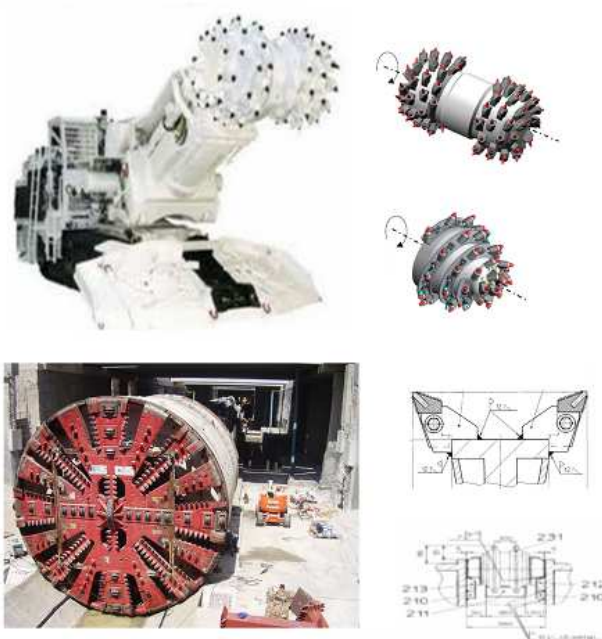


Διδακτορική Διατριβή

Με Τίτλο:

«Μοντέλα Όρυξης Υπογείων Έργων με Μηχανήματα Ολομετώπου και
Σημειακής Κοπής»

Ξηρουδάκης Γεώργιος



7-μελής Εξεταστική Επιτροπή:

1. Εξαδάκτυλος Γ., Καθηγητής Πολ. Κρήτης (επιβλέπων), exadakty@mred.tuc.gr
2. Αγιουτάντης Ζ., Καθηγητής University of Kentucky, USA, zach.agioutantis@uky.edu
3. Σταυρουλάκης Γ., Καθηγητής, Πολ. Κρήτης, gestavr@dpem.tuc.gr
4. Παπαμύχος Ε., Καθηγητής Α.Π.Θ., epapamic@civil.auth.gr
5. Μπαντής Σ., Καθηγητής Α.Π.Θ., sbandis@civil.auth.gr
6. Κωμοδρόμος Α., Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, ecommo@civ.uth.gr
7. Στειακάκης Ε., Επικ. Καθηγητής Πολ. Κρήτης, stiakaki@mred.tuc.gr

Χανιά Μάιος 2015

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής (ΔΔ) είναι η δημιουργία και επαλήθευση με πραγματικά δεδομένα ενός γρήγορου αλγόριθμου (μοντέλου) υπολογισμού στο χώρο και στο χρόνο της ειδικής ενέργειας κοπής (ενέργεια ανά μονάδα όγκου εξορυσσόμενου γεωυλικού) μηχανημάτων μηχανικής όρυξης υπογείων έργων (στοές, κεκλιμένα, σήραγγες κ.λπ.) όπως είναι το ευέλικτο ερπυστριοφόρο μηχανήμα σημειακής κοπής (Roadheader, RH) και το μηχανήμα ολομέτωπης κοπής (Tunnel Boring Machine, TBM). Εφόσον η ταχύτητα διάτρησης (penetration rate) των υπογείων μετώπων για δεδομένο μηχανήμα δεδομένης ισχύος, είναι αντιστρόφως ανάλογη της ειδικής ενέργειας κοπής, τότε καθίσταται φανερό ότι ένα τέτοιο μοντέλο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την πρόβλεψη της απόδοσης του μηχανήματος κατά την λειτουργία του. Αφού επιτευχθεί αυτός ο στόχος, τότε η ειδική ενέργεια που υπολογίζεται από καταγραφές των μηχανημάτων αυτών κατά τη λειτουργία των, μπορεί να μετατραπεί σε παραμέτρους αντοχής της εδαφοβραχώμαζας με βάση κατάλληλη μαθηματική-μηχανική θεωρία που θα αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό. Εν συνεχεία αυτές οι ποσοτικές εκτιμήσεις της αντοχής των ανομοιογενών γεωλογικών σχηματισμών μπορούν να παρεμβληθούν σε όλο το τριδιάστατο «γεωλογικό μοντέλο» με κατάλληλο γεωστατιστικό αλγόριθμο και σε συνδυασμό με μετρήσεις αντοχής σε πυρήνες δειγματοληπτικών γεωτρήσεων που έχουν γίνει από πριν, να βελτιωθεί το «γεωτεχνικό μοντέλο» (ground model) κατά την προχώρηση μιας σήραγγας ή στοάς.

Οι θεωρίες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του αναλυτικού μοντέλου υπολογισμού της ειδικής ενέργειας στο χώρο και στο χρόνο των ειδικών εκσκαπτικών μηχανημάτων RH και TBM είναι οι εξής:

- (i) Το Άνω Οριακό Θεώρημα και η θεωρία των γραμμών ολίσθησης (slip lines) της Θεωρίας Ιδεατής Πλαστικότητας (για εδαφικά, ημι-βραχώδη ή βραχώδη γεωυλικά),
- (ii) η Θραυστομηχανική με κατάλληλο κριτήριο θραύσης μικτού τύπου (προκειμένου για ψαθυρά πετρώματα) σε συνδυασμό με αριθμητική μέθοδο των συνοριακών στοιχείων με ειδικά στοιχεία, και
- (iii) η Γεωστατιστική θεωρία παρεμβολής χωρικών δεδομένων.

Η επαλήθευση του ολοκληρωμένου υπολογιστικού μοντέλου έγινε με επεξεργασία πραγματικών καταγραφών (logs) τέτοιων μηχανημάτων κατά την διάνοιξη τεσσάρων σηράγγων:

- (1) Τμήμα της γραμμής 9 του μετρό της Βαρκελώνης (Ισπανία) πλησίον του σταθμού Mas Blau εντός χαλαρών εδαφών με την χρήση μηχανήματος ολομέτωπου κοπής του τύπου εξισορρόπησης των γεωστατικών πιέσεων (EPB).
- (2) Των διδύμων σηράγγων στο Χονγκ-Κονγκ (Κίνα) με μικτού τύπου μηχανήμα ολομέτωπης κοπής (convertible TBM) σε πετρώματα και χαλαρά εδάφη.
- (3) Της οδικής σήραγγας του Μόντρεαλ (Καναδάς) που διανοίχθηκε με μηχανήμα σημειακής κοπής RH σε πετρώματα, και
- (4) τη σήραγγα του Μπιλμπάο (Ισπανία) επίσης με RH.

Τα δεδομένα των ανωτέρω καταγραφών προήλθαν από τις εταιρείες κατασκευής σηράγγων BOUYGUES (BYTP), Paris, France και Gestió d'Infraestructures, S. A.

ISA (GISA), και κατασκευής μηχανημάτων RH (Sandvik Mining and Construction G.m.b.H., Austria) και μηχανημάτων TBM (Herrenknecht AG, Germany). Για την παρεμβολή των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων/εδαφών στην περιοχή γύρω και κατά μήκος της σήραγγας κατασκευάστηκαν τριδιάστατα διακριτοποιημένα με πεπερασμένα στοιχεία, γεωλογικά μοντέλα από το Τμήμα Γεωλογίας - Τομέας Δυναμικής Τεκτονικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Αθηνών.

Abstract

This thesis aims to the development and verification with real time data of a fast algorithm for estimation of specific energy of cutting (energy consumption for the removal of unit volume of geomaterial). This energy is provided by mining or tunneling machines used for the mechanical excavation of tunnels such as the Roadheader (RH) and the Tunnel Boring Machine (TBM). It is noted that the specific energy is inversely proportional to the penetration rate for a given machine hence such an algorithm may be also employed to assess the performance of the mechanical excavation. For the creation of the final geotechnical model and for the correlation of machine with rock mass or soil data, a geostatistical algorithm was also employed for the interpolation of the strength parameters of the rock or soil on the grid of the three dimensional geological model inferred from the borehole data and RH (or TBM) data.

The theories used for the creation of the analytical models dedicated to the estimation of specific energy for TBM and RH machines are:

- (i) The Upper Bound theorem and the slip lines (Lower Bound) of the Ideal Plasticity Theory.
- (ii) The Linear Elastic Fracture Mechanic theory by using an appropriate crack propagation criterion combined with a special Boundary Element Method, and
- (iii) The Geostatistical theory for interpolation of data in the three dimensional space.

The proposed model was verified with real data from four (4) tunnel excavations by using TBM and RH machines, namely:

- (1) Section of Mas Blau Line-9 of Barcelona Metro constructed with EPB,
- (2) Hong – Kong twin tunnels constructed with a convertible TBM,
- (3) Montreal tunnel using a RH, and
- (4) Bilbao tunnel using RH machine.

The logged machine data are courtesy of tunnel construction companies like BOUYGUES (BYTP), Paris, France and Gestió d'Infraestructures, S. A. ISA (GISA) and machine construction companies for RH (Sandvik Mining and Construction G.m.b.H., Austria) and TBM (Herrenknecht AG, Germany). Three dimensional geological models, discretized with finite elements, were created in the Department of Dynamic, Tectonic and Applied Geology, Faculty of Geology of University of Athens.

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Εξώφυλλο..... | i |
| Περίληψη | ii |
| Abstract | iv |
| Περιεχόμενα..... | v |
| Λίστα Σχημάτων..... | vi |
| Λίστα Πινάκων..... | ix |
| Λίστα Εξισώσεων..... | x |
| Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή..... | 1 |
| 1.1. Αντικείμενο | 1 |
| 1.2. Στόχος | 4 |
| 1.3. Προτεινόμενο μοντέλο ανάλυσης λειτουργίας μηχανημάτων ολομέτρωτου και σημειακής κοπής..... | 5 |
| 1.4. Σύγκριση των βασικότερων μοντέλων και του προτεινόμενου μοντέλου για την ανάλυση λειτουργίας μηχανημάτων ολομέτρωτου και σημειακής κοπής..... | 8 |
| 1.5. Πρωτοτυπία ΔΔ..... | 13 |
| Κεφάλαιο 2. Αναλυτικός μηχανισμός κοπής γεωϋλικού..... | 15 |
| 2.1. Μηχανισμός κοπής για συνεκτικά πετρώματα..... | 15 |
| 2.2. Δοκιμές κοπής πετρωμάτων με κοπτικό εργαλείο | 20 |
| 2.2.1. Πειραματικά δεδομένα στον κόκκινο ψαμμίτη του Rothbach..... | 20 |
| 2.2.2. Πειραματικά δεδομένα στον ασβεστόλιθο στην Μάλαγα | 23 |
| 2.2.3. Πειραματικά δεδομένα για τον δολομίτη στην Μάλαγα..... | 26 |
| 2.3. Μηχανισμός κοπής πλαστικών πετρωμάτων και εδαφών..... | 28 |
| Κεφάλαιο 3. Υπολογιστικό μοντέλο κοπής βασιζόμενο στην θραυστομηχανική..... | 31 |
| 3.1. Κριτήριο θραύσης μικτού τύπου..... | 31 |
| 3.2. Υπολογισμός συντελεστών εντάσεως των τάσεων με τα συνοριακά στοιχεία..... | 33 |
| 3.3. Εκκίνηση και διάδοση κεκλιμένης ρωγμής στο επίπεδο | 36 |
| 3.4. Μοντελοποίηση της Κοπής με Αιχμηρό Κοπτικό Άκρο Πετρώματος με Επίπεδη Επιφάνεια και Γειτονική Εγκοπή..... | 38 |
| 3.5. Επαλήθευση με πειραματικά δεδομένα κοπής..... | 41 |
| Κεφάλαιο 4. Εφαρμογή του μοντέλου στην διάνοιξη σηράγγων με TBM | 47 |
| 4.1. Σήραγγα σταθμού Mas Blau της γραμμής 9 | 47 |
| 4.1.1. Εισαγωγή..... | 47 |
| 4.1.2. Γεωλογικό μοντέλο | 47 |
| 4.1.3. Κατασκευή γεωτεχνικού μοντέλου..... | 51 |
| 4.1.4. Υπολογισμός λειτουργικών παραμέτρων του TBM | 54 |
| 4.2. Δίδυμες σήραγγες στο Χονγκ – Κονγκ..... | 60 |
| 4.2.1. Γεωλογία..... | 61 |
| 4.2.2. Γεωστατιστική επεξεργασία RMR..... | 61 |
| 4.2.3. Επεξεργασία καταγραφών TBM..... | 63 |
| 4.2.4. Σύγκριση των εκτιμήσεων της αντοχής της βραχομάζας από την SE του TBM και από την θεωρία μηχανικής της φθοράς..... | 67 |
| Κεφάλαιο 5. Εφαρμογή του μοντέλου στη διάνοιξη σηράγγων με RH | 72 |
| 5.1. Ειδική ενέργεια για το μηχάνημα RH | 72 |
| 5.2. Γεωμετρία κοπής με την χρήση RH..... | 73 |
| 5.3. Προσδιορισμός Παραμέτρων Κοπής | 74 |
| 5.4. Σήραγγα του μετρό του Μόντρεαλ | 77 |
| 5.4.1. Στοχαστικές προσομοιώσεις | 79 |
| 5.4.2. Υπολογισμός της ειδικής ενέργειας | 82 |
| 5.5. Σήραγγα στο Μπιλμπάο | 85 |
| Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα – Προτάσεις..... | 91 |
| Δημοσιεύσεις που έγιναν στα πλαίσια της παρούσης ΔΔ | 93 |
| Βιβλιογραφία | 94 |

| | |
|---|-----|
| Άλλες Πηγές..... | 97 |
| Παράρτημα Α. Σύντομη περιγραφή του γεωστατιστικού κώδικα KRIGSTAT..... | 98 |
| Α.1. Εισαγωγή..... | 98 |
| Α.2. Συνοπτική παρουσίαση βασικών εννοιών της γεωστατιστικής θεωρίας..... | 98 |
| Α.3. Εκτιμήσεις με την μέθοδο Kriging..... | 102 |
| Α.4. Υπό συνθήκη στοχαστικές προσομοιώσεις..... | 103 |

Λίστα Σχημάτων

| | |
|---|----|
| Σχήμα 1.1: Σχεδιαζόμενο δίκτυο υπογείων έργων στην Ευρώπη | 1 |
| Σχήμα 1.2: Κύκλος διάτρησης ανατίναξης (Heino, 1999): με κυκλικό τρόπο α) τοπογραφικές μετρήσεις (αριστερά), β) διάτρηση, γ) γόμωση με εκρηκτικές ύλες, δ) ανατίναξη πετρώματος, ε) αερισμός, στ) φόρτωση-μεταφορά, ζ) ξεσκάρωμα-καθαρισμός μετώπου και παρειών στοάς, και η) κοχλίωση οροφής. | 2 |
| Σχήμα 1.3: Παράδειγμα εφαρμογής της συμβατικής μεθόδου με εκσκαφή σε δύο φάσεις (ανωτέρου μετώπου μορφής στοάς και στην συνέχεια της βαθμίδας): α) εκσκαφή μετώπου μορφής στοάς, β) τοποθέτηση προσωρινής υποστήριξης και εκσκαφή της βαθμίδας και γ) προσθήκη της τελικής υποστήριξης και του εξοπλισμού της σήραγγας..... | 3 |
| Σχήμα 1.4: Χρήση του RH ή του TBM ως “αισθητήρα” της αντοχής των γεωυλικών (Exadaktylos et al., 2008) και ο συνδυασμός με τα δεδομένα από τις προϋπάρχουσες γεωτρήσεις με βάση την γεωστατιστική θεωρία για την δημιουργία του γεωτεχνικού μοντέλου της σήραγγας. | 5 |
| Σχήμα 1.5: Διάγραμμα ροής των μοντέλων TBM και RH για την πρόβλεψη της απόδοσης των κατά την όρυξη σηράγγων και στοών. | 6 |
| Σχήμα 1.6: α) Άποψη RH, β) άποψη TBM διαμέτρου 15m που χρησιμοποιήθηκε στη Μαδρίτη, γ) εγκάρσια και αξονική κεφαλή RH με βιδία σημειακής προσβολής και δ) γεωμετρία συρτικών κοπτικών άκρων (knives) και δίσκων κοπής των TBM (πρόσθια όψη αριστερά και πλάγια όψη δεξιά). | 8 |
| Σχήμα 1.7: Ανάλυση δυνάμεων στους δίσκους κοπής των TBM. | 10 |
| Σχήμα 2.1: Διάγραμμα του κριτηρίου αστοχίας των Mohr-Coulomb με όριο εφελκυστικής τάσης με τις θλιπτικές τάσεις να θεωρούνται θετικές ποσότητες. | 15 |
| Σχήμα 2.2: Δημιουργία εφελκυστικής ακτινικής ρωγμής κάτω από το κοπτικό άκρο. | 16 |
| Σχήμα 2.3: Ο μηχανισμός κοπής πετρώματος όπου υπάρχει προηγούμενη κοπή: α) το κύριο επίπεδο κοπής με το διάγραμμα ταχυτήτων του μοντέλου (οδογράφημα), β) ανάλυση των δυνάμεων για τον κοπτικό δίσκο, και γ) ανάλυση των δυνάμεων στο κάθετο επίπεδο για το συρτικό κοπτικό..... | 18 |
| Σχήμα 2.4: Δοκιμές κοπής πετρωμάτων πάνω σε ευθεία ή καμπύλη διαδρομή: α) test rig (Sandvik laboratory), β) αριθμητική προσομοίωση δοκιμής. | 20 |
| Σχήμα 2.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά για τα πειράματα με την χρήση του NP59..... | 21 |
| Σχήμα 2.6: α) Εξάρτηση της κατακόρυφης δύναμης από την δύναμη κοπής και (β) εξάρτηση της δύναμης κοπής από το βάθος κοπής για τον ψαμμίτη. | 22 |
| Σχήμα 2.7: Προσδιορισμός της «πραγματικής» (intrinsic) ειδικής ενέργειας κοπής για τον ψαμμίτη. | 23 |
| Σχήμα 2.8: Σχέδιο του κοπτικού NP17 με γωνία 86°. | 24 |
| Σχήμα 2.9: α) Εξάρτηση της κατακόρυφης δύναμης από την δύναμη κοπής και (β) εξάρτηση της δύναμης κοπής από το βάθος κοπής για τον ασβεστόλιθο. | 25 |
| Σχήμα 2.10: Ειδική ενέργεια για τον ασβεστόλιθο. | 25 |
| Σχήμα 2.11: Γεωμετρία κοπτικού NP56. | 26 |
| Σχήμα 2.12: α) Εξάρτηση της κατακόρυφης δύναμης από την δύναμη κοπής και (β) εξάρτηση της δύναμης κοπής από το βάθος κοπής για τον δολομίτη. | 27 |
| Σχήμα 2.13: Ειδική ενέργεια για τον δολομίτη. | 27 |

| | |
|--|----|
| Σχήμα 2.14: Μοντέλο κοπής με την χρήση των γραμμών ολίσθησης α) χωρίς τριβές (smooth bit), β) τραχύ κοπτικό (rough bit) και γ) αμβλύ κοπτικό (false nose) και το σύστημα των Καρτεσιανών συντεταγμένων Oxy. | 29 |
| Σχήμα 3.1: Οι τρεις βασικοί τρόποι παραμορφώσεως των χειλέων επίπεδης ρωγμής α) I - εφελκυσμός, β) II - επίπεδη διάτμηση και γ) III - αντιεπίπεδη διάτμηση. | 31 |
| Σχήμα 3.2: Πολικές συντεταγμένες στην αιχμή της ασυνέχειας | 32 |
| Σχήμα 3.3: Κριτήριο διάδοσης μιας ρωγμής μικτού τύπου φόρτισης..... | 33 |
| Σχήμα 3.4: Ασυνεχείς μετατοπίσεις στις δύο διαστάσεις | 34 |
| Σχήμα 3.5: Τοπικά συστήματα συντεταγμένων των στοιχείων i και j. | 35 |
| Σχήμα 3.6: Διάδοση κεκλιμένης επίπεδης ρωγμής για διάφορες τιμές της διαζωνικότητας k. ... | 37 |
| Σχήμα 3.7: Μοντέλο κοπής πετρώματος για τραχεία αιχμή (rough bit) στο επίπεδο (σ, τ) με τα επίπεδα αστοχίας εντός του πετρώματος να ταυτίζονται με τα επίπεδα επαφής κοπτικού άκρου-πετρώματος (DE) και (EF). | 39 |
| Σχήμα 3.8: Μοντέλο κοπής πετρώματος για αμβλεία αιχμή (false nose) με το επίπεδο των κυρίων τάσεων είναι το οριζόντιο. | 40 |
| Σχήμα 3.9: Η κατανομή εσωτερικού μήκους κατά μήκος της ρωγμής. | 41 |
| Σχήμα 3.10: Ειδική ενέργεια κοπής (Snowdon et. al., 1982) | 42 |
| Σχήμα 3.11: Μηχανισμός κοπής του πετρώματος με την αύξηση της απόστασης (Rostami & Ozdemir, 1993) α) υπερβολική θραύση του πετρώματος, β) βέλτιστη απόσταση κοπής και γ) ανεπαρκής θρυμματισμός του πετρώματος. | 43 |
| Σχήμα 3.12: Εύρεση του κρίσιμου φορτίου διάδοσης της ασυνέχειας ως την ελεύθερη επιφάνεια. | 43 |
| Σχήμα 3.13: Σύγκριση πειραματικών δεδομένων του ορθού φορτίου με τα αποτελέσματα των συνοριακών στοιχείων..... | 44 |
| Σχήμα 3.14: Υπολογισμός της δύναμης κοπής σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα. | 45 |
| Σχήμα 3.15: Σύγκριση ειδικής ενέργειας με την αναλυτική και με την αριθμητική επίλυση της κοπής του γρανίτη με την χρήση κοπτικού κυλιόμενου δίσκου. | 46 |
| Σχήμα 4.1: Διατομή της σήραγγας του τομέα Firs-αεροδρόμιο του Prat..... | 47 |
| Σχήμα 4.2: Κάτοψη της σήραγγας του Mas-Blau. | 47 |
| Σχήμα 4.3: α) Αδρή γεωλογική μηκοτομή στην περιοχή της σήραγγας του MasBlau βασισμένη στα γεωλογικά δεδομένα και τις γεωτρήσεις β) οι γεωτρήσεις στην περιοχή της σήραγγας με τον γεωλογικό σχηματισμό που διαπερνά. (GISA). | 48 |
| Σχήμα 4.4: Κατασκευή αρχικού τριδιάστατου μοντέλου α) τοπογραφία, β) διάταξη της σήραγγας και γ) τριδιάστατο μοντέλο. | 49 |
| Σχήμα 4.5: α) σχηματικός διδιάστατος προσδιορισμός των διεπιφανειών από τις γεωτρήσεις, (β) διαχωρισμός του αρχικού μοντέλου από την διεπιφάνεια του Kriging και γ) το τελικό γεωλογικό μοντέλο. | 50 |
| Σχήμα 4.6: Διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία του γεωλογικού μοντέλου. | 51 |
| Σχήμα 4.7: Ιστογράμματα των μετρήσεων: α) N_{SPT} , β) LL και γ) PL, για τους 4 ξεχωριστούς σχηματισμούς. | 52 |
| Σχήμα 4.8: Γεωμετρική ανισοτροπία στο α) κατακόρυφο επίπεδο και β) στο οριζόντιο επίπεδο. | 53 |
| Σχήμα 4.9: Παράθυρο του κώδικα KRIGSTAT (Stavropoulou et al., 2007) με το ιστόγραμμα (πάνω αριστερά), την θέση των μετρήσεων στις γεωτρήσεις (πάνω δεξιά) και το ισοδύναμο ισότροπο ημιβαριόγραμμα του αριθμού χτυπημάτων N_{SPT} | 53 |
| Σχήμα 4.10: Εκτίμηση N_{SPT} | 54 |
| Σχήμα 4.11: Γεωμετρία: (α) της κοπτικής κεφαλής, (β) των δίδυμων συρτικών κοπτικών και γ) των κοπτικών δίσκων. | 55 |
| Σχήμα 4.12: Συσχέτιση υπολογισμού ειδικής ενέργειας από την ισχύ και από την μέση δύναμη κοπής στα συρτικά κοπτικά..... | 56 |
| Σχήμα 4.13: Συσχέτιση ειδικής ενέργειας με τον γεωλογικό σχηματισμό. | 57 |
| Σχήμα 4.14: Συσχέτιση ειδικής ενέργειας με τον αριθμό χτυπημάτων N_{SPT} | 58 |
| Σχήμα 4.15: α) σχεδιασμός συρτικών κοπτικών άκρων, β) πλάγια όψη κοπτικού άκρου, και γ) πρόσθια όψη μηχανισμού γραμμών ολίσθησης για διείδυση του κοπτικού p. | 59 |
| Σχήμα 4.16: Κατανομή της συνοχής του εδάφους κατά μήκος της σήραγγας. | 60 |

| | |
|--|----|
| Σχήμα 4.17: Χάρτης της περιοχής της σήραγγας του Χονγκ – Κονγκ (BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS)..... | 60 |
| Σχήμα 4.18: α) Γεωλογικό μοντέλο στην περιοχή γύρω και κατά μήκος της σήραγγας του Χονγκ – Κονγκ και β) διακριτοποιημένο γεωλογικό μοντέλο (MIDAS TM). | 61 |
| Σχήμα 4.19: Γεωστατιστική ανάλυση των δεδομένων RMR από τις διαθέσιμες γεωτρήσεις με βάση τον αλγόριθμο KRIGSTAT..... | 62 |
| Σχήμα 4.20: Εκτίμηση του RMR: α) στο συνολικό μοντέλο, β) ογκικό Kriging κατά μήκος της σήραγγας. | 63 |
| Σχήμα 4.21: Λειτουργία TBM ως: (α) EPB, (β) ανοιχτού τύπου (BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS)..... | 64 |
| Σχήμα 4.22: Γεωμετρία κοπτικής κεφαλής του TBM (αριστερά) και κυκλικές διαδρομές των κοπτικών δίσκων (δεξιά). | 65 |
| Σχήμα 4.23: Ροπή που ασκείται στην κοπτική κεφαλή σε συνάρτηση με τον τρόπο λειτουργίας του TBM και της θέσης κατά μήκος της σήραγγας. | 66 |
| Σχήμα 4.24: Σύγκριση ειδικής ενέργειας κοπής με βάση την δύναμη κοπής και με βάση την ισχύ..... | 66 |
| Σχήμα 4.25: Σύγκριση εκτίμησης του RMR από την ειδική ενέργεια με τις επί τόπου αποτυπώσεις και με τις τιμές των γεωτρήσεων. | 67 |
| Σχήμα 4.26: Φύλλο εργασίας Excel® για τον υπολογισμό της αντοχής της βραχομάζας από την αξιολόγηση του RMR κατά μήκος της σήραγγας #1 του Χονγκ Κονγκ με βάση τη θεωρία της μηχανικής της φθοράς. | 69 |
| Σχήμα 4.27: Σύγκριση της εκτίμησης της μονοαξονικής αντοχής UCS _m με βάση το RMR και την θεωρία της μηχανικής της φθοράς από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε πυρήνες γεωτρήσεων (με τελείες) και με βάση από την ειδική ενέργεια SE που καταναλώνεται από το TBM και την αναλυτική εξ. (4.12) (συνεχής γραμμή). | 71 |
| Σχήμα 5.1: Κοπτικά άκρα ακτινικού τύπου (αριστερά) ,εμπρόσθιας προσβολής (στη μέση) και σημειακής προσβολής (αριστερά). | 72 |
| Σχήμα 5.2: Αξονικό και εγκάρσιο RH. | 73 |
| Σχήμα 5.3: α) Σχέδιο εκσκαφής με το αξονικό RH, β) σταδιακό βύθισμα του RH και γ) σχέδιο εκσκαφής για το εγκάρσιο RH. | 74 |
| Σχήμα 5.4: Επιφάνεια επαφής της κοπτικής κεφαλής με το πέτρωμα, (α) πρόσοψη και (β) πλάγια όψη. | 75 |
| Σχήμα 5.5: Υπολογισμός τόξου επαφής AO ₂ B..... | 75 |
| Σχήμα 5.6: α) Γεωμετρία κεφαλής, β) ο υπολογισμός του όγκου κατά μήκος της διαδρομής και γ) το προφίλ της κοπής στο AutoCAD..... | 76 |
| Σχήμα 5.7: Χάρτης της πόλης του Μόντρεαλ και η προβολή της γραμμής 2 του μετρό (Sandvik). | 77 |
| Σχήμα 5.8: Γεωμετρία της κεφαλής του RH ATM 105/028-IC..... | 77 |
| Σχήμα 5.9: Γεωλογική μηκοτομή στην περιοχή της σήραγγας στο Μόντρεαλ..... | 78 |
| Σχήμα 5.10: Γεωμετρία κοπτικών άκρων σημειακής προσβολής της κοπτικής κεφαλής του RH. | 79 |
| Σχήμα 5.11: Εξάρτηση της ειδικής ενέργειας από τον λόγο S/h. | 80 |
| Σχήμα 5.12: Εκτιμώμενες κατανομές της ειδικής ενέργειας SE (kWh/m ³) για: α) σχιστόλιθο και β) ασβεστόλιθο. | 80 |
| Σχήμα 5.13: Παραγωγή τυχαίων δεδομένων για τους δυο σχηματισμούς μαζί με το πειραματικό ημιβαριόγραμμα της αρχικής προσομοίωσης..... | 81 |
| Σχήμα 5.14: Τελικό προσομοίωμα της ειδικής ενέργειας για τους δυο σχηματισμούς (δεξιά) μαζί με το πειραματικό ημιβαριόγραμμα της τελικής προσομοίωσης (αριστερά). | 82 |
| Σχήμα 5.15: Δεδομένα από την πρώτη διατομή στην Χ.Θ. 25893. | 83 |
| Σχήμα 5.16: α) Απεικόνιση της ειδικής ενέργειας στη διατομή της σήραγγας (Χ.Θ. 25893) σε kWh/m ³ και β) συσχέτιση των δυο ειδικών ενεργειών σε MPa ή MJ/ m ³ (1kWh/m ³ = (10/36) x MPa)..... | 83 |
| Σχήμα 5.17: Σύγκριση της λιθολογίας και των αποτελεσμάτων για την ειδική ενέργεια από τις στοχαστικές προσομοιώσεις και από τις καταγραφές του RH. | 84 |

| | |
|---|-----|
| Σχήμα 5.18: Φαινόμενο κλίμακας για τον ασβεστόλιθο και τον σχιστόλιθο στην Χ.Θ. 25893, αντιστοίχως. | 85 |
| Σχήμα 5.19: Τοπικό σύστημα συντεταγμένων του RH. | 85 |
| Σχήμα 5.20: Καθολικό σύστημα συντεταγμένων, σύστημα συντεταγμένων της σήραγγας και σύστημα συντεταγμένων του RH. | 86 |
| Σχήμα 5.21: α) Διαδοχικά μέτωπα στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων και β) στο σύστημα της σήραγγας. | 87 |
| Σχήμα 5.22: Εκτίμηση του βάθους κοπής CD από τα δεδομένα για το τέταρτο μέτωπο. | 87 |
| Σχήμα 5.23: Εκτίμηση SD από την κοπή του προηγούμενου μετώπου κοπής. | 88 |
| Σχήμα 5.24: Σύγκριση υπολογισμών της ειδικής ενέργειας. | 88 |
| Σχήμα 5.25: Διακριτοποίηση μετώπου της σήραγγας. | 89 |
| Σχήμα 5.26: Σύγκριση δύο μεθόδων υπολογισμού της ειδικής ενέργειας SE_2 | 89 |
| Σχήμα 5.27: Κατανομή SE_2 καθ' όλη την διατομή των τεσσάρων μετώπων. | 90 |
| Σχήμα A.1: Κύριες συνιστώσες (εργαλεία) σχεδιασμού υπογείων έργων (Meschke et al., 2009). | 98 |
| Σχήμα A.2: Παράδειγμα υπολογισμού του πειραματικού ημιβαριογράμματος για την ανάλυση της χωρικής συνέχειας μιας μεταβλητής από ζεύγη μετρήσεων εντός γεωτρήσεων (down the hole) (Surpac TM της GEMCOM). | 100 |
| Σχήμα A.3: Παράδειγμα διερεύνησης της ανισοτροπίας πάνω σε επίπεδο όπου φαίνονται και οι ανοχές κατά την έννοια της γωνιακής και ακτινικής διεύθυνσης για την εύρεση ζευγών τιμών (Surpac TM της GEMCOM). | 100 |
| Σχήμα A.4: Ελλειψοειδές με μήκη κυρίων αξόνων ίσα με τις ακτίνες επίδρασης του ημιβαριογράμματος (Surpac TM της GEMCOM). | 101 |
| Σχήμα A.5: Άποψη αποτελεσμάτων ανάλυσης Kriging από το KRIGSTAT v. 2.0 που αφορούν την εκτίμηση του πειραματικού ημι-βαριογράμματος της περιεκτικότητας (%) σε άμμο στο μέτωπο της σήραγγας στο Koraln στη διατομή +69500 έως +7000. | 102 |
| Σχήμα A.6: Διάγραμμα ροής της τεχνικής στοχαστικής προσομοίωσης. | 106 |

Λίστα Πινάκων

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1.1: Ενδεικτικά στοιχεία για τα σχεδιαζόμενα υπόγεια έργα στην Ευρώπη (πηγή: TEN-T*)..... | 2 |
| Πίνακας 1.2: Σύγκριση του νέου μοντέλου με προηγούμενα βασικά μοντέλα CSM και NTH. . | 12 |
| Πίνακας 2.1: Πειραματικά δεδομένα για τον ψαμμίτη | 20 |
| Πίνακας 2.2: Παράμετροι αναλυτικού μοντέλου για τον ψαμμίτη | 23 |
| Πίνακας 2.3: Πειραματικά δεδομένα για τον ασβεστόλιθο..... | 24 |
| Πίνακας 2.4: Παράμετροι αναλυτικού μοντέλου για τον ασβεστόλιθο. | 25 |
| Πίνακας 2.5: Πειραματικά δεδομένα για τον δολομίτη | 26 |
| Πίνακας 2.6: Παράμετροι αναλυτικού μοντέλου για τον δολομίτη. | 27 |
| Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα για την διάδοση μικτού τύπου ρωγμής αρχικής κλίσης $\alpha=30^\circ$ στο αρχικό βήμα διάδοσης της ρωγμής. | 38 |
| Πίνακας 3.2: Πειραματικά δεδομένα για τον γρανίτη Merrivale..... | 41 |
| Πίνακας 3.3: Παράμετροι αναλυτικού μοντέλου για τον γρανίτη. | 44 |
| Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά του TBM..... | 55 |
| Πίνακας 4.2: Λειτουργία TBM κατά μήκος της σήραγγας. | 64 |
| Πίνακας 4.3: Καταγραφές TBM..... | 65 |
| Πίνακας 4.4: Σταθερές παράμετροι της αναλυτικής σχέσης (2.9) υπολογισμού της UCS του πετρώματος από την SE κατά μήκος της σήραγγας..... | 69 |
| Πίνακας 5.1: Σύγκριση εκτιμήσεων του όγκου με το AutoCAD. | 77 |
| Πίνακας 5.2: Γενικά στοιχεία για το RH – ATM 105/028. | 78 |
| Πίνακας 5.3: Λειτουργικοί παράμετροι του RH – ATM 105/028..... | 78 |
| Πίνακας 5.4: Δεδομένα μηχανικών αντοχών (Lammer, Sandvik G.m.b.H.) | 79 |
| Πίνακας 5.5: Κατανομή της SE για τους δυο σχηματισμούς..... | 80 |

| | |
|---|----|
| Πίνακας 5.6: Γεωμετρία του RH MT520. | 85 |
|---|----|

Λίστα Εξισώσεων

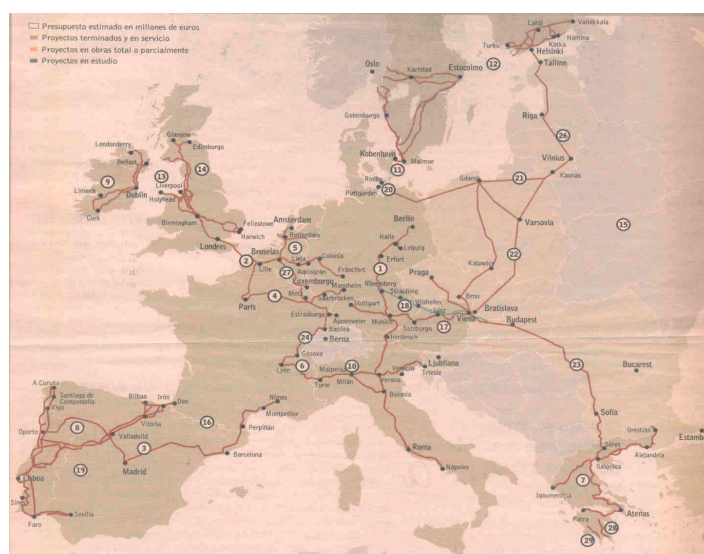
| | |
|--|----|
| Εξίσωση (1.1): Υπολογισμός ειδικής ενέργειας από την δύναμη κοπής..... | 7 |
| Εξίσωση (1.2): Υπολογισμός ειδικής ενέργειας από την ισχύ..... | 7 |
| Εξίσωση (1.3): Συσχέτιση του ρυθμού προχώρησης και του ρυθμού διάτρησης..... | 8 |
| Εξίσωση (1.4): Υπολογισμός των απαιτούμενων λειτουργικών παραμέτρων του TBM..... | 9 |
| Εξίσωση (1.5): Υπολογισμός συνισταμένης δύναμης στον κοπτικό δίσκο..... | 10 |
| Εξίσωση (1.6): Υπολογισμός εφαρμοζόμενου φορτίου στον κοπτικό δίσκο..... | 11 |
| Εξίσωση (1.7): Υπολογισμός της ορθής και της δύναμης κύλισης ανά κοπτικό δίσκο..... | 11 |
| Εξίσωση (1.8): Υπολογισμός μοναδιαίου κόστους όρυξης..... | 11 |
| Εξίσωση (1.9): Διάρκεια ζωής κοπτικού άκρου..... | 11 |
| Εξίσωση (1.10): Υπολογισμός της διάρκειας ζωής κοπτικού άκρου..... | 11 |
| Εξίσωση (2.1): Γραμμικό κριτήριο Mohr-Coulomb με κατώφλι εφελκυστικής τάσης..... | 16 |
| Εξίσωση (2.2): Συσχέτιση της συρτικής δύναμης με την ορθή δύναμη για συρτικό άκρο..... | 17 |
| Εξίσωση (2.3): Συσχέτιση δύναμης κύλισης με την ορθή δύναμη για τον κοπτικό δίσκο..... | 17 |
| Εξίσωση (2.4): Συσχέτιση ταχυτήτων του οδογράφου..... | 18 |
| Εξίσωση (2.5): Δαπανώμενη ενέργεια για την παραμόρφωση της διατμητικής ασυνέχειας..... | 19 |
| Εξίσωση (2.6): Υπολογισμός συνοχής απο το γραμμικό κριτήριο Mohr – Coulomb με όριο εφελκυστικής τάσης..... | 19 |
| Εξίσωση (2.7): Δαπανώμενη ενέργεια δημιουργίας της εφελκυστικής ρωγμής..... | 19 |
| Εξίσωση (2.8): Παραγόμενο έργο από το εξωτερικό φορτίο..... | 19 |
| Εξίσωση (2.9): Υπολογισμός της ειδικής ενέργειας με το άνω οριακό θεώρημα..... | 19 |
| Εξίσωση (2.10): Θεμελειώδης σχέση υπολογισμού βάθους κοπής..... | 19 |
| Εξίσωση (2.11): Υπολογισμός του δείκτη επί τόπου διείδυσης FPI..... | 19 |
| Εξίσωση (2.12): Υπολογισμός γωνίας διεπαφής κοπτικού – ψαμμίτη..... | 21 |
| Εξίσωση (2.13): Γραμμική εξάρτηση της δύναμης κοπής με το βάθος κοπής..... | 22 |
| Εξίσωση (2.14): Φαινόμενο κλίμακας της ειδικής ενέργειας..... | 22 |
| Εξίσωση (2.15): Διαφορική εξίσωση των γραμμών ολίσθησης..... | 28 |
| Εξίσωση (2.16): Γραμμές ολίσθησης για το κάτω οριακό θεώρημα..... | 28 |
| Εξίσωση (2.17): Υπολογισμός ειδικής ενέργειας με τις γραμμές ολίσθησης..... | 28 |
| Εξίσωση (2.18): Υπολογισμός του ορθού φορτίου με τις γραμμές ολίσθησης..... | 29 |
| Εξίσωση (2.19): Υπολογισμός ειδικής ενέργειας με τις γραμμές ολίσθησης..... | 29 |
| Εξίσωση (3.1): Υπέρθωση τάσεων για παραμόρφωση ασυνέχειας μικτού τύπου..... | 31 |
| Εξίσωση (3.2): Κριτήριο διάδοσης ασυνέχειας σε εφελκυσμό (Τύπος Ι)..... | 31 |
| Εξίσωση (3.3): Εφαπτομενική τάση στην αιχμή της ασυνέχειας..... | 32 |
| Εξίσωση (3.4): Εφαπτομενικός συντελεστής εντάσεως των τάσεων..... | 32 |
| Εξίσωση (3.5): Κριτήριο διάδοσης της ασυνέχειας στην κατεύθυνση της μέγιστης εφαπτομενικής τάσης..... | 32 |
| Εξίσωση (3.6): Κατεύθυνση της μέγιστης εφαπτομενικής τάσης..... | 32 |
| Εξίσωση (3.7): Κριτήριο διάδοσης της ασυνέχειας..... | 33 |
| Εξίσωση (3.8): Ορισμός ασυνεχών μετατοπίσεων..... | 34 |
| Εξίσωση (3.9): Υπολογισμός της οριζόντιας ορθής τάσης για την βαθμωτή ελαστικότητα με την χρήση του μετασχηματισμού Fourier..... | 34 |
| Εξίσωση (3.10): Υπολογισμός της διατμητικής τάσης για την βαθμωτή ελαστικότητα με την χρήση του μετασχηματισμού Fourier..... | 34 |
| Εξίσωση (3.11): Υπολογισμός της κατακόρυφης ορθής τάσης για την βαθμωτή ελαστικότητα με την χρήση του μετασχηματισμού Fourier..... | 34 |
| Εξίσωση (3.12): Μετασχηματισμός συντεταγμένων..... | 35 |
| Εξίσωση (3.13): Μετασχηματισμός του i στις τοπικές συντεταγμένες του στοιχείου j | 35 |
| Εξίσωση (3.14): Υπολογισμός της διατμητικής συνιστώσας του τανυστή τάσεων στο τοπικό σύστημα του στοιχείου i | 35 |

| | |
|---|-----|
| Εξίσωση (3.15): Υπολογισμός της ορθής συνιστώσας του τανυστή τάσεων στο τοπικό σύστημα του στοιχείου i | 36 |
| Εξίσωση (3.16): Υπολογισμός των ΣΕΤ από τις ασυνεχείς μετατοπίσεις | 36 |
| Εξίσωση (3.17): Υπολογισμός φορτίου του αριθμητικού μοντέλου | 38 |
| Εξίσωση (3.18): Αδιαστατοποίηση του φορτίου..... | 39 |
| Εξίσωση (3.19): Λογαριθμική σπείρα | 44 |
| Εξίσωση (3.20): Γραμμική προσέγγιση μήκους κοπής - απόσταση διαδοχικών κοπών..... | 44 |
| Εξίσωση (4.1): Πειραματικός υπολογισμός του ανισότροπου ημιβαριογράμματος | 52 |
| Εξίσωση (4.2): Διόρθωση γεωμετρικής ανισοτροπίας | 53 |
| Εξίσωση (4.3): Εκθετικό μοντέλο ημιβαριογράμματος | 53 |
| Εξίσωση (4.4): Σύστημα επίλυσης του κανονικού Kriging..... | 54 |
| Εξίσωση (4.5): Εκτιμήσεις κανονικού Kriging | 54 |
| Εξίσωση (4.6): Απόδειξη της ταύτισης των δύο τρόπων υπολογισμού της ειδικής ενέργειας για την περίπτωση του μηχανήματος TBM | 56 |
| Εξίσωση (4.7): Εκτιμήσεις Kriging στο πεδίο των δεικτών | 56 |
| Εξίσωση (4.8): Υπολογισμός της συνοχής από την SE και τις γραμμές ολίσθησης..... | 59 |
| Εξίσωση (4.9): Γενικό εκθετικό μοντέλο ημιβαριογράμματος..... | 62 |
| Εξίσωση (4.10): Εκτίμηση της μέσης δύναμης κοπής για τους κοπτικούς δίσκους..... | 65 |
| Εξίσωση (4.11): Συσχέτιση της ειδικής ενέργειας με τον δείκτη ταξινόμησης της βραχομάζας RMR..... | 66 |
| Εξίσωση (4.12): Υπολογισμός μονοαξονικής αντοχής της βραχομάζας από την SE | 67 |
| Εξίσωση (4.13): Υπολογισμός της φθοράς από το RMR | 68 |
| Εξίσωση (4.14): Εμπειρική συσχέτιση της φθοράς και του RMR..... | 68 |
| Εξίσωση (5.1): Υπολογισμός της μέσης δύναμης κοπής του μηχανήματος RH..... | 72 |
| Εξίσωση (5.2): Εκτίμηση του εκσκαπτόμενου όγκου..... | 76 |
| Εξίσωση (5.3): Σχετικά σφάλματα υπολογισμού του όγκου..... | 77 |
| Εξίσωση (5.4): Φαινόμενο κλίμακας της ειδικής ενέργειας του μηχανήματος RH..... | 84 |
| Εξίσωση (5.5): Υπολογισμός της ειδικής ενέργειας με την διακριτοποίηση της διατομής της σήραγγας | 89 |
| Εξίσωση (A.1): Υπολογισμός της μέσης τιμής και της διασποράς | 99 |
| Εξίσωση (A.2): Υπολογισμός της λοξότητας και της κυρτότητας..... | 99 |
| Εξίσωση (A.3): Υπολογισμός συνδιασποράς | 99 |
| Εξίσωση (A.4): Υπολογισμός ημιβαριογράμματος..... | 99 |
| Εξίσωση (A.5): Συσχέτιση ημιβαριογράμματος-συνδιασποράς | 99 |
| Εξίσωση (A.6): Υπολογισμός ισότροπου ημιβαριογράμματος | 99 |
| Εξίσωση (A.7): Εκτίμηση Kriging | 102 |
| Εξίσωση (A.8): Συνθήκη αμεροληψίας..... | 103 |
| Εξίσωση (A.9): Ελαχιστοποίηση τετραγωνικού σφάλματος | 103 |
| Εξίσωση (A.10): Σύστημα κανονικού Kriging | 103 |
| Εξίσωση (A.11): Συνθήκη αμεροληψίας κανονικού Kriging | 103 |
| Εξίσωση (A.12): Σφάλμα κανονικού Kriging | 103 |
| Εξίσωση (A.13): Στοχαστικές προσομοιώσεις | 104 |
| Εξίσωση (A.14): Αντικειμενική συνάρτηση προσομοίωσης..... | 104 |
| Εξίσωση (A.15): Κανόνας αποδοχής αναδιάταξης | 104 |
| Εξίσωση (A.16): Σταδιακή μείωση της παραμέτρου θερμοκρασίας | 105 |

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1. Αντικείμενο

Η συνεχώς αυξανόμενη τάση κατασκευής υπογείων έργων σε διεθνές αλλά και σε εθνικό επίπεδο είναι η ολοένα αύξηση της κατασκευής υπογείων έργων (λ.χ. οδικές και σιδηροδρομικές σήραγγες, υδραυλικές σήραγγες, υπόγειοι χώροι αναψυχής και εργασίας, υπόγειες διαβάσεις και χώροι στάθμευσης, αποθηκευτικοί χώροι ενεργειακών πόρων ή αποβλήτων και υπόγειες εκμεταλλεύσεις μεταλλευμάτων και βιομηχανικών ορυκτών λόγω εξάντλησης των πλούσιων υπαίθριων αποθεμάτων ή λόγω περιβαλλοντικών προβλημάτων, μεταξύ άλλων) αντί για την κατασκευή αυτοκινητοδρόμων ή γεφυρών ή υπαίθριων εκμεταλλεύσεων που δημιουργούν μεγάλη ατμοσφαιρική και ηχητική ρύπανση αλλά και συντελούν στην ραγδαία αύξηση της χρήσης των ιδιωτικών οχημάτων σε αντιδιαστολή με τα μέσα μαζικής μεταφοράς. Σε αυτό το σημείο αναφέρεται η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την αναβάθμιση του Διευρωπαϊκού Οδικού Δικτύου (*Trans European Road Network, TEN-T*, βλ. Σχ. 1.1) για την βελτίωση της μεταφορικής ικανότητας. Αυτό συνεπάγεται την κατασκευή σημαντικού αριθμού σιδηρόδρομων, περίπου 2100 km σιδηρόδρομων θα κατασκευασθούν στην Ευρώπη μέχρι το 2020 (βλ. ενδεικτικά στοιχεία στον Πίν. 1.1). Η χρήση υπογείων χώρων μπορεί να λύσει μελλοντικά σημαντικά οικονομικά, κοινωνικά και οικολογικά προβλήματα. Αναφέρονται ενδεικτικά η αύξηση χρήσης και αξίας της γης, αύξηση της απασχόλησης, προστασία του περιβάλλοντος κ.λπ. Όμως τα δύο κυριότερα προβλήματα που σχετίζονται με την κατασκευή υπογείων έργων είναι (α) το ψηλότερο κόστος συγκριτικά με τα υπαίθρια έργα (το οποίο πολλές φορές δεν μπορεί να προβλεφθεί εντός ασφαλών ορίων, π.χ. πρόσφατη μελέτη κατέδειξε ότι το κόστος σιδηρόδρομων μπορεί να κυμαίνεται ενδεικτικά μεταξύ 20,000 – 50,000 €/m ανάλογα με τις επί τόπου γεωλογικές συνθήκες), και (β) η ασφάλεια κατασκευής και λειτουργίας του υπόγειου δεδομένου ότι το έδαφος ή το πέτρωμα δεν είναι τυποποιημένο υλικό από πλευράς μηχανικών ιδιοτήτων (όπως λ.χ. το σκυρόδεμα και τα μέταλλα). Το μεγαλύτερο μοναδιαίο κόστος στην κατασκευή των υπόγειων έργων αντιστοιχεί στις εργασίες όρυξης και υποστήριξης.



Σχήμα 1.1: Σχεδιαζόμενο δίκτυο υπογείων έργων στην Ευρώπη

Πίνακας 1.1: Ενδεικτικά στοιχεία για τα σχεδιαζόμενα υπόγεια έργα στην Ευρώπη (πηγή: *TEN-T**)

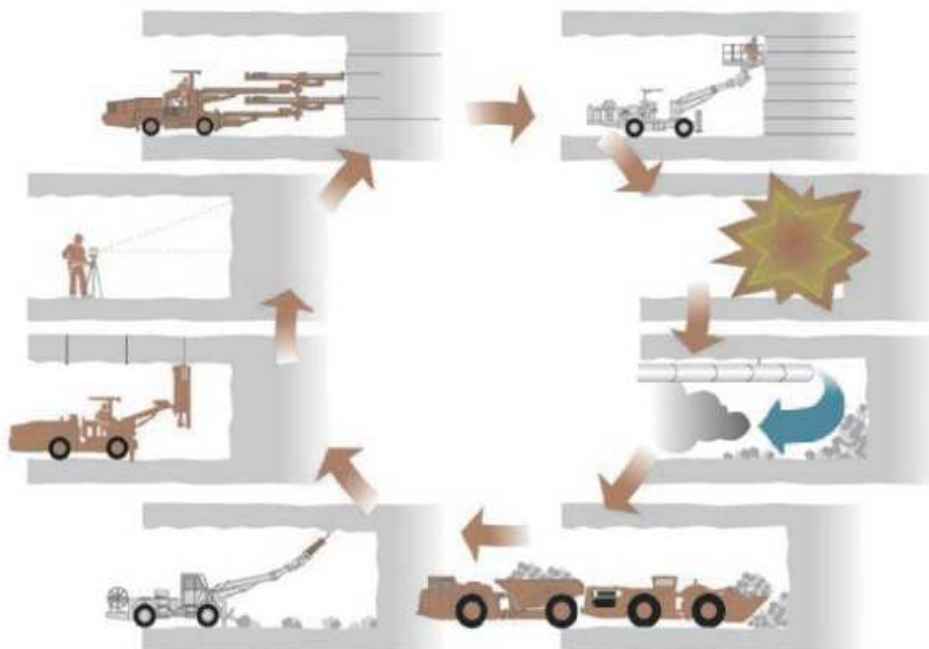
| Σήραγγα | Μήκος | Τοποθεσία | Κατασκευή | | Κόστος x10 ⁹ € |
|---------------|------------|---------------|-----------|-------|------------------------------|
| | [km] | | Αρχή | Πέρας | |
| Brenner basis | 55 | Αυστρία | 2010 | 2020 | 9 |
| Koralalm | 33 | Αυστρία | 2008 | 2016 | 4 |
| Semmering | 22 | Αυστρία | 2009 | 2018 | 2.6 |
| Lyon-Turin | 52 | Γαλλία-Ιταλία | 2009 | 2019 | 7.6 |
| Σύνολο | 162 | | | | 23.2 |

* Τα στοιχεία προέρχονται από τα σχεδιαζόμενα έργα το 2008

Τα υπόγεια έργα όπως σήραγγες, στοές προσπέλασης, κ.λπ., ορύσσονται σήμερα είτε με συνεχή τρόπο με μηχανήματα ολομέτωπης κοπής (TBM), είτε ασυνεχώς με τους κάτωθι τρεις τρόπους:

- α) με την κλασική υβριδική μέθοδο της διάτρησης-ανατίναξης (Σχ. 1.2),
- β) με χρήση συμβατικών εκσκαφών, ή
- γ) με την χρήση εκσκαπτικών μηχανημάτων σημειακής κοπής (Σχ. 1.3),

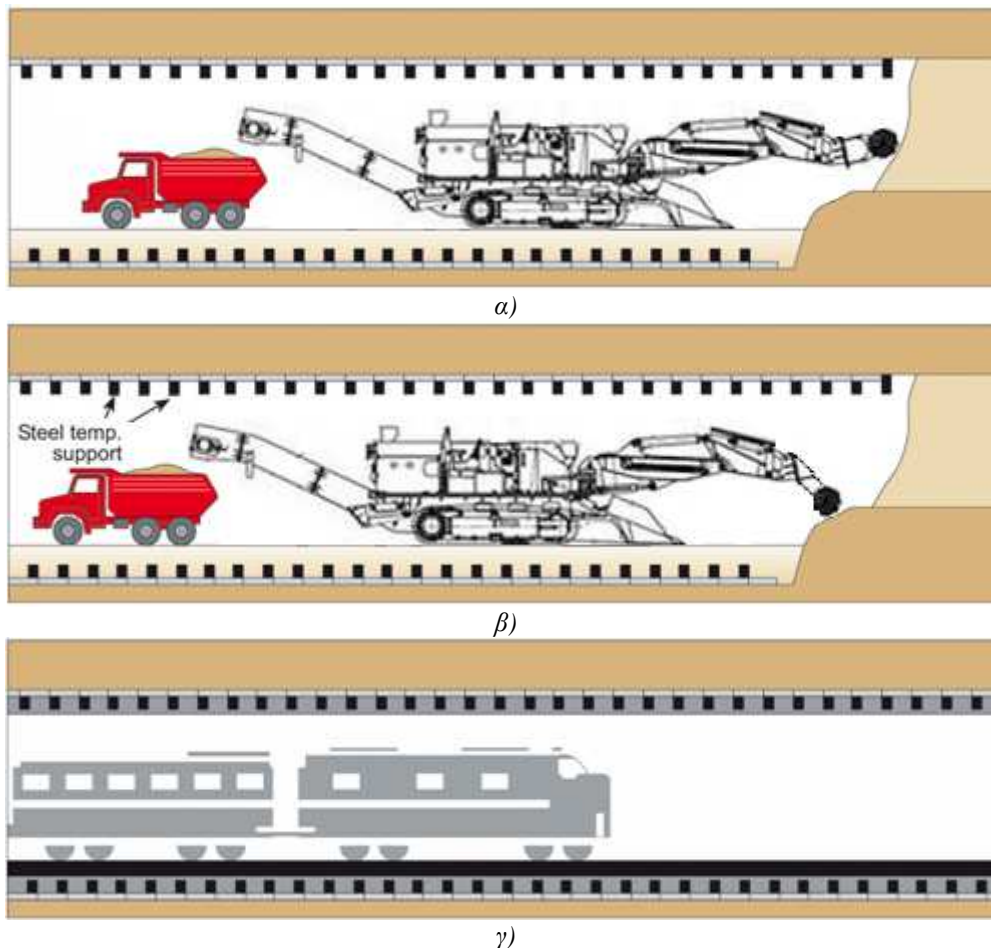
Η πρώτη μέθοδος της ασυνεχούς εξόρυξης έχει καλύτερη απόδοση σε σκληρούς, φθοροποιούς και ασυνεχείς γεωλογικούς σχηματισμούς, αλλά χαρακτηρίζεται από ασυνεχή κύκλο εργασιών, μη-πλήρη μηχανοποίηση (λ.χ. κατά την γόμωση των διατρημάτων με εκρηκτικές ύλες και την συνδεσμολογία της πυροδότησης), σημαντικές απαιτήσεις σε αερισμό των μετώπων μετά τις ανατινάξεις και ρηγμάτωση του πετρώματος πέρα από το σύνορο της εκσκαφής (δημιουργία υπερεκσκαφών και φθοράς προκαλώντας περιφερειακή ζώνη φθοράς γνωστής και με τον αγγλικό όρο Excavation Damage Zone, EDZ).



Σχήμα 1.2: Κύκλος διάτρησης ανατίναξης (Heino, 1999): με κυκλικό τρόπο α) τοπογραφικές μετρήσεις (αριστερά), β) διάτρηση, γ) γόμωση με εκρηκτικές ύλες, δ) ανατίναξη πετρώματος, ε) αερισμός, στ) φόρτωση-μεταφορά, ζ) ξεσκάρωμα-καθαρισμός μετώπου και παρειών στοάς, και η) κοχλίωση οροφής.

Σύμφωνα με την τρίτη μέθοδο ασυνεχούς όρυξης υπογείων έργων (Σχ. 1.3) χρησιμοποιούνται ειδικά εκσκαπτικά μηχανήματα όπως τα μηχανήματα σημειακής

κοπής (Roadheaders) για την εξόρυξη σε χαλαρούς έως σκληρούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Οι τρεις παραπάνω μέθοδοι αναφέρονται ως μέθοδος τμηματικής (κυκλικής) όρυξης υπογείων μετώπων που είναι ευρέως γνωστή και ως Νέα Αυστριακή ή συμβατική μέθοδος. Στη μέθοδο της συνεχούς εξόρυξης γίνεται η χρήση μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής (Tunnel Boring Machines, TBM's).



Σχήμα 1.3: Παράδειγμα εφαρμογής της συμβατικής μεθόδου με εκσκαφή σε δύο φάσεις (ανωτέρου μετώπου μορφής στοάς και στην συνέχεια της βαθμίδας): α) εκσκαφή μετώπου μορφής στοάς, β) τοποθέτηση προσωρινής υποστήριξης και εκσκαφή της βαθμίδας και γ) προσθήκη της τελικής υποστήριξης και του εξοπλισμού της σήραγγας.

