

Νεστόροβ Β. Νικόλαος

Γεωλογική Μοντελοποίηση και Γεωστατιστική –
Κοιτασματολογική μελέτη του κοιτάσματος μει-
κτών θειούχων του Μαντέμ Λάκκου
Χαλκιδικής

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Π.Μ.Σ. Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος

Ειδίκευση: Ορυκτοί Πόροι – Περιβάλλον

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας

Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης:

08/03/2013

Εξεταστική Επιτροπή

1. Καθηγητής Α. Φιλιππίδης, Επιβλέπων
2. Καθηγητής Κ. Μιχαηλίδης, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής
3. Επικ. καθηγητής Ι. Κατταγερίδης, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

© Νικόλαος Β. Νεστόροβ
© Α.Π.Θ.

Γεωλογική Μοντελοποίηση και Γεωστατιστική – Κοιτασματολογική μελέτη του κοιτάσματος μεικτών θειούχων του Μαντέμ Λάκκου Χαλκιδικής
Μ.Δ.Ε., Τομέας Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Σχολή Θετικών Επιστημών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Nikolaos V. Nestorov

Geological Modeling and Geostatistical – Economic Geological study of the massive sulfide ore deposit of Madem Lakkos Chalkidiki

M. Sci. Thesis, Department of Mineralogy – Petrology – Economic Geology, School of Geology, Faculty of Sciences, Aristotle University of Thessaloniki, Hellas

«Η έγκριση της παρούσης Διατριβής Ειδίκευσης από το Τμήμα Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέως»

Αυτή μου την προσπάθεια την αφιερώνω στα αγαπημένα μου πρόσωπα...!

Στην Οικογένειά μου που με στήριξε πέραν του δυνατού

Στους Φίλους μου που δεν έπαψαν να πιστεύουν σε μένα

και

Στους Καθηγητές μου που ποτέ δε με περιορίσαν αλλά μου έδωσαν φτερά...

«...Οι αριθμοί καθορίζουν την τάξη και την αρμονία στο σύμπαν...»

Πυθαγόρας

«Οι άνθρωποι έχουν το φυσικό χάρισμα να κρίνουν την αλήθεια και συνήθως την αποκαλύπτουν. Και γι' αυτό, όσοι μπορούν εύστοχα να την αντιληφθούν, είναι επίσης ικανοί ν' αντιληφθούν και τις πιθανότητες που υπάρχουν.»

Αριστοτέλης

«...όταν καταφέρεις να μετρήσεις αυτό στο οποίο αναφέρεσαι και να το εκφράσεις με αριθμούς, τότε ξέρεις κάτι γι' αυτό, αλλά όταν δεν μπορείς να το μετατρέψεις σε αριθμούς, τότε οι γνώσεις σου είναι λιγοστές και ανικανοποίητες, μπορεί να είναι η απαρχή της γνώσης, αλλά στις σκέψεις σου ελάχιστα έχεις προοδεύσει στο επίπεδο της επιστήμης, οποιοδήποτε και αν είναι το αντικείμενο... »

Λόρδος Κέλβιν

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	vii
1 Εισαγωγή.....	1
2 Βασικές έννοιες στον υπολογισμό αποθεμάτων.....	3
2.1 Κοίτασμα.....	3
2.2 Όριο εκμεταλλευσιμότητας	4
2.3 Επιλεκτική Μονάδα Εξόρυξης	5
2.4 Αποθέματα	7
2.5 Περιοχική μεταβλητή.....	7
2.6 Εκτιμήσεις Σημείου και Τεμάχους (block).....	9
2.7 Παραδοσιακές μέθοδοι εκτίμησης αποθεμάτων Ο.Π.Υ.....	9
2.7.1 Μέθοδος των τομών	12
2.7.2 Πολυγωνικές Μέθοδοι	14
2.7.3 Μέθοδοι Τριγώνων.....	16
2.7.4 Μέθοδος ζύγισης αντιστρόφου αποστάσεως	16
2.7.5 Μέθοδος καμπυλών ισοκατανομής ή ισοπεριεκτικών καμπυλών (contouring)	17
2.8 Γεωστατιστική	18
2.8.1 Πειραματική ημι-βαριογραφία (Variography)	20
2.8.2 Μέθοδος παρεμβολής κανονικού (Ordinary) Kriging.....	21
3 Γεωγραφική θέση	24
3.1 Γενικά	24
3.2 Η ιστορία των Μεταλλείων Κασσάνδρας	24
4 Γεωλογία της περιοχής	28
4.1 Η Σερβομακεδονική μάζα (Sm).....	29
4.2 Το κοιτάσμα του Μαντέμ Λάκκου	35
5 Υλικά και Μέθοδοι.....	40
5.1 Σύνοψη των δεδομένων και της ερευνητικής μεθοδολογίας.....	40
5.2 Οργάνωση και αξιολόγηση βάσης δεδομένων στο Vulcan:Isis	44
5.3 Μονομεταβλητή Ανάλυση πρωτογενών Δεδομένων (Univariate Analysis of Raw Data)	46
5.4 Μονομεταβλητή Ανάλυση Δεδομένων πάνω από το όριο ανιχνευσιμότητας και δίχως τα outliers - extreme values (Univariate Analysis of Edited Data)	54

5.5	Ανάλυση δεδομένων ανά λιθολογικά πεδία (Domains).....	62
5.6	Γεωμετρική Μοντελοποίηση του Σώματος Μεταλλοφορίας με Χρήση Πεδίου-Δείκτη της Λιθολογίας.....	67
5.7	Αξιολόγηση Αναλύσεων Au, Ag, Pb, Zn σε διαστήματα σταθερού μήκους 77	
5.8	Υπολογισμός και Μοντελοποίηση Down hole Βαριογραμμάτων για κάθε Στοιχείο.....	81
5.9	Εκτίμηση Μοντέλου Μπλοκ με Κανονικό (Ordinary) Kriging.....	88
5.10	Διασταυρωμένη Επικύρωση Εκτιμήσεων (Cross-validation).....	89
6	Αποτελέσματα.....	96
6.1	Αποτελέσματα βαριογραφίας.....	96
6.2	Αποτελέσματα εκτίμησης πόρων Μαντέμ Λάκκου.....	96
6.3	Καμπύλη περιεκτικότητας – tonnage και συνολικά αποθέματα.....	100
7	Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	107
7.1	Συμπεράσματα.....	107
7.2	Προτάσεις.....	108
	Περίληψη.....	109
	Extended abstract.....	111
	Ελληνόγλωσση.....	113
	Ξενόγλωσση.....	113

KENH

1 Εισαγωγή

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης (Μ.Δ.Ε.) εκπονήθηκε στον Τομέα Ορυκτολογίας – Πετρολογίας – Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας της Σχολής Θετικών Επιστημών (Σ.Θ.Ε.) του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.) στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος της ειδίκευσης Ορυκτοί Πόροι - Περιβάλλον.

Η εκπόνηση της Μ.Δ.Ε. έγινε υπό την επίβλεψη του Dr Ανέστη Φιλιππίδη, Καθηγητή Ορυκτολογίας – Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας της Σ.Θ.Ε. του Α.Π.Θ. Την τριμελή συμβουλευτική επιτροπή συμπληρώνουν ο Dr Κλέοπας Μιχαηλίδης, Καθηγητής Ορυκτολογίας – Κοιτασματολογίας του Τμήματος Γεωλογίας της Σ.Θ.Ε. του Α.Π.Θ. και ο Dr Ιωάννης Καπαγερίδης, Επίκουρος Καθηγητής Μεταλλευτικής Πληροφορικής του Τμήματος Γεωτεχνολογίας και Περιβάλλοντος της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα τον Καθηγητή Dr Ανέστη Φιλιππίδη, ο οποίος από την ιδιαίτερη θέση του επιβλέποντος με καθοδήγησε και με συμβούλεψε σοφά καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, τον Καθηγητή Dr Κλέοπα Μιχαηλίδη για την αφοσίωση και το ενδιαφέρον του, καθώς και τον Επίκουρο Καθηγητή Dr Ιωάννη Καπαγερίδη, ο οποίος με εισήγαγε στον κόσμο της μεταλλευτικής πληροφορικής.

Επιπρόσθετα, οφείλω να ευχαριστήσω ολόψυχα τον Καθηγητή Dr Γεώργιο Βουτσά για τις πολύτιμες συμβουλές του, ο οποίος αν και καθηγητής του Τομέα Εφαρμοσμένης Φυσικής με βοήθησε σαν να ήταν καθηγητής του Γεωλογικού τμήματος αλλά και τον Καθηγητή Dr Φαίδωνα Κυριακίδη για το ενδιαφέρον που έδειξε από την αρχή της συνεργασίας μας.

Επίσης, ευχαριστώ τους λέκτορες Dr Λαμπρινή Παπαδοπούλου, Dr Νικόλαο Καντηράνη, Dr Βασίλειο Μέλφο και Dr Δημήτριο Οικονομίδη για την στήριξη και τη βοήθειά τους.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου με τους οποίους είχα την τιμή να συνεργαστώ σε διάφορα ζητήματα ακόμη και πέραν της άμεσης ειδίκευσής μου.

Τέλος οφείλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου και να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην εταιρεία «ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΧΡΥΣΟΣ Α.Ε. ΑΝΩΝΥΜΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΧΡΥΣΟΥ», για την στήριξη που μου προσέφερε, κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διατριβής ειδίκευσης και ιδιαίτερα τον Dr Γεώργιο Περαντώνη, Διευθυντή του Τμήματος Γεωλογικής Έρευνας για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθειά του.

Ο στόχος της διατριβής ειδίκευσης είναι ο υπολογισμός των αποθεμάτων του κοιτάσματος του Μαντέμ Λάκκου. Το μεταλλείο βρίσκεται σε προχωρημένη φάση, καθώς το κοίτασμα έτυχε έντονης εκμετάλλευσης για περισσότερο από 40 περίπου χρόνια και επομένως υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα από γεωτρήσεις και χημικές αναλύσεις.

2 Βασικές έννοιες στον υπολογισμό αποθεμάτων

Στη μεταλλευτική ορολογία χρησιμοποιούνται διάφορες έννοιες για τον υπολογισμό αποθεμάτων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η κοινή χρήση των διάφορων όρων είναι χαλαρή σε σχέση με τους ευρύτερα αποδεκτούς τεχνικούς όρους. Σε άλλες περιπτώσεις, ορισμένοι τεχνικοί όροι έχουν συγκεκριμένη σημασία, που δεν είναι κοινά αποδεκτή είτε εντός είτε εκτός της βιομηχανίας διότι εισήλθαν στην βιβλιογραφία από αλλού, όπως στην περίπτωση μιας ομάδας όρων που προέρχονται από τη γεωστατιστική. Για τους παραπάνω λόγους, είναι χρήσιμο να ορίσουμε κάποιες έννοιες που έχουν ευρύτερα ενσωματωθεί στις εργασίες εκτίμησης αποθεμάτων.

2.1 Κοίτασμα

Ο Taylor (1986) ορμώμενος από το μεγάλο εύρος των δημοσιευμάτων που αφορούν την ορολογία του κοιτάσματος, προτείνει τον παρακάτω ορισμό: «το πολύτιμο στερεό ορυκτό το οποίο αναζητήθηκε και κατόπιν εξήχθη από τις εργασίες ενός μεταλλείου, με την ελπίδα ή την προσδοκία (που δεν επιτυγχάνεται πάντα) του ωφέλιμου για τη διαχείριση του μεταλλείου ή για το κοινό καλό της κοινωνίας». Η γενικότητα του ορισμού συσκοτίζει το εύρος της κοινής χρήσης.

Ο όρος «κοίτασμα» εφαρμόζεται στα μεταλλοφόρα πετρώματα με τρεις έννοιες: (1) με την γεωλογική και επιστημονική έννοια, (2) για τον έλεγχο ποιότητας στα μεταλλευτικά αποθέματα και (3) για ένα μεταλλοφόρο περιεχόμενο του υπεδάφους μέσα σ' ένα μεταλλείο, ανεξάρτητα από την περιεκτικότητά του. Στις εργασίες εκτίμησης αποθεμάτων, ο δεύτερος ορισμός είναι μέγιστης σημασίας και υποδεικνύει τη διάκριση του μεταλλεύματος (που εξορύσσεται με κέρδος) από το στείρο (δεν περιέχει επαρκή αξία για να εξορυχθεί με κέρδος) (Sinclair and Blackwell, 2004).

Όπως αποδεικνύεται από τους (Wober and Morgan (1993), ο ορισμός του μεταλλοφόρου συστατικού ενός συγκεκριμένου κοιτάσματος, είναι συνάρτηση του χρόνου (τιμή μετάλλων, τεχνολογία, φορολογικό καθεστώς, κλπ.), παράγοντες θέσης (σε σχέση με τις υποδομές), νομικοί παράγοντες (ασφάλεια, περιβάλλον, εργασία, κλπ.), το κέρδος και τα προεξοφλητικά επιτόκια. Κατά γενική

ομολογία, τα μεταλλεία τίθενται σε παραγωγή με τη λογική ότι θα υπάρξει ένα αποδεκτό κέρδος από την απαιτούμενη επένδυση.

2.2 Όριο εκμεταλλευσιμότητας

Η έννοια του ορίου εκμεταλλευσιμότητας και οι πρακτικές του εφαρμογές, έχουν προκαλέσει ευρεία συζήτηση στην επιστημονική βιβλιογραφία (Sinclair and Blackwell, 2004). Για πρακτικούς λόγους, ένα όριο εκμεταλλευσιμότητας αποτελεί μια περιεκτικότητα κάτω από την οποία η αξία των μετάλλων ή μεταλλικών ορυκτών που περιέχονται σε έναν όγκο πετρωμάτων, δεν πληρούν ορισμένες οικονομικές απαιτήσεις. Τα όρια εκμεταλλευσιμότητας χρησιμοποιούνται για τη διάκριση (επιλογή) τεμαχών (block) μεταλλεύματος από τα στείρα. Η επιλογή μεταλλεύματος/στείρου βασίζεται σε εκτιμήσεις (που περιέχουν κάποιο σφάλμα) και όχι στην πραγματική τους περιεκτικότητα (που είναι άγνωστη). Ως εκ τούτου, στην περίπτωση της εκτίμησης των τεμαχών, είναι προφανές ότι μερικά τεμάχια μεταλλεύματος θα ταξινομηθούν ακούσια σαν στείρο και ορισμένα τεμάχια στείρου θα ταξινομηθούν λανθασμένα σαν μέταλλευμα.

Ο όγκος μιας προκαθορισμένης εξορυκτικής μονάδας, πάνω στον οποίο βασίζεται η επιλεκτική εξόρυξη και στον οποίο εφαρμόζεται το όριο εκμεταλλευσιμότητας, μπορεί να μεταβληθεί με την πάροδο του χρόνου, όπως επίσης και το ίδιο το όριο εκμεταλλευσιμότητας. Καθώς αυξάνει το όριο εκμεταλλευσιμότητας, μειώνεται το tonnage και ο μέσος όρος του μετάλλου στο συγκεκριμένο tonnage αυξάνει. Σαν κανόνας, η σχέση αποκάλυψης (strip ratio), δηλαδή οι μονάδες στείρων που πρέπει να αφαιρεθούν για κάθε μονάδα μεταλλεύματος, επίσης αυξάνει με την αύξηση του ορίου εκμεταλλευσιμότητας.

Η εκτίμηση του ορίου εκμεταλλευσιμότητας, αν και αποτελεί πολύπλοκο οικονομικό πρόβλημα πέραν του σκοπού της παρούσας διατριβής, συνδέεται με την έννοια της δαπάνης λειτουργίας (ανά τόνο) και μπορεί να εξηγηθεί απλουστευτικά, όπως περιγράφηκε από τον (John, 1985). Το λειτουργικό κόστος ανά λειοτριβημένο τόνο μεταλλεύματος, (OC – Operating Cost), δίνεται από:

$$OC = FC + (SR + 1) \times MC$$

Εξίσωση 2.1: Η παραπάνω μαθηματική σχέση υπολογίζει το λειτουργικό κόστος OC σε συνάρτηση με τα πάγια έξοδα FC, τη σχέση αποκάλυψης SR και τα έξοδα εξόρυξης, εκφρασμένα ανά λειοτριβημένο τόνο μεταλλεύματος.

όπου

OC= Λειτουργικό κόστος/λειοτριβημένο τόνο (Operating Cost)

FC = πάγια έξοδα/λειοτριβημένο τόνο (Fixed Cost)

SR = σχέση αποκάλυψης (Strip Ratio)

MC= έξοδα εξόρυξης/εξορυγμένοι τόνοι (Mining Cost)

Το όριο εκμεταλλευσιμότητας, είναι χρήσιμο σε επιχειρησιακό επίπεδο για την αναγνώριση του μεταλλεύματος από το στείρο, και εκφράζεται με μονάδες περιεκτικότητας μεταλλεύματος, για ένα και μόνο μέταλλο. Το όριο εκμεταλλευσιμότητας μπορεί να καθοριστεί από τα λειτουργικό κόστος ως εξής:

$$g_c = OC/p$$

Εξίσωση 2.2: Η παραπάνω μαθηματική σχέση υπολογίζει το όριο εκμεταλλευσιμότητας σε συνάρτηση με το λειτουργικό κόστος και την πραγματική τιμή του μετάλλου.

όπου

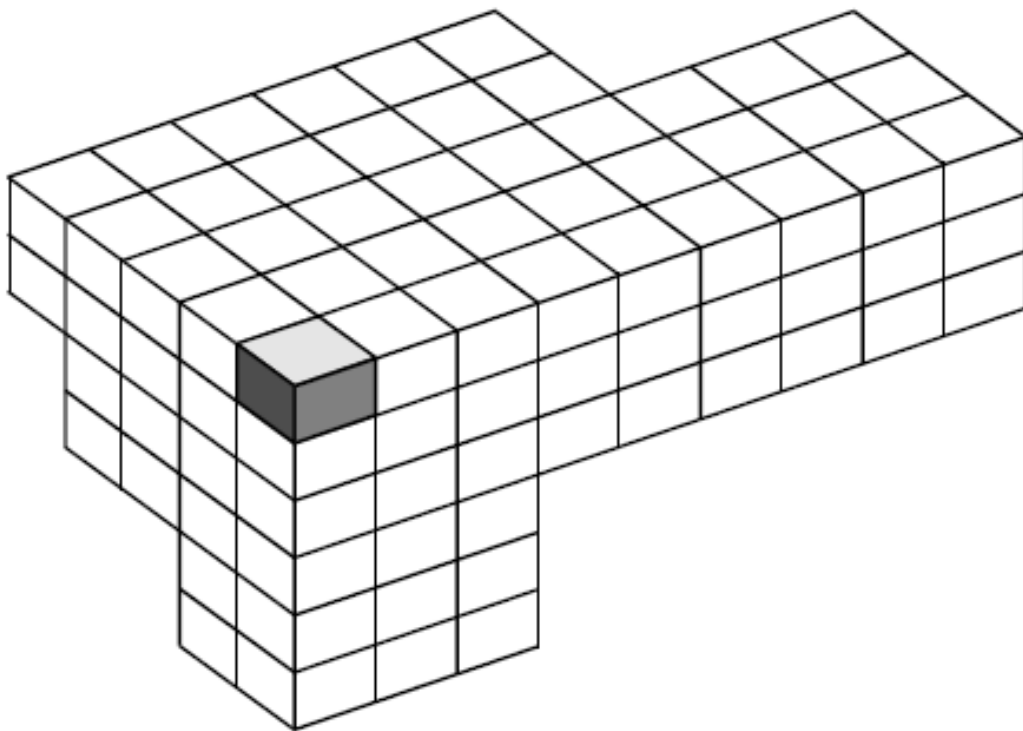
g_c είναι το λειτουργικό όριο εκμεταλλευσιμότητας (π.χ. ποσοστό μετάλλου) και p είναι η πραγματική (realized) τιμή μετάλλου ανά μονάδα περιεκτικότητας (π.χ. η πραγματική αξία σε δολάρια από τη χύτευση 10 Kg μετάλλου, όπου η περιεκτικότητα του μετάλλου είναι επί τοις εκατό %).

2.3 Επιλεκτική Μονάδα Εξόρυξης

Η Επιλεκτική Μονάδα Εξόρυξης (EME) αποτελεί το μικρότερο τέμαχος πάνω στο οποίο βασίζεται η διάκριση μεταξύ στείρου και μεταλλεύματος. Το μέγεθος μιας EME γενικά καθορίζεται από περιορισμούς που σχετίζονται με τη μέθοδο εξόρυξης που θα εφαρμοσθεί και την κλίμακα των εργασιών. Για λόγους σχεδιασμού, ένα κοίτασμα (και πιθανότατα τα τριγύρω στείρα υλικά) μπορούν να θεωρηθούν σαν μια τρισδιάστατη συστοιχία από EME (Σχήμα 2.1), κάθε μια

από αυτές έχει τιλοδοτηθεί με μια συγκεκριμένη περιεκτικότητα αλλά και με άλλες παραμέτρους. Αυτή η τρισδιάστατη συστοιχία από ΕΜΕ, συνήθως αποτελεί την βάση για την οικονομική μελέτη σκοπιμότητας, ως εκ τούτου οι ΕΜΕ αποτελούν τον ελάχιστο όγκο για τον οποίο απαιτούνται εκτιμήσεις (estimated blocks).

Συνεπώς, οι διαστάσεις μιας ΕΜΕ πρέπει να καθοριστούν προσεκτικά. Αυτές οι διαστάσεις εξαρτώνται από παράγοντες όπως, οι αποστάσεις των εκρηκτικών κατά τη διάρκεια της παραγωγής, προδιαγραφές των εξορυκτικών μηχανημάτων, το ύψος του πατώματος (bench) και τα χαρακτηριστικά ανατίναξης του εδάφους που προκύπτουν από τη γεωτεχνική αξιολόγηση (Sinclair and Blackwell, 2004).



Σχήμα 2.1: Μια τρισδιάστατη συστοιχία τεμαχών (block array), σχεδιασμένα να προσεγγίζουν τη γεωμετρία του κοιτάσματος. Το μέγεθος του τεμαχούς (block) συνήθως λαμβάνεται σαν μια ΕΜΕ, ο μικρότερος όγκος για τον οποίο είναι πιθανή η διάκριση μεταλλεύματος και στείρου και έτσι είναι ο μικρότερος όγκος για τον οποίο πρέπει να εκτιμηθεί μια μέση περιεκτικότητα (Sinclair and Blackwell, 2004).

2.4 Αποθέματα

Η έννοια του αποθέματος ποικίλει από τον ένα επίσημο φορέα στον άλλο, μολονότι γίνονται αυξανόμενες προσπάθειες για παγκόσμια αποδεκτούς ορισμούς. Με την απουσία τέτοιας παγκόσμιας συμφωνίας, υπάρχει μια αυξανόμενη τάση τόσο στην βιομηχανία όσο και στην επιστημονική βιβλιογραφία να χρησιμοποιείται είτε η Καναδική νομοθεσία (NI 43-101) είτε ο "Αυσταλοασιατικός Κώδικας (JORC) για την υποβολή εκθέσεων για την εκτίμηση αποθεμάτων των Ορυκτών Πρώτων Υλών.

Ο όρος *μεταλλευτικά αποθέματα* χρησιμοποιείται μόνο μετά τη διενέργεια μελέτης τεχνικών και οικονομικών κριτηρίων/δεδομένων που σχετίζονται και εκφράζονται με όρους εξορύξιμων τόνων ή όγκου/περιεκτικότητας. Η δημοσίευση πληροφοριών που σχετίζονται με αποθέματα Ορυκτών Πρώτων Υλών και σχετικές εκτιμήσεις, πρέπει να προέρχονται από εκθέσεις που συντάσσονται από κατάλληλα εξειδικευμένα άτομα (QP – Qualified Person).

Για τον υπολογισμό των αποθεμάτων ενεργοποιείται ένα ευρύ φάσμα διαδικασιών του μεταλλευτικού έργου, οι οποίες συνοψίζονται στη γεωλογική και ποσοτική βάση δεδομένων, στις διαδικασίες εκτίμησης αποθεμάτων, στο σχεδιασμό της παραγωγής, στην τεχνολογία εξόρυξης και θραύσης, στη διαχείριση εργασιών, στη χρηματοδότηση, στα περιβαλλοντικά και νομικά θέματα (Sinclair and Blackwell, 2004).

2.5 Περιοχική μεταβλητή

Αρκετές μεταβλητές που σχετίζονται με τη μεταλλευτική, είναι περιφερειοποιημένες, όπως το πάχος μιας φλέβας, η περιεκτικότητα και η πυκνότητα των θραυσμάτων και οι συσσωρεύσεις μετάλλων (περιεκτικότητα x μήκος). Γενικά, οι περιφερειοποιημένες μεταβλητές αποτελούνται από τουλάχιστον δύο συστατικά: από ένα τυχαίο συστατικό και από ένα δομημένο συστατικό.

Η περιοχική μεταβλητή είναι μια μεταβλητή που κατανέμεται στο χώρο με μερικώς δομημένο τρόπο, έτσι ώστε να υπάρχει κάποιος βαθμός χωρικής αυτοσυσχέτισης. Ο δομημένος χαρακτήρας αποκαλείται περιφερειοποίηση από το

γεγονός ότι τα κοντινά δείγματα είναι, κατά μέσο όρο, πιο όμοια σε σχέση με τα πιο απόμακρα, όσον αφορά τις τιμές τους.

Το τυχαίο συστατικό συνήθως επισκιάζει το δομημένο συστατικό έως ένα βαθμό. Διάφορες συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης (μαθηματικές/στατιστικές) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το χαρακτηρισμό μιας περιφερειοποιημένης μεταβλητής, επιτρέποντας στην αυτοσυσχέτιση να ενσωματωθεί στη διαδικασία εκτίμησης αποθεμάτων Ο.Π.Υ.

Η περιφερειοποίηση των περιεκτικοτήτων είναι σύμφωνη με την εμφάνιση ζωνών υψηλής περιεκτικότητας μέσα σ' ένα πεδίο χαμηλών περιεκτικοτήτων, όπως είναι σύνηθες στις μεταλλοφόρες περιοχές. Γενικά ισχύει ότι δύο δείγματα με απόσταση μικρότερη από τις διαστάσεις της ζώνης υψηλής περιεκτικότητας, θα μοιάζουν περισσότερο, κατά μέσο όρο, από δύο δείγματα, που η μεταξύ τους απόσταση είναι μεγαλύτερη από τις διαστάσεις της ζώνης υψηλής περιεκτικότητας.

Οι περιφερειοποιημένες μεταβλητές όπως η περιεκτικότητα, ορίζονται με ιδιαίτερη στήριξη μέσα σε μια καθορισμένη περιοχή ή πεδίο (π.χ., οι περιεκτικότητες από πυρηνοληψία 2m, μέσα σε ζώνη μεταλλοφορίας που περιβάλλεται από στείρα πετρώματα).

Η στήριξη αναφέρεται στη μάζα, στο σχήμα και στον προσανατολισμό του όγκου του δείγματος που λαμβάνεται για ανάλυση. Μισοί πυρήνες ενός μέτρου από κατακόρυφες γεωτρήσεις, αντιπροσωπεύουν μια περιοχική μεταβλητή με ομοιόμορφη στήριξη. Αν αυξηθεί το μήκος του δείγματος του μισού πυρήνα, στα 2m, τότε ορίζεται μια νέα περιφερειοποιημένη μεταβλητή με διαφορετική στήριξη.

Τα παραπάνω δύο διαφορετικά δείγματα (πυρήνας 1m και πυρήνας 2m) δεν μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους διότι έχουν διαφορετική στήριξη. Μια εξομάλυνση των τιμών (μείωση της μεταβλητότητας) – ή αλλιώς κανονικοποίηση – συνοδεύει την αύξηση της στήριξης μιας περιφερειοποιημένης μεταβλητής.

2.6 Εκτιμήσεις Σημείου και Τεμάχους (block)

Είναι ουσιώδες να διακρίνουμε μεταξύ των εννοιών, της εκτίμησης περιεκτικότητας σε ένα σημείο (ή σε ένα πολύ μικρό όγκο όπως αυτόν ενός δείγματος) και της εκτίμησης της μέσης περιεκτικότητας ενός μεγάλου όγκου, όπως μιας μονάδας παραγωγής ή ενός τεμάχους (ενός όγκου που μπορεί να είναι πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από ένα δείγμα).

Σημειακές ή ακριβείς εκτιμήσεις χρησιμοποιούνται στις μεταλλευτικές εφαρμογές, κυρίως σαν μέσο επικύρωσης ή σύγκρισης μιας μεθόδου εκτίμησης και για την εκτίμηση ενός κανονικού δικτύου τομών σαν μια βάση για οριοθέτηση (contouring π.χ. οριοθέτηση – contouring του ορίου εκμεταλλευσιμότητας ώστε να καθοριστεί το περιθώριο μεταλλεύματος/στείρου).

Η βάση δεδομένων των δειγμάτων (πολλοί μικροί όγκοι) είναι η βάση δεδομένων των σημείων, που χρησιμοποιούνται στις σημειακές εκτιμήσεις. Οι εκτιμήσεις τεμαχών πραγματοποιούνται επίσης από τη βάση δεδομένων των δειγμάτων (σημείων), αλλά είναι μεγαλύτεροι όγκοι σε σχέση με εκείνους των δειγμάτων.

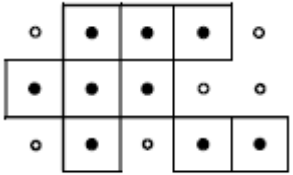
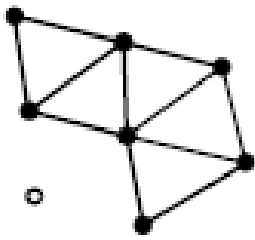
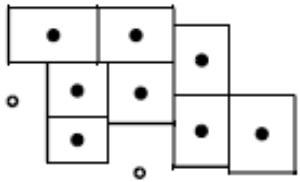
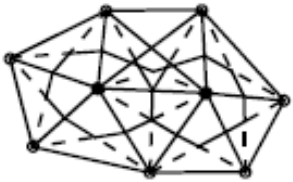
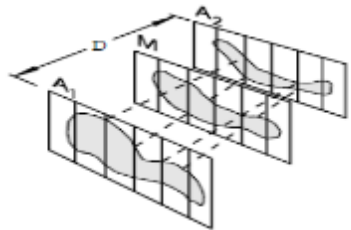
2.7 Παραδοσιακές μέθοδοι εκτίμησης αποθεμάτων Ο.Π.Υ.

Αρκετές παραδοσιακές και ευρέως εφαρμόσιμες μέθοδοι εκτίμησης αποθεμάτων περιγράφονται από τους Patterson (1959) και Annels (1991) και συνοψίζονται παρακάτω:

- a. Μέθοδος των κατόψεων και των τομών (διαμήκεις και εγκάρσιες)
- b. Πολυγωνική μέθοδος
- c. Τριγωνική μέθοδος
- d. Μέθοδος κανονικού και τυχαία στρωματοποιημένου πλέγματος
- e. Μέθοδος στάθμισης της αντιστρόφου αποστάσεως ($1/d$, $1/d^2$, κ.λ.π)
- f. Μέθοδος ισοπεριεκτικών καμπυλών

Οι μέθοδοι a έως c περιλαμβάνουν εκτιμήσεις όγκων, ενώ οι μέθοδοι d έως f ασχολούνται με σημειακά δείγματα των οποίων οι ιδιότητες (π.χ., περιεκτικότητες) έχουν εκτιμηθεί και συχνά εφαρμόζονται για την εκτίμηση σημείων σε ένα κανονικό πλέγμα.

Κάθε μια από αυτές τις μεθόδους έχει βρει εφαρμογή στη βιομηχανία και είναι όλες εμπειρικές, γι' αυτό και η χρήση τους εξαρτάται σημαντικά από την εμπειρία του χρήστη. Όταν εφαρμόζονται με αυστηρό γεωλογικό έλεγχο και επάρκεια δειγμάτων, έχουν αποδειχθεί χρήσιμες και αξιόπιστες. Ωστόσο, υπάρχουν εγγενή χαρακτηριστικά στις ίδιες τις μεθοδολογίες οι οποίες μπορεί να μας οδηγήσουν σε καταστροφικά σφάλματα αν δεν εφαρμοστούν σωστά.

A		Γ		E	
B		Δ		Z	

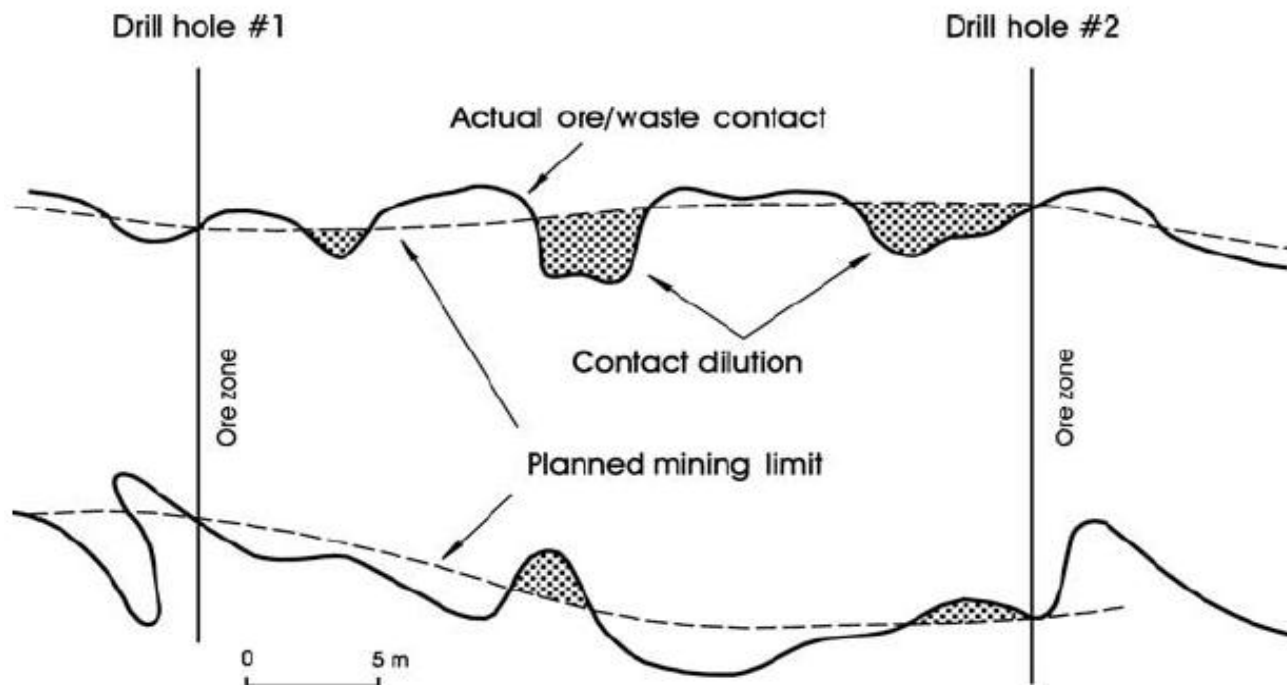
Σχήμα 2.2: Παραδείγματα κοινών μεθόδων εκτίμησης περιεκτικότητας (από Patterson, 1959). (A) Πολυγωνική: ομοιόμορφα ορθογώνια τεμάχια κεντραρισμένα με βάση δεδομένα που ισαπέχουν. (B) Πολυγωνική: ανομοιόμορφα ορθογώνια τεμάχια κεντραρισμένα σε δεδομένα ακανόνιστης απόστασης. (Γ) Πολυγωνική: πολύγωνα που ορίζονται από τις μεσοκαθέτους μεταξύ των δεδομένων. (Δ) Πολυγωνική: πολύγωνα που ορίζονται από τις διχοτόμους των γωνιών, σε ένα πλέγμα συνεχόμενων τριγώνων. (E) Τριγωνική: Σε κάθε τριγωνικό πολύγωνο αποδίδεται ο μέσος όρος των περιεκτικότητας των κορυφών του κάθε τριγώνου. (Z) Μέθοδος Τομών: το μετάλλευμα περιγράφεται από τις τομές των γεωτρήσεων και καθορίζεται ο σταθμισμένος μέσος όρος της περιεκτικότητας, για την κάθε τομή. Το μετάλλευμα μεταξύ των τομών παρεμβάλλεται, συνήθως με απλή γραμμική παρεμβολή μεταξύ των γειτονικών τομών (από Sinclair and Blackwell, 2004).

2.7.1 Μέθοδος των τομών

Η μέθοδος των (εγκάρσιων) τομών (Σχήμα 2.3) εφαρμόζεται με επιτυχία στην περίπτωση των κοιτασμάτων τα οποία παρουσιάζουν σχετικά απότομα όρια και ομαλή συνέχεια όπως στα περισσότερα επίπεδα (tabular), φλεβικά αλλά και στρωματομόρφα κοιτάσματα. Οι πληροφορίες των αναλύσεων (π.χ. από τις γεωτρήσεις) συνήθως συγκεντρώνονται κατά μήκος ισαπεχουσών τομών ώστε να παράγουν μια σχετικά συστηματική συστοιχία δεδομένων, σε αντίθεση με τις υπόγειες εκμεταλλεύσεις όπου οι συστοιχίες δεδομένων είναι σπάνια κανονικά τοποθετημένες (τοποθέτηση γεωτρήσεων με τη μορφή «βεντάλιας»). Για κάθε μηκοτομή ή οριζοντιογραφία πραγματοποιείται μια παρεμβολή είτε γεωλογική είτε περιεκτικότητας, και η ερμηνεία της κάθε τομής προβάλλεται με ομαλή ή βαθμιδωτή μετάβαση στις παρακείμενες τομές.

Να σημειωθεί ότι αυτή η παρεμβολή δύο βημάτων (βήμα 1^ο πάνω στην τομή και βήμα 2^ο μεταξύ των τομών) αντιπροσωπεύει τις κύριες υποθέσεις στις οποίες στηρίζεται η υπόθεση των τομών (ή οριζοντιογραφιών). Στο σχηματικό παράδειγμα του σχήματος 2.3 πρόκειται για μια ομαλή γραμμική παρεμβολή ή εναλλακτικά παρεμβολή ενός βήματος μεταξύ των τομών (το 1^ο βήμα ερμηνείας στην τομή έχει πραγματοποιηθεί και πλέον παρατηρούμε το 2^ο βήμα ερμηνείας μεταξύ των τομών). Ο ζυγισμένος μέσος όρος της περιεκτικότητας μιας τομής συνήθως εκτείνεται (ή παρεκτείνεται) σε έναν όγκο ο οποίος παρεμβάλλεται στο ενδιάμεσο μεταξύ των παρακείμενων τομών.

Επιπρόσθετα, το σχήμα 2.3 ξεκάθαρα παρουσιάζει πως το ακανόνιστο όριο μεταλλεύματος στείρου μπορεί να επηρεάσει τα αποθέματα. Κατά κανόνα, η περιεκτικότητα υπερεκτιμάται διότι μια άγνωστη ποσότητα στείρου περιλαμβάνεται στη ζώνη που ερμηνεύσαμε σαν μετάλλευμα. Ενώ, μια ποσότητα μεταλλεύματος χάνεται μέσα στο στείρο (π.χ. μια ποσότητα μεταλλεύματος βρίσκεται έξω από τα σχεδιασμένα μεταλλευτικά όρια).

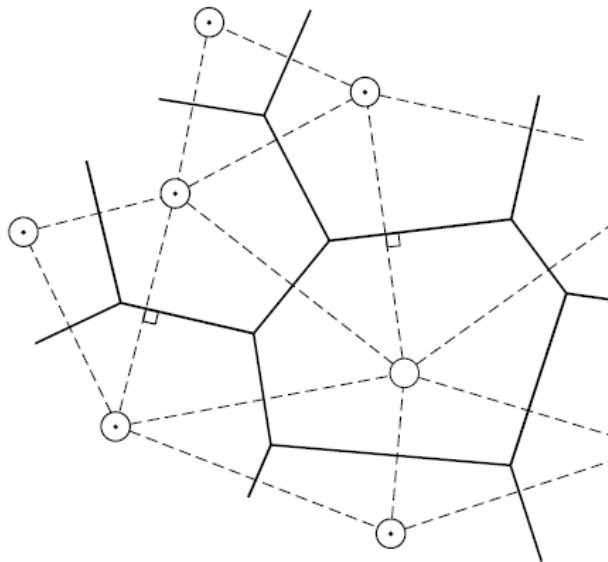


Σχήμα 2.3: Απεικονίσεις ενός ακανόνιστου ορίου μεταλλεύματος – στείρου, το οποίο προσεγγίζεται με τις ομαλές διακεκομμένες ευθείες, οι οποίες προκύπτουν από την ερμηνεία των γεωτρήσεων (στην τομή), δημιουργώντας μια παρεμβολή μεταξύ τους. Με τέτοια ακανόνιστα περιθώρια η μέθοδος των τομών είναι σίγουρα λάθος και μόνο κατά τύχη μπορεί να εκτιμήσει τη σωστή περιεκτικότητα για την παρεμβαλλόμενη ζώνη, διότι μια ποσότητα στείρου περιέχεται στη ζώνη που ερμηνεύσαμε σαν μεταλλοφόρα (τροποποιημένο από τους Sinclair and Blackwell, 2004).

2.7.2 Πολυγωνικές Μέθοδοι

Οι πολυγωνικές μέθοδοι περιλαμβάνουν μια πλειάδα διαφορετικών προσεγγίσεων ώστε να χρησιμοποιηθούν τα ελάχιστα δυνατά δεδομένα για την εκτίμηση των μεμονωμένων πολυγωνικών όγκων οι οποίοι έχουν προσδιοριστεί γεωμετρικά με διάφορους τρόπους. Στην περίπτωση των πολυγωνικών μεθόδων συνήθως δεν υπάρχει εξομάλυνση των πρωτογενών δεδομένων, αλλά μια μεμονωμένη περιεκτικότητα δείγματος αποδίδεται ως η μέση περιεκτικότητα ενός μεγάλου τεμάχους (block – πολυγωνικού πρίσματος) μεταλλεύματος ή στείρου (Σχήμα 2.4). Οι διαδικασίες περιγράφονται αναλυτικότερα από τον Annels (1991).

