



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών

ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων»

**Υπόγεια εκμετάλλευση λατομείων ασβεστολίθου και μαρμάρου
Ζητήματα ευστάθειας οροφής και στύλων**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

της

Βώβου Θεοδώρας



Επιβλέπων Καθηγητής

Αλέξανδρος Ι. Σοφιανός

Αθήνα, Δεκέμβριος 2015



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών

ΔΠΜΣ «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων»

**Υπόγεια εκμετάλλευση λατομείων ασβεστολίθου και μαρμάρου
Ζητήματα ευστάθειας οροφής και στύλων**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

της

Βώβου Θεοδώρας

Επιβλέπων Καθηγητής

Αλέξανδρος Ι. Σοφιανός

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 18/12/2015

Αλέξανδρος Ι. Σοφιανός, Καθηγητής ΕΜΠ

Παύλος Νομικός, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Ανδρέας Μπενάρδος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2015

Περίληψη

Κύριο αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η παρουσίαση της εξορυκτικής δραστηριότητας σχετικά με την εκμετάλλευση υπόγειων λατομείων διακοσμητικών λίθων ανά τον κόσμο. Η εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση της διαθέσιμης ερευνητικής δραστηριότητας έχει απώτερο σκοπό τη συγκέντρωση ενός αριθμού μεθοδολογιών και τεχνικών ανάλυσης και την εξέταση εφαρμογής τους σε υπόγεια λατομεία, και συγκεκριμένα στο υπόγειο λατομείο μαρμάρου στον Διόνυσο Αττικής. Αρχικά, εξετάζονται σύγχρονες πρακτικές σχεδιασμού υπόγειων θαλάμων, όπως περιγράφονται στη διαθέσιμη βιβλιογραφία, ακολουθώντας τα κριτήρια και τις αρχές που διέπουν μια ασφαλή υπόγεια εκμετάλλευση. Η εγκυρότητα των προτεινόμενων μεθόδων που έχουν εφαρμοστεί σε υπάρχοντα λατομεία ελέγχεται μέσω των επί τόπου μετρήσεων που λήφθηκαν από τις τεχνικογεωλογικές έρευνες πεδίου. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα στάδια των μεθοδολογιών που ακολουθούνται για την ανάλυση ευστάθειας υπόγειων λατομείων ανά τον κόσμο.

Το σύνολο των τεχνικών που παρουσιάζονται εστιάζουν στην επίδραση των ασυνεχειών στη συμπεριφορά της βραχομάζας και, κατ' επέκταση, στην ανάγκη ορθής εκτίμησης των γεωμετρικών και γεωμηχανικών χαρακτηριστικών των ασυνεχειών για τη διασφάλιση της καθολικής ευστάθειας ενός υπόγειου θαλάμου. Η μελέτη ευστάθειας ενός υπόγειου λατομείου μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω διάφορων εμπειρικών, αναλυτικών και αριθμητικών προσεγγίσεων ανάλογα με τις ανάγκες του έργου υπό εξέταση. Η αριθμητική προσομοίωση που στηρίζεται σε επί τόπου μετρήσεις και στατιστικά δεδομένα επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό των απαραίτητων παραμέτρων για το σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση των στύλων και της οροφής ενός υπόγειου λατομείου.

Ο συνδυασμός εμπειρικών και αναλυτικών προσεγγίσεων με την αριθμητική προσομοίωση των γεωμετρικών και γεωμηχανικών παραμέτρων της βραχομάζας και των ασυνεχειών οδηγούν στον αποδοτικό σχεδιασμό ενός υπόγειου λατομείου. Συνοπτικά, τα αποτελέσματα των αναλύσεων που συγκεντρώθηκαν επιβεβαιώνουν ότι οι προτεινόμενες μεθοδολογίες μπορούν να εφαρμοστούν επιτυχώς σε υπάρχουσες και μελλοντικές εκμεταλλεύσεις υπόγειων λατομείων διακοσμητικών λίθων.

Abstract

The present thesis aims to offer a general view of underground dimensional stone quarrying as an emerging sector of the mining industry and propose a number of methodologies and techniques that can be successfully applied in underground quarries in Greece, and specifically at the Dionysso marble quarry. First, current design practices are examined, as they are described in the available literature, and a discussion regarding the principles for safe underground mining is presented. The validity of the proposed methods has been checked against in situ measurements. Then, the application of stability control methodologies on various underground quarries around the world, with an emphasis on marble quarries, is presented.

All of the presented tools and methodologies focus on the effect of joints in the rock mass and the importance of the correct interpretation of the geometrical and geomechanical properties of discontinuities towards a stable underground opening. Stability analyses of underground quarries can be carried out with different empirical, analytical and numerical approaches depending on the project examined. Numerical modeling based on both in situ measurements and statistical data permits accurate estimation of room-and-pillar parameters and effective stone pillar and roof design methods.

Overall, it is shown that the proposed methodologies and techniques can be successfully applied to existing and potential underground quarries. Application of the stability control criteria coupled with a step-by-step numerical evaluation of the qualitative geological parameters lead to an efficient design of the underground excavation.

Ευχαριστίες

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Αλέξανδρο Σοφιανό, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, για την ανάθεση του θέματος της εργασίας, την εμπιστοσύνη που μου έχει δείξει και τη συνεργασία που έχουμε αναπτύξει τα τελευταία χρόνια.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Υποψήφια Διδάκτωρ, κα. Παρασκευή Γιούτα-Μήτρα, για τη βοήθεια που μου προσέφερε ως προς την προσέγγιση του θέματος και για την καθοδήγηση σε κάθε φάση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παύλο Νομικό, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, και τον κ. Ανδρέα Μπενάρδο, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, για τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	v
Abstract.....	vi
Ευχαριστίες.....	vii
Πίνακας Περιεχομένων.....	ix
Λίστα Σχημάτων.....	x
Λίστα Εικόνων.....	xiii
Λίστα Πινάκων.....	xiii
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Υπόγεια εκμετάλλευση διακοσμητικών λίθων.....	1
1.2 Διάρθρωση εργασίας.....	3
2 Υπόγεια εκμετάλλευση λατομείων διακοσμητικών λίθων.....	5
2.1 Υπόγεια λατομεία ασβεστολίθου και μαρμάρου ανά τον κόσμο.....	5
2.2 Εκσκαφή και εκμετάλλευση υπόγειου λατομείου.....	11
2.3 Επίδραση ασυνεχειών στην ευστάθεια υπόγειου λατομείου.....	13
2.3.1 Εφαρμογή της τεχνικής της φωτοανάλυσης σε υπόγεια λατομεία μαρμάρου στην Τουρκία.....	14
2.3.2 Εφαρμογή τρισδιάστατης σάρωσης με λέιζερ σε υπόγειο λατομείο μαρμάρου στην Ιταλία.....	17
3 Σχεδιασμός και ανάλυση ευστάθειας υπόγειων λατομείων ασβεστολίθου και μαρμάρου.....	21
3.1 Εισαγωγή.....	21
3.2 Εμπειρικές μέθοδοι ανάλυσης υπόγειων θαλάμων.....	22
3.2.1 Εφαρμογή εμπειρικών σχέσεων σε λατομείο μαρμάρου στην Ισπανία.....	22
3.3 Αναλυτικές μέθοδοι ανάλυσης υπόγειων θαλάμων.....	29
3.3.1 Θεωρία Τεμαχίων για την εκτίμηση ευστάθειας υπόγειων ανοιγμάτων.....	29
3.4 Εφαρμογή αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων για την ανάλυση ευστάθειας υπόγειων λατομείων μαρμάρου στην Ιταλία.....	32
3.5 Συνδυασμός αριθμητικών μεθόδων για την προσομοίωση σύνθετης μορφολογίας και γεωμετρικών χαρακτηριστικών.....	37
4 Ευστάθεια οροφής θαλάμων σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις ασβεστολίθου.....	43
4.1 Εισαγωγή.....	43
4.2 Μηχανισμοί αστοχίας της άμεσης οροφής.....	44
4.3 Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας οροφής.....	45
4.4 Μελέτη ευστάθειας οροφής υπόγειων λατομείων στην Ισπανία.....	47
4.4.1 Διατύπωση του προβλήματος και μεθοδολογία ανάλυσης.....	47
4.4.2 Αστοχία οροφής σε εφελκυσμό.....	48
4.4.3 Ανάλυση του λατομείου Kampanzar.....	49
4.4.4 Ανάλυση του λατομείου Calzada.....	52
4.4.5 Συμπεράσματα.....	53
4.5 Μελέτη ευστάθειας οροφής υπογείων λατομείων στις ΗΠΑ.....	54
5 Υπόγεια εκμετάλλευση του λατομείου μαρμάρου στον Διόνυσο Αττικής.....	63

5.1 Γεωλογικά και τοπογραφικά στοιχεία για το λατομείο	63
5.2 Στάδια της υπόγειας εξόρυξης και μέτρα υποστήριξης	66
5.3 Ιδιότητες του Πεντελικού μαρμάρου και των κύριων συστημάτων ασυνεχειών	69
5.4 Αριθμητική προσομοίωση του υπόγειου λατομείου	70
5.4.1 Περιγραφή του κώδικα διακριτών στοιχείων <i>3DEC</i> και του μοντέλου που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο ανάλυσης του υπόγειου λατομείου	71
5.5 Μελλοντική εκμετάλλευση του λατομείου στον Διόνυσο Αττικής	74
6 Συμπεράσματα.....	77
Βιβλιογραφία	83

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Τομή και θέση εισόδου του λατομείου Danby (Πηγή: www.vermontquarries.com).....	6
Σχήμα 2.2 Κάτοψη της εκμετάλλευσης του λατομείου Danby στο Βερμόντ των Ηνωμένων Πολιτειών με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων (Πηγή: www.anr.state.vt.us).....	6
Σχήμα 2.3 Γεωλογικός χάρτης του αντικλίνου Estremoz και θέση των υπόγειων λατομείων μαρμάρου (Carvalho, et al., 2008)	8
Σχήμα 2.4 Λεκάνες μαρμάρου Carrara (α) (από Baroni et al., 2010) και άποψη λατομείου μαρμάρου Carrara (β) (Πηγή: https://artislimited.wordpress.com/2013/08/07/carrara-a-marble-quarry-at- night/).....	9
Σχήμα 2.5 Τρισδιάτατο μοντέλο υπόγειου λατομείου μαρμάρου τριών επιπέδων (Careddu et al., 2010).....	9
Σχήμα 2.6 Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου θαλάμων και στύλων για την εκμετάλλευση υπόγειων λατομείων.....	11
Σχήμα 2.7 Σχηματική απεικόνιση των τριών κύριων επιπέδων ενός ογκομαρμάρου και είδη κοπής ανάλογα με τον προσανατολισμό του μετώπου (Πηγή: www.marmaronet.com).....	12
Σχήμα 2.8 Μείωση αντοχής στύλου συναρτήσει γωνίας ασυνέχειας μεγάλης κλίμακας για διάφορες τιμές του λόγου W/H (Esterhuizen et al., 2011)	13

Σχήμα 2.9 Θέση των υπόψη λατομείων μαρμάρου (από Nefeslioglu et al., 2006)	14
Σχήμα 2.10 Σχηματική απεικόνιση του ανοίγματος μεταξύ τριών συστημάτων ασυνεχειών	15
Σχήμα 2.11 Θέση του υπόψη λατομείου στην περιοχή Massa-Carrara της Ιταλίας (από Vanneschi et al., 2014).....	17
Σχήμα 2.12 Τρισδιάστατο μοντέλο του υπόγειο λατομείου, θέση εισόδου του λατομείου και θέση του μαρμαροφόρου κοιτάσματος (μπλε χρώμα) (Vanneschi et al., 2014)	18
Σχήμα 3.1 Επίδραση επιφάνειας αδυναμίας στην αντοχή του στύλου (Gonzalez-Nicieza et al., 2006)	25
Σχήμα 3.2 Μορφές αστοχίας των στύλων του υπόγειο λατομείου μαρμάρου (Gonzalez-Nicieza et al., 2006).....	26
Σχήμα 3.3 Κάτοψη του πρώτου επιπέδου του λατομείου και των στύλων που αστοχούν (Gonzalez-Nicieza et al., 2006)	28
Σχήμα 3.4 Κάτοψη του δεύτερου επιπέδου του λατομείου και των στύλων που αστοχούν (Gonzalez-Nicieza et al., 2006)	28
Σχήμα 3.5 Γραφική μέθοδος επίλυσης της Θεωρίας Τεμαχίων (Goodman & Shi, 1985)	29
Σχήμα 3.6 Τεμάχια-κλειδιά σε υπόγειο άνοιγμα (Goodman & Shi, 1985)	30
Σχήμα 3.7 Κατηγορίες τεμαχίων σύμφωνα με τη Θεωρία Τεμαχίων (Goodman & Shi, 1985)	32
Σχήμα 3.8 Συντελεστής ασφάλειας ως συνάρτηση της συνοχής για σταθερή γωνία τριβής 25 (Ferrero et al., 2010)	34
Σχήμα 3.9 Συντελεστής ασφάλειας ως συνάρτηση της γωνίας τριβής για μηδενική συνοχή (Ferrero et al., 2010)	34
Σχήμα 3.10 Γεωμετρία εκσκαφής και διακριτοποίηση του τριδιάστατου μοντέλου στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Straus 7 (Ferrero et al., 2010).....	36
Σχήμα 3.11 Κατακόρυφες τάσεις σε έναν από τους στύλους της υπόγειας εκμετάλλευσης (Ferrero et al. 2010).....	36
Σχήμα 3.12 Χάρτης με τη θέση των στύλων και τις τιμές του συντελεστή ασφάλειας που υπολογίστηκε για τον καθένα (Ferrero et al., 2010)	37
Σχήμα 3.13 Κατακόρυφη τάση συναρτηθεί της απόστασης από αριστερό τοίχωμα του στύλου (από Fomaro et al., 2001).....	39
Σχήμα 3.14 Τρισδιάστατο μοντέλο και γεωμετρία του λατομείου Ravaccione (Ferrero et al., 2013)	40
Σχήμα 3.15 Κατακόρυφη τάση μετά την εκσκαφή (Ferrero et al., 2013)	40

Σχήμα 4.1 Μηχανισμοί αστοχίας λόγω στρωσιγένειας (Σοφριανός και Καπένης, 1999, από τον Sterling, 1980)	45
Σχήμα 4.2 Λόγος πάχους/ανοίγματος οροφής για διαφορετικές τιμές του ειδικού βάρους της βραχομάζας (Alcalde-Gonzalo et al., 2013).....	49
Σχήμα 4.3 Ωφέλιμο τμήμα της οροφής μετά την αστοχία για το λατομείο Kampanzar (Alcalde-Gonzalo et al., 2013).....	51
Σχήμα 4.4 Νέο πάχος οροφής έπειτα από προσαρμογή του ουδέτερου άξονα και δημιουργία αψίδας θλιπτικών τάσεων (Alcalde-Gonzalo et al., 2013).....	51
Σχήμα 4.5 Κατανομή κατακόρυφων τάσεων στο FLAC 2D για το λατομείο Calzada (Alcalde-Gonzalo et al., 2013).....	52
Σχήμα 4.6 Νέο πάχος οροφής του λατομείου Calzada για άνοιγμα πάνω από 50 μέτρα (Alcalde-Gonzalo et al., 2013).....	53
Σχήμα 4.7 Χάρτης της Βόρειας Αμερικής που απεικονίζει τις Εσωτερικές Πεδιάδες (κόκκινο χρώμα) (αριστερά) (Πηγή: www.wikipedia.org) και τμήμα του χάρτη της Αμερικής με τις πολιτείες (μωβ χρώμα) που βρίσκονται στα Απαλάχια Υψίπεδα (Πηγή: www.learner.org).....	54
Σχήμα 4.8 Προσεγγιστικές τοποθεσίες των 34 υπογείων ασβεστολιθικών λατομείων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη ευστάθειας οροφής (Esterhuizen et al., 2011)	55
Σχήμα 4.9 Κατανομή διαστάσεων ανοίγματος οροφής που σε 34 ασβεστολιθικά λατομεία (Esterhuizen et al., 2011)	58
Σχήμα 4.10 Επίδραση του πάχους της άμεσης οροφής στην ευστάθεια του θαλάμου (Esterhuizen et al., 2011)	59
Σχήμα 5.1 Κάτοψη του Υπογείου 1 και θέση εισόδων (από Παπαμαργαρίτη και Τσάγκα, 2012).....	64
Σχήμα 5.2 Ενδεικτική απεικόνιση του λατομείου Διονύσου Αττικής (στοιχεία από την Α.Ε.Β.Ε Λατομείων Μαρμάρου Διονύσου-Πεντέλης).....	65
Σχήμα 5.3 Κάτοψη του Υπογείου 2 και θέση εισόδων (στοιχεία από την Α.Ε.Β.Ε Λατομείων Μαρμάρου Διονύσου-Πεντέλης)	66
Σχήμα 5.4 Τομή T4-T4' της εκμετάλλευσης του λατομικού χώρου Δ (στοιχεία από την Α.Ε.Β.Ε Λατομείων Μαρμάρου Διονύσου-Πεντέλης)	67
Σχήμα 5.5 Κάτοψη του υπό μελέτη υπογείου και θέση των μηκυσιομέτρων και τασιομέτρων (αριστερά) και μοντέλο που κατασκευάστηκε στο 3DEC στο πλαίσιο της ανάλυσης (δεξιά)(Exadaktylos et al., 2007).....	73
Σχήμα 5.6 Κατακόρυφη τάση συναρτήσει του χρόνου εκσκαφής και σύγκριση των επί τόπου μετρήσεων μέσω των τασιομέτρων S_1 και S_2 με τα αποτελέσματα των αναλύσεων στο 3DEC (Exadaktylos et al., 2007).....	74

Σχήμα 5.7 Μετατόπιση συναρτήσεων του χρόνου εκσκαφής και σύγκριση των επί τούτου μετρήσεων των μηκυνσιομέτρων E_1 και E_2 με τα αποτελέσματα των αναλύσεων στο 3DEC (Exadaktylos et al., 2007)	74
Σχήμα 5.8 Γεωμετρία του μοντέλου του υπόγειου λατομείου που δημιουργήθηκε στο 3DEC (Τσουβαλά, 2009).....	75
Σχήμα 5.9 Κατακόρυφη τάση συναρτήσεων του χρόνου εκσκαφής για 10 στάδια εκσκαφής (Τσουβαλά, 2009).....	76

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 2.1 Θέσεις εισόδων για το υπόγειο λατομείο στον Διόνυσο Αττικής (Πηγή: www.oryktosploutos.net)	7
Εικόνα 2.2 Υπόγεια λατομεία μαρμάρου στην Ιταλία όπου η εξόρυξη πραγματοποιείται με κοπή στο επίπεδο που είναι κάθετο προς τη στρώση του μαρμάρου(από Carmignani et al., 2005).....	12
Εικόνα 2.3 Εικόνα από το βοηθητικό πρόγραμμα Leica TruView με τις συντεταγμένες σημείων που αντιστοιχούν σε ρήγμα που διέρχεται από το υπόγειο λατομείο (Vanneschi et al., 2014)	19
Εικόνα 4.1 Ευσταθής οροφής υπογείου θαλάμου (αριστερά) και ασταθής υπόγειος θάλαμος (δεξιά) που έχει υποστεί κατάπτωση οροφής (Esterhuizen et al., 2007)	60
Εικόνα 5.1 Πανοραμική άποψη του λατομείου μαρμάρου στον Διόνυσο Αττικής (από Παπαμαργαρίτη και Τσάγκα, 2012)	63
Εικόνα 5.2 Κοχλίωση οροφής στο λατομείο Διονύσου (στοιχεία από την Α.Ε.Β.Ε Λατομείων Μαρμάρου Διονύσου-Πεντέλης)	68

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1.1 Παράμετροι που επηρεάζουν την επιλογή υπόγειας εκμετάλλευσης (Fornaro & Lovera, 2004).....	2
Πίνακας 2.1 Σύνολο υπόγειων λατομείων ασβεστολίθου και μαρμάρου ανά τον κόσμο και διαθέσιμα στοιχεία για την υπόγεια εκμετάλλευση σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές πηγές.....	10
Πίνακας 3.1 Μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας ενός υπόγειου λατομείου	21
Πίνακας 3.2 Παράμετροι ταξινόμησης και βαθμονόμησης σύμφωνα με το σύστημα RMR (Bieniawski, 1989) για τα δύο επίπεδα του λατομείου (Gonzalo-Nicieza et al., 2006).....	24
Πίνακας 3.3 Γεωμετρία των τεμαχίων που υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη Θεωρία Τεμαχίων (Ferrero et al., 2010)	35

Πίνακας 4.1 Πληροφορίες για τα ασβεστολιθικά λατομεία Kampanzar και Calzada (Alcalde-Gonzalo et al., 2013).....	47
Πίνακας 4.2 Δεδομένα για τη μελέτη ευστάθειας οροφής ασβεστολιθικών λατομείων (από Esterhuizen et al., 2007)	57
Πίνακας 4.3 Κατηγορίες αστοχιών οροφής (Esterhuizen et al., 2007).....	57
Πίνακας 4.4 Σύνοψη διαστάσεων υπογείων ασβεστολιθικών λατομείων (Esterhuizen et al., 2007)	58
Πίνακας 4.5 Περιγραφή των τεχνικών αξιολόγησης οροφής υπογείου θαλάμου (από Esterhuizen et al., 2007)	61
Πίνακας 5.1 Ιδιότητες μαρμάρου Διονύσου (σύμφωνα με εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης).....	69
Πίνακας 5.2 Ιδιότητες των πέντε κύριων συστημάτων ασυνεχειών (Exadaktylos et al., 2007).....	70
Πίνακας 6.1 Στοιχεία για τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά του βράχου στα υπό μελέτη υπόγεια λατομεία	80
Πίνακας 6.2 Στοιχεία για τις διαστάσεις των θαλάμων και στύλων για τα υπόγεια λατομεία υπό μελέτη	81

1 Εισαγωγή

1.1 Υπόγεια εκμετάλλευση διακοσμητικών λίθων

Η μέθοδος που επιλέγεται για την εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος καθορίζεται από παράγοντες που σχετίζονται με τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας, το γεωτεχνικό περιβάλλον, τη γεωμετρική διάταξη και την ευστάθεια του ανοίγματος. Παρόλο που μία επιφανειακή εκμετάλλευση χαρακτηρίζεται, σε γενικές γραμμές, από χαμηλό κόστος, τόσο η μείωση στα επιφανειακά αποθέματα μαρμάρου όσο και η αύξηση της ευαισθητοποίησης σε περιβαλλοντικά ζητήματα καθιστούν την υπόγεια εκμετάλλευση ως τη βέλτιστη δυνατή λύση (Aksoy & Onargan, 2006). Από την άλλη πλευρά, το υψηλό κόστος των αρχικών σταδίων μιας υπόγειας εκμετάλλευσης θα πρέπει να αξιολογηθεί προσεκτικά, λαμβάνοντας υπόψη ότι ένα μέρος του δυνητικά εκμεταλλεύσιμου πετρώματος θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη του υπόγειου χώρου.

Η υπόγεια εκμετάλλευση δύναται να αποτελεί εναλλακτική ή μοναδική λύση όταν το κοίτασμα βρίσκεται σε βραχώδεις περιοχές με ακανόνιστη γεωμορφολογία με μεγάλο πάχος υπερκειμένων ή όταν οι απαιτήσεις για την ασφάλεια και την εξασφάλιση ευστάθειας δεν επιτρέπουν την εξόρυξη με τη μέθοδο ανοικτού ορύγματος. Για την επίτευξη της βέλτιστης εκμετάλλευσης ενός σύνθετου υπόγειου περιβάλλοντος τεσσάρων διαστάσεων (τρεις χωρικές διαστάσεις και μια επιπλέον διάσταση του χρόνου λόγω αλληλουχίας της εκσκαφής), οι μελέτες για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του πετρώματος οφείλουν να περιλαμβάνουν τυποποιημένες δοκιμές εκτίμησης της αντοχής του πετρώματος και ταξινόμηση της ποιότητας της βραχομάζας, αποτύπωση των ασυνεχειών κατά την προχώρηση της εκσκαφής, και παρακολούθηση του εντατικού πεδίου (Exadaktylos, et al, 2007). Στην περίπτωση που τίθεται υπό συζήτηση η μελλοντική υπογειοποίηση ενός λατομείου, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη πλήθος παραγόντων που καθορίζουν αν αυτή η προσέγγιση είναι εφικτή. Ο Πίνακας 1.1 παρουσιάζει τα κριτήρια για την επιλογή της υπόγειας εκμετάλλευσης μαζί με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα για το καθένα.

Πίνακας 1.1 Παράμετροι που επηρεάζουν την επιλογή υπόγειας εκμετάλλευσης (Fornaro & Lovera, 2004)

Κριτήρια για την επιλογή υπόγειας εκμετάλλευσης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Χαρακτηριστικά της βραχομάζας	<ul style="list-style-type: none"> - Δυνατότητα επιλεκτικής εκμετάλλευσης του κοιτάσματος - Εκμετάλλευση του κοιτάσματος όταν η υπαίθρια εκμετάλλευση είναι μη πρακτική ή αντι-οικονομική 	<ul style="list-style-type: none"> - Απαίτηση μεγαλύτερης ακρίβειας των μεθόδων διερεύνησης υπεδάφους - Δυσκολία στην κατηγοριοποίηση και βαθμονόμηση της βραχομάζας - Πιθανές επιπλοκές κατά την εκσκαφή (παρουσία ρηγμάτων, εισροή υπόγειων υδάτων κλπ.)
Τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά	<ul style="list-style-type: none"> - Μη παρουσία προβλημάτων αστάθειας πρσανούς - Δυνατότητα εκμετάλλευσης ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών 	<ul style="list-style-type: none"> - Ενδελεχής μελέτη των φάσεων εκσκαφής - Ανάλυση ευστάθειας θαλάμων και στύλων - Ανάγκη για τεχνική καθοδήγηση από ανάλογη εμπειρία
Οικονομικοί παράγοντες	<ul style="list-style-type: none"> - Αποφυγή απομάκρυνσης των υπερκειμένων - Λιγότερη παραγωγή στείρων και πιθανότητα αποθήκευσης τους στο χώρο μετά την εκμετάλλευση - Μείωση κόστους για την περιβαλλοντική αποκατάσταση - Σχεδόν αμετάβλητη γεωμετρία της επιφάνειας 	<ul style="list-style-type: none"> - Υψηλότερο κόστος του έργου - Υψηλότερο κόστος και λιγότερη παραγωγή κατά τα πρώτα στάδια της εκμετάλλευσης - Μεγαλύτερη επένδυση - Κόστος για τα πρόσθετα κατασκευαστικά μέτρα υποστήριξης (αγκύρια κλπ)
Περιβαλλοντικοί παράγοντες	<ul style="list-style-type: none"> - Λιγότερες οπτικές επιπτώσεις - Δυνατότητα εκμετάλλευσης σε προστατευμένες περιοχές 	<ul style="list-style-type: none"> - Πιθανά μακροχρόνια προβλήματα αστάθειας - Πιθανή παρέμβαση στην υπάρχουσα κατάσταση των υπογείων υδάτων (πχ. μεταβολή της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου)

Κρίσιμος παράγοντας, επιπλέον, είναι η καθολική ευστάθεια του υπόγειου χώρου, που εξαρτάται από την ευστάθεια των στύλων και της οροφής. Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια συγκέντρωσης των διαθέσιμων μεθοδολογιών ανάλυσης της ευστάθειας υπόγειων λατομείων όπως έχουν εφαρμοστεί από διάφορους ερευνητές σε λατομεία διακοσμητικών λίθων, κυρίως ασβεστολίθου και μαρμάρου, ανά τον κόσμο.

1.2 Διάρθρωση εργασίας

Η εργασία είναι οργανωμένη σε έξι κεφάλαια. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στην υπόγεια εκμετάλλευση διακοσμητικών λίθων και αναφέρονται οι λόγοι που οδηγούν στην υπόγεια εκμετάλλευση.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στα υπάρχοντα μαρμαροφόρα και ασβεστολιθικά κοιτάσματα ανά τον κόσμο και περιγράφονται οι απαραίτητες προϋποθέσεις που καθορίζουν αν η υπόγεια εκμετάλλευση είναι εφικτή. Επιπλέον, δίνεται έμφαση στην επίδραση των ασυνεχειών στη γενικότερη συμπεριφορά ενός υπόγειου θαλάμου και γίνεται αναφορά σε καινοτόμες μεθοδολογίες καταγραφής και εντοπισμού των συστημάτων ασυνεχειών.

Το Κεφάλαιο 3 παρουσιάζει εμπειρικές, αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους για την ανάλυση ευστάθειας υπόγειων λατομείων.

Το Κεφάλαιο 4 εστιάζει στην οροφή υπόγειων θαλάμων και τους μηχανισμούς αστοχίας.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το υπόγειο λατομείο μαρμάρου στον Διόνυσο Αττικής, γίνεται αναφορά στις μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα και γίνεται πρόταση για τη μελλοντική εκμετάλλευση του λατομείου .

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από το σύνολο της βιβλιογραφίας που παρουσιάστηκε και γίνονται προτάσεις για την ανάλυση ευστάθειας των στύλων και της οροφής ενός υπόγειου λατομείου.

2 Υπόγεια εκμετάλλευση λατομείων διακοσμητικών λίθων

2.1 Υπόγεια λατομεία ασβεστολίθου και μαρμάρου ανά τον κόσμο

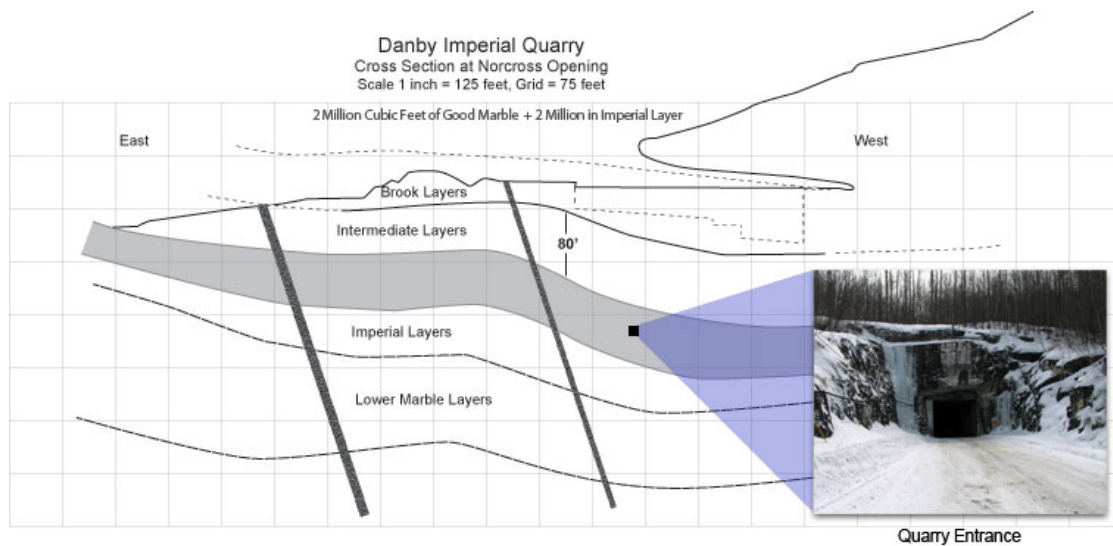
Οι διακοσμητικοί λίθοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες με βάση την αποξεστικότητα, δηλαδή τη φθοροποιό ικανότητά τους. Η μία κατηγορία περιλαμβάνει γρανίτες και παρόμοια λειαντικά πετρώματα, και η δεύτερη περιλαμβάνει μη αποξεστικά πετρώματα, κυρίως ανθρακικά όπως τα μάρμαρα (Mancini et al., 1995). Οι Carvalho et al. (2008) χωρίζουν τα διακοσμητικά πετρώματα στις εξής έξι ομάδες: γρανίτες, ασβεστόλιθοι, μάρμαρα, χαλαζιακά πετρώματα (ψαμμίτης, χαλαζιακός ψαμμίτης, χαλαζίτης), σχιστόλιθος, και άλλα πετρώματα που χρησιμοποιούνται σε πιο σπάνιες περιπτώσεις. Ανάλογα με τα φυσικά και τα ορυκτολογικά χαρακτηριστικά τους επιβάλλονται αντίστοιχοι περιορισμοί για τη χρήση τους σε εσωτερικούς ή εξωτερικούς, ιδιωτικούς ή δημόσιους χώρους.

Η υπόγεια εκμετάλλευση διακοσμητικών λίθων πραγματοποιείται από την αρχαιότητα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η εκμετάλλευση υπόγειων λατομείων της Αιγύπτου αρκετές χιλιάδες χρόνια προ Χριστού, η υπόγεια εκμετάλλευση των λατομείων μαρμάρου της Πάρου στην αρχαία Ελλάδα, όπως και η διάνοιξη πολλών υπόγειων ασβεστολιθικών λατομείων στην Ιταλία την περίοδο της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας (Fornaro & Bosticco, 1999). Τα τελευταία χρόνια, όλο και περισσότερα λατομεία εκμεταλλεύονται υπογείως με τη χρήση τεχνολογικών μέσων που δεν προκαλούν βλάβη στο υλικό, δηλαδή χωρίς τη χρήση εκρηκτικών υλών.

