



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

**"Εφαρμογή και σύγκριση μοντέλων πρόγνωσης ρυθμού
προχώρησης ανιούσας σήραγγας σε ετερογενείς βραχώμαζες
με TBM διπλής ασπίδας"**

Διατριβή για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης



**Ερμιόνη Ε. Γιαλύτη
Γεωλόγος**

Εξεταστική επιτροπή:

Γεώργιος Εξαδάκτυλος, Καθηγητής Π.Κ., (επιβλέπων)
Μιχαήλ Γαλετάκης, Αν. Καθηγητής Π.Κ.
Εμμανουήλ Στειακάκης, Επ. Καθηγητής Π.Κ.

**Χανιά
Μάρτιος, 2016**

Περίληψη

Για την πρόβλεψη του ρυθμού διάτρησης και προχώρησης μηχανημάτων ολομέτωπης κοπής (Tunnel Boring Machine, TBM) κατά την όρυξη σήραγγων σε σκληρά πετρώματα έχουν καταρτιστεί αρκετά (περίπου 20) μοντέλα, τα παλαιότερα από τα οποία (μέσα δεκαετίας 80) είναι ημι-εμπειρικά και προκύπτουν από εργαστηριακές δοκιμές γραμμικής κοπής και τυποποιημένες εργαστηριακές δοκιμές μηχανικής των πετρωμάτων. Τα πιο πρόσφατα μοντέλα, αναπτύχθηκαν με βάση πραγματικά δεδομένα υπαίθρου από διαφορετικές γεωλογικές συνθήκες, μετά από στατιστική επεξεργασία ανάδρομης ανάλυσης, ρεαλιστικών τιμών γεωλογικών παραμέτρων, σε συνδυασμό με τα εκάστοτε λειτουργικά χαρακτηριστικά TBM και εμπειρικά συστήματα ταξινόμησης βραχομάζας. Οι πιο συχνές παράμετροι που προσμετρώνται είναι: η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου βράχου, η απόσταση και ο προσανατολισμός των ασυνεχειών, η ονομαστική τιμή ώθησης ανά κοπτικό δίσκο, η διάμετρος του TBM και η απόσταση των κοπτικών. Στο πρώτο τμήμα της παρούσας εργασίας γίνεται συνοπτική περιγραφή των μοντέλων που χρησιμοποιούνται σε σκληρά πετρώματα, προσδιορίζοντας τις κύριες παραμέτρους στις οποίες βασίστηκαν, καθώς και κάποια ενδεικτικά παραδείγματα εφαρμογής: N.Barton (Q_tbm), Norwegian Institute (NTNU), Colorado School of Mines (CSM), και το μοντέλο Οριακής Ανάλυσης (TUC, Exadaktylos et al., 2015-2016). Στο δεύτερο τμήμα παρουσιάζονται οι γεωλογικές συνθήκες, οι τεχνικές προδιαγραφές του TBM της σήραγγας Αποσελέμη, και τα στοιχεία που κατεγράφησαν κατά τη διάνοιξή της έως σήμερα. Κατόπιν παρουσιάζει η μέθοδος της συγκριτικής εφαρμογής των 4 μοντέλων για την πρόβλεψη του ρυθμού διάτρησης και προχώρησης της. Η πρωτοτυπία της παρούσης εργασίας είναι ότι η μέθοδος σύγκρισης των διαφορετικών μοντέλων πρόγνωσης διαμορφώθηκε κατά τέτοιο τρόπο που να λαμβάνει υπόψιν τα διακριτά νέα δεδομένα: (α) ότι το TBM είναι διπλής ασπίδας, (β) ότι η σήραγγα διανοίγεται κατά την ανιούσα φορά, και (γ) δυνατότητα συσχέτισμού με τις πραγματικές τιμές, και ταυτόχρονης αναπροσαρμογής του μοντέλου, με καθημερινή παρακολούθηση της διάνοιξης των πρώτων 550 m της σήραγγας.

Abstract

In order to predict the penetration and advance rates of a Tunnel Boring Machine (TBM) drilling through a rock mass, there have been proposed in the past, more than 20 models. The oldest of these models created in the mid -80's are empirical and are based on linear cutting test rigs in the lab and on rock mechanics element tests. The most recent ones are based on the back-analysis of logged TBM data during the tunnel driving in various geological conditions, rock mechanics tests and empirical rock mass classification systems. The most common rock parameters that are considered are the Uniaxial Compressive Strength (UCS) and the tensile strength (TS) of the rock mass, and other index tests like bit wear tests and drilling rate tests among others, the penetration depth per revolution of the cutter and cutter spacing. In the first part of the present work a brief description of the most used models is performed. The models described in the first part of this paper, are: Barton's Qtbm model, the NTNU model, the Colorado School of Mines (CSM) model and the recently proposed TUC (based on limit analysis) model. In the second part we present the real geological conditions and the technical specifications of the hydraulic tunnel of Aposelemis as well as the up to date logged TBM data. Subsequently the comparative evaluation of each of the considered models is performed regarding the prediction of the penetration and advance rates of the TBM. The innovation of this work is that the comparative evaluation method of the various models is performed in such a way, that takes in account: (a) the TBM double shield machine, (b) the fact that the tunnel is driven as a raise (15%), and (c) the data recorded along the first 550 m of the tunnel.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	2
Abstract	3

ΜΕΡΟΣ Α'

1. Εισαγωγή.....	11
2. Ιστορικό Μηχανοποιημένης Διάνοιξης Σηράγγων	11
3. Γενικά για τα Μοντέλα Πρόγνωσης	13
4. Συσχετισμός RMR και Ρυθμού Προχώρησης AR.....	15
5. Σχεδιαστικές παράμετροι TBM.....	16
6. Παράμετροι πετρώματος	17
7. Βαθμίδα Διείσδυσης - Βαθμίδα Προχώρησης.....	18
8. Εκτίμηση καθυστερήσεων και χρήσης του TBM.....	19
9. Όρυξη με TBM σε σκληρό βράχο - Μηχανισμός θραύσης πετρώματος.....	21
10. Μοντέλα πρόγνωσης της ταχύτητας προχώρησης του TBM.....	23
10.1 Το μοντέλο πρόγνωσης Q t_{bm} – N. Barton	
10.1.1. Ο δείκτης ταξινόμησης Q _{t_{bm}} – αναλυτική περιγραφή.....	25
10.1.1.α.Κερματισμός της βραχομάζας.....	26
10.1.1.β.Διατμητική αντοχή των ασυνεχειών.....	29
10.1.1.γ.Ενεργές τάσεις.....	30
10.1.1.δ.Αντοχή πετρώματος και ώση TBM.....	30
10.1.1.ε.Αποξεστικότητα πετρώματος.....	32
10.1.1.στ.Τάσεις στο μέτωπο.....	34
10.1.2. Νόμος του φθίνοντος ρυθμού προχώρησης	35
10.1.3. Δείκτης Q και φθίνων ρυθμός προχώρησης.....	37
10.1.4. Απαιτούμενος χρόνος όρυξης	38
10.2. Το Νορβηγικό μοντέλο NTNU	39
10.2.1. Καθαρός ρυθμός διείσδυσης σε mm/rev και m/h.....	40
10.2.2. Παράμετροι πετρώματος και μηχανής	42
10.2.3. Ρυθμός προχώρησης σύμφωνα με το NTNU.....	45
10.3. COLORADO SCHOOL OF MINES - CSM Model	46
10.3.1. Η προσέγγιση της «Ειδικής Ενέργειας».....	51
10.3.2. Ανάλυση Δυνάμεων	53
10.4. Μοντέλο TUC (G. Exadaktylos et al, 2016)	55
10.4.1. Παράδειγμα Υπολογισμού	56

ΜΕΡΟΣ Β'**Εφαρμογή των 4 Μοντέλων Πρόγνωσης στη διάνοιξη σήραγγας Αποσελέμη
με ΤΒΜ Διπλής Ασπίδας**

1. Γενικά Στοιχεία του Έργου	58
2. Τεχνικά χαρακτηριστικά ΤΒΜ σήραγγας ΑΠΟΣΕΛΕΜΗ	59
3. Τεχνικογεωλογικές ενότητες στο διάδρομο της Σήραγγας	61
3.1. Αυτόχθονη σειρά των πλακωδών ασβεστολίθων (κατάνη)	63
3.2. Αλλόχθονη σειρά των φυλλιτών (ενδιάμεσα)	63
3.3. Αλλόχθονη σειρά των ασβεστολίθων Τρίπολης (ανάντη)	63
4. Ταξινόμηση Βραχομάζας	66
4.1. Μικροτεκτονική Ανάλυση Βραχομάζας	68
4.1.1 ΤΔ-1 – Ασβεστόλιθοι Plattenkalk	69
4.1.2 ΤΔ-2 –Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	69
4.1.3 Στερεογραφική προβολή - Δίκτυο Schmidt ΤΔ-1 (Βόρειο στόμιο - Plattenkalk)	70
4.1.4 Στερεογραφική προβολή - Δίκτυο Schmidt ΤΔ-2 (Νότιο στόμιο - Ασβεστόλιθοι Τρίπολης)	71
5. Γεωτεχνικές Παράμετροι σχεδιασμού	72
6. Υπολογισμός Ρυθμού Προχώρησης στη σήραγγα Αποσελέμη, με το μοντέλο Qtbm (N. Barton)	75
6.1. Εφαρμογή “νόμου φθίνοντος ρυθμού προχώρησης (Barton)” με βάση τα δεδομένα σήραγγας Αποσελέμη - επίδραση βαθμού χρησιμοποίησης μηχανής (utilization factor U%) στο AR	82
6.2. Αποτελέσματα	84
7. Υπολογισμός Ρυθμού Προχώρησης στη σήραγγα Αποσελέμη, με το μοντέλο NTNU	85
7.1. Αποτελέσματα	85
8. Υπολογισμός Ρυθμού Προχώρησης στη σήραγγα Αποσελέμη με το μοντέλο CSM	86
8.1. Αποτελέσματα	92
9. Υπολογισμός Ρυθμού Προχώρησης στη σήραγγα Αποσελέμη, με το μοντέλο TUC (Exadaktylos et al, 2016)	93
9.1. Ανάλυση δυνάμεων	93
9.2. Υπολογισμός της ορθής δύναμης F_n	97
9.3. Συσχετισμός με πραγματικά δεδομένα	98
9.4. Αποτελέσματα πρόγνωσης με βάση το μοντέλο TUC	100

10. Σύγκριση πρόγνωσης μοντέλων TUC-CSM-Qtbm (penetration 10mm)....	103
10.1. Συμπεράσματα για τα Μοντέλα Πρόγνωσης.....	104
10.2. Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	106
10.3. Τελικό Συμπέρασμα - Επίλογος	108
11. Βιβλιογραφία.....	109
12. Παράρτημα Ι: Φύλλα Υπολογισμών	113

II. Κατάλογος Σχημάτων

1.	Συσχετισμός RMR και ρυθμού προχώρησης TBM (Grandori, 1995).	15
2.	Όρυξη με TBM σε σκληρό βράχο - Μηχανισμός θραύσης πετρώματος	21
3.	Δυνάμεις που επενεργούν στη βραχομάζα μέσω κοπτικού δίσκου	22
4.	Αρχική συσχέτιση PR και AR και η γενική επίδραση της τιμής Q επί αυτών Barton	24
5.	Συσχέτιση ανάμεσα στην σκληρότητα του βράχου (σ_c/I_{50}) και την βαθμίδα διείσδυσης PR και προσανατολισμό των διακλάσεων - Barton	27
6.	Επίδραση του προσανατολισμού της φόρτισης (γωνία β) στη βαθμίδα PR - επίδραση της ανισοτροπίας των πετρωμάτων - Sanio 1985	27
7.	Επίδραση της ανομοιογένειας της βραχομάζας στη δημιουργία chips, όπως εκφράζεται μέσω της στρώσης και της σχιστότητας των ασυνεχειών - Aasen 1980	28
8.	Διακύμανση του PR σε σχέση με την εφαρμοζόμενη ώση ανά κοπτικό για πέτρωμα δεδομένης αντοχής σε θλίψη	31
9.	Διάγραμμα απεικόνισης των καταγεγραμμένων τιμών AVS (Τιμή Αποξεστικότητας κοπτικών Χάλυβα) για συνήθη πετρώματα.	32
10.	Συσχετισμός μεταξύ CAI και AVS (Cerchar Institute, 1986)	33
11.	Συσχετισμός μεταξύ CAI και Siever's J- Value	33
12.	Συσχετισμός μεταξύ των UCS (ISRM) και προτεινόμενων τιμών S_{20} .	33
13.	Νόμος του Φθίνοντος Ρυθμού Προχώρησης Νομόγραμμα N. Barton (από 145 σήραγγες) για συσχέτιση PR, AR, T	35
14.	Εκτίμηση της παραμέτρου απομείωσης χρόνου (-)m, συναρτήσει της τιμής Q	37
15.	Απεικόνιση της σχετικής δυσκολίας προχώρησης με χρήση TBM, συναρτήσει της διευρυμένης παραμέτρου Qtbm (Barton and Abrahao, 2003)	37
16.	Απαιτούμενος χρόνος όρυξης - συσχέτιση AR και Qtbm για διάφορες σήραγγες	38
17.	Γενική πορεία μίας δοκιμαστικής καμπύλης διείσδυσης συναρτήσει της μέγιστης ώσης ανά κοπτικό- από Νορβηγικό Μοντέλο (NTNU)	40
18.	Γραφική απεικόνιση τιμών που προκύπτουν από δοκιμές διείσδυσης - από Νορβηγικό Μοντέλο (NTNU)	41
19.	Τιμές που λαμβάνει ο δείκτης CLI στο μοντέλο πρόβλεψης NTNU για διάφορα μεγέθη κοπτικών δίσκων (Movinkel & Johannessen 1986, NTH 1994)	45

20.	Σχηματισμός Chips βράχου σε άρρηκτο βράχο (Rostami & Ozdemir, 1993)	46
21.	Colorado School of Mines - Ανάλυση δυνάμεων στους δίσκους κοπής των ΤΒΜ, (α) ισομετρική άποψη, (β) πρόσθια και πλάγια κατακόρυφη τομή.	47
22	Κατανομή πίεσης με την εφαρμογή δύναμης	48
23	Ανάλυση δυνάμεων στην προσέγγιση της Ειδικής Ενέργειας -	52
24	Δυνάμεις αντίστασης κοπής, ολίσθησης και κλίσης που πρέπει να υπερνικηθούν από το ΤΒΜ	54
25	Απεικόνιση της γεωμετρίας κοπής, κάτω από την ακμή κοπτικού δίσκου στο μοντέλο TUC	55
26	Διάγραμμα καταγραφής χρησιμοποιούμενης ώθησης (σημεία) έναντι της μέσης προβλεπόμενης.	56
27	Διάγραμμα καταγραφής πραγματικής διείδυσης (σημεία) έναντι της μέσης προβλεπόμενης.	56
28	Αεροφωτογραφία με τη διάταξη όδευσης της Σήραγγας Αποσελέμη	59
29	Απόσπασμα Γεωλογικού Χάρτη με τη διάταξη της όδευσης της Σήραγγας Αποσελέμη - ΙΓΜΕ	61
30	Γεωλογική τομή στον άξονα της σήραγγας (Μελέτη Δημοπράτησης)	64
31	Γεωλογική τομή στον άξονα της σήραγγας (Μελέτη Εφαρμογής)	64
32	Τεκτονικό διάγραμμα ΤΔ-1: Δίκτυο Schmidt, ίσων επιφανειών, προβολή κάτω ημισφαιρίου. Στατιστική επεξεργασία των πόλων των επιπέδων στρώσης (B) και διάκλασης (J).	70
33	Τεκτονικό διάγραμμα ΤΔ-1: Δίκτυο Schmidt, ίσων επιφανειών, προβολή κάτω ημισφαιρίου των μέσων επιπέδων στρώσης (B) και διάκλασης (J).	70
34	Τεκτονικό διάγραμμα ΤΔ-2: Δίκτυο Schmidt, ίσων επιφανειών, προβολή κάτω ημισφαιρίου. Στατιστική επεξεργασία των πόλων των επιπέδων στρώσης (B) και διάκλασης (J).	71
35	Τεκτονικό διάγραμμα ΤΔ-2: Δίκτυο Schmidt, ίσων επιφανειών, προβολή κάτω ημισφαιρίου των μέσων επιπέδων στρώσης (B) και διάκλασης (J).	71
36	Εφαρμογή κριτηρίου HOEK - BROWN για την ενότητα Πλακωδών Ασβεστολίθων	73
37	Εφαρμογή κριτηρίου HOEK - BROWN για την ενότητα Φυλλίτων	73
38	Εφαρμογή κριτηρίου HOEK - BROWN για την ενότητα Ασβεστολίθων Τρίπολης	74
39	Γραφική απεικόνιση μεταβολής της βαθμίδας διείδυσης (άξονας Y), συνάρτηση με τη δύναμη κοπτικού δίσκου (άξονας X) με βάση το μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε ασβεστόλιθους Plattenkalk	77
40	Γραφική απεικόνιση μεταβολής της βαθμίδας διείδυσης (άξονας Y), συνάρτηση με τη δύναμη κοπτικού δίσκου (άξονας X) με βάση το μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε Φυλλίτες	79
41	Γραφική απεικόνιση μεταβολής της βαθμίδας διείδυσης (άξονας Y), συνάρτηση με	81

	τη δύναμη κοπτικού δίσκου (άξονας X) με βάση το μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε ασβεστόλιθους Τρίπολης	
42	Σήραγγα Αποσελέμη - ρυθμός διάτρησης με TBM (penetration rate PR) ρυθμός προχώρησης (Advance Rate) - συναρτήσει του χρόνου T	82
43	Σήραγγα Αποσελέμη - μηχανική διαθεσιμότητα (utilization factor %) συναρτήσει του χρόνου T	82
44	Σήραγγα Αποσελέμη - διακύμανση τιμής μηχανικής διαθεσιμότητας (utilization factor %) συναρτήσει των PR και AR	83
45	Απεικόνιση της σχετικής δυσκολίας προχώρησης με χρήση TBM, συναρτήσει της πλήρως ανεπτυγμένης παραμέτρου Q _t bm (Barton and Abrahao, 2003) – διακύμανση των τιμών PR και AR συναρτήσει του Q _t bm	84
46	Ανάλυση δυνάμεων με βάση το TUC σε ανιούσα σήραγγα (Αποσελέμη)	93
47	Εφαρμογή κριτηρίου Mohr-Coulomb για αστοχία πετρώματος με δεδομένη αντοχή σε εφελκυσμό (UTS) στο επίπεδο τ-σ	95
48	Μοντέλο TUC - μηχανισμός δημιουργίας θραυσμάτων (chips), με συστοιχία κοπτικών δίσκων (κάτοψη)	95
49	Μοντέλο TUC - υπολογισμός ορθής δύναμης επί του κοπτικού, σύμφωνα με τη θεωρία κοπής σε μορφή θραυσμάτων (chips) - κάτοψη.	97
50	Φωτογραφία από Monitor κατά τη διάρκεια διάτρησης σήραγγας – αρχείο Ε. Γιαλύτη, μέλος της ομάδας Συμβούλου Διαχ/σης Έργου για την ολοκλήρωση του έργου «Υδρευση Ηρακλείου – Αγ. Νικολάου από το φράγμα Αποσελέμη και σχετικών συμβάσεων» – EUROESTUDIOS S.A. (1/4/2013-31/12/2015)	98
51	Υπολογισμός της ορθής δύναμης F _n σύμφωνα με τη θεωρία Οριακής Ανάλυσης - και το νέο μοντέλο TUC (2016) - Πρόσθια και πλάγια όψη	99
52	Γράφημα απόδοσης TBM με βάση την πρόγνωση μοντέλου TUC σε ασβεστόλιθους Plattenkalk	100
53	Γράφημα απόδοσης TBM με βάση την πρόγνωση μοντέλου TUC σε Φυλλίτες	101
54	Γράφημα απόδοσης TBM με βάση την πρόγνωση μοντέλου TUC σε ασβεστόλιθους Τρίπολης	102

III. Κατάλογος Πινάκων

1.	Εκτίμηση καθυστερήσεων και χρήσης του TBM - βαθμού χρησιμοποίησης μηχανής (utilization factor)	20
2.	Τυπική χρονική διακύμανση τιμών PR, AR, U για ένα έτος διάνοιξης με TBM	36
3	Τυπικές τιμές του συντελεστή m για διάφορες συνθήκες διάτρησης	36
4	Βασικά χαρακτηριστικά της διανοιγόμενης σήραγγας Αποσελέμη (2015)	58
5	Τεχνικά Χαρακτηριστικά TBM Αποσελέμη	60
6	Κατάταξη ρωγματωμένης βραχομάζας κατά GSI (Hoek & Marinos,2000)	67
7	Γεωτεχνικές παράμετροι πετρωμάτων σήραγγας Αποσελέμη	72
8	Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε ασβεστόλιθους Plattenkalk	76
8.1.	Τιμές διακύμανσης της βαθμίδας διείσδυσης (PR) , σε συνάρτηση με τη δύναμη κοπτικού δίσκου (Fn) με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε ασβεστόλιθους Plattenkalk	77
9	Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε Φυλλίτες	78
9.1.	Τιμές διακύμανσης της βαθμίδας διείσδυσης (PR) , σε συνάρτηση με τη δύναμη κοπτικού δίσκου (Fn) με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε Φυλλίτες	79
10	Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε ασβεστόλιθους Τρίπολης	80
10.1.	Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε ασβεστόλιθους Τρίπολης	81
11	Αποτελέσματα ρυθμού προχώρησης με βάση τη στατιστική επεξεργασία δεδομένων εμπειρικού μοντέλου NTNU - Βαθμίδες διάτρησης για διαφορετικές ομάδες παραμέτρων και διαφορετικής διαμέτρου TBM	85
12	Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης CSM - σε ασβεστόλιθους Plattenkalk	86
12.1.	Τιμές διακύμανσης της βαθμίδας διείσδυσης (PR) , σε συνάρτηση με τη δύναμη κοπτικού δίσκου (Fn) με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης CSM - σε ασβεστόλιθους Plattenkalk	87
13	Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης CSM - σε Φυλλίτες	88
13.1.	Τιμές διακύμανσης της βαθμίδας διείσδυσης (PR) , σε συνάρτηση με τη δύναμη κοπτικού δίσκου (Fn) με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης CSM - σε Φυλλίτες	89
14	Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης CSM - σε ασβεστόλιθους Τρίπολης	90
14.1.	Τιμές διακύμανσης της βαθμίδας διείσδυσης (PR) , σε συνάρτηση με τη δύναμη κοπτικού δίσκου (Fn) με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης CSM - σε ασβεστόλιθους Τρίπολης	91

15	Συμπεράσματα - αποτελέσματα πρόγνωσης ρυθμού προχώρησης για Ασβεστόλιθους και Φυλλίτες, με βάση το μοντέλο CSM (επεξεργασία Εξαδάκτυλος - Γιαλύτη 2015-2016)	92
16	Συντελεστής τριβής (μ) μεταξύ ατσαλιού ασπίδας και διαφόρων τύπων πετρωμάτων	94
17	Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης TUC - σε ασβεστόλιθους Plattenkalk	100
18	Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης CSM - σε Φυλλίτες	101
19	Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης CSM - σε ασβεστόλιθους Τρίπολης	102
20	Σύγκριση μοντέλων CSM, LAM, Qtbm για κάθε γεωλογικό σχηματισμό	103
21	Βασικά χαρακτηριστικά των μοντέλων πρόγνωσης και περιορισμοί τους	105
22	Συνοπτική παρουσίαση των θεωρούμενων μοντέλων πρόβλεψης και ο συσχετισμός τους με χαρακτηριστικά μηχανής και τιμές βάσης γεωλογικών δεδομένων (πηγή: Cheda, 2013, επικαιροποίηση Εξαδάκτυλος - Γιαλύτη, 2016)	106
23	Εύρος διακύμανσης ρυθμού διείσδυσης, από διαφορετικά μοντέλα πρόβλεψης	107

"Εφαρμογή και σύγκριση μοντέλων πρόγνωσης ρυθμού προχώρησης ανιούσας σήραγγας σε ετερογενείς βραχώμαζες με TBM διπλής ασπίδας"

1. Εισαγωγή

Στην τεχνολογία σήραγγων, η εμφάνιση των TBM αποτελεί ορόσημο για τις θεαματικές εξελίξεις που ακολούθησαν, αλλά και μία σύνθετη πρόκληση για τους μελετητές και κατασκευαστές, που αντιμετώπισαν σημαντικές αδυναμίες στην κατανόηση της αλληλεπίδρασης των συνθηκών βραχομάζας και της λειτουργίας του TBM.

Η επιλογή των μηχανημάτων αυτών και ο σχεδιασμός τους εξαρτάται απ' την φύση των σχηματισμών, την γεωμετρία της διατομής, το μήκος της σήραγγας και το κόστος του έργου. 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 αυτής (C).

2. Ιστορικό Μηχανοποιημένης Διάνοιξης Σηράγγων

Παρ' όλο που η χρήση «μηχανών συνεχούς όρυξης» έλαβε διαστάσεις από τη δεκαετία του 1950, με την πρώτη μηχανή της Robbins, η ιδέα είναι παλαιά δεδομένου ότι οι εν γένει ασχολούμενοι με την κατασκευή υπογείων έργων διακατέχονταν από την εμμονή για την επινόηση κάποιας μηχανής που θα μπορούσε να αποσπάσει το πέτρωμα από τη φυσική του θέση χωρίς την παρεμβολή άλλης εξωτερικής δύναμης.

Ήδη, από τη δεκαετία του 1880, πέραν της περιστροφικής μηχανής διαμέτρου 2,2 m, που σχεδιάστηκε από τον Συνταγματάρχη Beaumont και κατασκευάστηκε από τον Οίκο John Fowler & Co το 1881 και χρησιμοποιήθηκε στις πρώτες δοκιμαστικές πιλοτικές προχωρήσεις της Σήραγγας της Μάγχης από την Αγγλική πλευρά (1881-82) αναφέρεται και η περίφημη μηχανή που κατασκευάστηκε από τον John Wilson το 1856 και χρησιμοποιήθηκε κατά την εκσκαφή της σιδηροδρομικής σήραγγας Hoosac στην Πολιτεία της Μασαχουσέτης των ΗΠΑ προκειμένου να ενώσει τη Βοστώνη με την κοιλάδα του ποταμού Hudson. Στην σήραγγα αυτή, μήκους 7,4 χλμ, η οποία για διάφορους λόγους χρειάστηκε 21 χρόνια για να ολοκληρωθεί, η εν λόγω μηχανή κατάφερε να διανοίξει 3,5 περίπου μέτρα και εγκαταλείφθηκε.

Εξ' άλλου, εξορυκτική διάταξη με μηχανική ασπίδα για μαλακά εδάφη χρησιμοποιήθηκε στην Αγγλία από το 1825 (Brunel), για την όρυξη σήραγγας κάτω από τον Τάμεση, μήκους 0,5 χλμ. Χρειάστηκε ασφαλώς αρκετός χρόνος ώστε οι διαφοροποιήσεις μεταξύ μηχανικών ασπίδων για μαλακά εδάφη και μηχανών εξορύξεως για βραχώδη εδάφη να τεθούν υπό ενιαία αντιμετώπιση και να επικρατήσει ο όρος TBM για όλους τους τύπους των περιστροφικών μηχανών ορύξεως με ολομέτωπη προσβολή. Σήμερα, ο κατασκευαστής

μιας σήραγγας μπορεί να επιλέξει μεταξύ: TBM ανοικτού τύπου, με απλή ή διπλή ασπίδα, εξισορρόπησης πίεσεως (EPB-M), τύπου κλειστού μετώπου όπου η υποστήριξη του εδάφους γίνεται με πολφό ιλύος - μπετονίτη, πολυμερή, αφρούς κλπ.

Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα του TBM είναι ότι δεν μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά και συνεχώς υπό συνθήκες μεταβαλλόμενης ποιότητας εδάφους ή πετρώματος. Εάν συναντήσει έδαφος άλλο από εκείνο για το οποίο έχει σχεδιαστεί δεν λειτουργεί με επιτυχία, δημιουργούνται σοβαρές καθυστερήσεις, αύξηση δαπανών, ακόμα και επιστροφή στη συμβατική μέθοδο διάνοιξης.

Μετά από την εμπειρία σε διάνοιξη με TBM επί πολλές δεκαετίες, διαπιστώνεται ότι: **“εκείνο το οποίο με βεβαιότητα αναμένεται να εμφανισθεί κατά τη διάρκεια κατασκευής ενός τέτοιου έργου, είναι το απροσδόκητο”**. Η διάνοιξη μιας σήραγγας είναι κατά κανόνα γεμάτη εκπλήξεις, οι περισσότερες από τις οποίες, από μία περιέργη συγκυρία εμφανίζονται σε απίθανες θέσεις και σε ακατάλληλο χρόνο.

Δεδομένου ότι ένα σύγχρονο TBM είναι πολλαπλασίως ταχύτερο σε σύγκριση με τις κλασικές μεθόδους διάνοιξης, η πληρότητα των γεωτεχνικών ερευνών (ποιότητα των πετρωμάτων κατά μήκος της σήραγγας, τυχόν ύπαρξη ζωνών διατμήσεως, διακλάσεων, εισροής υδάτων, εκρηκτικών αερίων κλπ.) καθίσταται περισσότερο σημαντική, καθώς τα TBM είναι περισσότερο ευαίσθητα στις μεταβολές των λιθολογικών παραμέτρων και τις τεκτονικές διαταραχές, παράγοντας ο οποίος στον Ελληνικό χώρο αποκτά ιδιαίτερη σημασία.

Εάν σε μία σήραγγα αναμένεται 90% καλό έδαφος και 10% προβληματικό έδαφος, είναι ενδεχόμενο η εκσκαφή του τμήματος αυτού, να απαιτήσει το 50% του συνολικού χρόνου όρυξης. Ο ρυθμός προχώρησης είναι συνδυαστικό αποτέλεσμα πολλών παραγόντων που είναι δύσκολο να αναλυθούν και να προσδιορισθούν ποσοτικά.

Ένα TBM μπορεί να καθηλωθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ είναι εξαιρετικά δύσκολο ή και αδύνατο να αποσυρθεί από μια σήραγγα εάν συναντήσει δυσμενείς συνθήκες. Εν τούτοις, έχει αποδειχθεί ότι με προσεκτική εξόρυξη στις ασταθείς ζώνες, μικρά έως μέτρια μήκη σήραγγας μπορεί να διανοιχθούν χωρίς να παραβλαβεί αισθητά η απόδοση του μηχανήματος. Εάν οι προκαταρκτικές έρευνες έχουν καταλήξει σε αξιόπιστα συμπεράσματα, ο σχεδιασμός του TBM μπορεί να μετατραπεί και προσαρμοσθεί αναλόγως, ώστε τελικά η απόδοσή του να υπερτερεί έναντι των κλασικών μεθόδων.

Κατά καιρούς έχουν σημειωθεί εξαιρετικά υψηλές αποδόσεις στη λειτουργία των TBM (αλλά μόνο κάτω από ιδιαίτερα ευνοϊκές συνθήκες). Είναι συνεπώς απαραίτητο όλοι οι εμπλεκόμενοι να ενημερώνονται επί των πρόσφατων εξελίξεων ώστε να επωφελούνται από

τη διεθνή εμπειρία, δεδομένου ότι όσο περισσότερα στοιχεία γίνονται διαθέσιμα, τόσο ακριβέστερα αντανakλούν τη φύση και το μέγεθος των αντιμετωπιζόμενων προβλημάτων και συμβάλλουν στην επιλογή κατάλληλων μεθόδων αντιμετώπισης.

3. Γενικά για τα Μοντέλα Πρόγνωσης

Τα ΤΒΜ έχουν εξελιχθεί τόσο πολύ, ώστε επηρεάζουν άμεσα το σχεδιασμό της σήραγγας. Επιπλέον, παρέχουν ικανοποιητικό τρόπο ασφαλούς πρόβλεψης και υψηλού βαθμού προχώρησης, αλλά αποτελούν και πηγή προβλημάτων όταν συναντώνται απροσδόκητες συνθήκες εδάφους, όπου το ΤΒΜ ακινητοποιείται για μήνες και η κατάσταση αντιμετωπίζεται μόνο με χειρωνακτική όρυξη ή παλαιότερες μεθόδους (εκρηκτικά κλπ).

Στην περίπτωση αυτή, προκύπτει ένα σοβαρό πρόβλημα: πως να αξιολογηθεί σωστά η αλληλεπίδραση μεταξύ βραχομάζας και τεχνικών χαρακτηριστικών ΤΒΜ. Έχουν γίνει κάποιες σοβαρές προσπάθειες επίλυσης αυτού του προβλήματος, αλλά η τελική ευθύνη βαρύνει τους κατασκευαστές ΤΒΜ και τους αναδόχους με παρόμοια εμπειρία σε διάνοιξη.

Σημαντικός παράγοντας για την επιτυχή εφαρμογή και λειτουργία μίας μηχανής ΤΒΜ είναι η ικανότητα εκτίμησης ρυθμού προχώρησης με ακρίβεια, ώστε να καθοριστούν ανάλογα τα διαγράμματα χρόνου και κόστους.

Τα τελευταία 40 χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα πρόβλεψης ρυθμού προχώρησης. Τα περισσότερα από αυτά βασίζονται σε μία ημι-θεωρητική και εμπειρική προσέγγιση και στατιστική επεξεργασία παρατηρήσεων υπαίθρου, γεωλογικών συνθηκών, τεχνικών χαρακτηριστικών κατασκευής και λειτουργίας του ΤΒΜ. Εξαιτίας της εμπειρικής φύσης των μοντέλων, η εκτίμηση συχνά διαφέρει από τις πραγματικές μετρήσεις στο έργο.

Είναι γενικά δύσκολο να προβλέψει κανείς διάνοιξη με ΤΒΜ σε μία μονοσήμαντη σχέση για όλους τους τύπους πετρωμάτων.

Ωστόσο, όλα τα εργαλεία μηχανικής κοπής πετρωμάτων, διέπονται από κοινές αρχές λειτουργίας, γι'αυτό και έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες πρόγνωσης και έχουν διατυπωθεί θεωρίες για την συμπεριφορά του βράχου σε δυνάμεις διείσδυσης.

Αναφέρονται παρακάτω κάποιες από τις προσεγγίσεις:

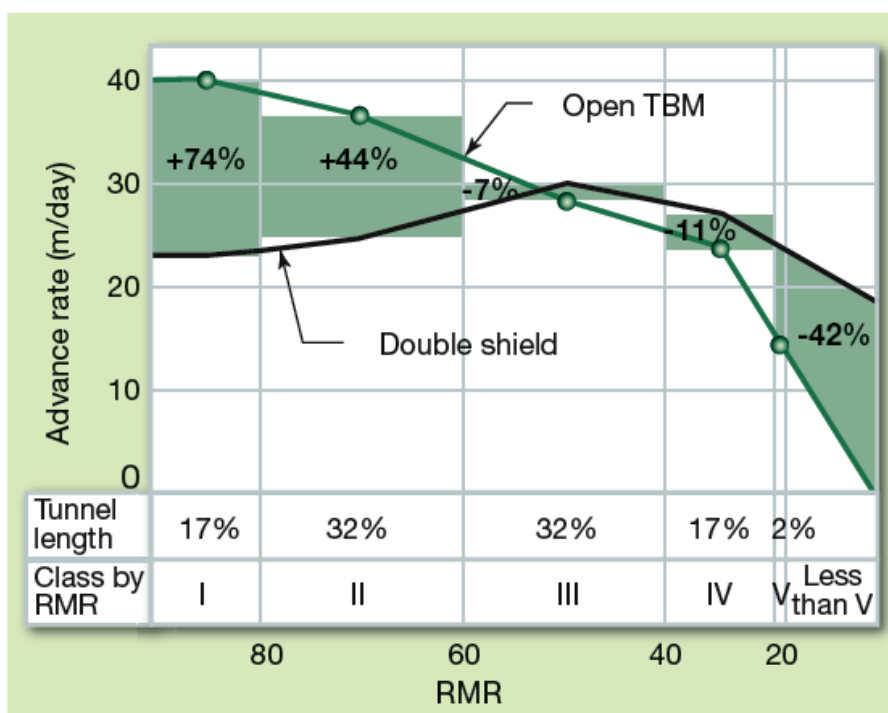
- (Roxborough 1975), Ozdemir (1977), Cook *et al.* (1984), Sanio (1985), Snowdon *et al.* (1983), Peng *et al.* (1989)). Η αναλυτική θεώρηση της οδόντωσης των μηχανικών εργαλείων μέσα στο πέτρωμα, ξεκινά με την ανάλυση των τάσεων μέσα σε ελαστικό μέσο, κάτω από σημειακή φόρτιση.
- Swain and Lawn (1975) πρότειναν περισσότερο αναλυτική περιγραφή της οδοντωτής θραύσης, για να εκφράσουν το φαινόμενο κοπής βράχου.
- Paul & Sikarski (1965) πρότειναν ένα θεωρητικό μοντέλο διείσδυσης σφήνας, παραλείποντας την εμφάνιση μίας πλήρως διατμημένης ζώνης, και δίνοντας έμφαση στην ύπαρξη μίας φάσης θραυσμάτων, μέσα σε ισότροπο βράχο.
- Wijk (1982) και τροποποίηση Paul and Sikarski's πρότειναν να ληφθεί υπόψιν η αλληλεπίδραση μεταξύ των επιμέρους διεισδύσεων.
- Cook *et al.* (1984) πραγματοποίησε μία σειρά από μετρήσεις με ακουστική μέθοδο, για να παρατηρήσει την γένεση των ρωγματώσεων μέσα στο βράχο, οι οποίες παράγονται από ένα οδοντωτό κοπτικό.
- Graham (1976), Farmer and Glossop (1980), Snowdon *et al.* (1983), and Sanio (1985), πρότειναν ισχυρούς συσχετισμούς ανάμεσα στην αντοχή σε θλίψη του πετρώματος και την ειδική ενέργεια που καθορίζεται σαν «η απαιτούμενη ενέργεια για την εκσκαφή μίας μονάδας όγκου του βράχου».
- Roxborough (1975), Ozdemir and Miller (1978), Sanio (1985), and Sato *et al.* (1991). Εξετάστηκε διεξοδικά η επίδραση διακλάσεων και επιφανειών αδυναμίας.
- Barton (2000): τροποποίησε ελαφρά την παράμετρο Q του συστήματος κατάταξης βραχομάζας και παρήγαγε μία νέα εξίσωση προσδιοριζόμενη σαν Q_{TBM} που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του Ρυθμού Διείσδυσης.
- Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστεί ένα ακόμα Νέο Μοντέλο πρόγνωσης “Technical University of Crete – TUC” (Exadaktylos *et al.*, 2015-2016) και τα αποτελέσματά του θα συγκριθούν με αυτά υφιστάμενων μοντέλων, σε πραγματικές συνθήκες διάνοιξης σήραγγας.

4. Συσχετισμός RMR και Ρυθμού Προχώρησης AR

Από το 2000 έχουν γίνει διάφορες έρευνες για την πρόβλεψη ρυθμού προχώρησης του ΤΒΜ. Πρόσφατα, βάσει 400 διαφορετικών διατομών σηράγγων στην Ισπανία, εισήχθη ο όρος RME (Rock Mass Excavability - εκσκαψιμότητα βραχομάζας). Στη συνέχεια, ο όρος εξειδικεύτηκε σε διπλής ασπίδας ΤΒΜ μελετώντας και άλλες περιπτώσεις σηράγγων και συνεχίστηκαν οι προσπάθειες πρόγνωσης ρυθμού προχώρησης βάσει και του τύπου της μηχανής, μια που τα χαρακτηριστικά του πετρώματος αποδείχθηκαν ανεπαρκή για το σκοπό αυτό.

Με βάση τα παραπάνω, το σχ.1, δείχνει αποτελέσματα έρευνας (Grandori, 1995) με συσχετισμό RMR και ρυθμού προχώρησης ΤΒΜ. Από εκεί προέκυψαν μερικές ενδιαφέρουσες τάσεις για τη σήραγγα του Μόρνου, συγκρίνοντας τη λειτουργία ανοιχτού τύπου και διπλής ασπίδας ΤΒΜ.

Απ'ότι φαίνεται, η Κατηγορία III κατά RMR (Rock Mass Rating System) είναι αυτή που δίνει την παραγωγή αιχμής σε διπλής ασπίδας ΤΒΜ, ενώ δεν θα μπορούσε να προταθεί η χρήση του σε Κατηγορία I (πολύ καλό πέτρωμα) ούτε και σε Κατηγορία V (πολύ πτωχό πέτρωμα).



Σχήμα 1. Στοιχεία από σήραγγα Ευήνου (Μόρνου) – Ρυθμός προχώρησης σε συνάρτηση με την ποιότητα βραχομάζας RMR για δύο τύπους μηχανής (Grandori et al, 1995)

(ref: Bieniawski, B Celada, JM Galera, 2007)

5. Σχεδιαστικές παράμετροι TBM

Συνήθως ένα TBM κατασκευάζεται (ή τροποποιείται ένα υφιστάμενο) για ένα συγκεκριμένο έργο και για τις γεωλογικές συνθήκες που αναμένεται να συναντήσει κατά την διάτρηση, καθώς και σύμφωνα με τα οικονομοτεχνικά δεδομένα του έργου (tailored machine).

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του TBM βάσει των οποίων γίνεται πρόγνωση της λειτουργίας και εκτίμηση βαθμού προχώρησης, σε συνδυασμό πάντα με τις γεωτεχνικές μεταβλητές πετρώματος, είναι:

- Διάμετρος κοπτικής κεφαλής D
- Αριθμός κοπτικών δίσκων N (κεντρικών και περιφερειακών)
- Διάμετρος κοπτικού δίσκου R και πλάτος αιχμής δίσκου w
- Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής δίσκων m/min
- Απόσταση μεταξύ κοπτικών δίσκων mm
- Ροπή στρέψης Torque
- Ώθηση κεφαλής F
- Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής κεφαλής ω
- Ισχύς Thrust
- Δύναμη ώσης (φορτίο ανά κοπτικό)
- Μέγιστη περιστροφή κοπτικής κεφαλής RPM
- Ρυθμός διάτρησης (PR)
- Ρυθμός προχώρησης (AR)

Από αυτές τις παραμέτρους, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες όπως:

- Συντελεστής κοπής $CC=Fr/Fn$ (Fr : δύναμη κύλισης / Fn : κάθετη δύναμη)
- Δείκτης διείδυσης $Rf=Fn/Prev$ (Fn : κάθετη δύναμη / $Prev$ = διείδυση ανά περιστροφή))
- Λόγος απόστασης κοπτικών S / προς διείδυση p (s/p)
- Κρίσιμη τιμή ώσης, για την επίτευξη διείδυσης $Prev=1\text{mm}$ ανά περιστροφή
- Ειδική ενέργεια SE (Special Energy)

και άλλα μεγέθη τα οποία θα αναλυθούν διεξοδικά στη συνέχεια

6. Παράμετροι πετρώματος

Η λειτουργία της μηχανής κοπής δεν μπορεί παρά να συνδέεται άμεσα και με τα πετρώματα τα οποία πρόκειται να διατρήσει. Οι επιδόσεις των μηχανών ΤΒΜ θα εξαρτώνται έμμεσα από τη φύση γεωλογικών σχηματισμών και συγκεκριμένα:

- Την αντοχή άρρηκτου πετρώματος και βραχομάζας
- Τα δίκτυα ασυνεχειών

A. Από τα χαρακτηριστικά άρρηκτου πετρώματος, αυτά που μετρώνται και συνυπολογίζονται στο σχεδιασμό των συνθηκών διάτρησης είναι:

- Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (UCS), αντοχή σε εφελκυσμό – Brazilian (UTS),
- Δείκτης σημειακής φόρτισης (Is50).
- Σκληρότητα και διατρησιμότητα
- Κατακερματισμός brittleness
- Δείκτης ευθρυπτότητας (Cerchar)
- Άλλες παράμετροι (λόγος Poisson, μέτρο ελαστικότητας, γωνία φ, πορώδες, μέγεθος κόκκου, κλπ).

