

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*“Ταξινόμηση ασθενών και σύνθετων βραχώμαζων
ανάλογα με το είδος του τεχνικού έργου”*



**ΓΙΑΝΝΟΥΚΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΜΠΑΛΙΑΚΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ :
ΜΑΡΙΝΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ, ΛΕΚΤΟΡΑΣ**

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία είναι αποτέλεσμα εκτενούς αναζήτησης και έρευνας. Πρώτα απ' όλα σε αυτό το σημείο, θέλουμε να απευθύνουμε θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μας εργασίας, κ. Μαρίνο Βασίλειο, για την ανάθεση του συγκεκριμένου ενδιαφέροντος θέματος, καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μας.

Πάνω απ' όλα όμως, είμαστε ευγνώμονες στους γονείς μας που ήταν δίπλα μας σε κάθε μας βήμα και των οποίων η πίστη στις δυνατότητές μας αποτέλεσε αρωγός σε όλους τους στόχους μας. Το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλουμε λοιπόν σε αυτούς και τους αφιερώνουμε την παρούσα εργασία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	i
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	iii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	1
1.1 Σύνδεση γεωτεχνικής μελέτης με ταξινόμηση βραχώμαζων	1
1.2 Μεθοδολογία	2
1.3 Ανάλογα με το αντικείμενο μελέτης	8
1.3.1 Άρρηκτος βράχος	8
1.3.2 Ασυνέχειες	8
1.3.3 Βραχώμαζα	9
1.3.4 Νερό	10
1.4 Σκοπός ταξινόμησης	12
2. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΣΘΕΝΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΒΡΑΧΟΜΑΖΩΝ	13
2.1 Ασθενείς και σύνθετες βραχώμαζες	13
2.1.1 Γενική ταξινόμηση	13
2.1.2 Ανάλογα με το είδος του κατασκευαστικού έργου	14
2.2 Ασθενείς βραχώμαζες (weak rockmasses)	15
2.2.1 Γενικά	15
2.2.2 Πρωτογενείς διεργασίες	23
2.2.1.1 Μαλακοί βράχοι (soft rocks)	23
2.2.3 Δευτερογενείς διεργασίες	24
2.2.3.1 Τεκτονική	24
2.2.3.2 Αποσάθρωση	27

3.	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ	32
3.1	Γεωτεχνική περιγραφή σχηματισμών	32
3.1.1	Ιζηματογενή	32
3.1.2	Πυριγενή	35
3.1.2	Ηφαιστειακά	35
3.2	Βασικοί τύποι πετρωμάτων	39
3.2.1	Ασβεστόλιθος	39
3.2.2	Φλύσχης	40
3.2.3	Μολάσσα	43
3.2.4	Κρυσταλλικά πετρώματα	47
3.2.5	Οφιολιθικό σύμπλεγμα	56
4.	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΟΥ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ	59
4.1	Σήραγγες	59
4.1.1	Μηχανισμοί αστοχίας	59
4.1.2	Παραδείγματα	62
4.2	Φράγματα	90
4.2.1	Μηχανισμοί αστοχίας	90
4.2.2	Παραδείγματα	93
4.3	Πρανή	103
4.3.1	Μηχανισμοί αστοχίας	103
4.3.2	Παραδείγματα	104
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	133
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	135
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	140

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1.1 Σύνδεση γεωτεχνικής μελέτης με ταξινόμηση βραχόμαζων

Ένα από τα πιο χρήσιμα εργαλεία της τεχνικής γεωλογίας είναι η ταξινόμηση βραχόμαζων η οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την γεωτεχνική μελέτη ενός τεχνικού έργου δηλ. η ποσοτικοποίηση της ποιότητας της βραχόμαζας με βάση κάποια χαρακτηριστικά της (δομή, κερματισμός, πλήθος ασυνεχειών, παρουσία νερού κτλ).

Γενικότερα όσον αφορά τις γεωλογικές μελέτες, είναι ένα κομμάτι που θα ασχοληθεί απαραίτητως ο εκάστοτε γεωλόγος και αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα των διαφόρων σταδίων μελετών οποιουδήποτε τεχνικού έργου, με τον τελικό στόχο να είναι ο γεωτεχνικός σχεδιασμός (τεύχος μελέτης, σχέδια κατασκευής του έργου κτλ), η πλήρης διερεύνηση γεωλογικών, γεωμορφολογικών, τεκτονικών, υδρογεωλογικών και τεχνικογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή και που επηρεάζουν το προς κατασκευή έργο.

Όμως οι ταξινομήσεις της βραχόμαζας αποτελούν τη ραχοκοκαλιά του εμπειρικού σχεδιασμού ενός τεχνικού έργου δηλαδή είναι ένα βασικό εργαλείο για την μηχανική προσέγγιση των πετρωμάτων και των διαφόρων συστημάτων ταξινόμησης τόσο της βραχόμαζας όσο και της δομής του βράχου στην γεωτεχνική μηχανική και σχετίζονται με τη μεταβλητότητα των σχηματισμών, των ιδιοτήτων τους και των χαρακτηριστικών του.

Ένα πέτρωμα μπορεί να έχει διαφορετικές ιδιότητες ανάλογα με την δομή του, τον κερματισμό του, την αποσάθρωσή του, την παρουσία νερού και την ορυκτολογία του. Έτσι αντιλαμβανόμαστε την σημαντικότητα του διαχωρισμού των πετρωμάτων σε διαφορετικούς τύπους και στη συνέχεια σε εδαφικές ενότητες με διαφορετικές γεωτεχνικές ιδιότητες, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με ποσοτικοποίηση/παραμετροποίηση των γεωυλικών εκτιμώντας την τεχνικογεωλογική συμπεριφορά τους. Συνεπώς ο τύπος της βραχόμαζας εξαρτάται από την συνολική γεωλογική ιστορία.

Στην περίπτωση πάλι που σε συγκεκριμένη θέση του έργου συναντηθούν ποικίλες γεωλογικές συνθήκες, οι οποίες οδηγούν π.χ. τόσο σε καλής ποιότητας βραχόμαζα όσο και σε κακής, τότε είναι σημαντικό να καθοριστεί η πλέον κρίσιμη

κατάσταση, όπου συγκεκριμένα γεωλογικά/τεκτονικά χαρακτηριστικά (π.χ. όπως μια ρηξιγενής ζώνη) έχουν έντονη επίδραση στη διαμόρφωση των συνθηκών ευστάθειας.

Η γεωμηχανική ταξινόμηση, τελικά καταλήγει σε συστάσεις για την καλύτερη επιλογή μέσων ενίσχυσης (αντιστήριξης ή υποστήριξης αντίστοιχα), το οποίο αποτελεί ένα ξεχωριστό κεφάλαιο μελέτης στην συνολική γεωλογική/γεωτεχνική έρευνα.

1.2 Μεθοδολογία

Οι αρχικές προσπάθειες ταξινόμησης οι οποίες στηρίχθηκαν σε χαρακτηριστικό γνώρισμα του υγιούς (ακέραιου) βράχου, όπως η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, είναι αναφορικά οι εξής :

1. Ο Ritter επιχείρησε την πρώτη προσπάθεια ταξινόμησης με εμπειρική προσέγγιση του σχεδιασμού σηράγγων για την κατάλληλη μέθοδο αντιστήριξης.
2. “Η ταξινόμηση του καναλιού του Παναμά” (αρχές 20ου αιώνα). Κατά τη διάνοιξη του καναλιού του Παναμά, έγινε μία σχετική προσπάθεια ταξινόμησης ιδιοτήτων της βραχώμαζας.
3. Ο Terzaghi (1946), με μία μέθοδο ταξινόμησης του βραχώδους φορτίου (Rock load classification method).
4. Ο Lauffer (1957) με ένα σύστημα ταξινόμησης βασισμένο στο χρόνο ευστάθειας υπόγειου ανοίγματος (Stand up time method).
5. Στη συνέχεια μια νέα Αυστριακή μέθοδος διάνοιξης σηράγγων (NATM) με συνεχείς τροποποιήσεις από άλλους Αυστριακούς μηχανικούς στην αρχική ταξινόμηση κατά Lauffer (1957 - 1965), οδήγησε στη διαμόρφωσή της.
6. Ο Deer (1967) χρησιμοποίησε το RQD, για τον ποσοτικό υπολογισμό της ποιότητας της βραχώμαζας.
7. Οι Deere - Miller (1966) πραγματοποίησαν μία ταξινόμηση με βάση την αντοχή των πετρωμάτων (σ_{ci}) και το λόγο του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας E_t προς την αντοχή σ_{ci} (το E_t λαμβάνεται για $\sigma = \sigma_{ci} / 2$).

8. Οι Franklin et al. (1971). Συνδυασμός δύο δεικτών: αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη και απόσταση των ασυνεχειών, για να παρουσιάσουν έναν δείκτη ποιότητας του πετρώματος.
9. Οι Wickham et al. το 1972. Ταξινόμηση RSR. Η RSR (Rock Structure Rating), δηλαδή η ταξινόμηση της βραχώδους δομής, είναι η πρώτη πλήρης ταξινόμηση πρόγνωσης της αντιστήριξης του εδάφους μετά από αυτήν του Terzaghi, που περιγράφει την ποιότητα της βραχομάζας αλλά και την κατάλληλη αντιστήριξη του σχηματισμού.
10. Οι Coates - Parsons (1966). Σύστημα ταξινόμησης με βάση την αντοχή του ακέραιου πετρώματος και τη συμπεριφορά αυτού στην παραμόρφωση.
11. Το Βρετανικό Γεωλογικό Ινστιτούτο (BGS) το 1970 και το ISRM το 1981, διαμόρφωσαν ταξινομήσεις του στηρίχθηκαν στο βαθμό αποσάθρωσης και στην αντοχή των πετρωμάτων, αντίστοιχα.

Τα πιο πρόσφατα πολυπαραμετρικά συστήματα ταξινόμησης είναι :

- Γεωμηχανική ταξινόμηση κατά Bieniawski (RMR)
- Γεωμηχανική ταξινόμηση κατά Barton (Q-system)
- Δείκτης GSI

Τα παραπάνω συστήματα ταξινόμησης με τις αντίστοιχες παραμέτρους και δείκτες που χρησιμοποιούνται στο καθένα από αυτά, είναι τα πλέον ευρέως εφαρμοζόμενα σήμερα.

Γενικά οι αναγκαίες παράμετροι για την εφαρμογή των συστημάτων ταξινόμησης κατά Bieniawski και Barton είναι:

- Αντοχή
- RQD
- Αριθμός συστημάτων ασυνεχειών
- Κατάσταση ασυνεχειών όπως άνοιγμα, πλήρωση, τραχύτητα, απόσταση
- Καθεστώς υπεδαφικού νερού, κτλ

Οι δύο πρώτες από αυτές (αντοχή και RQD) λαμβάνονται συνήθως από τα αποτελέσματα του γεωτρητικού προγράμματος, ενώ τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών, μετρούνται και εκτιμούνται κατά την διάρκεια των λοιπών εργασιών υπαίθρου.

Το σύστημα GSI (Geological Strength Index) αρχικώς προτάθηκε από τον Hoek (1995), και με βελτιώσεις από τους Hoek, Marinos & Benissi το 1998 και το 2000, και δίνει ιδιαίτερη έμφαση σε σχετικώς πτωχής ποιότητας βραχώμαζες με $RMR < 40$ αλλά

με λειτουργία αλληλοεμπλοκής μεταξύ των βραχωδών τεμαχών. Τέτοιου τύπου βραχώμαζες δομούν ένα σημαντικό ποσοστό του Ελληνικού χώρου και συνεπώς έχουν μεγάλη σημασία στο σχεδιασμό υπογείων έργων. Το σύστημα GSI βασίζεται στη συναξιολόγηση δυο παραμέτρων :

- Της δομής της βραχώμαζας, που χαρακτηρίζει το βαθμό αλληλοεμπλοκής των βραχωδών τεμαχών και
- Της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής αντοχής τους

Έτσι με τα διάφορα συστήματα ταξινόμησης, αναλύονται οι παράμετροι αναφοράς, προκύπτει η βαθμονόμηση αυτών, γίνεται η τελική ποιοτική βαθμονόμηση της βραχώμαζας και εκτιμώνται τα όρια κύμανσης των γεωμηχανικών παραμέτρων αυτής.

Ενδεικτικά επισυνάπτουμε τις παρακάτω δημοσιεύσεις :

1. *“A geo - engineering classification for rocks and rock masses”*

“Μία γεωτεχνική ταξινόμηση για βράχους και βραχώμαζες”

Ramamurthy, T., 2004

Σε αυτό το άρθρο γίνεται μία προσπάθεια να αξιολογηθεί η αξιοπιστία της πρόβλεψης της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και του αντίστοιχου βαθμού ποιότητας της βραχώμαζας. Αυτές οι δύο βασικές ιδιότητες της μηχανικής κατά τις οποίες εκτιμάται η ποιότητα της βραχώμαζας με τους δείκτες RMR, Q και GSI δεν δείχνουν σχεδόν καμία μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας με την αλλαγή της ποιότητας της βραχώμαζας από πολύ καλή έως πολύ κακή. Ωστόσο ο συντελεστής αναλογίας που λαμβάνεται από τις σχέσεις που περιλαμβάνονται στον κοινό παράγοντα J_r , ο οποίος βασίζεται σε πολλά πειραματικά δεδομένα δηλώνει μία συνεχή μείωσή του με την μείωση της ποιότητας της βραχώμαζας σε αντίθεση με άλλες προσεγγίσεις. Επιτρέπει επίσης να εκτιμηθεί η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας σε ανεμπόδιστη θλίψη ή κάτω από την ύπαρξη οποιονδήποτε πλευρικών πιέσεων.

Το μέτρο ελαστικότητας και η τάση αστοχίας σε συνθήκες ανεμπόδιστης θλίψης έχουν παρουσιαστεί από μία μεγάλη βάση πειραματικών δεδομένων σε προηγούμενες δημοσιεύσεις. Μερικές από αυτές τις σχέσεις εγκρίθηκαν για την επαλήθευση της απόκρισης των ρωγματομένων δοκιμίων, για την απόκριση της βραχώμαζας κατά διάρκεια της εκσκαφής υπόγειων τμημάτων ορυχείων ή έργων υποδομής, για την δημιουργία ειδικών καμπυλών αντίδρασης του εδάφους

συμπεριλαμβανομένης της έκτασης της διαρρηγμένης ζώνης και για την φέρουσα ικανότητα των θεμελίων.

Ο κοινός παράγοντας συνδέεται πλέον με τους δείκτες RMR, Q και GSI. Η πρόβλεψη της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας εμφανίζεται να είναι πιο αξιόπιστη. Για την ταξινόμηση της βραχόμαζας με βάση τις ιδιότητες, η ταξινόμηση “Deere και Miller” που ισχύει για υγιείς βραχόμαζες έχει τροποποιηθεί κατάλληλα. Τα αποτελέσματα των διαφόρων τύπων αστοχίας των ασυνεχειών δημιούργησαν οριστικές αλλαγές στο μέτρο ελαστικότητας που αντιστοιχεί σε υγιή βραχόμαζα στο τροποποιημένο διάγραμμα Deere και Miller. Μία γεωμηχανική ταξινόμηση εξελίχθηκε συμπεριλαμβάνοντας την αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας, τον βαθμό αποσάθρωσης και την λιθολογία της βραχόμαζας.

2. *“Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q - system ”*

“Χρήση και κατάχρηση των συστημάτων ταξινόμησης βραχόμαζας με ιδιαίτερη αναφορά στο σύστημα ταξινόμησης - Q”

Palmstrom, A., Broch, E., 2006

Τα συστήματα ταξινόμησης έχουν αποκτήσει μεγάλη αξία και χρησιμοποιούνται συχνά στην γεωμηχανική και στον σχεδιασμό. Ωστόσο, όλα αυτά τα συστήματα έχουν περιορισμούς ώστε να εφαρμόζονται σωστά και με προσοχή. Το εν λόγω άρθρο περιγράφει την ιστορία του συστήματος ταξινόμησης Q που εισήχθη το 1974, και αργότερα την εξέλιξή του. Αναλύονται οι παράμετροι, και η σημασία τους για τα φυσικά γεωλογικά χαρακτηριστικά που προσπαθούν να προσομοιώσουν. Αυτό ισχύει τόσο για την αρχική αξιολόγηση της ποιότητας βραχόμαζας ώστε να εκτιμηθούν τα μέτρα αντιστήριξης, όσο και για τις μεταγενέστερες προσπάθειες να γίνει η μέθοδος ένα είδος γενικής ταξινόμησης της βραχόμαζας με πολλές εφαρμογές. Αυτό περιλαμβάνει επίσης την πρόσφατη εισαγωγή του QTBM, το οποίο επιτρέπει εκτιμήσεις διεύθυνσης και εκσκαφής για το TBM, καθώς επίσης και προσπάθειες για εφαρμογή του συστήματος Q για να εκφραστούν οι επιπτώσεις πριν την έκχυση ρευστοκονιάματος.

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι το σύστημα Q, το οποίο χρησιμοποιείται με πλήρη επίγνωση των περιορισμών του, μπορεί να εφαρμοστεί για την ταξινόμηση σταθερότητας και εκτίμησης υποστηρίξεων των σηράγγων, κατά προτίμηση σε βράχους με διακλάσεις, ενώ είναι λιγότερο χρήσιμο για την εκτίμηση υποστήριξης κατά τη διάρκεια της κατασκευής και δεν συνίσταται η χρήση του. Επειδή

οι τιμές του συστήματος Q βασίζονται σε πολλαπλασιασμό, είναι εύκολα αμφισβητήσιμη η ακρίβειά του σε σχέση με ένα σύστημα RMR ή GSI, όμως οι συγγραφείς του συγκεκριμένου άρθρου έχουν αντίθετη άποψη. Αξίζει να σημειώσουμε ότι στη Νορβηγία η χρήση του συστήματος Q αυξάνεται συνεχώς, ιδίως στο στάδιο του προγραμματισμού σε σχέση με τις εκτιμήσεις των ιδιοτήτων βραχώμαζας και το αναμενόμενο μέγεθος της υποστήριξης.

Τέλος συνίσταται από τους συγγραφείς του άρθρου οι τιμές Q να μην συσχετίζονται με άλλα συστήματα ταξινόμησης και κλείνοντας με λόγια του Karl Terzaghi στα τελευταία χρόνια της ζωής του : " Ο γεωτεχνικός πρέπει να εφαρμόσει τη θεωρία και τον πειραματισμό αλλά όμως με την ψύχραιμη εφαρμογή τους μέσα στο πλαίσιο της αβεβαιότητας της φύσης. Η τελική απόφαση εισέρχεται μέσω της Τεχνικής Γεωλογίας".

3. *“A comparative study of the determination of rock mass deformation modulus by using different empirical approaches”*

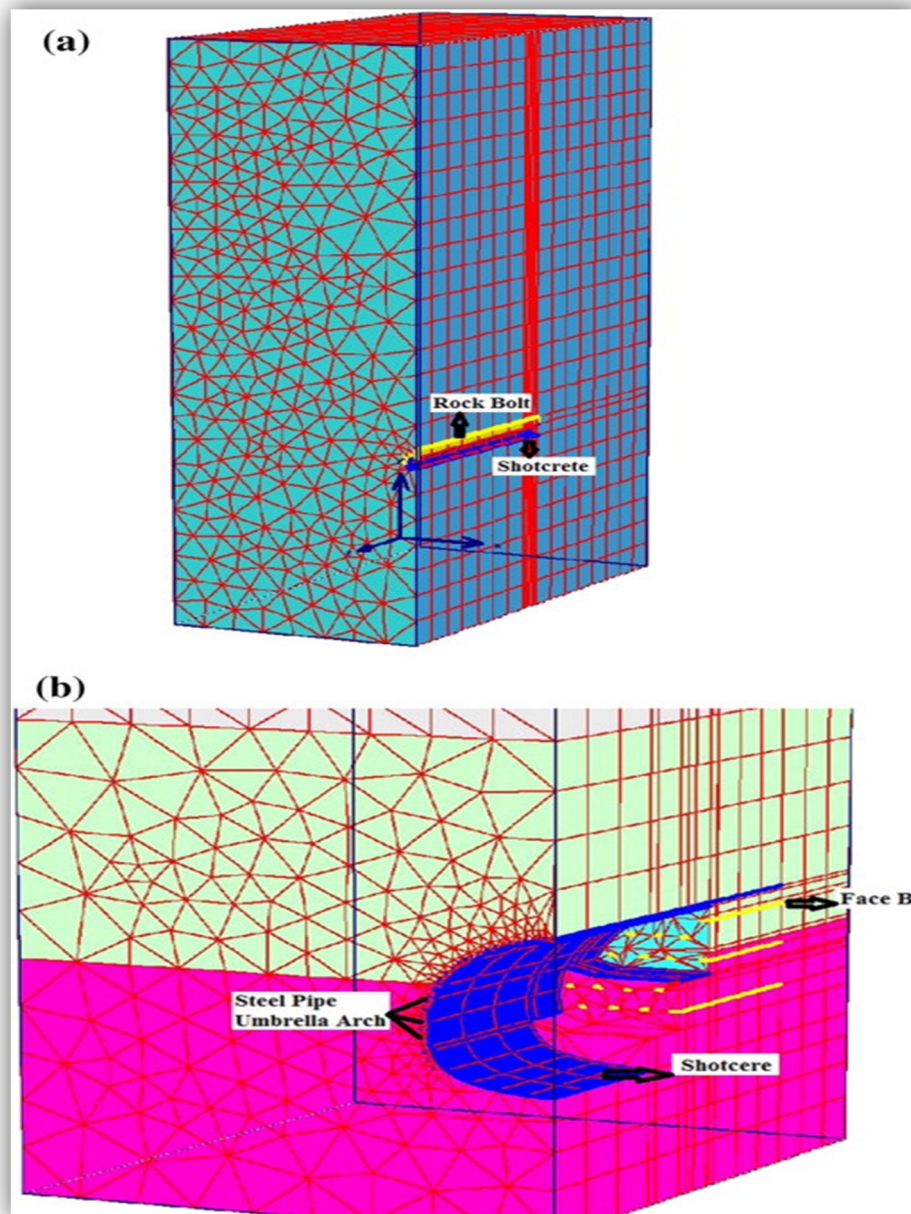
“Μια συγκριτική μελέτη του προσδιορισμού του συντελεστή παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας με τη χρήση διαφόρων εμπειρικών προσεγγίσεων”

Aksoya, C.O., Geniş, M., Aldas, G.U., Aldas, G.U., Özacar, V., Özer, S.C., 2012

Στην παρούσα μελέτη οι μετρήσεις λήφθηκαν από περιπτώσεις 12 υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων και σιράγγων των πόλεων Tokat, Amasya, Bartın, Ordu, καθώς και 3 από σήραγγες του μετρό της Σμύρνης και χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά συστήματα ταξινόμησης (RMR, Q, GSI, RMI). Η παραμορφωσιμότητα προσδιορίζεται βάσει εμπειρικών εξισώσεων που προτάθηκαν από τους Nicholson και Bieniawski (1990), Palmstrom (1996), Palmstrom and Singh (2001), Barton (2002), Sonmez et al. (2004), Hoek και Diederichs (2006). Ο βασικός λόγος για την επιλογή αυτών των εξισώσεων είναι ότι ενημερώθηκαν εμπειρικά και δημοσιεύτηκαν πρόσφατα. Όλες οι παράμετροι που επιλέχθηκαν είναι οι ίδιες για όλες τις περιπτώσεις. Η ανάλυση της πλαστικότητας και της ελαστικότητας της βραχώμαζας γίνεται με το κριτήριο Mohr - Coulomb.

Σταθμοί μέτρησης στήθηκαν σε ορισμένα σημεία (στις σήραγγες) για τον προσδιορισμό πιθανής σύγκλισης. Ελάχιστα προβλήματα προέκυψαν κυρίως όσον αφορά τις εργαστηριακές μεθόδους για τον προσδιορισμό των διαφορετικών ενοτήτων παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα των διαφόρων αριθμητικών μοντέλων συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα των μετρήσεων και παρατίθενται όπως π.χ. στην περίπτωση σκληρής βραχώμαζας και μεγάλου μεγέθους των μπλοκς, τα αριθμητικά

αποτελέσματα βάσει εξισώσεων των μοντέλων που προτείνονται από Palmstrom και Singh (2001), είναι πιο κοντά στις επί τόπου μετρήσεις.



Σχήμα 1.1 : Απλή άποψη των μοντέλων πλέγματος,
(α) υδροηλεκτρικού σταθμού σε σήραγγες, (β) σήραγγες του μετρό
Aksoya, C.O., Geniş, M., Aldas, G.U., et al., 2012

Η αύξηση των τεχνικών έργων κατά την τελευταία δεκαετία, έχει οδηγήσει σε μια αύξηση της σημασίας του προσδιορισμού των παραμέτρων βραχωμάζας. Παρά το γεγονός ότι οι ιδιότητες του πετρώματος συνήθως καθορίζονται εργαστηριακά, μπορούν επίσης να προσδιοριστούν και από τις ειδικές επί τόπου δοκιμές (in situ).

Οι επί τόπου δοκιμές είναι δαπανηρές και χρονοβόρες, με συνέπεια να αναπτυχθούν εμπειρικές εξισώσεις για την εκτίμηση των ιδιοτήτων της βραχόμαζας από διάφορους ερευνητές. Στην αριθμητική προσομοίωση, οι ιδιότητες της βραχόμαζας είναι εξίσου σημαντικές. Επιπλέον, έχοντας τα αριθμητικά αποτελέσματα, μπορεί να γίνει μια καλή ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη και τα ήδη γνωστά αριθμητικά μοντέλα, η οποία είναι πολύ σημαντική.

Η συγκεκριμένη μελέτη έχει ως στόχο την ανάλυση της σύγκρισης των διαφορετικών εμπειρικών εξισώσεων για τον προσδιορισμό του μέτρου παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας η οποία προτάθηκε από διάφορους ερευνητές με τη χρήση κάποιων μετρήσεων του πεδίου μετατοπίσεως και τα διάφορα αριθμητικά αποτελέσματα των μοντέλων αυτών.

1.3 Ανάλογα με το αντικείμενο μελέτης

1.3.1 Άρρηκτος βράχος

Αρχικά η μελέτη του άρρηκτου βράχου μας παραπέμπει σε εκτίμηση αντοχής και παραμορφωσιμότητας με εργαστηριακές δοκιμές στο βράχο με σκοπό να προσδιορίσουμε αστοχίες και παραμορφώσεις του άρρηκτου βράχου υπολογίζοντας την διατμητική αντοχή, δηλ. την τάση που πρέπει να εφαρμοστεί ώστε να προκληθεί η αμοιβαία μετατόπιση των κόκκων ή τεμαχών βράχου και η οποία εκφράζεται από την :

- Συνοχή c (KPa) : Εκφράζει το “δέσιμο” των κόκκων στον άρρηκτο βράχο ή τεμαχών στη βραχόμαζα και
- Γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi_{(o)}$: Τριβή ανάμεσα στα ορυκτά ή στα τεμάχια που αντιστέκεται στη διάτμηση

1.3.2 Βραχόμαζα

Στη συνέχεια η μελέτη της βραχόμαζας μας οδηγεί σε εκτίμηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας με εργαστηριακές δοκιμές αλλά και με επί τόπου δοκιμές (υψηλό κόστος και πρόβλημα κλίμακας), καθώς επίσης και με ανάστροφες αναλύσεις

(ακριβέστερη μέθοδος) με τη βοήθεια χρήσης ταξινομήσεων βραχόμαζας (RQD, Q, RMR, GSI κτλ).

Έπειτα υπάρχουν εμπειρικές μέθοδοι «ποσοτικοποίησης» της ποιότητας της βραχόμαζας, με βάση κάποια χαρακτηριστικά της όπως η δομή και ο κερματισμός, η αντοχή άρρηκτου βράχου, η ποιότητα και το πλήθος ασυνεχειών.

Για να προσδιορίσουμε την αντοχή της βραχόμαζας χρειαζόμαστε τις ακόλουθες παραμέτρους:

1. Για την αντοχή του άρρηκτου βράχου :
 - Μονοαξονική θλιπτική αντοχή σ_{ci}
 - Σταθερά υλικού m_i
2. Για την απομείωση της αντοχής του άρρηκτου βράχου :
 - Βαθμονόμηση της ποιότητας της βραχόμαζας (συστήματα ταξινόμησης, GSI, RMR)
 - Διαταραχή της βραχόμαζας κατά την κατασκευή (D)

Σε πολύ μεγάλα βάθη η βραχόμαζα έχει τόσο σφικτή δομή που το πέτρωμα πλησιάζει τη συμπεριφορά του άρρηκτου βράχου.

1.3.3 Ασυνέχειες

Τέλος η διάκριση άρρηκτου βράχου και βραχόμαζας δηλαδή η ύπαρξη ή όχι ασυνεχειών μας παραπέμπει αυτομάτως στην εξέταση του γεωολογικού και στον εντοπισμό των ασυνεχειών με αντίστοιχη μελέτη της διατμητικής τους αντοχής.

Πολύ σημαντικό λοιπόν είναι να αναρωτηθούμε “τι” είναι αυτό που καθορίζει κυρίως τη συμπεριφορά ενός βραχώδους σχηματισμού και αυτό είναι το καθεστώς διάρρηξης που χαρακτηρίζει την βραχόμαζα άρα οι ασυνέχειες των βραχωδών σχηματισμών, η διάκριση των οποίων βοηθά στο να αποκτήσουμε μια καλύτερη εικόνα αναφορικά με τις αντοχές της.

Γενικά η διατμητική αντοχή της βραχόμαζας διαμορφώνεται από τον αριθμό, τα κύρια χαρακτηριστικά και την αλληλοεμπλοκή των συστημάτων των ασυνεχειών που την διασχίζουν. Οι ασυνέχειες ταξινομούνται - ομαδοποιούνται κι αυτές σε συστήματα τα μέλη των οποίων έχουν λίγο πολύ κοινό προσανατολισμό και συμπεριφορά που σχετίζεται με μια σειρά άλλων παραμέτρων όπως η συνέχειά τους (μήκος), η απόσταση μεταξύ τους, το άνοιγμα, το υλικό πλήρωσης, η αντοχή, η τραχύτητα των τοιχωμάτων και οι συνθήκες του νερού.

Οι κυριότερες κατηγορίες ασυνεχειών, που συναντάμε στα πετρώματα είναι οι ακόλουθες :

- Στρώση (Bedding plane)
- Σχιστότητα (Schistosity)
- Διαρρήξεις/διακλάσεις (Joints)
- Ρήγματα (Faults)
- Σχισμός (Cleavage) και θραύση σε επιφάνειες αδυναμίας
- Φύλλωση (Foliation) και προσανατολισμός ορυκτών

Για την καταγραφή και ανάλυση των τρισδιάστατων σχημάτων που προκύπτουν από την παρουσία των ασυνεχειών, ρηγμάτων κτλ μέσα στη μάζα του βράχου και όχι μόνο, χρησιμοποιείται ευρύτατα η στερεογραφική προβολή στους βασικούς πυλώνες της γεωτεχνικής μηχανικής, δηλαδή στην εδαφοδυναμική (σεισμοί κλπ), στην τεχνική γεωλογία και στη βραχομηχανική. Συγκεκριμένα μεταφέροντας στο δίκτυο ισοεμβαδικής προβολής (δίκτυο Schmidt) τους πόλους των επιπέδων που μετρήσαμε, μπορούμε να προχωρήσουμε στη στατιστική τους επεξεργασία που τα τελευταία χρόνια γίνεται πλέον με τη χρήση ειδικών προγραμμάτων στον υπολογιστή (π.χ. το dips).

1.3.4 Νερό

Επίσης ένα ξεχωριστό κεφάλαιο μελέτης θα λέγαμε, καθοριστικού παράγοντα της ευστάθειας ή γενικότερα της ποιότητας της βραχώμαζας, είναι όπως προαναφέρθηκε η παρουσία του νερού με ότι αυτό μπορεί να συνεπάγεται (αύξηση πίεσης στις εφελκυστικές ρωγμές, αύξηση βάρους της βραχώμαζας γενικά, διάβρωση πετρωμάτων, διόγκωση, πήξη και μετατροπή σε πάγο κτλ). Αιτία μείωσης της αντοχής του πετρώματος είναι και η πίεση που εξασκεί το νερό των πόρων στο πέτρωμα.

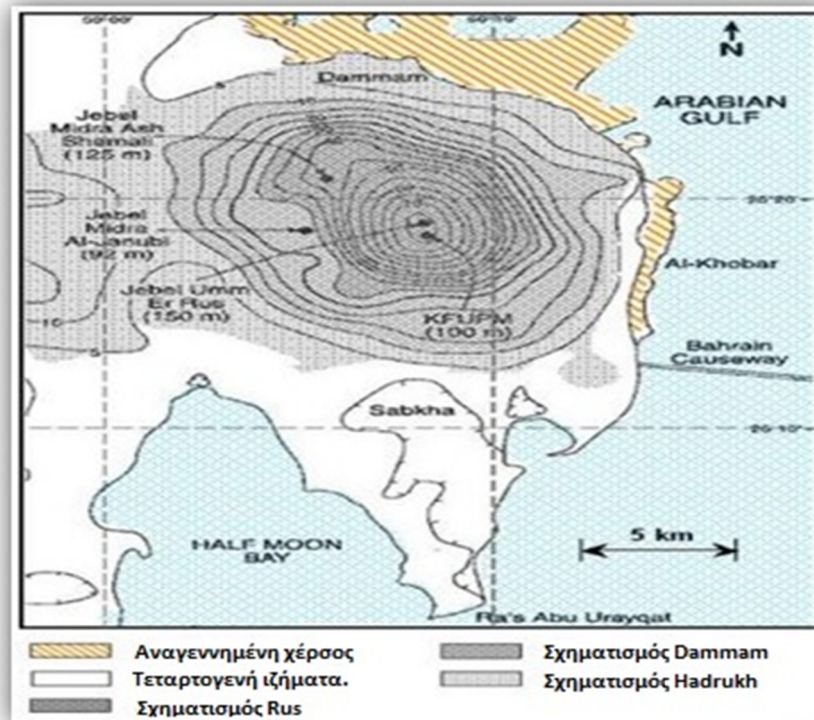
Σε άρρηκτα πετρώματα με πολύ μικρό πορώδες μπορεί να θεωρηθεί ότι οι πιέσεις των πόρων δεν προλαβαίνουν να εκτονωθούν κατά την εξέταση των δοκιμών. Αντίθετα, η πίεση του νερού των ασυνεχειών σε διακλασμένη βραχώμαζα, αναμένεται ότι θα διαχυθεί πιο γρήγορα από αυτή των πόρων του άρρηκτου πετρώματος. Σε κερματισμένα επομένως πετρώματα, στα οποία η αστοχία αναμένεται στις επιφάνειες των διακλάσεων, η αρχή των ενεργών τάσεων θα εφαρμόζεται για πίεση πόρων του νερού των ασυνεχειών.

Ενδεικτικά για την επίδραση του νερού παραθέτουμε την παρακάτω δημοσίευση :

4. “Engineering behaviour of clay-bearing calcium sulphate in Dammam Dome, eastern Saudi Arabia”

“Η μηχανική συμπεριφορά αργίλου με θειικό ασβέστιο στο Dammam Dome, στην ανατολική Αραβία”

Azam, S., 2008



Σχήμα 1.2 : Γεωλογία και τοπογραφία του Dammam Dome
(μετά από Tleel 1973, Weijermars, 1999)

Οι περισσότεροι τοπικοί σχηματισμοί στην ανατολική Σαουδική Αραβία περιέχουν μεταβλητές ποσότητες αργίλου και θειικού ασβεστίου. Ως εκ τούτου η κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς αυτών των υλικών αποτελεί προϋπόθεση για τις κατασκευές. Η παρούσα δημοσίευση περιγράφει την συμπεριφορά της αργίλου από έρευνες βασισμένες σε εργαστηριακές μεθόδους δειγμάτων που ελήφθησαν από την περιοχή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απορρόφηση νερού από τον ανυδρίτη και την γύψο συσχετίζεται σε ικανοποιητικό βαθμό με την κρυστάλλωση των δύο αυτών ορυκτών. Ο δείκτης και οι ιδιότητες διόγκωσης ακολούθησαν μία γραμμική τάση με την αλλαγή της περιεκτικότητας σε άργιλο. Η δυναμική της διόγκωσης και η πίεση που ασκείται μετρήθηκε στο 8% και με τιμή 245 kPa για τον ανυδρίτη και 1,4% και 56 kPa για την γύψο. Η επιφανειακή ενυδάτωση των αργίλων αποτέλεσε τον κύριο μηχανισμό διόγκωσης κατά την έρευνα των γεωυλικών.

1.4 Σκοπός ταξινόμησης

Τελικός στόχος είναι οι παράμετροι (αντοχή και παραμορφωσιμότητα) της βραχώμαζας. Ο γεωτεχνικός σχεδιασμός των έργων απαιτεί αριθμούς όσον αφορά την αντοχή και την παραμορφωσιμότητα του βράχου, τις επιτόπου τάσεις και την πίεση των πόρων. Οι αριθμοί αυτοί απαιτούνται για τον υπολογισμό της ευστάθειας των πρανών, την φέρουσα ικανότητα του εδάφους θεμελίωσης, την ικανότητα υποστήριξης στην εκσκαφή υπογείων έργων κτλ. Οι αριθμοί αυτοί εξαρτώνται άμεσα από τις ιδιαιτερότητες του γεωυλικού.

Η ανάπτυξη ή η μεταβολή κυρίως των διατμητικών τάσεων είναι αυτή που προκαλεί τις παραμορφώσεις και η αντοχή περιγράφει ακριβώς την “άμυνα” του γεωυλικού (βράχου - βραχώμαζας) στη διάτμηση αυτή.

Είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστούν οι παράμετροι που περιγράφουν τη βραχώμαζα ως ενιαίο, ομοιογενές και ισότροπο υλικό. Χρησιμοποιώντας το κατάλληλο κριτήριο αστοχίας, αρχικά υπολογίζουμε τις αντίστοιχες παραμέτρους του άρρηκτου βράχου και στη συνέχεια με απομείωση αυτών καταλήγουμε στις αντίστοιχες ιδιότητες της βραχώμαζας. Τα τεχνικά έργα σχεδόν κατά κανόνα κατασκευάζονται επί ή εντός κερματισμένου - διαταραγμένου βραχώδους υλικού κι όχι άρρηκτου βράχου.

Ανάλογα λοιπόν με το πως κατανέμονται οι τάσεις στο έδαφος ή στο βράχο, όπου κατασκευάζονται τα τεχνικά έργα, εξαρτώνται οι παραμορφώσεις και οι αστοχίες που μπορεί να προκληθούν στα γεωυλικά. Υπολογίζονται είτε αναλυτικά είτε με αριθμητικές μεθόδους με σκοπό να προσδιορίσουμε το “πως μπορεί να αστοχήσει η βραχώμαζα στην κάθε περίπτωση”. Αξίζει να σημειώσουμε ότι στις περιπτώσεις που η αντοχή και η παραμόρφωση δεν καθορίζεται από το ασθενέστερο υλικό, σύμφωνα με τα κατώτερα όρια τιμών των χαρακτηριστικών των αντίστοιχων παραμέτρων, τότε χρησιμοποιούνται κατάλληλες μέθοδοι μέσου όρου. Σημαντικό στοιχείο επίσης είναι ότι κατά την κατασκευή τεχνικών έργων οι τάσεις μεταβάλλονται δραματικά.

Εκτός από τον εντοπισμό των παραμέτρων που έχουν τη μεγαλύτερη επιρροή στη συμπεριφορά της βραχομάζας, την υποδιαίρεσή της σε κατηγορίες διαφορετικής ποιότητας και τέλος την παροχή ποσοτικών δεδομένων για τον τελικό σχεδιασμό και την λήψη των κατάλληλων μέτρων αντιστήριξης ή υποστήριξης αντίστοιχα, σημαντικός σκοπός της ταξινόμησης είναι και ο συσχετισμός των τοπικών συνθηκών μιας περιοχής με τις συνθήκες άλλων περιοχών.

2. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΣΘΕΝΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΒΡΑΧΟΜΑΖΩΝ

2.1 Ασθενείς και σύνθετες βραχόμαζες

2.1.1 Γενική ταξινόμηση

Σε γενικές γραμμές ταξινομώντας τις βραχόμαζες σε “ασθενείς” και “σύνθετες” κάποια από τα κοινά στοιχεία που χαρακτηρίζουν τις ασθενείς θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι :

- η τεκτονική καταπόνηση που υποβαθμίζει την όποια αρχική ποιότητα της βραχόμαζας
- η παρουσία γενικά αργίλου η οποία μας παραπέμπει σε επίδραση νερού
- η αποσάθρωση καθώς και
- κάποιες καρστικές κοιλότητες πληρωμένες με εδαφικά υλικά

ενώ οι σύνθετες εμφανίζουν λιθολογική, δομική και γεωτεχνική ετερογένεια σε μακροσκοπική κλίμακα και χαρακτηρίζονται κυρίως από :

- Εναλλαγές ικανών μεγάλης γενικά αντοχής πετρωμάτων και μη ικανών μικρής γενικά αντοχής
- Σχηματισμούς με στρωσιγένεια, αλλαγή της δομής με το βάθος καθώς και στρώματα με διάφορα πάχη
- Έντονη τεκτονική διαταραχή τέτοια που μεταβάλλει την αρχική δομή δημιουργώντας τεκτονικά μίγματα και χαοτικές δομές
- Διαφορετικό βαθμό αποσάθρωσης στα τμήματα μιας σύνθετης βραχόμαζας καθώς και καρστικοποιημένα τμήματα που εμφανίζουν έγκοιλα

χωρίς να είναι απόλυτο ότι αυτά τα χαρακτηριστικά είναι πάντα ίδια για τους διάφορους γεωλογικούς/λιθολογικούς τύπους των πετρωμάτων. Επίσης γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι στην περίπτωση μιας σύνθετης βραχόμαζας, εξαιτίας ακριβώς της

συνθετότητάς της, η διερεύνηση και οριοθέτηση συγκεκριμένων ζωνών καθίσταται πιο δύσκολη.

Η διερεύνηση της συμπεριφοράς της βραχομάζας δείχνει ότι οι παράμετροι δεν είναι απολύτως ανεξάρτητες μεταξύ τους αλλά υπάρχει μια αλληλεπίδραση. Υπάρχουν περιπτώσεις όμως όπως σε κάποια πρηνή όπου η ταξινόμηση της βραχομάζας δεν έχει νόημα, όταν π.χ. το γεωυλικό είναι αυστηρά ανισότροπο και έτσι την ευστάθεια του πρηνούς θα την καθορίσει η αντοχή των ασυνεχειών.

2.1.2 Ανάλογα με το είδος του κατασκευαστικού έργου

Μελετώντας αντίστοιχα κάθε έργο ξεχωριστά θα επικεντρώσουμε την προσοχή μας σε διαφορετικά σημεία μελέτης, όπως για παράδειγμα στα πρηνή (slopes) θα δώσουμε έμφαση στον έλεγχο της ευστάθειας πρηνούς δηλ. την γωνία/κλίση της πλαγιάς, την λιθολογία του γεωυλικού, την παρουσία υπόγειων νερών κτλ, καθώς επίσης και σε μία πιθανή μελλοντική κατολίσθηση (slump) ή ακόμα και μια κατολίσθηση που έγινε στο συγκεκριμένο σημείο παλαιότερα (ένα σημαντικό ποσοστό κατολισθήσεων εκδηλώνονται κατά τη διάρκεια ή και λίγο μετά από έντονες σεισμικές δράσεις). Έτσι θα πρέπει να απαντήσουμε σε ερωτήματα όπως “τί καθορίζει την κατολίσθηση”, “πότε μας ενδιαφέρει η αντοχή των ασυνεχειών” μελετώντας αντίστοιχα την διατμητική αντοχή τους ή όχι, “τί είδους ολίσθηση έχουμε ή αναμένουμε”, “ ποιές είναι οι προϋποθέσεις ολίσθησης”.

Στις σήραγγες (tunnels) ο καθορισμός των τύπων βραχώμαζας θα γίνει με βάση την λιθολογία, τον κερματισμό/δομή (τεκτονισμός αλλά και στοιχεία γένεσης όπως στρώσεις/σχιστότητα), τα χαρακτηριστικά αποσάθρωσης, τα χαρακτηριστικά περατότητας, την αλλαγή ισορροπίας/τάσεων στο βουνό, για να καταλήξουμε στο “πόσο εύκολα σκάβεται ένα πέτρωμα”, στην επιλογή ισχυρών ή ελαφριών μέτρων υποστήριξης και στον τρόπο διάνοιξης της σήραγγας (διάτρηση, εκσκαφή και επανεπίχωση ή υποστήριξη και εκσκαφή).

Ενώ στα φράγματα (dams) θα εξετάσουμε εάν οι πλαγιές είναι σταθερές ή ολισθαίνουν, την αντοχή των πετρωμάτων στη βάση του φράγματος (φέρουσα ικανότητα) και την στεγανότητά τους, ώστε αντιστοίχως να επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος κατασκευής του φράγματος (χωμάτινο, βαρύτητας ή τοξωτό).

Για την ορθή συνολική περιγραφή των βραχωδών σχηματισμών χρειάζονται και άλλες κύριες παράμετροι όπως η δομή (στρώση, σχιστότητα κτλ), το μέγεθος των κόκκων (σχετίζεται άμεσα με τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών), το χρώμα (διπλή συνήθως έκφραση π.χ. καστανέρυθρο) καθώς και ο τύπος του πετρώματος.

2.2 Ασθενείς βραχώμαζες

2.2.1 Γενικά

Η μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων καθορίζεται από :

1. την φύση των πετρωμάτων
2. τον τεκτονισμό και
3. την αποσάθρωση

Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες ένα γεωυλικό αποκτά πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά εξαρτάται από τους τρεις αυτούς παράγοντες. Ως φύση των πετρωμάτων εννοούμε τις ιδιότητες που αποκτάει ένα πέτρωμα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες σχηματισμού π.χ. ιζηματογένεση βαθιάς θάλασσας, διαγένεση κτλ.

Στην παρούσα εργασία ενδιαφερόμαστε για τις μηχανικές ιδιότητες, ιδιότητες που εν τέλει αποκτάει ένα πέτρωμα από πρωτογενή αίτια δηλαδή τη χημική του σύσταση (μαλακά ή σκληρά ορυκτά) καθώς και τον βαθμό συγκόλλησης των κόκκων που είναι συνάρτηση του βαθμού διαγένεσης ή από δευτερογενή αίτια δηλαδή ενδεχόμενη τεκτονική καταπόνηση και αποσάθρωση. Ένας άλλος παράγοντας είναι η δομή που στην περίπτωση των ιζηματογενών πετρωμάτων έχουμε συχνά την παρουσία στρώσεων στο πέτρωμα όπου κατά μήκος έχουμε χαμηλότερες αντοχές από ότι σε άλλες διευθύνσεις της βραχώμαζας. Επίσης όσο πιο λεπτοπλακώδες είναι το πέτρωμα τόσο χαμηλότερες αντοχές παρουσιάζει. Δηλαδή ορισμένοι τύποι πετρωμάτων παρουσιάζουν ανάλογα με την φύση τους και στην υγιή τους κατάσταση (χωρίς δηλαδή να έχουν υποστεί τεκτονισμό ή αποσάθρωση) χαμηλές αντοχές.

Επίσης γίνεται αναφορά στους γεωλογικούς σχηματισμούς που παρουσιάζουν προβληματική συμπεριφορά, δηλαδή είναι επιρρεπείς στο να αστοχήσουν. Εδώ ακριβώς διαχωρίζονται και οι βραχώμαζες στις μαλακές και ασθενείς. Είναι σημαντικό να δωθεί έμφαση σε αυτόν τον διαχωρισμό έτσι ώστε να συμπεριληφθούν στην πρώτη κατηγορία οι σχηματισμοί εκείνοι που αντιμετωπίζονται ως προβληματικοί εξ αρχής ανεξαρτήτως δευτερογενών διεργασιών που ενδεχομένως να επιδεινώσουν την κατάστασή του και στην δεύτερη, οι σχηματισμοί εκείνοι που οι δευτερογενείς αυτές διεργασίες, τους κατέστησαν γεωτεχνικά ασθενείς.

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σ_{ci} (UCS), και το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας E_t , του άρρηκτου πετρώματος, είναι παράμετροι άμεσα εφαρμόσιμοι στις μελέτες έργων σχετικά με:

- τις υπόγειες εκσκαφές και τη διάνοιξη σηράγγων
- την εκσκαφή πρανών και ορυγμάτων
- την θεμελίωση σημαντικών κατασκευών

Επιπλέον, η αντοχή αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο για τα συστήματα χαρακτηρισμού και γεωτεχνικής ταξινόμησης του άρρηκτου πετρώματος και της βραχώμαζας.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	σ_{ci} (MPa)	ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ
Εξαιρετικά ισχυρό - Πολύ υψηλή αντοχή	> 250	Δεν θραύεται με γεωλογικό σφυρί	Χαλαζίτης, δολερίτης, γάββρος, υγής βασάλτης, γνεύσιος, γρανίτης, διαβάσης, πυριτιόλιθος
Πολύ ισχυρό - Υψηλή αντοχή	100 - 250	Θραύεται μετά από πολλούς κτύπους με γεωλογικό σφυρί	Μάρμαρο, αμφιβολίτης, γρανοδιορίτης, περιδοτίτης, γνεύσιος, ασβεστόλιθος, ρυόλιθος, τόφφος
Ισχυρό - Μέτρια Αντοχή	50 - 100	Θραύεται με περισσότερο από έναν κτύπο με γεωλογικό σφυρί	Ψαμμίτης, μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος, μαργαϊκός ασβεστόλιθος
Μετρίως ισχυρό - Χαμηλή Αντοχή	25 - 50	Δεν χαράσσεται με μαχαίρι, θραύεται με ένα μόνο κτύπο με γεωλογικό σφυρί	Ψαμμίτης μέτρια συνεκτικός, ιλυόλιθος, αργιλικός σχιστόλιθος, φυλλίτης, σκυρόδεμα
Ασθενές - Πολύ χαμηλή αντοχή	5 - 25	Χαράσσεται δύσκολα με γεωλογικό μαχαίρι	Κιμωλία, αργιλόλιθος, αργιλικός σχιστόλιθος, κρητίς, ποτάσα, μάργα, ορυκτό αλάτι, αποσαθρωμένα πετρώματα
Πολύ ασθενές	1 - 5	Θρυμματίζεται με ισχυρά χτυπήματα με γεωλογικό σφυρί, χαράσσεται με μαχαίρι	Μαλακοί βράχοι, έντονα αποσαθρωμένοι ή εξαλλοιωμένοι βράχοι
Εξαιρετικά ασθενές	0.25 - 1	Χαράσσεται με το νύχι	Έδαφος, στιφρό υλικό πλήρωσης ρήγματος

Σχήμα 2.1 : Τιμές της αντοχής των πετρωμάτων σε μονοαξονική θλίψη UCS - σ_{ci} , (Anonymous, ISRM 1981)

Ο όρος «ασθενής» αντιπροσωπεύει όλα τα πετρώματα συμπεριλαμβανομένου και των μαλακών βράχων ορίζεται από τα χαρακτηριστικά της παραμορφωσιμότητας και της αντοχής της βραχόμαζας σε σχέση με τον χρόνο. (Oliveira 1993). Ειδικότερα στις δευτερογενείς διεργασίες η αποσάθρωση και η τεκτονική καταπόνηση οδηγούν στην απομείωση των γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχόμαζας.

Ο όρος “ασθενής βραχόμαζα” αναφέρεται συνήθως κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή στα πιθανά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν και που μπορεί να αφορούν ακόμα και αστοχίες αν και αυτό δεν ισχύει πάντα. Ασθενείς βραχόμαζες θα μπορούσαν να είναι περιπτώσεις γεωυλικών όπως έχει προαναφερθεί, με πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά δηλαδή έντονα τεκτονισμένους ή αποσαθρωμένους σχηματισμούς, με τμήματα χαμηλής αντοχής που μπορεί να εμφανίζουν ετερογένεια. Καθώς και όταν η πιθανή αστοχία συνδέεται με την ανεπάρκεια της αντοχής, που διαθέτει ένα σύστημα που δέχεται τάσεις και όχι ως μία αστοχία των τοπικών χαρακτηριστικών (άθικτα πετρώματα και ασυνέχειες). Αστοχίες όπως ολισθήσεις επίπεδων τεμαχών στα αντερείσματα φραγμάτων ή σφηνοειδείς αστοχίες σε σήραγγες, δεν συνδέονται με πρότυπα αστοχίας που μπορεί να συνδέονται άμεσα με τις ασθενείς βραχόμαζες.

Μία γενική διαχωριστική γραμμή θα μπορούσε να είναι ότι μία ασθενής βραχόμαζα :

- α) στην διάνοιξη σιηράγγων μπορεί να αναπτύξει διατμητικού τύπου αστοχίες και παραμορφώσεις ακόμα και κάτω από συνθήκες μέτριου ύψους υπερκείμενων και
- β) στα φράγματα μπορεί να εγείρει σοβαρές ανησυχίες για την θεμελίωση με αποτέλεσμα να κριθεί ακατάλληλος οποιοσδήποτε άλλος τύπος φράγματος εκτός του χωμάτινου.

Συνήθως η ποιότητα της βραχόμαζας αν δεν αξιολογηθεί σωστά μπορεί να συνδεθεί κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή με πιθανά προβλήματα ακόμα και αστοχίες. Ωστόσο αυτός ο όρος συνήθως επιχειρεί να περιγράψει και να ποσοτικοποιήσει την ποιότητα της βραχόμαζας μέσω μίας απόλυτης γεωτεχνικής προσέγγισης, χωρίς αυτό να συνεπάγεται απαραίτητα την προβληματική συμπεριφορά της βραχόμαζας, ανεξάρτητα από το είδος και τα χαρακτηριστικά του έργου. Ως εκ τούτου μία ασθενής βραχόμαζα θα μπορούσε να προκαλέσει μεγάλες συγκλίσεις κατά την διάνοιξη σε μεγάλου πάχους υπερκείμενων, ενώ η ίδια η σήραγγα να είναι σταθερή

κάτω από μικρό πάχος. Από την άλλη πλευρά η διάνοιξη σήραγγας σε υψηλής αντοχής άρρηκτο βράχο, θα μπορούσε να οδηγήσει σε αστοχίες όπως σφηνοειδείς ολισθήσεις κάτω από χαμηλά υπερκείμενα ή σε εκτίναξη τεμαχίων κάτω από μεγάλο πάχος υπερκείμενων. Ο χαρακτηρισμός μιας βραχόμαζας εξαρτάται κυρίως από την λιθολογία του πετρώματος και την κατάστασή της. Αυτά μπορούν να ποσοτικοποιηθούν με την χρήση της αντοχής σ_{ci} και τον Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής GSI όπως στην περίπτωση του κριτηρίου αστοχίας Hoek - Brown.

Υπό αυτή την έννοια η περιγραφή της ποιότητας μιας βραχόμαζας θα έπρεπε να είναι μία απλή διαδικασία, ανεξάρτητα από το είδος του έργου. Ωστόσο αυτό δεν ισχύει στην πράξη. Πράγματι είναι εύκολο να χαρακτηριστεί μία βραχόμαζα με αντοχή $\sigma_{ci} < 5\text{MPa}$ και $\text{GSI} < 20$ ως ασθενής ή μία βραχόμαζα με $\sigma_{ci} > 100\text{MPa}$ και $\text{GSI} > 70$ ως μη ασθενής. Ωστόσο το ερώτημα που προκύπτει έχει να κάνει με όλες τις βραχόμαζες που ενδέχεται να δημιουργήσουν πρόβλημα. Αυτός είναι και ο λόγος που πρέπει κανείς να εξετάσει το είδος του έργου, την κλίμακα και την γεωμετρία.

Επομένως η απόδοση του όρου ασθενής είναι χρήσιμη μόνο ακαδημαϊκά. Στην πράξη οι συνθήκες που προκαλούν αστοχία αφορούν τα χαρακτηριστικά του έργου και της βραχόμαζας τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους δημιουργώντας κάθε φορά μοναδικές συνθήκες. Γενικά ανισότροπες αστοχίες όπως ολίσθηση επίπεδων τεμαχίων στα αντερείσματα ενός φράγματος ή σφηνοειδείς ολισθήσεις στις σήραγγες δεν αποτελούν πρότυπα αστοχίας που συνδέονται με ασθενείς βραχόμαζες. Για παράδειγμα στην περίπτωση της διάνοιξης σηράγγων η εκτίμηση της αντοχής θα πρέπει να σχετίζεται με την αστάθεια του μετώπου, με μεγάλες μετατοπίσεις ή πιέσεις του κελύφους υποστήριξης και όχι με γνώμονα τη σοβαρότητα προβλημάτων που σχετίζονται με την βαρύτητα όπως σφηνοειδείς αστοχίες.

Κατά συνέπεια, μία βραχόμαζα θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως “αδύναμη”, όταν η πιθανή αστοχία οδηγείται από την ανεπάρκεια της αντοχής (σ_{cm}) στο να δεχθεί τις τάσεις που ασκούνται πάνω της. Ανεπάρκεια η οποία αναφέρεται στην βραχόμαζα ως σύνολο και όχι μεμονωμένα (μόνο το άθικτο πέτρωμα ή μόνο οι ασυνέχειες). Επιπλέον ο χαρακτηρισμός της βραχόμαζας σε ένα γεωτεχνικό πρόβλημα δεν εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά της βραχόμαζας αλλά και από το πιθανό μοτίβο αστοχίας.