Σε μια δυσδιάστατη προβολή ενός κοιτάσματος ή ενός μετώπου (bench) που δείχνει τις τοποθεσίες των δειγμάτων, μπορούμε να ορίσουμε τα πολύγωνα με διάφορους τρόπους. Μια από τις συνηθέστερες τεχνικές είναι η χρήση διχοτόμων που είναι κάθετες προς τις απέναντι ακμές, που ενώνουν τα δείγματα μεταξύ τους (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Λεπτομέρειες της κατασκευής μιας πολυγωνικής περιοχής στην οποία περιέχεται και εφαρμόζεται μια μεμονωμένη περιεκτικότητα (π.χ. η περιεχόμενη τιμή περιεκτικότητας παραεκτείνεται για όλο το πολύγωνο). Οι κύκλοι είναι σημειακά δεδομένα, οι διακεκομμένες γραμμές ενώνουν παρακείμενα σημειακά δεδομένα σχηματίζοντας τα τρίγωνα του Delaunay. Οι πα-

κιές γραμμές που καθορίζουν τα πολύγωνα Voronoi (Voronoi tessellations) είναι οι μεσοκάθετες των διακεκομμένων γραμμών (Sinclair and Blackwell, 2004).

Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή και σαν Voronoi tessellation. Κάθε πολύγωνο περιέχει ένα μοναδικό δείγμα και κάθε άλλο σημείο του πολυγώνου βρίσκεται κοντύτερα στο περιεχόμενο δείγμα παρά σε οποιοδήποτε άλλο εξωτερικό δείγμα. Βέβαια θα πρέπει να ληφθούν αυθαίρετες αποφάσεις, όσον αφορά τη διαμόρφωση των περιφερειακών πρισμάτων και ειδικότερα για το πώς αυτά θα συνδέονται με την εξωτερική τους κορυφή. Η τρίτη διάσταση, το ύψος του πολυγωνικού πρίσματος, αντιπροσωπεύει το πάχος του κοιτάσματος ή του μετώπου (bench) και είναι κάθετο στο επίπεδο προβολής.

Η παραπάνω μεθοδολογία μας οδηγεί σε ένα πρότυπο (pattern) πολυγωνικών πρισμάτων στα οποία αποδίδεται η περιεκτικότητα του περιεχόμενου δείγματος. Η μέθοδος είναι απλή και γρήγορη, ενώ αυτόματα αποκεντρώνει (de-clusters) τα δεδομένα.

Εναλλακτικές μέθοδοι μεμονωμένου καθορισμού των πολυγωνικών πρισμάτων μπορούν να καταλήξουν σε δεδομένα τα οποία δεν τοποθετούνται με το βέλτιστο δυνατό τρόπο μέσα στα πρίσματα. Για παράδειγμα, αν υπερθέσουμε ένα τετραγωνικό πλέγμα πάνω στα δυσδιάστατα δεδομένα ενός μετώπου (bench), κάθε τετράγωνο μπορεί να εκτιμηθεί από την περιεκτικότητα του πλησιέστερου δείγματος. Αυτή η παραλλαγή της πολυγωνικής μεθόδου ονομάζεται *διαδικασία εκτίμησης με τη χρήση του πλησιέστερου δείγματος* (nearest neighbor estimation procedure).

Οι προηγούμενες αναφορές έχουν γίνει για την κανονικοποίηση των περιεκτικότητας (μείωση της μεταβλητότητας) καθώς αυξάνει η στήριξη (όγκος). Σαν συνέπεια αυτού, είναι ότι κατά μέσο όρο η χρήση των περιεκτικότητας των πρωτογενών δειγμάτων για την εκτίμηση της μέσης περιεκτικότητας των μεγάλων τεμαχών υπερεκτιμά την περιεκτικότητα των τεμαχών υψηλής περιεκτικότητας ενώ αντίστοιχα υποτιμά την περιεκτικότητα των τεμαχών χαμηλής περιεκτικότητας (π.χ. μια μεροληψία υπό συνθήκη – conditional bias, η οποία είναι εξαρτημένη από την εκτιμώμενη περιεκτικότητα).

2.7.3 Μέθοδοι Τριγώνων

Μια τριγωνική παραλλαγή της πολυγωνικής προσέγγισης, είναι πιο συντηρητική από την απλή απόδοση μεμονωμένων τιμών σε μεγάλα τεμάχια. Τα τριγωνικά πρίσματα ορίζονται σε δυσδιάστατη προβολή (π.χ κάτοψη επιπέδου) με την ένωση τριών σημειακών δειγμάτων, έτσι ώστε το τρίγωνο που προκύπτει να μην περιέχει κανένα δείγμα. Για την κατασκευή των τριγώνων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τριγωνισμός του Delaunay. Η μέθοδος αυτή αποτελεί πρόδρομο του Voronoi tessellation. Η μέση τιμή των τριών περιεκτικοτήτων των κορυφών του τριγώνου αποδίδεται στο τριγωνικό πρίσμα. Το κυριότερο πλεονέκτημα είναι ότι ενσωματώνεται μια εξομάλυνση στην εκτίμηση των μεμονωμένων πρισμάτων. Τα προβλήματα της τριγωνικής μεθόδου είναι

- 1) η εξομάλυνση είναι πολύ εμπειρική
- 2) ο συντελεστής βαρύτητας (ίση βαρύτητα των τριών δειγμάτων) είναι αυθαίρετος και έτσι δεν είναι ο βέλτιστος
- 3) οι ανισοτροπίες δεν λαμβάνονται υπόψη και
- 4) οι εκτιμώμενες ενότητες δεν διαμορφώνουν μια κανονική σειρά τεμαχών.

2.7.4 Μέθοδος ζύγισης αντιστρόφου αποστάσεως

Οι μέθοδοι ζύγισης αντιστρόφου αποστάσεως γενικά εφαρμόζονται σε μια κανονική τριδιάστατη συστοιχία τεμαχών, η οποία υπερτίθεται σε ένα κοίτασμα. Κάθε τέμαχος προσδιορίζεται ξεχωριστά από μια ομάδα παρακείμενων δεδομένων, τα οποία επιλέγονται με βάση το κριτήριο της απόστασης σε σχέση με το σημείο ή το τέμαχος το οποίο θέλουμε να εκτιμήσουμε και με βάση το πλήθος των δεδομένων που επιθυμούμε για μια μεμονωμένη εκτίμηση. Οι μέθοδοι αντιστρόφου αποστάσεως πρέπει να πραγματοποιούνται έτσι ώστε τα αντίστοιχα βάρη να έχουν άθροισμα ένα, ειδαίλλως η μέθοδος έχει μεροληψία. Έτσι τα βάρη ορίζονται ως ακολούθως:

$$W_i = 1/d_i^x / \sum (1/d_i^x)$$

Εξίσωση 2.3: Η παραπάνω μαθηματική σχέση υπολογίζει τα βάρη που προκύπτουν από τη στάθμιση με τη μέθοδο της αντιστρόφου αποστάσεως (Sinclair and Blackwell, 2004).

Όπου X είναι μια αυθαίρετη δύναμη

Στην ειδική περίπτωση όπου $d_i = 0$ η μέθοδος αντιστρόφου αποστάσεως τουλάχιστον θεωρητικά (αλλά όχι απαραίτητα και στην πράξη) μεταπίπτει σε μια πολυγωνική εκτίμηση, π.χ., $w_i = 1$ για $d_i = 0$.

Στην πράξη οι ανισοτροπίες δεν λαμβάνονται υπόψη, αν και είναι σχετικά εύκολο να γίνει με μετασχηματισμό των συντεταγμένων, κάτι που θα βελτιώνει σημαντικά την εμπιστοσύνη στην ποιότητα της εκτίμησης. Τέτοιες τεχνικές όπως η αναζήτηση του τεταρτοκυκλίου (ή οκτακυκλίου) μπορούν επίσης να βελτιστοποιήσουν την χωρική κατανομή των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για να κάνουν μια εκτίμηση τεμάχους ή/και σημείου.

Οι διαδικασίες εκτίμησης με τη μέθοδο ζύγισης της αντιστρόφου αποστάσεως αν και αρκετά υποκειμενικές παραμένουν πολύ δημοφιλείς. Σε πολλές περιπτώσεις έχει αποδειχθεί ότι παράγουν αποτελέσματα εφάμιλλα με εκείνα της μεθόδου του απλού Kriging. Η μέθοδος ζύγισης της αντιστρόφου αποστάσεως όταν προσαρμόζεται σε ένα κοίτασμα σε καλά κατανομημένα δεδομένα, μπορεί να εκτιμήσει πολύ μεγάλα τεμάχια.

2.7.5 Μέθοδος καμπυλών ισοκατανομής ή ισοπεριεκτικών καμπυλών (contouring)

Οι μέθοδοι ισοκατανομής (contouring) εφαρμόζονται και για την εκτίμηση αποθεμάτων. Γενικά εξαρτώνται από την εκτίμηση ενός κανονικού πλέγματος σημείων με κάποια διαδικασία παρεμβολής (π.χ. ίσως με κάποια από τις κλασικές μεθόδους εκτίμησης που περιγράψαμε προηγουμένως) και ακολούθως κατασκευάζονται καμπύλες ισοκατανομής (contours) των δεδομένων.

Συνήθως επικαλούμαστε την μέθοδο ισοκατανομής (contouring) για να αποφύγουμε την οδοντωτή, τεχνητή απεικόνιση του ορίου μεταλλεύματος και στείρου, το οποίο προκύπτει από την προηγούμενη εκτίμηση των τεμαχών. Επιπρόσθετα, η κατασκευή καμπυλών ισοκατανομής (contouring) είναι μια εύκολη διαδικασία (τουλάχιστον εκ πρώτης όψεως).

2.8 Γεωστατιστική

Η σημασία και συμβολή των γεωμαθηματικών αποδεικνύεται έμπρακτα στην εκμετάλλευση των Ορυκτών Πρώτων Υλών (Ο.Π.Υ.) όπου καθημερινά παράγονται και εφαρμόζονται νέες καινοτόμες γεωμαθηματικές μέθοδοι. Οι τελευταίες βασίζονται σε πανάκριβους υπερυπολογιστές και τροφοδοτούνται με διάφορων ειδών δεδομένα όπως Τεκτονικά, Γεωφυσικά, Γεωχημικά, Ιζηματολογικά κ.α. με μοναδικό στόχο την εκτίμηση της ποιότητας και της ποσότητας των κοιτασμάτων αυτών. Με τη βοήθεια των γεωμαθηματικών πραγματοποιείται η σύνθεση αριθμητικών μοντέλων για την προσέγγιση της πραγματικότητας. Σε αντίθεση με τις κλασικές και ξεπερασμένες Γεωλογικές μεθόδους, στη Γεωστατιστική υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού της απόκλισης από την πραγματικότητα, δηλαδή το σφάλμα.

Η αριθμητική προσέγγιση ενός ποσοτικού γεωλογικού φαινομένου επιτρέπει την απόδειξη ή την κατάρριψη των όποιων αρχικών υποθέσεων. Επίσης επιβεβαιώνεται η αντίληψη μιας δειγματοληπτικής μεροληψίας (bias) με συνέπεια να σχεδιαστεί εξαρχής ορθολογικά. Τελικά το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των Γεωμαθηματικών μεθόδων δεν είναι τόσο η δυνατότητα που έχουν να επαληθεύουν το αληθές, αλλά η ικανότητά τους να αποκαλύπτουν το ψευδές.

Η προσεκτική εφαρμογή των Γεωστατιστικών μεθόδων ελαχιστοποιεί τα περισσότερα αν όχι όλα τα εγγενή προβλήματα των υποκειμενικών προσεγγίσεων στις εκτιμήσεις των Ο.Π.Υ. Η γεωστατιστική έχει ένα ορθολογικό και στέρεο υπόβαθρο μεταλλευτικής αξιολόγησης. Η αναγνώριση ότι οι μεταβολές στα δεδομένα οφείλονται εν μέρει σε ένα δομημένο παράγοντα (αυτοσυσχέτιση – autocorrelation) και εν μέρει σε ένα τυχαίο παράγοντα (φαινόμενο κόκκου – nugget

effect) είναι θεμελιώδους σημασίας για την κατανόηση της θεωρίας της Γεωστατιστικής και υπονοείται έμμεσα στις μεθοδολογίες τις τελευταίας.

Τα χαρακτηριστικά αυτοσυσχέτισης των διαφόρων τιμών (χωρικές μεταβλητές) μπορούν να προσδιοριστούν ειδικότερα για ένα συγκεκριμένο κοιτάσμα ή τμήμα ενός κοιτάσματος παρά να εξαρτόμαστε από ποιοτικές και υποκειμενικές εικασίες. Αυτή η αυτοσυσχέτιση μπορεί να εκφραστεί με μια μέση μαθηματική συνάρτηση (μοντέλο), η οποία ποσοτικοποιεί τη συνέχεια των τιμών και τη «μέση δομή» του κοιτάσματος. Αυτή η ποσοτικοποίηση των τιμών της συνέχειας αποτελεί τη βάση των γεωστατιστικών μεθόδων που θα συζητηθούν παρακάτω.

Με τη βοήθεια των γεωμαθηματικών συνθέτουμε αριθμητικά μοντέλα. Δηλαδή προσπαθούμε να προσομοιώσουμε την πραγματικότητα με εξισώσεις. Όσο πιο πολύπλοκο το φαινόμενο τόσο πιο μεγάλη θα είναι η απόκλιση του μαθηματικού μοντέλου από την πραγματικότητα. Ξεκινάμε επομένως με τη λογική ότι το αποτέλεσμα μας θα έχει σίγουρα κάποιο σφάλμα. Αυτό είναι και το μεγαλύτερο όπλο των γεωμαθηματικών. Σε αντίθεση με τις κλασικές και ξεπερασμένες Γεωλογικές μεθόδους, στη Γεωστατιστική μπορούμε να υπολογίσουμε την απόκλισή μας από την πραγματικότητα, δηλαδή το σφάλμα.

Η χρήση της γεωστατιστικής στο δυτικό κόσμο είναι καλά περιχαρακωμένη αλλά άργησε να αναπτυχθεί εξαιτίας της πολυπλοκότητας των μαθηματικών, της λιγοστής αγγλικής βιβλιογραφίας (να σημειωθεί ότι ο Matheron ο οποίος ήταν ο πατέρας της Γεωστατιστικής έγραφε στα Γαλλικά) αλλά και το γεγονός ότι η παραγωγή θεωρούσε τη γεωστατιστική σαν ένα γενικότερο ερευνητικό αντικείμενο παρά σαν ένα εφαρμοσμένο εργαλείο.

Σήμερα η θεωρία είναι ευρέως διαδεδομένη και υπάρχουν διάφορα εισαγωγικά εγχειρίδια. Πολλοί επαγγελματίες έχουν εκπαιδευτεί τόσο σε συγκεκριμένες πρακτικές εφαρμογές όσο και στις δυνητικές εφαρμογές της γεωστατιστικής μεθοδολογίας. Έχει παρατηρηθεί μια γενικότερη αύξηση στις δημοσιεύσεις στην επιστημονική και τεχνική βιβλιογραφία με θέμα τις διάφορες γεωστατιστικές μεθοδολογίες και τεχνικές.

Ιδιαίτερα εγγενή χαρακτηριστικά στις γεωστατιστικές μεθόδους είναι η ποσοτικοποίηση του πεδίου επιρροής των δειγμάτων, εξέταση της clustered φύσης των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν στην εκτίμηση και η μεταβλητή στήριξη των δειγμάτων σε σχέση με το μέγεθος των τεμαχών που θέλουμε να εκτιμήσουμε.

2.8.1 Πειραματική ημι-βαριογραφία (Variography)

Η **Βαριογραφία** είναι το βασικό διαγνωστικό εργαλείο για το χωρικό χαρακτηρισμό μιας μεταβλητής και επίσης διαδραματίζει πρωταγωνιστικό ρόλο στην γεωστατιστική εκτίμηση αποθεμάτων. Η μαθηματική περιγραφή ενός πειραματικού βαριογράμματος μιας τυχαίας συνάρτησης ορίζεται με βάση την παρακάτω εξίσωση (Sinclair and Blackwell, 2004):

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

Εξίσωση 4: Η μαθηματική έκφραση του πειραματικού ημι-βαριογράμματος μοιάζει με εκείνη της διασποράς ενός στατιστικού δείγματος. Η διαφορά είναι όμως ότι βρίσκουμε τη διασπορά μόνο εκείνων των μετρήσεων της μεταβλητής Z που ισαπέχουν απόσταση περίπου h . Το $\gamma(h)$ είναι αύξουσα συνάρτηση του h και ερμηνεύει τη χωρική συσχέτιση της μετρούμενης μεταβλητής. Η ανώτερη τιμή του $\gamma(h)$ τείνει στη διασπορά του στατιστικού δείγματος.

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός γραφήματος βαριογραφίας $\gamma(h)$ παρουσιάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Η συνάρτηση $\gamma(h)$ είναι θετική με αποτέλεσμα να ισχύει $\gamma(h) > 0$.
- Όταν το $h=0$ τότε η συνάρτηση ξεκινά από την αρχή των αξόνων.
- Γενικά η συνάρτηση $\gamma(h)$ αυξάνει ανάλογα με το h .
- Η συνάρτηση $\gamma(h)$ μπορεί να αυξάνει μέχρι μια ορισμένη τιμή του h που ονομάζεται οριακή τιμή (sill value) και μετά σταθεροποιείται.
- Ο ρυθμός αύξησης του βαριογράμματος με την αύξηση του h είναι ενδεικτικός του πόσο γρήγορα μειώνεται η 'επιρροή' των δειγμάτων με την απόσταση.

Συνεπώς, για να εκτιμήσουμε ένα σημείο στο χώρο θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας κάποια δείγματα τα οποία βρίσκονται στην άμεση γειτονία με αυτό. Ο στόχος της βαριογραφίας είναι να μας υποδείξει το εύρος επιρροής των δειγμάτων. Επομένως, πρόκειται για το κριτήριο της απόστασης εκείνης εντός της οποίας θα συμπεριλαμβάνονται όλα τα δείγματα στην εκτίμηση και αμοιβαία θα αποκλείονται τα υπόλοιπα δείγματα που δεν πληρούν την παραπάνω προϋπόθεση.

Η βαριογραφία αποτελεί τη μαθηματική απόδειξη ότι τα πλησιέστερα δείγματα ενός κοινού γεωλογικού πεδίου (domain) παρουσιάζουν γενικά μεγαλύτερες ομοιότητες μεταξύ τους, όσον αφορά τις περιεκτικότητές τους, σε αντίθεση με δείγματα τα οποία είναι σε μεγαλύτερη απόσταση. Όσο πιο μεγάλη είναι η μεταξύ τους απόσταση τόσο μεγαλύτερη είναι η αναμενόμενη διαφορά τους.

2.8.2 Μέθοδος παρεμβολής κανονικού (Ordinary) Kriging

Με την επωνυμία Kriging αναφερόμαστε σε μια ομάδα γεωστατιστικών τεχνικών και μεθόδων για την παρεμβολή μιας τυχαίας μεταβλητής. Για παράδειγμα την εκτίμηση της περιεκτικότητας σαν συνάρτηση της γεωγραφικής τοποθέτησης (X,Y,Z) σε ένα σημείο κάποιου κοιτάσματος για το οποίο δεν υπάρχει καμία πληροφορία, χρησιμοποιώντας δεδομένα από γειτονικά δείγματα.

Η θεωρία πίσω από την παρεμβολή (interpolation) και παρέκταση (extrapolation) με τη χρήση του kriging βασίστηκε στη διατριβή ειδίκευσης του Ν.Αφρικάνου Danie G. Krige στο κοιτάσμα Witwatersrand reef complex της Ν. Αφρικής. Η μεθοδολογία βελτιώθηκε από το Γάλλο Georges Matheron παίρνοντας την σύγχρονη μορφή της.

Η μέθοδος Kriging ανήκει στην οικογένεια των αλγορίθμων γραμμικής εκτίμησης που βασίζονται στη χρήση των ελαχίστων τετραγώνων. Ο στόχος του kriging είναι να εκτιμήσει την τιμή μιας άγνωστης συνάρτησης, f , σε ένα δεδομένο σημείο αυτής x^* , έχοντας σαν μόνα στοιχεία ορισμένες γνωστές τιμές της ζητούμενης συνάρτησης σε κάποια άλλα σημεία της τελευταίας, $x_1, \dots, x_n$. Ο

εκτιμητής kriging είναι γραμμικός καθώς η εκτιμητέα τιμή $\hat{f}(x^*)$ αποτελεί ένα γραμμικό συνδυασμό, ο οποίος μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\hat{f}(x^*) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(x^*) f(x_i).$$

Τα βάρη $\lambda_i(x^*)$ αποτελούν λύσεις ενός συστήματος γραμμικών εξισώσεων, το οποίο έχει προκύψει από την υπόθεση ότι η f , αποτελεί το μονοπάτι μιας τυχαίας διεργασίας $F(x)$, ενώ το σφάλμα της εκτίμησης πρέπει να ελαχιστοποιηθεί με κάποιο τρόπο.

$$\varepsilon(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(x) F(x_i) - F(x)$$

Το απλό kriging βασίζεται στην υπόθεση ότι ο μέσος και η συνδιακύμανση της $F(x)$, είναι γνωστές και επομένως ο εκτιμητής kriging είναι αυτός που ελαχιστοποιεί τη διακύμανση του εκτιμώμενου σφάλματος.

3 Γεωγραφική θέση

3.1 Γενικά

Η έκταση του Νομού Χαλκιδικής με βάση την Εθνική Στατιστική Υπηρεσία είναι 2918 km² με πρωτεύουσα τον Πολύγυρο. Η πληθυσμιακή πυκνότητα του νομού είναι 35.9 κάτοικοι/km² και συνολικά ο πληθυσμός της Χαλκιδικής είναι 104894 κάτοικοι, με βάση την απογραφή του 2001.

Το έδαφος της χερσονήσου της Χαλκιδικής ποικίλει από ορεινό και δυσπρόσιτο, π.χ. χερσόνησος του Άθω, έως λοφώδες με δάση και άφθονα νερά. Το κλίμα της περιοχής είναι γενικά μεσογειακό, με ήπιους χειμώνες και δροσερά καλοκαίρια. Αυτό οφείλεται στην ευεργετική επίδραση της θάλασσας που την περιβάλλει. Το ύψος των βροχοπτώσεων κυμαίνεται από 600mm μέχρι 800 mm, αλλά στις υψηλότερες κορυφές της χερσονήσου ξεπερνά τα 1000mm.

3.2 Η ιστορία των Μεταλλείων Κασσάνδρας

Η μεταλλευτική και μεταλλουργική δραστηριότητα στην ΒΑ Χαλκιδική εντοπίζεται στις αρχές της κλασσικής αρχαιότητας (6ο αιώνα π.Χ.) με πλήθος παλαιών μεταλλευτικών σκαριών, που απαντώνται σε ολόκληρη την περιοχή. Τα μεταλλεία χρηματοδότησαν τον Μακεδονικό στρατό κατά τη διάρκεια της Αλεξανδρινής εποχής και συγκεκριμένα τόσο τις εκστρατείες του Φιλίππου Β' όσο και του Μεγάλου Αλεξάνδρου. Κατά τη ρωμαϊκή περίοδο παρατηρείται μια γενικότερη παρακμή και η μεταλλευτική δραστηριότητα ξαναρχίζει κατά τους Βυζαντινούς χρόνους με κέντρο τη σημερινή Στρατονίκη (Ζαφείρης, κ.α., 2001).

Στις αρχές του 15ου αιώνα, τα μεταλλεία της ΒΑ Χαλκιδικής ακμάζουν μετά την κατάκτηση από τους Τούρκους. Σημειώνεται ότι στην περιοχή λειτουργούσαν 500 - 600 καμίνια, για τη κατεργασία των μεκτών θειούχων μεταλλευμάτων. Σαν αντάλλαγμα για την αυτονομία της η περιοχή ήταν υποχρεωμένη να αποδίδει φόρο στον σουλτάνο το 1 στα 12 δράμια αργύρου της παραγωγής της. Μετά από εναλλασσόμενες περιόδους άνθισης και παρακμής κατά τη διάρκεια του 16ου και του 17ου αιώνα, το 1705 με φερμάνι του Σουλτάνου τα Μαντεμοχώρια αποκτούν το δικαίωμα της αυτοδιαχείρισης. Συστήνεται ο Μεταλλευτικός

Συνεταιρισμός, στη γενική διοίκηση του οποίου μετέχουν οι εκπρόσωποι των 12 μεγάλων χωριών. Η μόνη τους υποχρέωση απέναντι στην Μεγάλη Πύλη είναι η παράδοση ενός φόρου ύψους 550 λιβρών αργύρου το χρόνο. Μετά την αποτυχία της επανάστασης του 1822, τα Μαντεμοχώρια χάνουν την αυτονομία τους (Ζαφείρης, κ.α., 2001).

Για πρώτη φορά το 1893 εμφανίζεται η επωνυμία Μεταλλεία Κασσάνδρας κατά την παραχώρηση των μεταλλευτικών δικαιωμάτων από την Οθωμανική Αυτοκρατορία στη Γάλλο-Οθωμανική Α.Ε., με έδρα το Παρίσι. Το όνομα οφείλεται στην τότε ονομασία της χερσονήσου (χερσόνησος της Κασσάνδρας). Στην περιοχή απασχολήθηκαν περίπου 6000 εργάτες διαφόρων εθνικοτήτων. Εισάγεται για πρώτη φορά η πενθήμερη εργασία καθώς οι Εβραίοι εργάτες είχαν αργία το Σάββατο ενώ οι Χριστιανοί την Κυριακή. Έως το 1900 εξορύσσονται και περνούν από μεταλλουργική κατεργασία περίπου 72000 τόνοι μεταλλεύματος. Το 1901 η εταιρεία αρχίζει την επιφανειακή εκμετάλλευση του κοιτάσματος σιδηροπυρίτη στο μεταλλείο του «Μαντέμ Λάκκου» κοντά στη Στρατονίκη (Ζαφείρης, κ.α., 2001).

Τη Γάλλο-Οθωμανική εταιρεία διαδέχεται το 1927 η Ανώνυμη Ελληνική Εταιρεία Χημικών Προϊόντων & Λιπασμάτων (ΑΕΕΧΠ&Λ). Η εταιρεία διαβλέπει εγκαίρως την αναγκαιότητα ευρείας χρήσης λιπασμάτων για την ανάπτυξη της γεωργίας στην χώρα. Με στόχο την εξασφάλιση του θείου ως πρώτης ύλης για την παρασκευή λιπασμάτων, οδηγείται στην αγορά μεταλλείων σε διάφορα σημεία της χώρας. Εκτός των μεταλλείων της Κασσάνδρας η ΑΕΕΧΠ&Λ αγοράζει και αυτά της Κύπρου, της Ερμιόνης, του Ωρωπού και της Κορώνης, ενώ ταυτόχρονα ιδρύει εργοστάσιο λιπασμάτων στην Δραπετσώνα (Ζαφείρης, κ.α., 2001).

Μετά τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο η πλειοψηφία των μετοχών της ΑΕΕΧΠ&Λ περιέρχονται στην ιδιοκτησία του Μποδοσάκη, ο οποίος με την δραστηριότητά του δίνει ιδιαίτερη ώθηση στον μεταλλευτικό κλάδο. Επίκεντρο των μεταλλευτικών δραστηριοτήτων της εταιρείας γίνεται το Στρατώνι. Στις αρχές της δεκαετίας του 1970 η ΑΕΕΧΠ&Λ κατασκευάζει στην παραλία του Στρατωνίου εργοστάσιο εμπλουτισμού και ξεκινάει την παραγωγή και επεξεργασία μικτών θειούχων συμπυκνωμάτων Σιδηροπυρίτη, Σφαλερίτη και Γαληνίτη. Παράλληλα, από το

1972 αρχίζει η εκμετάλλευση του μεταλλείου μεκτών θειούχων της Ολυμπιάδας. Το 1976 κατασκευάζεται το νέο εργοστάσιο εμπλουτισμού στην Ολυμπιάδα, οπότε τα προϊόντα της εκεί μεταλλευτικής δραστηριότητας μεταφέρονται έτοιμα προς φόρτωση στο Στρατώνι (Ζαφείρης, κ.α., 2001).

Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 αποφασίζει το Ελληνικό Κράτος τη δημιουργία μεταλλουργίας χρυσού μέσω της κρατικής ΜΕΤΒΑ στην περιοχή της Ολυμπιάδας. Η απόφαση αυτή, όμως, δε θα υλοποιηθεί ποτέ λόγω των αντιδράσεων της τοπικής κοινωνίας. Το 1992 η ΑΕΕΧΠ&Λ μπαίνει σε ειδική εκκαθάριση εν λειτουργία από την Εθνική Τράπεζα της Ελλάδος (Ζαφείρης, κ.α., 2001).

Το Δεκέμβριο του 1995, μετά από δύο άκαρπους διαγωνισμούς τα δικαιώματα εκμετάλλευσης των Μεταλλείων Κασσάνδρας και το σύνολο των μεταλλευτικών εγκαταστάσεων περιέρχονται στην TVX Hellas, θυγατρική της καναδικής μεταλλευτικής εταιρείας TVX Gold. Πρωταρχικός σκοπός της εταιρείας είναι η δημιουργία μεταλλουργίας χρυσού στην περιοχή της Ολυμπιάδας (Ζαφείρης, κ.α., 2001).

Παράλληλα, η TVX έχει άδεια εκμετάλλευσης του κοιτάσματος μεκτών θειούχων στις «Μαύρες Πέτρες» κάτω από τη Στρατονίκη. Η επένδυση στην Ολυμπιάδα δεν θα υλοποιηθεί ποτέ λόγω των αντιδράσεων της τοπικής κοινωνίας, καθώς και μίας αρνητικής απόφασης του Συμβουλίου της Επικρατείας (ΣτΕ) το 2002. Άλλη μία αρνητική απόφαση του ΣτΕ, αυτήν τη φορά για τυπικούς λόγους, οδηγεί την εταιρεία στις αρχές του 2003 στην διακοπή των εργασιών στο μεταλλείο Μαύρες Πέτρες. Οι εργαζόμενοι τίθενται σε διαθεσιμότητα. Η εταιρεία και ολόκληρη η περιοχή περιέρχονται σε δυσχερή οικονομική κατάσταση, ενώ 480 εργαζόμενοι χάνουν τη δουλειά τους. Τα χωριά της περιοχής αρχίζουν να μαραζώνουν οικονομικά και πληθυσμιακά. Για την αποφυγή κοινωνικών εκρήξεων η τότε κυβέρνηση καταρτίζει ειδικό κοινωνικό πρόγραμμα το οποίο απορροφά όλους τους εργαζόμενους των μεταλλείων (Ζαφείρης, κ.α., 2001).

Τον Ιανουάριο του 2004 τα μεταλλευτικά δικαιώματα των Μεταλλείων Κασσάνδρας και το σύνολο των μεταλλευτικών εγκαταστάσεων περιέρχεται στην

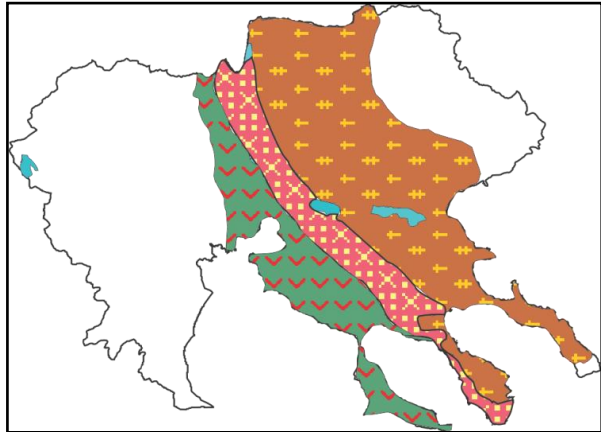
ιδιοκτησία της εταιρείας ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΧΡΥΣΟΣ Α.Ε. με ειδικό νόμο που επικυρώνεται από τη Βουλή. Η καινούργια εταιρεία προχωρά αμέσως στη σύνταξη Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για την επαναλειτουργία του Μεταλλείου των Μαύρων Πετρών. Το μεταλλείο ξεκινά και πάλι την λειτουργία του τον Οκτώβριο του 2005 με την παραγωγή συμπυκνωμάτων Γαληνίτη και Σφαλερίτη (Ζαφείρης, κ.α., 2001).

Παράλληλα, η Ελληνικός Χρυσός Α.Ε. υποβάλλει τον Ιανουάριο του 2006, ενιαίο επιχειρηματικό σχέδιο για την παράλληλη ανάπτυξη και εκμετάλλευση των κοιτασμάτων της Ολυμπιάδας και των Σκουριών, το οποίο προβλέπει και τη δημιουργία μεταλλουργίας χρυσού στην ευρύτερη περιοχή του Στρατωνίου. Μετά την κατ' αρχήν αποδοχή του επιχειρηματικού σχεδίου από την κυβέρνηση, η Ελληνικός Χρυσός καταθέτει τον Μάιο του ίδιου χρόνου Προμελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΠΠΕ) (Ζαφείρης, κ.α., 2001).

Μετά την θετική γνωμοδότηση των 5 συναρμοδίων υπουργείων (Υπουργείο Ανάπτυξης, Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Υπουργείο Πολιτισμού, Υπουργείο Γεωργικής Ανάπτυξης και Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας) επί της ΠΠΕ τον Οκτώβριο του 2009, η εταιρεία κατέθεσε την τελική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) το τέλος του 2009, η έγκριση της οποίας αποτελεί την τελική περιβαλλοντική αδειοδότηση του επενδυτικού σχεδίου (Ζαφείρης, κ.α., 2001).

4 Γεωλογία της περιοχής

Ο χώρος της Ανατολικής Μακεδονίας και της Θράκης αντιπροσωπεύει την Ελληνική Ενδοχώρα (Μάζες Ροδόπης και Σερβομακεδονικής), ενώ η Κεντρική και Δυτική Μακεδονία, τις Εσωτερικές Ελληνίδες ζώνες, δηλαδή την Περιροδοπική ζώνη, τη Ζώνη Αξιού (Παιονία – Πάικο – Αλμωπία), την Πελαγονική ζώνη και την Υποπελαγονική ζώνη (Kockel et al. 1971, Μουντράκης, 1983, 1994).



Σχήμα 4.1: Απεικόνιση της χερσονήσου της Χαλκιδικής. Το σκούρο καφέ και ανατολικότερο τμήμα είναι η Σερβομακεδονική μάζα, το ερυθρό και κεντρικό τμήμα είναι η Περιροδοπική ζώνη και το πράσινο – δυτικότερο τμήμα είναι η ζώνη Αξιού – υποζώνη Παιονίας (Μουντράκης, 1983, 1994).

Η χερσόνησος της Χαλκιδικής είναι η μοναδική χερσόνησος της Βόρειας Ελλάδας. Το μεγαλύτερο τμήμα της Χαλκιδικής, τοποθετείται στην Ενδοχώρα, εκτός από δύο λεπτές επιμήκεις λωρίδες, πάχους περίπου 18-22 Km και διεύθυνση ΒΔ - ΝΑ, οι οποίες ανήκουν στις Εσωτερικές Ελληνίδες ζώνες (Σχήμα 4.1).

Συγκεκριμένα, απαρτίζεται από τρεις Γεωτεκτονικές ζώνες, που έχουν γενική διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ. Εκτείνονται από τα Β σύνορα της Ελλάδος, έως το Β Αιγαίο πέλαγος. Οι ζώνες αυτές είναι από Δ προς Α, η ζώνη Αξιού – Vardar και συγκεκριμένα η υποζώνη Παιονίας (Pe), η Περιροδοπική ζώνη (CRB) και η Σερβομακεδονική μάζα (Sm), έως το γεωτεκτονικό όριο του Στρυμώνα ποταμού.

Οι παραπάνω δύο Γεωτεκτονικές ενότητες (Σχήμα 4.1), η ζώνη Αξιού (υποζώνη Παιονίας) και η Περιροδοπική ζώνη εντάσσονται στις Εσωτερικές Ελληνίδες. Στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα της χερσονήσου ξεδιπλώνεται η Σερβομακεδονική μάζα, η οποία καταλήγει στο τεκτονικό όριο του Στρυμώνα ποταμού. Πέρα από το προαναφερθέν όριο βρίσκεται η μάζα της Ροδόπης. Οι τελευταίες δύο γεωτεκτονικές ενότητες συντελούν την επονομαζόμενη Ελληνική Ενδοχώρα (Kockel et al. 1971, Μουντράκης 1983, 1994).

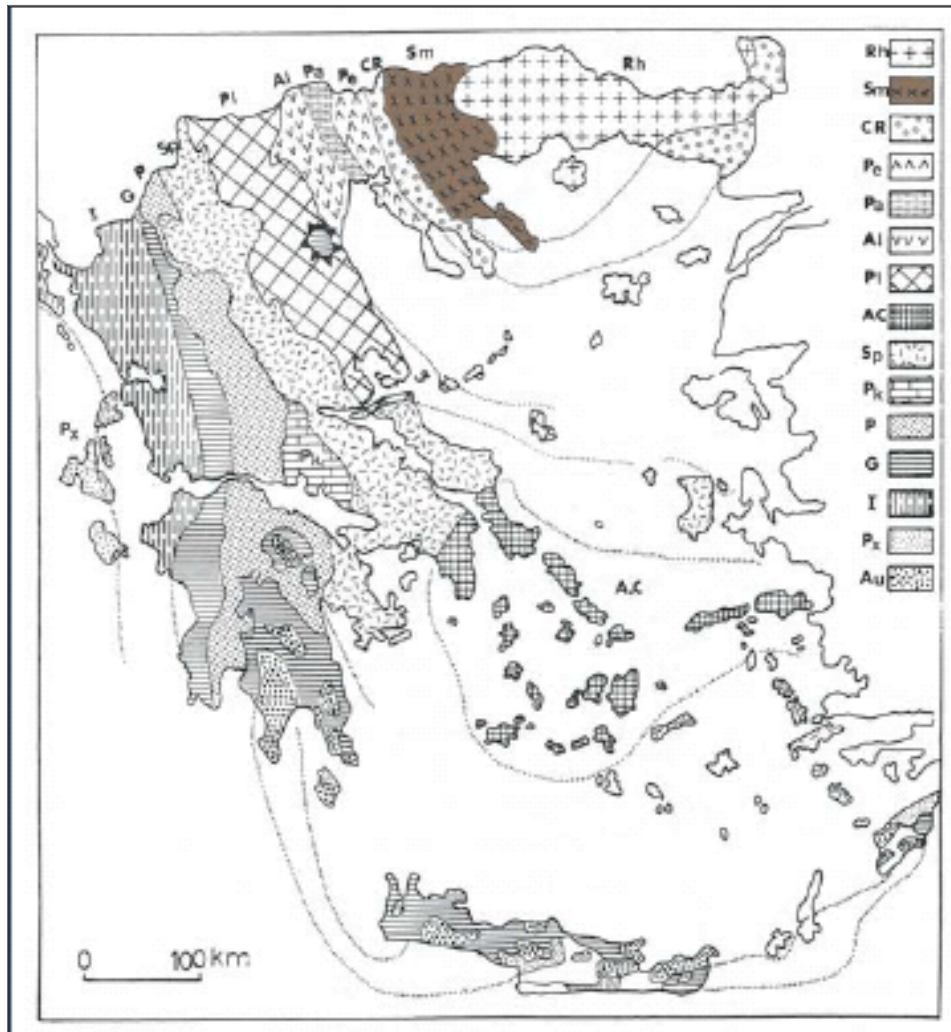
4.1 Η Σερβομακεδονική μάζα (Sm)

Τα μεταμορφωμένα κρυσταλλικά πετρώματα του «προκαμβρικού υποβάθρου» της Βαλκανικής είχαν ενταχθεί στη «μάζα της Ροδόπης» ή «Θρακική μάζα». Στη συνέχεια λόγω των σημαντικών διαφορών μεταξύ των πετρωμάτων εκατέρωθεν του Στρυμόνα ποταμού, το κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο ανατολικά του Στρυμόνα ονομάστηκε «μάζα Ρίλα – Ροδόπης», ενώ το δυτικό τμήμα ονομάστηκε **Σερβομακεδονική μάζα** (Jaranov, 1960).

Στο ελληνικό τμήμα της Σερβομακεδονικής μάζας όπως και στην πρώην Γιουγκοσλαβία, από ανατολικά προς δυτικά διέκριναν την ενότητα Βερτίσκου και την ενότητα Κερδυλλίων αντίστοιχα (Dimitrijevic & Ciric 1967, Kockel & Walther 1965, 1968, Kockel et al. 1971).

Κατόπιν ραδιοχρονολογήσεων στην προέκταση της Σερβομακεδονικής στη Βουλγαρία και Γιουγκοσλαβία οριστικοποιήθηκε η ηλικία της τελευταίας ως Προκάμβρια (540 – 635 Ma), ενώ η μεταμόρφωση και ο μαγματισμός της ραδιοχρονολογήθηκαν στα 300 – 350Ma (Dimitrijevic & Ciric 1967). Η αντίστοιχη ηλικία του κρυσταλλοσχιστώδους στον ελληνικό χώρο προσδιορίστηκε με ραδιοχρονολογήσεις σε μαρμαρυγίες των πηγματιτών ως Παλαιοζωική και η μεταμόρφωση ως Ερκύνια (275 – 337Ma) (Kockel et al. 1971). Οι Himmerkus et al. (2006) υπολόγισαν την ηλικία του κρυσταλλοσχιστώδους στο Προκάμβριο (555 – 587Ma) και τις διεισδύσεις των γρανιτών – ορθογνευσίων στο Σιλούριο (428 – 433 Ma), επιβεβαιώνοντας τις παλαιότερες απόψεις.

