



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Σχεδιασμός Υπόγειου Χώρου Αποθήκευσης Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τολιά Αιμιλία – Βασιλεία

Επιβλέπων: Ανδρέας Μπενάρδος

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Σχεδιασμός Υπόγειου Χώρου Αποθήκευσης Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τολιά Αιμιλία – Βασιλεία

Επιβλέπων: Ανδρέας Μπενάρδος

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις: 27/07/2022

Ανδρέας Μπενάρδος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Πάυλος Νομικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Βασίλειος Γαγάνης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2022

Copyright © Τολιά Αιμιλία – Βασιλεία, 2022

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών και επιβλέποντα στη διπλωματική μου εργασία, κύριο Ανδρέα Μπενάρδο τόσο για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, όσο και για την συστηματική καθοδήγηση και προθυμία του να επιλύσει την κάθε μου απορία, κατά τη διάρκεια της έρευνας και συγγραφής της εργασίας. Η συμβολή του σε κάθε βήμα ήταν ανεκτίμητη.

Με την ευκαιρία θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους καθηγητές της κατεύθυνσης Γεωτεχνολογίας για την ιδιαίτερα προσεκτική και ουσιαστική διδασκαλία των μαθημάτων τους.

Τέλος ευχαριστώ πολύ την οικογένειά μου για τη στήριξη και τις συμβουλές που μου προσφέρουν διαρκώς. Η εργασία είναι αφιερωμένη σε εκείνους.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο θέμα τον σχεδιασμό ενός υπόγειου χώρου αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή υγροποιημένου φυσικού αερίου. Στόχος της είναι η προοδευτική ανάλυση του ευρύτερου ζητήματος της υπόγειας αποθήκευσης ενέργειας και των διαφόρων μορφών της, ώστε τελικά να καταλήξει στην αποθήκευση φυσικού αερίου σε υγροποιημένη μορφή. Μετά την παρουσίαση περαιτέρω πληροφοριών για το προϊόν, ακολουθεί ο σχεδιασμός ενός υποθετικού χώρου και η παρουσίαση οικονομικών στοιχείων για την κατασκευή του.

Αναλυτικότερα, στο πρώτο μέρος της εργασίας παρουσιάζονται βασικά στοιχεία για την υπόγεια αποθήκευση ενέργειας και τα πλεονεκτήματά της συγκριτικά με την επιφανειακή. Στη συνέχεια καταγράφονται οι πέντε βασικοί τύποι υπόγειας αποθήκευσης ενέργειας και μερικές από τις μορφές με τις οποίες μπορεί να αποθηκευτεί, όπως για παράδειγμα ο πεπιεσμένος αέρας και το υδρογόνο. Το επόμενο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο αποκλειστικά στο φυσικό αέριο σε υγροποιημένη μορφή, οπότε το ζήτημα αναλύεται εκτενέστερα. Ειδικότερα αφού γίνει αναφορά σε γενικά στοιχεία για το προϊόν, τον ρόλο του στην ενεργειακή κλίμακα και των χαρακτηριστικών πλεονεκτημάτων του, παρουσιάζονται παλαιές προσπάθειες αποθήκευσής του χωρίς ιδιαίτερη επιτυχία και ύστερα αναλύεται σε βάθος η κατασκευή και μελέτη των αποτελεσμάτων λειτουργίας μιας πιλοτικής μονάδας αποθήκευσης LNG στην Κορέα. Έπειτα παρατίθενται αναλυτικά στοιχεία για την εφαρμογή της μεθόδου LRC και στη Σουηδία. Το κομμάτι του σχεδιασμού ενός υποθετικού υπόγειου χώρου αποθήκευσης LNG αναλύεται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο κατά το οποίο περιγράφεται ολοκληρωμένη η διαδικασία ξεκινώντας από την επιλογή περιοχής, διαστάσεων και δυναμικότητας, και καταλήγοντας στην προσομοίωση μοντέλων με διαφορετικούς συνδυασμούς χαρακτηριστικών πετρώματος, με στόχο την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού. Η εργασία ολοκληρώνεται με την εκτίμηση του κόστους διάνοιξης και υποστήριξης του έργου και την οργάνωση του χρόνου που απαιτεί η κάθε εργασία. Τελικά μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω καταγράφονται σχόλια, παρατηρήσεις και πιθανές αδυναμίες της έρευνας.

