



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ
ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΜΑΡΜΑΡΩΝ**



ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ

ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΜΑΡΜΑΡΩΝ

ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Επιβλέπων: Μπενάρδος Ανδρέας, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλη Επιτροπής: Μπενάρδος Ανδρέας, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Νομικός Παύλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ζευγώλης Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2022

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με θέμα τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση της ευστάθειας υπόγειας εκμετάλλευσης μαρμάρων πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των σπουδών μου στο τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την καθοδήγηση από τον κ. Ανδρέα Μπενάρδο, Καθηγητή της Σχολής Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών του ΕΜΠ. Είμαι ευγνώμων για την άριστη συνεργασία που είχαμε και για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος που ταίριαζε απόλυτα στις κλίσεις μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, επίσης, τον κ. Παύλο Νομικό, Καθηγητή της Σχολής Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών του ΕΜΠ για τις υποδείξεις του στον τομέα των γεωτεχνικών και τον κ. Ιωάννη Βλαχογιάννη, Διπλωματούχο Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργό και Υποψήφιο Διδάκτορα του ΕΜΠ για τις συμβουλές του που κατέστησαν άμεση την εξοικείωσή μου με συγκεκριμένο λογισμικό που αξιοποίησα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τους «σημαντικούς άλλους» της ζωής μου για την αμέριστη κατανόηση, υποστήριξη και συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Την τελευταία δεκαετία η υπόγεια εκμετάλλευση μαρμάρων επιλέγεται πλέον ολοένα και περισσότερο από τις λατομικές επιχειρήσεις μαρμάρου. Εφόσον εφαρμοστεί σωστά, είναι σε θέση να προσφέρει σημαντικά συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι της υπαίθριας. Για τον σωστό σχεδιασμό μια υπόγεια εκμετάλλευσης μαρμάρου και την εξασφάλιση της ευστάθειάς της, είναι απαραίτητη η ενδελεχής μελέτη του λατομικού και του ευρύτερου χώρου πριν το ξεκίνημα της εκμετάλλευσης, καθώς και η συνεχής παρακολούθηση και αξιολόγηση της συμπεριφοράς της όσο λειτουργεί.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί να διερευνήσει την επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην ευστάθεια στύλων μαρμάρου. Οι παράμετροι που διερευνώνται είναι ο λόγος πλάτους/ύψος (W_p/H_p) των στύλων, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (UCS) άρρηκτου πετρώματος, ο γεωλογικός δείκτης GSI, η παρουσία δικτύου ασυνεχειών εντός της δομής των στύλων και το πλάτος των θαλάμων (W_T).

Οι μελέτες που γίνονται είναι δύο ειδών. Η πρώτη αξιολόγηση της συμπεριφοράς των στύλων πραγματοποιείται με τη βοήθεια εμπειρικών σχέσεων και τη θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας, ενώ η δεύτερη βασίζεται σε δισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων (RS2).

Η μέθοδος των θαλάμων και στύλων, που αξιοποιείται στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις μαρμάρων, είναι δύσκολο να προσομοιωθεί ικανοποιητικά σε τέτοια μοντέλα, μιας και η αρχή της μεθόδου έχει τρισδιάστατη όψη. Με σκοπό την μοντελοποίηση της τρισδιάστατης γεωμετρίας και των φορτίσεων που αναπτύσσονται, αξιοποιείται η προσεγγιστική τεχνική του εξωτερικού φορτίου q . Η επιλογή της μεταξύ άλλων τεχνικών γίνεται μετά από συγκριτική αξιολόγηση με τα αποτελέσματα του τρισδιάστατου μοντέλου (RS3). Παρά την ικανοποιητική προσέγγιση των μέγιστων κύριων τάσεων σ_1 της στέψης, η τεχνική του εξωτερικού φορτίου q υποεκτιμά τις αντίστοιχες τάσεις στο μέσο του στύλου.

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων αξιολογούνται τόσο ανά ομάδες όσο και στο σύνολό τους. Την μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση στους συντελεστές ασφαλείας επιφέρει η αύξηση του γεωλογικού δείκτη GSI κατά 10 μονάδες, δείγμα της επίδρασής του στην αντοχή των στύλων. Στα εξεταζόμενα μοντέλα δεν παρατηρείται καμία αστοχία στη δομή των στύλων. Σε μερικά, μόνο, μοντέλα παρατηρούνται σημεία αστοχίας στους θαλάμους που τους περιβάλλουν. Από την αξιολόγηση των δύο ειδών μελέτης συμπεραίνεται η υπερεκτίμηση των συντελεστών ασφαλείας από τις εμπειρικές σχέσεις.

ABSTRACT

During the last decade, underground marble exploitation has been increasingly chosen by marble companies. If properly implemented, it can offer significant comparative advantages over open-pit exploitation. In order to properly design an underground marble exploitation and ensure its stability, a thorough study of the quarry and the surrounding area is essential before starting the operation, as well as continuous monitoring and evaluation of its behaviour during its life span.

This thesis attempts to investigate the effect of various parameters on the stability of marble pillars. The parameters that are investigated are the ratio of pillar width to height (W_p/H_p), the uniaxial compressive strength (UCS) of intact rock, the Geological Strength Index (GSI), the presence of a discontinuity network within the pillar structure, and the width of rooms (W_r).

The behaviour of the pillars is studied in two different manners. The first one makes use of empirical strength formulas and the tributary area method, while the second one is based on 2D finite element models (RS2).

The room and pillar method, which is utilized in underground marble quarries, is difficult to simulate adequately in such models, since it has a three-dimensional aspect. In an attempt to model the 3D geometry and the loading states developed, the external load technique is used. Its selection among other techniques is made after benchmarking with the results of the 3D model (RS3). Despite the satisfactory approach of the maximum principal stresses (σ_1) of the crown, the external load technique underestimates these kinds of stresses in the middle of the pillar.

The results of the numerical analyses are evaluated both by groups and as a whole. The maximum percentage increase of the safety factors is achieved by increasing the GSI value by 10 points, indicating its effectiveness on the pillar strength. In the tested models there is no sight of component failure within the pillar structure. In only a few models, points of failure are observed in the surrounding rooms. From the evaluation of the two types of study, it is concluded that the empirical formulas tend to overestimate the safety factors.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	II
ABSTRACT.....	III
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	VI
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	VI
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	VII
1. ΦΥΣΙΚΟ ΠΕΤΡΩΜΑ ΜΑΡΜΑΡΟΥ.....	- 1 -
1.1 Ορισμός και χαρακτηριστικά.....	- 1 -
1.2 Χρήσεις μαρμάρου.....	- 2 -
1.3 Κατανομές και χαρακτηριστικά εγχώριων εκμεταλλεύσεων.....	- 3 -
1.4 Εκμετάλλευση μαρμάρου.....	- 5 -
1.4.1 Επιλογή μεταξύ υπαίθριας και υπόγειας εκμετάλλευσης.....	- 6 -
1.4.2 Ιστορία υπόγειων εκμεταλλεύσεων μαρμάρου.....	- 8 -
2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΙ ΣΤΥΛΩΝ.....	- 10 -
2.1 Εισαγωγή – γενικά στοιχεία.....	- 10 -
2.2 Γενική περιγραφή μεθόδου.....	- 11 -
2.3 Ανάλυση της συμπεριφοράς των στύλων.....	- 12 -
2.3.1 Κριτήρια αστοχίας στύλων.....	- 12 -
2.3.2 Συμπεριφορά στύλων σε συνθήκες φόρτισης.....	- 13 -
2.3.3 Επίδραση ασυνεχειών στην ευστάθεια των στύλων.....	- 18 -
2.4 Βασικές αρχές σχεδιασμού.....	- 22 -
2.4.1 Ασκούμενες τάσεις στους στύλους.....	- 22 -
2.4.1.1 Θεωρία συνεισφέρουσας επιφάνειας.....	- 24 -
2.4.1.2 Μέθοδοι αριθμητικής μοντελοποίησης.....	- 28 -
2.4.2 Εκτίμηση της αντοχής των στύλων.....	- 29 -
2.4.2.1 Obert & Duvall (1967).....	- 32 -
2.4.2.2 Lunder & Pakalnis (1997).....	- 32 -
2.4.2.3 Esterhuizen et al. (2008).....	- 33 -
2.4.2.4 Εμπειρικό κριτήριο των Hoek & Brown.....	- 36 -
3 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΩΝ ΜΑΡΜΑΡΟΥ.....	- 39 -
3.1 Στοιχεία λατομικού χώρου.....	- 39 -
3.1.1 Καθορισμός υπερκείμενων στρωμάτων.....	- 39 -

3.1.2	Καθορισμός παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας	- 39 -
3.2	Κατηγορίες παραμετρικών αναλύσεων.....	- 42 -
A'	Ομάδα Αναλύσεων	- 43 -
B'	Ομάδα Αναλύσεων	- 44 -
Γ'	Ομάδα Αναλύσεων.....	- 45 -
Δ'	Ομάδα Αναλύσεων.....	- 46 -
E'	Ομάδα Αναλύσεων.....	- 48 -
3.3	Προσομοίωση των εγκάρσιων εκσκαφών στη διδιάστατη ανάλυση	- 48 -
3.3.1	Ανάλυση στο RS2.....	- 51 -
3.3.1.1	Βήματα προσομοίωσης.....	- 51 -
3.3.1.2	Στάδια προσομοίωσης.....	- 61 -
3.3.1.3	Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	- 62 -
3.3.2	Ανάλυση στο RS3	- 75 -
3.3.2.1	Βήματα προσομοίωσης.....	- 75 -
3.3.2.2	Στάδια προσομοίωσης.....	- 81 -
3.3.2.3	Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	- 82 -
3.3.3	Επιλογή προσεγγιστικής τεχνικής.....	- 88 -
3.4	Μελέτη ευστάθειας παραμετρικών αναλύσεων	- 92 -
3.4.1	Εμπειρική μελέτη ευστάθειας	- 92 -
3.4.2	Αριθμητική μελέτη ευστάθειας.....	- 98 -
3.4.2.1	Οριζόντιες συγκρίσεις και σχολιασμοί αποτελεσμάτων	- 98 -
3.4.2.1.1	Παραμετροποίηση λόγου W_p/H_p (A' Ομάδα Αναλύσεων).....	- 98 -
3.4.2.1.2	Παραμετροποίηση UCS (A – B.1 – B.2)	- 109 -
3.4.2.1.3	Παραμετροποίηση GSI (A – Γ.1 – Γ.2)	- 118 -
3.4.2.1.4	Επιρροή δικτύου ασυνεχειών (A – Δ).....	- 127 -
3.4.2.1.5	Παραμετροποίηση W_r (A – E.1 – E.2).....	- 136 -
3.4.2.2	Κάθετες συγκρίσεις και σχολιασμοί αποτελεσμάτων.....	- 146 -
3.4.3	Σύγκριση εμπειρικών – αριθμητικών μελετών	- 150 -
4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 153 -
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	- 158 -
A.	Επιλογή προσεγγιστικής τεχνικής.....	- 158 -
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	- 163 -

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.4.1: Εξόρυξη όγκου με αδαμαντοφόρο συρματοκοπής (ΙΚΤΙΝΟΣ ΕΛΛΑΣ Α.Ε.)	5 -
Εικόνα 1.4.2: Εξόρυξη όγκου με αλυσοπρίονο Benetti Macchine TCM 988 Plus (ΙΚΤΙΝΟΣ ΕΛΛΑΣ Α.Ε.).....	6 -
Εικόνα 1.4.2.1: Προσπάθεια υπόγειας εκμετάλλευσης μαρμάρου στις αρχές της δεκαετίας του '90, Διονυσοβούνι Αττικής (Dionyssomarble SA)	8 -
Εικόνα 2.1.1: Bench mining σε υπόγεια εκμετάλλευση μαρμάρου (ΙΚΤΙΝΟΣ ΕΛΛΑΣ Α.Ε.)	10 -
Εικόνα 2.3.2.1: Χαρακτηριστικό σχήμα κλεψύδρας που υποδεικνύει υπερφόρτιση στύλου έπειτα από benching (Esterhuizen et al., 2011).....	15 -

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.4.2.3.1: Μεταβολές των τιμών του DDF ως συνάρτηση της κλίσης και του λόγου W_p/H_p (Esterhuizen et al., 2008)	34 -
Πίνακας 2.4.2.3.2: Οι τιμές του συντελεστή FF για μια σειρά από μέσες συχνότητες ασυνεχειών ανά στύλο (Esterhuizen et al., 2008).....	35 -
Πίνακας 2.4.2.3.3: Εμπειρικές σχέσεις αντοχής στύλων	36 -
Πίνακας 3.1.2.1: Μεταβολή του GSI_r ως συνάρτηση των τιμών του GSI	41 -
Πίνακας 3.3.1.3.1: Ποσοστά μεταβολής των μέσων ορθών τάσεων ως αποτέλεσμα της επιβολής του εξωτερικού φορτίου q (Στέψη)	68 -
Πίνακας 3.3.1.3.2: Ποσοστά μεταβολής των μέσων ορθών τάσεων ως αποτέλεσμα της επιβολής του εξωτερικού φορτίου q (Μέσο του ύψους).....	70 -
Πίνακας 3.3.1.3.3: Ποσοστά μεταβολής των μέσων ορθών τάσεων ως αποτέλεσμα της αύξησης των ειδικών βαρών των υπερκειμένων (Στέψη)	73 -
Πίνακας 3.3.1.3.4: Ποσοστά μεταβολής των μέσων ορθών τάσεων ως αποτέλεσμα της αύξησης των ειδικών βαρών των υπερκειμένων (Μέσο του ύψους).....	74 -
Πίνακας 3.3.3.1: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των μέσων τιμών των σ_1 (Στέψεις).....	89 -
Πίνακας 3.3.3.2: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των μέσων τιμών των σ_1 (Μέσο του ύψους)	89 -
Πίνακας 3.4.1.1: Συντελεστές ασφαλείας στύλων (Εμπειρική μελέτη).....	94 -
Πίνακας 3.4.2.1.1.1: Σύγκριση μέσων τιμών συνολικών μετατοπίσεων σε m (Στέψη - Οροφές)..	108 -
Πίνακας 3.4.2.1.1.2: Σύγκριση μέσων τιμών συνολικών μετατοπίσεων σε m (Βάσεις - Δάπεδα)..	108 -
Πίνακας 3.4.2.1.2.1: Σύγκριση ποσοστών αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση της UCS (Στέψεις)	110 -
Πίνακας 3.4.2.1.2.2: Σύγκριση ποσοστών αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση της UCS (Μέσο του ύψους).....	112 -
Πίνακας 3.4.2.1.2.3: Σύγκριση ποσοστών αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση της UCS (Βάσεις).....	113 -
Πίνακας 3.4.2.1.2.4: Σύγκριση ποσοστών αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση της UCS (Αριστερές παρείς)	115 -
Πίνακας 3.4.2.1.3.1: Σύγκριση ποσοστών αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση του GSI (Στέψεις)	119 -
Πίνακας 3.4.2.1.3.2: Σύγκριση ποσοστών αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση του GSI (Μέσο του ύψους).....	121 -

Πίνακας 3.4.2.1.3.3: Σύγκριση ποσοστών αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση του GSI (Βάσεις).....	122 -
Πίνακας 3.4.2.1.3.4: Σύγκριση ποσοστών αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση του GSI (Αριστερές παρειές)	124 -
Πίνακας 3.4.2.1.4.1: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας λόγω επίδρασης δικτύου ασυνεχειών (Στέψεις)	128 -
Πίνακας 3.4.2.1.4.2: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας λόγω επίδρασης δικτύου ασυνεχειών (Μέσο του ύψους).....	129 -
Πίνακας 3.4.2.1.4.3: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας λόγω επίδρασης δικτύου ασυνεχειών (Βάσεις)	131 -
Πίνακας 3.4.2.1.4.4: Σύγκριση των μέσων τιμών των συνολικών μετατοπίσεων σε m για παρουσία δικτύου ασυνεχειών (Στέψεις - Οροφές).....	135 -
Πίνακας 3.4.2.1.5.1: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση του W_f (Στέψεις)	137 -
Πίνακας 3.4.2.1.5.2: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση του W_f (Μέσο του ύψους).....	139 -
Πίνακας 3.4.2.1.5.3: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση του W_f (Βάσεις)	141 -
Πίνακας 3.4.2.1.5.4: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση του W_f (Αριστερές παρειές).....	142 -
Πίνακας 3.4.2.1.5.5: Σύγκριση των μέσων τιμών των συνολικών μετατοπίσεων σε m για παραμετροποίηση του W_f (Στέψεις - Οροφές)	146 -
Πίνακας 3.4.2.2.1: Σύγκριση των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας όλων των αναλύσεων	150 -
Πίνακας 3.4.2.2.2: Σύγκριση των μέσων τιμών των συνολικών μετατοπίσεων σε m συγκεκριμένων αναλύσεων (Στέψεις – Οροφές).....	150 -
Πίνακας 3.4.3.1: Σύγκριση των δύο μελετών ως προς τους συντελεστές ασφαλείας ($W_p/H_p = 0,5$)	151 -

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.2.1: Ποσοστά χρήσης φυσικών διακοσμητικών πετρωμάτων (Παρουσιάσεις μαθήματος).-	2 -
Σχήμα 1.3.1: Περιοχές εντοπισμού μαρμάρων (IGME).....	4 -
Σχήμα 1.4.1.1: Μεταβολή του κόστους εκμετάλλευσης συναρτήσει της μεταβολής του βάθους (Μενεγάκη, 2020)	7 -
Σχήμα 2.2.1: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου θαλάμων και στύλων (Hamrin et al., 2001).....	11 -
Σχήμα 2.3.1.1: Φόρτιση στύλων από την τάση των υπερκείμενων πετρωμάτων (Μπενάρδος και Καλλιαμπάκος, 2010)	12 -
Σχήμα 2.3.2.1: Παρουσίαση της συμπεριφοράς στύλου που υπόκειται σε φόρτιση στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης (Μπενάρδος και Καλλιαμπάκος, 2010).....	13 -
Σχήμα 2.3.2.2: Διάταξη εκμετάλλευσης υπό την παρουσία στύλων φραχτών (Brady and Brown, 2004)	14 -
Σχήμα 2.3.2.3: Συνήθεις τρόποι αστοχίας στύλων (Brady & Brown, 2004)	16 -
Σχήμα 2.3.2.4: Απεικόνιση της εξέλιξης των ρωγματώσεων και της αστοχίας σε στύλο εντός συμπαγούς πετρώματος (Lunder and Pakalnis, 1997)	17 -

Σχήμα 2.3.2.5: Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης στύλων για διάφορες τιμές του λόγου W/H (Das, 1986)	18 -
Σχήμα 2.3.3.1: Επίδραση των ασυνεχειών στην αντοχή δοκιμίων πετρώματος (Farmer, 1983).....	19 -
Σχήμα 2.3.3.2: Σύγκριση ως προς τη μορφή των στύλων, το πλάτος των θαλάμων και το ύψος των στύλων 35 διαφορετικών περιπτώσεων τετραγωνικών στύλων (Iannacchione, 1999)	20 -
Σχήμα 2.3.3.3: Μεταβολές της μέγιστης κατακόρυφης τάσης καθώς η κλίση των ασυνεχειών κυμαίνεται από τις 0° στις 90° για τέσσερις διαφορετικούς λόγους w/h στύλων (Iannacchione, 1999) .-	21 -
Σχήμα 2.3.3.4: Επίδραση μεγάλων ασυνεχειών στην αντοχή των στύλων, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα αριθμητικών μοντέλων (Esterhuizen et al., 2011)	22 -
Σχήμα 2.4.1.1: Ανακατανομή των τάσεων κατά την αξονική διεύθυνση ενός στύλου (Brady and Brown, 2004)	24 -
Σχήμα 2.4.1.1.1: Κάτοψη της διάταξης των θαλάμων και στύλων. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή αποτελεί τη συνεισφέρουσα επιφάνεια του στύλου (Brady and Brown, 2004).....	25 -
Σχήμα 2.4.1.1.2: Εκτίμηση της μέσης ορθής τάσης που αναλαμβάνει ο στύλος για διάφορες δυνατές διατάξεις θαλάμων - στύλων (Hoek and Brown, 1980).....	26 -
Σχήμα 2.4.1.1.3: Επίδραση του συντελεστή απόληξης και του ύψους των υπερκειμένων στην μέση ορθή τάση που ασκείται στο στύλο (Iannacchione, 1999).....	28 -
Σχήμα 2.4.2.1: Επίδραση του μεγέθους και του σχήματος στην τελική αντοχή του στύλου (Μπενάρδος και Καλλιαμπάκος, 2010)	31 -
Σχήμα 2.4.2.2.1: Η αύξηση του περιορισμού στο κέντρο του στύλου ως συνάρτηση των κ, C_{pav} και W/H (Lunder & Pakalnis, 1997).....	33 -
Σχήμα 2.4.2.4.1: Εξιδανικευμένη απεικόνιση της μετάβασης από την άρρηκτη στην έντονα διαταραγμένη από ασυνέχειες βραχομάζα με αυξανόμενο μέγεθος δείγματος (Hoek & Brown, 1980) .-	37 -
Σχήμα 2.4.2.4.2: Κλιμάκωση της περιβάλλουσας καμπύλης αστοχίας Hoek - Brown για αντοχή αδιατάρακτου πετρώματος σε αντοχή διαταραγμένης βραχομάζας (Marinos et al., 2005).....	38 -
Σχήμα 3.1.2.1: Σχέση μεταξύ του λόγου GSI _i /GSI και του GSI (Cai et al., 2007).....	40 -
Σχήμα 3.3.1.1.1: Σχεδιασμός εξωτερικού πλαισίου.....	52 -
Σχήμα 3.3.1.1.2: Σχεδιασμός των θαλάμων.....	53 -
Σχήμα 3.3.1.1.3: Εισαγωγή των ορίων των υλικών	54 -
Σχήμα 3.3.1.1.4: Εισαγωγή των ορίων των benches.....	55 -
Σχήμα 3.3.1.1.5: Εκχώρηση των υλικών στις κατάλληλες θέσεις	55 -
Σχήμα 3.3.1.1.6: Η περιοχή ενδιαφέροντος πριν από οποιαδήποτε εκσκαφή (1° Στάδιο).....	56 -
Σχήμα 3.3.1.1.7: Η περιοχή ενδιαφέροντος μετά την ολοκλήρωση του δεύτερου bench (10° Στάδιο)....	56 -
Σχήμα 3.3.1.1.8: Η περιοχή ενδιαφέροντος μετά την ολοκλήρωση όλων των εκσκαφών (22° Στάδιο) .-	57 -
Σχήμα 3.3.1.1.9: Αλλαγή του τασικού πεδίου από υδροστατικό (K=1) σε ανισοτασικό (K=0,5) ...	57 -
Σχήμα 3.3.1.1.10: Διακριτοποίηση του μοντέλου σε πεπερασμένους βαθμούς ελευθερίας.....	58 -
Σχήμα 3.3.1.1.11: Δημιουργία πλέγματος (meshing)	59 -
Σχήμα 3.3.1.1.12: Αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος (mesh density)	59 -
Σχήμα 3.3.1.1.13: Απελευθέρωση επιφάνειας του εδάφους.....	60 -
Σχήμα 3.3.1.1.14: Συγκράτηση του αριστερού και του δεξιού άκρου του εξωτερικού ορίου μόνο ως προς την κατεύθυνση X	61 -

Σχήμα 3.3.1.3.1: Ισοϋψείς των σ_1 μετά την ολοκλήρωση του πέμπτου bench (Χωρίς προσεγγιστική τεχνική)	63 -
Σχήμα 3.3.1.3.2: Κατανομές των σ_1 στη στέψη των στύλων των Αναλύσεων της Α' Ομάδας, χωρίς τη χρήση κάποιας προσεγγιστικής τεχνικής.	63 -
Σχήμα 3.3.1.3.3: Κατανομές των σ_1 στο μέσο του ύψους των στύλων των Αναλύσεων της Α' Ομάδας, χωρίς τη χρήση κάποιας προσεγγιστικής τεχνικής	65 -
Σχήμα 3.3.1.3.4: Τοποθέτηση του ομοιόμορφου φορτίου q στην περιοχή που προβάλλεται ακριβώς πάνω από τον στύλο.....	66 -
Σχήμα 3.3.1.3.5: Ισοϋψείς των σ_1 μετά την ολοκλήρωση του πέμπτου bench (Εξωτερικό φορτίο) -	67 -
Σχήμα 3.3.1.3.6: Κατανομές των σ_1 στη στέψη των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων, με τη χρήση της προσεγγιστικής τεχνικής του εξωτερικού φορτίου q.....	68 -
Σχήμα 3.3.1.3.7: Κατανομές των σ_1 στο μέσο του ύψους των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων, με τη χρήση της προσεγγιστικής τεχνικής του εξωτερικού φορτίου q.....	69 -
Σχήμα 3.3.1.3.8: Αντικατάσταση των υλικών από τα νέα υλικά αυξημένων ειδικών βαρών	71 -
Σχήμα 3.3.1.3.9: Ισοϋψείς των σ_1 μετά την ολοκλήρωση του πέμπτου bench (Επαυξημένα ειδικά βάρη).....	71 -
Σχήμα 3.3.1.3.10: Κατανομές των σ_1 στη στέψη των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων, με τη χρήση της προσεγγιστικής τεχνικής επαύξησης των ειδικών βαρών των υπερκειμένων	72 -
Σχήμα 3.3.1.3.11: Κατανομές των σ_1 στο μέσο του ύψους των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων, με τη χρήση της προσεγγιστικής τεχνικής επαύξησης των ειδικών βαρών των υπερκειμένων	74 -
Σχήμα 3.3.2.1: Αναπαράσταση της υπόγεια εκμετάλλευσης μέσω του λογισμικού S-Pillar.....	75 -
Σχήμα 3.3.2.1.1: Δημιουργία γεωμετρίας	77 -
Σχήμα 3.3.2.1.2: Εισαγωγή των θαλάμων που πρόκειται να εκσκαφθούν	78 -
Σχήμα 3.3.2.1.3: Διαίρεση όλων των γεωμετριών (Initial).....	79 -
Σχήμα 3.3.2.1.4: Διαίρεση όλων των γεωμετριών (5 th Bench)	80 -
Σχήμα 3.3.2.1.5: Ορισμός αυτόματων οριακών συνθηκών (επιφανείας)	80 -
Σχήμα 3.3.2.1.6: Δημιουργία πλέγματος (meshing)	81 -
Σχήμα 3.3.2.3.1: Ισοϋψείς των σ_1 πριν από οποιαδήποτε εκσκαφή (RS3)	83 -
Σχήμα 3.3.2.3.2: Ισοϋψείς των σ_1 μετά την ολοκλήρωση του πρώτου bench (RS3).....	84 -
Σχήμα 3.3.2.3.3: Ισοϋψείς των σ_1 μετά την ολοκλήρωση του δεύτερου bench (RS3)	84 -
Σχήμα 3.3.2.3.4: Ισοϋψείς των σ_1 μετά την ολοκλήρωση του τρίτου bench (RS3).....	85 -
Σχήμα 3.3.2.3.5: Ισοϋψείς των σ_1 μετά την ολοκλήρωση του τέταρτου bench (RS3)	85 -
Σχήμα 3.3.2.3.6: Ισοϋψείς των σ_1 μετά την ολοκλήρωση του πέμπτου bench (RS3).....	86 -
Σχήμα 3.3.2.3.7: Κατανομές των σ_1 στη στέψη των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων, όπως προκύπτουν από το λογισμικό RS3	86 -
Σχήμα 3.3.2.3.8: Κατανομές των σ_1 στο μέσο του ύψους των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων, όπως προκύπτουν από το λογισμικό RS3	87 -
Σχήμα 3.3.3.1: Σύγκριση μεταξύ των μέσων τιμών των σ_1 στη στέψη των στύλων	88 -
Σχήμα 3.3.3.2: Σύγκριση μεταξύ των μέσων τιμών των σ_1 στο μέσο του ύψους των στύλων	89 -
Σχήμα 3.3.3.3: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στη στέψη του στύλου της Ανάλυσης A.5	91 -
Σχήμα 3.3.3.4: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στο μέσο του ύψους του στύλου της Ανάλυσης A.5.-	91 -
Σχήμα 3.4.1.1: Σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας των στύλων όπως υπολογίζονται από τις τρεις εμπειρικές σχέσεις για τις αναλύσεις της Α' Ομάδας.....	96 -
Σχήμα 3.4.1.2: Αξιολόγηση της εμπειρικής σχέσης των Obert & Duvall μέσω σύγκρισης των συντελεστών ασφαλείας των παραμετρικών αναλύσεων	96 -

Σχήμα 3.4.1.3: Αξιολόγηση της εμπειρικής σχέσης των Lunder & Pakalnis μέσω σύγκρισης των συντελεστών ασφαλείας των παραμετρικών αναλύσεων	97 -
Σχήμα 3.4.1.4: Αξιολόγηση της εμπειρικής σχέσης των Esterhuizen et al. μέσω σύγκρισης των συντελεστών ασφαλείας των παραμετρικών αναλύσεων	97 -
Σχήμα 3.4.2.1.1.1: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στη στέγη των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων.....	99 -
Σχήμα 3.4.2.1.1.2: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις βάσεις των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων.....	100 -
Σχήμα 3.4.2.1.1.3: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση Α.1	101 -
Σχήμα 3.4.2.1.1.4: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση Α.2	101 -
Σχήμα 3.4.2.1.1.5: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση Α.3	101 -
Σχήμα 3.4.2.1.1.6: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση Α.4	102 -
Σχήμα 3.4.2.1.1.7: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση Α.5	102 -
Σχήμα 3.4.2.1.1.8: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στο μέσο του ύψους των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων.....	103 -
Σχήμα 3.4.2.1.1.9: Ορισμός του stage 2 ως reference stage	104 -
Σχήμα 3.4.2.1.1.10: Ισοϋψείς των συνολικών μετατοπίσεων στην Ανάλυση Α.1.....	105 -
Σχήμα 3.4.2.1.1.11: Ισοϋψείς των συνολικών μετατοπίσεων στην Ανάλυση Α.2.....	105 -
Σχήμα 3.4.2.1.1.12: Ισοϋψείς των συνολικών μετατοπίσεων στην Ανάλυση Α.3.....	106 -
Σχήμα 3.4.2.1.1.13: Ισοϋψείς των συνολικών μετατοπίσεων στην Ανάλυση Α.4.....	106 -
Σχήμα 3.4.2.1.1.14: Ισοϋψείς των συνολικών μετατοπίσεων στην Ανάλυση Α.5.....	106 -
Σχήμα 3.4.2.1.1.15: Κατανομές των συνολικών μετατοπίσεων στη στέγη και τις οροφές των Αναλύσεων της Ομάδας Α'	107 -
Σχήμα 3.4.2.1.1.16: Κατανομές των συνολικών μετατοπίσεων στις βάσεις και τα δάπεδα των Αναλύσεων της Ομάδας Α'	108 -
Σχήμα 3.4.2.1.2.1: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση Β.1.5.....	109 -
Σχήμα 3.4.2.1.2.2: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση Β.2.5.....	109 -
Σχήμα 3.4.2.1.2.3: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις στέψεις των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικές τιμές UCS.....	111 -
Σχήμα 3.4.2.1.2.4: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στο μέσο του ύψους των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικές τιμές UCS.....	113 -
Σχήμα 3.4.2.1.2.5: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις βάσεις των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικές τιμές UCS.....	115 -
Σχήμα 3.4.2.1.2.6: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις αριστερές παρειές των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικές τιμές UCS.....	117 -
Σχήμα 3.4.2.1.3.1: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση Γ.1.5.....	118 -
Σχήμα 3.4.2.1.3.2: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση Γ.2.5.....	118 -
Σχήμα 3.4.2.1.3.3 Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις στέψεις των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικές τιμές GSI	120 -
Σχήμα 3.4.2.1.3.4: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στο μέσο του ύψους των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικές τιμές GSI	122 -
Σχήμα 3.4.2.1.3.5: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις βάσεις των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικές τιμές GSI	124 -
Σχήμα 3.4.2.1.3.6: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις αριστερές παρειές των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικές τιμές GSI	126 -

Σχήμα 3.4.2.1.4.1: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις στέψεις των στύλων των Αναλύσεων Α.5 - Δ.5.....	- 127 -
Σχήμα 3.4.2.1.4.2: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στο μέσο του ύψους των στύλων των Αναλύσεων Α.5 - Δ.5.....	- 130 -
Σχήμα 3.4.2.1.4.3: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις βάσεις των στύλων των Αναλύσεων Α.5 - Δ.5.....	- 132 -
Σχήμα 3.4.2.1.4.4: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις παρειές του στύλου της Ανάλυσης Δ.5.....	- 133 -
Σχήμα 3.4.2.1.4.5: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις δεξιές παρειές των στύλων των Αναλύσεων Α.5 - Δ.5.....	- 133 -
Σχήμα 3.4.2.1.4.6: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση Δ.1.....	- 134 -
Σχήμα 3.4.2.1.4.7: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση Δ.5.....	- 134 -
Σχήμα 3.4.2.1.4.8: Κατανομές των συνολικών μετατοπίσεων στις στέψεις των στύλων και τις οροφές των θαλάμων των Αναλύσεων Α.5 - Δ.5.....	- 135 -
Σχήμα 3.4.2.1.4.9: Ισοϋψείς των συνολικών μετατοπίσεων στην Ανάλυση Δ.5.....	- 136 -
Σχήμα 3.4.2.1.5.1: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση Ε.1.5.....	- 136 -
Σχήμα 3.4.2.1.5.2: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση Ε.2.5.....	- 137 -
Σχήμα 3.4.2.1.5.3: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις στέψεις των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικά πλάτη θαλάμων.....	- 138 -
Σχήμα 3.4.2.1.5.4: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στο μέσο του ύψους των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικά πλάτη θαλάμων.....	- 140 -
Σχήμα 3.4.2.1.5.5: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις βάσεις των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικά πλάτη θαλάμων.....	- 142 -
Σχήμα 3.4.2.1.5.6: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις αριστερές παρειές των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικά πλάτη θαλάμων.....	- 145 -
Σχήμα 3.4.2.1.5.7: Ισοϋψείς των συνολικών μετατοπίσεων στην Ανάλυση Ε.1.5.....	- 145 -
Σχήμα 3.4.2.1.5.8: Ισοϋψείς των συνολικών μετατοπίσεων στην Ανάλυση Ε.2.5.....	- 146 -
Σχήμα 3.4.2.2.1: Σύγκριση όλων των κατανομών των συντελεστών ασφαλείας στις στέψεις των στύλων.....	- 147 -
Σχήμα 3.4.2.2.2: Σύγκριση όλων των κατανομών των συντελεστών ασφαλείας στο μέσο του ύψους των στύλων.....	- 147 -
Σχήμα 3.4.2.2.3: Σύγκριση όλων των κατανομών των συντελεστών ασφαλείας στις βάσεις των στύλων.....	- 148 -
Σχήμα 3.4.2.2.4: Σύγκριση όλων των κατανομών των συντελεστών ασφαλείας στις παρειές των στύλων.....	- 148 -
Σχήμα 3.4.3.1: Σύγκριση των δύο μελετών ως προς τους συντελεστές ασφαλείας (Α' Ομάδα Αναλύσεων).....	- 151 -
Σχήμα Α.1: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στη στέψη του στύλου της Ανάλυσης Α.1.....	- 158 -
Σχήμα Α.2: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στη στέψη του στύλου της Ανάλυσης Α.2.....	- 159 -
Σχήμα Α.3: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στη στέψη του στύλου της Ανάλυσης Α.3.....	- 159 -
Σχήμα Α.4: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στη στέψη του στύλου της Ανάλυσης Α.4.....	- 160 -
Σχήμα Α.5: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στο μέσο του ύψους του στύλου της Ανάλυσης Α.1.....	- 160 -
Σχήμα Α.6: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στο μέσο του ύψους του στύλου της Ανάλυσης Α.2.....	- 161 -

Σχήμα A.7: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στο μέσο του ύψους του στύλου της Ανάλυσης A.3-
161 -

Σχήμα A.8: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στο μέσο του ύψους του στύλου της Ανάλυσης A.4-
162 -

1. ΦΥΣΙΚΟ ΠΕΤΡΩΜΑ ΜΑΡΜΑΡΟΥ

1.1 Ορισμός και χαρακτηριστικά

Το μάρμαρο, σύμφωνα με τη γεωλογική επιστήμη, είναι κρυσταλλικό πέτρωμα αποτελούμενο από ασβεστίτη (CaCO_3) ή και από το συνδυασμό των ορυκτών ασβεστίτη (CaCO_3) και δολομίτη ($(\text{Ca,Mg}) (\text{CO}_3)_2$) και έχει δημιουργηθεί από την μεταμόρφωση ασβεστόλιθων, δηλαδή ιζηματογενών ανθρακικών πετρωμάτων.

Εκτός από τα μάρμαρα που ορίζει η γεωλογική επιστήμη, ο κλάδος του εμπορίου θεωρεί και μια σειρά από άλλα πετρώματα ως μάρμαρα. Τέτοια πετρώματα είναι οι ασβεστόλιθοι, οι δολομίτες, οι σερπεντινίτες, ορισμένα κροκαλοπαγή και οι γρανίτες, αφού κοπούν σε σχετικά λεπτές πλάκες, λειανθούν και στιλβωθούν.

Το μάρμαρο χαρακτηρίζεται από κοκκοβαλτικό ιστό, έχει σκληρότητα 3-4 στην κλίμακα Mohs και το ειδικό του βάρος κυμαίνεται συνήθως από $1,8 \text{ g/cm}^3$ μέχρι $2,85 \text{ g/cm}^3$. Ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων των κρυστάλλων τους, τα μάρμαρα χαρακτηρίζονται ως:

- λεπτοκοκκώδη (με μέγεθος κόκκων 0,01-0,5 mm),
- μεσοκοκκώδη (με μέγεθος κόκκων 0,5-2 mm) και
- χονδροκοκκώδη (με μέγεθος κόκκων 2-6 mm).

Τα λεπτοκοκκώδη μάρμαρα θεωρείται ότι έχουν μεγαλύτερη μηχανική αντοχή από τα χονδροκοκκώδη. Η αντοχή τους όμως εξαρτάται και από τα ιστολογικά χαρακτηριστικά τους.

Οι σημαντικότερες από τις φυσικομηχανικές και τεχνικές ιδιότητες που παρουσιάζει το μάρμαρο είναι:

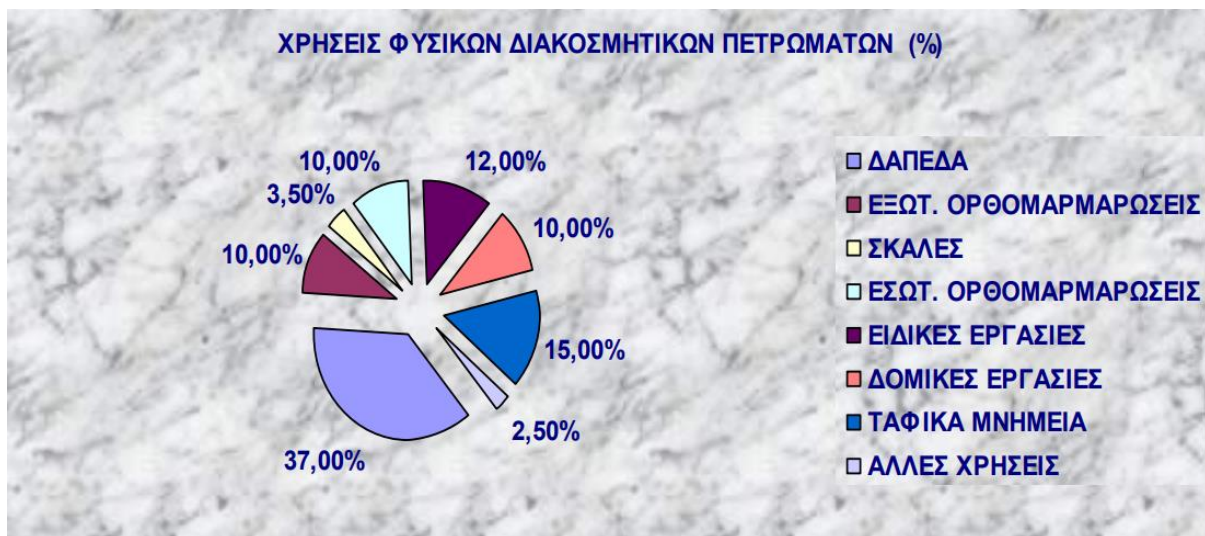
- η φαινόμενη ειδική πυκνότητα (kg/m^3)
- ο συντελεστής ανοιχτού πορώδους (% κ.ο.)
- ο συντελεστής υδαταπορρόφησης (% κ.β.)
- η αντοχή σε θλίψη (MPa ή kg/cm^2)
- η αντοχή σε κάμψη (MPa ή kg/cm^2)

- το μέτρο ελαστικότητας (GPa)
- η αντοχή σε φθορά μετά από τριβή
- η αντοχή σε κρούση ή ο προσδιορισμός της ενέργειας θραύσης
- η μικροσκληρότητα κατά Κnoop
- ο συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής

Η ποιότητα των μαρμάρων εξαρτάται κυρίως από τη σύσταση των πετρωμάτων από τα οποία προήλθαν και από το βαθμό της μεταμόρφωσής τους. Τα χρώματα των μαρμάρων ποικίλουν. Το μάρμαρο είναι, ως επί το πλείστον, λευκό - ημίλευκο έως γκρι σε διάφορους τόνους, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να είναι μαύρο, πρασινωπό, ροζ, ερυθρωπό, εξαιτίας της παρουσίας οργανικών ουσιών ή σιδηροξειδίων ή μαγγανιούχων οξειδίων.

1.2 Χρήσεις μαρμάρου

Τα μάρμαρα χρησιμοποιούνται κυρίως για διακοσμητικούς (π.χ. μνημεία, γλυπτά κλπ.) και οικοδομικούς λόγους (πλάκες και πλακίδια δαπέδων, σκαλοπάτια κλπ.). Σε αυτούς του κλάδους σημασία έχει η αισθητική εμφάνιση του μαρμάρου, η οποία εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες όπως το χρώμα του μαρμάρου, η παρουσία και η συχνότητα εμφανίσεως εγκλεισμάτων (κονδύλων, λατύπων, κλπ.) και «λεκέδων», και η παρουσία ή όχι φλεβιδίων με διαφορετική διάταξη, πάχος και χρώμα.



Σχήμα 1.2.1: Ποσοστά χρήσης φυσικών διακοσμητικών πετρωμάτων (Παρουσιάσεις μαθήματος)

Κύριος σκοπός της εκμετάλλευσης ενός λατομείου μαρμάρων είναι η παραγωγή ογκομαρμάρων. Τα ογκομάραμα είναι οι ορθογωνισμένοι όγκοι μαρμάρου (σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου), και προορίζονται κυρίως για κοπή σε πλάκες και στη συνέχεια για παραγωγή τελικών προϊόντων από φυσικούς λίθους. Το ορθογωνισμένο σχήμα τους επιβάλλεται από την ανάγκη περιορισμού των απωλειών (φύρας) κατά την επεξεργασία των όγκων στα σχιστήρια για την παραγωγή πλακών. Κατά την εκμετάλλευση συχνά παράγονται και αδιαμόρφωτοι όγκοι ακανόνιστου σχήματος, τα λεγόμενα «ξοφάρια». Οι διαστάσεις των ορθογωνισμένων όγκων (μήκος x πλάτος x ύψος) ποικίλουν, ανάλογα με το κοίτασμα, φτάνοντας μέχρι τα 320 x 180 x 180 και πλέον εκατοστά. Πρόκειται, δηλαδή, για ορθογωνισμένους όγκους κυβισμού μέχρι 10 και πλέον κυβικά μέτρα και βάρους μέχρι 28 και πλέον τόνους.

Κατά τη διαμόρφωση των ογκομαρμάρων στα λατομεία επιδιώκεται αυτά να είναι «υγιή», δηλαδή απαλλαγμένα από εσωτερικά ελαττώματα (φυσικές ή τεχνητές ρωγμές, οπές κ.ά.) και οι διαστάσεις τους να είναι οι μεγαλύτερες δυνατές, αφού η τιμή πώλησης ενός υλικού σε μεγάλους ορθογωνισμένους όγκους είναι υψηλότερη από την τιμή σε όγκους μικρών διαστάσεων.

Η αξιοποίηση του μαρμάρου δεν περιορίζεται μόνο στα ογκομάραμα. Η λατύπη (κομμάτι μαρμάρου ακανόνιστου σχήματος πολύ μικρών διαστάσεων) που προέρχεται από λατομεία μαρμάρου, μετά από κατάλληλη επεξεργασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μιας σειράς υποπροϊόντων. Τα υποπροϊόντα αυτά είναι:

- μαρμαροψηφίδες
- μαρμαρόσκονη
- αδρανή υλικά για παραγωγή σκυροδέματος
- πληρωτικό υλικό (filler) που προστίθεται σε διάφορα προϊόντα, όπως χαρτί, ελαστικό, πλαστικά

1.3 Κατανομές και χαρακτηριστικά εγχώριων εκμεταλλεύσεων

Το μάρμαρο αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προϊόντα του υπεδάφους της χώρας μας. Από την άποψη της συνολικής αξίας τόσο της παραγωγής όσο και των εξαγωγών, αλλά και από την άποψη του συνολικού αριθμού εργατικού δυναμικού που απασχολεί ο κλάδος, το

μάρμαρο συναγωνίζεται τις κυριότερες ορυκτές ύλες που παράγονται στην Ελλάδα, όπως είναι ο βωξίτης, τα νικελιούχα μεταλλεύματα, ο λευκόλιθος και ο χρωμίτης.

Ο κλάδος του μαρμάρου ξεχωρίζει από τους άλλους κλάδους της μεταλλευτικής και λατομικής βιομηχανίας της χώρας μας, καθώς τα αποθέματα και ταυτόχρονα οι εκμεταλλεύσεις του μαρμάρου εκτείνονται σχεδόν σε ολόκληρο τον Ελλαδικό χώρο. Πράγματι, στην χώρα μας υπάρχουν λατομεία και εγκαταστάσεις επεξεργασίας μαρμάρου σε 43 από τους 54 συνολικά νομούς, ενώ τα αποθέματα μαρμάρου που υπάρχουν στο υπέδαφος χαρακτηρίζονται από πολλούς ως ανεξάντλητα. Τα κύρια σύγχρονα λατομικά κέντρα στην Ελλάδα, εντοπίζονται στις μαρμαροφόρες περιοχές Δράμας, Καβάλας - Θάσου (Α. Μακεδονία), Κοζάνης – Βέροιας, Ιωαννίνων, Βόλου, Διονύσου Πεντέλης, Λειβαδιάς – Ελικώνα, καθώς και σε άλλες περιοχές (Αργολίδας, Εύβοιας, Σκύρου, Νάξου, Πάρου, Τήνου, κ.λ.π.). Το σπουδαιότερο λατομικό κέντρο της χώρας θεωρείται εκείνο της Ανατολικής Μακεδονίας, με 135 ενεργά λατομεία και ετήσια παραγωγή που έφθασε τα 300.000 m³ ογκομαρμάρων πριν ξεσπάσει η πανδημία COVID-19 (Tzeferis, 2021).



Σχήμα 1.3.1: Περιοχές εντοπισμού μαρμάρων (IGME)

Ο κλάδος του μαρμάρου γνώρισε την τελευταία δεκαετία σημαντική αύξηση στις εξαγωγές. Η ύφεση της ελληνικής οικονομίας και η μειωμένη ζήτηση στην εγχώρια αγορά, οδήγησε στην αλλαγή στρατηγικής και στη στροφή προς την παγκόσμια αγορά. Ο κλάδος στηρίχθηκε και ανταποκρίθηκε στη ζήτηση, που ανέκαθεν υπήρχε για το ελληνικό μάρμαρο μέσω επενδύσεων σε νέες τεχνολογίες και ανέπτυξε μία κορυφαία βιομηχανία με έντονο εξαγωγικό προσανατολισμό.

1.4 Εκμετάλλευση μαρμάρου

Η εκμετάλλευση μαρμάρου μπορεί να είναι τόσο υπαίθρια όσο και υπόγεια ή ακόμα και συνδυασμός των δύο. Οι υπαίθριες εκμεταλλεύσεις μαρμάρου γίνονται με τη μέθοδο των ορθών βαθμίδων, που μπορούν να είναι είτε ανοικτές είτε κλειστές. Οι υπόγειες γίνονται με τη μέθοδο των θαλάμων και στύλων που ανήκει στις μεθόδους εκμετάλλευσης με κενά μέτωπα (open stopes). Η υπόγεια εξόρυξη των ογκομαρμάρων από τη φυσική τους θέση γίνεται με τη χρήση αλυσοπρίονων ή αδαμαντοφόρων συρματοκοπής.



Εικόνα 1.4.1: Εξόρυξη όγκου με αδαμαντοφόρο συρματοκοπής (ΙΚΤΙΝΟΣ ΕΛΛΑΣ Α.Ε.)



Εικόνα 1.4.2: Εξόρυξη όγκου με αλυσοπρίοιο Benetti Machine TCM 988 Plus (IKTINOS ELLAS A.E.)

1.4.1 Επιλογή μεταξύ υπαίθριας και υπόγειας εκμετάλλευσης

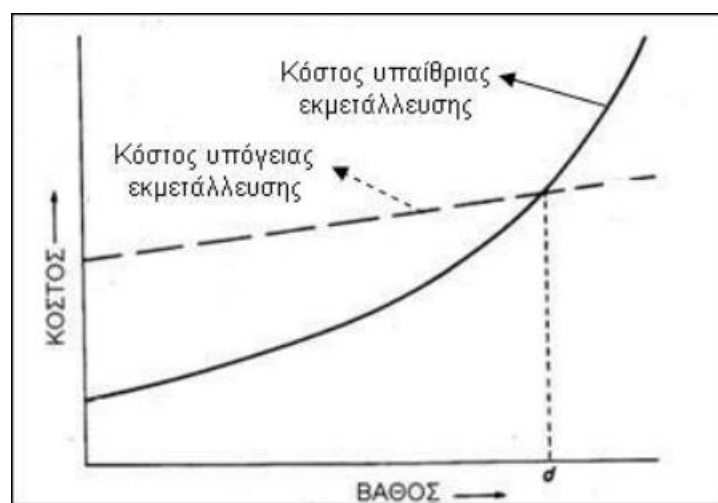
Οι υπαίθριες εκμεταλλεύσεις παρέχουν γενικά υψηλότερο συντελεστή απόληψης του κοιτάσματος και εξασφαλίζουν χαμηλότερο κόστος εξόρυξης. Δίνουν τη δυνατότητα ευελιξίας στην παραγωγή, επιτρέποντας για παράδειγμα την παραγωγή όγκων μεγάλων διαστάσεων κατάλληλων για ειδικές χρήσεις (Τζεφέρης Π, 2019). Ωστόσο, οι καιρικές συνθήκες που μπορεί να προκαλέσουν καθυστερήσεις στην παραγωγή, καθώς και η καταστροφή του φυσικού περιβάλλοντος, τόσο από την εξόρυξη όσο και από την απόθεση των αγόνων συγκαταλέγονται στα μειονεκτήματα αυτού του είδους εκμετάλλευσης.

Οι υπόγειες εκμεταλλεύσεις μαρμάρου έχουν αρκετά πλεονεκτήματα, εκ των οποίων μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, που είναι ίσως ο σημαντικότερος λόγος για να μετακινηθεί η εκμετάλλευση υπόγεια. Πιο συγκεκριμένα, οι υπόγειες εκμεταλλεύσεις δεν επεμβαίνουν στο ανάγλυφο της επιφάνειας, δεν χρησιμοποιούν εκρηκτικές ύλες και άρα δεν επιβαρύνουν με ανατινάξεις, δονήσεις και θόρυβο το ευρύτερο περιβάλλον. Η χρήση μηχανημάτων σύγχρονης τεχνολογίας (αλυσοπρίοια υπόγειας κοπής και αδαμαντοφόρα συρματοκοπής) οδηγεί σε ήπια επέμβαση και βελτιωμένες συνθήκες εργασίας. Η δυνατότητα

εκλεκτικής εξόρυξης σε περιορισμένο χώρο επέμβασης (προσβολή και αποκομιδή μόνο του ωφέλιμου τμήματος) αφήνοντας πίσω την φτωχότερη ποιότητα μαρμάρου ως στύλους είναι επίσης σημαντική. Οι τοπικές μορφολογικές συνθήκες (απότομες κλίσεις) και η εμφάνιση μη εκμεταλλεύσιμων υπερκείμενων πετρωμάτων πάνω από το κοίτασμα ευνοούν περαιτέρω τις υπόγειες εργασίες. Γενικά, τα υπόγεια λατομεία δημιουργούν μικρότερες ποσότητες στείρων συγκριτικά με τα αντίστοιχα υπαίθρια, άρα και μικρότερες αποθέσεις. Και στην υπόγεια εκμετάλλευση, όμως, συναντώνται δυσκολίες/προκλήσεις. Ειδικότερα, χρειάζεται εξαρχής επένδυση σοβαρών κεφαλαίων για την έρευνα, μελέτη και εκμετάλλευση του μαρμαροφόρου κοιτάσματος, καθώς και ενδεδειγμένη τεκτονική διερεύνηση του λατομικού και του ευρύτερου χώρου, ώστε να γίνει ο σωστός σχεδιασμός του έργου. Με γνώμονα την μέγιστη ασφάλεια του προσωπικού και του έργου, απαιτείται συνεχής παρακολούθηση και αξιολόγηση της συμπεριφοράς της υπόγειας εκμετάλλευσης, μέσω εγκατάστασης οργάνων παρακολούθησης σε καίριες περιοχές.

Στο Σχήμα 1.4.1.1 παρουσιάζεται η μεταβολή του κόστους εκμετάλλευσης για υπόγεια και επιφανειακή εκσκαφή συναρτήσει της μεταβολής του βάθους. Το σημείο τομής των δύο καμπυλών καθορίζει το βάθος πέρα από το οποίο η επιφανειακή εκμετάλλευση καθίσταται ασύμφορη και θα πρέπει να προτιμηθεί η υπόγεια. Το σημείο αυτό προσδιορίζει την οριακή τιμή της σχέσης εκμετάλλευσης R_E , η οποία ονομάζεται μέγιστη οικονομική σχέση εκμετάλλευσης και καθορίζεται από τη σχέση:

$$R_E = \frac{\text{Κόστος ανά τόνο υπόγειας εκμετάλλευσης} - \text{Κόστος ανά τόνο υπαίθριας}}{\text{Κόστος αποκάλυψης ανά τόνο αγόνων}}$$



Σχήμα 1.4.1.1: Μεταβολή του κόστους εκμετάλλευσης συναρτήσει της μεταβολής του βάθους (Μενεγάκη, 2020)

1.4.2 Ιστορία υπόγειων εκμεταλλεύσεων μαρμάρου

Οι υπόγειες εκμεταλλεύσεις μαρμαροφόρων κοιτασμάτων είναι γνωστές ήδη από τα αρχαία χρόνια με σημαντικότερη την υπόγεια εκμετάλλευση του «Λυχνίτη» στην περιοχή του οικισμού Μαράθι της Πάρου. Τα υπόγεια λατομεία εκεί λειτούργησαν για πρώτη φορά κατά την πρωτοκυκλαδική εποχή, ενώ έφτασαν στην ακμή τους τον 5^ο αιώνα π.Χ. Προσπάθειες αναβίωσης των υπόγειων εκμεταλλεύσεων στην περιοχή έγιναν και κατά τα τέλη του 19^{ου} αιώνα (Μπενάρδος, 2014).



Εικόνα 1.4.2.1: Προσπάθεια υπόγειας εκμετάλλευσης μαρμάρου στις αρχές της δεκαετίας του '90, Διονυσοβούνι Αττικής (Dionyssomarble SA)

Με εξαίρεση την μεμονωμένη περίπτωση «Σακιώτη Λαυρίου» στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, η εγχώρια υπόγεια εξόρυξη μαρμάρου στη σύγχρονη εποχή ξεκίνησε τη δεκαετία του 1990 στο Λατομείο του Διονύσου (Διονυσοβούνι Αττικής) και στη συνέχεια στο λατομείο της ίδια εταιρείας στο Βόλακα Δράμας (Dionyssomarble SA και σήμερα NORDIA ENERGY) (Τζεφέρης Ι, 2019).

Ακολούθησαν οι εταιρείες που ασχολούνται με το ελληνικό μάρμαρο στην Βόρεια κυρίως Ελλάδα, Περιφέρεια Αν. Μακεδονίας - Θράκης, στο Βόλακα και στο Γρανίτη Δράμας, όπου

οι φυσικο-μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων αποδεικνύονται ευνοϊκές για μια τέτοια δραστηριότητα. Πρώτη από αυτές, το 2013, η εταιρεία «FHL Κυριακίδης Μάρμαρα Γρανίτες ΑΒΕΕ», ενώ ακολούθησαν οι «ΠΑΥΛΙΔΗΣ Α.Ε. ΜΑΡΜΑΡΑ-ΓΡΑΝΙΤΕΣ» και «ΙΚΤΙΝΟΣ ΕΛΛΑΣ Α.Ε.». Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτές τις περιοχές οι υπόγειες εκμεταλλεύσεις αρχίζουν από υφιστάμενα μέτωπα εξόρυξης, δηλαδή πρόκειται για επεκτάσεις των επιφανειακών εκμεταλλεύσεων και το μετασχηματισμό τους σε υπόγειες.

Στις χώρες του Ευρωπαϊκού Νότου η ανάπτυξη υπόγειων εκμεταλλεύσεων μαρμάρου έχει επίσης μεγάλη ιστορία αλλά και ένα δυναμικό παρόν. Τις πλέον σημαντικές και μεγάλες σε αριθμό εκμεταλλεύσεις έχει η Ιταλία και ακολουθούν κατά σειρά η Ισπανία, η Κροατία, η Πορτογαλία και άλλες χώρες της Ευρώπης και της Αμερικής (Μπενάρδος, 2014).

2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΙ ΣΤΥΛΩΝ

2.1 Εισαγωγή – γενικά στοιχεία

Η μέθοδος θαλάμων και στύλων (room and pillar method) ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων εκμετάλλευσης με κενά μέτωπα (open stopes). Ο κενός χώρος που δημιουργείται από τις εργασίες εκσκαφής, διατηρείται ανοικτός με τη βοήθεια της φυσικής υποστήριξης που παρέχεται από το πέτρωμα. Το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου είναι τα οριζόντια ως μέτριας κλίσης στρωσιγενή κοιτάσματα ικανοποιητικής αντοχής, μικρού ή μεγάλου πάχους, τα οποία εντοπίζονται σε μικρό έως μέσο βάθος και έχουν ανθεκτική οροφή. Συγκεκριμένα, η κλίση των στρωμάτων πρέπει να είναι μικρότερη των 30° , το δε πάχος φθάνει συνήθως τα 10m περίπου, μπορεί όμως να είναι και πολύ παραπάνω (Μπενάρδος, 2014). Σε περίπτωση που το προς εκμετάλλευση κοίτασμα έχει μεγάλο πάχος, η εξόρυξη του πετρώματος πραγματοποιείται με τη χρήση βαθμίδων εκμετάλλευσης (bench mining).



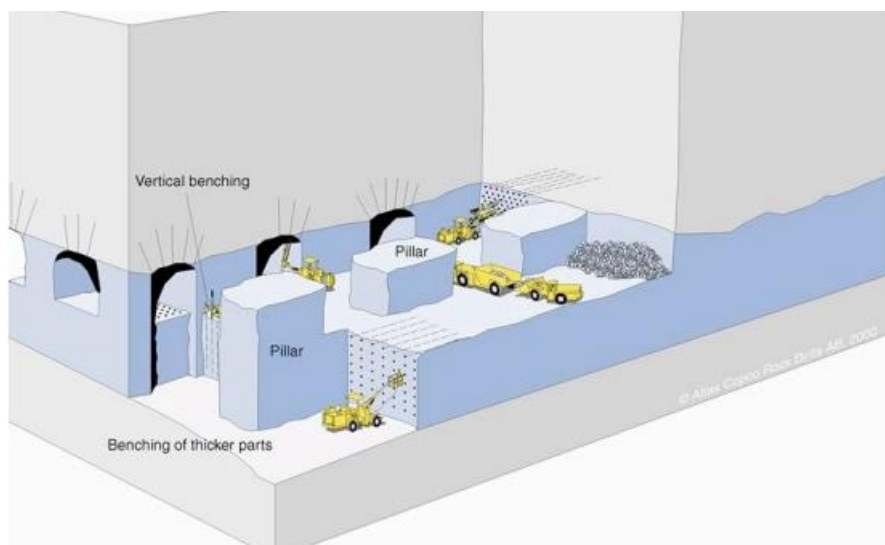
Εικόνα 2.1.1: Bench mining σε υπόγεια εκμετάλλευση μαρμάρου (ΙΚΤΙΝΟΣ ΕΛΛΑΣ Α.Ε.)

Η μέθοδος των θαλάμων και στύλων ενδείκνυται για τη δημιουργία μεγάλων υπόγειων χώρων καθώς (Benardos et al., 2001):

- με την ολοκλήρωση της εκμετάλλευσης καθίσταται δυνατή η ικανοποιητική και λειτουργική αξιοποίηση του χώρου.
- η εμπειρία στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι αρκετά μεγάλη. Στον ελληνικό μεταλλευτικό κλάδο χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά.
- δεν εμφανίζει ιδιαίτερες δυσκολίες, είναι απλή και δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις σε εξοπλισμό και τεχνικές.

2.2 Γενική περιγραφή μεθόδου

Στην γενική εφαρμογή της μεθόδου θαλάμων και στύλων, το πέτρωμα εξορύσσεται μέσω ενός συστήματος παράλληλων θαλάμων οι οποίοι διαχωρίζονται από στύλους (Σχήμα 2.2.1). Οι θάλαμοι, αρχικά, ορύσσονται ως στοές και οι άξονές τους συνήθως ισαπέχουν. Στη συνέχεια ορύσσονται νέες στοές κάθετα ή με κάποια κλίση ως προς τις πρώτες και με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται στύλοι πετρώματος που στηρίζουν την οροφή. Η φέρουσα ικανότητα των στύλων είναι τελικά αυτή που προσδίδει ευστάθεια στους θαλάμους.



Σχήμα 2.2.1: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου θαλάμων και στύλων (Hamrin et al., 2001)

Στην περίπτωση της μεταλλευτικής εφαρμογής της μεθόδου, η ύπαρξη στύλων από το ίδιο το κοίτασμα αποτελεί απώλεια χρήσιμου υλικού. Για το λόγο αυτό, συχνά η εκμετάλλευση συνεχίζεται με τη φάση της μείωσης των διαστάσεων των στύλων (φάση εξόφλησης), με σκοπό τη μεγιστοποίηση του συντελεστή απόληψης. Ωστόσο, η ευστάθεια της υπόγειας εκσκαφής προέχει της απόληψης. Έτσι, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες οι αυξημένες

απαιτήσεις ευστάθειας μπορεί να οδηγήσουν στην υιοθέτηση συντηρητικών σχεδιαστικών πρακτικών όσον αφορά στις διαστάσεις των στύλων της υπόγειας εκμετάλλευσης.

2.3 Ανάλυση της συμπεριφοράς των στύλων

Η ανάλυση της συμπεριφοράς των στύλων είναι καταλυτική για το σχεδιασμό της υπόγειας εκμετάλλευσης, καθώς τελικά θα κρίνει τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εκμετάλλευσης και την επιτυχή κατασκευαστική και λειτουργική ζωή της.

2.3.1 Κριτήρια αστοχίας στύλων

Σε γενικές γραμμές, οι στύλοι δύναται να αστοχήσουν σε θλίψη και διάτμηση. Οι στύλοι αστοχούν σε θλίψη όταν η θλιπτική τάση (σ_p) που ασκείται σε αυτούς υπερβεί την αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη (C_p ή S_p) (Σχήμα 2.3.1.1), ή αλλιώς:

$$\sigma_p \geq C_p$$



Σχήμα 2.3.1.1: Φόρτιση στύλων από την τάση των υπερκείμενων πετρωμάτων (Μπενάρδος και Καλλιαμπάκος, 2010)

Το κριτήριο του Coulomb περιγράφει την αστοχία του στύλου σε διάτμηση τόσο σε περίπτωση παρουσίας, όσο και απουσίας επιπέδου ασυνέχειας. Αυτή η σχέση είναι:

$$\tau_p \geq S_p + \sigma_n \cdot \mu_f \rightarrow \tau_p \geq S_p + \sigma_n \cdot \tan \varphi_f$$

όπου,

τ_p : η διατμητική τάση στο επίπεδο αστοχίας ή ασυνέχειας

S_p : η αντοχή σε διάτμηση του πετρώματος ή του επιπέδου ασυνέχειας

σ_n : η κάθετη τάση στο επίπεδο αστοχίας ή ασυνέχειας

μ_f : ο συντελεστής εσωτερικής τριβής του πετρώματος ή του επιπέδου ασυνέχειας

ϕ_f : η γωνία εσωτερικής τριβής του πετρώματος ή του επιπέδου ασυνέχειας.

Είθισται να χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση συντελεστές ασφαλείας (FOS – F), οι οποίοι αποτελούν τον λόγο της αντοχής του στύλου σε θλίψη (C_p) ως προς την τάση που ασκείται σε αυτόν (σ_p). Με αυτόν τον τρόπο, η σχέση γράφεται ως:

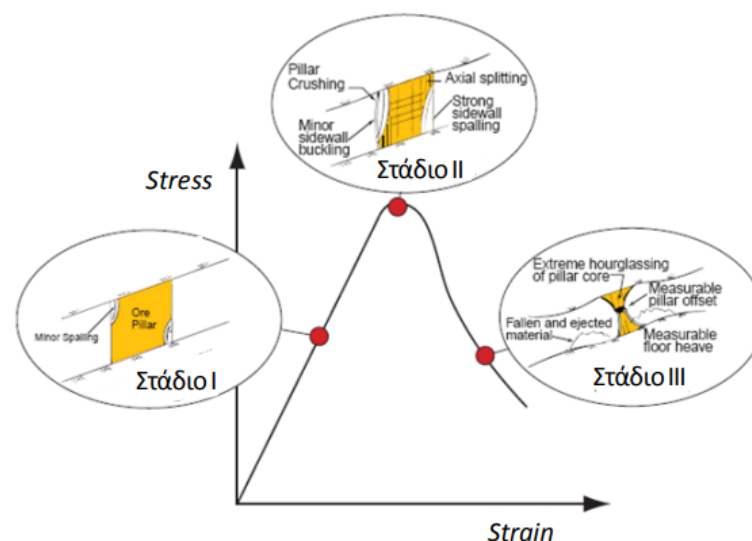
$$\sigma_p \geq \frac{C_p}{F}$$

όπου F: ο συντελεστής ασφαλείας των στύλων σε θλίψη

Το ζήτημα της αποδεκτής τιμής του συντελεστή ασφαλείας των στύλων εξαρτάται τόσο από τη μονιμότητα και το είδος χρήσης του έργου όσο και από την ακολουθούμενη μεθοδολογία εκτίμησης της αντοχής των στύλων (εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού). Στη μεταλλευτική γίνονται αποδεκτοί χαμηλότεροι συντελεστές ασφαλείας σε σύγκριση με υπόγεια έργα μόνιμου χαρακτήρα. Όπως αναλύεται στη συνέχεια, κάθε εμπειρικό κριτήριο προτείνει συγκεκριμένες τιμές συντελεστών.

2.3.2 Συμπεριφορά στύλων σε συνθήκες φόρτισης

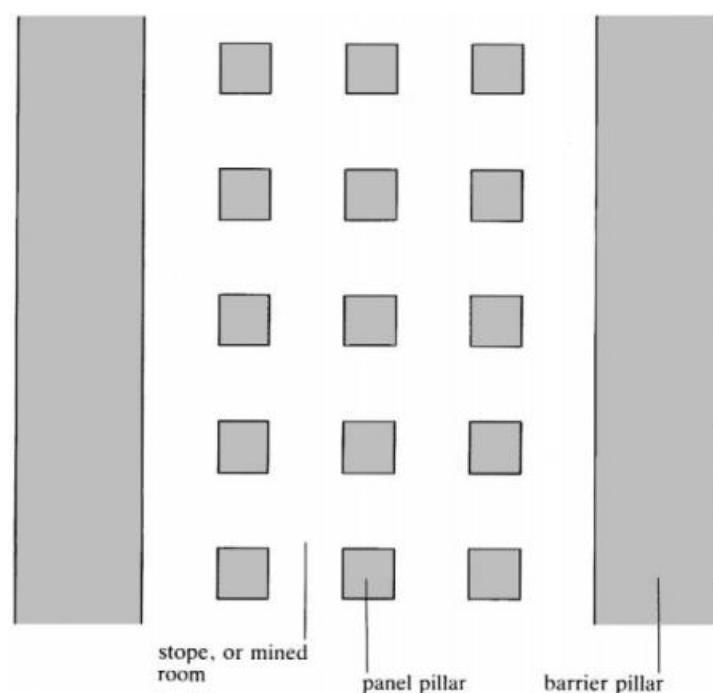
Η εκσκαφή του πετρώματος έχει σαν αποτέλεσμα την ανακατανομή των τάσεων και την αύξηση των φορτίων που αναλαμβάνουν οι στύλοι. Όταν οι τάσεις είναι μικρότερες από την αντοχή του στύλου, ο στύλος παραμένει ουσιαστικά ανέπαφος και συμπεριφέρεται ελαστικά στην αύξηση των τάσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.2.1 - Στάδιο I.



Σχήμα 2.3.2.1: Παρουσίαση της συμπεριφοράς στύλου που υπόκειται σε φόρτιση στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης (Μπενάρδος και Καλλιμπάκος, 2010)

Όταν οι τάσεις ξεπεράσουν την αντοχή του στύλου (είτε από μεγάλα βάθη εκσκαφής είτε από υψηλούς συντελεστές απόληψης), δύο κύριες μορφές αστοχίας μπορεί να εμφανιστούν. Αυτές είναι η προοδευτική ή ελεγχόμενη μορφή αστοχίας και η διαρρηκτική (bursting) ή ασταθής αστοχία.

Η διαρρηκτική αστοχία (bursting) χαρακτηρίζεται από ταχεία απελευθέρωση ενέργειας και μάζας, και μπορεί να προκαλέσει σοβαρές ζημιές στις κοντινές υποδομές και την ανθρώπινη ζωή, εξαιτίας των εκτοξευόμενων τεμαχίων. Όταν ένας στύλος υποστεί διαρρηκτική αστοχία μέσα σε μια διάταξη, οι τάσεις που είχε αναλάβει μεταφέρονται στους γειτονικούς στύλους με αποτέλεσμα να δέχονται πλέον μεγαλύτερες φορτίσεις και να κινδυνεύουν να αστοχήσουν και αυτοί αλυσιδωτά, διευρύνοντας έτσι την περιοχή της αστοχίας. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου που ονομάζεται «διαδοχική αστοχία στύλων» (cascading pillar failure), οι εκμεταλλεύσεις των κοιτασμάτων συχνά διαιρούνται σε μικρότερες περιοχές που διαχωρίζονται από «στύλους φράχτες» (barrier pillars). Οι συγκεκριμένοι στύλοι σχεδιάζονται με σκοπό να περιορίσουν τις περιοχές αστοχίας, μιας και είναι πρακτικά αδύνατον να καταρρεύσουν.



Σχήμα 2.3.2.2: Διάταξη εκμετάλλευσης υπό την παρουσία στύλων φραχτών (Brady and Brown, 2004)

Η προοδευτική αστοχία, που παρατηρείται συνηθέστερα, συμβαίνει σε βάθος χρόνου και είναι αποτέλεσμα της σταδιακής απελευθέρωσης ενέργειας από έναν στύλο. Χαρακτηρίζεται από την αύξηση του αριθμού και του μεγέθους των θραύσεων μαζί με την αποκόλληση

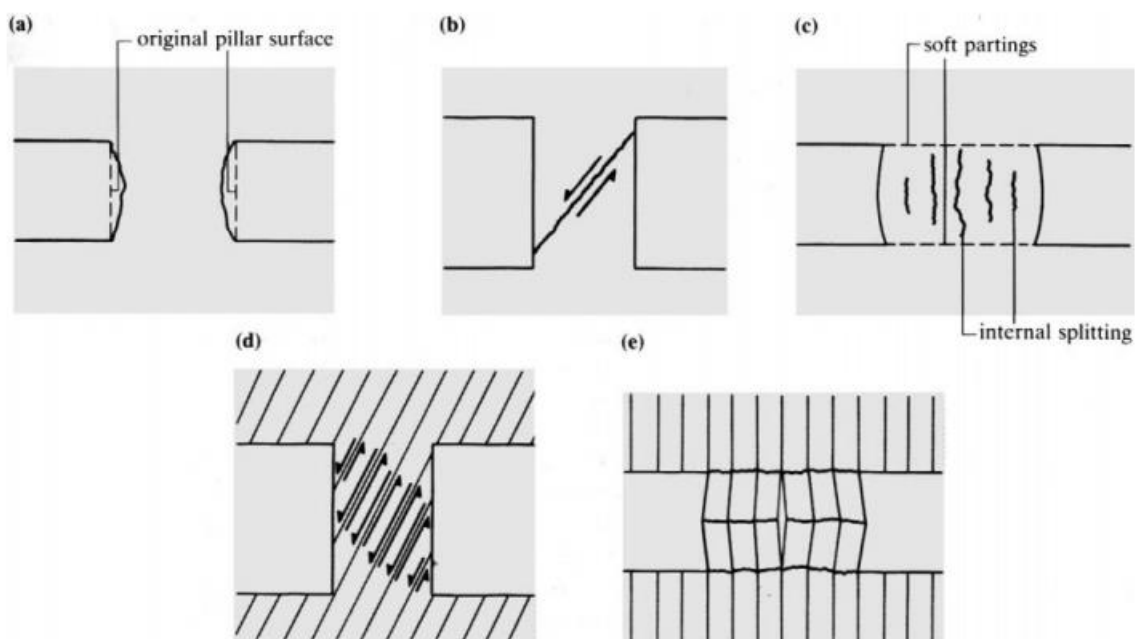
τεμαχών από τις παρειές του στύλου (Σχήμα 2.3.2.1 - Στάδιο II) και τη σταδιακή δημιουργία του χαρακτηριστικού σχήματος κλεψύδρας (hour glass shape), όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3.2.1.



Εικόνα 2.3.2.1: Χαρακτηριστικό σχήμα κλεψύδρας που υποδεικνύει υπερφόρτιση στύλου έπειτα από benching (Esterhuizen et al., 2011)

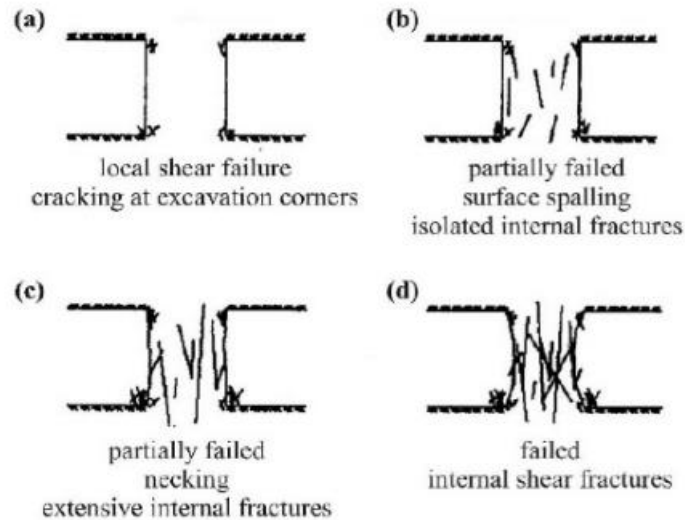
Σύμφωνα με τους Brady et al. (2004), οι συνήθεις τρόποι προοδευτικής αστοχίας των στύλων δίνονται στο Σχήμα 2.3.2.3. Σε συμπαγές πέτρωμα, ο κύριος τρόπος διάρρηξης του στύλου περιλαμβάνει απολέπιση των παρειών (spalling) και απόσχιση του πετρώματος πλευρικά (slabbing) (Σχήμα 2.3.2.3a), οδηγώντας σε φθορά του στύλου και δημιουργία λαιμού. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται προοδευτικά η ενεργός διατομή του στύλου, αυξάνοντας την κατακόρυφη τάση που ασκείται σε αυτόν και που σταδιακά μπορεί να οδηγήσει στην αστοχία του. Στο Σχήμα 2.3.2.3b παρατηρείται η αστοχία στύλου σε διάτμηση λόγω ύπαρξης επιπέδου αδυναμίας στη μάζα του. Στην περίπτωση αυτή, η διατμητική αντοχή της ασυνέχειας ορίζει και την τελική αντοχή του στύλου. Σε διάτμηση είναι δυνατόν να αστοχήσει ο στύλος και όταν δεν υπάρχει επίπεδο ασυνέχειας, εφόσον ικανοποιείται το σχετικό κριτήριο αστοχίας. Ο τρίτος τρόπος αστοχίας (Σχήμα 2.3.2.3c) εμφανίζεται σε πετρώματα με ισχυρά παραμορφώσιμα επίπεδα αδυναμίας (όπως τα στρωσιγενή) και χαρακτηρίζεται από πλευρική διόγκωση του στύλου που παραπέμπει σε σχήμα βαρελιού. Στο Σχήμα 2.3.2.3d, η ύπαρξη οικογένειας επιπέδων αδυναμίας (διακλάσεις – ασυνέχειες – στρώση) οδηγεί στην αστοχία του στύλου σε διάτμηση, όταν η γωνία κλίσης των ρωγματώσεων προς το κύριο επίπεδο του στύλου (κάθετο στον άξονα του στύλου), υπερβεί

την ενεργή γωνία τριβής. Τέτοια υφιστάμενα επίπεδα ασυνεχειών δημιουργούν συχνά επισφαλείς όγκους (σφήνες) στις οροφές των θαλάμων. Για την συγκράτησή τους συνίσταται επιπρόσθετη υποστήριξη των ανοιγμάτων μέσω χρήσης κοχλιών. Κοχλιώσεις μπορούν επίσης να γίνουν σε θέσεις παρειών των στύλων ή στις θέσεις εισόδου ώστε να διασφαλιστεί η ευστάθειά τους. Αξίζει να σημειωθεί πως η χρήση κοχλιών και μεταλλικού πλέγματος είναι οι μόνοι τρόποι δευτερογενούς υποστήριξης μιας υπόγειας εκμετάλλευσης θαλάμων και στύλων. Τέλος, στο Σχήμα 2.3.2.3ε παρατηρείται η αστοχία στύλου υπό τη μορφή λυγισμού, που συναντάται σε πετρώματα με επίπεδα καλά αναπτυγμένης φύλλωσης ή σχιστότητας παράλληλα στον κύριο άξονα φόρτισης.



