramcolumns=read.table("Distancevaluevariogramcolumnscu.txt",header = TRUE)
199
200 ##### spherical###
201 sillspherical=1.034
202 rangespherical=2.420
203 nuggetspherical=0.595
204 setwd("c:\\users\\Dr.MatePc\\Desktop\\Diploma")
205 distancevalue1ignite=read.xlsx("tab1_e_1_ignite.xlsx")
206 r=distancevalueignite[,1]
207 sphericalsquareerror=sum((sillspherical*((1.5*abs(r))/rangespherical-((0.5*abs(r))/rangespherical)^3)-
208                             distancevalueignite[,2]^2))
209 sphericalsquareerror=sum((sillspherical*((1.5*abs(r))/rangespherical-((0.5*abs(r))/rangespherical)^3)+
210                             nuggetspherical-distancevalueignite[,2]^2))
211 sphericalsquareerror=(distancevalueignite[,5]-distancevalueignite[,2])^2
212

```

```
213 sphericalsquareerror=sum((sillspherical*((1.5*abs(r))/rangespherical-((0.5*abs(r))/rangespherical)A3)-]A2))
214
215 ### Exponential###
216 sillexp=1.286
217 theorangeexp=1.176
218 nuggetsillexp=0.485
219 expsquareerror=sum((sillexp*(1-exp(-r/theorangeexp))+ nuggetsillexp-distancevaluelignite[,2]))^2
220 kexp=(sillexp*(1-exp(-r/theorangeexp))+nuggetsillexp)
221 expsquareerror=sum(kexp-distancevaluelignite[,2])^2
222 ###Gaussian###
223 sillgaussian=0.895
224 theorangegaussian=1.161
225 nuggetsillgaussian=0.732
226 gaussiansquareerror=sum((sillgaussian*(exp(-r/theorangegaussian))^2*nuggetsillgaussian-e[,2])^2)
227 kgau=(sillexp*(1-exp(-rA2/theorangeexpA2))+nuggetsillexp)
228 gaussiansquareerror=sum((kgau-distancevaluelignite[,2])^2)
229
230 ### Prints###
231 print(sphericalsquareerror)
232 print(expsquareerror)
233 print(gaussiansquareerror)
234 ##### spherical Model#####
235 a=distance[,1]/23.2426
236 b=aA3
237 vario.theor.sph.regr.1=6.238484+(8.065647*((1.5*a)-0.5*b))
238 vario.theor.sph.2=(6.238484+8.065647)
239 sph.error.regr.1=(value[,1]-vario.theor.sph.regr.1)^2
240 sph.error.2=(value[,25:30]-vario.theor.sph.2)^2
241 sum.sph.regr.error.1=sum(sph.error.regr.1)
242 sum.sph.regr.error.1
243 sum.sph.error.2=sum(sph.error.2)
244 sum.sph.error=Sum.sph.regr.error.1+sum.sph.error
245 sum.sph.error
246 ##### Exponential Model###
247 d=exp(-distance/12.68063)
248 vario.theor.regr.exp=5.690571+(10.19295*(1-d))
249 exp.regr.error=(value-vario.theor.regr.exp)A2
250 sum.exp.error.regr=sum(exp.regr.error)
251 sum.exp.error.regr
252 ##### Kriging###
253 a=proc.time()
254 load("c:\\users\\Dr.MatePc\\Desktop\\Diploma\\neighborhood.RData")
255 neighcreator<-neigh.input(ndim = 2)
```

```

256 save(neighcreator;file = "neighborhood.RData")
257 nx=59
258 ny=88
259 grid.db<- db.grid.init(data.detr.db,nodes=c(nx,ny),margin=-2)
260 grid.db<- kriging(data.detr.db,grid.db,data.modelfit3,neighcreator) b=proc.time()
261 hwrapou8elw=(b-a)[3.]
262 plot(grid.db,xlab="Easting (km)",
263       ylab="Northing (km)",title="Kriging.3.estimat",axes=TRUE,asp=1,
264       col=colorRampPalette(c("black","blue","green","white"))(255)) box(col = 'black')
265 zr=range(grid.db[,4],na.rm = TRUE)
266 image.plot( legend.only=TRUE, zlim= zr,
267             col=colorRampPalette(c("black","blue","green","white"))(255), legend.mar =
268             6.5, horizontal = FALSE)
269
270
271
272 ##### Prosthiki tasis Kriging ###
273 XT=grid.db[,2]
274 YT=grid.db[,3]
275 XT1=XT^2
276 YT1=YT^2
277 XT=matrix(XT)
278 YT=matrix(YT)
279 XTl=matrix(XTl)
280 YTl=matrix(YTl)
281 XYT=XT*YT
282 XYT=matrix(XYT)
283 G=cbind(1,XT,YT,XTl,YTl,XYT)
284 v=G%>%coef(A)
285 gridM=grid.db
286 gridM[,4]=gridM[,4]+v
287 xlim=c(min(x),max(X))
288 plot(gridM,xlab="Easting (km)",ylab="Northing (km)",
289       title="Kriging.3.estim Tash",axes=TRUE,asp=1,
290       col=colorRampPalette(c("black","blue","green","white"))(255))
291 box(col = 'black')
292 zr=range(gridM[,4],na.rm = TRUE)
293 image.plot( legend.only=TRUE, zlim= zr,
294             col=colorRampPalette(c("black","blue","green","white"))(255), legend.mar
295             = 6.5, horizontal = FALSE)
296
297 ##### Errors tou Kriging ###
298 gridME2=gridM
299 zr=range(gridME2[,5],na.rm = TRUE)

```