B. Σε ότι αφορά τις συνθήκες βραχομάζας ή δίκτυα ασυνεχειών, εδνιαιφέρουν:

- Το πλήθος, η απόσταση και η αποσάθρωση των ασυνεχειών
- Η γωνία μεταξύ άξονα σήραγγας και επιφανειών αδυναμίας
- Η κατάταξη βραχομάζας με συστήματα RMR, GSI, Q
- Άλλα θέματα όπως πιέσεις υπερκειμένων, παρουσία υδροφορίας κλπ.

7. Βαθμίδα Διείσδυσης - Βαθμίδα Προχώρησης

Ο ρυθμός διάτρησης (PR) (m/h):

διείσδυση στο πέτρωμα, σε διάρκεια **καθαρού χρόνου** συνεχόμενης όρυξης (net excavation time). Είναι πολυπαραμετρικό μέγεθος και εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του άρρηκτου πετρώματος (αντοχή, διακλάσεις, κλπ), όσο και από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής, συμπεριλαμβανομένων και των προδιαγραφών της ώθησης και της ροπής. Παρατηρήθηκε από όλους τους ερευνητές μία σημαντική μείωση στη δύναμη κοπής, με την παρουσία διακλάσεων – *με εξαίρεση τις διακλάσεις που έχουν προσανατολισμό όμοιο με το μέτωπο της επιφάνειας κοπής*. Ανάλυση θα γίνει παρακάτω (μηχανισμός θραύσης πετρώματος).

Βαθμίδα προχώρησης AR (m/h):

Είναι ο μέσος ρυθμός προχώρησης της διάνοιξης σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα (μπορεί να είναι μόλις 0,005m/h ή και μηδενική για μεγάλα χρονικά διαστήματα). Λαμβάνονται υπ'όψιν όλες οι καταστάσεις του TBM (εξόρυξη, αναμονή, εμπλοκή, αλλαγή κοπτικών, συντήρηση, επισκευή, κλπ).

Στιγμιαίος ρυθμός διάτρησης *Instantaneous Penetration Rate IPR* (mm/revolution) που ορίζεται ως: μήκος διανοιγόμενης σήραγγας ανά περιστροφή της κοπτικής κεφαλής

Υπάρχει επίσης η έννοια της βαθμίδας προχώρησης ανά βάρδια AR (m/shift) που ορίζεται σαν: βαθμίδα διάτρησης PR (σε διακεκριμένα χρονικά διαστήματα συνεχούς εξόρυξης) (m/h) x ώρες βάρδιας x χρήση TBM (%).

Διακυμάνσεις βαθμίδας

Αν η οριζόμενη βαθμίδα προχώρησης είναι μη αποδεκτή (οικονομικά ασύμφορη στο έργο), τότε γίνεται προσπάθεια να ελαχιστοποιηθούν οι καθυστερήσεις κατά το σχεδιασμό, ώστε να βελτιωθεί ο ρυθμός προώθησης.

Για την τεχνολογική εξέλιξη που έλαβε χώρα από τις **ανοιχτές μηχανές** διάτρησης σκληρού βράχου σε **μηχανές ασπίδας** για χαμηλής αντοχής πέτρωμα, έχουν ακόμα ληφθεί υπ'όψιν: η απώλεια ώθησης εξαιτίας των δυνάμεων τριβής από την επαφή κεφαλής – πετρώματος, με αποτέλεσμα τη μείωση της δύναμης που τροφοδοτεί τα κοπτικά. Οι μηχανές ασπίδας επίσης συναντούν κάποιες δυσκολίες λόγω συγκέντρωσης λάσπης μέσα και γύρω από την κοπτική κεφαλή κάτι που προκαλεί πρόσθετη μείωση στο βαθμό προχώρησης. Ιδιαίτερα σε εδαφικούς σχηματισμούς, η πρόβλεψη εξαρτάται κυρίως από την ικανότητα απομάκρυνσης λάσπης, περισσότερο από κάθε άλλο παράγοντα. Επίσης, στα μικτής χρήσης μηχανήματα, ολική σκληρότητα και ικανότητα απομάκρυνσης λάσπης, ελέγχουν τη διάνοιξη και απαιτούν σωστή εκτίμηση των μεγεθών τους.

8. Εκτίμηση καθυστερήσεων και χρήσης του TBM

Οι χρονικές στιγμές που το TBM δε λειτουργεί, γενικά ο χρόνος αργίας του TBM ονομάζεται στη διεθνή ορολογία “downtime”.

Τα κύρια αίτια αργίας μπορεί να σχετίζονται με το μήκος της σήραγγας, την ευχέρεια διάτρησης του πετρώματος, το χρόνο συντήρησης, την απαίτηση διατρήσεων προπορείας, καθώς και άλλες καθυστερήσεις που μπορεί να οφείλονται σε αίτια γεωτεχνικά, μηχανολογικού σχεδιασμού, βλάβης ή λειτουργικά.

Η εκτίμηση των καθυστερήσεων με βάση και την προηγούμενη στατιστική εμπειρία, αφορά τον υπολογισμό χρόνου που δαπανάται στους λόγους που σταματούν το TBM.

Συνήθως ο χρόνος αργίας του TBM καταγράφεται σε λεπτά κατά τη διάρκεια μιας βάρδιας και εκφράζεται ως εξής:

$$\text{ΠΟΣΟΣΤΟ ΧΡΗΣΗΣ TBM - utilization (\%)} = \frac{\text{χρόνος λειτουργίας TBM}}{\text{χρόνος βάρδιας}}$$

Ο κύριος σκοπός μίας εύστοχης πρόγνωσης είναι ήδη από το στάδιο σχεδιασμού του μηχανήματος να ελαχιστοποιηθούν όσο γίνεται οι καθυστερήσεις, να γίνει ακριβής εκτίμηση αντοχής εδάφους, οργάνωση συρμού υποστήριξης (back up system), αποτελεσματική διαχείριση παραμέτρων και χρόνου.

Υπάρχουν διαφοροποιήσεις στο ρυθμό προχώρησης, που μπορεί να περιγραφούν επιγραμματικά στα παρακάτω:

- Υδραυλικά – κατανομή πιέσεων
- Επέκταση του back up system και των καλωδιώσεων με extra χρόνο για τη συντήρηση όλων των εφαρμογών του
- Εκφυγές του ιμάντα απομάκρυνσης προϊόντων εκσκαφής
- Καθυστερήσεις βαγονιών
- Επαναπροσδιορισμός – ρυθμίσεις συστήματος καθοδήγησης
- Καθυστερήσεις λόγω δυσμενών γεωλογικών συνθηκών - απροσδόκητες συνθήκες διάνοιξης σχετιζόμενες με ασυνήθιστα γεωλογικά φαινόμενα.

- Πρόσθετες ενέργειες:
 - Έλεγχος αντοχής των πλευρικών πεδίων
 - Έλεγχος και αλλαγές κοπτικών
 - Ανίχνευση αερίων και δοκιμές
 - Γεωτρήσεις προπορείας (διάτρηση, γεωφυσικές διακοπήσεις, δειγματοληψία (πιθανόν))
 - Διάτρηση οπών ενεμάτωσης και ενεμάτωση όπου απαιτείται
 - Δομές υποστήριξης
 - Εισροές νερού
 - Χειρωνακτική εκσκαφή
- Συσκέψεις για θέματα ασφαλείας σε περίπτωση απρόβλεπτων συνθηκών
- Αλλαγές βάρδιας και χρόνος μετάβασης - Φαγητό
- Καμπύλη εκμάθησης (learning curve) “the rate of a person's progress in gaining experience or new skills”

Όλα τα παραπάνω εξαρτώνται κατά πολύ και από το μήκος της διανοιγόμενης σήραγγας. Συμπερασματικά μπορεί να απεικονιστεί η συνολική απόδοση του TBM, όπως αυτή επηρεάζεται από τις παράλληλες ή διαδοχικές δραστηριότητες, απαραίτητες για τη συμπλήρωση του κύκλου εκσκαφής. Εάν δεν προκύψουν ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες ακινητοποίησης του TBM, ένα ενδεικτικός κύκλος περιλαμβάνει την κάτωθι αναλογία «καθαρής χρήσης» για όρυξη (Utilization) και βαθμίδων απόδοσης TBM (%):

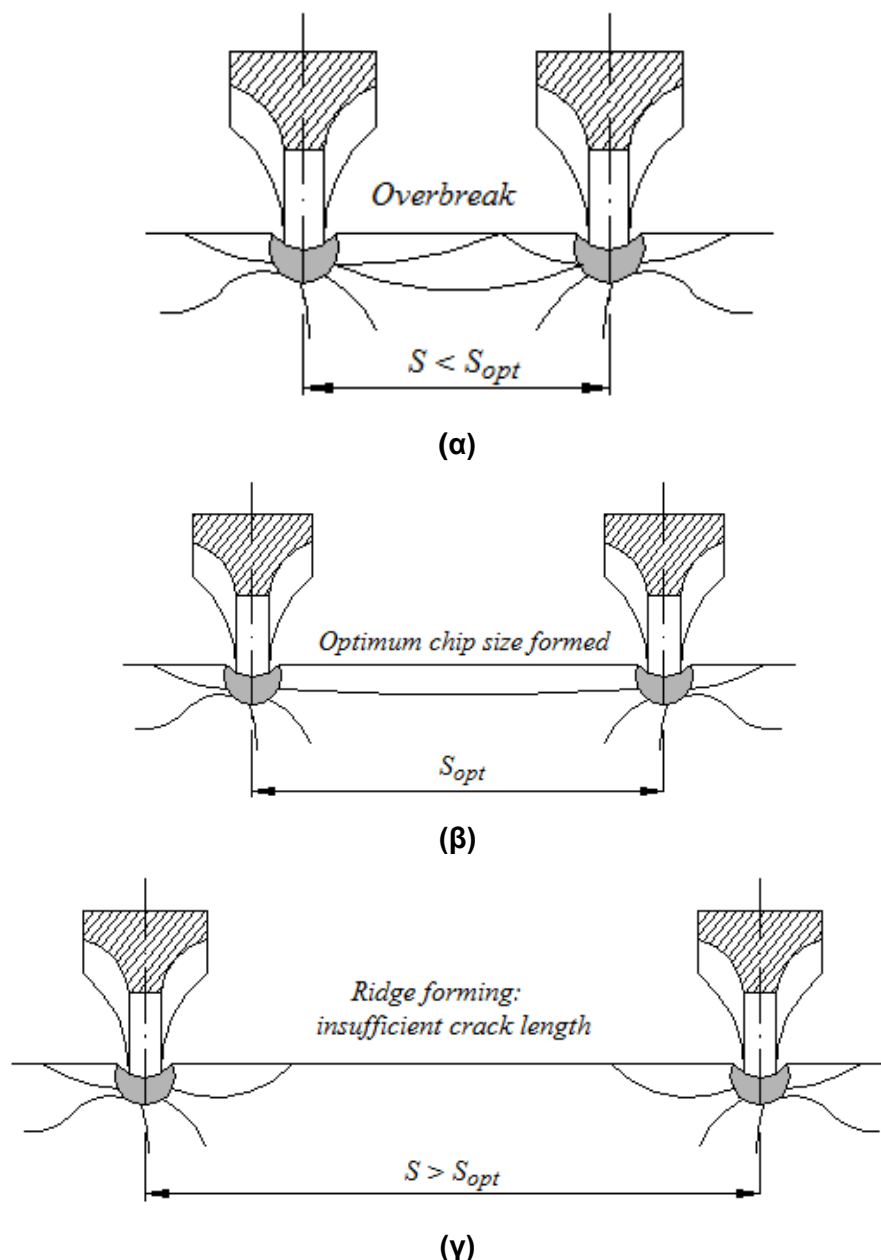
<u>ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ</u>	Ποσοστό απασχόλησης (%)	
Καθαρή διάτρηση (όρυξη) – UTILIZATION	49	Ο βαθμός καθαρής χρήσης του TBM μειώνεται με το μήκος σήραγγας.
Αναμετάθεση	4	
Κοπτικά άκρα, αλλαγή & επιθεώρηση	11	
Ανεξέλεγκτες διακοπές	4	
Σύστημα υποστηρίξεως (βλάβες)	4	
Είσοδος υπογείων υδάτων	7	
Αναμονή συρμού μεταφοράς	12	
Γεωλογικές & λοιπές διακοπές	9	
	100	

Πιν.1 - Εκτίμηση καθυστερήσεων και χρήσης του TBM - utilization factor

9. Όρυξη με ΤΒΜ σε σκληρό βράχο - Μηχανισμός θραύσης πετρώματος

Η διάνοιξη σε σκληρό πέτρωμα, κατά κανόνα βασίζεται στην δημιουργία **chips** βράχου μεταξύ δύο διαδοχικών αυλακώσεων κοπής (Σχ.2), εφόσον βεβαίως είναι επαρκώς μικρή η απόσταση S μεταξύ των γειτονικών κοπών (αυλακώσεων).

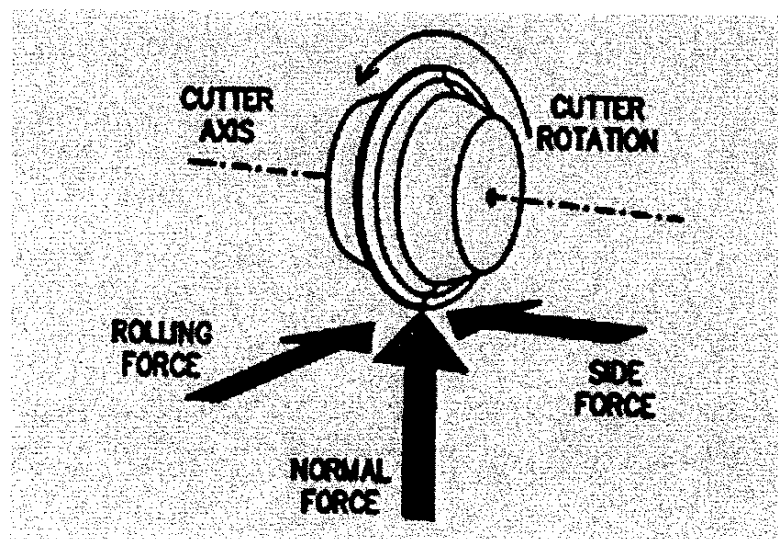
Σε κάθε δίσκο κοπής που βρίσκεται επί της κοπτικής κεφαλής εξασκούνται: η δύναμη ώσης (normal force), η δύναμη κύλισης (rolling force) και η πλευρική δύναμη από το πέτρωμα στον δίσκο και αντίστροφα (side force) όπως φαίνεται στο Σχ. 3.



Σχήμα 2:

Μηχανισμός κοπής του πετρώματος με την αύξηση της απόστασης (Rostami & Ozdemir, 1993 "new model for performance prediction of hard rock TBMs" - α) υπερβολική θραύση του πετρώματος, β) βέλτιστη απόσταση κοπής και γ) ανεπαρκής θρυμματισμός του πετρώματος.

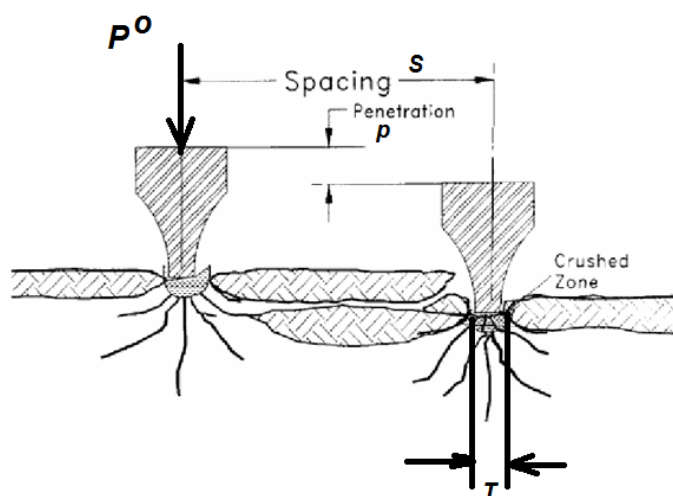
(ref: Ξηρουδάκης Γεώργιος, 2015)



Σχήμα 3. Δυνάμεις που επενεργούν στη βραχομάζα μέσω κοπτικού δίσκου
(Ref: Wolfgang Leitner and Eckhart Schneider, 2003)

Οι ιδανικές συνθήκες πετρώματος για αποτελεσματική λειτουργία του TBM είναι:

- Η εισχώρηση του δίσκου P και η κάθετη δύναμη F_N πρέπει να μπορούν να δημιουργήσουν τάσεις ικανές να σχηματίσουν μια ζώνη σύνθλιψης πετρώματος (crushed zone).
- Οι τάσεις σε αυτή την ζώνη πρέπει να είναι αρκετά υψηλές ώστε να προκαλέσουν διάδοση ρωγμής προς περιοχές γειτονικής κοπής.
- Η απόσταση S πρέπει να είναι αρκετά κοντά ώστε οι ρωγμές να μπορούν να επεκταθούν και να δημιουργήσουν chip. Για αποτελεσματική διείδυση, ο λόγος S/P πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 10-14.
- Η F_R πρέπει να είναι ικανή ώστε να διατηρήσει την κίνηση του δίσκου



Σχηματική απεικόνιση (σκαρίφημα)

10. Μοντέλα πρόγνωσης της ταχύτητας προχώρησης του TBM

Η κατάστρωση ενός μοντέλου πρόβλεψης απόδοσης είναι η βάση για την τελική επιλογή ή/και σχεδιασμό της κατάλληλης μηχανής TBM με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ισχύος, αριθμού και τύπου κοπτικών δίσκων κ.λ.π. Βασίζεται κυρίως στη γεωμετρία της διατομής, το μήκος της σήραγγας και το κόστος του έργου. Επιπλέον, υψηλής σημασίας παράμετρο, αποτελεί η φύση των γεωλογικών σχηματισμών που αναφέρεται στην αντοχή, την σκληρότητα τους, τα φθοροποιά χαρακτηριστικά, στον τεκτονισμό τους και στην ύπαρξη υπογείων υδάτων. Συνήθως οι σχηματισμοί είναι ανομοιογενείς, οπότε οι ιδιότητες αυτές μεταβάλλονται από θέση σε θέση αλλά και στο ίδιο το μέτωπο καθεαυτό. Όλα τα παραπάνω εισάγονται σε ένα θεωρητικό μοντέλο, με σκοπό την πρόβλεψη του χρόνου κατασκευής της σήραγγας.

Για την εκτίμηση διείσδυσης TBM σε σκληρό βράχο, έχουν καταρτιστεί αρκετά (περίπου 20) μοντέλα πρόγνωσης, τα παλαιότερα από τα οποία (μέσα δεκαετίας 80) είναι ημι-εμπειρικά και προκύπτουν από δοκιμές γραμμικής κοπής. Τα πιο πρόσφατα μοντέλα, αναπτύχθηκαν με βάση πραγματικά δεδομένα υπαίθρου από διαφορετικές εδαφικές συνθήκες, μετά από στατιστική επεξεργασία ανάδρομης ανάλυσης, τιμών γεωλογικών παραμέτρων, σε συνδυασμό με τα εκάστοτε λειτουργικά χαρακτηριστικά TBM. Οι πιο συχνές παράμετροι που προσμετρώνται είναι: η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου βράχου, η απόσταση και ο προσανατολισμός των ασυνεχειών, η ονομαστική τιμή ώθησης ανά κοπτικό και η διάμετρος αυτού.

Στην παρούσα εργασία θα περιγραφούν τα μοντέλα

- **N.Barton (Q_tbm),**
- **Norwegian Institute (NTNU),**
- **Colorado School of Mines (CSM)**
- **Ειδικής Ενέργειας (SE)**
- **Οριακής Ανάλυσης (Exadaktylos et al- ΜΗΧ.Ο.Π., 2015-2016).**

10.1 Το μοντέλο πρόγνωσης Q t_{bm} – N. Barton

Οι παράγοντες τόσο της μηχανής όσο και του πετρώματος, 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*). Για όρυξη με ΤΒΜ ο Barton (2000) πρότεινε την παρακάτω εμπειρική σχέση μεταξύ *AR* και *PR*:

$$AR = PR \cdot n_{util} \quad (10.1)$$

όπου n_{util} = βαθμός χρησιμοποίησης του ΤΒΜ για «καθαρή» όρυξη (utilization %)

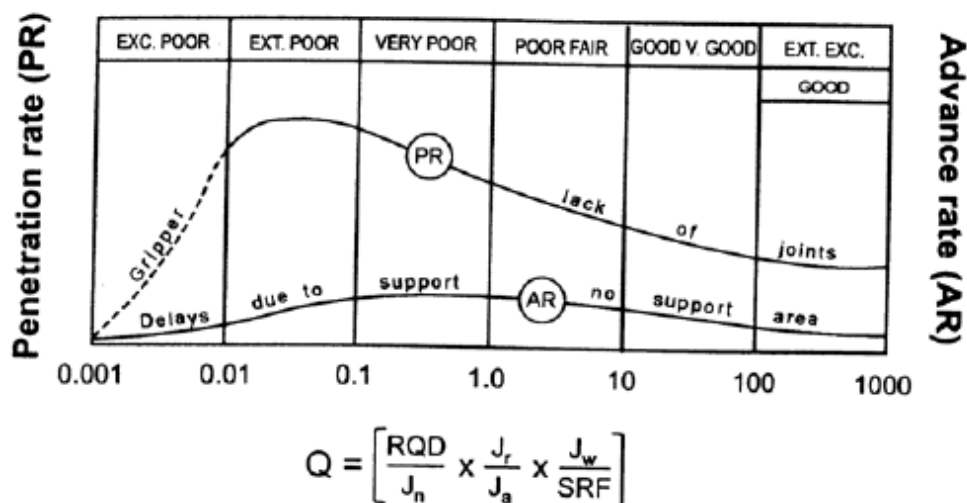
$$n_{util} = t^m \quad (10.2)$$

όπου t ο χρόνος διάρκειας της κατασκευής της σήραγγας ή στοάς (σε μήνες ή έτη) και ο εκθέτης m είναι ένας αρνητικός πραγματικός αριθμός που μειώνει τον μέσο ρυθμό προχώρησης της σήραγγας με την αύξηση του χρόνου κατασκευής (τυπικές τιμές: -0,15 έως -0,45).

Στο εμπειρικό μοντέλο πρόγνωσης Q_{tbm} , αρχικά, είτε εκτιμάται η βαθμίδα διείδυσης *PR* από τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας, είτε προσδιορίζεται η τιμή του από τα πραγματικά δεδομένα ενός έργου (back-calculated Q_{TBM}). Εμπειρικά έχει αποδειχτεί ότι ισχύει:

$$PR = 5 Q_{tbm}^{-1/5} \quad (10.3)$$

Ουσιαστικά, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4, το μοντέλο πρόγνωσης Barton βασίζεται επέκταση του συστήματος *Q* ώστε να προβλέπει τον *PR* και *AR*.



Σχήμα 4. Αρχική συσχέτιση των παραμέτρων *PR* και *AR* με τη διακύμανση του δείκτη *Q*
(Ref: N Barton, 2000. "TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock". AA Balkema.)

10.1.1. Ο δείκτης ταξινόμησης Q_{tbm} – αναλυτική περιγραφή παραγόντων

Πέρα από τον δείκτη ταξινόμησης Q , το μοντέλο Barton περιλαμβάνει τις δυνάμεις σε κάθε κοπτικό δίσκο, υφή και δομή βραχομάζας, UCS, λειαντική ικανότητα βράχου, όπως θα περιγραφεί σε εξισώσεις παρακάτω.

$$Q_{TBM} \approx \frac{RQD_a}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5}$$

δείκτης Q

- τάσεις στο μέτωπο
- αποξεστικότητα πετρώματος
- αντοχή πετρώματος και ώση TBM
- ενεργές τάσεις
- διατμητική αντοχή των ασυνεχειών
- κερματισμός της βραχομάζας

(10.4)

10.1.1.α. Κερματισμός της βραχομάζας

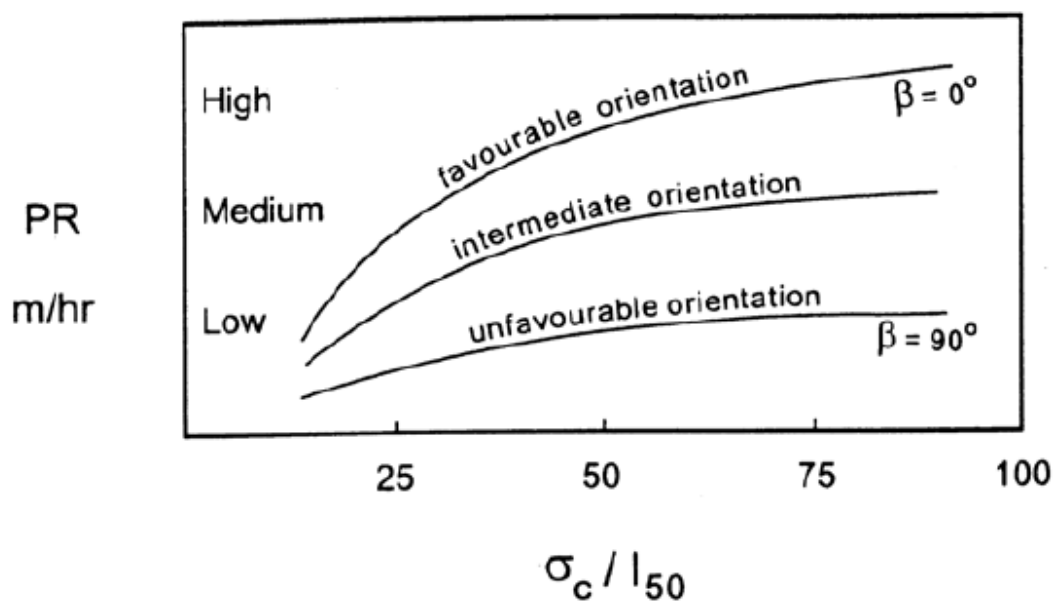
$$Q_{TBM} = \frac{RQD_o}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5}$$

RQD_o: Oriented RQD – ο δείκτης ποιότητας του πετρώματος (Rock Quality Designation) προσανατολισμένος κατά τη διεύθυνση του άξονα της σήραγγας. Τιμές 0-100, από πολύ πτωχή έως εξαιρετική ποιότητα.

J_n: πλήθος συστημάτων ασυνεχειών (joint set number). Τιμές 0,5-20, από συμπαγής βράχος έως θρυμματισμένος βράχος και γαιώδες υλικό.

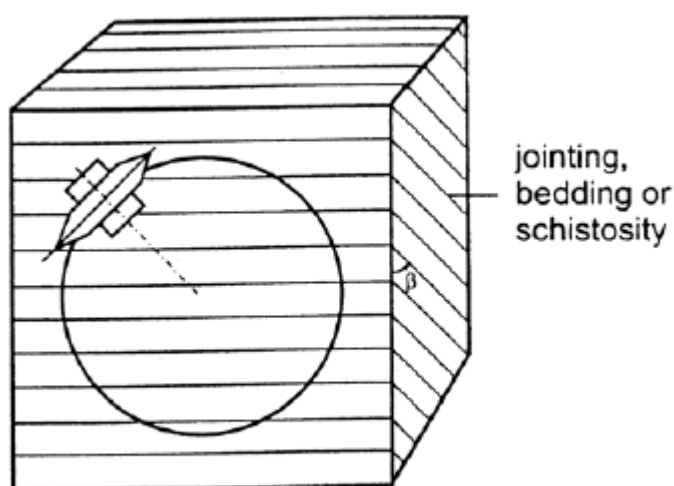
Ο λόγος RQD/J_n εκφράζει το μέσο μέγεθος των ογκοτεμαχίων που απομονώνονται μεταξύ των ασυνεχειών της βραχομάζας.

- Μεγάλα ογκοτεμάχια τείνουν να ολισθαίνουν (translational sliding), ενώ μικρά μπλοκ τείνουν να περιστρέφονται (rotation).
- Δομές προσανατολισμένες παράλληλα με τον άξονα της σήραγγας συνήθως προκαλούν μείωση των PR και U, αφ' ενός διότι δεν ευνοείται η δημιουργία μεγάλων θραυσμάτων (chips), αφετέρου λόγω ενδεχόμενων υπερεκσκαφών και κατάρρευσης της οροφής, που προκαλεί αυξημένες απαιτήσεις για υποστήριξη.
- Δομές προσανατολισμένες παράλληλα με το μέτωπο της σήραγγας συνήθως ευνοούν τα PR και U, αφ' ενός διότι οι ασυνέχειες ευνοούν τη δημιουργία μεγάλων θραυσμάτων, αφετέρου διότι στην εξόρυξη με ΤΒΜ οι τιμές αυτές παρουσιάζουν σταθερότητα.
- Όταν η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών προσεγγίζει την απόσταση μεταξύ των κοπτικών, επιτυγχάνεται υψηλός PR.
- Ο PR είναι αντιστρόφως ανάλογος της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών.
- Η ανισοτροπία λόγω ασυνεχειών ή σχιστότητας επηρεάζει σημαντικά το PR. Σχιστότητα παράλληλα προς το μέτωπο δίνει PR έως και 6 φορές υψηλότερο από τη σχιστότητα παράλληλα προς τον άξονα της σήραγγας.



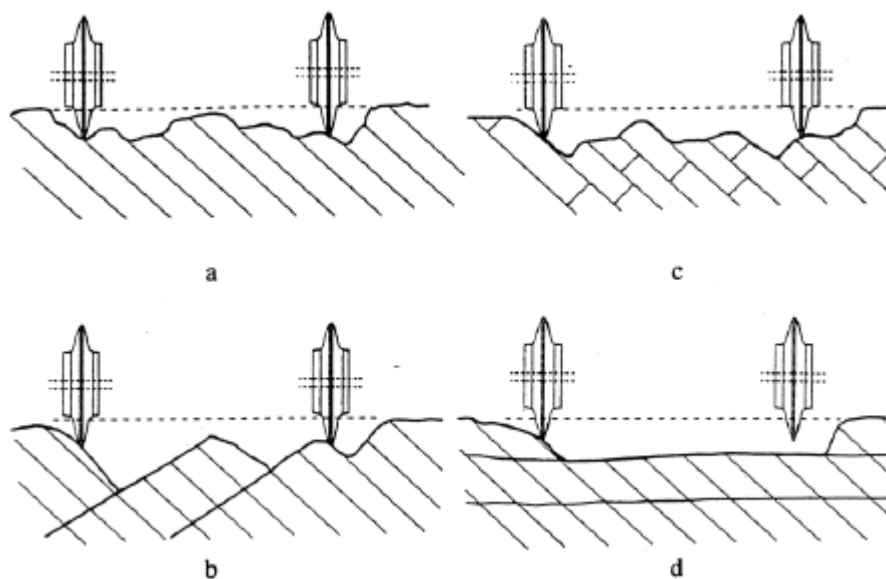
Σχήμα 5. Συσχέτιση ανάμεσα στην σκληρότητα του βράχου (λόγος σ_c / I_{50}) και την βαθμίδα διείδυσης σε κάθε πιθανό προσανατολισμό των διακλάσεων. Όταν γωνία $\beta=0^\circ$ (παράλληλη με το μέτωπο), είναι ευνοϊκός ο προσανατολισμός και μέγιστο το PR. Όταν γωνία $\beta=90^\circ$ (παράλληλη με τον άξονα), είναι δυσμενής ο προσανατολισμός και το PR ελαχιστοποιείται.

(Ref: N Barton, 2000. "TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock". AA Balkema.)



Σχήμα 6. – Επίδραση του προσανατολισμού της φόρτισης (γωνία β) στη βαθμίδα PR Η διείδυση του κοπτικού είναι η ελάχιστη, όταν η γωνία γίνεται $\beta=90^\circ$ (Sanio 1985).

(Ref: N Barton, 2000. "TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock". AA Balkema.)



Σχήμα 7: η επίδραση της ανομοιογένειας της βραχώμαζας στη δημιουργία chips, όπως εκφράζεται μέσω της στρώσης και της σχιστότητας των ασυνεχειών (Aasen 1980)

(Ref: N Barton, 2000. "TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock". AA Balkema.)

10.1.1.β. Διατμητική αντοχή των ασυνεχειών

$$Q_{TBM} \approx \frac{RQD_o}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5}$$

J_r: Δείκτης αδρότητας των επιφανειών (joint roughness). Τιμές 0,5-4 για λείες, επίπεδες έως αδρές, μη επίπεδες επιφάνειες.

J_a: Δείκτης αλλοίωσης επιφανειών (joint alteration). Τιμές 0,75-20, για αναλλοίωτες επιφάνειες έως αποχωρισμένες από παχύ στρώμα υλικού πλήρωσης.

Λαμβάνονται οι τιμές για τις ασυνέχειες που ευνοούν την εξόρυξη.

- Επίπεδες ασυνέχειες με πρότερη διάτμηση ($J_r=0.5$) δίνουν υψηλό PR αλλά χαμηλό Utilization% λόγω των αυξημένων απαιτήσεων σε υποστήριξη.
- Ασυνέχειες τραχείες, κυματοειδείς ($J_r=3-4$), επουλωμένες με σκληρά υλικά πλήρωσης ($J_a=0,75-1$) παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση στην απελευθέρωση των μπλοκ από το μέτωπο, με συνέπεια χαμηλό PR.
- Γενικά, ο λόγος $J_r/J_a < 1.0$ αυξάνει το PR, ενώ $J_r/J_a > 1.0$ μειώνει το PR. Το αντίθετο ισχύει για U και AR.

10.1.1.γ. Ενεργές τάσεις

$$Q_{TBM} \approx \frac{RQD_o}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5}$$

Jw: Συντελεστής υδατικών πιέσεων (joint water reduction). Τιμές 0,05-1, για υψηλές έως μηδενικές υδατικές πιέσεις και παροχές

SRF: Συντελεστής τάσεων (stress reduction factor). Τιμές 1-20, ανάλογα με τις ιδιαίτερες τοπικές συνθήκες π.χ: έντονος τεκτονισμός, ζώνες διάτμησης, υψηλές πιέσεις, σύνθλιψη, διόγκωση, κλπ.

- Εξαιρετικά μεγάλη παροχή νερού ή «ανατινάξεις» με υψηλή πίεση, απαιτούν την αντιμετώπιση του προβλήματος ή αναμονή για εκτόνωση του φαινομένου με συνέπεια σε κάθε περίπτωση **χαμηλό AR**.
- Ομοίως, χαλαρές ζώνες διάτμησης αν και εξορύσσονται με ευκολία, δημιουργούν προβλήματα λόγω της αστάθειάς τους, προκαλούν εμπλοκές της κοπτικής κεφαλής και απαιτούν αυξημένα μέτρα υποστήριξης με συνέπεια **χαμηλό AR**.

10.1.1.δ. Αντοχή πετρώματος και ώση TBM

$$Q_{TBM} \approx \frac{RQD_o}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5}$$

$$Q_o = \frac{RQD_o}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

SIGMA: αντοχή του πετρώματος

F: δύναμη ώσης στα κοπτικά

- Όταν ο μηχανισμός αστοχίας κυριαρχείται από **θλίψη** ($\beta > 60^\circ$)

$$SIGMA_{cm} = 5\gamma Q_c^{1/3}, \text{ όπου } \gamma \text{ η πυκνότητα} \quad (10.5)$$

$$Q_c = Q_o \times \sigma_c / 100 \quad (10.6)$$

Q_o ο δείκτης Q με RQD_o και J_r/J_a για τις ασυνέχειες που επηρεάζουν την κοπή.

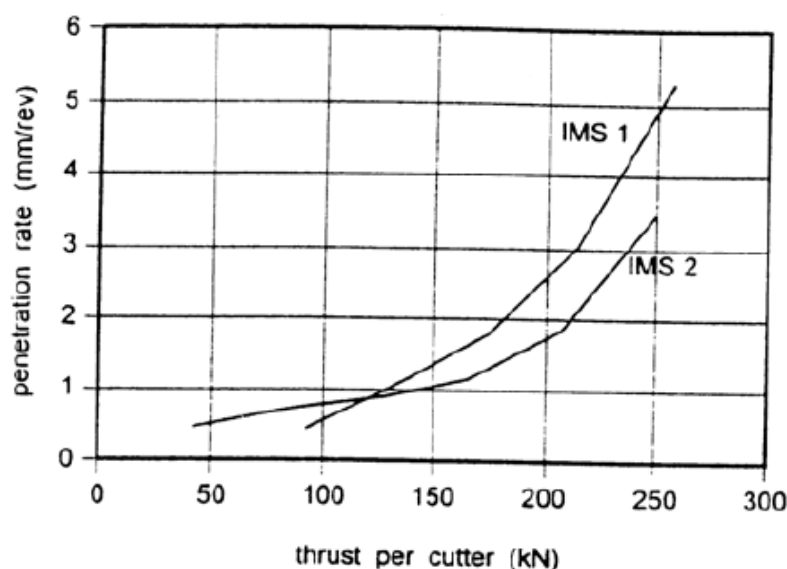
σ_c η αντοχή σε θλίψη

- Όταν ο μηχανισμός αστοχίας διέπεται από **εφελκυσμό** ($\beta < 30^\circ$ ή $UCS/I_{50} > 24$)

$$SIGMA_{tm} = 5\gamma Q_t^{1/3}, \text{ όπου } \gamma \text{ η πυκνότητα} \quad (10.7)$$

$$Q_t = Q_o \times I_{50}/4 \text{ και } I_{50} \text{ ο δείκτης αντοχής σε σημειακή φόρτιση} \quad (10.8)$$

Ουσιαστικά, για την περίπτωση της θλίψης γίνεται αναγωγή της αντοχής με βάση τα 100 MPa και κατ'αναλογία για την περίπτωση του εφελκυσμού με βάση τα 4 MPa (γιατί $\sigma_c \approx 24 I_{50}$).



Σχήμα 8: Διακύμανση του PR σε σχέση με την εφαρμοζόμενη ώση ανά κοπτικό για πέτρωμα δεδομένης αντοχής σε θλίψη. Σε πετρώματα καλής ποιότητας (IMS 1) παρατηρείται μικρή μεταβολή της κλίσης, ενώ σε χαμηλότερης ποιότητας (IMS 2) η μεταβολή είναι πιο έντονη
(Ref: N Barton, 2000. "TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock". AA Balkema. Grandori et al, 1995a)

- Η αντοχή σε θλίψη είναι διαισθητικά κατάλληλο μέτρο της αντίστασης ενός πετρώματος στην εξόρυξη με TBM, διότι η ώση ασκεί στο μέτωπο θλίψη.
- Ο μηχανισμός αστοχίας του άρρηκτου πετρώματος αναδεικνύει την αντοχή σε εφελκυσμό ως το πλέον κρίσιμο μέγεθος
- Όταν το πέτρωμα είναι κερματισμένο ή με έντονη σχιστότητα, το PR εξαρτάται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών και την ανισοτροπία.
- Στη μηχανική πετρωμάτων συνηθίζεται η συσχέτιση της αντοχής σε εφελκυσμό με την αντοχή σε θλίψη.
- Συνεπώς, είναι τελικά δυνατό να χρησιμοποιηθεί η αντοχή σε θλίψη ως μέτρο της αντίστασης εξόρυξης σε εκείνες τις περιπτώσεις που δεν κυριαρχεί η ανισοτροπία ή εξαιρετικά μεγάλος λόγος της θλιπτικής αντοχής προς την εφελκυστική αντοχή.
- Ο λόγος θλιπτικής αντοχής UCS προς την εφελκυστική αντοχή UTS παρουσιάζει καλή συσχέτιση με το PR.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο λόγος UCS/I_{50} , όπου I_{50} ο δείκτης αντοχής σε σημειακή φόρτιση, ως δείκτης για τη δυσθραυστότητα (toughness) του πετρώματος.

10.1.1.ε. Αποξεστικότητα πετρώματος

$$Q_{TBM} \approx \frac{RQD_o}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \boxed{\frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20}} \times \frac{\sigma_\theta}{5}$$

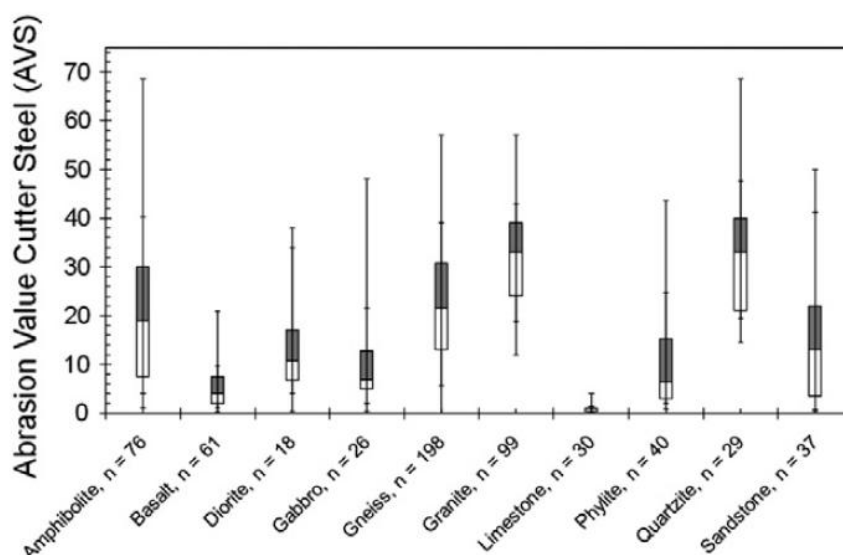
CLI: δείκτης διάρκειας ζωής των κοπτικών (cutter life index) Τιμές 0-120, για εξαιρετικά έως ελάχιστης αποξεστικής ικανότητας πετρώματα αντίστοιχα.

q: %περιεκτικότητα σε χαλαζία

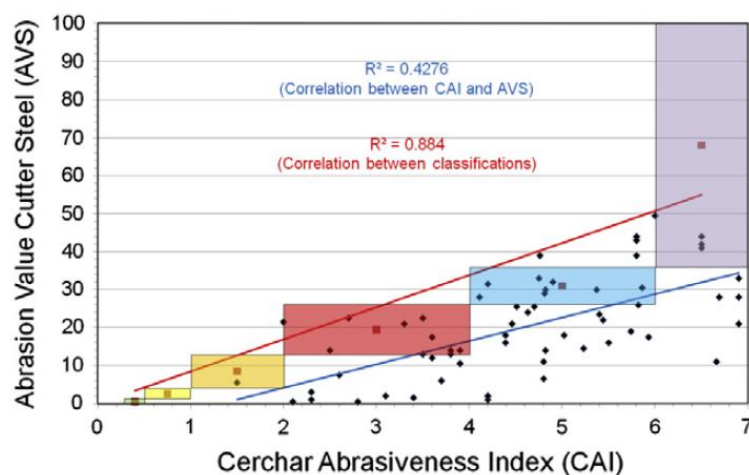
Η **εκτίμηση φθοράς κοπτικών** είναι πιο αποτελεσματική όταν βασίζεται σε παραμέτρους που σχετίζονται με τις ιδιότητες του βράχου. Με βελτιώσεις που αφορούν αντοχή, σφράγιση και αντιδιαβρωτικές ιδιότητες, ο χρόνος ζωής των κοπτικών μπορεί να αυξηθεί κατά 30% σε σχέση με παλαιότερες τεχνολογίες.