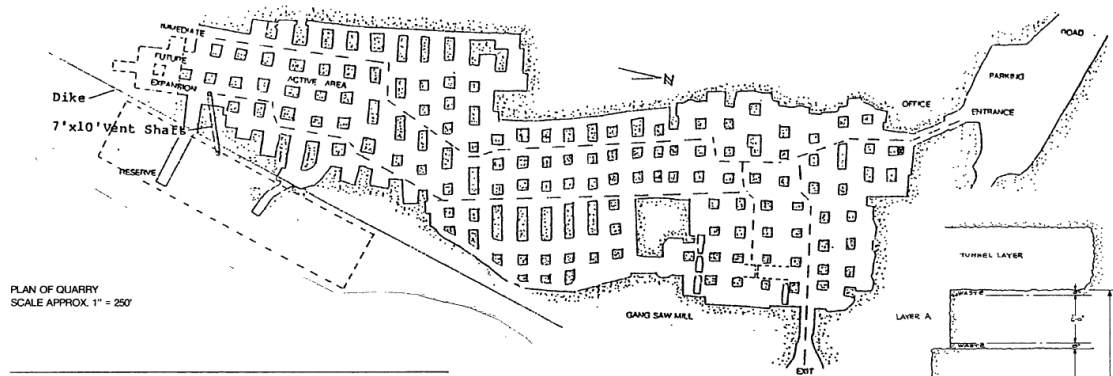
Το λατομείο Danby στο Βερμόντ των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής είναι το μεγαλύτερο υπόγειο λατομείο μαρμάρου στον κόσμο. Το λατομείο βρίσκεται στο βουνό Dorset και είναι σε συνεχή λειτουργία από το 1903. Το μάρμαρο Danby έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλά ιστορικά μνημεία και κτίρια, όπως στο Μνημείο του Λίνκολν στην Ουάσιγκτον και το κτίριο της Γερουσίας στην Ουάσιγκτον καθώς και σε άλλα ομοσπονδιακά και κρατικά κτίρια. Το μαρμαροφόρο κοίτασμα εμφανίζεται στη μια πλευρά του βουνού Dorset και βυθίζεται νότια προς το εσωτερικό του βουνού με κλίση περίπου 8% και βρίσκεται σε ευρεία αύλακα με πάχος έως 25 μέτρα στο κέντρο και πλάτος περίπου 150 μέτρα. Το κοίτασμα αποτελείται από

επτά διαφορετικές στρώσεις μαρμάρου, η διαφοροποίηση των οποίων οφείλεται στην απόθεση ασβεστολίθου τα προϊστορικά χρόνια και την παρουσία υπογείου νερού.

Η εξόρυξη του μαρμάρου ξεκινάει με οριζόντια διατρήματα και τη χρήση εκρηκτικών υλών για την εκσκαφή σήραγγας μέσα από τα υπερκείμενα στρώματα δολομιτικών και σχιστολιθικών σχηματισμών. Έπειτα, η απομάκρυνση των ογκομαρμάρων πραγματοποιείται με κατακόρυφα διατρήματα. Το μέσο τεμάχιο που απομακρύνεται έχει όγκο περίπου 5m^3 ($7 \times 5 \times 5 \text{ft}^3$) και ζυγίζει 15 τόνους. Η εκμετάλλευση του λατομείου πραγματοποιείται με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων, με εμβαδόν στύλου περίπου 2.8m^2 (30ft^2), ύψος 9 m και απόσταση μεταξύ στύλων περίπου 21 m (70 ft) από το κέντρο τους.



Σχήμα 2.1 Τομή και θέση εισόδου του λατομείου Danby (Πηγή: www.vermontquarries.com)



Σχήμα 2.2 Κάτοψη της εκμετάλλευσης του λατομείου Danby στο Βερμόντ των Ηνωμένων Πολιτειών με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων (Πηγή: www.anr.state.vt.us)

Τα αποθέματα μαρμάρων στην Ελλάδα χαρακτηρίζονται ως πρακτικά ανεξάντλητα, επομένως η εξορυκτική δραστηριότητα αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για το μέλλον της μαρμαροβιομηχανίας, ιδιαίτερα στο κομμάτι των εξαγωγών στις διεθνείς αγορές. Η ευρύτερη περιοχή της Αττικής είναι ένα από τα αρχαιότερα κέντρα εξόρυξης και κατεργασίας μαρμάρου τόσο στην Ελλάδα όσο και διεθνώς. Παρόλο που στην Ελλάδα η πλέον διαδεδομένη είναι η επιφανειακή εκμετάλλευση, το λατομείο μαρμάρου στον Διόνυσο Αττικής είναι το μόνο στο οποίο πραγματοποιείται υπόγεια εκμετάλλευση και εξορύσσεται το γνωστό από την αρχαιότητα λευκό Πεντελικό μάρμαρο. Η Εικόνα 2.1 απεικονίζει τις εισόδους του υπόγειου λατομείου. Περισσότερα στοιχεία για την υπόγεια εκμετάλλευση του λατομείου δίνονται στο Κεφάλαιο 5.

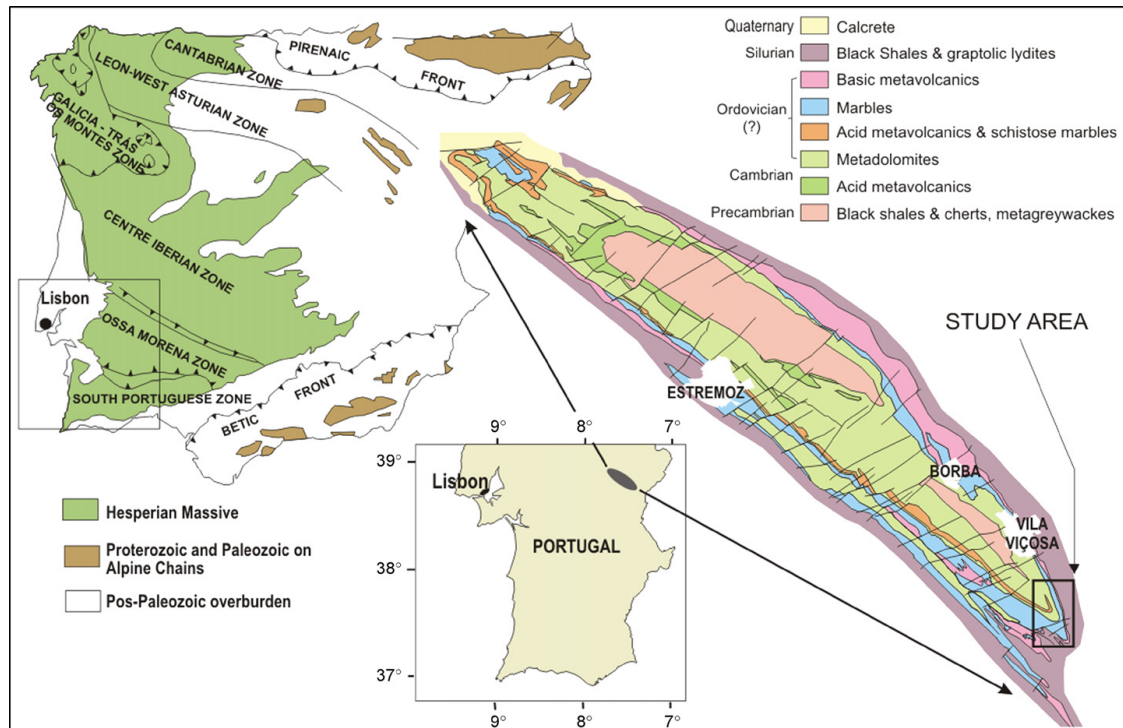


Εικόνα 2.1 Θέσεις εισόδων για το υπόγειο λατομείο στον Διόνυσο Αττικής (Πηγή: www.oryktosploutos.net)

Άλλες Ευρωπαϊκές χώρες στις οποίες η υπόγεια εκμετάλλευση, κυρίως μαρμάρου, είναι διαδεδομένη αποτελούν η Ιταλία, η Σλοβενία, στην οποία πραγματοποιείται υπόγεια εκμετάλλευση μαρμάρου από το 1993, και συγκεκριμένα βορειοδυτικά της Λιουμπλιάνα με ετήσια παραγωγή που ανέρχεται στα 500 m³ (Kortnik, 2009), το Βέλγιο, όπου γίνεται εξόρυξη μαρμάρου μαύρου χρώματος νοτιοδυτικά των Βρυξελλών, η Πορτογαλία και η Ισπανία, με σημαντικό αριθμό υπόγειων λατομείων.

Στην Πορτογαλία τα κοιτάσματα μαρμάρου εμφανίζονται κυρίως στην περιοχή Estremoz (Σχήμα 2.3), η οποία είναι αντικλινοειδής, με τοξοειδή μορφολογία και

καμπυλόγραμμο άξονα που βυθίζεται προς ΒΔ και ΝΑ. Ένα από τα λατομεία στα οποία πραγματοποιείται υπόγεια εκμετάλλευση είναι το λατομείο Pardais στην περιοχή Vila Vicosa (Matilde Costa e Silva & Falcao Neves, 2008).



Σχήμα 2.3 Γεωλογικός χάρτης του ανκλίνου Estremoz και θέση των υπόγειων λατομείων μαρμάρου (Carvalho, et al., 2008)

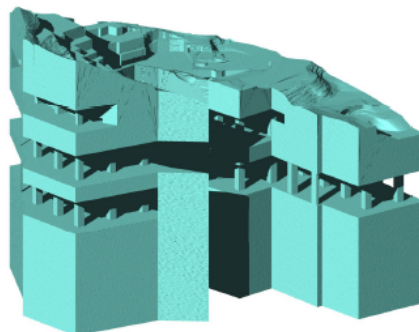
Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί έντονη ερευνητική δραστηριότητα για τη μελέτη υπόγειων λατομείων μαρμάρου στην Ιταλία, ιδιαίτερα αναφορικά με τις τεχνικογεωλογικές – γεωλογικές έρευνες πεδίου για θέματα ευστάθειας, τον προσδιορισμό των γεωμηχανικών χαρακτηριστικών της βραχομάζας για τη δημιουργία υπολογιστικών μοντέλων, καθώς και την εφαρμογή συστήματος γεωτεχνικής και τοπογραφικής παρακολούθησης (Cravero & Iabichino, 1997; Ferrero, Godio et al., 2007; Salvini, Vanneschi et al., 2015).

Στα Απέννινα Όρη, όπου πραγματοποιείται η εξόρυξη του περίφημου λευκού μαρμάρου της Carrara, περίπου το 10% των μαρμαροφόρων κοιτασμάτων εκμεταλλεύονται υπογείως με τη μέθοδο των θαλάμων και στύλων. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται ο χάρτης των λεκανών μαρμάρου Carrara στην περιφέρεια της Τοσκάνης και τα όρια μεταξύ τους. Μέχρι το 2010, στην περιοχή υπήρχαν 78 ενεργά λατομεία μαρμάρου, από τα οποία 10 ήταν υπόγεια (Baroni, et al., 2010).



Σχήμα 2.4 Λεκάνες μαρμάρου Carrara (α) (από Baroni et al., 2010) και άποψη λατομείου μαρμάρου Carrara (β)
(Πηγή: <https://artislimited.wordpress.com/2013/08/07/carrara-a-marble-quarry-at-night/>)

Αρκετοί ερευνητές έχουν αναγνωρίσει την αναγκαιότητα της υπόγειας εκμετάλλευσης κι έχουν προσπαθήσει να μελετήσουν το κατά πόσο είναι εφικτή η μελλοντική υπογειοποίηση υπάρχοντων επιφανειακών λατομείων. Η ερευνητική δραστηριότητα σχετικά με τη μελλοντική αξιοποίηση λατομείων μαρμάρου είναι συγκεντρωμένη κυρίως στην Τουρκία (Aksoy & Onargan, 2006; Kun et al., 2014) και την Ιταλία. Για παράδειγμα, το ζήτημα υπογειοποίησης ενός επιφανειακού λατομείου μελετήθηκε από τους Careddu et al. (2010) για το λατομείο μαρμάρου Orosei στη βορειοανατολική Σαρδηνία. Η εξόρυξη μαρμάρου στο υπόψη λατομείο ξεκίνησε τη δεκαετία του 1960 με ετήσια παραγωγή 300,000 κυβικά μέτρα μέχρι το 2010, όμως, με τη μέθοδο ανοικτού ορύγματος ήταν δυνατή η εκμετάλλευση μόνο του 12% του διαθέσιμου μαρμαροφόρου κοιτάσματος, επομένως κρίθηκε αναγκαία η μελέτη βαθμιαίας υπογειοποίησης του λατομείου.



Σχήμα 2.5 Τρισδιάτατο μοντέλο υπόγειου λατομείου μαρμάρου τριών επιπέδων (Careddu et al., 2010)

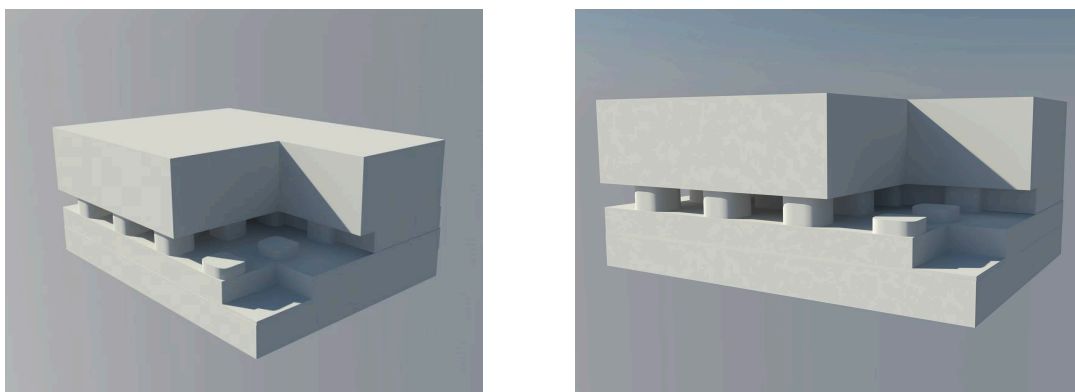
Ο Πίνακας 2.1 συγκεντρώνει όλα τα υπόγεια λατομεία, ενεργά και μη, που συγκεντρώθηκαν στην παρούσα εργασία από τις διαθέσιμες βιβλιογραφικές πηγές.

Πίνακας 2.1 Σύνολο υπόγειων λατομείων ασβεστολίθου και μαρμάρου ανά τον κόσμο και διαθέσιμα στοιχεία για την υπόγεια εκμετάλλευση σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές πηγές

Χώρα	Περιοχή	Αριθμός λατομείων	Ονομασία λατομείου	Είδος διακοσμητικού λίθου	Ενεργό (Ε) / Ανενεργό (Α) / Μελλοντική Εκμετάλλευση (ΜΕ)	Στοιχεία για τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά	Στοιχεία για τις ασυνέχειες	Στοιχεία για τις διαστάσεις του υπόγειου θαλάμου	Βιβλιογραφικές πηγές
Βέλγιο	Riemst	1	-	ασβεστόλιθος	A	OXI	OXI	OXI	Sergeant et al. (2016)
Ελλάδα	Πεντέλη	1	Λατομείο Διονύσου	λευκό μάρμαρο	E	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	Exadaktylos et al. (2007); Τσουβαλά (2009); επικοινωνία με ΑΕΒΕ Λατομείων Μαρμάρου Διονύσου-Πεντέλης (2014); Μοσκοφόγλου Π. (Μελέτη εκμετάλλευσης) (1990)
ΗΠΑ	Βερμόντ	1	Danby	λευκό μάρμαρο	E	OXI	OXI	ΝΑΙ	Agency of Natural Resources, State of Vermont
	Εσωτερικές Πεδιάδες, Απαλάχια Υψίπεδα	34	-	κυρίως ασβεστόλιθος		ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	Esterhuizen et al. (2000,2007,2011)
Ισπανία	Alicante, Νότια Ισπανία	1	-	μάρμαρο	E	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	Gonzalez-Nicieza et al. (2006)
	Arrasate, Gipuzkoa Villamartin de Vadeorras, Orense	2	Kampanzar, Calzada	ασβεστόλιθος	E	ΝΑΙ	OXI	ΝΑΙ	Alcade-Gonzalo et al. (2012)
Ιταλία	Lasa (Venosta Valley)	1	Acqua Bianca	λευκό μάρμαρο	E	ΝΑΙ	ΝΑΙ	OXI	Cravero et al. (1997)
	Valchiavenna, Sondrio,	1	Spluga Valley	πράσινος χαλαζιτής	E	OXI	OXI	ΝΑΙ	Formaro & Lovera (2004)
	Firenzuola, Φλωρεντία	-	-	ψαμμίτης	ME	OXI	OXI	OXI	Formaro & Lovera (2004)
	Massa, Carrara	4	Tavolini, Padulello, Piastrone, Gioia	μάρμαρο	E	OXI	ΝΑΙ	OXI	Carmignani et al. (2005)
	Stazzema (Lucca)	1	-	μάρμαρο	E	OXI	ΝΑΙ	ΝΑΙ	Ferrero et al. (2007)
	ΒΑ Σαρδηνία	1	Orosei	μάρμαρο	ME	OXI	ΝΑΙ	ΝΑΙ	Careddu et al. (2010)
	Viggiu, Varese	2	Beltrami, Danzi	ασβεστόλιθος	A	ΝΑΙ	ΝΑΙ	OXI	Ferrero et al. (2010)
	Laas (Lasa) στη βόρεια Ιταλία (50 km δυτικά της πόλης Bolzano)	3	Weisswassebruch Göflanerbruch	μάρμαρο	E	OXI	OXI	OXI	Unterwurzacher & Obojes (2012)
	Λεκάνες Carrara	2	Ravaccione Fantiscritti	μάρμαρο	E	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	Ferrero et al. (2013)
	Απέννινα Όρη, Massa Carrara	1	Romana	μάρμαρο	E	OXI	ΝΑΙ	OXI	Vanneschi et al. (2014)
	Ossola Valley, Βόρειες Ιταλικές Άλπεις	1	Candoglia	ροζ μάρμαρο	E	ΝΑΙ	OXI	ΝΑΙ	Oggeri & Oreste (2015) Borghi et al. (2015)
	Απέννινα Όρη	1	Lorano	μάρμαρο	E	OXI	ΝΑΙ	OXI	Salvini et al. (2015)
Πορτογαλία	Λεκάνη Alentejo	-	-	ροζ μάρμαρο	ME	ΝΑΙ	OXI	ΝΑΙ	Fomaro et al. (2001)
	Pardais, Vila Vicosa	1	-	μάρμαρο	ME	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	Matilde Costa e Silva & Falcao Neves (2008)
Σλοβενία	-	3	Hotavje, Lipica I, Doline	ασβεστόλιθος	E	OXI	OXI	OXI	Kortnik (2009)
	-	1	Lipica II			ΝΑΙ	OXI	OXI	Kos & Kortnik (2013)
Τουρκία	Beydaglari Autochthonous (ΝΔ Τουρκία)	1	-	ασβεστόλιθος	ME	ΝΑΙ	OXI	ΝΑΙ	Kun et al. (2014)

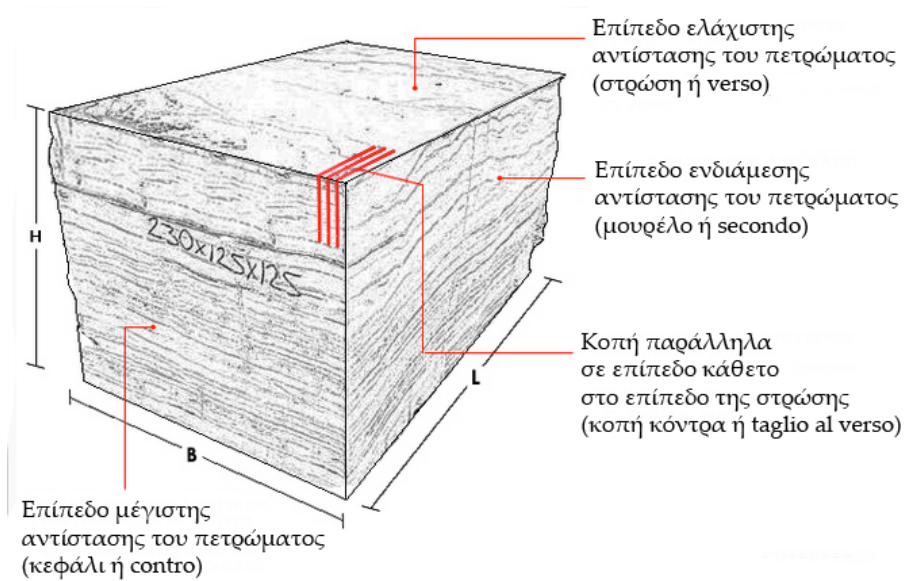
2.2 Εκσκαφή και εκμετάλλευση υπόγειου λατομείου

Η υπόγεια εκμετάλλευση πραγματοποιείται με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων και αρχίζει από υφιστάμενα μέτωπα εξόρυξης, δηλαδή πρόκειται για την επέκταση της επιφανειακής εκμετάλλευσης και το μετασχηματισμό της σε υπόγεια. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6, το πέτρωμα εξορύσσεται μέσω ενός συστήματος θαλάμων που διαμορφώνονται ως στοές σε παράλληλη διάταξη και διαχωρίζονται από στύλους του ίδιου πετρώματος, οι οποίοι αναλαμβάνουν τη στήριξη της οροφής. Η εκμετάλλευση με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων συνίσταται στο να πραγματοποιηθεί η εκσκαφή του υλικού διατηρώντας το δάπεδο της εκσκαφής σε σταθερό ύψος. Στόχος της μεθόδου είναι η μεταβίβαση των τάσεων από την περιοχή εκσκαφής στη γειτονική περιοχή χωρίς τη διατάραξη της ευστάθειας.



Σχήμα 2.6 Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου θαλάμων και στύλων για την εκμετάλλευση υπόγειων λατομείων

Το επίπεδο κατά το οποίο η κοπή του πετρώματος πραγματοποιείται ευκολότερα με κρούση ονομάζεται *στρώση* ή *verso*, είναι παράλληλο με το επίπεδο της σχιστότητας και αντιστοιχεί σε αυτό όπου τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος παρουσιάζουν τη χαμηλότερη τιμή. Το κάθετο επίπεδο στη στρώση ονομάζεται *μουρέλο* ή *secondo* και το πέτρωμα παρουσιάζει ενδιάμεση αντίσταση κατά την κοπή του ως προς αυτό. Το τρίτο επίπεδο, το οποίο είναι κάθετο ως προς τα δύο προηγούμενα, ονομάζεται *κεφάλι* ή *contro* και είναι αυτό κατά το οποίο το πέτρωμα παρουσιάζει τη μέγιστη αντίσταση κατά την κοπή. Η κοπή του μαρμάρου παράλληλα προς αυτήν την επιφάνεια δεν επιχειρείται για μηχανικούς και αισθητικούς λόγους.



Σχήμα 2.7 Σχηματική απεικόνιση των τριών κύριων επιπέδων ενός ογκομαρμάρου και είδη κοπής ανάλογα με τον προσανατολισμό του μετώπου (Πηγή: www.marmaronet.com)

Τα τρία κύρια επίπεδα που προαναφέρθηκαν είναι παράλληλα με τα αντίστοιχα κύρια επίπεδα των φυσικών ασυνεχειών του πετρώματος. Η απόφαση για την επιλογή του κατάλληλου προσανατολισμού του μετώπου συνδέεται με τα συστήματα ασυνεχειών και τη σχιστότητα, και οι επιφάνειες αυτές αποτελούν τα στοιχεία που προσδιορίζουν πού και πώς θα ξεκινήσει η υπόγεια εκμετάλλευση (Carmignani et al., 2005). Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα από λατομεία στα Απέννινα Όρη όπου επιλέχθηκε η κάθετη επιφάνεια στη στρώση (secondo) για το πρώτο στάδιο της υπόγειας εκμετάλλευσης. Οι μαύρες γραμμές υποδηλώνουν τον προσανατολισμό της στρώσης (verso).

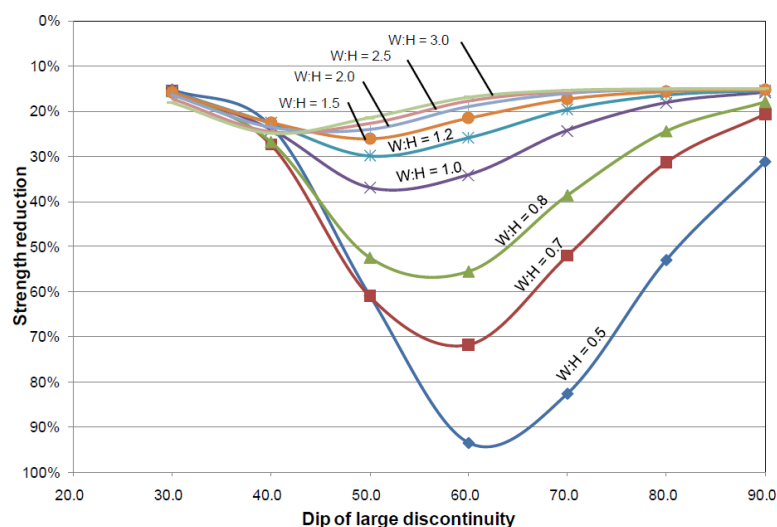


Εικόνα 2.2 Υπόγεια λατομεία μαρμάρου στην Ιταλία όπου η εξόρυξη πραγματοποιείται με κοπή στο επίπεδο που είναι κάθετο προς τη στρώση του μαρμάρου (από Carmignani et al., 2005)

2.3 Επίδραση ασυνεχειών στην ευστάθεια υπόγειου λατομείου

Η παρουσία ασυνεχειών επηρεάζει σημαντικά τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας μειώνοντας την ικανότητά της να παραλάβει φορτία σε αξονικές και διατμητικές κατευθύνσεις (Exadaktylos et al, 2006). Η γεωμετρία και φυσική συμπεριφορά των ασυνεχειών μιας ρωγματωμένης βραχομάζας είναι διαφορετική από εκείνη του άρρηκτου βράχου, και η αμέλεια απόδοσης του κατάλληλου βαθμού σπουδαιότητας συχνά οδηγεί σε εσφαλμένη ερμηνεία της συμπεριφοράς της βραχομάζας.

Η επίδραση ασυνεχειών μεγάλης κλίμακας στην αντοχή του στύλου έχει διερευνηθεί με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων, και η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων με την πραγματική συμπεριφορά του στύλου έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης τα τελευταία χρόνια (Esterhuizen, 2000, 2006). Οι Esterhuizen et al. (2011) κατασκεύασαν μια σειρά αριθμητικών μοντέλων για την προσομοίωση στύλων για διαφορετικές τιμές του λόγου πλάτους προς ύψος (W/H). Κάθε μοντέλο αποτελείται από μια ασυνέχεια μεγάλης κλίμακας που διέρχεται από το κέντρο του στύλου, με την παράταξη (strike) της ασυνέχειας, δηλαδή την τομή του επιπέδου της ασυνέχειας με το οριζόντιο επίπεδο, να είναι παράλληλη με τα άκρα του στύλου. Το Σχήμα 2.8 παρουσιάζει την ποσοστιαία μείωση της αντοχής του στύλου συναρτήσει της κλίσης των ασυνεχειών για ένα εύρος τιμών του λόγου W/H .



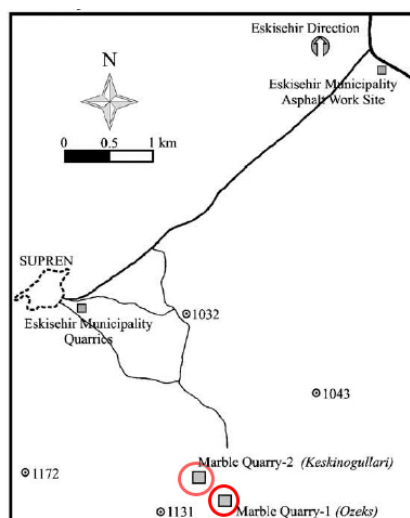
Σχήμα 2.8 Μείωση αντοχής στύλου συναρτήσει γωνίας ασυνέχειας μεγάλης κλίμακας για διάφορες τιμές του λόγου W/H (Esterhuizen et al., 2011)

Για λόγο W/H ίσο με 0.5 ο στύλος θα υποστεί μείωση της αντοχής κατά 95% αν τέμνεται από ασυνέχεια με κλίση 60° , ενώ σε στύλο με λόγο $W/H=1.0$ η μείωση θα είναι της τάξης του 34%. Ουσιαστικά, τα αποτελέσματα των αναλύσεων επιβεβαιώνουν ότι υπερβολικά υψίκορμοι στύλοι πρέπει να αποφεύγονται κατά το σχεδιασμό ενός υπόγειου θαλάμου.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα γίνει αναφορά σε διάφορες μεθόδους καταγραφής των συστημάτων ασυνεχειών και αξιολόγησης των κυριότερων παραμέτρων τους. Οι μεθοδολογίες και καινοτομίες που θα παρουσιαστούν έχουν εφαρμοστεί σε λατομεία ασβεστολίθου και μαρμάρου ανά τον κόσμο ως μέρος ερευνητικών προγραμμάτων.

2.3.1 Εφαρμογή της τεχνικής της φωτοανάλυσης σε υπόγεια λατομεία μαρμάρου στην Τουρκία

Ορισμένα πετρώματα, όπως το μάρμαρο, περιέχουν μικρότερο αριθμό ασυνεχειών και η συλλογή πληροφοριών από τις επί τόπου μετρήσεις για στατιστική ανάλυση είναι εξαιρετικά δύσκολη. Διάφορες συνθήκες αστάθειας, όπως για παράδειγμα οι καταπτώσεις βράχων ή η περίπλοκη τοπογραφία, προκαλούν δυσκολία του προσδιορισμού των απαραίτητων χαρακτηριστικών των ασυνεχειών. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, οι Nefeslioglu et al. (2006) εφήρμοσαν την τεχνική της φωτοανάλυσης για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των ασυνεχειών που χαρακτηρίζουν το μάρμαρο σε δύο λατομεία στην ευρύτερη περιοχή Eskisehir στη βορειοδυτική Τουρκία.

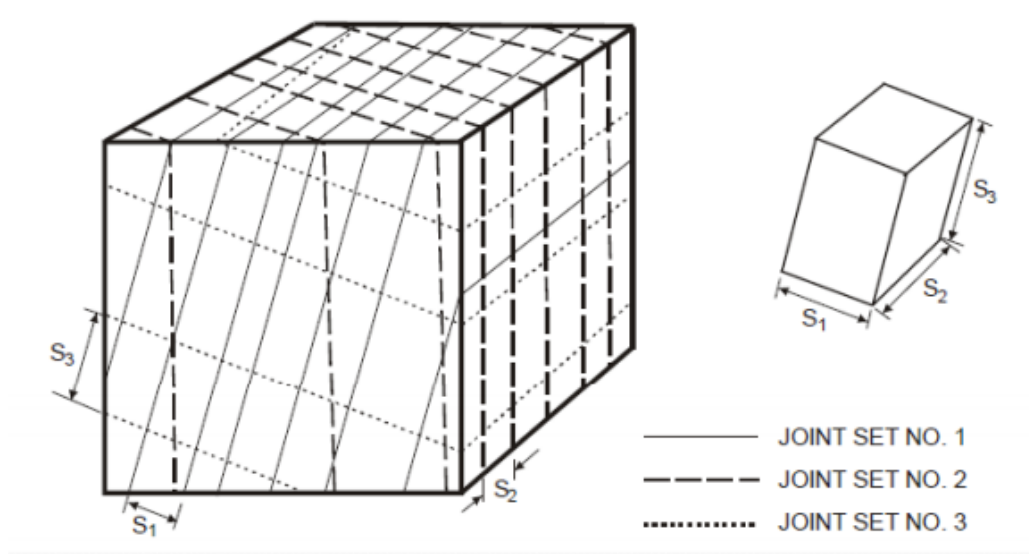


Σχήμα 2.9 Θέση των υπόψη λατομείων μαρμάρου (από Nefeslioglu et al., 2006)

Η εκτίμηση του μεγέθους και των διαστάσεων τεμαχίων βράχου πραγματοποιείται συχνά, όπως παρατηρείται στη βιβλιογραφία, με δύο προσεγγίσεις του Palmström (1982, 1995). Η πρώτη μέθοδος (Palmström, 1982) υπολογίζει τον ογκομετρικό βαθμό κερματισμού (J_v) για το σύνολο των συστημάτων που τέμνουν όγκο πετρώματος 1 m^3 και προκύπτει από το άθροισμα των συχνοτήτων ως εξής:

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots \quad (2.1)$$

όπου S_1, S_2, S_3 είναι το άνοιγμα μεταξύ των ασυνεχειών (Σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10 Σχηματική απεικόνιση του ανοίγματος μεταξύ τριών συστημάτων ασυνεχειών

(Πηγή: www.legah.ntua.gr)

Η δεύτερη μέθοδος (Palmström, 1995) αφορά στην εκτίμηση της σταθμισμένης πυκνότητας ασυνεχειών (wJd) για την ανάκτηση πληροφοριών από τις γεωτρήσεις. Η παράμετρος wJd υπολογίζεται σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$wJd = \frac{1}{\sqrt{A}} \sum \frac{1}{\sin \delta_i} = \frac{1}{\sqrt{A}} \sum f_i \quad (2.2)$$

$$wJd = \frac{1}{L} \sum \frac{1}{\sin \delta_i} = \frac{1}{L} \sum f_i \quad (2.3)$$

όπου δ η γωνία που σχηματίζεται από την τομή του επιπέδου παρατήρησης ή της γεώτρησης με τη μεμονωμένη ασυνέχεια, A είναι το μέγεθος της επιφάνειας υπό μελέτη, L το μήκος του τμήματος κατά μήκος του πυρήνα της γεώτρησης και f_i συντελεστής βαθμονόμησης.

Η μελέτη ξεκίνησε με το στάδιο της φωτοανάλυσης, κατά το οποίο πραγματοποιήθηκε ψηφιοποίηση ενός αριθμού φωτογραφιών που λήφθηκαν στα υπόψη δύο λατομεία. Στη συνέχεια, έγινε η μέτρηση των παραμέτρων των ασυνεχειών από τις ψηφιοποιημένες εικόνες και η αξιολόγηση των δεδομένων. Στην περιοχή δειγματοληψίας με εμβαδόν 1855 m^2 πραγματοποιήθηκε ψηφιοποίηση από 1118 ίχνη ασυνεχειών. Μετά την ολοκλήρωση της ψηφιοποίησης των ασυνεχειών, σημειώθηκαν φωτογραφικές γραμμές μέτρησης που τέμνουν τις ασυνέχειες και οι ιδιότητες κάθε τεμνόμενης ασυνέχειας μετρήθηκαν απευθείας από τις εικόνες. Το σύνολο των απαραίτητων στοιχείων αξιολογήθηκε στατιστικά και υπολογίστηκε ο δείκτης w/d για την εκτίμηση του μεγέθους των τεμαχίων που δημιουργούνται λόγω της παρουσίας των ασυνεχειών.

Τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν, έπειτα, για αναλύσεις παλινδρόμησης για την έρευνα της συσχέτισης μεταξύ του δείκτη w/d και των ιδιοτήτων των ασυνεχειών, όπως το μέσο άνοιγμα. Επιπλέον, στην προσπάθειά τους να παράγουν συμπεράσματα μέσα σε συνθήκες αβεβαιότητας, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν ασαφή συστήματα (fuzzy systems) για την πρόβλεψη του w/d , έτσι ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση του ανοίγματος και του βαθμού αποσάθρωσης στο μέγεθος των τεμαχίων.

Από το σύνολο των αναλύσεων παρατηρήθηκε ότι μεγάλες τιμές του ανοίγματος των ασυνεχειών, που προκαλούνται λόγω χημικής αποσάθρωσης, έχουν ως αποτέλεσμα τη μη-προβλεπόμενη ογκομετρική μείωση του μεγέθους των τεμαχίων που εκτιμώνται. Επομένως, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που προέκυψαν από τις αναλύσεις παλινδρόμησης μεταξύ του βαθμού επιφανειακής αποσάθρωσης και τις τιμές της ογκομετρικής μείωσης, μπορεί να υπολογιστεί η ογκομετρική μείωση τεμαχίου. Η εκτίμηση αυτής της παραμέτρου είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι η αδυναμία πρόβλεψης ακόμα και 1% ογκομετρικής μείωσης μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις στην οικονομική δραστηριότητα ενός λατομείου μαρμάρου.

2.3.2 Εφαρμογή τρισδιάστατης σάρωσης με λέιζερ σε υπόγειο λατομείο μαρμάρου στην Ιταλία

Ο σχεδιασμός μιας υπόγειας εκμετάλλευσης απαιτεί λεπτομερή γνώση της γεωμετρίας της ευρύτερης περιοχής μελέτης, καθώς και του γεωλογικού περιβάλλοντος. Οι ερευνητές Vanneschi et al. (2014) του Πανεπιστημίου Σιένα της Ιταλίας χρησιμοποίησαν την τρισδιάστατη τεχνική σάρωσης με λέιζερ με εφαρμογή σε υπόγειο λατομείο μαρμάρου που βρίσκεται στην περιοχή Massa-Carrara της Ιταλίας (Σχήμα 2.11).

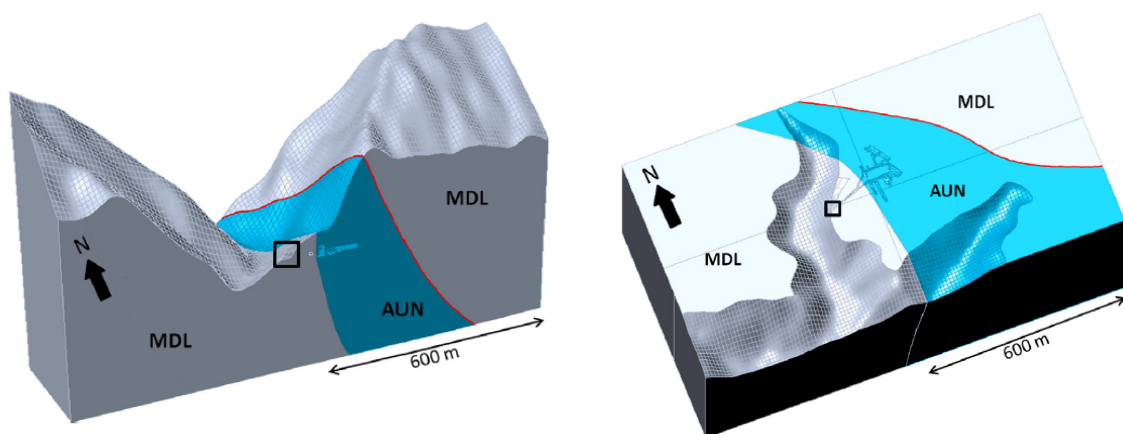


Σχήμα 2.11 Θέση του υπόψη λατομείου στην περιοχή Massa-Carrara της Ιταλίας (από Vanneschi et al., 2014)

Στόχος της μελέτης είναι να παρουσιάσει τις δυνατότητες καταγραφής και αποτύπωσης της γεωμετρίας του υπογείου χώρου και των χαρακτηριστικών των ασυνεχειών με χρήση επίγειας τρισδιάστατης σάρωσης (*TLS*) για τη δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου ενός υπόγειου λατομείου. Η εργασία εστιάζει στα στάδια της συλλογής των σημείων και της αξιολόγησης του τρισδιάστατου μοντέλου που προέκυψε. Η αποτύπωση του λατομείου πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των πολικών συντεταγμένων, εφόσον ήταν δυνατή η άμεση μέτρηση του μήκους προς το σκοπευόμενο σημείο, και με την τρισδιάστατη σάρωση με λέιζερ. Η αποτύπωση επιφανειών με τη μέθοδο *TLS* επιτυγχάνεται με τη σάρωση ως προς την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση. Λόγω της καταγραφής μεγάλου πλήθους σημείων ανά δευτερόλεπτο κατέστη δυνατή η λήψη όλων των απαραίτητων πληροφοριών με μεγάλη ακρίβεια και σε μικρό χρονικό διάστημα. Η συχνότητα καταγραφής των σημείων είναι συνάρτηση της τεχνικής προσέγγισης και της επιθυμητής ανάλυσης της σάρωσης κι έχει ως αποτέλεσμα τη τρισδιάστατη απεικόνιση του χώρου, που αποτελείται από πυκνά κατανεμημένα σημεία (νέφος σημείων).

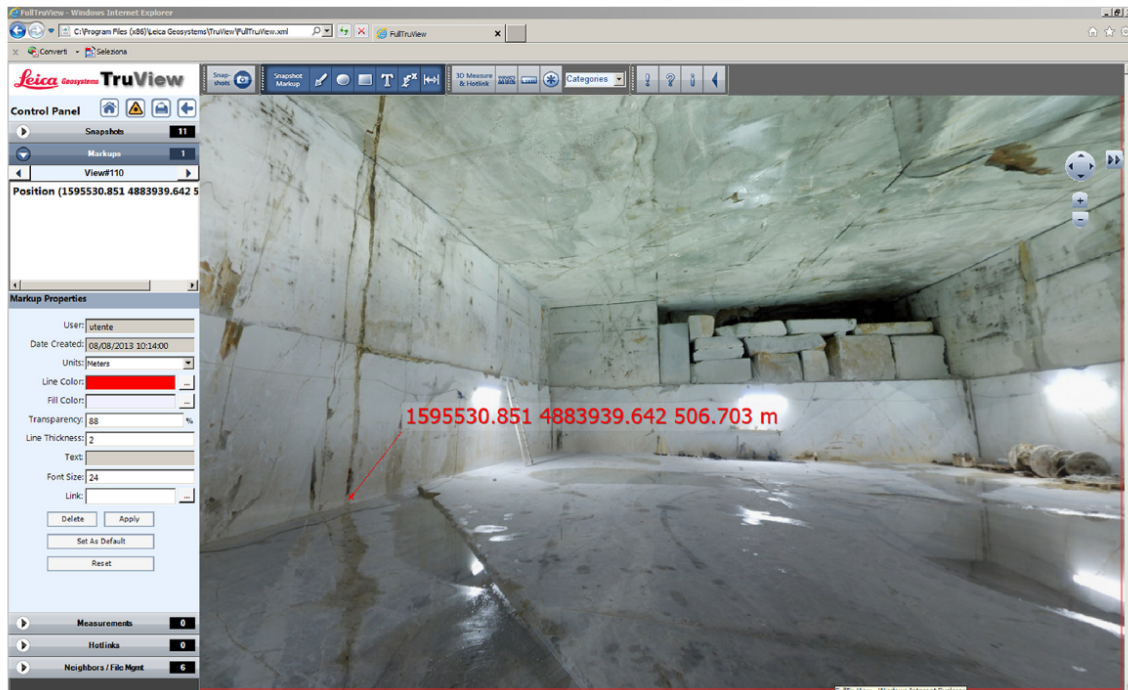
Με τη χρήση του προγράμματος *Leica Cyclone 8.0* ήταν δυνατή η δημιουργία γραμμικών στοιχείων που αντιπροσωπεύουν τους θαλάμους, στύλους, και όλα τα τμήματα που απαιτούνται για τη λεπτομερή τοπογραφική αποτύπωση ενός υπόγειου λατομείου. Το Σχήμα 2.12 απεικονίζει το τρισδιάστατο μοντέλο του λατομείου, το οποίο κατασκευάστηκε μετά από μια σειρά διορθώσεων λαμβάνοντας υπόψη τη γεωλογική έρευνα και χαρτογράφηση. Το μοντέλο αντιπροσωπεύει τα πραγματικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του λατομείου και τη θέση του σε σχέση με το μαρμαροφόρο κοίτασμα, το οποίο παρουσιάζεται με μπλε χρώμα.

Μετά την κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου κρίθηκε απαραίτητος ο προσδιορισμός των κύριων συστημάτων ασυνεχειών για την περαιτέρω ανάλυση της ευστάθειας του υπόγειου θαλάμου. Η καταγραφή των συστημάτων ασυνεχειών πραγματοποιήθηκε με το βοηθητικό πρόγραμμα *Leica TruView*, το οποίο αποδείχτηκε πολύ σημαντικό εργαλείο λόγω της υψηλής ανάλυσης των φωτογραφιών και της δυνατότητας αναγνώρισης και συλλογής συντεταγμένων των σημείων που αντιστοιχούν σε ασυνέχειες, ρήγματα και ρωγματώσεις. Το πρόγραμμα είχε τη δυνατότητα αποτύπωσης πολύπλοκων τμημάτων με μεγάλη λεπτομέρεια, συλλογή δεδομένων κάτω από συνθήκες χαμηλού φωτισμού αλλά και απουσίας σήματος του GPS. Επιπρόσθετα, είναι δυνατή η μέτρηση των συντεταγμένων τριών ή περισσότερων σημείων που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο με μια ασυνέχεια, και στη συνέχεια ο υπολογισμός της κλίσης και της γωνίας κλίσης του επιπέδου που τα περιέχει.



Σχήμα 2.12 Τρισδιάστατο μοντέλο του υπόγειο λατομείου, θέση εισόδου του λατομείου και θέση του μαρμαροφόρου κοίτασματος (μπλε χρώμα) (Vanneschi et al., 2014)

Όπως γίνεται αντιληπτό από την παραπάνω περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολούθησαν οι ερευνητές, η τρισδιάστατη σάρωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μια ακριβής, πολύ γρήγορη και χαμηλού κόστους διαδικασία. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η δυνατότητα λήψης πολύ μεγάλου αριθμού γεωμετρικών στοιχείων (εκατομμύρια σημεία), ακόμη και σε απρόσιτα τμήματα, και υψηλής ποιότητας πληροφορία σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.



Εικόνα 2.3 Εικόνα από το βοηθητικό πρόγραμμα Leica TruView με τις συντεταγμένες σημείου που αντιστοιχούν σε ρήγμα που διέρχεται από το υπόγειο λατομείο (Vanneschi et al., 2014)

3 Σχεδιασμός και ανάλυση ευστάθειας υπόγειων λατομείων ασβεστολίθου και μαρμάρου

3.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση ευστάθειας μιας υπόγειας εκμετάλλευσης βασίζεται στη μελέτη ευστάθειας της οροφής και των στύλων του υπόγειου θαλάμου και πραγματοποιείται με τις ακόλουθες προσεγγίσεις:

Πίνακας 3.1 Μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας ενός υπόγειου λατομείου

Τύπος ανάλυσης	Στόχος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Εμπειρικές Μέθοδοι	Διαστασιολόγηση των θαλάμων και στύλων μέσω απόδοσης κατάλληλου συντελεστή ασφάλειας	Βαθμονόμηση της βραχομάζας μέσω της επιλογής κατάλληλου κριτηρίου αντοχής Χρήση γραφημάτων και σχέσεων για την εκτίμηση της ευστάθειας στύλου	Εφαρμογή σε λατομεία που βρίσκονται κάτω από παρόμοιες συνθήκες με αυτές στις οποίες εφαρμόστηκαν οι σχέσεις
Αναλυτικές Μέθοδοι	Ερμηνεία της συμπεριφοράς υπόγειου ανοίγματος υπό φόρτιση και τον υπολογισμό του τασικού πεδίου της οροφής μέσω της θεωρίας ελαστικότητας	Προσδιορισμός επισφαλών τεμαχίων βράχου λόγω παρουσίας ασυνεχειών με τη Θεωρία Τεμαχίων (Block Theory) Δυνατότητα εκτίμησης της συμπεριφοράς οροφής στρωσιγενούς βραχομάζας (θεώρηση δοκού Voussoir)	Συχνά δύσκολη εφαρμογή λόγω του ότι δεν προσεγγίζεται με ακρίβεια η γεωμετρία ενός ανοίγματος, αλλά προσομοιώνεται με κύκλο ή έλλειψη (Τσουτρέλης et al., 1997)
Αριθμητικές Μέθοδοι	Πρόβλεψη παραμορφώσεων, υπολογισμός αντοχής στύλου, εκτίμηση ωφέλιμου ανοίγματος οροφής, ευστάθειας θαλάμου και φορτίων υποστήριξης	αξιολόγηση των συνθηκών τάσης-παραμόρφωσης της βραχομάζας και της υποστήριξης του υπογείου εξετάζοντας τη βραχομάζα ως συνεχές ή ασυνεχές μέσο	Αδυναμία πρόβλεψης της συμπεριφοράς της ρωγματομένης βραχομάζας όταν δε λαμβάνεται υπόψη η παρουσία ασυνεχειών

Η επιλογή των κατάλληλων μεθόδων εξαρτάται κυρίως από την ανάγκη ανάλυσης τοπικών ή καθολικών συνθηκών ευστάθειας. Συνήθως, κατά το σχεδιασμό ενός υπόγειου λατομείου, και ιδιαίτερα των στύλων, εΐθισται να χρησιμοποιείται κάποιο εμπειρικό σύστημα γεωμηχανικής ταξινόμησης της βραχομάζας και εμπειρικά νομογράμματα, πίνακες και σχέσεις. Ο μηχανικός εξετάζει τις επί τόπου γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες και προτείνει τον τρόπο εξόρυξης και τη διαστασιολόγηση των μέτρων υποστήριξης. Έπειτα, ακολουθούν οι αριθμητικές προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα των οποίων επιβεβαιώνονται μέσω αναλυτικών μεθόδων. Ο κύριος λόγος για τις δυσκολίες προσομοίωσης της βραχομάζας με οποιαδήποτε αριθμητική μέθοδο είναι ότι το πέτρωμα είναι ένα φυσικό γεωλογικό υλικό κι έτσι οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του δεν μπορούν να αποδοθούν ή να οριστούν μέσω μιας τυποποιημένης διαδικασίας, όπως γίνεται για παράδειγμα για τα μέταλλα.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται η προσέγγιση ανάλυσης ευστάθειας υπόγειων λατομείων με την εφαρμογή συνδυαστικών εμπειρικών, αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων, όπως συγκεντρώθηκαν από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία.

3.2 Εμπειρικές μέθοδοι ανάλυσης υπόγειων θαλάμων

3.2.1 Εφαρμογή εμπειρικών σχέσεων σε λατομείο μαρμάρου στην Ισπανία

Το αρχικό στάδιο του σχεδιασμού αφορά συνήθως στην εκτίμηση της αντοχής του στύλου και της τάσης που του ασκείται. Έπειτα, ακολουθεί η διαστασιολόγηση και η επιλογή του κατάλληλου συντελεστή ασφαλείας. Οι μέθοδοι σχεδιασμού που στηρίζονται σε εμπειρικές σχέσεις συνήθως είναι της μορφής:

$$S_p = S_0 \frac{a_p^\alpha}{H_p^\beta} \quad (3.1)$$

όπου S_p η αντοχή του στύλου σε θλίψη, S_0 η θλιπτική αντοχή δοκιμίου άρρηκτου βράχου, H_p και a_p το ύψος και το πλάτος του στύλου, αντίστοιχα, α και β εμπειρικές παράμετροι.

Ο συντελεστής ασφάλειας (SF) συνδέει τη μέση αντοχή του στύλου (S_p) με τη μέση τάση (σ_p) που του ασκείται ως εξής:

$$SF = \frac{S_p}{\sigma_p} \quad (3.2)$$

Ο συντελεστής ασφαλείας πρέπει να επιλέγεται με προσοχή διότι πρέπει να αντισταθμίζει τους αβέβαιους γεωλογικούς παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή της βραχομάζας και το εντατικό πεδίο (Esterhuizen et al., 2008). Οι εμπειρικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των παραμέτρων των στύλων υπόγειων θαλάμων, όπως αυτή της Εξίσωσης 3.2, δε λαμβάνουν υπόψη την ποιότητα της βραχομάζας, επομένως είναι δύσκολη η εφαρμογή τους σε διαφορετικές γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες από τις συγκεκριμένες που λήφθηκαν υπόψη για την τεκμηρίωση των σχέσεων.

Οι ερευνητές Gonzalez-Nicieza et al. (2006) του Πανεπιστημίου Οβιέδο της Ισπανίας πρότειναν την τροποποίηση των σχέσεων, ώστε ο υπολογισμός της αντοχής τους να λαμβάνει υπόψη την ποιότητα της βραχομάζας βάσει του δείκτη RMR (Bieniawski, 1989). Οι τροποποιημένες σχέσεις εφαρμόστηκαν, έπειτα, στη μελέτη ευστάθειας των στύλων ενός υπόγειου λατομείου μαρμάρου που βρίσκεται στην περιοχή Alicante στη νότια Ισπανία.

Το αρχικό στάδιο της ανάλυσης ευστάθειας των στύλων ήταν η αξιολόγηση της κατάστασης της βραχομάζας και των ασυνεχειών και η ταξινόμηση με το σύστημα RMR . Η εκμετάλλευση του λατομείου πραγματοποιείται σε δύο υψομετρικά επίπεδα, τα οποία έχουν διανοιχτεί με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων. Ο Πίνακας 3.2 παρουσιάζει τις μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας και των ασυνεχειών και τη βαθμονόμηση σύμφωνα με το σύστημα RMR για τα δύο επίπεδα εξόρυξης. Τα δύο επίπεδα εκμετάλλευσης έχουν μήκος 325 m και πλάτος 200 m. Το πρώτο επίπεδο βρίσκεται σε βάθος 100 m και το δεύτερο στα 150 m. Το μέσο άνοιγμα του θαλάμου είναι 18 m και οι διαστάσεις των στύλων είναι μεταβλητές, με ύψος 14-17 m, παράλο που σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπερνάει τα 20 m, και πλάτος 8-22 m. Οι δύο υπόγειοι θάλαμοι αποτελούνται από 37 και 24 στύλους, αντίστοιχα.

Πίνακας 3.2 Παράμετροι ταξινόμησης και βαθμονόμησης σύμφωνα με το σύστημα RMR (Bieniawski, 1989) για τα δύο επίπεδα του λατομείου (Gonzalo-Nicieza et al., 2006)

	Πρώτο επίπεδο (100 m)		Δεύτερο επίπεδο (150 m)	
Παράμετροι	Κατάσταση	Κατάταξη RMR	Κατάσταση	Κατάταξη RMR
Μονοαξονική θλιπτική αντοχή (σ_c) (MPa)	61	7	104	12
RQD (%)	75÷90	17	75÷90	17
Απόσταση ασυνεχειών (cm)	20÷60	10	20÷60	10
Συνέχεια (m)	3÷10	2	3÷10	2
Άνοιγμα	Κανένα÷1-5mm	6÷1	Κανένα÷1-5cm	6÷0
Τραχύτητα	Τραχεία	5	Λεία-Τραχεία	0÷5
Υλικό πλήρωσης	Σκληρό υλικό πλήρωσης <5mm	4÷6	Μαλακό υλικό πλήρωσης >5mm	0÷6
Νερό	Ξηρή-υγρή κατάσταση	10÷15	Υγρή κατάσταση - ροή στάγδην	4÷15
Αποσάθρωση	Ελαφρά αποσαθρωμένη επιφάνεια	5÷6	Ελαφρά αποσαθρωμένη επιφάνεια	5÷6
Δείκτης RMR		61÷74		50÷79

Η ευστάθεια των στύλων μελετήθηκε για δύο μηχανισμούς αστοχίας, και συγκεκριμένα για αστοχία λόγω θλίψης και διάτμησης. Η προτεινόμενη μέθοδος για την εκτίμηση του συντελεστή ασφάλειας των στύλων σε θλίψη βασίζεται στη σχέση του Hedley (1972):

$$S_p = S_0 \frac{a_p^{0.5}}{H_p^{0.75}} \quad (3.3)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, η θλιπτική αντοχή άρρηκτου δοκιμίου βράχου (S_0) αντικαθίσταται από την αντοχή της βραχομάζας (σ_{cm}) σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας του Sheorey (1997) για την εκτίμηση της αντοχής της βραχομάζας ως συνάρτηση του δείκτη RMR.

$$\sigma_{cm} = \sigma_c \cdot e^{\frac{RMR-100}{20}} \quad (3.4)$$

Η αστοχία του στύλου σε θλίψη επέρχεται όταν η τάση που του ασκείται ξεπεράσει την αντοχή του. Ο συντελεστής ασφάλειας, επομένως, υπολογίζεται σύμφωνα με τη θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας (Farmer, 1992) ως εξής:

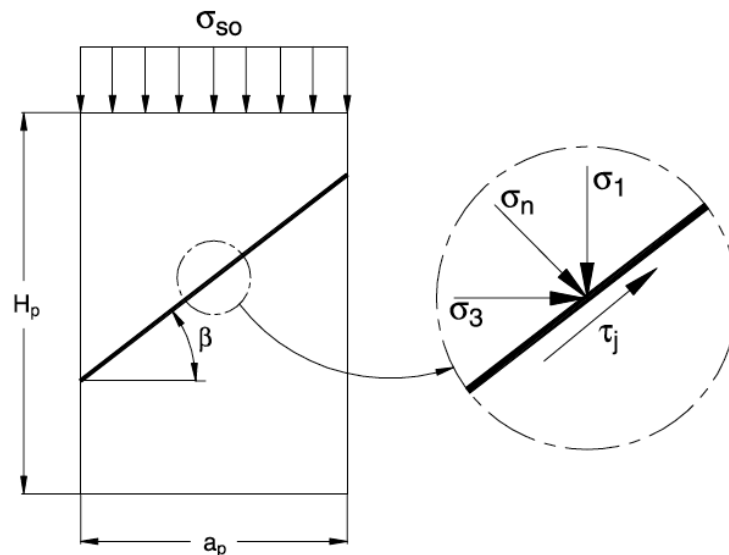
$$SF_c = \frac{S_p}{\sigma_{so}} \quad (3.5)$$

όπου σ_{so} η μέση τάση στο στύλο που δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{so} = \frac{(a_p + a_c)^2 \cdot H \cdot \gamma_t}{a_p^2}$$

όπου a_p είναι το πλάτος του στύλου και a_c το άνοιγμα του μετώπου, εφόσον το έδαφος έχει ειδικό βάρος γ_t και ο στύλος βρίσκεται σε βάθος H .

Κάθε επίπεδο αδυναμίας της βραχομάζας δεν προκαλεί μόνο τη μείωση της αντοχής της συγκριτικά με αυτήν του άρρηκτου βράχου, αλλά ενδέχεται να προκαλέσει και τοπικές διατμητικές αστοχίες στους στύλους. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, η τάση που εφαρμόζεται στο δοκίμιο αναλύεται στην ορθή και διατμητική τάση στο επίπεδο της ασυνέχειας. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται το κριτήριο Mohr-Coulomb για να εξεταστεί η δυνατότητα ολίσθησης (Σοφιανός & Νομικός, 2008).



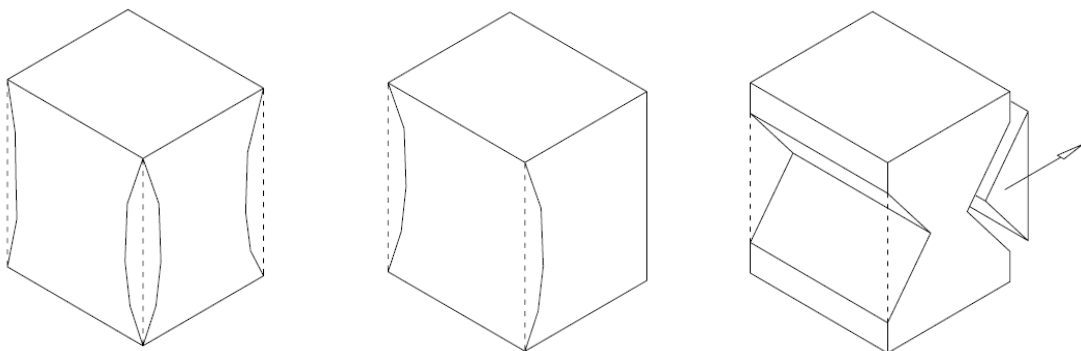
Σχήμα 3.1 Επίδραση επιφάνειας αδυναμίας στην αντοχή του στύλου (Gonzalez-Nicieza et al., 2006)

Ο συντελεστής ασφάλειας για την αστοχία του στύλου σε διάτμηση υπολογίζεται σύμφωνα με τη θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας και το κριτήριο Mohr-Coulomb και δίνεται από τη σχέση:

$$SF_s = \frac{c_j + \left[\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \cos(2\beta) \right] \cdot \tan \varphi_j}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \sin(2\beta)} \quad (3.7)$$

όπου c_j και φ_j είναι η συνοχή και η γωνία τριβής για την ασυνέχεια, σ_1 και σ_3 οι κύριες τάσεις, και β η γωνία κλίσης της ασυνέχειας σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο.

Το Σχήμα 3.2 απεικονίζει τις τρεις μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν στους στύλους του υπόψη λατομείου. Η συντριπτική πλειοψηφία των στύλων παρουσιάζει ελαφριά μορφή αστοχίας που εκδηλώνεται με αποκόλληση μικρών τεμαχίων βράχου από τις γωνίες του στύλου με αποτέλεσμα να δημιουργούνται στρογγυλεμένες άκρες (Σχήμα 3.2α). Αυτή η μορφή αστοχίας δεν κρίθηκε επικίνδυνη για την ευστάθεια των στύλων. Η δεύτερη μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε αφορά σε πλευρικές ρωγματώσεις στους στύλους, οι οποίες εκδηλώνονται σταδιακά και προκαλούνται από τη διάδοση των αρχικών ρωγματώσεων σε δύο διαδοχικές γωνίες του στύλου προς όλη την πλευρά του στύλου (Σχήμα 3.2β). Όταν ρωγμές μεγαλύτερης κλίμακας διασχίζουν εγκάρσια το στύλο, τότε η αστοχία διαδίδεται μέχρι τον πυρήνα του με αποτέλεσμα την αποκόλληση τμήματος του στύλου και τη μερική ή πλήρη κατάρρευσή του (Σχήμα 3.2γ). Η αστοχία ενός στύλου έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά του υπερκείμενου φορτίου στους γειτονικούς στύλους, ειδικά σε αυτούς που παρουσιάζουν κλιμακωτή μορφή αστοχία.



Σχήμα 3.2 Μορφές αστοχίας των στύλων του υπόγειου λατομείου μαρμάρου (Gonzalez-Nicieza et al., 2006)

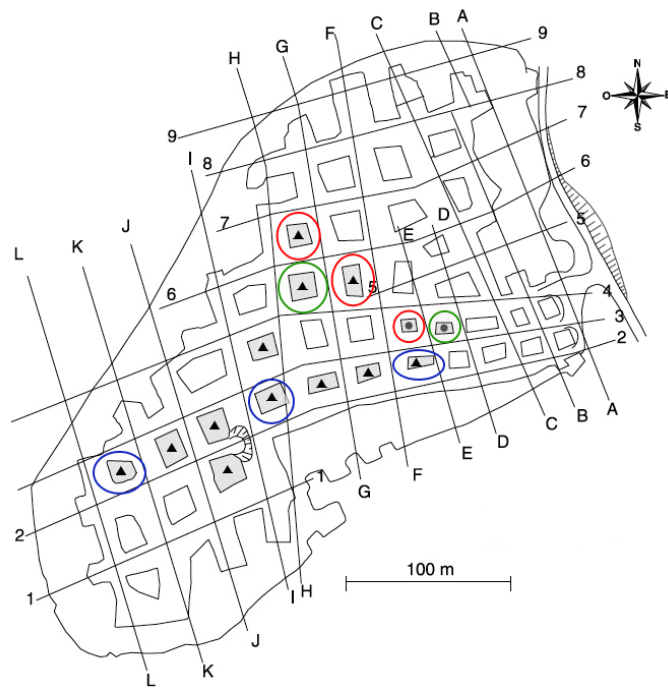
Ο υπολογισμός της αντοχής και του συντελεστή ασφαλείας των στύλων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις σχέσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Στις σχέσεις αποδόθηκε ένας βαθμός *RMR* για τον κάθε στύλο εξετάζοντας για κάθε περίπτωση τα στοιχεία της βραχομάζας και τις ασυνέχειες. Ορισμένοι στύλοι παρουσίασαν διαφορές μεταξύ της πραγματικής κατάστασης και της θεωρητικής αναμενόμενης συμπεριφοράς ως συνάρτηση του συντελεστή ασφαλείας. Επομένως, κρίθηκε απαραίτητη η μελέτη κάθε στύλου ξεχωριστά λαμβάνοντας υπόψη την εξέλιξη των αστοχιών με την πάροδο του χρόνου. Τα Σχήματα 3.3 και 3.4 απεικονίζουν την κάτοψη των δύο επιπέδων εκμετάλλευσης και τους αντίστοιχους στύλους. Κάθε στύλος που υπέστη κάποια μορφή αστοχίας συμβολίζεται με τριγωνικό σχήμα, ενώ οι στύλοι που κατέρρευσαν με κυκλικό σχήμα.

Η αστοχία των δύο στύλων του Σχήματος 3.3 που απεικονίζονται με πράσινο χρώμα προκλήθηκε από το πλεονάζον φορτίο στο οποίο υποβλήθηκαν μετά από την αστοχία των γειτονικών στύλων (κόκκινο χρώμα). Οι απομειωμένες διαστάσεις των γειτονικών στύλων ήταν ανεπαρκείς για την υποστήριξη του βάρους του υπερκείμενου στρώματος, επομένως το φορτίο μεταφέρθηκε στους δύο στύλους με αποτέλεσμα την κατάρρευσή τους. Ο συντελεστής ασφαλείας σε θλίψη των στύλων με μπλε χρώμα εκτιμήθηκε από 0.82 έως 1.05 που σημαίνει ότι θεωρητικά θα έπρεπε να παρουσιάζουν κάποια μορφή αστοχίας. Στην πραγματικότητα, όμως, οι στύλοι αυτοί βρίσκονταν ακόμα σε αρχικά στάδια αστοχίας λόγω της θέσης τους κοντά στην άκρη του μετώπου εκμετάλλευσης, το οποίο δρα σαν ένας στύλος μεγάλου μεγέθους, απελευθερώνοντας ένα σημαντικό μέρος του φορτίου που τους ασκείται.

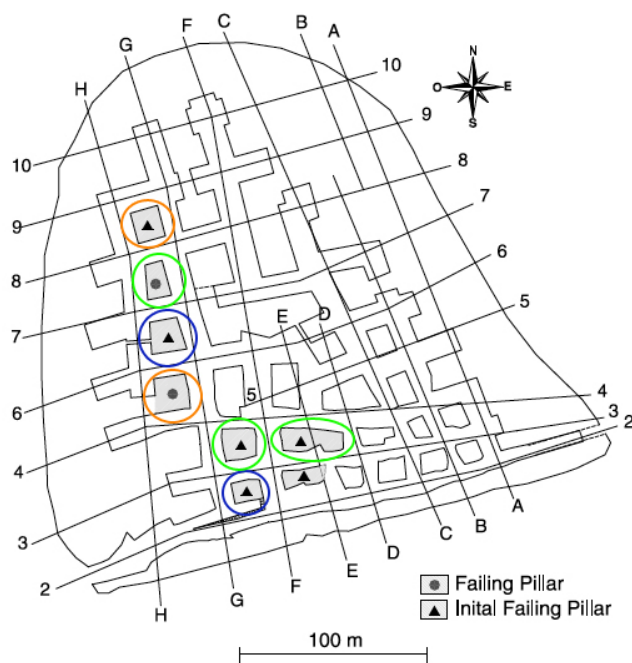
Στην κάτοψη του Σχήματος 3.4 σημειώνονται οι στύλοι που έχουν αστοχήσει. Οι στύλοι με πορτοκαλί χρώμα έχουν χαμηλό συντελεστή ασφαλείας σε διάτμηση, ενώ η τιμή του συντελεστή ασφαλείας σε θλίψη είναι αρκετά υψηλή. Ο στύλος στο πάνω μέρος του σχήματος υπέστη διατμητική αστοχία με ρωγματώσεις λόγω ασυνεχειών κλίσης 45°, ενώ ο στύλος στο κάτω μέρος του σχήματος αστοχεί βαθμιαία λόγω παρουσίας ρήγματος με σερπεντίνη ως υλικό πλήρωσης.

Οι στύλοι με μπλε χρώμα παρουσίασαν σημάδια σταδιακής αστοχίας, ωστόσο η κατάρρευσή τους αποφεύχθηκε λόγω της θέσης τους κοντά στην άκρη του μετώπου εκμετάλλευσης αλλά και κοντά σε στύλους μεγαλύτερου μεγέθους που έχουν τη

δυνατότητα παραλαβής μέρους των τάσεων. Οι στύλοι με πράσινο χρώμα παρουσίασαν αστοχία σημαντικού βαθμού προφανώς λόγω της αστοχίας των γειτονικών στύλων και του φορτίου που έπρεπε να αναλάβουν, το οποίο ήταν μεγαλύτερο από την αντοχή τους.