```

300 gridME2[,4]=gridME2[,5]
301 plot(gridME2,xlab="Easting (km)",ylab="Northing (km)",
302       title="Kriging"axes=TRUE,asp=1,
303       col colorRampPalette(c("black","blue","green","white"))(255))
304 box(col = 'black') image.plot( legend.only TRUE, zlim zr,
305
306 co1=co1orRampPalette(c("black","blue","green","white"))(255),
307 legend.mar = 6.6, horizontal = FALSE)
308
309 ##### Inverse Box cox transformation ###
310 gridM2=gridM
311
312 gridM2[,4] bxcx(gridM2[,4],lambda,InverseQ = TRUE,boxcox')
313 plot(gridM2,xlab="Easting (km)",ylab="Northing (km)",title="Kriging",
314
315 axes TRUE,asp 1,col colorRampPalette(c("black","blue","green","white"))(255))
316 box(col = 'black')
317
318 zr range(gridM2[,4],na.rm = TRUE)
319 image.plot( legend.only=TRUE, zlim= zr,
320 ##### cross-validation Kriging ###
321 A=data.detr.2
322 A=hpcdata2[,1:3]
323 syntetOL=A[,1:2]/1000
324 PaXOL=A[,3]
325 PaxOL=hpcdata2[,3]
326 N=length(PaxOL)
327 pax.cv=matrix(nrow = N,c(O))
328 tO=proc.time()
329 B=A
330 B[,3]=P3
331
332 db<-db.create(B2,flag.grid = FALSE,ndim = 2,autoname FALSE)
333 shmeio=A[i2,]
334 load("neighborhood.RData")
335 data.uniq.neigh-neigh.input(ndim=2)
336 XO=Shmeio[1:2]
337 nxx=c(1,1)
338 dx=c(1,1)
339 print(i2)
340 db22.grid=db.create(flag.grid=TRUE,xO=xO,nx=nxx,dx=dx)
341 db.grid=kriging(B.db,db22.grid,data.modelfit3,neighcreator)
342 pax.cv[i2]=db.grid[1,4] }
343

```



