ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να αφιερώσω λίγα λόγια ώστε να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους με βοήθησαν να φέρω σε πέρας αυτήν την εργασία. Πρώτο θα ευχαριστήσω τον Κύριο Δ. Χριστόπουλο, υπεύθυνο καθηγητή μου σε αυτή την μεταπτυχιακή διατριβή που με τις γνώσεις του και τον χαρακτήρα του ακούραστα με βοηθούσε και με καθοδηγούσε καθ' όλη την διάρκεια του μεταπτυχιακού μου. Τον κύριο Κ. Καβουρίδη, για τις συμβουλές του στα θέματα της εκμετάλλευσης και για την συνεισφορά του στον ορισμό του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας. Τον κύριο Χ. Ρούμπο για την βοήθεια που μου προσέφερε στην εφαρμογή των μεθόδων εκτίμησης και καθ' όλη τη διάρκεια της μεταπτυχιακής εργασίας όπως και για τα απολογιστικά δεδομένα της Δ.Ε.Η. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους μεταδιδακτορικούς του εργαστηρίου, τον Milan Zukovic και τον Samuel Elogne για τις συμβουλές τους και την βοήθεια που μου προσέφεραν στην κατανόηση της μέγιστης πιθανοφάνειας και τα Σπαρτιάτικα μοντέλα. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τις φίλες, τους φίλους και τους γονείς μου για την στήριξη που μου παρείχαν κατά την διάρκεια του μεταπτυχιακού μου και την εμπιστοσύνη τους σε μένα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην διατριβή αυτή συγκρίνονται τρεις μέθοδοι εκτίμησης των αποθεμάτων λιγνίτη στο ορυχείο της Δ.Ε.Η. στο Αμύνταιο, δημιουργούνται χάρτες εκτίμησης του συνολικού πάχους λιγνίτη και εισάγεται ο δείκτης εκμεταλλευσιμότητας λιγνιτικών στρωμάτων .

Αναφέρονται μερικές εισαγωγικές έννοιες της γεωστατιστικής, και γίνεται στατιστική και γεωστατιστική ανάλυση (εκτίμηση τάσης και ημιβαριογραμμάτων) του συνολικού πάχους λιγνίτη σε δύο σύνολα δεδομένων γεωτρήσεων για το ορυχείο. Το πρώτο σύνολο αποτελείται από γεωτρήσεις σε μία περιοχή του ορυχείου που έχει ήδη εξοφληθεί και για την οποία υπάρχουν διαθέσιμα απολογιστικά δεδομένα. Το δεύτερο σύνολο αποτελείται από γεωτρήσεις που καλύπτουν όλη την περιοχή του ορυχείου. Στη συνέχεια εφαρμόζονται οι τρεις μέθοδοι εκτίμησης αποθεμάτων. Τα αποθέματα εκτιμούνται πρώτα με την μέθοδο των πολυγώνων Voronoi με χρήση ενός συνόλου σημείων κατοπτρισμού για να κλείσουν τα πολύγωνα στα άκρα του ορυχείου. Η δεύτερη μέθοδος εκτίμησης που χρησιμοποιείται είναι το κανονικό Kriging χρησιμοποιώντας ως θεωρητικό μοντέλο το Σπαρτιάτικο μοντέλο ημιβαριογράμματος. Οι παράμετροι του ημιβαριογράμματος προκύπτουν με χρήση της μεθόδου της μέγιστης πιθανοφάνειας. Τέλος τα αποθέματα εκτιμούνται με την μέση τιμή των γεωτρήσεων. Γίνεται σύγκριση των μεθόδων μεταξύ τους και σύγκριση των εκτιμούμενων αποθεμάτων με την πρόβλεψη της Δ.Ε.Η. Το λογισμικό που χρησιμοποιεί η Δ.Ε.Η βασίζεται στη μέθοδο των αντίστροφων αποστάσεων.

Για την μελέτη της ποσότητας του λιγνίτη που απορρίπτεται ως μη οικονομικά εκμεταλλεύσιμος, εισάγεται ο δείκτης εκμεταλλευσιμότητας των λιγνιτικών στρωμάτων. Ορίζοντας το κατώτερο αποδεκτό όριο του δείκτη αυτού, εξετάζεται ποια στρώματα λιγνίτη βρίσκονται σε μεγάλο βάθος σε σχέση με το πάχος τους ώστε να είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμα. Από το συνολικό πάχος στρωμάτων λιγνίτη αφαιρείται το τμήμα που δεν είναι απολήψιμο λόγω περιορισμών των μηχανημάτων εξόρυξης.

Οι τρεις μέθοδοι εφαρμόζονται εκ νέου στα τροποποιημένα δεδομένα που αφορούν τον απολήψιμο λιγνίτη. Σημειώνεται πως η μέθοδος διάκρισης των λιγνιτικών στρωμάτων είναι διαφορετική από την μέθοδο της Δ.Ε.Η. με αποτέλεσμα να διαφοροποιούνται κάπως οι εκτιμήσεις αποθεμάτων.

Τέλος, στο πρώτο παράρτημα δίνονται τα διαγράμματα των διαδικασιών που ακολουθούνται σε κάθε κεφάλαιο, και στο παράρτημα ΙΙ παρατίθενται οι αλγόριθμοι που κατασκευάστηκαν σε περιβάλλον matlab.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εργασία αυτή εφαρμόζονται και συγκρίνονται διάφορες μέθοδοι υπολογισμού αποθεμάτων λιγνίτη στο ορυχείο του Αμυνταίου στην Β. Ελλάδα. Ένας στόχος αυτής της εργασίας είναι να γίνει σύγκριση των μεθόδων που παρουσιάζονται και να δημιουργηθεί λογισμικό που να εκτιμά γρήγορα τα αποθέματα και είναι ευέλικτο σε αλλαγές των δεδομένων (πχ δεδομένα από άλλα λιγνιτικά ορυχεία της Δ.Ε.Η.) ή των κριτηρίων αποδοχής στρωμάτων λιγνίτη. Στους βασικούς στόχους της διατριβής είναι να εκτιμηθούν τα αποθέματα του ορυχείου και να δημιουργηθούν χάρτες πάχους στρωμάτων λιγνίτη. Επιπλέον στόχος της εργασίας είναι να οριστεί ένας δείκτης εκμεταλλευσιμότητας των στρωμάτων του λιγνίτη. Με την εφαρμογή αυτού του δείκτη συγκρίνονται ξανά τα αποτελέσματά των μεθόδων εκτίμησης με χρήση των τροποποιημένων δεδομένων.

1.1 *<u>Ο λιγνίτης στην Ελλάδα</u>*

Σε μία εποχή που η τιμή του πετρελαίου είναι υψηλή (65$/βαρέλι, Οκτώβριος 2008) στην Ελλάδα βρίσκονται 3,1 δισεκατομμύρια τόνοι επιβεβαιωμένων και εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων λιγνίτη. Η χρήση του λιγνίτη σαν καύσιμο σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας είναι σημαντικά πιο οικονομική από την χρήση του πετρελαίου. Σαν πρόσθετο πλεονέκτημα, η εκμετάλλευση της ενεργειακής αυτής πηγής προσδίδει στην χώρα μας μεγαλύτερη ενεργειακή αυτονομία και ενισχύει οικονομικά οικισμούς της περιφέρειας δημιουργώντας θέσεις εργασίας και κίνητρα στους κατοίκους να παραμείνουν στον τόπο τους.

Πάνω από το 60% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα παράγεται από ατμοηλεκτρικούς σταθμούς που χρησιμοποιούν λιγνίτη σαν καύσιμο. Περίπου το 97% του παραγόμενου λιγνίτη χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει τους σταθμούς με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 5,3 GW. Για την παραγωγή μίας MWh ηλεκτρικής ενέργειας χρειάζονται περίπου 2 τόνοι λιγνίτη.

Η έρευνα για εξωηλεκτρικές χρήσεις και η έρευνα για τον εξευγενισμό των στερεών καυσίμων εντείνεται σε παγκόσμια κλίμακα. Σε χώρες όπως η Γερμανία και η Αμερική, η εξαερίωση (gasification), η υγροποίηση του άνθρακα (liquefaction), αλλά και η παραγωγή και καύση εξευγενισμένων λιγνιτικών αιωρημάτων (coal slurries) αποτελούν τεχνολογίες που συνεχώς εξελίσσονται.

Η Δ.Ε.Η είναι η κύρια παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα και η κυριότερη παραγωγός λιγνίτη με δικαίωμα να εξορύξει το 60,5% των επιβεβαιωμένων αποθεμάτων λιγνίτη. [A. Pavlides et al., 2007]

1.2 *Το ορυχείο του Αμυνταίου*

Το ορυχείο του Αμυνταίου (σχήμα 1.1) λειτουργεί από το 1989 και δίνει κατά μέσο όρο 8 Mt λιγνίτη το χρόνο. Ο λιγνίτης αυτός χρησιμοποιείται από τον γειτονικό ατμοηλεκτρικό σταθμό εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος 600 MW. Ο λιγνίτης του ορυχείου εκτιμάται πως έχει μέση κατώτερη θερμογόνο δύναμη (ΚΘΔ) 1200 kcal/kg. Το κοίτασμα του Αμυνταίου έχει ένα εκτενές σύστημα ρηγμάτων που δυσκολεύουν την εφαρμογή των γεωστατιστικών μεθόδων και των μεθόδων εκτίμησης αποθεμάτων και της ποιότητας. Αυτό συμβαίνει γιατί η παρουσία πολλαπλών ρηγμάτων στην περιοχή περιορίζει τις χωρικές εξαρτήσεις, δυσχεραίνοντας μια ακριβή εκτίμηση.

Το ορυχείο λειτουργεί με έξι τομές. Τρεις από τις τομές αυτές είναι λιγνιτικές, δηλαδή από τις τομές αυτές εξορύσσεται λιγνίτης, ενώ στις υπόλοιπες εξορύσσονται μόνο υπερκείμενα στείρα υλικά Η εκτίμηση της Δ.Ε.Η για τα συνολικά αποθέματα του ορυχείου είναι 210 Mt εκ των οποίων είχαν εξορυχθεί 105 Mt ως το τέλος του 2006.

Σχήμα 1. 1 Το ορυχείο του Αμυνταίου και ο γειτονικός ατμοηλεκτρικός σταθμός παραγωγής ενέργειας (Google earth 2008). Το πλάτος της φωτογραφίας είναι 7,21 km.

Ένα από τα κύρια προβλήματα του ορυχείου είναι η σταδιακή βύθιση της λιγνιτοφόρου σειράς από ανατολικά προς δυτικά. Η περιοχή είναι έντονα τεκτονισμένη, με μια σειρά ρηγμάτων διευθύνσεως κυρίως ΒΑ-ΝΔ που διακόπτουν την συνέχεια των στρωμάτων (σχήμα 1.2). Ένα επιπλέον πρόβλημα της εκμετάλλευσης είναι ότι εμφανίζονται προβλήματα στην ευστάθεια των πρανών. Ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας προκαλεί πρόβλημα στην εκσκαφή καθώς εμφανίζεται η πιεζομετρική επιφάνειά του στην τρίτη τομή. [A. Pavlides et al., 2007, Δεληγιαννίδου, 2006]

Σχήμα 1. 2 Εμφάνιση ρήγματος στο ορυχείο του Αμυνταίου. [Δεληγιαννίδου, 2006]

1.3 *Γεωλογία της περιοχής*

Κατάλληλες συνθήκες για την δημιουργία λιγνιτικών κοιτασμάτων στην Ελλάδα συνέτρεξαν κατά περιόδους από τις αρχές του καινοζωικού αιώνα μέχρι τους πρόσφατους γεωλογικούς χρόνους. Η κύρια φάση της λιγνιτογένεσης συμπίπτει με την Νεοτριτογενή και την τεταρτογενή περίοδο. Τα σημαντικότερα κοιτάσματα λιγνίτη αναπτύχθηκαν σε αβαθής λίμνες και έλη. Μία τέτοια λεκάνη είναι και η λιγνιτοφόρος περιοχή του Αμυνταίου.

Η λιγνιτοφόρος περιοχή Αμυνταίου δεν διαφέρει γεωλογικά από τη λιγνιτοφόρο περιοχή της Πτολεμαΐδας. Πρόκειται για την ίδια γεωλογική ενότητα, που η συνέχειά της διακόπηκε λόγω μεγάλης κλίμακας τεκτονικών φαινομένων. Τα φαινόμενα αυτά συνέβησαν κατά τη διάρκεια της τεταρτογενούς περιόδου. Επιμήκεις και βαθιές τάφροι (όπως της Άρδασσας-Πτολεμαΐδας-Βεγορίτιδας) συνέβαλαν στη διακοπή της συνέχειας των δύο λιγνιτοφόρων περιοχών.

Τα λιγνιτοφόρα ιζήματα της περιοχής Αναργύρων, που βρίσκονται δίπλα στο ορυχείο του Αμυνταίου, αποτελούν μέρος μιας παχιάς νεογενούς σειράς ιζημάτων. Τα ιζήματα αυτά είναι καλυμμένα σχεδόν στο σύνολό τους από τεταρτογενείς ποταμολιμναίους σχηματισμούς που καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της έκτασης του τεκτονικού βυθίσματος Χειμαρίτιδας-Πετρών Αμυνταίου.

Η γεωλογική ανάλυση της ευρύτερης περιοχής σε συνδυασμό με τα λιθοστρωματογραφικά στοιχεία που προέκυψαν από την εξέταση των πυρήνων των γεωτρήσεων κατεύθυναν την κοιτασματολογική έρευνα. Οι έρευνες αυτές συντέλεσαν στον εντοπισμό και στην καλύτερη γνώση του λιγνιτικού κοιτάσματος. [Δεληγιαννίδου, 2006, Γαλετάκης, 1996]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ

Γεωστατιστική ονομάζεται η επιστήμη που παρέχει μεθόδους για την εκτίμηση των παραμέτρων της χωρικής κατανομής εξαρτημένων τυχαίων μεταβλητών, όπως και μεθόδους εκτίμησης διάφορων ποσοτήτων σε σημεία που δεν υπάρχουν μετρήσεις.

Εκτίμηση ονομάζεται η διαδικασία προσδιορισμού της βέλτιστης τιμής του πεδίου στο σημείο που μας ενδιαφέρει ή σε πολλά σημεία συγχρόνως, βάσει κάποιου κριτηρίου βελτιστοποίησης, όπως η ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος.

Προσομοίωση ονομάζεται η διαδικασία παραγωγής πολλών πιθανών καταστάσεων του πεδίου. Οι καταστάσεις αυτές πρέπει να συμφωνούν ικανοποιητικά με τους στατιστικούς περιορισμούς που προκύπτουν από το πειραματικό δείγμα. Επομένως η προσομοίωση αποσκοπεί στην παραγωγή πολλών εναλλακτικών σεναρίων, τα οποία είναι πιθανά με βάση τις υπάρχουσες μετρήσεις. [Χριστόπουλος, 2004]

2.1 *Τυχαία πεδία*

Η Γεωστατιστική στηρίζεται στη μαθηματική έννοια του **τυχαίου πεδίου**. Ένα πεδίο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο τυχαίων μεταβλητών κατανεμημένων στο χώρο. Ένα τυχαίο πεδίο αναπαριστά μια φυσική μεταβλητή, όπως το πάχος στρώματος λιγνίτη ή η περιεκτικότητα του λιγνίτη σε τέφρα. Το τυχαίο πεδίο προσδιορίζει τις πιθανότητες η μεταβλητή αυτή να λαμβάνει συγκεκριμένες τιμές σε κάθε σημείο του χώρου. Σε αντίθεση με τις αιτιοκρατικές συναρτήσεις, το τυχαίο πεδίο αντιπροσωπεύει ένα σύνολο δυνατών καταστάσεων. Σ’ ένα τυχαίο πεδίο η κατανομή των πιθανοτήτων είναι τέτοια ώστε η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας σ’ ένα σημείο Α να εξαρτάται από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας στα γειτονικά σημεία. Αυτή η χωρική εξάρτηση είναι το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των τυχαίων πεδίων που τα διαφοροποιεί από ένα σύνολο ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών.

Μέση τιμή του πεδίου ή **τάση** του πεδίου ονομάζεται η μέση τιμή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας υπολογισμένη ως προς το σύνολο των καταστάσεων του πεδίου, όπως φαίνεται στη σχέση 2.1

$$m_X(\mathbf{s}) = \int dx\ f_X[x(\mathbf{s})]x \qquad [2.1]$$

$x(\mathbf{s})$ είναι οι τιμές μιας κατάστασης του πεδίου, η συνάρτηση $f_X[x(\mathbf{s})]$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του πεδίου, ενώ με $X(\mathbf{s})$ συμβολίζεται το πεδίο. Συνήθως η τάση αντιπροσωπεύει τις αργές μεταβολές στην τιμή του πεδίου και τις περισσότερες φορές μπορεί να περιγραφεί με μια αιτιοκρατική συνάρτηση όπως ένα πολυώνυμο.

Διακύμανση του πεδίου ονομάζεται το τυχαίο πεδίο που προκύπτει από τη διαφορά του πεδίου με την μέση τιμή, όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.2. Η διακύμανση συμβολίζεται με $\chi(\mathbf{s})$.

$$\chi(\mathbf{s}) = X(\mathbf{s}) - m_X(\mathbf{s}) \qquad [2.2]$$

Η διακύμανση του τυχαίου πεδίου είναι ένα διαφορετικό τυχαίο πεδίο και αντιπροσωπεύει τις γρήγορες μεταβολές.

Η **στατιστική ομοιογένεια** είναι ιδιότητα μερικών τυχαίων πεδίων. Σημαίνει ότι οι στατιστικές ιδιότητες του πεδίου είναι ανεξάρτητες από τις χωρικές συντεταγμένες του εξεταζόμενου σημείου. Ένα πεδίο είναι στατιστικά ομοιογενές όταν η μέση τιμή είναι σταθερή και η συνάρτηση συνδιασποράς εξαρτάται αποκλειστικά από το διάνυσμα της απόστασης $\mathbf{r}(\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j)$ μεταξύ δύο σημείων.

Η στατιστική ομοιογένεια πρακτικά σημαίνει πως η μεταβολή των τιμών του πεδίου μπορεί να αποδοθεί σε διακυμάνσεις γύρω από την συνάρτηση της μέσης τιμής και ότι οι ιδιότητες του πεδίου δεν εξαρτώνται από τη θέση αλλά μόνο από την απόσταση των σημείων. [Χριστόπουλος, 2004]

2.2 *Ημιβαριόγραμμα*

Το **ημιβαριόγραμμα** ενός τυχαίου πεδίου ορίζεται βάσει της εξίσωσης 2.3.

$$\gamma_X(\mathbf{s},\mathbf{r}) = \frac{1}{2} E\ \left\{ \left[X(\mathbf{s}+\mathbf{r}) - X(\mathbf{s}) \right]^2 \right\} \qquad [2.3]$$

Όπου **r** είναι το βήμα απόστασης. Το ημιβαριόγραμμα δηλαδή ορίζεται σε σχέση με ζεύγη σημείων. Ουσιαστικά το ημιβαριόγραμμα μετρά πόσο διαφέρουν μεταξύ τους οι τιμές του πεδίου σαν συνάρτηση της απόστασης.

Αν στατιστικές ιδιότητες του πεδίου X δεν εξαρτώνται από τις χωρικές συντεταγμένες του σημείου, δηλαδή αν το πεδίο είναι στατιστικά ομοιογενές, το ημιβαριόγραμμα συνδέεται άμεσα με την συνάρτηση συνδιασποράς μέσω της εξίσωσης 2.4.

$$\gamma_X(\mathbf{r}) = \sigma_X{}^2 - c_X(\mathbf{r}) \qquad [2.4]$$

σ^2_X είναι η διασπορά των τιμών του πεδίου και $c_X(\mathbf{r})$ είναι η συνάρτηση συνδιασποράς. Από την 2.4 έπεται ότι το ημιβαριόγραμμα τείνει ασυμπτωτικά στην τιμή της διασποράς.

Οι παράμετροι του ημιβαριογράμματος καθορίζουν την χωρική εξάρτηση των τιμών του πεδίου σε δύο γειτονικά σημεία. Δηλαδή πρακτικά το ημιβαριόγραμμα είναι ένα εργαλείο που δείχνει την εξάρτηση των σημείων του πεδίου σε σχέση με την απόσταση τους. [Χριστόπουλος, 2004]

2.2.1 *Εκτίμηση πειραματικού ημιβαριογράμματος*

Η εκτίμηση του δειγματικού ή πειραματικού ημιβαριογράμματος γίνεται με διάφορους τρόπους. Ο πιο διαδεδομένος είναι η μέθοδος των ροπών (εξ 2.5).

$$\hat{\gamma}_X(\mathbf{r}_k) = \frac{1}{2n} \sum_{i,j=1}^{n_{\mathbf{r}}} \left\{ \left[X(\mathbf{s}_i) - X(\mathbf{s}_j) \right]^2 \right\}, \qquad (\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j) \in B(\mathbf{r}_k),\ k = 1,\ldots,N_c \qquad [2.5]$$

$B(\mathbf{r}_k)$ είναι μία κλειστή περιοχή γύρο από το διάνυσμα $\mathbf{r}_k$ που προσδιορίζει το μέγεθος της **τάξης** του βήματος. Αν ένα σημείο $\mathbf{s}_j$ βρίσκεται μέσα στην τάξη $B(\mathbf{r}_k)$ θεωρείται ότι απέχει απόσταση $\mathbf{r}_k$ από το σημείο $\mathbf{s}_i$.

N_c είναι το πλήθος των τάξεων και $n_{\mathbf{r}}$ το πλήθος των ζευγών που περιέχονται μέσα στην τάξη $B(\mathbf{r}_k)$.

Ουσιαστικά η μέθοδος των Ροπών προσδιορίζει μια τιμή του πειραματικού ημιβαριογράμματος για κάθε $\mathbf{r}_k$. Αυτό γίνεται βάσει του μέσου όρου των διαφορών $[X(\mathbf{s}_i) - X(\mathbf{s}_j)]^2$ για όλα τα ζεύγη σημείων, των οποίων το διάνυσμα της απόστασης ανήκει στην περιοχή $B(\mathbf{r}_k)$. [Χριστόπουλος, 2004]

2.2.2 *Ευσταθής εκτιμήτρια ημιβαριογράμματος*

Μία διαφορετική εκτιμήτρια για το πειραματικό ημιβαριόγραμμα είναι η ευσταθής εκτιμήτρια. Αυτή η εκτιμήτρια (σχέση 2.6) μειώνει την επιρροή ακραίων τιμών στο βαριόγραμμα.

$$\hat{\gamma}_X(\mathbf{r}_k) = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n_r} \sqrt{\left| X(\mathbf{s}_i) - X(\mathbf{s}_j) \right|} \Big/ N_r \right]^4}{2(0.494/N_r + 0.457)}, \quad (\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j) \in B(\mathbf{r}_k),\ k = 1,\ldots,N_c \qquad [2.6]$$

$n_{\mathbf{r}}$ το πλήθος των ζευγών που περιέχονται μέσα στην τάξη $B(\mathbf{r}_k)$.

Σε σύγκριση με την μέθοδο των ροπών όπως εφαρμόστηκε σε αυτήν την εργασία η ευσταθής εκτιμήτρια τίνει να δίνει μικρότερες εκτιμήσεις για το εμπειρικό ημιβαριόγραμμα, της τάξης του 10-20% μικρότερες. [Cressie, 1980]

2.2.3 *Υπολογισμός θεωρητικού μοντέλου ημιβαριογράμματος*

Αφού υπολογιστεί το πειραματικό ημιβαριόγραμμα, πρέπει να βρεθεί ένα θεωρητικό μοντέλο το οποίο ταιριάζει καλύτερα στο πειραματικό ημιβαριόγραμμα. Το θεωρητικό μοντέλο επιτρέπει τον υπολογισμό του ημιβαριογράμματος για οποιαδήποτε απόσταση.

Παρουσιάζονται παρακάτω οι εξισώσεις για μερικά ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα ημιβαριογράμματος και το σπαρτιάτικο θεωρητικό μοντέλο.

Η εξίσωση που δίνει το εκθετικό ισοτροπικό μοντέλο είναι:

$$\gamma_X(r) = \sigma_X^2 [1 - e^{-\frac{r}{\xi}}] \qquad [2.7]$$

Όπου ξ ορίζεται το **μήκος συσχέτισης,** δηλαδή ένα μήκος που κανονικοποιεί την απόσταση r και ορίζει το διάστημα μέσα στο οποίο υπάρχει ισχυρή αλληλεξάρτηση τιμών του πεδίου. Για το εκθετικό μοντέλο ημιβαριογράμματος θεωρείται πως σε αποστάσεις μεγαλύτερες από $3 \cdot \xi$ δεν υπάρχει ουσιαστική αλληλεξάρτηση.

Η εξίσωση που δίνει το γκαουσιανό ισοτροπικό μοντέλο είναι:

$$\gamma_X(r) = \sigma_X^2 \left[1 - e^{-\left(\frac{r}{\xi}\right)^2} \right] \qquad [2.8]$$

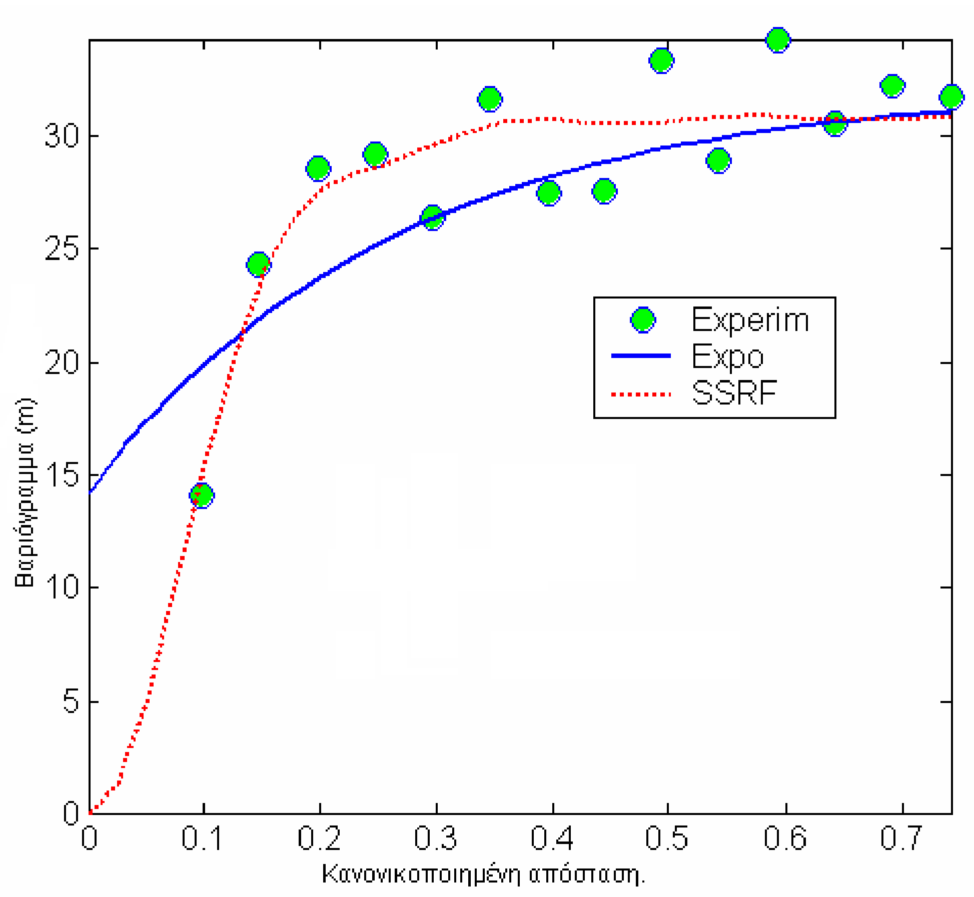
Η εξίσωση που δίνει το σπαρτιάτικο θεωρητικό μοντέλο είναι:

$$\gamma(\mathbf{r}) = \frac{\eta_0 \xi^2}{2\pi} \int_0^{k_c} dk \, \frac{k[1 - J_0(kr)]}{1 + \eta_1 \xi^2 k^2 + \xi^4 k^4} \qquad [2.9]$$

Στην εξίσωση 2.9 $J_o(kr)$ είναι η συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης, η_o είναι η παράμετρος κλίμακας, ξ είναι το χαρακτηριστικό μήκος και k_c είναι το σημείο φασματικής αποκοπής. [Hristopulos, 2003]

Το σπαρτιάτικο ημιβαριόγραμμα έχει επιπλέον χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη τιμών που λείπουν από τα δεδομένα [Zukovic and Hristopulos, 2008/1] ή για την επεξεργασία ανισοτροπικών δεδομένων [Chorti and Hristopulos, 2008] όπως και στην αδέσμευτη προσομοίωση τυχαίων πεδίων σε μη κανονικό πλέγμα [Hristopulos, 2005]. Έχει χρησιμοποιηθεί σε περιβαλλοντικές εφαρμογές, όπως για τη δημιουργία χαρτών πρόβλεψης μεταβολών στην ραδιενέργεια μιας περιοχής [Elogne et al, 2008]. Άλλες χρήσεις του Σπαρτιάτικου ημιβαριογράμματος περιλαμβάνουν την μοντελοποίηση χρονοσειρών [Zukovic and Hristopulos, 2008/2]. Πιο λεπτομερής ανάλυση γίνεται στα [Hristopulos and Elogne, 2007, Hristopulos, 2006].

Στο σχήμα 2.1 φαίνεται ένα πειραματικό ημιβαριόγραμμα και δύο θεωρητικά μοντέλα βαριογράμματος που το προσεγγίζουν. Τα δύο μοντέλα είναι το σπαρτιάτικο και το εκθετικό μοντέλο με φαινόμενο κόκκου. [Χριστόπουλος, 2004, Olea, 2006, Hristopulos, 2003]



Σχήμα 2. 1 Το πειραματικό και τα θεωρητικά μοντέλα βαριογράμματος για την εκτίμηση του συνολικού πάχους στρωμάτων λιγνίτη στο ορυχείο του Αμύνταιο

Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του θεωρητικού μοντέλου συνήθως υπολογίζονται από την ελαχιστοποίηση του τετραγώνου του σφάλματος του θεωρητικού μοντέλου γ_X. Δηλαδή της διαφοράς μεταξύ του θεωρητικού μοντέλου γ_X και του πειραματικού βαριογράμματος $\hat{\gamma}_X$ στα σημεία που υπάρχει εκτίμηση του $\hat{\gamma}_X$. Ανάλογα με τον αριθμό των ζευγών που αντιστοιχούν σε κάθε τάξη, δίνεται διαφορετικός συντελεστής βαρύτητας στις τάξεις κατά την προσαρμογή του θεωρητικού μοντέλου.

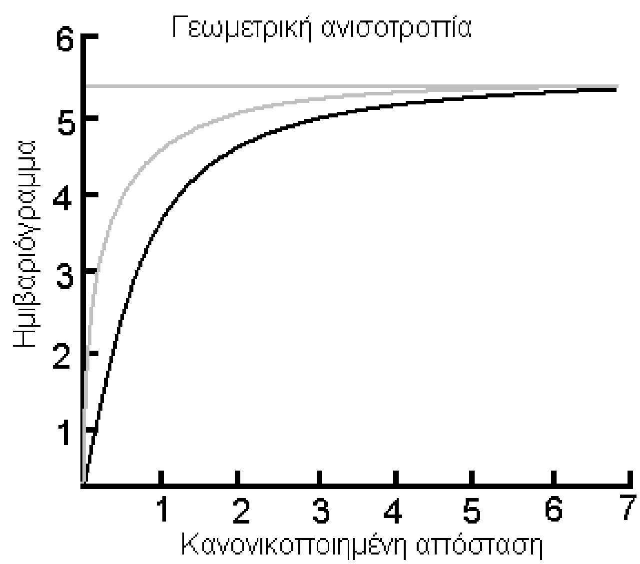
2.3 *Ανισοτροπία.*

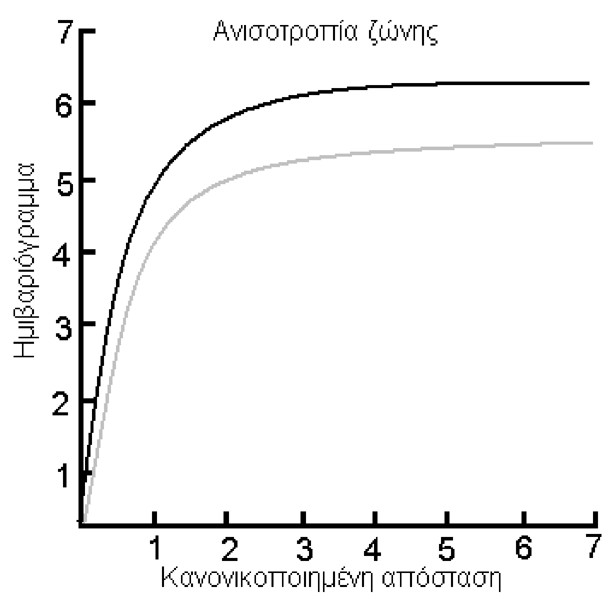
Στατιστική ισοτροπία ορίζεται ως η εξάρτηση της συνάρτησης συνδιασποράς μόνο από το μέτρο r της απόστασης $\mathbf{r}$ και όχι από την κατεύθυνση αυτού του διανύσματος.