Η διάκριση των δύο ενότητων στηρίχθηκε σε λιθολογικές διαφορές και κυρίως στο βαθμό μεταμόρφωσης, των πετρωμάτων ο οποίος θεωρήθηκε χαμηλότερος στην ενότητα Βερτίσκου κυρίως διότι παρατηρήθηκαν θέσεις με επίδραση πρασινοσχιστολιθικής μεταμόρφωσης. Στην ενότητα των Κερδυλλίων εντοπίζονται μάρμαρα μεγάλου πάχους, σε αντίθεση με την ενότητα Βερτίσκου όπου είναι είτε σπάνια είτε σε λεπτές ενστρώσεις. Αντίθετα, εντός των πετρωμάτων της ενότητας Βερτίσκου παρεμβάλλονται τεκτονικά σχιστοποιημένα σερπεντινικά σώματα τα οποία απουσιάζουν από την ενότητα Κερδυλλίων.



Σχήμα 4.2: Γεωτεκτονικός χάρτης της Ελλάδας. Η σκιασμένη ζώνη του χάρτη αποτελεί την περιοχική ενδιαφέροντος (Sm) Σερβομακεδονική μάζα (Κατά Μουντράκης 1983, 1994).

Η **ενότητα του Βερτίσκου** θεωρείται προπαλαιοζωικής ηλικίας και αποτελείται κυρίως από γνευσιακά πετρώματα. Συγκεκριμένα παρατηρούνται καφέ – κίτρινοι λεπτο-μεσοκοκκώδεις διμαρμαρυγικοί και ανοιχτόχρωμοι μοσχοβιτικοί γνεύσιοι. Κατά θέσεις εναλλάσσονται εντός των προαναφερθέντων πετρωμάτων γρανατούχοι – μοσχοβιτικοί ± τουρμαλινικοί γνεύσιοι αλλά και οφθαλμογνεύσιοι (Οικονομίδης 2000).

Στην παραπάνω σειρά των γνευσίων παρεμβάλλονται αμφιβολίτες – περιδοίτες με φακοειδή – ταινιωειδή μορφή (Kockel & Mollat 1977, Frei, 1992, Σακελλαρίου 1989). Τα παραπάνω πετρώματα θεωρούνται ότι αποτελούν μέλη της Παλαιοτηθύος (Sengor et al., 1984) αλλά και μέλη ενός in-situ Μεσοζωικού

οφιολίθου (Dixon & Dimitriadis, 1984) απ' όπου προήλθαν με επωθητικές διαδικασίες στην παρούσα θέση τους και κατά τόπους φέρουν χαρακτήρες εκλογιτικής φάσης μεταμόρφωσης (Dimitriadis & Godelitsas, 1991).

Η **ενότητα των Κερδυλλίων** θεωρείται γενικά προκάμβριας ηλικίας και αποτελείται από γνευσίους, οι οποίοι συνιστούν τους βαθύτερους ορίζοντες της Σερβομακεδονικής μάζας και ίσως τους βαθύτερους ορίζοντες πετρωμάτων σ' όλη την Ελλάδα (Σακελλαρίου, 1989). Συγκεκριμένα το κύριο πέτρωμα της σειράς Κερδυλίων είναι λεπτομεσόκοκκοι βιοτιτικοί γνεύσιοι, οι οποίοι προς το βάθος μεταβαίνουν σε μιγματιτικούς γνεύσιους με οφθαλμοειδή δομή.

Στην περιοχή μεταξύ Ζέπκου και Ολυμπιάδας εντοπίζεται πλαγιокλαστικός – μικροκλινικός – γνεύσιος που κατά θέσεις έχει υποστεί έντονη καλιούχο μετασώματωση από πυκνό δίκτυο πηγματιτικών-απλιτικών φλεβών και φλεβιδίων αλλά με χαρακτηριστική απουσία ενστρώσεων μαρμάρου. Εντός των γνευσίων παρατηρούνται λεπτές ενστρώσεις λεπτόκοκκων αμφιβολιτών και αμφιβολιτικών γνευσίων (Οικονομίδης, 2000).

Τρεις κύριοι ορίζοντες λευκών – γκρίζων μαρμάρων με πάχος από 10m έως 500m παρεμβάλλονται εντός των γνευσίων. Τοπικά είναι δολομιτικής σύστασης και δείχνουν εσωτερική στρωμάτωση. Τα μάρμαρα φιλοξενούν τα κοιτάσματα μεικτών θειούχων (Frei 1992, Kalogeropoulos et al., 1989. Επίσης, το κατώτερο μάρμαρο τέμνεται από το γρανοδιορίτη του Στρατωνίου στην περιοχή Σιδηρόλακκου.

Πυριγενείς διεισδύσεις διακόπτουν τη συνέχεια των μεταμορφωμένων πετρωμάτων της Σερβομακεδονικής μάζας και κατατάσσονται συμβατικά σε τέσσερις φάσεις μαγματισμού (Σχήμα 4.3).

Η πρώτη φάση μαγματισμού βασικής - υπερβασικής σύστασης προαλπικής ηλικίας εντοπίζεται κυρίως στο χώρο επαφής των δύο ενοτήτων Βερτίσκου και Κερδυλλίων βόρεια της λίμνης Βόλβης και απαρτίζεται από μεταβασικά πετρώματα ορθο – αμφιβολίτες, μετα – γάββρους και μετα – διαβάσες τα οποία περιέχουν τα υπολείματα των εκλογιτών.

Η δεύτερη φάση μαγματισμού γρανιτικής σύστασης είναι Άνω Παλαιοζωικής ηλικίας συνδεδεμένη με την Ερκύνια ορογένεση και αντιπροσωπεύεται από τους πλαγιокλαστικούς – μικροκλινικούς γνεύσιους των περιοχών Κερδυλλίων, Ολυμπιάδας, Βερτίσκου οι οποίοι θεωρούνται παλιοί γρανίτες.

Η επόμενη φάση μαγματισμού Μεσοζωικής ηλικίας δημιούργησε τους μεγάλους γρανιτικούς όγκους της Αρναίας (135 – 212 Ma) του Μονοπήγαδου, του Λαχανά, τον χαλαζιακό Διορίτη του Φλαμουρίου στο όρος Βερτίσκος και άλλους. Οι πλουτωνικοί αυτοί όγκοι ανάγονται στη βύθιση του ωκεανού της ζώνης Αζιού και θεωρούνται σύγχρονοι με την κύρια αλπική πτύχωση του Ιουρασικού.

Ο γρανίτης της Αρναίας, ο οποίος χρονολογείται περί τα 155 ± 11 Ma (DeWet et al. 1989), πρόκειται για μεσοκοκκώδη βιοιτιτικό – μοσχοβιτικό – λευκογρανίτη, και βρίσκεται σε τεκτονική επαφή με τους γνευσίους του Βερτίσκου. Οι Ανατηξίτες, ηλικίας Ανώτερου Κρητιδικού – Ηώκαινου, αναπτύσσονται μέσα στους βιοιτιτικούς γνεύσιους των Κερδυλλίων και μεταβαίνουν σε χονδρόκοκκους διατηξίτες. Πρόκειται για πυκνό δίκτυο πηγματιτικών και απλιτικών φλεβών, υλικό ανατηκτικής προέλευσης, το οποίο προκαλεί έντονη Κ-ούχα μετασώματωση στο περιβάλλον γνευσιακό πέτρωμα.

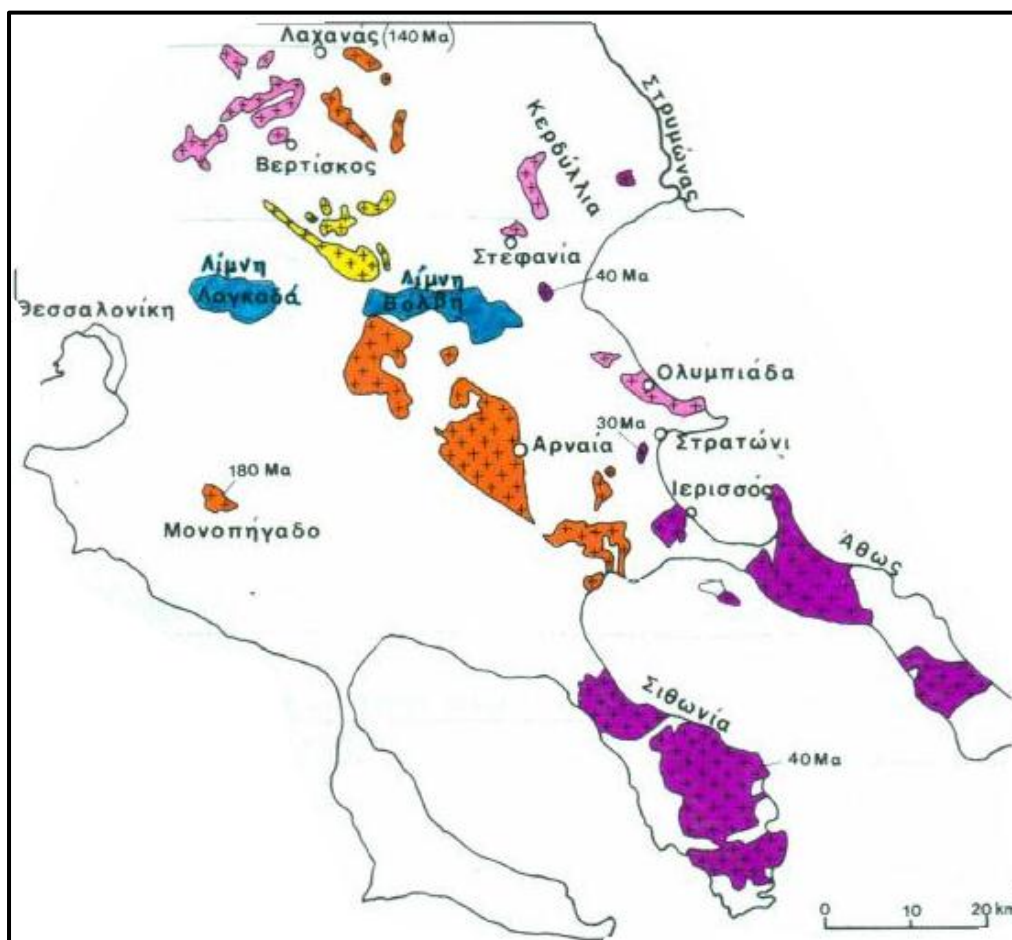
Τέλος, η τέταρτη μαγματική φάση ήταν του Τριτογενούς (Ηώκαινο - Ολιγόκαινο), μετά – ορογενετική, όξινη που δημιούργησε τον γρανίτη της Ιερισσού, τον γρανίτη της Σιθωνίας, τον γρανίτη της Μονής Γρηγορίου στο Άγιο Όρος, τον γρανοδιορίτη του Στρατωνίου, τους χαλαζιακούς διορίτες Μεγάλης Παναγίας, Στεφανίας και Στρυμώνα. Με τη φάση αυτή συνδέονται και ορισμένες εμφανίσεις πορφύρων και πηγματιτικών και απλιτικών φλεβών με πλούσια μεταλλοφορία.

Ο Γρανοδιορίτης της Ιερισσού, ηλικίας $50,4 \pm 0,7$ Ma κατά Frei (1992), αποτελεί μια αδρομεσοκρυσταλλική διείδυση, ασβεσταλκαλικής σύστασης που διεisdύει στα υπερβασικά πετρώματα της περιοχής, αλλά και στους γνεύσιους του Βερτίσκου. Οι επαφές με τα περιβάλλοντα πετρώματα είναι απότομες και έχουν επηρεαστεί θερμικά, ενώ απλιτικές και πηγματιτικές φλέβες εμφανίζονται σε απόσταση από την επαφή.

Ο Γρανодиόριτης του Στρατωνίου, Ολιγοκαινικής ηλικίας (27.6 ± 1.0 Ma) κατά Frei (1992) και Ηώκαινικής ηλικίας (35 ± 4 Ma) κατά Barbieri et al. (1995) αποτελεί μία λεπτο- έως αδρο- κρυσταλλική διεισδυση ασβεσταλκαλικής σύστασης εντός της σειράς των Κερδυλλίων. Η έκταση του στην επιφάνεια είναι μικρή ενώ με βάση τα γεωφυσικά δεδομένα, επεκτείνεται σε βάθος μεταξύ Στρατωνίου-Ολυμπιάδας.

Τέλος στο βόρειο χώρο της Σερβομακεδονικής έχουν εντοπισθεί μερικές μικρές εμφανίσεις (Ποντοκερασιάς, Στρυμονικού κ.λ.π.) ρυολίθων, ανδεσιτών που οφείλονται στην ηφαιστειότητα που εκδηλώθηκε στα τελευταία στάδια ($23 - 28$ Ma) της Μαγματικής φάσης του Τριτογενούς.

Υποηφαιστιακές διεισδύσεις (ηλικίας 20 ± 1 Ma κατά Frei (1992)). Πρόκειται για κεροσιλβικές βιοτιτικές χαλαζοδιοριτικές – διοριτικές και ανδεσιτικές πορφυριτικές διεισδύσεις που φέρουν διάσπαρτη και φλεβική μεταλλοφορία Cu, Au (Σκουριές, Φυσώκα) με σημαντική άλω υδροθερμικής εξαλλοίωσης (Σκουριές – Αλατίνα – Φυσώκα). Αποτελούν υποηφαιστιακές διεισδύσεις κατανεμημένες μέσα στα ρήγματα με διεύθυνση BBA-NNΔ, του τριτογενούς εφελκυστικού τεκτονισμού. Η μαγματική αυτή δραστηριότητα, εκτός των φαινομένων μεταμορφισμού επαφής και ανάδρομης πρασινοσχιστολιθικής φάσης μεταμόρφωσης, οδηγεί και στις υδροθερμικές μεταλλοφόρες συγκεντρώσεις της περιοχής.



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

	Τριτογενείς πυριγενείς διεισδύσεις
	Μεσοζωικές πυριγενείς διεισδύσεις
	Παλαιοζωικές πυριγενείς διεισδύσεις

Σχήμα 4.3: Σκαρίφημα του ευρύτερου χώρου της Σερβομακεδονικής μάζας με τις κυριότερες πλουτωνικές εμφανίσεις και τις αντίστοιχες ηλικίες των ραδιοχρονολογήσεων,  Παλαιοζωικές πυριγενείς διεισδύσεις,  Μεσοζωικές πυριγενείς διεισδύσεις,  Τριτογενείς πυριγενείς διεισδύσεις (τροποποιημένο από Μουντράκη, 1983).

4.2 Το κοιτάσμα του Μαντέμ Λάκκου

Η περιοχή της ΒΑ Χαλκιδικής παρουσιάζει έντονο κοιτασματολογικό και μεταλλευτικό ενδιαφέρον λόγω των σημαντικών κοιτασμάτων σουλφιδίων βασικών και πολύτιμων μετάλλων. Τα κοιτάσματα αυτά εντοπίζονται στο σχηματισμό των Κερδυλίων, κατά μήκος του μεταλλοφόρου ρήγματος-επώθησης Στρατωνίου-Βαρβάρας, ενώ στο σχηματισμό του Βερτίσκου απαντούν τα πορφυριτικού τύπου κοιτάσματα χαλκού-χρυσού.

Τα πετρώματα της ενότητας Κερδυλλίων έχουν πτυχωθεί σχηματίζοντας μια γενικότερη αντικλινική δομή. Το επονομαζόμενο αντίκλινο των Κερδυλλίων έχει άξονα διεύθυνσης ΑΝΑ-ΔΒΔ, με βύθιση προς τα ΝΑ, και οριοθετείται στα βόρεια από τον αμφιβολιτικό γνεύσιο και στα νότια από το ρήγμα – επώθηση Στρατωνίου-Βαρβάρας, το οποίο όπως προαναφέρθηκε αποτελεί το διαχωριστικό όριο των σχηματισμών Κερδυλλίων-Βερτίσκου. Στο αντίκλινο αυτό και εντός του μαρμάρου των Κερδυλλίων και κοντά στην επαφή με το ρήγμα Στρατωνίου φιλοξενείται η μεταλλοφορία των μεικτών θειούχων μεταλλευμάτων Μαντέμ Λάκκου.

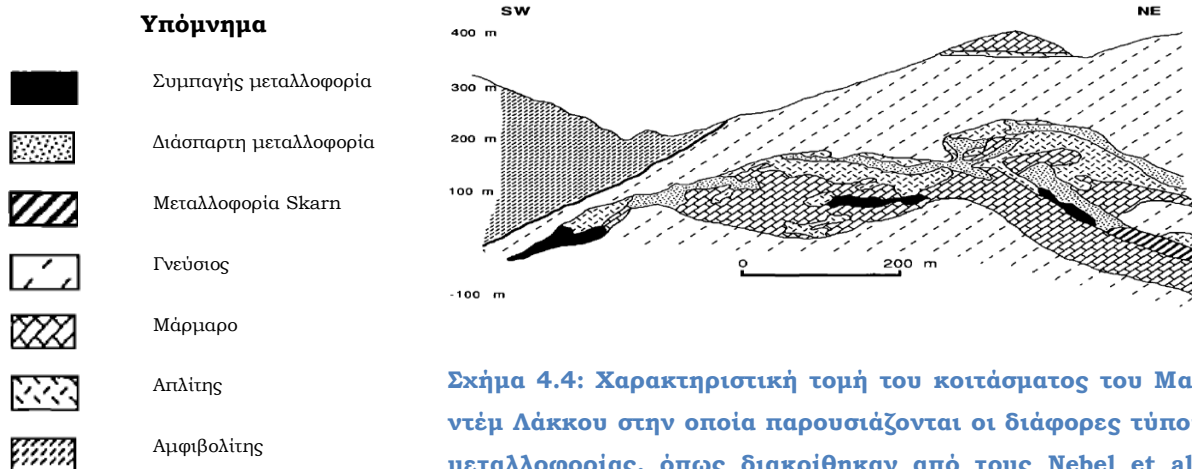
Σύμφωνα με τον Frei (1992) και τους Kalogeropoulos et al. (1989) το κοιτάσμα του Μαντέμ Λάκκου κατατάσσεται στην κατηγορία των πολυμεταλλικών (Pb-Zn-Ag-Au) κοιτασμάτων υδροθερμικής αντικατάστασης ανθρακικών πετρωμάτων (hydrothermal carbonate replacement). Το κοιτάσμα εντοπίζεται εντός των διοικητικών ορίων του Δ.Δ. Στρατονίκης του Δήμου Σταγίων – Ακάνθου 2 km Α των ορίων του οικισμού. Το σύνολο της περιοχής των μεταλλείων Στρατωνίου αποτελεί μεταλλειοκτησία της Ελληνικός Χρυσός Α.Ε. και ανήκει στις μεταλλευτικές παραχωρήσεις Φ16 και ΟΠ25.

Με βάση τα ιστορικά στοιχεία παραγωγής, η συνολική ποσότητα μεταλλεύματος που έχει εξορυχθεί από την περιοχή από τις δύο προηγούμενες μεταλλειοκτητήτριες εταιρείες Α.Ε.Ε.Χ.Π.&Λ και TVX Hellas Α.Ε. ανέρχεται σε περίπου 24 Mt. Από αυτά, οι 15,5 Mt προήλθαν από τα υπόγεια Μεταλλεία των Μαύρων Πετρών και Μαντέμ Λάκκου ενώ οι υπόλοιποι 8,5 Mt από την παλαιά επιφανειακή εκμετάλλευση στην περιοχή Σεβαλιέ. Η μέση σύσταση του κοιτά-

σματος του Μαντέμ Λάκκου υπολογίζεται σε: Au 1-2 gr/tn, Ag 279 gr/t, Zn 12%, Pb 10,4%.

Στο Μαντέμ Λάκκο υπήρχαν 7 κύρια μεταλλοφόρα σώματα, τα οποία ονομάστηκαν τομέας IIb, τομέας III, τομέας Vb, τομέας VI, τομέας VIb, VIII και ο τομέας θερμών (Hot area). Οι εργασίες εξόρυξης εκτείνονται εντός του μεταλλείου από τα 262 m πάνω από το απόλυτο υψόμετρο της θάλασσας έως -115 m κάτω από αυτό. Τα μεταλλοφόρα σώματα του Μαντέμ Λάκκου βρίσκονται στον στρωματογραφικά κατώτερο από τους δύο ορίζοντες μαρμάρων. Η μεταλλοφορία του Μαντέμ Λάκκου ακολουθεί τη γεωμετρία του κυρίως αντικλίνου, με διεύθυνση ΑΝΑ-ΔΒΔ και βύθιση προς τα ΝΑ. Στο κεντρικό τμήμα του κοιτάσματος του Μαντέμ Λάκκου, κοντά στον άξονα του αντικλίνου, τα μεταλλοφόρα σώματα είναι υπο-οριζόντια, ενώ μακριά από την κεντρική περιοχή, τα μεταλλοφόρα σώματα βαθαινούν απότομα, προσεγγίζοντας τις άκρες του αντικλίνου (Haines, 1998).

Οι ζώνες μεταλλοφορίας του Μαντέμ Λάκκου συνίστανται από φακούς σιδηροπυρίτη, γαληνίτη και σφαλερίτη. Οι φακοί παρουσιάζουν μια γενικότερη ΒΔ διεύθυνση έχοντας μεγαλύτερη γωνία βύθισης (25° - 65°) προς ΝΔ. Κάτω από τη μεταλλοφορία του Μαντέμ Λάκκου βρίσκεται ο αμφιβολιτικός γνεύσιος, ο οποίος αποτελεί και τον πυρήνα του αντικλίνου. Το νότιο άκρο αυτού του αντικλίνου βρίσκεται κάτω από το ρήγμα του Στρατωνίου (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4: Χαρακτηριστική τομή του κοιτάσματος του Μαντέμ Λάκκου στην οποία παρουσιάζονται οι διάφορες τύποι μεταλλοφορίας, όπως διακρίθηκαν από τους Nebel et al. (1991).

Οι Nebel et al. (1991) κατόπιν λεπτομερούς ορυκτολογικής, ιστολογικής και γεωχημικής εξέτασης της μεταλλοφορίας του Μαντέμ Λάκκου διέκριναν τρεις τύπους: 1) την συμπαγή μεταλλοφορία, 2) τη διάσπαρτη μεταλλοφορία και τη μεταλλοφορία Skarn.

Επιπλέον αναφέρουν ότι η συμπαγής μεταλλοφορία παρουσιάζει καλά ανεπτυγμένο μεταμορφικό ιστό το οποίο τους οδήγησε στο συμπέρασμα ότι θα πρέπει να έχει δεχθεί μεταμόρφωση αμφιβολιτικής φάσης μαζί με τα περιβάλλοντα πετρώματα (μάρμαρα, γνεύσιοι). Παρά τη μεταμόρφωση της συμπαγούς μεταλλοφορίας, η τελευταία διατηρεί μια γενικότερη στρωμάτωση έχοντας απότομες επαφές με τα γειτονικά πετρώματα και αποτελείται κυρίως από σιδηροπυρίτη, σφαλερίτη, γαληνίτη και ελάχιστες ποσότητες χαλκοπυρίτη και αρσενοπυρίτη με τοπική παρουσία χαλαζία και γραφίτη (Nebel et al., 1991).

Η κατανομή της συμπαγούς μεταλλοφορίας περιορίζεται στο κεντρικό και νοτιοδυτικό τμήμα του μεταλλείου στα πατώματα +66, +72, +88 (Nebel et al., 1991) και -115. Ακανόνιστοι φακοί και αποφύσεις συμπαγούς μεταλλοφορίας με μέγεθος από λίγα εκατοστά έως λίγα μέτρα, διακόπτουν τα γειτονικά μάρμαρα. Έχει παρατηρηθεί ότι οι φακοί περιέχουν περισσότερο γαληνίτη.

Η πιο διαδεδομένη μεταλλοφορία είναι η διάσπαρτη και απαντάται σε όλα τα πατώματα του μεταλλείου. Αποτελείται από ένα πολύπλοκο σύστημα φλεβιδίων - διαποτισμών (impregnations) και φιλοξενείται σε υδροθερμικά εξαλλοιωμένα μάρμαρα, απλίτες και πηγματίτες. Η επαφή της διάσπαρτης μεταλλοφορίας με τα μάρμαρα και τους απλίτες παρουσιάζει διαβάθμιση σε αντίθεση με τους γνευσίους, η οποία είναι απότομη. Η ορυκτολογία της διάσπαρτης μεταλλοφορίας αποτελείται από σιδηροπυρίτη, σφαλερίτη, τενναντίτη, χαλκοπυρίτη, αρσενοπυρίτη, γαληνίτη, σελιγμανίτη, βουλανζεριτίτη και μικρές ποσότητες θειοαλάτων μέσα σε μια ανθρακική κύρια μάζα. Η διάσπαρτη μεταλλοφορία τέμνει και αντιδρά με τη συμπαγή μεταλλοφορία και δεν παρουσιάζει ενδείξεις μεταμόρφωσης. Τέλος η διάσπαρτη μεταλλοφορία παρουσιάζει αυξημένη περιεκτικότητα σε Cu, As, Mn, Sb και Bi σε σχέση με τη συμπαγή μεταλλοφορία (Nebel et al., 1991).

Η μεταλλοφορία τύπου Skarn περιέχει σιδηροπυρίτη, χαλκοπυρίτη, σεελίτη, και μικρότερες ποσότητες σφαλερίτη, γαληνίτη και θειοάλατα Pb-Bi και μια ασβεστο-πυριτική κύρια μάζα σύνδρομων ορυκτών. Αυτά είναι γρανάτες (ανδραδίτης - γροσσουλαριος), διοψίδιος, ασβεστίτης, χαλαζίας, επίδοτο και σε μικρότερο ποσοστό χλωρίτης, ακτινόλιθος και μαγνητίτης (Nebel et al., 1991).

5 Υλικά και Μέθοδοι

5.1 Σύνοψη των δεδομένων και της ερευνητικής μεθοδολογίας

Η εκτίμηση αποθεμάτων αποτελεί μια συνθετική επιχείρηση που απαιτεί ένα εύρος επαγγελματικών ειδικοτήσεων. Στις περιπτώσεις εκτίμησης των αποθεμάτων μπορεί να χρειαστεί μια μεγάλη ομάδα επαγγελματιών. Συνήθως συμμετέχουν Γεωλόγοι και Μεταλλειολόγοι μηχανικοί, όπως επίσης και ειδικοί στα οικονομικά των Ορυκτών Πρώτων Υλών, αλλά και από κάθε είδος εξειδικευμένου τομέα που μπορεί να είναι συναφής με το συγκεκριμένο κοιτάσμα ή τις υποδομές που απαιτούνται ώστε να εξορυχθεί.

Ωστόσο, η βασική προϋπόθεση στην εκτίμηση των αποθεμάτων αποτελεί η γνώση της χωρικής κατανομής των περιεκτικοτήτων και οι τοποθεσίες των μεταλλοφόρων όγκων που είναι πάνω από το όριο εκμεταλλευσιμότητας. Όποιος και αν είναι ο σκοπός μιας εκτίμησης αποθεμάτων, θα πρέπει να γίνει με μεθοδευμένο τρόπο. Αδυναμίες και ειδικότερα σημαντικές παραδοχές θα πρέπει να επισημαίνονται ώστε να βελτιώνονται με την προσθήκη νέων δεδομένων. Η ενδεχόμενη εκτίμηση αποθεμάτων δεν πρέπει να θεωρηθεί σαν τελική, αντιθέτως θα πρέπει να θεωρηθεί σαν ένα συνεχώς βελτιούμενο προϊόν, με την περιοδική προσθήκη καινούργιων δεδομένων.

Στην ευρύτερη περιοχή του Μαντέμ Λάκκου πραγματοποιήθηκαν 1123 γεωτρήσεις με συνολικό μήκος 92569.61 m. Από τις προαναφερθείσες διατρήσεις το 28.58 % (26459.30 m) είναι επιφανειακές ενώ το 71.41 % (66110.31 m) είναι μέσα από τις στοές του μεταλλείου. Οι γεωτρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε διάφορα χρονολογικά στάδια ξεκινώντας από τη δεκαετία του 1950 και καταλήγοντας μέχρι και το 1997 καλύπτοντας μια γεωγραφική έκταση 13,59 Km². Το εμβαδό αυτό προκύπτει από ένα ορθογώνιο το οποίο περικλείει τις εν λόγω γεωτρήσεις και έχει συντεταγμένες (HATT) της κάτω αριστερής γωνίας X: 24647, Y: -27302 και της άνω δεξιάς X: 28049, Y: -23307.

Σε κάθε γεώτρηση υπάρχει η αντίστοιχη λιθολογική περιγραφή. Οι διάφοροι λιθολογικοί τύποι που έχουν καταγραφεί παρατίθενται παρακάτω αλφαβητικά.

- Αμφιβολίτης
- Απλίτης
- Γνεύσιος
- Γρανοδιορίτης
- Κερατόλιθος
- Λαμπροφύρης
- Μάρμαρο
- Μεταλλοφορία
- Μηγματίτης
- Μυλωνίτης
- Πηγματίτης
- Πορφύρης
- Σκαρν
- Σχιστόλιθος
- Τεκτονικό λατυποπαγές - breccia

Οι πυρήνες των γεωτρήσεων αποθηκεύθηκαν σε ειδικό χώρο του μεταλλείου όπου ακολούθησε λεπτομερής καταγραφή πολλών παραμέτρων. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι γεωλογικές περιγραφές των γεωτρήσεων. Στο πρώτο μισό του πυρήνα πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία ανά 1m ενώ το δεύτερο μισό αποθηκεύθηκε σαν αντιδείγμα. Κατόπιν τα δείγματα στάλθηκαν στο χημείο της εταιρείας για χημική ανάλυση. Τα χημικά στοιχεία που προσδιορίστηκαν είναι κατά σειρά σπουδαιότητας τα εξής Au, Ag, Pb, Zn, Cu, Fe, As, Sb και Bi.

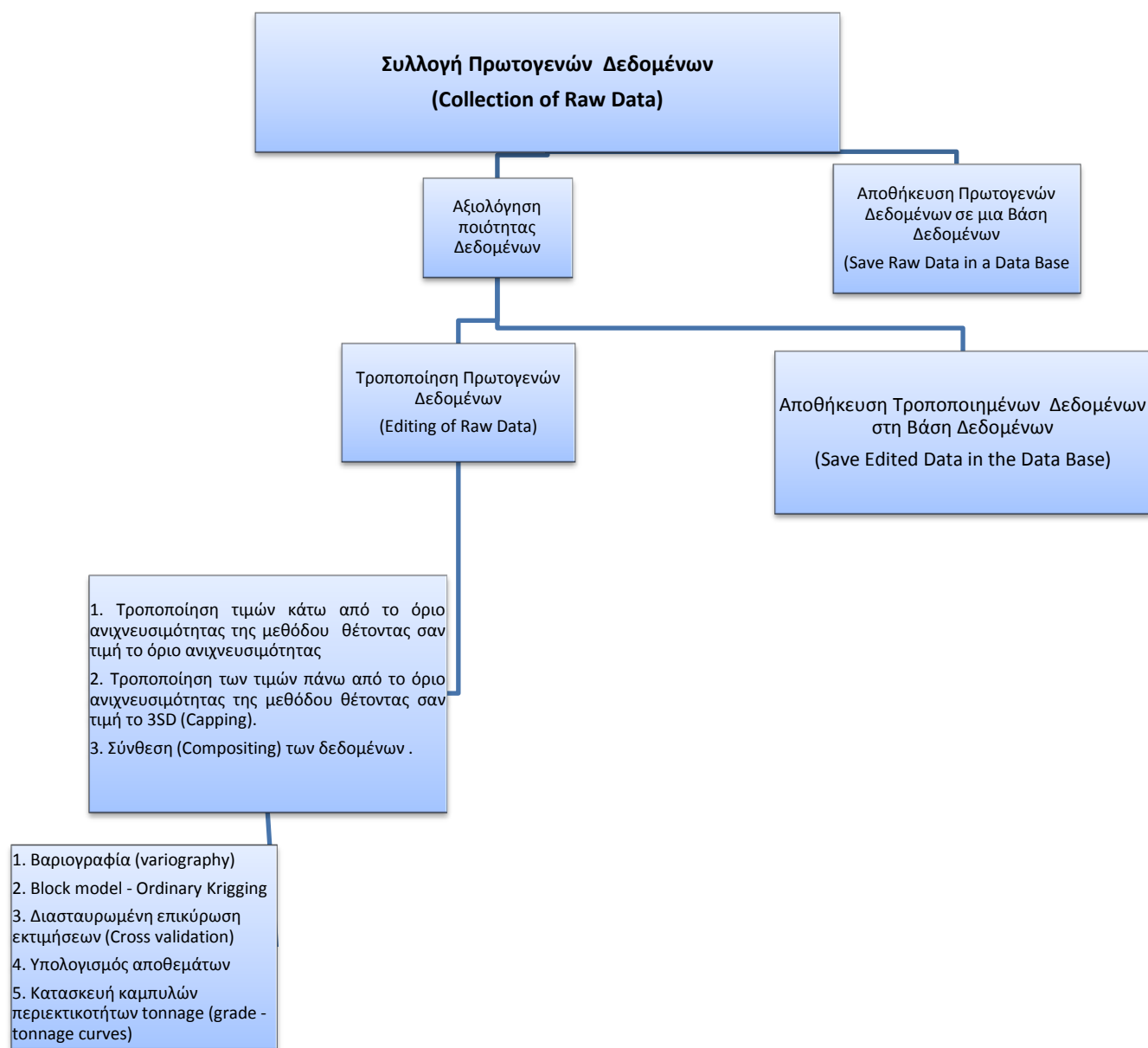
Ο χρυσός προσδιορίστηκε με Fire Assay ενώ τα υπόλοιπα μέταλλα αναλύθηκαν με ICP-AES (Induced Coupled Plasma – Atomic Emission Spectroscopy). Όλα τα αποτελέσματα είναι εκφρασμένα σε wt% για το κάθε στοιχείο εκτός από το Au και τον Ag, τα οποία είναι σε ppm (gr/tn). Το όριο ανιχνευσιμότητας για το Au και τον Ag είναι 0.01ppm και για τα λοιπά μέταλλα είναι 0.01 wt%.

Για τους σκοπούς της διατριβής ειδικεύθηκε δημιουργήθηκε ειδική βάση δεδομένων με τη βοήθεια του λογισμικού Vulcan. Όλα τα διαθέσιμα πρωτογενή δεδομένα οργανώθηκαν σε μια βάση τύπου ISIS, όπου και αποθηκεύτηκαν. Ακολούθησε αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων.

Κατόπιν, πραγματοποιήθηκαν τροποποιήσεις στα πρωτογενή δεδομένα ώστε να αξιοποιηθούν στην εκτίμηση των αποθεμάτων. Συγκεκριμένα, όσες τιμές χημικών αναλύσεων ήταν κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας, αντικαταστάθηκαν με την τιμή του ορίου ανιχνευσιμότητας. Για την αποφυγή υπερεκτιμήσεων των αποθεμάτων τέθηκε σαν ανώτατο όριο (capping) στις ακραίες τιμές των χημικών αναλύσεων η τιμή του 3SD ανά στοιχείο. Κατόπιν, ακολούθησε σύνθεση (compositing) των δεδομένων ανά 4m.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν ημιβαριογράμματα για τον καθορισμό της χωρικής συσχέτισης μεταξύ των τιμών των μεταβλητών εντός του κοιτάσματος. Συγκεκριμένα, κατασκευάστηκαν ημιβαριογράμματα καταμήκος των γεωτρήσεων (downhole semivariograms) για να εκτιμηθεί το φαινόμενο κόκκου (nugget effect). Κατασκευάστηκαν τα ημιβαριογράμματα για κάθε στοιχείο ξεχωριστά σε διάφορες διευθύνσεις για τον προσδιορισμό του ελλειψοειδούς ανισοτροπίας στο μεταλλοφόρο σώμα.

Επιπρόσθετα, κατασκευάστηκε το μοντέλο τεμαχών (block model) της μεταλλοφορίας με τη χρήση της μεθόδου του κανονικού Krigging (ordinary Krigging) από την οποία προέκυψε μια ταξινόμηση των εκτιμηθέντων τεμαχών (block) σε τρεις κατηγορίες (βέβαια αποθέματα, δυνατά αποθέματα και πιθανά αποθέματα). Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν ανά κατηγορία περιγράφονται στο Σχήμα 5.1. Τέλος, τα εκτιμηθέντα τεμάχια (block) αξιολογήθηκαν με τη μέθοδο της διασταυρωμένης επικύρωσης (cross validation).



Σχήμα 5.1: Ροή διεργασιών που ακολουθήθηκε στην παρούσα διατριβή ειδίκευσης.

5.2 Οργάνωση και αξιολόγηση βάσης δεδομένων στο Vulcan:Isis

Η αξιολόγηση των δεδομένων αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι οποιασδήποτε μελέτης για την εκτίμηση των αποθεμάτων. Περιλαμβάνει εκτενή οργάνωση και κατανόηση των δεδομένων τα οποία είναι το υπόβαθρο για την εκτίμηση των αποθεμάτων. Ο υπέρτατος στόχος της διερευνητικής ανάλυσης δεδομένων (Exploratory Data Analysis) σε μια μελέτη υπολογισμού αποθεμάτων είναι για τη βελτιστοποίηση της ποιότητας της εκτίμησης και συγκεκριμένα:

- 1) Για την αναγνώριση σφαλμάτων
- 2) Παροχή περιεκτικής άποψης για τα στατιστικά και χωρικά χαρακτηριστικά όλων των υπό μελέτη μεταβλητών για την εκτίμηση των αποθεμάτων
- 3) Για την καταγραφή και κατανόηση των σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών
- 4) Για την αναγνώριση οποιασδήποτε συστηματικής χωρικής μεταβολής των μεταβλητών, όπως για παράδειγμα η περιεκτικότητα και το πάχος των μεταλλοφόρων ζωνών
- 5) Για την αναγνώριση και για τον καθορισμό διακριτών γεωλογικών πεδίων (domains) τα οποία θα πρέπει να αξιολογηθούν ανεξάρτητα στη μελέτη εκτίμησης των αποθεμάτων
- 6) Για την αναγνώριση και κατανόηση των ακραίων τιμών (outliers)
- 7) Για την εκτίμηση της ομοιότητας/ανομοιότητας των διαφόρων τύπων των πρωτογενών δεδομένων, ειδικότερα για τα δείγματα που έχουν διαφορετική στήριξη (support)

Οι επιμέρους στόχοι δεν είναι αμοιβαία αποκλειόμενοι (mutually exclusive) αλλά ο καθένας έχει το δικό του αντίκτυπο στην εκτίμηση των αποθεμάτων. Η οργάνωση των δεδομένων και η εκτίμηση μπορεί να καταναλώσει έως και το 50% του απαιτούμενου χρόνου για την εκπόνηση μιας μελέτης εκτίμησης αποθεμάτων.

Για την εκτίμηση των αποθεμάτων θα πρέπει να ακολουθείται μια διαδικασία μορφής κλαδογράμματος (Σχήμα 5.1) και θα ήταν βέλτιστο αν το σύστημα αυτό μεταβαίνει προοδευτικά από απλές σε περισσότερο πολύπλοκες τεχνικές, όταν απαιτείται (Sinclair & Blackwell 2004).

Συνεπώς στην παρούσα διατριβή ειδίκευσης σχεδιάστηκε βάση δεδομένων με πίνακες και πεδία για να δεχτούν τα δεδομένα των γεωτρήσεων, σύμφωνα με τα κριτήρια που προαναφέρθηκαν. Τα δεδομένα προηγουμένως έχουν αποθηκευτεί σε ξεχωριστά αρχεία csv για κάθε πίνακα (Συντεταγμένες, Προσανατολισμός, Λιθολογία, Αναλύσεις). Στην συνέχεια έγινε η εισαγωγή και επικύρωση των δεδομένων.

Παρακάτω ακολουθεί μια σειρά από διαγράμματα που στόχο έχει να αποδώσει οπτικά τη γενικότερη εικόνα για την κατανομή των διαφόρων στοιχείων. Επιπλέον θα αποκομισθούν οι πρώτες εντυπώσεις όσον αφορά κάποιες στατιστικές παραμέτρους όπως ο μέσος, η διάμεσος, η διασπορά κ.λ.π. αλλά και θα αναγνωριστούν οι διαφορετικοί πληθυσμοί που απαρτίζουν τη σύνθετη εικόνα.