Εξισώσεις, νομογράμματα από τη βιβλιογραφία και γενικές αρχές που ισχύουν για τον υπολογισμό του χρόνου ζωής κοπτικών (Cutter Life Index), δίδονται παρακάτω.

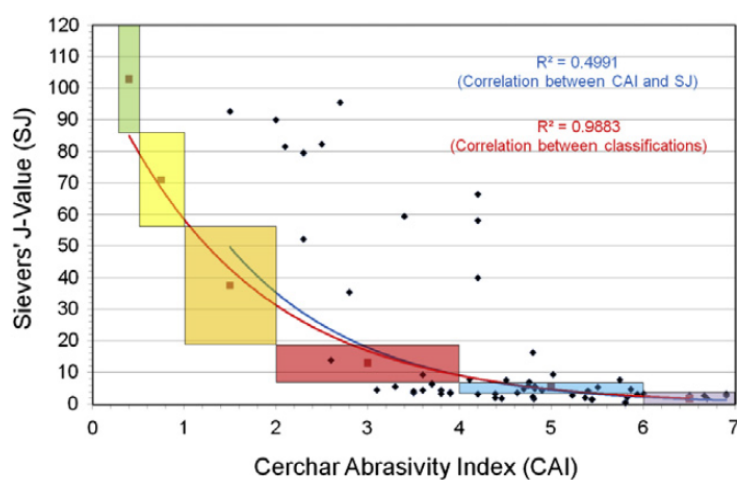
(Στους υπολογισμούς σήραγγας Αποσελέμη που θα ακολουθήσουν, θα ληφθούν υπ'όψιν οι εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού του δείκτη *Cerchar Abrasivity Index* που πραγματοποιήθηκαν κατά τη γεωτεχνική μελέτη σχεδιασμού.)



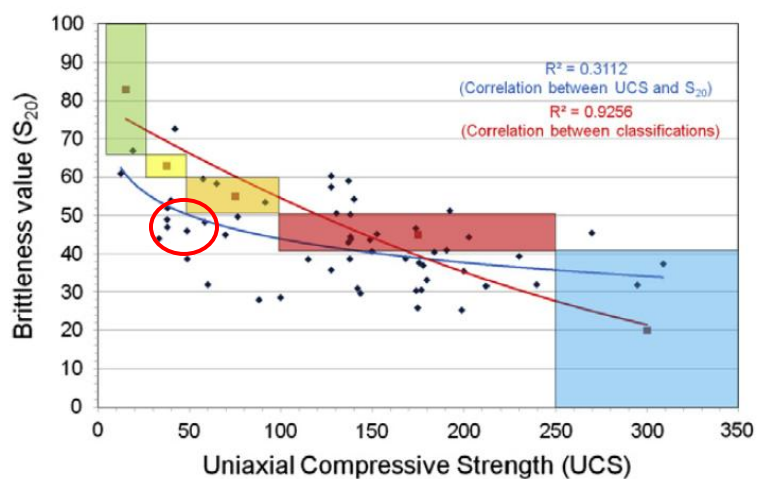
Σχήμα 9. Θηκόγραμμα (box-plot) απεικόνισης των καταγεγραμμένων τιμών AVS (Τιμή Αποξεστικότητας κοπτικών Χάλυβα) για συνήθη πετρώματα (n=αριθμός δοκιμών)



Σχήμα 10. Συσχετισμός μεταξύ CAI και AVS (προτεινόμενες τιμές από Cerchar Institute, 1986)



Σχήμα 11. Συσχετισμός μεταξύ CAI και SJ (προτεινόμενες τιμές από Cerchar Institute, 1986).
Siever's J- Value: επιφανειακή σκληρότητα του βράχου (τιμές 0-120)



Σχήμα 12. Συσχετισμός μεταξύ των UCS (ISRM) και προτεινόμενων τιμών S_{20} .

(Σχ 9-12: Ref: Amund Bruland, 1998)

Η τιμή ευθραυστότητας S_{20} αντιπροσωπεύει την «πρόθεση» του πετρώματος να δημιουργεί και να μεταδίδει τις ρωγμές. Δίδεται από εργαστηριακές δοκιμές ευθραυστότητας. Η μαθηματική σχέση που γενικά εφαρμόζεται στο μοντέλο πρόγνωσης Q_{tbm} για το χρόνο ζωής των κοπτικών (Cutter Life Index), είναι:

$$CLI \cong 14 \cdot \left(\frac{SJ}{AVS} \right)^{0.4} \quad (\text{Ref: Politecnico di Torino, 2012}) \quad (10.9)$$

Όλα τα παραπάνω σχετιζόμενα με τη φθορά κοπτικών, ισχύουν και για το εμπειρικό μοντέλο NTNU.

10.1.1.στ. Τάσεις στο μέτωπο

$$Q_{TBM} \cong \frac{RQD_o}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5}$$

σ_θ : μέση διαξονική τάση στο μέτωπο της σήραγγας

Επιχειρείται με τον παράγοντα αυτό στην εξίσωση, να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα κατά τη διάνοιξη σήραγγων σε μεγάλα βάθη όπου προϋπάρχουν υψηλές τάσεις.

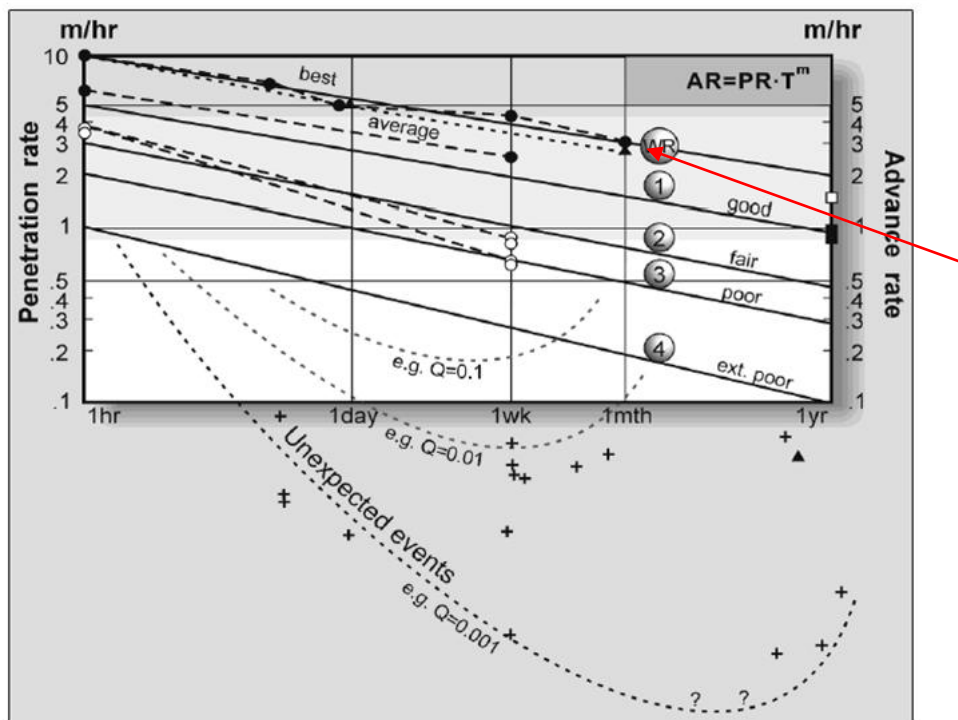
Η σ_θ στο μέτωπο, δίδεται από το γινόμενο υπερκείμενου ύψους, με το μοναδιαίο βάρος του σχηματισμού. $\sigma_\theta = \gamma \cdot H$

10.1.2. Νόμος του φθίνοντος ρυθμού προχώρησης

Για την εκτίμηση των καθυστερήσεων (downtime) που μπορεί να οφείλονται σε αίτια γεωτεχνικά, μηχανολογικού σχεδιασμού, βλάβης ή λειτουργικά, εισάγεται η έννοια του “φθίνοντος ρυθμού προχώρησης”, ο οποίος εκφράζεται με τον όρο m στην εξίσωση:

$$AR = PR \times T^m \quad (10.10)$$

Ταυτόσημη είναι και η έννοια του Utilization U (%) οπότε $AR = PR \times U$ όπου $U = T^m$



Σχήμα 13. Νομόγραμμα N. Barton για φθίνοντα ρυθμό προχώρησης (από 145 σήραγγες)
(Ref: N Barton, 2000. "TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock". AA Balkema.)

- Τα σημεία καταγεγραμμένου PR σε διάφορες χρονικές στιγμές ενώνονται και σχηματίζουν μια ευθεία.
- Εφόσον οι άξονες είναι σε λογαριθμική κλίμακα τότε οι ευθείες επί του διαγράμματος δίνουν τη σχέση $AR=PR \times t^m$, όπου $m < 0$ γιατί η ευθεία είναι φθίνουσα.
- Από πάνω προς τα κάτω οι ευθείες αντιστοιχούν σε όλο και χειρότερης ποιότητας βραχώμαζα ή μικρότερο QTBM.

Table 8. Typical PR, U and AR data for one year of TBM tunnelling.

	PR 1 hr	1 shift 8 hrs	1 day 24 hrs	1 week 168 hrs	1 month 720 hrs	3 months 2160 hrs	1 year 8760 hrs	
U =	100%	66%	53%	36%	27%	22%	16%	
AR=	3.0	2.0	1.6	1.1	0.8	0.6	0.5	m/hr

Πιν. 2: Τυπική χρονική διακύμανση τιμών PR, AR, U για ένα έτος διάνοιξης με ΤΒΜ

(Ref: N Barton, 2000. "TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock". AA Balkema.)

Ο συντελεστής m φθίνοντος ρυθμού προχώρησης δίδεται από τον τύπο:

$$m \approx m_1 \left(\frac{D}{5} \right)^{0.20} \left(\frac{20}{CLI} \right)^{0.15} \left(\frac{q}{20} \right)^{0.10} \left(\frac{n}{2} \right)^{0.05} \quad (10.11)$$

m_1 : αρχικός συντελεστής με βάση το δείκτη Q

D: διάμετρος σήραγγας (m)

CLI: δείκτης διάρκειας ζωής κοπτικών (0-120)

q: περιεκτικότητα σε χαλαζία (%)

n: πορώδες (%)

Τυπικές τιμές του συντελεστή m για διάφορες συνθήκες διάτρησης δίνονται παρακάτω:

Table 9. Estimates of utilisation (%) as a function of various utilisation decay gradients.

Period	Hrs	$m = -0.2$ Typical mean	$m = -0.15$ Learning curve	$m = -0.25$ Extremely poor	$m = -0.45$ Pre-inject. example
PR	1	100	100	100	100
shift	10	63.1	70.8	56.2	35.5
day	24	53.1	62.1	45.2	23.9
week	168	35.9	46.4	27.8	10.0
month	720	26.8	37.3	19.3	5.2*
year	8760	16.3	25.6	10.3	1.7*

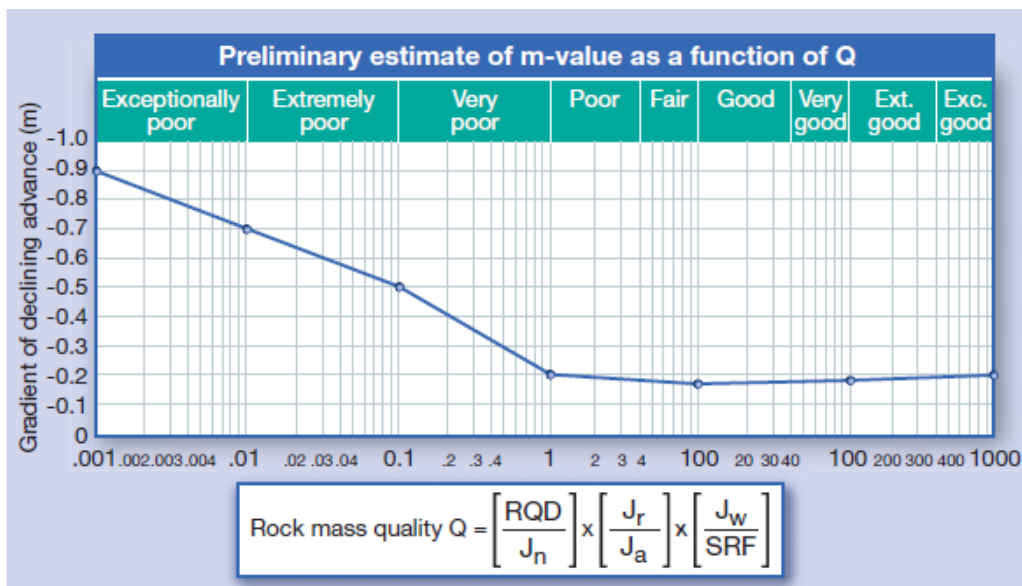
*Such low values that improved efficiencies must be achieved.

Πιν. 3: Τυπικές τιμές του συντελεστή m για διάφορες συνθήκες διάτρησης

(Ref: N Barton, 2000. "TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock". AA Balkema.)

10.1.3. Δείκτης Q και φθίνων ρυθμός προχώρησης

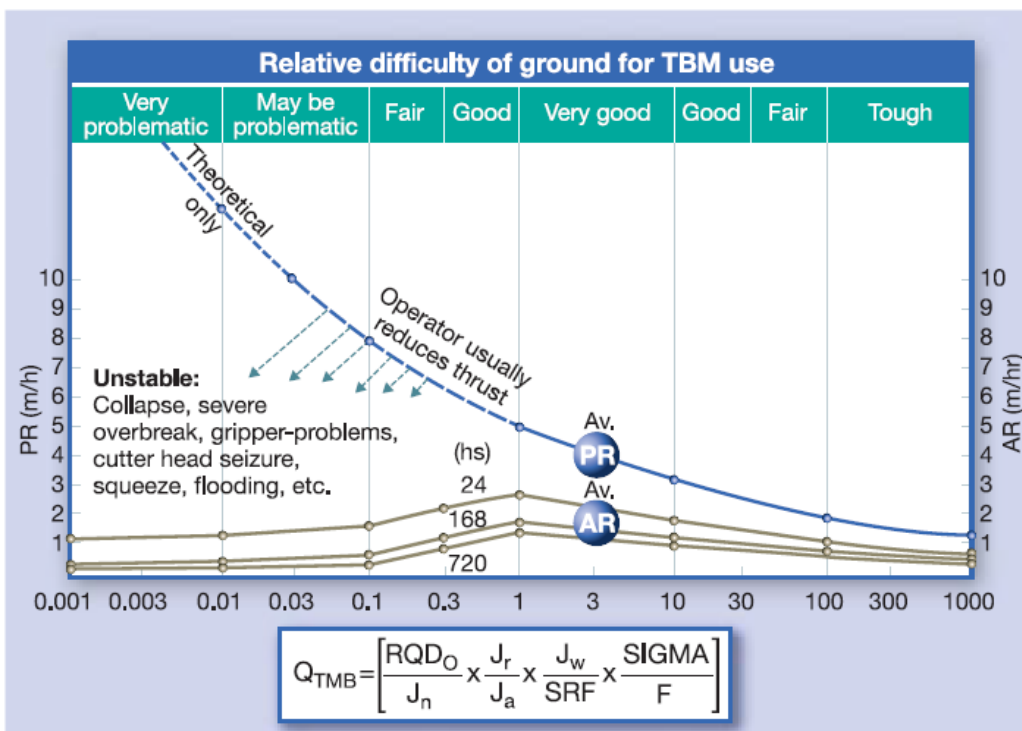
Τυπικές τιμές του συντελεστή m και η διακύμανσή του ανάλογα με την ποιότητα βραχομάζας δίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 14: Αρχική εκτίμηση της παραμέτρου (-) m, συναρτήσει του δείκτη Q.

(Ref: Barton N., 2005)

Μετά από όλα τα παραπάνω, η σχετική δυσκολία προχώρησης μίας μηχανής TBM σε διαφορετικής ποιότητας πετρώματα, απεικονίζεται γραφικά:



Σχήμα 15: Απεικόνιση της σχετικής δυσκολίας προχώρησης με χρήση TBM, συναρτήσει της διευρυμένης παραμέτρου Q_{tbm} (Barton and Abrahao, 2003) – διακύμανση των τιμών PR και AR συναρτήσει του Q_{tbm}

(Ref: N Barton, 2000. "TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock". AA Balkema.)

10.1.4. Απαιτούμενος χρόνος όρυξης

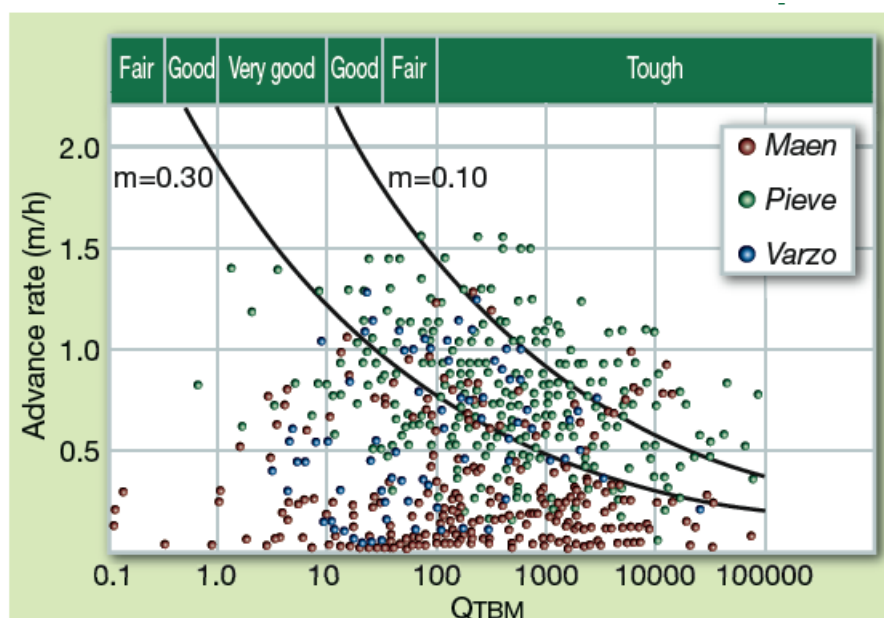
$$T = \frac{L}{AR} \quad T = \frac{L}{PR \times T^m} \quad T = \left(\frac{L}{PR} \right)^{\frac{1}{1+m}} \quad (10.12)$$

(Ref: N Barton, 2000. "TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock". AA Balkema.)

Αυτός ο χρόνος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πρόβλεψη ρυθμού προχώρησης (σε ημέρες), αλλά και να καθορίσει το διάστημα ακινητοποίησης σε συγκριμένη φθοροποιό ζώνη μήκους L μέσα στη σήραγγα.

Το παρακάτω Σχ. 16 δείχνει τα αποτελέσματα μιας προσπάθειας συσχετισμού του βαθμού προχώρησης AR, με χρήση του δείκτη Q_{TBM} .

Παρατηρείται πολύ μεγάλη διασπορά τιμών, λόγω του ότι ο δείκτης Q_{TBM} καθίσταται περίπλοκος περιλαμβάνοντας 21 παραμέτρους. Αποτέλεσμα είναι η μεμονωμένη χρήση του να μην προτείνεται στην τεχνική βιβλιογραφία. Θα πρέπει πάντα όταν χρησιμοποιείται, να συνδυάζεται με δεδομένα από άλλα μοντέλα πρόβλεψης (στατιστικά ή μηχανικά).



Σχήμα 16: Βαθμίδα προχώρησης όρυξης – συσχέτιση AR / Q_{TBM} για 3 διαφορετικές σήραγγες (Sapigni et al, 2002)

10.2. Το Νορβηγικό μοντέλο NTNU

Είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα διεθνή εμπειρικά μοντέλα (Bruland et al. 1995) που βασίζεται σε εργοταξιακά δεδομένα και στατιστική ανάλυση στοιχείων από 35 εργοτάξια και περισσότερα από 135 μίλια όρυξης σήραγγων. Βασίζεται σε μία ανάδρομη ανάλυση εμπειρικών δεδομένων από ήδη κατασκευασμένες σήραγγες με παρόμοια μηχανήματα, για διαφορετικούς τύπους πετρώματος.

Στους εμπειρικούς υπολογισμούς ενσωματώνει παραμέτρους πετρώματος όπως η μονοαξονική αντοχή, ο δείκτης διατρησιμότητας (Drilling Rate Index, DRI), ο δείκτης φθοράς (abrasivity, Cutting Life Index, CLI), ο δείκτης ψαθυρότητας (Brittleness Index, BI), χαρακτηριστικά ασυνεχειών (απόσταση και προσανατολισμός), προδιαγραφές μηχανής (RPM, ώθηση ανά δίσκο, γεωμετρία δίσκου). Χρησιμοποιεί διαγράμματα για να καθορίσει τις παραμέτρους λειτουργίας του TBM.

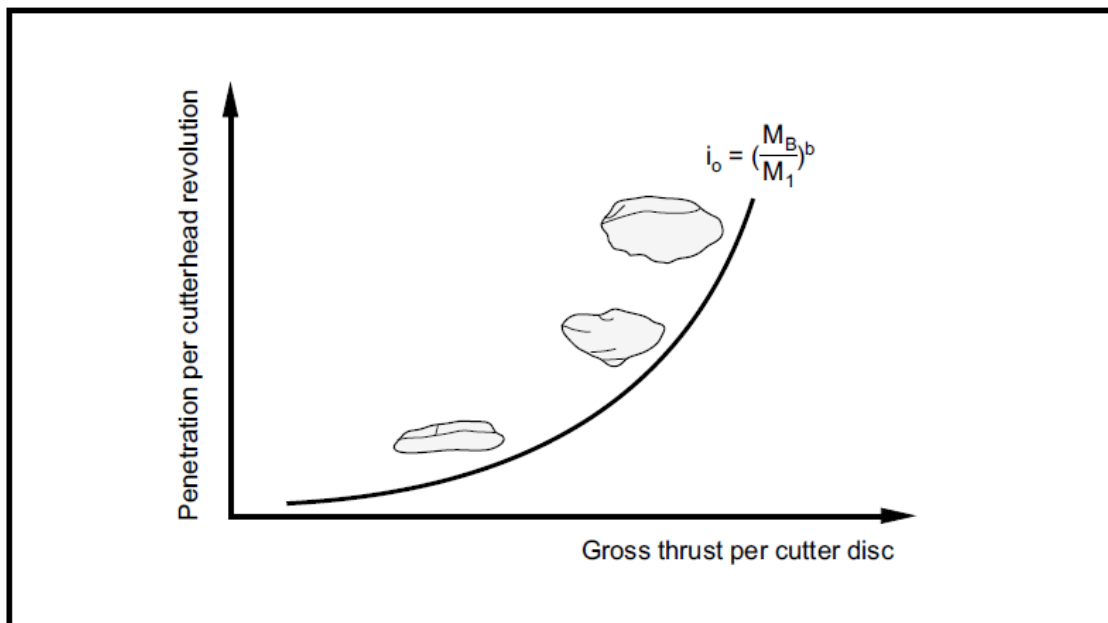
Το μοντέλο NTNU συγκρίνει 4 ανεξάρτητες παραμέτρους για να υπολογίσει κατανάλωση χρόνου και κόστος εξόρυξης σήραγγας με TBM.

- Καθαρός ρυθμός διείσδυσης σε mm/rev και m/h
- Χρόνος ζωής κοπτικών σε h/κοπτικό
- Ολική βαθμίδα προχώρησης (έκφραση κατανάλωσης χρόνου) σε h/km
- Κόστος εκσκαφής

Ο βασικότερος περιορισμός αυτού του μοντέλου είναι ο εμπειρικός χαρακτήρας των σχέσεων, οι οποίες **ισχύουν μόνο για το εύρος των πετρωμάτων και τύπων μηχανημάτων από τα οποία έχουν προκύψει αυτές.**

10.2.1. Καθαρός ρυθμός διείσδυσης σε mm/rev και m/h

Το μοντέλο βασίζεται στη γενική πρόοδο της καμπύλης διείσδυσης, όπως φαίνεται στο σχ. 16. και προκύπτει από ανάλογες δοκιμές με TBM, από διάφορες σήραγγες.

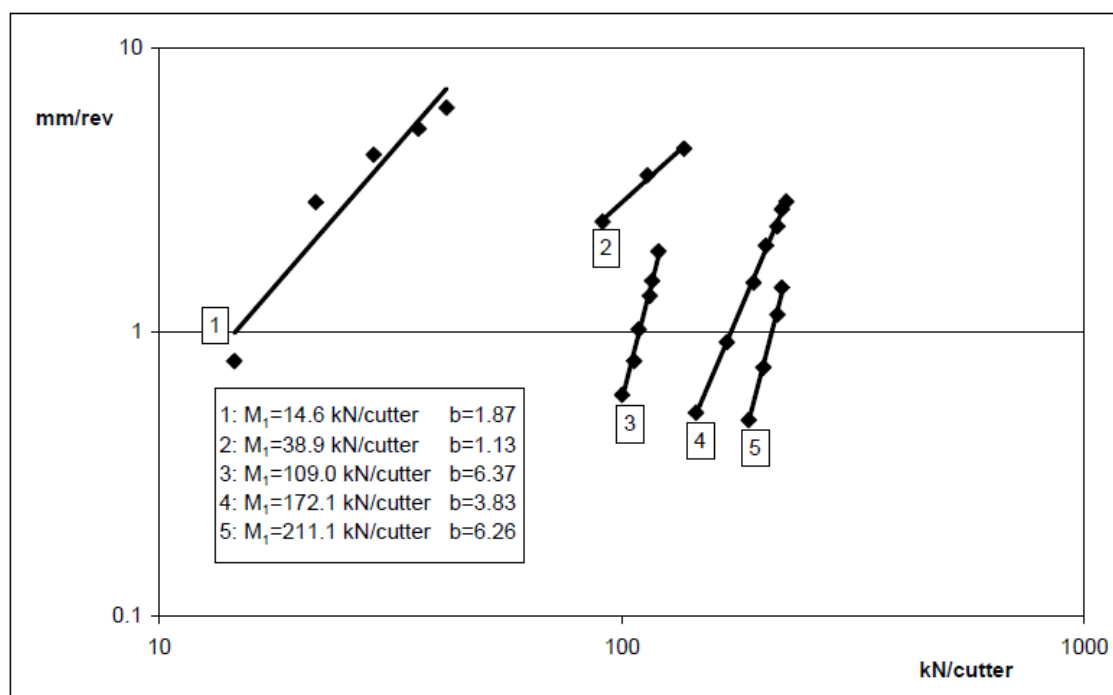


Σχήμα 17. γενική μορφή μίας δοκιμαστικής καμπύλης διείσδυσης (Ref: NTNU, 2000)

Οι βασικές αρχές μίας καμπύλης διείσδυσης είναι η κρίσιμη ή απαραίτητη **ώθηση M_1** που απαιτείται για την διείσδυση 1mm ανά περιστροφή κοπτικού και ο **συντελεστής διείσδυσης b** που περιγράφει την επίδραση της μεταβολής της εφαρμοζόμενης δύναμης θραύσης.

Η εξίσωση που διέπει την καμπύλη διείσδυσης δίνει μία πολύ καλή συσχέτιση με ένα μεγάλο αριθμό δοκιμών σε διαφορετικά πετρώματα και διαφορετικές μηχανές TBM. Όταν τα αποτελέσματα των δοκιμών πλοτάρονται σε ένα λογαριθμικό διάγραμμα (σχ. 18), γίνεται ένας γρήγορος υπολογισμός σε κάθε σημείο ενός ζεύγους τιμών M_1 και b .

1. Σαν πρώτο βήμα στην ανάπτυξη του μοντέλου, γίνεται ανάστροφη ανάλυση σε μια βάση δεδομένων (με ιδιότητες πετρώματος και χαρακτηριστικά μηχανής - μέσες τιμές από δεδομένα διάνοιξης 250km σήραγγων), ώστε να βρεθούν οι κατάλληλοι συσχετισμοί ανάμεσα στους όρους M_1 και b και τις παραμέτρους γεωλογίας και TBM ενός συγκεκριμένου έργου.



Σχήμα 18 : Γραφική απεικόνιση τιμών που προκύπτουν από δοκιμές διείδυσης
(Ref: NTNU, 2000)

2. Το επόμενο βήμα είναι να υπολογιστεί το ανάστροφο μοντέλο βάσει των τιμών που εκτιμήθηκαν και να προσδιοριστούν οι παράμετροι που ταιριάζουν καλύτερα σε αυτά τα δεδομένα. Αυτή η διεργασία γενικά οδηγεί σε μία σαφή επίδραση κάθε μίας από τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται.

Στο μοντέλο NTNU, επιλέγεται συνοπτικά η επίδραση των παραμέτρων μηχανής σε μία ποσότητα που ονομάζεται **“ισοδύναμη θραύση – M_{ekv} ”**.

Κατ’αντιστοιχία, συνοψίζονται οι παράμετροι της βραχομάζας σε μία μόνο τιμή που ονομάζεται **“ισοδύναμος παράγοντας θραύσης – k_{ekv} ”**. Η τιμή αυτή καθορίζει την κρίσιμη δύναμη ώσης M_1 και τον συντελεστή διείδυσης b .

Το μοντέλο έχει ισχυρή αλληλοσυσχέτιση μεταξύ M_1 και b . Όταν το M_1 μειώνεται, τότε και το b μειώνεται. Ο συντελεστής διείδυσης b δεν επηρεάζεται από τη διάμετρο κοπτικής κεφαλής ή την απόσταση των κοπτικών. Αυτό δεν ανταποκρίνεται απόλυτα στην πραγματικότητα, αλλά αποτελεί μία προσπάθεια περιορισμού του πλήθους των παραμέτρων επιροής.

10.2.2. Παράμετροι πετρώματος και μηχανής

Σε ό,τι αφορά το πέτρωμα:

Το **DRI** εκφράζει την διατρησιμότητα του άρρηκτου βράχου. Η δοκιμή ευθραυστότητας μπορεί αρχικά να δώσει μία εκτίμηση της ειδικής ενέργειας που απαιτείται για να σπάσει το πέτρωμα.

Περαιτέρω, η δοκιμή ευθραυστότητας είναι πολύ ισχυρή και θεωρείται ότι η θραύση του πετρώματος προκύπτει από αστοχία λόγω μείωσης της αντοχής σε εφελκυσμό. Όταν η θραύση (chipping) κάτω από ένα κοπτικό είναι αποτελεσματική, η κατάσταση των δυνάμεων θραύσης είναι πολύ δυναμική και προκαλεί τη χαλάρωση μεγάλων θραυσμάτων, κυρίως λόγω της αύξησης των ρωγμών εφελκυσμού.

Η ρωγμάτωση της βραχομάζας εκφράζεται μέσω του συντελεστή k_s που εξαρτάται από τη μέση απόσταση μεταξύ επιφανειών αδυναμίας, και τη γωνία μεταξύ άξονα της σήραγγας και των επιφανειών αδυναμίας. Σε συνθήκες σκληρού βράχου, η ρωγμάτωση είναι ο παράγοντας που επηρεάζει περισσότερο από όλους το ρυθμό προχώρησης και ως εκ τούτου το κόστος εκσκαφής.

Η μεγάλη επίδραση του βαθμού ρωγμάτωσης γίνεται απλά κατανοητή σαν η «βοήθεια» της φύσης στη διάνοιξη της σήραγγας. Στις περισσότερες περιπτώσεις (όπως και στην περίπτωση Αποσελέμη), η βραχομάζα έχει ήδη εκτεθεί απαραίτητα σε ένα βαθμό ρωγμάτωσης και θραύσης κατά τη διάρκεια της γεωλογικής ιστορίας. Σαν αποτέλεσμα, οι υπάρχουσες ρωγμές θα προκαλέσουν κάποιες πτώσεις τεμαχών στο μέτωπο, που θα απαλλάξουν τα κοπτικά από ένα μέρος του φορτίου τους και θα μεταφερθεί το φορτίο αυτό μέσω της κεφαλής στα υπόλοιπα κοπτικά. Αυτό δημιουργεί υψηλότερες μεσες τιμές φορτίων στα κοπτικά που βρίσκονται ακόμα σε επαφή με το πέτρωμα και ένα περισσότερο ισχυρό πεδίο τάσεων σε όλα τα κοπτικά. Έρευνες έχουν δείξει ότι ακόμα και οι πολύ μικρές – σχεδόν μη ορατές - ρωγμές και λεπτές σχιστολιθικές ενστρώσεις, δρουν σαν επιφάνειες αδυναμίας κατά τη διάτρηση.

Σύμφωνα με έρευνες του NTNU, η επίδραση της ρωγμάτωσης στη βραχομάζα είναι τόσο σημαντική, ώστε θα έπρεπε κάθε μοντέλο πρόγνωσης προχώρησης με TBM να έχει σαν δεδομένο μία συγκεκριμένη παράμετρο που να περιγράφει το βαθμό ρωγμάτωσης.

Συνήθως, τα σκληρά πετρώματα έχουν **πορώδες** μικρότερο από 2% (ογκομετρικό). Σε μερικές περιπτώσεις στη βάση δεδομένων του NTNU μοντέλου, λαμβάνεται τιμή πορώδους έως 11%. Το ακριβές μέγεθος της επίδρασης δεν είναι γνωστό, αλλά από τα δεδομένα υπαίθρου διαφαίνεται μία σαφής επιρροή, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι οι πόροι δρουν σαν «μεταβιβαστές» και «ενισχυτές» της ρωγμής.

Η **περιεκτικότητα σε χαλαζία** του πετρώματος είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό του χρόνου ζωής των κοπτικών, όπως θα περιγραφεί παρακάτω.

Από την πλευρά του μηχανήματος:

Το **μέσο φορτίο κοπής** είναι η κύρια παράμετρος, για προφανείς λόγους. Με αύξηση του φορτίου, η άκρη του κοπτικού θα διατρήσει βαθύτερα μέσα στην επιφάνεια του βράχου κι έτσι θα μεταβιβαστεί ταχύτερα και πιο αποτελεσματικά η ενέργεια από την κοπτική κεφαλή στο πέτρωμα. Η αύξηση της αποτελεσματικότητας αυτής, μπορεί να μεταφραστεί σαν ο «συντελεστής διείσδυσης b » της καμπύλης διείσδυσης.

Δοκιμές διείσδυσης σε άρρηκτη βραχώμαζα έδειξαν τιμές του συντελεστή έως και $b=7$.

Το μοντέλο NTNU χρησιμοποιεί τη **μέση συνολική δύναμη ώσης της κοπτικής κεφαλής** που προσδίδεται από τους κυλίνδρους. Η εφαρμοζόμενη δύναμη θραύσης αυξάνεται με την αύξηση της διαμέτρου της κεφαλής, αφού η **διάμετρος κεφαλής** καθορίζει τη ζώνη επαφής με το πέτρωμα για συγκεκριμένο φορτίο κοπτικού.

Θεωρείται μία μέση **απόσταση μεταξύ κοπτικών** στην κεφαλή (διάμετρος κεφαλής διαιρούμενη με τον αριθμό των κοπτικών). Κάποιες κεφαλές έχουν διπλά κοπτικά σε μία εγκοπή. Αυτό δεν επηρεάζει τους υπολογισμούς μέσης απόστασης και συνεπώς μέσης δύναμης θραύσης, αν τα διπλά κοπτικά δεν υπερβαίνουν το 10% του συνόλου.

Η **διάμετρος κοπτικού** είναι η κεντρική παράμετρος, με την οποία σχετίζεται στενά η εφαρμοζόμενη δύναμη θραύσης, η ποιότητα των κοπτικών δίσκων, και η ρωγμάτωση της βραχομάζας. Υπάρχει σχεδόν αναλογική σχέση μεταξύ διαμέτρου και διάρκειας ζωής κοπτικού. Αντίθετα, δεν λαμβάνεται υπόψιν το πλάτος αιχμής κοπτικών (tip width) σαν μία ανεξάρτητη παράμετρος.

Δεν περιλαμβάνονται στους υπολογισμούς διορθώσεις που αφορούν **δυνάμεις τριβής και συρτικές (έλξης συρμού)**. Παρόλα αυτά, η μέση ώθηση θραύσης θα πρέπει να διορθώνεται όσο σύρεται το back up system κατά τη διάρκεια της διάνοιξης. Το μοντέλο NTNU δεν δίνει συσχετισμό μεταξύ της εφαρμοζόμενης δύναμης θραύσης και του βαθμού κατακερματισμού της βραχομάζας.

Το **RPM (mm/rev)** της κεφαλής έχει άμεση επίδραση στη βασική διάτρηση. Το μοντέλο προϋποθέτει μία τιμή RPM σχεδόν την ίδια με την ταχύτητα περιστροφής των εξωτερικών κοπτικών. Προς το παρόν υπάρχουν πολύ λίγα δεδομένα για απόλυτο συσχετισμό του RPM με την πρόβλεψη προχώρησης, αλλά όλα τα παραπάνω αποτελούν μία ένδειξη.

Φθορά κοπτικών

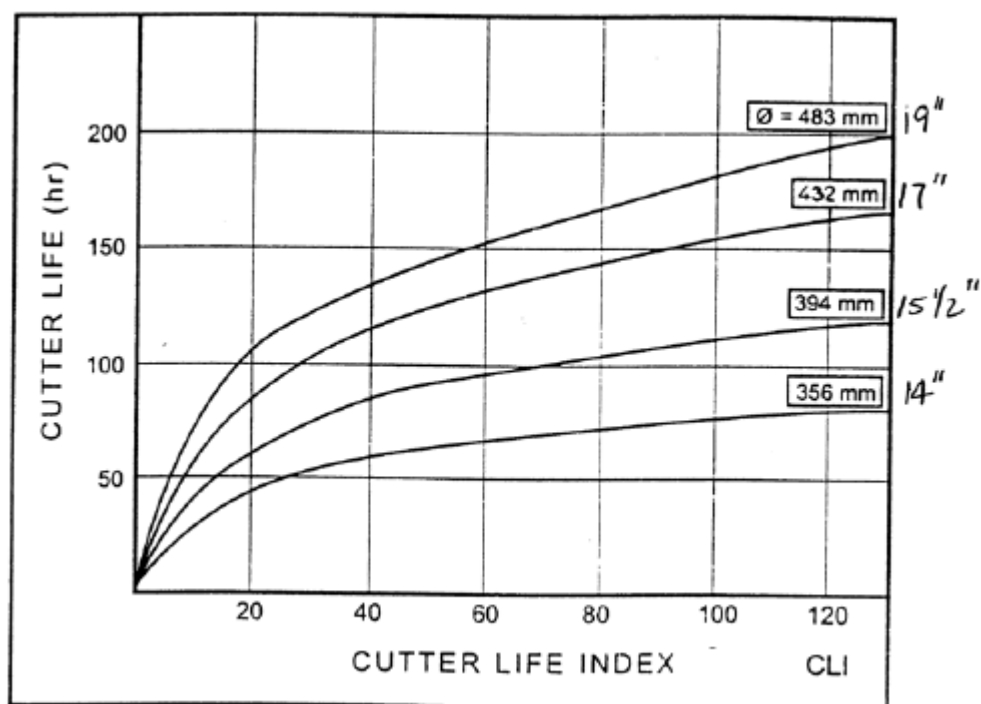
Ο χρόνος ζωής τους εξαρτάται από την ευθρυπτότητα των δακτυλίων κοπής. Το μοντέλο σαν εμπειρικό, στηρίζεται αποκλειστικά σε δεδομένα από μητρώα αλλαγής κοπτικών σε σήραγγες, και συσχετισμό με εργαστηριακές δοκιμές βραχωδών δειγμάτων. Ο χρόνος ζωής των κοπτικών (h/cutter) είναι μέγεθος ισοδύναμο με την απόσταση που έχει «διανύσει» το κοπτικό (km/cutter), για δεδομένο RPM Μηχανής TBM και συνδυάζεται με τη βαθμίδα διεיסδυσης (m/h) και τη διάμετρο του TBM.

Ο χρόνος αντικατάστασης του κάθε κοπτικού είναι καθοριστικός. Στο NTNU μοντέλο, απαιτούνται 45-60 min για κάθε κοπτικό, ανάλογα με τη διάμετρο. Στην πράξη, μια αλλαγή κοπτικού θα έπρεπε να περιλαμβάνει αλλαγή ομάδας κοπτικών. Όσο περισσότερα κοπτικά αντικαθίστανται σε μία διακοπή του μηχανήματος, τόσο μικρότερη η επίδραση στο συνολικό χρόνο.

Ο δείκτης **CLI** εκφράζει την ικανότητα απόξεσης του θρυμματισμένου πετρώματος στο μέτωπο της σήραγγας. Αποτελείται από την τιμή απόξεσης AVS του θρυμματισμένου πετρώματος και την σκληρότητα της επιφάνειας του πετρώματος (Sievers' J-value). Η τιμή AVS δείχνει πόσο γρήγορα το θρυμματισμένο πέτρωμα θα φθείρει τον δακτύλιο κοπής και το SJ εκφράζει σε ποιο σημείο του δακτυλίου θα εμφανιστεί η φθορά. Οι δοκιμές φθοράς cerchar συναρτήσει του χρόνου χαρακτηρίζουν την αντοχή του χάλυβα και άλλων μετάλλων, κατά τα διεθνή πρότυπα.