Προφανώς αν ένα πεδίο είναι ισοτροπικό θα είναι και στατιστικά ομοιογενές χωρίς να ισχύει υποχρεωτικά το αντίστροφο.

Στην περίπτωση α**νισοτροπίας**, η συσχέτιση των τιμών του πεδίου και η συνάρτηση συνδιασποράς του εξαρτώνται και από την κατεύθυνση του διανύσματος **r.** Ένα τέτοιο πεδίο ονομάζεται ανισοτροπικό.

Οι δύο κύριοι τύποι ανισοτροπίας που συναντώνται είναι η **γεωμετρική ανισοτροπία** και η **ανισοτροπία ζώνης**. Παραδείγματα φαίνονται στο σχήμα 2.2.



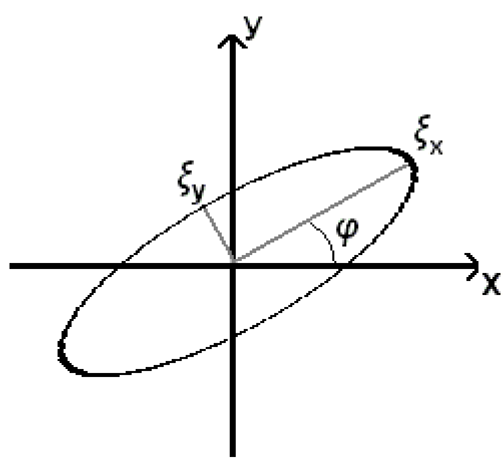


Σχήμα 2. 2 Παραδείγματα ανισοτροπίας για δύο κατευθυντικά βαριογράμματα.

Στη γεωμετρική ανισοτροπία, το ημιβαριόγραμμα περιλαμβάνει περισσότερα από ένα μήκη συσχέτισης, ένα για κάθε διάσταση του χώρου. Αυτά τα μήκη είναι διαφορετικά μεταξύ τους με αποτέλεσμα το βαριόγραμμα να τείνει προς την τιμή της συνδιασποράς του πεδίου με διαφορετική ταχύτητα σε κάθε κατεύθυνση. Στην περίπτωση της ανισοτροπίας ζώνης το βαριόγραμμα τείνει σε διαφορετικό άνω φράγμα αναλόγως με την κατεύθυνση.

Στην περίπτωση που εξετάζεται γεωμετρική ανισοτροπία στο επίπεδο, σε δύο διαστάσεις **x**, **y** του χώρου, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα μήκη συσχέτισης ξ_x και ξ_y σχηματίζουν μια έλλειψη. Η έλλειψη αυτή έχει σαν κύριους άξονες τα δύο μήκη συσχέτισης ξ_x και ξ_y.

Η **γωνία προσανατολισμού της ανισοτροπίας** φ ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του συστήματος συντεταγμένων και των κύριων αξόνων της έλλειψης της ανισοτροπίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. **Λόγος της ανισοτροπίας** ρ ορίζεται ο λόγος ξ_y/ξ_x. Οι δύο αυτές παράμετροι προσδιορίζουν την γεωμετρική ανισοτροπία.



Σχήμα 2. 3 Παράδειγμα έλλειψης γεωμετρικής ανισοτροπίας.

Η εξίσωση που δίνει το εκθετικό ανισοτροπικό μοντέλο είναι:

$$\gamma_X(r) = \sigma_X^2 \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\sqrt{\left(\frac{r_x}{\xi_x}\right) + \left(\frac{r_y}{\xi_y}\right) + 2\frac{r_x \cdot r_y}{\xi_x \cdot \xi_y}\cos(\varphi)} \right) \right] \right\} \qquad [2.10]$$

Όπου r_χ και r_y είναι οι αποστάσεις μεταξύ των ζευγών στον x και y άξονα του συστήματος συντεταγμένων που βρίσκονται τα δεδομένα. [Χριστόπουλος, 2004]. Μέθοδοι εκτίμησης της ανισοτροπίας και άλλα μοντέλα ανισοτροπίας δίνονται στο [Hristopulos, 2002]

2.4 *Εκτίμηση τυχαίων πεδίων.*

Η βασική ιδέα των μεθόδων εκτίμησης είναι ότι η τιμή του πεδίου στο σημείο εκτίμησης προκύπτει από ένα συνδυασμό των γειτονικών τιμών. Ο συνδυασμός μπορεί να είναι γραμμικός ή μη γραμμικός και οι παράμετροί του προσδιορίζονται από τη βελτιστοποίηση κάποιου στατιστικού μέτρου. Συνήθως χρησιμοποιείται η ελαχιστοποίηση του σφάλματος εκτίμησης. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι εκτίμησης είναι γνωστές με την ονομασία Kriging. Αυτό το σύνολο μεθόδων βασίζεται σε γραμμική παρεμβολή σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος εκτίμησης.

Το πρόβλημα της σημειακής εκτίμησης συνίσταται στην πρόβλεψη της τιμή του πεδίου X στο σημείο εκτίμησης **u.** Η εκτίμηση βασίζεται σε ένα σύνολο δεδομένων $X(\mathbf{s}_i)$ στα σημεία $\mathbf{s}_i$ που βρίσκονται εντός μιας περιοχής **Ω.** Η περιοχή αυτή περιλαμβάνει το σημείο **u**. Η εκτιμώμενη τιμή στο σημείο **u** συμβολίζεται ως $\hat{X}(\mathbf{u})$. [Χριστόπουλος, 2004]

2.4.1 *Διαδικασία Εκτίμησης.*

Η διαδικασία της εκτίμησης επαναλαμβάνεται σε όλα τα σημεία ενός προεπιλεγμένου πλέγματος. Η εκτίμηση αυτή πρέπει να συνοδεύεται και από την εκτίμηση της **αξιοπιστίας** η οποία προσδιορίζει την αβεβαιότητα της εκτίμησης στο κάθε σημείο.

Στις γραμμικές μεθόδους Kriging προσδιορίζεται μία γειτονιά $\omega(\mathbf{u})$ η οποία περιλαμβάνει n σημεία. Η εκτιμώμενη τιμή του πεδίου στο σημείο **u**, βάσει των τιμών του δείγματος μέσα στην γειτονιά του **u** δίνεται από την εξίσωση 2.11

$$\hat{X}(\mathbf{u}) = m_X(\mathbf{u}) + \sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_\alpha [X(\mathbf{s}_\alpha) - m_X(\mathbf{s}_\alpha)] \qquad [2.11]$$

Οι συντελεστές λ_α αντιπροσωπεύουν τα γραμμικά βάρη, και η $\mathbf{m}_X(\mathbf{s})$ την τάση του πεδίου (δηλαδή τις αργές μεταβολές) για τα σημεία **s**.

Το **σφάλμα της εκτίμησης** $\varepsilon(\mathbf{u})$ είναι η τυχαία μεταβλητή που ορίζεται ως η διαφορά ανάμεσα στην πραγματική και την εκτιμώμενη τιμή του πεδίου.

Η **συνθήκη αμεροληψίας** δίνεται από την εξίσωση 2.12 και εξασφαλίζει το μηδενισμό της μέσης τιμής του σφάλματος εκτίμησης.

$$E[\varepsilon(\mathbf{u})] = E[\widehat{X}(\mathbf{u}) - X(\mathbf{u})] = \mathbf{0} \qquad [2.12]$$

Η συνθήκη αυτή αποτελεί ένα πρόσθετο περιορισμό για τα γραμμικά βάρη, εκτός αν ικανοποιείται αυτόματα από την εξίσωση της γραμμικής παρεμβολής.

Οι μέθοδοι Kriging προσδιορίζουν την βέλτιστη τιμή $\widehat{X}(\mathbf{u})$ ως την τιμή που ελαχιστοποιεί τη διασπορά του σφάλματος της εκτίμησης. Οι εξισώσεις των μεθόδων αυτών οδηγούν σε ένα γραμμικό σύστημα ως προς τους γραμμικούς συντελεστές λ της εξίσωσης 2.9. Γνωστά στοιχεία του συστήματος που προκύπτει αποτελούν τα δεδομένα $X(\mathbf{s})$ και η τιμή του ημιβαριογράμματος στις κατάλληλες αποστάσεις. Η μέση τιμή του πεδίου ανάλογα με την μέθοδο μπορεί να είναι γνωστή, να θεωρείται σταθερή εντός της περιοχής $\omega(\mathbf{u})$ ή και να αλλάζει μέσα σ' αυτή τη γειτονιά.

Σ' αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε το κανονικό Kriging ή Ordinary Kriging. Το κανονικό Kriging προϋποθέτει ότι η τάση είναι σταθερή μέσα σε κάθε γειτονιά εκτίμησης αλλά μπορεί να μεταβάλλεται από γειτονιά σε γειτονιά. Το γραμμικό σύστημα των εξισώσεων που δίνουν τα γραμμικά βάρη δίνεται στην εξίσωση 2.13

$$\sum_{\beta=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_\beta \mathbf{C}_X(\mathbf{s}_\alpha - \mathbf{s}_\beta) + \mu = \mathbf{C}_X(\mathbf{s}_a - \mathbf{u}), \quad \alpha = 1, \ldots, n(\mathbf{u})$$

$$\sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_\alpha = 1 \qquad [2.13]$$

Στην εξίσωση 2.9 λ είναι τα ζητούμενα γραμμικά βάρη, $\boldsymbol{C}_X(\mathbf{s}_\alpha - \mathbf{s}_\beta)$ είναι η συνδιασπορά μεταξύ των σημείων $\mathbf{s}_\alpha$, $\mathbf{s}_\beta$ και μ είναι η σταθερά του Lagrance.

Το ελάχιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα εκτίμησης δίνεται από την εξίσωση 2.14

$$\sigma^2{}_{\mathrm{E,OK}}(\mathbf{u}) = \sigma^2{}_X - \sum_{a=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_\alpha C_X(\mathbf{u}, \mathbf{s}_a) - \mu \qquad [2.14]$$

Το $\sigma^2{}_{\mathrm{E,OK}}(\mathbf{u})$ αντιπροσωπεύει την αξιοπιστία της εκτίμησης στο σημείο **u**. [Χριστόπουλος, 2004]

2.4.2 *Περιορισμοί των μεθόδων Kriging.*

Η εφαρμογή των μεθόδων Kriging, παρόλο που είναι πολύ διαδεδομένες, βασίζεται σε κάποιες παραδοχές, οπότε υπόκειται σε περιορισμούς που πρέπει να τηρούνται.

Πρέπει η κατανομή της πιθανότητας της ιδιότητας που εξετάζεται να είναι συμμετρική και κοντά στην κανονική κατανομή. Τέλος πρέπει η συνάρτηση συνδιασποράς και το βαριόγραμμα να είναι ανεξάρτητα από τη θέση των εξεταζόμενων σημείων. Για να εξασφαλιστεί αυτό πρέπει η διακύμανση να είναι στατιστικά ομοιογενές πεδίο.

2.5 *Μέθοδος μέγιστης πιθανοφάνειας*

Για να υπολογιστούν οι παράμετροι της ανισοτροπίας και οι παράμετροι του Σπαρτιάτικου θεωρητικού μοντέλου ημιβαριογράμματος, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας.

Έστω ένα δείγμα με n στοιχεία ($\chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_n$) από μία κατανομή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας f, όπου εξαρτώνται από μία άγνωστη παράμετρο θ. **Πιθανοφάνεια** ονομάζεται η συνάρτηση:

$$L(\theta) = f_\theta(\chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_n | \theta) \qquad [2.15]$$

Αντί για μία παράμετρο, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μπορεί να εξαρτάται από έναν αριθμό ανεξάρτητων παραμέτρων **θ.**

Η μέθοδος της **μέγιστης πιθανοφάνειας** (Maximum likelihood) αναζητά τις παραμέτρους **θ** ενός θεωρητικού μοντέλου που δίνουν την πιθανότερη κατάσταση στο εκτιμώμενο πεδίο. Απλούστερα, η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας εκτιμά τις **θ** βρίσκοντας τις τιμές που μεγιστοποιούν την $L(\boldsymbol{\theta})$. [Eulogio Pardo-Iguzquiza, 1998., Kitanidis, 1987]

2.5.1 *Υπολογισμός της μέγιστης πιθανοφάνειας*

Δεδομένου ότι η λογαριθμική συνάρτηση είναι μονότονη αύξουσα συνάρτηση, λογαριθμώντας την συνάρτηση πιθανοφάνειας δεν αλλάζει το μέγιστο το οποίο αναζητείται.

Για ένα τυχαίο πεδίο της μορφής $\mathbf{X} = \mathbf{m_X} + \boldsymbol{\chi}$ με διακύμανση $\sigma_X{}^2$ και πίνακα συνδιασποράς $\mathbf{C}$ η συνάρτηση της αρνητικής λογαριθμικής πιθανοφάνειας (L_l) είναι:

$$\begin{aligned} L_l(\mathbf{m_X}, \hat{\sigma}_X{}^2, \boldsymbol{\theta}; \mathbf{X}) &= \frac{n}{2}\left[\ln(2\pi) + 1 - \ln(n)\right] + \frac{1}{2}\ln\left|\mathbf{C}\right| + \\ &+ \frac{n}{2}\ln\left[(\mathbf{X}-\mathbf{m_X})^T \cdot \mathbf{C}^{-1} \cdot \left(\mathbf{X}-\mathbf{m_X}\right)\right] \end{aligned} \qquad [2.16]$$

Οι ζητούμενες τιμές των παραμέτρων $\boldsymbol{\theta}$ του μοντέλου είναι οι τιμές που ελαχιστοποιούν την εξίσωση 2.16. Επειδή η $L_l(\boldsymbol{\theta})$ είναι ο αρνητικός λογάριθμος της $L(\boldsymbol{\theta})$ οι τιμές $\boldsymbol{\theta}$ της εξίσωσης 2.16 δίνουν το μέγιστο για την $L(\boldsymbol{\theta})$. Έτσι εκτιμάται η πιθανότερη κατάσταση στο πεδίο **X** από τις εξεταζόμενες καταστάσεις. [Eulogio Pardo-Iguzquiza, 1998, Kitanidis, 1987]

2.5.2 *Μειονεκτήματα της μεθόδου και αντιμετώπιση*

Η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας παρόλη τη χρησιμότητα της υπόκειται σε κάποια προβλήματα και δυσκολίες.

Το κυριότερο μειονέκτημα είναι πως οι τιμές που προκύπτουν από την εξίσωση 2.16 πιθανόν να ανήκουν σε κάποιο τοπικό ελάχιστο κι όχι το ολικό ελάχιστο της L_l με αποτέλεσμα να δοθεί λάθος εκτίμηση για τις παραμέτρους $\boldsymbol{\theta}$. Ο χρήστης πρέπει να έχει γνώση του προβλήματος και να κρίνει αν τα αποτελέσματα για τις παραμέτρους $\boldsymbol{\theta}$ είναι αποδεκτά.

Επιπλέον ο υπολογισμός του ελάχιστου με τους σύγχρονους υπολογιστές μπορεί να είναι εξαιρετικά χρονοβόρος για μεγάλο πλήθος παραμέτρων και μεγάλο πλήθος δείγματος.

Υπάρχουν μέθοδοι οι οποίες ελαττώνουν τον αριθμό των παραμέτρων **θ**. Μία τέτοια μέθοδος βασίζεται στην απαλοιφή της σ_X^2 από τις παραμέτρους **θ** καθώς εξαρτάται από τις άλλες παραμέτρους (εξίσωση 2.16). [Eulogio Pardo-Iguzquiza, 1998., Kitanidis, 1987]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΟ ΟΡΥΧΕΙΟ ΤΟΥ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πρακτική εφαρμογή των μεθόδων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η εφαρμογή έγινε σε **δεδομένα γεωτρήσεων** από το ορυχείο του Αμυνταίου, όπως δόθηκαν από την Δ.Ε.Η. Στο συγκεκριμένο ορυχείο, συστήματα ρηγμάτων και ασυνεχειών καταστρέφουν την χωρική συνέχεια και δυσχεραίνουν την χωρική ανάλυση (βλέπε ενότητα 1.2).

Στο τμήμα αυτό της εργασίας αναλύθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν δύο σύνολα δεδομένων γεωτρήσεων από δύο περιοχές του ορυχείου. Το πρώτο σύνολο δεδομένων αποτελείται από γεωτρήσεις σε μια περιοχή του ολικού ορυχείου που έχει ήδη εξοφληθεί. Για την περιοχή αυτή υπάρχουν απολογιστικά στοιχεία από τη ΔΕΗ. Το δεύτερο σύνολο αποτελείται από γεωτρήσεις σ’ ολόκληρη την περιοχή του ορυχείου.

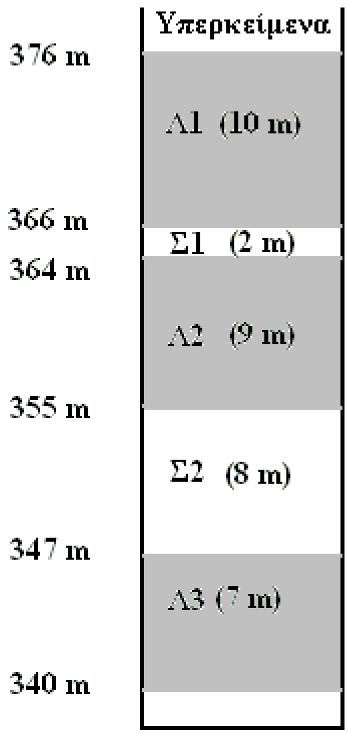
Τα δεδομένα των γεωτρήσεων περιέχουν στοιχεία για την θερμογόνο δύναμη του εμφανιζόμενου υλικού (λιγνίτη ή στείρο) σε όλο το μήκος της γεώτρησης, καθώς και στοιχεία για το πάχος του κάθε εξεταζόμενου στρώματος. Συνήθως τα στοιχεία είναι ανά δύο μέτρα βάθος.

Μετά από αξιολόγηση των δεδομένων εκτιμάται ποια λιγνιτικά στρώματα θεωρούνται εκμεταλλεύσιμα. Η Δ.Ε.Η για την αξιολόγηση και την ενοποίηση των στρωμάτων χρησιμοποιεί μια σειρά κριτηρίων που προκύπτουν από τους περιορισμούς που θέτει η μέθοδος εκμετάλλευσης, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί. [Γαλετάκης, 1996]

Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν σ' αυτήν την εργασία για την αποδοχή ενός στρώματος σαν οικονομικά εκμεταλλεύσιμο προέρχονται από μία απλοποίηση των κριτηρίων που χρησιμοποιεί η ΔΕΗ και είναι:

- Το πάχος του στρώματος να είναι πάνω από 0,5 m.
- Το άθροισμα της τέφρας και του CO_2 να είναι κάτω από 50%

Το ολικό πάχος του λιγνίτη στο σημείο **s** = (*x*, *y*) συμβολίζεται με *Z*(**s**). Ένα παράδειγμα του υπολογισμού του συνολικού πάχους στρωμάτων λιγνίτη με τα κριτήρια που ορίστηκαν σ' αυτή την ενότητα δίνεται στο σχήμα 3.1



Σχημά 3. 1 Θεωρητικό παράδειγμα γεώτρησης. Τα στρώματα Λ1, Λ2, Λ3 έχουν άθροισμα τέφρας και CO_2 κάτω από 50%. Τα στρώματα Σ1, Σ2 έχουν άθροισμα τέφρας και CO_2 πάνω από 50%.

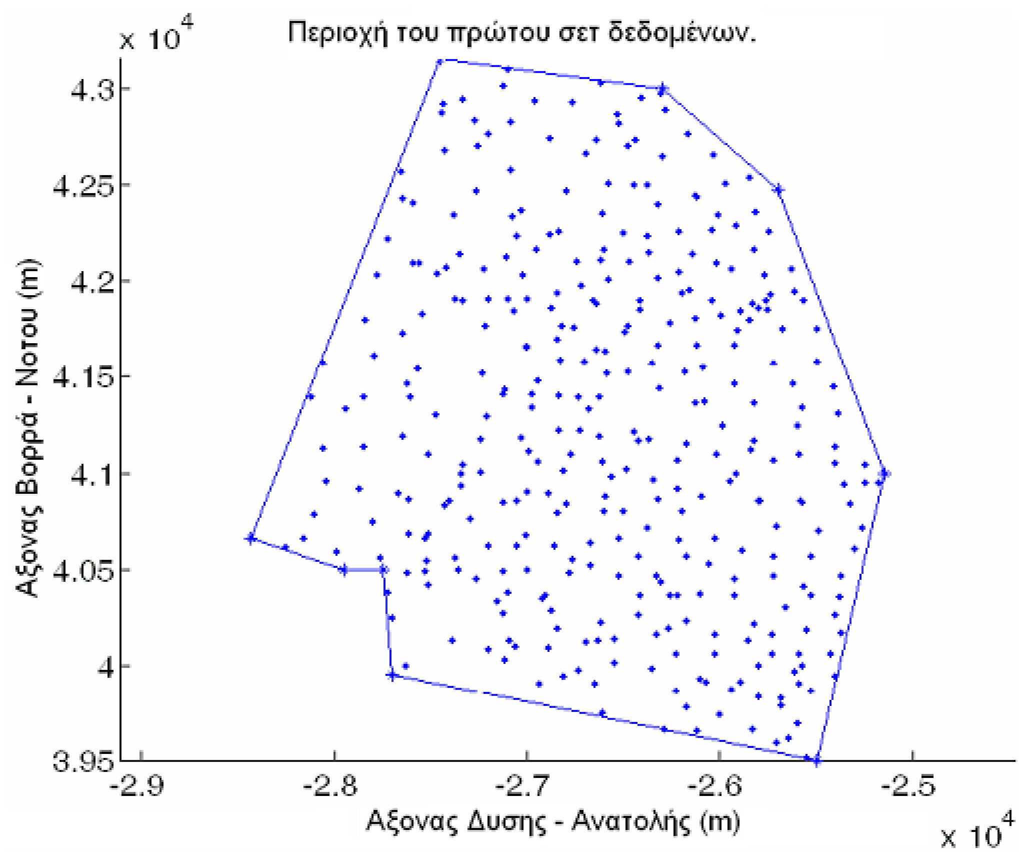
Στο σχήμα 3.1 δίνεται μία θεωρητική γεώτρηση, με συντεταγμένες έστω x_k, y_k στο τοπικό σύστημα αναφοράς. Φαίνονται τα υπερκείμενα στείρα στρώματα, τρία στρώματα (Λ1, Λ2, Λ3) με άθροισμα τέφρας και CO_2 κάτω από 50% και δύο στρώματα (Σ1, Σ2) με άθροισμα τέφρας και CO_2 πάνω από 50%. Τα στρώματα Σ1, Σ2 δεν πληρούν τις προδιαγραφές που ορίστηκαν παραπάνω και έτσι θεωρούνται από τον αλγόριθμο που κατασκευάστηκε (βλέπε παράρτημα ΙΙ) ως στείρα στρώματα και αγνοούνται. Τα στρώματα Λ1, Λ2, Λ3 πληρούν τις προδιαγραφές και έτσι το πάχος τους αθροίζεται στο συνολικό πάχος στρωμάτων λιγνίτη για αυτή γεώτρηση.

Στο παράδειγμα του σχήματος 3.1, ο αλγόριθμος θα έδινε σαν αποτέλεσμα συνολικού πάχους λιγνίτη $Z(\mathbf{s}_k)$ για αυτή τη γεώτρηση τα 26 m (Λ1 + Λ2 +Λ3 = 10 m +9 m +7 m).

Σημειώνεται εδώ, πως στο κεφάλαιο 5 χρησιμοποιούνται πιο πολύπλοκα κριτήρια για την αποδοχή στρωμάτων.

3.1 Ανάλυση δεδομένων εξαντλημένης περιοχής

Το πρώτο σύνολο δεδομένων αποτελείται από γεωτρήσεις τυχαία κατανεμημένες στην περιοχή που φαίνεται στο σχήμα 3.2. Οι άξονες του σχήματος είναι στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται από τη ΔΕΗ.



Σχημά 3. 2 Οι θέσεις των γεωτρήσεων στην εξοφλημένη περιοχή του ορυχείου.

Η περιοχή αυτού του συνόλου έχει ήδη εξαντληθεί και υπάρχουν απολογιστικά δεδομένα. Οι στατιστικές ιδιότητες του συνόλου αναλύονται ώστε να εξεταστεί πόσο ταιριάζει η κατανομή των δεδομένων με την κανονική κατανομή και για να βρεθούν τα βασικά στατιστικά μεγέθη.

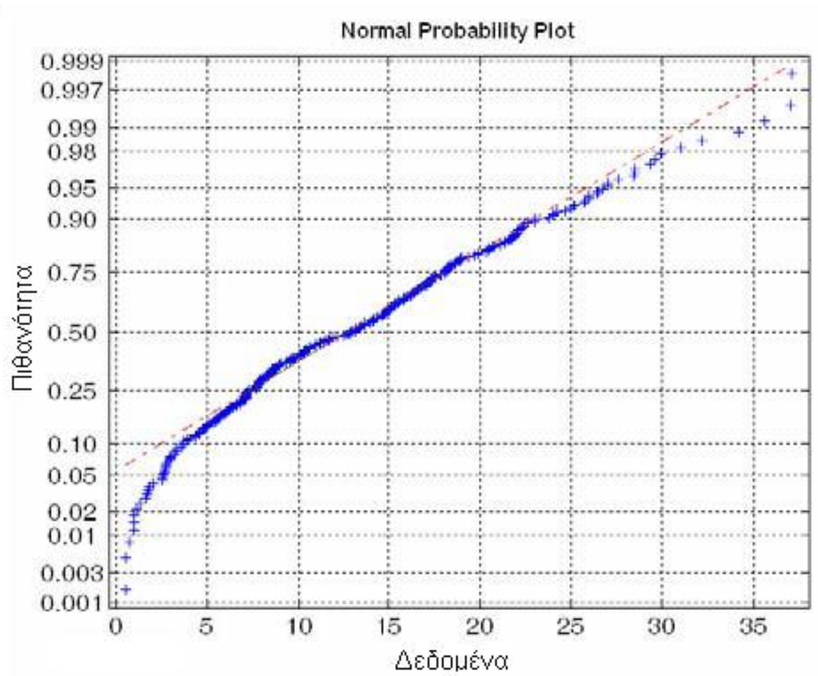
Τα βασικά στατιστικά μεγέθη δίνονται στον πίνακα 3.1.

Πινακας 3. 1 Στατιστικά μεγέθη ολικού πάχους στρωμάτων λιγνίτη ανά γεώτρηση.

Στατιστικό μέγεθος	**Πρώτο σύνολο**	**Δεύτερο σύνολο**
Μέγεθος δείγματος	**302**	**376**
Μέση τιμή (m)	**13.26**	**14.67**
Διάμεσος (m)	**12.85**	**14.10**
Τυπική απόκλιση (m)	**7.60**	**8.44**
Εύρος (m)	**36.60**	**48.00**
Ελάχιστο (m)	**0.50**	**0.50**
Μέγιστο (m)	**37.10**	**48.50**

Η μέση ελάχιστη απόσταση μεταξύ των δεδομένων είναι 103,6 m και το δείγμα αποτελείται από $N = 302$ γεωτρήσεις.

Το διάγραμμα κανονικής πιθανότητας (normal probability plot) του ολικού πάχους λιγνίτη γεώτρησης $Z(\mathbf{s})$ φαίνεται στο σχήμα 3.3. Από το σχήμα είναι αντιληπτό πως η τάση δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή καθώς στα άκρα αποκλίνει σημαντικά από την ευθεία. Η κανονική υπόθεση απορρίπτεται από το Lilliefors test σε επίπεδο εμπιστοσύνης 90% [Lilliefors, 1967].



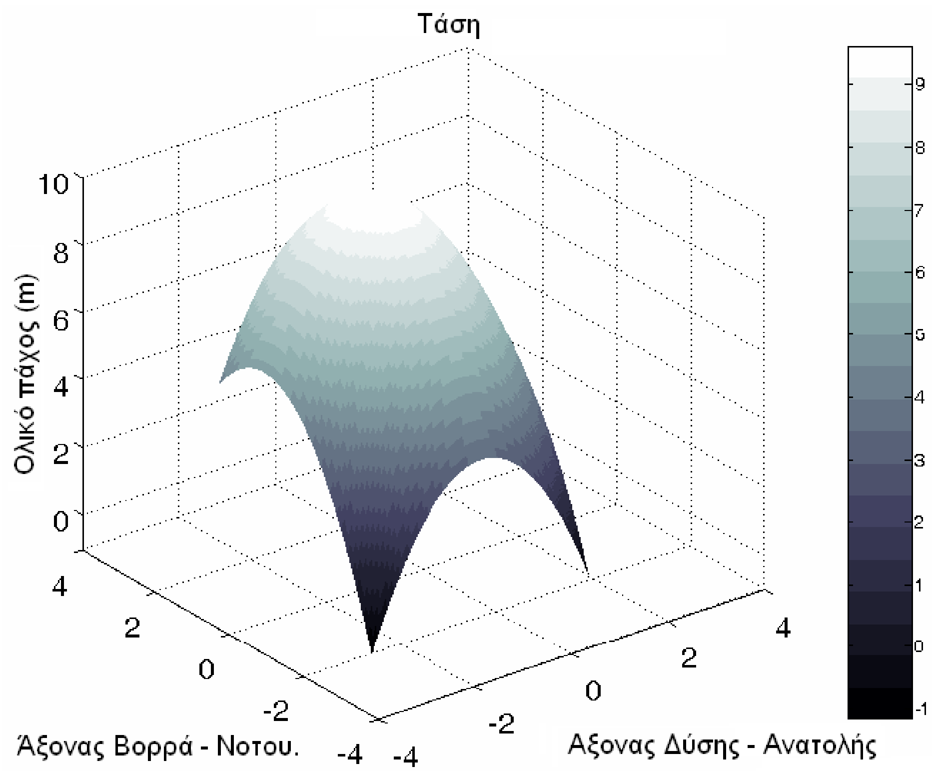
Σχήμα 3. 3 Διάγραμμα κανονικής πιθανότητας του συνολικού πάχους λιγνίτη πριν την αφαίρεση της τάσης.

3.1.1 Προσδιορισμός τάσης.

Για να εκτιμηθούν τα βαριογράμματα και για να ταιριάξει καλύτερα η κατανομή των δεδομένων στην κανονική κατανομή, επιλέχθηκε η αφαίρεση της τάση μακράς εμβέλειας από τα δεδομένα. Για να βρεθεί η τάση μακράς εμβέλειας προσαρμόστηκε στα δεδομένα ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού. Η τάση μακράς εμβέλειας στο σημείο **s**, $m_Z(\mathbf{s})$ δίνεται από την εξίσωση 3.1.

$$m_Z(\text{s}) = 15.13 - 4.07x + 2.56y - 0.13x^2 - 1.96y^2 - 1.93xy \qquad [3.1]$$

Ο συντελεστής συσχέτισης ανάμεσα στις τιμές της τάσης που προκύπτουν από το πολυώνυμο 3.1 στα σημεία των γεωτρήσεων και των τιμών από τα δεδομένα είναι 67.4%. Μία αναπαράσταση της τάσης φαίνεται στο σχήμα 3.4.