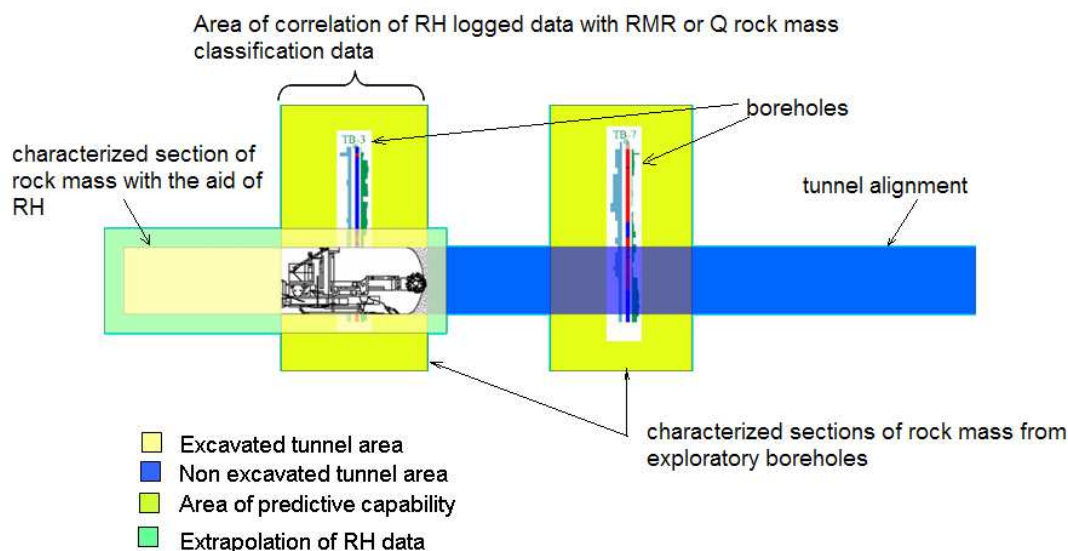
Τις τελευταίες 3 δεκαετίες έχουν γίνει σημαντικές καινοτομικές τεχνολογικές βελτιώσεις των μηχανημάτων μηχανικής όρυξης RH και TBM με στόχο την αύξηση της ισχύος των, της αντοχής των κοπτικών άκρων, του αυτοματισμού των εργασιών και των καταγραφών επί μέρους λειτουργιών των μηχανημάτων κ.λπ. Από την άλλη πλευρά όμως υπάρχουν μεγάλα περιθώρια αύξησης της αποδοτικότητας των (μείωσης του κόστους και του χρόνου όρυξης), αλλά και απόκτησης δεδομένων κατά την όρυξη σε πραγματικό χρόνο που αφορούν την αντοχή των γεωλογικών υλικών και της κατανάλωσης της ενέργειας που στην αρχή της εξόρυξης είναι ασαφείς. Αυτό είναι εφικτό αν κατανοηθούν οι μηχανισμοί θραύσης των πετρωμάτων ή πλαστικής αποφλοίσωσης (peeling) των εδαφικών στρωμάτων που λαμβάνουν χώρα στην επαφή των κοπτικών άκρων και του μετώπου.

1.2. Στόχος

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή (ΔΔ) έχει ως στόχο στην ανάπτυξη ολοκληρωμένου υπολογιστικού μοντέλου που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

- (1) αφενός μεν για τον ανάδρομο υπολογισμό των παραμέτρων αντοχής των γεωϋλικών από καταγραφές κατανάλωσης ισχύος και άλλων λειτουργικών παραμέτρων των μηχανών ολομέτωπης (Tunnel Boring Machines, TBM) και των μηχανών σημειακής (Roadheaders, RH) εξόρυξης μέσω του υπολογισμού της ειδικής ενέργειας εξόρυξης,
- (2) αφετέρου δε στην απευθείας πρόβλεψη της κατανάλωσης ισχύος δεδομένου μηχανήματος καθώς και του ωφέλιμου ρυθμού προχώρησης (net advance rate) ή ταχύτητας διάτρησης (Penetration Rate, *PR*) μιας σήραγγας συναρτήσει της ώσης της κεφαλής στο μέτωπο από γεωτεχνικά δεδομένα που έχουν από πριν περισυλλεχθεί από πυρηνοληπτικές ή δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και άλλα γεωλογικά δεδομένα στη φάση του σχεδιασμού της σήραγγας ή από γεωτεκτονικές αποτυπώσεις μετώπων κατά την φάση της διάνοιξης της.

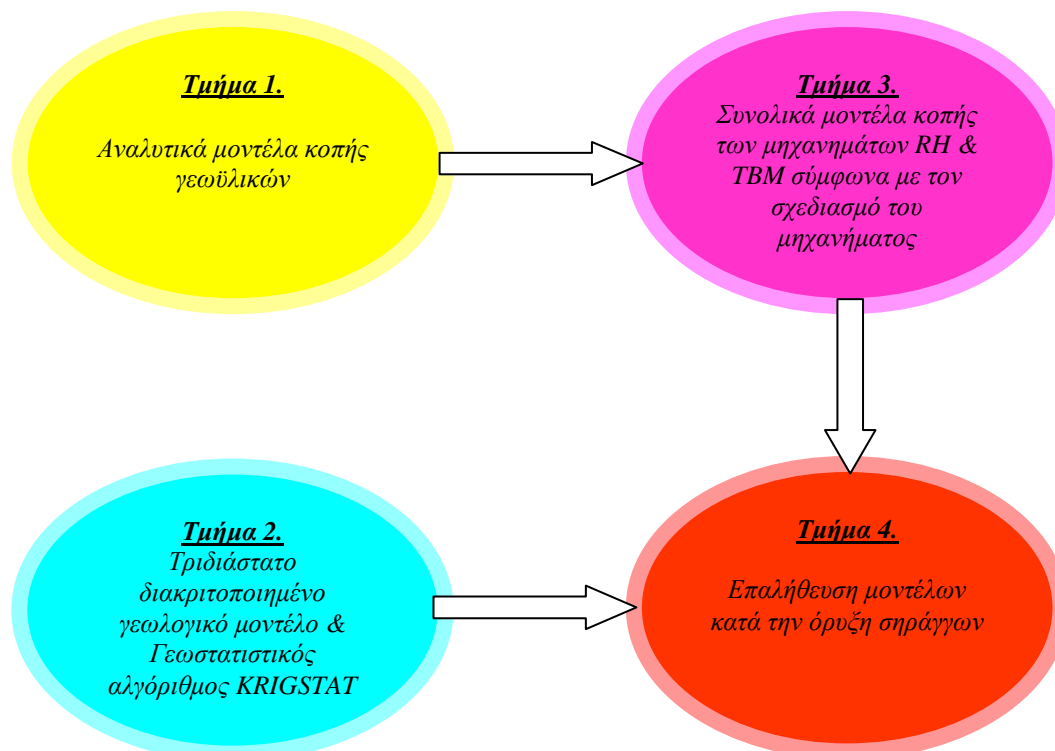
Αν έχει κατανοηθεί και εν συνεχεία ποσοτικοποιηθεί ο τρόπος που εξορύσσει ο RH ή το TBM ένα γεωλογικό σχηματισμό, τότε από την ανάδρομη ανάλυση και επεξεργασία των καταγραφών του που θα οδηγούν στον υπολογισμό της ειδικής ενέργειας (είτε σε πραγματικό χρόνο από το ίδιο το μηχάνημα, είτε από το γραφείο στο τέλος μιας προχώρησης), μπορεί να βελτιώνεται σταδιακά όλο και περισσότερο ο χαρακτηρισμός των γεωλογικών σχηματισμών που διαπερνά, συγκριτικά με την φάση σχεδιασμού του έργου που ο χαρακτηρισμός αυτός (κυρίως από πυρηνοληπτικές ή δειγματοληπτικές γεωτρήσεις) είναι πολύ πτωχός (μπορεί και λιγότερο από 10^{-8} % του συνολικού όγκου να έχει χαρακτηριστεί επαρκώς από ένα σχετικά πυκνό κάρναβο γεωτρήσεων). Καταυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε αφενός μεν (α) την μετατροπή ενός καταρχάς ποιοτικού γεωλογικού/γεωτεχνικού μοντέλου (ground model) σε ποσοτικό, αλλά και (β) ποσοτικοποιείται η απόδοση της λειτουργίας του μηχανήματος καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης ενός υπόγειου έργου. Για να επιτευχθεί αυτός ο μετασχηματισμός του ποιοτικού γεωλογικού μοντέλου σε ποσοτικό, εκτός από την ανάδρομη ανάλυση των καταγραφών του μηχανήματος χρειάζεται ένας γρήγορος αλγόριθμος παρεμβολής ποσοτικών δεδομένων από τα σημεία των μετρήσεων (γεωτρήσεις, μέτωπα) παντού μέσα στο γεωλογικό χώρο ενδιαφέροντος και κατά μήκος της σήραγγας όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο [Σχ. 1.4](#). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο βελτιωμένος ως προς την ταχύτητα και τις δυνατότητες παρεμβολής δεδομένων ο Γεωστατιστικός κώδικας KRIGSTAT v. 2.0 ([Exadaktylos et al., 2008](#), [Stavropoulou et al., 2007a](#), [2007b](#)) που έχει αναπτύξει το Εργαστήριο Μελέτης & Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων (βλ. [Παράρτημα Α](#)).



Σχήμα 1.4: Χρήση του RH ή του TBM ως “αισθητήρα” της αντοχής των γεωυλικών ([Exadaktylos et al., 2008](#)) και ο συνδυασμός με τα δεδομένα από τις προϋπάρχουσες γεωτρήσεις με βάση την γεωστατιστική θεωρία για την δημιουργία του γεωτεχνικού μοντέλου της σήραγγας.

1.3. Προτεινόμενο μοντέλο ανάλυσης λειτουργίας μηχανημάτων ολομέτωπου και σημειακής κοπής.

Το μοντέλο που προτείνεται στην παρούσα ΔΔ χωρίζεται σε τέσσερα τμήματα, όπως παραστατικά φαίνεται στο [Σχ. 1.5](#). Το πρώτο τμήμα αφορά την κατάστρωση και επαλήθευση με πειραματικά δεδομένα αναλυτικών/αριθμητικών μοντέλων κοπής γεωυλικών με συμπεριφορά που κυμαίνεται από πλαστική (λ.χ. άργιλοι) έως τελείως ψαθυρή (λ.χ. γρανίτες) που γίνεται είτε με συρτικά άκρα είτε με δίσκους κοπής όταν πλησίον της κοπής αυτής υπάρχει προϋπάρχουσα εγκοπή από γειτονικό κοπτικό άκρο. Κατόπιν στα πλαίσια του δεύτερου τμήματος γίνεται η χρήση του γεωστατιστικού κώδικα KRIGSTAT v. 2.0 για την παρεμβολή στο χώρο δεδομένα της εδαφοβραχώμαζας (αντοχή, δείκτες πετρωμάτων κ.α.) σε συνδυασμό με επί τόπου αποτυπώσεις στα μέτωπα για την συσχέτιση με τις λειτουργικές παραμέτρους του μηχανήματος όπως η ειδική ενέργεια κοπής. Η παρεμβολή γίνεται στους κόμβους διακριτοποιημένου τριδιάστατου γεωλογικού μοντέλου. Το τρίτο τμήμα της προτεινόμενης προσέγγισης αφορά την σύνθεση των συνολικών μοντέλων λειτουργίας των RH και TBM για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ανάλογα με τον τύπο (RH ή TBM) και σχεδιασμό της κοπτικής κεφαλής, των παραμέτρων λειτουργίας και των παραμέτρων αντοχής της εδαφοβραχώμαζας. Σ’ αυτό το τμήμα το γενικό μοντέλο κάθε τύπου μηχανήματος συντίθεται από τα μοντέλα των κοπτικών άκρων που έχουν γίνει στο πρώτο τμήμα. Το τελευταίο τμήμα αφορά την επαλήθευση όλων των προηγούμενων μοντέλων με πραγματικά δεδομένα από τέσσερις (4) συνολικά σήραγγες που εξορύσσονται σε όλο το εύρος της συμπεριφοράς των γεωυλικών (πλαστικά εδάφη – ψαθυρά πετρώματα).



Σχήμα 1.5: Διάγραμμα ροής των μοντέλων TBM και RH για την πρόβλεψη της απόδοσης των κατά την όρυξη σιράγγων και στοών.

Η βασικότερη παράμετρος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ΔΔ για την περιγραφή της αποδοτικότητας της λειτουργίας του TBM ή του RH όταν ορύσσουν ανομοιογενείς γεωλογικούς σχηματισμούς είναι η ειδική ενέργεια κοπής ανά μονάδα όγκου του γεωωλικού, δηλαδή η ενέργεια που δαπανάται από τα ενεργά κοπτικά άκρα της κεφαλής (αυτά που βρίσκονται σε επαφή με το μέτωπο) για την απόσπαση μοναδιαίου όγκου γεωωλικού. Η ειδική ενέργεια (specific energy) προτάθηκε από τον [Teale \(1965\)](#) και αρχικά χρησιμοποιήθηκε ως παράμετρος για την ανάλυση της κρουστικής ή περιστροφικής διάτρησης των πετρωμάτων αλλά μετά επεκτάθηκε και για άλλα μηχανήματα μηχανικής όρυξης πετρωμάτων. Η κατανάλωση της ειδικής ενέργειας (με μονάδες στο SI: MJ/m^3 (ή MPa , μονάδες τάσης) που ισοδυναμούν με $0.278 kWh/m^3$) έχει άμεσο αντίκτυπο στην αποδοτικότητα της όρυξης δηλαδή:

- 1) στην καθαρή ταχύτητα προχώρησης ή ταχύτητα διάτρησης (PR) της σήραγγας χωρίς βέβαια να υπολογίζονται οι νεκροί χρόνοι που το μηχάνημα δεν λειτουργεί για την όρυξη της σήραγγας αλλά σε άλλες λειτουργίες (λ.χ. καθαρισμός μετώπου, αντικατάσταση κοπτικών άκρων, προχώρηση στην επόμενη θέση, συντήρηση κ.λπ.), και
- 2) στο κόστος της εκσκαφής (κόστος χρήσης του μηχανήματος για δεδομένο χρόνο ολοκλήρωσης του έργου και ο ρυθμός φθοράς κοπτικών άκρων).

Η ειδική ενέργεια υπολογίζεται με δύο διαφορετικές αλλά πρακτικά ισοδύναμες μεθόδους. Στην πρώτη μέθοδο ο υπολογισμός γίνεται από την κοπή με ένα κοπτικό άκρο (εξ. (1.1)) όπου η ειδική ενέργεια υπολογίζεται από τον λόγο της συρτικής δύναμης κοπής $F_i^c = F_s^c$ (προκειμένου για συρτικά κοπτικά άκρα) ή από την δύναμη κύλισης $F_i^c = F_r^c$ (προκειμένου για κυλιόμενους κοπτικούς δίσκους) προς το γινόμενο του βάθους κοπής ανά περιστροφή της κοπτικής κεφαλής, δ, επί την μέση απόσταση γειτονικών κοπών S .

$$SE = \frac{F_i^c}{S \cdot \delta} \quad (1.1)$$

Στην δεύτερη μέθοδο ο υπολογισμός γίνεται από το πηλίκο της δαπανώμενης ισχύος ανά εκσκαπτόμενο όγκο πετρώματος στη μονάδα του χρόνου.

$$SE = \eta \cdot \frac{P}{V/t} \Leftrightarrow ICR = \frac{V}{t} = \frac{\eta \cdot P}{SE} \quad (1.2)$$

όπου:

η ο συντελεστής απόδοσης του συστήματος που εκφράζει το ποσοστό μετάδοσης της ενέργειας στην κοπτική κεφαλή,

P η αναλίσκόμενη συνολική ισχύς κατά την όρυξη κατά το χρονικό διάστημα t και

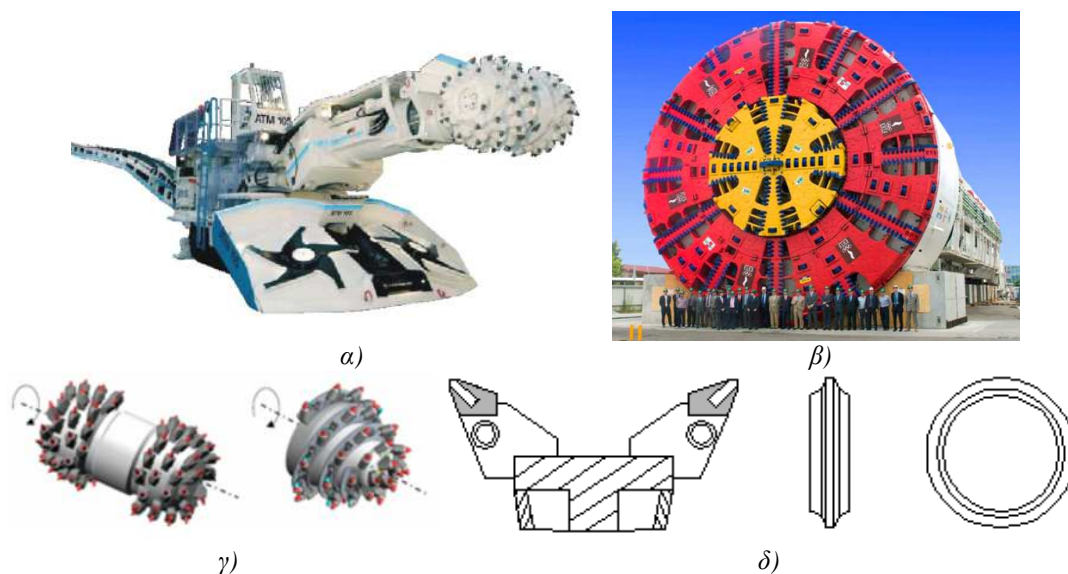
V ο όγκος του πετρώματος που ορύσσεται στο ίδιο χρονικό διάστημα.

Από τον ίδιο τύπο [εξ. \(1.2\)](#) προκύπτει ότι ο ρυθμός παραγωγής εκσκαπτόμενου υλικού (Instantaneous Cutting Rate, ICR) είναι αντιστρόφως ανάλογος της ειδικής ενέργειας.

Οι βασικότερες παράμετροι που επηρεάζουν την κατανάλωση ειδικής ενέργειας κατά την όρυξη σιηράγγων και άλλων τύπων υπογείων που προαναφέρθηκαν με τις δύο υπόψιν τεχνικές μηχανικής διάνοιξης σιηράγγων είναι οι εξής:

- α) Προκειμένου για RH ([Σχ. 1.6α](#)) ο τύπος του μηχανήματος που μπορεί να είναι εγκάρσιος (transverse) για ημίσκληρα και σκληρά πετρώματα με άξονα περιστροφής των δύο κεφαλών κάθετο προς την μπούμα ([Σχ. 1.6γ](#)) ή ο αξονικός (axial) για εδάφη και μαλακά πετρώματα με άξονα περιστροφής της κοπτικής κεφαλής ομοαξονικό με την μπούμα ([Σχ. 1.6γ](#)),
- β) η διάμετρος της κοπτικής κεφαλής του RH και του TBM,
- γ) ο αριθμός, η γεωμετρία και η θέση των κοπτικών άκρων επί της κεφαλής του RH και των συρτικών άκρων και των δίσκων κοπής ([Σχ. 1.6δ](#)) του TBM ([Σχ. 1.6α](#)),
- δ) η ταχύτητα σάρωσης του μετώπου για RH ή της προχώρησης του μετώπου για TBM,
- ε) η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής και η ώση επί της κοπτικής κεφαλής,
- στ) το βάθος κοπής και η πραγματική απόσταση των κοπτικών άκρων,
- ζ) η φθορά των κοπτικών άκρων (πλάτυνση των αιχμών),
- η) οι παράμετροι αντοχής και τα φθοροποιά συστατικά του πετρώματος ή του εδάφους, και
- θ) η πίεση των πόρων όταν τα εδάφη και τα πορώδη πετρώματα βρίσκονται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα.

Οι τρεις πρώτες από τις παραπάνω παραμέτρους ($\alpha - \gamma$) παραμένουν σταθερές σε μια πρακτική εφαρμογή ενώ οι υπόλοιπες μεταβάλλονται ανάλογα με τις συναντώμενες γεωλογικές συνθήκες. Για να χρησιμοποιηθεί η ειδική ενέργεια είτε στην φάση της κατασκευής του υπογείου για τον χαρακτηρισμό της αντοχής των εκσκαπτόμενων γεωλογικών σχηματισμών και την αποδοτικότητα της εξόρυξης, είτε στη φάση του σχεδιασμού της σήραγγας για την επιλογή και τον σχεδιασμό του κατάλληλου μηχανήματος και των λειτουργικών παραμέτρων, πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση των υπολοίπων παραμέτρων ($\delta - \theta$) στον υπολογισμό της (ειδικής ενέργειας).



Σχήμα 1.6: α) Άποψη RH, β) άποψη TBM διαμέτρου 15m που χρησιμοποιήθηκε στη Μαδρίτη, γ) εγκάρσια και αξονική κεφαλή RH με βιδία σημειακής προσβολής και δ) γεωμετρία συρτικών κοπτικών άκρων (knives) και δίσκων κοπής των TBM (πρόσθια όψη αριστερά και πλάγια όψη δεξιά).

1.4. Σύγκριση των βασικότερων μοντέλων και του προτεινόμενου μοντέλου για την ανάλυση λειτουργίας μηχανημάτων ολομέτωπου και σημειακής κοπής

Στην ενότητα αυτή θα γίνει η σύγκριση των προβλέψεων των μοντέλων της παρούσας ΔΔ με τα ήδη υπάρχοντα μοντέλα στην διεθνή βιβλιογραφία. Τα πιο γνωστά και διαδεδομένα από αυτά τα μοντέλα (πρότυπα) είναι αυτό του Πανεπιστημίου του Κολοράντο (Colorado School of Mines, CSM) και του Νορβηγικού Ινστιτούτου Τεχνολογίας (Norwegian Institute of Technology, NTH).

Πριν προχωρήσουμε στην κατάστρωση των μοντέλων (προτύπων) πρόβλεψης της λειτουργίας των μηχανημάτων TBM και RH θα αναφερθούν λίγα λόγια για το πλαίσιο σχεδιασμού της όρυξης σήραγγων με τα μηχανήματα αυτά.

1) Η επιλογή των μηχανημάτων αυτών και ο σχεδιασμός τους εξαρτάται απ' την φύση των γεωλογικών σχηματισμών, την γεωμετρία της διατομής, το μήκος της σήραγγας και το κόστος του έργου. Η φύση των γεωλογικών σχηματισμών αναφέρεται στην αντοχή και στην σκληρότητα τους, τα φθοροποιά χαρακτηριστικά, στον τεκτονισμό τους και στην ύπαρξη υπογείων υδάτων. Όπως είναι γνωστό οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι συνήθως ανομοιογενείς, οπότε οι ιδιότητες αυτές μεταβάλλονται από θέση σε θέση αλλά και στο ίδιο το μέτωπο καθεαυτό. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν τον καθαρό ρυθμό διάτρησης (**Penetration Rate, PR [m/h]**), τον ρυθμό προχώρησης της σήραγγας (**Advance Rate, AR [m/h]**) και το κόστος της όρυξης (C) που αφορά το κόστος αντικατάστασης των κοπτικών άκρων και της χρήσης του μηχανήματος (TBM ή RH). Προκειμένου για όρυξη με TBM ο [Barton \(2000\)](#) πρότεινε την παρακάτω εμπειρική σχέση μεταξύ AR και PR:

$$AR = PR \cdot t^m \quad (1.3)$$

όπου:

t ο χρόνος διάρκειας της κατασκευής της σήραγγας ή στοάς και
 m ο εκθέτης που είναι ένας αρνητικός πραγματικός αριθμός που μειώνει τον μέσο ρυθμό προχώρησης της σήραγγας με την αύξηση του χρόνου κατασκευής με τυπικές τιμές που κυμαίνονται από -0.15 έως -0.45.

2) Η ειδική ενέργεια (SE), αρχικά μειώνεται με τον λόγο S/δ μετά φθάνει μια ελάχιστη τιμή (συνήθως στο διάστημα $S/\delta = 2 - 4$ για RH και $S/\delta = 8-12$ για TBM) και μετά αυξάνει έως όπου φθάσει μια σταθερή τιμή (βλ. [Σχ. 3.10](#)). Επίσης η συνολική δύναμη που δέχονται τα κοπτικά άκρα αυξάνει με το βάθος κοπής ανά περιστροφή της κοπτικής κεφαλής. Σύμφωνα με τα παραπάνω ο σχεδιασμός των μηχανημάτων όρυξης που αφορά α) τη διάταξη των κοπτικών άκρων στην κοπτική κεφαλή με την επιθυμητή απόσταση S γειτονικών εγκοπών και β) το βάθος προχώρησης δ κατά την λειτουργία τους, γίνεται έτσι ώστε αφενός μεν να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση της ειδικής ενέργειας, αφετέρου δε η συνολική δύναμη που ασκείται σε κάθε κοπτικό να μην υπερβαίνει την αντοχή του σε θραύση που θα οδηγήσει την πρόωρη αντικατάστασή του.

Καθίσταται λοιπόν προφανές ότι για τον υπολογισμό των δυνάμεων που ασκούνται στα κοπτικά άκρα χρειάζεται ένα θεωρητικό μοντέλο στην αρχική φάση σχεδιασμού του μηχανήματος. Ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό της ειδικής ενέργειας σε συνάρτηση των S και δ . Στην περίπτωση αυτή (δηλαδή του υπολογισμού της ειδικής ενέργειας) ο υπολογισμός της συρτικής δύναμης είναι αναγκαίος καθώς η ορθή δύναμη δεν παράγει έργο. Τα δύο μοντέλα υπολογισμού των δυνάμεων κοπής στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται στα [Κεφ. 2-3](#).

3) Η μέγιστη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της κεφαλής ω [rad/min] που ελέγχεται από τον χειριστή, δεν μπορεί να υπερβεί την μέγιστη γραμμική ταχύτητα των κοπτικών ([εξ. \(1.4\)](#)) που προδιαγράφεται από τον κατασκευαστή. Το γινόμενο της γωνιακής ταχύτητας με την ροπή στρέψης T [kNm] της κεφαλής δίνει την στιγμιαία κατανάλωση της ισχύος P της κεφαλής. Επίσης το γινόμενο της ταχύτητας περιστροφής και του βάθους διείσδυσης δίνει τον ρυθμό διάτρησης, ενώ η συνολική ροπή στρέψης T βρίσκεται από το άθροισμα του γινομένου των συρτικών δυνάμεων με τον μοχλοβραχίονα R_i σε όλα τα ενεργά κοπτικά και η συνολική ώση Th βρίσκεται από το άθροισμα των ορθών δυνάμεων. Η ορθή δύναμη (ώση) είναι η δύναμη η οποία πρέπει να ασκηθεί στο μέτωπο από την κεφαλή για την διείσδυση των κοπτικών άκρων σε βάθος δ .

$$\begin{aligned} v_i &= \omega \cdot R_i \\ PR &= \omega \cdot \delta \\ Th &= \sum_{i=1}^N F_{ni}^c \approx N \cdot F_n^c \\ T &= \sum_{i=1}^N F_{ri}^c \cdot R_i \approx 0.3 \cdot N \cdot D \cdot F_r^c \\ P &= T \cdot \omega \end{aligned} \quad (1.4)$$

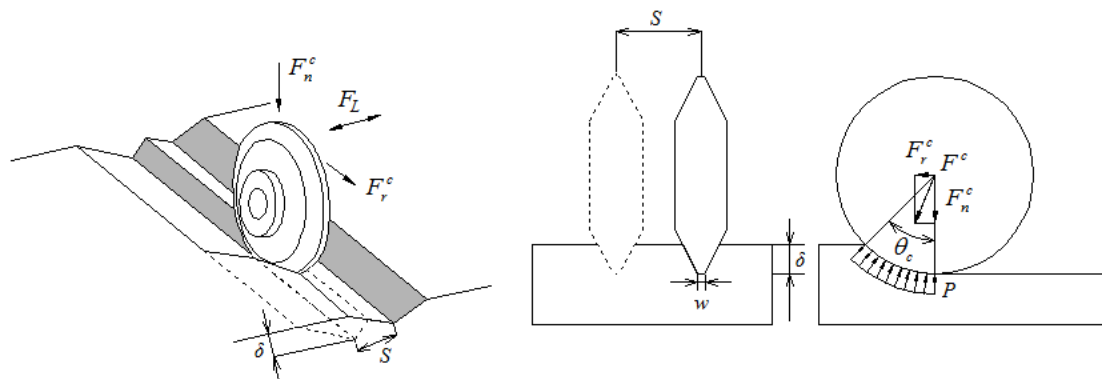
όπου:

- v_i η γραμμική ταχύτητα του κοπτικού i
- N ο αριθμός των κοπτικών δίσκων
- D η διάμετρος του TBM και
- R_i ο μοχλοβραχίονας του κοπτικού i

Σημειώνεται ότι οι άνω υπολογισθείσες ποσότητες Th , T και P πρέπει να διαιρεθούν με τον συντελεστή μεταφοράς της ισχύος από τον κινητήρα στην κοπτική κεφαλή.

4) Το μηχανικό μοντέλο υπολογισμού της δύναμης επί του κοπτικού άκρου στην πραγματικότητα πρέπει να είναι δυναμικό (εφόσον η αντοχή των πετρωμάτων

εξαρτάται απ'τον ρυθμό φόρτισης) και τριδιάστατο, αλλά τα έως σήμερα προτεινόμενα αναλυτικά μοντέλα είναι στατικά και επίπεδα.



Σχήμα 1.7: Ανάλυση δυνάμεων στους δίσκους κοπής των TBM.

Μετά από τις ανωτέρω επισημάνσεις γίνει αναφορά στην βασική φιλοσοφία του μοντέλου CSM που είναι ο υπολογισμός της απαιτούμενης ισχύος, της ροπής και της δύναμης ώθησης ολόκληρης της κοπτικής κεφαλής του μηχανήματος TBM από τον υπολογισμό των δυνάμεων σε κάθε κοπτικό άκρο ξεχωριστά για την επίτευξη μιας ορισμένης καθαρής ταχύτητας διάτρησης. Αυτή η περίπτωση αφορά την επιλογή του μηχανήματος για δεδομένο γεωλογικό σχηματισμό. Στην περίπτωση δεδομένου μηχανήματος το ζητούμενο είναι η ταχύτητα διάτρησης και η φθορά των κοπτικών άκρων σε δεδομένο γεωλογικό σχηματισμό. Οι δυνάμεις υπολογίζονται ως συνάρτηση των ιδιοτήτων αντοχής του πετρώματος και την γεωμετρία των κοπτικών άκρων με βάση πειραματικές δοκιμές πλήρους κλίμακας (linear cutting rig tests) και κατάλληλες εμπειρικές σχέσεις. Η χρήση πειραματικών δοκιμών για διαφορετικούς τύπους κοπτικών άκρων και πετρωμάτων με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες είναι ο ασφαλέστερος και ακριβέστερος τρόπος υπολογισμού των αναλυτικών σχέσεων που περιγράφουν τις δυνάμεις κοπής. Παραδείγματα τέτοιων σχέσεων μπορούν να βρεθούν στην διεθνή βιβλιογραφία στις εργασίες των [Roxborough & Phillips \(1975\)](#), [Sanio \(1985\)](#), [Sato \(1993\)](#), [Rostami & Ozdemir \(1993\)](#), [Rostami et al. \(1996\)](#) και [Yagiz \(2006\)](#) με τις αντίστοιχες σχέσεις για το μηχάνημα σημειακής κοπής από τους [Rostami et al. \(1994\)](#) και [Neil et al. \(1994\)](#). Η βασική εξ. (1.5) για τον υπολογισμό της συνισταμένης δύναμης που ασκείται σε ένα κοπτικό άκρο (F^c) είναι η εξής (βλ. Σχ. 1.7):

$$F^c = \int dF = \int_0^{\theta_c} P \cdot R \cdot w \cdot d\alpha = \int_0^{\theta_c} P' \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\theta_c}\right)^n \cdot R \cdot w \cdot d\alpha = \frac{P' \cdot R \cdot w \cdot \theta_c}{n+1} \quad (1.5)$$

όπου:

R η ακτίνα του κοπτικού δίσκου,

w το πλάτος της αιχμής του κοπτικού άκρου,

θ_c το συνολικό τόξο επαφής κοπτικού δίσκου – πετρώματος,

α είναι η γωνία που κυμαίνεται από 0 έως θ_c ,

P η κατανομή του φορτίου στην επαφή κοπτικού – πετρώματος,

n ο εκθέτης που καθορίζει την κατανομή της πίεσης (με τυπικές τιμές 0.2 έως -0.2 και μειώνεται με την αύξηση της αιχμής του κοπτικού), και

P' η αποκαλούμενη βασική πίεση η οποία εξαρτάται από την αντοχή του πετρώματος (σ_c η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη, σ_t η αντοχή σε εφελκυσμό), την γεωμετρία του κοπτικού (R , w) και την γεωμετρία κοπής (την απόσταση

γειτονικής εγκοπής S , το βάθος κοπής δ) και σύμφωνα με το μοντέλο CSM υπολογίζεται από εμπειρικές σχέσεις που προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα (linear cutting rig tests). Παράδειγμα μιας τέτοιας σχέσης ([Rostami et al., 1996](#)) είναι η ακόλουθη:

$$P' = C \cdot \sqrt[3]{\frac{S \cdot \sigma_t \cdot \sigma_c^2}{\theta_c \cdot \sqrt{R \cdot w}}} \quad (1.6)$$

όπου C αδιάστατη σταθερά ίση περίπου με 2.12.

Για την περίπτωση ομοιόμορφου φορτίου ($n=0$) ή γραμμικού φορτίου ($n=1$) η δύναμη κύλισης και η ορθή δύναμη μπορούν να εκτιμηθούν από τις εξής αναλυτικές εκφράσεις:

$$F_n^c = \int_0^{\theta_c} P' \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\theta_c}\right)^n \cdot R \cdot w \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha = \begin{cases} P' \cdot R \cdot w \cdot \sin \theta_c, & n=0 \\ \frac{P' \cdot R \cdot w}{\theta_c} \cdot (1 - \cos \theta_c), & n=1 \end{cases} \quad (1.7)$$

$$F_r^c = \int_0^{\theta_c} P' \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\theta_c}\right)^n \cdot R \cdot w \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha = \begin{cases} P' \cdot R \cdot w \cdot (1 - \cos \theta_c), & n=0 \\ \frac{P' \cdot R \cdot w}{\theta_c} \cdot (\theta_c - \sin \theta_c), & n=1 \end{cases}$$

Με βάση τις [εξ. \(1.4\)](#) και [εξ. \(1.7\)](#) μπορούν να υπολογισθούν οι απαιτούμενες λειτουργικές παράμετροι του μηχανήματος όπως η ροπή T , η ισχύς P και η δύναμη ώθησης Th . Όλες οι παράμετροι λειτουργίας για συγκεκριμένο μηχάνημα και συγκεκριμένο πέτρωμα παραμένουν σταθερές με την μόνη μεταβαλλόμενη παράμετρο να είναι η διείδυση ανά κοπτικό με βάση την οποία γίνεται η ρύθμιση των λειτουργικών παραμέτρων με βάσει τις δυνατότητες του μηχανήματος (ισχύς της κεφαλής και αντοχή των κοπτικών εργαλείων).

Το μοναδιαίο κόστος C της όρυξης εκφρασμένο σε μονάδες [€/m] μπορεί να αποδοθεί με την εξής σχέση:

$$C = \frac{Dc}{AR} + N \cdot \frac{Pr}{L} \quad (1.8)$$

όπου:

Dc συμβολίζει το ημερήσιο κόστος χρήσης του μηχανήματος σε [€/ημέρα],
 N τον αριθμό των κοπτικών εργαλείων της κεφαλής του TBM ή του RH,
 L την διάρκεια ζωής των εργαλείων εκφρασμένη σε [m/εργαλείο],
 Pr την τιμή του κάθε εργαλείου εκφρασμένη σε [€/εργαλείο], και
 AR ο ρυθμός προχώρησης αποδίδεται από την [εξ. \(1.3\)](#) συναρτήσει του ρυθμού διάτρησης PR .

Ένα απλό μαθηματικό μοντέλο για την διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων L μπορεί να έχει τη γενική μορφή:

$$L = f(Th, \omega, abrasiveness) \quad (1.9)$$

Για δεδομένο πέτρωμα με δεδομένες φθοροποιές ιδιότητες (abrasiveness) που εξαρτώνται από την περιεκτικότητα του σε SiO_2 και σκληρά μεταλλικά ορυκτά το ανωτέρω μοντέλο βασιζόμενο σε βασικές αρχές της διαστασιολογικής ανάλυσης (dimensional analysis) μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$L = \lambda \cdot Th^{-\kappa} \cdot \omega^{-\nu} \quad (1.10)$$

όπου λ , κ , ν είναι θετικές σταθερές και $Th < \max(Th)$, $\omega < \omega_{max}$.

Τα εμπειρικά μοντέλα χρησιμοποιούν σχέσεις υπολογισμού της λειτουργίας των μηχανημάτων TBM βασιζόμενα σε ιστορικά δεδομένα κοπής από τέτοια μηχανήματα για διαφορετικούς τύπους πετρώματος. Η εμπειρική μέθοδος περιλαμβάνει νομογράμματα και εμπειρικές σχέσεις ως συνάρτηση των ιδιοτήτων των πετρωμάτων, συνθήκες της βραχομάζας, τις παραμέτρους του μηχανήματος και τον ρυθμό διάτρησης. Από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα εμπειρικά μοντέλα στην διεθνή βιβλιογραφία είναι αυτό με βάση το τροποποιημένο σύστημα ταξινόμησης της βραχομάζας Q_{TBM} του [Barton \(1999\)](#) και το Νορβηγικό μοντέλο NTH ([Bruland et al. 1995](#)). Το μοντέλο NTH χρησιμοποιεί ένα αριθμό παραμέτρων και δεικτών του πετρώματος όπως είναι η μονοαξονική αντοχή, ο δείκτης διατρησιμότητας (Drilling Rate Index, DRI), ο δείκτης φθοράς (abrasivity, Cutting Life Index, CLI), και ο δείκτης ψαθυρότητας (Brittleness Index, BI). Οι τελευταίοι τρεις δείκτες προσδιορίζονται από πειραματικές διατάξεις που σχεδιάστηκαν στο Trondheim για το σκοπό αυτό ([University of Trondheim, 1994](#), [Bruland, 1998](#)). Ο βασικότερος περιορισμός αυτού του μοντέλου είναι ότι οι σχέσεις είναι εμπειρικές και ισχύουν μόνο για το εύρος των πετρωμάτων και τύπων μηχανημάτων από τα οποία έχουν προκύψει αυτές.

Στο μοντέλο της παρούσας εργασίας το βασικό λειτουργικό μέγεθος που χρησιμοποιείται είναι η ειδική ενέργεια κοπής η οποία υπολογίζεται με αναλυτικό τρόπο με βάση τις ιδιότητες του γεωυλικού και την γεωμετρία των κοπτικών δίσκων ή των συρτικών κοπτικών, είτε από τις καταγραφές του μηχανήματος (RH ή TBM) με τον υπολογισμό της μέσης τιμής των κοπτικών δυνάμεων ανά κοπτικό. Ο γεωστατιστικός κώδικας Krigstat v. 2.0 που αναφέρεται περιληπτικά στο [Παράρτημα Α](#) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση με την μέθοδο Kriging ή των στοχαστικών προσομοιώσεων κατά μήκος της σήραγγας των ιδιοτήτων του γεωυλικού (UCS, UTS, ϕ) με βάση τις υπάρχουσες μετρήσεις στο μέτωπο στη φάση της όρυξης αλλά και τις πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις στη φάση της έρευνας. Οι εκτιμήσεις αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της λειτουργικότητας του μηχανήματος με την χρήση αναλυτικών ή εμπειρικών μοντέλων. Στον [Πιν. 1.2](#) που ακολουθεί παρουσιάζονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά των τριών μεθόδων και οι περιορισμοί αυτών.

Πίνακας 1.2: Σύγκριση του νέου μοντέλου με προηγούμενα βασικά μοντέλα CSM και NTH.

| | Προτεινόμενο (νέο) μοντέλο | CSM | NTH |
|---|--|--|--|
| Βασική Φιλοσοφία | Υπολογισμός ειδικής ενέργειας SE (ή του ICR) και γρήγορη ανάδρομη ανάλυση για την αναβάθμιση του αρχικού γεωτεχνικού μοντέλου. | Υπολογισμός δυνάμεων κοπής ανά κοπτικό | Εμπειρικές σχέσεις, χρήση δεικτών πετρώματος |
| Δυνάμεις κοπής | Ναι | Ναι | Όχι |
| Γεωμετρία κοπτικών εργαλείων | Ναι | Ναι | Όχι |
| Διάταξη κοπτικών (S,δ) | Ναι | Ναι | Μερικώς |
| Σχεδιασμός μηχανήματος (κεφαλή, ισχύς κ.λπ.) | Ναι (TBM-RH) | Ναι (TBM-RH) | Μερικώς (TBM) |
| Μηχανικές παράμετροι των γεωυλικών | Ναι (UCS, UTS, ϕ) | Ναι (UCS, UTS) | Μερικώς |
| Δείκτες πετρώματος | Μερικώς (δοκιμές μικροδιάτρησης) | Μερικώς | Ναι (BI, DRI, CLI) |
| Ιδιότητες βραχομάζας (ασυνέχειες, ρήγματα) | Ναι (RMR, Q, GSI, Damage (D)) $c = c_i \cdot (1 - D)$; $\phi = \phi_i$ $D = f(RMR)$; $D \in [0,1]$ | Εμμέσως | Ναι |

| | | | |
|---|---|---------|---------|
| Συνθήκες βραχομάζας (ύπαρξη νερού) | Εμμέσως (<i>RMR, Q, GSI</i>) | Εμμέσως | Ναι |
| Πρόβλεψη απόδοσης πίσω από το μέτωπο (αδιατάρακτο πέτρωμα) | Ναι (χρήση γεωστατιστικού κώδικα KRIGSTAT) | Ναι | Ναι |
| Εκτίμηση κόστους | Μερικώς (πρόβλεψη της PR αλλά όχι του ρυθμού φθοράς των κοπτικών εργαλείων) | Ναι | Ναι |
| Ευαισθησία-κρίση χειριστή | Μερικώς (η γρήγορη ανάδρομη ανάλυση εντός της ημέρας είναι εφικτή, άρα δημιουργούνται περιθώρια αντίδρασης όταν συναντηθούν διαφορετικές συνθήκες βραχομάζας ή γίνει αντιληπτή μειωμένη απόδοση της εκσκαφής) | Όχι | Μερικώς |

1.5. Πρωτοτυπία ΔΔ

Η βασική πρωτοτυπία της ΔΔ παρουσιάστηκε ήδη στο σκίτσο του Σχ. 1.4. Συνίσταται στην σταδιακή αναβάθμιση του αρχικού γεωτεχνικού μοντέλου της σήραγγας ή υπόγειου έργου με δεδομένα που λαμβάνονται και επεξεργάζονται κατά την όρυξη της με μηχανήματα σημειακής ή ολομέτωπης κοπής. Για το σκοπό αυτό εφαρμόζεται με τον πιο ολοκληρωμένο τρόπο η θεωρία της Γεωστατιστικής σε συνδυασμό με την τριδιάστατη διακριτοποιημένη μορφή γεωλογικών μοντέλων που απαρτίζονται από διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Αυτό είναι αναγκαίο γιατί η παρεμβολή στους κόμβους των τιμών παραμέτρων πρέπει να γίνει ξεχωριστά για κάθε διακριτό γεωλογικό σχηματισμό που διέπεται από διαφορετικές στατιστικές και γεωστατιστικές ιδιότητες. Μια άλλη πρωτοτυπία της ΔΔ που χρειάστηκε να υλοποιηθεί για να λάβει η προτεινόμενη μέθοδος «σάρκα και οστά» είναι η παρουσίαση νέων μοντέλων κοπής εδαφικών, ημι-βραχωδών και βραχωδών γεωυλικών με διαφόρων τύπων κοπτικές ακμές ή δίσκους, που θα λαμβάνουν υπόψιν τις πραγματικές παραμέτρους αντοχής των υλικών αυτών στα πλαίσια της θεωρίας Αντοχής των Υλικών όπως είναι η 1) αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, 2) η αντοχή σε εφελκυσμό, 3) η γωνία εσωτερικής τριβής, 4) η διεπιφανειακή γωνία τριβής εργαλείου-γεωυλικού, και της αντοχής στη διάδοση ρωγμής στα πλαίσια της Θραυστομηχανικής όπως είναι 5) η θραυστική στιβαρότητα (fracture toughness). Τα μοντέλα αυτά λαμβάνουν υπόψιν τους την παρακείμενη ήδη υπάρχουσα εγκοπή από γειτονικό κοπτικό άκρο στην περίπτωση που αυτή υπάρχει. Επίσης η εργασία που αφορά την κατασκευή ειδικών συνοριακών στοιχείων για την σημαντική βελτίωση της ακρίβειας του υπολογισμού του συντελεστή της έντασης των τάσεων σε αιχμές ρωγμών που παρουσιάστηκε διαδοχικά σε τρία άρθρα σε διεθνή περιοδικά είναι πρωτότυπη.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έως σήμερα έχουν παρουσιασθεί μοντέλα κοπής κυρίως των πετρωμάτων με τα κυριότερα να είναι: α) αυτό του [Evans \(1962\)](#) το οποίο θεωρεί ότι ο βασικός μηχανισμός θραύσης του πετρώματος από συρτικό κοπτικό άκρο είναι η αντοχή σε εφελκυσμό, β) το μοντέλο των [Pariseau & Fairhurst, \(1967\)](#) με την χρήση των γραμμών ολίσθησης χωρίς να λαμβάνει υπόψιν την γειτονική εγκοπή, γ) του [Nishimatsu \(1972\)](#) στο οποίο υπολογίζονται οι δυνάμεις κοπής με βάση μηχανισμού κοπής για ψαθυρά υλικά με βάση την γεωμετρία του συρτικού κοπτικού άκρου, το βάθος κοπής και την γωνία επαφής (rake angle), δ) των [Roxborough & Phillips \(1975\)](#) που είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο υπολογισμού των

δυνάμεων που ασκούνται σε κυλιόμενους κοπτικούς δίσκους τύπου σφήνας (V) χωρίς να λαμβάνει υπόψιν την καμπυλότητα της αιχμής, ε) το μοντέλο του [Sanio \(1985\)](#) για τον υπολογισμό των δυνάμεων που ασκούνται σε αιχμηρό κοπτικό δίσκο στην περίπτωση κοπής ανισότροπου πετρώματος, στ) το εμπειρικό μοντέλο του [Goktan \(1995\)](#) που αποτελεί βελτίωση του [Evans \(1962\)](#) για κωνικά κοπτικά άκρα, ζ) το εμπειρικό μοντέλο υπολογισμού της ειδικής ενέργειας των [Balci et al. \(2004\)](#) με βάση πειραματικά δεδομένα κοπής με συρτικά κοπτικά άκρα και η) το μοντέλο των [Li & Itakura \(2012\)](#) στο οποίο γίνεται ο υπολογισμός της ειδικής ενέργειας για την διάτρηση με συρτικά ή περιστρεφόμενα κοπτικά άκρα χωρίζοντας την ροπή σε τέσσερα τμήματα την κοπή, την διεύθυνση, τις τριβές στην διεπαφή και την ροπή για την περιστροφή του κοπτικού (idle).

Τα ανωτέρω μοντέλα κοπής που έχουν προταθεί έως σήμερα βασίζονται στις αντοχές μοναξονικής θλίψης και εφελκυσμού χωρίς να λαμβάνουν υπόψιν την γωνία τριβής (internal friction angle) και διαστολής (dilatancy angle). Μερικά από αυτά δεν λαμβάνουν υπόψη την παρακαείμενη εγκοπή στη γειτονιά του κοπτικού άκρου, ενώ άλλα είναι εμπειρικά που σημαίνει ότι δεν ισχύουν για όλες τις περιπτώσεις που μπορεί να προκύψουν στην πράξη. Μια άλλη πρωτοτυπία του προτεινόμενου μοντέλου είναι η απαλοιφή της εξάρτησης της ειδικής ενέργειας από το βάθος κοπής με βάση απλό μαθηματικό μοντέλο που βασίζεται στο φαινόμενο κλίμακας (size effect). Σημειώνεται ότι η εξάρτηση αυτή αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα χρησιμοποίησης της ειδικής ενέργειας ή ισοδύναμα της κατανάλωσης ισχύος ανά μονάδα εξορυσσόμενου όγκου σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ως παράμετρο για τον χαρακτηρισμό της αντοχής των εδαφοβραχομαζών αλλά και της ενεργειακής αποδοτικότητας και ταχύτητας του μηχανήματος. Τα μοντέλα αυτά σε δεύτερη φάση θα γενικευθούν έτσι ώστε να θεωρούν οποιοδήποτε αριθμό κοπτικών εργαλείων, οποιουδήποτε σχήματος, σε οποιαδήποτε διάταξη επί της κοπτικής κεφαλής του RH ή του TBM. Η πρωτοτυπία της προτεινόμενης έρευνας είναι η μέσω αναλυτικών εξισώσεων πρόβλεψη της ταχύτητας διάτρησης συναρτήσει της συνολικής δύναμης ώθησης του RH ή TBM και εν τέλει της ειδικής ενέργειας, ή αντιστρόφως η εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής της εδαφοβραχόμαζας από καταγραφές διαφόρων παραμέτρων του RH ή του TBM κατά την διάνοιξη σηράγγων με κατάλληλη ανάδρομη ανάλυση. Προτείνεται επίσης για πρώτη φορά μέθοδος για την αξιοποίηση των καταγραφών των RH σε σχεδόν πραγματικό χρόνο για την αποτύπωση της κατανομής της ειδικής ενέργειας στα διαδοχικά μέτωπα κατά μήκος της σήραγγας.

Κεφάλαιο 2. Αναλυτικός μηχανισμός κοπής γεωϋλικού

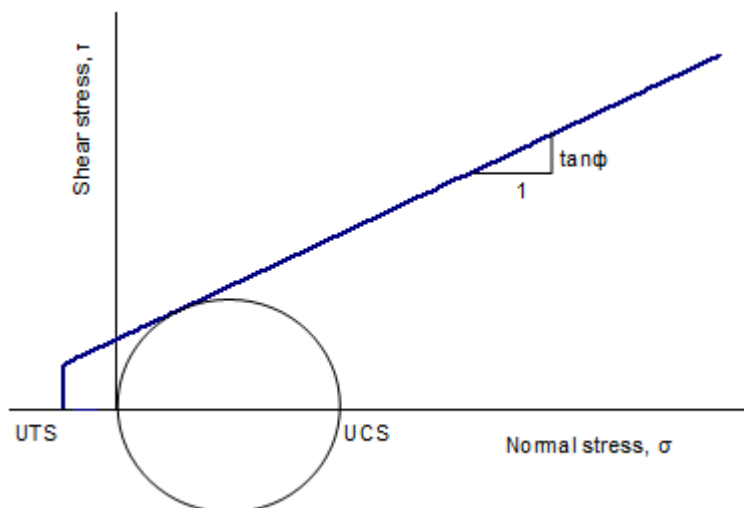
Οι θεωρίες που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του αναλυτικού μοντέλου υπολογισμού της ειδικής ενέργειας είναι το Άνω Οριακό Θεώρημα και η θεωρία των γραμμών ολίσθησης (slip lines) που συνιστά το Κάτω Οριακό Θεώρημα της Ιδεατής Θεωρίας Πλαστικότητας (για εδαφικά, ημι-βραχώδη ή βραχώδη γεωϋλικά). Η πραγματική λύση βρίσκεται μεταξύ των λύσεων των δύο αυτών θεωρημάτων.

2.1. Μηχανισμός κοπής για συνεκτικά πετρώματα

Ο μηχανισμός κοπής για συνεκτικά πετρώματα θα βρεθεί με την χρήση του Άνω Οριακού Θεωρήματος με την χρήση της εξίσωσης των έργων. Τέσσερα βασικά βήματα χρειάζονται για την εύρεση αναλυτικής λύσης, ήτοι ([Chen, 1975](#)) :

1. Η εύρεση του κινηματικού μηχανισμού αστοχίας που ικανοποιεί τις μηχανικές συνοριακές συνθήκες.
2. Το έργο που παράγεται από τα εξωτερικά φορτία.
3. Ο υπολογισμός της εσωτερικής ενέργειας που δαπανάται για την πλαστική παραμόρφωση των ρωγμών σύμφωνα με τον κινηματικό μηχανισμό.
4. Η πιο κρίσιμη (upper bound) επίλυση για τον επιλεγμένο μηχανισμό εντοπίζεται με την εξίσωση των έργων.

Καταρχήν γίνεται η παραδοχή γεωϋλικού που ακολουθεί το γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr Coulomb με αποκοπή στην αντοχή σε εφελκυσμό UTS , όπως φαίνεται στο [Σχ.2.1](#).



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα του κριτηρίου αστοχίας των Mohr-Coulomb με όριο εφελκυστικής τάσης με τις θλιπτικές τάσεις να θεωρούνται θετικές ποσότητες.

Για την εύρεση του μηχανισμού αστοχίας χρειάζεται να περιγραφεί ο τρόπος που μεταβάλλονται οι οριζόντιες και οι κατακόρυφες τάσεις εντός του πετρώματος από την διείδυση ενός κοπτικού άκρου. Η διείδυση του κοπτικού έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μια πλαστικής ζώνης, γύρω από την περιοχή της αιχμής του κοπτικού ([Σχ. 2.2](#)), όπου επικρατούν πολύ μεγάλες θλιπτικές δυνάμεις οι οποίες προκαλούν την λειοτρίβηση του πετρώματος ([Swain & Lawn, 1978](#)). Λόγω του ότι το κοπτικό άκρο ωθείται στο πέτρωμα, το εξεταζόμενο πρόβλημα είναι πρόβλημα ώθησης γαιών όπου οι κατακόρυφες τάσεις αναμένονται να είναι περισσότερο θλιπτικές από τις

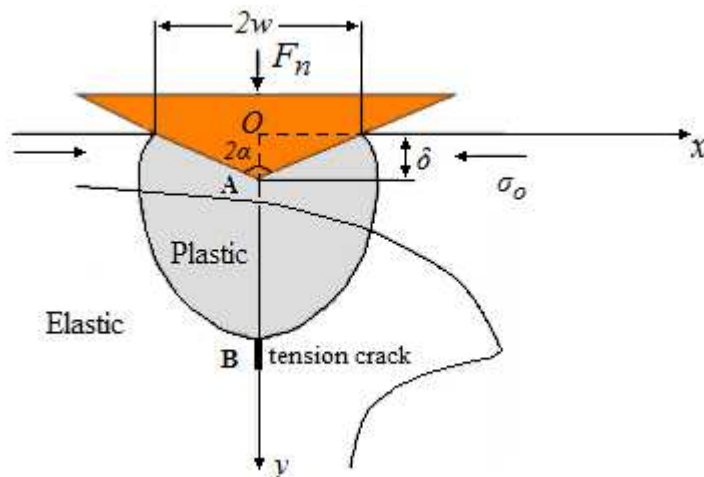
οριζόντιες και σε συνδυασμό με το ότι το κριτήριο αστοχίας (Σχ. 2.1) πρέπει να ικανοποιείται στην ζώνη αστοχίας (θλιπτική ζώνη) τότε οι τάσεις στον κατακόρυφο άξονα αναγκαστικά ικανοποιούν την ακόλουθη σχέση (για γραμμικό Mohr-Coulomb κριτήριο) (Chen, 1975):

$$\sigma_{yy} = K_p \cdot \sigma_{xx} + q \quad (2.1)$$

όπου ο συντελεστής αναλογίας K_p παριστά τον συντελεστή παθητικής ώθησης και ϕ τη γωνία εσωτερικής τριβής του γεωϋλικού:

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

Σημειώνεται ότι οι ορθές τάσεις κατά μήκος του άξονα του κοπτικού είναι ταυτόχρονα και κύριες τάσεις με $\sigma_{yy} = \sigma_3$, $\sigma_{xx} = \sigma_1$ όπου $\sigma_3 < \sigma_1$ και σ_3 είναι η πιο θλιπτική τάση. Εφόσον όπως αναμένεται κατακόρυφη τάση σ_{yy} μειώνεται κατ' απόλυτη τιμή με το βάθος όσο δηλαδή απομακρύνεται από την αιχμή του κοπτικού άκρου, τότε βάσει της εξ. (2.1) προκύπτει ότι η οριζόντια τάση σ_{xx} συνεχώς αυξάνει μακριά από την αιχμή του κοπτικού έως ότου σε κάποιο βάθος να γίνει εφελκυστική. Αν η οριζόντια εφελκυστική τάση ξεπεράσει την αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού τότε δημιουργείται μικρορωγμή στην κορυφή του λοβού όπως φαίνεται στο Σχ. 2.2.



Σχήμα 2.2: Δημιουργία εφελκυστικής ακτινικής ρωγμής κάτω από το κοπτικό άκρο.

Ο τρόπος που μεταβάλλονται οι τάσεις στον κατακόρυφο άξονα από την αιχμή του κοπτικού (σημείο Α) έως το σημείο της διεπιφάνειας της πλαστικής – ελαστικής περιοχής (σημείο Β) φαίνονται στο Σχ. 2.2. Ο μηχανισμός αυτός υποδεικνύει ότι σε κάποια απόσταση από το κοπτικό είναι δυνατή η διάδοση μιας εφελκυστικής ασυνέχειας και με βάση αυτή την πληροφορία συν του ότι η πλαστική ζώνη εκτείνεται σε μικρό βάθος, ιδιαίτερα για αιχμηρά κοπτικά (μικρή γωνία α), ο απλός μηχανισμός που χρησιμοποιείται για την εύρεση της ειδικής ενέργειας παρουσιάζεται στο Σχ. 2.3 και έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Η εφαρμογή του κατακόρυφου εξωτερικού φορτίου F_n .
- Κατά την διείσδυση του κοπτικού άκρου, με κατακόρυφη ταχύτητα V_L , αμέσως κάτω από την αιχμή του δημιουργείται μια μικρού μήκους, h , εφελκυστική ακτινική ρωγμή (ΒΓ) η οποία δίδει μια οριζόντια μετατόπιση με ταχύτητα V_0 .
- Μια ευθύγραμμη ασυνέχεια (ΑΒ) που εκτείνεται από την αιχμή της εφελκυστικής ασυνέχειας (ΒΓ) και καταλήγει στην ελεύθερη επιφάνεια (ΑΕ) από προηγούμενη κοπή σχηματίζοντας γωνία β με το οριζόντιο επίπεδο και έχει

σαν αποτέλεσμα την μετακίνηση με ταχύτητα V_2 με γωνία θ από την ασυνέχεια η οποία αναφέρεται στην διασταλτικότητα της κύριας ασυνέχειας που εκτείνεται από το κοπτικό στην ελεύθερη επιφάνεια και κυμαίνεται μεταξύ 0° (καθαρή διάτμηση mode-II) και 90° (καθαρός εφελκυσμός mode-I).

- Η σχετική μετακίνηση του δεύτερου σώματος ως προς το πρώτο σώμα συμβολίζεται ως V_{I2} και σχηματίζει γωνία ψ' από την αιχμή του κοπτικού η οποία κυμαίνεται από το μηδέν έως την γωνία ψ .
- Το σχήμα του κωνικού κοπτικού συμπεριλαμβάνεται στον μηχανισμό με την χρήση της γωνίας του κοπτικού, $2a$ και της γωνίας εφαρμογής ρ (attack angle).
- Υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια από προηγούμενη κοπή σε απόσταση S .
- Επίσης εισάγεται και η γωνία εσωτερικής τριβής για την διεπαφή εργαλείου - πετρώματος και συμβολίζεται με το γράμμα ψ . Οι τιμές της γωνίας ψ είναι μηδέν για τέλεια διεπαφή, σε αντίθετη περίπτωση κυμαίνεται γύρω από την γωνία εσωτερικής τριβής του πετρώματος, ϕ .
- Η δύναμη κοπής F^c αναλύεται σε δυο κύριες συνιστώσες, F_n^c και F_s^c (ή F_r^c για κοπτικό δίσκο), οι οποίες είναι η μια κάθετη και η άλλη παράλληλη στην επιφάνεια του πετρώματος, αντιστοίχως. Ο λόγος μεταξύ των δύο αυτών συνιστωσών δίδεται από την [εξ. \(2.2\)](#) για την περίπτωση που η κοπή γίνεται με την χρήση συρτικού κοπτικού και από την [εξ. \(2.3\)](#) για την περίπτωση κοπτικού δίσκου.

