



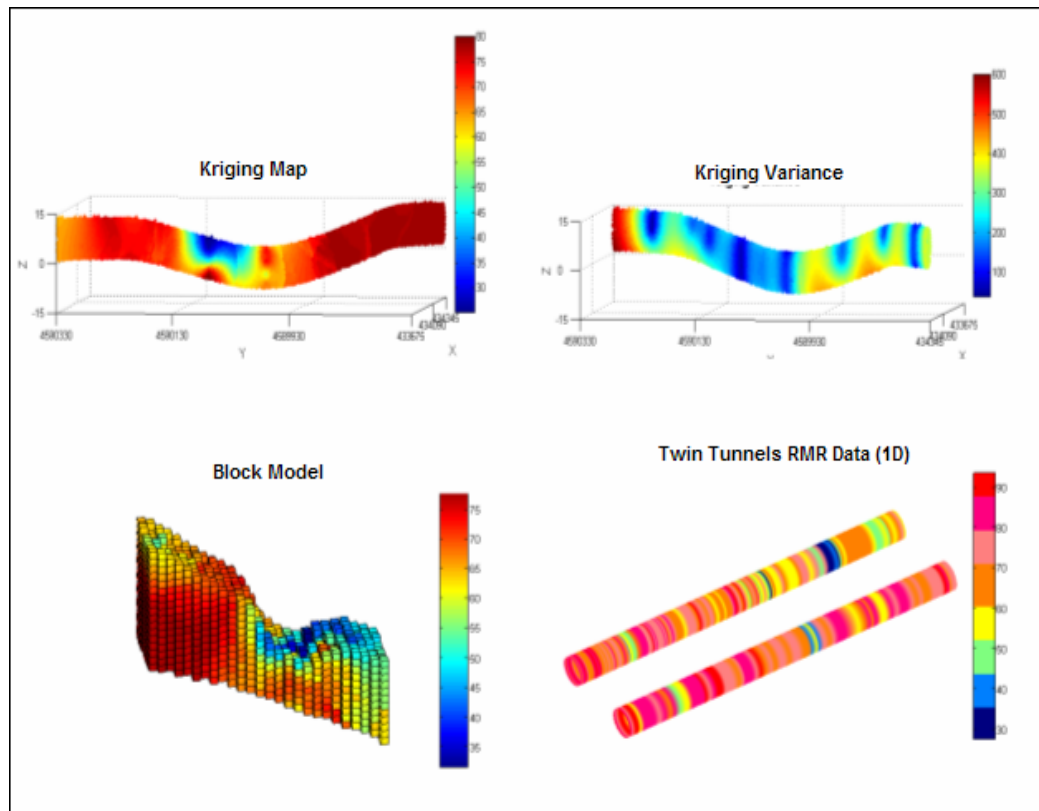
# ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων  
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Γεωτεχνολογία & Περιβάλλον»

## Μεταπτυχιακή Διατριβή

Γεωτεχνικός Χαρακτηρισμός Βραχομαζών με Βάση τη Γεωστατιστική Ανάλυση  
Δεδομένων από Γεωτρήσεις Δειγματοληψίας και από Μηχανές Ολομέτωπης  
Κοπής TBM

Ξηρουδάκης Γεώργιος



Εξεταστική Επιτροπή:

Γεώργιος Εξαδάκτυλος, Καθηγητής (Επιβλέπων)  
Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής  
Διονύσιος Χριστόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Χανιά 2007

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις της κοπής των πετρωμάτων με την χρήση κυλιόμενων κοπτικών. Η θεωρία αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των παραμέτρων λειτουργίας του Μηχανήματος Ολομέτωπης Κοπής (Tunnel Boring Machine) και κυρίως της ειδικής ενέργειας (Specific Energy) που καταναλώνεται για τη θραύση του πετρώματος, ως συνάρτηση της γεωμετρίας της κεφαλής και των κοπτικών δίσκων αλλά και των λειτουργικών παραμέτρων του TBM (ρυθμός κοπής, ταχύτητα περιστροφής, η δύναμη ωθήσεως κ.τ.λ.).

Αυτό το θεωρητικό μοντέλο χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας του TBM συναρτήσει της ποιότητας της βραχομάζας που περιγράφεται ποσοτικά με την χρήση των συστημάτων ταξινόμησης, όπως για παράδειγμα είναι η γεωμηχανική ταξινόμηση RMR (Rock Mass Rating) που έχει προταθεί από τον Bieniawski ή ο δείκτης ποιότητας σήραγγας Q του Barton. Εναλλακτικά, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάδρομη ανάλυση των καταγραφών του TBM για την πρόβλεψη των δεικτών ποιότητας της βραχομάζας RMR ή Q κατά μήκος της σήραγγας.

Για την καλύτερη συσχέτιση της ειδικής ενέργειας με το RMR (ή το Q) κατά μήκος της σήραγγας, αλλά και την πρόβλεψη των μεγεθών αυτών μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας, χρησιμοποιήθηκε η γεωστατιστική μέθοδος Kriging. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένας γρήγορος αλγόριθμος [Stavropoulou et. al. \(2007\)](http://www.kcl.ac.uk/kis/support/cit/fortran/) σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran 77 (<http://www.kcl.ac.uk/kis/support/cit/fortran/>), ο οποίος έχει την δυνατότητα υπολογισμού των τιμών μιας τυχαίας συνάρτησης με την μέθοδο του Kriging από την μια έως τις τρεις διαστάσεις του χώρου (1D-3D). Για την χρήση των γραφικών δυνατοτήτων του προγράμματος Matlab ([Mathworks, 2000](http://www.mathworks.com/)) σε συνδυασμό με την ταχύτητα της Fortran, οι υπορουτίνες της Fortran μετατράπηκαν σε μορφή dll συμβατή με τον επεξεργαστή του Matlab.

Για την αξιολόγηση και επαλήθευση της προτεινόμενης μεθοδολογίας, μελετήθηκαν τρία υπόγεια έργα, δηλ.:

- (α) μια υδραυλική σήραγγα στο Pieve της βόρειας Ιταλίας,
- (β) δίδυμες οδικές σήραγγες στο Χονγκ Κονγκ, και
- (γ) η σήραγγα Singuerlin – Esglesias της γραμμής L9 του μετρό της Βαρκελώνης.

Η καινοτομία της παρούσας εργασίας σχετίζεται με την ολοκληρωμένη μεθοδολογία που προτείνεται και η οποία περιλαμβάνει:

- την ανάλυση γεωτεχνικών δεδομένων και των δεδομένων που περισυλλέγονται από το TBM με την βοήθεια του κατάλληλου μοντέλου και την γεωστατιστική ανάλυση kriging,
- την πρόβλεψη των γεωτεχνικών συνθηκών πριν και κατά την διάρκεια της εξόρυξης της σήραγγας,
- την βελτίωση του γεωτεχνικού προτύπου, και
- τον έλεγχο της απόδοσης του TBM

Τα σημαντικότερα αποτελέσματα που προκύπτουν από την μελέτη των τριών παραπάνω περιπτώσεων εκσκαφής σηράγγων με την χρήση του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής (TBM) είναι:

- (α) με βάση την βελτιωμένη μορφή του αλγορίθμου Kriging (KRIGSTATv2.0) που έγινε στα πλαίσια αυτής της εργασίας, μπορούν να γίνουν προβλέψεις της απαιτούμενης ειδικής ενέργειας θραύσης κατά μήκος της σήραγγας από την φάση της έρευνας με γεωτρήσεις,
- (β) η συσχέτιση της ειδικής ενέργειας θραύσης του TBM με τον δείκτη ποιότητας της βραχομάζας RMR με μια συνάρτηση κλασματικής μορφής, και
- (γ) η συνεχής ανατροφοδότηση του μοντέλου με νέα στοιχεία από το TBM για βελτίωση των προβλέψεων μπροστά από το μέτωπο.

## Abstract

To begin with, this thesis deals with basic principles of the theory of rock cutting with rolling disc cutters which are used to appropriately reduce Tunnel Boring Machine (TBM) data and calculate the Specific Energy (SE) of cutting as a function of geometry of the cutter head and TBM operational parameters (penetration rate, rotational speed, thrust etc).

This theoretical model may be used for TBM performance evaluation by using previously rock mass classification schemes such as the Rock Mass Rating value (RMR) or Tunneling Quality Index (Q) and logged TBM data. Alternatively, this model may be used for back-analysis of TBM logged data for the prediction of the rock mass quality indices RMR, Q or other.

For this purpose the geostatistical theory is employed and more specifically the point or block kriging technique in 1D, 2D and 3D space. A code written in FORTRAN77 (<http://www.kcl.ac.uk/kis/support/cit/fortran/>) was further elaborated in order to inverse its capabilities that may be used for two purposes, namely (1) in order to establish a good correlation between SE and RMR (or Q) or vice versa along the chainage of the tunnel, and (2) to make predictions of SE and RMR in front of the tunnel's face where no excavation hasn't take place yet. For combining visualization capabilities of Matlab ([Mathworks, 2000](#)) with tools which are provided from FORTRAN77 environment, FORTRAN's subroutines were compiled in dll format compatible with Matlab environment.

Three separate data sets were used for verifying and validating the proposed methodology, namely:

- a) Data from a hydraulic tunnel excavated in Pieve, North Italy,
- b) Data from a tunnel in Hong Kong, and
- c) Data from the Metro L9 tunnel in Barcelona.

The aim of the present work is the development of an integrated methodology in order to predict geotechnical conditions along the tunnel alignment by using TBM logging data. Alternatively, it may be used to predict the variation of geological conditions along the tunnel that influence TBM performance (i.e. specific energy). Besides the TBM model this methodology is based on the further development and validation of a kriging algorithm (KRIGSTATv2.0) on databases of TBM tunnel excavation data and geotechnical data from several projects. Data reduction was performed based on the TBM model proposed here. The most important results of this work are the following:

- a) the establishment of an empirical fractional relationship between RMR and SE consumed by the rock cutting process along the tunnel,
- b) the good agreement of RMR predictions from kriging model by using borehole data and predictions estimated from the SE of TBM
- c) the possibility of upgrade of geotechnical model by continuously feeding the kriging algorithm with TBM data during the tunnel construction

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εξώφυλλο .....	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	II
Abstract .....	III
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	IV
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	V
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	V
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ .....	VII
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή .....	1
1.1. Μηχάνημα Ολομέτωπης Κοπής (TBM) .....	1
1.2. Συστήματα Ταξινόμησης Βραχομάζας .....	2
1.3. Σκοπός .....	3
Κεφάλαιο 2: Γεωστατιστική Επεξεργασία .....	5
2.1. Βασική Στατιστική Ανάλυση .....	5
2.2. Χωρική Ανάλυση .....	6
2.2.1 Πειραματικό Ημιβαριόγραμμα .....	7
2.2.2. Θεωρητικά Πρότυπα Ημιβαριογράμματος .....	8
2.2.3. Ανισοτροπία .....	10
2.2.4. Προσδιορισμός Παραμέτρων Ημιβαριογράμματος .....	11
2.3. Γραμμική Παρεμβολή Kriging .....	11
2.3.1 Απλό Kriging -SK- (Simple Kriging) .....	12
2.3.2 Κανονικό Kriging -OK- (Ordinary Kriging) .....	12
2.3.3 Καθολικό Kriging -UK- (Universal Kriging) .....	13
2.3.4 Ογκομετρικό Kriging -BK- (Block Kriging) .....	14
2.3.4 Kriging σε Πεδίο Δεικτών -IK- (Indicator Kriging) .....	15
2.4. Επαλήθευση των Παραμέτρων του Kriging .....	16
Κεφάλαιο 3: Περιγραφή Γεωστατιστικού Αλγορίθμου KRIGSTATv2.0 .....	18
3.1. Γενικά .....	18
3.2. Διάγραμμα Ροής .....	18
3.3. Βασικά Τμήματα Αλγορίθμου .....	21
Κεφάλαιο 4: Χαρακτηριστικά Λειτουργίας TBM .....	23
4.1. Γενικά .....	23
4.2 Βασικές σχέσεις .....	24
4.3. Μηχανισμός Θραύσης Πετρώματος από Συνδυασμό Κοπτικών .....	26
Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία Δεδομένων από Εξόρυξη Σηράγγων με TBM .....	27
5.1. Σήραγγα Pieve της Βόρειας Ιταλίας .....	27
5.1.1. Γενικά .....	27
5.1.2. Στατιστική Επεξεργασία των Δεδομένων .....	28
5.1.3. Χωρική Ανάλυση .....	30
5.2. Αίδυμη Οδική Σήραγγα στο Χονγκ Κονγκ .....	34
5.2.1. Γενικά .....	34
5.2.2. Επεξεργασία RMR .....	40
5.2.3. Επεξεργασία του Δείκτη Ποιότητας της Βραχομάζας Q .....	43
5.2.4. Επεξεργασία των Εκτιμήσεων της Ειδικής Ενέργειας Θραύσης .....	47
5.3. Σήραγγα της Γραμμής 9 του Μετρό της Βαρκελώνης (Τομή <i>Singuerlin-Esglesias</i> ) .....	52
5.3.1. Γενικά .....	52
5.3.2. Μοντέλο Μηχανήματος TBM .....	53
5.3.3. Γεωλογικά Στοιχεία .....	54
5.3.4 Διαθέσιμα Δεδομένα .....	57
5.3.5. Επεξεργασία Βραχωδών Σχηματισμών .....	58
5.3.5. Επεξεργασία Εδαφικών Σχηματισμών .....	70
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα – Προτάσεις .....	72
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	73
Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις .....	75

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Σχέσεις RMR-Q από διάφορα πεδία .....	2
Πίνακας 2.1: Μοντέλα ημιβαριογράμματος .....	9
Πίνακας 3.1: Βασικές υπορουτίνες υπολογιστικού αλγορίθμου KRIGSTAT .....	22
Πίνακας 5.1: Κύριες μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων στην σήραγγα Pieve .....	27
Πίνακας 5.2: Στοιχεία και εξοπλισμός για την σήραγγα Pieve.....	28
Πίνακας 5.3: Δεδομένα TBM και ταξινόμησης της βραχομάζας κατά μήκος της σήραγγας Pieve .....	28
Πίνακας 5.4: Κύρια χαρακτηριστικά σήραγγας.....	35
Πίνακας 5.5: Κύρια γεωλογικά χαρακτηριστικά .....	35
Πίνακας 5.6: Τρόπος λειτουργίας TBM κατά μήκος της σήραγγας .....	38
Πίνακας 5.7: Κύρια χαρακτηριστικά του TBM.....	38
Πίνακας 5.8: Χαρακτηριστικά του μηχανήματος της NFM. ....	54
Πίνακας 5.9: Παράμετροι αναβάθμισης μοντέλου kriging.....	65

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Φύλλο εργασίας του 'Excel' με τον υπολογισμό του RMR .....	3
Σχήμα 1.2: Προσθήκη των καταγραφών του TBM στη βάση δεδομένων των καταγραφών στις γεωτρήσεις για την αύξηση της αξιοπιστίας του γεωτεχνικού προτύπου.....	4
Σχήμα 2.1: Ομαδοποίηση/εξομάλυνση δεδομένων για: α) 1D, β) 2D, και γ) δεδομένα γεωτρήσεων.....	6
Σχήμα 2.2: Υπολογισμός ημιβαριογράμματος στην διεύθυνση NE .....	7
Σχήμα 2.3: Σύγκριση στάσιμων θεωρητικών συναρτήσεων.....	8
Σχήμα 2.4: Διόρθωση γεωμετρικής ανισοτροπίας .....	10
Σχήμα 2.5: Γραφική αναπαράσταση: α) γεωμετρικής, β) ανισοτροπίας ζώνης.....	11
Σχήμα 2.6: Διακριτοποίηση ογκομετρικού kriging σε 2 και 3 διαστάσεις .....	11
Σχήμα 2.7: Κατανομή συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της $Q_1$ και $Q_2$ .....	17
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής γεωστατιστικού κώδικα .....	19
Σχήμα 3.2: Βασικό παράθυρο γεωστατιστικού κώδικα kriging. ....	21
Σχήμα 4.1: Τυπική πρόσοψη κοπτικού άκρου TBM .....	23
Σχήμα 4.2: Γεωμετρία και δυνάμεις που ασκούνται σε ένα κοπτικό δίσκο. ....	24
Σχήμα 4.3: Κατανομή φορτίου στον κοπτικό δίσκο: α) γραμμική , β) γενική .....	24
Σχήμα 4.4: Αστοχία πετρώματος σύμφωνα με το βάθος κοπής. ....	26
Σχήμα 5.1: Γεωλογική τομή κατά μήκος της σήραγγας στο Pieve.....	27
Σχήμα 5.2: Στατιστικά στοιχεία για: α) το RMR, β) την ειδική ενέργεια κοπής (SE) για την σήραγγα του Pieve .....	29
Σχήμα 5.3: Εξομάλυνση δεδομένων του Pieve για: α) RMR, β) SE .....	29
Σχήμα 5.4: Στατιστικά για τα εξομαλυσμένα δεδομένα του Pieve: α) RMR, β) SE.....	30
Σχήμα 5.5: Ημιβαριόγραμμα των δεδομένων του Pieve: α) RMR, β) SE .....	30
Σχήμα 5.6: Αξιολόγηση θεωρητικών ημιβαριογραμμάτων (Pieve): α) RMR, β) SE .....	31
Σχήμα 5.7: Διασταυρωμένη αξιολόγηση αποτελεσμάτων στη σήραγγα του Pieve: α) RMR, β) SE.....	32
Σχήμα 5.8: Σχέση ειδικής ενέργειας – RMR για την σήραγγα του Pieve.....	33
Σχήμα 5.9: Ανάδρομη ανάλυση των αποτελεσμάτων της κλασματικής σχέσης στο Pieve.....	34
Σχήμα 5.10: Μελέτη KCRC4 .....	34
Σχήμα 5.11: Γεωλογική τομή κατά μήκος της σήραγγας του Χονγκ Κονγκ.....	36
Σχήμα 5.12: Τύπος TBM του Χονγκ Κονγκ.....	37
Σχήμα 5.13: Κοπτική κεφαλή TBM.....	39
Σχήμα 5.14: Επί τόπου χαρτογράφηση του μετώπου της σήραγγας.....	39
Σχήμα 5.15: Φύλλα εργασίας του 'Excel' με δεδομένα κατά μήκος της σήραγγας 1 .....	40

Σχήμα 5.16: Σύγκριση δεδομένων πριν και μετά την στατιστική επεξεργασία καθώς και η παρατηρούμενη γραμμική τάση των.....	41
Σχήμα 5.17: Ιστόγραμμα του RMR για την σήραγγα #1 του σχεδίου KCRC: α) αρχικά δεδομένα, β) επεξεργασμένα δεδομένα.....	41
Σχήμα 5.18: Γκαουσιανό μοντέλο ημιβαριογράμματος για το RMR.....	42
Σχήμα 5.19: Αξιολόγηση του kriging για τα δεδομένα του Χονγκ Κονγκ.....	43
Σχήμα 5. 20: Ιστόγραμμα για το Q: α) πριν και β) μετά την εξομάλυνση.....	43
Σχήμα 5.21: Έλεγχος KS για τα λογαριθμοκανονικά δεδομένα Q του Χονγκ Κονγκ.....	44
Σχήμα 5.22: Σφαιρικό μοντέλο για το Q του Χονγκ Κονγκ.....	46
Σχήμα 5.23: Εύρεση βέλτιστης λογαριθμικής εξάρτησης RMR - Q για τα δεδομένα της σήραγγας 1 του Χονγκ Κονγκ.....	47
Σχήμα 5.24: Ιστογράμματα για την ειδική ενέργεια κοπής του TBM του Χονγκ Κονγκ για: α) τα αρχικά δεδομένα, β) τα μειωμένα δεδομένα.....	48
Σχήμα 5.25: Αξιολόγηση αποτελεσμάτων του kriging με την χρήση γκαουσιανού μοντέλου για τα δεδομένα της ειδικής ενέργειας στην σήραγγα του Χονγκ Κονγκ.....	49
Σχήμα 5.26: Κλασματική σχέση RMR-SE για το Χονγκ Κονγκ.....	50
Σχήμα 5.27: Σύγκριση μετρήσεων/εκτίμησης με την κλασματική σχέση για το RMR.....	50
Σχήμα 5.28: Μετρήσεις και πρόβλεψη της κλασματικής σχέσης κατά μήκος της σήραγγας 2 του Χονγκ Κονγκ.....	51
Σχήμα 5.29: α) Σύγκριση μετρήσεων – προβλέψεων της εξ.5.5 βαθμονομημένης για τα πρώτα 400 m της σήραγγας του Pieve.....	52
Σχήμα 5.30: Χάραξη της γραμμής L9 στην πόλη της Βαρκελώνης.....	52
Σχήμα 5.31: Κοπτική κεφαλή σε: α) 3 διαστάσεις, β) πρόσοψη, και γ) σχεδιαστική τομή.....	53
Σχήμα 5.32: Κύρια γεωλογική τομή της γραμμής 9 του μετρό της Βαρκελώνης.....	56
Σχήμα 5.33: Φύλλο εργασίας Excel με τις καταγραφές των παραμέτρων του TBM.....	57
Σχήμα 5.34: Σύγκριση μετρήσεων με τις προβλέψεις για το RMR κατά μήκος της σήραγγας του Singerlin.....	58
Σχήμα 5.35: α) Κατανομή δεδομένων, β) Σύνθετα δείγματα γεωτρήσεων για τον σχηματισμό GR1 και PF.....	59
Σχήμα 5.36: Μέσο ισότροπο ημιβαριόγραμμα (omnidirectional) και η αξιολόγηση του.....	60
Σχήμα 5.37: Αξιολόγηση ισότροπης και ανισότροπων επιλύσεων.....	60
Σχήμα 5.38: Εκτίμηση ανισοτροπίας για τα δεδομένα του σχηματισμού GR1.....	61
Σχήμα 5.39: α) Διορθωμένο γεωμετρικά ημιβαριόγραμμα (GR1), β) αξιολόγηση ημιβαριογράμματος.....	61
Σχήμα 5.40: α) Διορθωμένο γεωμετρικά ημιβαριόγραμμα (GR2), β) αξιολόγηση ημιβαριογράμματος.....	62
Σχήμα 5.41: Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για τον σχηματισμό: α) GR1 και PF, β) τον GR2.....	62
Σχήμα 5.42: Χάρτες εκτίμησης του RMR και της διασποράς στην σήραγγα για: α) ισότροπη, β) ανισότροπη επίλυση, και γ) της περιοχής γύρω από την σήραγγα, ανισότροπη επίλυση.....	63
Σχήμα 5.43: Εισαγωγή των δεδομένων του TBM της Βαρκελώνης.....	64
Σχήμα 5.44: Σύγκριση προβλέψεων kriging και δεδομένων του TBM κατά μήκος της σήραγγας.....	66
Σχήμα 5.45: Ανανέωση του μοντέλου ημιβαριογράμματος.....	67
Σχήμα 5.46: Αναβάθμιση της πρόβλεψης του μοντέλου kriging: α) κατά μήκος της σήραγγας, β) στην περιοχή γύρω από την σήραγγα, και γ) διασταυρούμενη αξιολόγηση.....	68
Σχήμα 5.47: Χρόνος επίλυσης του kriging συναρτήσει του αριθμού: α) των σημείων εκτίμησης και β) των δεδομένων.....	69
Σχήμα 5.48: Στατιστικές κατανομές c, E και φ.....	70
Σχήμα 5.49: α) Ημιβαριογράμματα για τις μεταβλητές: c, E και φ, αντίστοιχα.....	70
Σχήμα 5.50: Εκτιμήσεις εδαφικού σχηματισμού QCS για τις παραμέτρους c, E και φ.....	71

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

(1.1) Υπολογισμός του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας Q .....	2
(1.2) Λογαριθμική συσχέτιση RMR και Q .....	2
(2.1) Έλεγχος κανονικότητας Kolmogorov – Smirnov .....	5
(2.2) Λογαριθμικός-εκθετικός μετασχηματισμός δεδομένων .....	5
(2.3) Σύνθετα δείγματα γεωτρήσεων .....	5
(2.4) Κανονικοποίηση συντεταγμένων .....	6
(2.5) Κανονικοποίηση δεδομένων .....	6
(2.6) Ορισμός ημιβαριογράμματος .....	6
(2.7) Δειγματικός προσδιορισμός ημιβαριογράμματος .....	7
(2.8) Εκτίμηση συνδιασποράς .....	7
(2.9) Συσχέτιση συνδιασποράς – ημιβαριογράμματος .....	8
(2.10) Συνθήκη θετικής διασποράς .....	8
(2.11) Συνθήκη αμεροληψίας .....	8
(2.12) Διόρθωση γεωμετρικής ανισοτροπίας .....	10
(2.13) Ανισοτροπία ζώνης .....	10
(2.14) Διόρθωση ανισοτροπίας ζώνης .....	10
(2.15) Συνάρτηση ελαχιστοποίησης στην μέθοδο σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων .....	11
(2.16) Ορισμός συντελεστών βάρους της μεθόδου σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων .....	11
(2.17) Εκτίμηση της μεθόδου kriging .....	11
(2.18) Απλό kriging .....	12
(2.19) Εκτίμηση με το απλό kriging .....	12
(2.20) Σύστημα εξισώσεων του απλού kriging σε μορφή πινάκων .....	12
(2.21) Διασπορά του απλού kriging .....	12
(2.22) Κανονικό kriging .....	12
(2.23) Γραμμικό σύστημα εξισώσεων του κανονικού kriging .....	12
(2.24) Διασπορά κανονικού kriging .....	13
(2.25) Καθολικό kriging .....	13
(2.26) Τάση των δεδομένων .....	13
(2.27) Συνθήκη αμεροληψίας για την περίπτωση του καθολικού kriging .....	13
(2.28) Σύστημα εξισώσεων του καθολικού kriging .....	13
(2.29) Διασπορά καθολικού kriging .....	13
(2.30) Πολυονυμικές συναρτήσεις βάσης .....	13
(2.31.a) Γραμμική τάση στις 3 διαστάσεις .....	13
(2.31.b) Συνθήκη αμεροληψίας για την περίπτωση του καθολικού kriging με γραμμική τάση .....	14
(2.31.c) Σύστημα εξισώσεων του καθολικού kriging με γραμμική τάση δεδομένων .....	14
(2.31.d) Διασπορά καθολικού kriging με γραμμική τάση δεδομένων .....	14
(2.32) Σύγκριση διασπορών με τις 3 μεθόδους kriging .....	14
(2.33) Υπολογισμός ημιβαριογράμματος για το ογκομετρικό kriging .....	14
(2.34) Σύστημα εξισώσεων ογκομετρικού kriging .....	14
(2.35) Εκτίμηση με το ογκομετρικό kriging .....	15
(2.36) Διασπορά του ογκομετρικού kriging .....	15
(2.37) Μετασχηματισμός στο πεδίο των δεικτών .....	15
(2.38) Σταθμισμένα σφάλματα .....	16
(2.39) Πρώτη στατιστική τιμή των σταθμισμένων σφαλμάτων $Q_1$ .....	16
(2.40) Δεύτερη στατιστική τιμή των σταθμισμένων σφαλμάτων $Q_2$ .....	16
(4.1) Γωνία επαφής κοπτικού δίσκου .....	24
(4.2) Κατανομή φόρτισης στον κοπτικό δίσκο .....	25
(4.3) γωνία συνισταμένης δύναμης στον κοπτικό δίσκο .....	25
(4.4) Συντελεστής κοπής .....	25
(4.5) Συνισταμένη δύναμη στην περίπτωση γραμμικής κατανομής του φορτίου στον κοπτικό δίσκο .....	25

(4.6) Συντελεστής κοπής για την περίπτωση γραμμικής κατανομής του φορτίου .....	25
(4.7) Συντελεστής κοπής για την περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής του φορτίου .....	25
(4.8) Υπολογισμός δύναμης κύλισης από την ορθή δύναμη .....	25
(4.9) Υπολογισμός της μέσης ορθής δύναμης .....	25
(4.10) Υπολογισμός της δύναμης κυλίσεως από την μέση εφαρμοζόμενη ροπή .....	26
(4.11) Υπολογισμός της ροπής από το βάθος προχώρησης.....	26
(4.12) Βάθος προχώρησης .....	26
(4.13) Ειδική ενέργεια κοπής του πετρώματος με την χρήση του TBM .....	26
(5.1) Κλασματική σχέση μεταξύ RMR-SE για τα δεδομένα της σήραγγας του Pieve .....	32
(5.2) Αντίστροφος μετασχηματισμός για τα λογαριθμοκανονικά δεδομένα .....	46
(5.3) Λογαριθμική συσχέτιση RMR-Q για τα δεδομένα του Χονγκ Κονγκ.....	46
(5.4) Κλασματική σχέση για τα δεδομένα RMR-SE του Χονγκ Κονγκ.....	49
(5.5) Γενικευμένη κλασματική σχέση RMR-SE .....	51



## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

### 1.1. Μηχάνημα Ολομέτωπης Κοπής (TBM)

Η μηχανική όρυξη των σιράγγων αναπτύχθηκε ώστε να βελτιώσει την ασφάλεια και την ταχύτητα της εξόρυξης των πετρωμάτων που γινόταν πριν κυρίως με την χρήση εκρηκτικών υλών. Η χρήση των Μηχανών Ολομέτωπου Κοπής (Tunnel Boring Machine) αυτοματοποίησε πλήρως την διαδικασία εξόρυξης (εξόρυξη – αποκομιδή των θραυσμένων γεωυλικών – υποστύλωση), επιτυγχάνοντας μεγάλες ταχύτητες προχώρησης (μέχρι και 400 m την εβδομάδα). Εκτός αυτού επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ασφάλεια κατά την όρυξη καθώς οι διαταραχές που προκαλούνται στα περιβάλλοντα πετρώματα είναι ελάχιστες και τα έργα υποστήριξης τοποθετούνται αμέσως μετά την εκσκαφή.

Τα μηχανήματα ολομέτωπης κοπής διακρίνονται σε:

- Μηχανήματα χωρίς ασπίδα (ή ανοιχτού τύπου) τα οποία είναι κατάλληλα για εξορύξεις σε σκληρά πετρώματα.
- Μηχανήματα με ασπίδα (μονή/διπλή) (ή κλειστού τύπου), για εξόρυξη σε μέτριας έως μικρής αντοχής πετρώματα.
- Μηχανήματα για ειδικές συνθήκες (πίεσεως-πολφού (EPB), πεπιεσμένου αέρα (compressed air)), όταν η εξόρυξη γίνεται σε μεταβαλλόμενες γεωλογικές συνθήκες σε χαλαρούς σχηματισμούς και εδάφη.

Η απόδοση του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως:

- Τύπος γεωλογικού σχηματισμού
- Διάμετρος σήραγγας
- Τύπο του TBM, ανοιχτού ή κλειστού
- Γεωμετρία της κεφαλής: αριθμό κοπτικών δίσκων, την απόσταση μεταξύ των κοπτικών, την διάμετρο εκσκαφής.
- Την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της κεφαλής
- Την μέγιστη ισχύ του μηχανήματος
- Την δύναμη ωθήσεως

και τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος στο οποίο γίνεται η εκσκαφή:

- Μονοαξονική θλιπτική αντοχή (Uniaxial Compressive Strength, UCS)
- Αντοχή σε εφελκυσμό (Uniaxial Tensile Strength)
- Γωνία εσωτερικής τριβής
- Φθοροποιά χαρακτηριστικά του πετρώματος (περιεκτικότητα σε SiO<sub>2</sub>, κ.λ.π.)

Οι καλύτερες συνθήκες εξόρυξης με TBM αναφέρονται στην ελαχιστοποίηση της ενέργειας που δαπανάται ανά εξορυσσόμενο όγκο πετρώματος (ειδική ενέργεια) και στην επιθυμητή ταχύτητα προχώρησης του μηχανήματος.

## 1.2. Συστήματα Ταξινόμησης Βραχομάζας

Τα συστήματα ταξινόμησης έχουν αναπτυχθεί για τον επί τόπου εμπειρικό χαρακτηρισμό των γεωμηχανικών ιδιοτήτων της βραχομάζας και την εκτίμηση των έργων υποστήριξης που χρειάζονται, κατά την όρυξη υπογείων έργων. Η χρήση τους όμως έχει επεκταθεί και σε άλλα προβλήματα της γεωμηχανικής.

Ο [Bieniawski \(1973\)](#) πρότεινε ένα σύστημα ταξινόμησης της βραχομάζας το οποίο καλείται Γεωμηχανική Ταξινόμηση (Rock Mass Rating). Το σύστημα αυτό έχει βελτιωθεί περαιτέρω με την χρήση νέων παραμέτρων ([Bieniawski, 1989](#)). Οι 6 παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην ταξινόμηση RMR, είναι:

1. Μονοαξονική θλιπτική αντοχή (UCS)
2. Ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος (RQD)
3. Η απόσταση των ασυνεχειών
4. Η κατάσταση των ασυνεχειών
5. Η επίδραση των υπογείων υδάτων
6. Ο προσανατολισμός των ασυνεχειών

Στο Σχ.1.1 παρουσιάζεται το φύλλο εργασίας του "Excel" με βάση το οποίο έγιναν οι εκτιμήσεις του RMR στην παρούσα εργασία. Ο δείκτης ποιότητας της βραχομάζας Q που προτάθηκε από τους [Barton, Lien και Lunde \(1974\)](#) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (1.1)$$

όπου  $J_n$  ο δείκτης του αριθμού των συστημάτων ασυνεχειών ([Palmstrom, 1982](#))

$J_r$  είναι ο δείκτης τραχύτητας των ασυνεχειών

$J_a$  ο δείκτης εξαλλοίωσης των ασυνεχειών

$J_w$  ο δείκτης επίδρασης του νερού στις ασυνέχειες

$SRF$  ο συντελεστής εκτόνωσης των τάσεων

Ο δείκτης Q σχετίζεται με μια λογαριθμική σχέση με το RMR. Η εμπειρική σχέση που προτείνεται από τον [Bieniawski \(1974\)](#) είναι:

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \quad (1.2)$$

Οι εμπειρικές σχέσεις μεταξύ των δεικτών RMR και Q οι οποίες έχουν βρεθεί σε διάφορες περιπτώσεις υπογείων έργων παρουσιάζονται στον Πίν.1.1.

Πίνακας 1.1: Σχέσεις RMR-Q από διάφορα πεδία ([Milne et al., 1998](#))

Συντελεστές a,b της σχέσης $RMR = a \times \ln Q + b$		Περιοχή	Σχόλια
a	b		
13.5	43	N. Ζηλανδία	Σήραγγες
12.5	55.2	Ισπανία	Σήραγγες
5	60.8	N. Αφρική	Σήραγγες
10.5	41.8	Ισπανία	Εκμεταλλεύσεις σε μαλακά πετρώματα
12.11	50.81	Καναδάς	Εκμεταλλεύσεις σε σκληρά πετρώματα
8.7	38	Καναδάς	Σήραγγες σε σκληρά πετρώματα
10	39	Καναδάς	Εκμεταλλεύσεις σε σκληρά πετρώματα

Α ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ			
A1 Αντοχή συμπαγούς πετρώματος (MPa)		A5 Κατάσταση Ασυνεχειών	
Χαρακτηρισμός $f_{ck}$ $\sigma_c$	Βαθμολογία	A5.1 Εμμενή (m)	Βαθμολογία
Εξαιρετικά υψηλή >10 >250	15	Χαρακτηρισμός VL <1	6
Πολύ υψηλή Y 4-10 100-250	12	Χαμηλή L 1-3	4
Υψηλή S 2-4 50-100	7	Μέτρια M 3-10	2
Μέσης MS 1-2 25-50	4	Υψηλή H 10-20	1
Χαμηλή W 5-25	2	Πολύ υψηλή VH >20	0
Πολύ χαμηλή VW 1-5	1	Εμμενή M ~ M	
Εξαιρετικά χαμηλή EW <1	0	Βαθμολογία 2 ~ 2	
⊙ $\sigma_c$	71 ~ 71	A5.2 Άνοιγμα (mm)	
⊙ Χαρακτηρισμός	7 ~ 7	Χαρακτηρισμός	Βαθμολογία
Βαθμολογία	7 ~ 7	Κλειστή VT	6
A2 Δείκτης ποιότητας βράχου RQD (%)		Στενές T <0.1	5
Χαρακτηρισμός RQD	Βαθμολογία	Μέτριες MO 0.1-1	4
Εξαιρετική E 90-100	20	Ανοιχτή O 1-5	1
Καλή G 75-90	17	Ευρείες VW >5	0
Μέτρια F 50-75	13	Άνοιγμα MO ~ T	
Πτωχή P 25-50	8	Βαθμολογία 4 ~ 5	
Πολύ πτωχή VP <25	3	A5.3 Τραχύτητα	
⊙ RQD	75 ~ 90	Χαρακτηρισμός	Βαθμολογία
⊙ Χαρακτηρισμός	15 ~ 18	Πολύ Τραχείες VR	6
Βαθμολογία	15 ~ 18	Τραχείες R	5
A3 Απόσταση ασυνεχειών mm		Ελαφρά Τραχείες SR	3
Χαρακτηρισμός	Βαθμολογία	Ομαλές SN	1
Πολύ μεγάλη VL >2000	20	Ολισθηρές SL	0
Μεγάλη L 600-2000	15	Τραχύτητα SN ~ SR	
Μέση M 200-600	10	Βαθμολογία 1 ~ 3	
Μικρή S 60-200	8	A5.4 Υλικό πλήρωσης (mm)	
Πολύ μικρή VS <60	5	Χαρακτηρισμός	Βαθμολογία
⊙ Απόσταση	## ~ #	Καθόλου O	6
⊙ Χαρακτηρισμός	8 ~ 11	Εκτενός 5mm H1	4
Βαθμολογία	8 ~ 11	Εκτενός 5mm H2	2
A4 Υπόγειο νερό (εισροή σε l/min/10m)		Μαλακό <5mm S1	2
Χαρακτηρισμός	Βαθμολογία	Μαλακό >5mm S2	0
Ισχυρή ροή F >125	0	Υλικό πλήρωσης O ~ O	
Μικρή ροή Dr 25-125	4	Βαθμολογία 6 ~ 6	
Σταγόνες V 10-25	7	A5.5 Αποσάθρωση	
Υγρασία Da <10	10	Χαρακτηρισμός	Βαθμολογία
Στεγνό CD Στεγνό	15	Χωρίς UW	6
Υπόγειο νερό CD ~ CD		Ελαφρά SW	5
Βαθμολογία 15 ~ 15		Μέτρια MW	3
		Εντονή HW	1
		Εντελώς D	0
		Αποσάθρωση SW ~ UW	
		Βαθμολογία 5 ~ 6	

Β ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ	
Στοιχεία Ασυνέχειας: 45/258	(Κλίση/Δνση κλίσης)
Χαρακτηρισμός	Βαθμολογία
Πολύ ευνοϊκή	0
Ευνοϊκή	-2
Μέτρια	-5
Δυσμενής	-10
Πολύ δυσμενής	-12
Βαθμολογία	-2

Γ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ-ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	
G1 ΒΑΘΜΟΛΟΓΙΑ RMR <sub>1000</sub>	63 ~ 73
G2 ΒΑΘΜΟΛΟΓΙΑ RMR <sub>90</sub>	63 ~ 73
G3 GSI = RMR <sub>90</sub> - 5	58 ~ 68
G4 ΒΑΘΜΟΛΟΓΙΑ RMR <sub>wp</sub>	61 ~ 71
G5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	II ~ II
G6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	KA/II ~ KA/II

Δ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	
Δ1 ΣΥΝΟΧΗ $\sigma$ (kPa)	# ~ #
Δ2 ΓΩΝΙΑ ΤΡΙΒΗΣ $\phi$ (°)	35 ~ 45
Δ3 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ E (GPa)	22 ~ 42
για RMR <sub>wp</sub> > 50	
E = 2 * RMR <sub>wp</sub> - 100	
για 20 < RMR <sub>wp</sub> ≤ 50	
E = 10 <sup>(RMR<sub>wp</sub> - 10)/4</sup>	
για RMR <sub>wp</sub> ≤ 20	
E = (σ <sub>1</sub> /100) <sup>1.2</sup> * 10 <sup>(RMR<sub>wp</sub> - 10)/4</sup>	
Δ4 ΦΟΡΤΙΟ ΥΠΟΣΤΡΗΞΗΣ P (kN/m²)	101.4 ~ 75.4
P = ((100 - RMR <sub>wp</sub> )/100) * γ * B	
γ = 28 kN/m³	
B = 10 m	

Σύνταξη	Ελεγχος

Σχήμα 1.1: Φύλλο εργασίας του 'Excel' με τον υπολογισμό του RMR

### 1.3. Σκοπός

Η συλλογή των επί τόπου δεδομένων, που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των γεωμηχανικών και γεωλογικών συνθηκών γύρω από μια σήραγγα, είναι μια χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία. Πολλές φορές ο γεωτεχνικός μηχανικός καλείται να σχεδιάσει τις διαφορετικές φάσεις κατασκευής της σήραγγας βασισμένος σε μικρό αριθμό δεδομένων από γεωτρήσεις και επί τόπου μετρήσεις από το μέτωπο της εκσκαφής. Εκτός αυτού, λόγω του ότι οι γεωλογικές συνθήκες είναι μεταβαλλόμενες και μερικές φορές λίαν πολύπλοκες, ακόμα και η ύπαρξη πληθώρας δεδομένων δεν αρκούν για να καθορίσουν τις παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοση της εξόρυξης και της μηχανικής συμπεριφοράς του πετρώματος γύρω από το υπόγειο άνοιγμα.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται αν οι καταγραφές των διαφόρων παραμέτρων κατά την λειτουργία του μηχανήματος ολομέτωπης κοπής TBM (Tunnel Boring Machine) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον γεωμηχανικό χαρακτηρισμό του πετρώματος που εκφράζεται από το σύστημα ταξινόμησης RMR (Rock Mass Rating) ή του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας Q. Η χρήση των καταγραφών του TBM μπορεί να οδηγήσει σε βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της σήραγγας που περιλαμβάνει την επιλογή των καταλληλότερων έργων υποστήριξης και την βελτιστοποίηση των παραμέτρων λειτουργίας του μηχανήματος όπως για παράδειγμα η ελαχιστοποίηση της ειδικής ενέργειας κοπής κατά την εξόρυξη.

