

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Εκτίμηση της Συμπεριφοράς Στύλων με Χρήση
Τρισδιάστατης Αριθμητικής Ανάλυσης**

ΓΟΥΔΕΛΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: ΜΠΕΝΑΡΔΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ,
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Εκτίμηση της συμπεριφοράς στύλων με χρήση
τριδιάστατης αριθμητικής ανάλυσης**

ΓΟΥΔΕΛΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

Επιβλέπων καθηγητής: ΜΠΕΝΑΡΔΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις /10/2011

Μπενάρδος Ανδρέας, Λέκτορας ΕΜΠ (Επιβλέπων):

Καλιαμπάκος Δημήτρης, Καθηγητής ΕΜΠ :

Νομικός Παύλος, Λέκτορας ΕΜΠ :

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

Copyright © Γουδέλης Δημήτρης, 2011
Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως θέμα την, «Εκτίμηση της συμπεριφοράς των στύλων με τη χρήση τρισδιάστατης μεθόδου ανάλυσης για τη μέθοδο θαλάμων και στύλων».

Τα θέματα που αναλύονται σε κάθε κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, συνοπτικά, είναι τα ακόλουθα:

- ❖ **Κεφάλαιο 1^ο**. Αναλύεται σε βάθος ο τρόπος σχεδιασμού υπόγειων εκσκαφών με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων. Επίσης, παρουσιάζεται τόσο η μέθοδος εκτίμησης της αντοχής του στύλου όσο και της υφιστάμενης τάσης στους στύλους.
- ❖ **Κεφάλαιο 2^ο**. Αρχικά, δίνονται τα βασικά στοιχεία των αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης και αναλύεται η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ 2-D και 3-D αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης. Τέλος, παρουσιάζεται το τρισδιάστατο πρόγραμμα ανάλυσης Midas GTS 2010.
- ❖ **Κεφάλαιο 3^ο**. Γίνεται περιγραφή των βασικών αρχών σχεδιασμού του προγράμματος τρισδιάστατης ανάλυσης, Midas GTS. Έπειτα, δημιουργούνται ομάδες αναλύσεων για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των στύλων και περιγράφεται η μέθοδος προσομοίωσης τους.
- ❖ **Κεφάλαιο 4^ο**. Παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα εξαχθέντα αποτελέσματα όλων των ομάδων αναλύσεων.
- ❖ **Κεφάλαιο 5^ο**. Συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα και εξάγονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ανδρέα Μπενάρδο, Λέκτορα της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του ΕΜΠ, για την καθοριστική καθοδήγηση και επίβλεψη που μου παρείχε καθώς, επίσης, και για τις σημαντικές συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον κ. Δ. Καλιαμπάκο, Καθηγητή της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του ΕΜΠ, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα.

Ἀφιέρωση

*Γιὰ τοὺς ἐρωτευμένους ποὺ παντρεύτηκαν
Γιὰ τὸ σπίτι ποὺ χτίστηκε
Γιὰ τὰ παιδάκια ποὺ μεγάλωσαν
Γιὰ τὰ πλοῖα ποὺ ἄραξαν
Γιὰ τὴ μάχη ποὺ κερδήθηκε
Γιὰ τὸν ἄσωτο ποὺ ἐπέστρεψε
Γιὰ ὅλα ὅσα τέλειωσαν χωρὶς ἐλπίδα πιά.*

Μανόλης Ἀναγνωστάκης (Θεσσαλονίκη 1925 - Ἀθήνα 2005): Ἴατρος ἀκτινολόγος, ποιητὴς καὶ δοκιμογράφος.

Περίληψη

Η δημιουργία υπόγειων χώρων με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων (room and pillar method) τυγχάνει ευρείας εφαρμογής σε παγκόσμιο επίπεδο και η εύρεση των βέλτιστων διαστάσεων των στύλων με μέγιστη ασφάλεια και με μέγιστη δυνατή λειτουργικότητα αποτελεί αντικείμενο μελέτης από πολλούς ερευνητές.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την ανάλυση της συμπεριφοράς των στύλων με τη χρήση τρισδιάστατης ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, καθώς μπορεί να προσομοιωθεί πιο αξιόπιστα η τρισδιάστατη γεωμετρία των εκσκαφών. Η ανάλυση πραγματοποιείται με την δημιουργία διαφόρων μοντέλων εξέτασης με τη χρήση του λογισμικού πακέτου τρισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, MIDAS GTS. Επιτυγχάνεται έτσι, η βελτίωση της διακριτικής ικανότητας της ανάλυσης και κατανόηση της συμπεριφοράς των στύλων υπό διάφορες συνθήκες γεωμετρίας και φόρτισης, η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχα λογισμικά πακέτα δισδιάστατης ανάλυσης, αλλά και ταυτόχρονα η εκμάθηση και εξοικείωση με το λογισμικό πακέτο MIDAS GTS.

Πιο αναλυτικά στην εργασία, πραγματοποιούνται παραμετρικές αναλύσεις χωρισμένες σε 4 διαφορετικές ομάδες αναλύσεων. Για την κατανόηση της συμπεριφοράς των στύλων, σε κάθε μια από τις ομάδες αναλύσεων μεταβάλλεται μια βασική παράμετρος, όπως, η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη (UCS), ο λόγος W_p/H_p και το πλευρικό φορτίο που ασκείται στο στύλο λόγω της ενίσχυσης. Σε κάθε ομάδα ανάλυσης, εξετάζεται η ευστάθεια και η συμπεριφορά των στύλων μέσω των οριζόντιων μετατοπίσεων (Horizontal Displacement), του συντελεστή ασφαλείας (Factor of Safety) και των αστοχιών που συμβαίνουν.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δείχνουν ότι με την αύξηση του UCS και του λόγου W_p/H_p επιτυγχάνεται βελτίωση της ευστάθειας του στύλου, ενώ με την εφαρμογή της ενίσχυσης επιτυγχάνονται μεν καλύτερες συνθήκες, αλλά οι οριζόντιες μετατοπίσεις δεν μειώνονται σε μεγάλο βαθμό διότι ο στύλος έχει ήδη παραμορφωθεί λόγω των ισχυρών τάσεων που δέχεται. Γενικότερα, αποδείχτηκε ότι τα μέτρα ενίσχυσης δεν επιδρούν στην αποτροπή της εμφάνισης των αστοχιών, αλλά στον περιορισμό των συνεπειών τους. Τέλος, αναφορικά με την σύγκριση μεταξύ 2-D και 3-D ανάλυσης, εξήχθησαν αποτελέσματα ίδιας τάξης μεγέθους. Μολαταύτα, εκτιμάται ότι τα αποτελέσματα της 3-D ανάλυσης παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακρίβεια και, επίσης, ότι τα αποτελέσματα της 2-D ανάλυσης φαίνεται να υποεκτιμούν την τρισδιάστατη γεωμετρία της εκσκαφής.

Abstract

The creation of underground spaces by using the room and pillar method is applied widely at international level and the discovery of the best dimensions of pillars and their biggest possible functionality constitutes the object of study of many researchers.

The main objective of this diploma thesis is the study of the behavior of pillars by using 3D finite elements analysis method, since it can simulate more reliable the 3D geometry. The analysis is performed by creating different groups models using the software three dimensional finite elements analysis software, MIDAS GTS. Thus, the goals of understanding the behavior of pillars under various geometry and loading conditions, the comparison between 2D and 3D numerical analysis methods and, also, learning and the familiarization with a state-of-the-art computer program MIDAS GTS, are achieved.

More precisely, parametric analysis divided into four different groups, are effectuated. To understand the behavior of pillars, we change in each of analyses one basic parameter, such as the Unconfined Compressive Strength (UCS), the pillar W/H ratio and the reinforcement's lateral load exerted on the pillar. In every group of analysis, we examine the stability conditions of pillars via the Horizontal Displacement, the Factor of Safety and the pillar failures that occur.

The results of the analyses show that because of the increase in the UCS and the pillar W/H ratio, we achieve an improvement of the stability of the pillar, whereas by applying the reinforcement we achieve better stability conditions, but the horizontal displacements aren't decreased greatly because the pillar is already disfigured due to intense stresses. Generally, it was proved that the reinforcement measures don't have an impact on preventing the pillar failures from appearing. However they can restrict their consequences. Finally, as for the comparison between 2D and 3D analysis, the results have presented similar rates. Nevertheless, it is estimated that the results of 3D analysis present greater accuracy and, also, the results of 2D analysis seem to underestimate the three dimensional geometry of the excavation.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΧΩΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΙ ΣΤΥΛΩΝ

1.1 Εισαγωγή	2
1.2 Γενική Περιγραφή της Μεθόδου	3
1.3 Βασικές Αρχές Σχεδιασμού	5
1.3.1 Ασκούμενες τάσεις.....	6
1.4 Σχεδιασμός Στύλων	7
1.4.1 Μέθοδοι σχεδιασμού στύλων.....	9
1.4.2 Εκτίμηση της υφιστάμενης τάσης στους στύλους.....	10
1.4.3 Εκτίμηση της αντοχής των στύλων	15
1.4.4 Κριτήριο αστοχίας Hoek - Brown.....	21
1.5 Συμπεριφορά των στύλων σε συνθήκες φόρτισης.....	22
1.5.1 Τρόποι αστοχίας στύλων.....	25
1.5.2 Επίδραση των ασυνεχειών στην ευστάθεια των στύλων	27
1.6 Συντελεστής Ασφαλείας στύλων	29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΚΣΚΑΦΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

2.1 Εισαγωγή	32
2.2 Γενικά στοιχεία της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων	34
2.3 Βασικές έννοιες της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων	36
2.3.1 Διακριτοποίηση (Meshing).....	37
2.3.2 Συναρτήσεις μορφής.....	39
2.3.3 Καταστατικές εξισώσεις.....	39
2.3.4 Συνοριακές συνθήκες και μοντέλα συμπεριφοράς υλικών	40
2.3.5 Κριτήρια αστοχίας γεωυλικών.....	41
2.3.6 Μειονέκτημα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.....	42

2.4 Σύγκριση 2D και 3D αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης.....	43
2.5 Γενικά στοιχεία του προγράμματος Midas GTS 2010	49
2.5.1 Περιβάλλον Εργασίας Midas GTS 2010.....	53
2.5.2 Χαρακτηριστικά ανάλυσης.....	57
2.5.3 Κριτήρια αστοχίας.....	59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ (3D) ΑΝΑΛΥΣΗΣ

3.1 Σχεδιασμός μοντέλου στο MIDAS GTS 2010	63
3.2 Εφαρμογή πεπερασμένων στοιχείων για την εκτίμηση της συμπεριφοράς στύλων	69
3.3 Μέθοδος προσομοίωσης	70
3.4 Ενίσχυση των στύλων	73
3.5 Συντελεστής Ασφάλειας (Safety Factor).....	74
3.6 Εκτίμηση γεωτεχνικών παραμέτρων	74
3.7 Ορισμός Παραμέτρων των Αναλύσεων	77
3.7.1 Α' Ομάδα Αναλύσεων.....	77
3.7.2 Β' Ομάδα Αναλύσεων.....	78
3.7.3 Γ' Ομάδα Αναλύσεων.....	79
3.7.4 Δ' Ομάδα Αναλύσεων.....	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ- ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

4.1 Αποτελέσματα Α Όμάδας Αναλύσεων.....	83
4.1.1 Ανάλυση Α.1 - Σχολιασμός.....	83
4.2 Αποτελέσματα Β' Όμάδας Αναλύσεων	98
4.2.1 Ανάλυση Β.1	98
4.2.2 Ανάλυση Β.2.....	101
4.2.3 Ανάλυση Β.3.....	105

4.2.4 Ανάλυση B.4.....	108
4.2.5 Ανάλυση B.5.....	112
4.2.6 Σχολιασμός - Σύγκριση B' Ομάδας Αναλύσεων.....	115
4.3 Αποτελέσματα Γ' Ομάδας Αναλύσεων.....	118
4.3.1 Ανάλυση Γ.1.....	118
4.3.2 Ανάλυση Γ.2.....	119
4.3.3 Ανάλυση Γ.3.....	122
4.3.4 Σχολιασμός - Σύγκριση Γ' Ομάδας Αναλύσεων.....	124
4.4 Αποτελέσματα Δ' Ομάδας Αναλύσεων.....	127
4.4.1 Ανάλυση Δ.1.....	127
4.4.2 Ανάλυση Δ.2.....	130
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : <u>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>	135
Βιβλιογραφία.....	141
Παράρτημα.....	143

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1.1. Εμπειρικές σχέσεις αντοχής στύλων για σκληρά πετρώματα.....	19
Πίνακας 3.1. Σύστημα ταξινόμησης βραχομάζας GSI	75
Πίνακας 3.2. Λόγος του Poisson ανάλογα με τον τύπο της βραχομάζας.....	76
Πίνακας 3.3. Τιμή του μέτρου ελαστικότητας (E) για τις αναλύσεις Γ.1, Γ.2, Γ.3	80
Πίνακας 4.1. Αποτελέσματα αξονικών μετατοπίσεων (D_{xy}) στο κέντρο και στις παρειές των στύλων σε σύγκρισή με τους λόγους W_p / H_p	85
Πίνακας 4.2. Συντελεστής Ασφαλείας (FS) στο κέντρο και στις παρειές των στύλων	90
Πίνακας 4.3. Επίδραση ενίσχυσης στις αξονικές μετατοπίσεις για τη Β' ομάδα αναλύσεων ..	115
Πίνακας 4.4. Ποσοστιαία αύξηση FS ($\Delta FS\%$) για τη Β' ομάδα αναλύσεων.....	116
Πίνακας 4.5. Ποσοστό αστοχίας του στύλου για την Β' ομάδα αναλύσεων	117
Πίνακας 4.6. Συντελεστής Ασφαλείας (FS) στο κέντρο και στις παρειές των στύλων σε σύγκριση με την μεταβολή του UCS (60,75,90).....	126

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1.1. Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου θαλάμων και στύλων	4
Σχήμα 1.2. Κατανομή της ορθής τάσης σε στύλο πετρώματος τετραγωνικής διατομής.	7
Σχήμα 1.3. Κάτοψη της διάταξης των θαλάμων και στύλων	10
Σχήμα 1.4. Παραλληλεπίπεδο που φορτίζει τον στύλο, σύμφωνα με την θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας	11
Σχήμα 1.5. Εκτίμηση της μέσης ορθής τάσης που αναλαμβάνει ο στύλος για διάφορες διατάξεις.....	12
Σχήμα 1.6. Επίδραση του συντελεστή απόληψης και του ύψους υπερκειμένων στην μέση ορθή τάση που ασκείται στο στύλο	14
Σχήμα 1.7.α,β. Επίδραση του μεγέθους και του σχήματος στην τελική αντοχή του στύλου....	16
Σχήμα 1.8. Εμπειρικά δεδομένα σχετικά με την αστοχία στύλων σε σχέση με τις πιέσεις στο στύλο και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του	17
Σχήμα 1.9. Επίδραση του συντελεστή k στην αύξηση του περιορισμού στο κέντρο του στύλου.....	21
Σχήμα 1.10. Συμπεριφορά στύλου που υπόκειται σε φόρτιση	23
Σχήμα 1.11. Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης στύλων για διάφορες τιμές του λόγου W/H. 24	
Σχήμα 1.12. Συνήθεις τρόποι αστοχίας στύλων	25
Σχήμα 1.13. Απεικόνιση της εξέλιξης των ρωγματώσεων και της αστοχίας σε στύλο	26

Σχήμα 1.14. Απεικόνιση των ευσταθών και ασταθών στύλων (Salamon and Munro).....	30
Σχήμα 4.1. Συγκριτικά αποτελέσματα αξονικών μετατοπίσεων (D_{xy}) κατά πλάτος των στύλων για όλους τους λόγους W_p / H_p	86
Σχήμα 4.2. Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά πλάτος του στύλου ($W/H=0,5$), πριν και μετά την εφαρμογή της ενίσχυσης.....	100
Σχήμα 4.3. Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά πλάτος του στύλου ($W/H=1$), πριν και μετά την εφαρμογή της ενίσχυσης.....	103
Σχήμα 4.4. Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά πλάτος του στύλου ($W/H=1,5$), πριν και μετά την εφαρμογή της ενίσχυσης.....	107
Σχήμα 4.5. Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά πλάτος του στύλου ($W/H=2$), πριν και μετά την εφαρμογή της ενίσχυσης.....	110
Σχήμα 4.6. Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά πλάτος του στύλου ($W/H=3$), πριν και μετά την εφαρμογή της ενίσχυσης.....	113
Σχήμα 4.7. Οριζόντιες μετατοπίσεις (D_{xy}) κατά πλάτος του στύλου, για $UCS = 60MPa$	118
Σχήμα 4.8. Οριζόντιες μετατοπίσεις (D_{xy}) κατά πλάτος του στύλου, για $UCS = 75MPa$	120
Σχήμα 4.9. Οριζόντιες μετατοπίσεις (D_{xy}) κατά πλάτος του στύλου, για $UCS = 90MPa$	123
Σχήμα 4.10. Οριζόντιες μετατοπίσεις (D_{xy}) κατά πλάτος του στύλου ($W/H=0,5$), σχετικά με τη διαφοροποίηση του UCS (60,75,90 MPa)	125
Σχήμα 4.11. Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά πλάτος του στύλου με 2D ανάλυση, Midas GTS.	128
Σχήμα 4.12. Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά πλάτος του στύλου με 2D ανάλυση, Phase2	129
Σχήμα 4.13. Συγκριτικά αποτελέσματα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά πλάτος του στύλου ($W/H=2$), από τις 2D αναλύσεις των προγραμμάτων Midas GTS και Phase2	130
Σχήμα 4.14. Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά πλάτος του στύλου με 3D ανάλυση Midas GTS.	132
Σχήμα 4.15. Συγκριτικά αποτελέσματα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά πλάτος του στύλου, από 2D αναλύσεις των Midas GTS & Phase2 και 3D ανάλυση του Midas GTS ...	133

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1.1. Στύλος μεγάλου ύψους που διαμορφώθηκε με τη χρήση βαθμίδων.....	4
Εικόνα 1.2. Αστοχία στύλου εξαιτίας προϋπάρχουσας ασυνέχειας υπό γωνία 60°	28
Εικόνα 2.1. Παρουσίαση των αριθμητικών μεθόδων (Gnilsen, 1989)	33
Εικόνα 2.2. Είδη στοιχείων διακριτοποίησης.....	38
Εικόνα 1.3. Επίτευξη πραγματικού ανάγλυφου μέσω του Terrain Geometry Maker	46
Εικόνα 2.4. Μετατροπή δισδιάστατης γεωμετρίας σε τρισδιάστατη.....	48

Εικόνα 2.5. Αρχική σελίδα (Start Page) του Midas GTS 2010	50
Εικόνα 2.6. Διάφορες επιλογές προβολής της γεωμετρίας του μοντέλου	51
Εικόνα 2.7. Δυνατότητες προβολής του πλέγματος του μοντέλου.....	52
Εικόνα 2.8. Διαμόρφωση συντομογραφιών του μοντέλου	52
Εικόνα 2.9. Περιβάλλον Εργασίας του Midas GTS 2010.....	54
Εικόνα 2.10. Διαμόρφωση και δυνατότητες του Works Tree Window.....	55
Εικόνα 2.11. Παράθυρο ιδιοτήτων (Property window), ανάλογα με το στάδιο εργασίας.....	56
Εικόνα 3.1. Αταξινόμητες στοές.....	64
Εικόνα 3.2. Κοινό επίπεδο βάσης στοών	64
Εικόνα 3.3. Σχεδιασμός περιγραμμάτων στοών και ορίων του μοντέλου	65
Εικόνα 3.4. Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου.....	65
Εικόνα 3.5. Δημιουργία πλέγματος (Meshing) των στοών	66
Εικόνα 3.6. Δημιουργία πλέγματος (Meshing) ολόκληρου του μοντέλου.....	67
Εικόνα 3.7. Παράθυρο σχολίων (Output Window)	68
Εικόνα 3.8. Στάδια εκσκαφής του μοντέλου για τη δημιουργία των θαλάμων και των στύλων.....	71
Εικόνα 3.9.α,β. Κεντρικός στύλος ο οποίος εξετάζεται σε όλες τις ομάδες αναλύσεων.....	72
Εικόνα 3.10. Στύλος που έχει ενισχυθεί με τη βοήθεια αγκυρίων	73
Εικόνα 4.1.α,β,γ,δ,ε. Αξονικές μετατοπίσεις των στύλων για λόγους $W_p/H_p=0.5,1,1.5,2,3$...	85
Εικόνα 4.2. Επιφάνεια αστοχίας του στύλου με $W_p / H_p = 0,5$ – κατά μήκος τομή.....	91
Εικόνα 4.3. Σημεία διαρροής του στύλου με $W_p / H_p = 0,5$ – κάτοψη.....	91
Εικόνα 4.4. Επιφάνεια αστοχίας του στύλου με $W_p / H_p = 1$ – κατά μήκος τομή	92
Εικόνα 4.5. Σημεία διαρροής του στύλου με $W_p / H_p = 1$ – κάτοψη.....	93
Εικόνα 4.6. Επιφάνεια αστοχίας του στύλου με $W_p / H_p = 1,5$ – κατά μήκος τομή.....	94
Εικόνα 4.7. Σημεία διαρροής του στύλου με $W_p / H_p = 1,5$ – κάτοψη.....	94
Εικόνα 4.8. Επιφάνεια αστοχίας του στύλου με $W_p / H_p = 2$ – κατά μήκος τομή	95
Εικόνα 4.9. Σημεία διαρροής του στύλου με $W_p / H_p = 2$ – κάτοψη.....	95
Εικόνα 4.10. Επιφάνεια αστοχίας του στύλου με $W_p / H_p = 3$ – κατά μήκος τομή.....	96
Εικόνα 4.11. Σημεία διαρροής του στύλου με $W_p / H_p = 3$ – κάτοψη.....	97
Εικόνα 4.12.α,β. Αξονική μετατόπιση πριν και μετά την ενίσχυση του στύλου ($W/H=0,5$)....	99
Εικόνα 4.13.α,β. Αξονική μετατόπιση πριν και μετά την ενίσχυση του στύλου ($W/H=1$).....	102
Εικόνα 4.14. Σημεία διαρροής του στύλου με $W_p / H_p = 1$ μετά την εφαρμογή ενίσχυσης....	105
Εικόνα 4.15.α,β. Αξονική μετατόπιση πριν και μετά την ενίσχυση του στύλου ($W/H=1,5$)...106	
Εικόνα 4.16.α,β. Αξονική μετατόπιση πριν και μετά την ενίσχυση του στύλου ($W/H=2$).....	109
Εικόνα 4.17.α,β. Αξονική μετατόπιση πριν και μετά την ενίσχυση του στύλου ($W/H=3$).....	113
Εικόνα 4.18. Αξονικές μετατοπίσεις (D_{xy}) στύλου, λόγου $W_p / H_p = 0.5$, με $UCS=75MPa$.120	

Εικόνα 4.19. Αξονικές μετατοπίσεις (Dxy) στύλου, λόγου $W_p / H_p = 0.5$, με UCS=90MPa.	122
Εικόνα 4.20. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Dx), δισδιάστατης ανάλυσης από το Midas GTS.....	128
Εικόνα 4.21. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Dx), δισδιάστατης ανάλυσης από το Phase ²	129
Εικόνα 4.22. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Dxy), τρισδιάστατης ανάλυσης από το Midas GTS ..	131

Κεφάλαιο 1.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΧΩΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΘΑΛΑΜΩΝ ΚΑΙ ΣΤΥΛΩΝ

1.1. Εισαγωγή

Η μέθοδος θαλάμων και στύλων (room and pillar method) ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων εκμετάλλευσης με κενά μέτωπα (open stopes), δηλαδή χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι ο κενός χώρος που δημιουργείται από τις εργασίες εκσκαφής, διατηρείται ανοικτός με τη βοήθεια της φυσικής υποστήριξης που παρέχεται από το πέτρωμα. Στη μεταλλευτική της εφαρμογή, το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου είναι τα οριζόντια ως μέτριας κλίσης στρωσιγενή κοιτάσματα ικανοποιητικής αντοχής, μικρού ή μεγάλου πάχους, τα οποία εντοπίζονται σε μικρό ως μέσο βάθος τα οποία έχουν ανθεκτική οροφή. Στις περιπτώσεις που η μέθοδος χρησιμοποιείται για τη δημιουργία υπόγειων εκσκαφών για την εγκατάσταση χρήσεων, οι απαιτήσεις επικεντρώνονται κυρίως στην ανθεκτικότητα του πετρώματος, ώστε οι στύλοι να μπορούν να αναλάβουν τις τάσεις των υπερκειμένων ενώ παράλληλα να μπορούν να γίνουν εκσκαφές ικανοποιητικού πλάτους (θάλαμοι).

Η επιλογή της παραπάνω μεθόδου για τη δημιουργία μεγάλων υπογείων χώρων βασίζεται στους εξής λόγους (Benardos et al., 2001):

- Η μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα για ικανοποιητική και λειτουργική αξιοποίηση του χώρου μετά το πέρας της εκμετάλλευσης.
- Η εμπειρία στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι αρκετά μεγάλη, τυγχάνει εφαρμογής σε πολλές περιπτώσεις στο διεθνή χώρο για την κατασκευή υπόγειων χώρων μεγάλης επιφάνειας, ενώ χρησιμοποιείται στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων στον ελληνικό μεταλλευτικό κλάδο.
- Η μέθοδος δεν εμφανίζει ιδιαίτερες δυσκολίες, είναι απλή και δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις σε εξοπλισμό και τεχνικές.

Ο Salamon (1983) ταξινόμησε τους στύλους σε τρεις κύριες κατηγορίες, ως εξής : 1) Στύλοι – Στύλοι υποστήριξης (support pillars), 2) Στύλοι προστασίας (protective pillars) και 3) Στύλοι ελέγχου (control pillars). Οι τρεις κατηγορίες περιγράφονται παρακάτω :

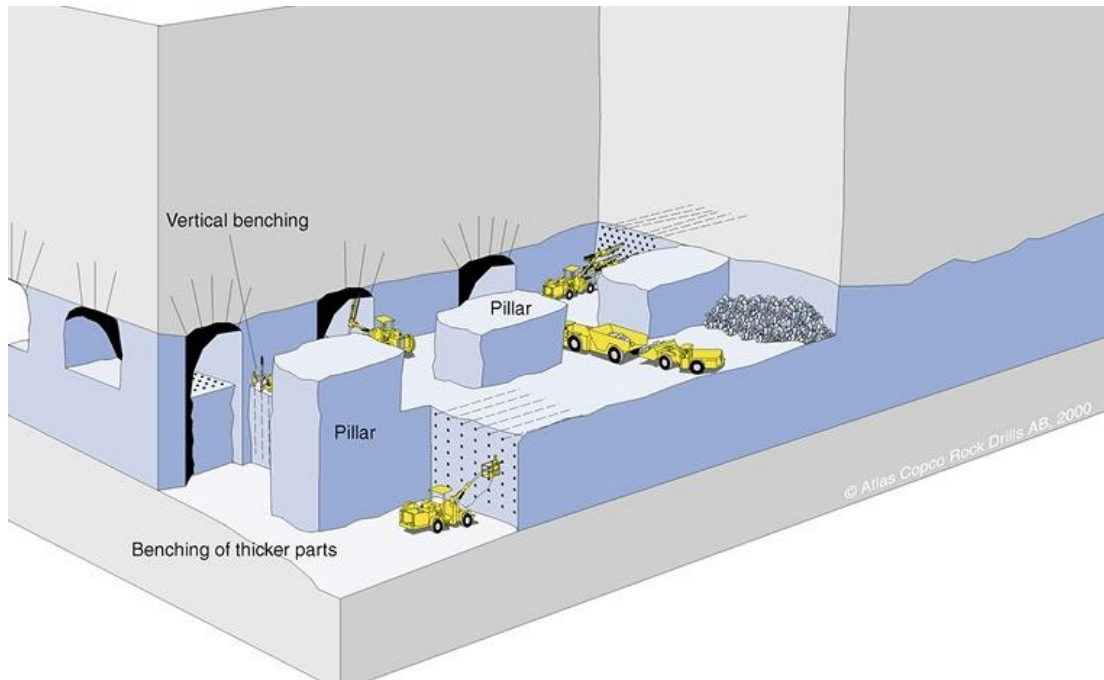
1. **Στύλοι – Στύλοι υποστήριξης (Support pillars).** Εμπεριέχονται όλοι οι στύλοι στους οποίους χρησιμοποιείται υποστήριξη της οροφής. Η διάταξη των στύλων στο χώρο, συνήθως, είναι κανονική και ομοιόμορφη. Παράδειγμα αποτελεί η εκσκαφή με κενά μέτωπα εντός σκληρού σχηματισμού, εμπεριέχοντας την μέθοδο θαλάμων και στύλων, τους επιμήκεις στύλους (rib pillars) και άλλους.

2. **Στύλοι προστασίας (Protective pillars).** Οι στύλοι αυτοί χρησιμοποιούνται για την προστασία μιας εγκατάστασης. Στους συγκεκριμένους στύλους καμιά αστοχία δεν είναι ανεκτή. Παραδείγματα εγκαταστάσεων που προστατεύουν, αποτελούν οι κατασκευές που βρίσκονται στην επιφάνεια, φρέατα μεταλλείων καθώς και οι στύλοι που χρησιμοποιούνται ως όρια μεταξύ παρακείμενων εκμεταλλεύσεων. Οι στύλοι αυτοί, μπορούν να αναφερθούν εναλλακτικά ως ‘shaft pillars’, ‘roadway pillars και ‘boundary pillars’. Ο συντελεστής ασφαλείας (safety factor) που επιδιώκεται, στις περιπτώσεις αυτών των στύλων, είναι σημαντικά μεγάλος με σκοπό να αντισταθμίσει δυνητικά σφάλματα που σχετίζονται με τις παραδοχές που πραγματοποιήθηκαν κατά την εκτίμηση αντοχής των στύλων.
3. **Στύλοι ελέγχου (Control pillars).** Οι στύλοι αυτοί χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις όπου αναμένεται ακαριαία θραύση στους στύλους. Οι συγκεκριμένοι στύλοι σχεδιάζονται με στόχο να μην δημιουργηθεί καμιά αστοχία. Ο σκοπός οποίος κατασκευάζονται είναι, να μειωθεί η σημασία της ανακατανομής της τάσης στο περιβάλλον της εκσκαφής και να ελαττωθεί το ρίσκο της ακαριαίας θραύσης.

Λαμβάνοντας υπόψη τους τρεις τύπους στύλων που αναφέρθηκαν, η παρούσα διπλωματική ασχολείται μόνο με τον πρώτο τύπο, δηλαδή τους ‘support pillars’. Ειδικότερα, για εκσκαφή με την μέθοδο θαλάμων και στύλων εντός σκληρού πετρώματος.

1.2. Γενική Περιγραφή της Μεθόδου

Στη γενική εφαρμογή της μεθόδου θαλάμων και στύλων, το πέτρωμα εξορύσσεται μέσω ενός συστήματος παράλληλων θαλάμων οι οποίοι διαχωρίζονται από στύλους (Σχήμα 1.1). Οι θάλαμοι ορύσσονται ως στοές και οι άξονες τους συνήθως ισαπέχουν. Στη συνέχεια ορύσσονται νέες στοές κάθετα ή με κάποια κλίση ως προς τις πρώτες. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται στύλοι πετρώματος που στηρίζουν την οροφή. Η ευστάθεια δηλαδή των θαλάμων επιτυγχάνεται χάρη στους στύλους και συγκεκριμένα χάρη στην εκμετάλλευση της φέρουσας ικανότητας αυτών. Τόσο η διάταξη των στύλων στο χώρο, όσο και η διατομή τους μπορεί να είναι κανονική (τετραγωνική ή ορθογωνική) ή ακανόνιστη.



Σχήμα 1.1. Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου θαλάμων και στύλων.

Στις περιπτώσεις όπου επιζητείται η δημιουργία χώρου μεγάλου ύψους (ή το προς εκμετάλλευση κοίτασμα έχει μεγάλο ύψος) η εξόρυξη του πετρώματος είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με τη χρήση βαθμίδων (bench mining) εκμετάλλευσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.1.



Εικόνα 1.1. Στύλος μεγάλου ύψους που διαμορφώθηκε με τη χρήση βαθμίδων.

Στην μεταλλευτική εφαρμογή 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. Στην περίπτωση κατά την οποία επιλογή είναι η δημιουργία υπόγειου χώρου, η συγκεκριμένη φάση δεν υφίσταται, καθώς η μείωση της διατομής των στύλων συνεπάγεται και μείωση της αντοχής τους. Χρειάζεται επομένως να υπάρξει κατάλληλη επιλογή των χαρακτηριστικών της εκμετάλλευσης ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για αυξημένο χώρο, χωρίς όμως να διακυβεύεται η ασφάλεια του ίδιου του χώρου.

1.3. Βασικές Αρχές Σχεδιασμού

Ο στόχος του σχεδιασμού ενός μόνιμου υπόγειου χώρου είναι ο προσδιορισμός των βέλτιστων διαστάσεων των στύλων, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται ταυτόχρονα, με την εξής σειρά: α) η ασφάλεια, β) η λειτουργικότητα του χώρου και γ) η εκμετάλλευση. Ακριβώς οι ίδιοι παράμετροι πρέπει να πληρούνται και στην μεταλλευτική εφαρμογή της μεθόδου, με τη διαφορά ότι η εκμετάλλευση προέχει της λειτουργικότητας.

Σύμφωνα με τους Deng et al. (2003), ένα θεμελιώδες μέγεθος που πρέπει να υπολογιστεί κατά το σχεδιασμό μιας υπόγειας εκσκαφής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο θαλάμων και στύλων είναι το μέγεθος των στύλων. Οι διαστάσεις των στύλων πρέπει να είναι επαρκείς ώστε με βάση τις συγκεκριμένες γεωλογικές συνθήκες του πετρώματος και των περιβαλλόντων πετρωμάτων να προσφέρουν ικανοποιητική ευστάθεια στον υπόγειο χώρο.

Οι βέλτιστες διαστάσεις των στύλων υπολογίζονται με βάση δύο βασικά στοιχεία:

- Τις ασκούμενες, από τα υπερκείμενα στρώματα, τάσεις στους στύλους.
- Την αντοχή των στύλων η οποία εξαρτάται από τα μηχανικά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους.

1.3.1. Ασκούμενες τάσεις

Οι τάσεις που ασκούνται στα πετρώματα διακρίνονται 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. Συνήθως, στο πρώτο στάδιο του σχεδιασμού οι γνώσεις για τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και τον τρόπο επίδρασής τους στο τασικό πεδίο είναι σχετικά περιορισμένες. Για το λόγο αυτό, ο αρχικός σχεδιασμός θεωρεί ότι στους στύλους ασκούνται μόνο λιθοστατικές τάσεις (Παναγιώτου, 1982).

Οι λιθοστατικές τάσεις διακρίνονται σε κατακόρυφες και οριζόντιες τάσεις. Η κατακόρυφη τάση (S_v) που ασκείται λόγω των υπερκειμένων δίνεται από τη σχέση:

$$S_v = \gamma \cdot h \quad (1.1)$$

όπου,

γ : το ειδικό βάρος του υπερκειμένου πετρώματος

h : το ύψος των υπερκειμένων

Ενώ, η οριζόντια τάση (S_h) που ασκείται δίνεται από τη σχέση:

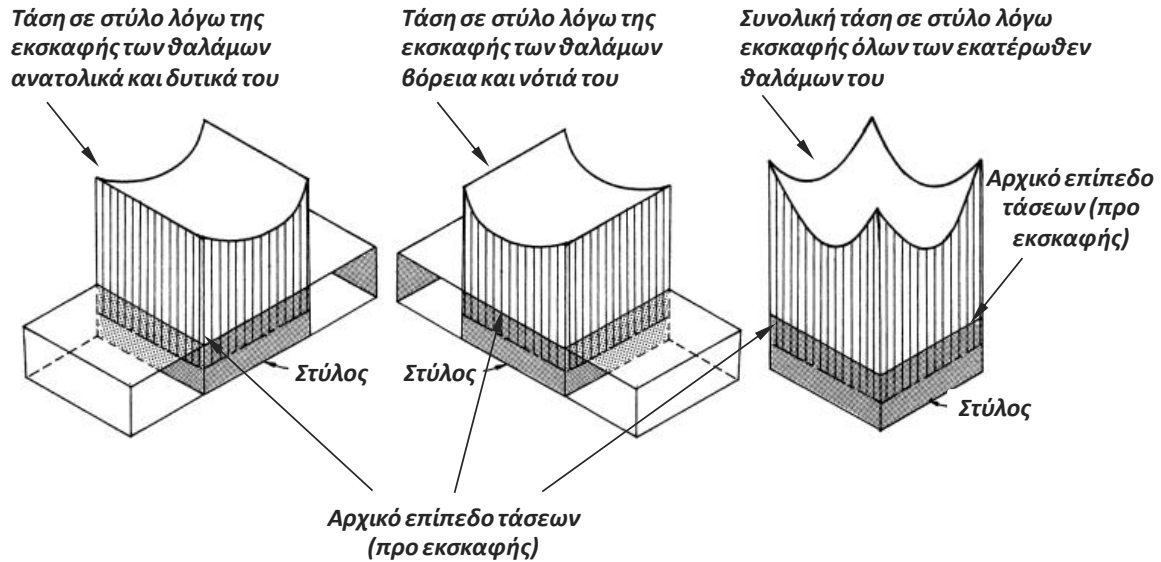
$$S_h = \frac{\nu}{1 - \nu} \cdot S_v \quad (1.2)$$

όπου,

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

S_v : η κατακόρυφη τάση.

Η τάση που αναπτύσσεται στους στύλους που δημιουργούνται είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αρχική κατακόρυφη τάση πριν την εκσκαφή (Σχήμα 1.2) και εξαρτάται από τα σχετικά μεγέθη του πλάτους του στύλου (W_P) και του πλάτους του θαλάμου (W_R) που έχουν δημιουργηθεί.



Σχήμα 1.2. Κατανομή της ορθής τάσης σε στύλο πετρώματος τετραγωνικής διατομής. Διακρίνεται το επίπεδο των αρχικών τάσεων πριν την εκσκαφή (virgin field stress), (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010).

1.4. Σχεδιασμός Στύλων

Μια μικρή έρευνα στην υπάρχουσα βιβλιογραφία (Lunder, 1994) αρκεί, ώστε να γίνει αντιληπτό ότι για τον σχεδιασμό υπόγειας εκσκαφής με την μέθοδο θαλάμων και στύλων δύο είναι τα κυρίαρχα ζητήματα, α) η αντοχή των στύλων σε θλίψη (C_p) και β) η τάση που δέχονται οι στύλοι (σ_p). Σε έναν τέτοιο υπόγειο χώρο, για την σωστή λειτουργία των στύλων πρέπει να εξασφαλίζεται η σταθερότητα τους καθ' όλη τη διάρκεια του έργου, ειδικότερα στις περιπτώσεις ενός μόνιμου έργου. Ο λόγος των δύο αυτών μεγεθών καλείται συντελεστής ασφαλείας (FS) και δίνεται από την παρακάτω σχέση (Σχέση 1.3).

$$FS = C_p / \sigma_p \quad (1.3)$$

όπου,

FS = Συντελεστής ασφάλειας (Factor of Safety)

C_p = Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

σ_p = Θλιπτική Τάση που δέχεται ο στύλος

Γίνεται άμεσα κατανοητό ότι, όταν η τάση που δέχεται ο στύλος είναι μεγαλύτερη από την αντοχή του, τότε θεωρείται ότι ο στύλος έχει αστοχήσει. Επίσης, όπως αναφέρεται και σε

επόμενη παράγραφο, οι στύλοι συνήθως αστοχούν σε διάτμηση διότι η αντοχή των στύλων σε διάτμηση είναι κατά πολύ μικρότερη από την αντοχή των στύλων σε θλίψη (Καλιαμπάκος, 2003).

Σύμφωνα με τους Lunder and Pakalnis (1994), ένα δοκίμιο αφού υποβληθεί σε εργαστηριακές δοκιμές μπορεί να προσδιοριστεί με σχετική ακρίβεια η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, αλλά η ενδεδειγμένη μέθοδος για την εκτίμηση της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος (C_p) για το συνολικό μέγεθος του στύλου είναι αρκετά πιο περίπλοκη και δύσκολη. Η συσχέτιση μεταξύ αντοχής άρρηκτου πετρώματος και in-situ αντοχής του στύλου, αποτελεί αντικείμενο μακροχρόνιων μελετών από πολλούς ερευνητές (Lunder & Pakalnis, 1994). Επίσης, ούτε η εκτίμηση της ασκούμενης τάσης στους στύλους (σ_p) οι οποίοι είναι ακανόνιστα ή ανομοιόμορφα διατεταγμένοι στο χώρο, δεν είναι εύκολη.

Μια συνηθισμένη προσέγγιση για τον σχεδιασμό των στύλων αποτελεί η αποκτηθείσα εμπειρία από παραπλήσιες συνθήκες. Αυτή η δοκιμαστική και λανθασμένη μέθοδος (Lunder and Pakalnis, 1994) είναι δυνατόν να στεφθεί με επιτυχία σε ορισμένες περιπτώσεις, μολαταύτα δεν βασίζεται σε θεμελιώδεις αρχές της μηχανικής. Σε επόμενη παράγραφο της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται διάφοροι εμπειρικοί τύποι για την εκτίμηση της αντοχής των στύλων.

Ο σχεδιασμός των στύλων, στις περισσότερες περιπτώσεις, ακολουθεί την υπόθεση ότι οι στύλοι θα διατηρούν την φέρουσα ικανότητα τους για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής τους, ειδικότερα σε έργα μόνιμου χαρακτήρα. Με στόχο την επίτευξη των παραπάνω, η αντοχή του στύλου θα πρέπει να επαρκεί ώστε να υποστηρίξει την τάση στην οποία υποβάλλεται. Οι δύο πρωταρχικοί παράγοντες που πρέπει να ερευνηθούν στο σχεδιασμό των στύλων, όπως προαναφέρθηκε, είναι η αντοχή των στύλων και η ασκούμενη τάση σε αυτούς.

Στη μέθοδο θαλάμων και στύλων, η εκτίμηση της αντοχής των στύλων (C_p) είναι άμεσα εξαρτώμενη από τους παρακάτω παράγοντες :

- i. Την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος του στύλου.
- ii. Τη γεωμετρία των στύλων (πλάτος, ύψος, λόγος W/H).
- iii. Τον όγκο του στύλου (Size and Shape effect).
- iv. Τις ιδιότητες των υλικών των στύλων, όπως η παραμορφωσιμότητα.
- v. Την επίδραση των εκρηκτικών στην εκσκαφή.

Η μέθοδος σχεδιασμού των στύλων είναι απόλυτα συνδεδεμένη με την τάση που υφίστανται οι στύλοι (σ_p). Η εκτίμηση της τάσης στην οποία υποβάλλονται οι στύλοι επηρεάζεται από τους εξής παράγοντες :

- i. Οι επί τόπου συνθήκες τάσεων (in-situ stress).
- ii. Οι μεταβολές των τάσεων που προκαλούνται από την εκσκαφή.
- iii. Η επίδραση των γεωλογικών χαρακτηριστικών, όπως αστοχίες και ασυνέχειες.
- iv. Το σχήμα και ο προσανατολισμός των στύλων.
- v. Η χωρική σχέση μεταξύ στύλων και θαλάμων.
- vi. Η επίδραση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, πραγματοποιείται ανάλυση τόσο της εκτίμησης της ασκούμενης τάσης στους στύλους, όσο και της εκτίμησης της αντοχής των στύλων.

1.4.1. Μέθοδοι σχεδιασμού στύλων

Ο Potvin (1985) διαχώρισε τον σχεδιασμό των στύλων (pillar design) σε 4 ευρείες κατηγορίες: ευρετικές (heuristic), εμπειρικές (empirical), θεωρητικές (theoretical) και αριθμητικές (numerical) μέθοδοι. Αυτές οι τέσσερις κατηγορίες εμπεριέχουν τις μεθόδους οι οποίες έχουν εφαρμοστεί για τον σχεδιασμό των θαλάμων και για την εκτίμηση της ασκούμενης τάσης.

Ο Potvin (1985) ανέφερε ότι οι ευρετικές (heuristic) μέθοδοι είναι λιγότερο εξελεγμένες από όλες τις μεθόδους σχεδιασμού στύλων. Η συγκεκριμένη κατηγορία δεν λαμβάνει υπόψη την αντοχή του στύλου και τις συνθήκες φόρτισης, κατά συνέπεια δεν αποτελεί ενδεδειγμένη επιλογή.

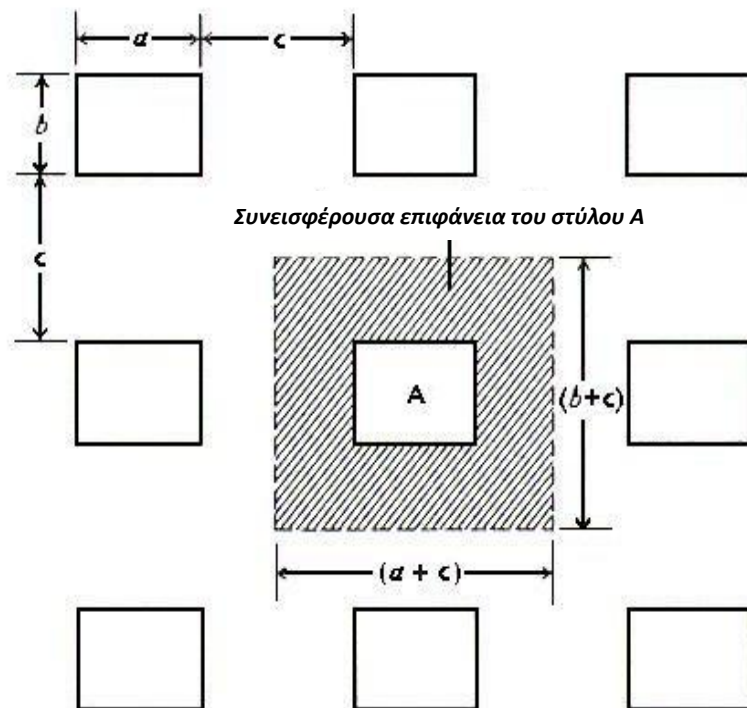
Οι εμπειρικές μέθοδοι, εξ' ορισμού, βασίζονται σε πειραματικές διαδικασίες ή στην αποκτηθείσα εμπειρία. Η κυρίαρχη διαφορά από τις ευρετικές μεθόδους είναι ότι, αρχικά μελετάται το ιστορικό και στη συνέχεια εφαρμόζεται σε μια υπόγεια εκμετάλλευση. Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι η πλειοψηφία των ερευνών έχει διεξαχθεί σε ανθρακωρυχεία (coal mines), με αποτέλεσμα να μην εφαρμόζεται με μεγάλη επιτυχία σε άλλα πετρώματα.

Οι θεωρητικές μέθοδοι σχεδιασμού στύλων χρησιμοποιούν αριθμητικές έννοιες βασισμένες σε αυστηρούς τύπους και εξισώσεις. Η πολύπλοκη προσέγγιση των θεωρητικών μεθόδων, τις καθιστά πολύ δύσκολες και χρονοβόρες.

Οι αριθμητικές μέθοδοι είναι, κυρίως, γνωστές για την αποτελεσματική εκτίμηση σχετικά με την υφιστάμενη τάση στους στύλους καθώς επίσης και για την εκτίμηση της αντοχής τους. Με τη βοήθεια ενός προγράμματος ανάλυσης σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, καθίσταται δυνατή η εκτίμηση της τάσης στους στύλους χωρίς να απαιτείται υπέρογκος χρόνος ή να καταβάλλεται μεγάλη προσπάθεια για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

1.4.2. Εκτίμηση της υφιστάμενης τάσης στους στύλους

Για να εκτιμηθεί η τάση που δέχεται ο στύλος χρησιμοποιείται 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, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3. Η οριζόντια αυτή επιφάνεια ονομάζεται συνεισφέρουσα.

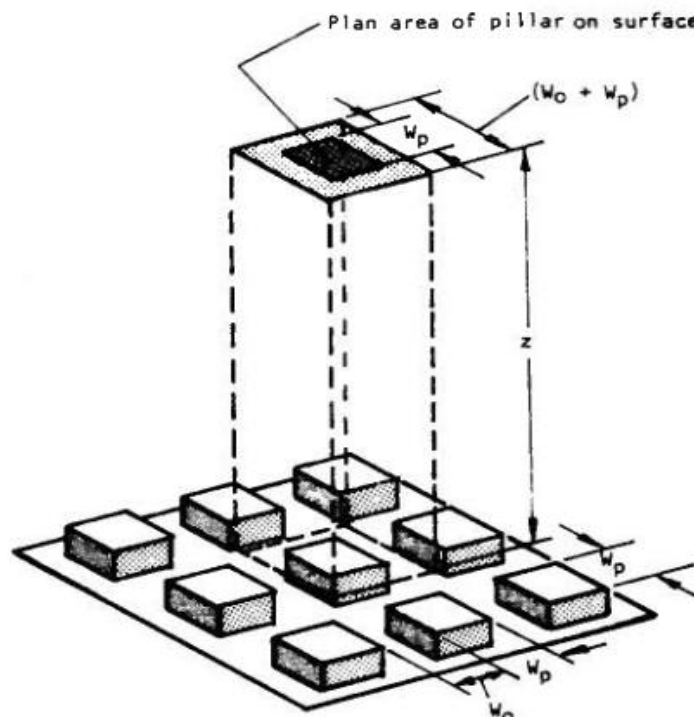


Σχήμα 1.3. Κάτοψη της διάταξης των θαλάμων και στύλων. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή αποτελεί τη συνεισφέρουσα επιφάνεια του στύλου.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου, είναι τα εξής :

- Χρειάζονται περιορισμένες πληροφορίες όσον αφορά το σχεδιασμό, όπως τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά των στύλων, το ύψος και το ειδικό βάρος των υπερκειμένων. Κάτι που την κάνει ιδιαίτερα εύχρηστη κατά τον αρχικό σχεδιασμό τέτοιων έργων.
- Προσφέρει πολύ γρήγορα τα αποτελέσματα της ανάλυσης, είναι πολύ απλή και σε περιπτώσεις ομοιόμορφων εκσκαφών δίνει αρκετά μεγάλη ακρίβεια.
- Υπολογίζεται η μέγιστη φόρτιση που μπορεί να εφαρμοστεί στους στύλους, οπότε δίνει τα πιο συντηρητικά και ασφαλή αποτελέσματα.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου καταγράφεται το γεγονός ότι αφορά κυρίως στη φόρτιση λόγω των κατακόρυφων τάσεων, υποθέτοντας ότι οι άλλες συνιστώσες του πεδίου των τάσεων δεν έχουν καμία επίδραση στη λειτουργία του στύλου. Επιπλέον, δεν μπορεί να δώσει ακριβή αποτελέσματα σε περιπτώσεις μη ομοιόμορφης κατανομής στύλων καθώς και σε περιπτώσεις αυξημένων πλευρικών τάσεων. Τέλος, πολλές φορές μπορεί να είναι υπέρ του δέοντος συντηρητική διότι θεωρεί ότι ο στύλος φορτίζεται από το παραλληλεπίπεδο που ορίζεται από την συνεισφέρουσα επιφάνεια με ύψος που φθάνει μέχρι την επιφάνεια.



Σχήμα 1.4. Παραλληλεπίπεδο που φορτίζει τον στύλο, σύμφωνα με την θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας (Hoek and Brown, 1980).

Η μαθηματική προσέγγιση της θεωρίας της συνεισφέρουσας επιφάνειας δίνεται ακολούθως (Σχέση 1.4). Αν A_R , η επιφάνεια που αντιστοιχεί σε κάθε στύλο (γραμμοσκιασμένο τμήμα) και A_p η επιφάνεια του στύλου, τότε το άθροισμα των δυο παραπάνω επιφανειών (A_t) είναι:

$$A_t = A_R + A_p \quad (1.4)$$

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

$$\sigma_p = f(h, W_p, W_R) \quad (1.5)$$

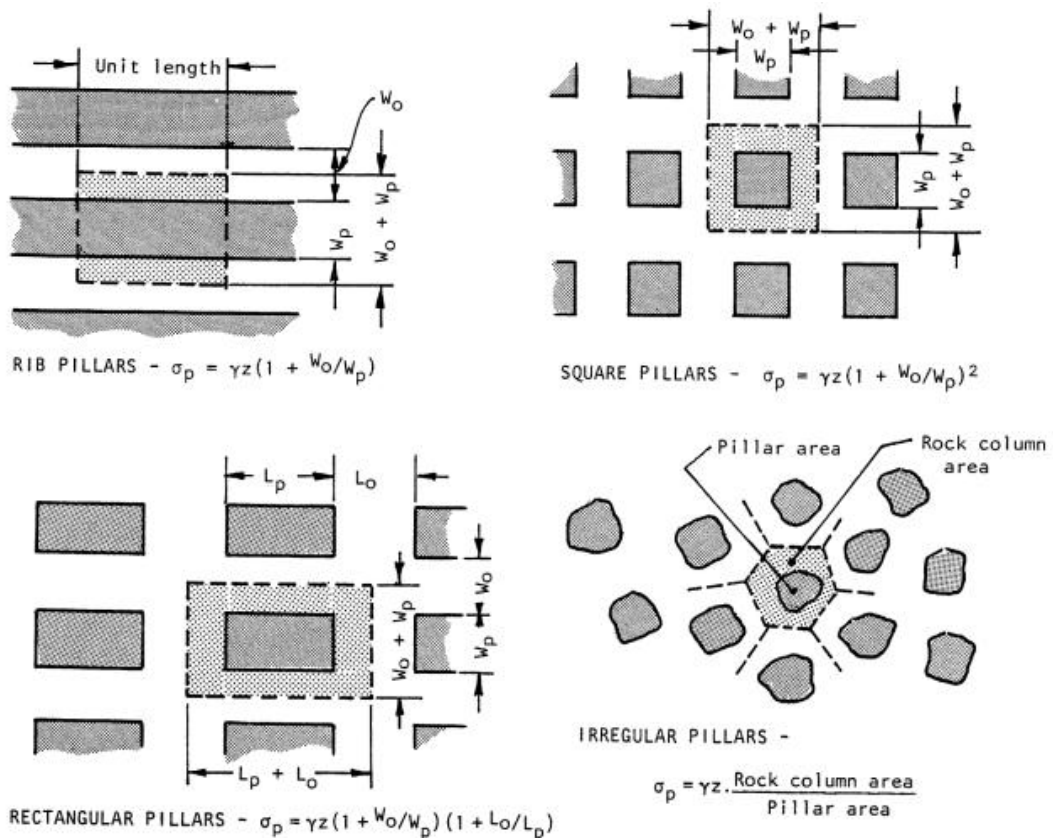
όπου,

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

Γενικά, η διάταξη των στύλων μπορεί να ακολουθεί κάποιο συγκεκριμένο κάρναβο, έτσι ώστε τα κέντρα τους να απέχουν συγκεκριμένες αποστάσεις σε σχέση με τους γειτονικούς στύλους (regular pattern) ή η κατανομή τους να είναι ακανόνιστη (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5. Εκτίμηση της μέσης ορθής τάσης που αναλαμβάνει ο στύλος για διάφορες διατάξεις (Hoek and Brown, 1980).

Στη πλέον συνηθισμένη διάταξη όπου οι στύλοι είναι τετραγωνικής διατομής, η μέση ορθή τάση που αναπτύσσεται σε αυτούς δίνεται από τη Σχέση 1.6. Αντίστοιχα, στις περιπτώσεις ορθογώνιων στύλων η τάση δίνεται από τη Σχέση 1.7.

$$\sigma_p = S_v \cdot \frac{A_t}{A_p} \Rightarrow \sigma_p = \gamma \cdot h \cdot \frac{(W_R + W_P)^2}{W_P^2} \Rightarrow \sigma_p = \gamma \cdot h \cdot \left(1 + \frac{W_R}{W_P}\right)^2 \quad (1.6)$$

$$\sigma_p = \gamma \cdot h \cdot \left(1 + \frac{W_R}{W_P}\right) \cdot \left(1 + \frac{L_R}{L_P}\right) \quad (1.7)$$

όπου,

L_p : το μήκος του στύλου

L_R : το μήκος του θαλάμου μεταξύ δύο διαδοχικών στύλων

Ο συντελεστής απόληψης (R) εκφράζεται, σε σχέση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης των θαλάμων και των στύλων, σύμφωνα με τη Σχέση 1.8.

$$R = \frac{A_R}{A_t} = \frac{A_R}{(A_R + A_P)} \quad (1.8)$$

Στην περίπτωση τετραγωνικών στύλων, ο συντελεστής απόληψης δίνεται από τη παρακάτω σχέση (Σχέση 1.9).

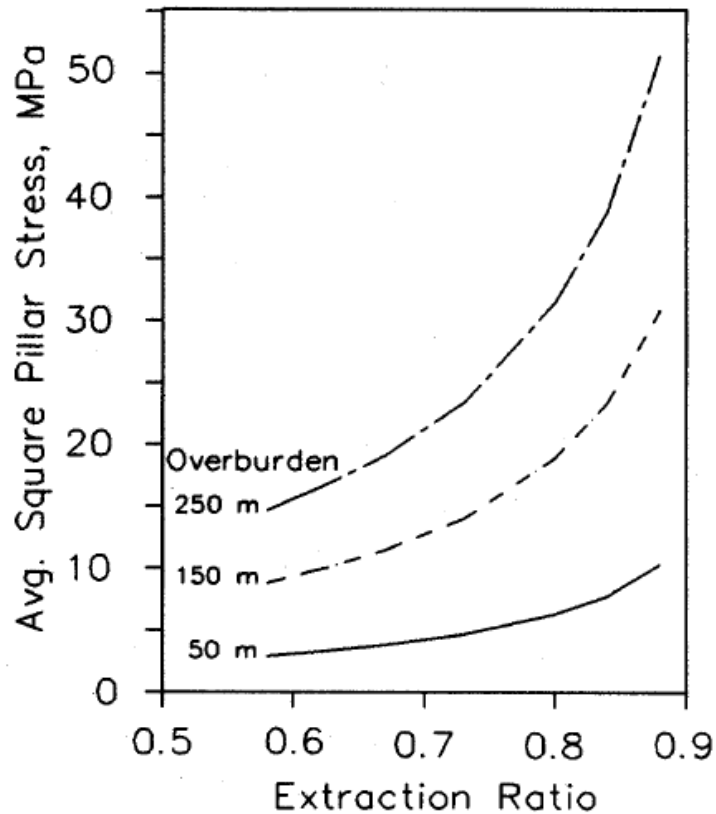
$$R = 1 - \left[\frac{W_P}{(W_R + W_P)} \right]^2 \quad (1.9)$$

Αντίστοιχα, οι σχέσεις υπολογισμού της μέσης ορθής τάσης μπορούν να εκφραστούν και με τη χρήση του συντελεστή απόληψης (R). Κατά συνέπεια, η Σχέση 1.6 μπορεί να μετατραπεί ως εξής:

$$\sigma_p = \gamma \cdot h \cdot \left[\frac{1}{(1-R)} \right] \quad (1.10)$$

Γίνεται άμεσα αντιληπτό από την Σχέση 1.10, ότι μεταβολή του συντελεστή απόληψης (R) ή του ύψους των υπερκειμένων (h) συνεπάγεται μεταβολή της μέσης τάσης του στύλου. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 1.6, η αύξηση του ύψους των υπερκειμένων και του

συντελεστή απόληψης προκαλούν μια σημαντική αύξηση της μέσης τάσης που δέχεται ο στύλος.



Σχήμα 1.6. Επίδραση του συντελεστή απόληψης και του ύψους υπερκειμένων στην μέση ορθή τάση που ασκείται στο στύλο.

Από το Σχήμα 1.6 συμπεραίνεται ότι, μεταβολές στο ύψος των υπερκειμένων προκαλούν μια παράλληλη μεταβολή της μέσης τάσης στο στύλο για συγκεκριμένη τιμή συντελεστή απόληψης. Ομοίως, η αύξηση του συντελεστή απόληψης προκαλεί εκθετική αύξηση της μέσης τάσης στο στύλο για συγκεκριμένο βάθος υπερκειμένων. Συνεπώς, αυτό εξηγεί γιατί συντελεστές απόληψης μεγαλύτεροι από 75%-80% είναι δύσκολο να επιτευχθούν στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται αποκλειστικά μέθοδος φυσικής υποστήριξης με στύλους σε συνήθη βάθη εκσκαφής. Τέλος, μεταβολές του συντελεστή απόληψης μικρότερες από 75%, παρουσιάζουν μικρή επίδραση στην μέση ορθή τάση που ασκείται στον στύλο.

1.4.3. Εκτίμηση της αντοχής των στύλων

Για τον υπολογισμό της αντοχής του στύλου σε θλίψη (C_p) έχουν διατυπωθεί αρκετές εμπειρικές σχέσεις. Μετρώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των στύλων, την αντοχή δοκιμίων πετρώματος και το τασικό πεδίο που ασκούνται σε αυτούς, γίνεται προσπάθεια εύρεσης μιας μαθηματικής έκφρασης με σκοπό τον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής του στύλου.