Σχήμα 3.3 Κάτοψη του πρώτου επιπέδου του λατομείου και των στύλων που αστοχούν (Gonzalez-Nicieza et al., 2006)



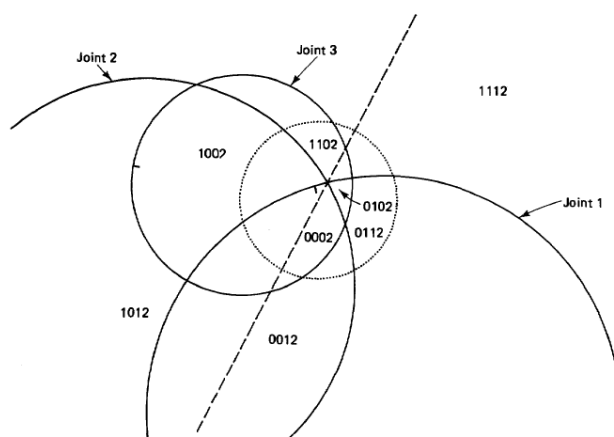
Σχήμα 3.4 Κάτοψη του δεύτερου επιπέδου του λατομείου και των στύλων που αστοχούν (Gonzalez-Nicieza et al., 2006)

Συνοψίζοντας, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας και τον επί τούτου παρατηρήσεων της συμπεριφοράς και των μορφών αστοχίας των στύλων του υπογείου λατομείου, οι ερευνητές προτείνουν την ακόλουθη ταξινόμηση των στύλων με βάση το συντελεστή ασφάλειας για λατομεία με παρόμοιες συνθήκες: για $SF > 1.25$ οι στύλοι είναι ευσταθείς, για $0.90 < SF < 1.25$ οι στύλοι παρουσιάζουν βαθμιαία αστοχία, και για $SF < 0.90$ οι στύλοι παρουσιάζουν εμφανή και σημαντικού μεγέθους αστοχία.

3.3 Αναλυτικές μέθοδοι ανάλυσης υπόγειων θαλάμων

3.3.1 Θεωρία Τεμαχίων για την εκτίμηση ευστάθειας υπόγειων ανοιγμάτων

Ένα είδος ανάλυσης που χρησιμοποιείται συχνά στη βραχομηχανική είναι η Θεωρία Τεμαχίων (Block Theory) των Shi και Goodman (1985). Η θεωρία έχει στόχο να εντοπίσει τα κρίσιμα βραχώδη τεμάχια που, ελλείψει της κατάλληλης αντίστασης, ελευθερώνουν άλλα τεμάχια πλησίον των κενών που δημιουργούνται μεταξύ τους, προκαλώντας μια κατάσταση αστοχίας και κατ' επέκταση την κατάρρευση της κατασκευής.

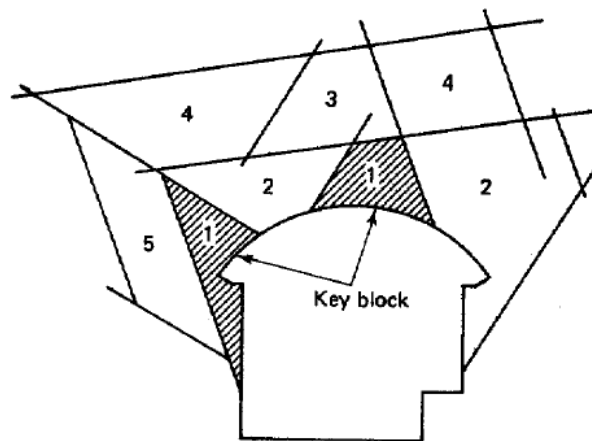


Σχήμα 3.5 Γραφική μέθοδος επίλυσης της Θεωρίας Τεμαχίων (Goodman & Shi, 1985)

Η ανάλυση μπορεί να εφαρμοστεί με διανυσματικό λογισμό ή γραφικά. Στην πράξη χρησιμοποιούνται και οι δύο μέθοδοι, αλλά συνήθως η εφαρμογή του διανυσματικού λογισμού προηγείται για τον υπολογισμό των απαραίτητων διανυσμάτων και στη συνέχεια ακολουθεί η γραφική επίλυση. Η γραφική μέθοδος χρησιμοποιεί ισογώνια στερεογραφική προβολή (Σχήμα 3.6), κατά την οποία όλα τα

σημεία προβάλλονται από τον έναν πόλο της σφαίρας. Τα κύρια χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι ότι τα επίπεδα προβάλλονται ως κύκλοι και οι γραμμές προβάλλονται ως σημεία. Επιπρόσθετα, με την προβολή διατηρούνται σταθερές οι γωνίες μεταξύ των επιπέδων.

Η τομή των επιφανειών των διαφόρων οικογενειών ασυνχειών δημιουργεί ογκοτεμάχια ακανόνιστου σχήματος και μεγέθους, ενώ μετά την εκσκαφή δημιουργούνται νέα τεμάχια λόγω των πρόσθετων επιφανειών που αποκαλύπτονται. Παρόλο που μερικά από αυτά δε θα έχουν τη δυνατότητα μετακίνησης, όπως τα τεμάχια με αριθμό 2 του Σχήματος 3.7, ορισμένα που προηγουμένως συγκρατούνταν, θα ελευθερωθούν (τεμάχια με αριθμό 1 στο ίδιο σχήμα).



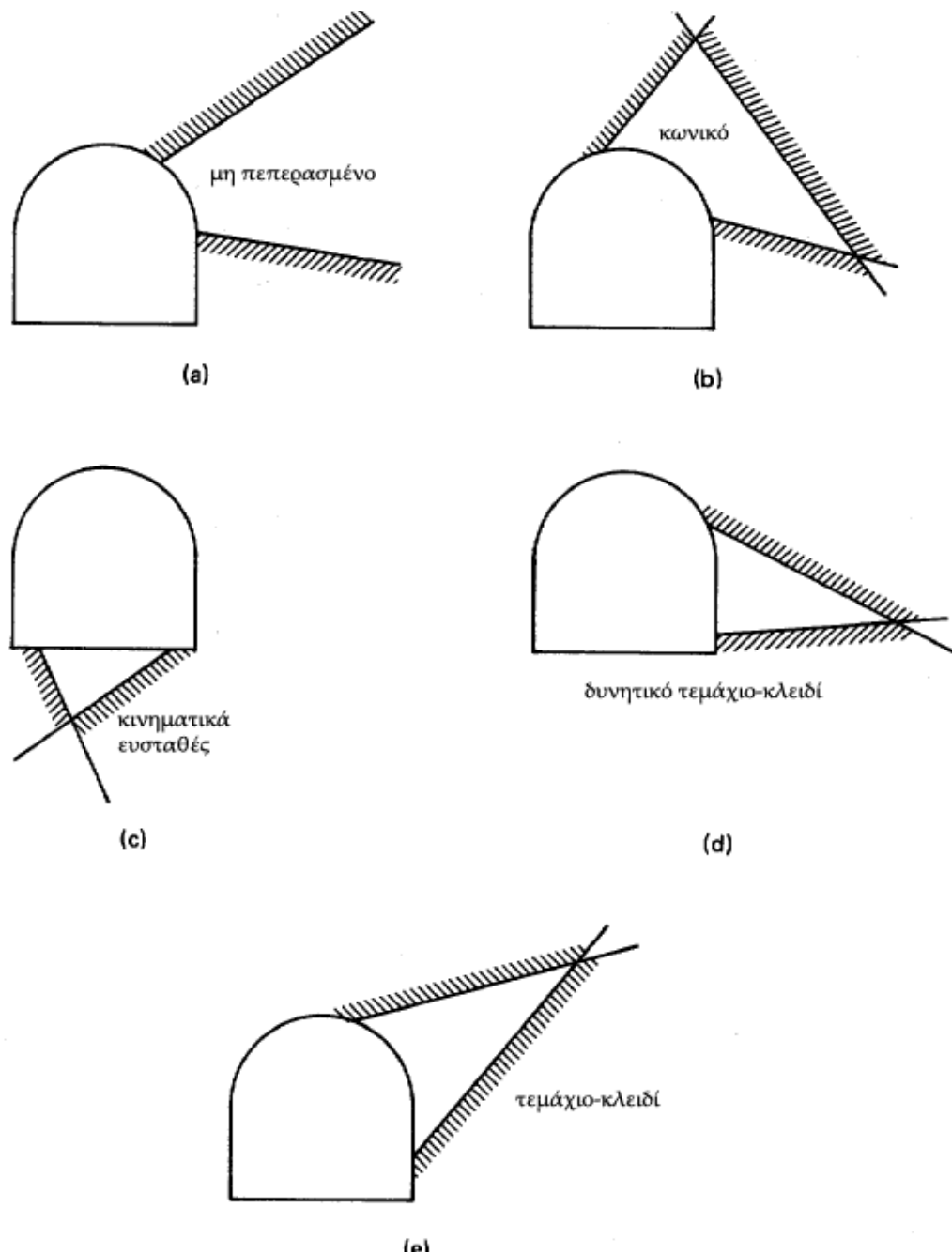
Σχήμα 3.6 Τεμάχια-κλειδιά σε υπόγειο άνοιγμα (Goodman & Shi, 1985)

Το τεμάχιο που βρίσκεται στη δυνητικά επικίνδυνη θέση, και αποτελεί το πρώτο τεμάχιο που θα απελευθερωθεί, ορίζεται ως το «τεμάχιο-κλειδί» (key block). Στην περίπτωση που το τεμάχιο-κλειδί εντοπιστεί πριν την έναρξη της μετακίνησης, κι εφόσον η ευστάθεια της κατασκευής έχει εξασφαλιστεί, τότε δεν υπάρχει κίνδυνος ολίσθησης των υπόλοιπων τεμαχίων. Η μετακίνηση των σκιαγραφημένων τεμαχίων με αριθμό 1 του Σχήματος 3.7 θα προκαλέσει τη μετακίνηση των υπολοίπων με αποτέλεσμα τη σταδιακή κατάρρευση του θαλάμου. Ένα τεμάχιο-κλειδί είναι δυνητικά κρίσιμο για την ευστάθεια της εκσκαφής, διότι εξ' ορισμού είναι πεπερασμένο, μπορεί να απομακρυνθεί από τη θέση του, και είναι δυνητικά ασταθές.

Στο Σχήμα 3.8 δίνεται η γραφική απεικόνιση των πέντε διακριτών κατηγοριών τεμαχίων που συναντώνται σε μια υπόγεια εκσκαφή. Το Σχήμα 3.8a απεικονίζει ένα μη πεπερασμένο τεμάχιο (infinite block), το οποίο δεν αποτελεί κίνδυνο για την εκσκαφή εφόσον δε δημιουργείται ρωγμή στο εσωτερικό του. Εκτός από τα μη πεπερασμένα τεμάχια γίνεται λόγος και για τα πεπερασμένα τεμάχια (finite blocks), τα οποία χωρίζονται σε αυτά που μπορούν να απομακρυνθούν από τη θέση τους και σε αυτά που δε μπορούν να απομακρυνθούν.

Ένα μη πεπερασμένο τεμάχιο χωρίς εσωτερική ρωγμή προφανώς δε μπορεί να απομακρυνθεί από τη βραχομάζα. Ακόμα, όμως, κι ένα πεπερασμένο τεμάχιο ενδέχεται να μην αποκοπεί αν έχει κωνικό (tapered) σχήμα (Σχήμα 3.8b). Μη κωνικά, πεπερασμένα τεμάχια μπορούν να αποκοπούν από τη βραχομάζα αλλά αποτελούν απαραίτητα κρίσιμα τεμάχια για την ευστάθεια μιας εκσκαφής υπό συγκεκριμένο εντατικό πεδίο.

Για το διαχωρισμό των τεμαχίων που μπορούν να αποκοπούν από τη βραχομάζα εισάγονται τρεις νέες κατηγορίες. Πιο συγκεκριμένα, τα τεμάχια χωρίζονται σε κινηματικά ευσταθή (stable), ευσταθή λόγω τριβής – δυνητικά ρυθμιστικά (stable with friction – potential key blocks), και ασταθή ή ρυθμιστικά τεμάχια (key blocks). Ως ρυθμιστικό τεμάχιο ή τεμάχιο-κλειδί, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ορίζεται κάθε πεπερασμένο και κινηματικά ελεύθερο τεμάχιο, η μετακίνηση του οποίου δίνει τη δυνατότητα ολίσθησης των υπόλοιπων τεμαχίων. Στο Σχήμα 3.8c απεικονίζεται ένα κινηματικά ευσταθές τεμάχιο, το οποίο δεν αποτελεί κίνδυνο για τον υπόγειο θάλαμο αν ληφθεί υπόψη μόνο το βαρυτικό πεδίο. Στο Σχήμα 3.8d απεικονίζεται δυνητικά τεμάχιο-κλειδί, η κίνηση του οποίου είναι σχεδόν απίθανη εκτός αν η αντίσταση λόγω τριβής στο δυνητικά ολισθαίνον μέτωπο είναι εξαιρετικά μικρή, ή αν υπάρχουν άλλα φορτία εκτός από το ίδιο βάρος του τεμαχίου που λειτουργούν ως κινητήριες δυνάμεις. Ένα πραγματικό τεμάχιο-κλειδί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8e, έχει προσανατολισμό που συνεισφέρει στην αστάθεια του τεμαχίου προκαλώντας την ολίσθησή του.



Σχήμα 3.7 Κατηγορίες τεμαχίων σύμφωνα με τη Θεωρία Τεμαχίων (Goodman & Shi, 1985)

3.4 Εφαρμογή αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων για την ανάλυση ευστάθειας υπόγειων λατομείων μαρμάρου στην Ιταλία

Οι ερευνητές Ferrero, Segalini και Giani (2010) συνεργάστηκαν στο ερευνητικό έργο του Πανεπιστημίου της Πάρμα (DICATeA) για την ανάλυση ευστάθειας αρχαίων υπόγειων λατομείων μαρμάρου στην περιοχή Varese της Ιταλίας. Τα δύο λατομεία

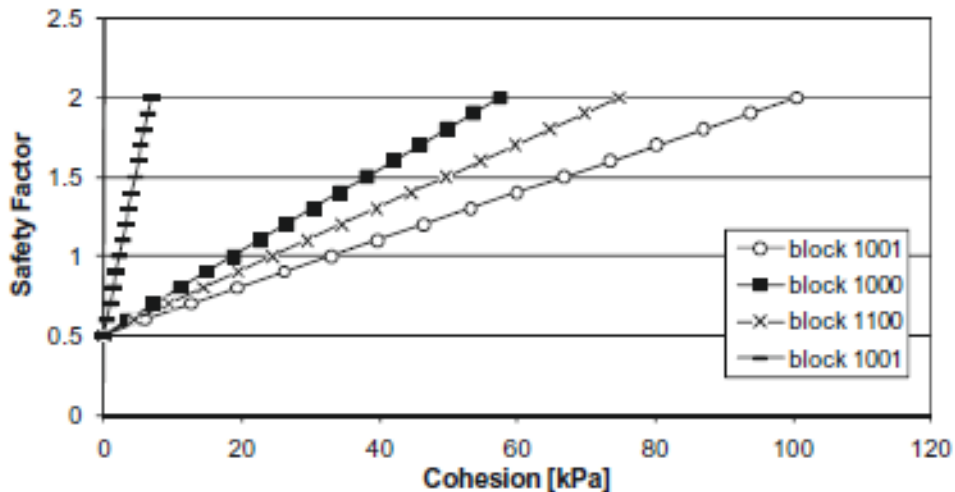
που μελετήθηκαν βρίσκονται στο νότιο τμήμα του ορεινού όγκου Monte Rosa, στο χωριό Viggiù, με ονομασίες Cava Danzi και Cava Beltrami, αντίστοιχα.

Μια από τις αναλύσεις ευστάθειας εφήρμοσε τη θεωρία Τεμαχίων στις οροφές των υπόγειων θαλάμων δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση κυρίως στις ζώνες εισόδου των λατομείων. Με την ανάλυση έγινε εφικτός ο προσδιορισμός του αριθμού και του μεγέθους των επισφαλών τεμαχίων πλησίον κάθε εισόδου αποτυπώνοντας πρώτα τα μεγαλύτερα τεμάχια βράχου που δημιουργήθηκαν λόγω των εξεταζόμενων οικογενειών ασυνεχειών. Αυτή η φάση της ανάλυσης επαναλήφθηκε για κάθε τύπο τεμαχίου, έτσι ώστε να εκτιμηθούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί αστοχιών λόγω της αστάθειας των τεμαχίων και να αποδοθούν οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας. Θέλοντας να μελετήσουν την επίδραση των τιμών κλίσης και γωνίας κλίσης των ασυνεχειών στις συνθήκες ευστάθειας των τεμαχίων, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν ένα εύρος τιμών του προσανατολισμού των ασυνεχειών για τις αναλύσεις.

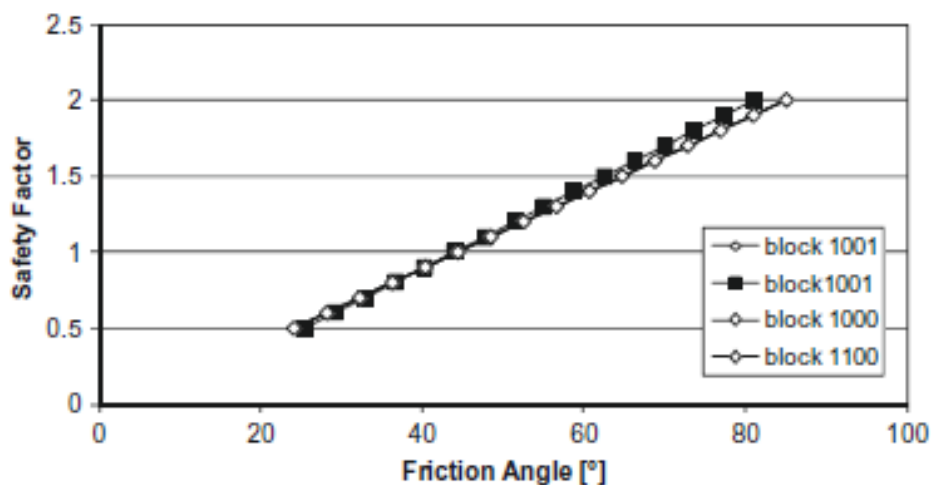
Τα Σχήματα 3.9 και 3.10 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων των τριών εισόδων για το πρώτο λατομείο (Cava Danzi). Στις πρώτες αναλύσεις αποδόθηκε σχετικά χαμηλή τιμή της γωνίας τριβής, η οποία ήταν ίση με τη παραμένουσα τιμή που μετρήθηκε στο εργαστήριο, και θεωρήθηκε μηδενική συνοχή. Στη συνέχεια, οι ερευνητές προχώρησαν σε παραμετρικές αναλύσεις για την αξιολόγηση της επιρροής της τιμής της παραμένουσας αντοχής στις συνθήκες ευστάθειας του συστήματος.

Οι παραμετρικές αναλύσεις για την κεντρική είσοδο του λατομείου πραγματοποιήθηκαν για συνθήκες οριακής ισορροπίας ($SF=1$) και για συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1.3. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για γωνία τριβής με τιμή μικρότερη από 53.7° , η αστοχία είναι αναπόφευκτη. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι όταν η γωνία τριβής κυμαίνεται μεταξύ 53.7° και 68.6° και η συνοχή έχει τιμή 8.10-13.56 kPa, τότε εξασφαλίζεται η ευστάθεια της οροφής με συντελεστή ασφαλείας ίσο με 1-1.3. Για γωνία τριβής μεγαλύτερη από 68.6° , ο συντελεστής ασφαλείας έχει μεγαλύτερη τιμή και δεν υπάρχει κίνδυνος αστάθειας. Η ανάλυση της υψομετρικά χαμηλότερης εισόδου υπέδειξε τρία επισφαλή τεμάχια όγκου 11.8, 2.2 και 4.9 m³, αντίστοιχα, ενώ η αστοχία παρατηρήθηκε για γωνία τριβής 44.5° . Ο συντελεστής ασφαλείας κυμαίνεται μεταξύ 1-1.3 όταν η γωνία τριβής έχει τιμή από 44.5° έως 56.6° και η συνοχή βρίσκεται μεταξύ 30.38 kPa και 32.92 kPa. Όταν η γωνία τριβής

είναι μεγαλύτερη από 56.6° , ο συντελεστής ασφάλειας είναι μεγαλύτερος από 1.3. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων με τα πειραματικά δεδομένα παρατηρήθηκε ότι παρόλο που η γωνία τριβής δεν εξασφαλίζει ικανοποιητικές συνθήκες ευστάθειας, η παρουσία ελάχιστης συνοχής μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη συνολική ευστάθεια του συστήματος.



Σχήμα 3.8 Συντελεστής ασφάλειας ως συνάρτηση της συνοχής για σταθερή γωνία τριβής 25 (Ferrero et al., 2010)



Σχήμα 3.9 Συντελεστής ασφάλειας ως συνάρτηση της γωνίας τριβής για μηδενική συνοχή (Ferrero et al., 2010)

Το τμήμα του δεύτερου λατομείου (Cava Beltrami) που εξετάστηκε ήταν η οροφή με διαστάσεις $27 \times 27 \text{ m}^2$. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τη Θεωρία Τεμαχίων, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μεταβάλλοντας τον προσανατολισμό των κυριότερων συστημάτων ασυνεχειών. Ο Πίνακας 3.2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των αναλύσεων σχετικά με τον αριθμό και τις διαστάσεις των επισφαλών τεμαχίων

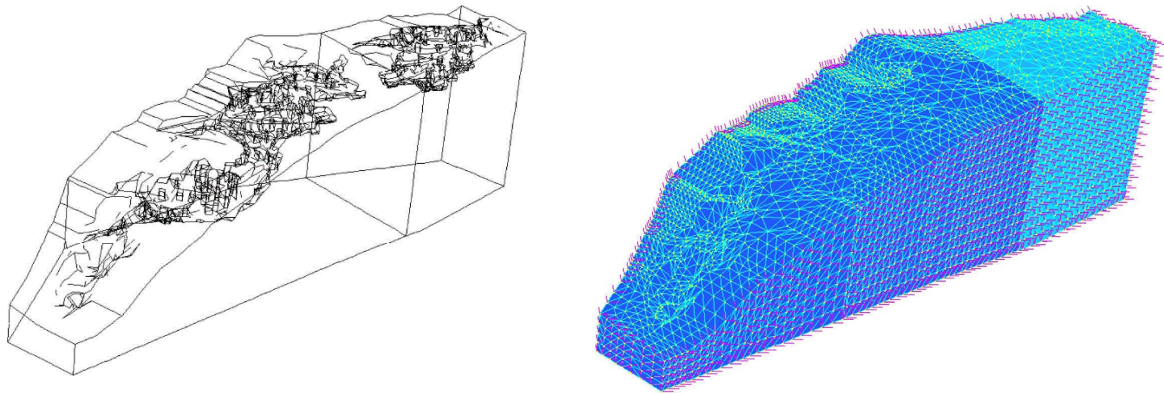
που υπολογίστηκαν. Το μεγαλύτερο τεμάχιο έχει όγκο 4.108 m³ και βρίσκεται κοντά στην είσοδο του λατομείου.

Πίνακας 3.3 Γεωμετρία των τεμαχίων που υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη Θεωρία Τεμαχίων (Ferrero et al., 2010)

Τεμάχιο	Όγκος (m ³)
1	2.110
2	4.108
3	0.490
4	1.870
5	1.125
6	1.482
7	0.800

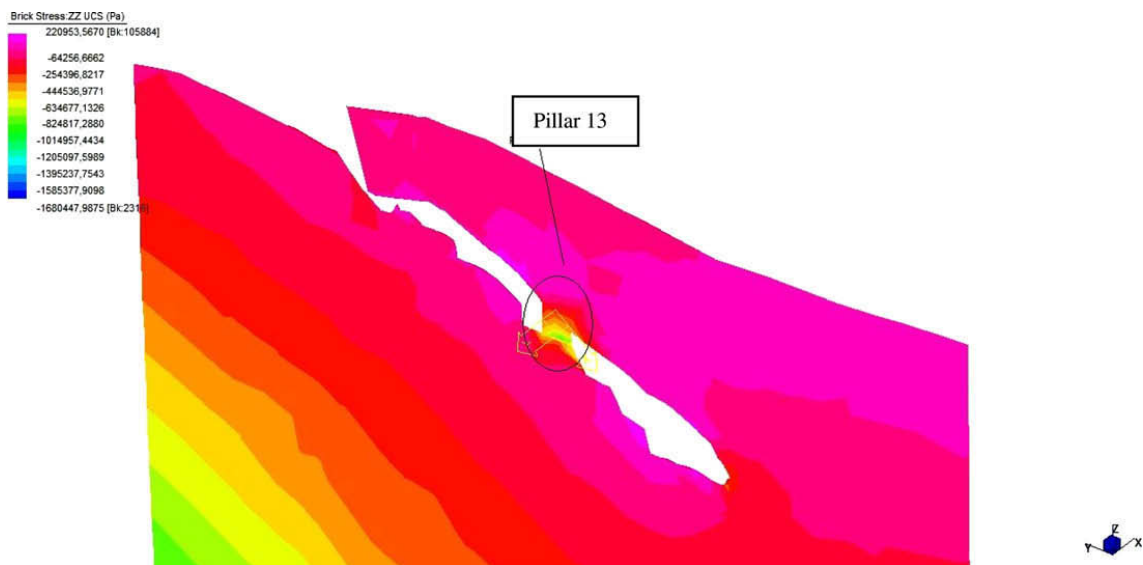
Μερικά από τα προβλήματα σχεδιασμού υπόγειων εκσκαφών, όπως αυτά που αφορούν σε μια ρωγματωμένη βραχομάζα, μπορούν να αναλυθούν με τη θεώρηση ογκοτεμαχίων και τη βοήθεια απλής στατικής (Brady & Brown, 2004). Ωστόσο, λόγω των χαρακτηριστικών της γεωμετρίας της εκσκαφής των υπόψη λατομείων κρίθηκε απαραίτητη η περαιτέρω ανάλυση των λατομείων με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων, και πιο συγκεκριμένα με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Straus 7 (G+D Computing, 2000). Σκοπός των αριθμητικών αναλύσεων ήταν η μελέτη της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης του υπόγειου χώρου με την υπόθεση ισοδύναμου συνεχούς μέσου. Οι αναλύσεις ακολούθησαν πολλές φάσεις, από την αρχική γεωστατική κατάσταση μέχρι την εκσκαφή των θαλάμων. Τα Σχήματα 3.11α και 3.11β παρουσιάζουν το τρισδιάστατο μοντέλο που αντιπροσωπεύει τη γεωμετρία της εκσκαφής και τη διακριτοποίηση του μοντέλου, αντίστοιχα.

Η συγκέντρωση των κατακόρυφων τάσεων συνήθως παρατηρείται στα άκρα των στύλων. Η μικρή σχετικά κλίση των επιπέδων εκσκαφής σε συνδυασμό με ορισμένους στύλους που χαρακτηρίζονται από μικρό λόγο πλάτους προς ύψος έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη καμπτικής και θλιπτικής εντατικής κατάστασης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Η κατακόρυφη τάση στα άκρα του στύλου 13 μετρήθηκε ίση με 1.70 MPa, ενώ στο κέντρο του ήταν ίση με 2.40 MPa.

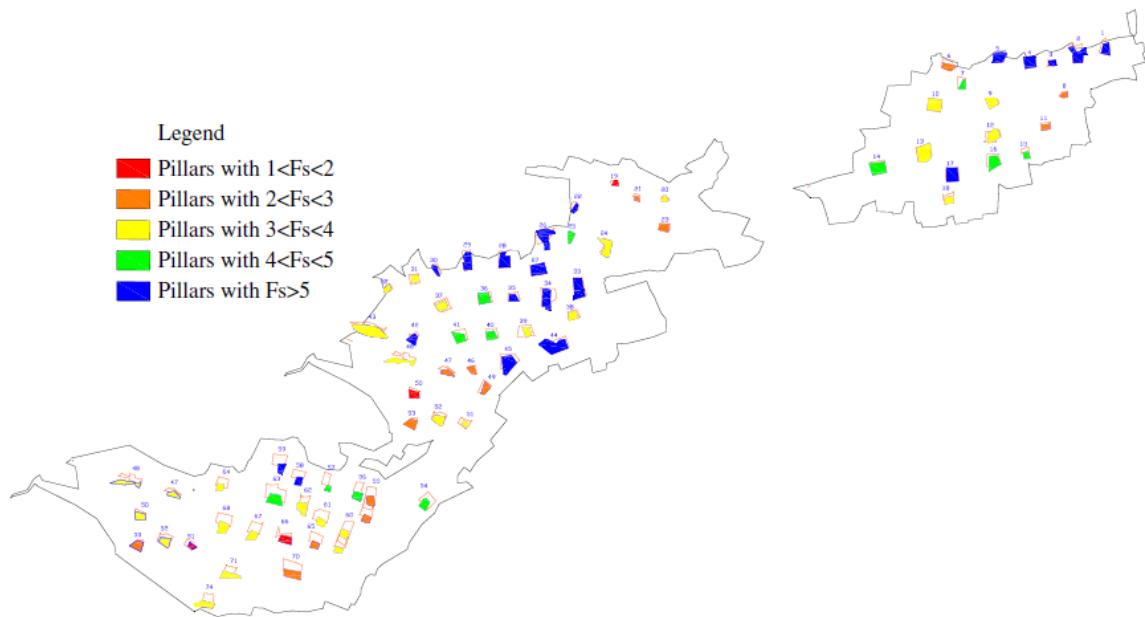


Σχήμα 3.10 Γεωμετρία εκσκαφής και διακριτοποίηση του τριδιάστατου μοντέλου στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων Straus 7 (Ferrero et al., 2010)

Το φορτίο που ασκείται στο στύλο υπολογίζεται συνήθως με τη θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας, όπως έχει προαναφερθεί. Ωστόσο, οι αναλύσεις με κώδικες πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπουν τον υπολογισμό των κατακόρυφων τάσεων σε κάθε στοιχείο του πλέγματος, επομένως για τον υπολογισμό της δρώσας πίεσης χρησιμοποιείται η μέση τιμή της κατακόρυφης τάσης που ασκείται στο μέσον του στύλου. Η αντοχή του στύλου υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση του Hedley και την τροποποίηση του Singh λαμβάνοντας υπόψη την αντοχή της βραχομάζας (βλ. Εξισώσεις 3.3 και 3.4) για σ_{cm} ίση με 110 MPa και δείκτη RMR περίπου 60, και συνεπώς η τιμή του δείκτη S_0 υπολογίστηκε ίση με 13.47. Το Σχήμα 3.13 απεικονίζει χάρτη της περιοχής εκμετάλλευσης και το εύρος των τιμών του συντελεστή ασφαλείας για κάθε στύλο.



Σχήμα 3.11 Κατακόρυφες τάσεις σε έναν από τους στύλους της υπόγειας εκμετάλλευσης (Ferrero et al. 2010)



Σχήμα 3.12 Χάρτης με τη θέση των στύλων και τις τιμές του συντελεστή ασφάλειας που υπολογίστηκε για τον καθένα (Ferrero et al., 2010)

Τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων υποδεικνύουν τον κίνδυνο αστάθειας τεμαχίων βράχου στα υπόψη λατομεία. Με την εφαρμογή της Θεωρίας Τεμαχίων έγινε η εκτίμηση πιθανής αστάθειας και αποκόλλησης τεμαχίων βράχου από την οροφή και τα πλευρικά τμήματα των στύλων. Παρόλο που η αριθμητική προσομοίωση δεν αποτελεί εύκολη διαδικασία, καθώς η αποτύπωση των πραγματικών τιμών των ιδιοτήτων της βραχομάζας είναι συνεχώς αμφίβολη και η προσομοίωση στηρίζεται συχνά σε εμπειρικές υποθέσεις, η χρήση τρισδιάστατου υπολογιστικού μοντέλου αποτέλεσε χρήσιμο εργαλείο για την ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση της ευστάθειας της εκσκαφής. Περαιτέρω μελέτη θα καθοδηγήσει το μηχανικό στην επιλογή των κατάλληλων μέτρων υποστήριξης για την αποφυγή αστοχίας.

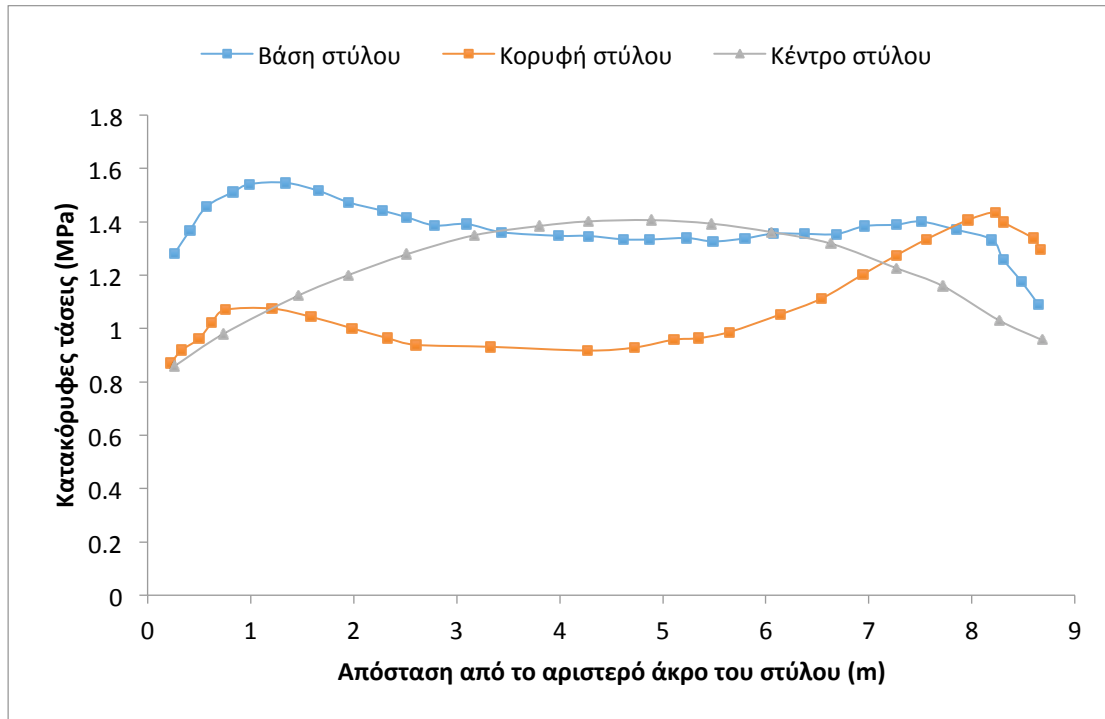
3.5 Συνδυασμός αριθμητικών μεθόδων για την προσομοίωση σύνθετης μορφολογίας και γεωμετρικών χαρακτηριστικών

Μια αριθμητική μέθοδος που αποτυπώνει επαρκώς τις πολύπλοκες φυσικές και γεωχημικές πτυχές των ρωγματωμένων πετρωμάτων πρέπει να έχει τη δυνατότητα να παρουσιάζει τη γεωμετρία του ρωγματωμένου συστήματος, τις συνοριακές και

αρχικές συνθήκες συμπεριλαμβανομένης της κλίμακας και των επιπτώσεων του χρόνου. Σε πολλές περιπτώσεις, η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του υπό μελέτη χώρου και των ασυνεχειών απαιτεί τη δοκιμή διάφορων αριθμητικών μεθόδων, έτσι ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος τρόπος προσομοίωσης. Επομένως, συχνά επιλέγεται η αρχική προσέγγιση ενός προβλήματος μέσω αριθμητικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων ή διαφορών και ακολουθεί η ανάλυση με μοντέλο διακριτών στοιχείων, το οποίο συμπεριλαμβάνει τα συστήματα ασυνεχειών που επηρεάζουν την ευστάθεια του συστήματος.