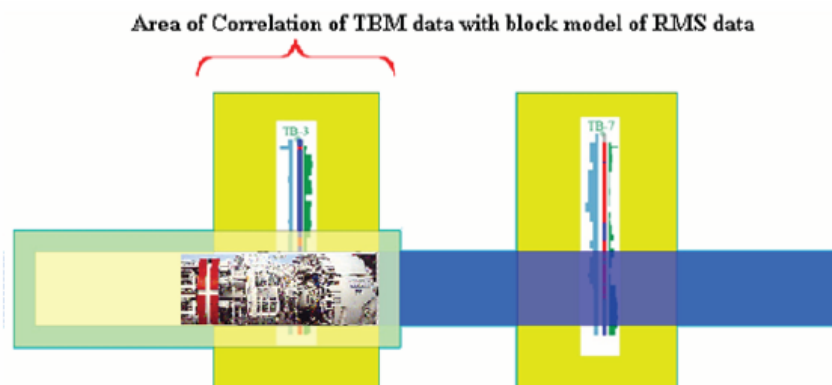
Η μεθοδολογία που προτείνεται βασίζεται στη χρήση της γεωστατιστικής μεθόδου παρεμβολής kriging, που περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο (κεφ.2). Πιο συγκεκριμένα όπως παρουσιάζεται στο Σχ.1.2, η εκτίμηση του RMR (ή του Q), που έχει γίνει από τον χαρακτηρισμό των πυρήνων από τις γεωτρήσεις δειγματοληψίας, χρησιμοποιείται για να βαθμονομηθεί το μοντέλο εκτίμησης του RMR ή του Q με την χρήση των καταγραφών του TBM όταν αυτό διέρχεται από τα σημεία της πρόβλεψης. Στην συνέχεια η πρόβλεψη του Kriging μεταξύ των γεωτρήσεων βελτιώνεται με την προσθήκη των καταγραφών του TBM στις προϋπάρχουσες μετρήσεις με βάση το βαθμονομημένο μοντέλο.

Ανακεφαλαιώνοντας η προτεινόμενη μεθοδολογία προσπαθεί να επιτύχει τους εξής στόχους:

- Γνωρίζοντας την χωρική κατανομή των δεικτών RMR ή Q από τις πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις σε συνδυασμό με παρεμβολή στις θέσεις που δεν υπάρχουν μετρήσεις, να γίνεται πρόβλεψη για την ειδική ενέργεια κοπής SE (Specific Energy) του TBM κατά μήκος της σήραγγας.
- ή εναλλακτικά, γνωρίζοντας την ειδική ενέργεια του TBM να γίνεται πρόβλεψη για το RMR (ή Q) στις θέσεις εκείνες τις σήραγγας που δεν έχουν χαρακτηριστεί και στην συνέχεια σε συνδυασμό με τις υπάρχουσες μετρήσεις από τις γεωτρήσεις να γίνει βελτίωση της πρόβλεψης της ποιότητας της βραχομάζας μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας μεταξύ των γεωτρήσεων.

Η μέθοδος Kriging χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των παραμέτρων του TBM κατά την διάρκεια της εκσκαφής με την χρήση του βελτιωμένου κώδικα KRIGSTAT σε γλώσσα μηχανής Fortran 77. Ο έλεγχος του κώδικα γίνεται με την χρήση δεδομένων κοπής του TBM, του RMR και του δείκτη Q, για τρεις περιπτώσεις:

- Δημοσιευμένα δεδομένα για την σήραγγα στο Pieve της Β. Ιταλίας ([Sapigni et. al., 2002](#)),
- Δεδομένα από δίδυμες σήραγγες στο Χονγκ Κονγκ που εδόθησαν από την Bouygues Travaux Publics (BYTP), και
- Δεδομένα προερχόμενα από την κατασκευή της γραμμής L9 του μετρό της Βαρκελώνης και εδόθησαν από την GISA



Σχήμα 1.2: Προσθήκη των καταγραφών του TBM στη βάση δεδομένων των καταγραφών στις γεωτρήσεις για την αύξηση της αξιοπιστίας του γεωτεχνικού προτύπου.

## Κεφάλαιο 2: Γεωστατιστική Επεξεργασία

### 2.1. Βασική Στατιστική Ανάλυση

Η βασική στατιστική προ-επεξεργασία των δεδομένων περιλαμβάνει:

- Υπολογισμό των βασικών στατιστικών στοιχείων: μέση τιμή, τυπική απόκλιση, διασπορά, διάμεσο, κυρτότητα και τον συντελεστή ασυμμετρίας της κατανομής των δεδομένων.
- Έλεγχο για το αν τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή.  
Η μέθοδος γραμμικής παρεμβολής του kriging έχει σαν βασική προϋπόθεση ότι τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή ώστε η πρόβλεψη να είναι αμερόληπτη ([Moyeed & Papritz, 2002](#)), δηλαδή η μέση τιμή του σφάλματος να τείνει στο μηδέν.  
Κατά τον έλεγχο Kolmogorov–Smirnov (KS-test) ([Chakravarti et. al., 1967](#)), η αθροιστική κατανομή  $N$  δεδομένων  $Y_i$  συγκρίνεται με την αντίστοιχη της κανονικής αθροιστικής κατανομής  $F(Y_i)$ , από όπου εντοπίζεται η μέγιστη ποσοστιαία απόκλιση  $D$  των δυο κατανομών, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$D = \max_{1 \leq i \leq N} \left| F(Y_i) - \sum_{j=1}^i \frac{J}{N} \right| \quad (2.1)$$

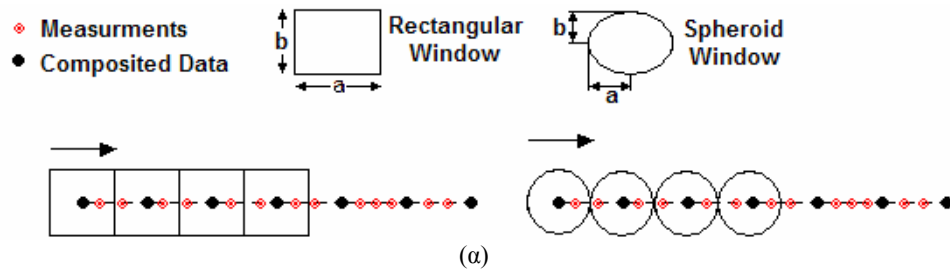
Άλλες μέθοδοι ελέγχου κανονικότητας, παραλλαγές της KS είναι: Anderson–Darling ([Calzada & Scariano, 2000](#), [Elliasi et. al., 2002](#), [Evans et. al., 1989](#)), Shapiro–Wilk ([Kumar Sen et. al., 2003](#), [Royston, 1986](#), [Stephens, 1974](#)), Chi-square ([Snedecor & Cochran, 1989](#))

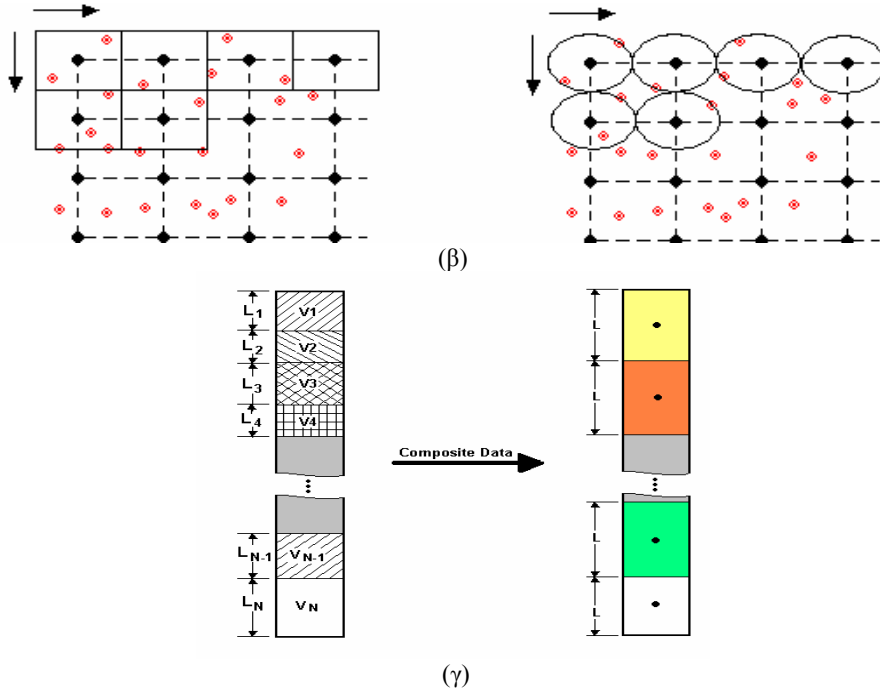
- Μετασχηματισμός δεδομένων. Στην περίπτωση όπου τα δεδομένα  $Y_i$  δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή είναι δυνατόν με τους καλούμενους εκθετικούς – λογαριθμικούς (ή Cox Box) μετασχηματισμούς να προκύψουν δεδομένα που ακολουθούν την κανονική κατανομή ([Journel & Huijbregts, 1978](#)),

$$\hat{Y}_i = \begin{cases} (Y_i^k - 1)/k, & k \neq 0 \\ \ln(Y_i), & k = 0 \end{cases}, i = 1, N \quad (2.2)$$

- Ομαδοποίηση/εξομάλυνση δεδομένων: Τα δεδομένα ομαδοποιούνται με την χρήση των κινούμενων "παραθύρων" μέσης/ενδιάμεσης τιμής που παρουσιάζονται στο Σχ2.1.α-β. Με τον τρόπο αυτό αφαιρούνται οι ακραίες τιμές και αποσβένεται ο τυχόν θόρυβος από τις μετρήσεις.
- Σύνθετα δείγματα: Στις περιπτώσεις που τα δεδομένα προέρχονται από πυρήνες γεωτρήσεων από δείγματα διαφορετικού μήκους, η παραγωγή σύνθετων δειγμάτων  $\hat{Y}$ , με σταθερό μήκος  $L$ , ανάγεται σε μια διάσταση με την χρήση της μεθόδου σταθμισμένης μέσης τιμής με βάση το μήκος  $l_i$  κάθε δείγματος (βλ. Σχ.2.1.γ).

$$\hat{Y} = \sum w_i Y_i = \frac{\sum l_i Y_i}{\sum l_i}, i \in \{\sum l_i \leq L\} \quad (2.3)$$





Σχήμα 2.1: Ομαδοποίηση/εξομάλυνση δεδομένων για:  
 (α) μονοδιάστατα,  
 (β) διδιάστατα δεδομένα, και  
 (γ) δεδομένα γεωτρήσεων

➤ Κανονικοποίηση δεδομένων.

Οι συντεταγμένες ενός πεδίου μετρήσεων  $\mathbf{s} = (s_1, s_2, s_3)$ , σε Καρτεσιανό τρισσορθογώνιο σύστημα αναφοράς, που ανήκουν στο διάστημα  $[a, b]$  μετατρέπονται σε κανονικοποιημένες συντεταγμένες  $\hat{\mathbf{s}}$  που αναφέρονται στο διάστημα  $[0, 1]$  με την χρήση του απλού γραμμικού μετασχηματισμού:

$$\hat{\mathbf{s}} = \frac{\mathbf{s} - a}{b - a} \quad (2.4)$$

ενώ τα δεδομένα με μέση τιμή  $\mu$  και διασπορά  $\sigma^2$  μετασχηματίζονται σε δεδομένα με μέση τιμή ίση με μηδέν και μοναδιαία διασπορά, με την χρήση του γραμμικού μετασχηματισμού:

$$\hat{Y}_i = (Y_i - \mu) / \sigma, i = 1, N \quad (2.5)$$

Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται απλούστερα για την επεξεργασία και στατιστικά ισοδύναμα δεδομένα.

## 2.2. Χωρική Ανάλυση

Όλα τα στατιστικά που προαναφέρθηκαν δεν λαμβάνουν υπόψιν καθόλου την χωρική αλληλεξάρτηση ή την συσχέτιση των μετρήσεων. Η θέση των μετρήσεων παίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό ενός τυχαίου πεδίου καθώς η χωρική συνέχεια επιβάλλει να παρατηρούνται παραπλήσιες τιμές σε γειτονικές θέσεις.

Η χωρική συνέχεια μπορεί να περιγραφεί με την διακύμανση της διασποράς στο χώρο η οποία αποδίδεται με την ακόλουθη θεωρητική σχέση (Cressie, 1991, Χριστόπουλος, 2006):

$$2\gamma(\mathbf{r}) = E[(Y(\mathbf{s}) - Y(\mathbf{s} + \mathbf{r}))^2] \quad (2.6)$$

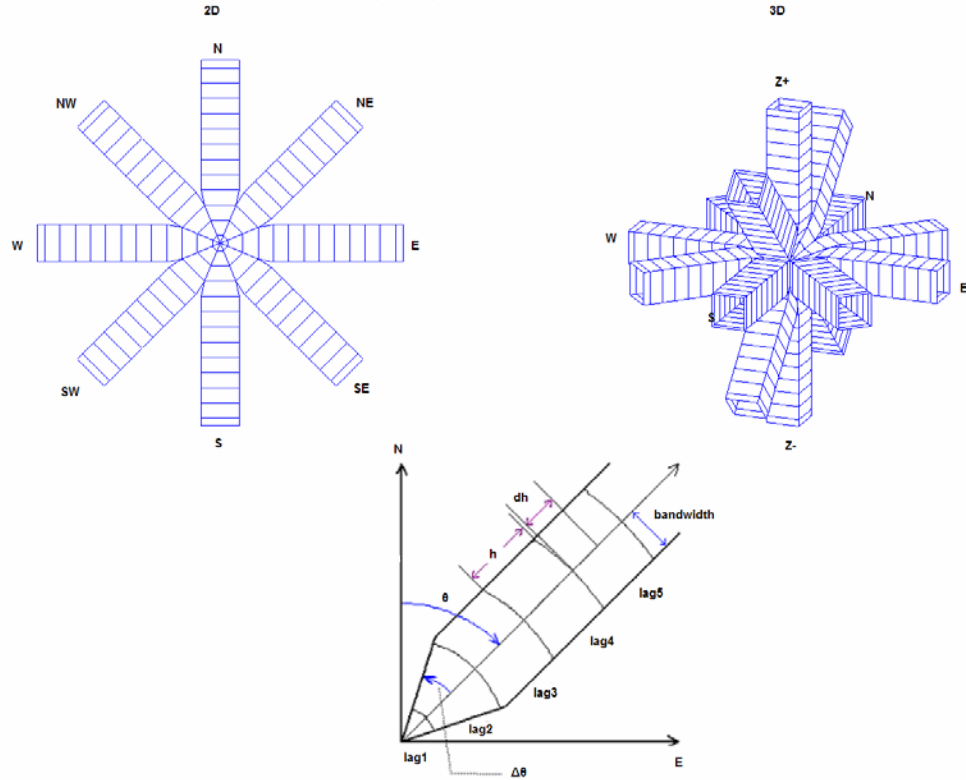
όπου ο τελεστής  $E[\cdot]$  δηλώνει την μέση τιμή και  $\mathbf{r}$  το διάνυσμα της απόστασης.

### 2.2.1 Πειραματικό Ημιβαριόγραμμα

Η παράμετρος  $\gamma$  της εξ. (2.6) καλείται ημιβαριόγραμμα και με βάση αυτήν την μεταβλητή έχει αναπτυχθεί η τεχνική παρεμβολής του kriging. Το ημιβαριόγραμμα μπορεί να προσδιορισθεί πειραματικά με την χρήση όλων των ζευγών,  $N(\mathbf{r})$ , από τα δεδομένα που απέχουν απόσταση  $\mathbf{r}$  μεταξύ τους (Cressie, 1991, Χριστόπουλος, 2006):

$$\hat{\gamma}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2N(\mathbf{r})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{r})} (Y(\mathbf{s}_i) - Y(\mathbf{s}_i + \mathbf{r}))^2 \quad (2.7)$$

Ο ορισμός της εξ. (2.7) στην ισότροπη περίπτωση εξαρτάται μόνο από την απόσταση, όπου για την εύρεση αντιπροσωπευτικού αριθμού ζευγών για κάθε απόσταση πολλές φορές στην αναζήτηση χρειάζεται να δοθεί κάποια ανοχή  $\tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{r} \pm d\mathbf{r}$ . Στην γενικότερη περίπτωση ανισότροπων δεδομένων το ημιβαριόγραμμα υπολογίζεται σαν συνάρτηση της απόστασης και της γωνίας. Σε αυτήν την περίπτωση για την εύρεση αντιπροσωπευτικού αριθμού σημείων εκτός από την ανοχή στην απόσταση χρειάζεται να δοθεί και κάποια ανοχή και στην έρευνα ανά διεύθυνση  $\tilde{\theta} = \theta \pm \Delta\theta$  (βλ. Σχ.2.2).



Σχήμα 2.2: Υπολογισμός ημιβαριογράμματος στην διεύθυνση NE

Στην γεωστατιστική πολλές φορές συνηθίζεται στην θέση του ημιβαριογράμματος να χρησιμοποιείται η συνάρτηση της συνδιασποράς (covariance) λόγω του ότι αυτή μειώνεται καθώς η απόσταση αυξάνει. Ο πειραματικός προσδιορισμός της μεταβλητής αυτής βρίσκεται ως εξής:

$$\hat{C}(\mathbf{r}) = \frac{1}{N(\mathbf{r})} \sum_{i=1}^{N(\mathbf{r})} (Y(\mathbf{s}_i) - m(\mathbf{s}_i))(Y(\mathbf{s}_i + \mathbf{r}) - m(\mathbf{s}_i + \mathbf{r})) \quad (2.8)$$

όπου  $m(\mathbf{s})$  η μέση τιμή γύρω από το σημείο  $\mathbf{s}$ .

Η χρήση της μια ή της άλλης μεταβλητής οδηγεί στα ίδια αποτελέσματα καθώς οι μεταβλητές αυτές, στην περίπτωση που το πεδίο  $Y(\mathbf{s})$  είναι ομοιογενές, σχετίζονται με την ακόλουθη γραμμική σχέση:



$$\gamma(\mathbf{r}) = C(0) - C(\mathbf{r}) \quad (2.9)$$

όπου  $C(0)$  μια σταθερά που προσεγγίζει την διασπορά του στατιστικού δείγματος.

### 2.2.2. Θεωρητικά Πρότυπα Ημιβαριογράμματος

Τα θεωρητικά πρότυπα ημιβαριογράμματος χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την μεταβολή του ημιβαριογράμματος με την αύξηση της απόστασης και προκύπτουν από συνδυασμό απλών μαθηματικών συναρτήσεων (εκθετικές, τριγωνομετρικές, πολυωνυμικές κ.τ.λ.), που είναι κατάλληλα ορισμένες έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ακόλουθη συνθήκη ([Armstrong, 1992](#), [Journel & Huijbregts, 1978](#), [Sain, 2004](#)):

$$\sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \gamma(\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j) \leq 0 \Rightarrow \text{Var}\{Y\} = \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j C(\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j) \geq 0 \quad (2.10)$$

όπου  $Y$  η πρόβλεψη,  $\text{Var}$  η εκτίμηση της διασποράς και  $\lambda$  οι συντελεστές βαρύτητας, από το γραμμικό εκτιμητή του kriging, που ικανοποιούν την συνθήκη αμεροληψίας:

$$\sum_i \lambda_i = 1 \quad (2.11)$$

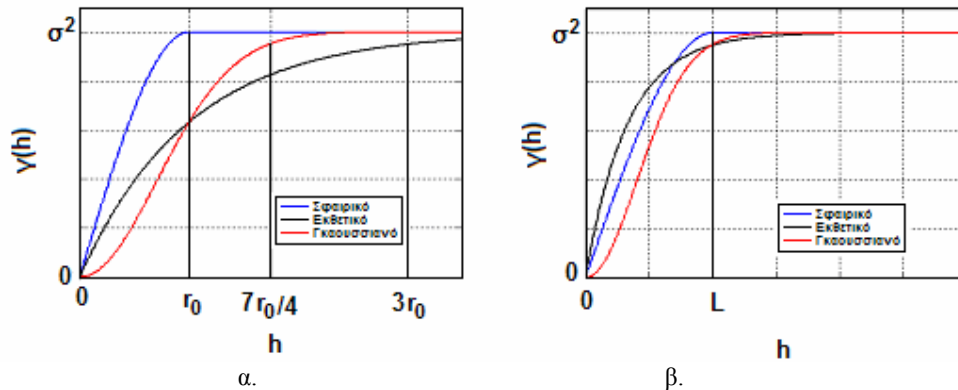
Οι βασικές ιδιότητες των περισσότερων θεωρητικών ημιβαριογραμμάτων είναι:

- $\gamma(\mathbf{r}) = \gamma(-\mathbf{r}) \geq 0$
- $\gamma(0) = 0$
- $\lim_{\|\mathbf{r}\| \rightarrow 0} \frac{\gamma(\mathbf{r})}{\|\mathbf{r}\|^2} = 0$
- γ αρνητικά ορισμένο ώστε να εξασφαλίζεται θετική διασπορά (εξ. 2.10)

Τα κυριότερα θεωρητικά ημιβαριογράμματα που χρησιμοποιούνται στις γεωστατιστικές αναλύσεις, είναι τα εξής ([Deutsch & Journel, 1992](#), [Χριστόπουλος, 2006](#)):

- Στάσιμα μοντέλα (Stationary Models)

Τέτοιες συναρτήσεις τείνουν σε μια σταθερή τιμή που στις περισσότερες περιπτώσεις ταυτίζεται με την διασπορά των δεδομένων. Τέτοιου τύπου συναρτήσεις είναι το εκθετικό, το γκαουσιανό και το σφαιρικό ημιβαριόγραμμα. Στο διάγραμμα που ακολουθεί συγκρίνονται οι τρεις τύποι θεωρητικού ημιβαριογράμματος για ίδιες τιμές των παραμέτρων: α)  $c_0$  (~διασπορά),  $r_0$  (παράμετρος κλίμακας) και β)  $c_0$ ,  $L$  (μήκος συσχέτισης).



Σχήμα 2.3: Σύγκριση στάσιμων θεωρητικών συναρτήσεων

α. ως προς την παράμετρο  $r_0$

β. ως προς το μήκος συσχέτισης  $L$

Άλλα λιγότερο γνωστά μοντέλα αυτού του τύπου είναι το τμηματικά γραμμικό, το κυβικό και το τετραγωνικό.

- Μη στάσιμα μοντέλα (Non Stationary Models)



Τέτοιου είδους μοντέλα ημιβαριογράμματος δεν τείνουν σε κάποια τιμή, αντιθέτως αυξάνονται συνεχώς με την απόσταση. Το πιο γνωστό από αυτά είναι το γραμμικό.

- Φαινόμενο πυρήνα ή κόκκου (Nugget Effect)

Το ημιβαριογράμμα αυτού του τύπου δεν επηρεάζεται από την απόσταση και καλείται φαινόμενο κόκκου (nugget effect). Η χρήση του σε συνδυασμό με άλλα θεωρητικά πρότυπα ημιβαριογράμματος εισάγει μια ασυνέχεια στην αρχή των αξόνων που αντιπροσωπεύει τα σφάλματα μικροκλίμακας και τα τυχαία σφάλματα των μετρήσεων. Οφείλεται να σημειωθεί ότι στην περίπτωση του γκαουσιανού μοντέλου είναι απαραίτητη η προσθήκη έστω μιας μικρής ποσότητας του μοντέλου αυτού έτσι ώστε να προκύψουν επιλύσιμα συστήματα της μεθόδου kriging. Ακέραιο το φαινόμενο κόκκου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει δεδομένα που δεν παρουσιάζουν καμία χωρική συσχέτιση.

- Μοντέλα με οπή αντισυσχέτισης (Hole Effect) ([Journal & Froidevaux, 1982](#))

Τα θεωρητικά ημιβαριογράμματα αυτού του τύπου παρουσιάζουν μια περιοδικότητα και συνήθως χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν μονοδιάστατα προβλήματα. Τα πιο γνωστά από αυτά είναι: Το συνημιτονικό, συνημιτονικό με απόσβεση και το περιοδικό μοντέλο με απόσβεση που χρησιμοποιεί την συνάρτηση sinc ([Deutsch & Journal, 1992](#)).

Πίνακας 2.1: Μοντέλα ημιβαριογράμματος

Όνομα μοντέλου	Εξίσωση	Περιγραφή	Παρατηρήσεις
Γενικά	$\gamma(\mathbf{r}) = c_0 \gamma^*(h),$ <p>όπου <math>h = \ \mathbf{r}\  / r_0</math> για το ισότροπο, <math>h = \sqrt{\left(\frac{r_1}{r_{01}}\right)^2 + \left(\frac{r_2}{r_{02}}\right)^2 + \left(\frac{r_3}{r_{03}}\right)^2}</math>, ανισότροπο</p> $c_0 \sim \sigma^2,$ $r_0 \text{ παράμετρος κλίμακας}$ $r_{01}, r_{02}, r_{03} \text{ οι ανισότροποι παράμετροι κλίμακας}$		
Εκθετικό	$\gamma^*(h) = 1 - \exp(-h)$	Στάσιμα ή στατιστικά ομοιογενή μοντέλα που τείνουν στην τιμή $c_0$	Μήκος συσχέτισης $\sim 3 r_0$
Γκαουσιανό	$\gamma^*(h) = 1 - \exp(-h^2)$		Μήκος συσχέτισης $\sim 7/4 r_0$
Τμηματικά γραμμικό	$\gamma^*(h) = \min(h, 1)$		Μήκος συσχέτισης $r_0$
Τετραγωνικό	$\gamma^*(h) = 2 \min(h, 1) - \min(h, 1)^2$		Μήκος συσχέτισης $r_0$
Σφαιρικό	$\gamma^*(h) = 1.5 \min(h, 1) - 0.5 \min(h, 1)^3$		Μήκος συσχέτισης $r_0$
Κυβικό	$\gamma^*(h) = 7 \min(h, 1) - 8.75 \min(h, 1)^2 + 3.5 \min(h, 1)^3 - 0.75 \min(h, 1)^4$		Μήκος συσχέτισης $r_0$
Φαινόμενο κόκκου	$\gamma^*(h) = 1 - \delta(h)$	Ασυνεχές μοντέλο ως προς τις μηδενικές αποστάσεις.	$\delta$ η συνάρτηση του dirac δεν παρουσιάζει καμία χωρική συσχέτιση
Γραμμικό	$\gamma^*(h) = h$	Μη στάσιμο μοντέλο, συνεχώς αυξανόμενο με την απόσταση	Η κλίση προσδιορίζεται από τον λόγο $c_0/r_0$
Συνημίτονο	$\gamma^*(h) = 1 - \cos(2\pi b h)$	Μη μονοτονικά μοντέλα με διαστήματα αρνητικής συσχέτισης	$b$ ο αριθμός κύκλων σε απόσταση $r_0$
Συνημίτονο με απόσβεση	$\gamma^*(h) = 1 - \exp(-3h/d) \cos(2\pi b h)$		$b$ ο αριθμός κύκλων σε απόσταση $r_0$ $d * r_0$ είναι η απόσταση απόσβεσης 95%
sinc	$\gamma^*(h) = 1 - \sin(2\pi b h)/(2\pi b h)$		$b$ ο αριθμός κύκλων σε απόσταση $r_0$

### 2.2.3. Ανισοτροπία

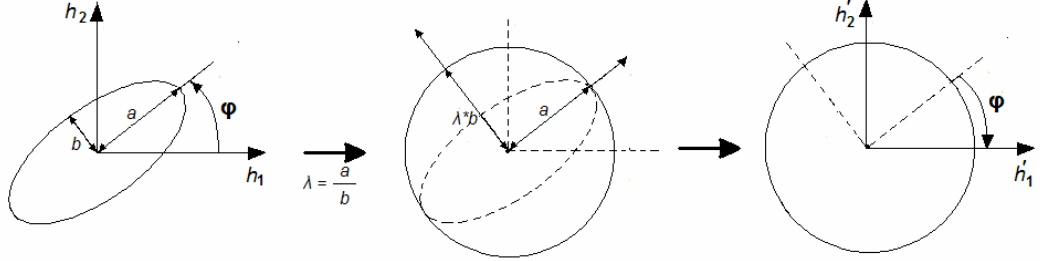
Προηγουμένως η κύρια ανάλυση επικεντρώθηκε στην μελέτη της περίπτωσης της ισότροπης συμπεριφοράς. Στην γενικότερη περίπτωση τα δεδομένα παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με την διεύθυνση. Η ανισοτροπία μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κύριες κατηγορίες ([Journal & Huijbregts, 1978](#)):

I) Την γεωμετρική, όπου η ανισοτροπία μπορεί να περιγραφεί σαν μια έλλειψη η οποία μπορεί να μετατραπεί σε μια ισοδύναμη κατάσταση (κύκλο) με την χρήση ενός απλού γραμμικού μετασχηματισμού. Στην περίπτωση των δυο διαστάσεων ο μετασχηματισμός δίδεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} h'_1 \\ h'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

που περιλαμβάνει τα εξής 3 βήματα που παρουσιάζονται στο Σχ.2.4:

- α) αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων με περιστροφή κατά την γωνία  $\phi$ , ώστε οι νέοι άξονες να ταυτίζονται με τους κύριους άξονες της έλλειψης ( $a > b$ ),
- β) πολλαπλασιασμό της κατακόρυφης συνιστώσας με τον λόγο ανισοτροπίας  $\lambda = a/b$  για την μετατροπή της έλλειψης σε κύκλο, και
- γ) επαναφορά του συστήματος συντεταγμένων στο αρχικό σύστημα, με περιστροφή των αξόνων με γωνία  $-\phi$



Σχήμα 2.4: Διόρθωση γεωμετρικής ανισοτροπίας.

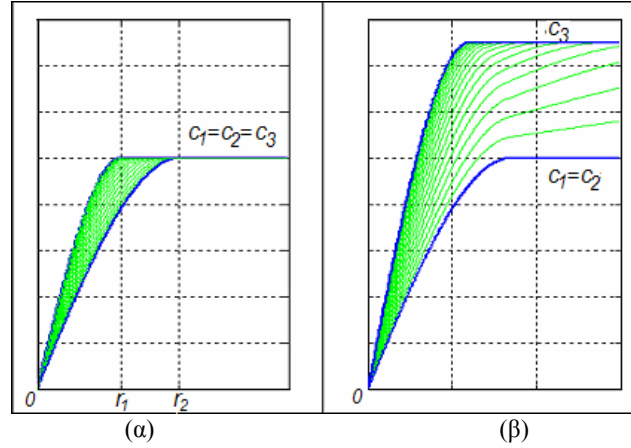
II) Την ανισοτροπία ζώνης, κατά την οποία δεν υπάρχουν απλοί μετασχηματισμοί οι οποίοι να οδηγούν σε κάποια ισοδύναμη ισότροπη κατάσταση. Στην γενική περίπτωση η ανισοτροπία ζώνης μπορεί να περιγραφεί σαν γραμμικός συνδυασμός διαφορετικών μοντέλων σύμφωνα με την σχέση:

$$\gamma(\mathbf{r}) = \sum w_i \gamma_i(r_1, r_2, r_3) \quad (2.13)$$

όπου το διάνυσμα της απόστασης δίδεται ως  $\mathbf{r} = (r_1, r_2, r_3)$ , ως προς τρισσορθογώνιο Καρτεσιανό σύστημα αναφοράς.

Η ανισοτροπία ζώνης μπορεί να προσεγγιστεί από την ύπαρξη μιας κύριας διεύθυνσης ανισοτροπίας με την οροφή του ημιβαριογράμματος να είναι διαφορετική από την οροφή του ημιβαριογράμματος στο κάθετο επίπεδο, όπου παρουσιάζει ισότροπη/γεωμετρικά ανισότροπη συμπεριφορά, ( $c_3 \neq c_2 = c_1$ ). Η προσέγγιση της ανισοτροπίας αυτού του τύπου γίνεται με την υπέρθεση του ημιβαριογράμματος στο κάθετο επίπεδο και του ημιβαριογράμματος στην κύρια διεύθυνση της ανισοτροπίας, ως εξής:

$$\gamma(\mathbf{r}) = \gamma_1(\sqrt{r_1^2 + r_2^2}) + \gamma_2(r_3) \quad (2.14)$$



Σχήμα 2.5: Γραφική αναπαράσταση: α) γεωμετρικής β) ανισοτροπίας ζώνης

#### 2.2.4. Προσδιορισμός Παραμέτρων Ημιβαριογράμματος

Για τα πιο συνηθισμένα από τα ‘μοντέλα’ ημιβαριογράμματος (σφαιρικό, εκθετικό, γκαουσιανό) οι παράμετροι που χρειάζεται να προσδιορισθούν είναι το μήκος συσχέτισης  $r_0$ , η οροφή του βαριογράμματος  $c_0$  και το φαινόμενο κόκκου (βλ. Πιν.2.1). Υπάρχουν δυο τρόποι με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί η καλύτερη επιλογή των παραμέτρων αυτών: Ι) με την χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων και ΙΙ) με την μέγιστη πιθανοφάνεια.

Στην μέθοδο των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίζονται οι παράμετροι  $\theta$  οι οποίοι ελαχιστοποιούν τον όρο (Cressie, 1985, Sain, 2004, Gribov et. al., 2006):

$$O = \sum_{j=1}^N w_j (\hat{\gamma}(\mathbf{r}_j) - \gamma(\mathbf{r}_j; \theta))^2 \quad (2.15)$$

όπου οι συντελεστές βαρύτητας μπορούν να δοθούν σαν συνάρτηση της διασποράς του πειραματικού ημιβαριογράμματος, είτε σαν συνάρτηση του αριθμού ζευγών (Gribov et. al., 2006):

$$w_j = (E[\gamma(\mathbf{r}_j)^2])^{-1} = [2\gamma(\mathbf{r}_j; \theta)^2 / N(\mathbf{r}_j)]^{-1} \quad (2.16)$$

### 2.3. Γραμμική Παρεμβολή Kriging

Το kriging είναι μια μέθοδος γραμμικής παρεμβολής που περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\hat{Y}_0 = \sum_{i=1}^N \lambda_i Y(\mathbf{s}_i) \quad (2.17)$$

Σε αντίθεση με τις άλλες γραμμικές μεθόδους παρεμβολής (αντίστροφων τετραγώνων των αποστάσεων, μέθοδο των πολυγώνων κ.τ.λ.), στο kriging ο τρόπος υπολογισμού των συντελεστών βαρύτητας μπορεί να προσδιορισθεί με βάση τα υπάρχοντα δεδομένα (υπολογισμό πειραματικού – ταίριασμα θεωρητικού ημιβαριογράμματος), έτσι ώστε να επιτυγχάνεται:

α) αμεροληψία-μηδενική μέση τιμή σφάλματος

$$(E[\hat{Y}_0 - Y(\mathbf{s}_i)]) = 0$$

β) η ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος της εκτίμησης

$$(E[(\hat{Y}_0 - Y(\mathbf{s}_i))^2])$$

Για το λόγο αυτό το kriging καλείται Βέλτιστος Αμερόληπτος Γραμμικός Εκτιμητής (**Best Linear Unbiased Estimator**) για τυχαίες συναρτήσεις. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ήτοι το απλό kriging όπου η μέση τιμή του τυχαίου πεδίου είναι γνωστή, το κανονικό όπου η μέση τιμή είναι άγνωστη αλλά σταθερή στο πεδίο έρευνας και μια ειδικότερη περίπτωση που είναι το καθολικό kriging όπου η μέση τιμή δεν είναι σταθερή στο χώρο. Οι εξισώσεις του για τους διάφορους τύπους του kriging δίδονται στην συνέχεια ([Clark, 1977](#), [Deutsch & Journel, 1992](#), [Kitanidis, 1997](#), [Marcotte, 1991](#), [Χριστόπουλος, 2006](#)).

### 2.3.1 Απλό Kriging -SK- (Simple Kriging)

Στο απλό kriging η μέση τιμή του πεδίου θεωρείται γνωστή, οπότε η μεταβλητή που εκτιμάται  $Y(s)$  μπορεί να περιγραφεί σαν μια ταλάντευση  $\varepsilon(s)$  γύρω από την σταθερή μέση τιμή  $\mu$ . Η μαθηματική έκφραση που περιγράφει το  $Y(s)$  είναι:

$$Y(s) = \mu + \varepsilon(s) \quad (2.18)$$

Η εκτίμηση στην περίπτωση αυτή δίδεται από [εξ.\(2.17\)](#) αφαιρώντας την γνωστή μέση τιμή σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\hat{Y}_0 = \mu + \sum_{i=1}^N \lambda_i (Y(s_i) - \mu) \quad (2.19)$$

Το σύστημα του απλού kriging για την θέση  $s_0$  αναπτύσσεται σε μορφή πινάκων ως εξής:

$$\Gamma_{ij}' \Lambda_j' = \Gamma_{0i}' \Rightarrow \begin{bmatrix} 0 & -\gamma(s_1 - s_2) \cdots -\gamma(s_1 - s_N) \\ -\gamma(s_2 - s_1) & 0 & \cdots -\gamma(s_2 - s_N) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ -\gamma(s_N - s_1) & -\gamma(s_N - s_2) \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\gamma(s_1 - s_0) \\ -\gamma(s_2 - s_0) \\ \vdots \\ -\gamma(s_N - s_0) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Η συνθήκη αμεροληψίας στην περίπτωση αυτή τηρείται αυτομάτως με την χρήση της [εξ.\(2.19\)](#).