Έχουν πραγματοποιηθεί λεπτομερείς μετρήσεις για την συμπεριφορά των στύλων, και την ανάλυση της φέρουσας ικανότητάς τους, από πολλούς ερευνητές (Lunder & Pakalnis, 1994). Οι εμπειρικές αυτές σχέσεις προέρχονται κυρίως από υπόγεια ανθρακωρυχεία, ενώ η εκτίμηση της αντοχής των στύλων εντός σκληρών σχηματισμών δεν έχει τύχει ανάλογης προσοχής. Το γεγονός αυτό, σύμφωνα με τους Martin και Maybee (2000), οφείλεται στο ότι ελάχιστα ορυχεία εντός σκληρών πετρωμάτων αναπτύσσονται σε βάθη τέτοια που να μπορεί να προκληθεί αστοχία των στύλων και επιπλέον η διάταξη των στύλων στα περισσότερα από αυτά είναι ακανόνιστη με αποτέλεσμα να μη μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια το φορτίο του κάθε στύλου. Όμως, οι σχέσεις της αντοχής των στύλων έχουν πλέον εμπλουτιστεί και από περιπτώσεις εκμεταλλεύσεων σε σκληρά πετρώματα (hard rock mining).

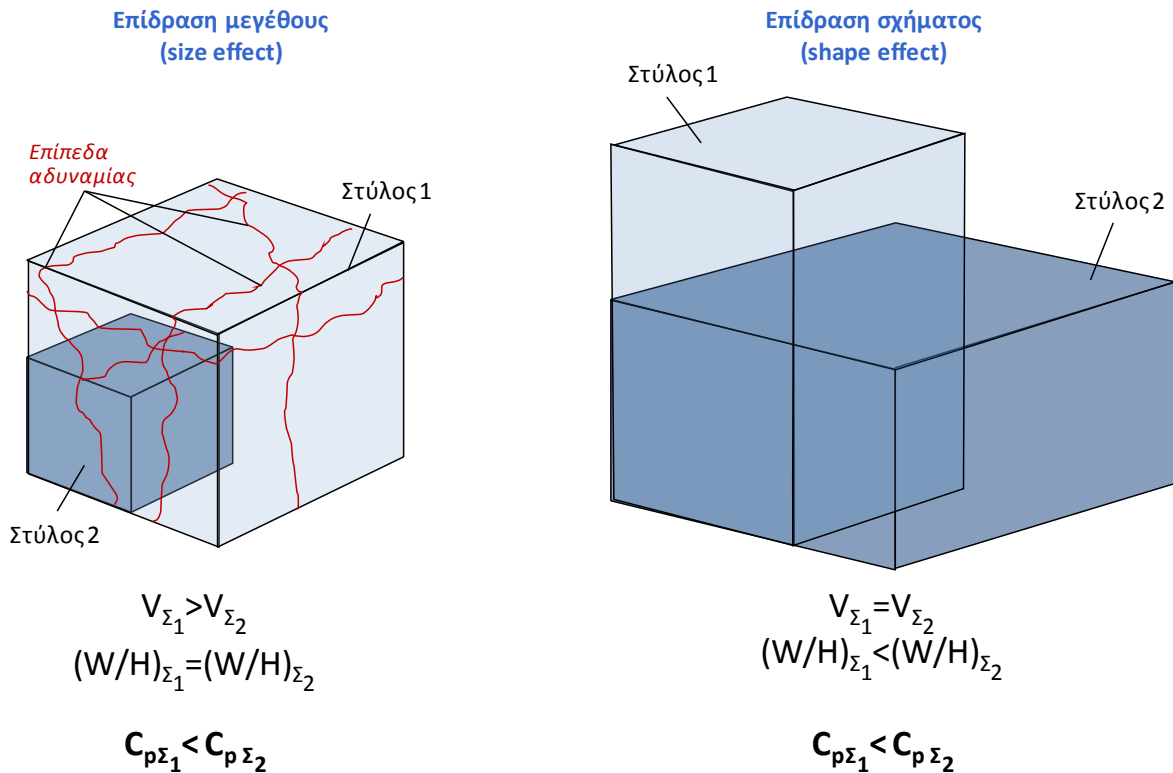
Η αντοχή του στύλου (C_p) είναι συνάρτηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του πετρώματος και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του στύλου. Οι εμπειρικές σχέσεις που έχουν διατυπωθεί, διακρίνονται σε δύο βασικές μορφές, στις εκθετικές (Σχέση 1.11) και στις γραμμικές (Σχέση 1.12) σχέσεις:

$$C_p = K \cdot \frac{W_p^\alpha}{H_p^\beta} \quad (1.11)$$

$$C_p = K \cdot \left(a + b \frac{W_p}{H_p} \right) \quad (1.12)$$

Ο συντελεστής K (ή C_1), εκφράζει την αντοχή του πετρώματος στην κλίμακα του στύλου. Πρόκειται για συντελεστή ο οποίος λαμβάνει υπ' όψη του την επίδραση της κλίμακας (scale effect) στην αντοχή του στύλου (Σχήμα 1.7). Συνήθως η τιμή του λαμβάνεται από δοκιμές σε αντιπροσωπευτικά κυβικά δοκίμια του πετρώματος (δοκίμια με $d/h=1$).

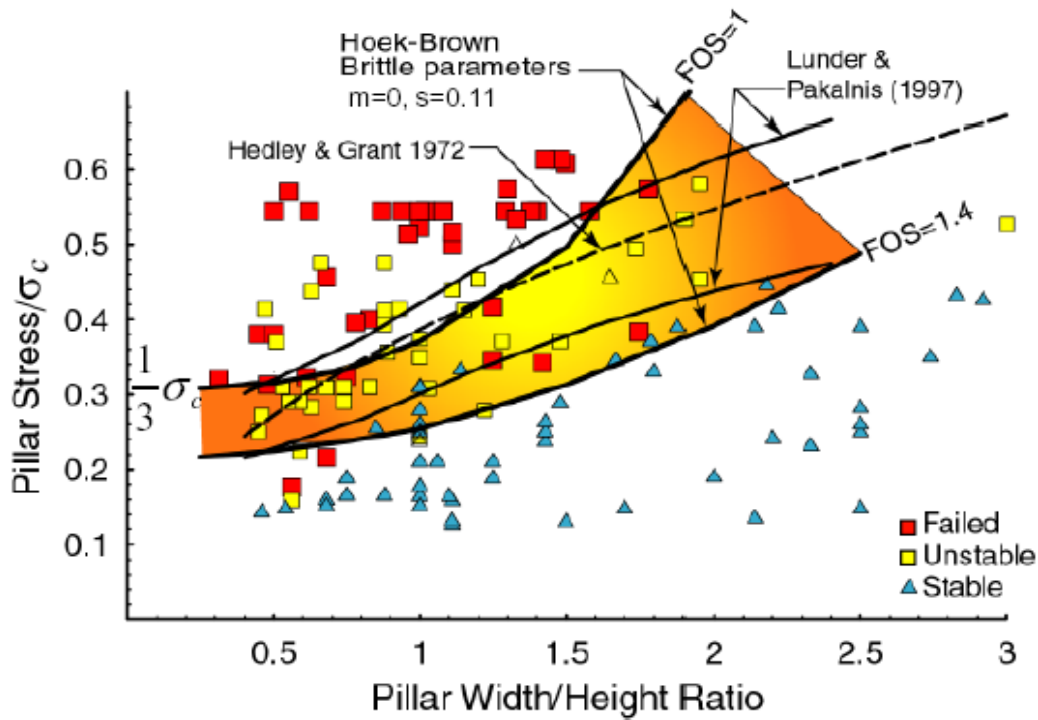
Τα δείγματα των εργαστηριακών δοκιμών συνήθως υπερεκτιμούν την αντοχή αφού αναφέρονται κυρίως σε άρρηκτο πέτρωμα, ενώ στο εσωτερικό του στύλου είναι δυνατό να υπάρχουν ασυνέχειες ή διακλάσεις που δεν λαμβάνονται υπόψη. Γι' αυτό τον λόγο, εφαρμόζεται ένας συντελεστής απομείωσης της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}), ο οποίος μπορεί να κυμαίνεται από 1/3 έως 2/3 (Ozbay et al., 1995, Iannacchione, 1999).



*Σχήμα 1.7.α,β. Επίδραση του μεγέθους και του σχήματος στην τελική αντοχή του στύλου
(Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010).*

Στις εξισώσεις αντοχής ο λόγος W_p/H_p αλλά και οι εμπειρικοί συντελεστές α , β , και a , b εκτιμούν την επίδραση του σχήματος του στύλου στην αντοχή του. Ο λόγος W_p/H_p συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0,5 και 4. Για μόνιμου χαρακτήρα έργα συνήθως επιλέγεται να παίρνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας ($W/H > 1$). Όταν ο λόγος W/H λαμβάνει τιμές μικρότερες του 0,8 τότε ουσιαστικά δεν υφίσταται πλευρικός περιορισμός προς τον πυρήνα του στύλου. Γι' αυτό το λόγο, οι λεπτοί στύλοι είναι πιο πιθανό να αστοχήσουν (Esterhuizer et al., 2008). Στο Σχήμα 1.8 παρουσιάζονται δεδομένα αστοχίας στύλων σε σχέση με τις τάσεις που αναπτύσσονται στο στύλο και το λόγο πλάτους / ύψους (W_p/H_p),

όπως επίσης και η γραφική απεικόνιση κριτηρίων αστοχίας όπως δίνονται από διάφορους ερευνητές.



Σχήμα 1.8. Εμπειρικά δεδομένα σχετικά με την αστοχία στύλων σε σχέση με τις πιέσεις στο στύλο και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του (Martin and Maybee, 2002).

Στη συνέχεια δίδονται οι κυριότερες εμπειρικές σχέσεις που έχουν διατυπωθεί.

Οι Holland & Gaddy (1957), για τον υπολογισμό της αντοχής των στύλων, πρότειναν την ακόλουθη σχέση :

$$C_p = C_1 \cdot \frac{\sqrt{W_p}}{H_p} \quad (1.13)$$

όπου,

C_p : η αντοχή του στύλου σε θλίψη (MPa).

C_1 : η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίου του πετρώματος από το οποίο αποτελείται ο στύλος, με λόγο $d/h = 1$ (MPa).

Ο συντελεστής ασφαλείας (SF) για τον συγκεκριμένο τύπο προτείνεται μεταξύ 1,8 και 2,2.

Οι Salamon & Munro (1967) μελετώντας 125 περιπτώσεις αστοχίας στύλων, πρότειναν την παρακάτω σχέση :

$$C_p = C_1 \cdot \left(\frac{W_p^{0,46}}{H_p^{0,66}} \right) \quad (1.14)$$

Στη συγκεκριμένη σχέση, ο συντελεστής ασφαλείας (SF) κυμαίνεται μεταξύ 1,6 και 1,8.

Bieniawski (1967):

$$C_p = C_1 \cdot \left(0,64 + 0,36 \frac{W_p}{H_p} \right) \quad (1.15)$$

Ο συντελεστής ασφαλείας (SF) για την συγκεκριμένη σχέση κυμαίνεται μεταξύ 2 και 4.

Obert & Duvall (1967):

$$C_p = C_1 \cdot \left(0,778 + 0,222 \frac{W_p}{H_p} \right) \quad (1.16)$$

Ο συντελεστής ασφαλείας για την συγκεκριμένη σχέση κυμαίνεται μεταξύ 2 και 4.

Hedley & Grant, (1972):

$$C_p = C_1 \cdot \left(\frac{W_p^{0,5}}{H_p^{0,75}} \right) \quad (1.17)$$

Η μέση τιμή του προτεινόμενου συντελεστή ασφαλείας (SF) για το συγκεκριμένο τύπο είναι 1,6.

Οι κυριότερες εμπειρικές σχέσεις αντοχής στύλων για σκληρά πετρώματα, οι οποίες βασίζονται βέβαια στις προαναφερθείσες γενικές σχέσεις, παρουσιάζονται παρακάτω:

Esterhuizen et al. (2008):

$$C_p = 0,65 \cdot UCS \cdot \frac{W_p^{0,3}}{H_p^{0,59}} \quad (1.18)$$

Lunder & Pakalnis (1997):

$$C_p = 0,44 \cdot UCS \cdot (0,68 + 0,52\kappa) \quad (1.19)$$

όπου, UCS: η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος.

κ: συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την επίδραση της πλευρικής πίεσης σ_3 .

Σχεδιασμός υπόγειων χώρων με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1.1), παρουσιάζονται συγκεντρωτικά πολλοί τύποι εκτίμησης της αντοχής των στύλων από διάφορους ερευνητές.

Πίνακας 1.1. Εμπειρικές σχέσεις αντοχής στύλων για σκληρά πετρώματα (Παπαγιαννόπουλος, 2010)

Ερευνητής	Αντοχή στύλου C_p (MPa)	Πέτρωμα ανάλυσης	Μέσο UCS (MPa)	Αριθμός στύλων	Προτεινό μενος SF
Obert & Duvall (1967)	$C_1 \cdot \left(0,778 + 0,222 \frac{W_p}{H_p} \right)$	Σκληρά πετρώματα			2 - 4
Bieniawski (1968)	$C_1 \cdot \left(0,64 + 0,36 \cdot \frac{W_p}{H_p} \right)$	Μαλακά & σκληρά πετρώματα			
Hedley & Grant (1972)	$133 \cdot \left(\frac{W_p^{0,5}}{H_p^{0,75}} \right)$	Χαλαζίτης	230	28	1,6
Goodman et al. (1980)	$C_1 \cdot \left(0,875 + 0,25 \cdot \frac{W_p}{H_p} \right)$	Ασβεστόλιθος			1,5 - 2
Hardy & Agapito (1982)	$UCS \cdot \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^{0,118} \left[\frac{(W_p \cdot h_s)}{(w_s \cdot h_p)} \right]^{0,833}$	Πετρελαιοφόροι σχιστόλιθοι (West Colorado)			
Von Kimmelmann et al. (1984)	$65 \cdot \left(\frac{W_p^{0,46}}{H_p^{0,66}} \right)$	Μεταμορφωμέν α ιζηματογενή	94	57	
Krauland & Soder (1987)	$35,4 \cdot \left(0,778 + 0,222 \cdot \frac{W_p}{H_p} \right)$	Ασβεστόλιθος	100	287	
Potvin et al. (1989)	$0,42 \cdot UCS \cdot \left(\frac{W_p}{H_p} \right)$	Πετρώματα Καναδικής ασπίδας		47	
Sjoeberg (1992)	$74 \cdot \left(0,778 + 0,222 \cdot \frac{W_p}{H_p} \right)$	Ασβεστόλιθος	240	9	
Lunder & Pakalnis (1997)	$0,44 \cdot UCS \cdot (0,68 + 0,52\kappa)$ $\kappa = \tan \left[\cos^{-1} \left(\frac{1 - C_{pav}}{1 + C_{pav}} \right) \right]$ $C_{pav} = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} = 0,46 \left[\log \left(\frac{W}{H} + 0,75 \right) \right]^{1,4}$	Σκληρά πετρώματα		178	1,4
Golder Associates (2003)	$0,3478 \cdot UCS \cdot \left(\frac{W_p}{H_p} \right)^{0,75}$	Σκληρά πετρώματα			1,5 - 2
Esterhuizen et al. (2008)	$0,65 \cdot UCS \cdot \frac{W_p^{0,3}}{H_p^{0,59}}$	Σκληρά πετρώματα			1,8

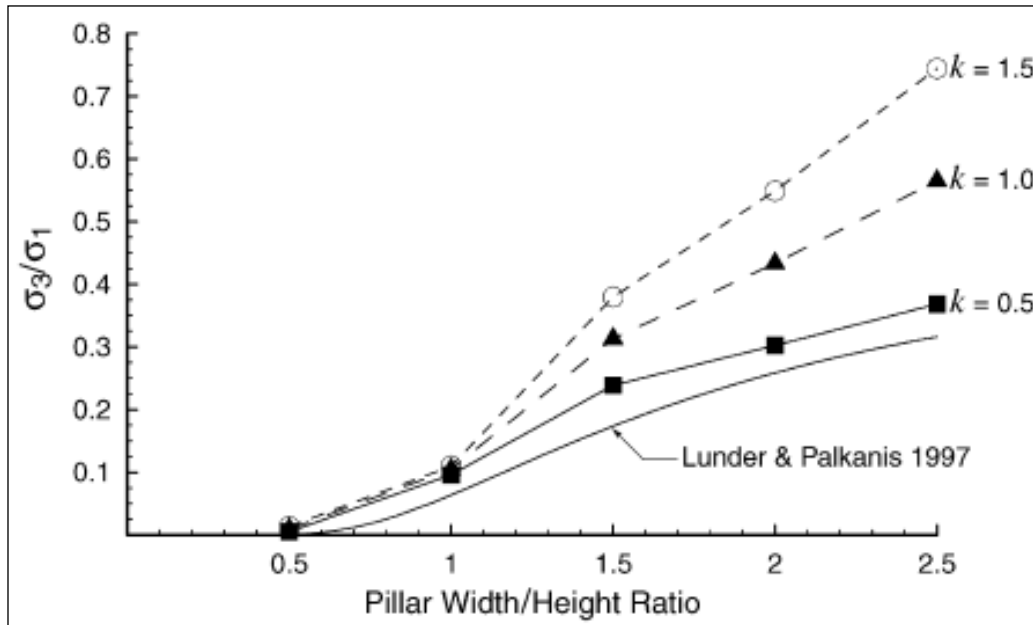
Αξίζει να σημειωθεί ότι, μόνο ο τύπος των Lunder and Pakalnis (1997), λαμβάνει υπόψη την επίδραση της πλευρικής πίεσης σ_3 . Όμως, παρά την προσπάθεια τους να συμπεριλάβουν την επίδραση της σ_3 μέσω της παραμέτρου κ (Σχήμα 1.9), η σχέση τους δίνει τιμές αντοχής παρόμοιες με αυτές των υπόλοιπων εμπειρικών σχέσεων (Martin and Maybee, 2002). 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 «κοντόχοντρους» στύλους με $W/H > 1,5 - 2$ οι εμπειρικές σχέσεις προβλέπουν αύξηση της αντοχής του στύλου, καθώς ο πυρήνας του βρίσκεται υπό καθεστώς τριαξονικής φόρτισης και συνεπώς συμπεριφέρεται καλύτερα στις ασκούμενες τάσεις. Κατά συνέπεια για στύλους με $W/H > 2$ συνήθως δεν παρουσιάζονται αστοχίες. Οι Lunder and Pakalnis (1997) εξέτασαν 178 περιπτώσεις στύλων σε σκληρά πετρώματα, παρατήρησαν ότι όλες οι αστοχίες παρουσιάστηκαν για λόγο $W/H < 2,5$. Η κύρια μορφή της αστοχίας είναι προοδευτική αποκόλληση πλακών από τα πλευρά του στύλου (slabbing) και θρυμματισμός της μάζας του στύλου (spalling), τα οποία οδηγούν σε μείωση των διαστάσεων του.

Η επίδραση της σ_3 ουσιαστικά αγνοείται από τις εμπειρικές σχέσεις, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Η ελαστική κατανομή των τάσεων σε στύλους είναι συνάρτηση της γεωμετρίας του στύλου. Αυτές οι κατανομές μπορούν άμεσα να καθοριστούν μέσα από αριθμητικά προγράμματα υπολογιστών. Οι Lunder and Pakalnis (1997) εξέτασαν την κατανομή των τάσεων σε στύλους σκληρού πετρώματος και πρότειναν ότι ο μέσος περιορισμός στον στύλο (C_{pav}) μπορεί να εκφραστεί ως ο λόγος σ_3/σ_1 . Τέλος, εξέφρασαν το λόγο αυτό ως συνάρτηση του πλάτους και του ύψους του στύλου, ως εξής :

$$C_{pav} = \frac{\sigma_3}{\sigma_1} = 0,46 \left[\log \left(\frac{W}{H} + 0,75 \right) \right]^{1,4} \quad (1.20)$$

Η τιμή της παραμέτρου κ , προκύπτει από την παρακάτω σχέση (Σχέση 1.21):

$$\kappa = \tan \left[\cos^{-1} \left(\frac{1 - C_{pav}}{1 + C_{pav}} \right) \right] \quad (1.21)$$



Σχήμα 1.9. Επίδραση του συντελεστή k στην αύξηση του περιορισμού στο κέντρο του στύλου (Lunder and Palkanis, 1997).

1.4.4. Κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown

Το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown είναι ένα εμπειρικό κριτήριο κυρίως για εκτίμηση της αντοχής της ρωγματωμένης βραχομάζας (Σχέση 1.22), το οποίο τυγχάνει ευρείας εφαρμογής και εξάγει αξιόπιστα αποτελέσματα. Οι Hoek & Brown (1980) πρότειναν μια μέθοδο που παρέχει εκτιμήσεις της αντοχής της ρωγματωμένης βραχομάζας, η οποία βασίζεται στον υπολογισμό της αλληλοεξάρτησης των όγκων πετρώματος και της κατάστασης των επιφανειών ανάμεσα στους όγκους. Επίσης, οι Hoek and Brown (1980) πρότειναν ακόμα ότι ο βαθμός κερματισμού και όγκος του στύλου μπορούν να ποσοτικοποιηθούν με τη χρήση ταξινομημένων παραμέτρων της βραχομάζας. Αυτή η ταξινόμηση, οδήγησε στις εμπειρικές παραμέτρους « m » και « s », οι οποίες χρησιμοποιούνται στη Σχέση 1.22 για να προσδιορίσουν την ποιότητα της βραχομάζας.

Το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown ορίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} \quad (1.22)$$

όπου,

σ_1 : η μέγιστη κύρια τάση στην κατάσταση αστοχίας (MPa).

σ_3 : η ελάχιστη κύρια τάση στην κατάσταση αστοχίας (MPa).

σ_c : η αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (MPa).

m, s : εμπειρικές σταθερές που χαρακτηρίζουν την ποιότητα της βραχομάζας.

Οι σταθερές m και s εκφράζουν τον βαθμό κερματισμού και αποσάρθρωσης της βραχομάζας και υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις :

$$m = m_i * \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (1.23)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (1.24)$$

όπου,

m_i : σταθερά του άρρηκτου πετρώματος.

D : παράγοντας που εξαρτάται από το βαθμό της διαταραχής που έχει υποστεί η βραχομάζα λόγω των εκρήξεων και της χαλάρωσης λόγω των τάσεων. Λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Για αδιατάραχτη βραχομάζα $D = 0$, ενώ για πολύ διαταραγμένη βραχομάζα $D = 1$.

Με σκοπό τον υπολογισμό της αντοχής των στύλων με τη βοήθεια του κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown, πρέπει να εκτιμηθούν τρεις ιδιότητες της βραχομάζας. Οι οποίες είναι οι εξής :

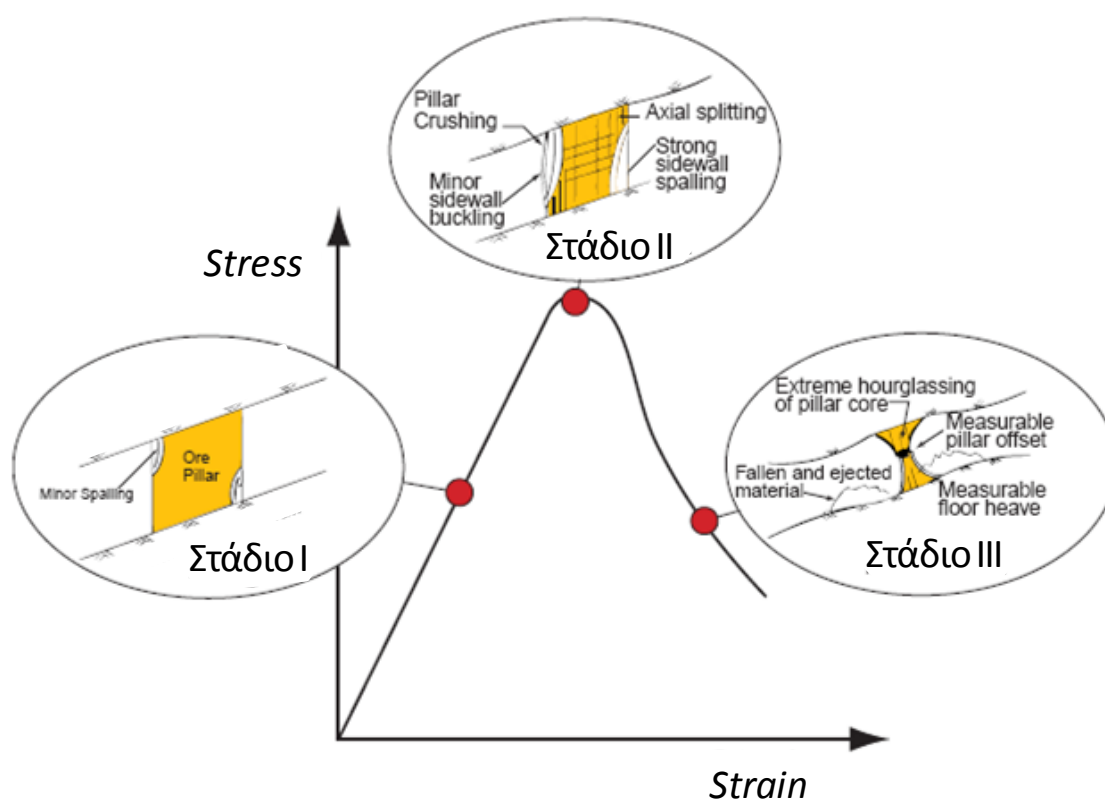
1. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη των δοκιμίων του πετρώματος (σ_c).
2. Η τιμή της σταθεράς « m_i » για άρρηκτα τεμάχια πετρώματος.
3. Η τιμή του GSI για την βραχομάζα.

1.5 Συμπεριφορά των 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 που ασκούνται είναι μικρότερες από την αντοχή του στύλου, ο στύλος παραμένει ουσιαστικά ανέπαφος και

συμπεριφέρεται ελαστικά στην αύξηση των τάσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.10 – Στάδιο I.

Το επίκεντρο της μελέτης βρίσκεται στο στάδιο που ξεπερνιέται η αντοχή του στύλου. Η αστοχία του στύλου τότε εκδηλώνεται με εκτεταμένες αποκολλήσεις τεμαχών από τις παρειές του (spalling, slabbing), με διεύρυνση και δημιουργία νέων ρωγματώσεων (Σχήμα 1.10. - Στάδιο II), διαμορφώνοντας έτσι το χαρακτηριστικό σχήμα κλεψύδρας του στύλου (hourglass-shaped pillar). Μετά το σημείο αστοχίας, ο στύλος δεν μπορεί να παραλάβει φορτίσεις και οι παραμορφώσεις του αυξάνονται κατά πολύ (Σχήμα 1.10. - Στάδιο III). Εκεί πλέον μπορεί να υπάρχει και η σημαντική απομείωση της διατομής του. Σημειώνεται όμως, ότι δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει πλήρης κατάρρευση του στύλου, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις κοντόχοντρων στύλων, όπως αναλύεται και στη συνέχεια.

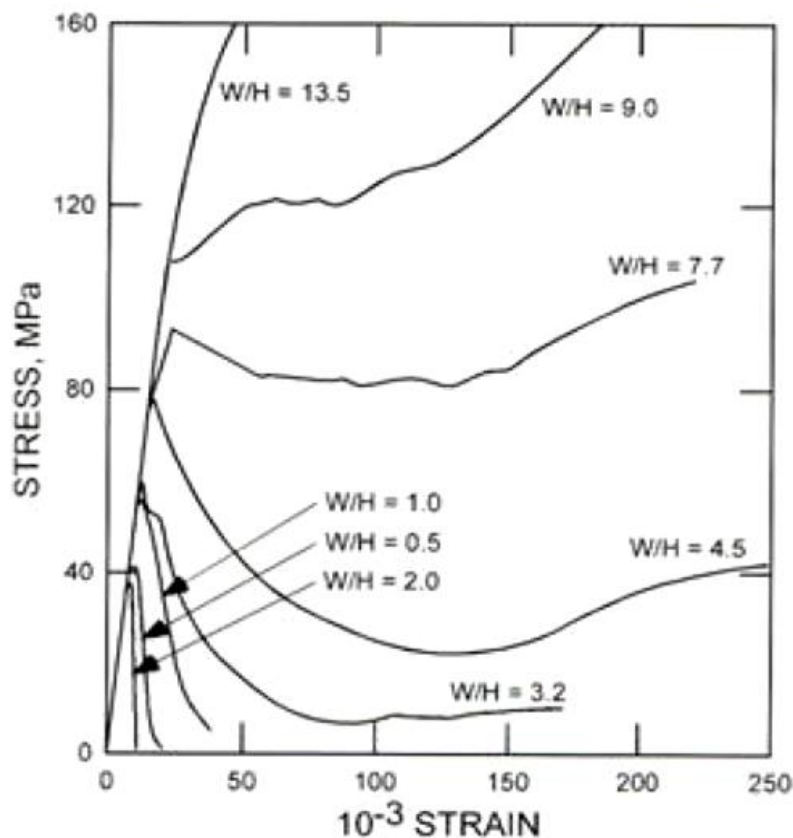


Σχήμα 1.10. Συμπεριφορά στύλου που υπόκειται σε φόρτιση (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010).

Πολλές φορές, παρά την αστοχία του, ο στύλος μπορεί να εμφανίσει μια παραμένουσα αντοχή (residual strength), αρκετά βέβαια μικρότερη της μέγιστης αντοχής του. Σύμφωνα με έρευνα που διεξήχθη από τον Bekendam (2004) η παραμένουσα αντοχή μπορεί να οριστεί ως η αντοχή των δοκιμίων που αντιστοιχεί σε τιμή παραμόρφωσης τριπλάσια

αυτής που υφίσταται κατά τη στιγμή της αστοχίας τους. Επίσης, σημειώνεται ότι οι λεπτοί στύλοι αστοχούσαν ραγδαία με τη διαρροή να αναπτύσσεται από τις παρειές προς το κέντρο τους. Καθώς οι στύλοι γίνονταν πιο χονδροί, ο αυξημένος οριζόντιος περιορισμός που προέκυπτε σαν αποτέλεσμα των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών, αύξανε σημαντικά την αντοχή τους.

Στο Σχήμα 1.11 καθίσταται εμφανής η εξάρτηση της συμπεριφοράς του στύλου από τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, όπως προαναφέρθηκε. Παρουσιάζονται καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης στύλων για διάφορες τιμές του λόγου πλάτους / ύψους (W/H) (Das, 1986). Όπως παρατηρείται, τόσο η τιμή της αντοχής των στύλων όσο και η παραμένουσα αντοχή τους είναι ανάλογες της τιμής του λόγου W/H. Σε περιπτώσεις στύλων με λόγο W/H μικρότερο του 2, οι στύλοι δεν φαίνεται να παρουσιάζουν αξιοσημείωτη τιμή παραμένουσας αντοχής, ενώ αντίθετα με την αύξηση του λόγου W/H η αντοχή των στύλων αλλά και η παραμένουσα αντοχή τους αυξάνεται σημαντικά. Ιδιαίτερα σε περιπτώσεις κοντόχοντρων στύλων (squat pillars) με τιμές $W/H \geq 5$, πέρα από την σημαντική αύξηση της αντοχής τους, ουσιαστικά μπορεί να θεωρηθεί ότι πρακτικά ο στύλος δεν μπορεί να αστοχήσει (Ozbay et al., 1995).



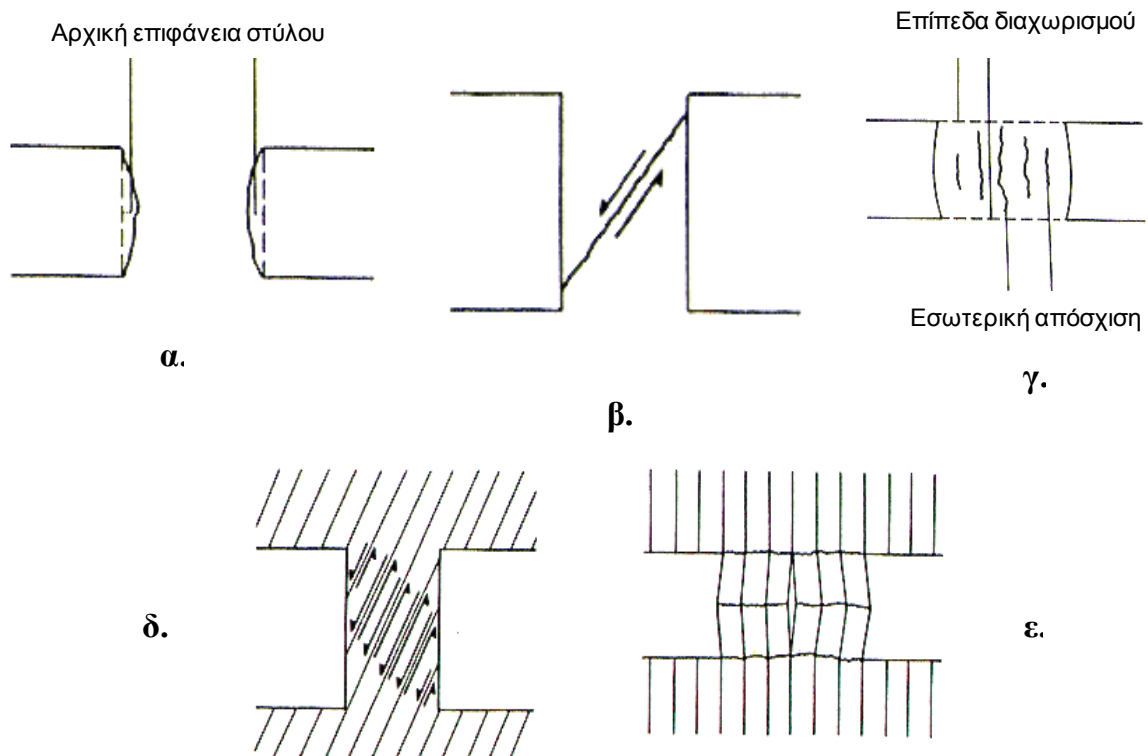
Σχήμα 1.11. Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης στύλων για διάφορες τιμές του λόγου W/H (Das, 1986).

1.5.1 Τρόποι αστοχίας στύλων

Οι συνήθεις τρόποι αστοχίας των στύλων δίνονται στο Σχήμα 1.12 (Brady and Brown, 2004). Σε συμπαγές πέτρωμα, ο κύριος τρόπος διάρρηξης του στύλου περιλαμβάνει απολέπιση των παρειών (spalling) και απόσχιση πετρώματος πλευρικά (Σχήμα 1.12.α), οδηγώντας σε φθορά του στύλου και δημιουργία λαιμού. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται προοδευτικά η ενεργός διατομή του στύλου, που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της κατακόρυφου τάσεως που ασκείται σε αυτόν και που σταδιακά μπορεί να οδηγήσει στην αστοχία του.

Στο Σχήμα 1.12.β, παρατηρείται η αστοχία του στύλου σε διάτμηση λόγω ύπαρξης επίπεδου αδυναμίας στη μάζα του. Στην περίπτωση αυτή η διατμητική αντοχή της ασυνέχειας ορίζει και την τελική αντοχή του στύλου. Η επίδραση των σχετικών διαστάσεων ενός στύλου μπορεί να οδηγήσει σε τέτοιου τύπου αστοχίες. Σε διάτμηση είναι δυνατόν να αστοχήσει ο στύλος και όταν δεν υπάρχει επίπεδο ασυνέχειας, εφόσον ικανοποιείται το σχετικό κριτήριο αστοχίας.

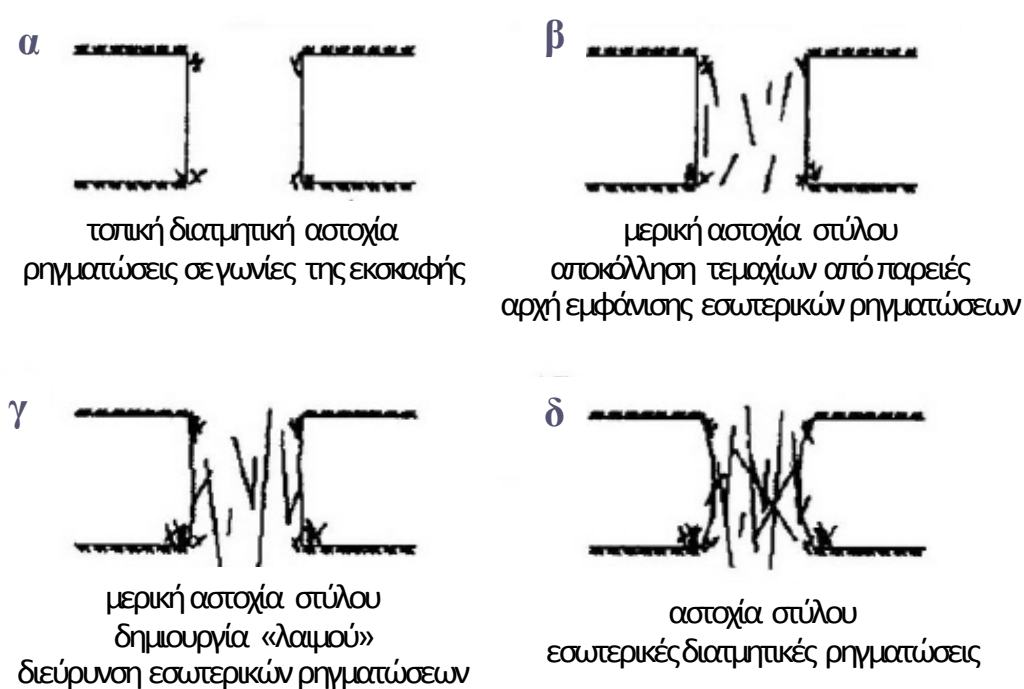
Ο τρίτος τρόπος αστοχίας του στύλου εμφανίζεται σε πετρώματα με ισχυρά παραμορφώσιμα επίπεδα αδυναμίας (Σχήμα 1.12.γ). Ο συγκεκριμένος τρόπος αστοχίας παρατηρείται στο στύλο με την έντονη πλευρική διόγκωσή του υπό τη μορφή βαρελιού.



Σχήμα 1.12. Συνήθεις τρόποι αστοχίας στύλων.

Στα Σχήματα 1.12.δ και 1.12.ε παρατηρείται επίδραση της γεωλογικής δομής του στύλου στην συμπεριφορά και στην αστοχία του. Η ύπαρξη οικογένειας επιπέδων αδυναμίας (διακλάσεις – ασυνέχειες – στρώση) οδηγεί στην αστοχία του στύλου σε διάτμηση, στην πρώτη περίπτωση (Σχήμα 1.12.δ). Τέλος, στο Σχήμα 1.12.ε παρατηρείται αστοχία στύλου υπό τη μορφή λυγισμού.

Ειδικότερα για την αστοχία που αφορά στη σταδιακή μείωση της αντοχής στύλου εντός συμπαγούς πετρώματος (Σχήμα 1.12.α), δίνονται ορισμένες χαρακτηριστικές εικόνες της εξέλιξης της παραμόρφωσής του στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.13.).



Σχήμα 1.13. Απεικόνιση της εξέλιξης των ρωγματώσεων και της αστοχίας σε στύλο κατασκευασμένο εντός συμπαγούς σχηματισμού.

Τα αρχικά σημάδια της διάρρηξης μπορεί να έχουν τη μορφή τοπικής αστοχίας σε διάτμηση (Σχήμα 1.13.α). Η απολέπιση των επιφανειών του, δηλαδή η σταδιακή αποκόλληση τμημάτων των παρειών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.13.β γίνεται πιο εμφανής, ενδεικτική των υψηλών τάσεων, οι οποίες επιπλέον ευνοούν τις συνθήκες δημιουργίας ρωγματώσεων στο εξωτερικό τμήμα του στύλου. Σε αυτή την φάση ο στύλος έχει υποστεί μερική αστοχία αλλά ο πυρήνας του είναι ακόμη άθικτος και μπορεί να παραλαμβάνει τάσεις.

Η αύξηση των τάσεων οδηγεί στην επέκταση / διεύρυνση των εσωτερικών ρωγματώσεων – ασυνεχειών, καθώς και στην αλληλεπίδραση μεταξύ τους (Σχήμα 1.13.γ). Όταν κινητοποιηθεί πλήρως η τριβή μεταξύ των ρωγματώσεων που έχουν σχηματιστεί, ο στύλος βρίσκεται στην περιοχή της μέγιστης αντοχής του. Μετά από το σημείο αυτό ο στύλος αστοχεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.13.δ, όπου πλέον δημιουργούνται έντονες ρωγματώσεις, αποκολλήσεις τεμαχίων του στύλου και πιθανή τελικά λύση της συνέχειας του υλικού.

1.5.2. Επίδραση των ασυνεχειών στην ευστάθεια των στύλων

Η ευστάθεια των στύλων μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από την παρουσία προϋπαρχόντων ασυνεχειών σε αυτόν (geological discontinuities). Ο πιο κατάλληλος τρόπος να αναλυθεί η επίδραση των ασυνεχειών στην ευστάθεια των στύλων, είναι να αξιολογηθεί η συμπεριφορά των στύλων όταν πραγματοποιείται εξόρυξη με τη χρήση βαθμίδων, όπου το σχήμα των στύλων είναι γενικά λεπτό.

Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές αναλύσεις σε αριθμητικά μοντέλα (A.T. Iannachionne, 1999), με σκοπό να αξιολογηθεί η επίδραση των ασυνεχειών στην αντοχή των στύλων για περιπτώσεις σκληρών πετρωμάτων, οι οποίες έδειξαν ότι η αντοχή των στύλων λαμβάνει την χαμηλότερη τιμή της, όταν η κλίση των ασυνεχειών λαμβάνει την τιμή :

$$\beta_{\min} = 45^\circ + \frac{\Phi_d}{2} \quad (1.25)$$

όπου,

Φ_d : η γωνία εσωτερικής τριβής της ασυνέχειας.

Μία ακόμη μελέτη, που πραγματοποιήθηκε από τον Esterhuizen (1998) σε στύλους άνθρακα (coal pillars) με σκοπό να αξιολογηθεί η επίδραση της κλίσης των ασυνεχειών στην αντοχή των στύλων σε ανθρακωρυχεία, έδειξε ότι ασυνέχειες με κλίση από 45° έως 55° έχουν τις πιο σοβαρές επιπτώσεις στην αντοχή των στύλων. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του λόγου W/H, η επίδραση της κλίσης των ασυνεχειών στην αντοχή των στύλων είναι λιγότερο έντονη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι με την αύξηση του περιορισμού που ασκείται στον πυρήνα του στύλου, αυξάνεται και η αντοχή σε διάτμηση κατά μήκος των ασυνεχειών.



Εικόνα 1.2. Αστοχία στύλου εξαιτίας προϋπάρχουσας ασυνέχειας υπό γωνία 60° .

Μερικά βασικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν τη σημασία μιας γεωλογικής ασυνέχειας (geological discontinuities) για την αντοχή των στύλων, είναι τα εξής :

- *Η έκταση (μήκος) της ασυνέχειας.* Πρέπει να είναι της ίδιας κλίμακας με τον στύλο έτσι ώστε η αντοχή του να επηρεαστεί σημαντικά.
- *Η κλίση της ασυνέχειας.* Μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την αντοχή του στύλου.
- *Η απόσταση των ασυνεχειών.* Είναι πολύ σημαντική ώστε να καθοριστεί το ενδεχόμενο αστοχίας των στύλων σε μεγάλη έκταση εκμετάλλευσης.
- *Οι μηχανικές ιδιότητες των ασυνεχειών.* Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της μείωσης της αντοχής.
- *Διεύθυνση – Προσανατολισμός.* Αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό ιδιαίτερα όταν οι στύλοι είναι ορθογώνιοι. Η αντοχή των στύλων επηρεάζεται περισσότερο όταν η ασυνέχεια είναι ευθυγραμμισμένη με τον διαμήκη άξονα του στύλου.

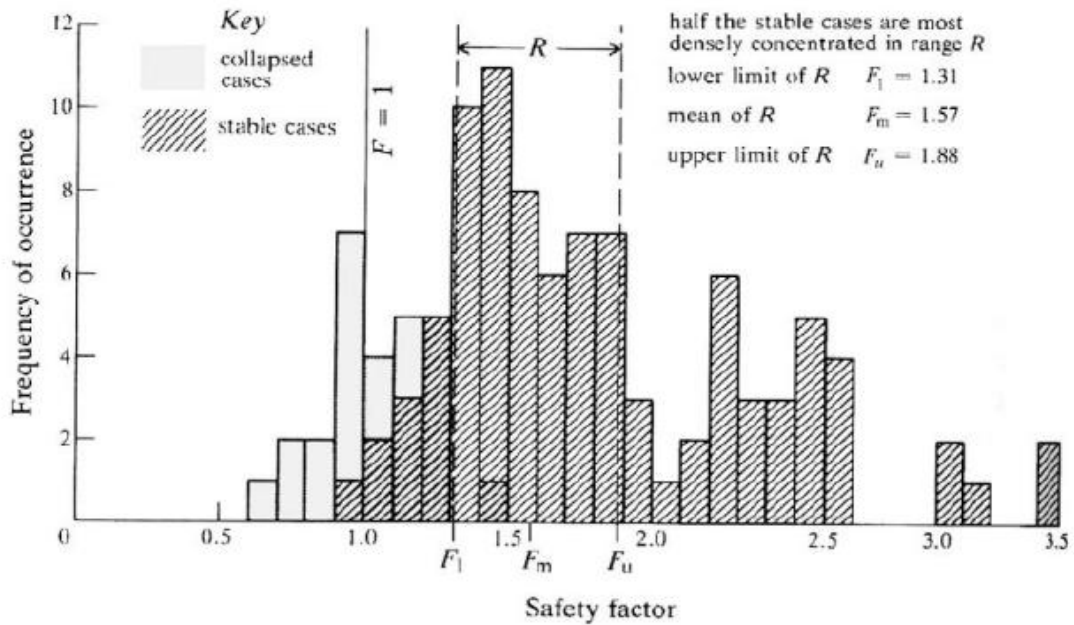
1.6. Συντελεστής Ασφαλείας στύλων

Υπάρχουν διάφορες απόψεις σχετικά με την αποδεκτή τιμή του συντελεστή ασφαλείας (SF), οι οποίες βασίζονται στη μονιμότητα και το χαρακτήρα του έργου και στην ακολουθούμενη μέθοδο εκτίμησης της αντοχής των στύλων (Μπενάρδος και Καλιαμπάκος, 2010).

Όσον αφορά τον χαρακτήρα του έργου, προφανώς δεν χρειάζεται να εξαντλούνται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σχεδιασμού ώστε να επιτυγχάνεται ο μικρότερος αποδεκτός συντελεστής ασφαλείας όπως στην μεταλλευτική εφαρμογή.

Σχετικά με την επιλεγθείσα μέθοδο εκτίμησης της αντοχής, για κάθε εμπειρικό κριτήριο προτείνεται και διαφορετικό εύρος συντελεστή ασφαλείας. Παρ' όλα αυτά, στις περισσότερες περιπτώσεις ο συντελεστής ασφαλείας των στύλων κυμαίνεται μεταξύ 1,5 και 4. Η διαφοροποίηση αυτή συμβαίνει γιατί ενώ υπολογίζονται διαφορετικές τιμές αντοχής στύλου, η ύπαρξη ή όχι αστοχίας είναι μοναδικά ορισμένη. Επομένως, έχοντας διαφορετικές τιμές αντοχής, η χρήση διαφορετικών συντελεστών ασφαλείας εξυπηρετεί στην επίτευξη μίας κοινής τελικής κατάστασης ευστάθειας ή αστοχίας.

Ακόμα όμως και για συγκεκριμένα εμπειρικά κριτήρια αντοχής στύλου, υπάρχει μια περιοχή μετάβασης από την αστοχία στην ευστάθεια, παρά μια διακριτή μοναδιαία τιμή. Έτσι για παράδειγμα στην περίπτωση του Salamon and Munro (1967), η τιμή του $FS > 1,6$ που προτείνεται αποτελεί μια στατιστική μέση τιμή των ευσταθών στύλων που αναλύθηκαν (Σχήμα 1.14).



Σχήμα 1.14. Απεικόνιση των ευσταθών και ασταθών στύλων σύμφωνα το κριτήριο των Salamon and Munro (1967).

Σύμφωνα με τον εμπειρικό τύπο που δίνεται από τον Esterhuizen et al. (2008) προτείνεται συντελεστής ασφαλείας να λαμβάνει τιμές πάνω από 1,8. Οι ίδιοι οι ερευνητές όμως, υποστηρίζουν ότι υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες οι στύλοι που αστόχησαν είχαν συντελεστή ασφαλείας που κυμαινόταν από 1,0 έως 4,0 με μέση τιμή 2,35.

Φαίνεται επομένως ότι όσο πιο αβέβαιες θα είναι οι συνθήκες και οι παράμετροι σχεδιασμού τόσο υψηλότερες θα πρέπει να είναι οι τιμές των αποδεκτών συντελεστών ασφαλείας. Έτσι, με δεδομένο ότι δεν υπάρχουν περιορισμοί στο ζήτημα της απόληψης του χώρου, προτείνεται για το σχεδιασμό των στύλων να λαμβάνονται τα υψηλότερα όρια των συντελεστών ασφαλείας ή να λαμβάνονται τιμές του συντελεστή, οι οποίες να έχουν προσαυξηθεί σημαντικά σε σχέση με αυτές που προτεινόταν αρχικά (Μπενάρδος και Καλιαμπάκος, 2010).

Κεφάλαιο 2.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΚΣΚΑΦΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Οι διαδικασίες επίλυσης των γεωμηχανικών προβλημάτων γενικά περιλαμβάνουν τις α) εμπειρικές, β) τις αναλυτικές και γ) τις αριθμητικές μεθόδους.

- Οι εμπειρικές λύσεις προϋποθέτουν την ύπαρξη μιας ικανής βάσεως εμπειρικών δεδομένων σχετικών με το πρόβλημα. Οι λύσεις αυτές, που βασίζονται κυρίως σε προϋπάρχουσες συσχετίσεις παρατηρηθέντων αιτίων και αποτελεσμάτων, αποτελούν συνήθως μία ευρεία αντιμετώπιση του προβλήματος της μελέτης της συμπεριφοράς ενός γεωλικού.
- Οι αναλυτικές επιλύσεις των προβλημάτων προϋποθέτουν την ύπαρξη αναλυτικής λύσης των διαφορικών ή των απλών εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα (καταστατικές εξισώσεις) για τις συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες.
- Με τον όρο αριθμητικές ή υπολογιστικές μέθοδοι νοείται η αριθμητική επίλυση των καταστατικών εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα, για τις ίδιες συνοριακές συνθήκες. Οποιαδήποτε διαδικασία κι αν ακολουθηθεί, αυτή συνήθως καταλήγει στην επίλυση γραμμικού συστήματος εξισώσεων, των οποίων το μέγεθος εξαρτάται από τη διαίρεση του αρχικού πεδίου και από τον επιθυμητό βαθμό ακρίβειας κατά την επίλυση του προβλήματος.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τις αριθμητικές μεθόδους ανάλυσης.

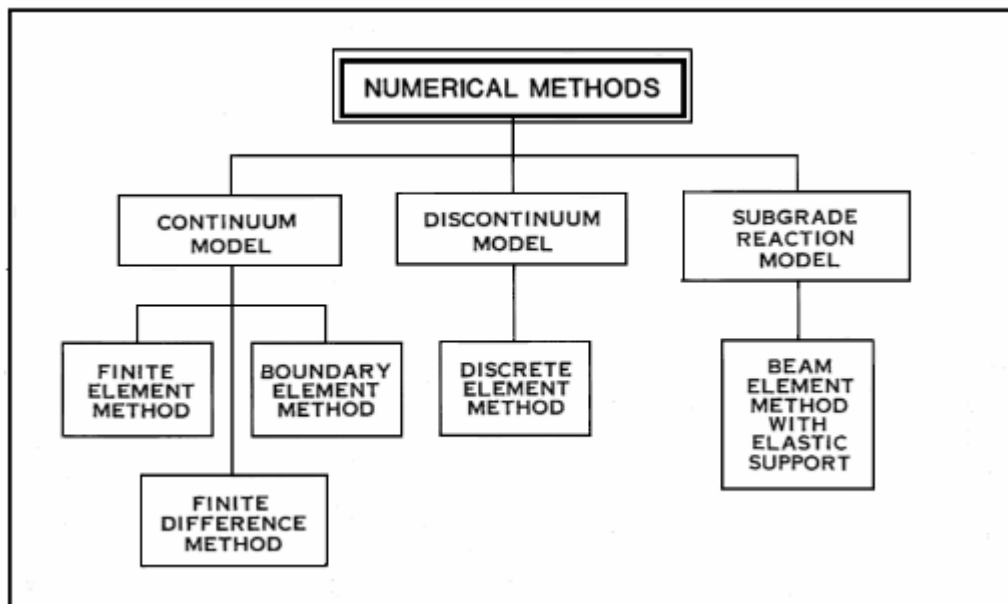
Η πλειοψηφία των αριθμητικών μεθόδων απαιτεί τη διαίρεση του μέσου σε επιμέρους τμήματα, έναστο από τα οποία θεωρείται ότι έχει γνωστή γεωμετρία, καθώς και γνωστές παραμέτρους συμπεριφοράς. Η λύση του προβλήματος προκύπτει από την επίλυση ενός γραμμικού ή μη γραμμικού συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων που συμμετέχουν όλα τα επιμέρους τμήματα του μέσου (Αγιουτάντης, 2002).

Με τις αριθμητικές μπορούν να αναλυθούν προβλήματα που με άλλες μεθόδους δεν είναι εύκολο ή πολλές φορές εφικτό (Gioda & Swoboda, 1999). Η χρήση των μεθόδων αυτών μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο για το μηχανικό αφενός μεν κατά τη φάση του σχεδιασμού, αφετέρου δε κατά τη φάση της εκτελέσεως ενός έργου. Ένας λόγος είναι ότι οι κλασσικές μέθοδοι είχαν περιορισμένη ικανότητα στο να προσδιορίσουν την ανάπτυξη της διατάραξης της υπό μελέτη περιοχής η οποία είχε σημαντική επίδραση στην τελική αντοχή του εδάφους. Για αυτό το λόγο σχεδιάστηκαν διαδικασίες

αριθμητικών μεθόδων (πεπερασμένων στοιχείων), οι οποίες προσομοιάζουν την επιφάνεια αστοχίας σε ελαστοπλαστικά υλικά (Beer & Booker & Carter, 1992).

Μερικές από τις αριθμητικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής (Αγιουτάντης, 2002), όπως φαίνονται στην Εικόνα 2.1:

- Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method).
- Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method).
- Μέθοδος των συνιοριακών στοιχείων (boundary element method).
- Μέθοδος των διακριτών ή διακεκριμένων στοιχείων (distinct element method).
- Υβριδικές μέθοδοι (hybrid methods), οι οποίες συνδυάζουν χαρακτηριστικά από δύο ή περισσότερες μεθόδους.



Εικόνα 2.1. Παρουσίαση των αριθμητικών μεθόδων (Gnilsen, 1989).

Στη συνέχεια αναλύεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στην οποία βασίζεται η λειτουργία του λογισμικού πακέτου Midas GTS, το οποίο χρησιμοποιείται για την επίλυση των προβλημάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2.2 Γενικά στοιχεία της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method, FEM), γνωστή και ως ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (finite element analysis, FEA), είναι μια αριθμητική μέθοδος (δηλ. μέθοδος υπολογισμού με χρήση Η/Υ) η οποία βρίσκει προσεγγιστικές λύσεις μέσω μερικών διαφορικών εξισώσεων για την επίλυση των προβλημάτων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων. Η αρχική διατύπωση της μεθόδου έγινε με βάση την μητρωϊκή ανάλυση, αργότερα όμως δόθηκε ευρύτερη και πιο θεμελιώδης θεωρητική βάση. Η εξέλιξη αυτή επιτεύχθηκε από διάφορους σπουδαίους επιστήμονες όπως ο Ιωάννης Αργύρης (1959), ο Clough (1956), ο Courant (1943) και άλλους.

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονταν τα διάφορα τεχνικά προβλήματα ήταν δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι τάσεις και τα γεωμετρικά σχήματα ήταν πάρα πολύ απλά. Όμως, σύμφωνα με τους Gioda & Swoboda (1999), υπήρχε η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι. Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα, έχει, έτσι, το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα (Zienkiewicz and Cheung, 1964).

Πράγματι, πεδίο της ανάλυσης της μεθόδου μπορεί να αποτελέσει όχι μόνο το (συμβατικό) ελαστικό πεδίο (θεωρία μικρών μετατοπίσεων) αλλά και τα μη-γραμμικά προβλήματα, όπως ο λυγισμός, η δυναμική συμπεριφορά και άλλα. Η μέθοδος χρησιμοποιείται γενικότερα σε προβλήματα που επιδέχονται μεταβολική διατύπωση στην μηχανική των συνεχών μέσων.

Χαρακτηριστικό της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί η χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων για την προσομοίωση συνεχών μέσων. Κατά συνέπεια, έχουν δημιουργηθεί πληθώρα εμπορικών προγραμμάτων γενικής χρήσης τα οποία αναλύουν τα μοντέλα με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων, όπως για παράδειγμα το ANSYS, το Midas, το Abaqus και άλλα. Ακόμα, έχουν δημιουργηθεί εξειδικευμένα προγράμματα που αφορούν αποκλειστικά γεωτεχνικά προβλήματα όπως είναι το PLAXIS, το FLAC, το Midas GTS, το Phase και άλλα.

Η εφαρμογή της ΜΠΣ σε προβλήματα ελαστικότητας (ή γενικότερα παραμόρφωσης υλικών) σε δύο ή τρεις διαστάσεις περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (Desai, 1979):

- Διαίρεση του πεδίου, το οποίο εξετάζεται σε κατάλληλα στοιχεία. Η διαίρεση πεδίων με ακανόνιστη γεωμετρία γίνεται προσεγγιστικά με μικρά ευθύγραμμα τμήματα.
- Επιλογή των κατάλληλων συναρτήσεων για την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών σε κάθε στοιχείο.
- Προσδιορισμό των συναρτήσεων που συνδέουν την ανηγμένη παραμόρφωση με την μετατόπιση (strain-displacement) και των συναρτήσεων που συνδέουν την τάση με την ανηγμένη παραμόρφωση (stress-strain) , ώστε να συνδεθεί το αίτιο (τάση, δύναμη) με το αποτέλεσμα (μετατόπιση) που αποτελεί και το άγνωστο μέγεθος.
- Κατασκευή των καταστατικών (θεμελιωδών) εξισώσεων για κάθε στοιχείο (element equation).
- Υπέρθωση (άθροιση κατά κόμβο) των εξισώσεων των στοιχείων για τον προσδιορισμό του τελικού συστήματος και εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών.
- Υπολογισμό της εντατικής κατάστασης κάθε στοιχείου ως συνάρτηση των μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου.
- Υπολογισμό των δευτερογενών μεγεθών που προκύπτουν από την επίλυση (ανηγμένες παραμορφώσεις, τάσεις κ.λ.π.)
- Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Τα στάδια αυτά αναφέρονται στα περισσότερα προβλήματα που αντιμετωπίζονται από τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων.

2.3 Βασικές έννοιες της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

Τα βασικά χαρακτηριστικά επίλυσης με την ΜΠΣ είναι τα εξής:

- Η ΜΠΣ αποτελεί μία μέθοδο επίλυσης διαφορικών εξισώσεων σε συγκεκριμένο πεδίο ορισμού και με συγκεκριμένους περιορισμούς.
- Το πεδίο ορισμού των εξισώσεων αυτών απαιτεί κυρίως συνεχή μέσα. Όταν υπάρχει ανάγκη να συμπεριληφθούν ασυνέχειες στην περιγραφή του μέσου, τότε χρησιμοποιούνται ειδικά στοιχεία ασυνεχειών, τα οποία εξασφαλίζουν μεν μια μαθηματική συνέχεια με το υπόλοιπο μέσο, αλλά χαρακτηρίζονται από μία ‘χαλαρότητα’ σε σχέση με τα συνήθη στοιχεία.
- Η καταστατική εξίσωση συμπεριφοράς του υλικού, η οποία επιλύεται στο συγκεκριμένο μέσο, συνδέει ουσιαστικά το αίτιο (δύναμη, τάση) με το αποτέλεσμα (μετατόπιση, παραμόρφωση) που αποτελεί και το άγνωστο μέγεθος.

Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι, όπως και στη μητρωική ανάλυση, η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων (Καρύδης, 2001). Για παράδειγμα σε μία συνεχή κατασκευή δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί και συνεπώς απαιτείται να γίνει τεχνητός διαχωρισμός σε στοιχεία, τα οποία να συνδέονται κατά μήκος των άκρων (πλευρών) τους. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία, ή πεπερασμένα στοιχεία, είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά και οι κόμβοι συνήθως βρίσκονται στα άκρα. Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων και όλες οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται σε σχέση με τις κομβικές μετατοπίσεις. Με αυτό τον τρόπο οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους και το πρόβλημα μετατρέπεται από συνεχές σε διακριτό. Παρ’ όλο που μπορεί να υπάρχει μεγάλος αριθμός κομβικών μετατοπίσεων ο αριθμός τους είναι πεπερασμένος. Το πρόβλημα εκφράζεται τότε ως ένα σύνολο (σύστημα) γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με αριθμητικές (μητρωικές) μεθόδους.