σ_{ci}	ΣΥΝΘΗΚΕΣ		ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ
< 20	Ασθενείς βραχώμαζες (weak rockmasses) ονομάζονται όλα τα πετρώματα που είτε λόγω πρωτογενών διεργασιών (soft rocks) είτε δευτερογενώς έχουν υποστεί αποσάθρωση και τεκτονισμό έχοντας απολέσει το μεγαλύτερο τμήμα της αντοχής τους.	Μαλακοί βράχοι (Soft rocks) όπως μάρμα, ιλυόλιθος, αργιλικός σχιστόλιθος, τύρφη, ατελώς συγκολλημένοι ψαμμίτες κ.ά.	Πιθανές παραμορφώσεις στην θεμελίωση λόγω διογκώσεων (ενυδάτωση αργίλων) ή καθίζηση εξαιτίας της συμπίεσης. Προβλήματα ευστάθειας στα πρανή και στις σήραγγες κτλ
		Αποσαθρωμένοι οφιόλιθοι, τεκτονικά καταπονημένος φλύσχης, διατμημένες ζώνες σε σκληρά πετρώματα κ.ά.	Παραμορφώσεις στη θεμελίωση λόγω συμπίεσης ή ολίσθησης διατμημένων ζωνών (φράγματα), καταπτώσεις οροφής και προβλήματα ευστάθειας του μετώπου στις σήραγγες κτλ

Σχήμα 2.2 : Πίνακας χαρακτηρισμού της βραχώμαζας σε ένα γεωτεχνικό πρόβλημα

Ενδεικτικά επισυνάπτουμε παρακάτω ορισμένες δημοσιεύσεις ταξινομήσεων καθώς και νέων μεθόδων :

5. “Modified rock mass classification system by continuous rating”
“Τροποποιημένο σύστημα ταξινόμησης με συνεχή διαβάθμιση”

Şen, Z., Sadagah, B.H.,2003

Ο σκοπός της παρούσας δημοσίευσης δεν είναι να προτείνει ένα νέο σύστημα ταξινόμησης βραχώμαζας, αλλά στην βελτίωση των ήδη υφισταμένων ενσωματώνοντας μερικές απλές ποσοτικές ερμηνείες. Το σύστημα ταξινόμησης για τις κατακερματισμένες βραχώμαζες έχει τροποποιηθεί έτσι ώστε να μειωθεί η απαίτηση της προσωπικής εκτίμησης που συμμετέχει στον καθορισμό της ποιότητας. Από τις έξι

παραμέτρους που συμπεριλαμβάνονται στον δείκτη (RMR) μόνο οι πέντε αφορούν συγκεκριμένα την ποιότητα του βράχου. Ο δείκτης RQD με την υποκείμενη λειτουργία κατανομής της συχνότητας των ανέπαφων τμημάτων του δείγματος, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ή η δοκιμή της σημειακής φόρτισης ανέπαφων δειγμάτων βράχων, η κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών, ο προσανατολισμός τους καθώς και η κατάσταση των υπόγειων υδάτων.

Το κλασικό σύστημα αντικαθίσταται από το σύστημα συνεχούς διαβάθμισης το οποίο δεν αφήνει ασάφειες για έναν άπειρο μηχανικό στο να βαθμονομήσει την βραχώμαζα ποιοτικά στο πεδίο ή με μετρήσεις στο εργαστήριο. Εν κατακλείδι παρουσιάζονται όλα τα απαραίτητα διαγράμματα έτσι ώστε να αποκτηθούν απλές τιμές σχεδιασμού σχετικές με τον μέσο όρο χρόνου και αντιστοίχισή του στην ανυποστήρικτη έκταση της εκσκαφής σε κατακερματισμένη βραχώμαζα, τιμές σχετικές με την συνοχή καθώς και την γωνία τριβής της βραχώμαζας. Το συνεχές σύστημα RMR είναι πολύ βολικό για την εφαρμογή του σε ειδικά υπολογιστικά προγράμματα. Ο σκοπός της μεθοδολογίας μειώνει το μέγεθος της υποκειμενικότητας και οδηγεί σε μία μοναδική τιμή σχεδιασμού κατά την εκσκαφή.

6. *“Considerations on strength of intact sedimentary rocks”*

“Συλλογισμοί για την αντοχή ανέπαφων ιζηματογενών πετρωμάτων”

Tsiambaos, G., Sabatakakis, N., 2004

Σε αυτή την μελέτη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών σε ιζηματογενή πετρώματα με δοκιμές σημειακής φόρτισης καθώς και αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Από την στατιστική ανάλυση δεδομένων, προσδιορίστηκαν διάφοροι συντελεστές μετατροπής που αφορούν την μονοαξονική αντοχή σε θλίψη και την δοκιμή σημειακής φόρτισης από μαλακές έως σκληρές βραχώμαζες. Επιπρόσθετα η σταθερά γεωυλικού m_i που είναι μία παράμετρος του κριτηρίου αστοχίας Hoek - Brown υπολογίζεται για διαφορετικά δείγματα ασβεστόλιθου, αναλύοντας τα αποτελέσματα από μια σειρά τριαξονικών δοκιμών κάτω από διαφορετικές τιμές πίεσης. Η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη (UCS) σε δείγματα βραχώμαζας όπως υπολογίστηκε από τον δείκτη σημειακής φόρτισης, χρησιμοποιώντας συντελεστές μετατροπής σε συνδυασμό με την σταθερά m_i Hoek - Brown και τον γεωλογικό δείκτη αντοχής (GSI), συνιστούν τις παραμέτρους για τον υπολογισμό της αντοχής και της παραμόρφωσης της βραχώμαζας.

7. *“Geotechnical properties of an attapulgitic clay shale in Northwestern Nigeria”*

“Γεωμηχανικές ιδιότητες της ατταπουλγιτικής αργίλου στην βορειοδυτική Νιγηρία”

Ola, S.A., 1982

Η παρούσα εργασία κάνει μία σύντομη επισκόπηση της γεωλογίας της λεκάνης Basin της νοτιοδυτικής Νιγηρίας και το πώς η στρωματογραφία δημιουργεί πολύπλοκα γεωτεχνικά προβλήματα. Η ορυκτολογική ανάλυση έδειξε ότι η άργιλος στον σχιστόλιθο αποτελείται κυρίως από το ορυκτό ατταπουλγίτη. Οι λεπτομερείς γεωτεχνικές ιδιότητες της αργίλου έδειξαν ότι το όριο υδαρότητας είναι μεγαλύτερο από 200% και εξαρτάται σημαντικά από επεξεργασία που θα γίνει πριν από την δοκιμή. Βρέθηκαν τιμές πολύ χαμηλής μέγιστης ξηρής πυκνότητας 1137kg/m^3 (71pcf), υψηλής βέλτιστης περιεχόμενης υγρασίας 41% και υψηλού δείκτη συμπίεσης 0,23. Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται επίσης αναφέρεται ότι ο ατταπουλγίτης διαθέτει πολύ κρίσιμη κατάσταση μεταβολής του όγκου του. Τα αποτελέσματα των χαρακτηριστικών της διατμητικής αντοχής έδωσαν μηδενικές τιμές συνοχής σε όλες τις δοκιμές και απώλεια της αντοχής κατά 50%.

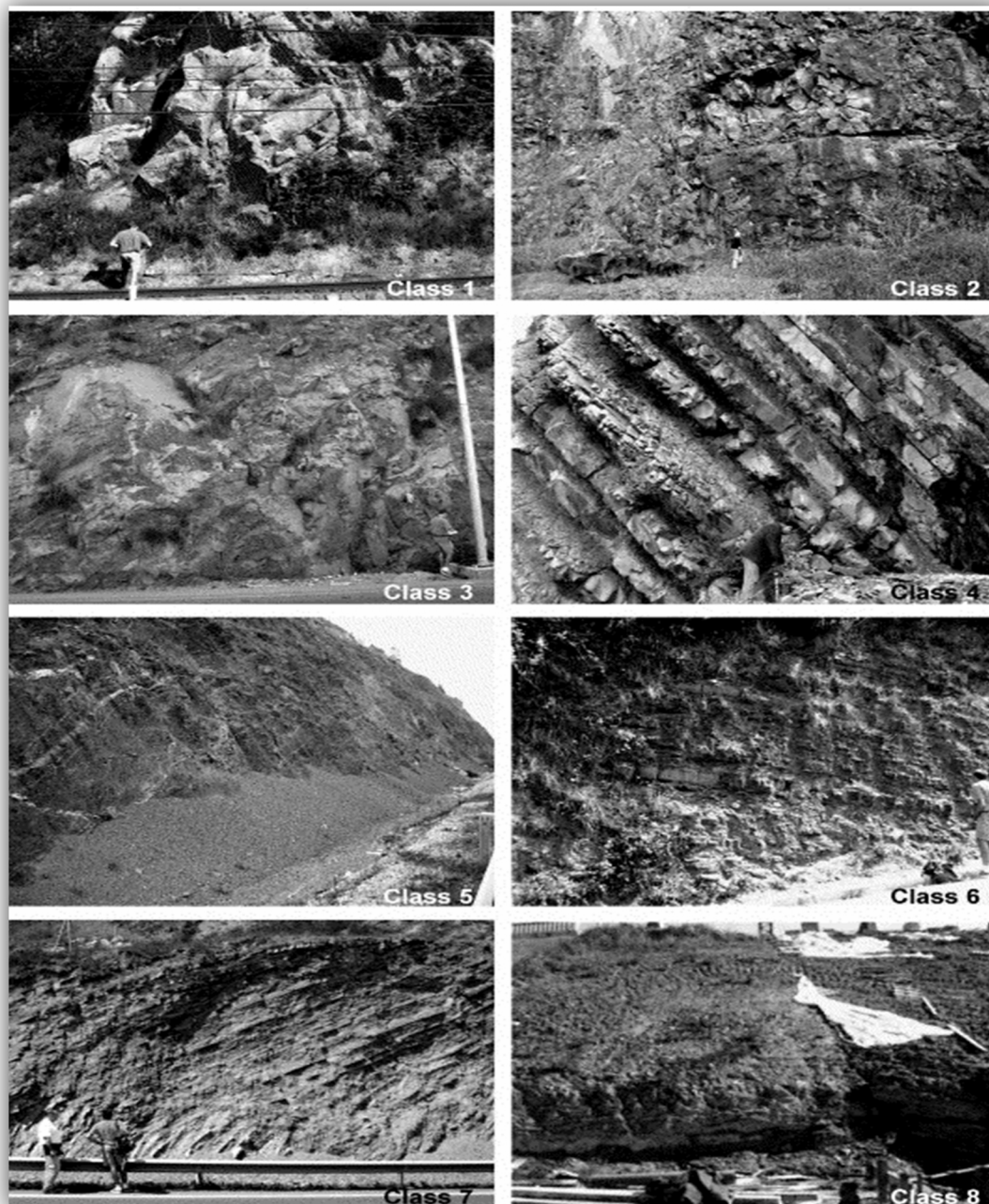
8. *“Geomechanical characterisation of rock masses in Alpine regions: the Basque Arc (Basque-Cantabrian basin, Northern Spain)”*

“Γεωμηχανικός χαρακτηρισμός των βραχώμαζων στις Άλπεις”

Morales, T., Uribe-Etxebarria, G., Uriarte, J.A., Valderrama, F.I., 2004

Η γεωμηχανικός χαρακτηρισμός της βραχώμαζας στις Άλπεις είναι μία από τις κυριότερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει σήμερα η επιστήμη της βραχομηχανικής. Αυτές οι βραχώμαζες αποτελούνται από πολλά διαφορετικά πετρώματα τα οποία συχνά βρίσκονται τεκτονικά διαταραγμένα γεγονός που επηρεάζει την μηχανική συμπεριφορά τους και προκαλώντας σημαντικά προβλήματα στα διάφορα τεχνικά έργα. Έτσι την χώρα των Βάσκων αυτοί οι σχηματισμοί είναι υπεύθυνοι για την πρόκληση σημαντικών θανάτων τα τελευταία χρόνια. Σε αυτό το πλαίσιο στοχεύουμε στον χαρακτηρισμό των γεωολικών αυτών με απώτερο σκοπό την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους. Ο χαρακτηρισμός αρχικά προσεγγίζεται με βάση τις παραμέτρους GSI, m_i και σ_{ci} ακολουθώντας το κριτήριο αστοχίας Hoek - Brown. Αυτές οι πληροφορίες συμπληρώνονται με μετρήσεις στο πεδίο και στο εργαστήριο λαμβάνοντας υπόψη και τους δείκτες RQD και RMR.

Χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες που προέρχονται από 99 σταθμούς μέτρησης, έχουμε αναπτύξει ένα γραφικό σύστημα ταξινόμησης, το οποίο μας επιτρέπει να διακρίνουμε τα γεωυλικά με βάση τα χαρακτηριστικά τους, το είδος και το βαθμό των συναφών προβλημάτων που εμπεριέχονται σε αυτά καθώς και τον τύπο και την αποτελεσματικότητα των λύσεων που παρέχονται. Η ταξινόμηση της βραχώμαζας έχει ταξινομηθεί σε οχτώ κλάσεις.



Εικόνα 2.1 : Παραδείγματα των κατηγοριών της βραχώμαζας
Morales, T., Uribe-Etxebarria, G., Uriarte, J.A., Valderrama, F.I., 2004

2.2.2 Πρωτογενείς διεργασίες

2.2.2.1 Μαλακοί βράχοι (soft rocks)

Πριν γίνει λεπτομερής αναφορά στους τύπους εκείνους των πετρωμάτων που αντιπροσωπεύουν τους μαλακούς βράχους κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία σύντομη περιγραφή του όρου έτσι όπως έχει οριστεί από τους εκάστοτε γεωλόγους και γεωτεχνικούς μηχανικούς. Ο όρος που έχει επικρατήσει σήμερα “μαλακοί βράχοι” ανήκουν σε μία ζώνη η οποία κυμαίνεται ανάμεσα σε σκληρά εδάφη και μαλακούς βράχους όπου άλλοτε πλησιάζουν τις ιδιότητες βράχων και άλλοτε τις μηχανικές ιδιότητες των εδαφών. Είναι δύσκολος ο προσδιορισμός καθώς οι μαλακοί βράχοι καθορίζονται από ένα όριο που η συμπεριφορά τους είναι διττή και εξαρτάται από πολλούς γεωλογικούς παράγοντες.

Ο όρος “μαλακός” χαρακτηρίζει βράχους που έχουν χαμηλή αντοχή λόγω των συνθηκών σχηματισμού τους (π.χ. βαθμός διαγένεσης), την χημική - ορυκτολογική τους σύσταση και γενικότερα την δομή τους (π.χ. στρωσιγένεια) δηλαδή πρωτογενών επιδράσεων ενώ ο όρος “ασθενής” αντιπροσωπεύει όλα τα πετρώματα συμπεριλαμβανομένων και των μαλακών βράχων που έχουν γίνει ασθενή είτε από πρωτογενείς είτε από δευτερογενείς διεργασίες.

Ποσοτικοί προσδιορισμοί που έχουν ορισθεί παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα :

ΑΝΤΟΧΗ	ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ (MPa)
Εξαιρετικά χαμηλή	0.25 - 1
Πολύ χαμηλή	1- 5
Χαμηλή	5 - 25
Μέση έως εξαιρετικά υψηλή	25 - >250

Σχήμα 2.3 : ISRM (1981)

Η ζώνη των μαλακών βράχων κυμαίνεται μεταξύ 2 - 20MPa. Τα γεωυλικά με τιμές κάτω από τα 2MPa αντιμετωπίζονται γεωτεχνικά ως εδαφικοί σχηματισμοί ενώ πάνω από τα 20MPa ως βράχοι. Σημειώνεται ότι η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη εξαρτάται άμεσα από τον βαθμό κορεσμού. Κατά τα βρετανικά δεδομένα (British

standard , BS 5930 : 1981) οι τιμές των βραχωδών σχηματισμών έχουν ως αφετηρία την τιμή 1,25 MPa σε ανεμπόδιστη θλίψη.

Στην κατηγορία των μαλακών βράχων ανήκουν σχηματισμοί όπως οι μάργες, οι ιλυόλιθοι, οι αργιλικόι σχιστόλιθοι, ο λιγνίτης και η τύρφη, καθώς και οι ψαμμίτες, τα κροκαλοπαγή και τα λατυποπαγή όταν το συνδετικό υλικό είναι άργιλος.

Οι μαλακές βραχώμαζες έχουν το χαρακτηριστικό να έχουν μεγάλη πλαστικότητα σε σχέση με τους σκληρούς βράχους όπως ο γρανίτης. Αυτό οφείλεται στην σύσταση του πετρώματος. Ο χαλαζίας και ο γρανάτης είναι ορυκτά που έχουν μεγάλο δείκτη σκληρότητας ενώ η γύψος και ο ασβεστίτης έχουν μικρό και είναι πιο πλαστικά. Ακόμα πιο πολύ αυξάνει την πλαστικότητα η άργιλος, λόγω του ότι έχει την ιδιότητα να προσροφάει νερό. Γενικότερα όσο αυξάνει η περιεκτικότητα των πετρωμάτων σε νερό τόσο αυξάνει η πλαστικότητα και η ικανότητα των πετρωμάτων να απορροφάνε νερό συνδέεται με το πορώδες.

Όσο ισχυρότερος είναι ο βαθμός συγκόλλησης των κόκκων τόσο το γεωυλικό γίνεται πιο ψαθυρό. Αντίθετα όσο πιο χαλαροί είναι οι δεσμοί συγκόλλησης τόσο πιο όλκιμο γίνεται το πέτρωμα.

Επομένως ανάλογα με το είδος της παραμορφωσιμότητας της βραχώμαζας καθορίζεται και ο τρόπος επίλυσης των αντίστοιχων γεωτεχνικών προβλημάτων. Όσο πιο πολύ πλησιάζει το γεωυλικό τις ιδιότητες του εδάφους τόσο πιο πολύ καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει η πίεση των πόρων και η συμπίεστικότητα. Αντίθετα όσο πιο πολύ πλησιάζει τις ιδιότητες του σκληρού βράχου τόσο πιο πολύ επιδρούν οι εφελκυστικές τάσεις, η διαστολή και η ψαθυρότητα του γεωυλικού στον τρόπο σχεδίασης μιας γεωτεχνικής μελέτης.

2.2.3 Δευτερογενείς διεργασίες

2.2.3.1 Τεκτονική

Η τεκτονική μελετά εκείνα τα φαινόμενα που προκαλούν σαφείς παραμορφώσεις και μεταβολές στους γεωλογικούς σχηματισμούς, και που έχουν ως αιτία την δράση ενδογενών δυνάμεων. Κατά την παρατήρηση των παραμορφώσεων αυτών (πτυχές, σύγκλινα, αντίκλινα, ρήγματα, διακλάσεις), είναι εφικτό να δοθούν στοιχεία για τις ενδογενείς δυνάμεις όσο αναφορά την χρονική στιγμή δράσης, την φύση και ένταση τους καθώς και την διεύθυνσή τους.

Πτύχωση καλείται η δημιουργία κυματοειδών παραμορφώσεων στα στρώματα των σχηματισμών και οφείλεται κατά μεγάλο ποσοστό στην πλαστικότητά τους, ενώ με τον όρο ρήγμα ή τεκτονικό ρήγμα εννοούμε μια ασυνέχεια στους γεωλογικούς σχηματισμούς που δημιουργήθηκε από την ενέργεια μεγάλων τεκτονικών δυνάμεων. Ο βαθμός πτυχώσεως των πετρωμάτων εξαρτάται από το πάχος των επιμέρους στρωμάτων και από το είδος των πετρωμάτων. Όσο πιο πτυχωμένα είναι τα πετρώματα τόσο μεγαλύτερη καταπόνηση έχουν υποστεί.

Η διαφορετική συμπεριφορά των πετρωμάτων έναντι των δυνάμεων αυτών εξαρτάται πρώτα απ’ όλα από τη μεγαλύτερη ή μικρότερη πλαστικότητα των υλικών και κατά δεύτερο λόγο από τις ιδιότητες των παραμορφωτικών δυνάμεων (διάρκεια και ένταση). Κατά τη διάρκεια των πτυχώσεων, τα στρώματα των πετρωμάτων που δεν είναι πολύ δύσκαμπτα, όταν υποστούν την επίδραση κανονικών και μεγάλης διάρκειας πιέσεων (ο παράγοντας χρόνος έχει θεμελιώδη σημασία στα τεκτονικά φαινόμενα και εξηγεί πολλές ιδιότητες των παραμορφώσεων των πετρωμάτων, που διαφορετικά θα παρέμεναν ανεξήγητες) υφίστανται πλαστικές παραμορφώσεις. Έτσι στους υψηλότερους τεκτονικούς ορίζοντες του φλοιού της γης, κυριαρχεί σε γενικές γραμμές η ρηξιγενής τεκτονική. Σε βαθύτερους ορίζοντες, λόγω αυξήσεως της θερμοκρασίας και της πίεσης, ελαττώνεται η παρουσία των δομών της ρηξιγενούς τεκτονικής, ενώ αυξάνονται αντίθετα, οι δομές της πτυχογόνου τεκτονικής.

Τα επιφανειακά και γραμμικά αυτά στοιχεία αποτελούν εκφράσεις των τεκτονικών-γεωλογικών δομών. Με άλλα λόγια, το μεγαλύτερο μέρος των γεωλογικών-τεκτονικών δομών εκφράζεται είτε ως επιφανειακό, είτε ως γραμμικό στοιχείο. Η γένεση των δομών αυτών είναι δυνατόν να αποδοθεί σε φαινόμενα ιζηματογένεσης, διαγένεσης, μεταμόρφωσης, μαγματισμού και τεκτογένεσης.

Γενικά σε περιοχές όπου εδράζονται τεχνικά έργα και που χαρακτηρίζονται από την σχετική παρουσία ρηγμάτων, επισημαίνονται τα εξής :

- κίνδυνος ενεργοποιήσεως, ο οποίος αντιμετωπίζεται με την κατασκευή ελαστικών κατασκευών
- το επίπεδο του ρήματος αποτελεί επιφάνεια ολικής ασυνέχειας με μειωμένη αντίσταση τριβής
- η ζώνη δεξιά και αριστερά από το ρήγμα παρουσιάζει μεγάλη καταπόνηση, ώστε να απαιτείται ενίσχυση
- πιθανή θεμελίωση σε τελείως διαφορετικά πετρώματα δεξιά και αριστερά του ρήματος
- πιθανή παρουσία μεγάλων ποσοτήτων υπόγειων νερών

Επίσης με τον όρο διακλάσεις, εννοούμε ασυνέχειες που διασχίζουν τα πετρώματα, χωρίς να συνοδεύονται από σχετική μετακίνηση των δύο τμημάτων. Είναι αποτέλεσμα διατμητικών και εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά τις

ορογενετικές κινήσεις καθώς και από την αποσυμπίεση των σχηματισμών που βρίσκονται στο εσωτερικό της γης υπό εντατική κατάσταση.

Εκείνο το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του είδους και της έντασης μιας τεκτονικής παραμόρφωσης ενός γεωλογικού σχηματισμού είναι το υλικό ή τα υλικά που αποτελείται ο σχηματισμός αυτός. Όταν ένας σχηματισμός π.χ. που αποτελείται από διάφορα υλικά (συνήθως αυτό συμβαίνει) δεχθεί την επίδραση δυνάμεως, τότε κάθε υλικό του θα αντιδράσει διαφορετικά.

Έτσι αν φανταστούμε π.χ. ότι ένας γεωλογικός σχηματισμός που αποτελείται από παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθους ή χαλαζίτες (πετρώματα δηλαδή που θεωρούνται ως συμπαγή, "Kompetente"), σε εναλλαγές με λεπτοστρωματώδη ιζήματα, (λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους, ή αργιλλικούς σχιστές, πετρώματα δηλαδή που θεωρούνται ως ασθενή, Inkom-petente) δέχεται την επίδραση δυνάμεων, τότε θα έχουμε την εξής σε γενικές γραμμές εικόνα παραμόρφωσης : Στα συμπαγή μέλη του θα αποτυπωθούν κυρίως δομές ρηξιγενούς τεκτονικής ή μεγάλων διαστάσεων δομές πτυχογόνου τεκτονικής, ενώ στα ασθενή μέλη του θα αποτυπωθούν κυρίως δομές πτυχογόνου τεκτονικής μικρότερων διαστάσεων.

Για την καλύτερη συνεπώς αξιολόγηση των τεκτονικών φαινομένων, τη μελέτη της μορφής των τεκτονικών δομών, καθώς και την ανάλυση της κινηματικής και της δυναμικής τους, οι παρατηρήσεις και οι συγκρίσεις θα πρέπει να περιορίζονται, σε όσο το δυνατόν ομογενείς περιοχές, ως προς τις φυσικές, τουλάχιστον, ιδιότητές τους.

Η πλέον απλή τεχνικογεωλογική περιγραφή πρέπει να περιλαμβάνει :

- α) το βαθμό αποσάθρωσης
- β) τη δομή (στρώση, σχιστότητα, φύλλωση, σχισμός, ασυνέχειες, κλπ), που καθορίζει τον κερματισμό
- γ) το χρώμα
- δ) το μέγεθος των κόκκων
- ε) την αντοχή
- στ) τον τύπο του πετρώματος

Πέρα από τις τρεις τελευταίες που είναι πολύ σημαντικές, οι δύο πρώτες ιδιότητες είναι επίσης ουσιαστικές για την τεχνικογεωλογική συμπεριφορά, ενώ για το χρώμα υπάρχουν διστάμενες απόψεις για τη σπουδαιότητά του.

Η δομή περιλαμβάνει :

- την στρώση (bed planes, bedding, lamination)
- τη σχιστότητα (schistosity)
- τη φύλλωση (foliation, προσανατολισμός ορυκτών)
- τον σχισμό (cleavage, θραύση σε επιφάνειες αδυναμίας)
- την ευθυγράμμιση ορυκτολογικών συστατικών (lineation) κλπ.

Οι ασυνέχειες αυτών των μορφών επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή ενός βραχώδους σχηματισμού, κυρίως λόγω της κατεύθυνσης αυτών (άλλες οι τιμές της αντοχής κάθετα, άλλες παράλληλα και άλλες διαγώνια στις υπόψιν ασυνέχειες).

Όλα τα πετρώματα σε υγιή κατάσταση παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη αντοχή υλικού σε σύγκριση με αυτή της βραχώμαζας τους (διπλάσια περίπου), καθώς η τελευταία επηρεάζεται από την παρουσία των ασυνεχειών που τη διασχίζουν. Συνεπώς στην αστοχία ενός πρανούς για παράδειγμα, σημαντικότερη δεν είναι η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος αλλά η αντοχή της βραχώμαζας, η οποία διαμορφώνεται από ένα πλήθος παραμέτρων, τα κύρια χαρακτηριστικά και την αλληλοεμπλοκή των συστημάτων των ασυνεχειών που την διασχίζουν.

Έτσι, η γεωμηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας κατά την εμπλοκή της στην θεμελίωση ενός τεχνικού έργου ή στην κατασκευή ενός υπόγειου έργου εντός αυτής, καθορίζεται κυρίως από το καθεστώς διάρρηξης που τη χαρακτηρίζει.

2.2.3.2 Αποσάθρωση

Αποσάθρωση ονομάζεται η διαδικασία της καταστροφής των προϋπαρχόντων πετρωμάτων. Ανάλογα με τους παράγοντες που την προκαλούν διακρίνεται σε :

- α) φυσική ή μηχανική αποσάθρωση
- β) χημική αποσάθρωση
- γ) βιολογική αποσάθρωση

Στα λεπτοστρωματώδη ή αποσαθρωμένα ή και έντονα τεκτονισμένα πετρώματα είναι δύσκολη ή και αδύνατη η προετοιμασία δοκιμίων, ακόμη και μικρών διαστάσεων, για τον εργαστηριακό προσδιορισμό της αντοχής σ_{ci} , και του μέτρου ελαστικότητας E_i .

Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υγιών πετρωμάτων εξαρτώνται από τις αντίστοιχες ιδιότητες των ορυκτολογικών τους συστατικών και από το μέγεθος των κρυστάλλων και του τρόπου συνδέσεως και διατάξεως αυτών εντός της μάζας του πετρώματος, δηλαδή τον ιστό και την υφή. Τα ορυκτά συστατικά των πετρωμάτων είναι ομογενή σώματα με συγκεκριμένη σύσταση και κρυσταλλική δομή και αποτελούν τα δομικά στοιχεία των πετρωμάτων. Ορυκτά με την ίδια ακριβώς χημική σύσταση, αλλά διαφορετική κρυσταλλική δομή, παρουσιάζουν διαφορετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες (ασβεστίτης-αραγωνίτης).

Αξίζει να αναφέρουμε τα κυριότερα χαρακτηριστικά ορυκτών που μας ενδιαφέρουν :

- Σκληρότητα : Η αντίσταση την οποία παρουσιάζει ένα ορυκτό στη χάραξη ή στην λείανσή του λέγεται σκληρότητα χαράξεως ή λειάνσεως

αντίστοιχα. Για τον εμπειρικό προσδιορισμό της σκληρότητας, ιδιαίτερα στην ύπαιθρο, χρησιμοποιείται η σκληρομετρική κλίμακα του Mohs :

Ορυκτό	Σκληρότητα (κατά Mohs)
Τάλκης	1
Γύψος	2
Ασβεστίτης	3
Φθορίτης	4
Απατίτης	5
Ορθόκλαστο	6
Χαλαζία	7
Τοπάζιο	8
Κορούνδιο	9
Διαμάντι	10

Σχήμα 2.4 : Σκληρομετρική κλίμακα κατά Mohs, 1812

Χαρακτηριστική ιδιότητα αποτελεί και η μικροσκληρότητα, η οποία προσδιορίζεται στο εργαστήριο με την χρήση μεταλλογραφικού μικροσκοπίου.

- Σχισμός : Η διάσπαση ενός κρυσταλλικού σώματος σε συγκεκριμένα επίπεδα μετά από μηχανική καταπόνηση. Αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα πολλών κρυσταλλικών σωμάτων και νοείται όταν κατά την επίδραση μιας μηχανικής καταπόνησης (θλίψης, εφελκυσμού, κρούσης) διασπάται κατά επίπεδα εντελώς καθορισμένα και υπακούοντα στην συμμετρία του κρυστάλλου.

Ο σχισμός αποτελεί χαρακτηριστική ασυνεχή ανυσματική ιδιότητα της κρυσταλλικής ύλης και επηρεάζει αποφασιστικά τις μηχανικές ιδιότητες και τη μηχανική ανισοτροπία των κρυσταλλικών σωμάτων. Τα ορυκτά που στερούνται σχισμού και όταν υποβληθούν σε μηχανική καταπόνηση θραύονται, αντί να σχίζονται. Διακρίνονται : τέλειος σχισμός, ατελής, καλός, σαφής σχισμός, ασαφής σχισμός και φτωχός.

- Ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις : Στους κρυστάλλους το μέτρο ελαστικότητας E , δείκτης που χαρακτηρίζει την μεταβολή του μήκους ενός σώματος κατά την επιβολή σχετικής τάσης, λαμβάνει τιμές που εξαρτώνται από την διεύθυνση. Αν από το κέντρο ενός κρυστάλλου φέρουμε ανύσματα ανάλογα με τις τιμές του E και συνδέσουμε τα άκρα των ανυσμάτων με μια επιφάνεια, παίρνουμε το λεγόμενο στερεό ελαστικότητας, το οποίο καθιστά σαφή την ανισοτροπία της ελαστικότητας του κρυστάλλου.

Η πλαστική παραμόρφωση συντελείται μεταξύ του ορίου ελαστικότητας και του ορίου θραύσης και πολλές φορές συνοδεύεται και από μετατοπίσεις στοιβάδων του κρυσταλλικού πλέγματος που λέγονται επιφάνειες ολίσθησης. Κρύσταλλοι, των οποίων το όριο ελαστικότητας είναι μεγάλο, μπορούν να υποστούν εύκολα ελαστική κάμψη χωρίς να θραυσθούν όπως συμβαίνει στις μαρμαρυγίες. Η πλαστική παραμόρφωση στους κρυστάλλους μπορεί να γίνει κατά δυο τρόπους : ως ομοιόμορφη ενδοπλεγματική μετατόπιση και σαν μηχανική παραγωγή διδύμων.

- Αντοχή : Ως αντοχή εννοούμε τον τρόπο αντίδρασης στις διάφορες μηχανικές επιδράσεις των ορυκτών και ο χαρακτηρισμός της χρησιμοποιείται μόνο για ορυκτο - διαγνωστικούς σκοπούς. Τα ορυκτά ανάλογα και με την αντοχή που παρουσιάζουν διακρίνονται σε ελαστικά, πλαστικά, εκτατά, εύθραστα, εύκαμπτα, εύξεστα, δύσξεστα. Αν και είναι στερεά σώματα δεν έχουν τις ίδιες τιμές αντοχής, γεγονός το οποίο οφείλεται στην ανισοτροπία που παρουσιάζουν.
- Θερμική διαστολή : Η ανισοτροπία που παρουσιάζει η ιδιότητα της θερμικής διαστολής των ορυκτών, παίζει ιδιαίτερο ρόλο στην κατανόηση της φυσικής αποσάθρωσης των πετρωμάτων. Με τις συνεχείς αυξομειώσεις της θερμοκρασίας, τα ορυκτά διαστέλλονται και συστέλλονται συνεχώς και ανομοιόμορφα προς τις διάφορες διευθύνσεις το οποίο συνεπάγεται την χαλάρωση της συνοχής μεταξύ των κόκκων του πετρώματος με τελικό αποτέλεσμα την βαθμιαία καταστροφή του.

Ωστόσο στα εξαιλωμένα και διερρηγμένα πετρώματα που έχουν υποστεί σε κάποιο βαθμό την επίδραση των μηχανισμών αποσάθρωσης, οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητές τους εξαρτώνται κυρίως από τον βαθμό διαρρήξεως και εξαιλώσεως και δευτερευόντως από τα παραπάνω χαρακτηριστικά των υγιών πετρωμάτων.

Το αποσαθρωμένο πέτρωμα γενικά παρουσιάζει πολύ πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά. Πρωταρχικός σκοπός είναι να μελετηθεί η ζώνη αποσάθρωσης και να διαπιστωθεί η καταλληλότητά της. Βασικές έννοιες που πρέπει να αποσαφηνιστούν πριν την όποια προσπάθεια διαμόρφωσης συστήματος ταξινόμησης της αποσάθρωσης είναι :

1. Η μηχανική (φυσική) αποσάθρωση οδηγεί στη διεύρυνση των ασυνεχειών, στη δημιουργία νέων, στο άνοιγμα των επαφών μεταξύ των κόκκων, αλλά και το θραυσμό των ορυκτών κόκκων.
2. Η χημική αποσάθρωση επιφέρει σε αρχικό στάδιο αποχρωματισμό των πετρωμάτων (λόγω οξείδωσης, κλπ) και σε επόμενο, αποσύνθεση των πυριτικών στοιχείων των αργιλικών ορυκτών.

3. Η διάλυση, η οποία εξαρτάται από την διαλυτότητα των ορυκτών, που περιέχονται μέσα στα πετρώματα. Οι παράγοντες που επιδρούν στη διάλυση είναι η θερμοκρασία, η παρουσία CO₂ και η ποσότητα του νερού.

Προκειμένου να αξιολογηθεί ο βαθμός αποσάθρωσης χρησιμοποιούνται ευρέως αποδεκτές ταξινομήσεις όπου παρατηρείται σημαντική μείωση της αντοχής με την αποσάθρωση του βραχώδους υλικού, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Κατηγορία	Ταξινόμηση	Περιγραφή
I	Fresh rock - Υγιές Πέτρωμα	Κανένα ορατό ίχνος αποσάθρωσης. Πιθανός ελαφρός αποχρωματισμός στις επιφάνειες των κύριων ασυνεχειών.
II	Slightly Weathered Rock (discoloured) - Ελαφρά Αποσαθρωμένο Πέτρωμα (Αποχρωματισμένο)	Ο αποχρωματισμός του πετρώματος και των επιφανειών των ασυνεχειών του δηλώνει αποσάθρωση. Αν η αλλαγή του χρώματος περιορίζεται σε μερικά ορυκτά πρέπει να αναφέρεται.
III	Moderately Weathered Rock - Μέτρια Αποσαθρωμένο Πέτρωμα	Λιγότερο από το μισό του πετρώματος έχει διαλυθεί και/ή έχει αποσυντεθεί σε έδαφος. Το υγιές ή το αποχρωματισμένο πέτρωμα παρουσιάζεται είτε σε συνεχή δομή είτε ως «πυρήνες».
IV	Highly Weathered (decomposed) - Ισχυρά Αποσαθρωμένο Πέτρωμα (Αποσυνθεμένο)	Περισσότερο από το μισό του πετρώματος έχει διαλυθεί και/ή έχει αποσυντεθεί σε έδαφος. Το υγιές ή το αποχρωματισμένο πέτρωμα παρουσιάζεται είτε σε ασυνεχή δομή είτε ως «πυρήνες».
V	Completely Weathered (disintegrated) - Έντονα Αποσαθρωμένο Πέτρωμα (Θρυμματισμένο)	Όλο το πέτρωμα έχει διαλυθεί και/ή έχει αποσυντεθεί σε έδαφος. Η αρχική δομή του πετρώματος είναι ακόμη άθικτη και οι κρύσταλλοι δεν έχουν αποσυντεθεί.
VI	Residual Soil - Υπολειμματικό Έδαφος	Όλο το πέτρωμα έχει μετατραπεί σε έδαφος. Η δομή του πετρώματος έχει καταστραφεί. Υπάρχει σημαντική αλλαγή στον όγκο του πετρώματος, αλλά το έδαφος δεν έχει μετακινηθεί σημαντικά από την αρχική του θέση.

Σχήμα 2.5 : ISRM 1981, Γεωλογική Εταιρεία Λονδίνου

Η αποσάθρωση των βραχωδών μαζών (μετατροπή τελικά σε εδαφικούς σχηματισμούς), έχει ένα μεγάλο σύμμαχο, τις ασυνέχειες της βραχώμαζας, οι οποίες διευκολύνουν τη δράση των παραγόντων της αποσάθρωσης βαθιά μέσα στη βραχώμαζα, επιταχύνοντας έτσι την αποσάθρωσή της.

Η προσέγγιση κάποιας από τις παραπάνω κατηγορίες αποσάθρωσης σε ένα βραχώδη σχηματισμό διαφοροποιείται ανάλογα με τον τρόπο δράσης των αποσθρωτικών παραγόντων στο είδος των πετρωμάτων το οποίο εντάσσεται ο υπόψιν σχηματισμός σύμφωνα με την διάκριση των βραχωδών σχηματισμών, δηλαδή στα ιζηματογενή, μεταμορφωμένα ή εκρηξιγενή.

Επίσης η αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας προκαλεί μείωση της μηχανικής αντοχής των πετρωμάτων. Η περιεκτικότητα σε νερό ή η φυσική υγρασία, είναι η ποσότητα του νερού που περιέχει ένα πέτρωμα στο φυσικό του περιβάλλον. Η περιεκτικότητα σε νερό εκφράζεται με τον λόγο του βάρους του περιεχομένου στο πέτρωμα νερού προς το ξηρό βάρος του και δίνεται σε μονάδες επί τις εκατό (%). Γίνεται αντιληπτό ότι η τιμή της ιδιότητας αυτής εξαρτάται τόσο από τις φυσικές ιδιότητες του ίδιου του πετρώματος, όσο και από αυτές των πετρωμάτων που το περιβάλλουν.

Τα κρυσταλλικά πετρώματα π.χ. έχουν ελάχιστες τιμές φυσικής υγρασίας, μέχρι 1 %, ενώ τα αργιλικής σύστασης, μαργόλιθοι, ιλυόλιθοι, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι μέχρι και 30 %.



Εικόνα 2.2 : Σχιστοποίηση βράχου λόγω “ύγρρανσης-ξήρανσης”, [52]

3. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

3.1 Γεωτεχνική περιγραφή σχηματισμών

3.1.1 Ιζηματογενή

Τα πετρώματα αυτά σχηματίσθηκαν σε βαθιές ωκεάνιες λεκάνες ως προϊόντα αποσάθρωσης παλαιότερων γεωλογικά πετρωμάτων. Η μεταφορά και η απόθεση γίνεται είτε με τη μορφή αιώρησης (κλαστικά ιζήματα), είτε με μορφή διάλυσης (χημικά ιζήματα).

Διακρίνονται σε κλαστικά, σε χημικά και βιογενή και η αποσάθρωσή τους είναι λιγότερο έντονη από τις άλλες κατηγορίες πετρωμάτων.

Όμως ενδέχεται να εμφανίσουν :

1. Φαινόμενα διάλυσης του συνδετικού υλικού μεταξύ των κόκκων του πετρώματος (κλαστικά ιζήματα)
2. Φαινόμενα διόγκωσης λόγω προσρόφησης νερού (π.χ. ανυδρίτης που μετατρέπεται σε γύψο)
3. Φαινόμενα γενικότερης χαλάρωσης λόγω χαλάρωσης των δεσμών μεταξύ των κόκκων, χωρίς τη διάλυσή τους

Τα ιζηματογενή πετρώματα γενικά είναι αδιαπέρατα, εκτός από το επιφανειακό τους τμήμα που παρουσιάζεται αποσπασμένο. Εξαίρεση αποτελούν τα ανθρακικά πετρώματα που παρουσιάζουν μεγάλη περατότητα λόγω διάλυσής τους από το νερό (ασβεστόλιθοι, δολομίτες) καθώς και τα κροκαλοπαγή που παρουσιάζουν συγκόλληση μεταξύ των κροκαλών με ασβεστιτικό υλικό.

Τα κλαστικά πετρώματα είναι ανάλογα του μεγέθους των συνθετικών τους κόκκων. Αποτελεί πολύ χρήσιμη παράμετρο στην περιγραφή των βραχωδών σχηματισμών αφού σχετίζεται άμεσα με τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών. Περιγραφές δηλαδή όπως αδρόκοκκος ψαμμίτης, κλπ είναι πολύ χρήσιμες.

Όνομα	Μέγεθος κόκκου (mm)
Ογκόλιθος	> 300
Κροκάλες, λατύπες	75 – 300
Χαλίκια	4.75 – 75
Άμμος	0.075 – 4.75
Ιλύς	0.002 – 0.075
Άργιλος	< 0.002

Σχήμα 3.1 : Διάμετρος των κόκκων σύμφωνα με το Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης , U.S.C.S

Στα πετρώματα αυτά ανήκουν :

- Κροκαλοπαγή
- Λατυποπαγή
- Ψαμμίτες
- Ιλυόλιθοι
- Αργιλικοί σχιστόλιθοι

Τα χημικά πετρώματα είναι :

- Ασβεστόλιθοι
- Δολομίτες
- Μάργες
- Κερατόλιθοι
- Εβαπορίτες (ορυκτό αλάτι, γύψος, ανυδρίτης)

και βιογενή πετρώματα τα οποία δημιουργήθηκαν από συσσώρευση οργανικής ύλης :

- Τύρφη
- Λιγνίτης
- Βιογενής ασβεστόλιθος

Οι πηλίτες σχηματίζονται από ιζήματα με διάμετρο κόκκου μικρότερη από 0,063 mm και ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων που επικρατεί διακρίνονται σε ιλυόλιθο ή άργιλο - αργιλικό σχιστόλιθο καθώς και σε μάργα όταν το πέτρωμα έχει μικτή σύσταση από άργιλο και ανθρακικό ασβέστιο δηλαδή είναι χημικής και κλαστικής προέλευσης.

Οι μάργες αποτελούνται από αργιλικά και ανθρακικά ορυκτά με υψηλό ποσοστό ασβεστίου. Το ποσοστό περιεκτικότητας του ανθρακικού ασβεστίου κυμαίνεται από 35 έως 65%. Ανάλογα με το ορυκτό που επικρατεί χαρακτηρίζεται για περιπτώσεις με υψηλά ποσοστά σε ανθρακικό ασβέστιο σαν μαργαϊκός ασβεστόλιθος ο οποίος έχει μικρότερη αντοχή από τον καθαρό ασβεστόλιθο, και με υψηλά ποσοστά

αργίλου ως αργιλική μάργα με την συμπεριφορά της να πλησιάζει τις στιφρές αργίλους ή τους αργιλικούς σχιστόλιθους και αποτελεί έναν αδιαπέρατο σχηματισμό.

Συγκεκριμένα στις σήραγγες χρειάζεται άμεση υποστήριξη γιατί αποσπώνται αμέσως μικρά πρίσματα από τη μάζα της. Η μάργα μπορεί να αποτελέσει όρο μίας ακολουθίας εναλλασσόμενων στρωμάτων διαφορετικής περιεκτικότητας σε κροκάλες, άμμο, ιλύ, άργιλο και ανθρακικά ορυκτά. Γενικότερα η αντοχή της μάργας είναι μικρή και πολλές φορές συμπεριφέρεται σαν σκληρό έδαφος ή σαν μαλακός βράχος.



Εικόνα 3.1 : Αστοχία σφήνας και κατάπτωση σε ασβεστολιθική βραχώμαζα, [51]

Στους βραχώδεις σχηματισμούς παρατηρούνται με πολύ μικρότερη συχνότητα καταπτώσεις - ολισθήσεις βραχωδών μαζών, πλην όμως όπου εκδηλωθούν είναι μεγάλης συνήθως έκτασης με σοβαρά προβλήματα.



Εικόνα 3.2 : Καταπτώσεις βραχωδών μαζών σε ψαμμίτες των νεογενών (Διακοφτό), [51]

3.1.2 Πυριγενή

Τα Πλουτωνικά πετρώματα (πλουτωνίτες) είναι αδρόκοκκα και δημιουργούνται όταν το μάγμα ψύχεται μέσα στο φλοιό της γης όπως είναι τα όξινα γρανιτικά.

Ο γρανίτης όταν είναι υγιής είναι πέτρωμα πολύ υψηλών αντοχών που παρουσιάζει πλήρως ελαστική συμπεριφορά με ψαθυρή θραύση. Αντιθέτως η αντοχή του μειώνεται όσο πιο αποσαθρωμένο εμφανίζεται. Η γεωμετρία του αποσαθρωμένου τμήματος πρέπει να ερευνάται προσεκτικά γιατί πολλές φορές δεν παρουσιάζεται παράλληλα προς την επιφάνεια του εδάφους και ένας τρόπος για να διαπιστωθεί η κατανομή του με το βάθος είναι με χρήση γεωφυσικών μεθόδων. Αποσαθρώνεται εύκολα με τελικό προϊόν τη γρανιτική άμμο (αρένα). Ο άστριος μετατρέπεται σε καολίνη, ο χαλαζίας παραμένει αναλλοίωτος. Χαρακτηριστικό τους η κατάτμηση σε τρεις επιφάνειες διαχωρισμού που είναι περίπου ορθογώνιες μεταξύ τους, οι οποίες πληθαίνουν από τον τεκτονισμό που υφίσταται το πέτρωμα και που κοντά στην επιφάνεια είναι αρκετά ανοικτές διευκολύνοντας την γρήγορη αποσάθρωση του πετρώματος. Ο γρανοδιορίτης επίσης έχει ίδια αντοχή και συμπεριφορά με τον γρανίτη.

Από τα βασικά και υπερβασικά πετρώματα ο γάββρος είναι υψηλών αντοχών όταν είναι υγιής, αλλά αποσαθρώνεται και ρωγματώνεται εύκολα δημιουργώντας δευτερογενές πορώδες, επιτρέποντας την κυκλοφορία νερού. Ο περιδοτίτης είναι επίσης υψηλών αντοχών όταν είναι υγιής. Αποσαθρώνεται προς σερπεντινίτη που έχει μικρή αντοχή σε διάτμηση, με σαπωνοειδή υφή. Ο βασάλτης έχει υαλώδη μάζα με γκρίζο ή μαύρο χρώμα και είναι πέτρωμα πολύ υψηλών αντοχών που παρουσιάζει δυσκολία στην αποσάθρωση. Ο διαβάσης έχει μικροκρυσταλλική μάζα με γκρίζο ή μαύρο χρώμα, επίσης πολύ υψηλών αντοχών με δυσκολία στην αποσάθρωση.

3.1.3 Ηφαιστειακά

Προέρχονται από έκχυση λάβας πάνω στα πετρώματα που υπάρχουν στην επιφάνεια της γης, ενώ πολλές φορές διακόπτουν την ιζηματογένεση. Έχουν υψηλές αντοχές και γενικά είναι σκληρά πετρώματα κατάλληλα για θεμελιώσεις τεχνικών έργων, αλλά παρουσιάζουν πρωτογενή κενά που οφείλονται στη διαδικασία ψύξης της λάβας καθώς έρχεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα, και τα οποία δεν είναι απαραίτητο να επικοινωνούν μεταξύ τους. Η ύπαρξη των κενών αυτών μπορεί να οδηγήσει σε διαφορικές καθιζήσεις, ενώ γενικά καθιζήσεις αναμένονται και όταν χαλαρά ηφαιστειακά πετρώματα (τόφφοι) διακόπτουν μια ιζηματογενή σειρά.

Στα πετρώματα αυτά ανήκουν :

- Λάβα
- Ρυόλιθος
- Τραχείτης
- Ανδεσίτης
- Ηφαιστειακοί τόφοι

Επίσης ολισθήσεις εδαφών και καταπτώσεις βράχων σημειώνονται και στα ηφαιστειακά σκληρά πετρώματα που δημιουργούν απότομα πρανή και είναι ιδιαίτερα επιρρεπή σε αστοχίες, λόγω ανάπτυξής τους πάνω σε αργιλώδη υλικά ή και πάνω στους τόφους αυτών.



Εικόνα 3.3 : Καταπτώσεις βραχώμαζων από ηφαιστειακά πρανή, [51]

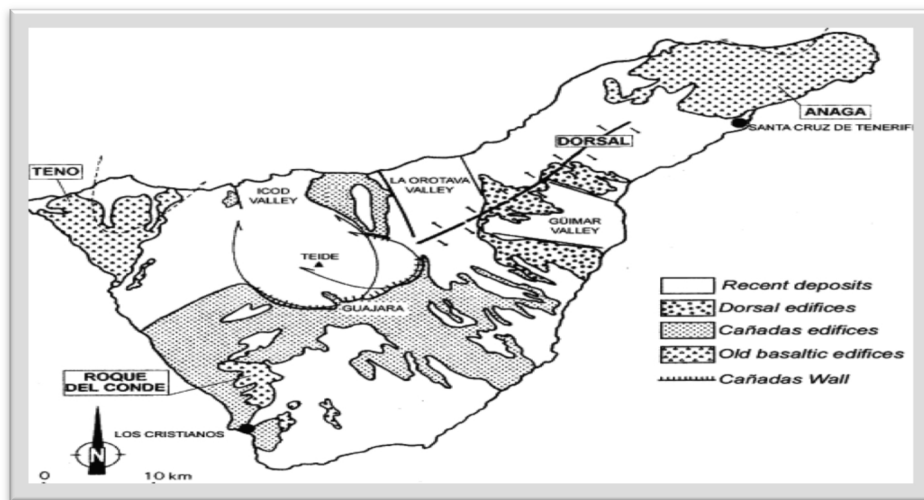
Ενδεικτικά επισυνάπτουμε την παρακάτω δημοσίευση :

9. “*The foundation of a 40 - storey tower in jointed basalt*”
“**Η θεμελίωση ενός 40 - όροφου ουρανοξύστη σε ρηγματωμένο βασάλτη**”

Justoa, J.L., Justoa, E., Duranda, P., Azañónb, J.M., 2006

Η Τενερίφη είναι το μεγαλύτερο και ψηλότερο νησί των Κανάριων νήσων και διαθέτει μία πολύπλοκη ηφαιστειακή ιστορία. Τα παλαιότερα ορατά γεωυλικά (η παλιά βασιλική σειρά) σώζονται σε τρεις ορεινούς όγκους: Anags (BA) , Teno (BΔ) και Roque del Conde (NΔ). Σχηματίστηκαν στα τέλη του Μειοκαίνου και στις αρχές του Πλειοκαίνου. Μετά τις παλιές βασιλικές σειρές η ηφαιστειακή δραστηριότητα

συγκεντρώθηκε σε δύο μεγάλα ηφαιστειακά κέντρα. Το κεντρικό ηφαίστειο Las Canadas και η κορυφογραμμή Dorsa (ΝΔ-ΒΑ) είναι μία ηφαιστειακή κορυφογραμμή που συνδέει τους ορεινούς όγκους Las Canadas και Anaga. Σε κάθε πλευρά της κορυφογραμμής Dorsal δύο μεγάλες κοιλάδες σχηματίστηκαν η Guimar και η La Orotava. Η Σάντα Κρούζ της Τενερίφης βρίσκεται στο ΒΑ τμήμα του νησιού μεταξύ του ορεινού όγκου Anaga και της κοιλάδας Gu. Η βασαλτική λάβα ηλικίας τεταρτογενούς που προέρχεται από την κορυφογραμμή Dorsal αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό του υποστρώματος αυτής της πόλης. Το πάχος της λάβας σπάνια υπερβαίνει το 1m και συνήθως κυμαίνεται από 40 έως 80 cm. Πριν την κατασκευή υπολογίστηκε το μέτρο παραμορφωσιμότητας E σε οκτώ διαφορετικά στρώματα.

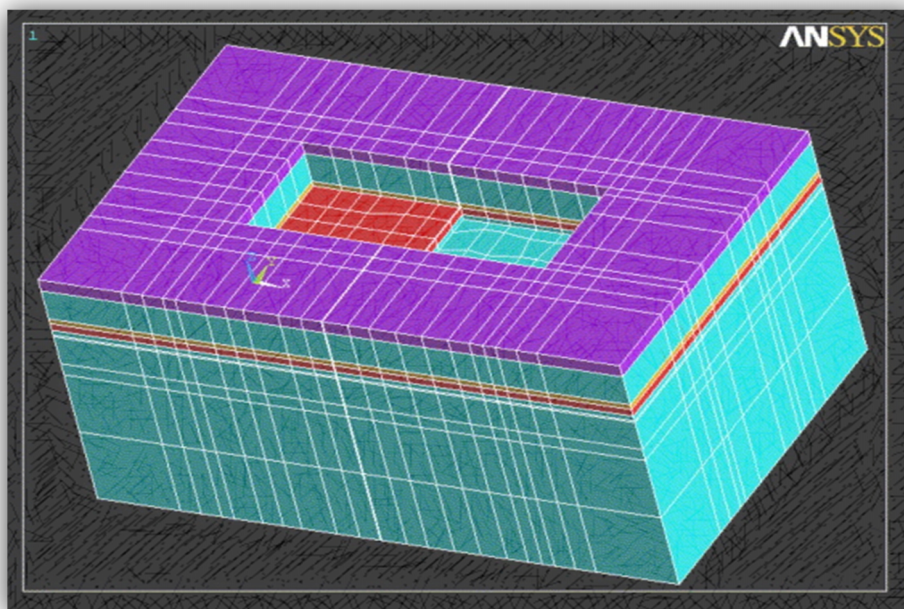


Σχήμα 3.2 : Ηφαιστειακές δομές στο νησί της Τενερίφης
Justoa, J.L., Justoa, E., Duranda, P., Azañónb, J.M., 2006



Εικόνα 3.4 : Διακλάσεις και μικρά έγκοιλα που εντοπίστηκαν στην ανώτερη βασαλτική ζώνη
Justoa, J.L., Justoa, E., Duranda, P., Azañónb, J.M., 2006

Ένας ουρανοξύστης ύψους 132,7 μέτρων ολοκληρώθηκε με επιτυχία στο νησί της Τενερίφης. Τα θεμέλια του ουρανοξύστη αποτελούνται από μία πλάκα με 2 μέτρων πάχους οπλισμένου σκυροδέματος η οποία βρίσκεται πάνω σε πορώδη αποσαθρωμένο βασάλτη και σκωρία.



Σχήμα 3.3 : Όγκος εδάφους σε διακριτά τμήματα
Justoa, J.L., Justoa, E., Duranda, P., Azañónb, J.M., 2006

Ένα τρισδιάστατο μοντέλο ελαστικών πεπερασμένων στοιχείων πρόγραμμα έχει την δυνατότητα να υπολογίζει τις μετατοπίσεις της κατασκευής και τις τάσεις που ασκούνται στην πλάκα. Η εγκατάσταση εκτασιομέτρων σε διαφορετικά βάθη κάτω από την πλάκα και κλυσιομέτρων αντίστοιχα στο χαμηλότερο επίπεδο παρείχαν συγκρίσιμα δεδομένα μεταξύ των μετρήσιμων μετατοπίσεων στο πεδίο σε σχέση με αυτών που είχαν υπολογιστεί από το πρόγραμμα καθώς και μια εκτίμηση των παραμέτρων παραμόρφωσης που είχαν υπολογιστεί με εργαστηριακές μεθόδους.

Ένα πρώτο στάδιο πρόβλεψης επέτρεψε την καθιέρωση ενός ανωτάτου ορίου με βάση τις δοκιμές πρεσσιομέτρησης και ένα κατώτατο όριο με βάση την εξίσωση του Bieniawski (The geomechanics classification in rock engineering applications. In: Proceedings of the fourth cong. ISRM congress, Montreux, vol.2.1979.p.41 - 48). Η γεωμετρική ερμηνεία αυτών των τιμών βρίσκεται σε συμφωνία με τις μετρήσεις που καταγράφηκαν από τα όργανα γεωμηχανικής και δομικής παρακολούθησης που εγκαταστάθηκαν.

3.2 Βασικοί τύποι πετρωμάτων

3.2.1 Ασβεστόλιθος

Αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη με ποικίλο χρώμα και σύσταση. Είναι πέτρωμα συμπαγές μέχρι πορώδες με καλή λείανση και κατεργάζεται εύκολα. Ο ασβεστόλιθος παρουσιάζει μικρή ανθεκτικότητα στη φωτιά, στα οξέα και στις καιρικές επιδράσεις.

Οι ασβεστόλιθοι προέρχονται από την καθίζηση και την διαγένεση ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) και σχηματίζονται μέσα σε θαλάσσιο περιβάλλον. Η τεχνική τους συμπεριφορά εξαρτάται από τον προσανατολισμό, την πυκνότητα και το εύρος των διακλάσεων τους. Είναι πετρώματα με υψηλές αντοχές κατάλληλα για δομικά έργα. Όμως παρατηρείται αλλαγή της συμπεριφοράς τους προς το χειρότερο, όταν είναι :

- Καρστικοποιημένος και έτσι δημιουργούνται προβλήματα διαφυγών σε φράγματα καθώς και σε σήραγγες στην ζώνη μεταβίβασης των καρστικών νερών με κίνδυνο αιφνίδιων εισροών καθώς και στην ζώνη κορεσμού όπου έχουμε σταθερή αποστράγγιση του υδροφόρου ορίζοντα
- Ρωγματομένος ή τέμνεται από ρήγματα
- Λεπτοστρωματώδης και διαταραγμένος ή ακόμη και όταν :
- Παρουσιάζει δυσμενή προσανατολισμό της στρώσης και των ασυνεχειών (αστάθεια πρανών, δυσκολία στη διάνοιξη σιηράγγων)
- Παρουσιάζει ενδιάμεσα λεπτά στρώματα μικρής αντοχής με αποτέλεσμα την αστάθεια πρανών, τον κίνδυνο στη θεμελίωση βάθρων γεφυρών κτλ
- Τα καρστικά κενά είναι γεμάτα με αργιλικό υλικό, οπότε και έχουμε μείωση περατότητας, προβλήματα θεμελίωσης (καθιζήσεις, υποχωρήσεις), προβλήματα υποστήριξης σε σήραγγες, έκπλυση από την πίεση του νερού στον ταμιευτήρα του φράγματος και επαναλειτουργία των αγωγών με ανεξέλεγκτες διαφυγές.