Η διασπορά της εκτίμησης του απλού kriging εκτιμάται ως εξής:

$$\sigma_{ol}^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(s_i - s_0) \quad (2.21)$$

### 2.3.2 Κανονικό Kriging -OK- (Ordinary Kriging)

Στην περίπτωση αυτή η μέση τιμή του πεδίου είναι άγνωστη αλλά θεωρείται σταθερή στην γειτονιά της εκτίμησης, οπότε στην περίπτωση αυτή ισχύει:

$$Y(s) = \hat{\mu} + \varepsilon(s) \quad (2.22)$$

Η εκτίμηση στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται από την [εξ.\(2.17\)](#), οπότε είναι απαραίτητη η εισαγωγή μιας επιπλέον παραμέτρου ώστε να ικανοποιείτε η [εξ.\(2.11\)](#), που στην προκειμένη περίπτωση είναι ο πολλαπλασιαστής του Lagrange  $\nu$ , με συνέπεια το σύστημα Kriging να διαμορφώνεται ως εξής:

$$\Gamma_{ij}'' \Lambda_j'' = \Gamma_{0i}'' \Rightarrow \begin{bmatrix} [\Gamma']_{N \times N} & [I]_{N \times 1} \\ [I']_{1 \times N} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Lambda']_{N \times 1} \\ \nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\Gamma_0']_{N \times 1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

όπου ο πίνακας  $I_i=1$  για  $i=1, N$ , ενώ οι υπόλοιποι πίνακες έχουν οριστεί στην περίπτωση του απλού kriging. Επίσης η διασπορά της εκτίμησης του κανονικού kriging εκτιμάται ως εξής:

$$\sigma_{0II}^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_0) - \nu \quad (2.24)$$

### 2.3.3 Καθολικό Kriging -UK- (Universal Kriging)

Το καθολικό είναι ένας γενικότερος τύπος kriging όπου η μέση τιμή είναι άγνωστη και μεταβάλλεται ανάλογα με την θέση στο χώρο και περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Z(\mathbf{s}) = m(\mathbf{s}) + \varepsilon(\mathbf{s}) \quad (2.25)$$

όπου  $m(\mathbf{s})$  περιγράφει την τάση που ακολουθεί η μέση τιμή σύμφωνα με τις χωρικές συντεταγμένες και που προσομοιώνεται με την χρήση των  $p$  συναρτήσεων βάσης  $f_k$ :

$$m(\mathbf{s}) = \sum_{k=1}^p a_k f_k(\mathbf{s}) \quad (2.26)$$

Η συνθήκη αμεροληψίας στην περίπτωση αυτή επιτυγχάνεται με την εισαγωγή στο σύστημα του kriging επιπλέον σταθερών έτσι ώστε να ισχύει η σχέση:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i f_k(\mathbf{s}_i) = f_k(\mathbf{s}_0) \quad \Big|_{k=1,p} \quad (2.27)$$

άρα το σύστημα του kriging μπορεί να γραφεί ως ακολούθως:

$$\Gamma_{ij}^{III} \Lambda_j^{III} = \Gamma_{oi}^{III} \Rightarrow \begin{bmatrix} \Gamma^I ]_{N \times N} & [F_k ]_{N \times p} \\ [F'_k ]_{p \times N} & [O]_{p \times p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Lambda^I ]_{N \times 1} \\ [A_k ]_{p \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\Gamma_0^I ]_{N \times 1} \\ [F_0 ]_{p \times 1} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

όπου:

$F_k$  ο πίνακας των συναρτήσεων βάσης για κάθε σημείο που χρησιμοποιείται στο kriging

$\mathbf{s}_{i=1,N}$ ,

$O$  είναι ο μηδενικός τετραγωνικός πίνακας,

$A_k$  ο πίνακας των συντελεστών της εξ. (2.26), και

$F_0$  ο πίνακας των συναρτήσεων βάσης για το προσδιοριζόμενο σημείο  $\mathbf{s}_0$ .

Στην ακόλουθη εξίσωση δίδεται η εκτίμηση της διασποράς για την περίπτωση του καθολικού kriging:

$$\sigma_{oIII}^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_0) - \sum_{k=1}^p a_k f_k(\mathbf{s}_0) \quad (2.29)$$

Στην απλούστερη περίπτωση η τάση των δεδομένων μπορεί να προσεγγιστεί με την χρήση πολυωνυμικών συναρτήσεων, οπότε ισχύει:

$$f_k(\mathbf{s}) = \mathbf{s}^k \quad (2.30)$$

Για την κατανόηση των εξ. (2.26) – (2.29) γίνεται η ανάπτυξη τους στην γενικότερη περίπτωση των τριών διαστάσεων και για γραμμική τάση των δεδομένων που δίδεται από

$$m(\mathbf{s}) = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 z \quad (2.31.a)$$

όπου το διάνυσμα θέσης δίδεται ως  $\mathbf{s}=(x,y,z)$

Η συνθήκη αμεροληψίας για την περίπτωση αυτή δίδεται ως εξής:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i (a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 z) = a_1 + a_2 x_0 + a_3 y_0 + a_4 z_0 \quad (2.31.b)$$

Αντικαθιστώντας την προηγούμενη εξίσωση στο σύστημα του kriging, προκύπτει το γραμμικό σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{bmatrix} 0 & -\gamma(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2) \cdots -\gamma(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_N) \\ -\gamma(\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_1) & 0 & \cdots -\gamma(\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_N) \\ \vdots & \vdots & \cdots \vdots \\ -\gamma(\mathbf{s}_N - \mathbf{s}_1) -\gamma(\mathbf{s}_N - \mathbf{s}_2) \cdots 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 x_1 y_1 z_1 \\ 1 x_2 y_2 z_2 \\ \vdots \\ 1 x_N y_N z_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\gamma(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_0) \\ -\gamma(\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_0) \\ \vdots \\ -\gamma(\mathbf{s}_N - \mathbf{s}_0) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_N \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_N \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (2.31.c)$$

Η διασπορά που προκύπτει από την εκτίμηση με την χρήση της εξ.(2.31.c), δίδεται ως:

$$\sigma_{oII}^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_0) - (a_1 + a_2 x_0 + a_3 y_0 + a_4 z_0) \quad (2.31.d)$$

Παρατηρήσεις:

Οι δυο προηγούμενοι τύποι kriging μπορούν να θεωρηθούν σαν ειδική εφαρμογή του καθολικού με την χρήση πολυνύμου μηδενικού βαθμού.

Συγκρίνοντας την αβεβαιότητα της εκτίμησης για τους τρεις τύπους kriging μπορεί να εύκολα να διαπιστωθεί η ακόλουθη ανισότητα:

$$\sigma_{oII}^2 \geq \sigma_{oH}^2 \geq \sigma_{oI}^2 \quad (2.32)$$

### 2.3.4 Ογκομετρικό Kriging -BK- (Block Kriging)

Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του ογκομετρικού kriging (block kriging) για την εκτίμηση της αντιπροσωπευτικής τιμής εντός όγκου (block) όπως φαίνεται στο Σχ.2.6. Η εκτίμηση σε αυτήν την περίπτωση βρίσκεται με την χρήση της μέσης τιμής των τιμών του ημιβαριογράμματος στα σημεία που διακριτοποιούν το “block”, όπως φαίνεται στην ακόλουθη σχέση:

$$\tilde{\gamma}_{iA} = \frac{1}{|A|} \sum_{j \in A} \gamma(\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j) \quad (2.33)$$

Στην επόμενη σχέση αναπτύσσεται το σύστημα με την χρήση του απλού ογκομετρικού kriging:

$$\begin{bmatrix} 0 & -\gamma(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2) \cdots -\gamma(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_N) \\ -\gamma(\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_1) & 0 & \cdots -\gamma(\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_N) \\ \vdots & \vdots & \cdots \vdots \\ -\gamma(\mathbf{s}_N - \mathbf{s}_1) -\gamma(\mathbf{s}_N - \mathbf{s}_2) \cdots 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tilde{\gamma}_{1A} \\ -\tilde{\gamma}_{2A} \\ \vdots \\ -\tilde{\gamma}_{NA} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

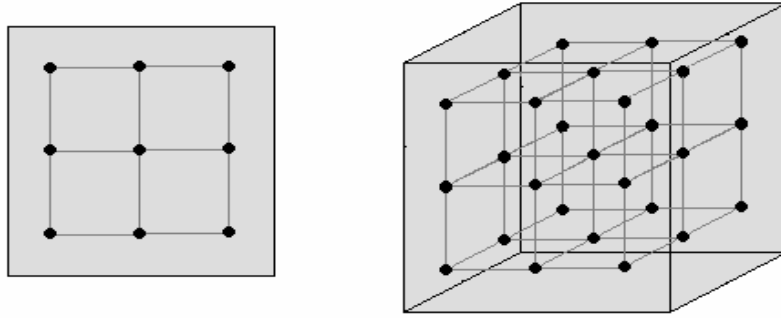
Στην περίπτωση του κανονικού και του καθολικού kriging μπορούν να εκφραστούν από την προσθήκη επιπλέον εξισώσεων στο σύστημα του απλού όπως φαίνεται στις εξ. (2.23), (2.28) και (2.31.c).

Η εκτίμηση που προκύπτει από την χρήση της προηγούμενης εξίσωσης είναι ισοδύναμη με την μέση τιμή των εκτιμήσεων στα σημεία που διακριτοποιούν το “block”,  $V_j$ , με την χρήση σημειακού kriging:

$$V_A = \frac{1}{|A|} \sum_{j \in A} V_j \quad (2.35)$$

Ενώ η εκτίμηση της διασποράς βρίσκεται από την αφαίρεση της διασποράς του σημειακού kriging  $\sigma_{kr}^2$  την διασπορά του ίδιου του “block”  $\sigma_{A,A}^2$ :

$$\sigma_A^2 = \sigma_{kr}^2 - \sigma_{A,A}^2 \quad (2.36)$$



Σχήμα 2.6: Διακριτοποίηση όγκου σε 2 και 3 διαστάσεις

Η επιλογή του αριθμού των σημείων που διακριτοποιούν του “block” παίζει σημαντικό ρόλο στην αξιοπιστία των εκτιμήσεων, όσο περισσότερα σημεία χρησιμοποιούνται τόσο πιο αξιόπιστη είναι η εκτίμηση. Έχει παρατηρηθεί ότι η χρήση  $4 \times 4 = 16$  ή  $4 \times 4 \times 4 = 64$  σημείων είναι ένας ικανοποιητικός αριθμός σημείων, στις 2 και τις 3 διαστάσεις αντίστοιχα. Επίσης η επιλογή του μεγέθους του “block” παίζει σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα, έτσι η χρήση αρκετά μικρών διαστάσεων όγκου οδηγεί σε αποτελέσματα παραπλήσια του σημειακού kriging, αντιθέτως στην περίπτωση μεγάλων διαστάσεων όγκου χάνεται η συσχέτιση σε μικρές αποστάσεις με αποτέλεσμα οι εκτιμήσεις να παρουσιάζουν μεγάλη εξομάλυνση (~μέση τιμή).

### 2.3.4 Kriging σε Πεδίο Δεικτών –IK- (Indicator Kriging)

Ο τύπος αυτός του kriging χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που τα δεδομένα είναι ασύμμετρα με περισσότερες μεγάλες τιμές και δύσκολα μπορεί να βρεθεί μετασχηματισμός που να τα μετατρέπει σε κανονικά δεδομένα. Για τον υπολογισμό του IK γίνεται ο μετασχηματισμός των δεδομένων σε 1 αν ανήκουν σε μια κατηγορία και 0 σε κάθε άλλη περίπτωση.

$$i(Y, Y_k) = \begin{cases} 1, & \text{αν } Y \geq Y_k \\ 0, & \text{αν } Y < Y_k \end{cases} \quad (2.37)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται το ημιβαριόγραμμα και το kriging για τα μετασχηματισμένα δεδομένα στο πεδίο των δεικτών  $i(Y, Y_k)$ . Η εκτίμηση κυμαίνεται στο διάστημα 0 έως 1 και περιγράφει την εκτίμηση της πιθανότητας του η τοπική τιμή να υπερβαίνει την καθορισμένη τιμή  $Y_k$ . Με την επαναλαμβανόμενη εκτίμηση για διάφορες τιμές είναι δυνατόν να γίνει η εκτίμηση της αθροιστικής κατανομής της πιθανότητας ([Deutsch & Journel, 1992](#), [Χριστόπουλος, 2006](#)).

## 2.4. Επαλήθευση των Παραμέτρων του Kriging

Σε αυτή τη φάση γίνεται η επαλήθευση της ορθότητας των προβλέψεων που γίνονται με βάση το ημιβαριόγραμμα καθώς και με τις άλλες παραμέτρους του kriging. Τα ερωτήματα που καλείται να απαντήσει μια τέτοια μέθοδος επαλήθευσης είναι:

- Οι παράμετροι για τον υπολογισμό του πειραματικού ημιβαριογράμματος είναι σωστά ορισμένοι (απόσταση, διεύθυνση, ανοχή);
- Το επιλεγμένο θεωρητικό βαριόγραμμα περιγράφει το πειραματικό ημιβαριόγραμμα;
- Έχουν επιλεγεί οι βέλτιστοι παράμετροι (παράμετρος κλίμακας, οροφή, φαινόμενο κόκκου) του θεωρητικού ημιβαριογράμματος;
- Είναι το ισότροπο μοντέλο κατάλληλο;
- Ποιος είναι ο τύπος ανισοτροπίας: γεωμετρική ή ζωνώδης;
- Είναι ο αριθμός των σημείων που χρησιμοποιούνται στο Kriging αρκετός;
- Είναι η ελεγχόμενη περιοχή για σημεία αρκετά μεγάλη;
- Ποιος τύπος του Kriging κατάλληλος: απλό, κανονικό ή το καθολικό kriging;
- Εκτίμηση με σημειακό ή ογκομετρικό kriging;
- Υπερεκτιμάται ή υποεκτιμάται η μεταβλητή σε ορισμένες περιοχές;
- Είναι τα εκτιμώμενα σφάλματα συμβατά με τα πραγματικά;
- Ακολουθούν τα δεδομένα την κανονική κατανομή;

Η επιλογή του σωστού μοντέλου ημιβαριογράμματος παίζει τον σημαντικότερο ρόλο στις προβλέψεις που γίνονται με τη μέθοδο kriging, καθώς οι υπόλοιπες παράμετροι μπορούν εύκολα να προσδιορισθούν από τα υπάρχοντα δεδομένα και το ζητούμενο αποτέλεσμα. Έτσι η αξιολόγηση του μοντέλου kriging ανάγεται ουσιαστικά στην αξιολόγηση του επιλεγμένου μοντέλου ημιβαριογράμματος.

Η μέθοδος αξιολόγησης που χρησιμοποιείται είναι ο έλεγχος με την χρήση των σφαλμάτων των εκτιμήσεων, κανονικοποιημένων με την εκτίμηση της τυπικής απόκλισης του kriging (Q-test) ([Journel & Huijbregts, 1978](#)):

$$\varepsilon_i = \frac{\hat{Y}_i - Y(\mathbf{s}_i)}{\hat{\sigma}_i} \quad (2.38)$$

- Στατιστική τιμή  $Q_1$

Η στατιστική τιμή του  $Q_1$  υπολογίζεται σαν η μέση τιμή των κανονικοποιημένων σφαλμάτων:

$$Q_1 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n \varepsilon_i \quad (2.39)$$

Σύμφωνα με την θεωρία η στατιστική τιμή της εζ.2.38 είναι μια τυχαία μεταβλητή η οποία ακολουθεί την κανονική κατανομή ( $\mu=0, \sigma^2=1/(n-1)$ ).

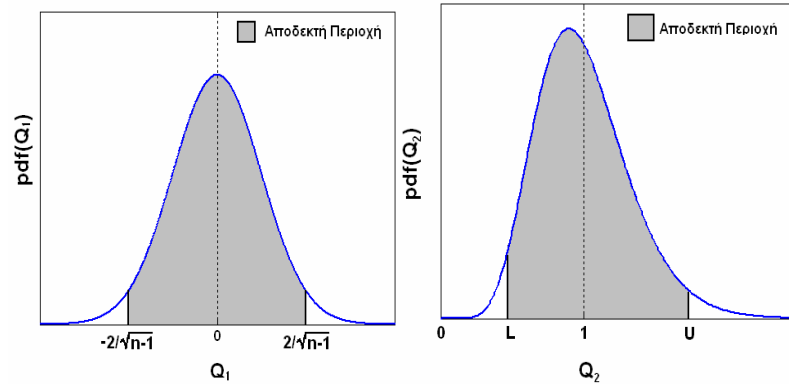
- Στατιστική τιμή  $Q_2$

Η ίδια διαδικασία μπορεί να ακολουθηθεί και για άλλα στατιστικά μεγέθη όπως η τιμή που δίδεται από:

$$Q_2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n \varepsilon_i^2 \quad (2.40)$$

Θεωρώντας ότι τα σφάλματα ακολουθούν την κανονική κατανομή, τότε το  $Q_2$  ακολουθεί την κατανομή “Chi square”, με μέση τιμή 1. Η κατανομή αυτή είναι μια μη συμμετρική κατανομή για την περίπτωση μικρού αριθμού δεδομένων ( $n < 40$ ), οπότε για τον εντοπισμό της περιοχής με επίπεδο εμπιστοσύνης 95% χρησιμοποιούνται πίνακες που δίδονται στην διεθνή βιβλιογραφία ([Journel & Huijbregts, 1978](#)).





Σχήμα 2.7: Κατανομή συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της  $Q_1$  και  $Q_2$

Για την επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων του ημιβαριογράμματος πρέπει να ελέγχεται αν:

- το  $Q_1$  είναι κοντά στο μηδέν;
- το  $Q_2$  είναι κοντά στη μονάδα;
- Τα σφάλματα  $\varepsilon$  ακολουθούν την κανονική κατανομή και είναι ασυσχέτιστα

## Κεφάλαιο 3: Περιγραφή Γεωστατιστικού Αλγορίθμου KRIGSTATv2.0

### 3.1. Γενικά

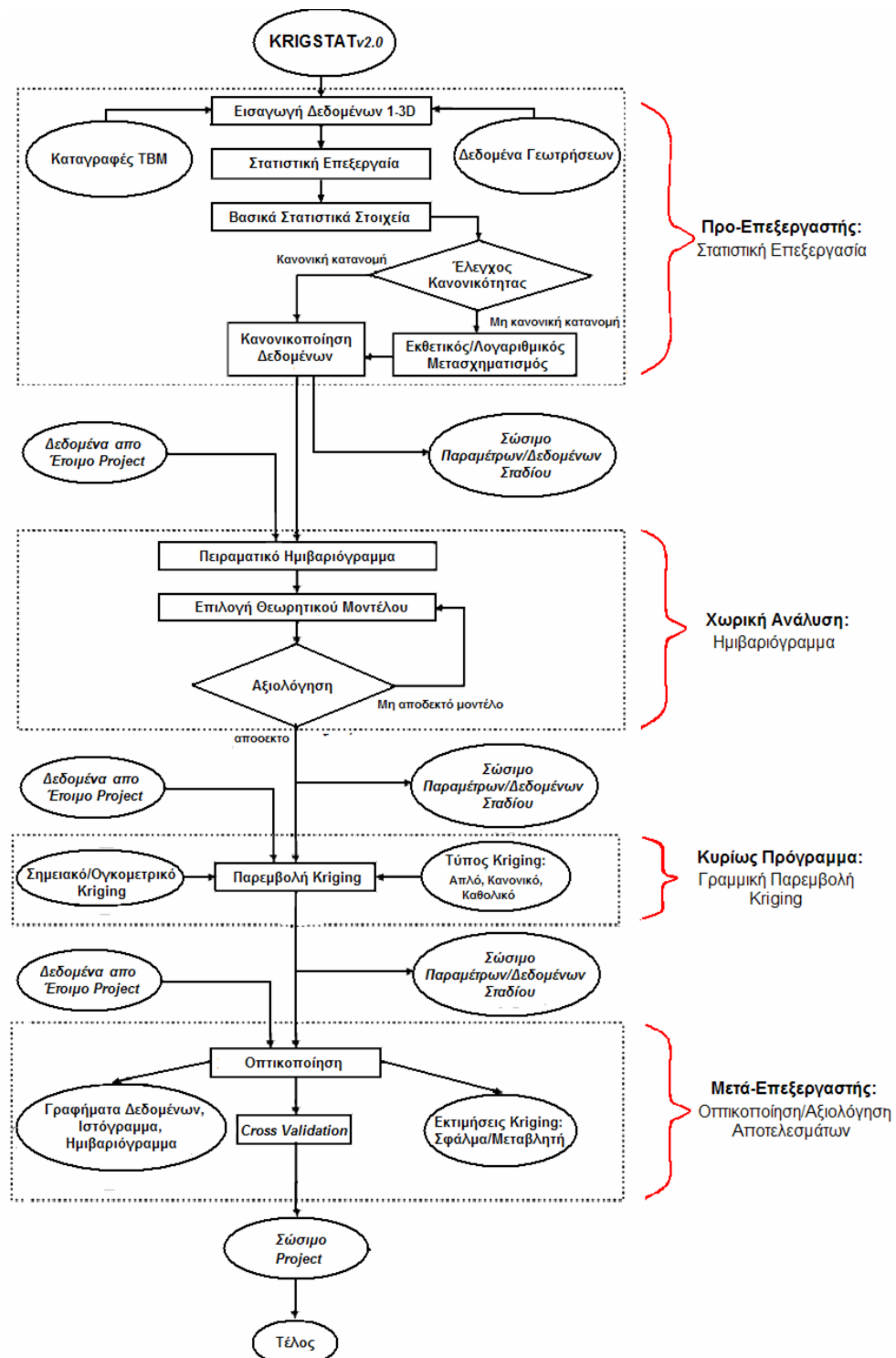
Όπως προαναφέρθηκε η μέθοδος γραμμικής παρεμβολής Kriging χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της ειδικής ενέργειας του TBM και του δείκτη ποιότητας της βραχομάζας κατά την εξόρυξη τριών σηράγγων συνολικού μήκους περίπου 9km. Η χρήση της τεχνικής αυτής έχει τα πλεονεκτήματα του ότι είναι απλή στην χρήση της, είναι γρήγορη και η πρόβλεψη προκύπτει με ελαχιστοποίηση του σφάλματος καθώς θεωρείται ως ο Βέλτιστος Αμερόληπτος Γραμμικός Εκτιμητής (BLUE) μεταξύ των σημείων δειγματοληψίας.

Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την γεωστατιστική επεξεργασία των δεδομένων είναι:

1. Μπορεί η ανισοτροπία που πολλές φορές παρουσιάζουν τα γεωλογικά υλικά να προσδιορισθεί και να ληφθεί υπόψιν στην εκτίμηση που με άλλες μεθόδους παρεμβολής είναι αδύνατον να επιτευχθεί.
2. Τα δεδομένα πολλές φορές προέρχονται από διαφορετικές πηγές και από διαφορετικές περιοχές. Έτσι η χρήση του Kriging για την πρόβλεψη στο πεδίο είναι πιο αντιπροσωπευτική καθώς όλη η πληροφορία συνδυάζεται για να προκύψουν χρήσιμες συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων εξορυξιμότητας και αντοχής της βραχομάζας.
3. Ο συνδυασμός μονοδιάστατων δεδομένων (1D) του TBM με τρισδιάστατα γεωλογικά και γεωτεχνικά δεδομένα κατά την διάρκεια της γεωλογικής έρευνας μπορούν να συνδυαστούν για την δημιουργία ενός καταλληλότερου γεωτεχνικού προτύπου γύρω από την περιοχή που γίνεται η εκσκαφή της σήραγγας.

### 3.2. Διάγραμμα Ροής

Στο Σχ.3.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του νέου βελτιωμένου γεωστατιστικού αλγορίθμου, σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN-77. Η πρώτη απλοποιημένη έκδοση του αλγορίθμου αυτού παρουσιάστηκε στην εργασία [Stavropoulou et. al. \(2007\)](#) και έγινε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος TUNCONSTRUCT (<http://www.tunconstruct.org/>). Άλλα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι [Carr et. al., 1985](#), [Deutsch & Journel, 1992](#), [Marcotte, 1991](#). Οι βελτιωμένες βασικές υπορουτίνες του αλγορίθμου μετατράπηκαν σε μορφή DLL που είναι συμβατή με το περιβάλλον του λογισμικού Matlab. Με τον τρόπο αυτό συνδυάζονται η ταχύτητα επίλυσης της Fortran και η χρήση των γραφικών και άλλων εργαλείων του Matlab ([Martinez, 2002](#)). Ο αλγόριθμος αποτελείται από τέσσερα βασικά τμήματα τα οποία είναι: α) Ο προεπεξεργαστής στον οποίο γίνεται η βασική στατιστική επεξεργασία, β) η χωρική ανάλυση όπου υπολογίζεται η χωρική εξάρτηση των δεδομένων με την χρήση της στατιστικής τιμής του ημιβαριογράμματος, γ) το κυρίως μέρος της εκτίμησης με την μέθοδο Kriging και δ) το μεταεπεξεργαστή όπου τα αποτελέσματα της γεωστατιστικής επεξεργασίας οπτικοποιούνται, ελέγχονται και αποθηκεύονται.



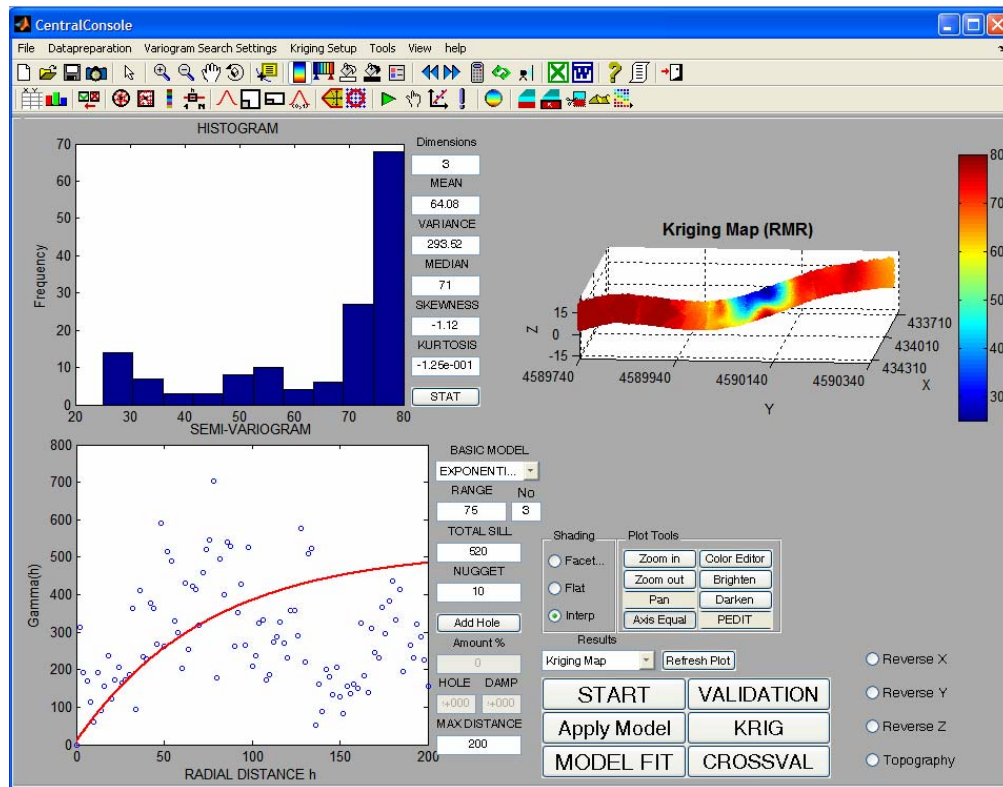
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής γεωστατιστικού κώδικα

Οι βελτιώσεις που έγιναν στον αλγόριθμο KRIGSTATv2.0 που όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιήθηκε ως εργαλείο για τους σκοπούς της παρούσης εργασίας, είναι:

- Αυτοματοποίηση όλης της γεωστατιστικής επεξεργασίας με την δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος (GUI) στο MATLAB.
- Βελτίωση της προεπεξεργασίας με την διαμόρφωση των εξής δυνατοτήτων:
  - Προσδιορισμό-μετατροπή των δεδομένων σε κανονικά κατανεμημένα δεδομένα
  - Δυνατότητα προσδιορισμού και αφαίρεση της τάσης από τα δεδομένα με την χρήση πολωνυμικών ή και άλλων συναρτήσεων
  - Οπτικοποίηση των επεξεργασμένων δεδομένων (ιστογράμματα, αθροιστικές κατανομές, τρισδιάστατα διαγράμματα των δεδομένων πριν και μετά την επεξεργασία)
  - Ικανότητα ανάλυσης κάθε γεωλογικού σχηματισμού που περιλαμβάνεται στο γεωλογικό μοντέλο της εξεταζόμενης περιοχής, ξεχωριστά
- Βελτίωση της διαδικασίας υπολογισμού του πειραματικού ημιβαριογράμματος και της προσαρμογής του θεωρητικού με την εισαγωγή των δυνατοτήτων:
  - Αυτόματου υπολογισμού της ανισοτροπίας
  - Δυνατότητα χρήσης της ανισοτροπίας ζώνης
  - Εισαγωγή περισσότερων θεωρητικών μοντέλων ημιβαριογραμμάτων εκτός αυτών που προϋπήρχαν
  - Δυνατότητα υπέρθεσης πολλαπλών ημιβαριογραμμάτων για την δημιουργία του τελικού θεωρητικού μοντέλου.
  - Δυνατότητα παραμετρικής ανάλυσης για την εύρεση του βέλτιστου θεωρητικού μοντέλου
  - Δυνατότητα παραμετρικού υπολογισμού του ημιβαριογράμματος με αλλαγή των παραμέτρων της μάσκας έρευνας.
  - Αυτόματη επιλογή των παραμέτρων του ημιβαριογράμματος με την χρήση είτε της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων, είτε της σταθμισμένης ελαχίστων τετραγώνων με βάση τα σημεία ή την διασπορά.
  - Δυνατότητα εξαίρεσης σημείων με μεγάλη διασπορά ή με μικρό αριθμό ζευγών από την προσαρμογή του μοντέλου.
  - Δυνατότητα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων (ισότροπο – ανισότροπο ημιβαριογράμμα, ζεύγη σημείων, συντελεστών βαρύτητας)
- Στο στάδιο της εκτίμησης έγιναν οι εξής βελτιώσεις/προσθήκες:
  - Δυνατότητα υπολογισμού του kriging σε πεδίο δεικτών IK
  - Δυνατότητα υπολογισμού σημειακού/ογκομετρικού kriging σε μη κανονικό κάρναβο σημείων.
  - Δυνατότητα εισαγωγής των σημείων εκτίμησης από εξωτερικό αρχείο προερχόμενο από κάποιο σχεδιαστικό πρόγραμμα.
  - Δυνατότητα εισαγωγής ή προσδιορισμού τοπογραφίας του κάρναβου εκτίμησης.
  - Δυνατότητα τμηματικής επεξεργασίας των δεδομένων πράγμα που διευκολύνει τον έλεγχο, αυξάνει την ταχύτητα και επιτρέπει την ξεχωριστή επεξεργασία δεδομένων σε ανομοιογενές μέσο (περίπτωση διαφορετικών γεωλογικών σχηματισμών)
  - Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων σε μορφή τομών, επιφανειών, αναπαράσταση των ογκοτεμαχίων του ογκομετρικού kriging.
  - Διασταυρωμένη αξιολόγηση (cross validation)
- Τέλος υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης ξεχωριστά κάθε σταδίου της επεξεργασίας, είτε σε μορφή αρχείου δεδομένων και σε φύλλα εργασίας excel, είτε σαν καινούργια εργασία με την δυνατότητα χρήσης όλων των παραμέτρων του κάθε σταδίου σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

### 3.3. Βασικά Τμήματα Αλγορίθμου

Στο Σχ. 3.2 παρουσιάζεται το "παράθυρο" που εμφανίζεται κατά την γεωστατιστική ανάλυση με τον αλγόριθμο KRIGSTATv2.0.



Σχήμα 3.2: Βασικό παράθυρο γεωστατιστικού κώδικα kriging.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα ροής τα στάδια της γεωστατιστικής ανάλυσης είναι τα εξής:

- A. Προεπεξεργασία των δεδομένων
  - A.1. Έλεγχος και διόρθωση των δεδομένων.
  - A.2. Ομαδοποίηση/ εξομάλυνση των δεδομένων
  - A.3. Υπολογισμός της στατιστικής κατανομής και των παραμέτρων αυτής (μέση τιμή, διασπορά, κύρτωση, ασυμμετρία κ.τ.λ.)
  - A.4. Έλεγχος αν χρειάζεται μετασχηματισμός των δεδομένων ώστε να προσεγγίζουν την κανονική κατανομή (KS-test).
  - A.5. Κανονικοποίηση των δεδομένων σε στατιστικά ισοδύναμους και απλούστερους αριθμούς.
- B. Χωρική ανάλυση
  - B.1. Υπολογισμός του πειραματικού ημιβαριογράμματος
  - B.2. Προσαρμογή θεωρητικού ημιβαριογράμματος με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.
  - B.3. Αξιολόγηση του ημιβαριογράμματος
- Γ. Γραμμική παρεμβολή με την μέθοδο Kriging
- Δ. Έλεγχος/εξαγωγή/γραφική απεικόνιση της λύσης παρεμβολής.

Οι βασικές υπορουτίνες του αλγορίθμου καθώς και η λειτουργία τους παρουσιάζονται στον Πίν.3.1:

Πίνακας 3.1: Βασικές υπορουτίνες υπολογιστικού αλγορίθμου KRIGSTAT

Τμήμα Αλγορίθμου	Υπορουτίνα	Λειτουργία
A.1.	CORRECT	Έλεγχος/Διόρθωση
A.2. Ομαδοποίηση/Εξομάλυνση	DRILLHOLE	Σύνθετα δείγματα γεωτρήσεων
	RANDCOMP	Σφαιρική μάσκα
	BLCOMP	Ορθογωνική μάσκα
	REDDAT	Μείωση δεδομένων
A.3.	STAT	Στατιστικά στοιχεία
A.4.	KST	Έλεγχος κανονικότητας (KS)
	TRANSVAL	Μετασχηματισμός δεδομένων
A.5.	NORMALIZE	Κανονικοποίηση
B.1.	SEMIVAR	Πειραματικό ημιβαριόγραμμα
B.3.	QVAL	Αξιολόγηση ημιβαριογράμματος
	LEAVE1OUT	
Γ.	BLKKRIG3D	Kriging

Ο έλεγχος της αξιοπιστίας και της ταχύτητας του αλγορίθμου KRIGSTAT έγινε με την επίλυση τριών περιπτώσεων εξόρυξης με την χρήση μηχανήματος ολομέτωπης κοπής TBM, οι οποίες παρουσιάζονται στο κεφάλαιο (5).

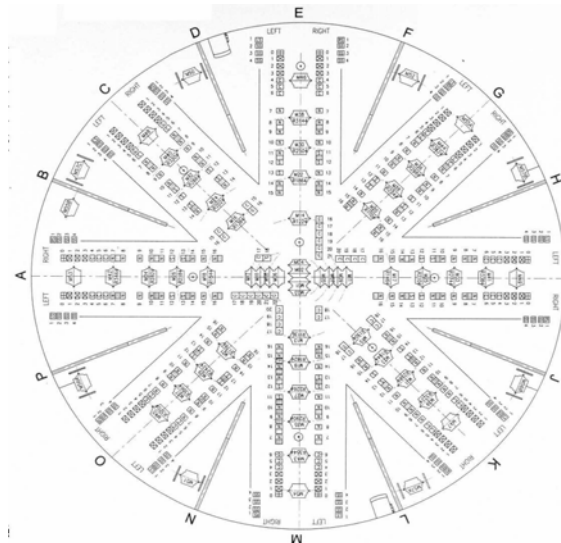
## Κεφάλαιο 4: Χαρακτηριστικά Λειτουργίας TBM

### 4.1. Γενικά

Η λειτουργία του μηχανήματος ολομέτωπου κοπής (TBM) εξαρτάται από πολλές παραμέτρους που σχετίζονται από τους διαφορετικούς τρόπους κοπής και από τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος που εξορύσσεται. Σημαντικός παράγοντας είναι η γεωμετρία της κεφαλής του κοπτικού (Σχ.4.1) και των κοπτικών δίσκων (Σχ.4.2), με βάση την οποία καθορίζονται οι δυνάμεις που ασκούνται στο πέτρωμα.

Οι βασικότεροι από τις παραμέτρους σχεδιασμού και λειτουργίας του TBM είναι οι εξής<sup>1</sup>:

- i. Η γεωμετρία της κεφαλής του κοπτικού που περιλαμβάνει:
  - α. την γεωμετρία των δίσκων κοπής που περιλαμβάνει:
    - την γωνία και την καμπυλότητα της ακμής των κοπτικών δίσκων, ( $\alpha$ , deg)
    - το πάχος ( $w$ ), και
    - την διάμετρο ( $d$ )
  - β. τον αριθμό των δίσκων κοπής ( $N$ )
  - γ. το πως έχουν καταταξιολογηθεί οι δίσκοι στην κοπτική κεφαλή (βλ. Σχ.4.1).
- ii. Η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κοπών  $S$  [L], που μπορεί να προσδιορισθεί από την κατανομή των δίσκων κοπής επί της κεφαλής.
- iii. Ο τρόπος κοπής του TBM (π.χ. ανοικτό τύπο, αεροσυμπιεζόμενο ή EPB)
- iv. Το μήκος της σήραγγας (chainage) ή τον αύξοντα αριθμό του δακτυλίου υποστύλωσης από σκυρόδεμα,  $C$  [L]
- v. Η ροπή που ασκείται στη κεφαλή,  $T$  [F L]
- vi. Η δύναμη ώσης που ασκείται στη κεφαλή,  $F$  [F]
- vii. Η γωνιακή ταχύτητα της κεφαλής,  $\omega$  [1/T]
- viii. Ο ρυθμός διεξόδου της κεφαλής,  $PR$  [L/T]
- ix. Ο ρυθμός προχώρησης του TBM,  $AR$  [L/T]
- x. Η κλίση της σήραγγας (διεύθυνση, βύθιση)
- xi. Η μέγιστη ταχύτητα των κοπτικών δίσκων,  $v_{max}$  [L/T]
- xii. Η περιεκτικότητα σε  $SiO_2$  (%) του πετρώματος (ή άλλων φθοροποιών ορυκτών).