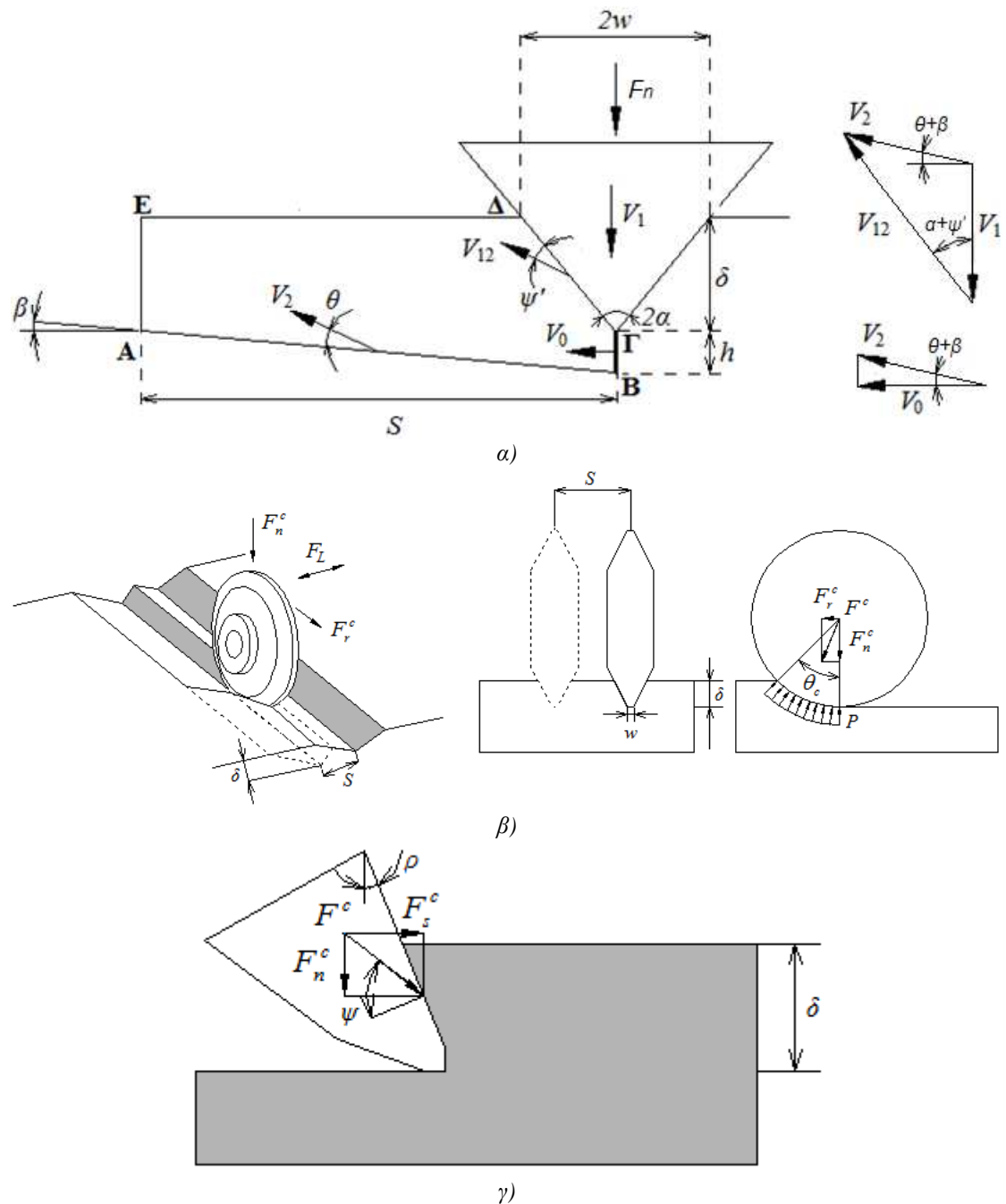
$$CC = \frac{F_s^c}{F_n^c} = \frac{1}{\tan(\psi - \rho)} \quad (2.2)$$

$$CC = \frac{F_r^c}{F_n^c} \quad (2.3)$$

όπου:

$$CC = \begin{cases} \tan \frac{\theta_c}{2} = \frac{1 - \cos \theta_c}{\sin \theta_c}, n = 0 \\ \frac{\theta_c - \sin \theta_c}{1 - \cos \theta_c}, n = 1 \end{cases} \quad \text{όπως προκύπτει από τις [εξ. \(1.7\)](#)}$$

$\theta_c = \cos^{-1} \frac{R - \delta}{R}$ το τόξο επαφής του κοπτικού δίσκου με ακτίνα R και του πετρώματος, για διείσδυση δ του κοπτικού δίσκου.



Σχήμα 2.3: Ο μηχανισμός κοπής πετρώματος όπου υπάρχει προηγούμενη κοπή: α) το κύριο επίπεδο κοπής με το διάγραμμα ταχυτήτων του μοντέλου (οδογράφημα), β) ανάλυση των δυνάμεων για τον κοπτικό δίσκο, και γ) ανάλυση των δυνάμεων στο κάθετο επίπεδο για το συρτικό κοπτικό

Από τον οδογράφο (hodograph) του Σχ. 2.3α. και με την χρήση του νόμου των ημιτόνων προκύπτουν οι εξής σχέσεις των ταχυτήτων:

$$\begin{aligned} V_0 &= V_2 \cdot \cos(\theta + \beta) \\ V_{12} &= V_1 \cdot \frac{\cos(\theta + \beta)}{\cos(a + \psi' + \theta + \beta)} \\ V_2 &= V_1 \cdot \frac{\sin(a + \psi')}{\cos(a + \psi' + \theta + \beta)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Με βάση τον μηχανισμό που περιγράφηκε παραπάνω και με την χρήση του κριτηρίου Mohr-Coulomb με κάτω όριο (ή κατώφλι) εφελκυστικής τάσης (Σχ. 2.1) η

ειδική ενέργεια βρίσκεται εξισώνοντας το έργο που παράγεται από το κατακόρυφο φορτίο (W) με την συνολική ενέργεια που δαπανάται για να διαδοθεί η εφελκυστική ρωγμή σε μήκος h (D_{BF}) κάτω από το κοπτικό και την ενέργεια που δαπανάται στην διατμητική ασυνέχεια (D_{AB}), η οποία δίδεται ([Chen, 1975](#)):

$$D_{AB} = c \cdot l_{AB} \cdot L \cdot V_2 \cdot \cos \theta \quad (2.5)$$

όπου:

$L = 2 \cdot \delta \cdot \tan \alpha$ το μήκος επαφής στην κάθετη κατεύθυνση

$l_{AB} = \frac{S}{\cos(\beta)}$ το μήκος της διατμητικής ασυνέχειας, και

c = συνοχή που βρίσκεται από το γραμμικό κριτήριο Mohr – Coulomb με κάτω όριο εφελκυστικής τάσης (tension cut-off) ([Chen, 1975](#)):

$$c = UCS \cdot \left[\frac{1 - \sin \theta}{2} + \left(\frac{UTS}{UCS} \right) \cdot \frac{\sin \theta - \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right] \quad (2.6)$$

Η ενέργεια που δαπανάται για την διάδοση της ακτινικής εφελκυστικής ρωγμής είναι η εξής:

$$D_{BF} = UTS \cdot h \cdot L \cdot V_0 \quad (2.7)$$

Το εξωτερικό έργο που παράγεται λόγω της ορθής δύναμης βρίσκεται από το γινόμενο της δύναμης αυτής καθεαυτής επί την ταχύτητα διείδυσης του κοπτικού:

$$W = F_n^c \cdot V_1 = \frac{F_i^c \cdot V_1}{CC} \quad (2.8)$$

Η ειδική ενέργεια [εξ. \(2.9\)](#) υπολογίζεται με βάση την υπολογιζόμενη εφαπτομενική δύναμη κοπής, F_i^c , ($i \equiv s, r$) χρησιμοποιώντας το Άνω Οριακό Θεώρημα (Upper Bound Theorem) από την εξίσωση των έργων,

$$SE = \frac{F_i^c}{\delta \cdot S} = \left(\frac{L}{\delta} \right) \cdot CC \cdot \frac{\sin(\alpha + \psi')}{\cos(\alpha + \psi' + \theta + \beta)} \cdot \left\{ c \cdot \frac{\cos \theta}{\cos \beta} + \left(\frac{h}{S} \right) \cdot UTS \cdot \cos(\theta + \beta) \right\} \quad (2.9)$$

Από τον ορισμό της SE μπορεί να προκύψει η θεμελιώδης σχέση για το βάθος κοπής [εξ. \(2.10\)](#) η οποία συνδυάζεται με την [εξ. \(2.9\)](#) όσον αφορά την αναλυτική έκφραση της SE.

$$\delta = \frac{F_n^c}{S \cdot \left(\frac{SE}{CC} \right)} \quad (2.10)$$

Η ανωτέρω σχέση της παραμέτρου δ αποδίδει τον ρυθμό διάτρησης εφόσον πολλαπλασιασθεί με την ταχύτητα περιστροφής ω που αναμένεται κατά την όρυξη σήραγγας ανάλογα με την εφαρμοζόμενη ώθηση, τον σχεδιασμό της κεφαλής (S , CC) και την SE. Επίσης ο αποκαλούμενος δείκτης επί τόπου διείδυσης (Field Penetration Index, FPI) μπορεί να προκύψει από την [εξ. \(2.10\)](#) που ορίζεται ως ο λόγος της μέσης δύναμης ώθησης ανά κοπτικό εργαλείο προς την διείδυση ανά περιστροφή της κεφαλής ως εξής:

$$FPI = \frac{F_n^c}{\delta} = S \cdot \left(\frac{SE}{CC} \right) \quad (2.11)$$

2.2. Δοκιμές κοπής πετρωμάτων με κοπτικό εργαλείο

Για την πειραματική εύρεση της επίδρασης του τύπου του κοπτικού εργαλείου, του τύπου πετρώματος, του βάθους κοπής, της απόστασης γειτονικών κοπών και της οριζόντιας ταχύτητας κοπής (slewing speed) στην κατανάλωση της ειδικής ενέργειας χρησιμοποιούνται οι καταγραφές από ειδική συσκευή κοπής πετρωμάτων με ένα κοπτικό άκρο σε ογκοτεμάχιο πετρώματος όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχ. 2.4. Η τροχιά του κοπτικού εργαλείου μπορεί να είναι ευθύγραμμη ή ελαφρώς καμπύλη όπως φαίνεται στο Σχ. 2.4β. Σε αυτά τα πειράματα ελεγχόμενης κοπής η δύναμη κοπής καταγράφεται με ειδικό κελλί φορτίου.



Σχήμα 2.4: Δοκιμές κοπής πετρωμάτων πάνω σε ευθεία ή καμπύλη διαδρομή: α) test rig ([Sandvik laboratory](#)), β) αριθμητική προσομοίωση δοκιμής.

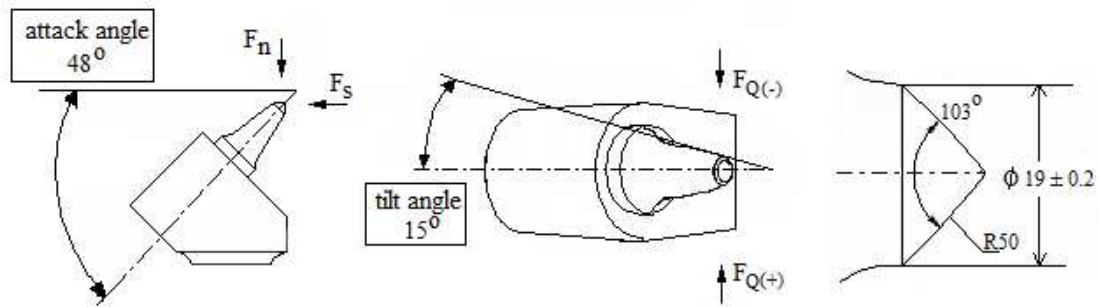
Οι δοκιμές αυτές εκτελέσθηκαν στις εγκαταστάσεις της Sandvik στο Zeltweg της Αυστρίας με χρήση κοπτικών εργαλείων σημειακής προσβολής. Παράλληλα με αυτές τις δοκιμές κοπής έγιναν και δοκιμές μικροδιάτρησης για τον συσχετισμό των μετρήσεων. Τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων θα παρουσιασθούν σε ολοκληρωμένη εργασία στο άμεσο μέλλον ([Exadaktylos et al., 2015](#)). Κατωτέρω παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα των δοκιμών κοπής στην ειδική τράπεζα κοπής διαφόρων τύπων πετρωμάτων με σκοπό την επαλήθευση του αναλυτικού μοντέλου που παρουσιάστηκε παραπάνω.

2.2.1. Πειραματικά δεδομένα στον κόκκινο ψαμμίτη του Rothbach

Η πρώτη σειρά δεδομένων που εξετάσθηκαν προέρχονται από τέτοια πειράματα κοπής σε ψαμμίτη (*stone No 11*) και παρουσιάζονται στον Πιν. 2.1. Στα πειράματα αυτά έγινε χρήση του συρόμενου κοπτικού **NP59** με γωνία της αιχμής 103° και γωνία σάρωσης $\rho = 48^\circ - 51.5^\circ = -3.5^\circ$ (Σχ. 2.5).

Πίνακας 2.1: Πειραματικά δεδομένα για τον ψαμμίτη

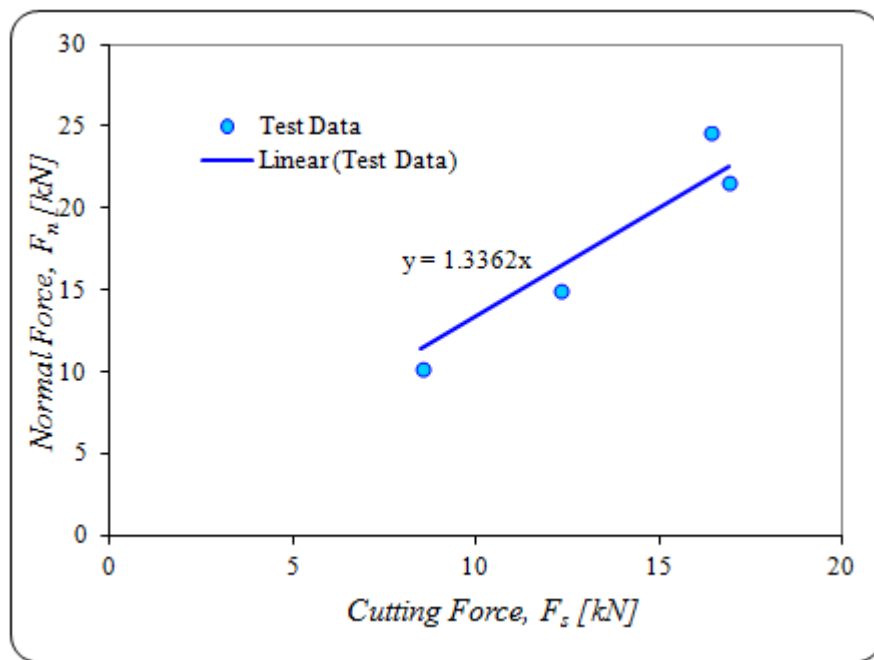
| δ [mm] | S [mm] | F_s^c [kN] | F_n^c [kN] | SE [kWh/m ³] |
|---------------|----------|--------------|--------------|----------------------------|
| 10 | 45 | 8.5 | 10.2 | 5.2 |
| 20 | 45 | 12.3 | 15 | 3.8 |
| 30 | 45 | 16.4 | 24.6 | 3.4 |
| 40 | 45 | 16.9 | 21.6 | 2.6 |



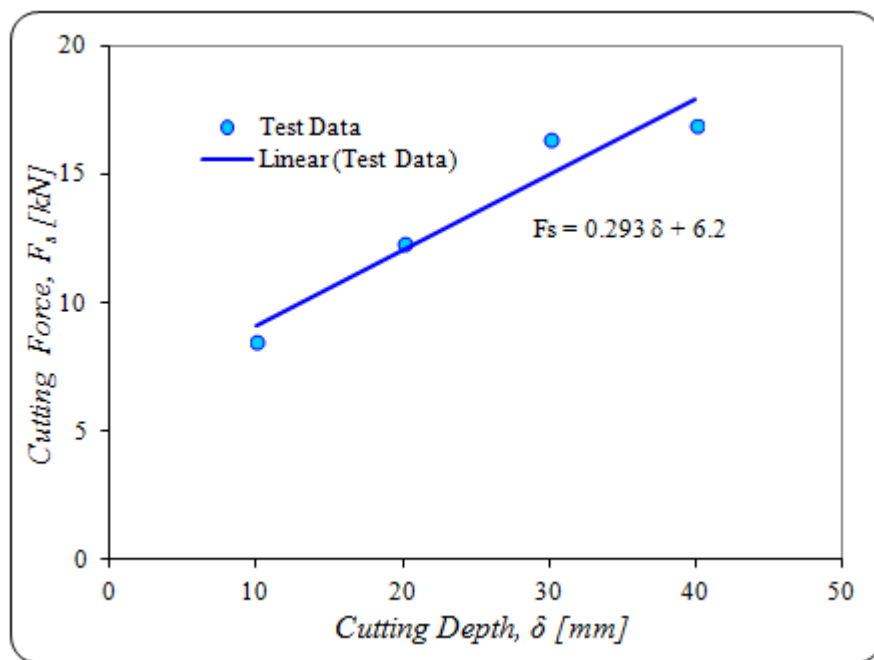
Σχήμα 2.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά για τα πειράματα με την χρήση του NP59.

Ο συντελεστής CC συσχέτισης του κατακόρυφου φορτίου με την συρτική δύναμη κοπής βρίσκεται από την κλίση του διαγράμματος της κατακόρυφης δύναμης σε συνάρτηση με τη δύναμη κοπής (Σχ. 2.6α):

$$F_n^c = 1.3362 \cdot F_s^c \Rightarrow CC = 0.75 \quad (2.12)$$



α)



β)

Σχήμα 2.6: α) Εξάρτηση της κατακόρυφης δύναμης από την δύναμη κοπής και (β) εξάρτηση της δύναμης κοπής από το βάθος κοπής για τον ψαμμίτη.

Η ειδική ενέργεια υπολογίστηκε με την χρήση της [εξ. \(1.1\)](#) και όπως παρατηρήθηκε από τα αποτελέσματα του [Πιν. 2.1](#) μειώνεται καθώς το βάθος κοπής αυξάνεται (φαινόμενο της κλίμακας). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις τριβές στην διεπαφή κοπτικού – γεωϋλικού που παίζουν σημαντικό ρόλο για μικρά βάθη σε σχέση με τις δυνάμεις κοπής ενώ παίζουν μηδαμινό ρόλο για μεγάλα βάθη κοπής. Ο προσδιορισμός του φαινομένου αυτού μπορεί να γίνει από το διάγραμμα της δύναμης κοπής με το βάθος κοπής όπου τα πειραματικά δεδομένα βρίσκονται επάνω σε μια ευθεία η οποία δεν διέρχεται από την αρχή των αξόνων ([Σχ. 2.6β](#)).

$$F_s = a + b \cdot \delta \quad (2.13)$$

όπου a , b συμβολίζουν την αποτέμνουσα και την κλίση της ευθείας παρεμβολής των πειραματικών δεδομένων.

Εισάγοντας την [εξ. \(2.13\)](#) στον ορισμό της ειδικής ενέργειας και για σταθερή απόσταση διαδοχικών κοπών ($S=45\text{mm}$) προκύπτει ότι η ειδική ενέργεια είναι αντιστρόφως ανάλογη με το βάθος κοπής όπου η πραγματική τιμή της ειδικής ενέργειας βρίσκεται από τον όρο (b/S) :

$$SE = \frac{F_s}{\delta \cdot S} = \frac{a}{\delta \cdot S} + \frac{b}{S} \quad (2.14)$$

Στο [Σχ. 2.7](#) που ακολουθεί παρουσιάζεται η εξάρτηση της ειδικής ενέργειας από το βάθος κοπής των πειραματικών δεδομένων (τετράγωνα) μαζί με την θεωρητική σχέση (συνεχόμενη γραμμή). Η πραγματική (intrinsic) ειδική ενέργεια μπορεί να υπολογισθεί από τα δεδομένα αφαιρώντας τον όρο $(a/S)/\delta$ (κύκλοι). Πιο συγκεκριμένα η διορθωμένη (χωρίς το φαινόμενο κλίμακας) ειδική ενέργεια κυμαίνεται μεταξύ $1.4\text{--}2.1 \text{ kWh/m}^3$ (μέση τιμή 1.81 kWh/m^3 έντονη γραμμή), ενώ ο αναλυτικός μηχανισμός που περιγράφηκε στην [εν. \(2.1\)](#) δίδει ελάχιστη τιμή όταν η διατμητική ασυνέχεια είναι οριζόντια και η σχετική ταχύτητα του πετρώματος ως προς το κοπτικό είναι παράλληλη με την αιχμή του κοπτικού ([Πιν. 2.2](#)) και είναι ίση

1.27 kWh/m^3 (έντονη διακεκομμένη γραμμή). Ενώ προσδιορίζοντας τις γωνίες θ , β και ψ' με την βέλτιστη προσαρμογή στα δεδομένα, τότε προκύπτει ειδική ενέργεια 1.55 kWh/m^3 (διακεκομμένη γραμμή), με το φαινόμενο κλίμακας του μοντέλου (με x στο Σχ. 2.7) να προσδιορίζεται από την γεωμετρία του κοπτικού:

$$\frac{L}{\delta} = 2 \cdot \left(\frac{w_o}{\delta} \cdot \left(1 - \frac{\tan \alpha_o}{\tan \alpha} \right) + \tan \alpha_o \right)$$

όπου:

$\alpha_o \approx 15^\circ$ η γωνία του κοπτικού

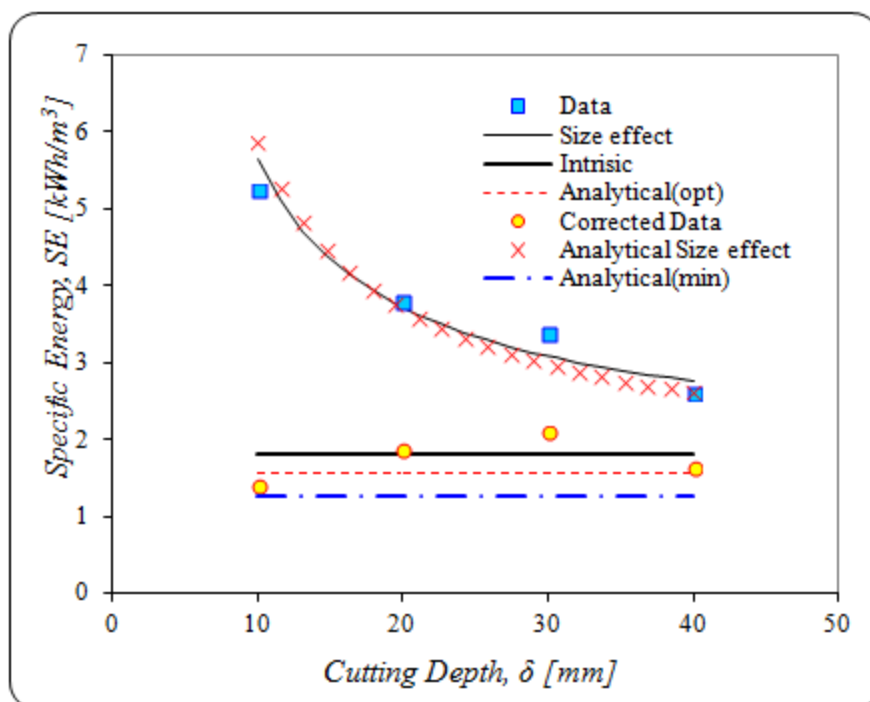
$\alpha = 51.5^\circ$ η γωνία της αιχμής και

$w_o = 9.5 \text{ [mm]}$ το πλάτος της αιχμής (βλ. Σχ.2.5)

Πίνακας 2.2: Παράμετροι αναλυτικού μοντέλου για τον ψαμμίτη.

| Παρ/τρος | β | θ | φ | ψ' | CC | UCS | UTS | S/h | L/δ_{min} |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------|-------|-------|------|------------------|
| Μονάδες | [$^\circ$] | [$^\circ$] | [$^\circ$] | [$^\circ$] | [-] | [MPa] | [MPa] | [-] | [-] |
| Τιμή (min) | 0 | 0 | 33 | 0 | 0.75 | 22 | 1.7 | 12.9 | 0.54 |
| Τιμή (opt) | 0 | 15.9 | 33 | 0 | 0.75 | 22 | 1.7 | 12.9 | 0.54 |

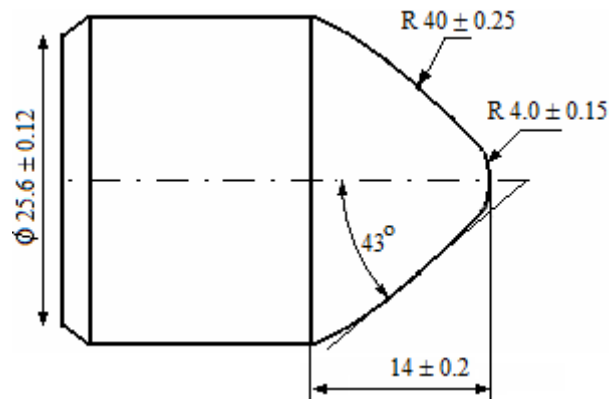
$$*L/\delta_{min} = 2 \tan 15^\circ$$



Σχήμα 2.7: Προσδιορισμός της «πραγματικής» (intrinsic) ειδικής ενέργειας κοπής για τον ψαμμίτη.

2.2.2. Πειραματικά δεδομένα στον ασβεστόλιθο στην Μάλαγα

Στα πειράματα στον ασβεστόλιθο από την Μάλαγα (Ισπανία) έγινε η χρήση του συρόμενου κοπτικού **NPI7** με γωνία της αιχμής 86° και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα:

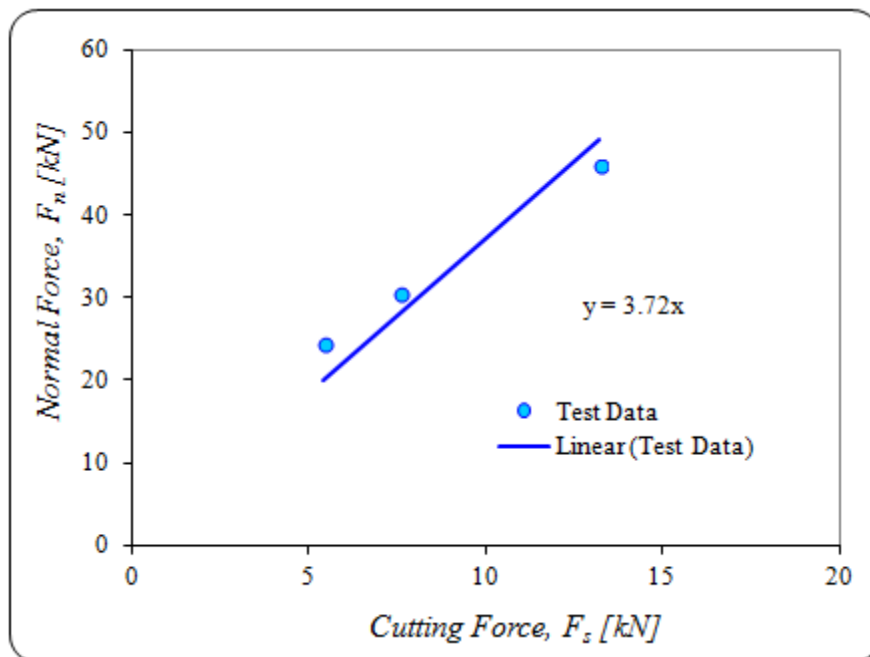


Σχήμα 2.8: Σχέδιο του κοπτικού NP17 με γωνία 86°.

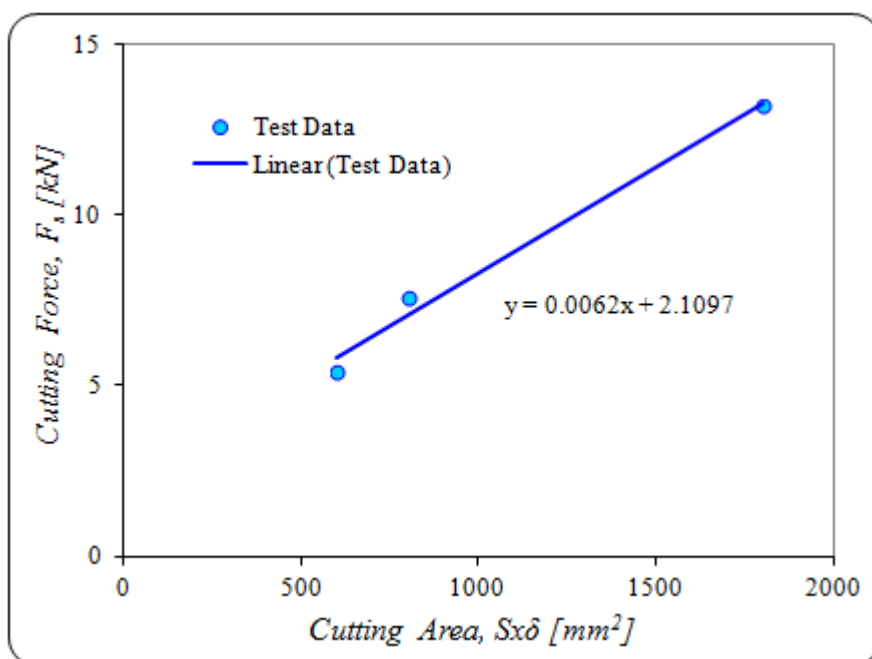
Πίνακας 2.3: Πειραματικά δεδομένα για τον ασβεστόλιθο.

| δ [mm] | S [mm] | F_s^c [kN] | F_n^c [kN] | SE_1 [kWh/m ³] |
|---------------|----------|--------------|--------------|------------------------------|
| 20 | 30 | 5.4 | 24.4 | 2.5 |
| 20 | 40 | 7.6 | 30.6 | 2.6 |
| 30 | 60 | 13.2 | 46 | 2.0 |

Στα πειραματικά δεδομένα του Πίν. 2.3 η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών κοπών δεν παραμένει σταθερή. Αλλά η δύναμη κοπής έχει γραμμική εξάρτηση με το γινόμενο της απόστασης των διαδοχικών κοπών με το βάθος κοπής, όπως υποδεικνύεται και από την αναλυτική σχέση εξ. (2.9). Στην περίπτωση αυτή η πραγματική ενέργεια είναι η κλίση της ευθείας του Σχ. 2.9β.



α)

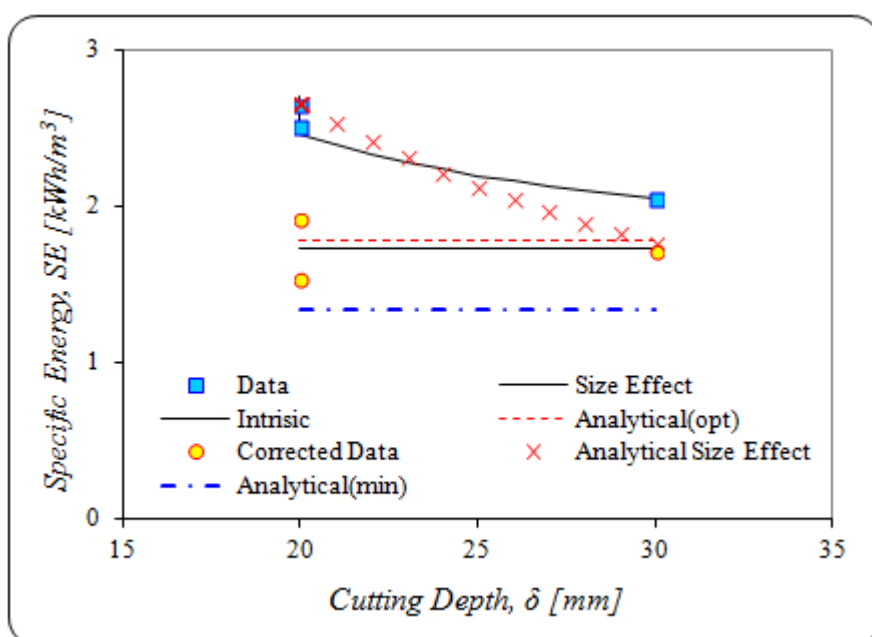


Σχήμα 2.9: α) Εξάρτηση της κατακόρυφης δύναμης από την δύναμη κοπής και (β) εξάρτηση της δύναμης κοπής από το βάθος κοπής για τον ασβεστόλιθο.

Η διορθωμένη (πραγματική) ειδική ενέργεια η οποία υπολογίστηκε από τα πειραματικά δεδομένα κυμαίνεται μεταξύ $1.5 - 1.9 \text{ kWh/m}^3$ (κύκλοι στο Σχ. 2.10) και μέση τιμή 1.7 kWh/m^3 (έντονη γραμμή στο Σχ. 2.10). Ο βέλτιστος αναλυτικός μηχανισμός (x στο Σχ. 2.10) δίνει ειδική ενέργεια 1.77 kWh/m^3 (για $\delta = 30 \text{ mm}$, διακεκομμένη γραμμή), ενώ με έντονη διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζεται η αντίστοιχη τιμή με τις ελάχιστες παραμέτρους (βλ. Πιν. 2.4).

Πίνακας 2.4: Παράμετροι αναλυτικού μοντέλου για τον ασβεστόλιθο.

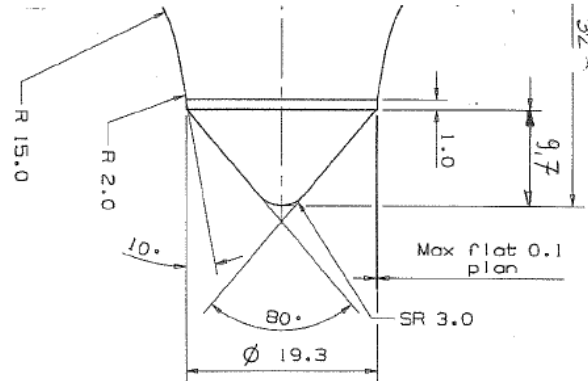
| Παρ/τρος | β | θ | ϕ | ψ' | CC | UCS | UTS | S/h | L/δ_{min} |
|------------|---------|----------|--------|---------|------|-------|-------|-----|------------------|
| Μονάδες | [°] | [°] | [°] | [°] | [-] | [MPa] | [MPa] | [-] | [-] |
| Τιμή (min) | 0 | 0 | 40 | 0 | 0.27 | 61 | 4.7 | 13 | 0.85 |
| Τιμή (opt) | 3 | 0 | 40 | 6.3 | 0.27 | 61 | 4.7 | 13 | 0.85 |



Σχήμα 2.10: Ειδική ενέργεια για τον ασβεστόλιθο.

2.2.3. Πειραματικά δεδομένα για τον δολομίτη στην Μάλαγα

Το κοπτικό που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση αυτή είναι για τα δυο πρώτα πειράματα το **NP17** του Σχ. 2.8, ενώ στο τελευταίο έγινε η χρήση του **NP56** με γωνία της αιχμής 80° (Σχ. 2.11).



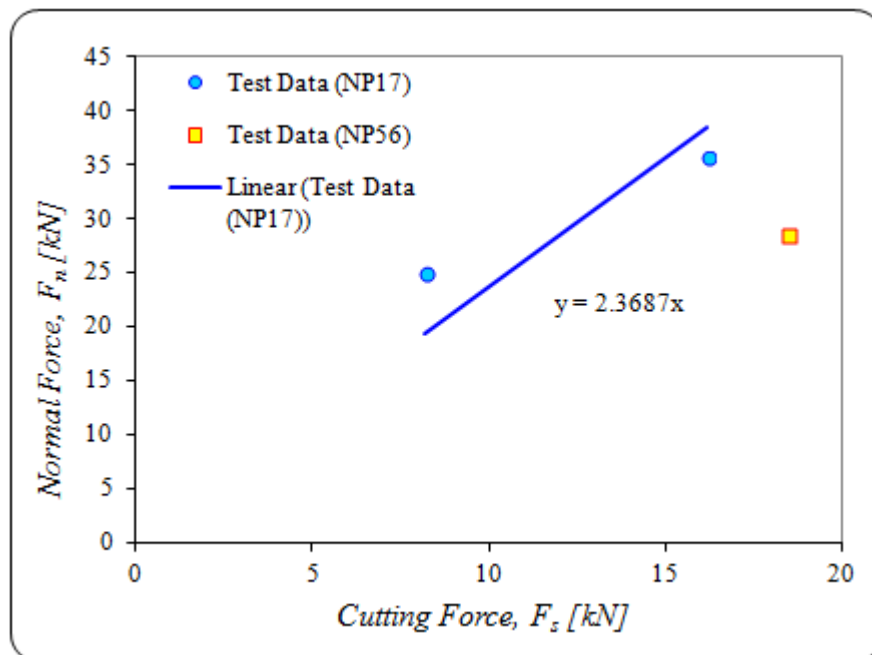
Σχήμα 2.11: Γεωμετρία κοπτικού NP56.

Τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα από την κοπή του δολομίτη με την χρήση των κοπτικών NP17 και NP56 παρουσιάζονται στον Πίν. 2.5 που ακολουθεί.

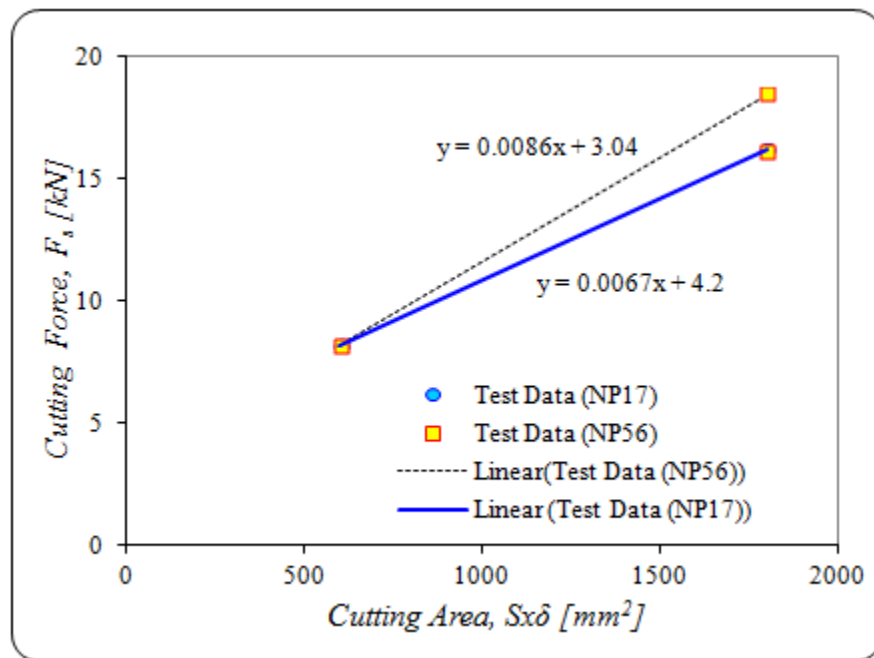
Πίνακας 2.5: Πειραματικά δεδομένα για τον δολομίτη

| δ [mm] | S [mm] | F_s^c [kN] | F_n^c [kN] | SE [kWh/m ³] | Κοπτικό |
|---------------|----------|--------------|--------------|----------------------------|---------|
| 20 | 30 | 8.2 | 24.9 | 3.8 | NP17 |
| 30 | 60 | 16.2 | 35.6 | 2.5 | NP17 |
| 30 | 60 | 18.5 | 28.4 | 2.9 | NP56 |

Για τα δεδομένα του κοπτικού NP56 (τετράγωνο), όπου υπάρχει μόνο μια μέτρηση, οπότε στο Σχ. 12β η κλίση της ευθείας προσδιορίζεται με βάση την επίλυση του αναλυτικού μοντέλου για το κοπτικό αυτό (x στο Σχ. 2.13).



α)

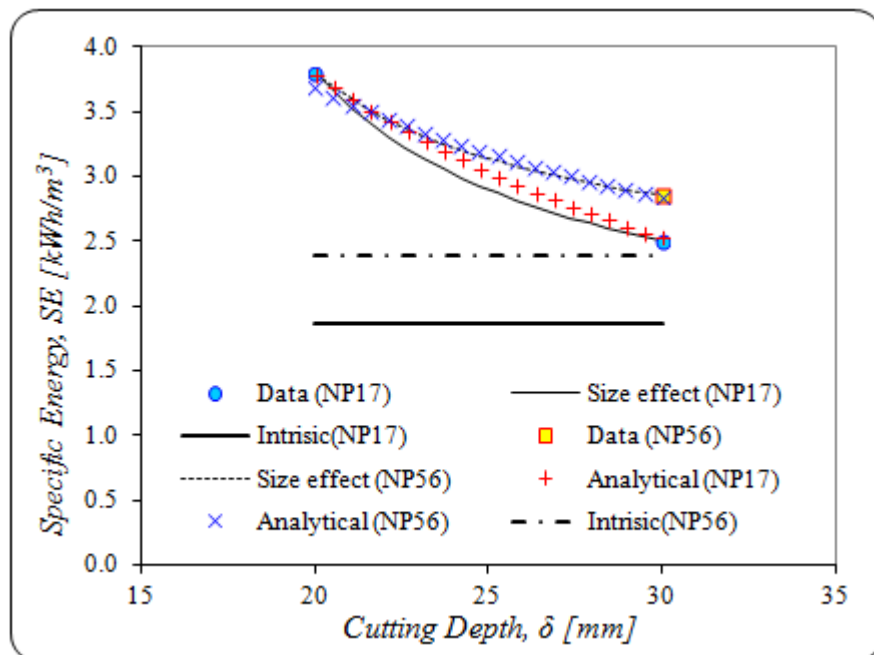


β)
Σχήμα 2.12: α) Εξάρτηση της κατακόρυφης δύναμης από την δύναμη κοπής και (β) εξάρτηση της δύναμης κοπής από το βάθος κοπής για τον δολομίτη.

Η διορθωμένη ειδική ενέργεια η οποία υπολογίσθηκε από τα πειραματικά δεδομένα για το κοπτικό NP17 είναι 1.86 kWh/m^3 (έντονη γραμμή Σχ. 2.13), ενώ για το κοπτικό NP56 η ειδική ενέργεια είναι 2.39 kWh/m^3 (έντονη διακεκομμένη γραμμή).

Πίνακας 2.6: Παράμετροι αναλυτικού μοντέλου για τον δολομίτη.

| Παρ/τρος | β | θ | φ | ψ' | CC | UCS | UTS | S/h | L/δ_{min} |
|-------------|---------|----------|-----------|---------|------|-------|-------|-----|------------------|
| Μονάδες | [°] | [°] | [°] | [°] | [-] | [MPa] | [MPa] | [-] | [-] |
| Τιμή (NP17) | 10.2 | 24 | 40.5 | 3 | 0.42 | 25.7 | 1.98 | 13 | 0.85 |
| Τιμή (NP56) | 10.2 | 24 | 40.5 | 3 | 0.65 | 25.7 | 1.98 | 13 | 0.35 |



Σχήμα 2.13: Ειδική ενέργεια για τον δολομίτη.

2.3. Μηχανισμός κοπής πλαστικών πετρωμάτων και εδαφών

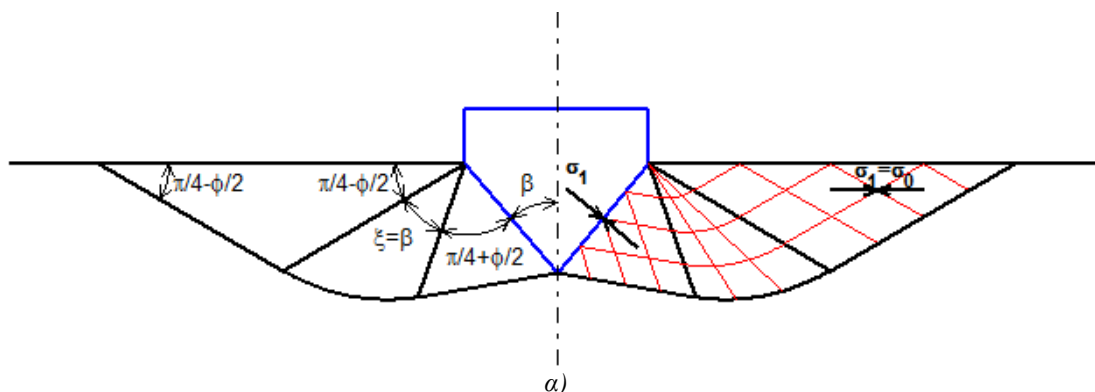
Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο μηχανισμός κοπής που αναπτύχθηκε από τους [Pariseau & Fairhurst \(1967\)](#) με βάση το Κάτω Οριακό Θεώρημα της Ιδεατής Θεωρίας της Πλαστικότητας και την έννοια των γραμμών ολίσθησης. Στην περίπτωση αυτή οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται είναι: α) οι εξισώσεις ισορροπίας, και β) το κριτήριο αστοχίας που θεωρείται όπως και προηγουμένως στην εφαρμογή του Κάτω Οριακού Θεωρήματος ότι είναι το γραμμικό κριτήριο των Mohr-Coulomb. Η εξίσωση που περιγράφει τις δύο οικογένειες γραμμών ολίσθησης στο σύστημα των Καρτεσιανών συντεταγμένων Oxy ([Σχ. 2.14](#)) είναι η εξής:

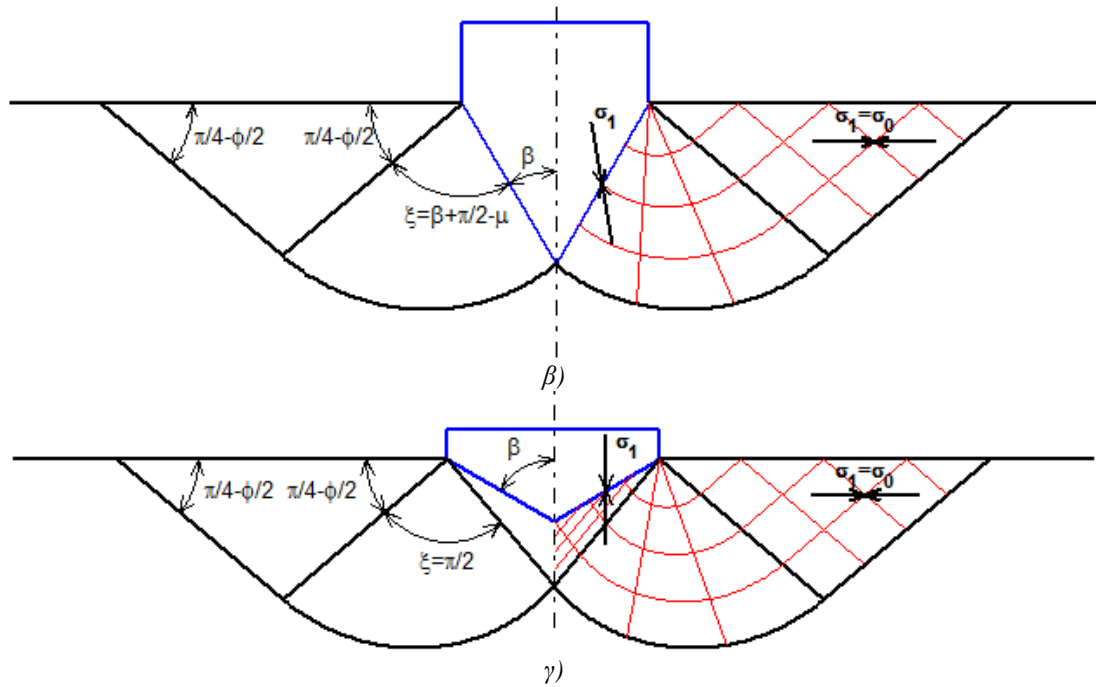
$$\begin{aligned}\frac{dy}{dx} &= \tan(\theta \pm \mu) \\ (1/2 \cot \phi) \ln \sigma + \theta &= \text{const.} \\ \mu &= \pi/4 - \phi/2 \\ \sigma &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\end{aligned}\quad (2.15)$$

Για την εύρεση της λύσης είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η συμπεριφορά της γωνιάς θ που σχηματίζει η μέγιστη κύρια τάση σ_1 με τον άξονα Oy. Για το λόγο αυτό το μοντέλο κοπής χωρίζεται σε τρεις περιοχές ([Σχ. 2.14](#)) σε δυο περιοχές όπου η μέση τάση σ είναι σταθερή (άρα και η θ) και οι δύο οικογένειες των γραμμών ολίσθησης περιγράφονται από την κατωτέρω γραμμική [εξ. \(2.16\)](#) και μια κεντρική περιοχή ακτινικής διάτμησης όπου η θ παραμένει σταθερή στην μια οικογένεια γραμμών ενώ στην άλλη οικογένεια σε πολικές συντεταγμένες (r, ω) οι γραμμές ολίσθησης δίδονται από την λογαριθμική σπείρα της [εξ. \(2.17\)](#).

$$y = x \cdot \tan(\theta \pm \mu) + \text{const.} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned}r &= r_o \exp((\omega - \omega_o) \tan \phi), \omega = \text{const} \\ \sigma &= \sigma_o \exp(-2(\omega - \omega_o) \tan \phi), \sigma = \text{const}\end{aligned}\quad (2.17)$$





Σχήμα 2.14: Μοντέλο κοπής με την χρήση των γραμμών ολίσθησης α) χωρίς τριβές (smooth bit), β) τραχύ κοπτικό (rough bit) και γ) αμβλύ κοπτικό (false nose) και το σύστημα των Καρτεσιανών συντεταγμένων Oxy.

Η εξίσωση που αποδίδει την κατακόρυφη δύναμη F_n^c στην γενικότερη περίπτωση είναι η εξής ([Pariseau & Fairhurst, 1967](#)):

$$\frac{F_n^c}{L \cdot \delta} = UCS \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \phi \tan \mu} \left\{ \frac{1 + (\cos(2\theta) + \cot \beta \sin(2\theta)) \sin \phi}{1 + \sin \phi} \exp(2\xi \tan \phi) - \tan^2 \mu \right\} \quad (2.18)$$

όπου:

- L το μήκος της επαφής του κοπτικού στην τρίτη διάσταση
- δ το βάθος κοπής
- UCS η μονοαξονική αντοχή
- β η μισή γωνία του κοπτικού άκρου
- ϕ η γωνία εσωτερικής τριβής
- ξ η γωνία της κύριας τάσης από την κατακόρυφο
- $\theta = \pi/2 - \xi$

Η ειδική ενέργεια στην περίπτωση αυτή μπορεί εύκολα να προκύψει με την χρήση των εξ. (2.2)-(2.3), εξ. (2.18) και εξ. (1.1).

$$SE = \frac{F_i^c}{S \cdot \delta} = \frac{L}{S} \cdot CC \cdot UCS \cdot \frac{\tan \beta}{\tan \phi \tan \mu} \cdot \left\{ \frac{1 + (\cos(2\theta) + \cot \beta \sin(2\theta)) \sin \phi}{1 + \sin \phi} \exp(2\xi \tan \phi) - \tan^2 \mu \right\} \quad (2.19)$$

Οι γωνίες ξ , θ και β για τις τρεις περιπτώσεις του Σχ. 2.14 είναι οι εξής ([Pariseau & Fairhurst, 1967](#)):

- α) Έτσι για την περίπτωση όπου η μέγιστη κύρια τάση είναι κάθετη στην διεπιφάνεια του κοπτικού πετρώματος (smooth bit) (Σχ. 2.14α) ισχύει ο περιορισμός:

$$0 \leq \beta \leq \pi / 2, \xi = \beta, \theta = \pi / 2 - \beta$$

β) Για την περίπτωση όπου η τριβή στην διεπιφάνεια κοπτικού και πετρώματος είναι τέτοια όπου το επίπεδο αστοχίας συμπίπτει με την διεπιφάνεια αυτή (rough bit) (Σχ. 2.14β) ισχύει ο εξής περιορισμός:

$$0 \leq \beta \leq \mu, \xi = \beta + \pi / 2 - \mu, \theta = \mu - \beta$$

γ) Ενώ για την περίπτωση όπου η μέγιστη κύρια τάση είναι κατακόρυφη (Σχ. 2.14γ) :

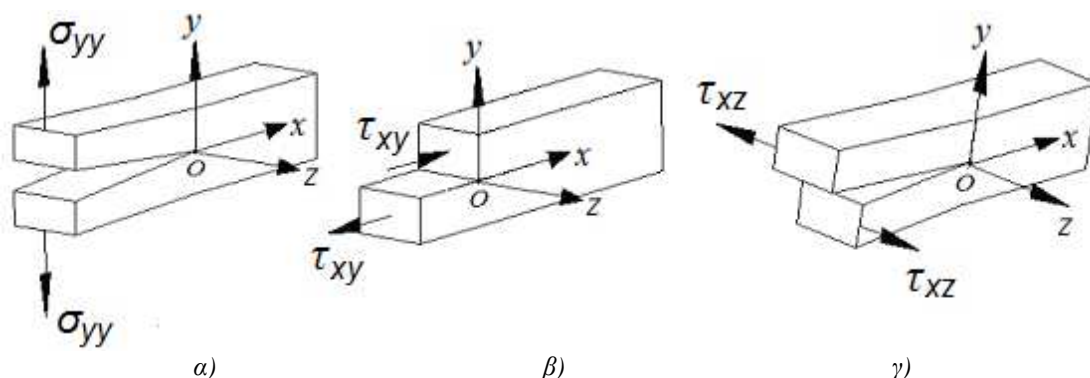
$$\mu \leq \beta \leq \pi / 2, \xi = \pi / 2, \theta = 0$$

Κεφάλαιο 3. Υπολογιστικό μοντέλο κοπής βασιζόμενο στην θραυστομηχανική

3.1. Κριτήριο θραύσης μικτού τύπου

Σε ένα προ-ρηγματωμένο (ή προ-διαρρηγμένο) στερεό σώμα υπάρχουν διάφοροι τρόποι που το φορτίο μπορεί να οδηγήσει στην διάδοση της ρωγμής. Σύμφωνα με τον [Barenblatt \(1962\)](#) διακρίνονται τρεις κινηματικοί τύποι ρωγμών. Σύμφωνα με τις λεπτομέρειες των [Σχ. 3α-γ](#) διακρίνονται οι εξής τύποι ρωγμών:

- α) Τύπος I: ο ανοικτός τύπος όπου η ασυνέχεια υποβάλλεται σε εφελκυστικό φορτίο ([Σχ. 3.1α](#)).
- β) Τύπος II: ο διατμητικός τύπος όπου δρουν διατμητικές δυνάμεις παράλληλες με την ασυνέχεια ([Σχ. 3.1β](#)), και
- γ) τύπος III: ο ψαλιδισμός όπου δρουν αντι-επίπεδες διατμητικές τάσεις ([Σχ. 3.1γ](#)).



Σχήμα 3.1: Οι τρεις βασικοί τρόποι παραμορφώσεως των χελών επίπεδης ρωγμής α) I -εφελκυσμός, β) II - επίπεδη διάτμηση και γ) III - αντιεπίπεδη διάτμηση.

Στην γενικότερη περίπτωση της θραύσης μικτού τύπου όπου οι παραπάνω τρόποι φόρτισης συνυπάρχουν τότε το αποτέλεσμα, σύμφωνα με την αρχή της υπέρθεσης της θεωρίας της γραμμικής ελαστικότητας απειροστικών παραμορφώσεων, προκύπτει από το άθροισμα των επιδράσεων των φορτίων που σχετίζονται με τον τύπο I, II και III.

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^I + \sigma_{ij}^{II} + \sigma_{ij}^{III} \quad (3.1)$$

Για την διάδοση της ρωγμής γίνεται η χρήση της έννοιας του Συντελεστή Εντάσεως των Τάσεων (ΣΕΤ) και του κατάλληλου κριτηρίου θραύσης. Έτσι για παράδειγμα στην απλή περίπτωση όπου η φόρτιση είναι τύπου I η διάδοση θα γινόταν κάθετα στο φορτίο αν ικανοποιείται το κριτήριο θραύσης:

$$K_I \geq K_{IC} \quad (3.2)$$

όπου K_I ο ΣΕΤ και K_{IC} ο κρίσιμος ΣΕΤ ή θραυστική στιβαρότητας (fracture toughness) που είναι ιδιότητα του υλικού.

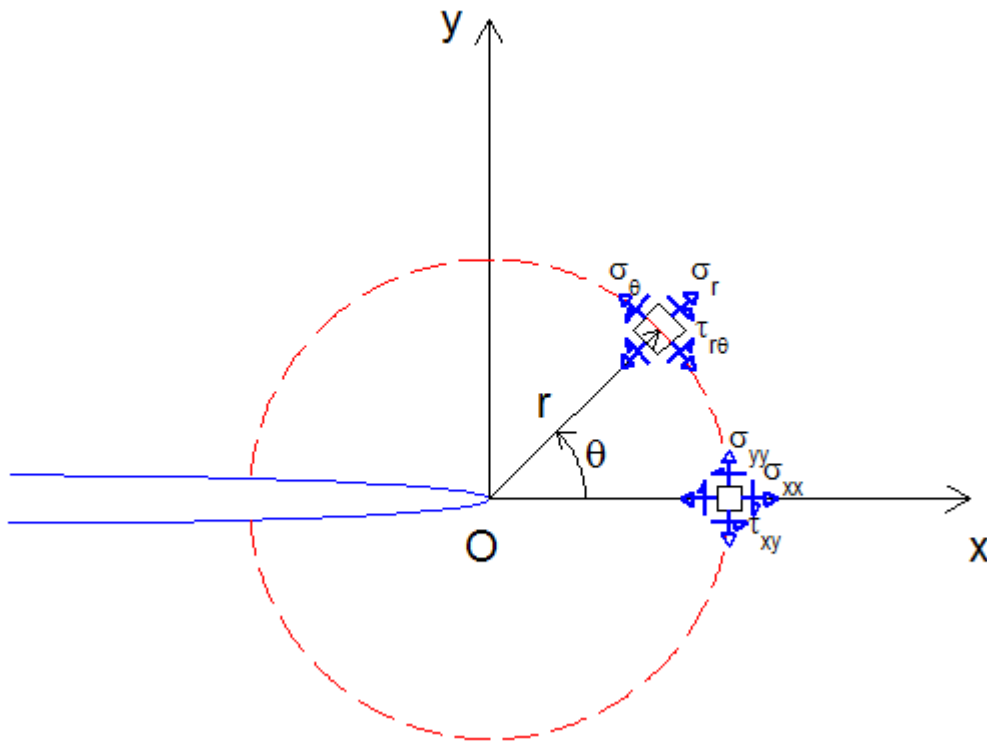
Παρόμοια μορφή θα είχε το κριτήριο θραύσης στην περίπτωση που η φόρτιση ήταν αμιγώς τύπου II ή III. Στην γενικότερη περίπτωση της μικτής θραύσης (τύπου I – τύπου II) εκτός του ότι χρειάζεται ένα γενικότερο κριτήριο θραύσης, είναι επίσης απαραίτητος και ο προσδιορισμός και της διεύθυνσης στην οποία θα γίνει η διάδοση της ρωγμής.