Το μοντέλο δεν ενσωματώνει το βαθμό θρυμματισμού της βραχομάζας σαν ξεχωριστή παράμετρο, αλλά μέσω της διάβρωσης κοπτικών στην καταγραφή των στατιστικών δεδομένων.

Μία σημαντική παράμετρος που σχετίζεται με το μηχανήμα, δεν περιλαμβάνεται στο μοντέλο φθοράς κοπτικών: η **δύναμη θραύσης του κάθε κοπτικού**. Η εμπειρία όμως δείχνει ότι σε συγκεκριμένο επίπεδο θραύσης κοπτικού, οι δακτύλιοι κοπής αρχίζουν να δείχνουν συμπεριφορά καταστρεπτική (περαιτέρω όχληση και αποσυναρμολόγηση του πετρώματος) αντί για αποξεστική. Το μοντέλο προϋποθέτει ότι το TBM δουλεύει πάντα κάτω από το επίπεδο αυτής της δύναμης θραύσης, ώστε να μην υπάρχουν καταστρεπτικές φθορές.



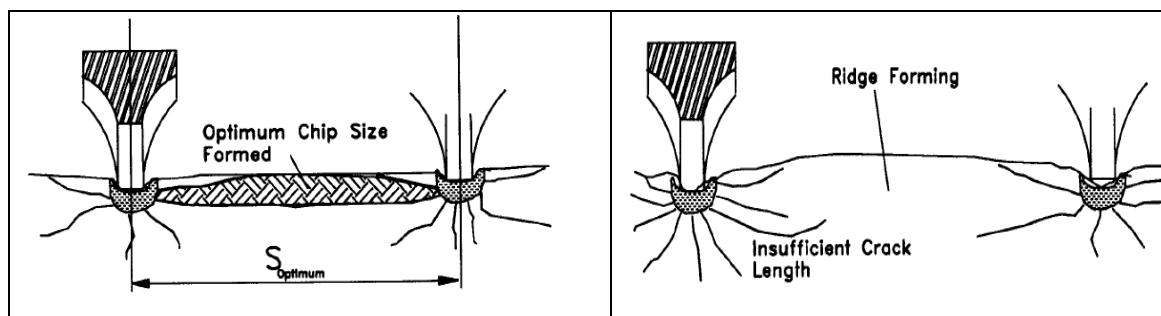
Σχήμα 19. Τιμές που λαμβάνει ο δείκτης CLI στο μοντέλο πρόβλεψης NTNU για διάφορα μεγέθη κοπτικών δίσκων (Movinkel & Johannessen 1986, NTH 1994)

10.2.3. Ρυθμός προχώρησης σύμφωνα με το NTNU

Εκτιμάται μέσω του ποσοστού λειτουργίας $U\%$ και την απόλυτη τιμή ρυθμού διείσδυσης PR σε m/h . Το μοντέλο βασίζεται σε μέσες τιμές δεδομένων κατά μήκος του συνόλου της σήραγγας. Η εκτίμηση του ποσοστού λειτουργίας γίνεται μέσω της εκτίμησης κατανάλωσης χρόνου για διάφορες εργασίες που απαιτούνται για την εκσκαφή (συντήρηση, διακοπή διάτρησης κλπ). Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα καταγραφής κατανάλωσης χρόνου για διάφορες λειτουργίες πρέπει να ειδωθεί από την πλευρά του TBM και όχι της σήραγγας σαν σύνολο.

10.3. COLORADO SCHOOL OF MINES - CSM Model

Η Σχολή Ορυκτών Πόρων του Colorado School of Mines (CSM) ανέπτυξε από το 1977 ένα μοντέλο πρόγνωσης για το ρυθμό προχώρησης και φθοράς κοπτικών του TBM σε συνθήκες σκληρού βράχου. Βασίζεται στην δημιουργία **chips** βράχου μεταξύ δύο διαδοχικών κοπών (Rostami, Ozdemir 1993).



Σχήμα 20. Σχηματισμός Chips βράχου σε άρρηκτο πέτρωμα (Rostami & Ozdemir, 1993 “new model for performance prediction of hard rock TBMs”)

Η προσέγγιση CSM εστιάζει στον **υπολογισμό των απαραίτητων δυνάμεων κοπής που απαιτούνται, για να επιτευχθεί μία συγκεκριμένη διείσδυση p (mm/rev)**, βασιζόμενο στις ιδιότητες του πετρώματος και τη γεωμετρία κοπής και κοπτικών. Αναλυτικά: υπολογίζει την απαιτούμενη ισχύ, τη ροπή και τη δύναμη ώθησης ολόκληρης της κοπτικής κεφαλής του TBM, από τον υπολογισμό των δυνάμεων σε κάθε κοπτικό άκρο ξεχωριστά.

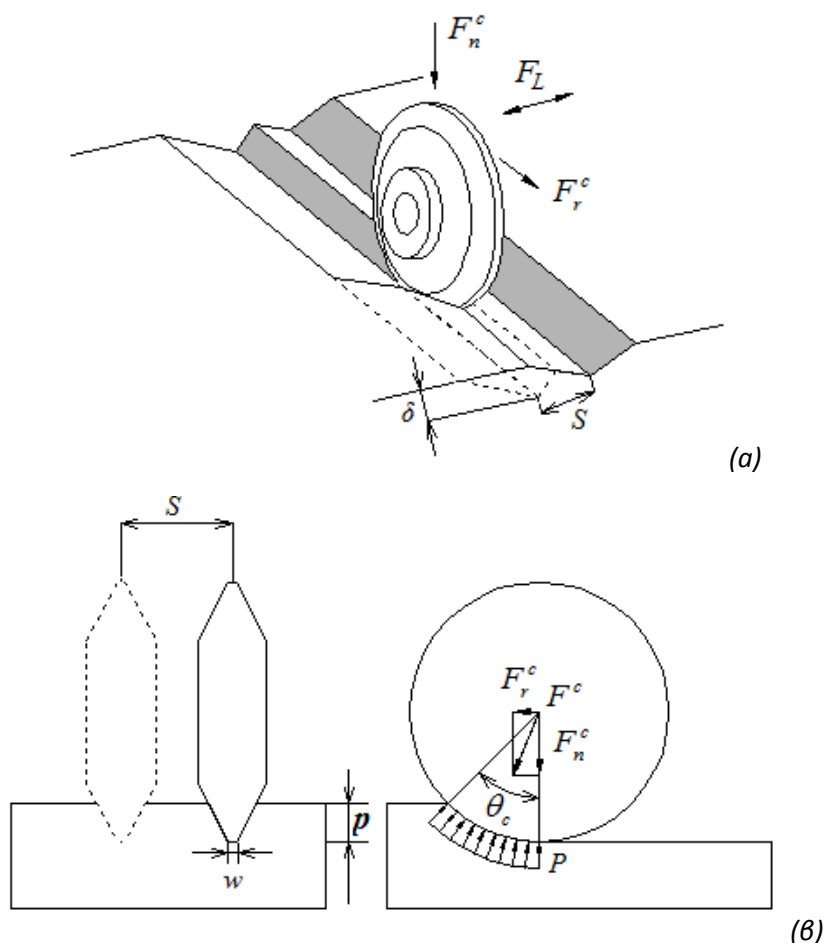
- Εάν εξετάζεται δεδομένος γεωλογικός σχηματισμός, μπορεί με βάση τα παραπάνω να γίνει επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος.
- Εάν εξετάζεται δεδομένος γεωλογικός σχηματισμός και δεδομένο μηχάνημα, το ζητούμενο είναι η ταχύτητα διάτρησης και η φθορά των κοπτικών άκρων.

Η βάση δεδομένων προκύπτει από ένα μεγάλο αριθμό εργαστηριακών δοκιμών γραμμικής κοπής δειγμάτων σε συμπαγή/ άρρηκτα δείγματα, στο εργαστήριο της σχολής CSM, σε πραγματική κλίμακα.

Για δεδομένο μηχάνημα με γνωστές προδιαγραφές και σε δεδομένο πέτρωμα, οι δυνάμεις υπολογίζονται ως συνάρτηση των ιδιοτήτων αντοχής του πετρώματος και της γεωμετρίας των κοπτικών άκρων με βάση επαναληπτικές πειραματικές δοκιμές πλήρους κλίμακας (linear cutting rig tests) και κατάλληλες εμπειρικές σχέσεις.

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)*.

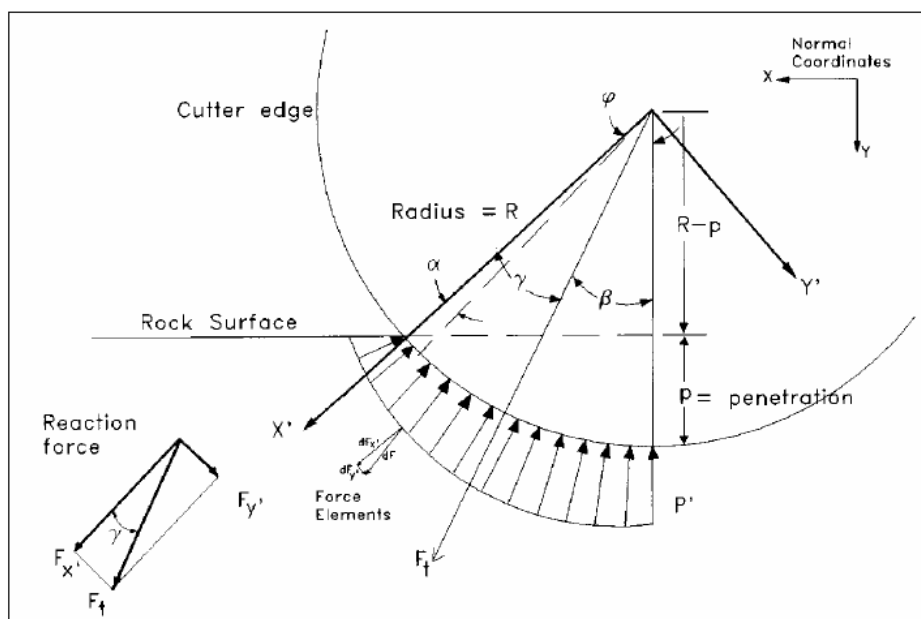


Σχήμα. 21: Ανάλυση δυνάμεων στους δίσκους κοπής των ΤΒΜ, (α) ισομετρική άποψη, (β) πρόσθια και πλάγια κατακόρυφη τομή.

(ref: *Rostami & Ozdemir, 1993 "new model for performance prediction of hard rock TBMs"*)

Η βασική εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της συνισταμένης δύναμης που ασκείται σε ένα κοπτικό άκρο (F^c) είναι η εξής (βλ. Σχ.):

$$F^c = \int dF = \int_0^{\theta_c} P^o \cdot R \cdot w \cdot d\alpha = \int_0^{\theta_c} P' \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\theta_c}\right)^n \cdot R \cdot w \cdot d\alpha = \frac{P' \cdot R \cdot w \cdot \theta_c}{n+1} \quad (10.13)$$



Σχήμα 22. Κατανομή πίεσης με την εφαρμογή δύναμης

(ref: Rostami & Ozdemir, 1993 "new model for performance prediction of hard rock TBMs")

όπου:

- R η ακτίνα του κοπτικού δίσκου,
- w το πλάτος της αιχμής του κοπτικού άκρου,
- θ_c το συνολικό τόξο επαφής κοπτικού δίσκου – πετρώματος,
- $\theta_c = \cos^{-1}\left(\frac{R-p}{R}\right)$ (10.14)
- α παράμετρος ολοκλήρωσης που είναι η γωνία που κυμαίνεται από 0 έως θ_c ,
- $P^o = P' \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\theta_c}\right)^n$ η κατανομή του φορτίου στην επαφή κοπτικού – πετρώματος,
- n ο εκθέτης που καθορίζει την κατανομή της πίεσης (τυπικές τιμές κυμαίνονται από 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 (αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (UCS) και αντοχή σε άμεσο εφελκυσμό (UTS)), την γεωμετρία του κοπτικού (R , w) και την γεωμετρία κοπής (την απόσταση γειτονικής εγκοπής S , το βάθος κοπής p) 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:

$$P' = C \cdot \sqrt[3]{\frac{S \cdot UTS \cdot UCS^2}{\theta_c \cdot \sqrt{R \cdot w}}} \quad (10.15)$$

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 του μοντέλου CSM:

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

$$F_r^c = \int_0^{\theta_c} P' \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\theta_c}\right)^n \cdot R \cdot w \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha = \begin{cases} P' \cdot R \cdot w \cdot (1 - \cos \theta_c), & n = 0 \\ \frac{P' \cdot R \cdot w}{\theta_c} \cdot (\theta_c - \sin \theta_c), & n = 1 \end{cases} \quad (10.16)$$

Οι δυνάμεις κοπής δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ των αλλά εξαρτώνται μέσω της έννοιας του “**Συντελεστή Κύλισης**”

Για γραμμική κατανομή φορτίου

$$CC = \frac{F_r}{F_n} = \frac{\theta_c - \sin \theta_c}{1 - \cos \theta_c} \quad (10.17\alpha)$$

Για ομοιόμορφη κατανομή φορτίου

$$CC = \frac{F_r}{F_n} = \frac{1 - \cos \theta_c}{\sin \theta_c} \quad (10.17\beta)$$

Η βαθμίδα διείσδυσης PR υπολογίζεται σταδιακά ως εξής:

- Βρίσκεται η βασική τάση κάτω από την αιχμή κοπτικού, βασισμένη σε μία δοκιμή θλίψης ή όλες τις ακόλουθες παραμέτρους: αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, δοκιμή εφελκυσμού Brazilian, απόσταση μεταξύ κοπτικών, πάχος αιχμής κοπτικού, ακτίνα κοπτικού, διείσδυση. Για κάθε ένα από τα παραπάνω δεδομένα, εισάγεται ένα εύρος τιμών εφαρμογής
- Γίνεται παραδοχή για το πως λειτουργεί η κατανομή της πίεσης κάτω από την οδόντωση του κοπτικού, σύμφωνα με όσα ισχύουν για συνεχή κοπή και κοπτικά άκρα τύπου σφήνας.
- Υπολογίζεται η κάθετη (F_n) δύναμη θραύσης και οι δυνάμεις στρέψης – ροπής (F_r) της κοπτικής κεφαλής

Για την πρόγνωση απόδοσης ΤΒΜ, με όλες τις παραμέτρους προκαθορισμένες σε συγκεκριμένο τύπο πετρώματος για συγκεκριμένο τύπο μηχανής, η **διείσδυση** είναι το μόνο μέγεθος που μπορεί να διαφοροποιηθεί ώσπου η απαραίτητη δύναμη θραύσης των κοπτικών ή η απαραίτητη ροπή της κοπτικής κεφαλής να ισοδυναμούν με τις προδιαγραφές του ΤΒΜ.

Το μοντέλο CSM ενσωματώνει και κάποιες βασικές αρχές της Νορβηγικής Σχολής (NTNU) για να εκτιμήσει τη βασική βαθμίδα διάτρησης. Αυτές είναι:

- Παράμετροι αντοχής του πετρώματος, σαν έκφραση της διατρησιμότητάς του
- Δύναμη ώσης κοπτικών
- Διάμετρος κοπτικών
- Απόσταση κοπτικών

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑ

Παρόλο που το μοντέλο αποδείχτηκε αποτελεσματικό σε συνθήκες άρρηκτου βράχου, η αξιοπιστία του μειώνεται σημαντικά όταν πρόκειται για κατακερματισμένο πέτρωμα. Δεν ενσωματώνει την ανομοιογένεια της βραχώμαζας, δεν περιλαμβάνει συστηματικά δεδομένα κατακερματισμού στην πρόγνωση, αν και υπάρχει σε πειραματικό επίπεδο προσπάθεια, ώστε να υπεισέρχεται η κατάσταση του πετρώματος στην απόδοση του TBM (Cheema, 1999 and Yagiz, 2002).

Στις προβλέψεις τόσο του CSM όσο και του Q_{tbn} , μετά την εισαγωγή του n_{util} (CSM) και $T(Q_{tbn})$ ο πραγματικός βαθμός προχώρησης AR, μειώνεται σημαντικά, οπότε διαφαίνεται η επίδραση του μήκους σήραγγας (ως παράγοντας επιβράδυνσης – deceleration factor), ιδιαίτερα στο μοντέλο Q_{tbn} .

10.3.1. Η προσέγγιση της «Ειδικής Ενέργειας»

Στη θεώρηση της λειτουργίας των ΤΒΜ χρησιμοποιείται η έννοια της ειδικής ενέργειας (SE - specific energy) που προτάθηκε από τον Teale (1965). Αρχικά χρησιμοποιήθηκε ως παράμετρος για την ανάλυση της κρουστικής ή περιστροφικής διάτρησης των πετρωμάτων αλλά στη συνέχεια επεκτάθηκε και για άλλα μηχανήματα μηχανικής όρυξης πετρωμάτων. Η κατανάλωση της ειδικής ενέργειας (σε μονάδες τάσης MPa) έχει άμεσο αντίκτυπο στην αποδοτικότητα της όρυξης, δηλαδή:

- στην καθαρή ταχύτητα διάτρησης (PR) της σήραγγας χωρίς να υπολογίζονται οι νεκροί χρόνοι (συντήρηση, καθαρισμός, αντικατάσταση κοπτικών, κ.λπ.)
- στο κόστος της εκσκαφής (κόστος χρήσης του μηχανήματος για δεδομένο χρόνο ολοκλήρωσης του έργου και ρυθμός φθοράς κοπτικών άκρων).

Ο Snowdon et al (1982) καθιέρωσε μία σχέση μεταξύ δυνάμεων περιστροφής, κάθετης δύναμης και διείσδυσης.
$$\boxed{F_{normal}/F_{rolling} = 21.71 * p^{-0.656}}$$
 (10.18)

(όπου $p = \text{penetr/rev}$)

Αποδεικνύεται ότι υπάρχει μία ιδανική αναλογία S/p συνήθως στο διάστημα $S/p = 7-12$, που δίνει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για την κοπή βραχώδους πετρώματος.

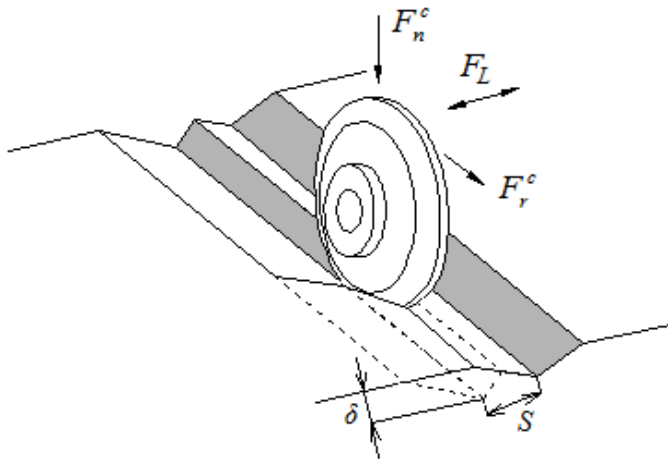
Επίσης, η συνολική δύναμη που δέχονται τα κοπτικά άκρα, αυξάνει με το βάθος κοπής ανά περιστροφή της κοπτικής κεφαλής.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η διάταξη και η απόσταση των κοπτικών άκρων στην κεφαλή, πρέπει να γίνεται έτσι ώστε: αφενός μεν το βάθος προχώρησης p είναι τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιείται η δαπανώμενη ειδική ενέργεια, αφετέρου δε η συνολική δύναμη που ασκείται σε κάθε κοπτικό δίσκο να μην υπερβαίνει την αντοχή του, γεγονός που θα οδηγήσει σε υπερβολική φθορά και πρόωρη αντικατάσταση.

Καθίσταται λοιπόν προφανές ότι για τον υπολογισμό των δυνάμεων που ασκούνται στα κοπτικά άκρα χρειάζεται ένα θεωρητικό μοντέλο στην αρχική φάση σχεδιασμού του μηχανήματος, το οποίο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση της ειδικής ενέργειας συναρτήσει των S και p .

Η ειδική ενέργεια υπολογίζεται με δύο διαφορετικές αλλά πρακτικά ισοδύναμες μεθόδους:

1. Στην πρώτη μέθοδο ο υπολογισμός γίνεται από την κοπή με ένα κοπτικό άκρο (Εξ. 10.19) όπου η ειδική ενέργεια δίδεται από τον λόγο της δύναμης κύλισης F_r^c προς το γινόμενο του βάθους κοπής ανά περιστροφή της κοπτικής κεφαλής, p , επί την μέση απόσταση γειτονικών κοπών S .



Σχήμα 23: Ανάλυση δυνάμεων στην προσέγγιση της Ειδικής Ενέργειας - Δυνάμεις
(ref: Rostami & Ozdemir, 1993 “new model for performance prediction of hard rock TBMs”)

$$SE = \frac{F_r^c}{S \cdot p} \quad (10.19)$$

2. Στην δεύτερη μέθοδο ο υπολογισμός γίνεται από το πηλίκο της δαπανώμενης ισχύος ανά εκσκαπτόμενο όγκο πετρώματος στη μονάδα του χρόνου (ονομάζεται και στιγμιαίος ρυθμός κοπής (ICR = Instantaneous Cutting Rate)),

$$SE = \eta \cdot \frac{P}{V/t} \Leftrightarrow ICR = \frac{V}{t} = \frac{\eta \cdot P}{SE} \quad (10.20)$$

όπου:

- η ο συντελεστής μηχανικής απόδοσης του συστήματος που εκφράζει το ποσοστό μετάδοσης της ενέργειας στην κοπτική κεφαλή. Επηρεάζεται από την κλίση, τη φθορά των δίσκων, πιθανώς σαπωνοειδή υφή του πετρώματος κλπ (Neil, Rostami et al.).
- P η αναλίσκόμενη συνολική ισχύς κατά την όρυξη κατά το χρονικό διάστημα t
- V ο όγκος του πετρώματος που ορύσσεται στο ίδιο χρονικό διάστημα.

Το γινόμενο της γωνιακής ταχύτητας $\omega_{ang} = 2\pi\omega$ με την ροπή στρέψης T [kNm] της κεφαλής δίνει την στιγμιαία κατανάλωση της ισχύος P της κεφαλής,

$$P = T \cdot \omega_{ang} \quad (10.21)$$

Ο αριθμός κοπτικών δίσκων πάνω στην κεφαλή εξαρτάται από τη διάμετρο της σήραγγας D και την απόσταση γειτονικών κοπών S που είναι και οι δύο παράμετροι σχεδιασμού

$$N_t = N + N_{gauge} \quad (10.22)$$

- N_t = συνολικός αριθμός κοπτικών δίσκων κεφαλής
- N = κοπτικοί δίσκοι μετώπου κεφαλής
- N_{gauge} = περιφερειακοί κοπτικοί δίσκοι

$$N = \frac{D}{2s} \quad (10.23)$$

- D = διάμετρος κεφαλής
- S = απόσταση γειτονικών κοπών

10.3.2. Ανάλυση Δυνάμεων

Η συνολική δύναμη (ώση) F_T είναι η δύναμη η οποία πρέπει να ασκηθεί στο μέτωπο από την κεφαλή για την διεύθυνση των κοπτικών άκρων σε βάθος p και ταυτόχρονα να υπερνικήσει τις αντιστάσεις ολίσθησης και κλίσης. Η αντίσταση ολίσθησης F_R οφείλεται στο βάρος του ΤΒΜ, στο οποίο θα συνυπολογιστεί και η πρόσθετη πίεση των υπερκειμένων. Σε περίπτωση ανοδικής κλίσης (π.χ. Αποσελέμη, όπως θα παρατεθεί στη συνέχεια), πρέπει να υπολογισθεί και η δύναμη αντίστασης κλίσεως F_A .

Η συνολική ροπή στρέψης T βρίσκεται από το άθροισμα του γινομένου των δυνάμεων κύλισης με τον μοχλοβραχίονα R_i σε όλα τα ενεργά κοπτικά. Αρα οι σχέσεις για την συνολική ώση και ροπή στρέψης που πρέπει να υπερνικηθούν είναι:

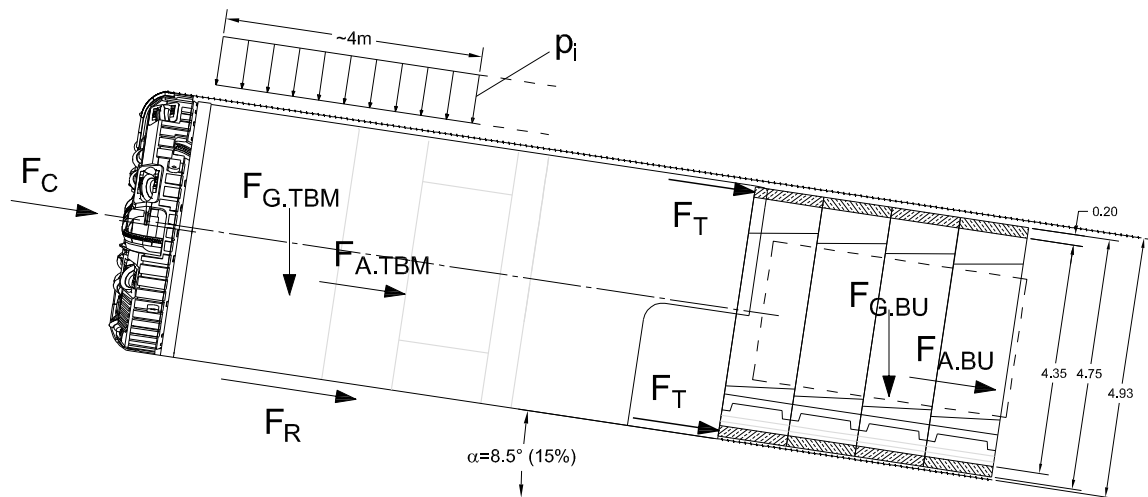
$$F_T = \sum_{i=1}^{N_t} F_{ni}^c + F_R + F_A \approx N_t \cdot F_n^c + F_R + F_A \quad (10.24)$$

$$T = \sum_{i=1}^N F_{ri}^c \cdot R_i = \frac{1}{4\eta} \cdot N_t \cdot D \cdot F_r^c$$

όπου: R_i ο μοχλοβραχίονας του κοπτικού δίσκου i

Π.χ. αν ο συντελεστής μηχανικής απόδοσης της κεφαλής είναι $\eta=0.85$ τότε

$$T = \sum_{i=1}^N F_{ri}^c \cdot R_i \approx 0.3 \cdot N_t \cdot D \cdot F_r^c$$



Σχήμα 24. Δυνάμεις αντίστασης κοπής, ολίσθησης και κλίσης που πρέπει να υπερνικηθούν από το TBM (ref: APOSELEMIS, 2014)

Με βάση τις Εξ. (10.21) και (10.24) μπορούν να υπολογισθούν οι απαιτούμενες λειτουργικές παράμετροι του μηχανήματος όπως η ροπή T , η ισχύς P και η δύναμη ώθησης F_T . Όλες οι παράμετροι λειτουργίας για συγκεκριμένο μηχάνημα και πέτρωμα, παραμένουν σταθερές με μόνη μεταβαλλόμενη παράμετρο τη διείδυση ανά κοπτικό p , βάση της οποίας γίνεται η ρύθμιση των λειτουργικών παραμέτρων, σε συνάρτηση πάντα με τις δυνατότητες του μηχανήματος (ισχύς κεφαλής, αντοχή κοπτικών).

Όσον αφορά τη **γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της κεφαλής ω [rad/min]**, αυτή ελέγχεται από τον χειριστή, ενώ η μέγιστη τιμή της δεν μπορεί να υπερβεί την μέγιστη γραμμική ταχύτητα των κοπτικών δίσκων που προδιαγράφεται από τον κατασκευαστή. Αυτός ο περιορισμός, σχετίζεται με την αποφυγή ανάπτυξης μεγάλων θερμοκρασιών στην επαφή δίσκου-πετρώματος και την πρόωρη αστοχία του δίσκου. (ενδεικτικά αναφέρεται: μέγιστη τιμή $v_{\max}=150$ m/min για δίσκους διαμέτρου 17" ή 43,5 cm).

Η γραμμική ταχύτητα των περιφερειακών δίσκων κοπής δίνεται από την γνωστή σχέση της Φυσικής Στερεού Σώματος

$$v_{gauge} = \omega \frac{D}{2} \leq v_{\max} \quad (10.25)$$

Το γινόμενο της ταχύτητας περιστροφής ω και του βάθους διείδυσης p δίνει τον

$$\text{ρυθμό διάτρησης, } PR = p[mm/rev] \cdot \omega[rev/min] \cdot 60[min/h] \cdot 10^{-3}[m/mm] \quad (10.26)$$

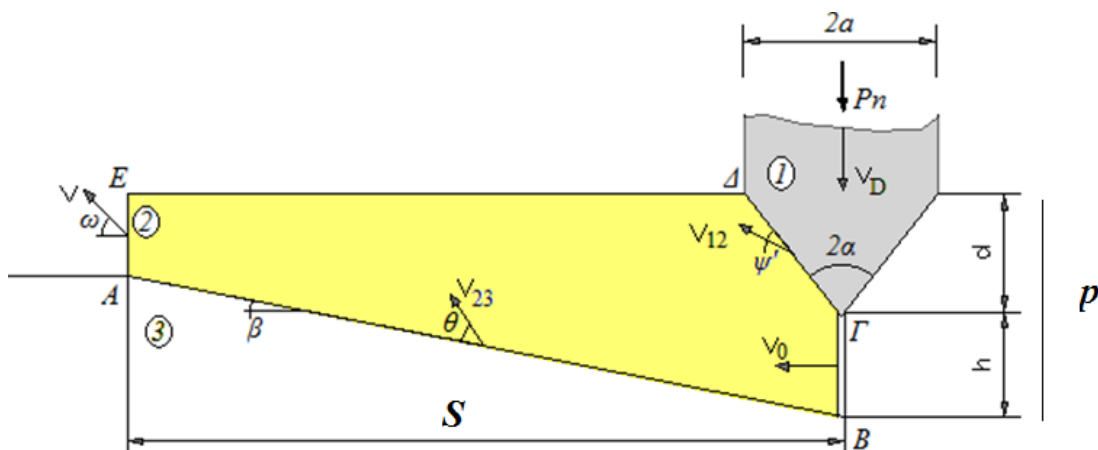
Ακολούθως, ο πραγματικός ρυθμός προχώρησης AR (advance rate) υπολογίζεται με

$$\text{βάση τον βαθμό χρήσης του TBM μόνο για «καθαρή» κοπή } AR = n_{util} \cdot PR \quad (10.27)$$

10.4. Μοντέλο TUC (G. Exadaktylos et al, 2016)

Σε συνάρτηση με την προσέγγιση της Ειδικής Ενέργειας, προτείνεται Νέο Μηχανικό Μοντέλο υπολογισμού της δύναμης επί του κοπτικού άκρου. Το μοντέλο TUC είναι δυναμικό (εφόσον η αντοχή των πετρωμάτων εξαρτάται από τον ρυθμό φόρτισης) και τριδιάστατο, σε αντίθεση με τα έως σήμερα προτεινόμενα αναλυτικά μοντέλα που είναι στατικά και επίπεδα.

Το βασικό λειτουργικό μέγεθος που χρησιμοποιείται είναι η **ειδική ενέργεια κοπής**, η οποία υπολογίζεται με αναλυτικό τρόπο, είτε με βάση τις ιδιότητες του γεωυλικού και την γεωμετρία των κοπτικών δίσκων, 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 χρησιμοποιείται για την εκτίμηση με την μέθοδο Kriging ή των στοχαστικών προσομοιώσεων κατά μήκος της σήραγγας των ιδιοτήτων του γεωυλικού (UCS, UTS, c , ϕ) με βάση τις υπάρχουσες μετρήσεις στο μέτωπο στη φάση της όρυξης αλλά και τις πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις στη φάση της έρευνας.



Σχήμα 25. Απεικόνιση της γεωμετρίας κοπής, κάτω από την ακμή κοπτικού δίσκου στο μοντέλο TUC (Ref: Stavropoulou M. & G. Exadaktylos 2016)

Το νέο μοντέλο **TUC** (Exadaktylos et al, 2016) βασίζεται στην Οριακή Ανάλυση της Ιδεατής Θεωρίας Πλαστικότητας και δίνει την ακόλουθη σχέση στην απλοποιημένη της μορφή για γωνία διεπιφανειακής τριβής δίσκου βραχομάζας $\psi = \phi$ (γωνία εσωτερικής τριβής της βραχομάζας),

$$SE / CC = 2 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{UTS}{UCS} \cdot \frac{\sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \cdot \tan \alpha \cdot \tan(\alpha + \phi) \cdot UCS \quad (10.28)$$

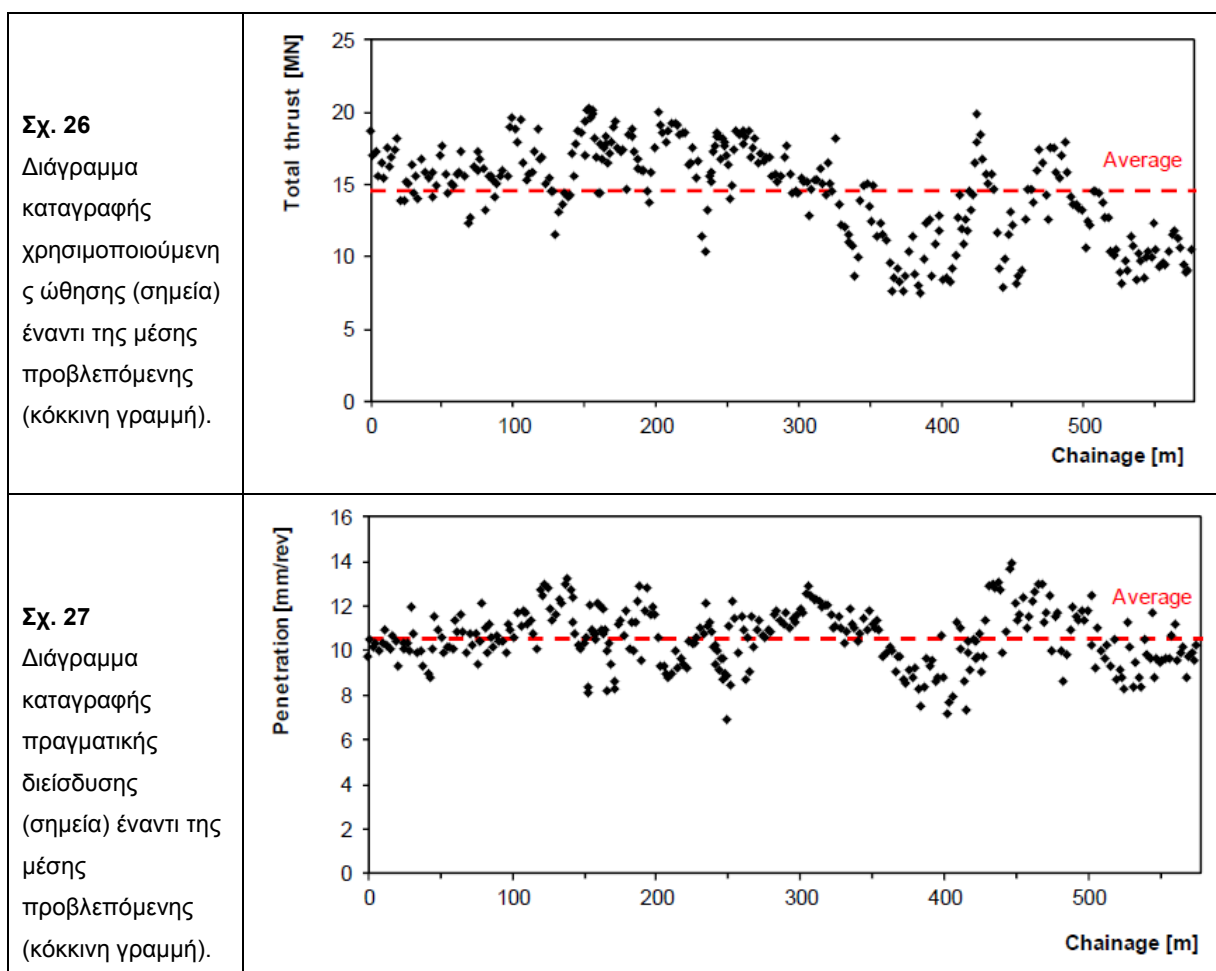
Όμως από την Εξ. (10.19) ισχύει $SE = \frac{F_r^c}{S \cdot p}$

Άρα από την Εξ. (10.28) αν έχουμε τις παραμέτρους αντοχής της βραχομάζας UTS, UCS και ϕ , τη σχεδιαστική παράμετρο S και την προβλεπόμενη δύναμη ώσης F_n ανά κοπτικό δίσκο (=συνολική ώση δια τον συνολικό αριθμό δίσκων), μπορούμε να υπολογίσουμε το βάθος διείδυσης από την Εξ. (10.29).

$$p = \frac{F_n}{S \cdot (SE / CC)} \quad (10.29)$$

10.4.1. Παράδειγμα Υπολογισμού

Πρόβλεψη λειτουργίας TBM - πρόγνωση διείδυσης p [mm/rev] βασισμένη σε τιμές της μέσης κάθετης δύναμης ανά κοπτικό δίσκο (F_n). Για TBM D=9,43 με κοπτικά διαμέτρου 17" (432mm) και πέτρωμα αντοχής UCS =78MPa (Alp Tranit Gotthard Tunnel, 2010)



(Ref: World Tunnel Congress 2013)

Από τη μέση τιμή $F_n=15000$ KN στο διάγραμμα, με πλήθος δίσκων $N=54$ και απόσταση $S=100$ mm μεταξύ τους, προκύπτει ανά κοπτικό δίσκο :

$$\bar{F}_n = \frac{15000}{54} = 277.8 \text{ kN}$$

Εάν γίνει η παραδοχή ότι μόνο το 80% της ώσης καταναλώνεται στην κοπή (απώλεια τριβών 20%), τότε: $F_n = 277,8 \cdot 80\% = 222,24$ KN ανά κοπτικό δίσκο.

Από την εξίσωση (3.15) υπολογίζεται για το ήμισυ της γωνίας κοπτικού δίσκου $\alpha=40^\circ$, $UCS=78$ MPa, $UTS=1/10$ $UCS=7.8$ MPa, και γωνία εσωτερικής τριβής $\phi=40^\circ$

$$SE/CC = 2 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{7.8}{78} \cdot \frac{\sin 40}{1 - \sin 40} \right) \cdot \tan 40 \cdot \tan(80) \cdot 78 = 237.13 \text{ MPa} \Rightarrow$$

$$p = 10 \text{ mm/rev}$$

Όπως φαίνεται και από τα εμπειρικά δεδομένα, πρόκειται για μία «αποτελεσματική» προσέγγιση.

Πέραν των παραπάνω ενδεικτικών υπολογισμών που σχετίζονται με την ονομαστική τιμή της F_n του μηχανήματος, στη συνέχεια (Μέρος Β') θα ακολουθήσει εφαρμογή του μοντέλου στη σήραγγα Αποσελέμη και εκτίμηση βαθμού διείσδυσης βάσει ρεαλιστικών δεδομένων πετρώματος και μηχανής ΤΒΜ.

ΜΕΡΟΣ Β΄

Εφαρμογή των 4 Μοντέλων Πρόγνωσης στη διάνοιξη σήραγγας Αποσελέμη με ΤΒΜ Διπλής Ασπίδας

1. Γενικά Στοιχεία του Έργου

Στο πρώτο τμήμα της παρούσας εργασίας, δόθηκε μία συνοπτική περιγραφή των μοντέλων που χρησιμοποιούνται σε σκληρά πετρώματα, προσδιορίζοντας τις κύριες παραμέτρους στις οποίες βασίστηκαν, καθώς και κάποια ενδεικτικά παραδείγματα εφαρμογής. Στο δεύτερο τμήμα, αναλύονται οι γεωλογικές συνθήκες και δυνάμεις ώθησης κατά την εκσκαφή της **σήραγγας Αποσελέμη**, οι τεχνικές προδιαγραφές του συγκεκριμένου ΤΒΜ και τα στοιχεία που καταγράφονται κατά τη διάνοιξη.

Θα γίνει συγκριτική εφαρμογή των 4 μοντέλων πρόγνωσης που περιγράφηκαν, στην πρόγνωση ρυθμού προχώρησης της διανοιγόμενης Σήραγγας Αποσελέμη, από την οποία υπήρχε η δυνατότητα λήψης ρεαλιστικών δεδομένων.