Επίσης ιδιαίτερα επικίνδυνοι είναι οι έντονα κερματισμένοι και πτυχωμένοι ορίζοντες στα απότομα πρανή τεκτονικών τάφρων, που βρίσκονται σε γεωδυναμική εξέλιξη. Στους σχηματισμούς αυτούς εκδηλώνονται οι σοβαρότερες και μεγάλων εκτάσεων κατολισθήσεις, κατά μήκος προετοιμασμένων επιφανειών ολίσθησης ή και ζωνών αδυναμίας με σοβαρές επιπτώσεις στα διάφορα τεχνικά έργα. Επίσης, είναι δυνατόν να προκληθούν ολισθήσεις βραχώμαζων, καθώς και αποκολλήσεις και καταπτώσεις βράχων, ιδιαίτερα κάτω από σεισμική φόρτιση.



Εικόνα 3.5 : Η βραχώμαζα είναι έντονα κερματισμένη και αποδιοργανωμένη από επιππευτικές κινήσεις και τεκτονικά ράκη, [53]

Ο δολομίτης είναι επίσης πέτρωμα με παρόμοια χαρακτηριστικά και τεχνική συμπεριφορά με αυτά των ασβεστολίθων, η καρστικοποίηση και η διάλυσή του όμως είναι λιγότερο έντονη, λόγω της ύπαρξης αλάτων μαγνησίου το οποίο διαλύεται δυσκολότερα από το νερό και παραμένει ως άμμος μέσα στις ρωγμές και τους καρστικούς αγωγούς του πετρώματος (δημιουργία άμμου $MgCO_3$). Ο δολομίτης, είναι βαρύτερος, σκληρότερος και περισσότερο εύθρυπτος από τον ασβεστόλιθο.

3.2.2 Φλύσχης

Χαρακτηριστικό παράδειγμα χαοτικού μίγματος είναι αυτό του φλύσχη όπου σε κλίμακα του μέτρου συνυπάρχουν άλλοτε “εν ηρεμία” και άλλοτε “χαοτικά” πετρώματα σκληρής, ψαθυρής, συμπεριφοράς (ψαμμίτες) με άλλα πλαστικής (αργιλικοί σχιστόλιθοι) ως αποτέλεσμα της τεκτονικής διαταραχής που μπορεί να προκαλέσει αλλαγή της αρχικής δομής και υποβάθμιση της όποιας αρχικής ποιότητας της βραχώμαζας. Ο φλύσχης αποτελώντας ένα σύστημα πετρωμάτων, συνδέεται άμεσα με την τεκτονική εξέλιξη του γεωσυγκλίνου και σηματοδοτεί το κλείσιμο του κύκλου ιζηματογένεσης πριν την κύρια πτύχωση (ορογένεση). Έτσι η ποικιλία των πετρωμάτων που συνθέτουν το φλύσχη του προσδίδουν έντονη ανισοτροπία.

Η σύστασή του αποτελείται από εναλλαγές στρωμάτων κυρίως ψαμμίτη, ιλυόλιθου, αργιλικού σχιστόλιθου, μάργας, αλλά και κροκαλοπαγών και ασβεστόλιθων

με πάχη στρωμάτων από λίγα εκατοστά μέχρι μερικά μέτρα. Είναι πρακτικά ένας στεγανός σχηματισμός με λιγότερο έντονες και επιφανειακές ρωγμές που όταν επικρατούν ψαμμίτες γίνονται πιο έντονες.



Εικόνα 3.6 : Χαοτικό μίγμα - γεωυλικά επώθησης, [52]

Στους ασβεστόλιθους - κερατόλιθους εκδηλώνονται αστοχίες λόγω της έντονης και πολυσχιδούς διάρρηξης και της δημιουργίας απότομων πρανών σε συνδυασμό με τις υποσκαφές, στο δε φλύσχη εξαιτίας της ισχυρής τεκτονικής καταπόνησης αυτού από τις επωθήσεις, αλλά και της σύστασής του από εναλλαγές οριζόντων με κυμαινόμενους φυσικομηχανικούς δείκτες και διάφορη υδρογεωλογική συμπεριφορά.

Στη διάνοιξη σηράγγων μέσα από μεγάλες τεκτονικές γραμμές, έστω και κάθετα σε αυτές, η βραχώμαζα είναι πολύ διαταραγμένη σε ευρεία κλίμακα λόγω κυρίως των διαφόρων επιππεύσεων και διατμήσεων. Προβλήματα προκύπτουν λόγω των συχνών εναλλαγών στρωμάτων διαφορετικής συμπεριφοράς και έντονου τεκτονισμού (πτυχώσεις, ζώνες διάτμησης) και απαιτείται υποστήριξη άμεση και συνεχής κυρίως σε λεπτοστρωματώδη και αργιλικής σύστασης πετρώματα.

Σε σοβαρές και εκτεταμένες θεμελιώσεις έχουμε προβλήματα πετρογραφικής ετερογένειας με διαφορικές καθιζήσεις. Πιο συγκεκριμένα σε φράγματα απαιτείται αποκλειστικά εύκαμπτος τύπος (χωμάτινο - λιθόρριπτο), ενώ δεν δημιουργούνται ιδιαίτερα προβλήματα σε μεσαίες και μικρές κατασκευές.

Σε φυσικές πλαγιές και πρανή η αστάθεια η οποία εκδηλώνεται με κατολισθήσεις οφείλεται στην αργιλική σύσταση και στον λεπτοστρωματώδη χαρακτήρα. Η ανάπτυξη μεγάλου πάχους μανδύα αποσάθρωσης οδηγεί σε μεγάλες

κατολισθήσεις οι οποίες μπορεί να αποτελούν απειλή και για οικισμούς και χωριά καθώς και για φράγματα, δρόμους κτλ.



Εικόνα 3.7 : Αστοχία τεχνικού έργου που θεμελιώνεται σε ιζήματα του φλύσχη, [51]

Έτσι, κατά τη διάνοιξη του οδικού δικτύου (ορύγματα, επιχώματα, γέφυρες, κ.α.), τη θεμελίωση οικιών και άλλων εγκαταστάσεων, θα πρέπει να λαμβάνονται ιδιαίτερα υπόψη οι ιδιάζουσες γεωλογικές συνθήκες και η γεωμετρία των πρανών αλλά και των σχηματισμών που τα συνθέτουν.

Πλέον επικίνδυνοι θεωρούνται οι τεταρτογενείς, χαλαροί σχηματισμοί (αργιλοαμμώδη υλικά, κορήματα) μικρού πάχους, που παρουσιάζουν γενικά μεγάλη κατακόρυφη και οριζόντια μεταβλητότητα στη σύστασή τους. Επίσης, διευκολύνονται οι καταπτώσεις βράχων σε ασβεστολιθικά - κερατολιθικά κυρίως πρανή καθώς και σε πρανή σχηματισμών του φλύσχη.

Επισημαίνεται εδώ ότι οι επωθημένοι υδροπερατοί σχηματισμοί στα πρακτικώς στεγανά πετρώματα του φλύσχη, τροφοδοτούν και εμποτίζουν αυτά με άφθονο νερό, γεγονός που διευκολύνει την ενεργοποίηση των υλικών με τη δημιουργία κλιμακωτών θραύσεων και ολισθήσεων.

Πλέον ασταθείς παρουσιάζονται οι ζώνες που καταλαμβάνονται από τα νεογενή, λεπτομερούς κυρίως φάσεως, από σχιστοκερατόλιθους, καθώς και από εναλλαγές αργιλικών σχιστολίθων, κερατόλιθων, μαργών και ασβεστολιθικών ενστρώσεων.



Εικόνα 3.8 : Αστοχία σε σχηματισμούς των νεογενών σε τμήμα του δρόμου Διακοφτού – Καλαβρύτων, [51]

Οι καταπτώσεις βράχων ευνοούνται ιδιαίτερα σε συμπαγή πετρώματα (μάρμαρα, σχιστόλιθοι, γρανίτες, κ.α.) , όπου:

- το ισχυρό μορφολογικό ανάγλυφο,
- η έντονη διάρρηξη από αλληλοτεμνόμενα επίπεδα συνδυάζονται με υποσκαφές
- η περιοδική δράση των θλιπτικών - εφελκυστικών τάσεων λόγω παγετού, φόρτισης κ.ά.,

δημιουργούν τοπικά σοβαρά προβλήματα

3.2.3 Μολάσσα

Χαρακτηρίζεται από ήρεμο τεκτονικό περιβάλλον με τοπικές μόνο μικροδιατμήσεις και μικροπτυχώσεις και με περιορισμένης έκτασης ζώνες ρηγμάτων. Στα περιθωριακά μόνο κράσπεδα των μολασσικών λεκανών υπάρχουν αρκετά ανάστροφα ρήγματα.

Οι σύνθετες βραχώμαζες αποτελούνται από εναλλαγές ικανών - καλής γενικά αντοχής - τραπεζών (στρωμάτων) ψαμμίτη ή/και κροκαλοπαγούς και μη ικανών -

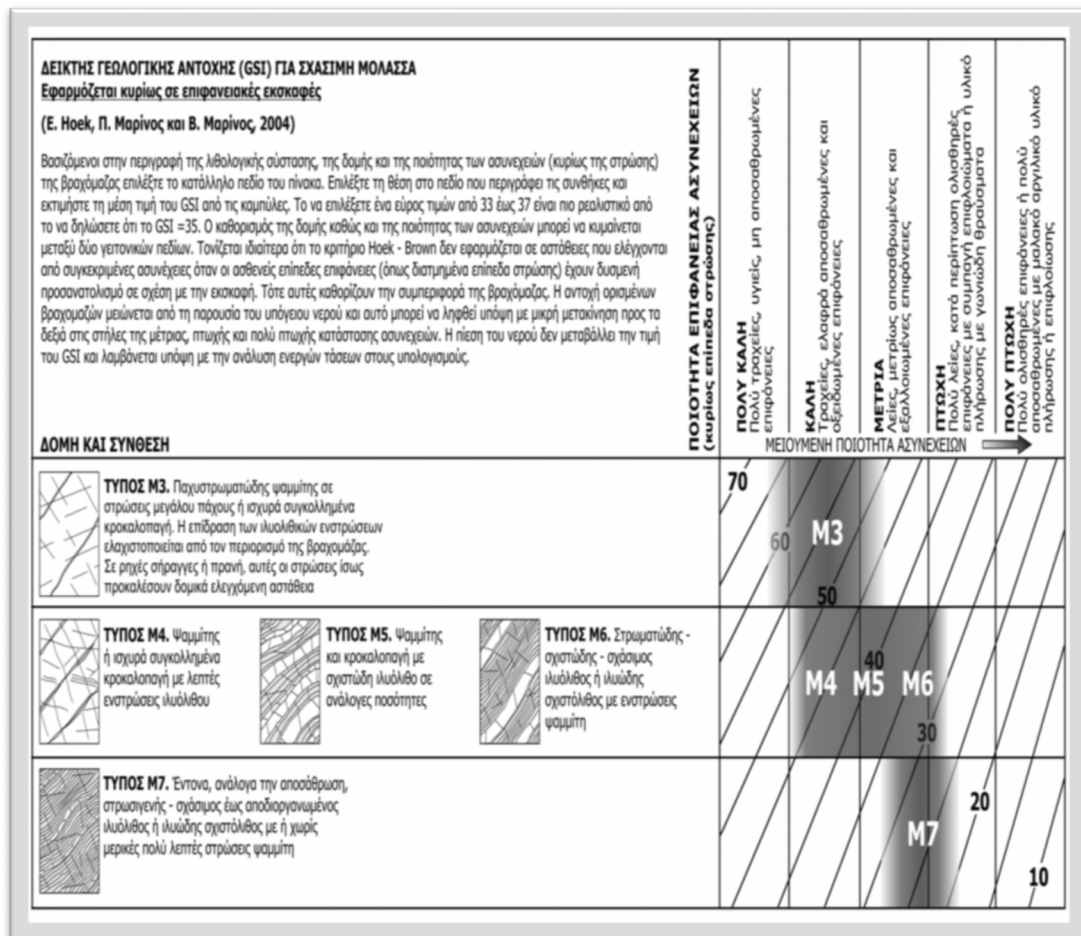
μέτριας ή μικρής γενικά αντοχής - στρωμάτων ιλυόλιθου ή αργιλόλιθου, ενώ οι ασθενείς χαρακτηρίζονται από την παρουσία ιλυολιθικών - αργιλικών πετρωμάτων. Οι μολασσικοί αυτοί σχηματισμοί έχουν το χαρακτηριστικό να είναι σχιστοποιημένοι - στρωματώδεις στην επιφάνεια λόγω της ιδιότητάς τους να υφίστανται σχάση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, με αποτέλεσμα την αποσάθρωση σε σημαντικό βαθμό και επιπλέον η επίδραση του νερού να γίνεται επιβαρυντική για τα ιλυολιθικά - αργιλικά μέλη και τις ασυνέχειές τους.



Εικόνα 3.9 : Σχηματισμός μολάσσας , [50]

Στο βάθος (από τα ~ 10 - 15m) λόγω του περιορισμού περίσφιγξης της βραχώμαζας και της ήρεμης τεκτονικής εξέλιξης, η βραχώμαζα εμφανίζεται μαζώδης, συνεχής και συμπαγής με λανθάνουσες μόνο διεπιφάνειες, παρατηρείται δηλαδή ετερογένεια και στρωσιγένεια στην επιφάνεια, και ομοιογένεια και συνεχής δομή στο βάθος.

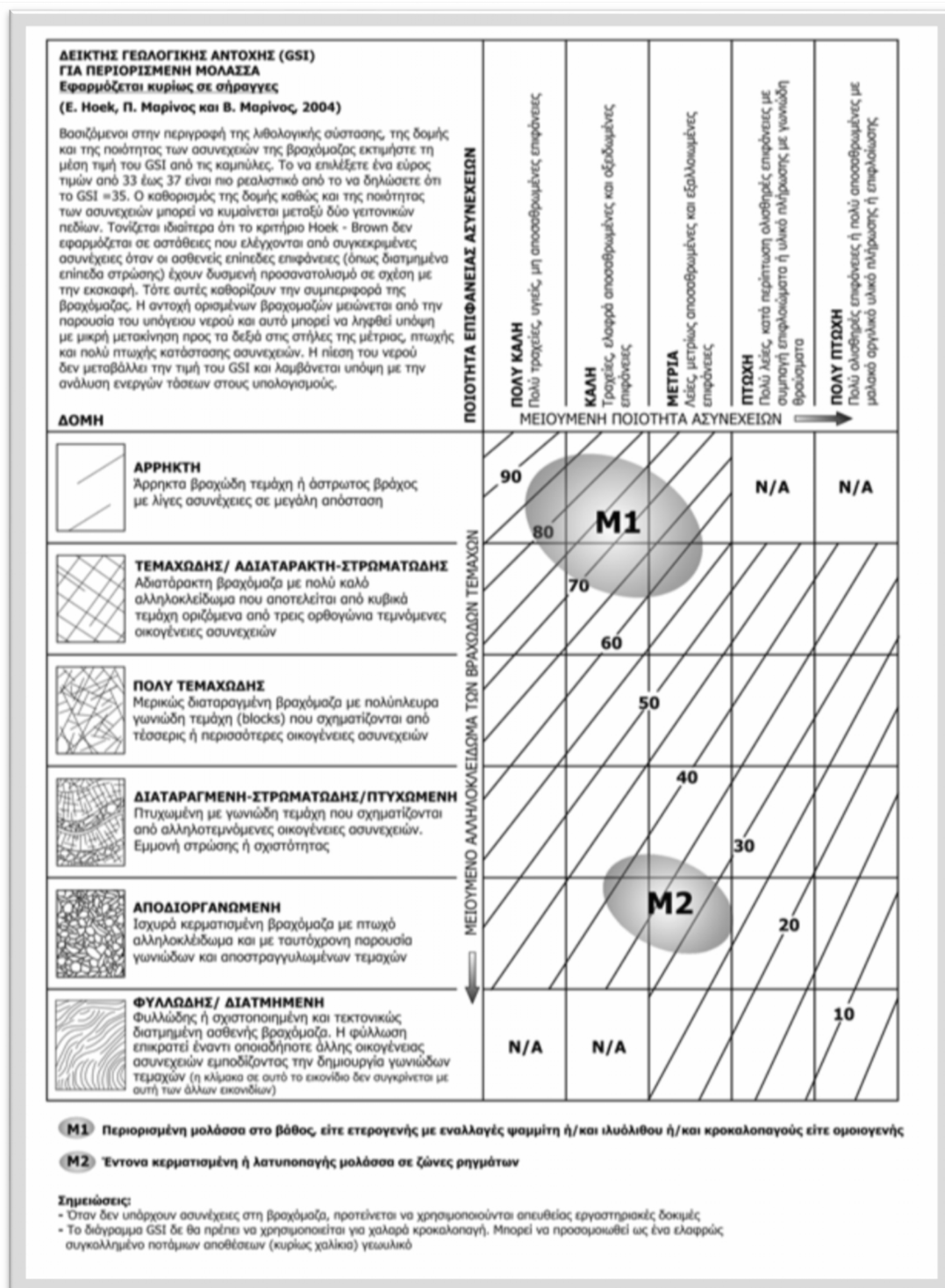
Τεχνικογεωλογικό Πρότυπο Σύστημα Ταξινόμησης GSI για Μολάσες



Σχήμα 3.4 : Πεδία μεταβολών του GSI για την μολάσσα με σχάσιμη δομή και εκπεφρασμένα επίπεδα στρώσης (κυρίως σε επιφανειακές εκσκαφές - πρανή), (Ε. Hoek, Π. Μαρίνος και Β. Μαρίνος, 2004)

Με βάση τα τεχνικογεωλογικά πρότυπα συστήματα ταξινόμησης GSI, σε γενικές γραμμές για την αποσπασθωμένη βραχώμαζα παρατηρούμε :

1. Πιο δεξιές θέσεις στον πίνακα απ'ότι στη μη αποσπασθωμένη.
2. Αν η αποσάθρωση έχει προχωρήσει και στη θεμελιώδη μάζα αλλά η δομή παραμένει ίδια, τότε οι τιμές και οι σταθερές του γεωυλικού (σ_{ci} , m_i) θα πρέπει να μειώνονται ανάλογα.
3. Αν η αποσάθρωση έχει εξαφανίσει τη λογική των ασυνεχειών τότε η αντοχή του γεωυλικού θα πρέπει να υπολογίζεται με τη λογική του εδάφους.



Σχήμα 3.5 : Πεδία μεταβολών του GSI για την μολάσση σε βάθος όπου λόγω παρεμποδισμού δεν έχουν “ελευθερωθεί” οι επιφάνειες στρώσης (εφαρμογή κυρίως σε σήραγγες), (Ε. Hoek, Π. Μαρίνος και Β. Μαρίνος, 2004)

3.2.4 Κρυσταλλικά πετρώματα

Κρυσταλλικά πετρώματα ονομάζονται εκείνα που αποτελούνται εξ ολοκλήρου από κρυσταλλικά ορυκτά χωρίς υαλώδη μάζα. Η δομή στα πυριγενή πετρώματα που στερεοποιούνται σε βάθος είναι σχεδόν πάντα κρυσταλλική, ενώ στα ηφαιστειοκλαστικά και πυροκλαστικά πετρώματα μπορεί να είναι η μάζα εν μέρει ή και εντελώς υαλώδης. Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την ικανότητα κρυστάλλωσης ενός μάγματος, αλλά η χρονική διάρκεια κατά την οποία λαμβάνει χώρα η ψύξη είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα είναι σχεδόν πάντα κρυσταλλικά καθώς και τα ιζηματογενή μπορεί επίσης να είναι κρυσταλλικά, όπως οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι. Ο όρος γενικά δεν εφαρμόζεται στα κλαστικά ιζήματα αν και σχηματίζονται σε μεγάλο βαθμό από τη συσσώρευση των κρυσταλλικών υλικών.

Τα μεταμορφωμένα πετρώματα γενικότερα προέρχονται από πετρώματα (ιζηματογενή ή πυριγενή). Η μεταμόρφωση αλλάζει τη διάταξη των ορυκτών δημιουργώντας ζωνώδη ή σχιστοφυή ιστό σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες. Ανάλογα φαινόμενα εκδηλώνονται στην περίπτωση ανάπτυξης σκληρών μεταμορφωμένων πετρωμάτων σε πιο μαλακούς σχηματισμούς, ή εκεί όπου επικρατούν σχιστολιθικοί σχηματισμοί ή εναλλαγές αργιλικών λεπτών ενστρώσεων ή σχιστολίθων και πλέον σκληρών πετρωμάτων (ψαμμίτες, μάρμαρα). Το κύριο χαρακτηριστικό του ιστού των πετρωμάτων αυτών είναι η παράλληλη διάταξη των ορυκτών τους, με συνέπεια την εμφάνιση επιπέδων με ορυκτά μειωμένης αντοχής (μαρμαρυγίες, χλωρίτες) και τον διαχωρισμό σε φύλλα ή λεπτές πλάκες κυρίως στους σχιστόλιθους. Επιπλέον χαρακτηριστικό των πετρωμάτων αυτών είναι η έντονη ανισοτροπία.

Το μάρμαρο σχηματίζεται από τη μεταμόρφωση ασβεστόλιθου και δολομίτη και έχει χρώμα το οποίο ποικίλει από λευκό μέχρι μαύρο. Είναι πέτρωμα κρυσταλλοκοκκώδες με καλή λείανση και λαξεύεται εύκολα. Το μάρμαρο δεν είναι ανθεκτικό στη φωτιά, ενώ η ανθεκτικότητά του στις καιρικές επιδράσεις ποικίλει ανάλογα με τη σύστασή του. Δεν παρουσιάζει αποσάθρωση και μόνο τα ανώτερα τμήματά του κοντά στην επιφάνεια του εδάφους παρουσιάζουν ρωγμές που όμως κλείνουν με το βάθος. Παρουσιάζει πολύ υψηλές αντοχές, αλλά όταν βρίσκεται σε περιβάλλον που υπάρχουν οξείδια του θείου αλλοιώνεται προς γύψο.

Ο γνεύσιος προέρχεται από τη μεταμόρφωση γρανιτών και παρόλο που παρουσιάζουν σχιστοφυή ιστό δεν χωρίζονται εύκολα σε πλάκες όπως οι φυλλίτες ή οι σχιστόλιθοι. Δεν είναι κατάλληλα για αδρανή στο σκυρόδεμα, λόγω της παράλληλης συνεχούς διάταξης των φυλλωδών ορυκτών.

Οι χαλαζίτες είναι τα πετρώματα με τις υψηλότερες αντοχές σε μονοαξονική θλίψη, αλλά η συμπεριφορά τους αυτή οδηγεί στην εμφάνιση ρωγμών, λόγω τεκτονικών καταπονίσεων. Η εκσκαφή τους γίνεται με χρήση εκρηκτικών και η προσχώρησή τους σε σήραγγες είναι πολύ αργή.

Θραύσεις και ολισθήσεις παρατηρούνται στο μανδύα αποσάθρωσης των σχηματισμών του υποβάθρου και στα κορήματα όταν είναι μεγάλου πάχους και έχουν το αργιλικό στοιχείο, καθώς και στη ζώνη χαλάρωσης αυτών, που είναι σχετικά βαθιά.



Εικόνα 3.10 : Αστοχίες σε πρανή με υλικά του μανδύα και κορήματα, [51]



Εικόνα 3.11 : Μεταθετική ολίσθηση σε υλικά της ζώνης αποσάθρωσης και κερματισμού σχιστόλιθων, [51]

Ενδεικτικά παραθέτουμε την παρακάτω περίπτωση στην περιοχή της Ινδίας :

10. *“Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state”*
“Επίδραση αποσάθρωσης στην αντοχή και παραμόρφωση των κρυσταλλικών πετρωμάτων κάτω από συμπίεση σε μονοαξονική θλίψη”

Gupta, A.S., Seshagiri Rao, K., 2000

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές συμπίεσης μονοαξονικής θλίψης σε τρεις λιθολογικές ενότητες για διάφορες κατηγορίες αποσάθρωσης : στον γρανίτη Malanjkhanda, στον βασάλτη Nagpur και στον χαλαζίτη Delhi, που βρίσκονται στην κεντρική και βόρεια Ινδία. Η παραμορφωτική συμπεριφορά μελετήθηκε από την άποψη της μεταβολής του φαινομενικού μέτρου ελαστικότητας E_{t50} και του μέτρου ελαστικότητας E_i κατά την εξέλιξη της αποσάθρωσης.

Η δυναμική σχέση ανάμεσα στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (σ_c) και το φαινομενικό μέτρο E_{t50} δείχνει ότι επηρεάζεται έντονα από την αποσάθρωση σε κοινούς τύπους πετρωμάτων. Αυτή η σχέση έχει καθιερωθεί από την ανάλυση της παλινδρόμησης και την σημαντική παράμετρο συσχέτισης (συντελεστής προσδιορισμού, $r_2 = 0,87$) για τα κρυσταλλικά πετρώματα. Έχει αποδειχθεί ότι υπάρχει συστηματική μείωση του λόγου δυσκαμψίας δηλαδή της σχέσης του φαινομενικού μέτρου ελαστικότητας E_{t50} και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη όσο αυξάνεται η αποσάθρωση.

Η σύγκριση ανάμεσα στο φαινομενικό μέτρο ελαστικότητας E_{t50} και του μέτρου ελαστικότητας έδειξε ότι το φαινομενικό μέτρο ελαστικότητας μειώνεται περισσότερο από ότι το μέτρο ελαστικότητας E_i . Και η μείωση του E_i γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνεται ο βαθμός της αποσάθρωσης και στους τρεις τύπους των πετρωμάτων. Η κατάσταση της αστοχίας έχει βρεθεί ότι επηρεάζεται από τις συνθήκες αποσάθρωσης στους βράχους.

Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή των εγγενών χαρακτηριστικών των υγείων και αποσαθρωμένων βραχώμαζων καθώς και της ποσοτικής διερεύνησης των μεταβολών της ορυκτολογικής σύστασης κατά την αποσάθρωση. Η διερεύνηση της συσχέτισης μεταξύ των πετρογραφικών και μηχανικών δεικτών έδειξε ότι οι μηχανικές ιδιότητες εξαρτώνται προφανώς από τα εγγενή χαρακτηριστικά των αποσαθρωμένων βραχώμαζων.

Κατηγορίες και περιγραφή αποσαθρωμένου γρανίτη :

Βαθμός αποσάθρωσης		Περιγραφή
Υγιής βραχώμαζα	W_0	Γκρι ή ροζ χρώμα. Δεν αποχρωματίζεται . Οι κόκκοι έχουν υαλώδη λάμψη. Ουσιαστικά δεν υπάρχουν σημαντικές ρωγμές.
Ελαφρώς αποσαθρωμένη	W_1	Κανένας σημαντικός χρωματισμός. Θαμπή λάμψη των ορυκτών . Οι κόκκοι είναι σφικτά συνδεδεμένοι. Λίγοι άστριοι είναι χαλικώδεις. Ρωγμές στο μέγεθος της τρίχας είναι ορατές σε μικρή ποσότητα.
Μέτρια αποσαθρωμένη	W_2	Ελαφρώς χρωματισμένο δείγμα. Λίγοι κόκκοι είναι χαλικώδεις στην εμφάνιση. Μικρορωγμές είναι ορατές, αλλά είναι σφικτές. Λίγα άστριοι (πλαγιόκλαστα) αποσυντίθεται και μπορούν να γρατσουνιστούν. Το δείγμα μπορεί να σπάσει από ένα χτύπημα γεωλογικού σφυριού.
Πολύ αποσαθρωμένη	W_3	Αποχρωματισμός και μόνο ένας ιδιαίτερος χρωματισμός σε ένα ανοιχτό καφέ χρώμα. Οι περισσότεροι κόκκοι είναι αμμώδεις και αργιλώδεις. Χαλαρά συνδεδεμένοι με σπασίματα κόκκοι χαλαζία. Οι μικρορωγμές γεμίζουν με άργιλο. Έχουν μείνει λίγοι άστριοι που δεν έχουν αποσυντεθεί.
Εντελώς αποσαθρωμένη	W_4	Πλήρης αποχρωματισμός με κηλίδες αργίλου. Πολύ χαλαρά συνδεδεμένα κόκκοι. Οι μικρορωγμές είναι ανοιχτές και γεμίζουν με άργιλο και αέρα. Το δείγμα μπορεί να θρυμματιστεί με τα δάχτυλα.
Έδαφος	W_5	Η αρχική υφή χάνεται. Το δείγμα έχει γίνει κοκκώδες. Δεν υπάρχει σχεδόν καμία συνοχή.

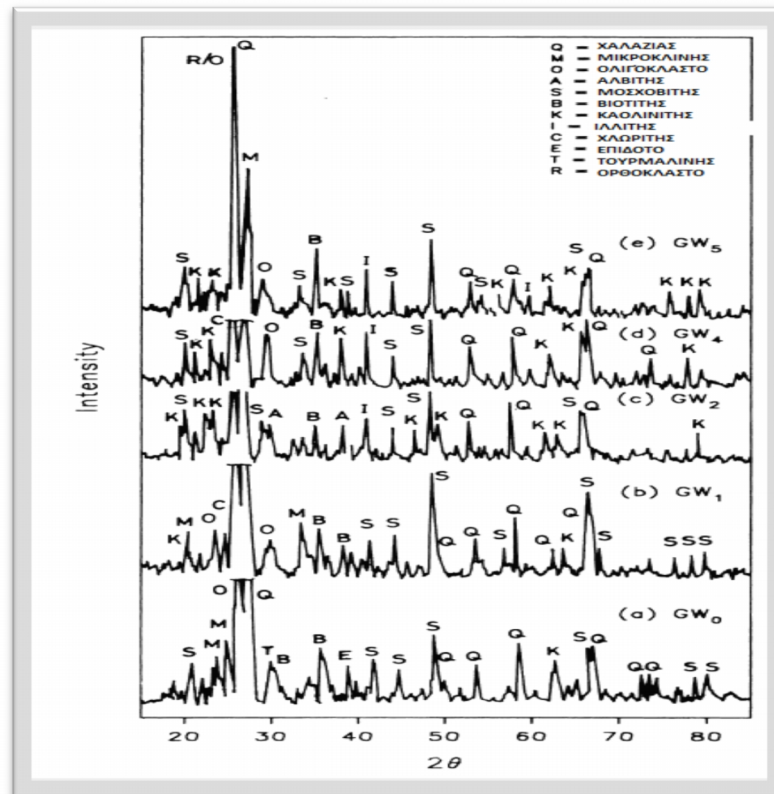
Σχήμα 3.6 : IAEG (1981) and ISRM (1981)

Γρανίτης Malanjhand

Τα δεδομένα από ακτίνες X περίθλασης σε διαφορετικούς βαθμούς αποσάθρωσης του γρανίτη δείχνουν σημαντική διακύμανση της ορυκτολογικής σύστασης κατά την εξέλιξη της αποσάθρωσης. Ορυκτά όπως το ορθόκλαστο, ο μικροκλινής, ο αλβίτης, το ολιγόκλαστο, ο μοσχοβίτης, ο χαλαζίας και ο βιοτίτης διακρίνονται έντονα από τα τις αιχμηρές κορυφές των υψηλών που παρουσιάζουν στο

διάγραμμα. Ο τουρμαλίνης και το επίδοτο διακρίνονται στο διάγραμμα με τις χαμηλές κορυφές με την παρουσία τους μόνο στον υγιή γρανίτη GW₀.

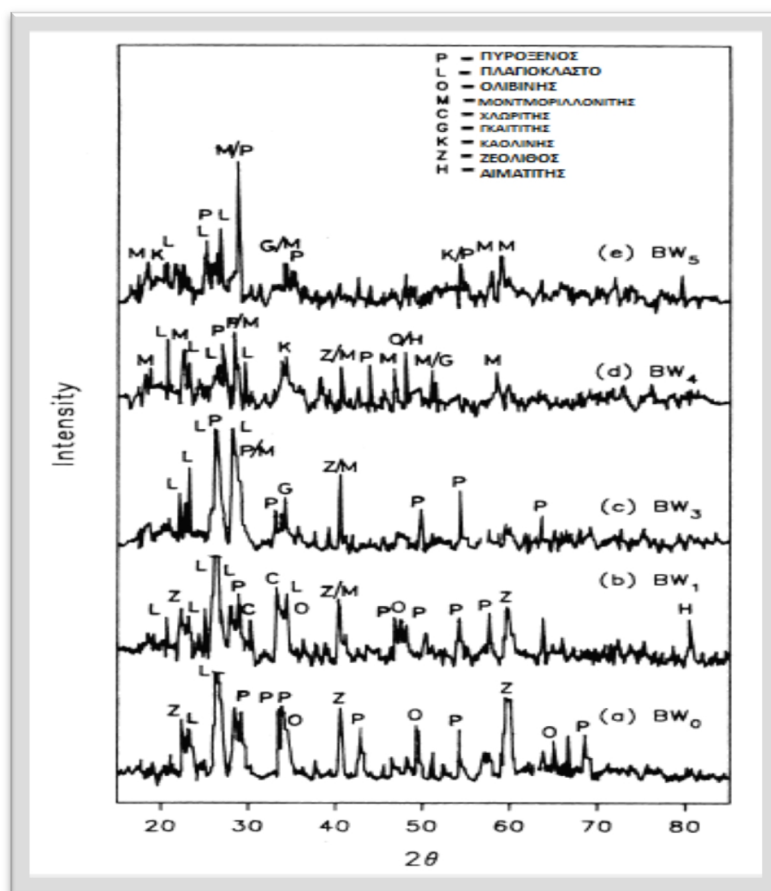
Τα αργιλικά ορυκτά каоλίνης και ιλλίτης εντοπίζονται σε υψηλότερους βαθμούς αποσάθρωσης και σε υπολλειμματικά εδάφη. Το μέγιστο του χαλαζία δείχνει μια μικρή μείωση με την αύξηση του βαθμού αποσάθρωσης. Επίσης στους υψηλότερους βαθμούς αποσάθρωσης παρατηρήθηκε μεταβολή των κορυφών του μοσχοβίτη.



Σχήμα 3.7 : Ανάλυση Γρανίτη, Gupta, A.S., Seshagiri Rao, K., 2000

Βασάλτης Nagpur

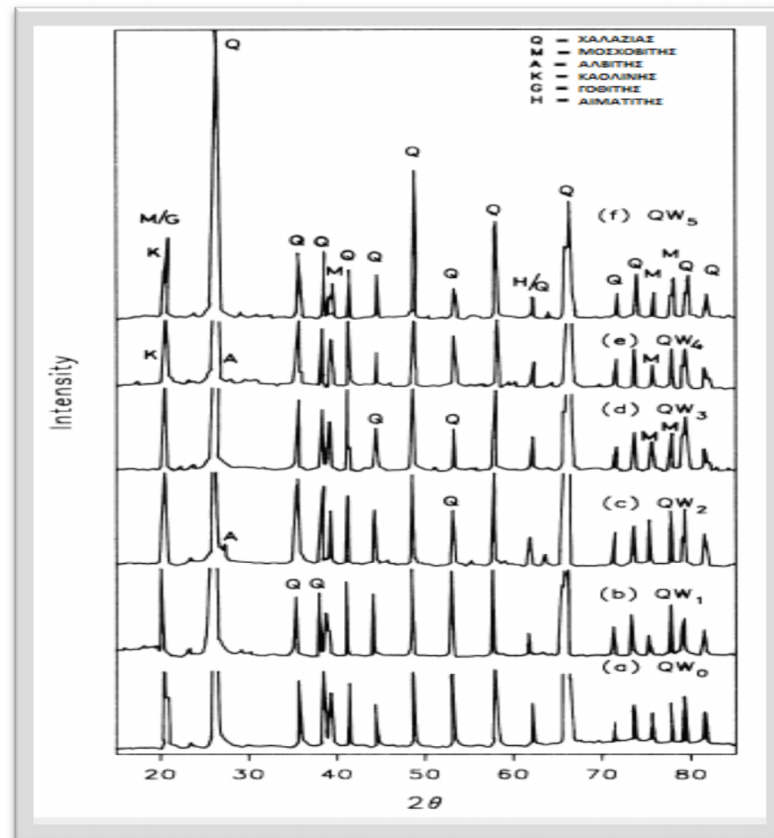
Η μελέτη των ορυκτολογικών μεταβολών μέσω των μέγιστων των διαγραμμάτων που προήλθαν από την ανάλυση ολόκληρης της βραχώμαζας έδειξε την εμφάνιση και εξαφάνιση ορισμένων ορυκτών κατά την εξέλιξη της αποσάθρωσης από τον υγιή βασάλτη έως το υπολειμματικό έδαφος από αποσαθρωμένο βασάλτη. Τα πλαγιόκλαστα και οι πυρόξενοι είναι τα πιο εμφανή στο διάγραμμα με ευδιάκριτες τις κορυφές των μέγιστων ενώ οι κορυφές του ολιβίνης και των ζεόλιθων είναι δυσδιάκριτες. Μεταξύ των ζεόλιθων επίσης εντοπίστηκαν ο λαουμονίτης και ο μεσόλιθος (Brick 1974). Μέγιστα μοντμοριλλονίτη και ζεόλιθων εντοπίζονται επίσης στους ίδιους βράχους. Τα μέγιστα σε πλαγιόκλαστα και αστρίους μειώνονται στο υπολειμματικό έδαφος.



Σχήμα 3.8 : Ανάλυση Βασάλτη, Gupta, A.S., Seshagiri Rao, K., 2000

Χαλαζίτης Delhi

Μία συγκριτική μελέτη από την περιθλασιομετρία του υγιή χαλαζίτη και τους διάφορους βαθμούς αποσάθρωσής του, δείχνει ότι τα περισσότερα μέγιστα των ορυκτών και ειδικά του χαλαζία είναι πανομοιότυπα σε όλους του βαθμούς αποσάθρωσης. Το μέγιστο του χαλαζία δείχνει μια μικρή μείωση στην ένταση του όσο αυξάνεται ο βαθμός αποσάθρωσης, υποδεικνύοντας μια μικρή διάσπαση του κρυστάλλου χαλαζία κατά μήκος ενός ορισμένου επιπέδου του πλέγματος. Ένα μικρό μέγιστο του καολίνη εμφανίζεται στους βαθμούς αποσάθρωσης QW₄ και QW₅. Μέγιστα του γκαϊτίτη και των αστρίων παρατηρήθηκαν επίσης σε μερικά στάδια. Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί ο αιματίτης.



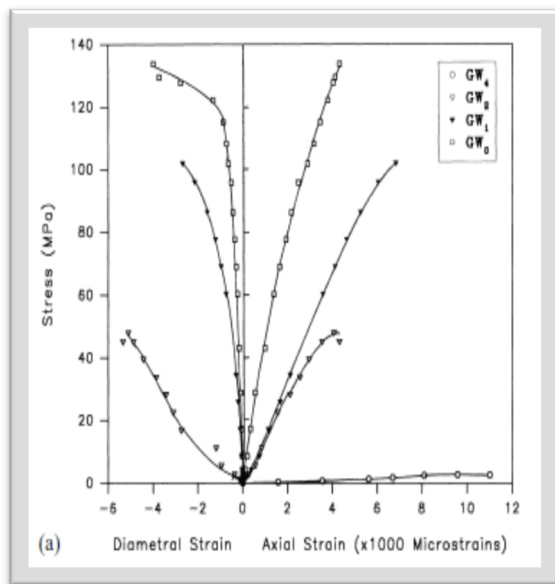
Σχήμα 3.9 : Ανάλυση Χαλαζίτη, Gupta, A.S., Seshagiri Rao, K., 2000

Από την άποψη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη (σ_c), ο υγιής χαλαζίτης έχει την μεγαλύτερη αντοχή με τιμές $\sigma_c = 207$ MPa και ακολουθεί ο βασάλτης 173MPa και ο γρανίτης (133MPa) όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Κατά την εξέλιξη της αποσάθρωσης αυτών των πετρωμάτων η αντοχή σ_c μειώνεται σταδιακά κατά αυξανόμενο βαθμό αποσάθρωσης. Ο βασάλτης και ο γρανίτης δείχνουν μία σχεδόν παρόμοια πτωτική τάση της αντοχής περίπου στο 98% σε εντελώς αποσαθρωμένη κατάσταση (W_4) σε σχέση με την αντοχή στην υγιή τους κατάσταση. Ο χαλαζίτης παρουσιάζει μικρότερη μείωση στο 94% σε βαθμό αποσάθρωσης QW_4 . Μελετάται η επίδραση του κορεσμού του νερού στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη στις εξεταζόμενες βραχόμαζες για διαφορετικούς βαθμούς αποσάθρωσης. Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι η παρουσία νερού στο πέτρωμα οδηγεί σε διάφορες μηχανικές και χημικές επιδράσεις, η πιο σημαντική από τις οποίες είναι η μείωση της αντοχής. Η παρουσία νερού μειώνει τις δυνάμεις μεταξύ των κρυστάλλων με αποτέλεσμα να μειώνεται η αντοχή του βράχου και να αυξάνεται η παραμορφωσιμότητα.

Μέτρο παραμορφωσιμότητας

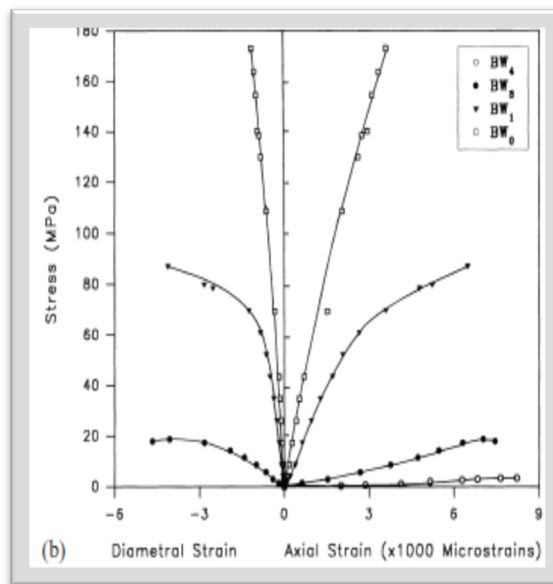
Οι παράμετροι παραμορφωσιμότητας σε συνθήκες ανεμπόδιστης θλίψης γραφικά έχουν ορισμένης μορφής καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης όπως φαίνεται παρακάτω στα διαγράμματα για διάφορους βαθμούς αποσάθρωσης.

ΓΡΑΝΙΤΗΣ



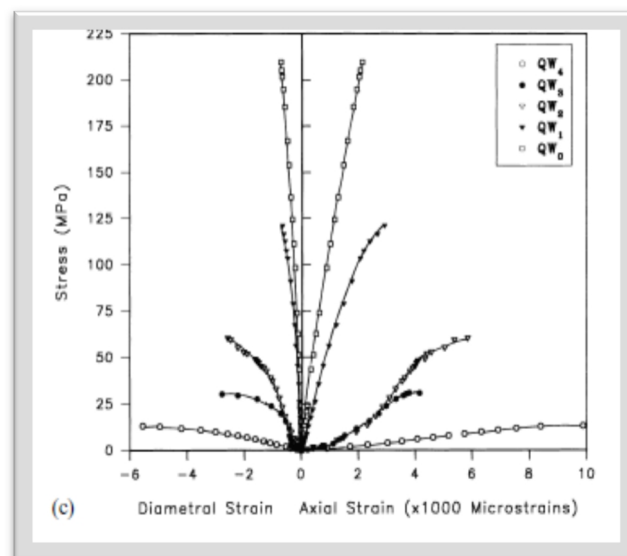
Σχήμα 3.10 : Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης,
Gupta, A.S., Seshagiri Rao, K., 2000

ΒΑΣΑΛΤΗΣ



Σχήμα 3.11 : Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης,
Gupta, A.S., Seshagiri Rao, K., 2000

ΧΑΛΑΖΙΤΗΣ



Σχήμα 3.12 : Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης,
Gupta, A.S., Seshagiri Rao, K., 2000

Το αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας E_i μετράται στο τμήμα της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης κατά την αρχή της φόρτισης, ενώ το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας E_{50} μετράται στο 50% της τάσης που θα αστοχήσει. Η μέγιστη τιμή της εφαπτόμενης τάσης της παραμόρφωσης παρατηρείται στα 94 GPa για τον υγιή χαλαζίτη κάτω από ξηρές συνθήκες. Μετά ακολουθεί ο βασάλτης με $E_{50} \sim 46$ GPa και ο γρανίτης με E_{50} περίπου στα 34 GPa .

Πίνακας ταξινόμησης των βαθμών αποσάθρωσης βασισμένο στην γενική παρατήρηση της αστοχίας του γεωυλικού κάτω από μονοαξονική θλίψη :

Βαθμός αποσάθρωσης βραχόμαζας	Τύπος αστοχίας
Υγιής	Σχισμός και εφελκυσμός
Ελαφρώς αποσαθρωμένη	Εφελκυσμός και διάτμηση
Μέτρια αποσαθρωμένη	Διάτμηση και εφελκυσμός
Πολύ αποσαθρωμένη	Διάτμηση
Εντελώς αποσαθρωμένη	Διάτμηση και διόγκωση

*Σχήμα 3.13 : Ταξινόμηση των βαθμών αποσάθρωσης
Gupta, A.S., Seshagiri Rao, K., 2000*

Συνοπτικά τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από αυτή την μελέτη είναι τα εξής:

- 1) Η σχέση μεταξύ τάσης - παραμόρφωσης αποκαλύπτει ότι τα υγιή πετρώματα συμπεριφέρονται ως γραμμικά - ελαστικά και σε κάποιες περιπτώσεις ως ημιαστικά ενώ σε προχωρημένα στάδια αποσάθρωσης η μορφή της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης έχει το χαρακτηριστικό σχήμα S.
- 2) Σε γενικές γραμμές, η βραχόμαζα παραμορφώνεται και το μέγεθος της αστοχίας αυξάνεται όσο πιο εξελιγμένο είναι το στάδιο αποσάθρωσης που έχει υποστεί. Αυτό οφείλεται στην διάσπαση του σκελετού του υλικού από μικρορωγμές, από παρουσία αργιλικών υλικών και κενών μέσα στον βράχο. Επισημαίνονται επίσης μερικές από τις ανωμαλίες στην τάση αστοχίας που μπορεί να οφείλονται σε πρόωρη αστοχία των δειγμάτων.

- 3) Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η μείωση του μέτρου ελαστικότητας E_i είναι περισσότερο δραστική από ότι του εφαπτομενικού. Et_{50} με την αύξηση της αποσάθρωσης.
- 4) Ερευνήθηκε κάτω από την σχέση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη - παραμόρφωση η εξάρτηση από τους παράγοντες εξασθένησης της βραχόμαζας διαμέσου της διακύμανσης της σ_c και Et_{50} με U_c . Η αρνητική εκθετική σχέση ήταν πλήρως δικαιολογημένη από την ανάλυση της παλινδρόμησης.

3.2.5 Οφιολιθικό σύμπλεγμα

Στην οικογένεια των βασικών - υπερβασικών πλουτωνικών πετρωμάτων ανήκουν οι γάββροι, οι περιδοτίτες, ο βασάλτης και ο διαβάσης ενώ συχνά εμφανίζονται ως ένα σύστημα πετρωμάτων, γνωστό και ως οφιόλιθος. Οι οφιόλιθοι είναι εκχύσεις μάγματος μέσα σε γεωσύγκλινο και συνήθως εμπλέκονται με τους ιζηματογενείς σχηματισμούς που αποτίθενται μέσα σε αυτό. Όταν είναι υγιείς είναι πολύ υψηλών αντοχών και κατάλληλοι για τη θεμελίωση οπουδήποτε τεχνικού έργου. Η ορυκτολογική τους σύσταση (άστριοι στους γάββρους, ολιβίνης στους περιδοτίτες) επιτρέπει την αποσάθρωση η οποία μπορεί να προχωρήσει και σε μεγαλύτερα βάθη λόγω της απουσίας του χαλαζία, αλλά και λόγω της εντονότερης ρωγμάτωσης. Η έντονη ρωγμάτωση βοηθά στην κατείσδυση του νερού σε βάθος με συνέπεια να δημιουργούνται υπόγεια αποθέματα νερού κατάλληλα προς εκμετάλλευση, όχι όμως ίδιου δυναμικού με αυτό των ασβεστιτικών πετρωμάτων.

Οι οφιόλιθοι θεωρούνται τμήματα του ωκεάνιου φλοιού, τα οποία δημιουργήθηκαν σε μία ωκεάνια ράχη και στον ανώτερο μανδύα ενός αρχαίου ωκεανού και τα οποία στην συνέχεια επωθήθηκαν στον ηπειρωτικό φλοιό κατά τη διάρκεια της ορογένεσης. Το οφιολιθικό σύμπλεγμα μπορεί να χαρακτηρίζεται από υποκείμενα περιδοτιτικά πετρώματα, καλυμμένα από γαββρικά πετρώματα, τα οποία με τη σειρά τους μπορεί να καλύπτονται από βασάλτες ή σπηλίτες, όμως αυτή η γεωμετρία διαταράσσεται σημαντικά καθώς τα οφιολιθικά συμπλέγματα εμφανίζονται κατά κύριο λόγο σε τεκτονικές ζώνες με επαλληλία πολλαπλών επωθήσεων. Ο μεταμορφισμός που επίσης συμμετέχει στην διαδικασία αλλάζει την αρχική φύση των υλικών. Ο υψηλός βαθμός σερπεντινίωσης και οι έντονες διατμητικές κινήσεις συχνά δυσχεραίνουν την αναγνώριση της αρχικής σύστασης και υφής των συσσωρεύσεων.

Η διακριτοποίηση των τύπων βραχώμαζας οφιολιθικού συμπλέγματος γίνεται ως εξής :

- I. Μη σερπεντινωμένος οφιόλιθος (περιδοτίτης - γάββρος)
- II. Σερπεντινωμένος περιδοτίτης - γάββρος
- III. Έντονα σερπεντινωμένος περιδοτίτης ή σερπεντινίτης με πιθανές ζώνες
- IV. Φυλλοποιημένου σερπεντινίτη
- V. Φυλλοποιημένος σερπεντινίτης (διατμημένοι σερπεντινίτες, και χαοτικές μάζες σε οφιολιθικά τεκτονικά μίγματα)
- VI. Οφιολιθικό σύμπλεγμα με σχιστοκερατόλιθους

Η σερπεντινίωση (μετατροπή ολιβίνη σε σερπεντίνη ή αλλιώς περιδοτίτη σε σερπεντινίτη) της βραχώμαζας με τους διάφορους τρόπους γένεσης αλλά και ανάπτυξής της είναι ακανόνιστη και δημιουργεί μεγάλη συνθετότητα στην οριοθέτηση συγκεκριμένων ζωνών περιδοτίτη, σερπεντινωμένου περιδοτίτη, σερπεντινίτη και σχιστοποιημένου σερπεντινίτη, με την αρχική τραχεία κατάσταση και ποιότητα των ασυνεχειών και των διακλάσεων να μειώνεται δραματικά σε πτωχή ή και πολύ πτωχή. Ο σερπεντινίτης παρουσιάζει μικρή αντοχή σε διάτμηση, έχει σαπωνοειδή υφή και είναι εύθραυστος, ενώ στην περίπτωση διάνοιξης σήραγγας μέσα στη μάζα του μπορεί να παρουσιάσει διογκώσεις και για το λόγο αυτό χρειάζεται συνεχής και βαριά υποστήριξη.

Ο γάββρος όταν είναι σε υγιή κατάσταση είναι πέτρωμα πολύ υψηλών αντοχών, αλλά με την εμφάνιση αλλοιώσεων στους αστρίους που αποτελούν συστατικό του, χάνει την αντοχή του. Επιπλέον επειδή είναι σκληρό πέτρωμα, ρωγματώνεται εύκολα και δημιουργείται στη μάζα του σημαντικό δευτερογενές πορώδες που επιτρέπει υπόγεια κυκλοφορία νερού.

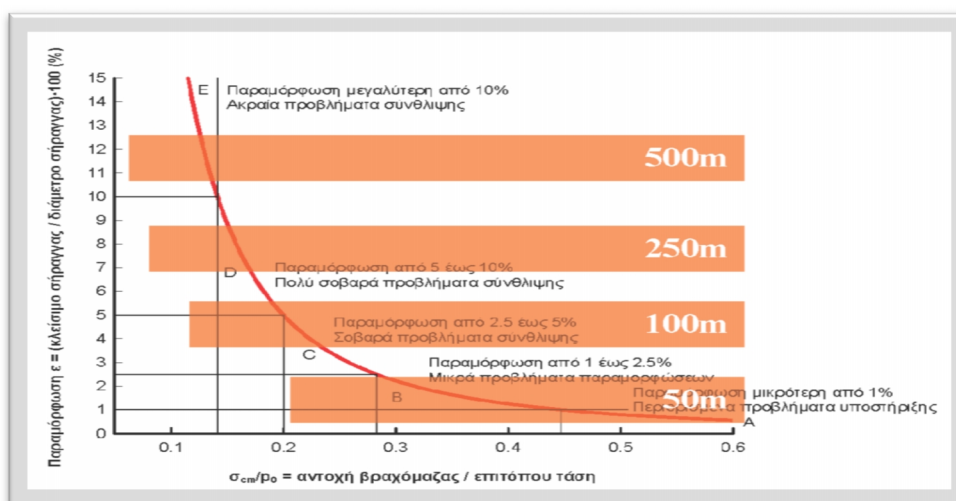
Ο βασάλτης έχει υαλώδη μάζα, ενώ ο διαβάσης έχει μικροκρυσταλλική. Έχουν γκρίζο ή μαύρο χρώμα και είναι πολύ σκληρά πετρώματα που εξαλλοιώνονται δύσκολα, άρα εμφανίζουν αντοχή στην αποσάθρωση. Η εκσκαφή τους γίνεται κυρίως με χρήση εκρηκτικών.

Οι περιπτώσεις αστοχιών σε σήραγγες μπορούν να διακριθούν επίσης σε :

1. Ολίσθηση σφηνών ανάλογα με τη γεωμετρία των ασυνεχειών και της σήραγγας. Ελάχιστες εισροές - σταγόνες. Σε μεγάλα βάθη εκτόξευση φλοιών πετρωμάτων.
2. Ολίσθηση σφηνών ανάλογα με τις μικρές έως μέτριες εισροές και την θέση του Υ.Ο. Πιθανότητα πιο ευρείας κατάπτωσης αν απαντάται έντονη σερπεντινίωση - φυλλοποίηση στις ασυνέχειες οι οποίες αποχωρίζουν ευκολότερα τα τεμάχια. Σε μεγάλα βάθη η βραχώμαζα είναι πιο περιορισμένη και αναμένονται κυρίως σφηνοειδείς ολισθήσεις.
3. Πιθανότητα σημαντικών καταπτώσεων τύπου καμινάδας λόγω του έντονου κερματισμού. Ολίσθηση ακανόνιστων μπλοκς λόγω της

μαλακής βραχώμαζας οι οποίες δεν οριοθετούνται από συγκεκριμένα συστήματα ασυνεχειών. Μικρές εισροές (ανάλογα και την θέση του Υ.Ο.) λόγω της έντονης σερπεντινίωσης - αργιλοποίησης διαφορών ζωνών. Σε μεγάλα βάθη αναπτύσσονται μέτριες παραμορφώσεις λόγω της απομείωσης του άρρηκτου βράχου σε ένα χαμηλό GSI αλλά και της χαμηλής αντοχής του άρρηκτου βράχου.

4. Ανάλογα με την πίεση των υπερκείμενων αλλά και το πόσο μικρή είναι η αντοχή του άρρηκτου τεμάχους παρατηρούνται μικρές έως μεγάλες παραμορφώσεις. Όταν η παρουσία τέτοιας ποιότητας είναι εντοπισμένη σε συγκεκριμένες θέσεις (π.χ. περιοχή θεμελίωσης της διατομής) ή απαντάται σε ζώνη με συγκεκριμένη διεύθυνση σε σχέση με τη σήραγγα μπορεί να παρατηρηθούν ανισότροπες παραμορφώσεις. Από την άλλη όταν αυτές οι ζώνες είναι περιορισμένες σε έκταση ή περιβάλλονται σε μικρή απόσταση από καλής ποιότητας περιδοτίτη οι παραμορφώσεις περιορίζονται.



Σχήμα 3.14 : Όρια των υπερκείμενων όπου αρχίζουν για την κατηγορία IV (την πτωχότερη) οφιδίλιθον τα θέματα των παραμορφώσεων :
Α : <1%, Β : 1-2,5, Γ : 2,5-5, Δ : 5-10, Ε : >10%, (Hoek and Marinos, 2000)

Η χρήση των συστημάτων ταξινόμησης, όσο σωστά και να γίνεται, συχνά περιορίζεται στον ποσοτικό χαρακτηρισμό της βραχώμαζας χωρίς να λαμβάνεται υπόψη και η συμπεριφορά που το γεωυλικό “προτιμά” κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να διαφέρει ακόμα και για βραχώμαζες με την ίδια ποσοτικοποίηση ως προς τον χαρακτηρισμό της. Οι ταξινομήσεις πρέπει λοιπόν να συνοδεύονται και από τη συμπεριφορά της βραχώμαζας στις σήραγγες ως προς τον τύπο και τον μηχανισμό αστοχίας που της “ταιριάζει”. Διαφορετικά χάνεται η γεωλογική ταυτότητα του γεωυλικού ενώ παράλληλα αγνοούνται οι ιδιαιτερότητες που μπορεί να έχει κατά περίπτωση.

4. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΟΥ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

4.1 Σήραγγες

4.1.1 Μηχανισμοί αστοχίας

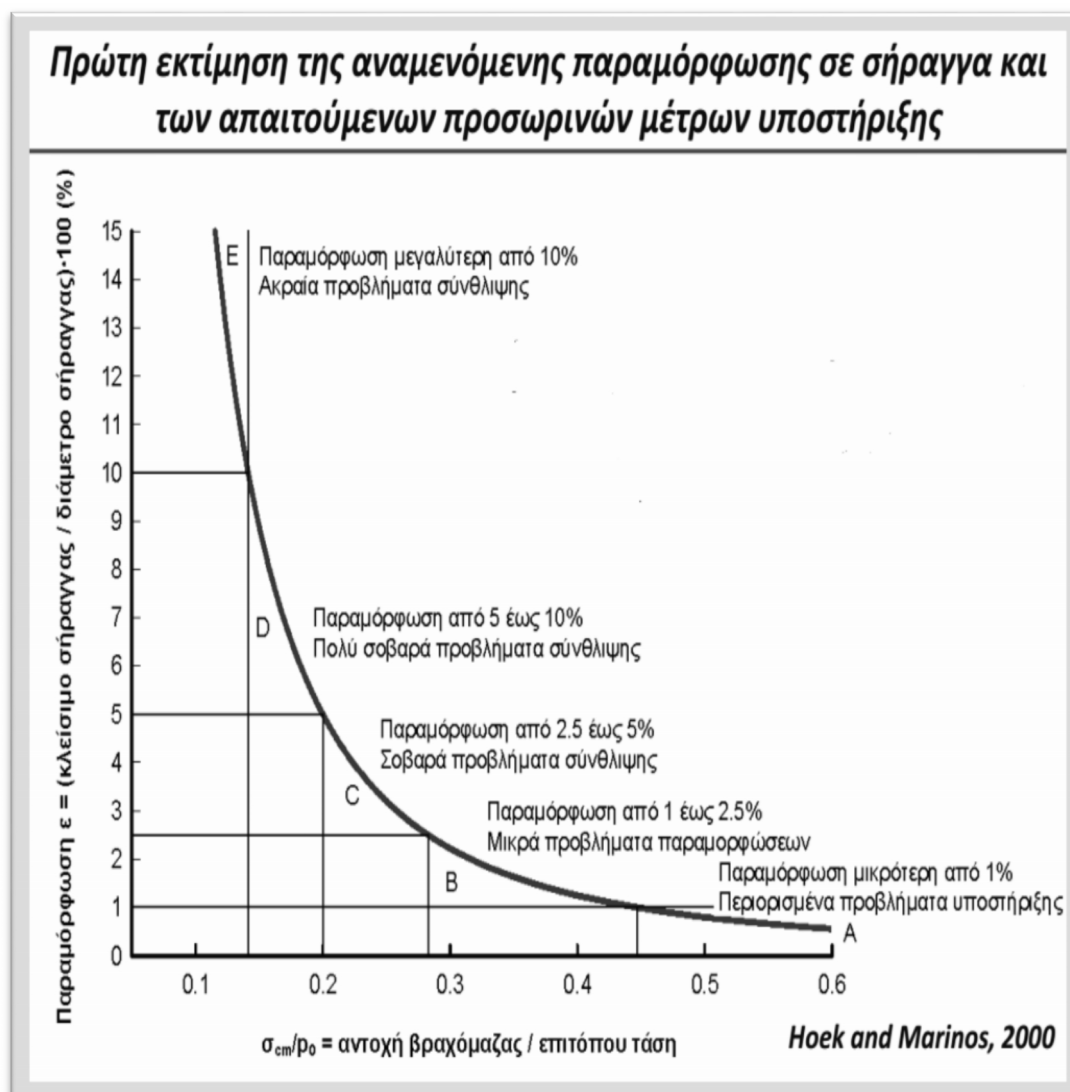
Η συμβατική εκσκαφή σιηράγγων δια μέσου ασθενών βραχώμαζων μπορεί να προσεγγιστεί καλύτερα προσδιορίζοντας τους τύπους αστοχίας που θα μπορούσαν ενδεχομένως να προκύψουν. Αυτοί οι τρόποι αστοχίας που συνήθως συνδέονται με φαινόμενα επιβολής τάσεων όπως η αστάθεια του μετώπου, οι μεγάλες μετατοπίσεις ή οι πιέσεις του κελύφους υποστήριξης που εκδηλώνονται με την κατάρρευση του μετώπου της σήραγγας και με πρόκληση μεγάλων συγκλίσεων.

Ένας παράγοντας που θα μπορούσε να υιοθετηθεί για να προσδιοριστεί η αδύναμη συμπεριφορά μίας βραχώμαζας κατά την διάνοιξη είναι ο λόγος της αντοχής της βραχώμαζας προς την γεωστατική τάση στο επίπεδο της σήραγγας. (Σχήμα 4.1) (σ_{cm}/P_o , Hoek & Marinos 2000). Οι χαμηλές τιμές του λόγου αυτού θα μπορούσε να είναι αποτέλεσμα του μεγάλου βάθους εκσκαφής ή/και χαμηλής αντοχής σ_{cm} η οποία αναλύεται περαιτέρω σε χαμηλό σ_{ci} ή/και χαμηλό GSI. Ο πίνακας συμπεριφοράς της σήραγγας (TBC, Marinos 2012, Σχήμα 4.2).

Είναι ένα ολοκληρωμένο εργαλείο για να δείξει τους συνδυασμούς της δομής της βραχώμαζας, της αντοχής και του πάχους των υπερκείμενων που μπορούν να αναπτύξουν προβληματική συμπεριφορά εξαιτίας των τάσεων. Τυπικά παραδείγματα αυτής της συμπεριφοράς περιλαμβάνουν τεκτονισμένες ετερογενείς ιζηματογενείς εναλλαγές όπως ο φλύσχης, έντονα τεκτονισμένοι ή/και αποσθρωμένοι οφιόλιθοι όπως φυλλοποιημένοι σερπεντινίτες, ισχυρά διατμημένα ομοιογενή ιζηματογενή πετρώματα χαμηλής αντοχής όπως αργιλλίτες, σχιστόλιθοι, μολασσικοί σχηματισμοί κλπ.

Για παράδειγμα οι μολλασικοί σχηματισμοί βρίσκονται σε μεγάλα βάθη με αποτέλεσμα να μην έχουν εκτονώσει τις τάσεις παρουσιάζοντας συμπαγή δομή και συνήθως υψηλές τιμές GSI (Marinos et al., 2013). Παρόλα αυτά, η αντοχή, ειδικά στην περίπτωση των ιλυόλιθων, είναι συνήθως χαμηλή, οδηγώντας έτσι σε μία χαμηλή

αντοχή της βραχώμαζας και ενδεχομένως και σε μία αδύναμη συμπεριφορά. Από την άλλη πλευρά υπάρχουν περιπτώσεις όπου τύποι βραχώμαζας που αναφέρονται γενικά ως μεγάλης αντοχής παρουσιάζουν τυπική συμπεριφορά αδύναμης βραχώμαζας. Ένα παράδειγμα είναι η εκσκαφή της σήραγγας Gotthard στην περιοχή Faido όπου εγκρίθηκε η εφαρμογή αγκυρίων βράχου κατά την διάνοιξη διά μέσω ενός τεκτονισμένου διατμημένου και φυλλοποιημένου γνεύσιου σε πάχος υπερκείμενων 1100 m.



Σχήμα 4.1 : Hoek and Marinos, 2000

Διάγραμμα συμπεριφοράς της βραχώμαζας στις σήραγγες (TBC). Τονίζεται η προβληματική συμπεριφορά ελέγχου των τάσεων που αντιστοιχεί σε ασθενείς βραχώμαζες :

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ (TBC) ΓΙΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ (V. Marinos)*					
ΔΟΜΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ (ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ GSI, Hoek & Marinos, 2000)	ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΑ (H) (Βραχώμαζες με πάχος υπερκεκλιμένων μερικών εκατοντάδων μέτρων**)				ΟΡΙΟ ΠΑΧΟΥΣ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ (H): ~ 150 m
	ΜΙΚΡΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΑ		ΜΕΓΑΛΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΑ		
	ΑΝΤΟΧΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ (σ _{ci}) εκτιμώμενο όριο σ _{ci} ~ 15 MPa χαμηλό σ _{ci}	ΑΝΤΟΧΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ (σ _{ci}) εκτιμώμενο όριο σ _{ci} ~ 15 MPa υψηλό σ _{ci}	ΑΝΤΟΧΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ (σ _{ci}) εκτιμώμενο όριο σ _{ci} ~ 15 MPa χαμηλό σ _{ci}	ΑΝΤΟΧΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ (σ _{ci}) εκτιμώμενο όριο σ _{ci} ~ 15 MPa υψηλό σ _{ci}	
ΑΡΡΗΚΤΗ Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση.	1	2	3	4	ΟΡΙΟ ΠΑΧΟΥΣ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ (H): ~ 100 m
ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ / ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ Αδιάτακτα βραχώδη τεμάχια με πολύ καλό αλληλοκλειδισμό που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογόνειες ασυνεχειών.	5	6	7	8	
ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογόνειες ασυνεχειών.	9	10	11	12	ΟΡΙΟ ΠΑΧΟΥΣ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ (H) : ~ 70m
ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ / ΠΤΥΧΩΜΕΝΗ Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οικογόνειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας.	13	14	15	16	
ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ Ισχυρά κεραματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλειδισμό και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρογγυλωμένων τεμαχίων.	17	18	19	20	ΟΡΙΟ ΠΑΧΟΥΣ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΩΝ (H) : ~ 100 m
ΦΥΛΛΩΔΗΣ / ΔΙΑΤΜΗΜΕΝΗ Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχώμαζα. Η φύλλωση επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων.	21	22	23	24	
St: Σταθερή βραχώμαζα Br: Ψαθυρή θραύση Wg: Σφηνοειδής αστοχία Ch: Κατάπτωση τύπου καμινάδας Rv: Καταρροή βραχώμαζας Fl: Ροή βραχώμαζας Sh: Επίπεδη αστοχία Sq: Παραμορφώσεις Sw: Διογκούμενο έδαφος SaH: Ανισότροπη βραχώμαζα					
Sh: Μικρές έως μέτριες παραμορφώσεις, με την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε ζώνη μικρής έκτασης περιμετρικά της σήραγγας. Η βραχώμαζα αποτελείται από τεμάχια άρρηκτου βράχου μικρής αντοχής (συνήθως σ _{ci} < 15MPa) ενώ η δομή της βραχώμαζας, μέσω του GSI, μειώνει περαιτέρω την αντοχή αυτή. Το βάρος των υπερκεκλιμένων για την εκδήλωση των παραμορφώσεων είναι είτε μικρό έως μέτριο (περί τα 50m) στην περίπτωση πτωχής ποιότητας διατμημένη βραχώμαζας, είτε είναι μεγαλύτερο για καλύτερης ποιότητας βραχώμαζες. Ο λόγος του σ _{ci} /ρ _o στην περίπτωση αυτή είναι μικρός (0.3 < σ _{ci} /ρ _o < 0.6) και αναμένονται ή παρατηρούνται μέτριες παραμορφώσεις (1-2.5%)					
Sq: Σημαντικές παραμορφώσεις λόγω υπερφόρτισης από την εκδήλωση διατμητικών αστοχιών σε εκτεταμένη ζώνη περιμετρικά της σήραγγας. Η βραχώμαζα αποτελείται από τεμάχια άρρηκτου βράχου μικρής αντοχής (σ _{ci} < 15MPa) ενώ η δομή της βραχώμαζας, μέσω GSI, μειώνει περαιτέρω την αντοχή αυτή. Ο λόγος του σ _{ci} /ρ _o στη περίπτωση αυτή είναι μικρός (σ _{ci} /ρ _o < 0.3) και αναμένονται ή παρατηρούνται παραμορφώσεις >2.5%, ενώ μπορεί να εκδηλώνονται και παραμορφώσεις και στο μέτωπο προκαλώντας πλέον ένα πρόβλημα τριών διαστάσεων.					
* Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στο πίνακα (TBC) ελήφθησαν από σήραγγες που διανοίχθηκαν με την συμβατική μέθοδο δι' ορύξεως πρώτα του άνω τμήματος, καθόλο το μήκος και στην συνέχεια το κάτω τμήμα σε μη αστικό περιβάλλον σε υπερκεκλιμένα μερικών εκατοντάδων μέτρων.(γενικά δεν υπερβαίνει τα 500μ.) και σήραγγα διαμέτρου 12μ.					
** Ο πίνακας δεν αναφέρεται σε πολύ μεγάλο πάχος υπερκεκλιμένων (π.χ. πολλά εκατοντάδες μέτρα ή > 1000μ.), όπου κλίμακα και ο μηχανισμός αστοχίας μπορεί να διαφέρει.					

Σχήμα 4.2 : Hoek and Marinos 2000

4.1.2 Παραδείγματα

11. *“Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index : the case of ophiolites with special emphasis on tunnelling”*

“Η μεταβλητότητα των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχώμαζας ποσοτικοποιήθηκε με τον γεωλογικό δείκτη αντοχής (GSI) : περίπτωση οφιόλιθων με ιδιαίτερη έμφαση στις σήραγγες”

Marinos, P., Hoek, E., Marinos, V., 2006

Εισαγωγή

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, διάφορες μέθοδοι ταξινόμησης βραχώμαζας έχουν αναπτυχθεί προκειμένου να καλύψουν τις ανάγκες σχεδιασμού των συγκεκριμένων έργων. Κατά την τελευταία δεκαετία όμως, η ανάπτυξη ενός λογισμικού πιο “προσιτού στον χρήστη” παρέχει εναλλακτικά εργαλεία σχεδιασμού που είναι καταλληλότερα σε πολλές περιπτώσεις. Ωστόσο, αυτό έφερε και την ανάγκη για μεγαλύτερη αξιοπιστία στα δεδομένα που εισάγονται, ιδιαίτερα εκείνα που σχετίζονται με ιδιότητες της βραχώμαζας. Για να πληρείται αυτή η προϋπόθεση, έχει αναπτυχθεί ένα σύστημα ταξινόμησης από τον Hoek(1994), το οποίο επεκτάθηκε με τους Hoek et al. (1998), Μαρίνος και Hoek (2001) και Hoek et al. (2005), που έχει να κάνει με τον γεωλογικό δείκτη αντοχής (GSI), έτσι ώστε να συμπεριληφθούν και ασθενείς και σύνθετες βραχώμαζες. Αυτό το σύστημα ταξινόμησης χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το κριτήριο αστοχίας Hoek and Brown για την εκτίμηση των γεωτεχνικών παραμέτρων.

Το άρθρο παρουσιάζει μια ποσοτικοποιημένη περιγραφή, χρησιμοποιώντας τον γεωλογικό δείκτη αντοχής (GSI) σε οφιολιθικό σύμπλεγμα με μεγάλη μεταβλητότητα λόγω διαφορετικής πετρογραφίας, τεκτονικής παραμόρφωσης και εσωτερικής αλλοίωσης των πετρωμάτων. Η παρουσίαση αυτή επιτρέπει την εκτίμηση του φάσματος των ιδιοτήτων της βραχώμαζας και την κατανόηση των μεγάλων μεταβολών της συμπεριφοράς της, που μπορούν να συμβούν κατά τη διάρκεια διάνοιξης μιας σήραγγας, από συνθήκες ισορροπίας σε μεγάλες συμπίεσεις και συγκλίσεις μέσα στον ίδιο σχηματισμό και στο ίδιο βάθος. Παρουσιάζεται ένα γεωλογικό μοντέλο στο οποίο φαίνεται πώς ένα οφιολιθικό σύμπλεγμα μπορεί να αναπτύξει τους διάφορους πετρογραφικούς τύπους και την τεκτονική του παραμόρφωση, κυρίως λόγω επωθήσεων. Η δομή των διαφόρων τύπων βραχώμαζας περιλαμβάνει όλα τα είδη από άρρηκτο βράχο έως και ασθενείς βραχώμαζες, ενώ η ποιότητα των ασυνεχειών στις

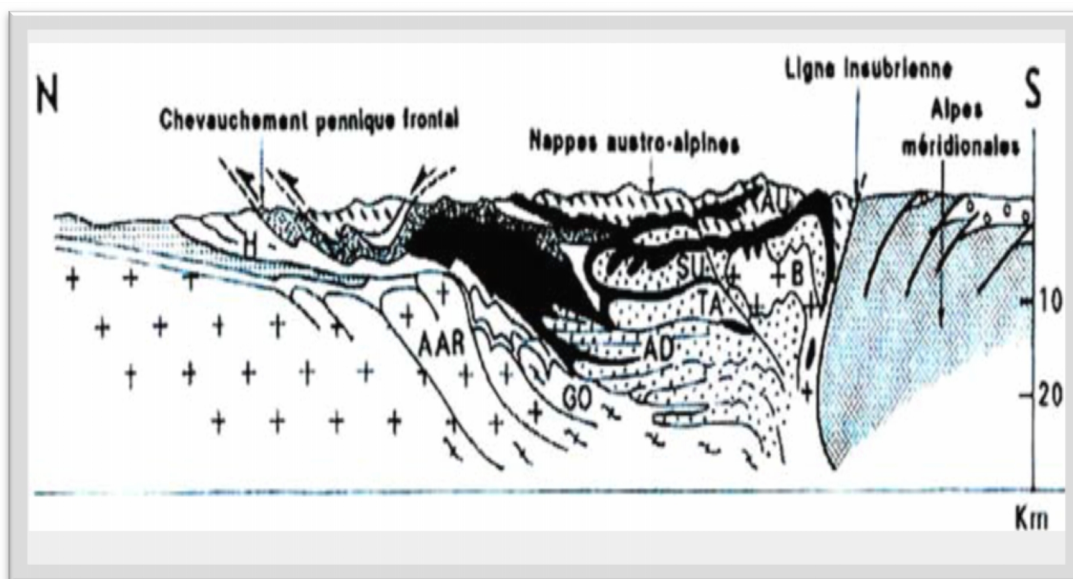
περισσότερες περιπτώσεις είναι πτωχή έως πολύ πτωχή, λόγω και της σερπεντινίωσης καθώς και των διατμήσεων.

Σερπεντινίωση

Είναι η μετατροπή σιδηρομαγνησιούχων ορυκτών, και ειδικότερα του ολιβίνη σε σερπεντίνη, η οποία λαμβάνει χώρα κατά τα τελευταία στάδια της κρυστάλλωσης του μάγματος, όπου υπάρχει περίσσεια νερού. Έτσι, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα είδος αυτό - μεταμορφισμού. Σε άλλες περιπτώσεις, η σερπεντινίωση αντιστοιχεί σε μια χαμηλού βαθμού μεταμόρφωση των περιδοιτικών πετρωμάτων. Σερπεντινίωση μπορεί να συμβεί και λόγω εξωγενών παραγόντων, όπως υπό την επίδραση νερού σε έγκοιλα κάτω από συνθήκες αποσάθρωσης. Στην περίπτωση αυτή η εξαλλοίωση διαλύει τα περιδοιτικά μητρικά πετρώματα σε ένα αργιλώδες έδαφος. Η ανάπτυξη σε βάθος του αποσαθρωμένου περιδοιτή είναι λιγότερο γενικευμένη και προφανώς περιορισμένη σε σύγκριση με την πρώτη περίπτωση μεταμορφισμού. Όταν η βασαλτική λάβα εισέρχεται ήρεμα στο νερό σχηματίζει τις λεγόμενες pillow λάβες ή μαξιλαροειδείς λάβες. Τα περισσότερα τεμάχια είναι σφαιρικά, με διάμετρο 30 cm έως λίγα μέτρα. Καθώς η λάβα εισέρχεται στο νερό η εξωτερική επιφάνεια κάθε λοβού ψύχεται αμέσως και σχηματίζονται ακτινωτές διακλάσεις σχηματίζοντας σταυροειδή τμήματα.

Τα οφιολιθικά συμπλέγματα συνδέονται με μεγάλης κλίμακας επωθήσεις και τεκτονικές δομές “melanges” που μπορεί να σχηματιστούν στη βάση και στο εμπρόσθιο μέρος. Αυτά τα melanges αποτελούνται από οφιολιθικά πετρώματα και διάφορους άλλους τύπους πετρωμάτων παλαιογεωγραφικής προέλευσης. Οι περισσότεροι από τους οφιόλιθους ανήκουν στον κύκλο των Άλπεων. Οι κύριοι και θεμελιώδεις τύποι είναι περιδοίτες, γάββροι, περιδοίτες, περισσότερο ή λιγότερο σερπεντινιωμένοι, σερπεντινίτες, σχιστό - σερπεντινίτες, διατμημένοι σερπεντινίτες, “pillow lavas” και χαοτικές μάζες οφιολιθικών melanges.

Μετά από συζήτηση και χρήση ενός εύρους τιμών (GSI), στην ενότητα αυτή ο τεχνητογεωλογικός χαρακτηρισμός που δώθηκε ήταν για βασικούς τύπους βραχόμαζων που απαντώνται συνηθέστερα σε οφιόλιθους. Τα δείγματα που πάρθηκαν είναι από βράχους πρανών, γεωλογικά καρότα γεωτρήσεων και από ανασκαφές σήραγγας από διάφορα οφιολιθικά συμπλέγματα και melanges στη βόρεια και κεντρική Ελλάδα. Οι τιμές GSI που χαρακτηρίζουν τις διάφορες βραχόμαζες, μαζί με την αντοχή του άρρηκτου βράχου σ_{ci} , και την πετρογραφική παράμετρο m_i , επιτρέπουν τη γεωτεχνική παραμετροποίηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας των διαφόρων πετρωμάτων, έτσι ώστε να εκτιμηθεί ένας βαθμός ακριβείας, ο οποίος είναι ικανοποιητικός για τον τεχνικό σχεδιασμό. Για την εκτίμηση αυτή το πρόγραμμα RocLab επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί.



Σχήμα 4.3 : Σχηματική τομή επάλληλες επωθήσεις (overthrusts) στις κεντρικές Άλπεις.
Επάλληλα τεκτονικά καλύμματα οφιόλιθων του Μεσοζωικού σε μαύρο χρώμα,
Marinos, P., Hoek, E., Marinos, V., 2006

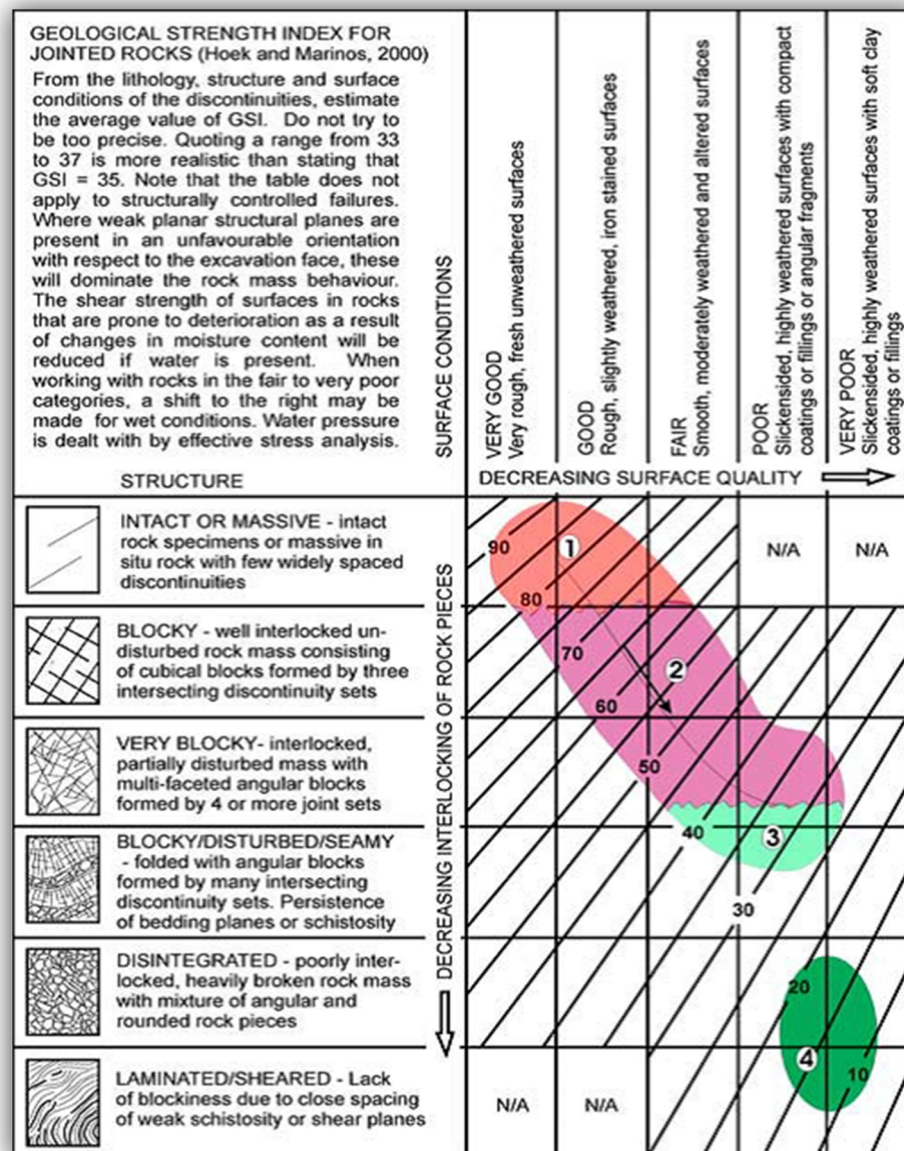
Περιδοτίτες

Δίνονται μέσες τιμές αντοχής περίπου 90 MPa από τις δοκιμές σε 130 δείγματα, λιγότερο ή περισσότερο σερπεντινωμένα, από διάφορες τοποθεσίες στην Ελλάδα. Οι προσεγγιστικές τιμές σ_{ci} που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό διάνοιξης σηράγγων στην Ελλάδα, είναι τουλάχιστον 50 MPa. Η τεκτονική διαταραχή τους εκφράζεται σε όρους τεμνόμενων κοινών διακλάσεων αναλόγως την πίεση κάτω από την οποία αναπτύχθηκαν.

Η βραχώμαζα μπορεί να είναι σχεδόν συμπαγής, με λίγες μόνο ανοιχτές ασυνέχειες, ακόμη και κοντά στην επιφάνεια σε “τεκτονικά ήσυχες” περιοχές. Οι υψηλές τιμές του GSI που μπορούν να αποδοθούν σε αυτόν τον περιδοτιτικό τύπο βραχώμαζας (GSI μεγαλύτερο από 65) βρίσκονται στην περιοχή 1.

Όταν η βραχώμαζα είναι διακλασμένη, οι τιμές του GSI πέφτουν έως και 35, όχι μόνο εξαιτίας της δομής αλλά και λόγω της κατάστασης των ασυνεχειών οι οποίες καθίστανται ολισθηρές λόγω της σερπεντινίωσης, ενώ σε μια διαταραγμένη περιδοτιτική μάζα, η σερπεντινίωση επηρεάζει συχνά και αποσυνθέτει τμήματα του βράχου, που όχι μόνο συμβάλλουν στην μείωση του GSI, αλλά επίσης και στη μείωση της αντοχής του άρρηκτου βράχου.

Το φάσμα τιμών GSI για περιδοτιτικούς τύπους βραχομάζας
του οφιολιθικού συμπλέγματος :



Σχήμα 4.4 : Hoek and Marinos, 2000

Γάββροι

Τα γαββρικά πετρώματα χαρακτηρίζονται όπως όλοι οι συμπαγείς βράχοι. Εάν είναι υγιείς τότε η συμπεριφορά τους εξαρτάται από το βαθμό διακλάσεως, ειδάλλως οι ασυνέχειες τους είναι καλύτερης κατάστασης από εκείνες των περιδοτιτών.

Σερπεντινίτες

Εάν η серπεντινίωση οφείλεται σε αυτό - μεταμορφισμό ή/και συνδέεται με τεκτονικές δυνάμεις, τότε η ποιότητα της βραχώμαζας είναι πτωχή, με μια διαταραγμένη σχιστολιθική δομή η οποία μπορεί να μειώσει το GSI σε τιμές έως 30 ή και παρακάτω. Η μέτρηση της αντοχής του άρρηκτου βράχου σ_{ci} , όπως και της βραχώμαζας αποτελεί πάντα ένα πρόβλημα. Κατά τη δοκιμή σχιστό - серпεντινιτιτών, υπήρξε σημαντική μείωση της αντοχής εξαιτίας της σχιστότητας σε ένα μεγάλο ποσοστό των δειγμάτων.

Κατά συνέπεια, είναι πολύ δύσκολο να ληφθούν αξιόπιστες τιμές από εργαστηριακές δοκιμές και προτείνεται ότι η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του σχιστό-серпεντινίτη θα πρέπει να εκτιμηθεί από εκείνη του συμπαγούς серпεντινίτη και να μειωθεί στη συνέχεια για τον λόγο αυτό, κατά περίπου 30%. Από διάφορες περιπτώσεις στη Βόρεια Ελλάδα θεωρείται ότι τα 40MPa μπορεί να είναι μια ρεαλιστική τιμή του серпεντινίτη και 30 MPa για τον σχιστό - серпεντινίτη (δίνονται τιμές των 45 MPa από 12 διαφορετικά δείγματα). Επίσης είναι απαραίτητη η διάκριση μεταξύ της αντοχής του άρρηκτου βράχου και της βραχώμαζας για την εκτίμηση δυνητικών αστοχιών διάνοιξης σηράγγων.

Όσον αφορά τους έντονα διατμημένους серпεντινίτες, στις ζώνες κερματισμού υπάρχει έλλειψη αλληλοεμπλοκής, η οποία επιτρέπει στον βράχο να αποσυντεθεί σε ολισθηρά στρωτά κομμάτια λίγων εκατοστών ή και χιλιοστών, με τις τιμές του GSI να μειώνονται σε λιγότερο από 20 και η αντοχή να ποικίλει από 20 έως 5 MPa ή ακόμη και πιο κάτω.

“Pillow lavas”

Η ποιότητα της βραχώμαζας μπορεί να είναι πτωχή μόνο όταν η αποσάθρωση και η τεκτονική καταπόνηση είναι αρκετά γενικευμένη. Το εύρος των τιμών GSI ποικίλλουν από 50 έως 25. Υπό αυτές τις συνθήκες διάνοιξης σηράγγων, η συγκεκριμένη ποιότητα της βραχώμαζας μπορεί να είναι μέτρια προς καλή, ενώ πτωχή μόνο όταν βρίσκεται κάτω από το όριο του “κερματισμένου” και “αποσαθρωμένου”. Παρόλα αυτά κρίθηκε απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν μέτρα προσωρινής υποστήριξης.

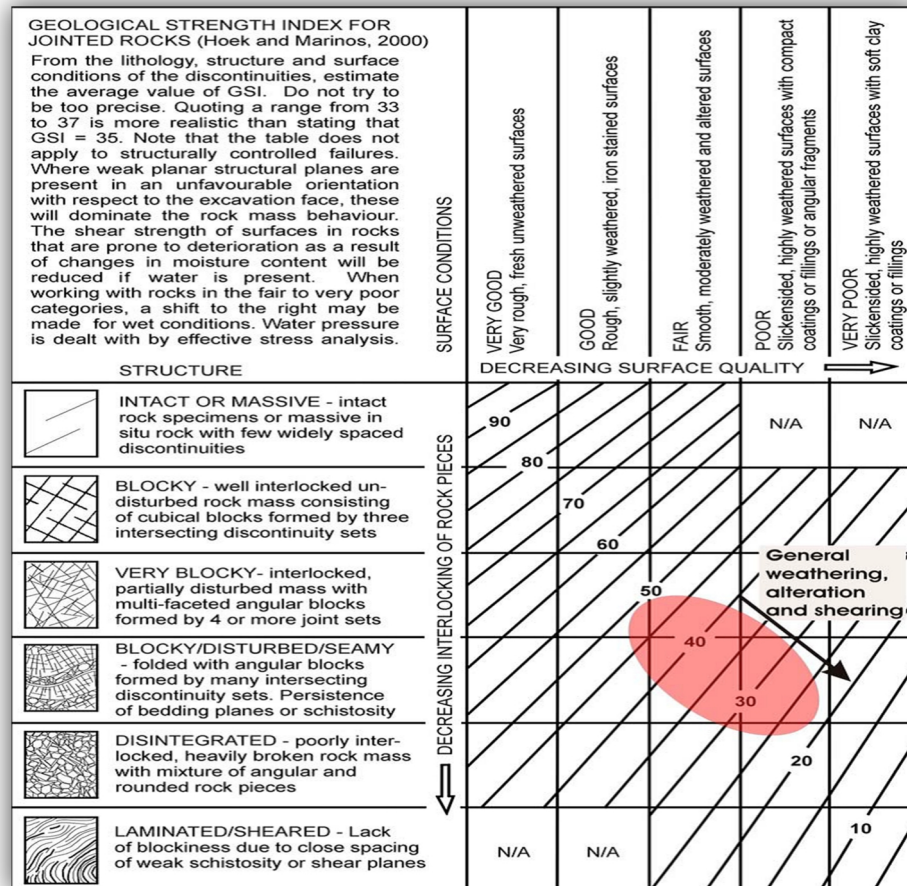
Τεκτονικά μίγματα “Melanges”

Χαμηλές έως πολύ χαμηλές τιμές GSI μπορούν να αποδοθούν σε βραχώμαζες οφιολιθικών melanges. Στο έδαφος είναι προφανές ότι μια ταξινόμηση με τον δείκτη GSI δεν θα είχε νόημα. Ωστόσο, είναι δυνατό ότι κατά τη διάρκεια διάνοιξης σηράγγων μέσα σε αυτές τις βραχώμαζες, μπορούν να συναντηθούν εκτεταμένα μπλοκς ιζηματογενών πετρωμάτων, καλής ποιότητας (π.χ. ασβεστόλιθοι ή ψαμμίτες). Παρόλα αυτά, η μετάβαση στις διατμημένες και αποσαθρωμένες βραχώμαζες που

περιβάλλονται, είτε οφιολιθικής σύστασης είτε άλλων αργιλωδών ιζηματογενών πετρωμάτων (φλύσχης, ιλυόλιθοι, αργιλίτες), είναι απότομη και απρόβλεπτη.

Εύρος τιμών GSI για βασαλτικές “pillow lavas”.

(Η σκιασμένη περιοχή δείχνει τα όρια των τιμών για το συγκεκριμένο τύπο πετρωμάτων. Μπορεί να μην αντιστοιχούν σε κάποια άλλη συγκεκριμένη περίπτωση) :



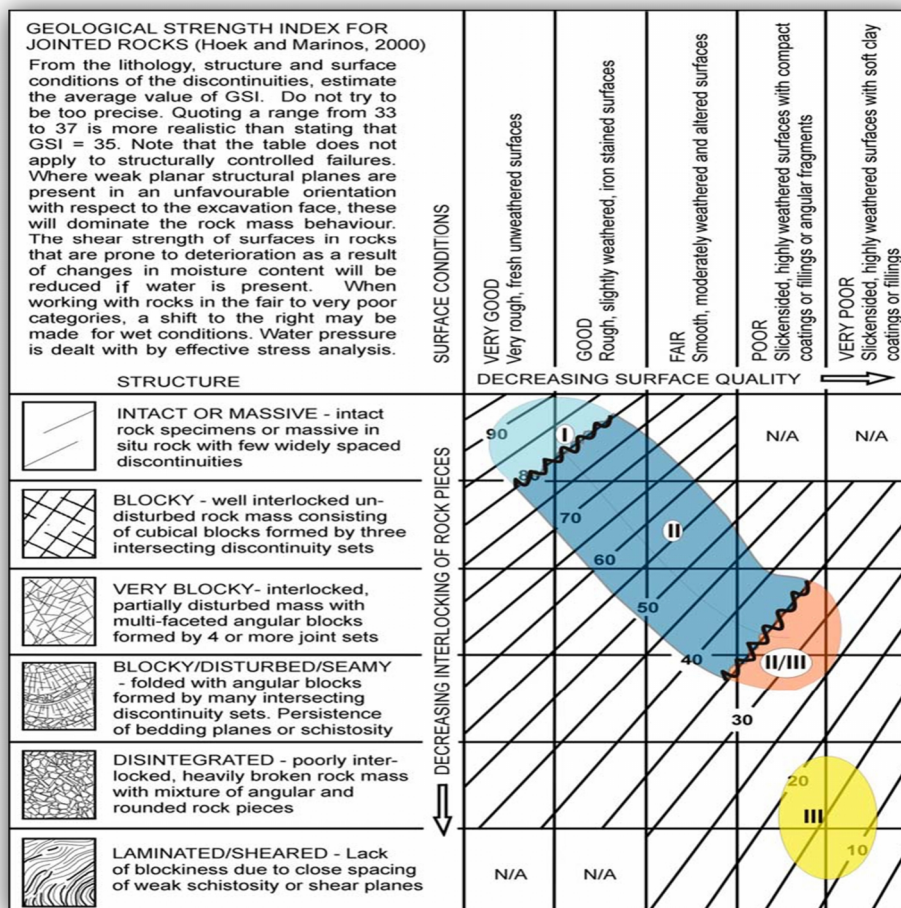
Σχήμα 4.5 : Hoek and Marinos, 2000

Πετρογραφικός δείκτης m_i

Στα οφιολιθικά συμπλέγματα του ελληνικού αλπικού ορογενούς, οι τιμές m_i μπορεί να είναι:

- Περιδοτίτες : πάνω από 20
- Σχιστολιθικά ελικοειδή : 12 ± 2
- Χαλαρά διατμημένα υλικά : 8 ± 2

Στο παρακάτω σχήμα, η συμπεριφορά των περιδοτιτών και σερπεντινιτιτών στη διάνοιξη σιδηρών ταξινομείται σύμφωνα με τον χαρακτηρισμό των βραχώμαζων που ήδη έχει γίνει.



Σχήμα 4.6 : Hoek and Marinos, 2000

Συνθήκες ισορροπίας : μόνο σε μεγάλα βάθη πιθανότητα αστοχιών με εκτίναξη τεμαχίων βράχου.

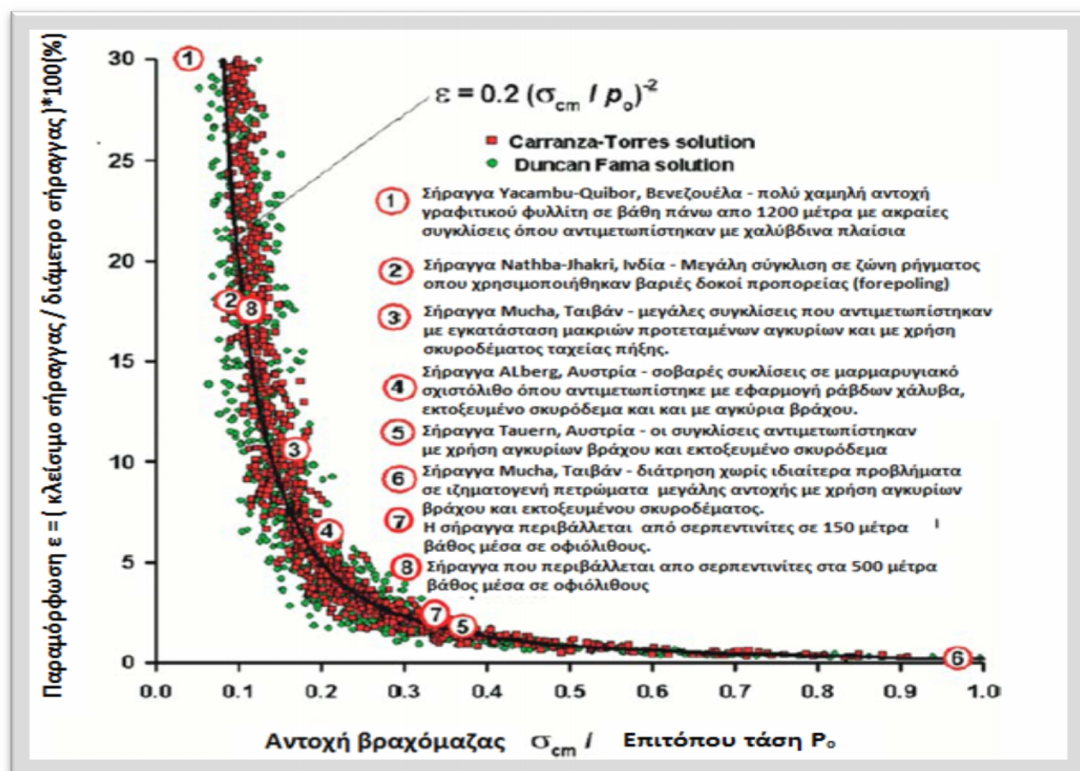
Η διακριτοποίηση των ζωνών συμπεριφοράς έχει ως εξής :

- I. Η ισορροπία εξαρτάται κυρίως από τη δομή των πετρωμάτων
- II. Η ισορροπία εξαρτάται από αστοχίες λόγω δομής ή από ήπια υπερφόρτιση υπερκείμενων σχηματισμών
- III. Η σταθερότητα εξαρτάται από αστοχίες της βραχομάζας εξαιτίας των συγκλίσεων με σημαντικές συμπίεσεις σε βάθος

Η αποφλοιώση της επιφάνειας της βραχομάζας συναντάται σε χαμηλές περιοχές των ζωνών II/III και της ζώνης III.

Επίσης σε καλής ποιότητας βραχώμαζες των περιδοτιτών, μπορεί να επιτευχθεί απλή ευθεία εμπρόσθια διάνοιξη. Για τις εν λόγω δομικής φύσεως αστοχίες που αφορούν μόνο λίγες ασυνέχειες, το πρόβλημα είναι ουσιαστικά μία αναπαράσταση της τρισδιάστατης γεωμετρίας με στερεογραφική τεχνική που όμως μπορεί να πραγματοποιηθεί κατόπιν αριθμητικών αναλύσεων με το πρόγραμμα Unwedge (βλ. <http://www.rocscience.com>) τόσο για την ανάλυση των διεργασιών αστοχίας όσο και για το σχεδιασμό του οπλισμού. Ωστόσο, είναι πολύ χρήσιμο να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση - αναπαράσταση κλειστού τύπου για την συμπεριφορά της σήραγγας για να αποδοθεί καλύτερα η σημασία και το μέγεθος των συγκλίσεων και συμπίεσεων.

Δύο περιπτώσεις από μια σήραγγα στην Ελλάδα με οφιόλιθους, υπό μορφή περισσότερο ή λιγότερο διατμημένων σερπεντινιτών απεικονίζονται στα σημεία 7 και 8 στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.7 : Παράδειγμα εφαρμογής της ολικής αντοχής της βραχομάζας για την εκτίμηση συγκλίσεων σε σήραγγα, (Hoek & Marinos, 2000)

Η παραμόρφωση ε (%) της διατομής της σήραγγας εξαρτάται από:

1. Ολική αντοχή της βραχώμαζας, σ_{cm}
2. Πεδίο των τάσεων, p₀ = γh

Το σημείο 7 αντιστοιχεί σε μία τιμή της βραχώμαζας περίπου 1,4 MPa και με μέτρο παραμορφωσιμότητας E = 800 MPa, κάτω από ένα κάλυμμα έκτασης περίπου

150 m. Αυτές οι τιμές προήλθαν από μία τέτοιου είδους αριθμητικής ανάλυσης της συμπεριφοράς ενός τμήματος της σήραγγας, όπου μετρήθηκαν και υπολογίσθηκαν μετατοπίσεις σε ποσοστό περίπου 1,5%.

Οι ιδιότητες αυτές αντιστοιχούν σε ασθενείς οφιολιθικές βραχομάζες (διατμημένοι σερπεντινίτες) με $GSI = 20$, $\sigma_{ci} = 16$ MPa και $m_i = 10$. Για ένα βάθος 500 m, ο λόγος της αντοχής της βραχομάζας με τις επί τόπου πιέσεις είναι 0.11 και αυτό δίνει μία σύγκλιση της τάξης του 17%, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να συμβεί ένα κλείσιμο περίπου 2 m σε μια μονή σήραγγα με διάμετρο 12 m, εκτός και εάν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα υποστήριξης.

Ειδικές διατάξεις μπορεί να απαιτηθούν για την εξάλειψη της πιθανότητας παγίδευσης του μηχανήματος σε περίπτωση εκσκαφής με χρήση TBM. Είναι πολύ σημαντικό ότι ένα μηχάνημα TBM δεν πρέπει ποτέ να διακόπτει την λειτουργία του σε ζώνες μεγάλων συγκλίσεων. Επίσης στην περίπτωση αυτή και δεδομένου ότι η εμφάνιση των ασθενών ή διατμημένων βραχομαζών είναι τυχαίως κατανεμημένες κατά μήκος της σήραγγας λόγω του συγκεκριμένου γεωλογικού μοντέλου των οφιολίθων, είναι καλό να εξετάζεται συνεχώς η περιοχή μπροστά από το μέτωπο της διάνοιξης, διατηρώντας το μήκος οπής καθετήρα σε μια απόσταση τουλάχιστον 20 m μπροστά από το μέτωπο ανά πάσα στιγμή. Εντούτοις, οι ασθενείς βραχομάζες είναι συνήθως μικρής περατότητας, επομένως πρέπει να εξεταστούν οι αποστραγγιστικές και ανακουφιστικές οπές, οι οποίες μπορεί να απαιτείται να είναι συστηματικές κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

Εν κατακλείδι, η γεωτεχνική ταξινόμηση GSI, εμπλουτισμένη από την γεωλογική λογική επιτρέπει το χαρακτηρισμό όχι μόνο του ευρέου φάσματος των οφιολιθικών συμπλεγμάτων αλλά και των παραλλαγών αυτών που μπορούν να υπάρξουν εντός των ίδιων οφιολιθικών βραχομαζών.

12. *“The application of rock mass classification systems to underground excavation in weak limestone, Ataturk dam, Turkey”*

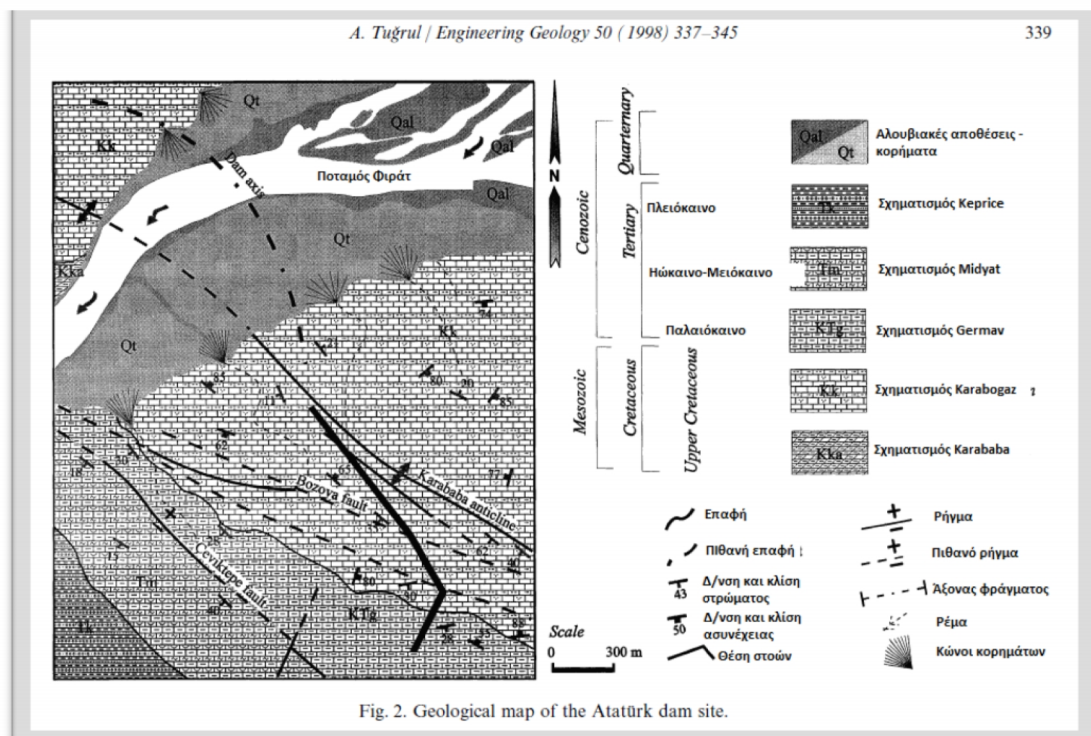
“Η εφαρμογή των συστημάτων ταξινόμησης στην υπόγεια εκσκαφή σε ασθενή ασβεστόλιθο , Φράγμα Ataturk, Τουρκία”

Tuğrul, A., 1998

Το φράγμα Ataturk Κατασκευάστηκε στον ποταμό Firat πάνω σε αργιλλώδη ασβεστόλιθο. Έγιναν κουρτίνες τσιμεντενέσεων για να μειωθεί τόσο η διαπερατότητα της βραχομάζας και οι ροές των υπόγειων υδάτων όσο και για να αυξηθεί η ακαμψία και η αντοχή του.

Οι ασβεστόλιθοι χωρίζονται από κάτω προς τα πάνω σε τέσσερις σχηματισμούς. Ο σχηματισμός Karampa του άνω κρητιδικού και που αποτελείται από δολομιτικό ασβεστόλιθο. Ο σχηματισμός Karabogaz του Άνω κρητιδικού που αποτελείται από αργιλώδη ασβεστόλιθο, ο σχηματισμός German του Άνω κρητιδικού - Παλαιοκαίνου που αποτελείται από εναλλασσόμενα στρώματα αργιλίτη, αργιλώδη ασβεστόλιθο και ψαμμίτη και ο σχηματισμός Midyat του Ηωκαίνου - Μειοκαίνου που αποτελείται από κρητιδικό κοραλιογενή ασβεστόλιθο. Ο σχηματισμός Karabogaz είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, διότι αποτελεί το υπόβαθρο θεμελίωσης του φράγματος και των αντρευσμάτων. Το πάχος των στρωμάτων είναι μεταξύ 100 - 300 mm και είναι συχνά έντονα τεκτονισμένα. Στο ανώτερο τμήμα αυτού του σχηματισμού ο ασβεστόλιθος είναι περισσότερο αργιλλώδης. Τα θραύσματα του βράχου έχουν πλακοειδές σχήμα γεγονός που τους χαρακτηρίζει ως πλακώδεις αργιλώδεις ασβεστόλιθους.

Πτυχώσεις, ρήγματα και διακλάσεις είναι οι πιο κυρίαρχες δομικές ασυνέχειες που παρατηρήθηκαν και μελετήθηκαν στην περιοχή. Το αντίκλινο του σχηματισμού Karababa αποτελεί την κύρια πτυχή στην περιοχή. Ο άξονας της πτυχής έχει διεύθυνση ΒΔ - ΝΑ. Υπάρχουν πολλά ρήγματα στην περιοχή. Το ρήγμα Bozova είναι το κύριο στην περιοχή και έχει παράταξη ΒΔ - ΝΑ και τα υπόλοιπα βρίσκονται σχεδόν παράλληλα σε αυτό.



Σχήμα 4.8 : Γεωλογικός χάρτης της περιοχής
Tuğrul, A., 1998

ΣΗΡΑΓΓΑ L1	
Θέση	Ταξινόμηση RMR
0 + 072	38
0 + 202	25
0 + 351	25
0 + 419	42
0 + 458	25
0 + 630	13
0 + 691	30
0 + 734	25
0 + 979	16
1 + 064	40
1 + 135	25

Σχήμα 4.9 : Tuğrul, A., 1998

ΣΗΡΑΓΓΑ L3A	
Θέση	Ταξινόμηση RMR
2+220	39
2+169	25
1+808	25
1+721	30
1+611	28
1+510	42
1+441	13
1+388	41
1+345	35
1+155	26

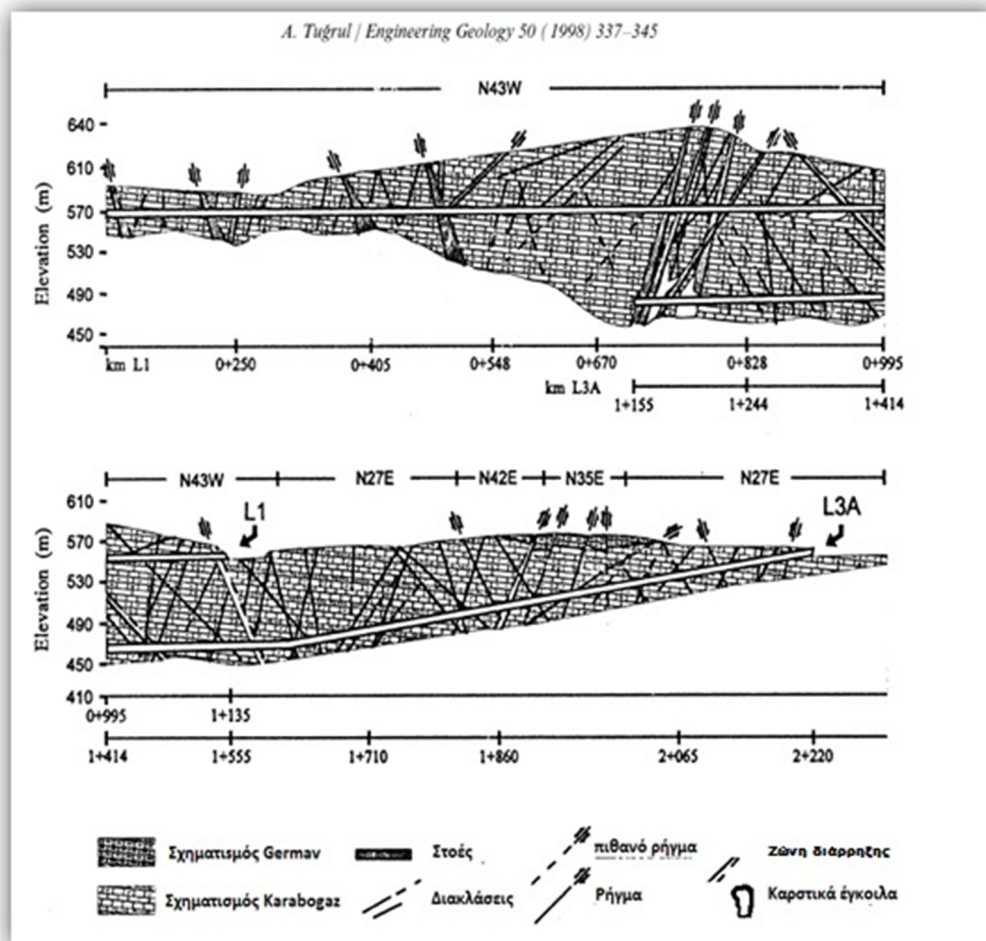
Σχήμα 4.10 : Tuğrul, A., 1998

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ RMR		
Περιγραφή βραχώμαζας	Κατηγορία βραχώμαζας	Τιμή του δείκτη RMR
Πολύ καλή	I	81 - 100
Καλή	II	61 - 80
Μέτρια	III	41 - 60
Φτωχή	IV	21 - 40
Πολύ φτωχή	V	0 - 20

Σχήμα 4.11 : Ποιότητα βραχομάζας σύμφωνα με τη γεωτεχνική ταξινόμηση κατά RMR, (Bieniawski, 1976)

Η περιγραφή της βραχώμαζας

Κατασκευάστηκαν στοές μέσω των οποίων έγιναν τσιμεντενέσεις και οι οποίες διήλθαν μέσω των σχηματισμών Karabogaz. Οι γεωτεχνικές περιγραφές των βραχώμαζων βασίστηκαν σε διαδικασίες που προτάθηκαν σύμφωνα με προδιαγραφές της ISRM (1981). Σε αυτή την μελέτη ειδική αναφορά γίνεται στο περιεχόμενο της αργίλου, τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών και επίσης τον βαθμό αποσάθρωσης που συνολικά επιδρούν στις μηχανικές ιδιότητες των ασβεστολίθων. Χαρακτηριστικά των ασυνεχειών όπως ο προσανατολισμός, η συχνότητα εμφάνισης και η τραχύτητα των επιφανειών παίζουν σημαντικό ρόλο στην παραμόρφωση των βραχώμαζων και στην ευστάθεια των σηράγγων (Johnson an DeGraff, 1988). Σε έρευνες που πραγματοποιήθηκαν κατά μήκος ανυποστήρικτων μετώπων έδειξαν ότι η βραχώμαζα είναι πολύ πυκνά και μέτρια ρωγματωμένη με τιμές RQD που κυμαίνονται από 0-50% (σε ορισμένα σημεία πάνω από 50%), τα διαστήματα μεταξύ διακλάσεων κυμαίνονται από 0,05 - 0,2 m (σε ορισμένες περιοχές, περισσότερο από 0,2 m). Τα διαστήματα των κενών του διαχωρισμού των επιφανειών των ασυνεχειών κυμαίνονται από 0,2 -15 mm με επιφάνειες ελαφρώς τραχείες έως επίπεδες λείες, πληρωμένες με ασβεστιτικό και αργιλικό υλικό. Επίσης δεν υπήρχε καμία ένδειξη για προβλήματα εισροής υδάτων κατά μήκος των στοών.



Σχήμα 4.12 : Γεωλογικές διατομές κατά μήκος των στοών L1 και L3A, Tuğrul, A., 1998

Γεωμηχανικές ιδιότητες του ασβεστόλιθου

Διάφορες εργαστηριακές δοκιμές διεξήχθησαν επί των πυρήνων από γεωτρήσεις και παρασκευάστηκαν δοκίμια για τον προσδιορισμό των γεωμηχανικών παραμέτρων του άθικτου ασβεστόλιθου. Οι δοκιμές σε δείγματα μεγέθους NX διεξήχθησαν σύμφωνα με τις διαδικασίες που συνιστώνται από τον Brown (1981). Το πρόγραμμα δοκιμών περιελάμβανε τον προσδιορισμό του ειδικού βάρους, του ξηρού βάρους ανά κυβικό μέτρο, την απορρόφηση του νερού, το ενεργό και ολικό πορώδες και το μέτρο ελαστικότητας του ασβεστόλιθου.

Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τις δοκιμές συνοψίζονται στον πίνακα :

ΓΕΩΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΕΛΑΧΙΣΤΟ	ΜΕΓΙΣΤΟ	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ
Ειδικό βάρος	2,60	2,65	2,63
Ξηρό βάρος (KN m ³)	22.1	24.7	24
Απορρόφηση νερού (%)	1,5	15,8	5,9
Ενεργό πορώδες (%)	3,7	13	7,3
Ολικό πορώδες (%)	5,9	15,7	9,3
Αντοχή σημειακής φόρτισης (MPa)	1,16	2,59	1,88
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	3,5	7,5	5,5
Μονοαξονική αντοχή (MPa)	22	39	28,5
Μέτρο ελαστικότητας E (GPa)	1,1	8,2	5,6

Σχήμα 4.13 : Tuğrul, A., 1998

Γεωτεχνικά προβλήματα κατά την εκσκαφή

Τα κύρια προβλήματα με τις υπόγειες εργασίες μέσα στον ασβεστόλιθο είχαν σχέση με την καρστικοποίησή του, η οποία επιτρέπει να παρουσία αιφνίδιων ροών ύδατος προκαλώντας συνθήκες αστάθειας στο μέτωπο εκσκαφής και στην οροφή στην αργιλώδη κατακερματισμένη βραχώμαζα και ευνοώντας την ολίσθηση μονομπλόκς κατά μήκος του επιπέδου στρώσης. Πολλά έγκοιλα συναντήθηκαν και αντιμετωπίστηκαν κατά την εκσκαφή των στοών. Τα έγκοιλα ήταν συγκεντρωμένα σε ζώνες διακλάσεων με πυκνή δομή και σε ζώνες ρηγμάτων. Τα έγκοιλα σε μικρό βάθος ήταν πληρωμένα με αργιλικό υλικό ενώ τα βαθύτερα σπανίως ήταν πληρωμένα. Καταπτώσεις τεμαχών της βραχώμαζας και εισροές υδάτων συνέβησαν στα τμήματα της στοάς όπου διασταυρώνονταν με ρήγματα και μεγάλης έκτασης ασυνέχειες.

13. “Hoek - Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels”

“Οι παράμετροι Hoek - Brown για την εκτίμηση του βάθους της ψαθυρής αστοχίας στις σήραγγες”

Martin, C.D., Kaiser, P.K., McCreath, D.R., 1999

Μία ανασκόπηση υπόγειας διάνοιξης σιηράγγων με εκσκαφή σε διαφόρους τύπους και συνθήκες βραχώμαζας δείχνει ότι η έναρξη της ψαθυρής αστοχίας αρχίζει να εμφανίζεται όταν ο δείκτης βλάβης D_i που εκφράζεται ως ο λόγος της μέγιστης εφαπτομενικής τάσης $\sigma_{\max}$ προς τη μονοαξονική αντοχή του αδιατάρακτου βράχου σ_c στο εργαστήριο σε ανεμπόδιση θλίψη, υπερβαίνει την τιμή 0,4. Όταν ο δείκτης ζημιών υπερβαίνει την τιμή αυτή το βάθος που αναμένουμε ψαθυρή αστοχία γύρω από μία σήραγγα μπορεί να εκτιμηθεί με την χρήση μίας περιβάλλουσας αντοχής που βασίζεται αποκλειστικά και μόνο στην συνοχή η οποία σύμφωνα με τους όρους των παραμέτρων Hoek - Brown συνεπάγεται ότι $m = 0$.

Προτείνεται ότι κατά την διαδικασία της ψαθυρής αστοχίας η μέγιστη συνοχή και η τριβή δεν συμβαδίζουν ταυτόχρονα και ότι γύρω από τα υπόγεια ανοίγματα η διαδικασία της ψαθυρής αστοχίας κυριαρχείται από μία απώλεια συνοχής της βραχώμαζας έτσι ώστε η δύναμη της τριβής να είναι δυνατόν να αγνοηθεί κατά την διαδικασία εκτίμησης του βάθους που θα δώσει ψαθυρή αστοχία, που αποτελεί μία βασική παράμετρο στην σχεδίαση των μέτρων υποστήριξης κατά την διάνοιξη μίας σήραγγας. Περιπτώσεις του παρελθόντος αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας το κριτήριο αστοχίας Hoek - Brown με παραδοσιακές παραμέτρους τριβής και με τις προτεινόμενες παραμέτρους θραύσης της βραχώμαζας : $m = 0$ και $s = 0.11$. Οι αναλύσεις έδειξαν ότι η χρήση κριτηρίων με παραμέτρους τριβής ($m > 0$) στην αστοχία της βραχώμαζας υποεκτιμούν σημαντικά το βάθος της ψαθυρής αστοχίας ενώ η χρήση των παραμέτρων θραύσης παρέχει καλή συμφωνία με τις παρατηρήσεις στο πεδίο. Οι αναλύσεις που χρησιμοποιούν τις παραμέτρους θραύσης δείχνουν επίσης ότι σε ενδιάμεσης τάσης περιβάλλοντα όπου η τάση που προκαλεί την ψαθυρή αστοχία είναι εντοπισμένη μία σήραγγα με επίπεδη οροφή είναι περισσότερο σταθερή από μία σήραγγα με θολωτή οροφή. Αυτό έχει επιβεβαιωθεί από παρατηρήσεις στο πεδίο.

Ως εκ τούτου, οι παράμετροι Hoek - Brown μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμηθεί το βάθος της ψαθυρής αστοχίας γύρω από τις σήραγγες, τα μέτρα υποστήριξης των φορτίων που δημιουργούνται από τις αστοχίες που προκαλούνται από τις τάσεις και η βέλτιστη γεωμετρία του ανοίγματος.

14. *“Stability of D - shaped tunnels in a Mohr - Coulomb material under anisotropic stress conditions”*

“Η ευστάθεια σε σήραγγες σχήματος D σε βραχώμαζες που ικανοποιούν το κριτήριο αστοχίας Mohr - coulomb κάτω από ανισότροπες συνθήκες πίεσης”

Meguid, M.A., Rowe, R.K., 2006

Στην παρούσα μελέτη διερευνάται η ευστάθεια κοντά στο μέτωπο εκσκαφής των σχήματος D σιράγγων σε γεωυλικά τα οποία υποβάλλονται σε εργαστηριακές δοκιμές σε ανισότροπες συνθήκες. Η κατασκευή της σήραγγας του πυρηνικού εργοστασίου του Ντάρλικτον αναλύεται με την χρήση τρισδιάστατων ελαστοπλαστικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. Η επαγόμενη μετατόπιση και οι τάσεις στα τοιχώματα της σήραγγας κατά την εκσκαφή του μετώπου σε σχέση με μετρήσεις στο πεδίο καταγράφηκαν κατά την διάρκεια της εκσκαφής της σήραγγας. Ερευνώνται η απώλεια της αντοχής της βραχώμαζας κατά την παραμόρφωση της σήραγγας, η ευστάθεια του μετώπου και η κατανομή των τάσεων στην περιφέρεια την σήραγγας για διάφορες συνθήκες πίεσης με επιτόπου δοκιμές πίεσης. Όταν ο λόγος της αντοχής της βραχώμαζας προς την υπερκείμενη πίεση πέσει κοντά στην τιμή 0,5 παρουσιάζεται έντονη παραμόρφωση και συμπίεση της βραχώμαζας δημιουργώντας συνθήκες που μπορούν να προκαλέσουν αστάθεια τόσο της περιφέρειας όσο και του μετώπου εκσκαφής.

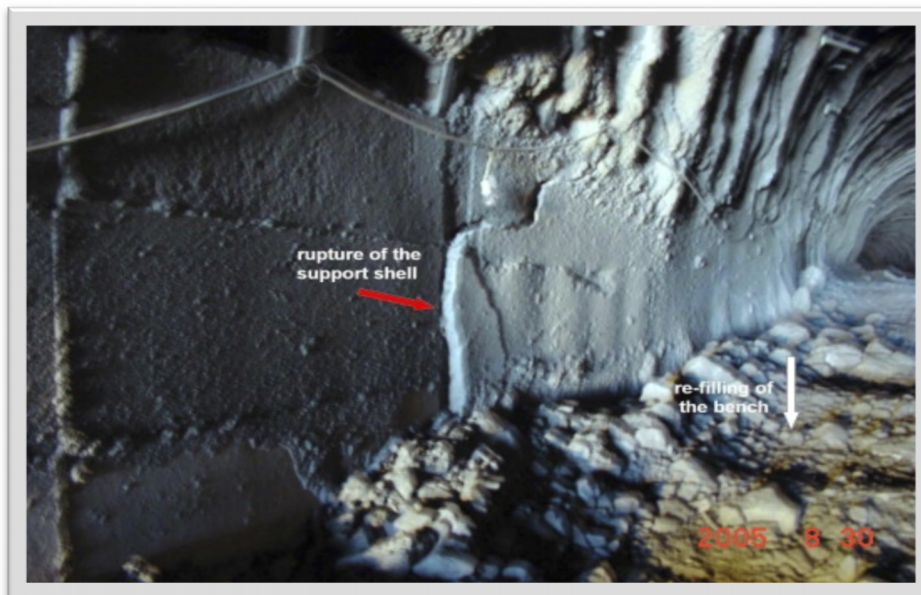
15. *“Delayed failure at the Messochora tunnel, Greece ”*

“Αστοχία σε μεταγενέστερο χρόνο στην σήραγγα της Μεσοχώρας, Ελλάδα”

Kontogiannia, V., Papantonopoulos, C., Stirosa, S., 2008

Δεδομένα από γεωδαιτικές μετρήσεις και επιμηκυνσιόμετρα χρησιμοποιήθηκαν για να αποσαφηνιστεί η σχετικά ελάχιστα γνωστή επίδραση των καθυστερούμενων παραμορφώσεων στις σήραγγες. Τέσσερις εβδομάδες μετά την πλήρη ανασκαφή του τμήματος και χωρίς καμία ένδειξη που να υποδηλώνει σταδιακή συσσώρευση τάσεων, πραγματοποιήθηκε σημαντική σύγκλιση των τοιχωμάτων της σήραγγας και εμφάνιση ρωγμών κατά μήκος της ασθενούς βραχώδους ζώνης μήκους 36 μέτρων στη σήραγγα της Μεσοχώρας (Ελλάδα). Η παραμόρφωση επεκτάθηκε και σε γειτονικά σταθεροποιημένα τμήματα της σήραγγας. Η εκδήλωση αυτή των παραμορφώσεων ήταν εκτός προβλέψεων, αποτέλεσμα ενός εκθετικού τύπου συσσώρευσης των τάσεων βασισμένο σε θεωρητικά δεδομένα και δεδομένα πεδίου. Μπορεί μόνο να εξηγηθεί εάν

αποδεχθούμε ότι η ασθενής ζώνη της σήραγγας βρισκόταν σε μία οριακή κατάσταση ευστάθειας και ότι κάποιες παρεμβάσεις μικρής κλίμακας που έγιναν, οι οποίες υπό άλλες συνθήκες δεν θα επηρέαζαν αρνητικά την κατάσταση ευστάθειας, οδήγησαν στην εκδήλωση νέων συσσωρεύσεων τάσεων και στην μετάδοση τους σε γειτονικά τμήματα.



Εικόνα 4.1 : Μια φωτογραφία από τη σήραγγα της Μεσοχώρας μία μέρα μετά από τον εντοπισμό της αστοχίας στο κέλυφος υποστήριξης, 30 Αυγούστου 2005

Τα στοιχεία αυτά από την σήραγγα της Μεσοχώρας δείχνουν ότι ειδικά σε ασθενείς βραχώμαζες, η σταθεροποίηση μετά την εκσκαφή μπορεί να είναι μόνο παροδική και εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ των τάσεων και την συνδυαζόμενη αντοχή των μέτρων υποστήριξης της βραχώμαζας.

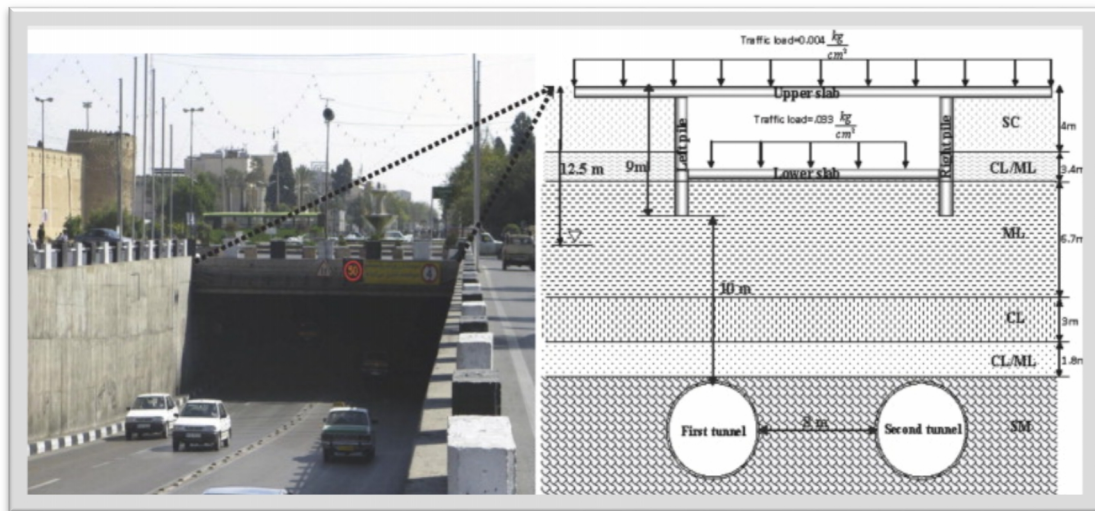
16. “Interaction of twin tunnels and shallow foundation at Zand underpass, Shiraz metro, Iran”

“Η αλληλεπίδραση των δύο δίδυμων σηράγγων και της ρηχής θεμελίωσης του υπόγειου αυτοκινητοδρόμου Zand, μετρό Σιράζ, Ιράν”

Mohammad Afifpour

Η κατασκευή σηράγγων σε αστικές περιοχές έχει ως αποτέλεσμα την αναπόφευκτη διέλευσή τους κοντά σε γειτονικές κατασκευές. Σε αυτή την έρευνα

αναλύονται οι επιπτώσεις της διάνοιξης δύο δίδυμων σηράγγων κατά την κατασκευή του μετρό της πόλης Shiraz στο Ιράν στο τμήμα που περνάει κάτω από την υπόγεια διέλευση του αυτοκινητοδρόμου στην περιοχή Zand από δεδομένα που έχουν καταγραφεί στην διάρκεια μιας 15ετίας. Ερευνώνται οι παράμετροι της μεθόδου εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPB) που περιλαμβάνονται κατά την πίεση που ασκείται από το έδαφος στο μέτωπο εκσκαφής και την πίεση που ασκείται στο έδαφος μέσα από τον θάλαμο εκσκαφής του μηχανήματος και η οποία είναι μία αποτελεσματική μέθοδος διάνοιξης σηράγγων.



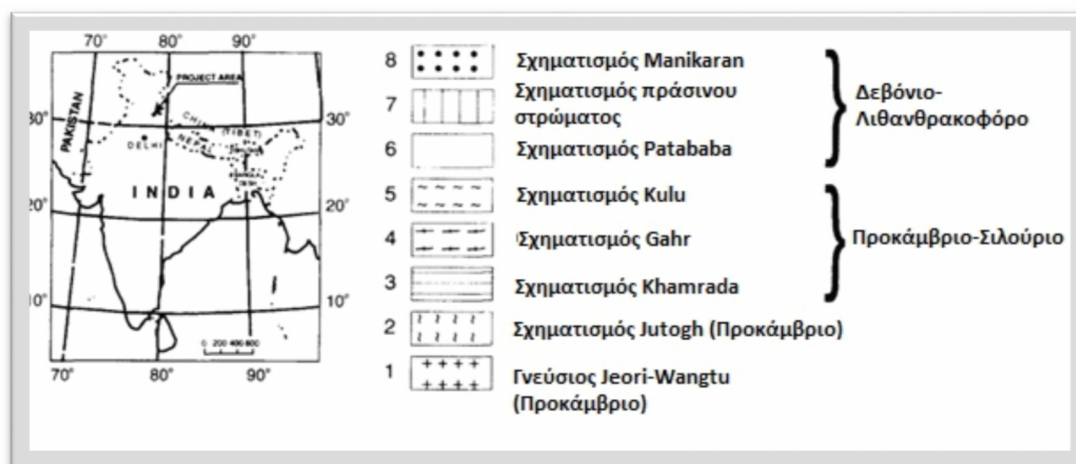
Εικόνα 4.2 : Η θέση των διδύμων σηράγγων και του υπόγειου αυτοκινητοδρόμου Zand, στα δεξιά διακρίνονται οι εναλλαγές των γεωολικών, Mohammad Afifipour

17. “Engineering geological characterization of low strength anisotropic rock in the Himalayan region for assessment of tunnel support”
“Γεωμηχανικός χαρακτηρισμός της χαμηλής αντοχής σε ανισότροπη βραχώμαζα στην περιοχή των Ιμαλαΐων για την εκτίμηση των μέτρων υποστήριξης μιας σήραγγας”

Bhasin, R., Barton, N., Grimstad, E., Chryssanthakis, P., 1995

Μία λεπτομερής τεχνικογεωλογική αξιολόγηση της χαμηλής αντοχής (6 - 35 MPa) ανισότροπων βραχώμαζων πραγματοποιήθηκε κατά την κατασκευή υδροηλεκτρικού εργοστασίου στην περιοχή των Ιμαλαΐων. Αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα έργα του συγκεκριμένου είδους στον κόσμο. Διαθέτει μία σήραγγα με 10,15 m διάμετρο και μήκος 23,7 km, ένα υπόγειο συγκρότημα 942.000 m³ καθώς και ένα υπόγειο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος διαστάσεων 20x49 x 216 m.

Επειδή η συγκεκριμένη κατασκευή πραγματοποιήθηκε σε χαμηλής αντοχής μεταμορφωμένα ανισότροπα πετρώματα από χαλαζιακούς μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, βιοτιτικούς και μοσχοβιτικούς σχιστόλιθους θεωρήθηκε αναγκαίο να προβούμε σε συνολική μελέτη της βραχώμαζας.



Σχήμα 4.14 : Γεωλογικός χάρτης γύρω από την περιοχή του έργου (τροποποιήθηκε από Bhargava, 1980)

Οι μελέτες περιλαμβάνουν πετρογραφικές αναλύσεις των πετρωμάτων, μετρήσεις των γεωμηχανικών ιδιοτήτων, μετρήσεις αντοχής, ταξινόμηση της βραχώμαζας χρησιμοποιώντας το σύστημα γεωμηχανικής ταξινόμησης Q του Barton καθώς και απόκτηση δεδομένων σχετικά με την γεωμετρία των ασυνεχειών, την τραχύτητα και την αντοχή τους. Η χρήση αυτών των γεωλογικών και γεωμηχανικών δεδομένων σε συνδυασμό με πειραματικά δεδομένα και μελέτες μοντελοποίησης βοήθησαν στο να κατανοήσουμε καλύτερα την συμπεριφορά της βραχώμαζας κατά την υπόγεια διάνοιξη.

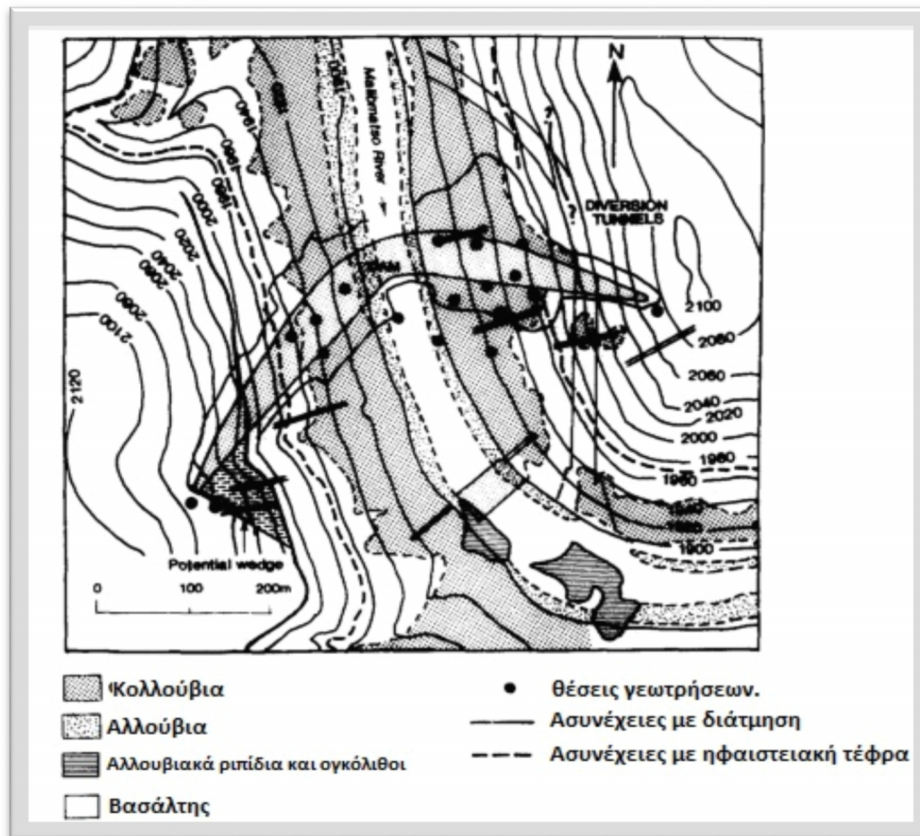
18. “A geotechnical overview of Katse Dam and Transfer Tunnel, Lesotho, with a note on basalt durability”

“Μία γεωτεχνική επισκόπηση του φράγματος Katse και της σήραγγας μεταφοράς του Lesotho με έμφαση στην ανθεκτικότητα του βασάλτη”

Bell, F.G., Haskins, D.R., 1997

Το φράγμα Katse και η σήραγγα μεταφοράς αποτελούν μέρος του έργου στην περιοχή των υψιπέδων του Lesotho και είναι κατασκευασμένα επάνω σε βασάλτες του

σχηματισμού Drakensberg. Το έργο αυτό θα παρέχει νερό στην κύρια βιομηχανική περιοχή της νότιας Αφρικής γύρω από την Πρετόρια και το Γιοχάνεσμπουργκ. Το έργο ξεκίνησε το 1987.



Σχήμα 4.15 : Η γεωλογία της περιοχής του φράγματος και οι θέσεις των γεωτρήσεων, (από Brackley et al., 1991)

Πολλοί από τους σχηματισμούς των βασαλτών έχουν υποστεί δευτερογενή εξαλλοίωση και κατά συνέπεια περιέχουν αργιλικά ορυκτά. Η παρουσία της αργίλου μπορεί να υποδηλώνει ότι οι συγκεκριμένοι βασάλτες αποσθλώνονται γρήγορα κατά την έκθεσή τους. Μία σειρά δοκιμών διεξήχθησαν για να εκτιμηθεί η ανθεκτικότητα των συγκεκριμένων βασαλτών. Οι ολιβινικοί βασάλτες και αυτοί οι τύποι που περιέχουν άργιλο είναι λιγότερο ανθεκτικοί. Πρόκειται για γεωλικά ακατάλληλα για χρήση ως αδρανή σκυροδέματος. Η φύση του βασάλτη ωστόσο μπορεί να περιορίσει την απορρόφηση νερού που διογκώνει τα ορυκτά και ως εκ τούτου επηρεάζει τον βαθμό κατακερματισμού τους και την αντοχή τους. Ο κατακερματισμός των βασαλτών που οδήγησε στον αποχωρισμό τμημάτων βράχου σε πλάκες και μικρά θραύσματα γύρω από τα τοιχώματα της σήραγγας καθώς και η πολυπλοκότητα της αποσάθρωσης και των διακλάσεων εξηγεί τον λόγο που αυξήθηκε το βάθος θεμελίωσης του

φράγματος. Οδήγησε επίσης στην καθυστέρηση ολοκλήρωσης της σήραγγας μεταφοράς.



*Εικόνα 4.3 : Τμήμα κατασκευής του φράγματος Katse , μέσα του 1993,
Bell, F.G., Haskins, D.R., 1997*



*Εικόνα 4.4 : Η κατασκευή του φράγματος Katse στο τελικό του στάδιο, μέσα του 1995,
Bell, F.G., Haskins, D.R., 1997*

19. *“Foundation Behaviour in Reusable Tunnels in weak rocks”*

“Συμπεριφορά θεμελίωσης σε επαναχρησιμοποιημένες σήραγγες σε ασθενή πετρώματα”

Hart, P.A.†, 1993

Στην παρούσα εργασία αναθεωρούνται οι κύριοι παράγοντες και οι προσεγγίσεις μοντελοποίησης όσον αφορά την συμπεριφορά των θεμελίων σε επαναχρησιμοποιημένες σήραγγες ανθρακωρυχείων. Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από δύο ανθρακωρυχεία που δραστηριοποιούνται στην λεκάνη της νότιας Ουαλίας δείχνουν πως οι γεωλογικές παράμετροι καθώς και οι παράμετροι της παραμόρφωσης μπορούν να επιδράσουν στην διόγκωση του δαπέδου των σιηράγγων των ορυχείων.

Ταξινομούνται οι μηχανισμοί διόγκωσης του δαπέδου, οι σχέσεις μεταξύ του γεωλογικού δείκτη με τον σχεδιασμό υποστήριξης και το ποσοστό διόγκωσης της σήραγγας μεταφοράς και συζητούνται για κάθε κατάσταση εξόρυξης ξεχωριστά. Συμπερασματικά, ο γεωλογικός δείκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του γεωτεχνικού χαρακτηρισμού του στρώματος και οι τιμές που θα προκύψουν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των τμημάτων που είναι επιρρεπή σε διόγκωση του δαπέδου.

20. *“TBM performance estimation using rock mass classifications”*

“Εκτίμηση της απόδοσης TBM με χρήση ταξινομήσεων βραχώμαζας”

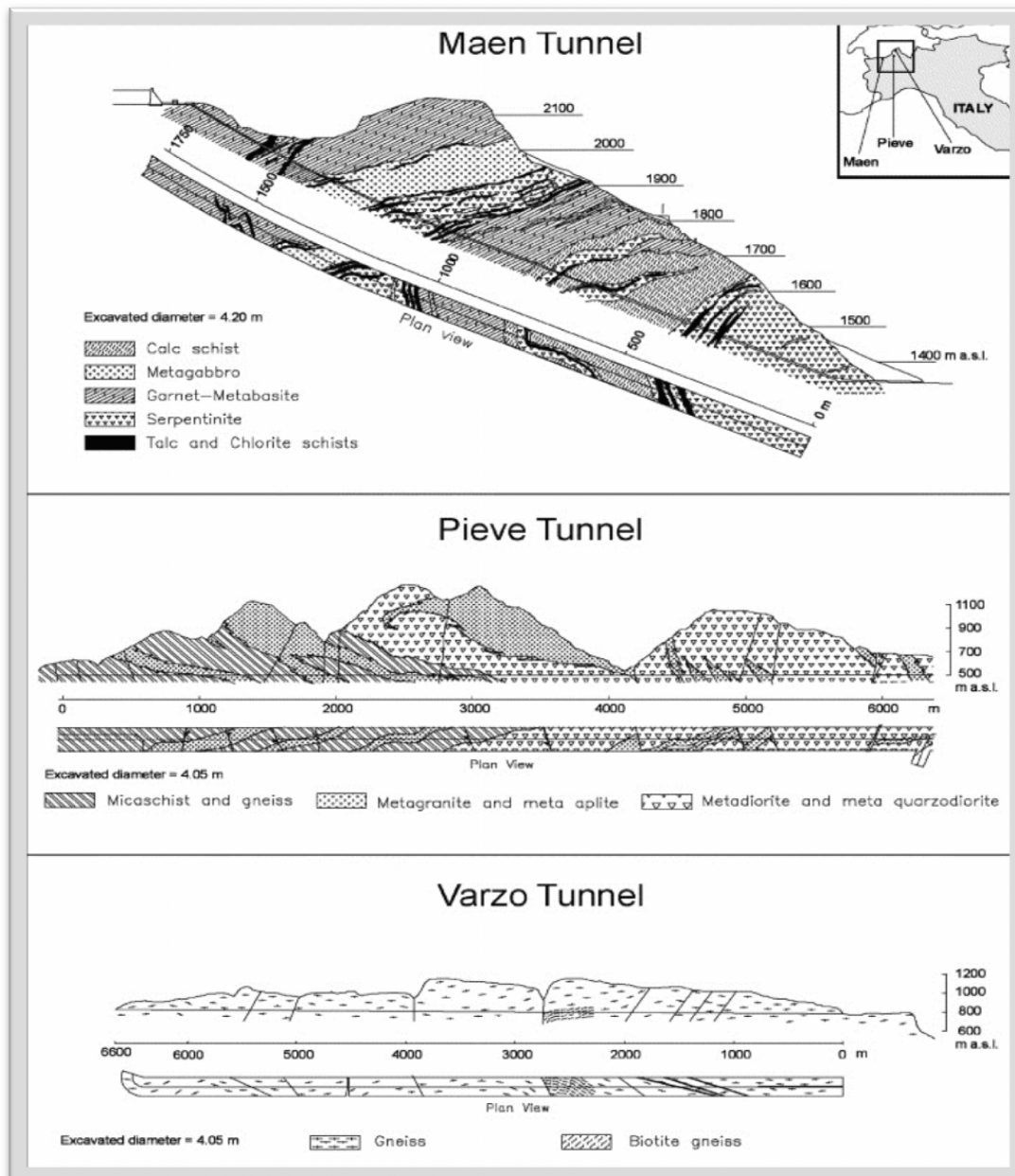
Sapignia, M., Bertib, M., Bethazc, E., Busillod, A., Cardone, G., 2002

Στη Βόρεια Ιταλία ανασκάφηκαν τρεις σήραγγες για υδραυλικούς σκοπούς από μηχανές διάνοιξης σήραγγας (TBM), σε ως επί το πλείστον σκληρά μεταμορφικά πετρώματα. Η έρευνα που ήταν σχεδόν διαρκής έγινε σε συνολικά 14 km σήραγγας, παρέχοντας πάνω από 700 σειρές δεδομένων με βάση τα οποία παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά της βραχώμαζας και οι επιδόσεις των TBM.

Οι εμπειρικές σχέσεις ανάμεσα στην αξιολόγηση της βραχομάζας και του βαθμού διεύθυνσης των TBM δείχνουν σαφώς ότι οι επιδόσεις τους είναι εξαιρετικές σε βραχώμαζες με εύρος τιμών 40-70 κατά RMR ταξινόμηση, ενώ πιο αργή διεύθυνση παρουσιάζεται τόσο σε πάρα πολύ κακές όσο και σε πολύ καλές βραχώμαζες.

Ωστόσο, καθώς διαφορετικές βραχώμαζες δίνουν διαφορετικούς ρυθμούς διεύθυνσης για το ίδιο εύρος RMR, η χρήση της ταξινόμησης Bieniawski για

προγνωστικούς σκοπούς είναι δυνατή μόνο εφόσον χρησιμοποιείται ομαλοποιημένος δείκτης RMR σε σχέση με τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη διάνοιξη σηράγγων με μηχανές διάνοιξης. Από τις συγκρίσεις των πραγματικών διεισδύσεων με αυτές που προβλέπονται από τα μοντέλα των Innaurato και Barton δεν παρουσιάζεται συμφωνία, κι έτσι αναδεικνύονται οι δυσκολίες που προκύπτουν στην πρόβλεψη των επιδόσεων διάτρησης με TBM.



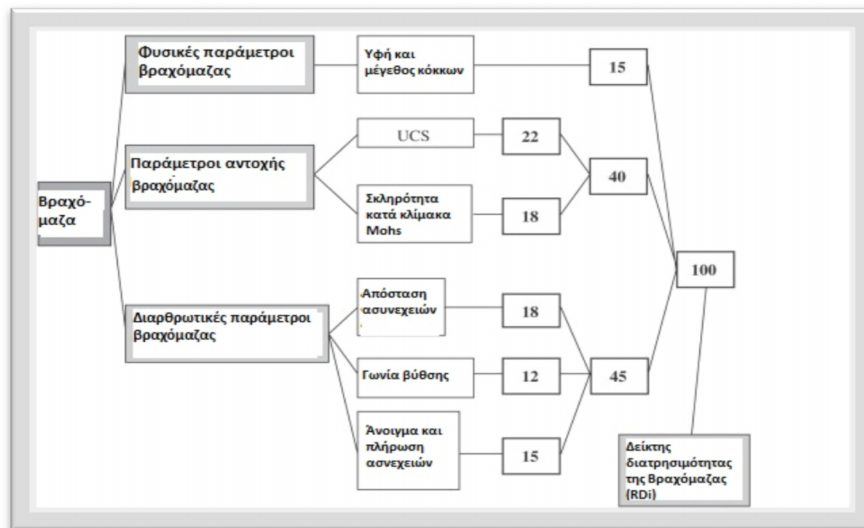
Σχήμα 4.16 : Γεωλογικοί σχηματισμοί κατά μήκος των τριών σηράγγων, Sapignia, M., Bertib, M., Bethazc, et al., 2002

21. “Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index (RD_i)”

“Ανάπτυξη ενός νέου συστήματος ταξινόμησης για την εκτίμηση του δείκτη ικανότητας διάτρησης (RD_i) βραχώδους μάζας”

Hoseiniea, S.H., Aghababaeib, H., Pourrahimian, Y. 2008

Η διαδικασία διάτρησης και τα αποτελέσματά της επηρεάζονται από διάφορες παραμέτρους του βραχώδους υλικού και της βραχώμαζας. Οι επιδράσεις στο βραχώδες υλικό έχουν τονιστεί σε διάφορες άλλες μελέτες. Ωστόσο, η έλλειψη άριστης γνώσης σχετικά με τις δομικές παραμέτρους της βραχώμαζας μπορούν να οδηγήσουν σε απρόβλεπτα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.17 : Ταξινόμηση βραχώμαζας με παραμέτρους δομής και αντοχής, Hoseiniea, S.H., Aghababaeib, H., Pourrahimian, Y. 2008

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένα νέο σύστημα ταξινόμησης για τον καθορισμό δείκτη ικανότητας διάτρησης (RD_i) της βραχώμαζας. Για το σκοπό αυτό, έχουν διερευνηθεί με φυσική προσομοίωση/μοντελοποίηση και έχουν αξιολογηθεί έξι παράμετροι της βραχώμαζας, συμπεριλαμβανομένης της υφής και του μεγέθους των κόκκων, της σκληρότητας Mohs, της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS), το άνοιγμα των ασυνεχειών, την πλήρωσή τους και την γωνία βύθισης. Ειδικότερα η φυσική μοντελοποίηση έχει χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση των επιδράσεων των κοινών χαρακτηριστικών στο συντελεστή διάτρησης. Στο προτεινόμενο σύστημα RD_i , σε κάθε βραχώδη μάζα αποδίδεται μια βαθμολογία 7 - 100, με υψηλότερη τη βαθμολογία που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη ευκολία διάτρησης. Με βάση την αξιολόγηση RD_i , ο συντελεστής διάτρησης μπορεί να ταξινομηθεί σε πέντε τύπους: αργός, αργός-μέτριος, μέτριος, μέτριος - γρήγορος και γρήγορος.



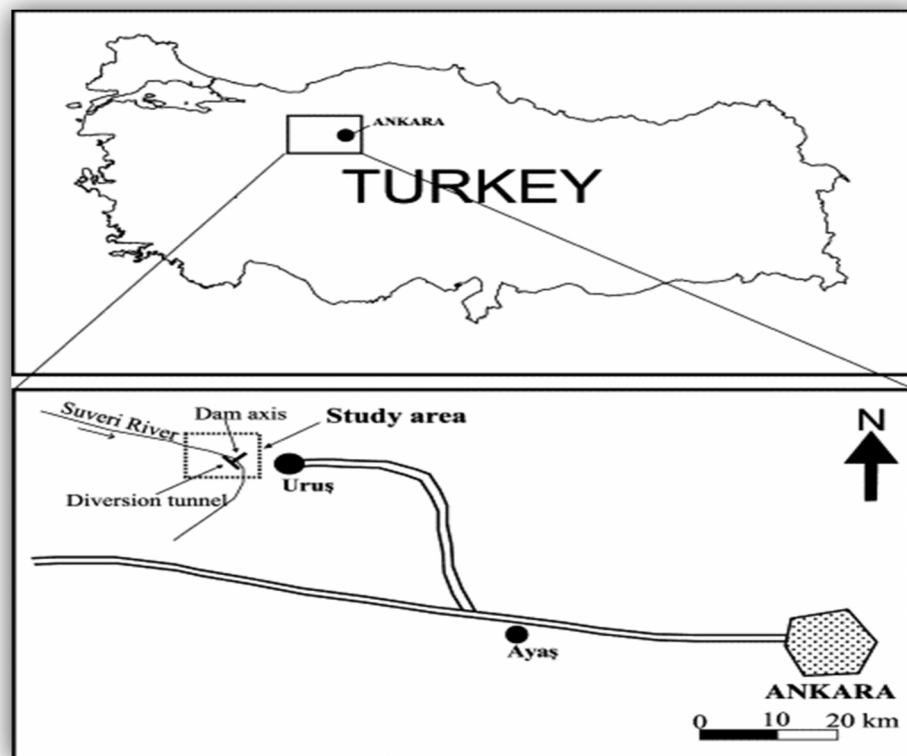
Εικόνα 4.5 : Διαδικασίες φυσικής μοντελοποίησης,
Hoseiniea, S.H., Aghababaeib, H., Pourrahimian, Y. 2008

22. “Support capacity estimation of a diversion tunnel in weak rock”

“Προσδιορισμός της ικανότητας υποστήριξης σε σήραγγα εκτροπής σε ασθενή βράχομαζα”

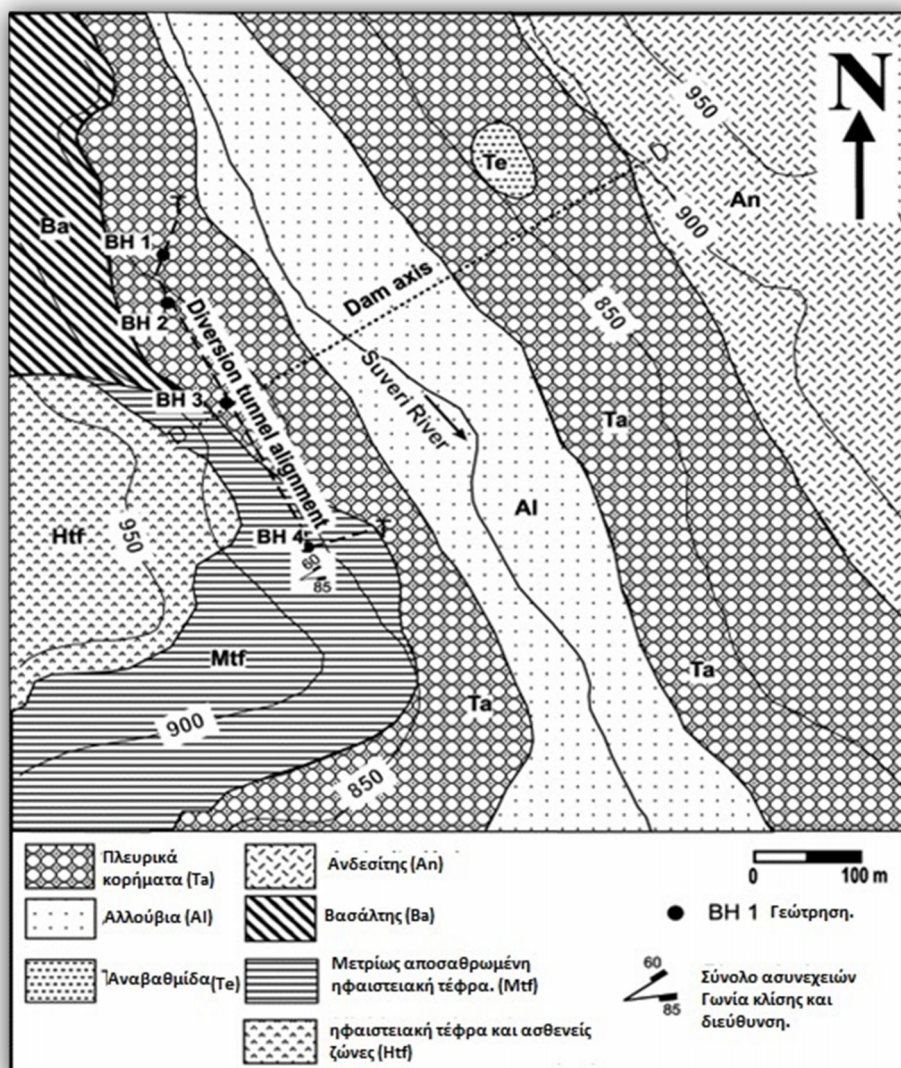
Özsan, A., Başarır, H., 2003

Η εργασία αυτή παρουσιάζει τα αποτελέσματα σχετικά με την υποστήριξη της σήραγγας εκτροπής του φράγματος στην περιοχή Urus σε ζώνη αδύναμη και εξαιρετικά διαβρωμένη από ηφαιστειακή τέφρα.



Σχήμα 4.18 : Περιοχή στον χάρτη της θέσης του φράγματος Urus,
Özsan, A., Başarır, H., 2003

Η διάνοιξη σήραγγων σε ασθενές πέτρωμα απαιτεί κάποια ειδική αντιμετώπιση, δεδομένου ότι η εσφαλμένη εκτίμηση για την υποστήριξη έχει ως αποτέλεσμα πολυδάπανες αστοχίες. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι προσδιορισμού των μέτρων υποστήριξης των πετρωμάτων και της επιλογής των τύπων τους. Ωστόσο, όλα τα συστήματα πάσχουν από χαρακτηριστικούς περιορισμούς στην επίτευξη των στόχων. Έτσι, είναι πιο χρήσιμο να χρησιμοποιήσουμε διαφορετικές μεθόδους για την εκτίμηση της πίεσης και τον τύπο υποστήριξης.



Σχήμα 4.19 : Γεωτεχνικός χάρτης της περιοχής,
Özsan, A., Başarır, H., 2003

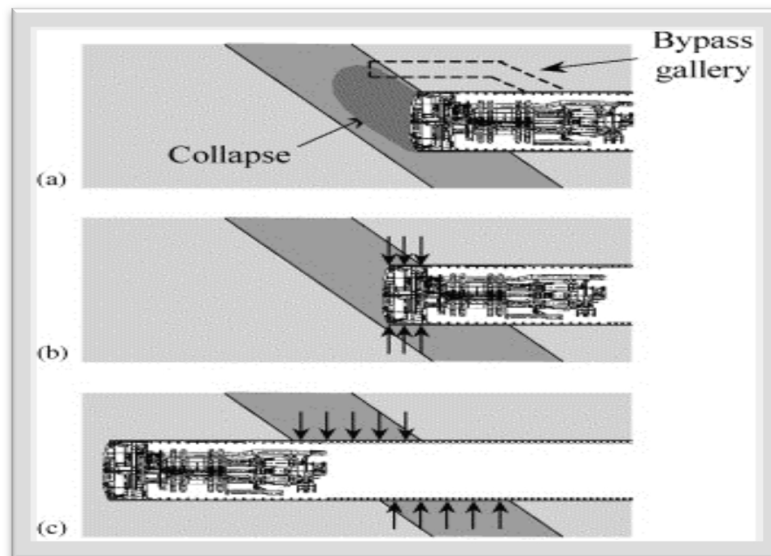
Η πίεση στήριξης p_i καθορίστηκε με τρεις διαφορετικές μεθόδους. Αυτές οι μέθοδοι είναι (1) εμπειρικές μέθοδοι που βασίζονται στην εκτίμηση της βραχομάζας (RMR) και στο δείκτη ποιότητας βραχώμαζας (συστήματα με Q - ταξινόμηση), (2) ανάλυση αλληλεπίδρασης με επίγεια στήριξη (GSIA) και (3) αριθμητικές μέθοδοι, δηλαδή, πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Phase2 (FEM). Οι βραχώμαζες χαρακτηρίστηκαν σε σχέση με τα RSR, RMR, σύστημα Q και GSI. Τα δείγματα που αποσπάστηκαν με διάτρηση εξετάστηκαν στο εργαστήριο μηχανικής πετρωμάτων για τον προσδιορισμό φυσικο - μηχανικών ιδιοτήτων. Η ανθεκτικότητα της βραχώμαζας υπολογίζεται με εμπειρικές μεθόδους.

23. “Geomechanical characterisation of cataclastic rocks : experience from the Cleuson - Dixence project”

“Γεωμηχανικός χαρακτηρισμός κατακλαστικών πετρωμάτων : η εμπειρία από το έργο Cleuson - Dixence”

Habimana, J., Labiouse, V., Descoedres, F., 2002

Η μηχανική συμπεριφορά των κατακλαστικών πετρωμάτων είναι δύσκολο να χαρακτηριστεί λόγω των πολλών δυσκολιών που προκύπτουν στη δειγματοληψία κατά τη διάρκεια των ερευνών, στο πλαίσιο προετοιμασίας του δείγματος και κατά την εκτέλεση των ενδεδειγμένων εργαστηριακών αναλύσεων. Για να αποκτήσουμε μια καλύτερη αντίληψη των εν λόγω πολύ φτωχών σε μηχανικά χαρακτηριστικά πετρωμάτων, το Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων EPFL ανέλαβε από την Cleuson - Dixence (Ελβετία) ένα εκτεταμένο εργαστηριακό πρόγραμμα διενέργειας δοκιμών σε κατακλαστικά πετρώματα. Μετά από ορισμένους προβληματισμούς για την ποσοτικοποίηση της έντασης της τεκτονικής διεργασίας αποσάθρωσης μέσω του Δείκτη Γεωλογικής Αντοχής, η εργασία περιγράφει εν συντομία τις τεχνικές δειγματοληψίας και δοκιμασίας.

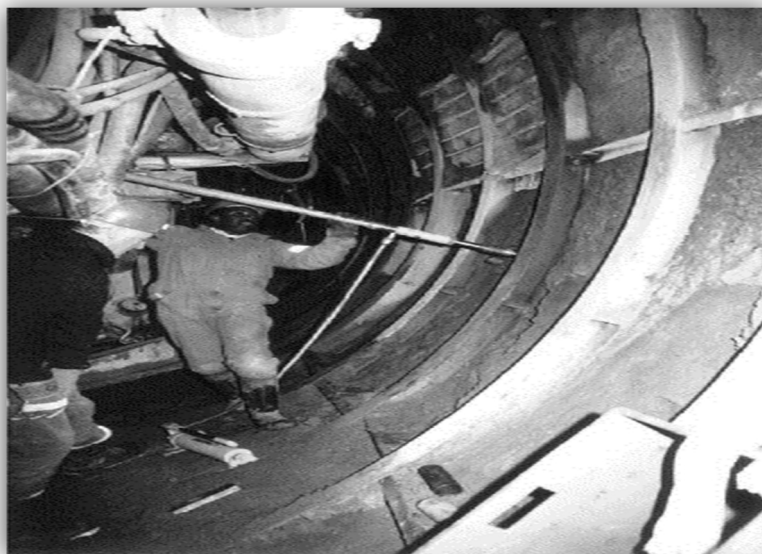


Σχήμα 4.20 : Η εξέλιξη της διάτρησης με TBM και η αντιμετώπιση των δυσκολιών που εμφανίζονται σε διατμήμενη βραχώμαζα. (τροποποιήθηκε από Habimana). (a) Αστάθεια στο μέτωπο εκσκαφής, (b) Αποσυμπίεση και μπλοκάρισμα της μηχανής και (c) Φαινόμενο ερπυσμού, Habimana, J., Labiouse, V., Descoedres, F., 2002

Στη συνέχεια, επικεντρώνεται στο κριτήριο αστοχίας και της σχέσης τάσης - καταπόνησης των δύο τύπων κατακλαστικών πετρωμάτων : χαλαζιακών ψαμμιτών και φυλλιτικών σχιστολίθων. Ένα νέο κριτήριο αστοχίας προτείνεται το οποίο αποτελεί μια επέκταση του κριτηρίου αστοχίας Hoek and Brown που λαμβάνει υπόψιν την

προοδευτική βλάβη που υπέστησαν τα κατακλαστικά πετρώματα κατά τη διάρκεια της τεκτονικής αποσάθρωσης.

Οι παράμετροι οριοθετούνται από ένα ανώτερο όριο που αντιστοιχεί στο αρχικό αδιατάρακτο πέτρωμα και ένα κατώτερο όριο που αντιστοιχεί σε ένα υλικό εξαιρετικά τεκτονισμένο που μοιάζει με έδαφος. Τέλος, η συμπεριφορά τάσης - καταπόνησης των εξεταζόμενων κατακλαστικών πετρωμάτων διαπιστώνεται ότι εξαρτάται από την περιοριστική πίεση και το βαθμό τεκτονισμού και προσεγγίζεται επαρκώς από το νόμο των Duncan και Chang.



Εικόνα 4.6 : Ειδική τεχνική που εφαρμόζεται κατά την κατασκευή ακριβώς πίσω από την κεφαλή του TBM, Habimana, J., Labiouse, V., Descoeudres, F., 2002

4.2 Φράγματα

4.2.1 Μηχανισμοί αστοχίας

Η ανάλυση των γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών στην περιοχή κατασκευής ενός φράγματος είναι απαραίτητη έτσι ώστε να προσδιοριστούν μέσα από ειδικές γεωλογικές μελέτες τα πιθανά προβλήματα που ενδέχεται να παρουσιαστούν τόσο κατά την διάρκεια κατασκευής ενός φράγματος όσο και μετά την αποπεράτωση

του έργου. Κατά την διεθνή επιτροπή μεγάλων φραγμάτων (ICOLD) αστοχία ενός φράγματος ορίζεται ως “Κατάρρευση ή μετακίνηση μέρους του φράγματος ή της περιοχής θεμελίωσης του τέτοια ώστε το φράγμα να μην μπορεί να συγκρατήσει νερό”. Η αστοχία έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων νερού εγκυμονώντας σοβαρούς κινδύνους για τους ανθρώπους και τις περιουσίες κατάντη του φράγματος.

Τα φράγματα διακρίνονται σε εύκαμπτα χωμάτινα ή λιθόρριπτα φράγματα και σε άκαμπτα φράγματα από σκυρόδεμα, τα τοξωτά και τα βαρύτητας. Οι αναλύσεις που πρέπει να γίνουν στην περιοχή θεμελίωσης αφορούν την ευστάθεια δηλαδή παραμέτρους παραμόρφωσης, αντοχής και στεγανότητας. Οι περιπτώσεις αστοχίας που έχουν συμβεί αφορούν τόσο τα χωμάτινα φράγματα όσο και αυτά από σκυρόδεμα. Όσον αφορά τις αστοχίες στα φράγματα από σκυρόδεμα τα κυριότερα προβλήματα εντοπίζονται στην θεμελίωση ενώ στα χωμάτινα οι κύριες αιτίες είναι υπερπήδηση και η εσωτερική διάβρωση.

Η θεμελίωση φραγμάτων σε ασθενή πετρώματα συχνά περιλαμβάνει προκλήσεις όπως βραχόμαζες με συμπιεστότητα, με παρουσία καταρρεόντων μελών και κατακερματισμένων καθώς και διατμημένων ζωνών με χαμηλή έως πολύ χαμηλή αντοχή, με φτωχά έως μέτρια συγκολλημένο υλικό, με διαφορετική ετερογένεια και παρουσία εγκοίλων. Αυτές οι συνθήκες συχνά οδηγούν σε μία μοναδική επιλογή όσον αφορά το είδος της κατασκευής δηλαδή στην κατασκευή ενός χωμάτινου φράγματος ή/και σπανιότερα ενισχύοντας την περιοχή θεμελίωσης ή αλλάζοντας την θέση κατασκευής του φράγματος.

Στο σχήμα 4.22 στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και των γεωλογικών σχηματισμών που εξετάζουμε παρουσιάζονται περιπτώσεις όπου η βραχόμαζα αξιολογείται ως ασθενής στις θεμελιώσεις φραγμάτων. Η συμπεριφορά της βραχόμαζας όπως προαναφέρθηκε καθορίζει και τον τύπο του φράγματος και εξαρτάται από την επίδραση της δομής του βράχου και τις μηχανικές του ιδιότητες που επηρεάζουν κυρίως την κατασκευή των φραγμάτων σκυροδέματος.

Στην περίπτωση κατασκευής φράγματος βαρύτητας η περιοχή θεμελίωσης θα πρέπει να είναι καλής ποιότητας και ομοιογενής διότι αυτός ο τύπος φράγματος είναι ευαίσθητος στις καθιζήσεις. Στα τοξωτά φράγματα απαιτείται μεγαλύτερη προσοχή στην συμπεριφορά της βραχόμαζας η οποία πρέπει να είναι πολύ καλής ποιότητας με υψηλές αντοχές, υψηλό μέτρο παραμορφωσιμότητας και μικρής ρωγμάτωσης. Επομένως οι περιορισμοί που θέτουν τα άκαμπτα φράγματα μας οδηγούν στην επιλογή κατασκευής ενός χωμάτινου έτσι ώστε να αποφύγουμε αστοχίες που οφείλονται στις πτωχές γεωμηχανικές ιδιότητες μίας βραχόμαζας.

Η παραμορφωσιμότητα E αποτελεί βασικό κριτήριο επιλογής τύπου φράγματος και καθορίζει την ποιότητα της βραχώμαζας :

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑ E
Καλή	$> 10 \text{ GPa}$
Ικανοποιητική	$5 \text{ GPa} < E < 10 \text{ GPa}$
Μέτρια	$E < 5 \text{ GPa}$
Φτωχή	$E < 1 \text{ GPa}$

Σχήμα 4.21 : [μαθηματα μαρινου]

Χαρακτηρισμός βραχώμαζας ως “ασθενής” κατά την θεμελίωση φραγμάτων :

<u>ΥΛΙΚΟ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ</u>	<u>ΤΕΧΝΙΚΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ</u>
ΦΛΥΣΧΗΣ	Οι εναλλαγές ψαμμιτών και ιλύολιθου είναι η πιο κοινές - Ποικίλες ετερογένειες - Παρουσία μελών με χαμηλή αντοχή - Σε αντίθεση με την μολάσσα πρόκειται για τεκτονικά διαταραγμένες δομές(δομική πολυπλοκότητα στον χώρο εξαιτίας πτυχώσεων και παρουσία ρηξιγενών τεκτονικών ζωνών και επιφανειών) - Εμμονή ασυνεχειών με χαμηλή αντοχή σε βάθος
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	Εσωτερική καρστική δομή, έγκοιλα κενά ή πληρωμένα με υλικό - Περιπτώσεις ενστρώσεων από ασθενή πηλίτη (φυλλίτες στην περίπτωση του μαρμάρου)
ΓΡΑΝΙΤΗΣ	Γενικά μεγάλης αντοχής αλλά με πιθανή εκτεταμένη αποσάθρωση - Ακανόνιστο προφίλ αποσάθρωσης και βραχώδους υποβάθρου (λιγότερο αποσαθρωμένοι ογκόλιθοι παρουσία εντελώς αποσαθρωμένου υλικού) - Κρυφές διακλάσεις μέχρι την επιφάνεια
ΒΑΣΙΚΑ - ΥΠΕΡΒΑΣΙΚΑ/ ΟΦΙΟΛΙΘΟΙ	Γενικά μεγάλης αντοχής αλλά οι περιδοτίτες μπορεί να περιέχουν σερπεντινιωμένες ζώνες χαμηλής αντοχής σε ακανόνιστη γεωμετρία μέσα στην μάζα - Ζώνες διάτμησης με αλλοιωμένο συμπιεστό υλικό
ΜΟΛΑΣΣΑ	Εναλλαγές ψαμμιτών με ιλύόλιθους (πιο συνηθισμένο) - Ποικίλες ετερογένειες - Παρουσία μελών με χαμηλή αντοχή - Ενδεχομένως να χαλαρώνει ο σχηματισμός όταν εκτίθεται

Σχήμα 4.22 : Ασθενείς βραχώμαζες, (Marinos 2012)

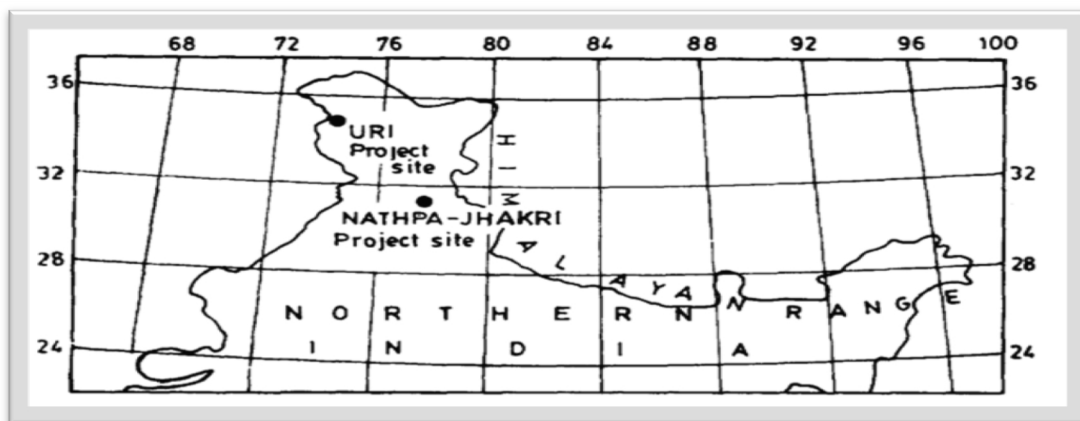
4.2.2 Παραδείγματα

24. “Engineering geological and geotechnical responses of schistose rocks from dam project areas in India”

“Γεωλογική μηχανική και γεωτεχνική συμπεριφορά των σχιστόλιθων για περιοχές κατασκευής φράγματος στην Ινδία”

Behrestaghia, M.H.N., Seshagiri, K., Ramamurthy, T., 1996

Για έναν ορθολογικό και ασφαλή σχεδιασμό των έργων των πολιτικών μηχανικών και των μηχανικών ορυχείων πάνω σε βράχο απαιτείται η σωστή κατανόηση της ποιότητας της βραχώμαζας καθώς και η αξιολόγηση των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των πετρωμάτων. Ειδικά αν η βραχώμαζα είναι ανισότροπη, η γενετική πολυπλοκότητα που συνδέεται δομή πετρωμάτων καθιστά πιο δύσκολη την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μία ολοκληρωμένη μελέτη της σύνθεσης, της φυσικής και της γεωμηχανικής τεσσάρων τύπων σχιστόλιθων δηλαδή χαλαζιακού, χλωριτικού, μαρμαρυγιακού χαλαζιακού σχιστόλιθου και βιοτιτικού σχιστόλιθου που προέρχονται από δύο τοποθεσίες υδροηλεκτρικών έργων στους πρόποδες των Ιμαλαΐων στην Ινδία.