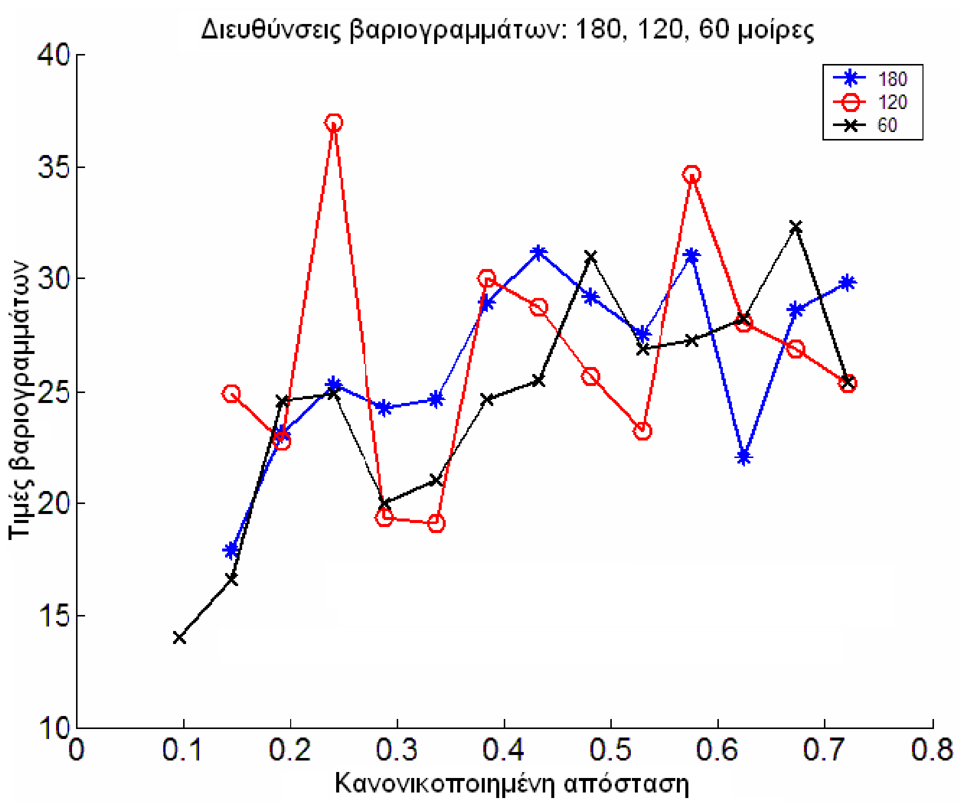
Σχημά 3. 4 Αναπαράσταση της τάσης χρησιμοποιώντας κανονικοποιημένους άξονες.

Η διακύμανση των τιμών που παραμένει αν αφαιρεθεί από της τιμές των δεδομένων η τάση είναι πιο κοντά στην κανονική κατανομή από τις δεδομένες τιμές του πεδίου. Η κανονική υπόθεση όμως εξακολουθεί να απορρίπτεται από το Lilliefors test σε επίπεδο εμπιστοσύνης 90%.

Η μορφή της τάσης, με τα παχύτερα στρώματα προς το δυτικό τμήμα της περιοχής και κέντρο του κοιτάσματος, ταιριάζει με την αναμενόμενη μορφή ενός λιγνιτικού κοιτάσματος.

3.1.2 Εκτίμηση εμπειρικών ημιβαριογραμμάτων και ανισοτροπίας.

Για να εξεταστεί πόσο διαφέρουν μεταξύ τους οι τιμές του πεδίου σε συνάρτηση με την απόσταση σε διαφορετικές κατευθύνσεις, υπολογίστηκαν τα κατευθυντικά ημιβαριογράμματα από 0 έως 180^{o}, ανά πέντε μοίρες με γωνία ανοχής 45^{o}. Για την εκτίμηση του εμπειρικού ημιβαριογράμματος χρησιμοποιήθηκε η ευσταθής εκτιμήτρια που δίνεται στην εξίσωση 2.6. Ο ελάχιστος αποδεκτός αριθμός ζευγών για σε κάθε τάξη υπολογισμού των εμπειρικών ημιβαριογραμμάτων ορίστηκε στα 50 σημεία. Στο σχήμα 3.5 δίνονται τρία ημιβαριογράμματα στις κατευθύνσεις 60^o, 120^o και 180^o.

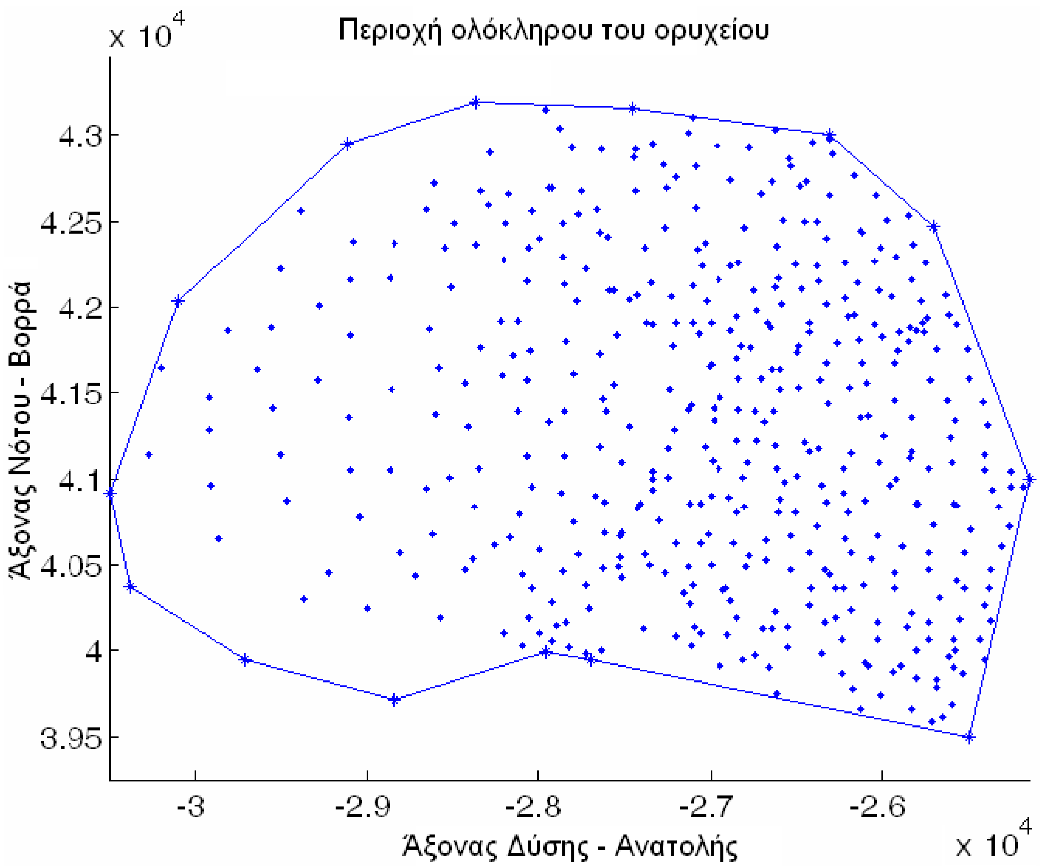


Σχημά 3. 5 Εμπειρικά βαριογράμματα ολικού πάχους στρώματος λιγνίτη με ανοχή 45^o

Από το σχήμα δεν προκύπτει ανισοτροπία ζώνης αλλά φαίνεται να υπάρχει γεωμετρική ανισοτροπία. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας (εξίσωση 2.13) από τον αλγόριθμο (παράρτημα ΙΙ) εκτίμησης των παραμέτρων του ανισοτροπικού εκθετικού μοντέλου που ταιριάζει καλύτερα στα πειραματικά ημιβαριογράμματα. Έτσι εκτιμάται ότι ο λόγος ανισοτροπίας είναι 1,90 και η διεύθυνση της ανισοτροπίας (ο μεγάλος άξονας σε σχέση με τον άξονα Δύση – Ανατολή) είναι $99{,}4^o$ (βλέπε ενότητα 2.3)

3.2 <u>Ανάλυση του δεδομένων ολόκληρης της περιοχής</u>

Το δεύτερο σύνολο δεδομένων αποτελείται από $N = 376$ γεωτρήσεις κατανεμημένες σ' όλη την έκταση του ορυχείου όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η δειγματοληψία στην δυτική περιοχή, όπου δεν έχει ξεκινήσει η εκμετάλλευση είναι αραιότερη. Η μέση ελάχιστη απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων σ' αυτή τη περίπτωση είναι 145,0 m



Σχημά 3. 6. Οι θέσεις των γεωτρήσεων σ' όλο το ορυχείο.

Στον πίνακα 3.1 δίνονται τα στατιστικά μεγέθη για το ολικό πάχος στρωμάτων λιγνίτη.

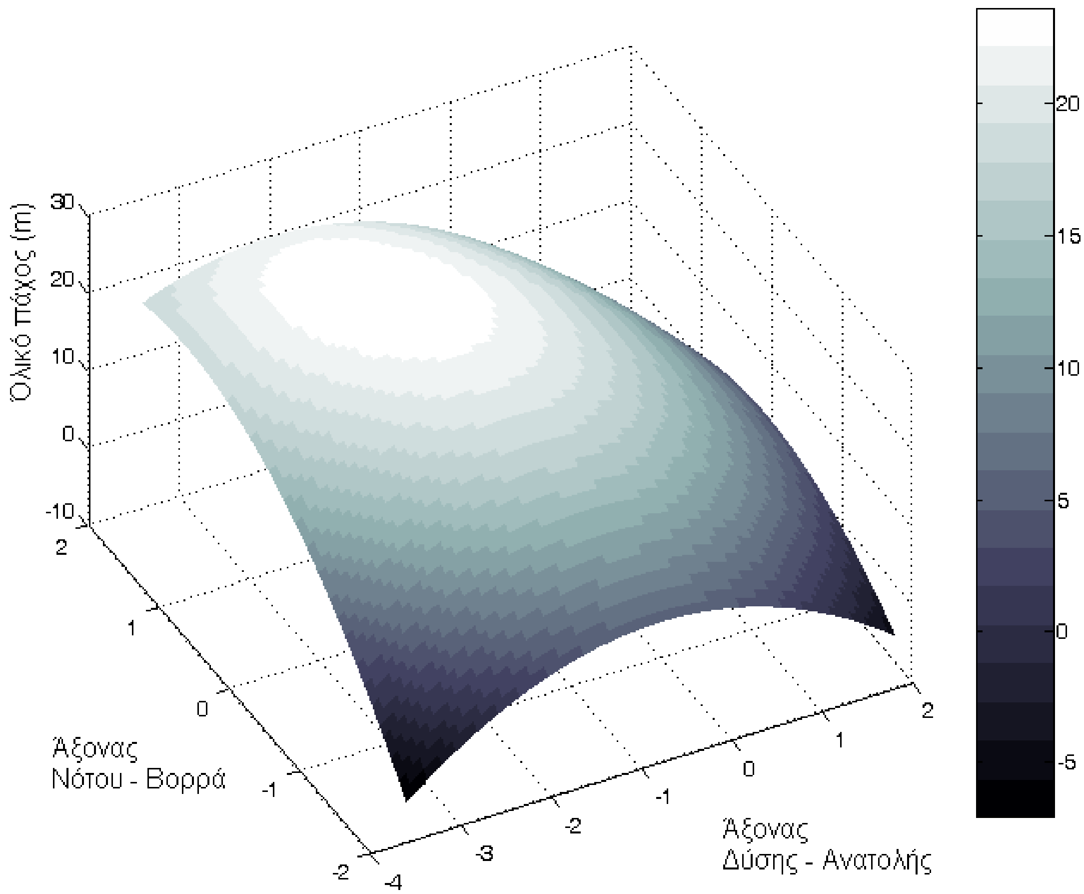
Το Lilliefors test συνεχίζει να απορρίπτει την κανονική υπόθεση σε επίπεδο εμπιστοσύνης 90% και για αυτό το σύνολο δεδομένων.

3.2.1 Προσδιορισμός τάσης

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε για την αφαίρεση της τάσης μακράς διαρκείας ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού. Οι παράμετροι του πολυωνύμου αυτού φαίνονται στην εξίσωση 3.3. Η συσχέτιση της τάσης με τα δεδομένα είναι 65,2%.

$$m_z(s) = 18.61 - 4.95x + 2.31y - 1.97x^2 - 2.17y^2 - 1.22xy \qquad (3.3)$$

Όπως και στην προηγούμενο σύνολο γεωτρήσεων, οι τιμές των αξόνων X, Y έχουν κανονικοποιηθεί.

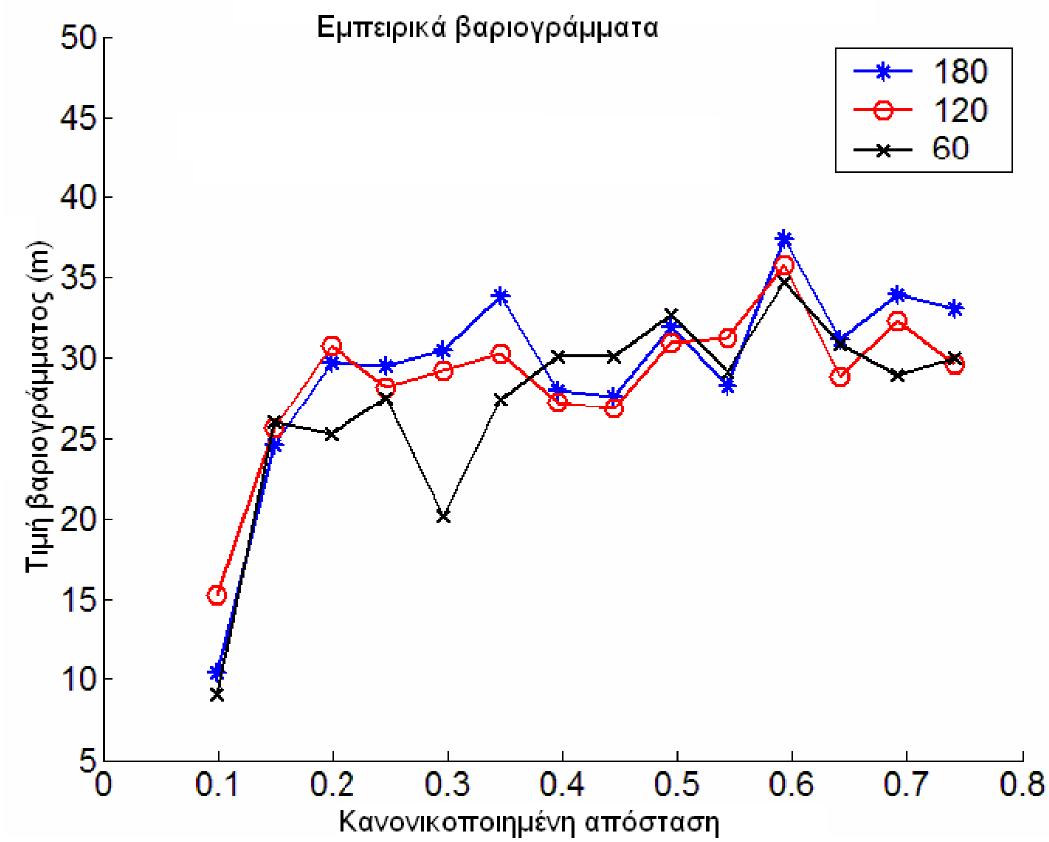


Σχημά 3. 7 Η τάση για ολόκληρη την περιοχή του ορυχείου. Οι άξονες είναι κανονικοποιημένοι.

Ό λόγος των συντελεστών του πολυωνύμου της τάσης σ' αυτή την περίπτωση για x^2, y^2 είναι κοντά στη μονάδα, το οποίο δείχνει μείωση της ανισοτροπίας. Αυτό μπορεί απλά να προέρχεται από την αύξηση της απόστασης μεταξύ των γεωτρήσεων, ή πραγματικά η συμπεριφορά του συνόλου να είναι ποιο ισοτροπική από το πρώτο σύνολο δεδομένων. Και σε αυτή την περίπτωση η μορφή της τάσης ταιριάζει με την αναμενόμενη μορφή ενός τυπικού λιγνιτικού κοιτάσματος, με τα μεγαλύτερο πάχος λιγνίτη προς το κέντρο της εκμετάλλευσης.

3.2.2 Εκτίμηση ημιβαριογράμματος.

Τα πειραματικά ημιβαριογράμματα υπολογίζονται με την ευσταθή εκτιμήτρια του βαριογράμματος της εξίσωσης 2.6. Τα ημιβαριογράμματα για τρεις διαφορετικές διευθύνσεις και με ανοχή 45^o φαίνονται στο σχήμα 3.8. Η κανονική υπόθεση απορρίπτεται και για τις διακυμάνσεις του δεύτερου συνόλου.



Σχημά 3. 8 Τα εμπειρικά βαριογράμματα για τρεις διευθύνσεις με ανοχή 45^o.

Από τα βαριογράμματα του σχήματος 3.8 φαίνεται πως δεν υπάρχει έντονη ανισοτροπία. Εξετάζοντας τα πειραματικά ημιβαριογράμματα με ανοχή 45^o για όλες τις διευθύνσεις ανά 5^o εκτιμάται ότι ο λόγος ανισοτροπίας είναι μεταξύ 1,45 – 1,7 και η κατεύθυνση ανισοτροπίας μεταξύ $130^o – 150^o$.

Δεδομένης της μικρής τιμής της ανισοτροπίας, υπολογίζεται το πανκατευθυντικό πειραματικό βαριόγραμμα. Το βαριόγραμμα αυτό μαζί με δύο θεωρητικά μοντέλα φαίνεται στο σχήμα 3.9.

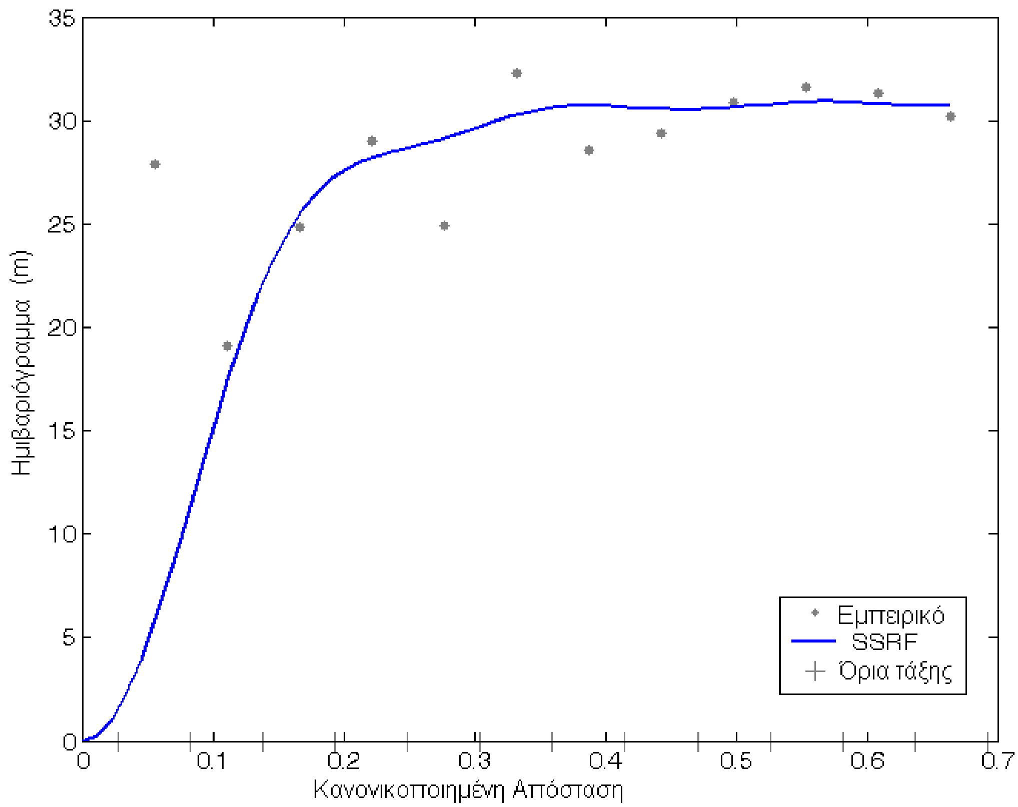
3.2.3 Προσαρμογή θεωρητικού μοντέλου βαριογράμματος.

Μετά την εκτίμηση του πανκατευθυντικού πειραματικού ημιβαριογράμματος, έγινε η επιλογή του θεωρητικού μοντέλου. Εξετάστηκαν τα θεωρητικά μοντέλα του εκθετικού, γραμμικού και γκαουσιανού ημιβαριογράμματος με ή χωρίς φαινόμενο κόκκου και το Σπαρτιάτικο θεωρητικό μοντέλο χωρίς φαινόμενο κόκκου (βλέπε ενότητα 2.3).

Για την επιλογή του θεωρητικού μοντέλου, αθροίστηκαν τα τετραγωνικά σφάλματα των εξεταζόμενων μοντέλων. Επιλέχθηκε το Σπαρτιάτικο μοντέλο βαριογράμματος που έδινε το μικρότερο άθροισμα τετραγωνικών σφαλμάτων και παρουσιάζεται στην εξίσωση 2.8.

Οι βέλτιστες παράμετροι που υπολογίστηκαν για το μοντέλο αυτό είναι η_o = 701,2, η_1 = 5,0, ξ = 0,0664 και k_c = 40. Οι αποστάσεις που χρησιμοποιούνται είναι κανονικοποιημένες.

Στο σχήμα 3.9 φαίνεται το πανκατευθυντικό ημιβαριόγραμμα και το Σπαρτιάτικο μοντέλο.



Σχημά 3. 9 Πειραματικό πανκατευθυντικό ημιβαριόγραμμα (Εμπειρικό) και το Σπαρτιάτικο θεωρητικό μοντέλο (SSRF).

Στην συγκεκριμένη εργασία δεν χρησιμοποιήθηκε φαινόμενο κόκκου στο Σπαρτιάτικο θεωρητικό μοντέλο βαριογράμματος. Αξίζει να σημειωθεί όμως ότι με χρήση του φαινόμενου κόκκου στο Σπαρτιάτικο ημιβαριόγραμμα η παράμετρος του φαινόμενου κόκκου ήταν πολύ υψηλή, όπως και στα υπόλοιπα εξεταζόμενα μοντέλα. Η δοκιμή του Σπαρτιάτικου μοντέλου με φαινόμενο κόκκου έγινε σε διαφορετικό εμπειρικό βαριόγραμμα από τις υπόλοιπες δοκιμές, χωρίς την ευσταθή εκτιμήτρια. Στο συγκεκριμένο εμπειρικό βαριόγραμμα η τιμή του φαινόμενου κόκκου ήταν συγκρίσιμη με αυτή του σπαρτιάτικου μοντέλου. Τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά και γι’ αυτό δεν παρουσιάζονται εδώ.

Για να βρεθούν οι βέλτιστες παράμετροι των θεωρητικών μοντέλων ώστε να ταιριάζουν με το πειραματικό ημιβαριόγραμμα, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ζυγισμένων ελάχιστων τετραγώνων.

Για να ελεγχθεί το βέλτιστο μοντέλο και να εκτιμηθεί το βέλτιστο μέγεθος γειτονιάς του Kriging χρησιμοποιήθηκε διασταυρωτική επαλήθευση (cross-validation). Η μέθοδος της διασταυρωτικής επαλήθευσης που χρησιμοποιήθηκε είναι η μέθοδος της αφαίρεσης ενός σημείου ανά φορά (leave-one-out cross-validation). Το θεωρητικό μοντέλο ημιβαριογράμματος που επιλέχθηκε, χρησιμοποιήθηκε στην μέθοδο κανονικού Kriging όπως παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο. [Olea, 2006]

Η διαδικασία που περιγράφηκε εδώ δίνεται σε διάγραμμα διαδικασιών στο παράρτημα Ι.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΘΕΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΟΡΥΧΕΙΟ ΤΟΥ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ

Το λιγνιτωρυχείο του Αμυνταίου τροφοδοτεί με λιγνίτη τον ατμοηλεκτρικό σταθμό του Αμυνταίου με ηλεκτρική ισχύ 600 MW. Μία εκτίμηση της Δ.Ε.Η (με την μέθοδο των αντίστροφων αποστάσεων) για τα αποθέματα του ορυχείου σε λιγνίτη ανέρχεται σε 210 Mt. Ένας από τους στόχους αυτής της εργασίας είναι να εκτιμηθούν τα αποθέματα με τρεις μεθόδους εκτίμησης αποθεμάτων και σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων μεταξύ τους και με την εκτίμηση της Δ.Ε.Η.

Είναι αναμενόμενη μία υπερεκτίμηση σε σχέση με τις εκτιμήσεις της Δ.Ε.Η όπως και των απολογιστικών δεδομένων, λόγω των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται για την επιλογή των εκμεταλλεύσιμων στρωμάτων και του πάχους στρώματος λιγνίτη. Όπως έχει αναφερθεί, κατά την εκμετάλλευση δεν λαμβάνεται όλος ο λιγνίτης ενός στρώματος λόγω περιορισμών των μηχανημάτων εκσκαφής. Σ’ αυτό το κεφάλαιο, αυτές οι απώλειες δεν λαμβάνονται υπ’ όψιν με αποτέλεσμα να εκτιμάται μεγαλύτερο πάχος στρώματος λιγνίτη από αυτό που είναι τελικά απολήψιμο. Η πυκνότητα του λιγνίτη θεωρείται ενιαία και ίση με 1,2 t/m^3. Δεν λαμβάνεται υπόψη η ρύπανση του λιγνίτη με στείρα κατά την εκμετάλλευση (5-20 cm). [Γαλετάκης, 1996]

Για τις εκτιμήσεις χρησιμοποιούνται και τα δύο σύνολα δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επειδή υπάρχουν απολογιστικά δεδομένα από την περιοχή που έχει εξοφληθεί, είναι εφικτή η επαλήθευση των εκτιμήσεων των αποθεμάτων για το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων. Τα συμπεράσματα από αυτή την επαλήθευση χρησιμοποιούνται στο δεύτερο σύνολο δεδομένων ώστε να βρεθεί μία καλύτερη εκτίμηση.

Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται συγκρίνονται σε αβεβαιότητα, στην μάζα των αποθεμάτων που εκτιμούν, στον υπολογιστικό χρόνο που χρειάζονται, στην ευκολία υλοποίησης της μεθόδου και στο αν δημιουργούν χάρτες εκτίμησης πάχους λιγνίτη.

Σημειώνεται εδώ πως τα όρια του ορυχείου που φαίνονται στο σχήμα 3.6 δεν έχει ληφθεί υπόψη η κλίση των πρανών. Το γεγονός αυτό αυξάνει λίγο τα αποθέματα που υπολογίζουν οι μέθοδοι υπολογισμού αποθεμάτων καθώς υπολογίζουν και λιγνίτη που δεν θα αποληφθεί λόγω της κλίσης των βαθμίδων. Η λεπτομερής εκτίμηση της ποσότητας αυτής του λιγνίτη, που εξαρτάται από την κατά τόπους κλίση των βαθμίδων και τον αριθμό τους, ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτής της διατριβής και δεν υπολογίζεται. Η ακρίβεια των προβλέψεων των αποθεμάτων που ακολουθούν δίνεται σε δεκάδες Mt.

4.1 *Εκτίμηση αποθεμάτων με πολύγωνα Voronoi.*

Η πρώτη μέθοδος που εξετάζεται είναι η μέθοδος των πολυγώνων Voronoi. Στη μέθοδο αυτή, η περιοχή μελέτης χωρίζεται σε πολύγωνα P_i. Το κέντρο κάθε πολυγώνου έχει συντεταγμένες μιας γεώτρησης $\mathbf{s}_i$ και περιλαμβάνει τα σημεία της περιοχής που βρίσκονται πιο κοντά σε αυτή τη γεώτρηση από οποιαδήποτε άλλη γεώτρηση. Θεωρείται ότι όλα τα σημεία του πολυγώνου έχουν ολικό πάχος στρωμάτων λιγνίτη ίσο με το πάχος λιγνίτη $Z(\mathbf{s}_i)$.

Ο συνολικός όγκος αποθεμάτων V_{tot} προκύπτει πως είναι:

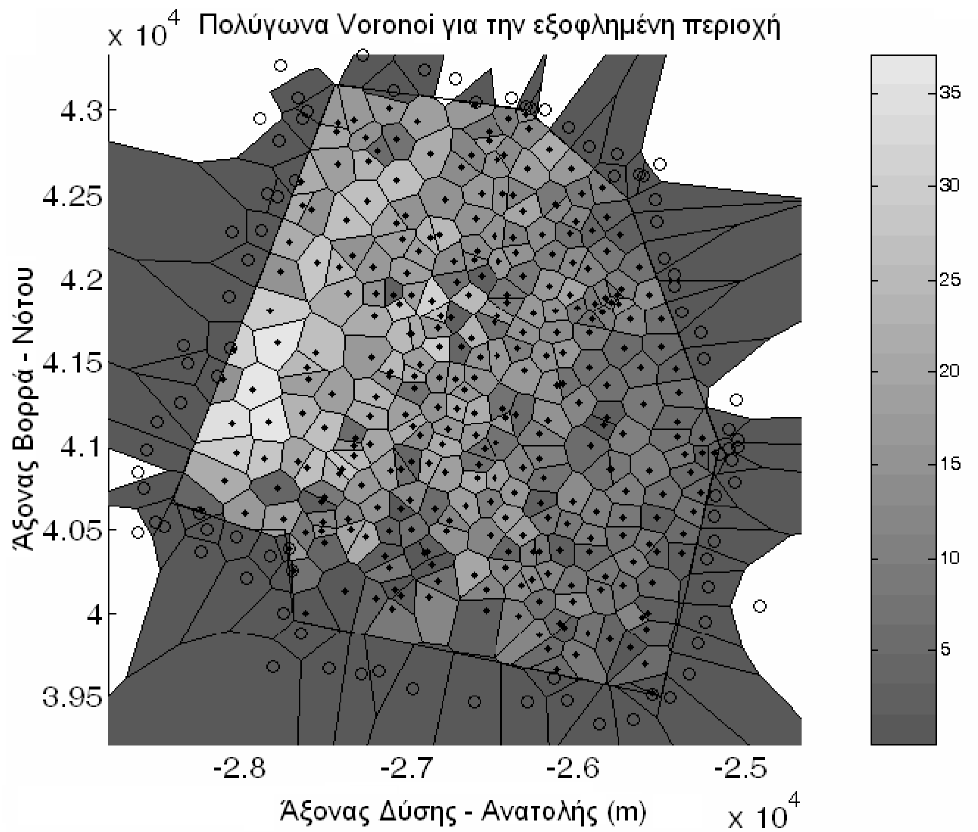
$$V_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^{N} Z(\mathbf{s}_i)\,\omega_i \qquad (4.1)$$

Όπου ω_i είναι η επιφάνεια του πολυγώνου P_i.

Για να κλείνουν τα πολύγωνα στα όρια του ορυχείου, χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο από **σημεία κατοπτρισμού** εκτός των ορίων του ορυχείου. Οι συντεταγμένες αυτών των σημείων βρίσκονται από τις γεωτρήσεις εντός του ορυχείου χρησιμοποιώντας ως επίπεδο κατοπτρισμού (επίπεδο συμμετρίας) τα όρια του ορυχείου. Με αυτόν τον τρόπο τα όρια του ορυχείου γίνονται το φράγμα των πολυγώνων, καθώς ισαπέχουν από τα σημεία των γεωτρήσεων και τα σημεία κατοπτρισμού που δημιουργούν.

Για το πρώτο σετ δεδομένων, τα πολύγωνα και τα σημεία κατοπτρισμού φαίνονται στο σχήμα 4.1.

Με χρήση της εξίσωσης 4.1 τα αποθέματα λιγνίτη στην περιοχή αυτή εκτιμούνται σε 136 Mt. Σύμφωνα με τα δεδομένα της Δ.Ε.Η. η περιοχή αυτή ως το τέλος του 2006 είχε δώσει 105 Mt λιγνίτη.



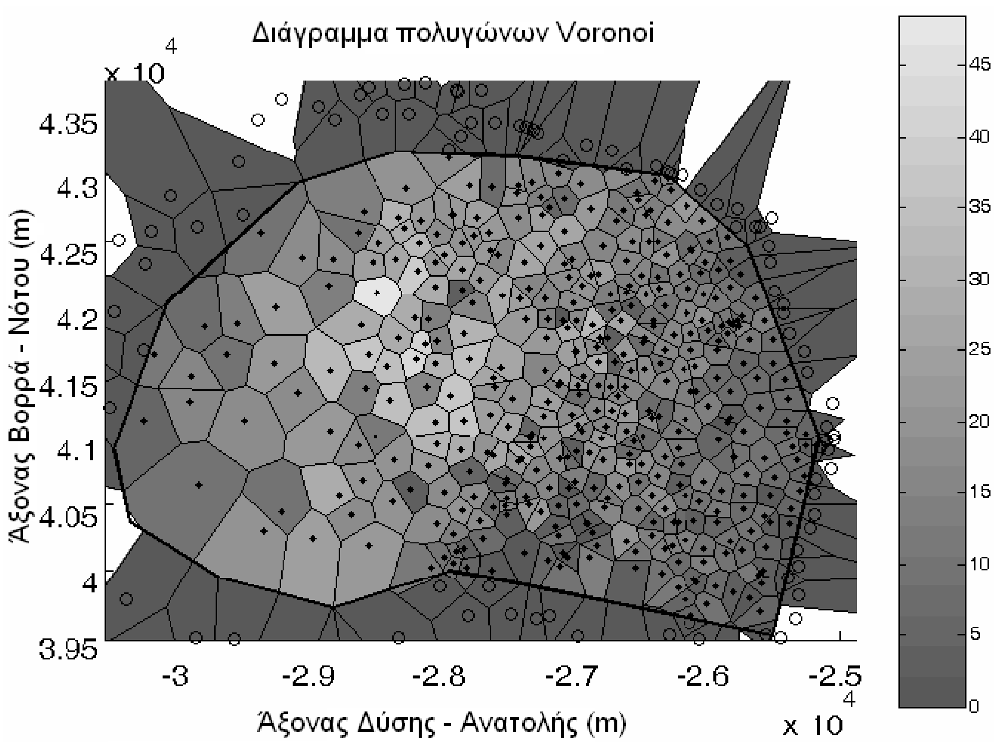
Σχημα 4. 1 Το διάγραμμα των πολυγώνων Voronoi για το συνολικό πάχος στρωμάτων λιγνίτη της εξοφλημένης περιοχής. Τα σημεία κατοπτρισμού συμβολίζονται με “o”.

