

# ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

# «ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΟΥ ΔΙΟΝΥΣΟΥ»

# ΤΣΟΥΒΑΛΑ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ Γ. ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Π.Κ. (Επιβλέπων) Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Π.Κ. Κ. ΠΡΟΒΙΔΑΚΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Π.Κ.

> ΧΑΝΙΑ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2009

# Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η προσπάθεια κατασκευής ενός μοντέλου διακριτών στοιχείων (Distinct Element Model) τριών διαστάσεων, που να προσομοιώνει τη μηχανική συμπεριφορά της μάζας του μαρμάρου που περιβάλλει υπόγειο θαλάμο, του οποίου η οροφή υποστηρίζεται από κεντρικό στύλο, στο κοίτασμα μαρμάρου Διονύσου Αττικής. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο κώδικας διακριτών στοιχείων τριών διαστάσεων 3DEC (Three Distinct Element Code). Η χρήση ενός μοντέλου σαν αυτό μπορεί να βρεί εφαρμογή στη βελτίωση του σχεδιασμού εξόρυξης των υπόγειων λατομείων μαρμάρου.

Κατά τον σχεδιασμό υπόγειων λατομείων με τη μέθοδο των θαλάμων και στύλων, από τα πιο σημαντικά ζητήματα είναι η γνώση των ιδιοτήτων αντοχής και παραμορφωσιμότητας του αρρήκτου πετρώματος, τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών που διασχίζουν το πέτρωμα, καθώς και οι επί τόπου κύριες τάσεις.

Θα πρέπει, σε αυτό το σημείο, να σημειωθεί ότι η δημιουργία ενός μοντέλου το οποίο θα περιέχει όλα τα συστήματα ασυνεχειών που συναντώνται επί τόπου στο λατομείο, αν και είναι εφικτή όσον αφορά τη γεωμετρία του μοντέλου, αποτελεί μια μη πρακτική τεχνική προσέγγισης του προβλήματος. Αυτό συμβαίνει γιατί η επίλυση ενός μοντέλου διακριτών στοιχείων το οποίο περιλαμβάνει ένα μεγάλο πλήθος ασυνεχειών, απαιτεί την πραγματοποίηση περισσότερων υπολογισμών, γεγονός που οδηγεί στην ανάγκη για χρήση ενός υπολογιστή με αρκετά μεγάλη μνήμη καθώς και στη μεγάλη αύξηση της χρονικής διάρκειας των υπολογιστικών κύκλων.

Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί, η τεχνική που επιλέγεται είναι να εισαχθούν στο μοντέλο μόνο τα πιο χαρακτηριστικά συστήματα ασυνεχειών που διασχίζουν το μάρμαρο. Η προσέγγιση που ακολουθείται για το σκοπό αυτό είναι πρώτα να εκτιμηθούν οι ιδιότητες του αρρήκτου πετρώματος. Στη συνέχεια αυτές θεωρούνται μειωμένες (ενεργές ιδιότητες) υπό την επίδραση των συστημάτων ασυνεχειών που δεν θα εισαχθούν στο μοντέλο. Τελικά εισάγονται λεπτομερώς στο τρισδιάστατο μοντέλο μόνο τα κύρια συστήματα ασυνεχειών. Η εκτίμηση των ενεργών ιδιοτήτων του μαρμάρου βασίζεται στην έννοια της 'φθοράς' όπως αυτή ορίζεται στη θεωρία Μηχανικής της Φθοράς και στον δείκτη "ποιότητας" βραχομάζας GSI.

Για τον καθορισμό των ιδιοτήτων παραμορφωσιμότητας των ασυνεχειών που τελικά εισάγονται στο μοντέλο θεωρείται επίσης το φαινόμενο της κλίμακας. Σύμφωνα με το φαινόμενο της κλίμακας οι τιμές των ιδιοτήτων αυτών πρέπει να μειωθούν από την πραγματική τους διάσταση στο επίπεδο του μοντέλου.

Ακολουθεί η εκ νέου κατασκευή του μοντέλου αυτή τη φορά χωρίς την εισαγωγή των ασυνεχειών. Αυτό γίνεται με σκοπό να υπάρξει ένα περισσότερο πρακτικό συνεχές μοντέλο που να μπορεί ωστόσο να αποδώσει τη συμπεριφορά της ασυνεχούς βραχομάζας το ίδιο καλά όσο το ασυνεχές.

Ο έλεγχος της ορθότητας της αριθμητικής προσομοιώσης και των αποτελεσμάτων γίνεται συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου με διαθέσιμες επί τόπου μετρήσεις μεταβολής τάσεων και μετατοπίσεων μέσα στο υπόγειο λατομείο.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	Εισαγωγή	
2.	Περιγραφή του λατομείου Διονύσου	
2	.1 Γεωλογία και τεκτονική	2
2	.2 Μέθοδος υπόγειας εκμετάλλευσης	3
2	.3 Όργανα καταγραφής των τάσεων και των μετατοπίσεων	4
3.	Ιδιότητες του μαρμάρου Διονύσου και των ασυνεχειών	9
3	.1 Φυσικές ιδιότητες	9
3	.2 Μηχανικές ιδιότητες του αρρήκτου πετρώματος	9
3	.3 Ιδιότητες των ασυνεχειών	9
4.	Μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας	
4	.1 Φθορά των ιδιοτήτων του αρρήκτου μαρμάρου	
4	.2 Φαινόμενο κλίμακας των ιδιοτήτων των ασυνεχειών	13
5.	Μεθοδολογία	
6.	Υπολογιστικός κώδικας	
7.	Κατασκευή του μοντέλου	
8.	Αποτελέσματα	
8	.1 Επεξεργασία των μετρήσεων	
8	.2 Ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου	
8	.3 Βαθμονόμηση του μοντέλου	27
8	.4 Διερεύνηση της συμπεριφοράς του υπογείου μετά την περάτωση	των μετρήσεων29
9.	Συμπεράσματα	
ПА	РАРТНМА А	
ПА	РАРТНМА В	

# 1. Εισαγωγή

Η υπόγεια εξόρυξη μαρμάρου, όπως άλλωστε και η υπαίθρια, έχει πρωταρχικό σκοπό την εξαγωγή πρισματικών – κατά προτίμηση ορθογώνιων – άρρηκτων ογκοτεμαχίων μαρμάρου, ελεύθερων από φυσικές ή τεχνητές ατέλειες (ασυνέχειες, εγκλείσματα κ.λπ.), με μικρότερη διάσταση μεγαλύτερη από 1m περίπου. Οι βασικοί στόχοι για την επίτευξη του βέλτιστου σχεδιασμού ενός υπόγειου λατομείου μαρμάρου, ανάμεσα σε άλλους, είναι:

- η απόσπαση άρρηκτων τεμαχίων πετρώματος, περιορισμένων ανάμεσα σε αμοιβαίως διατεμνόμενες ασυνέχειες, με τη μέγιστη ανάκτηση μεταλλεύματος,
- οι ασφαλείς συνθήκες υπόγειας εργασίας,
- η αποφυγή ρωγμάτωσης του αρρήκτου μαρμάρου, που προκαλείται λόγω μεγάλων συγκεντρώσεων τάσεων και
- η εγκατάλειψη των υπόγειων εκσκαφών σε συνθήκες μακροχρόνιας ευστάθειας για πιθανή μελλοντική χρήση.

Η δυσκολία προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων στα υπόγεια έργα έγκειται στο γεγονός ότι τα έργα αυτά κατασκευάζονται σε "άγνωστους" γεωλογικούς σχηματισμούς και ότι στη φάση του σχεδιασμού του έργου παρατηρούνται μόνο οι εκτεθειμένες επιφάνειες των πετρωμάτων. Από βιβλιογραφική ανασκόπηση προκύπτει ότι οι περισσότερες προσομοιώσεις έως τώρα γίνονται σε δύο διαστάσεις και θεωρούν τους γεωλογικούς σχηματισμούς ως συνεχή ισότροπα υλικά.

Κίνητρο για αυτή τη μελέτη αποτελούν τα ακόλουθα προβλήματα της βιομηχανίας υπόγειας εκμετάλλευσης μαρμάρου:

- Μέχρι στιγμής τα υπάρχοντα δεδομένα και η αποκτηθείσα γνώση σχετικά με την υπόγεια εκμετάλλευση δεν έχουν αξιοποιηθεί αρκετά.
- Η διαδικασία σχεδιασμού μιας υπόγειας εκμετάλλευσης είναι συχνά εμπειρική και πολλές φορές δεν επαρκεί λόγω της αβεβαιότητας περί των επικρατουσών συνθηκών.
- Δεν υπάρχουν ξεκάθαρες μέθοδοι για την ποσοτικοποίηση της γεωλογίας.
- Μέχρι στιγμής η Ελληνική Νομοθεσία δεν περιλαμβάνει κανονισμούς για την ενόργανη παρακολούθηση των υπογείων μεταλλευτικών και λατομικών έργων, όπως γίνεται για παράδειγμα στην περίπτωση των σηράγγων.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιχειρείται η προσομοίωση, με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, της διάνοιξης ενός υπόγειου θαλάμου, ο οποίος έχει εξορυχθεί κατά την περίοδο 1999-2005 εντός του κοιτάσματος μαρμάρου Διονύσου της Αττικής. Στόχος της εργασίας είναι να προκύψει ένα βαθμονομημένο τρισδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο, το οποίο θα είναι σε θέση να προβλέψει, με αρκετή αξιοπιστία, τη μηχανική συμπεριφορά του υπογείου, από τα αρχικά στάδια διανοιξής του μέχρι τη σημερινή του μορφή. Το ίδιο μοντέλο, θα μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την παρατήρηση της συμπεριφοράς του υπογείου, όσο η εξόρυξη προχωράει σε χαμηλότερα επίπεδα και μεταβάλλονται οι επικρατούσες συνθήκες.

## 2. Περιγραφή του λατομείου Διονύσου

Το μάρμαρο Διονύσου εξορύσσεται στα λατομεία της περιοχής Διονύσου Αττικής, περίπου 30 km Βόρεια του κέντρου της πόλης της Αθήνας. Η εξόρυξη στο χώρο έχει ξεκινήσει πριν 100 και πλέον έτη και σήμερα πραγματοποιείται σε εννέα μέτωπα επιφανειακής και δύο υπόγειας εκμετάλλευσης. Η υπόγεια εξόρυξη ξεκίνησε το 1994 και σε αυτήν εφαρμόζεται η μέθοδος των θαλάμων και στύλων σε συνδυασμό με ορθές βαθμίδες. Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή της γεωλογίας της περιοχής, του τεκτονικού περιβάλλοντος του λατομείου και της μεθόδου που ακολουθείται για την υπόγεια εξόρυξη του μαρμάρου.

#### 2.1 Γεωλογία και τεκτονική

Η Εικ. 1 δείχνει μια γεωλογική τομή της ευρύτερης περιοχής του κοιτάσματος του μαρμάρου Διονύσου, όπου διακρίνονται και τα περιβάλλοντα πετρώματα. Το υπό εκμετάλλευση κοίτασμα του μαρμάρου Διονύσου ανήκει στον 'κατώτερο ορίζοντα' του μαρμάρου Διονύσου - Πεντέλης και έχει μέγιστο πάχος μεγαλύτερο από 800m (Εικ. 1). Αντιθέτως, το Πεντελικό μάρμαρο ανήκει στον 'ανώτερο ορίζοντα', έχει μικρό πάχος και η εξαγωγή του σταμάτησε το 1980 για περιβαλλοντικούς λόγους. Το υπερκείμενο του κοιτάσματος πέτρωμα είναι σχιστόλιθος Καισαριανής.



Εικόνα 1. Γεωλογική τομή κατά Sindowski (Mo: ανώτερο μάρμαρο, Ks: σχιστόλιθοι Καισαριανής, Mu: κατώτερο μάρμαρο)

Το κύριο τεκτονικό χαρακτηριστικό της περιοχής είναι η ύπαρξη ενός αντικλίνου με άξονα ΝΔ-ΒΑ και οι άφθονες κατακλάσεις οι οποίες κατατεμαχίζουν το σύνολο του μαρμαροφόρου κοιτάσματος συμβάλλοντας έτσι στην εξαιρετικά χαμηλή αποληψιμότητα υγιών όγκων.

Στο λατομείο διακρίνονται πέντε χαρακτηριστικά συστήματα ασυνεχειών, των οποίων οι στερεογραφικές προβολές καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά φαίνονται στην Εικ. 2 και στον Πίνακα 1, αντίστοιχα. Από αυτά, τα τρία πρώτα συστήματα, τα οποία απομονώνουν πρισματικά τεμάχια μαρμάρου, είναι τα πιο επίμονα στα παρατηρούμενα μέτωπα και θεωρούνται ως τα κύρια συστήματα ασυνεχειών. Στη φωτογραφία της Εικ. 3 φαίνεται η είσοδος του υπογείου που μελετάται σε αυτή την εργασία και διακρίνονται μερικές από τις ασυνέχειες που διασχίζουν το πέτρωμα.



Εικόνα 2. Απεικόνιση κυκλογραφικών προβολών και πόλων των κύριων οικογενειών ασυνεχειών που χαρτογραφήθηκαν στο λατομείο Διονύσου σε στερεογραφική προβολή Schmidt χαμηλού ημισφαιρίου (Exadaktylos et. al., 2006)

Πίνακας 1. Ιδιότητες των συστημάτων ασυνεχειών που διασχίζουν το πέτρωμα στην περιοχή του υπό μελέτη υπογείου στο λατομείο Διονύσου (Exadaktylos et. al., 2006)

A/A	Σύστημα ασυνεχειών (ID)	Διεύθυνση κλίσης [deg]	Κλίση [deg]	Μέση απόσταση [m]	Επιμονή στα μέτωπα [%]
1	4m	233,0	80,2	4-7	100
2	1m	147,8	80,4	3-7	100
3	5m	202,3	77,0	4-7	100
4	3m	147,2	57,4	3-7	50
5	6m	80,8	55,2	3-7	50



Εικόνα 3. Φωτογραφία της εισόδου του υπό μελέτη υπογείου όπου διακρίνονται μερικές από τις ασυνέχειες της περιοχής (Cad-Puma, BRITE EURAM project, 2000).

## 2.2 Μέθοδος υπόγειας εκμετάλλευσης

Στο λατομείο Διονύσου εφαρμόζεται ένας συνδυασμός επιφανειακής και υπόγειας εκμετάλλευσης. Η υπόγεια εξόρυξη του μαρμάρου γίνεται με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων (Εικ. 4), σε συνδυασμό με τη μέθοδο των ορθών βαθμίδων για την ανάπτυξη του λατομείου σε κατώτερους ορίζοντες.