Σχήμα 2.3.2.3: Συνήθεις τρόποι αστοχίας στύλων (Brady & Brown, 2004)

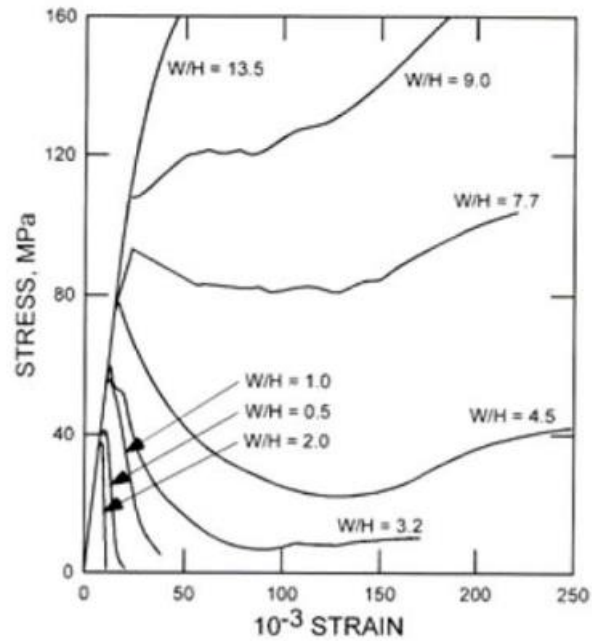
Ειδικότερα για την περίπτωση a, τα αρχικά σημάδια της διάρρηξης μπορεί να έχουν τη μορφή τοπικής αστοχίας σε διάτμηση (Σχήμα 2.3.2.4a). Η αύξηση των τάσεων προκαλεί απολέπιση των επιφανειών του (Σχήμα 2.3.2.4b) και δημιουργεί ρωγματώσεις στο εξωτερικό τμήμα του στύλου. Παρά την μερική αστοχία του στύλου, ο πυρήνας του είναι ακόμη άθικτος και μπορεί ακόμη να παραλάβει τάσεις. Η περαιτέρω αύξηση των τάσεων οδηγεί στην διεύρυνση των εσωτερικών ρωγματώσεων, καθώς και στην αλληλεπίδραση μεταξύ τους (Σχήμα 2.3.2.4c). Όταν κινητοποιηθεί πλήρως η τριβή μεταξύ των ρωγματώσεων, ο στύλος παρουσιάζει τη μέγιστη αντοχή του. Μετά από το σημείο αυτό ο στύλος αστοχεί (Σχήμα 2.3.2.4d).



Σχήμα 2.3.2.4: Απεικόνιση της εξέλιξης των ρωγματώσεων και της αστοχίας σε στύλο εντός συμπαγούς πετρώματος (Lunder and Pakalnis, 1997)

Σε κάθε περίπτωση, μετά το σημείο αστοχίας ο στύλος δεν μπορεί να παραλάβει φορτίσεις και οι παραμορφώσεις του αυξάνονται κατά πολύ (Σχήμα 2.3.2.1 - Στάδιο III). Σε αυτό το σημείο μπορεί να υπάρξει διακοπή της συνέχειας του στύλου και σημαντική απομείωση της διατομής του.

Μετά την αστοχία του ο στύλος μπορεί να εμφανίσει μια παραμένουσα αντοχή (residual strength), αρκετά μικρότερη της μέγιστης αντοχής του. Στο Σχήμα 2.3.2.5 παρουσιάζονται καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης στύλων για διάφορες τιμές του λόγου πλάτους/ύψος (W/H). Βάσει των ισχυρισμών του Das (1986), τόσο η τιμή της αντοχής των στύλων όσο και η τιμή της παραμένουσας αντοχής φαίνονται να είναι ανάλογες της τιμής του λόγου W/H . Οι στύλοι με λόγο W/H μικρότερο του 2, δεν φαίνεται να παρουσιάζουν σημαντική τιμή παραμένουσας αντοχής, ενώ αντίθετα με την αύξηση του λόγου W/H η αντοχή των στύλων αλλά και η παραμένουσα αντοχή τους αυξάνεται σημαντικά. Συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις κοντόχοντρων στύλων (squat pillars) με τιμές $W/H \geq 5$, πέρα από σημαντική αύξηση της αντοχής τους, μπορεί να θεωρηθεί πως ο στύλος πρακτικά δεν μπορεί να αστοχήσει (Ozbay et al., 1995).



Σχήμα 2.3.2.5: Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης στύλων για διάφορες τιμές του λόγου W/H (Das, 1986)

2.3.3 Επίδραση ασυνεχειών στην ευστάθεια των στύλων

Η ύπαρξη ασυνεχειών εντός της δομής της βραχομάζας μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στην ευστάθεια των στύλων. Με την αύξηση του ύψους των θαλάμων, αυξάνεται η επιφάνεια των πλευρών των στύλων και έτσι εκτίθενται σε περισσότερες ασυνέχειες.

Σύμφωνα με τον Farmer (1983), η αναλυτική λύση που περιγράφει την επίδραση των ασυνεχειών σε δοκίμια πετρώματος δίνεται από τη παρακάτω σχέση και παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 2.3.3.1:

$$\sigma_1 = \frac{2C_d + 2\sigma_3 \tan \varphi_d}{(1 - \cot \beta \tan \varphi_d) \sin 2\beta}$$

όπου,

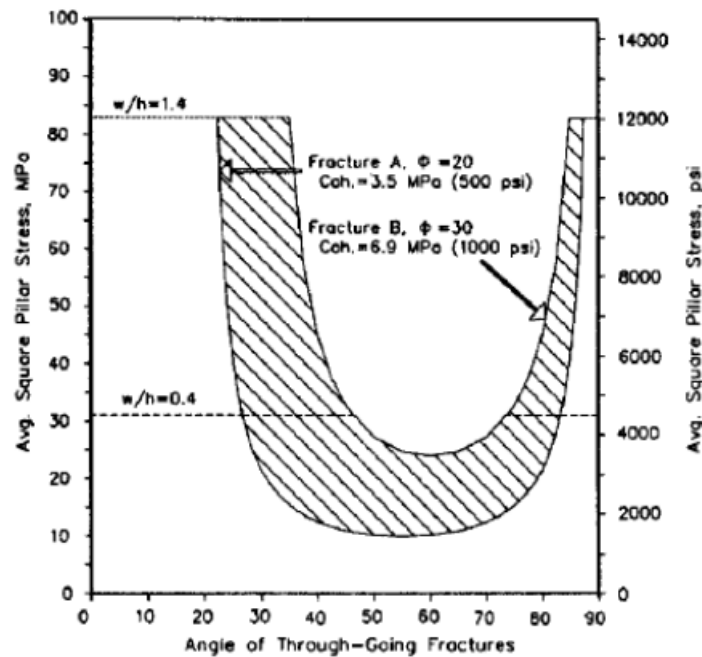
σ_1 : η κατακόρυφη τάση

σ_3 : η πλευρική τάση

C_d : η συνοχή κατά μήκος της ασυνέχειας

φ_d : η γωνία τριβής κατά μήκος της ασυνέχειας

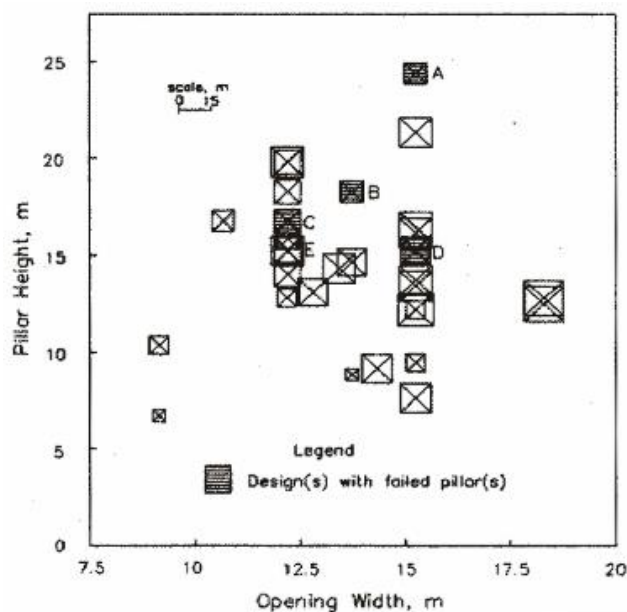
β : η κλίση της ασυνέχειας (μετρούμενη από τον κατακόρυφο άξονα)



Σχήμα 2.3.3.1: Επίδραση των ασυνεχειών στην αντοχή δοκιμίων πετρώματος (Farmer, 1983)

Το Σχήμα 2.3.3.1 δείχνει πως μεταβάλλεται η αντοχή των δοκιμίων σε σχέση με την κλίση των ασυνεχειών για διάφορες ιδιότητες ασυνεχειών. Η συγκεκριμένη ανάλυση, πέρα από τη σχέση μείωσης της αντοχής ανάλογα με την κλίση των ασυνεχειών δείχνει, ακόμη, πώς η γωνία τριβής και η συνοχή κατά μήκος των ασυνεχειών επηρεάζουν μεμονωμένα την αντοχή των δοκιμίων. Η αξία αυτής της τεχνικής στην ανάλυση της συμπεριφοράς των στύλων πετρώματος με ασυνέχειες είναι περιορισμένη επειδή αντιμετωπίζει το υλικό ως μια ομοιόμορφη ελαστική μάζα.

Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρουσιάζει ο Iannacchione (1999), ο καλύτερος τρόπος ανάλυσης της επίδρασης των ασυνεχειών στην ευστάθεια των στύλων είναι η αξιολόγηση της συμπεριφοράς στύλων σε εκμεταλλεύσεις με τη χρήση βαθμίδων (bench mining) και πιο συγκεκριμένα όταν οι στύλοι είναι λεπτόλιγνοι. Μία σύγκριση ως προς τη μορφή και το ύψος των στύλων και το πλάτος των θαλάμων 35 διαφορετικών περιπτώσεων τετραγωνικών στύλων που προέκυψαν από τη χρήση βαθμίδων εκμετάλλευσης γίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 2.3.3.2.

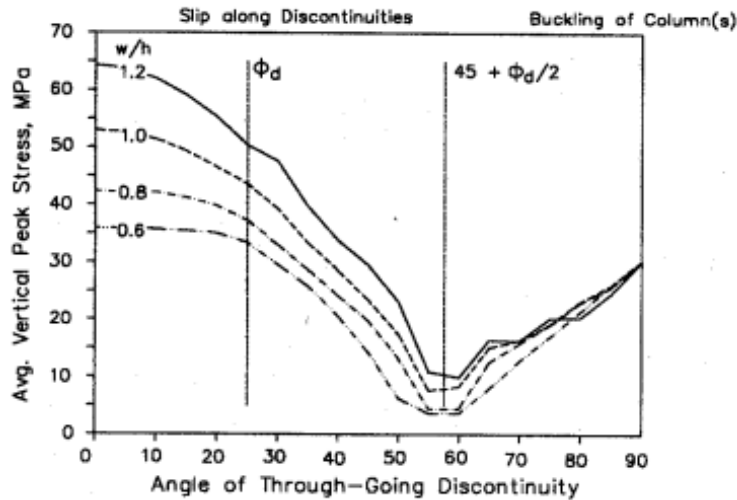


Σχήμα 2.3.3.2: Σύγκριση ως προς τη μορφή των στύλων, το πλάτος των θαλάμων και το ύψος των στύλων 35 διαφορετικών περιπτώσεων τετραγωνικών στύλων (Iannacchione, 1999)

Με βάση τα αποτελέσματα του Σχήμα 2.3.3.2, δεν μπορεί να ειπωθεί με σιγουριά ότι η αστοχία των στύλων εξαρτάται από το ύψος τους ή το πλάτος των θαλάμων. Πράγματι, τρεις από τις τέσσερις περιπτώσεις στύλων που αστόχησαν είχαν μέτριο ύψος και πλάτος (σημεία B,C και D). Τα σημεία αυτά αφορούν σχηματισμούς με περισσότερες ασυνέχειες (μεγάλης κλίσης) από το συνηθισμένο. Η τελευταία περίπτωση (σημείο A) αφορά σχηματισμό που δεν εμφανίζει συχνά ασυνέχειες και πιθανώς η αστοχία της να σχετίζεται με το σχήμα των στύλων ($W/H=0,5$).

Με σκοπό την περαιτέρω ανάλυση της επίδρασης των ασυνεχειών, ο Iannacchione (1999) εισάγει προσομοιωμένες ασυνέχειες στο μοντέλο του ελαστο-πλαστικού στύλου πεπερασμένων διαφορών (finite difference), που ανέλυσε ο Farmer, για μια σειρά από γωνίες. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να αξιολογηθούν οι αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού, στις κλίσεις των ασυνεχειών και στα σχήματα των στύλων. Από τις αναλύσεις των αριθμητικών μοντέλων, γίνεται φανερό πως η αντοχή των δοκιμίων παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή για κλίση ασυνεχειών ίση με:

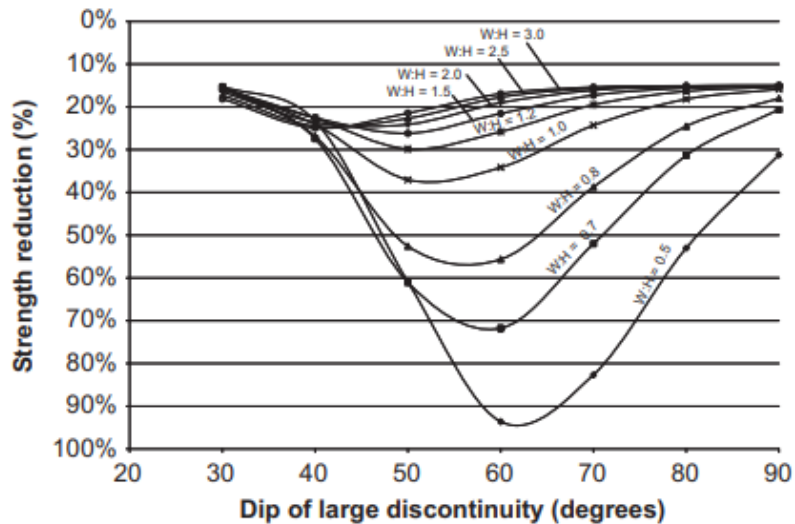
$$\beta_{min} = 45^{\circ} + \varphi_d/2$$



Σχήμα 2.3.3.3: Μεταβολές της μέγιστης κατακόρυφης τάσης καθώς η κλίση των ασυνεχειών κυμαίνεται από τις 0° στις 90° για τέσσερις διαφορετικούς λόγους w/h στύλων (Iannacchione, 1999)

Στον ίδιο άξονα κινούνται και οι Esterhuizen et al. (2011) με σκοπό τη διερεύνηση της πιθανής επίδρασης μιας μεμονωμένης μεγάλης ασυνέχειας στην αντοχή των στύλων. Μέσω του δισδιάστατου αριθμητικού λογισμικού UDEC πραγματοποιούν διάφορες αναλύσεις για στύλους τυπικού ασβεστολιθικού σχηματισμού με λόγο πλάτους/ύψος που ποικίλλει από 0,5 έως 1,5 και για ασυνέχειες με κλίσεις από 30° έως 90° . Όλες οι ασυνέχειες θεωρούνται λείες και επίπεδες με γωνία τριβής 30° και μηδενική συνοχή. Η αντοχή προσδιορίζεται με προσομοίωση σταδιακής θλίψης του στύλου μέχρι που φτάνει στο σημείο της μέγιστης αντοχής. Μια σειρά από καμπύλες προσαρμόζονται στη μέγιστη αντοχή του κάθε στύλου, με τα αποτελέσματα να φαίνονται στο Σχήμα 2.3.3.4.

Από το Σχήμα 2.3.3.4 φαίνεται ότι καθώς η κλίση της ασυνέχειας αυξάνεται από τις 30° στις περίπου 60° , η επίδρασή της στην αντοχή του στύλου αυξάνεται. Όταν η κλίση ξεπεράσει τις 70° , η επίδρασή της μειώνεται. Μια κάθετη ασυνέχεια κατά μήκος του κέντρου ενός στύλου φαίνεται πως έχει σχετικά μικρή επίπτωση στην αντοχή του. Η αναλογία πλάτους/ύψος φαίνεται να είναι ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει την επίδραση των ασυνεχειών. Το Σχήμα 2.3.3.4 δείχνει, για παράδειγμα, ότι ένας στύλος με λόγο πλάτους/ύψος ίσο με 0,5 θα υποστεί μείωση αντοχής κατά 95% εφόσον παρεμβάλλεται από μία ασυνέχεια κλίσης 60° , ενώ ένας στύλος με λόγο πλάτους/ύψος ίσο με 1,0 θα υποστεί μείωση της αντοχής μόνο κατά 34%.



Σχήμα 2.3.3.4: Επίδραση μεγάλων ασυνεχειών στην αντοχή των στύλων, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα αριθμητικών μοντέλων (Esterhuizen et al., 2011)

2.4 Βασικές αρχές σχεδιασμού

Η εκσκαφή σε μια υπόγεια εκμετάλλευση προκαλεί ανακατανομή των τάσεων και φόρτιση των στύλων. Σύμφωνα με τους Deng et al. (2003), το μέγεθος των στύλων έχει μεγάλη σημασία στο σχεδιασμό μιας υπόγειας εκσκαφής που χρησιμοποιεί τη μέθοδο «θαλάμων και στύλων». Για να υπάρχει ικανοποιητική ευστάθεια της υπόγειας εκμετάλλευσης πρέπει να γίνεται κατάλληλη επιλογή των διαστάσεων των στύλων με βάση τις εκάστοτε γεωλογικές συνθήκες του πετρώματος και των περιβαλλόντων πετρωμάτων.

Η αντοχή των στύλων και οι τάσεις που ασκούνται σε αυτούς (από τα υπερκείμενα στρώματα) καθορίζουν τις κατάλληλες διαστάσεις που πρέπει να έχουν. Η αντοχή τους εξαρτάται τόσο από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος από το οποίο αποτελούνται όσο και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους.

2.4.1 Ασκούμενες τάσεις στους στύλους

Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρουσιάζει ο Lunder (1994), ο υπολογισμός των πραγματικών τάσεων που ασκούνται σε έναν στύλο είναι ένα δύσκολο εγχείρημα, καθώς οι τάσεις αυτές εξαρτώνται από έναν αριθμό παραγόντων όπως:

- οι in situ τασικές συνθήκες
- οι διαφοροποιήσεις που προκαλούνται στις τάσεις από την εξόρυξη
- οι επιπτώσεις γεωλογικών χαρακτηριστικών (ρήγματα, ασυνέχειες)
- το σχήμα και ο προσανατολισμός των στύλων

- η χωρική σχέση μεταξύ των στύλων και των θαλάμων
- οι επιπτώσεις των υπόγειων νερών

Οι τάσεις που ασκούνται στα πετρώματα κατηγοριοποιούνται σε λιθοστατικές και τεκτονικές. Οι πρώτες οφείλονται στη βαρύτητα και είναι ανάλογες του βάθους. Οι δεύτερες οφείλονται σε ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (γεωλογικά, τεκτονικά, κ.λπ.) της κάθε περιοχής. Καθώς στο πρώτο στάδιο του σχεδιασμού οι γνώσεις για τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και τον τρόπο επίδρασής τους στο τασικό πεδίο είναι σχετικά περιορισμένες, θεωρείται πως ασκούνται μόνο λιθοστατικές τάσεις στους στύλους (Παναγιώτου, 1982).

Για τον υπολογισμό των τάσεων που ασκούνται στους στύλους χρησιμοποιούνται κυρίως η θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας και οι μέθοδοι αριθμητικής μοντελοποίησης. Η πρώτη χρησιμοποιεί μια απλοποιημένη προσέγγιση για τον προσδιορισμό των τάσεων, ενώ η δεύτερη βασίζεται σε υπολογιστικές τεχνικές για τον προσδιορισμό της ανακατανομής των τάσεων γύρω από τα ανοίγματα της εκμετάλλευσης.

Ο Lunder (1994) υπογραμμίζει τη σημασία του ορθού προσδιορισμού των *in situ* τάσεων. Η κατακόρυφη συνιστώσα της τάσης θεωρείται συχνά ότι είναι ίση με το βάρος των υπερκειμένων στρωμάτων. Σε εναποθέσεις οριζόντιας στρώσης αυτό μπορεί να είναι επαρκές για τον προσδιορισμό των τάσεων που ασκούνται στους στύλους. Σε ακανόνιστες αποθέσεις, ωστόσο, η τάση που καλείται να αναλάβει ένας στύλος είναι παράγοντας των τριών κύριων τάσεων και όχι μόνο της κατακόρυφης συνιστώσας. Η κατακόρυφη τάση (S_v) που ασκείται λόγω του βάρους των υπερκειμένων στρωμάτων δίνεται από τη σχέση:

$$S_v = \gamma \cdot h$$

όπου,

γ : το ειδικό βάρος του υπερκειμένου πετρώματος

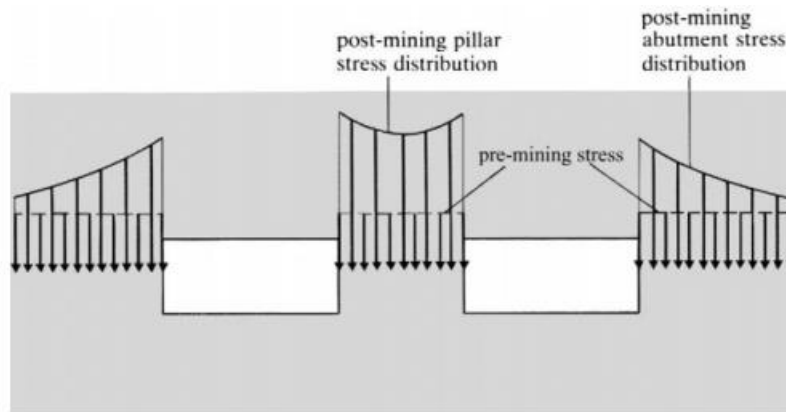
h : το ύψος των υπερκειμένων (βάθος από επιφάνεια)

Η οριζόντια τάση (S_h) που ασκείται στο ίδιο τμήμα δίνεται από τη σχέση:

$$S_h = \frac{\nu}{1 - \nu} \cdot S_v$$

όπου ν : ο λόγος του Poisson του πετρώματος, συνήθως μεταξύ 0,2 και 0,33.

Η κατακόρυφη τάση των υπερκειμένων αφορά την αρχική εντατική κατάσταση πριν την έναρξη των εκσκαφών. Η τάση που ασκείται στους δημιουργούμενους στύλους είναι αρκετά μεγαλύτερη (Σχήμα 2.4.1.1) και εξαρτάται από τις διαστάσεις των στύλων και των θαλάμων.



Σχήμα 2.4.1.1: Ανακατανομή των τάσεων κατά την αξονική διεύθυνση ενός στύλου (Brady and Brown, 2004)

2.4.1.1 Θεωρία συνεισφέρουσας επιφάνειας

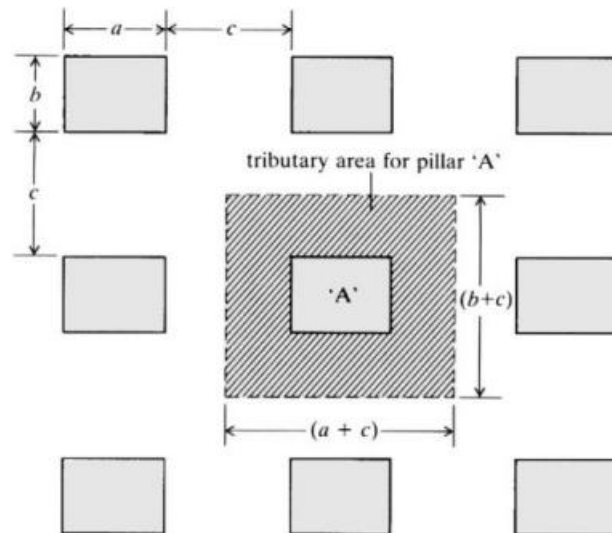
Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, μια μέθοδος εκτίμησης της τάσης που δέχεται ο στύλος είναι η θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας (tributary load area). Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, κάθε στύλος φέρει το φορτίο του πετρώματος που βρίσκεται μέσα στο κατακόρυφο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, του οποίου γενέτειρα είναι οι άξονες που χωρίζουν στη μέση τους διαδρόμους που περιβάλλουν το στύλο. Η οριζόντια αυτή επιφάνεια ονομάζεται συνεισφέρουσα.

Τα κύρια πλεονεκτήματά της συγκεκριμένης μεθόδου είναι τα εξής:

- είναι εξαιρετικά εύχρηστη στον αρχικό σχεδιασμό υπόγειων εκμεταλλεύσεων καθώς χρειάζεται περιορισμένες πληροφορίες όπως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των στύλων, το ύψος και το ειδικό βάρος των υπερκειμένων
- προσφέρει άμεσα και γρήγορα τα αποτελέσματα της ανάλυσης, είναι πολύ απλή και σε περιπτώσεις ομοιόμορφων εκσκαφών δίνει αρκετά μεγάλη ακρίβεια
- δίνει συντηρητικά και ασφαλή αποτελέσματα καθώς υπολογίζει τη μέγιστη φόρτιση που μπορεί να εφαρμοστεί στους στύλους

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγεται το γεγονός πως λαμβάνει υπ' όψη της το τασικό πεδίο πριν το άνοιγμα των θαλάμων και υποθέτει πως η φόρτιση των στύλων εξαρτάται κυρίως από τις κατακόρυφες τάσεις που ασκούνται σε αυτούς, θεωρώντας ότι οι άλλες συνιστώσες του πεδίου των τάσεων δεν έχουν καμία επίδραση στην ευστάθεια των

στύλων. Επιπλέον, δεν μπορεί να δώσει ακριβή αποτελέσματα σε περιπτώσεις μη ομοιόμορφης κατανομής στύλων, ενώ τέλος πολλές φορές μπορεί να είναι αρκετά συντηρητική.



Σχήμα 2.4.1.1.1: Κάτοψη της διάταξης των θαλάμων και στύλων. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή αποτελεί τη συνεισφέρουσα επιφάνεια του στύλου (Brady and Brown, 2004)

Η θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας ορίζεται μαθηματικά ως εξής. Αν A_R η επιφάνεια που αντιστοιχεί σε κάθε στύλο (γραμμοσκιασμένο τμήμα) και A_p η επιφάνεια του στύλου, τότε το άθροισμα των δύο παραπάνω επιφανειών (A_t) είναι:

$$A_t = A_R + A_p$$

Η τάση (σ_p) που ασκείται σε ένα στύλο δίνεται από εξίσωση της μορφής:

$$\sigma_p = f(h, W_p, W_R)$$

όπου,

h : το βάθος από την επιφάνεια στο οποίο πραγματοποιείται η εκμετάλλευση

W_p : το πλάτος του στύλου

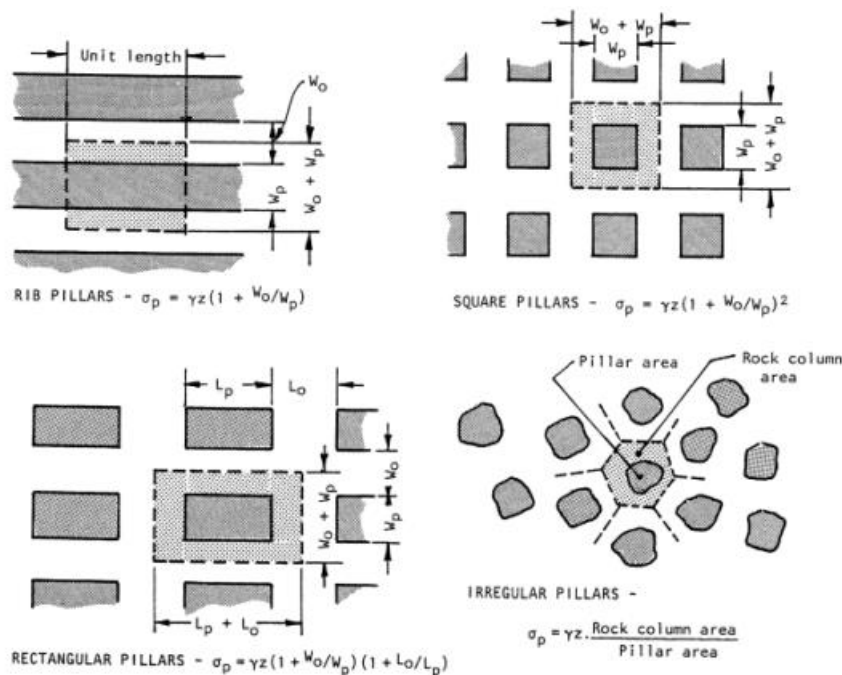
W_R : το πλάτος του θαλάμου μεταξύ δύο διαδοχικών στύλων

Η διάταξη των στύλων που υιοθετείται συνηθέστερα στο πεδίο είναι η κανονική (regular pattern). Σε αυτήν, οι στύλοι ακολουθούν έναν συγκεκριμένο κάρναβο, έτσι ώστε τα κέντρα τους να απέχουν συγκεκριμένες αποστάσεις από τους γειτονικούς στύλους. Αντίστοιχα, η πιο

σνηθισμένη διατομή στύλων είναι η τετραγωνική (square pillars), αλλά και η διατομή ορθογωνίου παραλληλογράμμου (rectangular pillars). Η χρήση ορθογώνιων στύλων γίνεται σε περιπτώσεις αυξημένων οριζόντιων τάσεων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο σχεδιασμός γίνεται έτσι ώστε η μεγάλη διάταξη των στύλων να βρίσκεται παράλληλα προς τη διεύθυνση που ασκείται η μέγιστη οριζόντια τάση (Παναγιώτου, 1982). Έχει παρατηρηθεί πως η επιλογή διατομών ορθογώνιου παραλληλογράμμου βοηθά στον έλεγχο της οροφής και στο σύστημα εξαερισμού, και προσδίδει στους στύλους μεγαλύτερη αντοχή από αυτήν που παρουσιάζουν οι στύλοι τετραγωνικής διατομής (Esterhuizen et al., 2011).

Στο Σχήμα 2.4.1.1.2, απεικονίζονται όλες οι δυνατές διατάξεις στύλων και οι αντίστοιχες μέσες ορθές τάσεις (σ_p) που εκτιμάται πως αναλαμβάνουν. Η γενική σχέση που περιγράφει την τάση στο στύλο δίνεται από την εξίσωση:

$$\sigma_p = S_v \cdot \frac{A_t}{A_p}$$



Σχήμα 2.4.1.1.2: Εκτίμηση της μέσης ορθής τάσης που αναλαμβάνει ο στύλος για διάφορες δυνατές διατάξεις θαλάμων - στύλων (Hoek and Brown, 1980)

Στην πιο απλή περίπτωση που οι στύλοι έχουν κανονική διάταξη και τετραγωνική διατομή, η μέση ορθή τάση που ασκείται σε αυτούς δίνεται από την εξίσωση:

$$\sigma_p = S_v \cdot \frac{A_t}{A_p} \rightarrow \sigma_p = \gamma \cdot h \cdot \frac{(W_R + W_p)^2}{W_p^2} \rightarrow \sigma_p = \gamma \cdot h \cdot \left(1 + \frac{W_R}{W_p}\right)^2$$

Αντίστοιχα, σε περιπτώσεις στύλων παραλληλογράμμου διατομής η τάση δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_p = \gamma \cdot h \cdot \left(1 + \frac{W_R}{W_P}\right) + \left(1 + \frac{L_R}{L_P}\right)$$

όπου,

L_P : το μήκος του στύλου

L_R : το μήκος του θαλάμου μεταξύ δύο διαδοχικών στύλων

Ο συντελεστής απόληψης (R) εκφράζεται, με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης των θαλάμων και των στύλων στο χώρο, σύμφωνα με τη σχέση:

$$R = A_R/A_T \rightarrow R = A_R/(A_R + A_P)$$

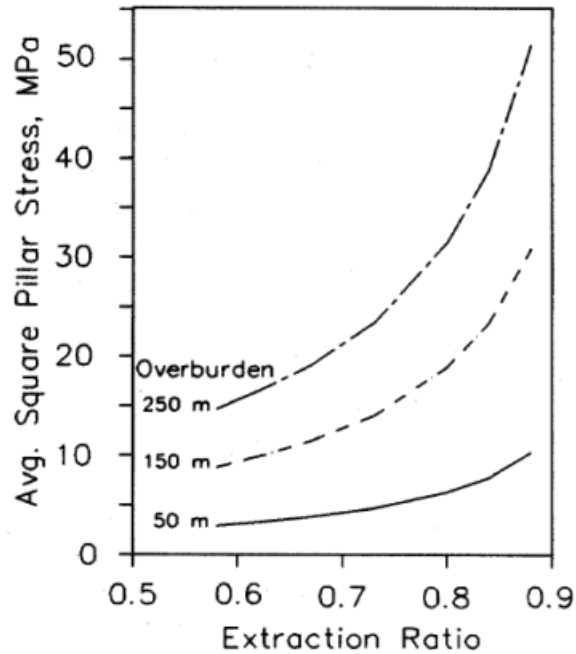
Στην περίπτωση τετραγωνικών στύλων, ο συντελεστής απόληψης δίνεται από τη σχέση:

$$R = 1 - \left[\frac{W_P}{(W_R + W_P)} \right]^2$$

Αντίστοιχα, οι σχέσεις υπολογισμού της μέσης ορθής τάσης μπορούν να εκφραστούν και με τη χρήση του συντελεστή απόληψης (R), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\sigma_p = \gamma \cdot h \cdot \left[\frac{1}{(1 - R)} \right]$$

Η τελευταία εξίσωση αποτυπώνεται γραφικά στο Σχήμα 2.4.1.1.3, όπου γίνεται φανερό πως η αύξηση του ύψους των υπερκειμένων και του συντελεστή απόληψης, επιφέρει σημαντική αύξηση στη μέση ορθή τάση που δέχεται ο στύλος. Στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις μαρμάρων το πάχος των υπερκειμένων στρωμάτων είναι συνήθως χαμηλό και οι βραχομάζες μαρμάρου δυνατές με αποτέλεσμα οι ασκούμενες τάσεις να μην αποτελούν εν γένει πρόβλημα.



Σχήμα 2.4.1.1.3: Επίδραση του συντελεστή απόληξης και του ύψους των υπερκειμένων στην μέση ορθή τάση που ασκείται στο στύλο (Iannacchione, 1999)

2.4.1.2 Μέθοδοι αριθμητικής μοντελοποίησης

Η αριθμητική μοντελοποίηση είναι η τεχνική εφαρμογής αριθμητικών μεθόδων για την επίλυση προβλημάτων που περιλαμβάνουν την απόκριση βραχομάζας σε φόρτιση. Τα προβλήματα συνοριακών τιμών που σχετίζονται με πολύπλοκες γεωμετρίες εξόρυξης δεν μπορούν να περιγραφούν από απλές μαθηματικές εξισώσεις, ενισχύοντας τη σημασία της αριθμητικής μοντελοποίησης. Η αριθμητική μοντελοποίηση γενικά χρησιμοποιεί την θεωρία της ελαστικότητας για να προσδιορίσει την ανακατανομή των τάσεων σε έναν τομέα υλικού διαφορετικών ελαστικών ιδιοτήτων. Ο ρόλος των αριθμητικών μοντέλων μπορεί να είναι διττός:

- Οι αριθμητικές μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της ανακατανομής των τάσεων στους στύλους αντί της μεθόδου της συνεισφέρουσας επιφάνειας. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται σε καταστάσεις όπου οι συνθήκες σε μία εκμετάλλευση είναι αρκετά περίπλοκες και δεν μπορεί να εφαρμοστεί η θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας. Η χρήση τους, ωστόσο, απαιτεί να γίνουν γενικεύσεις για την περιοχή ενδιαφέροντος.
- Οι αριθμητικές μέθοδοι μπορούν επίσης να αξιοποιηθούν ως εργαλείο σχεδιασμού. Υπάρχουν διάφορα λογισμικά μοντελοποίησης ικανά να προβλέψουν και να

αναλύσουν την απόκριση μιας βραχομάζας, απλά εισάγοντας τα κριτήρια αστοχίας και τις παραμέτρους αντοχής της βραχομάζας.

Τα αριθμητικά μοντέλα για να προσομοιάσουν την ακριβέστερη δυνατή συμπεριφορά των στύλων, απαιτούν την εισαγωγή των *in situ* δεδομένων της βραχομάζας. Τα *in situ* δεδομένα αποτελούνται από τις *in situ* τασικές συνθήκες (που μπορούν είτε να υπολογιστούν είτε να εκτιμηθούν), τη γεωμετρία της εκμετάλλευσης, τα χαρακτηριστικά της βραχομάζας και τις ελαστικές σταθερές.

2.4.2 Εκτίμηση της αντοχής των στύλων

Στο παρελθόν στην πλειονότητα των μεταλλείων, οι διαστάσεις των θαλάμων και των στύλων βασίζονταν στην εμπειρία από δεδομένα παρόμοιων, ασταθών και μη, εκμεταλλεύσεων. Μέσω του «ανάστροφου υπολογισμού» (*back-calculation*), δηλαδή της ανάλυσης της αστοχίας των στύλων, και αξιοποιώντας δεδομένα από τέτοιες εκμεταλλεύσεις όπως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των στύλων, την αντοχή δοκιμών πετρώματος και το τασικό πεδίο που ασκούνταν σε αυτούς, αναπτύχθηκαν σταδιακά ποικίλες εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού της αντοχής των στύλων σε θλίψη.

Πολλοί ερευνητές ανά τα χρόνια έχουν προτείνει σχέσεις για τη μοντελοποίηση συγκεκριμένων γεωλογικών δομών και συνθηκών, με την πλειονότητα να αφορά στύλους άνθρακα και ιζηματογενών πετρωμάτων. Περιορισμένες είναι, όμως, οι έρευνες που έχουν γίνει για την εκτίμηση της αντοχής στύλων σκληρών πετρωμάτων. Αυτό οφείλεται μερικώς στο γεγονός πως ελάχιστα τέτοια ορυχεία αναπτύσσονται σε βάθη ικανά να προκαλέσουν τάσεις που θα κάνουν τους στύλους να αστοχήσουν και πως η διάταξη των στύλων στα περισσότερα από αυτά είναι ακανόνιστη, δυσχεραίνοντας τον ακριβή υπολογισμό της τάσης του κάθε στύλου (Martin and Maybee, 2000).

Η αποδοτικότητα των εμπειρικών σχέσεων μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική στον πρωτογενές σχεδιασμό, καθώς πολυάριθμα μεταλλεία έχουν σχεδιασθεί και εκμεταλλευτεί σύμφωνα με αυτές. Ωστόσο, οι εμπειρικές σχέσεις έχουν μερικές ευδιάκριτες αδυναμίες. Είτε οι γενικές κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού απαιτούν τη δημιουργία μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης για την επιλογή των καταλληλότερων διαστάσεων θαλάμων και στύλων, είτε η μεγάλη βαθμονόμηση των μοντέλων υποβάλλεται σε αυστηρούς περιορισμούς και παραδοχές που αφορούν κυρίως τους γεωλογικούς σχηματισμούς που συναντώνται και τις συνθήκες του τασικού πεδίου (Deliveris and Benardos, 2017).

Οι διάφοροι εμπειρικοί τύποι που αναπτύχθηκαν για τον προσδιορισμό της αντοχής των στύλων σε θλίψη βασίζονται σε ένα από τα εξής:

- την επίδραση του σχήματος (shape effect)
- την επίδραση του μεγέθους (size effect)
- το εμπειρικό κριτήριο αστοχίας βραχομάζας των Hoek & Brown (2002).

Αυτές οι τεχνικές λαμβάνουν υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των στύλων, τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας (αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, ασυνέχειες) και τον συντελεστή ασφαλείας για τον προσδιορισμό της αντοχής των στύλων. Συνήθως οι εμπειρικές σχέσεις έχουν την γενική μορφή της ακόλουθης εξίσωσης:

$$C_p = K \cdot \left[A + B \left(\frac{W_p^a}{H_p^b} \right) \right]$$

όπου:

C_p : η αντοχή του στύλου (MPa)

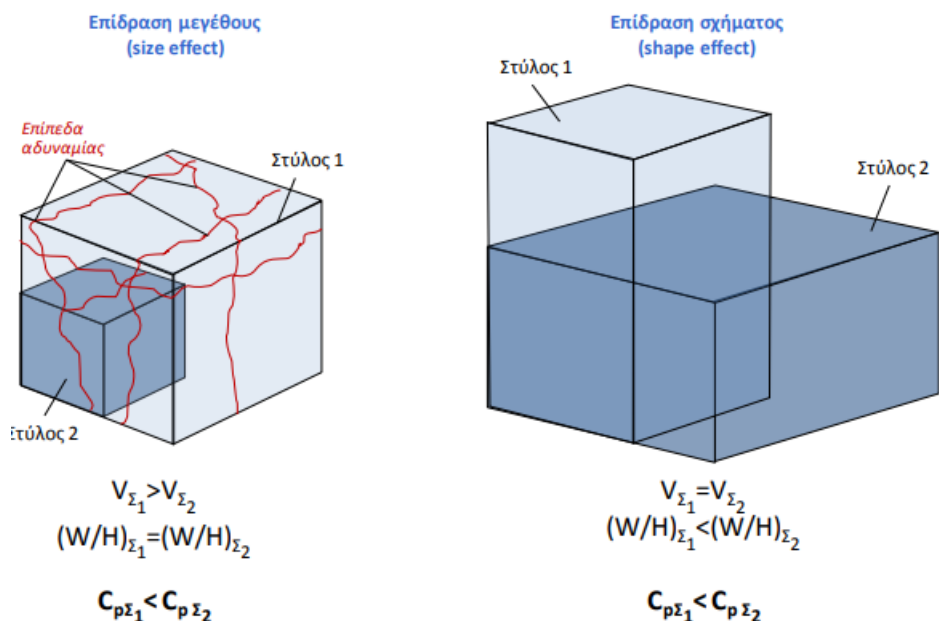
K : όρος που σχετίζεται με την αντοχή του υλικού του στύλου (MPa)

W_p : το πλάτος του στύλου (m)

H_p : το ύψος του θαλάμου (m)

A, B, a, b : εμπειρικά προερχόμενες σταθερές

Ανάλογα την επίδραση που λαμβάνει υπόψη η εκάστοτε εμπειρική σχέση, η γενικευμένη αυτή εξίσωση διαιρείται σε αυτήν του «size effect» και αυτήν του «shape effect». Η επίδραση του σχήματος (shape effect) θεωρεί τις εμπειρικά προερχόμενες σταθερές «a» και «b» ίσες, με αποτέλεσμα η αντοχή του στύλου να είναι ανεξάρτητη του όγκου του. Η επίδραση του μεγέθους (size effect) από την άλλη, θεωρεί τις σταθερές «a» και «b» διάφορες μεταξύ τους, έτσι ώστε για στύλους του ίδιου σχήματος η αντοχή τους να μειώνεται όσο αυξάνεται ο όγκος.



Σχήμα 2.4.2.1: Επίδραση του μεγέθους και του σχήματος στην τελική αντοχή του στύλου (Μπενάρδος και Καλλιαμπάκος, 2010)

Ο συντελεστής K (ή αλλιώς C_1), ο οποίος λαμβάνει υπόψη του την επίδραση του μεγέθους (size effect), εκφράζει την αντοχή του πετρώματος στην κλίμακα του στύλου. Ενδέχεται να παίρνει σταθερή τιμή (rock constant) όταν συγκεκριμένος σχηματισμός έχει αναλυθεί εκτενώς ή τιμή που λαμβάνεται από αντιπροσωπευτικά κυβικά δοκίμια του πετρώματος (δοκίμια με $w/h=1$) του στύλου που εξετάζεται. Τα δείγματα αυτά συνήθως υπερεκτιμούν την αντοχή αφού αναφέρονται κυρίως σε άρρηκτο πέτρωμα, κάτι το οποίο σπάνια συναντάται στην πραγματικότητα. Οι Kostak & Bielenstein (1971) βασιζόμενοι σε δείγματα εργαστηρίου, έδειξαν πως η μείωση της αντοχής προέκυπτε από την αύξηση του μεγέθους των δειγμάτων και την έκθεση αυτών σε μεγαλύτερο αριθμό δομικών ατελειών, ενώ οι Bieniawski (1975) και Denkhaus (1962) επεσήμαναν πως υπάρχει ένα κρίσιμο μέγεθος δείγματος πάνω από το οποίο η αύξηση των δομικών ελαττωμάτων, δεν έχει σημαντική επίδραση στην αντοχή των στύλων. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή K μπορούν να παρθούν τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών της αντοχής άρρηκτων δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη (UCS - σ_{ci}), μειωμένα κατά ένα συντελεστή απομείωσης της τάξης του 1/3 έως 2/3 (Ozbay et al. 1995; Iannacchione, 1999).

Ο λόγος W_p/H_p συνήθως παίρνει τιμές από 0,5 έως 4. Καθώς η αναλογία πλάτους/ύψους μειώνεται κάτω από 0,8, ο πλευρικός περιορισμός του στύλου πλησιάζει το 0 και ψαθυρή θραύση μπορεί να συμβεί στον άρρηκτο πυρήνα του στύλου. Για αυτό, λεπτοί στύλοι είναι πιθανότερο να αστοχήσουν (Esterhuizen et al., 2008).

2.4.2.1 Obert & Duvall (1967)

Οι Obert & Duvall (1967) αντλούν δεδομένα από μια σειρά δοκιμών αντοχής σε θλίψη που πραγματοποιήθηκε από τους Obert et al. (1946) σε δείγματα στύλων άνθρακα διαφορετικών σχημάτων (λόγων πλάτους προς ύψος). Έτσι, καθορίζουν την ακόλουθη σχέση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της αντοχής στύλου άνθρακα:

$$C_p = C_1 \cdot \left(0,778 + 0,222 \cdot \frac{W_p}{H_p} \right)$$

όπου:

C_p : η αντοχή του στύλου (MPa)

C_1 : η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη κυβικού δοκιμίου πετρώματος (MPa)

W_p : το πλάτος του στύλου (m)

H_p : το ύψος του στύλου (m)

Οι Obert & Duvall (1967) προτείνουν ο όρος « C_1 » να αναφέρεται στην αντοχή κυβικού δοκιμίου πετρώματος (πλάτος/ύψος=1), χωρίς όμως να προτείνουν κάποιο μέγεθος δοκιμίου. Αυτή η σχέση δεν περιλαμβάνει όρο που να υπολογίζει την επίδραση του μεγέθους στην αντοχή (size effect), για αυτό και οι Obert & Duvall συνιστούν συντελεστή ασφαλείας από 2 έως 4.

2.4.2.2 Lunder & Pakalnis (1997)

Οι Lunder & Pakalnis (1997), μετά από εξέταση κατανομών των τάσεων σε στύλους σκληρών πετρωμάτων, προτείνουν ένα σετ από εμπειρικά κριτήρια αντοχής για τον σχεδιασμό των στύλων. Σε αντίθεση με άλλους ερευνητές που μέχρι τότε εξέταζαν μόνο την επίδραση της σ_1 , προσπαθούν να συμπεριλάβουν μέσα στην εμπειρική σχέση τους και την επίδραση της πλευρικής τάσης σ_3 , επισημαίνοντας πως ο μέσος περιορισμός στον στύλο C_{pav} θα μπορούσε να εκφραστεί ως ο λόγος σ_3/σ_1 . Παρά την προσπάθειά τους, η σχέση τους δίνει τιμές αντοχής παρόμοιες με αυτές των υπόλοιπων εμπειρικών σχέσεων (Martin and Maybee, 2000). Πιο συγκεκριμένα, για «ψηλόλιγνους» στύλους ($W/H=0,5$) η αστοχία ξεκινά περίπου στο 1/3 της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη. Αντίστοιχα, για στύλους με $W/H > 1,5 - 2$ υπάρχει αύξηση της αντοχής του στύλου, καθώς ο πυρήνας του βρίσκεται υπό καθεστώς πλευρικού περιορισμού από το εξωτερικό τμήμα του στύλου, δηλαδή υπό

συνθήκες τριαξονικής φόρτισης και συνεπώς συμπεριφέρεται καλύτερα στις ασκούμενες τάσεις.

$$C_p = 0,44 \cdot UCS \cdot (0,68 + 0,52\kappa)$$

$$\kappa = \tan \left[\cos^{-1} \left(\frac{1 - C_{pav}}{1 + C_{pav}} \right) \right]$$

$$C_{pav} = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} = 0,46 \cdot \left(\log \left(\frac{W}{H} + 0,75 \right) \right)^{\frac{1,4}{(W/H)}}$$

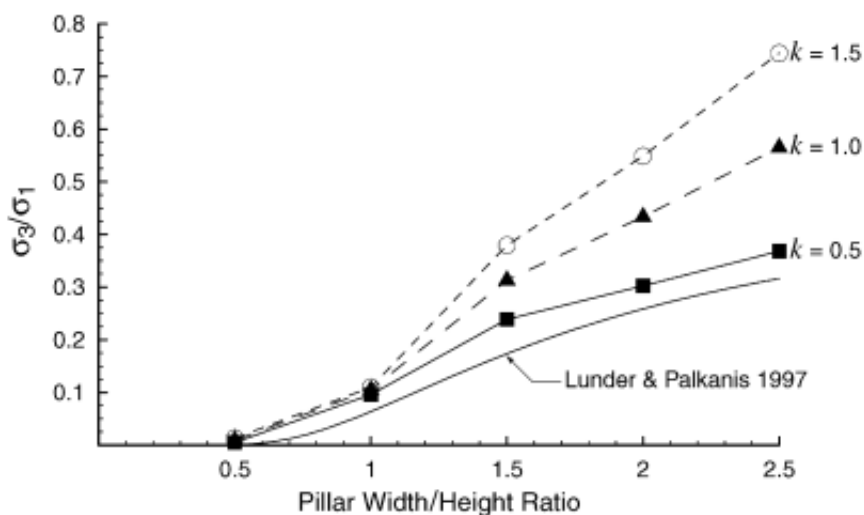
όπου,

UCS: η αντοχή άρρηκτου δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη (MPa)

κ: ο συντελεστής τριβής του στύλου της εκμετάλλευσης

C_{pav} : ο μέσος περιορισμός στον στύλο

Το Σχήμα 2.4.2.2.1 δείχνει ότι ο περιορισμός στους στύλους αυξάνεται σημαντικά για λόγους W/H μεγαλύτερους της μονάδας. Για λόγους μικρότερους της μονάδας, η επίδραση του κ μπορεί να αγνοηθεί.



Σχήμα 2.4.2.2.1: Η αύξηση του περιορισμού στο κέντρο του στύλου ως συνάρτηση των κ , C_{pav} και W/H (Lunder & Palkanis, 1997)

2.4.2.3 Esterhuizen et al. (2008)

Οι Esterhuizen et al. (2008) αναλύουν δεδομένα πρακτικών εξόρυξης και απόδοσης στύλων από ήδη υπάρχουσες εκμεταλλεύσεις σκληρών πετρωμάτων στις ανατολικές και μεσοδυτικές

Πολιτείες των Η.Π.Α και αναπτύσσουν μέσω back-calculation την ακόλουθη εμπειρική σχέση υπολογισμού της αντοχής των στύλων σε θλίψη:

$$C_p = 0,65 \cdot UCS \cdot \frac{w^{0,30}}{h^{0,59}}$$

όπου,

C_p : η αντοχή του στύλου (MPa)

UCS: η αντοχή άρρηκτου δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη (MPa)

w: το πλάτος του στύλου (m)

h: το ύψος του στύλου (m)

Παρά την ικανοποιητική συμφωνία των αποτελεσμάτων της παραπάνω εξίσωσης με την παρατηρούμενη απόδοση των στύλων των εκμεταλλεύσεων, οι Esterhuizen et al. (2008) κρίνουν πως η επίδραση των ασυνεχειών είναι αρκετά σημαντική για να μην συμπεριληφθεί στην σχέση τους. Η μείωση της αντοχής ενός στύλου που τέμνεται στο κεντρικό τμήμα του από μία ενιαία ασυνέχεια, εκφράζεται μέσω ενός παράγοντα που ονομάζεται discontinuity dip factor (DDF). Οι τιμές του παράγοντα αυτού, διαφοροποιούνται ανάλογα την κλίση της ασυνέχειας και τον λόγο πλάτους προς ύψος των στύλων. Από τα αποτελέσματα αριθμητικών μοντέλων προκύπτει ο ακόλουθος Πίνακας 2.4.2.3.1:

Πίνακας 2.4.2.3.1: Μεταβολές των τιμών του DDF ως συνάρτηση της κλίσης και του λόγου W_p/H_p (Esterhuizen et al., 2008)

Κλίση (°)	Λόγος πλάτους / ύψος στύλου								
	≤ 0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	> 1,2
30	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
40	0,23	0,26	0,27	0,27	0,25	0,24	0,23	0,23	0,22
50	0,61	0,65	0,61	0,53	0,44	0,37	0,33	0,30	0,28
60	0,94	0,86	0,72	0,56	0,43	0,34	0,29	0,26	0,24
70	0,83	0,68	0,52	0,39	0,30	0,24	0,21	0,20	0,18
80	0,53	0,41	0,31	0,25	0,20	0,18	0,17	0,16	0,16
90	0,31	0,25	0,21	0,18	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15

Οι τιμές του DDF ισχύουν για έναν στύλο που τέμνεται από μία μόνο ασυνέχεια. Οι πιθανότητες τομής για ένα εύρος συχνοτήτων ασυνεχειών ανά στύλο υπολογίζονται και παρουσιάζονται υπό τη μορφή του συντελεστή frequency factor (FF), οι τιμές του οποίου αποδίδονται στον Πίνακας 2.4.2.3.2:

Πίνακας 2.4.2.3.2: Οι τιμές του συντελεστή FF για μια σειρά από μέσες συχνότητες ασυνεχειών ανά στύλο (Esterhuizen et al., 2008)

Μέση συχνότητα ασυνεχειών ανά στύλο	Frequency Factor (FF)
0,0	0,00
0,1	0,10
0,2	0,18
0,3	0,26
0,5	0,39
1,0	0,63
2,0	0,86
3,0	0,95
> 3,0	1,00

Οι συντελεστές DDF και FF αξιοποιούνται στην ακόλουθη σχέση για να εκτιμήσουν τη μέση επίδραση των ασυνεχειών στην αντοχή των στύλων μίας διάταξης. Η σχέση αυτή ονομάζεται large discontinuity factor (LDF):

$$LDF = 1 - DDF \cdot FF$$

Η αναμενόμενη συχνότητα ασυνεχειών ανά στύλο υπολογίζεται διαιρώντας το πλάτος του στύλου με τη μέση απόσταση των ασυνεχειών. Έτσι, οι Esterhuizen et al. (2008) καταλήγουν στην εξής τελική μορφή της εμπειρικής σχέσης υπολογισμού της αντοχής των στύλων:

$$C_p = 0,65 \cdot UCS \cdot LDF \cdot \frac{w^{0,30}}{h^{0,59}}$$

Προτείνονται διατάξεις με τιμές συντελεστών ασφαλείας μεγαλύτερες του 1,8 και στύλοι με λόγους W_p/H_p μεγαλύτερους του 0,8.

Οι εμπειρικές σχέσεις που αναλύθηκαν παραπάνω παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακας 2.4.2.3.3:

Πίνακας 2.4.2.3.3: Εμπειρικές σχέσεις αντοχής στύλων

Ερευνητής	Αντοχή στύλου C_p (MPa)	Προτεινόμενος F
Obert & Duvall (1967)	$C_1 \cdot \left(0,778 + 0,222 \cdot \frac{W_p}{H_p}\right)$	2 - 4
Lunder & Pakalnis (1997)	$0,44 \cdot UCS \cdot (0,68 + 0,52\kappa)$ $\kappa = \tan \left[\cos^{-1} \left(\frac{1 - C_{pav}}{1 + C_{pav}} \right) \right]$ $C_{pav} = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} = 0,46 \cdot \left[\log \left(\frac{W}{H} + 0,75 \right) \right]^{\frac{1,4}{(W/H)}}$	$> 1,4$
Esterhuizen et al. (2008)	$0,65 \cdot UCS \cdot LDF \cdot \frac{W_p^{0,3}}{H_p^{0,59}}$	$> 1,8$

2.4.2.4 Εμπειρικό κριτήριο των Hoek & Brown

Οι Hoek & Brown (1980) προτείνουν, αρχικά, ένα εμπειρικό κριτήριο για τον προσδιορισμό της αντοχής της βραχομάζας, όπως φαίνεται στην εξίσωση:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{[(m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3) + (s \cdot \sigma_c^2)]}$$

όπου,

σ_1 = η μέγιστη κύρια τάση (MPa)

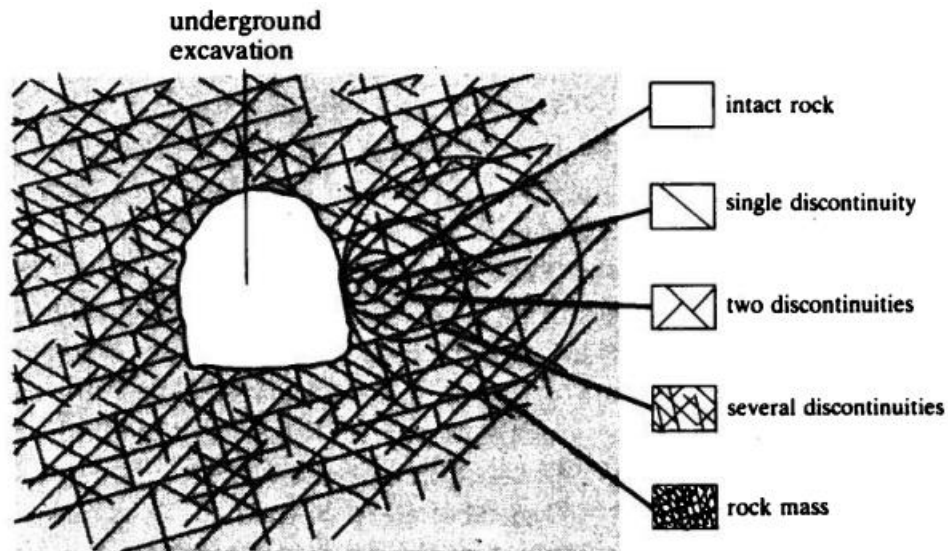
σ_3 = η ελάχιστη κύρια τάση (MPa)

σ_c = η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου υλικού της βραχομάζας (MPa)

m, s = εμπειρικά προερχόμενες σταθερές που βασίζονται στην ποιότητα της βραχομάζας του υλικού του στύλου

Το εμπειρικό κριτήριο των Hoek-Brown έχει ενημερωθεί αρκετές φορές μετά την πρώτη του διατύπωση, καθώς πρέπει να αντιμετωπιστούν ορισμένοι πρακτικοί περιορισμοί (Hoek and Brown 1988; Hoek et al. 1992, 1995, 2002). Οι ενημερώσεις αυτές περιλαμβάνουν κυρίως προσαρμογές για τη βελτίωση της εκτίμησης της αντοχής της βραχομάζας. Μια βασική ενημέρωση είναι η αναφορά της «γενικευμένης» μορφής του κριτηρίου (Hoek et al. 1995):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$



Σχήμα 2.4.2.4.1: Εξιδανικευμένη απεικόνιση της μετάβασης από την άρρηκτη στην έντονα διαταραγμένη από ασυνέχειες βραχόμαζα με αυξανόμενο μέγεθος δείγματος (Hoek & Brown, 1980)

Ο όρος m_b εισάγεται για τη διαταραγμένη βραχόμαζα. Ο αρχικός όρος m επαναξιολογείται και φαίνεται ότι εξαρτάται από την ορυκτολογία, τη σύνθεση και το μέγεθος των κόκκων της άρρηκτης βραχομάζας (Hoek et al. 1992). Ο εκθετικός όρος a προστίθεται για να αντιμετωπιστεί η μεροληψία του συστήματος προς τα σκληρά πετρώματα και να ληφθούν καλύτερα υπόψη οι φτωχότερες ποιοτικά βραχομάζες, επιτρέποντας τη ρύθμιση της καμπυλότητας της περιβάλλουσας καμπύλης αστοχίας, ιδιαίτερα κάτω από πολύ χαμηλές ορθές τάσεις (Hoek et al. 1992).

Ο Γεωλογικός Δείκτης Αντοχής (GSI) εισάγεται στη συνέχεια μαζί με διάφορες σχέσεις που σχετίζονται με τα m_b , s και a , με τη συνολική δομή της βραχομάζας (ή το βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχωδών τεμαχών) και την κατάσταση των επιφανειών των ασυνχειών (Hoek et al. 1995).

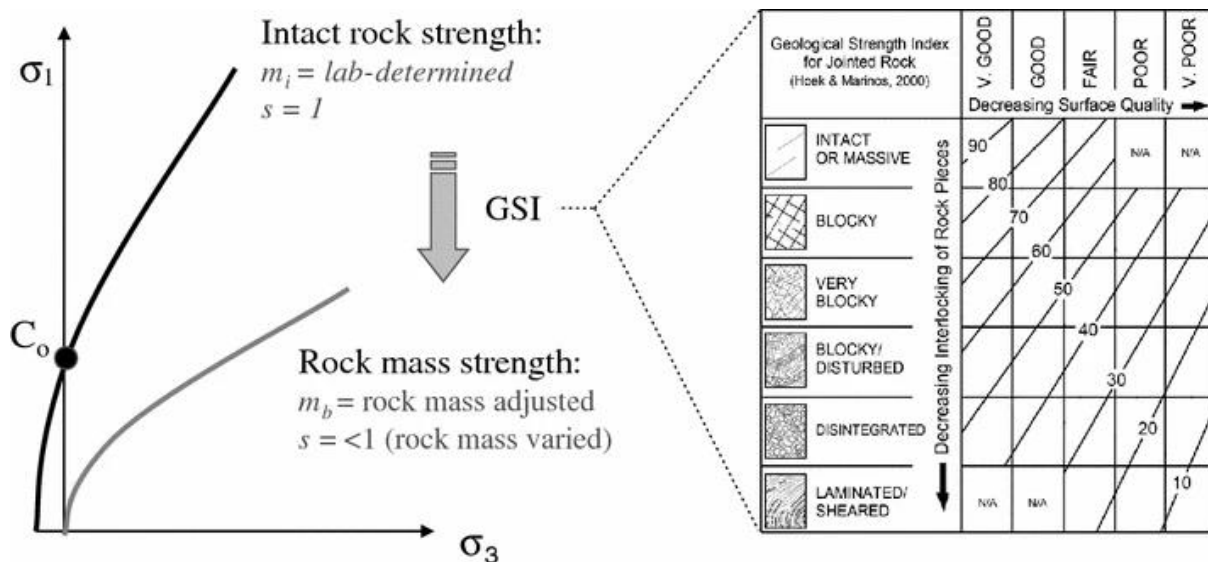
Το 2002, οι Hoek et al. επανεξετάζουν τις σχέσεις μεταξύ του GSI και των m_b , s και a , και εισάγουν έναν νέο παράγοντα D που εξαρτάται από το βαθμό της διαταραχής που έχει υποστεί η βραχόμαζα λόγω των εκρήξεων και της χαλάρωσης λόγω των τάσεων. Η τιμή του κυμαίνεται από $D = 0$ για αδιατάρακτη in situ βραχόμαζα έως $D = 1$ για πολύ διαταραγμένη βραχόμαζα. Αυτή η έκδοση του κριτηρίου αντιπροσωπεύει την τελευταία σημαντική αναθεώρηση του συστήματος Hoek-Brown. Οι σχέσεις που αναφέρθηκαν έχουν ως εξής:

$$m_b = m_i \cdot e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)}$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} + e^{-\frac{20}{3}} \right)$$

Από τα παραπάνω, ο όρος m_i είναι μια παράμετρος προσαρμογής καμπύλης που προέρχεται από την τριαξονική δοκιμή άρρηκτης βραχομάζας. Η παράμετρος m_b είναι μια μειωμένη τιμή της m_i , η οποία αντιπροσωπεύει τη μείωση στην αντοχή της βραχομάζας όπως ορίζεται από το GSI (Σχήμα 2.4.2.4.2). Οι προσαρμογές των s και a γίνονται σύμφωνα με τη τιμή GSI, που εκτιμάται από το διάγραμμα των Marinos et al. (2005). Αν και υπάρχουν σχέσεις για τη μετατροπή των RMR89 και Q σε GSI (βλ. Hoek et al. 1995), ο Hoek (2007) συνιστά να εκτιμάται απευθείας το GSI μέσω των διαγραμμάτων που δημοσιεύονται για τη χρήση του.



Σχήμα 2.4.2.4.2: Κλιμάκωση της περιβάλλουσας καμπύλης αστοχίας Hoek - Brown για αντοχή αδιατάρακτου πετρώματος σε αντοχή διαταραγμένης βραχομάζας (Marinos et al., 2005)

3 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΩΝ ΜΑΡΜΑΡΟΥ

Μεταξύ άλλων, η ευστάθεια μιας υπόγειας εκμετάλλευσης εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των βραχομαζών και από τις διαστάσεις των θαλάμων και των στύλων. Στην πρώτη περίπτωση τα χαρακτηριστικά είναι συγκεκριμένα για κάθε βραχώμαζα και δεν μπορούν να μεταβληθούν, ενώ στη δεύτερη μπορούν να μεταβληθούν κατάλληλα ανάλογα με τις απαιτήσεις ασφαλείας.

3.1 Στοιχεία λατομικού χώρου

Ένας σωστός σχεδιασμός ξεκινά από την μελέτη του λατομικού και του ευρύτερου χώρου. Δεδομένα από υπόγειες εκμεταλλεύσεις μαρμάρων λαμβάνονται υπόψη και δημιουργείται ένα πρότυπο περιβάλλον μέσα στο οποίο εξετάζεται η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στην ευστάθεια της εκμετάλλευσης.

3.1.1 Καθορισμός υπερκείμενων στρωμάτων

Ο καθορισμός των περιβαλλόντων πετρωμάτων αποτελεί το πρώτο βήμα για τον σχεδιασμό μιας εκμετάλλευσης. Η εμφάνιση του προς εκμετάλλευση μαρμαροφόρου κοιτάσματος θεωρείται πως βρίσκεται κάτω από υπερκείμενα πετρώματα σχιστόλιθου και μαρμάρου (μη εμπορικά εκμεταλλεύσιμου) σχετικά μικρού πάχους με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Υπερκείμενα σχιστόλιθου:
 - i. Πάχος: $h_{\text{σχιστ}} = 20\text{m}$
 - ii. Ειδικού βάρους: $\gamma_{\text{σχιστ}} = 25 \text{ kN/m}^3$
2. Υπερκείμενα μαρμάρου:
 - i. Πάχος: $h_{\text{μαρμ}} = 20\text{m}$
 - ii. Ειδικού βάρους: $\gamma_{\text{μαρμ}} = 27,5 \text{ kN/m}^3$

3.1.2 Καθορισμός παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας

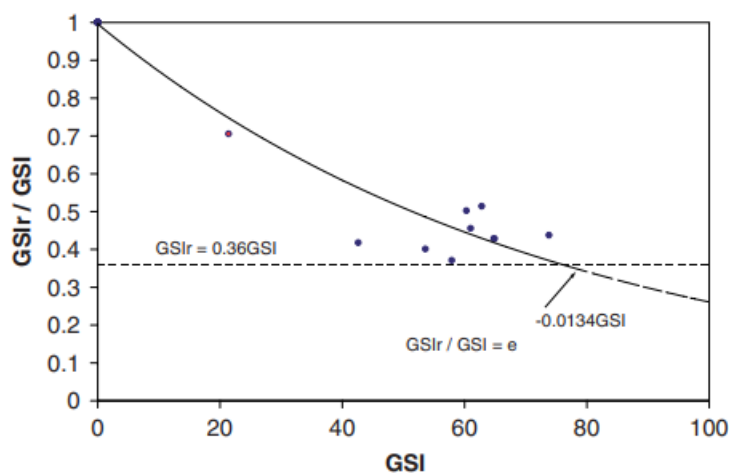
Για την εκτίμηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας μιας δεδομένης βραχομάζας μέσω του κριτηρίου Hoek-Brown, απαιτείται ο προσδιορισμός τριών ιδιοτήτων που την χαρακτηρίζουν: (Hoek, 2007)

- Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_{ci} των άρρηκτων τεμαχών του πετρώματος,

- Η τιμή της σταθεράς m_i για αυτά τα τεμάχια,
- Η τιμή του GSI της βραχομάζας.

Η συμπεριφορά όλων των βραχομαζών θεωρείται ελαστοπλαστική, με αποτέλεσμα να απαιτείται ο προσδιορισμός των παραμενουσών (residuals) τιμών m_{br} , s_r και a_r . Οι κατευθυντήριες γραμμές που δίνονται από το σύστημα GSI αφορούν την εκτίμηση των παραμέτρων της μέγιστης αντοχής της διαταραγμένης βραχομάζας, ενώ δεν υπάρχουν κατευθυντήριες γραμμές από το GSI, ή από οποιοδήποτε άλλο σύστημα, για την εκτίμηση της παραμένουσας αντοχής της που να παρέχουν συνεπή αποτελέσματα. Σε αυτή την απουσία βασίστηκαν οι Cai et al. (2007) και πρότειναν μια μέθοδο για την επέκταση του συστήματος GSI για την εκτίμηση της παραμένουσας αντοχής μιας βραχομάζας. Προτείνεται η προσαρμογή της μέγιστης τιμής GSI στην παραμένουσα τιμή GSI_r με βάση τους δύο κύριους παράγοντες ελέγχου του συστήματος GSI: τον υπολειπόμενο όγκο μπλοκ (residual block volume) V_b^r και τον υπολειπόμενο παράγοντα κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών (residual joint condition factor) J_c^r . Η παραμένουσα τιμή GSI_r μπορεί να εκφραστεί εμπειρικά ως συνάρτηση της μέγιστης τιμής GSI ως εξής:

$$GSI_r = GSI \cdot e^{-0,0134 \cdot GSI}$$



Σχήμα 3.1.2.1: Σχέση μεταξύ του λόγου GSI_r/GSI και του GSI (Cai et al., 2007)

Οι εκτιμώμενες παραμένουσες αντοχές, που υπολογίζονται με τη χρήση της απομειωμένης παραμένουσας τιμής GSI_r , συμφωνούν κατά πολύ με τις δοκιμές του πεδίου και τα δεδομένα που αναλύθηκαν εκ των υστέρων (Cai et al., 2007).

Με βάση την παραπάνω εξίσωση προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.1.2.1. Γίνεται φανερό πως στο εύρος 60-95 των τιμών του GSI, η παραμένουσα τιμή GSI_r ισούται με 27.

Εκτός από την εκτίμηση της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος και της βραχομάζας, η ανάλυση της συμπεριφοράς μιας εκμετάλλευσης απαιτεί επίσης την εκτίμηση του συντελεστή παραμόρφωσης της βραχομάζας στην οποία γίνονται οι εκσκαφές. Στη συγκεκριμένη μελέτη αξιοποιείται η ακόλουθη εξίσωση των Hoek and Diederichs (2006) για την εκτίμηση του συντελεστή παραμόρφωσης της βραχομάζας:

$$E_{rm} = E_i \cdot \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{[(60+15D-GSI)/11]}} \right)$$

Εισάγοντας τα απαιτούμενα δεδομένα στο λογισμικό RS2 της RocScience και πιο συγκεκριμένα στο GSI Calculator, υπολογίζονται οι υπόλοιπες τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την εκάστοτε βραχομάζα.

Πίνακας 3.1.2.1: Μεταβολή του GSI_r ως συνάρτηση των τιμών του GSI

GSI	GSI_r
100	26,18457
95	26,59909
90	26,94532
85	27,21182
80	27,38585
75	27,45335
70	27,39869
65	27,20463
60	26,85211
55	26,32011
50	25,58543
45	24,62255
40	23,40336
35	21,89697
30	20,06942
25	17,88345
20	15,29816
15	12,26869
10	8,745901
5	4,675976

0	0
---	---

Τα δεδομένα για τη βραχώμαζα του σχιστόλιθου θα είναι σταθερά σε κάθε ανάλυση, ως εξής:

- $UCS_{\sigma\chi\iota\sigma\tau} = 65 \text{ MPa}$
- $GSI_{\sigma\chi\iota\sigma\tau} = 60$
- $m_{i\sigma\chi\iota\sigma\tau} = 12$
- $E_{i\sigma\chi\iota\sigma\tau} = 40000 \text{ MPa}$
- $m_{b\sigma\chi\iota\sigma\tau} = 2,876$
- $s_{\sigma\chi\iota\sigma\tau} = 0,0117436$
- $a_{\sigma\chi\iota\sigma\tau} = 0,5028$
- $E_{r\mu\sigma\chi\iota\sigma\tau} = 20800 \text{ MPa}$
- $GSI_{r\mu\sigma\chi\iota\sigma\tau} = 27$
- $m_{i r\mu\sigma\chi\iota\sigma\tau} = 12$
- $m_{r\mu\sigma\chi\iota\sigma\tau} = 0,885$
- $s_{r\mu\sigma\chi\iota\sigma\tau} = 0,0003002$
- $a_{r\mu\sigma\chi\iota\sigma\tau} = 0,5273$
- $E_{r\epsilon\sigma\sigma\chi\iota\sigma\tau} = 2697 \text{ MPa}$
- $\mu_{\sigma\chi\iota\sigma\tau} = 0,25$

Οι γεωτεχνικές παράμετροι των βραχομαζών μαρμάρου των Παραμετρικών Αναλύσεων θα παρατίθενται κατόπιν της εκάστοτε ανάλυσης. Αξίζει να σημειωθεί πως ο παράγοντας διαταραχής (disturbance factor - D) για κάθε μοντέλο και κάθε είδους βραχώμαζα θεωρείται σταθερός και ίσος με το μηδέν, και η επιρροή των υπόγειων υδάτων δεν λαμβάνεται υπόψη θεωρώντας ότι όλες οι βραχομάζες είναι στραγγισμένες (drained).