Το κριτήριο το οποίο υιοθετείται εδώ βασίζεται στην παράμετρο της εφαιπτομενικής εφελκυστικής τάσης $\sigma_{\theta\theta}$ η οποία όπως είναι γνωστό ([Irwin, 1957](#), [Westergaard, 1939](#)) τείνει στο άπειρο στην αιχμή της ρωγμής και είναι προσεγγιστικά μόνο συνάρτηση του όρου $1/\sqrt{r}$ - όπου r η απόσταση από την αιχμή της ρωγμής - πολύ κοντά στην αιχμή της ρωγμής. Σε πολικές συντεταγμένες όπως φαίνεται στο [Σχ. 3.2](#) η εφαιπτομενική τάση δίδεται ως εξής ([Broek, 1982](#), [Cherepanov, 1979](#)):

$$\sigma_{\theta\theta}(r, \theta) = \frac{K_{\theta\theta}(\theta)}{\sqrt{2\pi r}} + O(\sqrt{r}) \quad (3.3)$$

όπου $K_{\theta\theta}$ ο συντελεστής εντάσεως των τάσεων που δίδεται ακολούθως:

$$K_{\theta\theta}(\theta) = \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(K_I \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - 3K_{II} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) \quad (3.4)$$



Σχήμα 3.2: Πολικές συντεταγμένες στην αιχμή της ασυνέχειας

Σύμφωνα μ' αυτό το κριτήριο, η πιθανή διάδοση της ρωγμής θα γίνει προς εκείνη την κατεύθυνση όπου η εφαιπτομενική τάση γίνεται μέγιστη δηλαδή στην διεύθυνση όπου μεγιστοποιείται ο $K_{\theta\theta}$, άρα το κριτήριο θραύσης θεωρώντας προσεγγιστικά ότι $K_{IC} \approx K_{IIC}$ και αγνοώντας αντι-επίπεδες παραμορφώσεις των χειλών της ρωγμής, παίρνει τη μορφή:

$$\max\{K_{\theta\theta}(\theta), \theta = -\pi \dots \pi\} \geq K_{IC} \quad (3.5)$$

Η γωνία διάδοσης της ρωγμής θ_p βρίσκεται ως η γωνία που μεγιστοποιεί της εφαιπτομενική τάση και δίδεται σαν συνάρτηση του λόγου $\lambda = K_I / K_{II}$:

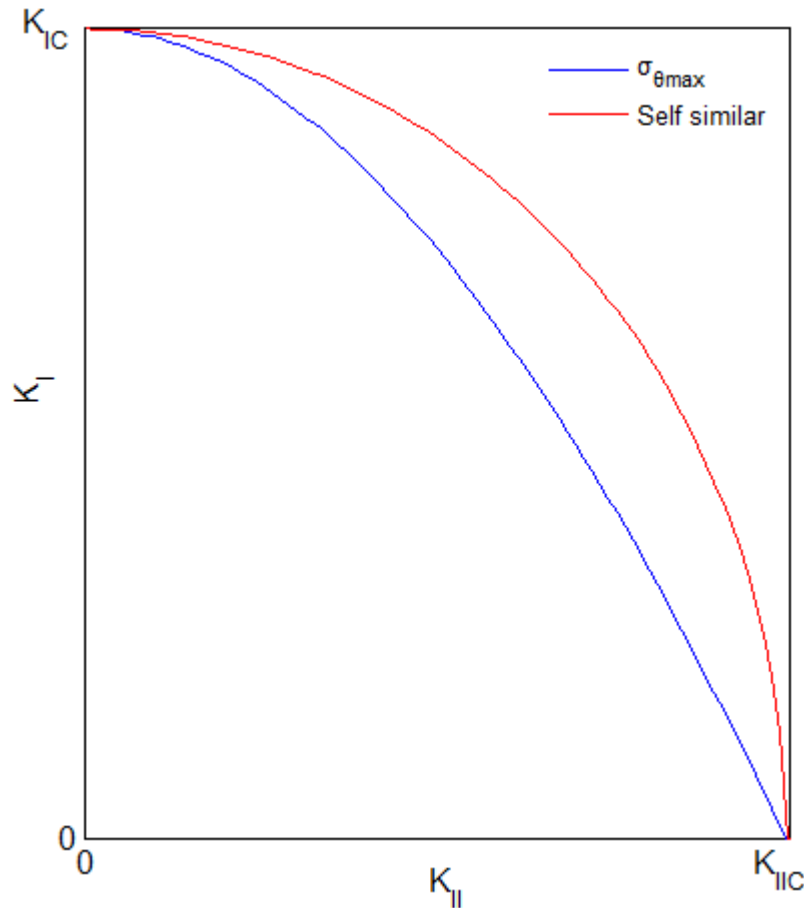
$$\theta_p = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{K_I - \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}}{4K_{II}} \right) = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\lambda}{4} - \frac{\sqrt{\lambda^2 + 8}}{4 \operatorname{sign}(K_{II})} \right) \quad (3.6)$$

Εισάγοντας την γωνία θ_p στην [εξ. \(3.5\)](#) το κριτήριο θραύσης που προκύπτει είναι το εξής:

$$\frac{4\sqrt{2}|K_{II}| \cdot \left(\lambda + 3 \cdot \text{sign}(K_{II}) \sqrt{\lambda^2 + 8} \right)}{\left(\lambda^2 + 12 - \lambda \cdot \text{sign}(K_{II}) \sqrt{\lambda^2 + 8} \right)^{\frac{3}{2}}} \geq K_{IC} \quad (3.7)$$

$$\text{όπου: } \text{sign}(K_{II}) = \begin{cases} -1, & K_{II} < 0 \\ 0, & K_{II} = 0 \\ 1, & K_{II} > 0 \end{cases}$$

Στο [Σχ. 3.3](#) συγκρίνονται οι προβλέψεις του υιοθετούμενου κριτηρίου θραύσης με το αυτό-όμοιο κριτήριο θραύσεως (δηλ. που θεωρεί ότι δεν αλλάζει το σχήμα της ρωγμής κατά τη διάδοση της παρά μόνο το μέγεθος της) ([Parker, 1981](#), [Broek, 1982](#)).



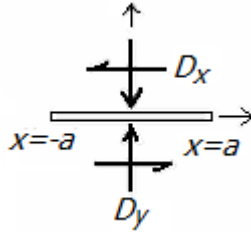
Σχήμα 3.3: Κριτήριο διάδοσης μιας ρωγμής μικτού τύπου φόρτισης.

3.2. Υπολογισμός συντελεστών εντάσεως των τάσεων με τα συνοριακά στοιχεία

Η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων και πιο συγκεκριμένα των ασυνεχών μετατοπίσεων που προτάθηκε από τον ([Crouch, 1976](#), [Crouch & Starfield, 1990](#)) είναι μια από τις καταλληλότερες μεθόδους για τον υπολογισμό των Συντελεστών Εντάσεως των Τάσεων (ΣΕΤ) στα πλαίσια της γραμμικής Θραυστομηχανικής. Τα βασικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο αυτή είναι οι σχετικές μετατοπίσεις

μεταξύ των παρειών μιας εξάρμωσης (dislocation) - που ουσιαστικά είναι οι ασυνεχείς μετατοπίσεις ([Hirth & Lothe, 1982](#)) - και ορίζονται ακολούθως:

$$\begin{aligned} D_x &\equiv u_x^- - u_x^+, \quad |x| < a, \\ D_y &\equiv u_y^- - u_y^+, \quad |x| < a, \\ D_z &\equiv u_z^- - u_z^+, \quad |x| < a \end{aligned} \quad (3.8)$$



Σχήμα 3.4: Ασυνεχείς μετατοπίσεις στις δύο διαστάσεις

Στα πλαίσια αυτής της αριθμητικής μεθόδου μια ρωγμή κατασκευάζεται από ένα σύνολο ευθύγραμμων εξαρμώσεων όπως φαίνεται στο [Σχ. 3.4](#), και εν συνεχεία υπολογίζονται τα μεγέθη των ασυνεχών μετατοπίσεων πάνω σε κάθε τέτοια ασυνέχεια που να ικανοποιούν τις συνοριακές συνθήκες του προβλήματος. Η παραπάνω μέθοδος βελτιώθηκε με την χρήση της θεωρίας της Βαθμωτής Θεωρίας της Ελαστικότητας (Gradient Elasticity Theory) με την εισαγωγή του εσωτερικού μικροδομικού μήκους ℓ του υλικού ([Exadaktylos et al., 1996](#)). Οι εκφράσεις για τις τάσεις στο επίπεδο του στοιχείου βρέθηκαν για $a=1$ με την χρήση των μετασχηματισμών Fourier ([Exadaktylos & Xiroudakis, 2009](#)) και δίδονται από τα ακόλουθα ημι-άπειρα ολοκληρώματα ([Exadaktylos & Xiroudakis, 2010a, 2010b](#)).

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}(x, y) = & -\frac{GD_x}{2(1-\nu)} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \xi^{1/2} (1 - \ell^2 \xi^2) J_{1/2}(\xi) e^{-y\xi} (2 - y\xi) \sin(x\xi) d\xi \\ & -\frac{GD_y}{2(1-\nu)} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \xi^{1/2} (1 - \ell^2 \xi^2) J_{1/2}(\xi) e^{-y\xi} (1 - y\xi) \cos(x\xi) d\xi \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{xy}(x, y) = & -\frac{GD_x}{2(1-\nu)} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \xi^{1/2} (1 - \ell^2 \xi^2) J_{1/2}(\xi) e^{-y\xi} (1 - y\xi) \cos(x\xi) d\xi \\ & -\frac{GD_y}{2(1-\nu)} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \xi^{1/2} (1 - \ell^2 \xi^2) J_{1/2}(\xi) e^{-y\xi} y\xi \sin(x\xi) d\xi \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}(x, y) = & -\frac{GD_x}{2(1-\nu)} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \xi^{1/2} (1 - \ell^2 \xi^2) J_{1/2}(\xi) e^{-y\xi} y\xi \sin(x\xi) d\xi \\ & -\frac{GD_y}{2(1-\nu)} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \xi^{1/2} (1 - \ell^2 \xi^2) J_{1/2}(\xi) e^{-y\xi} (1 + y\xi) \cos(x\xi) d\xi \end{aligned} \quad (3.11)$$

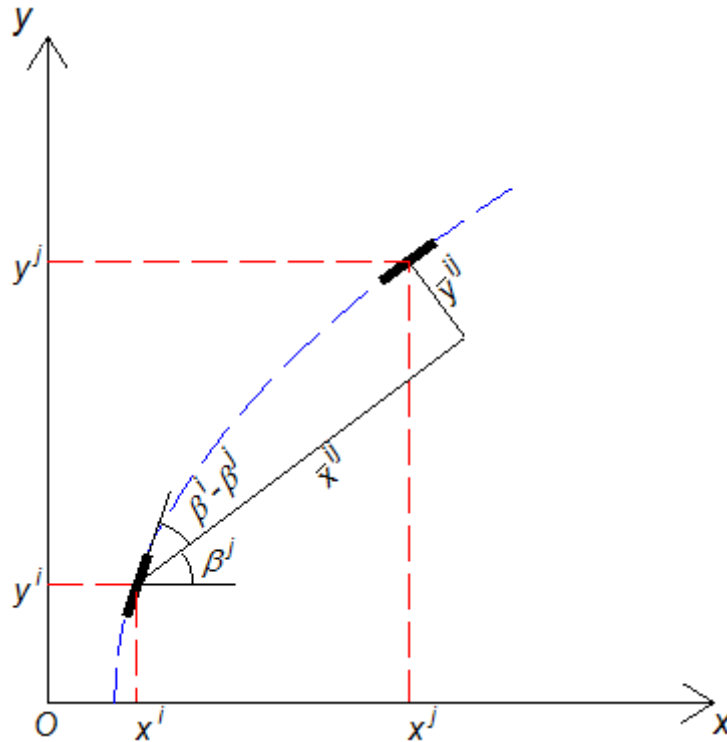
όπου J_ν η συνάρτηση Bessel πρώτου τύπου και τάξεως ν .

Τα ολοκληρώματα αυτά μπορούν να υπολογισθούν με εφαρμογή κατάλληλης αριθμητικής μεθόδου ολοκλήρωσης Gauss, Chebyshev, Lobatto ή άλλης. Στην γενικότερη περίπτωση όπου η ασυνέχεια είναι κεκλιμένη τότε οι [εξ. \(3.9\)-\(3.11\)](#) αναφέρονται στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων της ασυνέχειας:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= x \cos \beta + y \sin \beta \\ \bar{y} &= -x \sin \beta + y \cos \beta\end{aligned}\quad (3.12)$$

Σύμφωνα με την αριθμητική μέθοδο που καλείται G2CDD (Gradient 2 Constant Displacement Discontinuity) το σύνολο διακριτοποιείται σε N στοιχεία και οι τάσεις στο τυχαίο στοιχείο i υπολογίζονται από το άθροισμα των επιδράσεων από όλα τα στοιχεία. Έτσι για την εύρεση της επίδρασης του τυχαίου στοιχείου j στο τυχαίο στοιχείο i βρίσκεται η απόσταση των δυο στοιχείων στις τοπικές συντεταγμένες του στοιχείου j (Σχ. 3.5):

$$\begin{aligned}\bar{x}^{ij} &= (x^i - x^j) \cos \beta^j + (y^i - y^j) \sin \beta^j \\ \bar{y}^{ij} &= -(x^i - x^j) \sin \beta^j + (y^i - y^j) \cos \beta^j\end{aligned}\quad (3.13)$$



Σχήμα 3.5: Τοπικά συστήματα συντεταγμένων των στοιχείων i και j .

Εισάγοντας τις [εξ. \(3.13\)](#) στις [εξ. \(3.9\)-\(3.11\)](#) προκύπτουν οι τάσεις στο στοιχείο i στο τοπικό σύστημα του στοιχείου j , για να γίνει η άθροιση των επιδράσεων από όλα τα στοιχεία χρειάζεται να γίνει μετασχηματισμός του τανυστή των τάσεων σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων (τοπικό σύστημα του στοιχείου i) με την στροφή με γωνία $\beta^{ij} = \beta^j - \beta^i$. Έτσι περιγράφοντας τις διατμητικές σ_s^i και τις ορθές σ_n^i τάσεις στα συνοριακά στοιχεία προκύπτει το σύστημα $2N$ εξισώσεων με $2N$ αγνώστους τις ασυνεχείς μετατοπίσεις D_x^i, D_y^i :

$$\begin{aligned}\sigma_s^i &= -\frac{G}{2(1-\nu)} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{j=1}^N \int_0^\infty \xi^{1/2} (1 - \ell^2 \xi^2) J_{1/2}(\xi) e^{-\bar{y}^{ij} \xi} \times \\ &\quad \left\{ (1 - \bar{y}^{ij} \xi) [\sin(\bar{x}^{ij} \xi) \sin(2\beta^{ij}) + \cos(\bar{x}^{ij} \xi) \cos(2\beta^{ij})] D_x^j - \right. \\ &\quad \left. \bar{y}^{ij} \xi [\cos(\bar{x}^{ij} \xi) \sin(2\beta^{ij}) - \sin(\bar{x}^{ij} \xi) \cos(2\beta^{ij})] D_y^j \right\} d\xi\end{aligned}\quad (3.14)$$

$$\sigma_n^i = -\frac{G}{2(1-\nu)} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{j=1}^N \int_0^\infty \xi^{1/2} (1 - \ell^2 \xi^2) J_{1/2}(\xi) e^{-\bar{y}^{ij} \xi} \times \\ \left\{ \left[(2 \sin^2(\beta^{ij}) + \bar{y}^{ij} \xi \cos(2\beta^{ij})) \sin(\bar{x}^{ij} \xi) + (1 - \bar{y}^{ij} \xi) \cos(\bar{x}^{ij} \xi) \sin(2\beta^{ij}) \right] D_x^j - \right. \\ \left. \left[(1 + \bar{y}^{ij} \xi \cos(2\beta^{ij})) \cos(\bar{x}^{ij} \xi) + \bar{y}^{ij} \xi \sin(\bar{x}^{ij} \xi) \sin(2\beta^{ij}) \right] D_y^j \right\} d\xi \quad (3.15)$$

Τέλος, ο προσδιορισμός των συντελεστών εντάσεως των τάσεων (θεωρώντας γραμμικά ελαστικό μέσο) K_I , K_{II} , K_{III} στις αιχμές των ρωγμών γίνεται με την χρήση των [εξ. \(3.16\)](#).

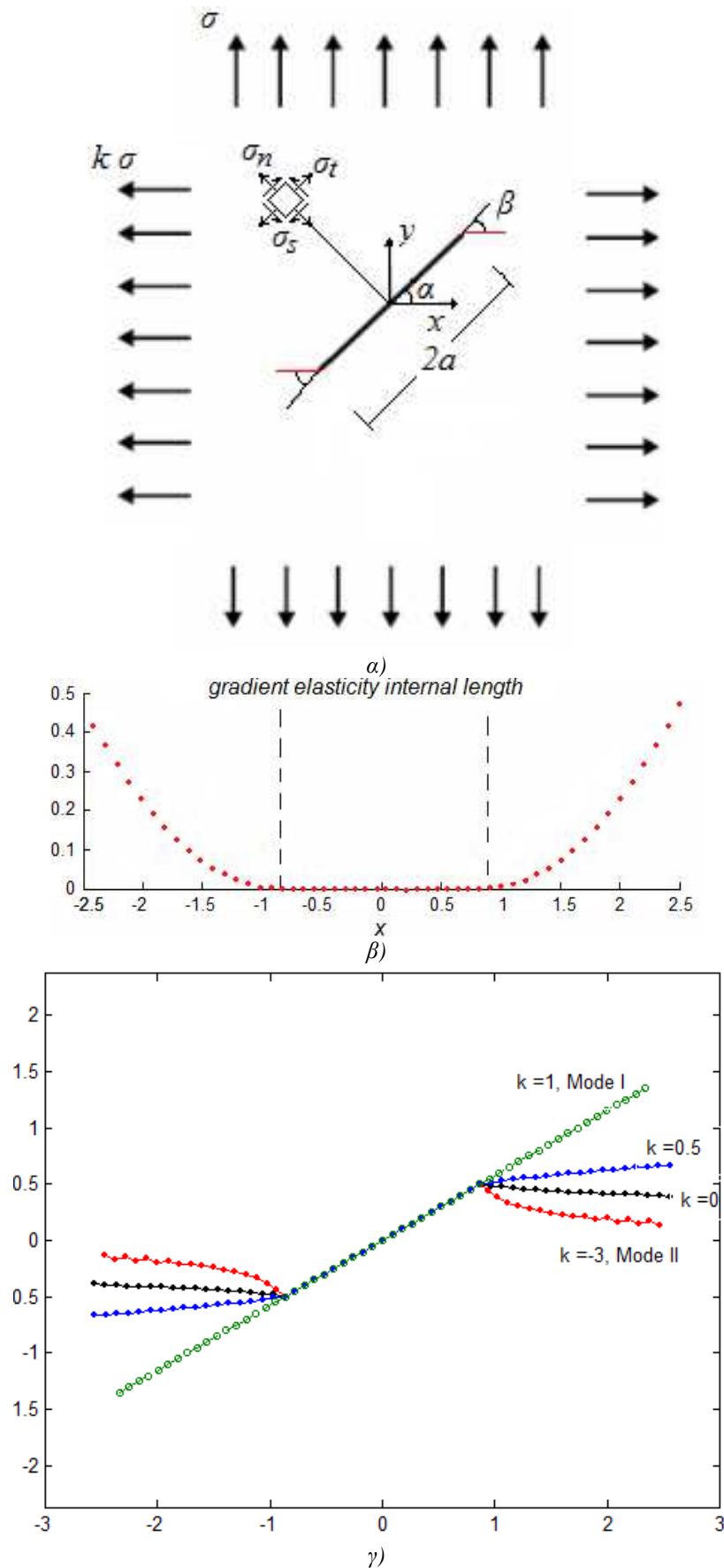
$$K_I = -\frac{G}{4(1-\nu)} \lim_{r \rightarrow 0} \left\{ \sqrt{\frac{2\pi}{r}} D_y(r) \right\} \approx -\frac{G}{4(1-\nu)} \sqrt{\frac{2\pi}{a}} D_y(a), \\ K_{II} = -\frac{G}{4(1-\nu)} \lim_{r \rightarrow 0} \left\{ \sqrt{\frac{2\pi}{r}} D_x(r) \right\} \approx -\frac{G}{4(1-\nu)} \sqrt{\frac{2\pi}{a}} D_x(a), \quad (3.16) \\ K_{III} = -\frac{G}{4} \lim_{r \rightarrow 0} \left\{ \sqrt{\frac{2\pi}{r}} D_z(r) \right\} \approx -\frac{G}{4} \sqrt{\frac{2\pi}{a}} D_z(a)$$

όπου, $D_x(a)$, $D_y(a)$, $D_z(a)$ παριστούν την ορθή, την διατμητική και την αντι-επίπεδη ασυνεχή μετατόπιση στην απόσταση από την αιχμή της ρωγμής που τίθεται ίση με το μισό μήκος των συνοριακών στοιχείων των αιχμών a , και έχουν υπολογισθεί προηγουμένως αριθμητικά για το υπόψιν πρόβλημα.

3.3. Εκκίνηση και διάδοση κεκλιμένης ρωγμής στο επίπεδο

Η μέθοδος G2CDD με την χρήση του εσωτερικού μήκους ℓ (βλ. [Σχ.3.6.β](#)) δίδει πολύ καλύτερες εκτιμήσεις για τους ΣΕΤ συγκριτικά με την κλασσική μέθοδο χωρίς την χρήση ειδικών στοιχείων στις αιχμές ([Exadakylos & Xiroudakis, 2010a, 2010b](#)). Στην συνέχεια εξετάζεται η διάδοση μιας κεκλιμένης διαξονικής ασυνέχειας (αρχικής κλίσης $\alpha=30^\circ$) η οποία υποβάλλεται σε ανισότροπη επίπεδη εφελκυστική φόρτιση ([Σχ. 3.6α](#)). Η γωνία β παριστά τη κλίση του νέου μικρού άλματος της ρωγμής. Η επίλυση με την κλασσική CDD μέθοδο και με την μέθοδο G2CDD έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- α) η κλασσική μέθοδος CDD υπερεκτιμά τους ΣΕΤ ([Πιν. 3.1](#)),
- β) και οι δυο μέθοδοι έδωσαν το ίδιο διαδρομή που θα ακολουθήσει η ασυνέχεια ([Σχ. 3.6γ](#)) και αυτό οφείλεται στο ότι στον υπολογισμό της γωνίας διάδοσης μπαίνει ο λόγος $\lambda = K_I / K_{II}$ με αποτέλεσμα το σφάλμα να απαλείφεται,
- γ) αντιθέτως το κρίσιμο φορτίο που απαιτείται για να διαδοθεί η ρωγμή είναι μεγαλύτερο απ' ότι υπολογίζεται από την κλασσική μέθοδο που υπερεκτιμά το πρώτο μέρος της [εξ. \(3.7\)](#).



Σχήμα 3.6: Διάδοση κεκλιμένης επίπεδης ρωγμής για διάφορες τιμές της διαζωνικότητας k .

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα για την διάδοση μικτού τύπου ρωγμής αρχικής κλίσης $\alpha=30^\circ$ στο αρχικό βήμα διάδοσης της ρωγμής.

| Υπολογιζόμενη ποσότητα | Μέθοδος υπολογισμού του ΣΕΤ | | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------|-------|-------|------|------|------|-----------|------|------|
| | G2CDD | | | CDD | | | Αναλυτική | | |
| k | -3 | 0 | 1 | -3 | 0 | 1 | -3 | 0 | 1 |
| σ | 0.29 | 0.57 | 0.58 | 0.23 | 0.45 | 0.45 | 0.28 | 0.56 | 0.56 |
| $K_I / \sigma_n / \sqrt{\pi a}$ | 0 | 0.975 | 0.975 | 0 | 1.25 | 1.25 | 0 | 1 | 1 |
| $K_{II} / \sigma_s / \sqrt{\pi a}$ | 0.975 | 0.975 | 0 | 1.25 | 1.25 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| β (μοίρες) | 70.5 | 43.2 | 0 | 70.5 | 43.2 | 0 | 70.5 | 43.2 | 0 |

3.4. Μοντελοποίηση της Κοπής με Αιχμηρό Κοπτικό Άκρο Πετρώματος με Επίπεδη Επιφάνεια και Γειτονική Εγκοπή

Για τον προσδιορισμό του μηχανισμού κοπής γεωυλικού εφαρμόστηκε η προτεινόμενη μέθοδος των συνοριακών στοιχείων G2TWODD που επιτρέπει τον ακριβέστερο υπολογισμό των ΣΕΤ στις αιχμές των ρωγμών και συνεπώς τον ακριβέστερο προσδιορισμό του μέγιστου απαιτούμενου φορτίου διείσδυσης P . Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι απλοποιητικές παραδοχές του μοντέλου παρουσιάζονται στα [Σχ. 3.7](#) και [3.8](#), όπου:

- (ABC) είναι η προηγούμενη γειτονική εγκοπή και (CD), (FG) η οριζόντια επιφάνεια που είναι ελεύθερη τάσεων.
- Οι διεπιφάνειες επαφής κοπτικού-πετρώματος (DE) και (EF) συμπίπτουν με τις επιφάνειες αστοχίας του γεωυλικού που ακολουθεί το μοντέλο των *Mohr-Coulomb*.
- Στις διεπιφάνειες επαφής κοπτικού-πετρώματος (DE) και (EF) εφαρμόζεται ομοιόμορφο φορτίο F .
- Το μέγεθος του φορτίου F βρίσκεται από την συνθήκη αστοχίας του γεωυλικού κατά μήκος των επιφανειών (DE) και (FE). Για γωνία αιχμής του κοπτικού $\beta < 30^\circ$ (οξεία αιχμή) εφαρμόζεται το μοντέλο του [Σχ. 3.7](#) με την γωνία θ να κυμαίνεται μεταξύ ϕ (κέντρο του κύκλου τείνει προς το άπειρο) και $\pi/4 + \phi/2$ (για τον πρώτο κύκλο με μηδενική την ελάχιστη κύρια τάση), ενώ για $\beta > 30^\circ$ (πιο συνήθης περίπτωση) το μοντέλο του [Σχ. 3.8](#) με την γωνία θ να κυμαίνεται μεταξύ ϕ (κέντρο του κύκλου τείνει προς το άπειρο) και $\pi/2 - \beta$ (για τον πρώτο κύκλο με μηδενική την ελάχιστη κύρια τάση). Και στις δύο περιπτώσεις βρίσκεται σύμφωνα με τις λεπτομέρειες των [Σχ. 3.7 - 3.8](#) από ισορροπία των δυνάμεων στον κατακόρυφο άξονα ως εξής:

$$\begin{aligned}
 P &= 2 \cdot \delta \cdot L \cdot (\sigma_n \cdot \tan \beta - \tau_s) \\
 F &= \frac{P}{2 \cdot \sin(\theta - \beta)} \\
 \tau_s &= \sigma_n \cdot \tan \theta
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$

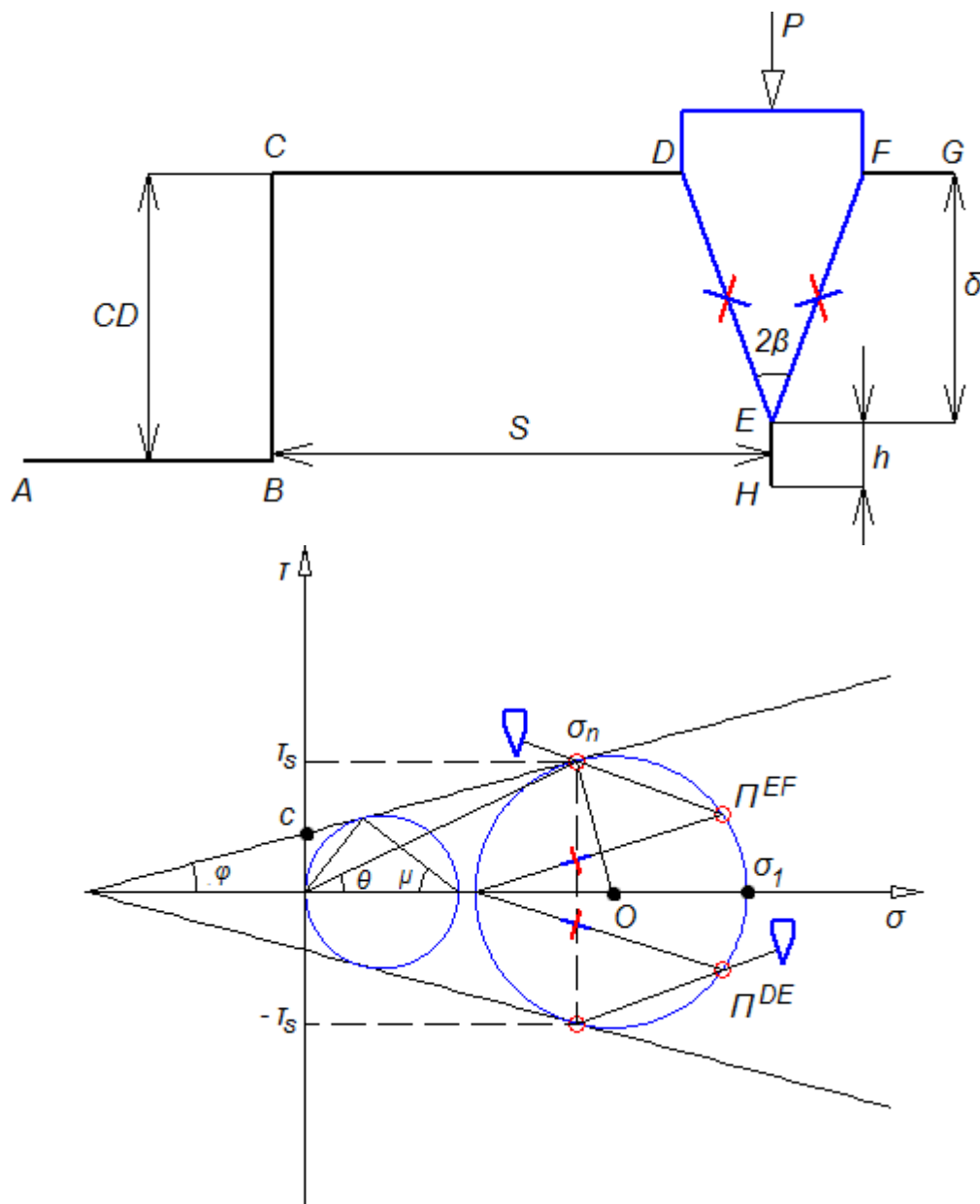
όπου σ_n και τ_s η ορθή και η διατμητική συνιστώσα που ασκείται στην διεπαφή κοπτικού – πετρώματος, αντίστοιχα.

- Το σύμβολο L παριστά το μήκος κοπής στην 3^η διάσταση κάθετη στο επίπεδο Oxy και $\mu = \pi/4 - \phi/2$.
- Κατά την διείσδυση του κοπτικού άκρου στο πέτρωμα δημιουργείται μια μικρού μήκους κατακόρυφη εφελκυστική ρωγμή (EH) ακριβώς κάτω απ' την αιχμή του κοπτικού. Ο μηχανισμός δημιουργίας της εφελκυστικής ρωγμής περιγράφεται στο [Κεφ. 2](#).

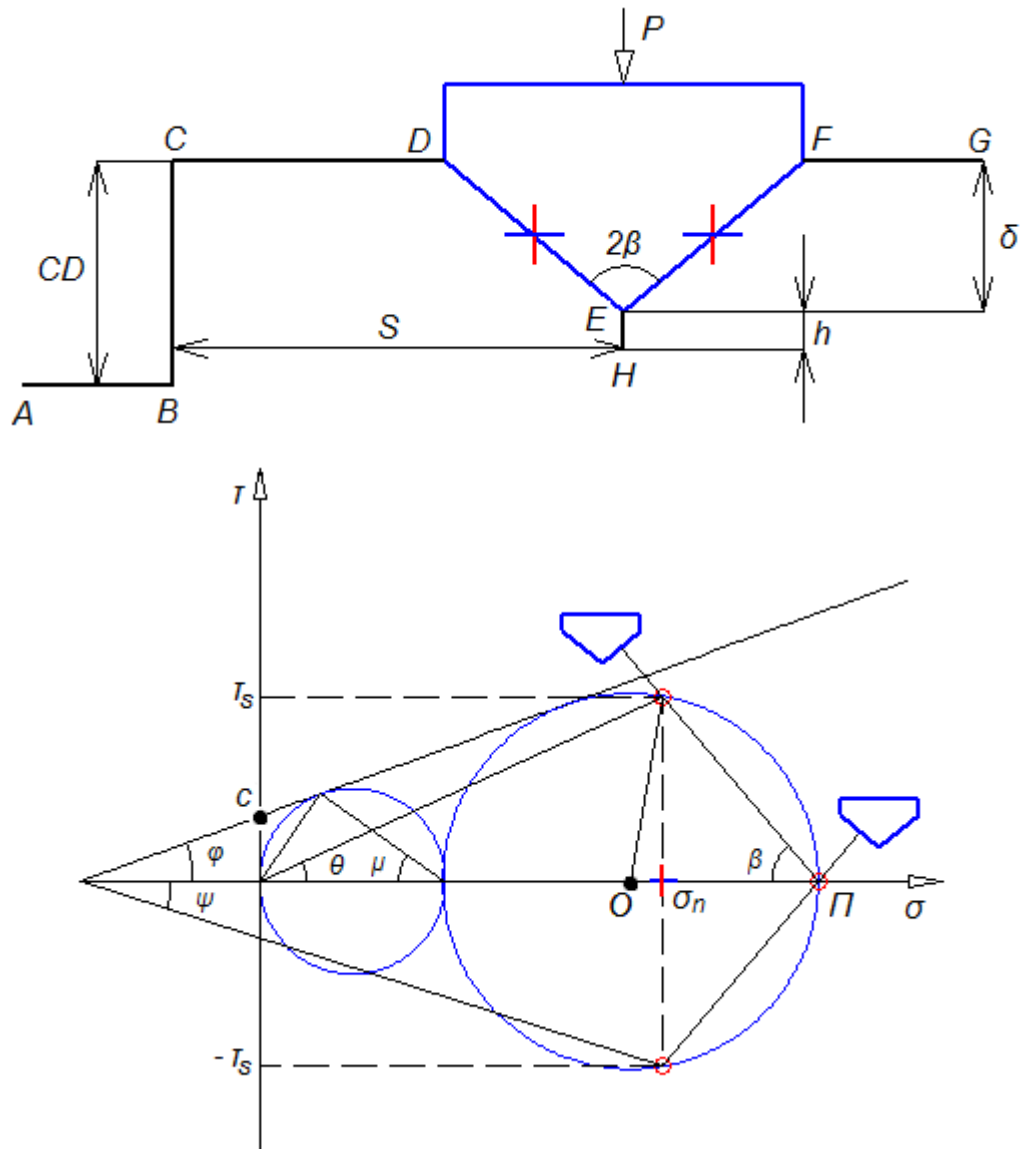
- Το αδιάστατο εσωτερικό μήκος ℓ (αδιαστατοποίηση με το μέγεθος των στοιχείων της ασυνέχειας) της βαθμωτής ελαστικότητας που χρησιμοποιήθηκε είναι μηδενικό στην αιχμή του κοπτικού (σημείο E στο [Σχ. 3.7 - 3.8](#)) και 0.5 στην αιχμή της ρωγμής. Η κατανομή του εσωτερικού μήκους παρουσιάζεται στο [Σχ. 3.9](#) όπου N ο αριθμός των στοιχείων μέχρι την αιχμή της ασυνέχειας.
- Το κρίσιμο εξωτερικό φορτίο P που χρειάζεται για να διαδοθεί η ρωγμή ως την επιφάνεια της προηγούμενης κοπής αδιαστατοποιείται με τον όρο:

$$P_o = K_{IC} \cdot \delta \cdot L / \sqrt{h} \quad (3.18)$$

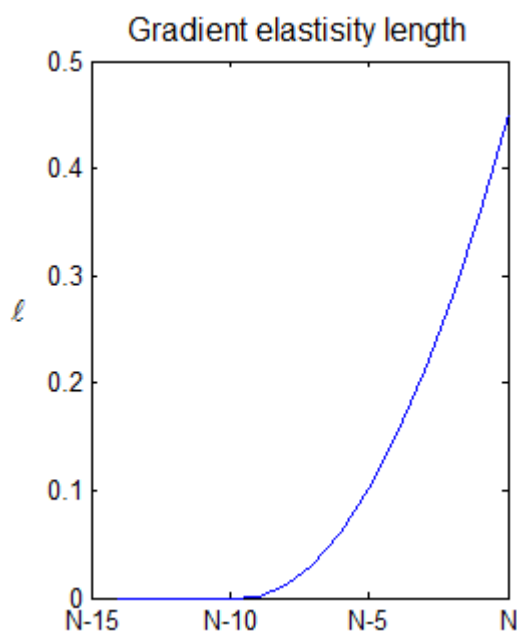
όπου $K_{IC} [Pa\sqrt{m}]$ ο κρίσιμος ΣΕΤ, h το μήκος της αρχικής ρωγμής, δ το βάθος κοπής και L το μήκος κοπής στην διεύθυνση κίνησης του κοπτικού.



Σχήμα 3.7: Μοντέλο κοπής πετρώματος για τραχεία αιχμή (rough bit) στο επίπεδο (σ , τ) με τα επίπεδα αστοχίας εντός του πετρώματος να ταυτίζονται με τα επίπεδα επαφής κοπτικού άκρου-πετρώματος (DE) και (EF).



Σχήμα 3.8: Μοντέλο κοπής πετρώματος για αμβλεία αιχμή (false nose) με το επίπεδο των κυρίων τάσεων είναι το οριζόντιο.



Σχήμα 3.9: Η κατανομή εσωτερικού μήκους κατά μήκος της ρωγμής.

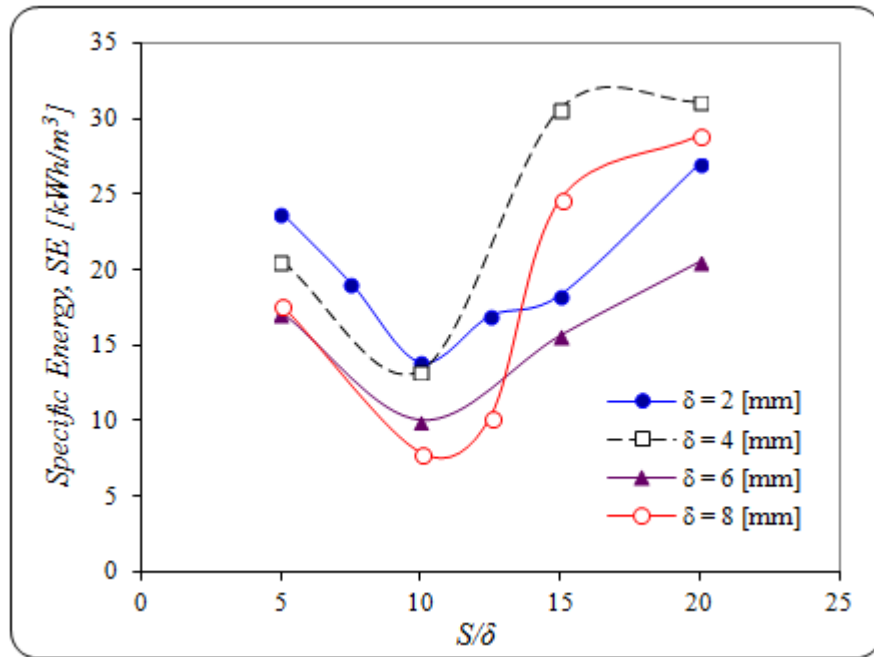
3.5. Επαλήθευση με πειραματικά δεδομένα κοπής

Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων θα χρησιμοποιηθούν πειραματικά δεδομένα Πιν. 3.2 κοπής που έγιναν με την χρήση κυλινδρικού κοπτικού δίσκου στην περίπτωση του γρανίτη Merrivale ([Snowdon et al., 1982](#)).

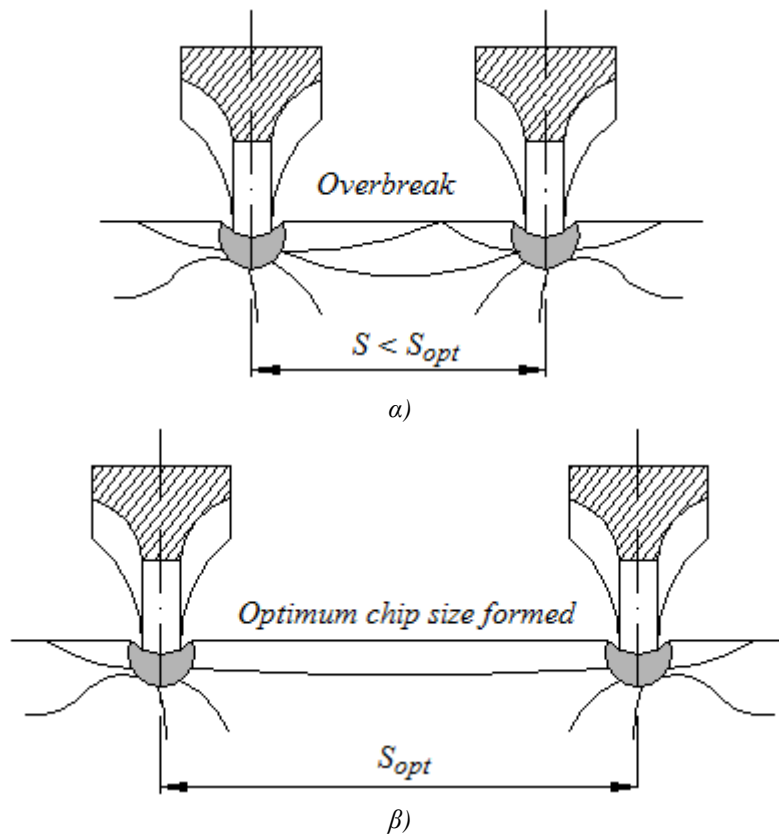
Πίνακας 3.2: Πειραματικά δεδομένα για τον γρανίτη Merrivale

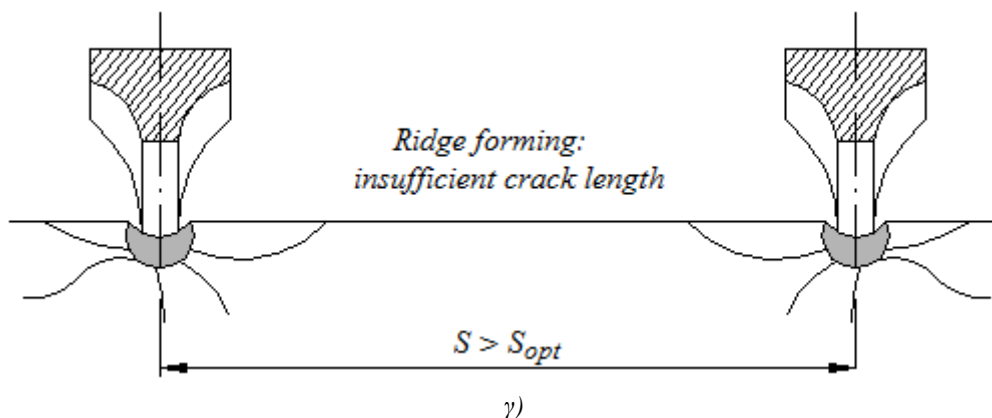
| δ [mm] | S [mm] | F_r^c [kN] | F_n^c [kN] | SE [kWh/m ³] |
|---------------|----------|--------------|--------------|----------------------------|
| 2 | 10 | 1.4 | 24.1 | 23.8 |
| 2 | 15 | 2.2 | 31.5 | 19.1 |
| 2 | 20 | 2.2 | 37.2 | 13.9 |
| 2 | 25 | 2.7 | 33.5 | 17.0 |
| 2 | 30 | 2.4 | 50.1 | 18.3 |
| 2 | 40 | 2.6 | 53.3 | 27.0 |
| 4 | 20 | 5.2 | 46.1 | 23.8 |
| 4 | 40 | 8.4 | 75.4 | 20.6 |
| 4 | 60 | 9.9 | 92.4 | 13.3 |
| 4 | 80 | 10.5 | 96.8 | 30.7 |
| 6 | 30 | 10.7 | 72.3 | 17.2 |
| 6 | 60 | 17.7 | 117.2 | 10.0 |
| 6 | 90 | 23.2 | 152 | 15.6 |
| 6 | 120 | 23.2 | 156.7 | 20.5 |
| 8 | 40 | 16.2 | 89 | 17.7 |
| 8 | 80 | 24.4 | 157 | 7.9 |
| 8 | 100 | 35.8 | 200.3 | 10.3 |
| 8 | 120 | 37 | 264.5 | 24.7 |
| 8 | 160 | 38.8 | 246 | 28.9 |

Στο Σχ. 3.10 που ακολουθεί παρουσιάζεται η εξάρτηση της ειδικής ενέργειας με τον λόγο S/δ για τα διάφορα βάθη κοπής απ' όπου φαίνεται καθαρά ότι το βέλτιστος λόγος είναι 10 για όλα τα βάθη κοπής. Για μικρότερους λόγους γίνεται υπέρβαση της θραύσης (υπερεκσκαφή) του πετρώματος ενώ για μεγαλύτερους λόγους το εφαρμοζόμενο φορτίο δεν αρκεί για την διάδοση της ρωγμής ως την γειτονική εγκοπή (βλ. Σχ. 3.11α.γ).



Σχήμα 3.10: Ειδική ενέργεια κοπής (Snowdon et. al., 1982)

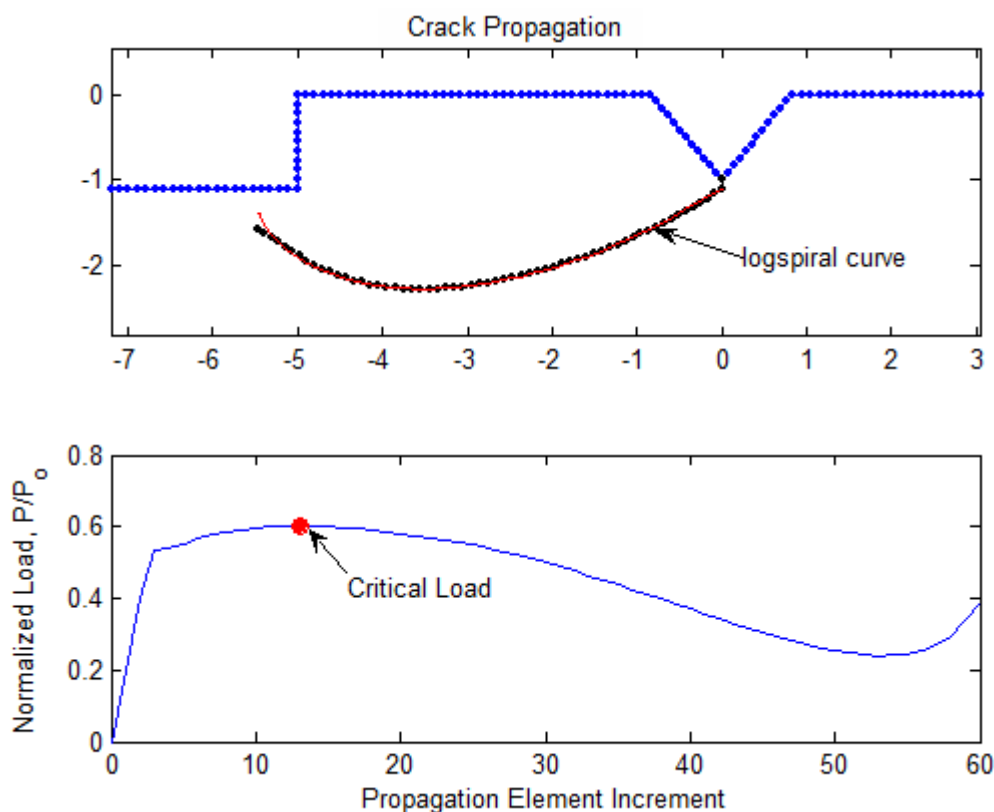




Σχήμα 3.11: Μηχανισμός κοπής του πετρώματος με την αύξηση της απόστασης ([Rostami & Ozdemir, 1993](#)) α) υπερβολική θραύση του πετρώματος, β) βέλτιστη απόσταση κοπής και γ) ανεπαρκής θρυμματισμός του πετρώματος.

Η ειδική ενέργεια του [Σχ. 3.10](#) διαφέρει από την ειδική ενέργεια που υπολογίζεται με την [εξ. \(1.1\)](#) ([Σχ. 3.15](#)) και αυτό οφείλεται στο ότι για να είναι αντιπροσωπευτικά αυτά τα πειράματα χρειάζεται να γίνει ένας αριθμός περασμάτων (pre-conditioning) έτσι ώστε να επέλθουν σταθερές συνθήκες και αυτό γίνεται όταν ο εκσκαπτόμενος όγκος ανά μήκος κοπής προσεγγίζεται από το γινόμενο $S \cdot \delta \cdot L$ ([Kutter & Sanio, 1983](#)).

Η επίλυση γίνεται για κοπτικό με γωνία 80° με την χρήση του μηχανισμού που περιγράφεται από το [Σχ. 3.8](#). Στο [Σχ. 3.12](#) παρουσιάζεται η διαδρομή της ρωγμής από την αιχμή της αρχικής εφελκυστικής ρωγμής κάτω από την αιχμή του κοπτικού έως την ελεύθερη επιφάνεια που δημιουργήθηκε από προηγούμενη εγκοπή. Έτσι το κρίσιμο φορτίο διάδοσης έως την ελεύθερη επιφάνεια βρίσκεται από την μέγιστη τιμή του [Σχ. 3.12](#).



Σχήμα 3.12: Εύρεση του κρίσιμου φορτίου διάδοσης της ασυνέχειας ως την ελεύθερη επιφάνεια.

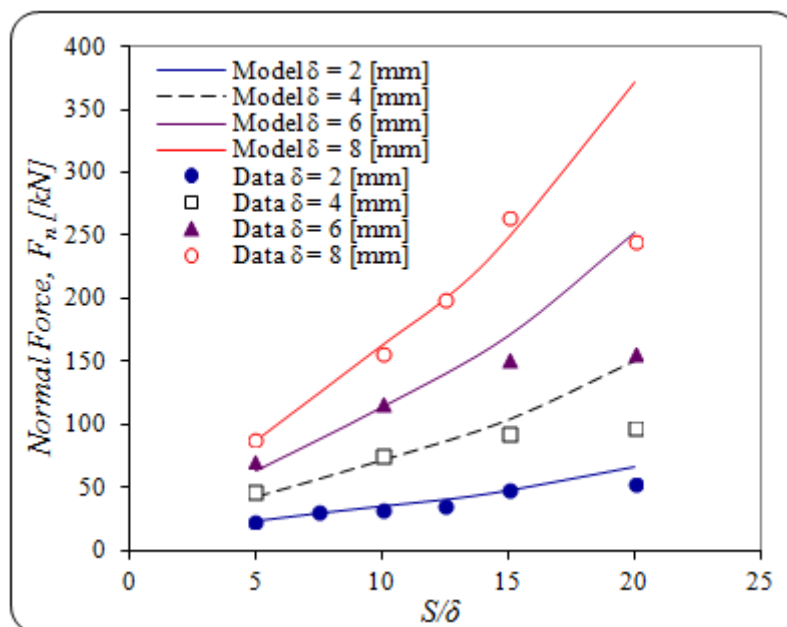
Παρατηρώντας το [Σχ. 3.12](#) προκύπτει ότι το βάθος κοπής του μοντέλου είναι μεγαλύτερο από το ονομαστικό, δ (υποεκσκαφή, αγγλ.: Undercutting), φαινόμενο που παρατηρήθηκε στα πραγματικά δεδομένα κοπής ([Snowdon et al., 1982](#)). Η μορφή που ακολουθεί η διάδοση της ρωγμής είναι της λογαριθμικής σπείρας, που παρουσιάζεται με συνεχή γραμμή, με εξίσωση:

$$\begin{aligned}x &= a \cdot \exp(b \cdot \theta) \cdot \cos \theta + x_c \\y &= a \cdot \exp(b \cdot \theta) \cdot \sin \theta + y_c\end{aligned}\quad (3.19)$$

όπου για την συγκεκριμένη περίπτωση είναι: $a=2.7e-4$, $b=1.576$ οι σταθερές που καθορίζουν το σχήμα και $x_c=-5.38$, $y_c=-1.1$ το κέντρο της λογαριθμικής σπείρας.

Για την σύγκριση με τις πειραματικές τιμές ([Σχ. 3.13](#)) το αδιαστατοποιημένο φορτίο πολλαπλασιάζεται με την [εξ. \(3.17\)](#), όπου ο ΣΕΤ για τον γρανίτη που χρησιμοποιήθηκε είναι $K_{IC} = 1.8 [MPa\sqrt{m}]$ ([Ouchterlony, 1990](#)), ενώ το μήκος L που διανύει ο δίσκος για την κοπή του πετρώματος δεν δίδεται οπότε η εκτίμηση του γίνεται προσαρμόζοντας στα δεδομένα μια γραμμική [εξ. \(3.20\)](#) με την απόσταση της γειτονικής εγκοπής, όπου στα δεδομένα για μεγάλους λόγους S/δ δόθηκε μικρότερος συντελεστής βαρύτητας καθώς ο μηχανισμός κοπής αλλάζει (βλ. [Σχ.3.11γ](#)) και το φορτίο είναι μικρότερο καθώς και η πραγματική απόσταση κοπής είναι μικρότερη.

$$L = 4.28 \cdot S + 0.11 \quad (3.20)$$



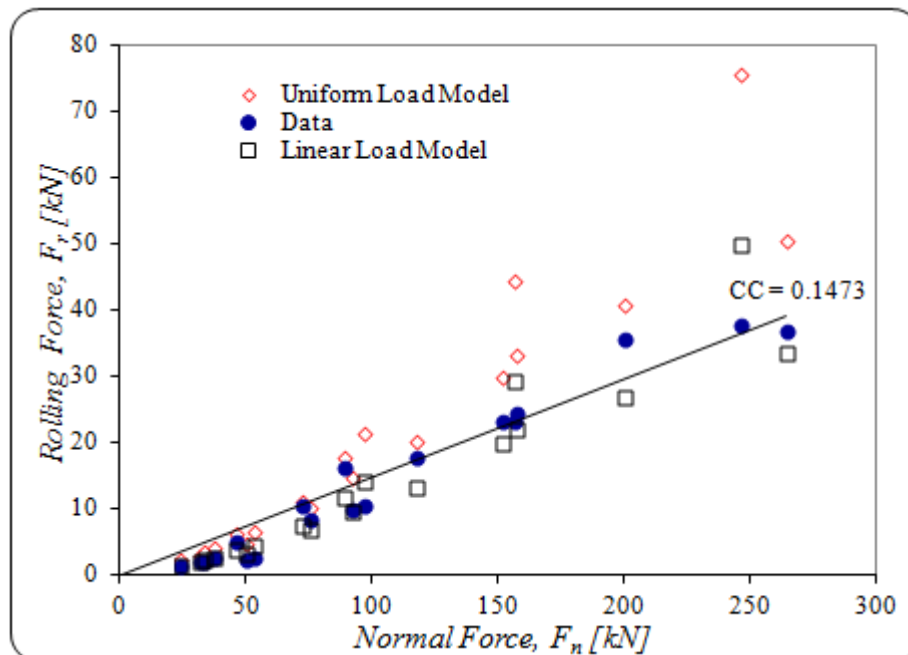
Σχήμα 3.13: Σύγκριση πειραματικών δεδομένων του ορθού φορτίου με τα αποτελέσματα των συνοριακών στοιχείων.

Στην συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός της ειδικής ενέργειας με την αναλυτική εξίσωση χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους του [Πιν. 3.3](#) με τον συντελεστή CC να έχει βρεθεί από τα πειραματικά δεδομένα ([Πιν. 3.2](#)), εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η [εξ. \(1.7\)](#) για ομοιόμορφη ή γραμμική κατανομή του φορτίου στην διεπαφή κοπτικού-πετρώματος. Τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων για την δύναμη κοπής μεταξύ αυτών των διαφορετικών προσεγγίσεων να παρουσιάζονται στο [Σχ. 3.14](#).

Πίνακας 3.3: Παράμετροι αναλυτικού μοντέλου για τον γρανίτη.

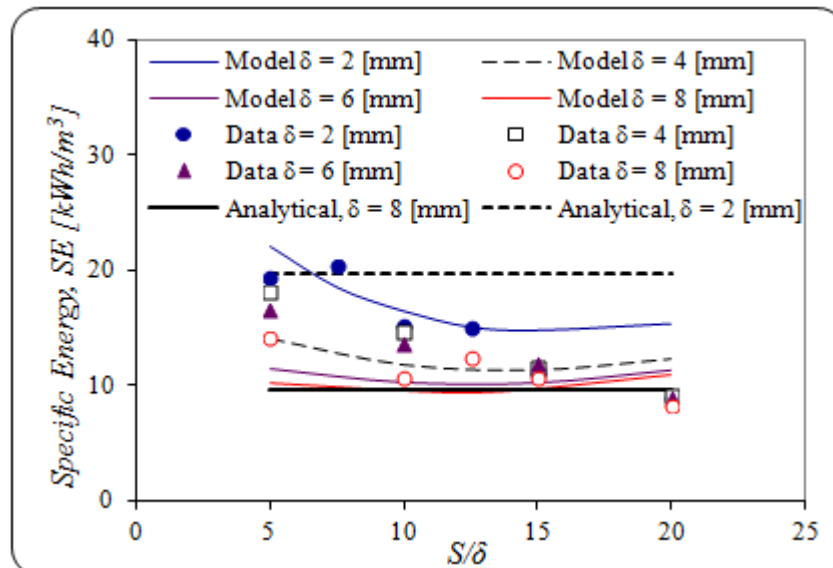
| Παρ/τρος | a | φ | ψ' | CC | UCS | UTS | S/h | L/δ_{min} |
|----------|----------|-----------|----------|------|-------|-------|-------|------------------|
| Μονάδες | [0] | [0] | [0] | [-] | [MPa] | [MPa] | [-] | [-] |

| | | | | | | | | |
|---|----|------|---|--------|-----|------|----|-----|
| Τιμή | 40 | 48.7 | 0 | 0.1473 | 174 | 17.4 | 10 | 4.9 |
| * $L/\delta = \sqrt{2 \cdot R/\delta - 1}$; $R = 100$ [mm] | | | | | | | | |

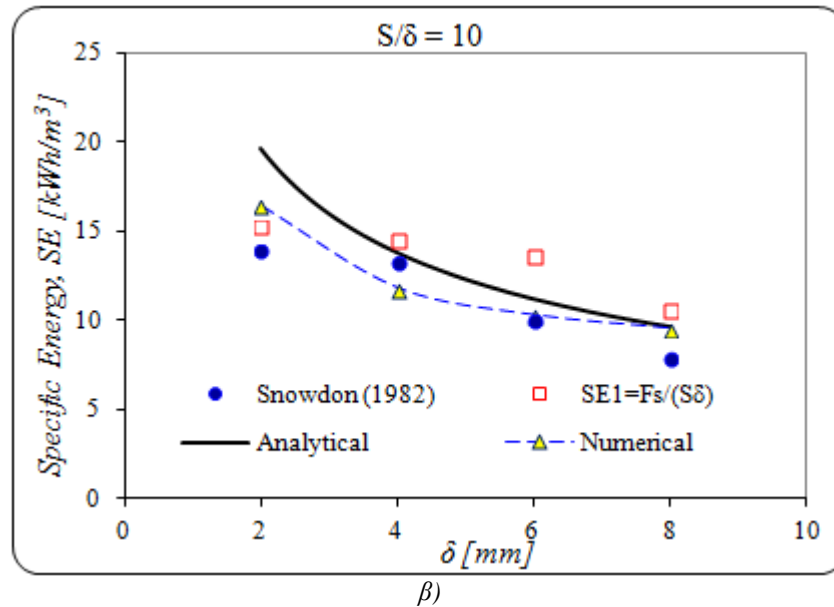


Σχήμα 3.14: Υπολογισμός της δύναμης κοπής σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα.

Στο Σχ. 3.15 γίνεται η σύγκριση της ειδικής ενέργειας που προκύπτει: α) από τα πειραματικά δεδομένα με χρήση της εζ. (1.1), β) με την αναλυτική σχέση (2.9) η οποία δίδει ειδική ενέργεια 9.65 [kWh/m^3] (για $\delta=8$ [mm]) έως 19.6 [kWh/m^3] (για $\delta=2$ [mm]) και γ) με βάση των αριθμητικών επιλύσεων για $n=1$.