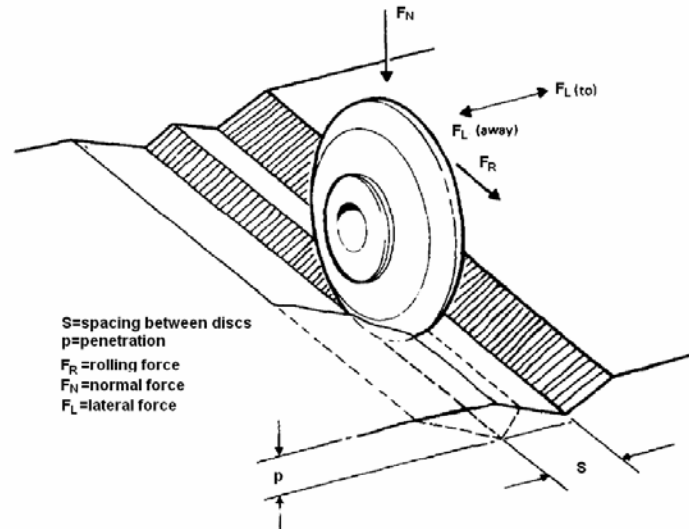


Σχήμα 4.1: Τυπική πρόσοψη κοπτικού άκρου TBM  
(πηγή: Michel de Broissia of BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS)

<sup>1</sup> [L], [F] και [T] οι μονάδες μέτρησης του μήκος, δύναμης και χρόνου αντίστοιχα

Τα βασικά μεγέθη του TBM που μετριοούνται ή υπολογίζονται κατά μήκος σήραγγας είναι:

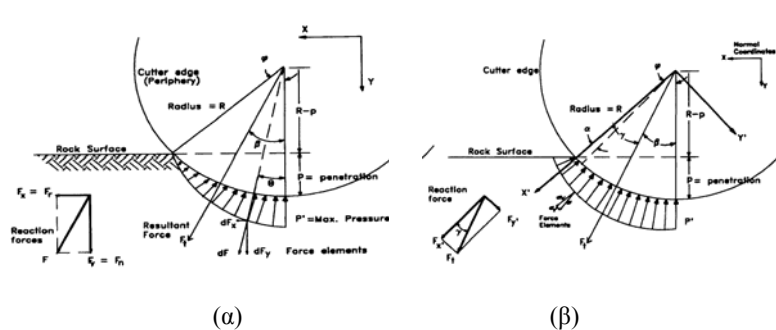
- i. την διείσδυση ανά περιστροφή,  $p$  [L]
- ii. την μέση απόσταση μεταξύ των γειτονικών κοπών,  $S$  [L]
- iii. την μέση δύναμη ώθησης του κοπτικού δίσκου (Thrust),  $F_N$  [F]
- iv. την μέση ροπή της κοπτικής κεφαλής,  $T_R$  [FL]
- v. την ειδική ενέργεια κοπής,  $SE$  [F L-2]
- vi. τη φθορά των κοπτικών,  $W$  [L]



Σχήμα 4.2: Γεωμετρία και δυνάμεις που ασκούνται σε ένα κοπτικό δίσκο (Snowdon et. al., 1982).

## 4.2 Βασικές σχέσεις

Η κατανομή των δυνάμεων όπως προτείνεται από τους [Rostami & Ozdemir \(1993\)](#) φαίνεται στο Σχ.4.3.



Σχήμα 4.3: Κατανομή πίεσης: α) γραμμική, β) γενική

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα η γωνία επαφής μπορεί να προσδιορισθεί γεωμετρικά σύμφωνα με την σχέση:

$$\varphi = \cos^{-1} \left( \frac{R-p}{R} \right) \quad (4.1)$$

όπου  $R$  η ακτίνα και  
 $p$  η διείσδυση του κοπτικού

Στην γενική περίπτωση η κατανομή της πίεσης στην επαφή κοπτικού δίσκου-πετρώματος μπορεί να περιγραφεί σαν συνάρτηση της γωνίας επαφής με την χρήση της εκθετικής σχέσης:



$$P = P' \left( 1 - \frac{\theta}{\varphi} \right)^n, \quad 0 \leq \theta \leq \varphi \quad (4.2)$$

όπου  $P'$  η μέγιστη πίεση. Οι διάφορες τιμές του εκθέτη  $n$  προσδιορίζουν την κατανομή των πιέσεων, με τις συνηθέστερες κατανομές να είναι οι εξής:

1. Η ομοιόμορφη κατανομή,  $n=0$ .
2. Η γραμμική,  $n=1$ .

Μεγάλες τιμές του  $n$  οδηγούν την συνισταμένη δύναμη προς τον άξονα συμμετρίας του κοπτικού ( $\theta \rightarrow 0^\circ$ ). Αντιθέτως μικρές τιμές οδηγούν σε συνισταμένη δύναμη με  $\theta \rightarrow \varphi$ . Τέλος αρνητικές τιμές οδηγούν σε κατανομές με πιέσεις μεγαλύτερες στα άκρα του κοπτικού.

Η γωνία  $\beta$  της συνισταμένης δύναμης βρίσκεται από τη σχέση:

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{F_R}{F_N} \right) \quad (4.3)$$

όπου ο λόγος της ορθής δύναμης προς την δύναμη κύλισης καλείται συντελεστής κοπής.

$$CC = \frac{F_R}{F_N} \quad (4.4)$$

Ολοκληρώνοντας την εξ. (4.2) στην επιφάνεια επαφής για  $n=1$ , προκύπτουν οι συνισταμένες δυνάμεις ως εξής:

$$\begin{aligned} F_x &= \int_0^\varphi dF_x = \int_0^\varphi dF \sin \theta = \int_0^\varphi (P R w \sin \theta) d\theta = \frac{RwP'}{\varphi} (\varphi - \sin \varphi) \\ F_y &= \int_0^\varphi dF_y = \int_0^\varphi dF \cos \theta = \int_0^\varphi (P R w \cos \theta) d\theta = \frac{RwP'}{\varphi} (1 - \cos \varphi) \end{aligned} \quad (4.5)$$

όπου  $w$  το πλάτος της ακμής του κοπτικού.

Ο συντελεστής κοπής για την περίπτωση της γραμμικής κατανομής βρίσκεται από την σχέση:

$$CC = \frac{F_x}{F_y} = \frac{\varphi - \sin \varphi}{1 - \cos \varphi} \quad (4.6)$$

Η ομοιόμορφη κατανομή ( $n=0$ ) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τα περισσότερα κοπτικά άκρα που χρησιμοποιούνται και κυρίως για κοπτικά σταθερής διατομής (Constant Cross Section) με πλάτος ακμής  $\sim 12.5\text{mm}$ .

Όπως είναι προφανές η γωνία της συνισταμένης δύναμης είναι  $\beta=\varphi/2$ , έτσι ο συντελεστής κοπής για την περίπτωση αυτή δίδεται ακολούθως:

$$CC = \tan \frac{\varphi}{2} \quad (4.7)$$

Χρησιμοποιώντας την εξ. (4.4) η δύναμη κύλισης μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση της ορθής δύναμης με την ακόλουθη σχέση:

$$F_R = CC \cdot F_N \quad (4.8)$$

όπου η ορθή δύναμη μπορεί να εκτιμηθεί από την συνολική δύναμη και των αριθμό των κοπτικών δίσκων:

$$F_N = \frac{F}{N} \quad (4.9)$$

Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού της δύναμης κύλισης  $F_R$  είναι με την χρήση της προσεγγιστικής σχέσης:

$$F_R \approx \frac{T}{0.3 D N} \quad (4.10)$$

όπου η ροπή  $T$  είτε μετράται, είτε εκτιμάται με την χρήση της εμπειρικής σχέσης που προτάθηκε από τον [Fukui & Okubo \(2005\)](#) και εκφράζεται ως:

$$\frac{T}{F} = 0.06 \sqrt{p}, \quad [T/F] = m, [p] = mm \quad (4.11)$$

όπου το βάθος της διείσδυσης σε κάθε περιστροφή του κοπτικού μπορεί να βρεθεί με την χρήση του ρυθμού διείσδυσης και της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του κοπτικού, τα οποία είναι μετρούμενα μεγέθη κατά την διάρκεια της κοπής, σύμφωνα με την χρήση της σχέσης:

$$p = \frac{PR}{\omega} \quad (4.12)$$

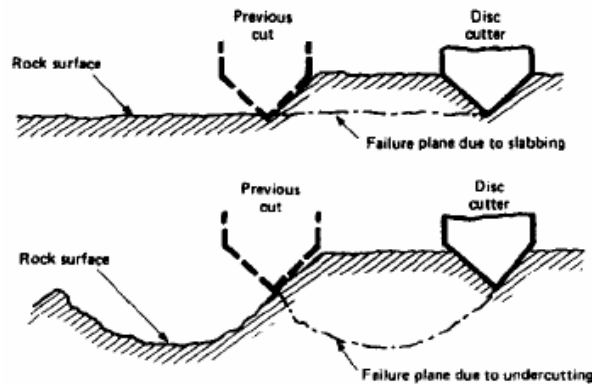
Άλλη μια σημαντική παράμετρος του TBM είναι η ειδική ενέργεια κοπής που περιγράφει την ενέργεια που πρέπει να δαπανηθεί για την αφαίρεση μιας μονάδας όγκου πετρώματος. Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό η ειδική ενέργεια μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$SE = \frac{F_R \cdot L}{V} = \frac{F_R \cdot L}{p \cdot s \cdot L} = \frac{F_R}{p \cdot s} \quad (4.13)$$

όπου  $L$  είναι το συνολικό μήκος το οποίο διάνυσε ο κοπτικός δίσκος και  $s$  η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κοπών.

### 4.3. Μηχανισμός Θραύσης Πετρώματος από Συνδυασμό Κοπτικών

Η θραύση του πετρώματος με την χρήση του TBM επιτυγχάνεται με την χρήση «συνεργαζόμενων» γειτονικών δίσκων κατά τις λεπτομέρειες του Σχ.4.1. Η δημιουργία εφελκυστικών ή διατμητικών ρωγμών που αναπτύσσονται μεταξύ δυο γειτονικών κοπών με απόσταση  $S$ , είναι ο κύριος μηχανισμός αστοχίας – κοπής του πετρώματος. Ο [Snowdon και άλλοι ερευνητές \(1982\)](#) παρατήρησαν δυο διαφορετικούς μηχανισμούς θραύσης του πετρώματος μεταξύ δυο διαδοχικών κοπών, όπως παρουσιάζεται στο Σχ.4.4. Στα σκληρότερα πετρώματα και στις μικρότερες διεισδύσεις, η αστοχία είναι σχεδόν παράλληλη με την επιφάνεια κοπής. Αντιθέτως σε μαλακότερα πετρώματα και σε μεγάλες διεισδύσεις η επιφάνεια αστοχίας πηγαίνει βαθύτερα σχηματίζοντας μια καμπυλόγραμμη επιφάνεια αστοχίας.



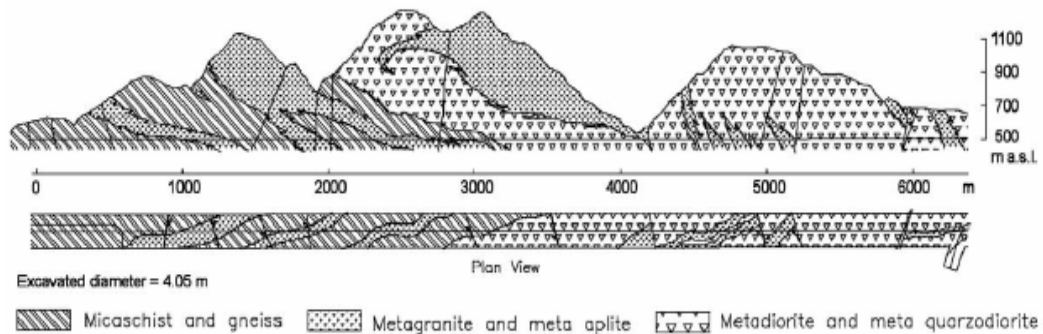
Σχήμα 4.4: Αστοχία πετρώματος σύμφωνα με το βάθος κοπής ([Snowdon et. al., 1982](#)).

## Κεφάλαιο 5: Επεξεργασία Δεδομένων από Εξόρυξη Σηράγγων με TBM

### 5.1. Σήραγγα Pieve της Βόρειας Ιταλίας

#### 5.1.1. Γενικά

Το μεγαλύτερο μέρος των σηράγγων στο Pieve βρίσκονται μέσα στην ζώνη Sesia-Lanzo του Αυστροαλπικού πεδίου ([Compagnoni et. al., 1977](#), [Dal Piaz et. al., 1972](#), [Reinhardt, 1966](#)). Οι σχηματισμοί που έχουν εξορυχθεί αποτελούνται από δύο συμπλέγματα μεταμορφωμένων πετρωμάτων από γνεύσιο και μαρμαρυγιακό σχιστόλιθο με παρεμβολές μεταδιορίτη, με μικρές εμφανίσεις χαλαζιακού μεταδιορίτη και μεταγάβρου. Στα πρώτα χιλιόμετρα της εκσκαφής της σήραγγας (1.5 km) συναντάται μεταγρανίτης ο οποίος ανήκει στο Πεννιδικό πεδίο (τεκτονική μονάδα M. Rosa) και για μικρό μήκος (~100m) συναντάται χλωριτικός και αμφιβολιτικός σχιστόλιθος ο οποίος διαχωρίζει το Αυστροαλπικό από το Πεννιδικό πεδίο.



Σχήμα 5.1: Γεωλογική τομή κατά μήκος της σήραγγας στο Pieve.

Πίνακας 5.1: Κύριες μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων στην σήραγγα Pieve ([Sapigni et al., 2002](#))

Πέτρωμα	UCS (MPa)	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Έλεγχος Σκληρότητας Διεισδυτή (u.c.)	Έλεγχος σκληρότητας Knoop (GPa)	Διατρησιμότητα (mm <sup>-1</sup> )	Εφαπτομενικό μέτρο του Young (GPa)
Μαρ/κός Σχιστόλιθος	124-215	5-9	7.5-9.7	5.2-8.5	0.11-0.22	28
Μεταδιορίτης	171-221	8-13	11	6.2-7	0.03-0.05	46-100
Μεταγρανίτης	146-296	0.7-7	7.1-7.4	7-10	0.06-0.09	24-38

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του TBM για το Pieve δίδονται στον ακόλουθο Πίν. 5.2:

Πίνακας 5.2: Στοιχεία και εξοπλισμός για την σήραγγα Pieve (*Sapigni et. al., 2002*)

	Pieve
Συνολικό μήκος της σήραγγας (m)	9600
Ολικός χρόνος εκσκαφής (ημέρες)	809
Μήκος χαρτογραφημένης περιοχής (m)	6400
Διάμετρος εκσκαφής (m)	4.05
Κλίση της σήραγγας (°)	~0
Μοντέλο TBM	Robbins 1111-234-3
Τύπος TBM	Διπλής ασπίδας (Double shield)
Αριθμός κοπτικών δίσκων	27
Απόσταση μεταξύ των κοπτικών (mm)	75
Διάμετρος κοπτικών (in)	17
Μέγιστη ώθηση (kN)	4602
Βάθος διάτρησης (m)	0.63
Καμπυλότητα κοπτικής κεφαλής	Επίπεδη
Ρυθμός περιστροφής κοπτικής κεφαλής (rpm)	11.3

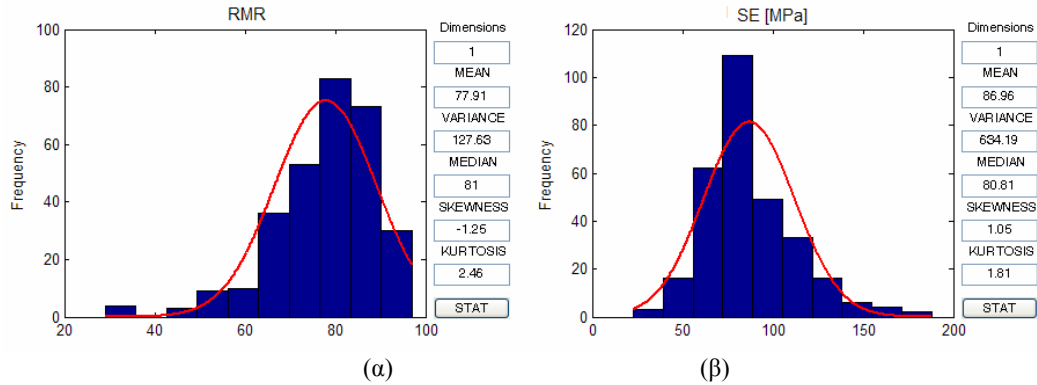
### 5.1.2. Στατιστική Επεξεργασία των Δεδομένων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τα πρώτα μέτρα της μηκοτομής της σήραγγας φαίνονται στον Πίν.5.3.

Πίνακας 5.3: Δεδομένα TBM και ταξινόμησης της βραχομάζας κατά μήκος της σήραγγας Pieve

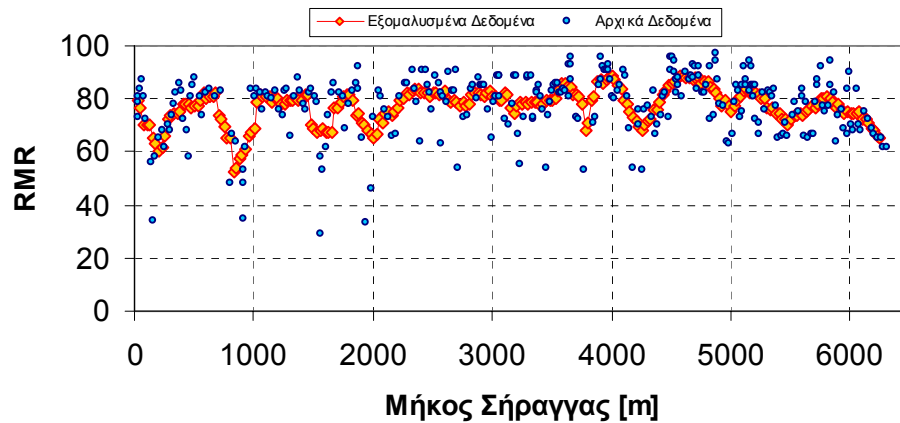
Μηκοτομή (m)	Λιθολογία	BRMR	RMR89	Ωθηση (kN)	Ωθηση (ton)	PR (m/h)	AR (m/h)	p (cm/rev)
30.2	MCS	79	69	5568	0.56	1.6	0.03	0.236
32.7	MCS	73	68	5413	0.54	2.1	0.03	0.310
35.2	MCS	81	76	4949	0.49	1.3	0.10	0.192
52.7	MCS	84	84	4640	0.46	1.3	0.18	0.192
59.6	MCS	87	87	5258	0.53	1.4	0.29	0.206
83.3	MCS	81	76	5877	0.59	1.7	0.34	0.251
97.0	MCS	72	72	5413	0.54	2.2	0.57	0.324
142.0	MCS	56	56	5104	0.51	2.2	0.83	0.324
157.0	MCS	34	34	4330	0.43	2.8	0.63	0.413
173.3	MCS	58	58	3248	0.32	3.5	0.68	0.516
205.6	MCS	65	63	4949	0.49	2.5	0.86	0.369
237.3	MCS	68	68	4330	0.43	2.6	0.68	0.383
259.8	MCS	62	57	4485	0.45	3.0	0.94	0.442
279.8	MCS	70	65	4021	0.40	2.3	0.83	0.339

Τα στατιστικά στοιχεία που αφορούν το δείκτη ποιότητας της βραχομάζας και της ειδικής ενέργειας εξόρυξης του TBM παρουσιάζονται με την μορφή ιστογραμμάτων κατανομής της συχνότητας εμφάνισης στα Σχ.5.2.α,β.

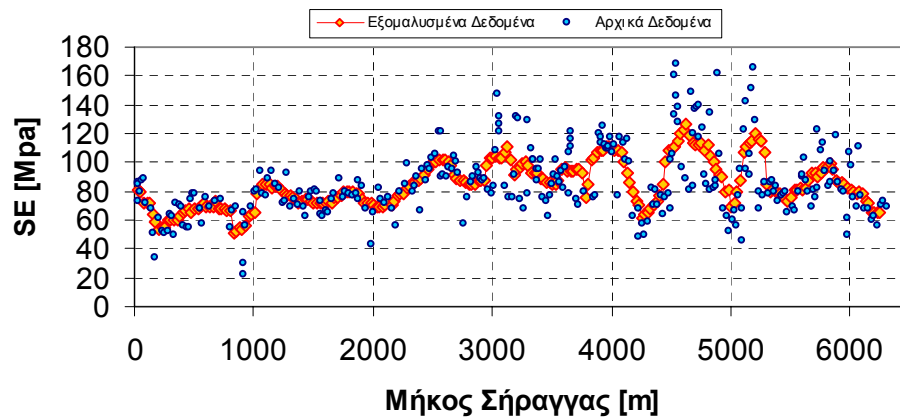


Σχήμα 5.2: Στατιστικά στοιχεία για: α) το RMR, β) την ειδική ενέργεια κοπής (SE)

Για την μείωση και την εξομάλυνση των δεδομένων που είναι απαραίτητη για την αποκοπή του τυχόν θορύβου στις μετρήσεις και τον καλύτερο προσδιορισμό της συσχέτισης των δεδομένων RMR και SE (βλ. Σχ.5.7), έγινε χρήση της τεχνικής των κινούμενων παραθύρων μέσης τιμής που περιγράφεται στο Σχ.2.1.α. Μετά από την εφαρμογή διαφόρων ακτίνων ανίχνευσης επιλέχθηκε η ακτίνα 100m με την οποία παράχθηκαν 250 δεδομένα με απόσταση 25m μεταξύ τους, από τα 301 αρχικά δεδομένα για το RMR και την SE, με την χρήση του αλγορίθμου RANDCOMP. Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται τα δεδομένα που προκύπτουν μετά την εφαρμογή του φίλτρου εξομάλυνσης.

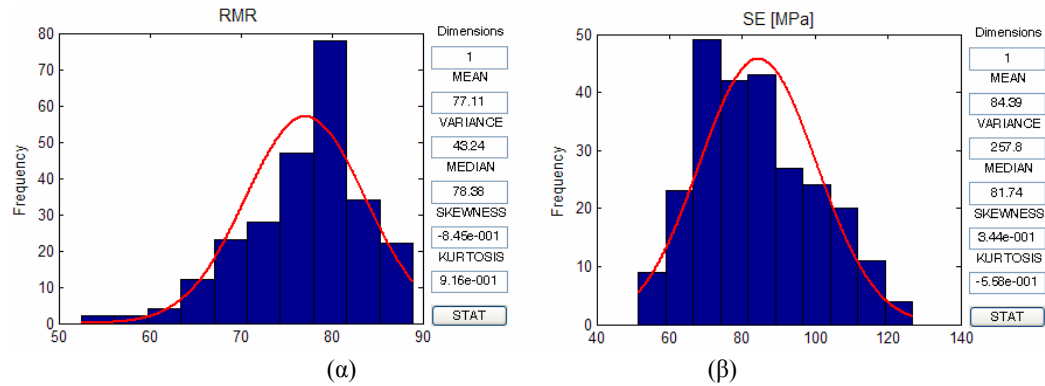


(α)



(β)

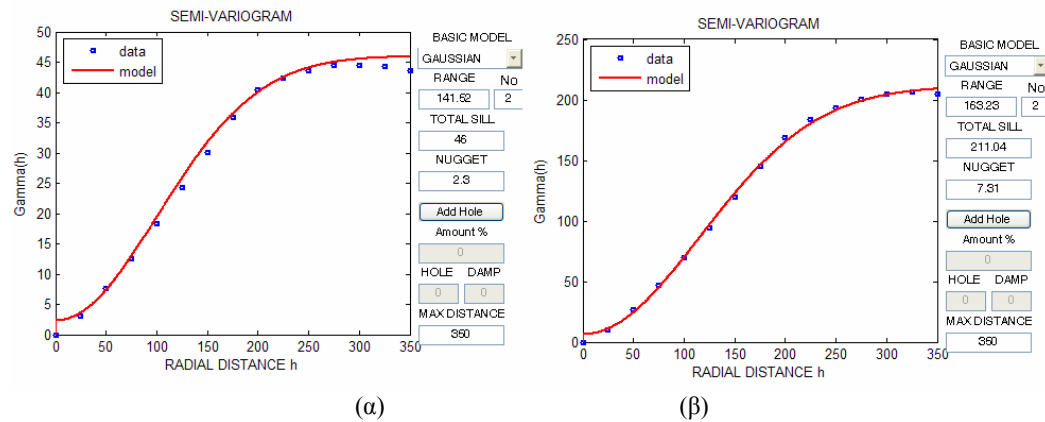
Σχήμα 5.3: Εξομάλυνση δεδομένων για: α) RMR, β) SE



Σχήμα 5.4: Στατιστικά για τα εξομαλυσμένα δεδομένα: α) RMR, β) SE

### 5.1.3. Χωρική Ανάλυση

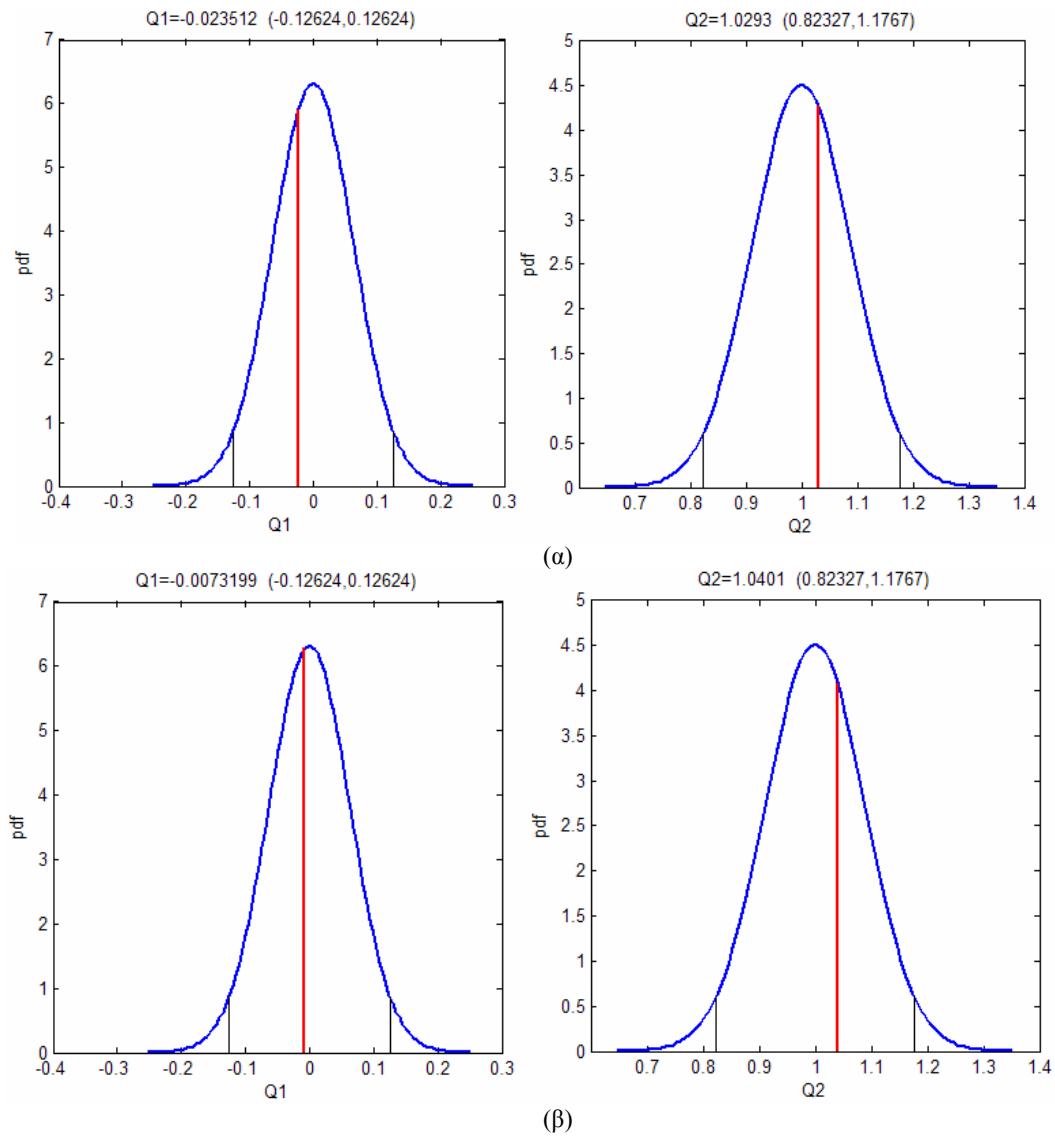
Το επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός της χωρικής εξάρτησης των δεδομένων με τον υπολογισμό του πειραματικού ημιβαριογράμματος με βήμα απόστασης 25m και ανοχή 1% (αλγόριθμος SEMIVAR). Στα δεδομένα προσαρμόζεται με την χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων το γκαουσιανό θεωρητικό ημιβαριόγραμμα με τις παραμέτρους που παρουσιάζονται στο Σχ.5.5:



Σχήμα 5. 5: Ημιβαριόγραμμα για: α) RMR, β) SE

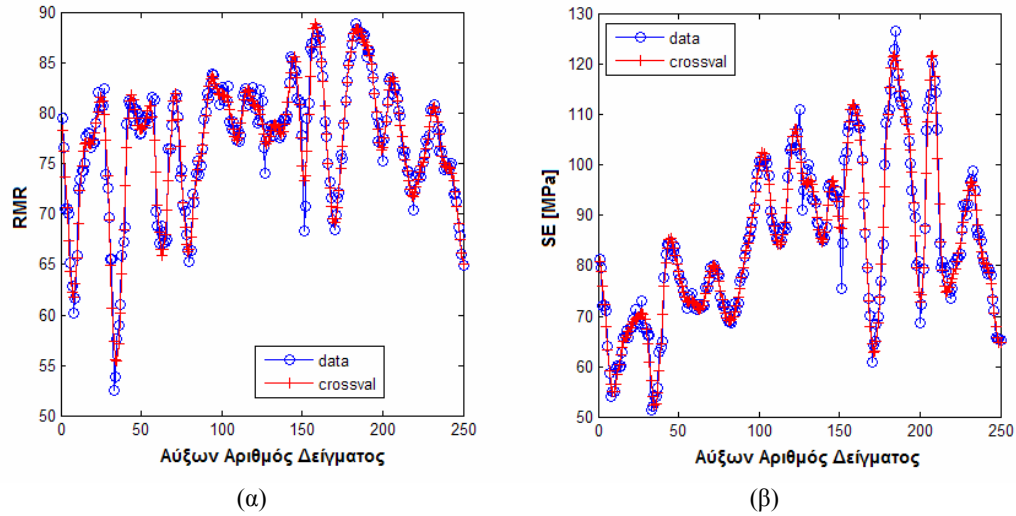
Ο τύπος kriging που χρησιμοποιήθηκε είναι το καθολικό με γειτονιά έρευνας τα 350 μέτρα με τον περιορισμό του ότι τουλάχιστον 15 σημεία χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση, ενώ ως ανώτερο όριο έχουν επιλεγεί τα 30 σημεία.

Με την χρήση των κανονικοποιημένων σφαλμάτων (Q-test) διαπιστώνεται ότι οι παράμετροι των ημιβαριογραμμάτων του Σχ.5.5 και του kriging δίνουν αποδεκτές τιμές (όρια εμπιστοσύνης 95%) των στατιστικών τιμών Q1-Q2 (βλ. Σχ.5.6), άρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό με την μέθοδο kriging σε οποιοδήποτε σημείο της σήραγγας, των δεδομένων RMR και SE.



Σχήμα 5.6: Αξιολόγηση θεωρητικών ημβαριογραμμμάτων για: α) RMR, β) SE

Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της μεθόδου του καθολικού Kriging διαπιστώνεται με την χρήση της διασταυρωμένης αξιολόγησης από όπου τα εξομαλισμένα δεδομένα υπολογίζονται με την εφαρμογή του kriging στις θέσεις των δεδομένων με την χρήση των εκτιμήσεων του kriging σε κανονικό κάρναβο 1258 σημείων:

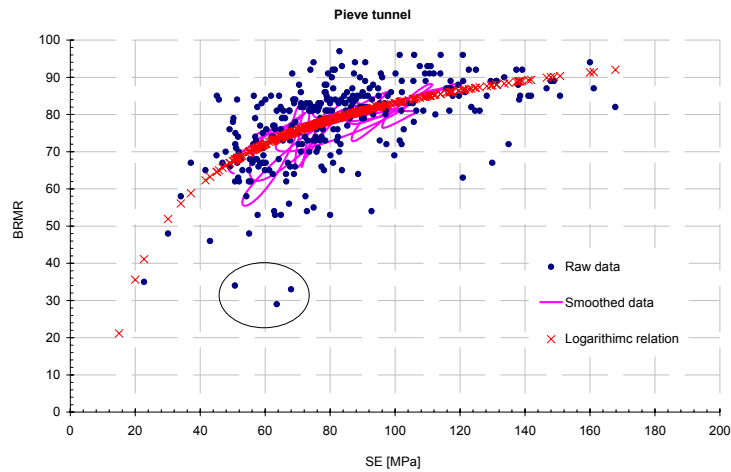


Σχήμα 5.7: Διασταυρωμένη αξιολόγηση μεθόδου kriging για: α) RMR, β) SE

Ο κύριος σκοπός της παραπάνω ανάλυσης, εκτός από τον προσδιορισμό της χωρικής εξάρτησης των δεδομένων BRMR και SE, είναι η εύρεση μιας απλής αναλυτικής σχέσης που να συνδέει τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος (RMR) με την ειδική ενέργεια κοπής του TBM. Η σχέση που βρέθηκε να περιγράφει καλύτερα την εξάρτηση του RMR από την ειδική ενέργεια κοπής (SE), είναι μια κλασματική σχέση πρώτου βαθμού (εξίσωση υπερβολής):

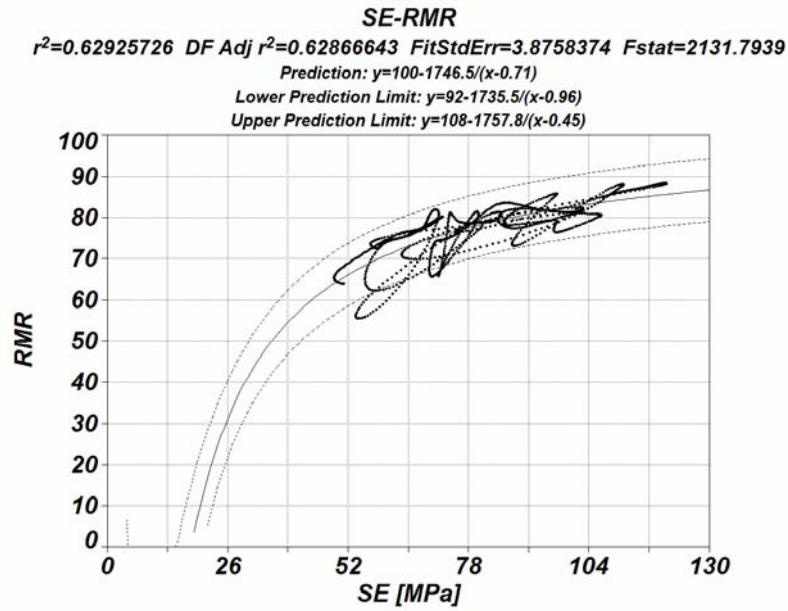
$$RMR = 100 - \frac{1746.5}{SE - 0.71} \quad (5.1)$$

Στο Σχ.5.8.α παρουσιάζεται η συσχέτιση των δεδομένων πριν και μετά την στατιστική επεξεργασία. Η σχέση που περιγράφει την συσχέτιση  $RMR = f(SE)$  μαζί με τα όρια εμπιστοσύνης 95% φαίνεται στο Σχ.5.8.β, για τα επεξεργασμένα δεδομένα όπου η συσχέτιση είναι περισσότερο εμφανής.



(α)





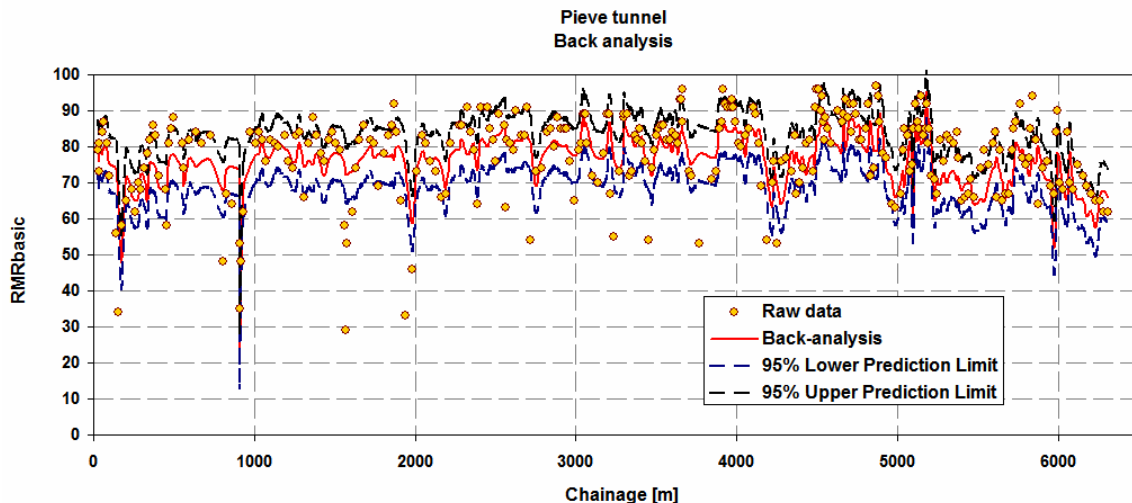
(β)

Σχήμα 5.8: Σχέση ειδικής ενέργειας – RMR

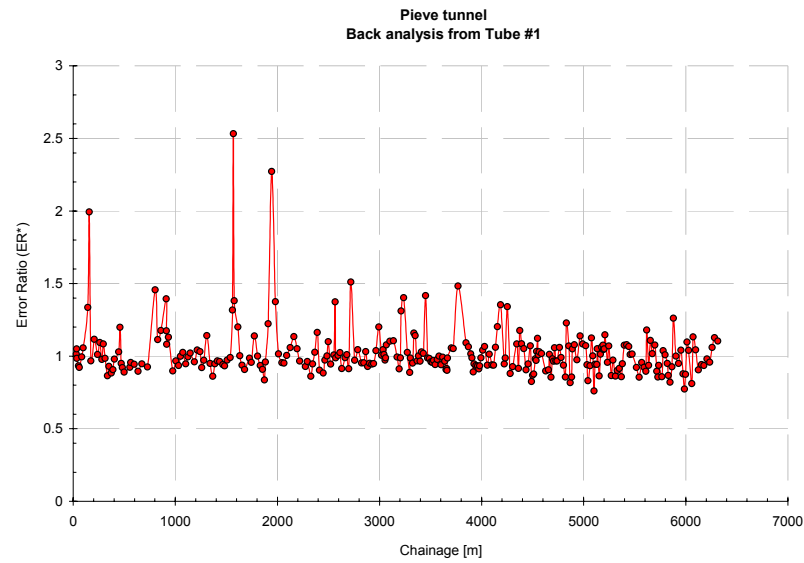
α) συσχέτιση SE-RMR

β) επιλογή της βέλτιστης καμπύλης για τα επεξεργασμένα δεδομένα μαζί με τα όρια βεβαιότητας 95%

Η εξ. (5.1), χρησιμοποιείται για τον ανάδρομο υπολογισμό του RMR από την ειδική ενέργεια εξόρυξης και σύγκριση του με τις μετρήσεις του RMR, με την χρήση των δεδομένων πριν την στατιστική επεξεργασία (βλ. Σχ.5.9.α,β). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περιοχές όπου ο λόγος υπολογισμένης/ μετρούμενης τιμής ξεπερνάει το 1.5, έχουν σημειωθεί με κύκλο στο Σχ.5.9.α, στο οποίο παρατηρείται ότι το RMR είναι σχετικά χαμηλό σε σχέση με την τιμή της ειδικής ενέργειας. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε δύο λόγους: α) είτε το RMR έχει μετρηθεί συντηρητικά από τον γεωτεχνικό μηχανικό, β) είτε η ειδική ενέργεια είναι πολύ υψηλότερη από αυτήν που προβλέπει η σχέση (5.1).