3.2 Κατηγορίες παραμετρικών αναλύσεων

Μετά από εξέταση στύλων σε ήδη υπάρχουσες εκμεταλλεύσεις μαρμαροφόρων κοιτασμάτων, παρατηρείται πως υπάρχει ευαισθησία γύρω από συγκεκριμένες παραμέτρους. Με γνώμονα την εξέταση της συμπεριφοράς των στύλων υπό αυτές τις παραμέτρους, διακρίνονται οι εξής Ομάδες Αναλύσεων:

- Α' Ομάδα Αναλύσεων: Εξέταση της συμπεριφοράς των στύλων υπό την παραμετροποίηση του λόγου πλάτους/ύψους (W_p/H_p)

- Β' Ομάδα Αναλύσεων: Εξέταση της συμπεριφοράς των στύλων υπό την παραμετροποίηση της αντοχής άρρηκτου δοκιμίου μαρμάρου σε μονοαξονική θλίψη (UCS)
- Γ' Ομάδα Αναλύσεων: Εξέταση της συμπεριφοράς των στύλων υπό την παραμετροποίηση του δείκτη GSI
- Δ' Ομάδα Αναλύσεων: Εξέταση της συμπεριφοράς των στύλων υπό την επίδραση δικτύου ασυνεχειών
- Ε' Ομάδα Αναλύσεων: Εξέταση της συμπεριφοράς των στύλων υπό την παραμετροποίηση του πλάτους των θαλάμων (W_T)

Πιο συγκεκριμένα, για κάθε Ομάδα Αναλύσεων διακρίνονται οι εξής υπό περιπτώσεις:

A' Ομάδα Αναλύσεων

Η Α' Ομάδα Αναλύσεων αξιολογεί τη συμπεριφορά των στύλων ως προς το λόγο πλάτους/ύψος (W_p/H_p). Επιλέγεται άνοιγμα θαλάμων $W_T = 15\text{m}$, πλάτος $W_p = 15\text{m}$ και μήκος στύλου $L_p = 15\text{m}$. Οι τετραγωνικοί στύλοι αρχικού ύψους $H_p = 6\text{m}$, μετά από δημιουργία benches των 6m , πρόκειται να φτάσουν σταδιακά το συνολικό ύψος των 30m . Η δημιουργία κάθε νέου bench ορίζει και μία ανάλυση και στο σύνολό τους ορίζουν την Α' Ομάδα Αναλύσεων. Οι αναλύσεις της Α' Ομάδας και οι λόγοι W_p/H_p που τους αντιστοιχούν έχουν ως εξής:

- A.1: $H_p = 6\text{m}$, επομένως $W_p/H_p \rightarrow 2,5$
- A.2: $H_p = 12\text{m}$, επομένως $W_p/H_p \rightarrow 1,25$
- A.3: $H_p = 18\text{m}$, επομένως $W_p/H_p \rightarrow 0,8333$
- A.4: $H_p = 24\text{m}$, επομένως $W_p/H_p \rightarrow 0,625$
- A.5: $H_p = 30\text{m}$, επομένως $W_p/H_p \rightarrow 0,5$

Για τα μεγέθη των θαλάμων και των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων, ο συντελεστής απόληψης υπολογίζεται ως:

$$R = 1 - \left[\frac{15}{(15 + 15)} \right]^2 = 0,75$$

Για τη βραχόμαζα του μαρμάρου της Α' Ομάδας Αναλύσεων ισχύουν τα ακόλουθα:

- $UCS_{\text{μαρμ}} = 90 \text{ MPa}$
- $GSI_{\text{μαρμ}} = 70$
- $m_{\text{μαρμ}} = 9$

- $E_{\text{μαρμ}} = 55000 \text{ MPa}$
- $m_{\text{βμαρμ}} = 3,083$
- $s_{\text{μαρμ}} = 0,0356740$
- $a_{\text{μαρμ}} = 0,5014$
- $E_{\text{Γμαρμ}} = 40304,8 \text{ MPa}$
- $GSI_{\text{Γμαρμ}} = 27$
- $m_{\text{ιΓμαρμ}} = 9$
- $m_{\text{Γμαρμ}} = 0,664$
- $s_{\text{Γμαρμ}} = 0,0003002$
- $a_{\text{Γμαρμ}} = 0,5273$
- $E_{\text{resμαρμ}} = 3708,4 \text{ MPa}$
- $\mu_{\text{μαρμ}} = 0,25$

B' Ομάδα Αναλύσεων

Η Β' Ομάδα Αναλύσεων αξιολογεί τη συμπεριφορά των στύλων ως προς την αντοχή άρρηκτου δοκιμίου μαρμάρου σε μονοαξονική θλίψη (UCS). Κατά τον ίδιο τρόπο με την Α' Ομάδα Αναλύσεων, η προχώρηση γίνεται κατά βάθος σε πέντε φάσεις των 6m και τα μεγέθη των θαλάμων και των στύλων παραμένουν σταθερά ($W_r = 15\text{m}$, $W_p = 15\text{m}$, $L_p = 15\text{m}$). Με βάση τις τιμές της UCS που εξετάζονται και τον λόγο W_p/H_p διακρίνονται οι εξής αναλύσεις:

- **B.1 Υποομάδα Αναλύσεων: UCS = 110 MPa**

1. $W_p/H_p = 2,5$
2. $W_p/H_p = 1,25$
3. $W_p/H_p = 0,8333$
4. $W_p/H_p = 0,625$
5. $W_p/H_p = 0,5$

- **B.2 Υποομάδα Αναλύσεων: UCS = 130 MPa**

1. $W_p/H_p = 2,5$
2. $W_p/H_p = 1,25$
3. $W_p/H_p = 0,8333$
4. $W_p/H_p = 0,625$
5. $W_p/H_p = 0,5$

Λόγω ίδιου GSI (70), οι υπόλοιπες τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχομάζας μαρμάρου των αναλύσεων της Β' Ομάδας είναι ίδιες με αυτές της Α' Ομάδας Αναλύσεων που παρατέθηκαν προηγουμένως.

Γ' Ομάδα Αναλύσεων

Η Γ' Ομάδα Αναλύσεων αξιολογεί τη συμπεριφορά των στύλων ως προς τον γεωλογικό δείκτη GSI. Κατά τον ίδιο τρόπο με τις προηγούμενες Ομάδες Αναλύσεων, η προχώρηση γίνεται κατά βάθος σε πέντε φάσεις των 6m και τα μεγέθη των θαλάμων και των στύλων παραμένουν σταθερά ($W_r = 15m$, $W_p = 15m$, $L_p = 15m$). Η Γ' Ομάδα Αναλύσεων διαιρείται σε δύο υποομάδες. Σε κάθε υποομάδα η αντοχή του άρρηκτου δοκιμίου μαρμάρου σε μονοαξονική θλίψη είναι σταθερή ($UCS = 90MPa$) και γίνεται παραμετροποίηση ως προς τον GSI. Κατά αυτόν τον τρόπο προκύπτουν οι αναλύσεις:

- **Γ.1 Υποομάδα Αναλύσεων: GSI = 75**

1. $W_p/H_p = 2,5$
2. $W_p/H_p = 1,25$
3. $W_p/H_p = 0,8333$
4. $W_p/H_p = 0,625$
5. $W_p/H_p = 0,5$

- **Γ.2 Υποομάδα Αναλύσεων: GSI = 80**

1. $W_p/H_p = 2,5$
2. $W_p/H_p = 1,25$
3. $W_p/H_p = 0,8333$
4. $W_p/H_p = 0,625$
5. $W_p/H_p = 0,5$

Για τη βραχομάζα μαρμάρου της υποομάδας Γ.1 ισχύουν τα εξής:

- $GSI_{μαρμ} = 75$
- $m_{iμαρμ} = 9$
- $E_{iμαρμ} = 55000 MPa$
- $m_{bμαρμ} = 3,685$
- $s_{μαρμ} = 0,0621765$
- $a_{μαρμ} = 0,5009$
- $E_{rτiμαρμ} = 44899,3 MPa$

- $GSI_{\text{μαρμ}} = 27$
- $m_{i\text{μαρμ}} = 9$
- $m_{\text{μαρμ}} = 0,664$
- $s_{\text{μαρμ}} = 0,0003002$
- $a_{\text{μαρμ}} = 0,5273$
- $E_{\text{resμαρμ}} = 3708,4 \text{ MPa}$
- $\mu_{\text{μαρμ}} = 0,25$

Για τη βραχομάζα μαρμάρου της υποομάδας Γ.2 ισχύουν τα ακόλουθα:

- $GSI_{\text{μαρμ}} = 80$
- $m_{i\text{μαρμ}} = 9$
- $E_{i\text{μαρμ}} = 55000 \text{ MPa}$
- $m_{b\text{μαρμ}} = 4,406$
- $s_{\text{μαρμ}} = 0,1083680$
- $a_{\text{μαρμ}} = 0,5006$
- $E_{\text{r}\text{μαρμ}} = 48419,1 \text{ MPa}$
- $GSI_{\text{μαρμ}} = 27$
- $m_{i\text{μαρμ}} = 9$
- $m_{\text{μαρμ}} = 0,664$
- $s_{\text{μαρμ}} = 0,0003002$
- $a_{\text{μαρμ}} = 0,5273$
- $E_{\text{resμαρμ}} = 3708,4 \text{ MPa}$
- $\mu_{\text{μαρμ}} = 0,25$

Δ' Ομάδα Αναλύσεων

Η Δ' Ομάδα Αναλύσεων αξιολογεί τη συμπεριφορά των στύλων ως προς την παρουσία δικτύου ασυνεχειών εντός της δομής τους. Κατά τον ίδιο τρόπο με τις προηγούμενες Ομάδες Αναλύσεων, η προχώρηση γίνεται κατά βάθος σε πέντε φάσεις των 6m και τα μεγέθη των θαλάμων και των στύλων παραμένουν σταθερά ($W_r = 15\text{m}$, $W_p = 15\text{m}$, $L_p = 15\text{m}$). Οι γεωτεχνικές παράμετροι της βραχομάζας της Δ' Ομάδας Αναλύσεων είναι ίδιες με τις αντίστοιχες της Α' Ομάδας (ίδιο UCS, ίδιο GSI). Η μόνη διαφορά μεταξύ τους έγκειται στο γεγονός πως στη Δ' Ομάδα Αναλύσεων οι εξεταζόμενοι στύλοι βρίσκονται υπό την επίδραση

ενός δικτύου ασυνεχειών. Επομένως, οι αναλύσεις της Δ' Ομάδας και οι λόγοι W_p/H_p που τους αντιστοιχούν έχουν ως εξής:

1. $W_p/H_p = 2,5$
2. $W_p/H_p = 1,25$
3. $W_p/H_p = 0,8333$
4. $W_p/H_p = 0,625$
5. $W_p/H_p = 0,5$

Από τις αναλύσεις των αριθμητικών μοντέλων του Iannacchione (1999), παρατηρείται πως η αντοχή των δοκιμίων παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή για κλίση ασυνεχειών ίση με $\beta_{min} = 45^\circ + \varphi_d/2$. Στον ίδιο άξονα οι Esterhuizen et al. (2011), επισημαίνουν πως για γωνία τριβής 30° και καθώς η κλίση της ασυνέχειας αυξάνεται από τις 30° στις περίπου 60° , η επίδρασή της στην αντοχή του στύλου αυξάνεται. Έχοντας υπόψη τα παραπάνω και θέλοντας να μελετηθεί η δυσχερέστερη δυνατή επίδραση των ασυνεχειών στην ευστάθεια των στύλων, αποφασίζεται γωνία τριβής ίση με $\varphi_d = 30^\circ$ και κλίση ασυνεχειών ίση με 60° . Το δίκτυο των ασυνεχειών είναι τύπου “Parallel Deterministic”, η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών ορίζεται στα 5m, η αρχική τοποθέτησή τους στον χώρο τυχαία και το μήκος τους απεριόριστο μέσα στη βραχώμαζα του μαρμάρου. Τα άκρα των ασυνεχειών θεωρούνται ανοιχτά στις διεπαφές τους τόσο με την επιφάνεια όσο και με τις εκσκαφές. Αναφορικά με τις ιδιότητες των ασυνεχειών, αυτές υπακούν στο κριτήριο ολίσθησης των Mohr – Coulomb. Από δεδομένα παρόμοιων εκμεταλλεύσεων, οι μηχανικές ιδιότητες των ασυνεχειών αποφασίζονται να έχουν ως εξής:

- Tensile Strength: 0 (+MPa)
- Peak Cohesion: 0,5 (+MPa)
- Peak Friction Angle: 30 (deg)
- Normal Stiffness: 100000 (MPa/m)
- Shear Stiffness: 10000 (MPa/m)

Η παραμένουσα αντοχή των ασυνεχειών θεωρείται μηδενική, η αρχική παραμόρφωση των ασυνεχειών ενεργή και επιπλέον πίεση εντός των ασυνεχειών ίση με την πίεση των πόρων των υπόγειων υδάτων.

Ε' Ομάδα Αναλύσεων

Η Ε' Ομάδα Αναλύσεων αξιολογεί τη συμπεριφορά των στύλων ως προς το πλάτος των θαλάμων (W_r). Όπως και στις προηγούμενες Ομάδες Αναλύσεων, η προχώρηση γίνεται κατά βάθος σε πέντε φάσεις των 6m. Τα μεγέθη των στύλων παραμένουν σταθερά ($W_p = 15m$, $L_p = 15m$), αλλά γίνεται παραμετροποίηση ως προς το πλάτος των θαλάμων. Έτσι, διακρίνονται οι εξής δύο υποομάδες και οι αναλύσεις που τους αντιστοιχούν:

- **E.1 Υποομάδα Αναλύσεων: $W_r = 10m$**

1. $W_p/H_p = 2,5$
2. $W_p/H_p = 1,25$
3. $W_p/H_p = 0,8333$
4. $W_p/H_p = 0,625$
5. $W_p/H_p = 0,5$

- **E.2 Υποομάδα Αναλύσεων: $W_r = 20m$**

6. $W_p/H_p = 2,5$
7. $W_p/H_p = 1,25$
8. $W_p/H_p = 0,8333$
9. $W_p/H_p = 0,625$
10. $W_p/H_p = 0,5$

Για τις υποομάδες E.1 και E.2, οι συντελεστές απόληψης υπολογίζονται ως:

$$R_{E.1} = 1 - \left[\frac{15}{(10 + 15)} \right]^2 = 0,64$$

$$R_{E.2} = 1 - \left[\frac{15}{(20 + 15)} \right]^2 = 0,82$$

Οι βραχομάζες μαρμάρου των E.1 και E.2 Υποομάδων είναι ίδιες με τη βραχομάζα της Α' Ομάδας.

3.3 Προσομοίωση των εγκάρσιων εκσκαφών στη δισδιάστατη ανάλυση

Παρά την ικανοποιητική απόδοση της θεωρίας της συνεισφέρουσας επιφάνειας και των εμπειρικών σχέσεων στον πρωτογενή σχεδιασμό, το πεδίο εφαρμογής τους είναι αρκετά περιορισμένο. Η σύσταση νέων μεθόδων ανάλυσης, όπως η αριθμητική μοντελοποίηση, προσφέρει πλέον ένα νέο επίπεδο λεπτομέρειας στις τάξεις των μηχανικών.

Ακόμα κι έτσι, η μέθοδος των θαλάμων και στύλων είναι αρκετά δύσκολο να προσομοιωθεί ικανοποιητικά σε αριθμητικά μοντέλα επιπέδων παραμόρφωσης 2D, καθώς η προσομοίωση εγκάρσιων εκσκαφών στις αρχικές παράλληλες μετατοπίσεις παραβιάζει την υπόθεση επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain), μιας και οι πρώτες βρίσκονται μπροστά από το επίπεδο της δισδιάστατης ανάλυσης. Η αρχή της μεθόδου των θαλάμων και στύλων έχει τρισδιάστατη όψη, καθώς οι εγκάρσιες εκσκαφές βρίσκονται στην κατεύθυνση εκτός επιπέδου (Parakonstantinou and Benardos, 2014).

Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα δύνανται να δώσουν τα τρισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα που προσομοιάζουν ακριβώς την απόκριση της βραχομάζας στην επιβολή της μεθόδου εκμετάλλευσης των θαλάμων και στύλων. Ωστόσο, η χρήση τους δεν είναι αρκετά διαδεδομένη μιας και είναι πολύ υπολογιστικά δαπανηρή και χρονοβόρα, κάτι που εμποδίζει την εφαρμογή τους στον συνηθισμένο σχεδιασμό της εκμετάλλευσης (Vlachopoulos and Diederichs, 2014).

Αρκετές ερευνητικές προσπάθειες έχουν γίνει, κατά το παρελθόν, για την προσομοίωση της επίδρασης του τρίτου επιπέδου στα δισδιάστατα αριθμητικά μοντέλα, με τις περισσότερες από αυτές να περιορίζονται στην αριθμητική προσομοίωση μέρους του μεγέθους ενός στύλου. Οι Deliveris and Benardos (2017) επιχείρησαν να διερευνήσουν τη χρήση προσεγγιστικών τεχνικών αριθμητικής προσομοίωσης 2D για την αξιολόγηση της γεωμηχανικής απόκρισης λιγνιτικών στύλων, που διαμορφώνονται με τη μέθοδο των θαλάμων και στύλων. Οι τεχνικές προσέγγισης που αξιοποίησαν είναι δύο από τις δημοφιλέστερες τεχνικές και έχουν ως εξής:

A. Τεχνική επιβολής εξωτερικού φορτίου q

Η συγκεκριμένη τεχνική βασίζεται στην ακόλουθη πρόταση: πριν από την εκτέλεση και προσομοίωση των εγκάρσιων εκσκαφών μπορεί να βρεθεί η μέση ορθή τάση σ_p στον διαμήκη στύλο με σχετική ακρίβεια από τα αποτελέσματα της δισδιάστατης αριθμητικής ανάλυσης των τάσεων.

Η μέση ορθή τάση σ_p είναι περίπου ίση με τη μέση τιμή που λαμβάνεται από την κατανομή της κύριας τάσης σ_1 σε όλο το πλάτος της δομής του στύλου. Μόλις ολοκληρωθούν οι εγκάρσιες εκσκαφές και τελικά διαμορφωθεί ο στύλος, η μέση ενεργή ορθή τάση που ασκείται στον στύλο μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση από τη θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας ως εξής:

$$\sigma'_p = \sigma_v \cdot \left(1 + \frac{W_R}{W_p}\right)^2$$

όπου σ_v : η κατακόρυφη in-situ τάση (MPa)

Η προσομοίωση των εγκάρσιων εκσκαφών μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της εφαρμογής ενός εξωτερικού ομοιόμορφου επιφανειακού φορτίου στην περιοχή που προβάλλεται ακριβώς πάνω από τον στύλο σε ένα μεταγενέστερο στάδιο της διαδικασίας μοντελοποίησης. Το μέγεθος αυτού του εξωτερικού φορτίου q μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι απλώς η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο υπολογισμένων μέσων ορθών τάσεων, της μίας πριν και της άλλης μετά την ολοκλήρωση των εγκάρσιων εκσκαφών, ως εξής:

$$q = \sigma'_p - \sigma_p$$

B. Τεχνική επαύξησης των ειδικών βαρών των υπερκειμένων

Η συγκεκριμένη μέθοδος συνιστά την αύξηση των ειδικών βαρών των υλικών της περιοχής που προβάλλεται ακριβώς πάνω από τον στύλο. Τα νέα ειδικά βάρη (γ') των υπερκειμένων υπολογίζονται ως εξής:

$$\gamma' = \gamma \left(1 + \frac{W_r}{W_p}\right)$$

όπου,

γ : τα πραγματικά ειδικά βάρη των υπερκειμένων υλικών (MN/m²)

W_r : το πλάτος του θαλάμου (m)

W_p : το πλάτος του στύλου (m)

Από τη συγκριτική αξιολόγηση των παραπάνω τεχνικών με την επίδοση του πιο άμεσου και ακριβούς τρισδιάστατου αριθμητικού μοντέλου, οι Deliveris and Benardos (2017) καταλήγουν πως οι τεχνικές προσέγγισης 2D πλησιάζουν αρκετά καλά το πραγματικό τρισδιάστατο πρόβλημα. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνική του εξωτερικού φορτίου φαίνεται να πλησιάζει σε μεγαλύτερο βαθμό τα αντίστοιχα αποτελέσματα των τρισδιάστατων αναλύσεων.

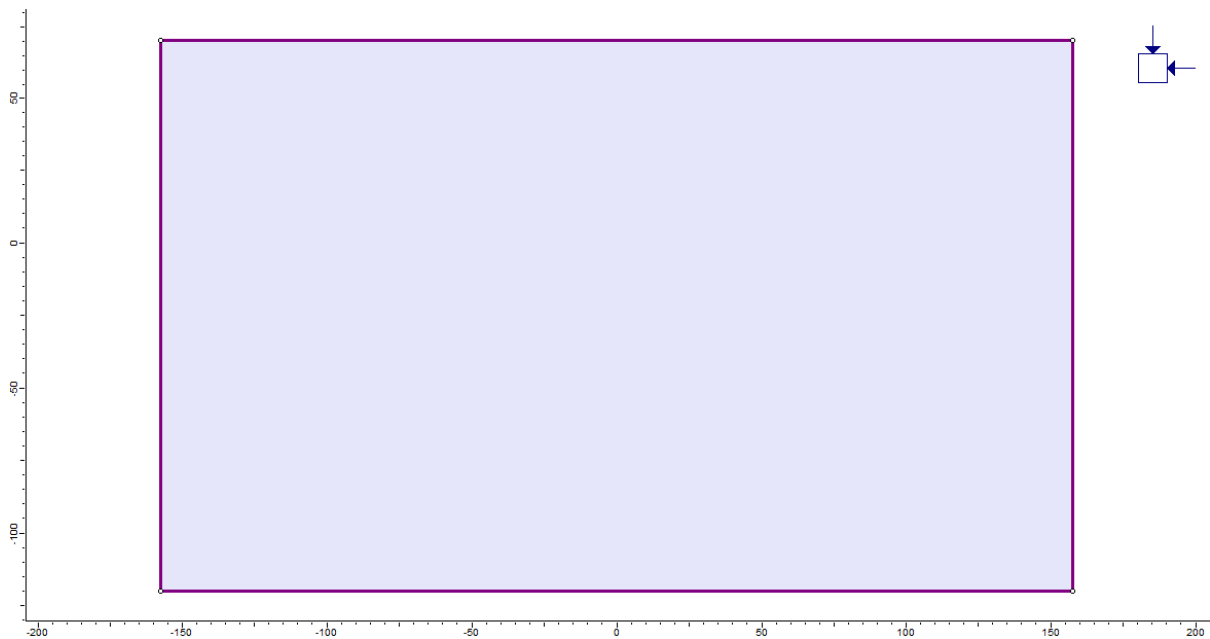
Με γνώμονα τα παραπάνω, είναι μείζονος σημασίας η πραγματοποίηση αντίστοιχης αξιολόγησης που να αφορά στύλους μαρμάρου κάτω από τις υπάρχουσες συνθήκες. Για τον σκοπό αυτό, θα αξιοποιηθούν οι στύλοι της Α' Ομάδας Αναλύσεων.

3.3.1 Ανάλυση στο RS2

3.3.1.1 Βήματα προσομοίωσης

Για την μοντελοποίηση των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων, χωρίς αξιοποίηση κάποιας προσεγγιστικής τεχνικής, ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- **Ρυθμίσεις του project:** Σε πρώτη φάση επιβεβαιώνεται ότι στο General tab των ρυθμίσεων (Analysis → Project Settings), οι μονάδες είναι μετρικές και οι τάσεις σε MPa. Στη συνέχεια ορίζεται ο αριθμός των σταδίων, όπως αυτά αναλύονται στην παράγραφο «Στάδια προσομοίωσης».
- **Σχεδιασμός του εξωτερικού πλαισίου:** Αρχικά ορίζεται το εξωτερικό πλαίσιο μέσα στο οποίο θα γίνει η δισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Boundaries → Add external). Έχοντας υπόψη πως τόσο οι στύλοι όσο και οι θάλαμοι είναι τετραγωνικής διατομής ($W_p = L_p = W_r = L_r = 15\text{m}$), οι συνολικές διαστάσεις της εκμετάλλευσης είναι $45\text{m} \times 30\text{m}$ (2 θάλαμοι και 1 στύλος). Αφήνοντας χώρο τριπλάσιο της εξεταζόμενης περιοχής (εκατέρωθεν της), το πλάτος του εξωτερικού πλαισίου είναι 315m και εκτείνεται από τα $-157,5\text{m}$ έως τα $157,5\text{m}$ (για να βρίσκεται στο $X=0$ ο πυρήνας του εξεταζόμενου στύλου). Αντίστοιχα το ύψος του εξωτερικού πλαισίου είναι 190m και εκτείνεται από τα 70m έως τα -120m . Επομένως, τα σημεία που ορίζουν το εξωτερικό πλαίσιο είναι:
 - Σημείο 1: $(-157,5, 70)$
 - Σημείο 2: $(157,5, 70)$
 - Σημείο 3: $(157,5, -120)$
 - Σημείο 4: $(-157,5, -120)$



Σχήμα 3.3.1.1.1: Σχεδιασμός εξωτερικού πλαισίου

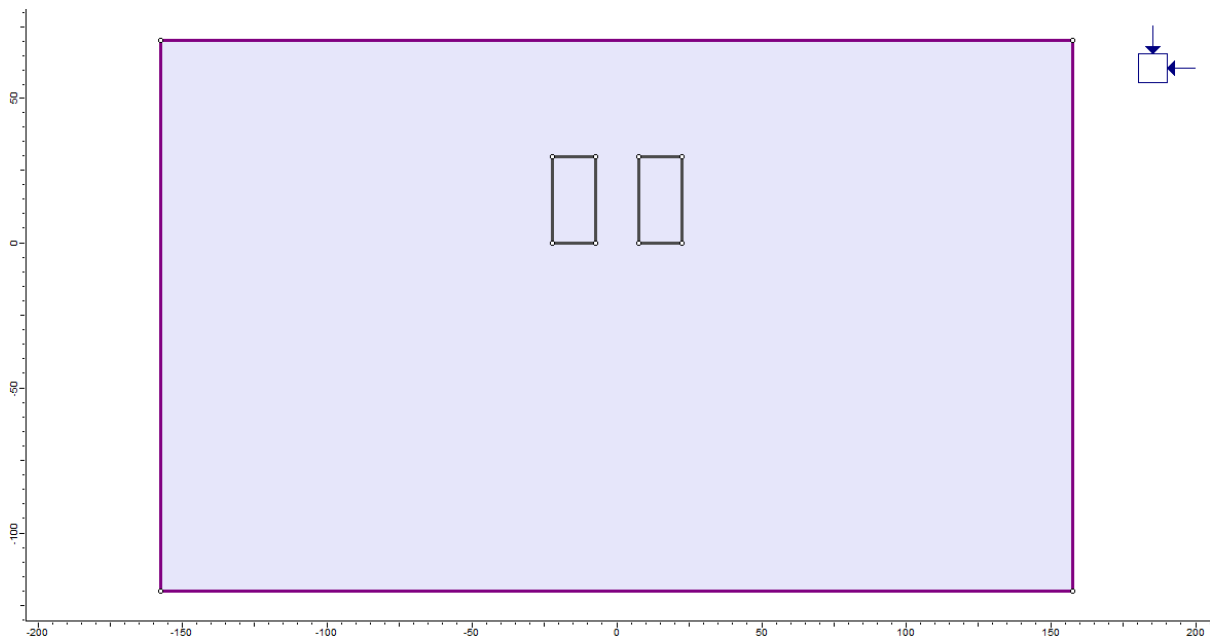
- **Σχεδιασμός των θαλάμων:** Στη συνέχεια, καθορίζονται οι περιοχές των θαλάμων που θα εκσκαφθούν εκατέρωθεν του στύλου, μέσω της εντολής Boundaries → Add Excavation. Πιο συγκεκριμένα, τα σημεία που ορίζουν τους θαλάμους είναι:

Αριστερός θάλαμος

- Σημείο 1: (-22,5 , 30)
- Σημείο 2: (-7,5 , 30)
- Σημείο 3: (-7,5 , 0)
- Σημείο 4: (-22,5 , 0)

Δεξιός θάλαμος

- Σημείο 1: (7,5 , 30)
- Σημείο 2: (22,5 , 30)
- Σημείο 3: (22,5 , 0)
- Σημείο 4: (7,5 , 0)



Σχήμα 3.3.1.1.2: Σχεδιασμός των θαλάμων

- **Καθορισμός των υλικών:** Σειρά έχει η εισαγωγή των γεωτεχνικών παραμέτρων για το υλικό της κάθε βραχομάζας (Properties → Define Materials). Τα υλικά είναι τρία: ο σχιστόλιθος, το μάρμαρο και το χαλαρωμένο μάρμαρο. Το χαλαρωμένο μάρμαρο έχει τις ίδιες γεωτεχνικές ιδιότητες με το υλικό του μαρμάρου με εξαίρεση το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου δοκιμίου (intact modulus – E_i). Στην περίπτωση του χαλαρωμένου μαρμάρου, το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου δοκιμίου λαμβάνεται απομειωμένο κατά 30% σε σχέση με το αντίστοιχο του μαρμάρου, έτσι ώστε να προσομοιώσει την χαλάρωση του θαλάμου πριν την κάθε εκσκαφή.
- **Εισαγωγή των ορίων των υλικών:** Έπειτα, σχεδιάζονται οι χώροι που προορίζονται για το εκάστοτε υλικό μέσω της εντολής Boundaries → Add Material, καθώς και τα όρια της περιοχής στην οποία θα επιβληθεί η κατάλληλη προσεγγιστική τεχνική σε επόμενη ανάλυση. Έτσι, τα σημεία που ορίζουν την κάθε περιοχή είναι τα εξής:

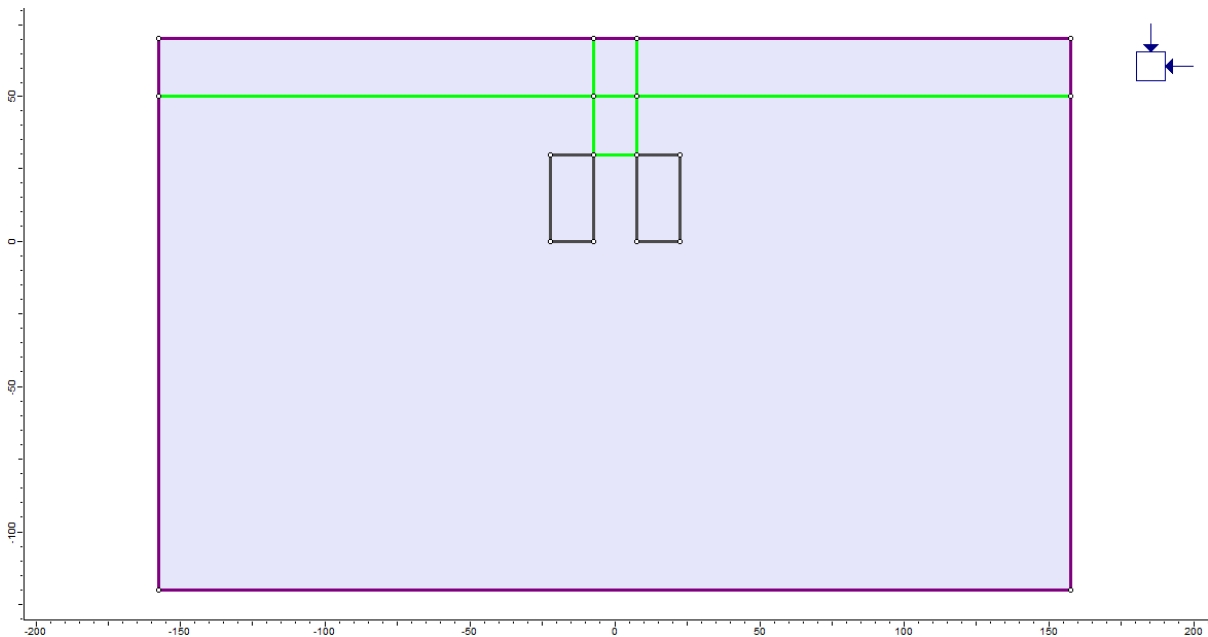
Όριο Σχιστόλιθου – Μαρμάρου

- Σημείο 1: (-157,5 , 50)
- Σημείο 2: (157,5 , 50)

Περιοχή επιβολής προσεγγιστικής τεχνικής

- Σημείο 1: (-7,5 , 70)
- Σημείο 2: (-7,5 , 30)
- Σημείο 3: (7,5 , 30)

- Σημείο 4: (7,5 , 70)



Σχήμα 3.3.1.1.3: Εισαγωγή των ορίων των υλικών

- **Εισαγωγή των ορίων των benches:** Εφόσον ο τελικός στύλος ύψους 30m σχηματίζεται μετά από τη δημιουργία benches των 6m, είναι σημαντικό να σχηματιστούν τα όρια της εκσκαφής του κάθε bench (Boundaries → Add Stage). Πιο συγκεκριμένα, τα σημεία που ορίζουν τα όρια αυτά είναι:

Αριστερός θάλαμος

Όριο 1st Bench - 2nd Bench

- Σημείο 1: (-22,5 , 24)
- Σημείο 2: (-7,5 , 24)

Όριο 2nd Bench - 3rd Bench

- Σημείο 1: (-22,5 , 18)
- Σημείο 2: (-7,5 , 18)

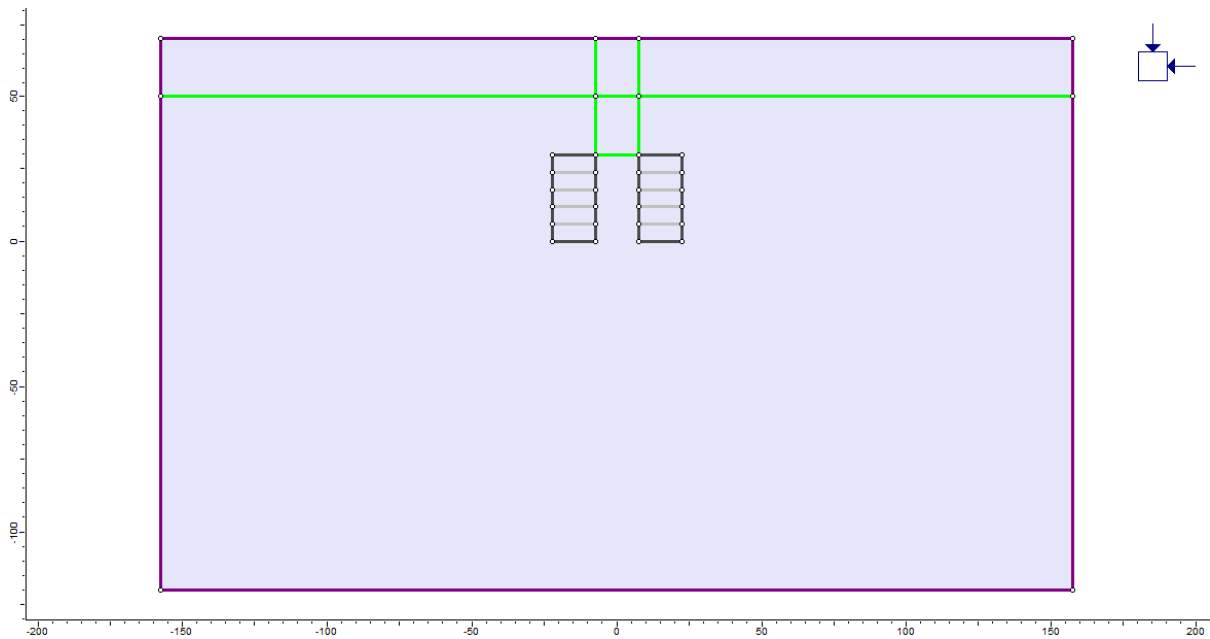
Όριο 3rd Bench - 4th Bench

- Σημείο 1: (-22,5 , 12)
- Σημείο 2: (-7,5 , 12)

Όριο 4th Bench – 5th Bench

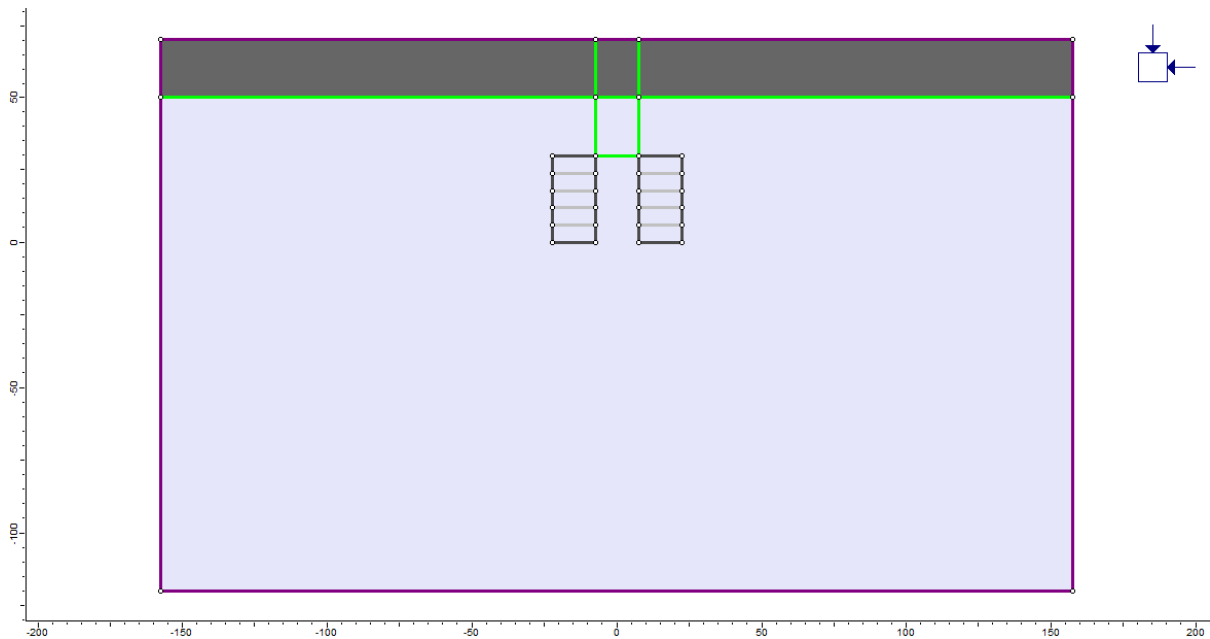
- Σημείο 1: (-22,5 , 6)
- Σημείο 2: (-7,5 , 6)

Αντίστοιχα ορίζονται και τα σημεία που αφορούν τον δεξιό θάλαμο.



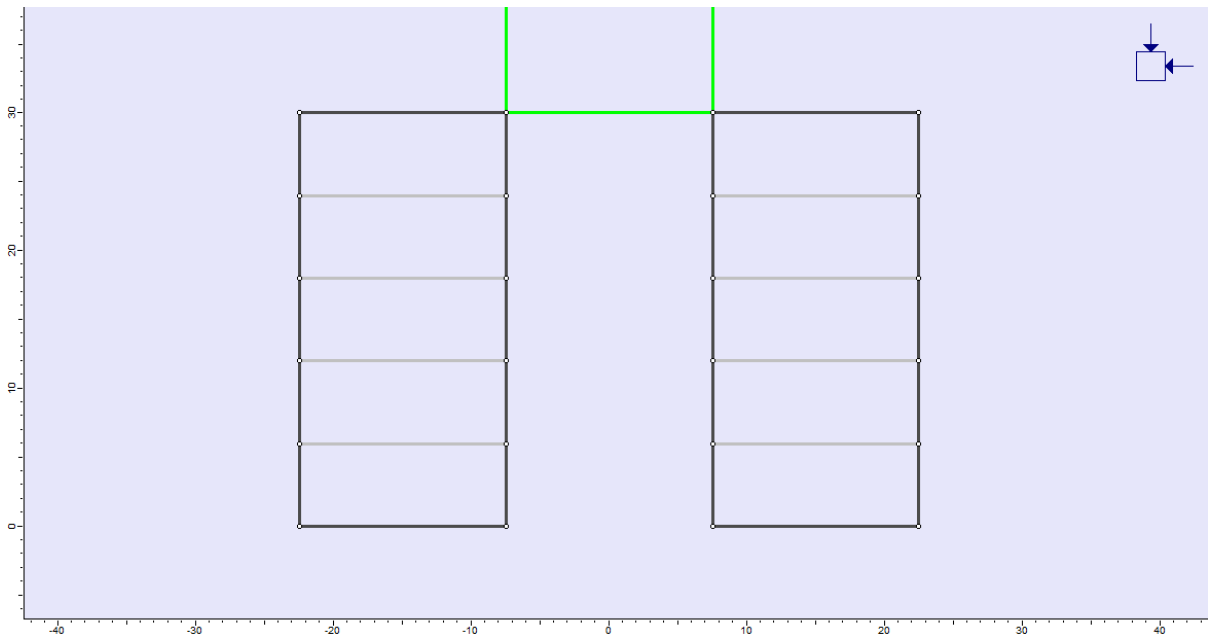
Σχήμα 3.3.1.1.4: Εισαγωγή των ορίων των benches

- **Εκχώρηση των υλικών:** Έχοντας καθορίσει τα όρια των εκσκαφών του κάθε bench, γίνεται η εκχώρηση των υλικών στις κατάλληλες θέσεις μέσω της εντολής Properties → Assign Properties. Η εκχώρηση αφορά τόσο τα υπερκείμενα πετρώματα όσο και το χαλαρωμένο μάρμαρο πριν την εκάστοτε εκσκαφή.

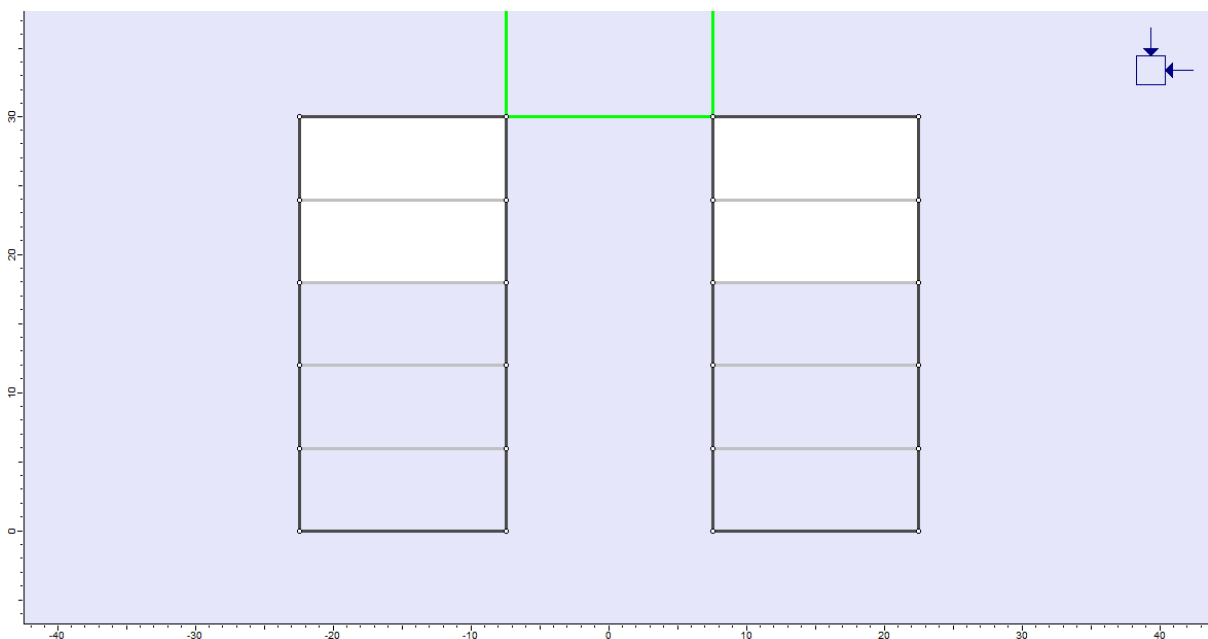


Σχήμα 3.3.1.1.5: Εκχώρηση των υλικών στις κατάλληλες θέσεις

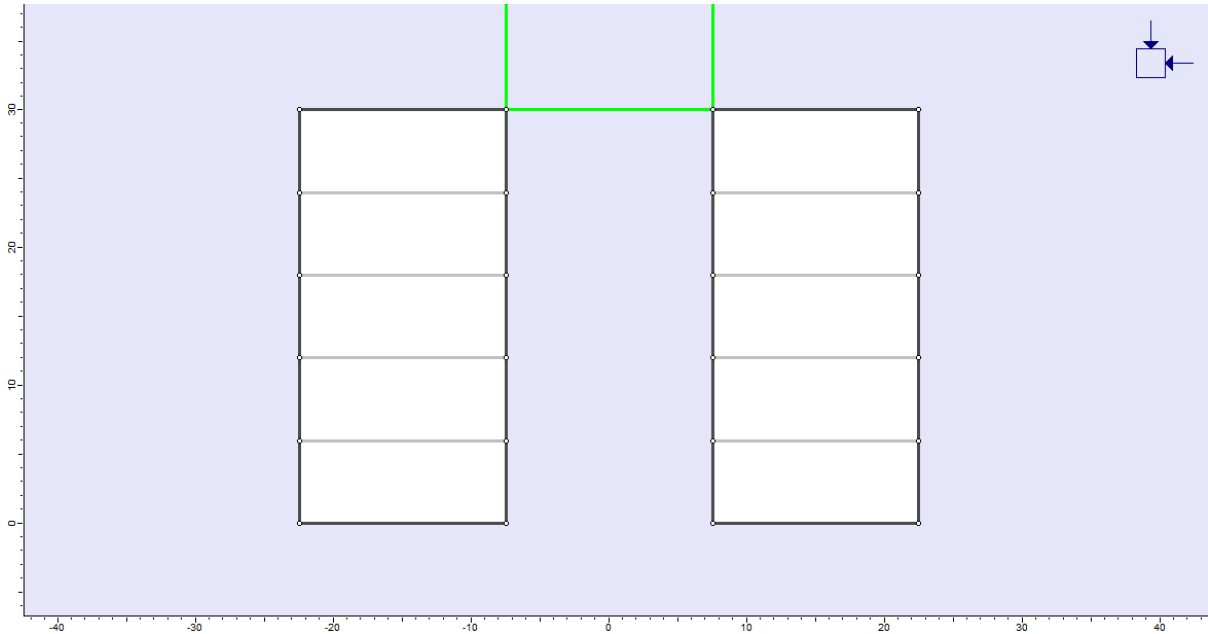
- **Εκσκαφή των θαλάμων:** Μετά την εκχώρηση των υλικών ακολουθεί η εκσκαφή των θαλάμων (Properties → Assign Properties → Excavate). Η σειρά με την οποία γίνονται οι εκσκαφές αναλύεται στην παράγραφο Στάδια προσομοίωσης.



Σχήμα 3.3.1.1.6: Η περιοχή ενδιαφέροντος πριν από οποιαδήποτε εκσκαφή (1^ο Στάδιο)

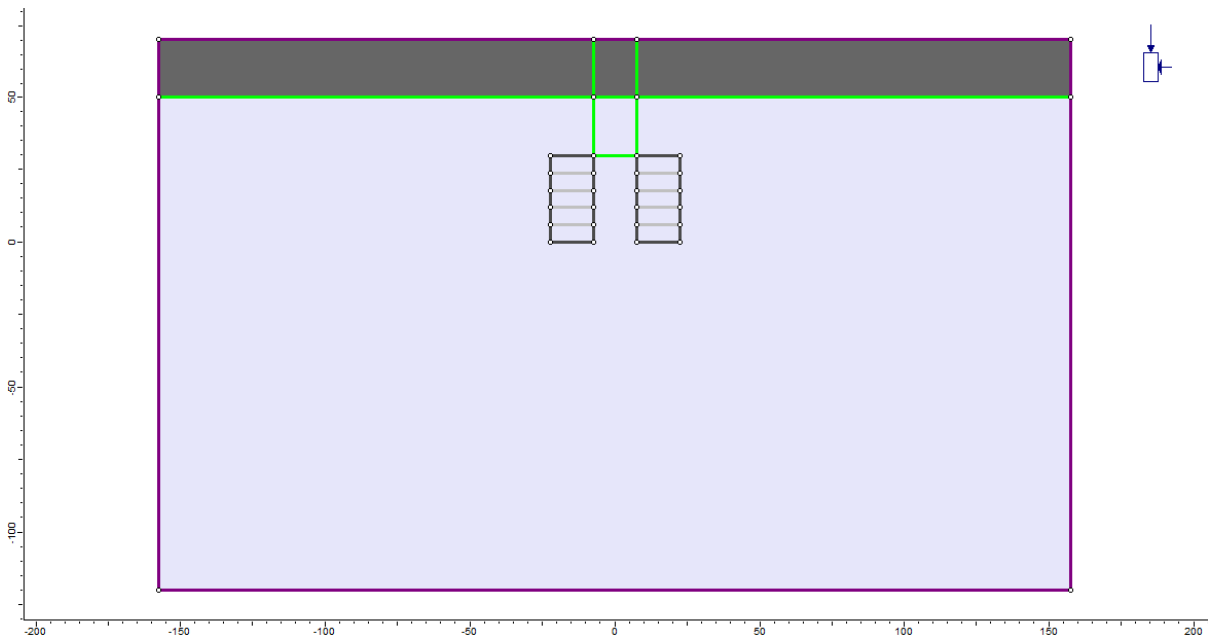


Σχήμα 3.3.1.1.7: Η περιοχή ενδιαφέροντος μετά την ολοκλήρωση του δεύτερου bench (1^ο Στάδιο)



Σχήμα 3.3.1.1.8: Η περιοχή ενδιαφέροντος μετά την ολοκλήρωση όλων των εκσκαφών (22^ο Στάδιο)

- Καθορισμός τασικού πεδίου:** Στον ίδιο άξονα, γίνεται η αλλαγή του τασικού πεδίου από υδροστατικό ($K=1$) σε ανισοτασικό ($K=0,5$). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εντολής Loading \rightarrow Field Stress, αλλάζοντας τις ενεργές αναλογίες τάσεων (τόσο τη horiz/vert in plane, όσο και τη horiz/vert out-of-plane) από 1 σε 0,5.



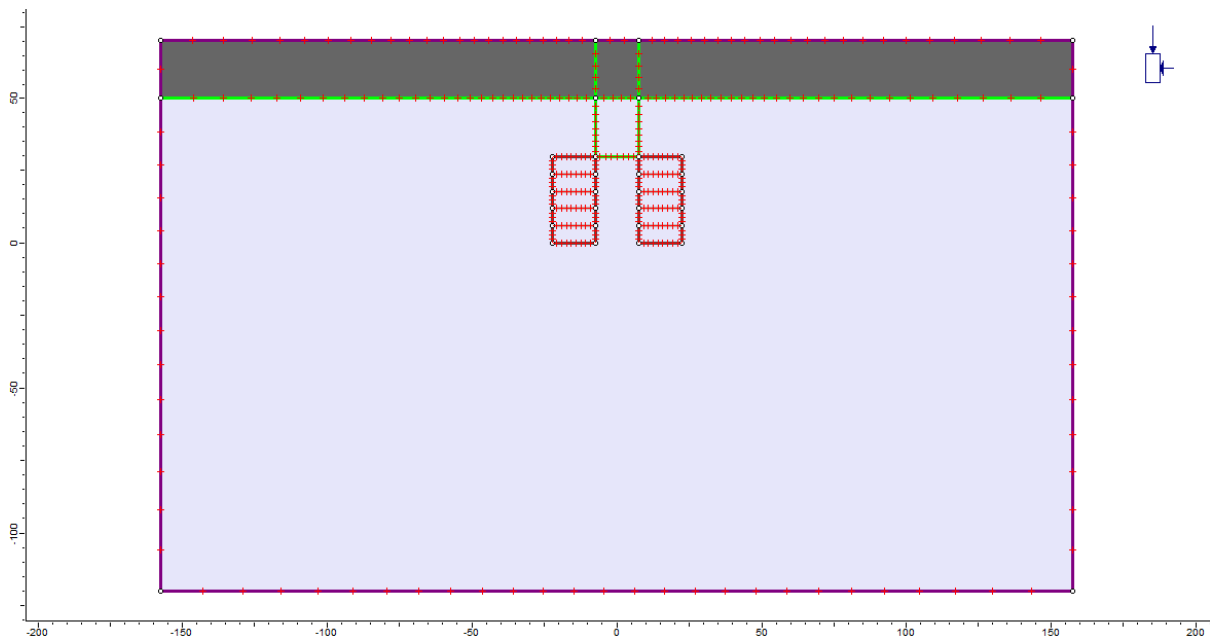
Σχήμα 3.3.1.1.9: Αλλαγή του τασικού πεδίου από υδροστατικό ($K=1$) σε ανισοτασικό ($K=0,5$)

- Διακριτοποίηση και δημιουργία πλέγματος:** Για την επίλυση του συνεχούς συστήματος με άπειρους βαθμούς ελευθερίας απαιτείται η διακριτοποίησή του σε πεπερασμένους βαθμούς ελευθερίας. Σκοπός της διακριτοποίησης είναι να χωρίσει το

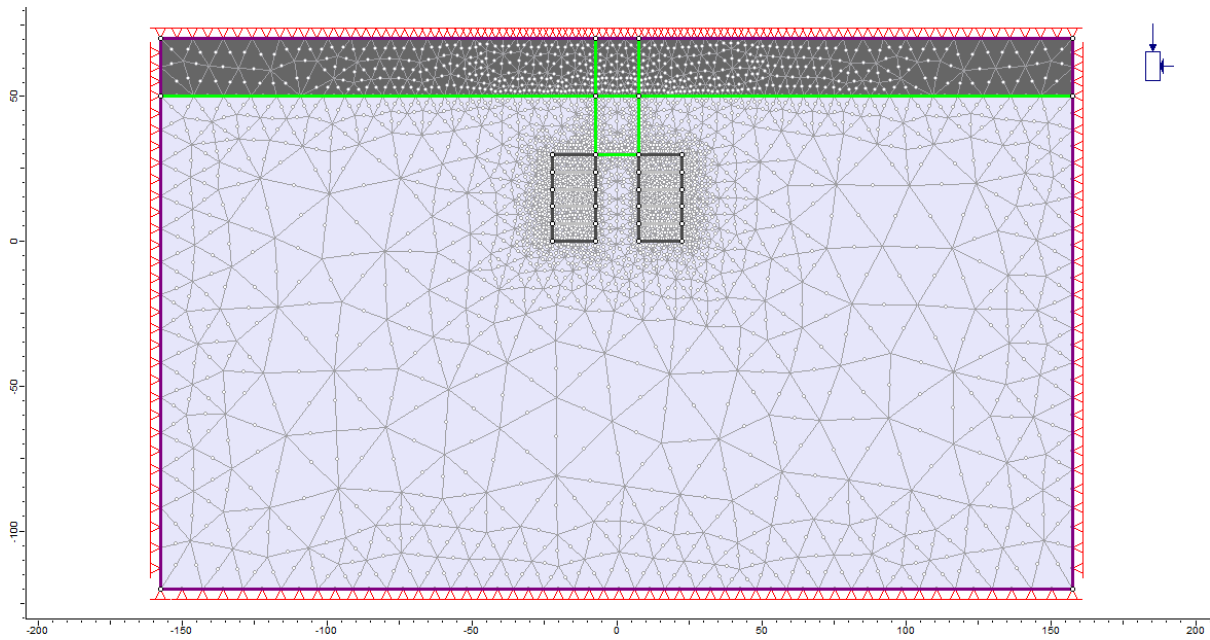
συνεχές αντικείμενο σε μικρά μέρη που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Τα σημεία που ενώνουν τα πεπερασμένα στοιχεία ονομάζονται κόμβοι και το σύνολο τους ονομάζεται πλέγμα (mesh). Στο παράθυρο διαλόγου Mesh → Mesh Setup αφήνονται όλα τα προεπιλεγμένα στοιχεία ως έχουν:

- Mesh Type: *Graded*
- Element Type: *6 Noded Triangles*
- Gradation Factor: *0,1*
- Default Number of All Nodes on All Excavations: *110*

και επιλέγεται η διακριτοποίηση και η δημιουργία πλέγματος (mesh).

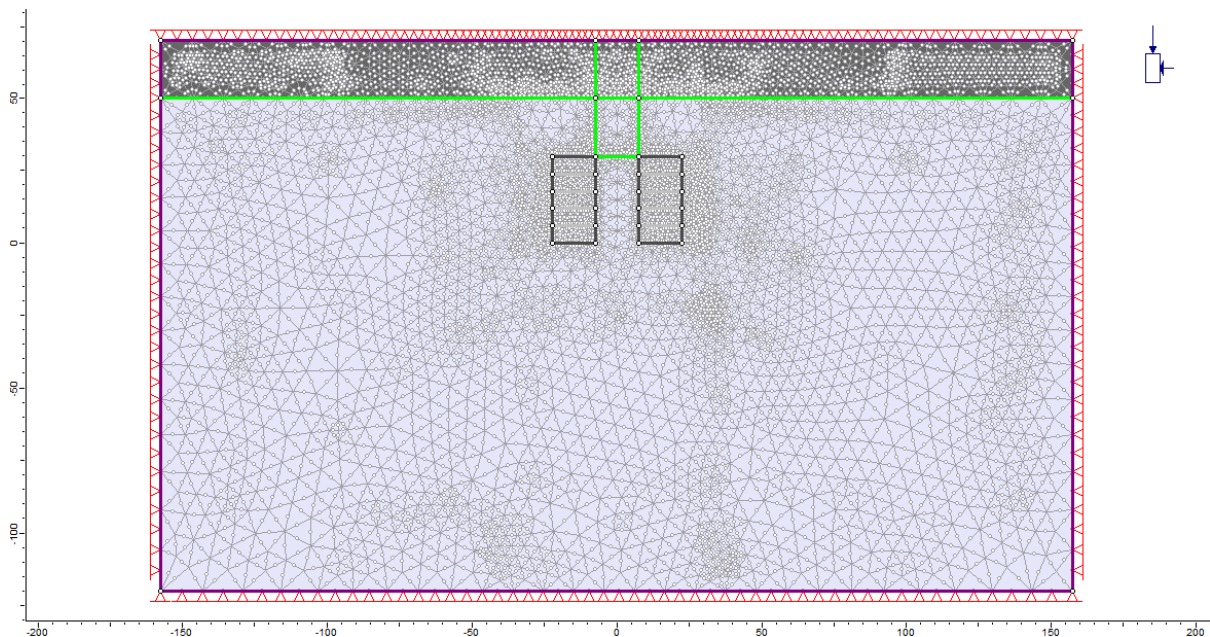


Σχήμα 3.3.1.1.10: Διακριτοποίηση του μοντέλου σε πεπερασμένους βαθμούς ελευθερίας



Σχήμα 3.3.1.1.11: Δημιουργία πλέγματος (meshing)

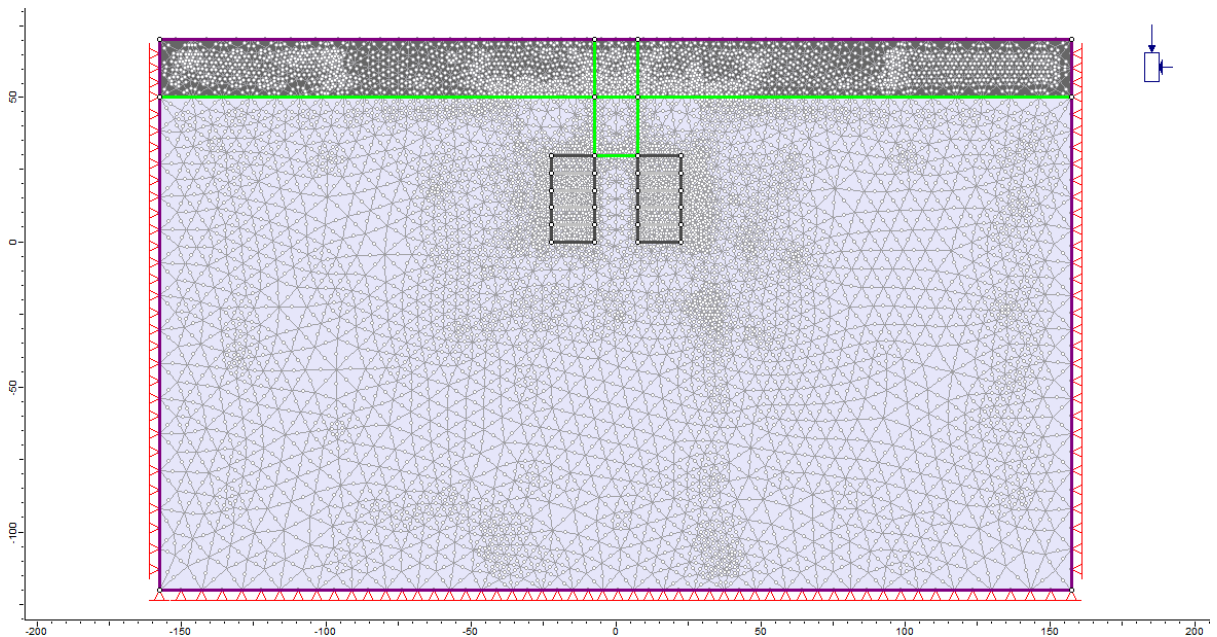
Σε περίπτωση που το meshing είναι αρκετά αραιό σε μια συγκεκριμένη περιοχή, μπορεί να γίνει πύκνωση μέσω της εντολής Mesh → Increase Density → Increase Mesh Element Density (Window) και επιλογή της αντίστοιχης περιοχής.



Σχήμα 3.3.1.1.12: Αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος (mesh density)

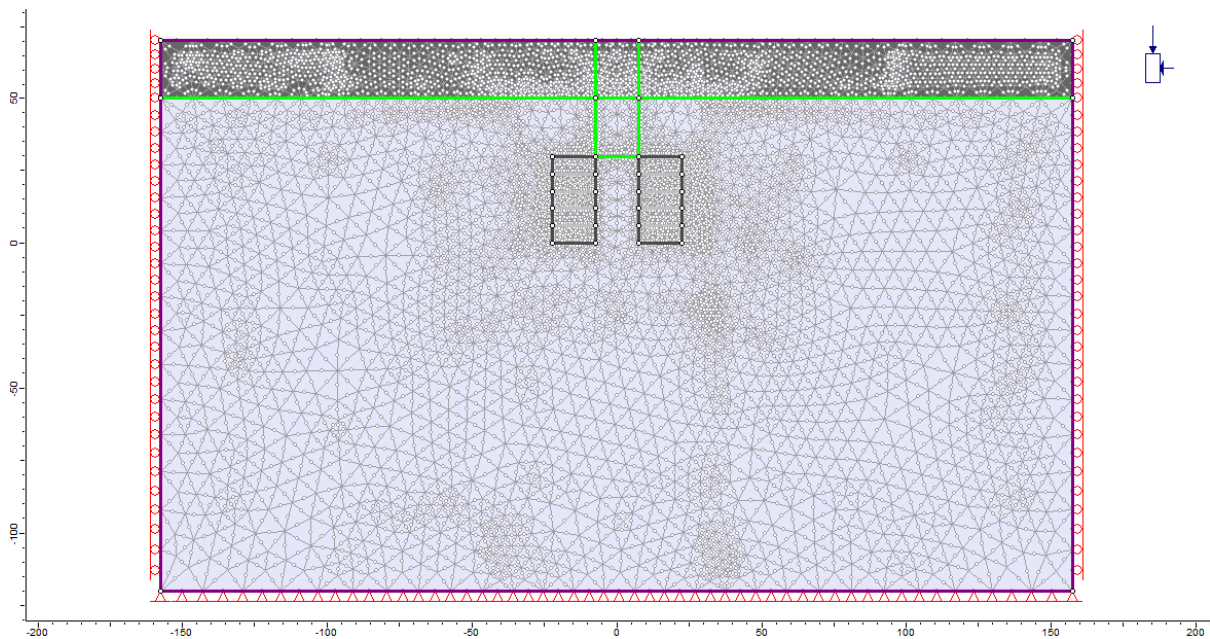
- **Αλλαγή οριακών συνθηκών:** Από προεπιλογή, όταν δημιουργείται το πλέγμα, δίνεται μία σταθερή οριακή συνθήκη μηδενικής μετατόπισης σε όλους της κόμβους του εξωτερικού ορίου. Αυτό υποδεικνύεται από τα τριγωνικά σύμβολα «καρφίτσας» σε κάθε κόμβο του εξωτερικού ορίου. Εφόσον πρόκειται για μοντέλο επιφανειακής

εκσκαφής, πρέπει να διευκρινιστεί ότι η επιφάνεια του εδάφους είναι ελεύθερη επιφάνεια. Αυτό γίνεται μέσω της εντολής Displacements → Free, επιλέγοντας τα segments της επιφάνειας.



Σχήμα 3.3.1.1.13: Απελευθέρωση επιφάνειας του εδάφους

Παράλληλα, το αριστερό και το δεξί άκρο του εξωτερικού ορίου πρέπει να καθοριστούν ως σταθερά μόνο προς την κατεύθυνση X (δηλαδή ελεύθερα να κινηθούν στην κατεύθυνση Y), ενώ το κάτω άκρο να παραμείνει σταθερό ως προς και τις δύο κατευθύνσεις. Αυτά επιτυγχάνονται μέσω των εντολών Displacements → Restrain X και Displacements → Restrain X,Y αντίστοιχα, επιλέγοντας σε κάθε περίπτωση τα κατάλληλα segments.



Σχήμα 3.3.1.1.14: Συγκράτηση του αριστερού και του δεξιού άκρου του εξωτερικού ορίου μόνο ως προς την κατεύθυνση X

Με την ολοκλήρωση της αλλαγής των οριακών συνθηκών, το μοντέλο είναι έτοιμο να υπολογίσει (Compute) και να ερμηνεύσει (Interpret) τα αποτελέσματα της δισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

3.3.1.2 Στάδια προσομοίωσης

Η προσομοίωση των μοντέλων στο δισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 γίνεται σε 22 στάδια:

- Το πρώτο στάδιο αφορά το αρχικό εντατικό πεδίο, προτού λάβει χώρα οποιαδήποτε εκσκαφή.
- Στο δεύτερο στάδιο εφαρμόζεται η επιλεγμένη τεχνική προσέγγισης 2D. Στην περίπτωση του μοντέλου χωρίς προσεγγιστική τεχνική, στο συγκεκριμένο στάδιο δε λαμβάνει χώρα καμία ενέργεια.
- Στο τρίτο στάδιο χαλαρώνεται η περιοχή του αριστερού θαλάμου ύψους 6m, που πρόκειται να εκσκαφθεί.
- Στο τέταρτο στάδιο πραγματοποιείται η πρώτη εκσκαφή ύψους 6m στον αριστερό θάλαμο.
- Στο πέμπτο στάδιο χαλαρώνεται η περιοχή του δεξιού θαλάμου ύψους 6m που πρόκειται να εκσκαφθεί.
- Στο έκτο στάδιο πραγματοποιείται η πρώτη εκσκαφή ύψους 6m στον δεξιό θάλαμο.

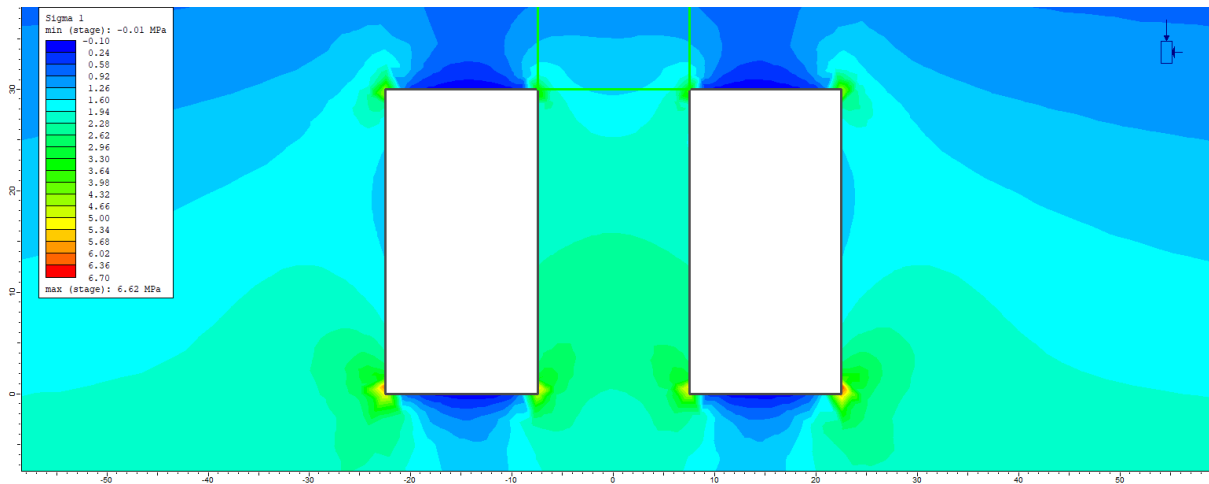
Με το πέρας του 6^{ου} σταδίου ολοκληρώνεται η δημιουργία του πρώτου bench των 6m. Εφόσον η εκμετάλλευση αποτελείται από πέντε τέτοια bench, τα βήματα 3 έως 6 επαναλαμβάνονται μέχρι το 22^ο στάδιο και την δημιουργία του τελικού στύλου ύψους 30m.

3.3.1.3 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Μετά τη διαδικασία των υπολογισμών, σειρά έχει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Για την εμφάνιση των σημείων που έχουν αστοχήσει επιλέγεται η εντολή Display Yielded Elements από το Quick Menu. Το RS2 επιτρέπει στους χρήστες να αναζητούν δεδομένα σε οποιοδήποτε σημείο του υλικού μέσω της εντολής Query → Add Material Query. Τα queries εισάγονται σε επιλεγμένα αντιπροσωπευτικά τμήματα των μοντέλων (όπως η στέψη και το μέσο του ύψους των στύλων) και οι τιμές που φέρουν μπορούν να εμφανιστούν είτε απευθείας στο μοντέλο είτε να απεικονιστούν σε γραφήματα. Επιλέγεται κατάλληλος αριθμός θέσεων (locations) κάθε φορά ώστε η απόσταση μεταξύ των σημείων ελέγχου να είναι σταθερή και ίση με 0,5m. Το κάθε query αναφέρεται στο αντίστοιχο stage που απαριθμεί. Επιγραμματικά, η αντιστοίχιση ανάμεσα στα stages και τις αναλύσεις της Α΄Ομάδας Αναλύσεων έχει ως εξής:

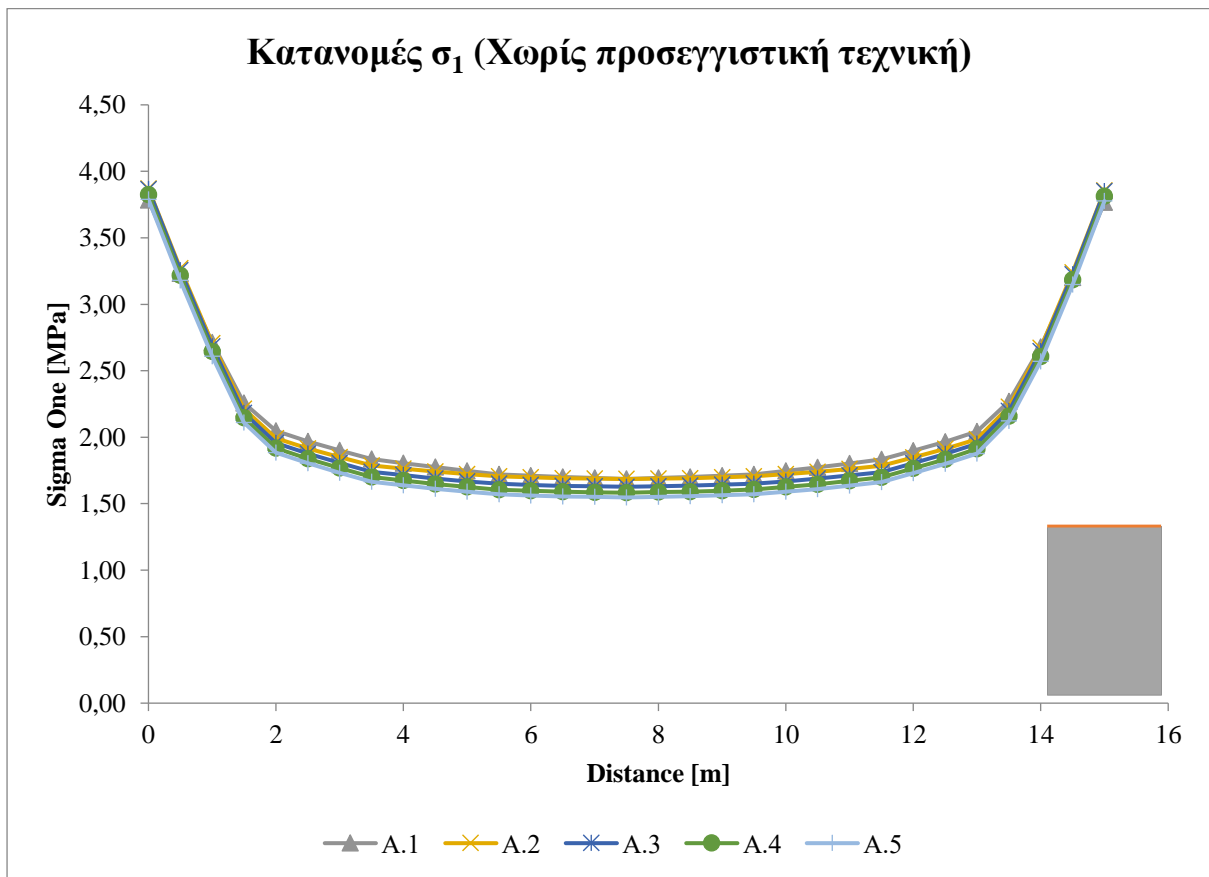
- Stage 6 → Ολοκλήρωση πρώτου bench → Ανάλυση A.1
- Stage 10 → Ολοκλήρωση δεύτερου bench → Ανάλυση A.2
- Stage 14 → Ολοκλήρωση τρίτου bench → Ανάλυση A.3
- Stage 18 → Ολοκλήρωση τέταρτου bench → Ανάλυση A.4
- Stage 22 → Ολοκλήρωση πέμπτου bench → Ανάλυση A.5

Η συγκριτική αξιολόγηση ανάμεσα στα μοντέλα του RS2 και το μοντέλο του RS3 θα γίνει ως προς τη μέγιστη κύρια τάση σ_1 . Επομένως, αυτός είναι ο τύπος δεδομένων που θα εξεταστεί σε πρώτη φάση για όλα τα μοντέλα.



Σχήμα 3.3.1.3.1: Ισοϋψείς των σ_1 μετά την ολοκλήρωση του πέμπτου bench (Χωρίς προσεγγιστική τεχνική)

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 3.3.1.3.1, οι ακμές του στύλου φαίνεται να φορτίζονται περισσότερο σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές του. Στις εκμεταλλεύσεις της Α' Ομάδας Αναλύσεων, δεν παρατηρείται κανένα σημείο αστοχίας. Από τις κατανομές των μέγιστων κύριων τάσεων σ_1 στη στέψη των στύλων προκύπτει το ακόλουθο Σχήμα 3.3.1.3.2.



Σχήμα 3.3.1.3.2: Κατανομές των σ_1 στη στέψη των στύλων των Αναλύσεων της Α' Ομάδας, χωρίς τη χρήση κάποιας προσεγγιστικής τεχνικής.

Η μέση τιμή (average) της σ_1 στη στέψη ενός στύλου μπορεί να θεωρηθεί πως προσεγγίζει με σχετική ακρίβεια τη μέση ορθή τάση σ_p που δέχεται ο στύλος. Έτσι, για τις εξεταζόμενες αναλύσεις, η μέση ορθή τάση σ_p ισούται με:

- Ανάλυση A.1 $\rightarrow \sigma_p = 2,11$ MPa
- Ανάλυση A.2 $\rightarrow \sigma_p = 2,09$ MPa
- Ανάλυση A.3 $\rightarrow \sigma_p = 2,05$ MPa
- Ανάλυση A.4 $\rightarrow \sigma_p = 2,01$ MPa
- Ανάλυση A.5 $\rightarrow \sigma_p = 1,97$ MPa

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τις κατανομές των σ_1 στη στέψη των στύλων (Σχήμα 3.3.1.3.2), η μέγιστη κύρια τάση σ_1 μειώνεται όσο γίνεται η προχώρηση κατά βάθος (μείωση W_p/H_p). Οι κατανομές των σ_1 στη στέψη των στύλων δεν προκαλούν κάποια έκπληξη. Όπως αναμένεται, στο κέντρο της στέψης οι τιμές της σ_1 δεν μεταβάλλονται σημαντικά από θέση σε θέση και παρουσιάζουν μια εκθετική αύξηση προς τις ακμές. Σε αυτά τα σημεία είναι που λαμβάνει τις μέγιστες τιμές της.