Ένας από τους λόγους αυτής της υπερεκτίμησης είναι πως στα δυτικά όρια της περιοχής μελέτης η εξόρυξη του λιγνίτη ήταν σε εξέλιξη κατά τον υπολογισμό των αποθεμάτων. Σ’ αυτήν την περιοχή βρίσκονται τα παχύτερα στρώματα του κοιτάσματος. Μεγάλο μέρος από οικονομικά εκμεταλλεύσιμο λιγνίτη απλά δεν είχε εξορυχτεί ως το τέλος του 2006 παρόλο που υπολογίζεται στα αποθέματα αυτής της περιοχής. Μία εκτίμηση του λιγνίτη που δεν έχει εξορυχθεί ακόμα βασισμένη στον όγκο της περιοχής είναι 10 – 15

Mt. Αυτή η εκτίμηση προκύπτει θεωρώντας πως περίπου τα 2/3 της μάζας του λιγνίτη που βρίσκεται στην υπό εξόρυξη περιοχή δεν είχε εξορυχτεί ακόμα.

Αν αφαιρεθεί από την εκτίμηση αυτός ο όγκος λιγνίτη, βρίσκεται πως η υπερεκτίμηση είναι περίπου 18% με 20%. Αιτίες της υπερεκτίμησης εξετάζονται στην ενότητα 4.4. Λόγω έλλειψης περισσότερων απολογιστικών δεδομένων θα θεωρηθεί στην υπόλοιπη εργασία ότι αυτό το ποσοστό υπερεκτίμησης παραμένει σταθερό για όλο το ορυχείο. Η παραδοχή αυτή δεν είναι απαραίτητα σωστή και χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση, καθώς τα εκμεταλλεύσιμα στρώματα λιγνίτη βρίσκονται σε διαφορετικά βάθη σε κάθε γεώτρηση λόγω του έντονου τεκτονισμού της περιοχής. Διερεύνηση αυτής της παραδοχής γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Λόγω της παραδοχής αυτής και λόγω της κλίσης των βαθμίδων που δεν λαμβάνεται υπόψη, η ακρίβεια των προβλέψεων των αποθεμάτων με τις μεθόδους που παρουσιάζονται σ' αυτή την εργασία δίνεται σε δεκάδες Mt.



Σχημα 4. 2 Πολύγωνα Voronoi για το συνολικό πάχος στρωμάτων λιγνίτη όλης της περιοχής. Τα σημεία κατοπτρισμού συμβολίζονται με "ο".

Με εφαρμογή της ίδιας μεθόδου σ’ όλο το ορυχείο, τα αποθέματα λιγνίτη στην περιοχή αυτή εκτιμούνται σε 287 Mt. Αφαιρώντας το 20% της θεωρούμενης υπερεκτίμησης, τα αποθέματα λιγνίτη με αυτή τη μέθοδο εκτιμούνται σε $\underline{M_{\mathrm{Vor}} = 2{,}3 \cdot 10^{8}\mathrm{t}}$ Τα πολύγωνα της περιοχής παρουσιάζονται στο σχήμα 4.2.

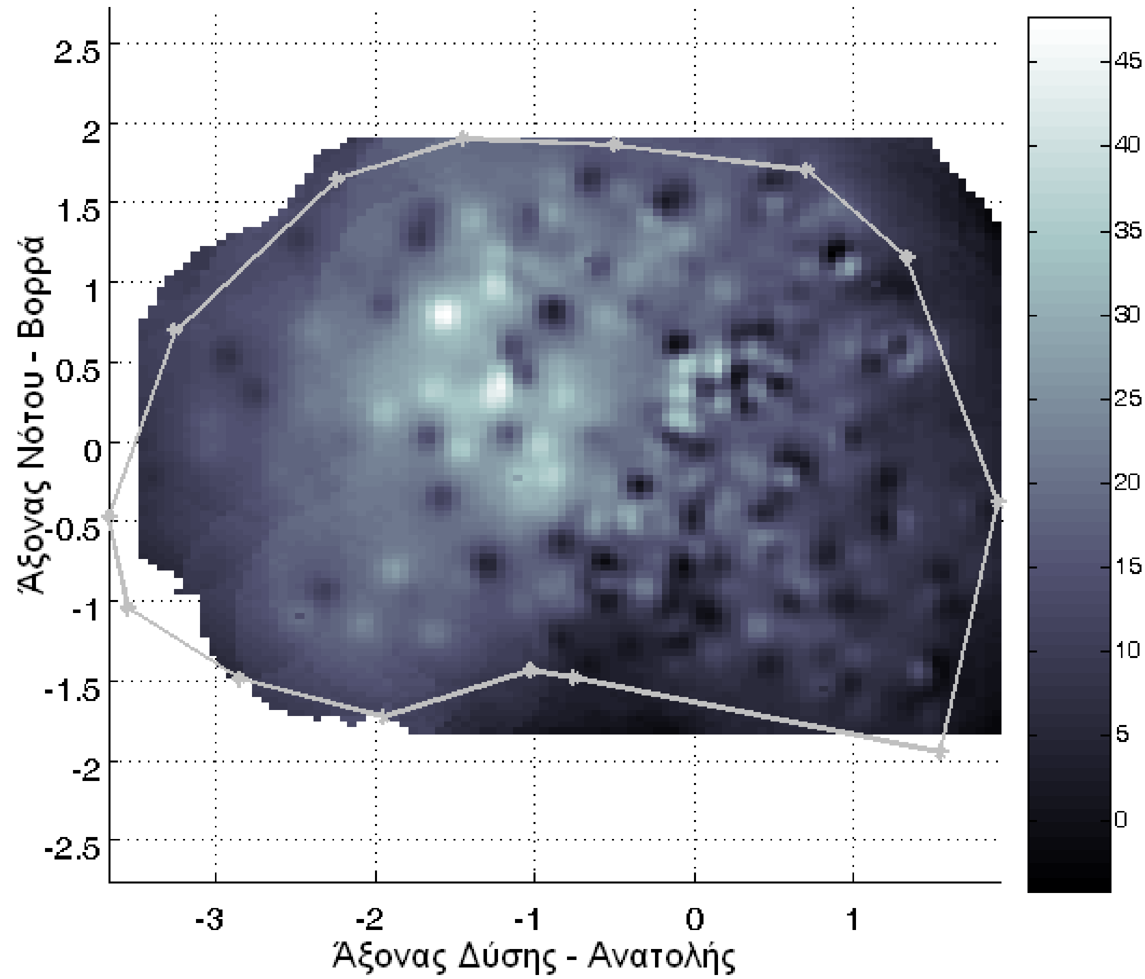
Η εκτίμηση με τα πολύγωνα Voronoi είναι υψηλότερη από τις υπόλοιπες εκτιμήσεις που παρουσιάζονται σ’ αυτό το κεφάλαιο. Όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 4.5 η μέθοδος αυτή είναι εύκολη και γρήγορη στην εφαρμογή. Η παρουσία μεγάλων πολυγώνων με τιμή υψηλότερη από την μέση τιμή (14.67 m) οδηγεί σε μια θετική μεροληψία της εκτιμησης.

4.2 *Εκτίμηση αποθεμάτων με Kriging.*

Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού αποθεμάτων σ’ αυτή την εργασία είναι η μέθοδος Ordinary Kriging. Η μέθοδος αυτή μπορεί να δώσει ένα χάρτη εκτίμησης του συνολικού πάχους στρωμάτων λιγνίτη (σχήμα 4.3). Στην εφαρμογή της μεθόδου έγινε χρήση του σπαρτιάτικου βαριογράμματος που δόθηκε στην εξίσωση 3.5. Από το χάρτη αυτό γίνεται μια εκτίμηση των αποθεμάτων του λιγνίτη. Ο κάνναβος είναι 100 x 100 και κάθε κελί έχει διαστάσεις 52 x 32 m.

Η ακτίνα της γειτονιάς εκτίμησης επιλέχθηκε ως 0,8 μονάδες κανονικοποιημένης απόστασης, δηλαδή περίπου 800 m. Σαν ακτίνα γειτονιάς εκτίμησης επιλέχτηκε το μέγεθος αποκοπής των ημιβαριογραμμάτων του σχήματος 3.7. Θεωρήθηκε ότι η συσχέτιση του συνολικού πάχους στρωμάτων με την απόσταση σε μεγαλύτερες αποστάσεις είναι αμελητέα καθώς τα πειραματικά ημιβαριογράμματα φαίνεται να έχουν φτάσει στο μέγιστό τους.

Κάθε κελί του πλέγματος θεωρείται πως έχει ενιαία τιμή πάχους λιγνίτη. Έτσι με γνωστή την επιφάνεια που καλύπτει κάθε κελί (1664 m^2) μπορεί να υπολογιστεί μία εκτίμηση για το συνολικό όγκο του λιγνίτη στην περιοχή που καλύπτει το πλέγμα. Θεωρώντας ως μέση πυκνότητα λιγνίτη την τιμή 1.2 tn/m^3 εκτιμούνται τα αποθέματα από τον συνολικό όγκο λιγνίτη σε κάθε κελί που βρίσκεται εντός των ορίων του ορυχείου.



Σχήμα 4. 3 Ο χάρτης εκτίμησης αποθεμάτων από τη μέθοδο Ordinary Kriging. Οι άξονες είναι κανονικοποιημένοι.

Σε ορισμένα σημεία στο σχήμα 4.3 παρατηρείται πως η μέθοδος αδυνατεί να δώσει εκτίμηση. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν υπάρχει ικανός αριθμός γειτονικών γεωτρήσεων ώστε να γίνει εκτίμηση στα συγκεκριμένα κελιά. Στην εργασία αυτή, για να γίνει εκτίμηση σε ένα σημείο του πλέγματος, πρέπει να υπάρχουν στην γειτονιά εκτίμησης τουλάχιστον τρεις γεωτρήσεις. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3, η περιοχή που δεν υπάρχουν αρκετές γεωτρήσεις για να γίνει εκτίμηση είναι στο νοτιοδυτικό άκρο του ορυχείου.

Λόγω αριθμητικών σφαλμάτων διακριτοποίησης οφειλόμενα στη χρήση ενός πίνακα αναφοράς του σπαρτιάτικου θεωρητικού μοντέλου (Look Up Table ή LUT), η μέθοδος δεν μπορούσε να εκτιμήσει την τιμή του πεδίου για δύο κελιά. Η τιμές των δύο αυτών κελιών εκτιμήθηκαν από το μέσο όρο των γειτονικών κελιών.

Τα σφάλματα αυτά οφείλονται στον τρόπο υπολογισμού της εκτιμώμενης τιμής παχους λιγνίτη από τις γειτονικές με το σπαρτιάτικο μοντέλο. Για να αποφευχθούν χιλιάδες εξαιρετικά χρονοβόροι υπολογισμοί, το διάστημα διακριτοποιήθηκε σε 2000 τμήματα που αντιστοιχούν σε ισάριθμες τάξεις απόστασης. Η τιμή του σπαρτιάτικου μοντέλου ημιβαριογράμματος υπολογίστηκε γι' αυτές τις τάξεις μία φορά και δημιουργήθηκε ένας πίνακας αναφοράς. Όλες οι αποστάσεις των σημείων από το σημείο εκτίμησης ανάγονται σ' αυτές τις τάξεις. Για παράδειγμα ένα αν ένα σημείο απέχει από το σημείο εκτίμησης από 6,4 ως 7,2 m θεωρείται πως απέχει 7,0 m. Όσο μεγάλύτερος είναι ο LUT τόσο λιγότερα είναι τα σημεία στα οποία η διακριτοποίηση δημιουργεί πρόβλημα. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή τα σημεία για τα οποία δεν είναι δυνατή η εκτίμηση είναι 2 από ένα πλήθος περίπου 8500 σημείων για τα οποία έγινε εκτίμηση.

Πριν τον υπολογισμό του όγκου του λιγνίτη πρέπει πρώτα να αφαιρεθούν τα κελιά του καννάβου τα οποία βρίσκονται έξω από τα όρια του ορυχείου. Στα σημεία αυτά έγινε εκτίμηση του πάχους λιγνίτη επειδή υπήρχαν αρκετά σημεία στη γειτονιά του πλέγματος και πρέπει ο όγκος αυτός να αφαιρεθεί. Ο λιγνίτης αυτός αντιστοιχεί περίπου σε 4,5 Mt.

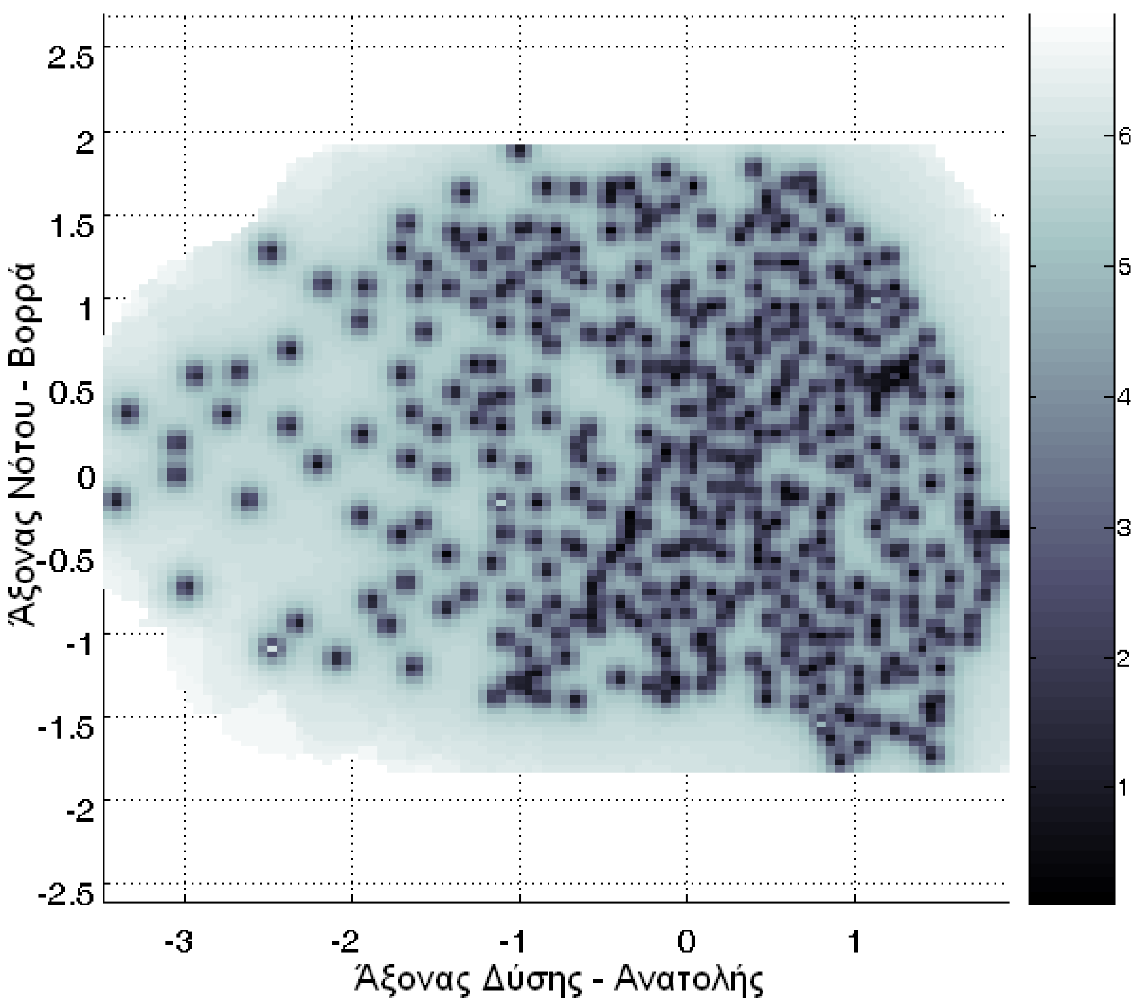
Η εκτιμώμενη από τη μέθοδο συνολική ποσότητα λιγνίτη είναι 251 Mt. Αφαιρώντας το 20% της υπερεκτίμησης που αντιπροσωπεύει την αναμενόμενη υπερεκτίμηση (ενότητα 4.1), τα αποθέματα λιγνίτη με αυτή τη μέθοδο εκτιμούνται σε $\underline{M_{OK} = 2{,}0 \cdot 10^{8}\mathrm{t}}$.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο τα δεδομένα δεν ακολουθούν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή. Έτσι τα αποτελέσματα της μεθόδου Kriging πρέπει να γίνουν δεκτά με κάποια επιφύλαξη.

Πέρα από τον χάρτη εκτίμησης του πάχους λιγνίτη, η μέθοδος Kriging δίνει την δυνατότητα δημιουργίας ενός χάρτη εκτίμησης της ακρίβειας της πρόβλεψης. Ο χάρτης αυτός δίνει την δυνατότητα στον μηχανικό του ορυχείου να αξιολογήσει τις εκτιμήσεις γνωρίζοντας τα περιθώρια του σφάλματος. Στο σχήμα 4.4 δίνεται η χωρική μεταβολή της σ_{OK}.

Η αβεβαιότητα φαίνεται σχετικά μεγάλη στο σχήμα 4.4. Αυτό σε μεγάλο βαθμό οφείλεται στο γεγονός ότι τα δεδομένα δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή, οπότε η εκτίμηση Kriging δεν δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα. Ένας επιπλέον παράγοντας που αυξάνει την αβεβαιότητα, όπως φαίνεται κι από το σχήμα είναι η πυκνότητα των γεωτρήσεων. Στην Ανατολική περιοχή όπου το δίκτυο είναι αραιότερο, η ακρίβεια της εκτίμησης είναι μικρότερη.

Η μέθοδος Kriging, αν και σημαντικά πιο χρονοβόρα από τις υπόλοιπες μεθόδους, έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά την εκτίμηση των αποθεμάτων. Ο χάρτης εκτίμησης θεωρητικά έχει σημαντική αβεβαιότητα, της τάξης των 10 m σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.



Σχήμα 4. 4 Ο χάρτης εκτίμησης της ακρίβειας του ΟΚ. Οι άξονες είναι κανονικοποιημένοι.

4.3 *Εκτίμηση αποθεμάτων με τη μέση τιμή*

Μία πολύ απλή μέθοδος για να υπολογιστούν τα αποθέματα είναι να ληφθεί η μέση τιμή από της γεωτρήσεις και να θεωρηθεί ότι είναι ενιαία σ’ όλο το ορυχείο. Αυτό δίνει μια εκτίμηση για τα συνολικά αποθέματα ίση με 209 Mt. Αφαιρώντας το 20% της υπερεκτίμησης (ενότητα 4.1), τα αποθέματα λιγνίτη με αυτή τη μέθοδο εκτιμούνται σε $\underline{M_{\mu\tau} = 1{,}7 \cdot 10^{8}\mathrm{t}}$.

Η εκτίμηση αυτή δίνεται εδώ μόνο για λόγους σύγκρισης με τις άλλες μεθόδους δεδομένου ότι η μέθοδος αυτή είναι η πιο επισφαλής και απλοϊκή. Ενδεικτικά αναφέρεται πως για την εξοφλημένη περιοχή του ορυχείου η μέθοδος αυτή προβλέπει 85,9 Mt λιγνίτη αντί για 105 Mt, αν αφαιρεθεί το 20% της αναμενόμενης υπερεκτίμησης.

Αφαιρώντας με τυχαίο τρόπο 50 γεωτρήσεις ανά επανάληψη, τα αποθέματα για όλη την περιοχή του ορυχείου εκτιμήθηκαν 10.000 φορές χωρίς να αφαιρεθεί η αναμενόμενη υπερεκτίμηση. Τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων αυτών κυμαίνονταν μεταξύ 201,1 Mt και 219,2 Mt. Η κατανομή των αποθεμάτων που εκτιμήθηκαν με τις δοκιμές αυτές, ακολουθεί την κανονική κατανομή με επίπεδο εμπιστοσύνης 99% σύμφωνα με το Lilliefors test [Lilliefors, 1967].

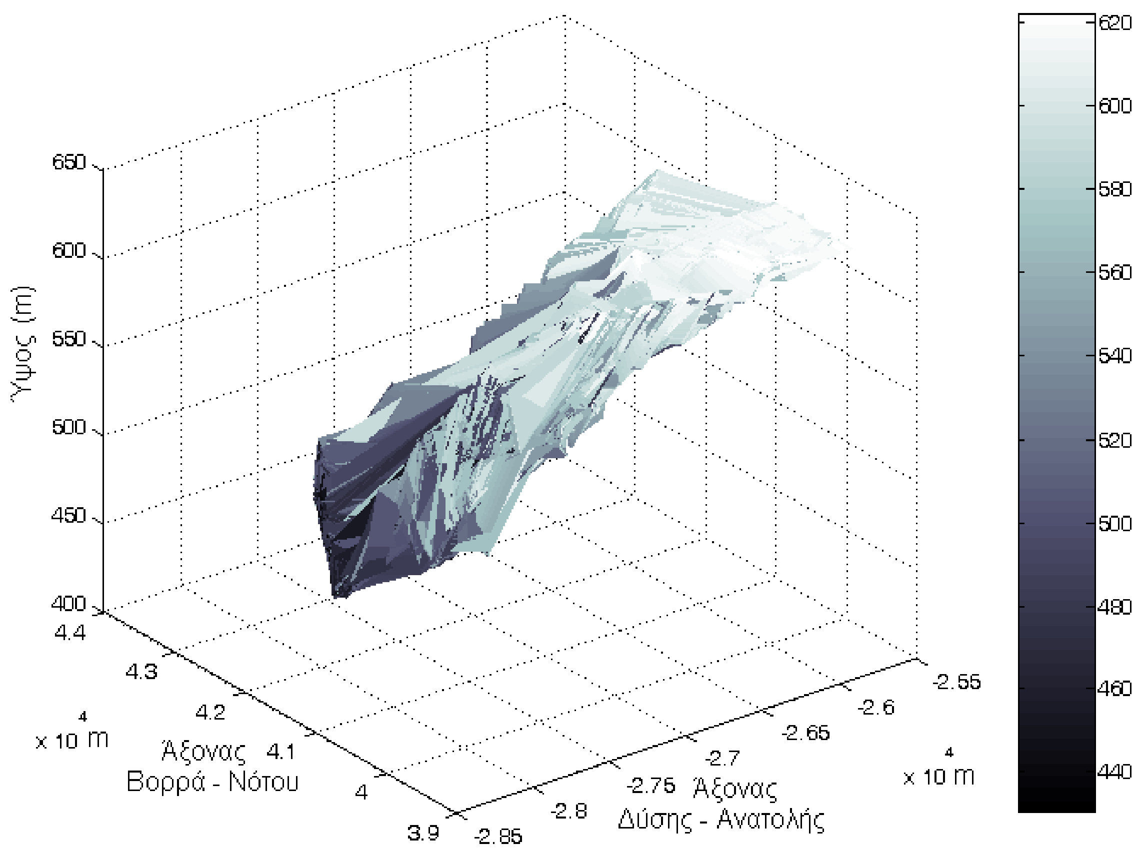
4.4 *Αιτίες υπερεκτίμησης*

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου και στην ενότητα 4.1 παρατηρείται μία υπερεκτίμηση των αποθεμάτων της εξοφλημένης περιοχής από τις μεθόδους Kriging και Voronoi. Αυτή η εκτίμηση ήταν αναμενόμενη για συγκεκριμένες γνωστές αιτίες.

Η κλίση των βαθμίδων έχει σαν αποτέλεσμα μέρος του όγκου που συμπεριλαμβάνεται εντός των ορίων του ορυχείου να μην εξορύσσεται. Οι δυσδιάστατες μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στην διατριβή αυτή δεν λαμβάνουν υπόψη την κλίση των βαθμίδων, με αποτέλεσμα να υπολογίζουν και λιγνίτη που δεν εξορύσσεται.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.1, οι μέθοδοι Kriging και πολυγώνων Voronoi εκτιμούν τα συνολικά αποθέματα στην πρώτη περιοχή. Μέρος αυτών των αποθεμάτων δεν είχε εξορυχτεί κατά την συλλογή των απολογιστικών δεδομένων από την Δ.Ε.Η. Τα αποθέματα αυτά εκτιμούνται σε 10-15 Mt. Αυτή η εκτίμηση εξάγεται θεωρώντας κλίση βαθμίδας 1/7 και πως ο λιγνίτης δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένος με το βάθος αλλά βρίσκεται κάτω από κάποιο βάθος, όπως φαίνεται στην εικόνα της οροφής του λιγνιτικού κοιτάσματος (σχήμα 4.5).

Για τον υπολογισμό των αποθεμάτων σ' αυτό το κεφάλαιο, θεωρήθηκε πως λαμβάνεται όλος ο εκμεταλλεύσιμος λιγνίτης όπως ορίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Κατά την εκμετάλλευση όμως, το ανώτερο και κατώτερο μέρος του στρώματος απορρίπτονται ως ρύπανση καθώς έχουν υποστεί αραίωση. Η ρύπανση αυτή είναι περίπου 9-10 cm στο ανώτερο και κατώτερο μέρος του κάθε λιγνιτικού στρώματος. Ανάλογα με τον αριθμό των στρωμάτων, αυτή η μείωση του πάχους του στρώματος μπορεί να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα. Ενδεικτικά αναφέρεται πως για κάθε κελί του πλέγματος Kriging (52m x 32 m) μείωση του πάχους απολήψιμου λιγνιτικού στρώματος κατα 20 cm αντιστοιχεί σε μείωση αποθεμάτων κατά 400 tn για τέτοιο στρώμα.



Σχήμα 4. 5 Οροφή λιγνιτικού κοιτάσματος.

Μέρος του λιγνίτη βρίσκεται σε μεγάλο βάθος σε σχέση με τα υπόλοιπα στρώματα για να είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμος. Αυτός ο όγκος λιγνίτη, αν και δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλος είναι ένας επιπλέον παράγοντας της υπερεκτίμησης.

Η ανάλυση των δύο τελευταίων παραμέτρων εξετάζεται στο επόμενο κεφάλαιο με χρήση του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας λιγνίτη, μίας έννοιας που εισάγεται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.5 *Σύγκριση μεθόδων εκτίμησης αποθεμάτων*

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των διάφορων μεθόδων που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3 όπως και η εκτίμηση της Δ.Ε.Η. για τα συνολικά αποθέματα. Από τις μεθόδους αυτές έχει αφαιρεθεί το 20% της εκτιμώμενης υπερεκτίμησης.

Πίνακας 4.1 Τα συγκριτικά αποτελέσματα για τα οικονομικά εκμεταλλεύσιμα αποθέματα λιγνίτη.

Πολύγωνα Voronoi	**Εκτίμηση Kriging**	**Μέση τιμή**	**Πρόβλεψη Δ.Ε.Η.**
$2{,}3 \cdot 10^8$t.	$2{,}0 \cdot 10^8$t.	$1{,}7 \cdot 10^8$t.	$2{,}1 \cdot 10^8$t.

Η εκτίμηση Kriging είναι πιο κοντά στην εκτίμηση της Δ.Ε.Η. παρόλη την αβεβαιότητα της εκτίμησης. Επιπλέον δίνει την δυνατότητα δημιουργίας χάρτη χωρικής μεταβολής αυτής της αβεβαιότητας. Σε ένα ορυχείο με καλύτερη χωρική συνέχεια, δηλαδή με λιγότερα ρήγματα και κατανομή παχών πλησιέστερη στην κανονική κατανομή, η μέθοδος θα λειτουργούσε καλύτερα δίνοντας μικρότερη αβεβαιότητα. Αν οι γεωτρήσεις ήταν πάνω στα σημεία ενός πλέγματος, αντί για τυχαία κατανεμημένες η αβεβαιότητα θα ήταν μικρότερη, οι υπολογισμοί ταχύτεροι και η κάλυψη της περιοχής καλύτερη, καθώς θα υπήρχαν ικανά σημεία σε όλες τις γειτονιές. Όμως απότομες αλλαγές όπως αυτές που παρατηρούνται στο σχήμα 4.3 όπου η τιμή του πάχους λιγνίτη φαίνεται να αλλάζει σημαντικά σε μικρή απόσταση δεν θα μπορούσαν να καταγραφούν. Οι αλλαγές αυτές οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στην παρουσία ρηγμάτων.

Η μέθοδος των πολυγώνων Voronoi είναι πιο απλή στην εφαρμογή. Η παρουσία μεγάλων πολυγώνων με τιμή υψηλότερη από την μέση τιμή οδηγεί σε μια θετική μεροληψία του αποτελέσματος. Επιπλέον, από τα δεδομένα της εξοφλημένης περιοχής αφαιρέθηκαν με τυχαίο τρόπο 50 από τις 302 γεωτρήσεις και υπολογίστηκαν τα αποθέματα ξανά. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε 100.000 φορές και τα αποτελέσματα διέφεραν από την αρχικά εκτιμώμενη τιμή των 136 Mt λιγότερο από 10%. Το μέγιστο ήταν 139 Mt και το ελάχιστο 127 Mt. Προκύπτει λοιπόν πως δεν χρειάζονται τόσο πολλές γεωτρήσεις για να προκύψει το ίδιο αποτέλεσμα με αυτή τη μέθοδο. Και πάλι η παρουσία καννάβου γεωτρήσεων θα βελτίωνε την διαδικασία καθώς μερικά από τα μεγαλύτερα πολύγωνα και στα δύο σύνολα δεδομένων έχουν τιμές λιγνίτη αρκετά υψηλότερες από το μέσο όρο.

Η μέθοδος της μέσης τιμής είναι απλούστατη στην εφαρμογή αλλά δίνει λιγότερο αξιόπιστη εκτίμηση. Επιπλέον, δεν δίνει σημειακή εκτίμηση όπως η μέθοδος Kriging, ούτε αναπαριστά την χωρική μεταβολή του πάχους λιγνίτη στο κοίτασμα.

Ο χρόνος που χρειάστηκαν οι τρεις μέθοδοι δίνεται στον πίνακα 4.2. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν σε περιβάλλον matlab 6.5 και σε υπολογιστή με τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

Επεξεργαστής Intel® Pentium® 4 CPU 3.00 GHz και 2 GB RAM, λειτουργικό σύστημα Windows XP.

Πολύγωνα Voronoi	**Εκτίμηση Kriging**	**Μέση τιμή**
0,6 sec	5 min	0,03 sec

Πίνακας 4.2 σύγκριση του υπολογιστικού χρόνου για τις τρεις μεθόδους.

Η αρχική επεξεργασία των δεδομένων για να εφαρμοστούν οι μέθοδοι (απομάκρυνση λεπτών λιγνιτικών στρωμάτων, υπολογισμός πάχους στρωμάτων, αφαίρεση μέσης τιμής, κανονικοποίηση) χρειάστηκε περίπου 10 sec υπολογιστικού χρόνου.