α)



Σχήμα 3.15: Σύγκριση ειδικής ενέργειας με την αναλυτική και με την αριθμητική επίλυση της κοπής του γρανίτη με την χρήση κοπτικού κυλινδρικού δίσκου.

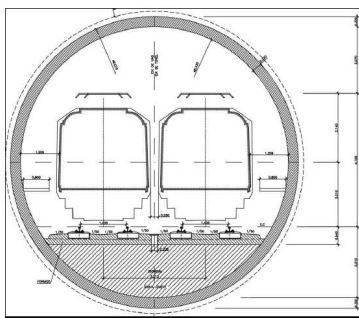
Εφόσον όπως άλλωστε φαίνεται και από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχ. 3.15 η αναλυτική σχέση (2.9) δίνει συγκρίσιμα αποτελέσματα με το πιο πολύπλοκο αριθμητικό μοντέλο θραυστομηχανικής, στη συνέχεια για την ανάδρομη ανάλυση πραγματικών δεδομένων χρησιμοποιείται η προσέγγιση της αναλυτικής σχέσης (μοντέλου).

Κεφάλαιο 4. Εφαρμογή του μοντέλου στην διάνοιξη σηράγγων με TBM

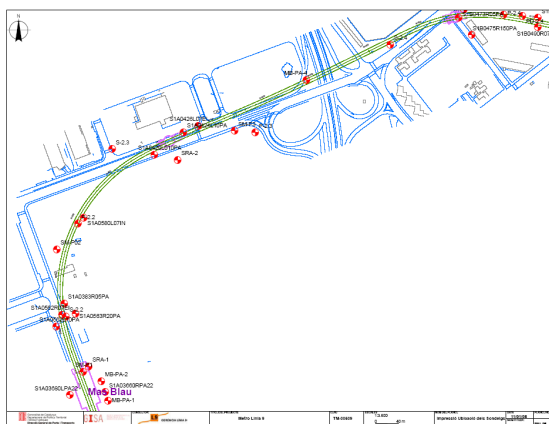
4.1. Σήραγγα σταθμού Mas Blau της γραμμής 9

4.1.1. Εισαγωγή

Η σήραγγα της γραμμής L9 του μετρό της Βαρκελώνης ανήκει στα αναπτυξιακά έργα υποδομής που συνδέει την Βαρκελώνη με την Μπανταλόνα και την Santa Coloma του Gramenet στα ανατολικά και με την Zona Franca και το αεροδρόμιο στο Prat στα δυτικά με διαδρομή που ξεπερνάει τα 49 km. Το τρίτο TBM ξεκίνησε να διατρήει της 26 Μαΐου, 2006 τη σήραγγα μεταξύ των μελλοντικών σταθμών Fira και Parc Logistic. Η διαδρομή του 1.3 km εκσκάφτηκε σε βάθος 10 και 15 m, η οποία θα ολοκληρωθεί σύντομα. Ενώ το ανατολικό άκρο της γραμμής από την Santa Coloma του Gramenet και την Μπανταλόνα αποτελείται από μία απλή σήραγγα διαμέτρου 12 m. Μόλις το TBM φτάσει στον σταθμό θα αποσυναρμολογηθεί και θα μεταφερθεί στο μελλοντικό σταθμό του Mas Blau δίπλα στο αεροδρόμιο του Prat. Η σήραγγα που ξεκινάει από το σταθμό του Mas Blau έχει την διατομή που φαίνεται στο Σχ. 4.1 και η διαδρομή που ακολουθεί παρουσιάζεται στο Σχ. 4.2.



Σχήμα 4.1: Διατομή της σήραγγας του τομέα Firs-αεροδρόμιο του Prat.



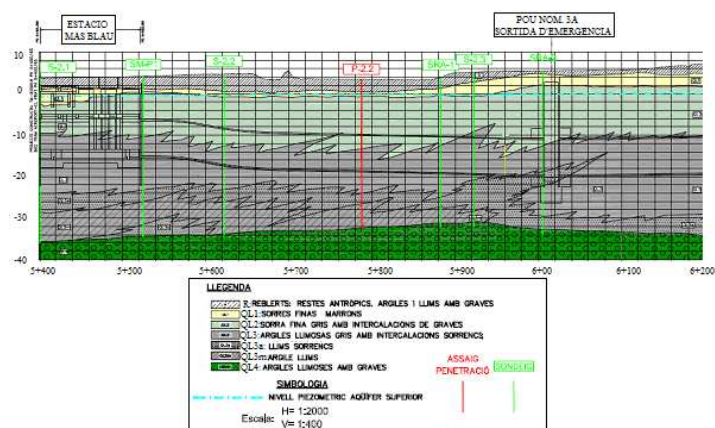
Σχήμα 4.2: Κάτοψη της σήραγγας του Mas-Blau.

4.1.2. Γεωλογικό μοντέλο

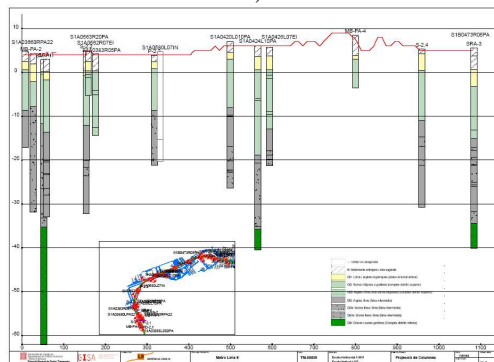
Η Βαρκελώνη βρίσκεται στην καλούμενη πεδιάδα της Βαρκελώνης η οποία οριοθετείται από το ρήγμα Collserola στα βορειοδυτικά, τη Μεσόγειο θάλασσα στα νοτιοανατολικά και τα ποτάμια Besòs και Llobregat στα βορειοανατολικά και νοτιοδυτικά, αντιστοίχως. Η γραμμή L9 διαπερνάει κυρίως Παλαιοζωικούς και

Τριτογενείς σχηματισμούς, με υπερκείμενα τα νεότερα υλικά από την Τεταρτογενή και Πλειστόκαινη γεωλογική περίοδο. Με εξαίρεση τα δέλτα των ποταμών Besòs και Lobregat όπου υπάρχουν αλλοιύβιες αποθέσεις απ' το Πλειόκαινο. Για την κατασκευή του γεωλογικού μοντέλου στην περιοχή της σήραγγας του Mas Blau συγκεντρώθηκαν τα στοιχεία της τοπογραφίας της περιοχής, το σχεδιασμό της σήραγγας, τα γεωλογικά δεδομένα και τα γεωτεχνικά δεδομένα από τις γεωτρήσεις (Σχ. 4.3-4.4). Η γεωλογία της περιοχής απ' το νεότερο στο παλαιότερο είναι:

1. ο σχηματισμός των φερτών υλικών Debris (R),
2. ο σχηματισμός QL1 που αποτελείται από ιλυώδη άργιλο και ιλυώδη άμμο (CL-SM),
3. ο σχηματισμός QL2 αποτελείται από ιλυώδη και αργιλώδη άμμο με χαλίκια (SM-SC),
4. ο σχηματισμός QL3 αποτελείται από αργιλώδη ιλύ, ιλυώδη άργιλο και ιλυώδη άμμο (ML-CL,SM) και
5. ο σχηματισμός QL4 με την χαλικιώδη άμμο με ιλύ και άργιλο (SW)



α)



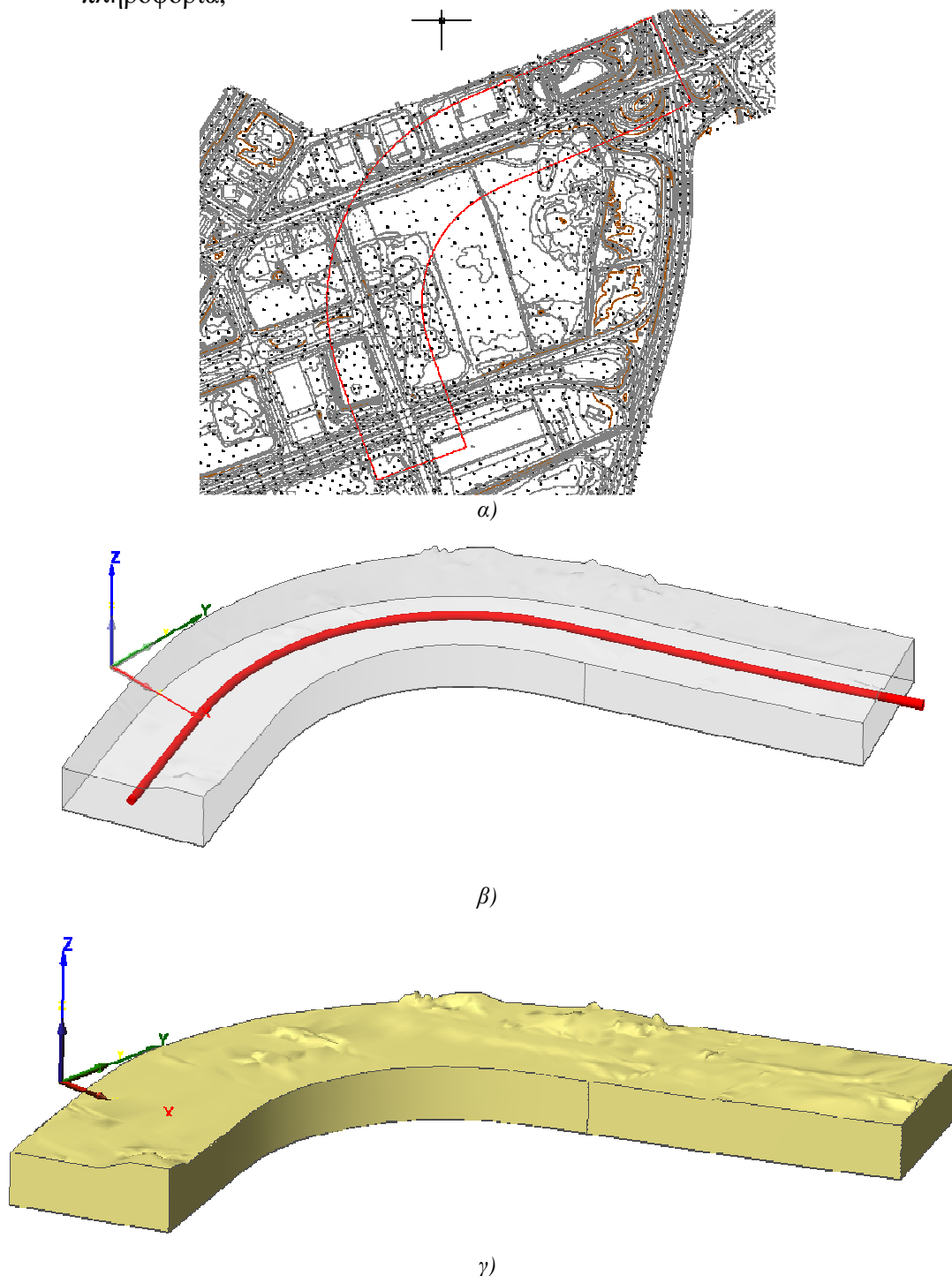
β)

Σχήμα 4.3: α) Αδρή γεωλογική μηκοτομή στην περιοχή της σήραγγας του MasBlau βασισμένη στα γεωλογικά δεδομένα και τις γεωτρήσεις β) οι γεωτρήσεις στην περιοχή της σήραγγας με τον γεωλογικό σχηματισμό που διαπερνά. (GISA).

Οι διεπιφάνειες μεταξύ των σχηματισμών προσδιορίζονται με την χρήση του γεωστατιστικού κώδικα *KRIGSTAT* με την χρήση της μεθόδου Kriging για την παρεμβολή του υψομέτρου z των διεπιφανειών που βρέθηκαν από τις 15 διαθέσιμες γεωτρήσεις (Σχ. 4.3β). Η διαδικασία που ακολουθείται περιλαμβάνει τα εξής βήματα (Stavropoulou et al., 2010):

- α) Το αρχικό μοντέλο δημιουργείται με βάση την τοπογραφία της περιοχής και την χάραξη της σήραγγας (Σχ. 4.4). Τα όρια των σχηματισμών του μοντέλου καθορίζονται να είναι γύρω από την σήραγγα, για την εξοικονόμηση

υπολογιστικού χρόνου παίρνοντας ταυτόχρονα και όλη την σημαντική πληροφορία,

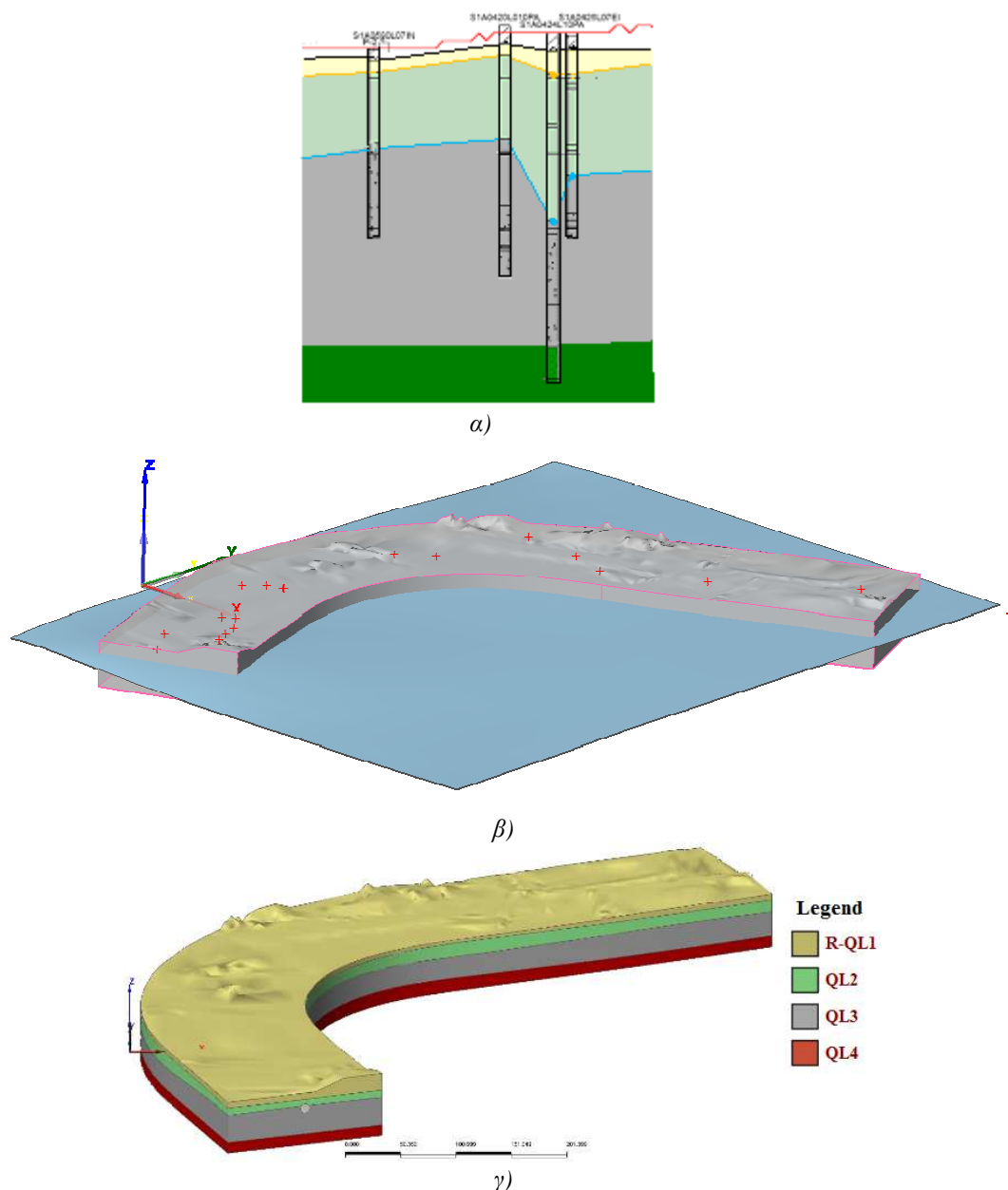


Σχήμα 4.4: Κατασκευή αρχικού τριδιάστατου μοντέλου α) τοπογραφία, β) διάταξη της σήραγγας και γ) τριδιάστατο μοντέλο.

β) υπολογίζονται τα διδιάστατα πειραματικά ημιβαριογράμματα του υψομέτρου z της κάθε διεπιφάνειας και προσαρμόζονται σε αυτά το θεωρητικό ημιβαριόγραμμα που περιγράφει την χωρική εξάρτηση του z ,

γ) με την μέθοδο του ordinary Kriging γίνεται παρεμβολή του υψομέτρου z από τις 15 γεωτρήσεις στο προκαθορισμένο δίκτυο σημείων (x,y) μέσα στο αρχικό μοντέλο,

δ) η κάθε διεπιφάνεια που προσδιορίστηκε με τον τρόπο αυτό χωρίζει το αρχικό μοντέλο σε δύο περιοχές δημιουργώντας έτσι το τελικό γεωλογικό μοντέλο (Σχ. 4.5)

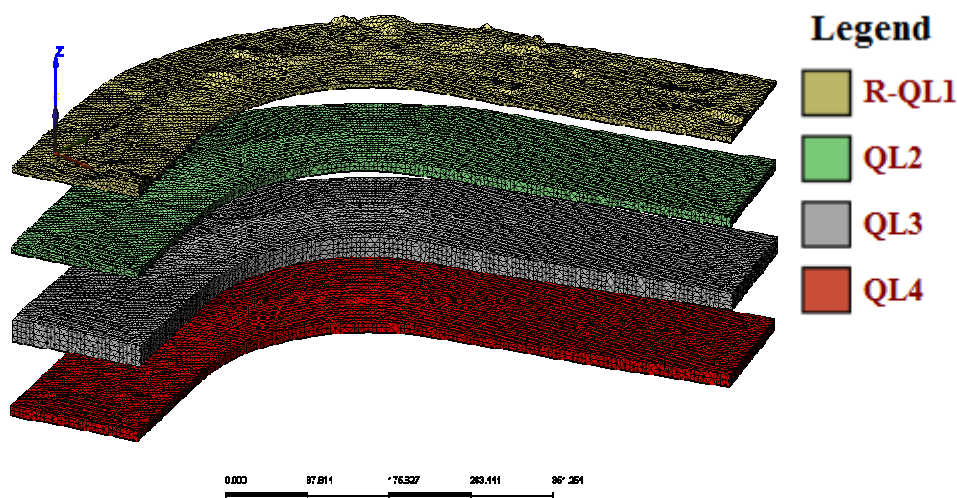


Σχήμα 4.5: α) σχηματικός διδιάστατος προσδιορισμός των διεπιφανειών από τις γεωτρήσεις, β) διαχωρισμός του αρχικού μοντέλου από την διεπιφάνεια του Kriging και γ) το τελικό γεωλογικό μοντέλο.

Εναλλακτικά οι σχηματισμοί θα μπορούσαν να προσδιορισθούν με την χρήση του Kriging στο πεδίο των δεικτών (Indicator Kriging) που έχει τα εξής μειονεκτήματα έναντι της εκτίμησης των διεπιφανειών των γεωλογικών στρωμάτων: α) λόγω του μικρού αριθμού των δεδομένων οδηγεί σε εκτιμήσεις με μεγάλη αβεβαιότητα, και β) η επίλυση γίνεται στις τρεις διαστάσεις αυξάνοντας την πολυπλοκότητα του συστήματος Kriging.

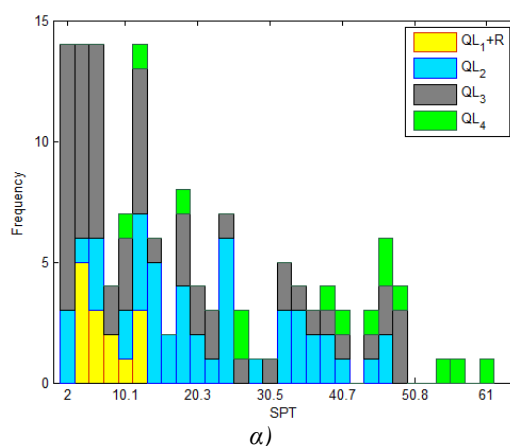
4.1.3. Κατασκευή γεωτεχνικού μοντέλου

Στην συνέχεια όπως φαίνεται στο Σχ. 4.6 το γεωλογικό μοντέλο διακριτοποιείται με τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία που σχηματίστηκαν με την χρήση του αλγορίθμου πεπερασμένων στοιχείων *MIDAS™* (en.midasuser.com).

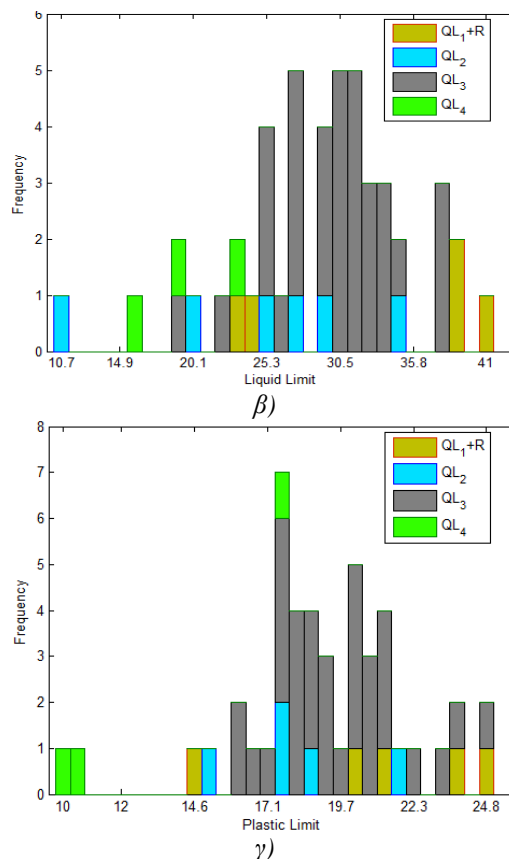


Σχήμα 4.6: Διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία του γεωλογικού μοντέλου.

Στους κόμβους του κάθε τετραεδρικού στοιχείου εκτός από την γεωλογική πληροφορία χρειάζεται να δοθούν και οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, όπως είναι η συνοχή, η γωνία εσωτερικής τριβής κ.α. Το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς της σήραγγας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι διαθέσιμες 140 μετρήσεις του αριθμού χτύπων από την τυποποιημένη δοκιμή διεισδύσεως N_{SPT} . Επίσης άλλες διαθέσιμες μετρήσεις που είναι διαθέσιμες είναι: 90 μετρήσεις των ορίων Atterberg (LL και PL) και 19 πειραματικές μετρήσεις της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής. Τα πειραματικά ιστογράμματα των μετρήσεων σε κάθε γεωλογικό σχηματισμό ξεχωριστά παρουσιάζονται στα Σχ. 4.7 α-γ.



α)

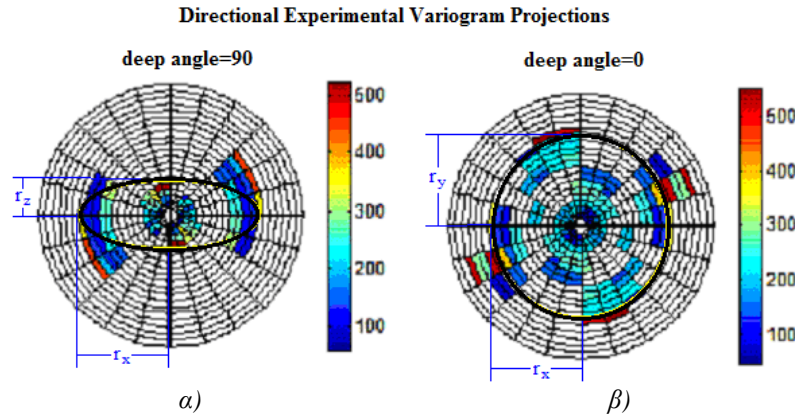


Σχήμα 4.7: Ιστογράμματα των μετρήσεων: α) N_{SPT} , β) LL και γ) PL , για τους 4 ξεχωριστούς σχηματισμούς.

Στην συνέχεια γίνεται ο προσδιορισμός του ημιβαριογράμματος της μεταβλητής N_{SPT} όπου είναι διαθέσιμες και οι πιο πολλές μετρήσεις. Για την εξέταση της πιθανής ανισοτροπίας γίνεται ο υπολογισμός του πειραματικού ημιβαριογράμματος ως συνάρτηση της απόστασης και της διεύθυνσης σύμφωνα με την εξίσωση ([Journal & Huijbregts, 1978](#)):

$$\hat{r}(r, \theta) = \frac{1}{2N(r, \theta)} \sum_1^{N(r, \theta)} (V(x) - V(x + r(\theta)))^2 \quad (4.1)$$

Επειδή οι γεωτρήσεις δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένες είναι αναγκαίο να δοθεί μια ανοχή στην απόσταση dr και την γωνία $d\theta$ για την εύρεση περισσότερων ζευγών $N(r \pm dr, \theta \pm d\theta)$. Έτσι, στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν οι εξής ανοχές $dr = 5m$ και $d\theta = \pi / 4$ με μέγιστο άνοιγμα $\max(r \cdot d\theta) = 15m$. Η ανισοτροπία προσδιορίζεται με την χρήση των πολικών διαγραμμάτων σε δυο διαφορετικά επίπεδα: Ι) το οριζόντιο Oxy και ΙΙ) το κατακόρυφο Oxz .



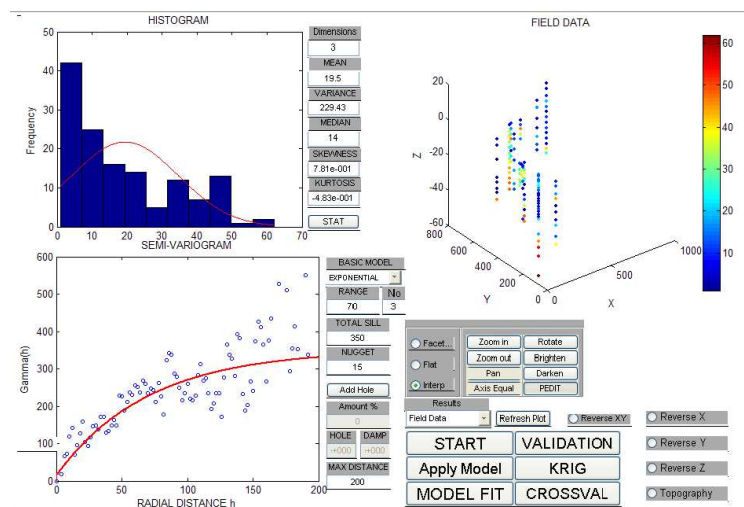
Σχήμα 4.8: Γεωμετρική ανισοτροπία στο α) κατακόρυφο επίπεδο και β) στο οριζόντιο επίπεδο.

Η κύρια ανισοτροπία εντοπίστηκε με βάση το Σχ. 4.8 στην κατακόρυφη διεύθυνση με λόγο ανισοτροπίας ($\lambda_{xz}=0.35$), ενώ στο οριζόντιο επίπεδο τα δεδομένα είναι ισότροπα ($\lambda_{xy}=1$). Η ανισοτροπία αυτή αντιμετωπίζεται ως γεωμετρική και προσεγγίζεται με ένα ελλειψοειδές με κύριους άξονες (r_x , r_y , r_z). Μετατρέποντας το ελλειψοειδές σε σφαίρα, το γεωμετρικά ανισότροπο ημιβαριόγραμμα μετασχηματίζεται σε ένα ισοδύναμο ισότροπο σύμφωνα με τον μετασχηματισμό:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\lambda_{xy} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\lambda_{xz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Στην συνέχεια αφού υπολογιστεί το ισοδύναμο ισότροπο ημιβαριόγραμμα χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες της εξ. (4.2), προσαρμόζεται ένα εκθετικό θεωρητικό ημιβαριόγραμμα με τρεις παραμέτρους α) την τιμή που προσεγγίζει το ημιβαριόγραμμα σε μεγάλες αποστάσεις (sill) και είναι $S = 350$, β) το μήκος κλίμακας l , που προσδιορίζει σε ποιά απόσταση το ημιβαριόγραμμα πρακτικά παίρνει την μέγιστη τιμή του $3l = 210$ και γ) το φαινόμενο κόκκου που είναι η ασυνέχεια στην αρχή των αξόνων, $S_o = 15$.

$$\gamma(h) = (S - S_o) \cdot (1 - e^{-h/l}) + S_o \quad (4.3)$$



Σχήμα 4.9: Παράθυρο του κώδικα KRIGSTAT (Stavropoulou et al., 2007) με το ιστόγραμμα (πάνω αριστερά), την θέση των μετρήσεων στις γεωτρήσεις (πάνω δεξιά) και το ισοδύναμο ισότροπο ημιβαριόγραμμα του αριθμού χτυπημάτων N_{SPT} .

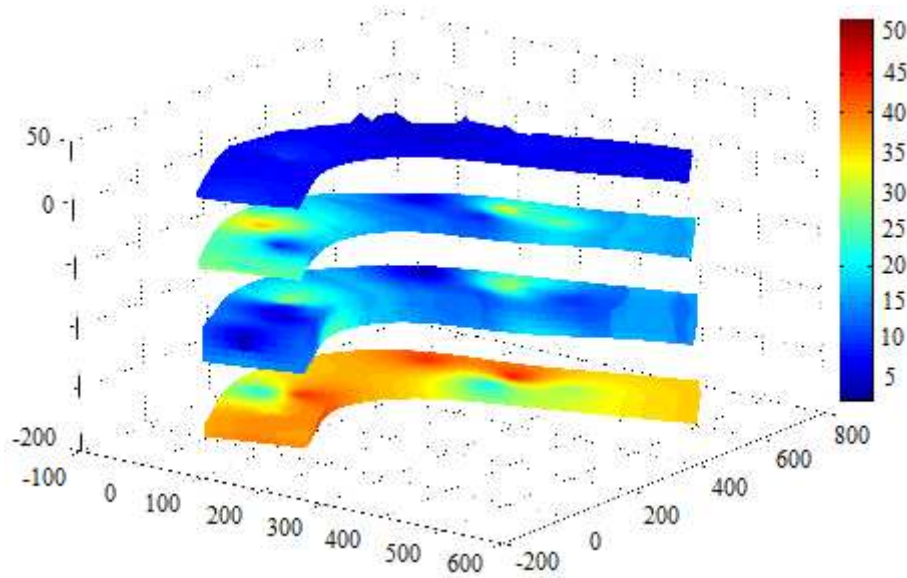
Στο επόμενο βήμα γίνεται παρεμβολή στο κέντρο των τετραεδρικών στοιχείων του τριδιάστατου διακριτοποιημένου γεωλογικού μοντέλου με την χρήση των αντίστοιχων μετρήσεων από τις γεωτρήσεις για κάθε γεωλογικό σχηματισμό ξεχωριστά. Για το λόγο αυτό γίνεται η χρήση του Kriging που θεωρείται ως ο Βέλτιστος Αμερόληπτος Γραμμικός Εκτιμητής (Best Linear Unbiased Estimator) για τυχαίες συναρτήσεις. Στην συγκεκριμένη περίπτωση έγινε η χρήση του κανονικού Kriging (Ordinary-Kriging) όπου η μέση τιμή είναι άγνωστη αλλά θεωρείται σταθερή στο πεδίο έρευνας. Η εξασφάλιση της αμεροληψίας στην περίπτωση αυτή εξασφαλίζεται με την επίλυση της [εξ. \(4.4\)](#), όπου ν ο πολλαπλασιαστής του Lagrange ([Clark, 1977](#), [Journel & Huijbregts, 1978](#), [Deutsch & Journel, 1992](#), [Kitanidis, 1997](#)).

$$\begin{cases} -\gamma(\|s_o - s_j\|) = -\sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot \gamma(\|s_i - s_j\|) + \nu, & j=1..N \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (4.4)$$

Η εκτιμήσεις του κανονικού *Kriging* με τους συντελεστές βάρους λ_i από την επίλυση της [εξ. \(4.4\)](#) δίδεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \hat{Y}(s_o) &= \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot Y(s_i) \\ \hat{\sigma}_Y^2(s_o) &= \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot \gamma(\|s_o - s_i\|) - \nu \end{aligned} \quad (4.5)$$

Με βάση τα παραπάνω έγινε η εκτίμηση του αριθμού χτυπημάτων N_{SPT} , στους κόμβους του τριδιάστατου μοντέλου, για κάθε γεωλογικό σχηματισμό ξεχωριστά με τα αποτελέσματα να φαίνονται στο [Σχ. 4.10](#).



Σχήμα 4.10: Εκτίμηση N_{SPT} .

4.1.4. Υπολογισμός λειτουργικών παραμέτρων του TBM

Το μηχάνημα που χρησιμοποιείται είναι με ασπίδα και χρησιμοποιεί εδαφικό πολφό (earth paste) υπό πίεση εντός του θαλάμου για την εξισορρόπηση της γεωστατικής πίεσης (εδαφικής και υδροστατικής) που ασκείται επί του μετώπου (Earth Pressure Balanced)

και έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία Herrenknecht. Τα χαρακτηριστικά του φαίνονται στον [Πιν. 4.1](#).

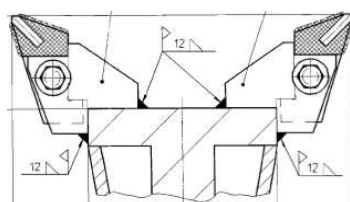
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά του TBM

| | |
|---------------------------|----------|
| Εξωτερική διάμετρος | 9.4 m |
| Εσωτερική διάμετρος | 8.43 m |
| Μήκος | 95 m |
| Βάρος | 1100 ton |
| Συνολική Ισχύς | 6000 kW |
| Ισχύς κοπτικής κεφαλής | 3600 kW |
| Πάχος δακτυλίου επένδυσης | 32 cm |
| Μήκος δακτυλίου επένδυσης | 1.8 m |

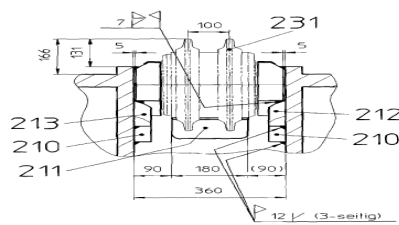
Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν οι καταγραφές (αριθμός δακτυλίου επένδυσης, ώση, η ροπή στρέψης, η ταχύτητα περιστροφής κ.α.) που συγκεντρώθηκαν κατά την διάρκεια της εκσκαφής μεταξύ των χλμ θέσεων (chainage) από +5522 έως και +6002 της σήραγγας, όπως αυτά δόθηκαν από τη [GISA](#). Στην κοπτική κεφαλή του TBM είναι προσαρμοσμένοι κοπτικοί δίσκοι που αποτελούν τον κύριο μηχανισμό θραύσης των συναντούμενων σκληρών γεωϋλικών και συρτικά αιχμηρά άκρα που εκσκάπτουν τους μαλακούς εδαφικούς σχηματισμούς. Επειδή μεταξύ των ανωτέρω χλμ θέσεων συναντήθηκαν οι μαλακοί εδαφικοί σχηματισμοί **QL2-QL3** όλοι οι εν συνεχεία υπολογισμοί έγιναν με βάση τα αιχμηρά κοπτικά άκρα ([Σχ. 4.11β](#)).



α)



β)



γ)

Σχήμα 4.11: Γεωμετρία: (α) της κοπτικής κεφαλής, (β) των διδυμων συρτικών κοπτικών και (γ) των κοπτικών δίσκων.

Ο υπολογισμός της ειδικής ενέργειας κατά την προχώρηση του TBM γίνεται με την χρήση των [εξ. \(1.1\)-\(1.2\)](#) και αποδεικνύεται ισοδύναμος ([εξ. \(4.6\)](#)).

$$\left. \begin{aligned} SE_2 &= \frac{n \cdot P}{\dot{V}} = \frac{n \cdot T \cdot \omega}{\pi \cdot R^2 \cdot PR} \\ F_i^c &\approx \frac{T}{2 \cdot a \cdot R \cdot N}, a = \frac{1}{4 \cdot n} \end{aligned} \right\} \Rightarrow SE_2 = \frac{F_i^c}{(R/N) \cdot (2 \cdot \pi \cdot PR / \omega)} = \frac{F_i^c}{S \cdot p} = SE_1 \quad (4.6)$$

όπου:

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot rpm$ η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής

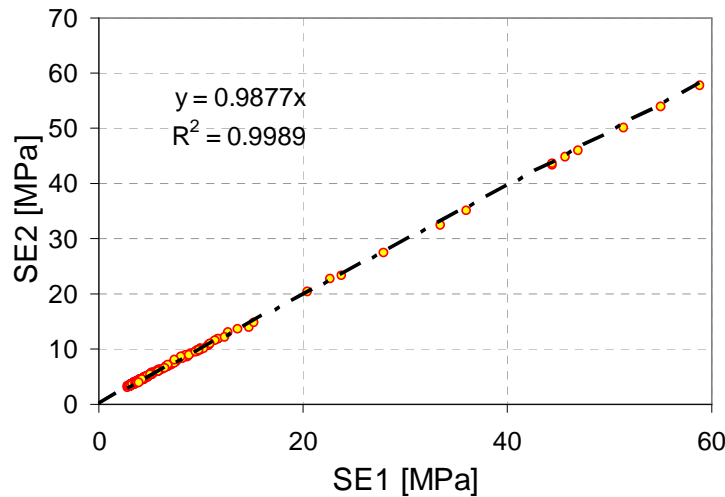
PR ο ρυθμός προχώρησης του TBM

$F_i^c = F_s^c$ η συρτική δύναμη κοπής

S η μέση απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπών ανά περιστροφή και

p το βάθος κοπής ανά περιστροφή

Στο Σχ. 4.12 που ακολουθεί παρουσιάζεται η συσχέτιση των δύο διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού της ειδικής ενέργειας για την περίπτωση που ο συντελεστής μεταφοράς της ισχύος στην κεφαλή $n=0.8$ και επομένως με σταθερά $a=0.3$.

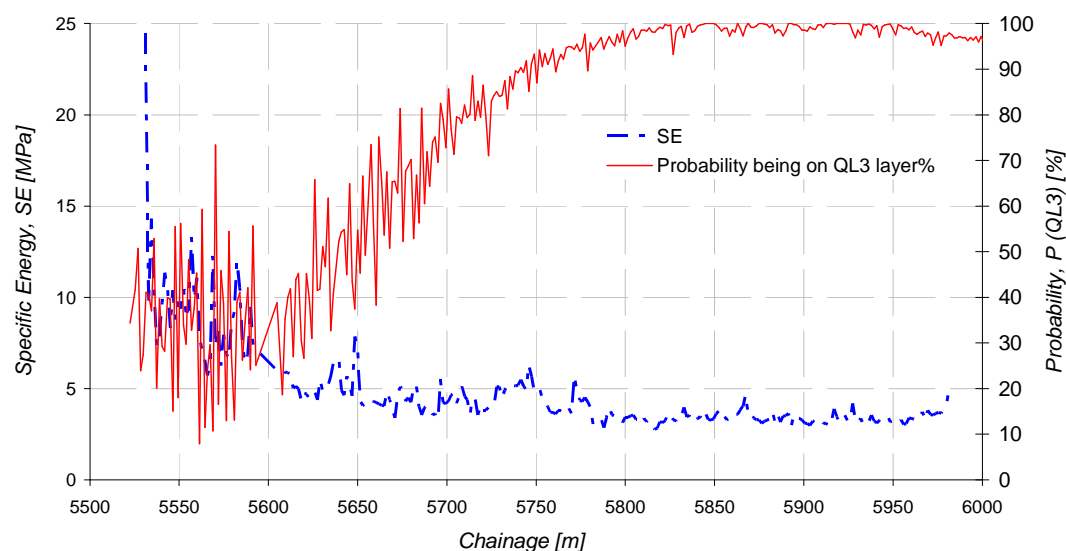


Σχήμα 4.12: Συσχέτιση υπολογισμού ειδικής ενέργειας από την ισχύ και από την μέση δύναμη κοπής στα συρτικά κοπτικά.

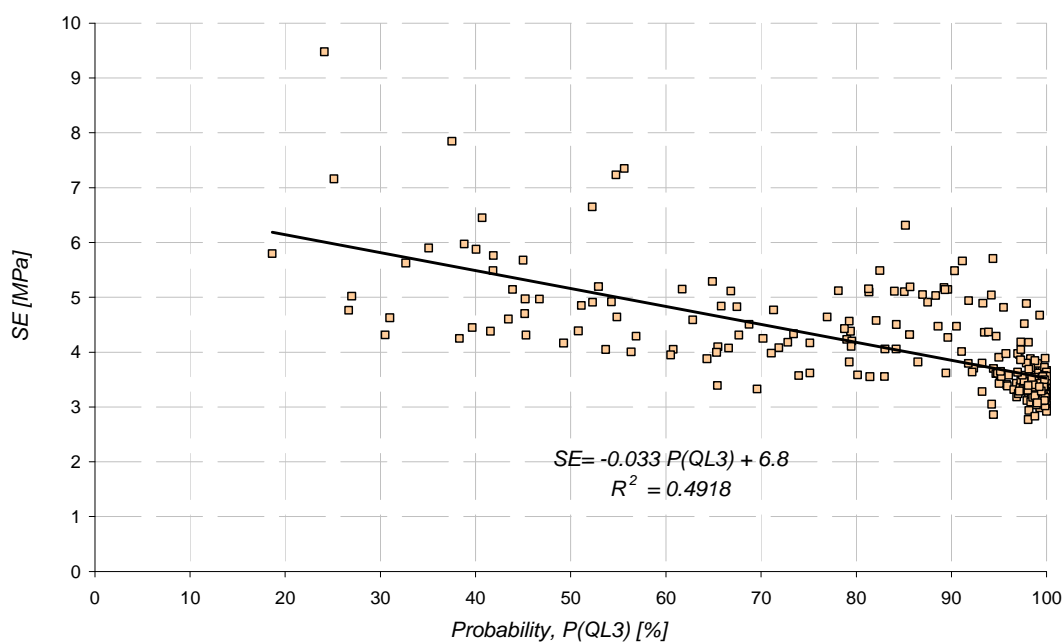
Για την συσχέτιση της ειδικής ενέργειας με τον σχηματισμό που εκσκάπτεται ($QL2/QL3$), γίνεται η χρήση του ογκικού Kriging (με διαστάσεις $1.8 \times 9.4 \times 9.4m$ και διακριτοποίηση $3 \times 3 \times 3$) στο πεδίο των δεικτών (Indicator Kriging).

$$I(x, y, z) = \begin{cases} 1, & (x, y, z) \in QL3 \\ 0, & (x, y, z) \notin QL3 \end{cases} \quad (4.7)$$

Το αποτέλεσμα που προκύπτει εκφράζει την πιθανότητα $P(QL3)$ η σήραγγα να διέρχεται από τον σχηματισμό $QL3$ ή το ποσοστό του $QL3$ στον συνολικό εκσκαπτόμενο όγκο όπως φαίνεται στο Σχ. 4.13α. Όπως επίσης φαίνεται στο Σχ. 4.13β αυτή η πιθανότητα συσχετίζεται γραμμικά με την ειδική ενέργεια κοπής του TBM και μάλιστα με φθίνουσα μορφή (συντελεστή συσχέτισης $\rho=-0.7$) (Stavropoulou et al., 2010).



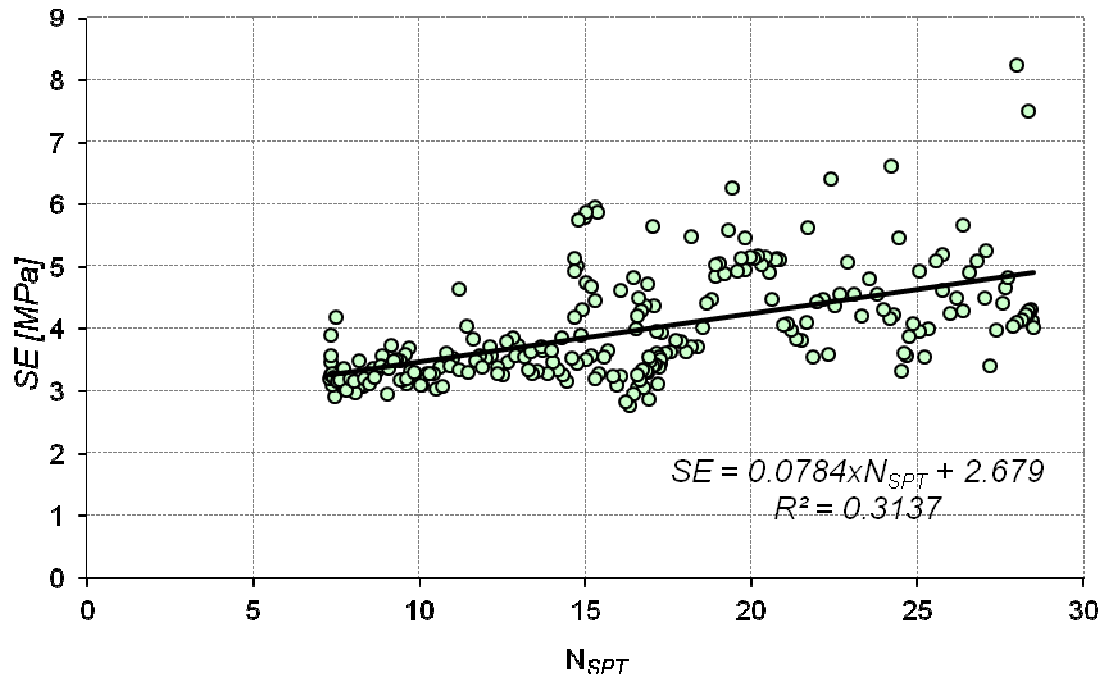
α)



β)

Σχήμα 4.13: Συσχέτιση ειδικής ενέργειας με τον γεωλογικό σχηματισμό.

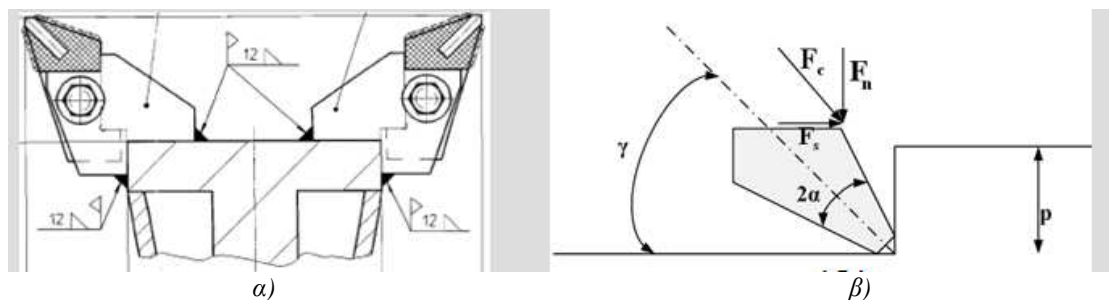
Σε επόμενο στάδιο βρέθηκε η γραμμική συσχέτιση της ειδικής ενέργειας με βάση τις καταγραφές του μηχανήματος TBM με τον δείκτη του αριθμού των χτυπημάτων N_{SPT} που εκτιμήθηκε στην προηγούμενη εν. (4.1.3) από τις διαθέσιμες γεωτρήσεις στην περιοχή μελέτης (Σχ. 4.14). Σημειώνεται ότι τα δεδομένα να έχουν έντονες διακυμάνσεις που οφείλονται στην γεωλογία (εναλλαγή QL2-QL3) και στην αλλαγή των παραμέτρων λειτουργίας (βάθος κοπής) του μηχανήματος, με αποτέλεσμα να δίνουν μικρό συντελεστή συσχέτισης ($\rho=0.56$).

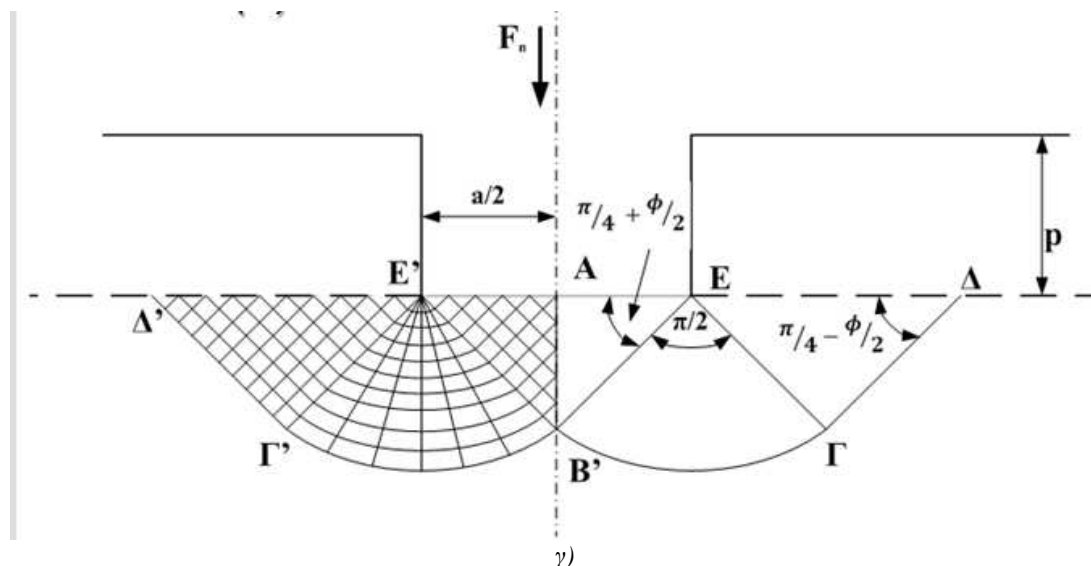


Σχήμα 4.14: Συσχέτιση ειδικής ενέργειας με τον αριθμό χτυπημάτων N_{SPT} .

Η ανωτέρω εμπειρική σχέση μεταξύ της SE και του δείκτη N_{SPT} μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάτρησης εντός των δεδομένων γεωλογικών σχηματισμών με βάση τις δοκιμές N_{SPT} εντός γεωτρήσεων.

Η άλλη προσέγγιση της ανάλυσης των διαθέσιμων δεδομένων είναι η θεώρηση της πλαστικής διαρροής του εδάφους του μετώπου από την δράση των συρτικών κοπτικών εργαλείων όπως φαίνεται στο [Σχ. 4.15α-γ](#). Σ' αυτήν την περίπτωση όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα μπορεί να εφαρμοσθεί το μοντέλο διαρροής με τη βοήθεια των γραμμών ολίσθησης που παρουσιάστηκε στην [Παράγραφο 2.3](#) και να λύσουμε ως προς την συνοχή του εδάφους. Το μοντέλο διαρροής κάτω από το κοπτικό εργαλείο που έχει διεισδύσει σε βάθος p και θεωρήθηκε στην παρούσα μελέτη φαίνεται στο [Σχ. 4.15γ](#).





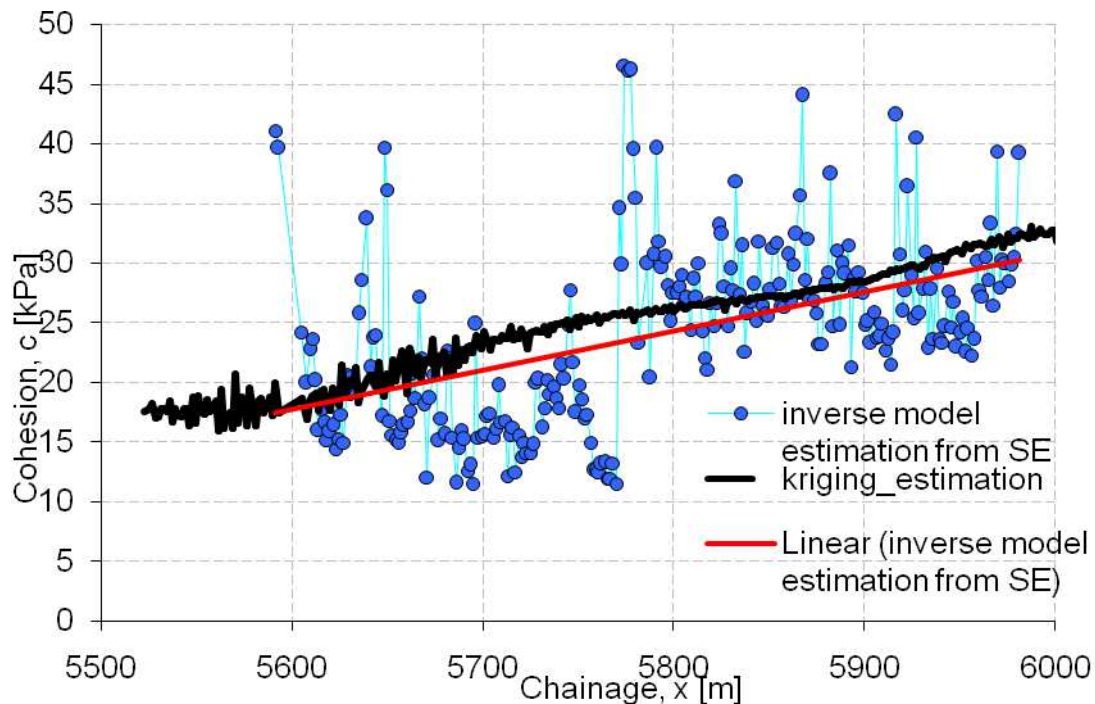
Σχήμα 4.15: α) σχεδιασμός συρτικών κοπτικών άκρων, β) πλάγια όψη κοπτικού άκρου, και γ) πρόσθια όψη μηχανισμού γραμμών ολίσθησης για διεξόδου του κοπτικού p .

Η συνοχή υπολογίζεται από την ειδική ενέργεια και την θεωρία των γραμμών ολίσθησης, η λύση που βρίσκεται σε αυτήν την περίπτωση είναι η ακόλουθη:

$$c = \frac{1}{8} \cdot SE \cdot \tan \rho \cdot \frac{1 - \sin \phi}{\cos \phi} \cdot \frac{\tan \phi \cdot \cot \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \cdot \cot \alpha}{e^{\pi \cdot \tan \phi} - \cot^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)} \cdot \frac{S}{p} \quad (4.8)$$

όπου $\tan \rho$ είναι η κλίση της ευθείας $F_n - F_s$ και κυμαίνεται από 0.2 έως 0.5 ανάλογα με τον γεωλογικό σχηματισμό (QL2 και QL3), και οι άλλες ανεξάρτητες παράμετροι έχουν εξηγηθεί προηγουμένως.

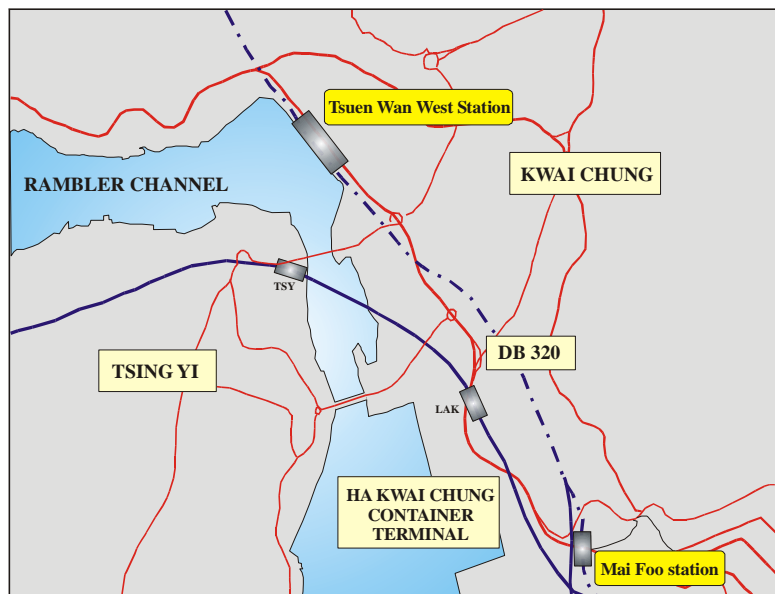
Στο [Σχ. 4.16](#) φαίνονται οι τιμές της συνοχής που προέκυψαν από την SE κατά μήκος της σήραγγας (με κύκλους). Η κατανομή αυτή της συνοχής θα πρέπει να συγκριθεί με τις τιμές της συνοχής που προέκυψαν από δοκιμές τριαξονικής θλίψης και άμεσης διάτμησης σε πυρήνες που εξήχθησαν από γεωτρήσεις και κατόπιν παρεβλήθησαν με τη μέθοδο Kriging κατά μήκος της σήραγγας. Η παρεμβολή της συνοχής με τη μέθοδο του συνήθους ή κανονικού Kriging φαίνεται με συνεχή γραμμή (μαύρη) στο [Σχ. 4.16](#). Η σύγκριση των δύο προσεγγίσεων μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η ειδική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της συνοχής του εδάφους.



Σχήμα 4.16: Κατανομή της συνοχής του εδάφους κατά μήκος της σήραγγας.

4.2. Δίδυμες σήραγγες στο Χονγκ – Κονγκ

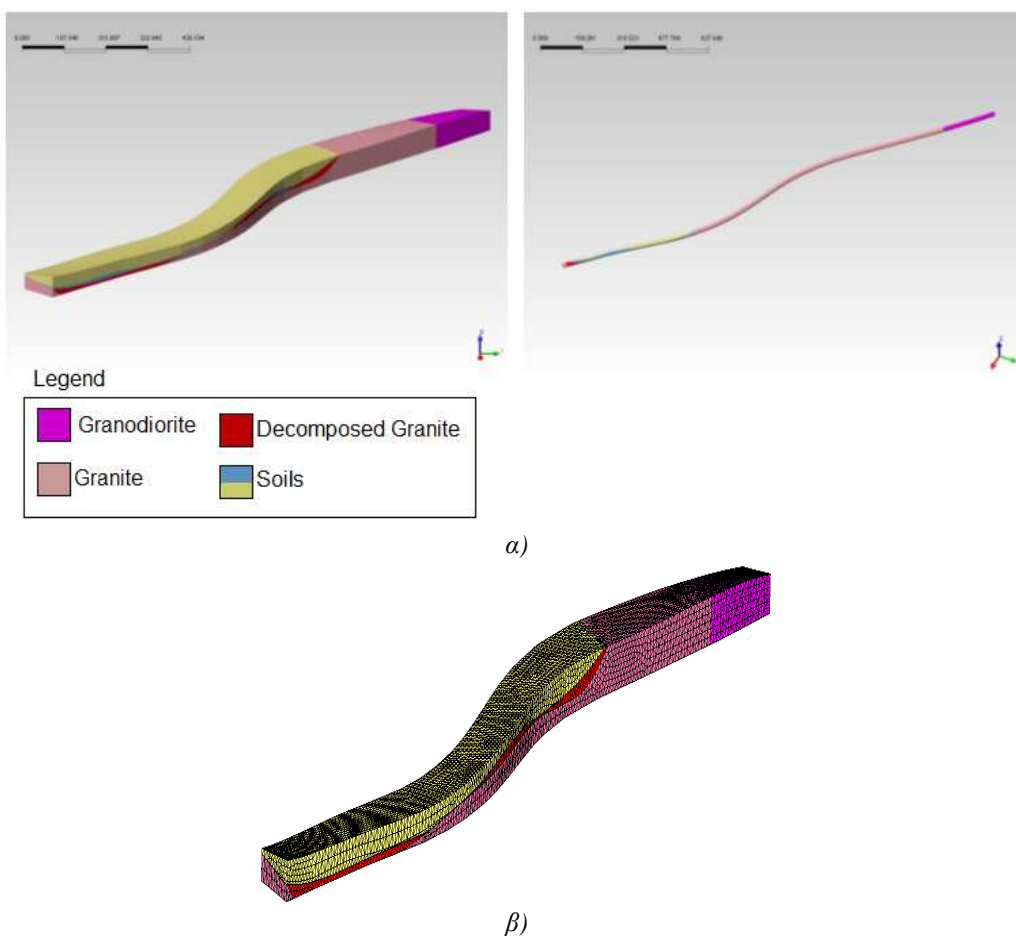
Η επόμενη περίπτωση αφορά το έργο **DB320** το οποίο αποτελεί τμήμα του δυτικού σιδηρόδρομου που ενώνει τον σταθμό Mai Foo και τον σταθμό Tsuen Wan στο Χονγκ – Κονγκ. Η διάμετρος των δίδυμων σηράγγων είναι 8.75m και το μήκος της σήραγγας είναι 1840 m.