Σύμφωνα με τον Bathe (1996), για να επιτευχθεί ακριβής λύση ενός προβλήματος στη διακριτοποιημένη μορφή του, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας και γεωμετρικής συμβατότητας στο εσωτερικό των στοιχείων αλλά και στα σύνορά τους. Μία διακριτή προσομοίωση δεν μπορεί όμως να αποδώσει με απόλυτη ακρίβεια την συμπεριφορά ενός συνεχούς μέσου, ανεξαρτήτως του αριθμού των διακριτών μεταβλητών

που χρησιμοποιούνται. Υπάρχει δηλαδή πάντοτε ένα σφάλμα, το οποίο όμως μπορεί να περιορισθεί και να γίνει αμελητέο και τοπικό. Δεν είναι συνεπώς δυνατόν να ικανοποιηθούν όλες οι προαναφερθείσες συνθήκες με απόλυτη ακρίβεια, έστω και αν γίνει χρήση μεγάλου αριθμού στοιχείων. Είναι όμως δυνατό, με σωστή επιλογή των ιδιοτήτων των στοιχείων και κατάλληλη διακριτοποίηση, να περιορισθεί το αριθμητικό σφάλμα. Η συμπεριφορά των στοιχείων καθορίζεται από συναρτήσεις οι οποίες ορίζουν τον τρόπο μεταβολής των τάσεων ή των μετατοπίσεων στο εσωτερικό τους. Με άλλα λόγια, προκαθορίζεται ο τρόπος συμπεριφοράς των διαφόρων μεταβλητών (Hughes, 1996). Το αποτέλεσμα είναι ότι, παρ' όλο που οι συνθήκες ισορροπίας και συμβατότητας ικανοποιούνται μόνο στους κόμβους, η προδιαγεγραμμένη συμπεριφορά στο εσωτερικό κάθε στοιχείου εξασφαλίζει ότι η συμβατότητα ικανοποιείται επαρκώς στο εσωτερικό και στα σύνορά τους.

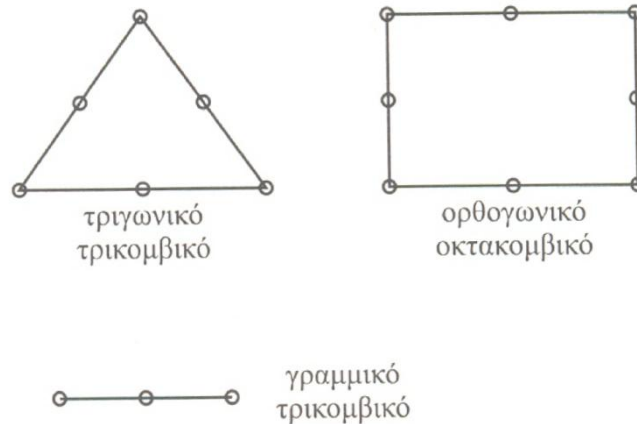
Συμπεραίνεται λοιπόν ότι απαιτείται προσοχή κατά την υποδιαίρεση (διακριτοποίηση) της κατασκευής, καθώς επίσης και κατά την επιλογή της συνάρτησης που περιγράφει τη συμπεριφορά στο εσωτερικό του κάθε στοιχείου (Bathe, 1996).

Τέλος, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα ισχυρό υπολογιστικό εργαλείο για την αξιόπιστη επίλυση προβλημάτων στη μηχανική, σύμφωνα με τον Albatineh (2006). Η δυναμική της μεθόδου έγκειται στην ικανότητα να προσομοιάζει την φυσική συμπεριφορά με την χρήση υπολογιστικών εργαλείων χωρίς την ανάγκη απλοποίησης του προβλήματος. Πράγματι, περίπλοκα προβλήματα μηχανικής έχουν ανάγκη την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων ώστε να αποκτήσουν μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία στα αποτελέσματά τους. Σήμερα, τα αποτελέσματα των νέων μεθόδων ανάλυσης μπορούν να επαληθευτούν με την χρήση των αποτελεσμάτων της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων ως σημείου αναφοράς.

2.3.1 Διακριτοποίηση (Meshing)

Με τον όρο διακριτοποίηση εννοείται η διαίρεση του μέσου σε στοιχεία-τμήματα (elements) με τη βοήθεια νοητών γραμμών ή επιφανειών. Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από δύο ή περισσότερους κόμβους, οι οποίοι συνδέονται με ευθύγραμμο ή καμπύλο τμήματα και βρίσκονται στις κορυφές των στοιχείων.

Χαρακτηριστικές μορφές στοιχείων είναι τα μονοδιάστατα ή γραμμικά, τα τριγωνικά και ορθογωνικά ή γενικότερα τετραπλευρικά σε δύο διαστάσεις και τα πυραμιδοειδή και πρισματικά (τρισδιάστατα). Στις γεωτεχνικές εφαρμογές είναι συνήθης η χρήση τριγωνικών ή τετραπλευρικών (επίπεδων) στοιχείων, τα οποία απεικονίζουν τμήματα υλικού, των οποίων η τρίτη διάσταση είναι μοναδιαία (όπου είναι δυνατή μία απλοποιητική παραδοχή).



Εικόνα 2.2. Είδη στοιχείων διακριτοποίησης (meshing).

Οι απλούστερες μορφές στοιχείων είναι αυτές που χαρακτηρίζονται από το ότι ο αριθμός των κόμβων του στοιχείου είναι ίσος με τον αριθμό των πλευρών, όπως για παράδειγμα τα τριγωνικά και τρικομβικά στοιχεία. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις, όπου περισσότεροι κόμβοι περιγράφουν ένα στοιχείο, όπως τριγωνικά και εξακομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και οκτακομβικά. Στους κόμβους αντιστοιχούνται τα φυσικά μεγέθη που συνδέουν το αίτιο με το αποτέλεσμα. Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας ενός στοιχείου αναφέρεται στο σύνολο των άγνωστων μεταβλητών που αντιστοιχεί σε κάθε στοιχείο. Στις συνήθεις περιπτώσεις των προβλημάτων μηχανικής, κάθε κόμβος έχει δύο ή τρεις βαθμούς ελευθερίας που αντιστοιχούν στις συνιστώσες του διανύσματος μετατόπισης του κόμβου. Εάν οι κόμβοι μεταφέρουν ροπές, τότε οι βαθμοί ελευθερίας ανά κόμβο μπορεί να αυξηθούν κατά έναν στις δύο διαστάσεις και κατά τρεις στις τρεις διαστάσεις.

Η διαδικασία της διακριτοποίησης περιλαμβάνει τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Την επιλογή της γεωμετρικής μορφής του στοιχείου.
- Την επιλογή του αριθμού κόμβων του στοιχείου και κατ' επέκταση των βαθμών ελευθερίας του στοιχείου.

- Την επιλογή των συναρτήσεων μορφής κάθε στοιχείου.
- Την επιλογή της πυκνότητας του καννάβου.

Η συνήθης πρακτική όσον αφορά στην επιλογή των διαστάσεων και της μορφής των στοιχείων είναι ότι χρησιμοποιούνται μικρότερα στοιχεία εκεί που αναμένονται μεγάλες μεταβολές των υπολογιζόμενων μεταβλητών και απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια. Επίσης, ότι η ακρίβεια της μεθόδου αυξάνεται όταν αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων, ή καλύτερα, των κόμβων. Όσο αυξάνεται όμως ο αριθμός των στοιχείων, τόσο αυξάνονται ο χρόνος υπολογισμού και το κόστος.

2.3.2 Συναρτήσεις μορφής

Οι συναρτήσεις μορφής εκφράζουν την κατανομή των άγνωστων μεταβλητών σε κάθε στοιχείο, συναρτήσει των τιμών των μεταβλητών στους κόμβους. Οι συναρτήσεις αυτές μπορεί να είναι είτε γραμμικές είτε μη γραμμικές. Στις περιπτώσεις στοιχείων με ισάριθμες ακμές και κόμβους εφαρμόζονται γραμμικές συναρτήσεις, ενώ, όταν ο αριθμός των κόμβων υπερβαίνει τον αριθμό των ακμών ενός στοιχείου, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθούν και μη γραμμικές συναρτήσεις.

2.3.3 Καταστατικές εξισώσεις

Οι παραμορφώσεις συνδέονται με τις μετατοπίσεις μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$\{\varepsilon\} = [B] \{q\} \quad (2.1)$$

όπου,

$\{\varepsilon\}$: ο πίνακας παραμορφώσεων με διάσταση $[3 \times 1]$

$\{q\}$: το μοναδιαίο διάνυσμα των μετατοπίσεων στους κόμβους με διάσταση $[n \times 1]$

$[B]$: ο πίνακας συσχετισμού με τη διάσταση $[3 \times n]$, και n οι συνολικοί βαθμοί ελευθερίας του στοιχείου.

Οι καταστατικές εξισώσεις που συνδέουν το αίτιο με το αποτέλεσμα είναι της μορφής,

$$\sigma_{ij} = f(\varepsilon_{ij}) \quad (2.2)$$

Οι οποίες σε μορφή πινάκων γράφονται ως εξής:

$$\{\sigma\} = [E] \{\varepsilon\} \quad (2.3)$$

όπου,

[E], ο πίνακας που παριστάνει ένα γενικευμένο μητρώο των ελαστικών ιδιοτήτων του υλικού.

2.3.4 Συνοριακές συνθήκες και μοντέλα συμπεριφοράς υλικών.

Η εισαγωγή συνοριακών συνθηκών είναι απαραίτητη για την επίλυση του προβλήματος και συνήθως εκφράζεται με τις συνθήκες ισορροπίας του πεδίου.

Υπάρχουν τρεις τύποι συνοριακών συνθηκών (Αγιουτάντης, 2002):

- Προσδιορισμός της ζητούμενης παραμέτρου (μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται γεωμετρικές (geometric or forced boundary conditions) και είναι γνωστές και ως συνθήκες Dirichlet.
- Προσδιορισμός της μεταβολής της ζητούμενης παραμέτρου (παράγωγος της μετατόπισης). Οι συνθήκες αυτές ονομάζονται φυσικές συνοριακές συνθήκες (slope or gradient, natural boundary conditions) και είναι γνωστές ως συνθήκες Neumann.
- Προσδιορισμός και των δύο παραμέτρων ή μικτές συνθήκες.

Στην περίπτωση των προβλημάτων ελαστικότητας, οι γεωμετρικές συνθήκες δίνονται από εκφράσεις της μορφής:

$$\begin{aligned} u_y &= u_o \\ u_x &= u_o \end{aligned} \quad (2,4)$$

Οι φυσικές συνθήκες δίνονται από τις εκφράσεις της μορφής:

$$\begin{aligned} f_x &= f_o \\ f_y &= f_o \end{aligned} \quad (2,5)$$

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου συμπεριφοράς του υλικού (material model), καθώς και η επιλογή των τιμών των σταθερών του μοντέλου αυτού, συνιστά έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την επιτυχημένη προσομοίωση συμπεριφοράς των φυσικών υλικών. Το απλούστερο μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι το γραμμικά ελαστικό το οποίο δεν είναι το πλέον κατάλληλο για την περιγραφή της συμπεριφοράς πετρωμάτων και εδαφικών υλικών. Το υλικό θεωρείται ότι παραμορφώνεται ελαστικά και ισότροπα και στην περίπτωση της μιας διάστασης δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2.6)$$

Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλα μοντέλα συμπεριφοράς όπως μοντέλα μη ισοτροπικής ελαστικής συμπεριφοράς, και μοντέλα μη ελαστικής συμπεριφοράς. Ακόμη καθώς η διαίρεση του πεδίου δημιουργεί συνεχή μεν, αλλά διακριτά τμήματα του σώματος, είναι δυνατό να οριστούν διαφορετικά μοντέλα υλικού σε διαφορετικά σημεία του σώματος.

2.3.5 Κριτήρια αστοχίας γεωυλικών

Σε περιπτώσεις όπου λόγω της φόρτισης ενός υλικού είναι δυνατό να επέλθει αστοχία του, τότε μαζί με την καταστατικά συμπεριφορά του, πρέπει να οριστεί το αντίστοιχο κριτήριο αστοχίας ή διαρροής του υλικού.

Ουσιαστικά τα κριτήρια αστοχίας των υλικών είναι δυνατό να επιδράσουν με δύο τρόπους:

- Είτε να θεωρήσουν ότι ένα στοιχείο αστοχεί όταν η εντατική κατάσταση που δέχεται το υλικό υπερβαίνει το όριο της αντοχής του, και επομένως να εμποδίσει το στοιχείο αυτό να δεχτεί μία ανώτερη εντατική κατάσταση.
- Είτε με τη θεώρηση ότι το υλικό αστόχησε στην παραπάνω εντατική κατάσταση, να τροποποιήσουν (να μειώσουν) τις ελαστικές ή πλαστικές σταθερές των στοιχείων, ώστε να προσομοιάσουν την αστοχία.

Οι παραπάνω διαδικασίες μπορούν να επαναλαμβάνονται μέχρις ότου, είτε αστοχήσουν όλα τα στοιχεία ενός σώματος, είτε σταθεροποιηθεί η κατάσταση και δεν υπάρχουν πλέον αλλαγές στα στοιχεία, είτε εάν η διαδικασία σταματήσει λόγω υπέρβασης του μέγιστου κύκλου επαναλήψεων της διαδικασίας επίλυσης (Αγιουτάντης 2002). Τα ευρέως

χρησιμοποιούμενα κριτήρια αστοχίας τόσο σε δισδιάστατη όσο και σε τρισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, είναι το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb, Hoek – Brown, Von Misses – Tresca, Drucker – Prager και Griffith.

2.3.6 Μειονεκτήματα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

Μειονέκτημα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα και τρισδιάστατα μοντέλα (Karakus & Fowell, 2006). Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών και γενικότερα της τεχνολογίας. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου είναι τόσο μεγάλη, που ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται στην έρευνα και στην βιομηχανία για την ανάλυση και τη μελέτη διάφορων κατασκευών.

Δεύτερο μειονέκτημα αποτελεί ο κίνδυνος εξαγωγής εσφαλμένων αποτελεσμάτων. Τα σφάλματα, αυτά, οφείλονται κυρίως σε δύο κατηγορίες (Καρύδης, 2001): α) αυτά που ανακύπτουν κατά τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος και β) αυτά που ανακύπτουν κατά την αριθμητική επίλυση του μαθηματικού μοντέλου στον υπολογιστή.

Στη πρώτη κατηγορία σφαλμάτων εμπεριέχεται κάθε στάδιο που έρχεται σε επαφή ο χρήστης με το υπολογιστικό εργαλείο και είναι ίσως η σοβαρότερη πηγή σφαλμάτων. Για παράδειγμα, αν η προσέγγιση του φυσικού προβλήματος είναι ανεπαρκής τότε εισάγονται λανθασμένα δεδομένα από τον χρήστη και κατά συνέπεια εξάγονται εσφαλμένα αποτελέσματα από το πρόγραμμα (garbage in – garbage out). Ο κίνδυνος αυτός, είναι δυνατόν να περιορισθεί με σωστή κατάρτιση των μελετητών, οργάνωση του χώρου και τρόπου εργασίας και χρήση κατάλληλων εργαλείων.

Η δεύτερη κατηγορία προέρχεται από την έλλειψη επαρκούς ακρίβειας στις τιμές των φυσικών σταθερών (επιτάχυνση λόγω βαρύτητας, κ.ά.) ή και σε τιμές εμπειρικών δεδομένων. Στη περίπτωση αυτή, μερικές φορές, η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων θεωρείται αμελητέα.

2.4. Σύγκριση 2D και 3D αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο εξετάζονται οι διαφορές μεταξύ 2-D & 3-D αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης. Όσον αφορά την επιλογή για την επικράτηση της μίας μεθόδου έναντι της άλλης, σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δύσκολη. Επίσης, σύμφωνα με τους Ghee και Zhu (2009), τόσο η δισδιάστατη όσο και η τρισδιάστατη ανάλυση είναι εξίσου απαραίτητες για ορισμένες κατασκευές. Πράγματι, ο στόχος όλων είναι η εύρεση της μεθόδου που θα πετυχαίνει την βέλτιστη προσομοίωση και τελικά αποτελέσματα όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην πραγματικότητα. Μολαταύτα, καμία από τις δυο μεθόδους δεν υπερτερεί ξεκάθαρα έναντι της άλλης, διότι κάθε μέθοδος προσφέρει πλεονεκτήματα αλλά και διάφορους περιορισμούς. Συνεπώς η απόφαση για την επιλογή δισδιάστατης ή τρισδιάστατης μεθόδου ανάλυσης δεν είναι απλή και εξαρτάται από πολλούς αλληλένδετους παράγοντες.

Μέχρι σήμερα, η μέθοδος που κυριαρχεί στην αγορά είναι η δισδιάστατη ανάλυση, όμως με τις πολλές δυνατότητες που προσφέρει ένα τρισδιάστατο πρόγραμμα ανάλυσης, όπως αναφέρονται παρακάτω, σε συνδυασμό με την εξέλιξη της τεχνολογίας και τα περιθώρια βελτίωσης, γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι το μέλλον ανήκει στην τρισδιάστατη μέθοδο ανάλυσης (Galli & Leonardi, 2004). Στη συνέχεια, επιχειρείται μια σύγκριση μεταξύ των προγραμμάτων που προσφέρουν δισδιάστατη και τρισδιάστατη ανάλυση.

Οι διαφορές μεταξύ 2-D και 3-D μεθόδου ανάλυσης είναι οι εξής :

1. Ο απαιτούμενος χρόνος υπολογισμού.

Βασική διαφορά μεταξύ των λογισμικών πακέτων με εφαρμογή 2-D και 3-D ανάλυσης αποτελεί ο χρόνος της διαδικασίας για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Ο χρόνος που απαιτείται για την διαδικασία ώστε να προκύψουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων για ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιεί 3-D ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων είναι κατά πολύ μεγαλύτερος απ' ότι χρειάζεται σε 2-D ανάλυση (Papadimitriou, Bouckovalas & Vytiniotis, 1998). Αυτή η μεγάλη χρονική διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι η 3-D ανάλυση επεξεργάζεται τεράστιο όγκο δεδομένων. Παρόλα ταύτα, τα τελευταία χρόνια η ελάττωση του χρόνου αναμονής για την εξαγωγή αποτελεσμάτων σε 3-D ανάλυση έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης και έχει παρατηρηθεί αξιοσημείωτη πρόοδος. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των δεδομένων, ο απαιτούμενος χρόνος υπολογισμού είναι αρκετά μεγαλύτερος με την χρήση 3-D ανάλυσης.

2. Το απλό και φιλικό περιβάλλον εργασίας.

Ένα πρόγραμμα με δυνατότητα δισδιάστατης ανάλυσης είναι σχετικά απλό στην εκμάθηση καθώς και στη χρήση του σε σύγκριση με ένα λογισμικό πακέτο που χρησιμοποιεί 3-D ανάλυση. Το γεγονός αυτό, τα καθιστά πιο προσιτά και φιλικά προς τον χρήστη. Αντίθετα, ο σχεδιασμός ενός τρισδιάστατου μοντέλου σε πρόγραμμα με χρήση 3-D ανάλυσης είναι αρκετά περίπλοκος και απαιτεί περισσότερη μελέτη. Το συγκεκριμένο φαινόμενο, όμως, τείνει να εκλείψει τα τελευταία χρόνια καθώς καταβάλλεται προσπάθεια με στόχο την βελτίωση του περιβάλλοντος εργασίας στα προγράμματα με 3-D ανάλυση. Παρόλα αυτά, τα λογισμικά πακέτα με χρήση 3-D ανάλυσης δεν θα μπορέσουν να γίνουν τόσο απλά στη χρήση τους όσο είναι τα αντίστοιχα 2-D ανάλυσης, διότι προσφέρουν πολύ περισσότερες σχεδιαστικές και άλλες δυνατότητες προς τους χρήστες όπως αναλύεται στη συνέχεια. Επομένως, το απλούστερο και φιλικότερο περιβάλλον εργασίας προσφέρεται, κατά κύριο λόγο, από τα λογισμικά πακέτα με χρήση 2-D μεθόδου ανάλυσης.

3. Το κόστος υπολογισμού.

Η οικονομική διαφορά μεταξύ των δύο τύπων αναλύσεων είναι υπαρκτή, όντας η μέθοδος δισδιάστατης ανάλυσης πιο οικονομική. Λαμβάνοντας υπόψη τις προηγούμενες διαφορές μεταξύ 2-D & 3-D ανάλυσης, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι η οικονομική διαφορά έγκειται στους εξής δύο παράγοντες.

Καταρχάς, για την ανάλυση ενός τρισδιάστατου μοντέλου σε πρόγραμμα με χρήση 3-D ανάλυσης απαιτούνται πολλοί υπολογιστές και με μεγάλες δυνατότητες (όπως για παράδειγμα ισχυρό επεξεργαστή ,μεγάλη μνήμη και άλλα), σε σύγκριση με αντίστοιχο πρόγραμμα που χρησιμοποιεί 2-D ανάλυση σύμφωνα με τους Karakus & Fowell (2006). Όλα τα παραπάνω οδηγούν στην επιλογή ισχυρών και κατά συνέπεια ακριβών υπολογιστών.

Ο δεύτερος λόγος όπου η μέθοδος με τρισδιάστατη ανάλυση είναι πιο ακριβή, αποτελείται από το γεγονός ότι η τιμή αγοράς των 3-D προγραμμάτων είναι κατά πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με τα 2-D προγράμματα. Η τιμή που ορίζουν οι κατασκευαστές για τα τρισδιάστατα προγράμματα είναι της τάξης των μερικών χιλιάδων ευρώ, ενώ τα δισδιάστατα προγράμματα κοστίζουν αρκετά λιγότερο. Το γεγονός αυτό, εν μέρει, δικαιολογείται λόγω των πολύπλοκων και πολύωρων εργασιών που απαιτούνται, από την μεριά του κατασκευαστή, για την δημιουργία ενός λογισμικού πακέτου με χρήση 3-D

ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Όμως, δε παύει να αποτελεί πλεονέκτημα για τις δισδιάστατες αριθμητικές μεθόδους ανάλυσης.

4. Η αποκτηθείσα εμπειρία.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ανάλυση που τυγχάνει, μέχρι σήμερα, ευρύτερης εφαρμογής είναι η δισδιάστατη. Επομένως, η αποκτηθείσα εμπειρία είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή που υπάρχει στα προγράμματα 3-D ανάλυσης και τα αποτελέσματα πολύ ικανοποιητικά, με αποτέλεσμα να αποτελεί πλεονέκτημα στην επιλογή μεταξύ των δύο μεθόδων. Γι' αυτό τον λόγο, σε πολλές περιπτώσεις τα αποτελέσματα μίας δισδιάστατης ανάλυσης χρησιμοποιούνται ως σημείο αναφοράς.

5. Οι σχεδιαστικές δυνατότητες.

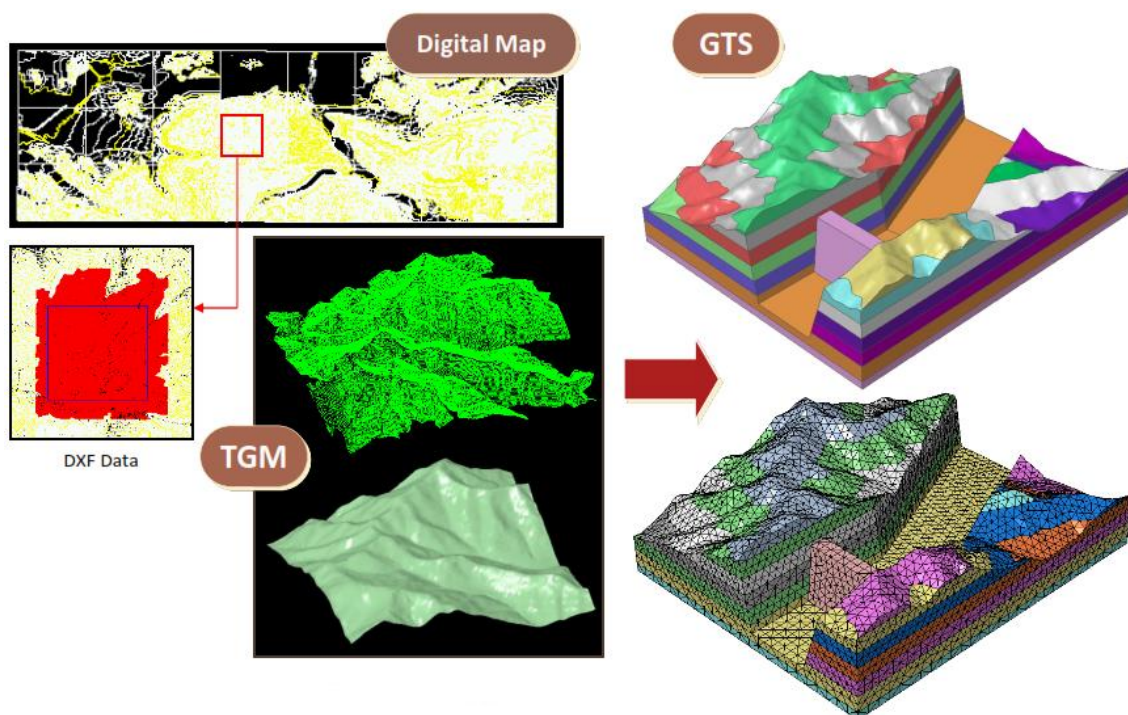
Μειονέκτημα για την 2-D ανάλυση αποτελεί ότι βασίζεται στην παραδοχή ότι η γεωμετρία της κατασκευής εκτείνεται στο άπειρο καθώς επίσης ότι η μελέτη περιορίζεται μόνο στο μέτωπο της εκσκαφής. Για παράδειγμα στη μέθοδο θαλάμων και στύλων, η δισδιάστατη ανάλυση λαμβάνει υπόψη μόνο την εκσκαφή των οριζόντιων θαλάμων ενώ αγνοείται η επίδραση που προκύπτει από τους κάθετους ως προς την διατομή θαλάμους (Παπαγιαννόπουλος, 2010) , κατά συνέπεια, λαμβάνονται αποτελέσματα μόνο για το μέτωπο της εκσκαφής σε αντίθεση με την 3-D ανάλυση η οποία προσφέρει την δυνατότητα εξέτασης της ανακατανομής του τασικού πεδίου και της επίδρασης που θα υποστεί το έδαφος μπροστά και πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής (Karakus & Fowell, 2006). Οπότε, όσον αφορά την μέθοδο θαλάμων και στύλων, η 2-D ανάλυση μειονεκτεί εμφανώς σε σχέση με την αντίστοιχη 3-D ανάλυση στην οποία επιτυγχάνεται η προσομοίωση και των οριζόντιων καθώς και των κάθετων θαλάμων.

Ωστόσο, με την χρήση λογισμικού πακέτου με 2-D ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και υιοθετώντας διαθέσιμες εναλλακτικές παραδοχές, όπως για παράδειγμα με την προσαύξηση του ειδικού βάρους των υπερκειμένων σχηματισμών (Pariseau et al., 1979), καθίσταται δυνατή η εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων για την επίδραση των πιέσεων στο έδαφος, χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση της 3-D ανάλυσης.

Δεύτερο παράδειγμα σαφούς πλεονεκτήματος του τρισδιάστατου μοντέλου έναντι του δισδιάστατου σχετικά με τον σχεδιασμό, εκτός της μεθόδου θαλάμων και στύλων,

αποτελεί η δυνατότητα σχεδιασμού καμπύλων τμημάτων ή διαφορετικών κλίσεων στη χάραξη μίας σήραγγας. Πράγματι, στα προγράμματα που χρησιμοποιούν 2-D ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων δεν δίνεται η δυνατότητα σχεδιασμού καμπύλων τμημάτων, όπως για παράδειγμα είναι οι στροφές ή κλίσεις του οδοστρώματος (ανηφόρα/ κατηφόρα). Γίνεται άμεσα αντιληπτό, ότι δεν μπορούν να υπολογιστούν τα σημεία όπου μεταβάλλεται η διεύθυνση της σήραγγας, άρα αγνοείται η μεταβολή των ασκούμενων τάσεων. Κατά συνέπεια, για το συγκεκριμένο παράδειγμα προκύπτουν λανθασμένα αποτελέσματα από ένα δισδιάστατο πρόγραμμα ανάλυσης. Γενικότερα, μόνο η 3-D ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν η γεωμετρία του μοντέλου είναι αρκετά περίπλοκη, όπως στην περίπτωση της μεθόδου θαλάμων και στύλων ή το σημείο που τέμνονται μια κύρια σήραγγα με ένα φρέαρ ή το σημείο που τέμνονται μια κύρια σήραγγα με μια σήραγγα εξόδου διαφυγής ή συνδετήρια σήραγγα.

Επιπροσθέτως, με την χρήση ενός προγράμματος το οποίο προσφέρει 3-D ανάλυση μπορεί να επιτευχθεί το πραγματικό ανάγλυφο (Terrain Geometry Maker) που επικρατεί πάνω από την εκσκαφή. Εισάγοντας με ένα αρχείο, για παράδειγμα .dxf file, τον τοπογραφικό χάρτη της εκάστοτε περιοχής στην οποία θα πραγματοποιηθεί εκσκαφή, επιτυγχάνεται η πλήρης ταύτιση με τις ισχύουσες συνθήκες και δίνεται μια πιο ρεαλιστική άποψη της περιοχής (Εικόνα 2.3). Ενώ αντίθετα στη 2-D ανάλυση, όποιο και είναι το πραγματικό ανάγλυφο, προσομοιάζεται ως επίπεδο.



Εικόνα 2.3. Επίτευξη πραγματικού ανάγλυφου μέσω του Terrain Geometry Maker (TGM), (Midas).

Ειδικότερα σε μια εκσκαφή μικρού βάθους, το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες αποκλίσεις αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο μεθόδων. Αντιθέτως, για εκσκαφές μεγάλου βάθους και εντός σκληρών σχηματισμών όπου η επιφάνεια δεν επηρεάζεται από την εκσκαφή ακόμα και στα προγράμματα που χρησιμοποιούν την τρισδιάστατη γεωμετρία, χάριν ευκολίας, το ανάγλυφο σχεδιάζεται ως επίπεδο χωρίς καταστροφικές συνέπειες στην εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Κατά συνέπεια, συμπεραίνεται ότι ένα λογισμικό πακέτο με χρήση 3-D ανάλυσης υπερτερεί σε σύγκριση με αντίστοιχο πρόγραμμα 2-D ανάλυσης, διότι τοποθετώντας την τρίτη διάσταση στο χώρο έχει την δυνατότητα να αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα, δίνοντας την αίσθηση του αληθινού χώρου και βοηθώντας στην κατανόηση όσο το δυνατόν καλύτερα της διαδικασίας που συμβαίνει έχοντας σφαιρική και πιο ολοκληρωμένη άποψη του μοντέλου.

6. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

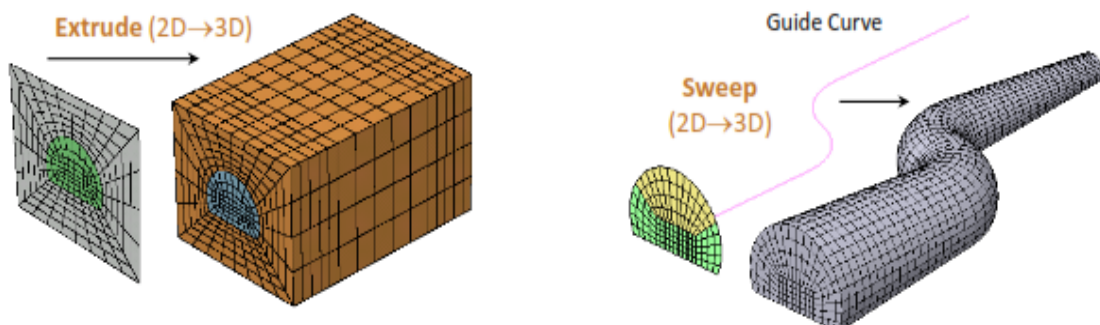
Από τα στοιχεία που αναλύθηκαν προηγουμένως, γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι με τη χρήση ενός τρισδιάστατου προγράμματος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων επιτυγχάνονται συνήθως ακριβέστερα αποτελέσματα, επειδή είναι δυνατή η πλήρης ταύτιση των συνθηκών που επικρατούν στην πραγματικότητα με αυτές του μοντέλου. Στα τρισδιάστατα προγράμματα ανάλυσης παρέχονται μεγαλύτερες δυνατότητες σχεδίασης, περισσότεροι τρόποι και χαρακτηριστικά ανάλυσης, περισσότερες ιδιότητες στοιχείων και εισαγωγή δεδομένων. Σε ένα δισδιάστατο πρόγραμμα υπάρχει μεν δυνατότητα προσομοίωσης τρισδιάστατης ανάλυσης, όπως προαναφέρθηκε, με εξίσου αξιόπιστα αποτελέσματα. Παρ' όλα αυτά, όπου επιδιώκεται η μέγιστη ακρίβεια, επιλέγεται η τρισδιάστατη ανάλυση.

Ύστερα από έρευνα που διεξήχθη από τους Rowe & Lo (2002) μεταξύ 2-D ανάλυσης, 3-D ανάλυσης και επί τόπου μετρήσεων αναφορικά με την θλιπτική τάση σε σήραγγες του Τορόντο, προέκυψε ότι η 3-D ανάλυση με τις επί τόπου μετρήσεις είχαν κοινά αποτελέσματα ενώ η 2-D ανάλυση διέφερε εμφανώς. Επίσης, σύμφωνα με τον Farias (2003), για την εκτίμηση των υφιστάμενων τάσεων καθώς επίσης και για τις μετατοπίσεις μόνο η τρισδιάστατη ανάλυση μπορεί να εξάγει αξιόπιστα αποτελέσματα. Η συγκεκριμένη σύγκριση πραγματοποιήθηκε μεταξύ των προγραμμάτων Flac2D και Flac3D.

Όλα τα παραπάνω, συντελούν στην εξαγωγή ακριβέστερων αποτελεσμάτων της 3-D ανάλυσης σε σύγκριση με την 2-D ανάλυση.

7. Η δυνατότητα 2-D & 3-D ανάλυσης.

Τα περισσότερα λογισμικά πακέτα με χρήση 3-D αριθμητικής μεθόδου ανάλυσης (π.χ. Midas GTS), πέρα από την αυτονόητη 3-D ανάλυση, προσφέρουν στον χρήστη και τη δυνατότητα 2-D ανάλυσης με εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα. Κατά συνέπεια, παρέχονται περισσότερες δυνατότητες με την απόκτηση ενός τρισδιάστατου προγράμματος ανάλυσης. Όπως για παράδειγμα, η δυνατότητα άμεσης σύγκρισης των αποτελεσμάτων της 2-D και της 3-D ανάλυσης από το ίδιο λογισμικό πακέτο. Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα άμεσης μετατροπής της δισδιάστατης γεωμετρίας σε τρισδιάστατη μέσω απλών εντολών, όπως διακρίνεται στην Εικόνα 2.4. Οι δυνατότητες αυτές, αποτελούν, σημαντικό πλεονέκτημα και κριτήριο επιλογής μεταξύ των δυο αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης.



Εικόνα 2.4. Μετατροπή δισδιάστατης γεωμετρίας σε τρισδιάστατη (Midas GTS).

Καταλήγοντας, συμπεραίνεται ότι η επιλογή μεταξύ 2-D & 3-D αριθμητικής μεθόδου ανάλυσης δεν είναι εύκολη υπόθεση καθώς υπάρχουν σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και στις δύο πλευρές. Σίγουρα μέχρι τώρα, τα λογισμικά πακέτα που χρησιμοποιούν τη δισδιάστατη μέθοδο ανάλυσης τυγχάνουν ευρύτερης εφαρμογής στο κατασκευαστικό κλάδο σε σύγκριση με την τρισδιάστατη μέθοδο. Παρόλα αυτά, με την ταχεία εξέλιξη της τεχνολογίας και σε συνδυασμό με την απλοποίηση του περιβάλλοντος εργασίας, προς τον χρήστη, τα προγράμματα που χρησιμοποιούν τρισδιάστατη αριθμητική μέθοδο ανάλυσης ανταγωνίζονται, πλέον, πλήρως τα αντίστοιχα δισδιάστατα προγράμματα. Επειδή τα κυρίαρχα μειονεκτήματα της 3-D ανάλυσης, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω, αποτελούνται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά υπολογιστών (όγκος δεδομένων,

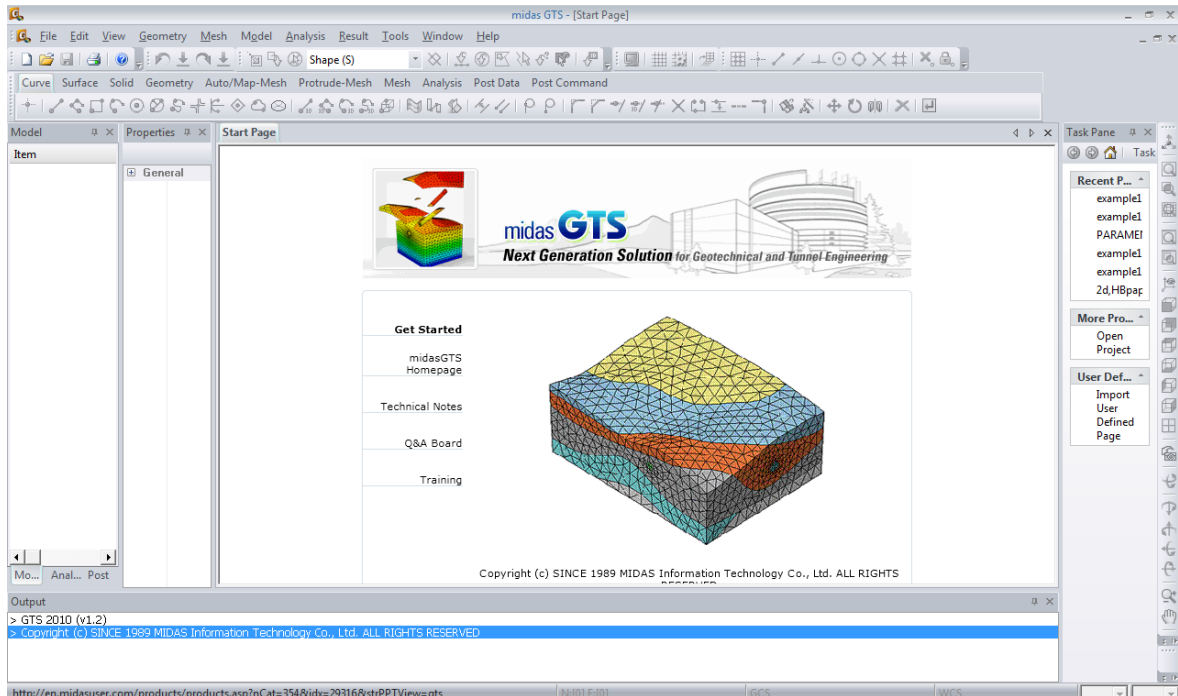
χρόνος επεξεργασίας κ.α.) και το περίπλοκο περιβάλλον εργασίας συμπεραίνεται ότι έχουν την δυνατότητα αλματώδους βελτίωσης τα επόμενα χρόνια. Τέλος, οι σχεδιαστικές δυνατότητες καθώς και η εξαγωγή ακριβέστερων αποτελεσμάτων αποτελούν βασικούς παράγοντες για την υπεροχή της τρισδιάστατης (3-D) έναντι της δισδιάστατης (2-D) αριθμητικής μεθόδου ανάλυσης.

2.5. Γενικά στοιχεία του προγράμματος MIDAS GTS 2010

Το λογισμικό πακέτο Midas GTS είναι ένα τρισδιάστατο πρόγραμμα ανάλυσης υπόγειων εκσκαφών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμη, το συγκεκριμένο πρόγραμμα εκτός από τη δυνατότητα τρισδιάστατης ανάλυσης προσφέρει επίσης και τη δυνατότητα δισδιάστατης ανάλυσης. Η δυνατότητα των δύο αυτών αναλύσεων που προσφέρεται, αποτελεί πλεονέκτημα του προγράμματος, διότι δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη για άμεση σύγκριση των δύο αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης. Το λογισμικό πακέτο Midas GTS εμπεριέχει ένα σύστημα ανάλυσης το οποίο βασίζεται στην ακριβή ανάλυση και στην τεχνολογία εξαιρετικών γραφικών. Το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα στο μηχανικό να σχεδιάσει περίπλοκα τρισδιάστατα γεωτεχνικά μοντέλα. Η ανάλυση επιτυγχάνεται μέσω του TNO-Diana solver το οποίο παρέχει γρήγορη και αποτελεσματική ανάλυση. Το Midas GTS είναι ένα καινούργιο λογισμικό, το οποίο παρέχει πολλές δυνατότητες, τόσο σχεδιαστικές όσο και ανάλυσης, και αποτελεί ένα αξιόπιστο πρόγραμμα ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

Η γενική σειρά των εργασιών που ακολουθούνται στο Midas GTS, είναι η εξής :

1. Σχεδιασμός γεωμετρίας μοντέλου.
2. Παραγωγή πλέγματος (Mesh generation).
3. Ορισμός παραμέτρων ανάλυσης.
4. Ανάλυση – Επίλυση.
5. Εξαγωγή και αξιολόγηση αποτελεσμάτων.

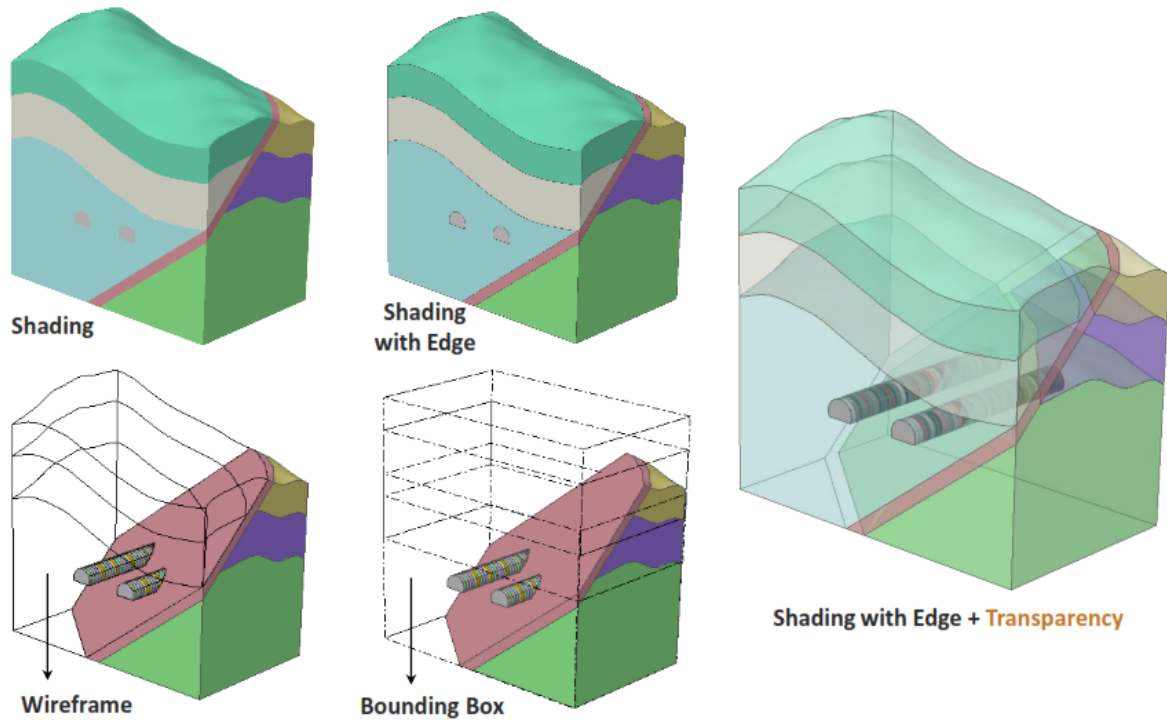


Εικόνα 2.5. Αρχική σελίδα (Start Page) του Midas GTS 2010.

Στη συνέχεια, αναλύεται η κάθε ενότητα εργασιών του Midas GTS, ξεχωριστά.

1. Σχεδιασμός γεωμετρίας μοντέλου.

Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του μοντέλου αποτελεί την βάση της δημιουργίας της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Το μοντέλο μπορεί να σχεδιαστεί κατευθείαν στο Midas GTS από τις λειτουργίες που παρέχονται στο βασικό μενού. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα ανταλλαγής δεδομένων της γεωμετρίας του μοντέλου που έχει σχεδιαστεί σε άλλο πρόγραμμα (Computer Aided Design). Επειδή το Midas GTS παρέχει εξειδικευμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανάλυσης, είναι πιο αποτελεσματικό τα περίπλοκα μοντέλα να σχεδιάζονται σε άμεση σύγκριση με άλλα αντίστοιχα λογισμικά πακέτα. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.6) παρουσιάζονται διάφορες επιλογές προβολής της γεωμετρίας του μοντέλου.



Εικόνα 2.6. Διάφορες επιλογές προβολής της γεωμετρίας του μοντέλου.

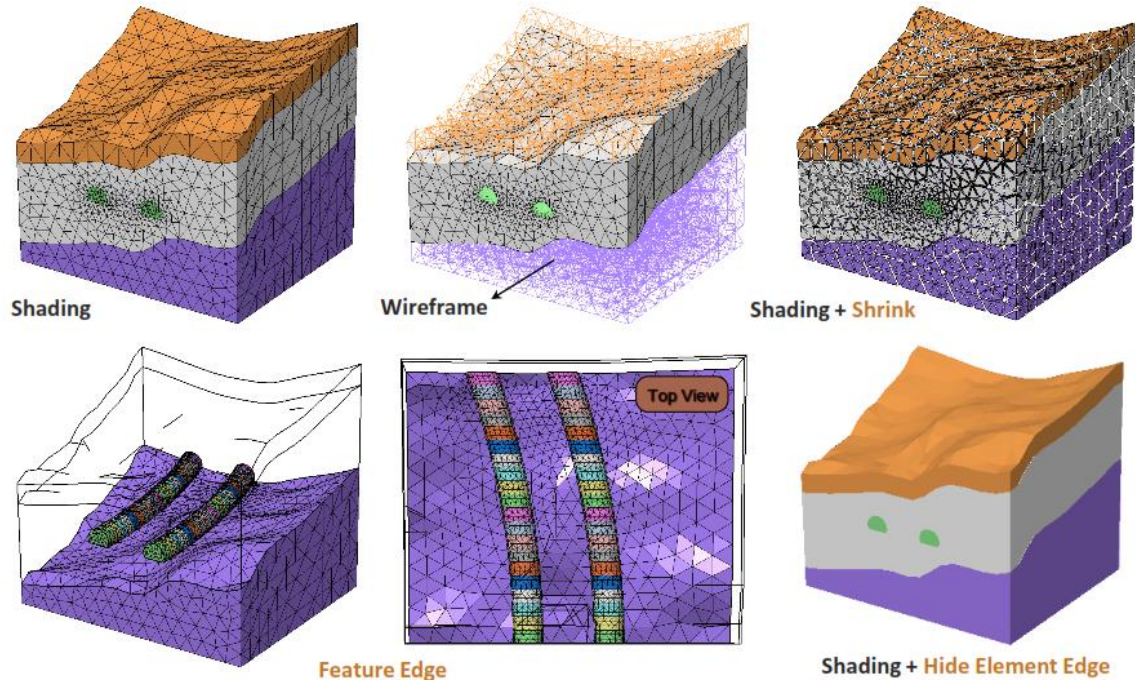
2. Παραγωγή πλέγματος (Mesh generation).

Για τη δημιουργία πλέγματος παρέχονται πολλές δυνατότητες επιλογής. Γενικά, προτείνεται η παραγωγή πλέγματος σε τετράεδρα ή σε εξαέδρα στοιχεία ώστε να προκύπτουν πιο ακριβή αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, για τα περίπλοκα μοντέλα συνηθίζεται η χρήση είτε τετράεδρων είτε τριγωνικών στοιχείων. Για την μεγιστοποίηση της λειτουργικότητας του, το Midas GTS παρέχει πληθώρα επιλογών και 3 διαφορετικές μεθόδους δημιουργίας πλέγματος (Auto-mesh, Mapped-mesh και Protrude-mesh). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.7, δίνεται η δυνατότητα διαφορετικής προβολής των πλεγμάτων.

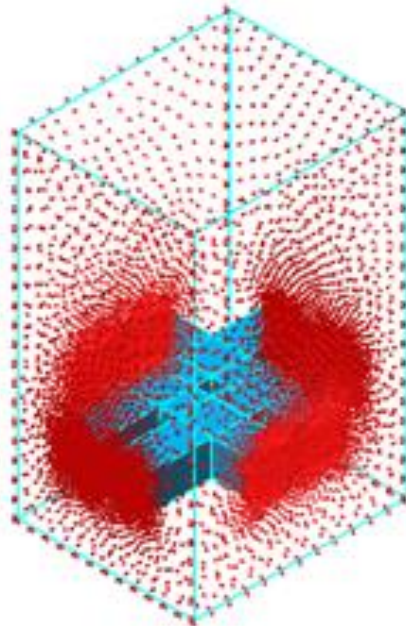
3. Ορισμός παραμέτρων ανάλυσης.

Το Midas GTS διαθέτει μεγάλη ποικιλία υλικών, φυσικών ιδιοτήτων, τύπων φορτίων και συνοριακών συνθηκών. Τα φορτία και οι συνοριακές συνθήκες μπορούν να εφαρμοστούν όχι μόνο σε συγκεκριμένα σημεία, αλλά και σε ολόκληρη πλευρά ή περιοχή πολλών σημείων. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η αποτελεσματική και ταχεία χρήση τους σε περίπλοκα μοντέλα. Με την αξιοποίηση όλων των παραθύρων εργασίας που βασίζονται σε περιβάλλον GUI (Graphical User Interface), το Midas GTS μεγιστοποιεί τη δυνατότητα

προσομοίωσης έτσι ώστε τα φορτία και οι συνοριακές συνθήκες να εμφανίζονται με πρακτικό τρόπο (Εικόνα 2.8). Ως αποτέλεσμα, αυτή η λειτουργία προσομοίωσης μειώνει δραματικά το σφάλμα εισαγωγής δεδομένων που μπορούν να γίνουν από το χρήστη.



Εικόνα 2.7. Δυνατότητες προβολής του πλέγματος του μοντέλου.



Εικόνα 2.8. Διαμόρφωση συνοριακών συνθηκών του μοντέλου.

4. Ανάλυση – Επίλυση.

Όταν το σχεδιασμένο μοντέλο λάβει και τις κατάλληλες παραμέτρους ανάλυσης, είναι έτοιμο για την ανάλυση. Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης όλα τα μηνύματα που αφορούν την εξέλιξη της, εμφανίζονται στο παράθυρο διαλόγου Output Window. Το Midas GTS παρέχει πληθώρα χαρακτηριστικών ανάλυσης τα οποία καλύπτουν σχεδόν όλο το εύρος των γεωτεχνικών εφαρμογών. Μερικές από τις λειτουργίες ανάλυσης είναι η στατική ανάλυση (Static Analysis), η ανάλυση σε στάδια εκσκαφής (Construction Stage Analysis), η ανάλυση σταθερής διαρροής (Steady-state Seepage Analysis), η ανάλυση Time History και άλλες οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια.

5. Εξαγωγή και αξιολόγηση αποτελεσμάτων.

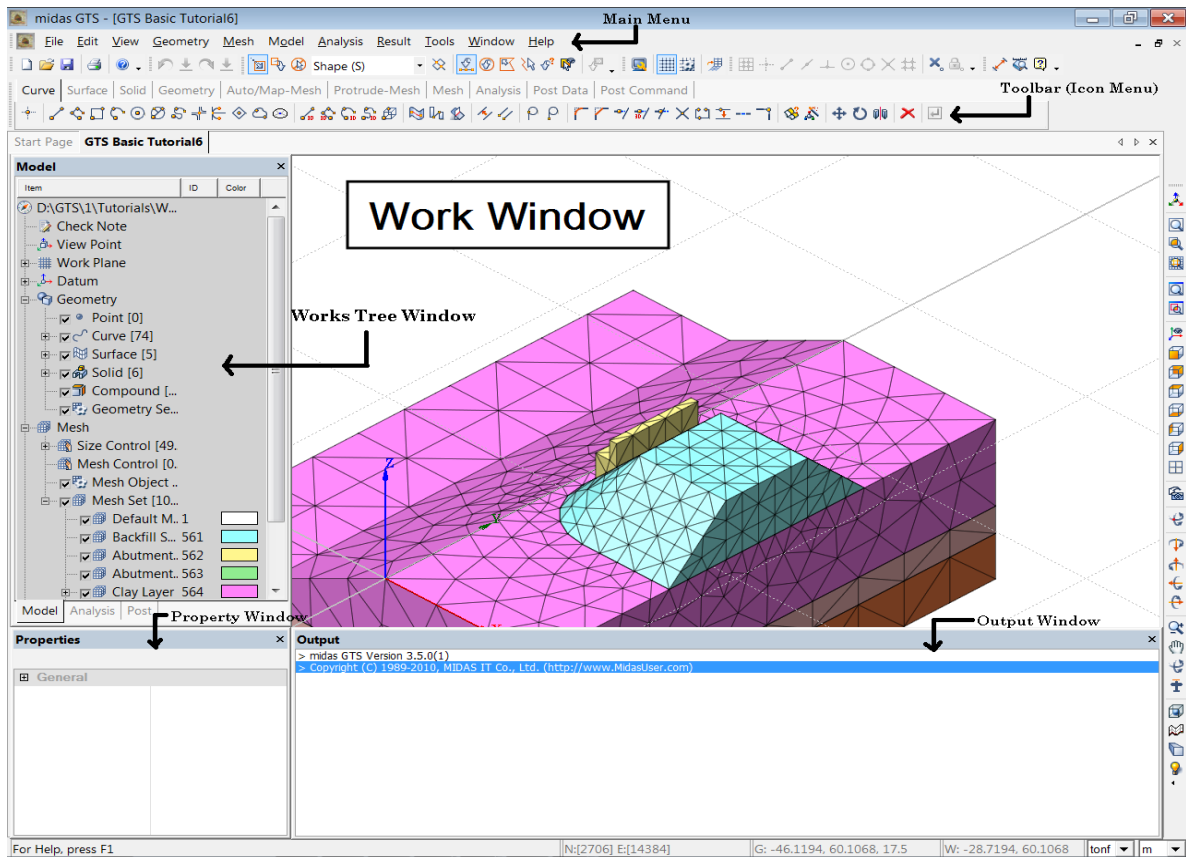
Έχοντας ολοκληρωθεί με επιτυχία η διαδικασία της ανάλυσης, το Midas GTS παρέχει μια ισχυρή βάση δεδομένων για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων (Result Evaluation). Προσφέρεται μεγάλος αριθμός γραφικών απεικονίσεων των αποτελεσμάτων, τα οποία έχουν βελτιωθεί σε σχέση με παλαιότερες εκδόσεις, με στόχο να εμφανίζουν μεγάλης κλίμακας μοντέλα και περίπλοκα στάδια εκσκαφής (construction stages). Επιπροσθέτως, όλοι οι πίνακες αποτελεσμάτων που δημιουργούνται είναι συμβατοί με το πρόγραμμα λογιστικών φύλλων, το MS Excel.

2.5.1. Περιβάλλον Εργασίας Midas GTS 2010

Το τρισδιάστατο πρόγραμμα ανάλυσης Midas GTS 2010 παρέχει ένα ευέλικτο περιβάλλον εργασίας. Το περιβάλλον εργασίας του προγράμματος είναι βελτιωμένο σε σύγκριση με παλαιότερες εκδόσεις του καθώς και με άλλα αντίστοιχα τρισδιάστατα προγράμματα. Ένα σημαντικό πρόβλημα των τρισδιάστατων προγραμμάτων ήταν πάντοτε ο πολύπλοκος σχεδιασμός, το Midas GTS 2010 έχει πετύχει να είναι φιλικό προς τον χρήστη, εύκολο στην εκμάθηση και εύχρηστο, κατά συνέπεια εξοικονομείται χρόνος σε σύγκριση με παλαιότερες εκδόσεις του Midas GTS.

Η οργάνωση των παραθύρων και τα διάφορα μενού επιλογών όπως αναλύονται στη συνέχεια, παρέχουν εύκολη πρόσβαση σε όλες τις λειτουργίες του προγράμματος που σχετίζονται με την είσοδο/έξοδο δεδομένων και γενικότερα με ολόκληρη την διαδικασία της ανάλυσης. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.9), διακρίνονται όλα τα παράθυρα

εργασίας καθώς και τα μενού εντολών που παρέχονται στο περιβάλλον εργασίας του Midas GTS 2010.



Εικόνα 2.9. Περιβάλλον Εργασίας του Midas GTS 2010.

Στο πρόγραμμα Midas GTS υπάρχουν συνολικά 5 παράθυρα εργασίας, τα οποία είναι τα εξής :

I. Παράθυρο εργασίας (Work Window)

Αποτελεί το κυριότερο παράθυρο του προγράμματος, αφού στο παράθυρο εργασίας σχεδιάζεται και εμφανίζεται το μοντέλο πριν και μετά την ανάλυση με τη βοήθεια προηγμένων γραφικών τελευταίας τεχνολογίας (Εικόνα 2.9).

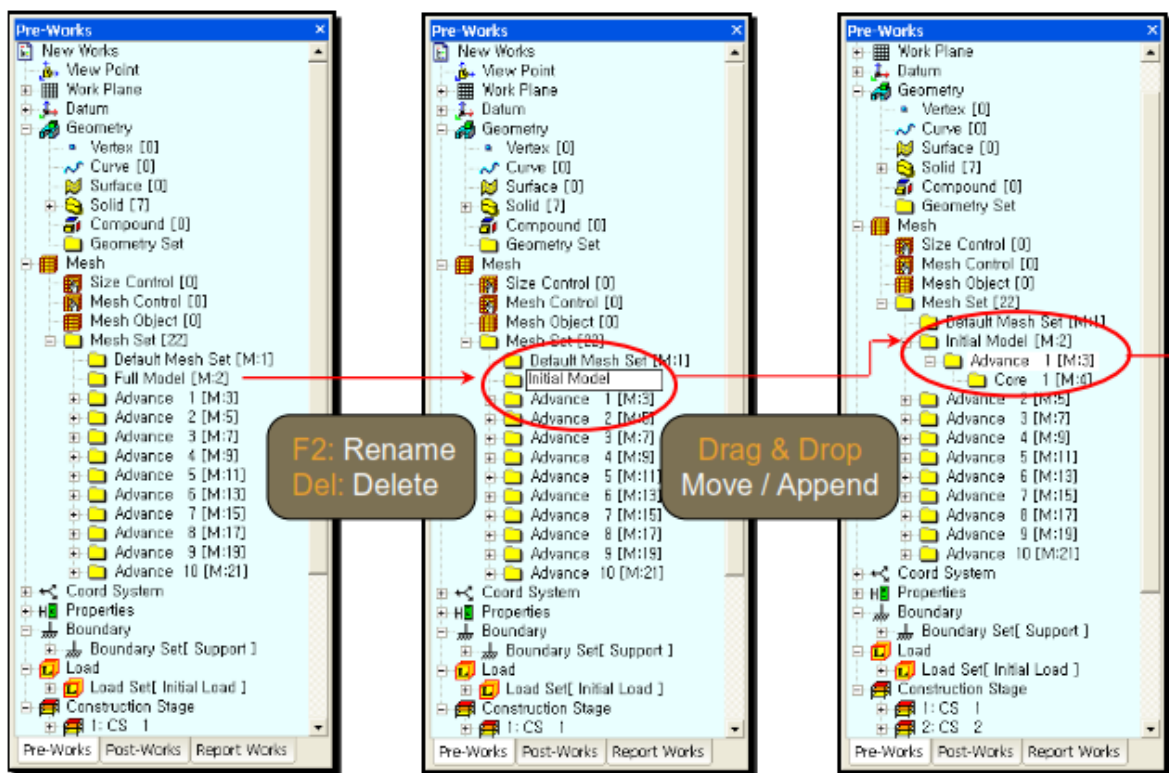
II. Παράθυρο πινάκων (Table Window)

Οι πίνακες παρουσιάζουν όλους τους τύπους δεδομένων εισόδου, ανάλυσης και αποτελεσμάτων σε μορφή υπολογιστικών φύλλων. Διάφορες λειτουργίες τροποποίησης, επιπρόσθετων δεδομένων εισόδου, σύνταξης, ρύθμισης χαρακτηριστικών και δυνατότητες αναζήτησης παρέχονται στο παράθυρο πινάκων. Επίσης, επιτρέπουν την μεταφορά και

ανταλλαγή δεδομένων με άλλα αντίστοιχα λογισμικά πακέτα βάσης δεδομένων, συμπεριλαμβανομένου του πλέον διαδεδομένου MS-Excel.

III. Works Tree Window

Στο Works Tree Window εμπεριέχονται όλα τα δεδομένα του τρέχοντος μοντέλου, όπως είναι η γεωμετρία, στοιχεία πλέγματος (mesh), φορτία, συνοριακές συνθήκες, έλεγχος ανάλυσης και ανάλυση των αποτελεσμάτων. Είναι οργανωμένο με δενδροειδής διάταξη με στόχο τον άμεσο και εύκολο χειρισμό, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.10.

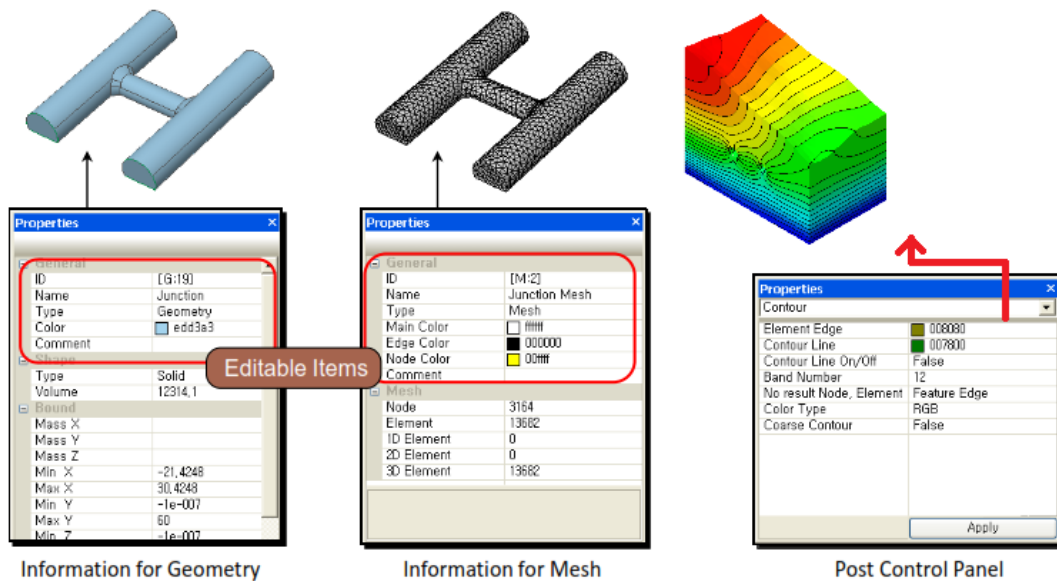


Εικόνα 2.10. Διαμόρφωση και δυνατότητες του Works Tree Window.