```

344 tl=proc.time()
345 - hwra=tl-tO
346 print(1111)
347 paxT.cv=bxcx(pax.cv+PI,lambda,InverseQ = TRUE,`soxcox`)
348 mean(paxT.cv,na.rm = TRUE)
349 Q=paxT.cv-PaxoL
350 SQ=sum(QA2,na.rm = TRUE)
351 - RMSE=sqrt(SQ/608) ## arithmos dedomenon
352 MaxAE=max(abs(Q),na.rm = TRUE)
353 MAE=mean(abs(Q), na.rm = TRUE)
354 ME=mean(Q, na.rm = TRUE)
355 corelation=cor(PaxoL,paxT.cv,use "complete")
356 RMSE
357 MAE
358 ME
359 corelation
360
361, ##### Ypologismos Apothematwn #####
362 paxh = gridM2[,4]
363 xr=range(gridM2[,2],na.rm = TRUE)
364 yr=range(gridM2[,3],na.rm=TRUE)
365 telxr=(xr[2]-xr[1])/nx
366 telyr=(yr[2]-yr[1])/ny
367 Embkeliou= telxr*telyr *10A6
368 AP08E= 1.21 * Embkeliou * sum(paxh)
369 AP08EII=AP08E / 10A6
370 AP08EII
371 tablepaxh=cbind(gridM2[,2],gridM2[,3],paxh)
372 tableoria<- read.xlsx("tableoria.xlsx")
373 DDD=point.in.polygon(point.x =tablepaxh[,1] , point.y=tablepaxh[,2],
374 pol.x=tableoria[,1], pol.y=tableoria[,2],
375 mode.checked=FALSE)
376 PAXH2=paxh*DDD
377 AP080RYXEIOY=sum(PAXH2)*Embkeliou*1.21/10A6
378 AP080RYXEIOY

```

Βιβλιογραφία

- [1] Βάμβουκα, Δ.: “Αντιρυπογόνος Χρήσις Γαιανθράκων- Τεχνολογίες Αξιοποίησης Γαιανθράκων Χαμηλής Τάξης” . ΙΩΝ, Αθήνα, 2002.
- [2] Χριστόπουλος, Δ.Θ.:“Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική” , Σημειώσεις του προπτυχιακού μαθήματος, Πολυτεχνείο κρήτης, Χανιά, 2014
- [3] Γαλετάκης, Μ.: “ Προσδιορισμός Ποιότητας Λιγνίτη που Εξορύσσεται με Συνεχή Μέθοδο Εκμετάλλευσης από Πολυστρωμικά Κοιτάσματα” . Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, 1996.
- [4] Χριστόπουλος, Δ.Θ.: Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική. Τεχνική αναφορά, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2012.
- [5] Pavlides, A. G.: “Development of New Geostastical Methods for Spatial Analysis and Applications in Reserves Estimation and Quality Characteristics of Coal Deposits” . Διδακτορική διατριβή, Technical University of Crete, 2016.
- [6] Γαλετάκης, Μ.: “ Περὶ γραφή-Επιλογή και υπολογισμός απόδοσης εξοπλισμού επιφανειακών εκμεταλλεύσεων” , Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2013
- [7] Δ.Ε.Η. Α.Ε.: “Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Ορυχείων Πτολεμαΐδας, Ν. Κοζάνης” Λ.Κ.Δ.Μ., Τεχνική έκθεση, 2010. <https://www.scribd.com/document/33373567/%CE%9A%CE%95%CE%A6%CE%91%CE%9B%CE%91%CE%99%CE%9F-1-%CE%9C%CE%A4%CE%A0-15-06-10#>
- [8] Βασιλείου, Α. Χ.: “Ανάπτυξη Αλγορίθμου στην Ασαφή Λογική για τον Καθορισμό των Εκμεταλλεύσιμων Στρωμάτων” . Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2004
- [9] Ζαραφίδης Δ., Παυλουδάκης Φρ.“ΟΛιγνίτης της Πτολεμαΐδας, Ιστορία, Παρούσα κατάσταση, Προοπτικές” , 2008.www.ptolemaida.gr/old/1/100xronia/pdf/diimerida/b/Zαραφίδης_Παρουσίαση.pdf
- [10] Roumpou Ch., Leontidis M., Dadswell J: Planning problems posed by unusual geological sequences [A question of geology]. World Coal, 10(8): 49-50.
- [11] Bochner, S., Tenenbaum, M., και Pollard, H.: Lectures on Fourier Integrals. Annals of mathematics studies. Princeton University Press, 1959, ISBN 9780691079943.

- [12] Τερεζόπουλος Ν.: “Μέθοδοι Υπαίθριων Εκμεταλλεύσεων”, ΕΜΠ, 2001.
- [13] Golosinski T. Boehm F. : Continius Surface Mining, proceedings of an international symposium. Edmonton, Trans Tech Publications.
- [14] Roumpos P.C., Paraskevis I.N., Galetakis. J.M., Michalakopoulos N.T. : “*Mineable Lignite Reserves Estimation in Continuous Surface Mining*”, P.P.C. S.A., Technical University of Crete, National Technical University of Athens, Chania, Athens, 2015.
- [15] Goovaerts, P.: “*Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Applied geostatistics series*”. Oxford University Press, New York, 1997, ISBN 9780195115383.
- [16] Taylor, J.R.: *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*. A series of books in physics. University Science Books, 1997.
- [17] Γκάφα Π.: «Γεωστατιστική ανάλυση αποθεμάτων γαιάνθρακα βάσει δεδομένων από την κομμητεία Campbell των ΗΠΑ» Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2017
- [18] Δημητρακόπουλος Δ.: «Υδρογεωλογικές συνθήκες ορυχείου Αμυνταίου: προβλήματα κατά την εκμετάλλευση και αντιμετώπισή τους», Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2001.
- [19] ΑΔΜΗΕ: Μηνιαίο Δελτίο Ενέργειας, Δεκέμβριος 2013.
- [20] Olea, R.A.: *Geostatistics for Engineers and Earth Scientists*. Springer US, 1999.
- [21] Papoulis, A. και Pillai, S.U.: *Probability, Random Variables and Stochastic Process*. McGraw-Hill Inc., New York, 4η έκδοση, 2002.
- [22] Roumpos Ch., Leontidis M.: lignite production- utilisation and technologies in Greece. Seminar V. Coal Utilisation and Technology, Turkey, 14-15 April.
- [23] Hristopulos T.D., C.Roumpos, Z. A Pavlides, Z. Agioutantis : “Spatial modeling of lignite energy reserves for exploitation planning and quality control”, Geostatistics Laboratory, School of mineral Resources Engineering, Technical University of Crete, Chania, Public Power Corporation S.A., Greece, Mining Engineering, University of Kentucky.
- [24] Noel A. C. Cressie: “Statistics for Spatial Data, Revised Edition” ISBN: 9780471002550, 2015
- [25] Azapagic A. : Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry, Journal of Cleaner Production, 12, 639-662
- [26] Euracoal: “Coal industry across Europe” 6th edition with insights, 2017
- [27] Hustrulid W., Kutcha, M.: Open Pit Mine Planning and Design, Balkema, Rotterdam
- [28] Μπασινάς Π., Σκορδάς Γ., Κακαράς Ε., Σακελλαρόπουλος Γ. “Ανάπτυξη Τεχνολογίας για την Παραγωγή «Καθαρών» Στερεών Καυσίμων από Λιγνίτες και Απόβλητα”. Γ΄ ΠΕΠ Δυτικής Μακεδονίας, Ιανουάριος 17, 2008, Πτολεμαίδα.