Τα βασικά δεδομένα της σήραγγας βρίσκονται στον ακόλουθο πίνακα:

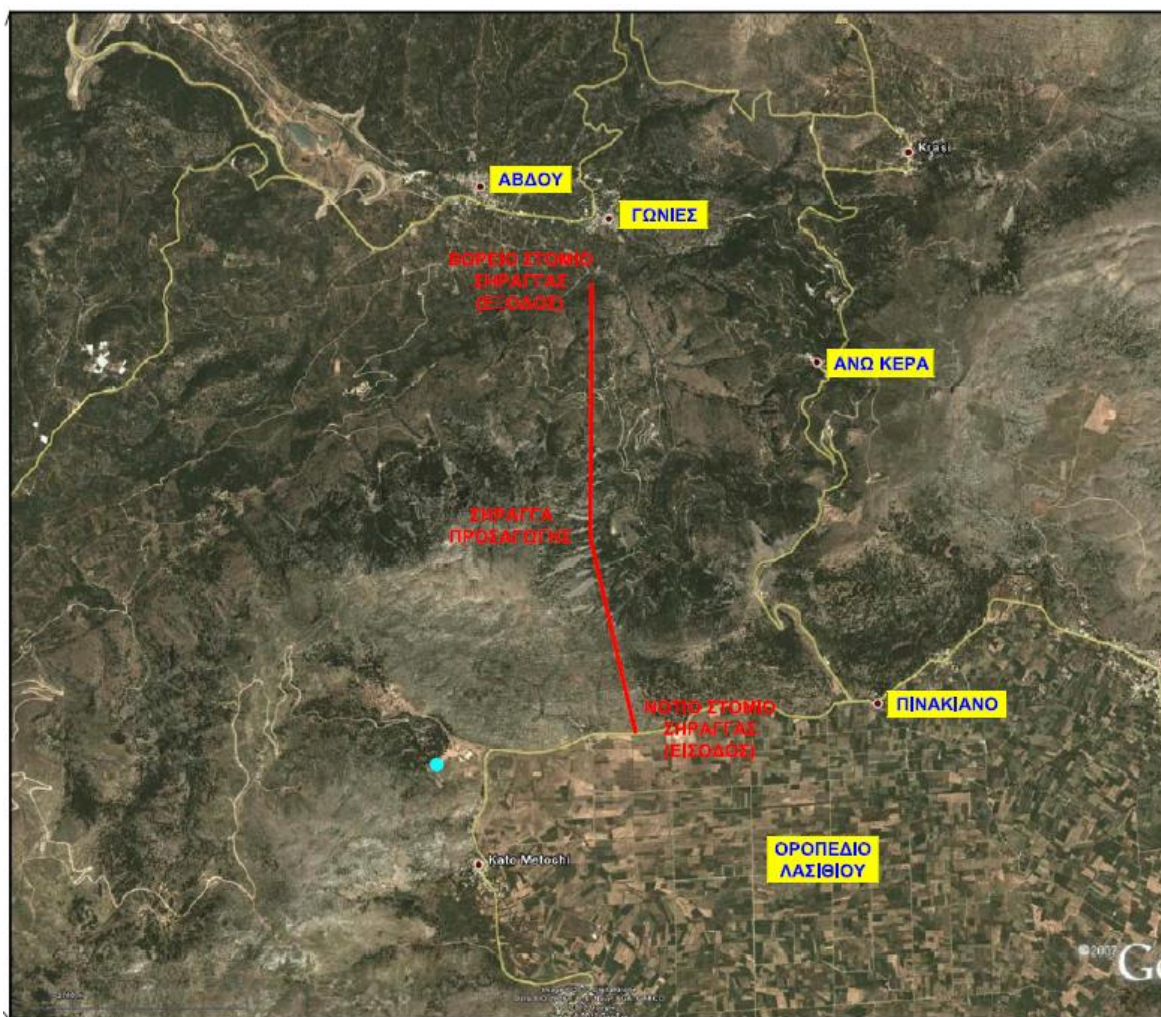
Μήκος: $L \approx 3,4\text{km}$
Μηκοτομική Κλίση: -15%
Ελάχιστη ακτίνα: $R \sim 1000\text{m}$
Υδραυλικές συνθήκες: εγκατάσταση αγωγού DN1800
Εσωτερική Διάμετρος: $D_{\text{int}} = 4,35\text{m}$
Διάμετρος εκσκαφής: $D_{\text{exc}} = 4,93\text{m}$
Πάχος στοιχείων επένδυσης: $h_s = 20\text{cm}$

Πιν.4: Βασικά χαρακτηριστικά της διανοιγόμενης σήραγγας Αποσελέμη (2015)

(Ref: Έργα ενίσχυσης Ταμιευτήρα φράγματος Αποσελέμη από το Οροπέδιο Λασιθίου – Οριστική Μελέτη Εφαρμογής, 2014)

Η γεωμετρία της σήραγγας είναι κυκλική και η διάνοιξη πραγματοποιείται από τα κατάντη προς τα ανάντη. Η τελική επένδυση γίνεται με προκατασκευασμένα στοιχεία (segments) οπλισμένου σκυροδέματος πάχους 20cm και ποιότητας C40/50.

Το υπερκείμενο της σήραγγας κυμαίνεται μεταξύ 5m και 290m περίπου.



Σχήμα 28: Απόσπασμα αεροφωτογραφίας (Google Earth) με τη διάταξη όδευσης της Σήραγγας Αποσελέμη (Ref: Έργα ενίσχυσης Ταμιευτήρα φράγματος Αποσελέμη από το Οροπέδιο Λασιθίου Οριστική Γεωλογική Μελέτη, Μάιος 2013)

2. Τεχνικά χαρακτηριστικά ΤΒΜ σήραγγας ΑΠΟΣΕΛΕΜΗ

Ως μηχανή διάνοιξης στη συγκεκριμένη σήραγγα, επιλέχθηκε ΤΒΜ διπλής ασπίδας (ολοκλήρωση της τελικής επένδυσης - segments - ταυτόχρονα με την προχώρηση), μέθοδος που εμφανίζει χρονικό πλεονέκτημα έναντι ανοιχτού ή μονής ασπίδας ΤΒΜ.

Στους σχηματισμούς σκληρού βράχου, το ΤΒΜ διπλής ασπίδας μπορεί να λειτουργεί με πέδιλα και συνεχή προχώρηση με υψηλούς ρυθμούς, ενώ στους ασθενείς φυλλίτες ή σε τυχόν ζώνες με πληρωμένα καρστικά κενά ή κατακερματισμένο ασβεστόλιθο, η ασπίδα θα προσφέρει άμεση υποστήριξη και η λειτουργία της μηχανής θα είναι του τύπου μονής ασπίδας.

Θα γίνει πρόβλεψη λειτουργίας ΤΒΜ - πρόγνωση διεύθυνσης p [mm/rev] βασισμένη σε τιμές της μέσης κάθετης δύναμης ανά κοπτικό δίσκο, σε μηχανή με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

GENERAL SPECIFICATIONS	
MITSUBISHI – BORETEC – NFM Double Shield TBM 1441 / 0187 / 006	
Machine type	Hard rock double shield TBM
Boring diameter	4.930 mm
Cutterhead	flat design with 17" disc cutters complete with wear plate type false face
Cutters	17" (back-loading)
Number of disc cutters	32
Maximum thrust per disc cutter	250 kN
Maximum thrust on the cutterhead	32 x 250 kN = 8.000 kN
Type of cutterhead drive	electric drive with variable speed (frequency variation / VFD)
Cutterhead head speed (VFD)	0 - 9 rpm
Cutterhead drive power	6 x 250 kW = 1.500 kW
Torque (constant torque range)	2.600 kNm @ 0-4.5 rpm
Torque (max. speed, constant power range)	1.300 kNm @ 9 rpm
Unlocking torque	3.900 kNm
Boring stroke main thrust auxiliary thrust	1.300 mm 2.200 mm
Main thrust (telescopic) Number of jacks Max. thrust force	8 15.200 kN @ 350 bar
Auxiliary thrust (segment jack) Number of jacks Max. thrust force	14 25.900 kN @ 350 bar
Grippers Force	30.000 kN
Maximum penetration rate	8 m/h
Conveyor	throughed belt conveyor
Electrical system Input power Main drive motor circuit Pump motor circuit Controls Total installed electric power	15.000 V, 3-phase, 50 Hz 690 V, 3-phase, 50 Hz 400 V, 3-phase, 50 Hz 220/110 V, 50 Hz ≈ 2.350 kVA (≈ 1.880 kW)
Machine weight	≈ 400 t
General lay-out drawing	290 PE 00 005 / B
Year of manufacture / diameter conversion	1995 / 2014

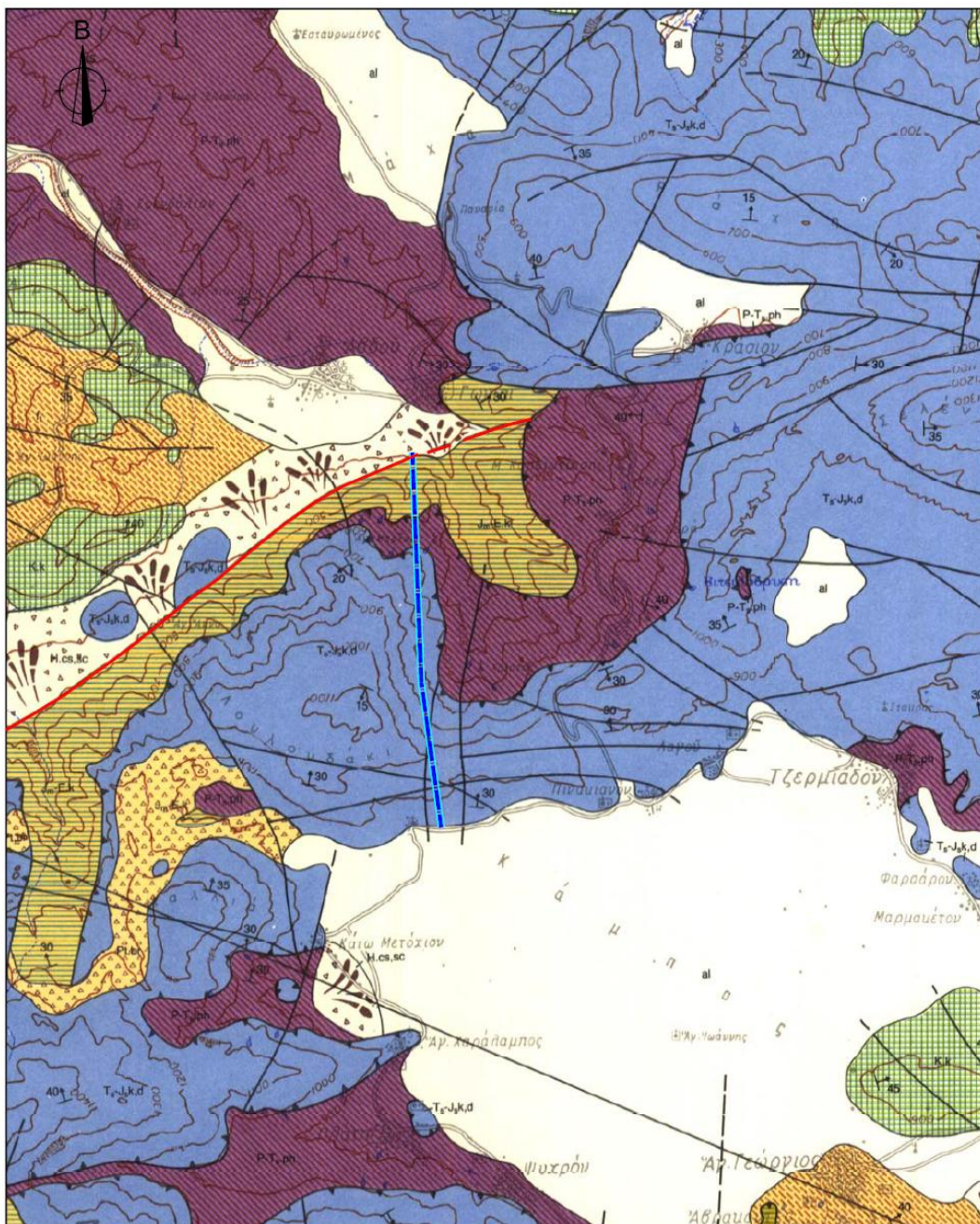
Πιν.5: Τεχνικά Χαρακτηριστικά ΤΒΜ Αποσελέμη (Ref: Specification TBM & BU System Oct, 2013)

3. Τεχνικογεωλογικές ενότητες στο διάδρομο της Σήραγγας

Κατά μήκος της σήραγγας αναμένεται να συναντηθούν τρεις βασικοί σχηματισμοί:

α) η αυτόχθονη σειρά των πλακωδών ασβεστολίθων στο κατάντη τμήμα της σήραγγας, β) η αλλόχθονη σειρά των φυλλιτών ενδιάμεσα και

γ) η αλλόχθονη σειρά των ασβεστολίθων – δολομιτών στο ανάντη τμήμα της σήραγγας.



Απόσπασμα Γεωλογικού Χάρτη Ι.Γ.Μ.Ε., Φύλλο: "ΜΟΧΟΣ", έκδοσης 1989.

0 0,5 1 Km
ΚΛΙΜΑΚΑ 1:50.000

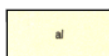
Υ Π Ο Μ Ν Η Μ Α

ΟΛΟΚΑΙΝΟ



Κώνιοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα: λατύπες κυρίως ανθρακικής σύστασης, αναμεμιγμένες με ερυθρογή.

ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ - ΟΛΟΚΑΙΝΟ



Αλλουβιακές αποθέσεις: χαλαρά αργιλοαμμόδη υλικά, ερυθρογή με κροκαλολατύπες και υλικά ελουβιακού μανδύα.

ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ



Λατυποπαγή: αποτελούνται από θραύσματα προνεογενούς ασβεστόλιθου, με ασβεσπιτική συνδετική ύλη.

ΑΛΛΟΧΘΟΝΕΣ ΣΕΙΡΕΣ

ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΖΩΝΗΣ ΤΡΙΠΟΛΕΩΣ

ΑΝΩΤΕΡΟ ΗΩΚΑΙΝΟ - ΟΛΙΓΟΚΑΙΝΟ



Φλύσης: εναλλαγές καστανών, ερυθρών αργιλικών σχιστολίθων και ψαμμιτών, με μικρές ενστρώσεις τεφρών ασβεστολιθικών τουρβιδιτών. Μέγιστο πάχος: 100 m περίπου.

ΚΡΗΤΙΔΙΚΟ



Ασβεστόλιθοι: τεφροί έως τεφρόμαυροι, μεσο-παχυ-στρωματώδεις έως άστρωτοι, βιτουμενιούχοι. Μέγιστο πάχος: 300 m περίπου.

ΑΝΩΤΕΡΟ ΤΡΙΑΔΙΚΟ - ΑΝΩΤΕΡΟ ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ



Ασβεστόλιθοι, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες: τα κατώτερα μέλη τους αποτελούνται από ημικρυσταλλικούς δολομίτες, παχυστρωματώδεις έως άστρωτους, τεφρούς, ενώ τα ανώτερα μεταπίπτουν σε ασβεστόλιθους και δολομιτικούς ασβεστόλιθους μεσο-στρωματώδεις. Στο σύνολό τους είναι καρστικοί και κυρίως στα ανώτερα μέλη. Μέγιστο πάχος: 600 m περίπου.

ΤΕΚΤΟΝΙΚΟ ΚΑΛΥΜΜΑ ΦΥΛΛΙΤΙΚΗΣ - ΧΑΛΑΖΙΤΙΚΗΣ ΣΕΙΡΑΣ

ΠΕΡΜΙΟ - ΑΝΩΤ, ΤΡΙΑΔΙΚΟ



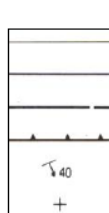
Ενότητα πετρωμάτων χαμηλής μεταμόρφωσης: φυλλίτες, χαλαζίτες και σερικιτικοί σχιστόλιθοι οι οποίοι παρεμβάλλονται μεταξύ των "πλακωδών ασβεστολίθων" ή του μεταφλύσχη των και των ανθρακικών πετρωμάτων της ζώνης Τριπόλεως. Επικρατούν: α) μαρμαρυγιακοί - ανθρακικοί σχιστόλιθοι, και β) χαλαζιακοί μετα-ψαμμίτες. Κατά θέσεις φέρουν φακοειδή σώματα από μεταβασίτες. Μέγιστο πάχος: 400 m περίπου.

ΑΥΤΟΧΘΟΝΗ ΣΕΙΡΑ ΚΡΗΤΗΣ ΙΟΝΙΟΣ(;) ΖΩΝΗ

ΜΕΣΟ ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ - ΗΩΚΑΙΝΟ



"Πλακώδεις ασβεστόλιθοι" (Plattenkalk): κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και κατά θέσεις μάρμαρα, μεσο-κρυσταλλικά, καλά στρωμένα σε πάγκους. Στα κατώτερα μέλη τους παχυ-στρωματώδεις, ενώ προς τα επάνω εξελίσσονται σε μέσο- και στη συνέχεια σε λεπτο-στρωματώδεις. Φέρουν ενστρώσεις πυριτολίθων και ανθρακικών - χαλαζιακών σχιστολίθων. Ορατό πάχος: 800 m περίπου.



Γεωλογικό όριο
Ρήγμα
Ρήγμα πιθανό ή καλυμμένο
Επώθηση
Διεύθυνση και κλίση στρωμάτων
Οριζόντια στρώματα

Σχήμα 29: Απόσπασμα Γεωλογικού Χάρτη με τη διάταξη της όδευσης της Σήραγγας Αποσελέμη - ΙΓΜΕ - φύλλο Μοχός - (Ref: Έργα ενίσχυσης Ταμειωτήρα φράγματος Αποσελέμη από το Οροπέδιο Λασιθίου, Οριστική Γεωλογική Μελέτη, Μάιος 2013)

3.1. Αυτόχθονη σειρά των πλακωδών ασβεστολίθων (κατάντη)

Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι μεσο-στρωματώδεις έως άστρωτοι, τεφρού έως μελανότεφρου χρώματος, με κερατολιθικές ενστρώσεις και κονδύλους. Στο τμήμα αυτό αναμένεται η ύπαρξη τριών κανονικών ρηγμάτων στις χιλιομετρικές θέσεις: 0+127, 0+472, 0+916.

Χαρακτηρίζονται γενικά από μέσες έως τοπικά υψηλές αντοχές και σχετικά μεγάλη δυσκολία αποσάθρωσης. Γενικά καλή έως τοπικά μέτρια γεωμηχανική συμπεριφορά και περιορισμένα προβλήματα διάνοιξης, λόγω καρστικών εγκοίλων και αιφνίδιων εισροών υπογείων υδάτων. Υποβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχομάζας αναμένεται μόνο στις θέσεις εντοπισμού των ρηγμάτων.

3.2 Αλλόχθονη σειρά των φυλλιτών (ενδιάμεσα)

Ισχυρά διακλασμένοι, αποσαθρωμένοι και Φυλλίτες του αλλόχθονου τεκτονικού καλύμματος. Χαμηλής αντοχής, με διάτμηση και καταπόνηση κυρίως λόγω επώθησης των ασβεστολίθων του καλύμματος Τριπόλεως επί αυτών. Εύπλαστοι σχηματισμοί και ως εκ τούτου πολυπτυχωμένοι. Φτωχά γεωμηχανικά χαρακτηριστικά, σχετικά μεγάλη ευκολία αποδόμησης, ελάχιστα έως λίγο φθοροποιός.

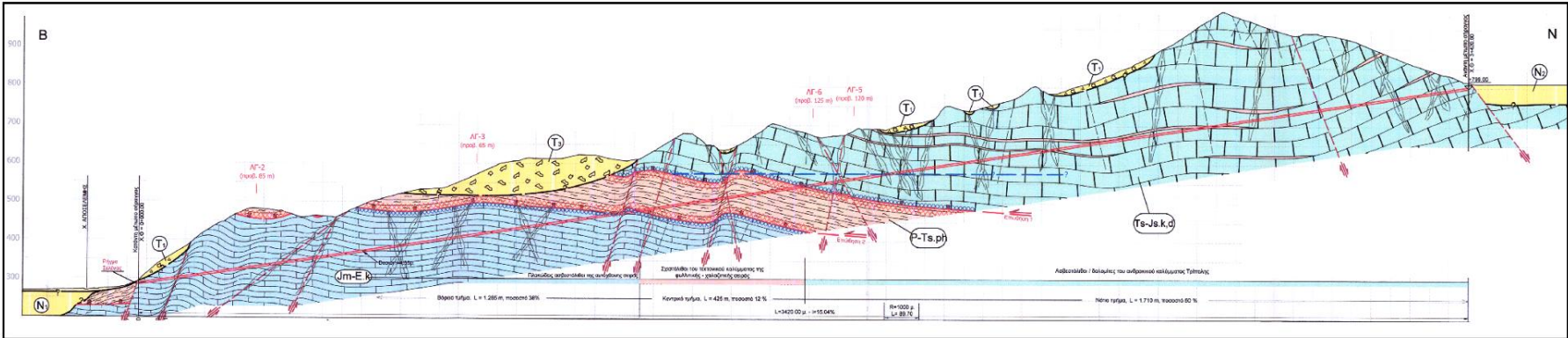
Η χαμηλή αντοχή του υλικού, σε συνδυασμό με το μεγάλο ύψος υπερκειμένων (έως και 300m), είναι πιθανό να οδηγήσουν στην εκδήλωση συνθηκών σύνθλιψης (squeezing conditions) κατά τη διάνοιξη. Υπάρχει κίνδυνος εμπλοκής της κοπτικής κεφαλής, μείωση του ρυθμού προχώρησης ή ακόμη και σε παγίδευση του ΤΒΜ. Κατά συνέπεια ο ρυθμός προχώρησης θα πρέπει να είναι υψηλός (αύξηση της δύναμης ώθησης). Πέραν της υψηλής ταχύτητας προχώρησης που συνιστάται, πρέπει να ελαχιστοποιηθούν οι στάσεις του ΤΒΜ στην εν λόγω περιοχή (συντηρήσεις κτλ).

Πρέπει σε κάθε περίπτωση να προβλέπεται η δυνατότητα επαυξημένης διαμέτρου εκσκαφής, ώστε μέχρι την τοποθέτηση της επένδυσης να υπάρχει διαθέσιμος χώρος για την παραμόρφωση του υλικού, που θα οδηγήσει σε απομείωση των φορτίων που ασκούνται στην επένδυση.

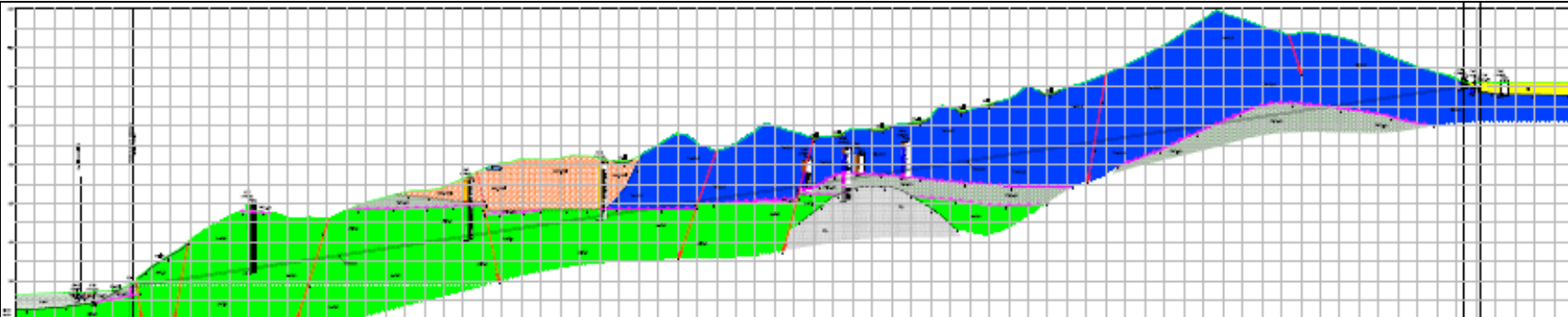
3.3. Αλλόχθονη σειρά των ασβεστολίθων – δολομιτών Τρίπολης (ανάντη)

Μέτρια διακλασμένοι και καρστικοποιημένοι άστρωτοι έως παχυ-πλακώδεις, τεφροί έως μαύροι κατά θέσεις βιτουμενιούχοι ασβεστόλιθοι και δολομίτες. Τοπικά παρατηρούνται στρώσεις αργιλικών σχιστολίθων και αργιλικών υλικών, καστανοκίτρινου χρώματος πάχους περίπου 30cm.

Η γεωμηχανική συμπεριφορά των σχηματισμών είναι καλή έως μέτρια, με περιορισμένα προβλήματα (ρήγμα, καρστικά έγκοιλα και αιφνίδια εισροή υδάτων).



Σχ. 30. Γεωλογική τομή στον άξονα της σήραγγας (Μελέτη Δημοπράτησης)



Σχ.31. Γεωλογική τομή στον άξονα της σήραγγας (Οριστική Μελέτη Εφαρμογής)

(Ref: Έργα ενίσχυσης Ταμιευτήρα φράγματος Αποσελέμη από το Οροπέδιο Λασιθίου - Οριστική Γεωλογική Μελέτη, Μάϊος 2013)

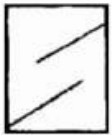



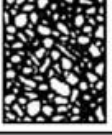

4. Ταξινόμηση Βραχομάζας

Για τις ανάγκες κάποιων από τα μοντέλα πρόγνωσης, θα χρησιμοποιηθούν στοιχεία από την ταξινόμηση της βραχομάζας που έγινε με τη χρήση του συστήματος RMR (Bieniawski, 1989), καθώς και GSI (Hoek and Marinos, 2000), στη διάρκεια εκπόνησης των γεωλογικών και γεωτεχνικών εργασιών υπαίθρου.

Για τη βαθμονόμηση των επιμέρους παραμέτρων των ασβεστολιθικών συστημάτων έγινε στατιστική επεξεργασία των ασυνεχειών, από τα τεκτονικά διαγράμματα στα στόμια της σήραγγας ΤΔ-1 και ΤΔ-2.

Για τον υπολογισμό της τιμής του δείκτη GSI χρησιμοποιείται η τιμή RMR (Rock Mass Rating, Bieniawski, 1989). Η τιμή $RMR_{89basic}$, χρησιμοποιείται στην ακόλουθη σχέση για τον προσδιορισμό του δείκτη GSI:

$$GSI = RMR_{89Basic} - 5$$

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ GSI ΣΕ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΕΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζόμενοι στην εμφάνιση της βραχομάζας (περιγραφή της δομής και της κατάστασης της επιφάνειας των ασυνεχειών) εκτιμάται η τιμή του GSI. Δεν απαιτείται ακριβής προσδιορισμός αφού αυτό δεν είναι πάντα δυνατό. Η επιλογή εύρους τιμών π.χ. από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστική από μια συγκεκριμένη τιμή π.χ. GSI=35. Σημειώνεται ότι ο δείκτης χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου η βραχομάζα συμπεριφέρεται ισότροπικά και δεν υπάρχει εκλεκτικός προσανατολισμός αστάθειας (ολίσθηση κατά μήκος συγκεκριμένων ασυνεχειών). Στην περίπτωση όπου οι ασυνέχειες έχουν εμμονή στην ανάπτυξή τους και δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με το μέτωπο εκσκαφής, τότε αυτές είναι που ελέγχουν την συμπεριφορά της βραχομάζας. Η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών μειώνεται με την παρουσία νερού στα πετρώματα ή υλικού πλήρωσης ασυνεχειών που είναι επιδεκτικά σε εξασθένηση από μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας. Έτσι, σε περίπτωση μέτριας έως πολύ πτωχής κατάστασης στην επιφάνεια των ασυνεχειών η παρουσία νερού πρέπει να οδηγεί σε μετακίνηση δεξιότερα στον Πίνακα. Η πίεση του νερού λαμβάνεται υπόψη ανεξαρτήτως των ανωτέρω με την ανάλυση με ενεργές τάσεις.		ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ				
		ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΠΤΩΧΗ	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ
		Πολύ τραχείες, μη αποσπασθωμένες επιφάνειες	Τραχείες, ελαφρά αποσπασθωμένες και οξειδωμένες επιφάνειες	Ομαλές, μέτρια αποσπασθωμένες και εξαλλοιωμένες επιφάνειες	Με ολισθηρές επιφάνειες, πολύ αποσπασθωμένες με συμπλεγείς ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη θραύσματα πετρώματος	Ολισθηρές επιφάνειες, πολύ αποσπασθωμένες, με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης.
ΔΟΜΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →				
	ΑΡΡΗΚΤΗ Η ΣΥΜΠΑΓΗΣ (INTACT OR MASSIVE)- Άρρηκτο πέτρωμα ή άστρωτος συμπαγής βράχος με λίγες και αραιές ασυνέχειες	90	80	70	60	50
	ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΗ (BLOCKY)-Αδιατάρακτη βραχομάζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών.	80	70	60	50	40
	ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΙΣΜΕΝΗ (VERY BLOCKY) – Μερικώς διαταραγμένη βραχομάζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια με σχετικά καλό αλληλοκλείδωμα που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών.	70	60	50	40	30
	ΚΕΡΜΑΤΙΣΜΕΝΗ/ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ/ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ (BLOCKY/DISTURBED/SEAMY) – Πτυχωμένη βραχομάζα με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας.	60	50	40	30	20
	ΑΠΟΔΟΜΗΜΕΝΗ (DISINTEGRATED) – Ισχυρά κερματισμένη βραχομάζα (αποδι-οργανωμένη) με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλωμένων τεμαχίων.	50	40	30	20	10
	ΦΥΛΛΩΔΗΣ/ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ (LAMINA-TED/SHEARED) – Φυλλώδης ή έντονα σχιστοποιημένη και τεκτονικά διατμημένη ασθενής βραχομάζα. Απουσία γωνιωδών ή άλλων τεμαχίων λόγω της πυκνής σχιστότητας ή των επιφανειών διάτμησης.	N/A	N/A			

Πιν.6: Κατάταξη ρωγματωμένης βραχομάζας κατά GSI (Hoek & Marinos,2000)

4.1. Μικροτεκτονική Ανάλυση Βραχομάζας

Για τη διερεύνηση της μικροτεκτονικής δομής των ασβεστολίθων της εξεταζόμενης περιοχής, πραγματοποιήθηκε συστηματική λήψη και επεξεργασία μετρήσεων προσανατολισμού των επιπέδων στρώσης (B) και διάκλασης (J), σε θέσεις των δύο στομιών: ΤΔ-1 και ΤΔ-2.

Ειδικότερα, οι ληφθείσες μικροτεκτονικές μετρήσεις αφορούν:

- το είδος της ασυνέχειας,
- την κλίση και φορά μέγιστης κλίσης κάθε ασυνέχειας.
- τη μέση απόσταση από την επόμενη ασυνέχεια του ίδιου συστήματος,
- το μήκος της,
- το άνοιγμά της,
- την τραχύτητά της,
- την ύπαρξη και το είδος του υλικού πλήρωσης,
- την αποσάθρωση της επιφάνειάς της και
- την τιμή του δείκτη τραχύτητας (JRC).

Πραγματοποιήθηκε προβολή κάτω ημισφαιρίου της μέγιστης πυκνότητας των πόλων με τη βοήθεια του δικτύου στερεογραφικής προβολής Schmidt, ίσων επιφανειών (χρήση του λογισμικού “Dips” (Rocscience Inc., E. Hoek et al.). Σε κάθε διάγραμμα προσδιορίστηκαν οι περιοχές διασποράς των πόλων σε διάστημα εμπιστοσύνης 95% και οι αντίστοιχες κυκλογραφικές προβολές των κύριων συστημάτων των ασυνεχειών. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία των ποιοτικών στοιχείων των ασυνεχειών, τα αποτελέσματα της οποίας εισάγονται άμεσα ή έμμεσα σε κάποια από τα μοντέλα πρόγνωσης (Q_{TBM} -Barton, NTNU-Burland, Exadaktylos) συμμετέχοντας στην τελική βαθμονόμηση.

4.1.1 ΤΔ-1 – Ασβεστόλιθοι PLattenkalk

Το τεκτονικό διάγραμμα ΤΔ-1 συντάχθηκε πλησίον του **βορείου στομίου** αυτής, στο σχηματισμό των ασβεστολίθων της αυτόχθονης ενότητας Κρήτης (Jm-E.k)

Μετά από στατιστική επεξεργασία προσδιορίστηκαν 7 διαφορετικά “μέσα επίπεδα” προσανατολισμού:

Κλίση / Παράταξη μέγιστης κλίσης

(B): 10°/348°

(J1): 31°/148°

(J2): 44°/295°

(J3): 68°/334°

(J4): 63°/176°

(J5): 68°/076°

(J6): 45°/200°

4.1.2 ΤΔ-2 –ασβεστόλιθοι Τρίπολης

Το τεκτονικό διάγραμμα ΤΔ-2 συντάχθηκε πλησίον του **νοτίου στομίου** , στο σχηματισμό των ασβεστολίθων, δολομιτικών ασβεστολίθων και δολομιτών της αλλόχθονης σειράς του τεκτονικού καλύμματος της ζώνης Τριπόλεως (Ts-Jsk,d)

Μετά από στατιστική επεξεργασία προσδιορίστηκαν 5 διαφορετικά “μέσα επίπεδα” προσανατολισμού:

Κλίση / Παράταξη μέγιστης κλίσης

(B): 26°/346° ,

(J1): 65°/175° ,

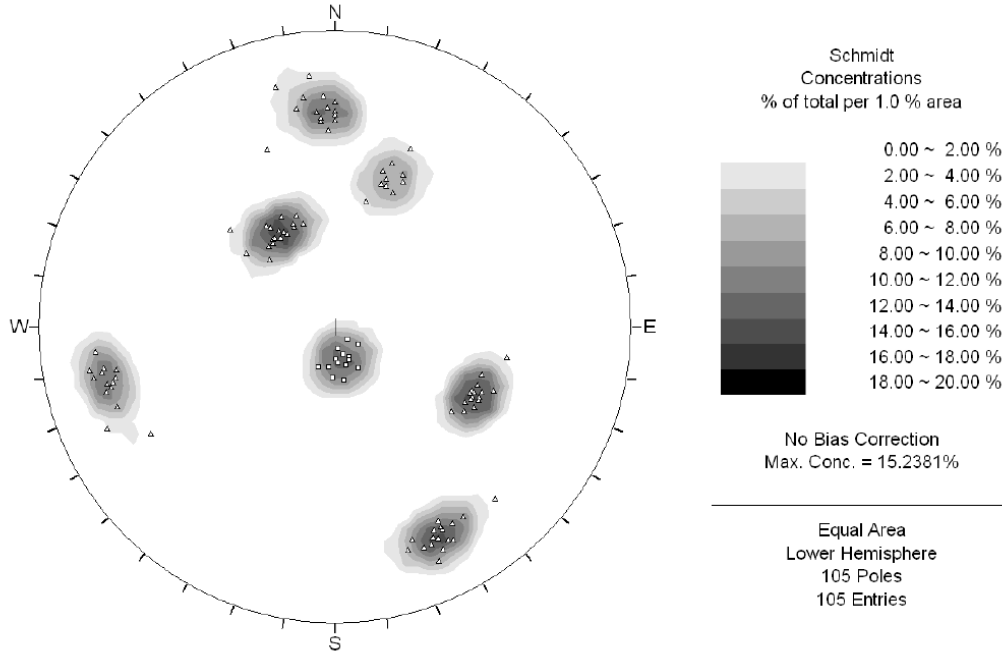
(J2): 62°/343° ,

(J3): 66°/207° ,

(J4): 69°/146° .

4.1.3 Στερεογραφική προβολή - Δίκτυο Schmidt ΤΔ-1 (Βόρειο στόμιο - Plattenkalk)

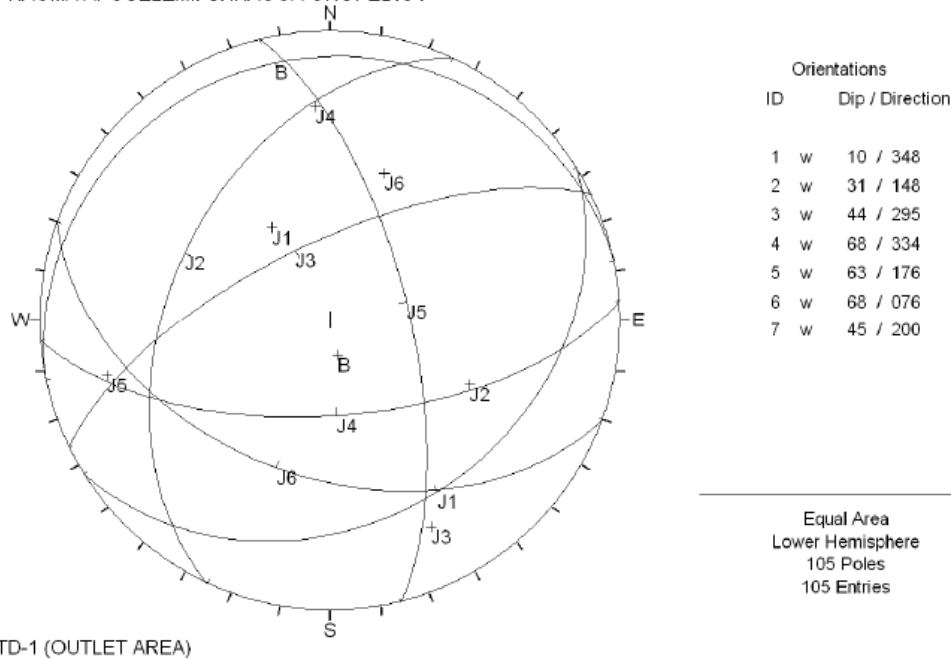
FRAGMA APOSELEMI: SHRAGGA OROPEDIOY



TD-1 (OUTLET AREA)

Σχήμα 32: Τεκτονικό διάγραμμα ΤΔ-1: Δίκτυο Schmidt, ίσων επιφανειών, προβολή κάτω ημισφαιρίου. Στατιστική επεξεργασία των πόλων των επιπέδων στρώσης (B) και διάκλασης (J).

FRAGMA APOSELEMI: SHRAGGA OROPEDIOY



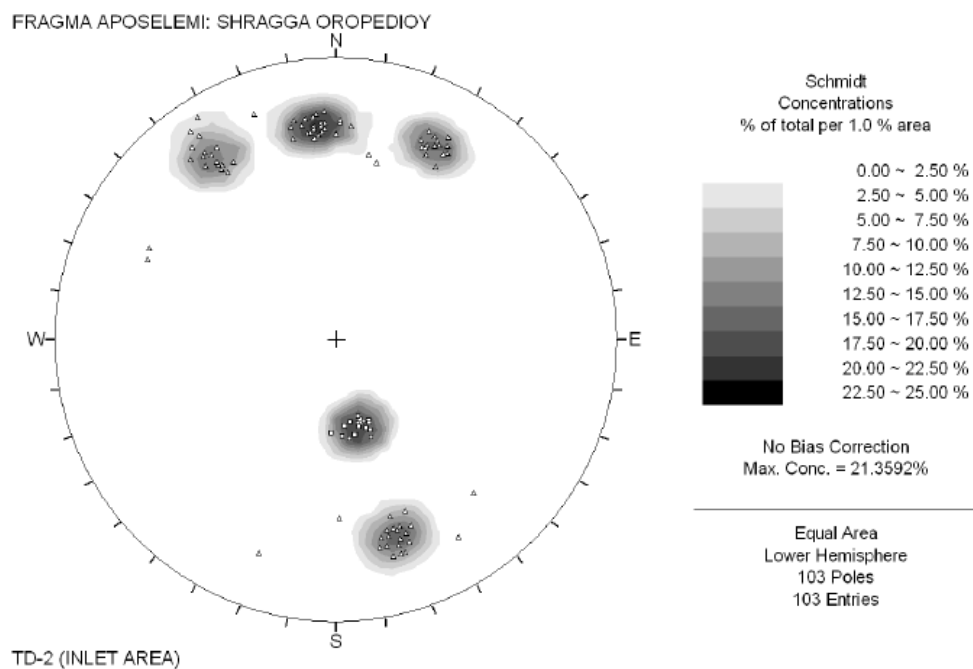
TD-1 (OUTLET AREA)

Σχήμα 33: Τεκτονικό διάγραμμα ΤΔ-1: Δίκτυο Schmidt, ίσων επιφανειών, προβολή κάτω ημισφαιρίου των μέσων επιπέδων στρώσης (B) και διάκλασης (J).

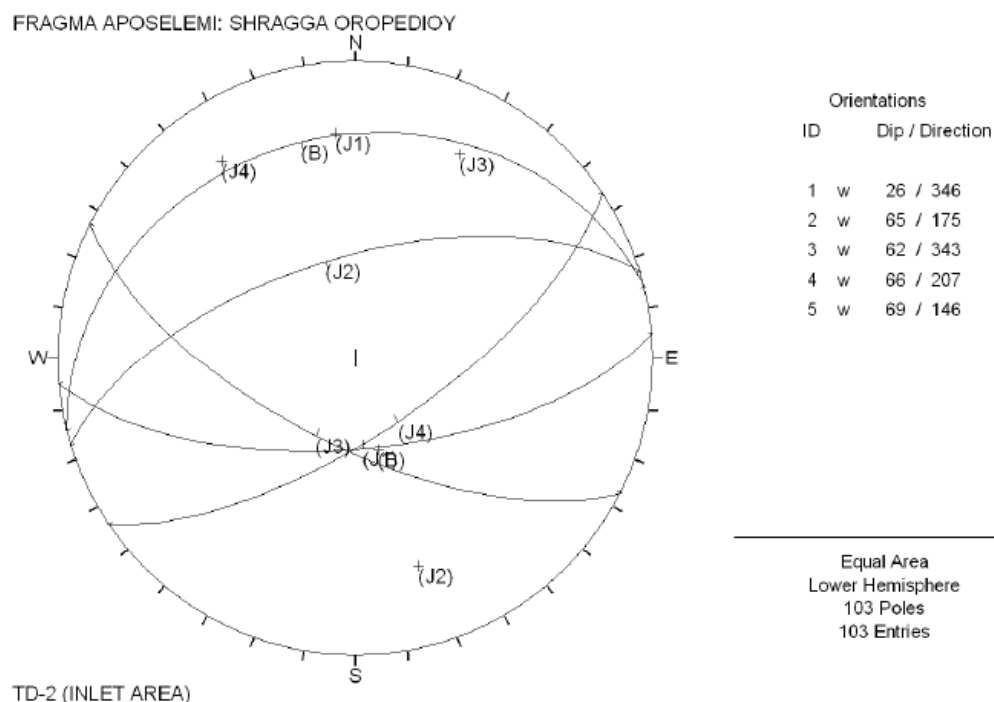
Το $10^\circ / 345^\circ$ είναι η στρώση (B). Τα υπόλοιπα διακλάσεις (J)

(Ref: Έργα ενίσχυσης Ταμιευτήρα φράγματος Αποσελέμη από Οροπέδιο Λασιθίου - Οριστική Γεωλογική Μελέτη, Μάιος 2013)

4.1.4 Στερεογραφική προβολή - Δίκτυο Schmidt ΤΔ-2 (Νότιο στόμιο - Ασβεστόλιθοι Τρίπολης)



Σχήμα 34: Τεκτονικό διάγραμμα ΤΔ-2: Δίκτυο Schmidt, ίσων επιφανειών, προβολή κάτω ημισφαιρίου. Στατιστική επεξεργασία των πόλων των επιπέδων στρώσης (B) και διάκλασης (J).



Σχήμα 35: Τεκτονικό διάγραμμα ΤΔ-2: Δίκτυο Schmidt, ίσων επιφανειών, προβολή κάτω ημισφαιρίου των μέσων επιπέδων στρώσης (B) και διάκλασης (J). Το $26^\circ / 346^\circ$ είναι η στρώση (B). Τα υπόλοιπα διακλάσεις (J).

(Ref: Έργα ενίσχυσης Ταμιευτήρα φράγματος Αποσελέμη από Οροπέδιο Λασιθίου - Οριστική Γεωλογική Μελέτη, Μάιος 2013)

5. Γεωτεχνικές Παράμετροι σχεδιασμού

Για τους ανωτέρω σχηματισμούς πραγματοποιείται στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών βραχομηχανικής και εδαφομηχανικής. Οι τιμές που εξάγονται και θα χρησιμοποιηθούν στα μοντέλα πρόγνωσης, παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω Πίνακα.