Εικόνα 4. Μέθοδος θαλάμων και στύλων με ορθές βαθμίδες σε μεταλλεία. Στα υπόγεια λατομεία μαρμάρου η μέθοδος είναι η ίδια εκτός από τη χρήση εκρηκτικών υλών

Η διαμόρφωση των υπογείων ξεκινάει από το ανώτερο υψόμετρο. Αρχικά διενεργείται η διάνοιξη των θαλάμων του πρώτου ορόφου και ο καθορισμός των στύλων. Ακολουθεί η εξόρυξη στο επίπεδο του αμέσως κατώτερου ορόφου, με την κατασκευή ορθής βαθμίδας. Η ανάπτυξη της υπόγειας εκμετάλλευσης συνεχίζεται με τον ίδιο τρόπο και στα επόμενα επίπεδα και προχωράει προς τα κάτω με τη μέθοδο των βαθμίδων. Πιο συγκεκριμένα, το ύψος των θαλάμων και των στύλων του πρώτου επιπέδου εκσκαφής είναι 3m. Ακολουθούν ακόμα 3m εκσκαφής στο δεύτερο επίπεδο (συνολικά 6m), ενώ στη συνέχεια η εκμετάλλευση επεκτείνεται προς τα κάτω με ορθές βαθμίδες ύψους 6m.



Εικόνα 5. Αποψη της υπόγειας εκμετάλλευσης και του στύλου

Στη φωτογραφία της Εικ. 5 φαίνεται μια εσωτερική άποψη της υπόγειας εκμετάλλευσης. Η προχώρηση της εξόρυξης περιμετρικά του στύλου γίνεται με την κοπή του μετώπου μέσου πλάτους 10m με βήμα 1,5 - 2,0m. Η μέση διάσταση των στύλων είναι 16m x 14m και των θαλάμων γύρω από τους στύλους 37m x 33m, ενώ το συνολικό ύψος των θαλάμων και των στύλων στο υπό μελέτη υπόγειο όπως αυτό είναι στη σημερινή του μορφή είναι 12m.

### 2.3 Όργανα καταγραφής των τάσεων και των μετατοπίσεων

Στα μέτωπα της υπόγειας εκμετάλλευσης του λατομείου Διονύσου χρησιμοποιούνται όργανα για την παρακολούθηση των τάσεων στο κέντρο των στύλων και των σχετικών μετατοπίσεων στην οροφή των θαλάμων. Όσον αφορά το υπό μελέτη υπόγειο, είναι διαθέσιμα στοιχεία επί τόπου μέτρησης τάσεων και μετατοπίσεων κατά το διάστημα από 05/1999 εως 04/2001 (Cad-Puma, BRITE EURAM project, 2000). Η καταγραφή των τάσεων στο εσωτερικό του στύλου και των μετατοπίσεων σε διάφορα βάθη από την οροφή του υπογείου, γίνεται με όργανα καταγραφής τάσεων και μετατοπίσεων της εταιρείας παραγωγής γεωτεχνικών μετρητικών οργάνων Geokon Incorporation (Εικ. 6 και 7 αντίστοιχα).

Συγκεκριμένα, για την μέτρηση των μετατοπίσεων χρησιμοποιούνται μηκυνσιόμετρα διατρήματος πολλαπλών σημείων (Multipoint Borehole Extensometers) και ειδικότερα το μοντέλο A6 τύπου εύκαμπτης ράβδου (Model A6 Flexible Rod Type, Εικ. 6α), σε συνδυασμό με αισθητήρα μετατοπίσεων και ειδικότερα το μοντέλο 4450 μετατροπέα μετατοπίσεων παλλόμενου καλωδίου (Model 4450 Vibrating Wire Displacement Transducer, Εικ. 6β).



Εικόνα 6. α) Μηκυνσιόμετρο τύπου εύκαμπτης ράβδου, μοντέλο Α6 της Geokon Inc., συσπειρωμένο για τη μεταφορά του και β) κεφαλή μηκυνσιομέτρου με αισθητήρα μετατοπίσεων παλλόμενου καλωδίου μοντέλο 4450 της Geokon Inc. (Geokon Inc. Instruction Manuals)

Τα μηκυνσιόμετρα τοποθετούνται σε διατρήματα και χρησιμοποιούνται για την μέτρηση μετακινήσεων πετρωμάτων, οι οποίες μπορεί να συμβούν ως αποτέλεσμα επιφανειακής και υπόγειας εκσκαφής, φόρτισης θεμελιώσεων ή μετακίνησης φυσικών πρανών. Τα

χρησιμοποιούμενα μηκυνσιόμετρα στο υπόγειο αποτελούνται από τρία κύρια μέρη (Εικ. 6β). Αυτά είναι ο αισθητήρας μετατόπισης, ο οποίος τοποθετείται στην κεφαλή του διατρήματος, οι αγκυρώσεις που βρίσκονται σε διάφορα βάθη μέσα στο διάτρημα και οι ράβδοι που εκτείνονται μεταξύ των αγκυρώσεων και της κεφαλής του διατρήματος και μεταδίδουν τις μετατοπίσεις των αγκυρώσεων στον αισθητήρα μετατόπισης. Η κεφαλή του μηκυνσιομέτρου φέρει φλάντζα, σχεδιασμένη να εφαρμόζει στην επιφάνεια του πετρώματος, του εδάφους ή του σκυροδέματος στο στόμιο του διατρήματος. Οι σχετικές μετατοπίσεις του πετρώματος διαδίδονται στις ράβδους και υπολογίζονται ως η μεταβολή της απόστασης ανάμεσα στην αγκύρωση και την κεφαλή αναφοράς που βρίσκεται στην κορυφή του διατρήματος.

Για την μέτρηση των τάσεων, αντίστοιχα, χρησιμοποιούνται διαξονικά τασιόμετρα (Biaxial Stressmeters) και ειδικότερα το μοντέλο 4350 παλλόμενου καλωδίου (Model 4350 Vibrating Wire) της εταιρείας Geokon Inc. (Εικ. 7α). Το τασιόμετρο αυτό αποτελείται από ένα χαλύβδινο κύλινδρο υψηλής αντοχής, ο οποίος είναι στερεωμένος με ρευστοκονίαμα μέσα σε ένα διάτρημα διαμέτρου 60mm (Εικ. 8). Η τοποθέτηση και ο προσανατολισμός του μέσα στο διάτρημα γίνεται με τη βοήθεια ράβδων διάταξης. Μικρές προεξοχές στις πλευρές του τασιομέτρου κεντράρουν τη θέση του μέσα στο διάτρημα και επιτρέπουν επίσης τη ροή ρευστοκονιάματος στο κελί. Η διατήρηση του τασιόμετρου στη θέση του και στο σωστό προσανατολισμό επιτυγχάνεται μέσω ενός ασφαλιστικού δακτυλίου συγκράτησης, ο οποίος όταν ενεργοποιείται από έναν ελκτικό μηχανισμό, επεκτείνεται και σφηνώνεται στα τοιχία του διατρήματος.



Εικόνα 7. a) Διαζονικό τασιόμετρο μοντέλο 4350, και β) τομή τασιόμετρου 4350 με τρείς αισθητήρες τοποθετημένους ανά 120° (Geokon Inc. Instruction Manuals)

Οι μεταβολές των τιμών και των διευθύνσεων των κυρίων τάσεων υπολογίζονται σε επίπεδο κάθετο στον άξονα του τασιόμετρου. Μεταβολές στις τάσεις του φιλοξενούντος υλικού επιφέρουν παραμόρφωση του κυλίνδρου. Η ακτινική παραμόρφωση του κυλίνδρου προκαλεί μεταβολές στη συχνότητα τριών ή έξι αισθητήρων παλλόμενων καλωδίων τοποθετημένων ανά διαστήματα 120° ή 60° αντίστοιχα (Εικ. 7β) και μετράται μέσω αυτών με βαθμονομήσεις παρεχόμενες από την κατασκευάστρια εταιρεία. Στη συνέχεια οι παραμορφώσεις μπορούν να συσχετιστούν με αλλαγές στις τάσεις.



Εικόνα 8. α) Τασιόμετρο και εξοπλισμός εγκατάστασης, β) διάτρημα για την τοποθέτηση του τασιόμετρου (Cad-Puma, BRITE EURAM project, 2000)

Για να γίνει αυτό χρησιμοποιείται η εξίσωση ακτινικής μετατόπισης κυλινδρικού εγκλείσματος μορφής δακτυλίου σε τέλεια επαφή με το περιβάλλον πέτρωμα και βασίζεται στην εργασία του Savin (1961). Παρόλο που το πέτρωμα έχει ιδιότητες που εξαρτώνται από το χρόνο, τα αναλυτικά αποτελέσματα των Berry & Fairhurst (1966) και οι πειραματικές εργασίες των Hawkes (1969), Skilton (1971) και Buswell et al. (1975) δείχνουν ότι οι εξισώσεις του Savin μπορούν εν τούτοις να χρησιμοποιηθούν.

Η χρήση του τασιόμετρου έχει σκοπό τη μέτρηση των τάσεων του πετρώματος στο επίπεδο. Η αρχή λειτουργίας του περιγράφεται αν θεωρηθεί ένας κυλινδρικός αισθητήρας ο οποίος "σφηνώνεται" σε ένα άπειρο ισότροπο μέσο (Εικ. 9). Ο αισθητήρας είναι προσανατολισμένος κάθετα σε επίπεδο το οποίο υποβάλλεται στις κύριες τάσεις p και q. Ο αισθητήρας έχει εξωτερική ακτίνα R<sub>2</sub> και εσωτερική ακτίνα R<sub>1</sub>.



Εικόνα 9. Τομή του κυλινδρικού αισθητήρα που τοποθετείται στο πέτρωμα (Geokon Inc. Instruction Manuals)

Η εξίσωση της ακτινικής μετατόπισης (Vr) του αισθητήρα ( $R_1 < r < R_2$ ) σε πολικές συντεταγμένες είναι:

$$V_r = A(p+q) + B(p-q)\cos 2\theta \tag{1}$$

όπου

$$A = \frac{R_2}{8\mu_s} \left[ C_2(X_s - 1)\frac{r}{R_2} + C_5\frac{R_2}{r} \right]$$

$$B = \frac{R_2}{8\mu_s} \left[ C_3(X_s - 3)\frac{r^3}{R_2^3} + C_7\frac{r}{R_2} + C_1(X_s + 1)\frac{R_2}{r} + C_4\frac{R_2^3}{r^3} \right]$$
(2)

Οι συντελεστές C1 έως C7 των εξισώσεων (2) εξαρτώνται από τη γεωμετρία του αισθητήρα και τις ιδιότητες του υλικού του αισθητήρα και του μέσου (πέτρωμα, πάγος, σκυρόδεμα) και δίνονται στην εργασία του Savin. Επομένως οι συντελεστές A και B της εξίσωσης (1) εξαρτώνται από τη γεωμετρία και τις μηχανικές ιδιότητες του αισθητήρα και τις μηχανικές ιδιότητες του περιβάλλοντος μέσου.

Στις εξισώσεις (2) υπεισέρχεται το μέτρο διάτμησης του μαρμάρου

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{3}$$

και ο συντελεστής

$$X = 3 - 4\nu \tag{4}$$

όπου *E* είναι το μέτρο ελαστικότητας, *v* ο λόγος Poisson και *θ* είναι η γωνία μετρημένη δεξιόστροφα από την κατεύθυνση της κύριας τάσης p προς την κατεύθυνση του πρώτου αισθητήρα. Ο δείκτης *s* των εξισώσεων (2) υποδηλωνει τις ιδιότητες του αισθητήρα.

Το μέγεθος και η κατεύθυνση των κύριων τάσεων στο μέσο, προσδιορίζονται από το μέγεθος της ακτινικής παραμόρφωσης του αισθητήρα που μετράται σε τρείς κατευθύνσεις. Στον διαξονικό αισθητήρα τάσεων, όπου υπάρχουν τρείς αισθητήρες, οι κατευθύνσεις μέτρησης είναι ανά 120° και από την εξίσωση (1) για τους τρείς αισθητήρες προκύπτει:

$$V_{r1} = A(p+q) + B(p-q)\cos 2\theta_{1}$$

$$V_{r2} = A(p+q) + B(p-q)\cos 2\theta_{2}$$

$$V_{r3} = A(p+q) + B(p-q)\cos 2\theta_{3}$$
(5)

όπου  $\theta_1$  είναι η γωνιά που μετράται δεξιόστροφα από τη διεύθυνση της κύριας τάσης p προς τη διεύθυνση μέτρησης  $V_{r1}$ ,  $\theta_2 = \theta_1 + 60^\circ$ ,  $\theta_3 = \theta_1 + 120^\circ$  και 2r (στις σχέσεις των συντελεστών A και B) είναι το μήκος του αισθητήρα (1 ίντσα).

Λύνοντας το σύστημα εξισώσεων (5) ως προς p, q και  $\theta$  προκύπτει:

$$p = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{3B} \left( (2V_{r1} - V_{r2} - V_{r3})^2 + 3(V_{r2} - V_{r3})^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{3A} (V_{r1} + V_{r2} + V_{r3}) \right]$$
(6)

$$q = \frac{1}{3A}(V_{r1} + V_{r2} + V_{r3}) - p \tag{7}$$

και

$$\theta_{1} = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left[ \frac{V_{r1} - A(p+q)}{B(p-q)} \right]$$
(8)

Επειδή όμως ισχύει ότι  $cos(\theta) = cos(-\theta)$ , η εξίσωση (8) έχει δύο λύσεις.

Av 
$$V_{r2} = A(p+q) + B(p-q)\cos 2(\theta_1 + 60^\circ)$$
, τότε η  $\theta_1$  είναι θετική.  
Αλλά, αν  $V_{r2} = A(p+q) + B(p-q)\cos 2(\theta_1 + 120^\circ)$ , τότε η  $\theta_1$  είναι αρνητική.

Η διάταξη των συσκευών μέτρησης σε μια κάτοψη του υπογείου φαίνεται στην Εικ. 10 και περιλαμβάνει ένα τασιόμετρο (Τ) και τρία μηκυνσιόμετρα (M1-M3). Το κάθε μηκυνσιόμετρο διαθέτει έξι σημεία καταγραφής σε διάφορα βάθη πάνω από την οροφή όπως φαίνεται στην κατακόρυφη τομή A-A' η οποία επισημαίνεται στην Εικ. 10 και παρουσιάζεται στην Εικ. 11. Οι επί τόπου μετρήσεις των τάσεων και των παραμορφώσεων χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την βαθμονόμηση του τρισδιάστατου μοντέλου, συγκρίνοντάς τες με τους αντίστοιχους υπολογισμούς του μοντέλου για τις τάσεις και τις μετατοπίσεις στα ίδια σημεία.