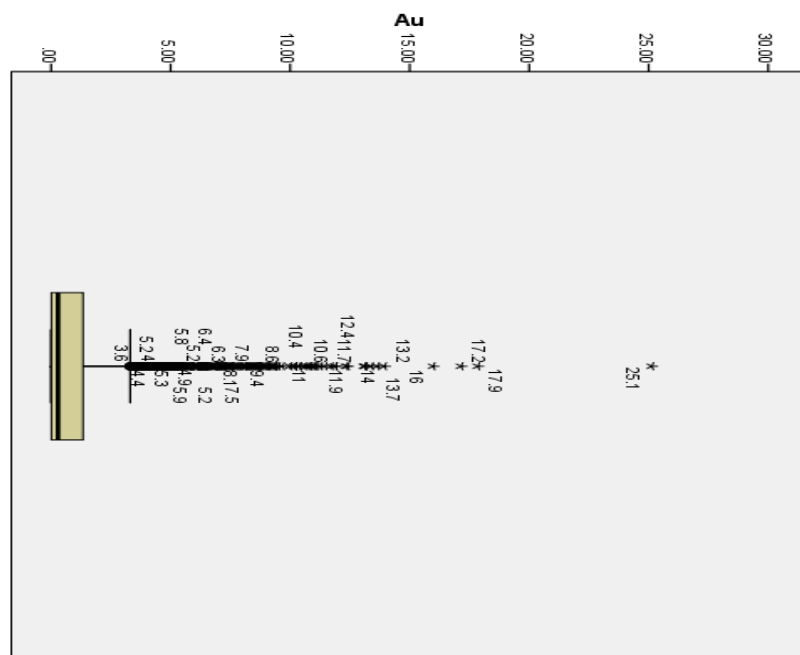
5.3 Μονομεταβλητή Ανάλυση πρωτογενών Δεδομένων (Univariate Analysis of Raw Data)

Χρυσός Au ppm

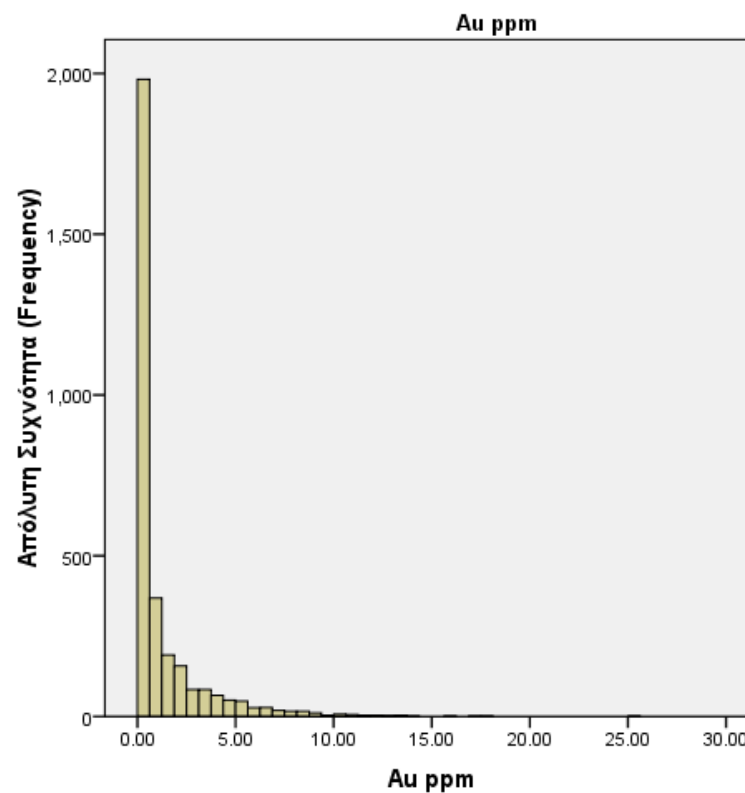
Το θηκόγραμμα του χρυσού παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή του δείγματος X_{min} , η οποία σηματοδοτείται από τη κάτω χορδή του διαγράμματος και είναι 0.01 ppm. Αντιθέτως η μεγαλύτερη «κανονική» τιμή του χρυσού X_{max} οριοθετείται από το ανώτερο άκρο της πάνω χορδής και είναι 3.23 ppm. Η τιμή του πρώτου τεταρτημορίου (βάση του πλαισίου) είναι 0.01 ppm. Η τιμή του δεύτερου τεταρτημορίου (διάμεσος) είναι 0.29 ppm. Η τιμή του τρίτου τεταρτημορίου (οροφή του πλαισίου) είναι 1.33 ppm.

Η κατανομή του χρυσού στο σύνολο των παρατηρήσεων είναι ασύμμετρη με κύρτωση προς τα δεξιά και πολύ μεγάλη μεταβλητότητα. Ουσιαστικά η κατανομή του χρυσού έχει πάρα πολλές χαμηλές τιμές και λίγες υψηλές. Η πιο αντιπροσωπευτική τιμή της κατανομής είναι η διάμεσος (0.29 ppm) όπου με τις σημερινές τιμές των μετάλλων θεωρείται σημαντική αλλά με αρκετά μεγάλη διασπορά πράγμα που δυσκολεύει την συστηματική εκτίμησή της.

Η κατανομή συχνοτήτων του χρυσού είναι ασύμμετρη και παρουσιάζει θετική λοξότητα με τιμή 3.188 το οποίο σημαίνει ότι έχει πάρα πολύ μεγάλη λοξότητα προς τις υψηλές περιεκτικότητες. Επίσης είναι πολύ λεπτόκυρτη με τιμή 14.963. Επιπλέον παρουσιάζει μια κορυφή στα <0.01ppm το οποίο εκ πρώτης όψεως συνεπάγεται τουλάχιστον δύο πληθυσμούς περιεκτικότητας. Τον πρώτο και μεγαλύτερο σε αναλογία που δεν έχει χρυσό και το δεύτερο και μικρότερο που έχει μια ποικίλη περιεκτικότητα σε χρυσό.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα πλαισίου του χρυσού το οποίο κατασκευάστηκε με το λογισμικό SPSS 17.



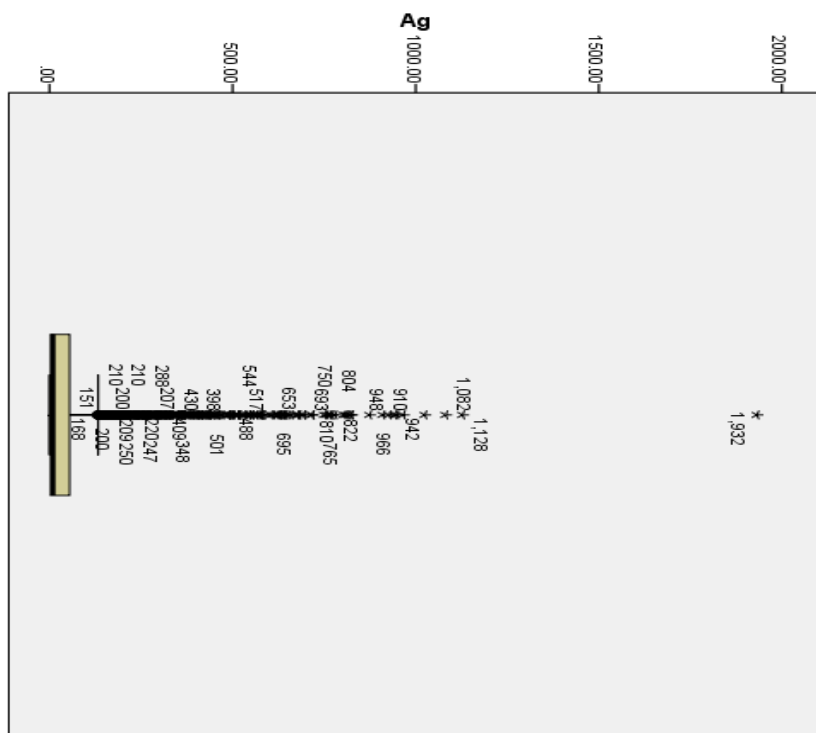
Σχήμα 5.3: Ιστόγραμμα περιεκτικότητας Χρυσού το οποίο κατασκευάστηκε με το λογισμικό SPSS 17.

Άργυρος Ag ppm

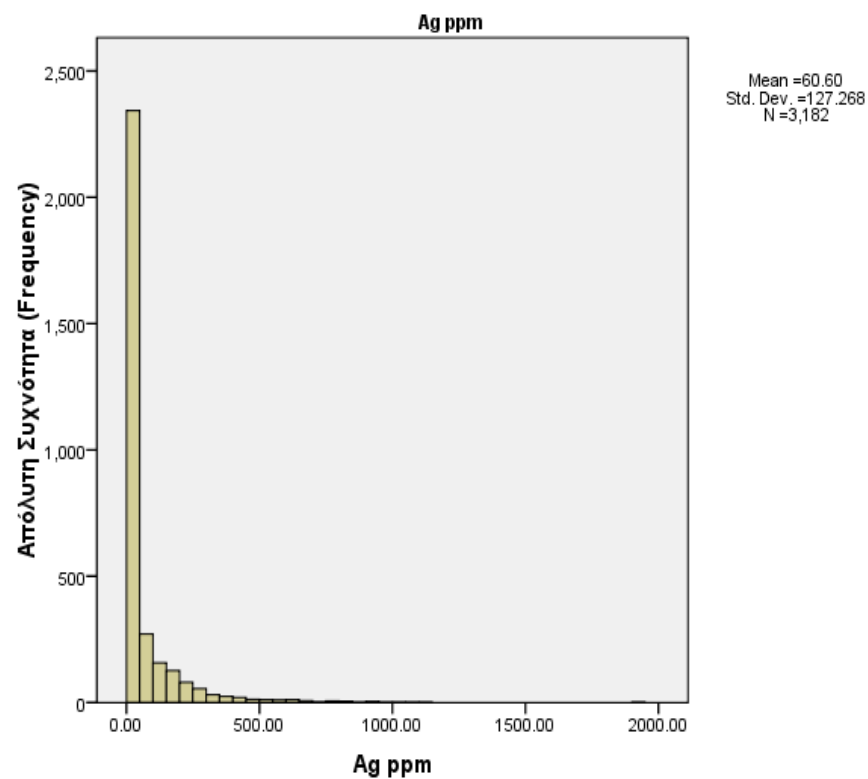
Το θηκόγραμμα του αργύρου παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή του δείγματος X_{min} , η οποία σηματοδοτείται από τη κάτω χορδή του διαγράμματος και είναι 0.01 ppm. Αντιθέτως η μεγαλύτερη «κανονική» τιμή του χρυσού X_{max} οριοθετείται από το ανώτερο άκρο της πάνω χορδής και είναι 150 ppm. Η τιμή του πρώτου τεταρτημορίου (βάση του πλαισίου) είναι 3 ppm. Η τιμή του δεύτερου τεταρτημορίου (διάμεσος) είναι 10 ppm. Η τιμή του τρίτου τεταρτημορίου (οροφή του πλαισίου) είναι 55 ppm.

Η κατανομή του Αργύρου στο σύνολο των παρατηρήσεων είναι ασύμμετρη με κύρτωση προς τα δεξιά και μεγάλη μεταβλητότητα. Ουσιαστικά η κατανομή του αργύρου έχει πάρα πολλές χαμηλές τιμές και λίγες υψηλές. Η πιο αντιπροσωπευτική τιμή της κατανομής είναι η διάμεσος (10 ppm) όπου με τις σημερινές τιμές των μετάλλων θεωρείται σημαντική αλλά με μεγάλη διασπορά πράγμα που δυσκολεύει την συστηματική εκτίμησή της.

Η κατανομή συχνοτήτων του αργύρου είναι ασύμμετρη και παρουσιάζει θετική λοξότητα με τιμή 4.342 το οποίο σημαίνει ότι έχει πάρα πολύ μεγάλη λοξότητα προς τις υψηλές περιεκτικότητες και είναι πολύ λεπτόκυρτη με τιμή 29.493. Επιπλέον παρουσιάζει μια κορυφή στα <0.01ppm το οποίο εκ πρώτης όψεως συνεπάγεται τουλάχιστον δύο πληθυσμούς περιεκτικότητας. Το πρώτο και μεγαλύτερο σε αναλογία που δεν έχει άργυρο και το δεύτερο και μικρότερο που έχει μια ποικίλη περιεκτικότητα σε άργυρο.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα πλαισίου του Αργύρου το οποίο κατασκευάστηκε με το λογισμικό SPSS 17.



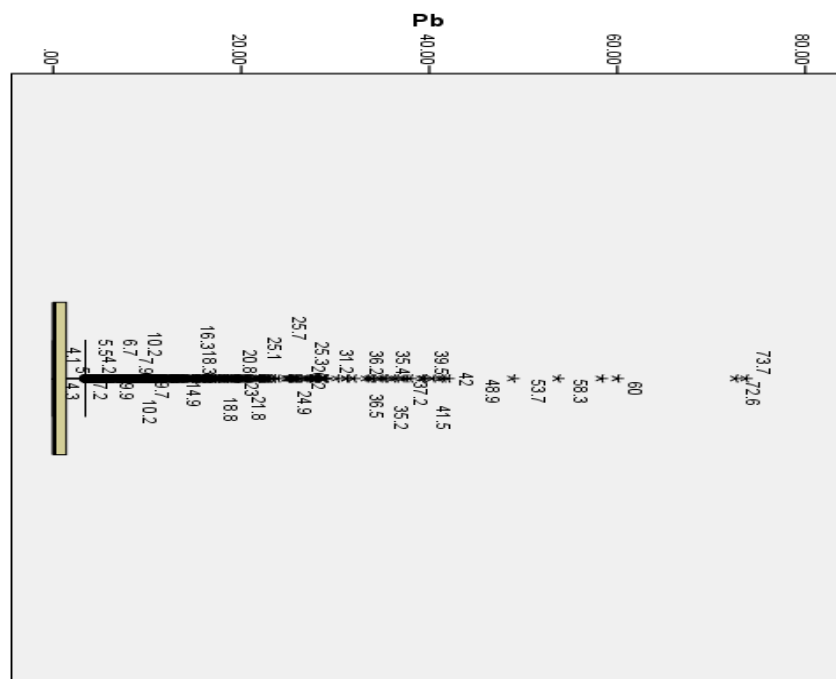
Σχήμα 5.4: Ιστόγραμμα περιεκτικότητας Αργύρου το οποίο κατασκευάστηκε με το λογισμικό SPSS 17.

Μόλυβδος Pb %

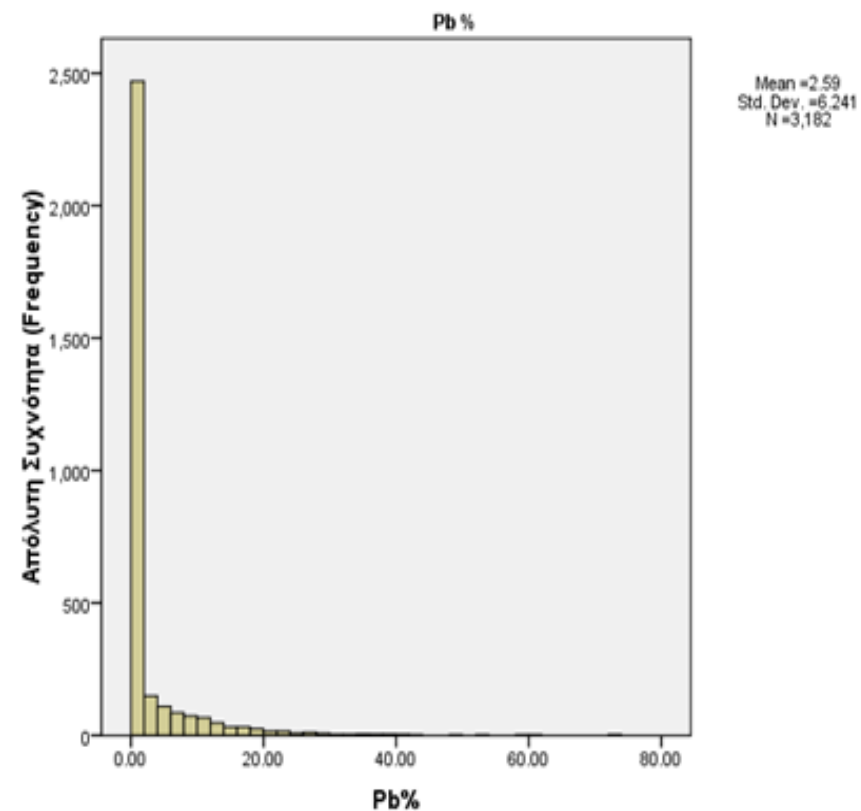
Το θηκόγραμμα του μολύβδου παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή του δείγματος X_{min} , η οποία σηματοδοτείται από τη κάτω χορδή του διαγράμματος και είναι 0.01%. Αντιθέτως η μεγαλύτερη «κανονική» τιμή του χρυσού X_{max} οριοθετείται από το ανώτερο άκρο της πάνω χορδής και είναι 4%. Η τιμή του πρώτου τεταρτημορίου (βάση του πλαισίου) είναι 0.02%. Η τιμή του δεύτερου τεταρτημορίου (διάμεσος) είναι 0.1%. Η τιμή του τρίτου τεταρτημορίου (οροφή του πλαισίου) είναι 1.38%.

Η κατανομή του μολύβδου στο σύνολο των παρατηρήσεων είναι ασύμμετρη με κύρτωση προς τα δεξιά και μέτρια μεταβλητότητα. Ουσιαστικά η κατανομή του μολύβδου έχει αρκετές χαμηλές τιμές αλλά και πολλές υψηλές. Η πιο αντιπροσωπευτική τιμή της κατανομής είναι η διάμεσος (0.1%) όπου με τις σημερινές τιμές των μετάλλων δεν θεωρείται σημαντική και η μέτρια διασπορά των τιμών διευκολύνει τη συστηματική εκτίμηση των περιεκτικοτήτων, οι οποίες είναι σημαντικές ακόμη και εντός των «κανονικών» ορίων των χορδών πράγμα που σημαίνει ότι τα οικονομικά εκμεταλλεύσιμα αποθέματα είναι σημαντικά.

Η κατανομή συχνοτήτων του μολύβδου είναι ασύμμετρη και παρουσιάζει θετική λοξότητα με τιμή 4.129 το οποίο σημαίνει ότι έχει πάρα πολύ μεγάλη λοξότητα προς τις υψηλές περιεκτικότητες και είναι πολύ λεπτόκυρτη με τιμή 24.479. Επιπλέον παρουσιάζει μια κορυφή στα <0.01ppm το οποίο εκ πρώτης όψεως συνεπάγεται τουλάχιστον δύο πληθυσμούς περιεκτικότητας: τον πρώτο και μεγαλύτερο σε αναλογία που δεν έχει μολύβδο και το δεύτερο και μικρότερο που έχει μια ποικίλη περιεκτικότητα σε μολύβδο.



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα πλαισίου του μολύβδου το οποίο κατασκευάστηκε με το λογισμικό SPSS 17.



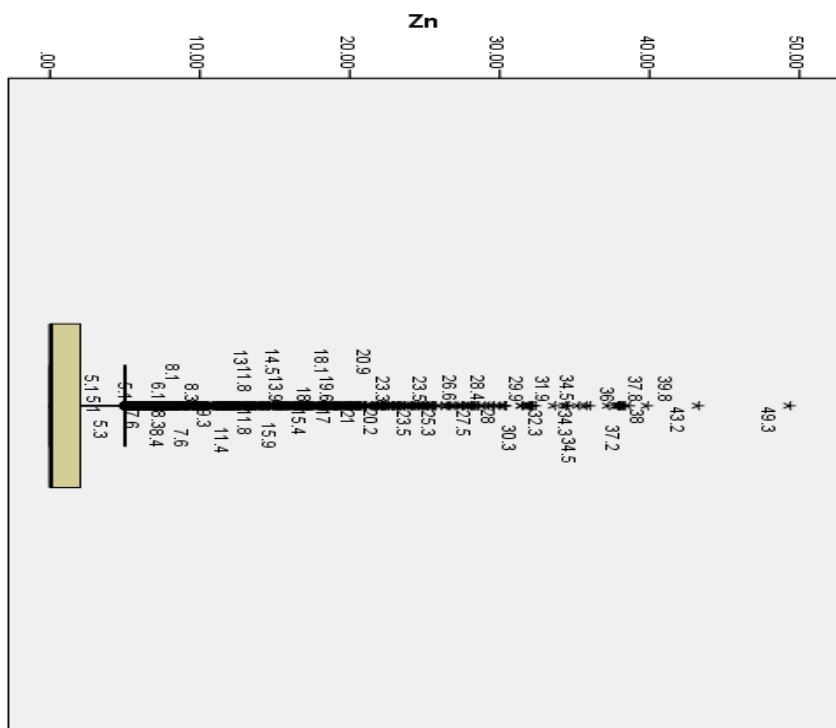
Σχήμα 5.7: Ιστόγραμμα περιεκτικότητας Μολύβδου το οποίο κατασκευάστηκε με το λογισμικό SPSS 17.

Ψευδάργυρος Zn %

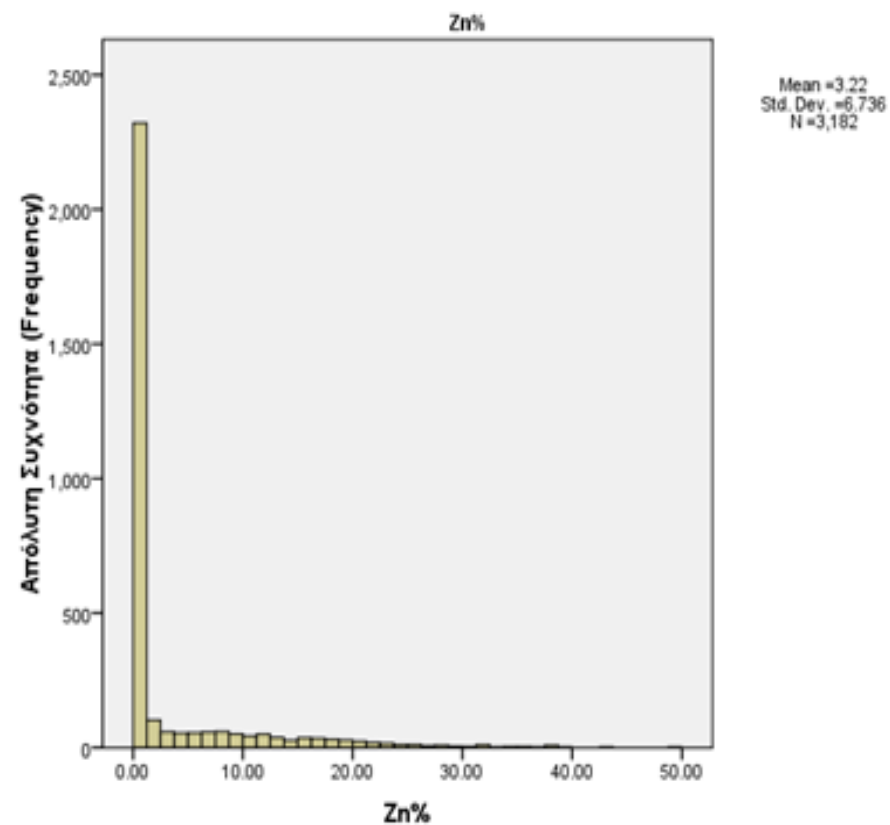
Το θηκόγραμμα του ψευδαργύρου παρουσιάζει ότι η ελάχιστη τιμή του δείγματος $X_{\min}$, η οποία σηματοδοτείται από τη κάτω χορδή του διαγράμματος και είναι 0.01%. Αντιθέτως η μεγαλύτερη «κανονική» τιμή του χρυσού $X_{\max}$ οριοθετείται από το ανώτερο άκρο της πάνω χορδής και είναι 5%. Η τιμή του πρώτου τεταρτημορίου (βάση του πλαισίου) είναι 0.01%. Η τιμή του δεύτερου τεταρτημορίου (διάμεσος) είναι 0.06%. Η τιμή του τρίτου τεταρτημορίου (οροφή του πλαισίου) είναι 2.02%.

Η κατανομή του Ψευδαργύρου στο σύνολο των παρατηρήσεων είναι ισχυρά ασύμμετρη με μεγάλη κύρτωση προς τα δεξιά και μέτρια έως μεγάλη μεταβλητότητα. Ουσιαστικά η κατανομή του μολύβδου έχει αρκετές χαμηλές τιμές αλλά και πολλές υψηλές. Η πιο αντιπροσωπευτική τιμή της κατανομής είναι η διάμεσος (0.06%) όπου με τις σημερινές τιμές των μετάλλων δεν θεωρείται σημαντική και η μέτρια διασπορά των τιμών διευκολύνει τη συστηματική εκτίμηση των περιεκτικοτήτων, οι οποίες είναι σημαντικές ακόμη και εντός των «κανονικών» ορίων των χορδών πράγμα που σημαίνει ότι τα οικονομικά εκμεταλλεύσιμα αποθέματα είναι σημαντικά.

Η κατανομή συχνοτήτων του ψευδαργύρου είναι ασύμμετρη και παρουσιάζει θετική λοξότητα με τιμή 2.586 το οποίο σημαίνει ότι έχει πάρα πολύ μεγάλη λοξότητα προς τις υψηλές περιεκτικότητες. Επίσης είναι λεπτόκυρτη με τιμή 7.035. Επιπλέον παρουσιάζει μια κορυφή στα <0.01ppm το οποίο εκ πρώτης όψεως συνεπάγεται τουλάχιστον δύο πληθυσμούς περιεκτικότητας. Τον πρώτο και μεγαλύτερο σε αναλογία που δεν έχει ψευδάργυρο και το δεύτερο και μικρότερο που έχει μια ποικίλη περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο.



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα πλαισίου του Ψευδαργύρου το οποίο κατασκευάστηκε με το λογισμικό SPSS 17.



Σχήμα 5.6: Ιστόγραμμα περιεκτικότητας Ψευδαργύρου το οποίο κατασκευάστηκε με το λογισμικό SPSS 17.

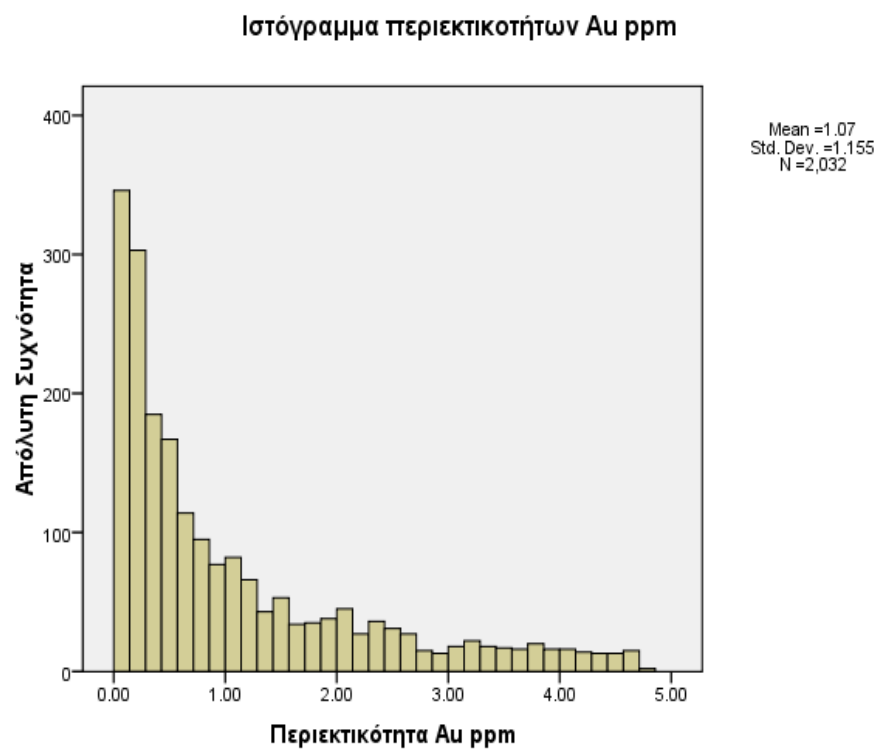
5.4 Μονομεταβλητή Ανάλυση Δεδομένων πάνω από το όριο ανιχνευσιμότητας και δίχως τα outliers - extreme values (Univariate Analysis of Edited Data)

Χρυσός Au ppm

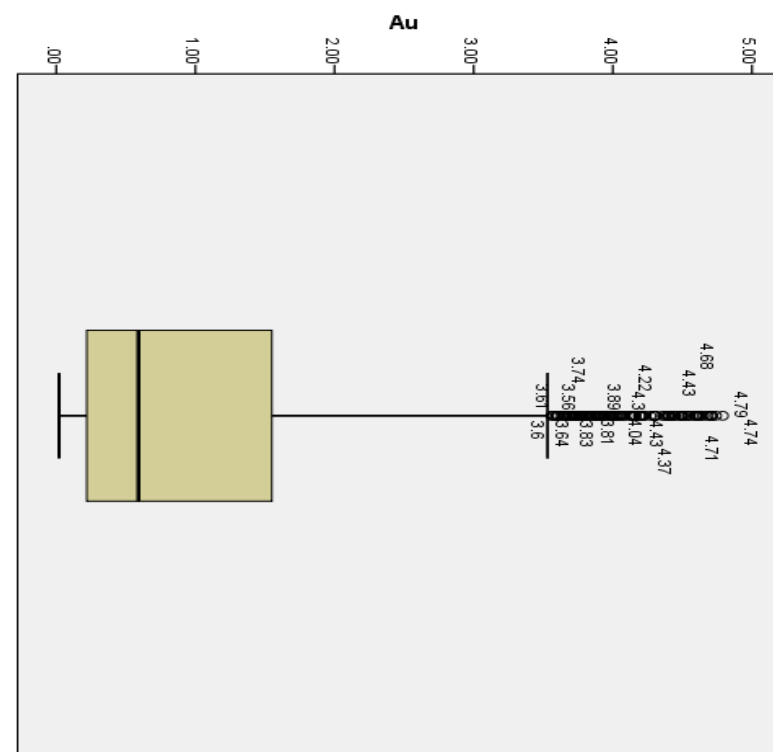
Το παραπάνω ιστόγραμμα και θηκόγραμμα του χρυσού έχει κατασκευαστεί λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές του στοιχείου πάνω από το όριο ανιχνευσιμότητας και δίχως να περιλαμβάνονται οι ακραίες τιμές (outliers - extreme values). Η ελάχιστη τιμή του δείγματος X_{min} , η οποία σηματοδοτείται από τη κάτω χορδή του διαγράμματος είναι 0.02 ppm. Αντιθέτως η μεγαλύτερη «κανονική» τιμή του χρυσού X_{max} οριοθετείται από το ανώτερο άκρο της πάνω χορδής και είναι 3.6 ppm. Η τιμή του πρώτου τεταρτημορίου (βάση του πλαισίου) είναι 0.22 ppm. Η τιμή του δεύτερου τεταρτημορίου (διάμεσος) είναι 0.59 ppm. Η τιμή του τρίτου τεταρτημορίου (οροφή του πλαισίου) είναι 1.55 ppm.

Το διάγραμμα πλαισίου του χρυσού μας πληροφορεί ότι η κατανομή του τελευταίου στο σύνολο των παρατηρήσεων είναι ασύμμετρη με κύρτωση προς τα δεξιά και πολύ μεγάλη μεταβλητότητα. Η ασυμμετρία της κατανομής εκφράζεται με θετική λοξότητα (1.4) το οποίο σημαίνει ότι έχει πάρα πολύ μεγάλη λοξότητα προς τις υψηλές περιεκτικότητες. Ουσιαστικά η κατανομή του χρυσού έχει πάρα πολλές χαμηλές τιμές και λίγες υψηλές. Η πιο αντιπροσωπευτική τιμή της κατανομής είναι η διάμεσος (0.59 ppm) αλλά με αρκετά μεγάλη διασπορά πράγμα που δυσκολεύει την συστηματική εκτίμησή της.

Επίσης είναι πολύ λεπτόκυρτη με τιμή 1.07. Επιπλέον παρουσιάζει μια κορυφή στα 0.02 ppm το οποίο εκ πρώτης όψεως συνεπάγεται τουλάχιστον δύο πληθυσμούς περιεκτικότητας. Τον πρώτο και μεγαλύτερο σε αναλογία μεταξύ των τιμών 0 – 0.4 ppm και το δεύτερο και μικρότερο που έχει μια ποικίλη περιεκτικότητα σε χρυσό.



Σχήμα 5.7 Ιστόγραμμα περιεκτικότητας Χρυσού το οποίο κατασκευάστηκε με το λογισμικό SPSS 17.



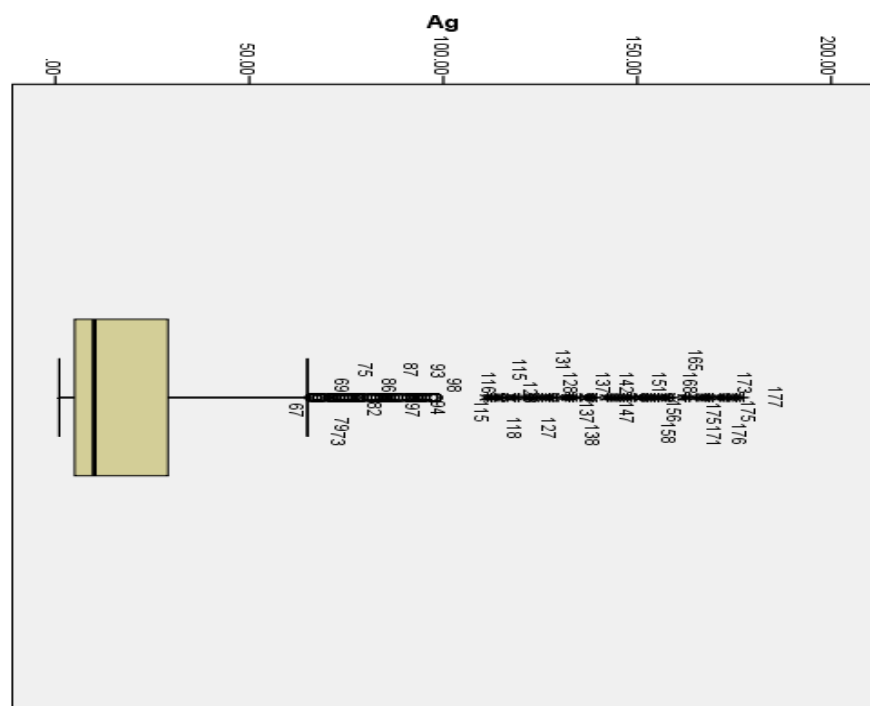
Σχήμα 5.8: Διάγραμμα πλαισίου του Χρυσού το οποίο κατασκευάστηκε με το λογισμικό SPSS 17.

Άργυρος Ag ppm

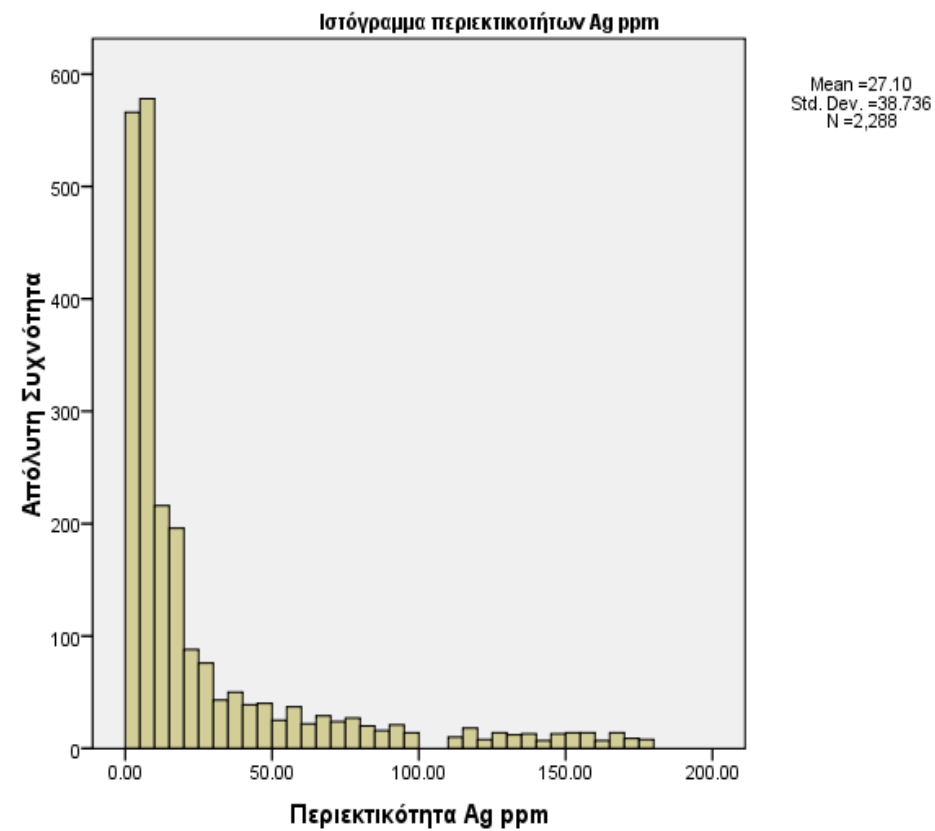
Το παραπάνω ιστόγραμμα και θηκόγραμμα του αργύρου έχει κατασκευαστεί λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές του στοιχείου πάνω από το όριο ανιχνευσιμότητας και δίχως να περιλαμβάνονται οι ακραίες τιμές (outliers - extreme values). Η ελάχιστη τιμή του δείγματος X_{min} , η οποία σηματοδοτείται από τη κάτω χορδή του διαγράμματος είναι 1 ppm. Αντιθέτως η μεγαλύτερη «κανονική» τιμή του χρυσού X_{max} ορίζεται από το ανώτερο άκρο της πάνω χορδής και είναι 67 ppm. Η τιμή του πρώτου τεταρτημορίου (βάση του πλαισίου) είναι 4.56 ppm. Η τιμή του δεύτερου τεταρτημορίου (διάμεσος) είναι 10.07 ppm. Η τιμή του τρίτου τεταρτημορίου (οροφή του πλαισίου) είναι 28.9 ppm.

Το διάγραμμα πλαισίου του αργύρου μας πληροφορεί ότι η κατανομή του τελευταίου στο σύνολο των παρατηρήσεων είναι ασύμμετρη με κύρτωση προς τα δεξιά και πολύ μεγάλη μεταβλητότητα. Η ασυμμετρία της κατανομής εκφράζεται με θετική λοξότητα (2.159) το οποίο σημαίνει ότι έχει πάρα πολύ μεγάλη λοξότητα προς τις υψηλές περιεκτικότητες. Ουσιαστικά η κατανομή του αργύρου έχει πάρα πολλές χαμηλές τιμές και λίγες υψηλές. Η πιο αντιπροσωπευτική τιμή της κατανομής είναι η διάμεσος (10.07 ppm) αλλά με αρκετά μεγάλη διασπορά πράγμα που δυσκολεύει την συστηματική εκτίμησή της.

Επίσης είναι πολύ λεπτόκυρτη με τιμή 4.035. Επιπλέον παρουσιάζει μια κορυφή στα 1 ppm το οποίο εκ πρώτης όψεως συνεπάγεται τουλάχιστον δύο πληθυσμούς περιεκτικότητας. Τον πρώτο και μεγαλύτερο σε αναλογία μεταξύ των τιμών 0 – 2 ppm και το δεύτερο και μικρότερο που έχει μια ποικίλη περιεκτικότητα σε άργυρο.



Σχήμα 5.9: Ιστόγραμμα περιεκτικότητας Αργύρου το οποίο κατασκευάστηκε με το λογισμικό SPSS 17.



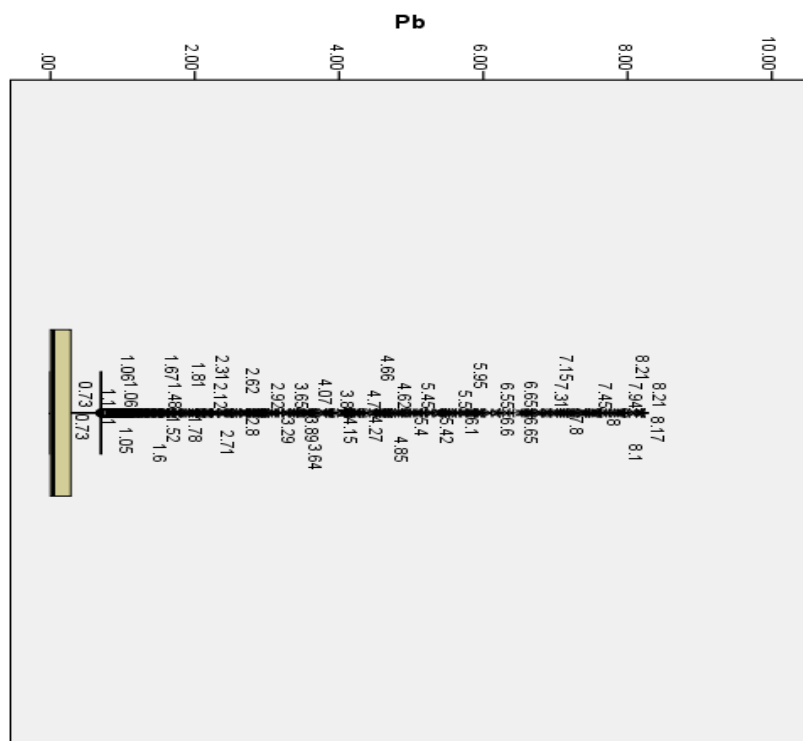
Σχήμα 5.10: Διάγραμμα πλαισίου του Αργύρου το οποίο κατασκευάστηκε με το λογισμικό SPSS 17.

Μόλυβδος Pb%

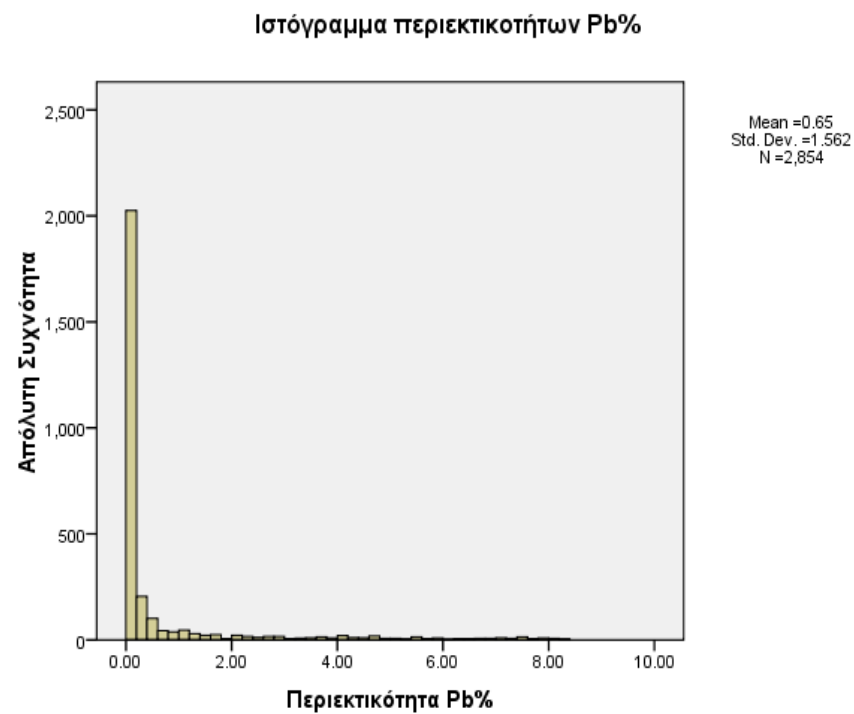
Το παραπάνω ιστόγραμμα και θηκόγραμμα του μολύβδου έχει κατασκευαστεί λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές του στοιχείου πάνω από το όριο ανιχνευσιμότητας και δίχως να περιλαμβάνονται οι ακραίες τιμές (outliers - extreme values). Η ελάχιστη τιμή του δείγματος X_{min} , η οποία σηματοδοτείται από τη κάτω χορδή του διαγράμματος είναι 0.01 %. Αντιθέτως η μεγαλύτερη «κανονική» τιμή του χρυσού X_{max} οριοθετείται από το ανώτερο άκρο της πάνω χορδής και είναι 0.73 %. Η τιμή του πρώτου τεταρτημορίου (βάση του πλαισίου) είναι 0.007. Η τιμή του δεύτερου τεταρτημορίου (διάμεσος) είναι 0.045 %. Η τιμή του τρίτου τεταρτημορίου (οροφή του πλαισίου) είναι 0.278 %.