IV. Παράθυρο ιδιοτήτων (Property window)

Στο παράθυρο ιδιοτήτων εμφανίζονται γενικές πληροφορίες σχετικά με συγκεκριμένα αντικείμενα που επιλέγει ο χρήστης είτε από το παράθυρο εργασίας είτε από το Works Tree Window. Βασικές τροποποιήσεις, όπως για παράδειγμα το όνομα και το χρώμα του επιλεγμένου αντικειμένου, μπορούν να επιτευχθούν από το παράθυρο ιδιοτήτων. Τέλος, ανάλογα με τον τρόπο εργασίας, δηλαδή προ-επεξεργασία (πριν την ανάλυση) ή μετά-

επεξεργασία (μετά την ανάλυση), το παράθυρο ιδιοτήτων έχει διαφορετική μορφή και λειτουργία όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.11).



Εικόνα 2.11. Παράθυρο ιδιοτήτων (Property window), ανάλογα με το στάδιο εργασίας.

V. Output Window

Στο Output Window εμφανίζονται όλοι οι απαραίτητοι τύποι πληροφοριών, σχετικά με την μοντελοποίηση, τις προειδοποιήσεις και τα δυνητικά προβλήματα που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της ανάλυσης.

Ακόμα, το πρόγραμμα Midas GTS 2010 παρέχει διάφορα μενού εντολών, όπως περιγράφονται παρακάτω :

- **Κύριο μενού (Main Menu)**

Εμπεριέχονται όλες οι εντολές που διαθέτει το πρόγραμμα και είναι απαραίτητες για την λειτουργία του.

- **Γραμμή εργαλείων (Toolbar, Icon Menu)**

Στη γραμμή εργαλείων, κάθε εντολή έχει ξεχωριστό εικονίδιο έτσι ώστε να γίνεται ευκολότερα αντιληπτή και άμεσα προσβάσιμη από τον χρήστη. Ακόμα, τα εικονίδια είναι ομαδοποιημένα ανάλογα με τις ιδιότητες που προσφέρουν οι εντολές τους με σκοπό την εξοικονόμηση χρόνου για συχνές και επαναλαμβανόμενες εντολές. Τέλος, δίνεται η

δυνατότητα μετακίνησης κάθε γραμμής εργαλείων στην επιθυμητή θέση που στοχεύει στην διευκόλυνση του χρήστη.

- **Context Menu**

Αποτελεί το αναδυόμενο παράθυρο το οποίο ελαχιστοποιεί την κίνηση του ποντικιού και προσφέρει άμεση επιλογή των συχνών εντολών που ο χρήστης χρησιμοποιεί. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση χρόνου.

2.5.2 Χαρακτηριστικά ανάλυσης

Το λογισμικό πακέτο Midas GTS παρέχει τις ακόλουθες επιλογές τρόπου ανάλυσης μοντέλων :

- *Στατική Ανάλυση (Static Analysis).*

Η στατική ανάλυση πραγματοποιείται όταν το εξεταζόμενο μοντέλο δεν βρίσκεται σε κίνηση. Ωστόσο, η συγκεκριμένη μέθοδος ανάλυσης συνήθως εφαρμόζεται ακόμα και όταν υφίσταται κίνηση, αλλά πολύ μικρής συχνότητας. Οι 3 τύποι ανάλυσης που περιλαμβάνει η στατική ανάλυση, είναι: α) Γραμμική, Ελαστική Ανάλυση (Linear Elastic Analysis), β) Μη-Γραμμική, Ελαστική Ανάλυση (Nonlinear Elastic Analysis) και γ) Ελαστοπλαστική Ανάλυση (Elastoplastic Analysis).

- *Ανάλυση σε στάδια εκσκαφής (Construction Stage Analysis).*

Με την συγκεκριμένη μέθοδο ανάλυσης δίνεται η δυνατότητα ανάλυσης κάθε γεωτεχνικού μοντέλου. Συνήθως, ασχολείται με τα μη-γραμμικά υλικά και οι ιδιότητες τους μπορούν να ληφθούν μόνο από την αρχική κατάσταση (initial stage), η οποία αναφέρεται ως η κατάσταση που επικρατεί πριν την εκσκαφή. Το πιο κρίσιμο ζήτημα στην αρχική κατάσταση είναι η αρχική τάση που δέχεται το έδαφος γιατί αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του φορτίου της εκσκαφής και της διατμητικής αντοχής των μοντέλων, όπως στα παραδείγματα που χρησιμοποιείται ανάλυση Mohr-Coulomb. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η εκτέλεση της ανάλυσης σε ξεχωριστά και διαδοχικά στάδια εκσκαφής ξεκινώντας από το αρχικό στάδιο. Δεδομένου ότι η διαδικασία της πραγματικής εκσκαφής είναι περίπλοκη και πολύπλοκη, η ανάλυση σε στάδια εκσκαφής (Construction Stage Analysis) απλουστεύει τη διαδικασία της ανάλυσης σε απλά βήματα.

- *Ανάλυση σταθερής διαρροής (Steady-state Seepage Analysis).*

Η ανάλυση σταθερής διαρροής αντιπροσωπεύει μια ανάλυση στην οποία δεν συμβαίνει καμία απολύτως αλλαγή τόσο στις εσωτερικές όσο και στις εξωτερικές συνοριακές συνθήκες κατά την διάρκεια της ανάλυσης. Ως εκ τούτου, στην συγκεκριμένη ανάλυση οι εισροές είναι πάντα ίσες με τις εκροές.

- *Ανάλυση παροδικής διαρροής (Transient Seepage Analysis).*

Η ανάλυση παροδικής διαρροής χρησιμεύει όταν συμβαίνουν μεταβολές στο φορτίο και στις συνοριακές συνθήκες κατά την διάρκεια της ανάλυσης. Τα πιο διακριτά χαρακτηριστικά της ανάλυσης είναι η αλλαγή των συνοριακών συνθηκών και η μεταβολή του όγκου του νερού εντός των υλικών.

- *Ανάλυση ιδιοτιμής (Eigenvalue Analysis).*

Η ανάλυση Eigenvalue χρησιμοποιείται για να ελέγξει την δυναμική συμπεριφορά του μοντέλου. Επίσης, ονομάζεται και ανάλυση Free Vibration.

- *Ανάλυση Time History*

Η ανάλυση Time History χρησιμοποιείται όταν ένα δυναμικό φορτίο εφαρμόζεται στο μοντέλο. Η συγκεκριμένη μέθοδος ανάλυσης, επιλύει τα προβλήματα με την εξέταση της δυναμικής συμπεριφοράς της εκσκαφής και των εφαρμοζόμενων φορτιών. Ακόμη, καθορίζει την συμπεριφορά των μοντέλων (π.χ. μετατοπίσεων) σε οποιοδήποτε χρονικό σημείο της ανάλυσης.

- *Ανάλυση Response Spectrum*

Η ανάλυση Response Spectrum χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον στον σχεδιασμό μοντέλων στα οποία υφίσταται σεισμική δόνηση.

2.5.3. Κριτήρια αστοχίας

Το πρόγραμμα Midas GTS παρέχει πληθώρα επιλογών σχετικά με την επιθυμητή συμπεριφορά των υλικών του μοντέλου, δηλαδή του κριτηρίου αστοχίας που ακολουθούν. Εμπεριέχονται ελαστικά και διαμήκη ισότροπα υλικά, καθώς επίσης και μη-γραμμικά υλικά. Τα κριτήρια αστοχίας που διατίθενται είναι τα ακόλουθα :

- *Κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.*

Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb είναι αρκετά απλό και ακριβές, γι' αυτούς τους λόγους είναι το πιο ευρέως διαδεδομένο στις γεωτεχνικές εφαρμογές. Παρ' όλα αυτά, το συγκεκριμένο κριτήριο έχει δύο μειονεκτήματα. Πρώτον, η αρχική τάση δεν επηρεάζει την τάση στην αστοχία, όμως αυτή η παραδοχή είναι άκρως αντίθετη με τα εργαστηριακά αποτελέσματα. Δεύτερον, υποθέτει α) ότι η περιβάλλουσα στο κύκλο του Mohr είναι ευθεία και β) ότι η αντοχή του πετρώματος δεν εξαρτάται από την υδροστατική πίεση. Συνεπώς, για χαμηλές τιμές της υδροστατικής πίεσης λαμβάνονται αρκετά καλά αποτελέσματα, ενώ για υψηλές τιμές της υδροστατικής πίεσης η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της ανάλυσης δεν είναι εγγυημένη. Παρά τα μειονεκτήματά του, το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb παραμένει το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο και επιτυχημένο κριτήριο στο κλάδο της γεωτεχνικής μηχανικής.

- *Κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown.*

Το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown είναι ένα εμπειρικό κριτήριο κυρίως για εκτίμηση της αντοχής της ρωγματωμένης βραχομάζας, το οποίο τυγχάνει ευρείας εφαρμογής. Βασίζεται στο κριτήριο του Griffith και έχει αναπτυχθεί με τη χρήση πολλών πειραματικών αποτελεσμάτων από πετρώματα διαφόρων αντοχών. Ωστόσο, το συγκεκριμένο κριτήριο έχει ένα περιορισμό στις εφαρμογές του. Στις περιπτώσεις όπου ένα πέτρωμα εμφανίζει ανισοτροπία, δε μπορεί να εφαρμοστεί το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown. Τέλος, το γεγονός ότι το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown περιλαμβάνει εξάρτηση μεταξύ της αντοχής του πετρώματος και της τάσης, το καθιστά πιο ενδεδειγμένο από το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb.

- *Κριτήριο αστοχίας Tresca.*

Το συγκεκριμένο κριτήριο έχει πολλές αρνητικές πτυχές όταν χρησιμοποιείται σε γεωτεχνικές εφαρμογές. Πρώτον, ο τύπος Tresca αγνοεί την άμεση σχέση της

υδροστατικής πίεσης με την διατμητική τάση. Δεύτερον, υπολογίζει την ίδια τιμή για την αντοχή σε εφελκυσμό με την αντοχή σε θλίψη του πετρώματος. Όμως, είναι αποδεδειγμένο, από πολλές πειραματικές δοκιμές, ότι η τιμή της αστοχίας σε εφελκυσμό είναι κατά πολύ μικρότερη από εκείνη της αστοχίας σε θλίψη. Τρίτον, δεν λαμβάνει ποτέ υπόψη την επίδραση της αρχικής τάσης. Ωστόσο, το κριτήριο αστοχίας Tresca μπορεί να εξάγει καλά αποτελέσματα στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της συνολικής τάσης σε κορεσμένο έδαφος. Σύμφωνα με πειραματικά αποτελέσματα, η διατμητική τάση των κορεσμένων εδαφών δεν σχετίζεται με την συνολική τάση εξαιτίας της υδροστατικής πίεσης. Ως εκ τούτου, στις περιπτώσεις αυτές το κριτήριο αστοχίας Tresca αποτελεί ασφαλή επιλογή.

- *Κριτήριο αστοχίας von Mises.*

Παρόμοιο με το κριτήριο αστοχίας Tresca, το von Mises βασίζεται στην παραδοχή ότι η εφελκυστική και η θλιπτική αντοχή του πετρώματος είναι η ίσες και ότι η υδροστατική πίεση δεν σχετίζεται με τη διατμητική τάση. Άρα, καθίσταται ακατάλληλη για πολλές γεωτεχνικές εφαρμογές. Όμως, όπως και το Tresca, το κριτήριο von Mises εφαρμόζεται σε κορεσμένα εδάφη. Τέλος, επειδή το von Mises εξαλείφει κάποιες υπολογιστικές δυσκολίες, καθίσταται πιο βολικό και προτιμάται από το κριτήριο αστοχίας Tresca.

- *Κριτήριο αστοχίας Drucker – Prager.*

Το κριτήριο αστοχίας Drucker – Prager μπορεί να θεωρηθεί σαν επέκταση των κριτηρίων Mohr-Coulomb και von Mises. Το συγκεκριμένο κριτήριο είναι πολύ απλό, διότι για να οριστεί χρειάζεται μόνο δυο παραμέτρους οι οποίες λαμβάνονται από την τυπική τριαξονική δοκιμή. Το επίπεδο αστοχίας του είναι πολύ ομαλό και κατά συνέπεια είναι μαθηματικά βολικό για τρισδιάστατο υπολογισμό. Σε αντίθεση με το Mohr-Coulomb, το κριτήριο αστοχίας Drucker – Prager λαμβάνει υπόψη την επίδραση της αρχικής τάσης. Ωστόσο, αν οι δυο παράμετροι ληφθούν από ένα πείραμα χωρίς προσεκτική και εκτεταμένη μελέτη, τότε η τιμή της αρχικής τάσης θα αποκλίνει σημαντικά από τα αποτελέσματα του εργαστηρίου.

- *Κριτήριο αστοχίας Duncan – Chang.*

Στο συγκεκριμένο κριτήριο αστοχίας η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης γίνεται μη-γραμμική. Αυτό το μη-γραμμικό ελαστικό μοντέλο αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά του

εδάφους με την μεταβολή του Μέρου Ελαστικότητας (Young's Modulus of Elasticity). Στο κριτήριο αστοχίας Duncan – Chang, η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης είναι υπερβολή και το Μέτρο Ελαστικότητας είναι συνάρτηση της διατμητικής τάσης.

- *Κριτήριο αστοχίας Strain Softening.*

Το λογισμικό πακέτο Midas GTS παρέχει, επίσης, το κριτήριο αστοχίας Strain Softening. Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης σε αυτό το κριτήριο μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη. Αρχικά, συμπεριφέρεται γραμμικά μέχρι την αρχική τάση. Στη συνέχεια ξεκινάει το κομμάτι της πλαστικής παραμόρφωσης. Τέλος, μόλις περάσει το κομμάτι της πλαστικής παραμόρφωσης, η καμπύλη γίνεται οριζόντια και η τάση παραμένει σταθερή.

- *Κριτήριο αστοχίας Modified Cam-Clay*

Το κριτήριο αστοχίας Modified Cam-Clay είναι το πρώτο κριτήριο το οποίο παρέχει ελαστική και πλαστική συμπεριφορά του υλικού. Είναι μια αριθμητική μέθοδος η οποία βασίζεται στους Atkinson & Brandsby (1978) και Britto & Gunn (1987). Το κριτήριο αστοχίας Modified Cam-Clay σε γενικές γραμμές είναι ίδιο με το κριτήριο Cam-Clay. Η διαφορά τους είναι ότι, στο Cam-Clay η καμπύλη είναι λογαριθμική, ενώ στο Modified Cam-Clay είναι έλλειψη.

- *Κριτήριο αστοχίας Jointed Rock Mass.*

Το κριτήριο αστοχίας Jointed Rock Mass αποτελεί ένα ανισότροπο-ελαστικό και πλαστικό μοντέλο. Ως εκ τούτου, το συγκεκριμένο κριτήριο εμπεριέχει τα χαρακτηριστικά ενός εγκάρσιου ισότροπου ελαστικού υλικού καθώς και ενός ανισότροπου πλαστικού υλικού. Γενικά, χρησιμοποιείται για την ανάλυση συμπεριφοράς κατακεραματισμένης βραχώμαζας.

- *Κριτήριο αστοχίας Jardine*

Το κριτήριο αστοχίας Jardine αποτελεί ένα ελαστοπλαστικό μοντέλο. Το συγκεκριμένο κριτήριο χαρακτηρίζεται από την αρχική άκαμπτη συμπεριφορά, ενώ στη συνέχεια η ακαμψία μειώνεται με την αύξηση της παραμόρφωσης. Εργαστηριακές μελέτες έδειξαν ότι ακόμη και για μικρή παραμόρφωση, πολλά εδάφη εμφανίζουν μη-γραμμική συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης. Σε πολλά γεωτεχνικά προβλήματα, πολύ μικρές παραμορφώσεις εμφανίζονται σε μεγάλο μέρος του μοντέλου.

Κεφάλαιο 3.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ (3D) ΑΝΑΛΥΣΗΣ

3.1. Σχεδιασμός μοντέλου στο MIDAS GTS 2010

Με σκοπό να κατανοηθούν οι βασικές αρχές σχεδιασμού, με τις οποίες λειτουργεί το λογισμικό πακέτο Midas GTS 2010, περιγράφεται παρακάτω ο σχεδιασμός και η ανάλυση ενός τρισδιάστατου μοντέλου. Επίσης, στο Παράρτημα της παρούσας διπλωματικής δίνεται λεπτομερές παράδειγμα σχεδιασμού στο Midas GTS.

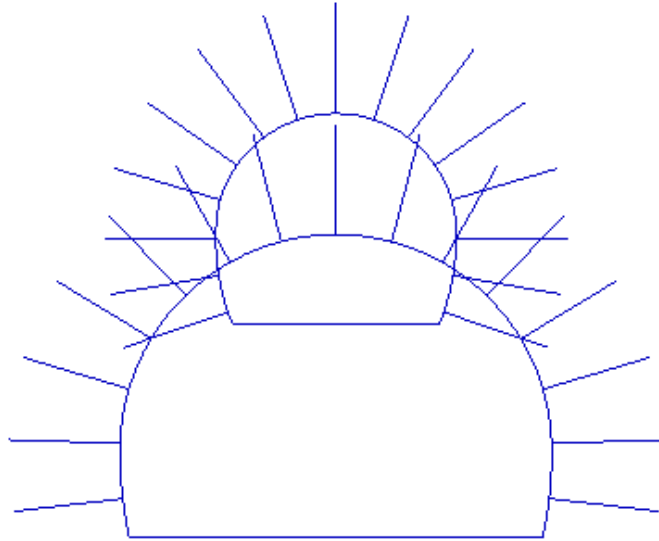
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο της παρούσας διπλωματικής, η σειρά με την οποία εκτελούνται οι εντολές στο Midas GTS βασίζεται σε 5 βασικούς άξονες. Η σειρά είναι η εξής :

1. Σχεδιασμός γεωμετρίας μοντέλου.
2. Παραγωγή πλέγματος (Mesh generation).
3. Ορισμός παραμέτρων ανάλυσης.
4. Ανάλυση – Επίλυση.
5. Εξαγωγή και αξιολόγηση αποτελεσμάτων.

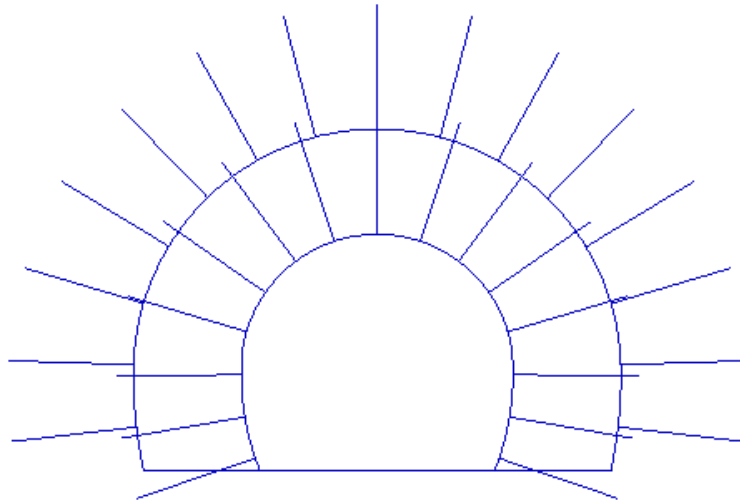
Η πρώτη ενέργεια στο Midas GTS αποτελείται από τον προσδιορισμό του είδους και των χαρακτηριστικών του εδάφους, εντός του οποίου θα τοποθετηθεί η επιθυμητή υπόγεια κατασκευή.

Στη συνέχεια, σχεδιάζεται η γεωμετρία της εκσκαφής και κατ' επέκταση του μοντέλου. Οι επιθυμητές διατομές των υπόγειων θαλάμων, λαμβάνονται είτε από αρχείο σχεδιασμένο σε πρόγραμμα Computer Aided Design (CAD), όπως για παράδειγμα από AutoCad .dxf file, είτε μέσω του ίδιου του προγράμματος, το οποίο παρέχει σχεδιαστική λειτουργία με μεγάλες δυνατότητες.

Οι διατομές των στοών που επιλέχθηκαν, τοποθετούνται ακανόνιστα στο χώρο (Εικόνα 3.1), γι' αυτό τον λόγο το επόμενο βήμα του σχεδιασμού της επιθυμητής γεωμετρίας είναι η επιλογή κοινού επιπέδου βάσης για όλες τις στοές όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2.

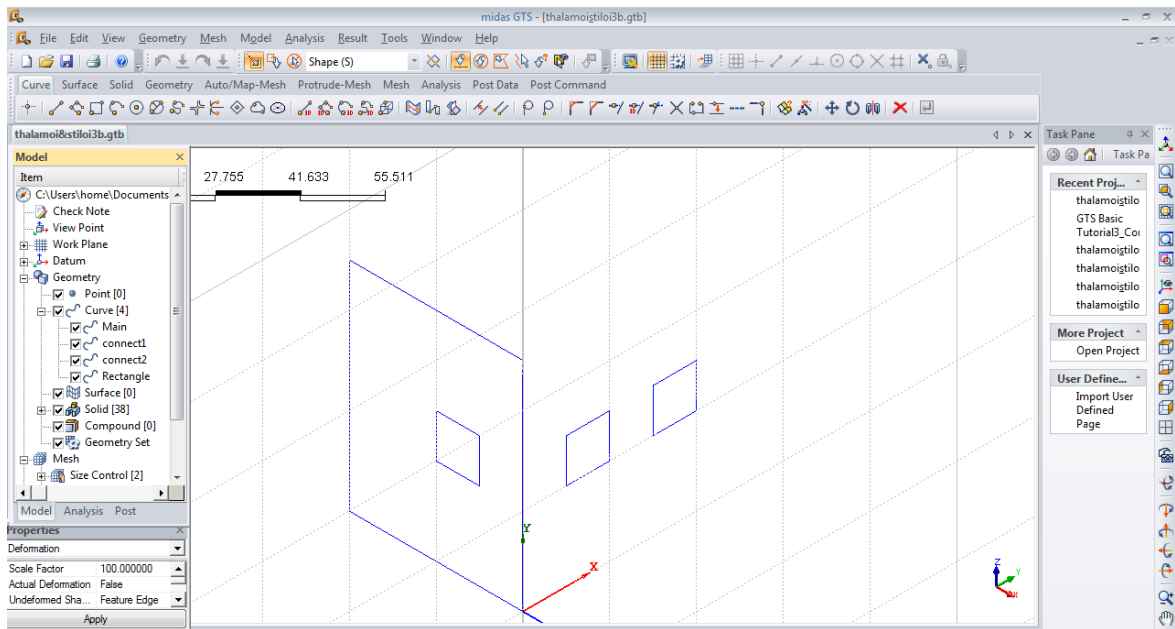


Εικόνα 3.1. Αταξινόμητες διατομές στοών.



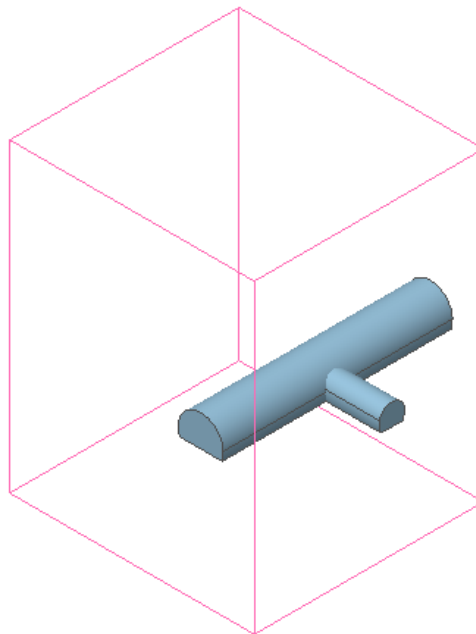
Εικόνα 3.2. Κοινό επίπεδο βάσης διατομών στοών.

Εφόσον επιτεύχθηκε το κοινό επίπεδο βάσης όλων των στοών, ακολουθεί η τοποθέτηση των διατομών προς την επιθυμητή διεύθυνση. Έπειτα, ακολουθεί ο σχεδιασμός των ορίων (περιγράμματος) του πετρώματος και κατά συνέπεια του μοντέλου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3. Σχεδιασμός περιγραμμάτων στοών και ορίων του μοντέλου.

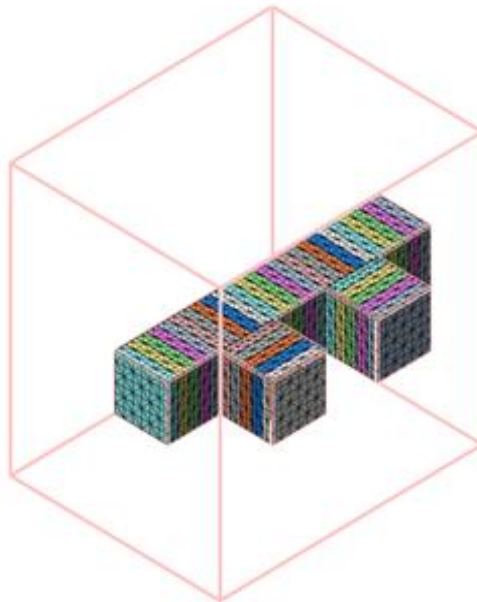
Στη συνέχεια, μετατρέπονται οι διατομές τόσο των στοών όσο και του περιγράμματος του μοντέλου που σχεδιάστηκε προηγουμένως, σε τρισδιάστατο μοντέλο με τις επιθυμητές διαστάσεις όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.4.



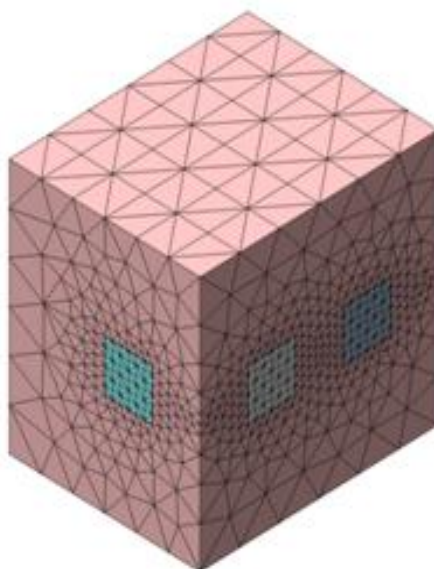
Εικόνα 3.4. Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου.

Στο επόμενο βήμα περιλαμβάνεται η δημιουργία τετράεδρου πλέγματος (Mesh) για τις στοές και το πέτρωμα που έχουν σχεδιαστεί (Εικόνα 3.5 & 3.6). Αρχικά, ορίζεται το μέγεθος του πλέγματος με σκοπό την καλύτερη ποιότητα του πλέγματος και κατά συνέπεια την εξαγωγή των βέλτιστων αποτελεσμάτων. Στο σημείο αυτό συναντάται το εξής πρόβλημα, εφόσον επιλεγθεί μικρό πλέγμα (δηλαδή μεγάλος αριθμός κόμβων), τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν θα είναι μεν ακριβή, όμως ο όγκος των δεδομένων που θα πρέπει να επεξεργαστεί το πρόγραμμα θα είναι αρκετά μεγάλος με συνέπεια τον υπερβολικό χρόνο υπολογισμού. Από την άλλη πλευρά, εφόσον επιλεγθεί μεγάλο πλέγμα (δηλαδή μικρός αριθμός κόμβων), τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν δεν θα αντικατοπτρίζουν την πραγματικότητα, παρουσιάζοντας μεγάλες αποκλίσεις.

Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό, επιχειρείται η εύρεση της βέλτιστης λύσης ώστε να εξάγονται ικανοποιητικά αποτελέσματα σε λίγο χρόνο.



Εικόνα 3.5. Δημιουργία πλέγματος (Meshing) των στοών.



Εικόνα 3.6. Δημιουργία πλέγματος (Meshing) ολόκληρου του μοντέλου.

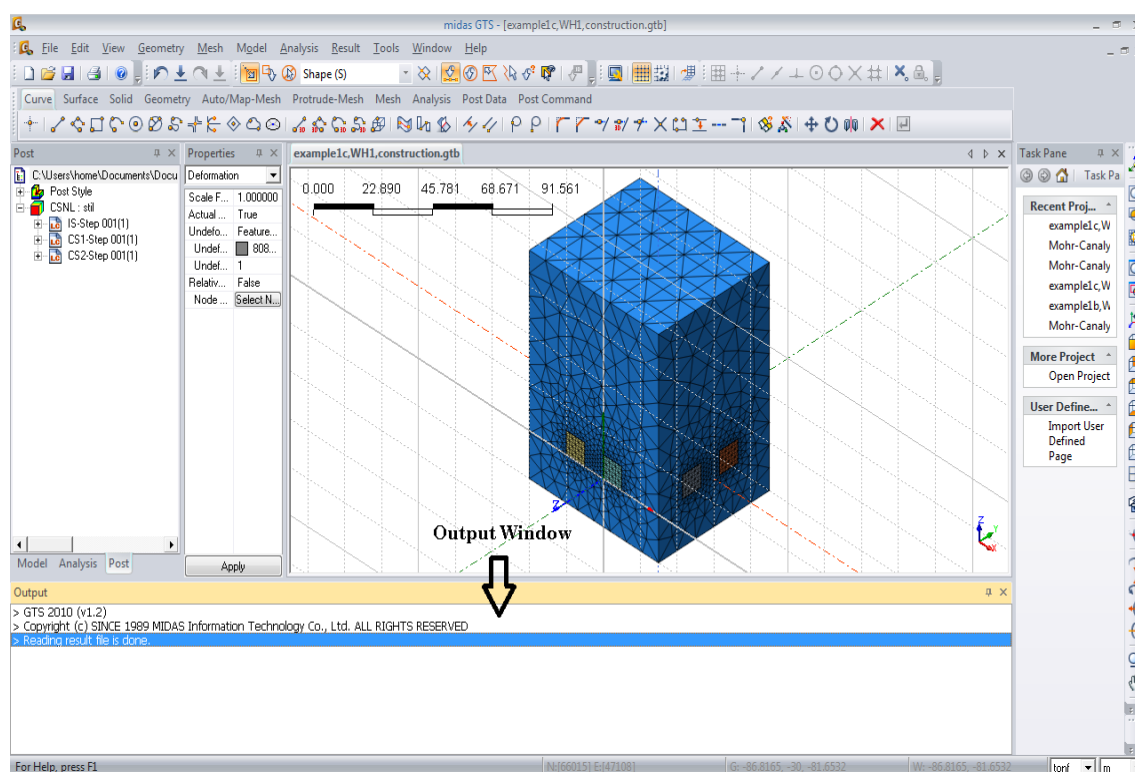
Συνεχίζοντας, το βήμα αυτό περιλαμβάνει τον ορισμό των συνοριακών συνθηκών του μοντέλου που σχεδιάστηκε. Οι συνοριακές συνθήκες έχουν την δυνατότητα να εφαρμόζονται, σε συγκεκριμένους κόμβους (nodes) ή στοιχεία (elements) ξεχωριστά, αλλά δίνεται και η δυνατότητα μαζικής σχεδίασης ολόκληρης πλευράς, η οποία διευκολύνει τον χρήστη σε περιπτώσεις μεγάλων και περίπλοκων μοντέλων.

Στη συνέχεια ορίζονται οι φάσεις (στάδια) της υπόγειας εκσκαφής. Τα στάδια εκσκαφής μπορούν να οριστούν όπως ο χρήστης επιθυμεί. Αρχικά, ορίζονται τα στοιχεία που υπάρχουν στο αρχικό στάδιο (initial stage), δηλαδή πριν αρχίσει η φάση της πρώτης εκσκαφής. Ακολούθως, ορίζονται τα στοιχεία τα οποία μετακινούνται σε κάθε επόμενο στάδιο εκσκαφής μετά το αρχικό (initial stage). Μετά το πέρας κάθε εκσκαφής είναι δυνατή η προσθήκη αγκυριών, εκτοξευόμενου σκυροδέματος καθώς και άλλων συμπληρωματικών στοιχείων υποστήριξης.

Στο επόμενο βήμα, επιλέγεται ο τρόπος με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση του μοντέλου και ορίζονται οι περαιτέρω λεπτομέρειες της ανάλυσης. Ο καθορισμός της μεθόδου ανάλυσης αποτελεί πολύ κρίσιμη επιλογή για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, αφού καθορίζει την συμπεριφορά του πετρώματος. Η ανάλυση μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τύπους ανάλυσης όπως για παράδειγμα, ανάλυση σε στάδια εκσκαφής (Construction Stage), γραμμική / μη-γραμμική στατική ανάλυση (Linear/Nonlinear Static), ανάλυση ευστάθειας πρανών (Slope Stability), ανάλυση διαρροής (Seepage) και άλλους.

Το τελευταίο βήμα περιλαμβάνει το στάδιο της επίλυσης με σκοπό να εξαχθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Η ανάλυση ξεκινά να εκτελείται άμεσα μετά από την επιλογή μία απλής εντολής.

Το μοντέλο αποθηκεύεται αυτόματα από το πρόγραμμα πριν αρχίσει να εκτελείται η ανάλυση. Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης εμφανίζονται μηνύματα στο παράθυρο διαλόγου Output Window, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.7. Τα μηνύματα που εμφανίζονται δείχνουν την διαδικασία και την εξέλιξη της ανάλυσης. Όμως, ορισμένα από τα μηνύματα είναι πολύ σημαντικά, επειδή αφορούν σφάλματα που μπορούν να προκληθούν κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Μετά το πέρας της ανάλυσης, τα μηνύματα αυτά αποθηκεύονται σε ξεχωριστούς φακέλους, τόσο τα αποτελέσματα της ανάλυσης (*.TA file) όσο και οι λεπτομερείς πληροφορίες της ανάλυσης (*.OUT file).



Εικόνα 3.7. Παράθυρο σχολίων (Output Window) Midas GTS.

Τέλος, μετά το πέρας μιας επιτυχημένης ανάλυσης, ακολουθεί η διαδικασία ανάγνωσης και αξιολόγησης των εξαχθέντων αποτελεσμάτων. Υπάρχει πληθώρα αποτελεσμάτων, ανάλογα με τον τρόπο ανάλυσης. Επίσης, το Midas GTS-Post Processing παρέχει την δυνατότητα συγκέντρωσης αποτελεσμάτων σε πίνακες ή διαγράμματα και τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων στο MS-Excel για την διευκόλυνση των χρηστών. Μερικά από τα συνήθη αποτελέσματα που εξαγονται από όλους τους τρόπους ανάλυσης είναι οι μετατοπίσεις (Displacements), οι τάσεις (3D Stress), οι παραμορφώσεις (3D Strain) κ.α.

3.2. Εφαρμογή πεπερασμένων στοιχείων για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των στύλων

Με στόχο να εξεταστεί η συμπεριφορά και η ευστάθεια των στύλων, σε συνάρτηση με τις μεταβολές διαφόρων παραμέτρων, όπως για παράδειγμα τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας, ο λόγος πλάτους / ύψους του στύλου και το πλευρικό φορτίο που ασκείται στον στύλο, δημιουργείται ένας αριθμός πρότυπων στύλων. Αυτοί οι πρότυποι στύλοι κατηγοριοποιούνται σε ομάδες έτσι ώστε η κάθε ομάδα στύλων να έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά και να εξετάζεται πιο αναλυτικά. Όλες οι ομάδες των στύλων που δημιουργούνται, αναλύονται με την βοήθεια ενός τρισδιάστατου λογισμικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων, του Midas GTS 2010. Η τρισδιάστατη ανάλυση επιλέγεται έναντι της δισδιάστατης, διότι, όπως προαναφέρθηκε, παρέχει μεγαλύτερες σχεδιαστικές δυνατότητες και εξάγει ακριβέστερα αποτελέσματα. Επίσης, σε σύγκριση με την 2-D ανάλυση, η τρισδιάστατη ανάλυση τοποθετώντας την τρίτη διάσταση στο χώρο έχει την δυνατότητα να αντικατοπτρίζει καλύτερα την πραγματικότητα, δίνοντας την αίσθηση του αληθινού χώρου.

Επιπροσθέτως, η επιλογή του τρισδιάστατου προγράμματος για την ανάλυση των στύλων βοηθάει σε έναν βασικό στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ο οποίος είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων της δισδιάστατης και της τρισδιάστατης μεθόδου ανάλυσης. Ακόμη, για την επίτευξη της συγκεκριμένης σύγκρισης λαμβάνονται αποτελέσματα δισδιάστατης ανάλυσης από προηγούμενη διπλωματική εργασία (Παπαγιαννόπουλος, 2010) μέσω του 2-D προγράμματος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων Phase².

Γενικά, σε κάθε μία από τις ομάδες των στύλων που θα δημιουργηθούν, θα αξιολογείται μια από τις παρακάτω παραμέτρους: α) οριζόντιες μετατοπίσεις (Displacements, Dxy), β) συντελεστής ασφαλείας (Factor of Safety, FS) και γ) αστοχίες σε θλίψη που συμβαίνουν στο στύλο.

Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν, σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά και την ευστάθεια των στύλων είναι ο λόγος W_p / H_p του στύλου, η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη του άρρηκτου πετρώματος (UCS) και η πλευρική φόρτιση μέσω της ενίσχυσης. Επιπλέον, πολύ σημαντικό ζήτημα αποτελεί η σύγκριση μεταξύ 2-D και 3-D μεθόδων ανάλυσης. Συνεπώς, προκύπτουν οι εξής ομάδες στύλων:

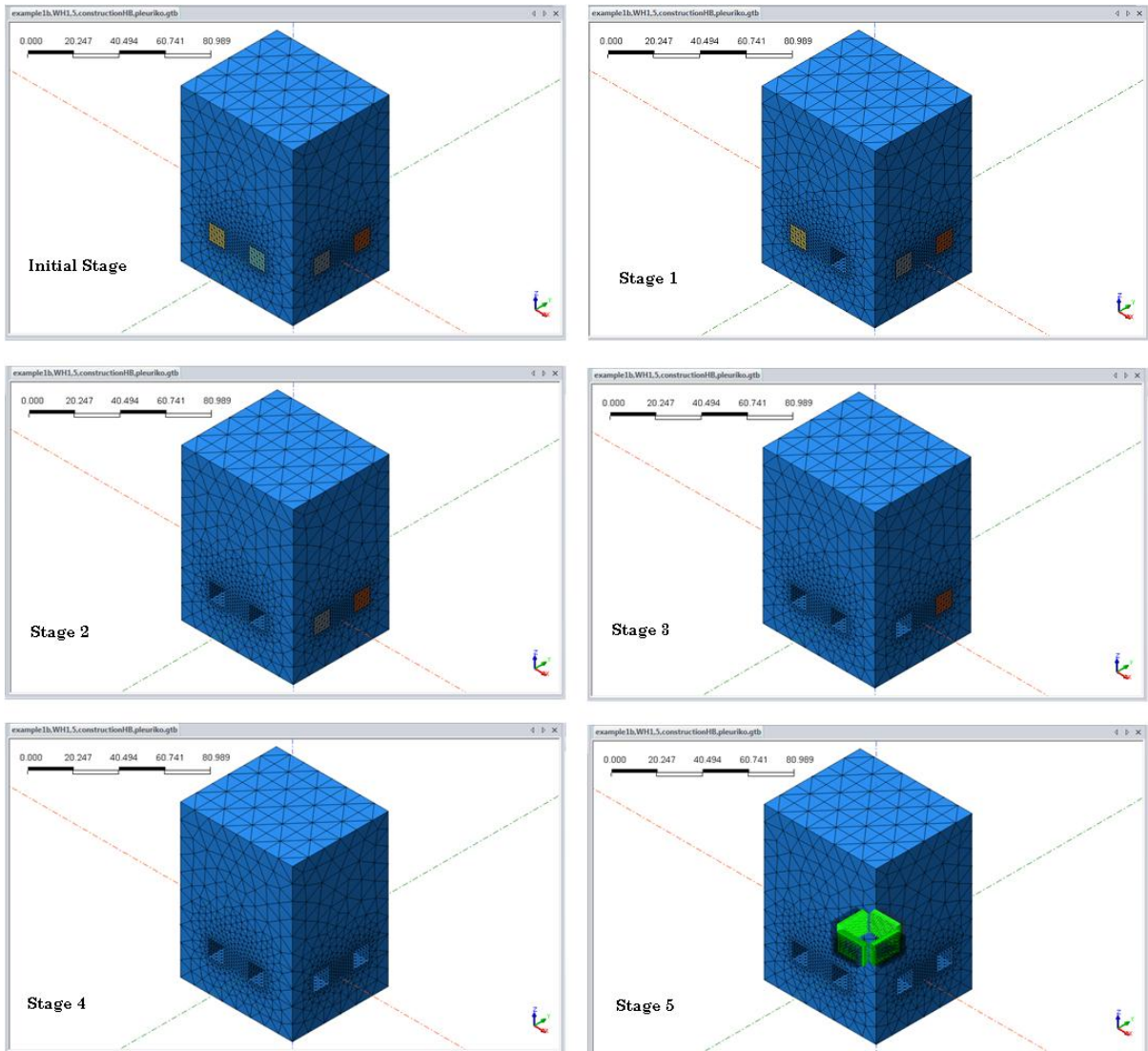
1. **Α' Ομάδα αναλύσεων.** Εκτίμηση της συμπεριφοράς των στύλων λόγω της διαφοροποίησης του λόγου πλάτους / ύψους του στύλου για 5 διαφορετικούς λόγους W_p / H_p .
2. **Β' Ομάδα αναλύσεων.** Εκτίμηση της συμπεριφοράς των στύλων λόγω πλευρικής ενίσχυσης των στύλων σε συνάρτηση με τη διαφοροποίηση του λόγου πλάτους / ύψους του στύλου (W_p / H_p).
3. **Γ' Ομάδα αναλύσεων.** Εκτίμηση της συμπεριφοράς των στύλων λόγω της διαφοροποίησης της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη του άρρηκτου πετρώματος (UCS), για λόγο $W_p / H_p = 0,5$.
4. **Δ' Ομάδα αναλύσεων.** Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης μεταξύ του δισδιάστατου προγράμματος Phase² και του τρισδιάστατου προγράμματος Midas GTS, για λόγο $W_p / H_p = 2$.

3.3. Μέθοδος προσομοίωσης

Η εκτίμηση της συμπεριφοράς των στύλων θα γίνει με το τρισδιάστατο πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, Midas GTS 2010. Σε κάθε περίπτωση ανάλυσης εξετάζεται μόνο ο κεντρικός στύλος. Για τον σχεδιασμό του κεντρικού στύλου ακολουθούνται τα στάδια που περιγράφονται παρακάτω και παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.8.

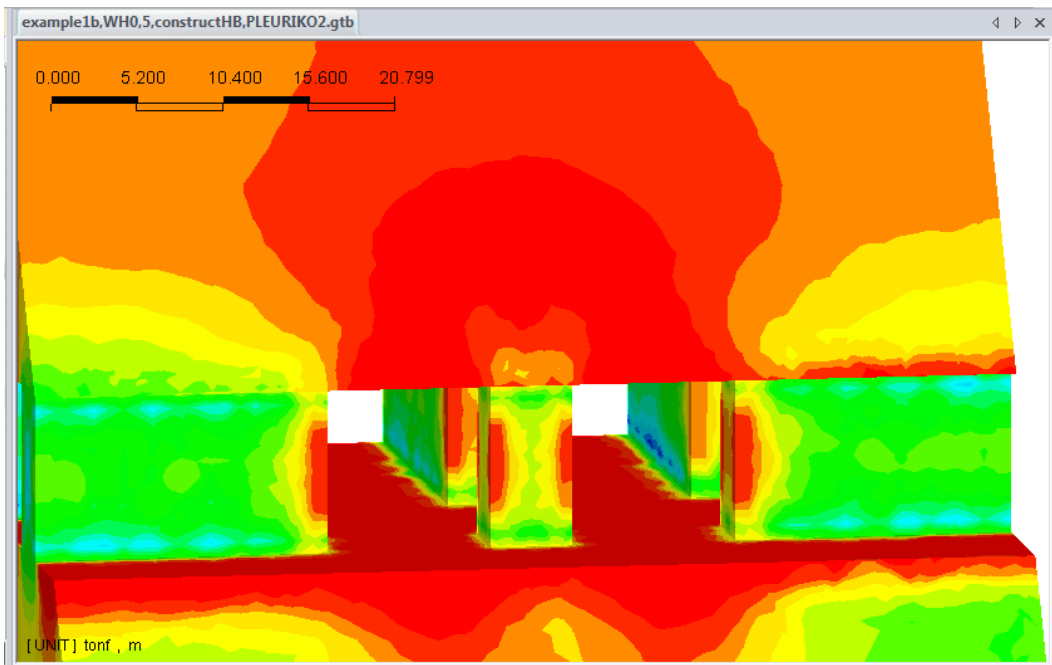
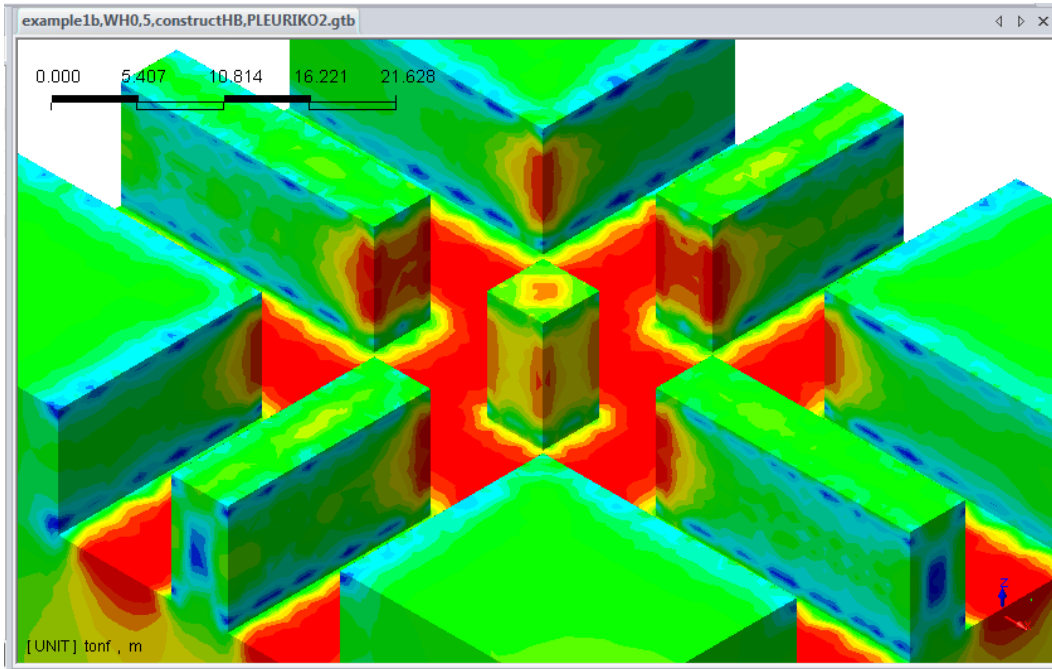
Το πρώτο στάδιο είναι το αρχικό εντατικό πεδίο (Initial Stage), δηλαδή το στάδιο πριν την εκσκαφή των θαλάμων. Στο δεύτερο στάδιο (Stage 1) πραγματοποιείται η εκσκαφή της δεξιάς κύριας στοάς ενώ στο τρίτο στάδιο (Stage 2) ακολουθεί η εκσκαφή της αριστερής κύριας στοάς. Μετά τη δημιουργία δύο παράλληλων σηράγγων, ακολουθούν στο τέταρτο (Stage 3) και στο πέμπτο στάδιο (Stage 4) η εκσκαφή των κάθετων στοών ως προς τις κύριες που δημιουργήθηκαν. Κατά συνέπεια, μετά το πέρας του πέμπτου σταδίου, έχει δημιουργηθεί ο επιζητούμενος στύλος. Για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιούνται οι στύλοι έχουν τετραγωνική διατομή με σκοπό να υπάρχει περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή τάσεων γύρω από το πέτρωμα. Τέλος, σε ορισμένες ομάδες στύλων υπάρχει και το έκτο στάδιο (Stage 5) το οποίο περιλαμβάνει την εφαρμογή του πλευρικού φορτίου στον στύλο. Το πλευρικό φορτίο που ασκείται στον στύλο είναι ισοδύναμο με το φορτίο

που ασκείται λόγω της τοποθέτησης προεντεταμένων συρματόσχοινων, για μια δεδομένη δύναμη προέντασης, σε δεδομένη διάταξη καννάβου όπως αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.



Εικόνα 3.8. Στάδια εκσκαφής του μοντέλου για τη δημιουργία των θαλάμων και των στύλων.

Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 3.9.α,β), διακρίνεται ο στύλος ο οποίος θα εξετάζεται σε κάθε ομάδα αναλύσεων. Βρίσκεται στο κέντρο του μοντέλου και σχεδιάστηκε με τα στάδια εκσκαφής τα οποία αναφέρθηκαν προηγουμένως.



Εικόνα 3.9.α,β. Κεντρικός στύλος ο οποίος εξετάζεται σε όλες τις ομάδες αναλύσεων.

3.4. Ενίσχυση των στύλων

Σε πολλές από τις περιπτώσεις στύλων διαφόρων χαρακτηριστικών που εξετάζονται στη συνέχεια, ενισχύονται πλευρικά με στόχο την αύξηση της φέρουσας ικανότητας τους και κατά συνέπεια την βελτίωση της συμπεριφοράς τους. Λαμβάνεται η παραδοχή ότι εφαρμόζεται στους στύλους πλευρικό φορτίο το οποίο προκύπτει λόγω προέντασης συρματόσχοινων σε συνδυασμό με την τοποθέτησή τους σε συγκεκριμένη διάταξη καννάβου. Σαφώς υπάρχουν και άλλα μέτρα ενίσχυσης των στύλων, όπως για παράδειγμα εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια (Εικόνα 3.10) και άλλα.

Στις αναλύσεις που πραγματοποιούνται, εφαρμόζονται καλωδιώσεις στο στύλο με προεντεταμένα συρματόσχοινα υψηλής αντοχής (HI-TEN Strand Bolt) $\Phi 23$, με όριο θραύσης 56 tn (0,55 MN) στα οποία δίνεται προένταση περίπου μέχρι το μισό της αντοχής τους (0,27 MN). Το πλευρικό φορτίο που εφαρμόζεται στους στύλους είναι ίσο με 0,16 MN/m² και είναι τοποθετημένο σε κάρναβο 1,3 x 1,3 m.

Η τοποθέτηση των συρματόσχοινων περιλαμβάνει, την όρυξη διατρημάτων μικρής διαμέτρου ($\Phi 28$) κάθετα στις πλευρές του στύλου. Κατόπιν τοποθετείται το συρματόσχοινο το οποίο αρχικά τανύζεται χειρονακτικά και στη συνέχεια ο υδραυλικός γρύλος δίνει την τελική προένταση. Μετά την τοποθέτηση των συρματόσχοινων, εσπιάζεται ένεμα με σκοπό να επέλθει η πλήρης πάκτωση.



Εικόνα 3.10. Στύλος που έχει ενισχυθεί με τη βοήθεια αγκυρίων.

3.5. Συντελεστής Ασφάλειας (Safety Factor)

Με σκοπό την εκτίμηση της ευστάθειας των στύλων, αξιολογείται ο συντελεστής ασφαλείας τους. Οι τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας (Factor of Safety) θα συγκρίνονται στο κέντρο και στις παρειές των στύλων. Το επιλεγμένο κριτήριο αστοχίας για όλες τις αναλύσεις που θα πραγματοποιηθούν είναι το Hoek - Brown, όμως το πρόγραμμα Midas GTS δεν παρέχει τιμές του FS παρά μόνο για το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb. Συνεπώς, στα παραδείγματα που ακολουθούν ο συντελεστής ασφαλείας (FS), υπολογίζεται ως εξής:

Αρχικά, λαμβάνεται μέσω των αποτελεσμάτων της ανάλυσης η τιμή της «σ₃» στο επιθυμητό σημείο. Στη συνέχεια υπολογίζεται η αντοχή της βραχώμαζας (σ₁) στο συγκεκριμένο σημείο μέσω της Σχέσης 3.1, όπως φαίνεται παρακάτω.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} \quad (3.1)$$

Κατόπιν, λαμβάνεται η τιμή της υφιστάμενης τάσης (σ_p) που ασκείται στο επιλεγμένο σημείο. Τέλος, εφόσον έχουν υπολογιστεί τόσο η αντοχή του πετρώματος (σ₁) όσο και η ασκούμενη τάση (σ_p), ο συντελεστής ασφαλείας (FS) ορίζεται ως εξής:

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} \quad (3.2)$$







Επιπλέον, στα παραδείγματα που ακολουθούν με σκοπό να εξετάζεται η επίδραση της ενίσχυσης που εφαρμόζεται στους στύλους, παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας (ΔFS%). Η οποία ορίζεται από την Σχέση 3.3, ως εξής :

$$\Delta FS\% = \frac{FS_{\text{μετά την ενίσχυση}} - FS_{\text{πρίν την ενίσχυση}}}{FS_{\text{πρίν την ενίσχυση}}} \% \quad (3.3)$$

3.6. Εκτίμηση γεωτεχνικών παραμέτρων

Στις αναλύσεις που ακολουθούν η συμπεριφορά της βραχώμαζας προσδιορίζεται από το κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown. Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητη η εύρεση της τιμής των σταθερών «m» και «s» οι οποίες χαρακτηρίζουν την ποιότητα της βραχώμαζας. Οι σταθερές «m» και «s» εξαρτώνται από τον Γεωλογικό Δείκτη Αντοχής (GSI), την σταθερά

του άρρηκτου πετρώματος «m_i» και από τον παράγοντα που εξαρτάται από το βαθμό της διαταραχής της βραχώμαζας (D). Η εκτίμηση του Γεωλογικού Δείκτη Αντοχής (GSI) της βραχώμαζας πραγματοποιείται μέσω του παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.1), σύμφωνα με τους Hoek & Marinos (2000).

<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. <u>Note that the table does not apply to structurally controlled failures.</u> Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		<p>SURFACE CONDITIONS</p> <p>VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces</p> <p>GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces</p> <p>FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces</p> <p>POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments</p> <p>VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings</p>				
<p>STRUCTURE</p>		<p>DECREASING SURFACE QUALITY →</p>				
 <p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	90			N/A	N/A	
 <p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>	80	70				
 <p>VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>		60	50			
 <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>			40	30		
 <p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>				20		
 <p>LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>	N/A	N/A			10	
<p>↓ DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES</p>						

Πίνακας 3.1. Σύστημα ταξινόμησης βραχώμαζας GSI (Hoek and Marinos, 2000).

Ο προσδιορισμός των σταθερών «m» και «s» πραγματοποιείται με την βοήθεια του λογισμικού πακέτου Roclab (2002). Η συμπεριφορά της βραχόμαζας θεωρείται ότι δεν είναι τέλεια ελαστοπλαστική, οπότε απαιτείται και ο προσδιορισμός των παραμενουσών τιμών των «m» και «s», δηλαδή των «m_r» και «s_r».

Μία ακόμη γεωτεχνική παράμετρος της βραχόμαζα που πρέπει να προσδιοριστεί είναι ο λόγος του Poisson (ν). Ο λόγος του Poisson ορίζεται ως ο λόγος της πλευρικής (εγκάρσιας) προς την αξονική παραμόρφωση και επηρεάζει σημαντικά την συμπεριφορά της βραχόμαζας. Η εκτίμηση του « ν » πραγματοποιείται κατά προσέγγιση με τη βοήθεια του παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.2).

Πίνακας 3.2. Λόγος του Poisson ανάλογα με τον τύπο της βραχομάζας (Καββαδάς, 2004).

Τύπος βραχόμαζας	Λόγος Poisson
Τεμαχώδης με καλή αλληλεμπλοκή των κόκκων χωρίς διαταραχή	0.20-0.25
Τεμαχώδης ελαφρώς διαταραγμένη	0.30-0.35
Διαταραγμένη, πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια	0.35-0.40
Πολύ διαταραγμένη με γωνιώδη και στρογγυλεμένα τεμάχια	0.30-0.35
Τελείως εξαλλοιωμένη βραχόμαζα	0.25-0.30

Η τιμή του λόγου του Poisson (ν) που λαμβάνεται για τη βραχομάζα, σε όλα τα μοντέλα που εξετάζονται, είναι 0,25. Η συγκεκριμένη τιμή αντιστοιχεί σε τεμαχώδη βραχόμαζα με καλή αλληλεμπλοκή των κόκκων και χωρίς διαταραχή.

3.7. Ορισμός Παραμέτρων των Αναλύσεων

3.7.1. Α' Ομάδα Αναλύσεων

Η Α' ομάδα αναλύσεων περιλαμβάνει την σύγκριση μεταξύ των 5 διαφορετικών τιμών του λόγου πλάτους / ύψους του στύλου (W_p / H_p). Η συγκεκριμένη ομάδα αναλύσεων, στοχεύει στην εξέταση της συμπεριφοράς και της ευστάθειας του στύλου, του οποίου ο λόγος πλάτους / ύψους μεταβάλλεται από τις πιο δυσμενείς ($W_p / H_p = 0,5$) στις πιο ευνοϊκές συνθήκες ($W_p / H_p = 3$). Οι 5 διαφορετικές τιμές του λόγου W_p / H_p είναι, 0.5, 1, 1.5, 2 και 3. Εξετάζονται οι πλευρικές μετατοπίσεις κατά πλάτος του στύλου καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή των πλευρικών μετατοπίσεων σε σύγκριση τη διαφοροποίηση του λόγου W_p / H_p . Επίσης, ελέγχεται ο Συντελεστής Ασφαλείας στις παρειές και στο κέντρο του στύλου και αστοχίες που συμβαίνουν σε αυτόν. Το ύψος των υπερκειμένων (H) είναι σταθερό και ίσο με 65m. Επίσης, το ύψος του στύλου (H_p) και το πλάτος των θαλάμων (W_r) είναι 10m.

Τα χαρακτηριστικά και οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχομάζας, παρουσιάζονται παρακάτω.

- **Poisson's Ratio (ν):** 0,25
- **Modulus of Elasticity (E):** 7746 MPa
- **Unit Weight (γ):** 0,0265 MN/m³
- **Coefficient of Lateral Pressure (K_0):** 1
- **Uniaxial Comp. Strength:** 60 MPa
- **GSI:** 50
- **m_i :** 10
- **Initial m:** 0,712
- **Residual m:** 1,667
- **Initial s:** 0,0039
- **Residual s:** 0,0003
- **D :** 0
- **Initial Stress (σ_1):** 1,722 MPa

3.7.2. Β' Ομάδα Αναλύσεων

Η Β' ομάδα αναλύσεων πραγματοποιείται με σκοπό να εξεταστεί η συμπεριφορά των στύλων λόγω της εφαρμογής πλευρικού φορτίου σε συνάρτηση με τη διαφοροποίηση του λόγου πλάτους / ύψους του στύλου. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων πριν την εφαρμογή πλευρικής ενίσχυσης, λαμβάνονται από την Α' ομάδα αναλύσεων Η παραμετρική ανάλυση πραγματοποιείται για τις εξής τιμές του λόγου W_p / H_p :

1. Ανάλυση **B.1**, $W_p / H_p = 0,5$
2. Ανάλυση **B.2**, $W_p / H_p = 1$
3. Ανάλυση **B.3**, $W_p / H_p = 1,5$
4. Ανάλυση **B.4**, $W_p / H_p = 2$
5. Ανάλυση **B.5**, $W_p / H_p = 3$

Για τις πέντε αναλύσεις που μόλις αναφέρθηκαν, θα αξιολογηθούν α) οι πλευρικές μετατοπίσεις (D_{xy}) κατά πλάτος του στύλου, β) ο συντελεστής ασφάλειας (FS) στο κέντρο και στις παρειές του στύλου και γ) οι αστοχίες που εμφανίζονται σε κάθε στύλο. Θεωρώντας σταθερό το πλάτος των θαλάμων ($W_t = 10m$) και το ύψος του στύλου ($H_p = 10m$) για όλες τις αναλύσεις, γίνεται αντιληπτό ότι το πλάτος του στύλου (W_p), λαμβάνει τις τιμές 5m, 10m, 15m, 20m, 30m για κάθε μια από τις πέντε αναλύσεις αντίστοιχα. Επίσης, για όλες τις αναλύσεις το βάθος της εκσκαφής (ύψος των υπερκειμένων) από την επιφάνεια του εδάφους θεωρείται σταθερό και λαμβάνει τη τιμή $H = 65m$. Τέλος το πλευρικό φορτίο το οποίο εφαρμόζεται σε όλους τους στύλους ισούται με $0,16 MN/m^2$. Αυτό το πλευρικό φορτίο προκύπτει από την τοποθέτηση συρματόσχοινων, όπως έχει προαναφερθεί, στα οποία έχει δοθεί προένταση ίση με $0,265 MN$ (27 tn), σε κάρναβο $1,3 \times 1,3 m$.