Εικόνα 10. Κάτοψη του υπογείου όπου φαίνονται οι θέσεις των μηκυνσιομέτρων (M1-M3) και του τασιόμετρου (T1)



Εικόνα 11. Κάθετη τομή (Α-Α) του υπογείου με τα όρια του μοντέλου και τη θέση του μηκυνσιόμετρου ΜΙ

#### 3. Ιδιότητες του μαρμάρου Διονύσου και των ασυνεχειών

#### 3.1 Φυσικές ιδιότητες

Το μάρμαρο Διονύσου είναι ένα ασβεστιτικό μάρμαρο (τουλάχιστον 98% περιεκτικότητα σε CaCO<sub>3</sub>) με εμφανή την παρουσία μικρών φλεβών δολομιτικής σύστασης. Το μάρμαρο Διονύσου παρουσιάζει μια μεγάλη κατανομή μεγέθους κόκκων, των οποίων το σχήμα ποικίλει. Μερικές από τις φυσικές ιδιότητες του μαρμάρου Διονύσου, το οποίο είναι υψηλής ποιότητας, φαίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Φυσικές ιδιότητες του μαρμάρου Διονύσου (Εργαστήριο μελέτης & σχεδιασμού εκμεταλλεύσεων, τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης)

Πραγματική πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Μέσο μέγεθος κόκκου (μm)	Υδατοαπορροφητικότητα (%)	Συνολικό ενεργό πορώδες (%)
$2,70 \pm 0,1$	$2,66 \pm 0,1$	300	$0,6 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,2$

#### 3.2 Μηχανικές ιδιότητες του αρρήκτου πετρώματος

Όσον αφορά τη μηχανική του συμπεριφορά το μάρμαρο Διονύσου συμπεριφέρεται ως γραμμικά ελαστικό – τέλεια ψαθυρό στερεό υλικό σε συνθήκες μονοαξονικής θλίψης και μονοαξονικού εφελκυσμού. Μερικές από τις μηχανικές ιδιότητές του, όπως έχουν προσδιορισθεί από πειράματα σε άρρηκτα δοκίμια στο εργαστήριο, φαίνονται στον Πίνακα 3.

Μέτρο Ελαστικότητας [GPa]	40
Λόγος Poisson	0,3
Αντοχή σε Μονοαξονική θλίψη [MPa]	86,17
Αντοχή σε εφελκυσμό [Mpa]	9,63
Συνοχή [MPa]	24,00
Γωνία εσωτερικής τριβής [deg]	36,00

Πίνακας 3. Μηχανικές ιδιότητες μαρμάρου Διονύσου (CNR-FIRGET, 2001)

#### 3.3 Ιδιότητες των ασυνεχειών

Το καταστατικό μοντέλο που περιγράφει τη συμπεριφορά των ασυνεχειών στο υπόγειο είναι το γραμμικά ελαστικό - τέλεια πλαστικό μοντέλο ολίσθησης τύπου Coulomb. Οι τιμές των ιδιοτήτων των ασυνεχειών που διασχίζουν το μάρμαρο όπως προέκυψαν από εργαστηριακά πειράματα δίνονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Ιδιότητες ασυνεχειών στο υπό μελέτη υπόγειο (CNR-FIRGET, 2001)

K <sub>n</sub> [MPa/m]	K <sub>s</sub> [MPa/m]	$\Phi$ [deg]	c [MPa]
50.000	25.000	31,2	0,47

Όπου  $K_n$  και  $K_s$  είναι η διατμητική και η ορθή ακαμψία (δυστροπία) των ασυνεχειών, αντίστοιχα. Η έννοια της ορθής και διατμητικής ακαμψίας των ασυνεχειών αποδίδεται στο σχηματικό διάγραμμα της Εικ. 12, ενώ οι προσεγγιστικές καταστατικές εξισώσεις των ασυνεχειών αγνοόντας πεπλεγμένους όρους ακαμψίας είναι οι εξής:

$$\begin{bmatrix} F_n \\ F_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_n & 0 \\ 0 & K_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_s \end{bmatrix}$$
(7)

$$F_s = \min\{\mu F_n, |F_s|\}$$
(8)

όπου  $F_n$ ,  $F_s$  η ορθή και διατμητική δύναμη αντίστοιχα,  $\Delta U_n$ ,  $\Delta U_s$  η προσαύξηση της ορθής και διατμητικής μετατόπισης, αντίστοιχα και  $\mu$  η γωνία τριβής.



Εικόνα 12. Σχηματικό διάγραμμα της ορθής και διατμητικής ακαμψίας των ασυνεχειών.

# 4. Μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο λατομείο υπάρχουν τρία πρωτεύοντα και δύο δευτερεύοντα συστήματα ασυνεχειών. Κατά τη σύνθεση του μοντέλου και με σκοπό να μειωθεί η απαιτούμενη μνήμη του υπολογιστή και η χρονική διάρκεια εκτέλεσης των υπολογισμών, εισάγονται σε αυτό μόνο τα κύρια συστήματα ασυνεχειών σε πρώτη φάση. Σε δεύτερη φάση υπολογισμών η βραχομάζα του μοντέλου θεωρείται συνεχής, χωρίς δηλαδή την ύπαρξη καμιάς ασυνέχειας. Και στις δύο περιπτώσεις, η επίδραση των ασυνεχειών που δεν εισάγονται στο μοντέλο, στην παραμόρφωση και στην αντοχή της βραχομάζας, λαμβάνεται υπόψη με την απομείωση των ελαστικών σταθερών και των παραμέτρων αντοχής του αρρήκτου πετρώματος όπως αυτές προσδιορίστηκαν στο εργαστήριο.

Για το σκοπό αυτό, η προσέγγιση που ακολουθείται εδώ είναι να γίνει αρχικά η εκτίμηση των ιδιοτήτων του αρρήκτου πετρώματος, και στη συνέχεια, να υπολογιστούν οι ενεργές ιδιότητες αυτού, θεωρώντας και την επίδραση των μη εισαγόμενων στη γεωμετρία του μοντέλου ασυνεχειών. Η εκτίμηση των ενεργών ιδιοτήτων του μαρμάρου που περιγράφεται στη συνέχεια, βασίζεται στην έννοια της 'φθοράς' όπως αυτή ορίζεται στη θεωρία Μηχανικής της Φθοράς (Damage Mechanics Theory, Lemaitre (1992)) και στον δείκτη ποιότητας βραχομάζας GSI.

Επιπλέον, για τις ιδιότητες παραμορφωσιμότητας των ασυνεχειών που τελικά εισάγονται στο μοντέλο, θεωρείται το φαινόμενο της κλίμακας όπως περιγράφεται στη συνέχεια. Σύμφωνα με το φαινόμενο της κλίμακας, οι τιμές των ιδιοτήτων αυτών πρέπει να μειωθούν από την πραγματική τους διάσταση στο επίπεδο του μοντέλου.

#### 4.1 Φθορά των ιδιοτήτων του αρρήκτου μαρμάρου

Η μέθοδος που ακολουθείται σε αυτή τη διερεύνηση, για τον προσδιορισμό των ενεργών ιδιοτήτων του μαρμάρου, περιλαμβάνει αρχικά την εκτίμηση του δείκτη GSI της βραχομάζας (Εικ. 13). Κατά την εκτίμηση του δείκτη GSI θεωρείται ότι η βραχομάζα διασχίζεται από εκείνα τα συστήματα ασυνεχειών τα οποία τελικώς δεν θα εισαχθούν στο μοντέλο.

Η τιμή του δείκτη συσχετίζεται στη συνέχεια με την "ακεραιότητα" του πετρώματος με τη βοήθεια του διαγράμματος της Εικ. 14. Το διάγραμμα αυτό έχει προκύψει από βάσεις δεδομένων μηχανικής πετρωμάτων. Τελικά το ενεργό μέτρο ελαστικότητας  $\overline{E}$  του μαρμάρου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\overline{E} = E \cdot (1 - D) \tag{9}$$

όπου Eείναι το μέτρο ελαστικότητας του αρρήκτου πετρώματος Dείναι η φθορά της βραχομάζας και (1-D) η ακεραιότητα της βραχομάζας.



Εικόνα 13. Εκτίμηση του γεωλογικού δείκτη αντοχής με βάση τον τεκτονισμό και την ποιότητα των ασυνεχειών της βραχομάζας (Hoek & Karzulovic, 2001)



Εικόνα 14. Συσχέτιση του δείκτη GSI με την ακεραιότητα του πετρώματος (Exadaktylos & Stavropoulou, 2008)

Όπως αναφέρθηκε ήδη στην παράγραφο 3.2, το μέτρο ελαστικότητας του αρρήκτου μαρμάρου Διονύσου ισούται με 40GPa. Συνεπώς, σε κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις – στην πρώτη όπου παραλείπονται τα δύο δευτερεύοντα συστήματα ασυνεχειών και στη δεύτερη όπου δεν σχεδιάζεται κανένα από τα πέντε συστήματα ασυνεχειών που διακρίνονται στο υπόγειο – θεωρώντας τη φθορά της βραχομάζας λόγω της επίδρασης

των συστημάτων αυτών, η μέθοδος που μόλις περιγράφηκε δίνει ενεργά μέτρα ελαστικότητας  $\overline{E} = 12 \ GPa$  και  $\overline{E} = 7.2 \ GPa$  αντίστοιχα (Πίνακας 5).

Πα	ράμετροι προσδιορισμο	Aciuma	Aucocalóznac	$\overline{\Gamma}$ ***			
Κατάσταση βραχομάζας	Πλήθος συστημάτων ασυνεχειών	Κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών	GSI *	(1-D) **	(GPa)		
συμπαγής	2	μέτρια	62	0,30	12		
μερικώς διαταραγμένη	5	μέτρια	55	0,18	7,2		
* Από γεωλογ	* Από γεωλογικό δείκτη ποιότητας GSI της βραχομάζας (Εικ. 12)						
** Από διάγραμμα συσχέτισης του δείκτη GSI με την ακεραιότητα του πετρώματος (Εικ. 13)							
*** Aπό σχέση (	1)						

Πίνακας 5. Προσδιορισμός του ενεργού μέτρου ελαστικότητας του μαρμάρου

#### 4.2 Φαινόμενο κλίμακας των ιδιοτήτων των ασυνεχειών

Η έννοια του φαινομένου της κλίμακας στις ιδιότητες των ασυνεχειών της βραχομάζας, αποδίδει το γεγονός ότι οι τιμές αυτών, που υπολογίζονται από μικρά δοκίμια στο εργαστήριο, παρουσιάζονται μειωμένες από τις πραγματικές τιμές στο επίπεδο της βραχομάζας (Εικ. 15). Ως εκ τούτου, οι τιμές των ιδιοτήτων παραμορφωσιμότητας των ασυνεχειών οι οποίες έχουν προσδιοριστεί από εργαστηριακές δοκιμές, απομειώνονται πριν την εισαγωγή τους στο μοντέλο, σύμφωνα με το φαινόμενο της κλίμακας, όπως περιγράφεται στην εργασία των Bandis et al (1983).



Εικόνα 15. Απεικόνιση της έννοιας του φαινομένου της κλίμακας

Συνοπτικά, εργαστηριακές έρευνες έχουν δείξει ότι οι τιμές της διατμητικής δυστροπίας  $K_s$  που υπολογίζονται από μικρά δείγματα, εξαρτώνται από τα μήκη των δοκιμίων τα οποία υποβάλλονται σε διάτμηση. Στην Εικ. 16 παρουσιάζεται ένα πειραματικό διάγραμμα, που συνοψίζει το φαινόμενο της κλίμακας για τη διατμητική δυστροπία των ασυνεχειών και συσχετίζει το μήκος του δοκιμίου που υποβάλλεται σε διάτμηση με αυτή.



Εικόνα 16. Εργαστηριακά στοιχεία για το φαινόμενο της κλίμακας στην διατμητική δυστροπία (Bandis et al., 1983)

Εργαστηριακές δοκιμές διάτμησης στο μάρμαρο Διονύσου, σε δοκιμία μήκους 100mm, υπολογίζουν διατμητική δυστροπία των ασυνεχειών του ίση με 25000 MPa/m, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.2. Ανάγοντας αυτή την τιμή στο επίπεδο του μοντέλου, δηλαδή σε μήκος τεμαχίου πετρώματος ίσο με 1m, σύμφωνα με το διάγραμμα, υπολογίζεται η νέα μειωμένη τιμή της διατμητικής δυστροπίας ίση με 1150 MPa/m.

Επιπλέον, ο προσδιορισμός της τιμής της ορθής δυστροπίας των ασυνεχειών, στηρίζεται στην παρατήρηση ότι οι ασυνεχείς βραχομάζες, αντίθετα με τις συνεχείς, παρουσιάζουν ανισότροπη συμπεριφορά ως προς τις ιδιότητες παραμορφωσιμότητάς τους. Πιο συγκεκριμένα η δυστροπία των ασυνεχειών είναι πολύ χαμηλότερη στην εφαπτομενική παρά στην ορθή διεύθυνση, γεγονός το οποίο παρατηρείται και από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών πειραμάτων (Πίνακας 4). Όπως περιγράφεται στην εργασία των Bandis et al., ο λόγος της ορθής προς την διατμητική δυστροπία δεν είναι σταθερός αλλά εξαρτάται από το επίπεδο της ορθής τάσης. Στο διάγραμμα της Εικ. 17 παρατηρείται ότι ο μεγαλύτερος βαθμός ανισοτροπίας εμφανίζεται στις χαμηλότερες τάσεις.