Σχήμα 4.17: Χάρτης της περιοχής της σήραγγας του Χονγκ – Κονγκ ([BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS](#)).

4.2.1. Γεωλογία

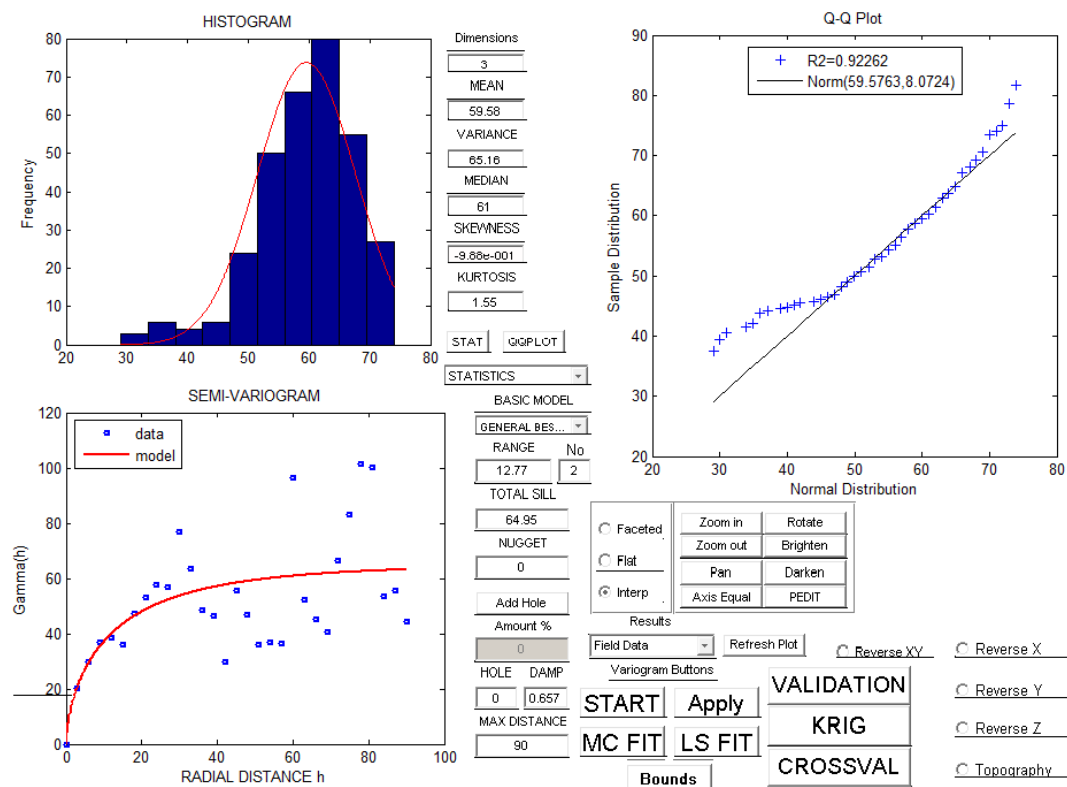
Το αδρό γεωλογικό μοντέλο της σήραγγας του Hong Kong, μαζί με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τις υπάρχουσες γεωτρήσεις και το μέτωπο της σήραγγας, συνδυάστηκαν για την κατασκευή του τριδιάστατου γεωτεχνικού μοντέλου. Για την κατασκευή του διακριτοποιημένου γεωλογικού μοντέλου (**Discretized Solid Geological Model**, Σχ. 4.18), στην περιοχή γύρω από την σήραγγα, θεωρήθηκαν τέσσερις ξεχωριστοί γεωλογικοί σχηματισμοί: α) ο γρανοδιορίτης (με μωβ χρώμα), β) ο γρανίτης (με ροζ χρώμα) γ) ο πλήρως αποσαθρωμένος γρανίτης (με κόκκινο χρώμα) και δ) οι εδαφικοί σχηματισμοί (με γαλάζιο – κίτρινο χρώμα).



Σχήμα 4.18: α) Γεωλογικό μοντέλο στην περιοχή γύρω και κατά μήκος της σήραγγας του Χονγκ – Κονγκ και β) διακριτοποιημένο γεωλογικό μοντέλο (*MIDAS^{IM}*).

4.2.2. Γεωστατιστική επεξεργασία RMR

Ο δείκτης ποιότητας της βραχομάζας RMR στην περιοχή του Χονγκ – Κονγκ είναι διαθέσιμος είτε από γεωτρήσεις (Σχ. 4.19) είτε από επί τόπου μετρήσεις στο μέτωπο της εκσκαφής. Η κατανομή των δεδομένων αυτών μαζί με τον έλεγχο κανονικότητας QQ-plot καθώς και η χωρική συσχέτιση του RMR παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα:



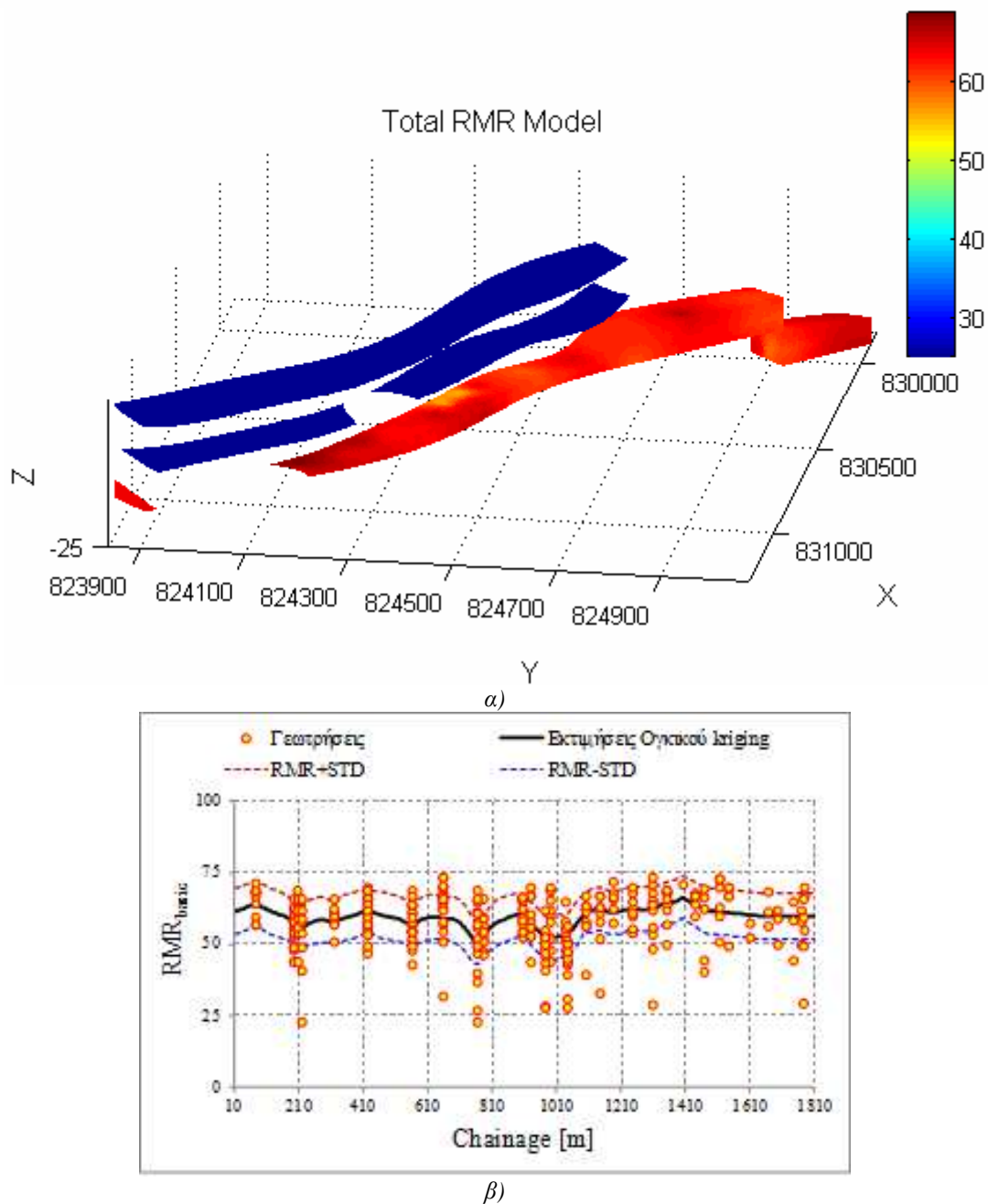
Σχήμα 4.19: Γεωστατιστική ανάλυση των δεδομένων RMR από τις διαθέσιμες γεωτρήσεις με βάση τον αλγόριθμο KRIGSTAT.

Για την εξέταση της χωρικής εξάρτησης των δεδομένων γίνεται η χρήση της γεωστατιστικής μεταβλητής του ημιβαριογράμματος, που υπολογίζεται από τα δεδομένα με βάση την εξ. (4.1). Το θεωρητικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για να προσεγγίζει καλύτερα το πειραματικό ημιβαριόγραμμα είναι το γενικό εκθετικό και περιγράφεται μαθηματικά από την ακόλουθη έκφραση:

$$\gamma(h) = (S - S_0) \cdot \left(1 - \exp\left(-\left(h/l\right)^n\right)\right) + S_0 \quad (4.9)$$

όπου n ο εκθέτης.

Με την χρήση της τεχνικής του σημειακού Kriging υπολογίζονται οι τιμές του RMR για τους βραχώδεις σχηματισμούς ενώ για τους εδαφικούς σχηματισμούς και τον τελείως αποσθρωμένο γρανίτη δίδεται η ελάχιστη αναμενόμενη τιμή του RMR για σκοπούς γραφικής αναπαράστασης (Σχ. 4.20).

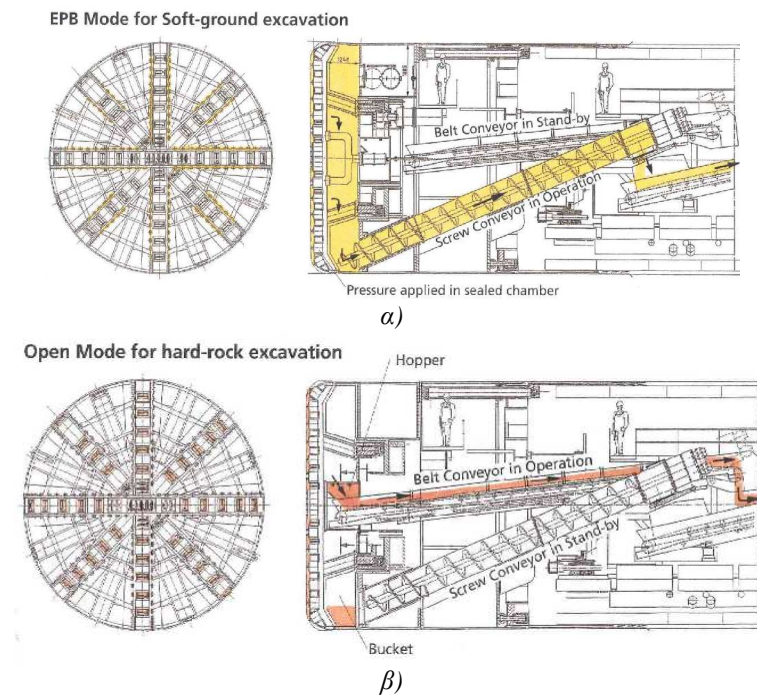


Σχήμα 4.20: Εκτίμηση του RMR: α) στο συνολικό μοντέλο, β) ογκικό Kriging κατά μήκος της σήραγγας.

4.2.3. Επεξεργασία καταγραφών TBM

Ο τύπος του TBM που χρησιμοποιήθηκε στις δίδυμες σήραγγες του Χονγκ Κονγκ είναι μικτού τύπου, με δυνατότητα εναλλαγής τρόπου λειτουργίας από ανοιχτού, για την εκσκαφή σε βραχώδεις συνεκτικούς σχηματισμούς με την χρήση (όταν χρειάζεται) πεπιεσμένου αέρα για την υποστήριξη του μετώπου, σε κλειστού τύπου με την χρήση πολφού EPB (Earth Pressure Balanced), για αποσαθρωμένους σχηματισμούς. Στην περίπτωση λειτουργίας ως EPB για την υποστήριξη του μετώπου γίνεται με την χρήση πολφού στον θάλαμο που βρίσκεται πίσω απ' την κοπτική κεφαλή, τα θραύσματα απομακρύνονται με την χρήση του κοχλιωτού μεταφορέα και από εκεί στο διαχωριστήρα (Σχ. 4.21α). Στην περίπτωση λειτουργίας ως ανοιχτού τύπου τότε το TBM λειτουργεί ως ένα συμβατικό TBM για σκληρούς σχηματισμούς.

Κατά την λειτουργία αυτή το υλικό απομακρύνεται μέσω της μεταφορικής ταινίας η οποία βρίσκεται στο μέσο του TBM (Σχ. 4.21β).

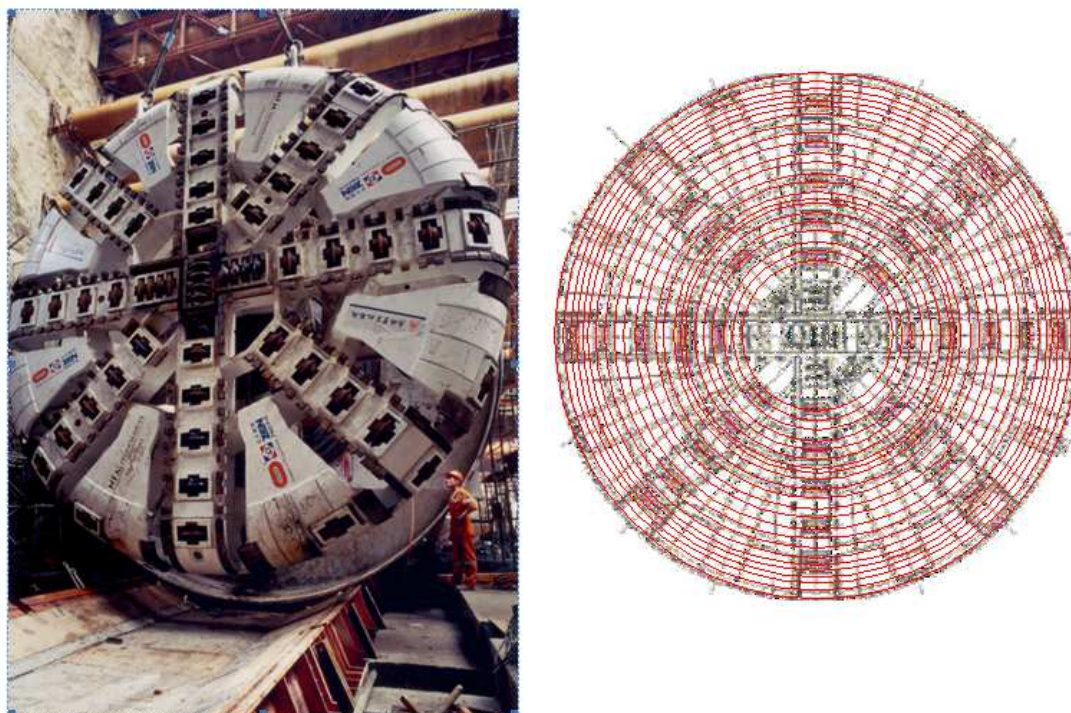


Σχήμα 4.21: Λειτουργία TBM ως: (α) EPB, (β) ανοιχτού τύπου ([BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS](#))

Στον Πίν. 4.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται η εναλλαγή λειτουργίας του TBM κατά μήκος (chainage) της σήραγγας:

Πίνακας 4.2: Λειτουργία TBM κατά μήκος της σήραγγας.

| Chainage [m] | | Λειτουργία |
|--------------|------|----------------|
| από | έως | |
| 0 | 600 | Open |
| 600 | 800 | Air compressed |
| 800 | 1260 | Open |
| 1260 | 1300 | Air compressed |
| 1300 | 1341 | EPB |
| 1341 | 1420 | Air compressed |
| 1420 | 1820 | EPB |



Σχήμα 4.22: Γεωμετρία κοπτικής κεφαλής του TBM (αριστερά) και κυκλικές διαδρομές των κοπτικών δίσκων (δεξιά).

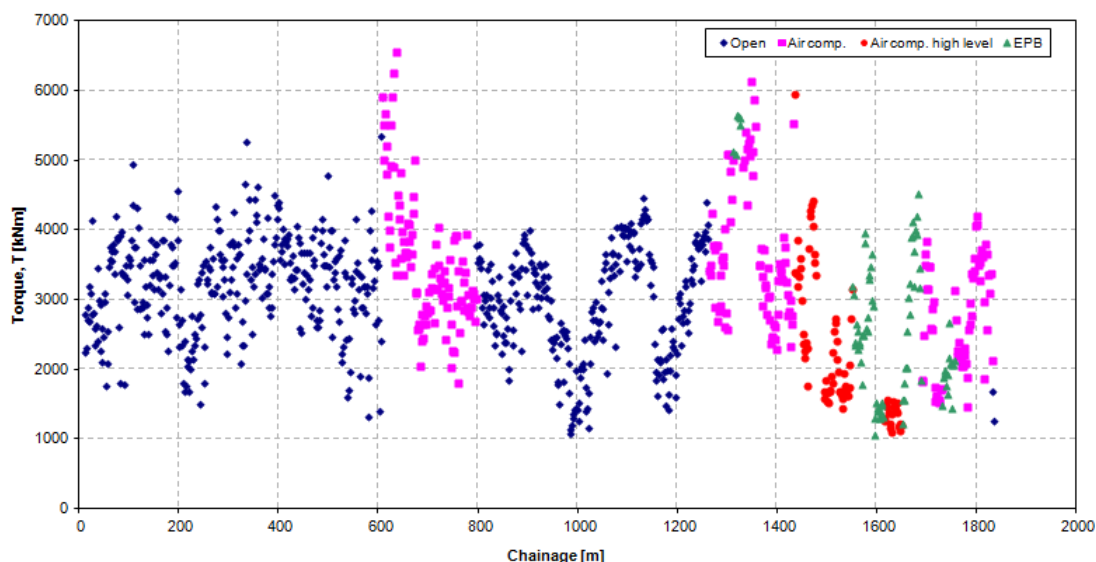
Η κοπή γίνεται με την χρήση κοπτικών δίσκων κατανεμημένων καθ' όλη την διατομή του TBM. Η μέση απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπών βρίσκεται με βάση τα ίχνη που αφήνουν οι κοπτικοί δίσκοι (Σχ. 4.22) και είναι 75mm. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι καταγραφές του TBM κατά την κοπή των πρώτων μέτρων της υπό μελέτη σήραγγας.

Πίνακας 4.3: Καταγραφές TBM

| Ring number | tmmc m | pushing F (tn) | torque kN m | ch speed rpm | ch power % | bm speed mm/min | penetration mm/rev | mode | Thrust kN | T/F [m] |
|-------------|-----------|-------------------|----------------|-----------------|---------------|--------------------|-----------------------|------|--------------|------------|
| 1 | 11.1 | 1036 | 2243 | 1.54 | | 4 | 2.597402597 | N/A | 10360 | 0.21651 |
| 2 | 12.9 | 1692 | 2796 | 1.54 | | 16 | 10.38961039 | Open | 16920 | 0.16525 |
| 3 | 14.7 | 1170 | 2300 | 1.54 | 15 | 12 | 7.792207792 | Open | 11700 | 0.19658 |
| 4 | 16.5 | 1200 | 2700 | 1.54 | 17 | 9 | 5.844155844 | Open | 12000 | 0.225 |
| 5 | 18.3 | 1560 | 2900 | 1.88 | 23 | 20 | 10.63829787 | Open | 15600 | 0.1859 |
| 6 | 20.1 | 1550 | 2680 | 1.88 | 24 | 22.5 | 11.96808511 | Open | 15500 | 0.1729 |
| 7 | 21.9 | 1780 | 3200 | 1.88 | 26 | 17 | 9.042553191 | Open | 17800 | 0.17978 |
| 8 | 23.7 | 1623 | 3093 | 1.88 | 26 | 18 | 9.574468085 | Open | 16230 | 0.19057 |
| 9 | 25.5 | 1748 | 4146 | 1.86 | 38 | 25 | 13.44086022 | Open | 17480 | 0.23719 |
| 10 | 27.3 | 1554 | 2790 | 1.88 | 23 | 13.5 | 7.180851084 | Open | 15540 | 0.17954 |
| 11 | 29.1 | 1570 | 2816 | 1.88 | | 14 | 7.446808511 | Open | 15700 | 0.17936 |
| 12 | 30.9 | 1734 | 2581.5 | 2.12 | | 17 | 8.018867925 | Open | 17340 | 0.14888 |
| 13 | 32.7 | 1640 | 2343 | 2.12 | 23 | 15 | 7.075471698 | Open | 16400 | 0.14287 |
| 14 | 34.5 | 1470 | 2624 | 2.12 | 23 | 16 | 7.547169811 | Open | 14700 | 0.1785 |
| 15 | 36.3 | 1504 | 3455 | 2.12 | 23 | 16 | 7.547169811 | Open | 15040 | 0.22972 |
| 16 | 38.1 | 1460 | 2400 | 2.12 | 24 | 18 | 8.490566038 | Open | 14600 | 0.16438 |
| 17 | 39.9 | 1480 | 3000 | 2.2 | 24 | 22 | 10 | Open | 14800 | 0.2027 |
| 18 | 41.7 | 1597 | 2927 | 2.2 | 24 | 18 | 8.181818182 | Open | 15970 | 0.18328 |

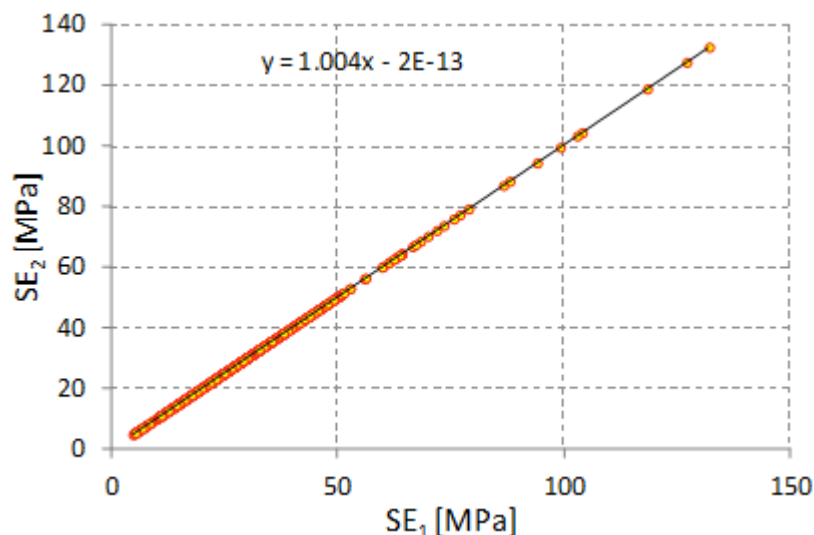
Για τον υπολογισμό της μέσης δύναμης κύλισης (F_r^c) χρησιμοποιείται η προσεγγιστική, εμπειρική εξ. (4.10) από την ροπή T (Σχ. 4.23), την διάμετρο D του TBM και τον αριθμό των δίσκων N .

$$F_r^c \approx \frac{T}{0.3 \cdot D \cdot N} \quad (4.10)$$



Σχήμα 4.23: Ροπή που ασκείται στην κοπτική κεφαλή σε συνάρτηση με τον τρόπο λειτουργίας του TBM και της θέσης κατά μήκος της σήραγγας.

Η ειδική ενέργεια υπολογίζεται με τις δύο μεθόδους (εξ. (1.1)-(1.2)) δίδοντας και στην περίπτωση αυτή ισοδύναμα αποτελέσματα (βλ. εξ. (4.6)).

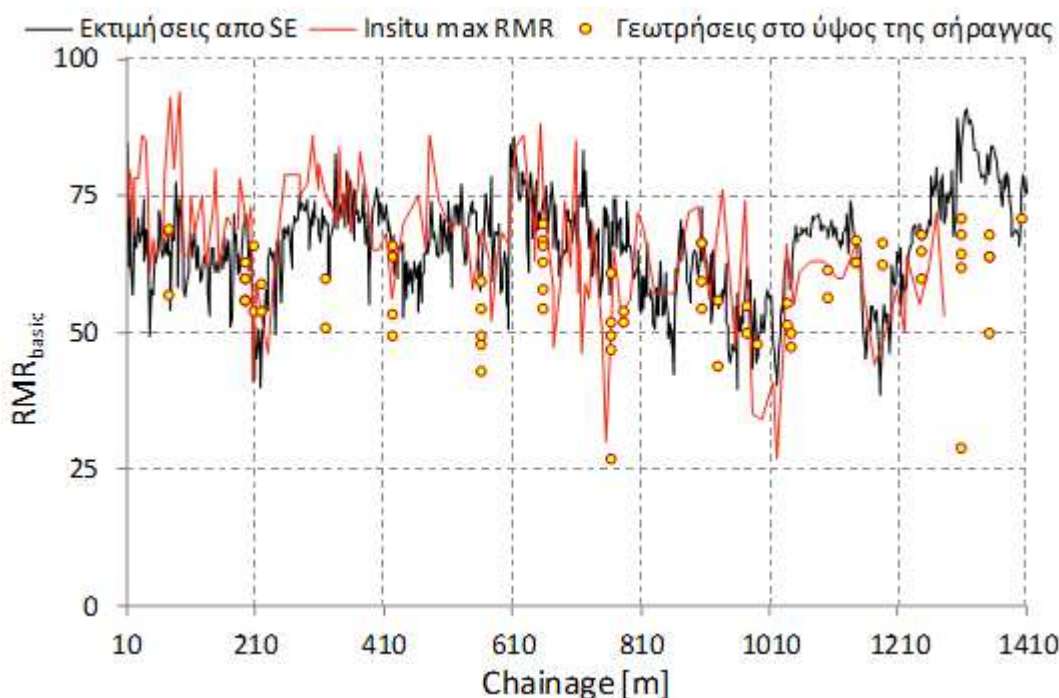


Σχήμα 4.24: Σύγκριση ειδικής ενέργειας κοπής με βάση την δύναμη κοπής και με βάση την ισχύ.

Η ειδική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ανάδρομο υπολογισμό των παραμέτρων αντοχής του πετρώματος που συναντάει το TBM κατά την διάρκεια της διάνοιξης της σήραγγας (Σχ. 4.25). Για την συγκεκριμένη σήραγγα βρέθηκε ότι το RMR συσχετίζεται με την ειδική ενέργεια με μία κλασματική σχέση όπως φαίνεται στην εξ. (4.11).

$$RMR_{\max} = 100 - \frac{1253.5}{SE + 10.4} \quad (4.11)$$

Αντιστρόφως, αν λύσουμε την εξ. (4.11) ως προς την SE, τότε μπορεί να προβλεφθεί η SE και συνεπώς η ταχύτητα διάτρησης με βάση το γεωστατιστικό μοντέλο του RMR.



Σχήμα 4.25: Σύγκριση εκτίμησης του RMR από την ειδική ενέργεια με τις επί τόπου αποτυπώσεις και με τις τιμές των γεωτρήσεων.

4.2.4. Σύγκριση των εκτιμήσεων της αντοχής της βραχομάζας από την SE του TBM και από την θεωρία μηχανικής της φθοράς

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκε εμπειρική σχέση μεταξύ των παραμέτρων RMR και SE . Καταδείχθηκε ότι αυτή η σχέση έχει μόνο δύο ελεύθερες παραμέτρους και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συνεχή αναβάθμιση του αρχικού γεωτεχνικού μοντέλου (ground model) με βάση τον δείκτη RMR , με τις εκτιμήσεις του SE από τις καταγραφές του TBM σύμφωνα με την ιδέα που απεικονίζεται στο Σχ. 1.4.

Κατόπιν, γίνεται προσπάθεια να εκτιμηθεί η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη της βραχομάζας στο μέτωπο της σήραγγας από την SE που υπολογίζεται από τις καταγραφές του TBM. Αυτό θα γίνει χρησιμοποιώντας την αναλυτική εξ. (2.9). Αυτή η προσέγγιση έχει ως σκοπό να καταδειχθεί πως μπορεί να γίνεται η αναβάθμιση του γεωτεχνικού μοντέλου από τον υπολογισμό της SE κατά την προχώρηση του TBM. Η αντιστροφή αυτής της εξίσωσης μας δίνει:

$$\frac{SE}{UCS_m} = CC \cdot f' \left(\frac{UCS_m}{UTS_m}, \alpha, \phi, \psi \right) \Leftrightarrow UCS_m = \frac{SE}{CC \cdot f'(n, \alpha, \phi, \psi)} \quad (4.12)$$

όπου θέσαμε $n = UCS_m / UTS_m$, UCS_m συμβολίζει τη μονοαξονική αντοχή σε θλίψη της βραχομάζας, και UTS_m συμβολίζει τη μονοαξονική αντοχή σε εφελκυσμό της βραχομάζας.

Η παραπάνω εκτίμηση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη μπορεί να επαληθευθεί αν έχουν γίνει δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης αρρήκτων πυρήνων γεωτρήσεων και μετά να γίνει υποβάθμιση της αντοχής για να θεωρηθούν και οι ασυνέχειες που διασχίζουν την βραχομάζα. Για τη συσχέτιση της αντοχής του αρρήκτου πετρώματος με τη βραχομάζα χρησιμοποιείται η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε από τους *Exadaktylos & Stavropoulou, (2008)* η οποία βασίζεται

στην Μηχανική της Φθοράς (Damage Mechanics). Η μεθοδολογία αυτή βασίζεται στην εξής υπόθεση: Υπάρχει μοναδική σχέση μεταξύ της παραμέτρου φθοράς D και του δείκτη ποιότητας βραχομάζας RMR (ή ισοδύναμα με τους δείκτες ποιότητας Q και GSI) για όλα τα πετρώματα.

Η υπόθεση αυτή βασίζεται στο γεγονός του ότι οι δείκτες RMR , Q ή GSI λαμβάνουν υπόψιν τους πιο σημαντικούς παράγοντες των ασυνεχειών της βραχομάζας που είναι υπεύθυνες για την υποβάθμιση των μηχανικών παραμέτρων του άθικτου πετρώματος. Έτσι μπορούν να συνδεθούν με την παράμετρο της φθοράς D ($0 \leq D \leq 1$) με την κατάλληλη σχέση. Μια τέτοια συνάρτηση πρέπει να έχει μια σιγμοειδή μορφή που προσομοιώνει την αθροιστική πυκνότητα πιθανότητας, και να δίνει τιμές για το D που κυμαίνονται από 0 έως 1 για τιμές του RMR ή GSI από 100 έως 0 ή για τιμές Q από 1000 έως 0.001, αντιστοίχως. Με βάση τις παραπάνω παραδοχές για την σχέση του D με το RMR προτείνεται η συνάρτηση της αθροιστικής πυκνότητας πιθανότητας Lorentzian (η οποία προέκυψε απευθείας από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του Cauchy):

$$D = 1 - \left\{ \hat{a} + \frac{\hat{b}}{\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{RMR - \hat{c}}{\hat{d}} \right) + \frac{\pi}{2} \right] \right\} \quad (4.13)$$

όπου:

\hat{c} η παράμετρος θέσεως, που προσδιορίζει την θέση της κορυφής της κατανομής,

\hat{d} είναι η παράμετρο κλίμακας που προσδιορίζει το μισό μήκος στο μισό της μέγιστης τιμής αντιστοίχως,

\hat{b} είναι μια αναλογική σταθερά και

\hat{a} μια σταθερά η οποία μπορεί να βρεθεί σαν συνάρτηση των προηγούμενων θέτωντας $D=1$ για $RMR=0$.

Σημειώνεται ότι η [εξ. \(4.13\)](#) δεν χρησιμοποιείται ως στατιστική συνάρτηση αλλά ως ντετερμινιστική συνάρτηση. Στην σχέση αυτή το RMR δεν λαμβάνει υπόψη την διόρθωση λόγω της μη επιθυμητής διάταξης της σήραγγας σε σχέση με τις ασυνέχειες και του υπογείου νερού (άρα το RMR λαμβάνει υπόψιν μόνο τις ασυνέχειες και την αντοχή του αρρήκτου πετρώματος, δηλ. RMR_{89}). Οι τρεις άγνωστοι παράμετροι \hat{b} , \hat{c} , \hat{d} προσδιορίζονται με βάση την εμπειρική σχέση που προτάθηκε από τους [Hoek & Brown \(1997\)](#) της εξάρτησης του $UCS_m / UCS_d = 1 - D$ από το RMR , ήτοι:

$$\frac{UCS_m}{UCS_{10}} = \sqrt{e^{\frac{(RMR-5)-100}{9}}} = \sqrt{e^{\frac{GSI-100}{9}}} \quad (4.14)$$

όπου:

UCS_{10} η τιμή της μονοαξονικής αντοχής (MPa) υπολογισμένη από εργαστηριακά πειράματα σε δείγματα ύψους 10 cm (με λόγο ύψους:διαμέτρου 2:1), και

UCS_d είναι η μονοαξονική αντοχή του αδιατάρακτου πετρώματος για αρκετά μεγάλο ύψος δοκιμίου (d) με τις ίδιες γεωμετρικές αναλογίες (δηλ. ίδιος λόγος ύψους:διάμετρος).

Με βάση αυτήν την διαδικασία της βέλτιστης προσαρμογή των παραμέτρων της [εξ. \(4.13\)](#) για $RMR < 80$, όπου οι παράμετροι που βρέθηκαν είναι οι εξής:

$$\hat{c} = 72.77, \hat{d} = 14.76, \hat{b} = 1.28, \hat{a} = -0.0776$$

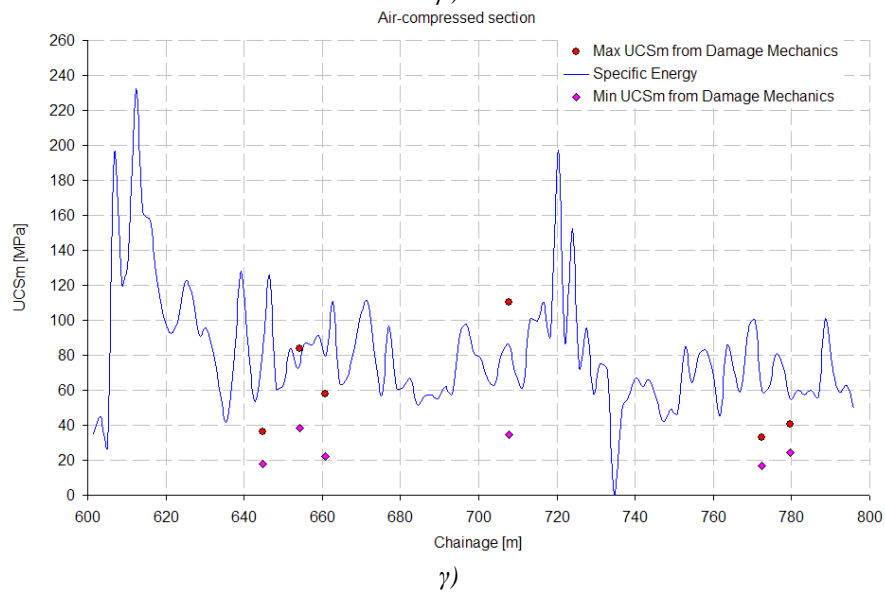
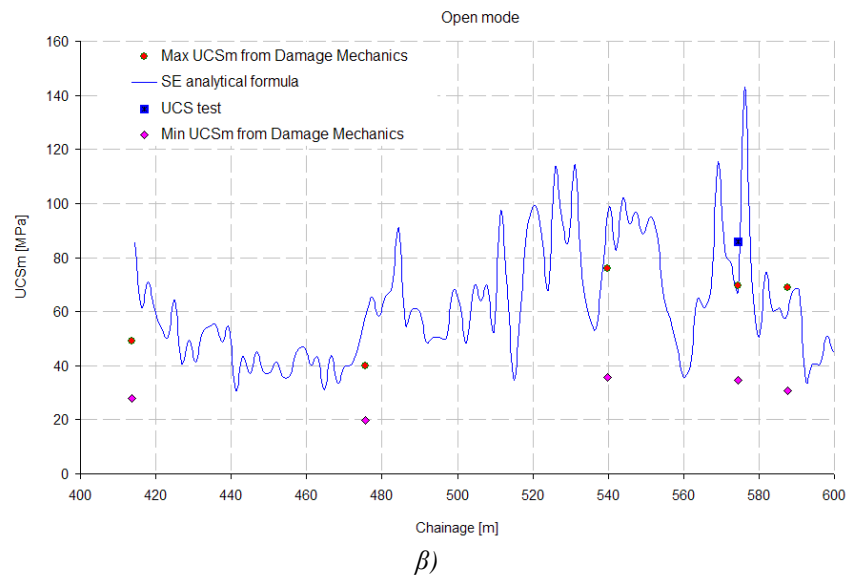
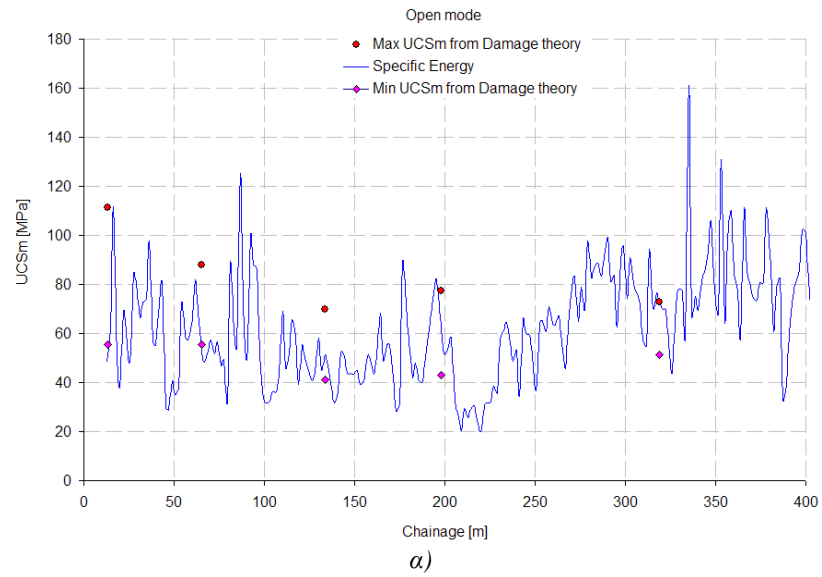
Σύμφωνα με την προτεινόμενη προσέγγιση δημιουργήθηκε στο ίδιο αρχείο με τον υπολογισμό της SE , ένα νέο φύλλο εργασίας του Excel® (Σχ. 4.26) για τον υπολογισμό της ελάχιστης και μέγιστης τιμής της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη της βραχομάζας με βάση αποτελέσματα δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης πυρήνων γεωτρήσεων, την θεωρία της μηχανικής της φθοράς και τις επι τόπου μετρήσεις του RMR στο μέτωπο της σήραγγας σε διάφορες στάσεις κατά μήκος της σήραγγας. Τα Σχ. 4.27α-δ παρουσιάζουν την σύγκριση της αντοχής του πετρώματος όπως προέκυψε από τις δύο μεθοδολογίες. Πιο συγκεκριμένα για τα αποτελέσματα της αναλυτικής εξ. (4.12), οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν δίδονται στον Πιν. 4.4.

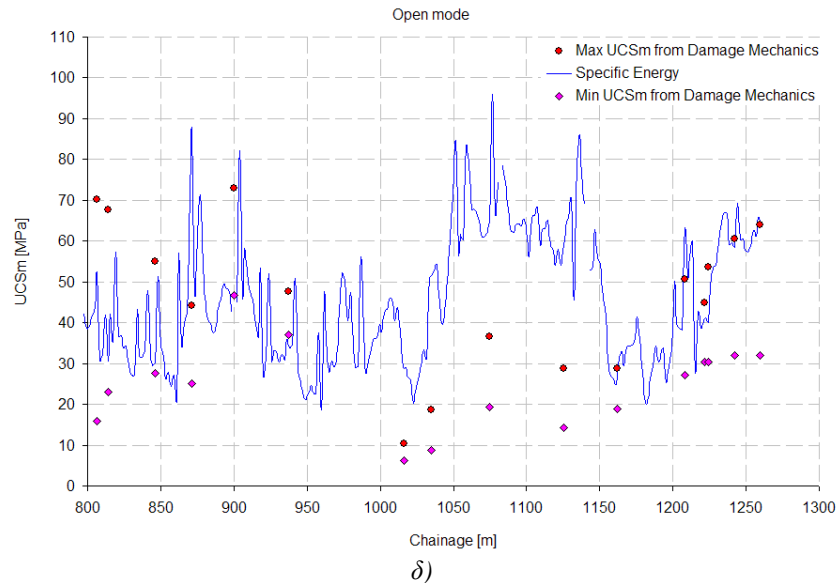
| Chainage | MIN | MAX | MIN | MAX | Rock type | UCS | psi (1-D) | D | min | UCS MASS | psi (1-D) | D | max | UCS MASS | MEAN |
|----------|--------|-----|-----|-----|-----------|--------------|-----------|---|-----|----------|-----------|---|-----|----------|------|
| 1 | 13.05 | 76 | 71 | 63 | 76 | 13.05 (0) | | | | | | | | | |
| 2 | 14.85 | 67 | 80 | 72 | 85 | 14.85 (3) | | | | | | | | | |
| 3 | 16.81 | 66 | 78 | 66 | 78 | 16.81 (3) | | | | | | | | | |
| 4 | 22 | 58 | 68 | 63 | 73 | 22 (-) | | | | | | | | | |
| 5 | 23.8 | 66 | 78 | 66 | 78 | 23.8 (8) | | | | | | | | | |
| 6 | 29.76 | 66 | 78 | 66 | 78 | 29.76 (11) | | | | | | | | | |
| 7 | 33.79 | 62 | 86 | 62 | 86 | 33.79 (-) | | | | | | | | | |
| 8 | 40.08 | 68 | 85 | 68 | 85 | 40.08 (17) | | | | | | | | | |
| 9 | 43.6 | 53 | 76 | 61 | 76 | 43.6 (-) | | | | | | | | | |
| 10 | 45.3 | 51 | 61 | 59 | 69 | 45.3 (-) | | | | | | | | | |
| 11 | 52.6 | 58 | 67 | 63 | 72 | 52.6 (24) | | | | | | | | | |
| 12 | 54.6 | 51 | 64 | 56 | 69 | 54.6 (24) | | | | | | | | | |
| 13 | 65.2 | 58 | 66 | 63 | 71 | 65.2 (30) | | | | | | | | | |
| 14 | 68.28 | 64 | 79 | 69 | 79 | 68.28 (-) | | | | | | | | | |
| 15 | 77.7 | 52 | 93 | 62 | 93 | 77.7 (37) | | | | | | | | | |
| 16 | 84.9 | 63 | 80 | 63 | 80 | 84.9 (41) | | | | | | | | | |
| 17 | 92.2 | 63 | 94 | 63 | 94 | 92.2 (45) | | | | | | | | | |
| 18 | 95.7 | 63 | 80 | 68 | 80 | 95.7 (-) | | | | | | | | | |
| 19 | 99.3 | 56 | 64 | 61 | 69 | 99.3 (49) | | | | | | | | | |
| 20 | 108.36 | 56 | 64 | 61 | 69 | 108.36 (54) | | | | | | | | | |
| 21 | 110.29 | 56 | 75 | 61 | 80 | 110.29 (-) | | | | | | | | | |
| 22 | 117.34 | 53 | 68 | 58 | 73 | 117.34 (59) | | | | | | | | | |
| 23 | 128.2 | 54 | 75 | 59 | 80 | 128.2 (-) | | | | | | | | | |
| 24 | 133.58 | 53 | 62 | 58 | 67 | 133.58 (68) | | | | | | | | | |
| 25 | 145.3 | 61 | 73 | 61 | 73 | 145.3 (75) | | | | | | | | | |
| 26 | 149.7 | 56 | 80 | 61 | 80 | 149.7 (-) | | | | | | | | | |
| 27 | 154.9 | 53 | 62 | 58 | 67 | 154.9 (80) | | | | | | | | | |
| 28 | 165.9 | 58 | 71 | 58 | 71 | 165.9 (-) | | | | | | | | | |
| 29 | 169.6 | 61 | 71 | 61 | 71 | 169.6 (88) | | | | | | | | | |
| 30 | 172.3 | 56 | 70 | 56 | 70 | 172.3 (-) | | | | | | | | | |
| 31 | 179.5 | 58 | 69 | 58 | 69 | 179.5 (94) | | | | | | | | | |
| 32 | 182 | 59 | 69 | 59 | 69 | 182 (96) | | | | | | | | | |
| 33 | 186.8 | 59 | 78 | 59 | 78 | 186.8 (-) | | | | | | | | | |
| 34 | 198.2 | 59 | 69 | 59 | 69 | 198.2 (106) | | | | | | | | | |
| 35 | 203.7 | 63 | 73 | 63 | 73 | 203.7 (108) | | | | | | | | | |
| 36 | 207 | 35 | 41 | 35 | 41 | 207 (111) | | | | | | | | | |
| 37 | 209.2 | 34 | 52 | 39 | 52 | 209.2 (-) | | | | | | | | | |
| 38 | 213 | 49 | 59 | 54 | 64 | 213 (114) | | | | | | | | | |
| 39 | 225 | 40 | 50 | 45 | 55 | 225 (121) | | | | | | | | | |
| 40 | 229.9 | 34 | 46 | 39 | 51 | 229.9 (-) | | | | | | | | | |
| 41 | 240.2 | 45 | 60 | 50 | 65 | 240.2 (-) | | | | | | | | | |
| 42 | 257.8 | 64 | 79 | 69 | 79 | 257.8 | | | | | | | | | |
| 43 | 273 | 69 | 79 | 69 | 79 | 273 (146) | | | | | | | | | |
| 44 | 278.5 | 63 | 79 | 63 | 79 | 278.5 (-) | | | | | | | | | |
| 45 | 280 | 66 | 75 | 66 | 75 | 280 (150) | | | | | | | | | |
| 46 | 291.9 | 68 | 77 | 68 | 77 | 291.9 (157) | | | | | | | | | |
| 47 | 300.3 | 63 | 86 | 63 | 86 | 300.3 (-) | | | | | | | | | |
| 48 | 301 | 75 | 84 | 75 | 84 | 301 (161) | | | | | | | | | |
| 49 | 308.11 | 67 | 76 | 72 | 81 | 308.11 (165) | | | | | | | | | |
| 50 | 309.6 | 69 | 81 | 74 | 86 | 309.6 (-) | | | | | | | | | |
| 51 | 319 | 67 | 76 | 72 | 81 | 319 (172) | | | | | | | | | |
| 52 | 326.2 | 63 | 73 | 68 | 78 | 326.2 (-) | | | | | | | | | |
| 53 | 326.2 | 63 | 73 | 68 | 78 | 326.2 (-) | | | | | | | | | |

Σχήμα 4.26: Φύλλο εργασίας Excel® για τον υπολογισμό της αντοχής της βραχομάζας από την αξιολόγηση του RMR κατά μήκος της σήραγγας #1 του Χονγκ Κονγκ με βάση τη θεωρία της μηχανικής της φθοράς.

Πίνακας 4.4: Σταθερές παράμετροι της αναλυτικής σχέσης (2.9) υπολογισμού της UCS του πετρώματος από την SE κατά μήκος της σήραγγας

| | |
|-------------|-------|
| alpha [rad] | 0.70 |
| theta [rad] | 1.05 |
| beta [rad] | 0.00 |
| phi [rad] | 0.79 |
| n (UCS/UTS) | 10.00 |
| psi [rad] | 0.75 |





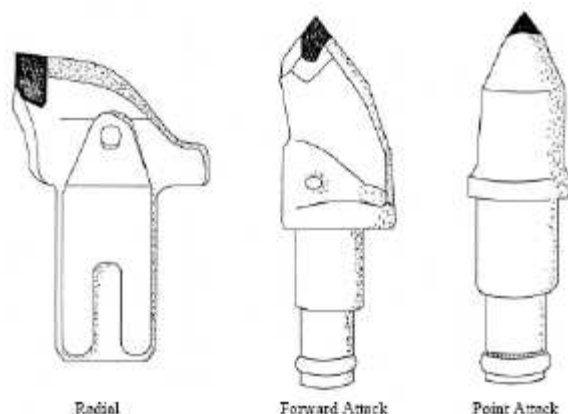
δ)
Σχήμα 4.27: Σύγκριση της εκτίμησης της μονοαξονικής αντοχής UCS_m με βάση το RMR και την θεωρία της μηχανικής της φθοράς από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε πυρήνες γεωτρήσεων (με τελείες) και με βάση από την ειδική ενέργεια SE που καταναλώνεται από το TBM και την αναλυτική εξ. (4.12) (συνεχής γραμμή).

Από τα ανωτέρω διαγράμματα φαίνεται ότι η μέθοδος υπολογισμού της UCS_m της βραχομάζας από την ανάδρομη ανάλυση της κατανάλωσης SE του TBM, δίδει συγκρίσιμα αποτελέσματα με τη μέθοδο υποβάθμισης του UCS_d των πυρήνων αρρήκτου πετρώματος με βάση το RMR ή της παραμέτρου φθοράς D . Συνεπώς ενισχύεται σημαντικά το επιχείρημα της χρήσης του TBM ως «αισθητήρα» της αντοχής της βραχομάζας κατά την διάνοιξη σήραγγας.

Κεφάλαιο 5. Εφαρμογή του μοντέλου στη διάνοιξη σηράγγων με RH

5.1. Ειδική ενέργεια για το μηχάνημα RH

Τα μηχανήματα RH χρησιμοποιούν συρτικά κοπτικά που διαχωρίζονται σε τρεις κυρίως τύπους, του ακτινικού (radial), της εμπρόσθιας προσβολής (forward attack) και της σημειακής προσβολής (point attack picks) κοπής του γεωϋλικού όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 5.1.

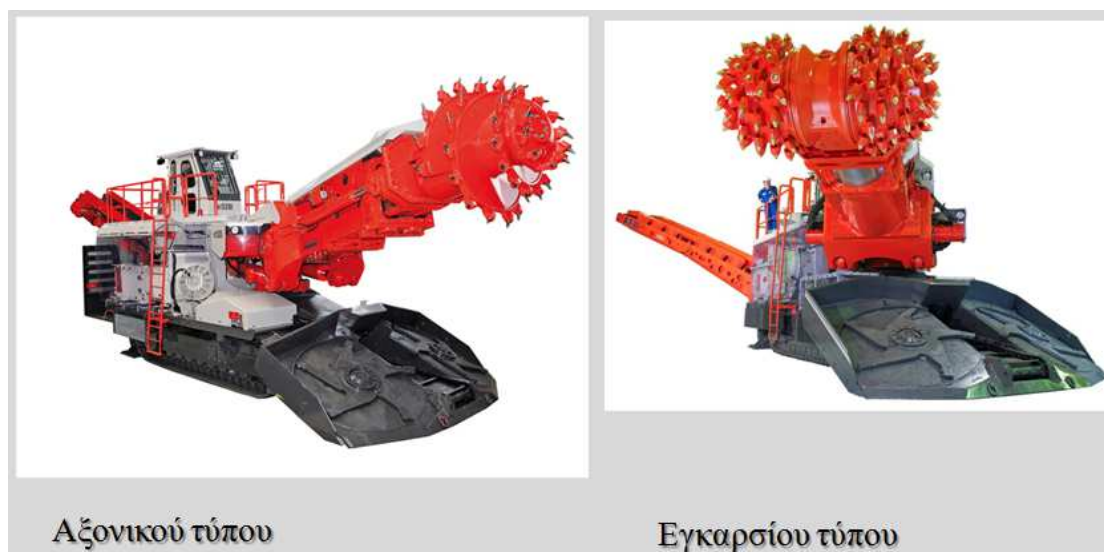


Σχήμα 5.1: Κοπτικά άκρα ακτινικού τύπου (αριστερά), εμπρόσθιας προσβολής (στη μέση) και σημειακής προσβολής (αριστερά).

Η ειδική ενέργεια για την περίπτωση του μηχανήματος RH υπολογίζεται από την ενέργεια που δαπανάται για την κοπή του μοναδιαίου όγκου γεωϋλικού και εξαρτάται κυρίως από τις παραμέτρους αντοχής του γεωϋλικού, της γεωμετρίας και την διάταξη των κοπτικών στην κεφαλή, την γεωμετρία των κοπτικών άκρων και τις λειτουργικές παραμέτρους λειτουργίας (ταχύτητα περιστροφής, ταχύτητα προχώρησης, βάθος κοπής, κ.α.) . Ο υπολογισμός της ειδικής ενέργειας, κατά αντιστοιχία με τα πειράματα κοπής με απλό κοπτικό, μπορεί να γίνει με βάση την εξ. (1.1) από το έργο που παράγεται από την μέση συρτική δύναμη κοπής \bar{F}_s^c ανά κοπτικό η οποία μπορεί να υπολογιστεί από την ροπή στρέψης της κεφαλής T , την ακτίνα της κεφαλής R και των αριθμό των ενεργών κοπτικών N_c με βάση την εξίσωση:

$$\bar{F}_s^c = \frac{T}{R \cdot N_c} \quad (5.1)$$

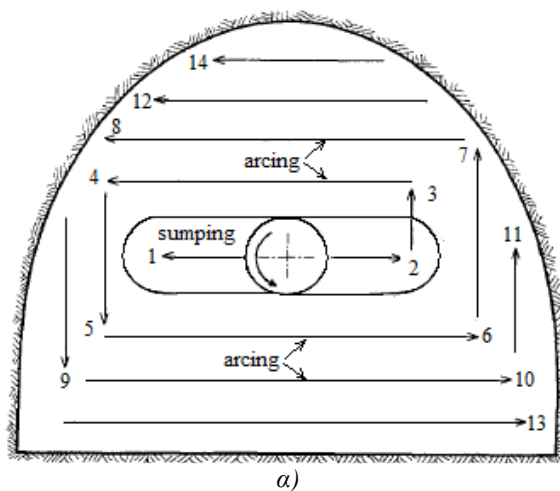
5.2. Γεωμετρία κοπής με την χρήση RH

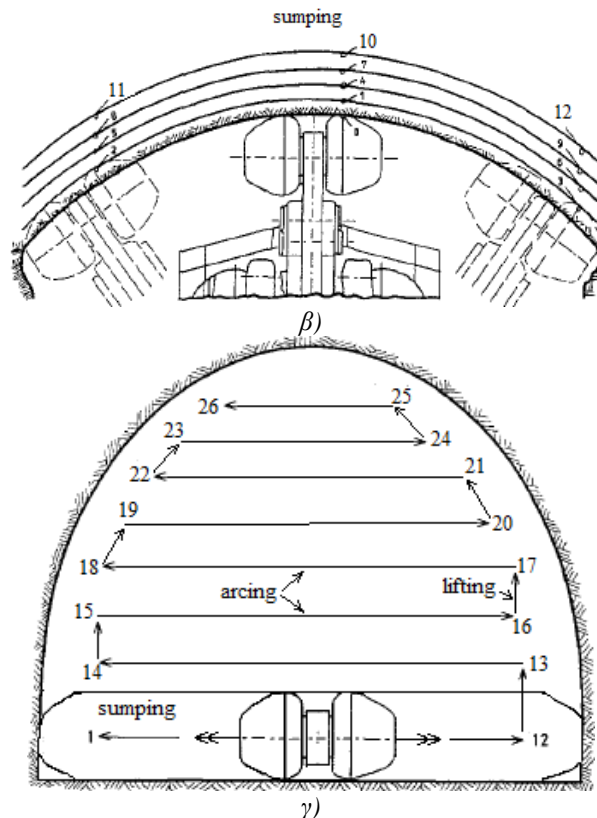


Σχήμα 5.2: Αξονικό και εγκάρσιο RH.

Για την διάτρηση με την χρήση RH υπάρχουν δύο τύποι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν (Σχ. 5.2):

- α) Στον αξονικό τύπο, όπου η κεφαλή περιστρέφεται γύρω από άξονα παράλληλο με τον βραχίονα του RH. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η κεφαλή βυθίζεται στο μέτωπο (sump) και στην συνέχεια δημιουργεί μια σπείρα κόβοντας οριζόντια (arcing) και κατακόρυφα (lifting) (Σχ. 5.3α). Ιδανικά όλο το μέτωπο κόβεται με μια βύθιση. Τα μηχανήματα αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται για την κοπή μαλακών πετρωμάτων και εδαφών.
- β) Στον εγκάρσιο τύπο, όπου υπάρχουν δυο κεφαλές που περιστρέφονται σε άξονα κάθετο ως προς το βραχίονα του RH. Στην περίπτωση αυτή η βύθιση γίνεται σταδιακά (Σχ. 5.3β), συνήθως στην κάτω μεριά του μετώπου και στην συνέχεια το μέτωπο εκσκάπτεται από κάτω προς τα πάνω σύμφωνα με το Σχ. 5.3γ. Τα μηχανήματα αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται για την κοπή σκληρών πετρωμάτων ($50 \text{ MPa} < \text{UCS} < 150 \text{ MPa}$).





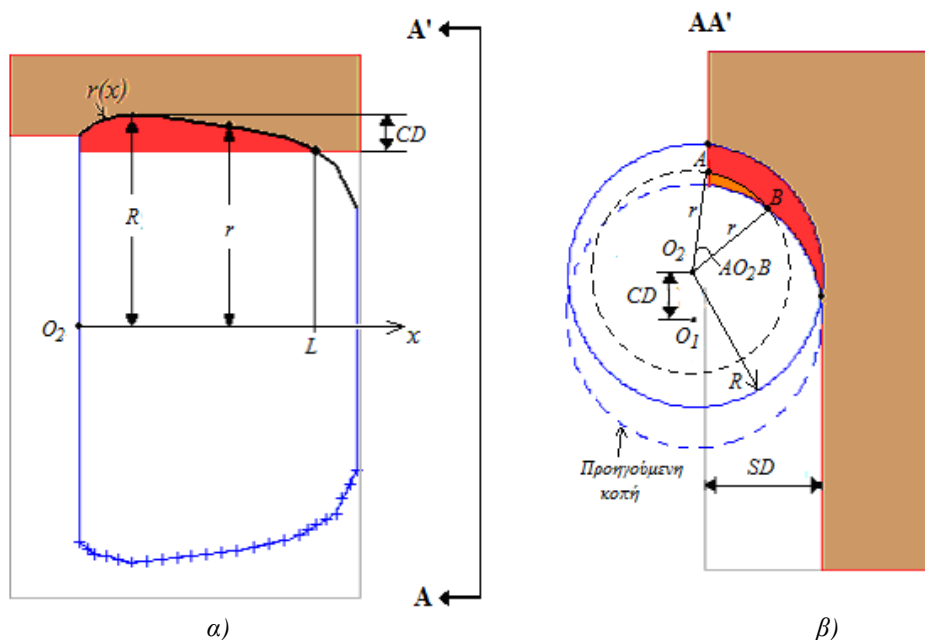
Σχήμα 5.3: α) Σχέδιο εκσκαφής με το αξονικό RH, β) σταδιακό βύθισμα του RH και γ) σχέδιο εκσκαφής για το εγκάρσιο RH.