Τα χαρακτηριστικά και οι γεωτεχνικές παράμετροι της βραχομάζας για την Β' Ομάδα αναλύσεων, παρουσιάζονται ακολούθως:

- **Poisson's Ratio (ν):** 0,25
- **Modulus of Elasticity (E):** 7746 MPa
- **Unit Weight (γ):** $0,0265 MN/m^3$
- **Coefficient of Lateral Pressure (K_0):** 1
- **Uniaxial Comp. Strength:** 60 MPa
- **GSI:** 50

- **m_i** : 10
- **Initial m**: 0,712
- **Residual m**: 1,667
- **Initial s**: 0,0039
- **Residual s**: 0,0003
- **D** : 0
- **Initial Stress (σ_1)**: 1,722 MPa

3.7.3. Γ' Ομάδα αναλύσεων

Η Γ' ομάδα αναλύσεων πραγματοποιείται με σκοπό να εξεταστεί η συμπεριφορά των στύλων σε συνάρτηση με την διαφοροποίηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος (UCS). Η μεταβολή της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη πραγματοποιείται για λόγο πλάτους / ύψους του στύλου ίσο με 0,5. Για στύλο με $W_p / H_p = 0,5$ οι τιμές που λαμβάνει η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη είναι οι εξής:

- Ανάλυση Γ.1, UCS = 60 MPa
- Ανάλυση Γ.2, UCS = 75 MPa
- Ανάλυση Γ.3, UCS = 90 MPa

Για όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιούνται, το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους θεωρείται σταθερό και λαμβάνει την τιμή $H = 65\text{m}$. Το πλάτος των θαλάμων είναι $W_r = 10\text{m}$ και το ύψος των στύλων είναι $H_p = 10\text{m}$.

Τα χαρακτηριστικά και οι γεωτεχνικές παράμετροι της βραχομάζας για τις οποίες πραγματοποιείται η Γ' ομάδα αναλύσεων, είναι οι εξής :

- **Poisson's Ratio (ν)**: 0,25
- **Unit Weight (γ)**: 0,0265 MN/m³
- **Coefficient of Lateral Pressure (K_0)**: 1
- **Uniaxial Comp. Strength**: 60 MPa
- **GSI**: 50
- **m_i** : 10
- **Initial m**: 0,712
- **Residual m**: 1,667

- **Initial s:** 0,0039
- **Residual s:** 0,0003
- **D :** 0
- **Initial Stress (σ_1):** 1,722 MPa

Πίνακας 3.3. Τιμή του μέτρου ελαστικότητας (E) για τις αναλύσεις Γ.1, Γ.2, Γ.3.

Ανάλυση Γ.1	Ανάλυση Γ.2	Ανάλυση Γ.3
$E = 7746 \text{ MPa}$	$E = 9114 \text{ MPa}$	$E = 9925 \text{ MPa}$

3.7.4. Δ' Ομάδα Αναλύσεων

Στη Δ' ομάδα αναλύσεων πραγματοποιείται ένας πρωταρχικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Δηλαδή, εξετάζεται η συμπεριφορά των στύλων συγκρίνοντας, αρχικά, α) τα αποτελέσματα προσομοίωσης τρισδιάστατης κατασκευής στη δισδιάστατη ανάλυση δυο διαφορετικών λογισμικών πακέτων (Phase² και Midas GTS) και στη συνέχεια, β) τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει, συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μίας πραγματικής τρισδιάστατης ανάλυσης με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Midas GTS. Συνεπώς οι δύο συγκρίσεις που αναφέρθηκαν, μπορούν να χωριστούν στις εξής δύο αναλύσεις:

- Ανάλυση Δ.1, σύγκριση δισδιάστατων αποτελεσμάτων ανάλυσης ($W_p / H_p = 2$).
- Ανάλυση Δ.2, σύγκριση δισδιάστατων και τρισδιάστατων αποτελεσμάτων ανάλυσης ($W_p / H_p = 2$).

Στις συγκεκριμένες αναλύσεις, το πλάτος του στύλου (W_p) είναι ίσο με 20 m, ενώ το πλάτος των θαλάμων (W_R) και το ύψος του στύλου (H_p) ισούνται με 10 m. Ακόμη, το ύψος των υπερκειμένων στρωμάτων είναι ίσο με 65 m.

Η προσομοίωση της εκσκαφής θαλάμων και στύλων σε δισδιάστατη ανάλυση είναι απαραίτητη, διότι διαφορετικά τα συγκεκριμένα προγράμματα βασίζονται στη παραδοχή ότι η γεωμετρία της κατασκευής εκτείνεται στο άπειρο και αγνοούν την επίδραση που έχει η εκσκαφή των κάθετων θαλάμων. Συνεπώς, προκύπτουν λανθασμένα αποτελέσματα αφού υποεκτιμούν την κατακόρυφη τάση που ασκείται στους στύλους. Η προσομοίωση

αυτή επιτυγχάνεται με την προσαύξηση του ειδικού βάρους των υπερκειμένων (Pariseau et al., 1979).

Το προσαυξημένο ειδικό βάρος των υπερκειμένων προκύπτει από την παρακάτω σχέση (Σχέση 3.4):

$$\gamma_{2D} = \gamma_{\text{αρχικό}} * \left(1 + \frac{W_R}{W_P}\right) \quad (3.4)$$

Από τον παραπάνω τύπο, για $\gamma_{\text{αρχ}} = 0,0265 \text{ MN/m}^3$, προκύπτει ότι το ειδικό βάρος για την δισδιάστατη ανάλυση (γ_{2D}) ισούται με $0,053 \text{ MN/m}^3$. Κατά συνέπεια, αφού μεταβάλλεται το ειδικό βάρος τότε μεταβάλλεται και το αρχικό τασικό πεδίο (σ_1). Επομένως, με το ύψος των υπερκειμένων σταθερό ($H = 65 \text{ m}$) και το $\gamma_{2D} = 0,053 \text{ MN/m}^3$, το σ_1 ισούται με $3,445 \text{ MPa}$.

Τα αποτελέσματα του δισδιάστατου προγράμματος Phase² με σκοπό την εκτίμηση και την σύγκριση τους με τα αντίστοιχα του προγράμματος Midas CTS, λαμβάνονται από παλαιότερη διπλωματική εργασία (Παπαγιαννόπουλος, 2010).

Τα χαρακτηριστικά και οι γεωτεχνικές παράμετροι της βραχομάζας για τις οποίες πραγματοποιείται η Δ' ομάδα αναλύσεων, δίνονται παρακάτω.

- **Poisson's Ratio (ν):** 0,25
- **Modulus of Elasticity (**E**):** 7746 MPa
- **Initial Unit Weight ($\gamma_{\text{αρχ}}$):** 0,0265 MN/m³
- **Unit Weight (γ_{2D}):** 0,053 MN/m³
- **Coefficient of Lateral Pressure (**K**₀):** 1
- **Uniaxial Comp. Strength:** 60 MPa
- **GSI:** 50
- **m_i:** 10
- **Initial m:** 0,712
- **Residual m:** 1,667
- **Initial s:** 0,0039
- **Residual s:** 0,0003
- **D:** 0
- **Initial Stress (σ_1):** 3,445 MPa

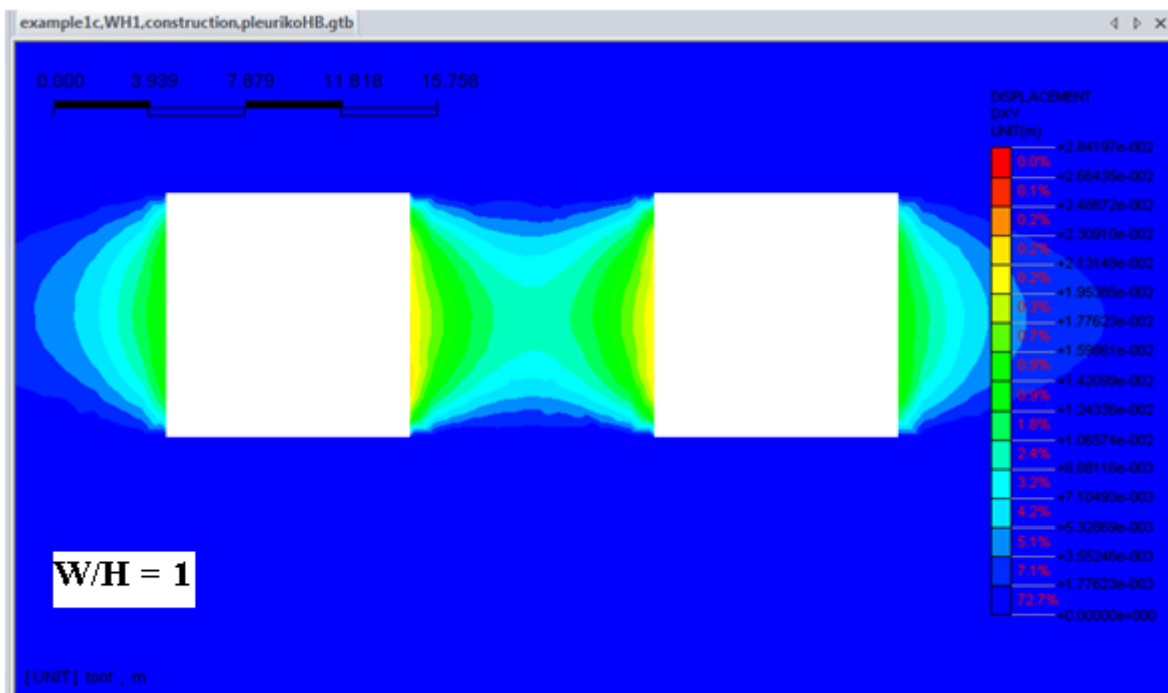
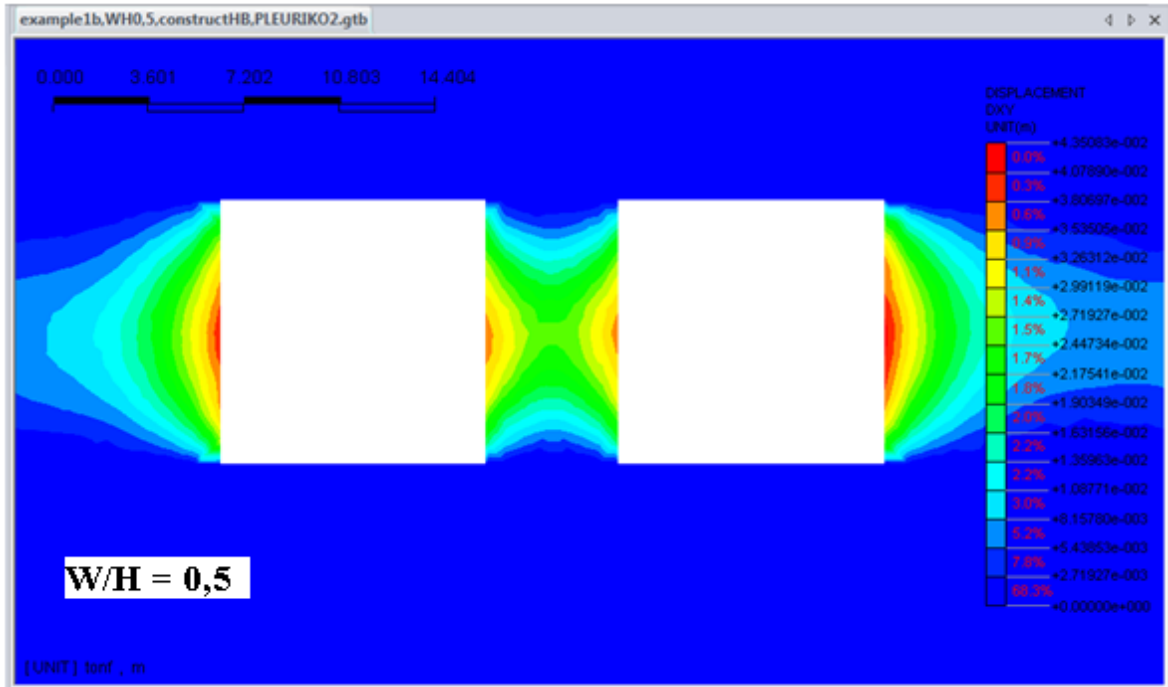
Κεφάλαιο 4.

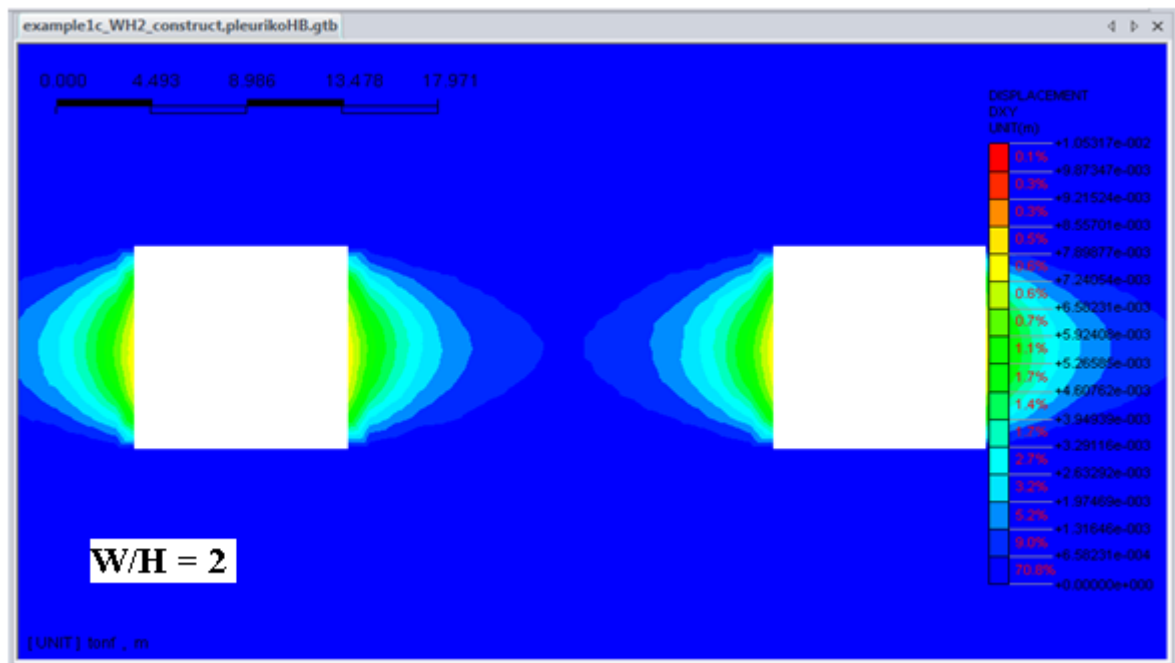
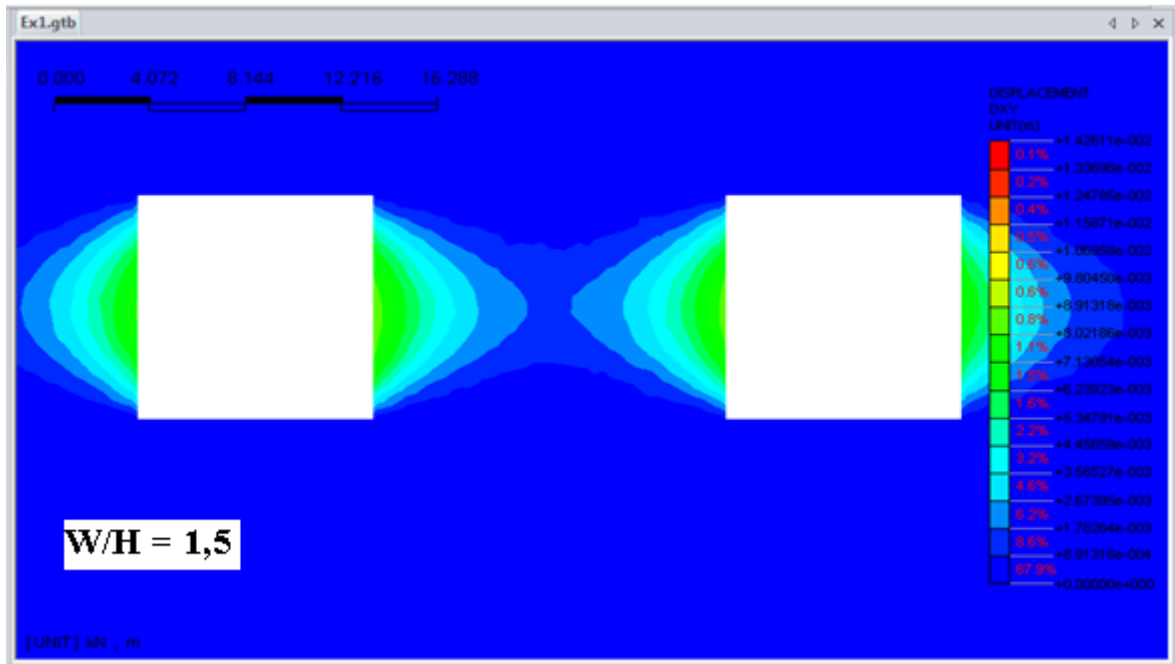
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

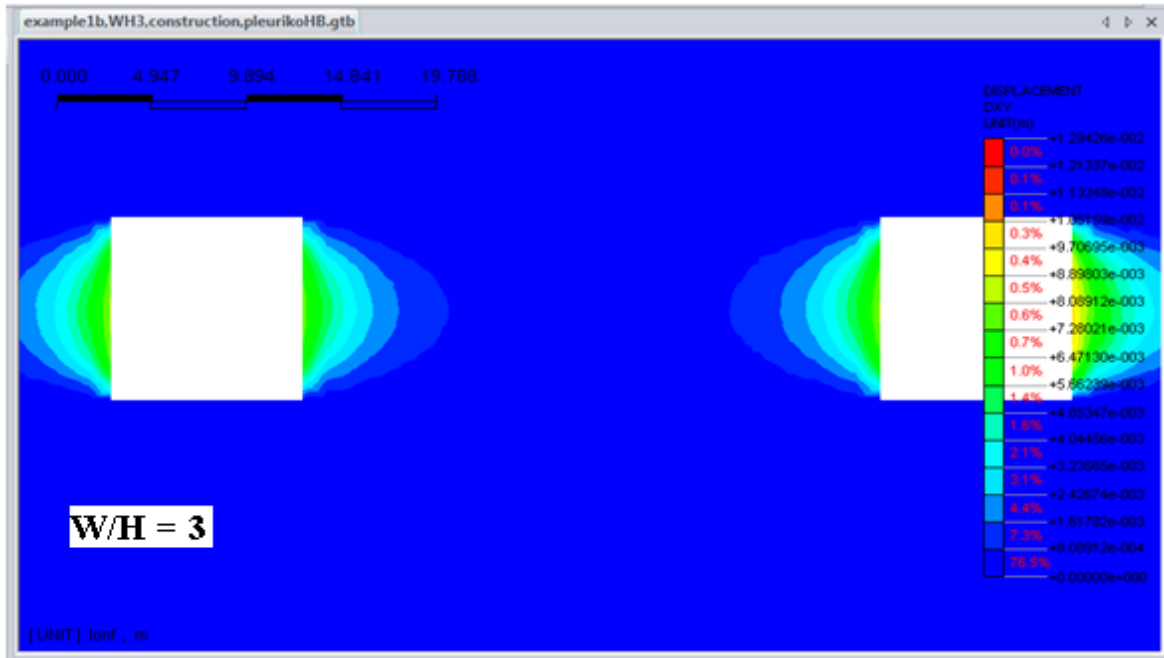
4.1. Αποτελέσματα Α' Ομάδας Αναλύσεων

4.1.1. Ανάλυση Α.1 - Σχολιασμός

Στη συγκεκριμένη ομάδα αναλύσεων επιτυγχάνεται άμεση σύγκριση μεταξύ των λόγων πλάτους / ύψους των στύλων (W_p / H_p), χωρίς την ενίσχυση με την εφαρμογή πλευρικού φορτίου. Καθίσταται άμεσα αντιληπτή η βελτίωση της συμπεριφοράς του στύλου με την αύξηση του λόγου πλάτους / ύψους του (Εικόνα 4.1.α,β,γ,δ,ε).







Εικόνα 4.1.α,β,γ,δ,ε. Αξονικές μετατοπίσεις των στύλων για λόγους $W_p / H_p = 0.5, 1, 1.5, 2, 3$ αντίστοιχα.

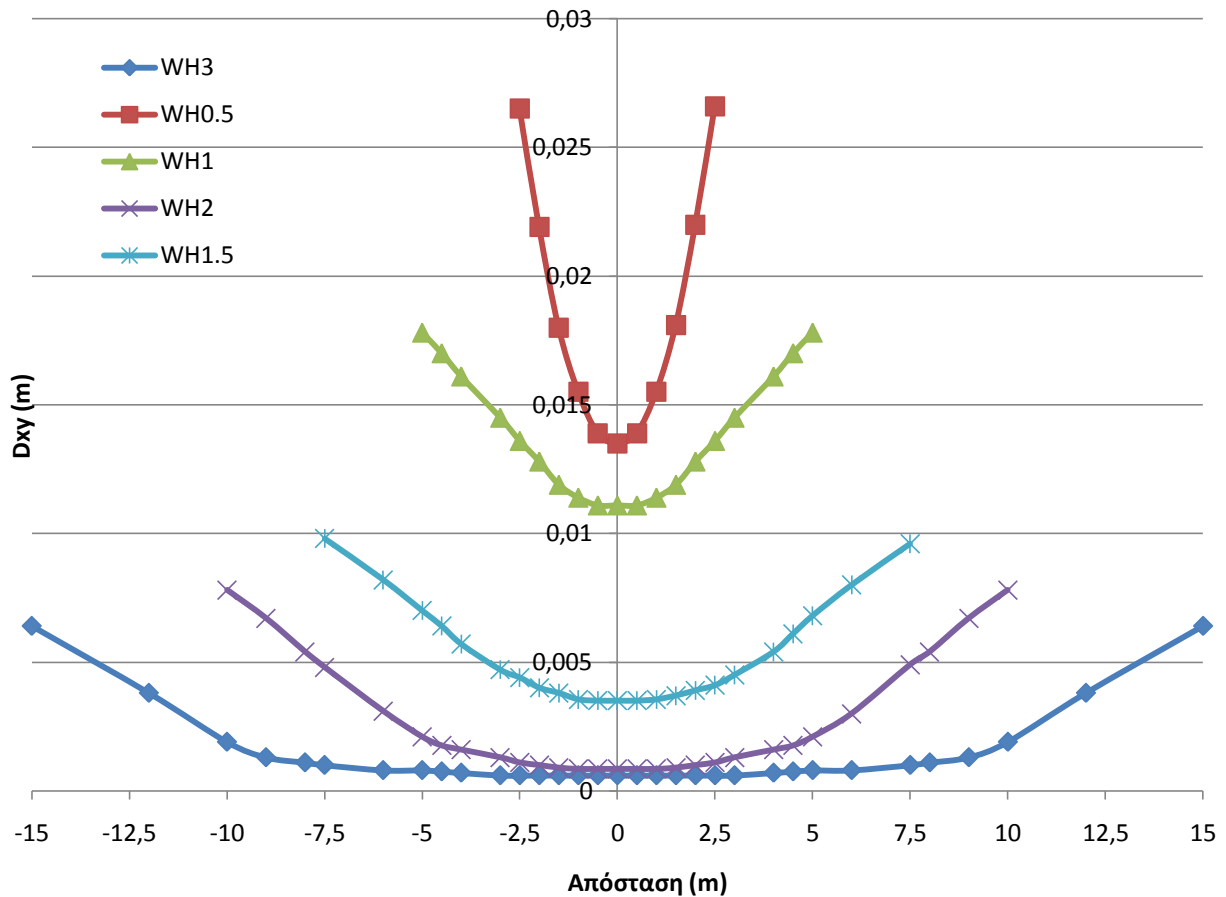
- **Οριζόντιες μετατοπίσεις (Dxy)**

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.1), παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των αξονικών μετατοπίσεων (Dxy) τόσο στις παρειές όσο και στο κέντρο του στύλου για τις πέντε αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί.

Πίνακας 4.1. Αποτελέσματα αξονικών μετατοπίσεων (Dxy) στο κέντρο και στις παρειές των στύλων σε σύγκρισή με τους λόγους W_p / H_p .

	Κέντρο (cm)	Παρειές (cm)
$W_p / H_p = 0,5$	1,35	2,65
$W_p / H_p = 1$	1,11	1,78
$W_p / H_p = 1,5$	0,35	0,96
$W_p / H_p = 2$	0,08	0,78
$W_p / H_p = 3$	0,06	0,64

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.1), παρατηρούνται καλύτερες συνθήκες ευστάθειας με την αύξηση του λόγου W_p / H_p . Δηλαδή, όσο αυξάνεται ο λόγος πλάτους / ύψους του στύλου, οι οριζόντιες μετατοπίσεις μειώνονται στις παρειές καθώς επίσης και στο κέντρο του. Στις δυο ακραίες περιπτώσεις, δηλαδή, για λόγο $W_p / H_p = 0,5$ στις παρειές λαμβάνει την τιμή 2,65 cm και στο κέντρο του 1,35 cm, ενώ για λόγο $W_p / H_p = 3$ στις παρειές λαμβάνει την τιμή 6,4 mm και στο κέντρο του 0,6 mm.



Σχήμα 4.1. Συγκριτικά αποτελέσματα αξονικών μετατοπίσεων (D_{xy}) κατά πλάτος των στύλων για όλους τους λόγους W_p / H_p .

Ένα ακόμα συμπέρασμα που προκύπτει από το Σχήμα 4.1 είναι ότι με την αύξηση του λόγου πλάτους / ύψους του στύλου παρουσιάζεται πιο ομοιόμορφη συμπεριφορά του στύλου και κατά συνέπεια καλύτερες συνθήκες ευστάθειας. Δηλαδή, όσο αυξάνει ο λόγος W_p / H_p , τόσο ελαττώνεται η διαφορά της οριζόντιας μετατόπισης (D_{xy}) στις παρειές με εκείνη στο κέντρο του στύλου και η καμπύλη ομαλοποιείται. Συνεπώς, η πιο ομοιόμορφη συμπεριφορά, εμφανίζεται για λόγο $W_p / H_p = 3$ όπου η διαφορά των πλευρικών μετατοπίσεων μεταξύ του κέντρου και των παρειών του στύλου είναι ίση με 5,7 mm.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι με την αύξηση του λόγου W_p / H_p από 0,5 σε 3, επέρχεται σημαντική μείωση των αστοχιών στις παρειές των στύλων, όπως αναλύεται στη συνέχεια.

- **Συντελεστής Ασφαλείας (FS)**

Η διαδικασία της εκτίμησης του Συντελεστή Ασφαλείας (Factor of Safety) επιτυγχάνεται μέσω του κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown. Αρχικά, υπολογίζεται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος, όπως φαίνεται παρακάτω για όλους τους λόγους W_p / H_p . Οι τιμές των σ_3 και σ_p λαμβάνονται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

i. $W_p / H_p = 0,5$

Για το κέντρο του στύλου χωρίς πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,55 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,55 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,55 + \sqrt{55 + 14,04} = 0,55 + 8,31 = 8,86 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{8,86 \text{ MPa}}{7,91 \text{ MPa}} = \mathbf{1,12}$$

Για τις παρειές του στύλου χωρίς πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,06 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,06 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,06 + \sqrt{6 + 14,04} = 0,06 + 4,47 = 4,53 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{4,53 \text{ MPa}}{5,26 \text{ MPa}} = \mathbf{0,86}$$

ii. $W_p / H_p = 1$

Για το κέντρο του στύλου χωρίς πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 1,1 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 1,1 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 1,1 + \sqrt{110 + 14,04} = 1,1 + 11,14 = 12,24 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{12,24 \text{ MPa}}{6,12 \text{ MPa}} = \mathbf{2}$$

Για τις παρειές του στύλου χωρίς πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,075 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,075 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,075 + \sqrt{7,5 + 14,04} = 0,075 + 4,64 = 4,68 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{4,68 \text{ MPa}}{3,21 \text{ MPa}} = \mathbf{1,45}$$

iii. $W_p / H_p = 1,5$

Για το κέντρο του στύλου χωρίς πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,85 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,85 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,85 + \sqrt{85 + 14,04} = 0,85 + 9,95 = 10,8 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{10,8 \text{ MPa}}{4,98 \text{ MPa}} = \mathbf{2,17}$$

Για τις παρειές του στύλου χωρίς πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,045 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,045 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,045 + \sqrt{4,5 + 14,04} = 0,045 + 4,3 = 4,35 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{4,35 \text{ MPa}}{2,9 \text{ MPa}} = \mathbf{1,5}$$

iv. $W_p / H_p = 2$

Για το κέντρο του στύλου χωρίς πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,98 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,98 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,98 + \sqrt{98 + 14,04} = 0,98 + 10,58 = 11,56 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{11,56 \text{ MPa}}{3,48 \text{ MPa}} = \mathbf{3,32}$$

Για τις παρειές του στύλου χωρίς πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,19 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,19 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,19 + \sqrt{19 + 14,04} = 0,19 + 5,75 = 5,94 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{5,94 \text{ MPa}}{3,57 \text{ MPa}} = \mathbf{1,66}$$

v. $W_p / H_p = 3$

Για το κέντρο του στύλου χωρίς πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,88 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,88 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,88 + \sqrt{88 + 14,04} = 0,88 + 10,09 = 10,97 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{10,97 \text{ MPa}}{2,63 \text{ MPa}} = \mathbf{4,17}$$

Για τις παρειές του στύλου χωρίς πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,055 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,055 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,055 + \sqrt{5,5 + 14,04} = 0,055 + 4,42 = 4,475 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{4,475 \text{ MPa}}{2,63 \text{ MPa}} = \mathbf{1,7}$$

Όσον αφορά τον Συντελεστή Ασφαλείας (FS), παρατηρείται σημαντική αύξηση με παράλληλη αύξηση του λόγου W_p / H_p . Κατά συνέπεια, όπως έχει προαναφερθεί, επιτυγχάνεται βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας που επικρατούν στον στύλο με την αύξηση του λόγου πλάτους / ύψους. Όπως παρατηρείται από τον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 4.2), για στύλο με $W_p / H_p = 0,5$ στις παρειές ο Συντελεστής Ασφάλειας λαμβάνει την τιμή 0,86 και στο κέντρο του ισούται με 1,12. Οι αντίστοιχες τιμές του FS για στύλο με $W_p / H_p = 3$ είναι 1,7 στις παρειές και 4,17 στο κέντρο του στύλου. Ωστόσο καθίσταται άμεσα αντιληπτό, το γεγονός ότι η αύξηση της τιμής του FS στο κέντρο των στύλων είναι κατά πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την αύξηση στις παρειές. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η τιμή του Συντελεστή Ασφαλείας του λόγου $W_p / H_p = 3$ στο κέντρο

των στύλων είναι σχεδόν τετραπλάσια από την αντίστοιχη του λόγου $W_p / H_p = 0,5$, ενώ στις παρειές των στύλων είναι μόλις διπλάσια.

Πίνακας 4.2. Συντελεστής Ασφαλείας (FS) στο κέντρο και στις παρειές των στύλων σε σύγκριση με τους λόγους W_p / H_p .

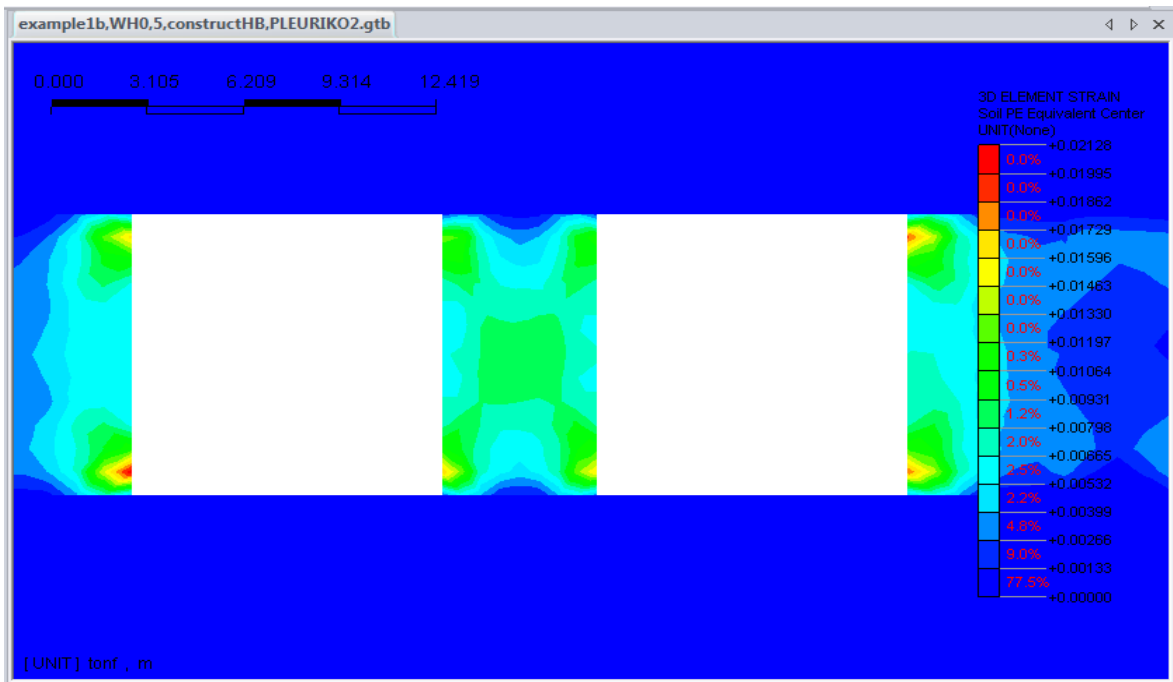
	Κέντρο	Παρειές
$W_p / H_p = 0,5$	1,12	0,86
$W_p / H_p = 1$	2	1,45
$W_p / H_p = 1,5$	2,17	1,5
$W_p / H_p = 2$	3,32	1,66
$W_p / H_p = 3$	4,17	1,7

Φαίνεται έτσι (Πίνακας 4.2), ότι ο Συντελεστής Ασφαλείας (Factor of Safety) στις παρειές των στύλων λαμβάνει αισθητά μικρότερες τιμές συγκριτικά με το κέντρο τους. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο και δικαιολογείται απόλυτα από τον αυξημένο πλευρικό περιορισμό που ασκείται στο κέντρο του στύλου λόγω τριβών και του ίδιου του όγκου του πετρώματος. Για παράδειγμα, στον στύλο με $W_p / H_p = 2$, στο κέντρο του στύλου ο Συντελεστής Ασφαλείας λαμβάνει την τιμή 3,32 ενώ στις παρειές του ισούται με το 50% της τιμής του στο κέντρο, δηλαδή με 1,66. Στον στύλο με $W_p / H_p = 3$ το ποσοστό αυτό είναι ακόμα μικρότερο, η τιμή του FS στις παρειές ισούται με το 40% της τιμής στο κέντρο του στύλου.

- **Αστοχίες - Διαρροές**

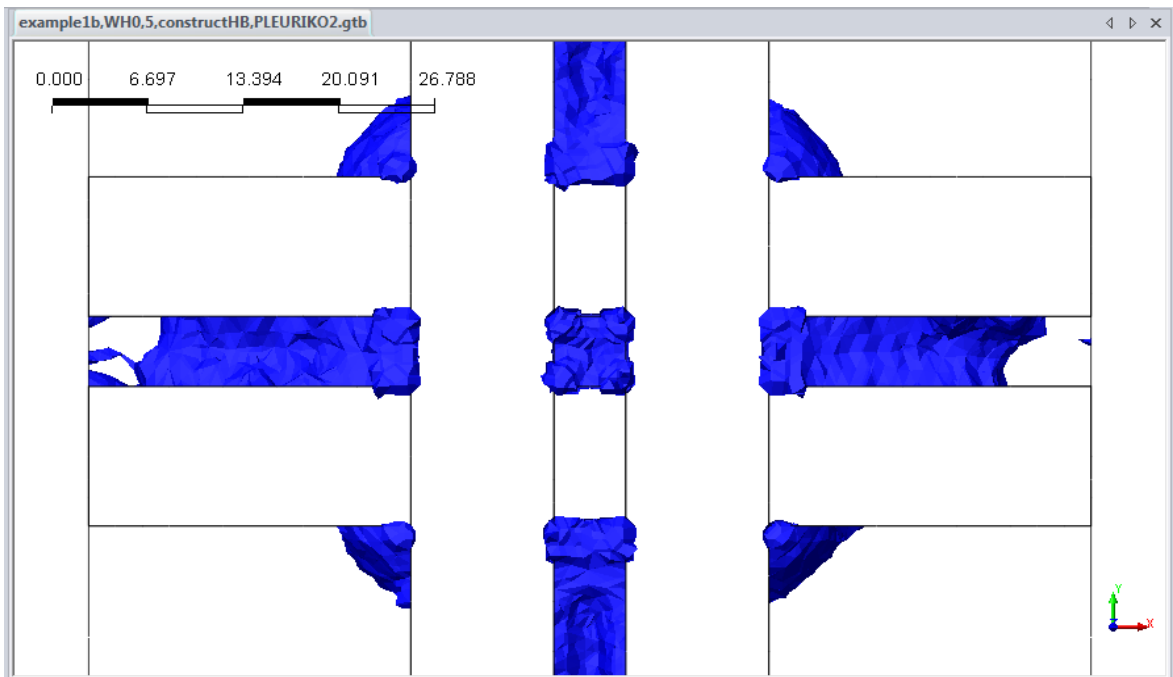
Όσον αφορά τις αστοχίες που συμβαίνουν στο στύλους, παρουσιάζονται στη συνέχεια με σκοπό την κατανόηση της συμπεριφοράς του στύλου. Στην Εικόνα 4.2 φαίνεται η επιφάνεια που συμβαίνουν οι αστοχίες κατά μήκος του στύλου με $W_p / H_p = 0,5$.

➤ $W_p / H_p = 0,5$



Εικόνα 4.2. Επιφάνεια αστοχίας του στύλου με $W_p / H_p = 0,5$ – κατά μήκος τομή.

Στην Εικόνα 4.3, παρουσιάζεται η κάτοψη της εκσκαφής και διακρίνονται τα σημεία διαρροής του στύλου. Σε συνδυασμό με την Εικόνα 4.2, εκτιμάται ο όγκος του στύλου που αστοχεί.

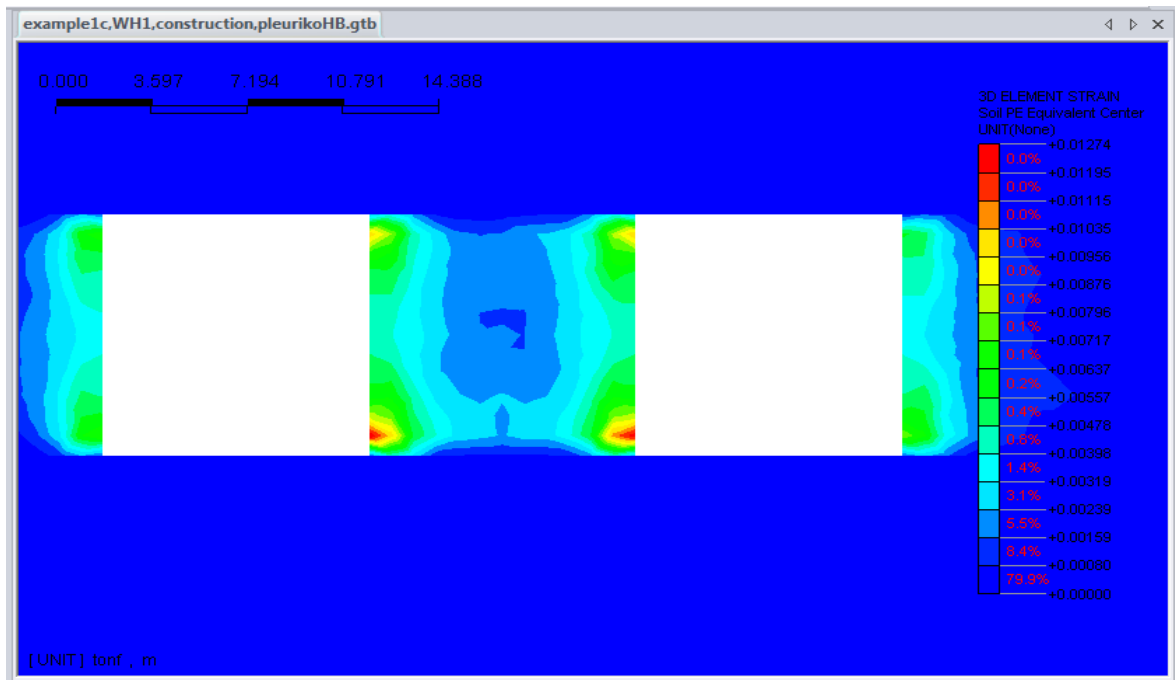


Εικόνα 4.3. Σημεία διαρροής του στύλου με $W_p / H_p = 0,5$ – κάτοψη.

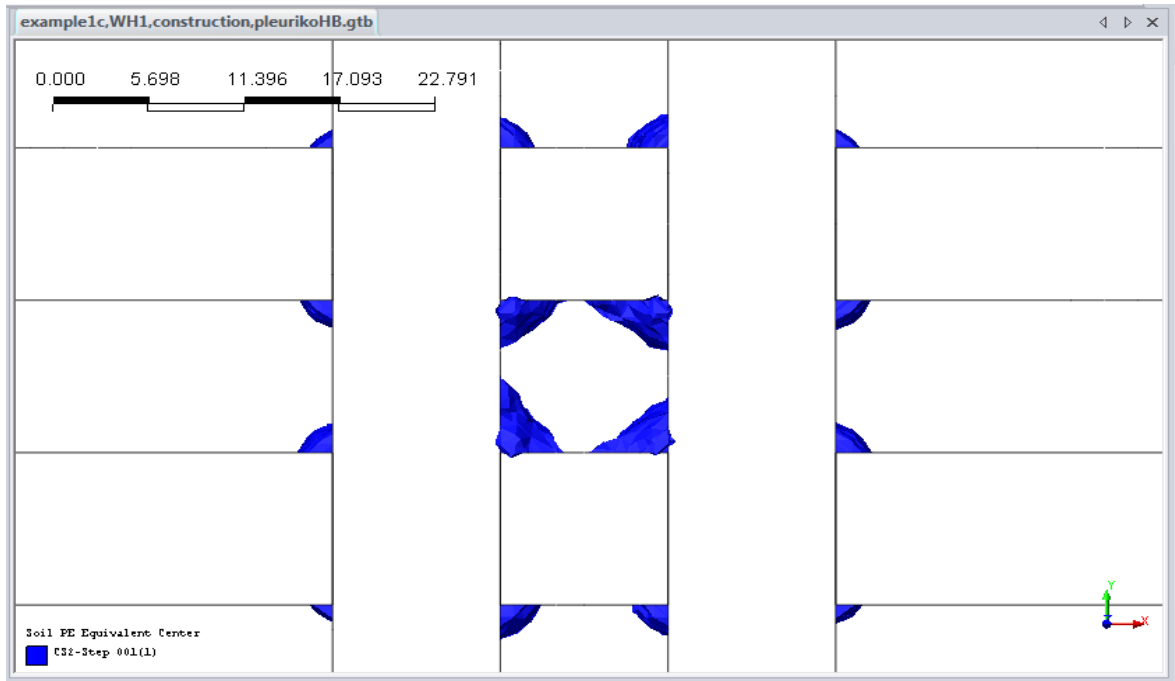
Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι, ο όγκος του στύλου που αστοχεί είναι 228 m^3 από τα συνολικά 250 m^3 του στύλου με $W_p / H_p = 0,5$. Επομένως, το ποσοστό του στύλου που αστοχεί είναι 91 %. Γίνεται αντιληπτό ότι, οι συνθήκες ευστάθειας του στύλου δεν είναι αποδεκτές αφού ο στύλος διαρρέει σχεδόν στο σύνολο του.

➤ $W_p / H_p = 1$

Στην Εικόνα 4.4 και 4.5 δίνονται η κατά μήκος τομή και η κάτοψη του στύλου με $W_p / H_p = 1$, αντίστοιχα, όπου διακρίνονται τα σημεία αστοχίας του στύλου.



Εικόνα 4.4. Επιφάνεια αστοχίας του στύλου με $W_p / H_p = 1$ – κατά μήκος τομή.

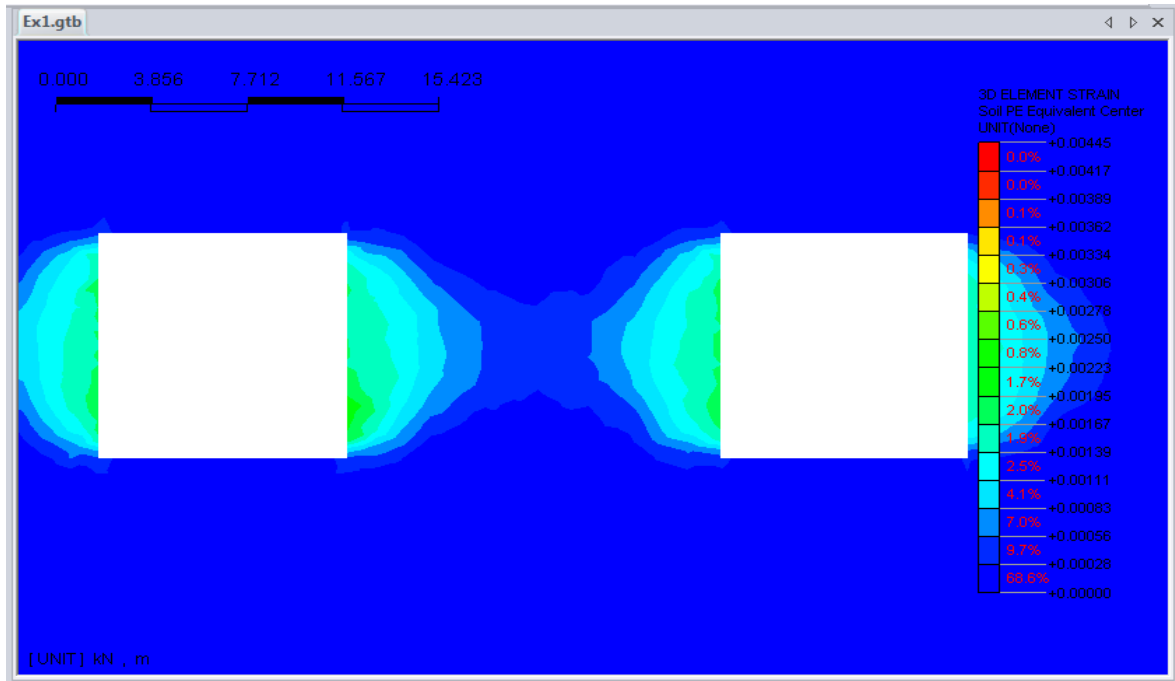


Εικόνα 4.5. Σημεία διαρροής του στύλου με $W_p / H_p = 1$ – κάτοψη.

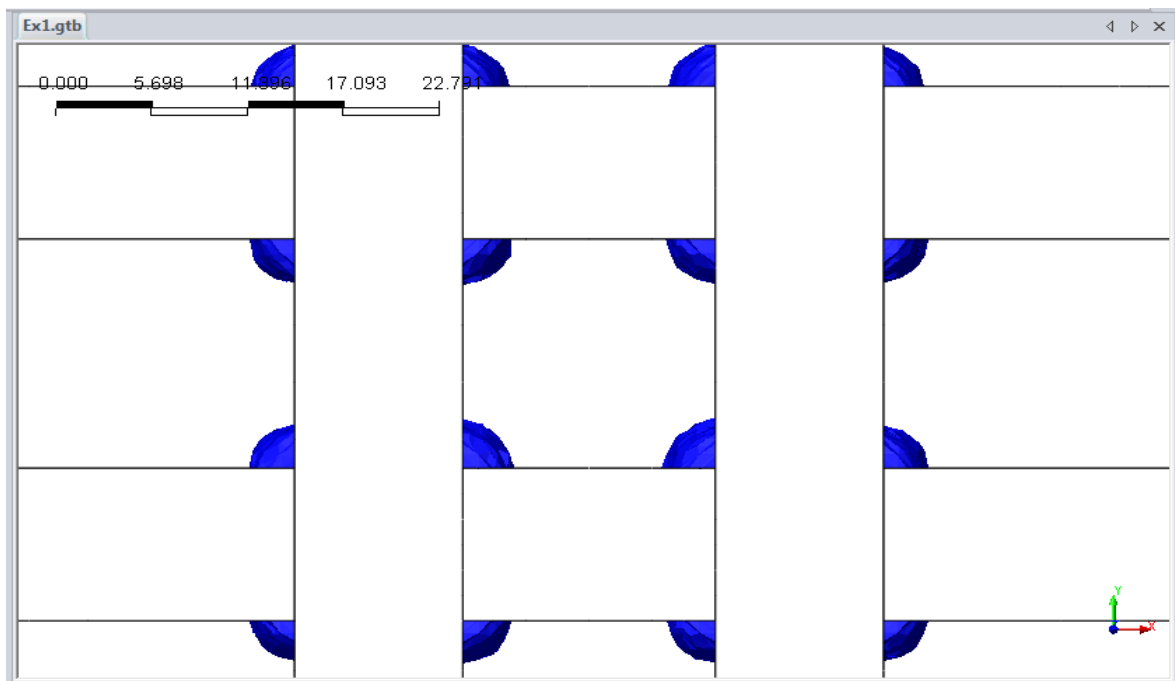
Συνεπώς, παρατηρείται, όπως αναμενόταν, εμφανής βελτίωση σε σύγκριση με τον στύλο με $W_p / H_p = 0,5$. Επίσης, παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος των αστοχιών συμβαίνουν στις παρειές του στύλου ενώ το κέντρο του παραμένει ανέπαφο. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι ο όγκος του στύλου που διαρρέει είναι 380 m^3 από τα συνολικά 1000 m^3 του στύλου. Επομένως το ποσοστό του στύλου με $W_p / H_p = 1$ που αστοχεί είναι 38 %.

➤ $W_p / H_p = 1,5$

Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 4.6 & 4.7), δίνονται τόσο η κατά μήκος τομή όσο και η κάτοψη του στύλου με $W_p / H_p = 1,5$, αντίστοιχα, όπου διακρίνονται τα σημεία αστοχίας του στύλου.



Εικόνα 4.6. Επιφάνεια αστοχίας του στύλου με $W_p / H_p = 1,5$ – κατά μήκος τομής.



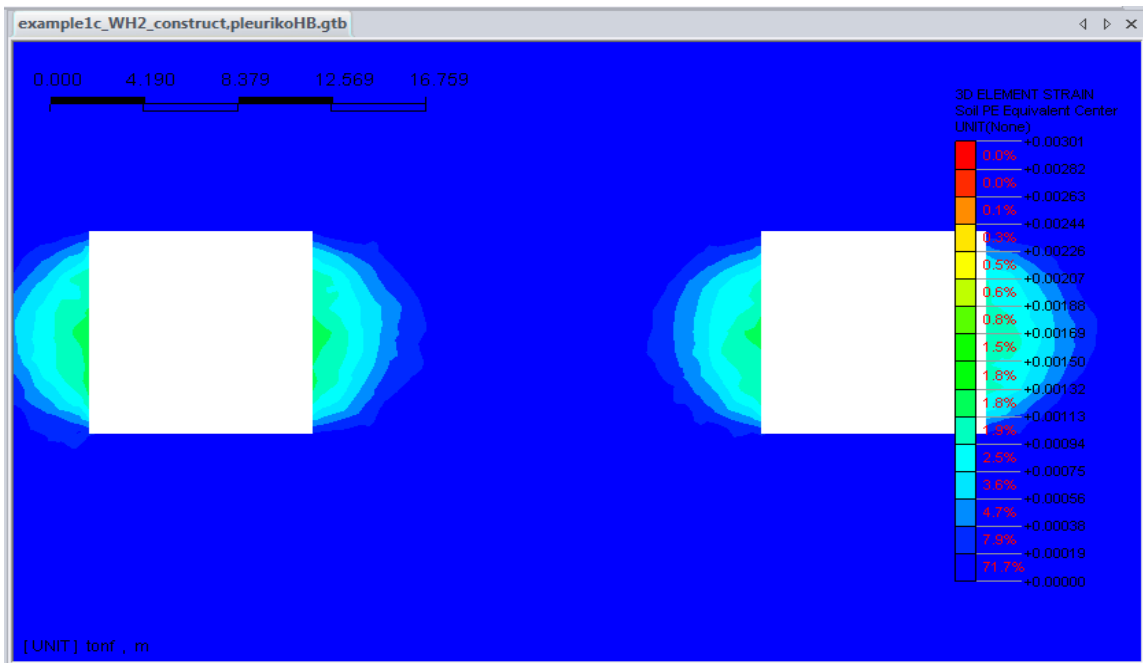
Εικόνα 4.7. Σημεία διαρροής του στύλου με $W_p / H_p = 1,5$ – κάτοψη.

Από τις παραπάνω εικόνες, καθίσταται αντιληπτή η σαφής βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας που επικρατούν στο στύλο με $W_p / H_p = 1,5$ σε σύγκριση με τους δυο προηγούμενους στύλους. Παρατηρείται, καταρχάς, η μείωση των αστοχιών στο σύνολο του στύλου και, επίσης, ότι στύλος διαρρέει μόνο στις παρειές του παραμένοντας

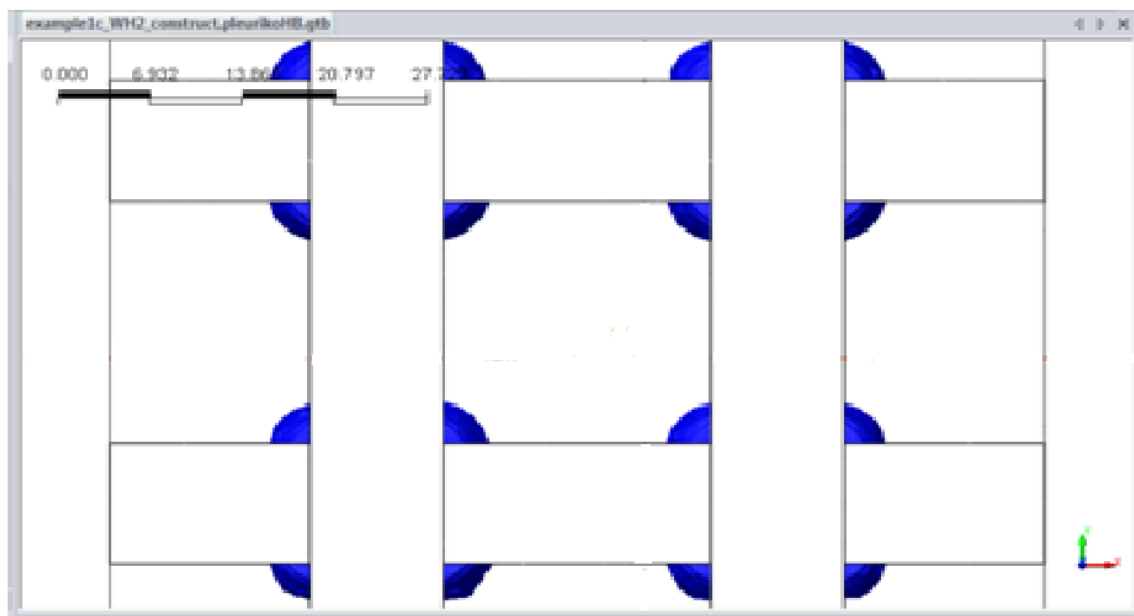
ανέπαφος ο πυρήνας του. Συμπεραίνεται ότι ο όγκος του στύλου που αστοχεί είναι 360 m^3 από τα 2250 m^3 του στύλου. Κατά συνέπεια, το ποσοστό του στύλου που διαρρέει ανέρχεται σε 16 %.

➤ $W_p / H_p = 2$

Στις Εικόνες 4.8 και 4.9 που ακολουθούν, δίνονται η κατά μήκος τομή και η κάτοψη του στύλου με λόγο $W_p / H_p = 2$, αντίστοιχα, όπου διακρίνονται τα σημεία αστοχίας του στύλου.



Εικόνα 4.8. Επιφάνεια αστοχίας του στύλου με $W_p / H_p = 2$ – κατά μήκος τομή.

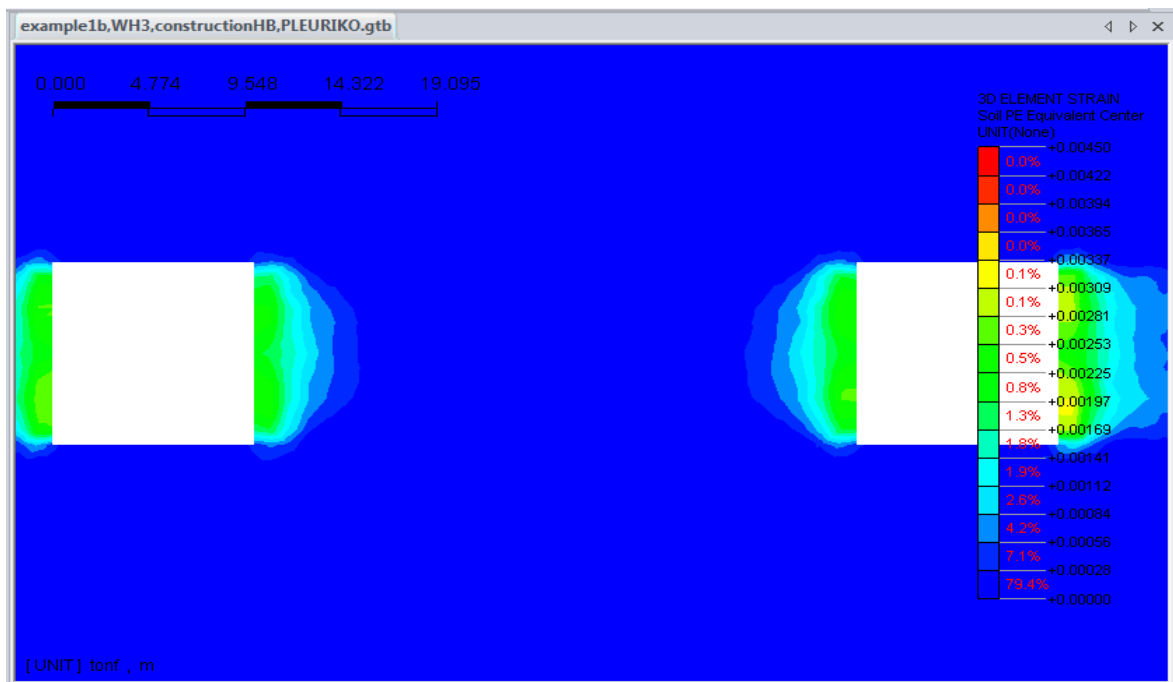


Εικόνα 4.9. Σημεία διαρροής του στύλου με $W_p / H_p = 2$ – κάτοψη.

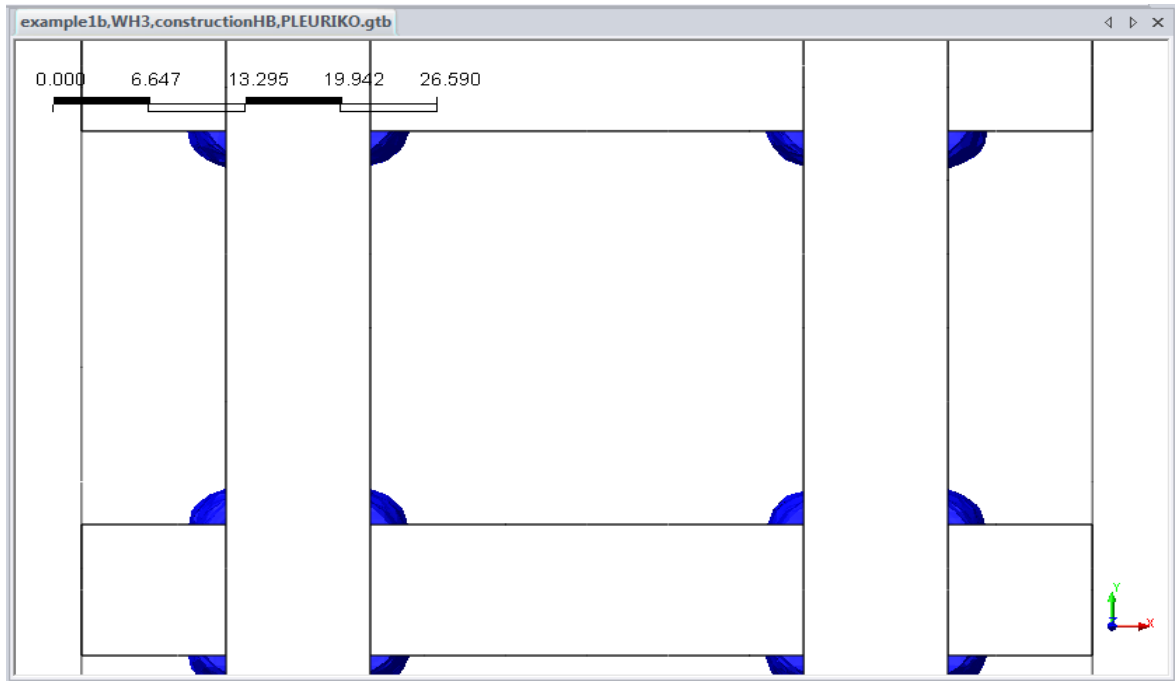
Παρατηρείται η ελάττωση των αστοχιών που συμβαίνουν στο στύλο σε σχέση με τις προηγούμενες αναλύσεις, επίσης, παρατηρείται ότι ο στύλος διαρρέει μόνο στις παρειές του και παραμένει αδιατάραχος στο κέντρο του. Επομένως, συμπεραίνεται ότι, ο όγκος του στύλου όπου παρουσιάζονται αστοχίες είναι 230 m^3 από τα συνολικά 4000 m^3 του στύλου με $W_p / H_p = 2$. Συνεπώς, το ποσοστό του στύλου που αστοχεί είναι 5,7 %.