Εικόνα 17. Ανισότροπη συμπεριφορά ασυνεχειών κάτω από ορθή και διατμητική φόρτιση (Bandis et al., 1983)

Για τον προσδιορισμό της τιμής της ορθής δυστροπίας των ασυνεχειών του μοντέλου, θεωρείται το φαινόμενο της κλίμακας σε συνδυασμό με την ανισότροπη συμπεριφορά των ασυνεχών βραχομαζών, όπως περιγράφεται στη συνέχεια. Εφόσον έχει βρεθεί η τιμή της διατμητικής δυστροπίας με τη θεώρηση του φαινομένου της κλίμακας, διερευνάται η τιμή της ορθής δυστροπίας λαμβάνοντας υπόψη το λόγο αυτών των δύο τιμών ( $K_n / K_s$ ). Η ορθή τάση στην οροφή του μοντέλου είναι της τάξης του 1MPa. Εάν στο διάγραμμα της Εικ. 17 από τις δύο γραμμές που προκύπτουν από τα εργαστηριακά αποτελέσματα θεωρηθεί μια μέση γραμμή και τάση ίση με 1 MPa, προκύπτει ότι ο λόγος  $K_n / K_s$  θα πρέπει να ισούται περίπου με 3. Επιπρόσθετα ο λόγος αυτός προσδιορίζεται από εργαστηριακά πειράματα στο μάρμαρο Διονύσου (Πίνακας 4) ίσος με 2. Συνεπώς η ορθή ακαμψία των ασυνεχειών του μοντέλου θα πρέπει να είναι ίση περίπου με δύο έως τρεις φορές την τιμή της διατμητικής ακαμψίας. Το συμπέρασμα αυτό συνεπάγεται ότι η τιμή της ορθής ακαμψία στο επίπεδο του μοντέλου κυμαίνεται μεταξύ 2300MPa/m και 3450MPa/m.

## 5. Μεθοδολογία

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η κατασκευή ενός μοντέλου διακριτών στοιχείων τριών διαστάσεων, για προσομοίωση της επέκτασης ενός υπογείου θαλάμου ο οποίος περιβάλλει ένα στύλο, εντός του κοιτάσματος μαρμάρου Διονύσου της Αττικής. Η εξόρυξη του μαρμάρου αυτού εκτελέστηκε κατά την περίοδο 1999-2005. Επιπλέον, γίνεται μια προσπάθεια προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς του μαρμάρου που περιβάλλει τον θάλαμο, μέχρι αυτός να αποκτήσει τη μορφή που είχε το 2005, όπου και σταμάτησε η εν λόγω εξόρυξη. Εν συνεχεία επιχειρείται η διερεύνηση της μελλοντικής συμπεριφοράς αυτού κατά την επέκτασή του σε χαμηλότερα υψομετρικά επίπεδα. Η κατασκευή του μοντέλου γίνεται με τον κώδικα τρισδιάστατων διακριτών στοιχείων 3DEC<sup>TM</sup> (3 Dimensional Distinct Element Code, Itasca Consulting Group Inc., 2003).

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται ακολουθεί τα βήματα του διαγράμματος της Εικ. 18 και περιλαμβάνει αρχικά την κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου διακριτών στοιχείων του υπογείου. Η γεωμετρία του μοντέλου αποτελείται από το στερεό μοντέλο, τα όρια του προϋπάρχοντα θαλάμου και των διαδοχικών εξορύξεων καθώς και τη γεωμετρία των συνεχειών. Για την προσομοίωση της σταδιακής εξόρυξης μαρμάρου στο υπόγειο λαμβάνεται υπόψιν η γεωμετρία του υπό μελέτη υπογείου στην αρχική του κατάσταση και η εξέλιξη αυτής καθώς πραγματοποιείται η εξόρυξη (χρονική ακολουθία των εξορύξεων). Η εισαγωγή των ορίων των διαδοχικών σταδίων των εξορύξεων στο μοντέλο γίνεται αυτόματα, από τρισδιάστατα σχέδια αυτών σε μορφή AutoCAD<sup>TM</sup>, με τη βοήθεια ενός κώδικα, που κατασκευάστηκε αποκλειστικά για αυτό το σκοπό με το Matlab<sup>TM</sup>. Ο κώδικας αυτός εξάγει από τα αρχεία AutoCAD τις συντεταγμένες των θαλάμων και τις αντιστοιχεί σε κατάλληλες εντολές που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα 3DEC για τη δημιουργία περιοχών οι οποίες στη συνέχεια, κατά τη φάση της προσομοίωσης, αφαιρούνται σχηματίζοντας τη γεωμετρία των θαλάμων.

Επιπλέον, η γεωμετρική σύνθεση του μοντέλου περιλαμβάνει την κατάτμηση αυτού σε επίπεδα τα οποία έχουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συστημάτων ασυνεχειών που διαπερνούν το μάρμαρο στην περιοχή του υπό εκμετάλλευση κοιτάσματος. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι αν και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ασυνεχειών (διεύθυνση κλίσης, κλίση, μέση απόσταση) μεταφέρονται ως έχουν στο μοντέλο, δεν συμβαίνει το ίδιο και με τις θέσεις των ασυνεχειών μέσα στο υπόγειο. Με άλλα λόγια, η εισαγωγή των ασυνεχειών στο μοντέλο γίνεται με τυχαίο τρόπο σε όλη τη μάζα του μοντέλου και δεν απεικονίζει την ακριβή τοποθέτηση αυτών στο υπόγειο.

Στη μάζα του γεωμετρικού μοντέλου, ορίζονται στη συνέχεια, τα σημεία τα οποία αντιστοιχούν στις θέσεις των οργάνων μέτρησης επί τόπου στο λατομείο, έτσι ώστε κατά την εκτέλεση των υπολογισμών να γίνεται σε αυτά καταγραφή των τάσεων και μετατοπίσεων.

Πέραν των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, εισάγονται στο μοντέλο παράμετροι οι οποίες αφορούν τις μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας (αρρήκτου πετρώματος και ασυνεχειών) υπολογισμένων όπως περιγράφεται στο 4° Κεφάλαιο, τους καταστατικούς νόμους που περιγράφουν τη συμπεριφορά αυτής και το επί τόπου εντατικό πεδίο. Αφού δημιουργηθεί το μοντέλο πραγματοποιούνται κύκλοι υπολογισμών έως ότου επέλθει ισορροπία δυνάμεων.

Ακολουθεί η αναπαραγωγή της διαδικασίας της υπόγειας εκμετάλλευσης του μαρμάρου που συμβαίνει στο λατομείο, αποσπώντας σταδιακά από τη μάζα του μοντέλου τις

προκαθορισμένες περιοχές που έχουν οριστεί κατά την γεωμετρική κατασκευή αυτού και των οποίων η γεωμετρία αντιστοιχεί στα βήματα της εξόρυξης. Μετά από την αφαίρεση κάθε περιοχής, πραγματοποιούνται υπολογιστικοί κύκλοι κατά τους οποίους υπολογίζονται οι προκαλούμενες λόγω της διατάραξης της ισορροπίας, τάσεις και μετατοπίσεις στο εσωτερικό του μοντέλου.



Εικόνα 18. Μεθοδολογία κατασκευής βαθμονομημένου τρισδιάστατου μοντέλου διακριτών στοιχείων

Αφού ολοκληρωθεί ένας επαρκής αριθμός σταδίων εξόρυξης, η προσομοίωση επαναλαμβάνεται από το βήμα του καθορισμού της συμπεριφοράς της βραχομάζας, μεταβάλλοντας μια εκ των παραμέτρων του μοντέλου. Μετά την ολοκλήρωση του ίδιου αριθμού εξορυκτικών σταδίων, αξιολογείται η επίδραση της επιλεγμένης παραμέτρου στην απόκριση του μοντέλου. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις παραμέτρους του μοντέλου, ώστε να καθοριστούν ποιές από αυτές επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά αυτού, δηλαδή γίνεται ανάλυση ευαισθησίας.

Αφού προσδιοριστούν οι πιο κρίσιμες παράμετροι, το μοντέλο ξανακατασκευάζεται με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, διερευνόντας αυτή τη φορά τις τιμές που πρέπει να έχουν αυτές οι παράμετροι. Στη συνέχεια η εκμετάλλευση προσομοιώνεται έως τη στιγμή όπου διακόπηκαν στο λατομείο οι επί τόπου μετρήσεις. Ακολουθεί η σύγκριση των τάσεων και των μετατοπίσεων στα προκαθορισμένα σημεία με τις επί τόπου μετρήσεις. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται από το βήμα της εισαγωγής των ιδιοτήτων της βραχομάζας, ενισχύοντας κάθε φορά τη διερεύνηση με νέες παρατηρήσεις και επιφέροντας μικρές μεταβολές στις τιμές των κρίσιμων παραμέτρων, μέχρις ότου τα αποτελέσματα του μοντέλου να έρχονται σε αποδεκτή συμφωνία με τις επί τόπου μετρήσεις. Το βαθμονομημένο μοντέλο, το οποίο προκύπτει με αυτόν τον τρόπο, χρησιμοποιείται έπειτα στην προσομοίωση της επέκτασης της υπόγειας εκμετάλλευσης σε χαμηλότερα επίπεδα, με σκοπό την ανάλυση της συμπεριφοράς του υπογείου καθώς μεταβάλλονται οι επικρατούσες συνθήκες.

## 6. Υπολογιστικός κώδικας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η προσομοίωση της συμπεριφοράς του ασυνεχούς μέσου το οποίο υποβάλεται σε στατική φόρτιση, γίνεται με τον κώδικα τρισδιάστατων διακριτών στοιχείων 3DEC. Το 3DEC είναι ένας αριθμητικός κώδικας ο οποίος εφαρμόζει τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών σε συνδυασμό με τη μέθοδο διακριτών στοιχείων, για να προσομοιώσει τη μηχανική απόκριση τρισδιάστατων συστημάτων τεμαχίων. Χρησιμοποιείται στην κατασκευή μοντέλων για τον σχεδιασμό εκσκαφών σε ασυνεχείς βραχομάζες.

Για την αναπαραγωγή του φαινομένου της παραμόρφωσης των τεμαχίων πετρώματος, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών. Παράλληλα, για την αναπαραγωγή του φαινομένου των μετατοπίσεων των παρειών των ασυνεχειών μεταξύ των τεμαχίων πετρώματος, χρησιμοποιεί τη μέθοδο διακριτών στοιχείων.

Το 3DEC βασίζεται σε ένα δυναμικό κώδικα ο οποίος χρησιμοποιεί τη διάταξη επίλυσης της Εικ. 19, που εκφράστηκε από τον Cundall (1987) για την επίλυση των εξισώσεων κίνησης ενός συστήματος τεμαχίων. Η διάταξη αυτή βασίζεται στην εξίσωση κίνησης του συστήματος, λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη τις ταχύτητες και τις εσωτερικές δυνάμεις αυτού. Σε κάθε υπολογιστικό βήμα εφαρμόζεται ο νόμος της κίνησης και η σχέση δύναμης - μετατόπισης η οποία καθορίζεται από την αρχή. Ο νόμος της κίνησης παρέχει τις νέες θέσεις των τεμαχίων και κατά συνέπεια τις επαυξήσεις (ή τις ταχύτητες) των μετατοπίσεων των επαφών. Η σχέση δύναμης - μετατόπισης των επαφών, οι οποίες εφαρμόζονται στα τεμάχια στο επόμενο βήμα.



Εικόνα 19. Υπολογιστικός κύκλος (Cundall, 1987)

Τα είδη των πολυεδρικών στοιχείων που μπορούν να διαμορφωθούν με τον κώδικα 3DEC είναι τα άκαμπτα και τα παραμορφώσιμα. Στην παρούσα μελέτη επιλέγεται η διαμόρφωση παραμορφώσιμων στοιχείων που επιτρέπουν αφενός μεν την προσομοίωση μεγάλων σχετικών μετατοπίσεων και περιστροφών των στοιχείων μεταξύ τους, περιλαμβάνοντας και τον εντοπισμό των νέων επαφών μετά από κάθε κύκλο υπολογισμού, αφετέρου δε την παραμόρφωση των όγκων μαρμάρου.

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών προσομοιώνει σύνθετες συμπεριφορές οι οποίες δεν προσαρμόζονται εύκολα σε κώδικες πεπερασμένων στοιχείων, όπως στην περίπτωση προβλημάτων που αποτελούνται από πολλά επί μέρους στάδια, μεγάλες μετατοπίσεις και

παραμορφώσεις, μη γραμμική συμπεριφορά υλικού και ασταθή συστήματα (ακόμη και περιπτώσεις διαρροής/αστοχίας πάνω από μεγάλες περιοχές, ή ολικής κατάρρευσης). Η χρήση της μεθόδου από το 3DEC επιτρέπει την έρευνα στην οποία είναι απαραίτητη η ανάλυση της συμπεριφοράς του συνεχούς μέσου.

Κατά τον αναλυτικό κύκλο υπολογισμών επιλύονται δύο συστήματα εξισώσεων, δηλαδή αυτών της κίνησης (2°ς Νόμος του Νεύτωνα,  $F = m\gamma$ ) και των καταστατικών που συνδέουν τάσεις με τροπές (ανηγμένες παραμορφώσεις) σε ένα συνεχές πλέγμα στοιχείων. Τα μέρη των εξισώσεων είναι αυτά που φαίνονται στην Εικ. 20α. Και στα δύο συστήματα εξισώσεων, οι μεταβλητές που βρίσκονται στη δεξιά πλευρά των εκφράσεων, είναι γνωστές και μπορούν να αντιμετωπιστούν ως σταθερές κατά τη διάρκεια του κύκλου υπολογισμών. Κατά συνέπεια, κάθε στοιχείο σε αυτόν τον τύπο μοντέλου, φαίνεται να είναι φυσικά αποκομμένο από τα γειτονικά στοιχεία κατά τη διάρκεια ενός βήματος υπολογισμών. Έτσι, εφαρμόζονται μη γραμμικές καταστατικές σχέσεις χωρίς υπολογισμών.



Εικόνα 20. Υπολογιστικός κύκλος α) της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών, β) της μεθόδου διακριτών στοιχείων. (Hart, 2003)

Αφετέρου, η αριθμητική μέθοδος διακριτών στοιχείων επιτρέπει την προσομοίωση της μηχανικής απόκρισης συστημάτων που αποτελούνται από διακριτά στοιχεία. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ότι η θεωρεί την βραχομάζα ως ένα σύνολο ξεχωριστών τεμαχίων πετρώματος (διακριτά στοιχεία), τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους από την ύπαρξη ασυνεχειών. Η μέθοδος μπορεί να θεωρήσει απεριόριστες παραμορφώσεις κατά μήκος των ασυνεχειών. Τα σχήματα των διακριτών στοιχείων είναι τυχαία, ενώ καθένα από αυτά μπορεί να αλληλεπιδρά με οποιοδήποτε άλλο στοιχείο χωρίς να υπάρχουν περιορισμοί στις μετατοπίσεις ή τις κυλίσεις αυτών.