5.3. Προσδιορισμός Παραμέτρων Κοπής

Για τον υπολογισμό της ειδικής ενέργειας σύμφωνα με τον ορισμό που χρησιμοποιείται στα πειράματα με ένα κοπτικό [εξ. \(1.1\)](#), χρειάζεται να γίνει ο υπολογισμός των εξής παραμέτρων:

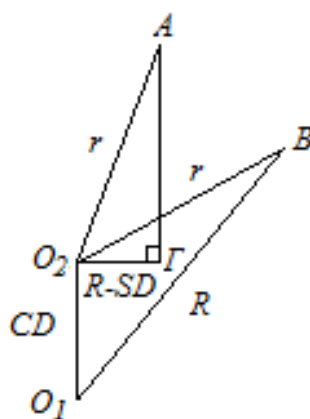
- i) τον αριθμό των κοπτικών άκρων που βρίσκονται σε επαφή με το πέτρωμα, N_c ,
- ii) το μέσο βάθος διείσδυσης των κοπτικών άκρων που χρησιμοποιούνται, δ και
- iii) την μέση απόσταση μεταξύ των διαδοχικών κοπών, S .

Τα μεγέθη αυτά εξαρτώνται από την γεωμετρία της κοπτικής κεφαλής, την διάταξη των κοπτικών στην κεφαλή και το σχέδιο της εκσκαφής που εκφράζεται από το βάθος κοπής, CD (Cutting Depth) (βλ. [Σχ. 5.4α](#)), το βύθισμα της κεφαλής, SD (Sumping Depth) (βλ. [Σχ. 5.4β](#)), και την ταχύτητα οριζόντιας προχώρησης, v_s (Slewing speed). Η εκτίμηση του αριθμού των κοπτικών που χρησιμοποιούνται για την κοπή του πετρώματος, βρίσκεται από τον λόγο της επιφάνειας που βρίσκεται σε επαφή με το πέτρωμα γίνεται ως προς την συνολική επιφάνεια και του συνολικού αριθμού των διαθέσιμων κοπτικών άκρων στην κεφαλή. Ο υπολογισμός αυτός θεωρεί ομοιόμορφη κατανομή των κοπτικών άκρων στην κεφαλή.



Σχήμα 5.4: Επιφάνεια επαφής της κοπτικής κεφαλής με το πέτρωμα, (α) πρόσοψη και (β) πλάγια όψη.

Η κοπτική κεφαλή είναι ένα στερεό εκ περιστροφής της συνάρτησης $r(x)$ και ο αριθμός των κοπτικών που συμμετέχουν στην κοπή N_c , μπορεί να υπολογισθεί με την θεώρηση ότι τα N_c κοπτικά άκρα είναι ομοιόμορφα κατανομημένα πάνω στην κεφαλή.



Σχήμα 5.5: Υπολογισμός τόξου επαφής AO_2B .

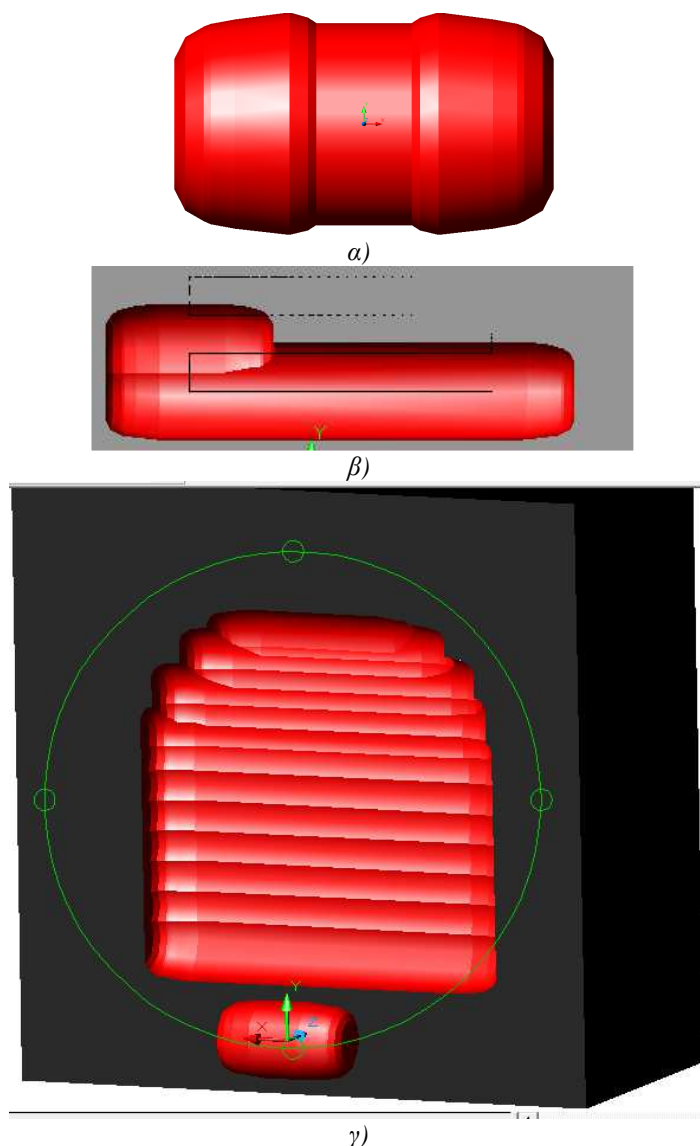
Η συνάρτηση που δίνει το τόξο της επαφής (AO_2B) της κοπτικής κεφαλής (Σχ. 5.5) με το πέτρωμα στην ακτίνα r μπορεί να προκύψει από κατάλληλες γεωμετρικές σχέσεις. Επίσης, το μέσο βάθος διείσδυσης των κοπτικών άκρων βρίσκεται από την οριζόντια ταχύτητα κοπής, v_s και τον χρόνο για να διανυθεί το τόξο επαφής AO_2B στην μέγιστη ακτίνα R (Σχ. 5.4β), ενώ η μέση απόσταση μεταξύ διαδοχικών κοπών βρίσκεται από τον σχεδιασμό της κοπτικής κεφαλής.

Στην συνέχεια γίνεται μια σύντομη περιγραφή για τον υπολογισμό του όγκου που εκσκάπτεται σε κάθε χρονικό βήμα. Ο όγκος αυτός χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της ειδικής ενέργειας με την δεύτερη μέθοδο εζ. (1.2) και εξαρτάται από την γεωμετρία της κεφαλής και τον τρόπο κοπής (arcing, lifting, sumping). Για την

περίπτωση των οριζόντιων κοπών (arcing) μια αρκετά ακριβής εκτίμηση του όγκου δίδεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\dot{V} = CF \cdot SD \cdot CD \cdot v_s \quad (5.2)$$

Η επιβεβαίωση της προηγούμενης σχέσης γίνεται με τον υπολογισμό του όγκου με την χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος του AutoCAD όπου η κοπτική κεφαλή (Σχ. 5.6α) ακολουθεί την διαδρομή του Σχ. 5.6β. Ο όγκος υπολογίζεται για διάφορα βάθη κοπής (CD) και διάφορες ταχύτητες (v_s).



Σχήμα 5.6: α) Γεωμετρία κεφαλής, β) ο υπολογισμός του όγκου κατά μήκος της διαδρομής και γ) το προφίλ της κοπής στο AutoCAD.

Ο όγκος υπολογίστηκε με την χρήση της εξ. (5.2) και με την χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCAD. Στην συνέχεια αυτές οι δυο εκτιμήσεις του όγκου συγκρίνονται στην περίπτωση των οριζόντιων κοπών (Πιν. 5.1). Από αυτήν τη σύγκριση προέκυψε ότι τα σχετικά σφάλματα που υπολογίζονται από την χρήση της εξ. (5.3) δεν ξεπερνούν το 1.5 %.

$$error = \frac{V_E - V_C}{V_C} \cdot 100 \quad (5.3)$$

Πίνακας 5.1: Σύγκριση εκτιμήσεων του όγκου με το AutoCAD.

| vs | CD | SD | Vestimated | Vautocad | error % |
|-----|-------|------|------------|----------|---------|
| 1 | 0.3 | 0.4 | 0.120 | 0.118 | 1.5 |
| 0.5 | 0.2 | 0.5 | 0.050 | 0.050 | 0.6 |
| 1 | 0.05 | 0.65 | 0.033 | 0.033 | 0 |
| 1 | 0.065 | 0.65 | 0.042 | 0.042 | 0.1 |

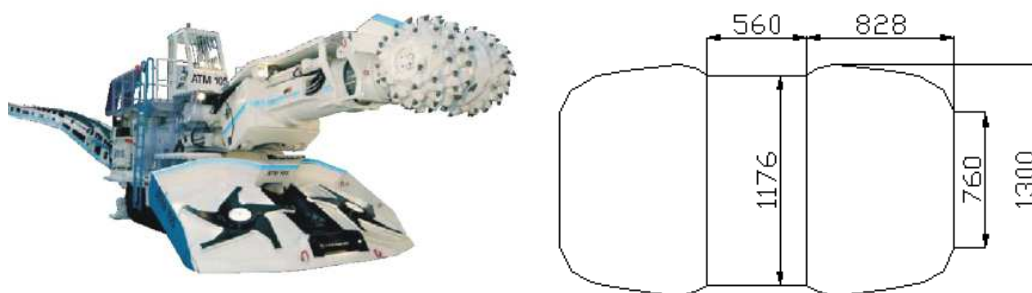
5.4. Σήραγγα του μετρό του Μόντρεαλ

Τα δεδομένα προέρχονται από την γραμμή 2 της προέκτασης του μετρό του Μόντρεαλ με τις θέσεις των μετρήσεων να φαίνονται στο χάρτη της περιοχής (Σχ. 5.7). Η διάνοξη της σήραγγας με διατομή περίπου 46 m² και συνολικό μήκος που ξεπερνάει τα 1200m άρχισε τον Ιούλιο του 2002 και σχεδιαζόμενο τέλος το Δεκέμβριο του 2006.



Σχήμα 5.7: Χάρτης της πόλης του Μόντρεαλ και η προβολή της γραμμής 2 του μετρό (Sandvik).

Ο τύπος του Road-Header (RH) που χρησιμοποιήθηκε, στις επέκταση του μετρό στο Μόντρεαλ είναι το **ATM 105/028-IC** (Σχ. 5.8).



Σχήμα 5.8: Γεωμετρία της κεφαλής του RH ATM 105/028-IC.

Οι παράμετροι που περιγράφουν τον συγκεκριμένο τύπο RH συνοψίζονται στους δυο ακόλουθους πίνακες [Πιν. 5.2-5.3](#):

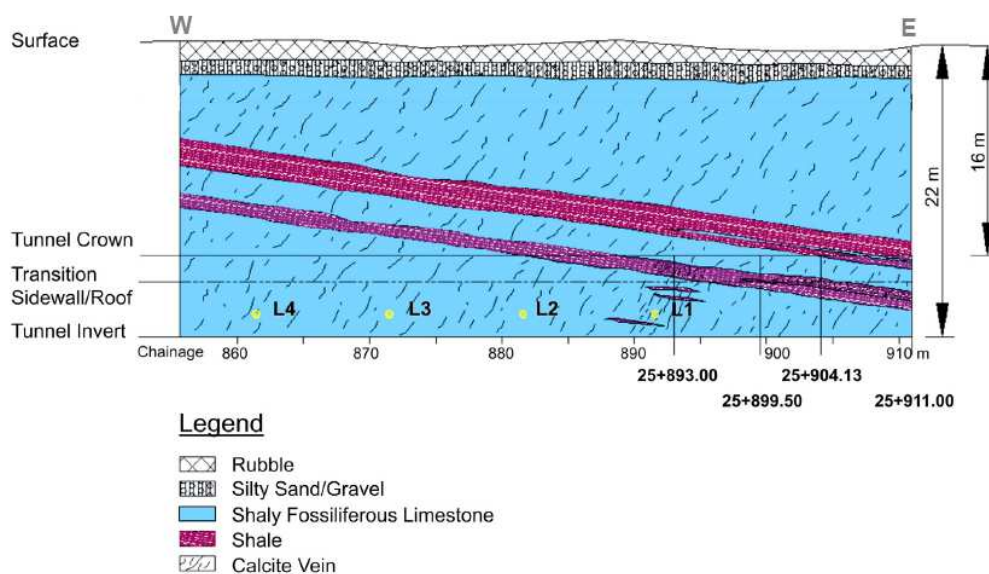
Πίνακας 5.2: Γενικά στοιχεία για το RH – ATM 105/028.

| Παράμετρος | Σύμβολο | Τιμή | Μονάδα |
|-----------------------------|----------|-------|--------|
| Διάμετρος | D | 1300 | mm |
| Ακτίνα κεφαλής | R | 650 | mm |
| Αριθμός κοπτικών ανά κεφαλή | N | 57 | - |
| Γωνιακή ταχύτητα | ω | 21.89 | rpm |
| Slewing speed | v_s | 0.21 | m/sec |
| Απόδοση κινητήρα | n | 0.9 | - |

Πίνακας 5.3: Λειτουργικοί παράμετροι του RH – ATM 105/028.

| SD [mm] | N_c | | | δ [mm] | | | S [mm] | | | S/δ |
|----------------------|-------|--------|-------|------------------|--------|-------|-------------|--------|-------|------------|
| | min | $mean$ | max | min | $mean$ | max | min | $mean$ | max | $mean$ |
| $CD = 50\text{ mm}$ | | | | | | | | | | |
| 400 | 2 | 3.2 | 4 | 11 | 13.3 | 14 | 30.7 | 33.6 | 38.4 | 2.52 |
| 500 | 2 | 3.9 | 5 | 11 | 13.3 | 14 | 30.7 | 33.6 | 38.4 | 2.52 |
| 600 | 4 | 4.6 | 6 | 11 | 13.3 | 14 | 30.7 | 33.6 | 38.4 | 2.52 |
| $CD = 100\text{ mm}$ | | | | | | | | | | |
| 400 | 4 | 4.9 | 6 | 11 | 17.1 | 35 | 30.7 | 40.4 | 54.3 | 2.36 |
| 500 | 5 | 5.9 | 7 | 11 | 17.1 | 35 | 30.7 | 40.4 | 54.3 | 2.36 |
| 600 | 5 | 6.8 | 8 | 11 | 17.1 | 35 | 30.7 | 40.4 | 54.3 | 2.36 |
| $CD = 150\text{ mm}$ | | | | | | | | | | |
| 400 | 4 | 6 | 8 | 11 | 21.1 | 57 | 30.7 | 42.3 | 59.3 | 2.00 |
| 500 | 6 | 7 | 9 | 11 | 21.1 | 57 | 30.7 | 42.3 | 59.3 | 2.00 |
| 600 | 6 | 8.1 | 10 | 11 | 21.1 | 57 | 30.7 | 42.3 | 59.3 | 2.00 |

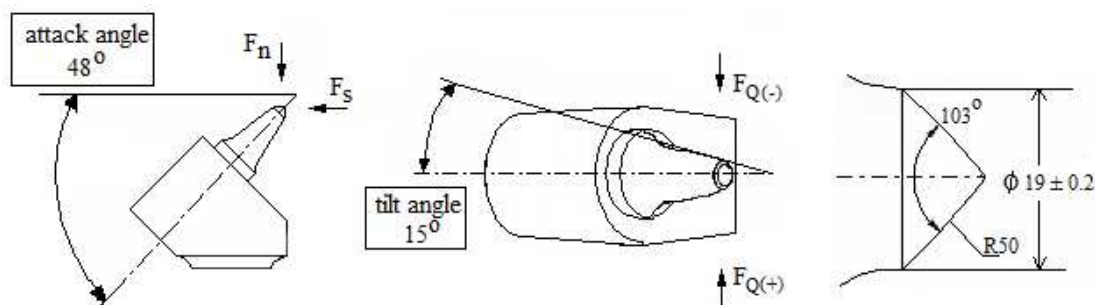
Η γεωλογία της περιοχής από όπου διέρχεται η σήραγγα αποτελείται κυρίως από αργιλώδη ασβεστόλιθο στον οποίο παρεμβάλλονται δυο σχιστολιθικά στρώματα ([Σχ. 5.9](#)). Πιο συγκεκριμένα ο αργιλώδης ασβεστόλιθος (με απολιθώματα) παρουσιάζεται κάτω από τα δύο επιφανειακά στρώματα μικρού πάχους (1-2m) τα οποία είναι: α) μπάζα – επιχωματώσεις και β) ιλυώδης άμμος. Μέσα στον ασβεστόλιθο υπάρχουν δύο κεκλιμένα στρώματα σχιστόλιθου (κλίση $\sim 10^\circ$) όπου το κοντινότερο στην επιφάνεια έχει πάχος περίπου 2m, ενώ το βαθύτερο είναι λεπτότερο με πάχος 1m.



Σχήμα 5.9: Γεωλογική μηκοτομή στην περιοχή της σήραγγας στο Μόντρεαλ.

Από την περιοχή διαθέσιμα είναι δεδομένα από την εκσκαφή της διατομής της σήραγγας σε πέντε ξεχωριστές διατομές που η θέση τους παρουσιάζεται στο [Σχ. 5.9](#).

5.4.1. Στοχαστικές προσομοιώσεις



Σχήμα 5.10: Γεωμετρία κοπτικών άκρων σημειακής προσβολής της κοπτικής κεφαλής του RH.

Στην ενότητα αυτή γίνεται ο υπολογισμός της ειδικής ενέργειας με την χρήση της αναλυτικής σχέσης που παρουσιάστηκε στο [Κεφ. 2](#). Ο υπολογισμός της ειδικής ενέργειας γίνεται με βάση την γεωμετρία των κοπτικών άκρων τα οποία είναι προσαρμοσμένα στην κοπτική κεφαλή ([Σχ. 5.10](#)) και από τα δεδομένα των αντοχών στα δείγματα του άθικτου ασβεστόλιθου και σχιστόλιθου που είναι διαθέσιμα από τα πειράματα: α) μονοαξονικής θλίψης και β) τα πειράματα προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής (Brazilian test) ([Πιν. 5.4](#))

Πίνακας 5.4: Δεδομένα μηχανικών αντοχών ([Lammer, Sandvik G.m.b.H.](#))

| Sample-number | Rock Type | ρ [g/cm ³] | UCS [MPa] | | | BTS [MPa] | | | W _f [Nm] | | | UCS:BTS | w _f :UCS [Nm/MPa] | CAI | | |
|---------------|--------------------------------------|--------------------------------|-----------|--------|--------|-----------|-------|------|---------------------|-------|-------|---------|---------------------------------|------|------|------|
| | | | from | to | mean | from | to | mean | from | to | mean | | | from | to | mean |
| 1 | Shale | 2.60 | 45.43 | 71.01 | 63.18 | 3.35 | 6.75 | 4.92 | 11.01 | 27.04 | 18.48 | 13 | 0.29 | 0.36 | 0.94 | 0.65 |
| 2 | Shaly fossiliferous limestone | 2.65 | 63.55 | 134.78 | 102.26 | 4.81 | 10.89 | 6.81 | 9.20 | 37.19 | 24.93 | 15 | 0.24 | 0.55 | 1.15 | 0.82 |
| 3 | Slightly shaly crystalline limestone | 2.64 | 88.09 | 117.05 | 105.87 | 5.11 | 9.81 | 7.50 | 21.52 | 34.99 | 27.09 | 14 | 0.26 | 0.29 | 0.84 | 0.62 |

ρ density

UCS uniaxial compression strength [MPa]

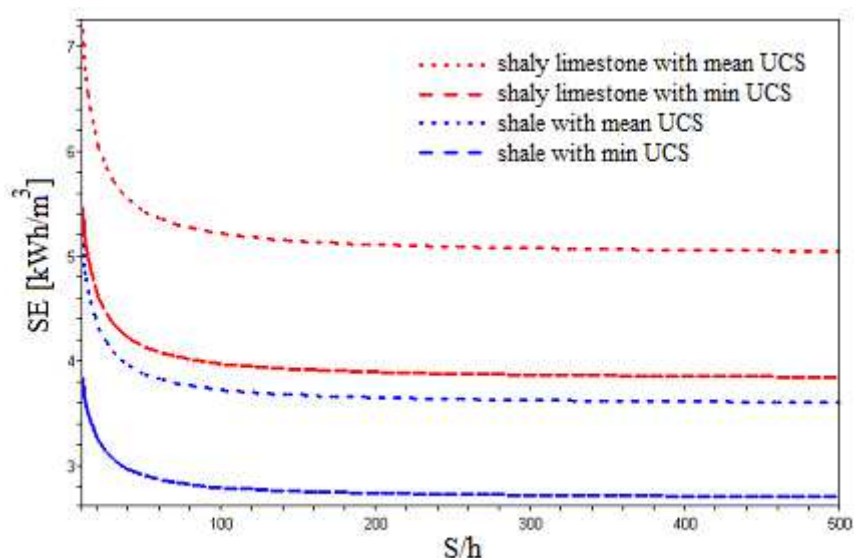
BTS Brazilian tensile strength [MPa]

CAI abrasively index

W_f fracture energy [Nm]

w_f specific or demanded fracture energy, derived from the ratio of W_f to UCS

Στην συνέχεια θεωρείται ότι η ειδική ενέργεια στους δυο γεωλογικούς σχηματισμούς ακολουθεί την Γκαουσιανή (κανονική) κατανομή με την μέση τιμή και την διασπορά να προσδιορίζονται από τις ελάχιστες και τις μέσες τιμές των αντοχών.

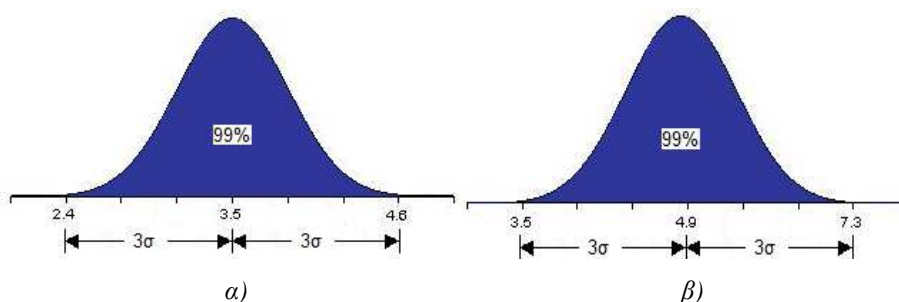


Σχήμα 5.11: Εξάρτηση της ειδικής ενέργειας από τον λόγο S/h .

Από το Σχ. 5.11 προκύπτει ότι η εκτίμηση της ειδικής ενέργειας εξαρτάται από την επιλογή του λόγου S/h (θυμίζουμε ότι το h συμβολίζει το μήκος της ακτινικής εφελκυστικής ρωγμής από όπου εκκινεί η μικτού τύπου ρωγμή που σχηματίζει την φλούδα του πετρώματος). Η πραγματική τιμή της ειδικής ενέργειας βρίσκεται ως η τιμή που προσεγγίζεται για πολύ μεγάλους λόγους S/h . Οι κύριες στατιστικές παράμετροι των κατανομών που προκύπτουν από την παραπάνω ανάλυση συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 5.5: Κατανομή της SE για τους δυο σχηματισμούς.

| ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ | TIMH | $SE [MPa]$ | $SE (kWh/m^3)$ |
|--------------|-----------|------------|----------------|
| Σχιστόλιθος | min | 8.69 | 2.41 |
| | mean | 12.76 | 3.54 |
| | 3σ | 4.07 | 1.13 |
| | σ | 1.35 | 0.38 |
| Ασβεστόλιθος | min | 12.48 | 3.47 |
| | mean | 17.67 | 4.91 |
| | 3σ | 5.19 | 1.44 |
| | σ | 1.73 | 0.48 |

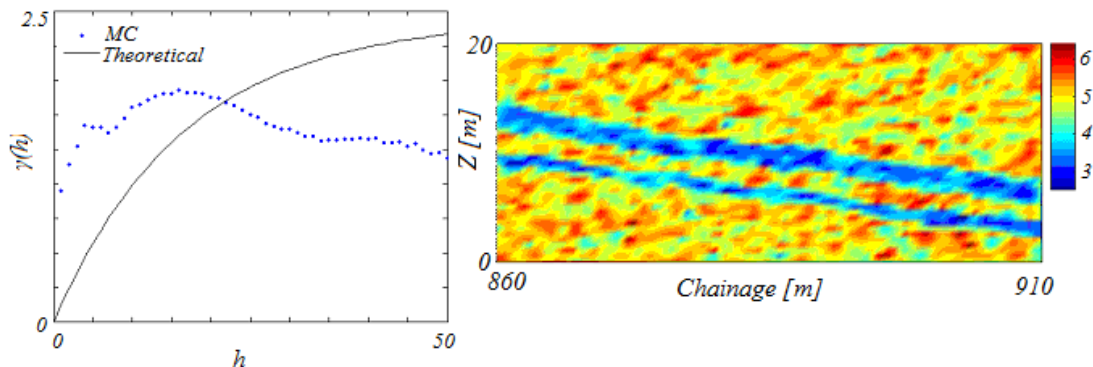


Σχήμα 5.12: Εκτιμώμενες κατανομές της ειδικής ενέργειας $SE (kWh/m^3)$ για: α) σχιστόλιθο και β) ασβεστόλιθο.

Με βάση τις διαστάσεις της γεωλογικής κατακόρυφης τομής του Σχ. 5.9 προκύπτει ότι τα δυο σχιστολιθικά στρώματα καταλαμβάνουν το 15% της συνολικής γεωλογικής τομής οπότε η κατανομή της ειδικής ενέργειας σε ολόκληρο το γεωλογικό μοντέλο (πλην των δυο επιφανειακών στρωμάτων) βρίσκεται από την παραγωγή τυχαίων αριθμών για κάθε σχηματισμό από την αντίστοιχη κατανομή της ειδικής ενέργειας (Σχ. 5.12). Για την δημιουργία του διδιάστατου στοχαστικού

προσομοιώματος της ειδικής ενέργειας χρησιμοποιούνται οι υπό συνθήκη στοχαστικές προσομοιώσεις (Simulation Annealing). Η υπορουτίνα των υπό συνθήκη στοχαστικών προσομοιώσεων εμπεριέχεται στον γεωστατιστικό αλγόριθμο του KRIGSTAT και παρουσιάζεται στο [Παράρτημα Α](#).

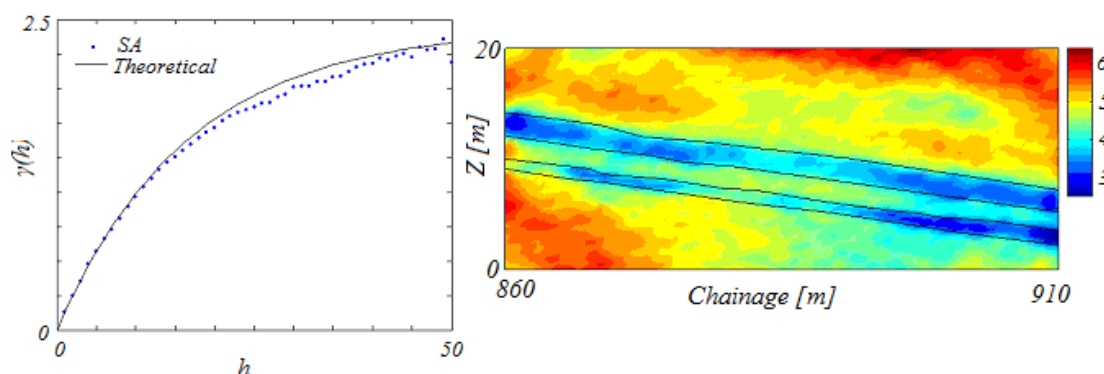
Στην συγκεκριμένη περίπτωση παρήχθησαν $N=2028$ δεδομένα από την συνδυαστική κατανομή του [Σχ. 5.12](#) σε κανονικό κάρναβο σημείων ([Σχ. 5.13](#)).



Σχήμα 5.13: Παραγωγή τυχαίων δεδομένων για τους δυο σχηματισμούς μαζί με το πειραματικό ημιβαριόγραμμα της αρχικής προσομοίωσης.

Το σχήμα που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από τρεις (3) κύκλους προσομοίωσης, όπου ο κάθε κύκλος χρησιμοποιεί σταθερή την «παράμετρο θερμοκρασίας» T και κανόνα αποδοχής $P_{acc} = 0.95$. Ο κύκλος τερματίζεται είτε όταν ο αριθμός των αποδεχόμενων αναδιατάξεων γίνει πολύ μεγάλος που σημαίνει ότι ο έλεγχος αποδοχής δεν είναι αρκετά αυστηρός $N_{acc}^{max} = 10 \cdot N$, είτε όταν ο συνολικός αριθμός αναδιατάξεων γίνει πολύ μεγάλος που σημαίνει ότι γίνονται πολλές αναδιατάξεις χωρίς να μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά το προσομοίωμα $N_{max} = 100 \cdot N$. Η αρχική παράμετρος θερμοκρασίας που χρησιμοποιήθηκε είναι $T_o = 0.5$ η οποία υποβαθμίζεται σε κάθε κύκλο Nc με την χρήση ενός συντελεστή $\lambda = 0.25$ κάνοντας τον κανόνα αποδοχής αυστηρότερο.

Η συνάρτηση στόχος είναι το εκθετικό μοντέλο ημιβαριογράμματος (βλ. [εξ. \(4.3\)](#)) με γεωμετρική ανισοτροπία να ταυτίζεται με την κλίση των σχιστολιθικών σχηματισμών $\theta = 10^\circ$ και λόγω ανισοτροπίας επιλεγμένος αυθαίρετα $r_y / r_x = 0.5$. Οι παράμετροι του μοντέλου είναι μηδενικό φαινόμενο κόκκου S_o , η οροφή να ταυτίζεται με την διασπορά των δεδομένων $S = 8.75 \text{ [MPa]}^2$ ή $S = 2.43 \text{ [kWh/m}^3\text{]}^2$ και ακτίνα επίδρασης ίση με την οριζόντια διάσταση του μοντέλου $3 \cdot l = 50 \text{ [m]}$. Το τελικό προσομοίωμα επιλέχθηκε από μια σειρά προσομοιώσεων με βάση την παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται στο [Σχ. 5.14](#), για την ευκολότερη σύγκλιση του προσομοιώματος μπορεί να γίνει επιλογή σταθερών σημείων (σημεία εκπαίδευσης) που δεν συμμετέχουν στην διαδικασία αναδιάταξης και με βάση τα οποία χτίζεται το τελικό προσομοίωμα.



Σχήμα 5.14: Τελικό προσομοίωμα της ειδικής ενέργειας για τους δυο σχηματισμούς (δεξιά) μαζί με το πειραματικό ημιβαριόγραμμα της τελικής προσομοίωσης (αριστερά).

5.4.2. Υπολογισμός της ειδικής ενέργειας

Ο υπολογισμός της ειδικής ενέργειας γίνεται στις περιοχές όπου η κοπή γίνεται στο ίδιο επίπεδο (arcing mode) όπου συμμετέχει μόνο η μία εκ των δυο κοπτικών κεφαλών του RH, ανάλογα με την διεύθυνση της κίνησης του RH. Για τον λόγο αυτό είναι αναγκαία η αποκοπή των δεδομένων όπου οι συνθήκες κοπής είναι διαφορετικές:

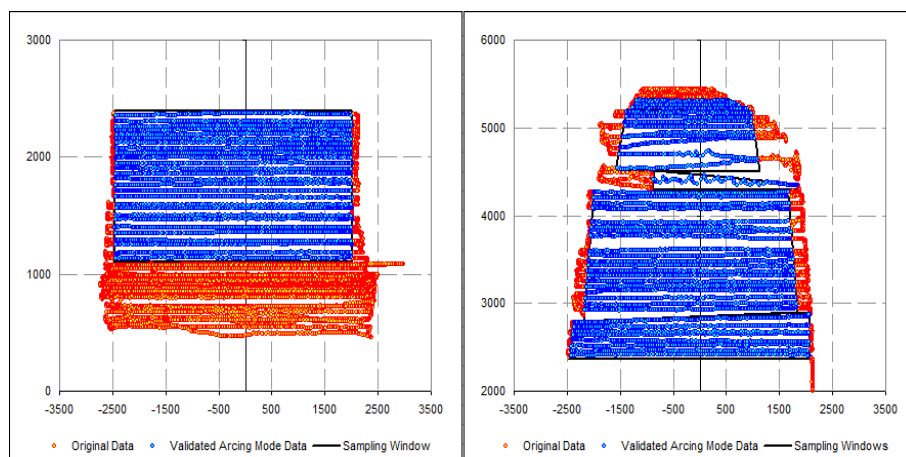
- α) τα δεδομένα από την σταδιακή βύθιση (βλ. Σχ. 5.3) της κοπτικής κεφαλής, που συνήθως γίνεται στο κάτω τμήμα της διατομής της σήραγγας
- β) τα δεδομένα από την κίνηση του RH σε νέο επίπεδο κοπής (βλ. Σχ. 5.3) και
- γ) τα δεδομένα από καθαρισμούς και την τελική μορφοποίηση της διατομής της σήραγγας

Οι παραπάνω περιπτώσεις δίδουν διαφορετικά αποτελέσματα για την ειδική ενέργεια ακόμα και αν η κοπή γίνεται στον ίδιο γεωλογικό σχηματισμό καθώς η ειδική ενέργεια επηρεάζεται έντονα από τις λειτουργικές παραμέτρους. Για την εξαίρεση των προαναφερθέντων δεδομένων χρησιμοποιούνται τα εξής “φίλτρα” αποκοπής δεδομένων:

- α) παράθυρα αποκοπής δεδομένων,
- β) αποκοπή δεδομένων με μεγάλες κλίσεις (απόκλιση από την οριζόντια κίνηση),
- γ) απομόνωση δεδομένων όπου ήδη έχει γίνει κοπή (καθαρισμός) και
- δ) κοπές με μικρή κατανάλωση ρεύματος που δεν γίνεται κοπή

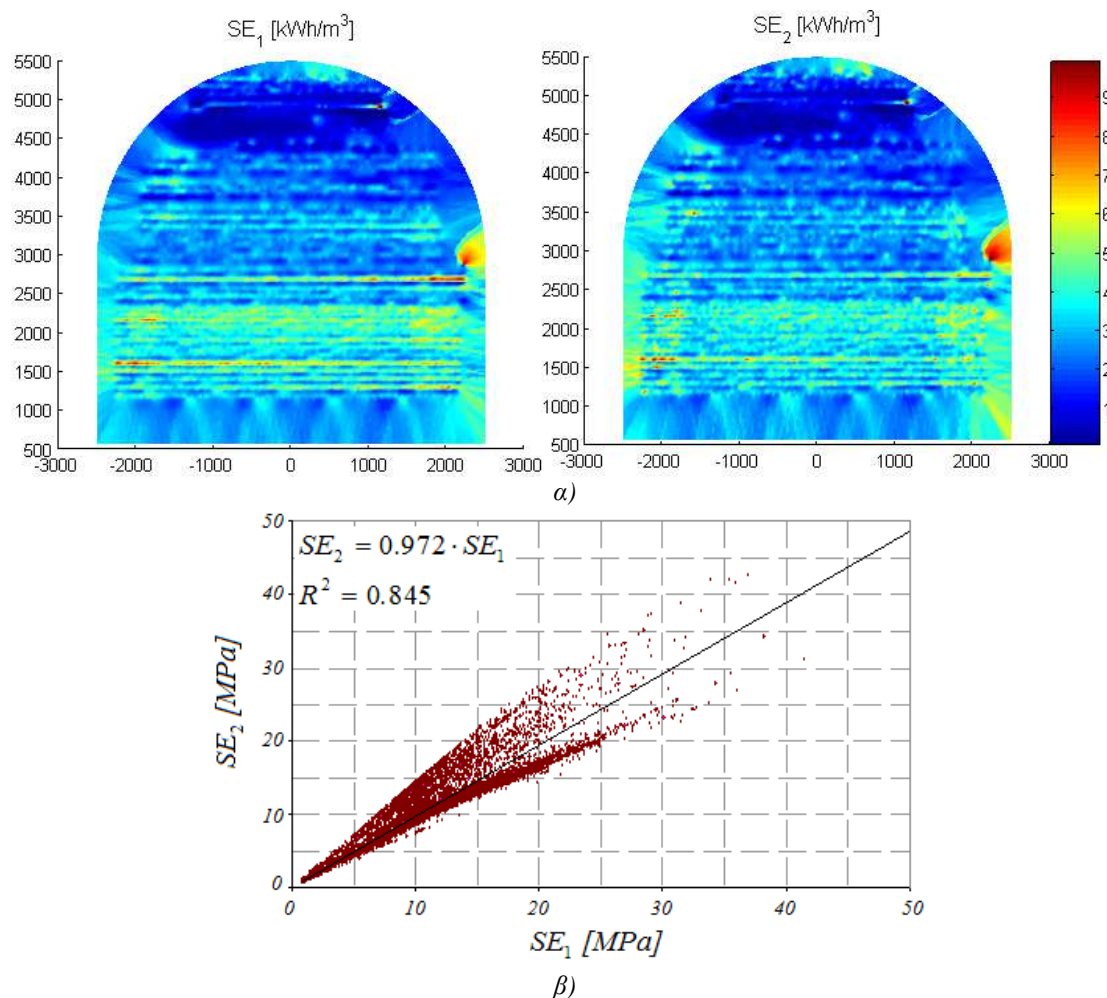
Τα “φιλτραρισμένα” δεδομένα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ειδικής ενέργειας και με την χρήση του γεωστατιστικού κώδικα KRIGSTAT παράγονται οι εκτιμήσεις της SE καθ’ όλη την διατομή της σήραγγας.

Υπάρχουν δεδομένα από πέντε (5) διαθέσιμες ολοκληρωμένες τομές του μετώπου της σήραγγας. Η πρώτη βρίσκεται στην Χιλιομετρική Θέση (Χ.Θ.) 25893 (βλ. Σχ. 5.9) η οποία χωρίζεται σε δυο τμήματα: το κατώτερο τμήμα στο οποίο γίνεται και η σταδιακή βύθιση (sumping) για την κοπή της νέας διατομής (στο ύψος ~1 m) και στην συνέχεια γίνεται η σταδιακή κοπή του μετώπου και το ανώτερο τμήμα όπου γίνεται η σταδιακή κοπή του μετώπου και η μορφοποίηση της τελικής διατομής (Σχ. 5.15). Το βάθος κοπής CD του μηχανήματος RH βρίσκεται από την απόσταση από το τρέχον επίπεδο κοπής με το προηγούμενο επίπεδο κοπής.



Σχήμα 5.15: Δεδομένα από την πρώτη διατομή στην Χ.Θ. 25893.

Η ειδική ενέργεια υπολογίζεται με τους δυο διαφορετικούς τρόπους *εξ. (1.1)-(1.2)*, όπου για την γραφική παρουσίαση των αποτελεσμάτων έγινε παρεμβολή των αποτελεσμάτων με την μέθοδο παρεμβολής Kriging με την χρήση των εκθετικών μοντέλων ημιβαριογραμμάτων για τις δυο ειδικές ενέργειες οι οποίες παρουσιάζεται με χρωματικό κώδικα στο *Σχ. 5.16α* δίδοντας ισοδύναμα αποτελέσματα (*Σχ. 5.16β*).

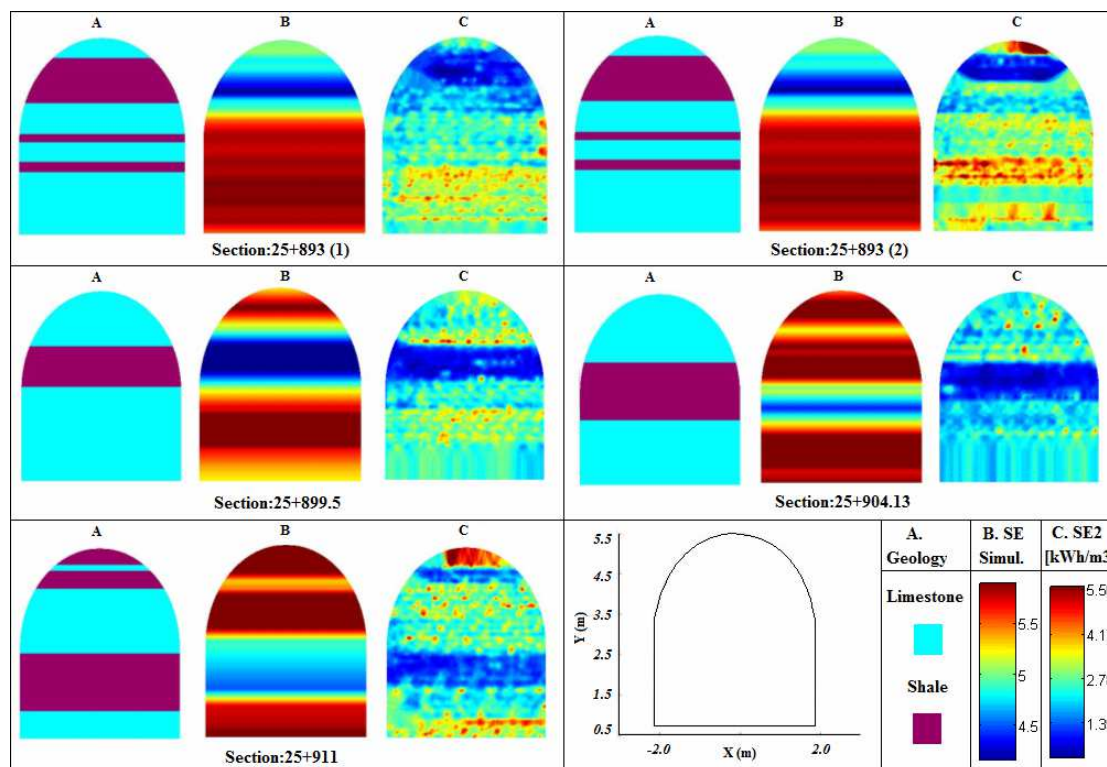


Σχήμα 5.16: α) Απεικόνιση της ειδικής ενέργειας στη διατομή της σήραγγας (Χ.Θ. 25893) σε kWh/m^3 και β) συσχέτιση των δυο ειδικών ενεργειών σε MPa ή MJ/m^3 ($1\text{kWh/m}^3 = (10/36) \times \text{MPa}$)

Από την απεικόνιση της ειδικής ενέργειας (*Σχ. 5.16α*) με τους δυο εναλλακτικούς τρόπους, φαίνεται ότι στην στέψη της σήραγγας συναντάται ο

σχιστόλιθος που είναι μαλακότερος από τον ασβεστόλιθο στα κάτω τμήματα της διατομής όπως αυτό αναμενόταν και από την γεωλογική μηκοτομή (Σχ. 5.9) .

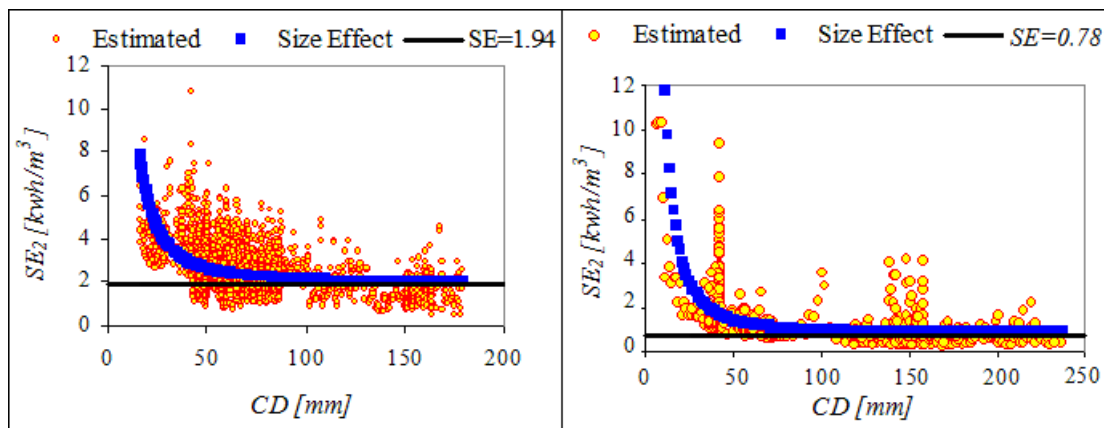
Με τον ίδιο τρόπο υπολογίσθηκαν και για τις άλλες διατομές: X.Θ. 25893, X.Θ. 25899.5, X.Θ. 25904.13 και X.Θ. 25911. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο Σχ. 5.15 σε σύγκριση με την γεωλογική πληροφορία (Σχ. 5.9) και με τις στοχαστικές προσομοιώσεις (Σχ. 5.14) από όπου φαίνεται καθαρά η εξάρτηση της ειδικής ενέργειας από τον σχηματισμό που συναντάει η κοπτική κεφαλή.



Σχήμα 5.17: Σύγκριση της λιθολογίας και των αποτελεσμάτων για την ειδική ενέργεια από τις στοχαστικές προσομοιώσεις και από τις καταγραφές του RH.

Η ειδική ενέργεια παρουσιάζει έντονη εξάρτηση από το βάθος κοπής CD του μηχανήματος με μια κλασματική σχέση κατά αντιστοιχία με αυτήν που παρουσιάστηκε στο [Κεφ. 2](#) για το μέσο βάθος κοπής, δ, ανά κοπτικό άκρο ([εξ. \(2.12\)](#)). Η κλασματική αυτή σχέση είναι ανωτέρου βαθμού [εξ. \(5.4\)](#) σε σύγκριση με την [εξ. \(2.14\)](#) και αυτό οφείλεται στο ότι το CD δεν εξαρτάται γραμμικά από το δ όπως φαίνεται από τον [Πιν. 5.3](#).

$$SE = \frac{a}{CD^2} + b \quad (5.4)$$



Σχήμα 5.18: Φαινόμενο κλίμακας για τον ασβεστόλιθο και τον σχιστόλιθο στην Χ.Θ. 25893, αντιστοίχως.

Στο [Σχ. 5.18](#) παρουσιάζεται το φαινόμενο κλίμακας της ειδικής ενέργειας για κάθε σχηματισμό στην Χ.Θ. 25893, όπου για τον ασβεστόλιθο η ειδική ενέργεια τείνει στην τιμή $1.94 \text{ [kWh/m}^3\text{]}$ ενώ για τον σχιστόλιθο $0.78 \text{ [kWh/m}^3\text{]}$, παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και για τις άλλες τομές.

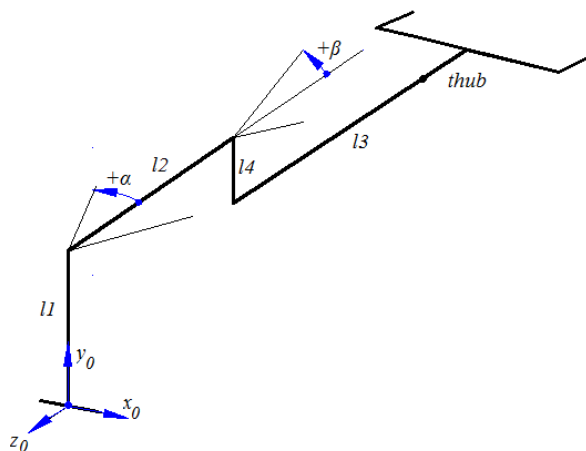
5.5. Σήραγγα στο Μπιλμπάο

Η τελευταία εξεταζόμενη περίπτωση αφορά την όρυξη της σήραγγας στο Μπιλμπάο (Ισπανία) που έγινε με RH. Το μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε είναι το **MT520** με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που φαίνονται στον [Πιν. 5.6](#).

Πίνακας 5.6: Γεωμετρία του RH MT520.

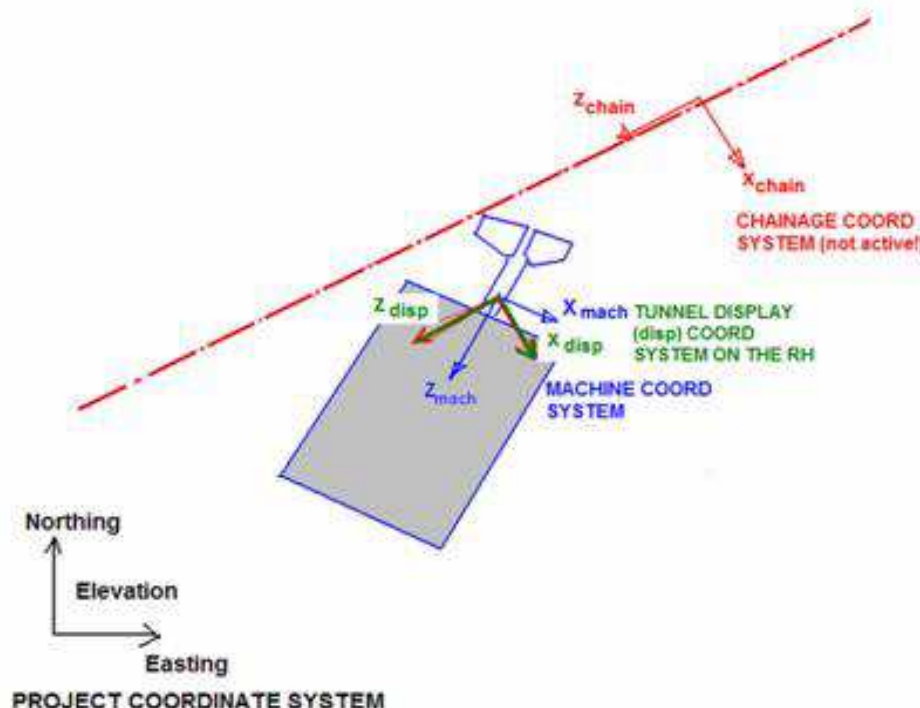
| | |
|-------------|-------|
| l1 [m] | 2.7 |
| l2 [m] | 1.245 |
| l3 [m] | 4.329 |
| l4 [mm] | 20 |
| Max thub[m] | 1.2 |
| R [m] | 0.65 |

Τα δεδομένα που δίδονται είναι στις τοπικές συντεταγμένες του RH και πιο συγκεκριμένα δίδονται η οριζόντια γωνία κίνησης α και η κατακόρυφη γωνία κίνησης β του βραχίονα. Οι συντεταγμένες στο τοπικό επίπεδο του RH βρίσκονται γεωμετρικά από το [Σχ. 5.19](#).



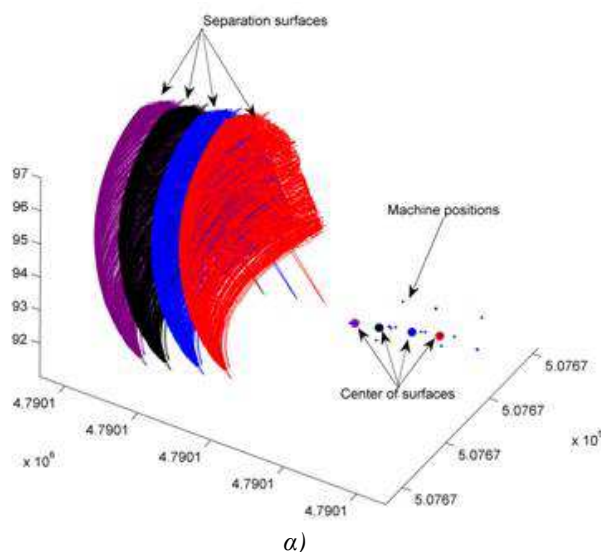
Σχήμα 5.19: Τοπικό σύστημα συντεταγμένων του RH.

Στην περίπτωση αυτή είναι διαθέσιμος και ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων στο καθολικό σύστημα αλλά και στο σύστημα της σήραγγας (Σχ. 5.20) έτσι ώστε να είναι δυνατός ο διαχωρισμός των διαδοχικών μετώπων εκσκαφής.



Σχήμα 5.20: Καθολικό σύστημα συντεταγμένων, σύστημα συντεταγμένων της σήραγγας και σύστημα συντεταγμένων του RH.

Ο διαχωρισμός των διαδοχικών μετώπων έγινε με την ανίχνευση της κίνησης του τηλεσκοπικού βραχίονα (αύξηση του μήκους «thub») που εκτός από τις περιπτώσεις καθαρισμών για την διαμόρφωση της τελικής διατομής, γίνεται στο κάτω τμήμα της διατομής της σήραγγας όπου γίνεται η βύθιση (sumping) για την κοπή σε νέο μέτωπο κοπής. Από την διαδικασία αυτή εντοπίστηκαν τέσσερα (4) διαδοχικά μέτωπα εκσκαφής όπου τα κέντρα των επιφανειών και οι θέσεις του μηχανήματος παρουσιάζονται στο Σχ. 5.21.

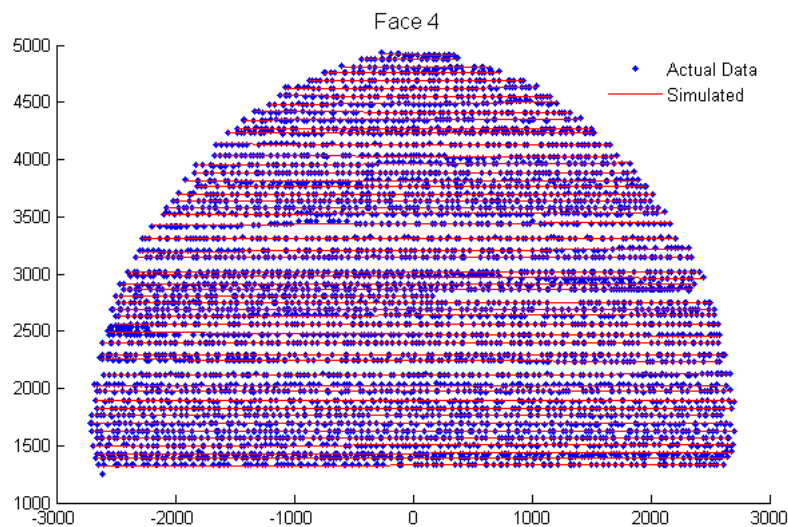




β)

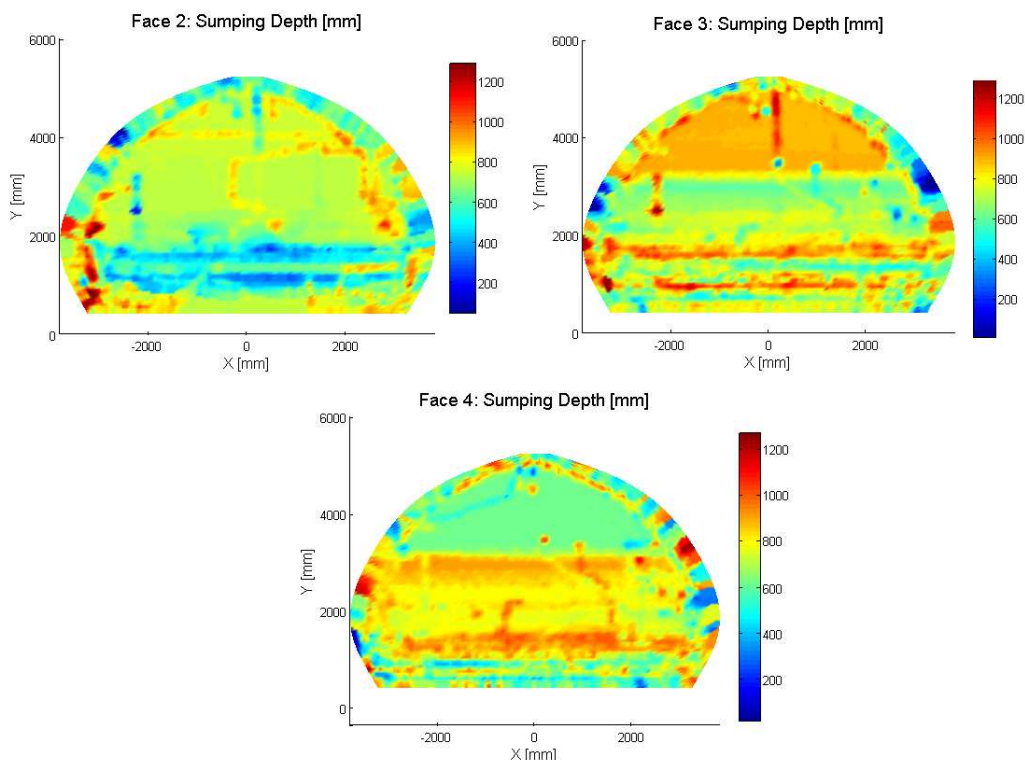
Σχήμα 5.21: α) Διαδοχικά μέτωπα στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων και β) στο σύστημα της σήραγγας.

Ο υπολογισμός του βάθους κοπής CD γίνεται όπως και στην περίπτωση του Μόντρεαλ με την αποκοπή των δεδομένων μη οριζόντιων κοπών (arcing).



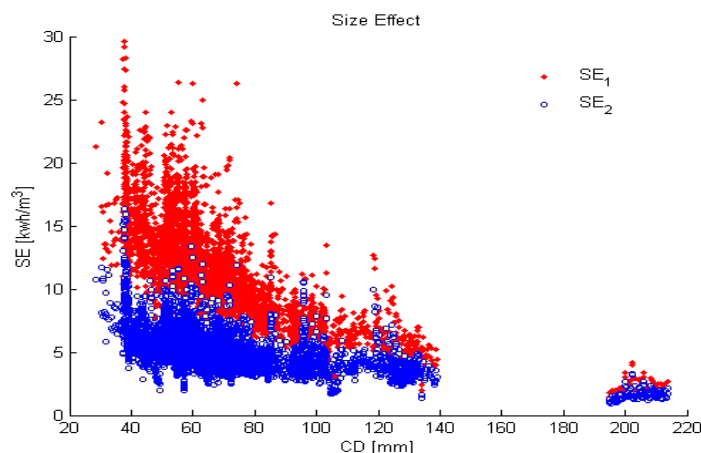
Σχήμα 5.22: Εκτίμηση του βάθους κοπής CD από τα δεδομένα για το τέταρτο μέτωπο.

Το βάθος βύθισης (SD) για το πρώτο μέτωπο κοπής είναι 650mm, ενώ για τα άλλα μέτωπα μπορεί να εκτιμηθεί από την απόσταση από την επιφάνεια του προηγούμενου μετώπου (Σχ. 5.23).



Σχήμα 5.23: Εκτίμηση SD από την κοπή του προηγούμενου μετώπου κοπής.

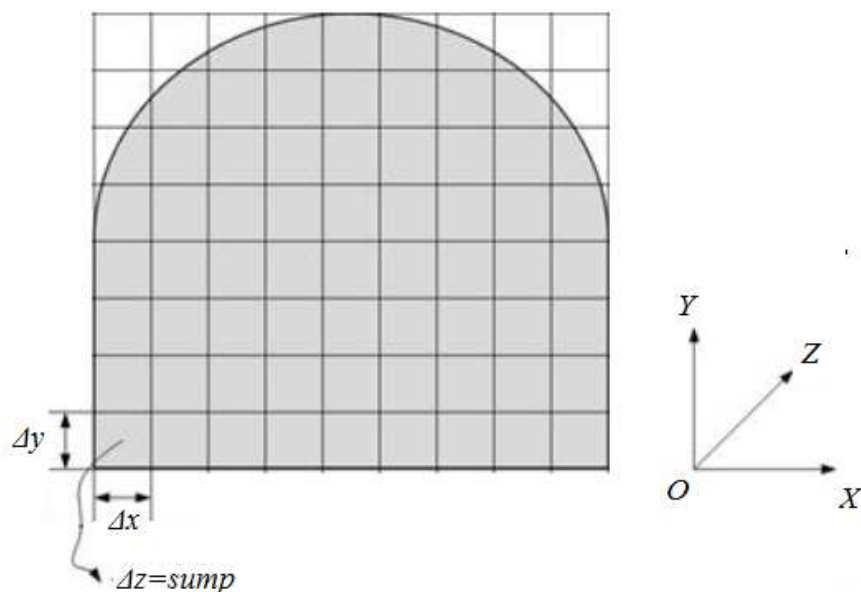
Με βάση όλα τα παραπάνω γίνεται η εκτίμηση της ειδικής ενέργειας για την περίπτωση του Μπιλμπάο, από την σύγκριση των αποτελεσμάτων για της δυο μεθόδους υπολογισμού των ειδικών ενεργειών (Σχ. 5.24) προκύπτει ότι διαφέρουν σημαντικά στα μικρά βάθη κοπής και αυτό οφείλεται στην υποεκτίμηση του μοντέλου υπολογισμού του βάθους κοπής ανά κοπτικό, δ . Παρόλο' αυτά η ειδική ενέργεια και στις δύο περιπτώσεις συγκλίνει στην ίδια τιμή ($\sim 2.4 \text{ kWh/m}^3$).