Οι μέσες ορθές τάσεις σ_p που ασκούνται στο μέσο του ύψους του εκάστοτε δημιουργούμενου στύλου έχουν ως εξής:

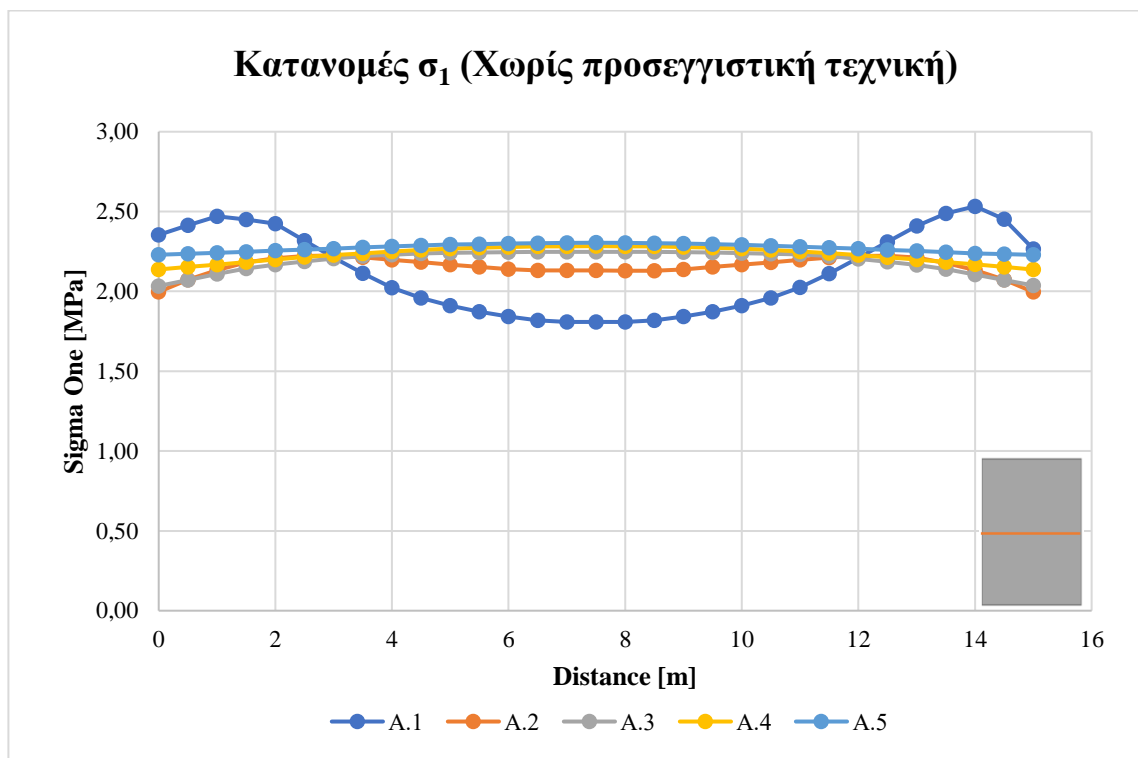
- Ανάλυση A.1 $\rightarrow \sigma_p = 2,12$ MPa
- Ανάλυση A.2 $\rightarrow \sigma_p = 2,16$ MPa
- Ανάλυση A.3 $\rightarrow \sigma_p = 2,19$ MPa
- Ανάλυση A.4 $\rightarrow \sigma_p = 2,23$ MPa
- Ανάλυση A.5 $\rightarrow \sigma_p = 2,27$ MPa

Από τιμές που παρουσιάζει η μέση ορθή τάση στο μέσο του ύψους των στύλων γίνεται αντιληπτό πως η μείωση του λόγου πλάτους προς ύψος (W_p/H_p) επιφέρει αύξηση στη μέση ορθή τάση σ_p . Στην αύξηση της μέσης ορθής τάσης επιδρά και η αλλαγή του σημείου που βρίσκεται σε κάθε περίπτωση το μέσο του στύλου, μιας και η προχώρηση γίνεται κατά βάθος.

Η κατανομή της σ_1 στην Ανάλυση A.1 έχει μορφή καμπύλης. Με την μείωση του λόγου W_p/H_p στο 1,25 (Ανάλυση A.2), η σ_1 αυξάνεται στο κεντρικό τμήμα της περιοχής και μειώνεται προς τις παρειές του στύλου. Από την Ανάλυση A.2 και έπειτα, η σ_1 αυξάνεται

σταδιακά με τέτοιο τρόπο ώστε στην Ανάλυση A.5 οι τιμές κατά πλάτος της περιοχής να μην μεταβάλλονται σχεδόν καθόλου.

Συγκρίνοντας την μέση ορθή τάση σ_p που ασκείται στη στέψη με εκείνη που ασκείται στο μέσο του ύψους του ίδιου στύλου προκύπτει πως ο στύλος δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση στο μέσο του.



Σχήμα 3.3.1.3.3: Κατανομές των σ_1 στο μέσο του ύψους των στύλων των Αναλύσεων της Α' Ομάδας, χωρίς τη χρήση κάποιας προσεγγιστικής τεχνικής

Για τον υπολογισμό του εξωτερικού φορτίου q της ομώνυμης προσεγγιστικής τεχνικής, αξιοποιείται η μέση ορθή τάση σ_p που ασκείται στη στέψη του στύλου μετά την ολοκλήρωση όλων των benches, όπως υπολογίστηκε στο προηγούμενο μοντέλο. Αυτή η τιμή αφορά τον διαμήκη στύλο πριν από την εκτέλεση των εγκάρσιων εκσκαφών.

Το εξωτερικό φορτίο q τοποθετείται ομοιόμορφα στην επιφάνεια της περιοχής που προβάλλεται ακριβώς πάνω από τον στύλο μέσω της εντολής (Loading \rightarrow Distributed Loads \rightarrow Add Uniform Load). Ο προσανατολισμός του φορτίου είναι κανονικός ως προς το όριο της επιφάνειας και το μέγεθός του υπολογίζεται ως εξής:

$$S_v = \gamma \cdot h = (\gamma_{\sigma\chi\iota\sigma\tau} \cdot h_{\sigma\chi\iota\sigma\tau}) + (\gamma_{\mu\alpha\rho\mu} \cdot h_{\mu\alpha\rho\mu})$$

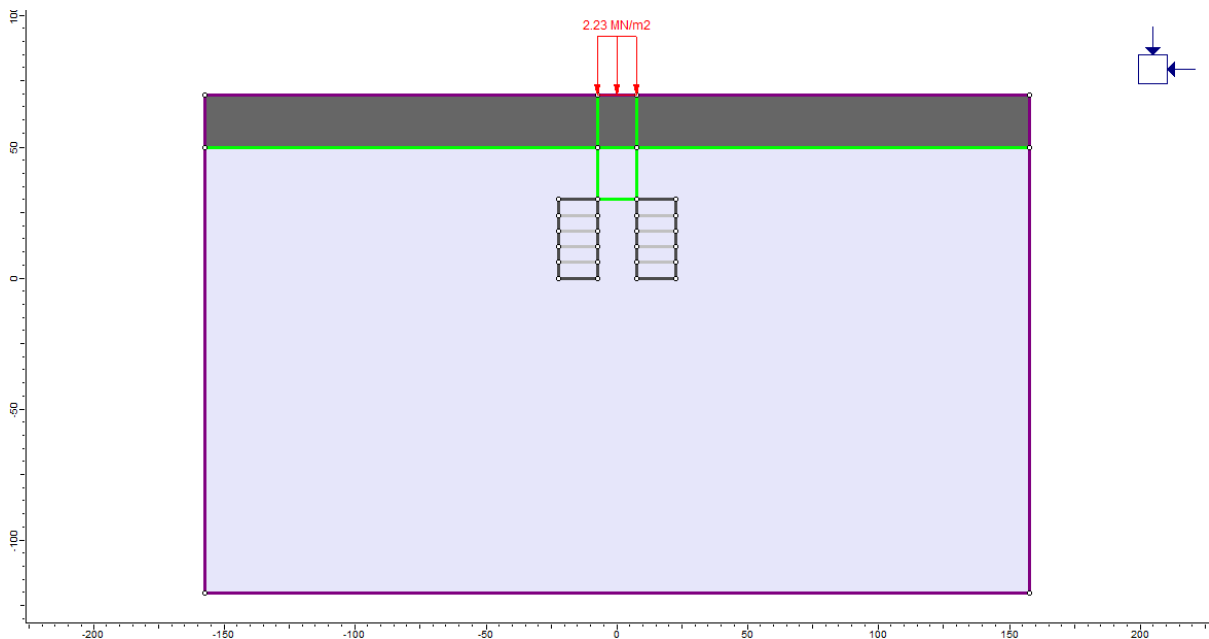
$$= \left(25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 20\text{m} \right) + \left(27,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 20\text{m} \right) = 1,05 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_p = \gamma \cdot h \cdot \left(1 + \frac{W_R}{W_p} \right)^2 = 1,05 \text{ MPa} \cdot \left(1 + \frac{15\text{m}}{15\text{m}} \right)^2 = 4,2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_p = 1,97 \text{ MPa}$$

$$q = \sigma'_p - \sigma_p = 4,2 \text{ MPa} - 1,97 \text{ MPa} = 2,23 \text{ MPa}$$

Το φορτίο q πρέπει να υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση Ομάδας/Υποομάδας ξεχωριστά. Η εισαγωγή του φορτίου γίνεται στο δεύτερο στάδιο της ανάλυσης μέσω της εντολής Stage Load \rightarrow Stage Factors, αλλάζοντας το Factor του πρώτου σταδίου από 1 σε 0 και αφήνοντας τα υπόλοιπα ως έχουν.

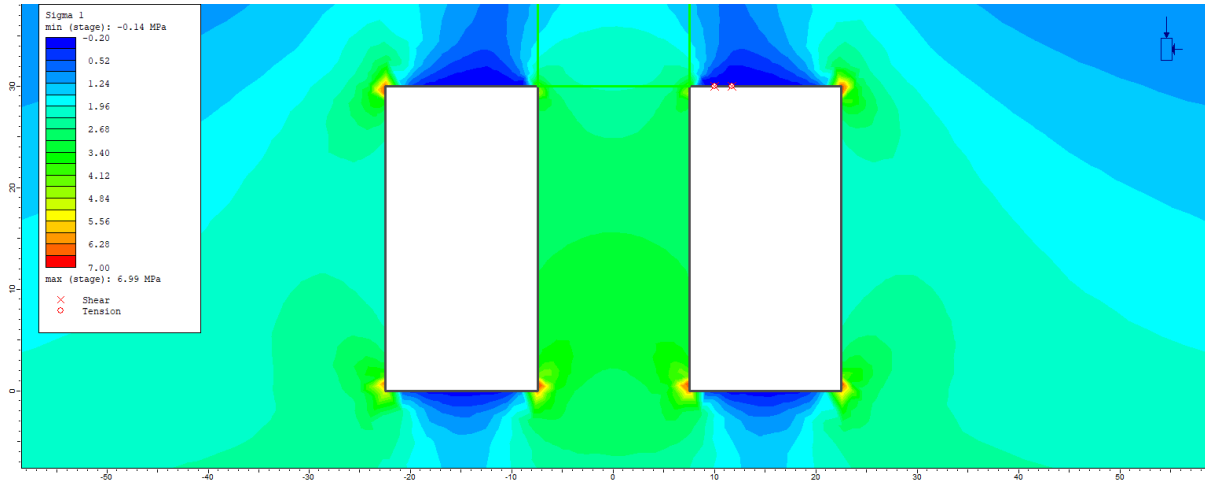


Σχήμα 3.3.1.3.4: Τοποθέτηση του ομοιόμορφου φορτίου q στην περιοχή που προβάλλεται ακριβώς πάνω από τον στύλο

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 3.3.1.3.5, οι ακμές των στύλων φορτίζονται περισσότερο σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές τους. Την μεγαλύτερη καταπόνηση, πιο συγκεκριμένα, δέχονται οι ακμές που βρίσκονται στη βάση της δομής τους.

Στις Αναλύσεις με το εξωτερικό φορτίο q δεν παρατηρούνται σημεία αστοχίας στη δομή των στύλων. Οι μόνες τοπικές αστοχίες που εμφανίζονται στην εκμετάλλευση αφορούν δύο σημεία στην οροφή του δεξιού θαλάμου. Οι τοπικές αυτές αστοχίες εμφανίζονται κατά τη δημιουργία του δεύτερου bench ($W_p/H_p = 1,25$) και οφείλονται στο συνδυασμό εφελκυσμού και διάτμησης. Η περιοχή αστοχίας δεν φαίνεται να παρουσιάζει κάποια εξάπλωση για

μείωση του λόγου πλάτους προς ύψος. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η επιβολή του εξωτερικού φορτίου q προκαλεί, όπως είναι λογικό, αύξηση στις τάσεις των περιοχών που προβάλλονται ακριβώς πάνω από τους στύλους.



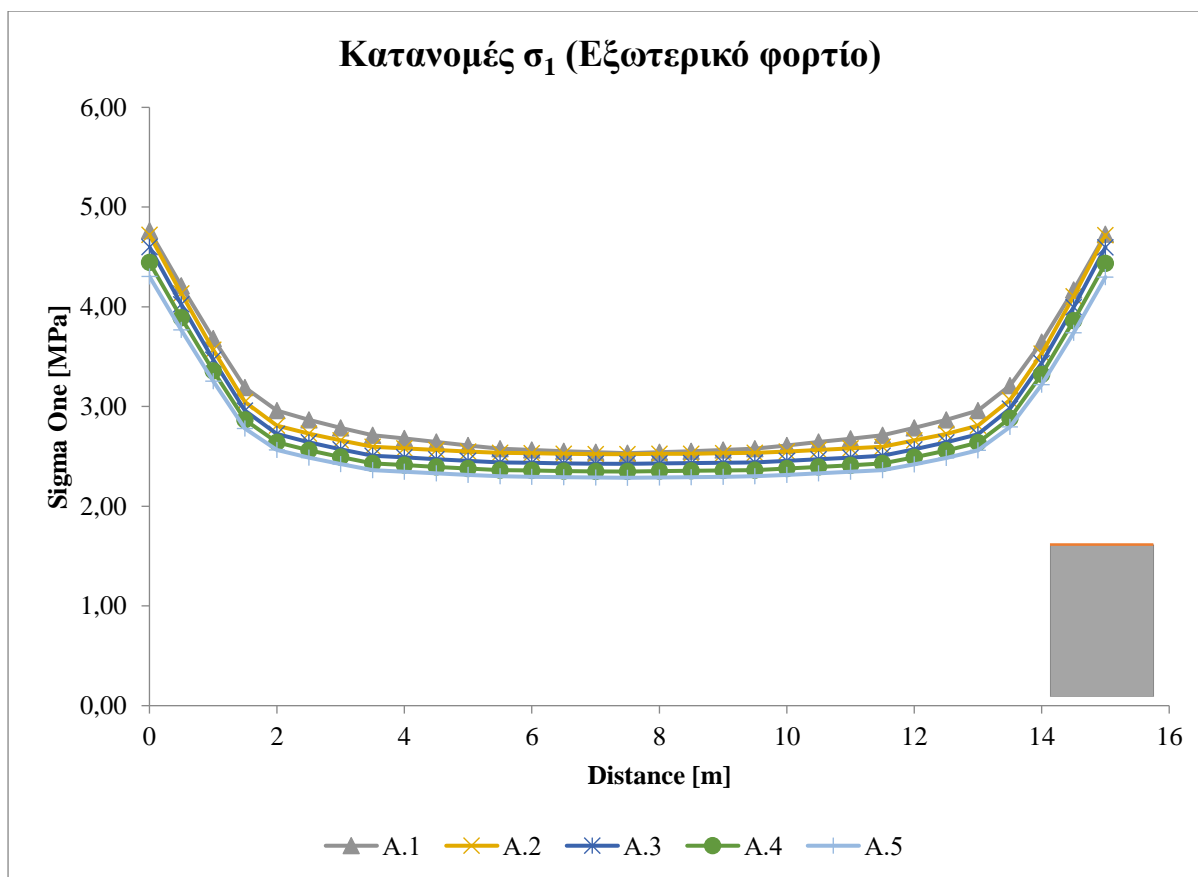
Σχήμα 3.3.1.3.5: Ισοϋψείς των σ_1 μετά την ολοκλήρωση του πέμπτου bench (Εξωτερικό φορτίο)

Από τις κατανομές των μέγιστων κύριων τάσεων σ_1 στη στέψη των στύλων, που καταπονούνται περισσότερο λόγω του εξωτερικού φορτίου q , προκύπτει το ακόλουθο Σχήμα 3.3.1.3.6.

Οι μέσες ορθές τάσεις σ_p που ασκούνται στη στέψη των στύλων έχουν ως εξής:

- Ανάλυση A.1 $\rightarrow \sigma_p = 3,00$ MPa
- Ανάλυση A.2 $\rightarrow \sigma_p = 2,92$ MPa
- Ανάλυση A.3 $\rightarrow \sigma_p = 2,83$ MPa
- Ανάλυση A.4 $\rightarrow \sigma_p = 2,74$ MPa
- Ανάλυση A.5 $\rightarrow \sigma_p = 2,66$ MPa

Η μέση ορθή τάση σ_p που ασκείται στη στέψη των στύλων μειώνεται όσο γίνεται η προχώρηση κατά βάθος. Οι κατανομές των σ_1 στη στέψη των στύλων έχουν την ίδια μορφή με εκείνες του προηγούμενου μοντέλου. Η ειδοποιός διαφορά τους είναι η αναμενόμενη αύξηση στη μέση ορθή τάση που δέχεται ο στύλος, λόγω της επιβολής του εξωτερικού φορτίου q .



Σχήμα 3.3.1.3.6: Κατανομές των σ_1 στη στέψη των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων, με τη χρήση της προσεγγιστικής τεχνικής του εξωτερικού φορτίου q

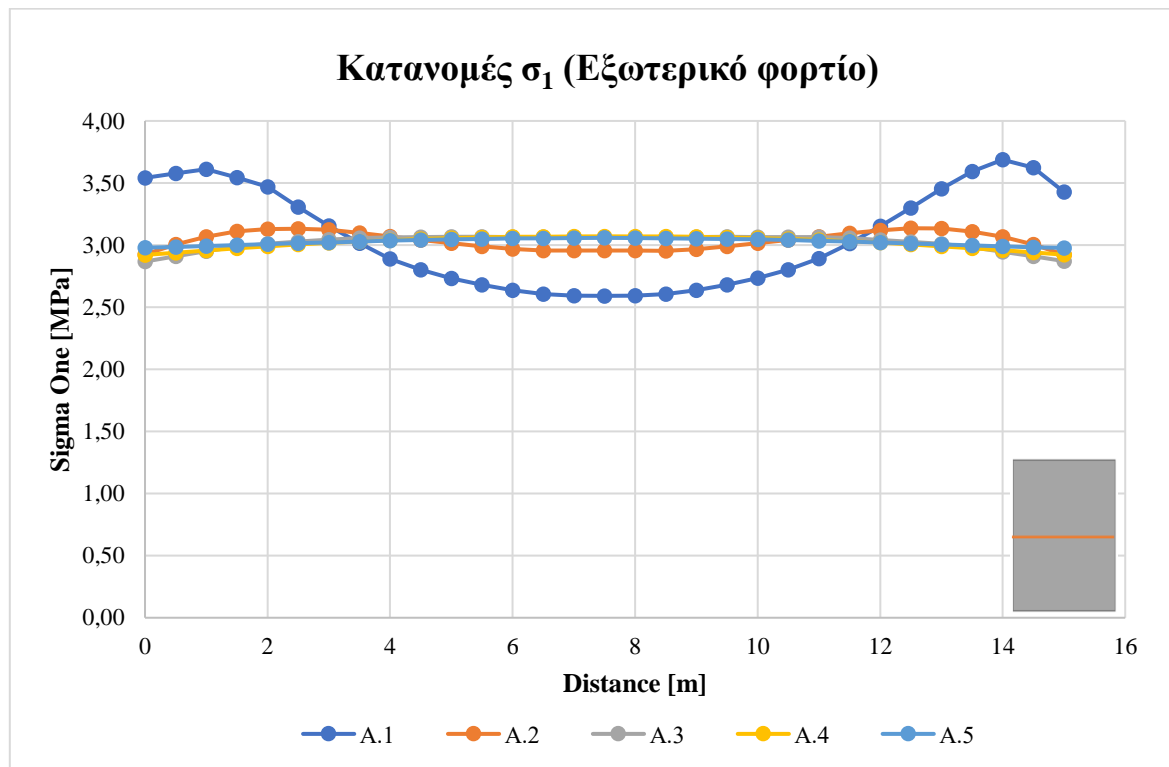
Πίνακας 3.3.1.3.1: Ποσοστά μεταβολής των μέσων ορθών τάσεων ως αποτέλεσμα της επιβολής του εξωτερικού φορτίου q (Στέψη)

Ανάλυση	Χωρίς προσεγγιστική τεχνική	Εξωτερικό φορτίο q	%
A.1	2,11	3,00	42,40
A.2	2,09	2,92	39,75
A.3	2,05	2,83	37,97
A.4	2,01	2,74	36,32
A.5	1,97	2,66	34,76

Στον Πίνακα 3.3.1.3.1 καταγράφονται τα ποσοστά αύξησης των μέσων ορθών τάσεων που δέχεται η στέψη των στύλων λόγω της επιβολής του εξωτερικού φορτίου q . Για τον υπολογισμό των ποσοστών λαμβάνονται υπόψη όλα τα δεκαδικά ψηφία των μέσων ορθών τάσεων, ακόμη και αν μέχρι τώρα αναφέρονται μόνο τα πρώτα δύο. Η μέση τιμή των ποσοστών αύξησης στη στέψη ανέρχεται στα 38,24%.

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι μέσες ορθές τάσεις σ_p που ασκούνται στο μέσο του ύψους του εκάστοτε δημιουργούμενου στύλου, ως αποτέλεσμα της μεθόδου των θαλάμων και στύλων και του εξωτερικού φορτίου q :

- Ανάλυση A.1 $\rightarrow \sigma_p = 3,06$ MPa
- Ανάλυση A.2 $\rightarrow \sigma_p = 3,04$ MPa
- Ανάλυση A.3 $\rightarrow \sigma_p = 3,02$ MPa
- Ανάλυση A.4 $\rightarrow \sigma_p = 3,02$ MPa
- Ανάλυση A.5 $\rightarrow \sigma_p = 3,03$ MPa



Σχήμα 3.3.1.3.7: Κατανομές των σ_1 στο μέσο του ύψους των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων, με τη χρήση της προσεγγιστικής τεχνικής του εξωτερικού φορτίου q

Οι κατανομές των σ_1 έχουν παρόμοια μορφή με τις αντίστοιχες κατανομές στο μοντέλο δίχως κάποια προσεγγιστική τεχνική. Η μέση ορθή τάση που δέχονται οι στύλοι στο μέσο του ύψους τους δεν αλλάζει σημαντικά με τη μείωση του λόγου W_p/H_p . Οι αυξήσεις, ωστόσο, στις τιμές της σ_p λόγω της επιβολής του εξωτερικού φορτίου q , φαίνονται στον Πίνακας 3.3.1.3.2:

Πίνακας 3.3.1.3.2: Ποσοστά μεταβολής των μέσων ορθών τάσεων ως αποτέλεσμα της επιβολής του εξωτερικού φορτίου q (Μέσο του ύψους)

Ανάλυση	Χωρίς προσεγγιστική τεχνική	Εξωτερικό φορτίο q	%
A.1	2,12	3,06	44,28
A.2	2,16	3,04	40,86
A.3	2,19	3,02	37,98
A.4	2,23	3,02	35,41
A.5	2,27	3,03	33,14

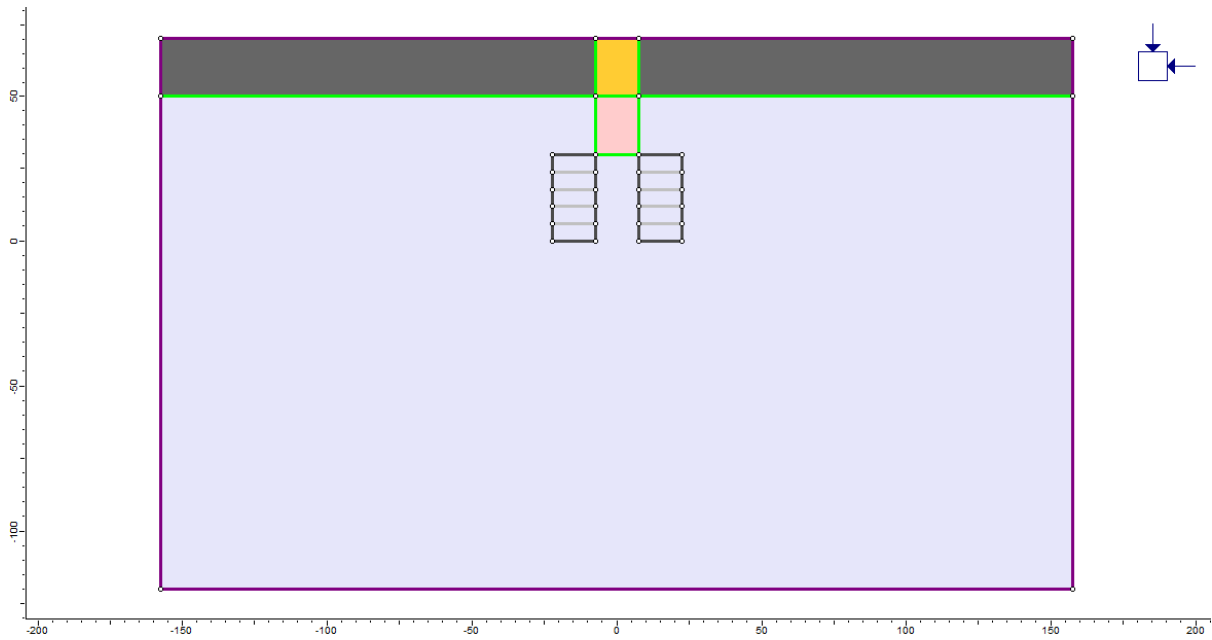
Πιο συγκεκριμένα, η μέση τιμή των ποσοστών αύξησης στο μέσο του ύψους ανέρχεται στα 38,33%, ποσοστό που συμφωνεί με την αντίστοιχη μέση τιμή στη στέγη. Αξίζει να σημειωθεί πως η μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση της μέσης ορθής τάσης ανάμεσα στα εξεταζόμενα μοντέλα παρουσιάζεται στην Ανάλυση A.1. Με τη μείωση του λόγου W_p/H_p , οι ποσοστιαίες αυξήσεις των μέσων ορθών τάσεων μειώνονται.

Αναφορικά με την τεχνική επαύξησης των ειδικών βαρών των υπερκειμένων, τα νέα ειδικά βάρη υπολογίζονται ως εξής:

$$\gamma'_{\sigma\chi\iota\sigma\tau} = 0,025 \frac{MN}{m^2} \left(1 + \frac{15\ m}{15\ m} \right) = 0,05 \frac{MN}{m^2}$$

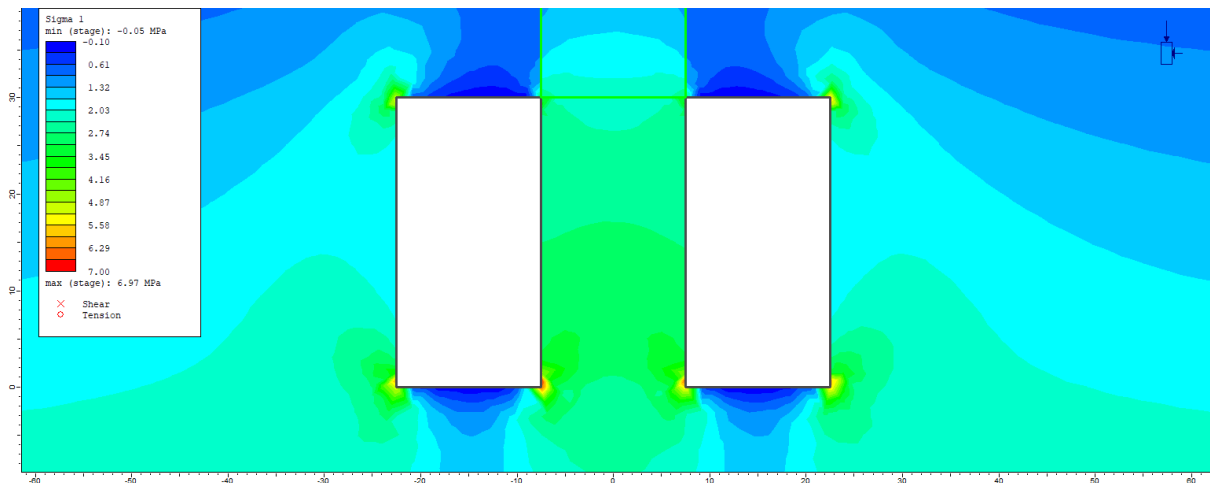
$$\gamma'_{\mu\alpha\rho\mu} = 0,0275 \frac{MN}{m^2} \left(1 + \frac{15\ m}{15\ m} \right) = 0,055 \frac{MN}{m^2}$$

Τα υλικά που βρίσκονται στην περιοχή που προβάλλεται ακριβώς πάνω από τον στύλο, αντικαθίστανται στο δεύτερο στάδιο της ανάλυσης από τα νέα υλικά αυξημένων ειδικών βαρών.



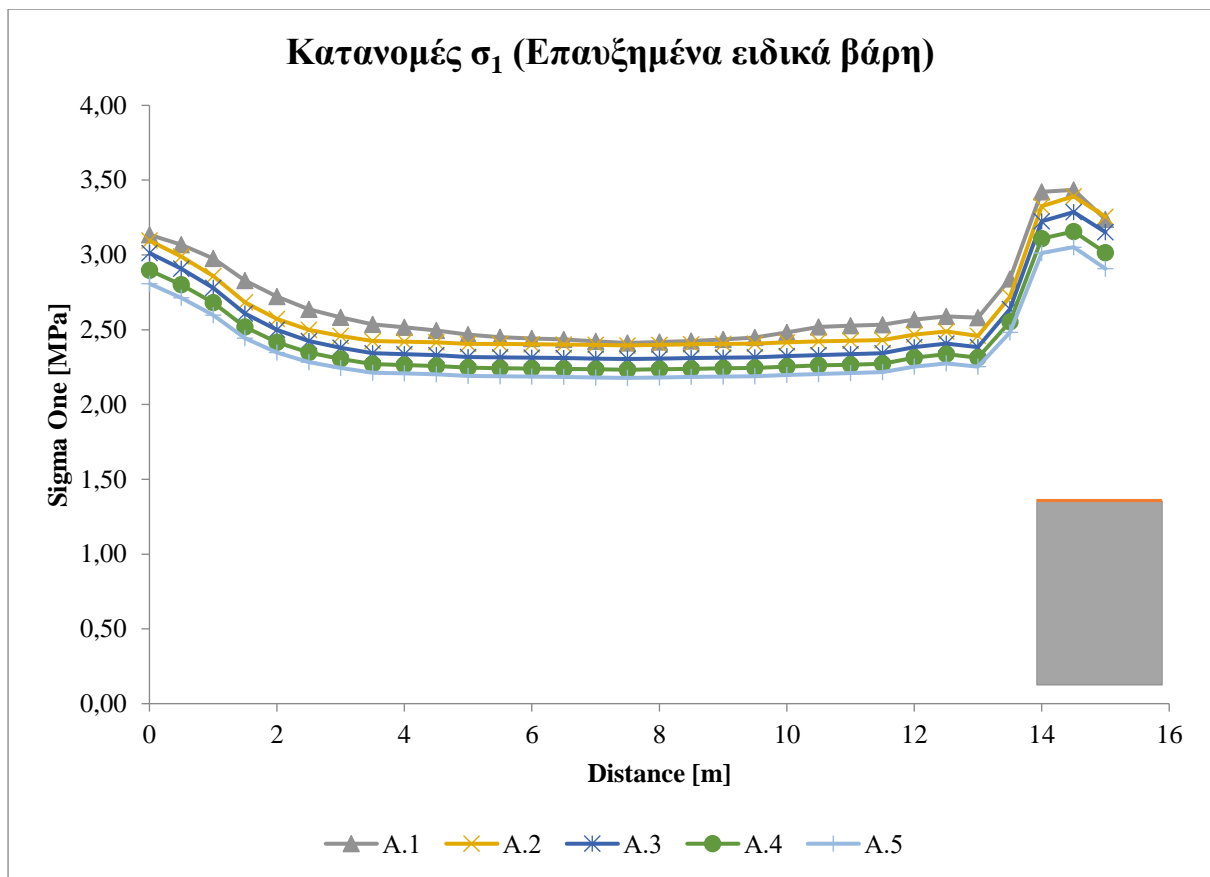
Σχήμα 3.3.1.3.8: Αντικατάσταση των υλικών από τα νέα υλικά αυξημένων ειδικών βαρών

Κατά τον ίδιο τρόπο με τα προηγούμενα μοντέλα, οι ακμές των στύλων φορτίζονται περισσότερο σε σχέση με της υπόλοιπες περιοχές της (ιδίως οι ακμές στη βάση της δομής της). Σε αντίθεση με το μοντέλο που χρησιμοποιεί το εξωτερικό φορτίο q , δεν παρατηρείται κανένα σημείο αστοχίας κατά την εκμετάλλευση του κοιτάσματος με την προσεγγιστική τεχνική των επαυξημένων ειδικών βαρών.



Σχήμα 3.3.1.3.9: Ισοϋψείς των σ_1 μετά την ολοκλήρωση του πέμπτου bench (Επαυξημένα ειδικά βάρη)

Από τις κατανομές των μέγιστων κύριων τάσεων σ_1 στη στέψη των στύλων δημιουργείται το ακόλουθο Σχήμα 3.3.1.3.10:



Σχήμα 3.3.1.3.10: Κατανομές των σ_1 στη στέψη των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων, με τη χρήση της προσεγγιστικής τεχνικής επαύξησης των ειδικών βαρών των υπερκειμένων

Η μέση ορθή τάση σ_p που ασκείται στη στέψη των στύλων του συγκεκριμένου μοντέλου μεταβάλλεται από ανάλυση σε ανάλυση ως εξής:

- Ανάλυση A.1 $\rightarrow \sigma_p = 2,66$ MPa
- Ανάλυση A.2 $\rightarrow \sigma_p = 2,59$ MPa
- Ανάλυση A.3 $\rightarrow \sigma_p = 2,50$ MPa
- Ανάλυση A.4 $\rightarrow \sigma_p = 2,42$ MPa
- Ανάλυση A.5 $\rightarrow \sigma_p = 2,35$ MPa

Η μέση ορθή τάση σ_p που ασκείται στη στέψη μειώνεται όσο γίνεται η προχώρηση κατά βάθος. Οι κατανομές των σ_1 στη στέψη των στύλων, που φορτίζονται περισσότερο λόγω της αλλαγής στα ειδικά βάρη των υπερκειμένων στρωμάτων, διαφέρουν από τις αντίστοιχες κατανομές των προηγούμενων μοντέλων. Ενώ στο κέντρο της στέψης οι τιμές της σ_1 δεν μεταβάλλονται σημαντικά από θέση σε θέση, οι τιμές κοντά στις ακμές της δεν παρουσιάζουν την ίδια εκθετική αύξηση με τα προηγούμενα μοντέλα. Ειδικότερα, η δεξιά

ακμή της στέψης των στύλων φαίνεται να καταπονείται περισσότερο σε σύγκριση με την αριστερή.

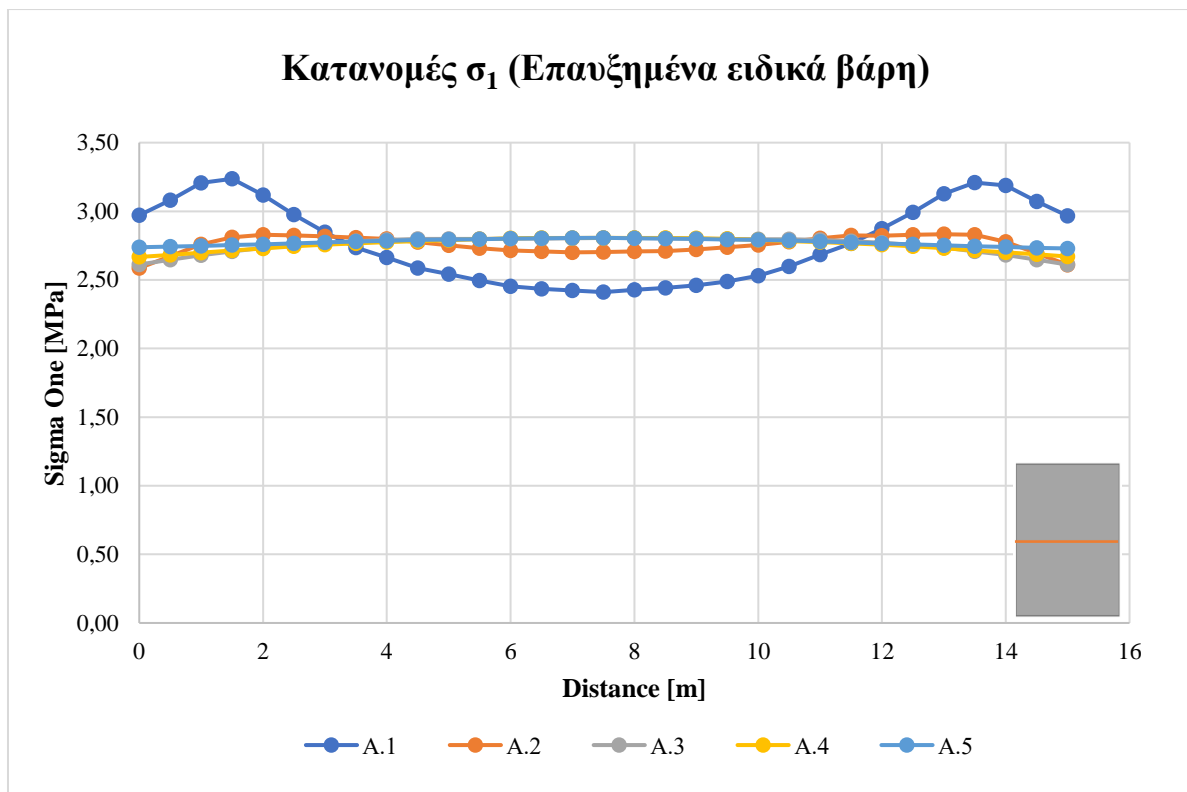
Πίνακας 3.3.1.3.3: Ποσοστά μεταβολής των μέσων ορθών τάσεων ως αποτέλεσμα της αύξησης των ειδικών βαρών των υπερκειμένων (Στέψη)

Ανάλυση	Χωρίς προσεγγιστική τεχνική	Επαυξημένα ειδικά βάρη	%
A.1	2,11	2,66	26,30
A.2	2,09	2,59	23,75
A.3	2,05	2,50	22,03
A.4	2,01	2,42	20,47
A.5	1,97	2,35	19,31

Στον Πίνακα 3.3.1.3.3 καταγράφονται τα ποσοστά αύξησης των μέσων ορθών τάσεων που δέχεται η στέψη των στύλων λόγω της αύξησης των ειδικών βαρών των υπερκειμένων. Η μέση τιμή των ποσοστών αύξησης στη στέψη ανέρχεται στα 22,37%.

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι μέσες ορθές τάσεις σ_p που ασκούνται στο μέσο του ύψους του εκάστοτε δημιουργούμενου στύλου, ως αποτέλεσμα της μεθόδου των θαλάμων και στύλων και των επαυξημένων ειδικών βαρών:

- Ανάλυση A.1 $\rightarrow \sigma_p = 2,77 \text{ MPa}$
- Ανάλυση A.2 $\rightarrow \sigma_p = 2,76 \text{ MPa}$
- Ανάλυση A.3 $\rightarrow \sigma_p = 2,75 \text{ MPa}$
- Ανάλυση A.4 $\rightarrow \sigma_p = 2,76 \text{ MPa}$
- Ανάλυση A.5 $\rightarrow \sigma_p = 2,77 \text{ MPa}$



Σχήμα 3.3.1.3.11: Κατανομές των σ_1 στο μέσο του ύψους των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων, με τη χρήση της προσεγγιστικής τεχνικής επαύξησης των ειδικών βαρών των υπερκειμένων

Οι κατανομές των σ_1 έχουν παρόμοια μορφή με της αντίστοιχες κατανομές των προηγούμενων μοντέλων. Η μέση ορθή τάση που δέχονται οι στύλοι στο μέσο του ύψους της, δεν αλλάζει σημαντικά με τη μείωση του λόγου W_p/H_p . Οι ποσοστιαίες αυξήσεις των τιμών της σ_p λόγω της επαύξησης των ειδικών βαρών των υπερκειμένων, παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 3.3.1.3.4:

Πίνακας 3.3.1.3.4: Ποσοστά μεταβολής των μέσων ορθών τάσεων ως αποτέλεσμα της αύξησης των ειδικών βαρών των υπερκειμένων (Μέσο του ύψους)

Ανάλυση	Χωρίς προσεγγιστική τεχνική	Επαυξημένα ειδικά βάρη	%
A.1	2,12	2,77	30,68
A.2	2,16	2,76	27,82
A.3	2,19	2,75	25,73
A.4	2,23	2,76	23,65
A.5	2,27	2,77	22,08

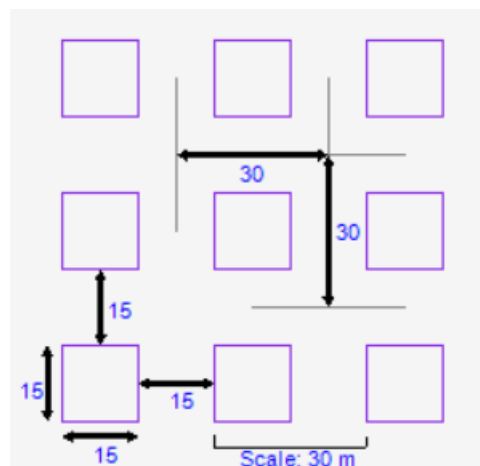
Πιο συγκεκριμένα, η μέση τιμή των ποσοστών αύξησης στο μέσο του ύψους ανέρχεται στα 25,99%, ένδειξη ότι στο μέσο του ύψους η φόρτιση λόγω της προσεγγιστικής τεχνικής είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη στέψη. Και σε αυτήν την περίπτωση, η μεγαλύτερη ποσοστιαία

αύξηση της μέσης ορθής τάσης παρουσιάζεται στην Ανάλυση Α.1. Με τη μείωση του λόγου W_p/H_p , οι ποσοστιαίες αυξήσεις των μέσων ορθών τάσεων μειώνονται.

Από την σύγκριση των ποσοστών αύξησης των μέσων ορθών τάσεων που επιφέρουν οι δύο τεχνικές, γίνεται αντιληπτό πως η τεχνική του εξωτερικού φορτίου q φορτίζει περισσότερο τους στύλους της Α' Ομάδας Αναλύσεων σε σχέση με την τεχνική επαύξησης των ειδικών βαρών των υπερκειμένων.

3.3.2 Ανάλυση στο RS3

Με σκοπό την καλύτερη δυνατή προσομοίωση της υπόγειας εκμετάλλευσης των θαλάμων και των στύλων στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων RS3, δημιουργείται μία διάταξη στύλων 3x3. Ο στύλος που εξετάζεται βρίσκεται στο κέντρο της διάταξης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.2.1:



Σχήμα 3.3.2.1: Αναπαράσταση της υπόγειας εκμετάλλευσης μέσω του λογισμικού S-Pillar

Για τη δημιουργία αυτής της διάταξης θα ανοιχθούν αρχικά δύο προσπελαστικές στοές (drifts) εκατέρωθεν του μαρμαροφόρου κοιτάσματος. Στη συνέχεια, θα γίνουν τέσσερις οριζόντιες εκσκαφές (crosscuts 1) και δύο κάθετες σε αυτές (crosscuts 2), ούτως ώστε να δημιουργηθούν οι επιθυμητοί στύλοι. Αυτή η διαδικασία θα επαναληφθεί συνολικά 5 φορές, έτσι ώστε να προσομοιωθούν τα πέντε benches των 6m για τη δημιουργία τελικών στύλων ύψους 30m. Οι συνολικές διαστάσεις της εκμετάλλευσης υπολογίζονται στα 105m x 105m x 30m (4 θάλαμοι και 3 στύλοι ανά διεύθυνση).

3.3.2.1 Βήματα προσομοίωσης

Τα βήματα που ακολουθούνται για τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου στο λογισμικό RS3, έχουν λογική αντίστοιχη με εκείνα του RS2.

- **Ρυθμίσεις του project:** Αρχικά, στις ρυθμίσεις του project (Analysis → Project Settings) και πιο συγκεκριμένα στο tab Units, επιβεβαιώνεται πως οι μονάδες είναι μετρικές και αλλάζονται οι τάσεις από kPa σε MPa. Στη συνέχεια ορίζεται ο αριθμός των σταδίων, όπως αυτά αναλύονται στην Παράγραφο 3.3.2.2 και τα υπόλοιπα tabs αφήνονται ως έχουν (default).
- **Καθορισμός των υλικών:** Σειρά έχει η εισαγωγή των γεωτεχνικών παραμέτρων για το υλικό της κάθε βραχομάζας (Properties → Define Materials), με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και στο RS2.
- **Δημιουργία γεωμετρίας:** Όπως το RS2, έτσι και το RS3 χρησιμοποιεί ένα εξωτερικό box που θέτει τα όρια του μοντέλου. Έτσι, μόνο τα αντικείμενα που περιέχονται εντός του εξωτερικού box ή είναι μέρος αυτού λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς. Μέσω της εντολής Geometry → Create External Box, εισάγονται οι συντεταγμένες των δύο γωνιών που ορίζουν το εξωτερικό box. Οι συντεταγμένες αυτές είναι:

Πρώτη γωνία: $X = -150\text{m}$, $Y = -150\text{m}$, $Z = -95\text{m}$

Δεύτερη γωνία: $X = 150\text{m}$, $Y = 150\text{m}$, $Z = 55\text{m}$

Εφόσον έχει οριστεί το εξωτερικό box, σειρά έχει ο σχεδιασμός των χώρων που προορίζονται για το εκάστοτε υλικό. Μέσω της εντολής Geometry → 3D Primitive Geometry → Box, εισάγονται οι συντεταγμένες των δύο γωνιών που ορίζουν τον χώρο του κάθε υλικού. Αυτές είναι:

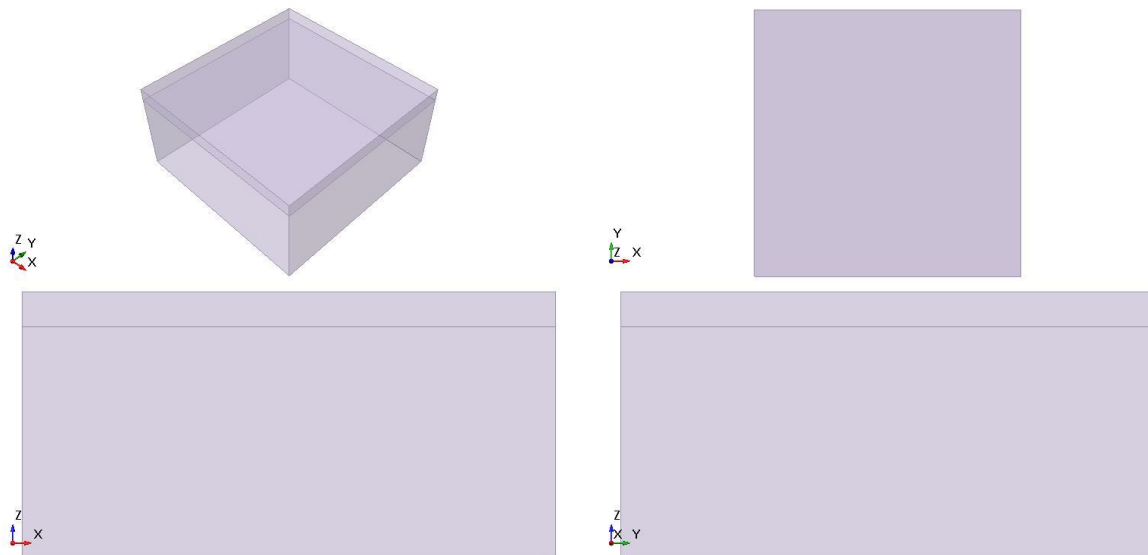
I. Σχιστόλιθος:

- Πρώτη γωνία: $X = -150\text{m}$, $Y = -150\text{m}$, $Z = 35\text{m}$
- Δεύτερη γωνία: $X = 150\text{m}$, $Y = 150\text{m}$, $Z = 55\text{m}$

II. Μάρμαρο:

- Πρώτη γωνία: $X = -150\text{m}$, $Y = -150\text{m}$, $Z = -95\text{m}$
- Δεύτερη γωνία: $X = 150\text{m}$, $Y = 150\text{m}$, $Z = 35\text{m}$

Τα δύο boxes επιλέγεται να έχουν ρόλο «γεωλογίας» και τα ονόματά τους αλλάζονται ώστε το καθένα να προσδιορίζει το υλικό το οποίο φέρει.



Σχήμα 3.3.2.1.1: Δημιουργία γεωμετρίας

- **Εισαγωγή των θαλάμων:** Στη συνέχεια, καθορίζονται οι περιοχές των θαλάμων. Οι εκσκαφές έχουν και αυτές την μορφή των boxes (Geometry → 3D Primitive Geometry → Box) και αποτελούνται από τα drifts, τα crosscuts 1 και τα crosscuts 2, όπως αναφέρθηκαν στην εισαγωγή της παραγράφου 3.3.2. Τα boxes αυτά διαδραματίζουν ρόλο εκσκαφής και ορίζονται από δύο γωνίες. Θεωρώντας το σημείο (0,0,0) ως το σημείο που βρίσκεται ο πυρήνας του κεντρικού στύλου που δημιουργείται μετά το τελευταίο bench, οι συντεταγμένες των boxes του πρώτου bench ορίζονται ως εξής:

I. Drifts

➤ **Drift 1:**

- Πρώτη γωνία: $X = 37,5\text{m}$, $Y = -97,5\text{m}$, $Z = 15\text{m}$
- Δεύτερη γωνία: $X = 52,5\text{m}$, $Y = 97,5\text{m}$, $Z = 9\text{m}$

➤ **Drift 2:**

- Πρώτη γωνία: $X = -37,5\text{m}$, $Y = -97,5\text{m}$, $Z = 15\text{m}$
- Δεύτερη γωνία: $X = -52,5\text{m}$, $Y = 97,5\text{m}$, $Z = 9\text{m}$

II. Crosscuts 1

➤ **Crosscut 1-1:**

- Πρώτη γωνία: $X = 37,5\text{m}$, $Y = 52,5$, $Z = 15\text{m}$
- Δεύτερη γωνία: $X = -37,5\text{m}$, $Y = 37,5\text{m}$, $Z = 9\text{m}$

➤ **Crosscut 1-2:**

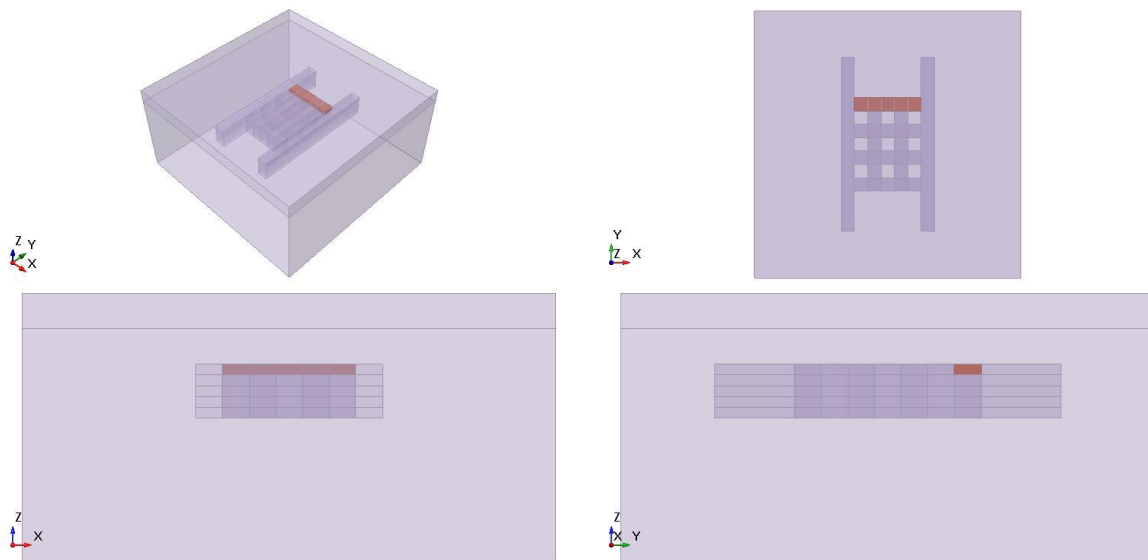
- Πρώτη γωνία: $X = 37,5\text{m}$, $Y = 22,5\text{m}$, $Z = 15\text{m}$

- Δεύτερη γωνία: $X = -37,5\text{m}$, $Y = 7,5\text{m}$, $Z = 9\text{m}$
- **Crosscut 1-3:**
 - Πρώτη γωνία: $X = 37,5\text{m}$, $Y = -7,5\text{m}$, $Z = 15\text{m}$
 - Δεύτερη γωνία: $X = -37,5\text{m}$, $Y = -22,5\text{m}$, $Z = 9\text{m}$
- **Crosscut 1-4:**
 - Πρώτη γωνία: $X = 37,5\text{m}$, $Y = -37,5\text{m}$, $Z = 15\text{m}$
 - Δεύτερη γωνία: $X = -37,5\text{m}$, $Y = -52,5\text{m}$, $Z = 9\text{m}$

III. Crosscuts 2

- **Crosscut 2-1:**
 - Πρώτη γωνία: $X = -22,5\text{m}$, $Y = 52,5\text{m}$, $Z = 15\text{m}$
 - Δεύτερη γωνία: $X = -7,5\text{m}$, $Y = -52,5\text{m}$, $Z = 9\text{m}$
- **Crosscut 2-2:**
 - Πρώτη γωνία: $X = 7,5\text{m}$, $Y = 52,5\text{m}$, $Z = 15\text{m}$
 - Δεύτερη γωνία: $X = 22,5\text{m}$, $Y = -52,5\text{m}$, $Z = 9\text{m}$

Εφόσον η προχώρηση γίνεται κατά βάθος, στα επόμενα benches τα μόνα που αλλάζουν στις συντεταγμένες των γωνιών είναι τα Z.

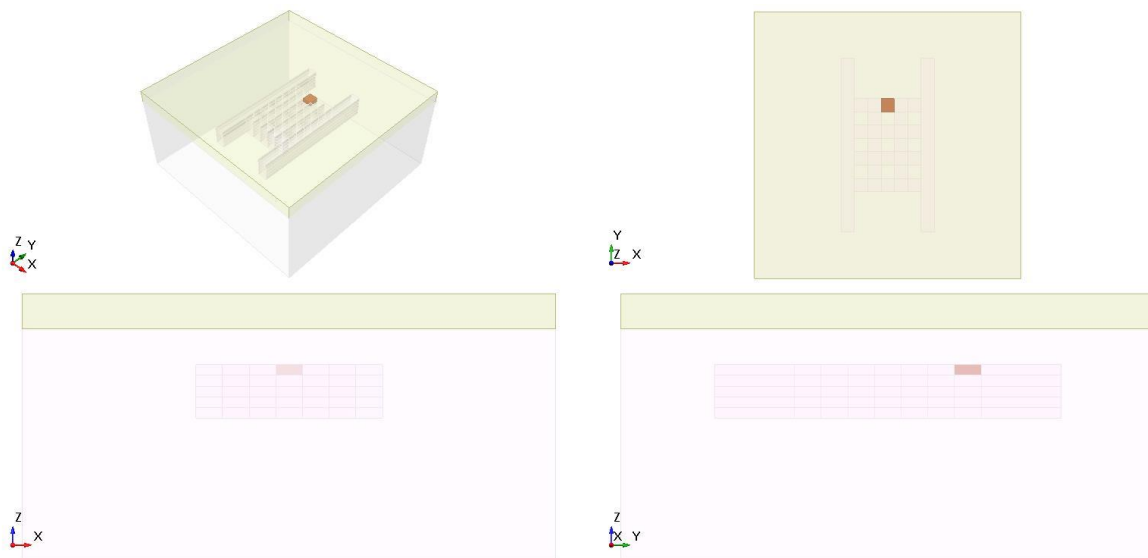


Σχήμα 3.3.2.1.2: Εισαγωγή των θαλάμων που πρόκειται να εκσκαφθούν

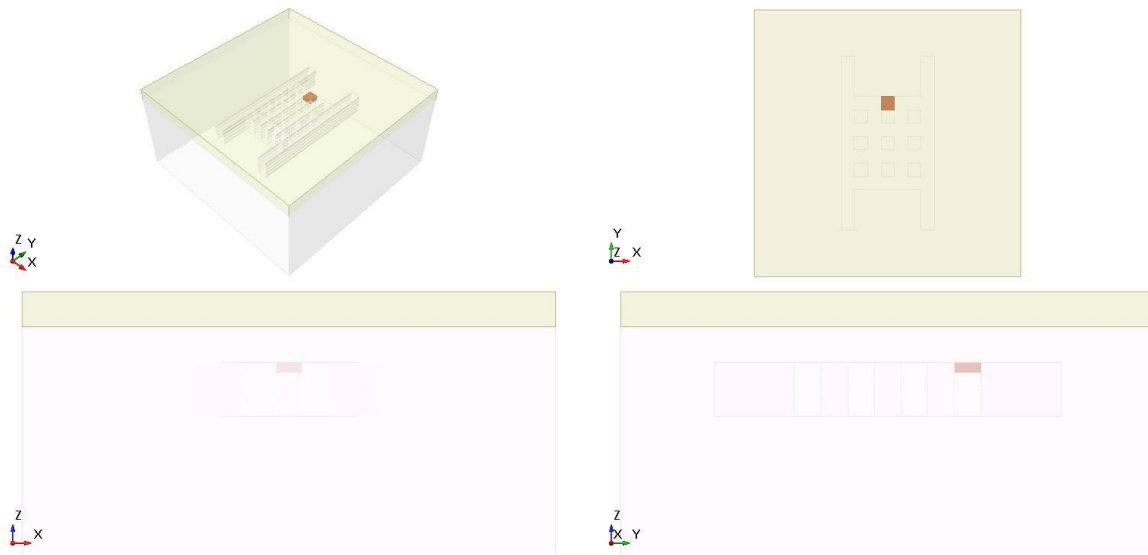
- **Εκχώρηση των υλικών:** Έχοντας καθορίσει τα όρια των εκσκαφών, γίνεται η εκχώρηση των υλικών στις κατάλληλες θέσεις, αλλάζοντας την ιδιότητα τους μέσω του παραθύρου ιδιοτήτων. Η σειρά με την οποία γίνονται οι εκσκαφές αναλύεται στην παράγραφο 3.3.2.2. Στο RS3 δεν υπάρχει εντολή Excavate (όπως υπάρχει στο

RS2), αλλά η εκσκαφή των θαλάμων γίνεται αλλάζοντας το υλικό τους σε «No Material».

- **Διαχωρισμός εκσκαφών σε τμήματα (segmenter):** Σειρά έχει η διαίρεση των εκσκαφών σε πολλαπλά τμήματα παράλληλων περιοχών με σκοπό την αύξηση της ακρίβειας των κατανομών των αποτελεσμάτων. Επιλέγοντας την εκάστοτε εκσκαφή και μέσω της εντολής Geometry → 3D Boolean → Segmenter, μπορεί να καθοριστεί το μονοπάτι (ή αλλιώς η κατεύθυνση κοπής) και το μήκος του κάθε τμήματος (1m).
- **Διαίρεση όλων των γεωμετριών:** Τώρα που έχει οριστεί το εξωτερικό πλαίσιο και τα αντικείμενα που θα κοπούν σε αυτό, μπορεί να εφαρμοστεί η διαίρεση των γεωμετριών. Αφού επιβεβαιωθεί ότι καμία από τις γεωμετρίες δεν είναι επιλεγμένη, ακολουθείται η εντολή Geometry → 3D Boolean → Divide All Geometry. Στο παράθυρο διαλόγου «Divide All Parameters» που εμφανίζεται, διατηρείται η προεπιλεγμένη ποιότητα και επιλέγεται το OK για να ολοκληρωθεί η διαίρεση. Δυστυχώς η υπολογιστική ισχύς δεν επιτρέπει την ολοκλήρωση της διαίρεσης όλων των γεωμετριών, αφού ο διαχωρισμός των εκσκαφών σε τμήματα μήκους 1m δημιουργεί χιλιάδες γεωμετρίες. Έτσι, ο διαχωρισμός των εκσκαφών σε τμήματα παραλείπεται.

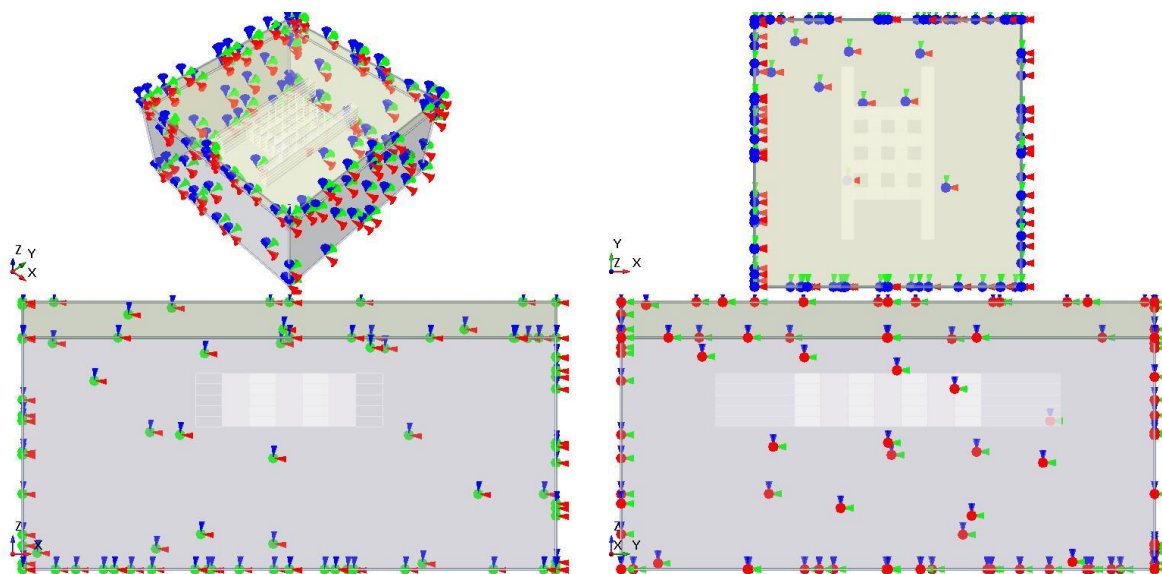


Σχήμα 3.3.2.1.3: Διαίρεση όλων των γεωμετριών (Initial)



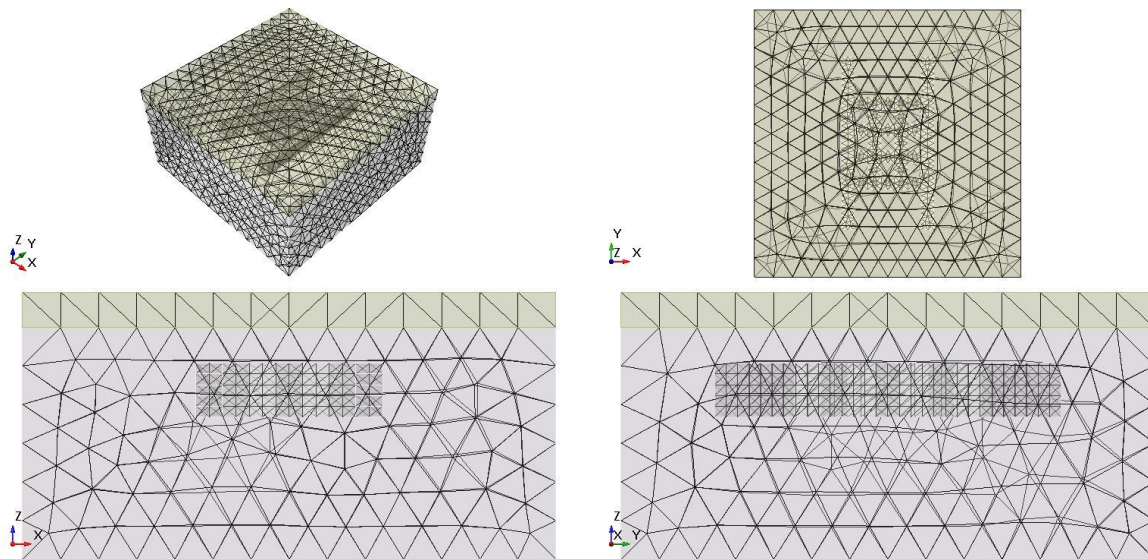
Σχήμα 3.3.2.1.4: Διαίρεση όλων των γεωμετριών (5th Bench)

- **Καθορισμός τασικού πεδίου:** Στη συνέχεια, γίνεται η αλλαγή του τασικού πεδίου από υδροστατικό ($K=1$) σε ανισοτασικό ($K=0,5$). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εντολής Loading \rightarrow Field Stress, αλλάζοντας τις οριζόντιες τάσεις (horizontal stresses) από 1 σε 0,5.
- **Ορισμός οριακών συνθηκών:** Για την εκχώρηση περιορισμών στα εξωτερικά όρια του μοντέλου αξιοποιείται το ενσωματωμένο εργαλείο «Auto Restrain» που φέρει το RS3. Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται το «Auto Restrain (Surface)» μέσω της μπάρας των Restraints.



Σχήμα 3.3.2.1.5: Ορισμός αυτόματων οριακών συνθηκών (επιφανείας)

- **Δημιουργία πλέγματος (Meshing):** Σειρά έχει η δημιουργία πλέγματος. Μέσω της εντολής Mesh → Mesh Settings, επιβεβαιώνεται πως το Element Type είναι 4-Noded Tetrahedra και το Mesh Gradation ότι είναι Graded. Επιλέγονται τα 4-Noded Tetrahedra έναντι των 10-Noded Tetrahedra για να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος, μιας και η γεωμετρία του μοντέλου φέρει ήδη αρκετά στοιχεία. Εφόσον ο έλεγχος των Mesh Settings ολοκληρωθεί, γίνεται η προχώρηση στη δημιουργία του πλέγματος μέσω της εντολής «Mesh».



Σχήμα 3.3.2.1.6: Δημιουργία πλέγματος (meshing)

Με την ολοκλήρωση του mesh, το μοντέλο είναι έτοιμο να υπολογίσει (Compute) και να ερμηνεύσει (Interpret) τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

3.3.2.2 Στάδια προσομοίωσης

Η προσομοίωση του μοντέλου στο τρισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS3 γίνεται σε 31 στάδια:

- Το πρώτο στάδιο αφορά το εντατικό πεδίο που υπάρχει προτού λάβει χώρα οποιαδήποτε εκσκαφή.
- Στο δεύτερο στάδιο χαλαρώνονται οι περιοχές των drifts του πρώτου bench, που πρόκειται να εκσκαφθούν.
- Στο τρίτο στάδιο πραγματοποιείται η εκσκαφή των drifts του πρώτου bench.
- Στο τέταρτο στάδιο χαλαρώνονται οι περιοχές των οριζόντιων crosscuts 1 του πρώτου bench, που πρόκειται να εκσκαφθούν.

- Στο πέμπτο στάδιο πραγματοποιείται η εκσκαφή των οριζόντιων crosscuts 1 του πρώτου bench.
- Στο έκτο στάδιο χαλαρώνονται οι περιοχές των κάθετων crosscuts 2 του πρώτου bench, που πρόκειται να εκσκαφθούν.
- Στο έβδομο στάδιο πραγματοποιείται η εκσκαφή των κάθετων crosscuts 2 του πρώτου bench.

Με το πέρας του 7^{ου} σταδίου ολοκληρώνεται η δημιουργία του πρώτου bench των 6m. Εφόσον η εκμετάλλευση αποτελείται από πέντε τέτοια bench, τα βήματα 2 έως 7 επαναλαμβάνονται μέχρι το 31^ο στάδιο και την δημιουργία των τελικών στύλων ύψους 30m.

3.3.2.3 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Με την ολοκλήρωση των υπολογισμών, σειρά έχει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Από την καρτέλα των αποτελεσμάτων (Results), μπορούν να αναλυθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου. Σε πρώτη φάση, γίνεται ανανέωση των αποτελεσμάτων μέσω της εντολής Interpret → Refresh All Results. Η ανανέωση των αποτελεσμάτων δίνει τη δυνατότητα να προβληθούν τα νέα αποτελέσματα του μοντέλου. Παρά το γεγονός πως δεν υπήρχαν προηγούμενα αποτελέσματα από αυτό το μοντέλο, είναι συνετό να ανανεώνονται τα αποτελέσματα πριν τη δημιουργία νέων διαγραμμάτων.

Στην επάνω δεξιά γωνία της οθόνης εμφανίζονται δύο αναπτυσσόμενα μενού; το Element = Solids (Στοιχείο = Στερεά) και το Data Type = Sigma 1 Effective (Τύπος Δεδομένων = Ενεργός Σίγμα 1) από προεπιλογή. Σε αντίθεση με το RS2 που το επιθυμητό επίπεδο εμφανίζεται κατευθείαν, στο RS3 αυτό πρέπει να εμφανιστεί μέσω της εντολής Interpret → Show Data On Plane → XZ Plane. Το επιθυμητό επίπεδο «τέμνει» τον κεντρικό στύλο κατά XZ και οι συντεταγμένες του επιπέδου είναι οι $(x, y, z) = (0,0,0)$. Μετά την εισαγωγή των συντεταγμένων, επιλέγεται προσθήκη (Add) και κλείσιμο (Close).

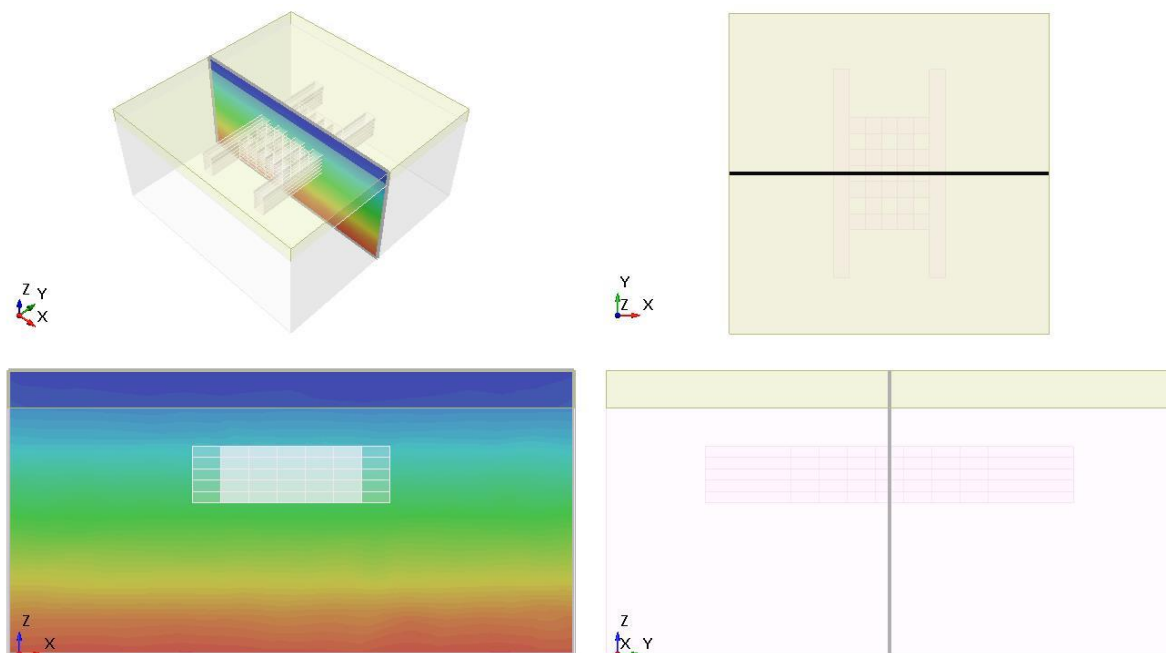
Για την εμφάνιση των σημείων που έχουν αστοχήσει ακολουθείται η εντολή Interpret → Yielded Elements → Show All Yielded Elements. Οι αστοχίες μπορεί να οφείλονται σε διάτμηση ή/και σε εφελκυσμό. Όπως το RS2, έτσι και το RS3, επιτρέπει στους χρήστες να αναζητούν δεδομένα σε οποιοδήποτε σημείο του υλικού μέσω της εντολής Interpret → Queries → Add Line Query. Τα queries εισάγονται στις ίδιες περιοχές των στύλων (στέψη και το μέσο του ύψους) για την μετέπειτα συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Το

κάθε query αναφέρεται στο αντίστοιχο stage που απαριθμεί. Επιγραμματικά, η αντιστοίχιση ανάμεσα στα stages και τις αναλύσεις της Α' Ομάδας Αναλύσεων έχει ως εξής:

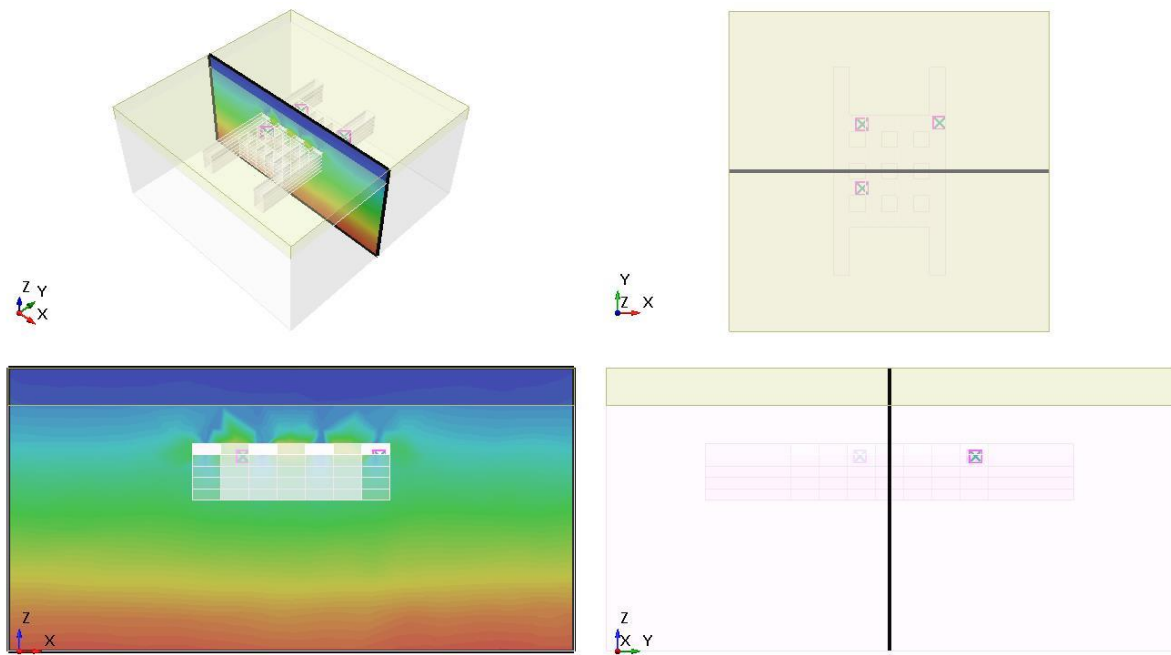
- Stage 7 → Ολοκλήρωση πρώτου bench → Ανάλυση Α.1
- Stage 13 → Ολοκλήρωση δεύτερου bench → Ανάλυση Α.2
- Stage 19 → Ολοκλήρωση τρίτου bench → Ανάλυση Α.3
- Stage 25 → Ολοκλήρωση τέταρτου bench → Ανάλυση Α.4
- Stage 31 → Ολοκλήρωση πέμπτου bench → Ανάλυση Α.5

Στις εκμεταλλεύσεις της Α' Ομάδας Αναλύσεων, παρουσιάζονται μερικά τοπικά σημεία αστοχίας σε διάτμηση και εφελκυσμό, όπως φαίνεται στα παρακάτω Σχήματα. Πιο συγκεκριμένα, αυτά εμφανίζονται κάτω από τα δάπεδα των θαλάμων και εξαφανίζονται με την εκσκαφή τους.