Οι μηχανικοί υπολογισμοί οι οποίοι πραγματοποιούνται σε κάθε υπολογιστικό κύκλο φαίνονται στην Εικ. 20β. Σε αυτή την περίπτωση, όπως και στην περίπτωση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών, σε κάθε κύκλο επιλύονται δύο συστήματα εξισώσεων, δηλαδή των εξισώσεων κίνησης και των καταστατικών εξισώσεων. Η διάταξη της επίλυσης που περιγράφηκε για την περίπτωση του συνεχούς πλέγματος στοιχείων (μέθοδος πεπερασμένων διαφορών) εφαρμόζεται και για τα διακριτά στοιχεία, με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση οι καταστατικές εξισώσεις διατυπώνονται με όρους προσαύξησης των δυνάμεων και των μετατοπίσεων.

# 7. Κατασκευή του μοντέλου

Το τρισδιάστατο μοντέλο διακριτών στοιχείων περιλαμβάνει τη γεωμετρία ενός προϋπάρχοντος υπογείου θαλάμου και τις διαδοχικές φάσεις εξόρυξης αυτού, κατά την επέκτασή του σε χαμηλότερους ορίζοντες γύρω από έναν κεντρικό στύλο. Η διαδικασία που ακολουθείται για τη σύνθεση του μοντέλου και την προσομοίωση της διαδικασίας εξόρυξης συνιστάται από τα επόμενα βήματα:

 Κατασκευάζεται η γεωμετρία του τρισδιάστατου μοντέλου εντός του οποίου πραγματοποιείται η εξόρυξη. Το γεωμετρικό μοντέλο αποτελείται από ένα στερεό, διαστάσεων 110m x 95m x 190m, που αντιπροσωπεύει τη μάζα του μαρμάρου (Εικ. 21).



Εικόνα 21. Τρισδιάστατο συνεχές μοντέλο που αποτελείται από μάρμαρο στο τρισδιάστατο Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων

2. Στη συνέχεια καθορίζονται οι περιοχές οι οποίες αντιστοιχούν στα πολυάριθμα στάδια της εξόρυξης (Εικ. 22). Ο ορισμός των περιοχών αυτών γίνεται με σκοπό τη σταδιακή αφαίρεσή τους από τη μάζα του μοντέλου, κατά τη φάση της προσομοίωσης. Αφήνονται έτσι βαθμιαία κενοί χώροι, οι οποίοι διαμορφώνουν τη γεωμετρία του θαλάμου καθώς εξελίσσεται η διάνοιξή του γύρω από το στύλο και η επέκτασή του σε χαμηλότερα επίπεδα. Τα όρια των εξορύξεων του υπογείου τα οποία βρίσκονται στο εσωτερικό του μοντέλου φαίνονται στη λεπτομέρεια της Εικ. 22. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η γεωμετρία των περιοχών οι οποίες αναλογούν στα όρια εξόρυξης εισάγεται στο μοντέλο αυτόματα, μέσω ενός κώδικα γραμμένου σε Matlab, από τρισδιάστατα σχέδια (Εικ. 23).



Εικόνα 22. Προοπτική άποψη του μοντέλου στο οποίο έχουν εισαχθεί τα οι περιοχές που αντιστοιχούν στα διαδοχικά στάδια εξόρυξης. Στη λεπτομέρεια διακρίνονται τα όρια του προϋπάρχοντος θαλάμου (1° επίπεδο) και της προς τα κάτω ανάπτυξης του υπογείου στο εσωτερικό του μοντέλου.



Εικόνα 23. Σχέδιο του υπογείου σε μορφή AutoCAD όπου απεικονίζονται α) σε προοπτική άποψη οι περιοχές που αντιπροσωπεύουν την αλληλουχία των εξορύξεων γύρω από τον κεντρικό στύλο σε κάθε επίπεδο και τα 10 επίπεδα ανάπτυξης του θαλάμου και β) σε κάτοψη τα διαδοχικά σταδία εξόρυξης, όπου αναγράφεται η σειρά που ακολουθείται στο ίδιο επίπεδο, γύρω από το στύλο.

- 3. Σε πρώτη φάση, το μοντέλο ενισχύεται περαιτέρω με την εισαγωγή των τριών κύριων συστημάτων ασυνεχειών σύμφωνα με τον Πίνακα 1 (Εικ. 24α). Σε επόμενη φάση, όπου το μοντέλο κατασκευάζεται συνεχές, το βήμα της εισαγωγής των ασυνεχειών παραλείπεται.
- 4. Ακολουθεί η διακριτοποίηση του μοντέλου σε παραμορφώσιμα στερεά στοιχεία (Εικ. 24β).



Εικόνα 24. Τρισδιάστατο μοντέλο στο οποίο διακρίνονται α) τα κύρια συστήματα ασυνεχειών και β) τα περιγράμματα των διακριτών στοιχείων

- 5. Εφαρμόζονται στο πέτρωμα και στις ασυνέχειες οι μηχανικές τους ιδιότητες.
- Καθορίζονται οι καταστατικοί νόμοι που θα ισχύουν για το μάρμαρο και τις ασυνέχειες (στη περίπτωση όπου γίνεται εισαγωγή αυτών στη γεωμετρία του μοντέλου).
- 7. Στη συνέχεια, αναπαράγεται το επί τόπου εντατικό πεδίο, επιβάλοντας στο αριθμητικό μοντέλο την επιτάχυνση της βαρύτητας (g= 9.81 m/s<sup>2</sup>) και εφαρμόζοντας τις αρχικές επί τόπου τάσεις καθώς και τις συνοριακές συνθήκες.

8. Αφου ολοκληρωθεί, το αριθμητικό μοντέλο φορτίζεται μέχρι να επέλθει ισορροπία τάσεων σε αυτό. Ο έλεγχος για την επίτευξη της ισορροπίας, γίνεται παρακολουθώντας την εξέλιξη της τιμής της μέγιστης μη-ισορροπημένης δύναμης (maximum unbalanced force) στο μοντέλο κατά την εκτέλεση των υπολογιστικών κύκλων, όπως φαίνεται στην Εικ. 25. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, προκύπτουν στο εσωτερικό του μοντέλου μετατοπίσεις οι οποίες, αφού αποκατασταθεί η ισορροπία, μηδενίζονται έτσι ώστε κατά την προσομοίωση της εκσκαφής να καταγράφονται οι τιμές των μετατοπίσεων που οφείλονται στην εξόρυξη.



Εικόνα 25. Καταγραφή της μέγιστης μη-ισορροπημένης δύναμης κατά τα πρώτα δέκα στάδια εζόρυζης του υπογείου

- 9. Μετά την αποκατάσταση της ισορροπίας υπό την επίδραση του επί τόπου εντατικού πεδίου, πραγματοποιείται η προσομοίωση των σταδίων της υπόγειας εκμετάλλευσης. Αρχικά αφαιρείται εξ' ολοκλήρου η περιοχή που αντιστοιχεί στη γεωμετρία του προϋπάρχοντος θαλάμου (1<sup>η</sup> φάση).
- 10. Ακολουθεί η διαδοχική αφαίρεση των περιοχών εξόρυξης του δεύτερου επιπέδου (2<sup>η</sup> φάση) του υπογείου, σύμφωνα με την προκαθορισμένη αλληλουχία και το χρονοδιάγραμμα που ακολουθείται στο λατομείο. Μετά από κάθε διαδοχικό στάδιο εξόρυξης, εκτελείται ένας αριθμός κύκλων φόρτισης έτσι ώστε η διαδικασία εξόρυξης να συνεχίζει κάθε φορά από την κατάσταση ισορροπίας.
- 11. Αφού ολοκληρωθεί η εκσκαφή και του δεύτερου επιπέδου ανάπτυξης, μέχρι το οποίο υπάρχουν διαθέσιμες επί τόπου μετρήσεις τάσεων και μετατοπίσεων, πραγματοποιείται βαθμονόμηση του μοντέλου συγκρίνοντας τις τιμές που προκύπτουν από αυτό με τις επί τόπου μετρήσεις.
- 12. Τελικά το βαθμονομημένο μοντέλο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της εκμετάλλευσης μετά την ημερομηνία κατά την οποία οι μετρήσεις στο λατομείο διακόπηκαν (3<sup>η</sup> φάση ανάπτυξης) και μέχρι τη σημερινή μορφή του υπογείου καθώς και την προσομοίωση των μελλοντικών εξορύξεων σε κατώτερα επίπεδα στο υπόγειο (φάσεις 4<sup>η</sup>, 5<sup>η</sup> κ.ο.κ.).

Οι μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας του βαθμονομημένου μοντέλου καθώς και τα καταστατικά μοντέλα αυτών φαίνονται συνολικά στον Πίνακα που ακολουθεί.

Ιδιότητες μαρμάρου							
Πυκνότητα $[kN/m^3]$	$\overline{E}$ (Gpa)		V	Καταστατικό μοντέλο			
27	Ασυνεχές μοντέλο	12	0.2				
	Συνεχές μοντέλο	7.2	0.5	Ι ραμμικά ελαστικό, ισστροπό			
Ιδιότητες ασυνεχειών							

Πίνακας 6. Μηχανικές ιδιότητες των παραμορφώσιμων τεμαχίων πετρώματος και των ασυνεχειών

$\Phi$ [deg]	c [MPa]	K <sub>n</sub> [MPa/m]	K <sub>s</sub> [MPa/m]	Καταστατικό μοντέλο
30	0.5	3330	1150	Μοντέλο ολίσθησης Coulomb

E: ενεργό μέτρο ελαστικότητας μαρμάρου θεωρώντας τις ασυνέχειες,  $\mathcal V$ : λόγος Poisson

**Φ**: γωνία εσωτερικής τριβής, **c**: συνοχή,  $K_n$ : ορθή ακαμψία,  $K_s$ : διατμητική ακαμψία

Η θεώρηση του επί τόπου εντατικού πεδίου, που αναφέρεται στο έκτο βήμα κατασκευής του μοντέλου, επιτυγχάνεται α) με την εφαρμογή συνοριακών συνθηκών, οι οποίες περιλαμβάνουν κατακόρυφη τάση ίση με  $\sigma_{yy} = 3.2 MPa$  στην οροφή και κυλίσεις στις υπόλοιπες πέντε πλευρές του μοντέλου, β) τη θεώρηση του συντελεστή πλευρικών τάσεων K ο οποίος ορίζεται ίσος με 1 καθώς και γ) τη θεώρηση του συντελεστή βαρύτητας g. Όσον αφορά τον συντελεστή πλευρικών τάσεων, αυτός ορίζεται παρατηρώντας το λόγο της οριζόντιας προς την κατακόρυφη τάση, που προκύπτει από τις επί τόπου μετρήσεις στο κέντρο του στύλου (Εικ. 26).



Εικόνα 26. Διερεύνηση της τιμής του συντελεστή πλευρικών τάσεων

Ο σχεδιασμός της υπόγειας εκμετάλλευσης στο μοντέλο περιλαμβάνει τα διαδοχικά στάδια που ακολουθούνται στο λατομείο. Προσομοιώνεται δηλαδή η μέθοδος θαλάμων και στύλων και η ανάπτυξη του λατομείου σε κατώτερους ορίζοντες με ορθές βαθμίδες. Οι διαστάσεις του στύλου στο υπό μελέτη υπόγειο είναι 13m x 14m και των θαλάμων 35m x 35m. Η 1<sup>η</sup> φάση εξόρυξης περιλαμβάνει την εξ' ολοκλήρου διάνοιξη του προϋπάρχοντος υπογείου θαλάμου και την εγκατάλειψη ενός κεντρικού στύλου (πρώτο επίπεδο ανάπτυξης στην Εικ. 22). Ακολουθούν οι επόμενες φάσεις εκμετάλλευσης με την επέκταση του θαλάμου σε κατώτερα επίπεδα και γύρω από τον κεντρικό στύλου (Εικ. 22). Τα στάδια της εκμετάλλευσης, η διάρκειά τους και το συνολικό ύψος του στύλου μετά την ολοκλήρωση καθενός από αυτά φαίνονται στον Πίνακα που ακολουθεί.

Φάση εξόρυξης	Διάρκεια εκσκαφών	Συνολικό ύψος στύλου (m)
1 <sup>η</sup>	προϋπάρχων θάλαμος	3
2 <sup>η</sup>	07/1999-04/2001	6
3 <sup>η</sup>	09/2001-06/2005	12
4 <sup>η</sup>	01/2008-11/2009	18
5 <sup>η</sup>	01/2010-11/2011	24
6 <sup>η</sup>	12/2011-11/2013	30

Πίνακας 7. Χρονικά στάδια της εκμετάλλευσης

7 <sup>η</sup>	12/2013-10/2015	36
$8^{\eta}$	12/2015-10/2017	42
9 <sup>ŋ</sup>	11/2017-10/2019	48
10 <sup>η</sup>	11/2019-09/2021	54

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι, στην πραγματικότητα η εκμετάλλευση του μαρμάρου στο υπό μελέτη υπόγειο σταμάτησε αφότου διανοίχτηκε και το 3° επίπεδο εξόρυξης (συνολικό ύψος θαλάμων και στύλων 12m). Συνεπώς τα επόμενα στάδια, τα οποία περιλαμβάνονται στο μοντέλο, αφορούν τη διερεύνηση της μελλοντικής συμπεριφοράς του υπογείου λόγω της τυχόν περαιτέρω εκμετάλλευσης. Επιπλέον, οι επί τόπου μετρήσεις στο λατομείο αφορούν μόνο τη δεύτερη φάση εκμετάλλευσης καθώς διακόπηκαν τον ένατο μήνα του 2001, με συνέπεια η βαθμονόμηση του μοντέλου να γίνεται με τα δεδομένα που προκύπτουν έως τη διάνοιξη και του δεύτερου επιπέδου.

## 8. Αποτελέσματα

#### 8.1 Επεξεργασία των μετρήσεων

Πριν την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του μοντέλου, οι επί τόπου μετρήσεις τάσεων και μετατοπίσεων απεικονίζονται γραφικά συναρτήσει του χρόνου, αφού αφαιρεθεί από καθεμία από αυτές η τιμή της πρώτης μέτρησης και προκύψουν οι διαφορές τάσης και μετατόπισης. Στο επόμενο στάδιο απεικονίζονται, στα ίδια διαγράμματα (τάσεων - χρόνου, μετατοπίσεων - χρόνου), οι τιμές της διαφοράς τάσης και της διαφοράς μετατόπισης που προκύπτουν από κάθε μοντέλο συναρτήσει του χρόνου. Προηγουμένως, οι τιμές των τάσεων και των μετατοπίσεων που προκύπτουν από τα μοντέλα θεωρούνται με αντίθετο πρόσημο, έτσι ώστε η σύμβαση προσήμου των αποτελεσμάτων του 3DEC να συμφωνεί με τη σύμβαση προσήμου της βραχομηχανικής η οποία χρησιμοποιείται και στις επί τόπου μετρήσεις.