Το διάγραμμα πλαισίου του μολύβδου μας πληροφορεί ότι η κατανομή του τελευταίου στο σύνολο των παρατηρήσεων είναι ασύμμετρη με κύρτωση προς τα δεξιά και πολύ μεγάλη μεταβλητότητα. Η ασυμμετρία της κατανομής εκφράζεται με θετική λοξότητα (3.043) το οποίο σημαίνει ότι έχει πάρα πολύ μεγάλη λοξότητα προς τις υψηλές περιεκτικότητες. Ουσιαστικά η κατανομή του μολύβδου έχει πάρα πολλές χαμηλές τιμές και λίγες υψηλές. Η πιο αντιπροσωπευτική τιμή της κατανομής είναι η διάμεσος (0.45 %) και με αρκετά μεγάλη διασπορά πράγμα που δυσκολεύει την συστηματική εκτίμησή της.

Επίσης είναι πολύ λεπτόκυρτη με τιμή 8.858. Επιπλέον παρουσιάζει μια κορυφή στα 0.02 % το οποίο εκ πρώτης όψεως συνεπάγεται τουλάχιστον δύο πληθυσμούς περιεκτικότητας. Τον πρώτο και μεγαλύτερο σε αναλογία μεταξύ των τιμών 0 - 0.02 % και το δεύτερο και μικρότερο που έχει μια ποικίλη περιεκτικότητα σε μόλυβδο.



Σχήμα 5.11: Ιστόγραμμα περιεκτικότητας Μολύβδου το οποίο κατασκευάστηκε με το λογισμικό SPSS 17.



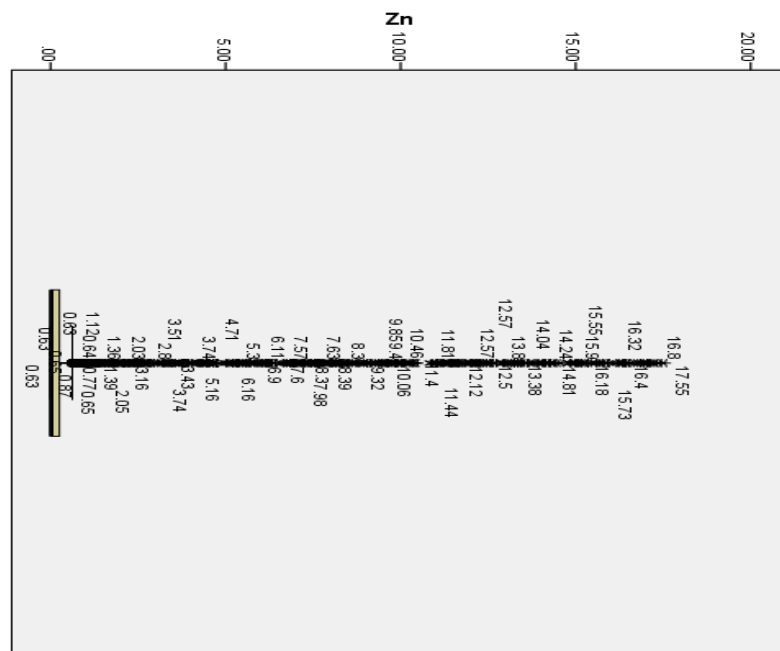
Σχήμα 5.12: Διάγραμμα πλαισίου του Μολύβδου το οποίο κατασκευάστηκε με το λογισμικό SPSS 17.

Ψευδάργυρος Zn%

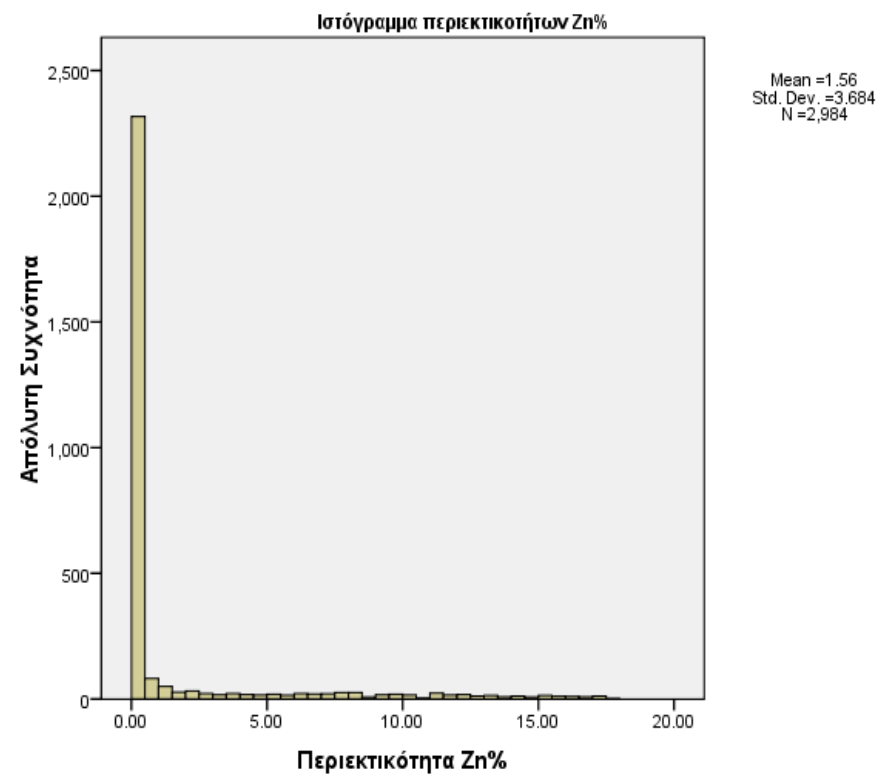
Το παραπάνω ιστόγραμμα και θηκόγραμμα του ψευδαργύρου έχει κατασκευαστεί λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές του στοιχείου πάνω από το όριο ανιχνευσιμότητας και δίχως να περιλαμβάνονται οι ακραίες τιμές (outliers - extreme values). Η ελάχιστη τιμή του δείγματος X_{min} , η οποία σηματοδοτείται από τη κάτω χορδή του διαγράμματος είναι 0.01 %. Αντιθέτως η μεγαλύτερη «κανονική» τιμή του χρυσού X_{max} οριοθετείται από το ανώτερο άκρο της πάνω χορδής και είναι 0.63 %. Η τιμή του πρώτου τεταρτημορίου (βάση του πλαισίου) είναι 0.01 %. Η τιμή του δεύτερου τεταρτημορίου (διάμεσος) είναι 0.02 %. Η τιμή του τρίτου τεταρτημορίου (οροφή του πλαισίου) είναι 0.25 %.

Το διάγραμμα πλαισίου του ψευδαργύρου μας πληροφορεί ότι η κατανομή του τελευταίου στο σύνολο των παρατηρήσεων είναι ασύμμετρη με κύρτωση προς τα δεξιά και πολύ μεγάλη μεταβλητότητα. Η ασυμμετρία της κατανομής εκφράζεται με θετική λοξότητα (2.603) το οποίο σημαίνει ότι έχει πάρα πολύ μεγάλη λοξότητα προς τις υψηλές περιεκτικότητες. Ουσιαστικά η κατανομή του ψευδαργύρου έχει πάρα πολλές χαμηλές τιμές και λίγες υψηλές. Η πιο αντιπροσωπευτική τιμή της κατανομής είναι η διάμεσος (0.02 %) και με αρκετά μεγάλη διασπορά πράγμα που δυσκολεύει την συστηματική εκτίμησή της.

Επίσης είναι πολύ λεπτόκυρτη με τιμή 5.89. Επιπλέον παρουσιάζει μια κορυφή στα 0.02 % το οποίο εκ πρώτης όψεως συνεπάγεται τουλάχιστον δύο πληθυσμούς περιεκτικότητας. Τον πρώτο και μεγαλύτερο σε αναλογία μεταξύ των τιμών 0 - 0.02 % και το δεύτερο και μικρότερο που έχει μια ποικίλη περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο.



Σχήμα 5.13: Ιστόγραμμα περιεκτικότητας Ψευδαργύρου το οποίο κατασκευάστηκε με το λογισμικό SPSS 17.



Σχήμα 5.14: Διάγραμμα πλαισίου του Ψευδαργύρου το οποίο κατασκευάστηκε με το λογισμικό SPSS 17.

5.5 Ανάλυση δεδομένων ανά λιθολογικά πεδία (Domains)

Για την επιτυχημένη μοντελοποίηση του κοιτάσματος διακρίθηκε ο συνολικός του όγκος σε 9 λιθοστρωματογραφικά domain. Συγκεκριμένα διαχωρίσαμε το χώρο της μεταλλοφορίας ανάλογα με τον πετρολογικό τύπο αλλά και λιθοστρωματογραφικά από πάνω προς τα κάτω σε Αμφιβολίτες – Σχιστολίθους (Α), Τεκτονικό Λατυποπαγές (Β), Μάρμαρο (C), Μεταλλοφορία συμπαγών σουλφιδίων (D), Καολίνη (Ε), Απλίτες (F), Πηγματίτες (G), Λαμπροφύρες (H) και Βιοτιτικούς Γνευσίους (I).

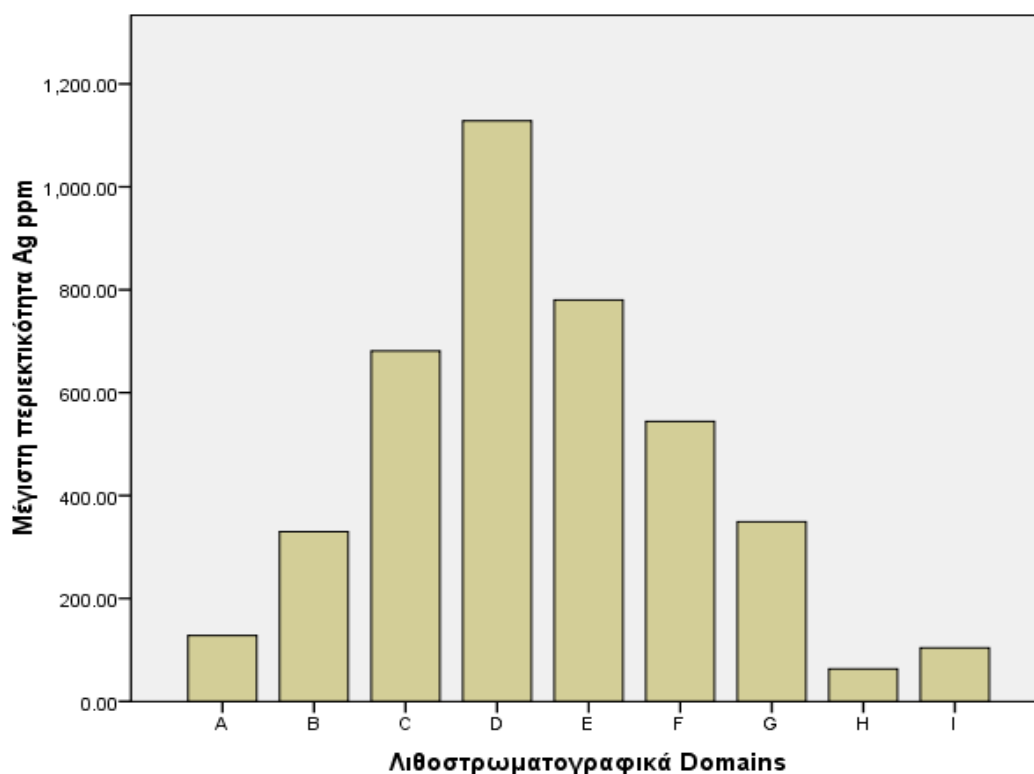
Παρακάτω παρατίθενται συνοπτικά και συγκριτικά τα διάφορα αποτελέσματα όπως διαμορφώνονται από τις χημικές αναλύσεις και τη στατιστική επεξεργασία που ακολούθησε. Σαν παράδειγμα παρατίθενται τα ραβδογράμματα των παρακάτω εικόνων. Η κατασκευή των ραβδογραμμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του SPSS 17 και πρόκειται για μια αρχική λιθοστρωματογραφική διάκριση των διαφόρων πεδίων (domain) σε σχέση με το βάθος ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζονται οι μέγιστες παρατηρηθείσες περιεκτικότητες ανά στοιχείο για κάθε ένα από τα πεδία (domain) ξεχωριστά.

Τα ραβδογράμματα που ακολουθούν απεικονίζουν μια σχετική στρωματογραφική στήλη από τον λιθότυπο Α έως και τον Ι. Η προαναφερθείσα στρωματογραφική στήλη προέκυψε αυτοματοποιημένα με βάση τις εμφανίσεις των διαφόρων λιθολογιών μέσα στις γεωτρήσεις. Συνεπώς μπορούμε να υποθέσουμε σε γενικές γραμμές ότι οι περιεκτικότητες που παρατηρούνται συνδέονται με τη γενικότερη λιθοστρωματογραφία του κοιτάσματος και στατιστικά.

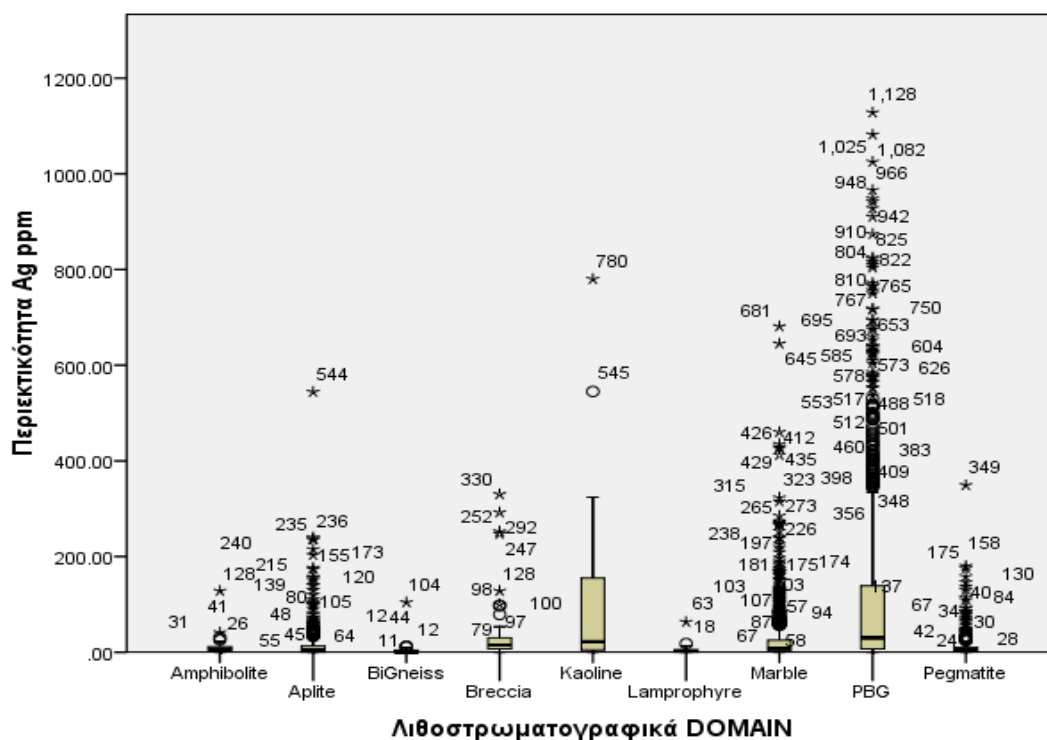
Συγκεκριμένα διαπιστώθηκε ότι το λιθοστρωματογραφικό πεδίο (domain) της συμπαγούς μεταλλοφορίας παρουσιάζει τις μεγαλύτερες περιεκτικότητες σε όλα τα στοιχεία. Αντιθέτως το πεδίο (domain) του αμφιβολίτη και του βιοτιτικού γνευσίου παρουσιάζουν τις μικρότερες περιεκτικότητες στα διάφορα στοιχεία. Επίσης, κάτι το αξιοσημείωτο είναι ότι η εικόνα των ραβδογραμμάτων τείνει να ακολουθήσει την κανονική κατανομή με τοπικό μέγιστο το πεδίο (domain) της συμπαγούς μεταλλοφορίας και απολήξεις τα πεδία (domain) του αμφιβολίτη – σχιστολίθου και γνευσίου αντίστοιχα.

Το λιθοστρωματογραφικό πεδίο (domain) του Αμφιβολίτη – Σχιστολίθου περιλαμβάνει 28 παρατηρήσεις, του Τεκτονικού λατυποπαγούς περιλαμβάνει 103 παρατηρήσεις, του Μαρμάρου περιλαμβάνει 733 παρατηρήσεις, της Συμπαγούς μεταλλοφορίας περιλαμβάνει 1440 παρατηρήσεις, του Καολίνη περιλαμβάνει 27 παρατηρήσεις, του Απλίτη περιλαμβάνει 481 παρατηρήσεις, του Πηγματίτη περιλαμβάνει 265 παρατηρήσεις, του Λαμπροφύρη περιλαμβάνει 27 παρατηρήσεις και του Βιοτιτικού Γνευσίου περιλαμβάνει 46 παρατηρήσεις, οι οποίες λήφθηκαν υπόψη για τη στατιστική επεξεργασία.

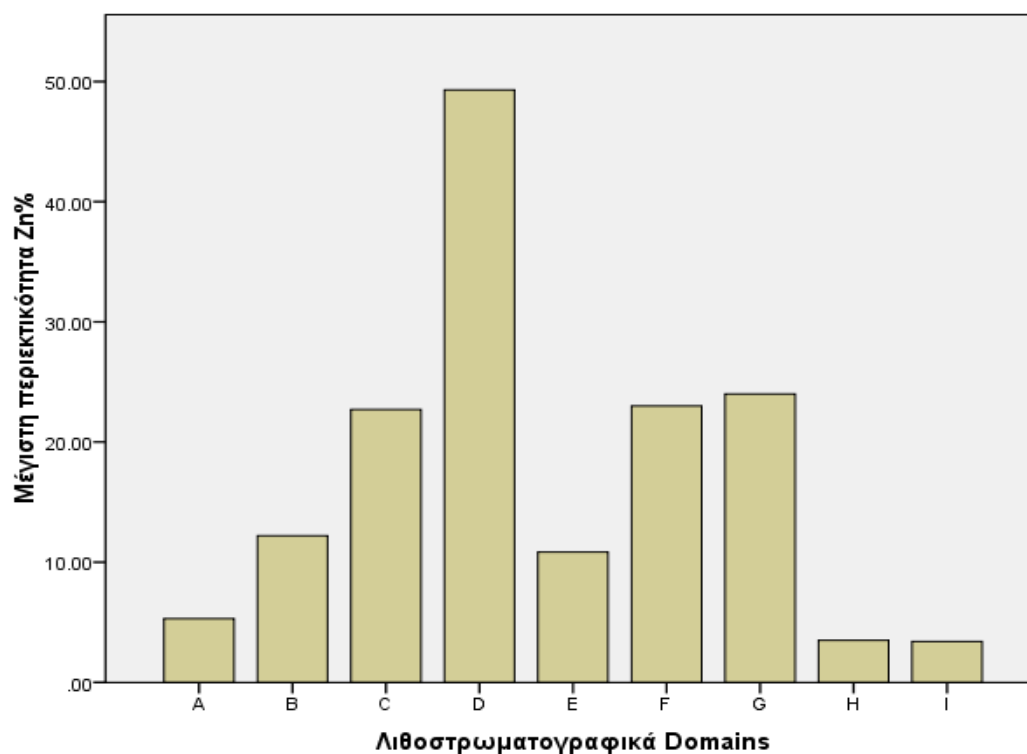




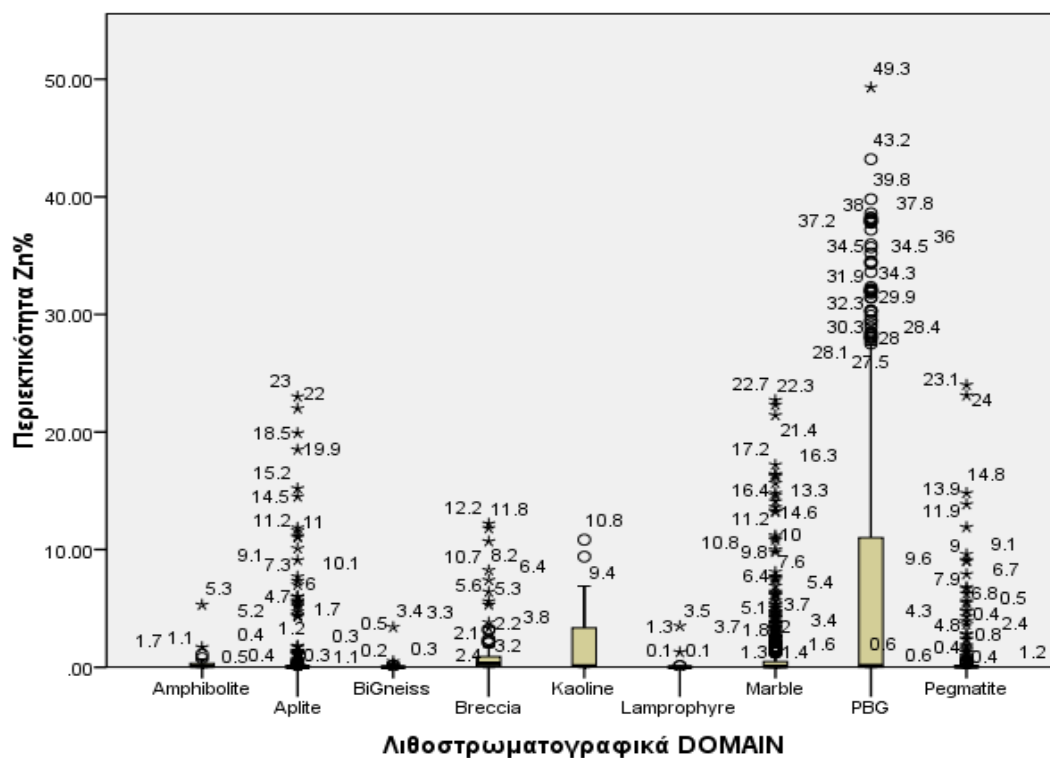
Σχήμα 5.20: Συγκεντρωτικό ραβδόγραμμα Ag prpm για όλα τα domain.



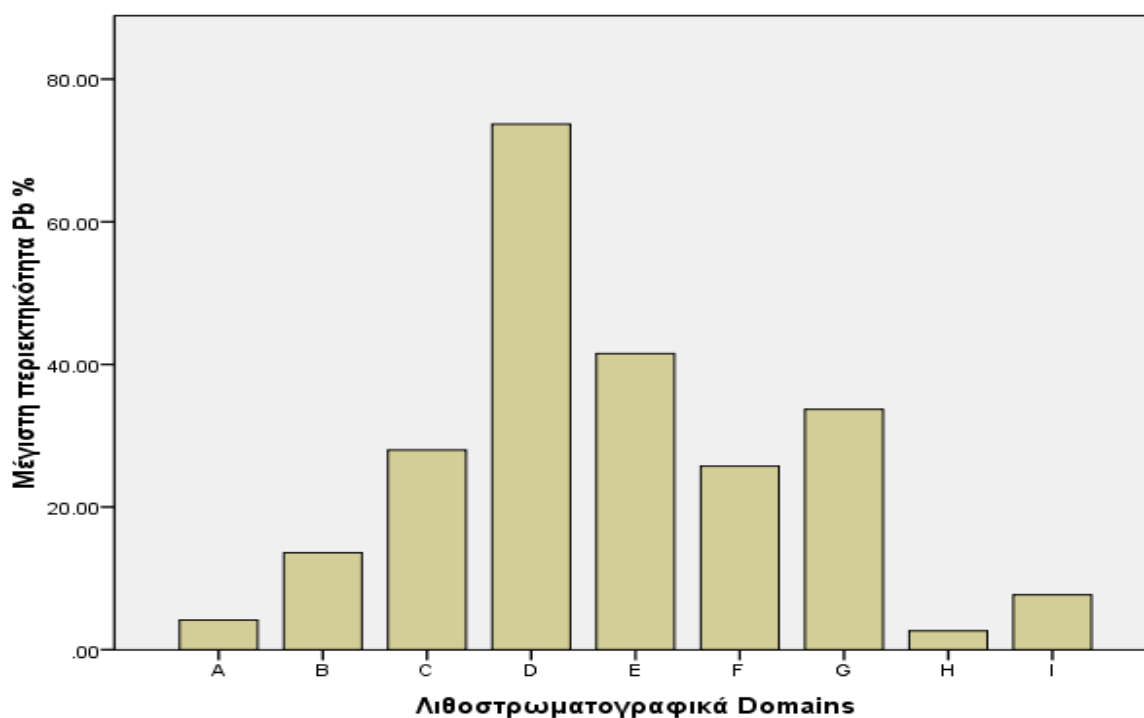
Σχήμα 5.21: Συγκεντρωτικό θηκόγραμμα Ag ppm για όλα τα domain.



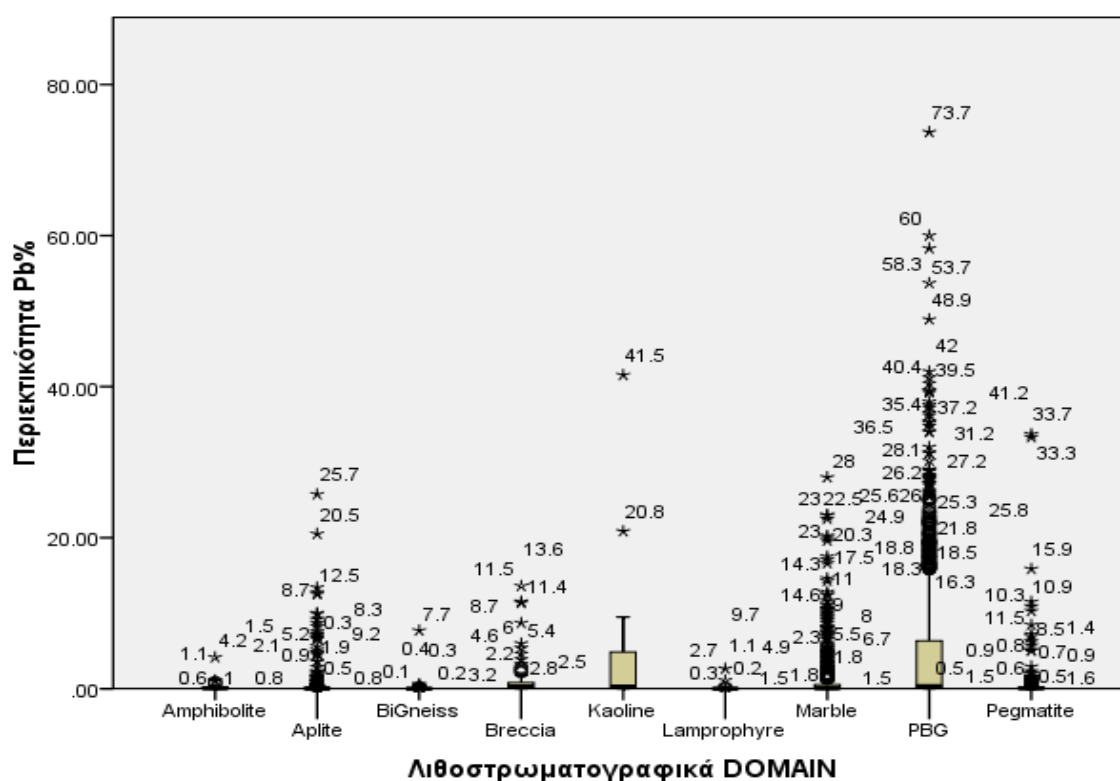
Σχήμα 5.22: Συγκεντρωτικό ραβδόγραμμα Zn% για όλα τα domain.



Σχήμα 5.23: Συγκεντρωτικό θηκόγραμμα Zn% για όλα τα domain.



Σχήμα 5.24: Συγκεντρωτικό ραβδόγραμμα Pb% για όλα τα domain.



Σχήμα 5.25: Συγκεντρωτικό θηκόγραμμα Pb% για όλα τα domain.

5.6 Γεωμετρική Μοντελοποίηση του Σώματος Μεταλλοφορίας με Χρήση Πεδίου-Δείκτη της Λιθολογίας

Η γεωμετρική μοντελοποίηση της μεταλλοφορίας πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο ζύγισης αντιστρόφου αποστάσεως (inverse distance weighting method). Ουσιαστικά εφαρμόζεται μια κανονική τρισδιάστατη συστοιχία τεμαχών ή σημείων, η οποία υπερτίθεται σε ένα κοιτάσμα. Κάθε εκτίμηση πραγματοποιείται ξεχωριστά από μια ομάδα παρακείμενων δεδομένων, τα οποία επιλέγονται με βάση το κριτήριο της απόστασης σε σχέση με το σημείο ή το τέμαχος το οποίο θέλουμε να εκτιμήσουμε και με βάση το πλήθος των δεδομένων που επιθυμούμε για μια μεμονωμένη εκτίμηση. Οι μέθοδοι αντιστρόφου αποστάσεως πρέπει να πραγματοποιούνται έτσι ώστε τα αντίστοιχα βάρη να έχουν άθροισμα ένα, ειδάλλως η μέθοδος έχει μεροληψία και επομένως δεν μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή.

Στην παρούσα διατριβή ειδίκευσης εφαρμόστηκε η παραπάνω μέθοδος διότι προσδιορίζει σχετικά εύκολα και γρήγορα την γεωμετρία της μεταλλοφορίας χρησιμοποιώντας κάποια κριτήρια ώστε να μην εξισώνει τις διάφορες παρατηρήσεις αλλά να προσδίδει στην καθεμιά την βαρύτητα που της αντιστοιχεί, με αποτέλεσμα να είναι πάρα πολύ ακριβής. Συνεπώς, κατασκευάστηκε ένα πρόσθετο πεδίο στον πίνακα της λιθολογίας στην βάση δεδομένων το οποίο προσδίδει ένα συντελεστή σε κάθε λιθολογία. Συγκεκριμένα εάν η λιθολογική περιγραφή είναι μεταλλοφορία τότε λαμβάνει το συντελεστή 1 εάν είναι στείρο λαμβάνει το συντελεστή 0. Επομένως στο νέο πεδίο ORX που προστέθηκε, οι τιμές είναι 0 και 1 (Σχήμα 5.26).

-55-54 ▼					
COLLAR SURVEY LITHO ASSAY					
	FROM	TO	LITHO	DESC	ORX
1	0.000	65.000	MA		0.000
2	65.000	73.000	AP		0.000
3	73.000	74.500	OR		1.000
4	74.500	107.000	MA		0.000
5	107.000	112.000	OR		1.000
6	112.000	159.000	OR		1.000
7	159.000	163.500	AP		0.000
*	0.000	0.000			0.000

Σχήμα 5.26: Απόκομμα του πεδίου από τη βάση δεδομένων του Vulcan (ISIS) στην δεξιά στήλη του οποίου διακρίνουμε την νέα μεταβλητή ORX με πεδίο τιμών από 0 έως 1.

Κατόπιν, κατασκευάστηκε μια νέα βάση δεδομένων η οποία ουσιαστικά περιλαμβάνει τα αξιολογημένα διαστήματα σταθερού μήκους (composites). Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι η διάκριση σε τέλεια σταθερά διαστήματα είναι ουσιαστικά αδύνατο να επιτευχθεί και για αυτόν το λόγο τροποποιήθηκε η διαδικασία ώστε τα διαστήματα τα οποία είναι λίγο μεγαλύτερα από το καθορισμένο μέγεθος να ανάγουν το υπόλοιπο του μήκους τους στα διαστήματα εκείνα που υπολείπονται (Σχήμ 5.27).

Γεωλογική Μοντελοποίηση και Γεωστατιστική – Κοιτασματολογική μελέτη του κοιτάσματος μεικτών θειούχων του Μαντέμ Λάκκου Χαλκιδικής, Μ.Α.Ε., Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., 2013, Ν. Β. Νεστόροβ

Maptek Vulcan 8.1.4 64-bit: Isis C:\vulcan_data\Research\madem - [Database: mlcomposites.orx.isis]

File Edit View Object Table Utilities Tools Window Help

Window: MADEM_LAKKOS.DG1(*) Layer: Z: 400 W: 0 Grad: 0:1

ALL

GROUP ENTRY

	DHID	MIDX	MIDY	MIDZ	TOPX	TOPY	TOPZ	BOTX	BOTY	BOTZ	LENGTH	FROM	TO	GEOCOD	BOUND	ORX	O
1	+100-01	27002.000	-25351.232	101.080	27003.000	-25349.500	101.080	27001.000	-25352.964	101.080	4.000	0.000	4.000	NONE		0.000	
2	+100-01	27000.000	-25354.696	101.080	27001.000	-25352.964	101.080	26999.000	-25356.428	101.080	4.000	4.000	8.000	NONE		0.000	
3	+100-01	26998.000	-25358.160	101.080	26999.000	-25356.428	101.080	26997.000	-25359.892	101.080	4.000	8.000	12.000	NONE		0.000	
4	+100-01	26996.000	-25361.624	101.080	26997.000	-25359.892	101.080	26995.000	-25363.356	101.080	4.000	12.000	16.000	NONE		0.000	
5	+100-01	26994.000	-25365.088	101.080	26995.000	-25363.356	101.080	26993.000	-25366.821	101.080	4.000	16.000	20.000	NONE		0.000	
6	+100-01	26992.000	-25368.553	101.080	26993.000	-25366.821	101.080	26991.000	-25370.285	101.080	4.000	20.000	24.000	NONE		0.000	
7	+100-01	26990.000	-25372.017	101.080	26991.000	-25370.285	101.080	26989.000	-25373.749	101.080	4.000	24.000	28.000	NONE		0.000	
8	+100-01	26988.000	-25375.481	101.080	26989.000	-25373.749	101.080	26987.000	-25377.213	101.080	4.000	28.000	32.000	NONE		0.375	
9	+100-01	26986.000	-25378.945	101.080	26987.000	-25377.213	101.080	26985.000	-25380.677	101.080	4.000	32.000	36.000	NONE		1.000	
10	+100-01	26984.000	-25382.409	101.080	26985.000	-25380.677	101.080	26983.000	-25384.141	101.080	4.000	36.000	40.000	NONE		0.000	
11	+100-01	26982.000	-25385.873	101.080	26983.000	-25384.141	101.080	26981.000	-25387.605	101.080	4.000	40.000	44.000	NONE		0.750	
12	+100-01	26980.000	-25389.337	101.080	26981.000	-25387.605	101.080	26979.000	-25391.069	101.080	4.000	44.000	48.000	NONE		1.000	
13	+100-01	26978.000	-25392.801	101.080	26979.000	-25391.069	101.080	26977.000	-25394.533	101.080	4.000	48.000	52.000	NONE		0.000	
14	+100-01	26976.750	-25394.966	101.080	26977.000	-25394.533	101.080	26976.500	-25395.399	101.080	1.000	52.000	53.000	NONE		0.000	
15	+100-02	27054.140	-25352.995	101.500	27054.000	-25351.000	101.500	27054.279	-25354.990	101.500	4.000	0.000	4.000	NONE		0.000	
16	+100-02	27054.419	-25356.985	101.500	27054.279	-25354.990	101.500	27054.558	-25358.981	101.500	4.000	4.000	8.000	NONE		0.000	
17	+100-02	27054.698	-25360.976	101.500	27054.558	-25358.981	101.500	27054.837	-25362.971	101.500	4.000	8.000	12.000	NONE		0.000	
18	+100-02	27054.977	-25364.966	101.500	27054.837	-25362.971	101.500	27055.116	-25366.961	101.500	4.000	12.000	16.000	NONE		0.000	
19	+100-02	27055.256	-25368.956	101.500	27055.116	-25366.961	101.500	27055.395	-25370.951	101.500	4.000	16.000	20.000	NONE		0.000	
20	+100-02	27055.535	-25372.946	101.500	27055.395	-25370.951	101.500	27055.674	-25374.942	101.500	4.000	20.000	24.000	NONE		0.000	
21	+100-02	27055.814	-25376.937	101.500	27055.674	-25374.942	101.500	27055.953	-25378.932	101.500	4.000	24.000	28.000	NONE		0.000	
22	+100-02	27056.093	-25380.927	101.500	27055.953	-25378.932	101.500	27056.232	-25382.922	101.500	4.000	28.000	32.000	NONE		0.000	
23	+100-02	27056.372	-25384.917	101.500	27056.232	-25382.922	101.500	27056.511	-25386.912	101.500	4.000	32.000	36.000	NONE		0.000	
24	+100-02	27056.651	-25388.907	101.500	27056.511	-25386.912	101.500	27056.790	-25390.903	101.500	4.000	36.000	40.000	NONE		0.000	
25	+100-02	27056.930	-25392.898	101.500	27056.790	-25390.903	101.500	27057.069	-25394.893	101.500	4.000	40.000	44.000	NONE		0.000	
26	+100-02	27057.209	-25396.888	101.500	27057.069	-25394.893	101.500	27057.348	-25398.883	101.500	4.000	44.000	48.000	NONE		0.000	
27	+100-02	27057.488	-25400.878	101.500	27057.348	-25398.883	101.500	27057.627	-25402.873	101.500	4.000	48.000	52.000	NONE		0.000	
28	+100-02	27057.767	-25404.868	101.500	27057.627	-25402.873	101.500	27057.906	-25406.864	101.500	4.000	52.000	56.000	NONE		0.000	

Graphics device supports local 3D
Loading fill patterns....
Line styles initialised.
Graphic device configuration complete

Workbench Envisage Console Envisage

Select menu option

Σχήμα 5.27: Ο πίνακας αυτός παρουσιάζει την νέα βάση δεδομένων η οποία φιλοξενεί τα αξιολογημένα διαστήματα σταθερού μήκους (composites).

Η **Βαριογραφία** είναι το βασικό διαγνωστικό εργαλείο για το χωρικό χαρακτηρισμό μιας μεταβλητής και επίσης διαδραματίζει πρωταγωνιστικό ρόλο στην γεωστατιστική εκτίμηση αποθεμάτων. Η μαθηματική περιγραφή ενός βαριογράμματος μιας τυχαίας συνάρτησης ορίζεται με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x+h) - Z(x)]$$

Εάν ισχύει η υπόθεση της εσωτερικής στασιμότητας τότε το βαριόγραμμα μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[\{Z(x+h) - Z(x)\}^2]$$

Για τον υπολογισμό των πειραματικών βαριογραμμάτων χρησιμοποιούμε την παρακάτω μαθηματική σχέση:

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

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός γραφήματος βαριογραφίας $\gamma(h)$ παρουσιάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά (Σχήμα 5.28):

- Η συνάρτηση $\gamma(h)$ είναι θετική με αποτέλεσμα να ισχύει $\gamma(h) > 0$.
- Όταν το $h=0$ τότε η συνάρτηση ξεκινά από την αρχή των αξόνων.
- Γενικά η συνάρτηση $\gamma(h)$ αυξάνει ανάλογα με το h .
- Η συνάρτηση $\gamma(h)$ μπορεί να αυξάνει μέχρι μια ορισμένη τιμή του h που ονομάζεται οριακή τιμή (sill value) και μετά σταθεροποιείται.
- Ο ρυθμός αύξησης του βαριογράμματος με την αύξηση του h είναι ενδεικτικός του πόσο γρήγορα μειώνεται η 'επιρροή' των δειγμάτων με την απόσταση.

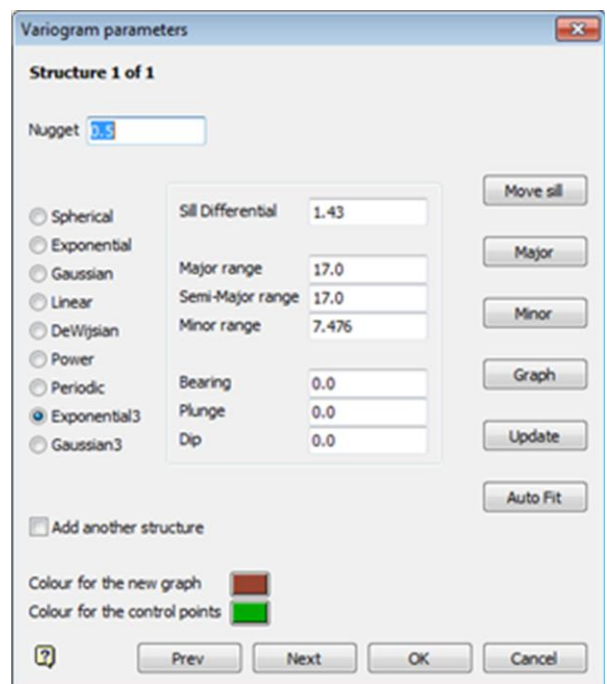
Συνεπώς, για να εκτιμήσουμε ένα σημείο στο χώρο θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας κάποια δείγματα τα οποία βρίσκονται στην άμεση γειτονία με αυτό.