Για να εξεταστεί το ποσοστό της υπερεκτίμησης και να βρεθεί ο όγκος λιγνίτη που δεν είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμος εισάγεται ο δείκτης εκμεταλλευσιμότητας στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΕΙΚΤΗ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΛΙΓΝΙΤΙΚΟΥ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΣ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκαν απλοποιημένα κριτήρια αξιολόγησης λιγνιτικών στρωμάτων για τον υπολογισμό των αποθεμάτων. Οι εκτιμήσεις που έγιναν ε τα απλοποιημένα αυτά κριτήρια δίνουν μία υπερεκτίμηση σε σχέση με τα απολογιστικά δεδομένα της Δ.Ε.Η για την εξαντλημένη περιοχή. Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 4.4 ο κυριότερος λόγος της υπερεκτίμησης είναι ότι 9-10 εκατοστά από την οροφή και το δάπεδο κάθε λιγνιτικού στρώματος δεν λαμβάνονται λόγω περιορισμών των μηχανημάτων συλλογής. Ενδεικτικά αναφέρεται πως για κάθε κελί του 100 x 100 πλέγματος Kriging (σχ. 4.3) αυτή η μείωση αντιστοιχεί σε 360 - 400 tn για κάθε απολήψιμο λιγνιτικό στρώμα. Ένας από τους λόγους της υπερεκτίμησης είναι πως μέρος του λιγνίτη βρίσκεται στην πραγματικότητα σε μεγάλο βάθος για να θεωρηθεί εκμεταλλεύσιμος.

Για να εξεταστούν διεξοδικά οι αιτίες της υπερεκτίμησης γίνεται χωρισμός των λιγνιτικών στρωμάτων ώστε να αφαιρεθεί ο μη απολήψιμος λιγνίτης της οροφής και του δαπέδου και εισάγεται ένας δείκτης εκμεταλλευσιμότητας του λιγνίτη. Ο συγκεκριμένος δείκτης εκτιμά αν το εξεταζόμενο λιγνιτικό στρώμα βρίσκεται σε μεγάλο βάθος για να θεωρηθεί εκμεταλλεύσιμο.

5.1 *Κριτήρια διαχωρισμού λιγνιτικών στρωμάτων.*

Για να εκτιμηθεί η ποσότητα του λιγνίτη που δεν εξορύσσεται λόγω περιορισμών του εξοπλισμού εξόρυξης είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός των λιγνιτικών στρωμάτων. Τα κριτήρια διαχωρισμού και σε αυτό το τμήμα της εργασίας είναι διαφορετικά από τα κριτήρια που χρησιμοποιεί η Δ.Ε.Η. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς τα κριτήρια της Δ.Ε.Η.

βασίζονται περισσότερο στην πείρα των μηχανικών του ορυχείου, κάποιοι εκ των οποίων εργάζονται εκεί για πάνω από δεκαπέντε χρόνια, οπότε δεν επιδέχονται εύκολη αυτοματοποίηση.

Τα επεξεργασμένα δεδομένα των γεωτρήσεων δίνουν το υψόμετρο της οροφής και του δαπέδου κάθε εμφάνισης λιγνίτη ανά ένα με δύο μέτρα αν η περιεκτικότητα σε λιγνίτη της εμφάνισης πληρεί τα κριτήρια της ενότητας 3.1, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του πίνακα 5.1. Οι τιμές των υψομέτρων είναι σε απόλυτα υψόμετρα.

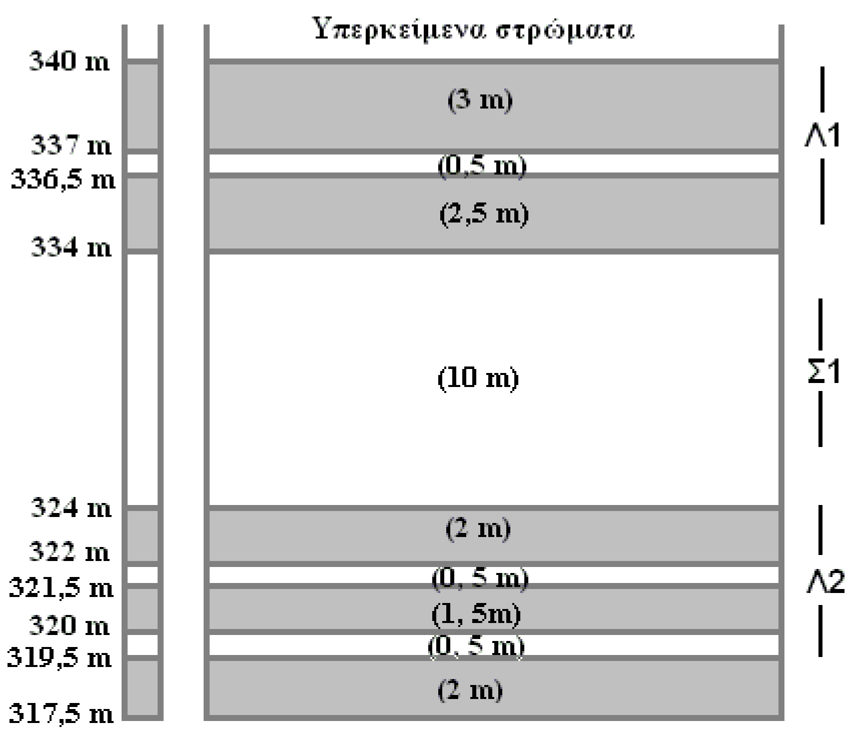
Πίνακας 5. 1 Επεξεργασμένα δεδομένα της πρώτης γεώτρησης. Παρουσιάζονται τα υψόμετρα της οροφής, και του δαπέδου, η περιεκτικότητα σε τέφρα και το πάχος της κάθε εμφάνισης. Τα υψόμετρα είναι από την επιφάνεια της θάλασσας.

Οροφή (m)	Δάπεδο (m)	Τέφρα+CO2 (%)	Πάχος (m)
507.59	506.09	45.00	1.50
506.09	504.89	27.90	1.20
504.89	503.19	32.40	1.70
503.19	501.89	33.40	1.30
501.89	500.89	45.70	1.00
500.89	498.89	26.50	2.00
498.89	497.39	30.20	1.50
497.39	495.89	39.20	1.50
495.89	493.89	23.80	2.00
491.19	489.89	49.00	1.30
489.89	488.89	31.00	1.00
476.89	474.89	40.30	2.00
474.89	473.39	42.10	1.50
473.39	471.89	35.10	1.50
446.89	445.89	35.40	1.00
444.89	442.89	23.00	2.00

Στο κεφάλαιο αυτό θεωρείται ότι δύο στρώματα λιγνίτη διαχωρίζονται μεταξύ τους αν παρεμβάλλεται ένα στρώμα στείρων υλικών πάχους ίσου με το πάχος του ανώτερου στρώματος (Σχήμα 5.1). Η διάκριση αυτή των στρωμάτων γίνεται μόνο για την αφαίρεση του μη απολήψιμου λιγνίτη από την οροφή και το δάπεδο κάθε θεωρούμενου στρώματος. Ο αλγόριθμος (παράρτημα II) απλά μετρά τα ενοποιημένα λιγνιτικά στρώματα και αφαιρεί 18 cm ανά στρώμα από το συνολικό πάχος του λιγνίτη που υπολογίστηκε για την γεώτρηση με τα κριτήρια του κεφαλαίου 3. Το πάχος ενδιάμεσων στείρων στρωμάτων που μπορεί να περιέχονται στο ενοποιημένο στρώμα, δεν προστίθεται στο πάχος του λιγνίτη.

Τα κριτήρια της Δ.Ε.Η. θεωρούν πως αν το ενδιάμεσο στρώμα είναι λεπτό και η συνολική περιεκτικότητα των στρωμάτων σε τέφρα και CO_2 δεν ξεπερνά το 50%, τα δύο αυτά λιγνιτικά στρώματα και το ενδιάμεσο στρώμα των στείρων θεωρείται ένα ενιαίο εκμεταλλεύσιμο στρώμα λιγνίτη. Δηλαδή, το πάχος του λεπτού στείρου στρώματος υπολογίζεται στο πάχος του λιγνιτικού κι εξορύσσεται μαζί του. Αν η συνολική περιεκτικότητα σε τέφρα και CO_2 ξεπερνά το 50%, και το ενδιάμεσο στρώμα δεν είναι λεπτό, η Δ.Ε.Η θεωρεί δύο διαφορετικά στρώματα λιγνίτη και τα εκμεταλλεύεται χωριστά. Σημειώνεται εδώ πως αυτή η ενοποίηση μειώνει τον αριθμό των στρωμάτων σε σχέση με τον διαχωρισμό που κάνει η Δ.Ε.Η. Λεπτό θεωρείται ένα στρώμα που έχει πάχος μικρότερο από το πάχος που μπορεί να εξορύξει επιλεκτικά ο εξοπλισμός

Στο παράδειγμα του σχήματος 5.1 το στρώμα Λ1 θεωρείται ένα ενιαίο λιγνιτικό στρώμα πάχους πεντέμισι μέτρων παρόλο που περιέχει ένα λεπτό ενδιάμεσο στρώμα στείρων (πάχους μισού μέτρου). Επειδή το πάχος του στρώματος Σ1 είναι δέκα μέτρα, το στρώμα Λ2 θεωρείται ένα ξεχωριστό λιγνιτικό στρώμα πάχους πεντέμισι μέτρων παρόλο που περιέχει δύο λεπτά στρώματα στείρων. Οι τιμές των υψομέτρων είναι σε απόλυτα υψόμετρα από την επιφάνεια της θάλασσας.



Σχήμα 5. 1 Δύο λιγνιτικά στρώματα (Λ1, Λ2) και ένα ενδίαμεσο στρώμα στείρων.

Ο αλγόριθμος της ενοποίησης (παράρτημα II) θα θεωρήσει στο παράδειγμα του σχήματος 5.1 δύο διαφορετικά στρώματα. Έτσι θα αφαιρεθούν συνολικά 36 cm από το συνολικό πάχος του λιγνίτη της γεώτρησης. Το συνολικό πάχος λιγνίτη για αυτή τη γεώτρηση θα υπολογιστεί σε 10,64 m αντί για 11 m που είναι το άθροισμα των λιγνιτικών στρωμάτων που πληρούν τα κριτήρια του κεφαλαίου 3.

Από τον διαχωρισμό των στρωμάτων προκύπτει ότι στα σημεία των γεωτρήσεων, εμφανίζονται από ένα έως 19 διαφορετικά στρώματα λιγνίτη ανάλογα με την τοποθεσία. Ο μέσος όρος των στρωμάτων που υπολογίζονται εδώ είναι 4,6. Το παχύτερο στρώμα έχει πάχος 26,5 m. Το λεπτότερο στρώμα έχει προφανώς πάχος μισό μέτρο καθώς αυτό είναι το ελάχιστο πάχος στρώματος που θεωρείται εκμεταλλεύσιμο.

Αφαιρώντας εννέα εκατοστά από την οροφή και το δάπεδο κάθε λιγνιτικού στρώματος τα αποθέματα που υπολογίζονται από τις μεθόδους του προηγούμενου κεφαλαίου μειώνονται. Τα υπολογιζόμενα αποθέματα με τη μέθοδο Voronoi για την εξοφλημένη περιοχή μειώνονται κατά περίπου 8 Mt και για την ολική περιοχή κατά περίπου 18 Mt. Έτσι για την εξοφλημένη περιοχή λαμβάνοντας υπ’ όψιν την μείωση των αποθεμάτων λόγω της απόλειας των 18 εκατοστών ανά στρώμα η εκτίμηση που προκύπτει είναι 128 Mt ενώ για τα συνολικά αποθέματα 269 Mt.

Από την εκτίμηση των 128 Mt για την εξοφλημένη περιοχή πρέπει να αφαιρεθούν και περίπου 10 - 15 Mt από τον λιγνίτη που δεν είχε εξορυχθεί κατά το τέλος του 2006, από όπου προέρχονται τα απολογιστικά στοιχεία (ενότητα 4.1). Προκύπτει λοιπόν μία εκτίμηση για την εξοφλημένη περιοχή της τάξης των 115 Mt.

Κρίνεται ότι μερικά στρώματα λιγνίτη μικρού πάχους, που βρίσκονται σε αρκετά μεγάλο βάθος κάτω από το προηγούμενο εκμεταλλεύσιμο στρώμα μπορεί να μην είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμα. Για να εξεταστεί ποια στρώματα πρέπει να απορριφθούν και σε πόσους τόνους λιγνίτη αντιστοιχούν θα εισαχθεί ένας δείκτης εκμεταλλευσιμότητας.

5.2 *Δείκτης εκμεταλλευσιμότητας λιγνιτικών στρωμάτων.*

Από τα προηγούμενα κεφάλαια γίνεται αντιληπτό πως ένα κλάσμα του κοιτάσματος δεν είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμο παρόλο που ο λιγνίτης που περιέχει πληρεί τα ποιοτικά κριτήρια που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3. Για να εκτιμηθεί η ποσότητα αυτή προτείνεται ο παρακάτω δείκτης.

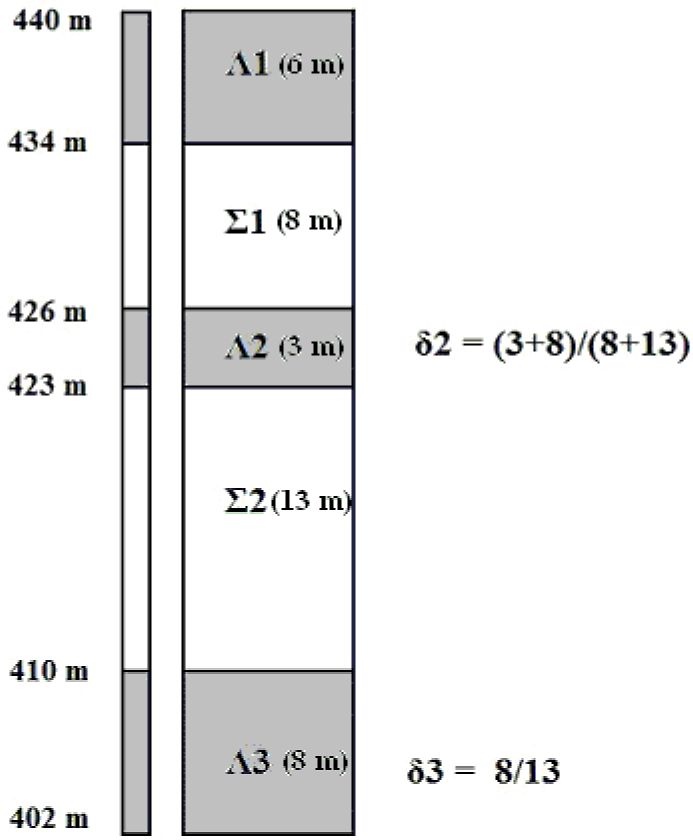
Ως **δείκτης εκμεταλλευσιμότητας λιγνιτικού στρώματος** ορίζεται ο λόγος του συνολικού πάχους λιγνίτη του εξεταζόμενου στρώματος και των οικονομικά αποδεκτών λιγνιτικών στρωμάτων κάτω από αυτό, προς το συνολικό πάχος συγκεκριμένων ενδιάμεσων στείρων στρωμάτων. Τα στείρα αυτά στρώματα είναι αυτά που παρευρίσκονται μεταξύ των λιγνιτικών στρωμάτων που αθροίστηκαν, όπως και μεταξύ του εξεταζόμενου λιγνιτικού στρώματος και του ακριβώς ανώτερου από αυτό λιγνιτικού στρώματος.

Ο δείκτης υπολογίζεται από το κατώτερο στρώμα προς τα ανώτερα ως το δεύτερο στρώμα από την κορυφή της γεώτρησης (σχήμα 5.2). Αν ένα στρώμα απορριφθεί λόγω χαμηλού δείκτη εκμεταλλευσιμότητας το ανώτερο στρώμα από αυτό θεωρείται το τελευταίο στρώμα. Ο μαθηματικός ορισμός του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας είναι:

$$\delta_\iota = \frac{\sum_{k=\iota}^{\nu} \lambda_k}{\sum_{k=\iota-1}^{\nu-1} \sigma_k}, \qquad \iota = \nu, \nu-1, \ldots, 3, 2 \qquad [5.1]$$

Όπου δ_ι ο δείκτης εκμεταλλευσιμότητας του λιγνιτικού στρώματος ι, λ_ι το πάχος του λιγνίτη του στρώματος ι, σ_ι το πάχος του στρώματος των ενδιάμεσων στείρων υλικών που βρίσκεται κάτω από το στρώμα λ_ι και ν ο συνολικός αριθμός των αποδεκτών και οικονομικά εκμεταλλεύσιμων λιγνιτικών στρωμάτων.

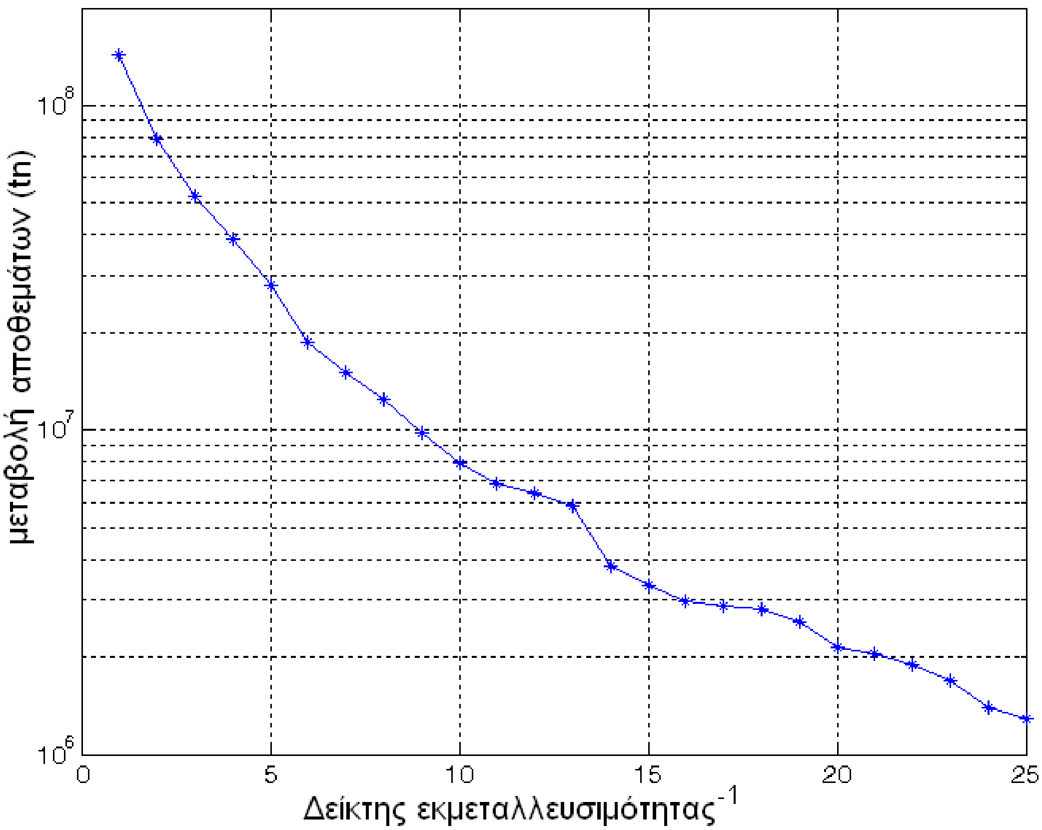
Στο παράδειγμα του σχήματος 5.2, θεωρείται πως το λιγνιτικό στρώμα Λ3 είναι το κατώτερο στρώμα λιγνίτη σε μία θεωρητική γεώτρηση. Ο δείκτης εκμεταλλευσιμότητας για το τρίτο στρώμα είναι το πάχος του (8 m) προς τα στείρα που παρεμβάλλονται με το στρώμα Λ2 (13 m). Ο δείκτης για το δεύτερο στρώμα είναι το πάχος του και το πάχος του τρίτου στρώματος (Λ2 + Λ3, 11 m) προς τα στείρα που παρευρίσκονται μεταξύ των εξεταζόμενων στρωμάτων και του στρώματος Λ1 (Σ1 + Σ2, 21 m). Σε περίπτωση που το στρώμα Λ3 δεν ήταν αποδεκτό, για παράδειγμα αν είχε πάχος ένα μέτρο ή απείχε 120m από το Λ2, ο δείκτης εκμεταλλευσιμότητας για το δεύτερο στρώμα θα ήταν απλά 3/8. Οι τιμές των υψομέτρων είναι σε απόλυτα υψόμετρα από την επιφάνεια της θάλασσας.



Σχήμα 5. 2 Παράδειγμα υπολογισμού του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας.

Από την Δ.Ε.Η προτάθηκε ένα στρώμα να θεωρείται αποδεκτό αν ο δείκτης εκμεταλλευσιμότητάς του ξεπερνά το 1/12. Στην περίπτωση του ορυχείου του Αμυνταίου το ποσοστό λιγνίτη που απορρίπτεται ως μη οικονομικά εκμεταλλεύσιμο είναι μικρό, καθώς η πλειοψηφία των εμφανιζόμενων στρωμάτων θεωρούνται αποδεκτά. Ενδεικτικά αναφέρεται πως με τη μέθοδο Voronoi εκτιμάται πως η ποσότητα του μη οικονομικά εκμεταλλεύσιμου λιγνίτη είναι 6,4 Mt σε όλο το ορυχείο και 3,5 Mt στην εξοφλημένη περιοχή.

Στο σχήμα 5.3 φαίνεται το διάγραμμα της μεταβολής της εκτίμησης των ολικών αποθεμάτων του λιγνίτη (όπως εκτιμούνται με τη μέθοδο Voronoi) ως συνάρτηση του αντίστροφου του αποδεκτού δείκτη εκμεταλλευσιμότητας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3, αν ο ελάχιστος αποδεκτός δείκτης εκμεταλλευσιμότητας είναι 1/25 απορρίπτονται μόλις 1,3 Mt περίπου. Έτσι προκύπτει πως όταν ένα λιγνιτικό στρώμα γίνεται αποδεκτό με δείκτη εκμεταλλευσιμότητας μικρότερο από 1/25 ουσιαστικά όλος ο λιγνίτης γίνεται αποδεκτός.

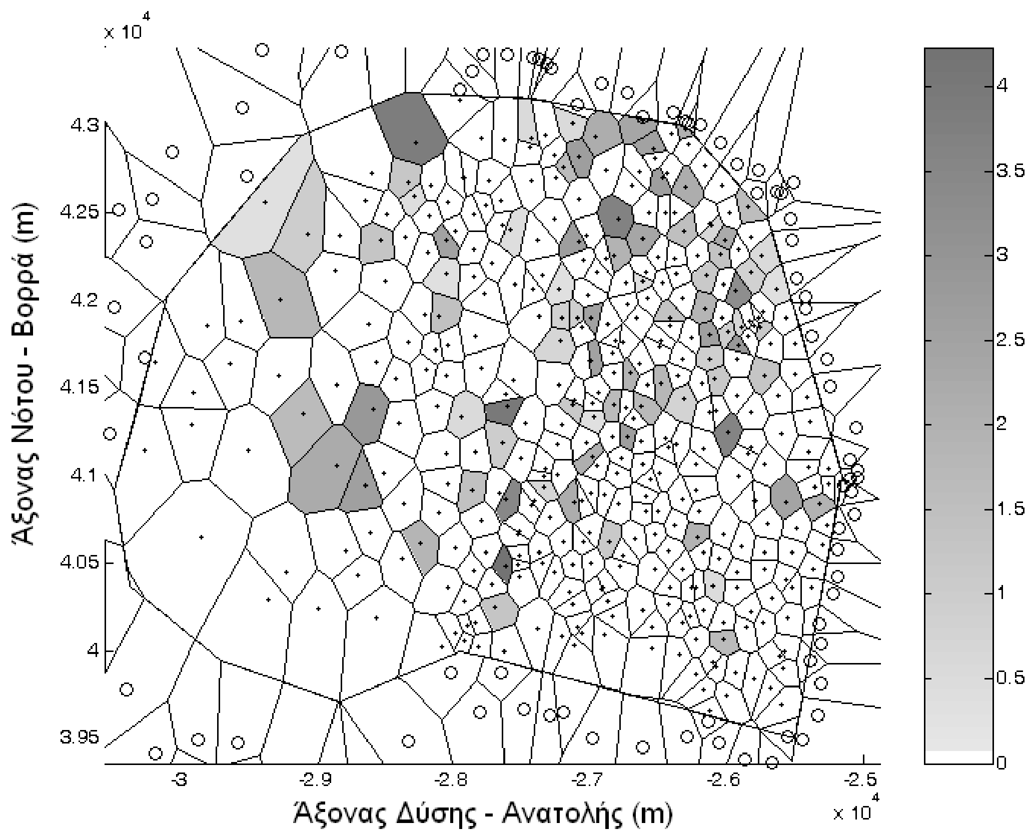


Σχήμα 5. 3 Διάγραμμα μεταβολής αποθεμάτων για την ολική περιοχή ως συνάρτηση του αντίστροφου του αποδεκτού δείκτη εκμεταλλευσιμότητας. Έχουν αφαιρεθεί 18 cm ανά στρώμα μη απολήψιμου λιγνίτη. Η μεταβολή των αποθεμάτων εκτιμήθηκε με την μέθοδο Voronoi.

Αξίζει να σημειωθεί πως με την αφαίρεση αυτών των 3,5 Mt από τα εκτιμώμενα αποθέματα της εξοφλημένης περιοχής η υπερεκτίμηση μειώνεται περαιτέρω. Σημαντικός λόγος για την παραμένουσα υπερεκτίμηση (περίπου 9%) είναι πως στην συγκεκριμένη εφαρμογή τα κριτήρια αποδοχής των στρωμάτων είναι διαφορετικά από της Δ.Ε.Η όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 5.1.

Στην συγκεκριμένη εργασία ορίστηκε ως ελάχιστη αποδεκτή τιμή του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας η τιμή 1/12 (πρόταση Δ.Ε.Η.) . Απορρίπτοντας μη εκμεταλλεύσιμα στρώματα και τον λιγνίτη που δεν λαμβάνεται λόγω περιορισμών των μηχανημάτων, τα δεδομένα των μεθόδων που παρουσιάστηκαν στα προήγουμενα κεφάλαια αλλάζουν, όπως αλλάζουν και τα αποτελέσματά τους.

Στο σχήμα 5.4 φαίνεται η μείωση του πάχους λιγνίτη σε κάθε γεώτρηση όπως προκύπτει με εφαρμογή του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας. Στρώματα με δείκτη εκμεταλλευσιμότητας μικρότερο από 1/12 απορρίπτονται ως μη οικονομικά εκμεταλλεύσιμα. Στο ορυχείο του Αμυνταίου, παρατηρούνται περιοχές μεγάλου μεγέθους με μη εκμεταλλεύσιμα στρώματα λιγνίτη. Για παράδειγμα αυτό ισχύει για μια περιοχή στο βορειοδυτικό άκρο του ορυχείου (συντεταγμένες κοντά σε X = -29000m και Y = 42500m στο τοπικό σύστημα αναφοράς). Η συγκεκριμένη περιοχή έχει επιφάνεια περίπου 700 στρέμματα. Η εξόρυξη των ενδιάμεσων στείρων στην περιοχή αυτή προκειμένου να ληφθούν τα κατώτερα λιγνιτικά στρώματα κρίνεται αντιοικονομική καθώς η τιμή του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας είναι μικρότερη από 1/12.



Σχήμα 5. 4 Η μεταβολή του πάχους λιγνίτη στα πολύγωνα Voronoi με την εφαρμογή του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας. Αναπαρίσταται η μείωση σε μέτρα του συνολικού πάχους σε κάθε πολύγωνο.

Έτσι, το διάγραμμα της εικόνας 5.4, βοηθά στο να αποφευχθεί η εξόρυξη εκατομμυρίων κυβικών μέτρων στείρων υλικών. Σημειώνεται πως με συμβατικά μέσα η εξόρυξη και απομάκρυνση ενός κυβικού μέτρου στείρων ενδιάμεσων υλικών κοστίζει περίπου 1 €.

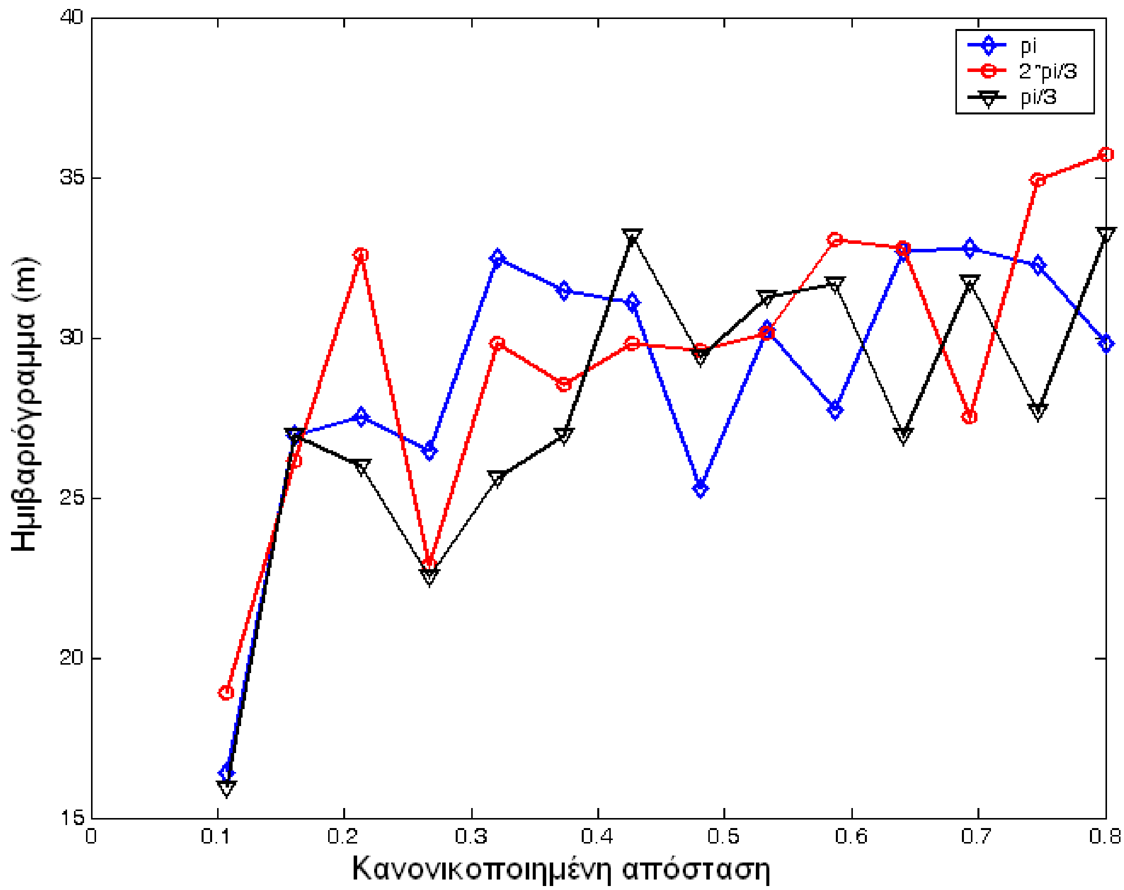
5.3 *Εκτίμηση απολήψιμων, οικονομικά εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων*

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των μεθόδων υπολογισμού αποθεμάτων λιγνίτη χρησιμοποιώντας για δεδομένα το τροποποιημένο συνολικό πάχος στρωμάτων λιγνίτη. Το τροποποιημένο αυτό πάχος προκύπτει θεωρώντας αποδεκτά στρώματα όσα έχουν τιμή δείκτη εκμεταλλευσιμότητας μεγαλύτερη από 1/12 και αφαιρώντας τα 9 cm λιγνίτη που δεν λαμβάνονται από την οροφή και το δάπεδο κάθε στρώματος.

Για το νέο σύνολο δεδομένων απορρίπτεται η κανονική υπόθεση σε επίπεδο εμπιστοσύνης 90%. Η χωρική τάση για το νέο σύνολο δεδομένων έχει τη μορφή της εξίσωσης 5.2. Ο συντελεστής συσχέτισης ανάμεσα στις τιμές της τάσης στα σημεία των γεωτρήσεων και των τιμών από τα τροποποιημένα δεδομένα είναι 63.2%.

$$m_z(\mathbf{s}) = 17,29 - 4,36x + 2,16y - 1.63x^2 - 2.50y^2 - 1.26xy \qquad [5.2]$$

Τα πειραματικά ημιβαριογράμματα υπολογίζονται με την ευσταθή εκτιμήτρια του βαριογράμματος της εξίσωσης 2.6. Τα ημιβαριογράμματα για τρεις διαφορετικές διευθύνσεις και με ανοχή 45^{o} φαίνονται στο σχήμα 5.5. Από τα ημιβαριογράμματα αυτά δεν φαίνεται να υπάρχει ανισοτροπία. Σημειώνεται πως τα ημιβαριογράμματα έχουν παρεμφερή μορφή με αυτά του σχήματος 3.8 αλλά φαίνεται να τείνουν προς μία μικρότερη τιμή οροφής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τυπική απόκλιση των δεδομένων σ' αυτή την περίπτωση είναι 6,33 m αντί για 8,44 m. Όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.4, η οροφή στην οποία τείνει το ημιβαριόγραμμα εξαρτάται από την τυπική απόκλιση. Έτσι αυτή η μείωση της τυπικής απόκλισης φέρνει και μείωση της οροφής στην οποία τείνει το ημιβαριόγραμμα.