Επιπλέον, όσον αφορά τα μηκυνσιόμετρα, αυτά μετράνε τις σχετικές μετατοπίσεις του πετρώματος ως προς την κορυφή του διατρήματος, όπως περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 2.3. Για το λόγο αυτό, οι τιμές των μετατοπίσεων των μοντέλων στα διάφορα βάθη μέσα στην οροφή, λαμβάνονται υπόψη μειωμένες κατά την αντίστοιχη τιμή της μετατόπισης της οροφής την ίδια χρονική στιγμή.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι παρατηρήσεις από την εφαρμογή της ανάλυσης ευαισθησίας, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου καθώς και τα αποτελέσματα της χρήσης των δύο μοντέλων για τη προσομοίωση της υπόγειας εκμετάλλευσης. Η σύμβαση προσήμου που θεωρείται εδώ είναι αυτή που χρησιμοποιεί η κλασσική Μηχανική Πετρωμάτων, δηλαδή οι θλιπτικές τάσεις και οι συσταλτικές παραμορφώσεις θεωρούνται θετικές.

## 8.2 Ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου

Όπως περιγράφηκε στο 5° Κεφάλαιο, η κατασκευή του μοντέλου απαιτεί την εφαρμογή της ανάλυσης ευαισθησίας, προκειμένου να αξιολογηθεί η βαρύτητα καθεμιάς από τις παραμέτρους του μοντέλου στα αποτελέσματα αυτού. Με τη μέθοδο αυτή εκτιμάται συνεπώς, η επίδραση όλων των παραμέτρων του Πίνακα 8, οι οποίες εισάγονται στο μοντέλο. Η αξιολόγηση αυτή καταδεικνύει ότι οι παράμετροι των οποίων οι τιμές έχουν την πιο κρίσιμη σημασία στην απόκριση ενός τέτοιου μοντέλου, είναι το μέτρο ελαστικότητας του αρρήκτου μαρμάρου, η διατμητική ακαμψία των ασυνεχειών (στην περίπτωση ασυνεχούς μοντέλου) και ο συντελεστής πλευρικών τάσεων.

Παράμετροι μαρμάρου	Παράμετροι ασυνεχειών	Παράμετροι εντατικού πεδίου
Ενεργό μέτρο ελαστικότητας ( $\overline{E}$ )	Γωνία εσωτερικής τριβής (Φ)	Suntelestúz pleurikón tásewn ( $K$ )
Λόγος Poisson ( $v$ )	Συνοχή (c)	Κατακόρυφη τάση στην κορυφή της
-	Ορθή ακαμψία ( $K_n$ )	επιφάνειας του μοντέλου ( $\sigma_{_{yy}}$ )
-	Διατμητική ακαμψία ( $K_s$ )	-

Πίνακας 8. Παράμετροι στις οποίες εφαρμόζεται η ανάλυση ευαισθησίας

#### 8.3 Βαθμονόμηση του μοντέλου

Η βαθμονόμηση του αριθμητικού μοντέλου περιλαμβάνει τη διερεύνηση των τιμών που πρέπει να αποδοθούν στις παραμέτρους του μοντέλου, ειδικότερα στις πιο κρίσιμες από αυτές, ώστε να προσομοιώνεται με επαρκή ακρίβεια η συμπεριφορά του κεντρικού στύλου και της οροφής του υπογείου θαλάμου, την οποία αυτός υποστηρίζει. Η εργασία αυτή, η οποία περιγράφηκε και στο 5° Κεφάλαιο, βασίζεται στη σύγκριση των τάσεων και των μετατοπίσεων, που προκύπτουν από την προσομοίωση της εκμετάλλευσης με το μοντέλο διακριτών στοιχείων σε προκαθορισμένα σημεία, με τις διαθέσιμες επί τόπου μετρήσεις στα ίδια σημεία εντός του υπογείου. Κάποια από τα διαγράμματα τάσεων και μετατοπίσεων, τα οποία φανερώνουν το βαθμό συμφωνίας ο οποίος επιτεύχθηκε μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των επί τόπου μετρήσεων, παρουσιάζονται στις Εικ. 27-30.

Η καλύτερη συσχέτιση που επιτυγχάνεται ανάμεσα στις επί τόπου μετρήσεις και στα αποτελέσματα του μοντέλου για τις κατακόρυφες τάσεις στο κέντρο του στύλου, παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί και δείχνει ότι οι πρώτες είναι υψηλότερες από τις τάσεις που προβλέπουν τα δύο μοντέλα κατά περίπου 0,5-1,0 MPa. Η συσχέτιση αυτή δεν θεωρείται τόσο ικανοποιητική ώστε η μελέτη της συμπεριφοράς του υπογείου να μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά στις τάσεις. Είναι ωστόσο ικανή η παρατήρηση των τάσεων που αναπτύσσονται κατά την προσομοίωση της εξόρυξης να δώσει στοιχεία για τη διερεύνηση του εντατικού πεδίου που αναπτύσσεται στο υπόγειο.



Εικόνα 27. Επί τόπου μετρήσεις και αποτελέσματα μοντέλων για την κατακόρυφη τάση στο κέντρο του στύλου

Όσον αφορά τις μετατοπίσεις, αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι σε αρκετές περιπτώσεις τα μηκυνσιόμετρα που έχουν τοποθετηθεί στο υπόγειο δίνουν επί τόπου μετρήσεις οι οποίες βρίσκονται κάτω από το όριο ανάλυσης των οργάνων, με αποτέλεσμα οι τιμές αυτές να μην θεωρούνται αξιόπιστες και κατά συνέπεια απορρίπτονται από την περαιτέρω αξιολόγηση. Στις Εικ. 28-30 παρουσιάζονται μερικά από τα διαγράμματα μετατοπίσεων συναρτήσει του χρόνου σε διαφορετικά βάθη για τα μηκυνσιόμετρα M1, M2 και M3, τα οποία είναι ενδεικτικά της συσχέτισης που επιτυγχάνεται. Συνολικά τα διαγράμματα που αφορούν στη βαθμονόμηση του μοντέλου περιέχονται στο Παράρτημα Α.

Σχετικά με τις κατακόρυφες μετατοπίσεις που προβλέπουν τα μοντέλα στη θέση του μηκυνσιομέτρου M1, παρατηρείται ότι σε γενικές γραμμές, αυτές είναι χαμηλότερες αλλά συγκρίσιμες με τις πραγματικές. Οι τιμές των μετατοπίσεων που δίνουν τα μοντέλα στις θέσεις των μηκυνσιομέτρων M2 και M3 θεωρείται ότι έχουν έρθει σε αρκετά καλή συμφωνία με αυτές που μετρήθηκαν επί τόπου. Παρατηρείται επιπλέον ότι τα διαγράμματα των σχετικών μετατοπίσεων που υπολογίζει το μοντέλο ακολουθούν σε γενικές γραμμές τη μορφή των επί τόπου μετρήσεων.



Εικόνα 28. Επί τόπου μετρήσεις του μηκυνσιόμετρου M1 και αποτελέσματα μοντέλων για τη σχετική μετατόπιση του πετρώματος σε βάθος 7m ως προς την οροφή του θαλάμου



Εικόνα 29. Επί τόπου μετρήσεις του μηκυνσιόμετρου M2 και αποτελέσματα μοντέλων για τη σχετική μετατόπιση του πετρώματος σε βάθος 3m ως προς την οροφή του θαλάμου



Εικόνα 30. Επί τόπου μετρήσεις του μηκυνσιόμετρου M3 και αποτελέσματα μοντέλων για τη σχετική μετατόπιση του πετρώματος σε βάθος 2m ως προς την οροφή του θαλάμου

Εν τέλει, οι τιμές των μεταβλητών για τις οποίες πραγματοποιείται η καλύτερη απόδοση της συμπεριφοράς της βραχομάζας και που εισάγονται στο μοντέλο και στην περίπτωση του ασυνεχούς και του συνεχούς μοντέλου, όπως προκύπτει από τη διαδικασία της βαθμονόμησης, είναι αυτές που φαίνονται στον Πίνακα 9.

	$\sigma_{_{yy}}$ (MPa)	K	$\overline{E}_{MARBLE}$ (GPa)	$v_{MARBLE}$	$K_n$ (MPa/m)	$K_s$ (MPa/m)
Ασυνεχές μοντέλο	4.0	0.5÷1	12	0.3	3330	1150
Συνεχές μοντέλο	4.0	1	7.2	0.3	-	-

Πίνακας 9. Τιμές των μεταβλητών του βαθμονομημένου μοντέλου

 $\pmb{\sigma}_{_{V\!V}}$ : κατακόρυφη <br/>ομοιόμορφη τάση στην κορυφή της επιφάνειας του μοντέλου

 $oldsymbol{K}$ : λόγος οριζόντιας / κατακόρυφη τάση

Ε : ενεργό μέτρο ελαστικότητας μαρμάρου θεωρώντας τις ασυνέχειες, V : λόγος poisson μαρμάρου

 $K_n$ : ορθή ακαμψία των ασυνεχειών,  $K_s$ : διατμητική ακαμψία των ασυνεχειών

Εκτός από τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις επί τόπου μετρήσεις, τα προηγούμενα διαγράμματα αποκαλύπτουν επιπλέον τη συμφωνία στην οποία βρίσκονται οι μετρήσεις των σχετικών μετατοπίσεων στα δύο μοντέλα. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι το συνεχές μοντέλο μπορεί να περιγράψει εξίσου καλά τη συμπεριφορά του υπογείου με το ασυνεχές, όσον αφορά τις μετατοπίσεις.

#### 8.4 Διερεύνηση της συμπεριφοράς του υπογείου μετά την περάτωση των μετρήσεων

Τα δυο βαθμονομημένα μοντέλα χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την προσομοίωση της εκμετάλλευσης μετά την διακοπή των μετρήσεων στο λατομείο και μέχρι τη σημερινή μορφή του υπογείου (3<sup>η</sup> φάση) καθώς και στην ανάλυση της μελλοντικής συμπεριφοράς του υπό μελέτη υπογείου στην περίπτωση που η εκμετάλλευση του μαρμάρου συνεχιστεί σε χαμηλότερα υψομετρικά επίπεδα. Τα αποτελέσματα αυτής της διερεύνησης παρουσιάζονται στη συνέχεια και αφορούν την εκμετάλλευση του μαρμάρου σε δέκα συνολικά επίπεδα (Πίνακας 7), από το πρώτο επίπεδο ανάπτυξης του λατομείου μέχρι τελικό ύψος στύλου 54m.

Όσον αφορά το διάγραμμα της κατακόρυφης τάσης στο κέντρο του στύλου (Εικ. 31), πρέπει αρχικά να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με τη βαθμονόμηση όπου χρησιμοποιήθηκε η διαφορά τάσης για να γίνει η σύγκριση με τις επί τόπου μετρήσεις, τώρα παρουσιάζεται η πραγματική τιμή της τάσης που καταγράφεται στο κέντρο του στύλου. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα η πραγματική τιμή της τάσης στο τέλος της πρώτης φάσης εκμετάλλευσης που καταγράφηκε στα δύο μοντέλα ήταν 7MPa.

Η εξέλιξη της τάσης στο πρώτο μοντέλο, το οποίο περιλαμβάνει τις ασυνέχειες δείχνει, μια αύξηση αυτής όσο η εξόρυξη του μαρμάρου επεκτείνεται προς τα κάτω. Η αύξηση της κατακόρυφης τάσης σταματάει μετά το 4° στάδιο εκμετάλλευσης (ύψος στύλου 18m) και ενώ έχει φτάσει στα 9MPa. Ακολουθεί μια απότομη μείωση στην τιμή της τάσης, η οποία συνεχίζεται μέχρι και το 6° στάδιο εκμετάλλευσης. Στο σημείο αυτό φαίνεται ότι ο στύλος, του οποίου το ύψος είναι πλέον 30m, δεν μπορεί να δεχτεί τις επιπλέον τάσεις που οφείλονται στην περαιτέρω εξόρυξη του μαρμάρου.



Εικόνα 31. Διάγραμμα της κατακόρυφης τάσης συναρτήσει του χρόνου μέσα στο στύλο του υπογείου. Το ύψος του στύλου στο τέλος κάθε φάσης αναγράφεται στο διάγραμμα

Μια πιθανή αιτία για αυτή την κατακόρυφη πτώση της τάσης μέσα στο στύλο είναι η ολίσθηση σε επίπεδα ασυνεχειών οι οποίες βρίσκονται στο εσωτερικό του στύλου, καθιστώντας τον μη ικανό να παραλάβει επιπρόσθετες τάσεις. Στην Εικ. 32 φαίνεται μια κάθετη τομή στο στύλο του μοντέλου, το Νοέμβριο του έτους 2013, η οποία φανερώνει ότι πραγματικά υπάρχει εκεί μια ασυνέχεια, της οποίας η βάση αρχίζει να αποκαλύπτεται όταν η εξόρυξη φθάνει στα 18m, με συνέπεια την ολίσθηση στο επίπεδο αυτής.

Πρέπει να επισημανθεί ότι στην πραγματικότητα η πιθανότητα να βρεθεί μια ασυνέχεια σαν αυτή μέσα στο στύλο καθώς ο θάλαμος επεκτείνεται σε χαμηλότερα υψομετρικά επίπεδα είναι μεγάλη, δεδομένου της μέσης απόστασης των ασυνεχειών. Συνεπώς η ολίσθηση σε επίπεδα ασυνεχειών αποτελεί έναν μηχανισμό αστοχίας στον οποίο πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την υπόγεια εκμετάλλευση του μαρμάρου Διονύσου.



Εικόνα 32. Κάθετη τομή στο κέντρο του στύλου στην οποία απεικονίζονται οι μετατοπίσεις των ασυνεχειών και εντοπίζεται η ολισθαίνουσα ασυνέχεια (το ύψος του στύλου είναι 30m)

Η προσομοίωση της εξόρυξης με το ασυνεχές μοντέλο δεν συνεχίζεται σε κατώτερα επίπεδα, εφόσον παρατηρείται αυτή η αστοχία. Ωστόσο η χρήση του συνεχούς μοντέλου είναι σε θέση να αποκαλύψει τη συμπεριφορά του υπογείου για περισσότερα εξορυκτικά στάδια χωρίς να επηρεάζεται από την ύπαρξη επιπέδων κατάτμησης.