Ο στόχος της βαριογραφίας είναι να μας υποδείξει το εύρος επιρροής των δειγμάτων. Επομένως, πρόκειται για το κριτήριο της απόστασης εκείνης εντός της οποίας θα συμπεριλαμβάνονται όλα τα δείγματα στην εκτίμηση και αμοιβαία θα αποκλείονται τα υπόλοιπα δείγματα που δεν πληρούν την παραπάνω προϋπόθεση. Αυτό ορίζεται από το εύρος επιρροής του ημιβαριογράμματος.

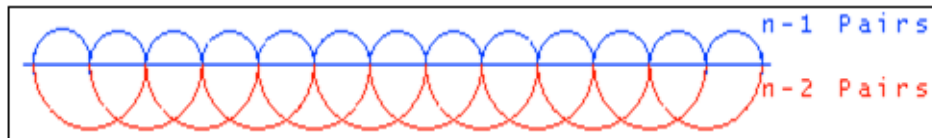
Η βαριογραφία αποτελεί τη μαθηματική απόδειξη ότι τα πλησιέστερα δείγματα ενός κοινού γεωλογικού domain παρουσιάζουν γενικά μεγαλύτερες ομοιότητες μεταξύ τους, όσον αφορά τις περιεκτικότητές τους, σε αντίθεση με δείγματα τα οποία είναι σε μεγαλύτερη απόσταση. Όσο πιο μεγάλη είναι η μεταξύ τους απόσταση τόσο μεγαλύτερη είναι η αναμενόμενη διαφορά τους.

Συνεπώς, τα ημιβαριογράμματα χρησιμοποιούνται για να καθοριστεί η χωρική συσχέτιση μεταξύ των τιμών μιας μεταβλητής εντός του πεδίου ενδιαφέροντος. Ένας τρόπος για τη σύγκριση γειτονικών δειγμάτων είναι η γραφική αποτύπωση των μισών τετραγώνων της απόλυτης τιμής των μέσων διαφορών των περιεκτικοτήτων σε όλα τα ζεύγη δειγμάτων τα οποία απέχουν μια απόσταση h μεταξύ τους.

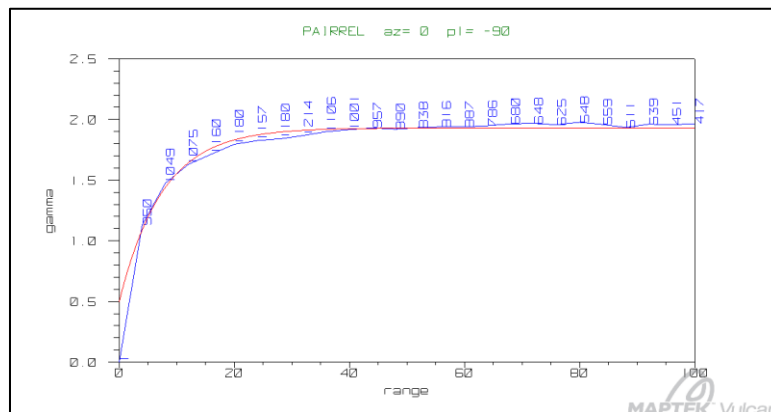
Επομένως, με βάση τα προαναφερθέντα υπολογίσθηκαν και μοντελοποιήθηκαν τα ημιβαριογράμματα για το πεδίο-δείκτη ORX (Σχήμα 5.28, 5.30).



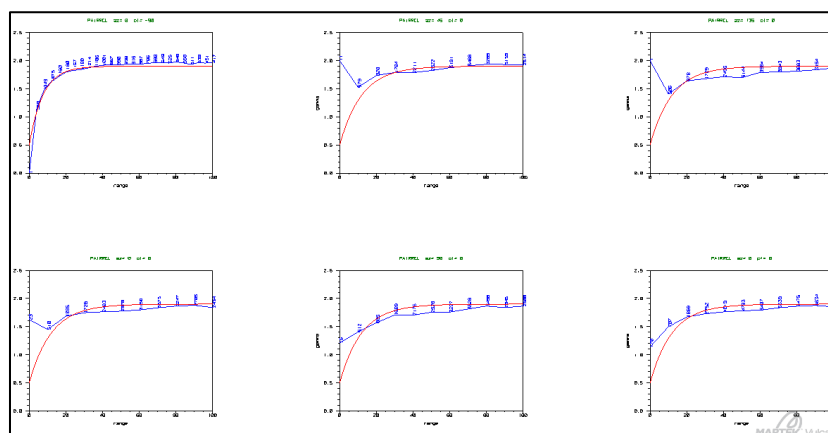
Σχήμα 5.28: Παράθυρο για τον καθορισμό των παραμέτρων μοντελοποίησης των ημιβαριογραμμάτων.



Σχήμα 5.29: Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε τον υπολογισμό ενός ημιβαριογράμματος από δείγματα σταθερής απόστασης h . Έστω ότι οι αποστάσεις μεταξύ των δειγμάτων είναι 1m. Συνεπώς οι πρώτες διαφορές (μπλε ζεύγη) θα είναι ανά 1m ενώ οι δεύτερες διαφορές (κόκκινα ζεύγη) θα είναι ανά 2m και συνεχίζουμε αυξάνοντας την απόσταση h των ζευγών.



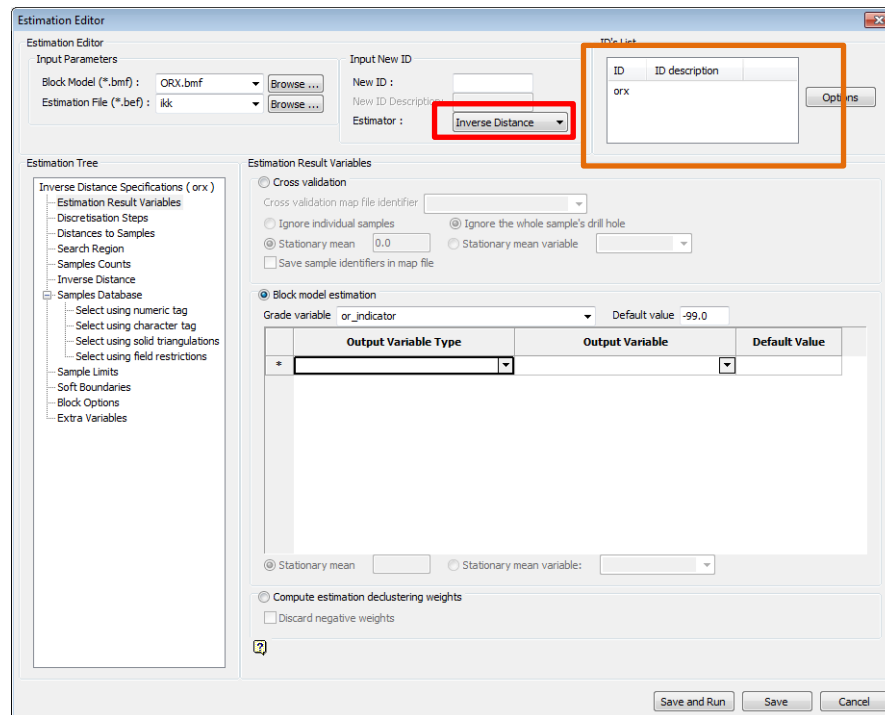
Σχήμα 5.30: Γραφική απεικόνιση του ημιβαριογράμματος κατά μήκος των γεωτρήσεων (down the hole). Το συγκεκριμένο ημιβαριόγραμμα μας πληροφορεί για το φαινόμενο κόκκου (nugget effect).



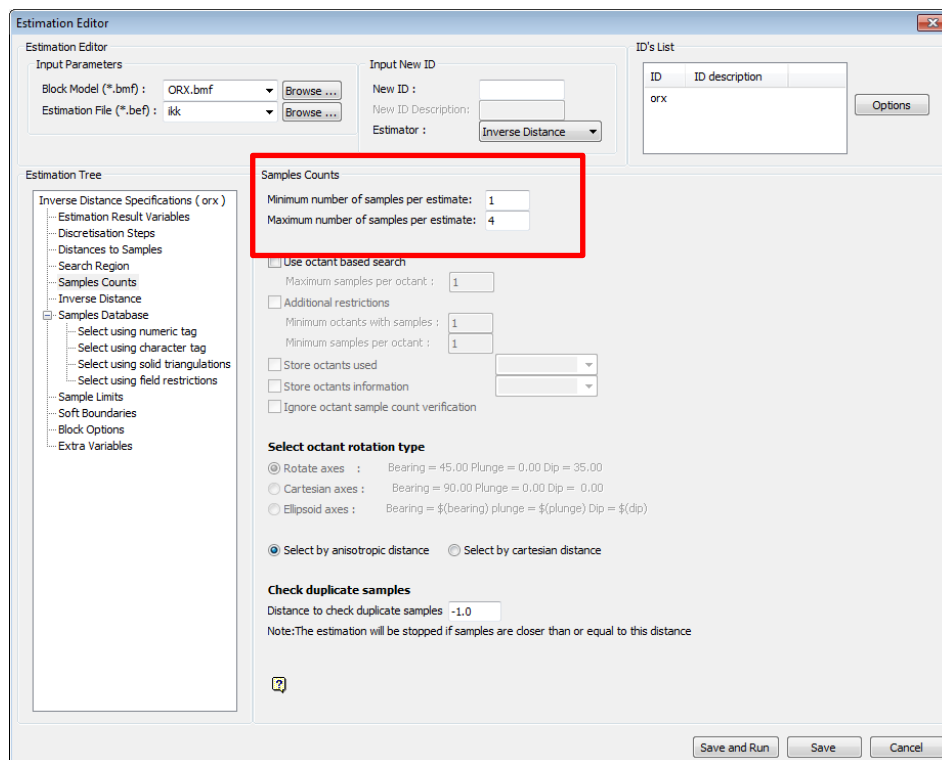
Σχήμα 5.31: Γραφική απεικόνιση των ημιβαριογραμμάτων σε διάφορους προσανατολισμούς, ώστε να υπολογιστεί το ελλειψοειδές σύμφωνα με το οποίο θα πραγματοποιηθεί η εκτίμηση των αποθεμάτων.

Κατόπιν, υπολογίστηκε το γεωμετρικό μοντέλο του κοιτάσματος του Μαντέμ Λάκκου με παρεμβολή τιμών του πεδίου-δείκτη σε μοντέλο μπλοκ με τη μέθοδο αντιστρόφου απόστασεως (Σχήμα 5.32). Με τον τρόπο αυτό καταφέραμε μέσα από τη λιθολογική περιγραφή των γεωτρήσεων να ξεχωρίσουμε τη μεταλ-

λοφορία και να την οριοθετήσουμε στο χώρο. Το παραπάνω βήμα είναι πολύ σημαντικό καθώς ο μετέπειτα υπολογισμός των αποθεμάτων θα βασιστεί αποκλειστικά και μόνο στο προαναφερθέν γεωμετρικό μοντέλο της μεταλλοφορίας. Επίσης ρυθμίστηκε η επιλογή του μέγιστου και του ελάχιστου αριθμού των δειγμάτων που θα χρησιμοποιηθούν για τη γεωμετρική μοντελοποίηση του κοιτάσματος του Μαντέμ Λάκκου (Σχήμα 5.33).

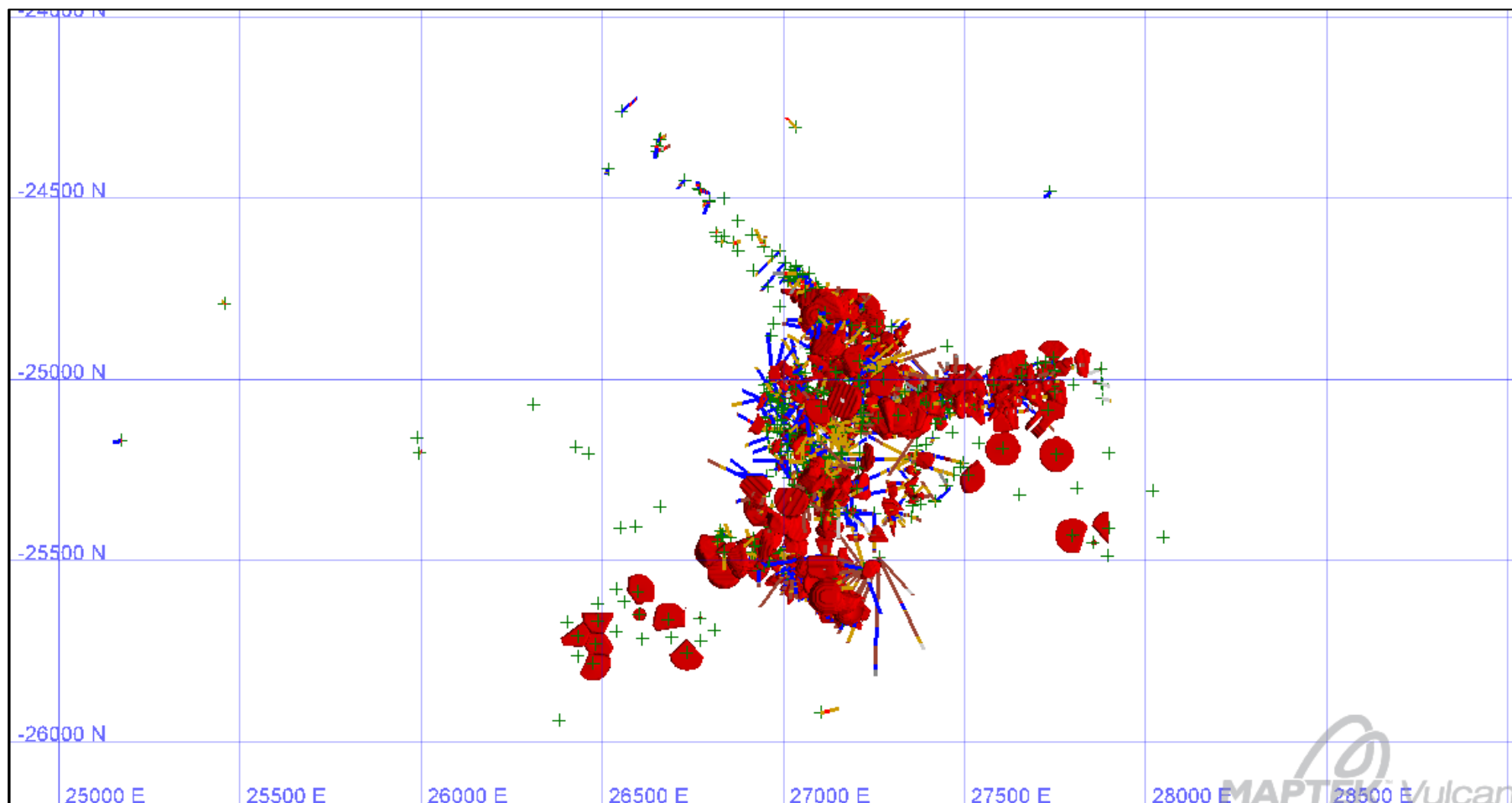


Σχήμα 5.32: Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται η επιλογή της μεθόδου παρεμβολής στο κόκκινο παραλληλόγραμμο η οποία είναι η μέθοδος ζύγισης της αντιστρόφου απόστασεως. Επίσης, στο άνω αριστερό τμήμα της εικόνας παρατηρούμε τη μεταβλητή η οποία θα μοντελοποιηθεί εντός του πορτοκαλί παραλληλογράμμου.

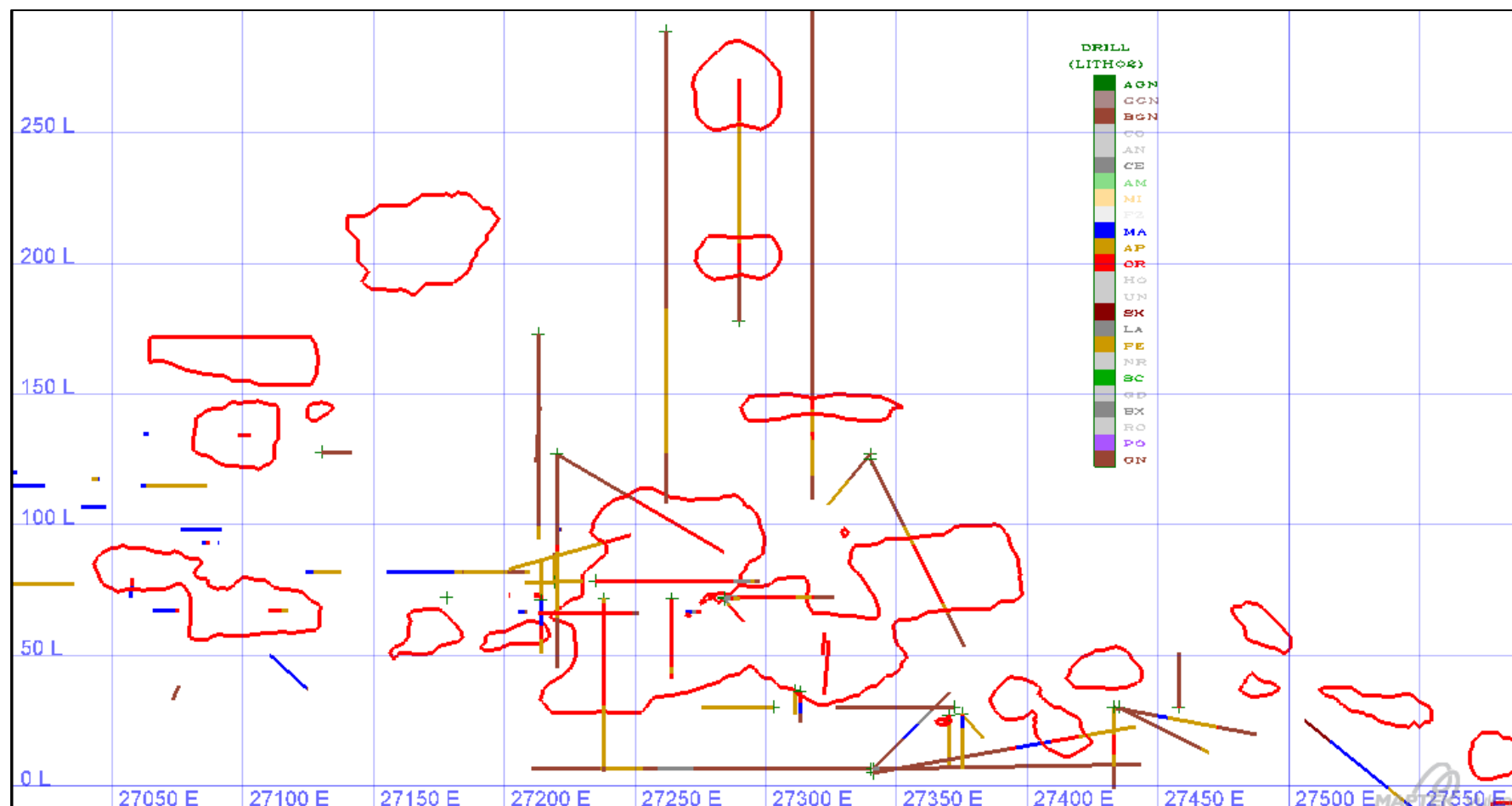


Σχήμα 5.33: Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται η επιλογή του μέγιστου και του ελάχιστου αριθμού των δειγμάτων που θα χρησιμοποιηθούν για τη γεωμετρική μοντελοποίηση του κοιτάσματος του Μαντέμ Λάκκου εντός του κόκκινου παραλληλογράμμου.

Επιπλέον, έγινε η επιλογή μιας κατώτερης οριακής τιμής (0.25) του πεδίου-δείκτη για τα μπλοκ που ανήκουν στο σώμα μεταλλοφορίας και κατασκευάστηκε το στερεό μοντέλο με τη μέθοδο του τριγωνισμού γύρω από τα μπλοκ αυτά. Η τιμή αυτή είναι το 0.25 ή αλλιώς 25%. Το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης παρουσιάζεται στα σχήματα 3.9 και 3.10.



Σχήμα 5.34: Κάτοψη (plan view) του γεωμετρικού μοντέλου του σώματος μεταλλοφορίας του κοιτάσματος του Μαντέμ Λάκκου. Με κόκκινο χρώμα παρατίθεται το στερεό μοντέλο του μεταλλεύματος ενώ ταυτόχρονα μπορούμε να διακρίνουμε τις γεωτρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί επιφανειακά αλλά και υπόγεια.



Σχήμα 5.35: Αντιπροσωπευτική τομή (-25100Y) του μοντέλου με γεωτρήσεις που έχουν χρωματισθεί ανάλογα με τη λιθολογία. Επιπρόσθετα, οι κόκκινες κλειστές γραμμές αντιπροσωπεύουν το σώμα της μεταλλοφορίας, ενώ ταυτόχρονα απεικονίζονται οι γεωτρήσεις για αντιπαραβολή με την πραγματικότητα.

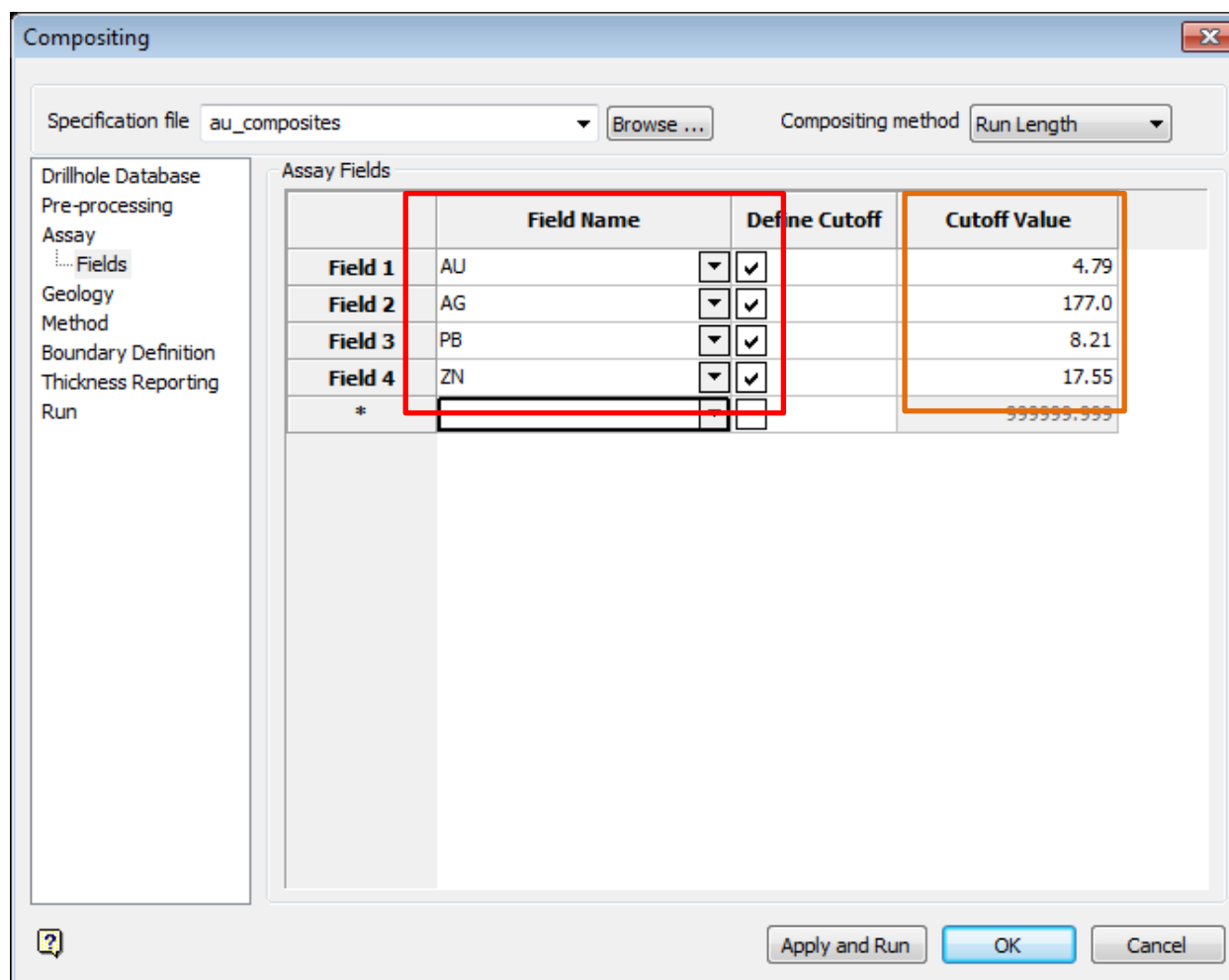
5.7 Αξιολόγηση Αναλύσεων Au, Ag, Pb, Zn σε διαστήματα σταθερού μήκους

Πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση των περιεκτικοτήτων σε σταθερά διαστήματα (composites) για τα ακόλουθα χημικά στοιχεία: Au, Ag, Pb, Zn. Μέσω τις μεθόδους της αξιολόγησης (compositing) όλες οι χημικές αναλύσεις για τα παραπάνω στοιχεία, οι οποίες έχουν προκύψει από δείγματα του μισού πυρήνα μιας γεώτρησης και μήκος από 1m έως 2m, ανάγονται σε σταθερό μήκος που ορίστηκε στα 4m.

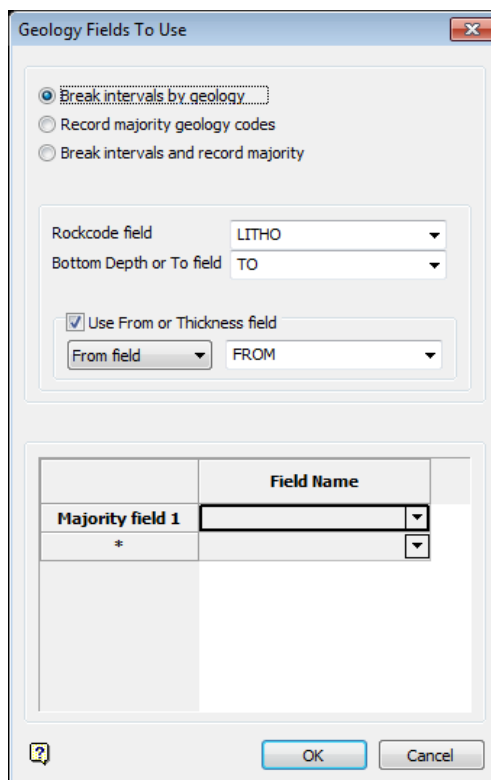
Σαν επιπλέον μέτρο εφαρμόστηκε μια μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή ανάλογα το στοιχείο. Κάθε μια από τις μεταβλητές (χημικά στοιχεία) έχει διάφορες περιεκτικότητες. Για να μην υπερεκτιμήσουμε τα αποθέματα δεν επιτρέπουμε στις μεταβλητές να λάβουν πολύ υψηλές περιεκτικότητες εφαρμόζοντας ένα ανώτερο επιτρεπόμενο όριο. Συνεπώς, για λόγους εκτίμησης αν μια μεταβλητή έχει υψηλή τιμή που υπερβαίνει το προαναφερθέν όριο τότε αυτόματα η υψηλή τιμή θα περικόπτεται (capping) και θα λαμβάνει την τιμή του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου (Σχήμα 5.36).

Επιπρόσθετα, εφαρμόστηκε το κριτήριο της λιθολογικής διάκρισης, για τον μετέπειτα υπολογισμό των αποθεμάτων. Συνεπώς, οι περιεκτικότητες που θα προκύψουν από τα αξιολογημένα διαστήματα σταθερού μήκους (composites) αλλά και με την εφαρμογή του ανώτατου επιτρεπόμενου ορίου (capping) θα πρέπει να περιλαμβάνονται και σε παρόμοιο χώρο από την άποψη της λιθολογίας (Σχήμα 5.37).

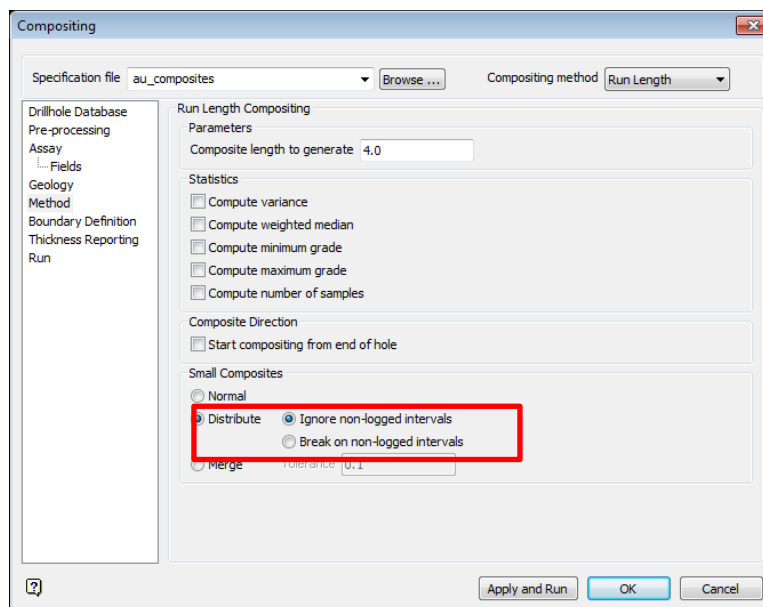
Για λόγους αξιοπιστίας δεν χρησιμοποιήθηκαν τα διαστήματα των γεωτρήσεων τα οποία δεν περιέχουν λιθολογικές πληροφορίες, εντούτοις όμως μπορεί να περιέχουν χημικές αναλύσεις. Η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε από το παράθυρο διαλόγου του σχήματος 5.38. Επιπρόσθετα επιλέχθηκε ο χειρισμός των υπολειμματικών αξιολογημένων διαστημάτων (composites), τα οποία έχουν μήκος μικρότερο του ιδανικού των 4m.



Σχήμα 5.36: Παρουσιάζονται τα χημικά στοιχεία Au, Ag, Pb, Zn (κόκκινο παραλληλόγραμμο) στα οποία έχει εφαρμοστεί μια μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή (capping) την οποία διακρίνουμε για το κάθε στοιχείο ξεχωριστά στην δεξιά στήλη (πορτοκαλί παραλληλόγραμμο). Ουσιαστικά αν μια από τις προαναφερθείσες μεταβλητές έχει τιμή μεγαλύτερη από τη μέγιστη οριακή τότε θα περικόπτεται και θα λαμβάνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη οριακή τιμή ανάλογα για το κάθε στοιχείο.



Σχήμα 5.37: Στο παράθυρο διαλόγου επιλέχθηκε η κωδικοποίηση των αξιολογημένων διαστημάτων με βάση τη λιθολογία (κόκκινο παραλληλόγραμμο).



Σχήμα 5.38: Στο παραπάνω παράθυρο διαλόγου επιλέχθηκε η όσο το δυνατό καλύτερη κατανομή των υπολειμματικών αξιολογημένων διαστημάτων τα οποία δεν μπορούν να έχουν ίσο μήκος για λόγους που έχουν περιγραφεί σε προηγούμενη παράγραφο. Επίσης, επιλέχθηκε να αγνοηθούν τα διαστήματα των γεωτρήσεων τα οποία δεν έχουν καμία πληροφορία.

Πίνακας 5.1: Παράδειγμα αξιολογημένης γεώτρησης όπου φαίνεται η κωδικοποίηση της λιθολογίας από την αρχική βάση δεδομένων (GEOCOD) και η κωδικοποίηση από το μοντέλο του σώματος μεταλλοφορίας (BOUND).

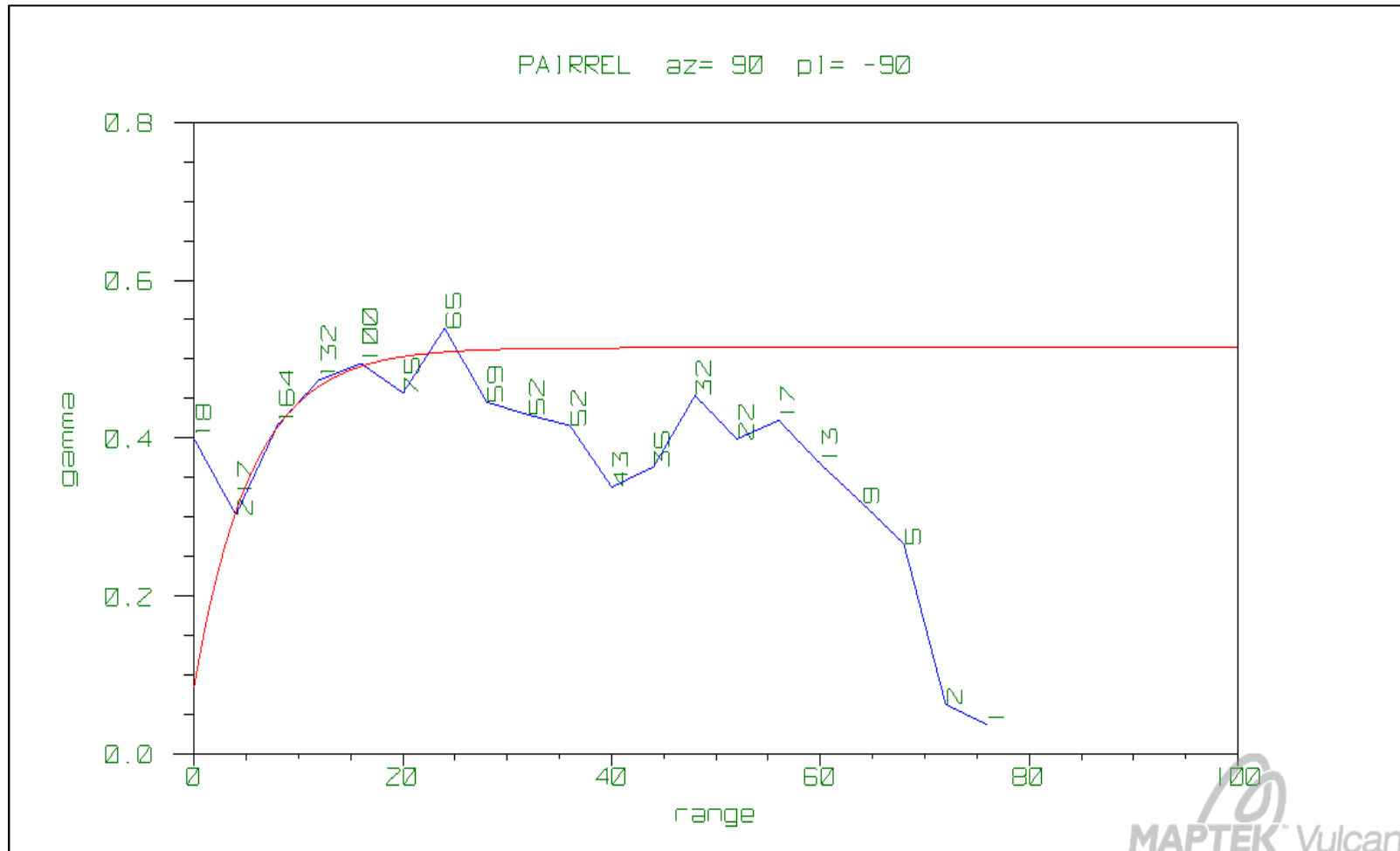
Γεώτρηση	X (m)	Y (m)	Z (m)	Μήκος (m)	Από (m)	Έως (m)	GEOCOD	BOUND	Au (ppm)
+15-10A	27474.953	-25031.173	20.631	3.860	0.000	3.860	OR	ORX25	0.200
+15-10A	27475.019	-25027.398	21.434	3.860	3.860	7.720	OR	ORX25	0.183
+15-10A	27475.085	-25023.623	22.236	3.860	7.720	11.580	OR	ORX25	0.727
+15-10A	27475.151	-25019.847	23.039	3.860	11.580	15.440	OR	ORX25	1.105
+15-10A	27475.217	-25016.072	23.841	3.860	15.440	19.300	OR	ORX25	4.276
+15-10A	27475.278	-25012.571	24.586	3.300	19.300	22.600	PE	ORX25	0.530
+15-10A	27475.352	-25008.317	25.490	5.400	22.600	28.000	OR	ORX25	1.163
+15-10A	27475.432	-25003.745	26.462	3.950	28.000	31.950	GN	ORX25	0.240
+15-10A	27475.499	-24999.881	27.283	3.950	31.950	35.900	GN	ORX25	0.240
+15-10A	27475.564	-24996.141	28.079	3.700	35.900	39.600	OR	ORX25	0.346
+15-10A	27475.628	-24992.522	28.848	3.700	39.600	43.300	OR	ORX25	0.298
+15-10A	27475.691	-24988.903	29.617	3.700	43.300	47.000	OR	ORX25	0.148
+15-10A	27475.742	-24985.957	30.244	2.326	47.000	49.326	GN	ORX25	0.150
+15-10A	27475.796	-24982.856	30.903	4.016	49.326	53.341	GN		0.150
+15-10A	27475.865	-24978.929	31.738	4.016	53.341	57.357	GN		0.150
+15-10A	27475.933	-24975.001	32.573	4.016	57.357	61.373	GN		0.150
+15-10A	27476.002	-24971.073	33.408	4.016	61.373	65.389	GN		0.150
+15-10A	27476.071	-24967.146	34.243	4.016	65.389	69.405	GN		0.150
+15-10A	27476.139	-24963.218	35.078	4.016	69.405	73.421	GN		0.150
+15-10A	27476.208	-24959.291	35.912	4.016	73.421	77.437	GN		0.150
+15-10A	27476.276	-24955.363	36.747	4.016	77.437	81.452	GN		0.150
+15-10A	27476.345	-24951.436	37.582	4.016	81.452	85.468	GN		0.150
+15-10A	27476.413	-24947.508	38.417	4.016	85.468	89.484	GN		0.150
+15-10A	27476.482	-24943.581	39.252	4.016	89.484	93.500	GN		0.150
+15-10A	27476.552	-24939.539	40.112	4.250	93.500	97.750	LA		0.150
+15-10A	27476.625	-24935.382	40.995	4.250	97.750	102.000	LA		0.150

Ο παραπάνω πίνακας περιέχει τη γεώτρηση 10^A από το πάτωμα +15 (+15-10^A) στην πρώτη στήλη. Η γεώτρηση αυτή έχει αξιολογηθεί και το αποτέλεσμα της αξιολόγησης (composites) παρατίθεται στην ένατη στήλη κάτω από τον τίτλο «Bound» και αναφέρεται στο κωδικό ORX25. Η όγδοη στήλη περιέχει την αρχική περιγραφή της λιθολογίας. Στην τελευταία στήλη παρατίθεται η αξιολογημένη περιεκτικότητα σε χρυσό.

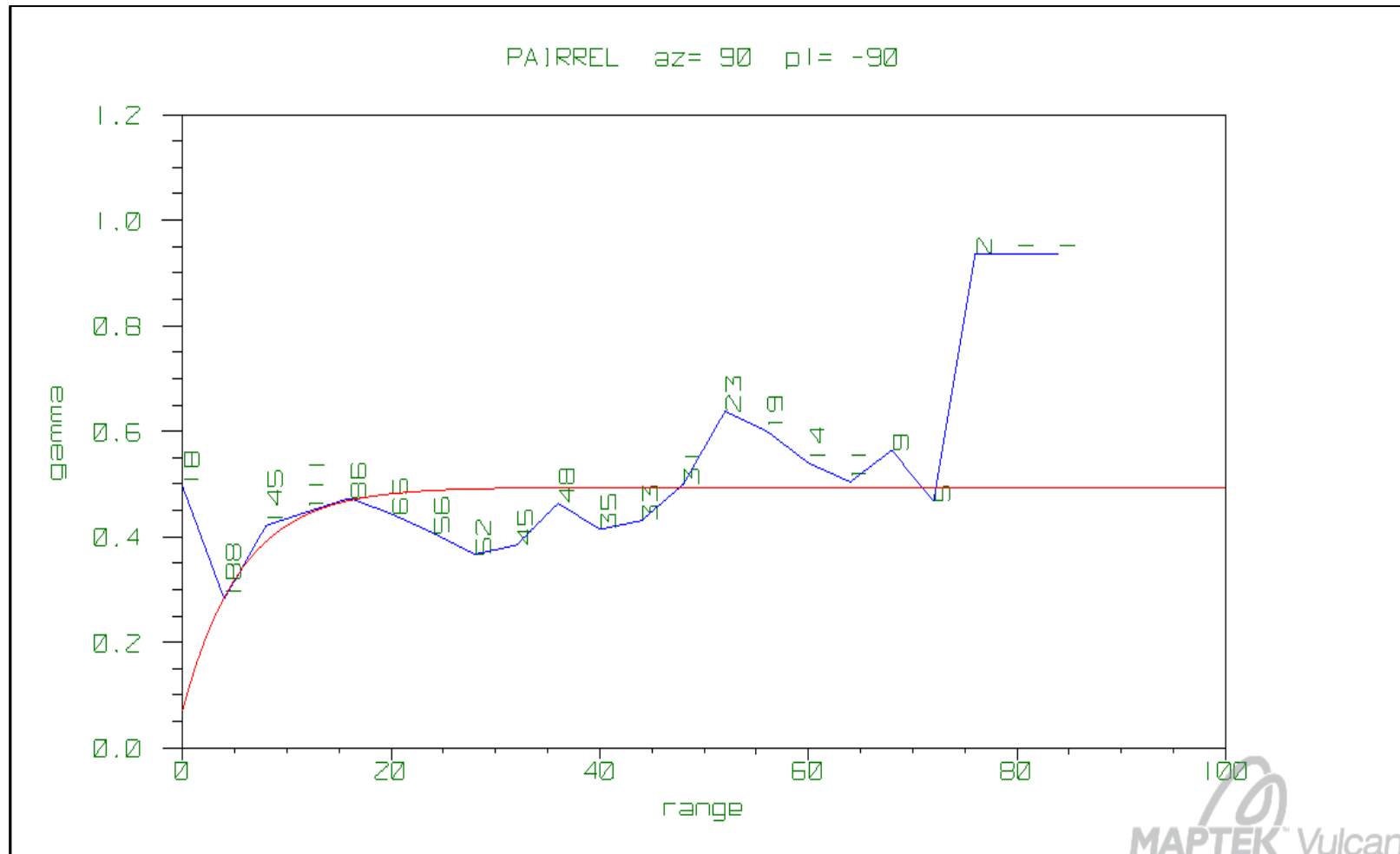
5.8 Υπολογισμός και Μοντελοποίηση Down hole Βαριογραμμάτων για κάθε Στοιχείο

Αρχικά θα πρέπει να εκτιμηθεί το φαινόμενο κόκκου (nugget effect). Επομένως κατασκευάστηκαν τα down hole ημιβαριογράμματα σκοπός των οποίων είναι η καλύτερη δυνατή προσέγγιση του φαινομένου κόκκου (nugget effect). Υπολογίστηκαν τα πειραματικά σχετικά βαριογράμματα ζευγών (pairwise relative variograms) με τη διαδικασία που περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Για τον υπολογισμό των διαφορών παραμέτρων από τα ημιβαριογράμματα θα πρέπει να προσαρμόσουμε στα τελευταία μια συνάρτηση ή διαφορετικά να τα μοντελοποιήσουμε. Συνεπώς σε όλα τα στοιχεία προσαρμόστηκε το εκθετικό μοντέλο (exponential semi-variogram) εκτός από το Pb όπου προσαρμόστηκε το σφαιρικό (spherical semi-variogram). Μπορούμε να διακρίνουμε τα διάφορα μοντέλα σαν μια κόκκινη γραμμή στα παρακάτω ημιβαριογράμματα (Σχήμα 5.39 έως 5.44).