➤ $W_p / H_p = 3$

Τέλος, όσον αφορά τις αστοχίες που συμβαίνουν στο στύλο με $W_p / H_p = 3$, στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 4.10 και 4.11) δίνονται η κατά μήκος τομή και η κάτοψη του στύλου, αντίστοιχα, όπου διακρίνονται τα σημεία αστοχίας του στύλου.



Εικόνα 4.10. Επιφάνεια αστοχίας του στύλο με $W_p / H_p = 3$ – κατά μήκος τομή.



Εικόνα 4.11. Σημεία διαρροής του στύλου με $W_p / H_p = 3$ – κάτοψη.

Παρατηρείται η ελάχιστη μείωση των αστοχιών που συμβαίνουν στο στύλο με $W_p / H_p = 3$ σε σύγκριση με τις τέσσερις προηγούμενες αναλύσεις. Ακόμη, όπως αναμενόταν, ο στύλος διαρρέει μόνο στις παρειές του και, επίσης, παρουσιάζονται πολύ καλές συνθήκες ευστάθειας αφού ο στύλος σχεδόν στο σύνολο του είναι αδιατάρακτος. Συνεπώς, ο όγκος του στύλου που αστοχεί είναι 225 m^3 από τα 9000 m^3 ολόκληρου του στύλου και, κατά συνέπεια, το ποσοστό του στύλου που αστοχεί ανέρχεται σε 2,5 %.

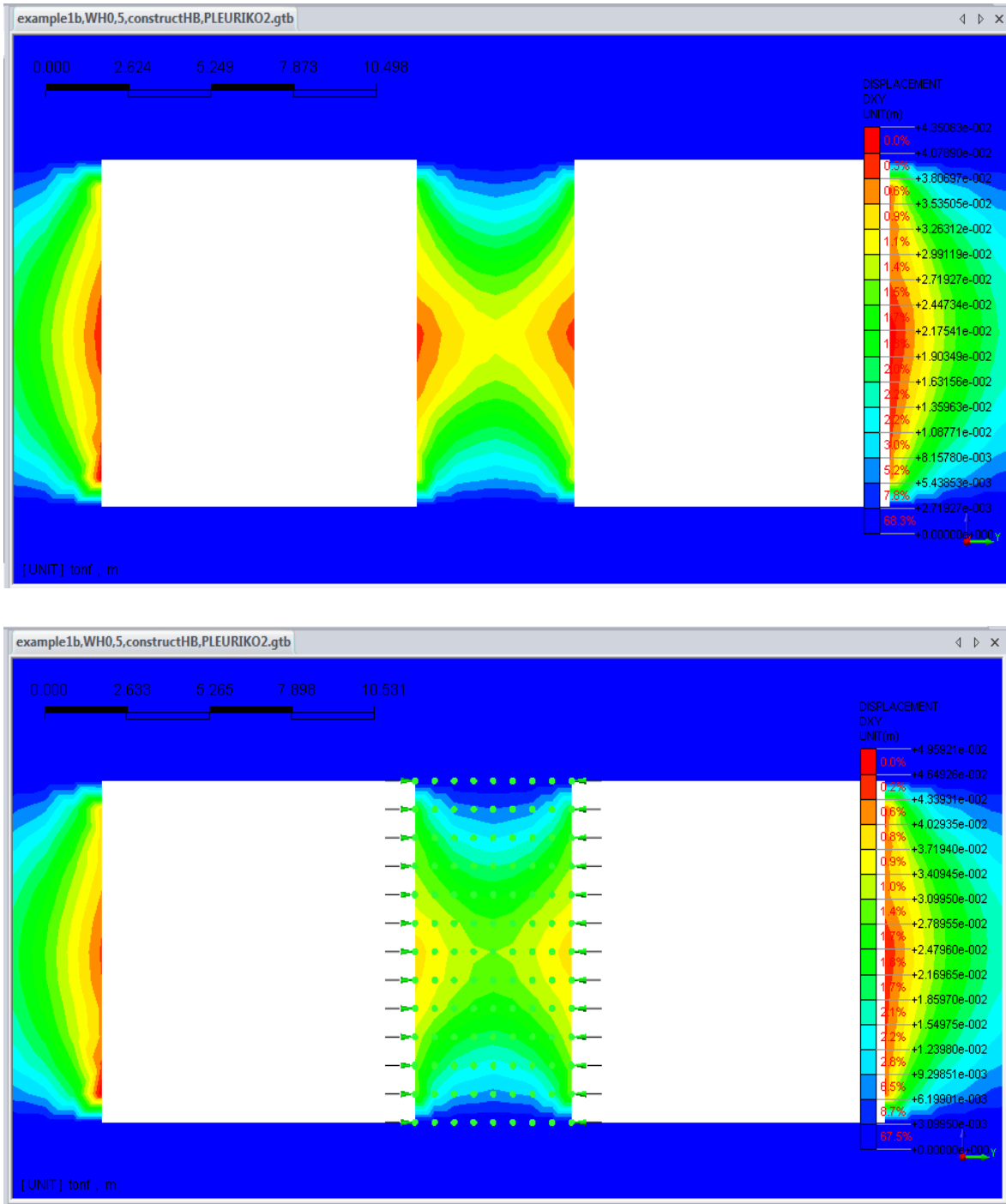
4.2. Αποτελέσματα Β' Ομάδας Αναλύσεων

4.2.1. Ανάλυση Β.1

- **Οριζόντιες μετατοπίσεις (D_{xy})**

Στη συγκεκριμένη ανάλυση, ο λόγος πλάτους / ύψους (W_p / H_p) του στύλου είναι ίσος με 0,5. Στην Εικόνα 4.12.α που ακολουθεί, παρατηρούνται σημαντικές αξονικές (πλευρικές) μετατοπίσεις στις παρειές του στύλου. Επίσης, παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στις τιμές των μετατοπίσεων κατά πλάτος του στύλου. Συνεπώς, στις παρειές του στύλου παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες τιμές (2,65 cm), ενώ στο κέντρο του στύλου οι χαμηλότερες (1,35 cm).

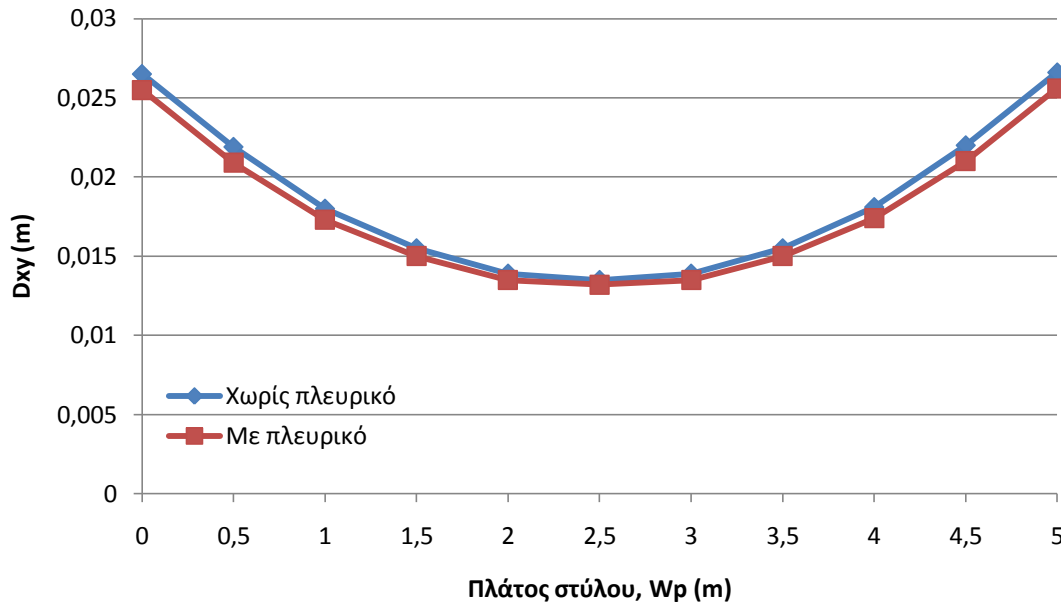
Στην Εικόνα 4.12.β παρουσιάζονται οι πλευρικές μετατοπίσεις μετά το στάδιο εφαρμογής πλευρικού φορτίου στο στύλο μεγέθους 0,16 MN/m². Παρατηρείται ότι υπάρχει βελτίωση μετά την επιβολή πλευρικού φορτίου, αλλά είναι μόλις 1 mm στις παρειές του στύλου και λιγότερο στο κέντρο του. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο διότι ο στύλος έχει ήδη παραμορφωθεί λόγω των ισχυρών τάσεων που δέχεται, με την επιβολή πλευρικού φορτίου δεν είναι δυνατό να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση παρά μόνο να περιοριστούν οι μετατοπίσεις και να βελτιωθούν οι συνθήκες ευστάθειας του στύλου. Γενικότερα, τα μέτρα ενίσχυσης δεν επιδρούν στην αποτροπή της εμφάνισης των αστοχιών, αλλά στον περιορισμό των συνεπειών τους.



Εικόνα 4.12.α,β. Αξονική μετατόπιση (Dxy) πριν και μετά την ενίσχυση του στύλου (W/H=0,5).

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.2) δίνονται οι τιμές των οριζόντιων μετατοπίσεων (Dxy) κατά πλάτος του στύλου, για την ανάλυση B.1 πριν και μετά την εφαρμογή πλευρικού φορτίου στον στύλο. Στο Σχήμα 4.2, παρατηρείται, αρχικά, η διαφοροποίηση των μετατοπίσεων σχετικά με τις παρειές και το κέντρο του στύλου. Στις παρειές είναι 2,65 cm, ενώ στο κέντρο του στύλου είναι 1,35 cm. Ακόμα, παρατηρείται ότι μετά την

εφαρμογή του πλευρικού φορτίου, στις παρειές εμφανίζεται βελτίωση κατά 3,9 %, ενώ στο κέντρο του στύλου 2,4 %.



Σχήμα 4.2. Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά πλάτος του στύλου ($W/H=0,5$), πριν και μετά την εφαρμογή ενίσχυσης.

- **Συντελεστής Ασφαλείας (FS)**

Αναφορικά με την βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας του στύλου, θα αξιολογηθεί και ο Συντελεστής Ασφάλειας (Factor of Safety) του στύλου στο κέντρο και στις παρειές του. Τα αποτελέσματα του FS πριν την εφαρμογή της ενίσχυσης λαμβάνονται από την Α' ομάδα αναλύσεων. Μέσω του κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown, υπολογίζεται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος, όπως φαίνεται παρακάτω για $W_p / H_p = 0,5$. Οι τιμές των σ_3 και σ_p λαμβάνονται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Για το κέντρο του στύλου με πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,78 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,78 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,78 + \sqrt{78 + 14,04} = 0,78 + 9,59 = 10,37 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{10,37 \text{ MPa}}{9,1 \text{ MPa}} = 1,14$$

Για τις παρειές του στύλου με πλευρικό φορτίο,

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,47 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,47 + 0,0039 \cdot 60^2} =$$

$$= 0,47 + \sqrt{47 + 14,04} = 0,47 + 7,81 = 8,28 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{8,28 \text{ MPa}}{7,52 \text{ MPa}} = 1,11$$

Από τους υπολογισμούς μόλις πραγματοποιήθηκαν, συμπεραίνεται ότι τόσο στο κέντρο του στύλου όσο και στις παρειές του, υπάρχει βελτίωση της ευστάθειας του στύλου, η οποία γίνεται ιδιαίτερα εμφανής στις παρειές του στύλου. Γίνεται άμεσα κατανοητό ότι στις παρειές του στύλου πριν την ενίσχυση του υπάρχουν διαρροές στοιχείων σε μεγάλο βαθμό και ο στύλος αστοχεί διότι $FS < 1$. Επίσης, στις παρειές εμφανίζεται αρκετά μεγαλύτερη βελτίωση σε σύγκριση με το κέντρο του στύλου αφού η τιμή του FS από 0,86 μεταβάλλεται σε 1,11. Συνεπώς, όπως φαίνεται παρακάτω, υπολογίζεται ότι η ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας ($\Delta FS\%$) για τις παρειές είναι 30,2 % και για το κέντρο 1,78 %.

Για το κέντρο του στύλου,

$$\Delta FS\% = \frac{FS_{\text{μετά την ενίσχυση}} - FS_{\text{πριν την ενίσχυση}}}{FS_{\text{πριν την ενίσχυση}}} \% = \frac{1,14 - 1,12}{1,12} \% = 1,78 \%$$

Για τις παρειές του στύλου,

$$\Delta FS\% = \frac{FS_{\text{μετά την ενίσχυση}} - FS_{\text{πριν την ενίσχυση}}}{FS_{\text{πριν την ενίσχυση}}} \% = \frac{1,11 - 0,86}{0,86} \% = 30,2 \%$$

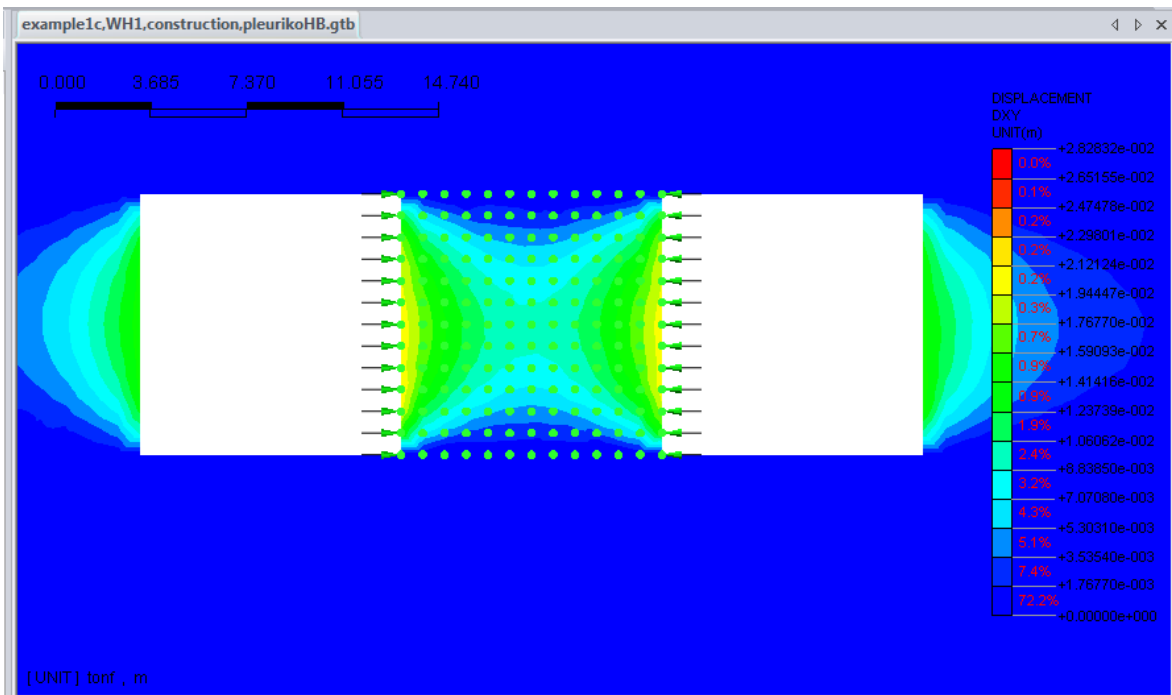
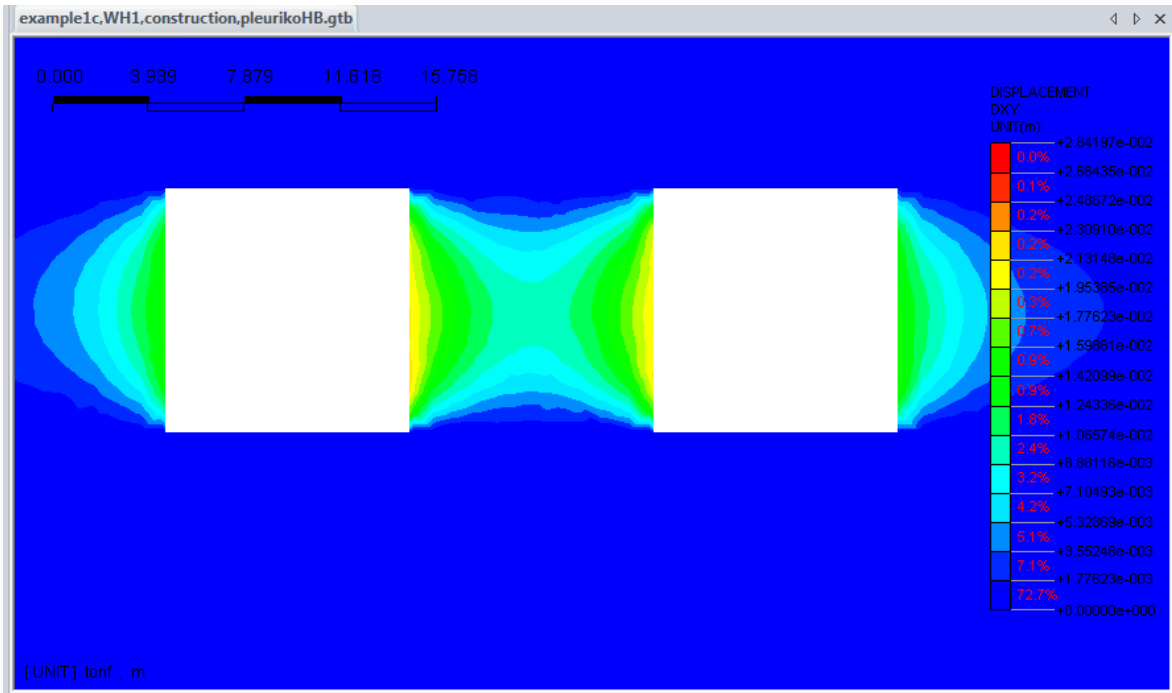
4.2.2. Ανάλυση B.2

- **Οριζόντιες μετατοπίσεις (Dxy)**

Στη συγκεκριμένη ανάλυση, ο λόγος πλάτους / ύψους (W_p / H_p) του στύλου ισούται με 1. Στην Εικόνα 4.13.α παρατηρούνται σχετικά μεγάλες οριζόντιες μετατοπίσεις (Dxy), αλλά είναι αρκετά μικρότερες από εκείνες της ανάλυσης B.1. Συνεπώς, παρατηρείται ότι στις παρειές οι οριζόντιες μετατοπίσεις είναι 1,78 cm, ενώ στο κέντρο του στύλου είναι 1,11 cm.

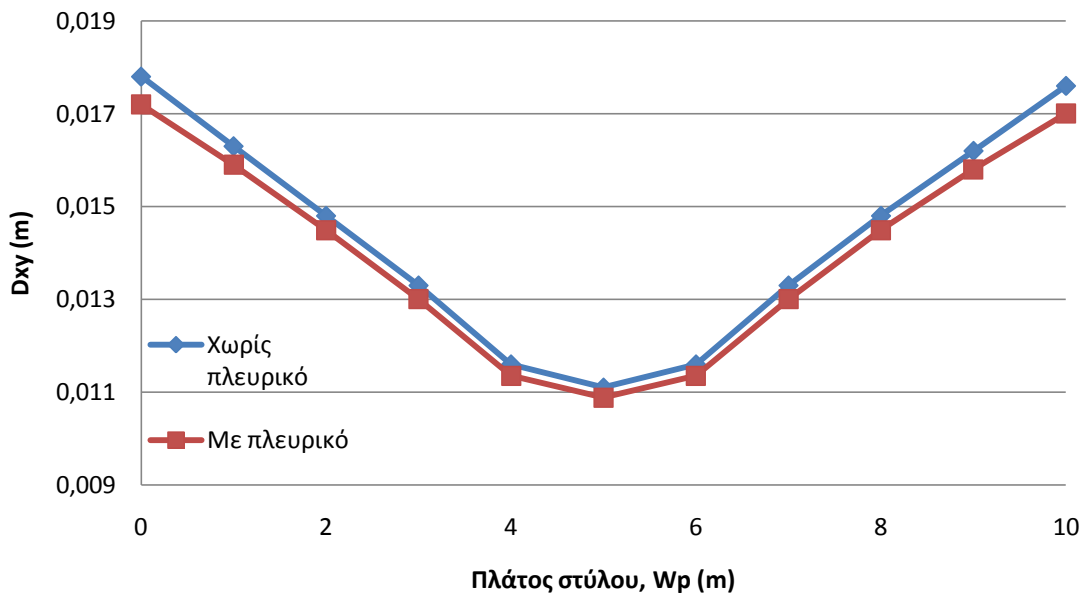
Ακόμη, στην Εικόνα 4.13.β φαίνεται ότι μετά την εφαρμογή του πλευρικού φορτίου στον στύλο, βελτιώνεται η συμπεριφορά του και ότι οι πλευρικές μετατοπίσεις περιορίζονται.

Επιπλέον, γίνεται αντιληπτό ότι η επίδραση της ενίσχυσης μπορεί να βελτιώνει την συμπεριφορά του στύλου, όμως είναι μικρότερη και στις παρειές καθώς και στο κέντρο του στύλου σε σύγκριση με την επίδραση της ενίσχυσης στην ανάλυση Β.1.



Εικόνα 4.13.α,β Αξονική μετατόπιση (D_{xy}) πριν και μετά την ενίσχυση του στύλου ($W/H=1$).

Στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 4.3), παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πλευρικών μετατοπίσεων τόσο πριν την εφαρμογή της ενίσχυσης όσο και μετά. Παρατηρείται ότι σε σύγκριση με την ανάλυση B.1, η καμπύλες ομαλοποιούνται. Δηλαδή, η διαφοροποίηση των τιμών των μετατοπίσεων από τις παρειές στο κέντρο δεν είναι τόσο μεγάλη. Το γεγονός αυτό θα παρατηρείται όλο και με πιο έντονο τρόπο με την αύξηση του λόγου πλάτους / ύψους του στύλου. Επιπροσθέτως, παρατηρείται ότι μετά την εφαρμογή του πλευρικού φορτίου, στις παρειές εμφανίζεται βελτίωση κατά 3,4 %, ενώ στο κέντρο του στύλου 2,11 %.



Σχήμα 4.3. Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά πλάτος του στύλου ($W/H=1$), πριν και μετά την εφαρμογή της ενίσχυσης.

- **Συντελεστής Ασφαλείας (FS)**

Για την εκτίμηση του συντελεστή ασφαλείας (FS) του στύλου με $W_p / H_p = 1$, ακολουθείται ακριβώς η ίδια μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην προηγούμενη ανάλυση. Επομένως, ο Συντελεστής Ασφαλείας για το κέντρο και τις παρειές του στύλου, πριν και μετά την εφαρμογή πλευρικού φορτίου, προκύπτει ως εξής :

Για το κέντρο του στύλου με πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 1,2 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 1,2 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 1,2 + \sqrt{120 + 14,04} = 1,2 + 11,57 = 12,77 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{12,77 \text{ MPa}}{6,23 \text{ MPa}} = \mathbf{2,05}$$

Για τις παρειές του στύλου με πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,3 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,3 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,3 + \sqrt{30 + 14,04} = 0,3 + 6,63 = 6,93 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{6,93 \text{ MPa}}{3,71 \text{ MPa}} = \mathbf{1,87}$$

Από τους υπολογισμούς που μόλις πραγματοποιήθηκαν, συμπεραίνεται ότι τόσο στο κέντρο του στύλου όσο και στις παρειές του, υπάρχει εμφανής βελτίωση της ευστάθειας του στύλου εξαιτίας της ενίσχυσης. Επιπλέον, στις παρειές εμφανίζεται αρκετά μεγαλύτερη βελτίωση σε σύγκριση με το κέντρο του στύλου. Συνεπώς, όπως υπολογίζεται παρακάτω, η ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας ($\Delta FS\%$) για τις παρειές είναι 28,9 % και για το κέντρο του στύλου είναι 2,5 %. Οπότε, σε σύγκριση με την ανάλυση B.1 παρουσιάζεται μείωση της ποσοστιαίας μεταβολής στις παρειές, ενώ εμφανίζεται αύξηση στο κέντρο.

Για το κέντρο του στύλου,

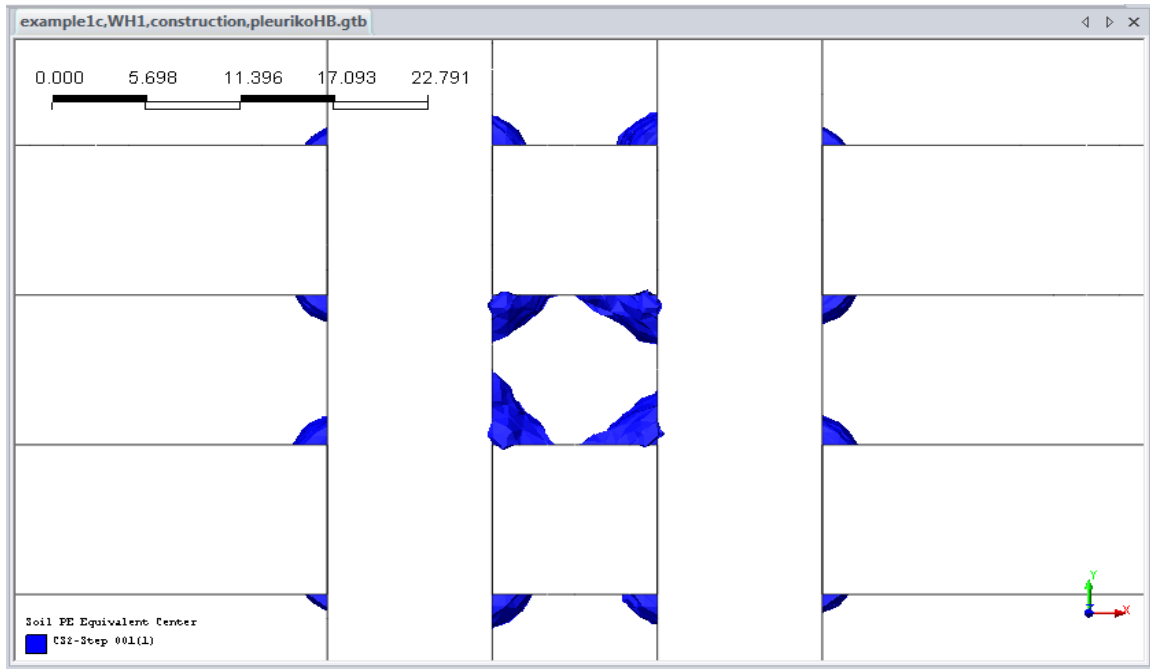
$$\Delta FS\% = \frac{FS_{\text{μετά την ενίσχυση}} - FS_{\text{πριν την ενίσχυση}}}{FS_{\text{πριν την ενίσχυση}}} \% = \frac{2,05 - 2}{2} \% = 2,5 \%$$

Για τις παρειές του στύλου,

$$\Delta FS\% = \frac{FS_{\text{μετά την ενίσχυση}} - FS_{\text{πριν την ενίσχυση}}}{FS_{\text{πριν την ενίσχυση}}} \% = \frac{1,87 - 1,45}{1,45} \% = 28,9 \%$$

- **Αστοχίες - Διαρροές**

Στην Α' ομάδα αναλύσεων εκτιμήθηκε ο όγκος του στύλου που αστοχεί πριν την εφαρμογή της πλευρικής ενίσχυσης. Στο συγκεκριμένο φορτίο εκτιμάται η διαρροή που συμβαίνει στον στύλο μετά την ενίσχυση (Εικόνα 4.14).



Εικόνα 4.14. Σημεία διαρροής του στύλου με $W_p / H_p = 1$ μετά την εφαρμογή ενίσχυσης.

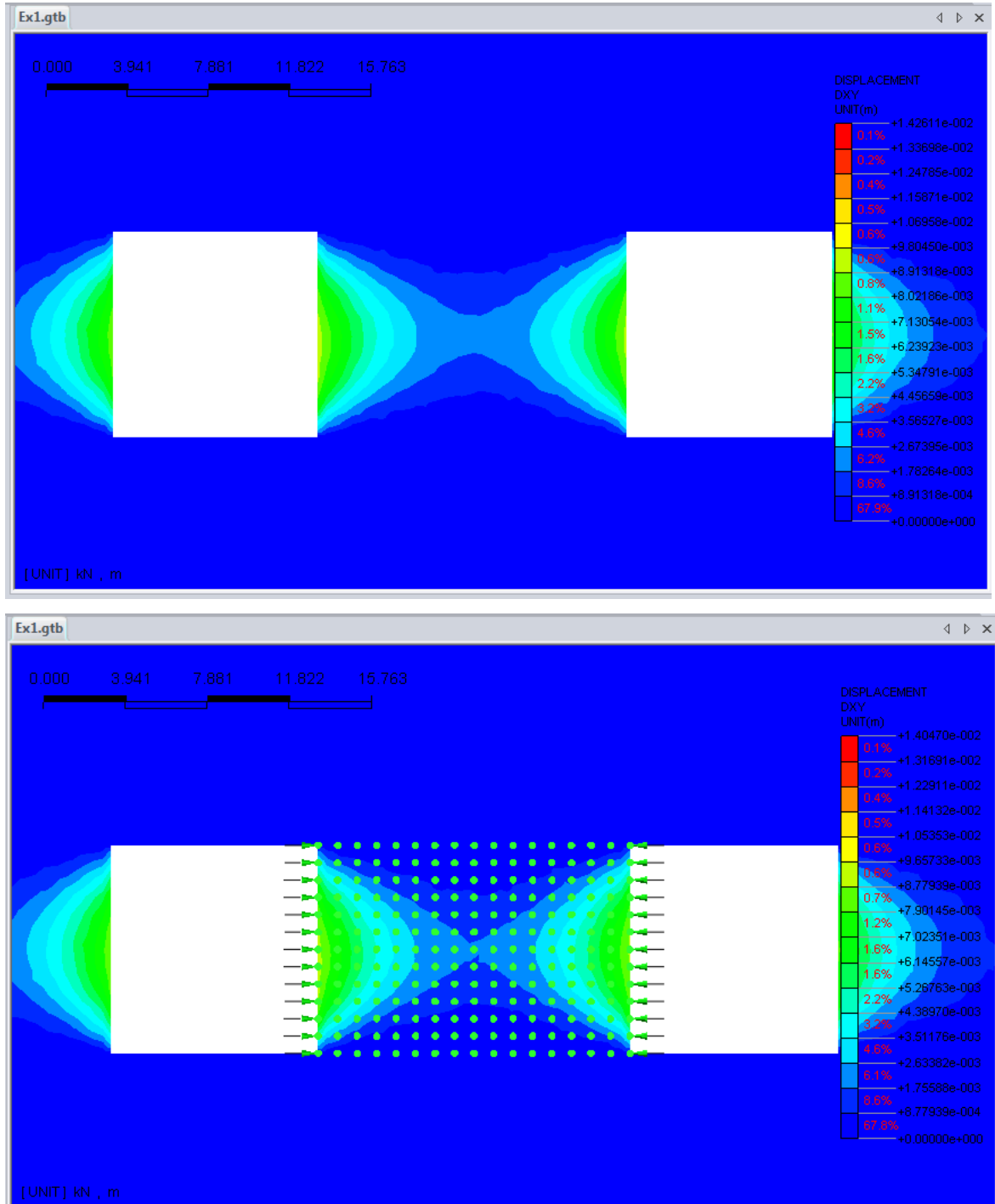
Παρατηρείται μια ελάχιστη μεταβολή, μόλις 1,4 %, από τα αποτελέσματα που προέκυψαν πριν την ενίσχυση. Επιβεβαιώνεται, λοιπόν, ότι τα μέτρα ενίσχυσης δεν επιδρούν στην αποτροπή της εμφάνισης των αστοχιών, αλλά στον περιορισμό των συνεπειών τους. Αφού ο στύλος έχει ήδη παραμορφωθεί λόγω των ισχυρών τάσεων που δέχεται, με την επιβολή πλευρικού φορτίου δεν είναι δυνατό να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση, αλλά να βελτιωθούν οι συνθήκες ευστάθειας που επικρατούν σε αυτόν.

4.2.3. Ανάλυση B.3

- **Οριζόντιες μετατοπίσεις (Dxy)**

Στη συγκεκριμένη ανάλυση, ο λόγος πλάτους / ύψους (W_p / H_p) του στύλου ισούται με 1,5. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.15.α, είναι αναμενόμενο ότι οι πλευρικές μετατοπίσεις (Dxy) στις παρειές είναι σημαντικά πιο μεγάλες απ' ότι στο κέντρο του στύλου. Παρατηρείται ότι στις παρειές εμφανίζεται μια αρκετά μεγάλη διαφορά σε σύγκριση με τις δυο προηγούμενες αναλύσεις, σχετικά με τις οριζόντιες μετατοπίσεις. Δηλαδή, οι πλευρικές μετατοπίσεις στις παρειές του στύλου είναι 9,8 mm ενώ στο κέντρο του 3,5 mm. Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι με την αύξηση του λόγου πλάτους / ύψους βελτιώνεται εμφανώς η συμπεριφορά του στύλου τόσο στις παρειές όσο και στο κέντρο του.

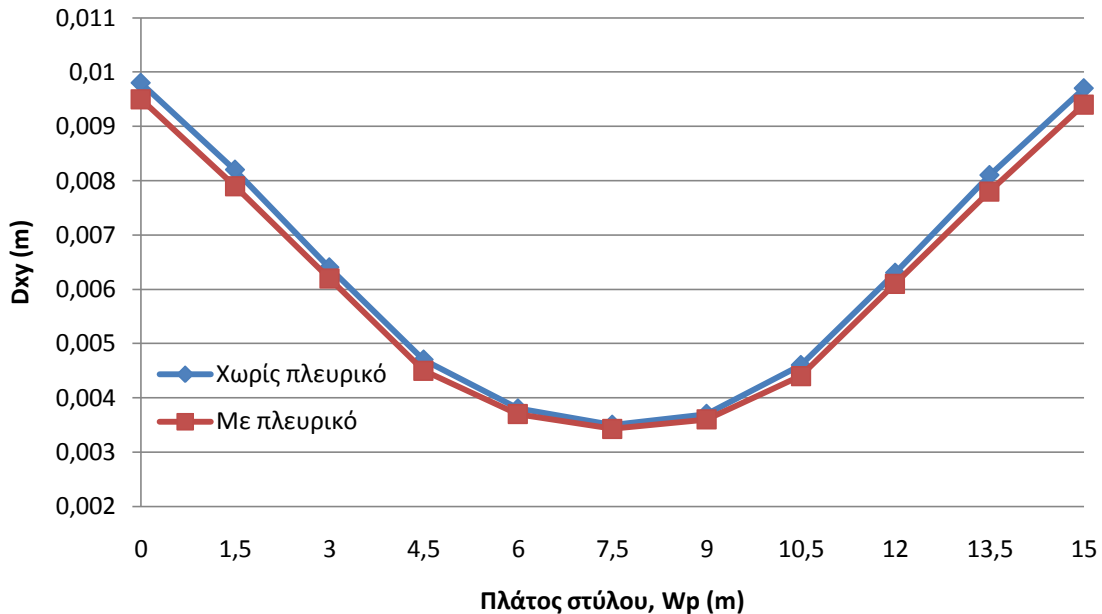
Επιπροσθέτως, παρατηρείται ότι η βελτίωση λόγω της επίδρασης της ενίσχυσης μειώνεται συγκριτικά με τις δυο προηγούμενες αναλύσεις (Εικόνα 4.15.β).



Εικόνα 4.15.α,β. Αξονική μετατόπιση (Dxy) πριν και μετά την ενίσχυση του στύλου ($W/H=1,5$).

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται οι τιμές των οριζόντιων μετατοπίσεων πριν και μετά την εφαρμογή του πλευρικού φορτίου στο στύλο, μεγέθους $0,16 \text{ MN/m}^2$. Παρατηρείται η μείωση της διαφοράς των τιμών της αξονικής μετατόπισης μεταξύ του κέντρου και των

παραιών του στύλου. Κατά συνέπεια, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, η καμπύλη ομαλοποιείται περισσότερο από τις δύο προηγούμενες αναλύσεις. Ακόμη, παρατηρείται ότι μετά την εφαρμογή του πλευρικού φορτίου, στις παρειές εμφανίζεται βελτίωση κατά 3,1 %, ενώ στο κέντρο του στύλου 2 %. Ένα ακόμα συμπέρασμα που εξάγεται είναι, ότι με την αύξηση του W_p / H_p η επίδραση του πλευρικού φορτίου στις παρειές του στύλου μειώνεται, ενώ αντιθέτως στο κέντρο του αυξάνεται.



Σχήμα 4.4. Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά πλάτος του στύλου ($W/H=1,5$), πριν και μετά την εφαρμογή της ενίσχυσης.

- **Συντελεστής Ασφαλείας (FS)**

Με σκοπό την εκτίμηση του Συντελεστή Ασφάλειας (FS) του στύλου με $W_p / H_p = 1,5$, ακολουθείται η ίδια μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στις προηγούμενες αναλύσεις. Συνεπώς, ο Συντελεστής Ασφαλείας για το κέντρο και τις παρειές του στύλου, πριν και μετά την εφαρμογή πλευρικού φορτίου, είναι :

Για το κέντρο του στύλου με πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,95 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,95 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,95 + \sqrt{95 + 14,04} = 0,95 + 10,44 = 11,39 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{11,39 \text{ MPa}}{5,06 \text{ MPa}} = 2,25$$

Για τις παρειές του στύλου με πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned}\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} &= 0,29 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,29 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,29 + \sqrt{29 + 14,04} = 0,29 + 6,5 = 6,85 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{6,85 \text{ MPa}}{3,63 \text{ MPa}} = \mathbf{1,88}$$

Από τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν, συμπεραίνεται ότι τόσο στο κέντρο του στύλου όσο και στις παρειές του, υπάρχει εμφανής βελτίωση της ευστάθειας του στύλου λόγω της ενίσχυσης που επιβλήθηκε. Γενικά, στο κέντρο του στύλου ο συντελεστής ασφάλειας (Factor of Safety) είναι πάντοτε μεγαλύτερος από ότι στις παρειές του. Αυτή η καλύτερη συμπεριφορά στο κέντρο του στύλου δικαιολογείται από το γεγονός του μεγαλύτερου τριαξονικού περιορισμού που υφίσταται, σε σύγκριση με τις παρειές του. Όπως υπολογίζεται παρακάτω, η ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας ($\Delta FS\%$) εξαιτίας της ενίσχυσης, για τις παρειές είναι 25,3 % και για το κέντρο του στύλου είναι 3,6 %.

Για το κέντρο του στύλου,

$$\Delta FS\% = \frac{FS_{\text{μετά την ενίσχυση}} - FS_{\text{πρίν την ενίσχυση}}}{FS_{\text{πρίν την ενίσχυση}}} \% = \frac{2,25 - 2,17}{2,17} \% = 3,6 \%$$

Για τις παρειές του στύλου,

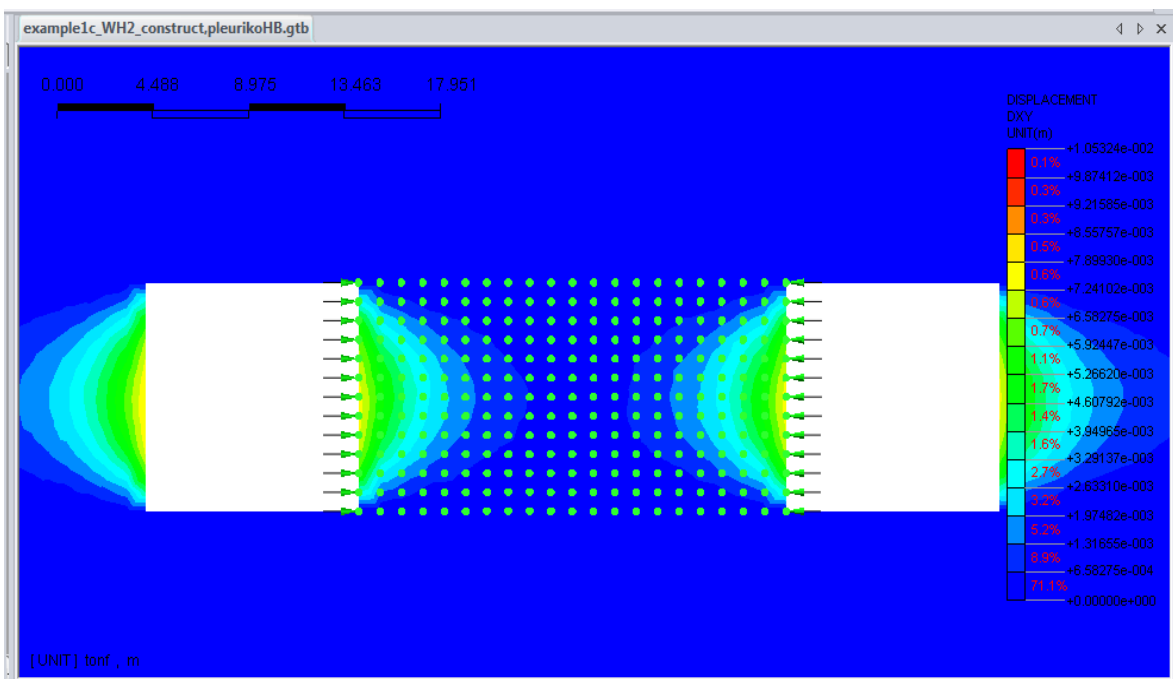
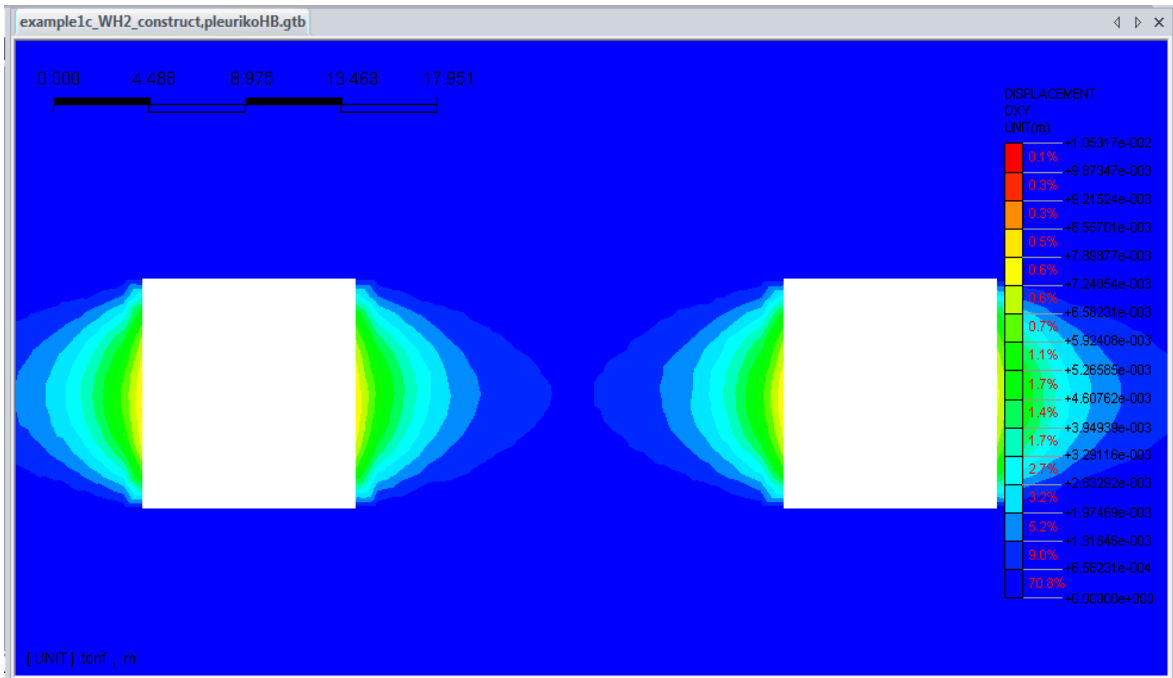
$$\Delta FS\% = \frac{FS_{\text{μετά την ενίσχυση}} - FS_{\text{πρίν την ενίσχυση}}}{FS_{\text{πρίν την ενίσχυση}}} \% = \frac{1,88 - 1,5}{1,5} \% = 25,3 \%$$

4.2.4. Ανάλυση B.4

- **Οριζόντιες μετατοπίσεις (Dxy)**

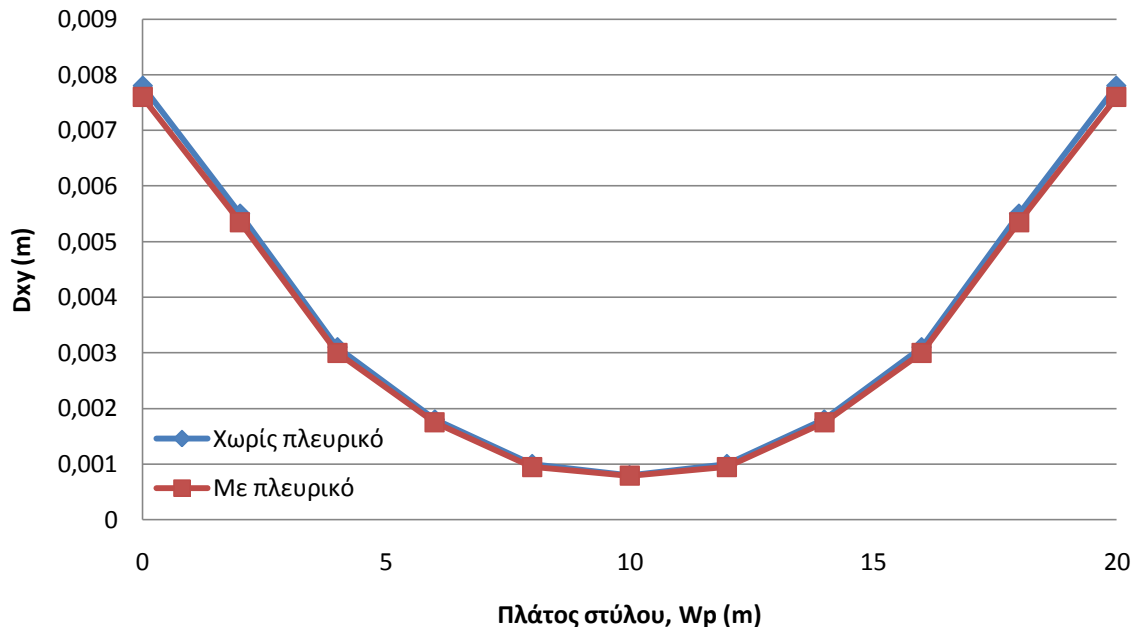
Στη συγκεκριμένη ανάλυση, ο λόγος πλάτους / ύψους (W_p / H_p) του στύλου ισούται με 2. Παρατηρούνται (Εικόνα 4.16.α) πολύ μικρές τιμές των πλευρικών μετατοπίσεων τόσο στις παρειές όσο και στο κέντρο του στύλου. Ωστόσο, ειδικά στο κέντρο του στύλου οι τιμές που εμφανίζονται είναι τόσο μικρές, που μπορούν να θεωρηθούν μηδενικές. Παρατηρείται ότι, οι αξονικές μετατοπίσεις (Dxy) στις παρειές του στύλου παρουσιάζουν μια μικρή

βελτίωση σε σχέση με την ανάλυση B.3, αλλά στο κέντρο του στύλου παρουσιάζεται μεγαλύτερη βελτίωση. Συνεπώς, στο κέντρο του στύλου οι πλευρικές μετατοπίσεις είναι 0,8 mm ενώ στις παρειές του είναι 7,8 mm. Στην Εικόνα 4.16.β, μετά την επιβολή του πλευρικού φορτίου, υπάρχει βελτίωση των συνθηκών τόσο στο κέντρο όσο και στις παρειές αλλά αυτή η βελτίωση είναι αρκετά μικρή. Για τον συγκεκριμένο λόγο $W_p / H_p = 2$, η ενίσχυση δεν θεωρείται μείζονος σημασίας αφού πετυχαίνονται πολύ καλές συνθήκες ευστάθειας πριν την επιβολή φορτίου.



Εικόνα 4.16.α,β. Αξονική μετατόπιση (Dxy) πριν και μετά την ενίσχυση του στύλου ($W/H=2$).

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται οι τιμές των οριζόντιων μετατοπίσεων πριν και μετά την εφαρμογή του πλευρικού φορτίου που εφαρμόζεται στο στύλο. Παρατηρείται ότι η επίδραση της ενίσχυσης για τον συγκεκριμένο λόγο πλάτους / ύψους ($W_p / H_p = 2$) είναι η μικρότερη που έχει παρουσιαστεί σε σύγκριση με τις τρεις προηγούμενες αναλύσεις. Η βελτίωση των αξονικών μετατοπίσεων στις παρειές του στύλου αγγίζει το 2,6 %, ενώ αναφορικά με το κέντρο του στύλου είναι μόλις 1,25 %.



Σχήμα 4.5. Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά πλάτος του στύλου ($W/H=2$), πριν και μετά την εφαρμογή της ενίσχυσης.

- **Συντελεστής Ασφαλείας (FS)**

Με σκοπό τον υπολογισμό του Συντελεστή Ασφάλειας (Factor of Safety) του στύλου με $W_p / H_p = 2$ για την εκτίμηση της ευστάθειας του στύλου, ακολουθείται η ίδια μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στις προηγούμενες αναλύσεις. Συνεπώς, ο Συντελεστής Ασφαλείας για το κέντρο και τις παρειές του στύλου, πριν και μετά την εφαρμογή πλευρικού φορτίου, αναλύεται παρακάτω. Όπως έχει προαναφερθεί, υπολογίζεται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος μέσω του κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown και οι τιμές των σ_3 και σ_p λαμβάνονται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Για το κέντρο του στύλου με πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 1 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 1 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 1 + \sqrt{100 + 14,04} = 1 + 10,67 = 11,67 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{11,67 \text{ MPa}}{3,38 \text{ MPa}} = \mathbf{3,45}$$

Για τις παρειές του στύλου με πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,31 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,31 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,31 + \sqrt{31 + 14,04} = 0,31 + 6,71 = 7,02 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{7,02 \text{ MPa}}{3,69 \text{ MPa}} = \mathbf{1,9}$$

Από τους υπολογισμούς που μόλις πραγματοποιήθηκαν, συμπεραίνεται ότι τόσο στο κέντρο του στύλου όσο και στις παρειές του, υπάρχει εμφανής βελτίωση της ευστάθειας του στύλου λόγω της ενίσχυσης που επιβλήθηκε. Ωστόσο, οι συνθήκες ευστάθειας που επικρατούν είναι αρκετά καλές και χωρίς την εφαρμογή της ενίσχυσης διότι, ειδικά στο κέντρο του στύλου, εμφανίζεται $FS = 3,32$. Όπως υπολογίζεται παρακάτω, η ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας ($\Delta FS\%$) εξαιτίας της ενίσχυσης, για τις παρειές είναι 14,4 % και για το κέντρο του στύλου είναι 3,9 %. Επομένως, συμπεραίνεται ότι με την αύξηση του λόγου πλάτους / ύψους του στύλου, η επίδραση της ενίσχυσης που εφαρμόζεται στον στύλο αυξάνει για το κέντρο του ενώ μειώνεται για τις παρειές του συγκριτικά με τις προηγούμενες αναλύσεις.

Για το κέντρο του στύλου,

$$\Delta FS\% = \frac{FS_{\text{μετά την ενίσχυση}} - FS_{\text{πριν την ενίσχυση}}}{FS_{\text{πριν την ενίσχυση}}} \% = \frac{3,45 - 3,32}{3,32} \% = 3,9 \%$$

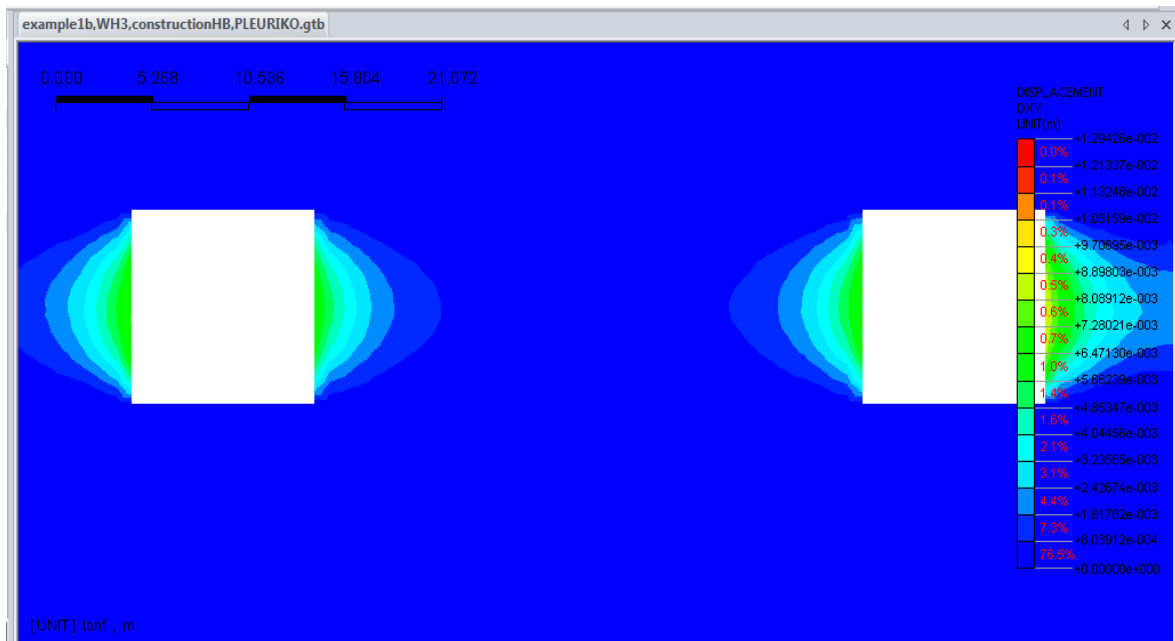
Για τις παρειές του στύλου,

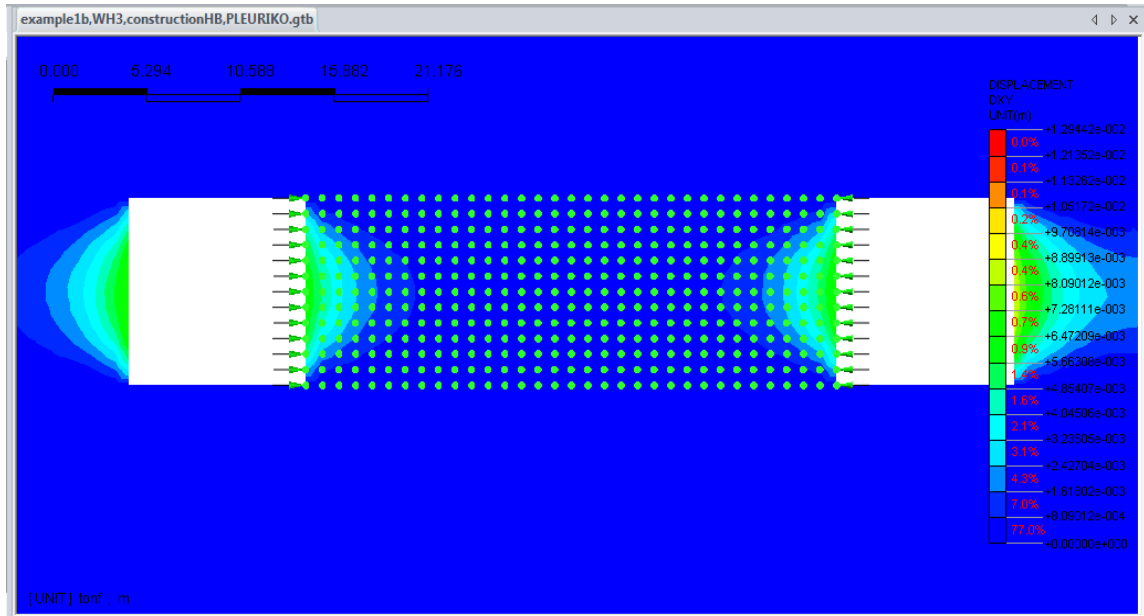
$$\Delta FS\% = \frac{FS_{\text{μετά την ενίσχυση}} - FS_{\text{πριν την ενίσχυση}}}{FS_{\text{πριν την ενίσχυση}}} \% = \frac{1,9 - 1,66}{1,66} \% = 14,4 \%$$

4.2.5. Ανάλυση B.5

- **Οριζόντιες μετατοπίσεις (Dxy)**

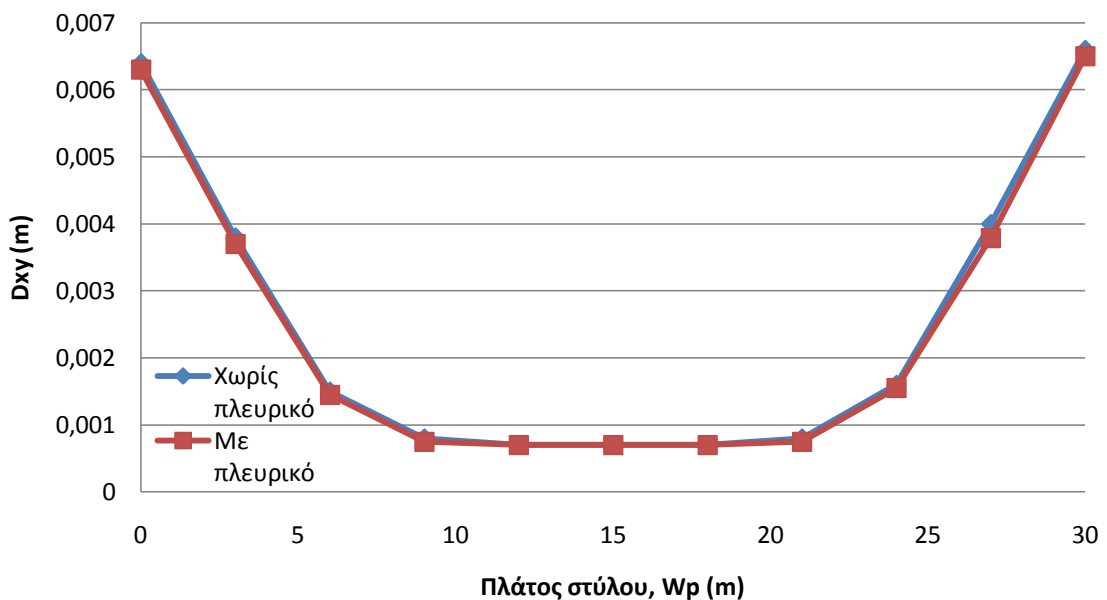
Στη συγκεκριμένη ανάλυση, ο λόγος πλάτους / ύψους (W_p / H_p) του στύλου ισούται με 3. Στην Εικόνα 4.17.α που ακολουθεί, παρατηρούνται πολύ μικρές αξονικές (πλευρικές) μετατοπίσεις στις παρειές και στο κέντρο του στύλου. Σαφώς, στις παρειές του στύλου είναι μεγαλύτερες οι τιμές των μετατοπίσεων απ' ό τι στο κέντρο του. Επίσης, η διαφοροποίηση στις τιμές των πλευρικών μετατοπίσεων (Dxy) κατά πλάτος του στύλου είναι η μικρότερη συγκριτικά με τις προηγούμενες αναλύσεις. Καταλήγοντας, στις παρειές του στύλου που παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες τιμές είναι 6,4 mm, ενώ στο κέντρο του στύλου οι χαμηλότερες είναι 0,6 mm, οι οποίες είναι τόσο μικρές που μπορούν να θεωρηθούν μηδενικές. Όπως και στην προηγούμενη ανάλυση, έτσι και για τον συγκεκριμένο λόγο $W_p / H_p = 3$, δε κρίνεται αναγκαία η εφαρμογή του πλευρικού φορτίου διότι υπάρχουν ήδη αρκετά καλές συνθήκες ευστάθειας, ωστόσο εμφανίζεται μικρή βελτίωση των συνθηκών στις παρειές του στύλου (Εικόνα 4.17.β).





Εικόνα 4.17.α,β. Αξονική μετατόπιση (D_{xy}) πριν και μετά την ενίσχυση του στύλου ($W/H=3$).

Στο Σχήμα 4.6 δίνονται οι τιμές των οριζόντιων μετατοπίσεων (D_{xy}) κατά πλάτος του στύλου, για την ανάλυση B.5 πριν και μετά την εφαρμογή πλευρικού φορτίου στον στύλο. Συμπεραίνεται ότι η καμπύλη των οριζόντιων μετατοπίσεων στη συγκεκριμένη ανάλυση είναι η πιο ομαλοποιημένη από όλες τις προηγούμενες, δηλαδή ότι η διαφορά της τιμής στις παρειές με την αντίστοιχη στο κέντρο είναι η μικρότερη (5,7 mm). Παρατηρείται, επίσης, ότι η επίδραση της ενίσχυσης για τον συγκεκριμένο λόγο $W_p / H_p = 3$ είναι η μικρότερη συγκριτικά με τις προηγούμενες αναλύσεις. Η βελτίωση των αξονικών μετατοπίσεων στις παρειές του στύλου είναι μόλις 1,6 %, ενώ αναφορικά με το κέντρο του στύλου είναι ουσιαστικά μηδενική.



Σχήμα 4.6. Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά πλάτος του στύλου ($W/H=3$), πριν και μετά την ενίσχυση.