Πιν.7. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΠΟΣΕΛΕΜΗ

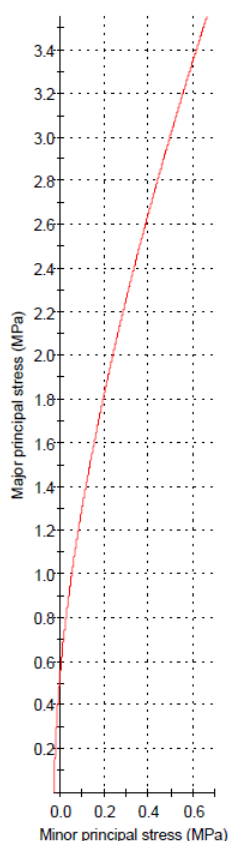
		ΠΛΑΚΩΔΕΙΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΙ ΡΛΑΤΤΕΝΚΑΛΚ	ΦΥΛΛΙΤΕΣ	ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΙ ΣΕΙΡΑΣ ΤΡΙΠΟΛΗΣ
Μοναδιαίο βάρος	κΝ/μ ³	27	24	26
UCS	MPa	37	7	40
UTS	MPa	4,68	-	4,30
Is50	MPa	3,64	-	3,94
RQD	%	75	20	60
GSI		40	15	30
Q (wall)		2,60	0,93	2,08
RMR		45	36	52
C	MPa	0,193	0,030	0,190
φ	deg	40	27	45
Ei (intact modulus)	MPa	40000	2750	40000
Es (deform. modulus)	MPa	2603,19	100,23	3255,32
Πορώδες n	%	17	8	22
Poisson ratio		0,17	0,25	0,18
Δείκτης Φθοράς Cerchar	CAI	3,00 (πολύ έως εξαιρετικά φθοροποιός)	-	2,50 (μέτρια έως πολύ φθοροποιός)

Ref: Έργα ενίσχυσης Ταμιευτήρα φράγματος Αποσελέμη από το Οροπέδιο Λασιθίου Οριστική Γεωλογική Μελέτη, Μάιος 2013

Όπου δεν υπάρχει δειγματοληψία και εργαστηριακές δοκιμές στη θέση διάνοιξης, προκειμένου να αποφευχθεί ο 'κατ'έκτιμηση' προσδιορισμός των παραμέτρων φ' και c', εφαρμόστηκε το **κριτήριο Hoek – Brown**. Ακόμη, η εφαρμογή του κριτηρίου, μπορεί να λειτουργήσει επικουρικά για συσχέτισμό υφιστάμενων εργαστηριακών τιμών (correlation).

Σχήμα 36: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΗΟΕΚ - BROWN ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΟΤΗΤΑ ΠΛΑΚΩΔΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ

TE-2: Moderately strong to strong, slightly weathered, moderately fragmented Limestone Jm-Ek (H=50m)

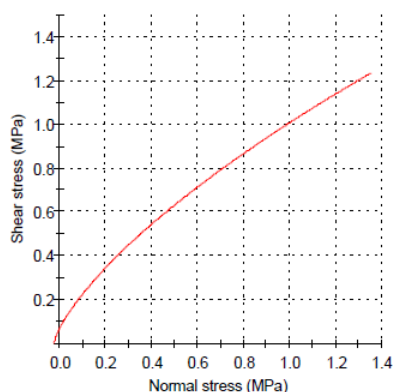


Hoek-Brown Classification
 intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 37 MPa
 GSI = 35 $m_i = 7$ Disturbance factor (D) = 0.4
 intact modulus (E_i) = 40000 MPa

Hoek-Brown Criterion
 $m_b = 0.384$ $s = 0.0002$ $a = 0.516$

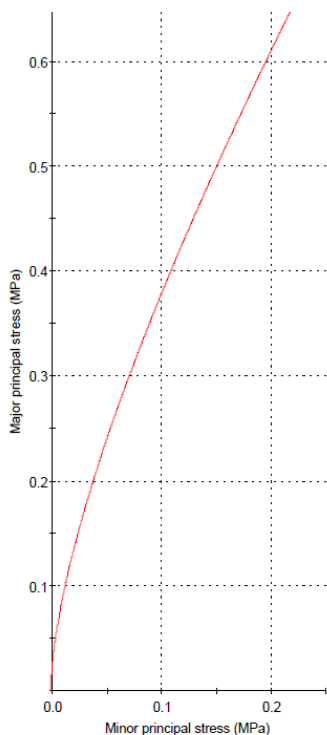
Mohr-Coulomb Fit
 cohesion = 0.193 MPa friction angle = 39.10 deg

Rock Mass Parameters
 tensile strength = -0.023 MPa
 uniaxial compressive strength = 0.502 MPa
 global strength = 2.831 MPa
 deformation modulus = 2603.19 MPa



Σχήμα 37: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΗΟΕΚ - BROWN ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΟΤΗΤΑ ΦΥΛΛΙΤΩΝ ΧΑΛΑΖΙΤΩΝ

TE-5: Very weak to weak, moderately to highly weathered, moderately to intensely fragmented Phyllite P-Tsph (H=20m)

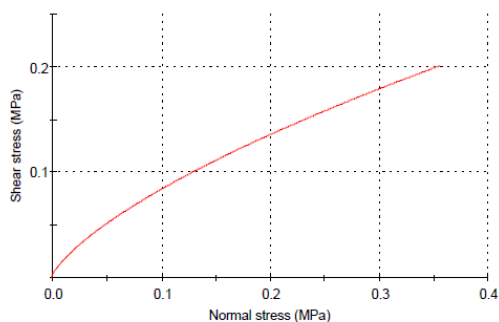


Hoek-Brown Classification
 intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 5 MPa
 GSI = 15 $m_i = 6$ Disturbance factor (D) = 0
 intact modulus (E_i) = 2750 MPa
 modulus ratio (MR) = 550

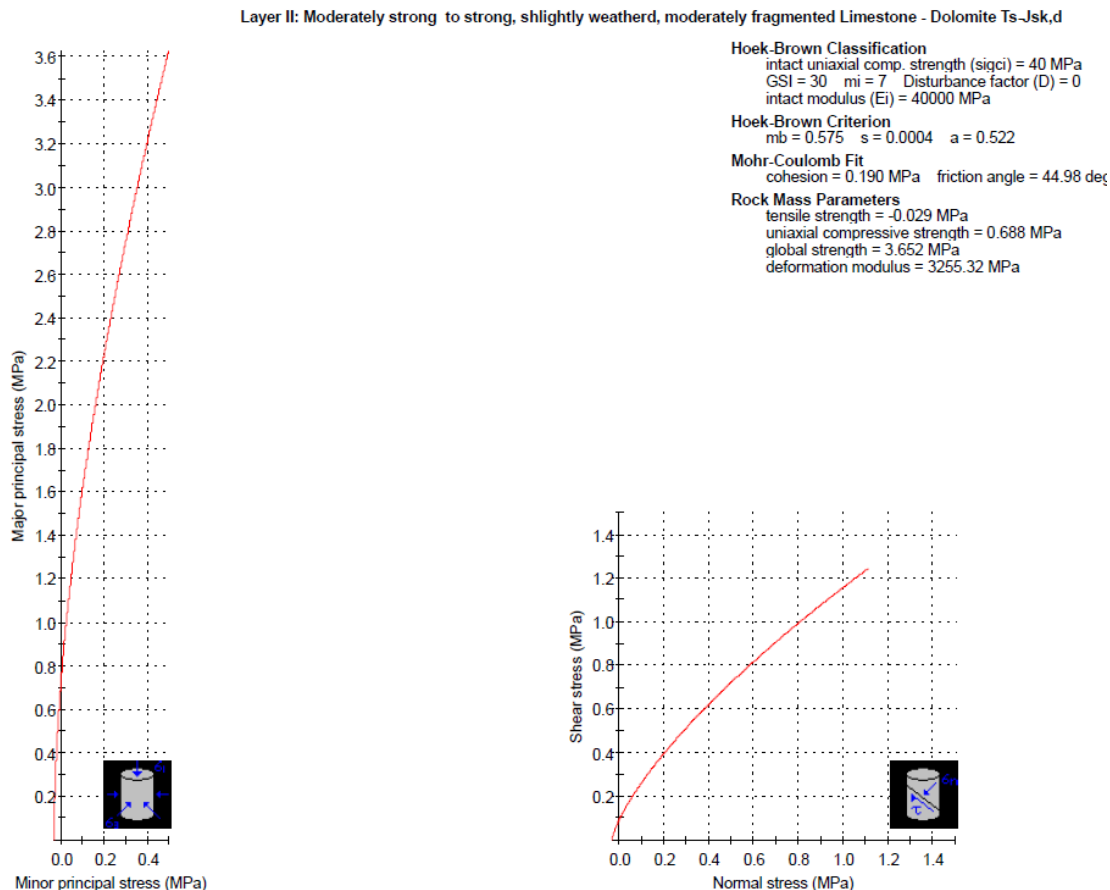
Hoek-Brown Criterion
 $m_b = 0.288$ $s = 0.0001$ $a = 0.561$

Mohr-Coulomb Fit
 cohesion = 0.030 MPa friction angle = 26.93 deg

Rock Mass Parameters
 tensile strength = -0.001 MPa
 uniaxial compressive strength = 0.025 MPa
 global strength = 0.252 MPa
 deformation modulus = 100.23 MPa



Σχήμα 38: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΗΟΕΚ - BROWN ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΟΤΗΤΑ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ ΤΡΙΠΟΛΗΣ



Ref: Έργα ενίσχυσης Ταμιευτήρα φράγματος Αποσελέμη από το Οροπέδιο Λασιθίου Οριστική Γεωλογική Μελέτη, Μάιος 2013

Εξωτερικά φορτία

Για τον υπολογισμό της μέγιστης ροπής κάμψης θεωρήθηκε ένα φορτίο αποσαθρωμένου βράχου ίσο με τη διάμετρο δύο σηράγγων ($h = 2 \times D_{exc} = 9.86m$) που αντιστοιχεί σε ένα βάρος $\gamma_s = 23kN/m^3$. Ένα μέγιστο φορτίο $226,8kN/m^2$ καθορίστηκε για όλους τους τύπους φόρτισης. Για κάθετη φόρτιση, ο μερικός συντελεστής ασφαλείας είναι $\gamma_Q = 1,35$.

6. Υπολογισμός Ρυθμού Προχώρησης στη σήραγγα Αποσελέμη, με βάση το μοντέλο Q_tbm (N. Barton)

$$Q_{TBM} \approx \frac{RQD_o}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5}$$

Η σχέση αυτή είναι η αρχική προσπάθεια του Barton να προσεγγίσει το PR.

Όπου το RQD_o υπολογίζεται από γεώτρηση παράλληλη με τον άξονα της σήραγγας.

F = μέση ώση ανά δίσκο (σε tnf). 1 tnf ≈ 10 kN.

γ = ειδ. Βάρος βραχώμαζας (tnf/m³)

SIGMA_{CM} = αντοχή βραχώμαζας στη διείδυση

- Για μηχανισμό θραύσης μέσω **θλίψης**, τότε

$$Q_c = Q_o \frac{\sigma_c}{100},$$

$$\sigma_c = UCS \quad SIGMA_{CM} = 5\gamma Q_c^{1/3}$$

Το UCS [MPa] είναι η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη του αρρήκτου πετρώματος.

- Για μηχανισμό θραύσης μέσω **εφελκυσμού ή “αποφλοΐωσης / chipping”** τότε

$$SIGMA_{CM} = 5\gamma Q_t^{1/3} \quad Q_t = Q_o \frac{I_{50}}{4}$$

Όπου I₅₀ είναι ο δείκτης σημειακής φόρτισης (point load index)

$$Q_o \approx \frac{RQD_o}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

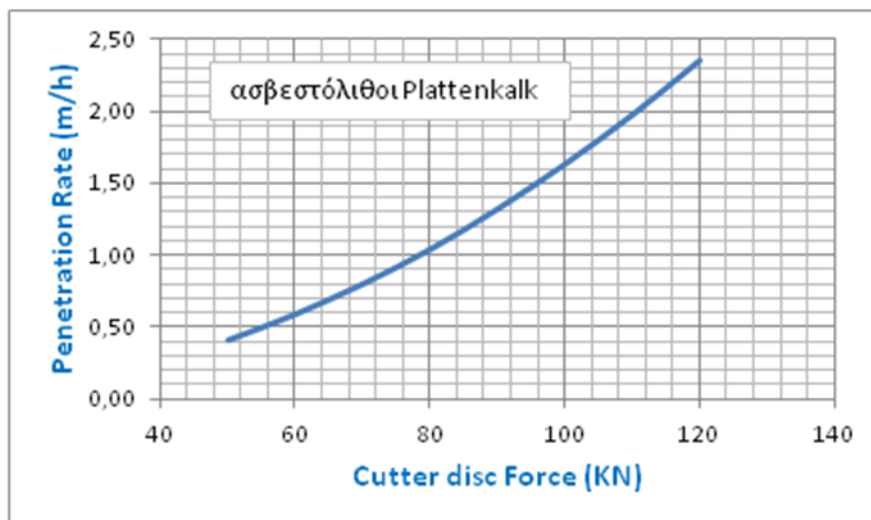
Ο υπολογισμός των επιμέρους παραμέτρων απεικονίζεται στα φύλλα βαθμονόμησης (RMR-Q-RMi) - Palmstrom, 2009 - Παράρτημα Ι

Στη συνέχεια ακολουθούν Πίνακες Υπολογισμών για κάθε γεωλογικό σχηματισμό χωριστά

Πίνακας 8:

Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε ασβεστόλιθους Plattenkalk

Ασβεστόλιθοι Πλακώδεις									
$Q_{TBM} \approx \frac{RQD_o}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5}$									
Παραδοχή: SRF=1 (moderate stress) από αντίστοιχο υπολογιστικό φύλλο δίδεται κατευθείαν το Q					επικρατέστερα συστήματα ασυνεχειών δίνουν γωνίες:				
Q=RQD/Jn*Jr/Ja*Jw/SRF					β1=80ο	πάντα β>60ο	επομένως κυριαρχεί μηχανισμός θλίψης		
Qo= 2,6					β2=60ο				
WALL					β3=64ο				
Λαμβάνεται Q=Qo, αφού Oriented Qo δεν έχει φυσική σημασία όταν υπάρχουν 6 συστήματα διακλάσεων					$Q_c = Q_o \frac{\sigma_c}{100}$		$SIGMA_{cm} = 5Q_c^{1/3}$		
δύναμη κάθε κοπτικού					σ c		37 Mpa		
X - axis	F [tnf]	10,00			Qc	0,96			
	F^10/20^9	0,02							
	CLI	17,71							
	20/CLI	1,13			m1	-0,2			
	q	10,00			D	4,93	m		
	H [m]	50,00			L	1266	m (length plattenkalk)		
	γ [t/m3]	2,70	gr/cm3		n	17			
	σθ [Mpa]	1,35	γ*H	overburden50m	m	-0,21091			
	SIGMAcm	13,33	compression		$m = m_1 \left(\frac{D}{5}\right)^{0.20} \left(\frac{20}{CLI}\right)^{0.15} \left(\frac{q}{20}\right)^{0.10} \left(\frac{n}{2}\right)^{0.05}$				
	SIGMA tens	0,00	chipping						
Qtbm	270,47								
Y - axis	PR	1,63	m/hr		$PR = 5Qtbm^{-1/5}$				
	AR	0,28	m/hr		$AR = PR \times T^m$				
	T	4.595,13	hr						
	ημέρες (22hr/shift)	208,87			$T = \left(\frac{L}{PR}\right)^{\frac{1}{1+m}}$				

**Σχήμα 39:**

Γραφική απεικόνιση μεταβολής της βαθμίδας διείσδυσης (άξονας Y), συνάρτηση με τη δύναμη κοπτικού δίσκου (άξονας X) με βάση το μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε ασβεστόλιθους Plattenkalk

F _n (KN)	F _n (tnf)	PR (m/hr)
50	5	0,41
60	6	0,59
70	7	0,80
80	8	1,04
90	9	1,32
100	10	1,63
110	11	1,97
120	12	2,35

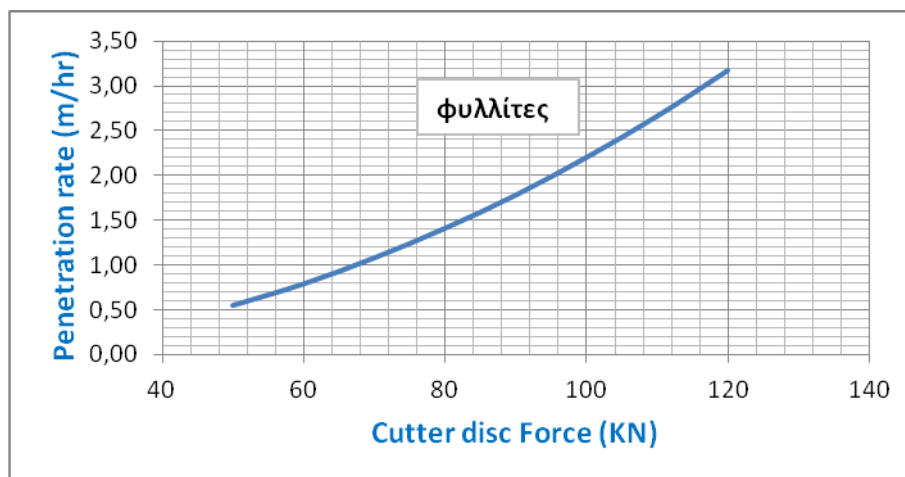
Πίνακας 8.1.:

Τιμές διακύμανσης της βαθμίδας διείσδυσης (PR), σε συνάρτηση με τη δύναμη κοπτικού δίσκου (F_n) με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε ασβεστόλιθους Plattenkalk

Πίνακας 9:

Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε Φυλλίτες

Φυλλίτες (ολοκληρωτικά αποσαθρωμένοι)									
$Q_{TBM} = \frac{RQD_o}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5}$									
Παραδοχή: SRF=0,67 (crushed) από αντίστοιχο υπολογιστικό φύλλο δίδεται κατευθείαν το Q					πλήρως διατμημένο πέτρωμα, δεν υπάρχουν γραμμικά στοιχεία μετρήσεων. Δεν υπάρχουν δοκιμές που να δίνουν Is50. Κυριαρχεί θλιπτικό πεδίο τάσεων				
Q=RQD/Jn*Jr/Ja*Jw/SRF Qo= 0,93 WALL					$Q_c = Q_o \frac{\sigma_c}{100}$ $SIGMA_{CM} = 5Q_c^{1/3}$				
Λαμβάνεται Q=Qo, αφού Oriented Qo δεν έχει φυσική σημασία όταν υπάρχουν 6 συστήματα διακλάσεων									
δύναμη κάθε κοπτικού					σ_c 7 Mpa				
X - axis	F [tnf]	9,00			Qc	0,07			
	F^10/20^9	0,0068101			Qt	0			
	CLI	9,12			m1	-0,2			
	20/CLI	2,19			D	4,93 m			
	q	10,00			L	410 m (length Phyllites)			
	H [m]	50,00			n	17			
	γ [t/m3]	2,40 gr/cm3			m	-0,233			
	σθ [Mpa]	1,20 γ*H			overburden 50m				
	SIGMAcm	4,83 compression			$m = m_1 \left(\frac{D}{5}\right)^{0.20} \left(\frac{20}{CLI}\right)^{0.15} \left(\frac{q}{20}\right)^{0.10} \left(\frac{n}{2}\right)^{0.05}$				
	SIGMA tens	0,00 chipping			$PR = 5Qtbm^{-1/5}$ $T = \left(\frac{L}{PR}\right)^{\frac{1}{1+m}}$				
Qtbm	173,56			AR = PRxT^m					
Y - axis	PR	1,78 m/hr							
	AR	0,34 m/hr							
	T	1.199,92 hr							
ημέρες (22hr/shift)		54,54							

**Σχήμα 40:**

Γραφική απεικόνιση μεταβολής της βαθμίδας διείσδυσης (άξονας Υ), συνάρτηση με τη δύναμη κοπτικού δίσκου (άξονας Χ) με βάση το μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε Φυλλίτες

F _n (KN)	F _n (tnf)	PR (m/hr)
50	5	0,55
60	6	0,79
70	7	1,08
80	8	1,41
90	9	1,78
100	10	2,20
110	11	2,66
120	12	3,17

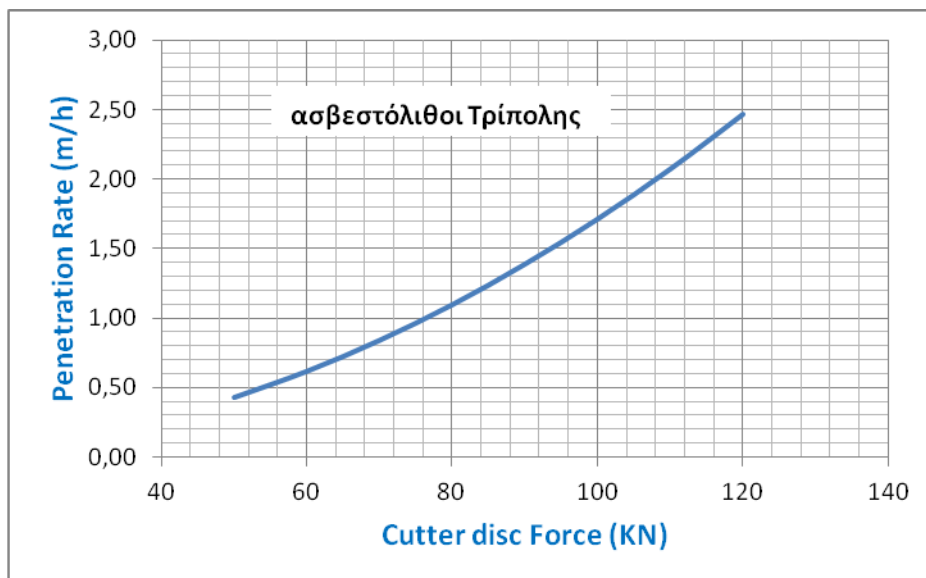
Πίνακας 9.1.:

Τιμές διακύμανσης της βαθμίδας διείσδυσης (PR) , σε συνάρτηση με τη δύναμη κοπτικού δίσκου (F_n) με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε Φυλλίτες

Πίνακας 10:

Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε ασβεστόλιθους Τρίπολης

Ασβεστόλιθοι Τρίπολης									
$Q_{TBM} = \frac{RQD_o}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5}$									
Παραδοχή: SRF=1 (moderate stress)					επικρατέστερα συστήματα ασυνεχειών δίνουν γωνίες:				
από αντίστοιχο υπολογιστικό φύλλο δίδεται κατευθείαν το Q					β1=25ο	οριακά	συνυπάρχει μηχανισμός εφελκυσμού/ αλλά κ συμπίεσης		
Q=RQD/Jn*Jr/Ja*Jw/SRF					β2=28ο	β≤30ο			
Qo= 2,08 WALL					$Q_t = Q_o \frac{I_{50}}{4} \quad SIGMA_{LM} = 5\gamma Q_t^{1/3}$ $Q_c = Q_o \frac{\sigma_c}{100} \quad SIGMA_{CM} = 5\gamma Q_c^{1/3}$				
Λαμβάνεται Q=Qo, αφού Oriented Qo δεν έχει φυσική σημασία όταν υπάρχουν 6 συστήματα διακλάσεων									
					σ c 40 Mpa				
δύναμη κάθε κοπτικού					Qc	0,83			
X - axis	F [tnf]	10,00			Qt	2,0488			
	F^10/20^9	0,02			m1	-0,2			
	CLI	21,73							
	20/CLI	0,92			I50	3,94			
	q	10,00			D	4,93 m			
	H [m]	50,00			Length	1744 m (Length Tripolis)			
	γ [t/m3]	2,60	gr/cm3		n	17			
	σθ [Mpa]	1,30	γ*H	overburden 50m	$m = m_1 \left(\frac{D}{5} \right)^{0.20} \left(\frac{20}{CLI} \right)^{0.15} \left(\frac{q}{20} \right)^{0.10} \left(\frac{n}{2} \right)^{0.05}$				
	SIGMAcm	12,23	compression						
	SIGMATens	16,51	chipping						
Qtbm	210,43								
Y- axis	PR	1,72	m/hr		m	-0,20454			
	AR	0,54	m/hr		$PR = 5Qtbm^{-1/5}$ $AR = PR \times T^m$				
	T	6.031,96	hr						
	ημέρες (22hr/shift)	274			$T = \left(\frac{L}{PR} \right)^{\frac{1}{1+m}}$				

**Σχήμα 41:**

Γραφική απεικόνιση μεταβολής της βαθμίδας διείσδυσης (άξονας Y), συνάρτηση με τη δύναμη κοπτικού δίσκου (άξονας X) με βάση το μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε ασβεστόλιθους Τρίπολης

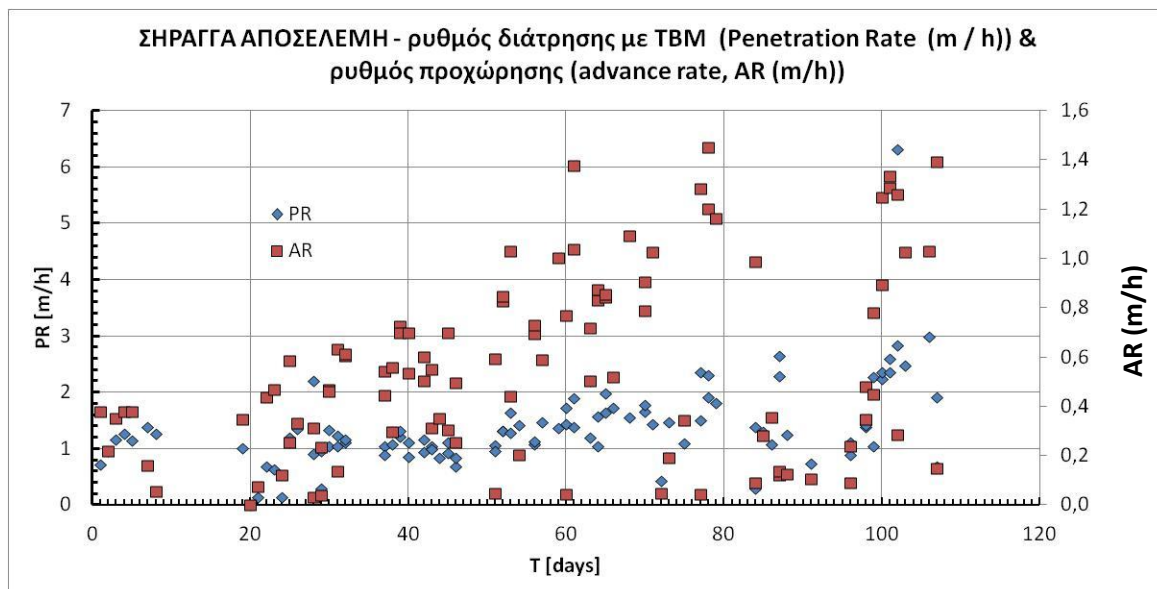
F _n (KN)	F _n (tnf)	PR (m/hr)
50	5	0,43
60	6	0,62
70	7	0,84
80	8	1,10
90	9	1,39
100	10	1,72
110	11	2,08
120	12	2,47

Πίνακας 10.1:

Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης QTBM - σε ασβεστόλιθους Τρίπολης

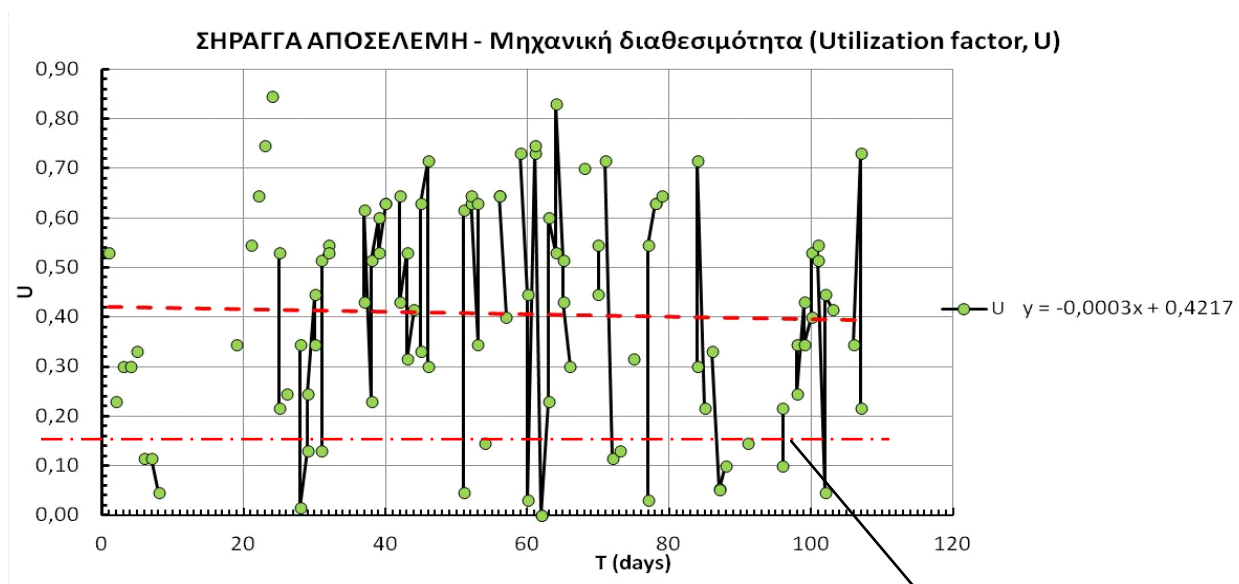
6.1. Εφαρμογή “νόμου φθίνοντος ρυθμού προχώρησης (Barton)” με βάση τα δεδομένα σήραγγας Αποσελέμη - επίδραση utilization factor $U\%$ στο AR

Προκύπτουν τα PR και AR των παρακάτω διαγραμμάτων, από τις πραγματικές μετρήσεις



Το σημείο $t=0$ αντιστοιχεί στην 1 /9/ 2015

Σχήμα 42: Σήραγγα Αποσελέμη - ρυθμός διάτρησης με TBM (penetration rate PR) ρυθμός προχώρησης (Advance Rate) - συναρτήσε του χρόνου T (ref: Εξαδάκτυλος - Γιαλύτη, 2015-2016)

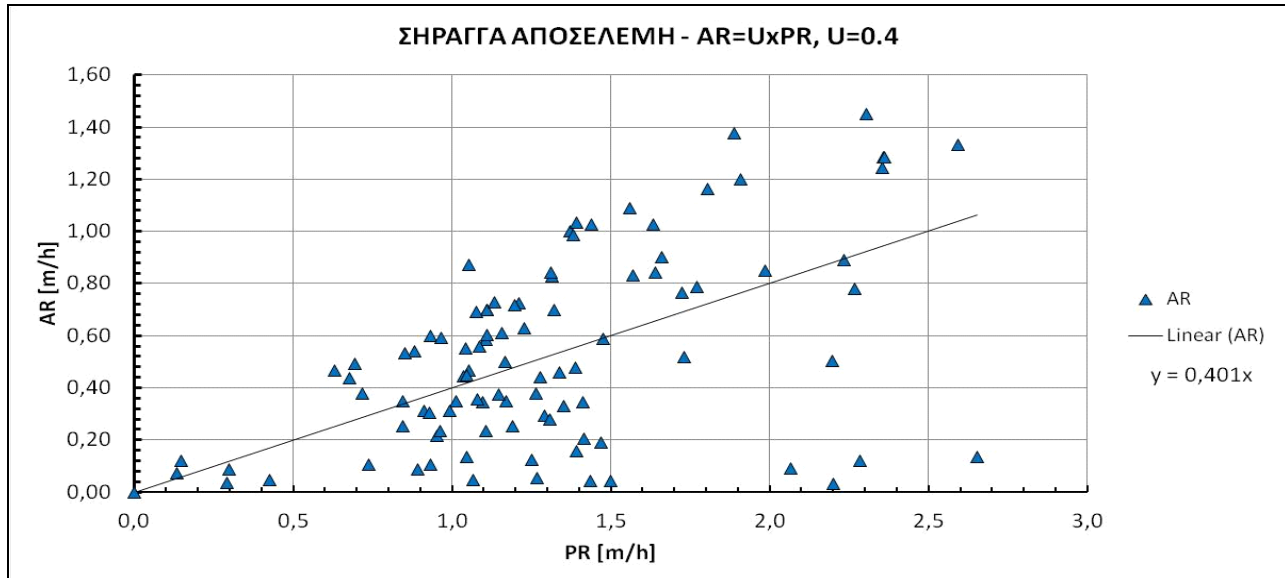


Συντελ. προς τα κάτω μείον μια τυπική απόκλιση (0,25) από τη μέση τιμή, δίνει $U_{min}=0.15$

Σχήμα 43: Σήραγγα Αποσελέμη - μηχανική διαθεσιμότητα (utilization factor %) συναρτήσε του χρόνου T (ref: Εξαδάκτυλος - Γιαλύτη, 2015-2016)

Η μέση τιμή U έχει τιμή της τάξεως **0.4217** με διακύμανση γύρω από αυτήν την τιμή

Η συμπεριφορά του U με τις έντονες διακυμάνσεις γύρω από τη μέση τιμή, αντανακλά την επίδραση της ετερογένειας του ασβεστολίθου (δομή και ρηγματογενείς ζώνες) στην απόδοση του ΤΒΜ.



Η κλίση της ευθείας, δίνει το μέσο $U=0.4$

Σχήμα 44: Σήραγγα Αποσελέμη - διακύμανση τιμής μηχανικής διαθεσιμότητας (utilization factor %) συναρτήσει των PR και AR (ref: Εξαδάκτυλος - Γιαλύτη, 2015-2016)

Τόσο στις προβλέψεις του Q_{tbm} όσο και του CSM, μετά την εισαγωγή του utilization factor, ο πραγματικός βαθμός προχώρησης AR, μειώνεται σημαντικά, οπότε διαφαίνεται έμμεσα και η επίδραση του μήκους σήραγγας (ως παράγοντας επιβράδυνσης – deceleration factor).

Διαπίστωση στη σήραγγα Αποσελέμη: Χαμηλή απόδοση του ΤΒΜ Διπλής Ασπίδας, κυρίως λόγω ισχυρού τεκτονισμού και κατακερματισμού των ασβεστολιθικών πετρωμάτων, ιδιαίτερα στην περιοχή των στομιών, και σε κάποια απόσταση από αυτά.

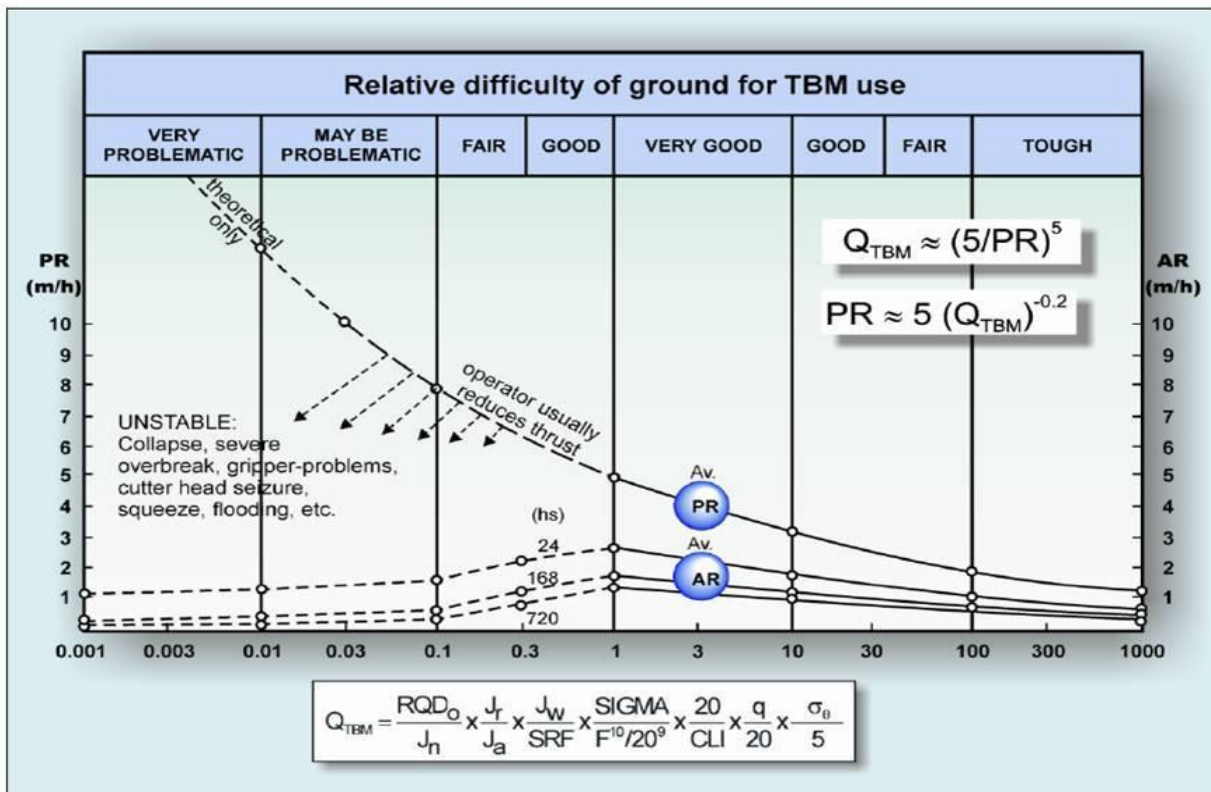
6.2. Αποτελέσματα

Plattenkalk: Για $Q_{TBM}=270,47$ το εμπειρικό μοντέλο του Barton δίνει $PR=1,63$ m/h

Φυλλίτες: Για $Q_{TBM}=173,56$ το εμπειρικό μοντέλο του Barton δίνει $PR=1,78$ m/h

Ασβ. Τρίπολης: Για $Q_{TBM}=210,43$ το εμπειρικό μοντέλο του Barton δίνει $PR=1,72$ m/h

Σε γενικές γραμμές, οι τιμές που εξάγονται από τους υπολογιστικούς τύπους του Q_{TBM} , συμφωνούν με το διάγραμμα (Σχ.45)



Σχήμα 45: Απεικόνιση της σχετικής δυσκολίας προχώρησης με χρήση ΤΒΜ, συναρτήσει της πλήρως ανεπτυγμένης παραμέτρου Q_{TBM} (Barton and Abrahao, 2003) – διακύμανση των τιμών PR και AR συναρτήσει του Q_{TBM}

(Ref: N Barton, 2000. "TBM Tunneling in Jointed and Faulted Rock". AA Balkema.)

7. Υπολογισμός Ρυθμού Προχώρησης στη σήραγγα Αποσελέμη, με βάση το μοντέλο NTNU

Από τις υφιστάμενες καταγραφές στη βάση δεδομένων του NTNU, επιλέγεται η περίπτωση κατασκευής σήραγγας μεταφοράς νερού με διάμετρο εκσκαφής 16ft (4,87m) και μήκος 11000ft (3352m) - Gorge Tunnel, όμοια με τη σήραγγα Αποσελέμη που αποτελεί το case study αυτής της εργασίας. Το TBM διέτρησε γνεύσιους και μεταμορφωμένα γρανιτοειδή πετρώματα (βραχομάζα), ελαφρά έως μέτρια αποσαθρωμένα, πτυχωμένα κατά θέσεις, με στρώση υπο-οριζόντια.

Για την πρόβλεψη του ρυθμού προχώρησης με βάση το Νορβηγικό μοντέλο NTNU, τα στοιχεία εμπλουτίστηκαν από χαρτογραφήσεις και συμπληρωματικές έρευνες.

Δημιουργήθηκαν 8 ομάδες παραμέτρων, που έδωσαν ισάριθμες ομάδες αποτελεσμάτων διείσδυσης και φθοράς (για τον Αποσελέμη δημιουργήθηκαν 3 ομάδες).

Table 4:
Net Penetration Rates (ft/hr)

Geologic Reach	TBM Diameter, ft/hr						
	14.76	15	16	17	18	19	20
1	11.74	11.84	11.25	11.15	10.86	10.43	10.07
2	9.41	9.51	9.02	8.99	8.76	8.46	8.17
3	11.35	11.41	10.86	10.76	10.50	10.10	9.71
4	8.04	8.13	7.71	7.71	7.51	7.28	7.02
5	12.40	12.50	11.84	11.78	11.41	10.99	10.59
6	12.40	12.50	11.84	11.78	11.41	10.99	10.59
7	14.56	14.63	13.87	13.74	13.32	12.79	12.30
8	11.12	11.22	10.63	10.56	10.30	9.91	9.54
Average	11.38	11.47	10.88	10.81	10.51	10.12	9.75

Πιν. 11: Αποτελέσματα ρυθμού προχώρησης με βάση τη στατιστική επεξεργασία δεδομένων εμπειρικού μοντέλου NTNU - Βαθμίδες διάτρησης για διαφορετικές ομάδες παραμέτρων και διαφορετικής διαμέτρου TBM (Ref: Gorge 2nd Tunnel, 2009)

7.1. Αποτελέσματα

Η βαθμίδα διείσδυσης στη συγκεκριμένη περίπτωση (για TBM διαμέτρου 16ft ή 4,87m) είναι της τάξεως των 10,88ft/hr ή **3,31m/h**, τιμή που κρίνεται ως συντηρητική, αλλά γενικά συμφωνεί με τους κατασκευαστές Herrenknecht and Robbins.

Οι ωριαίες βαθμίδες προχώρησης στο NTNU υπολογίζονται με βάση μία διαθεσιμότητα του μηχανήματος περίπου **42%** (utilization / χρόνος καθαρής διάτρησης). Θεωρείται υψηλό ποσοστό χρόνου, αλλά έχει γίνει η παραδοχή πολύ καλού βράχου, οπότε μειώνονται οι διακοπές για υποστήριξη και σχετικές εργασίες. Παράμετροι που επηρεάζουν αρνητικά το ρυθμό προχώρησης είναι πιθανές εισροές νερού, η περιεκτικότητα σε χαλαζία που σχετίζεται με τη συχνότητα αλλαγής των κοπτικών λόγω φθοράς, η κλίση των ασυνεχειών, το πλήθος των συστημάτων διακλάσεων, κλπ. Στο συγκεκριμένο μοντέλο έγιναν παραδοχές μέτριας συνεκτικότητας και μέτριας αποξεσιμότητας.