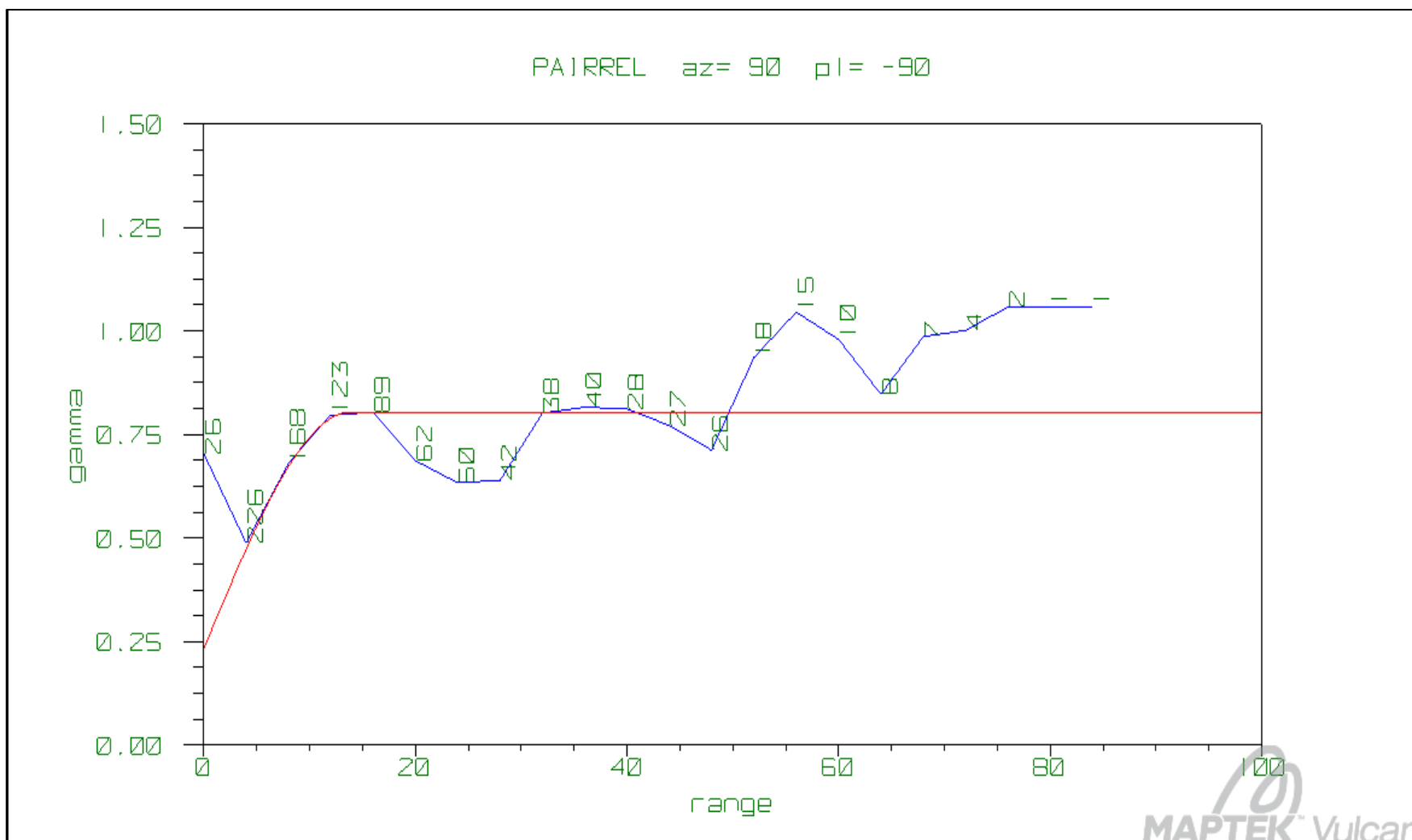
Επιπρόσθετα κατασκευάστηκαν τα ημιβαριογράμματα για κάθε στοιχείο ξεχωριστά σε διάφορες διευθύνσεις. Δυστυχώς η έλλειψη δεδομένων και η ακανόνιστη διάταξη της δειγματοληψίας έκανε την κατασκευή και ερμηνεία των πειραματικών δεδομένων πολύ δύσκολη. Η προσαρμογή των μοντέλων σε κάθε περίπτωση έγινε κατά προσέγγιση.



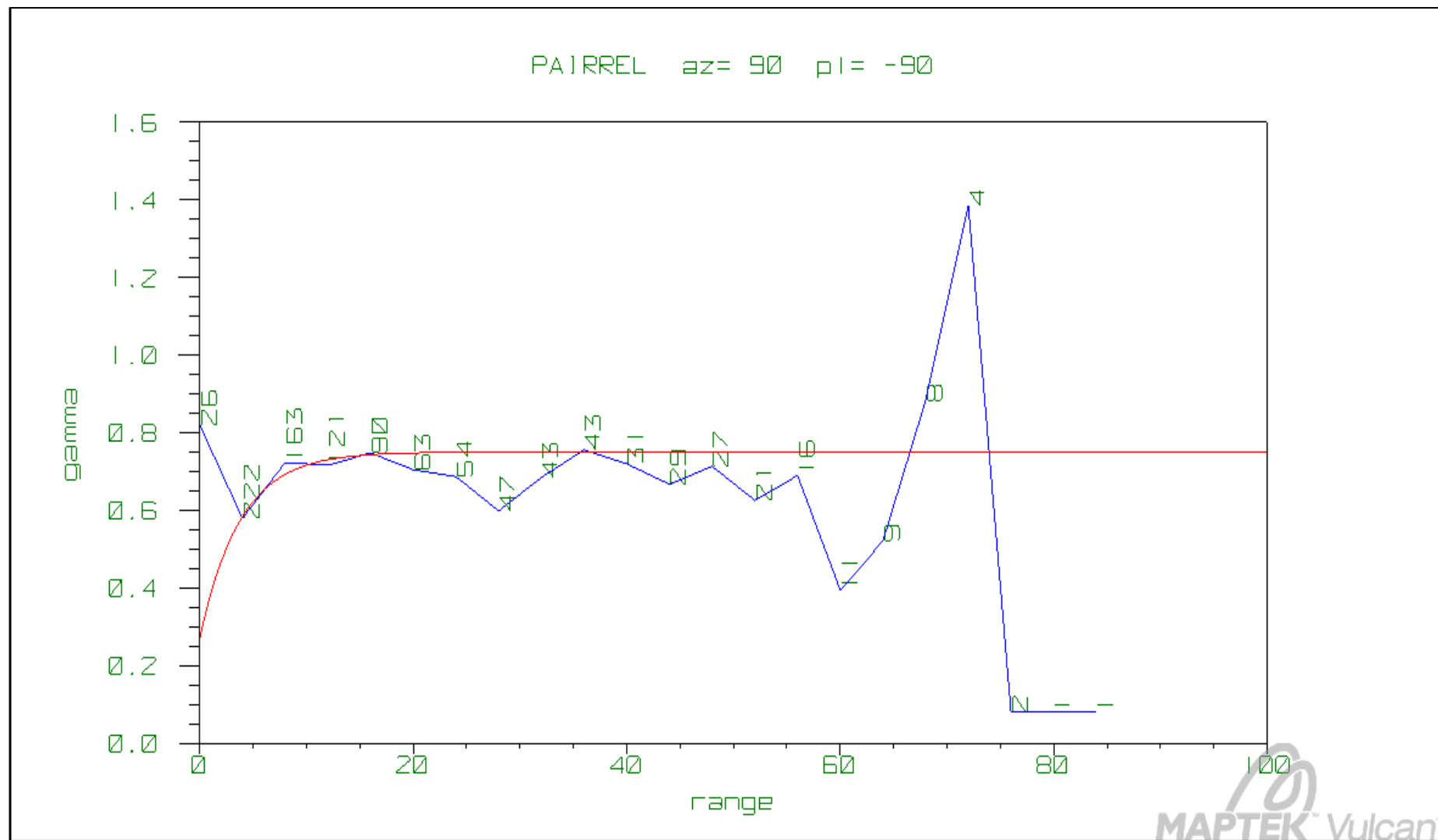
Σχήμα 5.39: Πειραματικό down hole σχετικό βαριόγραμμα ζευγών (pairwise relative variogram) για το Au. Παρατηρούμε ότι έχει προσαρμοστεί το εκθετικό μοντέλο (exponential model) το οποίο αντιπροσωπεύεται από την κόκκινη καμπύλη.



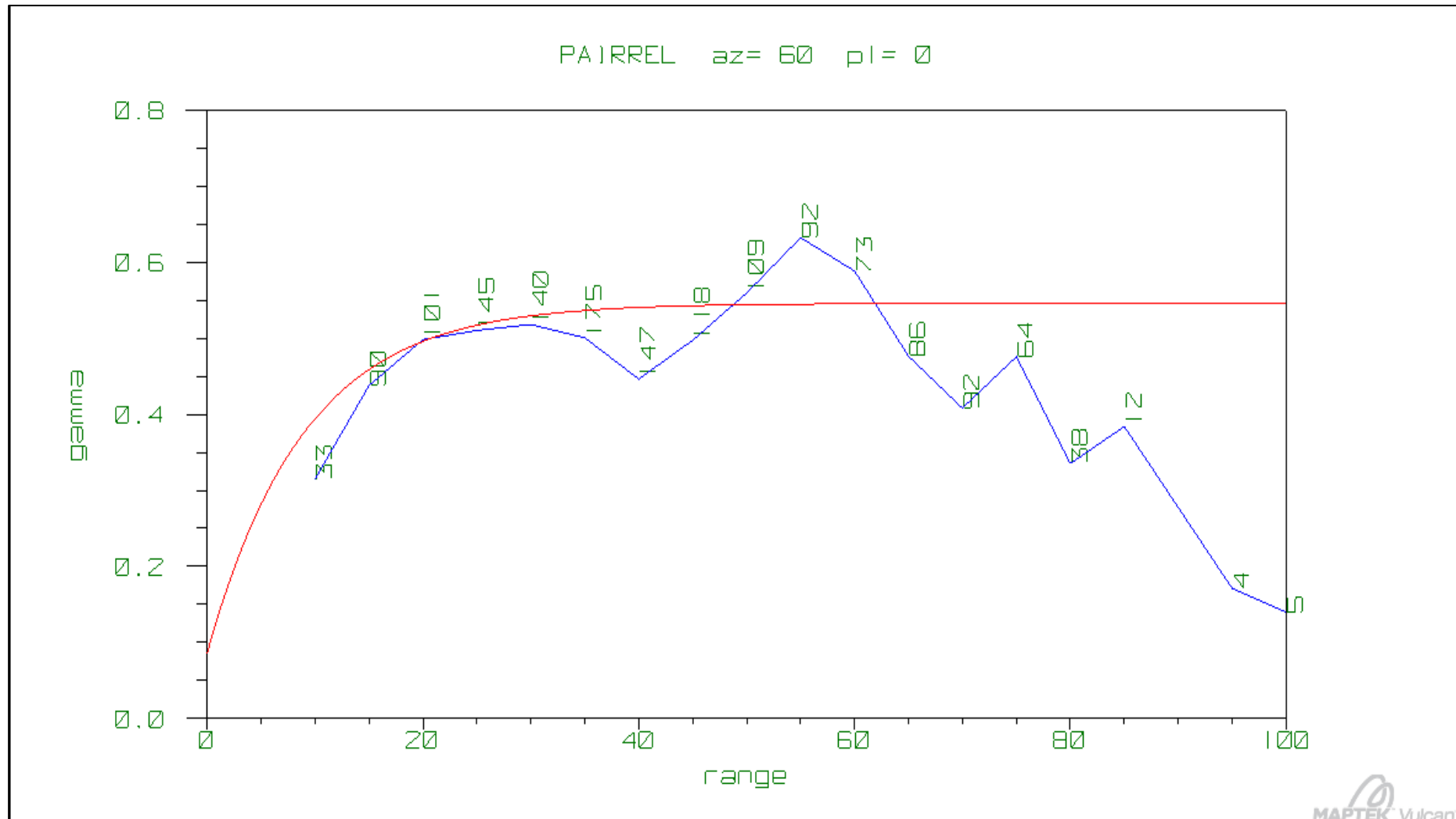
Σχήμα 5.40: Πειραματικό downhole σχετικό βαριόγραμμα ζευγών (pairwise relative variogram) για το Ag. Παρατηρούμε ότι έχει προσαρμοστεί το εκθετικό μοντέλο (exponential model) το οποίο αντιπροσωπεύεται από την κόκκινη καμπύλη.



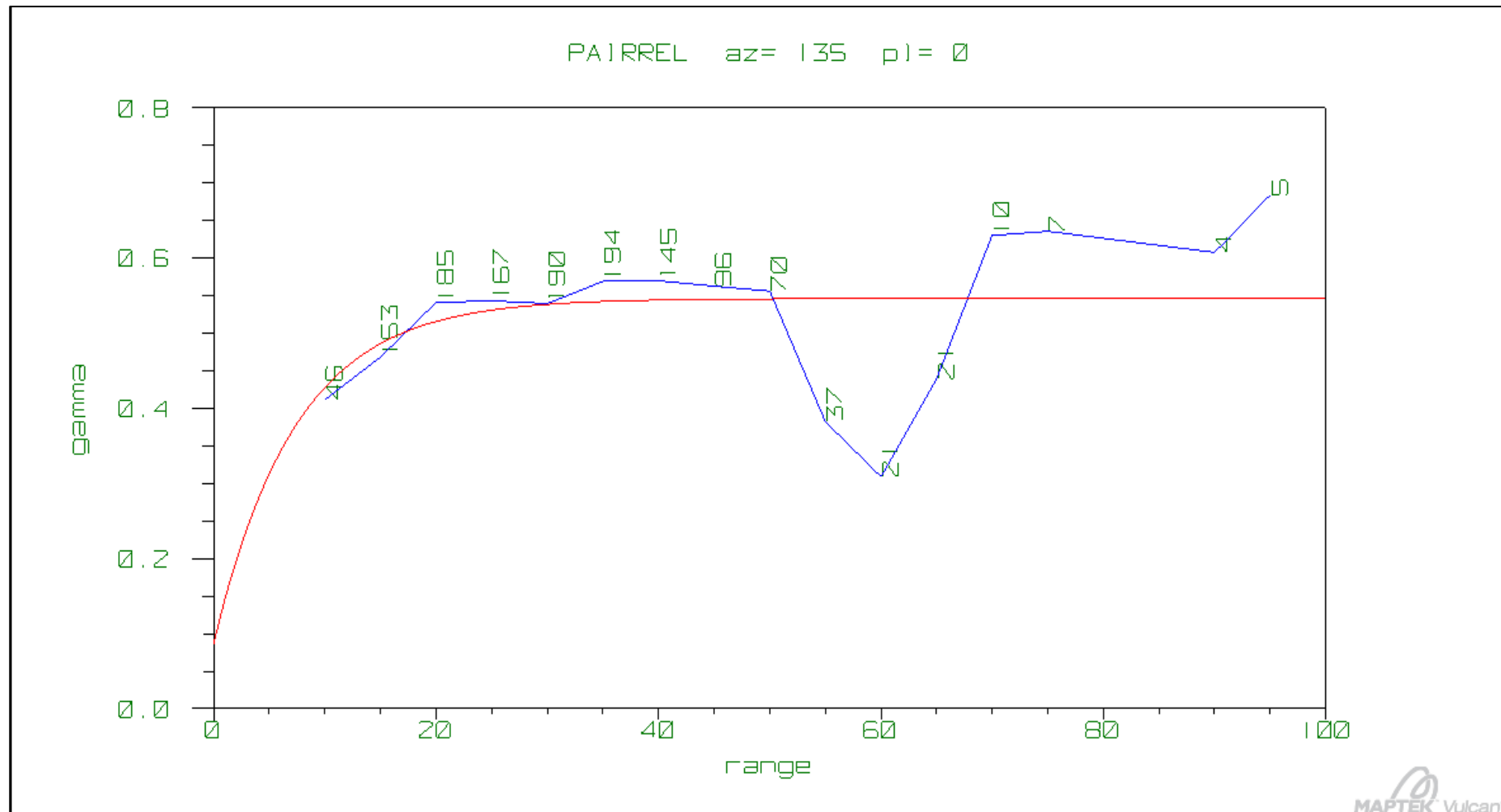
Σχήμα 5.41: Πειραματικό Down hole σχετικό βαριογράμμο ζευγών (Pairwise relative variogram) για το Pb. Παρατηρούμε ότι έχει προσαρμοστεί το σφαιρικό μοντέλο (spherical model) το οποίο αντιπροσωπεύεται από την κόκκινη καμπύλη.



Σχήμα 5.42: Πειραματικό down hole σχετικό βαριόγραμμα ζευγών (pairwise relative variogram) για το Zn. Παρατηρούμε ότι έχει προσαρμοστεί το εκθετικό μοντέλο (exponential model) το οποίο αντιπροσωπεύεται από την κόκκινη καμπύλη.



Σχήμα 5.43: Παράδειγμα πειραματικού βαριογράμματος και του συνοδού εκθετικού μοντέλου για το Au, με αζιμούθιο 60° και βύθιση 0°.



Σχήμα 5.44: Παράδειγμα πειραματικού βαριογράμματος και του συνοδού εκθετικού μοντέλου για το Au, με αζιμούθιο 135° και βύθιση 0°

5.9 Εκτίμηση Μοντέλου Μπλοκ με Κανονικό (Ordinary) Kriging

Με την επωνυμία Kriging αναφερόμαστε σε μια ομάδα γεωστατιστικών τεχνικών και μεθόδων για την παρεμβολή μιας τυχαίας μεταβλητής. Για παράδειγμα την εκτίμηση της περιεκτικότητας σαν συνάρτηση της γεωγραφικής τοποθέτησης (X,Y,Z) σε ένα σημείο κάποιου κοιτάσματος για το οποίο δεν υπάρχει καμία πληροφορία, χρησιμοποιώντας δεδομένα από γειτονικά δείγματα.

Η θεωρία πίσω από την παρεμβολή (interpolation) και παρέκταση (extrapolation) με τη χρήση του kriging, αναπτύχθηκε από το Γάλλο Georges Matheron, οποίος βασίστηκε στη διατριβή ειδίκευσης του Danie G. Krige, η οποία σχετιζόταν με την γραφική απεικόνιση των μέσων ζυγισμένων (με βάση την απόσταση μεταξύ των δειγμάτων) περιεκτικοτήτων του χρυσού στο κοιτάσμα Witwatersrand reef complex της Ν. Αφρικής.

Η μέθοδος Kriging ανήκει στην οικογένεια των αλγορίθμων γραμμικής εκτίμησης που βασίζονται στη χρήση των ελαχίστων τετραγώνων. Ο στόχος του kriging είναι να εκτιμήσει την τιμή μιας άγνωστης συνάρτησης, f , σε ένα δεδομένο σημείο αυτής x^* , έχοντας σαν μόνα στοιχεία ορισμένες γνωστές τιμές της ζητούμενης συνάρτησης σε κάποια άλλα σημεία της τελευταίας, $x_1, \dots, x_n$. Ο εκτιμητής kriging είναι γραμμικός καθώς η εκτιμητέα τιμή $\hat{f}(x^*)$ αποτελεί ένα γραμμικό συνδυασμό, ο οποίος μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\hat{f}(x^*) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(x^*) f(x_i).$$

Τα βάρη $\lambda_i(x^*)$ αποτελούν λύσεις ενός συστήματος γραμμικών εξισώσεων, το οποίο έχει προκύψει από την υπόθεση ότι η f , αποτελεί το μονοπάτι μιας τυχαίας διεργασίας $F(x)$, ενώ το σφάλμα της εκτίμησης πρέπει να ελαχιστοποιηθεί με κάποιο τρόπο.

$$\varepsilon(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(x) F(x_i) - F(x)$$

Το απλό kriging βασίζεται στην υπόθεση ότι ο μέσος και η συνδιακύμανση της $F(x)$, είναι γνωστές και επομένως ο εκτιμητής kriging είναι αυτός που ελαχιστοποιεί τη διακύμανση του εκτιμώμενου σφάλματος.

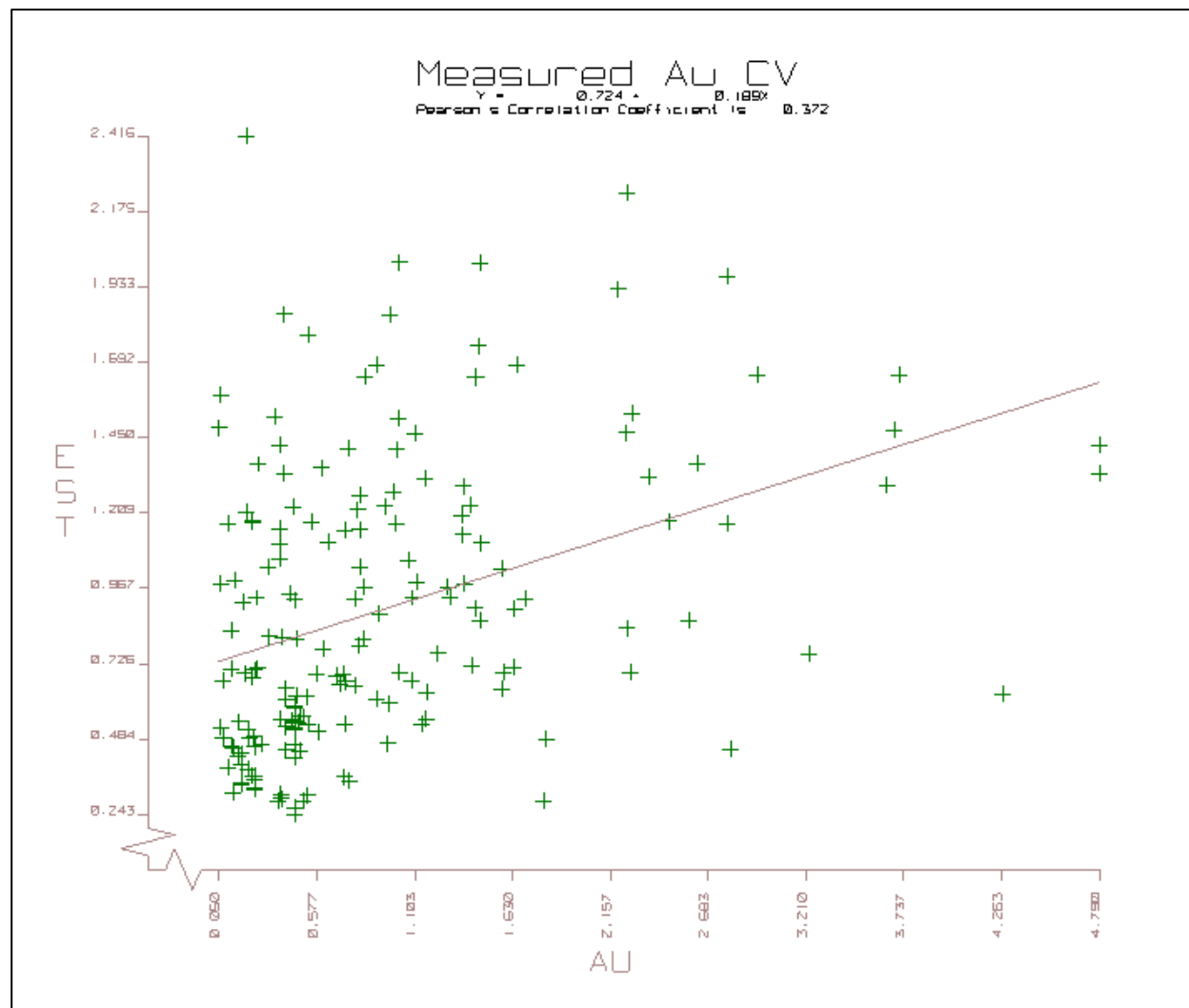
Η εκτίμηση των αποθεμάτων του κοιτάσματος του Μαντέμ Λάκκου πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή μοντέλο μπλοκ διαστάσεων 4x4x4m. Με βάση τα αντίστοιχα μοντέλα βαριογράμματος εκτιμήθηκαν όλα τα στοιχεία ξεχωριστά σε τρία στάδια οδηγώντας σε τρεις κλάσεις εκτιμήσεων (βέβαια, δυνατά, και πιθανά αποθέματα). Χρησιμοποιήθηκε ελλειψοειδές ανίχνευσης δειγμάτων που ταυτίζεται με το εύρος του μοντέλου βαριογράμματος σε κάθε περίπτωση.

5.10 Διασταυρωμένη Επικύρωση Εκτιμήσεων (Cross-validation)

Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων αλλά και της γενικότερης μεθοδολογίας πραγματοποιήθηκε επικύρωση ξεχωριστά για κάθε κλάση εκτιμήσεων. Πρακτικά αφαιρούμε κάθε φορά μια ολόκληρη γεώτρηση και επαναλαμβάνουμε την εκτίμηση για το σημείο εκείνο της απύσας γεώτρησης από τα γειτονικά δείγματα, δίχως να περιλαμβάνονται τα δείγματα της εξεταζόμενης γεώτρησης. Τα αποτελέσματα της διασταυρωμένης επικύρωσης παρατίθενται στους ακόλουθους πίνακες, όπως ακριβώς προκύπτουν από το λογισμικό.

**Πίνακας 1: Στατιστικά στοιχεία τιμών δειγμάτων (Au) και εκτιμώμενων τιμών δειγμάτων (EST)
(προδιαγραφές βέβαιων αποθεμάτων)**

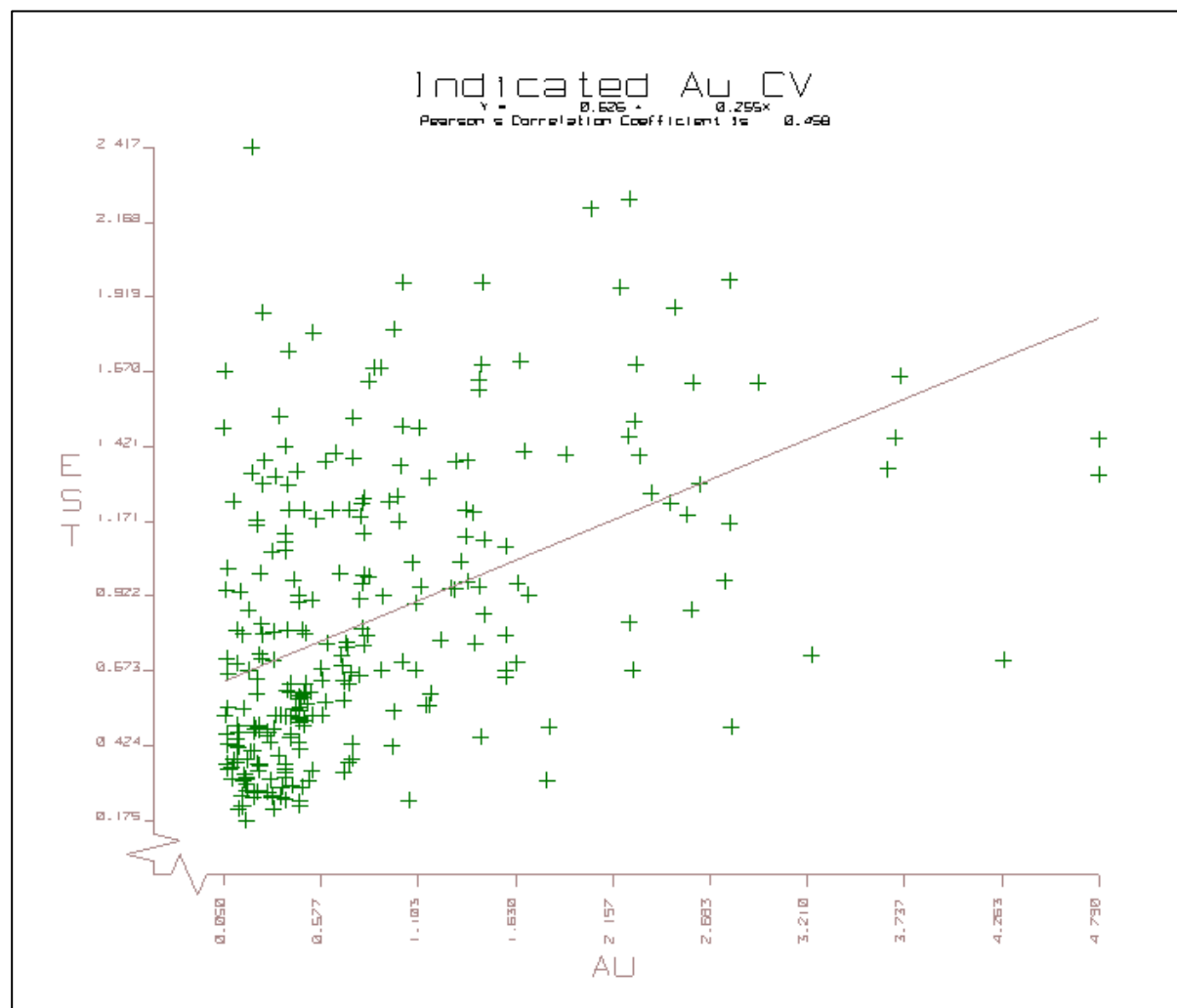
Γενικά στατιστικά στοιχεία				
Selection Method	:	ASCII		
Data Source	:	MLAU_1.MAP		
Location Data	:	MIDX	MIDY	MIDZ
Number of samples	:	180	180	180
Minimum	:	27096.426	-25257.518	-2.037
Maximum	:	27506.793	-24994.194	66.300
Range	:	410.367	263.324	68.337
Data	:	AU	EST	
Number of samples	:	180	180	
Arithmetic Mean	:	0.932	0.900	
Variance	:	0.829	0.213	
Standard Deviation	:	0.911	0.462	
Coef. Of variation	:	0.977	0.513	
Minimum	:	0.050	0.243	
Maximum	:	4.790	2.416	
Range	:	4.740	2.173	
Skewness	:	0.145	0.057	
Kurtosis	:	7.143	2.962	
Geometric Mean	:	0.604	0.787	
Geometric Variance	:	2.607	1.326	
Harmonic Mean	:	0.369	0.684	
Sichel "T" Estim.	:	0.975	0.906	
Mean of Nat. Logs	:	-0.505	-0.240	
Nat. Log Variance	:	0.958	0.282	



Σχήμα 3.45: Διάγραμμα διασποράς πραγματικών τιμών Au και εκτιμήσεων (προδιαγραφές για βέβαια αποθέματα)

**Πίνακας 2: Στατιστικά στοιχεία τιμών δειγμάτων (Au) και εκτιμώμενων τιμών δειγμάτων (EST)
(προδιαγραφές δυνατών αποθεμάτων)**

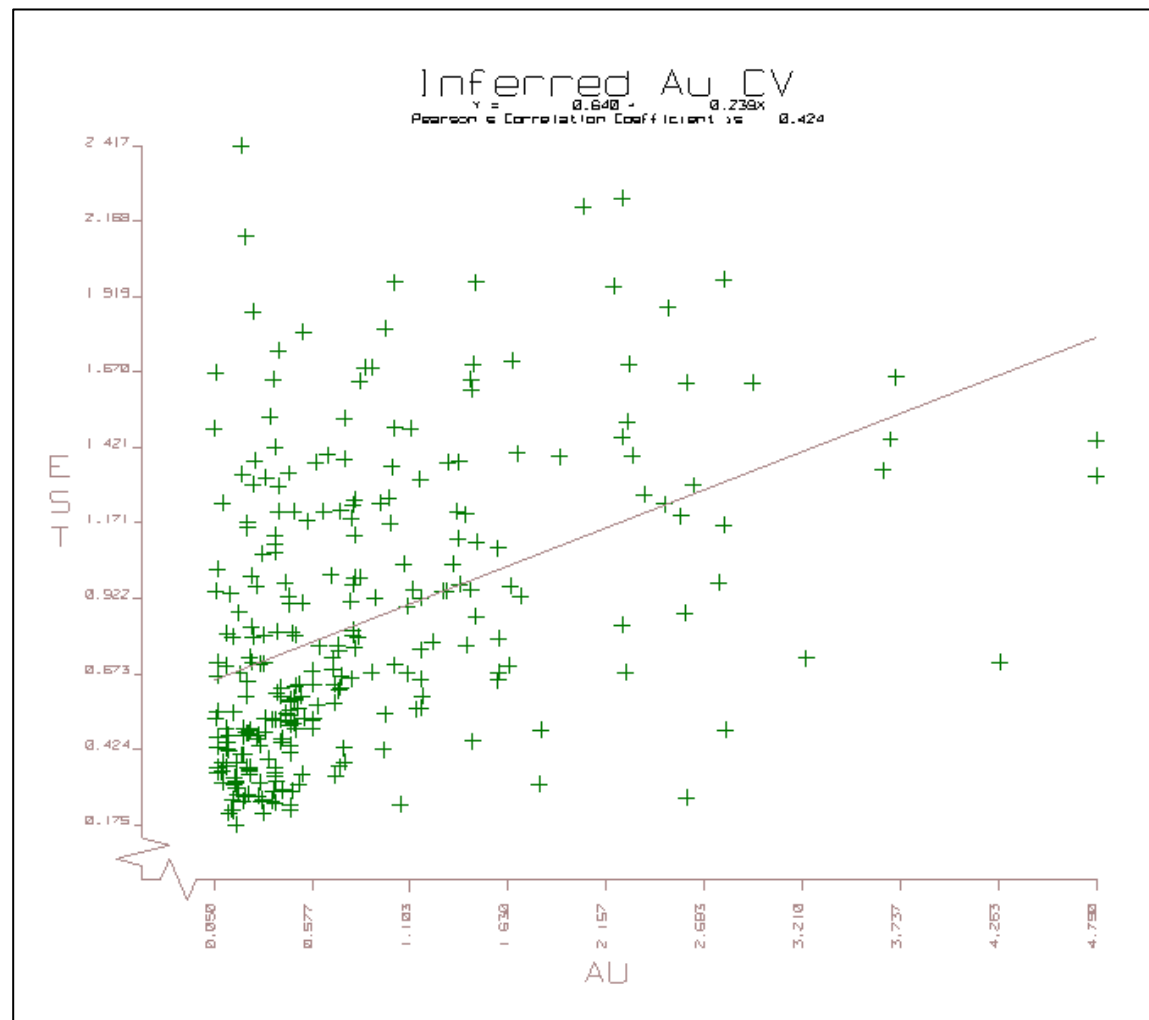
Γενικά στατιστικά στοιχεία				
=====				
Selection Method	:	ASCII		
Data Source	:	MLAU_2.MAP		
Location Data	:	MIDX	MIDY	MIDZ
Number of samples	:	266	266	266
Minimum	:	27094.904	-25334.955	-6.364
Maximum	:	27530.575	-24959.284	66.300
Range	:	435.671	375.671	72.664
Data	:	AU	EST	
Number of samples	:	266	266	
Arithmetic Mean	:	0.830	0.837	
Variance	:	0.723	0.224	
Standard Deviation	:	0.850	0.473	
Coef. of variation	:	1.025	0.565	
Minimum	:	0.050	0.175	
Maximum	:	4.790	2.417	
Range	:	4.740	2.242	
Skewness	:	0.124	0.049	
Kurtosis	:	7.647	2.940	
Geometric Mean	:	0.524	0.710	
Geometric Variance	:	2.668	1.418	
Harmonic Mean	:	0.324	0.596	
Sichel "T" Estim.	:	0.856	0.845	
Mean of Nat. Logs	:	-0.646	-0.343	
Nat. Log Variance	:	0.981	0.349	



Σχήμα 3.46: Διάγραμμα διασποράς πραγματικών τιμών Au και εκτιμήσεων (προδιαγραφές για δυνατά αποθέματα).

Πίνακας 3: Στατιστικά στοιχεία τιμών δειγμάτων (Au) και εκτιμώμενων τιμών δειγμάτων (EST) (προδιαγραφές πιθανών αποθεμάτων)

Γενικά στατιστικά στοιχεία				
=====				
Selection Method	:	ASCII		
Data Source	:	MLAU_3.MAP		
Location Data	:	MIDX	MIDY	MIDZ
Number of samples	:	279	279	279
Minimum	:	27094.904	-25334.955	-57.997
Maximum	:	27676.000	-24959.284	66.360
Range	:	581.096	375.671	124.357
Data	:	AU	EST	
Number of samples	:	279	279	
Arithmetic Mean	:	0.829	0.838	
Variance	:	0.707	0.224	
Standard Deviation	:	0.841	0.474	
Coef. of variation	:	1.015	0.565	
Minimum	:	0.050	0.175	
Maximum	:	4.790	2.417	
Range	:	4.740	2.242	
Skewness	:	0.122	0.050	
Kurtosis	:	7.716	3.020	
Geometric Mean	:	0.529	0.711	
Geometric Variance	:	2.607	1.412	
Harmonic Mean	:	0.330	0.599	
Sichel "T" Estim.	:	0.854	0.845	
Mean of Nat. Logs	:	-0.637	-0.341	
Nat. Log Variance	:	0.958	0.345	



Σχήμα 3.47: Διάγραμμα διασποράς πραγματικών τιμών Au και εκτιμήσεων (προδιαγραφές για πιθανά αποθέματα).

6 Αποτελέσματα

6.1 Αποτελέσματα βαριογραφίας

Ο πίνακας που ακολουθεί συνοψίζει όλα τα στοιχεία και τις παραμέτρους που υπολογίστηκαν από τα ημιβαριογράμματα (Πίνακας 4.1). Με βάση τελικά μοντέλα βαριογράμματος και τις διάφορες παραμέτρους που προέκυψαν από αυτά εκτιμήθηκαν τα αποθέματα του κοιτάσματος του Μαντέμ Λάκκου και παρατίθενται σε επόμενη παράγραφο.

6.2 Αποτελέσματα εκτίμησης αποθεμάτων Μαντέμ Λάκκου

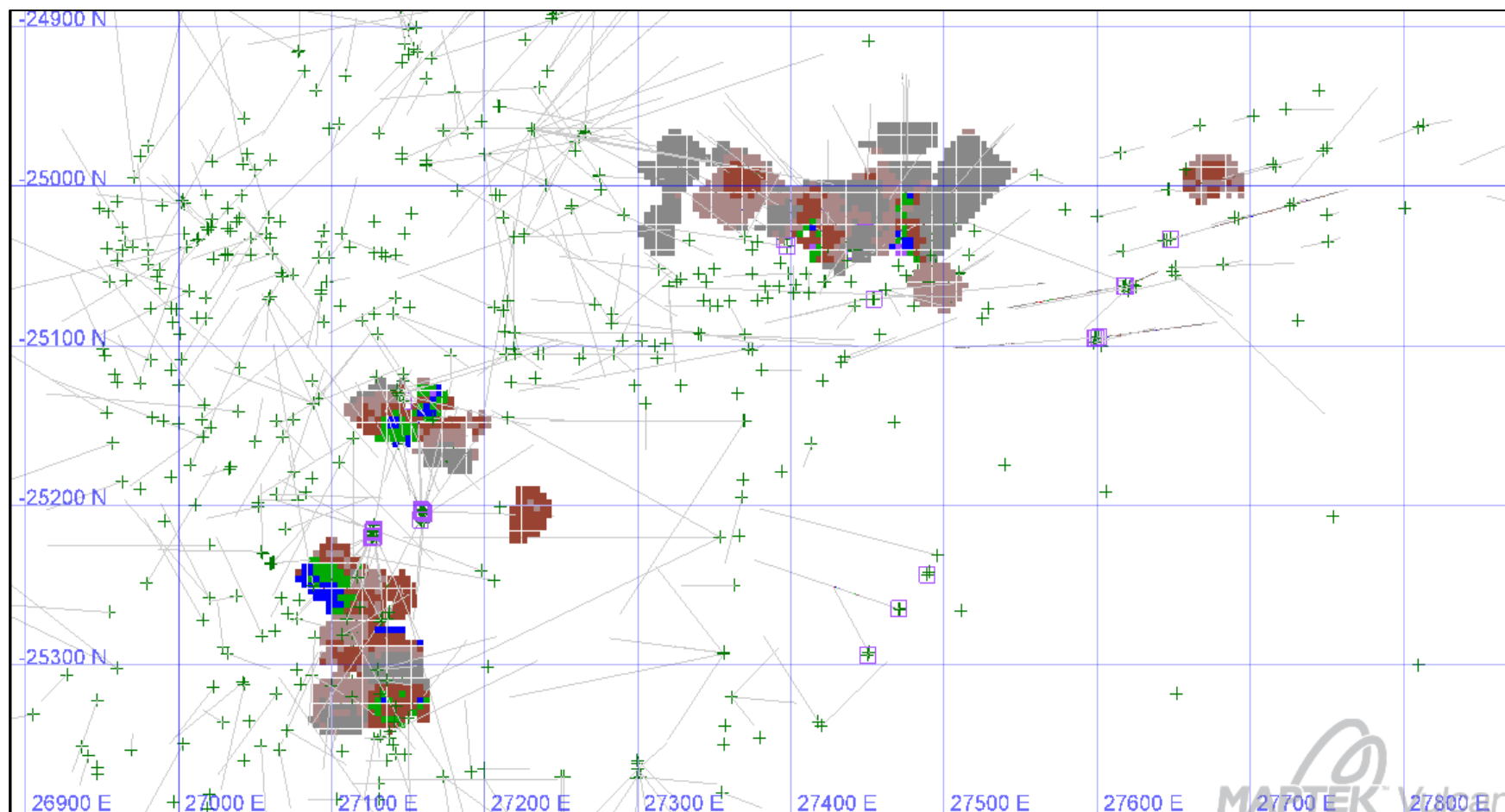
Για τους σκοπούς της εκτίμησης των αποθεμάτων του κοιτάσματος του Μαντέμ Λάκκου χρησιμοποιήθηκε μοντέλο μπλοκ διαστάσεων 4x4x4μ. Εκτιμήθηκαν όλα τα στοιχεία ξεχωριστά χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο μοντέλο βαριογράμματος. Για κάθε στοιχείο η εκτίμηση έγινε σε τρία στάδια. Κάθε στάδιο είχε διαφορετικές προδιαγραφές επιλογής δεδομένων οδηγώντας σε τρεις κλάσεις εκτιμήσεων (βέβαια, δυνατά και πιθανά αποθέματα). Χρησιμοποιήθηκε ελλειψοειδές ανίχνευσης δειγμάτων που ταυτίζεται με το εύρος του μοντέλου βαριογράμματος σε κάθε περίπτωση. Πέραν των εκτιμήσεων στην περίπτωση του Αι αποθηκεύθηκαν οι διακυμάνσεις μπλοκ και kriging, το ελάχιστο βάρος δείγματος, η απόσταση του κοντινότερου δείγματος, το πλήθος των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτίμηση του κάθε μπλοκ, το πλήθος των γεωτρήσεων των δειγμάτων αυτών.