Σχήμα 4.23 : Τοποθεσία των περιοχών του έργου “Uri” και “Nathpa-Jhakri”
Behrestaghia, M.H.N., Seshagiri, K., Ramamurthy, T., 1996

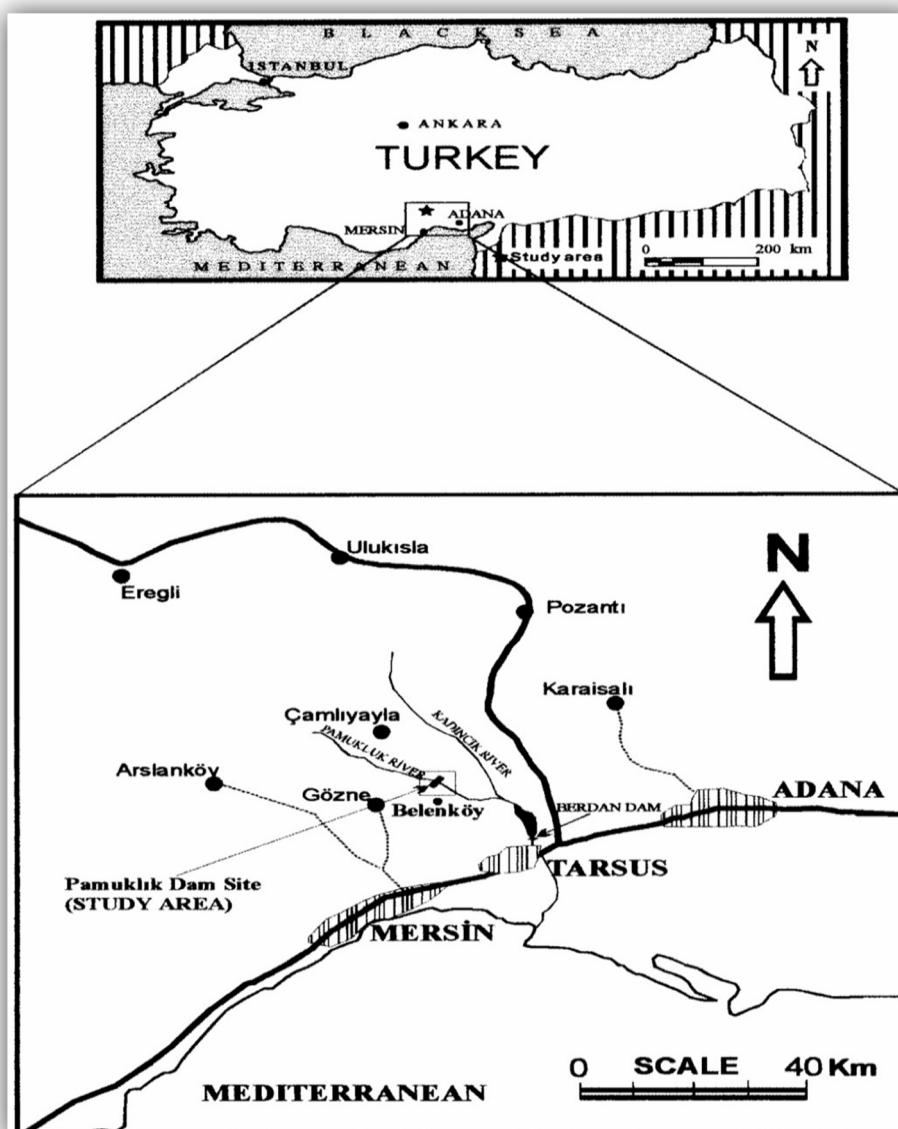
Η ανισότροπη συμπεριφορά της αντοχής των σχιστολίθων έχει τεθεί κάτω από δοκιμές με διαφορετικές γωνίες μεταξύ του προσανατολισμού της σχιστότητας και της κύριας τάσης στο πλαίσιο μονοαξονικών και τριαξονικών δοκιμών. Επίσης τονίζεται ο ρόλος που διαδραματίζει η ανισότροπη συμπεριφορά στον σχεδιασμό του έργου.

25. “Engineering properties of the magmatic rocks at the Pamukluk Dam site, Turkey”

“Μηχανικές ιδιότητες των μαγματικών πετρωμάτων στο φράγμα Pamukluk, Τουρκία”

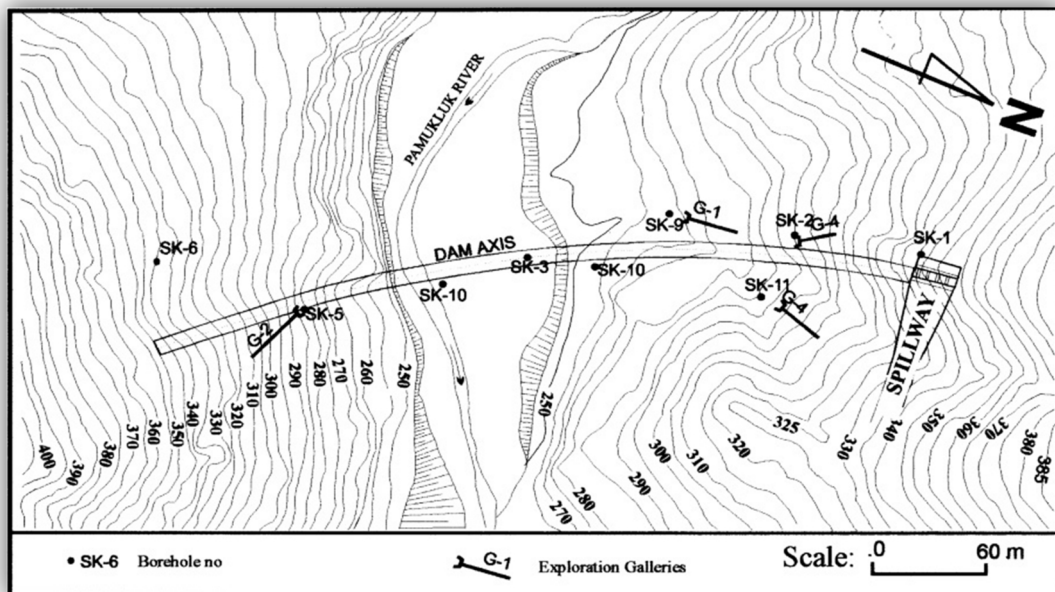
Turkmen, S., Ozguler, E., Ertunc, A., 2001

Το έγγραφο αυτό εξετάζει τα μαγματικά πετρώματα που αποτελούν υπόβαθρο πάνω στο οποίο είναι θεμελιωμένο το φράγμα Pamukluk στην Ταρσό της Τουρκίας.



Σχήμα 4.24 : Περιοχή έργου
Turkmen, S., Ozguler, E., Ertunc, A., 2001

Η περιοχή έχει υποστεί εκτεταμένες μαγματικές διεισδύσεις και σημαντικές τεκτονικές διαταραχές. Το παρόν έγγραφο αναφέρει τα αποτελέσματα εργαστηριακών ερευνών σε δοκίμια πυρηνοληπτικών γεωτρήσεων. Σε γενικές γραμμές οι διορίτες και οι μικροδιορίτες έχουν υποστεί μικρές αλλαγές και διατηρούν την μεγάλη αντοχή τους. Οι γρανοφύρες και λιγότερο τα αποσαθρωμένα όξινα πετρώματα έχουν μέτρια αντοχή ενώ οι γάββροι εμφανίζονται οι πιο αδύναμοι. Τα μέτρα ελαστικότητας κυμαίνονται μεταξύ 830 και περισσότερο από 3500 MPa. Δοκιμές πρεσσιομέτρησης έδειξαν ότι για ένα φράγμα ύψους 120 μέτρων η καθίζηση θα κυμαίνεται μεταξύ 33 και 69 χιλιοστών.



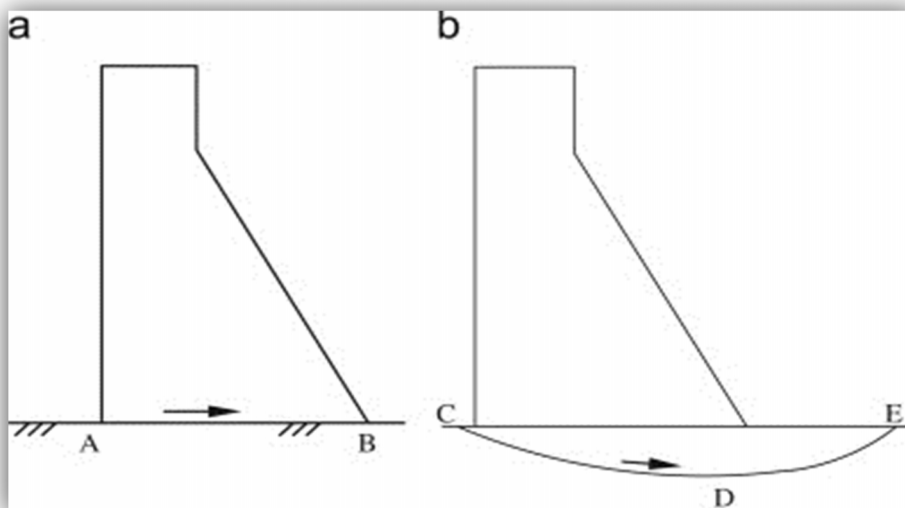
Σχήμα 4.25 : Θέσεις γεωτρήσεων και περιοχές έρευνας
Turkmen, S., Ozguler, E., Ertunc, A., 2001

26. “A three - dimensional procedure for evaluating the stability of gravity dams against deep slide in the foundation”
“Μια τρισδιάστατη διαδικασία για την αξιολόγηση της σταθερότητας των φραγμάτων βαρύτητας ενάντια σε τυχόν ολίσθηση στα θεμέλια”

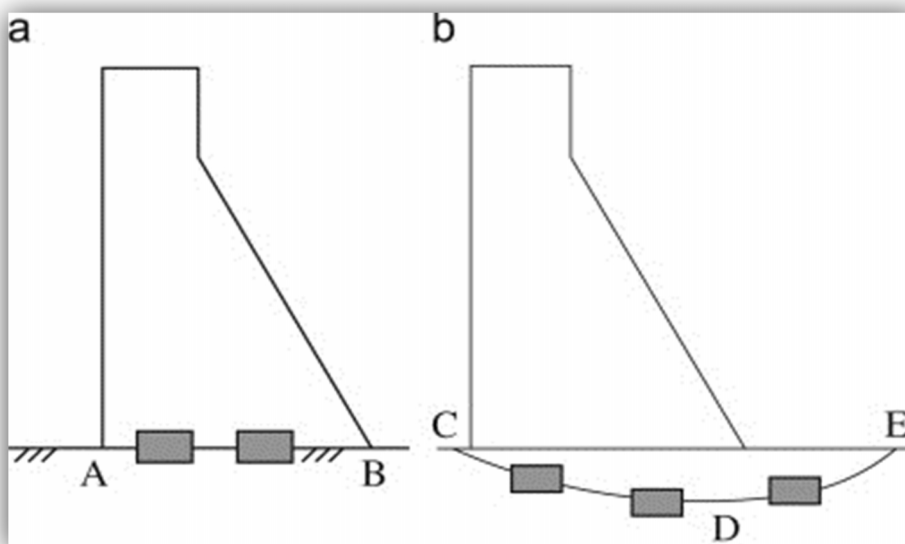
Guan-Hua Suna, Hong Zhengb, H., De-Fu Liub, 2011

Κατά το σχεδιασμό ενός φράγματος βαρύτητας, κάθε μονομπλόκ του φράγματος πρέπει να ελέγχεται για να προσδιοριστεί εάν η σταθερότητα ενάντια στην ολίσθηση κατά μήκος μιας εν δυνάμει ελαττωματικής επιφάνειας στα θεμέλια

ανταποκρίνεται στην απαίτηση που καθορίζεται από τον κώδικα σχεδιασμού. Μέχρι σήμερα, ο εν λόγω έλεγχος διεξάγεται συνήθως με βάση μεθόδους οριακής ισορροπίας δύο διαστάσεων. Οι αναλύσεις δύο διαστάσεων είναι μερικές φορές υπερβολικά συντηρητικές και δεν ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις.



Σχήμα 4.26 : Δύο τύποι αστοχίας του φράγματος.
(α) Ολίσθηση κατά μήκος της βάσης θεμελίωσης,
(β) Ολίσθηση κατά μήκος μιας βαθύτερης επιφανείας αστοχίας,
Guan-Hua Suna, Hong Zhengb, H., De-Fu Liub, 2011



Σχήμα 4.27 : Τοποθετημένα βύσματα σκυροδέματος για βελτίωση της σταθερότητας.
(α) Βύσματα στην βάση, (β) Βύσματα στην βαθύτερη επιφάνεια αστοχίας,
Guan-Hua Suna, Hong Zhengb, H., De-Fu Liub, 2011

Σε αυτή τη μελέτη, ένα τρισδιάστατο σύστημα οριακής ισορροπίας προτείνεται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της σταθερότητας των φραγμάτων βαρύτητας, κατά μήκος βαθιών επιφανειών αστοχίας της θεμελίωσης. Η μέθοδος ικανοποιεί όλες τις συνθήκες ισορροπίας, περιγράφει επιφάνειες αστοχίας οποιασδήποτε κατηγορίας, και τελικώς δίνει την δυνατότητα μείωσης κάποιων τιμών κατασκευής του φράγματος.

27. *“Stability assessment of the Three - Gorges Dam foundation, China, using physical and numerical modeling - Part I : physical model tests”*
“Εκτίμηση της ευστάθειας του φράγματος των τριών φαράγγιων, Κίνα, χρησιμοποιώντας φυσικά και αριθμητικά μοντέλα - Μέρος I : Δοκιμές φυσικών μοντέλων”

Jian Liua, Xia-Ting Fenga, Xiu-Li Dingb, Jie Zhangb, Deng-Ming Yueb, 2003

Η ευστάθεια των θεμελίων είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ασφάλεια του σκυροδέματος του φράγματος και ήταν ένα από τα κύρια τεχνικά προβλήματα κατά των σχεδιασμό του έργου κατασκευής του φράγματος Three - Gorges στην Κίνα.



Σχήμα 4.28 : Τοποθεσία του έργου των τριών φαράγγιων στην Κίνα
Jian Liua, Xia-Ting Fenga, Xiu-Li Dingb, et al., 2003

Οι κυριότερες δυσκολίες έγκειται σε δύο παράγοντες. Το πρώτο είναι ότι το υπόβαθρο στο οποίο είναι θεμελιωμένο το φράγμα αποτελείται από βράχους με διακλάσεις όπου αλλιώς καλούνται ‘rock bridges’ και οι οποίες διακλάσεις βυθίζονται με μικρή κλίση μέσα στην βραχώμαζα. Οι διακλάσεις διαδραματίζουν ένα κρίσιμο ρόλο στην ευστάθεια των θεμελίων. Το δεύτερο είναι ότι ακόμη και σε περιοχές όπου οι μικρής γωνίας κλίσης βυθιζόμενες διακλάσεις πάνω στον βράχο είναι περισσότερο ανεπτυγμένες δεν υπάρχουν επιφάνειες που μπορεί να ολισθήσουν εκτός και αν κάποιες από τις βραχώδεις γέφυρες που συγκρατούν τα μονομπλόκς αστοχήσουν, δημιουργώντας τουλάχιστον μία επιφάνεια ολίσθησης. Έως σήμερα δεν υπάρχουν οι κατάλληλες τεχνικές μοντελοποίησης με αποτέλεσμα να μην υπάρχει μία ικανοποιητική μέθοδος επίλυσης του προβλήματος εντελώς. Για αυτό τον λόγο εφαρμόστηκαν πολλαπλές μέθοδοι σε αυτή την μελέτη και οι οποίες αποδείχθηκαν αποτελεσματικές και αξιόπιστες.



*Εικόνα 4.7 : Περιοχή στα ανάντη του φράγματος κατά την κατασκευή,
Jian Liua, Xia-Ting Fenga, Xiu-Li Dingb, et al., 2003*

Στο πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας περιγράφεται το έργο με βάση τα αποτελέσματα των γεωλογικών ερευνών και των μηχανικών δοκιμών και τα οποία σχετίστηκαν με τα γεωλογικά και γεωμηχανικά μοντέλα που εφαρμόστηκαν στο συγκεκριμένο έργο. Στην συνέχεια δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα αναπτύχθηκαν για κάποιες κρίσιμες περιοχές.

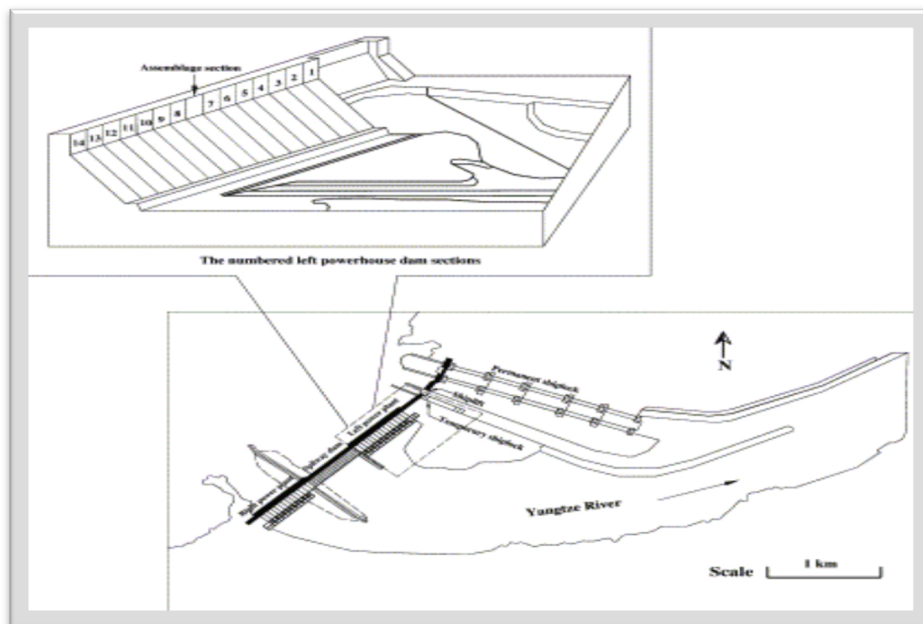
Στις δοκιμές που έγιναν πάνω σε μοντέλα εργαστηρίου και οι οποίες βασίστηκαν στην θεωρία της ομοιότητας, όπου γενικεύονται τα αποτελέσματα έτσι ώστε να αποκτηθούν νέες γνώσεις από την ομοιότητα των συνθηκών και των διαδικασιών, επιλέχθηκαν διάφορα υλικά για να την προσομοίωση της βραχώμαζας και του σκυροδέματος. Οι οριακές συνθήκες που δημιουργήθηκαν εργαστηριακά ακολούθησαν και αυτές τις απαιτήσεις της θεωρίας της ομοιότητας. Ο μηχανισμός της αστοχίας προήλθε μέσα από μία προοδευτική υπερφόρτωση κατά την προσομοίωση της

υδροστατικής πίεσης στο εργαστήριο στα ανάντη του φράγματος. Ο παράγοντας ασφαλείας ορίστηκε ως η οριακή κατάσταση ανάμεσα στην μέγιστη πίεση που μπορεί να αντέξει το φράγμα πριν οδηγηθεί σε αστοχία και της υδροστατικής πίεσης που ασκείται στα ανάντη. Τα πειραματικά μοντέλα έδειξαν ότι η ευστάθεια του θεμελίου ικανοποιεί τις απαιτήσεις ασφαλείας.

28. “Stability assessment of the Three - Gorges Dam foundation, China, using physical and numerical modeling - Part II : numerical modeling”
“Αξιολόγηση της σταθερότητας των θεμελίων του φράγματος Three - Gorges στην Κίνα, με χρήση φυσικών και ψηφιακών μοντέλων - Μέρος II : ψηφιακή μοντελοποίηση”

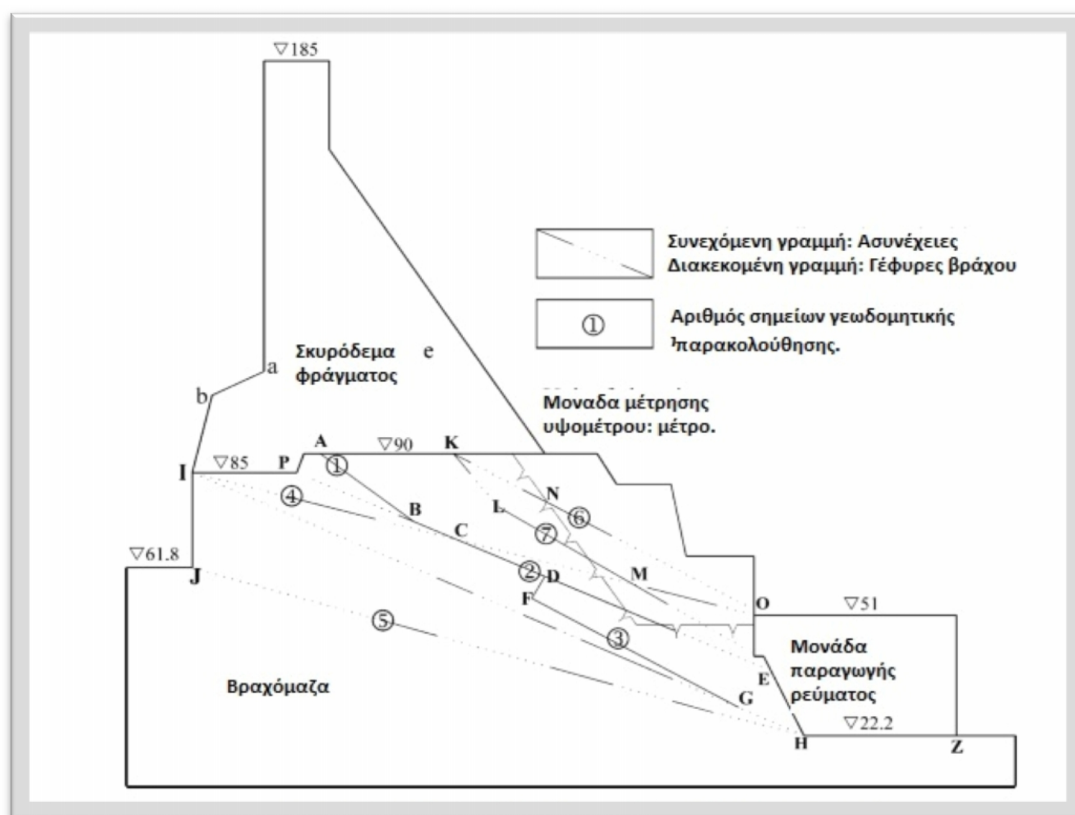
Jian Liua, Xia-Ting Fenga, Xiu-Li Ding, 2003

Η ολίσθηση στα θεμέλια φράγματος κατά μήκος των εν δυνάμει “επιφανειών ολίσθησης” γενικά προκαλείται από δύο είδη εξωτερικών παραγόντων: ο ένας είναι η υπερφόρτωση του υδροστατικού φορτίου στα ανάντη που προκαλείται από πλημμύρες και ο άλλος είναι η σταδιακή υποβάθμιση της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών λόγω διαρροής, παραμόρφωσης, βλάβης, και γεωχημικών αντιδράσεων του νερού με τα ορυκτά της επιφάνειας των ασυνεχειών.



Σχήμα 4.29 : Κάτοψη του έργου των τριών φαραγγιών και οι αριθμημένες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος,
Jian Liua, Xia-Ting Fenga, Xiu-Li Ding, 2003

Με βάση την εννοιολογική σημασία του γεωμηχανικού μοντέλου του φράγματος Three - Gorges, που περιγράφεται στο Μέρος Ι της εργασίας, στο Μέρος ΙΙ η μέθοδος ισορροπίας ορίων και η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των επιπτώσεων της σταδιακής υποβάθμισης της διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών στη σταθερότητα των θεμελίων του φράγματος. Η αριθμητική μοντελοποίηση επικεντρώνεται στις συνθήκες ευστάθειας του τμήματος Νο3 του φράγματος στο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος οι οποίες εκτιμάται ότι είναι οι πιο κρίσιμες. Περιλαμβάνονται επίσης οι περιοριστικές συνθήκες από τα παρακείμενα τμήματα του φράγματος Νο2, και Νο4 στο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος.

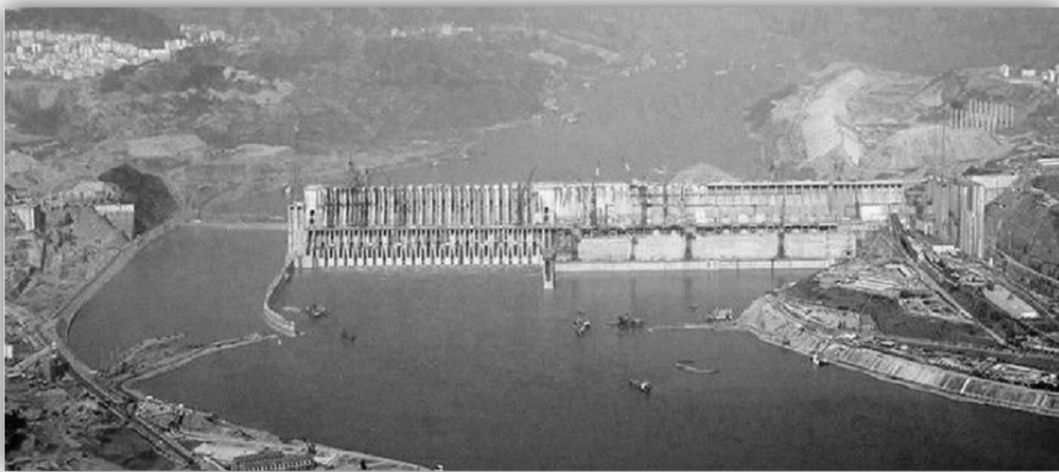


Σχήμα 4.30 : Γεωλογικό μοντέλο στον τομέα 3 στο αριστερό τμήμα του φράγματος, Jian Liua, Xia-Ting Fenga, Xiu-Li Ding, 2003

Οι μηχανισμοί αστοχίας, οι παράγοντες ασφάλειας και οι κρίσιμες μετατοπίσεις των τμημάτων αυτών του φράγματος προκύπτουν αριθμητικά ως μέτρα για την αξιολόγηση της ευστάθειας. Ο συντελεστής ασφαλείας ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της συνδυαζόμενης διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών και των άρρηκτων βράχων, προς την μέση διατμητική τάση κατά μήκος της εν δυνάμει επιφάνειας ολίσθησης που απαιτείται για την ισορροπία σύμφωνα με τα προβλεπόμενα εξωτερικά φορτία. Στην

παρούσα εργασία γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από αυτά τα διαφορετικά αριθμητικά μοντέλα, μαζί με τα αποτελέσματα των τεστ φυσικών μοντέλων όπως παρουσιάζονται στο Μέρος Ι της μελέτης.

Οι συγκρίσεις δείχνουν ότι τόσο τα αριθμητικά μοντέλα όσο και τα αποτελέσματα μέσω φυσικών μοντέλων στηρίζουν το ένα το άλλο και τονίζουν τη σταθερότητα των θεμελίων του φράγματος του Three - Gorges όπως έχουν μελετηθεί. Παρ'όλα αυτά, λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική σημασία από μηχανική και κοινωνικο - οικονομική άποψη των εγκαταστάσεων του φράγματος Three - Gorges, στην παρούσα εργασία συνιστώνται κάποια μέτρα πρόσθετης επεξεργασίας και ενίσχυσης.

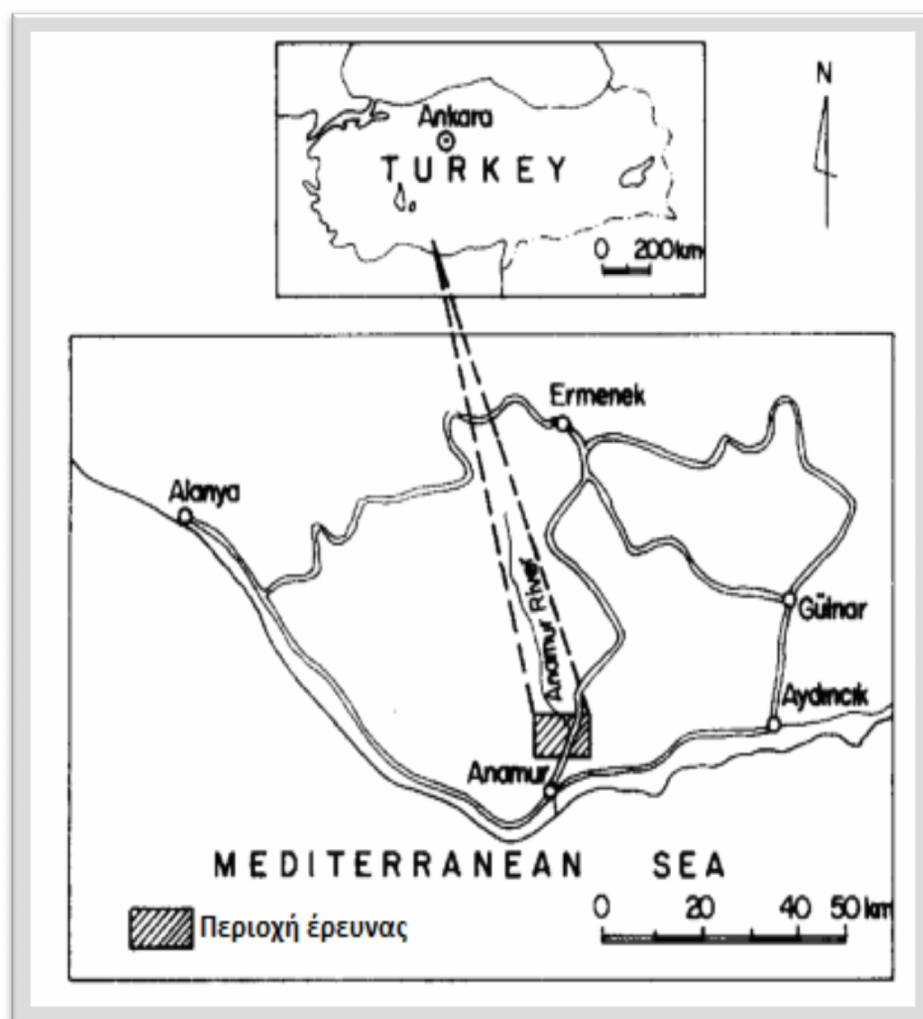


*Εικόνα 4.8 : Περιοχή στα κατάντη του φράγματος κατά την κατασκευή,
Jian Liua, Xia-Ting Fenga, Xiu-Li Ding, 2003*

29. *“Geotechnical rock-mass evaluation of the Anamur dam site, Turkey”*
**“Γεωτεχνική αξιολόγηση βραχώμαζας της περιοχής του φράγματος
Anamur, Τουρκία”**

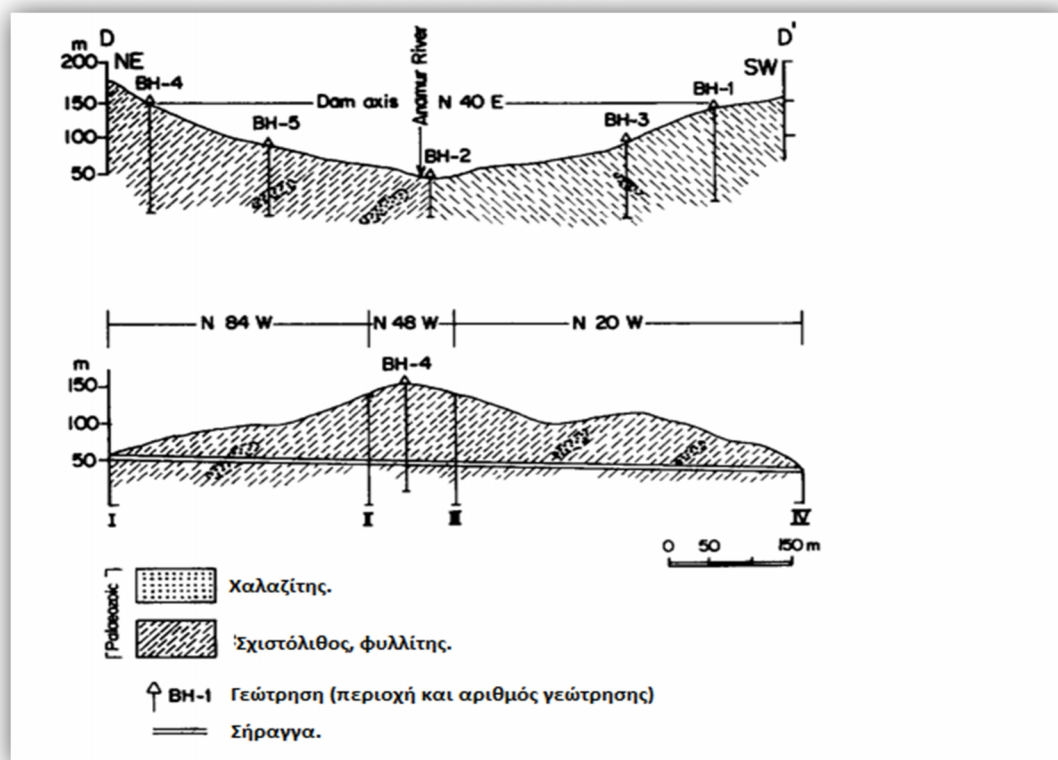
Özsana, A., Karpuz, C., 1996

Η παρούσα δημοσίευση περιγράφει ένα εφικτό επίπεδο γεωτεχνικής αξιολόγησης στην περιοχή του φράγματος Αναμούρ στην Τουρκία από την άποψη της ανάλυσης της ευστάθειας των θεμελίων, των πρανών εκσκαφής και της σήραγγας εκτροπής. Το συγκεκριμένο φράγμα πρόκειται να κατασκευαστεί στο ποταμό Αναμούρ σε μία σειρά από μεταμορφωμένα πετρώματα τα οποία αποτελούνται από σχιστόλιθους και φυλλίτες.



Σχήμα 4.31 : Τοποθεσία στο χάρτη της περιοχής του φράγματος,
Özsana, A., Karpuz, C., 1996

Οι γεωτεχνικές έρευνες περιελάμβαναν πυρηνοληπτικές γεωτρήσεις, δοκιμαστικές αντλήσεις, συλλογή δειγμάτων για εργαστηριακές δοκιμές καθώς και μία λεπτομερή έρευνα για την παρουσία των ασυνεχειών. Πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο μετρήσεις μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη, πυκνότητας, τριαξονικής αντοχής σε θλίψη και δοκιμές άμεσης διάτμησης. Τα δεδομένα που ελήφθησαν σχετικά με τις ασυνέχειες επεξεργάστηκαν με σκοπό την ταξινόμηση της βραχώμαζας στα διάφορα συστήματα ταξινόμησης. Η αξιολόγηση επικεντρώνεται στην κινηματική ανάλυση ευστάθειας πρανών, στην ευστάθεια των θεμελίων καθώς και στην ταξινόμηση της βραχώμαζας σε σχέση με την ευστάθεια της σήραγγας εκτροπής. Κατά την γεωτεχνική αξιολόγηση του συγκεκριμένου φράγματος και του ταμιευτήρα διαπιστώθηκε ότι δεν θα υπάρξουν προβλήματα σταθερότητας. Λεπτομερείς γεωτεχνικές έρευνες απαιτούνται για τον τελικό σχεδιασμό του έργου.



Σχήμα 4.32 : Γεωλογικά στοιχεία κατά μήκος της σήραγγας και του άξονα του φράγματος, Özşana, A., Karpuz, C., 1996

4.3 Πρανή

4.3.1 Μηχανισμοί αστοχίας

Τα πρανή αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα των περισσότερων τεχνικών έργων όπως κατασκευή οδικών αξόνων, φραγμάτων, λατομείων κτλ. Εκτός από τα τεχνητά πρανή, μεγάλου γεωλογικού και γεωτεχνικού ενδιαφέροντος είναι και τα φυσικά πρανή, δηλαδή τα πρανή που δεν οφείλουν την ύπαρξη τους σε ανθρώπινη παρέμβαση. Το ενδιαφέρον τους εντοπίζεται στις κατολισθήσεις που μπορεί να προκαλέσουν και οι οποίες ενδέχεται να είναι μεγάλης κλίμακας προξενώντας μεγάλες καταστροφές. Με την γενική έννοια του όρου, κατολίσθηση είναι οποιαδήποτε αλλαγή μικρή ή μεγάλη

της επιφάνειας μιας κλιτύος. Η κατολίσθηση εκφράζει το αποτέλεσμα αναζήτησης μίας νέας κατάστασης ισορροπίας του εδάφους και είναι δυνατή η ανθρώπινη παρέμβαση για την πλήρη παύση ή την επιβράδυνση του φαινομένου. Περιπτώσεις αστοχιών σε πρανή επισυνάπτονται αμέσως παρακάτω.

Εκτός από την απαραίτητη γνώση του γεωλογικού μοντέλου που καθορίζει τις συνθήκες ευστάθειας των τεχνικών έργων αναγκαία είναι ταυτόχρονα και η γνώση της ποιότητας της βραχώμαζας που είναι φυσικά συνάρτηση του γεωλογικού μοντέλου. Ο χαρακτηρισμός της ποιότητας της βραχώμαζας αποτελεί θεμελιώδες κριτήριο έτσι ώστε να εκτιμηθούν αξιόπιστα οι γεωτεχνικές παράμετροι.

4.3.2 Παραδείγματα

30.(A) *“Landslide of Tsakona 2003 : Analysis and Field Observations”*

“Κατολίσθηση Τσακώνας 2003 : Ανάλυση και Παρατηρήσεις Πεδίου”

Παπαντωνόπουλος Κ. Ι., Καπόπουλος Χ. Α., Ψαρρόπουλος Α. Τ., 2006

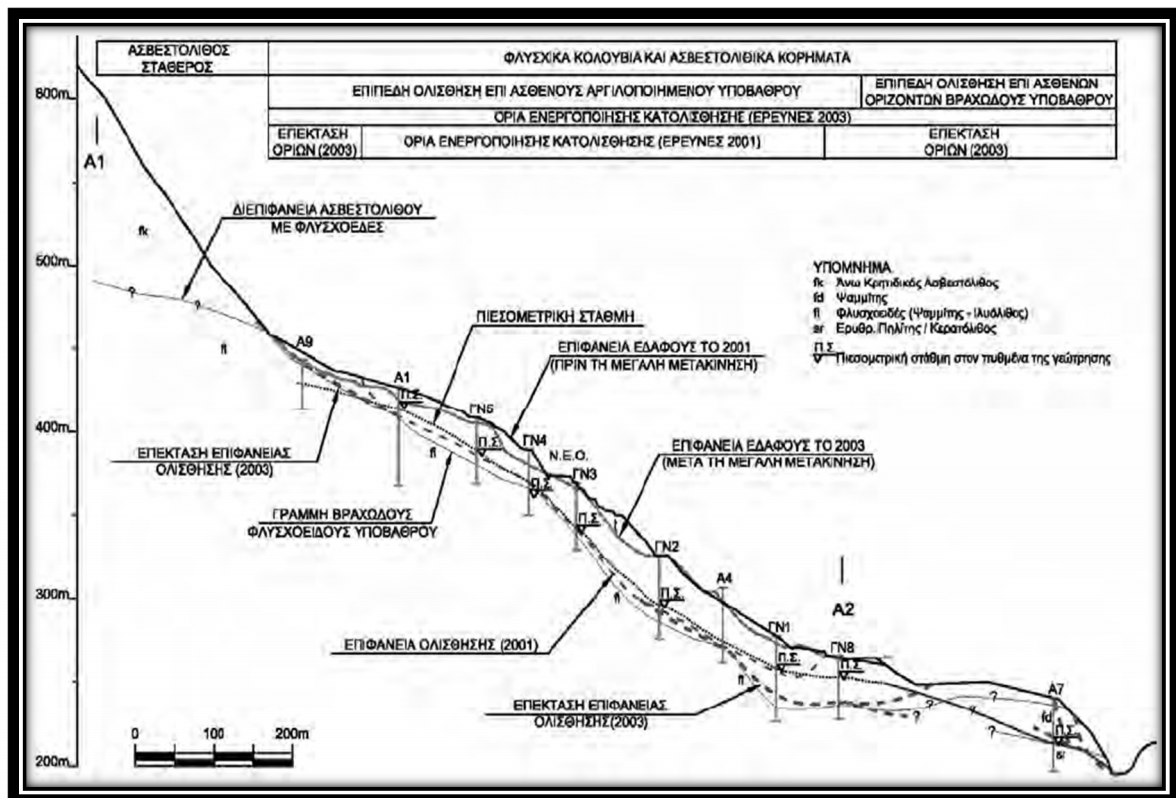
(B) *“The large landslide of Tsakona at the Tripoli – Kalamata National Road”*

***“Η μεγάλη κατολίσθηση της Τσακώνας στην Ε.Ο. Τρίπολης
Καλαμάτας”***

Ντουνιάς, Γ., Μπελόκας, Γ., Μαρίνος Π., Καββαδάς Μ.

Η αστοχία είχε επιμήκη άξονα μήκους 1200 μέτρα με διεύθυνση κάθετη στην διεύθυνση του άξονα της Εθνικής οδού και πλάτος 300 μέτρα. Ο επιμήκης άξονας της κατολίσθησης έχει διεύθυνση ΔΒΔ - ΑΝΑ. Το ΑΝΑ τμήμα του άξονα της βρίσκεται 265 μέτρα ανάντη της Νέας Εθνικής Οδού. Το ΒΔΒ άκρο της οριοθετείται από τον ποταμό Χάραδρο κατά μήκος του οποίου δημιουργήθηκε ανασήκωμα της αναβαθμίδας. Η περιοχή συνίσταται από τον “1^ο φλύσχη” της ζώνης Πίνδου ηλικίας Α.Ιουρασικού - Κ.Κρητιδικού, στα ανώτερα στρώματα από τους ασβεστόλιθους ηλικίας Α.Κρητιδικού

καθώς και μεταλλικά ιζήματα. Με βάση τα χαρακτηριστικά της μορφολογίας της κατολίσθησης χωρίζεται σε δύο τμήματα. Την περιοχή Α στα ανάντη και την Β στα κατόντη αντίστοιχα. Τα αίτια της κατολίσθησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται οι γεωτεκτονικές και υδρογεωλογικές συνθήκες που υφίστανται στην περιοχή και οι οποίες ενεργοποίησαν την κατολίσθηση στην περιοχή της οποίας έχουν ξανασυμβεί στο παρελθόν κατολισθήσεις. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι ανθρώπινες παρεμβάσεις που δημιουργήσαν συνθήκες αστάθειας καθώς και ακραίες κλιματολογικές συνθήκες όπως συνεχής και παρατεταμένη βροχόπτωση.



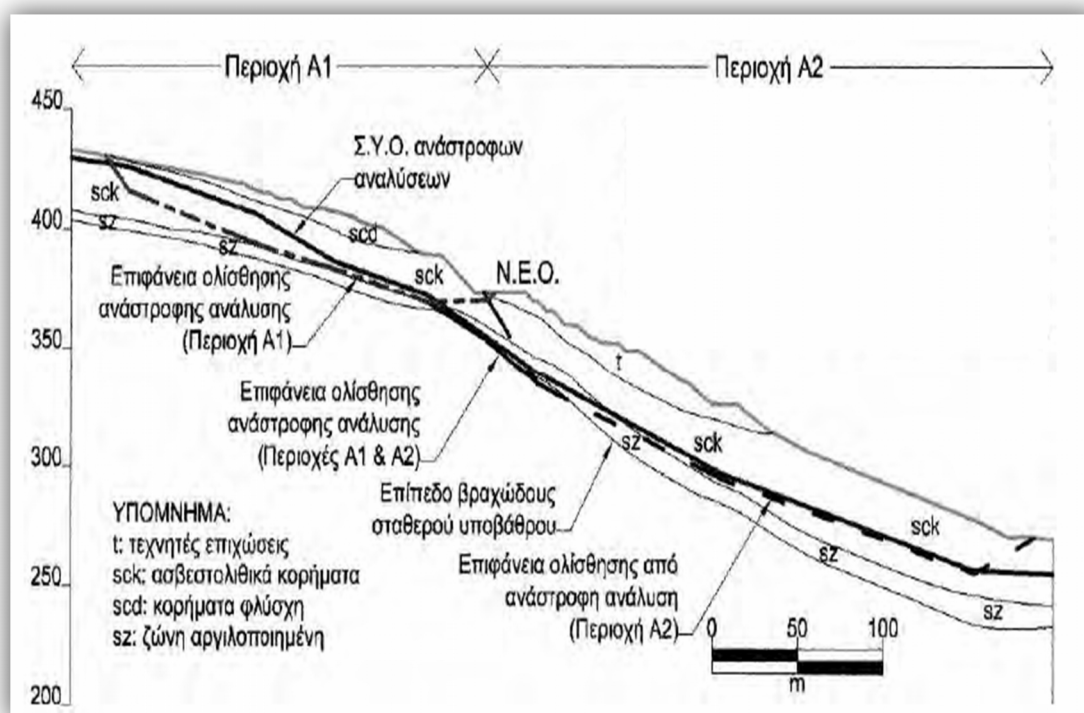
Σχήμα 4.33 : Γεωλογικός χάρτης φλυσικών κολούβιων και ασβεστολιθικών κορημάτων, Ντουινιάς Γ, Μπελόκας Γ., Μαρίνος Π., Καββαδάς Μ., 2006

Ο φλύσχος αποτελείται από ψαμμίτες και ιλυόλιθους, ενίοτε με κερατολιθικές ενστρώσεις. Τα μεταλλικά ιζήματα αποτελούνται από κολλούβια, κορήματα και μανδύες αποσάθρωσης. Η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται στην επαφή των χαλαρών υλικών με το βραχώδες υπόβαθρο. Στην περιοχή Α₁ το τμήμα πάνω από την Ε.Ο. η μέση κλίση της επιφάνειας του εδάφους ήταν γύρω στις 12 ° και του βραχώδους υποβάθρου γύρω στις 13,5°. Στο τμήμα Α₂ κάτω από την Ε.Ο. η μέση κλίση της επιφάνειας του εδάφους ήταν περίπου 19,5° και στο βραχώδες υπόβαθρο η κλίση κυμαίνεται περίπου από 11° έως 26°. Τα κλισιόμετρα και τα βάθρα επιφανειακών

μετακινήσεων έδειχναν μία συνεχή ενιαία εξέλιξη που υποδήλωνε ότι η κατολίσθηση βρισκόταν σε ερπυσμό. Η πιεζομετρική στάθμη από τις μετρήσεις στα πιεζόμετρα βρέθηκε σε βάθος κοντά στην επιφάνεια ολίσθησης εκτός από την περιοχή Α₁ πάνω από την εθνική οδό.

Μετά την μεγάλη ενεργοποίηση υπήρξε ηρεμία χωρίς μετρήσιμες μετακινήσεις στην περιοχή. Ερπυσμός της κατολίσθησης παρατηρήθηκε ξανά μετά το 2008 τάξης των 3 cm/yr. έως το 2010. Οι μετρήσεις από τα κλισιόμετρα έδειξαν ότι η επιφάνεια ολίσθησης είναι προδιατυμημένη. Η παραμένουσα διατμητική αντοχή αναμένεται να έχει κινητοποιηθεί ($c_r = 0$ kPa, $\phi = \phi_r < \phi_p$).

Επίσης διαπιστώθηκε παρουσία αργιλικών υλικών χαμηλής έως μέσης πλαστικότητας στην επιφάνειας ολίσθησης.



Σχήμα 4.34 : Όρια κατολίσθησης στην περιοχή της Τσακώνας, 2003, Ντουνιάς Γ, Μπελόκας Γ., Μαρίνος Π., Καββαδάς Μ., 2006

Πραγματοποιήθηκαν αναστροφές αναλύσεις κατά μήκος της διατομής του άξονα ολίσθησης (Σχήμα 4.35) έτσι ώστε να προσδιοριστεί η γωνία της ενεργοποιημένης διατμητικής αντοχής ϕ_m πριν την μεγάλη κατολίσθηση. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για διάφορες πιθανές στάθμες του υδροφόρου ορίζοντα. Όπως διαπιστώθηκε οι μεγαλύτερες γωνίες ϕ_m αντιστοιχούσαν στις υψηλότερες πιεζομετρικές στάθμες.

	Πριν την μεγάλη κατολίσθηση			Μετά την μεγάλη κατολίσθηση		
Επιφάνεια ολίσθησης	Διακριτή		Ενιαία	Διακριτή		Ενιαία
Περιοχή	A1	A2	A1 & A2	A1	A2	A1 & A2
ϕ_m (°) γωνία ενεργοποιημένης διατμητικής αντοχής	12,9-8,2	18,0-19,0	16,6-18,3			
ϕ_r (°) γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής				16	18	18
FOS Συντελεστής ασφαλείας				1,160	1,104	1,078

Σχήμα 4.35 : Αποτελέσματα ανάστροφων αναλύσεων πριν την μεγάλη κατολίσθηση και του συντελεστή ασφαλείας μετά την κατολίσθηση, (Ντουνιάς Γ, Μπελόκας Γ., Μαρίνος Π., Καββαδάς Μ., 2006)

Για άργιλο μέσης έως χαμηλής πλαστικότητας και σύμφωνα με εργαστηριακές δοκιμές αναμένεται $\phi_r = 15^\circ - 17^\circ$. Η περιοχή A1 διαπιστώθηκε ότι είναι περισσότερο ευαίσθητη στις μεταβολές τις πιεζομετρικής στάθμης όπου εκτιμάται πως κατά την αστοχία η πιεζομετρική στάθμη βρισκόταν πάνω από 4 m.

Σχηματισμός	Πρότυπο	C (KN/m ²)	ϕ (°)
Κολλούβια κορήματα	MC	15	30
Φλύσχης	MC	150	38
Βαθύτεροι ορίζοντες	MC	200	40

Σχήμα 4.36 : Αποτελέσματα συνοχής και γωνίας εσωτερικής τριβής, (Παπαντωνόπουλος, Κ. Ι., Καπόπουλος, Χ. Α., Ψαρρόπουλος, Α. Τ., 2006)

Προηγούμενες εδαφικές μετακινήσεις επηρέασαν την ευστάθεια του πρανούς και μείωσαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του με κάτω όριο τις τιμές που αντιστοιχούν στην παραμένουσα αντοχή. Με αντίστροφες αναλύσεις προέκυψε ενεργή γωνία τριβής $\varphi = 31^\circ$ για πολύ μικρή τιμή συνοχής $c = 5 \text{ KPa}$.

Από τις μελέτες διαπιστώθηκε πως μετά την μεγάλη κατολίσθηση ο συντελεστής ασφαλείας αυξήθηκε μόνο κατά 10% γεγονός που υποδηλώνει ότι σε ενδεχόμενη άνοδο της πιεζομετρικής στάθμης μπορεί να ξαναενεργοποιηθεί η κατολίσθηση.

31. *“Slope instability mechanisms in dipping interbedded conglomerates and weathered marls - the 1999 Rufi landslide, Switzerland”*

“Μηχανισμοί αστάθειας πρανών σε βυθίσεις κροκαλοπαγών και αποσαθρωμένων μαργών - κατολίσθηση στο Rufi, Ελβετία 1999”

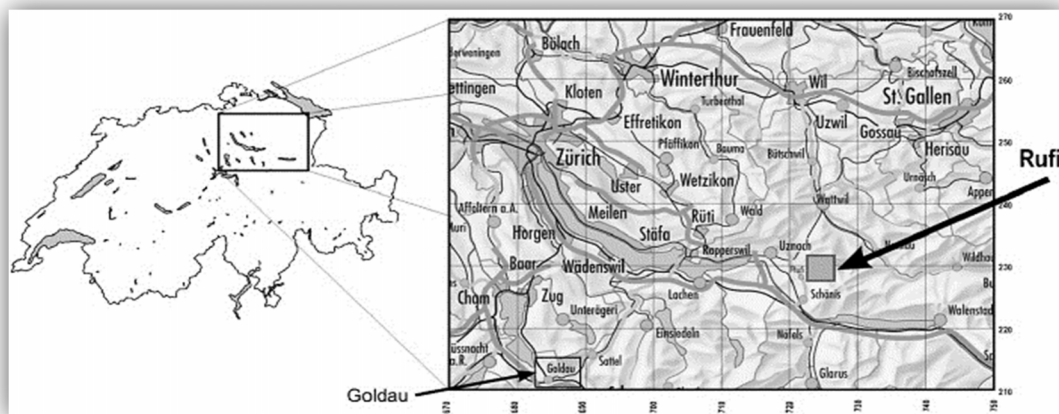
Eberhardt, E., Thurot, K., Luginbuehl, M., 2005

Τον Μάιο του 1999, το λιώσιμο του χιονιού σε συνδυασμό με τις έντονες βροχοπτώσεις στο βορειοανατολικό τμήμα της Ελβετίας είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πολλών κατολισθήσεων. Πολλές από αυτές τις κατολισθήσεις έλαβαν χώρα στην μολάσσα που βρίσκεται στους πρόποδες των Άλπεων, μία σειρά από εναλλαγές μαργών, ψαμμιτών και κροκαλοπαγών. Η υποαλπική αυτή μολάσσα είναι ιδιαίτερα ασταθής σε τέτοιου είδους φαινόμενα και η οποία βυθίστηκε με ολισθήσεις. Έτσι διαμορφώθηκε η μορφολογία της περιοχής και προέκυψαν οι ασθενείς μάργες των οποίων η ποιότητα υποβαθμίζεται ταχύτατα όταν εκτίθενται σε τέτοιου είδους καιρικές συνθήκες.

Ιστορικά, υπήρξε η αιτία πολλών και ποικίλου μεγέθους ολισθήσεων και η μορφολογία διαμορφώθηκε κυρίως από τις προηγούμενες κατολισθήσεις, οι οποίες επανενεργοποιήθηκαν κατά περιόδους ως δευτερεύουσες ολισθήσεις εδάφους. Έτσι λαμβάνοντας υπόψιν αυτές τις συνθήκες που ευνόησαν τις αστοχίες των πρανών καθώς και τις προηγούμενες ολισθήσεις, είναι πολύ πιθανό να εμφανιστούν μελλοντικά στην περιοχή παρόμοιες ολισθήσεις. Αυτό δείχνουν και τα στοιχεία από μια έρευνα μιας τέτοιας ολίσθησης στο Rufi το 1999. Τα αποτελέσματα μιας λεπτομερούς τεχνικογεωλογικής έρευνας δείχνουν ότι το αρχικό επίπεδο ολίσθησης, κατά κύριο λόγο αναπτύχθηκε και πέρασε μέσα από τα στρώματα των μαργών, όπως φαίνεται από την διείδυση της αποσάθρωσης στο μέτωπο των μαργών, και όχι κατά μήκος των

επανενεργοποιημένων διατμητικών επιφανειών ή των επαφών μεταξύ των μαργών και των υπερκείμενων κροκαλοπαγών.

Ειδικότερα η γρήγορη τήξης του χιονιού σε συνδυασμό με τις έντονες βροχοπτώσεις κατά το έτος 1999 είχε ως αποτέλεσμα να συμβούν πάνω από 350 καταγεγραμμένες κατολισθήσεις και ροές στην Ελβετία (Lateltin et al., 2001). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα 2 νεκρούς και άμεσες απώλειες πάνω από 100 εκατ. ελβετικά φράγκα. Σε περίπτωση που προκύψουν συνθήκες κορεσμού των υπόγειων υδάτων και οι κλίσεις των πρανών είναι αρκετά απότομες, αυτά τα ρεύματα θραυσμάτων Q, όπως είχαν ονομαστεί από τον Heim (1932), θα επανενεργοποιήσουν παλαιότερες κατολισθήσεις και ροές. Η πιο γνωστή αστοχία στην υποαλπική μολάσσα ήταν η κατολίσθηση Goldau (που αναφέρεται επίσης ως Rossberg ή Goldauer Bergsturz). Το 1806 εκεί χάθηκαν 457 ζωές, όταν σε μια επιφάνεια ολίσθησης εκτοξεύθηκαν 20 εκατομμύρια m³ βραχώμαζας εξαιτίας γρήγορης τήξης του χιονιού σε συνδυασμό με έντονες βροχοπτώσεις.