Σχήμα 5.24: Σύγκριση υπολογισμών της ειδικής ενέργειας.

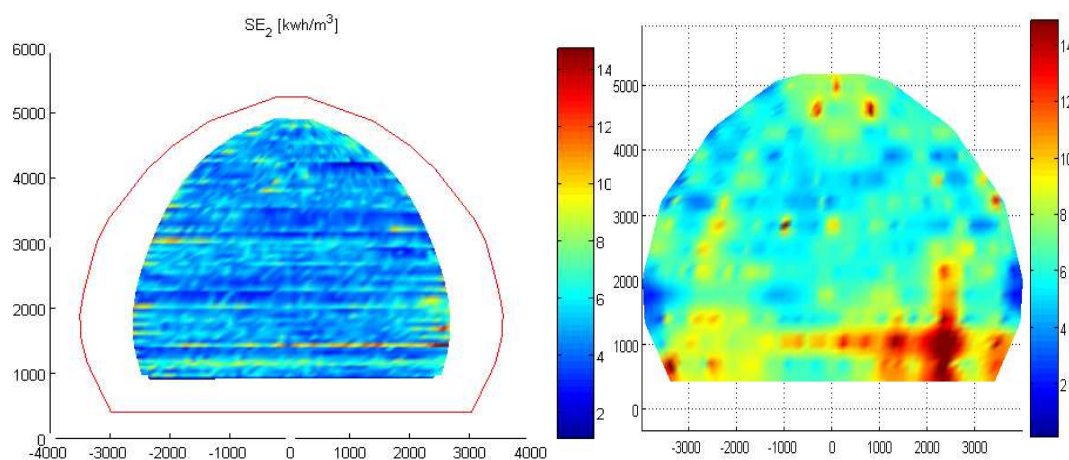
Στην συνέχεια προτείνεται ένας νέος τρόπος υπολογισμού της ειδικής ενέργειας σε όλο το μέτωπο της σήραγγας διακριτοποιώντας την επιφάνεια της σήραγγας σε στοιχεία με μέγεθος Δx , Δy (Σχ. 5.25) όπου η τρίτη διάσταση Δz είναι είτε το ονομαστικό βάθος βύθισης (650mm) είτε αυτό που βρέθηκε στα Σχ. 5.23. Η ειδική ενέργεια για κάθε στοιχείο βρίσκεται στην περίπτωση αυτή από την εξ. (5.5) από το άθροισμα της ενέργειας εντός του στοιχείου δια τον όγκο του στοιχείου $\Delta V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$.

$$SE_2 = \frac{\sum E}{\Delta V} \quad (5.5)$$



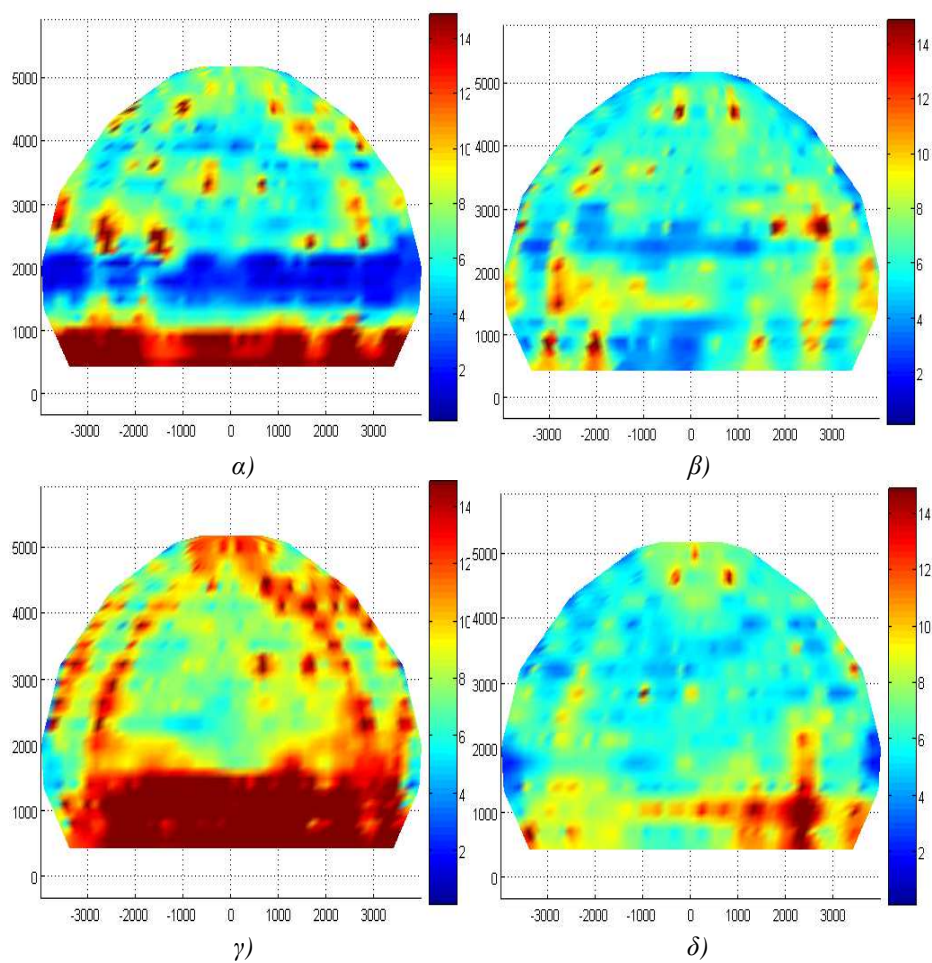
Σχήμα 5.25: Διακριτοποίηση μετώπου της σήραγγας.

Από αυτήν την μεθοδολογία προκύπτουν αποτελέσματα συγκρίσιμα με την ειδική ενέργεια που υπολογίστηκε παραπάνω (Σχ. 5.26), με τον επιπλέον υπολογισμό της ειδικής ενέργειας στις περιοχές βύθισης (sumping) και αλλαγής επιπέδου (lifting).



Σχήμα 5.26: Σύγκριση δύο μεθόδων υπολογισμού της ειδικής ενέργειας SE_2 .

Τέλος στο Σχ. 5.27 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την ειδική ενέργεια για τα τέσσερα μέτωπα κοπής, όπου φαίνεται ότι η ειδική ενέργεια είναι μεγαλύτερη στις περιοχές που γίνεται αλλαγή επιπέδου κοπής και στην περιοχή που γίνεται η βύθιση του μηχανήματος σε όλες τις τομές πλην της πρώτης όπου δεν υπήρχε διαθέσιμη η προηγούμενη επιφάνεια κοπής και χρησιμοποιήθηκε η ονομαστική βύθιση (sumping) για όλη την διατομή με αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση του όγκου (υποεκτίμηση της ειδικής ενέργειας) στην περιοχή που γίνεται η βύθιση της κοπτικής κεφαλής.



Σχήμα 5.27: Κατανομή SE_2 καθ' όλη την διατομή των τεσσάρων μετώπων.

Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκε η κοπή των πετρωμάτων με συρτικά κοπτικά άκρα (εργαλεία) και δίσκους κοπής τα οποία χρησιμοποιούνται στις κοπτικές κεφαλές των μηχανημάτων σημειακής και ολομέτωπης κοπής πετρωμάτων και εδαφών σε υπόγεια μέτωπα. Αυτή η μελέτη έγινε για να μπορεί να προβλεφθεί ή να αναλυθεί η αποδοτική λειτουργία των μηχανημάτων αυτών κατά την διάνοιξη υπογείων ανοιγμάτων αλλά και να σχεδιασθεί το καταλληλότερο μηχάνημα με την καλύτερη απόδοση σε δεδομένες γεωτεχνικές συνθήκες. Ο άλλος στόχος της εργασίας αυτής είναι η χρησιμοποίηση δεδομένων κατά την λειτουργία των μηχανημάτων αυτών έτσι ώστε να «εμπλουτίζεται» σταδιακά το γεωτεχνικό μοντέλο της βραχώμαζας γύρω και μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής. Για την πλήρωση αυτών των στόχων έπρεπε να επιλυθούν τα εξής ενδιάμεσα προβλήματα:

- 1) Να καταστρωθούν αναλυτικά μοντέλα κοπής γεωϋλικών με συρτικά κοπτικά άκρα και δίσκους κοπής αφού έως σήμερα τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα είναι είτε εμπειρικά είτε αριθμητικά.
- 2) Εν συνεχεία να καταστρωθούν τα μοντέλα των κοπτικών κεφαλών των μηχανημάτων όρυξης υπογείων και της κίνησης αυτών στον χώρο θεωρούμενων ως στερεών σωμάτων, τα οποία περιλαμβάνουν συστοιχία κοπτικών άκρων των δύο τύπων που προαναφέρθηκαν.
- 3) Να καταστρωθεί το τριδιάστατο και διακριτοποιημένο γεωλογικό – γεωστατιστικό μοντέλο της περιοχής γύρω από τη σήραγγα. Αυτό είναι απαραίτητο ώστε να μπορούν να γίνουν οι αναλύσεις σε κάθε γεωλογικό σχηματισμό ξεχωριστά και να παρεμβληθούν οι γεωτεχνικές και γεωλογικές μετρήσεις στις θέσεις του μετώπου όπου υπάρχουν διαθέσιμες καταγραφές από τα μηχανήματα όρυξης.
- 4) Να γίνουν βελτιώσεις στον ήδη υπάρχοντα γεωστατιστικό κώδικα KRIGSTAT και να αναβαθμισθεί σε KRIGSTAT v 2.0 που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των δεδομένων από τις τέσσερις εξετασθείσες περιπτώσεις όρυξης σηράγγων.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων διάνοιξης σηράγγων με την χρήση ειδικών μηχανημάτων κοπής (RH και TBM) είναι τα ακόλουθα:

- Το αναλυτικό μοντέλο υπολογισμό της ειδικής ενέργειας με βάση το Άνω Οριακό Θεώρημα της Ιδεατής Θεωρίας Πλαστικότητας έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα κοπής στην ειδική πειραματική συσκευή του εργαστηρίου για διαφορετικού τύπου συρτικά άκρα που χρησιμοποιήθηκαν σε τρία διαφορετικά πετρώματα.
- Από την χρήση διδιάστατου αριθμητικού κώδικα συνοριακών στοιχείων προέκυψε ότι η αρχική εφελκυστική ρωγμή (Mode I) κάτω από το κοπτικό διαδίδεται προς την ελεύθερη επιφάνεια ακολουθώντας την εξίσωση λογαριθμικής σπείρας με το βάθος κοπής του μοντέλου να είναι μεγαλύτερο από το ονομαστικό (undercutting).
- Τα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου στα πλαίσια της Θραυστομηχανικής θεωρίας συγκρίθηκαν με πραγματικά δεδομένα κοπής για τον γρανίτη από το Merrivale με κυλιόμενο κοπτικό δίσκο, δίνοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα. Οι προβλέψεις αυτού του μοντέλου έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα με το αναλυτικό μοντέλο που έγινε με βάση το

Κάτω Οριακό Θεώρημα. Γι' αυτό το λόγο στις πραγματικές εφαρμογές όρυξης σηράγγων χρησιμοποιήθηκαν τα αναλυτικά μοντέλα του Κάτω και Άνω Οριακού θεωρήματος που είναι μεν προσεγγιστικά αλλά οδηγούν σε γρηγορότερες αναλύσεις που είναι απαραίτητες στην πράξη.

- Η ειδική ενέργεια εξαρτάται από το βάθος κοπής (φαινόμενο κλίμακας) και στις δυο τύπους μηχανημάτων, όπου στην μεν περίπτωση του TBM είναι αντιστρόφως ανάλογη με το βάθος κοπής, ενώ για την περίπτωση του RH είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο του βάθους κοπής. Παρόλο αυτά και στις δυο περιπτώσεις είναι δυνατός ο προσδιορισμός και διόρθωσης της εξάρτησης αυτής από τα δεδομένα.
- Είναι εφικτή η μετατροπή μηχανημάτων σημειακής ή ολομέτωπης όρυξης σηράγγων σε «αισθητήρες» των μηχανικών ιδιοτήτων των γεωϋλικών μέσω του υπολογισμού της ειδικής ενέργειας κατά μήκος της σήραγγας όπως καταδείχθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια.
- Οι εκτιμήσεις του αναλυτικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό με τις στοχαστικές προσομοιώσεις για την μετατροπή της γεωλογικής πληροφορίας σε ένα προσομοίωμα της ειδικής ενέργειας κατά μήκος της σήραγγας όπως καταδείχθηκε σε ένα παράδειγμα από τις πραγματικές περιπτώσεις όρυξης σηράγγων.
- Προτείνεται επίσης για πρώτη φορά μέθοδος για την αξιοποίηση των καταγραφών των RH σε σχεδόν πραγματικό χρόνο για την αποτύπωση της κατανομής της ειδικής ενέργειας στα διαδοχικά μέτωπα κατά μήκος της σήραγγας

Για την περαιτέρω αξιοποίηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την μελέτη των τεσσάρων εξετασθέντων περιπτώσεων διάνοιξης σηράγγων γίνονται οι εξής προτάσεις:

- Να ληφθεί υπόψιν η επίδραση της ανισοτροπίας της βραχώμαζας λόγω της διάταξης των ασυνεχειών του πετρώματος στον υπολογισμό της ειδικής ενέργειας που δεν έγινε στην παρούσα εργασία.
- Όσον αφορά το αναλυτικό μοντέλο με τον κινηματικό μηχανισμό μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί της ευθύγραμμης διατμητικής ασυνέχειας η λογαριθμική σπείρα που ανταποκρίνεται περισσότερο στην πραγματικότητα ιδιαίτερα για μαλακά ή ψαθυρά γεωϋλικά, ή εναλλακτικά με την χρήση των γραμμών ολίσθησης του Κάτω Οριακού Θεωρήματος
- Για την περίπτωση που το μηχάνημα ολομέτωπης κοπής λειτουργεί ως κλειστού τύπου (EPB), όπως σε μεγάλο τμήμα των δύο περιπτώσεων διάνοιξης σηράγγων με την χρήση του μηχανήματος TBM που μελετήθηκαν, ένα μέρος της ενέργειας του μηχανήματος δαπανάται για την ανάδευση του πολφού μέσα στον θάλαμο. Έτσι για τον υπολογισμό της πραγματικής ενέργειας κοπής χρειάζεται να γίνει εκτίμηση της ενέργειας ανάδευσης για την αφαίρεση από την συνολική ενέργεια του μηχανήματος.
- Να επεκταθεί το συνδυασμένο γεωστατιστικό – μηχανικό μοντέλο ανάλυσης σηράγγων με μοντέλο πρόβλεψης του κόστους της όρυξης. Για να γίνει αυτό πρέπει να αναπτυχθεί μοντέλο της φθοράς των κοπτικών εργαλείων συναρτήσει των μέτρων προχώρησης της σήραγγας (σύμφωνα με τις σχέσεις 1.8 – 1.10 του 1^{ου} κεφαλαίου), να βρεθεί και η επίδραση της φθοράς των κοπτικών εργαλείων στην ειδική ενέργεια που επηρεάζει τον ρυθμό διάτρησης και να υπάρχει η σχέση του ρυθμού προχώρησης AR με τον ρυθμό διάτρησης PR.

Δημοσιεύσεις που έγιναν στα πλαίσια της παρούσης ΔΔ

(Α) Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά

1. Exadaktylos G., Stavropoulou, M., Xiroudakis, G., Broissia, M. & Schwarz, H., 2008. *A spatial estimation model for continuous rock mass characterization from the specific energy of a TBM*. Rock Mechanics & Rock Engineering, 41: 797–834, Springer.
2. Exadaktylos, G. & Xiroudakis, G., 2009. *A G2 constant displacement discontinuity element for analysis of crack problems*. Comput Mech, 45, 245–261.
3. Exadaktylos, G. & Xiroudakis, G., 2010a. *The G2 constant displacement discontinuity method. - Part I: Solution of plane crack problems*. Int. J. Solids Structures 47, 2568–2577.
4. Exadaktylos, G. & Xiroudakis, G., 2010b. *The G2 constant displacement discontinuity method - Part II: Solution of half-plane crack problems*. Int. J. Solids Structures 47, 2578–2590.
5. Stavropoulou, M., Xiroudakis, G. & Exadaktylos, G., 2010. *Spatial estimation of geotechnical parameters for numerical tunneling simulations and TBM performance models*. Acta Geotechnica 5, Number 2, June, 2010, pp. 139-160.

(Β) Δημοσιεύσεις σε διεθνή συνέδρια

6. Stavropoulou, M., Exadaktylos, G., Xiroudakis, G. & Saratsis, G., 2007. *Modeling of discrete geological volumes, spatial heterogeneity and upscaling of rock parameters in underground engineering ECCOMAS*. Thematic Conference on Computational Methods in Tunnelling (EURO:TUN 2007), J. Eberhardsteiner et.al. (eds.), Vienna, Austria, August 27- 29, 2007.
7. Stavropoulou, M., Exadaktylos, G., Xiroudakis, G., & Saratsis, G., 2009. *A geotechnical and EPB model of Mas-Blau L9 metro tunnel in Barcelona, EURO:TUN 2009*. 2nd International Conference on Computational Methods in Tunnelling, Ruhr University Bochum, 9-11 September 2009, Aedificatio Publishers, 933-954.

Βιβλιογραφία

- [1] Balci, C., Demircin, M.A., Copur, H. & Tuncdemir, H., 2004. *Estimation of optimum specific energy based on rock properties for assessment of roadheader performance*. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy
- [2] Barenblatt, G.I., 1962. *Mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture*. Advances in Applied Mechanics, Vol. 7. Academic Press, New York.
- [3] Barton N., 1999. *TBM performance in rock using QTBM*. Tunnel Tunnelling Int, Milan, 31:41–8.
- [4] Barton, N., 2000. *TBM tunnelling in jointed and faulted rock*. Rotterdam: Balkema.
- [5] Broek, D., 1982. *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. Martinus Nijhoff Publishers, Boston, The Hague, Dordrecht.
- [6] Bruland, A., Dahlo, T.S. & Nilsen, B., 1995. *Tunneling Performance Estimation Based on Drillability Testing*. Proceedings 8th International Congress on Rock Mechanics, Sept. 25-30, Tokyo, Japan.
- [7] Bruland, A., 1998. *Hard Rock Tunnel Boring; Drillability; Test Methods*. Thesis of Norwegian University of Science and Tecnology, Trondheim.
- [8] Chen, W.F., 1975. *Limit analysis and soil plasticity*. Developments in Geotechnical Engineering 7, Elsevier Scientific Publishing Company.
- [9] Cherepanov, G.P., 1979. *Mechanics of Brittle Fracture*. McGraw-Hill, New York.
- [10] Clark, I., 1977. *Practical Kriging in Three Dimensions*. Computers & Geosciences, Vol.3, Pergamon Press, p.p. 173-180.
- [11] Crouch, S.L., 1976. *Solution of plane elasticity problems by the displacement discontinuity method*. Int. J. Num. Methods Engng. 10, 301-343.
- [12] Crouch, S.L. & Starfield, A.M., 1990. *Boundary Element Methods in Solid Mechanics*. Unwin Hyman, Boston.
- [13] Deutsch, C.V. & Journel, A.G., 1992. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York.
- [14] Evans, I., 1962. *A theory of the basic mechanics of coal ploughing*. Proc Int Symp Min Res London, Vol. 2, Oxford, Pergamon Press, pp. 761-798.
- [15] Exadaktylos, G., Vardoulakis, I. & Aifantis, E., 1996. *Cracks in gradient elastic bodies with surface energy*. Int. J. Fracture 79, pp. 107-119.
- [16] Exadaktylos, G. & Stavropoulou, M., 2008. *A Specific Upscaling Theory of Rock Mass Parameters Exhibiting Spatial Variability: Analytical relations and computational scheme*. Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci, 45, 1102–1125.
- [17] Exadaktylos G., Stavropoulou, M., Xiroudakis, G., Broissia, M. & Schwarz, H., 2008. *A spatial estimation model for continuous rock mass characterization from the specific energy of a TBM*. Rock Mechanics & Rock Engineering, 41: 797–834, Springer.

- [18] Exadaktylos, G. & Xiroudakis, G., 2009. *A G2 constant displacement discontinuity element for analysis of crack problems*. Comput Mech, 45, 245–261.
- [19] Exadaktylos, G. & Xiroudakis, G., 2010a. *The G2 constant displacement discontinuity method. - Part I: Solution of plane crack problems*. Int. J. Solids Structures 47, 2568–2577.
- [20] Exadaktylos, G. & Xiroudakis, G., 2010b. *The G2 constant displacement discontinuity method - Part II: Solution of half-plane crack problems*. Int. J. Solids Structures 47, 2578–2590.
- [21] Exadaktylos, G, Xiroudakis, G., Stavropoulou, M., 2015. New cutting models for rocks with cutting picks and disc cutters and integrated models for TBM and Roadheaders. In preparation.
- [22] Goktan, RM., 1995. *Prediction of drag bit cutting force in hard rocks*. In: *Proc 3rd int symp mine mechanization automation*. Golden, Colorado, Vol. 1, p. 10–31/10–38.
- [23] Heino, M., 1999. *Rock Excavation Handbook*. Sandvik Tamrock Corp.
- [24] Hirth, J.P. & Lothe, J., 1982. *Theory of Dislocations*. John Wiley and Sons, New York.
- [25] Hoek, E. & Brown, ET, 1997. *Practical estimates of rock mass strength*. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 34(8), 1165–86.
- [26] Inglis, C.E., 1913. *Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners*. Transactions Inst. Naval Architects, Vol. 60.
- [27] Irwin, G.R., 1957. *Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate*. Journal of Applied Mechanics 24: 361-364.
- [28] Journel, A.G. & Huijbregts, C.J., 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, London.
- [29] Kitanidis, P.K., 1997. *Introduction to Geostatistics: Applications in Hydrogeology*. Cambridge University Press, United Kingdom.
- [30] Kutter, H.K. & Sanio, H.P., 1983. *Discussion of paper Snowdon et al. 1982*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 20, 2, 103-104.
- [31] Li, Z. & Itakura, K.I., 2012. *An analytical drilling model of drag bits for evaluation of rock strength*. Soils and Foundations, 52(2), 216–227.
- [32] Meschke, G., Nagel, F., Stascheit, J., Stavropoulou, M. & Exadaktylos, G., 2009. *Numerical Simulation of the Shield Supported Tunnel Constrution Process in Partially Saturated Soil*.
- [33] Neil, D.M., Rostami, J., Ozdemir, L. & Gertsch, R., 1994. *Production estimating techniques for underground mining using roadheaders*. Sme/Aime.
- [34] Nishimatsu, Y., 1972. *The Mechanics of Rock Cutting*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 9, pp. 261-270.
- [35] Ouchterlony, F., 1990. *Fracture Toughness Testing of Rock with Core Based Specimens*. Eng. Fract. Mech. Vol. 35., No 1-3, pp. 351-366.

- [36] Papoulis, A., 1984. *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*. 2nd Edition, Mc Graw-Hill.
- [37] Pariseau, W. G. and Fairhurst, C., 1967. *The Force-Penetration Characteristic for Wedge Penetration into Rock*. Int. J. Rmh Alech Aim, 5ct Vol 4, pp. 165-180.
- [38] Parker, A. P., 1981. *The mechanics of fracture and fatigue: an introduction*. E. & F.N. Spon.
- [39] Rostami, J. & Ozdemir, L., 1993. *A New Model for Performance Prediction of Hard Rock TBMS*. Chapter 3 in 1993 RETC PROCEEDINGS, 793-809.
- [40] Rostami, J., Ozdemir, L. & Nilsen, B., 1994. *Roadheaders Performance Optimization for Mining and Civil Construction*. 13th Technical Conference, Institute of Shaft Drilling Technology (ISDT).
- [41] Rostami, J., Ozdemir, L. & Nilsen, B., 1996. *Comparison Between CSM and NTH Hard Rock TBM Performance Prediction Models*. ISDT 1996, Las vegas NV.
- [42] Roxborough, F.F. & Phillips, H.R., 1975. *Rock Excavation by Disc Cutter*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 12, 361-366.
- [43] Sanio, HP, 1985. *Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 22, No. 3, pp. 153-161.
- [44] Sato, K., Gong, F. & Itakura, K., 1993. *Measurement of tool force and twist exerted on TBM disc cutters*. Proc. 2nd Int Mine Mechanization and Automation Symposium, Univ of Lulea, Lulea, Sweden.
- [45] Snowdon, R.A., Ryley, M.D. & Temporal, J., 1982. *A Study of Disc Cutting in Selected British Rocks*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 19, 107 to 12.
- [46] Stavropoulou, M., Exadaktylos, G. & Saratsis, G., 2007a. *A Combined Three-Dimensional Geological-Geostatistical-Numerical Model of Underground Excavations in Rock*. Mech. Rock Eng. 40 (3), 213–243.
- [47] Stavropoulou, M., Exadaktylos, G., Xiroudakis, G. & Saratsis, G., 2007b. *Modeling of discrete geological volumes, spatial heterogeneity and upscaling of rock parameters in underground engineering ECCOMAS*. Thematic Conference on Computational Methods in Tunnelling (EURO:TUN 2007), J. Eberhardsteiner et.al. (eds.), Vienna, Austria, August 27- 29, 2007.
- [48] Stavropoulou, M., Xiroudakis, G. & Exadaktylos, G., 2010. *Spatial estimation of geotechnical parameters for numerical tunneling simulations and TBM performance models*. Acta Geotechnica, Volume 5, Number 2, June, 2010, pp. 139-160.
- [49] Swain, M.V. & Lawn, B.P., 1978. *Indentation Fracture in Brittle Rocks and Glasses*. Int. J. Min.Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 13, 311-319.
- [50] Teale, R., 1965. *The concept of specific energy in rock drilling*. Int. J. Rock Mech.& Min. Sci., Vol. 2, p. 57-73.
- [51] University of Trondheim, 1994. *Hard Rock Tunnel Boring*. Project Report 1-94, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.

- [52] Westergaard, H.M., 1939. *Bearing Pressures and Cracks*. Trans. ASME. 61: A49-A53.
- [53] Yagiz, S., 2006. *A Model for Prediction of Tunnel Boring Machine Performance*. IAEG2006 Paper number 383

Άλλες Πηγές

Λογαριθμική Σπείρα: en.wikipedia.org/wiki/Logarithmic_spiral

Τομέας Δυναμικής Τεκτονικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας
Πανεπιστημίου Αθηνών: mstavrop@geol.uoa.gr

BOUYGUES (BYTP), Paris, France: m.debroissia@bouygues-construction.com

GISA Gestió d'Infraestructures, S. A. ISA (GISA), Barcelona, Spain: hsc@gisa.es

Herrenknecht AG, Germany: edelmann.thomas@herrenknecht.de

MIDAS Finite element Pre-Processor: en.midasuser.com

Sandvik Mining and Construction G.m.b.H., Austria: egmont.lammer@sandvik.com

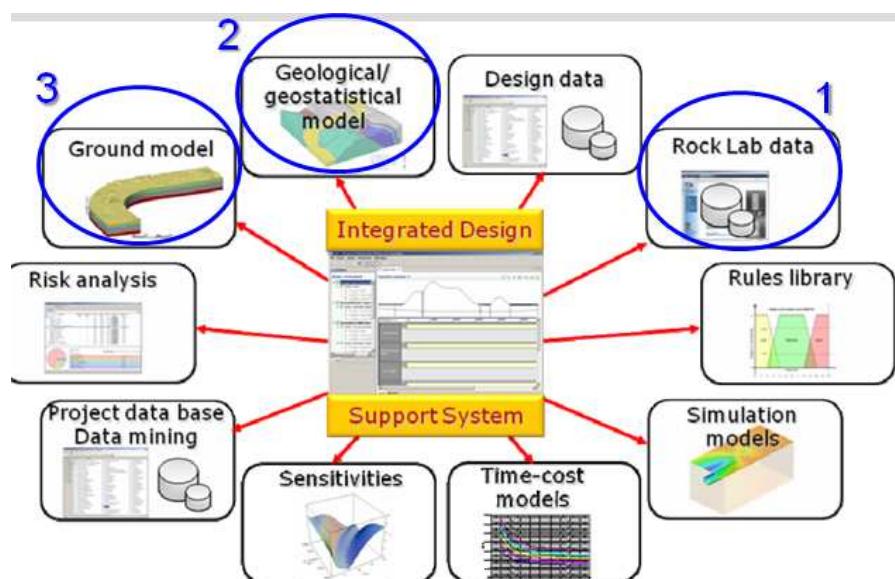
Trans European Road Network TEN-T:
epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Freight_transport_statistics_-_modal_split

<http://www.geovia.com/products/surpac>

Παράρτημα Α. Σύντομη περιγραφή του γεωστατιστικού κώδικα KRIGSTAT

Α.1. Εισαγωγή

Μετά την κατασκευή του ιδεατού (conceptual) γεωλογικού μοντέλου, η γεωστατιστική ανάλυση των γεωλογικών και ερευνητικών δεδομένων (λ.χ. πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις, στρωματογραφικές μετρήσεις, εργαστηριακές δοκιμές κ.λπ.) που περισυλλέγονται στην φάση του προσχεδιασμού και του σχεδιασμού αλλά και στην φάση της κατασκευής ενός υπογείου έργου (αποτυπώσεις μετώπων και μεγέθη που σχετίζονται με τις αποδόσεις μηχανών όρυξης κ.λπ.), κατέχει κεντρική θέση στον σχεδιασμό των υπογείων έργων (συνιστώσα 2) όπως φαίνεται στο Σχ. Α.1. Το διακριτοποιημένο γεωλογικό – γεωστατιστικό μοντέλο περιλαμβάνει εκτός των άλλων και τα αποτελέσματα των δοκιμών στο εργαστήριο (συνιστώσα 1 στο κάτωθι σχήμα) αλλά και τις καταγραφές των μηχανημάτων όρυξης κατά την προχώρηση της σήραγγας. Το γεωτεχνικό μοντέλο (συνιστώσα 3) προέρχεται από το γεωλογικό-γεωστατιστικό μοντέλο και περιλαμβάνει εκτός από την γεωλογία και τις μηχανικές ιδιότητες των σχηματισμών σε κάθε κόμβο που είναι απαραίτητες για να γίνουν μηχανικές αναλύσεις.



Σχήμα Α.1: Κύριες συνιστώσες (εργαλεία) σχεδιασμού υπογείων έργων (Meschke et al., 2009).

Όπως αναφέρθηκε ήδη στο Κεφ. 1 το προτεινόμενο νέο μοντέλο όρυξης σήραγγων και υπογείων έργων βασίζεται στην Γεωστατιστική Ανάλυση σε αντίθεση με τα επικρατούντα μοντέλα CSM και το Νορβηγικό για την ανάλυση αλλά και πρόβλεψη της απόδοσης μηχανών μηχανικής όρυξης. Η συνιστώσα αυτή του μοντέλου είναι σημαντική εφόσον οι εδαφοβραχώμαζες επιδεικνύουν χωρική ετερογένεια.

Α.2. Συνοπτική παρουσίαση βασικών εννοιών της γεωστατιστικής θεωρίας

Η θεωρία των τυχαίων μεταβλητών της Γεωστατιστικής και των Τυχαίων Πεδίων (Papoulis, 1984) παρέχουν τα απαραίτητα μαθηματικά εργαλεία για τη παρεμβολή δεδομένων στο χώρο από διαθέσιμα δειγματοληπτικά δεδομένα. Τα κυριότερα στατιστικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή μιας τυχαίας μεταβλητής

x είναι η εκτιμώμενη μέση τιμή και η διασπορά των μετρήσεων (1^{η} και 2^{η} στατιστική ροπή αντίστοιχα), δηλ.

$$\begin{aligned} m_x &= E[x] \\ \sigma_x^2 &= E[(x - m_x)^2] \end{aligned} \quad (A.1)$$

Επίσης άλλα χρήσιμα μεγέθη είναι η λοξότητα g_1 και η κυρτότητα g_2 , που χρησιμοποιούνται για την ποσοτική περιγραφή της συμμετρίας της κατανομής των δεδομένων αλλά και ως δείκτες για το κατά πόσο τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή, ήτοι

$$\begin{aligned} g_1 &= E[(x - m_x)^3] / \sigma_x^3 \\ g_2 &= E[(x - m_x)^4] / \sigma_x^4 \end{aligned} \quad (A.2)$$

Για τον περιγραφή της χωρικής εξάρτησης των δεδομένων γίνεται η χρήση της συνδιασποράς που περιγράφει την συσχέτιση δύο σημείων που απέχουν απόσταση h και βρίσκονται στο ίδιο στατιστικά ομογενές πεδίο με μέση τιμή m_x .

$$C_x(h) = E[(x(s+h) - m_x) \cdot (x(s) - m_x)] \quad (A.3)$$

Στις περισσότερες των περιπτώσεων η μέση τιμή του πεδίου δεν είναι γνωστή και χρειάζεται να εκτιμηθεί από τα δεδομένα, έτσι μια πιο χρήσιμη στατιστική μεταβλητή που χρησιμοποιείται είναι το ημιβαριόγραμμα και περιγράφεται από την σχέση:

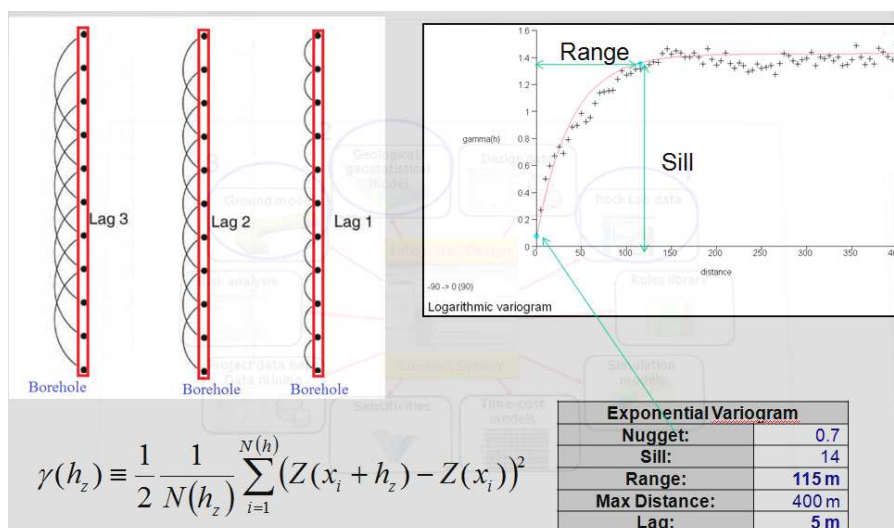
$$2 \cdot \gamma_x(h) = E[(x(s+h) - x(s))^2] \quad (A.4)$$

Στην περίπτωση στατικής τυχαίας μεταβλητής οι δυο παραπάνω μεταβλητές σχετίζονται άμεσα σύμφωνα με την [εξ. \(A.5\)](#).

$$\gamma_x(h) = C_x(0) - C_x(h) \quad (A.5)$$

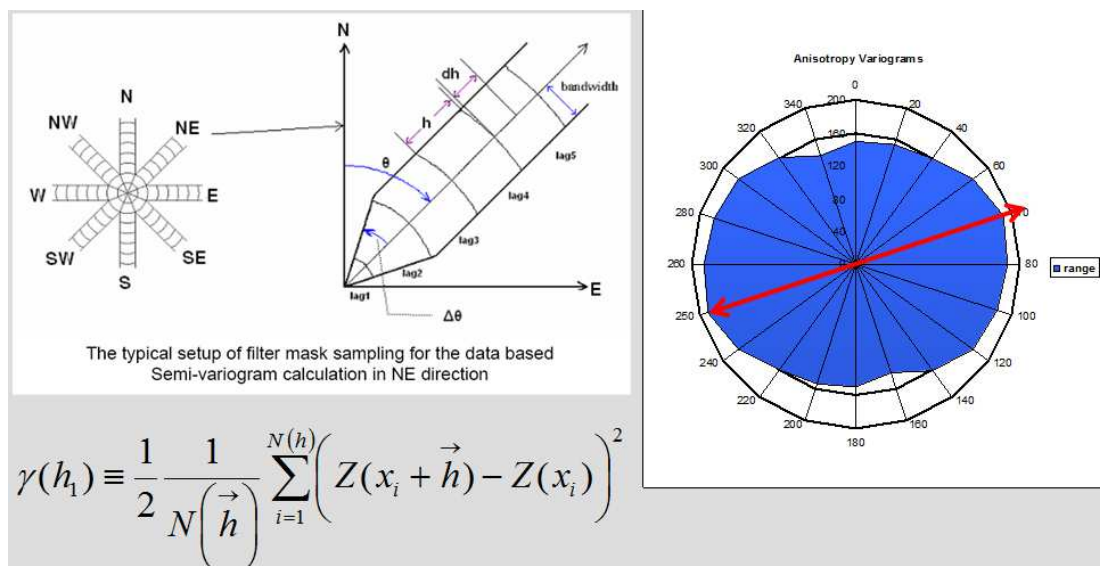
Πάνω στην μεταβλητή του ημιβαριογράμματος (ή της συνδιασποράς) έχει βασιστεί η μέθοδος παρεμβολής του Kriging. Το πειραματικό ημιβαριόγραμμα είναι ο υπολογισμός της διασποράς ζευγών δειγματοληπτικών τιμών (με πλήθος $N(h)$) που απέχουν σταθερή απόσταση h σύμφωνα με την [εξ. \(A.6\)](#) (βλ. [Σχ. A.2](#)).

$$\hat{\gamma}_x(h) = \frac{1}{2 \cdot N(h)} \cdot \sum_{i=1}^{N(h)} [(x(s_i + h) - x(s_i))^2] \quad (A.6)$$



Σχήμα Α.2: Παράδειγμα υπολογισμού του πειραματικού ημιβαριογράμματος για την ανάλυση της χωρικής συνέχειας μιας μεταβλητής από ζεύγη μετρήσεων εντός γεωτρήσεων (down the hole) (Surpac™ της GEMCOM).

Βεβαίως στην περίπτωση που οι δειγματοληπτικές μετρήσεις δεν είναι διατεταγμένα σε κανονικό κάνναβο, για τον πειραματικό προσδιορισμό του ημιβαριογράμματος είναι αναγκαία η χρήση μιας ανοχής κατά την έννοια της γωνιακής και ακτινικής συνιστώσας για την αύξηση των ζευγών του ημιβαριογράμματος ανά κλάση απόστασης όπως φαίνεται στο Σχ. Α.3. Έχοντας προσδιορίσει το ημιβαριόγραμμα κατά μήκος των γεωτρήσεων είναι αναγκαία η μελέτη της ανισοτροπίας του ημιβαριογράμματος στο οριζόντιο επίπεδο, όπου στην περίπτωση αυτή η απόσταση h είναι διάνυσμα (Σχ. Α.3). Το μαθηματικό μοντέλο και οι παράμετροι που το περιγράφουν αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την παρεμβολή των δεδομένων η οποία περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

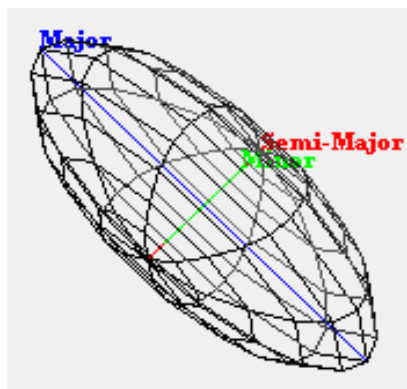


Σχήμα Α.3: Παράδειγμα διερεύνησης της ανισοτροπίας πάνω σε επίπεδο όπου φαίνονται και οι ανοχές κατά την έννοια της γωνιακής και ακτινικής διεύθυνσης για την εύρεση ζευγών τιμών (Surpac™ της GEMCOM).

Η μεταβλητή $\hat{\gamma}_x(h)$ καλείται «πειραματικό ημιβαριόγραμμα» το οποίο μαθηματικά προσεγγίζεται με την χρήση απλών συναρτήσεων όπως είναι το σφαιρικό, το εκθετικό (βλ. Σχ. Α.2), το γκαουσσισιανό, το γραμμικό κ.α. Τα πιο πολλά

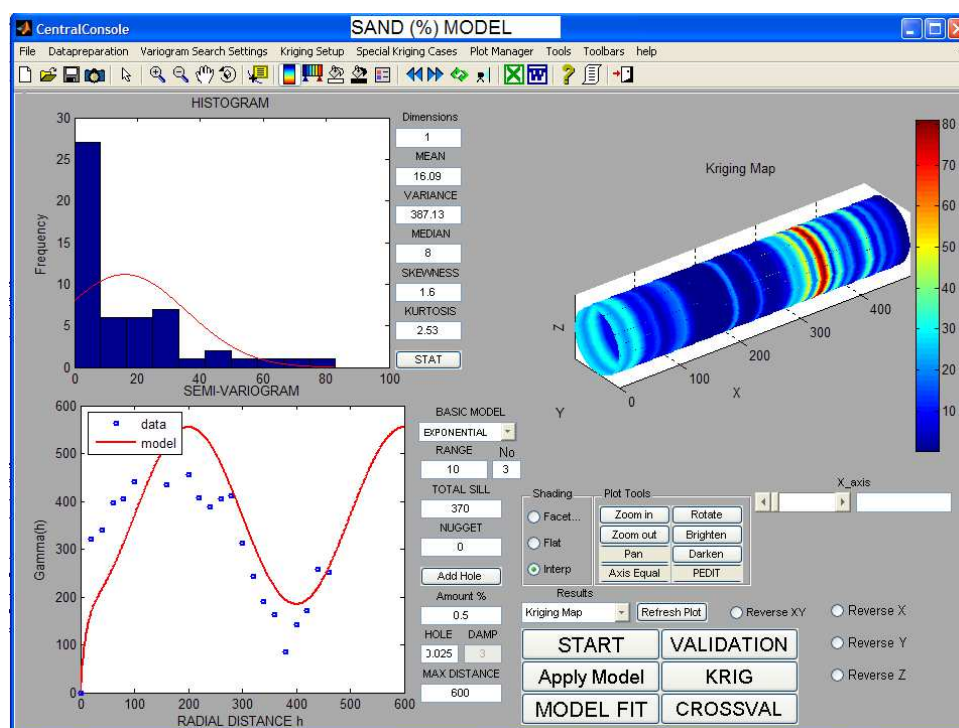
απο τα γνωστά θεωρητικά ημιβαριογράμματα έχουν τις εξής ιδιότητες (*Goovaerts, 1997*):

- 1) Το φαινόμενο κόκκου (nugget effect) (βλ. *Σχ. Α.2*) που περιγράφει την ασυνέχεια του ημιβαριογράμματος κοντά στην αρχή των αξόνων. Πειραματικά ημιβαριογράμματα που περιγράφονται από το φαινόμενο κόκκου προέρχονται από δεδομένα που δεν παρουσιάζουν καμία συσχέτιση.
- 2) Την οροφή (sill) (βλ. *Σχ. Α.2*) είναι η τιμή του ημιβαριογράμματος η οποία προσεγγίζεται σε αποστάσεις όπου η συσχέτιση έχει χαθεί και προσεγγιστικά ταυτίζεται με την διασπορά των δεδομένων, πράγμα που δεν ισχύει σε πολλές των περιπτώσεων (*Journel & Huijbregts, 1978*). Σε περιπτώσεις που το ημιβαριογράμμα δεν τείνει σε συγκεκριμένη τιμή, τότε γίνεται η χρήση μοντέλων όπως το γραμμικό ή το δυναμονομικό.
- 3) Την ακτίνα επίδρασης ή παράμετρος κλίμακας (range) (βλ. *Σχ. Α.2*) που προσδιορίζει την απόσταση που τα δεδομένα παρουσιάζουν χωρική συσχέτιση. Έτσι για παράδειγμα στο σφαιρικό μοντέλο ταυτίζεται με την απόσταση όπου το ημιβαριογράμμα παίρνει την μέγιστη τιμή του (sill), ενώ στο εκθετικό μοντέλο το 95% της οροφής προσεγγίζεται σε απόσταση τριπλάσια της παραμέτρου αυτής.
- 4) Τις παραμέτρους ανισοτροπίας που περιγράφουν την εξάρτηση του ημιβαριογράμματος εκτός από την απόσταση και από την διεύθυνση υπολογισμού. Ο πιο συνηθισμένος τύπος ανισοτροπίας που χρησιμοποιείται είναι η γεωμετρική ανισοτροπία που περιγράφεται πλήρως με τον προσδιορισμό των ακτινών επίδρασης και την κατεύθυνση των κύριων αξόνων ενός ελλειψοειδούς (*Σχ. Α.4*). Ένας άλλος πιο πολύπλοκος τύπος ανισοτροπίας είναι η ζωνώδης ανισοτροπία που εκτός από της ακτίνες επίδρασης και η οροφή του ημιβαριογράμματος αλλάζει στις διάφορες κατευθύνσεις.



Σχήμα Α.4: Ελλειψοειδές με μήκη κυρίων αξόνων ίσα με τις ακτίνες επίδρασης του ημιβαριογράμματος (*Surpac™ της GEMCOM*).

- 5) Τέλος μια επιπλέον παράμετρος που μπορεί να είναι χρήσιμη σε δεδομένα με μη μονοτονικά ημιβαριογράμματα που παρουσιάζουν μια περιοδικότητα. Στην περίπτωση αυτή γίνεται η χρήση των κυκλικών ημιβαριογραμμάτων (hole effect: π.χ. το συνημίτονο, το ημίτονο, το Bessel κ.α.) όπως φαίνεται στο *Σχ. Α.5*.



Σχήμα Α.5: Άποψη αποτελεσμάτων ανάλυσης Kriging από το KRIGSTAT v. 2.0 που αφορούν την εκτίμηση του πειραματικού ημι-βαριογράμματος της περιεκτικότητας (%) σε άμμο στο μέτωπο της σήραγγας στο Koralim στη διατομή +69500 έως +7000.

Α.3. Εκτιμήσεις με την μέθοδο Kriging

Η βασική στατιστική και γεωστατιστική επεξεργασία γίνεται με την χρήση του γεωστατιστικού αλγορίθμου KRIGSTAT που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Μελέτης & Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων για την ανάλυση δειγματοληπτικών δεδομένων και την εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων στο πεδίο μελέτης. Η ανάλυση ξεκινάει με την στατιστική επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων που περιλαμβάνει τους ελέγχους κανονικότητας, διαχωρισμό δεδομένων ανά γεωλογικό σχηματισμό ή ανά περιοχή με ικανοποιητική στατιστική ομοιογένεια, και τον καθορισμό της ύπαρξης τάσης στα δεδομένα. Στην συνέχεια προσδιορίζεται η χωρική εξάρτηση των δεδομένων και ο καθορισμός του σχήματος Kriging: α) απλό (SK)- συνηθισμένο (OK)- Universal (UK) β) σημειακό, ογκικό γ) ή ειδικών περιπτώσεων Kriging όπως στο πεδίο των δεικτών (IK), το Co-Kriging, το transgaussian Kriging (για μη κανονικά κατανομημένα δεδομένα). Η εκτίμηση της μεθόδου Kriging στην θέση s_o μπορεί να εκτιμηθεί με γραμμική παρεμβολή από τα N γειτονικά δείγματα, σύμφωνα με την εξ. (Α.7).

$$\hat{X}(s_o) = \sum_{i=1}^N \lambda_i X(s_i) \quad (\text{Α.7})$$

όπου λ_i είναι οι συντελεστές βαρύτητας της παρεμβολής.

Το Kriging καλείται Βέλτιστος Αμερόληπτος Γραμμικός Εκτιμητής (**Best Linear Unbiased Estimator**) γιατί σε αντίθεση με τις άλλες γραμμικές μεθόδους παρεμβολής (αντίστροφων τετραγώνων των αποστάσεων, μέθοδο των πολυγώνων κ.τ.λ.), 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

$$E[\hat{X}(s_o) - X(s_o)] = 0 \quad (A.8)$$

β) η ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος της εκτίμησης

$$E[(\hat{X}(s_o) - X(s_o))^2] = 0 \quad (A.9)$$

Το ημιβαριόγραμμα είναι η βασικότερη παράμετρος που χρησιμοποιείται στη μέθοδο Kriging για την ελαχιστοποίηση του τετραγωνικού σφάλματος που ταυτόχρονα αξιοποιεί την συσχέτιση των δεδομένων για τον καθορισμό του σχήματος της παρεμβολής. Για την αξιολόγηση των εκτιμήσεων χρησιμοποιούνται οι στατιστικές μεταβλητές των κανονικοποιημένων σφαλμάτων Q_1 - Q_2 ή άλλων μεθόδων (*Journal & Huijbregts, 1978*) (π.χ. leave-one-out ή cross-validation). Έτσι για την περίπτωση του OK, όπου η μέση τιμή είναι άγνωστη αλλά σταθερή στην γειτονιά έρευνας, οι συντελεστές βαρύτητας λ_i καθορίζονται με την επίλυση του γραμμικού συστήματος με $n+1$ αγνώστους:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma_x(\|s_i - s_j\|) + \beta = \gamma_x(\|s_i - s_o\|) \quad (A.10)$$

Η επιπλέον εξίσωση που χρειάζεται προέρχεται από την εξασφάλιση της αμεροληψίας της εκτίμησης (εξ. (A.8)):

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (A.11)$$

όπου β ο πολλαπλασιαστής του Lagrange και $s_i, s_j, i, j = 1..n$ οι δειγματοληπτικές θέσεις και s_o η θέση εκτίμησης.

Με το OK επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση του τετραγωνικού σφάλματος σύμφωνα με την σχέση (*Chiles & Delfiner, 1999*):

$$\sigma_{OK}^2(s_o) = E[(\hat{X}(s_o) - X(s_o))^2] = \sum_{j=1}^M \lambda_j \gamma_x(\|s_o - s_j\|) - \beta \quad (A.12)$$

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την εξ. (A.12) η διασπορά του Kriging δεν εξαρτάται άμεσα από τις τιμές των δεδομένων παρά μόνο από τις θέσεις τους σε σχέση με το σημείο εκτίμησης.

A.4. Υπό συνθήκη στοχαστικές προσομοιώσεις

Ο αλγόριθμος KRIGSTAT περιέχει και την στοχαστική μέθοδο παραγωγής δεδομένων τα οποία ακολουθούν την στατιστική κατανομή και το ημιβαριόγραμμα των δεδομένων και καλείται Προσομοίωση Ανόπτησης (Simulated Annealing). Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι μια μέθοδος βελτιστοποίησης παρά μια μέθοδος προσομοίωσης και το όνομα της προήλθε από την μεταλλουργία και πιο συγκεκριμένα από τις τεχνικές ανόπτησης (annealing) για την μείωση των ελαττωμάτων μετάλλων και κραμάτων αυτών.

Οι στοχαστικές προσομοιώσεις είναι οι διεργασίες παραγωγής εναλλακτικών χωρικών εκτιμήσεων, $x^{(r)}(s)$, με τις ίδιες πιθανότητες. Στην περίπτωση όπου οι εκτιμήσεις αναγκάζονται να ακολουθούν σε κάποια συγκεκριμένα σημεία στο χώρο

τις τιμές των δεδομένων στα σημεία αυτά, τότε καλούνται στοχαστικές προσομοιώσεις υπό συνθήκη.

$$x^{(r)}(s_o) = x(s_o) \quad \forall r \quad (A.13)$$

Οι στοχαστικές προσομοιώσεις διαφέρουν από την μέθοδο Kriging στα εξής καίρια σημεία:

- α) Οι περισσότερες τεχνικές παρεμβολής οι εκτιμήσεις σε κάθε σημείο παράγονται χωρίς να εξετάζονται τα στατιστικά στοιχεία και η χωρική εξάρτηση των εκτιμήσεων. Αντιθέτως στις προσομοιώσεις τα τελικά στατιστικά και η χωρική εξάρτηση των εκτιμήσεων λαμβάνεται υπόψη στις τελικές εκτιμήσεις.
- β) Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα το Kriging βρίσκει την βέλτιστη εκτίμηση σε κάθε σημείο. Από την άλλη μεριά, οι προσομοιώσεις παράγουν μια σειρά από εκτιμήσεις που είναι αντιπροσωπευτικές εάν εξεταστούν στην ευρύτερη κλίμακα και όχι τοπικά. Η αβεβαιότητα στην περίπτωση αυτή προσδιορίζεται από την διασπορά των εκτιμήσεων αυτών.
- γ) Η εκτίμηση στις προσομοιώσεις γίνεται μόνο σε κανονικό κάρναβο σημείων ενώ στο Kriging η εκτίμηση μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε κάρναβο.

Σύμφωνα με την τεχνική του SA (Σχ. 4.6) τυχαίοι αριθμοί παράγονται από την στατιστική κατανομή που ακολουθούν τα δεδομένα του εξεταζόμενου πεδίου με την χρήση της μεθόδου προσομοίωσης Monte Carlo. Τα δεδομένα αναδιατάσσονται ανά ζεύγη έτσι ώστε η κάτωθι οριζόμενη αντικειμενική συνάρτηση (OF) να ελαχιστοποιείται.

$$OF = \sum_h \frac{[\gamma_x(h) - \hat{\gamma}_x(h)]^2}{\gamma_x(h)^2} \quad (A.14)$$

Με βάση τον ορισμό της εζ. (A.14) η προσομοίωση δίδει μεγαλύτερη βαρύτητα στις μικρές αποστάσεις του ημιβαριογράμματος, με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι το ημιβαριόγραμμα της τελικής προσομοίωσης θα ακολουθείται στις μικρές αποστάσεις όπου τα δεδομένα έχουν μεγαλύτερη συσχέτιση. Με την αποδοχή μόνο των αναδιατάξεων που ελαττώνουν την OF ($\Delta OF = OF^i - OF^{i-1} < 0$) μπορεί να οδηγήσει σε μια προσομοίωση που συγκλίνει πολύ αργά, για τον λόγο αυτό αρχικά γίνεται αποδοχή και συνδυασμών που αυξάνουν ελάχιστα την OF. Σταδιακά ο κανόνας αποδοχής (εζ. (A.15)) μιας αναδιάταξης γίνεται πιο αυστηρός (υποβαθμίζοντας την παράμετρο T) και η προσομοίωση σταματά όταν με την συνεχή αναδιάταξη δεν συμβαίνει καμιά σημαντική βελτίωση στο μοντέλο.

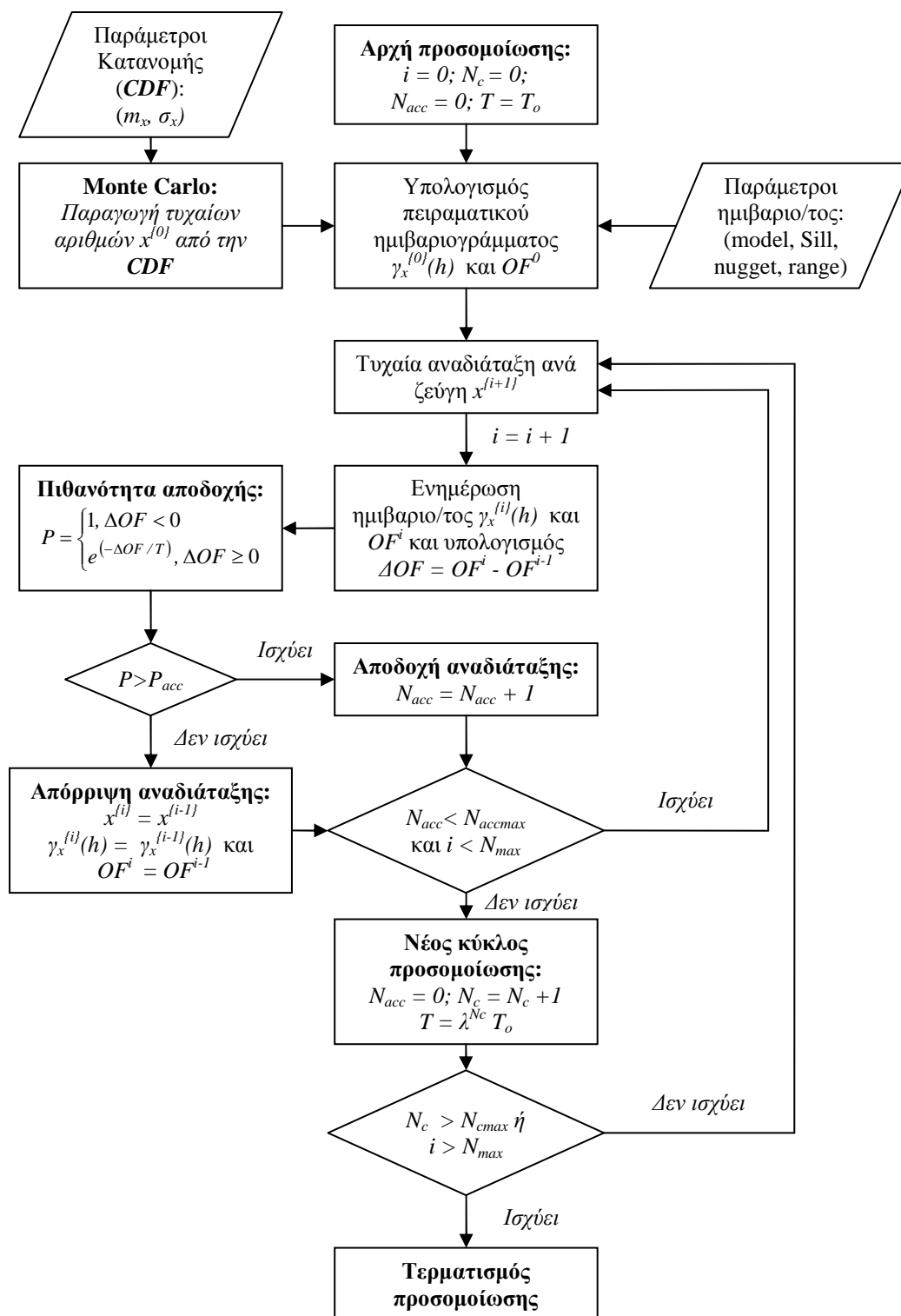
$$P_{acc} \leq \begin{cases} 1, & \Delta OF < 0 \\ \exp(-\Delta OF / T), & \Delta OF \geq 0 \end{cases} \quad (A.15)$$

Στο σχήμα που προτείνεται η προσομοίωση χωρίζεται σε κύκλους, όπου ο κάθε κύκλος χρησιμοποιεί σταθερή την παράμετρο T . Ο κύκλος τερματίζεται όταν ο αριθμός των αποδεχόμενων αναδιατάξεων γίνει πολύ μεγάλος ($> N_{acc\ max}$) που σημαίνει ότι ο έλεγχος αποδοχής δεν είναι αρκετά αυστηρός (συνήθως $N_{acc\ max} = 10$ φορές τον αριθμό των εκτιμώμενων σημείων). Η παράμετρος T σε κάθε κύκλο υποβαθμίζεται με την χρήση ενός συντελεστή $\lambda \in (0-1)$ (εζ. (A.16)) κάνοντας τον κανόνα αποδοχής αυστηρότερο.

$$T = \lambda^{N_c} T_o \quad (A.16)$$

όπου N_c ο τρέχων κύκλος και T_o η αρχική παράμετρος της T .

Η προσομοίωση τερματίζεται όταν ικανός αριθμός κύκλων έχει χρησιμοποιηθεί (συνήθως $N_{c,max} = 3$) ή όταν ο συνολικός αριθμός αναδιατάξεων γίνει πολύ μεγάλος ($> N_{max}$) που σημαίνει ότι γίνονται πολλές αναδιατάξεις χωρίς να μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά το προσομοίωμα (συνήθως $N_{max} = 100$ φορές τον αριθμό των εκτιμώμενων σημείων).



Σχήμα Α.6: Διάγραμμα ροής της τεχνικής στοχαστικής προσομοίωσης