Όσον αφορά την ένδειξη της κατακόρυφης τάσης στο κέντρο του στύλου την οποία δίνει το συνεχές μοντέλο, παρατηρείται από το διάγραμμα της Εικ. 31 ότι από το ξεκίνημα της  $3^{\eta\varsigma}$  φάσης εξόρυξης, η τιμή αυτής υφίσταται σταδιακή μείωση η οποία εξακολουθεί μέχρι και την  $10^{\eta}$  φάση. Παράλληλα, από την απεικόνιση των ισοτασικών καμπύλων της οριζόντιας τάσης σε μια κατακόρυφη τομή στο μοντέλο, στο τέλος της  $2^{\eta\varsigma}$  και της  $3^{\eta\varsigma}$  φάσης (Εικ. 33 α και β αντίστοιχα) παρατηρείται ότι καθώς αυξάνει το ύψος του στύλου, η πλευρική τάση στην οροφή και στο δάπεδο του θαλάμου αυξάνεται. Η αύξηση αυτή συνεχίζεται μέχρι και το τέλος της  $10^{\eta\varsigma}$  φάσης όπως φαίνεται στην Εικ. 34.



Εικόνα 33. Ισοτασικές καμπύλες για την οριζόντια τάση σε κάθετες τομές στο κέντρο του στύλου α) για ύψος στύλου 6m και β) για ύψος στύλου 12m



Εικόνα 34. Κάθετη τομή στο κέντρο του στύλου όπου απεικονίζονται οι ισοτασικές καμπύλες της οριζόντιας τάσης στο τέλος της 10<sup>ης</sup> φάσης εζόρυξης (ύψος στύλου 54m)

Το φαινόμενο αυτό, κατά το οποίο καθώς αυξάνεται το ύψος του στύλου επέρχεται πτώση της κατακόρυφης τάσης στο κέντρο αυτού και παράλληλα αύξηση της οριζόντιας τάσης στην οροφή και στο δάπεδο του θαλάμου, οφείλεται στη βαθμιαία αύξηση του ύψους του στύλου. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την κλασσική θεωρία της ελαστικότητας του συνεχούς μέσου και για ισότροπα θλιπτικά πεδία, οι εφαπτομενικές τάσεις που αναπτύσσονται γύρω από ένα υπόγειο άνοιγμα είναι μεγαλύτερες στα άκρα του μεγάλου άξονα του ανοίγματος και σε διεύθυνση κάθετη σε αυτόν και μικρότερες στα άκρα του μικρού άξονα και σε διεύθυνση επίσης κάθετη σε αυτόν (όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του ελλειπτικού ανοίγματος που περιγράφεται στην εργασία του Inglis, 1913).

Η θεωρία αυτή δεν λαμβάνει υπόψη τις τρείς διαστάσεις του μοντέλου ούτε την αλληλεπίδραση των γειτονικών ανοιγμάτων. Μπορεί όμως να εφαρμοστεί προσεγγιστικά στην περίπτωση του θαλάμου του μοντέλου μας και να δώσει τη φυσική ερμηνεία του φαινομένου. Για να γίνει αυτό πρέπει να α) αγνοηθούν οι τρείς διαστάσεις του μοντέλου και να θεωρηθεί η επίπεδη επιφάνεια των τομών καθώς και β) να μην ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση των γειτονικών ανοιγμάτων και η σύνδεση αυτών στο χώρο.

Κάνοντας λοιπόν αυτές τις παραδοχές, αναμένεται ότι η αύξηση του ύψους του στύλου θα επιφέρει αύξηση της συγκέντρωσης των εφαπτομενικών τάσεων στην οροφή και το δάπεδο του θαλάμου και μείωση αυτών στα πλαϊνά τοιχώματα του θαλάμου. Πραγματικά παρατηρείται ότι στην αρχή της εξόρυξης, όπου η οριζόντια διάσταση του ανοίγματος είναι μεγαλύτερη από την κατακόρυφη, οι κατακόρυφες τάσεις στο εσωτερικό του στύλου (εφαπτομενικές τάσεις στα πλαϊνά τοιχώματα του θαλάμου) είναι μεγαλύτερες από τις οριζόντιες τάσεις στην οροφή και το δάπεδο του ανοίγματος. Επιπλέον όσο αυξάνεται το ύψος του στύλου, δηλαδή αυξάνεται ο κατακόρυφος άξονας του ανοίγματος, οι κατακόρυφες τάσεις στο κέντρο του στύλου μειώνονται ενώ αυξάνονται οι οριζόντιες τάσεις στην οροφή και το δάπεδο του θαλάμου. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο όσο μεγαλώνει το ύψος του στύλου με αποτέλεσμα να παρατηρείται συνεχής πτώση των κατακόρυφων τάσεων μέσα στο στύλο.

Η προηγούμενη ανάλυση, παρά το γεγονός ότι δίνει μια ικανοποιητική εξήγηση για τα αποτελεσμάτα των τάσεων του συνεχούς μοντέλου, δεν είναι ωστόσο σε θέση να περιγράψει τη συμπεριφορά των τάσεων σε ένα υπόγειο θάλαμο ο οποίος βρίσκεται μέσα σε ασυνεχές μέσο, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του υπό μελέτη υπογείου. Αυτό συμβαίνει για το λόγο ότι η ύπαρξη ασυνεχειών σε ένα μέσο επηρεάζει τον τρόπο αντίδρασης αυτού κατά τη φόρτισή του. Ειδικότερα, η θεωρία της ελαστικότητας του συνεχούς μέσου που μόλις περιγράφηκε, θεωρεί ότι για την αποφόρτιση του στύλου μπορούν να αναπτυχθούν και εφελκυστικές συνιστώσες των τάσεων στον κατακόρυφο άξονα αυτού οι οποίες εν τέλει θα μειώσουν τις κατακόρυφες τάσεις. Οι ασυνέχειες δεν μπορούν να παραλάβουν εφελκυστικές τάσεις κάθετα στο επίπεδό τους. Συνεπώς στην περίπτωση του ασυνεχούς μέσου οι εφελκυστικές τάσεις δεν μεταδίδονται στη μάζα του στύλου και άρα ο στύλος δεν αποφορτίζεται. Η διαπίστωση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ένα ασυνεχές μοντέλο περιγράφει πιο σωστά την επίδραση που έχει η εκσκαφή σε μια ασυνεχή βραχομάζα όσον αφορά το τασικό πεδίο.

Ακολουθούν ενδεικτικά τα διαγράμματα των σχετικών μετατοπίσεων συναρτήσει του χρόνου στα διάφορα βάθη για το μηκυνσιόμετρο M1 (Εικ. 35-40). Η πρώτη παρατήρηση αφορά το γεγονός ότι τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων, όσον αφορά τις σχετικές μετατοπίσεις της οροφής του θαλάμου, συμφωνούν αρκετά μεταξύ τους. Διαπιστώνει συνεπώς κανείς ότι η διάνοιξη ενός υπόγειου θαλάμου σε ασυνεχή βραχομάζα, μπορεί να προσομοιωθεί εξίσου καλά, όσον αφορά στις μετατοπίσεις, χρησιμοποιώντας ένα συνεχές μοντέλο αντί του ασυνεχούς. Η διαπίστωση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική αν ληφθεί υπόψη η ευκολία με την οποία κατασκευάζεται και βαθμονομείται ένα μοντέλο αν δεν εισαχθούν σε αυτό τα επίπεδα ασυνεχειών σε σύγκριση με το αντίστοιχο ασυνεχές.

Όπως δείχνουν τα διαγράμματα των σχετικών μετατοπίσεων, η μελλοντική εξόρυξη του μαρμάρου στο υπόγειο προκαλεί συνεχόμενη μετατόπιση της οροφής προς τα κάτω. Η οροφή δείχνει να μετατοπίζεται ως προς τα διάφορα σημεία πάνω από αυτήν με σταθερό ρυθμό κατά τη διάρκεια της εξόρυξης χωρίς να παρουσιάζει ο ρυθμός αυτός έντονες αλλαγές. Επιπλέον η διατάραξη της ισορροπίας του συστήματος που προκαλεί η εξόρυξη δείχνει να επηρεάζει περισσότερο τα σημεία της οροφής του θαλάμου τα οποία βρίσκονται πιο κοντά στο άνοιγμα, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο. Έτσι παρατηρείται ότι σε βάθος 1m πάνω από την οροφή η μετακίνηση του πετρώματος ακολουθεί την μετακίνηση της οροφής και η σχετική μετατόπιση μεταξύ τους δεν ξεπερνάει τα 0,2mm (Εικ. 35). Αντίθετα για σημεία περισσότερο τη μετατόπιση του πετρώματος (Εικ. 36-39) και η σχετική μετατόπιση της οροφής ως προς ένα σημείο σε απόσταση 30m πάνω από αυτήν φτάνει μέχρι την τιμή του 1mm (Εικ. 40).



Εικόνα 35. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος σε βάθος 1m ως προς την οροφή του θαλάμου που προκύπτει από τα δύο μοντέλα στη θέση του μηκυνσιόμετρου M1



Εικόνα 36. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος σε βάθος 2m ως προς την οροφή του θαλάμου που προκύπτει από τα δύο μοντέλα στη θέση του μηκυνσιόμετρου M1



Εικόνα37. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος σε βάθος 3m ως προς την οροφή του θαλάμου που προκύπτει από τα δύο μοντέλα στη θέση του μηκυνσιόμετρου M1



Εικόνα38. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος σε βάθος 7m ως προς την οροφή του θαλάμου που προκύπτει από τα δύο μοντέλα στη θέση του μηκυνσιόμετρου M1



Εικόνα 39. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος σε βάθος 15m ως προς την οροφή του θαλάμου που προκύπτει από τα δύο μοντέλα στη θέση του μηκυνσιόμετρου Μ1



Εικόνα 40. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος σε βάθος 30m ως προς την οροφή του θαλάμου που προκύπτει από τα δύο μοντέλα στη θέση του μηκυνσιόμετρου M1

Η Εικ. 41 απεικονίζει τις μετατοπίσεις στον κατακόρυφο άξονα σε μια τομή μέσα στο μοντέλο, η οποία διέρχεται από το σημείο στο οποίο είναι τοποθετημένο το μηκυνσιόμετρο M2, στο τέλος του 10<sup>ου</sup> σταδίου εξόρυξης. Στην εικόνα έχουν σημειωθεί και τα διάφορα βάθη στα οποία καταγράφονται οι μετατοπίσεις στο μοντέλο. Η απεικόνιση αυτή επιβεβαιώνει την παρατήρηση η οποία έγινε από τα προηγούμενα διαγράμματα, ότι τα σημεία τα οποία είναι πιο απομακρυσμένα από την οροφή του θαλάμου μετακινούνται λιγότερο σε σύγκριση με αυτά που βρίσκονται κοντά σε αυτή. Παρατηρείται επίσης ότι η οροφή του υπογείου σε αυτό το στάδιο έχει μια απόλυτη μετατόπιση της τάξης των 15,00-19,00mm.



Εικόνα 41. Κάθετη τομή η οποία διέρχεται από το μηκυνσιόμετρο M2 και τον στύλο όπου απεικονίζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις στο τέλος της 10<sup>ης</sup> φάσης εξόρυξης (ύψος στύλου 54m)

Το σύνολο των διαγραμμάτων που αφορούν τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων μετά το πέρας των μετρήσεων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

## 9. Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας κατασκευάστηκε ένα μοντέλο διακριτών στοιχείων τριών διαστάσεων. Το μοντέλο αυτό προσομοιάζει τη μηχανική συμπεριφορά της μάζας του μαρμάρου που περιβάλλει υπόγειο θαλάμο, του οποίου η οροφή υποστηρίζεται από κεντρικό στύλο, στο κοίτασμα μαρμάρου Διονύσου Αττικής.

Η ιεραρχική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, ήταν να εκτιμηθεί αρχικά το επί τόπου πεδίο των τάσεων και ειδικότερα ο λόγος των πλευρικών τάσεων, θεωρώντας ότι η κατακόρυφη συνιστώσα προέρχεται από τη βαρύτητα. Κατόπιν εκτιμήθηκε το μέτρο ελαστικότητας της βραχομάζας. Με σκοπό να ξεπεραστούν οι δυσκολίες κατασκευής ενός μοντέλου το οποίο θα περιείχε όλα τα συστήματα ασυνεχειών που συναντώνται επί τόπου στο λατομείο, η προσέγγιση που ακολουθήθηκε ήταν να εκτιμηθεί το μέτρο ελαστικότητας της βραχομάζας θεωρώντας την επίδραση των δευτερευουσών ασυνεχειών και στη συνέχεια να εισαχθούν στο μοντέλο μόνο τα κύρια συστήματα ασυνεχειών. Η ανάλυση αυτή βασίστηκε στην έννοια της "φθοράς" και στον δείκτη "ποιότητας" βραχομάζας. Εν συνεχεία εκτιμήθηκαν η ορθή και η διατμητική ακαμψία των ασυνεχειών με βάση εργαστηριακά αποτελέσματα και το φαινόμενο κλίμακας.

Μια από τις δυσκολίες της τρισδιάστατης μοντελοποίησης ήταν η εισαγωγή της γεωμετρίας των διαδοχικών σταδίων εξόρυξης με απλό τρόπο. Η δυσκολία αυτή ξεπεράστηκε με τη βοήθεια ενός ειδικού αλγορίθμου στο Matlab. Με τον αλγόριθμο αυτό τα στάδια εξόρυξης μπόρεσαν να εισαχθούν αυτόματα στον κώδικα 3DEC, αφού αρχικά σχεδιάστηκαν στο AutoCAD. Επιπλέον η εισαγωγή των ασυνεχειών στο μοντέλο έγινε με τυχαίο τρόπο σε όλη τη μάζα του μοντέλου.

Το μοντέλο παρέμεινε όσο το δυνατόν πιο απλό, με σκοπό να διαπιστωθεί εαν αυτό μπορεί να συλλάβει τα κύρια χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς της βραχόμαζας. Στα πλαίσια της ανάλυσης ευαισθησίας διαπιστώθηκε ότι οι πιο σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν την απόκριση ενός τέτοιου μοντέλου είναι οι επί τόπου τάσεις, η ορθή και διατμητική ακαμψία των ασυνεχειών και η παραμορφωσιμότητα του αρρήκτου πετρώματος. Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων έγινε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου με διαθέσιμες επί τόπου μετρήσεις τάσεων και μετατοπίσεων μέσα στο υπόγειο λατομείο.