Στο πλαίσιο μελέτης σκοπιμότητας της υπόγειας εκμετάλλευσης ενός λατομείου μαρμάρου, οι Fomaro et al. (2001) πραγματοποίησαν αριθμητικές αναλύσεις για τη μελέτη ευστάθειας λατομείου ροζ μαρμάρου στην περιοχή Alentejo της Πορτογαλίας. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για υπόγειο θάλαμο χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά μοντέλα: ένα πεπερασμένων διαφορών με το πρόγραμμα *FLAC* κι ένα διακριτών στοιχείων με το πρόγραμμα *UDEC*, το οποίο έλαβε υπόψη την παρουσία ασυνεχειών. Σκοπός ήταν η χρήση του μοντέλου πεπερασμένων διαφορών, η οποία βασίστηκε στη θεώρηση του ισοδύναμου συνεχούς, για τη στατική επίλυση και τον υπολογισμό των τάσεων που δέχονται οι στύλοι του υπόγειου χώρου, και η χρήση μοντέλου διακριτών στοιχείων για τη λεπτομερέστερη ανάλυση ευστάθειας του υπόγειου θαλάμου.

Το Σχήμα 3.14 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των αναλύσεων στο *FLAC* αναφορικά με την κατανομή των κατακόρυφων τάσεων που δέχεται ένας από τους στύλους του υπόγειου θαλάμου σε σχέση με την απόσταση από το αριστερό του τοίχωμα. Παρατηρείται ότι στην κορυφή και τη βάση του στύλου, οι κατακόρυφες τάσεις συγκεντρώνονται στα άκρα, ενώ στο κεντρικό τμήμα του οι μέγιστες τιμές της κατακόρυφης τάσης παρατηρούνται στο κέντρο του στύλου όπου ο πλευρικός περιορισμός είναι μεγαλύτερος. Η συγκέντρωση της μέγιστης τάσης κοντά ή πάνω στο τοίχωμα του στύλου υποδηλώνει ότι η αστοχία θα ξεκινήσει από την επιφάνεια του στύλου (Caudle & Clark, 1955). Η ανάλυση είχε στόχο την εκτίμηση του ωφέλιμου πάχους των στοιχείων υποστήριξης μέσω του υπολογισμού του εντατικού πεδίου.

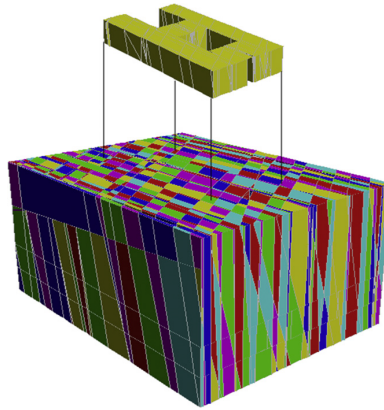


Σχήμα 3.13 Κατακόρυφη τάση συναρτήσει της απόστασης από αριστερό τοίχωμα του στύλου (από Fomaro et al., 2001)

Τα τελευταία χρόνια συνηθίζεται να χρησιμοποιείται η μέθοδος του ασυνεχούς μέσου για την ενσωμάτωση της επίδρασης των ασυνεχειών στη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας και, κατ' επέκταση, για την αξιολόγηση της ευστάθειας των υπογείων εκσκαφών. Οι Ferrero et al. (2013) πραγματοποίησαν αναλύσεις για τον προσδιορισμό του επί τόπου εντατικού πεδίου σε υπόγεια λατομεία διακοσμητικών λίθων. Συγκεκριμένα, οι ερευνητές ασχολήθηκαν με την ανάλυση ευστάθειας των λατομείων Ravaccione και Fantiscritti, που βρίσκονται στη λεκάνη Carrara στην Ιταλία, λόγω των σύνθετων γεωλογικών διεργασιών στις οποίες υπόκεινται τα υπόψη μαρμαροφόρα κοιτάσματα. Η γνώση της πραγματικής εντατικής κατάστασης της βραχομάζας, η οποία απαιτείται για την εκτίμηση της τελικής εντατικής κατάστασης μετά το τέλος της εκσκαφής, και η χρήση των κατάλληλων αριθμητικών μεθόδων για την αξιόπιστη προσομοίωση της βραχομάζας είναι υψίστης σημασίας για την εξέλιξη της εκμετάλλευσης.

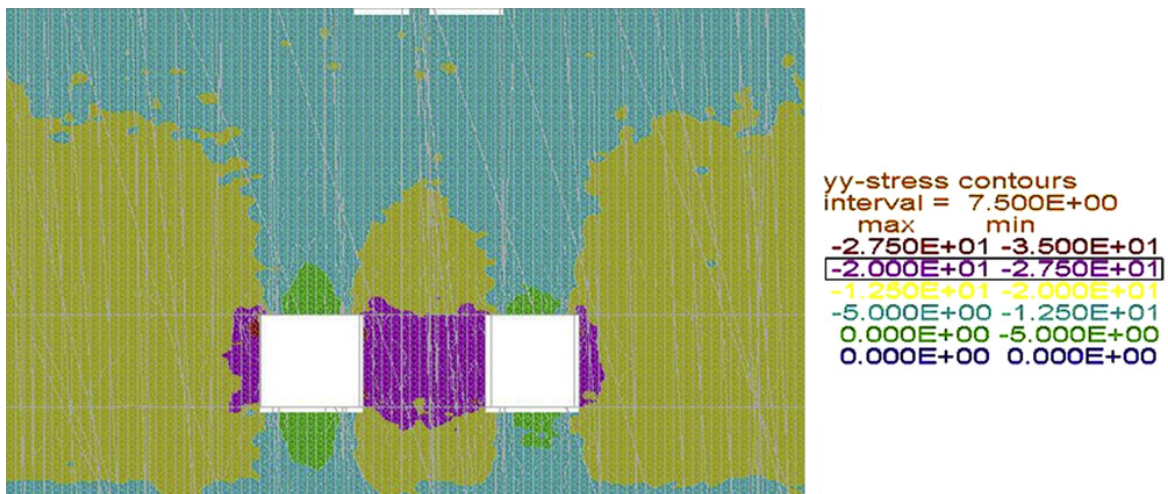
Οι αναλύσεις περιλαμβάνουν τη χρήση της μεθόδου των συνοριακών στοιχείων (Boundary Element Method) και τη χρήση της μεθόδου διακριτών στοιχείων με το πρόγραμμα 3DEC της ITASCA. Το Σχήμα 3.14 απεικονίζει το τρισδιάστατο μοντέλο του υπόγειου θαλάμου που κατασκευάστηκε στο 3DEC. Τα γεωμετρικά

χαρακτηριστικά του μοντέλου, οι διαστάσεις του οποίου είναι $170 \times 130 \times 80 \text{ m}^3$, διαμορφώθηκαν με την εισαγωγή των κύριων συστημάτων ασυνεχειών με ντετερμινιστικό τρόπο, αφού μετρήθηκαν και καταγράφηκαν κατά τη διεξαγωγή των επί τόπου γεωλογικών ερευνών.



Σχήμα 3.14 Τρισδιάστατο μοντέλο και γεωμετρία του λατομείου Ravaccione (Ferrero et al., 2013)

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν τέσσερις δοκιμές για διαφορετική αρχική εντατική κατάσταση μεταβάλλοντας την τιμή του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων, K_0 , σε κάθε δοκιμή. Συγκεκριμένα, οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για K_0 ίσο με 0.38, 0.33, 0.15 και 0.1, αντίστοιχα, και παρατηρήθηκε καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων των αναλύσεων και των επί τόπου μετρήσεων για $K_0 = 0.1$. Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση των καμπύλων τάσεων που προκαλούνται από την εκσκαφή και παρατηρείται η αύξηση των τάσεων λόγω της δημιουργίας του στύλου.



Σχήμα 3.15 Κατακόρυφη τάση μετά την εκσκαφή (Ferrero et al., 2013)

Το παραπάνω ερευνητικό έργο παρουσιάζει τη χρησιμότητα των αριθμητικών μεθόδων για την αντιμετώπιση σύνθετων γεωλογικών και γεωμετρικών προβλημάτων και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της βραχομάζας κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εφικτός ο εντοπισμός των κρίσιμων ογκοτεμαχίων τμημάτων της βραχομάζας και η πρόληψη αστοχιών μέσω της λήψης των απαραίτητων μέτρων υποστήριξης. Η ανάλυση τάσεων με τη μέθοδο του ασυνεχούς έχει τη δυνατότητα να αποτυπώσει τις επιπτώσεις στην παραμόρφωση και την ευστάθεια του υπόγειου χώρου από τον προσανατολισμό των συστημάτων ασυνεχειών, και να προσομοιώσει μεγάλες μετατοπίσεις που μπορεί να παρατηρηθούν σε ασυνεχείς βραχομάζες (Wang, 2012).

4 Ευστάθεια οροφής θαλάμων σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις ασβεστολίθου

4.1 Εισαγωγή

Τα υπόγεια έργα κατασκευάζονται συχνά σε στρωσιγενείς βραχομάζες. Η στρωσιγένεια χαρακτηρίζει κυρίως τα ιζηματογενή πετρώματα, τα οποία εμφανίζονται συνήθως διατεταγμένα σε στρώσεις διαφόρων παχών, και χαρακτηρίζεται γενικά από επίπεδη γεωμετρία και εμμονή. Σύμφωνα με τους Brady και Brown (1985) μια στρωσιγενής βραχομάζα έχει τις ακόλουθες δύο ιδιότητες: 1) χαμηλή ή μηδενική εφελκυστική αντοχή σε κατεύθυνση κάθετη προς τη διαστρωμάτωση, και 2) σχετικά χαμηλή διατμητική αντοχή σε σύγκριση με εκείνη του άρρηκτου βράχου. Η εκσκαφή ενός υπογείου έργου σε στρωσιγενές πέτρωμα θα έχει ως αποτέλεσμα την αποκόλληση της οροφής από τη βραχομάζα λόγω της χαμηλής εφελκυστικής αντοχής των επιπέδων των στρώσεων.

Τα χαρακτηριστικά της οροφής που ενδιαφέρουν το μηχανικό κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός υπογείου έργου είναι, κυρίως, ο προσανατολισμός, η κλίση και το άνοιγμα των οριζοντίων στρωμάτων, καθώς και η γωνία των κάθετων σε αυτά ασυνεχειών. Κατά το στάδιο των ερευνητικών γεωτρήσεων, ο γεωλόγος καλείται να εξετάσει τα δείγματα των γεωτρήσεων προσδιορίζοντας το χαρακτήρα τόσο του άρρηκτου βράχου όσο και των παρατηρούμενων ασυνεχειών. Ακόμη, η χρήση εκρηκτικών υλών για την απομάκρυνση του πετρώματος μπορεί να έχει σημαντική επιρροή στην ευστάθεια της οροφής, διότι ο κερματισμός του πετρώματος ενδέχεται να προκαλέσει ρωγμές ή αποκόλληση του πετρώματος της οροφής. Ωστόσο, στην περίπτωση που η βραχομάζα δεν είναι ομαλή ενδείκνυται η χρήση ασθενέστερων εκρηκτικών υλών για την επίτευξη λείας επιφάνειας οροφής.

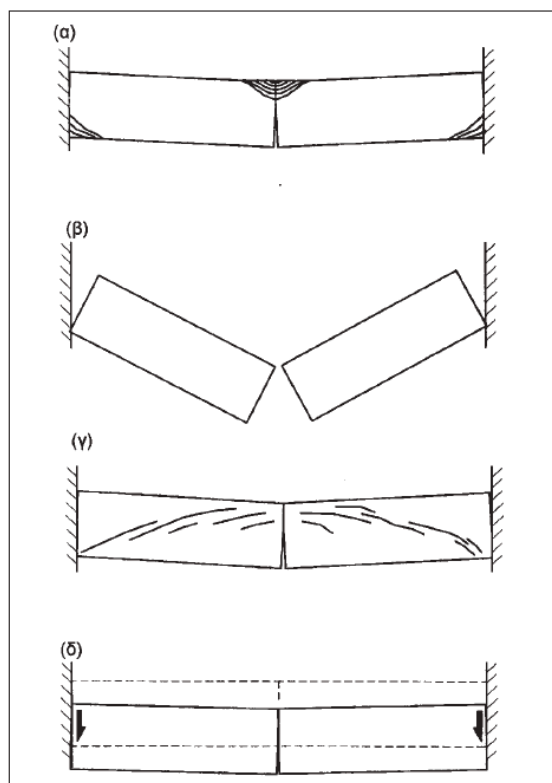
Βασικό στοιχείο της σχεδιαστικής φάσης μιας υπόγειας εκμετάλλευσης είναι ο καθορισμός του μέγιστου δυνατού ανοίγματος των θαλάμων, εντός των οποίων θα πραγματοποιηθεί η εξορυκτική δραστηριότητα. Οι μηχανισμοί που δύνανται να προκαλέσουν αστοχία της οροφής ενός θαλάμου εξαρτώνται από πολλούς

παράγοντες, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις σχετίζονται με τις ασυνέχειες στην οροφή των θαλάμων.

4.2 Μηχανισμοί αστοχίας της άμεσης οροφής

Η οροφή μιας υπόγειας εκσκαφής σε στρωσιγενή βραχομάζα αποτελείται συνήθως από διαδοχικά παράλληλα στρώματα, το πάχος των οποίων είναι μικρό σε σύγκριση με το άνοιγμα της οροφής (Obert & Duvall, 1967). Στις περισσότερες περιπτώσεις, η βραχομάζα διατέμενεται από πολυάριθμα συστήματα ασυνεχειών που σχηματίζουν ένα μητρώο μεμονωμένων βραχωδών τεμαχίων. Μια τυπική περίπτωση στρωσιγένειας αποτελεί η οριζόντια διαστρωμάτωση με κατακόρυφες ασυνέχειες. Είναι προφανές, λοιπόν, ότι οι μηχανικές ιδιότητες των ασυνεχειών υπαγορεύουν τόσο την παραμόρφωση όσο και τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας. Επομένως, είναι επιτακτική η ενσωμάτωση της επιρροής τους σε οποιαδήποτε μέθοδο ανάλυσης της παραμορφωσιακής κατάστασης των υπογείων εκσκαφών.

Οι συνήθεις μηχανισμοί αστοχίας που παρατηρούνται λόγω στρωσιγένειας είναι (Adhikary, 1997): α) αστοχία λόγω κάμψης (bending), όπου η οροφή κάμπτεται υπό φορτίο βαρύτητας που οδηγεί σε εφελκυστική ρωγμή (Hoek & Brown, 1980, Brady & Brown, 1985), β) αστοχία λόγω ελαστικής αστάθειας (buckling), κατά την οποία η οροφή και το δάπεδο της εκσκαφής αστοχούν λόγω υψηλών οριζόντιων τάσεων (Brady & Brown, 1985), γ) αστοχία λόγω διαγώνιας ρωγμάτωσης (flexural toppling) (Aydan, 1989), και δ) αστοχία λόγω ολίσθησης κατά μήκος προϋπαρχουσών ασυνεχειών και διάτμησης του άρρηκτου βράχου (sliding and shearing) (Kaiser, 1979). Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι των προαναφερθέντων τρόπων αστοχίας μπορεί να υπολογιστεί με την προϋπόθεση ότι η θλιπτική αντοχή του βράχου και η διατμητική αντοχή των ασυνεχειών είναι γνωστές. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται οι τρόποι αστοχίας οροφής, όπως διερευνήθηκαν από τον Sterling (1980).



Σχήμα 4.1 Μηχανισμοί αστοχίας λόγω στρωσιγένειας (Σοφιανός και Καπένης, 1999, από τον Sterling, 1980)

4.3 Μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας οροφής

Ο σχεδιασμός σταθερών ανοιγμάτων σε υπόγειες εκμεταλλεύσεις πραγματοποιείται κυρίως με εμπειρικές μεθόδους σε ένα πρώιμο στάδιο έρευνας και, στη συνέχεια, μπορεί να προχωρήσει σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα αναλυτικών μεθόδων και αριθμητικών λύσεων. Ωστόσο, λόγω του ότι δεν υπάρχουν καθολικά αποδεκτές μέθοδοι για την αξιολόγηση της ασφάλειας μιας υπόγειας εκσκαφής, η κρίση και η εμπειρία του μηχανικού συνεχίζουν να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο κατά το σχεδιασμό. Πιο συγκεκριμένα, ο μηχανικός καλείται να ακολουθήσει μια πραγματιστική προσέγγιση για το σχεδιασμό του ανοίγματος της οροφής, κατά την οποία θα παρακολουθεί τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας και το τασικό πεδίο καθ' όλη τη διάρκεια της σχεδιαστικής και εξορυκτικής φάσης.

Σε σπάνιες περιπτώσεις, η στρωσιγένεια των υπογείων ορόφων αντιπροσωπεύει τη μοναδική οικογένεια ασυνεχειών της βραχομάζας (Σοφιανός και Καπένης, 1999), και η ευστάθεια και η παραμόρφωση της οροφής είναι δυνατό να εκτιμηθούν με ελαστική επίλυση. Ο μηχανισμός αστοχίας ενεργοποιείται όταν τα μικρότερα σε

πάχος στρώματα πλησίον των υπογείων ανοιγμάτων τείνουν να αποκολληθούν από την κυρίως βραχομάζα, τα οποία, κατ' επέκταση, σχηματίζουν μεμονωμένες δοκούς επιτρέποντας την εφαρμογή της θεωρίας ελαστικότητας. Η αστοχία προκαλείται όταν η δοκός με το μικρότερο πάχος, στην άμεση οροφή, κάμπτεται προς τα κάτω και ρωγματώνεται στην άνω της επιφάνεια, στα άκρα, και στο μέσον της στην κάτω επιφάνεια (Goodman, 1989).

Η ύπαρξη κι άλλων συστημάτων ασυνεχειών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση και, στην ακραία περίπτωση, την αδυναμία της ικανότητας του πετρώματος να παραλάβει εφελκυστικές τάσεις σε διεύθυνση παράλληλη με αυτήν της στρώσης της οροφής. Ωστόσο, όταν οι ασυνέχειες τέμνουν κάθετα τις στρώσεις είναι δυνατή η υπόθεση ότι δημιουργείται μια θλιπτική αψίδα εντός της οροφής, η οποία μεταφέρει τα φορτία στις στηρίξεις (Diederichs and Kaiser, 1999). Ο Fayol (1885) παρατήρησε ότι τα στρώματα των υπόγειων ορόφων διαχωρίζονται κατά την κάμψη τους και κάθε ένα μεταφέρει το ίδιο βάρος του στις στηρίξεις όπως μια δοκός, χωρίς να δέχεται φόρτιση από τα γειτονικά στρώματα, με αποτέλεσμα η ευστάθεια να καθορίζεται από τη φέρουσα ικανότητα του φορτιζόμενου στρώματος και από το ίδιο του βάρος (Σοφιανός και Καπένης, 1999).

Ο Evans (1941) καθόρισε τη σχέση μεταξύ του βέλους κάμψης, της πλευρικής πίεσης και της ευστάθειας της ρωγματωμένης οροφής. Το έργο του εισήγαγε τον όρο της δοκού Voussoir, και κατ' επέκταση τη μέθοδο του χαμηλού θόλου (flat arch), για την περιγραφή του φαινομένου που εκτείνεται σε μια υπόγεια εκσκαφή. Με την εφαρμογή της ανάλυσης Voussoir είναι δυνατή η εκτίμηση της συμπεριφοράς οροφής στρωσιγενούς πετρώματος και ο σχεδιασμός των διαστάσεων ενός υπόγειου ανοίγματος. Παρόλο που η δύναμη της στρωσιγενούς οροφής που καθορίζεται από τις προτεινόμενες μεθόδους είναι προσεγγιστική, η ανάλυση αποτελεί μια ποσοτική κατευθυντήρια γραμμή για την αξιολόγηση της ευστάθειας της οροφής (Passaris, et al, 1993).

4.4 Μελέτη ευστάθειας οροφής υπόγειων λατομείων στην Ισπανία

4.4.1 Διατύπωση του προβλήματος και μεθοδολογία ανάλυσης

Οι ερευνητές Alcalde-Gonzalo et al. (2013) του Πανεπιστημίου του Οβιέδο της Ισπανίας προσπάθησαν να υπολογίσουν το μέγιστο δυνατό ασφαλές άνοιγμα υπόγειου χώρου, ώστε να μπορεί να παραλάβει τις εφελκυστικές τάσεις μέσω της οροφής. Οι ερευνητές μελέτησαν τη συμπεριφορά της οροφής και την επίδραση της εφελκυστικής αντοχής του πετρώματος κατά την αύξηση των εφελκυστικών τάσεων. Είναι προφανές ότι η ευστάθεια της οροφής των θαλάμων καθορίζει το άνοιγμά τους και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας και των ασυνεχειών.

Για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας για τη βραχομάζα σύμφωνα με τη διπλή θεωρία ελαστικότητας (Exadaktylos et al., 2001) και η μέθοδος εφαρμόστηκε σε υπαρκτά λατομεία μαρμάρου στην Ισπανία, και συγκεκριμένα στο λατομείο Kampanzar που βρίσκεται στο δήμο Arrasate της Gipuzkoa και στο λατομείο Calzada που βρίσκεται στην περιοχή Villamartin de Vadeorras της Orense. Ο Πίνακας 4.1 παρουσιάζει τις διαστάσεις των στρωμάτων και τις μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας που εντοπίζεται στις υπόψη εκμεταλλεύσεις.

Πίνακας 4.1 Πληροφορίες για τα ασβεστολιθικά λατομεία Kampanzar και Calzada (Alcalde-Gonzalo et al., 2013)

Ιδιότητες βραχομάζας	Λατομείο Kampanzar	Λατομείο Calzada
Πάχος στρώματος, T (m)	1	2
Πλάτος στρώματος, H (m)	1	1
Ειδικό βάρος, γ (kN/m ³)	27	27
Εφελκυστική αντοχή, σ_c (MPa)	5.57	15
Μέτρο ελαστικότητας, E (GPa)	100	64
Γωνία τριβής, φ (°)	30	44.3
Συνοχή, c (MPa)	2	10.9
Λόγος Poisson, ν	0.25	0.15

Για την προσομοίωση των λατομείων επιλέχθηκε επίμηκες υπόγειο άνοιγμα, η οροφή του οποίου έχει οριζόντια διάστρωση. Κάθε στρώση θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ως αμφίπακτη δοκός, η οποία έχει ορθογωνική διατομή και φέρει ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο ίσο με το ίδιο βάρος της. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων συγκρίνονται με τα αποτελέσματα αναλύσεων σύμφωνα με τη μεθοδολογία του Stephansson (1971) για την ευστάθεια ανοιγμάτων σε στρωσιγενή πετρώματα, και η συμπεριφορά της οροφής του υπογείου ανοίγματος μετά την αστοχία συγκρίνεται με αυτή της αψίδας θλιπτικών τάσεων (compression arch) της θεωρίας Voussoir.

4.4.2 Αστοχία οροφής σε εφελκυσμό

Αρχικά, για τον υπολογισμό των ροπών και του βέλους κάμψης θεωρούμε μια αμφίπακτη δοκό κάτω από την επίδραση ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου, P . Η διαφορική εξίσωση τέταρτης τάξης που περιγράφει το βέλος κάμψης της δοκού είναι:

$$EI \left(\frac{d^4 y}{dx^4} \right) = P \quad (4.1)$$

Όπου I η ροπή αδράνειας.

Η παραγωγή της Εξίσωσης (4.1) δύο και τέσσερις φορές μας δίνει τη συνάρτηση της ροπής, $M(x)$, και τη σχέση της ελαστικής γραμμής, $y(x)$, αντίστοιχα, σε κάθε τμήμα (x) του στρώματος της οροφής ως:

$$M(x) = -\frac{P}{2}x^2 + \frac{PL}{2}x - \frac{PL^2}{12} \quad (4.2)$$

$$y(x) = \frac{P}{24EI}x^4 - \frac{PL}{12EI}x^3 + \frac{PL^2}{24EI}x^2 \quad (4.3)$$

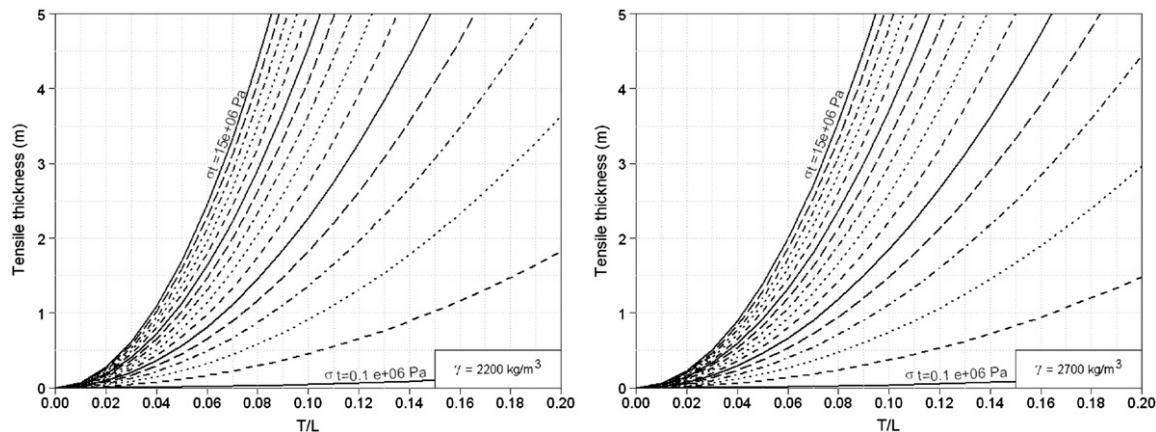
Οι Εξισώσεις (4.2) και (4.3) θεωρούν συμμετρική κατανομή των θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων ως προς την οριζόντια γραμμή που διέρχεται από το μέσο της δοκού.

Δεδομένου ότι η εφελκυστική αντοχή πετρωμάτων είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά με τη σημαντική θλιπτική τους αντοχή, επέρχεται το συμπέρασμα ότι η αστοχία

μπορεί να παρατηρηθεί όταν οι εφελκυστικές τάσεις είναι μεγαλύτερες από την εφελκυστική αντοχή της βραχομάζας. Οι ερευνητές χρησιμοποίησαν τις Εξισώσεις (4.2) και (4.3) κι εφήρμοσαν το νόμο του Navier θεωρώντας ότι οι τάσεις στο πέτρωμα είναι ίσες με τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή του πετρώματος, καταλήγοντας σε μια σχέση που συνδέει την εφελκυστική αντοχή, σ_t , με το ειδικό βάρος του πετρώματος, γ , και το «ωφέλιμο» πάχος δοκού (οροφής) κάτω από εφελκυστική τάση, T_1 , συναρτήσει του πραγματικού πάχους, T , και του ανοίγματος, L , της δοκού:

$$y_t = \frac{\sigma_t}{\gamma} \left(\frac{T}{L} \right)^2 \quad (4.4)$$

Με τη βοήθεια των διαγραμμάτων του Σχήματος 4.2, που προκύπτουν από την παραπάνω εξίσωση για ένα εύρος τιμών εφελκυστικής αντοχής και ειδικού βάρους πετρωμάτων, είναι εφικτός ο γραφικός προσδιορισμός του επιτρεπόμενου μέγιστου ανοίγματος οροφής για πραγματικό πάχος δοκού, χωρίς να προκληθεί αστοχία.



Σχήμα 4.2 Λόγος πάχους/ανοίγματος οροφής για διαφορετικές τιμές του ειδικού βάρους της βραχομάζας (Alcalde-Gonzalo et al., 2013)

4.4.3 Ανάλυση του λατομείου Kampanzar

Διάφοροι περιβαλλοντικοί και οικονομικοί λόγοι συνέβαλαν στη συζήτηση για τη μετατροπή της υπάρχουσας εκμετάλλευσης ασβεστολίθου του λατομείου Kampanzar σε υπόγεια, επομένως, το 2003 ξεκίνησε η μελέτη σκοπιμότητας της υπόγειας εκμετάλλευσης. Στόχος ήταν η εύρεση του μέγιστου ανοίγματος οροφής

χωρίς να προκληθεί αστοχία. Για το λόγο αυτόν πραγματοποιήθηκαν τριών ειδών αναλύσεις, και πιο συγκεκριμένα:

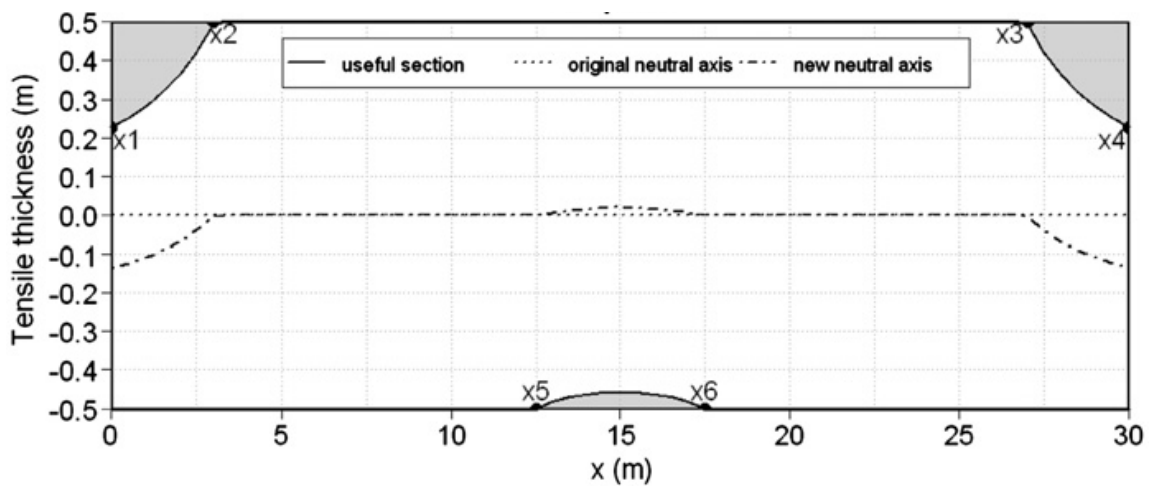
- Γραφική ανάλυση χρησιμοποιώντας τις καμπύλες αστοχίας του Σχήματος 4.2 για τη γρήγορη εκτίμηση του μέγιστου μήκους ανοίγματος της οροφής χωρίς τη δημιουργία ρωγμής.
- Αριθμητική ανάλυση με τη βοήθεια του λογισμικού ALMEC 3D για τον υπολογισμό του μήκους του ανοίγματος στο εσωτερικό των θαλάμων και του ύψους των στύλων. Το μέγιστο άνοιγμα των θαλάμων και το μέγιστο ύψος των στύλων εκτιμήθηκε ότι πρέπει να είναι μικρότερο από 20 m και 25 m, αντίστοιχα, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες ασφαλείας.
- Αναλυτική μέθοδος με την εφαρμογή της θεωρίας ελαστικότητας και της λύσης του Stephansson (1971) και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Σύμφωνα με τη θεωρία ελαστικότητας, οι μέγιστες τιμές εφελκυστικών τάσεων παρουσιάζονται στις στηρίξεις, από όπου και ξεκινάει η αστοχία, κι έπειτα παρουσιάζεται στο μέσο της δοκού, ενώ με τη θεωρία του Stephansson οι τάσεις έχουν σχεδόν ίδιες τιμές τόσο στις στηρίξεις όσο και στο μέσο της δοκού, και η αστοχία εξελίσσεται κατά μήκος του ανοίγματος. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, οι στηρίξεις στα άκρα της δοκού είναι ελαστικές με αποτέλεσμα την ομοιόμορφη κατανομή των εφελκυστικών τάσεων κατά μήκος του ανοίγματος. Το Σχήμα 4.3 απεικονίζει τη μορφή της οροφής του λατομείου κατά την αστοχία για ανοίγματα μεγαλύτερα από αυτά που εκτιμήθηκαν στις αναλύσεις. Η δοκός αρχικά θραύεται στις στηρίξεις στην άνω επιφάνεια, αλλά για ακόμα μεγαλύτερα ανοίγματα θραύεται στο μέσον της στην κάτω επιφάνεια.