8. Υπολογισμός Ρυθμού Προχώρησης στη σήραγγα Αποσελέμη, με βάση το μοντέλο CSM

Και για τους 3 σχηματισμούς, ισχύουν τα παρακάτω:

$$PR = p[mm/rev] \cdot \omega[rev/min] \cdot 60[min/h] \cdot 10^{-3}[m/mm] \quad AR = PR \cdot n_{util}$$

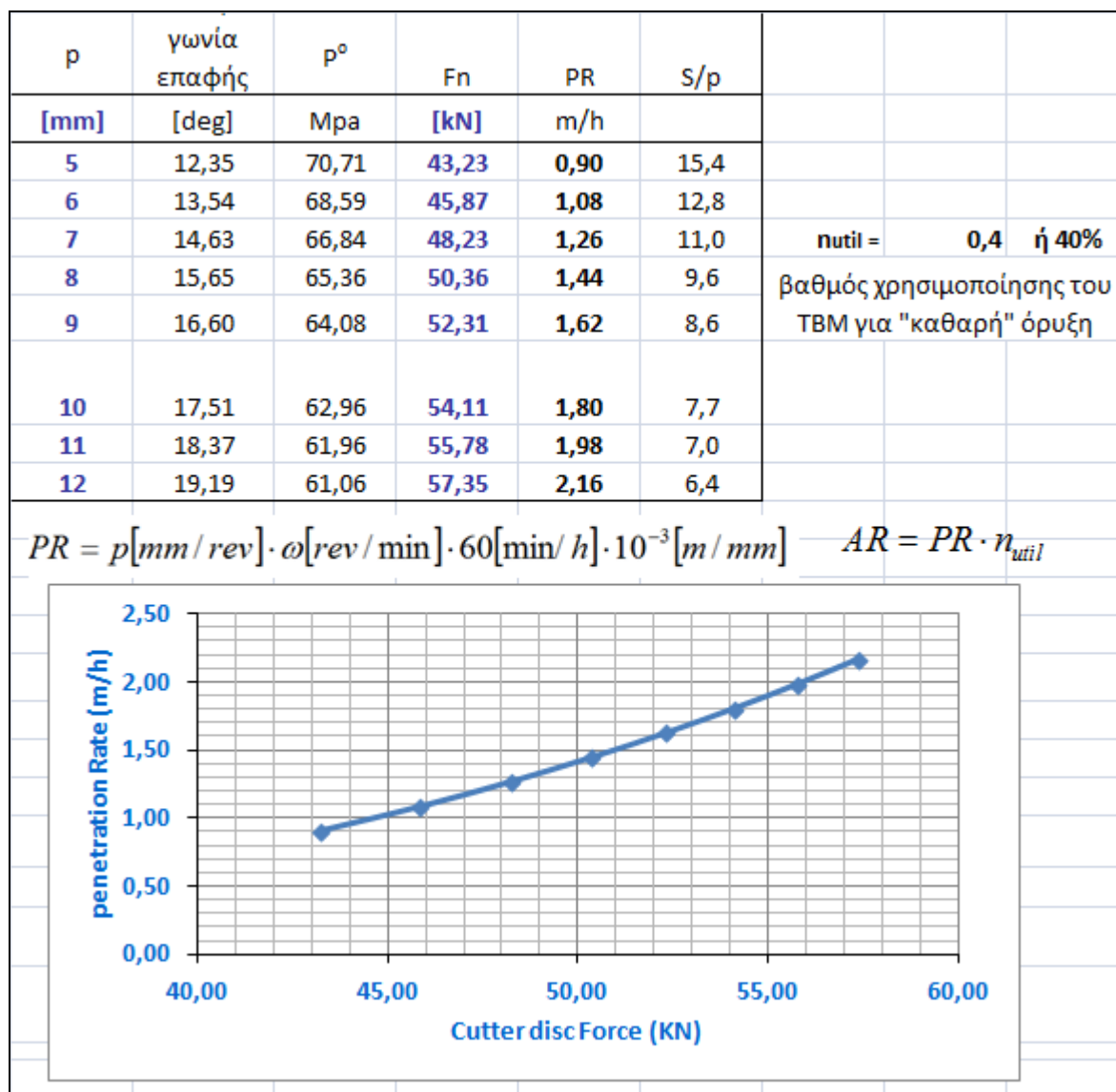
U(utilization)= 0,4 (παραδοχή βαθμού χρησιμοποίησης του TBM για "καθαρή" όρυξη: 40%)

Πίνακας 12:

Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης CSM - σε ασβεστόλιθους Plattenkalk

ΜΟΝΤΕΛΟ CSM - Ασβεστόλιθοι PLATTENKALK									
	UCS	37	Mpa		παράγοντες Po	49333,28	$S \cdot \sigma_c^2 \cdot \sigma_t$		
	UTS	4,68	MPa			1,587306	$\phi \sqrt{RT}$		
	disk radius R	21,59	cm						
	tip width T	1,25	cm						
	spacing S	7,7	cm						
Y-axis	penetration p	1	cm	10	mm		$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{R-p}{R} \right) \sigma \text{ rad}$		
	θς ή φ	17,51	degrees	0,3055	radians		γωνία επαφής πετρώματος/ δίσκου		
	σταθερά C	2,12							
	γων. ταχύτητα ω	3	rpm						
	Po=	66,65	Mpa	Po κατανομή φορτίου στην επαφή κοπτικού - πετρώματος		$P^o = C \cdot \sqrt{\frac{S}{\phi \sqrt{RT}}} \cdot \sigma_c^2 \cdot \sigma_t$			
	ή	6,67	KN/cm2						
X-axis	$F_n = T \cdot R \cdot P^o \cdot \sin \phi$			Fn =	54,11	KN	φ σε rad	cosφ=	0,953682
	$F_r = T \cdot R \cdot P^o \cdot (1 - \cos \phi)$			Fr=	8,33	KN		sinφ =	0,300816
								1-cosφ=	0,046318
								1-sinφ=	0,699184
	παραδοχή για ομοιόμορφο φορτίο						$CC = \frac{Fr}{Fn}$		0,15397
	Για διαμετρο κεφαλής TBM	D	4,93	m					
	Αριθμός δίσκων:	N	32						
	TBM thrust	Fn *N=	1731,579	KN ή	1,73	MN			
	TBM torque	(1/4n)* D*N*Fr =	354,8948	KNxm	0,35	MNm		για n=0,9	

Ασβεστόλιθοι Plattenkalk

**Πίνακας 12.1:**

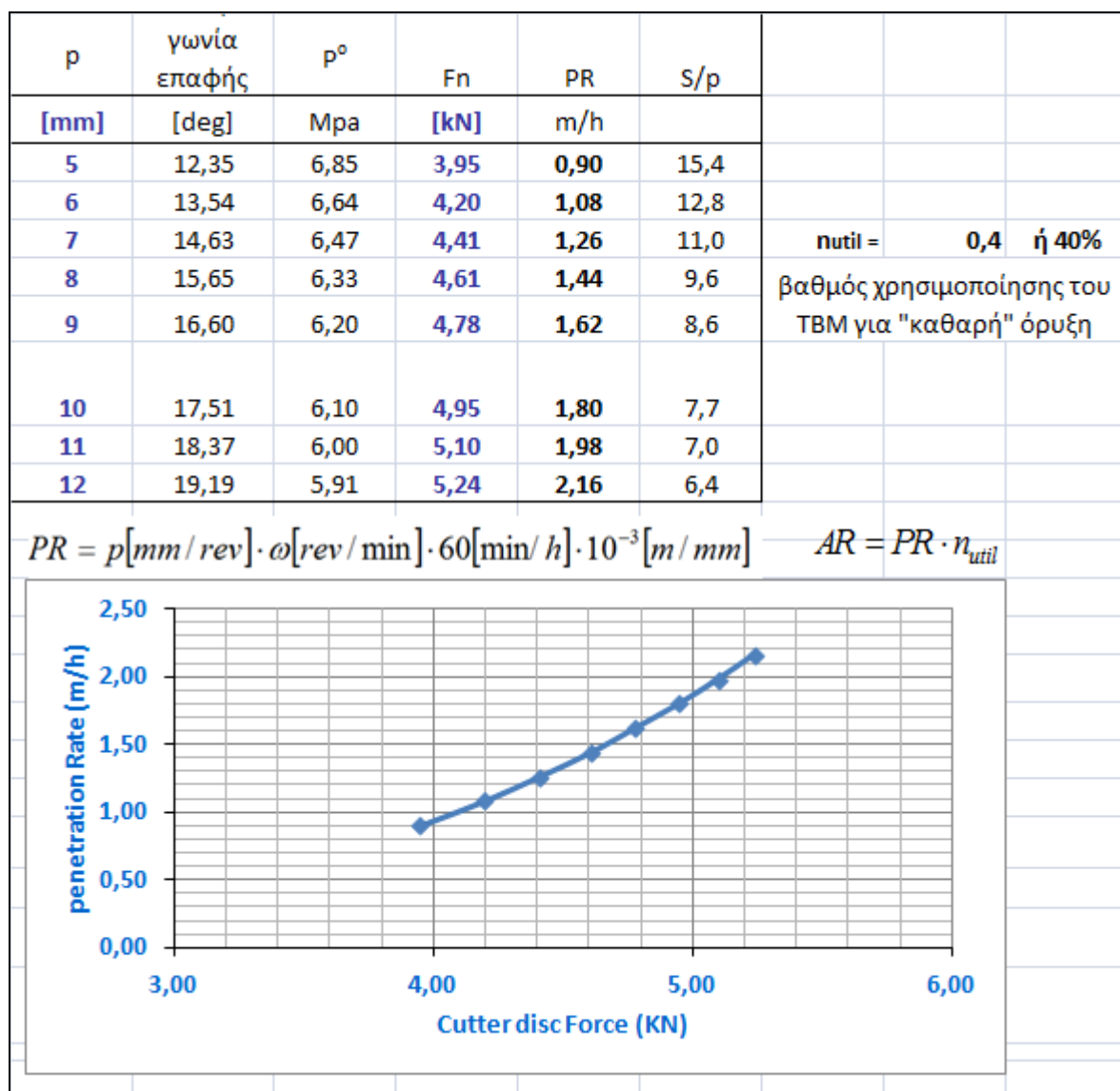
Τιμές διακύμανσης της βαθμίδας διείσδυσης (PR), σε συνάρτηση με τη δύναμη κοπτικού δίσκου (F_n) με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης CSM - σε ασβεστόλιθους Plattenkalk

Πίνακας 13:

Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης CSM - σε Φυλλίτες

ΜΟΝΤΕΛΟ CSM - ΦΥΛΛΙΤΕΣ						
	UCS	7 Mpa		παράγοντες Po	37,73	S*σ _c ² *σ _t
	UTS	0,1 MPa			1,587306	φ √ RT
	disk radius R	21,59 cm				
	tip width T	1,25 cm				
	spacing S	7,7 cm				
						$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{R-p}{R}\right) \sigma rad$
Y-axis	penetration p	1 cm	10 mm			
	θc ή φ	17,51 degrees	0,3055 radians			γωνία επαφής πετρώματος/ δίσκου
	σταθερά C	2,12				
	γων. ταχύτητα ω	3 rpm				
	Po=	6,10 Mpa	Po κατανομή φορτίου στην επαφή κοπτικού - πετρώματος			$P^{\circ} = C \cdot \sqrt[3]{\frac{S}{\Phi \sqrt{RT}}} \cdot \sigma_c^2 \sigma_t$
	ή	0,61 KN/cm2				
X-axis	$F_n = T \cdot R \cdot P^{\circ} \cdot \sin \varphi$		Fn =	4,95 KN	φ σε rad	cosφ= 0,953682 sinφ= 0,300816 1-cosφ= 0,046318 1-sinφ= 0,699184
	$F_r = T \cdot R \cdot P^{\circ} \cdot (1 - \cos \varphi)$		Fr=	0,76 KN		
	παραδοχή για ομοιόμορφο φορτίο					$CC = \frac{Fr}{F_n}$ 0,15397
	Για διαμετρο κεφαλής TBM	D	4,93 m			
	Αριθμός δίσκων:	N	32			
	TBM thrust	Fn *N=	158,3523 KN ή	0,16 MN		
	TBM torque	1/4n* D*N*Fr =	32,45502 KNxm	0,03 MNm	για n=0,9	

Φυλλίτες

**Πίνακας 13.1:**

Τιμές διακύμανσης της βαθμίδας διεσόδου (PR) , σε συνάρτηση με τη δύναμη κοπτικού δίσκου (F_n) με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης CSM - σε Φυλλίτες

Πίνακας 14:

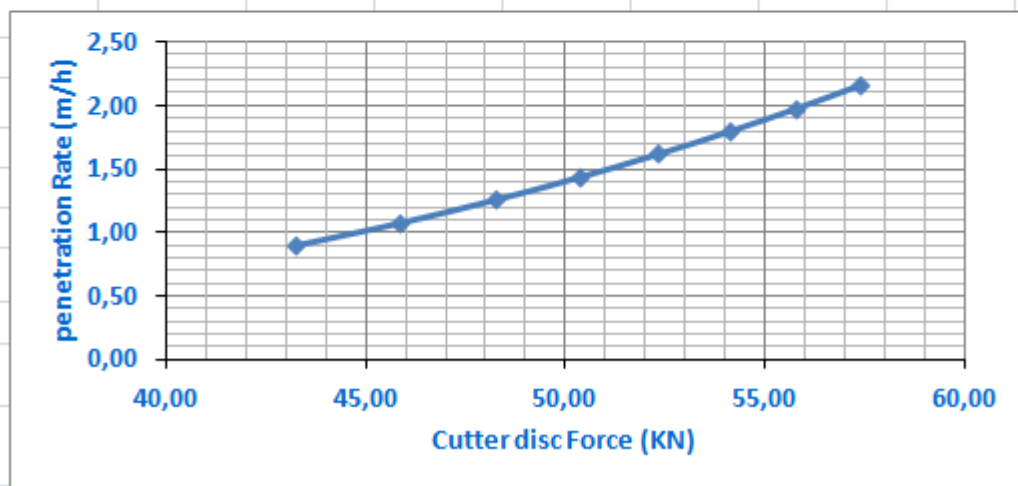
Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης CSM - σε ασβεστόλιθους Τρίπολης

ΜΟΝΤΕΛΟ CSM - Ασβεστόλιθοι Τρίπολης									
	UCS	40	Mpa			παράγοντες Po	52976	$S \cdot \sigma_c^2 \cdot \sigma_t$	
	UTS	4,3	MPa				1,587306	$\phi \vee RT$	
	disk radius R	21,59	cm						
	tip width T	1,25	cm						
	spacing S	7,7	cm						
Y-axis	penetration p	1	cm		10	mm		$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{R-p}{R} \right) \sigma rad$	
	θ_c ή ϕ	17,51	degrees		0,3055	radians		γωνία επαφής πετρώματος/ δίσκου	
	σταθερά C	2,12							
	γων. ταχύτητα ω	3	rpm						
	Po=	68,26	Mpa			Po κατανομή φορτίου στην επαφή κοπτικού - πετρώματος		$P^o = C \cdot \sqrt[3]{\frac{S}{\Phi \sqrt{RT}}} \cdot \sigma_c^2 \sigma_t$	
	ή	6,83	KN/cm2						
X-axis	$F_n = T \cdot R \cdot P^o \cdot \sin \varphi$				Fn =	55,41	KN	ϕ σε rad	$\cos \phi = 0,953682$ $\sin \phi = 0,300816$ $1 - \cos \phi = 0,046318$ $1 - \sin \phi = 0,699184$
	$F_r = T \cdot R \cdot P^o \cdot (1 - \cos \varphi)$				Fr=	8,53	KN		
	παραδοχή για ομοιόμορφο φορτίο							$CC = \frac{Fr}{Fn}$	0,15397
	Για διαμετρο κεφαλής TBM		D	4,93	m				
	Αριθμός δίσκων:		N	32					
	TBM thrust		Fn *N=	1773,19	KN ή	1,77	MN		
	TBM torque	(1/4n)* D*N*Fr =		363,4232	KNxm	0,36	MNm	για n=0,9	

Ασβεστόλιθοι Τρίπολης

ρ	γωνία επαφής	ρ°	F_n	PR	S/p			
[mm]	[deg]	Mpa	[kN]	m/h				
5	12,35	76,66	44,27	0,90	15,4			
6	13,54	74,36	46,98	1,08	12,8			
7	14,63	72,47	49,39	1,26	11,0	$n_{util} =$	0,4	ή 40%
8	15,65	70,86	51,58	1,44	9,6	βαθμός χρησιμοποίησης του TBM για "καθαρή" όρυξη		
9	16,60	69,47	53,57	1,62	8,6			
10	17,51	68,26	55,41	1,80	7,7			
11	18,37	67,17	57,13	1,98	7,0			
12	19,19	66,20	58,73	2,16	6,4			

$$PR = p[mm/rev] \cdot \omega[rev/min] \cdot 60[min/h] \cdot 10^{-3}[m/mm] \quad AR = PR \cdot n_{util}$$

**Πίνακας 14.1:**

Τιμές διακύμανσης της βαθμίδας διείσδυσης (PR) , σε συνάρτηση με τη δύναμη κοπτικού δίσκου (F_n) με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης CSM - σε ασβεστόλιθους Τρίπολης

8.1. Αποτελέσματα πρόγνωσης με βάση το μοντέλο CSM

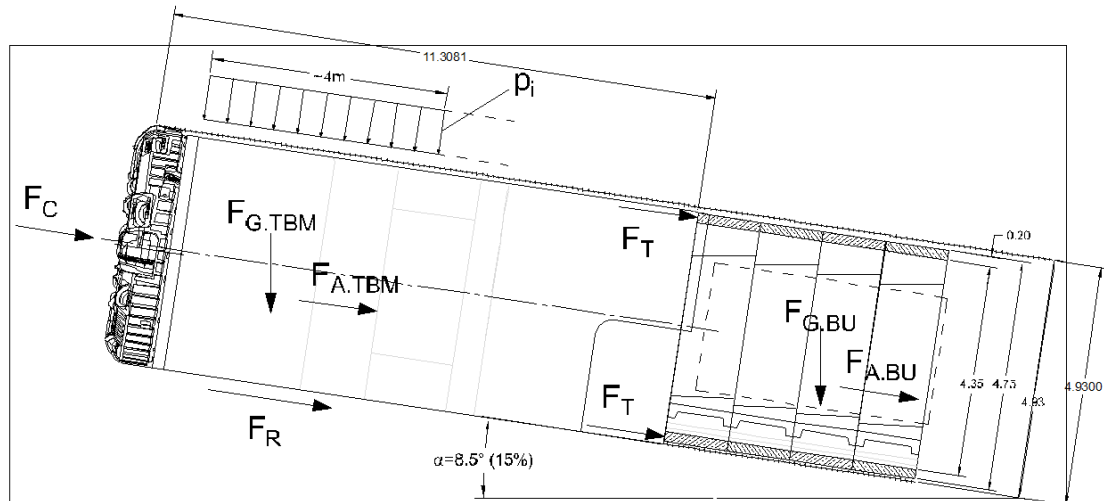
ρ	$\theta_c = \phi$ γωνία επαφής	ρ°	F_n	PR	S/p	
[mm]	[deg]	Mpa	[kN]	m/h		
5	12,35	70,71	43,23	0,90	133,7	Ασβεστόλιθοι Plattenkalk
6	13,54	68,59	45,87	1,08	111,4	
7	14,63	66,84	48,23	1,26	95,5	
8	15,65	65,36	50,36	1,44	83,6	
9	16,60	64,08	52,31	1,62	74,3	
10	17,51	62,96	54,11	1,80	66,8	
11	18,37	61,96	55,78	1,98	60,8	
12	19,19	61,06	57,35	2,16	55,7	
5	12,35	6,85	3,95	0,90	133,7	Φυλλίτες
6	13,54	6,64	4,20	1,08	111,4	
7	14,63	6,47	4,41	1,26	95,5	
8	15,65	6,33	4,61	1,44	83,6	
9	16,60	6,20	4,78	1,62	74,3	
10	17,51	6,10	4,95	1,80	66,8	
11	18,37	6,00	5,10	1,98	60,8	
12	19,19	5,91	5,24	2,16	55,7	
5	12,35	76,66	44,27	0,90	15,4	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
6	13,54	74,36	46,98	1,08	12,8	
7	14,63	72,47	49,39	1,26	11,0	
8	15,65	70,86	51,58	1,44	9,6	
9	16,60	69,47	53,57	1,62	8,6	
10	17,51	68,26	55,41	1,80	7,7	
11	18,37	67,17	57,13	1,98	7,0	
12	19,19	66,20	58,73	2,16	6,4	

Πιν. 15: Συμπεράσματα - αποτελέσματα πρόγνωσης ρυθμού προχώρησης για Ασβεστόλιθους και Φυλλίτες, με βάση το μοντέλο CSM (επεξεργασία Εξαδάκτυλος - Γιαλύτη 2015-2016)

9. Υπολογισμός Ρυθμού Προχώρησης στη σήραγγα Αποσελέμη, με βάση το μοντέλο TUC (Exadaktylos et al, 2015-2016)

Σε διάνοιξη με TBM διπλής ασπίδας για την κατασκευή ανιούσας σήραγγας, αναλύεται ο μηχανισμός **θραύσης πετρώματος με δίσκους**, και τα αποτελέσματα της πρόγνωσης συγκρίνονται με τα (ημι)εμπειρικά: CSM και Q_{TBM} .

9.1. Ανάλυση δυνάμεων



Σχήμα 46: Ανάλυση δυνάμεων με βάση το TUC σε ανιούσα σήραγγα (Αποσελέμη)
(Ref: APOSELEMIS Final lining design, 2014)

$$F_T = F_C + F_R + F_{A,TBM} + F_P$$

F_T = thrust force (συνολική ώση)

F_C = cutting force (αντίσταση κοπής)

F_R = sliding force (friction) (αντίσταση ολίσθησης)

F_A = gradient force (αντίσταση κλίσης)

F_P = pulling force on back-up system (έλξη συρμού)

Ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις για κάθε συνιστώσα:

$$F_C = N_t \cdot F_{C,i}$$

$$F_R = W_{TBM} \cdot \sin a = 4500 \cdot \sin 8.5 \cong 665 \text{ kN},$$

$$F_{A,TBM} = [W_{TBM} \cdot \cos a + (1 - \lambda) \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot p] \cdot \mu \cong 6353 \text{ kN},$$

$$F_{P,back-up} \cong 5500 \text{ kN}$$

$$\lambda \approx 0.9$$

$F_{C,i}$ = δύναμη κοπής κάθε κοπτικού δίσκου (υπολογίζεται αναλυτικά από θεωρητικό μοντέλο κοπής με δίσκο)

N_t = συνολικός αριθμός κοπτικών δίσκων

W_{TBM} = συνολικό βάρος του TBM

a = γωνία κλίσης του κεκλιμένου (8,5°)

μ = συντελεστής τριβής ατσαλιού ασπίδας με πέτρωμα (Πιν. 3-2)

p = πίεση επί της σήραγγας από το πέτρωμα = $\gamma \cdot H$,

γ = μοναδιαίο βάρος του πετρώματος (π.χ. ~0.027 MPa/m)

H = ύψος υπερκειμένων (στους υπολογισμούς παραδοχή 50m)

D = διάμετρος TBM (4,93)

L = μήκος ασπίδας

λ = συντ/στής εκτόνωσης τάσεων

Από τα χαρακτηριστικά του TBM δίδεται: Βάρος μηχανής = 450 tons - Βάρος back Up System = 550 tons.

Άρα θα ληφθεί **$W_{TBM}=10000 \text{ Kn}$**

Επίσης λαμβάνεται συντελεστής τριβής ως εξής:

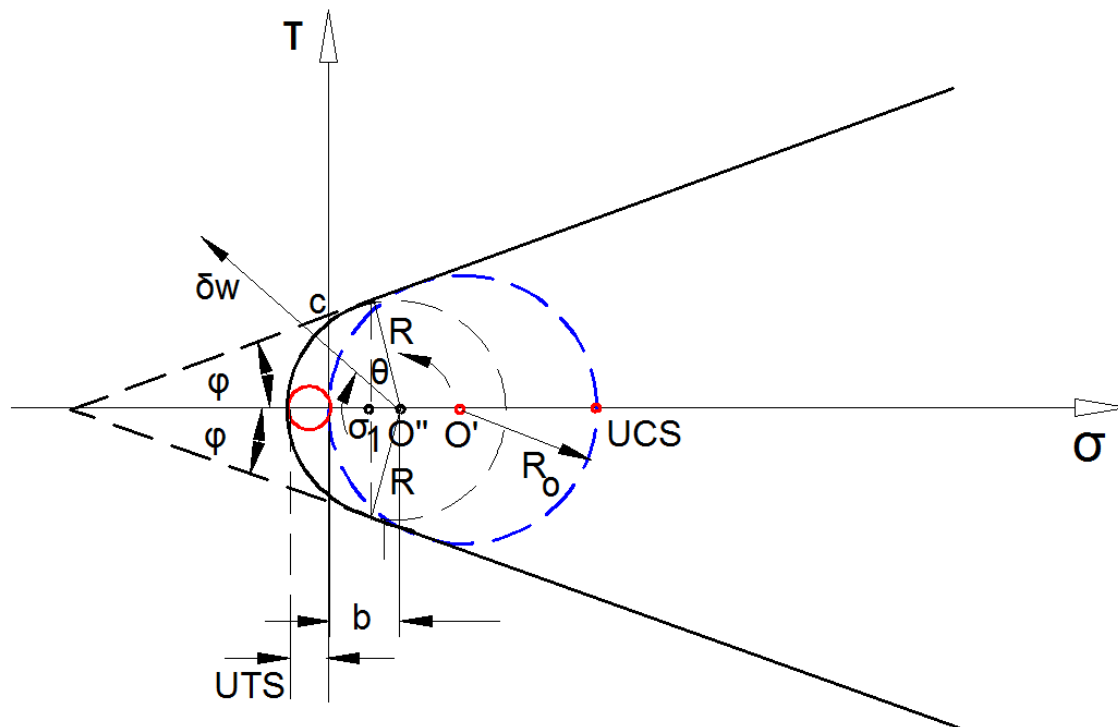
Table 3-2: Friction coefficient μ between shield skin and type of soil	
Soil Type	Friction Coefficient μ (-)
Gravel	0.55
Sand	0.45
Loam, Marl	0.35
Silt	0.30
Clay	0.20

Πιν. 16: Συντελεστής τριβής (μ) μεταξύ ατσαλιού ασπίδας και διαφόρων τύπων πετρωμάτων (REF: Wehrmeyer, 2012)

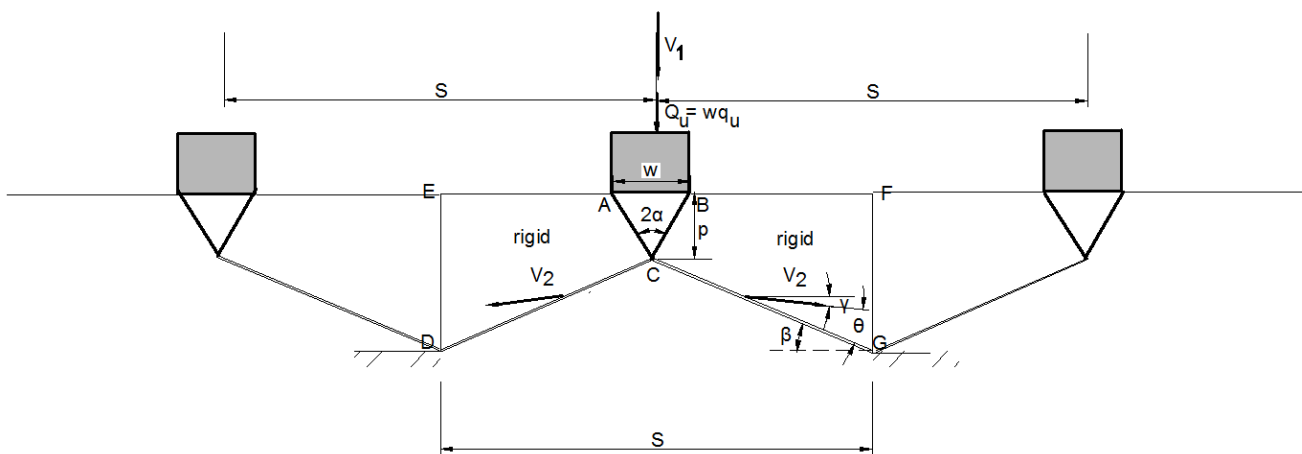
Θα ληφθεί **$\mu=0.5$** για ασβεστόλιθους Plattenkalk και Τρίπολης

Όπως και **$\mu=0.3$** για τους Φυλλίτες

Το μοντέλο κοπής με δίσκο και με αλληλεπίδραση με γειτονικούς δίσκους και τον σχηματισμό θραυσμάτων πετρώματος (rock chips) προέκυψε με την παραδοχή του κάτωθι μηχανισμού αστοχίας πετρώματος με ιδιότητες UCS, UTS, και γωνία τριβής ϕ .



Σχήμα 47: Εφαρμογή κριτηρίου Mohr-Coulomb για αστοχία πετρώματος με δεδομένη αντοχή σε εφελκυσμό (UTS) στο επίπεδο τ-σ (Ref: Stavropoulou M. & G. Exadaktylos (2016))



Σχήμα 48: μοντέλο TUC μηχανισμός δημιουργίας θραυσμάτων (chips), με συστοιχία κοπτικών δίσκων (κάτοψη)
(Ref: Stavropoulou M. & G. Exadaktylos (2016))

Το μοντέλο θραύσης βασίζεται στον σχηματισμό τριγωνικής σφήνας (ABC) κάτω από το πέλμα του δίσκου και διάδοση ρωγμών με κλίση β από την αιχμή της σφήνας που ενώνονται με τις παρακείμενες ρωγμές από τους γειτονικούς δίσκους και μορφώνουν τα θραύσματα (chips) με διαστάσεις πλάτος ίσο με την απόσταση S , πάχους $1-2p$ και μήκους της τάξης του S . Το φορτίο $Q_u = F_n$ κατόπιν προκύπτει από την εξίσωση του έργου των εξωτερικών δυνάμεων με το έργο που δαπανάται για την διάδοση των ρωγμών AC, BC, CD & CG σύμφωνα με το Ανω Οριακό Θεώρημα της [Θεωρίας Οριακής Ανάλυσης \(Chen & Drucker, 1969\)](#). Η γωνία της τριγωνικής σφήνας υπολογίζεται εύκολα από το βάθος διείσδυσης p και το πλάτος πέλματος του δίσκου w

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{w}{2p}\right) \quad (\text{Ref: Chen, W. F. \& Drucker, 1969})$$

$\varphi \leq \theta \leq 90^\circ$: η γωνία θ είναι πάντα μεγαλύτερη ή ίση με τη γωνία τριβής φ για διατμητική ρωγμή και έως 90° για εφελκυστική ρωγμή. Συνήθως κυμαίνεται περί τις 60° για μικτού τύπου ρωγμή. Τέλος, η γωνία γ είναι μικρή και βρίσκεται από το τοπικό ελάχιστο της δύναμης F_n .

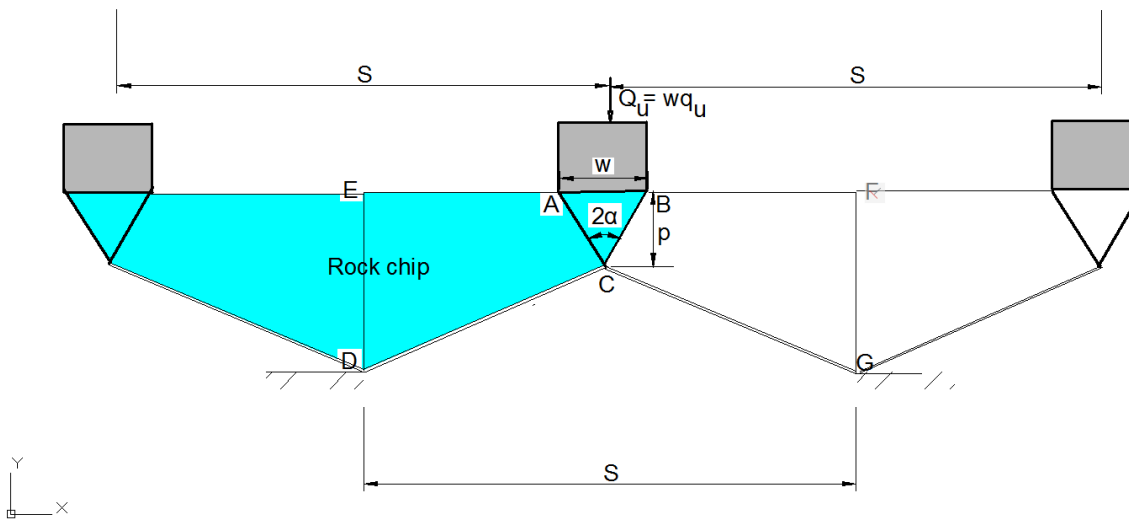
Το μοντέλο Οριακής Ανάλυσης (Stavropoulou & Exadaktylos, 2016) εκτός από τις 3 παραμέτρους αντοχής του πετρώματος (UTS, UCS & φ) και τη γεωμετρία των κοπτικών δίσκων (w, p) και την απόσταση μεταξύ αυτών (S) απαιτεί και τις 3 γωνίες, ήτοι:

1. β = γωνία των ρωγμών που εκκινούν από την κορυφή της τριγωνικής σφήνας και διαδίδονται πλαγίως για να ενωθούν με τις ρωγμές που διαδίδονται από τους γειτονικούς δίσκους
2. γ = γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα της ταχύτητας του chip με την οριζόντια
3. θ = γωνία διαστολής των πλαγίων ρωγμών που σχηματίζουν το chip και κυμαίνεται $\varphi \leq \theta \leq 90^\circ$ ($\tan\theta = \text{rate of vertical displ} / \text{rate of horizontal displ}$). Για $\theta = \varphi$ έχουμε διατμητική ρωγμή και για $\theta = 90^\circ$ έχουμε εφελκυστική ρωγμή (άνοιγμα των χειλέων). Για τιμές μεταξύ αυτών των δύο ορίων έχουμε μικτού τύπου ρωγμή (διάτμηση-εφελκυσμό).

Παρατηρήσεις:

- Από απλή γεωμετρία $\beta = \theta + \gamma$. Αρα οι άγνωστες γωνίες είναι δύο εφόσον συνδέονται μεταξύ των.
- Η γωνία θ επηρεάζει πολύ την τιμή της προβλεπόμενης δύναμης διείσδυσης όπως φαίνεται από την ανάλυση ευαισθησίας. Στην προκειμένη περίπτωση θεωρείται $\theta = 65^\circ$ για τους ασβεστολιθικούς και $\theta = 30^\circ$ για τους φυλλιτικούς σχηματισμούς (βάσει εργαστηριακών δοκιμών).
- Αφού θέσουμε την πιο λογική τιμή της γωνίας θ τότε η γ είναι εκείνη που δίνει τη μικρότερη δύναμη διείσδυσης (minimization problem).

9.2. Υπολογισμός της ορθής δύναμης F_n



Σχήμα 49: μοντέλο TUC - υπολογισμός ορθής δύναμης επί του κοπτικού, σύμφωνα με τη θεωρία κοπής σε μορφή θραυσμάτων (chips) - κάτωψη. (Ref: Stavrakopoulou M. & Exadaktylos G. (2016),

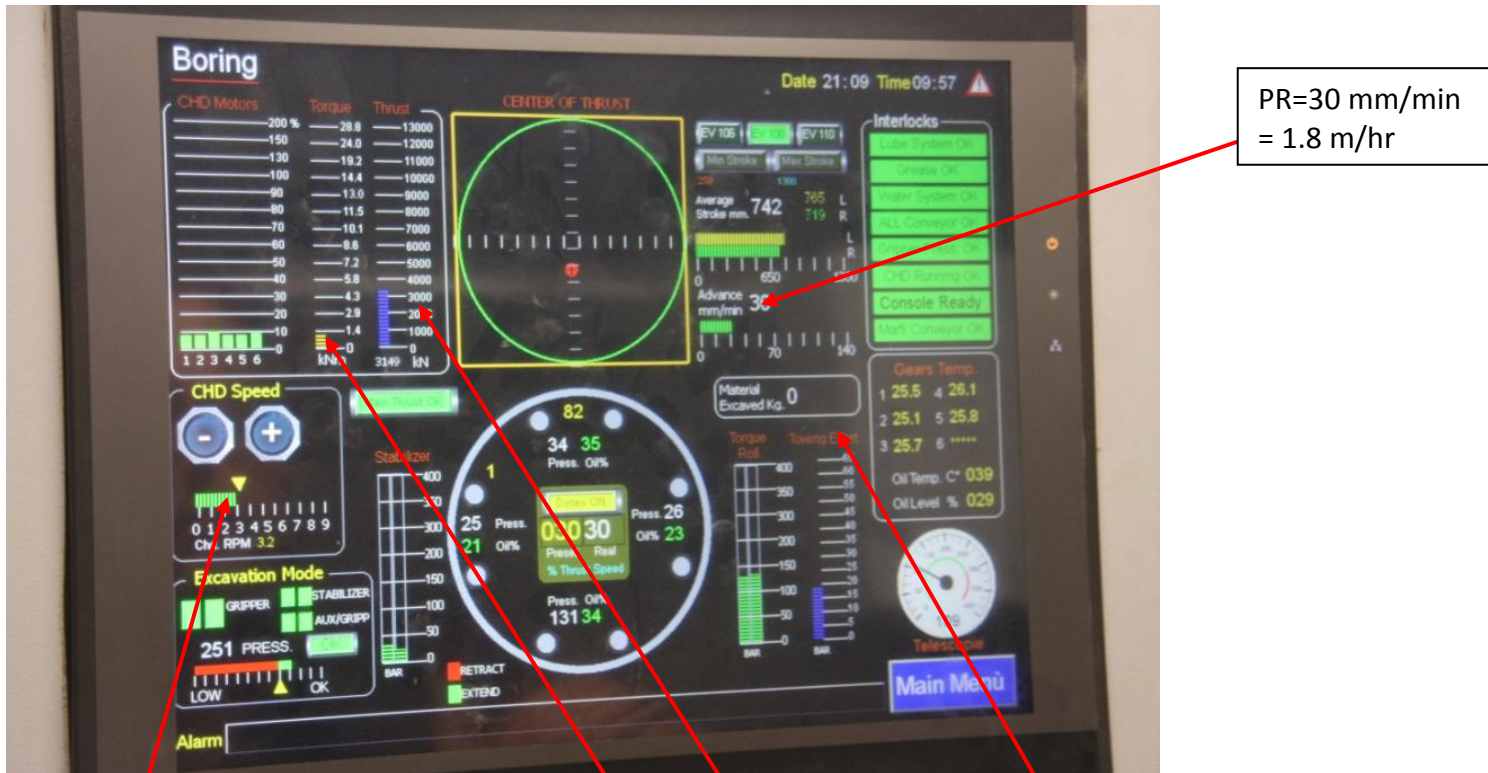
Υπολογισμός της απαιτούμενης δύναμης ώσης του δίσκου για δεδομένο βάθος διείσδυσης p

$$F_n = Q_u = \frac{2 \cdot UCS \cdot p \cdot S \cdot \tan \alpha}{\cos(\alpha + \phi)} \left\{ \left(0.1465 + \frac{UTS}{UCS} \frac{0.707 - \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \times \right. \\ \left. \times \frac{\sin(\alpha + \phi)}{0.707} + \frac{p}{S} \frac{(1 - \sin \phi)}{\cos \alpha} \right\},$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{w}{2p} \right)$$

w = πλάτος πέλματος δίσκου = 12.5 mm

9.3. Συσχετισμός με πραγματικά δεδομένα (Calibration according to real data)



Towing effort for Back Up system
(separately)

Σχήμα 50: Φωτογραφία από Monitor κατά τη διάρκεια διάτρησης σήραγγας – αρχείο Ε. Γιαλύτη, μέλος της ομάδας Συμβούλου Διαχ/σης Έργου για την ολοκλήρωση του έργου «Υδρευση Ηρακλείου – Αγ. Νικολάου από το φράγμα Αποσελέμη και σχετικών συμβάσεων» – EUROESTUDIOS S.A. (1/4/2013-31/12/2015)

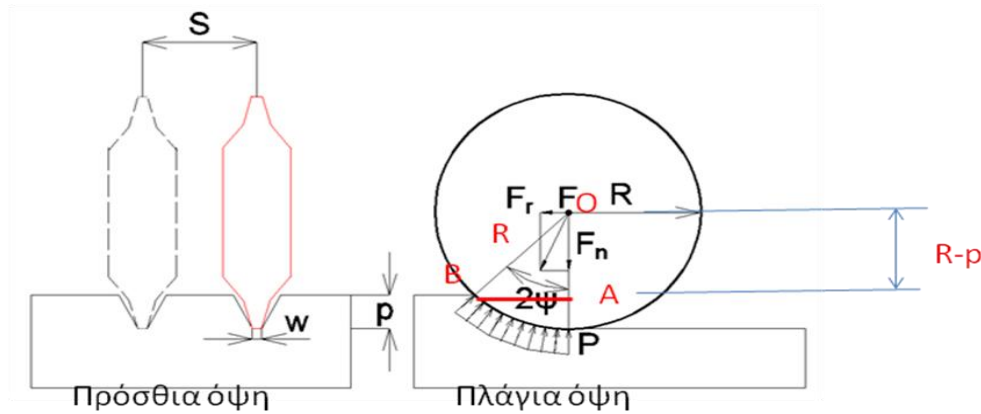
Η ροπή, με δεδομένο τον συντελεστή απόδοσης του κινητήρα της κεφαλής που αφορά την κοπή, εκφράζεται συναρτήσει της δύναμης κύλισης F_r

$$T = \frac{1}{4\eta} \cdot N_t \cdot D \cdot F_r$$

η = συντελεστής μηχανικής απόδοσης της κεφαλής (π.χ. $\eta=0.9$)

Η ροπή μπορεί να υπολογιστεί με δεδομένο τον συντελεστή απόδοσης του κινητήρα της κεφαλής που αφορά την κοπή, εφόσον έχει εκφραστεί συναρτήσει της δύναμης κύλισης F_r .