- **Συντελεστής Ασφαλείας (FS)**

Με σκοπό τον υπολογισμό του Συντελεστή Ασφάλειας (Factor of Safety) του στύλου με $W_p / H_p = 3$ για την εκτίμηση της ευστάθειας του στύλου, ακολουθείται η ίδια μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στις τέσσερις προηγούμενες αναλύσεις. Επομένως, ο Συντελεστής Ασφαλείας για το κέντρο και τις παρειές του στύλου, πριν και μετά την εφαρμογή πλευρικού φορτίου, υπολογίζεται ως εξής:

Για το κέντρο του στύλου με πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,98 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,98 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,98 + \sqrt{98 + 14,04} = 0,98 + 10,58 = 11,56 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{11,56 \text{ MPa}}{2,65 \text{ MPa}} = \mathbf{4,37}$$

Για τις παρειές του στύλου με πλευρικό φορτίο,

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,26 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,26 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,26 + \sqrt{26 + 14,04} = 0,26 + 6,32 = 6,58 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{6,58 \text{ MPa}}{3,42 \text{ MPa}} = \mathbf{1,92}$$

Παρατηρείται ότι για τον συγκεκριμένο λόγο $W_p / H_p = 3$, ο Συντελεστής Ασφάλειας (FS) είναι μεγαλύτερος σε σύγκριση με όλες τις προηγούμενες αναλύσεις, τόσο στις παρειές που λαμβάνει τιμή $FS = 1,7$ όσο και στο κέντρο του στύλου που λαμβάνει τιμή $FS = 4,17$. Όσον αφορά τη βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας εξαιτίας της ενίσχυσης, όπως υπολογίζεται και παρακάτω μέσω του $\Delta FS\%$, στις παρειές του στύλου η βελτίωση αγγίζει το 12,9 % ενώ στο κέντρο του είναι 4,8 %.

Για το κέντρο του στύλου,

$$\Delta FS\% = \frac{FS_{\text{μετά την ενίσχυση}} - FS_{\text{πριν την ενίσχυση}}}{FS_{\text{πριν την ενίσχυση}}} \% = \frac{4,37 - 4,17}{4,17} \% = 4,8 \%$$

Για τις παρειές του στύλου,

$$\Delta FS\% = \frac{FS_{\text{μετά την ενίσχυση}} - FS_{\text{πριν την ενίσχυση}}}{FS_{\text{πριν την ενίσχυση}}} \% = \frac{1,92 - 1,7}{1,7} \% = 12,9 \%$$

4.2.6. Σχολιασμός – Σύγκριση Β' Ομάδας Αναλύσεων

Στα αποτελέσματα της Β' ομάδας αναλύσεων, όπως αναμενόταν, η επίδραση της ενίσχυσης δεν ήταν ιδιαίτερα σημαντική σχετικά με τις αξονικές μετατοπίσεις (D_{xy}), διότι ο στύλος είχε παραμορφωθεί πριν την επιβολή του πλευρικού φορτίου. Επιτεύχθηκε όμως, ο περιορισμός των αξονικών μετατοπίσεων και η γενική βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας, λόγω της αύξησης του Συντελεστή Ασφάλειας (FS).

Επίσης, από τα αποτελέσματα της Β' ομάδας αναλύσεων προκύπτει ότι η συμπεριφορά της ενίσχυσης επηρεάζεται σημαντικά από τη διαφοροποίηση του λόγου W_p / H_p του στύλου. Συνεπώς, παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του λόγου πλάτους / ύψους του στύλου, η επίδραση της ενίσχυσης μειώνεται ενώ αντίθετα η μεγαλύτερη βελτίωση παρουσιάζεται για τον μικρότερο λόγο πλάτους / ύψους ($W_p / H_p = 0,5$), όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.3. Ακόμη, αξίζει να αναφερθεί ότι για κάθε λόγο W_p / H_p , η επίδραση της ενίσχυσης είναι μεγαλύτερη στις παρειές απ' ότι στο κέντρο του στύλου.

Πίνακας 4.3. Επίδραση της ενίσχυσης στις αξονικές μετατοπίσεις (D_{xy}) για την Β' ομάδα αναλύσεων.

	Κέντρο	Παρειές
B.1. ($W_p / H_p = 0,5$)	2,4 %	3,9 %
B.2. ($W_p / H_p = 1$)	2,11 %	3,4 %
B.3. ($W_p / H_p = 1,5$)	2 %	3,1 %
B.4. ($W_p / H_p = 2$)	1,25 %	2,6 %
B.5. ($W_p / H_p = 3$)	0 %	1,6 %

Μια ακόμη παρατήρηση προκύπτει από το γεγονός ότι με την επιβολή πλευρικού φορτίου μεγέθους $0,16 \text{ MN/m}^2$, για κάθε λόγο πλάτους / ύψους του στύλου η διαφορά των τιμών των πλευρικών μετατοπίσεων στις παρειές με το κέντρο του μειώνεται. Για παράδειγμα, η μικρότερη διαφορά παρουσιάστηκε για λόγο $W_p / H_p = 3$ και ήταν $5,6 \text{ mm}$. Το γεγονός αυτό μαρτυρά ότι επιτυγχάνεται μια ομοιόμορφη συμπεριφορά κατά πλάτος του στύλου και κατά συνέπεια, μια γενικότερη βελτίωση στις συνθήκες ευστάθειας του στύλου.

Αναφορικά με τον Συντελεστή Ασφάλειας (Factor of Safety), συμπεραίνεται η εμφανής βελτίωση του στύλου τόσο στο κέντρο του αλλά ειδικότερα στις παρειές του, μετά την εφαρμογή του πλευρικού φορτίου. Μόνο για τον στύλο με $W_p / H_p = 0,5$ παρατηρείται Συντελεστής Ασφάλειας < 1 στις παρειές του, όμως μετά την επιβολή της ενίσχυσης ο Συντελεστής Ασφάλειας (FS) λαμβάνει τιμή > 1 και κατά συνέπεια παρουσιάζει βελτιωμένη συμπεριφορά. Σε όλες τις υπόλοιπες αναλύσεις ο Συντελεστής Ασφάλειας είναι > 1 πριν την εφαρμογή της ενίσχυσης. Ειδικότερα για τους λόγους $W_p / H_p = 2$ και $W_p / H_p = 3$, δε κρίνεται αναγκαία η επιβολή του πλευρικού φορτίου για την ευστάθεια των στύλων διότι ο Συντελεστής Ασφάλειας λαμβάνει ήδη τιμές > 3 και > 4 αντίστοιχα. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.4), παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της Β' ομάδας αναλύσεων σχετικά με την ποσοστιαία μεταβολή του Συντελεστή Ασφάλειας ($\Delta FS\%$). Παρατηρείται ότι με την αύξηση του λόγου W_p / H_p , στις παρειές παρουσιάζεται ελάττωση της ποσοστιαίας μεταβολής του Συντελεστή Ασφαλείας ενώ αντίθετα στο κέντρο των στύλων εμφανίζεται αύξηση του ποσοστού.

Πίνακας 4.4. Ποσοστιαία αύξηση Συντελεστή Ασφαλείας ($\Delta FS\%$) για την Β' ομάδα αναλύσεων.

	Κέντρο	Παρειές
B.1. ($W_p / H_p = 0,5$)	1,78 %	30,2 %
B.2. ($W_p / H_p = 1$)	2,5 %	28,9 %
B.3. ($W_p / H_p = 1,5$)	3,6 %	25,3 %
B.4. ($W_p / H_p = 2$)	3,9 %	14,4 %
B.5. ($W_p / H_p = 3$)	4,8 %	12,9 %

Όσον αφορά τις αστοχίες που εμφανίζονται στον στύλο, παρατηρείται ότι με την αύξηση του λόγου πλάτους / ύψους (W_p / H_p) επιτυγχάνεται ελάττωση των αστοχιών. Κατά συνέπεια, προκύπτει ότι η μεγαλύτερη αστοχία παρουσιάζεται για στύλο με $W_p / H_p = 0,5$, η οποία είναι της τάξης του 91 % του συνολικού όγκου, ενώ η μικρότερη αστοχία παρουσιάζεται για στύλο με $W_p / H_p = 3$, όπου ανέρχεται σε 2,5 % επί του συνολικού όγκου του στύλου. Επίσης, συμπεραίνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις οι στύλοι διαρρέουν κυρίως στις παρειές του και λιγότερο έως καθόλου στο κέντρο τους. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.5), παρουσιάζεται το ποσοστό αστοχίας του στύλου για κάθε μια από τις 5 αναλύσεις.

Πίνακας 4.5. Ποσοστό αστοχίας του στύλου για την Β' ομάδα αναλύσεων.

	Στύλος σε αστοχία
B.1. ($W_p / H_p = 0,5$)	91 %
B.2. ($W_p / H_p = 1$)	38 %
B.3. ($W_p / H_p = 1,5$)	16 %
B.4. ($W_p / H_p = 2$)	5,7 %
B.5. ($W_p / H_p = 3$)	2,5 %

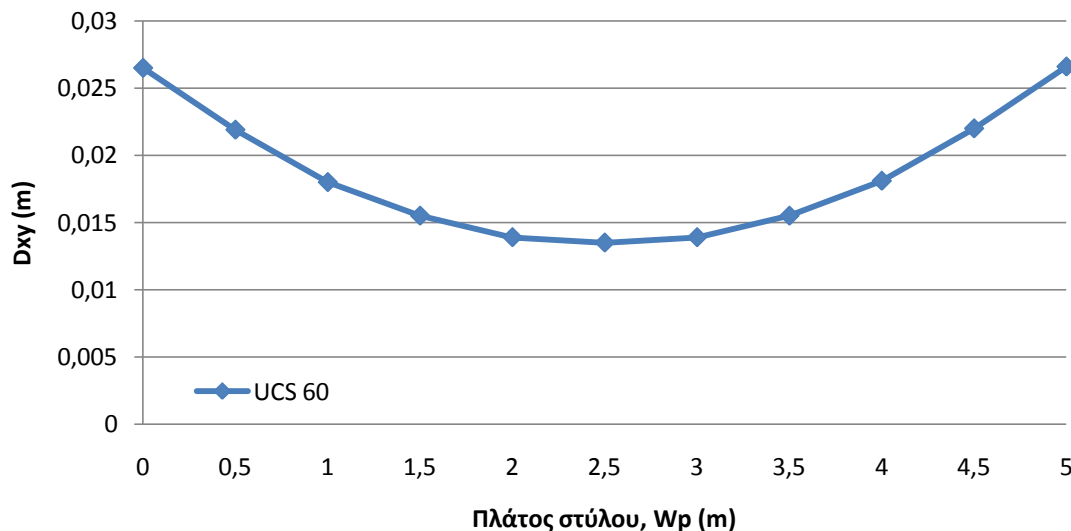
4.3. Αποτελέσματα Γ' Ομάδας Αναλύσεων

4.3.1. Ανάλυση Γ.1

Η Γ' ομάδα αναλύσεων πραγματοποιείται με σκοπό να εξεταστεί η συμπεριφορά των στύλων σε συνάρτηση με την διαφοροποίηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου πετρώματος (UCS). Στην ανάλυση Γ.1 περιλαμβάνεται η ανάλυση με μονοαξονική αντοχή θλίψης του πετρώματος ίση με 60 MPa. Η συγκεκριμένη ανάλυση έχει ήδη πραγματοποιηθεί (Ανάλυση Β.1) στη προηγούμενη παράγραφο, οπότε παρατίθενται τα αποτελέσματα της μέσω της ανάλυσης Β.1.

Συνεπώς, υπενθυμίζεται ότι οι αξονικές μετατοπίσεις είναι αρκετά μεγάλες τόσο στις παρειές του στύλου, όπου λαμβάνουν τιμές 2,65 cm, όσο και στο κέντρο του που λαμβάνουν τιμές 1,35 cm. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι συνθήκες ευστάθειας που επικρατούν στον στύλο είναι ανησυχητικές αφού οι μετατοπίσεις είναι υπερβολικές.

Σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.7), παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις (D_{xy}) κατά πλάτος του στύλου.



Σχήμα 4.7. Οριζόντιες μετατοπίσεις (D_{xy}) κατά πλάτος του στύλου ($W/H=0,5$), για $UCS = 60MPa$.

Για την εύρεση του Συντελεστή Ασφαλείας (FS), αρχικά, μέσω του κριτηρίου αστοχίας Hoek – Brown, υπολογίστηκε η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του πετρώματος. Στη συνέχεια οι τιμές των σ_3 και σ_p λήφθηκαν από τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Τέλος, υπολογίστηκε ο Συντελεστής Ασφαλείας μέσω του λόγου αντοχής / τάσης.

Για το κέντρο του στύλου,

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{8,86 \text{ MPa}}{7,91 \text{ MPa}} = \mathbf{1,12}$$

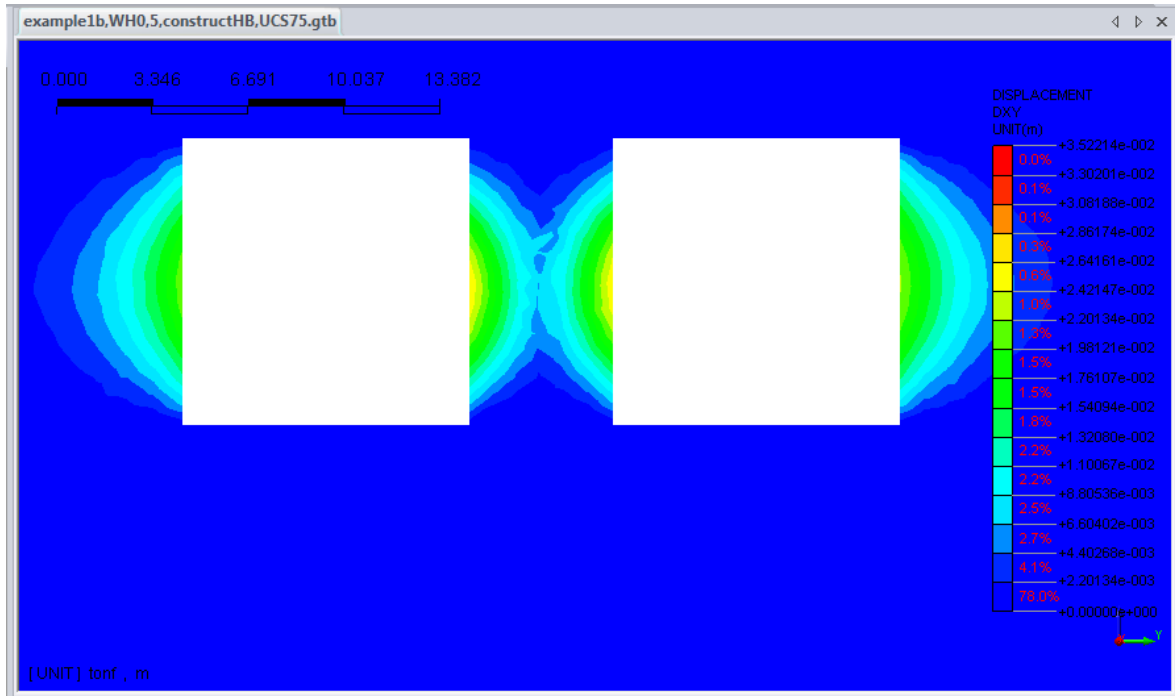
Για τις παρειές του στύλου,

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{4,53 \text{ MPa}}{5,26 \text{ MPa}} = \mathbf{0,86}$$

Από τους υπολογισμούς που μόλις πραγματοποιήθηκαν, συμπεραίνεται ότι οι συνθήκες ευστάθειας για μονοαξονική αντοχή σε θλίψη ίση με 60 MPa δεν πληρούν τις προϋποθέσεις αφού ο Συντελεστής Ασφαλείας στις παρειές είναι πολύ μικρός και ισούται με 0,86. Παρατηρείται, επίσης, ότι στο κέντρο του στύλου εμφανίζονται καλύτερες συνθήκες ευστάθειας με τιμή του FS ίση με 1,12. Η διαφορά στον Συντελεστή Ασφαλείας μεταξύ του κέντρου του στύλου και των παρειών του δικαιολογείται απόλυτα, διότι ο πλευρικός περιορισμός που υφίσταται στο κέντρο του στύλου είναι κατά πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με τις παρειές του.

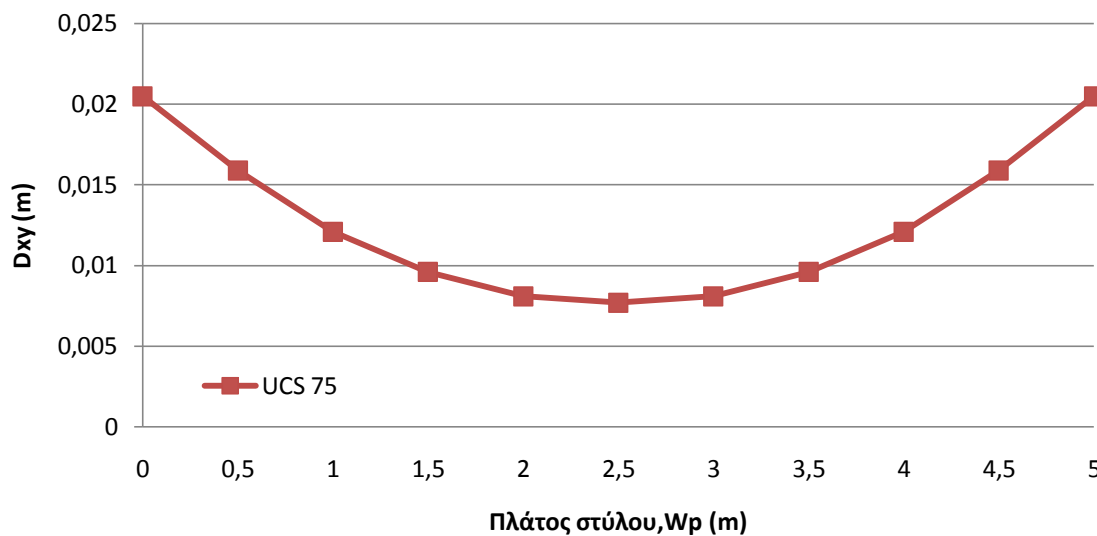
4.3.2. Ανάλυση Γ.2

Στην ανάλυση Γ.2 περιλαμβάνεται η ανάλυση με μονοαξονική αντοχή θλίψης (UCS) του πετρώματος ίση με 75 MPa. Παρατηρείται, μέσω της παρακάτω εικόνας (Εικόνα 4.18), ότι παρουσιάζεται γενική βελτίωση τόσο στις παρειές του στύλου όσο και στο κέντρο του συγκριτικά με την ανάλυση Γ.1. Δηλαδή, επιτυγχάνεται εμφανής μείωση των πλευρικών μετατοπίσεων με την αύξηση της μονοαξονικής αντοχής του στύλου κατά 15 MPa. Οι χαμηλότερες τιμές των αξονικών μετατοπίσεων (D_{xy}) παρατηρούνται στο μέσο του στύλου, όπου λαμβάνει την τιμή 7,7 mm, ενώ οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται, όπως αναμενόταν, στις παρειές του στύλου, όπου λαμβάνουν τιμές 20,5 mm.



Εικόνα 4.18. Αξονικές μετατοπίσεις (D_{xy}) του στύλου, λόγου $W_p/H_p = 0,5$, με $UCS = 75 \text{ MPa}$.

Σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.8), παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις (D_{xy}) κατά πλάτος του στύλου. Παρατηρείται ομοιόμορφη βελτίωση (6 mm) τόσο στις παρειές όσο και στο κέντρο του στύλου σε σύγκριση με την ανάλυση Γ.1.



Σχήμα 4.8. Οριζόντιες μετατοπίσεις (D_{xy}) κατά πλάτος του στύλου ($W/H=0,5$), για $UCS = 75 \text{ MPa}$.

Ο Συντελεστής Ασφαλείας (FS) στις παρειές και στο κέντρο του στύλου, για UCS = 75, υπολογίζεται ως εξής:

Για το κέντρο του στύλου,

$$\begin{aligned}\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} &= 0,3 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,3 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,3 + \sqrt{30 + 14,04} = 0,3 + 6,63 = 6,93 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{6,93 \text{ MPa}}{3,8 \text{ MPa}} = \mathbf{1,82}$$

Για τις παρειές του στύλου,

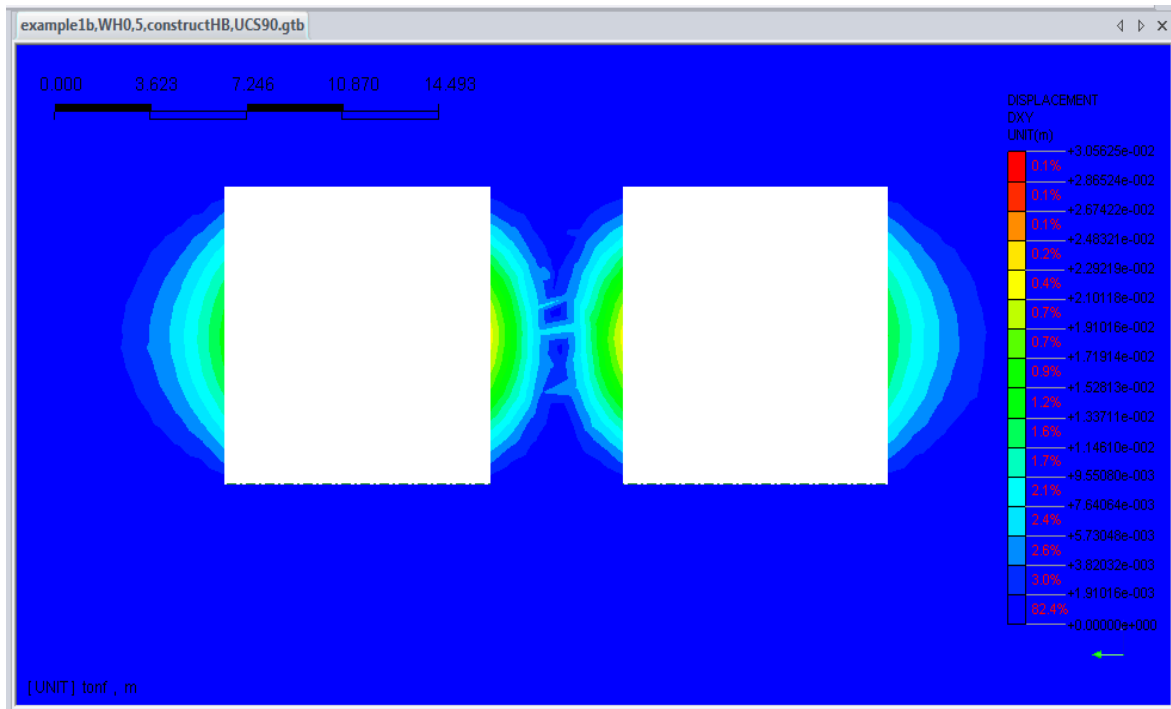
$$\begin{aligned}\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} &= 0,08 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,08 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,08 + \sqrt{8 + 14,04} = 0,08 + 4,69 = 4,77 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{4,77 \text{ MPa}}{2,82 \text{ MPa}} = \mathbf{1,69}$$

Παρατηρείται ότι οι καλύτερες συνθήκες, δηλαδή μεγαλύτερη τιμή του FS, βρίσκονται στο κέντρο του στύλου όπου ο FS λαμβάνει την τιμή 1,82. Ενώ η χαμηλότερη τιμή παρατηρείται στις παρειές του στύλου, όπου λαμβάνει την τιμή 1,69. Ωστόσο, παρατηρείται ότι σε σύγκριση με την ανάλυση Γ.1 οι τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας είναι εμφανώς βελτιωμένες και στις παρειές και στο κέντρο του στύλου. Ειδικότερα, όμως, στις παρειές του στύλου, στην ανάλυση Γ.1 ήταν μόλις 0,86 ενώ για UCS = 75 λαμβάνει τιμή ίση με 1,69 και με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ευστάθεια στα συγκεκριμένα σημεία σχετικά με τον Συντελεστή Ασφαλείας. Αντίστοιχα, για το κέντρο του στύλου παρατηρείται σημαντική βελτίωση με την αύξηση της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη κατά 15 MPa, αφού ο Συντελεστής Ασφαλείας από 1,12 βελτιώθηκε σε 1,82.

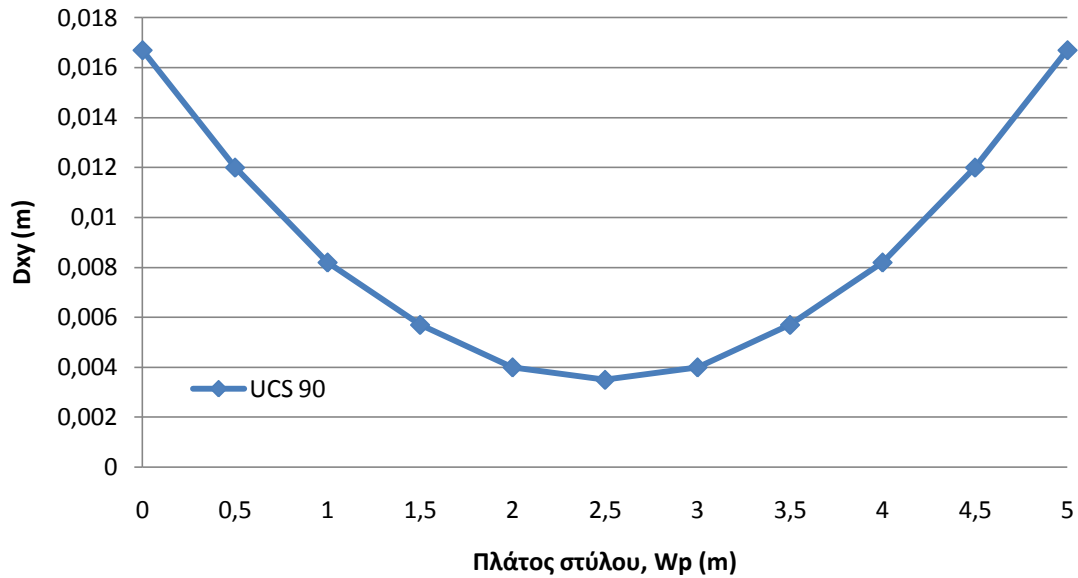
4.3.3. Ανάλυση Γ.3

Στην ανάλυση Γ.3 περιλαμβάνεται η ανάλυση με μονοαξονική αντοχή θλίψης (UCS) του πετρώματος ίση με 90 MPa. Από τη Εικόνα 4.19, παρατηρείται η γενική βελτίωση στις συνθήκες του στύλου σε σύγκριση με τις δυο προηγούμενες αναλύσεις (Γ.1, Γ.2) που πραγματοποιήθηκαν. Με την αύξηση της μονοαξονικής αντοχής της θλίψης του πετρώματος κατά 15 MPa, παρουσιάζεται μείωση των αξονικών μετατοπίσεων (D_{xy}) τόσο στις παρειές του στύλου όσο και στο κέντρο του. Οι μέγιστες μετατοπίσεις παρατηρούνται στις παρειές του στύλου λαμβάνοντας τιμές 16,7 mm, ενώ οι ελάχιστες παρατηρούνται στο κέντρο του λαμβάνοντας τιμή 3,5 mm.



Εικόνα 4.19. Αξονικές μετατοπίσεις (D_{xy}) του στύλου, λόγω $W_p/H_p = 0,5$, με $UCS = 90$ MPa.

Σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.9), παρουσιάζονται οι οριζόντιες μετατοπίσεις (D_{xy}) κατά πλάτος του στύλου. Παρατηρείται ότι η βελτίωση σε σύγκριση με την ανάλυση Γ.2 αντιστοιχεί σε περίπου 4 mm τόσο στο κέντρο όσο και στις παρειές του στύλου. Επομένως, συμπεραίνεται ότι, από $UCS = 75$ σε 90 MPa, η βελτίωση των συνθηκών είναι μικρότερη από ότι παρατηρήθηκε από $UCS = 60$ σε 75 MPa.



Σχήμα 4.9. Οριζόντιες μετατοπίσεις (D_{xy}) κατά πλάτος του στύλου ($W/H=0,5$), για $UCS = 90MPa$.

Με σκοπό τον υπολογισμό του Συντελεστή Ασφάλειας (FS) του στύλου για $UCS = 90$ MPa χρησιμοποιείται το εμπειρικό κριτήριο αστοχίας Hoek – Brown, όπως φαίνεται παρακάτω. Υπενθυμίζεται ότι οι τιμές των σ_3 και σ_p λαμβάνονται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Για το κέντρο του στύλου,

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,37 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,37 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,37 + \sqrt{37 + 14,04} = 0,37 + 7,16 = 7,53 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{7,53 \text{ MPa}}{4,1 \text{ MPa}} = \mathbf{1,84}$$

Για τις παρειές του στύλου,

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_3 + \sqrt{[(m\sigma_c\sigma_3) + (s\sigma_c^2)]} = 0,096 + \sqrt{1,667 \cdot 60 \cdot 0,096 + 0,0039 \cdot 60^2} = \\ &= 0,096 + \sqrt{9,6 + 14,04} = 0,096 + 4,86 = 4,956 \text{ MPa} \end{aligned}$$

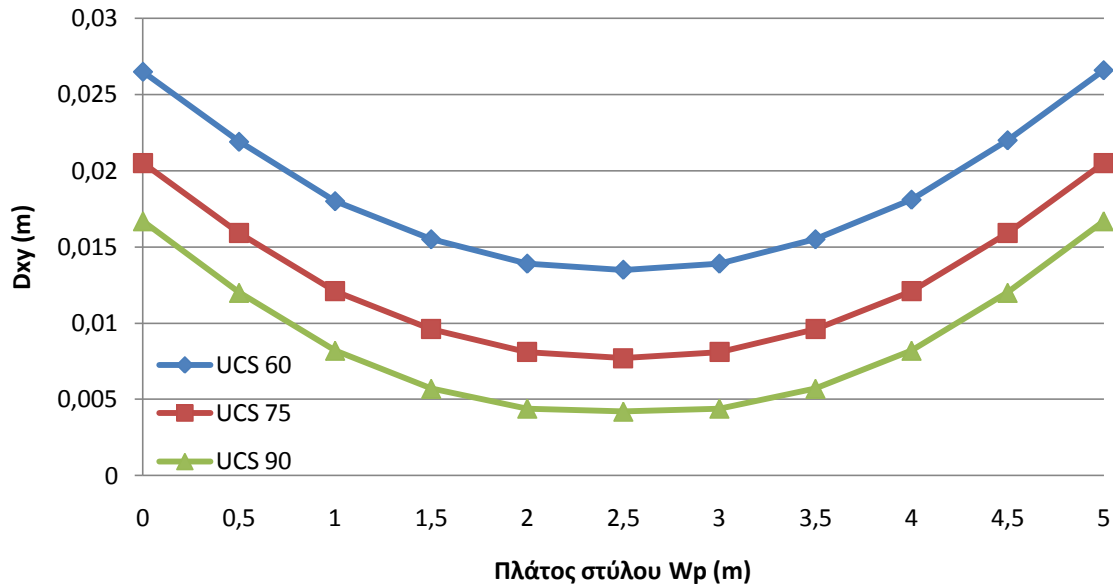
$$FS = \frac{\sigma_1}{\sigma_p} = \frac{4,956 \text{ MPa}}{2,85 \text{ MPa}} = \mathbf{1,74}$$

Από τους υπολογισμούς που μόλις πραγματοποιήθηκαν, παρατηρούνται οι καλές συνθήκες ευστάθειας που επικρατούν στον στύλο, με Συντελεστή Ασφαλείας στο κέντρο του 1,84 και στις παρειές του 1,74. Παρατηρείται, ακόμη, ότι με την αύξηση της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη κατά 15 MPa (από UCS = 75 σε 90 MPa), εμφανίζεται σαφής βελτίωση του Συντελεστή Ασφάλειας. Ωστόσο, η συγκεκριμένη βελτίωση του FS είναι μικρότερη από εκείνη που παρουσιάστηκε από UCS = 60 σε 75 MPa.

4.3.4. Σχολιασμός – Σύγκριση Γ' Ομάδας Αναλύσεων

Από τα αποτελέσματα της Γ' ομάδας αναλύσεων, προκύπτει το συμπέρασμα ότι με την αύξηση της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη (UCS) εμφανίζεται βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας, δηλαδή τόσο η μείωση των πλευρικών μετατοπίσεων (Dxy) όσο και η αύξηση του Συντελεστή Ασφαλείας (FS).

Επομένως, όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.10, αξίζει να αναφερθεί ότι οι μέγιστες τιμές των οριζόντιων μετατοπίσεων (Dxy) παρουσιάζονται για UCS = 60 MPa (Ανάλυση Γ.1), όπου στις παρειές του στύλου ισούνται με 26,5 mm και στο κέντρο του με 13,5 mm. Ενώ οι ελάχιστες οριζόντιες μετατοπίσεις παρουσιάζονται για UCS = 90 MPa (Ανάλυση Γ.3), όπου στις παρειές λαμβάνουν τιμές 16,7 mm και στο κέντρο του στύλου είναι 3,5 mm. Για την περίπτωση όπου UCS = 75 MPa (Ανάλυση Γ.2), οι τιμές του Dxy στις παρειές και στο κέντρο του στύλου βρίσκονται ανάμεσα στις δυο προηγούμενες περιπτώσεις, δηλαδή λαμβάνουν τιμές 20,5 mm και 7,7 mm αντίστοιχα.



Σχήμα 4.10. Οριζόντιες μετατοπίσεις (D_{xy}) κατά πλάτος του στύλου ($W/H=0,5$), σχετικά με τη διαφοροποίηση του UCS (60,75,90).

Μια ακόμα παρατήρηση που προκύπτει, σχετίζεται με το γεγονός ότι παρ' όλο που οι δυο μεταβολές της αντοχής της μονοαξονικής θλίψης (UCS) που σημειώθηκαν ήταν ίδιες, δηλαδή 15 MPa, οι μεταβολές των οριζόντιων μετατοπίσεων (D_{xy}) παρουσιάζουν διαφορετική τιμή.

Συνεπώς, στην ανάλυση Γ.2 (UCS = 75 MPa) σε σύγκριση με την ανάλυση Γ.1, η βελτίωση σε όλο το πλάτος του στύλου είναι σταθερή και ίση με 6 mm, δηλαδή στις παρειές του εμφανίζεται μείωση των αξονικών μετατοπίσεων κατά 22,6 % και στο κέντρο του κατά 43,6 %. Αντιθέτως, στην ανάλυση Γ.3 (UCS = 90 MPa) σε σύγκριση με την ανάλυση Γ.2, η ελάττωση των αξονικών μετατοπίσεων κατά πλάτος του στύλου είναι σταθερή και ισούται με 3,8 mm, δηλαδή στις παρειές του στύλου εμφανίζεται βελτίωση ίση με 18,5 % και στο κέντρο του είναι 41,9 %.

Όσον αφορά τη μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας (Factor of Safety) του στύλου, παρουσιάζεται η αύξηση του με παράλληλη αύξηση της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη (UCS). Όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.5), οι μέγιστες τιμές του FS εμφανίζονται για UCS = 90 MPa (1,84 στο κέντρο και 1,74 στις παρειές), ενώ οι ελάχιστες εμφανίζονται για UCS = 60 MPa (1,12 στο κέντρο και 0,86 στις παρειές). Σχετικά με την περίπτωση όπου η UCS ισούται με 75 MPa, οι τιμές του Συντελεστή Ασφαλείας κυμαίνονται μεταξύ των αναλύσεων Γ.1 και Γ.3 (1,82 στο κέντρο και 1,69 στις

παιρίες. Ο Πίνακας 4.6 παρουσιάζει συνοπτικά τα αποτελέσματα της Γ' ομάδας αναλύσεων αναφορικά με τον Συντελεστή Ασφαλείας.

Πίνακας 4.6. Συντελεστής Ασφαλείας (FS) στο κέντρο και στις παιρίες των στύλων σε σύγκριση με την μεταβολή του UCS (60,75,90).

	Κέντρο	Παιρίες
Ανάλυση Γ.1 UCS = 60 MPa	1,12	0,86
Ανάλυση Γ.2 UCS = 75 MPa	1,82	1,69
Ανάλυση Γ.3 UCS = 90 MPa	1,84	1,74

Τέλος, όπως και για τις πλευρικές μετατοπίσεις, συμπεραίνεται ότι ο Συντελεστής Ασφαλείας παρουσιάζει μεγαλύτερη αύξηση όταν μεταβάλλεται η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη από 60 σε 75 MPa. Επομένως, στη συγκεκριμένη περίπτωση, στις παιρίες βελτιώνεται κατά 96 % και στο κέντρο κατά 62,5 %. Αντιθέτως, στην περίπτωση από UCS= 75 σε 90 MPa, η βελτίωση που παρατηρείται στις παιρίες είναι κατά 2,95 % και στο κέντρο είναι κατά 1,1 %. Το γεγονός αυτό παρατηρείται, διότι στην ανάλυση Γ.2 ο στύλος παρουσιάζει ήδη πολύ καλά αποτελέσματα ευστάθειας σε σχέση με την ανάλυση Γ.1 όπου ο στύλος αστοχεί, οπότε δεν μπορεί να παρουσιάσει αλματώδης βελτίωση στην ανάλυση Γ.3.

4.4. Αποτελέσματα Δ' Ομάδας Αναλύσεων

Στην Δ' ομάδα αναλύσεων περιλαμβάνονται συγκρίσεις αποτελεσμάτων που προκύπτουν είτε, όπως στην ανάλυση Δ.1, από τη διαφορά λογισμικών πακέτων ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (Phase² και Midas GTS), είτε από τη διαφορά μεθόδου επίλυσης της ανάλυσης (δισδιάστατη και τρισδιάστατη ανάλυση), όπως στην ανάλυση Δ.2.

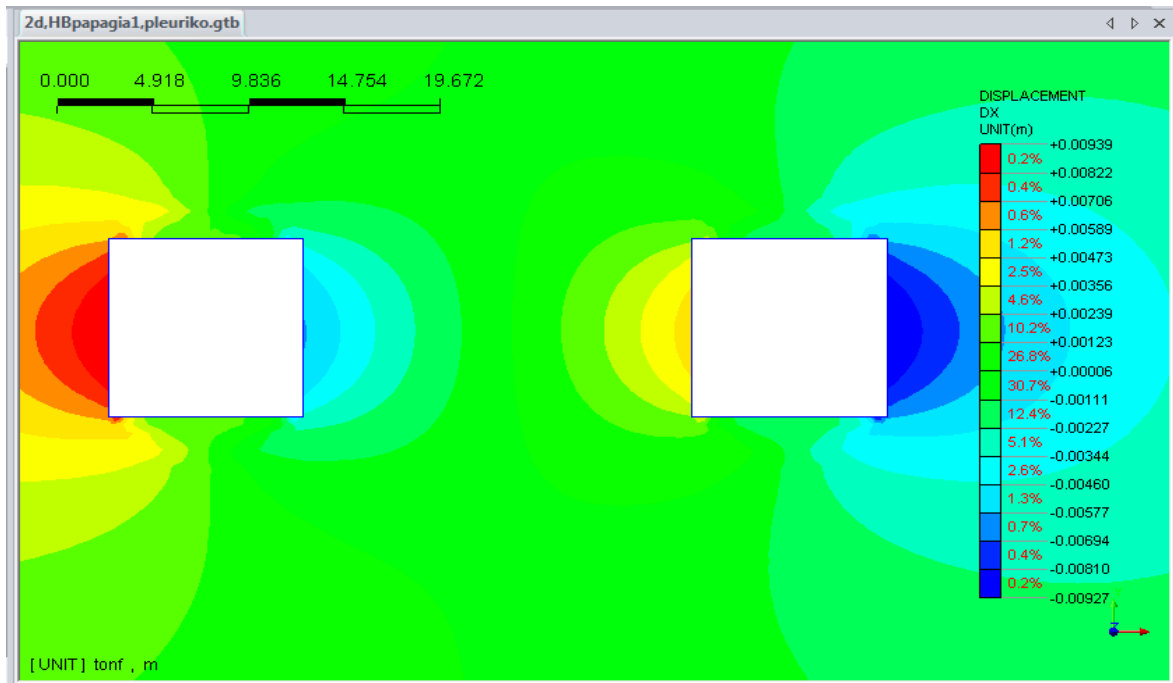
4.4.1. Ανάλυση Δ.1

Η ανάλυση Δ.1 περιλαμβάνει την σύγκριση μεταξύ δύο προγραμμάτων ανάλυσης με τη χρήση δισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων, του Phase² και Midas GTS. Το Midas GTS είναι τρισδιάστατο πρόγραμμα, αλλά παρέχει και την δυνατότητα δισδιάστατης ανάλυσης. Επίσης, τα αποτελέσματα του Phase², λαμβάνονται από παλαιότερη διπλωματική εργασία (Παπαγιαννόπουλος, 2010). Τέλος, στην ανάλυση που ακολουθεί, και με τα δύο προγράμματα, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση τρισδιάστατης εκσκαφής σε δισδιάστατη ανάλυση για την εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων. Η προσομοίωση αυτή επιτυγχάνεται με την αύξηση του ειδικού βάρους των υπερκειμένων (Pariseau et al., 1979), μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$\gamma_{2D} = \gamma_{αρχικό} * \left(1 + \frac{W_R}{W_P} \right)$$

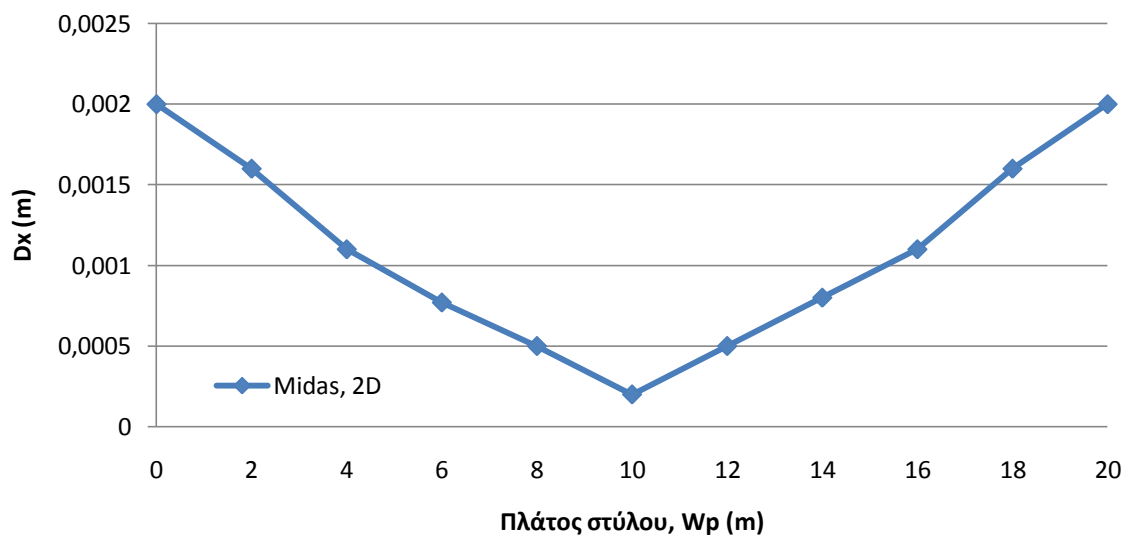
Στη συγκεκριμένη ανάλυση το πλάτος του στύλου (W_P) ισούται με 20 m και το πλάτος του θαλάμου (W_R) ισούται με 10 m. Επομένως, το ειδικό βάρος για τις δισδιάστατες αναλύσεις (γ_{2D}) μετατρέπεται σε 0,053 MN/m³ από 0,0265 MN/m³ που ήταν αρχικά ($\gamma_{αρχ}$).

Στην Εικόνα 4.20 που ακολουθεί, παρατηρούνται οι οριζόντιες μετατοπίσεις (D_x) για λόγο πλάτους / ύψους (W_P / H_p) ίσο με 2. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα έχουν προκύψει από δισδιάστατη ανάλυση από το πρόγραμμα Midas GTS.



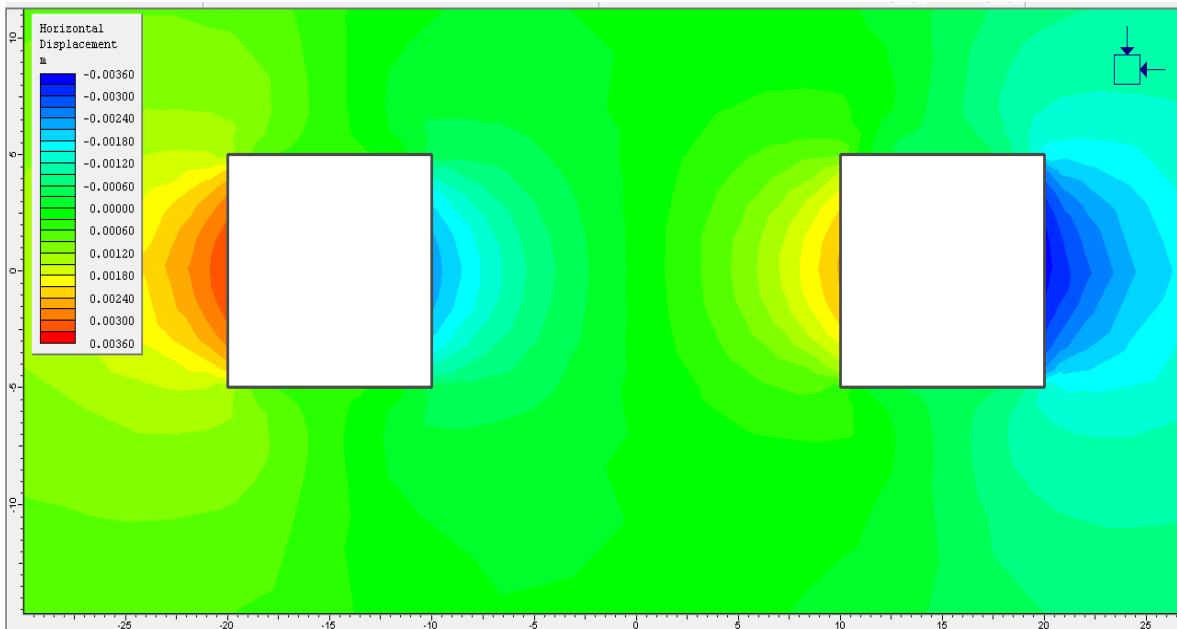
Εικόνα 4.20. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Dx), δισδιάστατης ανάλυσης από το πρόγραμμα Midas GTS.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.11), παρουσιάζονται οι τιμές των αξονικών μετατοπίσεων (Dx) κατά πλάτος του στύλου ($W_p / H_p = 2$). Παρατηρούνται αρκετά καλές συνθήκες ευστάθειας καθώς οι τιμές των μετατοπίσεων είναι πολύ μικρές. Οι μικρότερη μετατόπιση συμβαίνει στο κέντρο του στύλου και ισούται με 0,2 mm, ενώ οι μεγαλύτερες συμβαίνουν στις παρειές του στύλου και ισούνται με 2 mm.

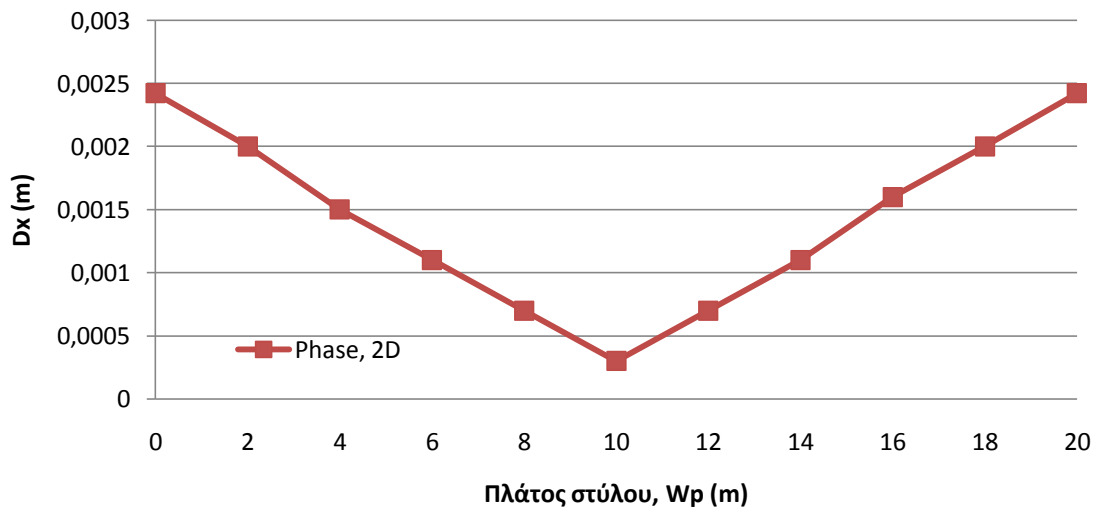


Σχήμα 4.11. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Dx) κατά πλάτος του στύλου ($W/H=2$), από δισδιάστατη ανάλυση του προγράμματος Midas GTS.

Με σκοπό να επιτευχθεί η σύγκριση μεταξύ των δυο λογισμικών προγραμμάτων, στη παρακάτω εικόνα (Εικόνα 4.21) και στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των οριζόντιων μετατοπίσεων (D_x) τα οποία έχουν προκύψει από το διδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Phase². Παρατηρούνται αρκετά μικρές τιμές οριζοντίων μετατοπίσεων κατά πλάτος του στύλου. Δηλαδή, οι μεγαλύτερες τιμές των οριζόντιων μετατοπίσεων εμφανίζονται στις παρειές του στύλου και ισούνται με 2,4 mm, ενώ η μικρότερη τιμή παρουσιάζεται, όπως αναμενόταν, στο κέντρο του στύλου και ισούται με 0,3 mm.

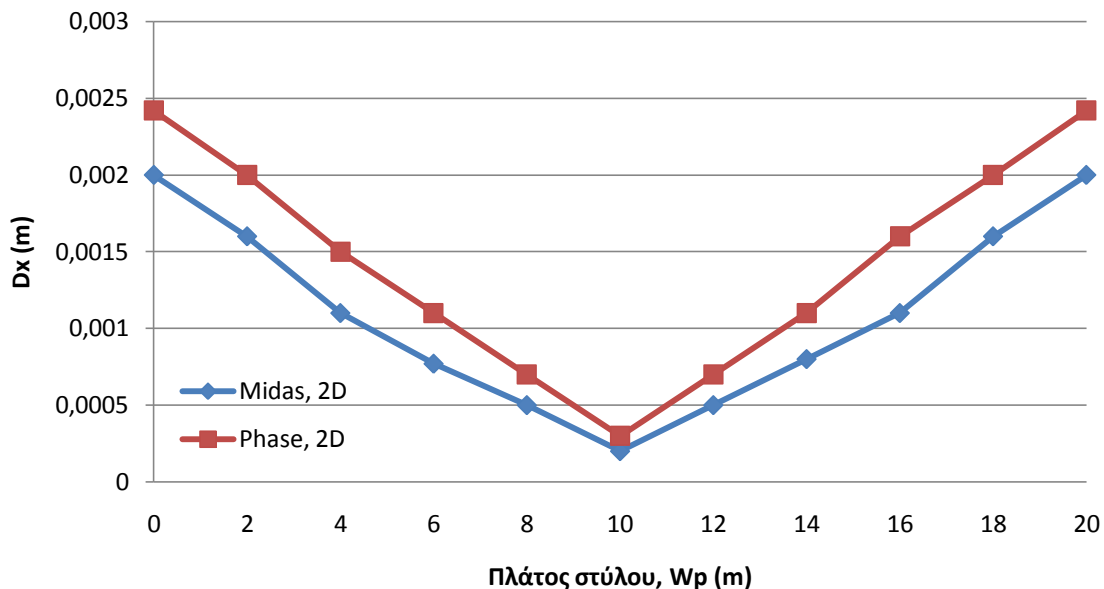


Εικόνα 4.21. Οριζόντιες μετατοπίσεις (D_x), διδιάστατης ανάλυσης από το πρόγραμμα Phase².



Σχήμα 4.12. Οριζόντιες μετατοπίσεις (D_x) κατά πλάτος του στύλου ($W/H=2$), από διδιάστατη ανάλυση του προγράμματος Phase².

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που μόλις αναφέρθηκαν, προκύπτει ότι τα αποτελέσματα των πλευρικών μετατοπίσεων μεταξύ των δύο προγραμμάτων ανάλυσης παρουσιάζουν ελάχιστη έως μηδενική διαφορά. Στο σχήμα (Σχήμα 4.13) που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα κατά πλάτος του στύλου μεταξύ των δισδιάστατων αναλύσεων τόσο στο πρόγραμμα Midas GTS όσο και στο Phase². Συμπεραίνεται ότι η διαφορά των αποτελεσμάτων δεν είναι ενιαία κατά πλάτος του στύλου. Συνεπώς, στις παρειές του στύλου παρατηρείται η μεγαλύτερη τιμή της διαφοράς, η οποία αγγίζει μόλις τα 0,4 mm, ενώ πλησιάζοντας στο κέντρο του στύλου η διαφορά διαρκώς μειώνεται μέχρις ότου να λάβει την ελάχιστη τιμή της, δηλαδή να γίνει σχεδόν μηδενική (0,1 mm) ακριβώς στο κέντρο του στύλου.



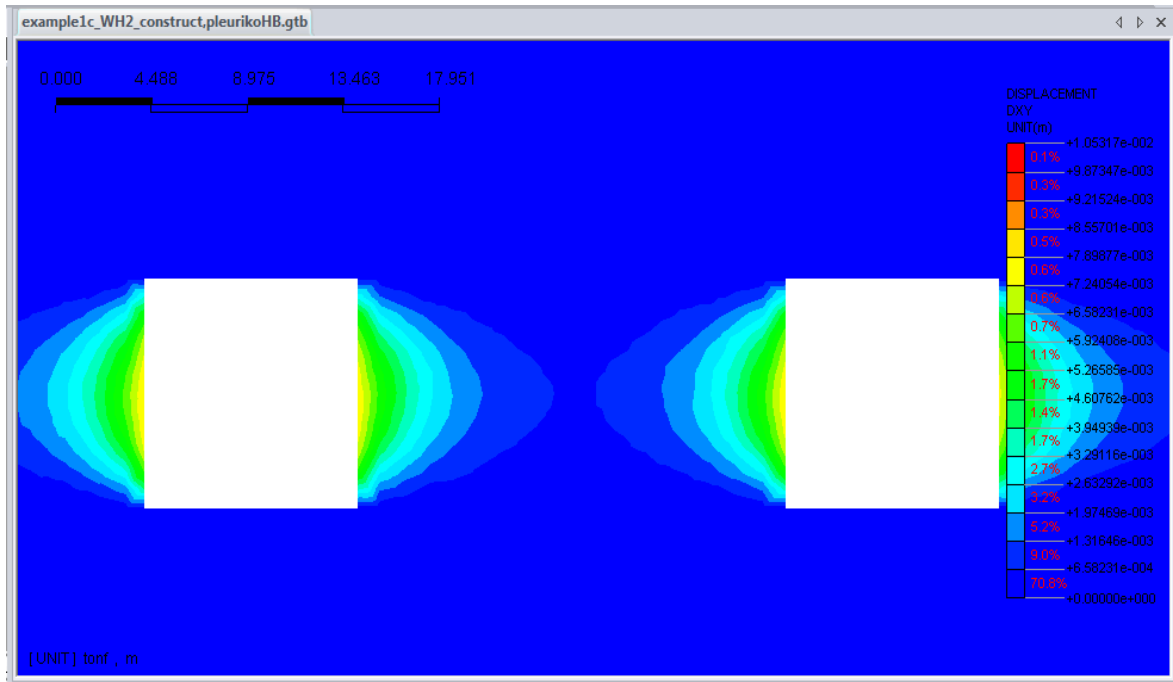
Σχήμα 4.13. Συγκριτικά αποτελέσματα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά πλάτος του στύλου ($W/H=2$), από τις δισδιάστατες αναλύσεις των προγραμμάτων Midas GTS και Phase².

4.4.2 Ανάλυση Δ.2

Θεωρώντας ότι τα αποτελέσματα των δυο δισδιάστατων αναλύσεων που προηγήθηκαν είναι κοινά, η ανάλυση Δ.2 περιλαμβάνει την σύγκριση μεταξύ δισδιάστατης και τρισδιάστατης μεθόδου ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

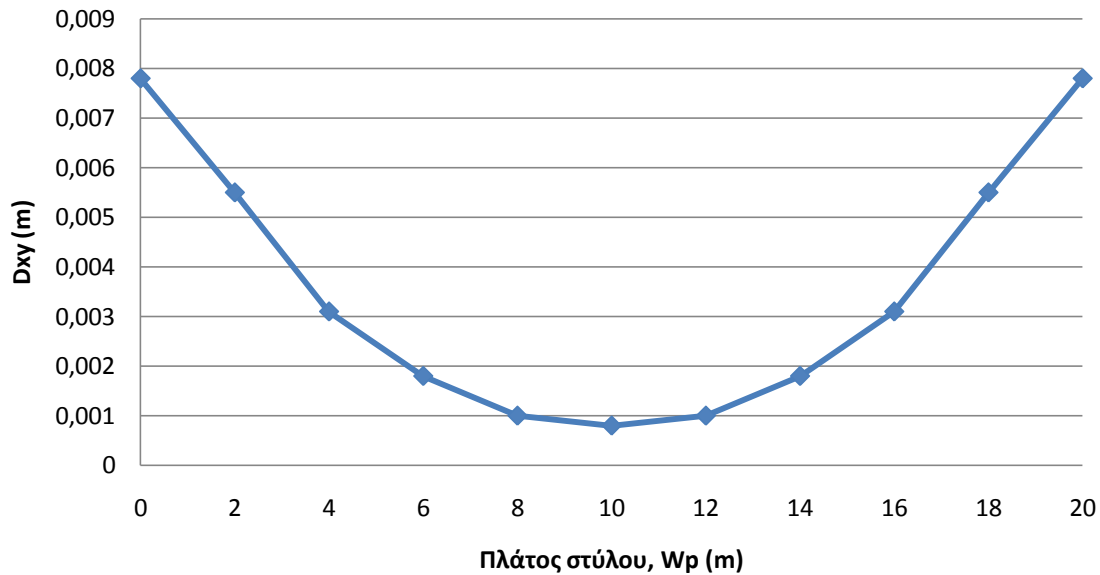
Συνεπώς, με τα ίδια χαρακτηριστικά, παραμέτρους και για λόγο $W_p / H_p = 2$ επιλύεται η ανάλυση με τη βοήθεια του τρισδιάστατου προγράμματος ανάλυσης Midas GTS, έτσι ώστε να επιτευχθεί η άμεση σύγκριση μεταξύ των δυο μεθόδων.

Στην Εικόνα 4.22 που ακολουθεί, παρατηρούνται οι οριζόντιες μετατοπίσεις (Dxy) στον στύλο που έχουν προκύψει μετά από την τρισδιάστατη ανάλυση από το λογισμικό πακέτο Midas GTS.



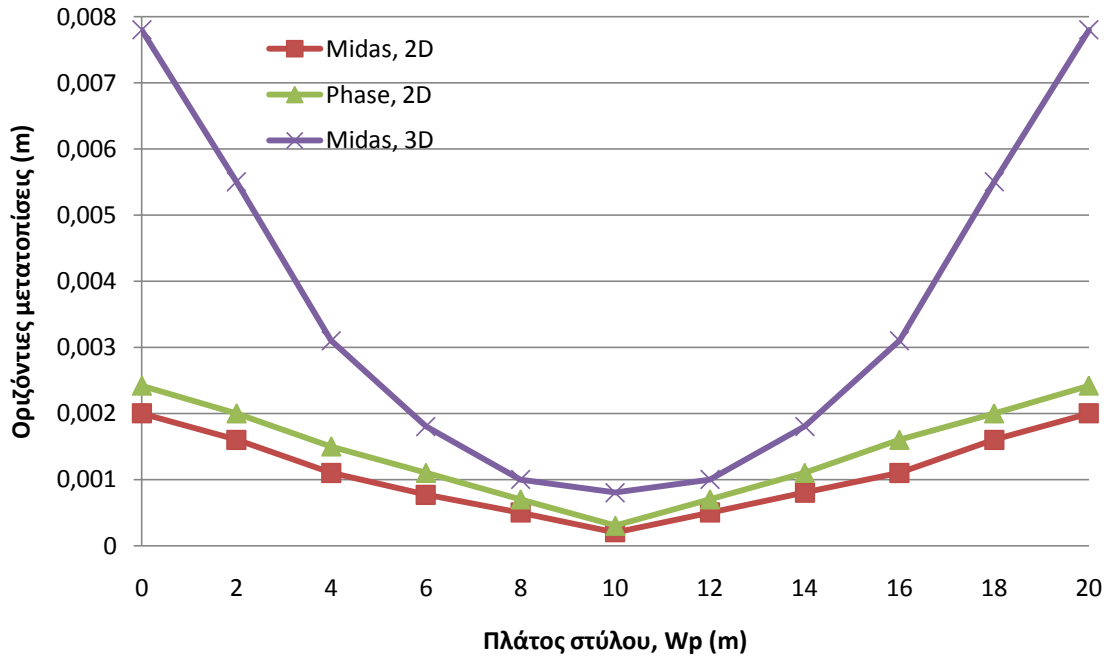
Εικόνα 4.22. Οριζόντιες μετατοπίσεις (Dxy), τρισδιάστατης ανάλυσης από το πρόγραμμα Midas GTS.

Από την Εικόνα 4.22 που προηγήθηκε αλλά και από το Σχήμα 4.14 που ακολουθεί, παρατηρούνται οι πλευρικές μετατοπίσεις (Dxy) που συμβαίνουν κατά πλάτος του στύλου, τόσο στις παρειές του όσο και στο κέντρο του στύλου, μετά την επίλυση του μοντέλου από το πρόγραμμα Midas GTS. Συνεπώς, παρατηρούνται οι μεγαλύτερες πλευρικές μετατοπίσεις στις παρειές των στύλων όπου ισούνται με 7,8 mm, ενώ οι μικρότερες παρατηρούνται στο κέντρο του στύλου και ισούνται με 0,8 mm.