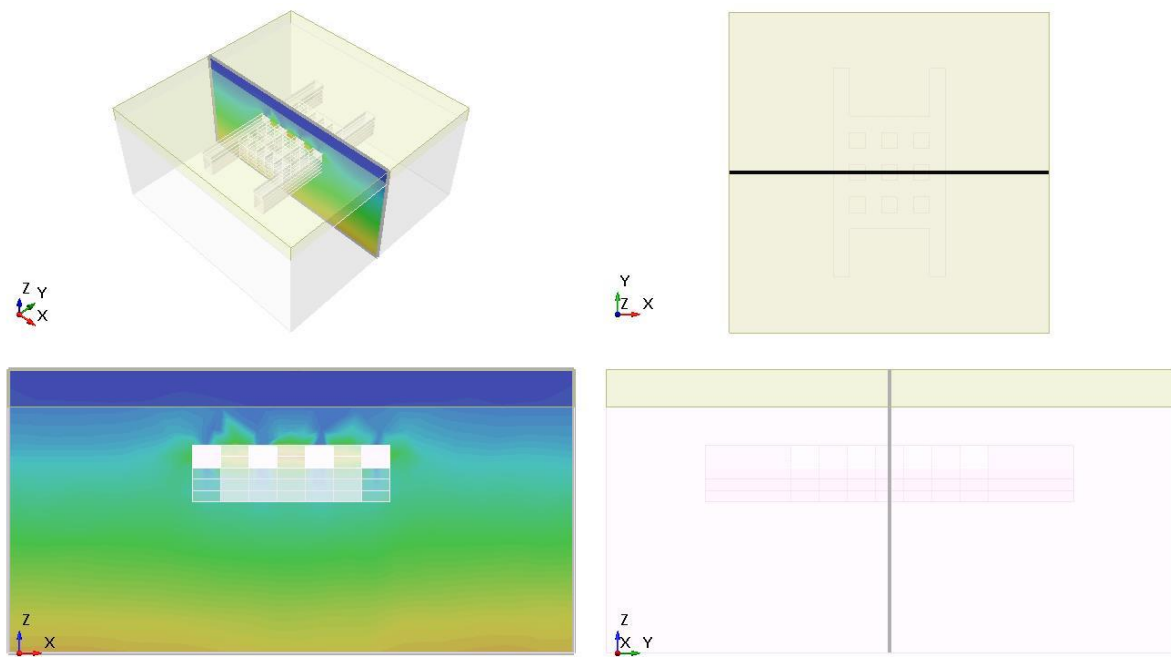
Από τις ισοϋψείς των σ_1 στους στύλους του τρισδιάστατου μοντέλου παρατηρείται μεγαλύτερη καταπόνηση στο μέσο του ύψους των δημιουργούμενων στύλων σε σχέση με τις στέψεις τους.



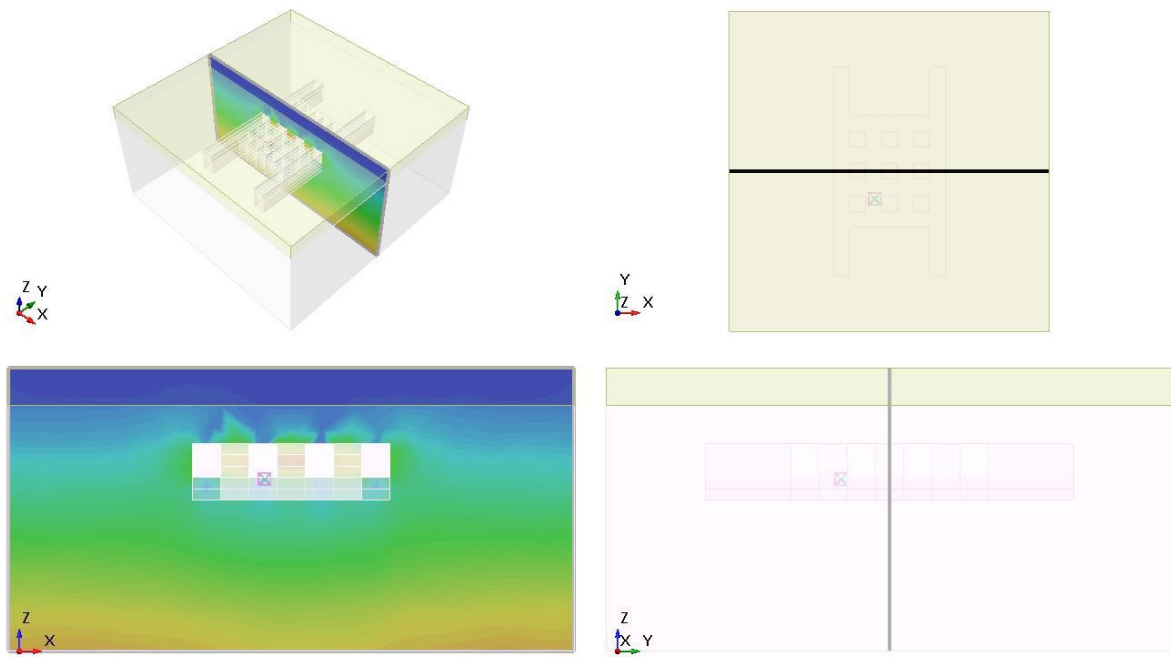
Σχήμα 3.3.2.3.1: Ισοϋψείς των σ_1 πριν από οποιαδήποτε εκσκαφή (RS3)



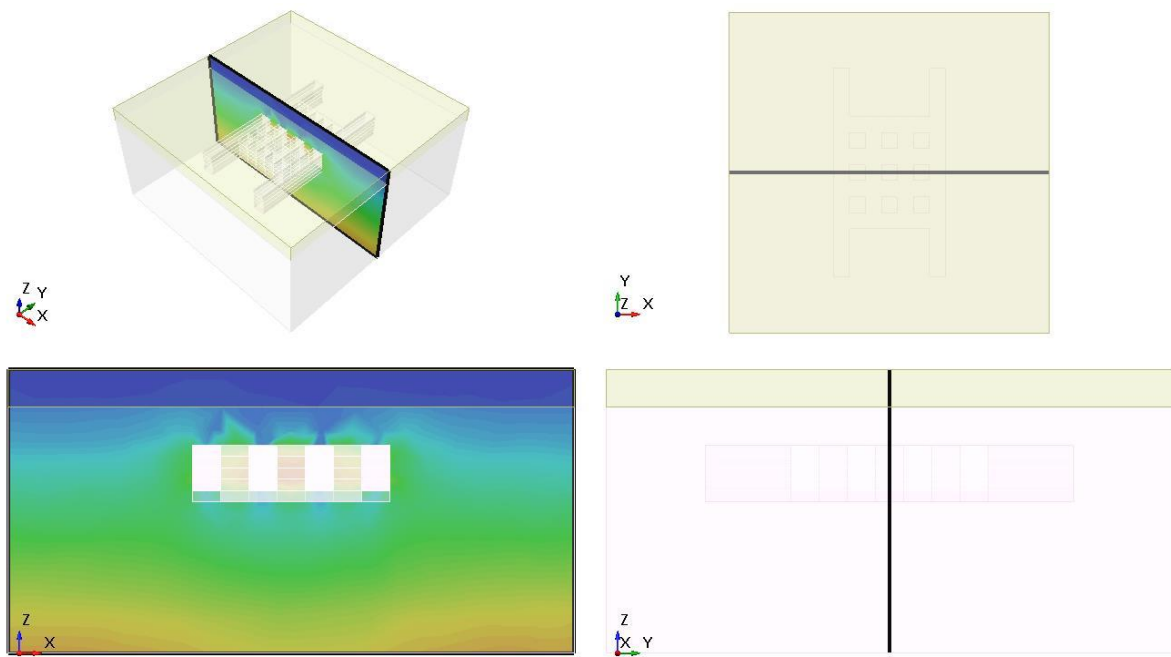
Σχήμα 3.3.2.3.2: Ισοϋψείς των σ_1 μετά την ολοκλήρωση του πρώτου bench (RS3)



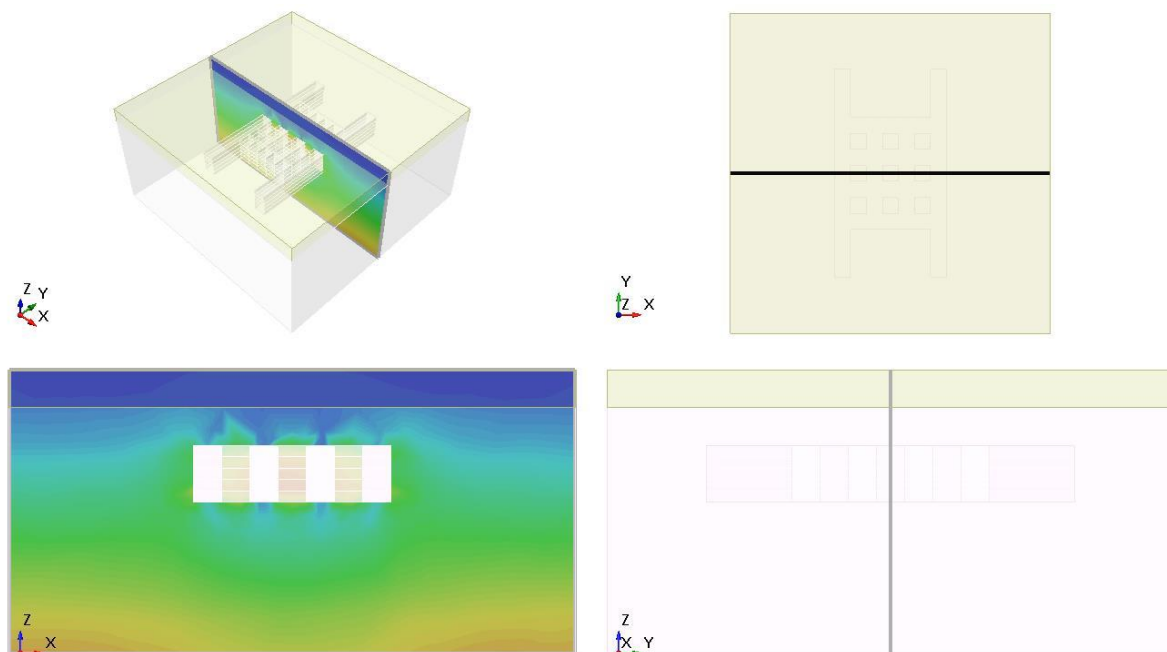
Σχήμα 3.3.2.3.3: Ισοϋψείς των σ_1 μετά την ολοκλήρωση του δεύτερου bench (RS3)



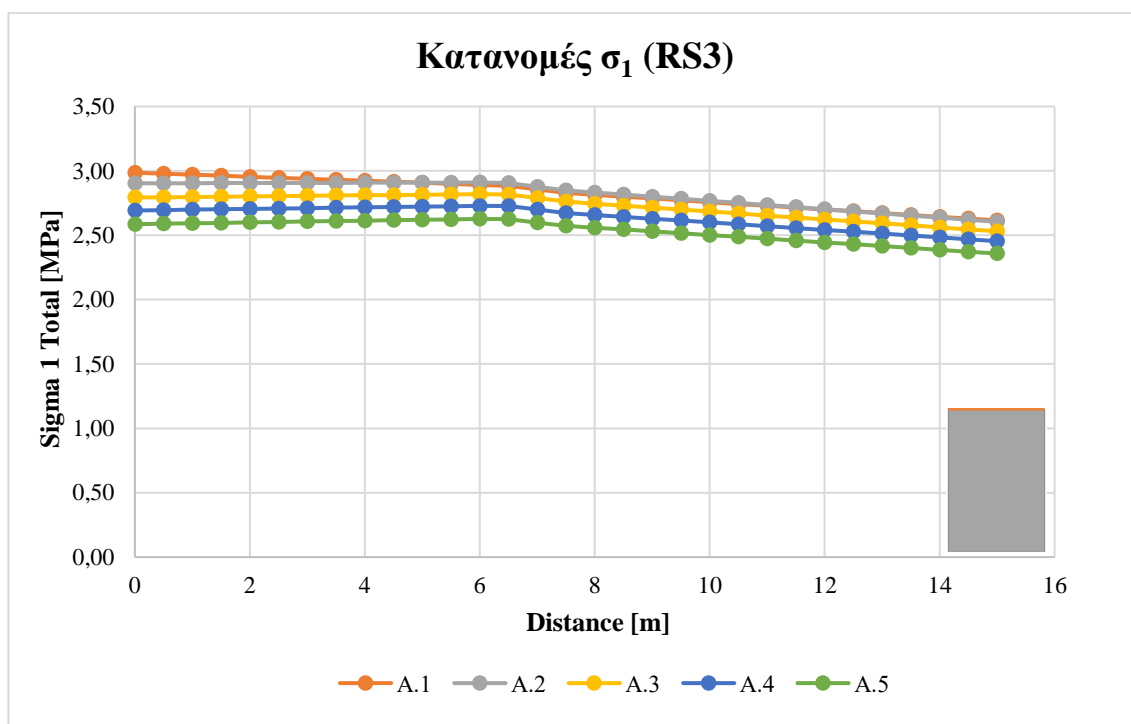
Σχήμα 3.3.2.3.4: Ισοϋψείς των σ_1 μετά την ολοκλήρωση του τρίτου bench (RS3)



Σχήμα 3.3.2.3.5: Ισοϋψείς των σ_1 μετά την ολοκλήρωση του τέταρτου bench (RS3)



Σχήμα 3.3.2.3.6: Ισοψείς των σ_1 μετά την ολοκλήρωση του πέμπτου bench (RS3)



Σχήμα 3.3.2.3.7: Κατανομές των σ_1 στη στέψη των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων, όπως προκύπτουν από το λογισμικό RS3

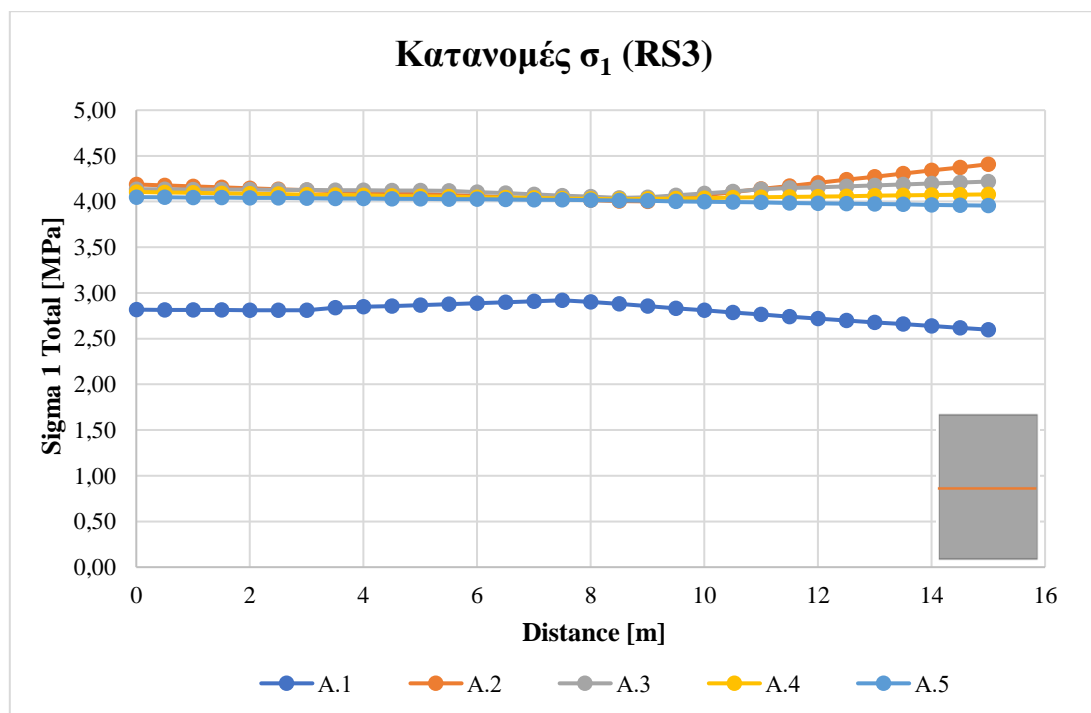
Οι κατανομές των σ_1 στη στέψη των στύλων, όπως προκύπτουν από το τρισδιάστατο μοντέλο, δεν θυμίζουν σε καμία περίπτωση τις αντίστοιχες κατανομές των προηγούμενων μοντέλων. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στην αδυναμία διαχωρισμού των εκσκαφών σε τμήματα, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.3.2.1. Παρά τη μορφή των κατανομών, οι

μέχρι έως τώρα παρατηρήσεις για μείωση της σ_p στη στέψη όσο μειώνεται ο λόγος W_p/H_p επιβεβαιώνονται. Οι μέσες ορθές τάσεις σ_p που ασκούνται στη στέψη των στύλων είναι οι εξής:

- Ανάλυση A.1 $\rightarrow \sigma_p = 2,82$ MPa
- Ανάλυση A.2 $\rightarrow \sigma_p = 2,81$ MPa
- Ανάλυση A.3 $\rightarrow \sigma_p = 2,72$ MPa
- Ανάλυση A.4 $\rightarrow \sigma_p = 2,63$ MPa
- Ανάλυση A.5 $\rightarrow \sigma_p = 2,53$ MPa

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι μέσες ορθές τάσεις σ_p που ασκούνται στο μέσο του ύψους του εκάστοτε δημιουργούμενου στύλου, ως αποτέλεσμα της μεθόδου των θαλάμων και στύλων:

- Ανάλυση A.1 $\rightarrow \sigma_p = 2,80$ MPa
- Ανάλυση A.2 $\rightarrow \sigma_p = 4,14$ MPa
- Ανάλυση A.3 $\rightarrow \sigma_p = 4,13$ MPa
- Ανάλυση A.4 $\rightarrow \sigma_p = 4,06$ MPa
- Ανάλυση A.5 $\rightarrow \sigma_p = 4,01$ MPa

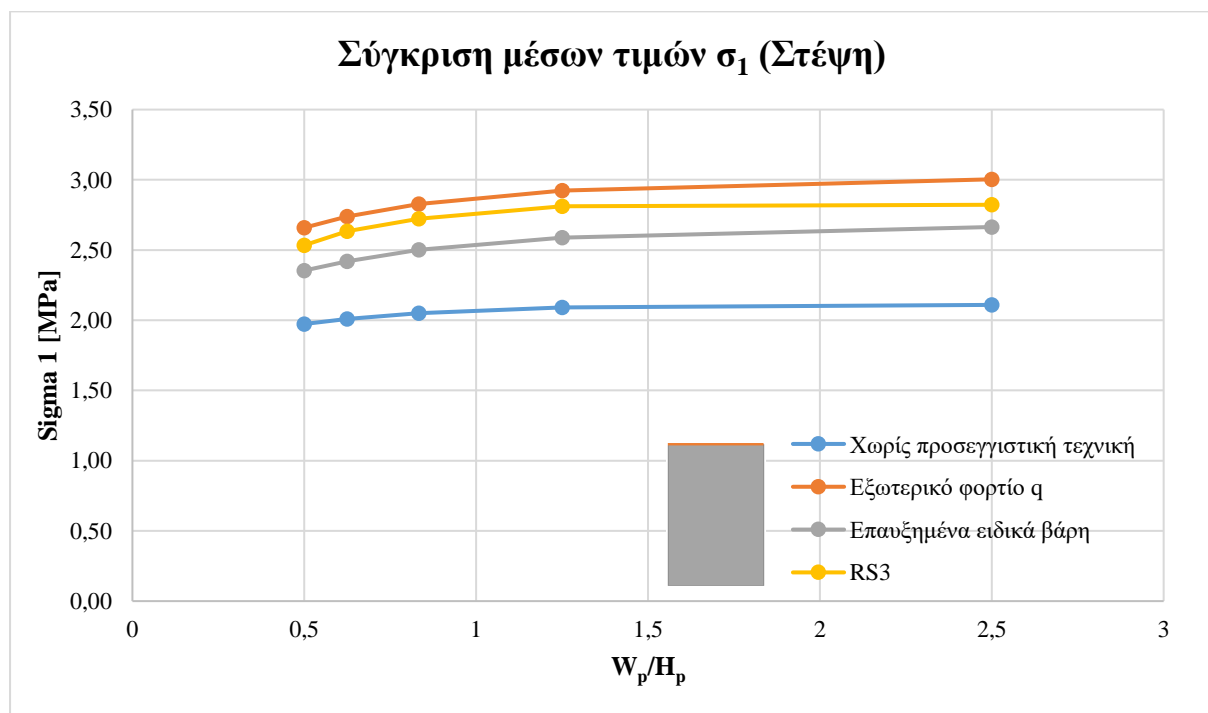


Σχήμα 3.3.2.3.8: Κατανομές των σ_1 στο μέσο του ύψους των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων, όπως προκύπτουν από το λογισμικό RS3

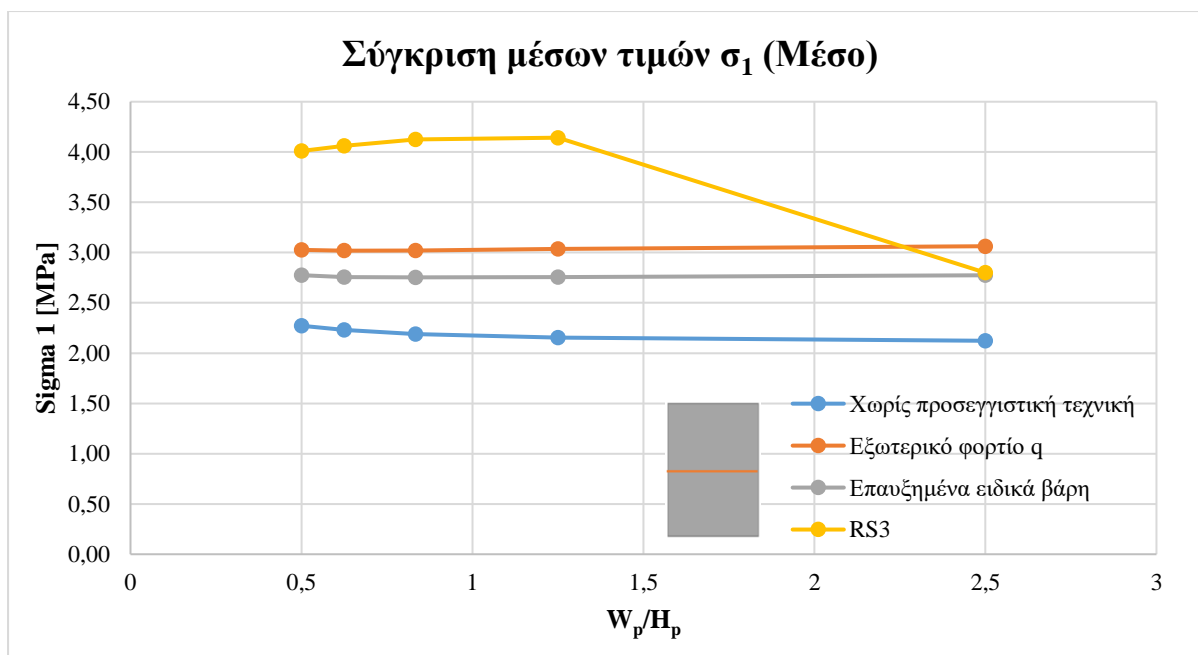
Οι μορφές των κατανομών των σ_1 στο μέσο του ύψους των στύλων του RS3 παραπέμπουν περισσότερο στις αντίστοιχες μορφές των κατανομών που συναντώνται στα διδιάστατα μοντέλα. Οι μέγιστες κύριες τάσεις σ_1 που ασκούνται στο μέσο του ύψους του στύλου της Ανάλυσης A.1 παρουσιάζουν πολύ χαμηλότερες τιμές σε σύγκριση με τις υπόλοιπες αναλύσεις. Στις υπόλοιπες αναλύσεις, οι σ_1 μειώνονται στο μέσο του ύψους των στύλων με μείωση του λόγου W_p/H_p .

3.3.3 Επιλογή προσεγγιστικής τεχνικής

Έχοντας παραθέσει και σχολιάσει τα αποτελέσματα που αφορούν τις κατανομές των σ_1 στη στέψη και στο μέσο του ύψους των δημιουργούμενων στύλων, τόσο για τα μοντέλα του RS2 όσο και για το μοντέλο του RS3, μπορεί να γίνει τώρα η συγκριτική τους αξιολόγηση. Στα Σχήματα που ακολουθούν καταγράφονται οι μέσες τιμές των σ_1 για το εύρος των λόγων W_p/H_p που παρουσιάζουν οι στύλοι των Αναλύσεων της Α' Ομάδας:



Σχήμα 3.3.3.1: Σύγκριση μεταξύ των μέσων τιμών των σ_1 στη στέψη των στύλων



Σχήμα 3.3.3.2: Σύγκριση μεταξύ των μέσων τιμών των σ_1 στο μέσο του ύψους των στύλων

Η εύρεση της κατάλληλης προσεγγιστικής τεχνικής γίνεται μέσω της σύγκρισης των ποσοστών μεταβολής των μέσων τιμών των σ_1 των μοντέλων του RS2 σε σχέση με τις αντίστοιχες του RS3. Έτσι, προκύπτουν οι ακόλουθοι Πίνακες:

Πίνακας 3.3.3.1: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των μέσων τιμών των σ_1 (Στέψεις)

Ανάλυση	RS2						RS3
	Χωρίς προσεγγιστική τεχνική		Εξωτερικό φορτίο q		Επαυξημένα ειδικά βάρη		
	Στέψη	%	Στέψη	%	Στέψη	%	
A.1	2,11	-25,27	3,00	6,42	2,66	-5,61	2,82
A.2	2,09	-25,63	2,92	3,93	2,59	-7,97	2,81
A.3	2,05	-24,72	2,83	3,86	2,50	-8,14	2,72
A.4	2,01	-23,76	2,74	3,93	2,42	-8,16	2,63
A.5	1,97	-22,14	2,66	4,93	2,35	-7,10	2,53

Πίνακας 3.3.3.2: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των μέσων τιμών των σ_1 (Μέσο του ύψους)

Ανάλυση	RS2						RS3
	Χωρίς προσεγγιστική τεχνική		Εξωτερικό φορτίο q		Επαυξημένα ειδικά βάρη		
	Μέσο ύψους	%	Μέσο ύψους	%	Μέσο ύψους	%	
A.1	2,12	-24,17	3,06	9,41	2,77	-0,90	2,80
A.2	2,16	-47,96	3,04	-26,70	2,76	-33,48	4,14
A.3	2,19	-46,91	3,02	-26,74	2,75	-33,25	4,13
A.4	2,23	-45,10	3,02	-25,66	2,76	-32,12	4,06

A.5	2,27	-43,34	3,03	-24,57	2,77	-30,83	4,01
-----	------	--------	------	--------	------	--------	------

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω πινάκων και τον υπολογισμό των μέσων τιμών των ποσοστών μεταβολής ανά μοντέλο, φαίνεται πως η προσεγγιστική τεχνική του εξωτερικού φορτίου q προσεγγίζει καλύτερα τα αποτελέσματα του τρισδιάστατου μοντέλου σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Πιο συγκεκριμένα, οι μέσες τιμές των ποσοστών μεταβολής στη στέψη έχουν ως εξής:

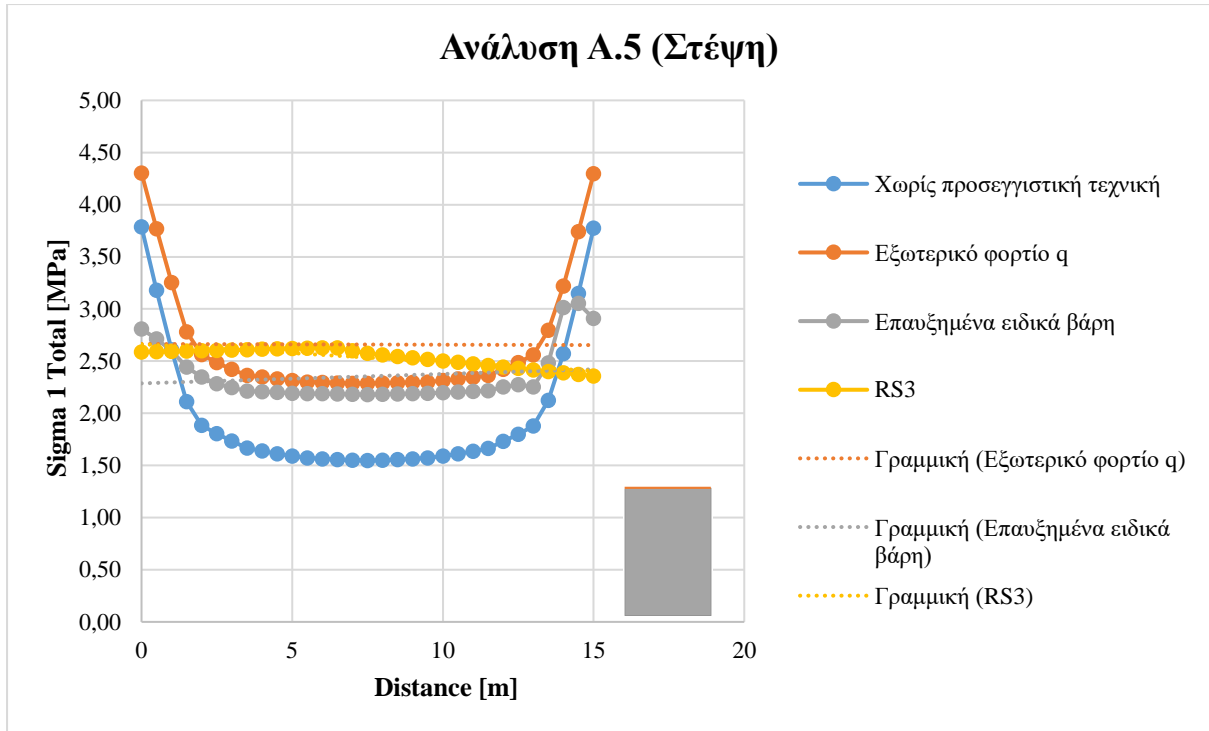
- Χωρίς προσεγγιστική τεχνική: -24,30%
- Εξωτερικό φορτίο q : 4,61%
- Επαυξημένα ειδικά βάρη: -7,40%

Ενώ στο μέσο του ύψους ως εξής:

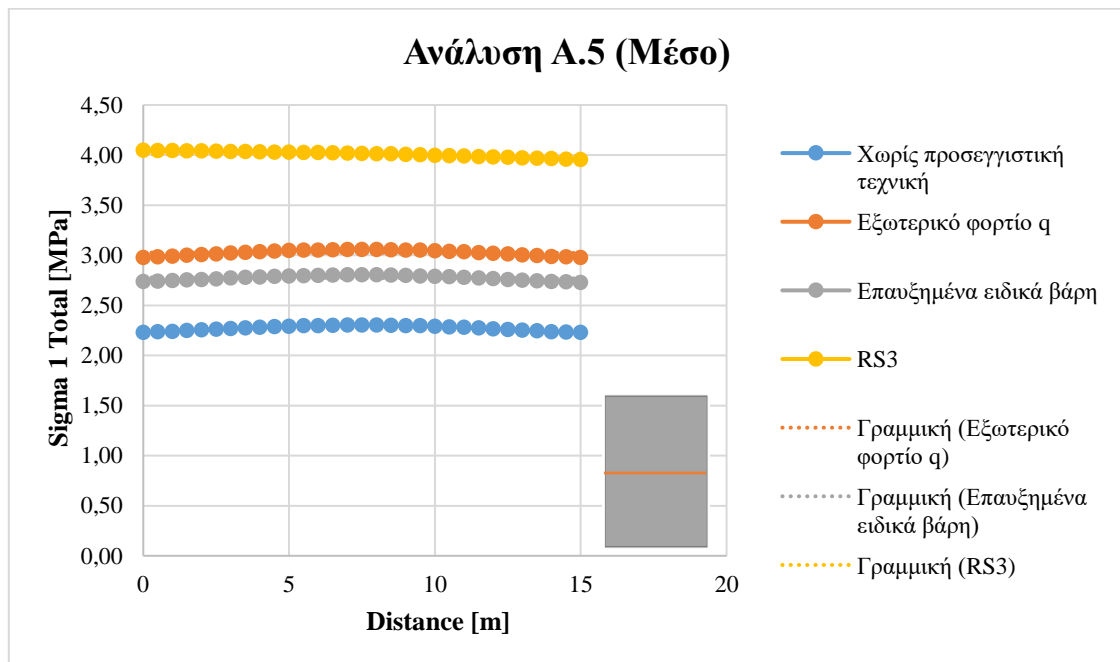
- Χωρίς προσεγγιστική τεχνική: -41,50%
- Εξωτερικό φορτίο q : -18,85%
- Επαυξημένα ειδικά βάρη: -26,12%

Η τεχνική επιβολής του εξωτερικού φορτίου q δίνει μέσες ορθές τάσεις (σ_p) στη στέψη με σφάλμα της τάξης του +5% κατά μέσο όρο, δηλαδή υπερεκτιμά τις πραγματικές μέγιστες κύριες τάσεις σ_1 . Στο μέσο του ύψους των στύλων, το αντίστοιχο σφάλμα ανέρχεται στο -19% κατά μέσο όρο, δείχνοντας πως η προσεγγιστική τεχνική που επιλέγεται υποεκτιμά αρκετά τις μέγιστες κύριες τάσεις σ_1 . Έτσι, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις μετέπειτα αναλύσεις θα πρέπει να αξιολογούνται προσεκτικά κάθε φορά, καθώς δεν αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές τιμές που συναντώνται στο πεδίο.

Στα παρακάτω Σχήματα απεικονίζονται, ενδεικτικά, οι κατανομές των σ_1 (όλων των μοντέλων) στις περιοχές ενδιαφέροντος του στύλου της Ανάλυσης A.5. Τα σχήματα που αφορούν τις υπόλοιπες αναλύσεις δίνονται στο παράρτημα.



Σχήμα 3.3.3.3: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στη στέψη του στύλου της Ανάλυσης A.5



Σχήμα 3.3.3.4: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στο μέσο του ύψους του στύλου της Ανάλυσης A.5

3.4 Μελέτη ευστάθειας παραμετρικών αναλύσεων

Η ευστάθεια των παραμετρικών αναλύσεων θα αξιολογηθεί με δύο μελέτες. Η πρώτη βασίζεται σε εμπειρικές τεχνικές για τον υπολογισμό των συντελεστών ασφαλείας, ενώ η δεύτερη σε αριθμητικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων.

3.4.1 Εμπειρική μελέτη ευστάθειας

Η εμπειρική μελέτη αξιοποιεί τις εμπειρικές σχέσεις των Obert & Duvall, Lunder & Pakalnis και Esterhuizen et al. για την εκτίμηση της αντοχής, και τη θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας για την εκτίμηση των τάσεων.

Από την ανάλυση των παραπάνω εμπειρικών σχέσεων στην παράγραφο 2.4.2, γίνεται αντιληπτό πως κανένας από αυτούς δεν λαμβάνει υπόψη τον γεωλογικό δείκτη GSI για τον υπολογισμό της αντοχής των στύλων (C_p). Επομένως, δεν υπάρχει νόημα υπολογισμού των συντελεστών ασφαλείας των στύλων της Γ' Ομάδας Αναλύσεων, καθώς πρόκειται να είναι ίσοι με τους αντίστοιχους της Α' Ομάδας. Με την ίδια λογική, οι αντοχές των στύλων της Δ' Ομάδας Αναλύσεων υπολογίζονται μόνο από την εμπειρική σχέση των Esterhuizen et al., μιας και είναι η μόνη σχέση που συνυπολογίζει την επίδραση του δικτύου ασυνεχειών.

Αναφορικά με τη σχέση των Obert & Duvall, οι αντοχές των άρρηκτων δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη (UCS) απομειώνονται κατά 1/2 για τον υπολογισμό της αντοχής των στύλων. Σχετικά με τον παράγοντα LDF των Esterhuizen et al., στις Α', Β' και Ε' Ομάδες Αναλύσεων αυτός θεωρείται ίσος με τη μονάδα μιας και η μέση συχνότητα ασυνεχειών (FF) ανά στύλο είναι 0. Στην Δ' Ομάδα Αναλύσεων, όπου υπάρχει δίκτυο ασυνεχειών, ο συντελεστής DDF λαμβάνεται από τον Πίνακα 2.4.2.3.1, ανάλογα το σχήμα του εκάστοτε στύλου και για κλίση ασυνεχειών ίση με 60°. Βάσει των χαρακτηριστικών των ασυνεχειών της Δ' Ομάδας Αναλύσεων, η μέση συχνότητα ασυνεχειών ανά στύλο είναι 3,0, επομένως ο συντελεστής FF προκύπτει από τον Πίνακα 2.4.2.3.2 ίσος με 0,95.

Α' Ομάδα Αναλύσεων

Σύμφωνα με τη θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας, για τον υπολογισμό της μέσης ορθής τάσης (σ_p) που ασκείται στον στύλο απαιτείται πρώτα ο προσδιορισμός της κατακόρυφης τάσης (S_v), η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$S_v = \gamma \cdot h = (\gamma_{\sigma\chi\iota\sigma\tau} \cdot h_{\sigma\chi\iota\sigma\tau}) + (\gamma_{\mu\alpha\rho\mu} \cdot h_{\mu\alpha\rho\mu})$$

$$= \left(25 \frac{kN}{m^3} \cdot 20m \right) + \left(27,5 \frac{kN}{m^3} \cdot 20m \right) = 1,05 MPa$$

Εφόσον ο στύλος είναι τετραγωνικής διατομής, η μέση ορθή τάση (σ_p) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_p = \gamma \cdot h \cdot \left(1 + \frac{W_R}{W_p} \right)^2 = 1,05 MPa \cdot \left(1 + \frac{15m}{15m} \right)^2 = 4,2 MPa$$

Από τις εμπειρικές σχέσεις και τον ορισμό του συντελεστή ασφαλείας, προκύπτουν τα εξής:

- **Ανάλυση A.1**

Obert & Duvall

$$C_p = C_1 \cdot \left(0,778 + 0,222 \cdot \frac{W_p}{H_p} \right) = 0,5 \cdot 90 MPa \cdot \left(0,778 + 0,222 \cdot \frac{15m}{6m} \right) = 59,985 MPa$$

$$F_{Obert \& Duvall} = \frac{C_p}{\sigma_p} = \frac{59,985 MPa}{4,2 MPa} = 14,28$$

Lunder & Pakalnis

$$C_{pav} = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} = 0,46 \cdot \left(\log \left(\frac{W}{H} + 0,75 \right) \right)^{\frac{1,4}{(W/H)}} = 0,46 \cdot \left(\log \left(\frac{15m}{6m} + 0,75 \right) \right)^{\frac{1,4}{(15m/6m)}}$$

$$= 0,31615$$

$$\kappa = \tan \left[\cos^{-1} \left(\frac{1 - C_{pav}}{1 + C_{pav}} \right) \right] = \tan \left[\cos^{-1} \left(\frac{1 - 0,31615}{1 + 0,31615} \right) \right] = 1,644443$$

$$C_p = 0,44 \cdot UCS \cdot (0,68 + 0,52\kappa) = 0,44 \cdot 90 MPa \cdot (0,68 + 0,52 \cdot 1,644443)$$

$$= 60,79016 MPa$$

$$F_{Lunder \& Pakalnis} = \frac{C_p}{\sigma_p} = \frac{60,79016 MPa}{4,2 MPa} = 14,47$$

Esterhuizen et al.

$$C_p = 0,65 \cdot UCS \cdot LDF \cdot \frac{W_p^{0,3}}{H_p^{0,59}} = 0,65 \cdot 90 MPa \cdot 1 \cdot \frac{15^{0,3} m}{6^{0,59} m} = 45,8009 MPa$$

$$F_{Esterhuizen \text{ et al.}} = \frac{C_p}{\sigma_p} = \frac{45,8009 \text{ MPa}}{4,2 \text{ MPa}} = 10,90$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι συντελεστές ασφαλείας των στύλων των υπόλοιπων Αναλύσεων. Ο Πίνακας 3.4.1.1 παρουσιάζει συνοπτικά τους συντελεστές ασφαλείας (F), όπως αυτοί προκύπτουν από τις τρεις εμπειρικές σχέσεις και τη θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας:

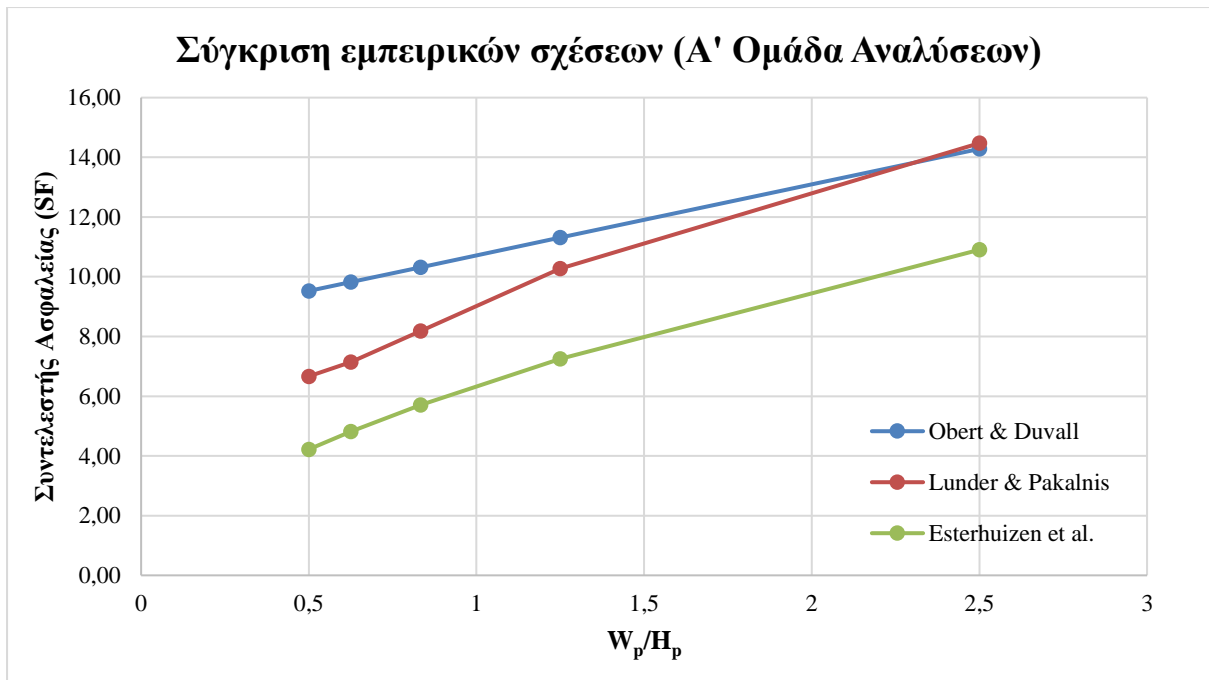
Πίνακας 3.4.1.1: Συντελεστές ασφαλείας στύλων (Εμπειρική μελέτη)

Ανάλυση	F_{Obert & Duvall}	F_{Lunder & Pakalnis}	F_{Esterhuizen et al.}
A.1	14,28	14,47	10,90
A.2	11,31	10,27	7,24
A.3	10,32	8,18	5,70
A.4	9,82	7,14	4,81
A.5	9,53	6,66	4,22
B.1.1	17,46	17,69	13,33
B.1.2	13,82	12,55	8,85
B.1.3	12,61	10,00	6,97
B.1.4	12,01	8,73	5,88
B.1.5	11,64	8,15	5,16
B.2.1	20,63	20,91	15,75
B.2.2	16,34	14,83	10,46
B.2.3	14,90	11,82	8,24
B.2.4	14,19	10,31	6,95
B.2.5	13,76	9,63	6,09
Δ.1	-	-	8,42
Δ.2	-	-	5,59
Δ.3	-	-	2,89
Δ.4	-	-	1,16
Δ.5	-	-	0,45
E.1.1	20,57	20,84	15,70
E.1.2	16,28	14,79	10,43
E.1.3	14,86	11,78	8,21
E.1.4	14,14	10,28	6,93

E.1.5	13,72	9,60	6,08
E.2.1	10,49	10,63	8,01
E.2.2	8,31	7,54	5,32
E.2.3	7,58	6,01	4,19
E.2.4	7,22	5,25	3,54
E.2.5	7,00	4,90	3,10

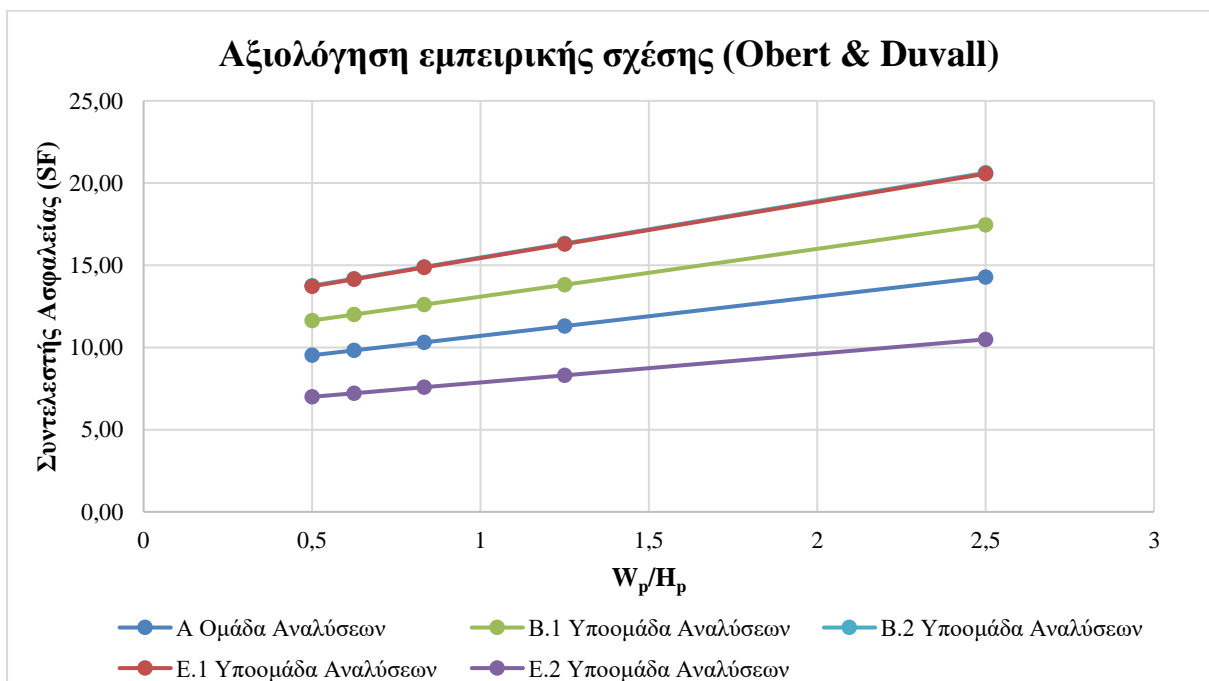
Λαμβάνοντας υπόψη τα εύρη των συντελεστών ασφαλείας που θεωρεί η κάθε εμπειρική σχέση ως αποδεκτά φαίνεται πως μόνο δύο από τους εξεταζόμενους στύλους αστοχούν. Αυτοί οι στύλοι ανήκουν στην Δ' Ομάδα Αναλύσεων και πρόκειται για τις αναλύσεις Δ.4 και Δ.5 με λόγους W_p/H_p ίσους με 0,625 και 0,5 αντίστοιχα. Από τις επιμέρους συγκρίσεις των συντελεστών ασφαλείας (F) του παραπάνω Πίνακα 3.4.1.1, προκύπτουν τα σχήματα που ακολουθούν.

Το Σχήμα 3.4.1.1 συγκρίνει τους συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν από τις τρεις εμπειρικές σχέσεις για τις Αναλύσεις της Ομάδας Α'. Σε όλα τα σχήματα που ακολουθούν, το κάθε σημείο αντιπροσωπεύει και μία Ανάλυση. Έτσι, π.χ. το σημείο (0,5 , 9,525) της Σειράς Obert & Duvall αφορά την Ανάλυση Α.5 κ.ο.κ. Οι μονάδες στον άξονα των X σε κάθε σχήμα είναι σε ανηγμένη μορφή (W_p/H_p). Από το Σχήμα 3.4.1.1 γίνεται αντιληπτό πως η εμπειρική σχέση των Esterhuizen et al. δίνει τις χαμηλότερες τιμές συντελεστών ασφαλείας. Η εμπειρική σχέση των Obert & Duvall, με εξαίρεση το λόγο $W_p/H_p = 2,5$, παρέχει τους μεγαλύτερους συντελεστές ασφαλείας. Όπως είχε αναφερθεί και στην παράγραφο 2.4.2.2, ο συνυπολογισμός της επίδρασης της πλευρικής τάσης σ_3 μέσω της παραμέτρου κ από τους Lunder & Pakalnis, δεν φαίνεται να έχει σημαντικό αντίκτυπο στους συντελεστές ασφαλείας. Η σχέση τους δίνει τιμές αντοχής παρόμοιες με αυτές των υπόλοιπων εμπειρικών σχέσεων, και πιο συγκεκριμένα οι τιμές αυτές κατατάσσονται μεταξύ των τιμών που υπολογίζονται από τις άλλες δύο εμπειρικές σχέσεις.

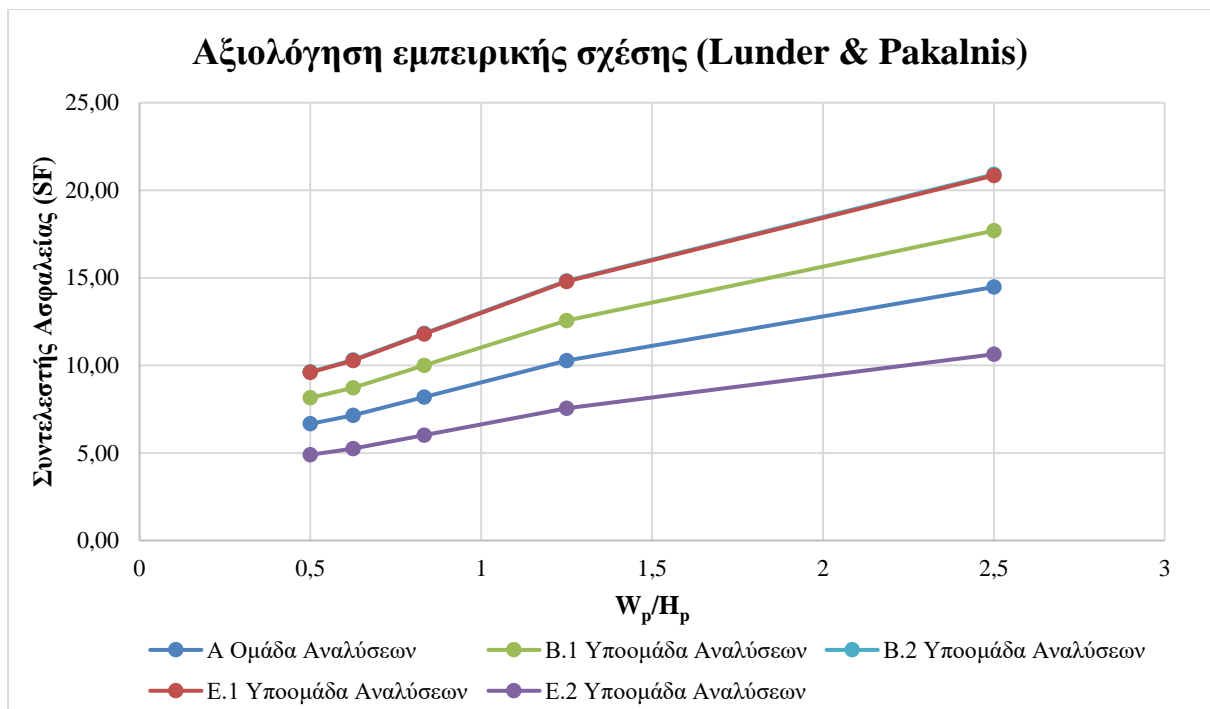


Σχήμα 3.4.1.1: Σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας των στύλων όπως υπολογίζονται από τις τρεις εμπειρικές σχέσεις για τις αναλύσεις της Α' Ομάδας

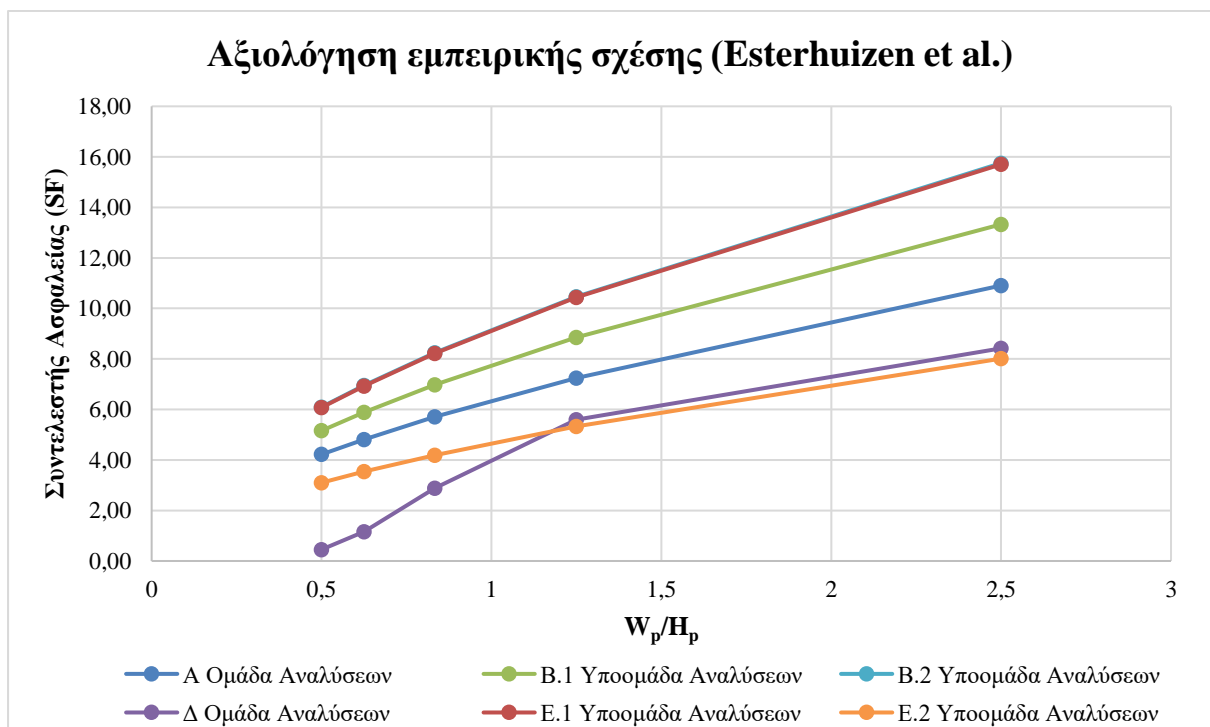
Σημαντική είναι και η σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας που προκύπτουν από την κάθε εμπειρική σχέση για διάφορες Ομάδες Αναλύσεων. Από αυτές τις συγκρίσεις προκύπτουν τα ακόλουθα Σχήματα:



Σχήμα 3.4.1.2: Αξιολόγηση της εμπειρικής σχέσης των Obert & Duvall μέσω σύγκρισης των συντελεστών ασφαλείας των παραμετρικών αναλύσεων



Σχήμα 3.4.1.3: Αξιολόγηση της εμπειρικής σχέσης των Lunder & Pakalnis μέσω σύγκρισης των συντελεστών ασφαλείας των παραμετρικών αναλύσεων



Σχήμα 3.4.1.4: Αξιολόγηση της εμπειρικής σχέσης των Esterhuizen et al. μέσω σύγκρισης των συντελεστών ασφαλείας των παραμετρικών αναλύσεων

Οι κατανομές των συντελεστών ασφαλείας παρουσιάζουν την ίδια μορφή από ομάδα σε ομάδα αναλύσεων, με εξαίρεση την ειδική περίπτωση της Ομάδας Δ'. Η επιρροή του δικτύου ασυνεχειών γίνεται μεγαλύτερη για λόγους πλάτους / ύψος στύλων μικρότερους του 1,25. Θα

μπορούσε να ειπωθεί πως οι κατανομές των συντελεστών ασφαλείας μετατοπίζονται είτε «προς τα πάνω» είτε «προς τα κάτω» ανάλογα την παραμετροποίηση της κάθε Ομάδας Αναλύσεων.

Ένα ενδιαφέρον αντικείμενο σχολιασμού είναι οι κατανομές των συντελεστών ασφαλείας των Αναλύσεων B.2 – E.1, που σχεδόν ταυτίζονται. Οι εμπειρικές σχέσεις, δηλαδή, εκλαμβάνουν ως ίσες τις επιδράσεις της αύξησης της UCS από τα 90MPa στα 130MPa και της μείωσης του πλάτους των θαλάμων από τα 15m στα 10m.

3.4.2 Αριθμητική μελέτη ευστάθειας

3.4.2.1 Οριζόντιες συγκρίσεις και σχολιασμοί αποτελεσμάτων

3.4.2.1.1 Παραμετροποίηση λόγου W_p/H_p (Α' Ομάδα Αναλύσεων)

Όπως έχει αναφερθεί, σκοπός της Α' Ομάδας Αναλύσεων είναι η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των στύλων υπό την παραμετροποίηση του λόγου πλάτους προς ύψος (W_p/H_p) των στύλων. Στην παράγραφο 3.3.1.3 έγινε μια πρώτη ανάλυση της συμπεριφοράς των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων ως προς την μέγιστη κύρια τάση σ_1 και την γενικότερη εικόνα των εκμεταλλεύσεων.

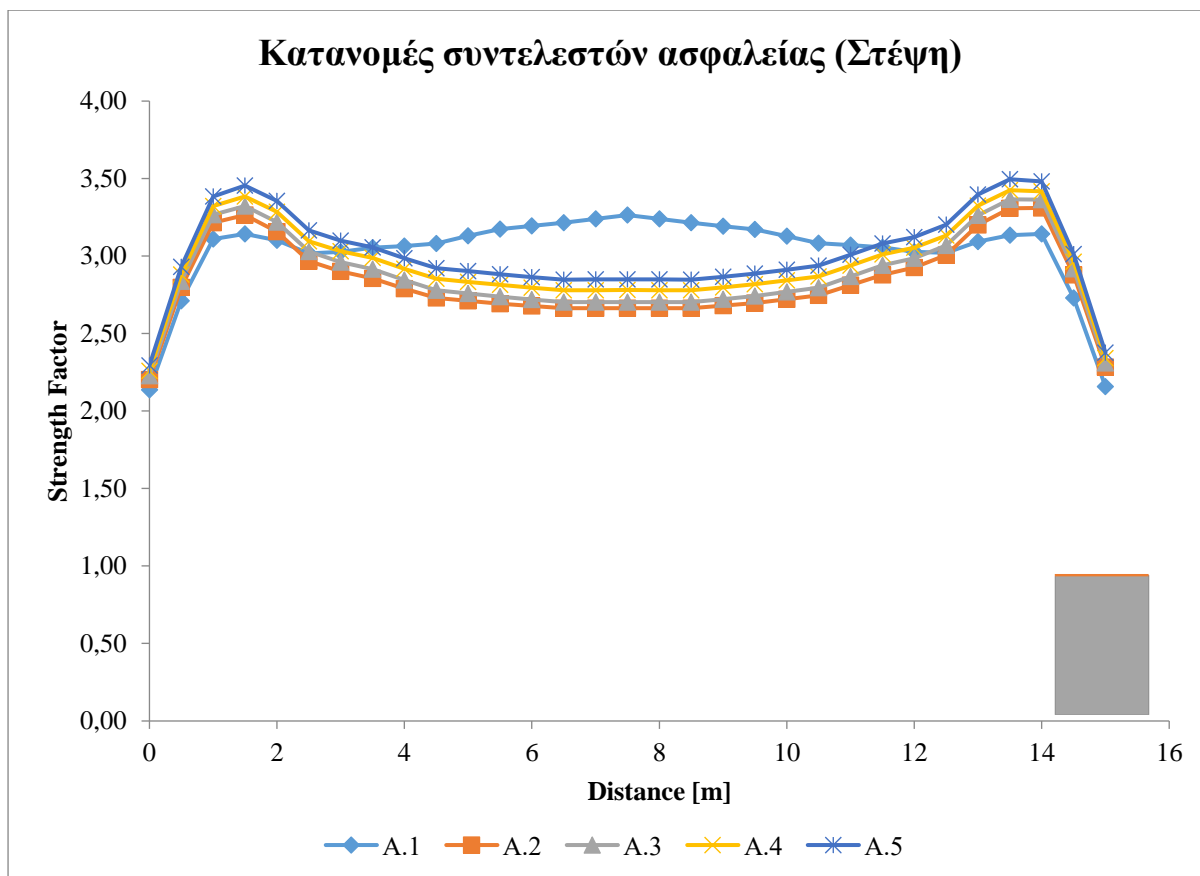
Αρχικά εξετάζονται οι συντελεστές ασφαλείας (strength factors) σε διάφορες περιοχές της εκμετάλλευσης, σαν αποτέλεσμα της μεθόδου των θαλάμων και των στύλων. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.3.1.3, οι μέγιστες τιμές των σ_1 παρουσιάζονται στις ακμές των στύλων. Εκεί αναμένονται κρίσιμοι συντελεστές ασφαλείας, επομένως οι βάσεις και οι στέψεις των στύλων είναι δύο περιοχές που συγκεντρώνουν μεγάλο ενδιαφέρον.

Από το Σχήμα 3.4.2.1.1.1, όπου συγκρίνονται οι συντελεστές ασφαλείας στη στέψη των στύλων της Α' Ομάδα Αναλύσεων, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Στο κεντρικό μέρος της στέψης, οι συντελεστές ασφαλείας της Ανάλυσης A.1 παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες αναλύσεις. Καθώς γίνεται η μετάβαση προς τις ακμές, όμως, οι συντελεστές ασφαλείας της Ανάλυσης A.1 εμφανίζονται μικρότεροι από τους αντίστοιχους συντελεστές των άλλων αναλύσεων.
- Με τη μείωση του λόγου W_p/H_p , οι κατανομές των συντελεστών ασφαλείας λαμβάνουν μια συγκεκριμένη μορφή καμπύλης, με την κατανομή της Ανάλυσης A.2

να εμφανίζει τις μικρότερες τιμές. Όσο γίνεται η προχώρηση κατά βάθος, οι συντελεστές ασφαλείας των στύλων φαίνεται πως αυξάνονται.

- Όπως αναμένεται, οι χαμηλότερες τιμές των συντελεστών ασφαλείας εμφανίζονται στις ακμές των στύλων. Πιο συγκεκριμένα, η χαμηλότερη τιμή παρουσιάζεται στην αριστερή ακμή της στέψης του στύλου της Ανάλυσης A.1 (2,14).



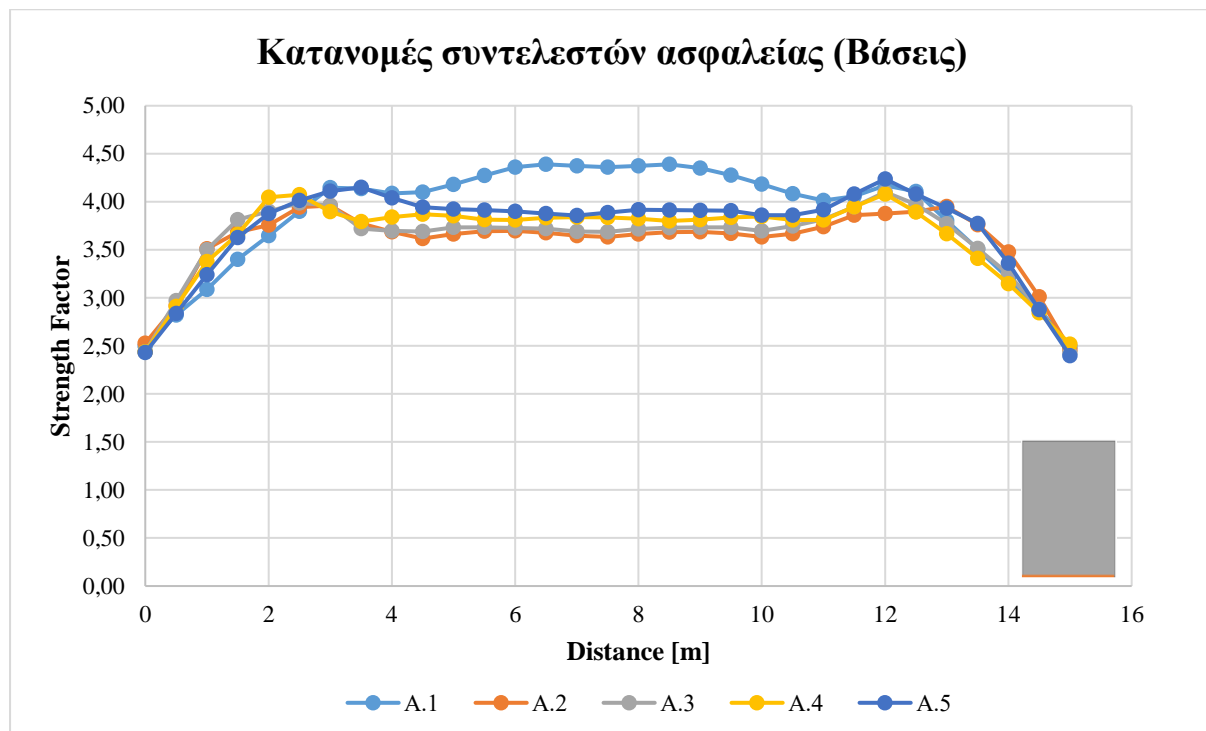
Σχήμα 3.4.2.1.1.1: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στη στέψη των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων

Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας στη στέψη είναι:

- A.1 → 3,04
- A.2 → 2,83
- A.3 → 2,88
- A.4 → 2,95
- A.5 → 3,01

Αντίστοιχα στο Σχήμα 3.4.2.1.1.2 συγκρίνονται οι συντελεστές ασφαλείας στις βάσεις των στύλων. Σε αυτήν την περίπτωση, η μορφή των καμπυλών είναι παρόμοια αν και η διάκριση τους (ιδίως κοντά στις ακμές) δεν είναι τόσο εύκολη όσο ήταν στη στέψη. Στο κεντρικό

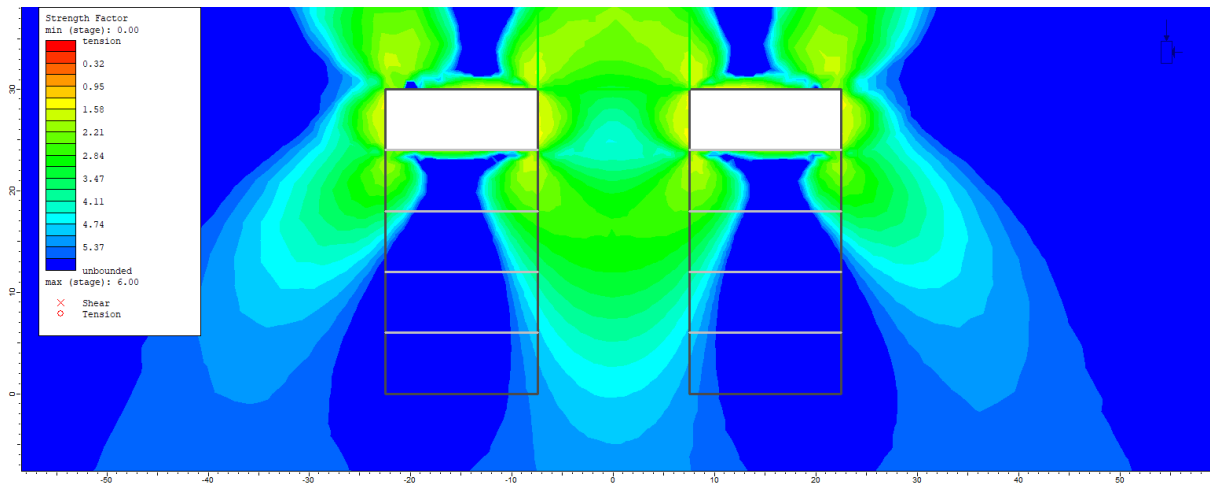
τιμήμα των βάσεων παρουσιάζονται μεταβολές των συντελεστών ασφαλείας (από ανάλυση σε ανάλυση) αντίστοιχες με εκείνες στη στέψη. Έτσι στο κεντρικό τμήμα, οι συντελεστές της Ανάλυσης A.1 παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές, οι συντελεστές της A.2 τις μικρότερες και στις υπόλοιπες αναλύσεις αυξάνονται μερικώς από ανάλυση σε ανάλυση. Όπως αναμένεται, οι χαμηλότερες τιμές των συντελεστών ασφαλείας εμφανίζονται στις ακμές των βάσεων. Πιο συγκεκριμένα, η χαμηλότερη τιμή παρουσιάζεται στην δεξιά ακμή της βάσης της Ανάλυσης A.5 (2,40).



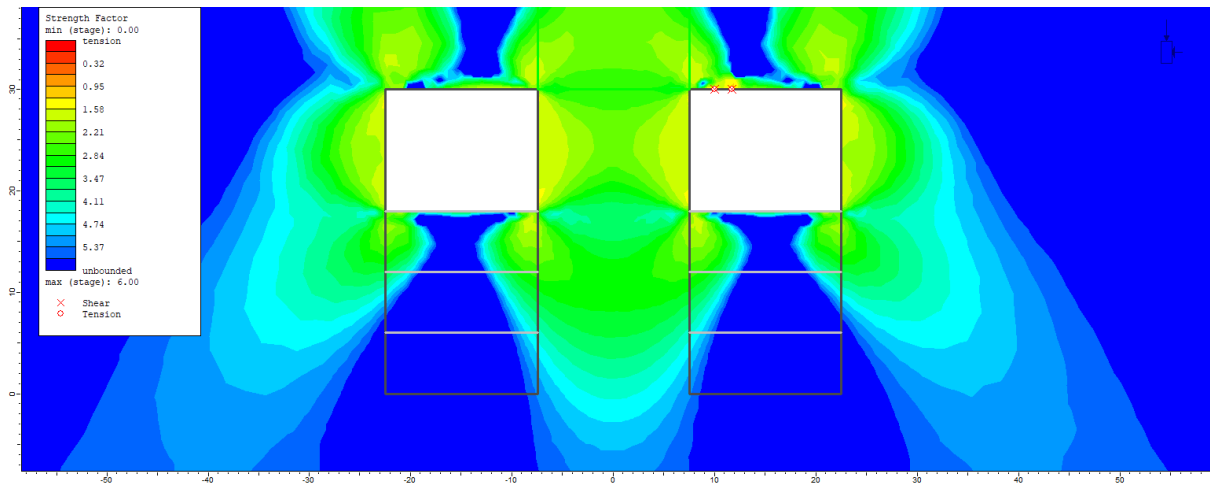
Σχήμα 3.4.2.1.1.2: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις βάσεις των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων

Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας στις βάσεις είναι:

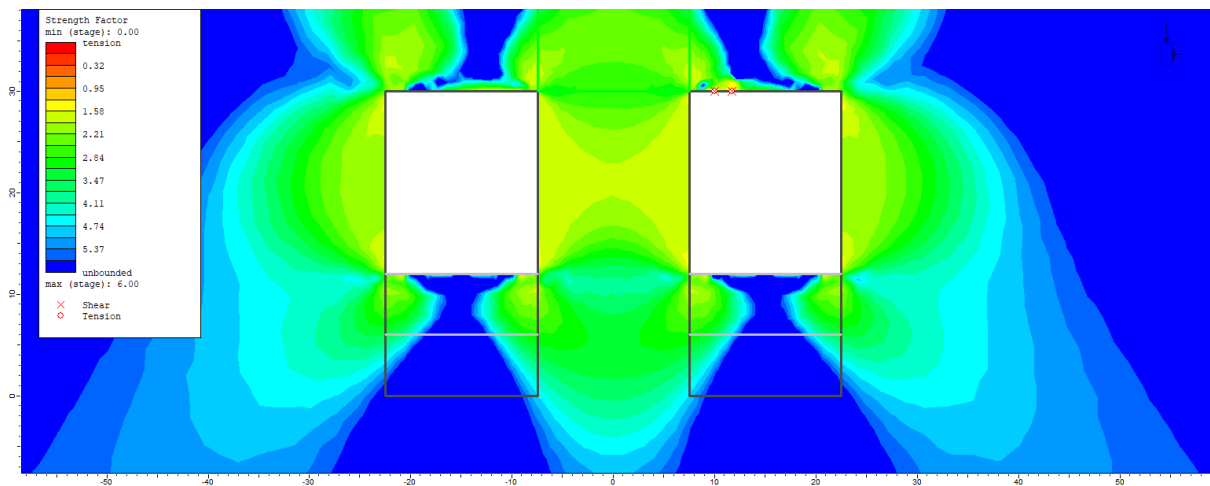
- A.1 → 3,86
- A.2 → 3,59
- A.3 → 3,61
- A.4 → 3,65
- A.5 → 3,73



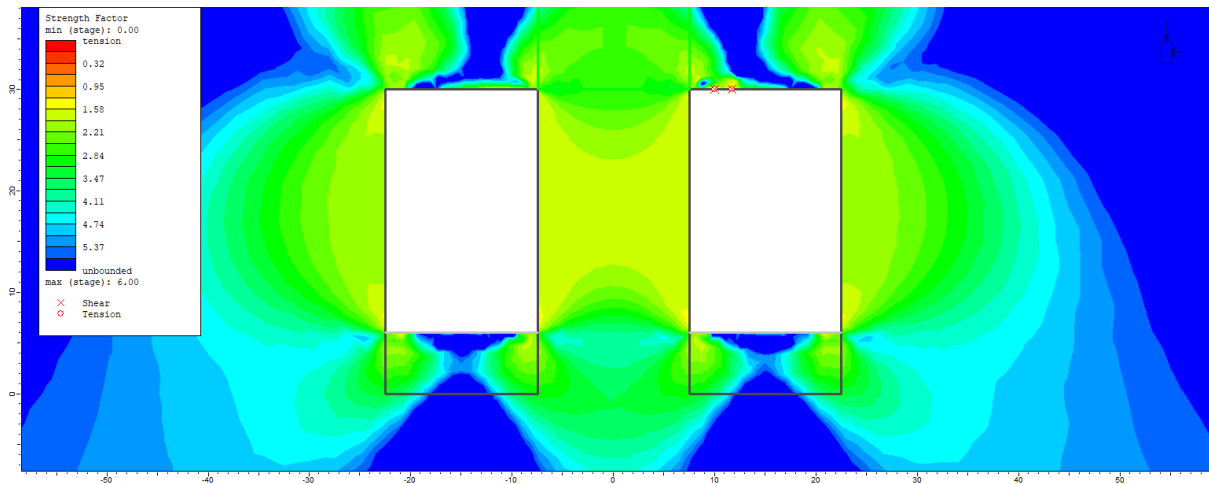
Σχήμα 3.4.2.1.1.3: Ισοϋφείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση A.1



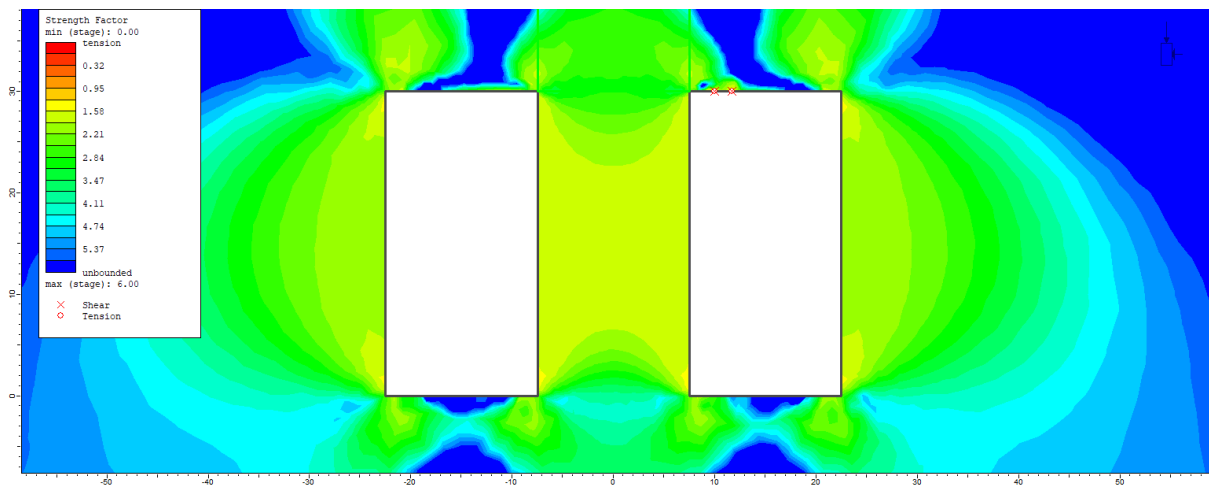
Σχήμα 3.4.2.1.1.4: Ισοϋφείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση A.2



Σχήμα 3.4.2.1.1.5: Ισοϋφείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση A.3

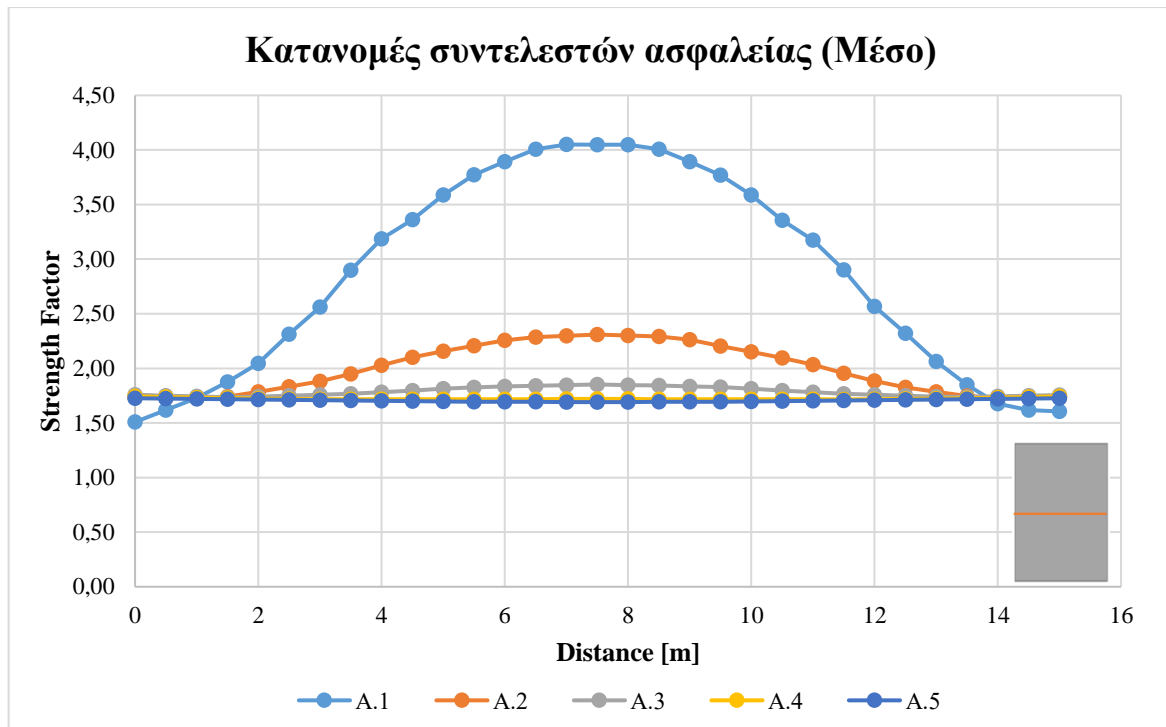


Σχήμα 3.4.2.1.1.6: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση A.4



Σχήμα 3.4.2.1.1.7: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση A.5

Από την παρατήρηση των ισοϋψών των συντελεστών ασφαλείας, αποφασίζεται η εξέταση ακόμα μίας περιοχής, που είναι το μέσο των στύλων. Η κατανομή των συντελεστών ασφαλείας της Ανάλυσης A.1 δημιουργεί μια μορφή καμπύλης, με τους μεγαλύτερους συντελεστές ασφαλείας να παρουσιάζονται στο κεντρικό τμήμα και να μειώνονται προς τις παρειές, όπου παρουσιάζεται η χαμηλότερη τιμή συντελεστή ασφαλείας (1,51). Η αύξηση του ύψους των στύλων επιφέρει μείωση στις τιμές των συντελεστών ασφαλείας της συγκεκριμένης περιοχής. Με τη σταδιακή μείωση του λόγου W_p/H_p , οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας τείνουν να μην μεταβάλλονται κατά πλάτος μιας συγκεκριμένης ανάλυσης.