(α)

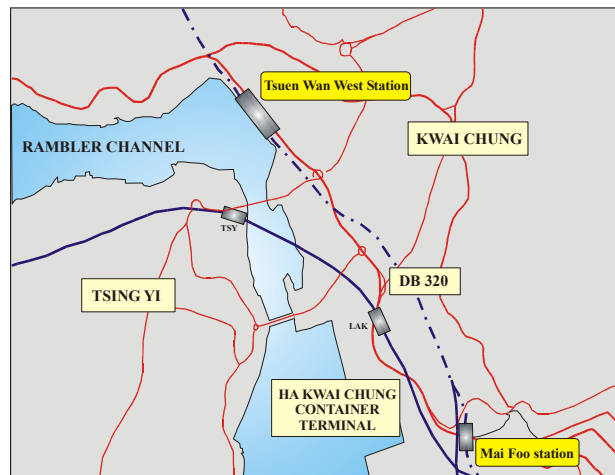


(β)  
Σχήμα 5.9: (α) Σύγκριση του μετρημένου – εκτιμώμενου RMR από την εξ.5.1,  
(β) μεταβολή του λόγου σφάλματος  $ER = \text{υπολογισμένο BRMR} / \text{μετρημένο BRMR}$  κατά μήκος της  
σήραγγας.

## 5.2. Δίδυμη Οδική Σήραγγα στο Χονγκ Κονγκ

### 5.2.1. Γενικά

Το έργο DB320 αποτελεί μέρος της μελέτης KCRC για την οδική σήραγγα που ενώνει τον σταθμό Mai Foo με τον σταθμό στο δυτικό Tsuen Wan στο Χονγκ Κονγκ (Σχ.5.10.). Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης σήραγγας παρουσιάζονται στον Πίν.5.4.



Σχήμα 5.10: Μελέτη KCRC  
(πηγή: Michel deBroissia of BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS).

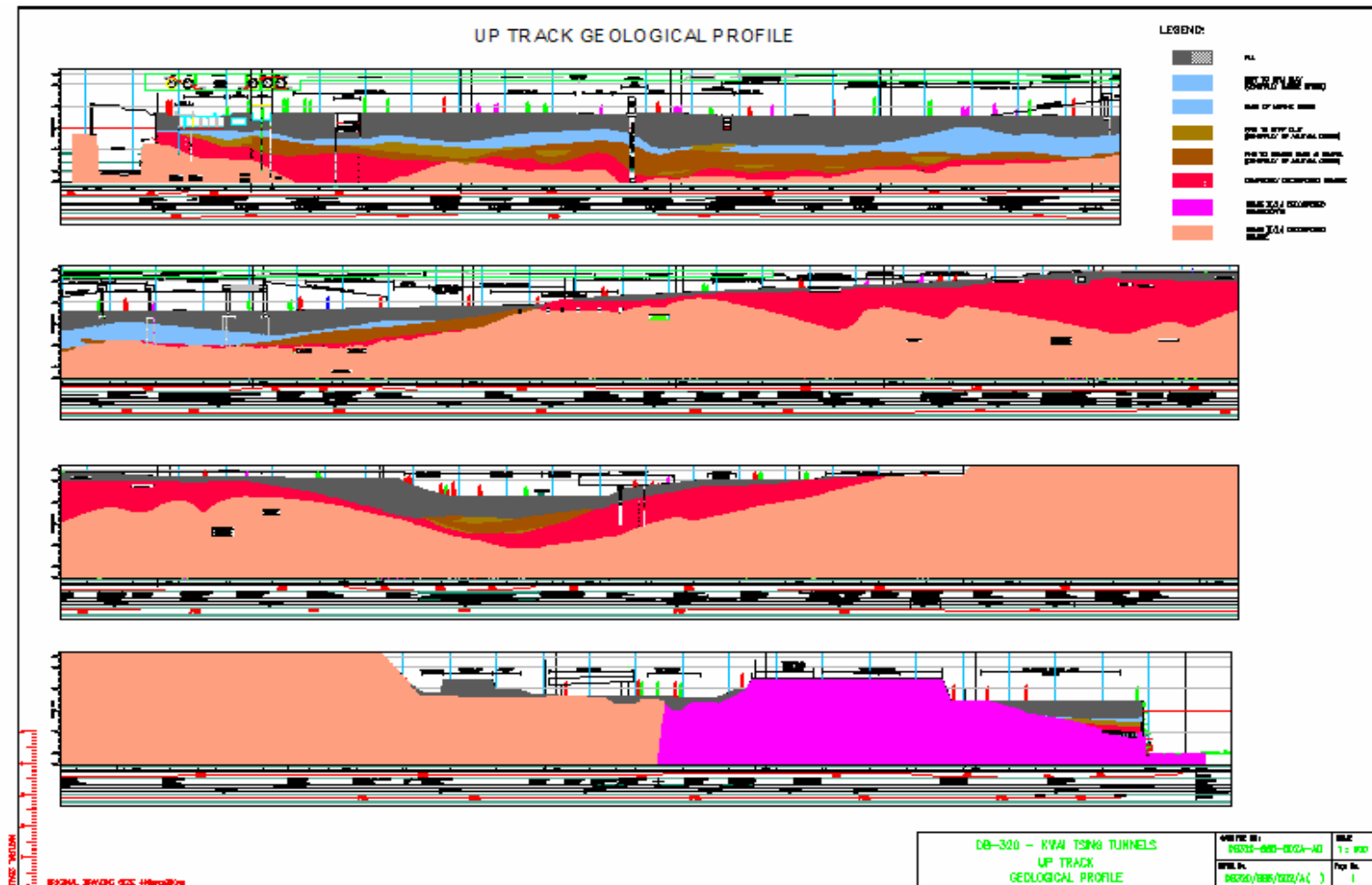
Πίνακας 5.4: Κύρια χαρακτηριστικά σήραγγας  
(πηγή: Michel deBroissia of BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS).

Μήκος Σήραγγας	1840 m
	δίδυμες σήραγγες
Διάμετρος Εκσκαφής	8.75 m
Επένδυση: Μήκος δαχτυλιδιού	1.8 m
Πάχος δαχτυλιδιού	400 mm
Εσωτερική διάμετρος	7.625 m
Απόσταση μεταξύ κάθετων κοπών	90 m

Λόγω των μεταβαλλόμενων γεωτεχνικών συνθηκών (βλ. Πιν.5.5) κατά μήκος των σηράγγων το μηχάνημα ολομέτωπης κοπής TBM που επιλέχθηκε έχει την δυνατότητα να λειτουργεί και στα μαλακά υλικά (αργιλικά με άμμο και αλούβιες αποθέσεις) και σε σκληρά πετρώματα με μέση μονοαξονική αντοχή (UCS) κυμαινόμενη από 80-250 MPa, αλλάζοντας τον τρόπο λειτουργίας του ανάλογα με τον τύπο πετρώματος που γίνεται η εκσκαφή (Earth Pressure Balanced (EPB)- open mode).

Πίνακας 5.5: Κύρια γεωλογικά χαρακτηριστικά  
(πηγή: Michel deBroissia of BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS).

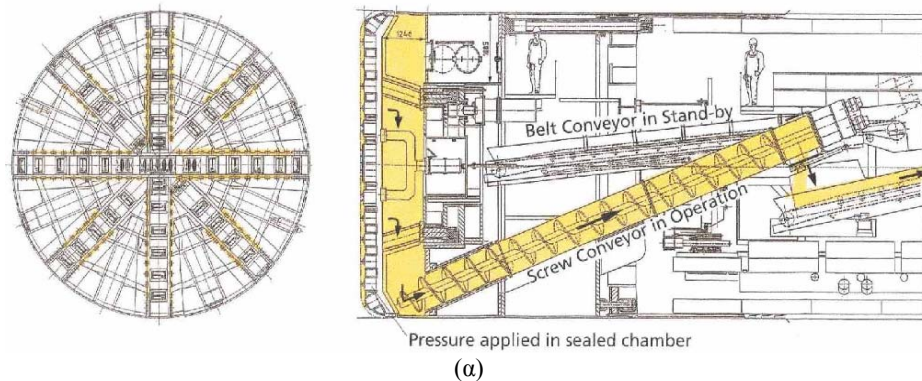
Μήκος Τομέα	Τύπος Πετρώματος	Κάλυψη
200 m	Σκληρό γρανοδιοριτικό πέτρωμα	Πάνω από 30 m
400 m	Μέτριας αντοχής γρανίτης	Πάνω από 50 m
700 m	Υψηλά ρηγματομένος και κατακερματισμένος γρανίτης	Πάνω από 50 m
200 m	Μεικτό μέτωπο (βράχου/εδάφους)	15 έως 25 m
300 m	Μαλακό έδαφος από αποσάθρωση γρανίτη, αλούβιων και θαλάσσιων ιζημάτων	15 m



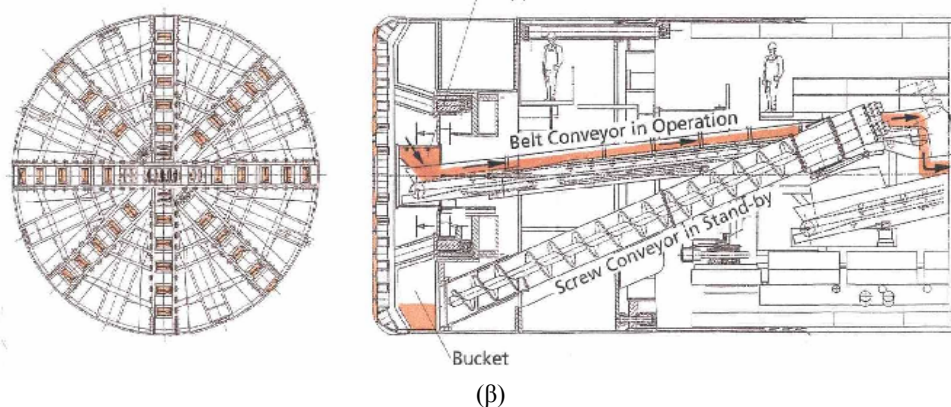
Σχήμα 5.11: Γεωλογική τομή κατά μήκος της σήραγγας του Χονγκ Κονγκ  
(πηγή: Michel deBroissia of BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS).

Όταν το TBM βρίσκεται εντός του μαλακού εδάφους τότε λειτουργεί με την μέθοδο εξισορρόπησης της πίεσης του εδάφους (EPB), όπου η πίεση εφαρμόζεται εντός αεροστεγούς θαλάμου εντός του οποίου βρίσκεται συνέχεια θρυμματισμένο υλικό για την υποστήριξη του μετώπου της σήραγγας με πίεση 3-5 bar. Τα θραύσματα απομακρύνονται με την βοήθεια μεταφορικής ταινίας μορφής κοχλίας (βλ.Σχ.5.12.α.). Στις περιπτώσεις όπου η εκσκαφή γίνεται σε μικτά μέτωπα η ρωγματομένα πετρώματα η εκσκαφή γίνεται είτε με την μέθοδο EPB είτε με την αεροσυμπιεζόμενη λειτουργία. Ενώ στις περιπτώσεις εκσκαφής μέσα σε σκληρά πετρώματα γίνεται με την χρήση του ανοιχτού τύπου (open mode) όπως λειτουργεί συνήθως το TBM. Σε αυτήν την περίπτωση δεν ασκείται καμία πίεση στο μέτωπο κοπής. Οι κοπτικοί δίσκοι θρυμματίζουν το πέτρωμα και οι περιστρεφόμενοι κάδοι οδηγούν το υλικό σε μια χοάνη. Το υλικό αυτό τροφοδοτείται σε μεταφορική ταινία που στη συνέχεια το απομακρύνει μακριά από την περιοχή της εκσκαφής (βλ.Σχ.5.12.β.).

**EPB Mode for Soft-ground excavation**



**Open Mode for hard-rock excavation**



Σχήμα 5.12: Λειτουργία του TBM με: α) EPB, β) Ανοιχτό τύπο  
(πηγή: Michel deBroissia of BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS)

Στον Πίν.5.6 παρουσιάζεται η αλληλουχία του τρόπου λειτουργίας του TBM ανάλογα με την θέση του εντός της σήραγγας.

Πίνακας 5.6: Τρόπος λειτουργίας TBM κατά μήκος της σήραγγας.  
(πηγή: Michel deBroissia of BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS)

Αρχικό Μήκος	Τελικό Μήκος	Λειτουργία
0	600	Ανοιχτού τύπου
600	800	Αεροσυμπιεζόμενο
800	1260	Ανοιχτού τύπου
1260	1300	Αεροσυμπιεζόμενο
1300	1341	EPB
1341	1420	Αεροσυμπιεζόμενο
1420	1820	EPB

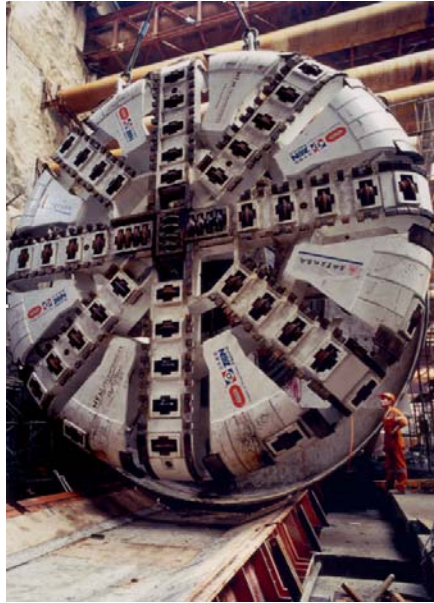
Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της λειτουργίας του TBM καθώς και η φωτογραφία του συγκεκριμένου τύπου TBM παρουσιάζονται στον Πίν.5.7 και το Σχ.5.13 αντιστοίχως. Για την υποστήριξη της σήραγγας μετά την εκσκαφή χρησιμοποιούνται προκατασκευασμένοι δακτύλιοι από σκυρόδεμα, τα οποία τοποθετούνται πίσω από το TBM αμέσως μετά την εκσκαφή.

Μετά το πέρας της εξόρυξης της πρώτης σήραγγας, η κεφαλή του TBM, για μεταφερθεί στο αρχικό τμήμα της εκσκαφής της δεύτερης σήραγγας, αποσυναρμολογήθηκε και μεταφέρθηκε οδικώς. Το υπόλοιπο τμήμα του TBM οδηγήθηκε μέσω της σήραγγας, ακολουθώντας αντίστροφη πορεία από την εκσκαφή.

Πίνακας 5.7: Κύρια χαρακτηριστικά του TBM  
(πηγή: Michel deBroissia of BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS)

Γενικά Χαρακτηριστικά	
Διάμετρος εκσκαφής	8.75 m
Ολικό βάρος	1400 t
Ελάχιστη ακτίνα της σήραγγας	4.00 m
Άδειασμα υλικού	1 m κατά μήκος της ταινίας μεταφοράς
Μέγιστη κλίση της σήραγγας	4%
Χορηγούμενη ηλεκτρική ισχύς	11kV
Μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς	4100 W
Ολικό μήκος	108 m
<b>Θώρακας σε 3 μέρη</b>	
Συνολικό βάρος	860 t
Κυρίως θώρακας	Ωθηση: 0-5200 tons 13 ζεύγη ωθητικών εμβόλων Ταχύτητα εκσκαφής: 0-80 mm/m
Κοπτική Κεφαλή (CH):	9 κινητήρες με ισχύ: 240 kW ο καθένας Στροφές: 0-3 rpm 61 κοπτικούς δίσκους (18-10")
Αρθρωτό κέλυφος (tail skin)	
<b>Οπισθοδομή</b>	
6 πλατφόρμες, 90 m Σύστημα εκτόξευσης: 0-49 m <sup>3</sup> /h	



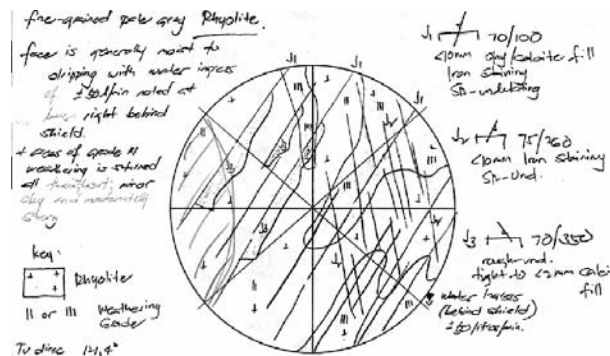


Σχήμα 5.13: Κοπτική κεφαλή TBM  
(πηγή: Michel deBroissia of BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS)

Η εξόρυξη των σηράγγων έγινε ακολουθώντας τον σχεδιασμό:

- Σήραγγα 1: εκσκαφή από Απρ.- Δεκ. 2000,
- Σήραγγα 2: εκσκαφή από Μάρτη – Ιούλιο 2001.

Τα δεδομένα που προέρχονται από χαρτογράφηση του μετώπου κατά μήκος της σήραγγας (βλ. Σχ.5.14) εισάγονται σε φύλλο εργασίας του 'Excel' για γρήγορη αξιολόγηση των συστημάτων ταξινόμησης RMR και Q (βλ.Σχ.1.1). Στα Σχ.5.15.α-γ παρουσιάζονται τα διαφορετικά φύλλα εργασίας του 'Excel' που χρησιμοποιούνται στην γεωστατιστική ανάλυση και περιέχουν τις παραμέτρους λειτουργίας του TBM, το RMR και του Q, αντίστοιχως.



Σχήμα 5.14: Επί τόπου χαρτογράφηση του μετώπου της σήραγγας

Ring number	Chainage	Thrust	Torque	ch speed	ch power	tbm speed	penetration	mode
	m	F (tn)	kN m	rpm	%	mm/min	mm/rev	
1	11.1	1036	2243	1.54		4	2.60	N/A
2	12.9	1692	2796	1.54		16	10.39	Open
3	14.7	1170	2300	1.54	15	12	7.79	Open
4	16.5	1200	2700	1.54	17	9	5.84	Open
5	18.3	1560	2900	1.88	23	20	10.64	Open
6	20.1	1550	2680	1.88	24	22.5	11.97	Open
7	21.9	1780	3200	1.88	26	17	9.04	Open
8	23.7	1623	3093	1.88	26	18	9.57	Open
9	25.5	1748	4146	1.86	38	25	13.44	Open
10	27.3	1554	2790	1.88	23	13.5	7.18	Open
11	29.1	1570	2816	1.88		14	7.45	Open
12	30.9	1734	2581.5	2.12		17	8.02	Open
13	32.7	1640	2343	2.12	23	15	7.08	Open
14	34.5	1470	2624	2.12	23	16	7.55	Open
15	36.3	1504	3455	2.12	23	16	7.55	Open

(α)

Chainage	MIN RMR basic	MAX RMR basic	MIN RMR89	MAX RMR89	Rock type	
13.05	58	71	63	76	13.05 (0)	GRANIODIORITE
14.85	67	80	72	85	14.85 (3)	GRANIODIORITE
16.81	66	78	66	78	16.81 (3)	GRANIODIORITE
22	58	68	63	73	22 (-)	GRANIODIORITE
23.8	66	78	66	78	23.8 (8)	GRANIODIORITE
29.76	66	78	66	78	29.76 (11)	GRANIODIORITE
33.79	62	86	62	86	33.79 (-)	GRANIODIORITE
40.08	68	85	68	85	40.08 (17)	GRANIODIORITE

(β)

Chainage [m]	RQD-min	RQD-max	Jn	Jw	Jr	Ja	Qmin	Qmax
13.05	75	90	3	0.9	2	6	7.5	9.0
14.85	75	90	3	0.9	1.5	6	5.6	6.8
16.81	90	100	3	1	2	6	10.0	11.1
22	90	100	3	1	2.5	6	12.5	13.9
22	90	100	3	1	2.5	6	12.5	13.9
22	90	100	3	1	2.5	6	12.5	13.9
23.8	90	100	3	1	2	6	10.0	11.1

(γ)

Σχήμα 5. 15: Φύλλα εργασίας του 'Excel' με δεδομένα κατά μήκος της σήραγγας 1:

(α) Μετρήσεις των παραμέτρων TBM,

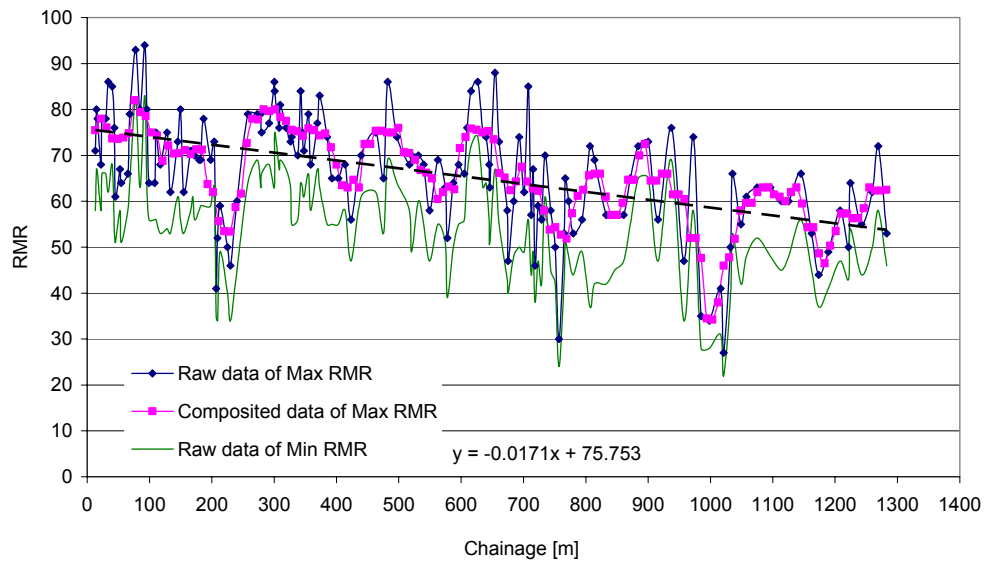
(β) την εκτίμηση του RMR και

(γ) Εκτίμηση του δείκτη ποιότητας Q

### 5.2.2. Επεξεργασία RMR

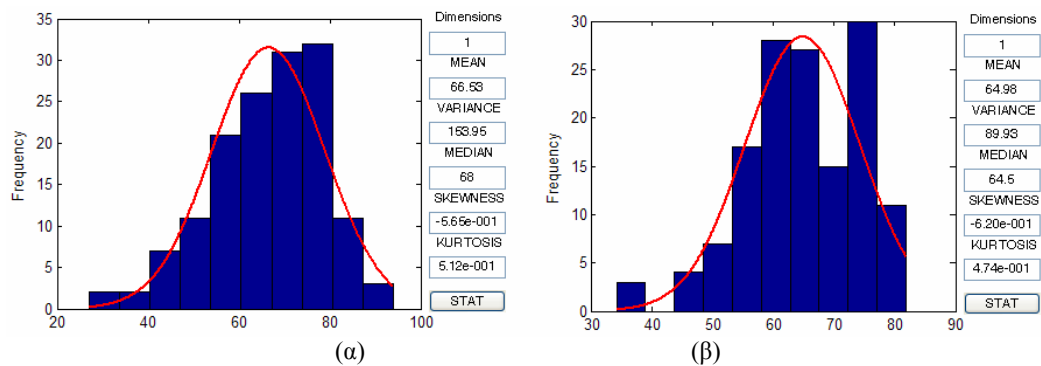
Ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία με στο προηγούμενο κεφάλαιο τα 148 αρχικά δεδομένα εξομαλύνονται με την χρήση φίλτρου της μέσης τιμής με ακτίνα επιρροής 20 m. Από την εφαρμογή του φίλτρου προκύπτουν 142 δεδομένα τα οποία δείχνουν να παρουσιάζουν γραμμική τάση κατά μήκος της σήραγγας (βλ. Σχ.5.16), οπότε είναι απαραίτητη η χρήση του καθολικού kriging.





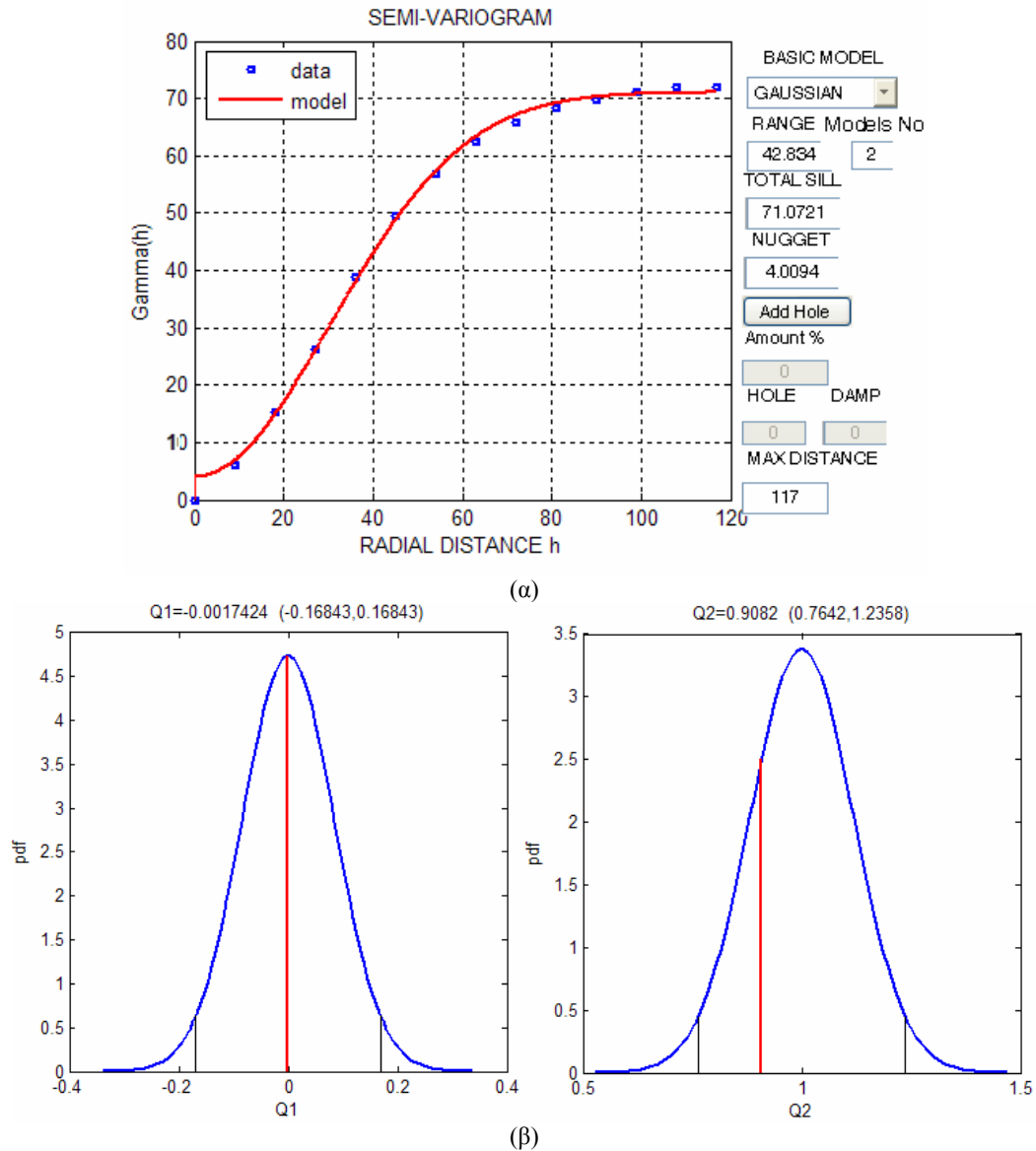
Σχήμα 5.16: Σύγκριση δεδομένων πριν και μετά την στατιστική επεξεργασία καθώς και η παρατηρούμενη γραμμική τάση των.

Τα βασικά στατιστικά στοιχεία καθώς και η κατανομή των δεδομένων πριν και μετά την επεξεργασία παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



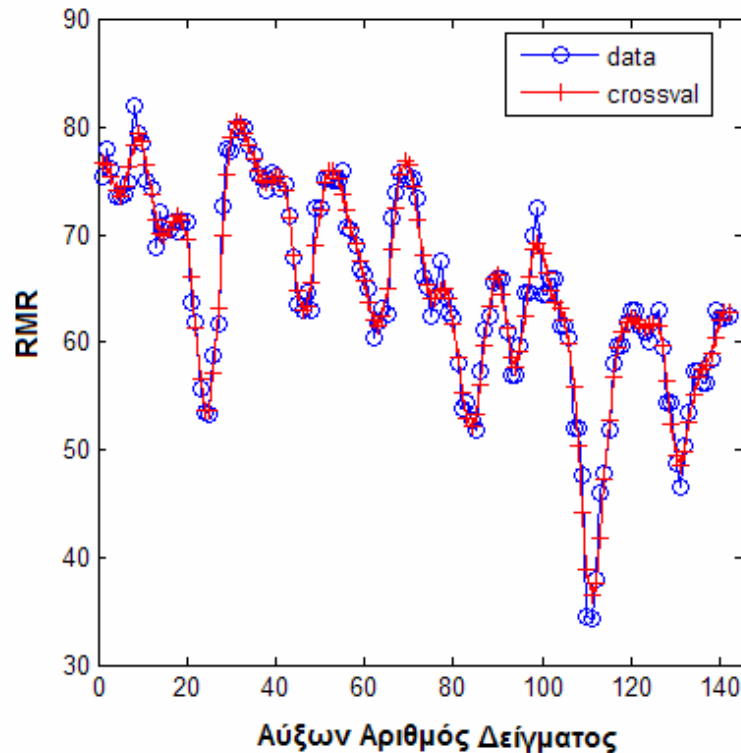
Σχήμα 5.17: Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης για την τιμή του RMR για την σήραγγα #1 του σχεδίου KCRC: α) αρχικά δεδομένα, β) επεξεργασμένα δεδομένα.

Το πειραματικό ημιβαριόγραμμα που υπολογίστηκε με βήμα απόστασης 9 μέτρα και ανοχή 1%, ακολουθεί το γκαουσιανό μοντέλο (Σχ.5.18.α). Μετά από την εξέταση διαφόρων παραμέτρων βρέθηκαν εκείνοι που ελαχιστοποιούν τις στατιστικές τιμές των κανονικοποιημένων σφαλμάτων Q (βλ. Σχ.5.18.α-β) και που ταιριάζουν καλύτερα στις πειραματικές τιμές του ημιβαριογράμματος. Η ακτίνα της γειτονιάς του kriging στην περίπτωση αυτή επιλέχθηκε να είναι στα 120 m με τον περιορισμό του τα σημεία στην περιοχή έρευνας να κυμαίνονται 15-30.



Σχήμα 5.18: (α) Γκαουσιανό ημιβαριόγραμμα για το RMR  
(β) Αξιολόγηση των παραμέτρων του Kriging με την χρήση των στατιστικών τιμών  $Q_1$  και  $Q_2$ .

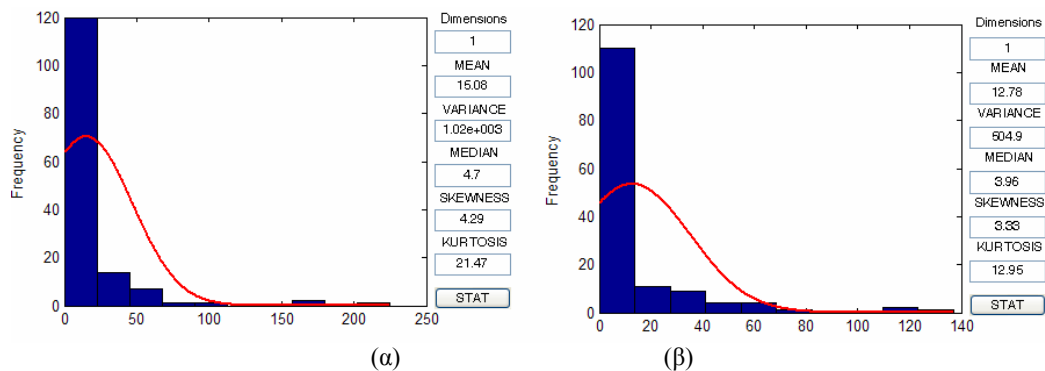
Η διασταυρωμένη αξιολόγηση του καθολικού kriging έγινε στα εξομαλισμένα δεδομένα και παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 5.19: Αξιολόγηση του kriging για τα δεδομένα του Χονγκ Κονγκ

### 5.2.3. Επεξεργασία του Δείκτη Ποιότητας της Βραχομάζας Q

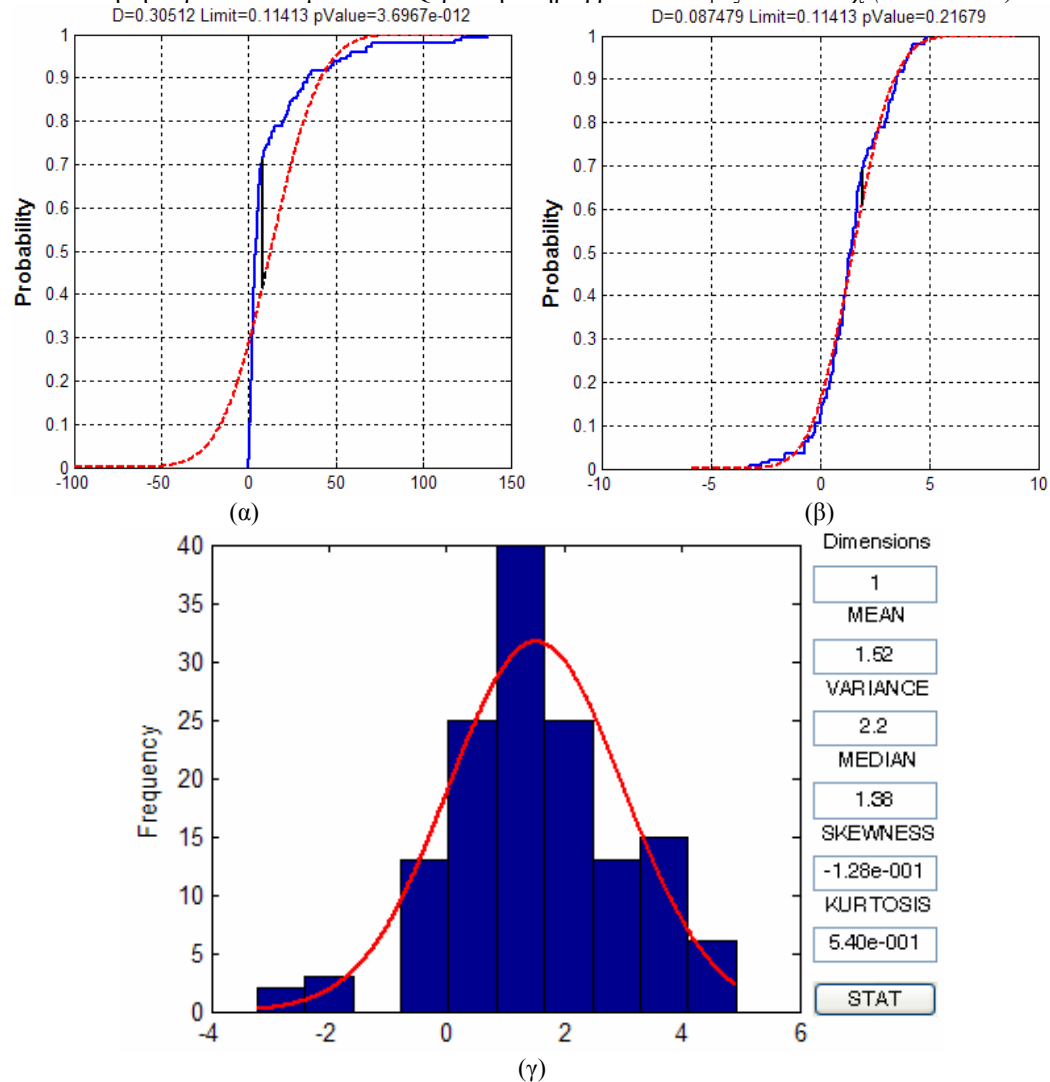
Στο επόμενο στάδιο ακολουθεί η επεξεργασία που περιγράφηκε παραπάνω για την περίπτωση του δείκτη Q γεωμηχανικής ταξινόμησης του Barton. Το φίλτρο εξομάλυνσης για την περίπτωση αυτή έχει ακτίνα επιρροής 20m και έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή 142 δεδομένων από τα 146 αρχικά δεδομένα, οι κατανομές των οποίων φαίνονται στο Σχ.5.20.