Σχήμα 4.14. Οριζόντιες μετατοπίσεις κατά πλάτος του στύλου ($W/H=2$), από τρισδιάστατη ανάλυση του προγράμματος *Midas GTS*.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που μόλις αναφέρθηκαν και λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της ανάλυση Δ.1, προκύπτει η σύγκριση μεταξύ των δυο μεθόδων αναλύσεων. Γίνεται άμεσα αντιληπτό πως τα αποτελέσματα των πλευρικών μετατοπίσεων μεταξύ δισδιάστατων αναλύσεων και τρισδιάστατης ανάλυσης παρουσιάζουν μια σχετική διαφορά. Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των πλευρικών μετατοπίσεων μεταξύ όλων των αναλύσεων (Phase 2D και *Midas GTS* 2D,3D). Θεωρώντας, λοιπόν, τα αποτελέσματα των δισδιάστατων αναλύσεων κοινά παρατηρείται ότι στις παρειές του στύλου τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης ανάλυσης διαφέρουν κατά + 5,4 mm με τα αντίστοιχα των δισδιάστατων. Ενώ, αντίστοιχα, παρατηρείται ότι στο κέντρο του στύλου τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης ανάλυσης διαφέρουν κατά + 0,5 mm με τα αντίστοιχα των δισδιάστατων. Παρ' όλα αυτά, τα αποτελέσματα θεωρούνται της ίδιας τάξης μεγέθους διότι η μέση διαφορά κατά μήκος του στύλου είναι μόλις 2,5 mm.



Σχήμα 4.15. Συγκριτικά αποτελέσματα οριζόντιων μετατοπίσεων κατά πλάτος του στύλου, από τις 2D αναλύσεις των Midas GTS και Phase² και την 3D ανάλυση του Midas GTS.

Η μικρή διαφορά που παρουσιάστηκε μεταξύ των δυο μεθόδων ανάλυσης εκτιμάται ότι δικαιολογείται απολύτως, αφού φαίνεται ότι οι δισδιάστατες αναλύσεις δεν λαμβάνουν υπόψη την τρισδιάστατη κατάσταση που επικρατεί σε μια μέθοδο θαλάμων και στύλων. Παρά την προσομοίωση τρισδιάστατης κατασκευής με την αύξηση του ειδικού βάρους που πραγματοποιήθηκε στις δισδιάστατες αναλύσεις, φαίνεται ότι υποεκτιμούν την επίδραση των κάθετων θαλάμων ως προς τη διατομή που αναλύεται και εξετάζεται μόνο το μέτωπο της εκσκαφής. Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι ευνοϊκότερα από τα αντίστοιχα της τρισδιάστατης ανάλυσης, ωστόσο στην τρισδιάστατη ανάλυση λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της τρισδιάστατης γεωμετρίας του μοντέλου με αποτέλεσμα να αντικατοπτρίζει τις συνθήκες που επικρατούν σε πραγματικές κατασκευές μεθόδου θαλάμων και στύλων. Τέλος, παρατηρείται ότι η τρισδιάστατη γεωμετρία επιτυγχάνοντας ακριβέστερα με την 3-D ανάλυση εμφανίζει την περιοχή των παρειών πιο ευάλωτη σε σχέση με την δισδιάστατη ανάλυση.

5^ο Κεφάλαιο.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η δημιουργία υπόγειων χώρων με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων (room and pillar method) τυγχάνει ευρείας εφαρμογής σε παγκόσμιο επίπεδο διότι, α) παρέχει τη δυνατότητα για λειτουργική αξιοποίηση του χώρου, β) η εμπειρία στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι αρκετά μεγάλη και γ) είναι απλή διότι δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις σε εξοπλισμό και τεχνικές. Αντικείμενο μελέτης από πολλούς ερευνητές αποτελεί η εύρεση των βέλτιστων διαστάσεων επιτυγχάνοντας τη μεγίστη ασφάλεια και τη μέγιστη δυνατή λειτουργικότητα του χώρου.

Οι βέλτιστες διαστάσεις των στύλων υπολογίζονται με βάση δύο βασικά στοιχεία, i) τις ασκούμενες, από τα υπερκείμενα στρώματα, τάσεις στους στύλους και ii) την αντοχή των στύλων η οποία εξαρτάται από τα μηχανικά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους. Για να εκτιμηθεί η τάση (σ_p) που δέχεται ο στύλος χρησιμοποιείται η θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας (tributary load area). Ενώ, για την εκτίμηση της αντοχής των στύλων (C_p) έχουν διατυπωθεί πολλές εμπειρικές σχέσεις που έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές (Lunder & Pakalnis, Obert & Duvall, Hedley & Grant, Bieniawski και άλλους), χωρίς όμως να υπερισχύει ξεκάθαρα μια εμπειρική σχέση έναντι των υπολοίπων αφού εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά.

Σύμφωνα με τον Potvin (1985), υπάρχουν διάφορες κατηγορίες μεθόδων για τον σχεδιασμό των στύλων, όπως είναι οι εμπειρικές, οι θεωρητικές και οι αριθμητικές μέθοδοι. Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τις αριθμητικές μεθόδους. Γενικότερα, στις αριθμητικές μεθόδους εμπεριέχονται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method), η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method), η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων (boundary element method), η μέθοδος των διακριτών στοιχείων (distinct element method). Πιο συγκεκριμένα η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την τρισδιάστατη μέθοδο ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

Οι αριθμητικές μέθοδοι προσφέρουν τη δυνατότητα είτε δισδιάστατης (2-D) είτε τρισδιάστατης (3-D) ανάλυσης. Αναγνωρίζεται ότι, καμία από τις δυο μεθόδους δεν υπερτερεί ξεκάθαρα έναντι της άλλης, διότι κάθε μέθοδος προσφέρει πλεονεκτήματα αλλά και διάφορους περιορισμούς. Επίσης, σύμφωνα με τους Ghee & Zhu (2009), τόσο η δισδιάστατη όσο και η τρισδιάστατη ανάλυση είναι εξίσου απαραίτητες. Μολαταύτα, μετά την σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων που πραγματοποιείται, συμπεραίνεται ότι, μέχρι σήμερα, τα λογισμικά πακέτα που χρησιμοποιούν τη δισδιάστατη αριθμητική μέθοδο ανάλυσης τυγχάνουν ευρύτερης εφαρμογής σε σύγκριση με την τρισδιάστατη μέθοδο.

Παρόλα αυτά όμως, με την ταχεία εξέλιξη της τεχνολογίας τα προγράμματα που χρησιμοποιούν τρισδιάστατη αριθμητική μέθοδο ανάλυσης ανταγωνίζονται πλήρως τα αντίστοιχα δισδιάστατα προγράμματα. Η εξέλιξη της τεχνολογίας αναφορικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υπολογιστών και το περίπλοκο περιβάλλον εργασίας, σε συνδυασμό με τα δύο βασικά πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα τρισδιάστατα προγράμματα έναντι των δισδιάστατων, τα οποία είναι α) οι σχεδιαστικές δυνατότητες και β) η εξαγωγή ακριβέστερων αποτελεσμάτων, καθιστά άμεσα κατανοητή την υπεροχή της 3-D ανάλυσης έναντι της 2-D και κατά συνέπεια των τρισδιάστατων λογισμικών πακέτων σε σύγκριση με τα δισδιάστατα.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, η επίλυση των προβλημάτων πραγματοποιείται με το λογισμικό πακέτο Midas GTS 2010, το οποίο είναι ένα τρισδιάστατο πρόγραμμα ανάλυσης υπόγειων εκσκαφών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Στόχο της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η εκμάθηση του Midas GTS 2010, το οποίο είναι ένα καινούργιο πρόγραμμα στο οποίο δεν υπάρχει αποκτηθείσα εμπειρία στον ελλαδικό χώρο. Η γενική σειρά των εργασιών που ακολουθείται στο πρόγραμμα, είναι η εξής :

1. Σχεδιασμός γεωμετρίας μοντέλου.
2. Παραγωγή πλέγματος (Mesh generation).
3. Ορισμός παραμέτρων ανάλυσης.
4. Ανάλυση – Επίλυση.
5. Εξαγωγή και αξιολόγηση αποτελεσμάτων.

Μέσω των ενεργειών που μόλις αναφέρθηκαν, σχεδιάστηκαν και εξετάστηκαν η συμπεριφορά και η ευστάθεια των στύλων, σε συνάρτηση με τις μεταβολές διαφόρων παραμέτρων όπως είναι τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας (UCS), το λόγο πλάτους / ύψους (W_p / H_p) του στύλου και το πλευρικό φορτίο που ασκείται στον στύλο λόγω της ενίσχυσης. Ακόμη, πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των αποτελεσμάτων δισδιάστατης και τρισδιάστατης ανάλυσης, για τον λόγο αυτό ελήφθησαν τα αποτελέσματα δισδιάστατης ανάλυσης από παλαιότερη διπλωματική εργασία (Παπαγιαννόπουλος, 2010) μέσω του 2-D προγράμματος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων Phase².

Το πλευρικό φορτίο που εφαρμόζεται στους στύλους είναι ίσο με $0,16 \text{ MN/m}^2$ και προκύπτει από την τοποθέτηση καλωδιώσεων στο στύλο με προεντεταμένα

συρματόσχοινα υψηλής αντοχής στα οποία δίνεται προένταση περίπου μέχρι το μισό της αντοχής τους και είναι τοποθετημένα σε κάρναβο 1,3 x 1,3 m.

Τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων επαληθεύουν την διαπίστωση ότι το πλευρικό φορτίο που ασκείται στους στύλους και η διαφοροποίηση των παραμέτρων W_p / H_p , UCS, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την συμπεριφορά και την ευστάθεια των στύλων.

Συνεπώς:

- Με την αύξηση του λόγου W_p / H_p του στύλου, σημειώνονται καλύτερες συνθήκες ευστάθειας στο στύλο. Δηλαδή, όσο αυξάνεται ο λόγος πλάτους / ύψους του στύλου, οι οριζόντιες μετατοπίσεις (D_{xy}) μειώνονται ενώ ο συντελεστής ασφαλείας (FS) αυξάνεται στο σύνολο του πλάτους του στύλου. Επομένως, ο στύλος με $W_p / H_p = 0,5$, εμφανίζει τις μεγαλύτερες οριζόντιες μετατοπίσεις και τη μικρότερη τιμή του Συντελεστή Ασφαλείας, δηλαδή, μετατοπίσεις ίσες με 2,65 cm και $FS = 0,86$ στις παρειές του. Ενώ, αντίθετα, οι μικρότερες οριζόντιες μετατοπίσεις και ο μεγαλύτερος Συντελεστής Ασφαλείας παρουσιάζονται στο στύλο με $W_p / H_p = 3$, όπου οι μετατοπίσεις είναι ίσες με 6,4 mm και $FS = 1,7$ στις παρειές του. Όπως αναμενόταν, για οποιονδήποτε λόγο W_p / H_p , οι τιμές των αξονικών μετατοπίσεων είναι μεγαλύτερες στις παρειές συγκριτικά με το κέντρο του στύλου. Συμπεραίνεται ακόμα ότι, με την αύξηση του λόγου πλάτους / ύψους του στύλου παρουσιάζεται πιο ομοιόμορφη συμπεριφορά του στύλου και κατά συνέπεια καλύτερες συνθήκες ευστάθειας. Δηλαδή, όσο αυξάνει ο λόγος W_p / H_p , τόσο ελαττώνεται η διαφορά της οριζόντιας μετατόπισης (D_{xy}) μεταξύ των παρειών και του κέντρου του στύλου. Επιπροσθέτως, συμπεραίνεται ότι ο Συντελεστής Ασφαλείας (Factor of Safety) στις παρειές των στύλων λαμβάνει αισθητά μικρότερες τιμές συγκριτικά με το κέντρο τους. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο και δικαιολογείται απόλυτα από τον αυξημένο πλευρικό περιορισμό που ασκείται στο κέντρο του στύλου λόγω τριβών και του ίδιου του όγκου του πετρώματος. Τέλος, για αυξημένες τιμές του λόγου W_p / H_p του στύλου εμφανίζονται πολύ λιγότερες αστοχίες συγκριτικά με χαμηλότερες τιμές του λόγου. Συνεπώς, για στύλο με $W_p / H_p = 3$ το ποσοστό του στύλου που αστοχεί είναι μόλις 2,5% ενώ για στύλο με $W_p / H_p = 1$ είναι 38 %.

- Αναφορικά με την ενίσχυση που εφαρμόζεται στους στύλους, συμπεραίνεται ότι, όσο αυξάνει ο λόγος W_p / H_p του στύλου τόσο λιγότερο επιδρά το πλευρικό φορτίο ενίσχυσης στη βελτίωση των οριζόντιων μετατοπίσεων (D_{xy}). Το γεγονός αυτό είναι απόλυτα δικαιολογημένο διότι, ο στύλος έχει ήδη παραμορφωθεί λόγω των τάσεων που δέχεται. Με την εφαρμογή πλευρικού φορτίου ο στύλος δεν επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση αλλά περιορίζονται οι μετατοπίσεις και βελτιώνονται οι συνθήκες ευστάθειας του. Ακόμα, παρατηρείται ότι με την αύξηση του λόγου W_p / H_p , στις παρειές των στύλων παρουσιάζεται ελάττωση της ποσοστιαίας μεταβολής του Συντελεστή Ασφαλείας ενώ αντίθετα στο κέντρο των στύλων εμφανίζεται αύξηση του ποσοστού αυτού. Κατά συνέπεια, για στύλο με $W_p / H_p = 0,5$ η ποσοστιαία αύξηση του Συντελεστή Ασφαλείας λόγω της ενίσχυσης, για τις παρειές του είναι 30,2 % και για το κέντρο του 1,78 %. Αντιθέτως, για στύλο με $W_p / H_p = 3$ η ποσοστιαία αύξηση λόγω της ενίσχυσης, για τις παρειές είναι 12,9 % και για το κέντρο του στύλου είναι 4,8 %. Γενικότερα, τα μέτρα ενίσχυσης δεν επιδρούν στην αποτροπή της εμφάνισης των αστοχιών, αλλά στον περιορισμό των συνεπειών τους.
- Όσον αφορά την μονοαξονική αντοχή σε θλίψη του πετρώματος, συμπεραίνεται ότι με την αύξηση της UCS εμφανίζεται βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας του στύλου. Συμπεραίνεται ότι, η βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας δεν είναι ίδιου μεγέθους σε όλο το πλάτος του στύλου, δηλαδή στις παρειές εμφανίζεται μεγαλύτερη βελτίωση συγκριτικά με το κέντρο του στύλου. Πιο συγκεκριμένα, όταν μεταβάλλεται η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη από 60 σε 75 MPa, ο Συντελεστής Ασφαλείας στις παρειές βελτιώνεται κατά 96 % ενώ στο κέντρο κατά 62,5 %. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση της UCS από ένα σημείο και πέρα, δεν παρουσιάζεται περαιτέρω βελτίωση της συμπεριφοράς του στύλου. Δηλαδή, για μεταβολή της UCS από 75 σε 90 MPa η μεταβολή του Συντελεστή Ασφαλείας (FS) στο κέντρο του στύλου είναι μόλις 1,1 %.
- Από την σύγκριση των δυο δισδιάστατων αναλύσεων μεταξύ των προγραμμάτων Phase² και Midas GTS που πραγματοποιήθηκε, συμπεραίνεται ότι η διαφορά των αποτελεσμάτων τους είναι τόσο μικρή που θεωρείται αμελητέα. Η διαφορά αυτή κατά μέσο όρο είναι 0,2 mm, κατά πλάτος του στύλου. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η σύγκριση μεταξύ της δισδιάστατης (2-D) μεθόδου ανάλυσης

και της τρισδιάστατης (3-D) μεθόδου ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Παρατηρήθηκε μια μικρή διαφορά στις τιμές τους κυρίως στις παρειές των στύλων, εκεί όπου οι τιμές της 3-D ανάλυσης ήταν μεγαλύτερες κατά 5,4 mm. Ενώ, κατά πλάτος του στύλου η μέση διαφορά τους ήταν 2,5 mm. Η μικρή αυτή διαφορά μεταξύ των δυο μεθόδων ανάλυσης δικαιολογείται απολύτως, αφού φαίνεται ότι οι δισδιάστατες αναλύσεις δεν λαμβάνουν υπόψη την τρισδιάστατη κατάσταση που επικρατεί. Παρά την προσομοίωση τρισδιάστατης κατασκευής με την αύξηση του ειδικού βάρους, οι δισδιάστατες αναλύσεις υποεκτιμούν την επίδραση των κάθετων θαλάμων ως προς τη διατομή που αναλύεται και εξετάζεται μόνο το μέτωπο της εκσκαφής.

Τέλος, σημειώνεται ότι οι μέθοδοι τρισδιάστατης αριθμητικής ανάλυσης υπερέχουν έναντι των δισδιάστατων, ειδικά σε περιπτώσεις περίπλοκων γεωμετριών εξέτασης και συνθήκες φορτίσεων. Παράλληλα, εκτιμάται ότι το λογισμικό πακέτο Midas GTS, και ειδικότερα, η επιλογή του για την πραγματοποίηση τρισδιάστατων αναλύσεων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση υπόγειων εκσκαφών προσφέροντας αυξημένες δυνατότητες ανάλυσης και αξιοπιστίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Albatineh N., **“Slope Stability Analysis using 2D and 3D methods”**, 2006.
- Bathe K.J., **“Finite Elements Procedures”**, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1996.
- Bekendam R.F., **“Stability and Subsidence Assessment over Shallow Abandoned Room and Pillar Limestone Mines”**, in Hack R., Azzam R., Charlier R., “Engineering geology for infrastructure planning in Europe”, 2004.
- Benardos A., Kaliampakos D., Prousiotis J., Mavrikos A, Skoparantzou K., **“Underground aggregate mining in Athens: A promising investment plan”**, Tunnelling and Underground Space Technology, vol 16, 2001.
- Brady B.H.G., Brown E.T., **“Rock Mechanics for underground mining”**, (Third Edition), Springer, 2004.
- Carmody J., Sterling R., **“Underground Space Design: A guide to Subsurface Utilization and Design for People in Underground Spaces”**, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
- Deng J., Yue Z., Tham L., Zhu H., **“Pillar design by combining finite element methods, neural networks and reliability: A case study of the Feng Huangshan copper mine China”**, IJRM, vol 40, 2003.
- Esterhuizen G.S., Dolinar D.R., Ellenberger J.L., **“Pillar Strength and Design Methodology for Stone Mines”**, NIOSH, 2008.
- Ghee E.H, Zhu B.T., Wines D.R., **“Numerical analysis of road tunnels using two and three – dimensional modeling techniques”**, 1999.
- Hughes O., **“Ship Structural Design, a rationally computer-aided optimization procedure”**, SNAME, New York, 1996.
- Iannacchione A.T., **“Analysis of Pillar Design Practices and Techniques for U.S. Limestone Mines”**, NIOSH, 1999.
- Kacar O., **“3D Finite elements of surface excavation and loading over existing tunnel”**, 2007.

Karakus M., Fowell R.J., **“2-D and 3-D Finite Element Analysis for the settlement due to Soft Ground Tunnelling”**, 2006.

Lunder P.J., **“Hard rock pillar strength estimation an applied empirical approach”**, The 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 and Metallurgy, 1997.

Martin C.D., Maybee W.G., **“The strength of hard-rock pillars”**, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 37, 2000.

Midas GTS manual, **“Getting started with Midas GTS 2010 v1.2”**, **“Midas GTS 2010 Release notes”** and **“Tutorials”**, 2010.

Midas User: **“www.midasuser.com”**.

Papadimitriou A.G., Bouckovalas A.C., Vytiniotis A.C., Bakas G.J., **“Equivalence between 2D and 3D numerical simulations of the seismic response of improved sites”**, 1999.

Rocscience Inc., **“Phase² Manual”**, 2005.

Salamon M.D.G., Munro A.H., **“A Study of the Strength of Coal Pillars”**, Journal of South African Inst. Of Mining – Metallurgy, 1967.

www.itascacg.com, www.unistuttgart.de.

Καρύδης Α.Π., **“Υπολογιστικές Μέθοδοι και εφαρμογές σε λεπτότοιχες κατασκευές”**, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., 2001.

Μπενάρδος Α., Καλιαμπάκος Δ., Σημειώσεις για το μάθημα **“Υπόγεια Έργα”**, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών Ε.Μ.Π., 2010.

Παναγιώτου Γ.Ν., **“Βασικές αρχές σχεδιασμού εκμεταλλεύσεως με την μέθοδο των θαλάμων και στύλων”**, Μεταλλειολογικά – Μεταλλουργικά Χρονικά, 1982.

Παπαγιαννόπουλος Π., **“Εκτίμηση της Αντοχής Στύλων για Περιπτώσεις Σκληρών Πετρωμάτων και Ανάλυση της Επίδρασης Μέτρων Ενίσχυσης στην Ευστάθεια τους”**, Αθήνα, 2010.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ MIDAS GTS

Δίνεται παρακάτω παράδειγμα σχεδιασμού και ανάλυσης ενός τρισδιάστατου μοντέλου με σκοπό να κατανοηθούν οι βασικές αρχές σχεδιασμού, με τις οποίες λειτουργεί το λογισμικό πακέτο Midas GTS. Η σειρά με την οποία εκτελούνται οι εντολές στο Midas GTS είναι η εξής :

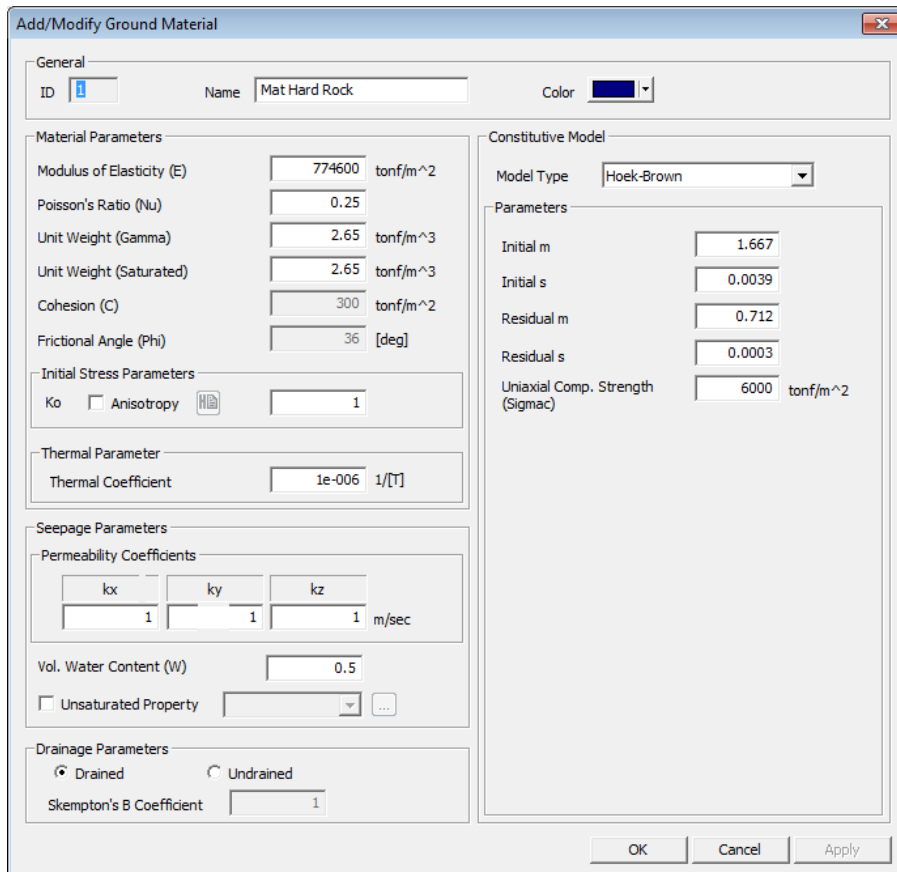
1. Σχεδιασμός γεωμετρίας μοντέλου.
2. Παραγωγή πλέγματος (Mesh generation).
3. Ορισμός παραμέτρων ανάλυσης.
4. Ανάλυση – Επίλυση.
5. Εξαγωγή και αξιολόγηση αποτελεσμάτων.

• Προσδιορισμός Χαρακτηριστικών των υλικών

Αρχικά, προσδιορίζεται το είδος και τα χαρακτηριστικά του εδάφους, εντός του οποίου θα τοποθετηθεί η υπόγεια κατασκευή. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα επιλέγεται μόνο ένας σχηματισμός με σχετικά υψηλή αντοχή (σκληρό πέτρωμα). Οι εντολές που ακολουθούνται είναι οι εξής :

- **Model > Property > Attribute...** από **Main Menu**.
- **Add > Solid** από **Attribute dialog box**.
- Εισαγωγή **ID, Name, Element Type** από **Add/Modify Solid Attribute dialog box**.

Εισάγονται όλα τα χαρακτηριστικά του πετρώματος, στο παράθυρο διαλόγου **Add/Modify Ground Material**, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα Π.1).



Εικόνα Π.1. Παράθυρο διαλόγου 'Add/Modify Ground Material'.

- **Σχεδιασμός γεωμετρίας μοντέλου.**

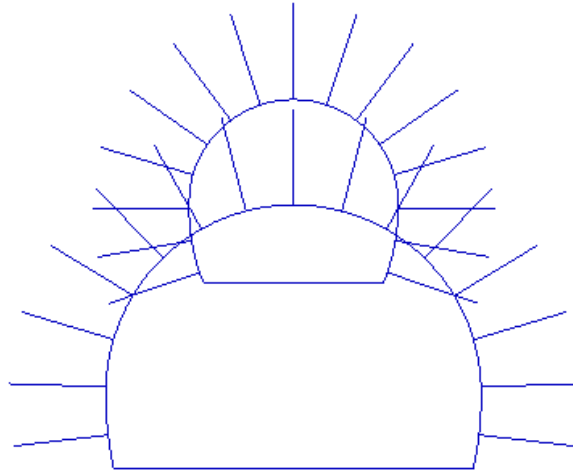
Στη συνέχεια, σχεδιάζεται η γεωμετρία της εκσκαφής και κατ' επέκταση του μοντέλου.

Οι εντολές που ακολουθούνται φαίνονται παρακάτω :

- **File > Import > DXF 2D (Wireframe)...** από **Main Menu**.
- **Επιλογή κατάλληλου αρχείου DXF.** 
- **Εισαγωγή Shape Type, Name** από **Import DXF 2D dialog box**.
- **Επιλογή εντολής Preview** , με σκοπό την επιβεβαίωση της επιλογής των διατομών.
- **Επιλογή πλήκτρου**  **για επιβεβαίωση.**




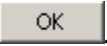
Η διαδικασία που μόλις αναφέρθηκε, ακολουθείτε βήμα προς βήμα για το σύνολο του αριθμού των στοών, δηλαδή τόσο για τις κύριες στοές όσο και για τις συνδετήριες στοές, οι οποίες τέμνουν κάθετα τις κύριες.

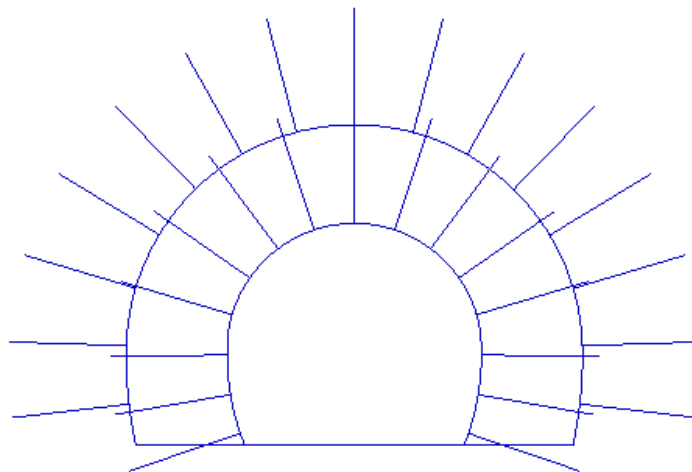
Οι διατομές των στοών τοποθετούνται ακανόνιστα στο χώρο (Εικόνα Π.2), γι' αυτό τον λόγο το επόμενο βήμα του σχεδιασμού της επιθυμητής γεωμετρίας είναι η επιλογή κοινού επιπέδου βάσης για όλες τις στοές όπως φαίνεται από την Εικόνα Π.3.



Εικόνα Π.2. Αταξινόμητες στοές.




Αυτό επιτυγχάνεται ακολούθως:

- **Geometry > Transform > Attach...** από **Main Menu**.
- Επιλογή όλων των διατομών με το πλήκτρο **Displayed** .
- Αλλαγή της επιλογής **'Selection Filter'** από **'Solid (L)'** σε **'Vertex (V)'** από **Selection Toolbar**.
- Επιλογή **Datum > 'Origin'** από **Works Tree**. 
- Επιλογή εντολής **Preview**  με σκοπό την επιβεβαίωση της ορθότητας των στοιχείων πρόκειται να σχεδιαστούν.
- Επιλογή πλήκτρου 





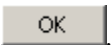


Εικόνα Π.3. Κοινό επίπεδο βάσης στοών.

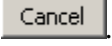

Εφόσον επιτεύχθηκε το κοινό επίπεδο βάσης όλων των στοών, ακολουθεί η τοποθέτηση των διατομών προς την επιθυμητή διεύθυνση. Αυτό επιτυγχάνεται μετά από τις εξής ενέργειες:

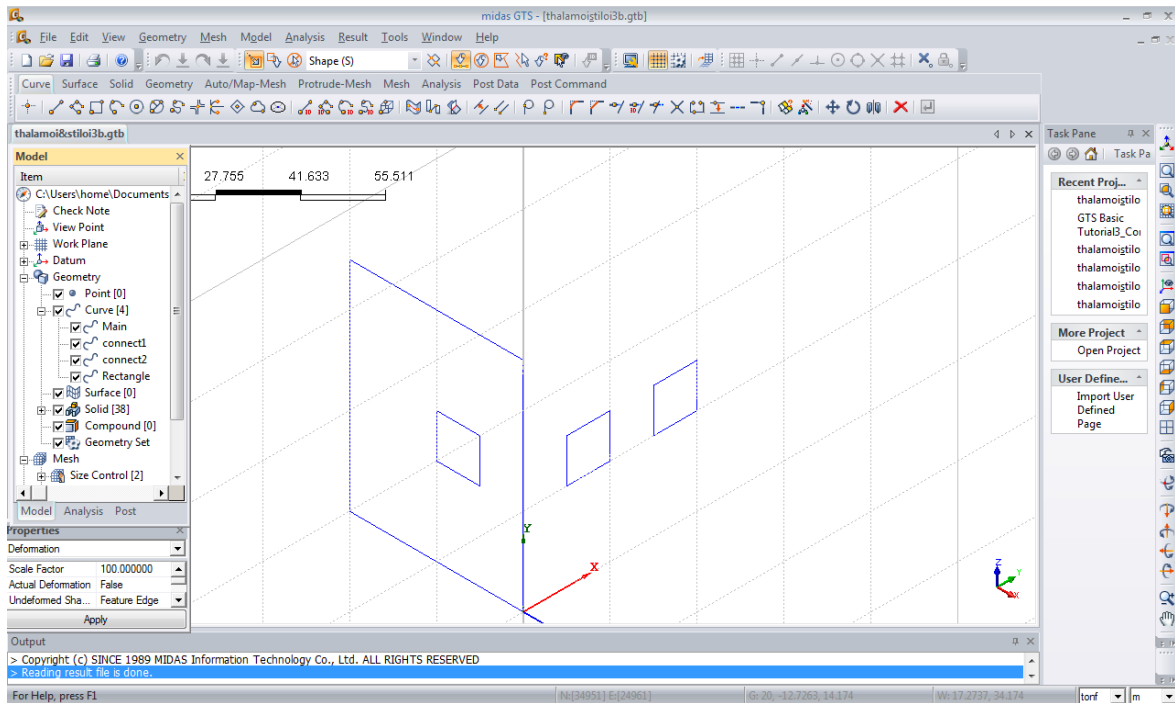
- Επιλογή εντολής **Isometric**  από **View Point Toolbar**.
- **Geometry > Transform > Translate...** από **Main Menu**.
- Επιλογή επιθυμητής στοάς, με την εντολή **Select Object Shape**.

- Αλλαγή **Selection Filter** σε **'Datum Axis (A)'** και επιλογή διεύθυνσης (x,y,z).


Για τις κάθετες στοές απαιτείται περαιτέρω διαδικασία, δηλαδή:

- **Geometry > Transform > Rotate...** από **Main Menu**.
- Επιλογή επιθυμητής στοάς, με την εντολή **Select Object Shape**.

- Επιλογή διατομών, άξονα περιστροφής  και γωνία περιστροφής. 
- Επιλογή εντολής **Preview** , με σκοπό την επιβεβαίωση της ορθότητας των στοιχείων πρόκειται να σχεδιαστούν.
- Επιλογή πλήκτρου , για επιβεβαίωση .

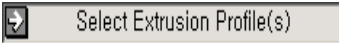
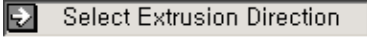


Ακολουθεί ο σχεδιασμός των ορίων (περιγράμματος) του πετρώματος και κατά συνέπεια του μοντέλου, όπως φαίνεται στην Εικόνα Π.4 :

- **Geometry > Curve > Create on WP > Rectangle (Wire)...** από **Main Menu**.
- Επιλογή μεθόδου **'ABS x, y'** από **Rectangle dialog box** και τοποθέτηση επιθυμητών συντεταγμένων.
- Επιλογή μεθόδου **'REL dx, dy'** από **Rectangle dialog box** και τοποθέτηση επιθυμητών συντεταγμένων.
- Επιλογή πλήκτρου 
- Επιλογή εντολής **Isometric**  από **View Point Toolbar**.

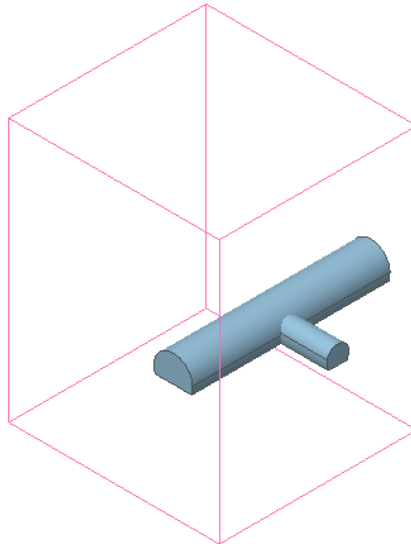


Εικόνα Π.4. Σχεδιασμός περιγραμμάτων στοών και ορίων του μοντέλου.

Με στόχο την μετατροπή τόσο των διατομών των στοών όσο και του περιγράμματος του μοντέλου που σχεδιάστηκε προηγουμένως, σε τρισδιάστατο μοντέλο με τις επιθυμητές διαστάσεις, ακολουθούνται οι παρακάτω εντολές όπου επαναλαμβάνονται για κάθε στοά ξεχωριστά:

- **Geometry > Generator Feature > Extrude...** από **Main Menu**.
- Αλλαγή **Selection Filter** από **'Face (F)'** σε **'Wire (W)'**.
- Επιλογή στοών ή περιγράμματος από **Works Tree**, (π.χ. **Works Tree > Curve > 'Main Tunnel Section'**). 
- Επιλογή διεύθυνσης , μήκους και ονόματος.
- Επιλογή εντολής **Preview** , με σκοπό την επιβεβαίωση της ορθότητας των όσων πρόκειται να σχεδιαστούν.
- Επιλογή πλήκτρου 


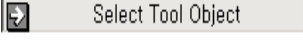
Όπως φαίνεται στην Εικόνα Π.5, μετά την εκτέλεση των παραπάνω εντολών, έχουν δημιουργηθεί οι πραγματικές διαστάσεις του μοντέλου.







Εικόνα Π.5. Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου.

Στο επόμενο βήμα περιλαμβάνονται οι διαδικασίες της Ενσωμάτωσης (Embed) και του Διαχωρισμού (Divide), οι οποίες είναι απαραίτητες ώστε να αποφευχθούν τυχόν λάθη στη σύνδεση των θαλάμων καθώς και αργότερα στη δημιουργία κόμβων για την παραγωγή του απαραίτητου πλέγματος (Mesh). Οι εντολές που ακολουθούνται φαίνονται παρακάτω.



Ενσωμάτωση (**E**mbed):

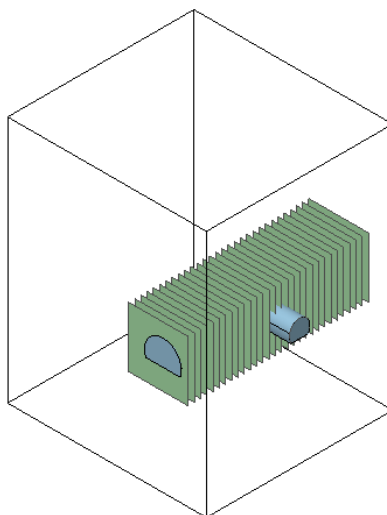
- **Geometry > Solid > Embed...** από **Main Menu**.
- Επιλογή κύριας στοάς ως **Master object**  και πετρώματος ως **Tool object**. 
- Επιλογή εντολής **Delete Original Shape(s)**.

Διαχωρισμός (**D**ivide):

- **Geometry > Solid > Divide...** από **Main Menu**.
- Επιλογή πετρώματος(**Ground**) ως **Shape to Divide**. 
- Επιλογή '**Selected Surface**' από **Dividing Tool**.
- Αλλαγή **Selection Filter** από '**Face (F)**' σε '**Shell (H)**'.
- Επιλογή δευτερεύουσας στοάς ως **Tool Surface**. 
- Επιλογή κύριας στοάς ως **Neighbor Shape**. 
- Επιλογή εντολών **Divide Touching Faces of Neighbors** και **Delete Original Shape(s)**.
- Επιλογή εντολής **Preview**  με σκοπό την επιβεβαίωση της ορθότητας των όσων πρόκειται να σχεδιαστούν.


Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει τον διαχωρισμό κάθε στοάς σε μικρότερα ισομεγέθη τμήματα (Εικόνα Π.6) που στοχεύει τόσο στην καλύτερη ποιότητα πλέγματος το οποίο θα δημιουργηθεί στη συνέχεια, όσο και στον διαχωρισμό σε στάδια εκσκαφής (Construction Stages). Για το σκοπό αυτό, ακολουθούνται οι εξής εντολές, οι οποίες επαναλαμβάνονται για κάθε στοά ξεχωριστά:

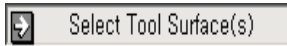


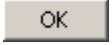
- **Geometry > Curve > Create on WP > Rectangle (Wire)...** από **Main Menu**.
- Επιλογή εντολής **Make Face**.
- Σχεδιασμός τετραγώνου(**Rectangle**), μεγέθους ικανού ώστε να καλύπτεται πλήρως η διατομή της στοάς.
- Επιλογή εντολής **Isometric**  από **View Point Toolbar**.
- **Geometry > Surface > 'Rectangle'** από **Works Tree**.
- **Geometry > Transform > Translate...** in the **Main Menu**.
- Αλλαγή **Selection Filter** σε **'Datum Axis (A).'**
- Επιλογή διεύθυνσης, εισαγωγή μήκους τμημάτων και συνολικού αριθμού τμημάτων.
- Επιλογή εντολής **Preview**  , με σκοπό την επιβεβαίωση των στοιχείων που πρόκειται να σχεδιαστούν.



Εικόνα Π.6. Διαχωρισμός στοών σε ισομεγέθη τμήματα.

Στην συνέχεια:



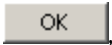


- **Geometry > Solid > Divide...** από **Main Menu**.
- Επιλογή στοάς ως **Shape to Divide**. 
- Επιλογή **'Selected Surface'** από **Dividing Tool**.
- Αλλαγή **Selection Filter** από **'Face (F)'** σε **'Shell (H)'**.

- Επιλογή όλων των τετραγώνων (**Rectangles**), που έχουν δημιουργηθεί, ως **Tool Surface**. 
- Επιλογή πετρώματος (**Ground**) και συνδετήριων στοών ως **Neighbor Shape**. 
- Επιλογή εντολών **Divide Touching Faces of Neighbors** και **Delete Original Shape(s)**.
- Επιλογή εντολής **Preview** , με σκοπό την επιβεβαίωση της ορθότητας των όσων πρόκειται να σχεδιαστούν.
- Επιλογή πλήκτρου  για επιβεβαίωση.

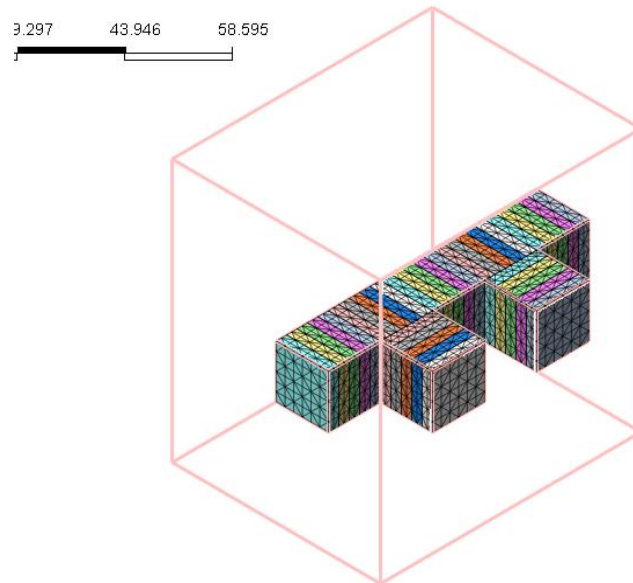
- **Δημιουργία Πλέγματος (Mesh Generation).**

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα δημιουργηθεί τετράεδρο πλέγμα (Mesh) για τις στοές και το πέτρωμα που έχουν σχεδιαστεί. Αρχικά, ορίζεται το μέγεθος του πλέγματος με σκοπό την καλύτερη ποιότητα του πλέγματος και κατά συνέπεια την εξαγωγή των βέλτιστων αποτελεσμάτων.

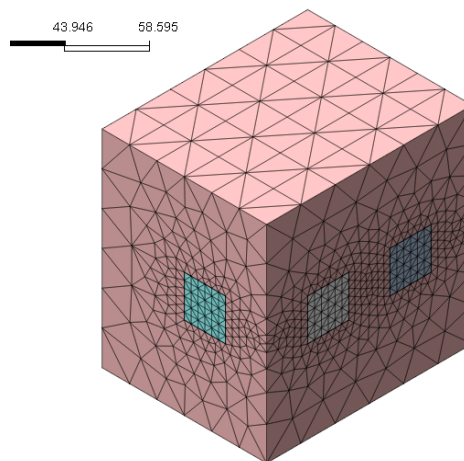
Επιχειρείται η εύρεση της βέλτιστης λύσης ώστε να εξάγονται ικανοποιητικά αποτελέσματα σε λίγο χρόνο. Οι εντολές που ακολουθούνται για τον καθορισμό του μεγέθους του πλέγματος, είναι οι εξής:

- **Mesh > Size Control > Along Edge** από **Main Menu**.
- Επιλογή ορίων του μοντέλου. 
- Επιλογή **'Linear Grading (Length)'** ως **Seeding Method**.
- Εισαγωγή επιθυμητών διαστάσεων και επιλογή εντολής **Symmetric Seeding**.
- Επιλογή εντολής **Preview** , με σκοπό την επιβεβαίωση της ορθότητας των όσων πρόκειται να σχεδιαστούν.
- Επιλογή πλήκτρου  για επιβεβαίωση.
- Επιλογή εντολής **Isometric**  από **View Point Toolbar**.
- **Mesh > Auto Mesh > Solid...** από **Main Menu**.
- Επιλογή όλων των μικρών τμημάτων της επιθυμητής στοάς. 
- Εισαγωγή επιθυμητού αριθμού στην επιλογή **Mesh Size**.

- Επιλογή εντολών **Register Each Solid Independently, Merge Nodes Option, Match Adjacent Faces, Hide Object Solid(s) after Meshing.**



Εικόνα Π.7. Δημιουργία πλέγματος (Meshing) των στοών.

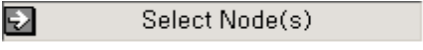



Εικόνα Π.8. Δημιουργία πλέγματος (Meshing) ολόκληρου του μοντέλου.

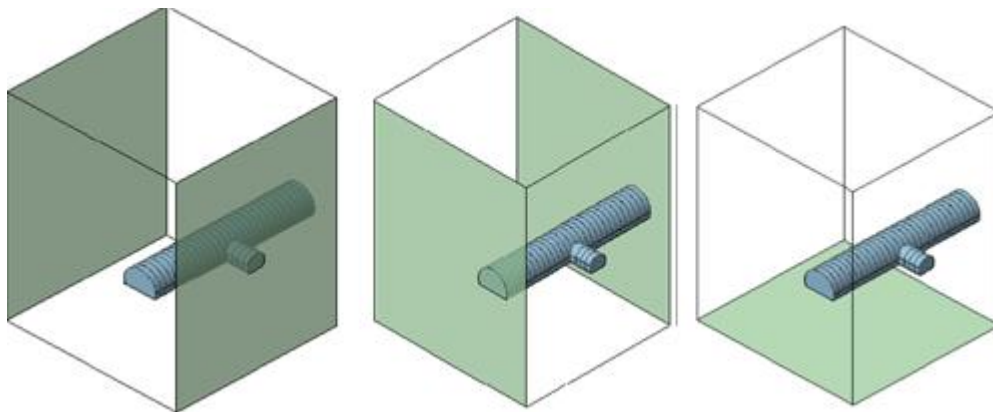
- **Ορισμός Παραμέτρων Ανάλυσης.**
 - **Ορισμός Συνοριακών συνθηκών.**

Οι συνοριακές συνθήκες έχουν την δυνατότητα να εφαρμόζονται, σε συγκεκριμένους κόμβους (nodes) ή στοιχεία (elements) ξεχωριστά, αλλά δίνεται και δυνατότητα μαζικής σχεδίασης ολόκληρης πλευράς, η οποία διευκολύνει τον χρήστη σε περιπτώσεις μεγάλων

και περίπλοκων μοντέλων . Με σκοπό να ορισθούν οι επιθυμητές συνοριακές συνθήκες η οποίες επικρατούν στο μοντέλο, ακολουθούνται οι εξής εντολές:

- **Model > Boundary > Supports...** από **Main Menu**.
- Επιλογή **'Node'** στην εντολή **Type of Object**.
- Αλλαγή **Selection Filter** σε **'Face (F)'**.
- Επιλογή πλευρών . (Εικόνα Π.9)
- Επιλογή **'Add'** στην επιλογή **Mode**.
- Επιλογή **'UX'** στην εντολή **DOF**.
- Επιλογή πλήκτρου 

Ακολούθως, επιλέγονται και οι άλλες πλευρές του μοντέλου με την σειρά που φαίνονται στις Εικόνες Π.10 και Π.11 αντίστοιχα, εκτός από την πάνω πλευρά η οποία μένει ελεύθερη.



Εικόνες Π.9, Π.10, Π.11. Επιλογή διαδοχικών πλευρών για τοποθέτηση συνοριακών συνθηκών.

➤ **Στάδια εκσκαφής.**

Τα στάδια εκσκαφής μπορούν να οριστούν όπως ο χρήστης επιθυμεί. Αρχικά, ορίζονται τα στοιχεία που υπάρχουν στο αρχικό στάδιο (initial stage), δηλαδή πριν αρχίσει η φάση της πρώτης εκσκαφής. Οι εντολές που ακολουθούνται φαίνονται παρακάτω:

- **Geometry** από **Works Tree**, επιλογή **Hide All**.
- **Mesh** από **Works Tree**, επιλογή **Show All**.
- **Model > Construction Stage > Stage Definition Wizard...** από **Main Menu**.
- Επιλογή **'Mesh'** στην εντολή **Set Type** in **Set Assignment Rules**.
- Εισαγωγή σταδίων εκσκαφής.

	Set Type	Set Name Prefix	A/R	Start Postfix	F	End Postfix	Postfix Inc.	Start Stage	Stage Inc.
	Mesh	Main Tunnel	A	1	<input type="checkbox"/>		1	0	0
	Mesh	Connecting Gallery	A	1	<input type="checkbox"/>		1	0	0
*	▼				<input type="checkbox"/>				

Εικόνα Π.12. Παράθυρο διαλόγου 'Set Assignment Rules' πριν την εκσκαφή (initial stage).

Στην συνέχεια ορίζονται τα στοιχεία τα οποία μετακινούνται σε κάθε επόμενο στάδιο εκσκαφής μετά το αρχικό (initial stage). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, στο δεύτερο στάδιο γίνεται η εκσκαφή της κύριας στοάς, ενώ στο τρίτο στάδιο πραγματοποιείται η εκσκαφή της δευτερεύουσας στοάς. Μετά το πέρας κάθε εκσκαφής είναι δυνατή η προσθήκη αγκυρίων, εκτοξευόμενου σκυροδέματος καθώς και άλλων συμπληρωματικών στοιχείων υποστήριξης.



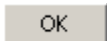
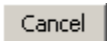
	Set Type	Set Name Prefix	A/R	Start Postfix	F	End Postfix	Postfix Inc.	Start Stage	Stage Inc.
	Mesh	Main Tunnel	A	1	<input type="checkbox"/>		1	0	0
	Mesh	Connecting Gallery	A	1	<input type="checkbox"/>		1	0	0
	Mesh	Main Tunnel	R	1	<input type="checkbox"/>		1	1	1
	Mesh	Main Tunnel R/B	A	1	<input type="checkbox"/>		1	2	1
	Mesh	Main Tunnel S/C	A	1	<input type="checkbox"/>		1	2	1
	Mesh	Connecting Gallery	R	1	<input type="checkbox"/>		1	32	1
	Mesh	Connecting Gallery R/B	A	1	<input type="checkbox"/>		1	33	1
	Mesh	Connecting Gallery S/C	A	1	<input type="checkbox"/>		1	33	1
*	▼				<input type="checkbox"/>				

Εικόνα Π.13. Παράθυρο διαλόγου 'Set Assignment Rules' μετά την εκσκαφή.

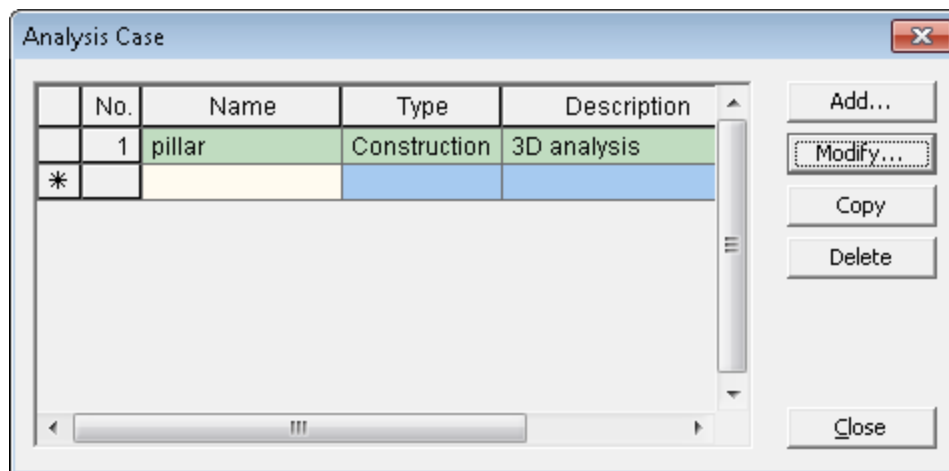
- **Καθορισμός μεθόδου ανάλυσης.**

Στο συγκεκριμένο βήμα, επιλέγεται ο τρόπος με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση του μοντέλου και ορίζονται οι περαιτέρω λεπτομέρειες της ανάλυσης. Οι εντολές που ακολουθούνται φαίνονται παρακάτω:

- *Analysis > Analysis Case...από Main Menu.*

- Επιλογή  σε *Analysis Case dialog box*. (Εικόνα Π.14)
- Εισαγωγή *Name, Description*.
- Επιλογή *'Construction Stage'* σε *Analysis Type*.
- Επιλογή πλήκτρου *Analysis Control*. 
- Επιλογή *'IS'* σε *Initial Stage for Stress Analysis*.
- Επιλογή *K₀ Condition*.
- Επιλογή πλήκτρου  σε *Add/Modify Analysis Control dialog box*.
- Επιλογή πλήκτρου 

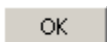
Παρ' όλο που στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε ο τύπος της ανάλυσης *Construction Stage*, η ανάλυση μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τύπους όπως για παράδειγμα *Linear/Nonlinear Static, Slope Stability, Seepage* και άλλους.

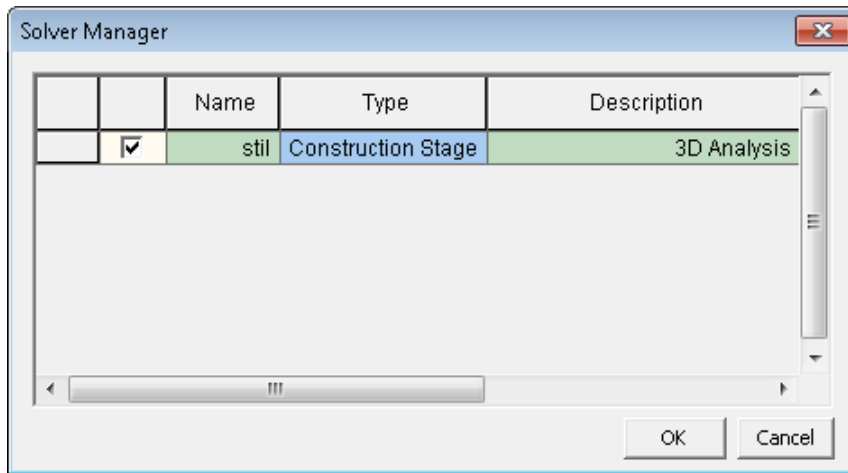


Εικόνα Π.14. Παράθυρο διαλόγου 'Analysis Case'.

• Ανάλυση – Επίλυση.

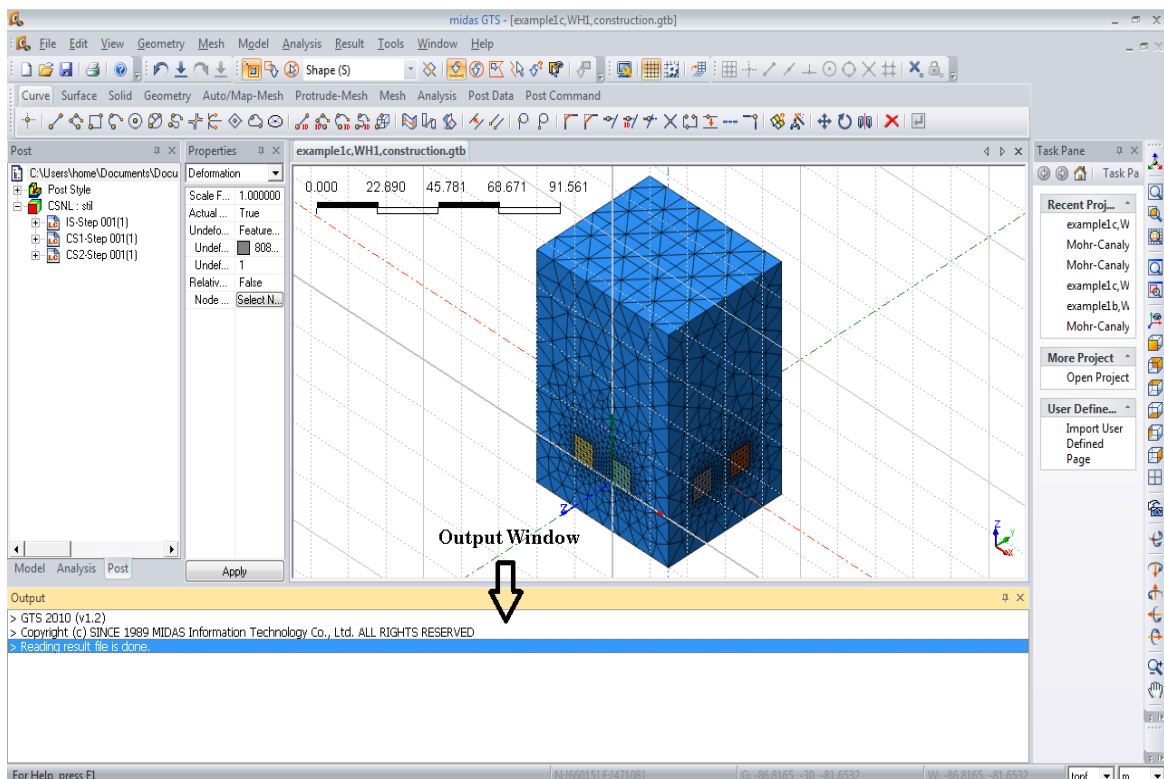
Το τελευταίο βήμα του σχεδιασμού του μοντέλου περιλαμβάνει το στάδιο της επίλυσης με σκοπό να εξαχθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Η ανάλυση εκτελείται μετά από τις παρακάτω εντολές:

- Επιλογή *Analysis > Solve...* από *Main Menu*. (Εικόνα Π.15)
- Επιλογή πλήκτρου  σε *Solver Manager dialog box*.



Εικόνα Π.15. Παράθυρο διαλόγου 'Solver Manager'.

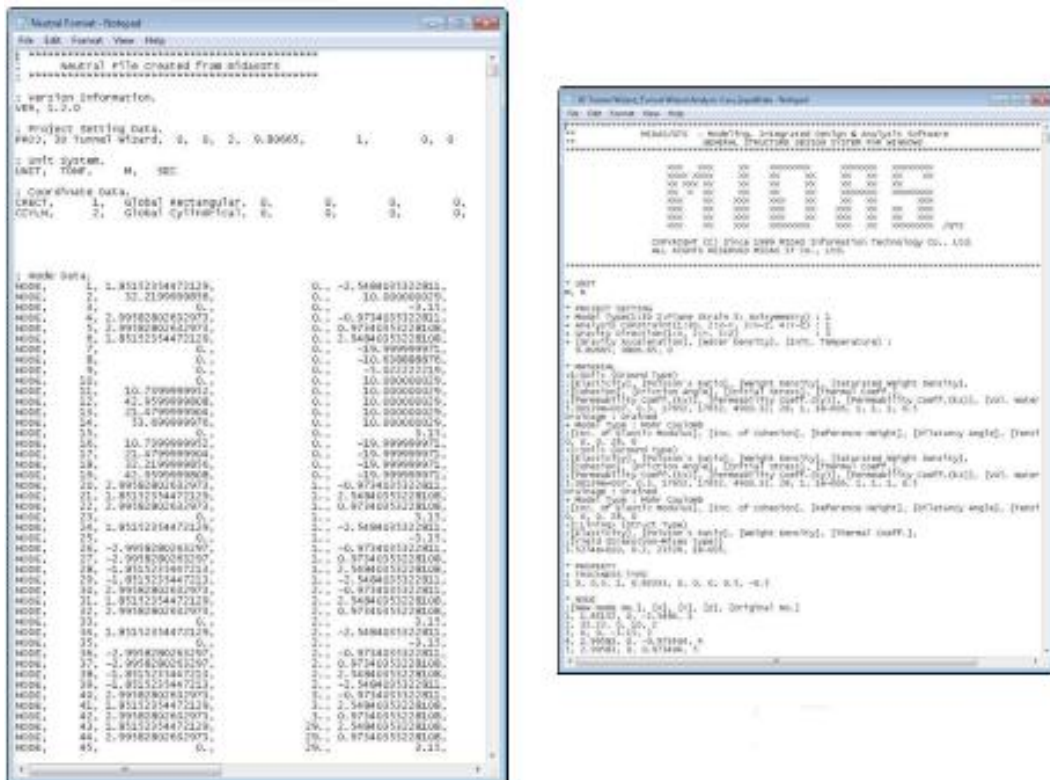
Το μοντέλο αποθηκεύεται αυτόματα από το πρόγραμμα πριν αρχίσει να εκτελείται η ανάλυση. Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης εμφανίζονται μηνύματα στο παράθυρο διαλόγου Output Window, όπως φαίνεται στην Εικόνα Π.16.



Εικόνα Π.16. Output Window.

Τα μηνύματα που εμφανίζονται δείχνουν την διαδικασία και την εξέλιξη της ανάλυσης. Όμως, ορισμένα από τα μηνύματα είναι πολύ σημαντικά, επειδή αφορούν σφάλματα που μπορούν να προκληθούν κατά τη διάρκεια της ανάλυσης.

Μετά το πέρας της ανάλυσης, τα μηνύματα αυτά αποθηκεύονται σε ξεχωριστούς φακέλους, τόσο τα αποτελέσματα της ανάλυσης (*.TA file) όσο και οι λεπτομερείς πληροφορίες της ανάλυσης (*.OUT file), όπως φαίνονται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα Π.17).



Εικόνα Π.17. Φάκελοι αποθήκευσης λεπτομερειών και αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

• Εξαγωγή και Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.

Μετά το πέρας μιας επιτυχημένης ανάλυσης, ακολουθεί η διαδικασία ανάγνωσης και αξιολόγησης των εξαχθέντων αποτελεσμάτων. Υπάρχει πληθώρα αποτελεσμάτων, ανάλογα με τον τρόπο ανάλυσης. Επίσης, το Midas GTS-Post Processing παρέχει την δυνατότητα συγκέντρωσης αποτελεσμάτων σε πίνακες ή διαγράμματα και τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων στο MS-Excel για την διευκόλυνση των χρηστών. Μερικά από τα συνήθη αποτελέσματα που εξάγονται από όλους τους τρόπους ανάλυσης είναι Displacement, 3D Stress, 3D Strain και άλλα. Οι εντολές που ακολουθούνται για την συγκέντρωση των αποτελεσμάτων σε πίνακα ή διάγραμμα, είναι οι εξής :

- Επιλογή **Result > On-Curve Diagram...** από **Main Menu**.
- Εισαγωγή συντεταγμένων σε **On-Curve Diagram dialog box**.
- Επιλογή πλήκτρου **Table** ή **Diagram**.