Σχήμα 3.4.2.1.1.8: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στο μέσο του ύψους των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων

Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας στο μέσο του εκάστοτε στύλου είναι:

- A.1 → 2,87
- A.2 → 1,99
- A.3 → 1,79
- A.4 → 1,72
- A.5 → 1,71

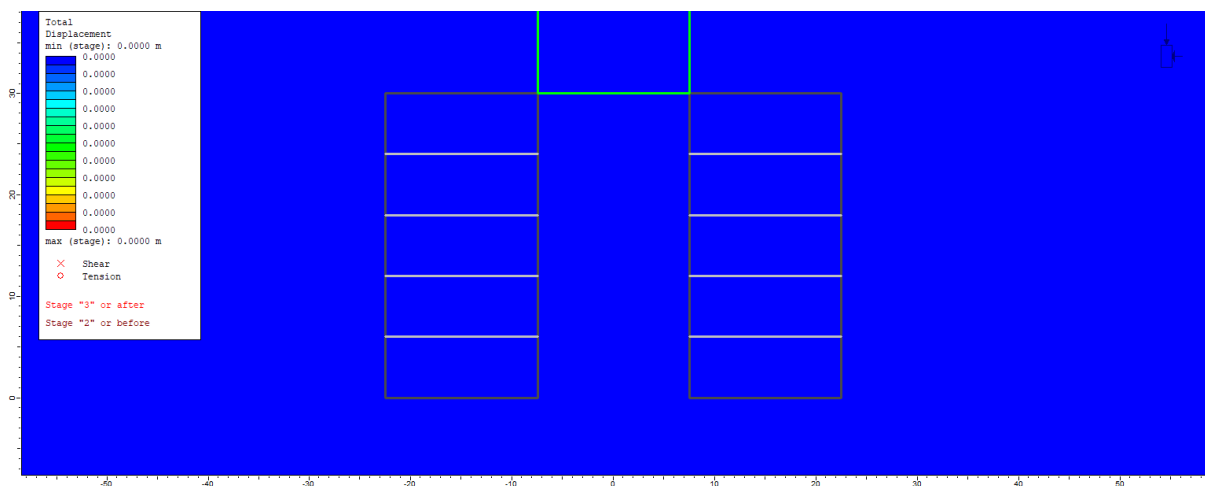
Μια τελευταία περιοχή που αξίζει να μελετηθεί είναι αυτή των παρειών. Στις παρειές η παρουσίαση των αποτελεσμάτων είναι πιο περίπλοκη σε σχέση με τις προηγούμενες, μιας και η απόσταση αλλάζει καθ' ύψος. Στις προηγούμενες μελέτες, η απόσταση παρέμενε σταθερή από ανάλυση σε ανάλυση γιατί τα queries ήταν κατά πλάτος. Όπως γίνεται αντιληπτό, η σύγκριση των κατανομών των συντελεστών ασφαλείας για τις αναλύσεις της Ομάδας Α' δεν έχει νόημα, μιας και το ύψος των στύλων αλλάζει από ανάλυση σε ανάλυση. Οι κατανομές στη συγκεκριμένη περιοχή αναμένεται να εξεταστούν στις επόμενες οριζόντιες συγκρίσεις, όπου ο λόγος W_p/H_p θα είναι σταθερός.

Για την Α' Ομάδα Αναλύσεων μπορούν να δοθούν, ωστόσο, οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας στις αριστερές παρειές των στύλων. μιας και δεν παρατηρούνται ουσιαστικές διαφορές ανάμεσα στις τιμές των συντελεστών των αριστερών και των δεξιών παρειών:

- A.1 → 1,65
- A.2 → 1,70
- A.3 → 1,71
- A.4 → 1,72
- A.5 → 1,72

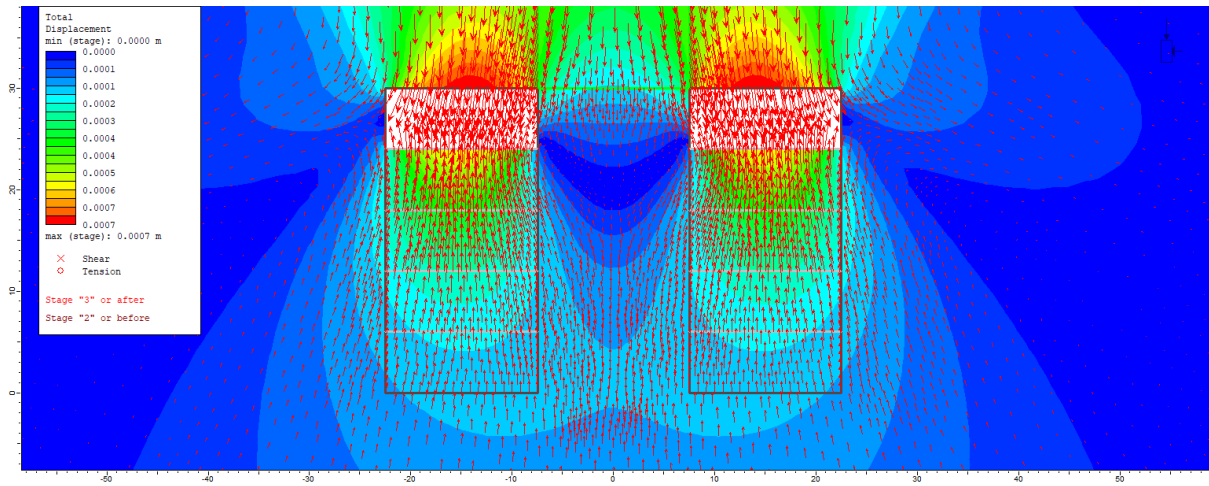
Αναλύοντας τους συντελεστές ασφαλείας των περιοχών που εξετάστηκαν, γίνεται φανερό πως την μεγαλύτερη καταπόνηση συνολικά την δέχονται οι στύλοι στο μέσο τους και στις παρειές τους. Σε κάθε περίπτωση, οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας των στύλων κρίνονται ικανοποιητικές. Το ίδιο δεν μπορεί να ειπωθεί και για τους θαλάμους και πιο συγκεκριμένα για τους δεξιούς, που παρουσιάζουν μια περιοχή αστοχίας στους ορόφους τους από την Ανάλυση A.2 και έπειτα. Για τον λόγο αυτό, παρακάτω εξετάζονται και οι συνολικές μετατοπίσεις εντός της εκμετάλλευσης.

Πέρα από τη μέθοδο εκμετάλλευσης, στις συνολικές μετατοπίσεις συμβάλει και η επιβολή του εξωτερικού φορτίου q . Για να ληφθούν υπόψη μόνο οι μετατοπίσεις λόγω της μεθόδου εκμετάλλευσης, τίθεται ως στάδιο αναφοράς (reference stage) το στάδιο στο οποίο επιβάλλεται η προσεγγιστική τεχνική. Έτσι, οι συνολικές μετατοπίσεις στο stage 2 είναι πια μηδενικές.

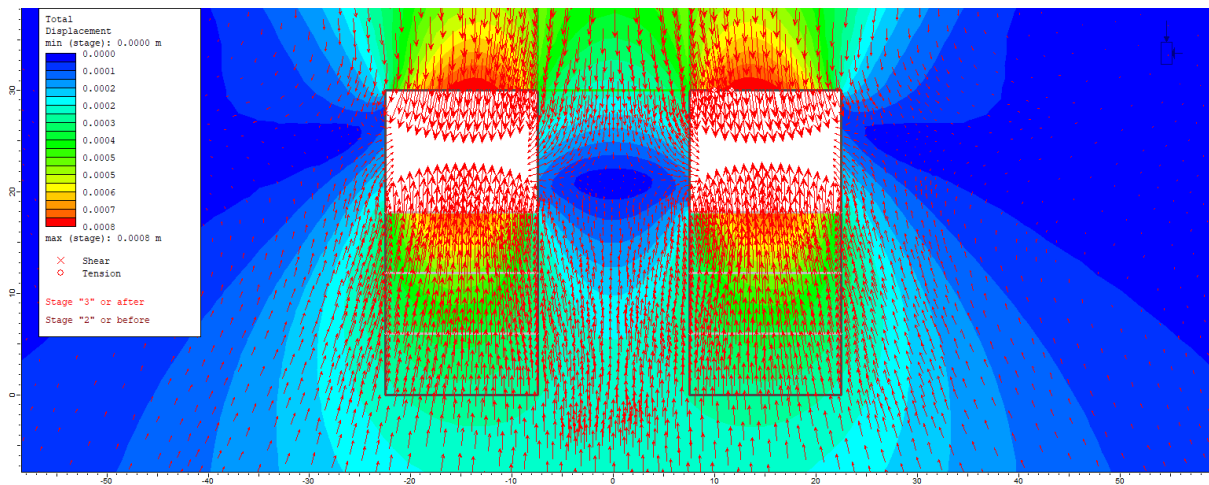


Σχήμα 3.4.2.1.1.9: Ορισμός του stage 2 ως reference stage

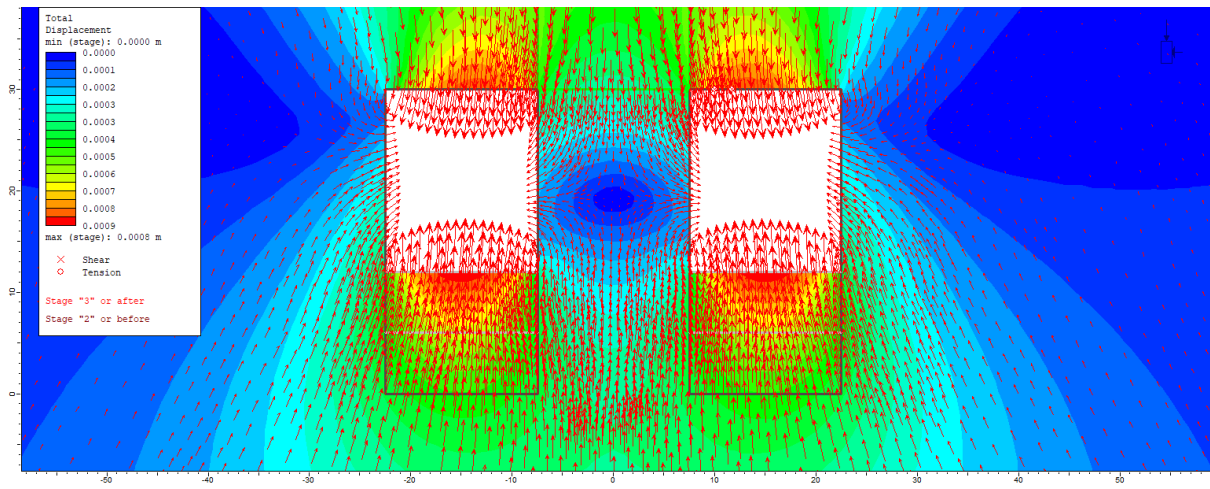
Εκτός από την παρουσίαση των yielded elements που επιλέγεται σε κάθε αναπαράσταση αποτελεσμάτων, όταν εξετάζονται οι συνολικές μετατοπίσεις επιλέγεται και η εμφάνιση των διανυσμάτων παραμόρφωσης μέσω της εντολής Display Deformation Vectors από το Quick Menu.



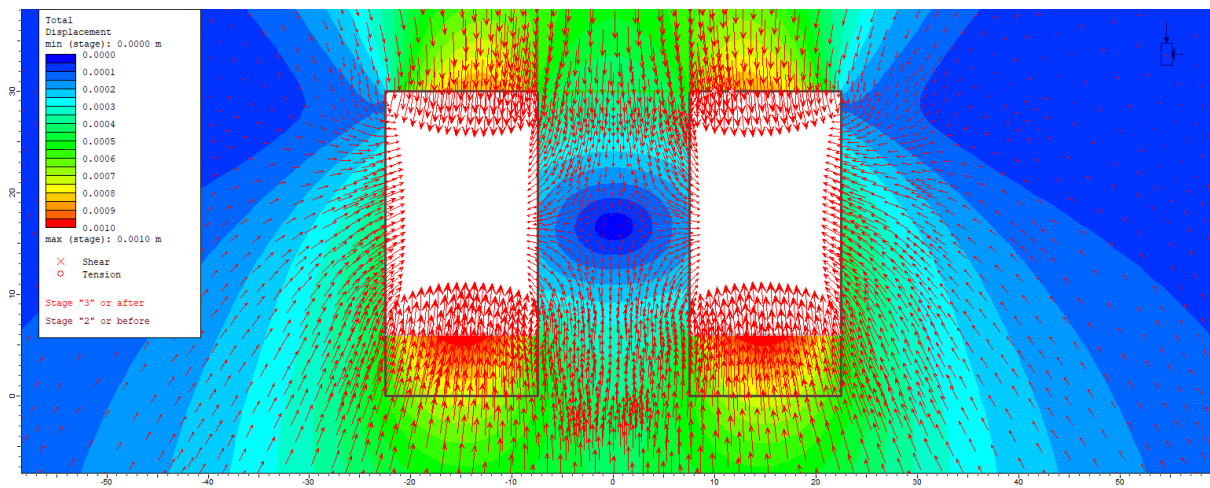
Σχήμα 3.4.2.1.1.10: Ισοϋφείς των συνολικών μετατοπίσεων στην Ανάλυση A.1



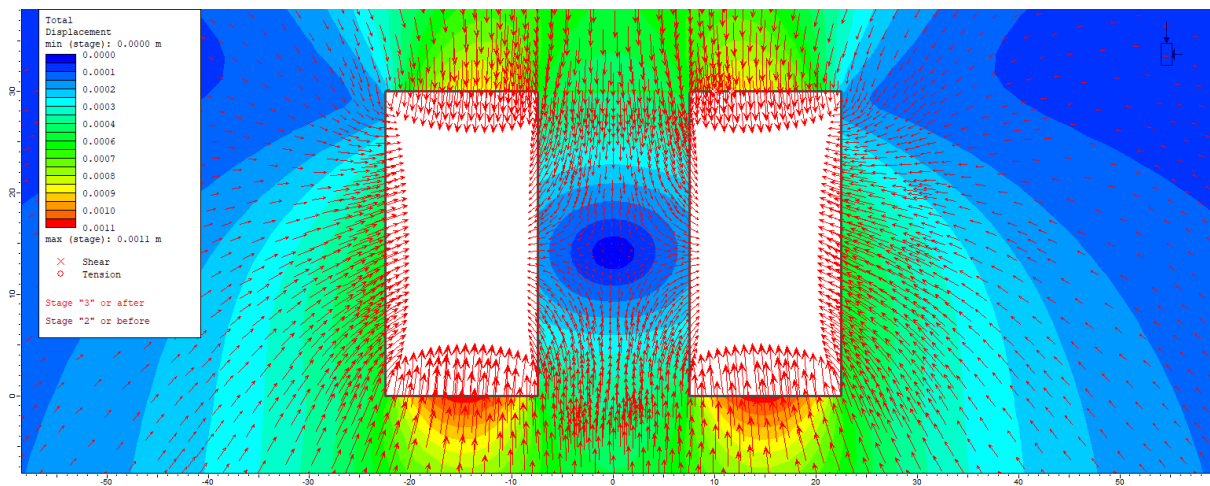
Σχήμα 3.4.2.1.1.11: Ισοϋφείς των συνολικών μετατοπίσεων στην Ανάλυση A.2



Σχήμα 3.4.2.1.1.12: Ισοϋψείς των συνολικών μετατοπίσεων στην Ανάλυση A.3



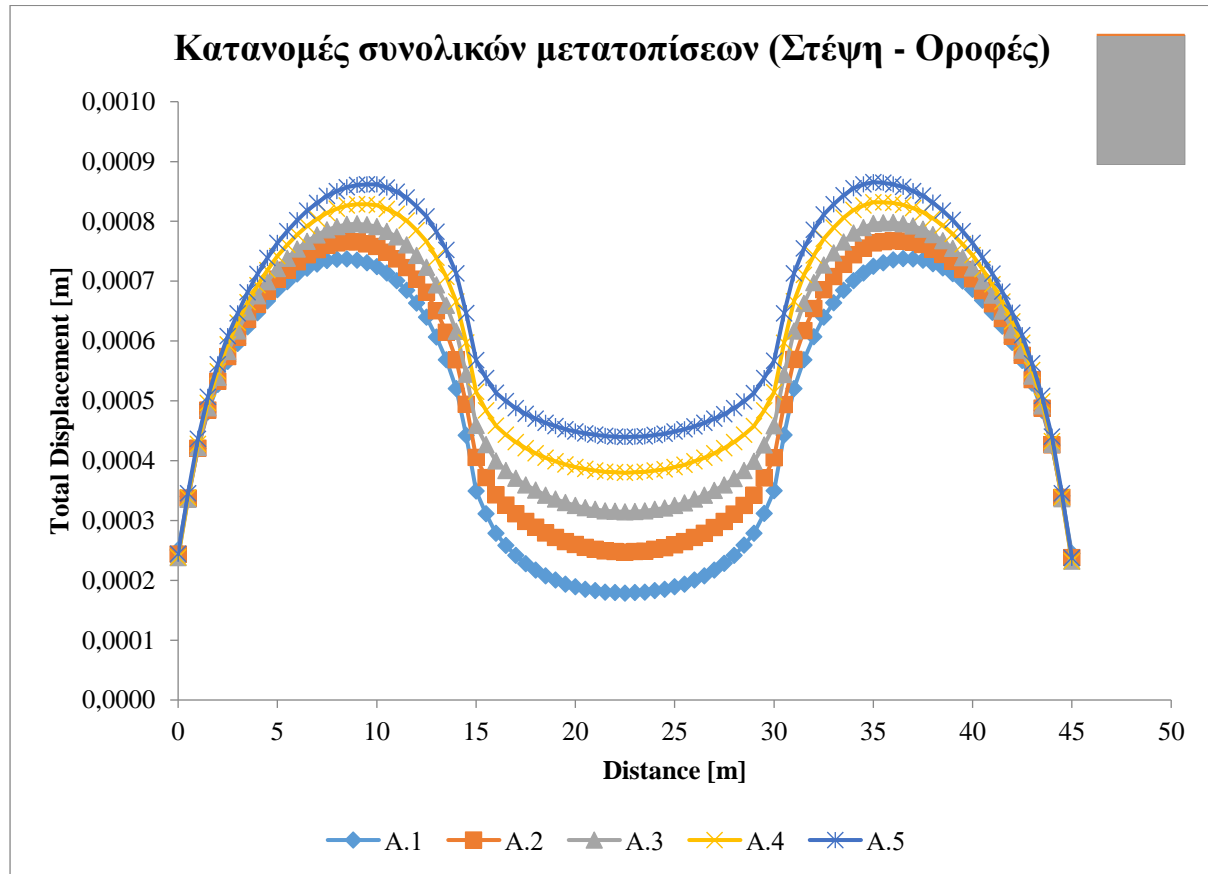
Σχήμα 3.4.2.1.1.13: Ισοϋψείς των συνολικών μετατοπίσεων στην Ανάλυση A.4



Σχήμα 3.4.2.1.1.14: Ισοϋψείς των συνολικών μετατοπίσεων στην Ανάλυση A.5

Από τις παραπάνω ισοϋψείς των συνολικών μετατοπίσεων, γίνεται φανερό πως οι μεγαλύτερες συνολικές μετατοπίσεις δεν εμφανίζονται στη δομή των στύλων, αλλά στους

θαλάμους και πιο συγκεκριμένα στις οροφές και τα δάπεδα αυτών. Με σκοπό την απεικόνιση των αποτελεσμάτων καθ' όλο το πλάτος της εκμετάλλευσης (αριστερός θάλαμος, στύλος, δεξιός θάλαμος), εισάγονται queries που εκτείνονται από άκρη σε άκρη αυτής.



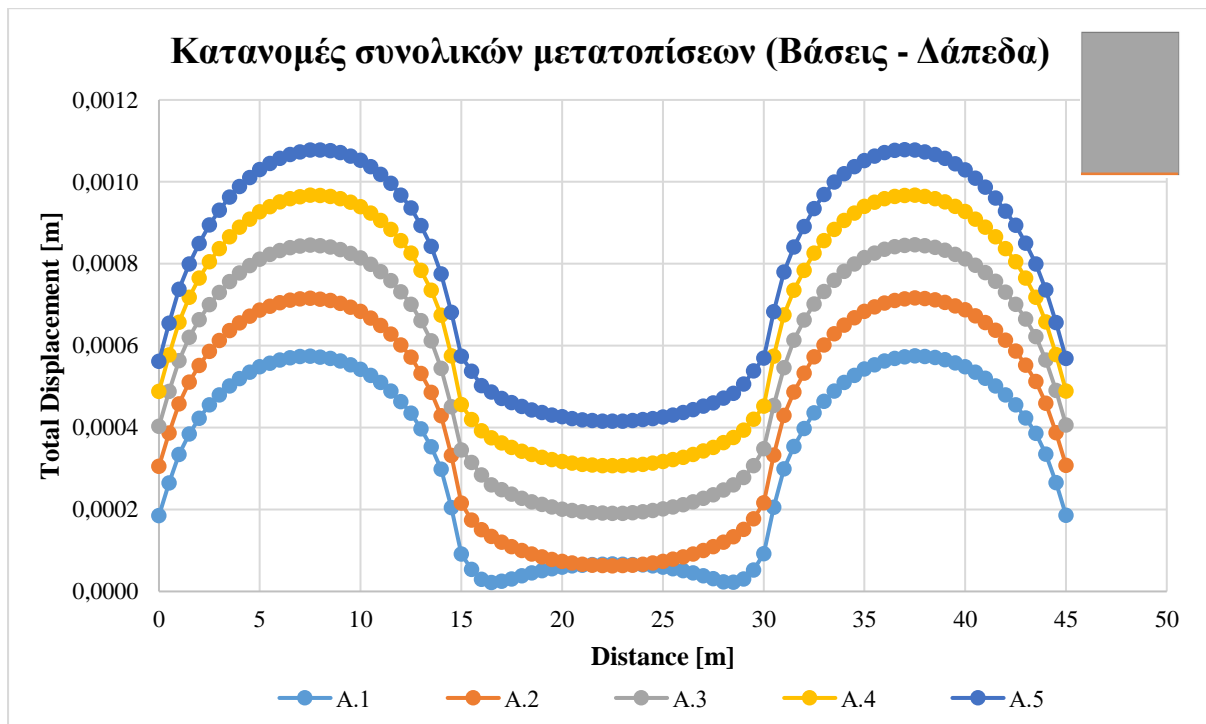
Σχήμα 3.4.2.1.1.15: Κατανομές των συνολικών μετατοπίσεων στη στέψη και τις οροφές των Αναλύσεων της Ομάδας Α'

Οι συνολικές μετατοπίσεις στη στέψη των στύλων και τις οροφές των θαλάμων των Αναλύσεων της Ομάδας Α', παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4.2.1.1.15. Στον άξονα των Χ, η απόσταση κυμαίνεται από τα 0 έως τα 45m. Σε κάθε ανάλυση, ο αριστερός θάλαμος βρίσκεται στο εύρος 0 – 15m, ο στύλος στο εύρος 15m – 30m και ο δεξιός θάλαμος στο εύρος 30m - 45m. Όπως είναι λογικό, οι συνολικές μετατοπίσεις στις οροφές των θαλάμων είναι μεγαλύτερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις στις στέψεις των στύλων που περιβάλλουν. Με τη μείωση του λόγου W_p/H_p , οι συνολικές μετατοπίσεις αυξάνονται. Οι μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις (0,0009m) παρουσιάζονται στην οροφή του δεξιού θαλάμου της Ανάλυσης Α.5. Στον παρακάτω Πίνακας 3.4.2.1.1.1 καταγράφονται οι μέσες τιμές των συνολικών μετατοπίσεων ανά περιοχή εξέτασης και ανάλυση. Από τα total displacements εμφανίζονται τα πρώτα τέσσερα δεκαδικά ψηφία. Τα ποσοστά μεταβολής αναφέρονται στις συνολικές μετατοπίσεις σε σχέση με εκείνες της Ανάλυσης Α.1.

Πίνακας 3.4.2.1.1.1: Σύγκριση μέσων τιμών συνολικών μετατοπίσεων σε m (Στέψη - Οροφές)

	A.1	A.2	%	A.3	%	A.4	%	A.5	%
Αρ. θάλαμος	0,0006	0,0006	4,11	0,0007	8,23	0,0007	12,83	0,0007	17,42
Στύλος	0,0002	0,0003	30,13	0,0004	57,80	0,0004	85,40	0,0005	110,95
Δεξ. θάλαμος	0,0006	0,0006	4,35	0,0007	8,45	0,0007	13,05	0,0007	17,50

Κατ' αντιστοιχία παρουσιάζονται και τα total displacements στις βάσεις των στύλων και τα δάπεδα των θαλάμων των Αναλύσεων της Α' Ομάδας (Σχήμα 3.4.2.1.1.16). Με τη μείωση του λόγου W_p/H_p , οι συνολικές μετατοπίσεις στα δάπεδα των θαλάμων αυξάνονται με μεγαλύτερο ρυθμό σε σχέση με τον αντίστοιχο ρυθμό μεταβολής στις οροφές. Οι μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις (0,0011m) παρουσιάζονται στο δάπεδο του δεξιού θαλάμου της Ανάλυσης A.5.



Σχήμα 3.4.2.1.1.16: Κατανομές των συνολικών μετατοπίσεων στις βάσεις και τα δάπεδα των Αναλύσεων της Ομάδας Α'

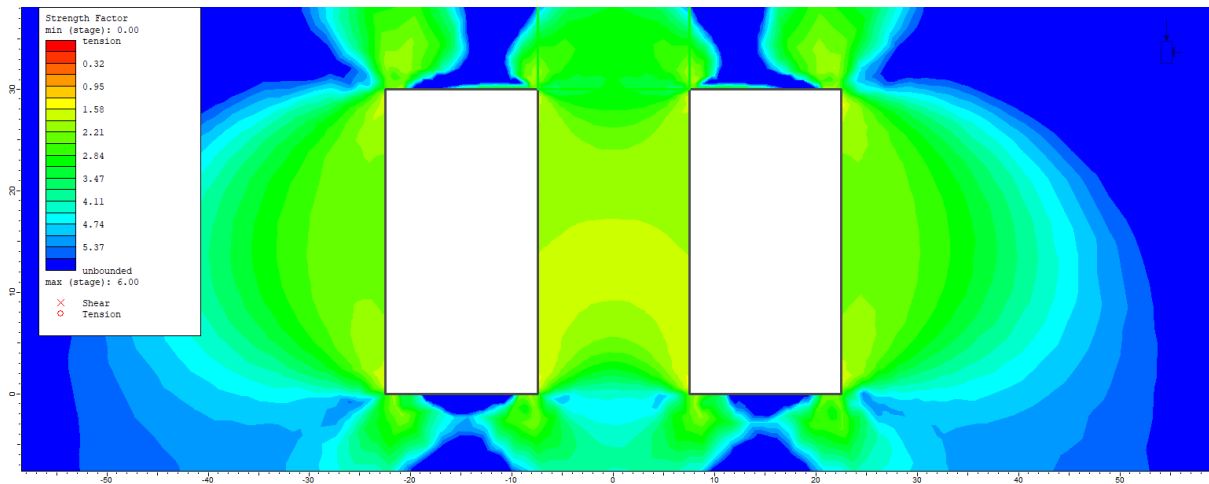
Πίνακας 3.4.2.1.1.2: Σύγκριση μέσων τιμών συνολικών μετατοπίσεων σε m (Βάσεις - Δάπεδα)

	A.1	A.2	%	A.3	%	A.4	%	A.5	%
Αρ. θάλαμος	0,0005	0,0006	29,78	0,0007	56,93	0,0008	82,44	0,0009	105,11
Στύλος	0,0001	0,0001	105,23	0,0002	356,10	0,0003	579,57	0,0005	795,04
Δεξ. θάλαμος	0,0005	0,0006	29,84	0,0007	57,05	0,0008	82,29	0,0009	104,93

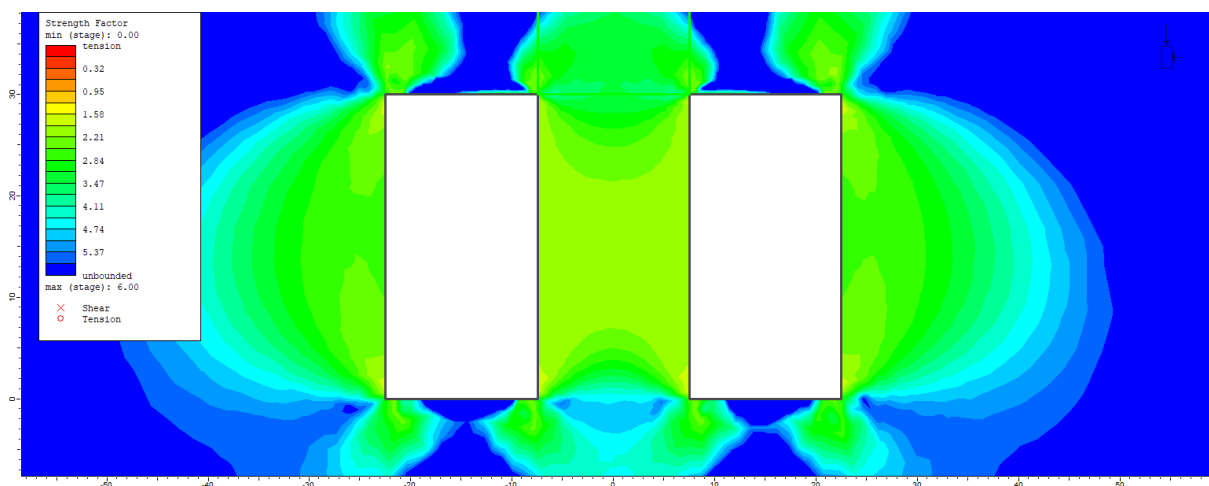
3.4.2.1.2 Παραμετροποίηση UCS (A – B.1 – B.2)

Η παραμετροποίηση ως προς τον λόγο W_p/H_p αναλύθηκε εκτενώς στην προηγούμενη παράγραφο, οπότε από εδώ και στο εξής οι συγκρίσεις θα γίνονται για συγκεκριμένο λόγο W_p/H_p . Ο λόγος αυτός επιλέγεται να είναι ίσος με 0,5.

Τα άρρηκτα δοκίμια μαρμάρου των στύλων των Αναλύσεων A.5 – B.1.5 – B.2.5 παρουσιάζουν διαφορετικές αντοχές σε μονοαξονική θλίψη UCS (90MPa, 110MPa και 130MPa αντίστοιχα). Παρατηρώντας τις ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας που προκύπτουν για τις νέες τιμές της UCS, καθίσταται φανερή η απουσία των σημείων αστοχίας από τις οροφές των δεξιών θαλάμων. Κατά τον ίδιο τρόπο με πριν, πρόκειται να εξεταστούν οι συντελεστές ασφαλείας των στύλων σε διάφορες περιοχές της εκμετάλλευσης.



Σχήμα 3.4.2.1.2.1: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση B.1.5



Σχήμα 3.4.2.1.2.2: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση B.2.5

Ξεκινώντας από τις στέψεις των στύλων, υπολογίζονται τα ποσοστά αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για κάθε αύξηση της τιμής της UCS. Έτσι προκύπτει ο ακόλουθος

Πίνακας 3.4.2.1.2.1, όπου συγκρίνονται οι συντελεστές ασφαλείας των Αναλύσεων Β.1.5 και Β.2.5 με τους αντίστοιχους της ανάλυσης Α.5. Από τους συντελεστές ασφαλείας εμφανίζονται τα πρώτα δύο δεκαδικά ψηφία.

Πίνακας 3.4.2.1.2.1: Σύγκριση ποσοστών αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση της UCS (Στέγεις)

A.5		B.1.5			B.2.5		
Distance [m]	Strength Factor	Distance [m]	Strength Factor	%	Distance [m]	Strength Factor	%
0	2,29	0	2,48	7,92	0	2,66	15,76
0,5	2,93	0,5	3,18	8,37	0,5	3,42	16,68
1	3,38	1	3,68	8,81	1	3,98	17,59
1,5	3,45	1,5	3,78	9,50	1,5	4,11	19,04
2	3,36	2	3,69	9,88	2	4,02	19,82
2,5	3,17	2,5	3,49	10,12	2,5	3,81	20,31
3	3,10	3	3,42	10,28	3	3,74	20,64
3,5	3,06	3,5	3,37	10,43	3,5	3,70	20,94
4	2,99	4	3,30	10,49	4	3,62	21,08
4,5	2,92	4,5	3,23	10,56	4,5	3,54	21,23
5	2,90	5	3,21	10,59	5	3,52	21,31
5,5	2,88	5,5	3,19	10,62	5,5	3,50	21,39
6	2,86	6	3,17	10,63	6	3,48	21,41
6,5	2,85	6,5	3,15	10,63	6,5	3,46	21,43
7	2,85	7	3,15	10,61	7	3,46	21,42
7,5	2,85	7,5	3,15	10,59	7,5	3,46	21,40
8	2,85	8	3,15	10,55	8	3,46	21,35
8,5	2,85	8,5	3,15	10,51	8,5	3,46	21,31
9	2,87	9	3,17	10,44	9	3,48	21,21
9,5	2,89	9,5	3,19	10,37	9,5	3,50	21,11
10	2,91	10	3,21	10,25	10	3,52	20,94
10,5	2,94	10,5	3,24	10,14	10,5	3,55	20,76
11	3,01	11	3,31	9,94	11	3,62	20,48
11,5	3,08	11,5	3,38	9,75	11,5	3,70	20,21
12	3,12	12	3,42	9,50	12	3,74	19,78
12,5	3,20	12,5	3,50	9,13	12,5	3,82	19,22
13	3,40	13	3,68	8,44	13	4,02	18,26
13,5	3,50	13,5	3,77	7,78	13,5	4,10	17,15
14	3,48	14	3,73	7,07	14	4,03	15,74
14,5	3,01	14,5	3,20	6,35	14,5	3,45	14,56
15	2,38	15	2,50	5,29	15	2,68	12,95

Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας για κάθε ανάλυση είναι:

- A.5 → 3,01
- B.1.5 → 3,30

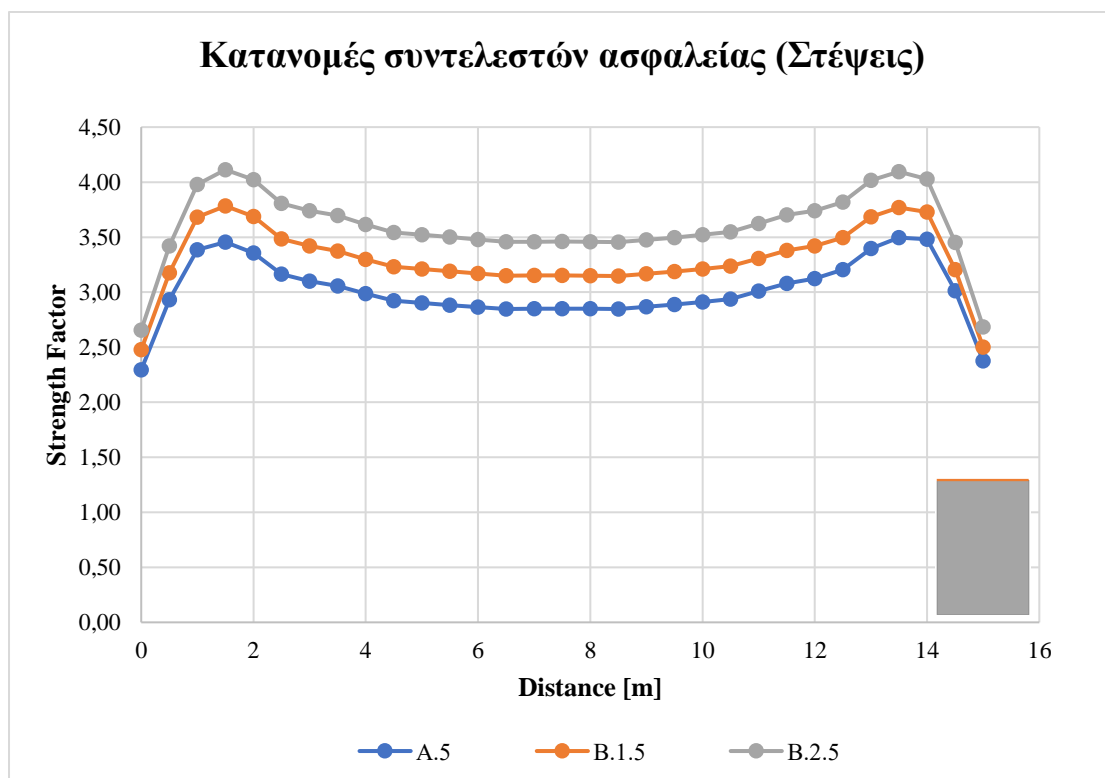
- B.2.5 → 3,60

Επομένως, τα ποσοστά αύξησης των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας είναι:

- B.1.5 → 9,53%
- B.2.5 → 19,56%

Όπως αναμένεται η αύξηση της αντοχής του άρρηκτου δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη οδηγεί σε αύξηση της αντοχής των στύλων, άρα και αύξηση των συντελεστών ασφαλείας. Από τα ποσοστά μεταβολής του Πίνακας 3.4.2.1.2.1 παρατηρείται πως η μεγαλύτερη αύξηση των συντελεστών παρουσιάζεται στο κεντρικό τμήμα των στέψεων. Η ελάχιστη τιμή συντελεστή ασφαλείας ανά ανάλυση βρίσκεται στην αριστερή ακμή της στέψης και ισούται με 2,29 , 2,48 και 2,66 για τις Αναλύσεις A.5, B.1.5 και B.2.5 αντίστοιχα.

Η απεικόνιση των κατανομών των συντελεστών ασφαλείας στις στέψεις των στύλων των εξεταζόμενων αναλύσεων γίνεται στο Σχήμα 3.4.2.1.2.3.



Σχήμα 3.4.2.1.2.3: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις στέψεις των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικές τιμές UCS

Κατά τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και στο μέσο του ύψους των στύλων τα ποσοστά αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για κάθε αύξηση της τιμής της UCS.

Πίνακας 3.4.2.1.2.2: Σύγκριση ποσοστών αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση της UCS (Μέσο του ύψους)

A.5		B.1.5			B.2.5		
Distance [m]	Strength Factor	Distance [m]	Strength Factor	%	Distance [m]	Strength Factor	%
0	1,73	0	1,90	10,31	0	2,08	20,57
0,5	1,72	0,5	1,90	10,30	0,5	2,08	20,55
1	1,72	1	1,90	10,30	1	2,07	20,53
1,5	1,72	1,5	1,89	10,29	1,5	2,07	20,51
2	1,71	2	1,89	10,28	2	2,07	20,49
2,5	1,71	2,5	1,89	10,27	2,5	2,06	20,47
3	1,71	3	1,88	10,26	3	2,06	20,45
3,5	1,70	3,5	1,88	10,25	3,5	2,05	20,44
4	1,70	4	1,88	10,24	4	2,05	20,42
4,5	1,70	4,5	1,87	10,24	4,5	2,05	20,41
5	1,70	5	1,87	10,23	5	2,04	20,39
5,5	1,69	5,5	1,87	10,23	5,5	2,04	20,39
6	1,69	6	1,87	10,23	6	2,04	20,38
6,5	1,69	6,5	1,87	10,22	6,5	2,04	20,37
7	1,69	7	1,86	10,22	7	2,04	20,37
7,5	1,69	7,5	1,86	10,22	7,5	2,04	20,37
8	1,69	8	1,86	10,22	8	2,04	20,37
8,5	1,69	8,5	1,87	10,22	8,5	2,04	20,38
9	1,69	9	1,87	10,23	9	2,04	20,38
9,5	1,69	9,5	1,87	10,23	9,5	2,04	20,39
10	1,70	10	1,87	10,24	10	2,04	20,40
10,5	1,70	10,5	1,87	10,24	10,5	2,05	20,41
11	1,70	11	1,88	10,25	11	2,05	20,43
11,5	1,70	11,5	1,88	10,26	11,5	2,05	20,45
12	1,71	12	1,88	10,27	12	2,06	20,47
12,5	1,71	12,5	1,89	10,28	12,5	2,06	20,49
13	1,71	13	1,89	10,29	13	2,07	20,51
13,5	1,72	13,5	1,90	10,30	13,5	2,07	20,53
14	1,72	14	1,90	10,31	14	2,08	20,55
14,5	1,72	14,5	1,90	10,32	14,5	2,08	20,57
15	1,73	15	1,90	10,32	15	2,08	20,58

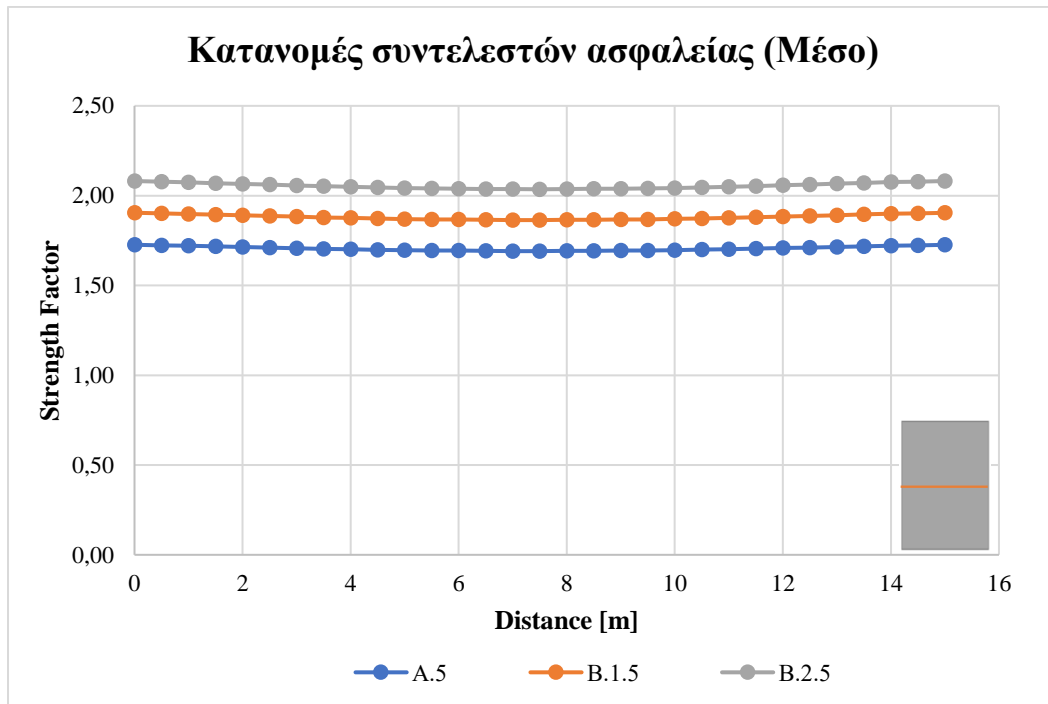
Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας για κάθε ανάλυση είναι:

- A.5 → 1,71
- B.1.5 → 1,88
- B.2.5 → 2,05

Επομένως, τα ποσοστά αύξησης των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας είναι:

- B.1.5 → 10,26%
- B.2.5 → 20,45%

Σε αντίθεση με τη στέψη, οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας δεν παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή κατά πλάτος, όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 3.4.2.1.2.4.



Σχήμα 3.4.2.1.2.4: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στο μέσο του ύψους των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικές τιμές UCS

Στις βάσεις των στύλων, τα ποσοστά αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για κάθε αύξηση της τιμής της UCS υπολογίζονται ως εξής:

Πίνακας 3.4.2.1.2.3: Σύγκριση ποσοστών αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση της UCS (Βάσεις)

A.5		B.1.5			B.2.5		
Distance [m]	Strength Factor	Distance [m]	Strength Factor	%	Distance [m]	Strength Factor	%
0	2,43	0	2,59	6,54	0	2,74	12,81
0,5	2,84	0,5	3,04	7,03	0,5	3,23	13,82
1	3,24	1	3,48	7,44	1	3,72	14,66
1,5	3,63	1,5	3,92	8,06	1,5	4,21	15,94
2	3,88	2	4,21	8,52	2	4,53	16,88
2,5	4,01	2,5	4,36	8,62	2,5	4,70	17,09
3	4,11	3	4,47	8,74	3	4,82	17,32
3,5	4,15	3,5	4,52	8,86	3,5	4,88	17,58
4	4,04	4	4,40	8,93	4	4,76	17,73
4,5	3,95	4,5	4,30	9,00	4,5	4,65	17,87

5	3,92	5	4,28	9,06	5	4,63	17,98
5,5	3,91	5,5	4,27	9,11	5,5	4,62	18,08
6	3,90	6	4,26	9,13	6	4,61	18,13
6,5	3,88	6,5	4,23	9,15	6,5	4,58	18,18
7	3,86	7	4,21	9,17	7	4,56	18,22
7,5	3,89	7,5	4,24	9,17	7,5	4,59	18,21
8	3,92	8	4,28	9,16	8	4,63	18,19
8,5	3,92	8,5	4,27	9,15	8,5	4,63	18,18
9	3,91	9	4,27	9,13	9	4,62	18,13
9,5	3,91	9,5	4,26	9,10	9,5	4,61	18,06
10	3,86	10	4,21	9,06	10	4,56	17,99
10,5	3,86	10,5	4,21	9,01	10,5	4,55	17,89
11	3,92	11	4,27	8,94	11	4,61	17,73
11,5	4,08	11,5	4,44	8,88	11,5	4,80	17,60
12	4,24	12	4,61	8,83	12	4,98	17,49
12,5	4,08	12,5	4,44	8,79	12,5	4,79	17,42
13	3,93	13	4,26	8,35	13	4,59	16,53
13,5	3,77	13,5	4,07	7,87	13,5	4,36	15,57
14	3,36	14	3,61	7,47	14	3,85	14,74
14,5	2,88	14,5	3,08	7,08	14,5	3,28	13,94
15	2,40	15	2,55	6,53	15	2,70	12,80

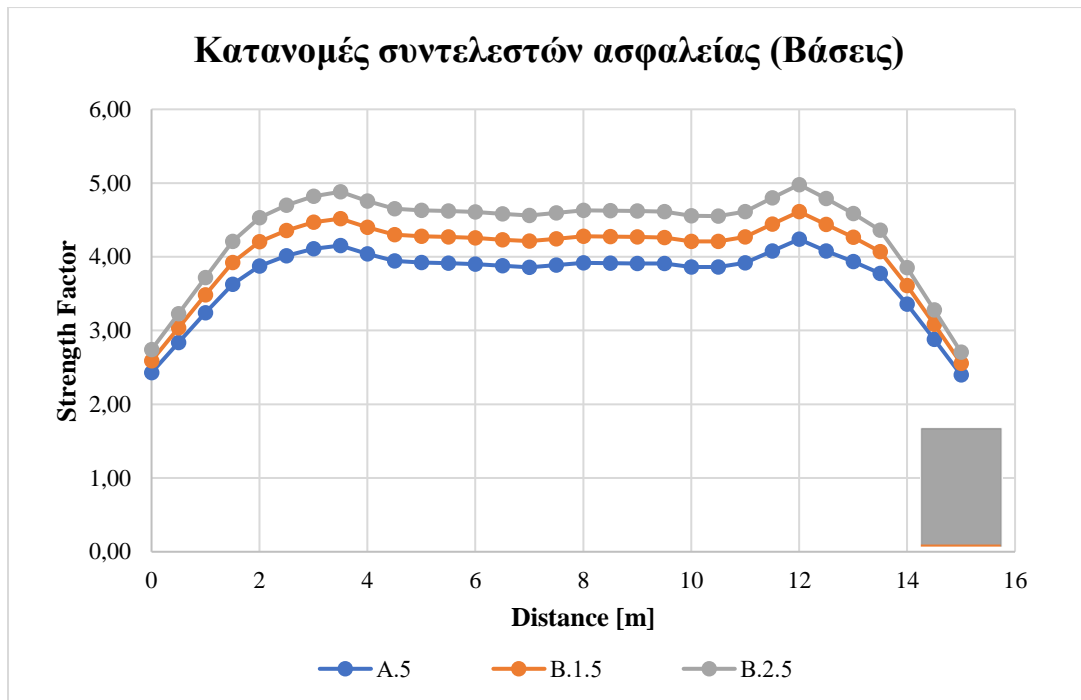
Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας για κάθε ανάλυση είναι:

- A.5 → 3,73
- B.1.5 → 4,05
- B.2.5 → 4,37

Επομένως, τα ποσοστά αύξησης των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας είναι:

- B.1.5 → 8,61%
- B.2.5 → 17,06%

Η ελάχιστη τιμή συντελεστή ασφαλείας ανά ανάλυση βρίσκεται στην δεξιά ακμή της βάσης και ισούται με 2,40 , 2,55 και 2,70 για τις Αναλύσεις A.5, B.1.5 και B.2.5 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.4.2.1.2.5: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις βάσεις των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικές τιμές UCS

Η τελευταία περιοχή που εξετάζεται είναι αυτή των παρειών των στύλων. Οι συντελεστές ασφαλείας παρουσιάζουν αντίστοιχες τιμές στην αριστερή και τη δεξιά παρειά κάθε στύλου, επομένως επιλέγεται η εξέταση μίας από αυτές (αριστερή). Στις αριστερές παρειές, λοιπόν, τα ποσοστά αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για κάθε αύξηση της τιμής της UCS έχουν ως εξής:

Πίνακας 3.4.2.1.2.4: Σύγκριση ποσοστών αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση της UCS (Αριστερές παρειές)

A.5		B.1.5			B.2.5		
Distance [m]	Strength Factor	Distance [m]	Strength Factor	%	Distance [m]	Strength Factor	%
0	2,43	0	2,59	6,54	0	2,74	12,81
0,5	1,78	0,5	1,89	6,52	0,5	2,00	12,82
1	1,40	1	1,50	7,22	1	1,60	14,26
1,5	1,29	1,5	1,40	8,80	1,5	1,52	17,50
2	1,45	2	1,59	9,17	2	1,72	18,25
2,5	1,55	2,5	1,69	9,43	2,5	1,84	18,76
3	1,57	3	1,72	9,62	3	1,87	19,14
3,5	1,59	3,5	1,74	9,77	3,5	1,90	19,46
4	1,61	4	1,76	9,87	4	1,92	19,65
4,5	1,62	4,5	1,78	9,90	4,5	1,94	19,71
5	1,65	5	1,82	9,98	5	1,98	19,89
5,5	1,67	5,5	1,84	10,04	5,5	2,00	19,99
6	1,68	6	1,85	10,06	6	2,02	20,04

6,5	1,69	6,5	1,86	10,10	6,5	2,03	20,11
7	1,69	7	1,86	10,12	7	2,03	20,16
7,5	1,69	7,5	1,86	10,13	7,5	2,03	20,18
8	1,69	8	1,87	10,14	8	2,04	20,21
8,5	1,70	8,5	1,87	10,15	8,5	2,04	20,23
9	1,70	9	1,87	10,16	9	2,04	20,25
9,5	1,70	9,5	1,87	10,18	9,5	2,05	20,28
10	1,70	10	1,88	10,18	10	2,05	20,30
10,5	1,71	10,5	1,88	10,19	10,5	2,05	20,31
11	1,71	11	1,88	10,19	11	2,05	20,32
11,5	1,71	11,5	1,88	10,20	11,5	2,06	20,34
12	1,71	12	1,89	10,22	12	2,06	20,37
12,5	1,71	12,5	1,89	10,24	12,5	2,06	20,41
13	1,71	13	1,89	10,25	13	2,07	20,44
13,5	1,72	13,5	1,89	10,26	13,5	2,07	20,46
14	1,72	14	1,90	10,28	14	2,07	20,49
14,5	1,72	14,5	1,90	10,29	14,5	2,08	20,52
15	1,73	15	1,90	10,31	15	2,08	20,57
15,5	1,73	15,5	1,91	10,34	15,5	2,09	20,61
16	1,73	16	1,91	10,36	16	2,09	20,66
16,5	1,74	16,5	1,92	10,38	16,5	2,10	20,70
17	1,74	17	1,92	10,40	17	2,10	20,75
17,5	1,74	17,5	1,93	10,43	17,5	2,11	20,80
18	1,75	18	1,93	10,45	18	2,11	20,84
18,5	1,75	18,5	1,94	10,48	18,5	2,12	20,90
19	1,76	19	1,94	10,50	19	2,12	20,95
19,5	1,76	19,5	1,95	10,53	19,5	2,13	21,01
20	1,77	20	1,95	10,56	20	2,14	21,07
20,5	1,77	20,5	1,96	10,59	20,5	2,14	21,13
21	1,78	21	1,96	10,61	21	2,15	21,18
21,5	1,78	21,5	1,97	10,63	21,5	2,16	21,22
22	1,78	22	1,97	10,65	22	2,16	21,27
22,5	1,78	22,5	1,97	10,67	22,5	2,16	21,31
23	1,79	23	1,98	10,69	23	2,17	21,36
23,5	1,79	23,5	1,98	10,71	23,5	2,17	21,39
24	1,79	24	1,98	10,71	24	2,17	21,40
24,5	1,79	24,5	1,98	10,72	24,5	2,17	21,41
25	1,79	25	1,98	10,71	25	2,17	21,40
25,5	1,79	25,5	1,98	10,69	25,5	2,17	21,35
26	1,77	26	1,96	10,65	26	2,15	21,27
26,5	1,74	26,5	1,92	10,61	26,5	2,11	21,19
27	1,68	27	1,86	10,56	27	2,03	21,09
27,5	1,66	27,5	1,83	10,47	27,5	2,01	20,90
28	1,65	28	1,82	10,37	28	1,99	20,69
28,5	1,64	28,5	1,81	10,26	28,5	1,97	20,47
29	1,55	29	1,69	8,94	29	1,83	17,79
29,5	1,77	29,5	1,91	8,09	29,5	2,06	16,08

30	2,29	30	2,48	7,92	30	2,66	15,76
----	------	----	------	------	----	------	-------

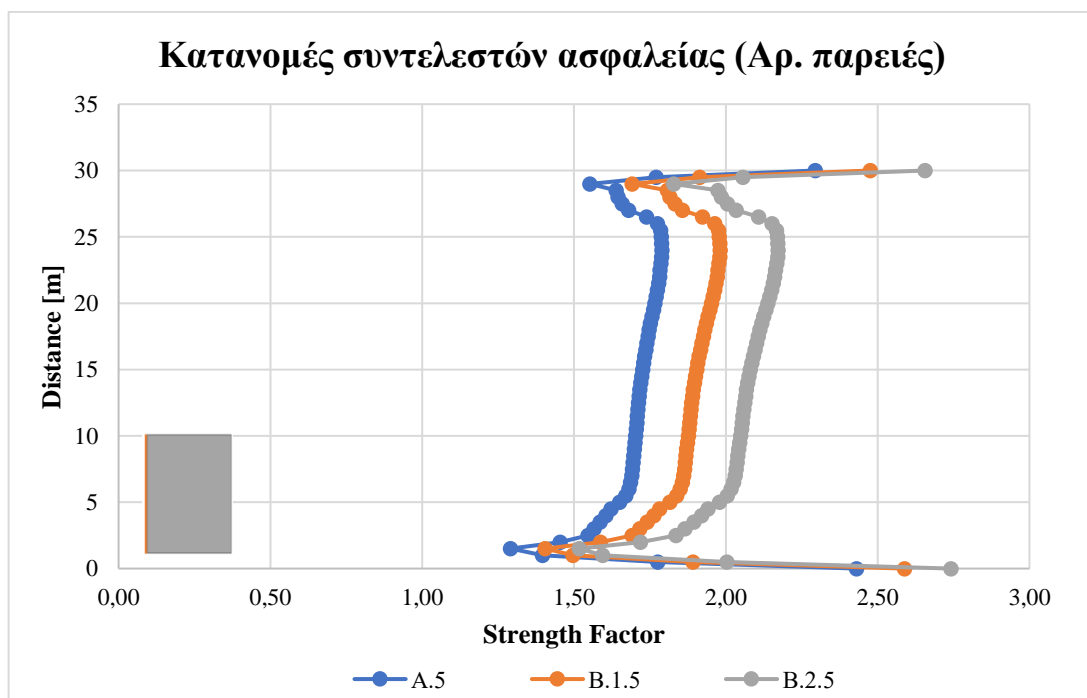
Η μέτρηση της απόστασης ξεκινά από τις βάσεις των στύλων (Distance = 0m) και φτάνει στις στέψεις τους (Distance = 30m). Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας για κάθε ανάλυση είναι:

- A.5 → 1,72
- B.1.5 → 1,89
- B.2.5 → 2,06

Επομένως, τα ποσοστά αύξησης των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας είναι:

- B.1.5 → 9,99%
- B.2.5 → 19,91%

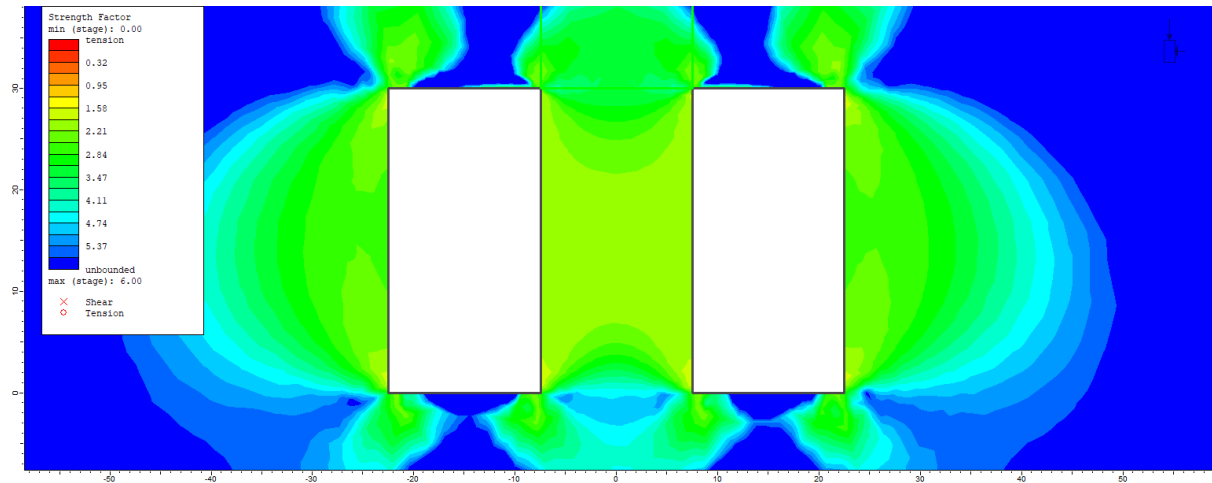
Η ελάχιστη τιμή συντελεστή ασφαλείας ανά ανάλυση βρίσκεται σε απόσταση 1,5m από την ακμή της βάσης και ισούται με 1,29, 1,40 και 1,52 για τις Αναλύσεις A.5, B.1.5 και B.2.5 αντίστοιχα.



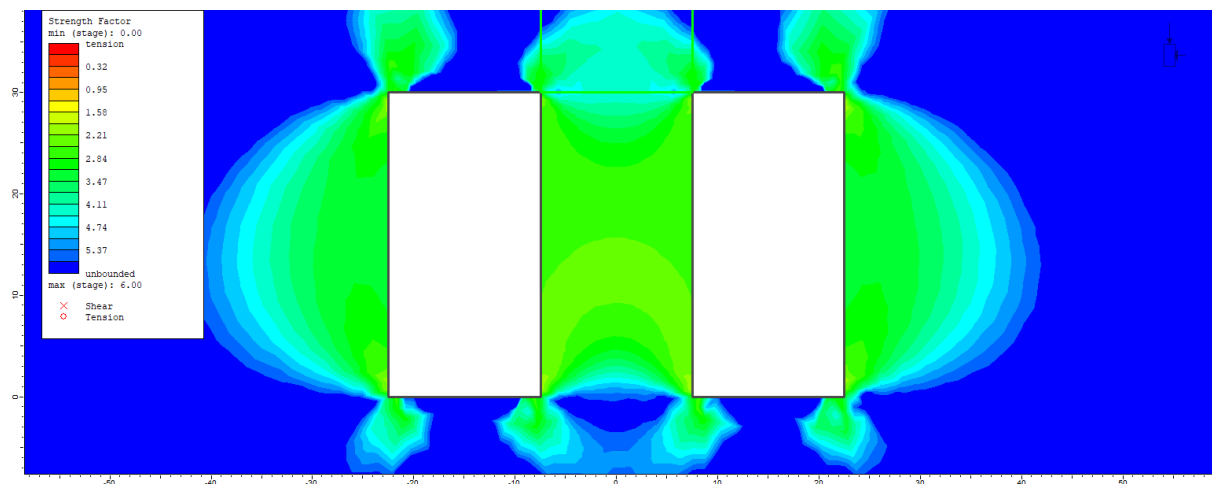
Σχήμα 3.4.2.1.2.6: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις αριστερές παρειές των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικές τιμές UCS

3.4.2.1.3 Παραμετροποίηση GSI (A – Γ.1 – Γ.2)

Οι βραχομάζες μαρμάρου των στύλων των Αναλύσεων A.5 – Γ.1.5 – Γ.2.5 παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές GSI (70, 75 και 80 αντίστοιχα). Όπως στις ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας των αναλύσεων B.1.5 και B.2.5, έτσι και στις παρακάτω δεν εμφανίζονται σημεία αστοχίας στις οροφές των δεξιών θαλάμων. Κατά τον ίδιο τρόπο με τις προηγούμενες οριζόντιες συγκρίσεις, πρόκειται να εξεταστούν οι συντελεστές ασφαλείας των στύλων στις διάφορες περιοχές ενδιαφέροντος.



Σχήμα 3.4.2.1.3.1: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση Γ.1.5



Σχήμα 3.4.2.1.3.2: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση Γ.2.5

Ξεκινώντας από τις στέψεις των στύλων, υπολογίζονται τα ποσοστά αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για κάθε αύξηση του δείκτη GSI. Έτσι προκύπτει ο ακόλουθος Πίνακας 3.4.2.1.3.1, όπου συγκρίνονται οι συντελεστές ασφαλείας των Αναλύσεων Γ.1.5 και Γ.2.5 με τους αντίστοιχους της Ανάλυσης A.5. Από τους συντελεστές ασφαλείας εμφανίζονται τα πρώτα δύο δεκαδικά ψηφία.

Πίνακας 3.4.2.1.3.1: Σύγκριση ποσοστών αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση του GSI (Στέφεις)

A.5		Γ.1.5			Γ.2.5		
Distance [m]	Strength Factor	Distance [m]	Strength Factor	%	Distance [m]	Strength Factor	%
0	2,29	0	2,63	14,69	0	3,12	35,84
0,5	2,93	0,5	3,39	15,48	0,5	4,04	37,80
1	3,38	1	3,94	16,36	1	4,74	39,97
1,5	3,45	1,5	4,07	17,89	1,5	4,97	43,78
2	3,36	2	3,99	18,76	2	4,90	45,95
2,5	3,17	2,5	3,78	19,36	2,5	4,67	47,41
3	3,10	3	3,71	19,74	3	4,60	48,34
3,5	3,06	3,5	3,67	20,06	3,5	4,56	49,15
4	2,99	4	3,59	20,24	4	4,47	49,59
4,5	2,92	4,5	3,52	20,41	4,5	4,38	50,02
5	2,90	5	3,50	20,50	5	4,36	50,27
5,5	2,88	5,5	3,48	20,59	5,5	4,34	50,50
6	2,86	6	3,46	20,62	6	4,31	50,61
6,5	2,85	6,5	3,44	20,65	6,5	4,29	50,70
7	2,85	7	3,44	20,64	7	4,29	50,69
7,5	2,85	7,5	3,44	20,62	7,5	4,29	50,68
8	2,85	8	3,44	20,57	8	4,29	50,62
8,5	2,85	8,5	3,43	20,53	8,5	4,29	50,56
9	2,87	9	3,45	20,42	9	4,31	50,36
9,5	2,89	9,5	3,47	20,31	9,5	4,34	50,16
10	2,91	10	3,50	20,13	10	4,36	49,81
10,5	2,94	10,5	3,52	19,95	10,5	4,39	49,45
11	3,01	11	3,60	19,64	11	4,48	48,84
11,5	3,08	11,5	3,68	19,33	11,5	4,57	48,24
12	3,12	12	3,71	18,88	12	4,60	47,29
12,5	3,20	12,5	3,79	18,27	12,5	4,68	46,05
13	3,40	13	3,98	17,21	13	4,89	44,05
13,5	3,50	13,5	4,06	16,01	13,5	4,94	41,42
14	3,48	14	3,99	14,52	14	4,80	37,82
14,5	3,01	14,5	3,42	13,38	14,5	4,08	35,43
15	2,38	15	2,66	11,91	15	3,15	32,60

Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας για κάθε ανάλυση είναι:

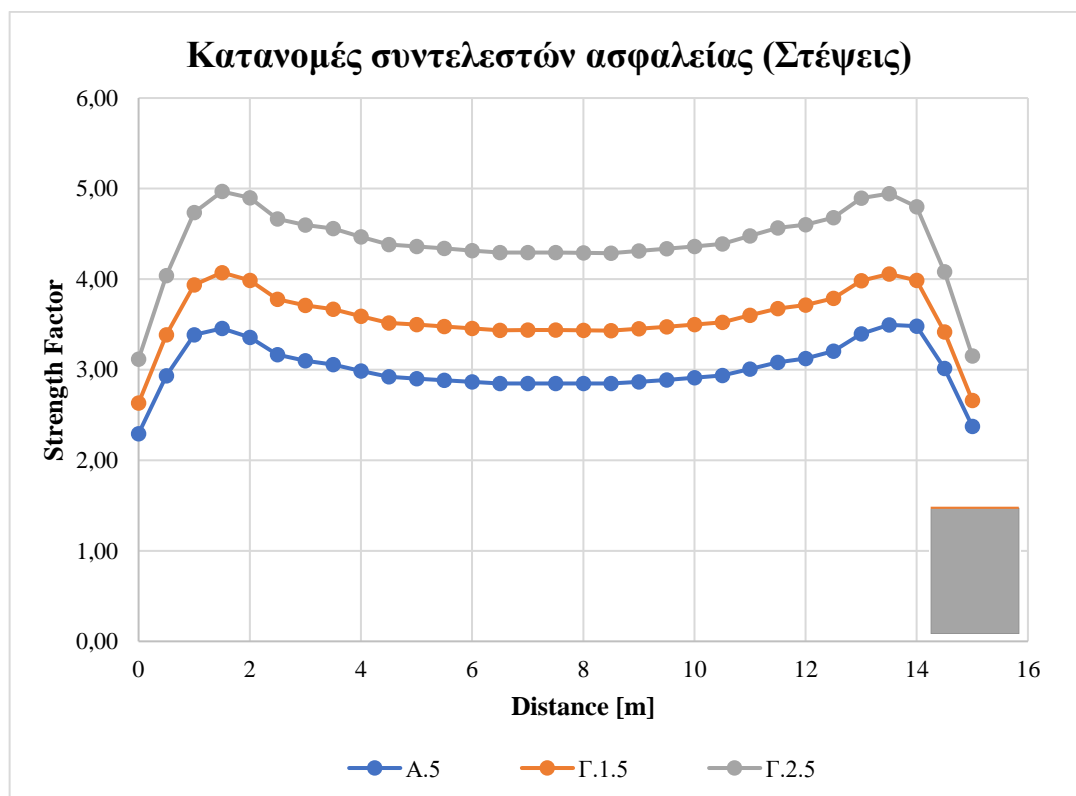
- A.5 → 3,01
- Γ.1.5 → 3,57
- Γ.2.5 → 4,40

Επομένως, τα ποσοστά αύξησης των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας είναι:

- Γ.1.5 → 18,63%
- Γ.2.5 → 46,25%

Αυξημένες τιμές GSI αντιστοιχούν σε καλύτερες ποιότητες βραχομάζας, άρα και αυξημένους συντελεστές ασφαλείας των στύλων. Από τα ποσοστά μεταβολής του Πίνακας 3.4.2.1.3.1 παρατηρείται πως η μεγαλύτερη αύξηση των συντελεστών παρουσιάζεται στο κεντρικό τμήμα της στέψης. Η ελάχιστη τιμή συντελεστή ασφαλείας ανά ανάλυση βρίσκεται στην αριστερή ακμή της στέψης και ισούται με 2,29, 2,63 και 3,12 για τις αναλύσεις Α.5, Γ.1.5 και Γ.2.5 αντίστοιχα.

Η απεικόνιση των κατανομών των συντελεστών ασφαλείας στις στέψεις των στύλων των εξεταζόμενων αναλύσεων γίνεται στο Σχήμα 3.4.2.1.3.3:



Σχήμα 3.4.2.1.3.3 Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις στέψεις των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικές τιμές GSI

Κατά τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και στο μέσο του ύψους των στύλων τα ποσοστά αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για κάθε αύξηση της τιμής του GSI.

Πίνακας 3.4.2.1.3.2: Σύγκριση ποσοστών αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση του GSI (Μέσο του ύψους)

A.5		Γ.1.5			Γ.2.5		
Distance [m]	Strength Factor	Distance [m]	Strength Factor	%	Distance [m]	Strength Factor	%
0	1,73	0	2,07	20,10	0	2,57	49,12
0,5	1,72	0,5	2,07	20,08	0,5	2,57	49,07
1	1,72	1	2,07	20,06	1	2,56	49,02
1,5	1,72	1,5	2,06	20,04	1,5	2,56	48,97
2	1,71	2	2,06	20,02	2	2,55	48,93
2,5	1,71	2,5	2,05	20,00	2,5	2,55	48,88
3	1,71	3	2,05	19,98	3	2,54	48,83
3,5	1,70	3,5	2,04	19,97	3,5	2,54	48,78
4	1,70	4	2,04	19,95	4	2,53	48,74
4,5	1,70	4,5	2,04	19,93	4,5	2,53	48,70
5	1,70	5	2,03	19,92	5	2,52	48,67
5,5	1,69	5,5	2,03	19,91	5,5	2,52	48,65
6	1,69	6	2,03	19,91	6	2,52	48,63
6,5	1,69	6,5	2,03	19,90	6,5	2,52	48,61
7	1,69	7	2,03	19,89	7	2,51	48,60
7,5	1,69	7,5	2,03	19,89	7,5	2,51	48,60
8	1,69	8	2,03	19,90	8	2,51	48,61
8,5	1,69	8,5	2,03	19,90	8,5	2,52	48,62
9	1,69	9	2,03	19,91	9	2,52	48,64
9,5	1,69	9,5	2,03	19,92	9,5	2,52	48,65
10	1,70	10	2,03	19,93	10	2,52	48,68
10,5	1,70	10,5	2,04	19,94	10,5	2,53	48,72
11	1,70	11	2,04	19,96	11	2,53	48,76
11,5	1,70	11,5	2,05	19,98	11,5	2,54	48,80
12	1,71	12	2,05	20,00	12	2,54	48,85
12,5	1,71	12,5	2,05	20,02	12,5	2,55	48,90
13	1,71	13	2,06	20,04	13	2,55	48,95
13,5	1,72	13,5	2,06	20,06	13,5	2,56	49,01
14	1,72	14	2,07	20,08	14	2,57	49,07
14,5	1,72	14,5	2,07	20,10	14,5	2,57	49,11
15	1,73	15	2,07	20,12	15	2,57	49,15

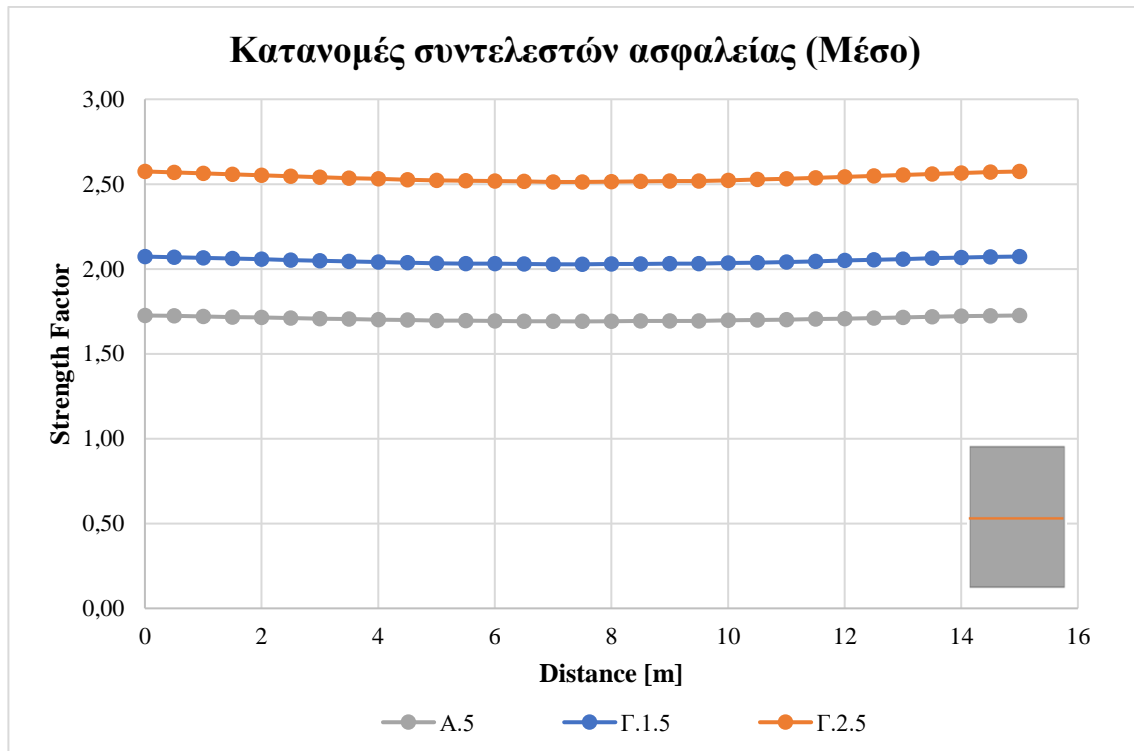
Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας για κάθε ανάλυση είναι:

- A.5 → 1,71
- Γ.1.5 → 2,05
- Γ.2.5 → 2,54

Επομένως, τα ποσοστά αύξησης των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας είναι:

- Γ.1.5 → 19,98%
- Γ.2.5 → 48,82%

Όπως συμβαίνει και στη σύγκριση ως προς τη UCS, οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας δεν παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή κατά πλάτος στο μέσο του ύψους των στύλων.