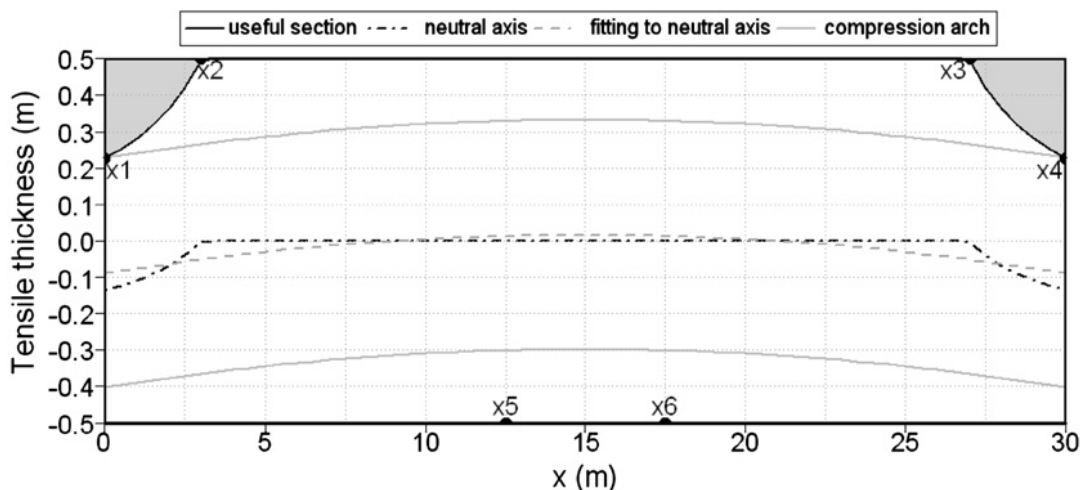
Σύμφωνα με τη θεωρία Voussoir, μια αμφίπακτη δοκός κάτω από ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο αστοχεί όταν η μέγιστη εφελκυστική τάση ξεπεράσει την εφελκυστική αντοχή του βράχου (Diederichs and Kaiser, 1999). Σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρούνται κατακόρυφες εφελκυστικές ρωγμές στις στηρίξεις και η δοκός μετατρέπεται σε αμφιέριστη, όταν ξεπεραστεί η επιτρεπόμενη τάση στην ακραία στήριξη. Έπειτα, λόγω της παραμόρφωσης που υφίσταται η δοκός, προκαλείται περαιτέρω θραύση στην περιοχή του μέσου της, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αψίδας θλιπτικών τάσεων και ροπής μεταξύ της δύναμης αντίδρασης στο μέσον και τις στηρίξεις για την αντιστάθμιση της ροπής

λόγω του ίδιου βάρους της δοκού. Για την αντιμετώπιση των μη-συμμετρικών οριζοντίων τάσεων, το μοντέλο που χρησιμοποίησαν οι ερευνητές θεωρεί ένα μέσο πάχος NT για την αψίδα, όπου N είναι ένας μειωτικός συντελεστής του πάχους T . Η δοκός βρίσκεται σε συνθήκη ισορροπίας όταν ο συντελεστής N πλησιάζει την τιμή 0.75.

Για την παρούσα ανάλυση, έπειτα από προσαρμογή του ουδέτερου άξονα της δοκού μέσω της θεωρίας ελαστικότητας, το νέο πάχος της οροφής βρίσκεται στο 64% του αρχικού πάχους (βλ. Σχήμα 4.4). Το ποσοστό αυτό πλησιάζει στο 70%, το οποίο θεωρείται ποσοστό ισορροπίας σύμφωνα με το μοντέλο Voussoir του Evans (1941).



Σχήμα 4.3 Ωφέλιμο τμήμα της οροφής μετά την αστοχία για το λατομείο Kampanzar (Alcalde-Gonzalo et al., 2013)

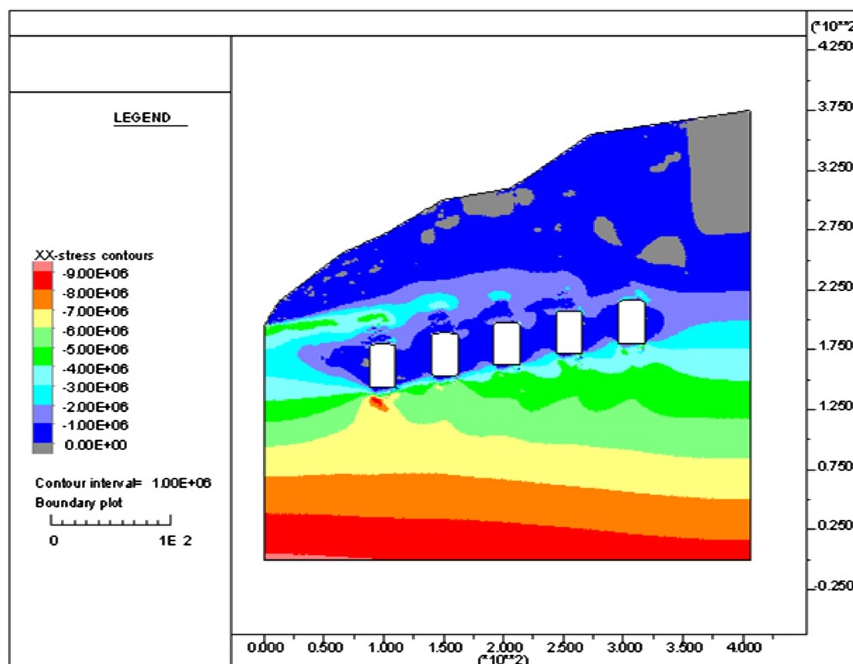


Σχήμα 4.4 Νέο πάχος οροφής έπειτα από προσαρμογή του ουδέτερου άξονα και δημιουργία αψίδας θλιπτικών τάσεων (Alcalde-Gonzalo et al., 2013)

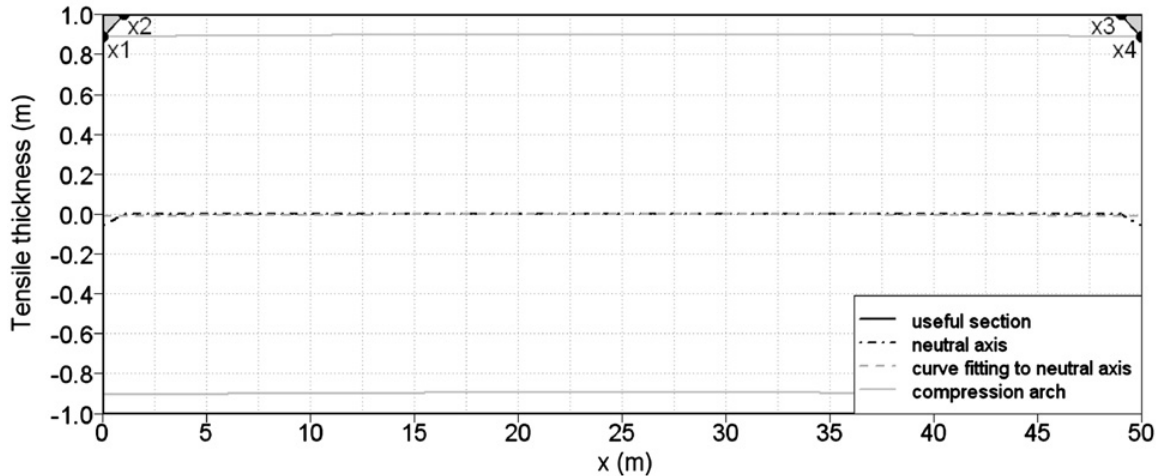
4.4.4 Ανάλυση του λατομείου Calzada

Η μελέτη υπόγειας εκμετάλλευσης του δεύτερου λατομείου (λατομείο Calzada) ακολούθησε τα ίδια βήματα και τις ίδιες μεθόδους ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν για το λατομείο Kampanzar, με τη διαφορά ότι για την αριθμητική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα FLAC 2D της *Itasca*. Το Σχήμα 4.5 παρουσιάζει την κατανομή κατακόρυφων τάσεων στο υπό μελέτη λατομείο. Παρόλο που οι αριθμητικές αναλύσεις για το συγκεκριμένο λατομείο έδειξαν ότι η αστάθεια της οροφής θα προκληθεί για άνοιγμα μεγαλύτερο από 40 μέτρα, ενώ σύμφωνα με τη γραφική μέθοδο και τη θεωρία ελαστικότητας το μέγιστο άνοιγμα είναι 47 μέτρα, οι διαστάσεις των θαλάμων και στύλων για το σχεδιασμό επιλέχθηκαν στα 20 μέτρα και 25 μέτρα, αντίστοιχα. Η επιλογή των διαστάσεων αυτών έγινε για τεχνικούς λόγους καθώς και για την οικονομική βιωσιμότητα του έργου.

Η μελέτη της συμπεριφοράς της οροφής για μεγαλύτερο άνοιγμα από το επιτρεπόμενο έγινε για άνοιγμα 50 μέτρων. Οι νέες ροπές και τα βέλη κάμψης για δοκό με άνοιγμα 50 μέτρων έχουν δύο σημεία καμπής πολύ κοντά στις στηρίξεις. Σε αυτήν την περίπτωση, λόγω του ότι οι τιμές των δύο εξεταζόμενων ανοιγμάτων (47 και 50 μέτρων) είναι πολύ κοντά, η αστοχία θα προκληθεί αποκλειστικά στις στηρίξεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.5 Κατανομή κατακόρυφων τάσεων στο FLAC 2D για το λατομείο Calzada (Alcalde-Gonzalo et al., 2013)



Σχήμα 4.6 Νέο πάχος οροφής του λατομείου Calzada για άνοιγμα πάνω από 50 μέτρα (Alcalde-Gonzalo et al., 2013)

4.4.5 Συμπεράσματα

Για την ακριβή προσομοίωση των παραμορφωσιακών χαρακτηριστικών μιας δοκού Voussoir απαιτείται η χρήση αριθμητικών μεθόδων. Η μέθοδος που επιλέγεται πρέπει να επιτρέπει την ταυτόχρονη κίνηση και παραμόρφωση του άκαμπτου σώματος, ενώ η σύγκλιση σε κάθε χρονικό βήμα θα πρέπει να επιτευχθεί μετά από σχετικά μεγάλη μετακίνηση και περιστροφή του τεμαχίου, χωρίς τον εφελκυσμό του. Επιπλέον, το κατακόρυφο φορτίο το οποίο συνήθως λαμβάνεται αυθαίρετα, πρέπει να αξιολογείται σε κάθε χρονικό βήμα, δεδομένου ότι ποικίλλει ανάλογα με την κατακόρυφη θέση στη δοκό, καθώς και με την εξέλιξη της παραμόρφωσής της. Τέλος, το μοντέλο πρέπει να λαμβάνει υπόψη την επίδραση της τριβής των ασυνεχειών σχετικά με τη μετατόπιση του τεμαχίου και το μηχανισμό κάμψης (Hatzor, 1999).

Συνοπτικά, οι Alcalde-Gonzalo et al. (2013) αναγνώρισαν ότι ένα από τα κρίσιμα ζητήματα αναφορικά με την ευστάθεια ενός υπογείου έργου είναι η εύρεση και εξασφάλιση σταθερής οροφής και με την έρευνα που πραγματοποίησαν προτείνουν τρεις εναλλακτικές μεθόδους εκτίμησης της ευστάθειας οροφής ενός υπόγειου ανοίγματος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων και την κρίση των μελετητών, οι βέλτιστες συνθήκες ευστάθειας εκτιμήθηκαν για άνοιγμα θαλάμου 20m και ύψος στύλων 25m, παρόλο που στο δεύτερο λατομείο εκτιμήθηκε αστοχία για άνοιγμα θαλάμου μεγαλύτερο των 40m.

4.5 Μελέτη ευστάθειας οροφής υπογείων λατομείων στις ΗΠΑ

Προκειμένου να μελετηθεί το πρόβλημα ευστάθειας οροφής υπογείων λατομείων και να αναπτυχθεί κατάλληλη μεθοδολογία για το σχεδιασμό ευσταθών ανοιγμάτων οροφής, το Εθνικό Ίδρυμα Επαγγελματικής Ασφάλειας και Υγείας (NIOSH) των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής πραγματοποίησε έρευνα σε συνεργασία με τους ερευνητές Esterhuizer et al. (2007, 2011) σε υπόγεια λατομεία ασβεστολίθου.

Η έρευνα διεξήχθη σε 34 λατομεία στην Ανατολική και Κεντροδυτική Αμερική και αφορά στη συλλογή δεδομένων σχετικά με ανοίγματα οροφής, ιδιότητες βραχομάζας και συνήθεις πρακτικές υποστήριξης. Τα 24 λατομεία βρίσκονται στις Εσωτερικές Πεδιάδες (Interior Plains), και συγκεκριμένα στις πολιτείες Ιλινόι, Αϊόβα, Κεντάκι, Μιζούρι και Ιντιάνα, ενώ τα υπόλοιπα 10 λατομεία βρίσκονται στα Απαλάχια Υψίπεδα (Appalachian Highlands), και συγκεκριμένα στις πολιτείες Πενσυλβάνια, Μέριλαντ, Δυτική Βιρτζίνια, Βιρτζίνια και Τενεσί. Το Σχήμα 5.7 απεικονίζει τις υπόψη φυσιογραφικές περιοχές στο χάρτη της Αμερικής και ο χάρτης του Σχήματος 5.8 απεικονίζει τις θέσεις των λατομείων.



Σχήμα 4.7 Χάρτης της Βόρειας Αμερικής που απεικονίζει τις Εσωτερικές Πεδιάδες (κόκκινο χρώμα) (αριστερά)

(Πηγή: www.wikipedia.org) και τμήμα του χάρτη της Αμερικής με τις πολιτείες (μωβ χρώμα) που βρίσκονται στα

Απαλάχια Υψίπεδα (Πηγή: www.learner.org)



Σχήμα 4.8 Προσεγγιστικές τοποθεσίες των 34 υπογείων ασβεστολιθικών λατομείων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη ευστάθειας οροφής (Esterhuizen et al., 2011)

Η υπόγεια εκμετάλλευση των ασβεστολιθικών κοιτασμάτων στην Ανατολική και Κεντροδυτική Αμερική πραγματοποιείται με τη μέθοδο των θαλάμων και στύλων. Η χρήση μηχανολογικού εξοπλισμού μεγάλων διαστάσεων σε υπογείους θαλάμους μέσου πλάτους 13.5 μέτρων και ύψους 7.5 μέτρων εξασφαλίζει τόσο υψηλή παραγωγικότητα όσο και χαμηλό κόστος εκμετάλλευσης. Σε περίπου 1 από τα 3 λατομεία που συμπεριλήφθηκαν στην έρευνα, το πέτρωμα εξορύσσεται μέσω ενός συστήματος βαθμίδων μεταξύ των στύλων, επομένως η ευστάθεια της οροφής κατά τη διάρκεια της εξορυκτικής φάσης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την εξέλιξη του έργου.

Για τη μελέτη και την αξιολόγηση των συνθηκών που επικρατούν στα λατομεία συλλέχθηκαν δεδομένα για την αντοχή του πετρώματος, τα γεωμετρικά στοιχεία και τις φυσικές ιδιότητες των επιφανειών ασυνέχειας, τις διαστάσεις των θαλάμων και στύλων, καθώς και στοιχεία για τη συμπεριφορά της οροφής και των στύλων. Η πρόβλεψη των συνθηκών ευστάθειας οροφής αποτελεί πρόκληση για το μηχανικό, διότι η κατάσταση και η συμπεριφορά της οροφής αξιολογούνται συχνά υποκειμενικά και εμπειρικά. Για την απόκτηση, επομένως, των απαραίτητων πληροφοριών σχετικών με τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας και των ασυνεχειών, δύο έως πέντε σύνολα δεδομένων συλλέχθηκαν από διαφορετικές τοποθεσίες στο κάθε λατομείο, με το κάθε σύνολο δεδομένων να περιγράφει τις συνθήκες ευστάθειας των θαλάμων και στύλων για χώρο με εμβαδόν 100 επί 100 m. Ο Πίνακας 4.2 παρουσιάζει αναλυτικά τις πληροφορίες που

καταγράφηκαν. Ο Πίνακας 4.3 παρουσιάζει τις κινηματικές και στατικές αστάθειες της οροφής που παρατηρήθηκαν στα λατομεία, οι οποίες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το μέγεθος των ογκοτεμαχίων βράχου που αστόχησαν.

Πριν από την εκσκαφή ενός υπόγειου χώρου, η κατανομή των τάσεων είναι ομοιόμορφη και το μέγεθος της κατακόρυφης τάσης αυξάνεται αναλογικά με το βάθος. Μετά την εκσκαφή, οι τάσεις στο τμήμα των στρωμάτων ακριβώς πάνω το άνοιγμα μηδενίζονται και το πέτρωμα χάνει την αρχική του υποστήριξη, με αποτέλεσμα να προκαλείται διαταραχή της εντατικής ισορροπίας. Ως εκ τούτου, το φορτίο της άμεσης οροφής τείνει να μεταφέρεται προς τα αντερείσματα και η οροφή αρχίζει να κάμπτεται στο μέσον της. Αν τα στρώματα της άμεσης οροφής είναι ικανά, ο λυγισμός θα σταματήσει πριν την κατάρρευση της οροφής και οι τάσεις γύρω από το άνοιγμα θα φτάσουν τελικά σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας.

Σύμφωνα με την έρευνα που πραγματοποιήθηκε, τα 30 από τα 34 λατομεία είχαν υποστεί κάποια αστοχία μικρής ή μεγάλης κλίμακας λόγω αστάθειας της οροφής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης κατάστασης της οροφής σύμφωνα με τις κατηγορίες αστοχιών που συμπεριλαμβάνει ο Πίνακας 4.3. Στο 28% της συνολικής έκτασης των υπογείων οροφών που μελετήθηκαν παρατηρήθηκαν και καταγράφηκαν μικρής κλίμακας αστοχίες και καταπτώσεις βράχων με τη μορφή λεπτών πλακών και ογκοτεμαχίων ή λόγω λειτουργίας του στρώματος της άμεσης οροφής ως δοκού. Στο υπόλοιπο 72% των εξεταζόμενων χώρων η οροφή ήταν ευσταθής χωρίς σημάδια αστοχίας.

Εκτός από τις αστοχίες μικρής κλίμακας σημειώθηκαν παράλληλα και μεγάλες καταπτώσεις τμημάτων οροφής στα 19 από τα 30 λατομεία. Οι παράγοντες που προκάλεσαν τέτοιου είδους αστοχίες σχετίζονται κυρίως με τις οριζόντιες τάσεις που φόρτιζαν την οροφή, τις ασυνέχειες που εκτείνονταν σε ορισμένες περιπτώσεις σε όλο το πλάτος του θαλάμου, την αστοχία των στρωμάτων της άμεσης οροφής, καθώς και κυρίως της κατακρήμνισης τμημάτων λόγω χαμηλής αντοχής της βραχομάζας.

Η αξιολόγηση του συνόλου των δεδομένων έδειξε, επίσης, ότι στα 25 από τα 34 λατομεία είχε γίνει προσπάθεια για τη διατήρηση συγκεκριμένου πάχους της άμεσης οροφής του ασβεστολιθικού στρώματος μέσω διατρήσεων. Το μέσο πάχος της άμεσης οροφής στα λατομεία που λειτουργούσαν χωρίς πρόσθετα μέτρα

υποστήριξης ήταν περίπου 2.25 m, ενώ στα λατομεία με συστήματα αγκύρωσης το μέσο πάχος της οροφής ήταν 1.3 m.

Πίνακας 4.2 Δεδομένα για τη μελέτη ευστάθειας οροφής ασβεστολιθικών λατομείων (από Esterhuizen et al., 2007)

Πληροφορία	Περιγραφή
Ποιότητα βραχομάζας	Ταξινόμηση σύμφωνα με το σύστημα RMR (Bieniawski, 1989). Εκτίμηση της συχνότητας ασυνεχειών με τη μέθοδο του Laubscher (1990). Μέτρηση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής (UCS) του πετρώματος με εργαστηριακές δοκιμές
Χαρακτηριστικά ασυνεχειών	Μελέτη μεμονωμένων ασυνεχειών που εκτείνονται σε όλο το μήκος του θαλάμου, οι οποίες ενδέχεται να έχουν σημαντική επίδραση στην ευστάθεια οροφής
Γεωμετρικά χαρακτηριστικά οροφής	Συγκέντρωση στοιχείων για τον τύπο και το πάχος των στρωμάτων της οροφής, καθώς και άλλων στοιχείων που επηρεάζουν την ευστάθεια
Παρακολούθηση της κατάστασης της οροφής	Οπτική αξιολόγηση τοπικών ασταθειών και κατηγοριοποίηση των θραυσμάτων ανάλογα με το μέγεθος των τεμαχίων σε “κατάπτωση βράχου” και “κατάπτωση οροφής”
Διαστάσεις θαλάμων και στύλων	Μέτρηση διαστάσεων υπογείου χώρου και συγκέντρωση πληροφοριών σχετικά με εκρηκτικές ύλες και αγκύρια

Πίνακας 4.3 Κατηγορίες αστοχιών οροφής (Esterhuizen et al., 2007)

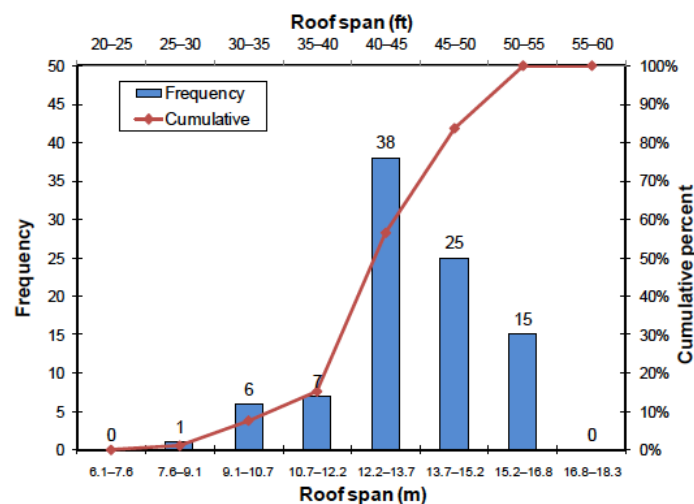
Τύπος αστοχίας / Αίτια	Περιγραφή
Κατάπτωση βράχου	Μεμονωμένα τεμάχια με μήκος < 1 m
<p>Μορφή πλάκας : Λεπτές πλάκες που δημιουργούνται λόγω αποσάθρωσης ή του εντατικού πεδίου με μήκος < 30 cm και πάχος περίπου 25 mm</p> <p>Τεμάχια βράχου : Πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών ή από τη χρήση εκρηκτικών υλών</p> <p>Μορφή δοκού : Τεμάχια βράχου που συμπεριφέρονται ως δοκοί λόγω αστοχίας που διαδίδεται παράλληλα προς τη στρώση</p>	
Κατάπτωση οροφής	Τεμάχια με μήκος > 1 m συνήθως αποτελούμενα από πολλαπλά θραύσματα βράχου
<p>Τεμάχια βράχου : Καταπτώσεις βράχων λόγω ασυνεχειών με μεγάλη εμμονή ή διακλάσεων</p> <p>Μορφή δοκού : Αστοχία λόγω κάμψης υπό φορτίο βαρύτητας</p> <p>Υψηλές οριζόντιες τάσεις : Αστοχία λόγω ελαστικής αστάθειας και διάτμησης του άρρηκτου βράχου</p> <p>Κατακρήμνιση οροφής : Κατάπτωση από βαθμιαίο θρυμματισμό ή αποσάθρωση αδύναμων στρωμάτων</p>	

Για τη μελέτη των συνθηκών ευστάθειας οροφής λήφθηκαν υπόψη μετρήσεις από 92 τοποθεσίες στα 34 λατομεία. Ο Πίνακας 4.4 συνοψίζει τις κύριες διαστάσεις των υπογείων εκμεταλλεύσεων και παρατηρείται ότι το πλάτος των θαλάμων

κυμαίνεται μεταξύ 9.1 μέτρων και 16.8 μέτρων. Το διάγραμμα του Σχήματος 4.9 παρουσιάζει την κατανομή των διαστάσεων των ανοιγμάτων της οροφής, με τον οριζόντιο άξονα να απεικονίζει τις διαστάσεις του ανοίγματος και τον κατακόρυφο άξονα να απεικονίζει τις τιμές της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής που αντιστοιχούν στο δείγμα. Σύμφωνα με το διάγραμμα, οι 63 από τους 92 θαλάμους έχουν άνοιγμα 12.2 - 15.2 μέτρων.

Πίνακας 4.4 Σύνοψη διαστάσεων υπογείων ασβεστολιθικών λατομείων (Esterhuizen et al., 2007)

Διαστάσεις	Μέση (m)	Ελάχιστη (m)	Μέγιστη (m)
Ύψος υπογείου χώρου	11.6	4.8	38.0
Πλάτος θαλάμου	13.5	9.1	16.8
Διαγώνιο άνοιγμα	21.7	29.6	16.1
Πλάτος στύλου	13.8	4.6	28.6

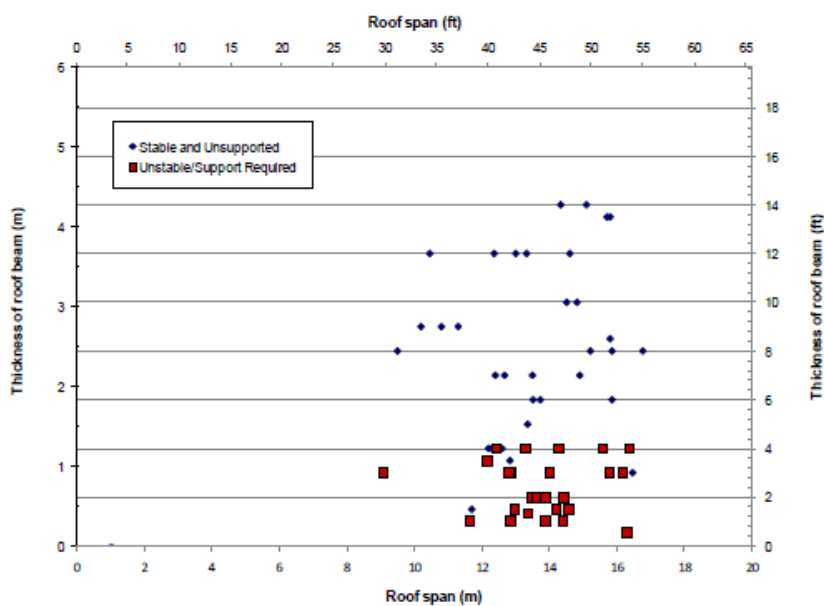


Σχήμα 4.9 Κατανομή διαστάσεων ανοίγματος οροφής που σε 34 ασβεστολιθικά λατομεία (Esterhuizen et al., 2011)

Η ευστάθεια εκσκαφής σε στρωσιγενές πέτρωμα σχετίζεται άμεσα με τη σύσταση και το πάχος της δοκού στην άμεση οροφή. Η αξιολόγηση των δεδομένων που συλλέχθηκαν έδειξε ότι στα 25 από τα 34 λατομεία υπήρξε προσπάθεια διατήρησης συγκεκριμένου πάχους του στρώματος της άμεσης οροφής. Πιο συγκεκριμένα, στα λατομεία που δεν υπέστησαν αστάθεια ή αστοχία λόγω οριζοντίων τάσεων παρατηρείται ότι όταν η δοκός έχει πάχος μικρότερο ή ίσο από 1.2 m, για τη διατήρηση της ευστάθειας απαιτείται υποστήριξη της οροφής (Σχήμα 4.10). Το 82% των τοποθεσιών όπου το πάχος της άμεσης οροφής μετρήθηκε κάτω από 1.2 m

χαρακτηρίστηκαν ως ασταθείς και κρίθηκε επιτακτική ανάγκη υποστήριξης της οροφής.

Καθώς η εξορυκτική δραστηριότητα καλείται να αντιμετωπίσει τις ολοένα αυξανόμενες προκλήσεις σχετικά με την παραγωγικότητα και την ασφάλεια ενός υπογείου έργου, η επιλογή του κατάλληλου συστήματος υποστήριξης της οροφής σε στρωσιγενές περιβάλλον είναι μια απόφαση υψίστης σημασίας για τη λειτουργία του έργου. Σε γενικές γραμμές, οι τρόποι αγκύρωσης μιας υπόγειας οροφής μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες, με πολυάριθμες παραλλαγές μεταξύ τους. Η πρώτη κατηγορία αφορά στα αγκύρια σημειακής πάκτωσης (εφελκόμενοι φορείς) και η δεύτερη στα αγκύρια πλήρους πάκτωσης. Τα αγκύρια σημειακής πάκτωσης αγκυρώνονται στην κορυφή με μηχανική συσκευή ή με ενεμάτωση. Στο αγκύριο πλήρους πάκτωσης, ο δακτύλιος μεταξύ του αγκυρίου και του τοιχώματος της οπής ενεματώνεται με τη βοήθεια ρητίνης (ή τσιμέντου) σε όλο το μήκος της οπής και δεν εφαρμόζεται τάση στο αγκύριο.



Σχήμα 4.10 Επίδραση του πάχους της άμεσης οροφής στην ευστάθεια του θαλάμου (Esterhuizen et al., 2011)

Η ενίσχυση της οροφής με συστηματική ή περιστασιακή αγκύρωση παρατηρήθηκε στο 46% του συνόλου των λατομείων. Το υπόλοιπο 54% των τοποθεσιών χαρακτηρίστηκε ως φυσικά ευσταθές, ενώ για την υποστήριξη απομονωμένων περιοχών χρησιμοποιήθηκαν μεμονωμένα αγκύρια. Στα λατομεία παρατηρήθηκε κυρίως η χρήση αγκυρίων πλήρους πάκτωσης με μήκη που κυμαίνονται μεταξύ 0.9

m και 2.4 m, με τα αγκύρια μήκους 1.8 m και 2.4 m να αποτελούν το 67% του συνόλου. Η απόσταση μεταξύ των αγκυρίων κυμαίνεται μεταξύ 1.5 m και 1.8 m, με μέγιστη απόσταση στα 2.4 m. Η Εικόνα 4.1α παρουσιάζει μια φυσικά ευσταθή οροφή ανοίγματος 13 μέτρων που δε χρήζει υποστήριξης, ενώ στην Εικόνα 4.1β διακρίνονται συστηματικές αγκυρώσεις στην οροφή υπόγειας εκμετάλλευσης για την αποκατάσταση μια σημαντικής κατάπτωσης οροφής.



Εικόνα 4.1 Ευσταθής οροφής υπογείου θαλάμου (αριστερά) και ασταθής υπόγειος θάλαμος (δεξιά) που έχει υποστεί κατάπτωση οροφής (Esterhuizen et al., 2007)

Οι τεχνικές αξιολόγησης της οροφής που έχουν καθιερωθεί στην πράξη περιλαμβάνουν κυρίως οπτική αξιολόγηση κατά το ξεσκάρωμα, επιθεώρηση διατρημάτων στην άμεση οροφή ή/και χρήση συγκεκριμένων εργαλείων για τον εντοπισμό κενών στην οροφή και παρατήρηση των γεωλογικών ανωμαλιών. Τρεις νέες τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράλληλα με τις παραπάνω τεχνικές είναι οι ακόλουθες: α) αξιολόγηση του κινδύνου πτώσης της οροφής μέσω του δείκτη κινδύνου κατάπτωσης (Roof Fall Risk Index, RFRI) (Iannacchione et al., 2006), β) αυτοματοποιημένη καταγραφή μέσω διάτρησης, και γ) παρακολούθηση μετατόπισης της οροφής. Ο δείκτης RFRI δίνει μια βαθμονόμηση από 0 έως 100, με τις τιμές κοντά στο 0 να αντιπροσωπεύουν ασφαλείς συνθήκες, ενώ όταν ο δείκτης πλησιάζει στο 100 υπάρχει σοβαρός κίνδυνος κατάπτωσης οροφής. Οι παραπάνω τεχνολογίες μπορούν να παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες, ώστε να αποτελέσουν σημαντική συνιστώσα ενός ολοκληρωμένου σχεδίου ελέγχου ευστάθειας ενός υπογείου χώρου. Ο Πίνακας 4.5 παρουσιάζει συνοπτικά το βασικό

τρόπο λειτουργίας των παραπάνω τεχνικών αξιολόγησης της κατάστασης της οροφής ενός υπογείου έργου.

Συνοψίζοντας, ένας εμπειρικός τρόπος για την αξιολόγηση και εκτίμηση του μέγιστου δυνατού ασφαλούς ανοίγματος οροφής είναι η συλλογή δεδομένων από άλλα λατομεία ανά τον κόσμο και η σύγκριση των γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχομάζας και των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των ασυνεχειών. Εκτός από τις εμπειρικές μεθόδους που περιγράφηκαν στο παρόν κεφάλαιο, οι αναλυτικές μέθοδοι και οι αριθμητικές αναλύσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σαφή κατανόηση των μηχανισμών αστοχίας καθώς και για την εκτίμηση του τρόπου διάδοσης της αστοχίας ή της επιρροής της στρωσιγένειας στο μέγεθος μιας υποθετικής κατάπτωσης οροφής.

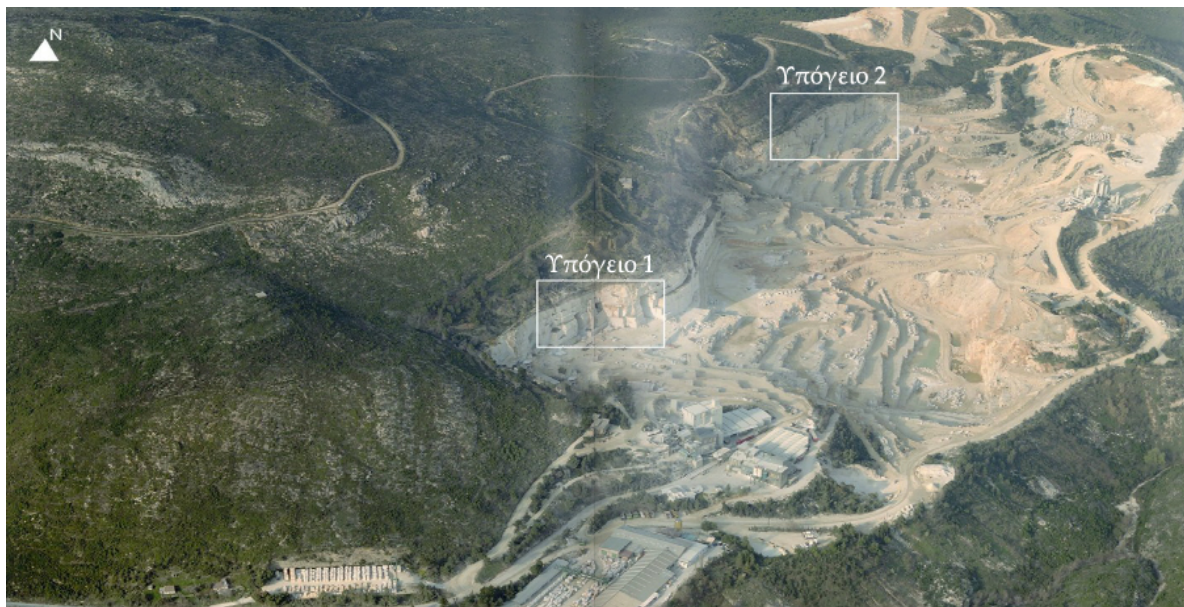
Πίνακας 4.5 Περιγραφή των τεχνικών αξιολόγησης οροφής υπογείου θαλάμου (από Esterhuizen et al., 2007)

Τεχνικές αξιολόγησης οροφής	Περιγραφή
Αξιολόγηση κινδύνου κατάπτωσης (Roof Fall Hazard Assessment)	Ο δείκτης κινδύνου κατάπτωσης οροφής εστιάζει στο χαρακτήρα και το μέγεθος των μεταβολών που προκαλούνται από ένα ευρύ φάσμα γεωλογικών, εξορυκτικών και εντατικών παραγόντων, και συνδέεται με την οποιαδήποτε μεταβολή που δημιουργεί κίνδυνο κατάπτωσης υλικού
Αυτοματοποιημένη καταγραφή μέσω διάτρησης (Automated Drill Recording)	Μετρήσεις δυνάμεων, ταχυτήτων και λειτουργικών χαρακτηριστικών κατά τη διάτρηση οροφής χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της βραχομάζας
Παρακολούθηση μετατόπισης της οροφής (Roof Displacement Monitoring)	Η μέτρηση μετατοπίσεων της οροφής, κυρίως με μηκυνσιόμετρα τριών σημείων, μπορεί να είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την παροχή πληροφοριών σχετικά με την ευστάθεια της οροφής
Παρακολούθηση μικροσεισμικών δεδομένων (Microseismic Monitoring)	Τα πετρώματα που βρίσκονται υπό ένταση εκπέμπουν μικροσεισμικά σήματα με ρυθμό που αυξάνεται ανάλογα με το επιβαλλόμενο φορτίο. Ο ρυθμός εκπομπής αυξάνεται πριν και κατά τη διάρκεια σημαντικής θραύσης του βράχου, επομένως η παρακολούθηση μέσω ειδικού συστήματος μπορεί να εντοπίσει τα μικροσεισμικά γεγονότα και να προσδιορίσει την πηγή με σκοπό την πρόληψη κατάπτωσης της οροφής.