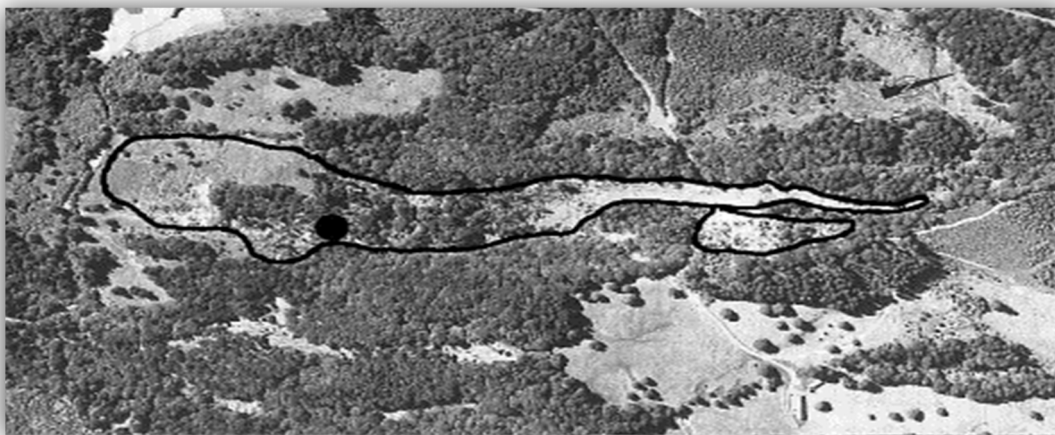


Σχήμα 4.37 : Περιοχή της κατολίσθησης του Rufi το 1999, Ελβετία, Eberhardt, E., Thuro1, K., Luginbuehl, M., 2005

Παρόμοια προβλήματα κατολισθήσεων που αφορούν ασθενείς πηλίτες, σχιστόλιθους ή μάργες παρουσιάστηκαν σε πολλές άλλες περιοχές. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αδύναμη φύση αυτών των πετρωμάτων μπορεί να είναι τέτοια ώστε με σφοδρές βροχοπτώσεις, ένα ποσοστό αυτών να υγροποιείται πάνω από τους υποκείμενους ψαμμίτες και ασβεστόλιθους και να καθίστανται υπεύθυνα για την εκδήλωση κατολισθήσεων και λασποροών (π.χ. κατολισθήσεις σε σχιστόλιθους του Ιονίου φλύσχη στη βορειοδυτική Ελλάδα - Χρηστάρας, 1997). Ωστόσο, αυτοί οι κίνδυνοι δεν συνεπάγονται πάντοτε αστοχίες όπου τα ασθενέστερα υλικά να υπέρκεινται των περισσότερο υγιών. Σύμφωνα με κάποιες εμπειρίες από τα μεγάλα βουνά Horn (Wyoming, USA), Deere και Patton (1971) παρατηρήθηκαν αστοχίες παρόμοιες με αυτές στην υποαλπική μολάσσα που προκύπτουν από μεγάλες

διακυμάνσεις των τιμών αντοχής, με το μέγιστο να παρατηρείται στους ασθενέστερους υποκείμενους σχιστόλιθους οι οποίοι οδήγησαν σε ολίσθηση των υπερκείμενων πετρωμάτων, μεγάλων τεμαχών και υψηλότερης αντοχής βραχώμαζας (π.χ. δολομίτη, ψαμμίτη κτλ).

Η εν λόγω κατολίσθηση βρίσκεται κοντά στην πόλη Ruffi στο Σεν Γκάλεν στη βορειοανατολική Ελβετία. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το έτος 1999 η Ελβετία σηματοδεύτηκε από σφοδρές βροχοπτώσεις. Αξιοσημείωτες ήταν και οι σφοδρές χιονοπτώσεις στις Άλπεις για μια περίοδο 4 εβδομάδων προς το τέλος του Ιανουαρίου έως τα μέσα Φεβρουαρίου και οι ισχυρές βροχοπτώσεις που συνέβησαν τον Μάιο, οι οποίες παρήγαγαν σημαντικές πλημμύρες και κατολισθήσεις. Η κυριότερη κατολίσθηση έγινε το βράδυ της 13^{ης} του Μάη. Σύμφωνα με τοπικά δημοσιεύματα, η κατολίσθηση σημειώθηκε ξαφνικά από τη μια μέρα στην άλλη μεταφέροντας ένα τμήμα του δρόμου έκτασης 30m. Ασφαλτος βρέθηκε 150 m χαμηλότερα στο κατερχόμενο τμήμα. Αρκετές ημέρες μετά από αυτό το κύριο γεγονός, και κατά τη διάρκεια αρκετών εβδομάδων συνέβησαν μια σειρά μικρότερων δευτερευόντων κατολισθήσεων με κορεσμένα λεπτόκοκκα υλικά που βρίσκονταν στο πόδι της κύριας κατολίσθησης. Η μολασσική λεκάνη της βορειοανατολικής Ελβετίας αποτελείται από παχιά στρώματα κλαστικών ιζημάτων, τα οποία αναδύθηκαν κατά την αλπική ορογένεση και βρίσκονται στο χαμηλότερο σημείο του αλπικού υπόβαθρου. Το μέγιστο πάχος τους φτάνει τα 5000 - 6000 m κατά μήκος του νότιου περιθωρίου κάτω από το μπροστινό μέρος των Αλπικών καλυμμάτων. Τα κροκαλοπαγή αποτελούν περίπου το 50% του πάχους της αλληλουχίας και είναι οι πιο ανθεκτικοί σχηματισμοί στην αποσάθρωση. Τα περισσότερα από τα κλαστικά ιζήματα προέρχονται από δολομίτες και ασβεστόλιθους και από τα επάλληλα τεκτονικά καλύμματα και αναδεικνύονται προς τα πάνω. Οι μάργες έχουν γκρι, μπλε - γκρι χρώμα και είναι ιδιαίτερα ευπαθείς στις καιρικές συνθήκες. Εργαστηριακές δοκιμές έδειξαν ότι η περιεκτικότητα σε ανθρακικό άλας κυμαίνεται από 40 έως 50% (Luginbuehl, 2001).



Εικόνα 4.9 : Αεροφωτογραφία της κατολίσθησης του Ruffi το 1999 (από Bollinger et al., 2000)

Οι διαφορετικές τεκτονικές μονάδες εύκολα μπορούν να διακριθούν. Στην περιοχή της ολίσθησης τα στρώματα βυθίζονται προς τα νοτιοδυτικά και τέμνονται εγκάρσια από σχεδόν ορθογώνιες ομάδες ασυνεχειών. Αυτές οι διακλάσεις, που βρίσκονται κυρίως στα κροκαλοπαγή και στους ψαμμιτικούς σχηματισμούς, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην αστάθεια της βραχώμαζας.

Η μορφολογία της επιφάνειας διαμορφώθηκε από τους παγετώνες που παίρνουν τη μορφή μιας σειράς ομαλών πρανών μετά την βύθιση των κροκαλοπαγών, ενώ με την τήξη του πάγου έχουμε πτώσεις υπολειμμάτων του ήδη διαβρωμένου υλικού και μικρότερων μπλοκς.

Σύμφωνα με εξέταση των συνθηκών του πρανούς πριν την αστοχία, φαίνεται ότι στην περιοχή Ruffi η επιφάνεια ολίσθησης διέρχεται κυρίως μέσω των μαργών (Luginbuehl, 2001) και κατά μήκος μιας αποσαθρωμένης ζώνης εντός των μαργών, που χωρίζει τα άνω πολύ έντονα αποσαθρωμένα από τα υποκείμενα μετρίως αποσαθρωμένα πετρώματα.

Με εξέταση της κατωφέρειας και των πλευρικών ορίων το πάχος των κροκαλοπαγών είναι περίπου 2 m στο φρύδι της κατολίσθησης, ενώ η στρωματογραφία διατηρείται αδιατάρακτη και η επιφάνεια ολίσθησης σε αυτό το πάνω τμήμα είναι επίπεδη με γωνία βύθισης περίπου 22° . Προχωρώντας η κλίση σταδιακά μειώνεται στις μάργες σε ένα πρανές μήκους περίπου 100 - 200 m.

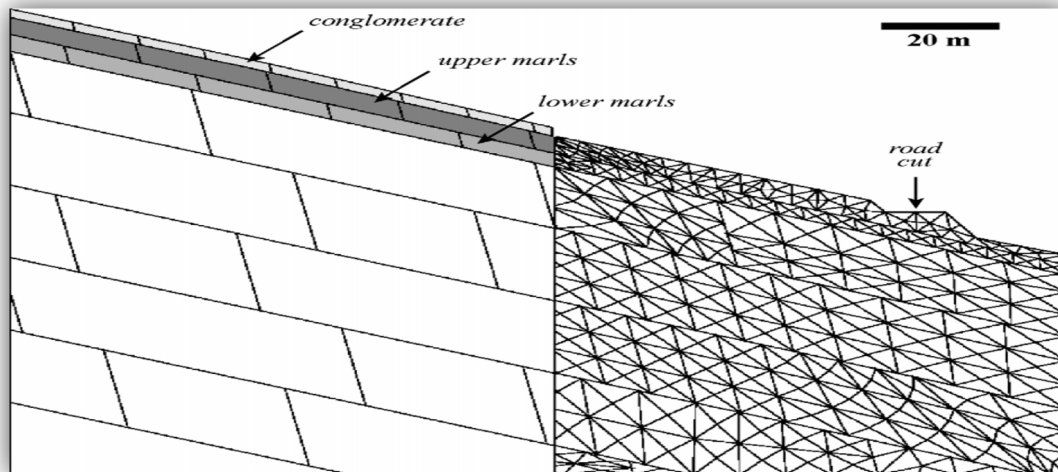
Το έναυσμα της καταστροφής δόθηκε από μία έντονη βροχόπτωση, από τις πολλές εκείνης της άνοιξης σε ολόκληρη την Ελβετία. Σύμφωνα με καταγραφές για την περιοχή στο Ruffi, δύο πολύ μεγάλης έντασης βροχοπτώσεις σημειώθηκαν στις 12^η και 21^η Μαΐου, με σχεδόν 100 χιλιοστά νερού εντός ενός 24ώρου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το σύνολο της βροχόπτωσης για τους μήνες Φεβρουάριο και Μάιο του 1999, υπερβαίνει τους ετήσιους μέσους όρους. Κατά την πρώτη εβδομάδα πριν την αστοχία μετρήθηκαν περίπου 200 χιλιοστά νερού. Αυτές οι έντονες βροχοπτώσεις πιθανότατα οδήγησαν στην απελευθέρωση και κυκλοφορία μεγάλων ποσοτήτων νερού που αποθηκεύτηκαν μέσω της γρήγορης τήξης του χιονιού, με αποτέλεσμα τον κορεσμό των μαργών και την αύξηση των υπόγειων πιέσεων κατά μήκος των ανοιχτών διακλάσεων.

Μια πρώτη προσπάθεια μοντελοποίησης έγινε με στόχο να υπολογιστεί μια σειρά από ισχυρά συνδεδεμένα στρώματα. Δεδομένης της αβεβαιότητας των συνθηκών των υπόγειων υδάτων πριν την αστοχία, αρκετά διαφορετικά σενάρια εξετάστηκαν, όπως :

- σε ξηρές συνθήκες
- με ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα που βρίσκεται 1,25 m κάτω από την επιφάνεια
- με επιφανειακή απορροή και
- σε αρτεσιανές συνθήκες

και υπολογίσθηκαν διάφορες τιμές της γωνίας τριβής συνυπολογίζοντας βέβαια και το βαθμό αποσάθρωσης.

Παρακάτω φαίνεται η γεωμετρία όπου ένα στρώμα κροκαλοπαγών βρίσκεται πάνω από δύο στρώματα μάργας, που κάθονται σε μια βάση κροκαλοπαγών και ψαμμίτη, με τις επαφές τους να θεωρούνται μη συνεκτικές.



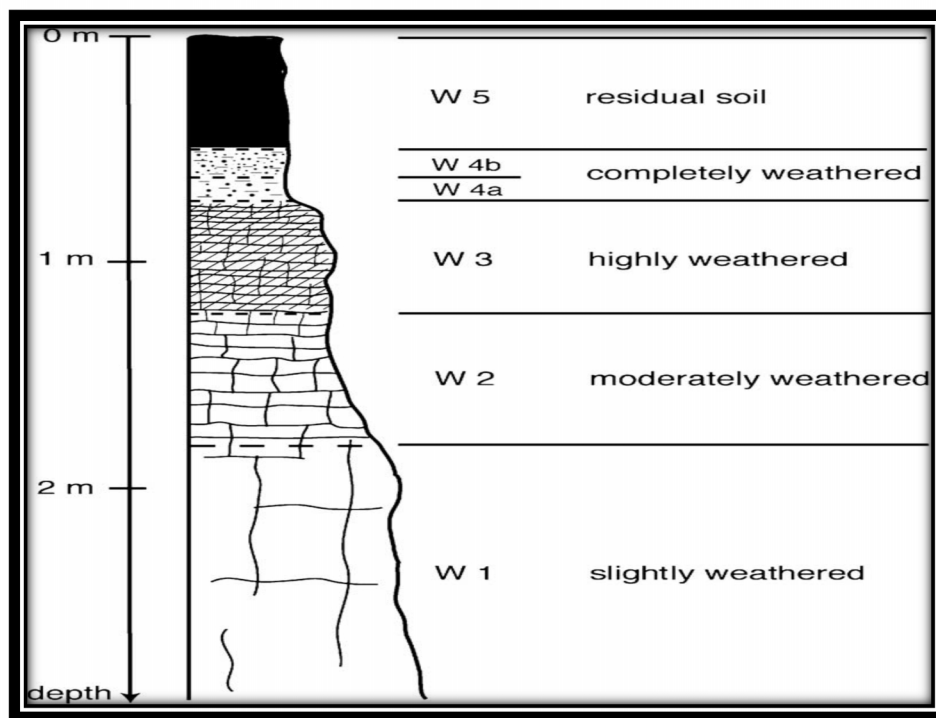
Σχήμα 4.38 : Γεωμετρικό μοντέλο και μοντελοποιημένες ζώνες γεωυλικών της κατολίσθησης του Rufi, Eberhardt, E., Thuro1, K., Luginbuehl, M., 2005



Εικόνα 4.10 : Συχνότητα διαστρωμάτωσης των κροκαλοπαγών και των μαργών κατά μήκος των ορίων της κατολίσθησης του Rufi, Eberhardt, E., Thuro1, K., Luginbuehl, M., 2005

Η αποσάθρωση που συντελέστηκε είναι είτε φυσική είτε χημική. Το βάθος διείσδυσης του παγετού μπορεί επίσης να είναι περιορισμένο, αλλά στις προαλπικές ζώνες μπορεί να φθάσει σε βάθη των 120 cm (Prinz, 1997). Η φυσική αποσάθρωση συντελείται μέσω διόγκωσης και πιέσεων που δημιουργούνται από αργιλικά ορυκτά και συγκεκριμένα από μοντοριλλονίτη ο οποίος βρέθηκε στις μάργες. Η χημική αποσάθρωση πιστεύεται ότι ήταν επίσης σημαντική στην περίπτωση του Ruffi λόγω αντιδράσεων των μαργών με ελαφρώς όξινο νερό της βροχής. Τέτοιες αντιδράσεις στις οποίες ο ασβεστίτης σταδιακά διαλύεται θα οδηγούσαν σε αύξηση των πόρων και των πιέσεων, επιτρέποντας έτσι περισσότερο νερό να διαρρεύσει μέσα στις μάργες υποβαθμίζοντας την αντοχή και γενικότερα την ποιότητά τους.

Λεπτομερής χαρτογράφηση και κάποια εργαστηριακή ανάλυση εκτελέστηκαν επί των χαρακτηριστικών της αποσάθρωσης στις μάργες όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.39 : Σχηματική απεικόνιση αποσαθρωμένων μαργών στην κατολίσθηση στο Ruffi, Ελβετία, 1999, Eberhardt, E., Thuro1, K., Luginbuehl, M., 2005

Ο βαθμός των σχηματισμών κάτω από την επιφάνεια ολίσθησης χαρακτηρίζεται ως W₁ (ελαφρώς αποσαθρωμένα), ενώ τα ανώτερα στρώματα μάργας που αποτελούν και το “σώμα” της ολίσθησης έχουν ένα εύρος από W₂ σε W₅ (μετρίως αποσαθρωμένα έως υπολειμματικό έδαφος).

Οι βαθμοί της αποσάθρωσης περιγράφονται αναλυτικότερα
στον πίνακα που ακολουθεί :

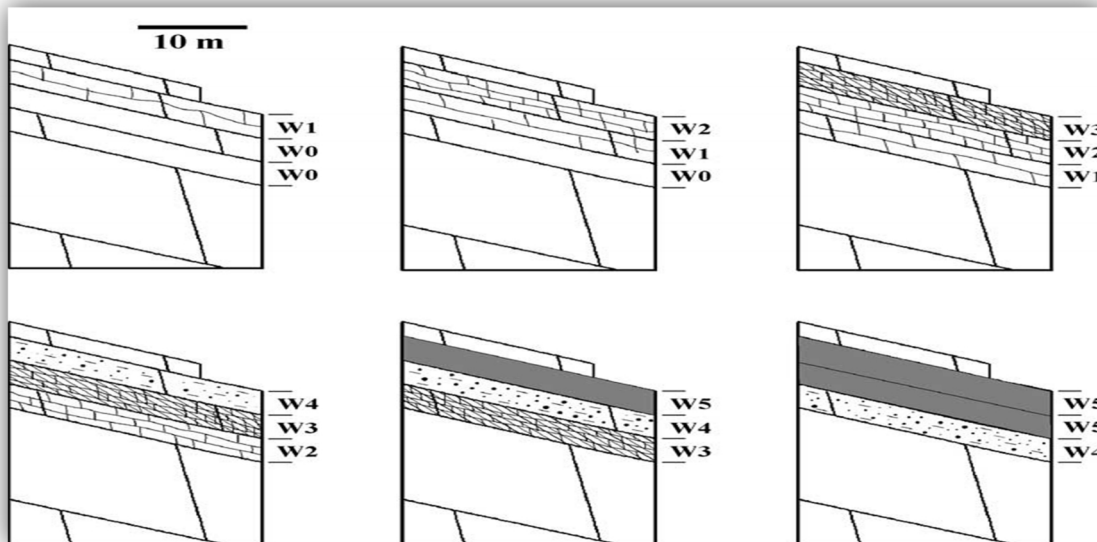
Βαθμός	Χαρακτηρισμός	Περιγραφή
W_0	Fresh - Υγιές	Άρρηκτος βράχος χωρίς ίχνος αποσάθρωσης
W_1	Slightly Weathered - Ελαφρά Αποσαθρωμένο	Μάργες φωτεινού γκρι χρώματος με ελαφρώς αποσαθρωμένες επιφάνειες ασυνεχειών, καλά σχηματισμένα μπλοκς έως και 20 cm και καλή περατότητα
W_2	Moderately Weathered - Μέτρια Αποσαθρωμένο	Μάργες φωτεινού γκρι χρώματος με Υψηλότερη περατότητα νερού, η βραχώμαζα μπορεί να σπάσει σε μεγάλα μπλοκς 3 έως 8 cm με γεωλογικό σφυρί, το μέγεθος των οποίων αυξάνει με το βάθος, κοκκίνο - καφέ επιφάνειες ασυνεχειών ελαφρώς πλαστικοποιημένες
W_3	Highly Weathered - Ισχυρά Αποσαθρωμένο	Σκούρες γκρι έως μαύρες μάργες με συχνές μικρορωγμές, κοκκίνο - καφέ επιφάνειες, ελαφρώς πλαστικοποιημένες, μπορεί εύκολα με τα χέρια να σπάσει σε μικρά κομμάτια
W_{4a}	Completely Weathered - Έντονα Αποσαθρωμένο	Σκούρες γκρι έως μαύρες μάργες αναμιγνύονται με πλήρως αποδιοργανωμένο ανοιχτό καφέ λασπώδες - αργιλώδες έδαφος, μεγάλη ανομοιογένεια
W_{4b}	Completely Weathered - Έντονα Αποσαθρωμένο	Λασπώδες - αργιλώδες ανοιχτού καφέ χρώματος έδαφος αναμιγνύεται με υπολείμματα μαργών σε μεγέθη από 1 έως 5 cm, τα κόκκινο - καφέ χρώματα κυριαρχούν
W_5	Residual Soil - Υπολειμματικό Έδαφος	Καφέ θραύσματα με χονδρόκοκκο υλικό αναμιγνύεται με αργιλώδη, αμμώδη ιλύ

Σχήμα 4.40 : βάσει ονομασιών από Einsele et al., 1985

Αριθμητικές αναλύσεις της μείωσης της αντοχής των μαργών έδειξαν ότι στις αστοχίες σε ασθενείς βραχώμαζες, η συμπεριφορά του άρρηκτου βράχου είναι εξίσου σημαντικής σημασίας με αυτήν της κατάστασης των ασυνεχειών. Με άλλα λόγια, η συμπεριφορά του άρρηκτου βράχου εφόσον συμβάλει στην ευστάθεια του πρανούς,

πρέπει να ενσωματώνεται στις εκάστοτε αναλύσεις για την ορθή μοντελοποίηση και εξαγωγή αποτελεσμάτων καθώς και την χρησιμοποίηση του σωστού μηχανισμού αστοχίας.

Όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα για παράδειγμα, μία πρώτη προσπάθεια μοντελοποίησης περιελάμβανε την προσομοίωση της προοδευτικής αποσάθρωσης των σχηματισμών και την διεύθυνσή της στα κάτω, μεσαία και άνω στρώματα των μαργών σύμφωνα με τους βαθμούς αποσάθρωσης που περιγράφηκαν προηγουμένως. Το ερώτημα που προέκυψε ήταν κατά πόσον η αποσάθρωση αυτού του μετώπου θα μπορούσε να διεξάγει αρκετά μέτρα μέσα στα υπερκείμενα κροκαλοπαγή και σε άνω ή και κατώτερα ακόμη στρώματα μαργών, το οποίο βέβαια απαντήθηκε από παρατηρήσεις πεδίου που έγιναν.



Σχήμα 4.41: Προσομοίωση της προοδευτικής αποσάθρωσης,
Eberhardt, E., Thuro1, K., Luginbuehl, M., 2005

Η προοδευτική υποβάθμιση της αντοχής λόγω της αποσάθρωσης στις μάργες διαμορφώθηκε μέσα από τη σταδιακή μείωση της συνοχής και της τριβής κατά τμήματα, ως συνάρτηση του βάθους, τόσο για τον άρρηκτο βράχο όσο και για τα ενδιάμεσα στρώματα.

Η διαδικασία που εφαρμόστηκε ήταν :

- (i) Υποστήριξη ενός μοντέλου σε μια αρχική κατάσταση ισορροπίας
- (ii) Μείωση της συνοχής και της γωνίας τριβής σύμφωνα και με την επιπρόσθετη αποσάθρωση και προσέγγιση σε κατάσταση ισορροπίας
- (iii) Επανάληψη έως ότου αστοχήσει

Ένα τέτοιο μοντέλο όμως μπορεί να είναι αντικειμενικό; Στην περίπτωση λάθους, οι κίνδυνοι θα ήταν καταστροφικοί, με μεγάλες μετατοπίσεις (>2μ.) και με συνεχή επιτάχυνση των κινήσεων των μπλοκς μεταξύ τους. Σημαντικό λοιπόν, όσον αφορά την καλύτερη κατανόηση του κύριου μηχανισμού αστοχίας στο Ruffi, είναι ότι τα συγκεκριμένα μοντέλα προσομοίωσης δεν μπορούν να προβλέψουν μία επιφάνεια ολίσθησης μεταξύ κροκαλοπαγών και μαργών, αλλά μια επιφάνεια ολίσθησης που περνά μέσα από την αποσαθρωμένη μάργα.

Όπως φαίνεται από αυτά τα μοντέλα που εφαρμόστηκαν, ένας στόχος είναι αποδώσουν όσο γίνεται καλύτερα την κίνηση των μαργών στην περιοχή όπου σχηματίστηκε το πόδι της κατολίσθησης. Στο άνω τμήμα του πρανούς, όπου οι κινητήριες δυνάμεις είναι μικρότερες, ο εκτιμώμενος βαθμός αποσάθρωσης της επιφάνειας ολίσθησης είναι W_5 , ενώ στην βάση του πρανούς, όπου είναι μεγαλύτερες, αντιστοιχεί σε W_4 . Τα μοντέλα γενικότερα δείχνουν ότι η αστοχία ξεκινά μέσα από τις μάργες μετά από υποχωρήσεις του άρρηκτου βράχου στη βάση του πρανούς, επιτρέποντας έτσι την απελευθέρωση κινηματικών δυνάμεων.

Αυτές οι κατολίσθησεις που συνέβησαν ενδέχεται να οδηγήσουν σε άλλες μεγαλύτερες, πιο καταστροφικές, με φόρτιση ασταθών, κορεσμένων κολλουβιακών αποθέσεων, οι οποίες καλύπτουν τα χαμηλότερα τμήματα του πρανούς. Η κατανόηση λοιπόν αυτών των διεργασιών αποσάθρωσης και η χρονική και χωρική τους εξέλιξη είναι απαραίτητη για την εκτίμηση ενδεχόμενων αστοχιών σε γειτονικά πρανή από το εν λόγω πρανές, και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα από τις αναλύσεις που έγιναν και για άλλα προβληματικά πρανή όπου μπορεί να συναντήσουμε στρώματα κροκαλοπαγών επάνω σε στρώματα μάργας.

32. *“Geologic processes affecting the stability of rock slopes along massachusetts highways”*

“Γεωλογικές διεργασίες που επηρεάζουν τη σταθερότητα των πρανών σε αυτοκινητόδρομους της Μασαχουσέτης”

Farquhar, O.C., 1980

Το παρόν άρθρο αφορά ένα πρόγραμμα περιγραφής και ανάλυσης των γεωυλικών κατά μήκος αυτοκινητόδρομων της Μασαχουσέτης. Η αντοχή αυτών των υλικών και κάθε αστοχία εξαρτώνται από τη σύνθεση και τη δομή τους, καθώς και από τις υδρολογικές συνθήκες και την κλίση των κλιτύων. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει λεπτομέρειες των γεωλογικών διεργασιών που επηρεάζουν τη σταθερότητα ορισμένων φυσικών πρανών εκτός από τις επιλεγμένες ανασκαφές.

Αν και η Μασαχουσέτη είναι μία συγκριτικά μικρή πολιτεία των ΗΠΑ, υπάρχει μεγάλη ποικιλία τόσο της γεωμορφολογίας όσο και των πετρωμάτων σε σχέση με πολλές άλλες μεγαλύτερες περιοχές. Το συγκεκριμένο άρθρο περιγράφει τα χαρακτηριστικά ενός σχεδίου για την εξέταση των προβλημάτων που δημιουργούνται στους αυτοκινητοδρόμους σε όλη την πολιτεία λόγω ολισθήσεων πρανών και κατακερματισμού των οδοστρωμάτων που αποτελούνται από άρρηκτο βράχο ή αποσαθρωμένη βραχόμαζα.

Ο πιο πρόσφατος χάρτης των σχηματισμών του υποβάθρου εκδόθηκε το 1916, οι οποίοι αποτελούνται γενικά από πετρώματα (γρανίτης, γνεύσιος, μάρμαρο κτλ). Αφού εντοπιστούν τα τμήματα των αυτοκινητοδρόμων που αντιμετωπίζουν προβλήματα ευστάθειας των πρανών, αναλύονται οι διαδικασίες που εμπλέκονται στην αστάθεια αυτή. Ο κύριος στόχος είναι η χαρτογράφηση και καταγραφή των γεωλογικών πληροφοριών.

Γενικά συλλέχθηκαν και παρουσιάστηκαν κάποια ημι-ποσοτικά στοιχεία για τις κλίσεις και τα γεωυλικά τα οποία μας παρέχουν μία ολοκληρωμένη περιγραφή των σχηματισμών της Πενσυλβάνιας. Μία άλλη περίπτωση εκτός από την παρούσα πρόταση ανάλυσης, ήταν κατά τη διάρκεια ενός συμποσίου που πραγματοποιήθηκε στην Πράγα το 1977 υπό την αιγίδα της Διεθνούς Ενώσεως των Γεωτεχνικών Μηχανικών, όπου συζητήθηκε η αστάθεια των φυσικών πρανών.

Εκτός από την σύσταση και την υφή, ολισθήσεις μπορούν να προκαλέσουν και οι τάσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των ρωγμών, ανατροπές εξαιτίας του πάγου, η σεισμική επίδραση η οποία δημιουργεί μονομπλόκ και βραχοσφήνες, η φύλλωση, τα ρήγματα και γενικά οι ασυνέχειες κ.ά. Ένας βασικός παράγοντας είναι ότι οι πιθανές περιπτώσεις ολίσθησης ποικίλουν και η παραμόρφωση σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να καταγραφεί άμεσα μετά από κάποια ανασκαφή, κυρίως λόγω του ευρέου φάσματος των τύπων των πετρωμάτων αλλά και των κλίσεων. Μπορούν να δημιουργηθούν περιστροφικές ολισθήσεις, επίπεδες, καταρροές και καταπτώσεις βράχων, η ταχύτητα των οποίων οφείλεται κυρίως στην συνοχή και το μέγεθός τους.

Εκτός από άμεση παρατήρηση και χαρτογράφηση, χρησιμοποιείται και η βοήθεια της τηλεπισκόπησης όπως π.χ. δορυφορικής κλίμακας τοπογραφικά χαρακτηριστικά του γήινου ανάγλυφου είναι χρήσιμα ως γενικές ενδείξεις. Τέλος μία ακόμη δυσκολία των απότομων πρανών είναι η επικινδυνότητα και η αδυναμία παρατήρησης των κορυφών οι οποίες από άποψης σταθερότητας πολλές φορές είναι σημαντικότερες από τις βάσεις των πρανών.



Σχήμα 4.42 : Κινητή πλατφόρμα που παρέχει πρόσβαση στα ανώτερα τμήματα του πρανούς,
Farquhar, O.C., 1980

33. Discussion of “A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment” by Liu and Chen, *Engineering Geology*, 89 : 129 - 143 (2007)

Συζήτηση για "Μια νέα προσέγγιση για ταξινόμηση βραχομάζας σε πρανή σχετικά με την αξιολόγηση της σταθερότητας" από τους Liu και Chen, τεχνική γεωλογία 89 : 129 - 143 (2007)

Ya-Ching Liu, Chao-Shi Chen, 2007

Ως μέρος ενός σχεδίου κατασκευής ενός αυτοκινητοδρόμου, η σταθερότητα των πρανών, έχει διερευνηθεί σε διάφορα στάδια της με ποικίλες λεπτομέρειες. Η έρευνα υποστηρίζεται από τεχνικές τηλεπισκόπησης, από αεροφωτογραφίες, από αναλύσεις ευπάθειας σε κατολισθήσεις όμως είναι απαραίτητο να μελετηθούν τα πιθανά είδη των αστοχιών που μπορούν να προκύψουν για προβλεπόμενες αστοχίες πάνω σε ασυνέχειες (επίπεδες, σφηνοειδείς, ανατροπές) καθώς και για μη προβλεπόμενες εξαιτίας καιρικών φαινομένων ή ύπαρξης πολλών και μεγάλων διακλάσεων. Στη συνέχεια λόγω της πιθανής αλλαγής της ισορροπίας των τάσεων της βραχομάζας υπολογίζεται η διατμητική της αντοχή (συνοχή c και εσωτερική γωνία τριβής ϕ).



Εικόνα 4.11 : Φωτογραφίες που δείχνουν τις αστοχίες των πρανών στην περιοχή που μελετάται, Ya-Ching Liu, Chao-Shi Chen, 2007

Οι συγγραφείς του συγκεκριμένου άρθρου μελέτησαν 161 περιπτώσεις σε πρανή του νότιου αυτοκινητοδρόμου Cross - Island στην Ταϊβάν. Οι τύποι αστοχίας που βρέθηκαν ήταν κυρίως σφηνοειδείς. Στη συνέχεια η ανάλυση για τα πιθανά είδη αστοχιών έγινε με τη βοήθεια 16 παραμέτρων που έχουν να κάνουν με τη γεωλογία, την γεωμετρία και το περιβάλλον και που σχετίζονται με την ευστάθεια των πρανών. Έπειτα τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται με την πραγματική κατάσταση και οι συγγραφείς δηλώνουν ότι οι πιθανότητες αστοχίας με αυτή τη νέα μέθοδο τους παρέχει μία πιο σαφή κατηγοριοποίηση των πρανών απ’ότι με τα υπάρχοντα συστήματα ταξινόμησης. Ωστόσο, υπάρχουν και αμφισβητήσεις που πρέπει να συζητηθούν όπως το γεγονός ότι η νέα μέθοδος δεν θα έπρεπε να προτείνεται για ένα πρώιμο στάδιο μελέτης λόγω λανθασμένης υπόδειξης λήψης μέτρων αντιστήριξης και γενικά του κόστους, επικινδυνότητας κ.ά. ή ακόμη ότι οι διάφορες μέθοδοι ταξινόμησης μπορούν να συγκριθούν μόνο για το ίδιο στάδιο της μελέτης και όχι μεταξύ ανόμοιων πραγμάτων.

34. *“Practical reliability analysis of slope stability by advanced Monte Carlo simulations in a spreadsheet”*

“Πρακτική ανάλυση αξιοπιστίας της ευστάθειας πρανών από προηγμένες προσομοιώσεις Monte Carlo σε φύλλα εργασίας”

Yu Wang, Zijun Cao, Siu-Kui Au, 2011

Η παρούσα εργασία αναπτύσσει μία προσομοίωση Monte Carlo (MCS) ανάλυσης αξιοπιστίας για προβλήματα ευστάθειας πρανών και χρησιμοποιεί μία προηγμένη μέθοδο MCS η οποία καλείται “υποσύνολο προσομοίωσης” για την βελτίωση της αποδοτικότητας και την επίλυση των MCS σε σχετικά μικρά επίπεδα πιθανότητας. Η ανάλυση της αξιοπιστίας είναι λειτουργικά αποσυνδεδεμένη από την ντετερμινιστική ανάλυση ευστάθειας πρανών και εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας ένα ευρέως διαθέσιμο λογισμικό υπολογιστικών φύλλων, το Microsoft Excel. Η ανάλυση της αξιοπιστίας πακέτων φύλλων επικυρώνεται μέσω της σύγκρισης με άλλες μεθόδους ανάλυσης αξιοπιστίας και εμπορικού λογισμικού. Το πακέτο των φύλλων excel χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να διερευνήσει την επίδραση της μεταβλητότητας των ιδιοτήτων του εδάφους και την κρίσιμη επιφάνειας ολίσθησης.

Έχει βρεθεί ότι όταν αγνοείται η χωρική μεταβλητότητα του εδάφους από την υπόθεση μίας τέλει συσχέτισης η διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας υπερεκτιμάται και το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε εκτίμηση είτε πάνω είτε κάτω από την εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας $P_f = P(FS < 1)$. Όταν η χωρική μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του εδάφους λαμβάνεται υπόψη η κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης ποικίλλει χωρικά και πρέπει να υπολογίζεται κανονικά αλλιώς η πιθανότητα αστοχίας μπορεί να υποεκτιμηθεί σημαντικά.

35. *“Geotechnical classification and characterisation of materials for stability analyses of large volcanic slopes”*

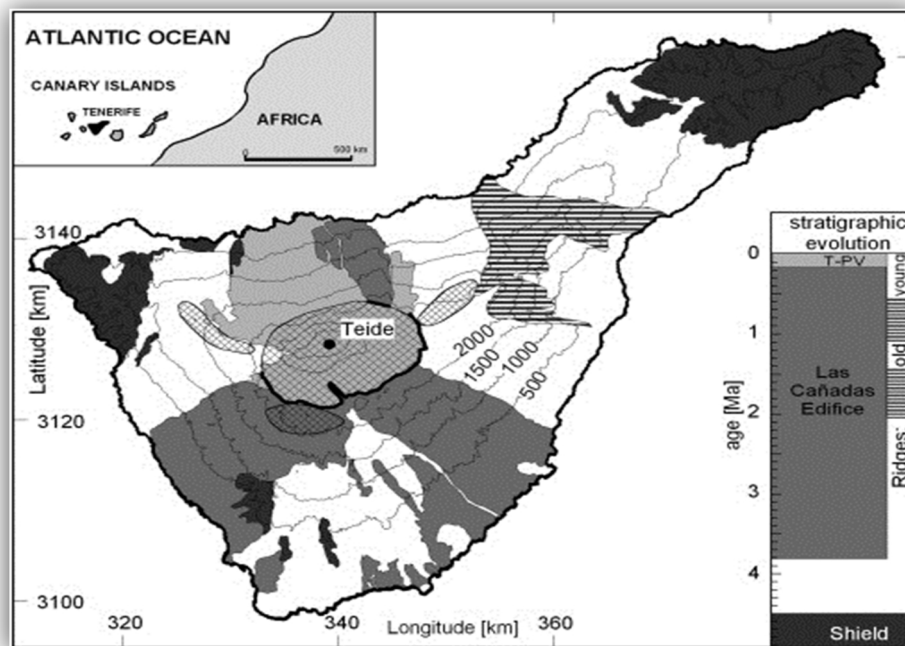
“Γεωτεχνική ταξινόμηση και χαρακτηρισμός των γεωολικών για ανάλυση ευστάθειας σε μεγάλα ηφαιστειακά πρανή”

Rodrigo del Potroa, Marcel Hürlimann, 2008

Η κύρια πρόκληση που αντιμετωπίζουν οι επιστήμονες μελετώντας μεγάλες ηφαιστειακές κατολισθήσεις είναι ο κατάλληλος γεωτεχνικός χαρακτηρισμός των ηφαιστειακών υλικών. Ανεξάρτητα από την σημασία, τα δημοσιευμένα στοιχεία είναι λιγοστά και δεν παρουσιάζουν πρότυπα ταξινομήσεων ή διαδικασιών. Στην

συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζεται μία νέα παγκόσμια ενωτική γεωτεχνική ταξινόμηση των ηφαιστειακών υλικών που περιλαμβάνει γεωτεχνικές μονάδες που ενδεχομένως να βρίσκονται σε ηφαιστειογενείς περιοχές. Τα ηφαιστειακά υλικά χωρίζονται σε τέσσερις κύριες γεωτεχνικές ενότητες : Τις λάβες, τα ηφαιστειακά λατυποπαγή, πυροκλαστικά πετρώματα και ηφαιστειακά υλικά, τα οποία υποδιαιρούνται περαιτέρω στην υδροθερμική εξαλλοίωση, την συγκόλληση και το αλληλοκλείδωμα.

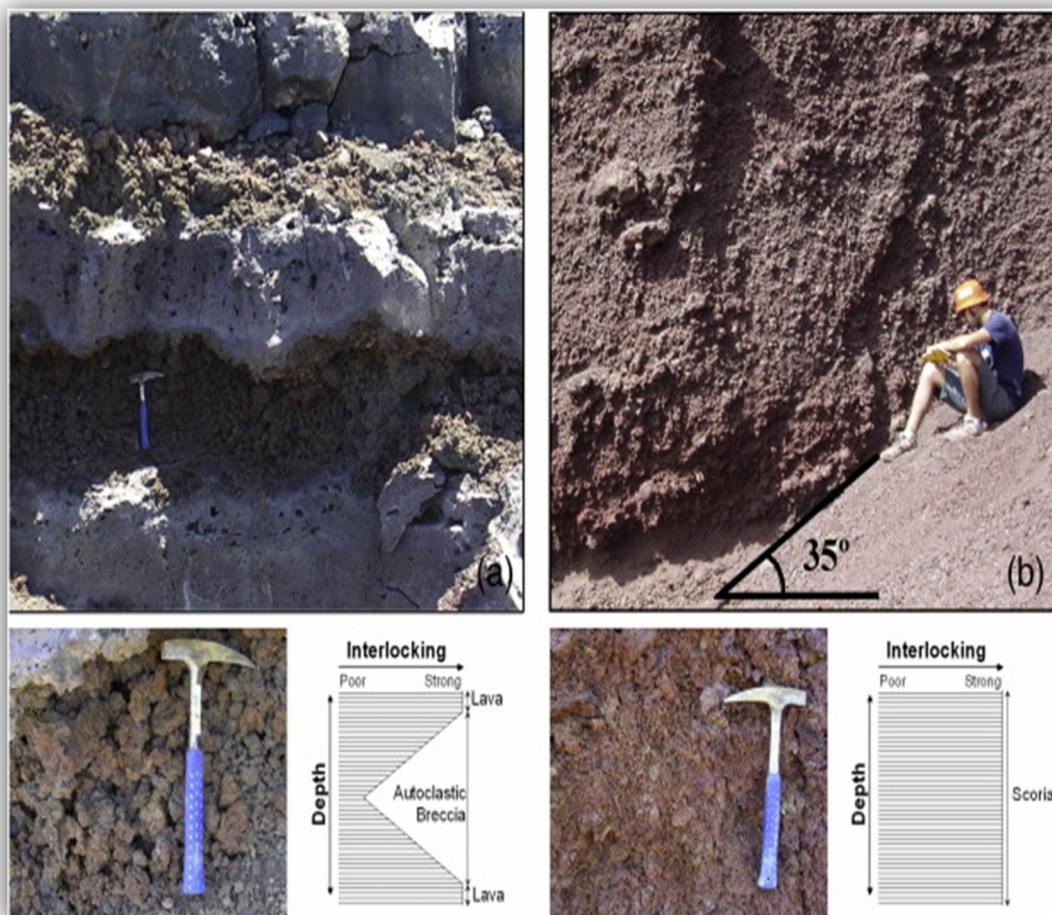
Ένας συνδυασμός νέων δεδομένων από τις πλαγιές του στρωματοηφαιστείου Teide στην Τενερίφη της Ισπανίας και η αναδιατύπωση των δεδομένων από μία πολύ εκτεταμένη επισκόπηση της βιβλιογραφίας παρουσιάζονται για κάθε γεωτεχνική μονάδα. Οι περισσότερες μέτρησης αντοχής του βράχου έγιναν με έμμεσες μεθόδους (με την χρήση σφυριού Schmidt και δοκιμές σημειακής φόρτισης) λόγω της μεγάλης απόστασης από τους περισσότερους βράχους και του απότομου αναγλύφου του ηφαιστειογενούς εδάφους.



Σχήμα 4.43 : Απλοποιημένος χάρτης της Τενερίφης. Το κελί στα δεξιά δείχνει την ηλικιακή διαφορά μεταξύ διαφορετικών γεωλογικών μονάδων. Τα σκιαγραφημένα τμήματα δείχνουν τις περιοχές όπου τα γεωλικά έχουν ελεγχθεί, Rodrigo del Potroa, Marcel Hürlimann, 2008

Η ποιότητα της βραχώμαζας αξιολογήθηκε με βάση τον δείκτη ποιότητας GSI. Λάβες και ισχυρά συγκολλημένα πυροκλαστικά πετρώματα έχουν τις υψηλότερες τιμές μονοαξονικής συμπίεσης ($\sigma_{ci} = 107$ και 82 MPa αντίστοιχα) αν και οι τιμές αυτές επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την υδροθερμική εξαλλοίωση. Οι λάβες έχουν την

χειρότερη ποιότητα με δείκτη $GSI = 55$ σε σύγκριση με τα ισχυρά συγκολλημένα πυροκλαστικά υλικά που εμφανίζουν δείκτη $GSI = 80$. Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στα ασθενώς συγκολλημένα λατυποπαγή που παρά το γεγονός ότι έχουν ταξινομηθεί ως διαμελισμένες κοκκώδεις μονάδες στο παρελθόν, εδώ ταξινομούνται ως βραχώμαζες εξαιτίας του υψηλού βαθμού αλληλοκλειδώματος μεταξύ κλαστικών υλικών. Παρουσιάζουν τιμές ασθενής βραχώμαζας ($\sigma_{ci} = 29$ και 13 MPa) αλλά γεωλογικό δείκτη καλής ποιότητας βραχώμαζας με $GSI = 60 - 80$. Τα ηφαιστειακά εδάφη είναι τα πιο αδύναμα υλικά που μπορούν υπάρξουν κατά την κατασκευή τεχνικών έργων υποδομής και ως εκ τούτου φαίνεται να είναι επιρρεπή στο να δημιουργήσουν συνθήκες μεγάλης αστάθειας πρανών.



Εικόνα 4.12 : (α) Λατυποπαγή με αλληλοκλείδωμα και (β) Πυροκλαστικά γεωυλικά με αλληλοκλείδωμα στην Τενερίφη. Ο βαθμός αλληλοκλειδώματος των λατυποπαγών μειώνεται με την απόσταση από την υπερκείμενη και την υποκείμενη ροή λάβας
Rodrigo del Potroa, Marcel Hürlimann, 2008

36. *“Slope stability problems in the area between St. George and St. Herene villages and their significance for the main road Argostoli - Poros on Kefallonia Island, Greece”*

“Προβλήματα ευστάθειας πρανούς στην περιοχή μεταξύ των χωριών του Αγίου Γεωργίου και της Αγίας Ειρήνης και η σημασία για τον κεντρικό αυτοκινητόδρομο Αργοστόλι - Πόρος”

Rozos, D., Apostolides, E., Christaras, B., 2002

Στην παρούσα δημοσίευση εξετάζονται τα σοβαρά κατολισθητικά φαινόμενα που εκδηλώθηκαν μεταξύ των χωριών του Αγίου Γεωργίου και της Αγίας Ειρήνης και τα οποία επηρεάζουν τον κεντρικό δρόμο στην Κεφαλονιά. Η επιτόπια έρευνα περιελάμβανε τέσσερις δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και μία σειρά αναλύσεων ευστάθειας πρανών. Τα δεδομένα που ελήφθησαν παρείχαν περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τα γεωτεχνικά - γεωμηχανικά χαρακτηριστικά του νεογενούς υποβάθρου, βοήθησαν στον προσδιορισμό των αιτιών της αστάθειας καθώς και στον σχεδιασμό των μέτρων έτσι ώστε να αποφευχθεί η επανεμφάνιση τέτοιων αστοχιών.



*Εικόνα 4.13 : Γενική εικόνα από την περιοχή της κατολίσθησης.
Είναι σημειωμένες οι θέσεις των κύριων αστοχιών του οδικού άξονα,
Rozos, D., Apostolides, E., Christaras, B., 2002*

Η Κεφαλονιά αποτελείται κυρίως από πετρώματα της γεωτεκτονικής ζώνης των Παξών. Στο νοτιοανατολικό μέρος όπου πραγματοποιείται η παρούσα έρευνα, συναντώνται ασβεστόλιθοι της Ιονίου ζώνης ηλικίας Α.Ιουρασικού - Κ.Κρητιδικού. Πλειοκαινικά και Πλειστοκαινικά ιζήματα έχουν αποτεθεί επίσης στην περιοχή, ενώ θραύσματα αποσπασμένου γεωυλικού ηλικίας νεογενούς βρέθηκαν στα χαμηλότερα πρηνή. Στην περιοχή της μελέτης ιζήματα ηλικίας Α.Ολιγοκαίνου - Α.Μειοκαίνου περιλαμβάνουν εναλλαγές από ψαμμιτικές και αργιλικές μάργες.

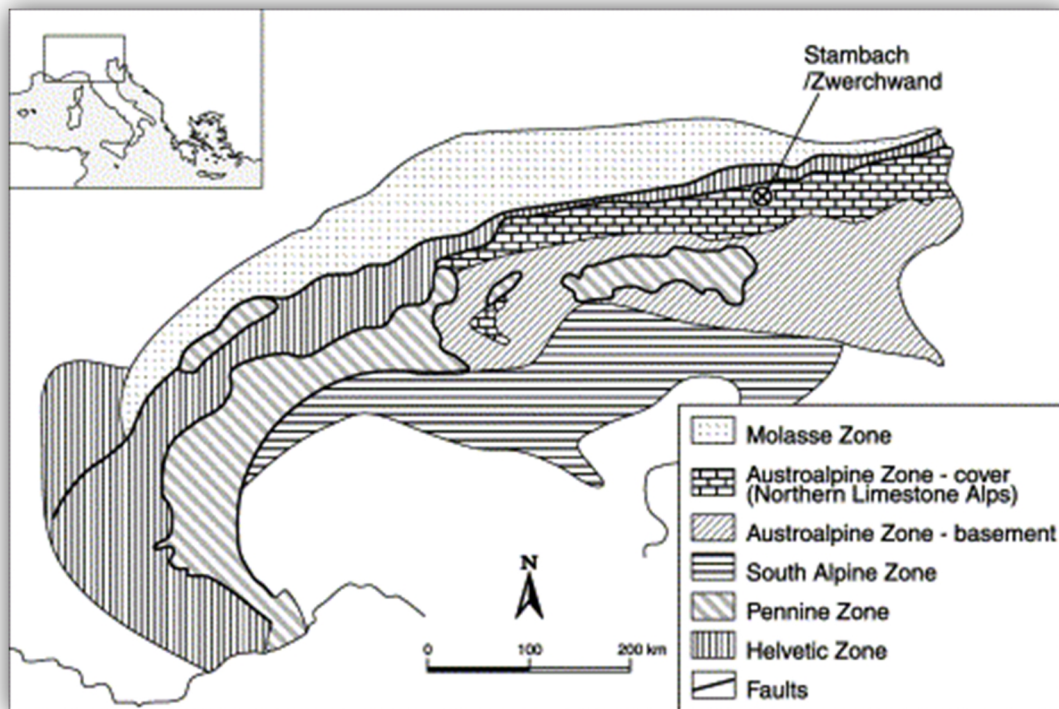
Επίσης συναντάμε κροκαλοπαγή από ασβεστιτικό ψαμμίτη τα οποία βρίσκονται κερματισμένα σε μονομπλόκς και τα οποία είναι ασταθή ή οριακά ευσταθή κατά μήκος των πρηνών στον οδικό άξονα. Τα στοιχεία τόσο της λιθολογίας όσο και των τεκτονικών συνθηκών περισσότερο ξεκάθαρα στα χονδρόκοκκα ιζήματα. Οι λιθολογικές και οι τεκτονικές συνθήκες σε συνδυασμό με την υψηλή βροχόπτωση και την αποσάθρωση, είχε ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό ενός μεγάλου πάχους χαλαρής ζώνης στην επιφάνεια.

37. *“Down-slope variation in geotechnical parameters and pore fluid control on a large - scale Alpine landslide”*

“Η διακύμανση γεωτεχνικών παραμέτρων κατακόρυφου πρηνούς και έλεγχος του πορώδους σε μία μεγάλης κλίμακας κατολίσθηση στις Άλπεις”

Wilson, A.J., David N. Petleyb, D.N., Murphyc, W., 2003

Μία γεωλογική έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε μία κατολίσθηση μεγάλης έκτασης στην κοιλάδα Stambach Valley στα πρηνή πάνω από την πόλη του Bad Goisern στην Αυστρία. Οι αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης αποτέλεσαν το βασικό παράγοντα που προκάλεσε μία μεγάλου όγκου ροή γεωυλικού. Η έναρξη αυτής της κατολίσθησης έχει συνδεθεί με την κατάπτωση βραχώμαζας από τα πετρώματα της Zwerchwand πάνω από την κεφαλή της κατολίσθησης. Η ερμηνεία της κατάστασης της πίεσης των πόρων που δημιουργείται από την εκτόνωση των τάσεων έχει χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί το μεσοδιάστημα των 10 μηνών που μεσολάβησε μεταξύ της φόρτισης και της επανενεργοποίησης της κατολίσθησης.

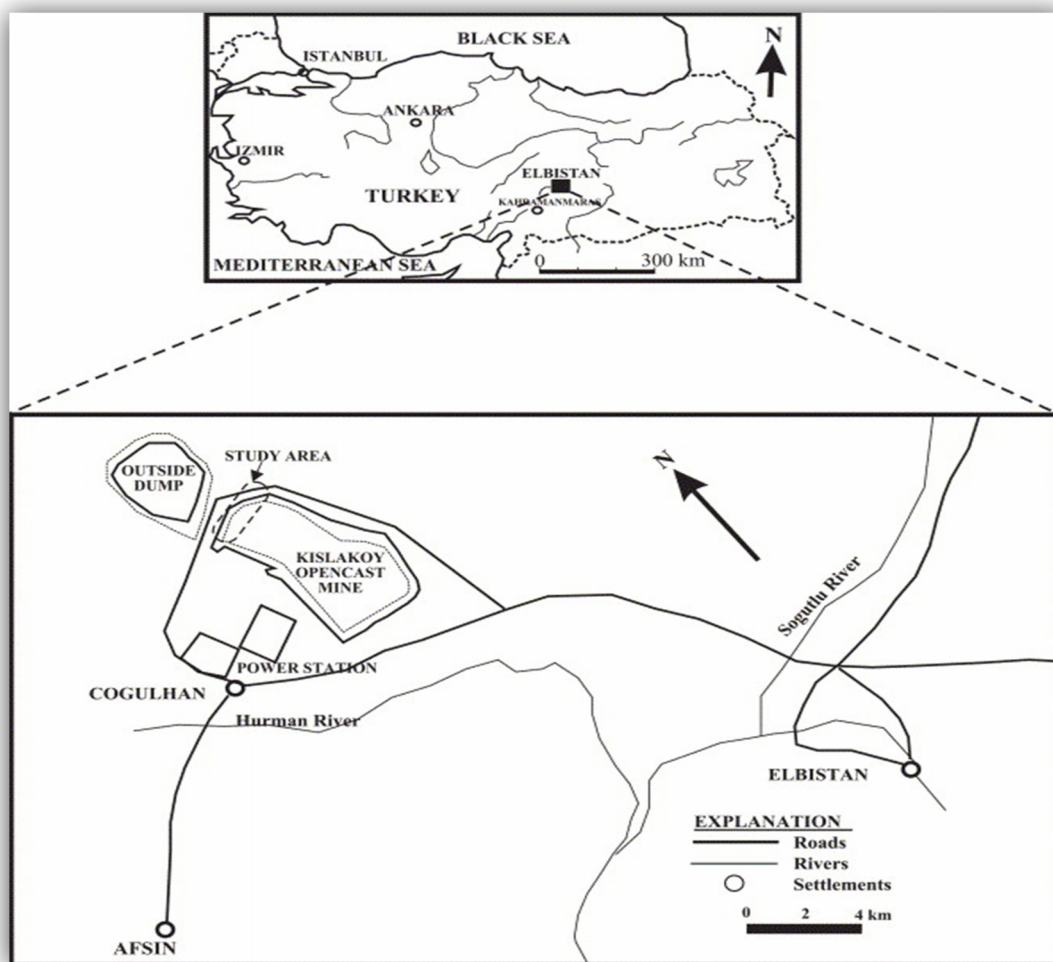


Σχήμα 4.44 : Τεκτονικές και λιθολογικές ζώνες των Άλπεων,
(Τροποποιήθηκε από Eisbacher and Clague, 1984)

38. “Geotechnical characterization of lignite-bearing horizons in the Afsin - Elbistan lignite basin, SE Turkey”
“Γεωτεχνικός χαρακτηρισμός των λιγνιτοφόρων οριζόντων στη λεκάνη Afsin - Elbistan, ΝΑ Τουρκία”

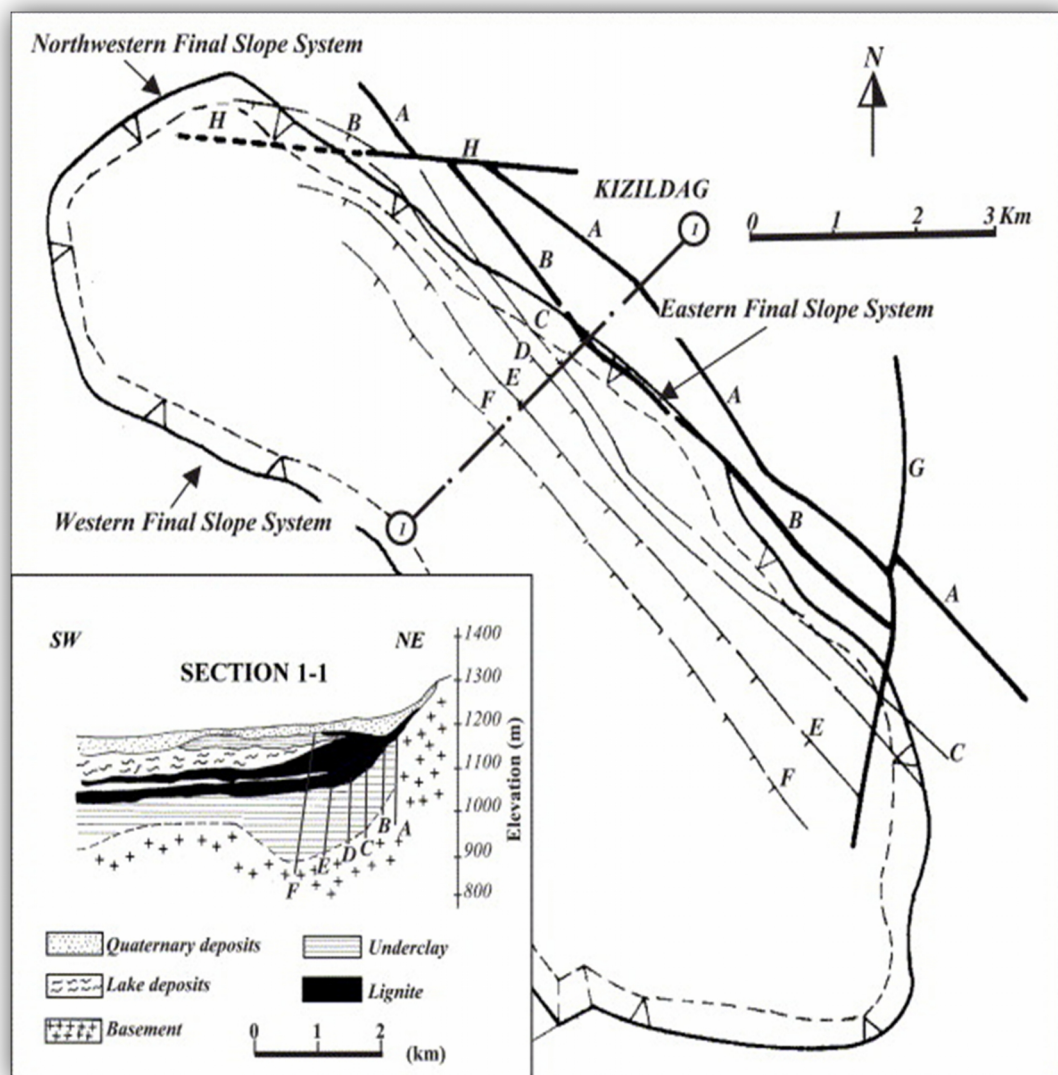
Ural, S., Yuksel, F., 2004

Το κοιτάσμα λιγνίτη Afsin - Elbistan με απόθεμα 3,4 δις τόνους είναι η μεγαλύτερη λιγνιτική λεκάνη και ένας από τους πιο σημαντικούς πόρους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Τουρκία. Το ορυχείο στο Kislakoy επιλέχθηκε ως το πρώτο επιφανειακό ορυχείο το οποίο θα παρέχει με ορυκτό καύσιμο τους τέσσερις σταθμούς παραγωγής ηλεκτρισμού ισχύος 300 MW ο καθένας. Η αστάθεια των πρανών αποτελεί ένα συνεχές πρόβλημα στα υπαίθρια ορυχεία στο Kislakoy. Ιδιαίτερα πολύπλοκες αστοχίες κατά μήκος μίας μη κυκλικής επιφάνειας εμφανίζονται στο τελικό στάδιο εξέλιξης των πρανών και καλύπτουν μεγάλες περιοχές στο ορυχείο αυξάνοντας την σημασία ευστάθειας.