Σχήμα 3.4.2.1.3.4: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στο μέσο του ύψους των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικές τιμές GSI

Στις βάσεις των στύλων, τα ποσοστά αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για κάθε αύξηση της τιμής του GSI υπολογίζονται ως εξής:

Πίνακας 3.4.2.1.3.3: Σύγκριση ποσοστών αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση του GSI (Βάσεις)

A.5		Γ.1.5			Γ.2.5		
Distance [m]	Strength Factor	Distance [m]	Strength Factor	%	Distance [m]	Strength Factor	%
0	2,43	0	2,71	11,41	0	3,10	27,48
0,5	2,84	0,5	3,19	12,48	0,5	3,69	30,18
1	3,24	1	3,68	13,38	1	4,29	32,43
1,5	3,63	1,5	4,17	14,79	1,5	4,93	35,92
2	3,88	2	4,49	15,83	2	5,37	38,45
2,5	4,01	2,5	4,66	16,05	2,5	5,58	38,97
3	4,11	3	4,78	16,31	3	5,74	39,61
3,5	4,15	3,5	4,84	16,61	3,5	5,83	40,36
4	4,04	4	4,72	16,80	4	5,69	40,84

4,5	3,95	4,5	4,61	16,98	4,5	5,57	41,28
5	3,92	5	4,59	17,12	5	5,56	41,62
5,5	3,91	5,5	4,59	17,23	5,5	5,55	41,91
6	3,90	6	4,58	17,29	6	5,54	42,06
6,5	3,88	6,5	4,55	17,35	6,5	5,51	42,20
7	3,86	7	4,53	17,39	7	5,49	42,31
7,5	3,89	7,5	4,56	17,38	7,5	5,53	42,27
8	3,92	8	4,60	17,36	8	5,57	42,23
8,5	3,92	8,5	4,59	17,34	8,5	5,57	42,19
9	3,91	9	4,59	17,28	9	5,56	42,04
9,5	3,91	9,5	4,58	17,20	9,5	5,54	41,85
10	3,86	10	4,52	17,14	10	5,47	41,67
10,5	3,86	10,5	4,52	17,02	10,5	5,46	41,37
11	3,92	11	4,58	16,82	11	5,52	40,89
11,5	4,08	11,5	4,76	16,65	11,5	5,73	40,44
12	4,24	12	4,94	16,48	12	5,93	40,00
12,5	4,08	12,5	4,75	16,42	12,5	5,71	39,85
13	3,93	13	4,54	15,36	13	5,40	37,30
13,5	3,77	13,5	4,31	14,23	13,5	5,08	34,54
14	3,36	14	3,81	13,34	14	4,45	32,33
14,5	2,88	14,5	3,24	12,53	14,5	3,75	30,31
15	2,40	15	2,67	11,40	15	3,06	27,48

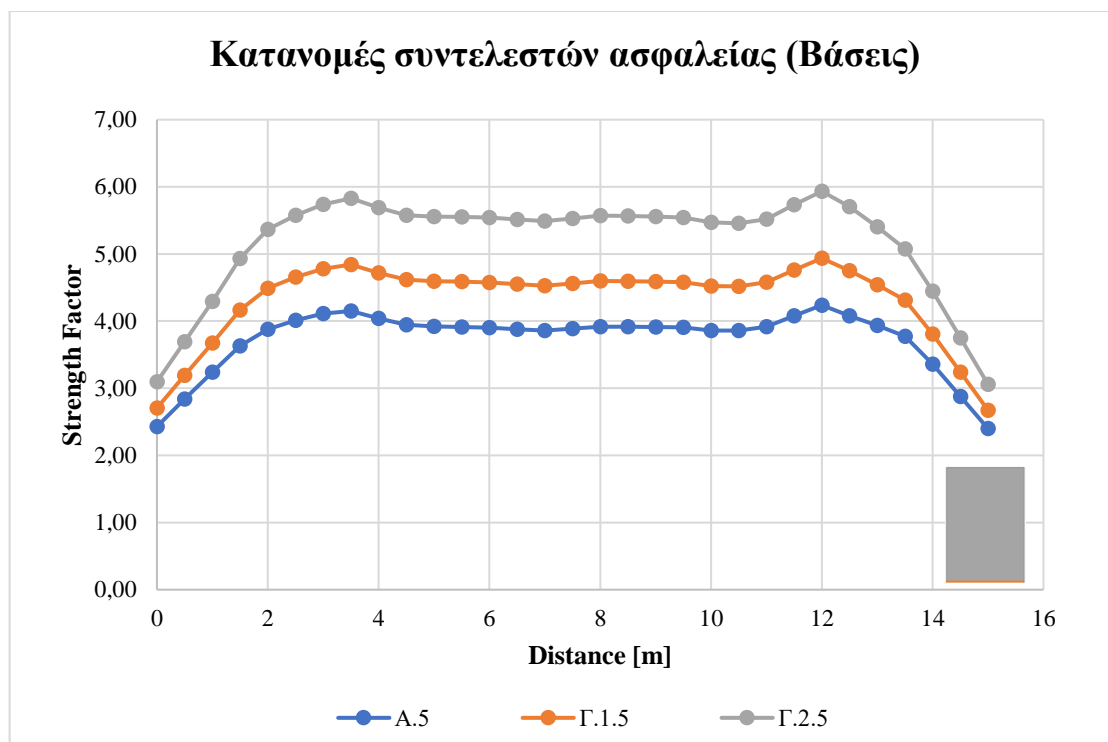
Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας για κάθε ανάλυση είναι:

- A.5 → 3,73
- Γ.1.5 → 4,33
- Γ.2.5 → 5,19

Επομένως, τα ποσοστά αύξησης των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας είναι:

- Γ.1.5 → 16,05%
- Γ.2.5 → 38,99%

Η ελάχιστη τιμή συντελεστή ασφαλείας ανά ανάλυση βρίσκεται στην δεξιά ακμή της βάσης και ισούται με 2,40, 2,67 και 3,06 για τις Αναλύσεις A.5, Γ.1.5 και Γ.2.5 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.4.2.1.3.5: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις βάσεις των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικές τιμές GSI

Η τελευταία περιοχή που εξετάζεται είναι αυτή των παρειών των στύλων. Σε αυτές, τα ποσοστά αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για κάθε αύξηση της τιμής του GSI έχουν ως εξής:

Πίνακας 3.4.2.1.3.4: Σύγκριση ποσοστών αύξησης των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση του GSI (Αριστερές παρειές)

A.5		Γ.1.5			Γ.2.5		
Distance [m]	Strength Factor	Distance [m]	Strength Factor	%	Distance [m]	Strength Factor	%
0	2,43	0	2,71	11,41	0	3,10	27,48
0,5	1,78	0,5	1,98	11,58	0,5	2,27	27,96
1	1,40	1	1,58	13,32	1	1,85	32,34
1,5	1,29	1,5	1,51	16,91	1,5	1,82	41,26
2	1,45	2	1,71	17,69	2	2,08	43,18
2,5	1,55	2,5	1,83	18,23	2,5	2,23	44,50
3	1,57	3	1,86	18,64	3	2,28	45,50
3,5	1,59	3,5	1,89	18,97	3,5	2,32	46,32
4	1,61	4	1,91	19,17	4	2,36	46,81
4,5	1,62	4,5	1,93	19,24	4,5	2,38	46,99
5	1,65	5	1,97	19,42	5	2,43	47,43
5,5	1,67	5,5	2,00	19,53	5,5	2,47	47,71
6	1,68	6	2,01	19,58	6	2,48	47,82
6,5	1,69	6,5	2,02	19,65	6,5	2,50	48,01
7	1,69	7	2,02	19,70	7	2,50	48,12

7,5	1,69	7,5	2,03	19,72	7,5	2,51	48,17
8	1,69	8	2,03	19,75	8	2,51	48,24
8,5	1,70	8,5	2,03	19,77	8,5	2,52	48,30
9	1,70	9	2,03	19,79	9	2,52	48,35
9,5	1,70	9,5	2,04	19,82	9,5	2,52	48,41
10	1,70	10	2,04	19,83	10	2,53	48,46
10,5	1,71	10,5	2,04	19,85	10,5	2,53	48,49
11	1,71	11	2,05	19,85	11	2,54	48,51
11,5	1,71	11,5	2,05	19,88	11,5	2,54	48,56
12	1,71	12	2,05	19,91	12	2,54	48,64
12,5	1,71	12,5	2,05	19,94	12,5	2,55	48,73
13	1,71	13	2,06	19,97	13	2,55	48,80
13,5	1,72	13,5	2,06	19,99	13,5	2,56	48,85
14	1,72	14	2,06	20,02	14	2,56	48,92
14,5	1,72	14,5	2,07	20,06	14,5	2,57	49,01
15	1,73	15	2,07	20,10	15	2,57	49,12
15,5	1,73	15,5	2,08	20,15	15,5	2,58	49,23
16	1,73	16	2,08	20,19	16	2,59	49,35
16,5	1,74	16,5	2,09	20,24	16,5	2,60	49,46
17	1,74	17	2,09	20,29	17	2,60	49,58
17,5	1,74	17,5	2,10	20,33	17,5	2,61	49,70
18	1,75	18	2,10	20,38	18	2,62	49,82
18,5	1,75	18,5	2,11	20,44	18,5	2,63	49,96
19	1,76	19	2,12	20,49	19	2,64	50,10
19,5	1,76	19,5	2,12	20,55	19,5	2,65	50,24
20	1,77	20	2,13	20,62	20	2,66	50,39
20,5	1,77	20,5	2,14	20,67	20,5	2,67	50,54
21	1,78	21	2,14	20,72	21	2,67	50,67
21,5	1,78	21,5	2,15	20,77	21,5	2,68	50,78
22	1,78	22	2,15	20,81	22	2,69	50,89
22,5	1,78	22,5	2,16	20,86	22,5	2,69	51,01
23	1,79	23	2,16	20,91	23	2,70	51,12
23,5	1,79	23,5	2,16	20,94	23,5	2,70	51,20
24	1,79	24	2,16	20,95	24	2,71	51,23
24,5	1,79	24,5	2,16	20,97	24,5	2,71	51,27
25	1,79	25	2,16	20,95	25	2,70	51,23
25,5	1,79	25,5	2,16	20,90	25,5	2,70	51,11
26	1,77	26	2,14	20,82	26	2,68	50,92
26,5	1,74	26,5	2,10	20,74	26,5	2,62	50,72
27	1,68	27	2,03	20,66	27	2,53	50,50
27,5	1,66	27,5	2,00	20,46	27,5	2,49	50,03
28	1,65	28	1,98	20,25	28	2,46	49,50
28,5	1,64	28,5	1,97	20,02	28,5	2,44	48,92
29	1,55	29	1,82	17,17	29	2,20	41,89
29,5	1,77	29,5	2,04	15,22	29,5	2,43	37,11
30	2,29	30	2,63	14,69	30	3,12	35,84

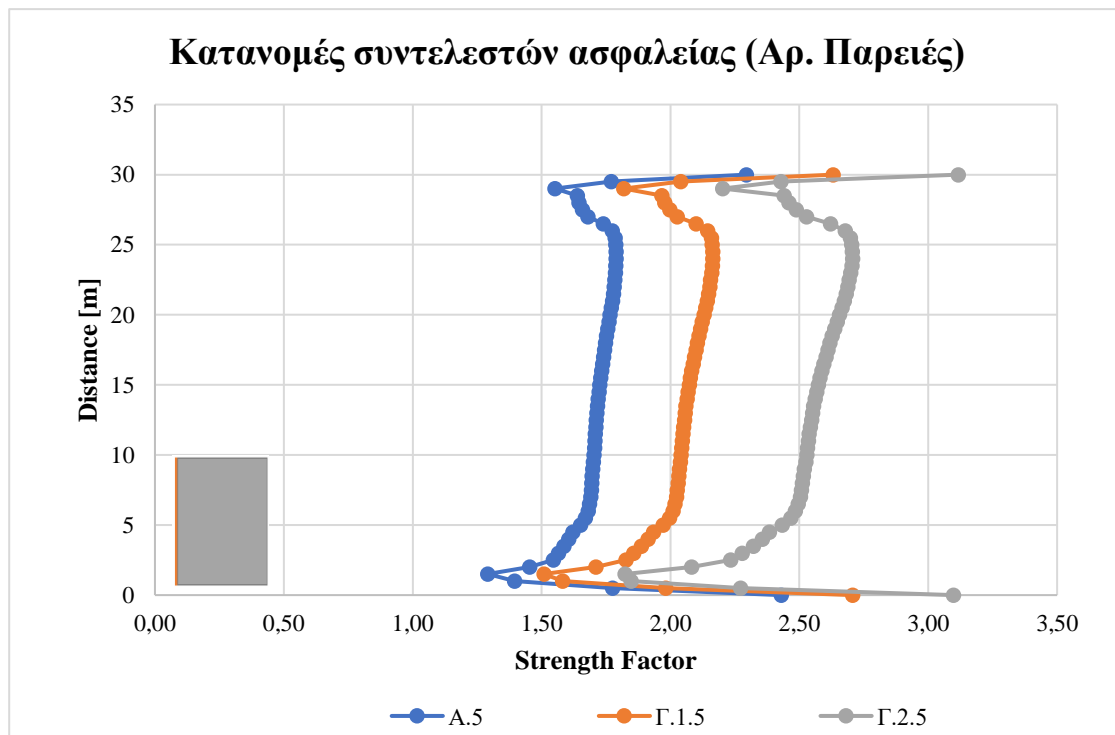
Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας για κάθε ανάλυση είναι:

- A.5 → 1,72
- Γ.1.5 → 2,05
- Γ.2.5 → 2,53

Επομένως, τα ποσοστά αύξησης των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας είναι:

- Γ.1.5 → 19,38%
- Γ.2.5 → 47,34%

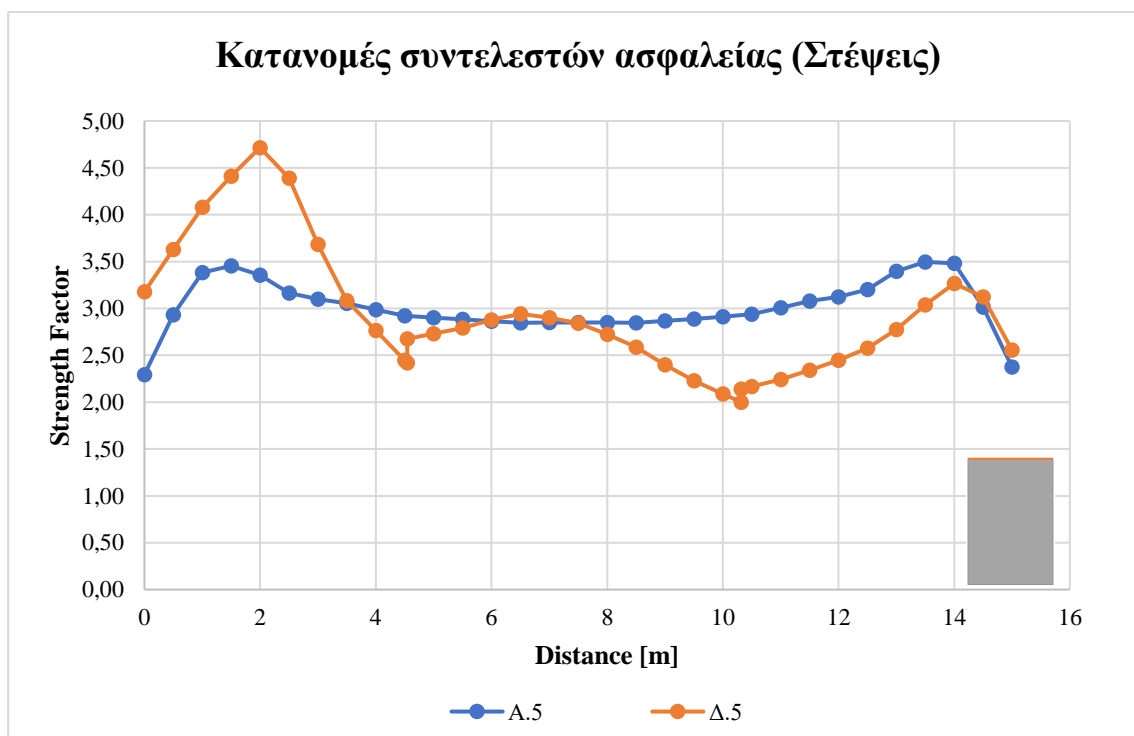
Η ελάχιστη τιμή συντελεστή ασφαλείας ανά ανάλυση βρίσκεται σε απόσταση 1,5m από την ακμή της βάσης και ισούται με 1,29, 1,51 και 1,82 για τις Αναλύσεις A.5, Γ.1.5 και Γ.2.5 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.4.2.1.3.6: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις αριστερές παρειές των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικές τιμές GSI

3.4.2.1.4 Επιρροή δικτύου ασυνεχειών (Α – Δ)

Η διαφορά μεταξύ των Αναλύσεων Α.5 και Δ.5 έγκειται στην ύπαρξη δικτύου ασυνεχειών εντός της δομής των στύλων της τελευταίας. Στις προηγούμενες Ομάδες Αναλύσεων, οι κατανομές των συντελεστών ασφαλείας παρουσίαζαν συγκεκριμένη μορφή ανά εξεταζόμενη περιοχή. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς από το Σχήμα 3.4.2.1.4.1 και τις κατανομές στις στέψεις, το ίδιο δεν μπορεί να ειπωθεί και για τη Δ' Ομάδα Αναλύσεων.



Σχήμα 3.4.2.1.4.1: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις στέψεις των στύλων των Αναλύσεων Α.5 - Δ.5

Στην παραπάνω κατανομή (Δ.5), παρατηρούνται δύο σημεία όπου παρουσιάζονται από δύο τιμές συντελεστών ασφαλείας. Πρόκειται για τα σημεία της στέψης που τέμνονται από το δίκτυο ασυνεχειών και όπου εμφανίζονται οι ελάχιστες τιμές των συντελεστών ασφαλείας τοπικά. Στο πρώτο τέτοιο σημείο μάλιστα από την δεξιά ακμή προς την αριστερή, αντιστοιχεί η ελάχιστη τιμή (2,00) συντελεστή ασφαλείας που συναντάται στη στέψη της Ανάλυσης Δ.5. Στην ανάλυση Α.5 η χαμηλότερη τιμή βρίσκεται στην αριστερή ακμή της στέψης και ισούται με 2,29. Στο μεγαλύτερο μέρος της στέψης της Ανάλυσης Δ.5 οι συντελεστές ασφαλείας παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές από εκείνες της Ανάλυσης Α.5. Μοναδική εξαίρεση αποτελούν οι συντελεστές ασφαλείας κοντά στην αριστερή ακμή της στέψης που εμφανίζονται αυξημένοι. Από τον υπολογισμό των ποσοστών μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας, προκύπτει ο ακόλουθος Πίνακας 3.4.2.1.4.1:

Πίνακας 3.4.2.1.4.1: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας λόγω επίδρασης δικτύου ασυνεχειών (Στέψεις)

Α.5		Δ.5		
Distance [m]	Strength Factor	Distance [m]	Strength Factor	%
0	2,29	0	3,18	38,48
0,5	2,93	0,5	3,63	23,79
1	3,38	1	4,08	20,56
1,5	3,45	1,5	4,41	27,70
2	3,36	2	4,72	40,55
2,5	3,17	2,5	4,39	38,76
3	3,10	3	3,68	18,86
3,5	3,06	3,5	3,08	0,87
4	2,99	4	2,76	-7,42
4,5	2,92	4,5	2,45	-16,28
5	2,90	4,54116237	2,42	
5,5	2,88	4,54119387	2,67	
6	2,86	5	2,73	-5,89
6,5	2,85	5,5	2,79	-3,11
7	2,85	6	2,88	0,45
7,5	2,85	6,5	2,94	3,34
8	2,85	7	2,90	1,86
8,5	2,85	7,5	2,84	-0,17
9	2,87	8	2,72	-4,40
9,5	2,89	8,5	2,59	-9,20
10	2,91	9	2,40	-16,28
10,5	2,94	9,5	2,23	-22,80
11	3,01	10	2,09	-28,29
11,5	3,08	10,3146651	2,00	
12	3,12	10,3146966	2,14	
12,5	3,20	10,5	2,17	-26,23
13	3,40	11	2,24	-25,45
13,5	3,50	11,5	2,34	-24,04
14	3,48	12	2,45	-21,67
14,5	3,01	12,5	2,58	-19,54
15	2,38	13	2,78	-18,28
		13,5	3,04	-13,09
		14	3,27	-6,15
		14,5	3,12	3,61
		15	2,56	7,58

Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας για κάθε ανάλυση είναι:

- Α.5 → 3,01
- Δ.5 → 2,89

Η παρατήρηση αυξομειώσεων στους συντελεστές ασφαλείας της Ανάλυσης Δ.5 δεν αφήνει περιθώρια προσδιορισμού του μέσου ποσοστού μεταβολής τους.

Κατά τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και στο μέσο του ύψους των στύλων τα ποσοστά μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας λόγω της επίδρασης του δικτύου των ασυνεχειών.

Πίνακας 3.4.2.1.4.2: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας λόγω επίδρασης δικτύου ασυνεχειών (Μέσο του ύψους)

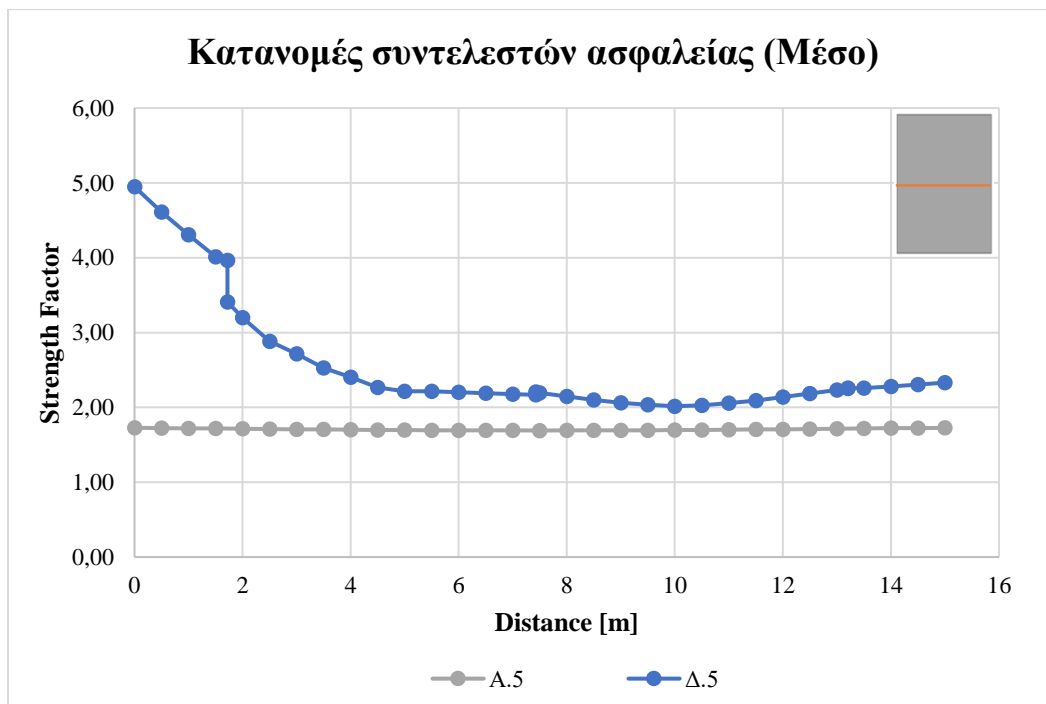
Α.5		Δ.5		
Distance [m]	Strength Factor	Distance [m]	Strength Factor	%
0	1,73	0	4,95	186,70
0,5	1,72	0,5	4,61	167,65
1	1,72	1	4,31	150,25
1,5	1,72	1,5	4,01	133,70
2	1,71	1,71909772	3,97	
2,5	1,71	1,71912922	3,41	
3	1,71	2	3,20	86,65
3,5	1,70	2,5	2,88	68,63
4	1,70	3	2,72	59,16
4,5	1,70	3,5	2,53	48,34
5	1,70	4	2,40	41,22
5,5	1,69	4,5	2,27	33,52
6	1,69	5	2,22	30,72
6,5	1,69	5,5	2,22	30,73
7	1,69	6	2,20	30,13
7,5	1,69	6,5	2,19	29,41
8	1,69	7	2,18	28,73
8,5	1,69	7,42791372	2,17	
9	1,69	7,42794522	2,21	
9,5	1,69	7,5	2,19	29,70
10	1,70	8	2,15	26,96
10,5	1,70	8,5	2,10	24,12
11	1,70	9	2,06	21,70
11,5	1,70	9,5	2,04	20,12
12	1,71	10	2,02	18,82
12,5	1,71	10,5	2,03	19,39
13	1,71	11	2,06	20,86
13,5	1,72	11,5	2,09	22,78
14	1,72	12	2,14	25,18
14,5	1,72	12,5	2,19	27,82
15	1,73	13	2,23	30,32
		13,2014164	2,25	
		13,2014479	2,26	
		13,5	2,26	31,51

		14	2,28	32,40
		14,5	2,30	33,67
		15	2,33	34,92

Από τα ποσοστά μεταβολής του παραπάνω πίνακα, παρατηρείται το παράδοξο της αύξησης των συντελεστών ασφαλείας υπό την επίδραση της οικογένειας των ασυνεχειών. Πιθανότατα, λοιπόν, η καταπόνηση να μεταφέρεται σε κάποια άλλη περιοχή. Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας για κάθε ανάλυση είναι:

- A.5 → 1,71
- Δ.5 → 2,58

Επομένως, το ποσοστό αύξησης της μέσης τιμής των συντελεστών ασφαλείας στο μέσο το ύψους είναι 51,49%, κάτι το οποίο οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στους αυξημένους συντελεστές ασφαλείας που παρατηρούνται κοντά στην αριστερή παρειά.



Σχήμα 3.4.2.1.4.2: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στο μέσο του ύψους των στύλων των Αναλύσεων A.5 - Δ.5

Στις βάσεις των στύλων, τα ποσοστά μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας λόγω της επίδρασης του δικτύου ασυνεχειών υπολογίζονται ως εξής:

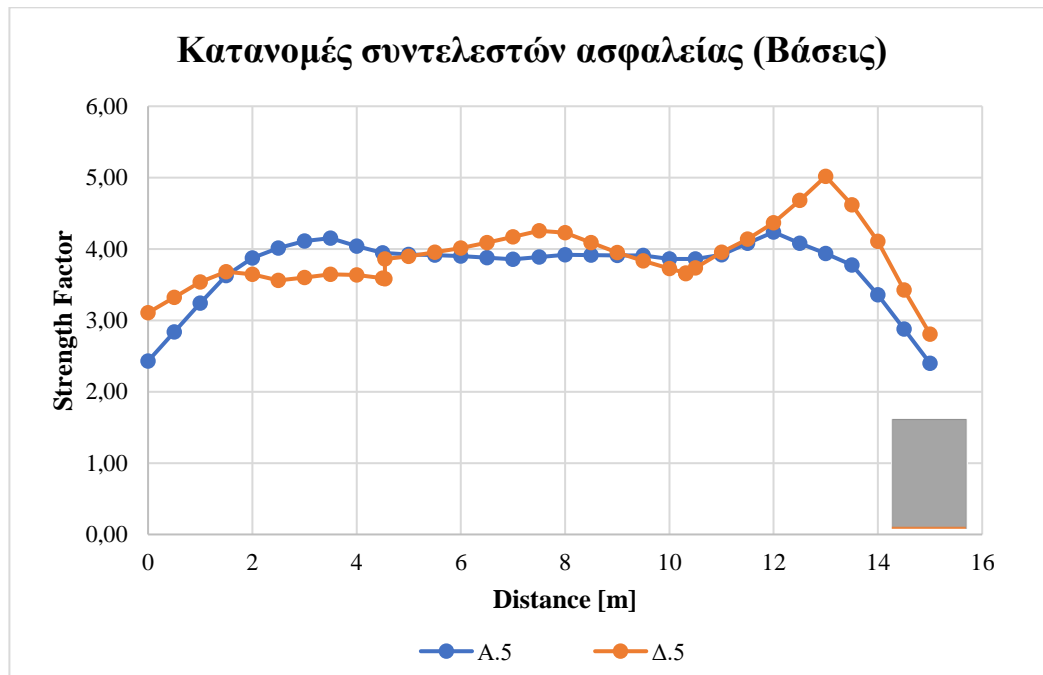
Πίνακας 3.4.2.1.4.3: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας λόγω επίδρασης δικτύου ασυνεχειών (Βάσεις)

Α.5		Δ.5		
Distance [m]	Strength Factor	Distance [m]	Strength Factor	%
0	2,43	0	3,11	27,82
0,5	2,84	0,5	3,32	17,13
1	3,24	1	3,54	9,19
1,5	3,63	1,5	3,68	1,49
2	3,88	2	3,64	-5,99
2,5	4,01	2,5	3,56	-11,25
3	4,11	3	3,60	-12,40
3,5	4,15	3,5	3,65	-12,16
4	4,04	4	3,64	-9,98
4,5	3,95	4,5	3,59	-8,96
5	3,92	4,54116237	3,58	
5,5	3,91	4,54119387	3,86	
6	3,90	5	3,90	-0,71
6,5	3,88	5,5	3,95	1,04
7	3,86	6	4,01	2,88
7,5	3,89	6,5	4,09	5,45
8	3,92	7	4,17	8,16
8,5	3,92	7,5	4,26	9,51
9	3,91	8	4,23	7,85
9,5	3,91	8,5	4,09	4,39
10	3,86	9	3,95	0,94
10,5	3,86	9,5	3,83	-1,90
11	3,92	10	3,73	-3,46
11,5	4,08	10,3146651	3,66	
12	4,24	10,3146966	3,65	
12,5	4,08	10,5	3,74	-3,21
13	3,93	11	3,96	0,97
13,5	3,77	11,5	4,14	1,38
14	3,36	12	4,37	3,08
14,5	2,88	12,5	4,68	14,78
15	2,40	13	5,02	27,53
		13,5	4,62	22,45
		14	4,11	22,27
		14,5	3,42	18,92
		15	2,81	17,07

Όπως στη στέψη έτσι και στη βάση του στύλου της Ανάλυσης Δ.5, η κατανομή των συντελεστών ασφαλείας παρουσιάζει αυξομειώσεις κατά πλάτος της εξεταζόμενης περιοχής, οπότε δεν υπάρχει νόημα υπολογισμού του μέσου ποσοστού μεταβολής των συντελεστών

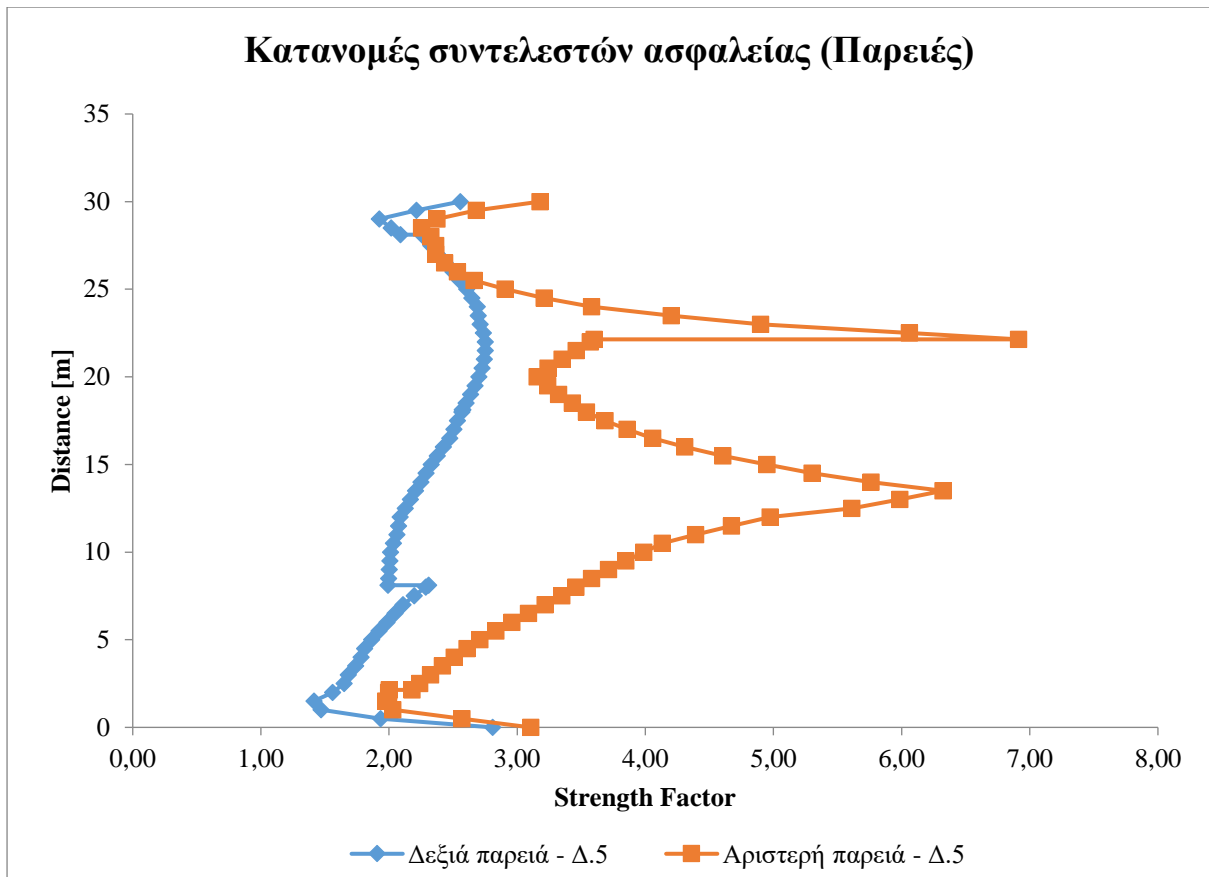
ασφαλείας. Η ελάχιστη τιμή (2,81) συντελεστή ασφαλείας που συναντάται στη βάση της Ανάλυσης Δ.5 είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη τιμή της Α.5 (2,40). Σε αμφότερες τις Αναλύσεις, η ελάχιστη τιμή παρουσιάζεται στην δεξιά ακμή της βάσης. Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας για κάθε ανάλυση είναι:

- Α.5 → 3,73
- Δ.5 → 3,86

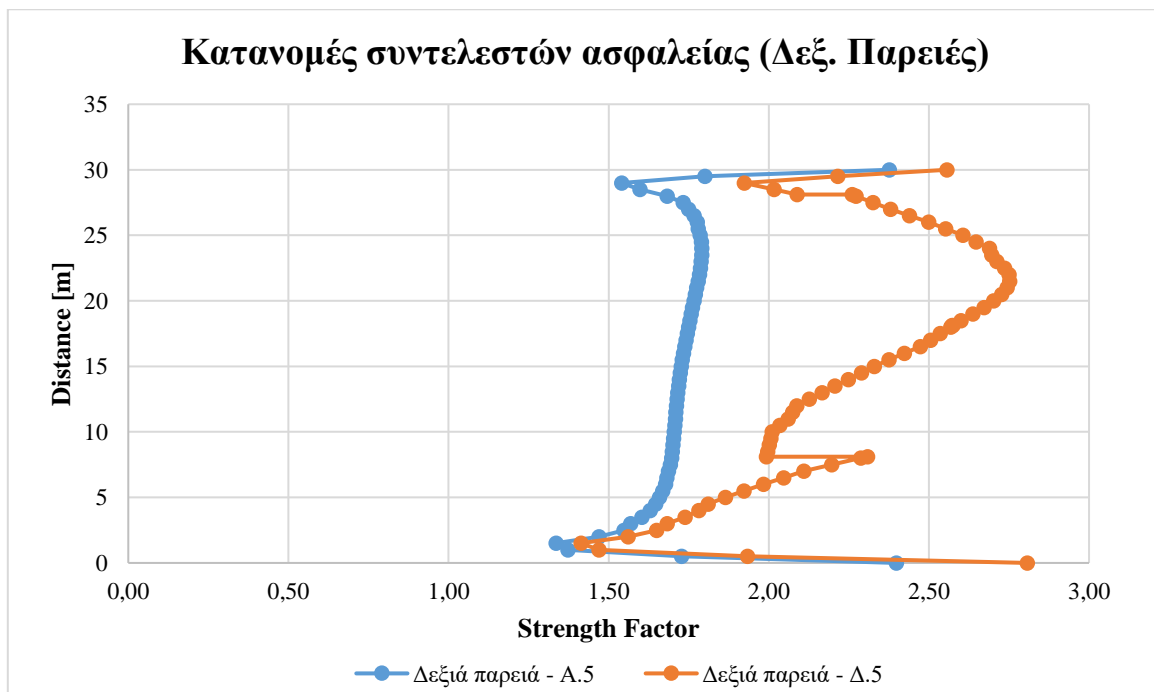


Σχήμα 3.4.2.1.4.3: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις βάσεις των στύλων των Αναλύσεων Α.5 - Δ.5

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες Ομάδες Αναλύσεων, όπου οι συντελεστές ασφαλείας παρουσίαζαν περίπου ίδιες τιμές στις παρειές των εξεταζόμενων στύλων, στην Ομάδα Δ' οι συντελεστές της δεξιάς παρειάς είναι χαμηλότεροι σε σχέση με εκείνους της αριστερής, όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 3.4.2.1.4.4. Αυτό πιθανότατα να οφείλεται στην κλίση των ασυνεχειών. Έτσι, η μέση τιμή των συντελεστών ασφαλείας λαμβάνεται από τη δεξιά παρειά του στύλου της Ανάλυσης Δ.5 και προκύπτει ίση με 2,26.

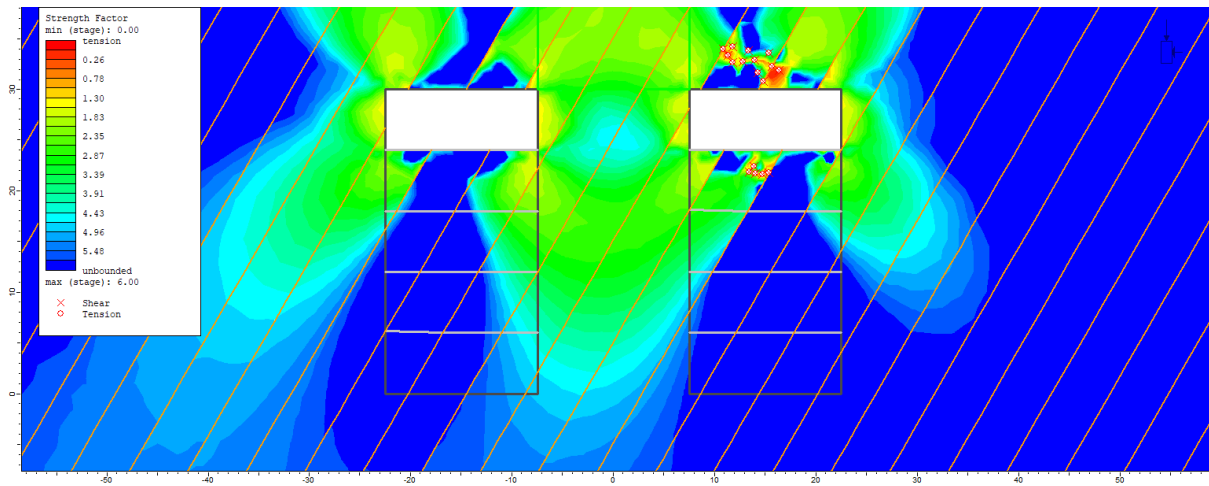


Σχήμα 3.4.2.1.4.4: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις παρειές του στύλου της Ανάλυσης Δ.5

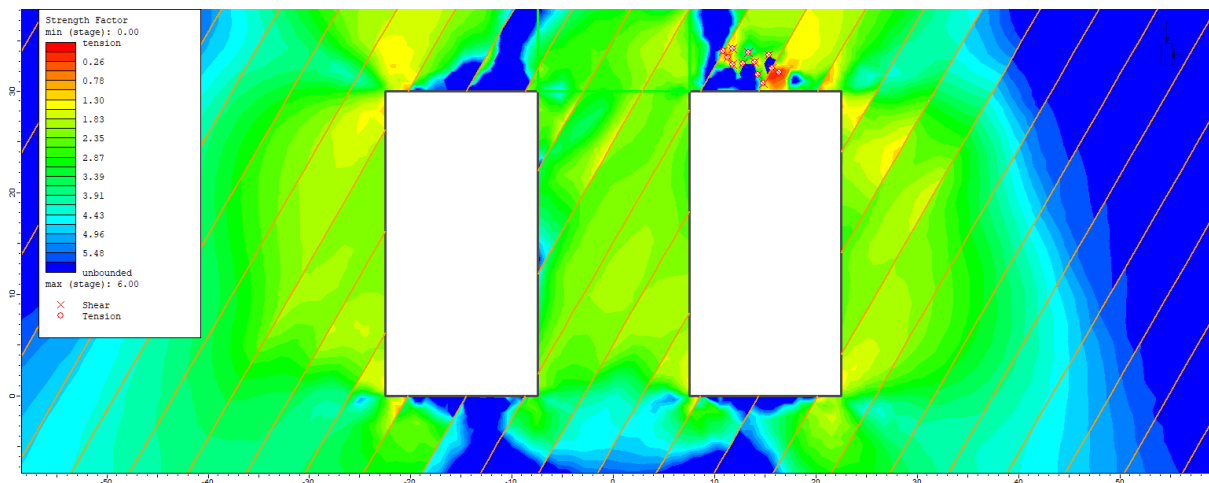


Σχήμα 3.4.2.1.4.5: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις δεξιές παρειές των στύλων των Αναλύσεων Α.5 - Δ.5

Από το παραπάνω Σχήμα 3.4.2.1.4.5, παρατηρείται το παράδοξο της αύξησης των συντελεστών ασφαλείας στη δεξιά παρειά υπό την επίδραση της οικογένειας των ασυνεχειών. Όπως φαίνεται από τις ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας της Ανάλυσης Δ.5, οι μικρότερες τιμές συντελεστών δεν παρατηρούνται στη δομή του στύλου αλλά στην περιοχή που βρίσκεται πάνω από την οροφή του δεξιού θαλάμου. Εκεί υπάρχει μία ζώνη διαρροής σε εφελκυσμό – διάτμηση αποτελούμενη από 12 σημεία, τα 3 εκ των οποίων εμφανίζονται κατά μήκος των ασυνεχειών. Αυτή η ζώνη διαρροής εμφανίζεται κατά τη δημιουργία του πρώτου κιάλας bench (Δ.1), στο οποίο παρατηρείται ακόμα μία περιοχή αστοχίας. Η τελευταία βρίσκεται κάτω από το δάπεδο του δεξιού θαλάμου και παύει να υφίσταται με την εκσκαφή της.

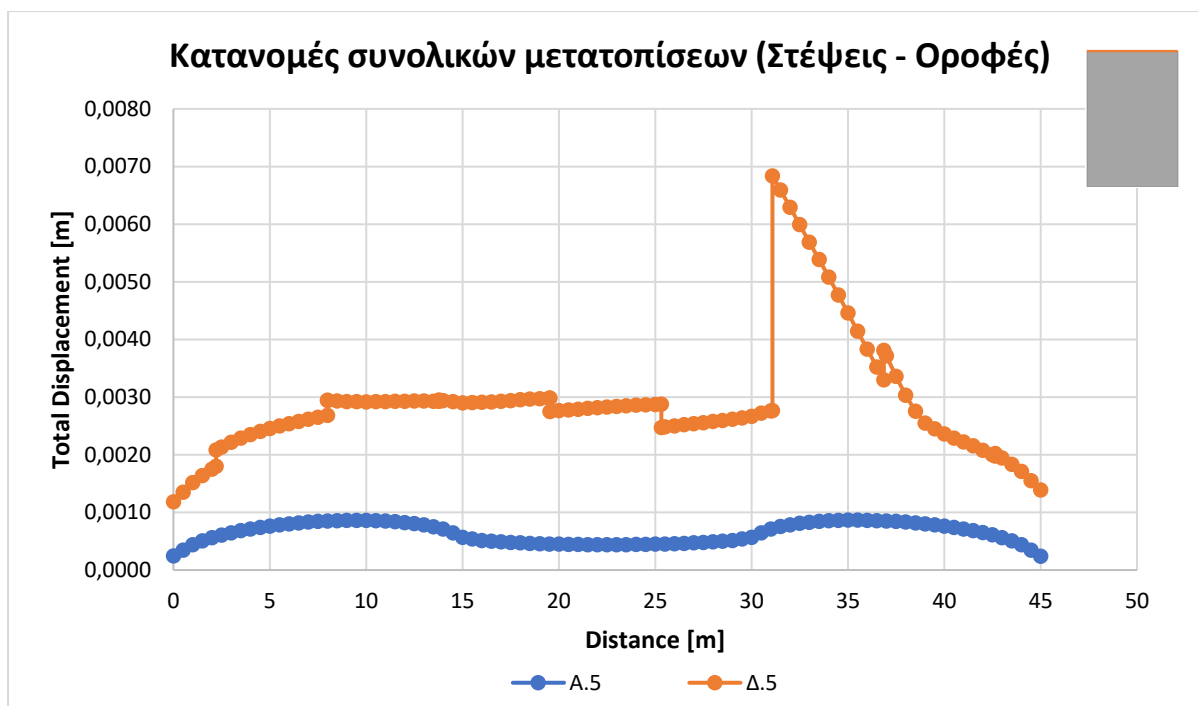


Σχήμα 3.4.2.1.4.6: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση Δ.1



Σχήμα 3.4.2.1.4.7: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση Δ.5

Οι μεταβολές των συνολικών μετατοπίσεων στο query των στέψεων των στύλων και των ορόφων των θαλάμων αποκτούν πλέον σημαντικό ενδιαφέρον.



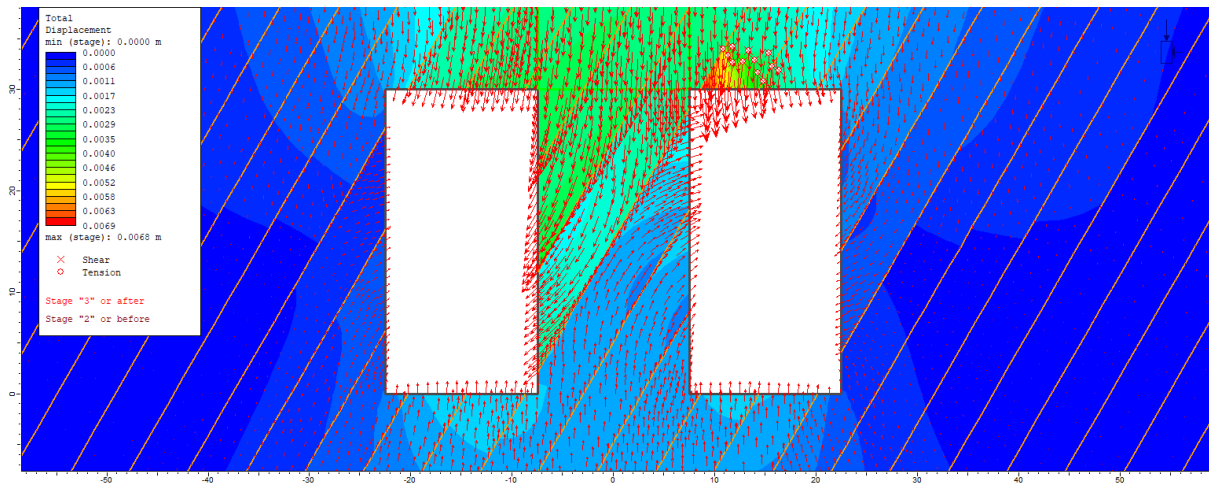
Σχήμα 3.4.2.1.4.8: Κατανομές των συνολικών μετατοπίσεων στις στέψεις των στύλων και τις οροφές των θαλάμων των Αναλύσεων Α.5 - Δ.5

Στην Ανάλυση Δ.5, εκτός των άλλων, παρατηρούνται τα σημεία στα οποία οι στέψεις των στύλων και οι οροφές των θαλάμων τέμνονται από τις ασυνέχειες, και οι συνολικές μετατοπίσεις αυξάνονται τοπικά. Η ύπαρξη δικτύου ασυνεχειών στη βραχόμαζα του μαρμάρου συνεπάγεται μεγαλύτερες πιθανότητες ο στύλος να αστοχήσει και οι συνολικές μετατοπίσεις να αυξηθούν. Η μεγαλύτερη τιμή συνολικών μετατοπίσεων (0,0068m) παρουσιάζεται στη ζώνη αστοχίας και πιο συγκεκριμένα σε σημείο τομής της οροφής του δεξιού θαλάμου από ασυνέχεια. Για κάθε περιοχή ενδιαφέροντος, οι μέσες τιμές των συνολικών μετατοπίσεων και τα ποσοστά μεταβολής τους έχουν ως εξής:

Πίνακας 3.4.2.1.4.4: Σύγκριση των μέσων τιμών των συνολικών μετατοπίσεων σε m για παρουσία δικτύου ασυνεχειών (Στέψεις - Οροφές)

	A.5	Δ.5	%
Αρ. θάλαμος	0,0007	0,0025	251,70
Στύλος	0,0005	0,0028	484,54
Δεξ. θάλαμος	0,0007	0,0034	366,05

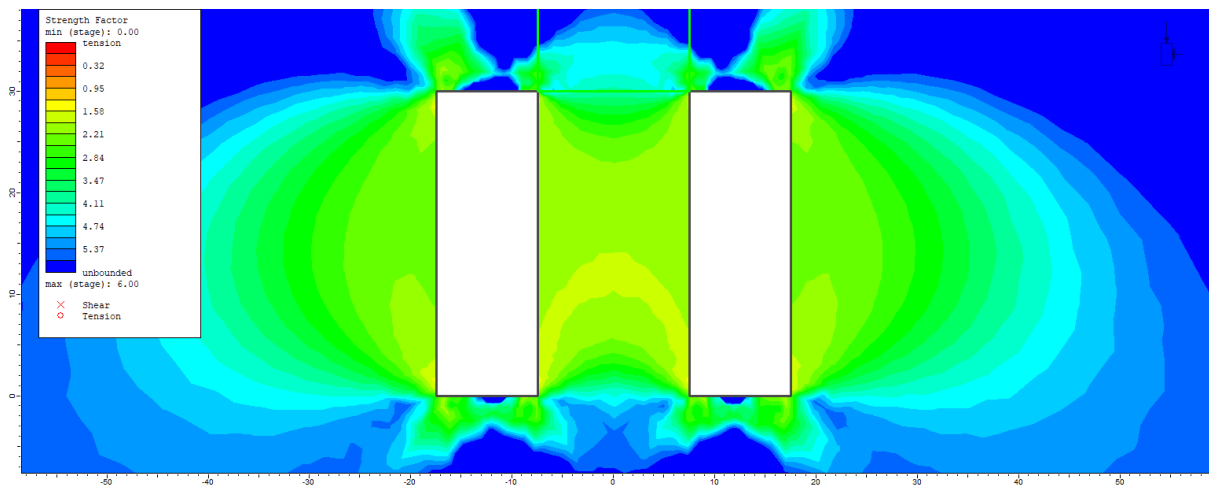
Από τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται φανερή η επίδραση του δικτύου των ασυνεχειών στις συνολικές μετατοπίσεις τμημάτων εντός της εκμετάλλευσης.



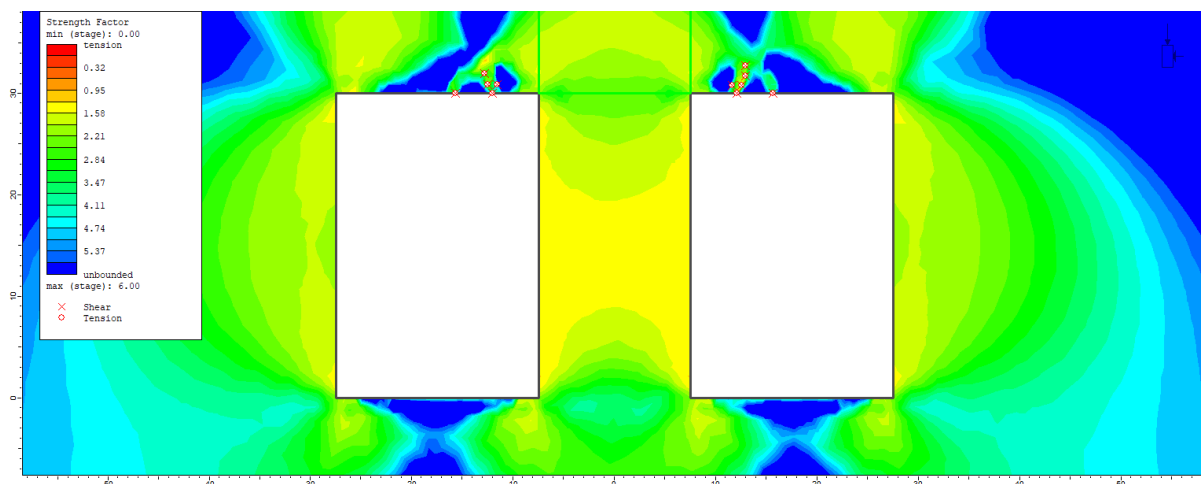
Σχήμα 3.4.2.1.4.9: Ισοϋψείς των συνολικών μετατοπίσεων στην Ανάλυση Δ.5

3.4.2.1.5 Παραμετροποίηση W_r (A – E.1 – E.2)

Οι Αναλύσεις A – E.1.5 – E.2.5 παρουσιάζουν διαφορετικά πλάτη θαλάμων W_r (15m, 10m και 20m αντίστοιχα). Η μείωση του πλάτους των θαλάμων κατά 5m (E.1.5) εξαλείφει τα σημεία αστοχίας που εμφανίζονταν στην οροφή του δεξιού θαλάμου της Ανάλυσης A.5. Από την άλλη, η αύξηση του πλάτους των θαλάμων κατά 5m (E.2.5) όχι μόνο διευρύνει την ζώνη αστοχίας που εμφανίζει η Ανάλυση A.5, αλλά δημιουργεί και ακόμα μία ζώνη αστοχίας ίδιας κλίμακας. Η νέα ζώνη που βρίσκεται στην οροφή του αριστερού θαλάμου και εμφανίζεται από την πρώτη κιάλας Ανάλυση E.2.1, είναι συμμετρική με την άλλη ζώνη αστοχίας ως προς τη διεύθυνση του πυρήνα του στύλου.



Σχήμα 3.4.2.1.5.1: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση E.1.5



Σχήμα 3.4.2.1.5.2: Ισοϋψείς των συντελεστών ασφαλείας στην Ανάλυση E.2.5

Ξεκινώντας από τη στέψη των στύλων, υπολογίζονται τα ποσοστά μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας για κάθε αλλαγή στο πλάτος των θαλάμων. Έτσι προκύπτει ο ακόλουθος Πίνακας 3.4.2.1.5.1, όπου συγκρίνονται οι συντελεστές ασφαλείας των Αναλύσεων E.1.5 και E.2.5 με τους αντίστοιχους της Ανάλυσης A.5.

Πίνακας 3.4.2.1.5.1: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση του W_r (Στέψεις)

A.5		E.1.5			E.2.5		
Distance [m]	Strength Factor	Distance [m]	Strength Factor	%	Distance [m]	Strength Factor	%
0	2,29	0	2,68	16,91	0	2,11	-8,08
0,5	2,93	0,5	4,10	39,78	0,5	2,42	-17,53
1	3,38	1	4,80	41,82	1	2,72	-19,52
1,5	3,45	1,5	4,85	40,44	1,5	2,91	-15,82
2	3,36	2	4,62	37,59	2	3,08	-8,27
2,5	3,17	2,5	4,46	40,79	2,5	2,85	-10,03
3	3,10	3	4,37	41,10	3	2,62	-15,60
3,5	3,06	3,5	4,26	39,44	3,5	2,54	-17,02
4	2,99	4	4,16	39,45	4	2,47	-17,26
4,5	2,92	4,5	4,14	41,79	4,5	2,43	-16,77
5	2,90	5	4,11	41,61	5	2,40	-17,32
5,5	2,88	5,5	4,07	41,06	5,5	2,38	-17,37
6	2,86	6	4,05	41,28	6	2,38	-16,92
6,5	2,85	6,5	4,04	41,81	6,5	2,38	-16,61
7	2,85	7	4,02	41,19	7	2,36	-17,11
7,5	2,85	7,5	4,00	40,51	7,5	2,35	-17,61
8	2,85	8	4,02	41,12	8	2,36	-17,15
8,5	2,85	8,5	4,04	41,79	8,5	2,38	-16,57
9	2,87	9	4,05	41,17	9	2,39	-16,77
9,5	2,89	9,5	4,06	40,78	9,5	2,39	-17,17
10	2,91	10	4,11	40,98	10	2,40	-17,43

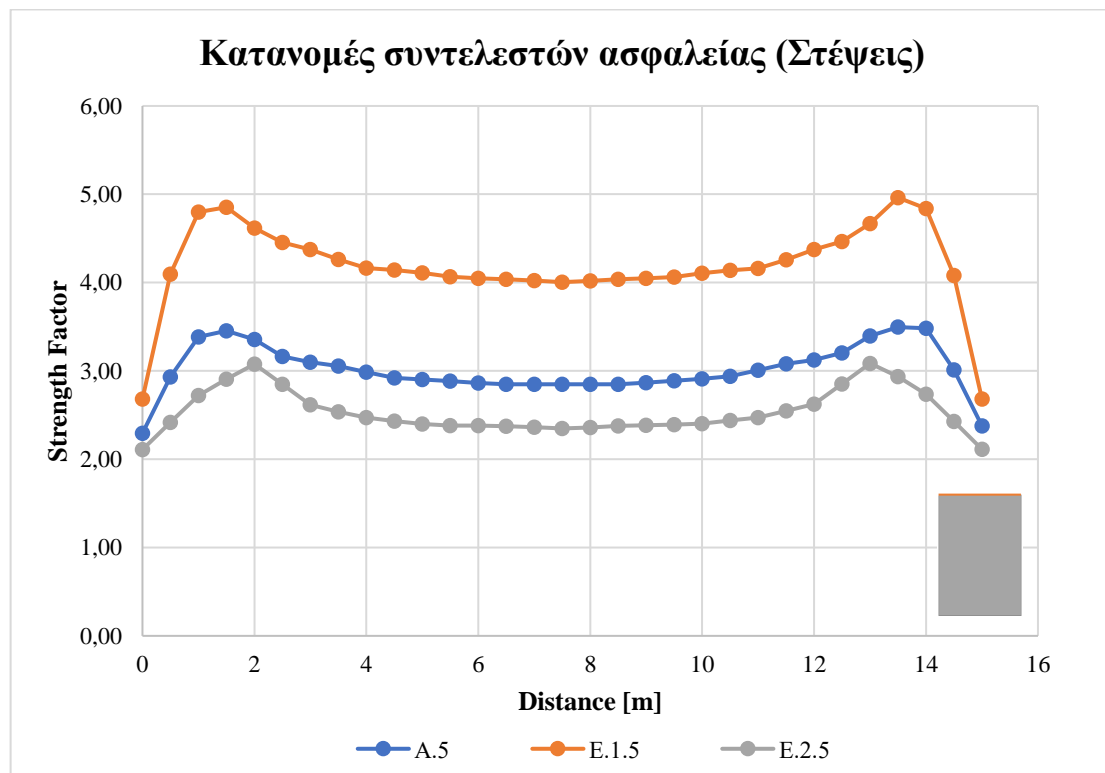
10,5	2,94	10,5	4,14	40,88	10,5	2,44	-17,03
11	3,01	11	4,16	38,35	11	2,47	-17,80
11,5	3,08	11,5	4,26	38,28	11,5	2,55	-17,27
12	3,12	12	4,37	40,05	12	2,62	-16,02
12,5	3,20	12,5	4,47	39,39	12,5	2,85	-10,96
13	3,40	13	4,67	37,42	13	3,09	-9,17
13,5	3,50	13,5	4,96	41,96	13,5	2,93	-16,07
14	3,48	14	4,84	39,01	14	2,74	-21,42
14,5	3,01	14,5	4,08	35,41	14,5	2,43	-19,42
15	2,38	15	2,68	12,91	15	2,11	-11,01

Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας για κάθε ανάλυση είναι:

- A.5 → 3,01
- E.1.5 → 4,18
- E.2.5 → 2,53

Επομένως, τα ποσοστά μεταβολής των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας είναι:

- E.1.5 → 38,92%
- E.2.5 → -15,85%



Σχήμα 3.4.2.1.5.3: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις στέψεις των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικά πλάτη θαλάμων

Από το παραπάνω Σχήμα 3.4.2.1.5.3, γίνεται αντιληπτό πως η μείωση του πλάτους των θαλάμων κατά 5m αυξάνει τις τιμές των συντελεστών ασφαλείας κατά μεγαλύτερο ποσοστό από το αντίστοιχο ποσοστό μείωσης τους όταν σημειώνεται αύξηση του πλάτους των θαλάμων κατά 5m. Η ελάχιστη τιμή συντελεστή ασφαλείας ανά ανάλυση βρίσκεται στην αριστερή ακμή της στέψης και ισούται με 2,29, 2,68 και 2,11 για τις Αναλύσεις A.5, E.1.5 και E.2.5 αντίστοιχα.

Κατά τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και στο μέσο του ύψους των στύλων τα ποσοστά μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας για κάθε αλλαγή στο πλάτος W_r .

Πίνακας 3.4.2.1.5.2: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση του W_r (Μέσο του ύψους)

A.5		E.1.5			E.2.5		
Distance [m]	Strength Factor	Distance [m]	Strength Factor	%	Distance [m]	Strength Factor	%
0	1,73	0	1,96	13,47	0	1,54	-10,51
0,5	1,72	0,5	1,96	13,51	0,5	1,54	-10,48
1	1,72	1	1,95	13,55	1	1,54	-10,46
1,5	1,72	1,5	1,95	13,50	1,5	1,54	-10,42
2	1,71	2	1,94	13,35	2	1,54	-10,42
2,5	1,71	2,5	1,94	13,28	2,5	1,53	-10,43
3	1,71	3	1,93	13,20	3	1,53	-10,42
3,5	1,70	3,5	1,93	13,14	3,5	1,53	-10,41
4	1,70	4	1,92	13,03	4	1,53	-10,36
4,5	1,70	4,5	1,92	12,90	4,5	1,52	-10,28
5	1,70	5	1,91	12,84	5	1,52	-10,22
5,5	1,69	5,5	1,91	12,84	5,5	1,52	-10,21
6	1,69	6	1,91	12,81	6	1,52	-10,27
6,5	1,69	6,5	1,91	12,80	6,5	1,52	-10,32
7	1,69	7	1,91	12,82	7	1,52	-10,37
7,5	1,69	7,5	1,91	12,77	7,5	1,52	-10,33
8	1,69	8	1,91	12,76	8	1,52	-10,33
8,5	1,69	8,5	1,91	12,76	8,5	1,52	-10,28
9	1,69	9	1,91	12,78	9	1,52	-10,22
9,5	1,69	9,5	1,91	12,80	9,5	1,52	-10,20
10	1,70	10	1,91	12,73	10	1,52	-10,27
10,5	1,70	10,5	1,92	12,88	10,5	1,52	-10,34
11	1,70	11	1,92	13,04	11	1,52	-10,41
11,5	1,70	11,5	1,93	13,11	11,5	1,53	-10,50
12	1,71	12	1,93	13,16	12	1,53	-10,52
12,5	1,71	12,5	1,94	13,24	12,5	1,53	-10,46
13	1,71	13	1,94	13,34	13	1,54	-10,44
13,5	1,72	13,5	1,95	13,45	13,5	1,54	-10,47
14	1,72	14	1,95	13,44	14	1,54	-10,53

14,5	1,72	14,5	1,96	13,45	14,5	1,54	-10,56
15	1,73	15	1,96	13,46	15	1,54	-10,60

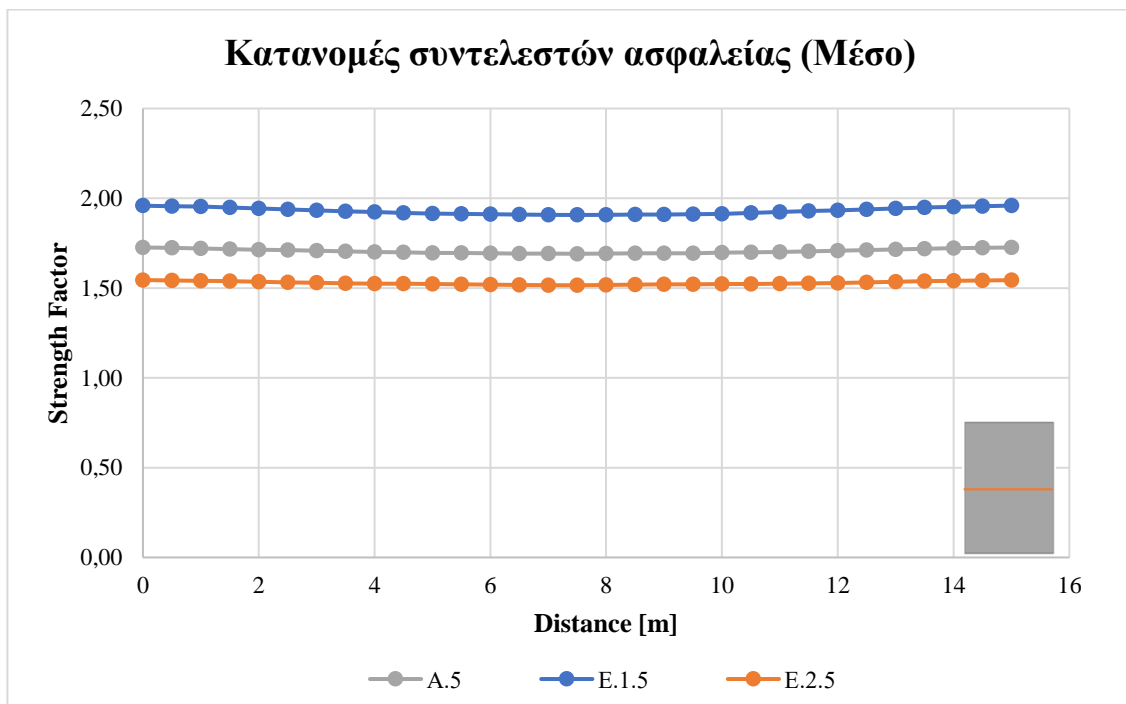
Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας για κάθε ανάλυση είναι:

- A.5 → 1,71
- E.1.5 → 1,93
- E.2.5 → 1,53

Επομένως, τα ποσοστά μεταβολής των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας είναι:

- E.1.5 → 13,10%
- E.2.5 → -10,39%

Οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας δεν παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή κατά πλάτος στο μέσο του ύψους των στύλων. Για οποιοδήποτε είδος μεταβολής (αύξηση ή μείωση) του πλάτους των θαλάμων κατά 5m, τα ποσοστά μεταβολής των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές (κατ' απόλυτο).