Σχήμα 5. 20: Ιστογράμματα συχνότητας εμφάνισης των δεδομένων: α) πριν και β) μετά την εξομάλυνση

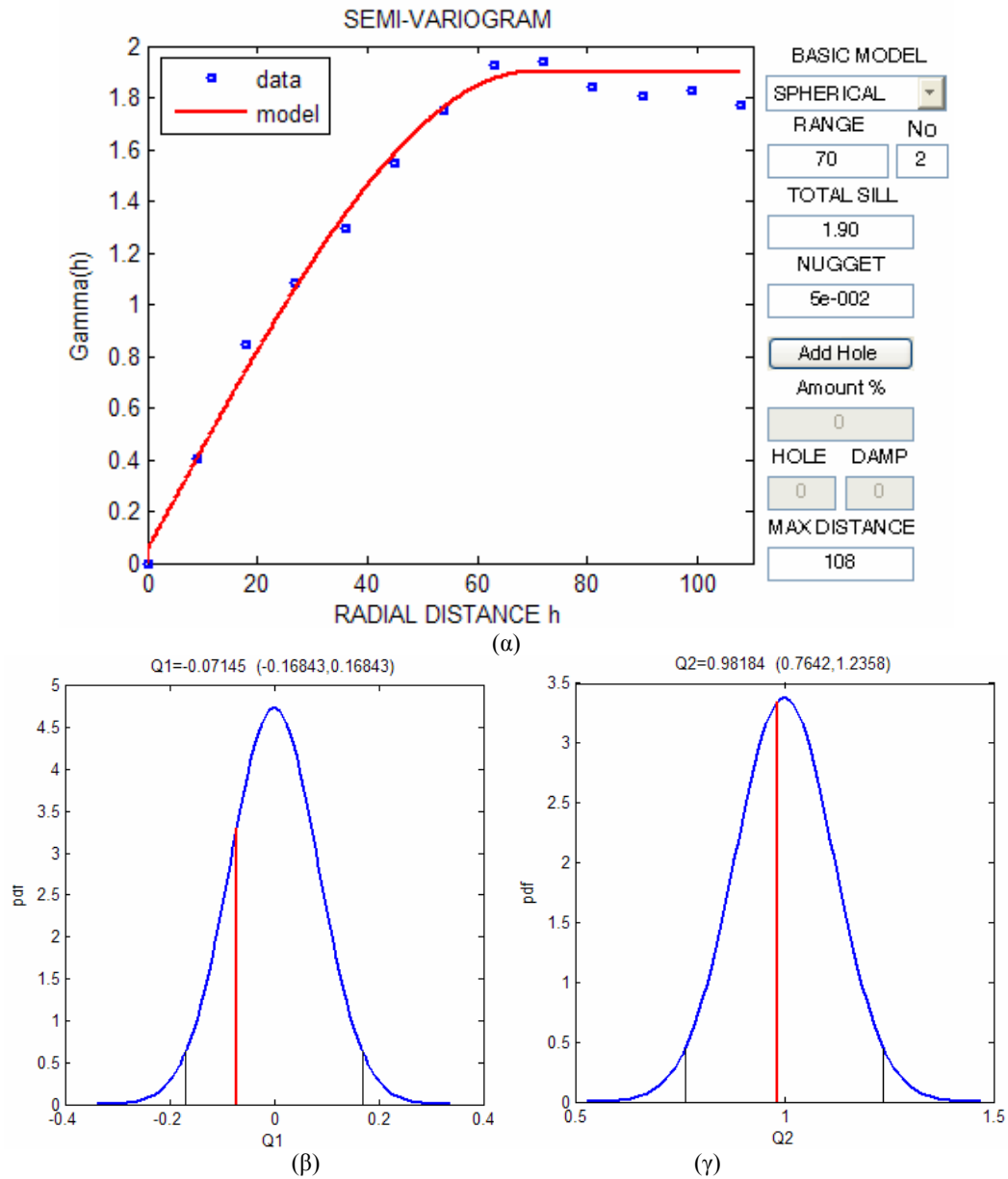
Όπως είναι ορατό τα δεδομένα πριν αλλά και μετά την εφαρμογή των κινούμενων παραθύρων της μέσης τιμής, ακολουθούν την λογαριθμοκανονική και όχι την κανονική κατανομή. Οπότε εφαρμόζεται ο λογαριθμικός μετασχηματισμός στα δεδομένα, με την χρήση του αλγορίθμου TRANSVAL, ώστε να ακολουθούν την κανονική κατανομή (βλ. Σχ.5.21.γ). Για την εξακρίβωση της καταλληλότητας του μετασχηματισμού γίνεται έλεγχος Kolmogorov-Smirnov (αλγόριθμος KST) με την κανονική και την λογαριθμοκανονική κατανομή (βλ.Σχ.5.21.α,β). Εν συνεχεία τα δεδομένα μετασχηματίζονται έτσι ώστε να ακολουθούν την

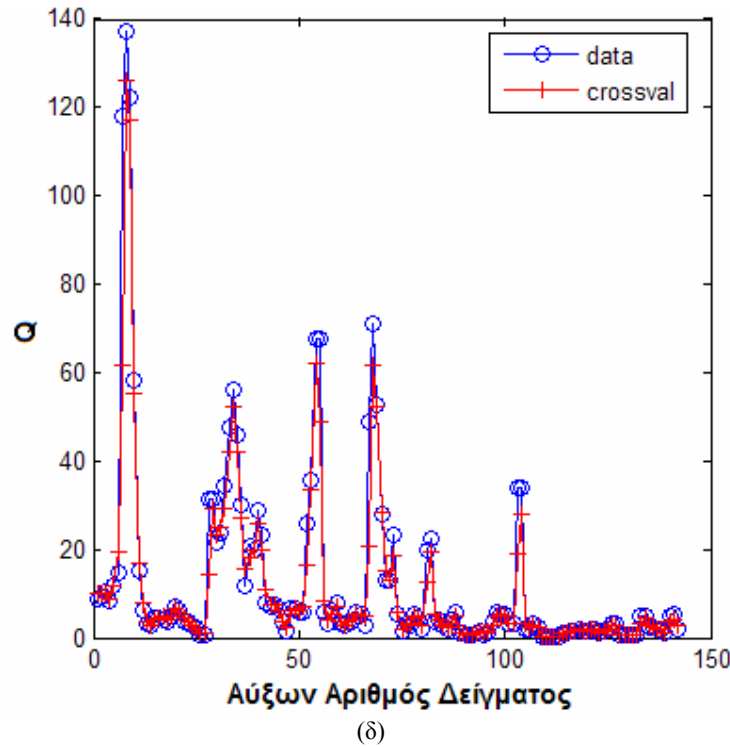
κανονική κατανομή (λογαριθμικός μετασχηματισμός). Η στατιστική επεξεργασία που ακολουθήθηκε για τα δεδομένα του Q για την σήραγγα 1 συνοψίζεται στο Σχ. (5.20 & 5.21).



Σχήμα 5.21: (α) Έλεγχος KS απόκλισης από την κανονική κατανομή.  
(β) Έλεγχος KS απόκλισης από την λογαριθμοκανονική κατανομή  
(γ) Ιστόγραμμα συχνότητας εμφάνισης των μετασχηματισμένων δεδομένων

Το πειραματικό ημιβαριόγραμμα υπολογίζεται για τα μετασχηματισμένα δεδομένα, της μεταβλητής Q, με βήμα απόστασης 9m και ανοχή 1%. Η χωρική εξάρτηση των δεδομένων περιγράφεται από το σφαιρικό θεωρητικό ημιβαριόγραμμα με ακτίνα συσχέτισης 70m το οποίο έχει σαν οροφή την τιμή 1.9 συνδυασμένο με την ποσότητα 0.05 του μοντέλου φαινομένου κόκκου, όπως φαίνεται στο Σχ.5.22 α. Επιλέχθηκε η επίλυση με την χρήση του κανονικού kriging με ακτίνα έρευνας τα 150m και τον περιορισμό χρήσης 15-30 γειτονικών σημείων. Η αξιολόγηση των επιλεγμένων παραμέτρων ήταν επιτυχής και παρουσιάζεται στο σχήμα (5.22.β-γ). Η εκτίμηση του kriging γίνεται σε κανονικό κάρναβο αποτελούμενο από 1258 σημεία με απόσταση 5m μεταξύ τους. Η διασταυρωμένη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι τα αρχικά δεδομένα αναπαράγονται με ικανοποιητική ακρίβεια (Σχ.5.22 δ), οπότε και οι εκτιμήσεις γίνονται αποδεκτές.





Σχήμα 5.22: (α) Ταίριασμα σφαιρικής συνάρτησης στο πειραματικό ημιβαριόγραμμα  
(β,γ) Στατιστικές τιμές ελέγχου Q1 και Q2 αντίστοιχα.  
(δ) Διασταυρωμένη αξιολόγηση αποτελεσμάτων kriging

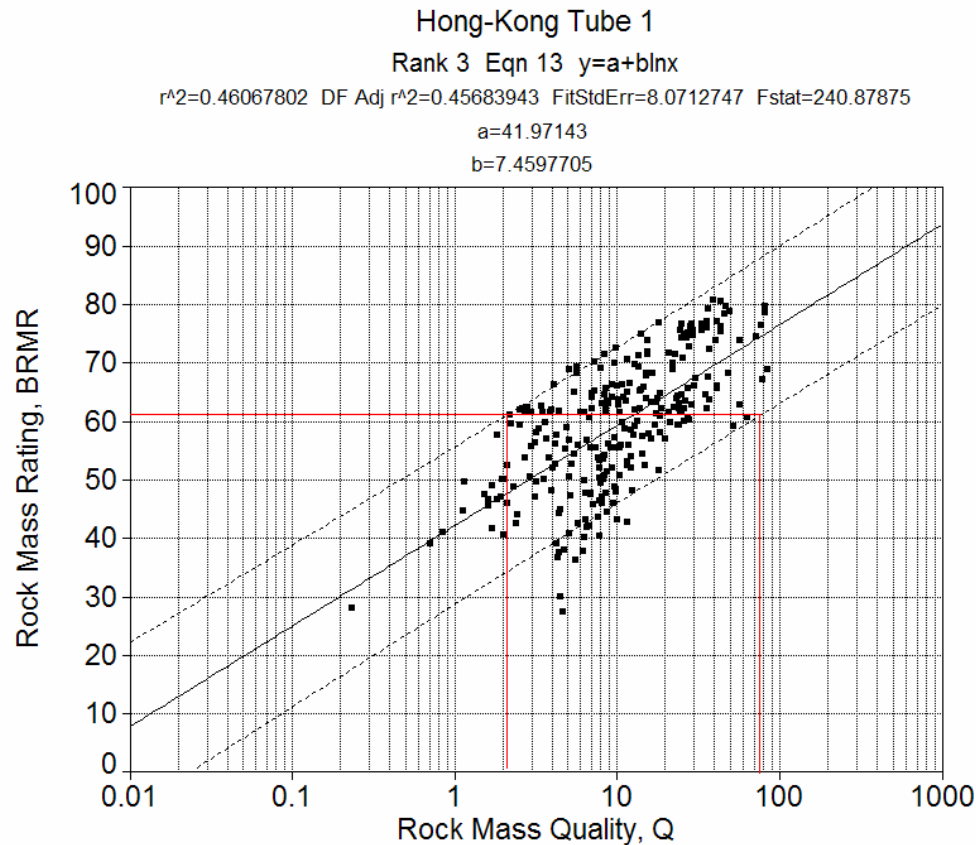
Η εκτίμηση του kriging προκύπτει μετά από τον αντίστροφο μετασχηματισμό (Dowd, 1982):  
όπου:

$$\begin{aligned} Z &= \exp(Y) \\ \sigma_Z^2 &= \mu_Z^2 \times (\exp(\sigma_Y^2) - 1) \end{aligned} \quad (5.2)$$

Y οι εκτιμήσεις του kriging για τα λογαριθμικά μετασχηματισμένα δεδομένα (γκαουσιανά),  
Z οι εκτιμήσεις κατά τον αντίστροφο μετασχηματισμό  
 $\mu_Z$  η δειγματική μέση τιμή για τα αρχικά δεδομένα,  
 $\sigma_Y$  η εκτίμηση της διασποράς του λογαριθμοκανονικού kriging,  
 $\sigma_Z$  η διασπορά κατά τον αντίστροφο μετασχηματισμό,

Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα μετά την στατιστική επεξεργασία των παραμέτρων Q και RMR, προκύπτει ότι συσχετίζονται με μία λογαριθμική σχέση (εξ.5.3) και που παρουσιάζεται γραφικά στο επόμενο σχήμα (Σχ.5.23).

$$BRMR = 7.5 \ln Q + 42 \quad (5.3)$$



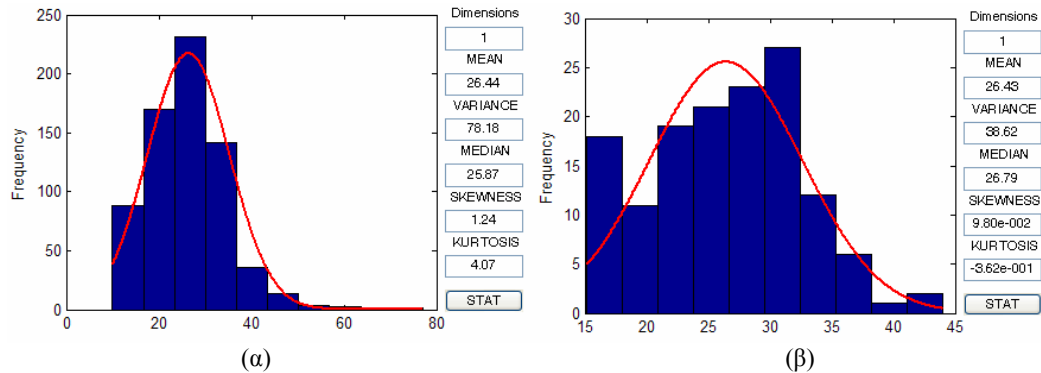
Σχήμα 5.23: Εύρεση βέλτιστης λογαριθμικής εξάρτησης  $BRMR$  και  $Q$  για τα δεδομένα της σήραγγας Tube 1. Επίσης παρουσιάζονται και τα όρια εμπιστοσύνης 90%.

#### Παρατήρηση:

Ενώ η εκτίμηση του λογαρίθμου της μεταβλητής είναι αμερόληπτη, κατά τον αντίστροφο μετασχηματισμό εισάγεται μια αμεροληψία με αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση του σφάλματος. Αν είναι επιθυμητή η αφαίρεση της αμεροληψίας αυτής, χρειάζεται η εφαρμογή διαφόρων μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί για την απαλοιφή της αμεροληψίας βασιζόμενες σε αναπτύγματα σειρών Taylor (Trans Gaussian Kriging ([Kozintseva, 1999](#))).

#### **5.2.4. Επεξεργασία των Εκτιμήσεων της Ειδικής Ενέργειας Θραύσης**

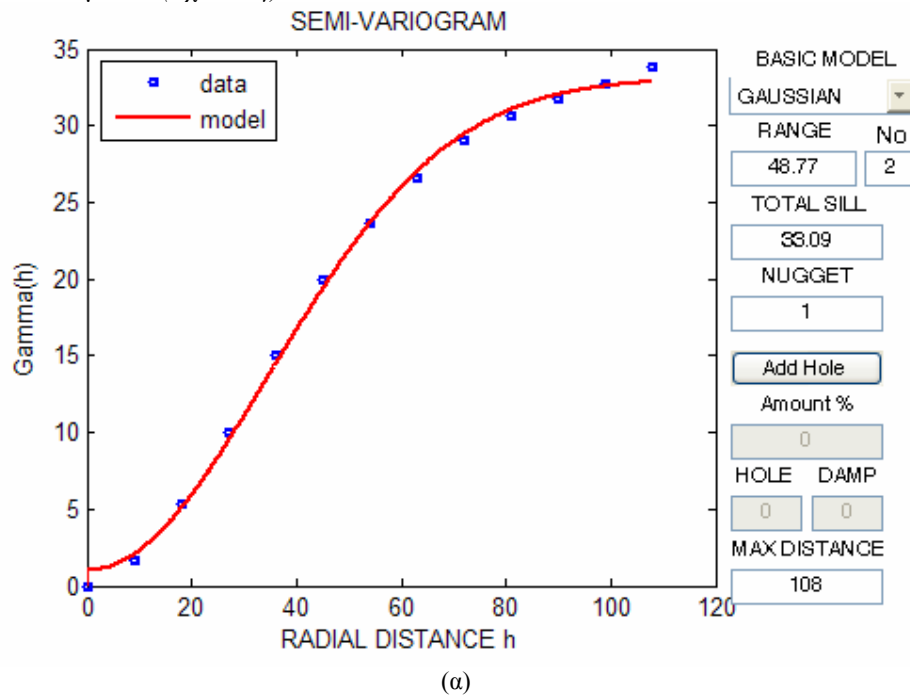
Στην ενότητα αυτή γίνεται επεξεργασία της ειδικής ενέργειας θρυμματισμού του πετρώματος που υπολογίστηκε με την χρήση της εξ. 4.13 και των 692 καταγραφών του TBM κατά μήκος της σήραγγας. Πρωταρχικά εφαρμόστηκε το σφαιρικό παράθυρο της μέσης τιμής με ακτίνα 20 m, κινούμενο σε σημεία με απόσταση 9 m, με αποτέλεσμα την μείωση του αριθμού των δειγμάτων σε 140. Τα στατιστικά στοιχεία των αρχικών και των επεξεργασμένων δεδομένων παρουσιάζονται στο Σχ. 5.24.



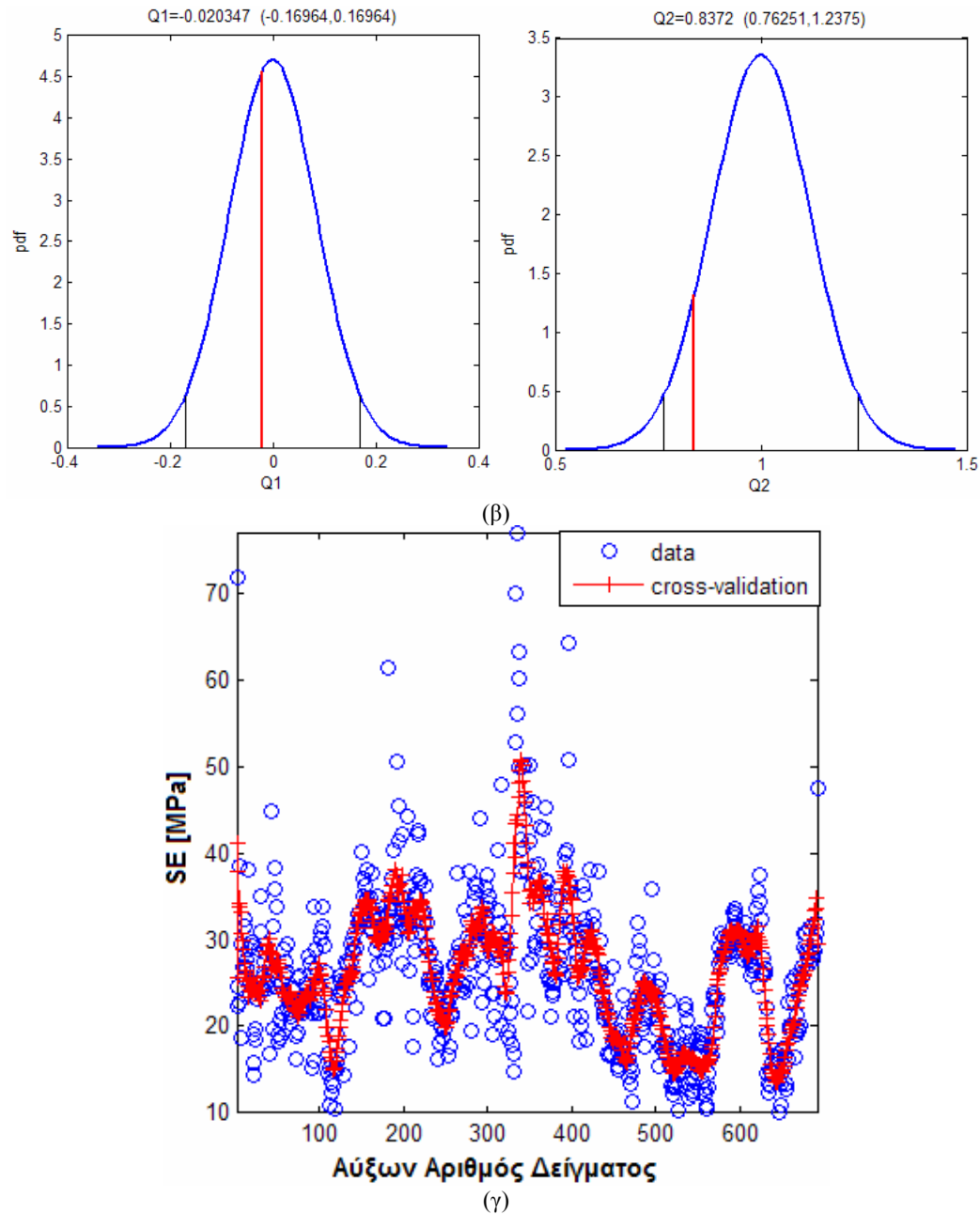
Σχήμα 5.24: Ιστογράμματα για: α) τα αρχικά δεδομένα, β) τα μειωμένα δεδομένα

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του πειραματικού ημιβαριογράμματος (ισότροπο – δεδομένα 1d) που γίνεται με βήμα απόστασης 9 m και ανοχή στην απόσταση 1%. Το πειραματικό ημιβαριόγραμμα που υπολογίζεται με βάση τις παραπάνω παραμέτρους περιγράφεται με την χρήση του γκαουσιανού μοντέλου με τις παραμέτρους που βελτιστοποιούν τις τιμές των στατιστικών ελέγχων Q και παρουσιάζονται στο Σχ.5.25.α-β. Χρησιμοποιήθηκε το κανονικό kriging με απόσταση έρευνας 150 μέτρων και με την χρήση 15-30.

Στο τελικό στάδιο της γεωστατιστικής επεξεργασίας οι εκτιμήσεις του kriging έγιναν σε κάνναβο 1258 σημείων με απόσταση 5m και αξιολογήθηκαν με την αναπαραγωγή των 692 αρχικών δεδομένων (Σχ.5.25.γ).





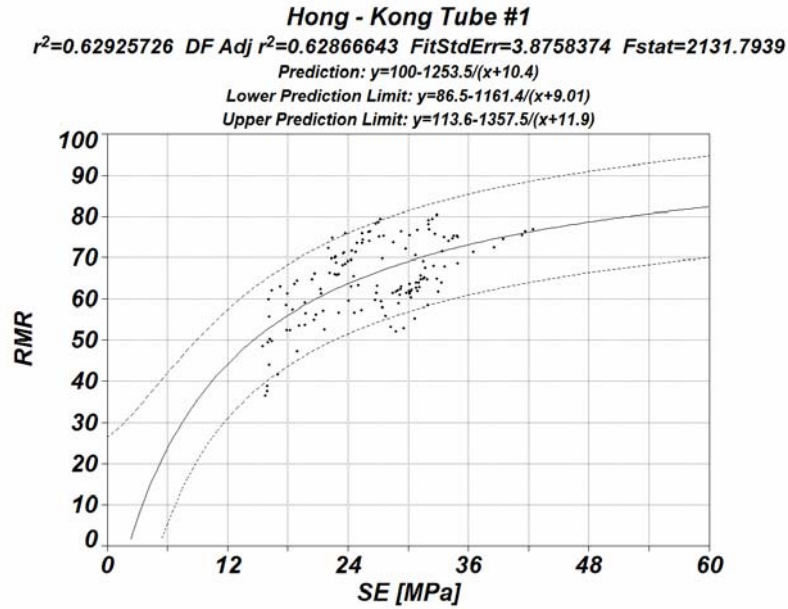


Σχήμα 5.25: α) Πειραματικό και Γκαουσιανό Ημιβαριόγραμμα, β) Ανάλυση αξιοπιστίας του ημιβαριογράμματος Q1 και Q2, και γ) Αξιολόγηση αποτελεσμάτων kriging

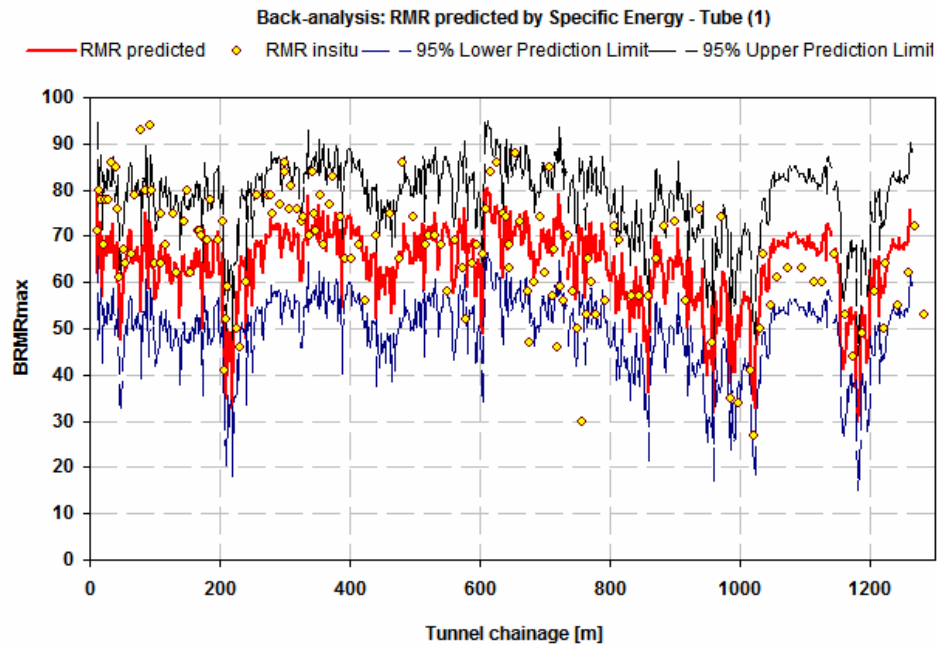
Τα δεδομένα SE και RMR μετά την εξομάλυνση και την χωρική επεξεργασία τους κατά μήκος της σήραγγας, δείχνουν να ακολουθούν μια κλασματική σχέση (Σχ.5.26). Σημειώνεται ότι η σχέση αυτή είναι της ίδιας μορφής με αυτήν που βρέθηκε στην περίπτωση της σήραγγας στην Βόρεια Ιταλία (βλ. εζ.5.1).

$$BRMR_{\max} = 100 - \frac{1253.5}{SE + 10.4} \quad (5.4)$$

Χρησιμοποιώντας την εζ. (5.4) για την εκτίμηση του RMR από τα αρχικά δεδομένα για την ειδική ενέργεια SE, προκύπτει ότι η πρόβλεψη βρίσκεται σε επιτρεπόμενες περιοχές απόκλισης από τις μετρημένες τιμές του RMR (Σχ.5.27).

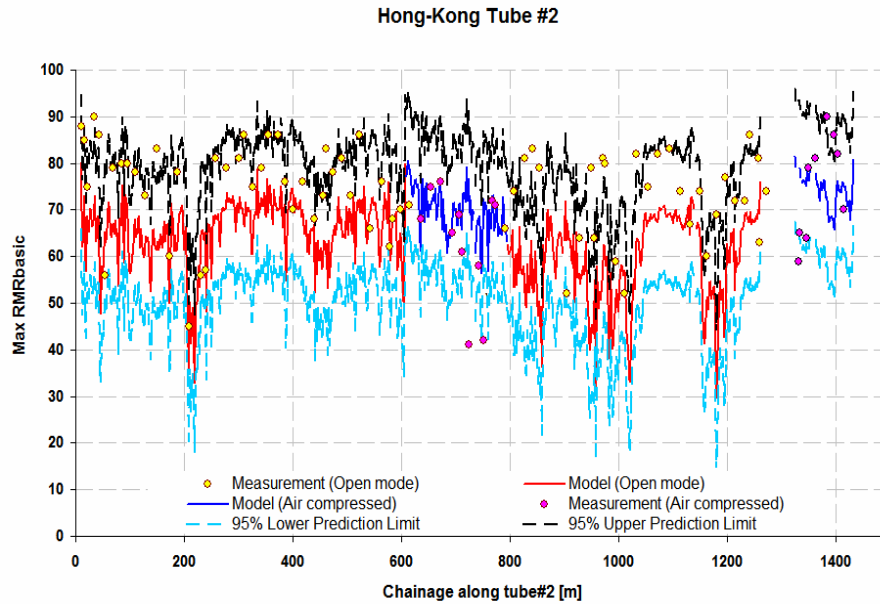


Σχήμα 5.26: Εύρεση βέλτιστης σχέσης μεταξύ RMR και SE μαζί με τα όρια εμπιστοσύνης 90%



Σχήμα 5.27: Σύγκριση μετρήσεων και εκτίμησης με την κλασματική σχέση για το RMR.

Σε δεύτερη φάση, η εξ.(5.4) που προέκυψε από τα δεδομένα της σήραγγας 1 χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του RMR στην δεύτερη σήραγγα. Η πρόβλεψη της κλασματικής σχέσης και σε αυτή την περίπτωση δείχνει να αναπαράγει τις μετρήσεις του RMR με ικανοποιητική ακρίβεια (Σχ.5.28)

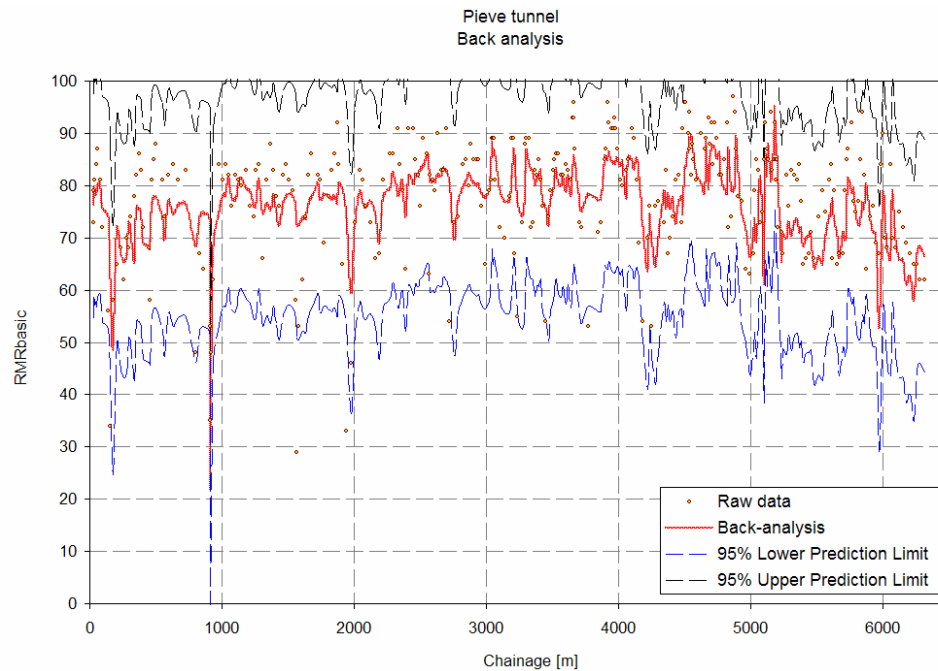


Σχήμα 5.28: Μετρήσεις και πρόβλεψη της κλασματικής σχέσης κατά μήκος της σήραγγας Tube2.

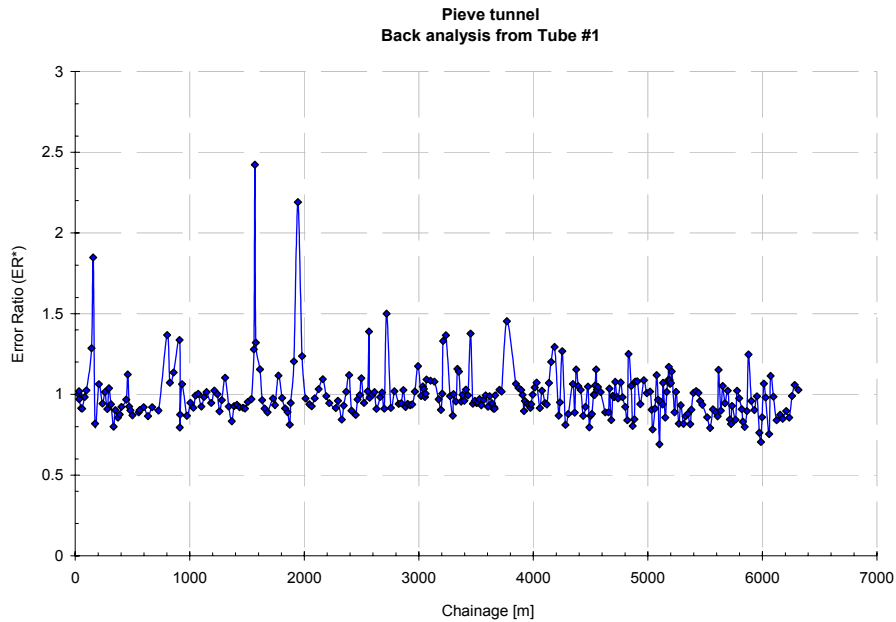
Στην συνέχεια συγκρίνοντας τις εξ. (5.4) και (5.1) προκύπτει ότι οι σταθερές διαφέρουν. Έτσι η κλασματική σχέση βελτιώνεται-γενικεύεται με την χρήση δύο άγνωστων σταθερών παραμέτρων (εξ.5.5)

$$RMR = 100 - \frac{a}{SE - b} \quad (5.5)$$

Οι παράμετροι  $a$  και  $b$  προσδιορίζονται στην αρχή κατασκευής της σήραγγας ελαχιστοποιώντας το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων. Έτσι επιστρέφοντας στα δεδομένα της Βόρειας Ιταλίας και με την χρήση των δεδομένων από τα 400 πρώτα μέτρα της σήραγγας δίνει τις ακόλουθες σταθερές  $a=1916$  και  $b=-5.14$  η οποία οδηγεί σε μια σχέση συγκρίσιμη με την εξ.(5.1) ( $a=1746.5$  and  $b=0.71$ ).



(α)



(β)

Σχήμα 5.29: α) Σύγκριση μετρήσεων – προβλέψεων της εξ.5.5 βαθμονομημένης για τα πρώτα 400 m της σήραγγας,

β) διάγραμμα σφάλματος ( $ER = \text{πρόβλεψη}/\text{μέτρηση}$ ) κατά μήκος της σήραγγας στο Pieve.

### 5.3. Σήραγγα της Γραμμής 9 του Μετρό της Βαρκελώνης (Τομή Singuerlin-Esglesias)

#### 5.3.1. Γενικά

Η γραμμή 9 (L9) του μετρό της Βαρκελώνης θα συνδέεται με τις προϋπάρχουσες γραμμές του μετρό, με τον προαστιακό σιδηρόδρομο και με τον αυτοκινητόδρομο υψηλών ταχυτήτων σε 12 σταθμούς υψηλής δυναμικότητας. Επιπροσθέτως, η γραμμή θα συνδέει το αεροδρόμιο με την πόλη. Η γραμμή 9 σχεδιάζεται να παραδοθεί σε λειτουργία το έτος 2007 και θα είναι η μακρύτερη σήραγγα στην Ευρώπη με μήκος 43 km (34 km υπόγεια) και 46 σταθμούς.



Σχήμα 5.30: Χάραξη της γραμμής L9 στην πόλη της Βαρκελώνης.

### 5.3.2. Μοντέλο Μηχανήματος TBM

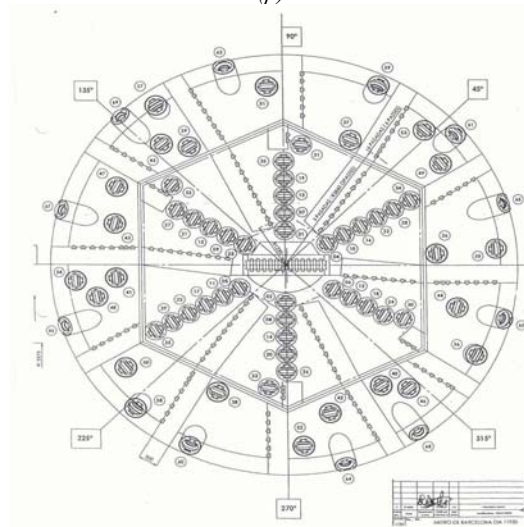
Λόγω του ότι η σήραγγα περνάει από περιοχές που υπάρχει μαλακό έδαφος, οδήγησε στην επιλογή μηχανήματος ολομέτωπου κοπής με εξισορρόπηση της πίεσης (EPB). Πιο συγκεκριμένα το μηχάνημα TBM που παραγγέλθηκε είναι διπλής χρήσης σκληρού βράχου/EPB από την εταιρία NFM της WIRTH (Πίν.5.8). Η εξόρυξη της L9 άρχισε το 2003 από την εταιρία Wirth. Το TBM θα χρησιμοποιηθεί για εκσκαφή σε σκληρό πέτρωμα για 4 χιλιόμετρα και στην συνέχεια εκσκαφή σε 8km μαλακού υλικού.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 5.31: Κοπτική κεφαλή σε: α) 3 διαστάσεις, β) πρόσοψη, και γ) σχεδιαστική τομή

Πίνακας 5.8: Χαρακτηριστικά του μηχανήματος της NFM.

Διάμετρος εκσκαφής	11.95 m
Ολική δύναμη ώθησης	90000 kN
Σύνδεσμοι	11 κυλίνδρους x 350 mm
Ταχύτητα περιστροφής κεφαλής	0 ÷ 3.7 rpm
Μέγιστη ονομαστική ροπή	27000 kNm στις 1.25 rpm
Μέγιστη ροπή	17750 kNm
Μέγιστη ταχύτητα προχώρησης	8 cm/min (με την χρήση using all thrust cylinders)
Τύπος	Μεικτού θώρακα: ανοιχτού και κλειστού (EPB,air) μόνιμα τοποθετημένα
Κοπτική κεφαλή	8 βραχίονες
Κοπτικά άκρα	282 κοπτικά δόντια, 69 κοπτικούς δίσκους 17” και 12 δίσκους 14”
Ισχύς	Ηλεκτρική
Θάλαμος – κεφαλή	Συμπιεσμένος αέρας ή υλικό θραύσης, σε πίεση 3 bar (μέγιστο)
Απομάκρυνση υλικού	Μέσω μεταφορικής ταινίας ή κοχλία. 2 μεταφορικές ταινίες
Γερανός	6 βαθμούς ελευθερίας περιστροφή $\pm 220^\circ$ ημιαυτόματη ανύψωση των τμημάτων της επένδυσης
Ρυμουλκούμενα Τρένα	6 ρυμουλκά
Βοηθητικός εξοπλισμός	Μηχανισμός εκτόξευσης, Διατρητικό μηχανήμα probe Μίγμα μπεντονίτη αφρού και λάσπης για εκτόξευση

### 5.3.3. Γεωλογικά Στοιχεία

Οι γεωλογικές τομές, τα δεδομένα γεωτρήσεων, τα εργαστηριακά δεδομένα και οι καταγραφές του TBM της περιοχής αυτής έχουν προσφερθεί από την GISA.

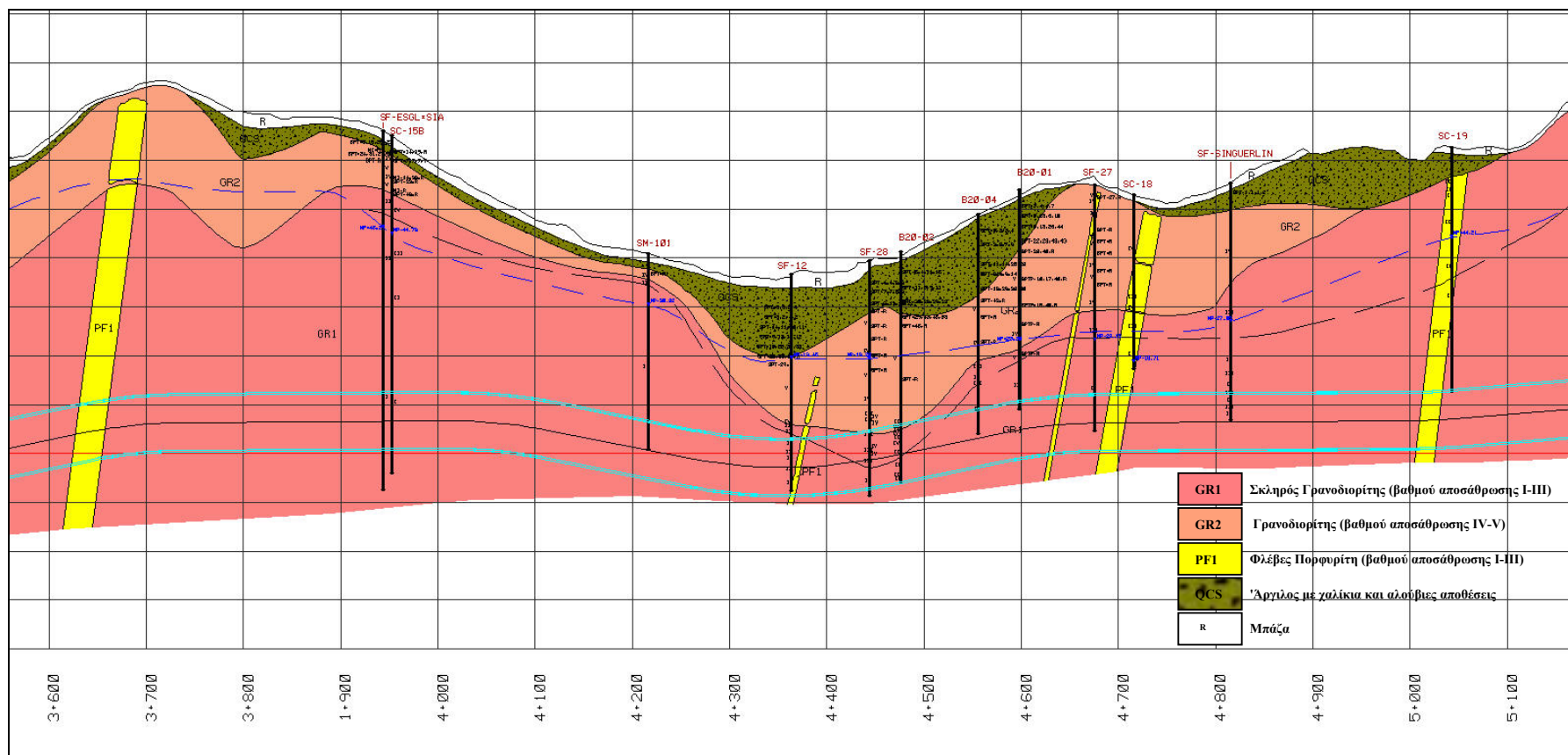
Η γεωμορφολογία της περιοχής που εξορύσσεται η σήραγγα μεταξύ των σταθμών Singuerlin – Esglesias, είναι σχετικά ομαλή και δεν έχουν σημειωθεί καθόλου καρστικά έγκοιλα. Τα γεωλογικά στρώματα δεν είναι πολύ ρωγματομένα ούτε διασχίζονται από ρήγματα (Σχ.5.32). Επιπλέον, σύμφωνα με την τομή της περιοχής το προφίλ δεν φαίνεται να αλλάζει σημαντικά στις κάθετες τομές.