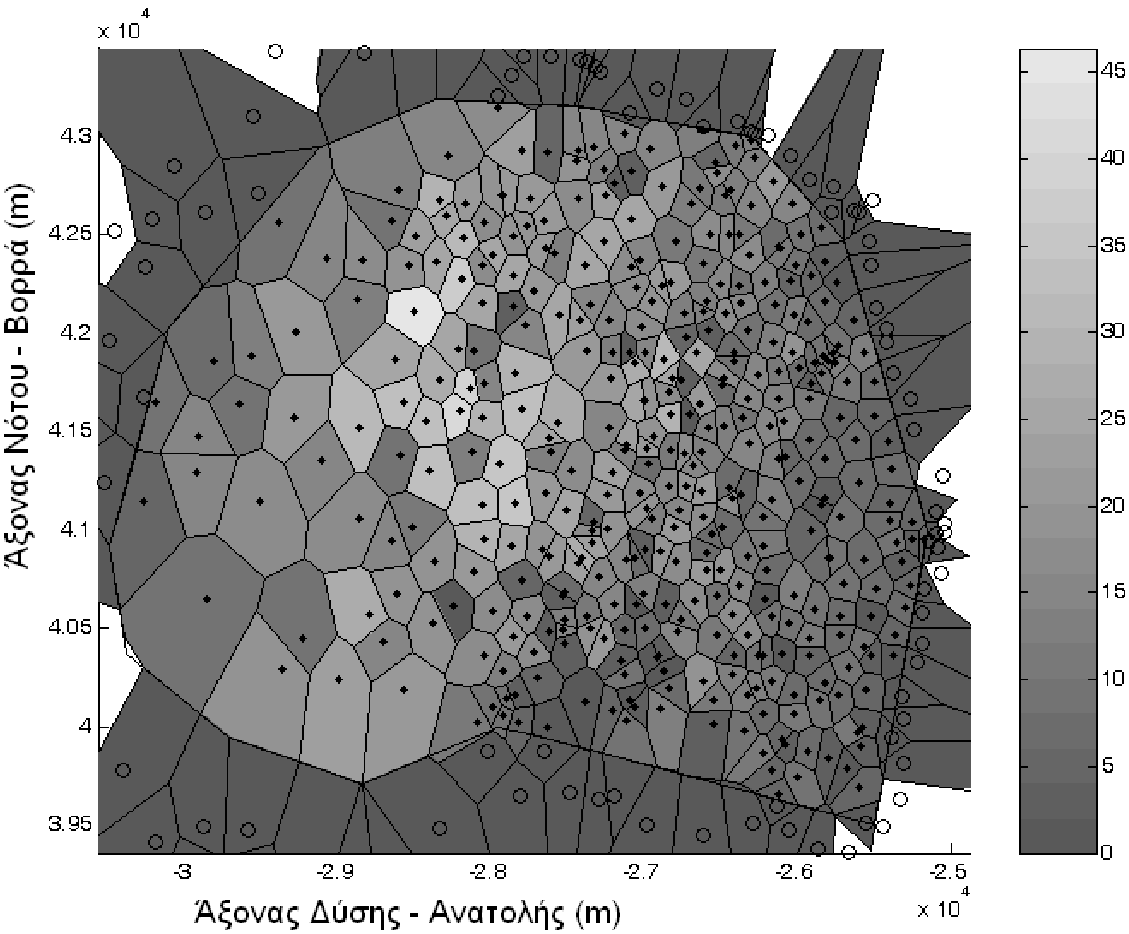
Σχήμα 5. 5 Εμπειρικά ημιβαριογράμματα ολικού πάχους στρώματος λιγνίτη με ανοχή 45°. Έχουν αφαιρεθεί μη οικονομικά εκμεταλλεύσιμα στρώματα και μη απολήψιμος λιγνίτης.

5.3.1 <u>*Υπολογισμός αποθεμάτων με τη μέθοδο των πολυγώνων Voronoi.*</u>

Εφαρμόζοντας την διαδικασία που αναφέρθηκε στην ενότητα 4.1 υπολογίστηκαν εκ νέου τα αποθέματα της ολικής περιοχής με την μέθοδο Voronoi και κατασκευάστηκε ο χάρτης με τα πολύγωνα Voronoi για τις νέες τιμές πάχους στρωμάτων λιγνίτη (σχ. 5.6). Αναλυτικά η διαδικασία φαίνεται στο παράρτημα Ι.

Η εκτίμηση των αποθεμάτων είναι 263 Mt, που αντιστοιχεί σε 24 Mt λιγότερα αποθέματα από την εκτίμηση της ενότητας 4.1.

Στην εκτίμηση αυτή και στον χάρτη δεν συμπεριλαμβάνονται τα 18 cm του μη απολήψιμου λιγνίτη ανά στρώμα και μη εκμεταλλεύσιμα στρώματα λιγνίτη όπως προκύπτουν από τη χρήση του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας. Τα κριτήρια αποδοχής των στρωμάτων είναι διαφορετικά από της Δ.Ε.Η όπως αναφέρεται στην ενότητα 5.1.



Σχήμα 5. 6 Πολύγωνα Voronoi για το συνολικό πάχος λιγνίτη σε όλο το ορυχείο. Έχουν αφαιρεθεί μη οικονομικά εκμεταλλεύσιμα στρώματα και μη απολήψιμος λιγνίτης. Τα σημεία κατοπτρισμού συμβολίζονται με “ο”.

Για την εξοφλημένη περιοχή, όπως αναφέρεται στην ενότητα 5.1, η εκτίμηση που βασίζεται στα πολύγωνα Voronoi είναι 115 Mt. Τα απολογιστικά δεδομένα για την περιοχή αυτή είναι 105 Mt. Η υπερεκτίμηση που προκύπτει από την εξοφλημένη περιοχή σε σχέση με τα απολογιστικά δεδομένα είναι μόλις 8% - 9% με χρήση του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας και λαμβάνοντας υπόψη τα 18 cm του λιγνίτη που δεν λαμβάνονται λόγω περιορισμών των μηχανημάτων.

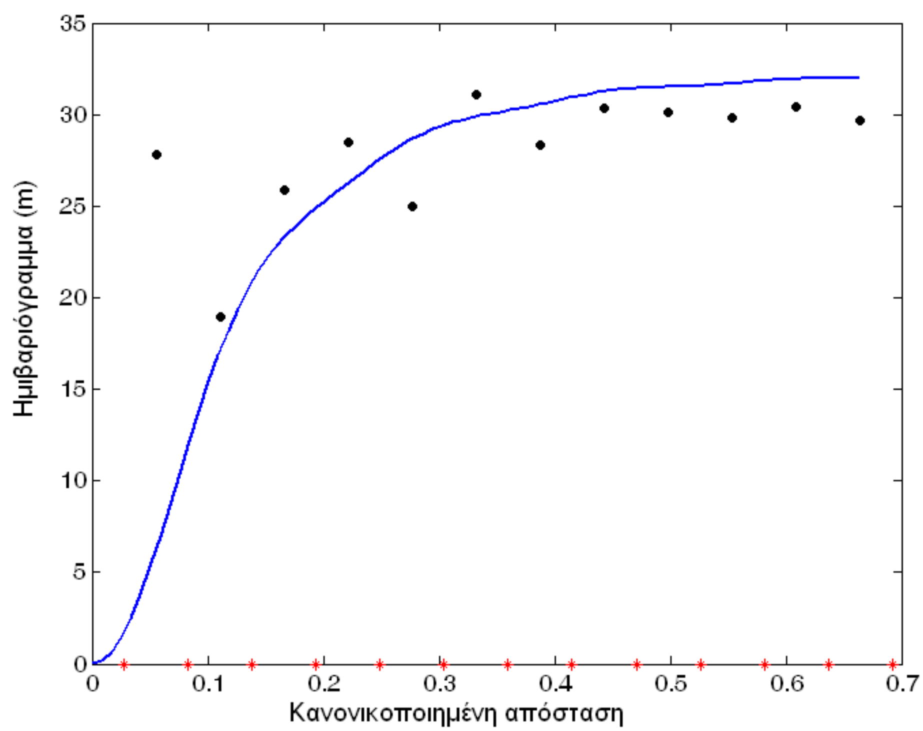
Δεδομένης της καλής εκτίμησης για την εξοφλημένη περιοχή και της διαφοροποίησης των κριτηρίων αποδοχής σε σχέση με αυτά της Δ.Ε.Η., κρίνεται πως δεν είναι σημαντική η υπερεκτίμηση που προκύπτει.

Τα ολικά αποθέματα λιγνίτη με αυτή τη μέθοδο εκτιμούνται σε $\underline{M_{Vor} = 2{,}6 \cdot 10^{8} t.}$

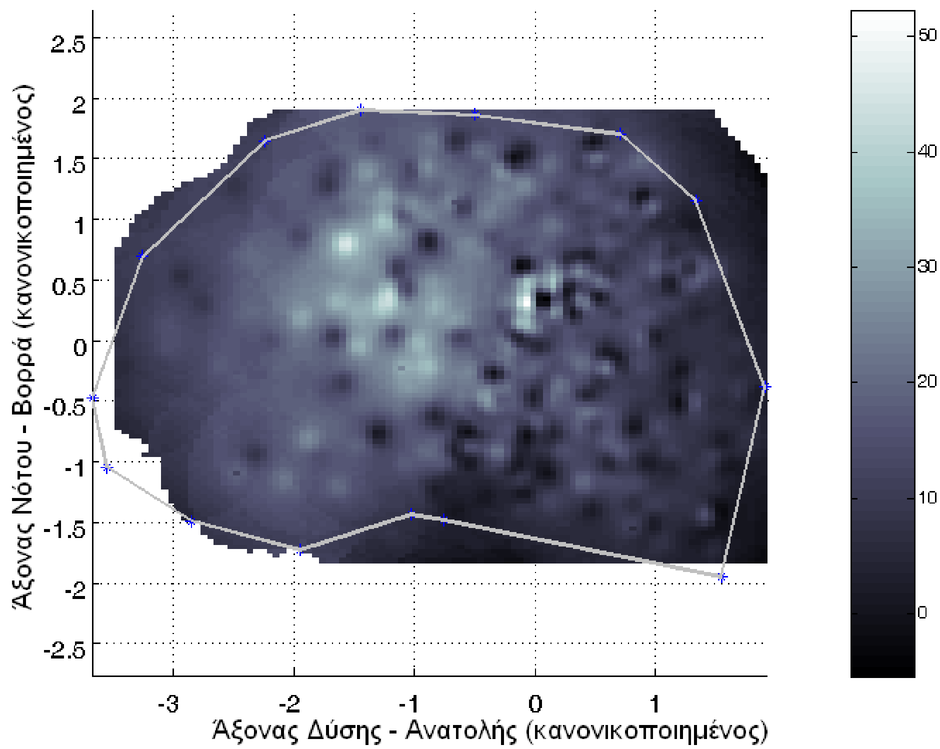
5.3.2 *Υπολογισμός αποθεμάτων με τη μέθοδο Kriging.*

Για να υπολογιστούν τα αποθέματα αφαιρώντας την ποσότητα του μη απολήψιμου λιγνίτη και των μη οικονομικά επικερδών στρωμάτων με την μέθοδο Kriging, έγινε ξανά υπολογισμός του σπαρτιάτικου μοντέλου με τα νέα δεδομένα. Οι βέλτιστες παράμετροι που υπολογίστηκαν για το σπαρτιάτικο μοντέλο είναι η_o = 855,1, η_1 = 5,0, ξ = 0,0716 και k_c = 40. Οι αποστάσεις που χρησιμοποιούνται είναι κανονικοποιημένες. Το νέο μοντέλο που προκύπτει και το εμπειρικό ημιβαριόγραμμα φαίνονται στο σχήμα 5.7.

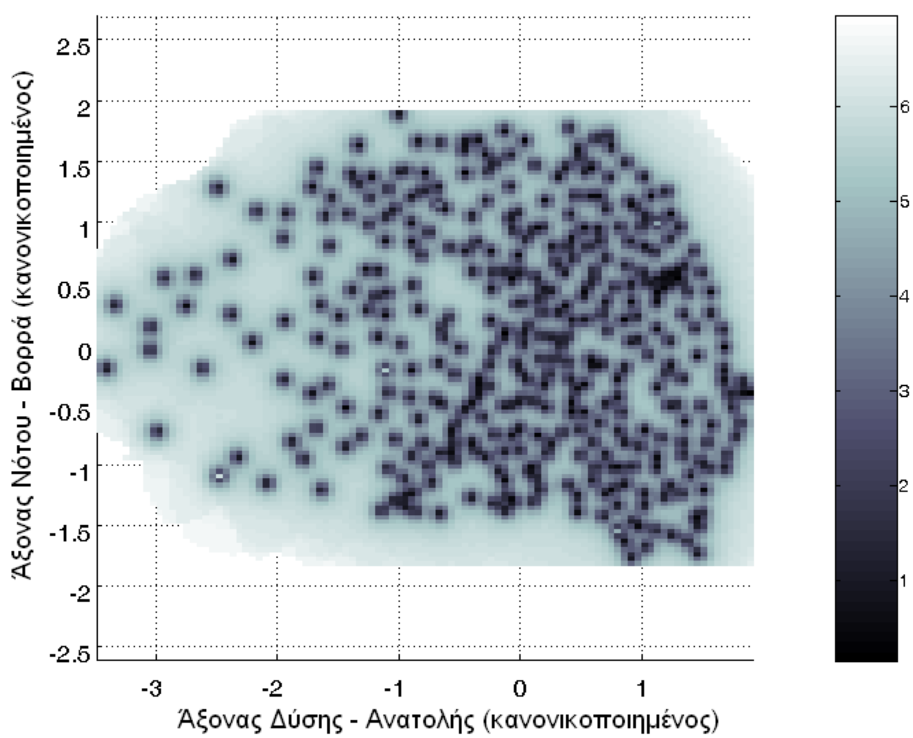
Μετά τον υπολογισμό του θεωρητικού μοντέλου πραγματοποιείται εκτίμηση αποθεμάτων και δημιουργούνται νέοι χάρτες πάχους λιγνίτη και αβεβαιότητας των εκτιμήσεων με τη διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα 4.2. Κατά τη διακριτοποίηση του διαστήματος με το νέο μοντέλο ημιβαριογράμματος και τα νέα δεδομένα, ένα μόνο σημείο από τα 8500 που βρίσκονται εντός των ορίων του ορυχείου δεν ήταν δυνατό να εκτιμηθεί λόγω αριθμητικών σφαλμάτων. Ο χάρτης της εκτίμησης του πάχους στρωμάτων λιγνίτη φαίνεται στο σχήμα 5.8 και ο χάρτης αβεβαιότητας της εκτίμησης φαίνεται στο σχήμα 5.9.



Σχήμα 5. 7 Το Σπαρτιάτικο μοντέλο (γραμμή) και το εμπειρικό, πανκατευθυντικό ημιβαριόγραμμα (κύκλοι). Έχουν αφαιρεθεί μη οικονομικά εκμεταλλεύσιμα στρώματα και μη απολήψιμος λιγνίτης.



Σχήμα 5. 8 Χάρτης εκτίμησης πάχους λιγνίτη με τη μέθοδο ΟΚ. Οι άξονες είναι κανονικοποιημένοι. Έχουν αφαιρεθεί μη οικονομικά εκμεταλλεύσιμα στρώματα και μη απολήψιμος λιγνίτης.



Σχήμα 5. 9 Ο χάρτης αβεβαιότητας των εκτιμήσεων του κανονικού Kriging. Οι άξονες είναι κανονικοποιημένοι.

Τα αποθέματα όλης της περιοχής σε λιγνίτη με την μέθοδο Kriging υπολογίζονται σε 230 Mt ή 21 Mt λιγότερο από τα αποθέματα που εκτιμήθηκαν στο κεφάλαιο 4.2. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5.3.1 κρίνεται πως δεν είναι απαραίτητη η αφαίρεση κάποιας υπερεκτίμησης.

Τα αποθέματα λιγνίτη με τη μέθοδο Ordinary Kriging (βλέπε ενότητα 4.2) εκτιμούνται σε $M_{OK} = 2,3 \cdot 10^8$t.

5.3.3 *Υπολογισμός αποθεμάτων με τη μέθοδο της μέσης τιμής.*

Η τρίτη μέθοδος εκτίμησης των αποθεμάτων, χωρίς τα 18 cm του μη απολήψιμου λιγνίτη και χωρίς τα μη οικονομικά εκμεταλλεύσιμα στρώματα λιγνίτη, είναι η μέθοδος της μέσης τιμής που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.3. Εφαρμόζοντας αυτή την απλή μέθοδο στα νέα δεδομένα η εκτίμηση των αποθεμάτων γίνεται 192 Mt ή 19 Mt λιγότερο από την εκτίμηση της ενότητας 4.3.

Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία 10000 φορές αφαιρώντας τυχαία 50 γεωτρήσεις κάθε φορά, τα αποθέματα που υπολογίζονται είναι από 185 Mt έως 201 Mt. Η κατανομή των αποθεμάτων που εκτιμούνται με αυτές τις 10000 επαναλήψεις ακολουθεί την κανονική κατανομή σύμφωνα με το Lilliefors test σε επίπεδο εμπιστοσύνης 99%.

Τα αποθέματα λιγνίτη με τη μέθοδο της μέσης τιμής εκτιμούνται σε $M_{μτ} = 1,9 \cdot 10^8$t.

5.4 *Σύγκριση μεθόδων εκτίμησης αποθεμάτων*

Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των διάφορων μεθόδων που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5 όπως και η εκτίμηση της Δ.Ε.Η.

Πίνακας 5. 2 Τα συγκριτικά αποτελέσματα για τα οικονομικά εκμεταλλεύσιμα αποθέματα λιγνίτη χωρίς τα μη οικονομικά εκμεταλλεύσιμα στρώματα και τον μη απολήψιμο λιγνίτη.

Πολύγωνα Voronoi	**Εκτίμηση Kriging**	**Μέση τιμή**	**Πρόβλεψη Δ.Ε.Η.**
$2,5 \cdot 10^8$t.	$2,3 \cdot 10^8$t.	$1,9 \cdot 10^8$t.	$2,1 \cdot 10^8$t.

Από τον πίνακα 5.2 φαίνεται πως οι δύο πρώτες μέθοδοι υπερεκτιμούν τα αποθεμάτα σε σχέση με την πρόβλεψη της Δ.Ε.Η. Η μέθοδος της μέσης τιμής συνεχίζει να δίνει σημαντικά χαμηλότερη εκτίμηση από τις άλλες δύο μεθόδους που αναφέρθηκαν σε αυτή την εργασία.

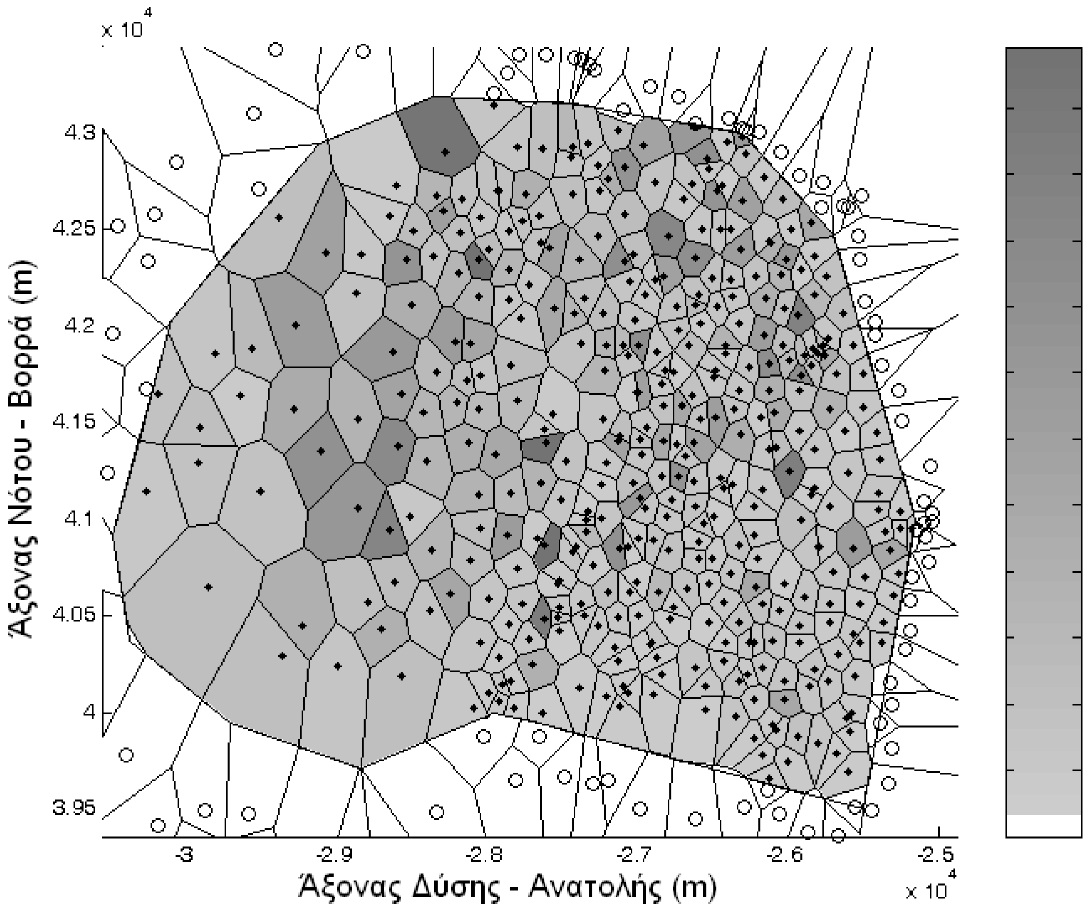
Η μέθοδος Kriging υπερεκτιμά κατά περίπου 10% τα αποθέματα σε σχέση με την πρόβλεψη της Δ.Ε.Η. το οποίο οφείλεται ως κάποιο βαθμό στην διαφορά των κριτηρίων αποδοχής των στρωμάτων και 8% λιγότερα αποθέματα από την μέθοδο των πολυγώνων Voronoi. Η μέθοδος Voronoi συνεχίζει να πάσχει από την παρουσία μεγάλων σε επιφάνεια πολυγώνων με υψηλές τιμές λιγνίτη που οδηγεί σε μια θετική μεροληψία της εκτίμησης.

Η προσθήκη επιπλέον κριτηρίων αποδοχής στρωμάτων σύμφωνα με την τιμή του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας και της αφαίρεσης λιγνίτη από κάθε στρώμα δεν αυξάνει σημαντικά τους χρόνους υπολογισμού των αλγορίθμων ούτε είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη προγραμματιστικά. Από αυτά συμπεραίνεται πως μία αυτοματοποιημένη διαδικασία υπολογισμού αποθεμάτων με τις παραπάνω μεθόδους είναι ευέλικτη σε αλλαγές κριτηρίων αποδοχής σύμφωνα με τις οικονομικές ή ποιοτικές απαιτήσεις και διαφορετικές μεθόδους εκμετάλλευσης λιγνίτη ή χωρισμού στρωμάτων.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.1 παρατηρήθηκε μία υπερεκτίμηση περίπου 8% με 9% από τα απολογιστικά δεδομένα της εξοφλημένης περιοχής που οφείλεται στη διαφορά κριτηρίων και σε άλλους άγνωστους και πιθανόν τυχαίους παράγοντες. Η υπερεκτίμηση αυτή δεν αιτιολογείται ως σημαντική καθώς είναι κάτω του 10%.

Στο σχήμα 5.10 φαίνονται η μεταβολή του συνολικού πάχους λιγνίτη (σε m) σε κάθε γεώτρηση με την εφαρμογή του δείκτη και χωρίς τις απώλειες λιγνίτη λόγω των περιορισμών των μηχανημάτων εξόρυξης.

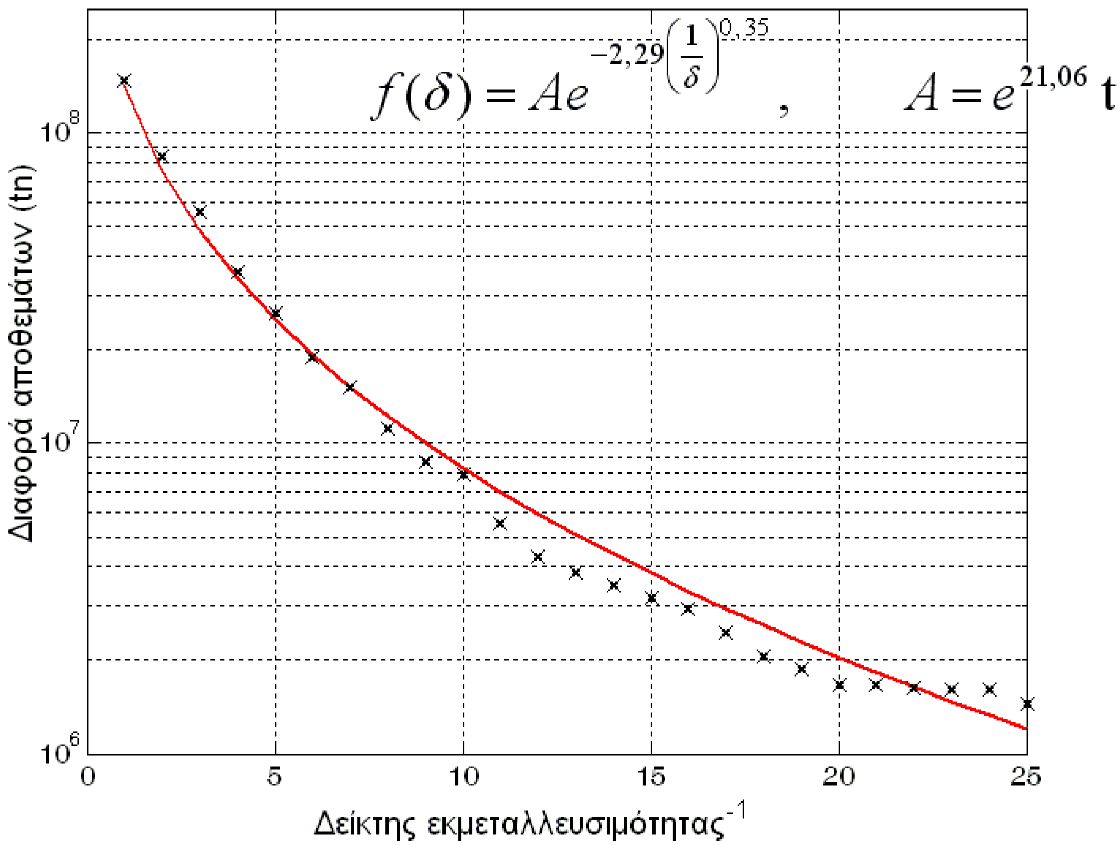
Σημειώνεται πως και σε αυτό το κεφάλαιο δεν έχει ληφθεί υπόψη η κλίση των πρανών με αποτέλεσμα να υπολογίζεται και μια ποσότητα λιγνίτη που βρίσκεται μέσα στα όρια του ορυχείου αλλά δεν θα εξορυχτεί. Η ακρίβεια των μεθόδων εκτιμάται σε δεκάδες Mt και έτσι οι προβλέψεις δίνονται σε δεκάδες Mt.



Σχήμα 5. 10 Η μείωση του πάχους λιγνίτη σε κάθε γεώτρηση με την εφαρμογή του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας και χωρίς απώλειες. Αναπαρίσταται η μείωση σε μέτρα του συνολικού πάχους σε κάθε πολύγωνο.

Στο σχήμα 5.11 φαίνεται η μεταβολή των οικονομικά εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων για διαφορετικά αποδεκτά όρια του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας. Σημειώνεται πως στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται η μείωση των αποθεμάτων λόγω μεταβολής του ορίου του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας <u>μόνο</u>. Η συνάρτηση που προσαρμόστηκε στα αποτελέσματα ισχύει για το ορυχείο του Αμυνταίου μόνο. Για άλλα ορυχεία ή διαφορετικά δεδομένα από το ίδιο ορυχείο οι παράμετροι της συνάρτησης αυτής θα είναι διαφορετικοί και θα πρέπει να εξερευνηθούν. Η συνάρτηση αυτή ορίζεται για τιμές του ορίου του δείκτη μεγαλύτερες από 1.

Το διάγραμμα της διαδικασίας που ακολουθήθηκε σε αυτό το κεφάλαιο δίνεται στο παράρτημα Ι.



Σχήμα 5. 11 Διάγραμμα μείωσης αποθεμάτων λιγνίτη με την μεταβολή του αντίστροφου του αποδεκτού δείκτη εκμεταλλευσιμότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η σύγκριση διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης αποθεμάτων, η ανάπτυξη λογισμικού υλοποίησης των μεθόδων, η εκτίμηση των αποθεμάτων του ορυχείου και η δημιουργία χαρτών της χωρικής μεταβολής του πάχους των στρωμάτων λιγνίτη. Επιμέρους στόχος της εργασίας ήταν ορισμός ενός δείκτη εκμεταλλευσιμότητας ανά στρώμα λιγνίτη και να εξεταστεί η εφαρμογή του στο συγκεκριμένο ορυχείο.

Τα αποθέματα, όπως εκτιμήθηκαν στο κεφάλαιο 4, δίνονται στον πίνακα 4.1. Η εκτιμώμενη υπερεκτίμηση που προκύπτει από την σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου Voronoi στην εξοφλημένη περιοχή με τα απολογιστικά δεδομένα της Δ.Ε.Η. είναι 20% και έχει αφαιρεθεί (ενότητα 4.4).

Τα αποθέματα όπως εκτιμήθηκαν στο κεφάλαιο 5, δίνονται στον πίνακα 5.2. Έχουν αφαιρεθεί μη οικονομικά εκμεταλλεύσιμα στρώματα (με δείκτη εκμεταλλευσιμότητας μικρότερο από 1/12) και μη απολήψιμος λιγνίτης λόγω περιορισμών του εξοπλισμού. Η υπερεκτίμηση σε σύγκριση με τα απολογιστικά δεδομένα είναι μικρότερη από 10% και οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην διαφορά κριτηρίων που εφαρμόστηκαν σ' αυτή την εργασία με τα κριτήρια της Δ.Ε.Η.

6.1 *Συμπεράσματα και προτάσεις για τον δείκτη εκμεταλλευσιμότητας*

Από την εργασία αυτή κρίνεται πως ο δείκτης εκμεταλλευσιμότητας λιγνιτικών στρωμάτων είναι απλός στην εφαρμογή και βελτιώνει την εκτίμηση. Στην εξοφλημένη περιοχή χρησιμοποιώντας ως όριο για τον δείκτη εκμεταλλευσιμότητας την τιμή 1/12 εκτιμάται πως 3,4 Mt λιγνίτη είναι μη οικονομικά εκμεταλλεύσιμοι. Η ποσότητα αυτή μειώνει την υπερεκτίμηση της μεθόδου Voronoi για την εξοφλημένη περιοχή περίπου κατά 17% και πιο συγκεκριμένα από περίπου 20% υπερεκτίμηση σε 16,5 % επί των 105 Mt που εξορύχτηκαν από την περιοχή σύμφωνα με τα απολογιστικά στοιχεία.

Ανεξαρτήτως από την βελτίωση της εκτίμησης, το πλεονέκτημα του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας είναι πως μπορεί να εισαχθεί ως κριτήριο στον αλγόριθμο ανίχνευσης εκμεταλλεύσιμων στρωμάτων. Αυτό απλοποιεί την διαδικασία για τον μηχανικό του ορυχείου που συνήθως καλείται να εκτιμήσει αν το υπό εξέταση στρώμα είναι εκμεταλλεύσιμο ή όχι. Έτσι ένα σημαντικό πρόβλημα στα πολυστρωματικά κοιτάσματα βελτιώνεται καθώς είναι ευκολότερη η ενοποίηση των διάφορων στρωμάτων ώστε να ελεγχθούν τα αποθέματα και η σχέση αποκάλυψης στην συγκεκριμένη θέση.