5 Υπόγεια εκμετάλλευση του λατομείου μαρμάρου στον Διόνυσο Αττικής

5.1 Γεωλογικά και τοπογραφικά στοιχεία για το λατομείο

Τα μάρμαρα Διονύσου Αττικής παρεμβάλλονται στους σχιστολίθους Καισαριανής Μεσοζωικής ηλικίας. Η περιοχή εκμετάλλευσης χωρίζεται σε τέσσερις λατομικούς χώρους (Α, Β, Γ και Δ) ανάλογα με τη διαφοροποίηση της κοιτασματοφορίας σε σχέση με το τοπογραφικό ανάγλυφο και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Η Εικόνα 5.1 παρουσιάζει την πανοραμική άποψη του λατομείου.



Εικόνα 5.1 Πανοραμική άποψη του λατομείου μαρμάρου στον Διόνυσο Αττικής (από Παπαμαργαρίτη και Τσάγκα, 2012)

Η σύμφωνη επαφή μαρμάρου-σχιστολίθου εντοπίζεται στο σύνολο του λατομικού χώρου και είναι κάθετη στην παράταξη του σχηματισμού, με κλίση που κυμαίνεται από 0 έως 90° ως προς το οριζόντιο επίπεδο και καθορίζει τα όρια της εκμετάλλευσης. Με τη μετατόπιση της επαφής λόγω των εργασιών αποκάλυψης προς τα βορειότερα και δυτικότερα υψόμετρα του χώρου, το ύψος του υπερκείμενου σχιστολίθου ανέρχεται σε περίπου 30 μέτρα. Η αύξηση της κλίσης των πρανών του φυσικού αναγλύφου σε συνδυασμό με τη βύθιση της επαφής (περίπου 45°) συνετέλεσε στη διακοπή της επιφανειακής εκμετάλλευσης στο σημείο της

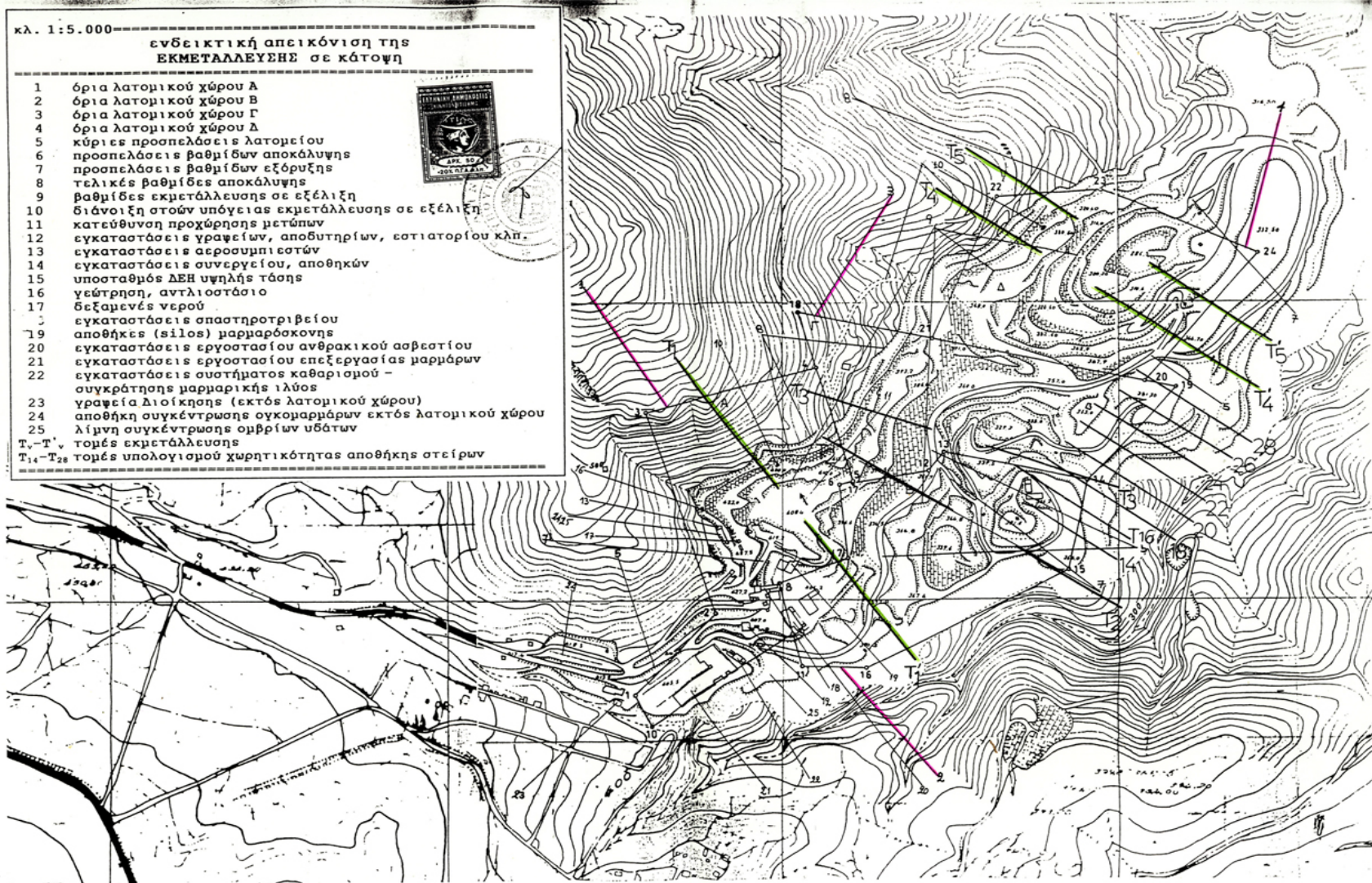
επαφής από άποψη ορθολογικής διαχείρισης του φυσικού περιβάλλοντος. Επομένως, οι εργασίες εξόρυξης στο μη αποκαλυμμένο τμήμα του κοιτάσματος στο δυτικό-βορειοδυτικό τμήμα του χώρου εκμετάλλευσης προχωρούν με υπόγεια εξόρυξη του μαρμάρου.

Συγκεκριμένα, εντοπίζονται δύο υπόγειες εκμεταλλεύσεις, στη μια εκ των οποίων η εξόρυξη μαρμάρου έχει εξαντληθεί (Υπόγειο 1 ή λατομικός χώρος Α), λόγω ασυνεχειών στη σύστασή του. Στη δεύτερη υπόγεια εκμετάλλευση (Υπόγειο 2 ή λατομικός χώρος Δ), οι εργασίες συνεχίζονται μέχρι σήμερα. Στους λατομικούς χώρους Β και Γ η εκμετάλλευση πραγματοποιήθηκε επιφανειακά, επομένως δε θα εξεταστούν στην παρούσα εργασία.

Στο Υπόγειο 1 (λατ. χώρος Α), η επιφανειακή εκμετάλλευση έχει συντελεστεί στο σύνολο του χώρου. Η μαρμαροφορία περιορίζεται στην οροφή από την επαφή σχιστολίθου-μαρμάρου στο απόλυτο υψόμετρο Υ+436, ενώ το δάπεδο φτάνει στο Υ+400 λόγω εμφάνισης μαρμάρου σκούρου χρώματος, το οποίο είναι ακατάλληλο για εκμετάλλευση. Η υπόγεια εκμετάλλευση έχει επίσης σταματήσει στο συγκεκριμένο τμήμα. Το Σχήμα 5.1 παρουσιάζει τις διαστάσεις του Υπογείου 1 και απεικονίζει τις θέσεις εισόδου του υπόγειου χώρου. Ο χάρτης του Σχήματος 5.2 απεικονίζει σε κάτοψη το λατομείο και τα όρια μεταξύ των τεσσάρων λατομικών χώρων.



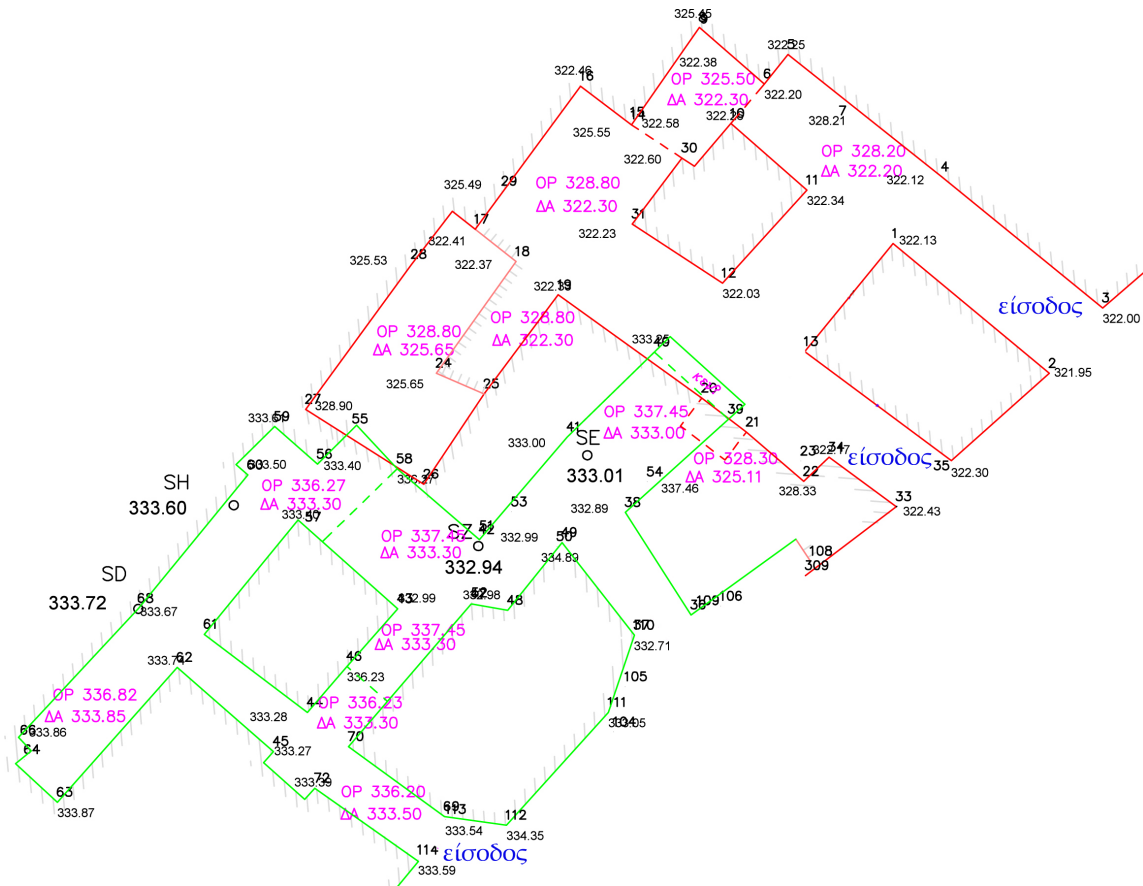
Σχήμα 5.1 Κάτοψη του Υπογείου 1 και θέση εισόδων (από Παπαμαργαρίτη και Τσάγκα, 2012)



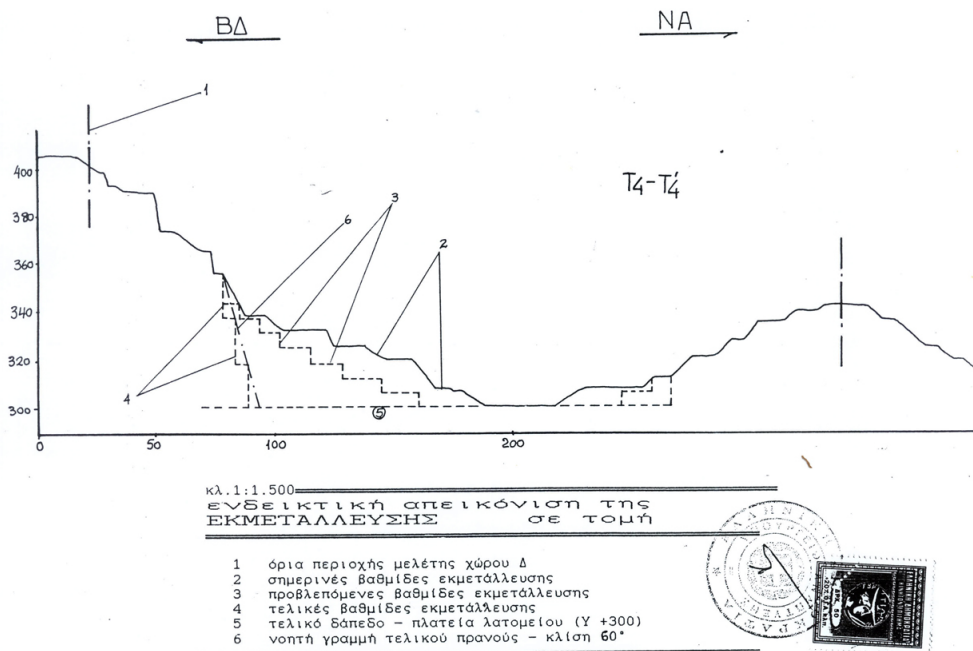
Σχήμα 5.2 Ενδεικτική απεικόνιση του λατομείου Διονύσου Αττικής (στοιχεία από την Α.Ε.Β.Ε Λατομείων Μαρμάρου Διονύσου-Πεντέλης)

5.2 Στάδια της υπόγειας εξόρυξης και μέτρα υποστήριξης

Στο Υπόγειο 2 (λατομικό χώρο Δ), η κύρια μαρμαροφορία του ΒΔκού τμήματος στην καθ' ύψος ανάπτυξη της περιορίζεται στην οροφή από την επαφή σχιστολίθου - μαρμάρου, που εντοπίζεται στο απόλυτο υψόμετρο Υ+370, ενώ το δάπεδο φτάνει μέχρι το Υ+285 λόγω εμφάνισης μαρμάρου σκούρου χρώματος και πάχους τουλάχιστον 15 m, το οποίο είναι ακατάλληλο για την εξόρυξη και τη διάθεση στην αγορά. Το Σχήμα 5.3 παρουσιάζει σε κάτοψη τον υπόψη υπόγειο χώρο και απεικονίζει τις διαστάσεις του θαλάμου και των στύλων καθώς και τις εισόδους. Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η τομή T₄-T_{4'} στα όρια της περιοχής μελέτης του λατομικού χώρου Δ και απεικονίζει τις προβλεπόμενες και τελικές βαθμίδες της υπόγειας εκμετάλλευσης.



Σχήμα 5.3 Κάτοψη του Υπογείου 2 και θέση εισόδων (στοιχεία από την Α.Ε.Β.Ε Λατομείων Μαρμάρου Διονύσου-Πεντέλης)



Σχήμα 5.4 Τομή T4-T4' της εκμετάλλευσης του λατομικού χώρου Δ (στοιχεία από την Α.Ε.Β.Ε Λατομείων Μαμάρου Διονύσου-Πεντέλης)

Στον παρών λατομικό χώρο έχει πραγματοποιηθεί η υπόγεια εξόρυξη με όρυξη της αρχικής στοάς της ανώτερης προπαρασκευαστικής βαθμίδας, η οποία χρησίμευσε για την αποκάλυψη και προπαρασκευή των υπόγειων εργασιών. Στη συνέχεια, ακολούθησε η διάνοιξη και ανάπτυξη των θαλάμων και η όρυξη των δύο παράπλευρων στοών. Η τεχνική της μεθόδου θαλάμων και στύλων εφαρμόζεται αποκλειστικά στην αρχική διάνοιξη της υπόγειας εκσκαφής, στον πρώτο υψηλότερο υπόγειο ορίζοντα, σε ύψος θαλάμου 3 m, ενώ ο συνδυασμός των δύο μεθόδων εφαρμόζεται στο δεύτερο υπόγειο ορίζοντα με την ίδια διαδικασία προχώρησης, αλλά με ύψος βαθμίδων 6 m και με διαφοροποίηση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού.

Στις κατώτερες βαθμίδες που έχουν ύψος 6 m προσφέρονται δύο ελεύθερες επιφάνειες και η εξόρυξη δε διαφέρει πολύ ως προς τον εξοπλισμό από αυτόν της επιφανειακής εκμετάλλευσης. Σαν εξορυκτικό μηχάνημα χρησιμοποιείται το αλυσοπρίονο οριζόντιας κοπής στο επίπεδο έδρασης για την εκτέλεση της οριζόντιας τυφλής τομής βάθους 3 m, και η συνήθης αδαμαντοφόρα συρματοκοπή για τις τρεις κατακόρυφες τομές. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εξορυσσόμενου όγκου στις τομές των κατώτερων

βαθμίδων είναι 6-10 m μήκος, 6 m ύψος και 3 m βάθος, ενώ οι διατομές των εγκαταλειπομένων στύλων ποικίλλουν από 100 – 200 m² (10x10 m² έως 13x15 m²) ανάλογα με τις τεκτονικές συνθήκες στο μαρμαροφόρο τμήμα. Οι διαστάσεις των σχηματιζόμενων θαλάμων έχουν 12 – 20 m πλάτος και μήκος όλο το διατιθέμενο μήκος του κοιτάσματος.

Λόγω της εφαρμοζόμενης μεθόδου εξόρυξης στην υπόγεια εκμετάλλευση και λόγω της εξαιρετικής μηχανικής αντοχής του υπερκειμένου μαρμάρου δε χρειάστηκε η λήψη ιδιαίτερων μέτρων υποστήριξης. Σε περιοχές έντονου τεκτονισμού παρατηρείται η χρήση αγκυρίων μήκους 3 m και Φ25 mm σε συνδυασμό με ρητίνη στην οροφή του θαλάμου. Το μάρμαρο της οροφής είναι ιδιαίτερα συνεκτικό και οι ασυνέχειες και διακλάσεις που εντοπίζονται δε δημιουργούν επισφαλείς όγκους στην οροφή, επομένως δε χρειάζεται κάποιο μέτρο υποστήριξης πέρα από την περιστασιακή αγκύρωση.



Εικόνα 5.2 Κοχλίωση οροφής στο λατομείο Διονύσου (στοιχεία από την Α.Ε.Β.Ε Λατομείων Μαρμάρου Διονύσου-Πεντέλης)

5.3 Ιδιότητες του Πεντελικού μαρμάρου και των κύριων συστημάτων ασυνεχειών

Το Πεντελικό μάρμαρο παρουσιάζει σχιστότητα, μια ιδιότητα που διευκολύνει την εξόρυξη των ογκολίθων και γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτή κατά τη μηχανική επεξεργασία του πετρώματος. Τα υγιή και εμπορικά εκμεταλλεύσιμα ογκομάραρα είναι παχυστρωματώδη, από πλευράς ιστού χαρακτηρίζονται μικροκρυσταλλικά και δεν περιέχουν χαλαζία υπό μορφή κονδύλων ή ενστρώσεων.

Το Πεντελικό μάρμαρο συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ένα γραμμικώς ελαστικό – τελείως ψαθυρό υλικό σε συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού και θλίψης με σημαντικά χαμηλότερη αντοχή και παραμόρφωση κατά την αστοχία σε συνθήκες φόρτισης μονοαξονικού εφελκυσμού συγκριτικά με τη φόρτιση σε μονοαξονική θλίψη. Επομένως, η δυσκαμψία του είναι ίση με το μέτρο ελαστικότητας, εφόσον το δοκίμιο δεν έχει υποστεί σημαντική φθορά.

Πίνακας 5.1 Ιδιότητες μαρμάρου Διονύσου (σύμφωνα με εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης)

	Πυκνότητα (g/cm ³)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm ³)	Μέσο μέγεθος κόκκου (μm)	Πορώδες (%)
Μάρμαρο Διονύσου	2.70 ± 0.1	2.66 ± 0.1	300	0.6 ± 0.1

Το μέτρο ελαστικότητας, E , και ο λόγος Poisson, ν , του άρρηκτου δοκιμίου μαρμάρου όπως προκύπτουν από δοκιμές σε μονοαξονική θλίψη είναι τα ακόλουθα:

$$E = 57 \text{ GPa}, \quad \nu = 0.3$$

Στο λατομείο εντοπίζονται τρία κύρια συστήματα ασυνεχειών και δύο δευτερεύοντα. Τα τρία κύρια συστήματα απομονώνουν πρισματικά τεμάχια μαρμάρου και αντιστοιχούν στο «μουρέλο» με διεύθυνση B-N και μεγάλη κλίση, στο «κεφάλι» με διεύθυνση A-Δ και μεγάλη κλίση, και στο «πρόσωπο» με σχεδόν οριζόντια διεύθυνση. Ο

Πίνακας 5.2 παρουσιάζει τις ιδιότητες των πέντε συστημάτων ασυνεχειών που εντοπίζονται στο λατομείο.

Πίνακας 5.2 Ιδιότητες των πέντε κύριων συστημάτων ασυνεχειών (Exadaktylos et al., 2007)

Σύστημα Ασυνεχειών	Διεύθυνση κλίσης (°)	Κλίση (°)	Μέση απόσταση (m)	Εμμόνη (%)
4 - "Μουρέλο"	233.0	80.2	4-7	100
1 - "Κεφάλι"	147.8	80.4	3-7	100
5	202.3	77.0	4-7	100
3	147.2	57.4	3-7	50
6	80.8	55.2	3-7	50

5.4 Αριθμητική προσομοίωση του υπόγειου λατομείου

Το υπόγειο τμήμα του λατομείου που εκμεταλλεύεται έως και σήμερα έχει υπάρξει αντικείμενο ενδιαφέροντος από τους Exadaktylos et al. (2007) και Τσουβαλά, Σ. (2009), οι οποίοι αναγνώρισαν την ανάγκη ανάπτυξης αριθμητικών μοντέλων που θα είναι ικανά να αποτυπώσουν τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στο λατομείο και θα εξυπηρετήσουν τη μελλοντική εκμετάλλευση του λατομείου δίνοντας στοιχεία για το εντατικό πεδίο, τις ιδιότητες των ασυνεχειών καθώς και για τις καθολικές συνθήκες ευστάθειας.

Οι Exadaktylos et al. (2007) κατασκεύασαν ένα τρισδιάστατο μοντέλο του υπόγειου λατομείου με βάση εργαστηριακά δεδομένα σχετικά με τις ιδιότητες του άρρηκτου βράχου, και τη χαρτογράφηση των ασυνεχειών. Για την προσομοίωση του Υπογείου 2 που προαναφέρθηκε, καθώς και του ήδη υπάρχοντος ανενεργού Υπογείου 1 χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας *3DEC* της *ITASCA*. Επιπλέον, για τις αριθμητικές αναλύσεις λήφθηκαν υπόψη οι έννοιες της φθοράς και του φαινομένου κλίμακας ψαθυρών υλικών και την ταξινόμηση της ποιότητας της βραχομάζας σύμφωνα με το σύστημα *RMR*. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκαν για την περαιτέρω σύγκριση της αριθμητικής ανάλυσης με τις επί τόπου μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο λατομείο για να διαπιστωθεί κατά πόσο συγκλίνουν.

5.4.1 Περιγραφή του κώδικα διακριτών στοιχείων *3DEC* και του μοντέλου που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο ανάλυσης του υπόγειου λατομείου

Το *3DEC* είναι ένα τρισδιάστατο αριθμητικό πρόγραμμα βασισμένο στη μέθοδο διακριτών στοιχείων για την προσομοίωση της απόκρισης του ασυνεχούς μέσου (όπως μια ρωγματωμένη βραχομάζα) υπό στατική ή δυναμική φόρτιση. Το ασυνεχές μέσο παριστάνεται ως ένα σύνολο από διακριτά ογκοτεμάχια, τα οποία συμπεριφέρονται ως άκαμπτα ή παραμορφώσιμα υλικά. Η προσομοίωση πραγματοποιείται με ένα υπολογιστικό μοντέλο πεπερασμένου αριθμού καλώς καθορισμένων στοιχείων. Η συμπεριφορά αυτών των στοιχείων είτε είναι γνωστή είτε μπορεί να αντιμετωπιστεί ανεξάρτητα με μαθηματικό τρόπο. Η καθολική συμπεριφορά του προβλήματος μπορεί να εξασφαλιστεί μέσω της καλώς καθορισμένης αλληλοσυσχέτισης μεταξύ των επιμέρους στοιχείων (Jing & Stephansson, 2006).

Τα παραμορφώσιμα ογκοτεμάχια υποδιαιρούνται σε ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, και κάθε στοιχείο ανταποκρίνεται σε έναν προκαθορισμένο γραμμικό ή μη γραμμικό νόμο τάσης-παραμόρφωσης. Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι οι υποκείμενες εξισώσεις μηχανικής δε βασίζονται στην αρχική υπόθεση ότι το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία, αλλά η αριθμητική λύση είναι σε θέση να παρακολουθεί την εξέλιξη της αστοχίας (Coulthard, 1999). Το σχήμα επίλυσης είναι παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιούν οι μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση του συνεχούς μέσου. Ο περιορισμός του χρονικού βήματος ισχύει τόσο για τα ογκοτεμάχια όσο και για τις διεπιφάνειες μεταξύ αυτών και το μέγεθός του καθορίζεται είτε από τη μάζα των ογκοτεμαχίων και την ακαμψία των διεπιφανειών, για άκαμπτα ογκοτεμάχια, είτε από το μέγεθος και τις ελαστικές σταθερές των τριγωνικών ζωνών σταθερής παραμόρφωσης και την ακαμψία των διεπιφανειών, για παραμορφώσιμα ογκοτεμάχια.

Η παραμορφωσιμότητα των ασυνεχειών περιγράφεται από το χαρακτήρα των καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης μέσω των παραμέτρων της ορθής, K_n , και διατμητικής, K_s , δυσκαμψίας. Η ορθή παραμορφωσιμότητα των ασυνεχειών εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος των ορθών τάσεων, λαμβάνοντας υπόψη το φυσικό περιορισμό

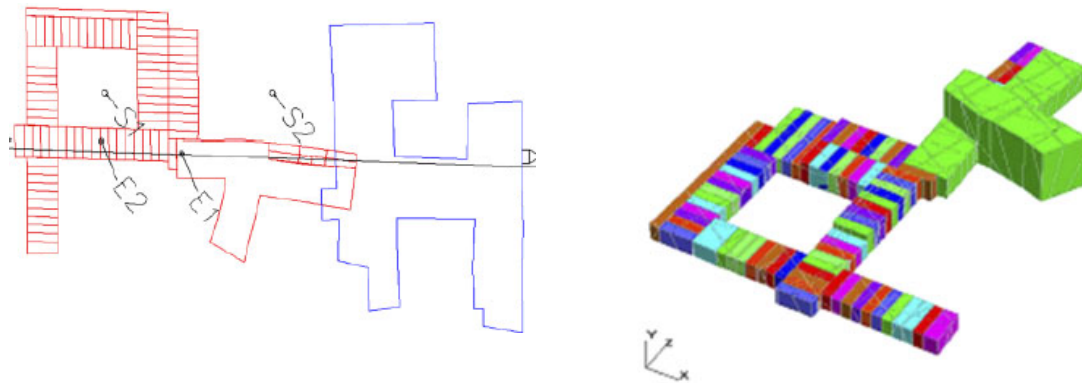
ότι η ασυνέχεια διαθέτει μηδενική αντοχή σε εφελκυσμό. Η διατμητική δυσκαμψία ορίζεται από τη μεταβολή της διατμητικής τάσης ανά μονάδα παραμόρφωσης. Το καταστατικό μοντέλο για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των ασυνεχειών υποθέτει γραμμικά ελαστική – τελείως πλαστική συμπεριφορά σύμφωνα με το μοντέλο ολίσθησης Coulomb.

Για τις ανάγκες της μελέτης πραγματοποιήθηκαν τέσσερις αναλύσεις. Στην πρώτη ανάλυση (Run 1) δόθηκαν υψηλές τιμές δυσκαμψίας των ασυνεχειών για την ακριβή προσομοίωση της συμπεριφοράς του άρρηκτου βράχου και του υπερκείμενου σχιστολίθου. Συγκεκριμένα, η τιμή της ορθής δυσκαμψίας ορίστηκε ίση με 26000 MPa/m και της διατμητικής δυσκαμψίας 11500 MPa/m. Στη δεύτερη ανάλυση (Run 2) για τη μελέτη της επίδρασης του μεγέθους της δυσκαμψίας των ασυνεχειών στα αποτελέσματα και πώς αυτά διαφέρουν από τις επί τόπου μετρήσεις, η τιμή της διατμητικής δυσκαμψίας μειώθηκε στα 1150 MPa/m, ενώ όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παρέμειναν σταθερές. Στην τρίτη (Run 3) και την τέταρτη ανάλυση (Run 4) έγινε μείωση της ορθής δυσκαμψίας των ασυνεχειών στα 3330 MPa/m για την πραγματοποίηση ανάλυσης ευαισθησίας, έτσι ώστε να αποδοθεί ο βαθμός επιρροής της δυσκαμψίας στη συμπεριφορά της βραχομάζας, και κατ' επέκταση στο εντατικό πεδίο και τις προβλεπόμενες μετακινήσεις.

Στην κάτοψη του Σχήματος 5.5α φαίνεται η διάταξη των συσκευών μέτρησης. Η εγκατάσταση δύο τασιόμετρων (S_1 , S_2) και δύο μηκυνσιόμετρων πολλαπλών σημείων (E_1 , E_2) στο υπό μελέτη λατομείο εξυπηρετεί στη μέτρηση των τάσεων και των παραμορφώσεων, αντίστοιχα. Τα μηκυνσιόμετρα μετράνε τις σχετικές μετατοπίσεις του πετρώματος ως προς την κορυφή του διατρήματος. Το τασιόμετρο S_1 είναι εγκατεστημένο στο κέντρο του στύλου, ενώ το τασιόμετρο S_2 είναι εγκατεστημένο στη βάση του στύλου. Στο Σχήμα 5.5β απεικονίζεται το μοντέλο που κατασκευάστηκε στο 3DEC. Τα διαφορετικά χρώματα υποδηλώνουν τις διαφορετικές φάσεις εκσκαφής.

Τα Σχήματα 5.6 και 5.7 απεικονίζουν τα διαγράμματα τάσεων και μετατοπίσεων συναρτήσει του χρόνου και περιλαμβάνουν τις επί τόπου μετρήσεις και τα αποτελέσματα των τεσσάρων αριθμητικών αναλύσεων. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 5.6α, το τασιόμετρο S_1 δίνει κατακόρυφη τάση ασυμπτωτικά στην τιμή των 2 MPa. Η

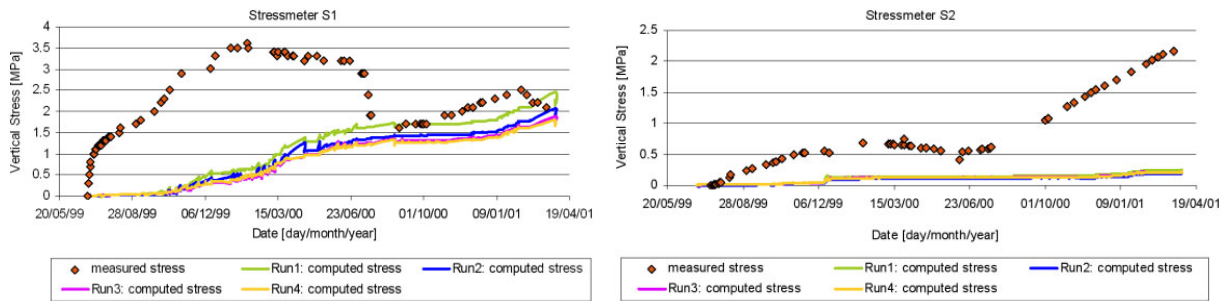
συμπεριφορά του τασιόμετρου έρχεται σε συμφωνία με τις τέσσερις αναλύσεις, οι οποίες καταλήγουν στην τιμή των 2 MPa. Το τασιόμετρο S_2 παρουσίασε ασταθή συμπεριφορά, γεγονός που επιβεβαιώνεται από τη μονοτονική αύξηση της καμπύλης με το χρόνο (Σχήμα 5.6β). Το σύνολο των αναλύσεων υποεκτίμησαν σημαντικά την κατακόρυφη τάση και τα αποτελέσματα δίνουν τιμή ίση με 0.3 MPa. Δεδομένου ότι η εξόρυξη του μαρμάρου στο χώρο B με μπλε χρώμα (Σχήμα 5.5) δεν πραγματοποιούνταν κατά την εκσκαφή στο χώρο A, τα αποτελέσματα των αναλύσεων θεωρούνται πιο αξιόπιστα και τίθεται ζήτημα εξέτασης της ορθής λειτουργίας του τασιόμετρου.