Από το ορθογώνιο τρίγωνο ΟΑΒ προκύπτει:

$$2\psi = \cos^{-1}\left(\frac{R-p}{R}\right)$$


Σχήμα 51: Υπολογισμός της ορθής δύναμης F_n σύμφωνα με τη θεωρία Οριακής Ανάλυσης - και το νέο μοντέλο TUC (2016) - Πρόσθια και πλάγια όψη

Αν δεχθούμε ομοιόμορφη κατανομή της δύναμης επαφής τότε από την εξίσωση ισορροπίας ροπών γύρω από το κέντρο του δίσκου προκύπτει:

$$F_r = F_n \cdot \tan \psi = F_n \cdot CC,$$

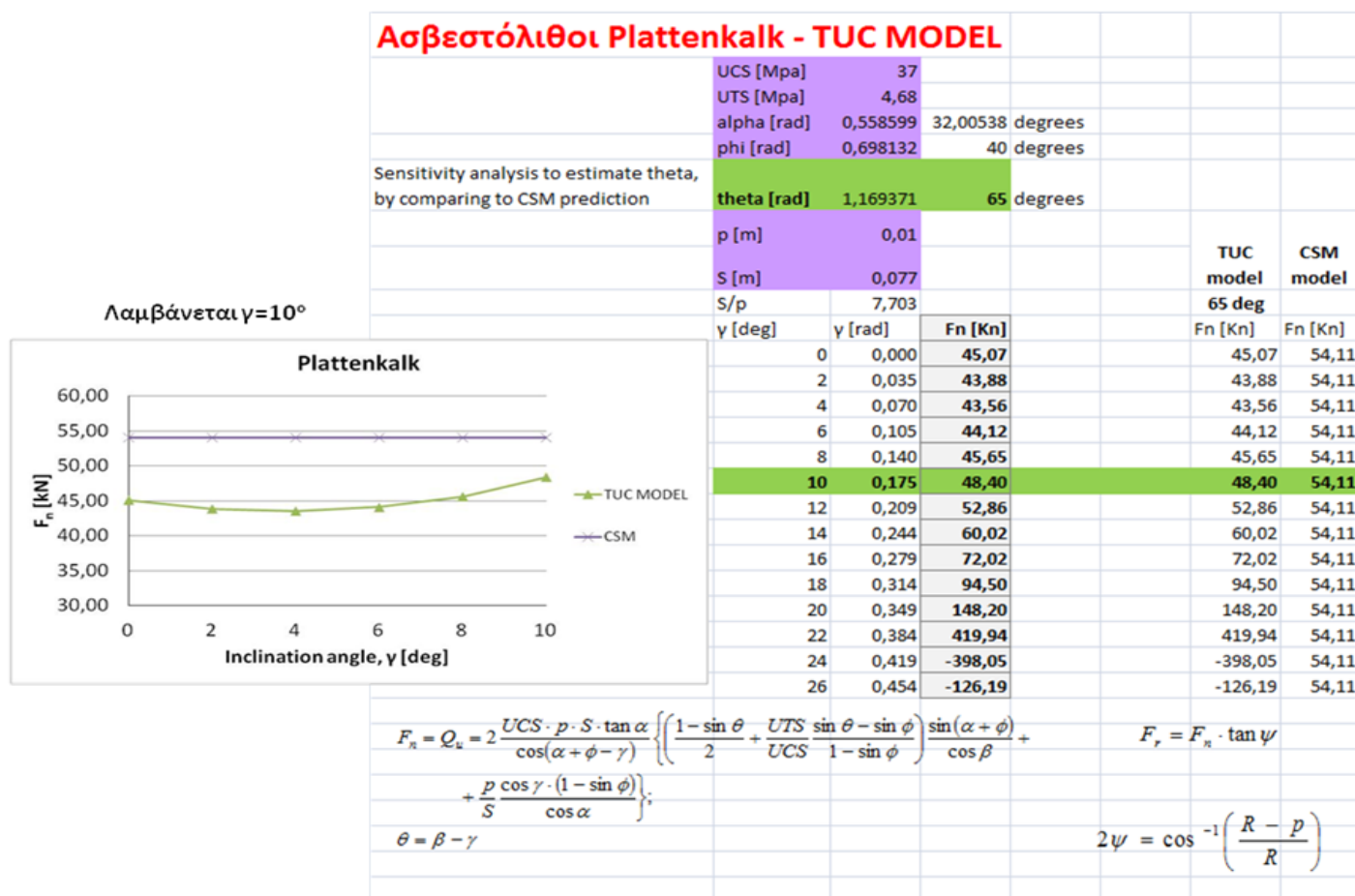
$$CC = \tan \psi$$

Στο μοντέλο TUC εισάγονται: UCS, ϕ , UTS για κάθε γεωλογικό σχηματισμό. Η βέλτιστη εκτίμηση της F_n γίνεται συναρτήσει της γωνίας γ . Παρακάτω δίδονται οι υπολογισμοί TUC για την βέλτιστη σύγκλιση τιμών και την εξαγωγή τιμών για τη γωνία γ .

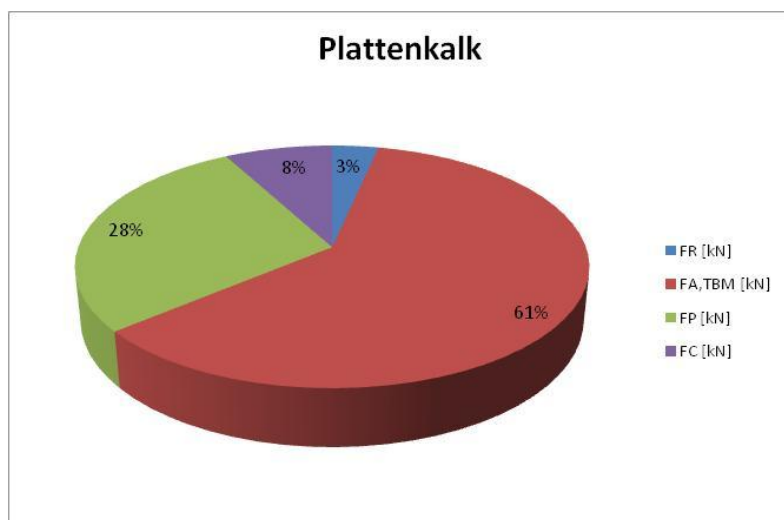
9.4. Αποτελέσματα πρόγνωσης με βάση το μοντέλο TUC

Πίνακας 17:

Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης TUC - σε ασβεστόλιθους Plattenkalk

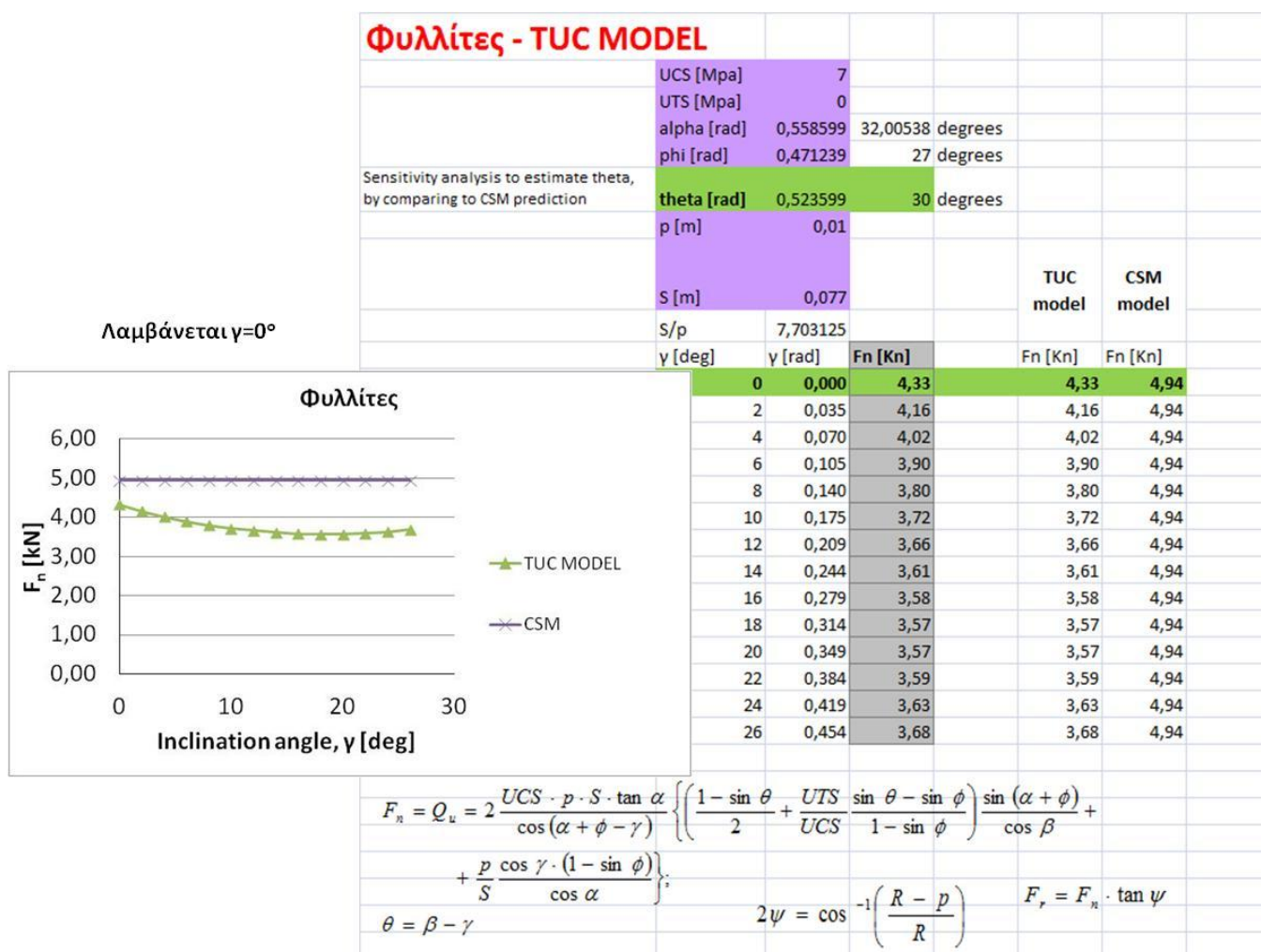


Σχήμα 52: Γράφημα απόδοσης TBM με βάση την πρόγνωση μοντέλου TUC σε ασβεστολίθους Plattenkalk

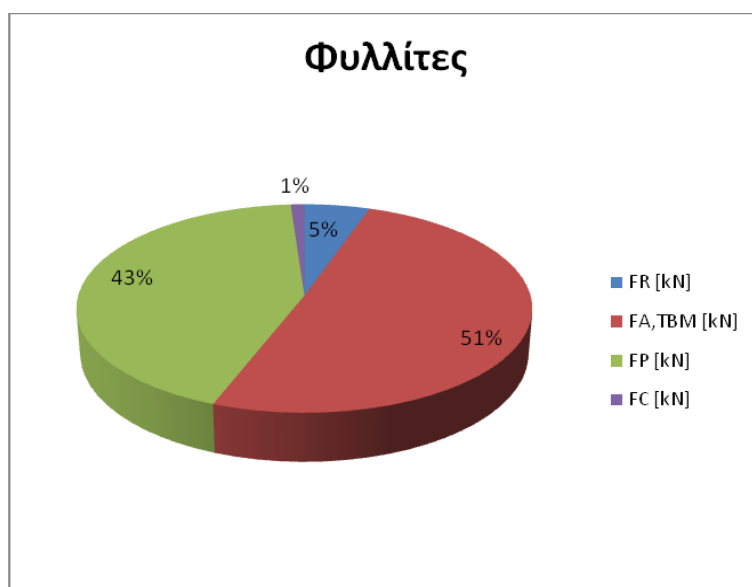


Πίνακας 18:

Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης CSM - σε Φυλλίτες

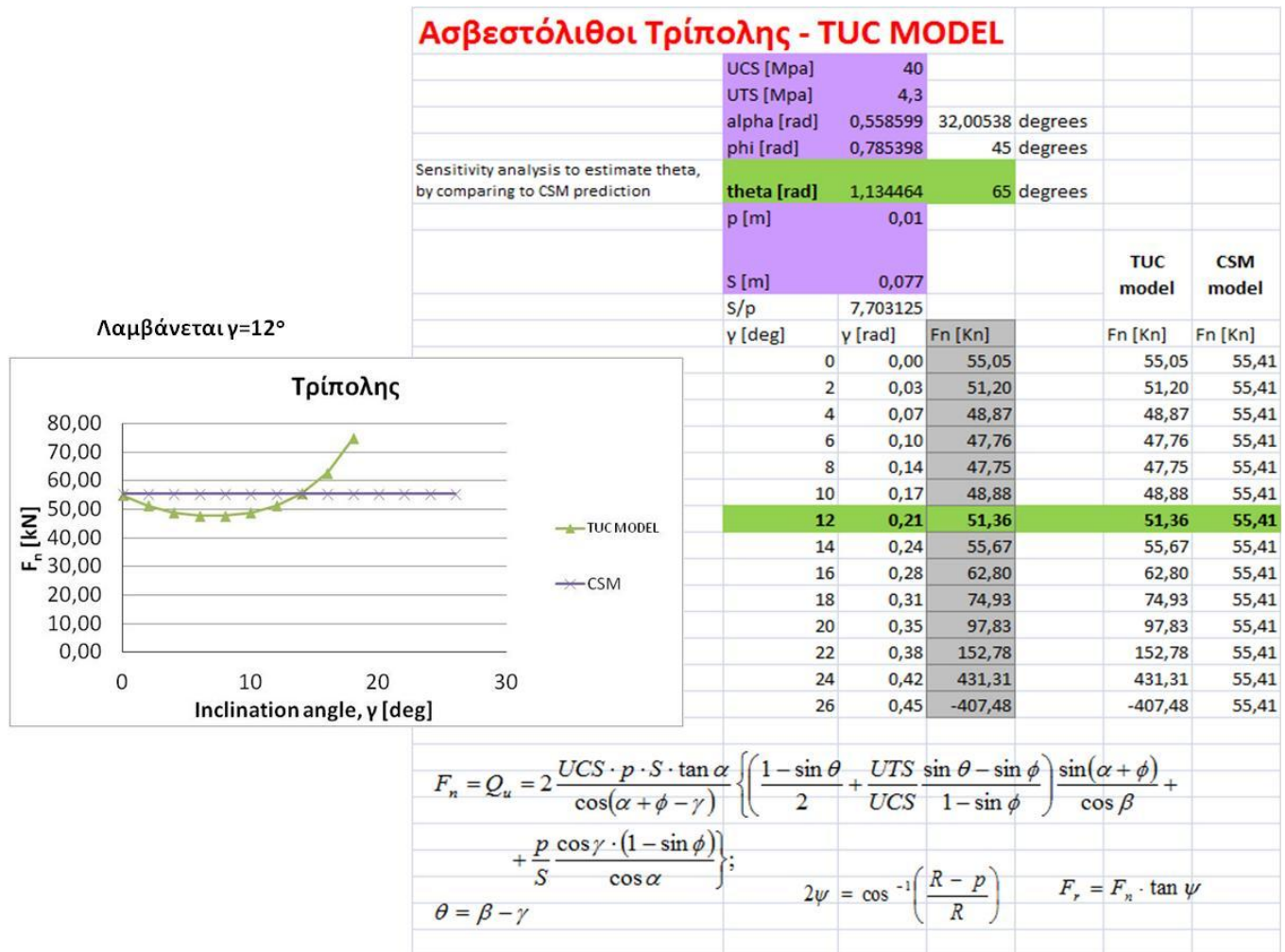


Σχήμα 53: Γράφημα απόδοσης TBM με βάση την πρόγνωση μοντέλου TUC σε Φυλλίτες

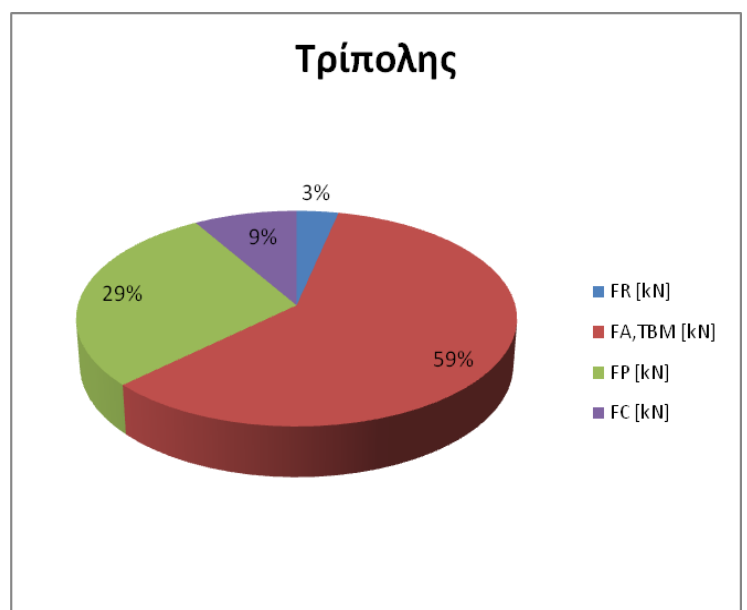


Πίνακας 19:

Υπολογισμός βαθμίδας PR με βάση το Μοντέλο πρόγνωσης CSM - σε ασβεστόλιθους Τρίπολης



Σχήμα 54: Γράφημα απόδοσης TBM με βάση την πρόγνωση μοντέλου TUC σε ασβεστόλιθους Τρίπολης



10. Σύγκριση πρόγνωσης των μοντέλων TUC - CSM - Qtbm (για penetration 10mm)

Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση της συνολικής εφαρμοζόμενης δύναμης κοπής F_n για τους 3 γεωλογικούς σχηματισμούς, όπως αυτή προέκυψε από το μοντέλο πρόγνωσης του Colorado School of Mines (**CSM**), το μοντέλο **Qtbm** (Barton) και σύγκρισή της με την αντίστοιχα υπολογιζόμενη από το Νέο μοντέλο **TUC**.

Πιν. 20. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ CSM, TUC, Qtbm ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ			
Εφαρμοζόμενη δύναμη κοπτικού F_n (KN)			
ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ	TUC (Exadaktylos et al, 2016)	CSM prediction	Qtbm prediction
	per disc		
PLATTENKALK	48,40	54,11	100,00
FYLLITES	4,33	4,94	90,00
			δεν έχει εφαρμογή στους φυλλίτες
TRIPOLIS	51,36	55,41	100,00

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 20, τα μοντέλα TUC και CSM δίνουν συγκρίσιμα αποτελέσματα, ενώ το Qtbm δίνει διπλάσιες τιμές δαπανώμενης F_n ανά κοπτικό δίσκο για την επίτευξη βαθμίδας $PR=1.80\text{m/hr}$, στους ασβεστόλιθους (μη ρεαλιστικό). Φαίνεται ανέφικτη η εφαρμογή του στους διατμημένους Φυλλίτες!!

Στους παραπάνω υπολογισμούς έχουν γίνει διάφορες παραδοχές με στόχο την ήδη διαπιστωμένη βαθμίδα διείδυσης $PR \approx 1.8 \text{ m/hr}$ που είναι η ρεαλιστική απόδοση του ΤΒΜ Αποσελέμη (δεδομένα Σεπτ-Δεκ 2015). Ο ρυθμός αυτός, σε συνδυασμό με $U \approx 0.4$ (βαθμός διαθεσιμότητας) δίνει $AR \approx 0.4 \times 1.8 \text{ m/hr} \times 2$ βάρδιες/ημx11ώρες/βάρδια $\approx 16 \text{ m/day}$.

Οι παραδοχές αυτές είναι:

- 1) $\omega = 3 \text{ rev/min}$
- 2) $L = 9,184 \text{ m}$
- 3) Συντελεστής διεπιφανειακής τριβής $\mu = 0.5$ για ασβεστόλιθο $\mu = 0.3$ για φυλλίτες
- 4) $\lambda = 0.9$ άρα $(1-\lambda) = 0.1$ συντελεστής αποτόνωσης τάσεων
- 5) $p = 10 \text{ mm}$

10.1. Συμπεράσματα για τα Μοντέλα Πρόγνωσης

Τα μοντέλα πρόβλεψης ρυθμού προχώρησης που εξετάστηκαν, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

10.1.1 Με βάση την καταγραφή και συλλογή δεδομένων από την διάνοιξη με TBM σε συγκεκριμένες γεωλογικές παραμέτρους (Q_{tbm}, NTNU)

Πλεονέκτημα: λαμβάνουν υπ'όψιν τη συμπεριφορά της βραχομάζας, ενώ συνυπολογίζουν τις λειτουργικές παραμέτρους του TBM (αν και όχι λεπτομερώς).

Μειονέκτημα α: η εφαρμογή τους περιορίζεται όταν υπάρχουν νέες παράμετροι μηχανής. Τα αποτελέσματα εκφράζονται σε όρους απόδοσης γνωστών και μόνο τύπων μηχανής.

Μειονέκτημα β: δεν περιλαμβάνουν δεδομένα για δυνάμεις κοπής και θεωρούν τη διάτρηση σαν μια γενικότερη έννοια, με αποτέλεσμα να είναι πολύ ευαίσθητα σε διακλάσεις και ρήγματα.

Έγκειται πλέον στη διαίσθηση του μελετητή, να μπορέσει από τα υφιστάμενα στοιχεία να παράγει ένα αναλυτικό διάγραμμα επίδρασης των συστημάτων ασυνεχειών.

10.1.2. Με βάση εργαστηριακές δοκιμές (CSM, TUC), υπολογίζουν τις κοπτικές δυνάμεις και το πως αυτές επενεργούν στα διάφορα εξαρτήματα της μηχανής, κυρίως μέσω των δίσκων. Βασίζονται σε δοκιμές γραμμικής κοπής και δίνουν συσχετισμούς για τις παραμέτρους κοπτικών και πετρώματος.

Πλεονεκτήματα: Επιτρέπουν στον χρήστη να υπολογίσει την απόδοση της μηχανής, με βάση τις τεχνικές της προδιαγραφής. Μπορούν να προσομοιώσουν την κίνηση της κοπτικής κεφαλής και να χρησιμοποιηθούν για σχεδιασμό, εξισορρόπηση, βελτίωση, σύζευξη δυνάμεων θραύσης και ροπής, επιτρέποντας έτσι στον κατασκευαστή να διαπιστώσει ποια είναι τα βέλτιστα χαρακτηριστικά για τα κοπτικά με βάση τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις.

Μειονεκτήματα: Οι βασικές παράμετροι βραχομάζας στα μηχανικά αυτά μοντέλα, (UCS, UTS, ϕ και c) είναι δείκτες που ωστόσο, δεν αντανakλούν με ακρίβεια την αντίδραση του βράχου σε κοπή. Δεν περιλαμβάνονται παράμετροι που σχετίζονται με την υφή του πετρώματος και την συμπεριφορά του σε κοπή (ευθραυστότητα, σκληρότητα, κλπ).

Γίνονται προσπάθειες να αντισταθμιστεί αυτό το μειονέκτημα, με την προσθήκη συντελεστών διόρθωσης από δοκιμές σημειακής φόρτισης (Sato, Sanio, etc).

Καινοτομία Νέου Μοντέλου TUC

Το μοντέλο TUC (2016) δίνει τιμές παρόμοιες με το CSM και NTNU, είναι όμως το μοναδικό μοντέλο που χρησιμοποιεί τη γωνία ϕ και προβλέπει την πρόσθετη απαιτούμενη ώση για την υπερνίκηση της τριβής του συρμού με το δάπεδο της ήδη διατρηθείσας σήραγγας. Επίσης μόνο μέσω του μοντέλου αυτού, γίνεται σαφές ότι όταν η διάτρηση γίνεται **υπό κλίση** (ανοδική κατεύθυνση διάτρησης) πρέπει να υπάρχει προσθαφαίρεση της συνιστώσας του βάρους στην συνολική υπολογιζόμενη ώση του TBM. Για το χειριστή, αυτό που ενδιαφέρει δεν είναι οι επιμέρους F_n/F_r , αλλά η συνολική ώση, η ροπή στρέψης, η ισχύς για δεδομένο PR.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των μοντέλων απεικονίζονται ως κάτωθι:

ΠΙΝΑΚΑΣ 21	Βασικά χαρακτηριστικά των 4 μεθόδων πρόβλεψης και περιορισμοί τους			
	TUC	Q _{TBM}	CSM	NTNU
Βασική Φιλοσοφία	Υπολογισμός ειδικής ενέργειας SE (γρήγορη ανάδρομη ανάλυση για την αναβάθμιση του αρχικού γεωτεχνικού μοντέλου).	Εκτίμηση βαθμίδας διείσδυσης PR από τα χαρακτηριστικά βραχομάζας, είτε από τα πραγματικά δεδομένα ενός έργου (back-calculated QTBM)	Υπολογισμός δυνάμεων κοπής ανά κοπτικό	Εμπειρικές σχέσεις, χρήση δεικτών πετρώματος
Δυνάμεις κοπής	Ναι	Ναι (συνολική ώση)	Ναι	Όχι
Γεωμετρία κοπτικών εργαλείων	Ναι	Όχι	Ναι	Όχι
Διάταξη κοπτικών (S,δ)	Ναι	Όχι	Ναι	Μερικώς
Σχεδιασμός μηχανήματος (κεφαλή, ισχύς κ.λπ.)	Ναι (TBM-RH)	Ναι (TBM-RH)	Ναι (TBM-RH)	Μερικώς (TBM)
Μηχανικές παράμετροι των γεωυλικών	Ναι (UCS, UTS, c, φ)	Μερικώς	Ναι	Μερικώς
Δείκτες πετρώματος	Μερικώς (δοκιμές μικροδιάτρησης)	Ναι	Μερικώς	Ναι (BI, DRI, CLI)
Ιδιότητες βραχομάζας (ασυνέχειες, ρήγματα)	Ναι	Ναι	Εμμέσως	Ναι
Συνθήκες βραχομάζας (ύπαρξη νερού)	Εμμέσως (RMR, Q, GSI)	Ναι	Εμμέσως	Ναι
Πρόβλεψη απόδοσης πίσω από το μέτωπο (αδιατάρακτο πέτρωμα)	Ναι (χρήση γεωστατιστικού κώδικα KRIGSTAT)	Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεμονωμένα, αλλά πάντα σε συνδυασμό με άλλα μοντέλα πρόβλεψης	Ναι	Ναι
Εκτίμηση κόστους	Μερικώς (πρόβλεψη της PR αλλά όχι του ρυθμού φθοράς των κοπτικών)	Μερικώς - μέσω της φθοράς κοπτικών	Ναι	Μερικώς
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	Όχι	Μερικώς

Πιν. 21: Βασικά χαρακτηριστικά των μοντέλων πρόγνωσης και περιορισμοί τους

(Ref: Ξηρουδάκης Γεώργιος 2015 - επικαιροποίηση Εξαδάκτυλος - Γιαλύτη 2016)

10.2. Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων

Οι πιο συχνές παράμετροι εισαγωγής στα μοντέλα πρόγνωσης είναι: Η **αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου βράχου** (χρησιμοποιείται σχεδόν από το 70% των μοντέλων), η **απόσταση και ο προσανατολισμός των ασυνεχειών** (χρησιμοποιείται σχεδόν από το 50% των μοντέλων), η **ονομαστική τιμή ώθησης ανά κοπτικό** (χρησιμοποιείται σχεδόν από το 40% των μοντέλων) και η **διάμετρος του κοπτικού** (χρησιμοποιείται σχεδόν από το 30% των μοντέλων).

Στον Πίνακα 22 που ακολουθεί, φαίνεται για 20 διαφορετικά μοντέλα: το εύρος διακύμανσης αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, το εύρος τιμών διαμέτρου κοπτικών δίσκων και κοπτικής κεφαλής, όπως επίσης και ποια από αυτά συμπεριλαμβάνουν ασυνέχειες της βραχομάζας.

Πιν. 22: Συνοπτική παρουσίαση των θεωρούμενων μοντέλων πρόβλεψης και ο συσχετισμός τους με χαρακτηριστικά μηχανής και τιμές βάσης γεωλογικών δεδομένων (Cheda, 2013, επικαιροποίηση Εξαδάκτυλος - Γιαλύτη, 2016) (Ref: World Tunnel Congress 2013)

ΕΥΡΟΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΗΣ TBM

	Cutterhead diameter			Cutters diameter			UCS										Disc onti nuiti es
	m			inches			Mpa										
	0	6	12	10	16	22	0	50	100	150	200	250	300	350	400		
Tarkoy (1973)	x			x													
Roxborough and Phillips (1975)					x												
Graham (1976)			x		x												
Farmer and Glossop (1980)			x		x												
Snowdon et al (1982)																	
Nelson and O' Rourke (1983)		x			x												
Nelson et al (1983,1985)		x			x												
Sanio (1985)					x										x		
Hughes (1986)					x												
Boyd (1986)																	
Innaurato et al (1991)	x				x										x		
Gehring (1995)		x				x					x				x		
Rostami et al - CSM (1993,1997)																	
Barton - QTBM (2000)		x									x				x		
Burland - NTNU (2000)			x												x		
Yagiz - MSCSM (2002, 2006)			x				x								x		
Ribacchi & Lembo Fazio (2004)	x				x										x		
Khademi Hemidi et al (2010)			x			x				x					x		
Farrokh et al (2012)	x									x					x		
Exadaktylos et al (2015-2016)		x				x				x					x		

Ασβεστόλιθοι σήραγγας
Αποσελέμη

Στον Πίνακα 23 που ακολουθεί, φαίνεται για τα 20 μοντέλα η διακύμανση της τιμής διείσδυσης στην κατασκευή σιράγγων, σε συνάρτηση με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ΤΒΜ.

- Η πρώτη στήλη δείχνει την μέση εκτιμώμενη διείσδυση **για όλα τα μοντέλα** - 11,2 mm/rev
- Η δεύτερη στήλη δείχνει το μέσο εκτιμώμενο ρυθμό διείσδυσης από επιλεγμένα μοντέλα που βασίστηκαν μόνο σε γεωτεχνικές παραμέτρους (UCS, διάμετρος κεφαλής, διάμετρος κοπτικών δίσκων), **που αποκλίνουν λιγότερο από 100%** από αυτές του παρόντος έργου. Μέση εκτιμώμενη διείσδυση 8 -9 mm/rev.
- Η τρίτη στήλη αφορά μόνο τα μοντέλα που βασίζονται σε παραμέτρους **ακόμα πλησιέστερες στο έργο που εξετάζεται (διαφοροποίηση κατά 50%)** - εκτιμώμενος ρυθμός διείσδυσης 10mm/rev.

Πιν. 23: Εύρος διακύμανσης ρυθμού διείσδυσης, από διαφορετικά μοντέλα πρόβλεψης (Cheda, 2013, επικαιροποίηση Εξαδάκτυλος - Γιαλύτη, 2016) (Ref: World Tunnel Congress 2013)

ΕΥΡΟΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΙΜΩΝ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ												
	All active				100%				50%			
	Penetration (mm/rev)				Penetration (mm/rev)				Penetration (mm/rev)			
	0	5	10	15	0	5	10	15	0	5	10	15
Tarkoy (1973)				X				X				
Roxborough and Phillips (1975)		X				X				X		
Graham (1976)				X								
Farmer and Glossop (1980)								X				
Snowdon et al (1982)				X								
Nelson and O' Rourke (1983)			X				X				X	
Nelson et al (1983,1985)			X				X				X	
Sanio (1985)								X				
Hughes (1986)								X				
Boyd (1986)								X				
Innaurato et al (1991)				X								
Gehring (1995)				X								
Rostami et al - CSM (1993,1997)				X				X				
Barton - QTBM (2000)				X				X				
Burland - NTNU (2000)		X				X				X		
Yagiz - MSCSM (2002, 2006)		X				X				X		
Ribacchi & Lembo Fazio (2004)		X				X				X		
Khademi Hemidi et al (2010)				X								
Farrokh et al (2012)				X				X				
Exadaktylos et al (2015-2016)				X				X				

10.3. Τελικό Συμπέρασμα - Επίλογος

Σε πολλές περιπτώσεις, λόγω απροσδόκητων συνθηκών, ούτε η βαθμίδα προχώρησης, ούτε και η βαθμίδα χρήσης του TBM υλοποιούνται όπως ακριβώς είχαν προβλεφθεί.

Στη σύγκριση των θεωρητικών μοντέλων πρόβλεψης προχώρησης με τα πραγματικά δεδομένα, υπάρχει μέτρια έως καλή συσχέτιση, που μπορεί ωστόσο να γίνει ακόμα πιο ακριβής όταν λαμβάνονται τιμές από βάση δεδομένων **κοντά στις πραγματικές συνθήκες** του έργου.

Από όλα όσα αναφέρθηκαν στην παρούσα εργασία, διαφαίνονται τόσο οι δυνατότητες, όσο και τα μειονεκτήματα των διαθέσιμων μοντέλων πρόβλεψης απόδοσης των TBM σκληρού βράχου, **των οποίων η ακρίβεια βελτιώνεται όταν συνδυάζονται οι εργαστηριακές δοκιμές με τα δεδομένα διάνοιξης**. Προτείνεται γενικά η χρήση περισσότερων του ενός μοντέλων, για να αποφευχθούν λάθος εκτιμήσεις που οφείλονται σε περιπτώσιολογία.

Σε κάθε περίπτωση, όποια από τα Μοντέλα και αν επιλεγούν, η βέλτιστη πρόβλεψη εκσκαψιμότητας ενός TBM, είναι επιβεβλημένο να γίνεται μέσω σχεδιασμού στην αρχική μελέτη και όχι η απόδοσή του να εξαρτάται από τις κρατούσες τεχνικογεωλογικές συνθήκες. Αυτός που σχεδιάζει τη διάνοιξη της σήραγγας οφείλει να επιλέξει τέτοιο τύπο εξοπλισμού και μεθόδους λειτουργίας, που να εξασφαλίζουν τον επιθυμητό ρυθμό προχώρησης, με ελαχιστοποίηση της επιρροής της γεωλογικής - γεωτεκτονικής αβεβαιότητας.

11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. American Journal of Applied Sciences: 2012 “The wear of TBM excavation tools in Rock, Claudio Oggeri & Pierpaolo Oreste, Politecnico di Torino, Italy
2. Askilsrud, O. (1984). Rock Report 1862, The Robbins Company, March 5, 1984.
3. APOSELEMIS PROJECT CRETE - PRECAST SEGMENTAL LINING Final lining design version: 04.08.2014 (Jägerbau G.m.b.H.- viglconsult ZT - A-6780 SCHRUNS)
4. Aposelemis Dam Project (Crete, Greece) JagerBau – INTRAKAT – Technical Specification TBM & BU System – Attachment 1 – 12252 APOS – Oct, 2013)
5. Aposelemis Tunnel - JagerBau Shift reports - ΣΔΕ Euroestudios S.A. - (επεξεργασία Εξαδάκτυλος - Γιαλύτη, 2015-2016)
6. Barton, 1988. “Rock mass classification using the Q-system” ASTM Tech Pub 984
7. Barton, N. 2000. TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock. Balkema, Rotterdam.
8. Barton, N. 2000. Rock mass classification for choosing between TBM and drill-and-blast or a hybrid solution. Keynote lecture, Proc. Int. Conf. on Tunnels and Underground Structures, ICTUS, Singapore.
9. Barton N. - A Critique of Qtbm. Tunnels and Tunnelling International, 2005
10. Barton N. TBM prognoses in hard rock with faults using Qtbm methods, 2009
11. Barton N, “TBM prognosis for open-gripper and double-shield machines tunneling through hard jointed rock with weakness zones”, NB&A, Oslo, Norway, 2013
12. Bruland, A. (1998). Hard Rock Tunnel Boring Advance Rate and Cutter Wear, NTNU Trondheim, Norway
13. Beniaowski, 1989. “Engineering Rock Mass Classifications - a Complete Manual” Wiley
14. Beniaowski, B Celada, JM Galera, M. Álvares, “Rock Mass Excavability (RME) index”, 2006
15. Beniaowski, B Celada, JM Galera, 2007. “TBM Excavability: Prediction and Machine-Rock
16. Brady, B.H.G and E.T. Brown, (1985), Rock Mechanics for Underground Mining, George Allen and Unwin, 527p
17. Carranza-Torres, C and J. Labuz, Tunnel support systems, Technologies and design. The Convergence-Confinement Method, Elastic solution of a circular tunnel, Class notes on Underground Excavations in Rock, 2006
18. Chen, W. F. & Drucker, D. C. (1969) Bearing capacity of concrete blocks on rock. Journal of Eng. Mech. Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 955-978.
19. Exadaktylos G., M. Stavropoulou, G. Xiroudakis, M. de Broissia and H. Schwarz, (2008) A spatial estimation model for continuous rock mass characterization from the specific energy of a TBM, Rock Mechanics & Rock Engineering, 41: pp. 797–834, Springer.
20. Exadaktylos G. 2014, “Performance analysis of TBM’s by using analytical cutting models and geostatistics”, Invited Lecture, Ruhr Universitaet Bochum (Germany) ,July 10th 2014.

21. Goodman, R.E., (1980), Introduction to Rock Mechanics, John Wiley, New York
22. Gorge 2nd Tunnel Boring Machine Preliminary Performance Evaluation Prepared by:Jacobs Associates June 4, 2009
23. Hoek, E. and E.T. Brown, (1980), Underground Excavations in Rock, Institution of Mining and Metallurgy
24. Hoek, E. P.K. Kaiser and W.F. Bawden, (1993), Support of Underground Excavations in Hard Rock, Clearance Center, Danvers, USA
25. Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B., Hoek-Brown criterion -2002 edition. Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002, 1, 267-273.
26. Hoek E., Practical Rock Engineering, (2007), Hoeks's Corner, Rockscience,
27. ITA World Tunnelling Congress, Korea. Interaction", RETC, Toronto, p1118Leitner W., Schneider E, (2003) "Penetration Prediction models for hard rock tunnel boring machines" Felshbau 21 No
28. Marinos, P., Hoek, E., Marinos, V. 2006. Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunnelling. Bull. Eng. Geol. Env., 65(2), 129-142
29. Mechanised Shield Tunneling - Bernhard Maidl,Martin Herrenknecht,Ulrich Maidl,Gerhard Wehrmeyer, 2012
30. Nowak, D. (1987). File C5231 Gorge Power, The Robbins Company, Memo to Martin Hansen, dated September 16, 1987
31. NORWEGIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY. 1995. Hard Rock Tunnel Boring. Project Report 1-94. Trondheim. Norway, 164.
32. OZDEMIR, L. 1977. Development of Theoretical Equations for Predicting Tunnel Borability. Thesis, Colorado School of Mines. Golden. Co. USA
33. OZDEMIR, L., MILLER, R.J. & WANG, F.D. 1978. Mechanical Tunnel Boring Prediction and Machine Design. NSF APR73- 07776-A03. Colorado School of Mines. Golden, USA.
34. L Ozdemir, B. Nilsen, 1993. "Hard rock tunnel boring prediction". Proc. RETC, Boston,
35. PANG, S.S., GOLDSMITH, W. & HOOD, M. 1989. A Force-Indentation Model for Brittle Rocks. Rock Mechanics and Rock Engineering, 22, 127-148.
36. PJ Tarkoy, 1991. "Determining total hardness for TBM boreability" Canadian Symp Rock Mech
37. PP Nelson, 1993. "TBM performance analysis wrt rock properties" Comp Rock Eng, p261
38. Palmström, E Broch, 2006. "Use and misuse of QTBM". TUST 21, p575
39. R Grandori, M Jäger, F Antonini, L Vigl, 1995. "Evinos-Mormos Tunnel - Greece" RETC, San Francisco, p747

40. ROSTAMI, J. 1991. Design Optimisation, Performance Prediction, and the Economic Analysis of TBM Application for the Construction of Proposed Yucca Mountain Nuclear Waste Repository. Thesis, Colorado School of Mines. Golden, Colorado, USA.
41. ROSTAMI, J. & OZDEMIR L. 1993b. A New Model for Performance Prediction of Hard Rock TBM. In Proceedings of Rapid Excavation and Tunnelling Conference. Chapter 50, Boston, MA. USA
42. ROSTAMI, J. & OZDEMIR, L. 1993c. Computer Modeling for Cutterhead Design and Layout of Mechanical Excavators. Proceedings of Annual Technical Meeting of the Institute of Shaft Drilling Technology. Las Vegas, NV. USA.
43. Rostami J, Ozdemir L (1993), "A NEW MODEL FOR PERFORMANCE PREDICTION OF HARD ROCK TBMS." RETC Proceedings
44. ROXBOROUGH, F. 1975. Research in Mechanical Rock Excavation: Progress and Prospects. In Proceedings of Rapid Excavation and Tunnelling Conference, New York, USA
45. Ramezanzadeh, A, Rostami J, Kastner R, Performance Prediction Models for Hard Rock Tunnel Boring Machines
46. Sapigni, M Berti, F Bethaz, A Bustillo, G Cardone, 2002. "TBM performance estimation using rock mass classifications". Int J Rock Mech Min Sci, 39, p771
47. SANIO, H.P. 1985. Prediction of the Performance of Disc Cutters in Anisotropy Rocks. Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics. Abstracts, 22/3, 153-161.
48. SATO, K., GONG, F. & ITAKURA, K. 1991. Prediction of Disc Cutter Performance using a Circular Rock Cutting Ring. Proceedings 1st International Mine Mechanization and Automation Symposium. Colorado School of Mines. Golden, Colorado, USA.
49. 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.
50. Stavropoulou M., G. Xiroudakis and G. Exadaktylos (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.
51. Stavropoulou M. & G. Exadaktylos (2016), "Characterization of rock masses based on geostatistical joint mapping and rock boring operations", Chapter in Comprehensive Rock Engineering entitled to be published 2016, Editor Prof. Feng Xia-Ting, accepted for publication.
52. SNOWDON, A.R., RYLEY, D.M. & TEMPORAL, J. 1983. Study of Disc Cutting in Selected British Rocks. Int. J. of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 19
53. Teale, R. (1965) The concept of specific energy in rock drilling. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2, 57-73. www.drillability.com/13A-98eng.pdf "Rock tunnel boring: Drillability test methods"

54. YAGIZ, S. & OZDEMIR, L. 2001. Geotechnical Parameters Influencing the TBM Performance in Various Rocks. In Program with Abstracts. 44th Annual Meeting of Association of Engineering Geologists. Technical Session 10; Eng. Geology for Construction Practices. Saint Louis. MO USA.
55. YAGIZ, S. 2002. Development of Rock Fracture and Brittleness Indices to Quantify the Effects of Rock Mass Features and Toughness in the CSM Model Basic Penetration for Hard Rock Tunnelling Machines. Thesis, Colorado School of Mines. Golden, Colorado, USA.
56. World Tunnel Congress 2013 Geneva Switzerland "Performance of penetration models for hard rock TBMs in the case of the Gotthard Base Tunnel - J. Cheda, R. Schuerch, P. Perazzelli, F. Mezger
57. Αγιουτάντης, Ζ., (2002), Στοιχεία Γεωμηχανικής, Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδ. Ίων, Αθήνα
58. Καββαδάς, Μ., (2000), Σχεδιασμός Υπόγειων έργων, Σημειώσεις Μαθήματος, ΕΜΠ, Αθήνα.
59. Οικονομόπουλος, Ι.Ν., (1973), Εκμετάλλευσις Μεταλλείων-Υποστήριξις, Αθήνα
60. Ξηρουδάκης Γεώργιος (2015), Νέα Μοντέλα Όρυξης Υπογείων Έργων με Μηχανήματα Ολομετώπου και Σημειακής Κοπής», Διδακτορική Διατριβή, Μάιος 2015, Πολυτεχνείο Κρήτης.
61. Υ.ΥΠΟ.ΜΕ.ΔΙ. / Γ.Γ.Δ.Ε.- ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ (Δ6) Έργο: «Ύδρευση Ηρακλείου – Αγ. Νικολάου από το φράγμα Αποσελέμη – Έργα ενίσχυσης Ταμιευτήρα φράγματος Αποσελέμη από το Οροπέδιο Λασιθίου – Ανάδοχος ΙΝΤΡΑΚΑΤ» Οριστική Γεωλογική Μελέτη, Μάιος 2013
62. Υ.ΥΠΟ.ΜΕ.ΔΙ. / Γ.Γ.Δ.Ε.- ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ (Δ6) Έργο: «Ύδρευση Ηρακλείου – Αγ. Νικολάου από το φράγμα Αποσελέμη – Έργα ενίσχυσης Ταμιευτήρα φράγματος Αποσελέμη από το Οροπέδιο Λασιθίου – Οριστική Μελέτη Εφαρμογής - 2014