Το αποδεκτό όριο του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας δεν είναι απαραίτητο να είναι ενιαίο σε ολόκληρη την περιοχή της εκμετάλλευσης. Σε περιοχές όπου η εξόρυξη και απομάκρυνση των στείρων είναι οικονομικά ακριβή, το όριο αποδοχής του δείκτη μπορεί να είναι μεγαλύτερο από τομείς και υποτομείς του ορυχείου όπου η απομάκρυνση στείρων κοστίζει λιγότερο. Επιπλέον, αλλαγές στις οικονομικές συνθήκες, την προσφορά και ζήτηση και τα τεχνικά μέσα εξόρυξης, επηρεάζουν και το αποδεκτό όριο του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας. Αυτό σημαίνει πως με χρήση του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας, η επανεκτίμηση των οικονομικά απολήψιμων αποθεμάτων με διαφορετικές οικονομικές συνθήκες γίνεται μέσα σε λίγα λεπτά καθώς τόσος είναι ο χρόνος που απαιτείται από τους αλγορίθμους.

Σημειώνεται πως με συμβατικά μέσα η εξόρυξη και απομάκρυνση ενός κυβικού μέτρου στείρων ενδιάμεσων υλικών στην περίπτωση του ορυχείου στο Αμύνταιο κοστίζει περίπου 1 €. Επιπλέον λόγω της κλίσης των βαθμίδων, απομακρύνονται περισσότερα στείρα υλικά για την λήψη του λιγνίτη από όσα προβλέπει το όριο του δείκτη. Έτσι μπορεί να αποφευχθεί κόστος εκατομμυρίων ευρώ από την απόρριψη μη οικονομικά εκμεταλλεύσιμων λιγνιτικών στρωμάτων.

Στην εργασία αυτή ο δείκτης εκμεταλλευσιμότητας αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε στο λιγνιτωρυχείο του Αμυνταίου. Η εφαρμογή του όμως σε άλλα πολυστρωματικά κοιτάσματα είναι απλή. Αρκεί οι μηχανικοί του εκάστοτε κοιτάσματος να μπορούν να εκτιμήσουν ποιο είναι το όριο του δείκτη κάτω από το οποίο η εκμετάλλευση του συγκεκριμένου στρώματος είναι αντιοικονομική. Ως πρώτη εκτίμηση προτείνεται το όριο της σχέσης αποκάλυψης αν και πρέπει να σημειωθεί πως οι παράμετροι που καθορίζουν το οικονομικά αποδεκτό όριο της σχέσης ορίζονται διαφορετικά.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε κεκλιμένα πολυστρωματικά κοιτάσματα, ή κοιτάσματα σε περιοχές με ρήγματα, ένα στρώμα με μικρό δείκτη εκμεταλλευσιμότητας μπορεί να είναι κοντά σε ένα άλλο εκμεταλλεύσιμο στρώμα. Ανάλογα με την κλίση των βαθμίδων στην περίπτωση αυτή, το συγκεκριμένο στρώμα μπορεί να είναι εκμεταλλεύσιμο.

Με περαιτέρω ανάπτυξη του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας ώστε να συμπεριλαμβάνει υπάρχοντα ρήγματα και την θέση του στρώματος σε σχέση με τα γειτονικά, η χρησιμότητα του δείκτη ως εργαλείο εξέτασης και αποδοχής στρωμάτων σε πολυστρωματικά κοιτάσματα αυξάνεται. Με εισαγωγή αυτών και άλλων παραμέτρων στο δείκτη εκμεταλλευσιμότητας, μπορεί να κωδικοποιηθεί η πολυετής εμπειρία των μηχανικών του ορυχείου απλοποιώντας την δουλειά των νεότερων και βοηθώντας σημαντικά στην εκπαίδευσή τους.

6.2 *Συμπεράσματα και προτάσεις για τις μεθόδους εκτίμησης αποθεμάτων*

Από την παραπάνω μελέτη προκύπτει ότι χρησιμοποιώντας μεθόδους γεωστατιστικής ακόμα και με απλοποιημένα κριτήρια αποδοχής στρωμάτων λιγνίτη μπορούν να εξαχθούν αρκετά ακριβή συμπεράσματα για τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παρουσία πολλαπλών ρηγμάτων στην περιοχή περιορίζει τις χωρικές εξαρτήσεις, δυσχεραίνοντας μια ακριβή εκτίμηση. Προκύπτει λοιπόν πως οι γεωστατιστικές μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν σε παρεμφερείς εμφανίσεις λιγνίτη και άλλων γαιανθράκων ακόμα και σε αυτές τις δυσμενείς συνθήκες.

Όπως φαίνεται στον πίνακα 4.2 ο υπολογιστικός χρόνος που χρειάζονται οι συγκεκριμένες μέθοδοι δεν είναι μεγάλος, οπότε μπορούν να εφαρμοστούν ακόμα και σε παλιότερης τεχνολογίας υπολογιστές. Αναφέρεται επιπλέον πως ο χρόνος δημιουργίας του πίνακα αναφοράς για το Σπαρτιάτικο μοντέλο ήταν περίπου 8 λεπτά.

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 4.5 κάθε μέθοδος έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η μέθοδος κανονικού Kriging παρουσιάζει κάποια προβλήματα στην ακρίβεια, επειδή η κατανομή των δεδομένων απέχει από την κανονική κατανομή.

Μέσω της μεθόδου OK παράγεται ένας χάρτη εκτίμησης του πάχους λιγνίτη καθώς και της αβεβαιότητας της στατιστικής πρόβλεψης. Η μέθοδος των πολυγώνων Voronoi είναι απλή και γρήγορη στην εφαρμογή, ειδικά με την χρήση των σημείων κατοπτρισμού, αλλά η συνολική εκτίμηση μεροληπτεί λόγω της ύπαρξης πολυγώνων με μεγάλη επιφάνεια και υψηλή τιμή. Η μέθοδος της μέσης τιμής είναι πολύ απλή στην υλοποίηση αλλά δεν δίνει την δυνατότητα δημιουργίας οποιουδήποτε χωρικού χάρτη και είναι λιγότερο αξιόπιστη.

Τέλος η μέθοδος Kriging και η μέθοδος των πολυγώνων Voronoi θα έδιναν καλύτερα αποτελέσματα αν οι θέσεις των δεδομένων βρίσκονταν σε κάνναβο γεωτρήσεων, καθώς θα υπήρχε καλύτερη κάλυψη της περιοχής. Η χρήση μεθόδων προσομοίωσης (όπως η μέθοδος Cholesky – Kriging) με εφαρμογή μεθόδων για την μοντελοποίηση μη γκαουσιανών διακυμάνσεων μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη αναπαράσταση της μεταβλητότητας στην περιοχή του ορυχείου. Άλλα πιθανά ερευνητικά βήματα που θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν είναι η χρήση μεθόδων μη γραμμικής γεωστατιστικής όπως και ανάλυση και μοντελοποίηση της υπάρχουσας ανισοτροπίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Δ. Θ. Χριστόπουλος, Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική. Δεκέμβριος 2004, πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης.
2. Eulogio Pardo-Iguzquiza, 1998. Maximum Likelihood Estimation of Spatial Covariance Parameters, Mathematical Geology, 30(1), 95-108.
3. Olea, R., 2006. "A six-step practical approach to semivariogram modeling, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment", 20, 307-318.
4. A. Pavlides, D.T. Hristopulos, Z. Agioutantis, K. Kavouridis and Ch. Roumpos, 2007. A geostatistical study of lignite spatial variations in the multilayer deposit of the Amyndeo mine in Northern Greece, In 3rd International Conference on Sustainable Development Indicators in the Minerals Industry (edited by Z. Agioutantis and K. Komnitsas), pp. 137-144. Heliotopos Conferences.
5. Δεληγιαννίδου Π., Ανάλυση γεωτρητικών δεδομένων για το ορυχείο Αμυνταίου. Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Απρίλιος 2006.
6. A. Pavlides, D.T. Hristopulos, Z. Agioutantis, K. Kavouridis, Ch. Roumpos, 2008. Comparison of lignite reserves estimates in the multilayer deposit of the Amyndeo mine. In International workshop on Geoenvironment and Geotechnics (edited by Z. Agioutantis and K. Komnitsas), pp. 231-236. Heliotopos Conferences.
7. Cressie, N. and D.M. Hawkins, 1980. Robust estimation of the semivariogram, I: Math. Geology, 12(2), p. 115-125.
8. Cressie, N., 1990. The origins of kriging, Mathematical Geology, 22(3), 239-252.
9. Hristopulos, D.T., 2003. Spartan Gibbs random field models for geostatistical applications, SIAM Journal of Scientific Computing 24 (6), 2125-2162.

10. Kitanidis, P.K., 1987. Parametric estimation of covariances of regionalized variables, Water Resources Bull., 23(4), 671-680.

11. Moyeed, R.A. and A. Papritz, 2002. An empirical comparison of kriging methods for nonlinear spatial point prediction, Mathematical Geology, 34(4), 365-386.

12. Stein, M.L., 1999. Interpolation of Spatial Data. Springer, New York.

13. Γαλετάκης Μ., Προσδιορισμός της ποιότητας λιγνίτη που εξορύσσεται με τη συνεχή μέθοδο εκμετάλλευσης από πολυστρωματικά κοιτάσματα. Διδακτωρική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, 1996.

14. M. Zukovic and D.T. Hristopulos, 2008. "Environmental Time Series Interpolation Based on Spartan Random Processes", Atmospheric Environment, 42(33), 7669–7678.

15. A. Chorti and D. T. Hristopulos, 2008. "Non-parametric Identification of Anisotropic (Elliptic) Correlations in Spatially Distributed Data Sets", IEEE Transactions on Signal Processing, 56(10), 4738-4751.

16. M. Zukovic and D.T. Hristopulos, 2008. "Spartan random processes in time series modeling," Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 387(15), 3995-4001.

17. S. Elogne, D. T. Hristopulos, M. Varouchakis, 2008. "An application of Spartan spatial random fields in environmental mapping: focus on automatic mapping capabilities," Stochastic Enviromental Research and Risk Assessment, 22(5), 633-646

18. D. T. Hristopulos and S. Elogne, 2007. "Analytic properties and covariance functions for a new class of generalized Gibbs random fields," IEEE Transactions on Information Theory, 53(12), 4467-4679.

19. D. T. Hristopulos, 2006. "Spatial random field models inspired from statistical physics with applications in the geosciences," Physica A: Statistical Mechanics and its Applications (1), pp. 211-216.

20. D. T. Hristopulos, 2005. “Spartan Gaussian random fields for geostatistical applications: non-constrained simulations on square lattices and irregular grids, Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 5(2), 149-164.

21. D. T. Hristopulos, 2002. “New Anisotropic Covariance Models and Estimation of Anisotropic Parameters Based on the Covariance Tensor Identity,” Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 16(1), 43-62 (2002)

22. Lilliefors H. W., 1967. “on the Kolmogorov – Smirnov test for normality with mean and variance unknown”, Journal of the American Statistical Association 62 (318), pp. 399-402

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

Στο παράρτημα αυτό δίνονται διαγράμματα των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν στα κεφάλαια 3, 4 και 5 προς ευκολία του αναγνώστη. Οι σημαντικότεροι αλγόριθμοι αυτών των διαδικασιών δίνονται στο επόμενο παράρτημα.

Διαδικασία Κεφαλαίου 3:

1. Αξιολόγηση των γεωτρήσεων με τα απλοποιημένα κριτήρια που δίνονται στην αρχή του κεφαλαίου 3.
2. Υπολογισμός συνολικού πάχους λιγνίτη (σύμφωνα με τα κριτήρια) για κάθε γεώτρηση.
3. Ανάλυση βασικών στατιστικών μεγεθών για το πρώτο σύνολο δεδομένων (Πίνακας 3.1)
4. Προσδιορισμός παραμέτρων του πολυωνύμου δευτέρου βαθμού της τάσης, υπολογισμός του συντελεστή συσχέτισής τους με τα δεδομένα και εφαρμογή του Lilliefors test.
5. Εκτίμηση εμπειρικών ημιβαριογραμμάτων σε διαφορετικές κατευθύνσεις με την ευσταθή εκτιμήτρια ημιβαριογράμματος. Κάθε σημείο του εμπειρικού ημιβαριογράμματος απαιτείται να έχει τουλάχιστον 50 ζεύγη για να θεωρηθεί η εκτίμηση του ημιβαριογράμματος στο σημείο αυτό αξιόπιστη.
6. Εκτίμηση της ανισοτροπίας που παρατηρείται με την μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας.
7. Επανάληψη των βημάτων 3 με 5 για το δεύτερο σύνολο δεδομένων, από όλη την περιοχή του ορυχείου. Δεν παρατηρείται ανισοτροπία.
8. Εκτίμηση του πανκατευθυντικού πειραματικού μοντέλου ημιβαριογράμματος.
9. Προσαρμογή του εκθετικού, του γραμμικού, του γκαουσιανού και του σπαρτιάτικου μοντέλου ημιβαριογράμματος στο πειραματικό ημιβαριόγραμμα του βήματος 8, με τη μέθοδο των ζυγισμένων ελαχίστων τετραγώνων. Σύγκριση των τετραγωνικών σφαλμάτων των εξεταζόμενων μοντέλων ώστε να επιλεχθεί το βέλτιστο μοντέλο.
10. Επιλογή του Σπαρτιάτικου μοντέλου.
11. Εκτίμηση της γειτονιάς Kriging με χρήση διασταυρωτικής επαλήθευσης (cross validation).

Διαδικασία Κεφαλαίου 4:

1. Εκτίμηση αποθεμάτων για την εξοφλημένη περιοχή με την μέθοδο των πολυγώνων Voronoi. (136 Mt)
2. Εκτίμηση της ποσότητας λιγνίτη που βρίσκεται στην υπό εξόρυξη δυτική πλευρά της εξοφλημένης περιοχής και αφαίρεσής του από την εκτίμηση. (11 – 15 Mt)
3. Υπολογισμός της υπερεκτίμησης σε 18-20%.
4. Εκτίμηση αποθεμάτων για όλο το ορυχείο με την μέθοδο των πολυγώνων Voronoi. (287 Mt).
5. Αφαίρεση της θεωρούμενης υπερεκτίμησης (20%) από την εκτίμηση. $2{,}3\cdot10^{8}$ Mt. Η πρόβλεψη δίνεται σε δεκάδες Mt.
6. Διακριτοποίηση του διαστήματος σε 2000 τάξης απόστασης. Υπολογισμός της τιμής του σπαρτιάτικου μοντέλου για τις τάξης αυτές και δημιουργεία πίνακα αναφοράς (LUT).
7. Δημιουργία χάρτη εκτίμησης συνολικού πάχους στρωμάτων λιγνίτη (που πληρούν τα κριτήρια του κεφαλαίου 3) με την μέθοδο Ordinary Kriging σε πλέγμα 100 x 100 με μέγεθος κελιού 52m x 32 m.
8. Δημιουργία χάρτη εκτίμησης της ακρίβειας της πρόβλεψης.
9. Εκτίμηση των τιμών δύο σημείων (από τα 8500 εντός του ορυχείου) από το μέσο όρο των γειτονικών κελιών. Η μέθοδος δεν μπορούσε να δώσει εκτίμηση για τα δύο αυτά σημεία του πλέγματος λόγω αριθμιτικών σφαλμάτων διακριτοποίησης.
10. Εκτίμηση και αφαίρεση λιγνίτη που βρίσκεται έξω από τα όρια του ορυχείου. (4,5 Mt).
11. Εκτίμηση της μάζας λιγνίτη από τον χάρτη εκτίμησης του συνολικού πάχους του βήματος 7. (251 Mt)
12. Αφαίρεση της θεωρούμενης υπερεκτίμησης (20%) από την πρόβλεψη του βήματος 11. ($2{,}0\cdot10^{8}$ Mt).

13. Υπολογισμός αποθεμάτων από την μέση τιμή των δεδομένων επί την επιφάνεια του ορυχείου. (209 Mt).
14. Αφαίρεση της θεωρούμενης υπερεκτίμησης (20%) από την πρόβλεψη του βήματος 13. ($1{,}7 \cdot 10^8$ Mt).
15. Επανάληψη του βήματος 13 10000 φορές αφαιρώντας τυχαία κάθε φορά 50 γεωτρήσεις από τα δεδομένα. Τα αποτελέσματα θεωρείται πως ακολουθούν την κανονική κατανομή και έχουν τιμές μεταξύ 201,1 Mt και 219,2 Mt.

Διαδικασία κεφαλαίου 5

1. Καθορισμός αριθμού λιγνιτικών στρωμάτων ανά γεώτρηση με τα κριτήρια του κεφαλαίου 5.
2. Αφαίρεση 18 cm λιγνίτη ανά θεωρούμενο στρώμα (όπως προκύπτουν από το βήμα 1) από το συνολικό πάχος λιγνίτη της κάθε γεώτρησης ώστε να βρεθούν τα τροποποιημένα δεδομένα.
3. Εκτίμηση με την μέθοδο των πολυγώνων Voronoi της συνολικής ποσότητας λιγνίτη που δεν λαμβάνεται λόγω περιορισμού των μηχανημάτων εξόρυξης για την εξοφλημένη περιοχή (8 Mt) και όλη την περιοχή του ορυχείου (18 Mt).
4. Υπολογισμός του δείκτη εκμεταλλευσιμότητας όπως ορίζεται στην ενότητα 5.2 για όλα τα θεωρούμενα στρώματα όπως προκύπτουν από το βήμα 1.
5. Επανεκτίμηση του συνολικού πάχους λιγνίτη ανά γεώτρηση (όπως προκύπτει από το βήμα 2) απορρίπτοντας στρώματα με δείκτη εκμεταλλευσιμότητας μικρότερο από 1/12.
6. Επανάληψη των βημάτων 7-11 της διαδικασίας του κεφαλαίου 3 με χρήση των τροποποιημένων δεδομένων όπως προκύπτουν από το προηγούμενο βήμα.
7. Επανάληψη των βημάτων 4, 6 με 9, 13 και 15 της διαδικασίας του κεφαλαίου 4 με χρήση των τροποποιημένων δεδομένων του βήματος 5.
8. Δημιουργία διαγράμματος Voronoi για να γίνει εμφανής η μείωση του συνολικού πάχους λιγνίτη της κάθε γεώτρησης στο σύνολο δεδομένων που προκύπτουν από το βήμα 5 σε σχέση με το σύνολο δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο 4.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΣΤΟ MATLAB 6.5

Στο παράρτημα ΙΙ δίνονται οι σημαντικότεροι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν σε περιβάλλον matlab 6.5. Λόγω περιορισμού του χώρου δεν δίνονται τα δεδομένα καθώς είναι 430 σελίδες. Από μια πρώτη επεξεργασία των αρχικών δεδομένων προκύπτει η δομή που φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

<u>Πρόγραμμα δεδομένων 1</u>

Το πρόγραμμα διαβάζει από το αρχείο Amidaio.mat τα επεξεργασμένα δεδομένα. Αυτά περιλαμβάνουν μόνο τα στρώματα που πληρούν τα κριτήρια που αναφέρονται στο κεφάλαιο 3. Οι πίνακες είναι δύο, ο πίνακας Xrhs και ο πίνακας Geo που έχουν τις μορφές που φαίνονται παρακάτω.

Xrhs:

Κωδικός	X	Y	Z	0
Κωδικός	Οροφή (m)	Δάπεδο (m)	0	Τέφρα%
…	…	…	…	…
Κωδικός	Οροφή (m)	Δάπεδο (m)	0	Τέφρα%
Κωδικός	X	Y	Z	0
Κωδικός	Οροφή (m)	Δάπεδο (m)	0	Τέφρα%
…	…	…	…	…
Κωδικός	Οροφή (m)	Δάπεδο (m)	0	Τέφρα%

Δηλαδή στην πρώτη γραμμή της γεώτρησης δίνονται οι συντεταγμένες και στην συνέχεια τα στοιχεία του λιγνίτη. Οι γεωτρήσεις διαδέχονται η μία την άλλη.

Geo:

Κωδικός	X	Y	Z	0
Κωδικός	X	Y	Z	0

Δηλαδή ο πίνακας αυτός περιέχει τις θέσεις των γεωτρήσεων και μόνο αυτές.

Το πρόγραμμα βρίσκει ποιές γεωτρήσεις είναι στην περιοχή μελέτης απορρίπτοντας της άλλες και κάνει καλύτερη ταξινόμηση των δεδομένων ώστε να χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα (έξοδος) του προγράμματος ευκολότερα από τα υπόλοιπα προγράμματα.

<u>Αλγόριθμος</u>

```
t0=cputime;
load C:\MATLAB6p5\work\Amidaio\Amidaio
load C:\MATLAB6p5\work\Amidaio\Amidaio
AM=Xrhs;

n=length(AM);

% ************** Deiktes kai ba8h ************

% otan deik=1, exw gewt,X,Y,Z,0 (Z to ypsometro).
% Otan deik=0 exw gewt, orofh, dapedo, 0, tefra

deik=AM(:,1)>50000000;

% Ba8: [1 orofh dapedo paxos]
% an ola 1 tote grammh gewtrhs

Ba8=ones(n,4);
Ba8(deik==0,2:3)=AM(deik==0,2:3);
Ba8(:,4)=Ba8(:,3)-Ba8(:,2);

de=zeros(n,1);
gd=0;
```

```
for i=1:n
   if deik(i)==1
      gd=gd+1;
      de(i)=gd;
   end
end

gd=0;

% *************** ba80s strwmatos ****************

Z=zeros(n,2);

for i=1:n
   if deik(i)==1
      gd=gd+1;
   end
   if deik(i)==0
      gramh=find(de==gd);
      bba8=AM(gramh,4);
      Z(i,1)=bba8-Ba8(i,2);
      Z(i,2)=bba8-Ba8(i,3);
   end
end

Xrhs2=Xrhs;

Xrhs2(deik==0,2:3)=Z(deik==0,1:2);
Xrhs2(deik==1,5)=0;
Xrhs(deik==1,5)=0;

save Amidaio Geo Xrhs Xrhs2
clear all
load Amidaio.mat

AM=Xrhs2;

ng=length(Geo);
n=length(Xrhs2);

% otan deik=1, exw gewt,X,Y,Z,0 (Z to ypsometro).
% Otan deik=0 exw gewt, orofh, dapedo, 0, tefra

deik=AM(:,1)>50000000;
```

```
Geo(:,1)=AM(deik==1,1);

% de o au3on ari8mos ths gewtrhshs sto Xrhs2
gd=0;
for i=1:n
   if deik(i)==1
      gd=gd+1;
      de(i)=gd;
   end
end
gd=0;

% ************* paxh *************

paxos=zeros(n,1);


for i=1:n
   if deik(i)==0
      paxos(i)=Xrhs2(i,2)-Xrhs2(i,3);
   end
end

% ************* polygwno gewtrhs ***************
% opou d=1 APORIPTETAI h gewtrhsh! ! !
% Sthn arxh kanw to paralhlogrammo

X=Geo(:,2);
Y=Geo(:,3);

d(:,1)=X(:,1)>-25000 | X(:,1)<-28500;
d(d==0,1)=Y(d==0,1)<39500 | Y(d==0,1)>43500;

% SHMEIA: Ta shmeia A, B, ... tou polygwnou
% X Y exw balei sto telos kai to A gia na kleinei

%Allazw to oti exei gia Y akribeia monadwn. PX 43155
SHM=[-27450          43155
-28430          40659
-27950          40500
-27750          40500
-27700          39950
-25500          39500
-25150          41000
-25700          42475
-26300          43000
```

```
-27450          43155];

% ********* Eu8eies **************
%Y=AX+B

A= [2.5469
   -0.3312
         0
  -11.0000
   -0.2045
    4.2857
   -2.6818
   -0.8750
   -0.1348];

B= [1.1305
    0.3124
    0.4050
   -2.6475
    0.3428
    1.4879
   -0.2645
    0.1999
    0.3946]*10^5;

d(d==0,1)=A(1)*X(d==0,1)+B(1)<Y(d==0,1);
d(d==0,1)=A(2)*X(d==0,1)+B(2)>Y(d==0,1) & X(d==0,1)<-27950;
d(d==0,1)=A(3)*X(d==0,1)+B(3)>Y(d==0,1) & X(d==0,1)<-29750;
%d(d==0,1)=X(d==0,1)<-27700 & Y(d==0,1)<40200; % To A(4),B(4)
d(d==0,1)=A(4)*X(d==0,1)+B(4)>Y(d==0,1) & Y(d==0,1)<40500;
d(d==0,1)=A(5)*X(d==0,1)+B(5)>Y(d==0,1);
d(d==0,1)=A(6)*X(d==0,1)+B(6)>Y(d==0,1);
d(d==0,1)=A(7)*X(d==0,1)+B(7)<Y(d==0,1);
d(d==0,1)=A(8)*X(d==0,1)+B(8)<Y(d==0,1);
d(d==0,1)=A(9)*X(d==0,1)+B(9)<Y(d==0,1);


clear Geo2
Geo2=Geo(d==0,:);

gd=0;
j=0;
for i=1:n
    if deik(i)==1
        gd=gd+1;
    end
```

```
    if d(gd)==0
        j=j+1;
        Xrhs3(j,:)=Xrhs2(i,:);
    end
end

figure
%plot(Geo(:,2),Geo(:,3),'r.')
hold on
plot(Geo2(:,2),Geo2(:,3),'.')
plot(SHM(:,1),SHM(:,2),'*')
plot(SHM(:,1),SHM(:,2))
hold off

save Amidaio Geo Geo2 Xrhs Xrhs2 Xrhs3 SHM

Tol=cputime-t0
```

Με μερικά ακόμα προγράμματα αυτής της μορφής δημιουργείται το cell των γεωτρήσεων CGEO και ο πίνακας των παχών paxos. Το CGEO αποτελείται από έναν πίνακα ανά γεώτρηση. Η διαμόρφωση του κάθε πίνακα μέσα στο CGEO είναι ίδια με του πίνακα Xrhs2 αλλά κάθε γεώτρηση έχει τον δικό της πίνακα. Το CGEO και το paxos σώζονται στο Amidaio.mat.

Πρόγραμμα δεδομένων 2

Το πρόγραμμα αυτό διαβάζει από το Amidaio.mat, αφαιρεί την ρύπανση και εφαρμόζει τον δείκτη εκμεταλλευσιμότητας στα δεδομένα. Δημιουργεί τον πίνακα DEIK των δεικτών για τα στρώματα από το δεύτερο και κάτω της κάθε γεώτρησης. Το πρώτο στρώμα θεωρείται ότι λαμβάνεται πάντα. Το cell STRWMA, στην πρώτη γραμμή έχει τον κωδικό και τα X, Y, Z της κάθε γεώτρησης. Στην δεύτερη γραμμή έχει τα πάχη των στρωμάτων ανά γεώτρηση. Στις γραμμές 3, 4 έχει τις οροφές και τα δάπεδα των στρωμάτων.

Αλγόριθμος

```
t0=cputime;
load C:\MATLAB6p5\work\Amidaio\Amidaio.mat
load paxos
AM=Xrhs3;

ng=length(Geo2);
n=length(Xrhs3);

% otan deik=1, exw gewt,X,Y,Z,0 (Z to ypsometro).
% Otan deik=0 exw gewt, orofh, dapedo, 0, tefra

deik=AM(:,1)>50000000;

% ***************** Cell Deiktwn **********************
% nge to length ths geotrhshs
% apoes h eswterikh apostash ths gewtrhshs pou deixnei
% to diafora meta3y ths apostashs tou panw dapedou kai
% ths katw orofhs
% dees o eswterikos logos tou ka8e strwmatos lignith
% me ta endiamesa gia na bgei. +0.01 gia na diairhte
% Cell deiktwn CDE:
% exei # X Y Z paxos; apoes dees 0 0 0 gia ka8e gewt
% Ta apoes, dees aforoun ta EXTRA apo to prwto lignit
% strwma. Etsi cell to CDE mporei na exei mono mia
% gramh

CDE=cell(1,ng);

for i=1:ng

Ge=CGEO{i};
[nge mge]=size(Ge);

apoes=Ge(2:(nge-1),3)-Ge(3:nge,2);
dees=apoes./Ge(3:nge,6);

CDE{i}(1,:)=CGEO{i}(1,1:4);
CDE{i}(1,5)=paxos(i,4);
CDE{i}(2:nge-1,1)=apoes;
CDE{i}(2:nge-1,2)=dees;
CDE{i}(2:nge-1,3:5)=0;
end

clear apoes dees Ge nge mge i

% ************ Enopoihsh Strwmatwn *****************
```

```
% STR o pinakas twn strwmatwn.
% Ka8e grammh strwma, ka8e sthlh gewtrhsh
% Me deikth< 1/1 allazei strwma. Estw 20 strwmata

STR=zeros(20,ng);
dapedo=zeros(20,ng);
orofh=zeros(20,ng);

for i=1:ng

gram=1;
Ge=CGEO{i};
[nge mge]=size(Ge);

% Prwta STR(gram,i) wste sto prwto strwma na eixei
% panta toulaxistwn thn 1h lignitikh
% O elegxos me to CDE koita thn epomenh grammh afou
% to CDE(j) einai mia grammh parakatw apo to CGEO(j)
% Afou einai dapedo(j)-orofh(j+1)

for j=2:nge-1
   STR(gram,i)=STR(gram,i)+CGEO{i}(j,6);
   if CDE{i}(j,2)>1
      dapedo(gram,i)=CGEO{i}(j,3);
      orofh(gram+1,i)=CGEO{i}(j+1,2);
      gram=gram+1;
   end
end

% pros8etw kai to teleutaio paxos.
STR(gram,i)=STR(gram,i)+CGEO{i}(nge,6);
dapedo(gram,i)=CGEO{i}(nge,3);
orofh(1,i)=CGEO{i}(2,2);

end

clear Ge i j nge mge gram

% ************** Morfopoihsh ************************
% Afairw ta 18 cm apo to paxos strwmatos
STR(:,:)=STR(:,:)-0.18;
a=STR<0;
STR(a)=0;
clear a

STRWMA=cell(4,ng);
```

```
for i=1:ng
   STRWMA{1,i}=CDE{i}(1,:);
   STRWMA{2,i}=STR(:,i);
   STRWMA{3,i}=orofh(:,i);
   STRWMA{4,i}=dapedo(:,i);
end


% ***************** Deikths ************************
% ste to paxos steirwn
% apoript o deikths katw apo ton opoio aporiptetai to strwma
% DEIK=-1 aporiptei strwma DEIK=0 den briskei strwma
[nd md]=size(STR);
ste=zeros(nd-1,md);
Apoript=1/12;

for j=1:md
   for i=1:nd-1
      if orofh(i+1,j)>0
         ste(i,j)=dapedo(i,j)-orofh(i+1,j);
      end
   end
end

DEIK=zeros(nd,md);

for j=1:md
   for i=nd-1:-1:1
      d=(sum(STR(i+1:nd,j)))/(sum(ste(i:nd-1,j)));
      if d>=Apoript
         DEIK(i+1,j)=d;
      elseif orofh(i+1,j)>0
         DEIK(i+1,j)=-1;
      end
      clear d
   end
end

ZER=DEIK==0;

% ka8arizw DEIK apo osa strwmata einai katw apo mh ekmetalleushma

for j=1:md
   cl=min(find(DEIK(:,j)==-1));
   DEIK(cl:nd,j)=-1;
end
```

```
DEIK(ZER==1)=0;

clear md nd cl ZER
save Amidaio Xrhs Xrhs2 Xrhs3 Geo Geo2 lign1 CGEO LIGN SHM CDE STRWMA
DEIK
save paxos2 paxos

Tol=cputime-t0
```

Στην συνέχεια τα δεδομένα έρχονται σε μορφή ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα προγράμματα που εκτιμούν την τάση και τα ημιβαριογράμματα. Δημιουργείται το αρχείο pedamid.mat που περιέχει τον πίνακα ped και δείκτες για το αν τα δεδομένα είναι λογαριθμημένα. Ο πίνακας ped έχει την παρακάτω διαμόρφωση για κάθε γεώτρηση:

Ped:

X	Y	υψόμετρο	Συνολικό πάχος στρώματος λιγνίτη (m)
…	…	…	…

Εκτίμηση Τάσης

Το πρόγραμμα αυτό διαβάζει από το Pedamid.mat, εκτιμά τις τάσεις, κανονικοποιεί τους άξονες και δημιουργεί τον πίνακα XTotal που χρησιμοποιείται στα επόμενα προγράμματα για να δώσει το πεδίο. Οι τάσεις που εκτιμά το πρόγραμμα είναι το πολυώνυμα πρώτου και δευτέρου βαθμού και το περιοδικό μοντέλο τάσης. Στο τέλος δίνεται η συσχέτιση των τριών μοντέλων τάσης με τα δεδομένα.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει επιλεγεί το πολυωνυμικό μοντέλο τάσης για την εξαγωγή της διακύμανσης.