Η περιοχή μεταξύ των σταθμών της σήραγγας Esglesia και Singuerlin, αποτελείται από 5 διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς και δίδονται από τον βαθύτερο και γηραιότερο προς τον ρηχότερο και νεότερο ακολούθως:

1. Σκληρός γρανοδιόριτης (GR1): Η ηλικία δημιουργίας του τοποθετείται στην Παλαιοζωική περίοδο. Είναι ελαφρά αποσπασμένος (βαθμού αποσάθρωσης I-III). Ολόκληρη η περιοχή καλύπτεται από την συγκεκριμένη λιθολογία που βρίσκεται σε βάθος 12-35 m από την επιφάνεια. Η σήραγγα βρίσκεται κυρίως σε αυτόν τον σχηματισμό, γι'αυτό τον λόγο και χρησιμοποιείται ο ανοικτός τύπος του TBM.
2. Γρανοδιόριτης μέτριας αντοχής (GR2): Σχηματίστηκε την ίδια περίοδο με το GR1, αλλά είναι υψηλά αποσπασμένος (IV-V). Το στρώμα αυτό φτάνει σε βάθη που κυμαίνονται από 0-16 m από την επιφάνεια. Η λιθολογία αυτή καλύπτει επίσης όλη την περιοχή, ενώ εμφανίζεται στην επιφάνεια σε περιοχή ~12 m. Η πιεζομετρική επιφάνεια διέρχεται από το στρώμα αυτό καθώς και από το προηγούμενο.
3. Αργίλος με χαλίκια και αλούβιες αποθέσεις (QCS): Αυτό το μαλακό εδαφικό στρώμα δημιουργήθηκε την Καινοζωική περίοδο και καλύπτει όλη την περιοχή από το Esglesia έως το Singuerlin. Το βάθος του βρίσκεται περίπου 1-2 m και είναι ουσιαστικά το ανώτερο στρώμα.
4. Μπάζα (R): Το βάθος του στρώματος αυτού δεν ξεπερνάει τα 2 m.

5. Μαγματική παρέμβαση (φλέβα) Πορφυρίτη (PF1): Είναι ελαφρά αποσθρωμένος και η σήραγγα περνάει δια μέσου αυτού κοντά στον σταθμό του Singuerlin. Υπάρχουν τρεις φλέβες στην περιοχή, η πρώτη που συναντάται βρίσκεται σε βάθος 20 m. Οι άλλες δύο είναι κοντά στην επιφάνεια και το βάθος τους εκτιμάται στα 60 m. Το πάχος αυτών των διεισδύσεων διαφέρει από λίγα μέτρα έως 20 m. Οι γεωμηχανικές παράμετροι είναι παρόμοιες με το GR1, ενώ η ηλικία του τοποθετείται στο Παλαιοζωικό.





Σχήμα 5.32: Κύρια γεωλογική τομή της γραμμής 9 (L9 Barcelona, πηγή: GISA).



### 5.3.4 Διαθέσιμα Δεδομένα

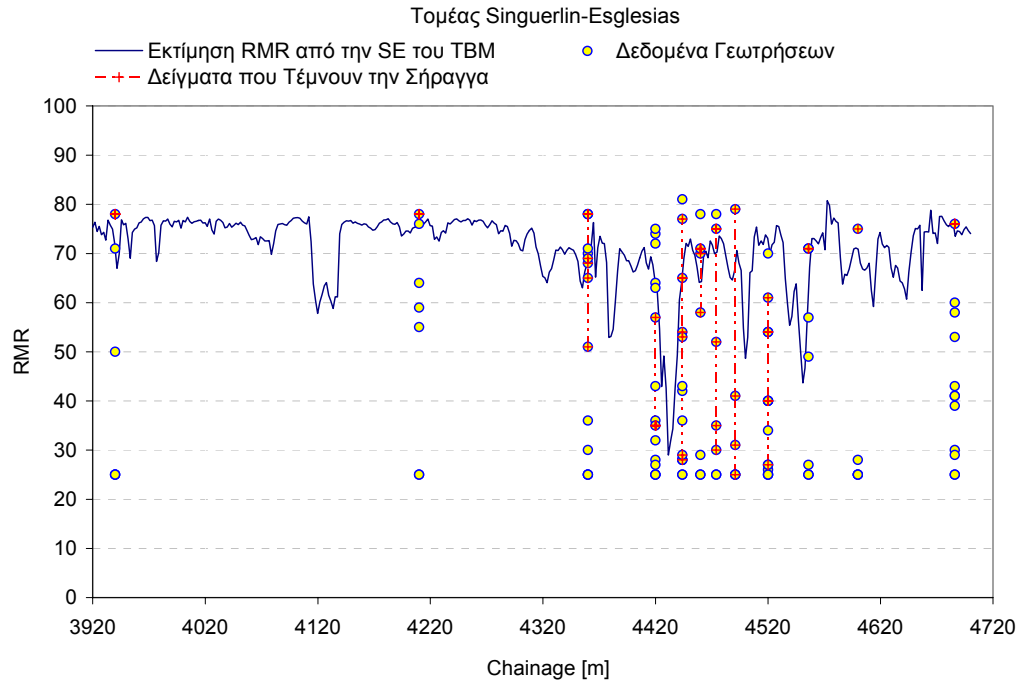
Τα δεδομένα του RMR που είναι διαθέσιμα από τις 12 γεωτρήσεις (Σχ.5.32) δεν είναι επαρκή για την ακριβή πρόβλεψη με την μέθοδο του kriging στον τρισδιάστατο χώρο. Επίσης το πεδίο δεν είναι ομοιογενές καθώς υπάρχουν 5 διαφορετικοί σχηματισμοί. Παρόλα αυτά μπορεί να γίνει ξεχωριστή επίλυση για κάθε σχηματισμό.

Τα αποτελέσματα βελτιώνονται με την εισαγωγή των καταγραφών του TBM κατά την διάρκεια της εκσκαφής όπου η συλλογή των δεδομένων γίνεται σε υψηλή συχνότητα ανά τοποθετούμενο δακτύλιο σκυροδέματος (Σχ.5.33).

Ring_number	tmmc	pushing	torque	ch speed	ch power	tbm speed	penetration	mode	Thrust
	m	F (tn)	kN m	rpm	%	mm/min	mm/rev		kN
513	4700.00	2406.46	3723.25	3.67		17.09	4.66	N/A	24064.65
514	4698.04	2447.87	2536.74	3.67		11.29	3.07	Open	24478.7
515	4696.08	2424.21	1908.16	3.70	15	8.17	2.21	Open	24242.12
516	4694.12	2523.44	2889.72	3.66	17	12.66	3.45	Open	25234.41
517	4692.16	2542.87	3844.48	3.54	23	17.23	4.87	Open	25428.74
518	4690.20	2545.10	2987.36	3.71	24	13.52	3.64	Open	25451.02
519	4688.24	2453.45	3358.54	3.72	26	15.15	4.07	Open	24534.45
520	4686.28	2408.40	3775.51	3.68	26	17.93	4.87	Open	24084
521	4684.32	2415.20	3799.96	3.66	38	15.26	4.17	Open	24151.96
522	4682.36	2410.00	4417.98	3.66	23	18.06	4.94	Open	24100
523	4680.40	2440.17	4767.61	3.62		19.89	5.50	Open	24401.74
524	4678.44	2551.31	4457.98	3.69		18.63	5.05	Open	25513.05
525	4676.48	2577.71	2573.19	3.71	23	10.29	2.78	Open	25777.07
526	4674.52	2477.66	3753.28	3.72	23	14.27	3.83	Open	24776.61

Σχήμα 5.33: Φύλλο εργασίας Excel με τις καταγραφές των παραμέτρων του TBM.

Το σημαντικότερο από τα αποτελέσματα για τα δεδομένα αυτά είναι ότι με την εφαρμογή της εξ.(5.5), με τις παραμέτρους a & b που βρέθηκαν στην σήραγγα του Χονγκ Κονγκ, στις επεξεργασμένες μετρήσεις (μονοδιάστατα) της ειδικής ενέργειας κατά μήκος της σήραγγας, προβλέπει το RMR σε πολύ καλή συμφωνία με τις εκτιμήσεις από τις γεωτρήσεις (Σχ.5.34). Η πρόβλεψη αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την βελτίωση του γεωστατιστικού τρισδιάστατου "μοντέλου", για την σήραγγα και την ευρύτερη περιοχή, με την χρήση των δεδομένων των γεωτρήσεων.



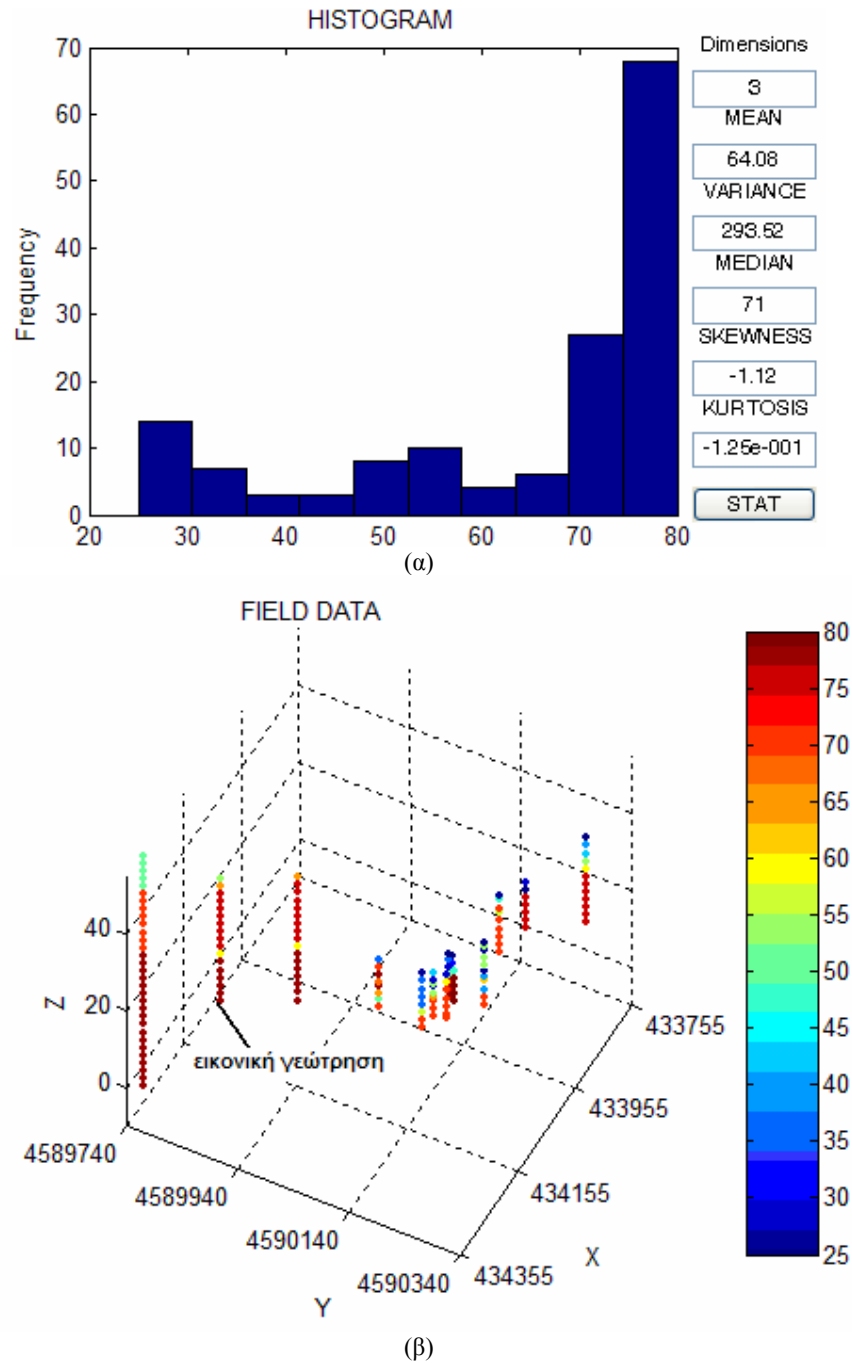
Σχήμα 5.34: Σύγκριση μετρήσεων με τις προβλέψεις για το RMR κατά μήκος της σήραγγας.

### 5.3.5. Επεξεργασία Βραχωδών Σχηματισμών

Λόγω της έντονης ανομοιογένειας της περιοχής επιλέγεται να γίνει επεξεργασία κάθε σχηματισμού ξεχωριστά. Πιο συγκεκριμένα ο σχηματισμός του σχετικά υγιούς γρανοδιוריτή (GR1) και του πορφυρίτη (PF) επεξεργάζονται μαζί καθώς παρουσιάζουν παρόμοια μηχανική συμπεριφορά, ενώ η επεξεργασία του γρανοδιוריτή μέτριας-υψηλής αποσάθρωσης γίνεται ξεχωριστά.

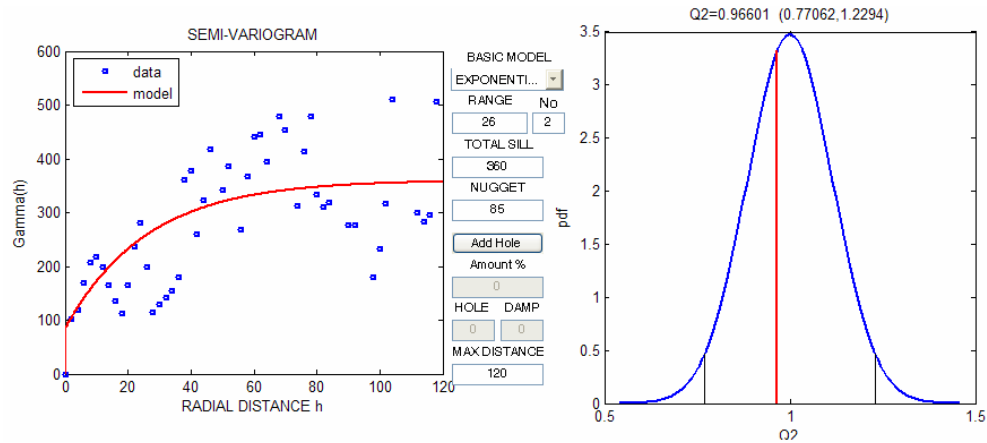
Η σήραγga διέρχεται στο μεγαλύτερο μέρος της μέσα από τον σχηματισμό GR1 και σε κάποιες περιοχές διέρχεται μέσω της φλέβας PF, ενώ σε ένα μικρό τμήμα της διέρχεται πολύ κοντά ή και τέμνει τον σχηματισμό GR2. Για τον λόγω αυτό η εκτίμηση του RMR στην σήραγga γίνεται αποκλειστικά με την χρήση των δεδομένων από τους σχηματισμούς GR1 και PF.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχηματισμό GR1 είναι 150 σύνθετα δείγματα μήκους 2 μέτρων που δημιουργήθηκαν με την εφαρμογή της εξ.2.3 στα δείγματα των 12 (+1) γεωτρήσεων του Σχ.5.36.α, οι οποίες βρίσκονται σε κυμαινόμενες αποστάσεις μεταξύ τους, μεγαλύτερες των 20m. Στις 12 προυπάρχουσες γεωτρήσεις έγινε προσθήκη μιας "εικονικής" γεώτρησης, με την χρήση των δεδομένων της SM-101, η οποία τοποθετήθηκε μεταξύ της SM-101 και SF-Esglesias. Η προσθήκη της γεώτρησης αυτής έγινε λόγω του ότι υπάρχει έλλειψη δεδομένων στην περιοχή αυτή και οι μηχανικές ιδιότητες των σχηματισμών παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Τα στατιστικά στοιχεία καθώς και η στατιστική κατανομή των δεδομένων παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα:



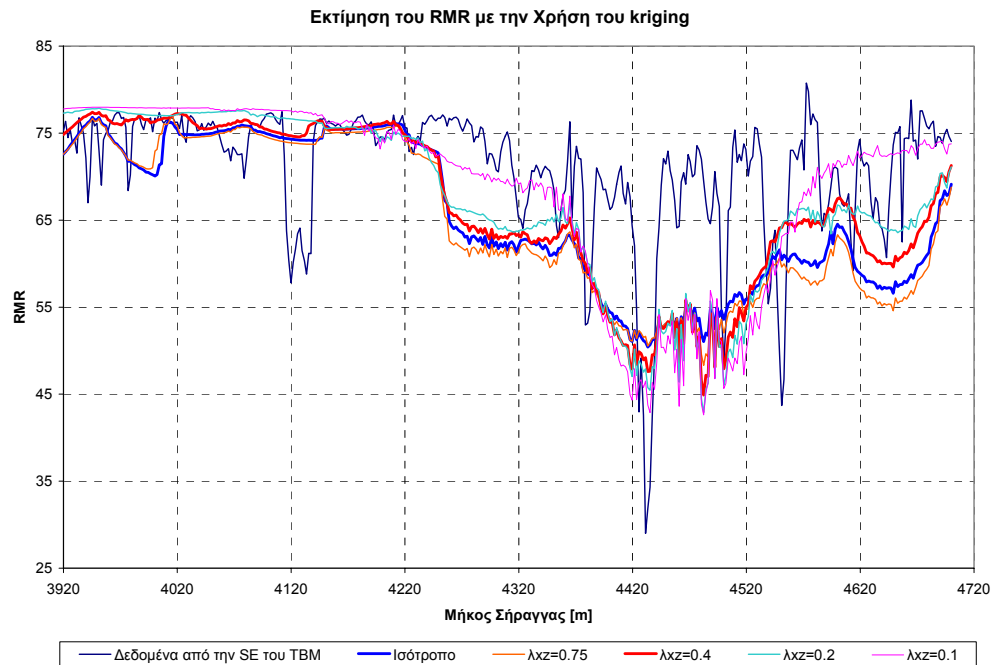
Σχήμα 5.35: α) Κατανομή δεδομένων, β) Σύνθετα δείγματα γεωτρήσεων για τον σχηματισμό GR1 και PF

Αρχικά η επίλυση γίνεται με την θεώρηση ισότροπης συμπεριφοράς οπότε υπολογίζεται το μέσο ημιβαριόγραμμα (omnidirectional), το οποίο παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα και για την περιγραφή του χρησιμοποιείται το εκθετικό μοντέλο που οι παράμετροι του προκύπτουν από την μέθοδο των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων, όπου οι συντελεστές βάρους επιλέχθηκαν με βάση τον αριθμό των ζευγών.



Σχήμα 5.36: Μέσο ισότροπο ημιβαριόγραμμα (omnidirectional) και η αξιολόγηση του

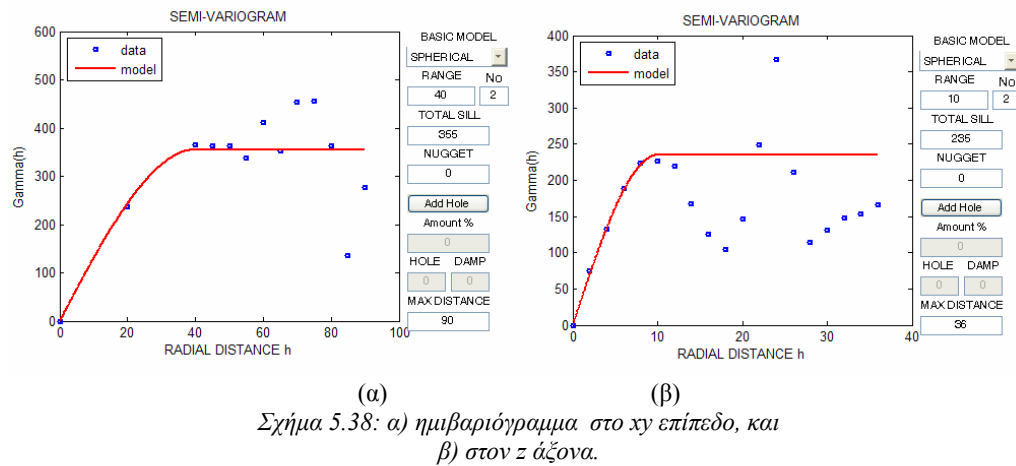
Η εκτίμηση έγινε κατά μήκος της σήραγγας η οποία αποτελείται από 25746 σημεία των κέντρων βάρους τετραεδρικών στοιχείων που κατασκευάστηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών  $FLAC^{3D}$  (Itasca, 2002). Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων υπολογίζεται η μέση τιμή από το μέτωπο της σήραγγας και συγκρίνεται με τις αναμενόμενες τιμές που υπολογίστηκαν από την ειδική ενέργεια κοπής του TBM.



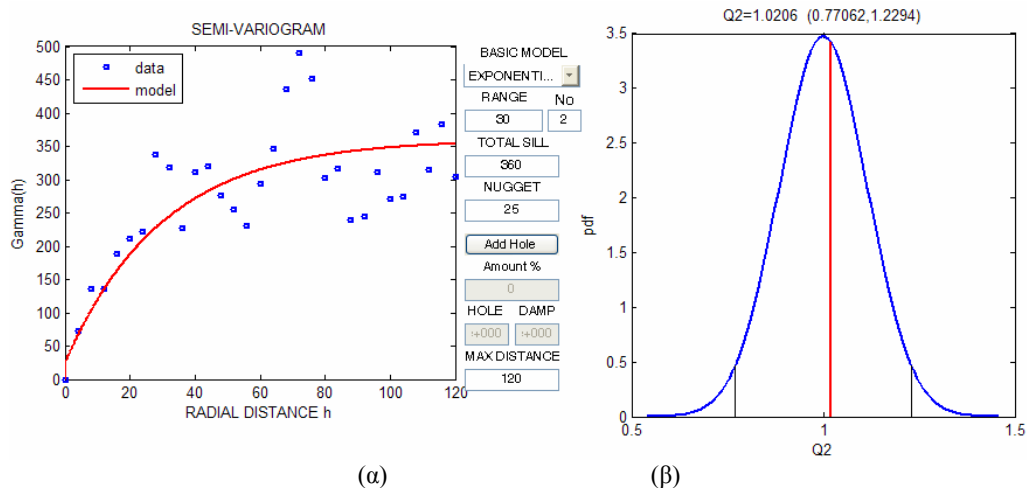
Σχήμα 5.37: Αξιολόγηση ισότροπης και ανισότροπων επιλύσεων

Από την εξέταση του προηγούμενου σχήματος φαίνεται ότι το RMR υποεκτιμάτε στο μεγαλύτερο τμήμα της σήραγγας. Το μοντέλο αυτό μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την ανισότροπη επίλυση, παρόλο την έλλειψη δεδομένων, καθώς τα υπάρχοντα δεδομένα παρουσιάζουν μια εμφανή ανισοτροπία κατά τον άξονα z, όπου η τιμή του RMR μεταβάλλεται γρηγορότερα από ότι στο xy επίπεδο (Σχ.5.35.β). Ο προσδιορισμός της ανισοτροπίας εκτιμήθηκε με βάση το μέσο ημιβαριόγραμμα στο xy επίπεδο (ισότροπο) και με το ημιβαριόγραμμα στην κατακόρυφη διεύθυνση (z) (Σχ.5.38.α-β), τα οποία υπολογίστηκαν με βήμα απόστασης (lag) 5m και ανοχή 50% και έρευνα με ανοχή στην διεύθυνση  $35^\circ$ , ενώ το μέγιστο πλάτος (bandwidth) ορίστηκε 30m. Επειδή η προσαρμογή των παραμέτρων στα

ημιβαριογράμματα του σχήματος 5.38 είναι υποκειμενική, η επιλογή έγινε έπειτα από την εξέταση των αποτελεσμάτων του kriging για διάφορους λόγους ανισοτροπίας (0.1, 0.2, 0.4, 0.75, 1), από όπου επιλέχθηκε ο λόγος ανισοτροπίας 0.4.

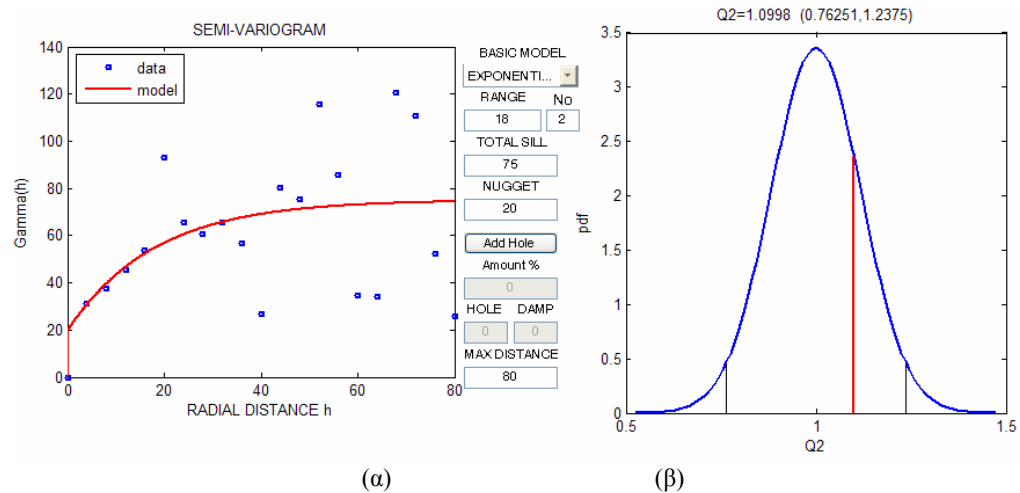


Μετά την διόρθωση της γεωμετρικής ανισοτροπίας σύμφωνα με την διαδικασία της εν.2.2.3 προκύπτει το ισοδύναμο ισότροπο ημιβαριόγραμμα, υπολογισμένο με βήμα απόστασης 4m και ανοχή 50%. Το γεωμετρικά διορθωμένο πειραματικό ημιβαριόγραμμα παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα, οπότε για την εύρεση της αντιπροσωπευτικής μέσης τάσης που ακολουθεί γίνεται αφαίρεση όλων των σημείων που έχουν υπολογισθεί με λιγότερα από 10 ζεύγη. Έτσι επιλέγεται το εκθετικό μοντέλο του οποίου οι παράμετροι επιλέχθηκαν έτσι ώστε να προσαρμόζονται καλύτερα στα πρώτα 120m και ταυτόχρονα η ακτίνα επίδρασης να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη (Σχ.5.39.α). Η μεγάλη ακτίνα επίδρασης είναι αναγκαία για την καλύτερη περιγραφή της δομής του πειραματικού ημιβαριογράμματος σε μεγάλες αποστάσεις, σε αντίθετη περίπτωση θα χρειαζόταν η υπέρθεση διαφορετικών θεωρητικών ημιβαριογραμμάτων. Στο Σχ.5.39.β φαίνεται ότι η στατιστική τιμή  $Q_2$  είναι εντός των ορίων εμπιστοσύνης 95% οπότε δεν υπάρχει λόγος για την απόρριψη του επιλεγμένου μοντέλου. Αναλυτικά οι παράμετροι του μοντέλου παρουσιάζονται στον Πιν.5.9.



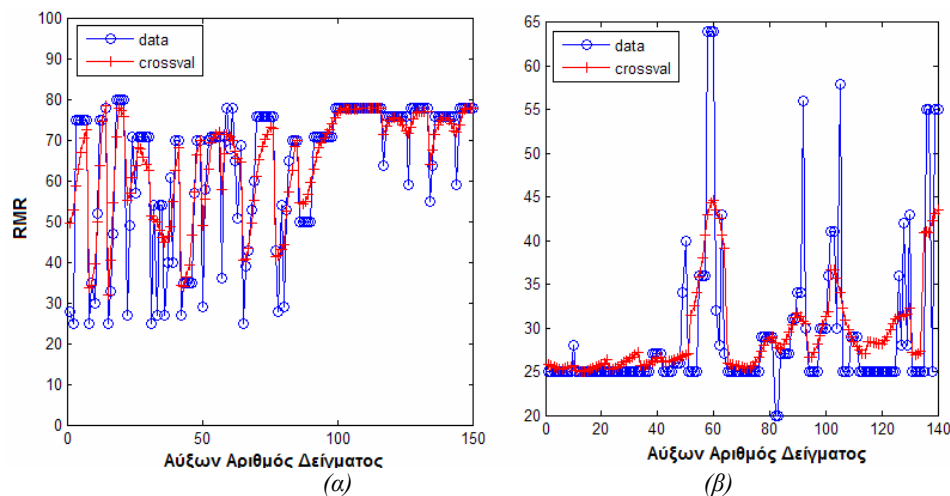
Ακολουθώντας την ίδια ακριβώς διαδικασία, προσδιορίζεται και η χωρική εξάρτηση για τα 140 σύνθετα δείγματα του σχηματισμού GR2, θεωρώντας ότι η ανισοτροπία και σε αυτήν την περίπτωση είναι η ίδια καθώς ο σχηματισμός αυτός έχει σχηματισθεί την ίδια περίοδο και κάτω από τις ίδιες συνθήκες με τον GR1 αλλά έχει υποστεί έντονη επιφανειακή αποσάθρωση.

Μετά την γεωμετρική διόρθωση και τον υπολογισμό του ημιβαριογράμματος με βήμα απόστασης 4m και 50% ανοχή, το μοντέλο που ταιριάζει καλύτερα και στην περίπτωση αυτή είναι το εκθετικό με μήκος συσχέτισης 54 m.



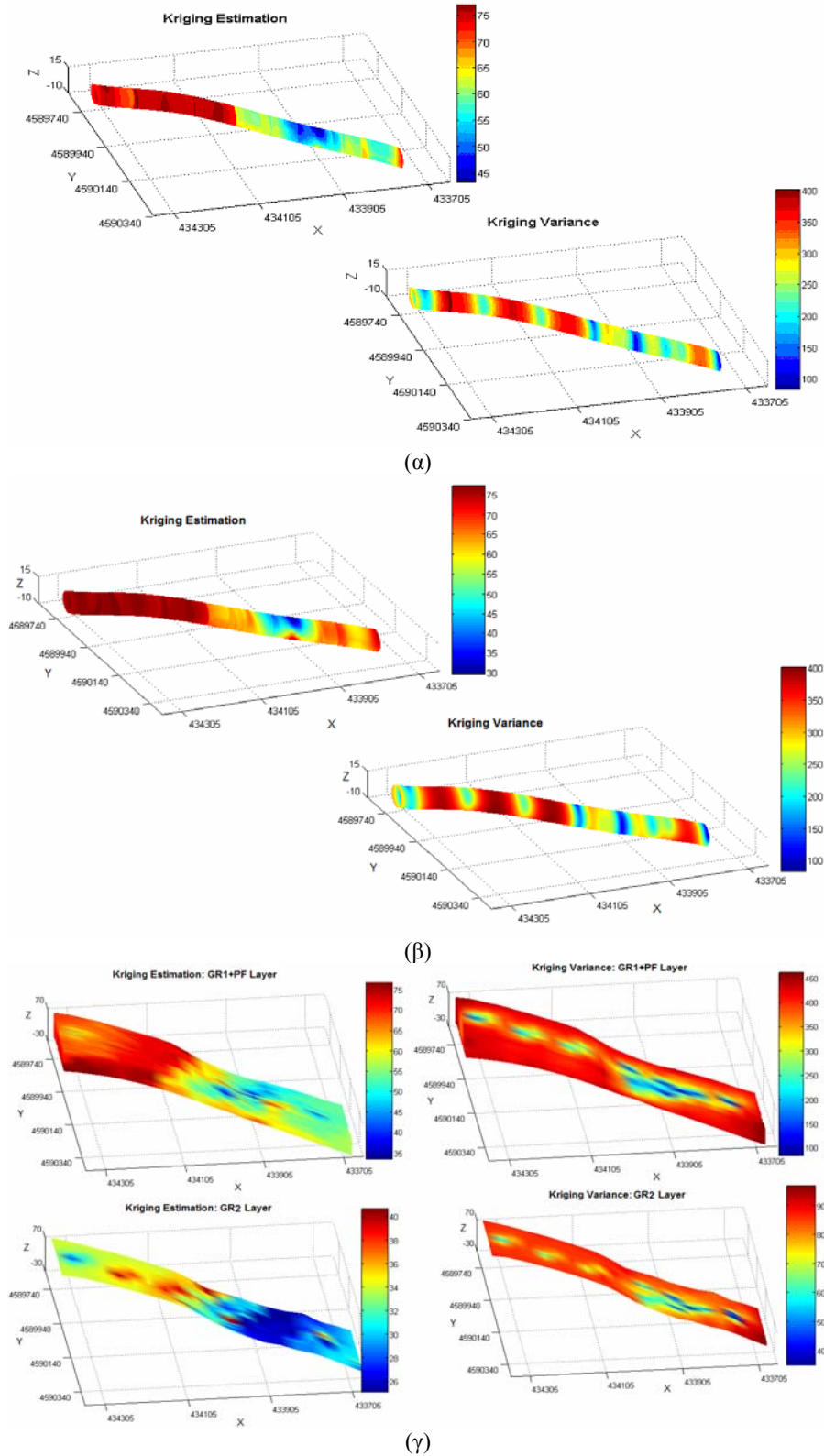
Σχήμα 5.40: α) Διορθωμένο γεωμετρικά ημιβαριόγραμμα (GR2), β) αξιολόγηση ημιβαριογράμματος.

Για την αξιολόγηση των εκτιμήσεων στους σχηματισμούς GR1 και PF έγινε επίλυση της με την χρήση της μεθόδου παρεμβολής kriging σε μη κανονικό κάρναβο σημείων αποτελούμενο από 10540 σημείων των κέντρων βάρους τετραεδρικών στοιχείων του FLAC<sup>3D</sup>. Στην συνέχεια έγινε αναπαραγωγή των σύνθετων δειγμάτων των γεωτρήσεων. Η αντίστοιχη διαδικασία έγινε για τον σχηματισμό GR2 για μη κανονικό κάρναβο σημείων αποτελούμενο από 3490 σημεία. Από την αξιολόγηση προκύπτει ότι τα αποτελέσματα του kriging είναι αποδεκτά καθώς αναπαράγουν τα χρησιμοποιούμενα δεδομένα σε ικανοποιητικό βαθμό (Σχ.5.41).



Σχήμα 5.41: Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για τον σχηματισμό: α) GR1 και PF, β) τον GR2

Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του kriging στην σήραγγα και στην γύρω από αυτήν περιοχή, όσον αφορά τους βραχώδους σχηματισμούς (Σχ.5.42).

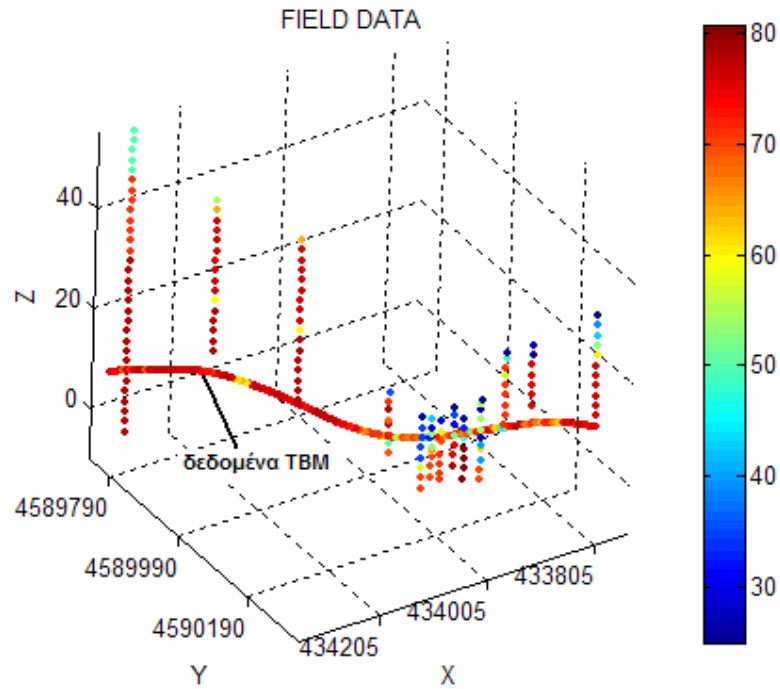


Σχήμα 5.42: Χάρτες εκτίμησης του RMR και της διασποράς:

- α) στην σήραγγα, ισότροπη επίλυση,
- β) στην σήραγγα, ανισότροπη επίλυση, και
- γ) στην περιοχή γύρω από την σήραγγα, ανισότροπη επίλυση



Για την περαιτέρω βελτίωση του γεωστατιστικού μοντέλου γίνεται συνδυασμός των δεδομένων των γεωτρήσεων και των συνεχόμενων καταγραφών του TBM που αποτελείται από 399 μετρήσεις των παραμέτρων λειτουργίας του TBM (βλ. Σχ.5.33). Από τις παραμέτρους αυτούς γίνεται ο υπολογισμός της ειδικής ενέργειας θρυμματισμού του πετρώματος και στην συνέχεια η εκτίμηση του RMR με την χρήση της κλασματικής εξ. (5.5).



Σχήμα 5.43: Εισαγωγή των δεδομένων του TBM

Το ημιβαριόγραμμα που χρησιμοποιείται συνεχώς αναβαθμίζεται με την εισαγωγή νέων δεδομένων με βήμα 100m και αξιολογείται με την χρήση των στατιστικών ελέγχων Q. Για την απλούστευση της διαδικασίας η ανισοτροπία θεωρείται η ίδια σε όλα τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα του kriging στον σχηματισμό GR1 αξιολογούνται με την αναπαραγωγή των αρχικών δεδομένων από τις εκτιμήσεις στα 10540 σημεία του FLAC<sup>3D</sup> για τον σχηματισμό GR1 (βλ. Πίν.4.9). Στο Σχ.5.45 παρουσιάζεται χαρακτηριστικά το ημιβαριόγραμμα μετά την εισαγωγή και των 399 δεδομένων του TBM.