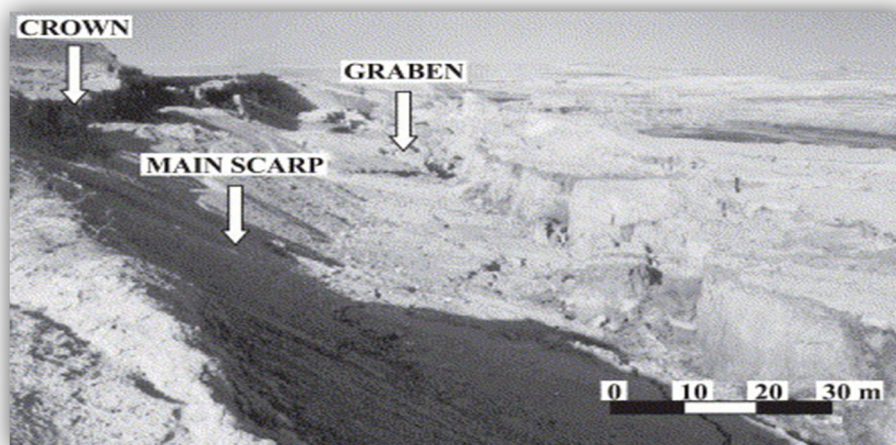
Σχήμα 4.45 : Γεωγραφική τοποθεσία της λιγνιτικής λεκάνης Afsin-Elbistan, Ural, S., Yuksel, F., 2004

Η μελέτη αυτή περιγράφει τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των λιγνιτοφόρων οριζόντων και περιγράφει τις αιτίες και τους μηχανισμούς της αστάθειας των πρανών που απειλούν την ασφάλεια του ορυχείου. Αναλύσεις X - ray διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας ένα διαδραστικό σύστημα επεξεργασίας δεδομένων (SIROQUANTk) με βάση τις μεθόδους ερμηνείας Rietveld. Παραμετρική ανάλυση ευστάθειας διεξήχθη για την αστοχία που σημειώθηκε στο βορειοδυτικό τμήμα του πρανούς σε τμήμα του ορυχείου. Η μέθοδος οριακής κατάστασης Spencer - Wright χρησιμοποιήθηκε με στόχο να καθοριστούν με βεβαιότητα οι πιο αντιπροσωπευτικές τιμές των παραμέτρων διατμητικής αντοχής, για να εξηγηθεί ο μηχανισμός της αστοχίας και για να αξιολογηθούν οι συνθήκες που επικρατούσαν το χρονικό διάστημα που συνέβη η αστοχία. Η πιεζομετρική επιφάνεια και η επιφάνεια υδροφόρου επίσης υπολογίστηκαν.



Σχήμα 4.46 : Το σύστημα ρηγμάτων κοντά στο Kizildag (Otto, 1969)

Από παρατηρήσεις και αναλύσεις της αστοχίας του πρανούς διαπιστώθηκε ότι συνέβη μία σύνθετη ολίσθηση στην ζώνη επαφής με τον λιγνίτη. Η ζώνη επαφής αυτή αποτελεί το πιο ασθενές γεωολικό της περιοχής. Η ανάλυση έδειξε ότι η κύρια αιτία της αστάθειας του βορειοδυτικού τμήματος του πρανούς ήταν η παρουσία υπόγειων υδάτων μειώνοντας την διατμητική αντοχή των σχηματισμών ειδικά στην ζώνη επαφής όπου η τιμή της μειώθηκε στη κρίσιμη τιμή κατά τον χρόνο που συνέβη η αστοχία.



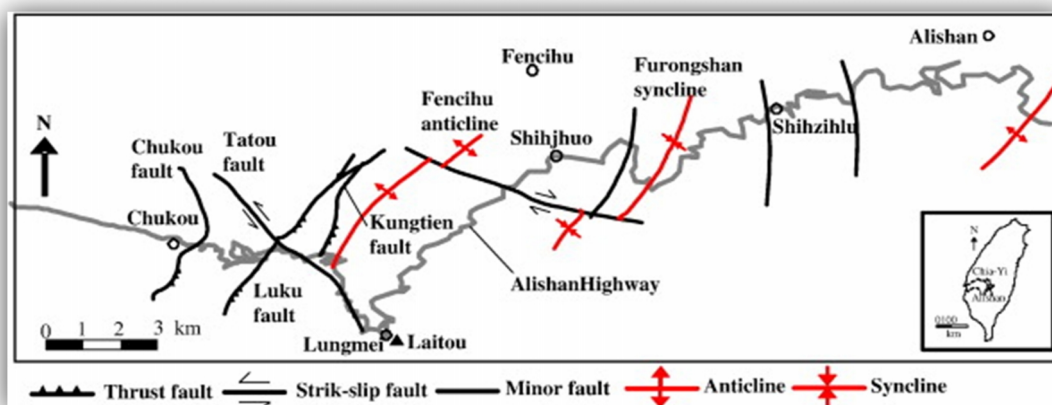
Εικόνα 4.14 : Μία εικόνα από την αστοχία στο βορειοδυτικό τμήμα του πρανούς, Ural, S., Yuksel, F., 2004

39. “Slope management criteria for Alishan Highway based on database of heavy rainfall - induced slope failures”

“Διαχείριση κριτηρίων πρανών για τον αυτοκινητόδρομο Alishan βασισμένη σε μία βάση δεδομένων πολύ έντονης βροχόπτωσης που προκάλεσε αστοχίες πρανών”

Der-Her Leea, Ming-Huang Laia, Jian-Hong Wua, Yun-Yao Chib, Wu-Te Koc and Bi-Ling Leea, 2013

Σε αυτό το άρθρο διεξήχθη μία μελέτη των αστοχιών κατά μήκος του αυτοκινητόδρομου Alishan (γνωστό και ως Tai - 18).



Σχήμα 4.47 : Κύριες γεωλογικές δομές κατά μήκος του αυτοκινητόδρομου Alishan, Der-Her Leea, Ming-Huang Laia, Jian-Hong Wua, et al., 2013

Ένα καινοτόμο εμπειρικό μοντέλο αναπτύχθηκε περιλαμβάνοντας δεδομένα 15 ετών συλλογής των βροχοπτώσεων των τυφώνων που προκάλεσαν τις αστοχίες στα πρανή. Αυτό το μοντέλο προορίζεται για την εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας στο μέλλον κατά μήκος του αυτοκινητόδρομου Tai - 18. Πρόκειται για μοντέλο που περιλαμβάνει δεδομένα της μέγιστης ωριαίας βροχόπτωσης και της αθροιστικής βροχόπτωσης που προκαλεί τις αστοχίες. Η τιμή της αθροιστικής βροχόπτωσης που προκαλεί την αστοχία ορίζεται ως το σημείο εκείνο όπου η κλίση της καμπύλης της αθροιστικής βροχόπτωσης μεταβάλλεται από απότομες κλίσεις σε σχετικά επίπεδες.

Στη συνέχεια ένα απλό κριτήριο εφαρμόστηκε για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας της αστοχίας του πρανούς και την σήμανση συναγερμού και διακοπής της ροής του αυτοκινητοδρόμου κατά την διάρκεια μίας μελλοντικής ακραίας βροχόπτωσης. Οι αστοχίες στα πρανή κατά την διάρκεια του τυφώνα “ Saola 2012 ” και αυτών στην Ιαπωνία αποδεικνύουν ότι το νέο εμπειρικό μοντέλο είναι αποτελεσματικό και εφαρμόσιμο και σε άλλες παρόμοιες περιοχές με τις ίδιες συνθήκες βροχόπτωσης.

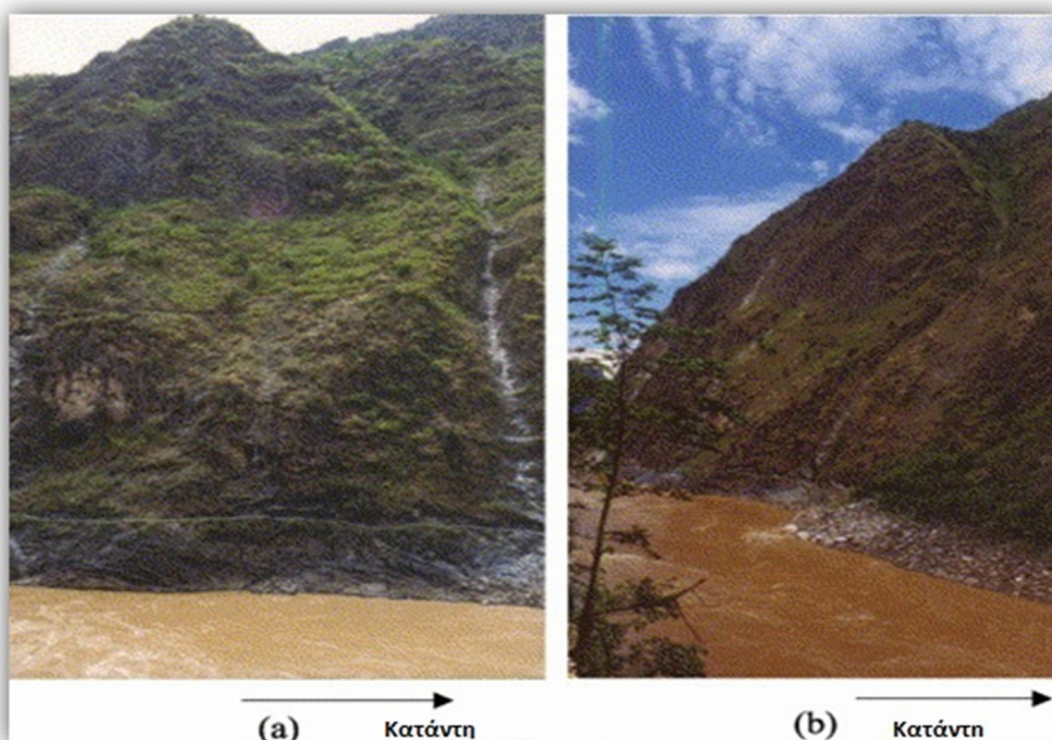
40. *“Mechanism of deep cracks in the left bank slope of Jinping first stage hydropower station”*

“Μηχανισμός ανάπτυξης/κατανομής βαθιών ρωγματώσεων στο αριστερό πρανές της όχθης του πρώτου σταδίου του υδροηλεκτρικού σταθμού Jinping ”

Shengwen Qi, Faquan Wu, Fuzhang Yana, Hengxing Lan, 2004

Η προτεινόμενη τοποθεσία του Jinping, πρώτου σταδίου του υδροηλεκτρικού σταθμού στην περιφέρεια Σιτσουάν της Κίνας, ορίστηκε στα μέσα περίπου του ποταμού Yalongjiang. Πρόκειται για ένα διπλό τοξωτό φράγμα με μέγιστο ύψος 305 m το οποίο θα είναι το ψηλότερο στον κόσμο. Βαθιά ρήγματα δημιουργήθηκαν στην αριστερή κλιτύ τα οποία αναπτύχθηκαν σε απόσταση πέρα των 200 m. Μια ολοκληρωμένη μελέτη γίνεται σε αυτό το έγγραφο σχετικά με τα χαρακτηριστικά της κατανομής των ρωγμών καθώς και τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης τους.

Ο μηχανισμός αυτής της κατανομής προβάλλεται ως ένα νέο θέμα αντιμετώπισης τέτοιου είδους προβλημάτων για την τεχνική γεωλογία και οι παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή και την παραμόρφωσή τους αναλύονται με τη βοήθεια της γεωλογίας, της μηχανικής και της αριθμητικής προσομοίωσης. Ένα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι βαθιές ρωγμές εμφανίστηκαν ως αποτέλεσμα της απελευθέρωσης της υψηλής τάσης (ζώνες εκφόρτισης) του εδάφους συμπεριλαμβανομένων και των δυνάμεων της βαρύτητας και των τεκτονικών τάσεων. Επιπροσθέτως έναν κατάλληλο συνδυασμό ευνοϊκής βραχώδους κατάστασης, δημιουργούν η απότομη γεωμετρία και η ύπαρξη σκληρών πετρωμάτων στο κάτω μέρος της πλαγιάς και των μαλακών στο ανώτερο τμήμα.



Εικόνα 4.15 : Απομονωμένος λόφος και βαθιά χαράδρα πρηνούς,
Shengwen Qi, Faquan Wu, Fuzhang Yana, Hengxing Lan, 2004

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται σε τεκτονικά μπλοκς του ανατολικού άκρου της οροσειράς Qingzang. Λόγω της ταχείας ανύψωσης του φλοιού κατά τη διάρκεια του Τεταρτογενούς, σχηματίστηκαν απότομα πρηνή εκατέρωθεν της κοιλάδας. Τρία επίπεδα διάβρωσης έχουν διαπιστωθεί σε αυτή την περιοχή η οποία σεισμικά θεωρείται σχετικά σταθερή. Το αριστερό πρηνές του φράγματος Pusiluogou είναι απότομο με πάνω από 1000 m ύψος. Κατά μήκος του ποταμού, η κλίση διατηρεί σε γενικές γραμμές μία ίδια τιμή. Στην θέση του φράγματος οι βασικές δομές αποτελούν σημείο συνένωσης

συγκλίνου και κάποιες τοπικές ολισθήσεις εξαρτώνται από κάποια ρήγματα, ενώ η παραμόρφωση και η σταθερότητα του πρανούς εξαρτάται από κάποια άλλα.



Εικόνα 4.16 : Παραμόρφωση σε βάθος 195 m,
Shengwen Qi, Faquan Wu, Fuzhang Yana, Hengxing Lan, 2004

Γενικότερα η τεκτονική καταπόνηση μπορεί να χωριστεί τουλάχιστον σε τρία στάδια : Στο πρώτο στάδιο ο σχηματισμός του σύγκλινου Santan. Στο δεύτερο ο σχηματισμός του αντικλίνου Pusiluogou όπου κάποιες μικρές δευτερεύουσες πτυχές σχηματίστηκαν στη μία πλευρά του σύγκλινου Santan, το οποίο δείχνει ότι η ένταση των τεκτονικών κινήσεων σε αυτό το στάδιο είναι πολύ ασθενέστερη από εκείνη του πρώτου. Το τρίτο στάδιο είναι ο σχηματισμός του σημερινού εδαφικού εντατικού πεδίου. Από το τεταρτογενές λοιπόν, ο φλοιός γνώρισε ταχεία ανύψωση με αποτέλεσμα η κοιλάδα του ποταμού να “κοπεί” βαθιά.

Οι βαθιές ρωγμές ομαδοποιήθηκαν σε τέσσερις κατηγορίες :

- i. Γενικά μια ενιαία μεγάλη θραύση με μέγιστο άνοιγμα πάνω από 20 cm χωρίς πλήρωση κάποιου υλικού.
- ii. Είναι μια ζώνη έντονης χαλάρωσης που αποτελείται από πολύ στενά διαστήματα από φρέσκα σπασίματα, η οποία έχει ένα άνοιγμα της τάξης των 10 - 20 cm με μία κανονική διάρρηξη δεκάδων εκατοστών. Η καταρροή είναι χαρακτηριστικό αυτής της ζώνης.

- iii. Μια ζώνη σχετικά μεγάλης χαλάρωσης που αποτελείται από πολλές μικρές ρωγματώσεις, οι οποίες κυμαίνονται από 3 έως 10 εκατοστά.
- iv. Είναι μια ζώνη μικρότερης χαλάρωσης. Το άνοιγμα των ρωγματώσεων εδώ πέρα είναι μικρότερο από 3 cm.



Εικόνα 4.17 : Η κατάσταση της βραχώμαζας σε βάθος των 136 m, Shengwen Qi, Faquan Wu, Fuzhang Yana, Hengxing Lan, 2004

Επίσης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και την έκταση της παραμόρφωσης του πρανούς που μας ενδιαφέρει κατά μήκος ροής του ποταμού, μπορούν να χωριστούν τρεις ζώνες, ανάντη του φράγματος η ζώνη Α, στον άξονα του φράγματος η ζώνη Β και κατάντη του φράγματος η ζώνη Γ. Είναι προφανές ότι οι βαθιές ρωγματώσεις σχεδόν συμπίπτουν με τα τεκτονικά ρήγματα. Μετέπειτα έγινε κατανομή σε άλλες τέσσερις περιπτώσεις όσον αφορά τον τρόπο σχηματισμού και παραμόρφωσης των βαθιών ρωγμών οι οποίες είναι πιο συχνές σε μάρμαρα στο αριστερό πρανές της όχθης του ποταμού. Έπειτα από συζητήσεις που έγιναν, συμπερασματικά ειπώθηκε ότι ο σχηματισμός αυτών των βαθιών ρωγμών οφείλεται κυρίως στον συνδυασμό της εκφόρτισης των τάσεων λόγω της βαρύτητας και στις τάσεις που δημιουργήθηκαν λόγω τεκτονισμού.

Τέλος η συνολική μετατόπιση του πρανούς είναι περίπου 2m και η εκτιμώμενη μέση μετατόπιση σε ποσοστό είναι 0,02 έως 0,067 mm/έτος. Με βάση αυτό το αποτέλεσμα η συνολική μετατόπιση στο μέλλον για 100 χρόνια εκτιμάται ότι θα είναι 2 - 6,7 mm.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με τον όρο “ασθενής βραχόμαζα” επιχειρούμε να περιγράψουμε και να ποσοτικοποιήσουμε την ποιότητα της βραχόμαζας μέσω μίας απόλυτης γεωτεχνικής προσέγγισης του όρου, ανεξάρτητα από το είδος ή τα χαρακτηριστικά του έργου. Ωστόσο, κατά την άποψη των συγγραφέων το είδος του έργου είναι επίσης σημαντικό για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της βραχόμαζας κατά την διάρκεια της κατασκευής. Διάφοροι ορισμοί και αναφορές σχετικά με τα όρια των ασθενών βραχομαζών παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία καθώς και μία ταξινόμηση ασθενών βραχομαζών ανάλογα με το είδος του τεχνικού έργου.

Έγινε αναφορά στην προβληματική συμπεριφορά των ασθενών σχηματισμών κατά την εκσκαφή σηράγγων, θεμελίωσης φραγμάτων, αντιστήριξης πρανών και γενικότερα θεμελιώσεων, προκειμένου να αποσαφηνιστεί όσο το δυνατόν καλύτερα ο όρος “ασθενείς και σύνθετες βραχόμαζες” και η αλληλεπίδραση τους με το είδος τεχνικού έργου. Ο χαρακτηρισμός “αδύναμη βραχόμαζα” σύμφωνα με το μηχανικό τμήμα προσέγγισης βασίζεται σε διαφορετικό μοτίβο. Στη διάνοιξη σηράγγων τονίζεται ο συνδυασμός της δομής της βραχόμαζας, του άθικτου πετρώματος και του πάχους των υπερκείμενων που μπορεί να οδηγήσει σε αναπτυσσόμενες τάσεις. Στην θεμελίωση φράγματος τονίζονται τα τεχνικογεωλογικά χαρακτηριστικά έτσι ώστε να χαρακτηριστούν αν υπάρχουν διαφορετικά είδη βράχου ως ασθενή.

Εκτός από την απαραίτητη γνώση του γεωλογικού μοντέλου που καθορίζει τις συνθήκες ευστάθειας των τεχνικών έργων αναγκαία είναι ταυτόχρονα και η γνώση της ποιότητας της βραχόμαζας που είναι φυσικά συνάρτηση του γεωλογικού μοντέλου. Ο χαρακτηρισμός της ποιότητας της βραχόμαζας αποτελεί θεμελιώδες κριτήριο έτσι ώστε να εκτιμηθούν αξιόπιστα οι γεωτεχνικές παράμετροι.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Επιστημονικές εργασίες

1. Ramamurthy, T., 2004. “A geo-engineering classification for rocks and rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*”, 41(1), pp. 89–101.
2. Palmstrom, A., Broch, E., 2006. “Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system”. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(6), pp. 575–593.
3. Aksoya, C.O., Geniş, M., Aldas, G.U., Aldas, G.U., Özacar, V., Özer, S.C., 2012. “A comparative study of the determination of rock mass deformation modulus by using different empirical approaches”. *Engineering Geology*, 131-132, pp. 19–28.
4. Azam, S., 2008. “Engineering behaviour of clay-bearing calcium sulphate in Dammam Dome, eastern Saudi Arabia”. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(4), pp. 521-528.
5. Şen, Z., Sadagah, B.H., 2003. “Modified rock mass classification system by continuous rating”. *Engineering Geology*, 67(3-4), pp. 269–280.
6. Tsiambaos, G., Sabatakakis, N., 2004. “Considerations on strength of intact sedimentary rocks”. *Engineering Geology*, 72(3-4), pp. 261-273.
7. Ola, S.A., 1982. “Geotechnical properties of an attapulgitic clay shale in northwestern Nigeria”. *Engineering Geology*, 19(1), pp. 1-13.
8. Morales, T., Uribe-Etxebarria, G., Uriarte, J.A., Valderrama, F.I., 2004. “Geomechanical characterisation of rock masses in Alpine regions: the Basque Arc (Basque-Cantabrian basin, Northern Spain)”. *Engineering Geology*, 71(3-4), pp. 343-362.
9. Justoa, J.L., Justoa, E., Duranda, P., Azañón, J.M., 2006. “The foundation of a 40-storey tower in jointed basalt”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(2), pp. 267–281.
10. Gupta, A.S., Seshagiri Rao, K., 2000. “Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state”. *Engineering Geology*, 56(3-4), pp. 257–274.
11. 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 tunneling”. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), pp. 129-142.
12. Tuğrul, A., 1998. “The application of rock mass classification systems to underground excavation in weak limestone, Atatürk dam, Turkey”. *Engineering Geology*, 50(3-4), pp. 337–345.
13. Martin, C.D., Kaiser, P.K., McCreath, D.R., 1999. “Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels”. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(1), pp. 136-151.
14. Meguid, M.A., Rowe, R.K., 2006. “Stability of D-shaped tunnels in a Mohr-Coulomb material under anisotropic stress conditions”. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(3), pp. 273-281.
15. Kontogiannia, V., Papantonopoulos, C., Stirosa, S., 2008. “Delayed failure at the Messochora tunnel, Greece”. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(3), pp. 232–240.
16. Mohammad Afifipour, Sharifzadeha, M., Shahriara, K., Jamshidib, H., 2011. “Interaction of twin tunnels and shallow foundation at Zand underpass, Shiraz metro, Iran”. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(2), pp. 356–363.

17. Bhasin, R., Barton, N., Grimstad, E., Chryssanthakis, P., 1995. “Engineering geological characterization of low strength anisotropic rocks in the Himalayan region for assessment of tunnel support”. *Engineering Geology*, 40(3-4), pp. 169–193.
18. Bell, F.G., Haskins, D.R., 1997. “A geotechnical overview of Katse Dam and Transfer Tunnel, Lesotho, with a note on basalt durability”. *Engineering Geology*, 46(2), pp. 175–198.
19. Hart, P.A.†, 1993. “Foundation behaviour in reusable tunnels in weak rocks”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 30(3), pp. 239–246.
20. Sapignia, M., Bertib, M., Bethazc, E., Busillod, A., Cardone, G., 2002. “TBM performance estimation using rock mass classifications”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(6), pp. 771–788.
21. Hoseiniea, S.H., Aghababaeib, H., Pourrahimian, Y. 2008. “Development of a new classification system for assessing of rock mass drillability index (RDi)”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(1), pp. 1–10.
22. Özsan, A., Başarır, H., 2003. “Support capacity estimation of a diversion tunnel in weak rock”. *Engineering Geology*, 68(3-4), pp. 319–331.
23. Habimana, J., Labiouse, V., Descoeudres, F., 2002. “Geomechanical characterisation of cataclastic rocks: experience from the Cleuson–Dixence project”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(6), pp. 677–693.
24. Behrestaghia, M.H.N., Seshagiri, K., Ramamurthy, T., 1996. “Engineering geological and geotechnical responses of schistose rocks from dam project areas in India”. *Engineering Geology*, 44(1-4), pp. 183–201.
25. Turkmen, S., Ozguler, E., Ertunc, A., 2001. “Engineering properties of the magmatic rocks at the Pamukluk Dam site, Turkey”. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60(1), pp. 19–22.
26. Guan-Hua Suna, Hong Zhengb, H., De-Fu Liub, 2011. “A three-dimensional procedure for evaluating the stability of gravity dams against deep slide in the foundation”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(3), pp. 421–426.
27. Jian Liua, Xia-Ting Fenga, Xiu-Li Dingb, Jie Zhangb, Deng-Ming Yueb, 2003. “Stability assessment of the Three-Gorges Dam foundation, China, using physical and numerical modeling—Part I: physical model tests”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(5), pp. 609–631.
28. Jian Liua, Xia-Ting Fenga, Xiu-Li Ding, 2003. “Stability assessment of the Three-Gorges Dam foundation, China, using physical and numerical modeling—Part II: numerical modeling”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(5), pp. 633–652.
29. Özšana, A., Karpuz, C., 1996. “Geotechnical rock-mass evaluation of the Anamur dam site, Turkey”. *Engineering Geology*, 42(1), pp. 65–70.
30. Παπαντωνόπουλος, Κ. Ι., Καπόπουλος, Χ. Α., Ψαρρόπουλος, Α. Τ., 2006. “Landslide of Tsakona 2003”.
31. Eberhardt, E., Thuro1, K., Lugimbuehl, M., 2005. “Slope instability mechanisms in dipping interbedded conglomerates and weathered marls—the 1999 Ruffi landslide, Switzerland”. *Engineering Geology*, 77(1-2), pp. 35–56.
32. Farquhar, O.C., 1980. “Geologic processes affecting the stability of rock slopes along Massachusetts highways”. *Engineering Geology*, 16(1-2), pp. 135–145.
33. Ya-Ching Liu, Chao-Shi Chen, 2007. “A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment”. *Engineering Geology*, 89(1-2), pp. 129–143.

34. Yu Wang, Zijun Cao, Siu-Kui Au, 2011. “Practical reliability analysis of slope stability by advanced Monte Carlo simulations in a spreadsheet”. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(1), pp. 162-172.
35. Rodrigo del Potroa, Marcel Hürlimann, 2008. “Geotechnical classification and characterisation of materials for stability analyses of large volcanic slopes”. *Engineering Geology*, 98(1-2), pp. 1-17.
36. Rozos, D., Apostolides, E., Christaras, B., 2002. “Slope stability problems in the area between St. George and St. Herene villages and their significance for the main road Argostoli-Poros on Kefallonia Island, Greece”. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61(4), pp. 303-309.
37. Wilson, A.J., David N. Petleyb, D.N., Murphyc, W., 2003. “Down-slope variation in geotechnical parameters and pore fluid control on a large-scale Alpine landslide”. *Geomorphology*, 54(1-2), pp. 49-62.
38. Ural, S., Yuksel, F., 2004. “Geotechnical characterization of lignite-bearing horizons in the Afsin-Elbistan lignite basin, SE Turkey”. *Engineering Geology*, 75(2), pp. 129-146.
39. Der-Her Leea, Ming-Huang Laia, Jian-Hong Wu, Yun-Yao Chib, Wu-Te Koc and Bi-Ling Leea, 2013. “Slope management criteria for Alishan Highway based on database of heavy rainfall-induced slope failures”. *Engineering Geology*, 162, pp. 97-107.
40. Shengwen Qi, Faquan Wu, Fuzhang Yana, Hengxing Lan, 2004. “Mechanism of deep cracks in the left bank slope of Jinping first stage hydropower station”. *Engineering Geology*, 73(1-2), pp. 129-144.
41. Stamou, I., Moutafis, N., Stefanakos, I., 2008. *The need for the formulation of technical specifications for dam failure studies*.
42. Moutafis, N.I., 2008. *Failures and incidents of Greek dams*.
43. Μαρίνος Β. Π., 2007. “Διδακτορική διατριβή: Γεωτεχνική Ταξινόμηση και τεχνικογεωλογική συμπεριφορά ασθενών και σύνθετων γεωλικών κατά τη διάνοιξη σπηραγγών”.
44. Marinos V., Fortsakis P., Stoumpos G., “Classification of weak rock masses in dam foundation and tunnel excavation”.
45. Marinos, P., 1999. Διημερίδα : “Οι σήραγγες της εγνατίας οδού”

Διαδουκτιακή βιβλιογραφία

46. www.journals.elsevier.com/engineering-geology
47. www.link.springer.com
48. www.sciencedirect.com
49. www.nrcresearchpress.com
50. www.civ.uth.gr/lessons/52%5Ckephalaio_4.pdf
51. www.issuu.com/enggeoauth/docs/techniki_geologia_5o_mathima_texniki_geologia_izima
52. www.legah.metal.ntua.gr/pdf/tex1/9D.pdf
53. www.eesy.gr/uploads/79/79/EESYE_TIAS_ST.VARVARA_2007_for_SITE_SMALL.pdf
54. enggeo-auth.weebly.com/uploads/9/2/1/9/9219674/1o_mathima_texnikis_geologias_eisagogiko.pdf
55. www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg881e/assets/geologikes-meletes-3o-mathima-site.pdf
56. www.legah.metal.ntua.gr/pdf/geotechATM/5%20Γεωτεχνική_%20Μηχανική_rockmass.pdf
57. www.metal.ntua.gr/uploads/2616/2a_DIALEXI.pdf
58. www.metal.ntua.gr/uploads/2700/10_DIALEXI.pdf
59. www.legah.metal.ntua.gr/pdf/tex1/8D.pdf
60. www.legah.metal.ntua.gr/pdf/tex1/9D.pdf
61. www.legah.metal.ntua.gr/pdf/tex1/13D.pdf

Α. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΟΥ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

	ΤΙΤΛΟΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗΣ	ΚΕΦΑΛΑΙΟ	ΣΕΛΙΔΑ
ΣΗΡΑΓΓΕΣ	“Η μεταβλητότητα των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχώμαζας ποσοτικοποιήθηκε με τον γεωλογικό δείκτη αντοχής (GSI): περίπτωση οφιόλιθων με ιδιαίτερη έμφαση στις σήραγγες”	Κεφ.4.1.2	Σελ.62
	“Η εφαρμογή των συστημάτων ταξινόμησης στην υπόγεια εκσκαφή σε ασθενή ασβεστόλιθο, Φράγμα Ataturk, Τουρκία”	Κεφ.4.1.2	Σελ.70
	“Οι παράμετροι Hoek - Brown για την εκτίμηση του βάθους της ψαθυρής αστοχίας στις σήραγγες”	Κεφ.4.1.2	Σελ.76
	“Η ευστάθεια σε σήραγγες σχήματος D σε βραχώμαζες που ικανοποιούν το κριτήριο αστοχίας Mohr-coulomb κάτω από ανισότροπες συνθήκες πίεσης”	Κεφ.4.1.2	Σελ.77
	“Αστοχία σε μεταγενέστερο χρόνο στην σήραγγα της Μεσοχώρας, Ελλάδα”	Κεφ.4.1.2	Σελ.77
	“Η αλληλεπίδραση των δύο δίδυμων σιράγγων και της ρηχής θεμελίωσης του υπόγειου αυτοκινητοδρόμου Zand, μετρό Σιράζ, Ιράν”	Κεφ.4.1.2	Σελ.78
	“Γεωμηχανικός χαρακτηρισμός της χαμηλής αντοχής σε ανισότροπη βραχώμαζα στην περιοχή των Ιμαλαΐων για την εκτίμηση των μέτρων υποστήριξης μιας σήραγγας”	Κεφ.4.1.2	Σελ.79
	“Μία γεωτεχνική επισκόπηση του φράγματος Katse και της σήραγγας μεταφοράς του Lesotho με έμφαση στην ανθεκτικότητα του βασάλτη”	Κεφ.4.1.2	Σελ.80
	“Συμπεριφορά θεμελίωσης σε επαναχρησιμοποιημένες σήραγγες σε ασθενή πετρώματα”	Κεφ.4.1.2	Σελ.83
	“Εκτίμηση της απόδοσης TBM με χρήση ταξινομήσεων βραχώμαζας”	Κεφ.4.1.2	Σελ.83
	“Ανάπτυξη ενός νέου συστήματος ταξινόμησης για την εκτίμηση του δείκτη ικανότητας διάτρησης (RDi) βραχώδους μάζας”	Κεφ.4.1.2	Σελ.85
	“Προσδιορισμός ικανότητας υποστήριξης σε σήραγγα εκτροπής σε ασθενή βράχο”	Κεφ.4.1.2	Σελ.87
ΦΡΑΓΜΑΤΑ	“Γεωμηχανικός χαρακτηρισμός κατακλαστικών πετρωμάτων : η εμπειρία από το έργο Cleuson - Dixence”	Κεφ.4.1.2	Σελ.89
	“Γεωλογική μηχανική και γεωτεχνική συμπεριφορά των σχιστόλιθων για περιοχές κατασκευής φράγματος στην Ινδία”	Κεφ.4.2.2	Σελ.93
	“Μηχανικές ιδιότητες των μαγματικών πετρωμάτων στο φράγμα Ramukluk, Τουρκία”	Κεφ.4.2.2	Σελ.94
	“Μια τρισδιάστατη διαδικασία για την αξιολόγηση της σταθερότητας των φραγμάτων βαρύτητας ενάντια σε τυχόν ολίσθηση στα θεμέλια”	Κεφ.4.2.2	Σελ.95
	“Εκτίμηση της ευστάθειας του φράγματος των τριών φαργγιών, Κίνα, χρησιμοποιώντας φυσικά και αριθμητικά μοντέλα-Μέρος I: Δοκιμές φυσικών μοντέλων”	Κεφ.4.2.2	Σελ.97
	“Αξιολόγηση της σταθερότητας των θεμελίων του φράγματος Three - Gorges στην Κίνα, με χρήση φυσικών και ψηφιακών μοντέλων-Μέρος II: ψηφιακή μοντελοποίηση”	Κεφ.4.2.2	Σελ.99
	“Γεωτεχνική αξιολόγηση βραχώμαζας της περιοχής του φράγματος Anamur, Τουρκία”	Κεφ.4.2.2	Σελ.101

	ΤΙΤΛΟΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗΣ	ΚΕΦΑΛΑΙΟ	ΣΕΛΙΔΑ
ΠΡΑΝΗ	“Κατολίσθηση Τσακώνας 2003 : Ανάλυση και Παρατηρήσεις Πεδίου”	Κεφ.4.3.2	Σελ.104
	“Μηχανισμοί αστάθειας πρανών σε βυθίσεις κροκαλοπαγών και αποσαθρωμένων μαργών - κατολίσθηση στο Ruzi, Ελβετία 1999”	Κεφ.4.3.2	Σελ.108
	“Γεωλογικές διεργασίες που επηρεάζουν τη σταθερότητα των πρανών σε αυτοκινητόδρομους της Μασαχουσέτης”	Κεφ.4.3.2	Σελ.116
	“Συζήτηση για «Μια νέα προσέγγιση για ταξινόμηση βραχομάζας σε πρανή σχετικά με την αξιολόγηση της σταθερότητας» από τους Liu και Chen, τεχνική γεωλογία 89:129-143 (2007)”	Κεφ.4.3.2	Σελ.118
	“Πρακτική ανάλυση αξιοπιστίας της ευστάθειας πρανών από προηγμένες προσομοιώσεις Monte Carlo σε φύλλα εργασίας”	Κεφ.4.3.2	Σελ.120
	“Γεωτεχνική ταξινόμηση και χαρακτηρισμός των γεωολικών για ανάλυση ευστάθειας σε μεγάλα ηφαιστειακά πρανή”	Κεφ.4.3.2	Σελ.120
	“Προβλήματα ευστάθειας πρανούς στην περιοχή μεταξύ των χωριών του Αγίου Γεωργίου και της Αγίας Ειρήνης και η σημασία για τον κεντρικό αυτοκινητόδρομο Αργοςτόλι - Πόρος”	Κεφ.4.3.2	Σελ.123
	“Η διακύμανση γεωτεχνικών παραμέτρων κατακόρυφου πρανούς και έλεγχος του πορώδους σε μία μεγάλης κλίμακας κατολίσθηση στις Άλπεις”	Κεφ.4.3.2	Σελ.124
	“Γεωτεχνικός χαρακτηρισμός των λιγνιτοφόρων οριζόντων στην λεκάνη Asfin - Elbistan, ΝΑ Τουρκία”	Κεφ.4.3.2	Σελ.125
	“Διαχείριση κριτηρίων πρανών για τον αυτοκινητόδρομο Alishan βασισμένη σε μία βάση δεδομένων πολύ έντονης βροχόπτωσης που προκάλεσε αστοχίες πρανών”	Κεφ.4.3.2	Σελ.128
	“ Μηχανισμός ανάπτυξης/κατανομής βαθιών ρωγματώσεων στο αριστερό πρανές της όχθης του πρώτου σταδίου του υδροηλεκτρικού σταθμού Jinping ”	Κεφ.4.3.2	Σελ.129
ΓΕΝΙΚΕΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΕΙΣ	“Μία γεωτεχνική ταξινόμηση για βράχους και βραχομάζες”	Κεφ.1.2	Σελ.4
	“Χρήση και κατάχρηση των συστημάτων ταξινόμησης βραχομάζας με ιδιαίτερη αναφορά στο σύστημα ταξινόμηση - Q”	Κεφ.1.2	Σελ.5
	“Μια συγκριτική μελέτη του προσδιορισμού του συντελεστή παραμορφωσιμότητας της βραχομάζας με τη χρήση διαφόρων εμπειρικών προσεγγίσεων”	Κεφ.1.2	Σελ.6
	“Η μηχανική συμπεριφορά αργίλου με θειικό ασβέστιο στο Dammam Dome, στην ανατολική Αραβία”	Κεφ.1.3.4	Σελ.11
	“Τροποποιημένο σύστημα ταξινόμησης με συνεχή διαβάθμιση”	Κεφ.2.2.1	Σελ.19
	“Συλλογισμοί για την αντοχή ανέπαφων ιζηματογενών πετρωμάτων”	Κεφ.2.2.1	Σελ.20
	“Γεωμηχανικές ιδιότητες της ατταπουλιτικής αργίλου στην βορειοδυτική Νιγηρία”	Κεφ.2.2.1	Σελ.21
	“Γεωμηχανικός χαρακτηρισμός των βραχόμαζων στις Άλπεις”	Κεφ.2.2.1	Σελ.21
	“Η θεμελίωση ενός 40 - ορόφου ουρανοξύστη σε ρηγματωμένο βασάλτη”	Κεφ.3.1.3	Σελ.36
	“Επίδραση αποσάθρωσης στην αντοχή και παραμόρφωση των κρυσταλλικών πετρωμάτων κάτω από συμπίεση σε μονοαξονική θλίψη”	Κεφ.3.2.4	Σελ.49

B. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ	ΚΕΦΑΛΑΙΟ	ΣΕΛΙΔΑ
Σχήμα 1.1	Απλή άποψη των μοντέλων πλέγματος σε σήραγγες	Κεφ.1.2	Σελ.7
Σχήμα 1.2	Γεωλογία και τοπογραφία του Dammam Dome	Κεφ.1.3.4	Σελ.11
Σχήμα 2.1	Πίνακας περιγραφής της αντοχής των πετρωμάτων βάσει επί τόπου μετρήσεων	Κεφ.2.2.1	Σελ.16
Σχήμα 2.2	Πίνακας χαρακτηρισμού της βραχώμαζας σε ένα γεωτεχνικό πρόβλημα	Κεφ.2.2.1	Σελ.19
Εικόνα 2.1	Παραδείγματα των κατηγοριών της βραχώμαζας στις Άλπεις	Κεφ.2.2.1	Σελ.22
Σχήμα 2.3	Πίνακας ποσοτικών προσδιορισμών σε ανεμπόδιστη θλίψη ISRM (1981)	Κεφ.2.2.2.1	Σελ.23
Σχήμα 2.4	Σκληρομετρική κλίμακα του Mohs	Κεφ.2.2.3.1	Σελ.28
Σχήμα 2.5	Πίνακας ταξινόμησης βαθμού αποσάθρωσης βραχώδους υλικού	Κεφ.2.2.3.2	Σελ.30
Εικόνα 2.1	Σχιστοποίηση βράχου λόγω “ύγρανσης-ξήρανσης”	Κεφ.2.2.3.2	Σελ.31
Σχήμα 3.1	Πίνακας ταξινόμησης κλαστικών πετρωμάτων ανάλογα του μεγέθους του συνθετικού τους κόκκου	Κεφ.3.1.1	Σελ.33
Εικόνα 3.1	Αστοχία σφήνας και κατάπτωση σε ασβεστολιθική βραχώμαζα	Κεφ.3.1.1	Σελ.34
Εικόνα 3.2	Καταπτώσεις βραχωδών μαζών σε ψαμμίτες των νεογενών στο Διακοφτό	Κεφ.3.1.1	Σελ.34
Εικόνα 3.3	Καταπτώσεις βραχώμαζων από ηφαιστειακά πρηνή	Κεφ.3.1.1	Σελ.36
Σχήμα 3.2	Ηφαιστειακές δομές στο νησί της Τενερίφης	Κεφ.3.1.1	Σελ.37
Εικόνα 3.4	Διακλάσεις και μικρά έγκοιλα που εντοπίστηκαν στην ανώτερη βασαλτική ζώνη	Κεφ.3.1.1	Σελ.37
Σχήμα 3.3	Τρισδιάστατο μοντέλο όγκου εδάφους σε διακριτά τμήματα	Κεφ.3.1.1	Σελ.38
Εικόνα 3.5	Έντονα κερματισμένη και αποδιοργανωμένη βραχώμαζα από επιπλευτικές κινήσεις και τεκτονικά ράκη	Κεφ.3.2.1	Σελ.40
Εικόνα 3.6	Χαοτικό μίγμα και γεωυλικά επώθησης	Κεφ.3.2.2	Σελ.41
Εικόνα 3.7	Αστοχία τεχνικού έργου που θεμελιώνεται σε ιζήματα του φλύσχη	Κεφ.3.2.2	Σελ.42
Εικόνα 3.8	Αστοχία σε σχηματισμούς των νεογενών σε τμήμα του δρόμου Διακοφτού – Καλαβρύτων	Κεφ.3.2.2	Σελ.43
Εικόνα 3.9	Σχηματισμός μολάσας	Κεφ.3.2.3	Σελ.44

	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ	ΚΕΦΑΛΑΙΟ	ΣΕΛΙΔΑ
Σχήμα 3.4	Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής (GSI) για σχάσιμη μολάσσα κυρίως σε επιφανειακές εκσκαφές	Κεφ.3.2.3	Σελ.45
Σχήμα 3.5	Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής (GSI) για σχάσιμη μολάσσα κυρίως σε σήραγγες	Κεφ.3.2.3	Σελ.46
Εικόνα 3.10	Αστοχίες σε πρανή με υλικά του μανδύα και κορήματα	Κεφ.3.2.4	Σελ.48
Εικόνα 3.11	Μεταθετική ολίσθηση σε υλικά της ζώνης αποσάθρωσης και κερματισμού σχιστολίθων	Κεφ.3.2.4	Σελ.48
Σχήμα 3.6	Πίνακας με κατηγορίες και περιγραφή του αποσαθρωμένου γρανίτη Malanjhand στην περιοχή της βόρειας Ινδίας	Κεφ.3.2.4	Σελ.50
Σχήμα 3.7	Διάγραμμα διακύμανσης της ορυκτολογικής σύστασης του αποσαθρωμένου γρανίτη Malanjhand στην περιοχή της βόρειας Ινδίας	Κεφ.3.2.4	Σελ.51
Σχήμα 3.8	Διάγραμμα διακύμανσης της ορυκτολογικής σύστασης του αποσαθρωμένου βασάλτη Nagpur στην περιοχή της βόρειας Ινδίας	Κεφ.3.2.4	Σελ.52
Σχήμα 3.9	Διάγραμμα διακύμανσης της ορυκτολογικής σύστασης του αποσαθρωμένου χαλαζίτη Delhi στην περιοχή της βόρειας Ινδίας	Κεφ.3.2.4	Σελ.53
Σχήμα 3.10	Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης του γρανίτη Malanjhand για διάφορους βαθμούς αποσάθρωσης	Κεφ.3.2.4	Σελ.54
Σχήμα 3.11	Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης του βασάλτη Nagpur για διάφορους βαθμούς αποσάθρωσης	Κεφ.3.2.4	Σελ.54
Σχήμα 3.12	Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης του χαλαζίτη Delhi για διάφορους βαθμούς αποσάθρωσης	Κεφ.3.2.4	Σελ.54
Σχήμα 3.13	Πίνακας ταξινόμησης των βαθμών αποσάθρωσης βασισμένο στην γενική παρατήρηση της αστοχίας του γεωυλικού κάτω από μονοαξονική θλίψη στον γρανίτη Malanjhand, στον βασάλτη Nagpur και στον χαλαζίτη Delhi	Κεφ.3.2.4	Σελ.55
Σχήμα 3.14	Διάγραμμα παραμόρφωσης σήραγγας - λογου σcm/ro κατά την εκσκαφή σε οφιολιθικό σύμπλεγμα	Κεφ.3.2.5	Σελ.58
Σχήμα 4.1	Διάγραμμα πρώτης εκτίμησης της αναμενόμενης παραμόρφωσης σε σήραγγα και των απαιτούμενων μέτρων προσωρινής υποστήριξης	Κεφ.4.1.1	Σελ.60
Σχήμα 4.2	Διάγραμμα συμπεριφοράς της βραχώμαζας στις σήραγγες (TBC)	Κεφ.4.1.1	Σελ.61
Σχήμα 4.3	Σχηματική τομή επάλληλες επωθήσεις (overthrusts) στις κεντρικές Άλπεις	Κεφ.4.1.2	Σελ.64
Σχήμα 4.4	Πίνακας με το φάσμα τιμών GSI για περιδοιτικούς τύπους βραχομάζας του οφιολιθικού συμπλέγματος	Κεφ.4.1.2	Σελ.65

	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ	ΚΕΦΑΛΑΙΟ	ΣΕΛΙΔΑ
Σχήμα 4.5	Πίνακας με το εύρος τιμών GSI για βασαλτικές “pillow lavas”	Κεφ.4.1.2	Σελ.67
Σχήμα 4.6	Πίνακας ταξινόμησης της συμπεριφοράς των περιδοτιτών και σερπεντινιτιτών του οφιολιθικού συμπλέγματος του ελληνικού αλπικού ορογενούς κατά τη διάνοιξη σήραγγων	Κεφ.4.1.2	Σελ.68
Σχήμα 4.7	Παραδείγματα σε διαφορες περιοχές εφαρμογής της ολικής αντοχής της βραχομάζας για την εκτίμηση συγκλίσεων σε σήραγγα	Κεφ.4.1.2	Σελ.69
Σχήμα 4.8	Γεωλογικός χάρτης εκσκαφής σε ασθενή ασβεστόλιθο στην περιοχή του φράγματος Atatürk στην Τουρκία	Κεφ.4.1.2	Σελ.71
Σχήμα 4.9	Πίνακας ταξινόμησης RMR στη σήραγγα L1 σε ασθενή ασβεστόλιθο του φράγματος Atatürk στην Τουρκία	Κεφ.4.1.2	Σελ.72
Σχήμα 4.10	Πίνακας ταξινόμησης RMR στη σήραγγα L3A σε ασθενή ασβεστόλιθο του φράγματος Atatürk στην Τουρκία	Κεφ.4.1.2	Σελ.72
Σχήμα 4.11	Πίνακας με κατηγορίες και χαρακτηρισμό της βραχομάζας κατά την εκσκαφή σε ασθενή ασβεστόλιθο στην περιοχή του φράγματος Atatürk στην Τουρκία	Κεφ.4.1.2	Σελ.73
Σχήμα 4.12	Μηκοτομές κατά μήκος των στοών εκσκαφής L1 και L3A σε ασθενή ασβεστόλιθο στην περιοχή του φράγματος Atatürk στην Τουρκία	Κεφ.4.1.2	Σελ.74
Σχήμα 4.13	Πίνακας με γεωμηχανικές παραμέτρους σε ασβεστόλιθο στην περιοχή του φράγματος Atatürk στην Τουρκία	Κεφ.4.1.2	Σελ.75
Εικόνα 4.1	Φωτογραφία από την αστοχία στο κέλυφος υποστήριξης στη σήραγγα της Μεσοχώρας	Κεφ.4.1.2	Σελ.78
Εικόνα 4.2	Η θέση των διδύμων σηράγγων και του υπόγειου αυτοκινητοδρόμου Zand στο μετρό Σιράζ, στο Ιράν	Κεφ.4.1.2	Σελ.79
Σχήμα 4.14	Γεωλογικός χάρτης γύρω από την περιοχή κατασκευής υδροηλεκτρικού εργοστασίου κοντά σε σήραγγες στα Ιμαλάια	Κεφ.4.1.2	Σελ.80
Σχήμα 4.15	Η γεωλογία της περιοχής του φράγματος Katse	Κεφ.4.1.2	Σελ.81
Εικόνα 4.3	Τμήμα κατασκευής του φράγματος Katse στα μέσα του 1993	Κεφ.4.1.2	Σελ.82
Εικόνα 4.4	Η κατασκευή του φράγματος Katse στο τελικό του στάδιο, μέσα του 1995	Κεφ.4.1.2	Σελ.82
Σχήμα 4.16	Γεωλογικοί σχηματισμοί κατά μήκος των τριών σηράγγων στην περιοχή της Βόρειας Ιταλίας	Κεφ.4.1.2	Σελ.84
Σχήμα 4.17	Ταξινόμηση βραχομάζας με παραμέτρους δομής και αντοχής	Κεφ.4.1.2	Σελ.85
Εικόνα 4.5	Διαδικασίες φυσικής μοντελοποίησης με βάση την αξιολόγηση RD_i	Κεφ.4.1.2	Σελ.86

	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ	ΚΕΦΑΛΑΙΟ	ΣΕΛΙΔΑ
Σχήμα 4.18	Περιοχή στον χάρτη της θέσης του φράγματος Urus στην Τουρκία	Κεφ.4.1.2	Σελ.87
Σχήμα 4.19	Γεωτεχνικός χάρτης της περιοχής του φράγματος Urus	Κεφ.4.1.2	Σελ.88
Σχήμα 4.20	Η εξέλιξη της διάτρησης με TBM και η αντιμετώπιση των δυσκολιών που εμφανίζονται σε διατμήμενη βραχόμαζα από το έργο Cleuson - Dixence	Κεφ.4.1.2	Σελ.89
Εικόνα 4.6	Ειδική τεχνική που εφαρμόζεται κατά την κατασκευή ακριβώς πίσω από την κεφαλή του TBM από το έργο Cleuson – Dixence	Κεφ.4.1.2	Σελ.90
Σχήμα 4.21	Πίνακας χαρακτηρισμού της ποιότητας της βραχόμαζας σε σχέση με την παραμορφωσιμότητα. Ε σε φράγματα	Κεφ.4.2.1	Σελ.92
Σχήμα 4.22	Πίνακας χαρακτηρισμού βασικών τύπων βραχόμαζας ως “ασθενή” κατά την θεμελίωση φραγμάτων (Marinos 2012)	Κεφ.4.2.1	Σελ.92
Σχήμα 4.23	Τοποθεσία των περιοχών του έργου “Uri” και “Nathra-Jhakri” στους πρόποδες των Ιμαλαΐων στην Ινδία	Κεφ.4.2.2	Σελ.93
Σχήμα 4.24	Περιοχή του φράγματος Ramukluk στην Τουρκία	Κεφ.4.2.2	Σελ.94
Σχήμα 4.25	Θέσεις γεωτρήσεων και περιοχές έρευνας στο φράγμα Ramukluk στην Τουρκία	Κεφ.4.2.2	Σελ.95
Σχήμα 4.26	Τύποι αστοχίας σε φράγματα βαρύτητας	Κεφ.4.2.2	Σελ.96
Σχήμα 4.27	Τοποθετημένα βύσματα σκυροδέματος για βελτίωση της σταθερότητας σε φράγματα βαρύτητας	Κεφ.4.2.2	Σελ.96
Σχήμα 4.28	Τοποθεσία του φράγματος Three - Gorges των τριών φαραγγιών στην Κίνα	Κεφ.4.2.2	Σελ.97
Εικόνα 4.7	Περιοχή στα ανάντη κατά την κατασκευή του φράγματος Three - Gorges	Κεφ.4.2.2	Σελ.98
Σχήμα 4.29	Κάτοψη του έργου των τριών φαραγγιών του έργου Three - Gorges	Κεφ.4.2.2	Σελ.99
Σχήμα 4.30	Γεωλογικό μοντέλο στον τομέα 3 στο αριστερό τμήμα του φράγματος του έργου Three - Gorges	Κεφ.4.2.2	Σελ.100
Εικόνα 4.8	Περιοχή στα κατόντη του φράγματος κατά την κατασκευή του φράγματος Three - Gorges	Κεφ.4.2.2	Σελ.101
Σχήμα 4.31	Τοποθεσία της περιοχής του φράγματος Anamur στην Τουρκία	Κεφ.4.2.2	Σελ.102
Σχήμα 4.32	Γεωλογικά στοιχεία κατά μήκος της σήραγγας και του άξονα του φράγματος του φράγματος Anamur στην Τουρκία	Κεφ.4.2.2	Σελ.103
Σχήμα 4.33	Γεωλογικός χάρτης φλυσικών κολούβιων και ασβεστολιθικών κορημάτων στην περιοχή της κατολίσθησης της Τσακώνας, 2003	Κεφ.4.3.2	Σελ.105
Σχήμα 4.34	Όρια κατολίσθησης στην περιοχή της Τσακώνας, 2003	Κεφ.4.3.2	Σελ.106
Σχήμα 4.35	Αποτελέσματα ανάστροφων αναλύσεων πριν την μεγάλη κατολίσθηση και του συντελεστή ασφαλείας μετά την κατολίσθηση στην περιοχή της Τσακώνας, 2003	Κεφ.4.3.2	Σελ.107
Σχήμα 4.36	Αποτελέσματα συνοχής και γωνίας εσωτερικής τριβής στην περιοχή της κατολίσθησης της Τσακώνας, 2003	Κεφ.4.3.2	Σελ.107

	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ	ΚΕΦΑΛΑΙΟ	ΣΕΛΙΔΑ
Σχήμα 4.37	Περιοχή της κατολίσθησης του Rufi το 1999 στην Ελβετία	Κεφ.4.3.2	Σελ.109
Εικόνα 4.9	Αεροφωτογραφία της κατολίσθησης του Rufi το 1999	Κεφ.4.3.2	Σελ.110
Σχήμα 4.38	Σχηματική απεικόνιση πρανών σε βυθίσσεις κροκαλοπαγών και αποσαθρωμένων μαργών στην περιοχή κατολίσθησης στο Rufi, Ελβετία, 1999	Κεφ.4.3.2	Σελ.112
Εικόνα 4.10	Συχνότητα διαστρωμάτωσης των κροκαλοπαγών και των μαργών κατά μήκος των ορίων της κατολίσθησης του Rufi	Κεφ.4.3.2	Σελ.112
Σχήμα 4.39	Σχηματική απεικόνιση αποσαθρωμένων μαργών στην κατολίσθηση στο Rufi, Ελβετία, 1999	Κεφ.4.3.2	Σελ.113
Σχήμα 4.40	Πίνακας με τους βαθμούς αποσαθρωμένων στρωμάτων στην περιοχή κατολίσθησης στο Rufi, Ελβετία, 1999	Κεφ.4.3.2	Σελ.114
Σχήμα 4.41	Προσομοίωση της προοδευτικής αποσάθρωσης των σχηματισμών στο Rufi, Ελβετία	Κεφ.4.3.2	Σελ.115
Σχήμα 4.42	Κινητή πλατφόρμα που παρέχει πρόσβαση στα ανώτερα τμήματα των πρανών σε αυτοκινητόδρομους της Μασαχουσέτης	Κεφ.4.3.2	Σελ.118
Εικόνα 4.11	Φωτογραφίες που δείχνουν τις αστοχίες των πρανών του νότιου αυτοκινητοδρόμου Cross - Island στην Ταιβάν	Κεφ.4.3.2	Σελ.119
Σχήμα 4.43	Απλοποιημένος χάρτης της Τενερίφης με τις ηλικιακές διαφορές μεταξύ διαφορετικών γεωλογικών μονάδων	Κεφ.4.3.2	Σελ.121
Εικόνα 4.12	Λατυποπαγή με αλληλοκλείδωμα και πυροκλαστικά γεωυλικά με αλληλοκλείδωμα στην Τενερίφη	Κεφ.4.3.2	Σελ.122
Εικόνα 4.13	Γενική εικόνα από την περιοχή της κατολίσθησης στον κεντρικό αυτοκινητόδρομο μεταξύ Αργοστόλι - Πόρος	Κεφ.4.3.2	Σελ.123
Σχήμα 4.44	Τεκτονικές και λιθολογικές ζώνες των Άλπεων	Κεφ.4.3.2	Σελ.125
Σχήμα 4.45	Γεωγραφική τοποθεσία της λιγνιτικής λεκάνης Afsin – Elbistan στη ΝΑ Τουρκία	Κεφ.4.3.2	Σελ.126
Σχήμα 4.46	Το σύστημα ρηγμάτων κοντά στο Kizildag στη λεκάνη Afsin – Elbistan στη ΝΑ Τουρκία	Κεφ.4.3.2	Σελ.127
Εικόνα 4.15	Μία εικόνα από την αστοχία στο βορειοδυτικό τμήμα του πρανού στη λιγνιτική λεκάνη Afsin – Elbistan στη ΝΑ Τουρκία	Κεφ.4.3.2	Σελ.128
Σχήμα 4.47	Κύριες γεωλογικές δομές κατά μήκος του αυτοκινητόδρομου Alishan στην Ιαπωνία	Κεφ.4.3.2	Σελ.128
Εικόνα 4.16	Απομονωμένος λόφος και βαθιά χαράδρα πρανού στην περιφέρεια Σιτσούν της Κίνας	Κεφ.4.3.2	Σελ.130
Εικόνα 4.17	Παραμόρφωση σε βάθος 195 m εκατέρωθεν της κοιλάδας στην οροσειρά Qingzang	Κεφ.4.3.2	Σελ.131
Εικόνα 4.18	Η κατάσταση της βραχώμαζας σε βάθος των 136 m εκατέρωθεν της κοιλάδας στην οροσειρά Qingzang	Κεφ.4.3.2	Σελ.132