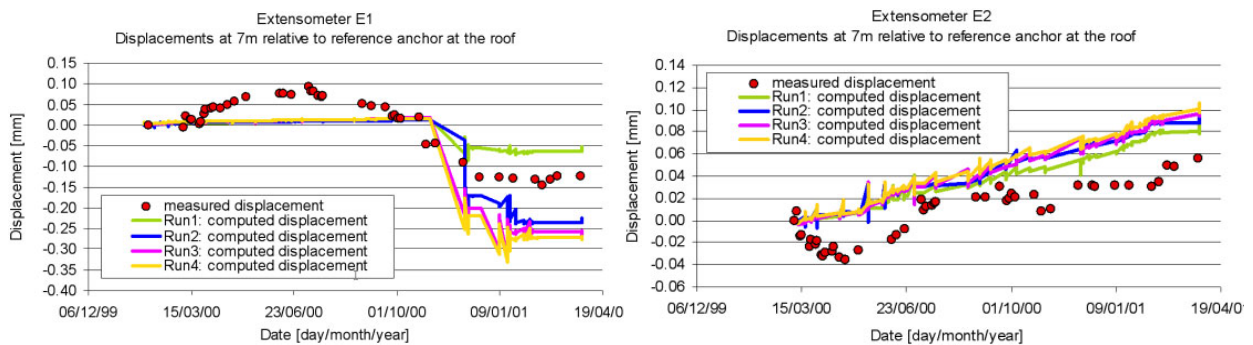
Σχήμα 5.5 Κάτοψη του υπό μελέτη υπογείου και θέση των μηχανοσιόμετρων και τασιόμετρων (αριστερά) και μοντέλο που κατασκευάστηκε στο 3DEC στο πλαίσιο της ανάλυσης (δεξιά)(Exadaktylos et al., 2007)

Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζονται τα διαγράμματα μετατοπίσεων σε απόσταση 7 m από την οροφή του θαλάμου. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για έναν αριθμό ενδεικτικών αποστάσεων. Σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα και έχουν έρθει σε καλή συμφωνία με τις πραγματικές επί τόπου μετρήσεις.

Στόχος των αναλύσεων που αναλύθηκαν ήταν ο έλεγχος της ορθότητας της αριθμητικής ανάλυσης μέσω της σύγκρισης με τις διαθέσιμες επί τόπου μετρήσεις μεταβολής τάσεων και παραμορφώσεων. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων επιβεβαιώνουν ότι η μέθοδος των διακριτών στοιχείων είναι πρακτική και αξιόπιστη και αποδίδει τη συμπεριφορά μιας βραχομάζας που τέμνεται από συστήματα ασυνεχειών.



Σχήμα 5.6 Κατακόρυφη τάση συναρτήσει του χρόνου εκσκαφής και σύγκριση των επί τόπου μετρήσεων μέσω των τασιομέτρων S_1 και S_2 με τα αποτελέσματα των αναλύσεων στο 3DEC (Exadaktylos et al., 2007)



Σχήμα 5.7 Μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου εκσκαφής και σύγκριση των επί τόπου μετρήσεων των μηχανομέτρων E_1 και E_2 με τα αποτελέσματα των αναλύσεων στο 3DEC (Exadaktylos et al., 2007)

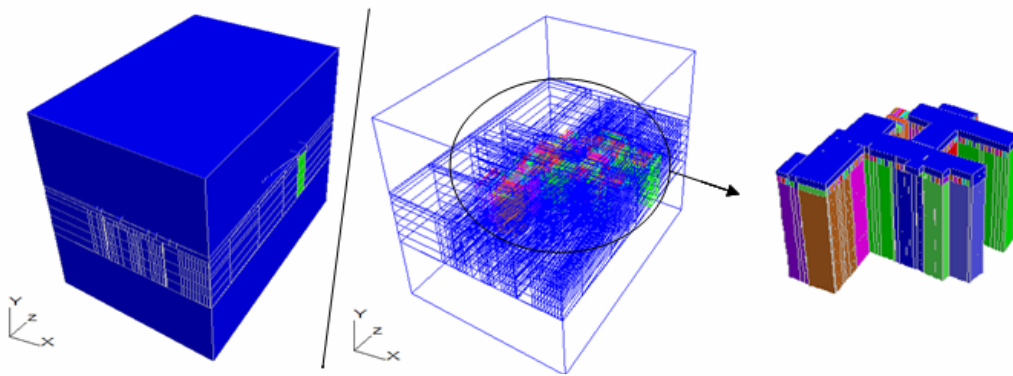
5.5 Μελλοντική εκμετάλλευση του λατομείου στον Διόνυσο Αττικής

Η εξασφάλιση της μελλοντικής εκμετάλλευσης του υπάρχοντος λατομείου είναι υψίστης σημασίας κυρίως για την εξαγωγική δραστηριότητα λόγω ζήτησης του μαρμάρου στην παγκόσμια αγορά. Η μελέτη εκμετάλλευσης του λατομείου που πραγματοποιήθηκε τη δεκαετία του 1990 προβλέπει τη συνέχεια της υπόγειας εκμετάλλευσης μετά την εξόφληση του παρόντος κοιτάσματος στο Υπόγειο 2 με άλλα επίπεδα.

Γενικά, στην περίπτωση υπόγειας εκμετάλλευσης με παραπάνω από ένα επίπεδα, η μέθοδος της επαλληλίας (superposition method) εξυπηρετεί στη μεταφορά των κατακόρυφων φορτίων μέσω ενός συνεχούς στύλου πετρώματος. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται επιτυχώς για την αποφυγή αστοχιών λόγω του εντατικού πεδίου και σε άλλα υπόγεια έργα. Η μακροπρόθεσμη ευστάθεια ενός πολυεπίπεδου λατομείου

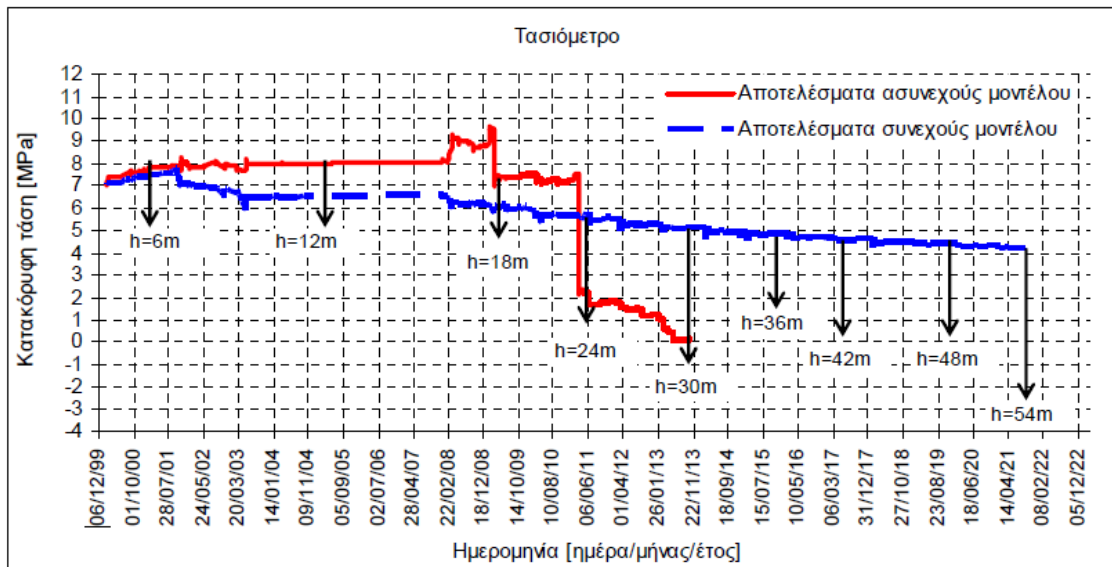
εξασφαλίζεται αφήνοντας σημαντικό πάχος πετρώματος για την οροφή του κάθε επιπέδου (Iannacchione and Prosser, 1998).

Η συμπεριφορά της βραχομάζας κατά τη βαθμιαία ανάπτυξη του λατομείου του Διονύσου σε κατώτερα επίπεδα γύρω από έναν κεντρικό στύλο μελετήθηκε από την Τσουβαλά (2009) μέσω της προσομοίωσης του υπόγειου λατομείου με τη βοήθεια του *3DEC*. Το Σχήμα 5.8 απεικονίζει τη γεωμετρία του μοντέλου που αναπτύχθηκε και τα διαδοχικά στάδια εξόρυξης. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με συνεχές και ασυνεχές μοντέλο.



Σχήμα 5.8 Γεωμετρία του μοντέλου του υπόγειου λατομείου που δημιουργήθηκε στο *3DEC* (Τσουβαλά, 2009)

Ένας από τους στόχους των αναλύσεων ήταν ο καθορισμός του μέγιστου ασφαλούς ύψους που μπορεί να έχει ο στύλος κατά την επέκταση του λατομείου σε κατώτερα επίπεδα και η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με τις επί τόπου μετρήσεις και τα διαθέσιμα στοιχεία από το λατομείο. Ωστόσο, οι επί τόπου μετρήσεις διακόπηκαν το 2001, επομένως δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία ώστε να υπάρχει δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων και εξέτασης της ορθότητας του μοντέλου και ικανότητάς του να αποτυπώσει τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στο λατομείο. Το Σχήμα 5.9 παρουσιάζει το διάγραμμα κατακόρυφης τάσης συναρτήσει του χρόνου εκσκαφής. Παρατηρείται ότι το ασυνεχές μοντέλο αστοχεί για ύψος στύλου 30 m με απότομη πτώση της κατακόρυφης τάσης πιθανώς λόγω ολίσθησης σε επίπεδα ασυνεχειών που βρίσκονται στο εσωτερικό του στύλου.



Σχήμα 5.9 Κατακόρυφη τάση συναρτήσει του χρόνου εκσκαφής για 10 στάδια εκσκαφής (Τσουβαλά, 2009)

Το συνεχές μοντέλο δεν παρουσίασε αστοχία και η ανάλυση σταμάτησε μετά την εκσκαφή δέκα διαδοχικών επιπέδων, για ύψος στύλου 54 m. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων έδειξαν ότι όσο αυξάνεται το ύψος του στύλου, οι κατακόρυφες τάσεις στο κέντρο του στύλου μειώνονται, ενώ παρατηρείται αύξηση των οριζόντιων τάσεων στην οροφή και το δάπεδο του θαλάμου. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη ότι το συνεχές μοντέλο δεν αποτυπώνει τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στο λατομείο, καθώς δε συνυπολογίζονται οι ιδιότητες των ασυνεχειών, επέρχεται το συμπέρασμα ότι ένα συνεχές μοντέλο δε μπορεί να προβλέψει την πραγματική συμπεριφορά της βραχομάζας και τις καθολικές συνθήκες ευστάθειας. Αν υποθέσουμε ότι το ασυνεχές μοντέλο αποτυπώνει πλήρως το εντατικό πεδίο και τη θέση και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών, τότε είναι εμφανές το μέγεθος του σφάλματος στην περίπτωση που επιλεγόταν το συνεχές μοντέλο για την προσομοίωση. Η μελέτη συμπεριφοράς θαλάμου σε ρωγματωμένη βραχομάζα, επομένως, απαιτεί το σαφή προσδιορισμό των συστημάτων ασυνεχειών και των ιδιοτήτων τους, διότι η αύξηση του ύψους του στύλου, για παράδειγμα, δεν εξασφαλίζει συνθήκες ευστάθειας λόγω του ότι η ύπαρξη ασυνεχειών επηρεάζει σημαντικά το εντατικό πεδίο γύρω από το στύλο.

6 Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας παρουσιάστηκαν οι κυριότερες μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας και πρόβλεψης της συμπεριφοράς της βραχομάζας σε υπόγεια λατομεία διακοσμητικών λίθων. Η υπόγεια εκμετάλλευση θα αποτελεί στο άμεσο μέλλον τη μόνη εναλλακτική λύση για την αντιμετώπιση των συνεχώς αυξανόμενων αναγκών και της ραγδαίας εξάντλησης των επιφανειακών κοιτασμάτων.

Η υπόγεια εξόρυξη διακοσμητικών λίθων πραγματοποιείται συνήθως σε καλής έως πολύ καλής ποιότητας βραχομάζα δεδομένων των προδιαγραφών που πρέπει να πληρούνται σχετικά με τις διαστάσεις και την ποιότητα των τεμαχίων που εξορύσσονται και διανέμονται προς αγορά και πώληση. Πάραυτα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η εξόρυξη πραγματοποιείται σε στρωσιγενείς σχηματισμούς με ενδιάμεσες λεπτές στρώσεις αργιλικού υλικού, γεγονός που απαιτεί ενδελεχή μελέτη της καθολικής ευστάθειας των υπόγειων θαλάμων και ιδιαίτερα της οροφής.

Για την ορθή μελέτη της ευστάθειας ενός υπόγειου λατομείου προτείνονται:

- η εφαρμογή εμπειρικών μεθόδων σε συνδυασμό με τις επί τόπου τεχνικογεωλογικές και γεωτεχνικές έρευνες για τον αρχικό σχεδιασμό
- ο συνδυασμός αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων για τη διαστασιολόγηση του υπόγειου θαλάμου
- ο έλεγχος ενδεχόμενων αστοχιών της οροφής ή των στύλων μέσω της μελέτης των μηχανισμών αστοχίας και των συνθηκών που επικρατούν στον υπόγειο χώρο

Όπως παρατηρήθηκε στη διαθέσιμη βιβλιογραφία, η πλειονότητα των ερευνών σχετικά με την υπόγεια εκμετάλλευση λατομείων διακοσμητικών λίθων αφορά κυρίως στη μελέτη ευστάθειας των στύλων και της οροφής των υπόγειων θαλάμων. Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία κρίνονται αναγκαία τα εξής βήματα για μια ολοκληρωμένη ανάλυση ευστάθειας ενός υπόγειου λατομείου:

- ο ακριβής προσδιορισμός των γεωμηχανικών χαρακτηριστικών της βραχομάζας και των ασυνεχειών μέσω συστημάτων τοπογραφικής παρακολούθησης και εργαστηριακών δοκιμών
- η συνεχής παρακολούθηση του εντατικού πεδίου σε κάθε βήμα εκσκαφής με επί τόπου μετρήσεις και αριθμητικές μεθόδους
- οι λεπτομερείς αναλύσεις ευστάθειας τόσο της οροφής όσο και των στύλων του υπόγειου θαλάμου και η εκτίμηση του βαθμού επιρροής των κρίσιμων παραμέτρων, ιδιαίτερα των χαρακτηριστικών των ασυνεχειών
- η χρήση διαφορετικών αριθμητικών μοντέλων, όπως πεπερασμένων στοιχείων και διακριτών στοιχείων, για την προσομοίωση του ίδιου υπόγειου χώρου, έτσι ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος τρόπος πρόβλεψης της συμπεριφοράς της βραχομάζας μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων των αναλύσεων και των επί τόπου μετρήσεων
- συγκέντρωση όλων των διαθέσιμων στοιχείων και μετρήσεων, έτσι ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία βάσης δεδομένων που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε λατομεία που χαρακτηρίζονται από παρόμοια γεωλογικά, γεωτεχνικά και γεωμηχανικά χαρακτηριστικά, ακολουθώντας την έρευνα των Esterhuizen et al. (2011) για τα ασβεστολιθικά λατομεία στις ΗΠΑ

Για τη μελλοντική εκμετάλλευση του λατομείου στον Διόνυσο Αττικής και την επέκτασή του σε κατώτερα επίπεδα προτείνεται η ακόλουθη μεθοδολογία ανάλυσης και σχεδιασμού:

- Μέτρηση τάσεων και μετακινήσεων της οροφής και των στύλων με τασιόμετρα και μηκυνσιόμετρα. Σύγκριση με τις τελευταίες επί τόπου μετρήσεις του 2001 για τυχόν διαφοροποιήσεις. Ενημέρωση σχετικά με αστοχίες που μπορεί να έλαβαν χώρα στο παρελθόν αλλά και μελέτη της παρούσας κατάστασης του λατομείου
- Δεδομένου ότι η ύπαρξη ασυνεχειών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στην ευστάθεια ενός υπόγειου χώρου, προτείνεται ακριβής καταγραφή των συστημάτων ασυνεχειών με τη μέθοδο της τρισδιάστατης επίγειας σάρωσης (TLS) λόγω της δυνατότητας αποτύπωσης επιφάνειας σε μεγάλη απόσταση από

το σημείο στάσης του οργάνου και δυσπρόσιτων σημείων. Επιπλέον, είναι δυνατή η παρακολούθηση παραμορφώσεων, π.χ. της οροφής και των στύλων, καθώς και ο έλεγχος φθοράς

- Αριθμητικές αναλύσεις για το βέλτιστο σχεδιασμό των διαδοχικών φάσεων εκσκαφής και την εκτίμηση διαστάσεων οροφής και στύλων για την κατασκευή περισσότερων επιπέδων
- Προσπάθεια κατασκευής αριθμητικών μοντέλων με τη μέθοδο διακριτών στοιχείων λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες των ασυνεχειών για την πρόβλεψη της ευστάθειας και λειτουργικότητας του λατομείου και ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Πολλοί ερευνητές έχουν αναπτύξει επαρκώς το θεωρητικό υπόβαθρο του ζητήματος της ευστάθειας ενός υπόγειου ανοίγματος, ωστόσο η πρακτική εφαρμογή των διάφορων αναλυτικών και αριθμητικών λύσεων σε υπάρχοντα λατομεία είναι ένα αντικείμενο που δεν καλύπτεται πλήρως από τη βιβλιογραφία. Επιπλέον, μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης εντοπίστηκαν πολλά κενά που υπάρχουν κυρίως αναφορικά με τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας, τα συστήματα ασυνεχειών και τις ιδιότητές τους, και τις διαστάσεις των υπόγειων θαλάμων.

Οι Πίνακες 6.1 και 6.2 παρουσιάζουν τις διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας και τις διαστάσεις των υπόγειων θαλάμων. Παρατηρείται ότι η πλειοψηφία των διαθέσιμων δημοσιεύσεων δεν παρέχει πλήθος πληροφοριών σχετικά με τις παραμέτρους που λήφθηκαν υπόψη για το σχεδιασμό των υπόγειων θαλάμων και τις αναλύσεις ευστάθειας.

Σύμφωνα με τους Πίνακες 6.1 και 6.2 θα μπορούσαμε να πούμε ότι για το σύνολο των λατομείων που λήφθηκαν υπόψη στην παρούσα εργασία, και σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των ασβεστολίθων και μαρμάρων λαμβάνει ένα εύρος τιμών με μέση τιμή περίπου στα 100 MPa, και η εφελκυστική αντοχή κυμαίνεται περίπου στα 6.5 MPa. Όσον αφορά στις διαστάσεις των υπόγειων θαλάμων, η πλειοψηφία των δημοσιεύσεων δεν παρείχε αρκετές πληροφορίες, όπως φαίνεται

στον Πίνακα 6.2, οπότε δε μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα σχετικά με τις βέλτιστες διαστάσεις θαλάμων και στύλων.

Συνοψίζοντας, στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η προσπάθεια συγκέντρωσης και παρουσίασης των διαθέσιμων στοιχείων σχετικά με υπόγεια λατομεία διακοσμητικών λίθων σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς και η παρουσίαση των εμπειρικών, αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων που έχουν εφαρμοστεί, έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων που θα αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για το μελλοντικό σχεδιασμό μιας υπόγειας εκμετάλλευσης.

Πίνακας 6.1 Στοιχεία για τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά του βράχου στα υπό μελέτη υπόγεια λατομεία

Χώρα	Ειδικό βάρος, γ (kN/m ³)	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, <i>UCS</i> (MPa)	Αντοχή σε εφελκυσμό, <i>T</i> (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας, <i>E</i> (GPa)	Λόγος Poisson, ν	Συνοχή, <i>c</i> (MPa)	Γωνία τριβής, φ (°)	Βιβλιογραφικές πηγές
Ελλάδα	27	86.17	9.63	40	0.3	24	36	CNR-FIRGET (2001)
ΗΠΑ	-	44-301	-	-	-	-	-	Esterhuizen et al. (2011)
Ισπανία	27	150	-	-	-	-	-	Gonzalez-Nicieza et al. (2006)
	27	-	5.57-15	64-100	0.15-0.25	2-10.9	30-44.3	Alcade-Gonzalo et al. (2013)
Ιταλία	-	76±6	6.5±1.2	68±9	0.28±0.035	13.2	50	Cravero et al. (1997)
	26.5	99	-	61.1	0.25	-	32	Ferrero et al. (2013)
	26.8	75.8-142.2	5.93-11.8	51.9-83.0	0.18-0.39	-	-	Oggeri & Oreste (2015)
Πορτογαλία	-	46-94	-	43-66	0.22-0.40	-	-	Fomaro et al. (2001)
	-	68	6.5	-	-	8	48	Matilde Costa e Silva & Falcao Neves (2008)
Σλοβενία	-	94-220	3.8-6.14	14-37	-	11.5	52-54	Kos & Kortnik (2013)
Τουρκία	24.2±0.25	42±1.29	-	44.3	0.41	7.6	-	Kun et al. (2014)

Πίνακας 6.2 Στοιχεία για τις διαστάσεις των θαλάμων και στύλων για τα υπόγεια λατομεία υπό μελέτη

Χώρα	Πάχος υπερκειμένων (m)	Επίπεδα εκμετάλλευσης / Αριθμός λατομείων	Ύψος θαλάμου (m)	Πλάτος/Ανοιγμα θαλάμου (m)	Μήκος θαλάμου (m)	Εμβαδόν θαλάμου (m ²)	Πλάτος στύλου (m)	Εμβαδόν διατομής στύλου (m ² ή m ²)	Αριθμός στύλων	Πηγές
Ελλάδα	30	1	12	37	-	37x33	16	16x14 100 - 200	-	Τσουβαλά (2009); στοιχεία από την ΑΕΒΕ Λατομείων Μαρμάρου Διονύσου-Πεντέλης (2014)
ΗΠΑ	117	-	11.1	13.5	-	-	13.1	-	-	Esterhuizen et al. (2011)
Ισπανία	100/150	2	14-17	18	-	-	8-22	-	37/24	Gonzalez-Nicieza et al. (2006)
	-	2	25	20	-	-	20	-	-	Alcade-Gonzalo et al. (2013)
Ιταλία	-	-	20	10-12	30	-	-	-	-	Formaro & Lovera (2004)
	-	4	3	-	55	-	10	10x10	-	Ferrero et al. (2007)
	-	3	-	-	-	900/900/841	-	25/36/49	-	Careddu et al. (2010)
	-	2	15	-	-	-	20/25	20x20 / 25x20	2/4	Ferrero et al. (2013)
	-	-	48	25	90	-	-	-	-	Oggeri & Oreste (2015)
Πορτογαλία	-	-	13.5	9	-	-	-	9x9	-	Fomaro et al. (2001)
	42	3	14.5	-	-	-	-	6x6	-	Matilde Costa e Silva & Falcao Neves (2008)
Τουρκία	70-75	-	5	15	15	-	-	9x9	-	Kun et al. (2014)

Βιβλιογραφία

Adhikary, D.P., Dyskin, A.V., (1997). Modelling the deformation of underground excavations in layered rock masses. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 34:3-4, Paper No. 005

Agency of Natural Resources, State of Vermont, Danby Imperial Quarry (http://www.anr.state.vt.us/dec/geo/pdfdocs/MineralResource/MRDS_Marble_Danby.pdf)

Aksoy, C.O., Onargan, T., (2006). Sizing room and pillar by numerical modeling for underground marble quarries in Turkey, *Journal of Mining Sciences*, Vol. 42, No. 5

Alcade-Gonzalo, J., et al. (2013). Roof tensile failures in underground excavations. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 58: 141-148

Aydan, O. (1989). The stabilization of rock engineering structures by rock bolts, PhD Thesis, Nagoya University, Japan.

Baroni, C., et al. (2010). Geomorphological map and raised-belief model of the Carrara marble basins, Tuscany, Italy, *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 33: 233-243

Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley

Borghi, A., Castelli, D., Corbetta, E., Dino, G.A. (2015). Candoglia Marble and the «Veneranda Fabbrica del Duomo di Milano»: a resource for Global Heritage Stone Designation in the Italian Alps, *EGU General Assembly 2015*, Vol.17, EGU2015-13002.

Brady, B.H.G., Brown, E.T. (1985). *Rock Mechanics for Underground Mining*, George Allen & Unwin, London.

Brady, B. H. G., Brown, E. T., (2004). *Rock Mechanics: For underground mining*, 3rd Edition, Netherlands: Springer.

Careddu, N., et al. (2010). Evolution of a marble quarry: from open cast to underground exploitation, *Global Stone Congress 2010*

Carmignani, L., Meccheri, M., Primavori, P., (2005). Marbles and other ornamental stones from the Apuane Alps (northern Tuscany, Italy), *Giornale di Geologia Applicata* 1: 233-246

Carvalho, J.F., et al. (2008). Decision criteria for the exploration of ornamental-stone deposits: Application to the marbles of the Portuguese Estremoz Anticline, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 45: 1306-1319

Caudle, R.D., Clark, G.B. (1955). Stresses around Mine Openings in Some Simple Geologic Structures, *University of Illinois Bulletin*, Volume 52, Number 69, May 1955.

CNR-FIRGET (2001). Development of an integrated computer aided design and planning methodology for underground marble quarries, Annual Report for the period (1/10/1999 – 31/9/2000), BRITE EURAM project, Contr. No. BE-5005

Coulthard, M. A., (1999). Applications of numerical modelling in underground mining and construction, *Geotechnical and Geological Engineering* 17, pp. 373-385, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Cravero, M., Iabichino, G. (1997). Geomechanical study for the exploitation of an underground marble quarry, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 34:3-4, No. 058

Diederichs, M.S., Kaiser, P.K., (1999). Stability of large excavations in laminated hard rock masses: the voussoir analogue revisited, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 36: 97-117

Esterhuizen, G.S. (2000). Jointing effects on pillar strength, *Proceedings of the 19th International Conference on Ground Control in Mining*, Morgantown, WV: West Virginia University, pp. 286-290.

Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R., Ellenberger, J.L., Prosser, L.J. Jr., Iannacchione, A.T. (2007). Roof stability issues in underground limestone mines in the United States, *Proceedings of the 26th International Conference on Ground Control in Mining*. Morgantown, WV: West Virginia University, pp. 241-253

Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R., Ellenberger, J.L., Prosser, L.J. (2011). Pillar and roof span design guidelines for underground stone mines, Department of Health and Human Services, NIOSH Publication 2011-171

Evans, W.H. (1941). The strength of undermined strata, *Trans Instn Min Metall*, 50: 475-532

Exadaktylos, G., et al. (2001). Influence of nonlinearity and double elasticity on flexure of rock beams – I. Technical theory, *International Journal of Solids and Structures*, 38: 4091-4117

Exadaktylos, G., et al. (2007). A three-dimensional model of an underground excavation and comparison with in situ measurements, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 2007; 31: 411-433

Farmer, I.W. (1992). Room and Pillar Mining, Ch. In *Mining Engineering Handbook*, 2nd Ed., H.L. Hartman, ed. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton, CO, pp. 1681-1701

Fayol, M. (1885). Sur les mouvements de terrain provoqués par l'exploitation des mines, *Bull. Soc. L'Industrie Minerale*, 14, 818.

Ferrero, A.M., Godio, A., Sambuelli, L., Voyat, I.H. (2007). Geophysical and Geomechanical Investigations Applied to the Rock Mass Characterisation for Distinct Element Modelling, *Rock Mech. Rock. Engng.*, 40 (6), pp. 603-622

Ferrero, A.M., et al. (2010). Stability analysis of historic underground quarries, *Computers and Geotechnics*, 37: 476-486

Ferrero, A.M., et al. (2013). In situ measurements interpretations in large underground marble quarry by 3D modeling, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 60: 103-113.

Fomaro, M., et al. (2001). Going underground in quarrying: technical perspectives for marble in Portugal, 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey – IMCET 2001.

Fornaro, M., Bosticco, L. (1999). La coltivazione in sotterraneo delle rocce ornamentali. Quaderno N.22, GEAM, Torino.

Fornaro, M., Lovera, E. (2004). Geological-Technical and Geo-engineering Aspects of Dimensional Stone Underground Quarrying, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 574-584

G+D Computing, (1999). *Straus7*, In: *Using Strand7*, Sydney, NSW 2000, Australia

Gonzalez-Nicieza, C., et al. (2006). A comparative analysis of pillar design methods and its application to marble mines, *Rock Mech. Rock Engng.*, 2006; 39 (5): 421-444

Goodman, R.E., Shi, G-H. (1985). *Block Theory and its Application to Rock Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey

- Goodman, R.E. (1989). Introduction to Rock Mechanics, 2nd edn., Wiley, New York, p. 562
- Hatzor, Y.H., (1999), The Voussoir Beam Reaction Curve.
- Hedley, D.G.F., Grant, F. (1972). Stope and pillar design for the Elliot Lake Uranium Mines, Bull. Can. Inst. Min. Metallurg. 63, 37-44.
- Hoek, E., Brown, E.T. (1980). Underground Excavations in Rocks, Inst. Min. & Metall., London
- Iannacchione, A.T., Prosser, L.J. (1998). Roof and rib hazard assessment for underground stone mines, Mining Engineering, pp. 76-80
- Iannacchione, A.T., Esterhuizen, G.S., Prosser, L.J., Bajpayee, T.S. (2006). Assessing Roof Fall Hazards for Underground Stone Mine: A Proposed Methodology, SME Preprint 06-59, SME Annual Meeting, St. Louis, MO, March 27-29.
- Itasca (2007). 3DEC – 3 Dimensional Distinct Element Code, Version 4.1, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis 2007.
- Jing, L., Stephansson, O. (2006). Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering: Theory and Application, Elsevier, Amsterdam
- Kaiser, P.K. (1979). Tunnel design – conclusions from long-term model tests, Proc. 4th Int. Cong. On Rock Mech., ISRM, Montreux, 3: 236-238
- Kortnik, J. (2009). Underground natural stone excavation technics in Slovenia, RMZ – Materials and Geoenvironment, Vol. 56, No. 2, pp.202-211.
- Kos, A., Kortnik, J. (2013). Monitoring of high safety pillars stability in quarry Lipica II – EL beam displacement sensors, RMZ – Materials and geoenvironment, Vol. 60, No. 2, pp. 111-119
- Kun, M., Tufan, B., Kun, N. (2014). The Applicability of Underground Mining Methods in Limestone Quarries of Western Taurus, Proceedings of the International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering, Prague, Czech Republic, August 11-12, 2004, No. 61.
- Mancini, R., Cardu, M., Fornaro, M., (1995). Hard dimension stone production by splitting and cutting methods in Italian quarries, *Proc. 4th Int. Symp. Mine Planning and Equipment Selection*, Calgary, Canada, pp. 151-156.

Matilde Costa e Silva, M., Falcao Neves, P. (2008). Procedures for geotechnical characterization and economical feasibility studies – application to an underground marble exploitation, *Journal of Mining Sciences*, Vol. 44, No. 1

Nefeslioglu, H. A., et al. (2006). Indirect determination of weighted joint density (wJd) by empirical and fuzzy models: Supren (Eskisehir, Turkey) marbles, *Engineering Geology*, 85: 251-269

Obert, L., Duvall, W.I. (1967). *Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock*, Wiley, New York.

Oggeri, C., Oreste, P. (2015). Underground Quarrying for Marble: Stability Assessment through Modelling and Monitoring, *International Journal of Mining Sciences*, Vol. 1, 1: 35-42

Palmström, A. (1982). The volumetric joint count – a useful and simple measure of the degree of rock jointing, *Proc. 4th Int. Cong. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 5: 221-228

Palmström, A. (1995). Rmi – A System for Characterization of Rock Masses for Rock Engineering Purposes, PhD Thesis, University of Oslo, Norway.

Passaris, E.K.S., Ran, J.Q., Mottahed, P., (1993). Stability of the jointed roof in stratified rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, 30 (7): 57-860

Salvini, R., Vanneschi, C., Riccucci, S., Francioni, M., Gulli, D. (2015). Application of an integrated geotechnical and topographic monitoring system in the Lorano marble quarry (Apuan Alps, Italy), *Geomorphology* 241: 209-223.

Sheorey, P.R. (1997). *Empirical rock failure criteria*, A. A. Balkema Publ., Rotterdam

Stephansson, O. (1971). Stability of single openings in horizontally bedded rock, *Eng Geol*, 5: 5-71

Sterling, R.L. (1980). The ultimate load behavior of laterally constrained rock beams, *Proc. 21st US Symposium Rock Mech.*, Missouri, 533-542

Tsesarsky, M. (2005). Stability of underground openings in stratified and jointed rock, PhD Thesis, University of the Negev.

Vanneschi, C., et al. (2014). Geological 3D modeling for excavation activity in an underground marble quarry in the Apuan Alps (Italy), *Computers & Geosciences*; 69: 41-54

Wang, X., Kulatilake, P.H.S.W., Song, W.D. (2012). Stability investigations around a mine tunnel through three-dimensional discontinuum and continuum stress analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 32: 98-112

Μοσκοφόγλου, Π. (1990). Μελέτη για το Λατομείο Διονύσου Αττικής

Παπαμαργαρίτη, Ε., Τσάγκα, Μ. (2012). Υπόγειοι Θάλαμοι Πληροφορίας στην Πεντέλη – Εξορύσσοντας 01100100 01100001 01110100 01100001, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Σοφιανός, Α.Ι., Καπένης, Α.Π., (1999). Συμπεριφορά χαμηλού θόλου των υπογείων οροφών για ακραία παραμορφωσιμότητα του πετρώματος, *Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, V, τεύχ. 1-2*

Σοφιανός, Α.Ι., Νομικός, Π. (2008). Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδόσεις ΕΜΠ.

Τσουβαλά, Σ. (2009). Τρισδιάστατη προσομοίωση υπόγειας εκμετάλλευσης του μαρμάρου Διονύσου, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης – Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Τσουτρέλης, Χ., Εξαδάκτυλος, Γ., Νομικός, Π., Ασβεστάς, Γ., (1997). Ευστάθεια της οροφής των θαλάμων σε υπόγεια εκμετάλλευση μαρμάρου, *Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, V, τεύχ. 1-2*