Αλγόριθμος

```
t0=cputime;
load('Pedamid.mat');

%X1=X, Y1=Y, B1= ba8os, TD1 = paxos
```

```
% Standdev oi std wste na mporw na metatrepsw se metra

X1=Ped(:,1);
Y1=Ped(:,2);
B1=Ped(:,3);
TD1=Ped(:,4);

n=length(TD1);
maxtim=max(TD1);

Stdev=(std(X1)+std(Y1))/2;
 X2=(X1-mean(X1))/Stdev;
 Y2=(Y1-mean(Y1))/Stdev;
 B2=(B1-mean(B1))/std(B1);
 Standdev=[Stdev Stdev std(B1)
        mean(X1) mean(Y1) mean(B1)];

% Afairw to polywnymiko systatiko

S=zeros(n,6);
S(:,1)=1;
S(:,2)=X2;
S(:,3)=Y2;
S(:,4)=X2.^2;
S(:,5)=Y2.^2;
S(:,6)=X2.*Y2;

ATD=Regress(TD1,S);
MPol=S*ATD;

% Afairw to linear systatiko

SL=zeros(n,3);
SL(:,1)=1;
SL(:,2)=X2;
SL(:,3)=Y2;

ATDL=Regress(TD1,SL);
MLin=SL*ATDL;



% ************* Periodiko montelo ***************

LB(1,1:15)=-inf;
UB(1,1:15)=inf;
```

```
LB(1,16:19)=-inf;
UB(1,16:19)=inf;


beta0=ones(1,19);

Tash=inline('sum((P3-  (x(1)+x(2).*P1+x(3).*P2+x(4).*P1.^2+x(5).*P2.^2+x(6).*P1.*P2
+x(7).*(sin(x(8).*P1+x(9)))                    +x(10).*(sin(x(11).*P2+x(12)))
+x(13).*(sin(x(14).*P1.*P2+x(15)))
+x(16).*P1.^3+x(17).*P2.^3+x(18).*P1.^2.*P2+x(19).*P1.*P2.^2  )  ).^2)',3);
bt=fmincon(Tash,beta0,[],[],[],[],LB,UB,[],[],X2,Y2,TD1);

MPer=bt(1)+bt(2).*X2+bt(3).*Y2+bt(4).*X2.^2+bt(5).*Y2.^2+bt(6).*X2.*Y2
+bt(7).*(sin(bt(8).*X2+bt(9)))                   +bt(10).*(sin(bt(11).*Y2+bt(12)))
+bt(13).*(sin(bt(14).*X2.*Y2+bt(15)))
+bt(16).*X2.^3+bt(17).*Y2.^3+bt(18).*X2.^2.*Y2+bt(19).*X2.*Y2.^2;

% ***************** Sygkriseis *****************

Diak=TD1-MPol;

SPer= corrcoef(TD1,MPer)
SPol= corrcoef(TD1,MPol)
SLin= corrcoef(TD1,MLin)

XTotal=[B2 X2 Y2 Diak];

save Ped1 X2 Y2 B2 Diak TD1 MPer MPol MLin XTotal bt ATD Standdev logged SHM


Tol=cputime-t0
```

Το Diak είναι το διάνυσμα της διακύμανσης. TD1 είναι το διάνυσμα των δεδομένων χωρίς να έχει αφαιρεθεί η μέση τιμή. Το XTotal είναι ο πίνακας που περιγράφει τα δεδομένα του πεδίου με την παρακάτω διαμόρφωση:

XTotal:

X	Y	υψόμετρο	Διακυμανση
…	…	…	…

Τα X, Y και το υψόμετρο είναι κανονικοποιημένα.

Πρόγραμμα υπολογισμού παραμέτρων Σπαρτιάτικου μοντέλου

Το πρόγραμμα αυτό διαβάζει από το Ped1. Δίνει την εκτίμηση των παραμέτρων του Σπαρτιάτικου μοντέλου και το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση με άλλα μοντέλα βαριογραμμάτων (όπως το εκθετικό). Οι αρχικές συνθήκες είναι παρμένες από τα αποτελέσματα του SDIMI 2007. Τα αποτελέσματα είναι με τη μορφή η_1, ξ, *Kc*. Το η_0 δεν εκτιμάται καθώς υπολογίζεται από τις άλλες παραμέτρους.

Αλγόριθμος

```
% *************** Spartan Variogram *********************
% If there are less than a 40 pairs in a class, the class is ignored.
% Needs: Ped1
%
% INPUT:
% Number of Classes
% Direction
% Tolerance (=pi for isotropic)
%
% OUTPUT:
% APOT=[Lags; pairs per class; Variogram]
% NOTE: The program does NOT work well for very small distances.
% NOTE: The program works for Directions between (0, pi)
% NOTE: Sill = 32.2


function [betaexp1]=variospar4(Lags,f,tole);

f2=f*360/2/pi;
f3=(f-pi/2)*360/2/pi;
tole2=tole*360/2/pi;
Dir1=num2str(f2);
Dir2=num2str(f3);
Direct=strcat(' Direction:',Dir1);
Direct2=strcat(' Direction:',Dir2);
Tole1=num2str(tole2);
Toleran=strcat(' Tolerance:',Tole1);
Titl=strcat(Direct,',',Toleran);
Tit2=strcat(Direct2,',',Toleran);
```

```
t0=cputime;

load ('Ped1')

n=length(Diak);
maxtim=max(Diak);

X=[zeros(length(Diak),1) X2 Y2 Diak];

[n m]=size(X);
nx=X(:,2);
ny=X(:,3);
value=X(:,4);

% ************ YPOLOGISMOS GWNIWN ******************
%mint, maxt to min kai to max ths cotan(f)
%minf, maxf to min kai to max ths f
%tole tolerance

minf=f-tole;
maxf=f+tole;

% ************ YPOLOGISMOS APOSTASEWN **************
% AP h apostash meta3y toy KA8E shmeioy m'ola t'alla


AP=zeros(n,n);
for i=1:n
   a1=nx(i); b1=ny(i);
   for j=1:n
      a2=nx(j); b2=ny(j);
      AP(i,j)= sqrt((a1-a2)^2+(b1-b2)^2);
   end
end

% ************ YPOLOGISMOS TA3EWN ****************

rcl=zeros((Lags+1),1);
MAP=0.25*max(max(AP))/2;
lagd=MAP/Lags/2;

%lagd h hmiapostash meta3y twn lags kai h aktina ths ta3hs
%MAP h megisth apostasth
% UB To anw orio gia tis times pou prosdiorizontai meta
% LB to katw orio tia tis times pou prosdiorizontai meta
```

```
% [h1 cor.length kc]
 LB=[5 0.05 1];
 UB=[5 0.1 40];

% Kentra
rcl(1)=0;
for i=2:Lags+1
   rcl(i)=rcl(i-1)+2*lagd;
end

% ********* PROSDIORISMOS SHMEIWN SE TA3H *******
%Prwtovar: to a8roisma twn tetragwnwn twn diaforwn
% NOTE: to ka8e zeugos metrietai 2 fores, alla diaireitai kai 2 fores
% class prosdiorizei se poia ta3h einai h sygkekrimenh apostash
% pointsinclass prosdiorizei posa zeugh einai sth ta3h
% Bazw kai mege8os apokophs alla to 8ewrw 0.0001
% Sto dy bazw +0.000001 gia na mhn diairw me 0 se zeugos
class=zeros(n,n);
t=zeros(n,n);
prwtovar=zeros(2*(Lags+1),1);
pointsinclass=zeros(Lags+1,1);
BG(n,n)=NaN;
for i=1:n
   for j=1:n
      class(i,j)=round(AP(i,j)/(2*lagd))+1;
      if class (i,j)<Lags+2
         dx=nx(j)-nx(i);
         dy=ny(j)-ny(i)+0.000001;
         t(i,j)=acot(dx/dy+0.000001);
         if minf<t(i,j)
            if t(i,j)<maxf
               if AP(i,j)>0.0001
                  pointsinclass(class(i,j))=pointsinclass(class(i,j))+1;
                  prwtovar(class(i,j))=prwtovar(class(i,j))+(abs(value(i)-value(j)))^0.5;
               end
            end
         end
         if minf-pi<t(i,j)
            if t(i,j)<maxf-pi
               if AP(i,j)>0.0001
                  pointsinclass(class(i,j))=pointsinclass(class(i,j))+1;
                  prwtovar(class(i,j))=prwtovar(class(i,j))+(abs(value(i)-value(j)))^0.5;
               end
            end
         end
```

```
        end
    end
end

% ********* YPOLOGISMOS BARIOGRAMMATOS **********
% Ypologizei to robust sta stis classes twn apostasewn.

var=zeros(Lags+1,1);
secvar=zeros(Lags+1,1);

for i=1:(Lags+1)
    secvar(i)=(prwtovar(i)/pointsinclass(i))^4;
    var(i)=secvar(i)/(0.494/pointsinclass(i)+0.457)/2;
    if pointsinclass(i)<40
        var(i)=NaN;
    end
end
distance=zeros(Lags+1,1);
for i=2:Lags+1
    distance(i)=(i-1)*2*lagd;
end
DDD(1:Lags+1)=0;
for i=1:2:2*Lags+2
    distance2(i/2+0.5)=i*lagd;
end

Variogram=var
Pairsperclass=pointsinclass
sum(Pairsperclass)
APOT1=[zeros(Lags+1,1) Pairsperclass var];
for i=1:Lags+1
APOT1(i,1)=(i-1)*2*lagd;
end

% ********* KA8ARISMOS VARIOGRAMMATOS **********
% Diwxnw apo to var ths times NaN
G=isnan(Variogram);
Variogram(G==1)=[];
distance(G==1)=[];
Pairsperclass(G==1)=[];


% ****** YPOLOGISMOS SPARTIATIKOY MONTELOY *******
% Ypologizw kai plotarw to spartiatiko montelo
% H h0 den einai mesa afou ypologizetai apo tis alles
% parametrous.
```

```
% betaexp1 einai oi parametroi tou spartiatikou apo to programma
% to varioth1 einai to montelo pou prokyptei apo to programma

% [h1 cor.length kc]
% sill h s^2 pou briskw apo to peiramatiko!
beta0=[2.26 0.06 32.13];
sill=32.2;

OPTIONS=optimset('MaxFunEvals',200);
betaexp1=fmincon(@chi,beta0,[],[],[],[],LB,UB,[],OPTIONS,sill,Pairsperclass,Variogra
m,distance);
r=linspace(0,max(distance),80);
varioth1=modspar(betaexp1,sill,r);
betaexp1

figure(2)
plot(distance, Variogram, 'b*');
hold on;
plot(r,varioth1);
plot(distance2,DDD,'r*')
Title1=strcat('Spartan model,',Titl);
title(Title1)
hold off

 % ***************** Program *****************
 h1=betaexp1(1);  rx=betaexp1(2);  kc=betaexp1(3);
 syms k;
 J=besselj(0,k*dis);
 B=k*J;
 C=1+h1*rx^2*k^2+rx^4*k^4;

 Inte=-(atanh(rx^2*(2*kc^2*rx^2+h1)/(-4*rx^4+h1^2*rx^4)^(1/2))-atanh(h1*rx^2/(-
4*rx^4+h1^2*rx^4)^(1/2)))/(-4*rx^4+h1^2*rx^4)^(1/2);
 A=sill/Inte;
 HT=double(int(B/C,0,kc));

 chi1=A*(Inte-HT);

 % Apotelesmata sfalmatos

 errorprogr=sum( ppc.*(var-chi1).^2)

 betaexp1

Tol=cputime-t0
```

```
% *******************************************
% ************* Functions *******************
% *******************************************

% **************** Chi **********************

function [chi,deikths]=chi(beta0,sill,Pairsperclass,Variogram,distance);
h1=beta0(1);  rx=beta0(2);  kc=beta0(3);
ppc=Pairsperclass; var=Variogram; dis=distance;

 syms k;
 J=besselj(0,k*dis);
 B=k*J;
 C=1+h1*rx^2*k^2+rx^4*k^4;

 Inte=        -(atanh(rx^2*(2*kc^2*rx^2+h1)/(-4*rx^4+h1^2*rx^4)^(1/2))-atanh(h1*rx^2/(-
4*rx^4+h1^2*rx^4)^(1/2)))/(-4*rx^4+h1^2*rx^4)^(1/2);
 A=sill^2/Inte;
 HT=double(int(B/C,0,kc));

 A=sill/Inte;
chi1=A*(Inte-HT);
chi=sum( ppc.*(var-chi1).^2)
 beta0

 % ************** modspar *******************

 function [modspar]=modspar(beta,sill,r);
 h1=beta(1);  rx=beta(2);  kc=beta(3); dis=r;

syms k;
 J=besselj(0,k*dis);
 B=k*J;
 C=1+h1*rx^2*k^2+rx^4*k^4;

 Inte=-(atanh(rx^2*(2*kc^2*rx^2+h1)/(-4*rx^4+h1^2*rx^4)^(1/2))-atanh(h1*rx^2/(-
4*rx^4+h1^2*rx^4)^(1/2)))/(-4*rx^4+h1^2*rx^4)^(1/2);
 A=sill/Inte;
 HT=double(int(B/C,0,kc));

 modspar=(A*(Inte-HT));
```

Στο τέλος της διαδικασίας αυτής γίνεται διασταυρωμένη επαλήθευση με διάφορα μεγέθη γειτονιάς ώστε να βρεθεί το μοντέλο που ταιριάζει καλύτερα στην μέθοδο Ordinary Kriging. (Πρβλ Kriging)

Πρόγραμμα υπολογισμού της Μέγιστης πιθανοφάνειας

Το πρόγραμμα αυτό διαβάζει από το Ped1. Δίνει την εκτίμηση των παραμέτρων του ανισοτροπικού εκθετικού μοντέλου με φαινόμενο κόκκου. Τα αποτελέσματα είναι της μορφής ξ_x, ξ_y, *Co*, γωνία φ

Αλγόριθμος

```
% ***********************************************************
% *********************** Maximum Likehood *******************
% ***********************************************************

function [Beta]=Maxlik3

t0 = cputime;

load ('C:\MATLAB6p5\work\Amidaio\Ped1')

X=XTotal;

n=length(X);
value=X(:,4);
EKT=zeros(n,1);
Beta=zeros(n,4);

maxAP=7;
minAP=0.01;

% ********************************************
% *************** SHMEIO KANNABOY *************
% ********************************************
```

```
% Apo edw pleon douleuw se ka8e shmeio tou deigmatos.
% xshm, yshm oi syntetagmenes tou shmeiou

AP=zeros(n,n);
for i=1:n
    a1=X(i,2); b1=X(i,3);
    for j=1:n
        a2=X(j,2); b2=X(j,3);
        AP(i,j)= sqrt((a1-a2)^2+(b1-b2)^2);
    end
end

% ********** KATASKEYH PINAKA DEDOMENWN ********
% Edw ftiaxnw ton pinaka me ta shmeia ths geitonias
% sgt ta shmeia ths geitonias, PLG to plh8os geiton

sgt=0;
clear x y v
APxg=zeros(n,n);
APyg=zeros(n,n);
v=value;
for i=1:n
  for j=1:n
          APxg(i,j)=(X(i,2)-X(j,2));
          APyg(i,j)=(X(i,3)-X(j,3));
  end
end

LB=[0.01 0.01 0 0];
UB=[maxAP/2 maxAP/2 var(value) pi];


% ************* elaxistopoihsh ************
% theta: rx ry Co gwnia(fi) se rad

theta0=[0.2098    0.3992    2.6493    1.7351];

OPTIONS = optimset('MaxFunEvals',500);
 [Theta,FV,SD,o]=fmincon(@L,theta0,[],[],[],[],LB,UB,[],OPTIONS,n,APxg,APyg,v)
% [Theta,FV,SD,o]=fminunc(@L,theta0,OPTIONS,n,APxg,APyg,v);

Beta=Theta;
o
FV
Tol=cputime-t0
disp('Anisotropy ratio:');Beta(1)/Beta(2)
```

```
disp('Angle:');Beta(4)*180/pi

% ****************************************
% ************* Functions *******************
% ****************************************

function [L, Deikths]=L(theta0,n,APxg,APyg,v);

disp('allagh')
 rx=theta0(1); ry=theta0(2); C0=theta0(3); fi=theta0(4);

distr=sqrt((APxg/rx).^2+(APyg/ry).^2 +2*(APxg.*APyg/rx/ry*cos(fi)));
C1=exp(-distr);
Cov=C0*eye(size(distr))+C1;
H=v'*inv(Cov)*v;

L=log(det(Cov))+n*log(H/n);
```

Πρόγραμμα υπολογισμού πολυγώνων Voronoi

Οι συντεταγμένες των σημείων κατοπτρισμού βρέθηκαν με το AUTOCAD 2004. Το πρόγραμμα δίνει τα πολυγωνα Voronoi για όλο το ορυχείο. Στο τέλος επιστρέφει τα αποθέματα σαν Apo8.

Αλγόριθμος

```
% **************  Voronoi diagram **************
% Ypolgizei kai area
% OLO to Oryxeio

load ('C:\MATLAB6p5\work\Amidaio\Ped1')
t0=cputime;

% P ta x,y twn gewtrhsewn

X2=X2*Standdev(1,1)+Standdev(2,1); Y2=Y2*Standdev(1,2)+Standdev(2,2);

% ************** pseudoshmeia *******************

Bord=[min(X2)-300 max(X2)+300 min(Y2)-300 max(Y2)+300];
n=length(X2);
```

```
Pseud=[-25629.2922  42618.2724
       -25510.1798  42677.7889
       -25533.0577  42467.4615
       -25523.7210  42340.6040
       -25483.3245  42122.9044
       -25421.2849  42019.2073
       -25420.8484  41956.0820
       -25375.4484  41798.2820
       -25264.2456  41668.3745
       -25247.7122  41513.3531
       -25049.5848  41270.8752
       -25099.6579  41096.5259
       -25040.7323  41028.4981
       -25093.6428  40982.6671
       -27375.0763  43375.0146
       -27286.6627  43326.8893
       -27099.5919  43116.8667
       -26923.0964  43238.4782
       -26733.9959  43190.7081
       -26615.3893  43052.3699
       -26392.2321  43071.9878
       -26301.6251  43024.2973
       -26278.2655  43010.9823
       -26190.2389  43001.5841
       -26052.1327  42896.9912
       -25923.8673  42783.0088
       -25780.9978  42612.7168
       -25765.4137  42744.9558
       -25602.1128  42610.4425
       -27322.5506  43354.9541
       -27418.5360  43385.2825
       -27613.7510  43403.0617
       -27786.7861  43409.1341
       -27870.7178  43307.1760
       -27959.7107  43204.5979
       -28261.5375  43470.1269
       -27888.3202  43644.4654
       -27903.1266  43647.5914
       -27714.4553  43649.3616
       -28570.1871  43671.9892
       -28296.3380  43699.4060
       -28130.4503  43704.9058
       -27995.3458  43793.9663
       -28464.2000  43468.0920
       -28637.7692  43621.8897
```

-28830.5255	43425.4462
-28951.9352	43526.7807
-29224.7320	43580.3243
-29412.5742	43430.3766
-29557.8751	43101.9597
-29517.8769	42706.4553
-29870.0106	42616.8849
-30072.0059	42852.6028
-30213.4466	42579.8345
-30252.8926	42331.9877
-30461.3805	42518.0383
-30490.1850	41964.6972
-30265.5038	41672.4320
-30591.4286	41710.8768
-30704.0291	41567.8589
-30916.3779	41322.9426
-30527.3017	41236.9383
-30795.4167	41031.0205
-31047.3330	40722.2888
-30963.0678	40413.8146
-30705.0027	39983.6909
-30406.7826	39781.5268
-29876.0449	39491.6865
-29950.7076	39298.3203
-29667.6895	39180.1772
-29432.0306	38814.1104
-29358.4835	38268.1554
-29240.1742	37975.5330
-30193.1239	39416.6875
-29591.2324	39475.1393
-29544.3455	39273.2318
-29243.8456	39334.5249
-28843.2179	39164.1211
-28475.6157	38753.8229
-28213.3287	38578.2367
-28938.7677	38922.7117
-28663.6180	39192.5373
-28340.2532	39482.9639
-27815.2547	39649.8548
-25552.2383	39508.1681
-25663.9106	39361.2147
-25869.4342	39378.3218
-26062.4814	39473.7576
-26135.0030	39599.3188
-26295.9370	39510.4189
-26619.6748	39449.4789

```
    -26984.5493  39500.2033
   -27193.5330  39648.9499
   -27296.9812  39633.3143
   -27486.4973  39663.1244
   -27658.9341  39878.1001
        -28020.6921  39877.5052
   -25041.5029  40991.0590
   -25081.3343  40910.3530
   -25144.1056  40941.3330
   -25064.0898  40775.8293
   -25175.4860  40696.9884
   -25186.0519  40578.4204
   -25187.0456  40425.0190
   -25225.8759  40323.7460
   -25318.9318  40157.7924
   -25311.5977  40037.0811
   -25384.0034  39942.3425
   -25310.4386  39813.4773
   -25328.7158  39629.5753
   -25448.2890  39488.9758];
% extran ta extra shmeia
% norig ta au8entika

extran=length(Pseud);
norig=n;
X2(n+1:n+extran)=Pseud(:,1);
Y2(n+1:n+extran)=Pseud(:,2);

for i=n+1:length(X2)
  TD1(i)=0;
  Diak(i)=0;
end

clear extran

P=[X2 Y2];


% ****************** Cells *********************

% V o pinakas twn points, C ta cells, n to mhkos tou C
% px gia to Cell 5, C{5} = 43, 6, 7, 1, 41
% ara to 5to apoteleitai apo V(43,:), V(6,:) ktl
% to ka8e cell einai sth seira tou X2,Y2 dhl to 5to
% antistoixei sth timh TD1(5)
% F o pinakas pou exei ta cells kai tis times
```

```
[V,C]=voronoin(P);

n=length(C);

D=C{1};
K=V(D,:);
tel=length(K);
KT=[K(1,1) K(1,2);K(tel,1) K(tel,2)];
clear D K

for i=1:n
   F{i,1}={C{i}};
   F{i,2}=TD1(i);
end

% Gia na dw ta F, px to F1
% F{1,1}{1} dinei to C{1}
% F{1,2} dinei to TD1(1)


% *****************************************
% *********** patching *********************
% *****************************************

% **************** Pedio *******************

figure(1)
axis(Bord)
%axis equal
title('Pedio')
for i = 1:n
if all(C{i}~=1)   % If at least one of the indices is 1,
                  % then it is an open region and we can't
                  % patch that.
patch(V(C{i},1),V(C{i},2),TD1(i));
end
end

COL1=[0.35:0.025:0.9];
COL=[COL1' COL1' COL1'];
clear COL1

colormap(COL)
colorbar
```

```
hold on
plot(X2(1:norig),Y2(1:norig),'k.')
plot(X2(norig+1:n),Y2(norig+1:n),'ko')
plot(SHM(:,1),SHM(:,2),'k')
hold off

% **************** Apo8emata ******************
% Ap ta apo8emata, Ar h area

Ar=zeros(n,1);
for i = 1:n
if all(C{i}~=1)   % If at least one of the indices is 1,
              % then it is an open region and we can't
              % patch that.
   P=polyarea(V(C{i},1),V(C{i},2));
      Ar(i)=P;
      clear P
   else
   end
   end
end


Ap=Ar.*TD1*1.2;
Apo8=sum(Ap)

Tol=cputime-t0
```

<u>Πρόγραμμα δημιουργείας LUTable για το Σπαρτιάτικο μοντέλο</u>

Για να συντομεύσουν οι πράξεις στο Kriging, δημιουργείται και σώζεται ένας Look Up Table όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 4.2.

<u>Αλγόριθμος</u>

```
% **************** SPARTAN CALCULATING *************
 % INPUT timgspar, r
 % beta [h1, rx, kc, sill]
 % n to length tou r
 % Prepei to mhkos tou r na einai 2xMaxAP afou mporei
 % 2 shmeia na einai ekaterw8en tou kentrou.
 % H prwth seira tou pinaka einai extra mhdenika
```

```
 t0=cputime;
 n=2000;
timgspar=[5.0000    0.0716   40.000 32.2]; r=linspace(eps,1.625,n)';
h1=timgspar(1);  rx=timgspar(2);  kc=timgspar(3); sill=timgspar(4); dis=r;

k=linspace(eps,kc,n)';
J=zeros(n,n);
B=zeros(n,n);

% ka8e grammh antistoixei se diaforetiko k, ka8e sthlh se diaf dis
for za=1:n
    J(za,:)=besselj(0,k(za)*dis)';
     B(za,:)=k(za)*J(za,:);
     C(za,1)=1+h1*rx^2*k(za)^2+rx^4.*k(za)^4;
end

 Inte=-(atanh(rx^2*(2*kc^2*rx^2+h1)/(-4*rx^4+h1^2*rx^4)^(1/2))-atanh(h1*rx^2/(-
4*rx^4+h1^2*rx^4)^(1/2)))/(-4*rx^4+h1^2*rx^4)^(1/2);
 A=sill/Inte;


for za=1:n
     HT(za)=sum(B(:,za)./C)*kc/n;
end

 Spartan=zeros(n,1)

 for i=1:n
  Spartan(i,1)=(A*(Inte-HT(i)));
  i
  r(i)
end

 LUTable=[r,real(Spartan)]
 LUTable(1,2)=eps;

 L1(length(LUTable)+1,1)=0;
 L2(length(LUTable)+1,1)=eps;
 L1(2:length(L1),1)=LUTable(:,1);
 L2(2:length(L2),1)=LUTable(:,2);
 LUTable=[L1 L2];

save SPLUT LUTable
Tol=cputime-t0
```

Πρόγραμμα για την μέθοδο Ordinary Kriging

Το πρόγραμμα αυτό επιστρέφει τα αποτελέσματα της μεθόδου Kriging με το Σπαρτιάτικο θεωρητικό μοντέλο και την χρήση του Look Up Table. Τα αποτελέσματα είναι η εκτίμηση της διακύμανσης (EKT), η τιμές του πεδίου (VAL), του σφάλματος του OK (SF) και τα σημεία της γειτονιάς (PLG) για κάθε σημείο του καννάβου.

Αλγόριθμος

```
% **************** Kriging *********************
%
%
% [EKT, PLG, VAL, SF]=Kriging(nx, ny)
% EKT h ektimhsh ths diasporas
% PLG to plh8os geitonwn
% VAL h ektimhsh ths timhs tou pediou
% SF to sfalma (OXI to tetragwn sfalma!)
% M h sta8era tou lagrance
% Pairnei to ped1

function [EKT,PLG,VAL,SF,M]=Kriging(nx,ny)

% value to dianisma twn timwn

t0 = cputime;

minAP=1.625/500;
maxAP=0.8;

load Ped1;
load SPLUT;
LUT=LUTable;

% floor(distance*160)+1 einai h seira tou LUT

clear MPol MPer

n=length(XTotal);
value=XTotal(:,4);
%Apokanonikopoihsh
```

```
%XTotal(:,2)=XTotal(:,2)*Standdev(1,1)                    +                    Standdev(2,1);
XTotal(:,3)=XTotal(:,3)*Standdev(1,2) + Standdev(2,2);

X=XTotal;
% PROSOXH! ny, nx gia grammes, sthles!


EKT=zeros(ny,nx);
SF=zeros(ny,nx);
minx=min(X(:,2))-0.05;
maxx=max(X(:,2))+0.05;
miny=min(X(:,3))-0.05;
maxy=max(X(:,3))+0.05;

xk=linspace(minx,maxx,nx);
yk=linspace(miny,maxy,ny);

% **********************************************
% **************** SHMEIO KANNABOY **************
% **********************************************
% Apo edw pleon douleuw se ka8e shmeio tou deigmatos.
% xshm, yshm oi syntetagmenes tou shmeiou

for LOOPi=1:ny
   for LOOPj=1:nx

xshm=xk(LOOPj);
yshm=yk(LOOPi);

AP= sqrt((xshm-X(:,2)).^2+(yshm-X(:,3)).^2);

% ********** KATASKEYH PINAKA DEDOMENWN ********
% Edw ftiaxnw ton pinaka me ta shmeia ths geitonias
% sgt ta shmeia ths geitonias, PLG to plh8os geiton

sgt=0;
clear x y v
x=NaN;
y=NaN;
v=NaN;
for i=1:n
   if AP(i)>minAP+ 0.00001
      if AP(i)<maxAP
         sgt=sgt+1;
         x(sgt,1)=X(i,2);
         y(sgt,1)=X(i,3);
```

```
          v(sgt,1)=X(i,4);
        end
    end
end

PLG(LOOPi,LOOPj)=sgt;

if sgt>2
    Xg=[zeros(sgt,1) x y v];
end


% ************* PINAKAS SYNDIASPORAS ************
% Cx o pinakas variogrammatwn
% disgeit oi apostaseis twn shmeiwn ths geitonias
% LUTrow se poia grammh tou LUT na koita3ei
% Brhka oti me floor(disgeit+617)+2 kalytero
% [x y] o pinakas twn syntetagmenwn twn shmeiwn ths geitonias
% squareform(pdist([x y])) enas pinakas ths morfhs
% [apost(1,1) apost(1,2) apost(1,3)...
%  apost(2,1) apost(2,2) apost(2,3)
%   ...

if sgt>2
Cx=zeros(sgt+1,sgt+1);
dis1=pdist([x y]);
disgeit=squareform(dis1);

LUTrow=floor(disgeit*615*2)+2;

for i=1:sgt
    for j=1:sgt
         Cx(i,j)=LUT(LUTrow(i,j),2)/2 +LUT(LUTrow(i,j)+1,2)/2;
    end
end

Cx(:,sgt+1)=1;
Cx(sgt+1,:)=1;
Cx(sgt+1,sgt+1)=0;
end
clear LUTrow

% ************** PINAKAS Cu ********************

if sgt>2
Cu=zeros(sgt+1,1);
```

```
disgeit=sqrt((x-xshm).^2+(y-yshm).^2);
LUTrow=floor(disgeit*615*2)+2;

for i=1:sgt
   Cu(i)=LUT(LUTrow(i),2)/2 +LUT(LUTrow(i)+1,2)/2;
end

Cu(sgt+1)=1;
end


% **************** PINAKAS L ********************
% O pinakas twn gramikwn barwn, sto telos exei
% th sta8era m.

if sgt>2
   L=inv(Cx)*Cu;
end


% ****************** EKTIMHSH *******************

EKT(LOOPi,LOOPj)=NaN;
if sgt>2
   EKT(LOOPi,LOOPj)=v'*L(1:sgt);
end

% ******************* SFALMA *******************
% SF to <Sfalma> OXI to tetragwn sfalma.
% M h sta8era m tou Lagrance gia ka8e shmeio

SF(LOOPi,LOOPj)=NaN;

if sgt>2
   SF(LOOPi,LOOPj)=(sqrt(L(1:sgt)'*Cu(1:sgt) +L(sgt+1)));
   M(LOOPi,LOOPj)=L(sgt+1);
end

if imag(SF(LOOPi,LOOPj))>0
   save res2 L Cu Cx
end

end
end

[xkg ykg]=meshgrid(xk,yk);
```

```
% *************** ka8arismos complex ************

SFcom=imag(SF);
ncomplex=length(find(SFcom>0))
[I,J]=find(SFcom>0);
for i=1:length(I)
   SF(I(i),J(i))=NaN;
   VAL(I(i),J(i))=NaN;
   EKT(I(i),J(i))=NaN;
end
%SF(I,J)=NaN;

% *********** Taseis ***************

MPer=bt(1)+bt(2).*xkg+bt(3).*ykg+bt(4).*xkg.^2+bt(5).*ykg.^2+bt(6).*xkg.*ykg
+bt(7).*(sin(bt(8).*xkg+bt(9)))                    +bt(10).*(sin(bt(11).*ykg+bt(12)))
+bt(13).*(sin(bt(14).*xkg.*ykg+bt(15)))
+bt(16).*xkg.^3+bt(17).*ykg.^3+bt(18).*xkg.^2.*ykg+bt(19).*xkg.*ykg.^2;

for i=1:6
   bp(i)=ATD(i);
end

MPol=bp(1)+bp(2).*xkg+bp(3).*ykg+bp(4).*xkg.^2+bp(5).*ykg.^2+bp(6).*xkg.*ykg;
[ny nx]=size(EKT);
%MPol(1:ny,1:nx)=1410;

G=isnan(EKT);
EKTk=EKT(G==0);
MPk=MPer(G==0);
PLGk=PLG(G==0);
%G2=isnan(SF);
SFk=SF(G==0);

% Ta Valk ktl, exoun problhma afou einai nxn!
% Ginontai pinakas sthlh!

%VAL=MPer+EKT;
VAL=MPol+EKT;

if logged==1
   VAL=exp(VAL);
end

VALk=VAL(G==0);
```

```
AverSfal=Mean(SFk)
save Krigres xk yk EKT PLG VAL SF VALk SFk M MPol MPer EKTk

Tol=cputime-t0
```