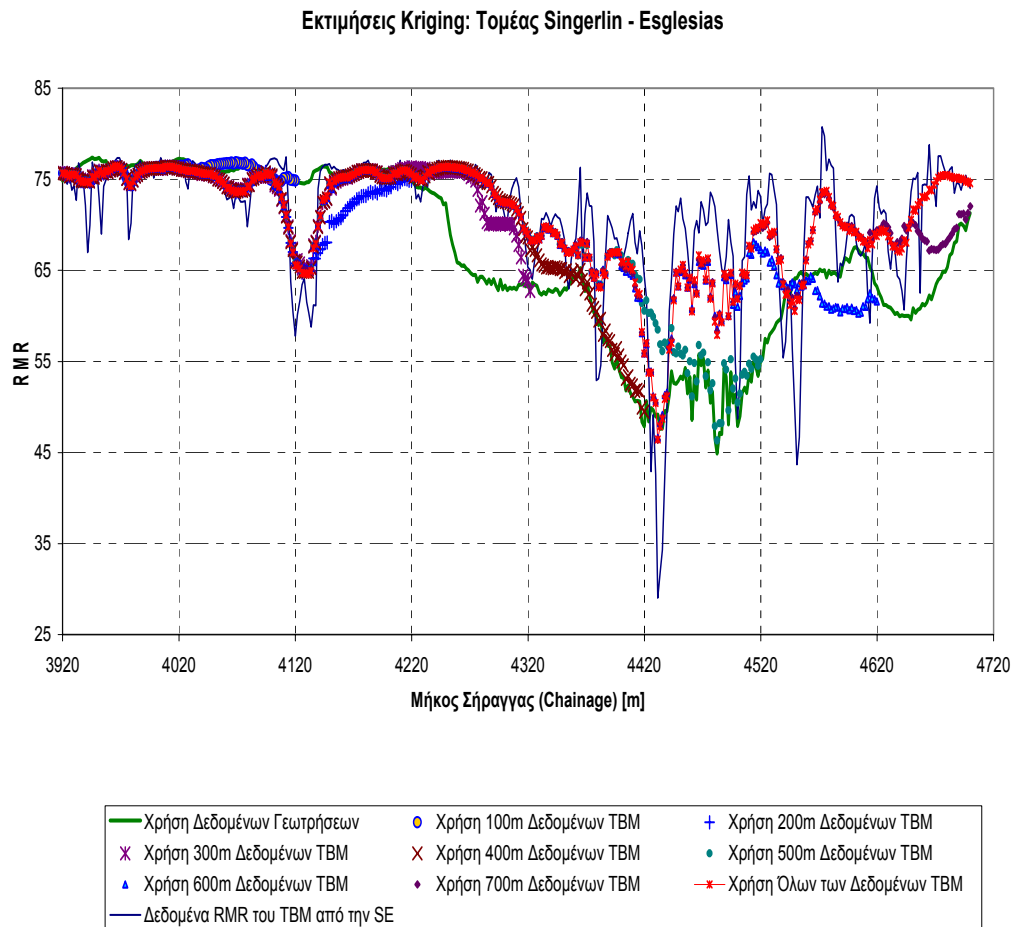
Πίνακας 5.9: Παράμετροι αναβάθμισης μοντέλου kriging

Παράμετροι	Δεδομένα Γεωτρήσεων	+100m δεδομένα TBM	+200m	+300m	+400m	+500m	+600m	+700m	+Όλα TBM data
Γενικά Στοιχεία									
Δεδομένα	150	203	254	304	356	406	458	508	549
Διασπορά Δεδομένων	293	243	205	179	157	141	144	136.5	129
Αριθμός Βημάτων Απόστασης (Lag)	30	30	30	30	30	30	50	50	50
Βήμα Απόστασης (Lag)	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Χρόνος Υπ/μού ημιβαριογράματος [sec]	0.67	0.89	1.17	1.65	2.00	2.41	3.00	3.28	3.81
Ακτίνα έρευνας [m]	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Σημεία Παρεμβολής (Σήραγγα)	25746	25746	25746	25746	25746	25746	25746	25746	25746
Χρόνος Kriging [sec]	15.11	15.45	15.97	16.16	16.56	16.75	17.05	17.41	17.72
Σημεία Παρεμβολής (GR1)	10540	10540	10540	10540	10540	10540	10540	10540	10540
Χρόνος Kriging [sec]	6.65	6.81	6.94	7.03	7.43	7.47	7.52	7.72	7.69
Θεωρητικό Ημιβαριόγραμμα									
Μοντέλο	Εκθετικό	Εκθετικό	Εκθετικό	Εκθετικό	Εκθετικό	Εκθετικό	Εκθετικό	Εκθετικό	Εκθετικό
$c_0$	360	225	155	113	100	105	115	120	130
$r_0$	30	27	25	14	21	17	12	14	20
Μήκος Συσχέτισης	90	81	75	42	63	51	36	42	60
nugget	25	24	23	18	17	12	0	0	5
Λόγος Ανισοτροπίας	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Αξιολόγηση Παραμέτρων Kriging									
$Q_1$	0.32	0.21	0.21	0.11	0.14	0.095	0.04	0.03	0.02
	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>V</b>	<b>X</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>
Κάτω όριο	-0.16	-0.14	-0.12	-0.115	-0.11	-0.10	-0.09	-0.09	-0.085
Πάνω όριο	0.16	0.14	0.12	0.115	0.11	0.10	0.09	0.09	0.085
$Q_2$	1.02	1.05	1.08	1.03	1.102	0.98	0.99	1.01	0.98
	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>
Κάτω όριο	0.77	0.8	0.82	0.84	0.85	0.86	0.87	0.875	0.88
Πάνω όριο	1.23	1.2	1.18	1.16	1.15	1.14	1.13	1.125	1.12
Crossval $Q_1$	-0.025	-0.035	-0.016	-0.018	-0.013	-0.0013	-0.0004	-0.0288	-0.0167
	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>	<b>V</b>
<b>V</b> επιτυχής <b>X</b> ανεπιτυχής									

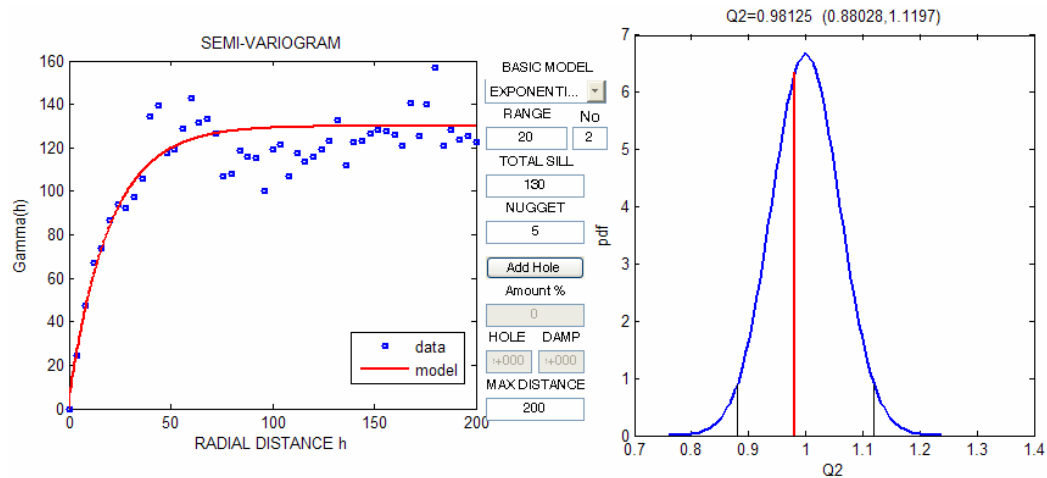
Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα, προκύπτει ότι εκτός από την αναβάθμιση των προβλέψεων γίνεται και ουσιαστική αναβάθμιση και στο ταίριασμα του θεωρητικού ημιβαριογράματος, πράγμα που φαίνεται από την αξιολόγηση του ημιβαριογράματος καθώς στα πρώτα στάδια της εισαγωγής των δεδομένων η στατιστική τιμή  $Q_1$  ήταν εκτός ορίων 95%. Στις περιπτώσεις αυτές δεν μπόρεσε να βρεθεί μοντέλο το οποίο να

ελαχιστοποιεί το Q1 παρόλα αυτά τα μοντέλα έγιναν αποδεκτά καθώς οι υπόλοιπες μέθοδοι αξιολόγησης ήταν επιτυχείς (Q2, cross validation).

Η αναβάθμιση των προβλέψεων του kriging αποδεικνύεται με την σύγκριση των αποτελεσμάτων στα 100m μπροστά από το κάθε στάδιο εισαγωγής των δεδομένων (100m, 200m κ.τ.λ.), με τα δεδομένα του RMR που προκύπτουν από τις καταγραφές του TBM και που αναπαριστώνται με συνεχή γραμμή και με τις προβλέψεις του kriging για το RMR με χρήση μόνο των δεδομένων των γεωτρήσεων που παρουσιάζονται με έντονη συνεχή γραμμή στο Σχ.5.44.

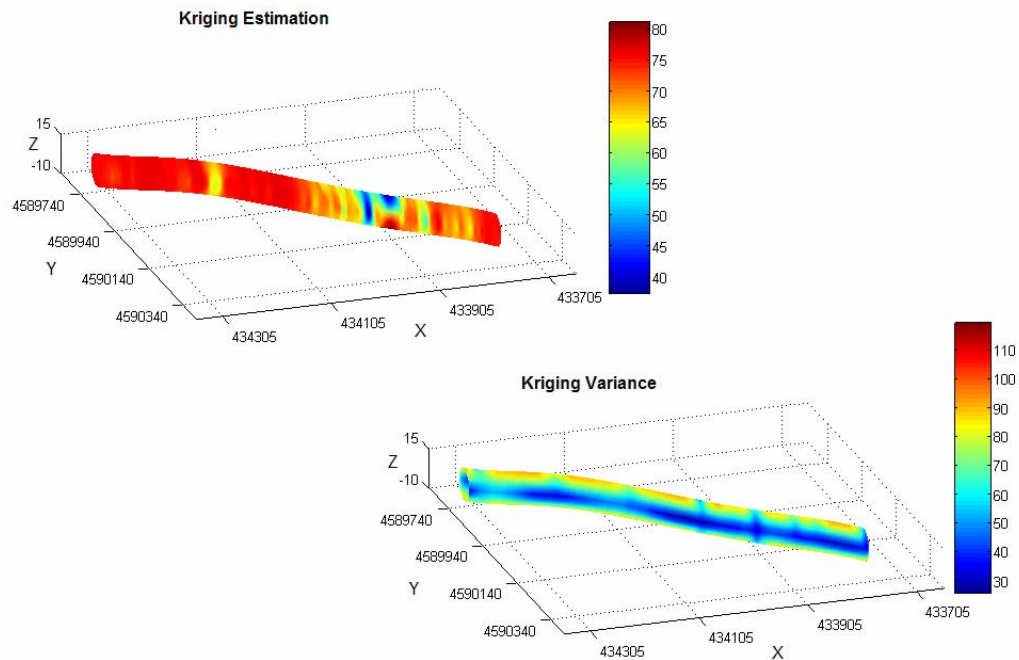


Σχήμα 5.44: Σύγκριση προβλέψεων kriging και δεδομένων του TBM κατά μήκος της σήραγγας.

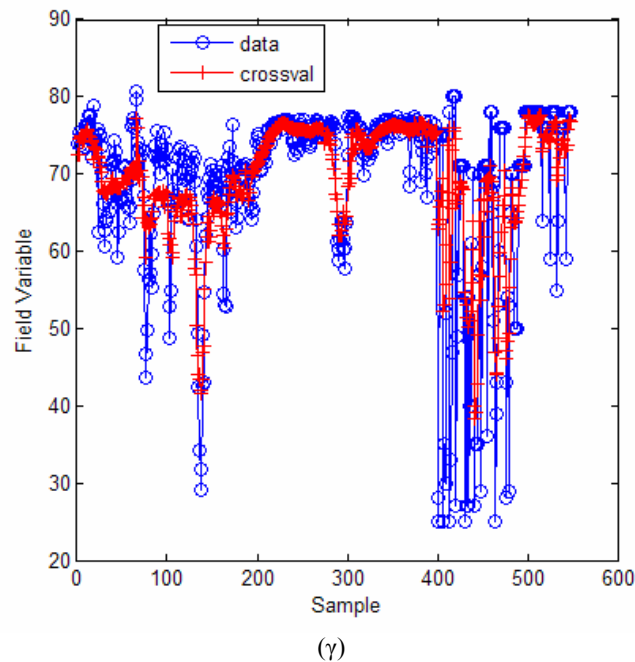
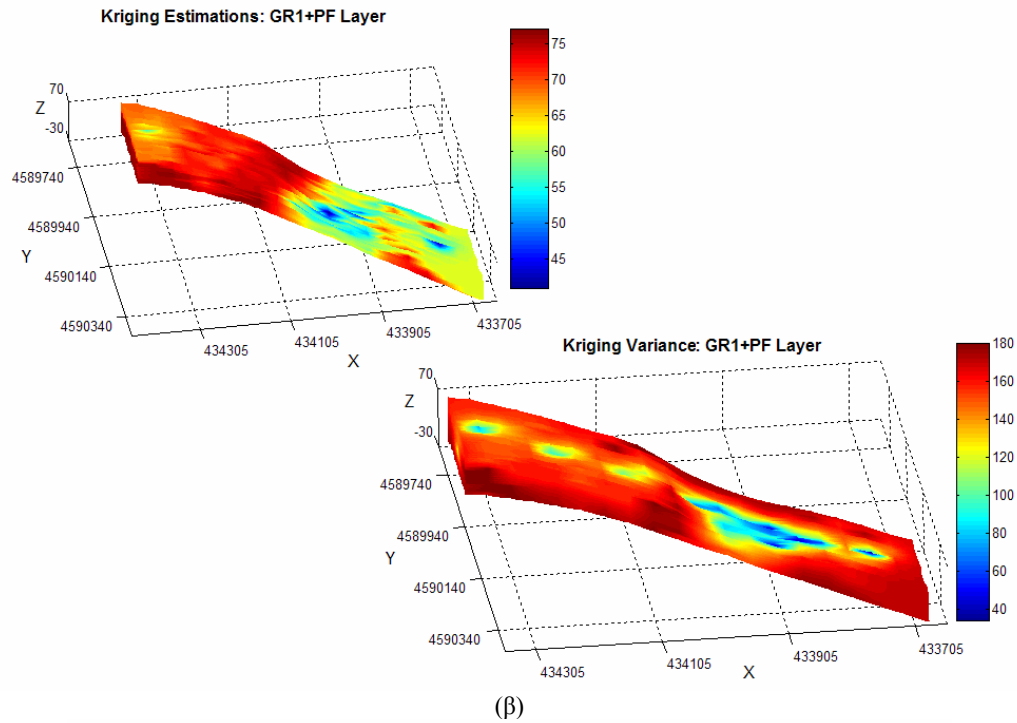


Σχήμα 5.45: Ανάνεωση του μοντέλου ημιβαριογράμματος

Η χρήση όλων των καταγραφών του TBM στα ήδη υπάρχοντα δεδομένα των γεωτρήσεων, έχει σαν αποτέλεσμα την καλύτερη προσαρμογή του θεωρητικού μοντέλου στο εκτιμώμενο πειραματικό ημιβαριόγραμμα, πράγμα που κάνει πιο αξιόπιστες τις εκτιμήσεις του kriging. Εκτός αυτού η εισαγωγή και μόνο επιπλέον δεδομένων αναβαθμίζει την πρόβλεψη, μειώνοντας την αβεβαιότητα, καθώς χρησιμοποιούνται περισσότερα σημεία κατά την εκτίμηση του kriging. Τα αποτελέσματα για την σήραγγα και τον σχηματισμό GR1 και PF παρουσιάζονται στο Σχ.5.46, καθώς τα αποτελέσματα στον σχηματισμό GR2 παραμένουν ως έχουν.



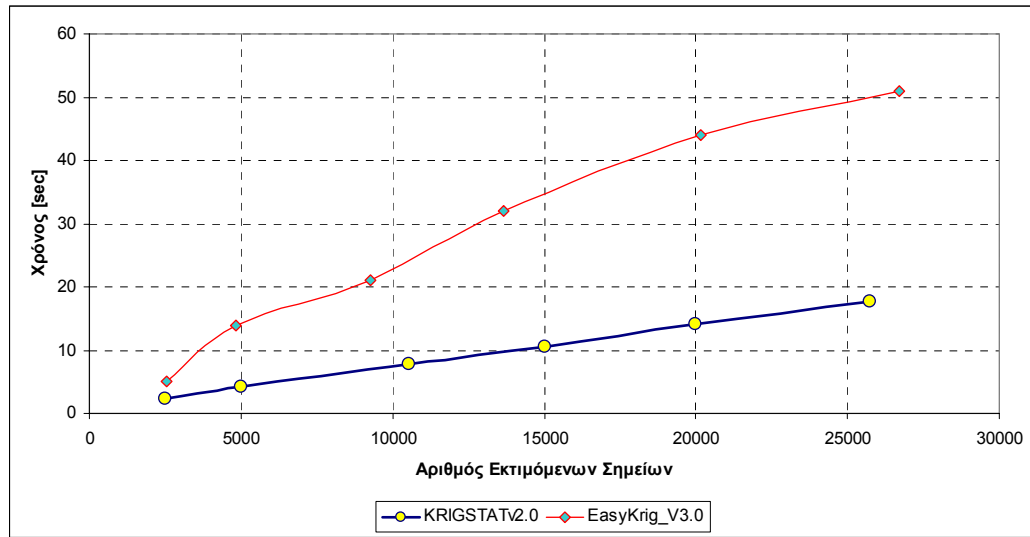
(α)



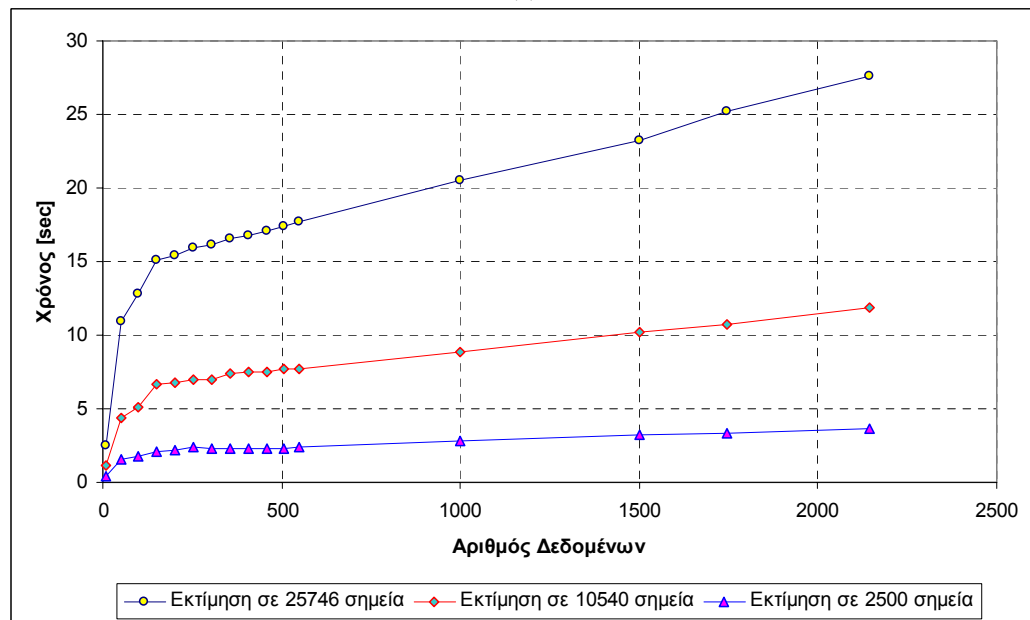
Σχήμα 5.46: Αναβάθμιση της πρόβλεψης του μοντέλου kriging: α) κατά μήκος της σήραγγας, β) στην περιοχή γύρω από την σήραγγα, και γ) διασταυρούμενη αξιολόγηση.

Η ταχύτητα επίλυσης του KRIGSTATv2.0 ερευνάτε στα επόμενα διαγράμματα στα οποία παρουσιάζεται ο χρόνος επίλυσης του kriging σε συνάρτηση με τον αριθμό δεδομένων και του αριθμού των σημείων της εκτίμησης, ενώ ταυτόχρονα έγινε σύγκριση με το λογισμικό EasyKrig\_V3.0 διαθέσιμο ελεύθερα στο διαδίκτυο ([http://globec.who.edu/pub/software/kriging/easy\\_krig/V3.0/](http://globec.who.edu/pub/software/kriging/easy_krig/V3.0/)). Η επίλυση έγινε με την χρήση του περιβάλλοντος Matlab σε

υπολογιστή HP Intel Pentium με επεξεργαστή 2 GHz και 512 MB RAM, ενώ το λειτουργικό σύστημα είναι τα Microsoft Windows XP Professional 2002.



(α)



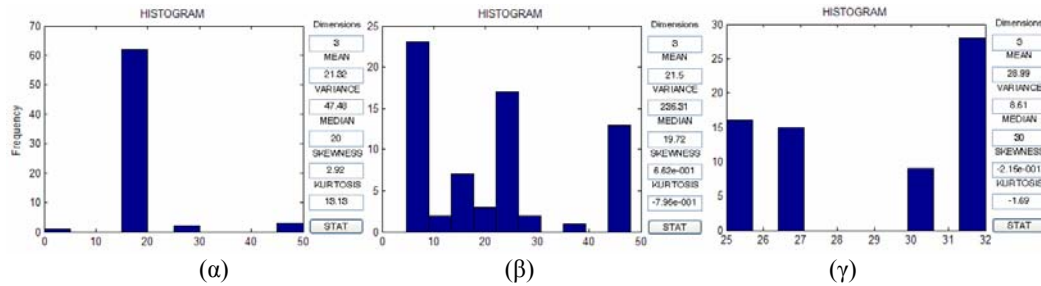
(β)

Σχήμα 5.47: Χρόνος επίλυσης του kriging συναρτήσει του αριθμού: α) των σημείων εκτίμησης και β) των δεδομένων.

Η εξάρτηση του χρόνου είναι γραμμική με την αύξηση των σημείων εκτίμησης, όπως φαίνεται στο Σχ.5.47.α για τα 549 δεδομένα γεωτρήσεων και TBM. Η αύξηση του αριθμού των δεδομένων είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επιδράει σημαντικά στον χρόνο της εκτίμησης (Σχ.5.45.β). Ενώ η ταχύτητα επίλυσης είναι 2-3 φορές μεγαλύτερη από την επίλυση με το λογισμικό EasyKrig\_V3.0, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις μεγάλου αριθμού δεδομένων εκτίμησης.

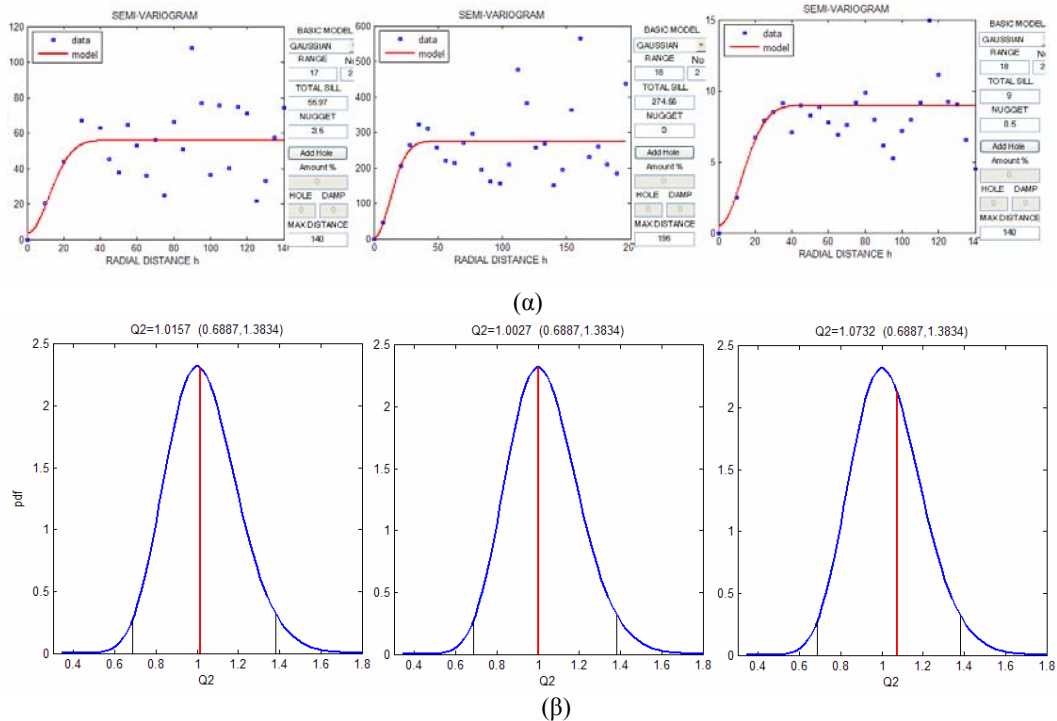
### 5.3.5. Επεξεργασία Εδαφικών Σχηματισμών

Για τα ανώτερα εδαφικά καλύμματα οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν την μηχανική συμπεριφορά τους είναι η συνοχή, η γωνία εσωτερικής τριβής και το μέτρο ελαστικότητας. Οπότε στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι προβλέψεις του kriging ξεχωριστά για τις 3 αυτές μεταβλητές με την χρήση 68 συνθετικών δειγμάτων των 12 γεωτρήσεων (+1 εικονική) τα στατιστικά των οποίων δίδονται στο Σχ.5.48 α-γ.



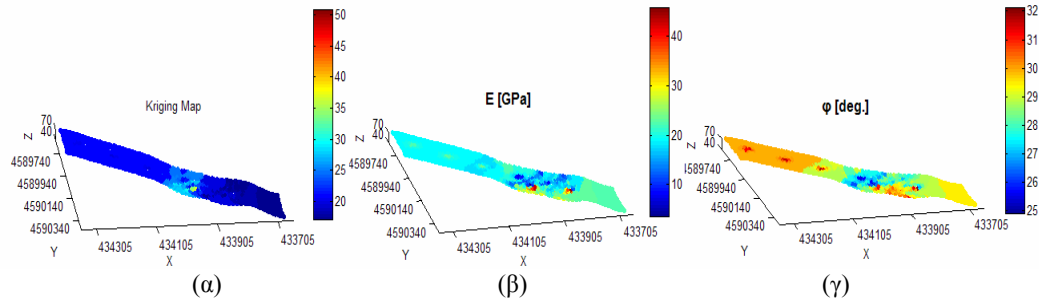
Σχήμα 5.48: Στατιστικές κατανομές: α) συνοχής  $c$  [kPa], β) του μέτρου ελαστικότητας του Young  $E$  [GPa], και γ) της γωνίας εσωτερικής τριβής  $\phi$  [°]

Ο υπολογισμός των πειραματικών ημιβαριογραμμάτων έγινε με θεώρηση ισοτροπίας και με την χρήση των ίδιων παραμέτρων: βήμα απόστασης 5 m και ανοχή 50%. Το μοντέλο που περιγράφει την χωρική δομή είναι το γκαουσιανό και για τις τρεις περιπτώσεις δεδομένων ( $c$ ,  $E$ ,  $\phi$ ), οι παράμετροι των οποίων παρουσιάζονται στο Σχ.5.49.α. Η αξιολόγηση και στις τρεις περιπτώσεις ήταν επιτυχής για το κανονικό kriging με ακτίνα έρευνας τα 200 μέτρα (Σχ.5.49.β).



Σχήμα 5.49: α) Ημιβαριογράμματα για τις μεταβλητές:  $c$ ,  $E$  και  $\phi$ , αντίστοιχα β) Η αξιολόγηση των παραμέτρων των ημιβαριογραμμάτων

Τα αποτελέσματα του kriging για τον εδαφικό σχηματισμό QCS έγιναν σε μη κανονικό κάρναβο 2687 σημείων των κέντρων βάρους των τετράεδρων του FLAC<sup>3D</sup> και συνοψίζονται στο επόμενο διάγραμμα:



Σχήμα 5.50: Εκτιμήσεις εδαφικού σχηματισμού QCS για τις παραμέτρους:  
 α) συνοχής  $c$  [kPa],  
 β) του μέτρου ελαστικότητας του Young  $E$  [GPa], και  
 γ) της γωνίας εσωτερικής τριβής  $\phi$  [°]

Οι εκτιμήσεις που προκύπτουν για τους βραχώδους και τους εδαφικούς σχηματισμούς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του συνολικού γεωτεχνικού μοντέλου σε συνδυασμό με κάποιο αριθμητικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων/πεπερασμένων διαφορών όπως για παράδειγμα του FLAC<sup>3D</sup> ([Stavropoulou et. al., 2007](#)).

## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα – Προτάσεις

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εξέταση των διαφόρων περιπτώσεων εξόρυξης σιδηρών με την χρήση του Μηχανήματος Ολομέτωπης Κοπής είναι:

- Η χρήση της γεωστατιστικής επεξεργασίας επιτρέπει τον συνδυασμό δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές πηγές, έτσι επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός πιο αξιόπιστου μοντέλου πρόβλεψης των γεωμηχανικών παραμέτρων μπροστά και γύρω από το μέτωπο της εξόρυξης.
- Η εύρεση μιας σχέσης που να συνδέει τους παραμέτρους λειτουργίας του TBM με τις γεωμηχανικές παραμέτρους του πετρώματος, είναι ένα από τα κυριότερα ζητούμενα της παρούσας εργασίας. Έτσι με την χρήση της μεθόδου kriging προσδιορίστηκε η εμπειρική κλασματική σχέση πρώτου βαθμού που περιγράφει καλύτερα την εξάρτηση των δεδομένων του RMR και της ειδικής ενέργειας κοπής.
- Η εμπειρική σχέση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των γεωμηχανικών παραμέτρων από τις επί τόπου μετρήσεις της ειδικής ενέργειας κατά την λειτουργία του μηχανήματος TBM. Οι εκτιμήσεις αυτές μπορούν στην συνέχεια να συνδυασθούν, με την κατάλληλη στατιστική επεξεργασία, με τα υπάρχοντα δεδομένα που προέρχονται από τις γεωτρήσεις για την αναβάθμιση του μοντέλου πρόβλεψης στην περιοχή που περνάει ή πρόκειται να περάσει η σήραγγα.
- Η σχέση αυτή επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της ειδικής ενέργειας κατά μήκος της σήραγγας από τις μετρήσεις του RMR στην περίπτωση που υπάρχουν αρκετά δεδομένα ή από τις προβλέψεις που προκύπτουν με την χρήση της μεθόδου kriging.
- Ο αλγόριθμος kriging που χρησιμοποιήθηκε, όπως προκύπτει από την εξέταση των τριών περιπτώσεων εξόρυξης σιδηρών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση μιας μεγάλης γκάμας προβλημάτων που περιλαμβάνουν την εκτίμηση σε ανισότροπο μέσο, επίλυση δεδομένων με μη σταθερή τιμή (ύπαρξη τάσης στα δεδομένα), επίλυση για μη κανονικά δεδομένα και τέλος είναι δυνατή και η εκτίμηση σε περιπτώσεις ετερογενούς μέσου. Η ευελιξία και η αξιοπιστία της συγκεκριμένης μεθόδου δεν μπορεί να επιτευχθεί από τις άλλες μεθόδους γραμμικής παρεμβολής. Εκτός αυτού ένα βασικό πλεονέκτημα του kriging είναι ότι μαζί με την πρόβλεψη υπολογίζεται και η αβεβαιότητα της. Λόγω των παραπάνω προτερημάτων η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων της γεωμηχανικής.

Τέλος για την συνέχιση και περαιτέρω αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας προτείνονται τα εξής:

- Για την εκτίμηση της ειδικής ενέργειας και του RMR να χρησιμοποιηθεί και η πληροφορία που προέρχεται από την μεταβλητότητα των δύο μεταβλητών με την επίλυση με την μέθοδο γραμμικής παρεμβολής του cokriging.
- Να γίνει συνδυασμός του αλγορίθμου kriging με αριθμητικό κώδικα επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων, για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς του πετρώματος στην περιοχή γύρω από την σήραγγα.
- Εναλλακτικά της μεθόδου kriging μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι στοχαστικές προσομοιώσεις ([Deutsch & Journel, 1992](#)) (π.χ. Monte Carlo, Simulation annealing κ.τ.λ.).



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Χριστόπουλος, Δ., 2006. *Εφαρμοσμένη Γεωστατιστική*. Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [2] Armstrong, M., 1992. *Positive Definiteness is not Enough*. Mathematical Geology, Vol. 24, No1.
- [3] Barton, N.R., R.Lien & J.Lunde, 1974. *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock mech, Vol.6, No 4, p.p. 189-239.
- [4] Barton N. (2002): Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 39, p.p. 185-216.
- [5] Bieniaski, Z.T., 1973. *Engineering classification of jointed rock masses*. Trans. S.Afr. Inst. Civ. Engrs, Vol 15, p.p. 335-344.
- [6] Bieniaski, Z.T., 1989. *Engineering rock mass classifications*. New York Wiley.
- [7] Calzada, M.E. & S.M. Scariano, 2000. *Visual EDF Software to Check the Normality Assumption*. Loyola University New Orleans.
- [8] Carr, J.R., Myers, D.E. and Glass, C.E., 1985. *Cokriging – A Computer Program*, Computers & Geosciences, Vol.11, No 2, p.p. 111-127.
- [9] Chakravarti, I.M., R.G. Laha & J. Roy, 1967. *Handbook of Methods of Applied Statistics, Volume I*, John Wiley and Sons, p.p. 392-394.
- [10] Clark, I., 1977. *Practical Kriging in Three Dimensions*. Computers & Geosciences, Vol. 3, Pergamon Press, p.p. 173-180
- [11] Compagnoni, R., G.V. Dal Piaz, J.C. Hunziker, G. Gosso, B. Lombardo & P.F. Williams, 1977. *The Sesia-Lanzo Zone, a slice of continental crust with alpine high pressure-low temperature assemblages in the Western Italian Alps*. Rend Soc. Ital Mineral Petrol 33, p.p. 281-334.
- [12] Cressie, N. A. C., 1991. *Statistics for Spatial Data*. John Wiley & Sons, New York.
- [13] Cressie, N.A.C., 1985. *Fitting variogram models by weighted least squares*. Journal of the International Association of Mathematical Geology, 17, 563–86
- [14] Dal Piaz, G.V., J.C. Hunziker & G. Martinotti, 1972. *La Zona Sesia-Lanzo e l'evoluzione tettonico-metamorfica delle Alpi nordoccidentali interne*. Mem Soc Geol Ital 11, p.p. 433-466.
- [15] Deutsch, C.V. & A.G. Journel, 1992. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York.
- [16] Dowd, P., 1982. *Lognormal Kriging – The General Case*. Mathematical Geology, Vol. 14, No 5, p.p. 475-499.
- [17] Elliasi Rad, T., T. Critchlow & G. Abdulla, 2002. *Statistical Modeling of Large-Scale Simulation Data*. Edmonton, Alberta, Canada.

- [18] Evans, J., R.A. Johnson & D.W. Green, 1989. *Two and Three Parameter Weibull Goodness of Fit Tests*. United States Department of Agriculture, Paper FPL-RP-493.
- [19] Fukui, K. & S. Okubo, 2005. *Some Attempts for Estimating Rock Strength and Rock Mass Classification from Cutting Force and Investigation of Optimum Operation of Tunnel Boring Machines*. Rock Mech. Rock Engng.
- [20] Gribov, A., K. Krivoruchko & J. Ver Hoef. *Modified weighted least squares semivariogram and covariance model fitting variogram*. Computer Applications in Geology. Vol 3
- [21] Journel, A.G. & R. Froidevaux, 1982. *Anisotropic hole-effect modelling*. *Mathematical Geology*. Vol. 14(3), p.p. 217–239.
- [22] Journel, A.G. & C.J. Huijbregts, 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, London.
- [23] Itasca Consulting Group Inc., 2002. *FLAC3D, Fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions: user guide*. Minneapolis, Minnesota USA.
- [24] Kitanidis, P.K., 1997. *Introduction to Geostatistics: Applications in Hydrogeology*. Cambridge University Press, United Kingdom.
- [25] Kozintseva, A., 1999. *Comparison of Three Methods of Spatial Prediction*. University of Maryland, Master's Thesis.
- [26] Kumar Sen, P., J. Jurejkova & J. Picek, 2003. *Goodness-of-Fit Test of Shapiro-Wilk Type with Nuisance Regression and Scale*. *Austrian Journal of Statistics*, Vol.32, Number 1&2, p.p. 163–177.
- [27] Marcotte, D., 1991. *Cokriging with Matlab, Computers & Geosciences*. Vol. 17, No 9, p.p. 1265-1280.
- [28] Martinez, W.L. and Martinez, A.R., (2002). *Computational Statistics Handbook with Matlab*, Chapman and Hall/CRC, London.
- [29] Matlab 6.0, 2000. The Mathworks Inc., Natick, Massachusetts, USA.
- [30] Milne, D., J. Hadjigeorgiou & R. Pakalnis, 1998. *Rock mass characterization for underground hard rock mines*. *Tunneling and underground space technology*, Vol. 20, issue 4, p.p. 362-377.
- [31] Moyeed, R.A. & A. Papritz, 2002. *An Empirical Comparison of Kriging Methods for Nonlinear Spatial Point Prediction*. *Mathematical Geology*, Vol. 34, No 4.
- [32] Palmstrom, A., 1982. *The volumetric joint count – a useful and simple measure of the degree of rock jointing*. *Proc.4th Congr. Int. Assn.Engng Geol.*. Delhi, Vol.5, p.p. 575-593.
- [33] Pyrez, M.J. and Deutsch, C.V. *The Whole Story on Hole Effect*. Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.
- [34] Reinhardt, B., 1966. *Geologie und Petrography der Monte Rosa-Zone und des Cavanese im Gebiet zwischen Valle Ossola und Valle Loana (Prov. Di Novara, Italien)*. *Schiez Mineral Petrol Mitt* 46, p.p. 553-678.

- [35] Rostami, J. & L.Ozdemir, 1993. *A New Model for Performance Prediction of Hard Rock TBMS*. Chapter 3 in 1993 RETC PROCEEDINGS, p.p. 793-809.
- [36] Royston, J.P. 1986. *A remark on AS181: The W test for Normality*. Appl. Statist., Vol.35, p.p. 232–234.
- [37] Sain, S.R., 2004. *Geostatistical Data and Variogram Models*. Math 6026: Topics in Prob & Stat Spatial Data Analysis. Lectures of Univversity of Colorado, Department of Mathematical Sciences.
- [38] Sapigni, M., M. Berti, E. Bethaz, A. Bussilo & G. Cartone, 2002. *TBM performance estimation using rock mass classifications*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol. 39, issue 6, p.p. 771-788.
- [39] Snedecor, G.W. & W.G. Cochran, 1989. *Statistical Methods*. Eighth Edition, Iowa State University Press.
- [40] Snowden, R. A., M. D. Ryley & J. Temporal, 1982. *A Study of Disc Cutting in Selected British Rocks*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 19, p.p. 107-121.
- [41] Stavropoulou, M., G. Exadaktylos & G. Saratsis, 2007. *A Combined Three-Dimensional Geological-Geostatistical-Numerical Model of Underground Excavations in Rock*. Rock. Mech. Rock Engng., Vol. 40 (3), p.p. 213-243.
- [42] Stephens, M. A. 1974. *EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons*. Journal of the American Statistical Association, Vol. 69, p.p. 730-737.

## Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις

- [43] <http://www.kcl.ac.uk/kis/support/cc/fortran/>
- [44] <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [45] <http://www.ai-geostats.org/>
- [46] [ftp://globec.who.edu/pub/software/kriging/easy\\_krig/V3.0/](ftp://globec.who.edu/pub/software/kriging/easy_krig/V3.0/)
- [47] <http://www.tunconstruct.org/>