Ακολούθησε η ανακατασκευή του μοντέλου αυτή τη φορά χωρίς την εισαγωγή καμίας εκ των ασυνεχειών. Αυτό έγινε με σκοπό την ύπαρξη ενός μοντέλου που να είναι πιο εύκολο να κατασκευαστεί, να βαθμονομηθεί, να εκτελέσει υπολογισμούς και παράλληλα να μπορεί να αποδώσει τη συμπεριφορά μιας ασυνεχούς βραχομάζας το ίδιο καλά όσο ένα ασυνεχές μοντέλο. Πράγματι διαπιστώθηκε ότι τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά όσον αφορά τις σχετικές μετατοπίσεις. Αντίθετα όσον αφορά τις τάσεις, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας ασυνεχούς βραχομάζας κατά τη διάνοιξη ενός θαλάμου σε αυτήν, δεν είναι δυνατή με τη χρήση ενός συνεχούς μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, αν κανείς ερμηνεύσει τα αποτελέσματα του συνεχούς μοντέλου που αφορούν τις τάσεις στο κέντρο του στύλου είναι πολύ πιθανό να οδηγηθεί σε εσφαλμένα συμπεράσματα και να θεωρήσει ότι όσο αυξάνεται το ύψος του στύλου αυτός γίνεται ασφαλέστερος από πλευράς τάσεων. Στην πραγματικότητα το πρόβλημα είναι περισσότερο σύνθετο αφού, όπως φάνηκε και από το ασυνεχές μοντέλο, η ύπαρξη των ασυνεχειών επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη μορφή των τάσεων στο υπόγειο σύστημα. Αποτέλεσμα αυτής της εργασίας ήταν να προκύψει ένα μοντέλο το οποίο να βρίσκεται σε αποδεκτή συμφωνία με τις επί τόπου μετρήσεις. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε, με αρκετή αξιοπιστία, στην πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς του υπογείου κατά την περαιτέρω διάνοιξη των θαλάμων, μέχρι τη σημερινή του μορφή. Επιπλέον, όπως φάνηκε, το μοντέλο αυτό είναι ικανό να χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση των συνθηκών ευστάθειας, καθώς και στον καθορισμό του μέγιστου ασφαλούς ύψους που μπορεί να επιτευχθεί με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων στο υπό μελέτη υπόγειο.

Μια πρώτη προσέγγιση της εκτίμησης του μέγιστου ασφαλούς ύψους που μπορεί να πραγματοποιηθεί έγινε ήδη, εξετάζοντας έναν πιθανό μηχανισμό αστοχίας, δηλαδή την ολίσθηση στα επίπεδα των προϋπαρχουσών ασυνεχειών. Εντούτοις, είναι πιθανό να παρατηρηθούν και άλλοι μηχανισμοί που οδηγούν σε αστοχία. Τέτοιοι μηχανισμοί είναι η ρωγμάτωση του αρρήκτου μαρμάρου, λόγω συγκέντρωσης τάσεων στις πλευρές των θαλάμων ή οι πτώσεις σφηνών, που δημιουργούνται από τις προϋπάρχουσες ασυνέχειες και συμβαίνουν λόγω της εκτόνωσης των τάσεων γύρω από το υπόγειο.

Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας, όσον αφορά τις υπόγειες εξορύξεις, δείχνουν ότι για βέλτιστες και ασφαλείς διαδικασίες απαιτείται συνεχής παρακολούθηση των υπογείων θαλάμων και στύλων. Επιπλέον, είναι χρήσιμη η εφαρμογή ενός κατάλληλα βαθμονομημένου μοντέλου με το οποίο να παρακολουθείται η συμπεριφορά του υπόγειου λατομείου για διαφορετικές εναλλακτικές εκδοχές εξόρυξης.

Το συμπέρασμα που προκύπτει από αυτή τη μελέτη, όσον αφορά την αριθμητική προσομοίωση, είναι ότι το πιο σημαντικό βήμα αυτής φαίνεται να είναι η έγκαιρη αντίληψη των παραμέτρων του προβλήματος που αφορούν τις κυρίαρχες διεργασίες και τις ιδιότητες του μοντέλου καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αυτές θα εκφραστούν μαθηματικά. Το ίδιο σημαντική είναι η εκτίμηση της κρισιμότητας των διαφόρων παραμέτρων του μοντέλου η οποία επιτυγχάνεται μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας. Η χρήση ενός μοντέλου στο οποίο έχουν πραγματικά εξεταστεί και συμπεριληφθεί τα καίρια χαρακτηριστικά της βραχομάζας μπορεί να παρέχει στη φάση του σχεδιασμού την δυνατότητα της πρόβλεψης.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. Bandis S. C., Lumsden A. C. and Barton N. R., 1983, Fundamentals of Rock Joint Deformation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 20, No. 6, pp. 249-268
- Berry D. S. and Fairhurst C., 1966, Influence of Rock Anisotropy and Time Dependent Deformation on the Stress Relief and High Modulus Inclusion Techniques of in situ Stress Determination, In: *Testing Techniques for Rock Mechanics*, ASTM, STP. 402, Am. Soc. Testing Mats., pp. 190–206
- 3. Buswell H.J., Moore D.R., Owens A., 1975, Solid inclusion stress gage in composite propellant charges, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 12 (8), pp. 465-471
- Cad-Puma, 2000, Development of an integrated computer aided design and planning methodology for underground marble quarries, Annual Report for the period (1/10/99 – 31/9/2000), BRITE EURAM project, Contr. No. BE-5005
- 5. CNR-FIRGET, 2001, Development of an integrated computer aided design and planning methodology for underground marble quarries, Final Report, Contr. No. BE-5005
- Cundall P. A., 1987, Distinct Element Models of Rock and Soil Structure, In: *Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics*, Chapter 4, pp. 129-163, E. T. Brown, Ed. London: George Allen and Unwin
- Cundall P. A., 1988, Formulation of a Three-Dimensional Distinct Element Model—Part I: A Scheme to Detect and Represent Contacts in a System Composed of Many Polyhedral Blocks, *Int. J. Rock Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 25, 107-116
- 8. Exadaktylos G. and Stavropoulou M., 2008, A Specific Upscaling Theory of Rock Mass Parameters Exhibiting Spatial Variability: Analytical relations and computational scheme, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45, pp. 1102–1125
- 9. Exadaktylos G., Tsouvala S., Liolios P. and Barakos G., 2006, A Three-dimensional Model of an Underground Excavation and Comparison with in situ Measurements
- Exadaktylos G. E. and Vardoulakis I., Microstructure in Linear Elasticity and Scale Effects: A Reconsideration of Basic Rock Mechanics and Rock Fracture Mechanics, *Tectonophysics*, 335, Nos. 1-2, pp. 81-110 (2001).
- 11. GeoKon Inc., Instruction manuals, 2003
- 12. Hart R., 2003, Enhancing rock stress understanding through numerical analysis, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40, 1089–1097
- Hart R. D., Cundall P. A. and Lemos J. V., 1988, Formulation of three-dimensional distinct element model--Part II: mechanical calculations for motion and interaction of a system of many polyhedral blocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 25, No. 3, pp. 117-125
- 14. Hawkes I., 1969, Stress evaluation in low-modulus and viscoelastic materials using photoelastic glass inclusions Magnitude and direction of stress changes in a body can be determined from isochromatic fringe patterns in a hollow glass cylinder cemented around its periphery in a borehole, *Experimental Mechanics*, 9 (2), pp. 58-66
- 15. Hoek E., Karzulovic A., 2001, Rock mass properties for surface mines, In: *Slope stability in surface mining*, chapter 6, 59-703-202, (Eds. W.A. Hustrulid, M.K. Mc Carter, D.J.A Van Zyl), Littleton, Society for mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME)
- 16. Inglis C. E., March 14 1913, Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners, Proc. Inst. Naval Architects
- 17. Itasca Consulting Group Inc., 2003, 3 Dimensional Distinct Element Code, Version 3.0
- 18. Lemaitre J., 1992, A course on damage mechanics, Springer Verlag, Berlin
- 19. Savin GN., 1961, Stress concentration around holes, Pergamon, London
- 20. Skilton D., 1971, Behaviour of rigid inclusion stressmeters in viscoelastic rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 8 (4), pp. 283-289
- 21. TUBERLIN, 2002, Development of an integrated computer aided design and planning methodology for underground marble quarries, Final Report, Contr. No. BE-5005

# ПАРАРТНМА А

#### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ



Εικόνα Α1. Αποτελέσματα βαθμονόμησης του μοντέλου βάσει επί τόπου μετρήσεων τάσεων στο εσωτερικό του στύλου.



Εικόνα Α2. Αποτελέσματα βαθμονόμησης του μοντέλου βάσει των επί τόπου μετρήσεων του μηκυνσιομέτρου Μ1 σε βάθος 1m ως προς την οροφή του θαλάμου.



Εικόνα Α3. Αποτελέσματα βαθμονόμησης του μοντέλου βάσει των επί τόπου μετρήσεων του μηκυνσιομέτρου Μ1 σε βάθος 2m ως προς την οροφή του θαλάμου.



Εικόνα Α4. Αποτελέσματα βαθμονόμησης του μοντέλου βάσει των επί τόπου μετρήσεων του μηκυνσιομέτρου ΜΙ σε βάθος 7m ως προς την οροφή του θαλάμου.



Εικόνα Α5. Αποτελέσματα βαθμονόμησης του μοντέλου βάσει των επί τόπου μετρήσεων του μηκυνσιομέτρου Μ1 σε βάθος 30m ως προς την οροφή του θαλάμου.



Εικόνα Α6. Αποτελέσματα βαθμονόμησης του μοντέλου βάσει των επί τόπου μετρήσεων του μηκυνσιομέτρου M2 σε βάθος 2m ως προς την οροφή του θαλάμου.



Εικόνα Α7. Αποτελέσματα βαθμονόμησης του μοντέλου βάσει των επί τόπου μετρήσεων του μηκυνσιομέτρου M2 σε βάθος 3m ως προς την οροφή του θαλάμου.



Εικόνα Α8. Αποτελέσματα βαθμονόμησης του μοντέλου βάσει των επί τόπου μετρήσεων του μηκυνσιομέτρου M2 σε βάθος 7m ως προς την οροφή του θαλάμου.



Εικόνα Α9. Αποτελέσματα βαθμονόμησης του μοντέλου βάσει των επί τόπου μετρήσεων του μηκυνσιομέτρου M2 σε βάθος 30m ως προς την οροφή του θαλάμου.



Εικόνα A10. Αποτελέσματα βαθμονόμησης του μοντέλου βάσει των επί τόπου μετρήσεων του μηκυνσιομέτρου M3 σε βάθος 2m ως προς την οροφή του θαλάμου.



Εικόνα A11. Αποτελέσματα βαθμονόμησης του μοντέλου βάσει των επί τόπου μετρήσεων του μηκυνσιομέτρου M3 σε βάθος 3m ως προς την οροφή του θαλάμου.



Εικόνα A12. Αποτελέσματα βαθμονόμησης του μοντέλου βάσει των επί τόπου μετρήσεων του μηκυνσιομέτρου M3 σε βάθος 7m ως προς την οροφή του θαλάμου.

# **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β** ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ



Εικόνα B1. Διάγραμμα της κατακόρυφης τάσης συναρτήσει του χρόνου μέσα στο στύλο του υπογείου κατά την προσομοίωση 10 σταδίων εκσκαφής. Το ύψος του στύλου στο τέλος κάθε φάσης αναγράφεται στο διάγραμμα.



Εικόνα B2. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος που προκύπτει από τα δύο μοντέλα σε βάθος 1m ως προς την οροφή του θαλάμου στη θέση του μηκυνσιόμετρου M1.



Εικόνα B3. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος που προκύπτει από τα δύο μοντέλα σε βάθος 2m ως προς την ροφή του θαλάμου στη θέση του μηκυνσιόμετρου M1.



Εικόνα Β4. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος που προκύπτει από τα δύο μοντέλα σε βάθος 3m ως προς την οροφή του θαλάμου στη θέση του μηκυνσιόμετρου M1.



Εικόνα B5. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος που προκύπτει από τα δύο μοντέλα σε βάθος 7m ως προς την οροφή του θαλάμου στη θέση του μηκυνσιόμετρου M1.



Εικόνα B6. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος που προκύπτει από τα δύο μοντέλα σε βάθος 15m ως προς την οροφή του θαλάμου στη θέση του μηκυνσιόμετρου M1.



Εικόνα B7. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος που προκύπτει από τα δύο μοντέλα σε βάθος 30m ως προς την οροφή του θαλάμου στη θέση του μηκυνσιόμετρου M1.



Εικόνα B8. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος που προκύπτει από τα δύο μοντέλα σε βάθος 1m ως προς την οροφή του θαλάμου στη θέση του μηκυνσιόμετρου M2.



Εικόνα B9. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος που προκύπτει από τα δύο μοντέλα σε βάθος 2m ως προς την οροφή του θαλάμου στη θέση του μηκυνσιόμετρου M2.



Εικόνα B10. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος που προκύπτει από τα δύο μοντέλα σε βάθος 3m ως προς την οροφή του θαλάμου στη θέση του μηκυνσιόμετρου M2.



Εικόνα B11. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος που προκύπτει από τα δύο μοντέλα σε βάθος 7m ως προς την οροφή του θαλάμου στη θέση του μηκυνσιόμετρου M2.



Εικόνα B12. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος που προκύπτει από τα δύο μοντέλα σε βάθος 15m ως προς την οροφή του θαλάμου στη θέση του μηκυνσιόμετρου M2.



Εικόνα B13. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος που προκύπτει από τα δύο μοντέλα σε βάθος 30m ως προς την οροφή του θαλάμου στη θέση του μηκυνσιόμετρου M2.



Εικόνα B14. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος που προκύπτει από τα δύο μοντέλα σε βάθος 2m ως προς την οροφή του θαλάμου στη θέση του μηκυνσιόμετρου M3.



Εικόνα B15. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος που προκύπτει από τα δύο μοντέλα σε βάθος 3m ως προς την οροφή του θαλάμου στη θέση του μηκυνσιόμετρου M3.



Εικόνα B16. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος που προκύπτει από τα δύο μοντέλα σε βάθος 7m ως προς την οροφή του θαλάμου στη θέση του μηκυνσιόμετρου M3.



Εικόνα B17. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος που προκύπτει από τα δύο μοντέλα σε βάθος 15m ως προς την οροφή του θαλάμου στη θέση του μηκυνσιόμετρου M3.



Εικόνα B18. Σχετική μετατόπιση του πετρώματος που προκύπτει από τα δύο μοντέλα σε βάθος 30m ως προς την οροφή του θαλάμου στη θέση του μηκυνσιόμετρου M3.