Σχήμα 3.4.2.1.5.4: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στο μέσο του ύψους των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικά πλάτη θαλάμων

Στις βάσεις των στύλων, τα ποσοστά μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας για κάθε αλλαγή στο πλάτος των θαλάμων υπολογίζονται ως εξής:

Πίνακας 3.4.2.1.5.3: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση του W_r (Βάσεις)

A.5		E.1.5			E.2.5		
Distance [m]	Strength Factor	Distance [m]	Strength Factor	%	Distance [m]	Strength Factor	%
0	2,43	0	2,53	4,18	0	2,23	-8,18
0,5	2,84	0,5	3,05	7,63	0,5	2,43	-14,23
1	3,24	1	3,57	10,04	1	2,63	-18,73
1,5	3,63	1,5	4,07	12,30	1,5	2,82	-22,34
2	3,88	2	4,25	9,58	2	3,05	-21,21
2,5	4,01	2,5	4,49	11,82	2,5	3,22	-19,78
3	4,11	3	4,63	12,63	3	3,38	-17,66
3,5	4,15	3,5	4,57	10,04	3,5	3,52	-15,12
4	4,04	4	4,47	10,73	4	3,53	-12,53
4,5	3,95	4,5	4,38	11,03	4,5	3,54	-10,16
5	3,92	5	4,33	10,31	5	3,66	-6,68
5,5	3,91	5,5	4,40	12,51	5,5	3,63	-7,21
6	3,90	6	4,49	15,00	6	3,57	-8,41
6,5	3,88	6,5	4,56	17,60	6,5	3,58	-7,70
7	3,86	7	4,47	15,80	7	3,59	-6,87
7,5	3,89	7,5	4,37	12,46	7,5	3,61	-7,20
8	3,92	8	4,42	12,86	8	3,59	-8,44
8,5	3,92	8,5	4,53	15,63	8,5	3,54	-9,53
9	3,91	9	4,58	17,10	9	3,48	-11,05
9,5	3,91	9,5	4,50	15,07	9,5	3,39	-13,13
10	3,86	10	4,41	14,11	10	3,36	-12,96
10,5	3,86	10,5	4,32	11,78	10,5	3,45	-10,65
11	3,92	11	4,38	11,90	11	3,50	-10,55
11,5	4,08	11,5	4,50	10,26	11,5	3,55	-13,13
12	4,24	12	4,54	7,10	12	3,55	-16,28
12,5	4,08	12,5	4,35	6,71	12,5	3,35	-17,90
13	3,93	13	4,35	10,62	13	3,12	-20,83
13,5	3,77	13,5	4,09	8,49	13,5	2,85	-24,40
14	3,36	14	3,49	3,84	14	2,62	-21,94
14,5	2,88	14,5	3,09	7,28	14,5	2,42	-15,84
15	2,40	15	2,59	8,10	15	2,22	-7,29

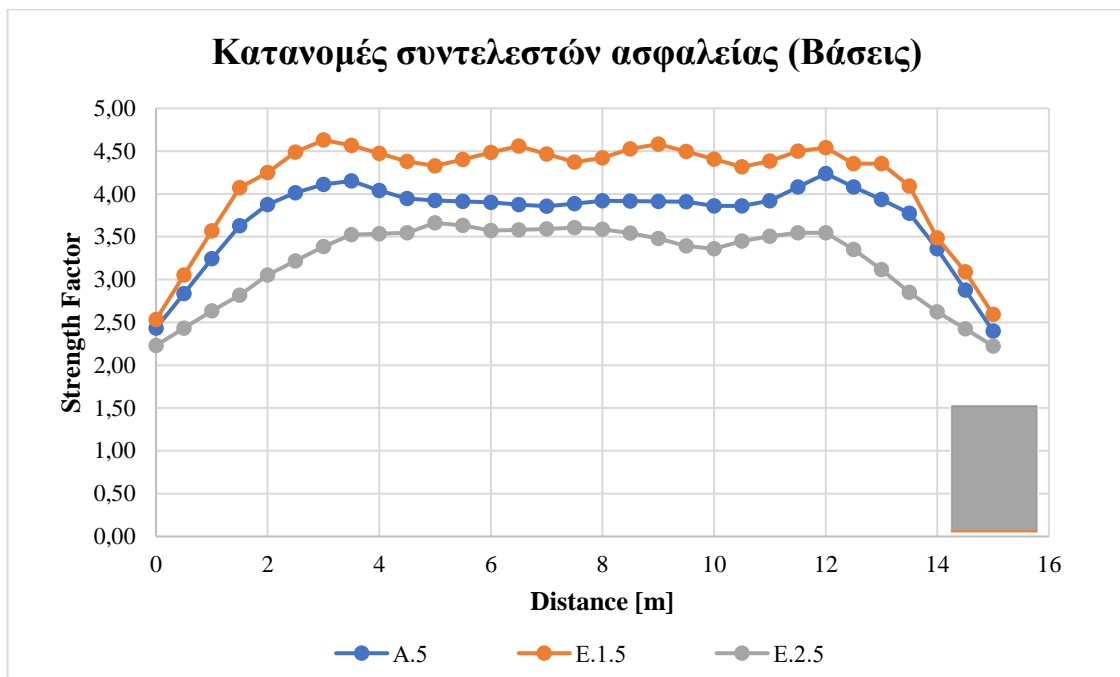
Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας για κάθε ανάλυση είναι:

- A.5 \rightarrow 3,73
- E.1.5 \rightarrow 4,15
- E.2.5 \rightarrow 3,23

Επομένως, τα ποσοστά μεταβολής των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας είναι:

- E.1.5 → 11,32%
- E.2.5 → -13,53%

Τα παραπάνω ποσοστά δείχνουν αντίστοιχες μεταβολές (κατ' απόλυτο) των συντελεστών ασφαλείας των στύλων για αύξηση ή μείωση του πλάτους των θαλάμων κατά 5m. Η χαμηλότερη τιμή συντελεστή ασφαλείας ανά ανάλυση βρίσκεται σε μία από τις ακμές της βάσης και ισούται με 2,40, 2,53 και 2,22 για τις Αναλύσεις A.5, E.1.5 και E.2.5 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.4.2.1.5.5: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις βάσεις των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικά πλάτη θαλάμων

Η τελευταία περιοχή που εξετάζεται είναι εκείνη των αριστερών παρειών των στύλων. Σε αυτές, τα ποσοστά μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας για κάθε αλλαγή του πλάτους W_r έχουν ως εξής:

Πίνακας 3.4.2.1.5.4: Σύγκριση ποσοστών μεταβολής των συντελεστών ασφαλείας για παραμετροποίηση του W_r (Αριστερές παρείες)

A.5		E.1.5			E.2.5		
Distance [m]	Strength Factor	Distance [m]	Strength Factor	%	Distance [m]	Strength Factor	%
0	2,43	0	2,53	4,18	0	2,23	-8,18
0,5	1,78	0,5	1,88	5,86	0,5	1,82	2,37
1	1,40	1	1,48	6,05	1	1,40	0,58
1,5	1,29	1,5	1,33	3,32	1,5	1,30	0,77
2	1,45	2	1,53	5,22	2	1,20	-17,62
2,5	1,55	2,5	1,65	6,88	2,5	1,32	-14,90

3	1,57	3	1,70	8,57	3	1,43	-8,51
3,5	1,59	3,5	1,76	10,69	3,5	1,44	-9,11
4	1,61	4	1,80	12,32	4	1,45	-9,60
4,5	1,62	4,5	1,84	13,48	4,5	1,47	-9,21
5	1,65	5	1,87	13,14	5	1,49	-9,49
5,5	1,67	5,5	1,89	12,87	5,5	1,50	-10,15
6	1,68	6	1,89	12,66	6	1,51	-10,29
6,5	1,69	6,5	1,90	12,62	6,5	1,51	-10,42
7	1,69	7	1,90	12,64	7	1,51	-10,46
7,5	1,69	7,5	1,91	12,71	7,5	1,52	-10,35
8	1,69	8	1,91	12,74	8	1,52	-10,21
8,5	1,70	8,5	1,91	12,78	8,5	1,53	-10,11
9	1,70	9	1,92	12,82	9	1,53	-10,02
9,5	1,70	9,5	1,92	12,77	9,5	1,53	-10,08
10	1,70	10	1,92	12,77	10	1,53	-10,11
10,5	1,71	10,5	1,92	12,81	10,5	1,53	-10,12
11	1,71	11	1,93	12,88	11	1,53	-10,12
11,5	1,71	11,5	1,93	12,94	11,5	1,53	-10,17
12	1,71	12	1,93	13,00	12	1,54	-10,22
12,5	1,71	12,5	1,94	13,09	12,5	1,54	-10,26
13	1,71	13	1,94	13,17	13	1,54	-10,29
13,5	1,72	13,5	1,94	13,26	13,5	1,54	-10,32
14	1,72	14	1,95	13,31	14	1,54	-10,40
14,5	1,72	14,5	1,95	13,38	14,5	1,54	-10,45
15	1,73	15	1,96	13,47	15	1,54	-10,51
15,5	1,73	15,5	1,96	13,59	15,5	1,55	-10,57
16	1,73	16	1,97	13,71	16	1,55	-10,65
16,5	1,74	16,5	1,98	13,84	16,5	1,55	-10,69
17	1,74	17	1,98	13,99	17	1,55	-10,76
17,5	1,74	17,5	1,99	14,15	17,5	1,56	-10,83
18	1,75	18	2,00	14,33	18	1,56	-10,89
18,5	1,75	18,5	2,01	14,55	18,5	1,56	-10,98
19	1,76	19	2,02	14,74	19	1,56	-11,09
19,5	1,76	19,5	2,02	14,91	19,5	1,56	-11,18
20	1,77	20	2,03	15,13	20	1,57	-11,24
20,5	1,77	20,5	2,04	15,34	20,5	1,57	-11,35
21	1,78	21	2,05	15,56	21	1,57	-11,46
21,5	1,78	21,5	2,06	15,81	21,5	1,57	-11,60
22	1,78	22	2,07	16,09	22	1,57	-11,68
22,5	1,78	22,5	2,08	16,40	22,5	1,57	-11,79
23	1,79	23	2,08	16,66	23	1,57	-11,94
23,5	1,79	23,5	2,09	16,85	23,5	1,57	-12,28
24	1,79	24	2,09	16,97	24	1,56	-12,57
24,5	1,79	24,5	2,09	17,07	24,5	1,56	-12,93
25	1,79	25	2,09	17,20	25	1,55	-13,27
25,5	1,79	25,5	2,10	17,36	25,5	1,54	-13,76

26	1,77	26	2,09	17,74	26	1,53	-13,80
26,5	1,74	26,5	2,08	19,48	26,5	1,52	-12,68
27	1,68	27	2,06	22,74	27	1,51	-10,21
27,5	1,66	27,5	2,05	23,60	27,5	1,42	-14,47
28	1,65	28	1,98	20,19	28	1,33	-19,19
28,5	1,64	28,5	1,84	12,43	28,5	1,48	-10,00
29	1,55	29	1,76	13,67	29	1,62	4,39
29,5	1,77	29,5	2,04	15,45	29,5	1,86	5,30
30	2,29	30	2,68	16,91	30	2,11	-8,08

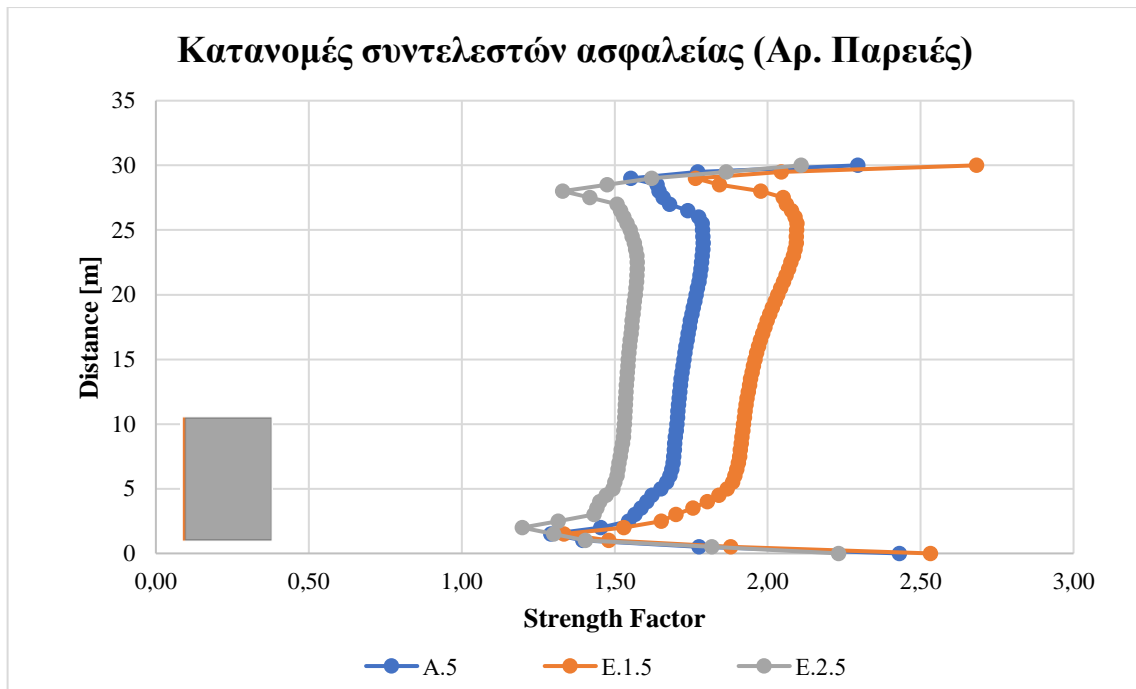
Οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας για κάθε ανάλυση είναι:

- A.5 → 1,72
- E.1.5 → 1,95
- E.2.5 → 1,55

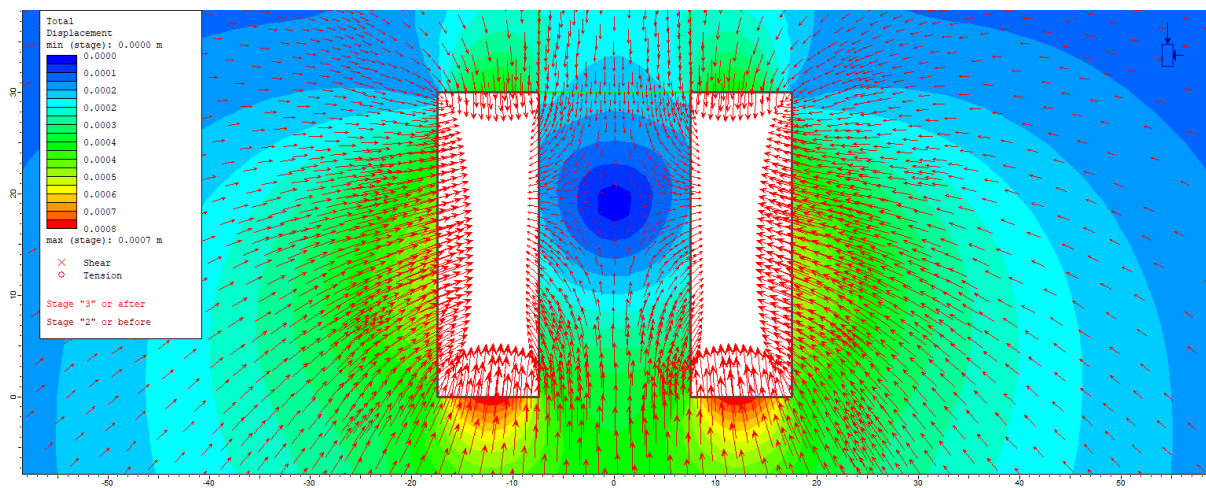
Επομένως, τα ποσοστά μεταβολής των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας είναι:

- E.1.5 → 13,76%
- E.2.5 → -10,05%

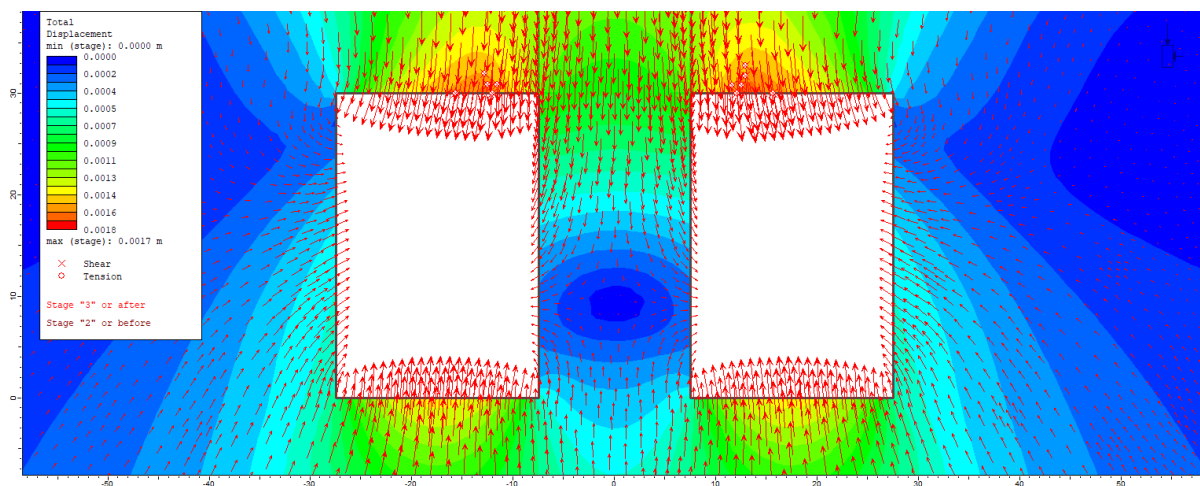
Τα παραπάνω ποσοστά δείχνουν αντίστοιχες μεταβολές (κατ' απόλυτο) των συντελεστών ασφαλείας των στύλων για αύξηση ή μείωση του πλάτους των θαλάμων κατά 5m. Η ελάχιστη τιμή συντελεστή ασφαλείας ανά ανάλυση βρίσκεται σε απόσταση 1,5m - 2,0m από την ακμή της βάσης και ισούται με 1,29, 1,33 και 1,20 για τις Αναλύσεις A.5, E.1.5 και E.2.5 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.4.2.1.5.6: Κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις αριστερές παρειές των στύλων των Αναλύσεων με διαφορετικά πλάτη θαλάμων



Σχήμα 3.4.2.1.5.7: Ισοϋψείς των συνολικών μετατοπίσεων στην Ανάλυση E.1.5



Σχήμα 3.4.2.1.5.8: Ισοϋψείς των συνολικών μετατοπίσεων στην Ανάλυση E.2.5

Από την παρατήρηση των παραπάνω Σχημάτων, αποφασίζεται η σύγκριση των συνολικών μετατοπίσεων στην περιοχή των στέψεων των στύλων – ορόφων των θαλάμων. Αλλάζοντας το πλάτος των θαλάμων, αλλάζει και ο αριθμός των σημείων πάνω στα queries με αποτέλεσμα να μην μπορούν να υπολογιστούν τα ποσοστά μεταβολής ανά σημείο στις περιοχές των θαλάμων. Έτσι, υπολογίζονται μόνο οι μέσες τιμές των συνολικών μετατοπίσεων και τα ποσοστά μεταβολής τους ανά ανάλυση και περιοχή:

Πίνακας 3.4.2.1.5.5: Σύγκριση των μέσων τιμών των συνολικών μετατοπίσεων σε m για παραμετροποίηση του W_r (Στέψεις - Οροφές)

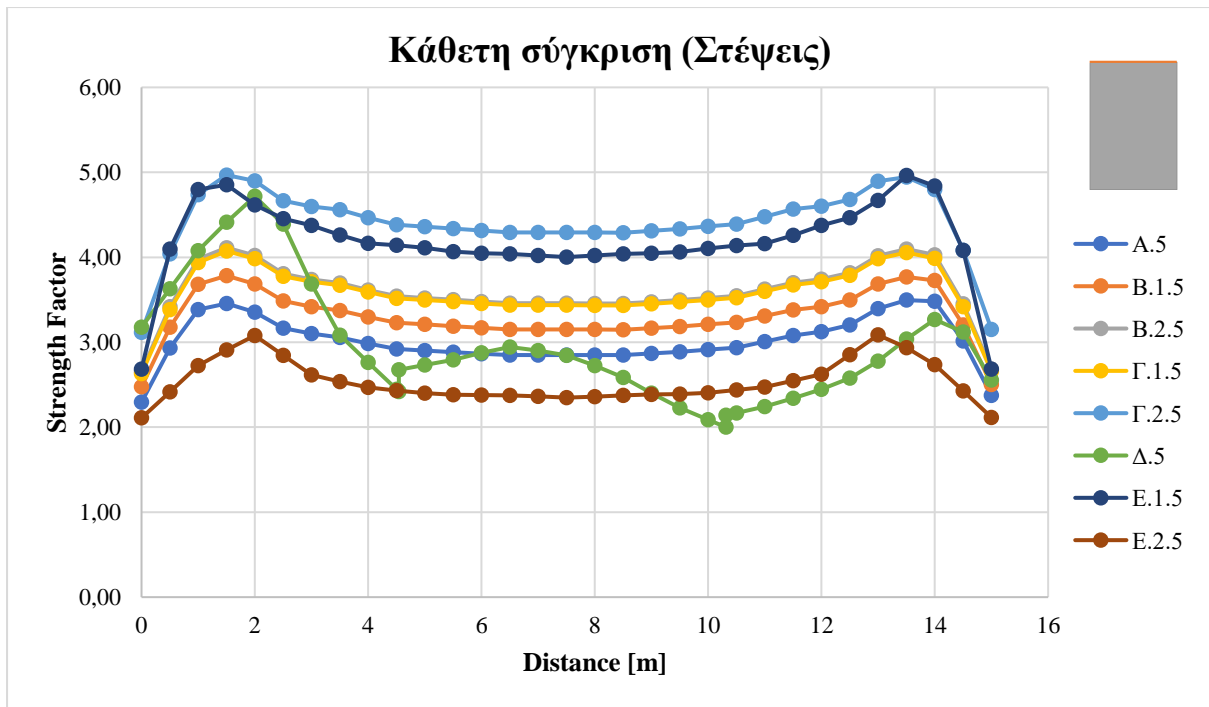
	A.5	E.1.5	%	E.2.5	%
Αρ. θάλαμος	0,0007	0,0003	-53,70	0,0013	83,52
Στύλος	0,0005	0,0002	-60,93	0,0010	101,60
Δεξ. θάλαμος	0,0007	0,0003	-53,81	0,0013	84,92

Στην Ανάλυση E.2.5, οι μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις παρουσιάζονται στην οροφή του δεξιού θαλάμου και είναι ίσες με 0,0017m. Αντίστοιχα, στην Ανάλυση E.1.5 παρουσιάζονται πάλι στην οροφή του δεξιού θαλάμου και είναι ίσες με 0,00041m.

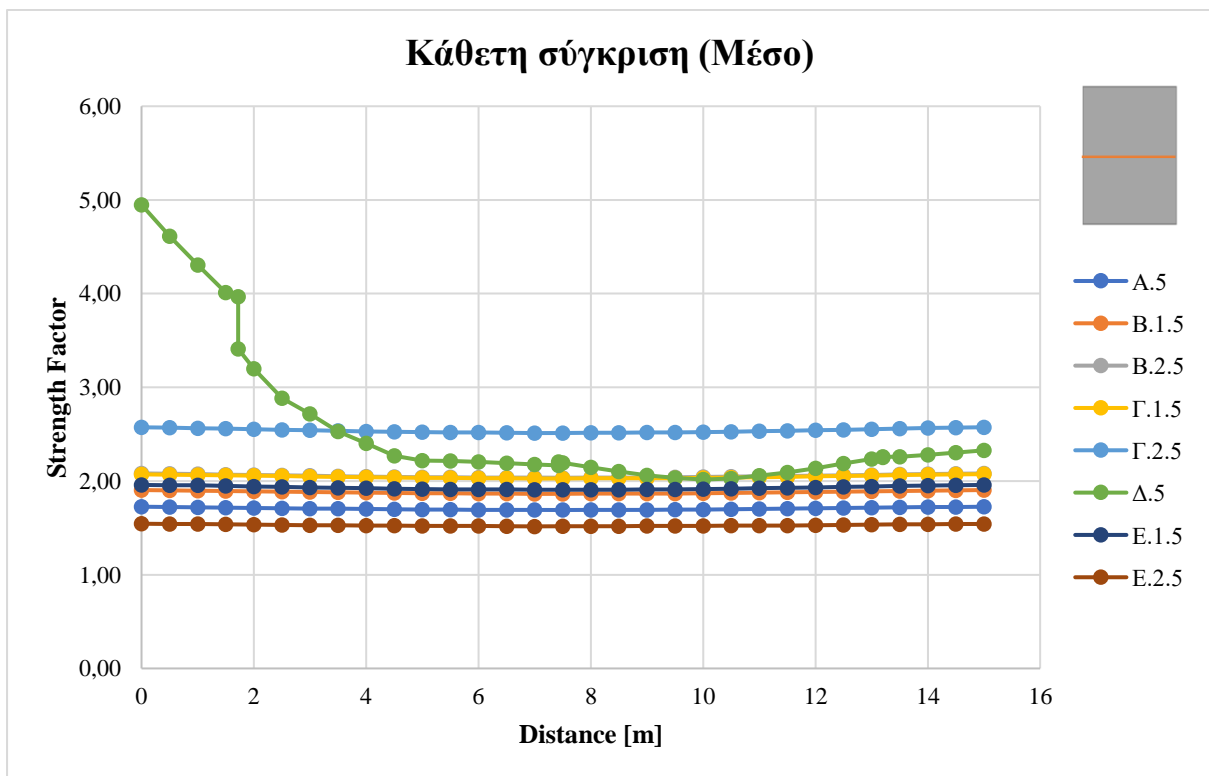
3.4.2.2 Κάθετες συγκρίσεις και σχολιασμοί αποτελεσμάτων

Με την ολοκλήρωση των οριζόντιων συγκρίσεων, μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους (κάθετα) όλα τα είδη των αναλύσεων.

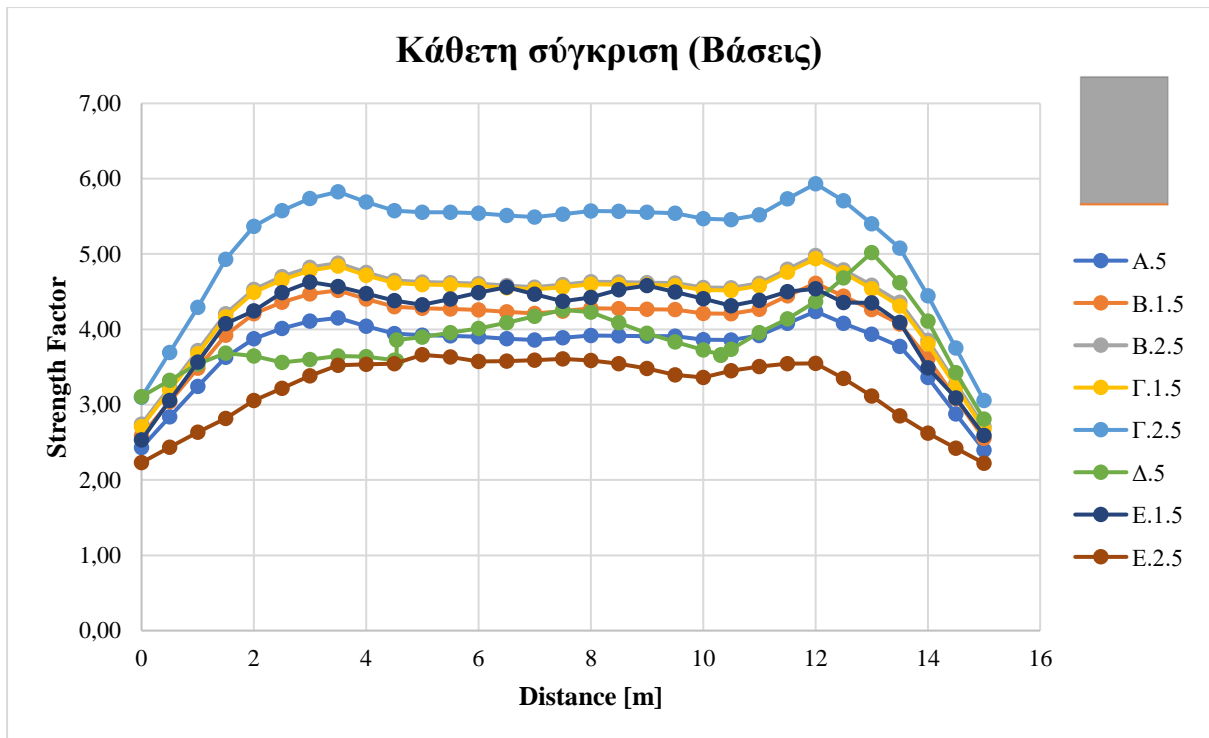
Στα παρακάτω σχήματα προβάλλονται οι κατανομές των συντελεστών ασφαλείας ανά περιοχή και ανά ανάλυση:



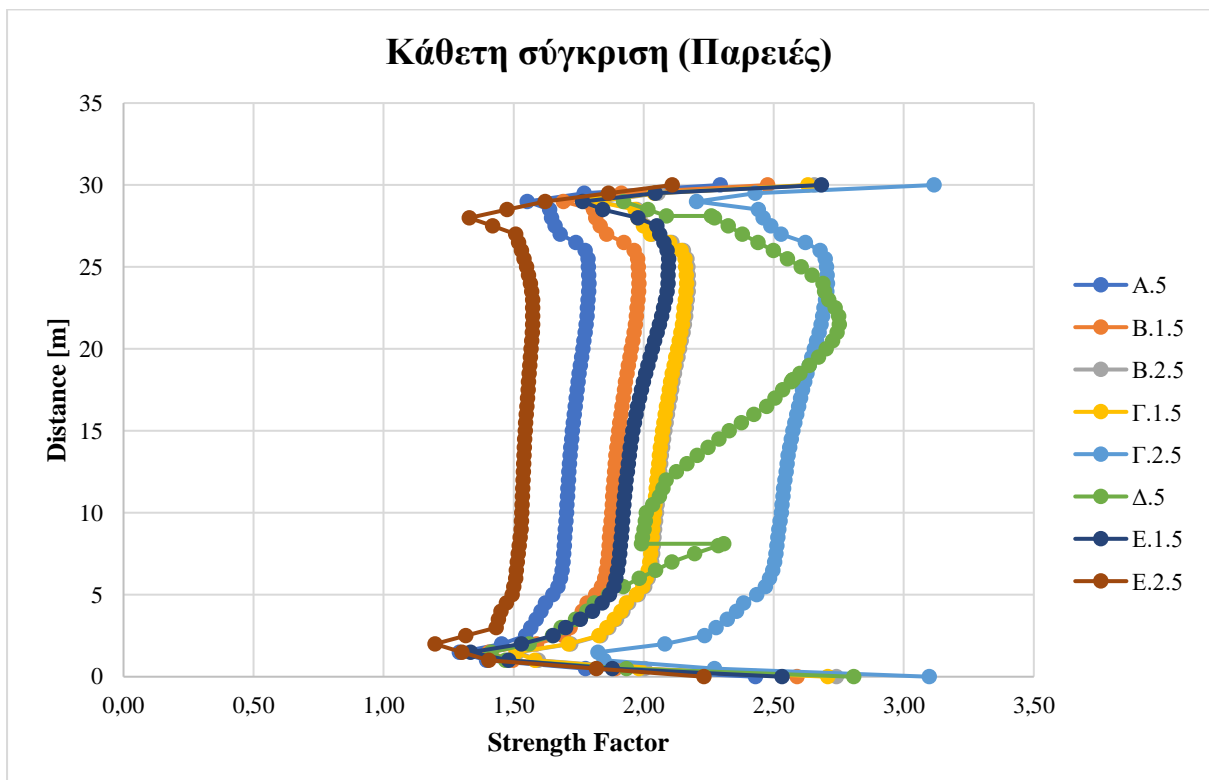
Σχήμα 3.4.2.2.1: Σύγκριση όλων των κατανομών των συντελεστών ασφαλείας στις στέψεις των στύλων



Σχήμα 3.4.2.2.2: Σύγκριση όλων των κατανομών των συντελεστών ασφαλείας στο μέσο του ύψους των στύλων



Σχήμα 3.4.2.2.3: Σύγκριση όλων των κατανομών των συντελεστών ασφαλείας στις βάσεις των στύλων



Σχήμα 3.4.2.2.4: Σύγκριση όλων των κατανομών των συντελεστών ασφαλείας στις παρείες των στύλων

Από την εξέταση των παραπάνω διαγραμμάτων εξάγονται τα ακόλουθα σχόλια - συμπεράσματα:

- Σε κάθε εξεταζόμενη περιοχή οι συντελεστές ασφαλείας έχουν ομοιόμορφη κατανομή, με μοναδική εξαίρεση τις κατανομές της Ανάλυσης Δ.5 που βρίσκεται υπό την επίδραση δικτύου ασυνεχειών.
- Από τις κατανομές των συντελεστών ασφαλείας στις στέψεις των στύλων γίνεται φανερό πως τους μεγαλύτερους συντελεστές παρουσιάζουν κατά σειρά οι Αναλύσεις Γ.2.5, Ε.1.5 Β.2.5, Γ.1.5, Β.1.5, Α.5 και Ε.2.5. Στις υπόλοιπες εξεταζόμενες περιοχές (μέσο του ύψους, βάσεις και παρειές) των στύλων η σειρά γίνεται Γ.2.5, Β.2.5, Γ.1.5, Ε.1.5, Β.1.5, Α.5 και Ε.2.5. Δηλαδή, η μείωση του πλάτους των θαλάμων κατά 5m (Ε.1.5) έχει μεγαλύτερη επίδραση στους συντελεστές ασφαλείας της στέψης σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές που εξετάζονται. Οι μορφές των κατανομών της Ανάλυσης Δ.5 δεν επιτρέπουν την ταξινόμησή τους, όπως γίνεται με τις υπόλοιπες αναλύσεις.
- Τις παραπάνω κατατάξεις επιβεβαιώνουν και οι μέσες τιμές των συντελεστών ασφαλείας. Εκείνες της ανάλυσης Δ.5 παρουσιάζουν την δεύτερη χαμηλότερη τιμή στην περιοχή της στέψης μετά την Ε.2.5, την υψηλότερη τιμή στο μέσο του ύψους, την τρίτη χαμηλότερη στην βάση μετά τις Ε.2.5 και Α.5, και την δεύτερη υψηλότερη τιμή στην παρειά μετά την Γ.2.5. Ωστόσο θα πρέπει να σημειωθεί πως αφού οι κατανομές της Δ.5 δεν έχουν σταθερή μορφή, τα αποτελέσματα από τις μέσες τιμές τους θα πρέπει να αξιολογούνται με προσοχή.
- Οι αναλύσεις Β.2.5 και Γ.1.5 παρουσιάζουν κατανομές που σχεδόν ταυτίζονται. Η αύξηση της UCS από τα 90MPa στα 130MPa, δηλαδή, μοιάζει να έχει την ίδια επίδραση με την αύξηση του GSI από τα 70 στα 75.
- Στις παρειές των στύλων οι χαμηλότεροι συντελεστές ασφαλείας εμφανίζονται στα 1,5 – 2,0m από τις βάσεις τους.
- Οι πιο ευαίσθητες περιοχές, από την άποψη των συντελεστών ασφαλείας, είναι το μέσο και οι παρειές ενός στύλου. Από τις τελευταίες είναι άλλωστε που συνήθως ξεκινά η διάρρηξη του στύλου και που εκδηλώνεται μέσω απολέπισης των παρειών (spalling) και απόσχισης του πετρώματος (slabbing).
- Την μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση στους συντελεστές ασφαλείας επιφέρει η αύξηση του γεωλογικού δείκτη GSI κατά 10 μονάδες (Γ.2.5), ενώ την μικρότερη η αύξηση της UCS κατά 20MPa (Β.1.5).

Πίνακας 3.4.2.2.1: Σύγκριση των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας όλων των αναλύσεων

	A.5	B.1.5	B.2.5	Γ.1.5	Γ.2.5	Δ.5	E.1.5	E.2.5
Στέψη	3,01	3,30	3,60	3,57	4,40	2,89	4,18	2,53
Μέσο του ύψους	1,71	1,88	2,05	2,05	2,54	2,58	1,93	1,53
Βάση	3,73	4,05	4,37	4,33	5,19	3,86	4,15	3,23
Παρειά	1,72	1,89	2,06	2,05	2,53	2,26	1,95	1,55

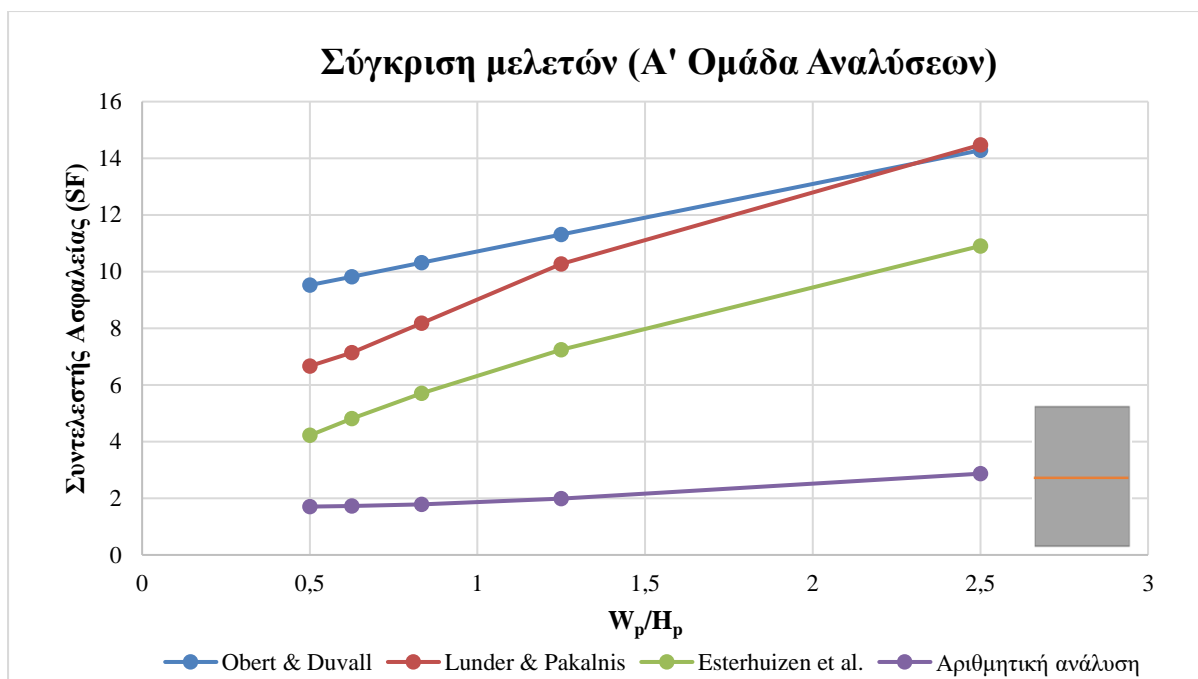
Στον ίδιο άξονα συγκρίνονται και οι μέσες τιμές των συνολικών μετατοπίσεων στις στέψεις των στύλων και τις οροφές των θαλάμων συγκεκριμένων Αναλύσεων ως προς εκείνες της Ανάλυσης A.5. Φαίνεται πως το δίκτυο των ασυνεχειών επιφέρει τις μεγαλύτερες μεταβολές στις μέσες συνολικές μετατοπίσεις τόσο στη στέψη του στύλου όσο και στις οροφές των θαλάμων.

Πίνακας 3.4.2.2.2: Σύγκριση των μέσων τιμών των συνολικών μετατοπίσεων σε *m* συγκεκριμένων αναλύσεων (Στέψεις – Οροφές)

	A.5	Δ.5	%	E.1.5	%	E.2.5	%
Αρ. θάλαμος	0,0007	0,0025	251,70	0,0003	-53,70	0,0013	83,52
Στύλος	0,0005	0,0028	484,54	0,0002	-60,93	0,0010	101,60
Δεξ. θάλαμος	0,0007	0,0034	366,05	0,0003	-53,81	0,0013	84,92

3.4.3 Σύγκριση εμπειρικών – αριθμητικών μελετών

Η πρώτη σύγκριση των δύο μελετών γίνεται με βάση τους συντελεστές ασφαλείας στο μέσο των στύλων των αναλύσεων της Α' Ομάδας. Στην περίπτωση της αριθμητικής ανάλυσης, οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας αποτελούν τις μέσες τιμές των κατανομών. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.4.3.1, οι συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν από τη χρήση των εμπειρικών σχέσεων και τη θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας υπερεκτιμούν την αντοχή των στύλων. Η αριθμητική μοντελοποίηση χρησιμοποιεί την θεωρία της ελαστικότητας για να προσδιορίσει την ανακατανομή των τάσεων και λαμβάνει υπόψη τα *in situ* δεδομένα της βραχομάζας, με αποτέλεσμα να προσομοιάζει πολύ ακριβέστερα την συμπεριφορά των στύλων.



Σχήμα 3.4.3.1: Σύγκριση των δύο μελετών ως προς τους συντελεστές ασφαλείας (Α' Ομάδα Αναλύσεων)

Οι μορφές των παραπάνω σειρών δεν αλλάζουν από ομάδα σε ομάδα Αναλύσεων. Επιλέγεται η σχέση των Esterhuizen et al. ως η πιο αντιπροσωπευτική εμπειρική σχέση για να συγκριθεί με την αριθμητική ανάλυση. Έτσι, συγκρίνονται οι συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν και για τις υπόλοιπες Ομάδες Αναλύσεων και αφορούν στύλους με λόγο W_p/H_p ίσο με 0,5:

Πίνακας 3.4.3.1: Σύγκριση των δύο μελετών ως προς τους συντελεστές ασφαλείας ($W_p/H_p = 0,5$)

	Αριθμητική	Εμπειρική
A.5	1,71	4,22
B.1.5	1,88	5,16
B.2.5	2,05	6,09
Δ.5	2,58	0,45
E.1.5	1,93	6,08
E.2.5	1,53	3,10

Από την εξέταση των συντελεστών ασφαλείας ανά ζευγάρια (π.χ. A.5 Εμπειρική – Αριθμητική) προκύπτει πως η εμπειρική σχέση των Esterhuizen et al. υπερεκτιμά την αντοχή των στύλων με εξαίρεση την περίπτωση Δ.5. Φαίνεται, δηλαδή, πως η παραπάνω εμπειρική σχέση υπερεκτιμά την επίδραση της οικογένειας των ασυνεχειών δίνοντας πολύ συντηρητικά αποτελέσματα. Η αριθμητική μελέτη, τέλος, δεν παρουσιάζει παρεμφερείς συντελεστές

ασφαλείας για τους στύλους των Αναλύσεων Β.2.5 - Ε.1.5, όπως έκανε η εμπειρική (Σχήμα 3.4.1.2, Σχήμα 3.4.1.3, Σχήμα 3.4.1.4).

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σωστός σχεδιασμός μια υπόγειας εκμετάλλευσης είναι κεφαλαιώδους σημασίας για την εξασφάλιση της ευστάθειάς της καθ' όλο το χρόνο ζωής της. Η παρούσα εργασία εξετάζει τα διάφορα στοιχεία που πιθανώς επιδρούν στην ευστάθεια των στύλων μέσα από μια παραμετρική αξιολόγηση που γίνεται κυρίως με τη χρήση αριθμητικών αναλύσεων. Αρχικά γίνεται η εκτίμηση της ευστάθειας των στύλων με τη χρήση των πλέον διαδεδομένων εμπειρικών σχέσεων, ενώ ακολούθως αξιολογείται ο τρόπος και οι τεχνικές που προσφέρουν τα βέλτιστα αποτελέσματα όσον αφορά στην ακρίβεια των δισδιάστατων (2D) αριθμητικών αναλύσεων με τη χρήση του λογισμικού RS2.

Για την προσομοίωση των εγκάρσιων εκσκαφών στη δισδιάστατη ανάλυση αξιοποιείται η τεχνική εφαρμογής εξωτερικού επιφανειακού φορτίου στην περιοχή που προβάλλεται ακριβώς πάνω από τον στύλο. Η συγκεκριμένη τεχνική επιλέγεται μετά από συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη χρήση διαφόρων τεχνικών με τα αποτελέσματα του τρισδιάστατου αριθμητικού μοντέλου (3D) όπως προκύπτουν μέσα από το λογισμικό RS3, καθώς είναι αυτή που εμφανίζει πιο μεγάλη ακρίβεια. Πιο συγκεκριμένα, δίνει μέσες ορθές τάσεις (σ_p) στην στέψη του στύλου με σφάλμα της τάξης του +5% κατά μέσο όρο, ενώ στο μέσο του ύψους των στύλων το αντίστοιχο σφάλμα ανέρχεται στο -19% υποεκτιμώντας τις μέγιστες κύριες τάσεις σ_1 .

Οι παραμετρικές αναλύσεις διαιρούνται σε Ομάδες Αναλύσεων με βάση τα στοιχεία που εξετάζουν.

- **Α' Ομάδα Αναλύσεων (5 Αναλύσεις)**

Η επίδραση του λόγου W_p/H_p εξετάζεται μέσω δημιουργίας ορθών βαθμίδων των 6m, σε περιβάλλον με $W_p = L_p = W_r = 15m$. Η δημιουργία κάθε νέου bench ορίζει και μία ανάλυση και στο σύνολό τους ορίζουν την Α' Ομάδα Αναλύσεων.

- A.1: $H_p = 6m$, επομένως $W_p/H_p \rightarrow 2,5$
- A.2: $H_p = 12m$, επομένως $W_p/H_p \rightarrow 1,25$
- A.3: $H_p = 18m$, επομένως $W_p/H_p \rightarrow 0,8333$
- A.4: $H_p = 24m$, επομένως $W_p/H_p \rightarrow 0,625$
- A.5: $H_p = 30m$, επομένως $W_p/H_p \rightarrow 0,5$

Η παραμετροποίηση ως προς τον λόγο W_p/H_p αναλύεται εκτενώς στην Α' Ομάδα Αναλύσεων, οπότε οι αναλύσεις των υπόλοιπων ομάδων γίνονται για συγκεκριμένο λόγο W_p/H_p . Ο λόγος αυτός επιλέγεται να είναι ίσος με 0,5, με την Ανάλυση Α.5 να αποτελεί την βάση αξιολόγησης των υπόλοιπων παραμέτρων. Για τις υπόλοιπες Ομάδες Αναλύσεων οι διαστάσεις των θαλάμων και των στύλων παραμένουν σταθερές, εκτός και αν αναφέρεται η αλλαγή τους.

- **Β' Ομάδα Αναλύσεων (2 Αναλύσεις)**

Στα πλαίσια της Β' Ομάδας Αναλύσεων εξετάζεται η επίδραση της UCS. Διακρίνονται δύο νέες Αναλύσεις Β.1.5 και Β.2.5 με τιμές UCS 110MPa και 130MPa αντίστοιχα, τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίνονται με εκείνα της Ανάλυσης Α.5 (UCS = 90MPa).

- **Γ' Ομάδα Αναλύσεων (2 Αναλύσεις)**

Στα πλαίσια της Γ' Ομάδας Αναλύσεων εξετάζεται η επίδραση του GSI. Διακρίνονται δύο νέες Αναλύσεις Γ.1.5 και Γ.2.5 με τιμές GSI 75 και 80 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αυτών των Αναλύσεων συγκρίνονται με εκείνα της Ανάλυσης Α.5 (GSI = 70).

- **Δ' Ομάδα Αναλύσεων (1 Ανάλυση)**

Στα πλαίσια της Δ' Ομάδας Αναλύσεων εξετάζεται η επίδραση ενός δικτύου ασυνεχειών εντός της δομής της βραχομάζας. Τα αποτελέσματα της νέας Ανάλυσης Δ.5 συγκρίνονται με εκείνα της Ανάλυσης Α.5 (απουσία δικτύου ασυνεχειών).

- **Ε' Ομάδα Αναλύσεων (2 Αναλύσεις)**

Σε αυτήν την περίπτωση γίνεται παραμετροποίηση ως προς το πλάτος των θαλάμων (W_T). Διακρίνονται δύο νέες Αναλύσεις Ε.1.5 και Ε.2.5 με πλάτη θαλάμων 10m και 20m αντίστοιχα και τα αποτελέσματα των Αναλύσεων συγκρίνονται με εκείνα της Ανάλυσης Α.5 ($W_T = 15m$).

Όπως η Ανάλυση Α.5, έτσι και οι υπόλοιπες αναλύσεις που εξετάζονται δημιουργούνται σε πέντε στάδια των 6m. Τα στάδια που προηγούνται χρονικά αποτελούν και αυτά αναλύσεις, παρά το γεγονός πως δεν εξετάζονται ενδελεχώς στα πλαίσια των αριθμητικών μεθόδων. Στις αριθμητικές μεθόδους, αυτές οι αναλύσεις εξετάζονται μόνο για σημεία αστοχίας μέσω των ισοϋψών που παρουσιάζουν, ενώ στις εμπειρικές μεθόδους οι συντελεστές ασφαλείας τους υπολογίζονται κανονικά.

Η εφαρμογή των εμπειρικών μεθόδων αξιοποιεί τις εμπειρικές σχέσεις των Obert & Duvall, Lunder & Pakalnis και Esterhuizen et al., οι οποίες χρησιμοποιούν και τη θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας, για την εκτίμηση των συντελεστών ασφαλείας. Από τα εύρη των συντελεστών που θεωρεί η κάθε εμπειρική σχέση ως αποδεκτά φαίνεται πως μόνο δύο από τους εξεταζόμενους στύλους αστοχούν. Αυτοί οι στύλοι ανήκουν στην Δ' Ομάδα Αναλύσεων και πρόκειται για τις Αναλύσεις Δ.4 και Δ.5 με λόγους W_p/H_p ίσους με 0,625 και 0,5 αντίστοιχα.

Από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών μοντέλων για όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν, παρατηρείται πως κανένας από τους εξεταζόμενους στύλους δεν αστοχεί. Όμως το ίδιο δεν μπορεί να ειπωθεί και για τους θαλάμους σε κάποιες από τις αναλύσεις και πιο συγκεκριμένα στις περιπτώσεις A.2-A.5, Δ.1-Δ.5, E.2.1-E.2.5, στις οποίες παρατηρούνται ζώνες διαρροής στην εγγύς περιοχή των θαλάμων.

Η μελέτη των αριθμητικών μοντέλων περιλαμβάνει συγκρίσεις των αποτελεσμάτων τόσο ανά Ομάδες Αναλύσεων όσο και στο σύνολό τους.

Η σημαντικότερη μείωση των συντελεστών ασφαλείας κατά τη μείωση του λόγου W_p/H_p (Α' Ομάδα Αναλύσεων) παρουσιάζεται στο μέσο του εκάστοτε στύλου, με τις μέσες τιμές των συντελεστών να έχουν ως εξής:

- A.1 → 2,87
- A.2 → 1,99
- A.3 → 1,79
- A.4 → 1,72
- A.5 → 1,71

Από τις ισοϋψείς των συνολικών μετατοπίσεων, γίνεται φανερό πως οι μεγαλύτερες συνολικές μετατοπίσεις δεν εμφανίζονται στη δομή των στύλων, αλλά στους θαλάμους και πιο συγκεκριμένα στις οροφές και τα δάπεδα αυτών. Με τη μείωση του λόγου W_p/H_p , οι συνολικές μετατοπίσεις αυξάνονται. Στη ζώνη διαρροής της Ανάλυσης A.5 οι συνολικές μετατοπίσεις φτάνουν τα 0,0009m.

Αυξάνοντας τις τιμές της UCS (Β' Ομάδα Αναλύσεων), τα σημεία αστοχίας στις οροφές των δεξιών θαλάμων παύουν να υφίστανται. Για αύξηση της UCS από τα 90MPa στα 110MPa (B.1.5), τα ποσοστά αύξησης των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας είναι 9-10%

ανάλογα την περιοχή που εξετάζεται, ενώ για αύξηση από τα 90MPa στα 130MPa (B.2.5) τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 17-20%.

Κατά τον ίδιο τρόπο με την Β' Ομάδα Αναλύσεων, η αύξηση του γεωλογικού δείκτη GSI (Γ' Ομάδα Αναλύσεων) εξαλείφει τα σημεία αστοχίας. Για αύξηση του GSI από τα 70 στα 75 (Γ.1.5), τα ποσοστά αύξησης είναι 16-20%, ενώ για αύξηση από τα 70 στα 80 (Γ.2.5) τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 39-49%.

Η Δ' Ομάδα Αναλύσεων διαφέρει σε σχέση με τις υπόλοιπες Ομάδες, μιας και οι συντελεστές ασφαλείας που παρουσιάζει δεν έχουν σταθερές κατανομές. Το ενδιαφέρον αυτής της Ομάδας Αναλύσεων επικεντρώνεται στις συνολικές μετατοπίσεις. Η ύπαρξη δικτύου ασυνεχειών στη βραχώμαζα του μαρμάρου συνεπάγεται μεγαλύτερες συνολικές μετατοπίσεις. Η μέγιστη τιμή των συνολικών μετατοπίσεων (0,0068m) παρουσιάζεται στη ζώνη αστοχίας και πιο συγκεκριμένα σε σημείο τομής της οροφής του δεξιού θαλάμου από ασυνέχεια.

Η μείωση του πλάτους των θαλάμων κατά 5m (E.1.5) εξαλείφει τα σημεία αστοχίας που εμφανίζονταν στην οροφή του δεξιού θαλάμου της Ανάλυσης A.5. Από την άλλη, η αύξηση του πλάτους των θαλάμων κατά 5m (E.2.5) όχι μόνο διευρύνει την ζώνη αστοχίας που εμφανίζει η Ανάλυση A.5, αλλά δημιουργεί και ακόμα μία ζώνη ίδιας κλίμακας στην οροφή του αριστερού θαλάμου. Η μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας (39%) παρουσιάζεται στη στέγη του στύλου της Ανάλυσης E.1.5, ενώ στις υπόλοιπες εξεταζόμενες περιοχές της Ανάλυσης οι αντίστοιχες αυξήσεις περιορίζονται στο 11-14%. Από την άλλη, η αύξηση του πλάτους των θαλάμων κατά 5m (E.2.5) οδηγεί σε ποσοστιαία μείωση των μέσων τιμών των συντελεστών ασφαλείας κατά 10-16%.

Στην Ανάλυση E.2.5, οι μέγιστες συνολικές μετατοπίσεις παρουσιάζονται στην οροφή του δεξιού θαλάμου και είναι ίσες με 0,0017m. Αντίστοιχα, στην Ανάλυση E.1.5 παρουσιάζονται πάλι στην οροφή του δεξιού θαλάμου και είναι ίσες με 0,00041m.

Τα σημαντικότερα σημεία που προκύπτουν από την σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας στο σύνολό τους (κάθετη σύγκριση) είναι τα εξής:

- Οι αναλύσεις B.2.5 και Γ.1.5 παρουσιάζουν κατανομές που σχεδόν ταυτίζονται. Η αύξηση της UCS από τα 90MPa στα 130MPa, δηλαδή, μοιάζει να έχει την ίδια επίδραση με την αύξηση του GSI από τα 70 στα 75.

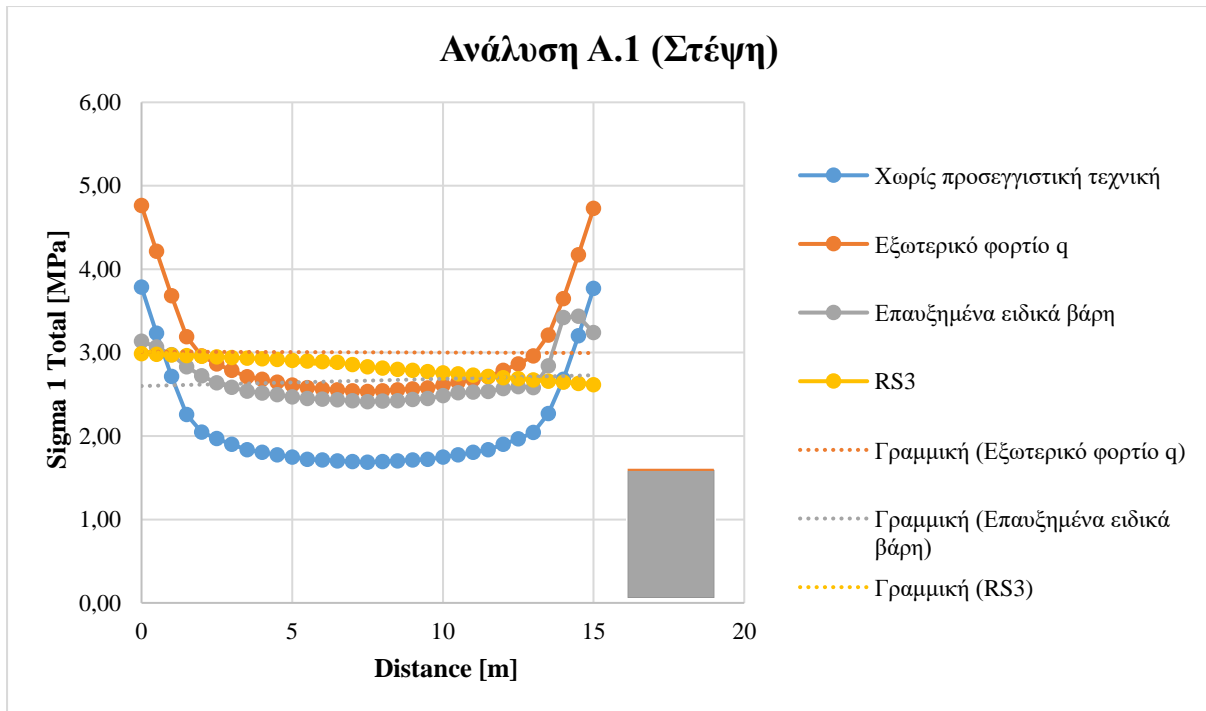
- Οι πιο ευαίσθητες περιοχές βρίσκονται στο μέσο και στις παρειές ενός στύλου. Από τις τελευταίες είναι άλλωστε που συνήθως ξεκινά η διάρρηξη του στύλου και που εκδηλώνεται μέσω απολέπισης (spalling) και απόσχισης του πετρώματος (slabbing).
- Την μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση στους συντελεστές ασφαλείας επιφέρει η αύξηση του γεωλογικού δείκτη GSI κατά 10 μονάδες (Γ.2.5), ενώ την μικρότερη η αύξηση της UCS κατά 20MPa (B.1.5).

Από την αξιολόγηση των συντελεστών ασφαλείας των στύλων της Α' Ομάδας Αναλύσεων, προκύπτει πως οι συντελεστές της εμπειρικής μελέτης υπερεκτιμούν την αντοχή των στύλων. Αυτό το πόρισμα επιβεβαιώνουν και οι συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν και για τις υπόλοιπες Ομάδες Αναλύσεων, με μοναδική εξαίρεση την περίπτωση της Ομάδας Δ'. Σε αυτήν την περίπτωση φαίνεται πως η εμπειρική σχέση των Esterhuizen et al. υπερεκτιμά την επίδραση της οικογένειας των ασυνεχειών, δίνοντας πολύ συντηρητικά αποτελέσματα.

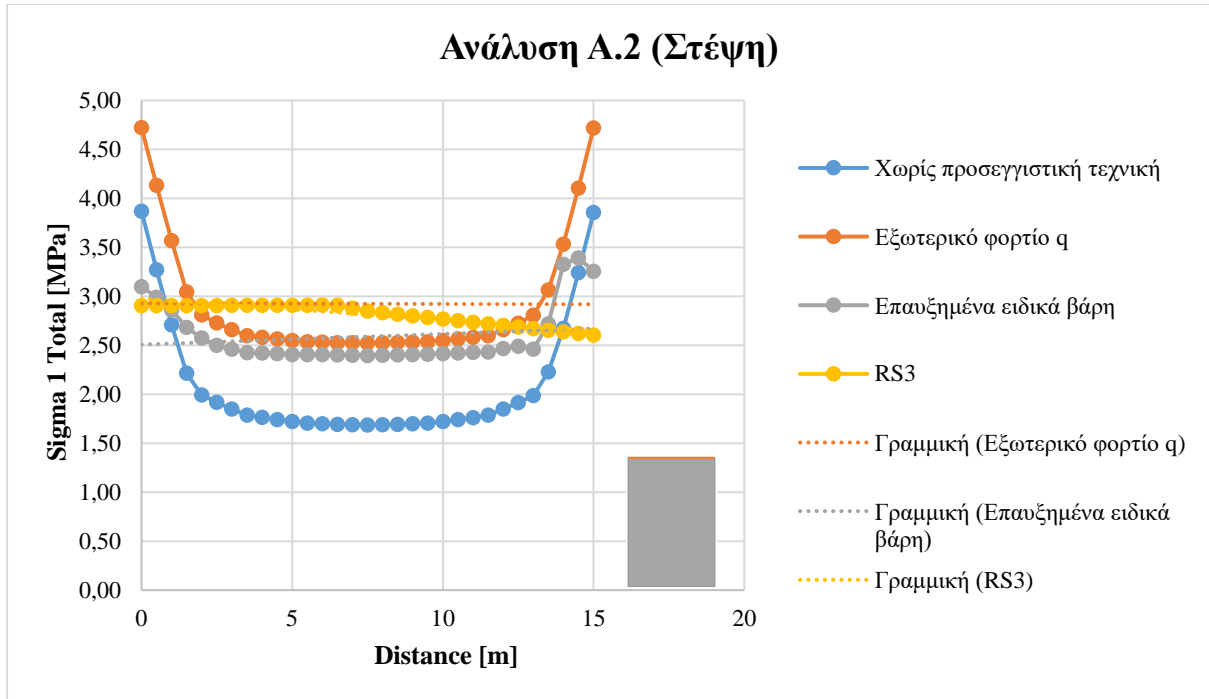
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

A. Επιλογή προσεγγιστικής τεχνικής

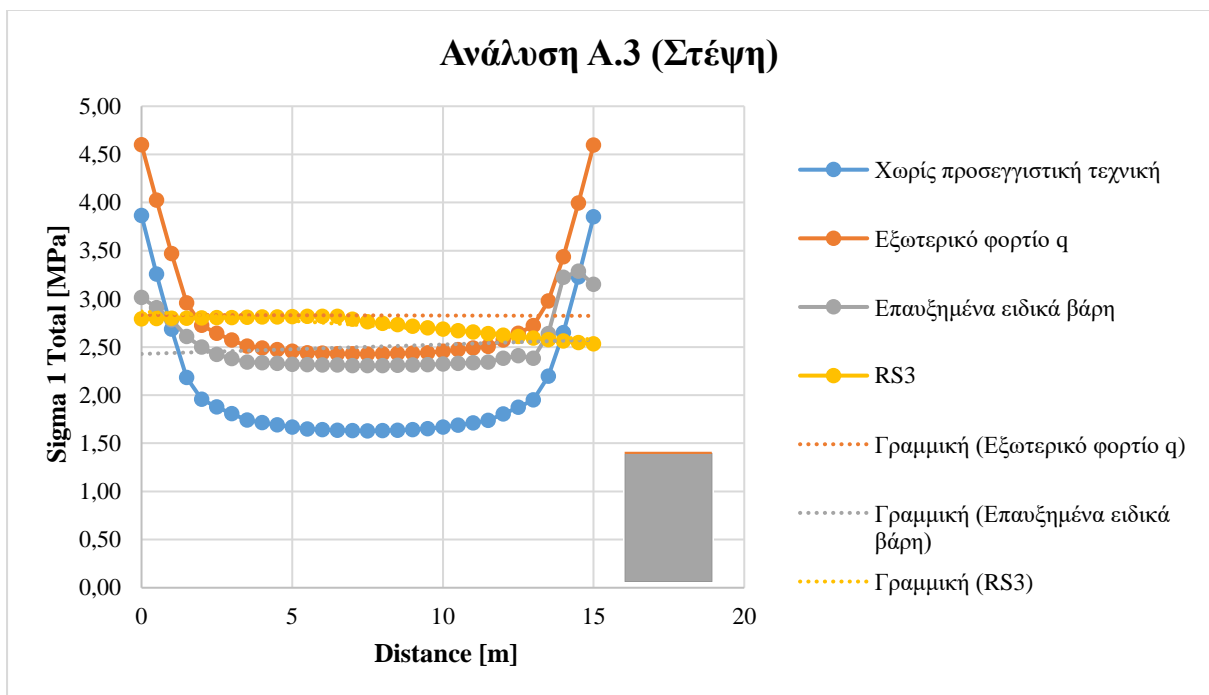
Στα παρακάτω Σχήματα απεικονίζονται οι κατανομές των σ_1 στις περιοχές ενδιαφέροντος (στέψη και μέσο) των υπόλοιπων αναλύσεων της Α' Ομάδας.



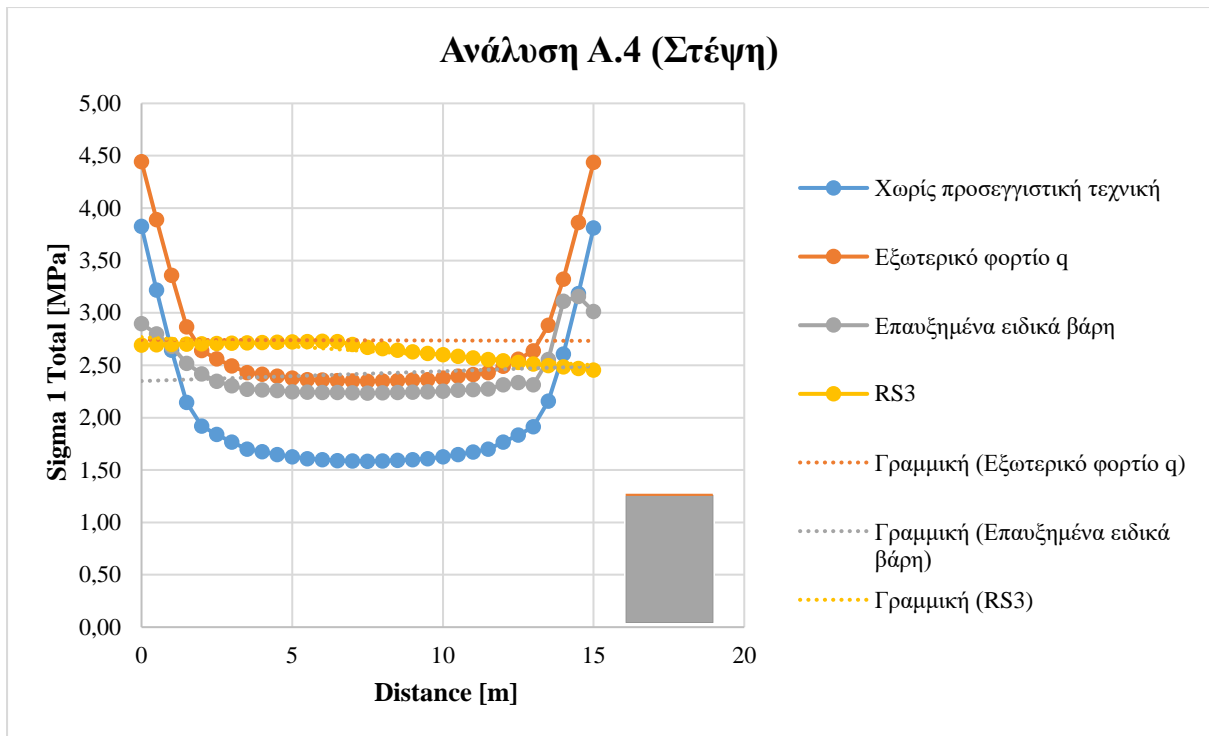
Σχήμα A.1: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στη στέψη του στύλου της Ανάλυσης A.1



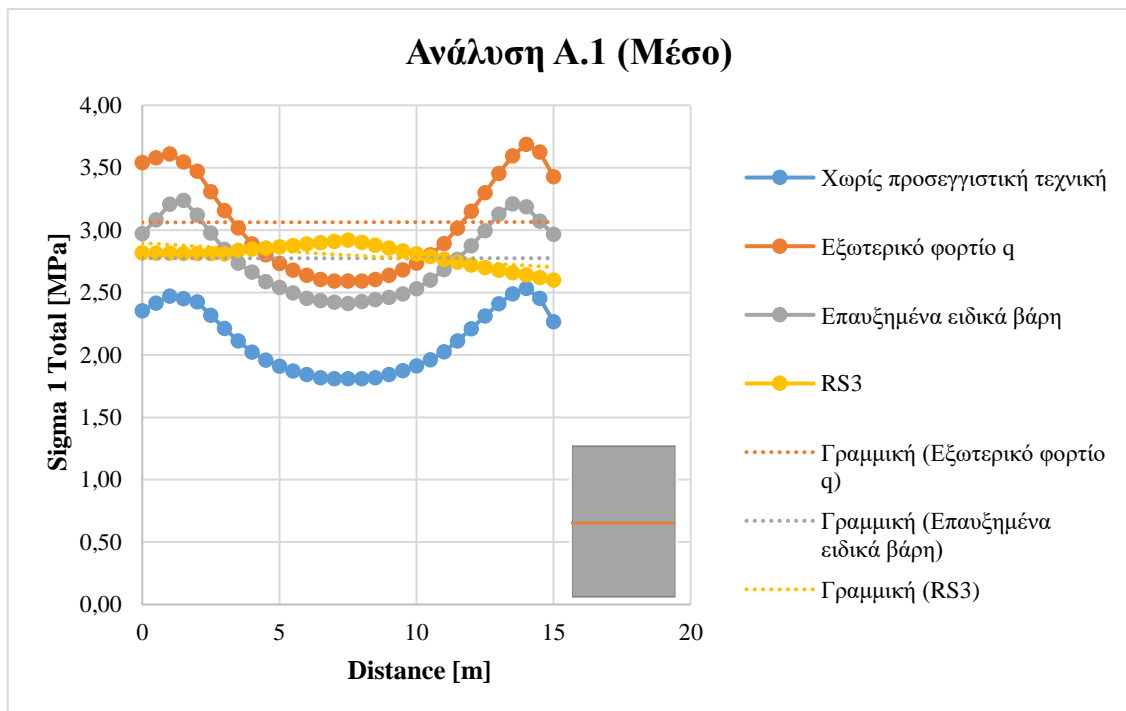
Σχήμα A.2: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στη στέψη του στύλου της Ανάλυσης A.2



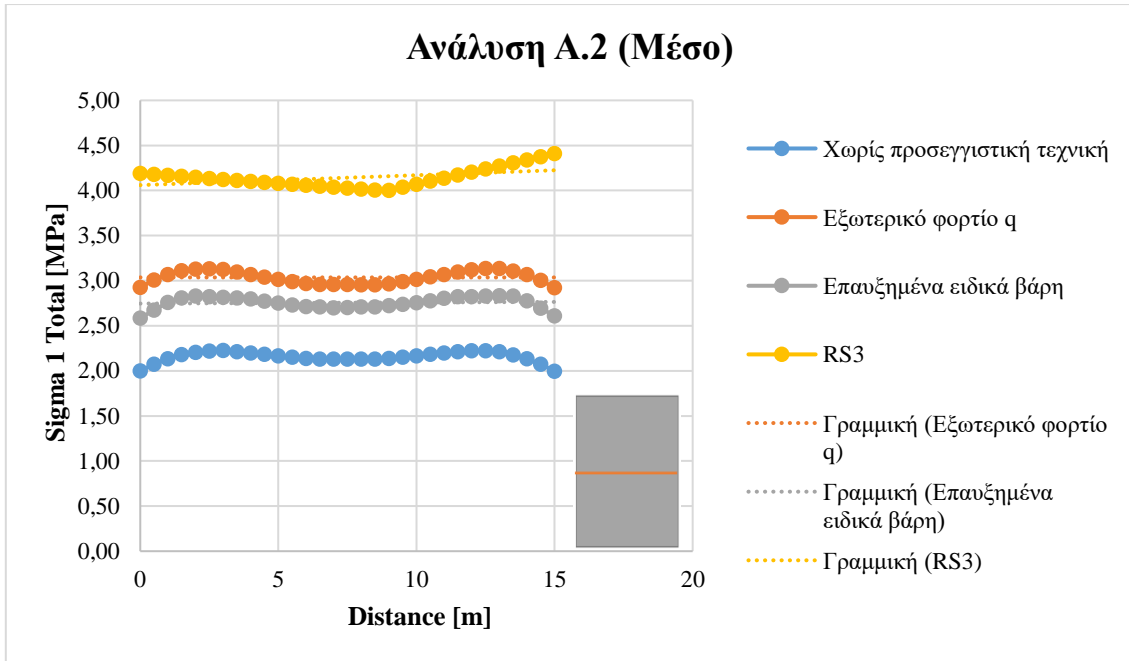
Σχήμα A.3: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στη στέψη του στύλου της Ανάλυσης A.3



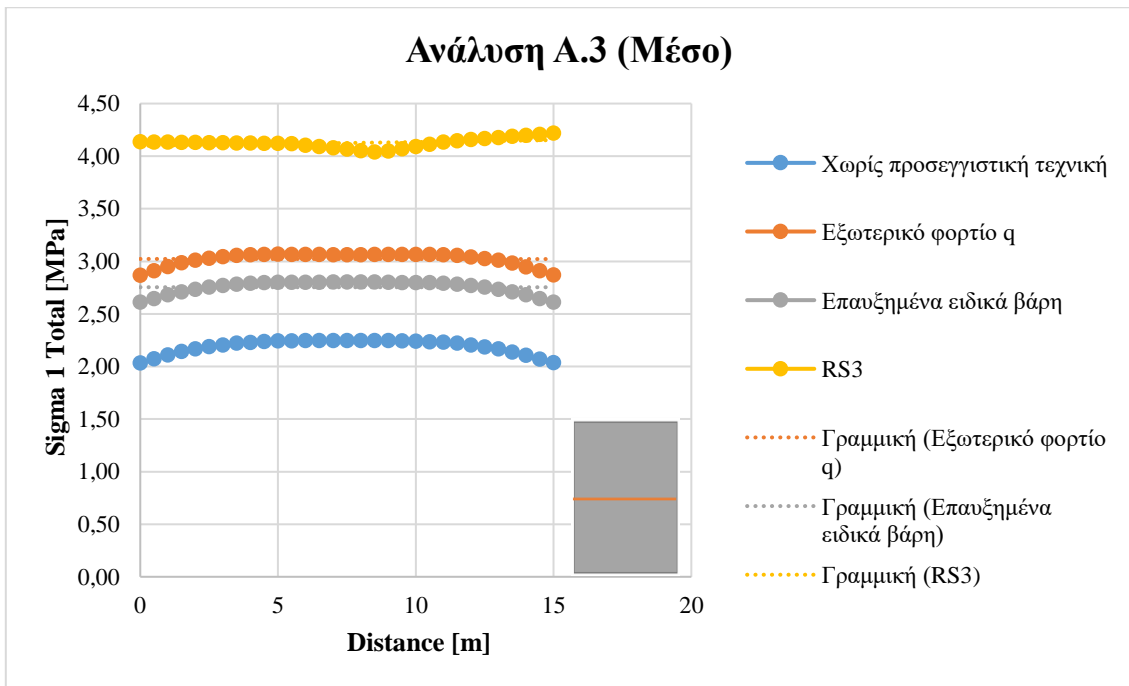
Σχήμα Α.4: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στη στέψη του στύλου της Ανάλυσης Α.4



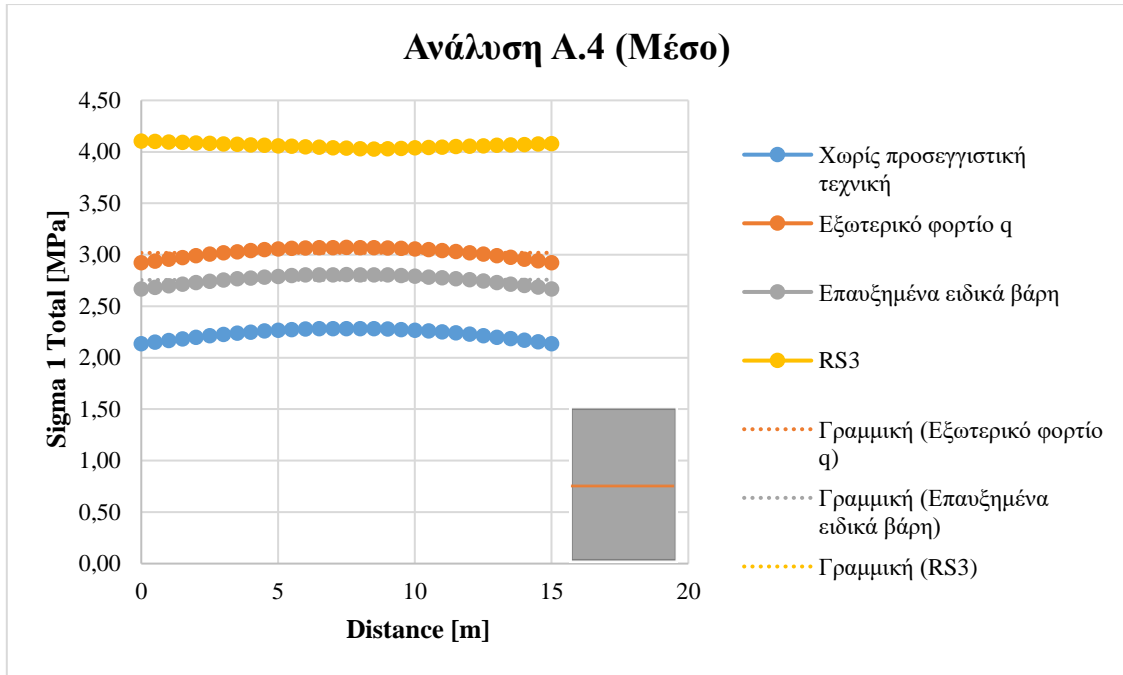
Σχήμα Α.5: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στο μέσο του ύψους του στύλου της Ανάλυσης Α.1



Σχήμα Α.6: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στο μέσο του ύψους του στύλου της Ανάλυσης Α.2



Σχήμα Α.7: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στο μέσο του ύψους του στύλου της Ανάλυσης Α.3



Σχήμα Α.8: Σύγκριση των κατανομών των σ_1 στο μέσο του ύψους του στύλου της Ανάλυσης Α.4

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Benardos, A.G., Kaliampakos, D.C., Prousiotis, J.G., Mavrikos, A.A., Skoparantzou, K.A., “*Underground aggregate mining in Athens: a promising investment plan*”, Tunneling and Underground Space Technology, Vol.16, pp. 325, 2001.

Bieniawski Z.T., “*Engineering rock mass classifications*”, John Wiley, New York, 1989.

Bieniawski Z.T., van Heerden W.L., “*The significance of in situ tests on large rock specimens*”, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., Vol.12, pp. 103, 1975.

Brady B.H.G., Brown E.T., “*Rock mechanics for underground mining*”, 3rd Edition, Kluwer Academic Publishers, 2004.

Brown, E.T., “*Strength of models of rock with intermittent joints*”, J. Soil. Mech. Found. Div., ASCE, Vol.96, No.6, pp. 1935-1949, 1970.

Cai, M., Kaiser, P.K., Tasaka, Y. and Minami, M., “*Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system*”, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 44(2), pp. 247-265, 2007.

Das, M.N., “*Influence of width/height ratio on postfailure behaviour of coal*”, Int. J. Min. Geol. Eng., Vol.4, pp. 79-87, 1986.

Deliveris, A.V., Benardos, A., “*Evaluating performance of lignite pillars with 2D approximation techniques and 3D numerical analyses*”, Int. J. Min. Sci. Tech., 27(6), pp. 929-936, 2017.

Deng, J., Yue, Z.Q., Tham, L.G., Zhu, H.H., “*Pillar design by combining finite element methods, neural networks and reliability: a case study of the Feng Huangshan copper mine China*”, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., Vol.40, pp. 585-599, 2003.

Denkhaus, H.G., “*A critical review of the present state of scientific knowledge related to the strength of mine pillars*”, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 63, pp. 59-75, 1962.

Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R., Ellenberger, J.L., “*Pillar strength and design methodology for stone mines*”, In: Proceedings of the 27th international conference on ground control in mining, Morgantown WV: West Virginia University, pp. 241-253, 2008.

Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R., Ellenberger, J.L. “*Pillar strength in underground stone mines in the United States*”, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 48(1), pp. 42-50, 2011.

Farmer, I.W., “*Engineering behaviour of rocks*”, Chapman and Hill, London, pp. 151-158, 1983.

Hamrin, H., Hustrulid, W., Bullock, R., “*Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies*”, Vol.1, pp. 4-5, Vol.13, pp. 371-372, 2001.

Hoek, E., “*Practical rock engineering*”, e-book, pp. 191,201, 2007.

Hoek, E., Brown, E.T., “*Underground excavations in rock*”, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1980.

Hoek, E., Brown, E.T., “*The Hoek–Brown failure criterion - a 1988 update*”, In: Curran J (ed) Proceedings of the 15th Canadian Rock Mechanics Symposium. University of Toronto, Toronto, pp. 31–38, 1988.

Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., Corkum, B., “*Hoek–Brown failure criterion - 2002 edition*”, In: Hammah, R., Bawden, W., Curran, J., Telesnicki, M., (eds) Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium (NARMS-TAC), University of Toronto Press, Toronto, pp. 267–273, 2002.

Hoek, E., Diederichs, M.S., “*Empirical estimation of rock mass modulus*”, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 43(2), pp. 203-215, 2006.

Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F., “*Support of underground excavations in hard rock*”, A.A. Balkema, Rotterdam, 1995.

Hoek, E., Wood, D., Shah, S., “*A modified Hoek–Brown criterion for jointed rock masses*”, In: Hudson JA (ed) Rock characterization: ISRM Symposium, Eurock ‘92, Chester, UK. Thomas Telford, London, pp. 209–213, 1992.

Iannacchione, A.T., “*Analysis of pillar design practices and techniques for U.S. limestone mines*”, Trans. Inst. Min. Metall. (Sect. A: Min. Industry), 108, pp. 152-160, 1999.

Kostak, B., Bielenstein, H.U., “*Strength distribution in hard rock*”. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 8, pp. 501-521, 1971.

Lunder, P.J., “*Hard rock pillar strength estimation an applied empirical approach*”, M.S. Thesis, University of British Columbia, 1994.

Lunder, P.J., Pakalnis, R., “*Determination of the strength of hard-rock pillars*”, Bulletin of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Vol.90, pp. 51-55, 1997.

Marinos, V., Marinos, P., Hoek, E., “*The geological strength index: applications and limitations*”, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 64(1), pp. 55–65, 2005.

Martin, C.D. and Maybee, W.G., “*The Strength of hard-rock pillars*”, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., Vol.37, pp. 1239-1246, 2000.

Obert, L., Duvall, W.I., “*Rock mechanics and the design of structures in rock*”, Vol.650, New York: Wiley, 1967.

Obert, L., Duvall, W.I., Windes, S.L., “*Standardized tests for determining the physical properties of mine rock*”, Vol.3891, US Bureau of Mines, 1946.

Ozbay, M.U., Ryder, J.A., Jager, A.J., “*The design of pillar systems as practiced in shallow hard-rock tabular mines in South Africa*”, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., Vol.95(1), pp. 7-18, 1995.

Papakonstantinou, D., Benardos, A., “*Pillar stability analysis using the finite element method at the Lavrion technological and cultural park’s underground hazardous waste repository*”, Proceedings of the 2nd Eastern European Tunneling Conference, Athens: Greek Tunneling Society, 2014.

Tzeferis, P., “*Greek marble industry and challenges*”, In: 23rd China Mining Conference and Exhibition, Tianjin China, October 21 - October 23, 2021.

Vlachopoulos, N., Diederichs M.S., “*Appropriate uses and practical limitations of 2D numerical analysis of tunnels and tunnel support response*”, Geotech. Geol. Eng., 32 (2), pp. 469-488, 2014.

Αποστολίδης, Ν.Χ., «*Εκμετάλλευση μαρμάρων*», Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών ΕΜΠ., 1991.

Μενεγάκη, Μ., «Εκμετάλλευση Μεταλλείων ΙΙ - Βασικές αρχές και έννοιες υπαίθριων εκμεταλλεύσεων», Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήμα Μηχ. Μεταλλείων - Μεταλλουργών ΕΜΠ., 2020.

Μενεγάκη, Μ., «Μάρμαρα και Βιομηχανικά Ορυκτά», Παρουσιάσεις Μαθήματος, Τμήμα Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών ΕΜΠ.

Μπενάρδος, Α., «Μέθοδοι Υπόγειας Εκμετάλλευσης - Ελληνικές Εκμεταλλεύσεις», Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήμα Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών ΕΜΠ., 2014.

Μπενάρδος, Α., Καλλιαμπάκος, Δ., «Υπόγεια Έργα», Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήμα Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών ΕΜΠ., 2010.

Παναγιώτου, Γ.Ν., «Βασικές αρχές σχεδιασμού εκμεταλλεύσεως με την μέθοδο των θαλάμων και στύλων», Μεταλλειολογικά - Μεταλλουργικά Χρονικά, Ιούλιος - Αύγουστος 1982.

Τερεζόπουλος, Ν., «Μέθοδοι Υπογείων Εκμεταλλεύσεων», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών ΕΜΠ., 2003.

Τζεφέρης, Π., «Υπόγεια εκμετάλλευση ελληνικού μαρμάρου στο Βόλακα», Ιστότοπος Ορυκτός Πλούτος, Ιούνιος 2016 (διαθέσιμα: https://www.oryktosploutos.net/2016/06/blog-post_5-12/).

Τζεφέρης, Π., «Η υπόγεια εξόρυξη του ελληνικού μαρμάρου», (Ι) & (ΙΙ), Ιστότοπος Ορυκτός Πλούτος, Σεπτέμβριος 2019 (διαθέσιμα: https://www.oryktosploutos.net/2019/09/blog-post_86/, https://www.oryktosploutos.net/2019/09/blog-post_57/).