Πίνακας 6.1: Σύνοψη των στοιχείων και των παραμέτρων που υπολογίστηκαν από τα ημιβαριογράμματα.

	Χρυσός (Au ppm)	Άργυρος (Ag ppm)	Μόλυβδος (Pb %)	Ψευδάργυρος (Zn %)
Mode	Σχετικά Βαριογράμματα Ζευγών Pairwise Relative	Σχετικά Βαριογράμματα Ζευγών Pairwise Relative	Σχετικά Βαριογράμματα Ζευγών Pairwise Relative	Σχετικά Βαριογράμματα Ζευγών Pairwise Relative
Μοντέλο (Model)	Εκθετικό Exponential	Εκθετικό Exponential	Σφαιρικό Spherical	Εκθετικό Exponential
Φαινόμενο Κόκκου Co	0.086	0.097	0.233	0.271
Οροφή Sill C	0.46	0.451	0.554	0.556
Κύριος Άξονας Ελλειψοειδούς	26.0	30	40	36
Ενδιάμεσος Άξονας Ελλειψοειδούς	22.5	30	40	30
Μικρός Άξονας Ελλειψοειδούς	14.7	15	22	15
Αξιμούθιο	180	180	180	180
Βύθιση	-55	-55	-55	-55
Dip	0	0	0	0

Πίνακας 6.2: Συνοπτικός πίνακας στον οποίο περιλαμβάνονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση, όπως επίσης και τα αποτελέσματα αυτής (τελευταία σειρά).

	Au			Ag			Pb			Zn		
Κλάση	Βέβαιοι	Δυνατοί	Πιθανοί	Βέβαιοι	Δυνατοί	Πιθανοί	Βέβαιοι	Δυνατοί	Πιθανοί	Βέβαιοι	Δυνατοί	Πιθανοί
Major	26.0			30			40			36		
Semi	22.5			30			40			30		
Minor	14.7			15			22			15		
Ελάχιστος αριθμός δειγμάτων	8	4	2	8	4	2	8	4	2	8	4	2
Μέγιστος αριθμός δειγμάτων	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Χρήση octants	Ναι	Όχι	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι
Μέγιστος αριθμός δειγμάτων ανά octant	3	-	-	3	-	-	3	-	-	3	-	-
Μπλοκ που εκτιμήθηκαν	2275	3394	1514	3258	3834	1691	5076	5308	2294	5101	5039	2451



Σχήμα 6.1: Κάτοψη με γεωτρήσεις και μπλοκ που εκτιμήθηκαν. Από τις 1123 γεωτρήσεις που απεικονίζονται μόνο οι 86 είχαν αναλύσεις Au.

6.3 Καμπύλη περιεκτικότητας – tonnage και συνολικά αποθέματα

Αρχικά εφαρμόστηκε η μέθοδος της αντιστρόφου αποστάσεως για τη μοντελοποίηση της γεωμετρίας του κοιτάσματος. Έπειτα, προσδιορίστηκε η ανισοτροπία της μεταλλοφορίας με τη χρήση και ερμηνεία της βαριογραφίας. Κατόπιν, εφαρμόστηκε κανονικό Kriging για την εκτίμηση του μοντέλου μπλοκ από το οποίο προέκυψαν διάφορα τεμάχια (block) με συγκεκριμένες περιεκτικότητες το καθένα. Θεωρώντας ότι η μέση πυκνότητα του μεταλλεύματος είναι 4.5gr/cm^3 σε συνδυασμό με ένα θεωρητικό όριο εκμεταλλευσιμότητας 0.5gr/tn Αυ και με βάση τις καμπύλες περιεκτικότητας – tonnage προκύπτει ότι:

- για πιθανά αποθέματα η μεταλλοφορία του χρυσού εκτιμάται στους 279 Ktn
- για δυνατά αποθέματα η μεταλλοφορία του χρυσού εκτιμάται στους 612 Ktn
- για βέβαια αποθέματα η μεταλλοφορία του χρυσού εκτιμάται στους 503 Ktn

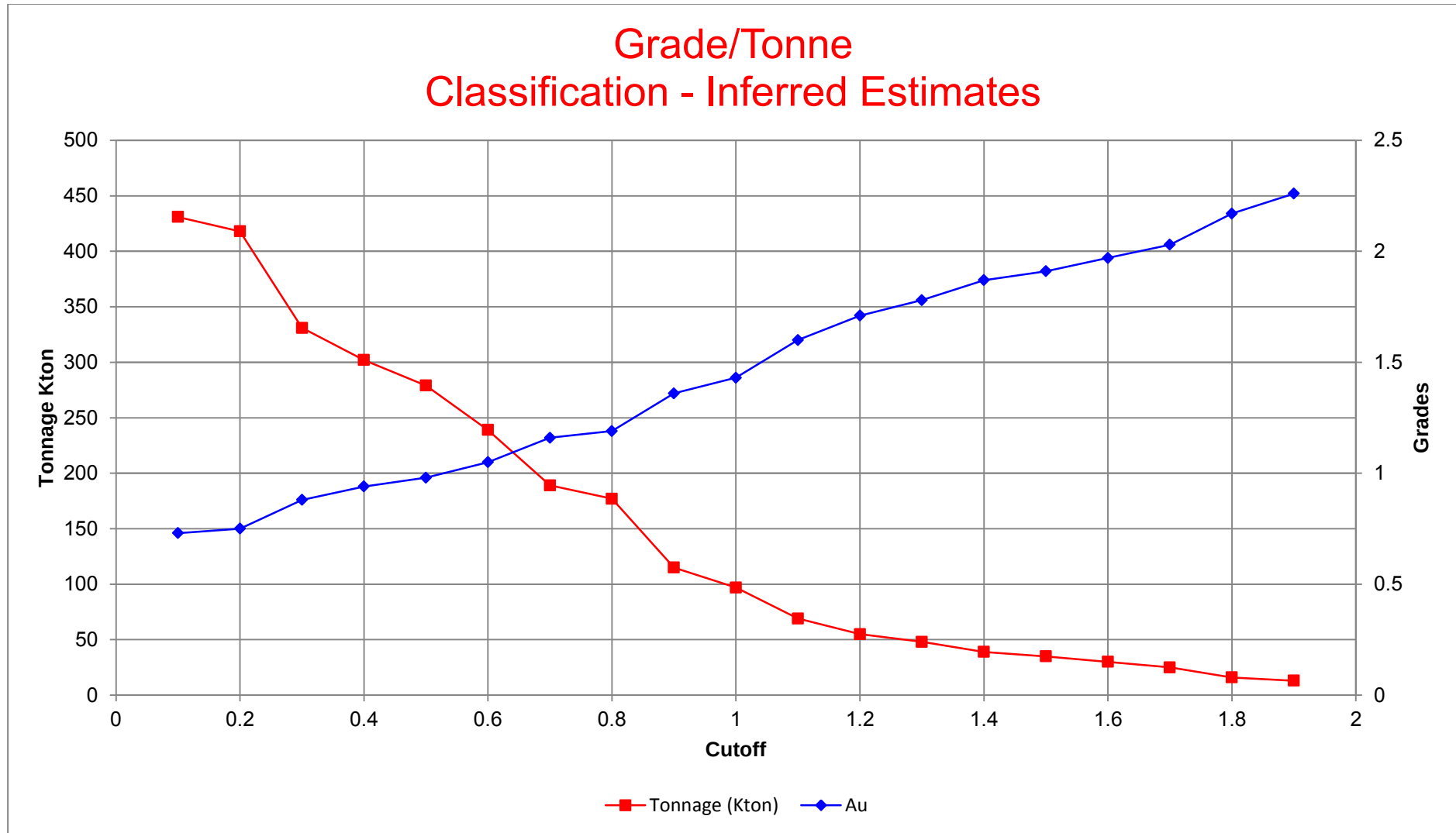
Η καμπύλη περιεκτικότητας – tonnage εφαρμόζεται κατά κόρων στη μεταλλευτική βιομηχανία, από το στάδιο της γεωλογικής μοντελοποίησης και του σχεδιασμού του μεταλλείου έως και σε οικονομοτεχνικές μελέτες. Επομένως, αποτελεί ένα από τα πλέον χρήσιμα εργαλεία για τον καθορισμό του όγκου και της περιεκτικότητας ενός υλικού για διάφορα όρια εκμεταλλευσιμότητας (John, 1985, Marek and Welhener, 1985).

Συνεπώς, η καμπύλη περιεκτικότητας tonnage υπολογίζεται για τα in-situ αποθέματα και πάντα παρουσιάζει το βέλτιστο ή το πλέον αισιόδοξο σενάριο. Βασίζεται στην υπόθεση ότι για δεδομένο όριο εκμεταλλευσιμότητας όλο το εκμεταλλεύσιμο υλικό προέρχεται από ένα μεταλλοφόρο σώμα συνεχές και κάθε τεμάχος (block) μπορεί να εξορυχθεί. Οπότε το αντίστοιχο tonnage που προκύπτει αποτελεί μια εξιδανικευμένη κατάσταση.

Συνήθως, η καμπύλη περιεκτικότητας tonnage δεν υπολογίζεται για τα εξορύξιμα αποθέματα, τα οποία και σαφώς εξαρτώνται από τη μεταλλευτική μέθοδο. Δηλαδή από τη γεωμετρία, τη χωρική τοποθέτηση και σχέση μεταξύ των εκμεταλλεύσιμων και στείρων τεμαχίων (blocks) και της χωροταξικής διευθέτησης των κύριων μεταλλευτικών υποδομών όπως οι γαλαρίες (galleries), οι κύριες ράμπες προσπέλασης (main ramps), τα πηγάδια (shafts) κ.λπ.

Πίνακας 6.3: Πιθανά αποθέματα ανά όριο εκμεταλλευσιμότητας (Inferred Resources per cutoff - cumulative).

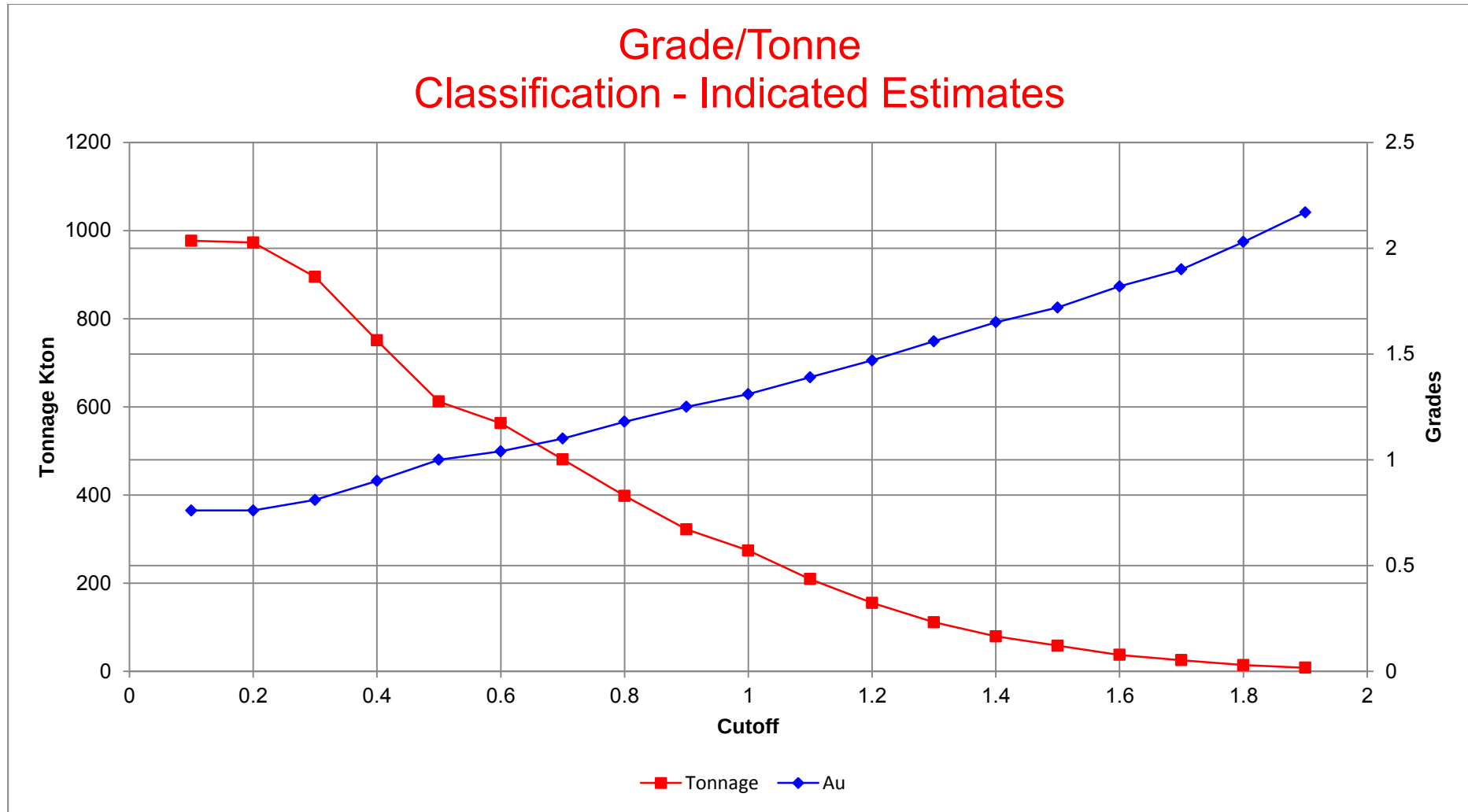
Cutoff	Au	Tonnage Kton	Ag	Pb	Zn
0.1	0.73	431	29.44	0.72	1.04
0.2	0.75	418	29.84	0.72	1.05
0.3	0.88	331	31.58	0.85	1.26
0.4	0.94	302	32.45	0.89	1.31
0.5	0.98	279	33.53	0.93	1.36
0.6	1.05	239	35.97	1.03	1.5
0.7	1.16	189	38.91	1.22	1.65
0.8	1.19	177	39.71	1.26	1.68
0.9	1.36	115	35.32	1.44	2.27
1	1.43	97	34.89	1.41	2.18
1.1	1.6	69	26.29	0.8	1.89
1.2	1.71	55	23.4	0.68	1.95
1.3	1.78	48	21.85	0.6	1.85
1.4	1.87	39	16.04	0.61	2.27
1.5	1.91	35	15.97	0.62	2.43
1.6	1.97	30	15.73	0.62	2.54
1.7	2.03	25	13.22	0.52	2.58
1.8	2.17	16	15.3	0.62	2.55
1.9	2.26	13	16.1	0.67	2.41



Σχήμα 6.2: Πιθανά αποθέματα ανά όριο εκμεταλλευσιρότητας (Inferred Resources per cutoff - cumulative)

Πίνακας 6.4: Δυνατά αποθέματα ανά όριο εκμεταλλευσιμότητας (Indicated Resources per cutoff - cumulative).

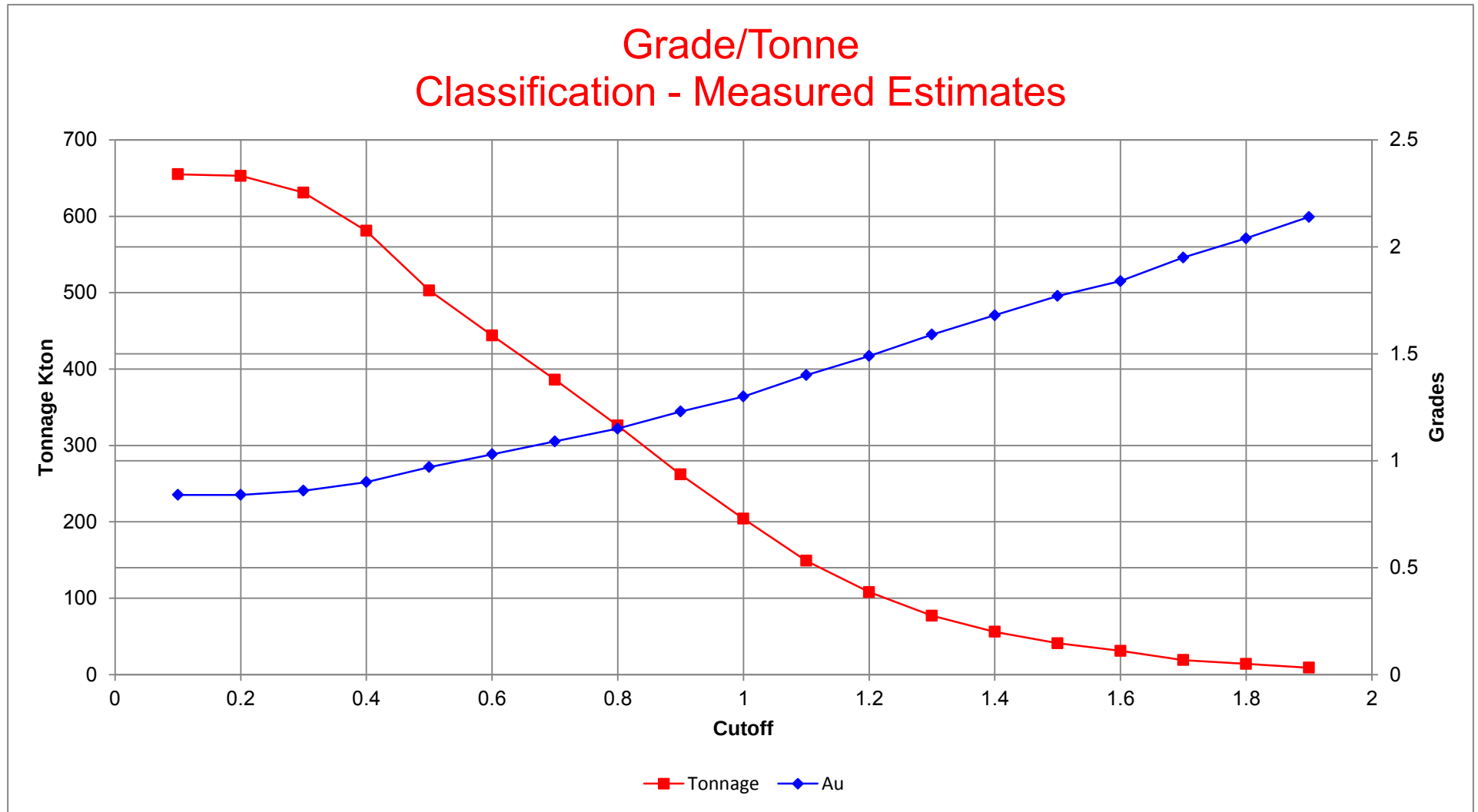
Cutoff	Au	Tonnage Kton	Ag	Pb	Zn
0.1	0.76	977	24.59	0.73	1.38
0.2	0.76	973	24.59	0.73	1.38
0.3	0.81	895	25.01	0.73	1.41
0.4	0.9	751	25.58	0.76	1.53
0.5	1	612	27.14	0.82	1.76
0.6	1.04	563	27.76	0.85	1.86
0.7	1.1	481	28.18	0.89	2.01
0.8	1.18	398	28.46	0.91	2.2
0.9	1.25	322	28.52	0.93	2.39
1	1.31	274	27.81	0.89	2.41
1.1	1.39	209	26.53	0.83	2.44
1.2	1.47	155	27.33	0.89	2.78
1.3	1.56	111	27.2	0.98	3.17
1.4	1.65	79	28.6	1.11	3.61
1.5	1.72	58	27.85	1.14	3.82
1.6	1.82	37	28.55	1.13	3.45
1.7	1.9	25	30.11	1.22	3.71
1.8	2.03	14	28.19	1	3.29
1.9	2.17	8	37.81	1.36	2.91



Σχήμα 6.3: Δυνατά αποθέματα ανά όριο εκμεταλλευσιμότητας (Indicated Resources per cutoff - cumulative)

Πίνακας 6.5: Βέβαια αποθέματα ανά όριο εκμεταλλευσιμότητας (Measured Resources per Cutoff -cumulative)

Cutoff	Au	Tonnage Kton	Ag	Pb	Zn
0.1	0.84	655	40.92	1.43	2.77
0.2	0.84	653	41.03	1.44	2.78
0.3	0.86	631	41.76	1.47	2.85
0.4	0.9	581	43.21	1.52	2.98
0.5	0.97	503	45.22	1.6	3.21
0.6	1.03	444	47.12	1.67	3.42
0.7	1.09	386	48.51	1.72	3.62
0.8	1.15	326	49.6	1.77	3.68
0.9	1.23	262	50.23	1.8	3.62
1	1.3	204	51.62	1.86	3.63
1.1	1.4	149	53.06	1.92	3.76
1.2	1.49	108	53.81	1.95	3.76
1.3	1.59	77	53.76	2	3.67
1.4	1.68	56	54.54	2.09	3.94
1.5	1.77	41	55.63	2.21	3.92
1.6	1.84	31	54.54	2.16	3.57
1.7	1.95	19	53	2.05	3.39
1.8	2.04	14	55.33	2.15	3.54
1.9	2.14	9	61.84	2.55	3.85



Σχήμα 6.4: Βέβαια αποθέματα ανά όριο εκμεταλλευσιμότητας (Measured Resources per Cutoff - cumulative)

7 Συμπεράσματα και Προτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διατριβή ειδίκευσης έγινε προσπάθεια ανακατασκευής του μοντέλου του Μαντέμ Λάκκου με τα ελάχιστα και ασύνδετα διαθέσιμα δεδομένα, καθώς από τις 1123 γεωτρήσεις μόνο οι 86 είχαν χημικές αναλύσεις. Η ακανόνιστη μορφή των βαριογραμμάτων οφείλεται επίσης στην έλλειψη δεδομένων. Εντούτοις, καταφέραμε να εξήχθησαν ποσοτικές πληροφορίες και αξιόπιστα συμπεράσματα στο μέτρο του δυνατού.

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο της αντιστροφής αποστάσεως για τη μοντελοποίηση της γεωμετρίας του κοιτάσματος, προσδιορίζοντας τη ανισοτροπία της μεταλλοφορίας με τη χρήση και ερμηνεία της βαριογραφίας και εφαρμόζοντας τη μέθοδο του κανονικού Kriging για την εκτίμηση του μοντέλου μπλοκ προέκυψαν διάφορα τεμάχια (block) με συγκεκριμένες περιεκτικότητες το καθένα. Θεωρώντας ότι η μέση πυκνότητα του μεταλλεύματος είναι 4.5 gr/cm^3 σε συνδυασμό με ένα θεωρητικό όριο εκμεταλλευσιμότητας 0.5 gr/tn Au και με βάση τις καμπύλες περιεκτικότητας – tonnage προκύπτει ότι:

- τα πιθανά αποθέματα της μεταλλοφορίας χρυσού εκτιμώνται στους 279Ktn με 1.3 ppm Au
- τα δυνατά αποθέματα της μεταλλοφορίας χρυσού εκτιμώνται στους 612Ktn με 1.0 ppm Au
- τα βέβαια αποθέματα της μεταλλοφορίας χρυσού εκτιμώνται στους 503Ktn με 1.75 ppm Au

Τα μεταλλοφόρα σώματα εμφανίζονται σε συγκεκριμένες θέσεις, εντός του πακέτου του μαρμάρου, και τουλάχιστον σε τρία επίπεδα στη δυτική ζώνη. Σε τομή ΒΑ – ΝΔ, τα μεταλλοφόρα σώματα είναι ακανόνιστα και προσδευτικά παραλληλίζονται με την ανώτερη επαφή του μαρμάρου.

Με βάση τη στατιστική επεξεργασία καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν τουλάχιστον τρεις διακριτοί στατιστικοί πληθυσμοί, όσον αφορά τις κατανομές του χρυσού, του αργύρου, του μολύβδου και του ψευδαργύρου. Ο πρώτος πληθυσμός παρουσιάζει χαμηλές περιεκτικότητες σε όλα τα στοιχεία και χαρακτηρίζεται σαν στείρο υλικό. Ο δεύτερος πληθυσμός παρουσιάζει περιεκτικότητες γύρω από τη μέση τιμή του εκάστωτε στοιχείου. Τέλος ο τρίτος πληθυσμός παρουσιάζει μέσες έως υψηλές περιεκτικότητες σε όλα τα στοιχεία

και δε συνδέεται με κάποιο συγκεκριμένο τύπο μεταλλοφορίας κατά Nebel et al. (1991).

7.2 Προτάσεις

Ακολουθούν ορισμένες προτάσεις σε διάφορους τομείς που χρειάζονται περαιτέρω έρευνας κυρίως σε εφαρμογές που σχετίζονται με την έρευνα νέων μεταλλευτικών στόχων.

Συνεπώς, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση στην περιοχή ενδιαφέροντος, με τη βοήθεια των σύγχρονων μεθόδων για τη διαπίστωση των ρηξιγενών δομών που μπορεί να φιλοξενούν τη μεταλλοφορία.

Απαιτείται η περαιτέρω διερεύνηση της κατανομής του Au εντός των μεταλλοφόρων σωμάτων για την καταγραφή πιθανής ύπαρξης κάποιας τεκτονικής (δομική κανονικότητα) ή ζώνωσης. Για παράδειγμα σε κάποιες περιοχές, παρατηρείται πως η υψηλότερη κατανομή του $Au > 15$ (gr/ton), εμφανίζεται στην οροφή και στη βάση της επαφής των μεταλλοφόρων σωμάτων. Πιθανότατα η κατανομή αυτή να σχετίζεται με τεκτονικές δομές – διόδους ρευστών στη βάση και στην οροφή. Επομένως, τα ερωτήματα που προκύπτουν είναι αν ο Au σχετίζεται με συγκεκριμένες δομές και αν αυτές μπορούν να προβλεφθούν. Η μεταλλοφορία του χρυσού έχει την ίδια ηλικία με τη μεταλλοφορία των μεικτών θειούχων και αν όχι πια είναι η σχετική τους ηλικία;

Περίληψη

Ο στόχος της διατριβής ειδίκευσης είναι ο υπολογισμός των αποθεμάτων του κοιτάσματος του Μαντέμ Λάκκου. Επίσης, γίνεται προσπάθεια να δημιουργηθεί ένα δυναμικό εργαλείο λήψης αποφάσεων και προβλέψεων για την ανακάλυψη μιας ενδεχόμενης μεταλλοφορίας παρόμοιου τύπου.

Η περιοχή ενδιαφέροντος εντοπίζεται στην Σερβοαμκεδονική μάζα και συγκεκριμένα στο όριο μεταξύ των ενοτήτων Βερτίσκου και Κερδυλίων. Η ηλικία της ζώνης γενικά θεωρείται Προ-παλαιοζωική. Ποικίλης σύστασης και ηλικίας πυριγενείς διεισδύσεις διακόπτουν τη συνέχεια των κρυσταλλοσχιστοδών πετρωμάτων. Γενικά έχει καθιερωθεί ότι η μεταλλοφορία του Μαντέμ Λάκκου οφείλεται στον Ηωκαινικό - Ολιγοκαινικό γρανοδιορίτη του Στρατωνίου.

Στην ευρύτερη περιοχή του Μαντέμ Λάκκου πραγματοποιήθηκαν 1123 γεωτρήσεις με συνολικό μήκος 92569.61 m. Για τους σκοπούς της μοντελοποίησης το κοίτασμα διακρίθηκε σε 15 λιθολογικά domain τα οποία είναι: Αμφιβολίτης, Απλίτης, Γνεύσιος, Γρανοδιορίτης, Κερατόλιθος, Λαμπροφύρης, Μάρμαρο, Μεικτά θειούχα, Μηγματίτης, Μυλωνίτης, Πηγματίτης, Πορφύρης, Σκαρν, Σχιστόλιθος, Τεκτονικό λατυποπαγές – breccia.

Στο πρώτο μισό του πυρήνα της κάθε γεώτρησης πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία ανά 1m ενώ το δεύτερο μισό αποθηκεύθηκε σαν αντιδείγμα. Κατόπιν ακολούθησε χημική ανάλυση των δειγμάτων για τον προσδιορισμό των ακόλουθων στοιχείων: Au, Ag, Pb, Zn, Cu, Fe, As, Sb και Bi.

Η γεωμετρική μοντελοποίηση της μεταλλοφορίας πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο ζύγισης αντιστρόφου αποστάσεως (inverse distance weighting method). Κατόπιν, κατασκευάστηκε μια νέα βάση δεδομένων η οποία ουσιαστικά περιλαμβάνει τα αξιολογημένα διαστήματα σταθερού μήκους (composites). Με βάση τη λιθολογική περιγραφή των γεωτρήσεων πραγματοποιήθηκε η διάκριση της μεταλλοφορίας και η οριοθέτησή της στο χώρο. Έπειτα, κατασκευάστηκαν και ερμηνεύτηκαν διάφορα ημι-βαριογράμματα για τον καθορισμό των απαιτούμενων παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν στην εκτίμηση. Τέλος, εκτιμή-

θηκε το μοντέλο μπλοκ με τη μέθοδο του κανονικού Kriging και ακολούθηκε ο έλεγχος της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο της επικυρωμένης επικύρωσης.

Συνεπώς, θεωρώντας ότι η μέση πυκνότητα του μεταλλεύματος είναι 4.5gr/tn σε συνδυασμό με ένα θεωρητικό όριο εκμεταλλευσιμότητας 0.5gr/tn Au και με βάση τις καμπυλές περιεκτικότητας – tonnage προκύπτει ότι, για πιθανά αποθέματα η μεταλλοφορία του χρυσού εκτιμάται στους 279Ktn με 1.3 ppm Au, για δυνατά αποθέματα η μεταλλοφορία του χρυσού εκτιμάται στους 612 Ktn με 1.0 ppm Au και για βέβαια αποθέματα η μεταλλοφορία του χρυσού εκτιμάται στους 503 Ktn με 1.75 ppm Au.

Μια σημαντική συμβολή της παρούσας διατριβής ειδίκευσης αποτελεί η κατασκευή του μοντέλου του Μαντέμ Λάκκου με ελάχιστα και ασύνδετα μεταξύ τους δεδομένα (από τις 1123 γεωτρήσεις μόνο οι 86 είχαν χημικές αναλύσεις). Η ακανόνιστη μορφή των βαριογραμμάτων οφείλεται επίσης στην έλλειψη δεδομένων. Εντούτοις, εξήχθησαν ποσοτικές πληροφορίες και αξιόπιστα συμπεράσματα στο μέτρο του δυνατού ώστε να χρησιμοποιηθεί το κοιτάσμα του Μαντέμ Λάκκου σαν παράδειγμα για τα πιθανά νέα κοιτάσματα που θα προκύψουν από μελλοντικές έρευνες στην ευρύτερη περιοχή.

Extended abstract

The primary aim of the present thesis is the calculation of the resources of the Madem Lakkos ore deposit. An effort was made to upgrade the model into a dynamic desition making tool so it can be used for the discovery of new ore bodies.

The area of interest is located in the Serbomacedonian massif which is considered to be pre-palaiozoic. The Madem Lakkos ore deposit is in the contact zone between Vertiskos and Kerdylia units. Several igneous intrusions of various chemical comositions and ages intercept the metamorphic rocks. It is considered that the Madem Lakkos mineralization comes from the Eocene - Oligocene Stratoní granodiorite.

More than 1123 bore holes have been drilled in the Madem Lakkos area with a total lenght of 92569.61m. For modeling purposes the ore body has been separated to 15 lithological domains which are: amphibolites, aplites, gneisses, granodiorite, quartzite, lamprophyre, marble, mixed sulphides, migmatite, mylonite, pegmatite, porphyry, skarn, schists, breccias.

The first half of the drill core is sampled every 1m while the second half is stored for reference. In addition the core samples are sent for chemical analysis for the determination of: Au, Ag, Pb, Zn, Cu, Fe, As, Sb και Bi.

The geological modeling of the mineralization was constructed with the inverse distance weighting method. A new database was created which includes the composites. The spatial continuation of the mineralization was defined on the basis of the lithological logging. Further more, semi-variograms were created so as to define all the parameteres required for the estimation. Finally the block model was estimated with the ordinary Kriging method followed by a cross validation check of the estimated blocks.

Therefore considering the mean density of the the ore deposit to be 4.5gr/tn while accepting a theoretical cut-off grage at 0.5gr/tn Au and on the basis of the grade - tonnage curves we conclude that for indicated re-

sources the gold mineralization is estimated to be 279Ktn at 1.3 ppm Au, for inferred resources the gold mineralization is estimated to be 612 Ktn at 1.0 ppm Au and for measured resources the gold mineralization is estimated to be 503 Ktn at 1.75 ppm Au.

A very important contribution of the present thesis is the construction of the Madem Lakkos model with data that can not be connected with each other (from the 1123 bore holes only 86 have chemical analysis). The pure semi-variogram shapes were due to the above mentioned lack of data. Nevertheless both quantitative information and reliable results were acquired. In addition the Madem Lakkos deposit can be used as an example for the new deposits that are yet to be discovered from the future exploration projects.

Βιβλιογραφία

Ελληνόγλωσση

Δημητριάδης Σ., 1974. *Πετρολογική μελέτη των μιγματικών γνευσίων και αμφιβολιτών των περιοχών Ρεντίνας - Ασπροβάλλτας, Σταυρού - Ολυμπιάδος. Διδακτορική Διατριβή*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, σελ. 232.

Ζαφείρης Χ., Παπάγγελος Ι. Α. και Πλακογιαννακης Κ. Ε., 2001. Χαλκιδική, Η θάλασσα, ορεινή Χαλκιδική, ιστορία, το Άγιον Όρος, Ζαρζώνη, 224 σελ.

Μουντράκης Δ., 1983. *Η γεωλογική δομή της Βόρειας Πελαγονικής ζώνης και η γεωτεκτονική εξέλιξη των εσωτερικών ελληνίδων*, Πραγματεία για Υφηγεσία: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, XXX σελ.

Μουντράκης Δ., 1994, Εισαγωγή στη Γεωλογία της Μακεδονίας και της Θράκης. Απόψεις για τη γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελληνικής ενδιχώρας και των Εσωτερικών Ελληνίδων. Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, 30, 31-46.

Οικονομίδης Δ. Ι., 2000. Συμβολή της τηλεπισκόπησης και των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών (G.I.S.) στην γεωλογική, κοιτασματολογική και περιβαλλοντική έρευνα της Β.Α. Χαλκιδικής. Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, 136 σελ.

Σακελλαρίου Δ., 1989. Γεωλογία της Σερβομακεδονικής μάζας στη ΒΑ Χαλκιδική. Παραμόρφωση και Μεταμόρφωση. Διδακτορική Διατριβή, Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, 177 σελ.

Ξενόγλωσση

Altherr R., Keller J., Harre W., Höhndorf A., Kreuzer H., Lenz H., Raschka H., Wendt I., 1976. Geochronological data on granitic rocks of the Aegean Sea. Preliminary results. In: International Symposium Structure Hist. Medit.

Bas. Split (Biju-Duval and Montadert, eds.), 317–318. Paris: Editions Technip 1977.

Annels A. E., 1991, Mineral deposit evaluation, a practical approach; Chapman and Hall, London, 436 p.

Barbieri M., Garbarino C., Masi U., Mignardi S., Nicoletti M., Kassoli-Fournaraki A. and Filippidis A., 1995. A further contribution to the geochemistry of the granitoid pluton of Stratoni (Eastern Chalkidiki, Greece). Geol. Soc. Greece, Sp. Publ., 4, 430-435.

De Wet A.P., Miller J.A., Bickle M.J. and Chapman H.J., 1989. Geology and geochronology of the Arnea. Sithonia and Ouranopolis intrusions, Chalkidiki peninsula, northern Greece. Tectonophysics, 161, 65-79.
Dimitriadis, S. & Godelitsas, A., 1991. Evidence for high pressure metamorphism in the Vertiskos group of the Serbomacedonian massif. The eclogite of Nea Roda, Chalkidiki. Bull. Geol. Soc. Greece, 25, 67-80.

Dimitriadis S., and Godelitsas A., 1991, Evidence for high pressure metamorphism in the Vertiskos group of the Serbomacedonian massif: The Eclogite of the Nea Roda, Chalkidiki: Bulletin of the Geological Society of Greece, v. XXV, 67-80.

Dimitrijevic M. & Ciric B., 1967. Essai sur l' eution de la masse Serbo - Macedoinienne. Acta Geol. Acad. Scient. Hungary, 11, 35-47.

Dixon J. & Dimitriadis S., 1984. Metamorphosed ophiolitic rocks from the Serbomacedonian Massif, near Lake vi, North - East Greece. Journal of Geol. Soc., Sp. publ., 17, 603-618.

Frei R., 1992. Isotope (Pb, Rb-Sr, S, O, C, U-Pb) geochemical investigations on Tertiary intrusives and related mineralizations in the Serbomacedonian Pb-Zn, Sb+Cu-Mo metallogenic province in Northern Greece. PhD thesis Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, 231 p.

Haines H., S., 1998. A structural synthesis of sector Vb of the Madem Lakos polymetallic sulphide deposit – Northeast Greece. Master Thesis, University of London, 81 p.

Himmerkus F., Reischmann, T. & Kostopoulos, D., 2006. Late Proterozoic and Silurian basement units within the Serbomacedonian massif, northern Greece: the significance of terrane accretion in the Hellenides. Tectonic development of the Eastern Mediterranean Region Geol. Soc. London, sp. publ, 260, 35-50.

Jaranov D., 1960. La tectonique de la Bulgarie. Maison d' edition d' Etat. Sofia, 283 p. (in Bulgarian with French abstract).

John H. T., 1985, Cut-off grade calculations for an open-pit mine; Can. Inst. Min. Metall. Bull., v. 78, no. 879, 73–75.

Karogeropoulos S. I., Economou G. S., Gerouki F., Karamanou E., Kougoulis C. and Perlikos P., 1988. The mineralogy and Geochemistry of the Stratoní Granodiorite and its metallogenetic significance, Proceedings 4th congress, Geol. Soc. Greece.

Kalogeropoulos S.I., Kiliass S.P. and Bitzios D.C., 1989. Genesis of the Olympias Carbonate-Hosted Pb-Zn (Au,Ag) Sulfide Ore Deposit, Eastern Chalkidiki Peninsula, Northern Greece. Economic Geology, . 84, 1210-1234.

Kockel F., Mollat H. & Walther H., 1971. Geologic des Serbo-Mazedonischen Massivs und seines mesozoischen Rahmens. Geol. Jb., 89, 529-551.

Kockel F., Mollat H. & Walther H., 1971.

Kockel F. & Walther H., 1965. Die Strimonlinie als Grenze zwischen Serbo-Mazedonien und Rila-Rhodope Massiv in Ost-Mazedonien.. Geol. Jb., . 83, 575-602.

Kockel F. & Walther H., 1968. Zur Geologischen entwicklung des Sudlichen Serbomazedonischen massivs. Bulg. Ak. Sc. Bull. Geol. , KH XVII, 133-142.

Neubauer W., 1957. Sudgrenze der Rhodopen. Ein Beitrag zur stratigraphischen Auflosung der Kristalline auf der halbinsel Chalkidikie. Sb. Ak. Wiss. Wien, Abt. I Bd, p. 166.

Patterson J. A., 1959, Estimating ore reserves follows logical steps; Eng. Min. Jour., September, 111–115.

Sengor A., Yilmaz Y., Sungurlu O., 1984. Tectonics of the Mediteranean Cimmerides: nature and eution of the western terminology of Paleo – Tethys. Geol. Soc. Lond Spec. Publ. 17: 77-112.

Sinclair A. J. & Blackwell G. H., 2004. Applied Mineral Inventory Estimation, Cambridge University Press, 381.

Taylor H. K., 1986, The war against “ore”, lets end it; *in* David, M., et al. (eds.), Proc. Symp. on “Ore Reserve Estimation, Methods, Models and Reality,” Can. Inst. Min. Metall., Montreal, May 10–11, 32–46.

Wober H. H., and P. J. Morgan, 1993, Classification of ore reserves based on geostatistical and economical parameters; Can. Inst. Min. Metall. Bull., v. 86, no. 966, 73–76.