Abstract

This thesis addresses the design of a subterranean space for the storage of liquified natural gas. It focuses primarily on the issue of energy in various forms and types of storage systems ultimately leading to liquified natural gas. Following the presentation of information on the product per se, the thesis discusses the design of a hypothetical storage area, with specific reference to the financial parameters pertinent to its construction.

More specifically, the first part of the research highlights key elements regarding underground energy storage as well as its advantages vis-a-vis above-the-ground storage. Next, five fundamental types of underground storage techniques are recorded along with reference to several forms of energy including compressed air and hydrogen.

The following chapter discusses extensively liquified natural gas, showcases general information about this product, stresses its role in the energy scale, analyzes its competitive advantages, presents older, somewhat successful, storage methods and efforts, and finally approaches the construction and study of results in the operation of a pilot LNG plant in Korea. In the same chapter, the author cites detailed data collected on the implementation of an LRC method in Sweden.

In the next part of the thesis, emphasis is placed on the design of a hypothetical subterranean storage space. This chapter replicates and analyzes the entire process starting with the selection of the appropriate land, moving to storage size and capacity, and concluding with the simulation of several models based on types of bedrock aiming at the optimal combination.

The thesis is completed with an entire section dedicated to the estimated cost involved in the excavation and support of the project including specific timeline required for the completion of each stage. In the final section, the author recapitulates key points raised and discussed and highlights possible limitations of the research.

Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή	1
2. Υπόγεια αποθήκευση ενέργειας.....	2
2.1 Πλεονεκτήματα υπόγειας αποθήκευσης ενέργειας.....	2
2.2 Τύποι υπόγειας αποθήκευσης ενέργειας.....	5
2.2.1 Κοιλότητες ορυκτού άλατος	6
2.2.2 Υδροφορείς	7
2.2.3 Εξαντλημένα κοιτάσματα φυσικού αερίου και πετρελαίου.....	7
2.2.4 Ορυχεία	7
2.2.5 Τεχνητοί υπόγειοι θάλαμοι	8
2.2.5.1 Μέθοδος υδροδυναμικού φραγμού	9
2.2.5.2 Μέθοδος LRC	11
2.3 Μορφές αποθηκευόμενης ενέργειας.....	12
2.3.1 Πεπιεσμένος αέρας	12
2.3.2 Θερμική ενέργεια.....	15
2.3.3 Υδρογόνο	18
2.3.4 Φυσικό αέριο.....	19
3. Υπόγεια αποθήκευση υγροποιημένου φυσικού αερίου	20
3.1 Φυσικό αέριο – Γενικά στοιχεία σε Ελλάδα και Ε.Ε.	20
3.2 Πλεονεκτήματα χρήσης υγροποιημένου φυσικού αερίου.....	20
3.2.1 Πλεονεκτήματα υπόγειας αποθήκευσης	21
3.2.2 Οικονομικά στοιχεία και δυναμικότητα.....	22
3.3 Προσπάθειες υπόγειας αποθήκευσης LNG στο παρελθόν	23
3.4 Νέα μέθοδος υπόγειας αποθήκευσης LNG – Το παράδειγμα της Κορέας.....	23
3.4.1 Βασικά χαρακτηριστικά.....	24

3.4.1.1	Δημιουργία παγωμένου δακτυλίου	25
3.4.1.2	Σύστημα συγκράτησης.....	26
3.4.1.3	Σύστημα αποστράγγισης.....	27
3.4.2	Επιλογή δοκιμαστικού χώρου και πετρώματος	28
3.4.3	Λειτουργία και έλεγχος.....	28
3.4.4	Παρατηρήσεις για τα συστήματα συγκράτησης και αποστράγγισης.....	30
3.4.5	Παρατηρήσεις για τον σχηματισμό του παγωμένου δακτυλίου.....	31
3.4.6	Εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας και συνοδά έργα	32
3.5	Μηχανική συμπεριφορά βραχομάζας υπό χαμηλές θερμοκρασίες.....	34
3.5.1	Δημιουργία νέων ρωγμών λόγω ψύξης.....	35
3.5.2	Διεύρυνση υπαρχόντων ρωγμών λόγω ψύξης	36
3.6	Άλλες εφαρμογές της μεθόδου LRC.....	36
3.6.1	Το παράδειγμα της Σουηδίας	36
3.6.1.1	Πειραματική μονάδα στο Grängesberg της Σουηδίας	37
3.6.1.2	Υπόγειος χώρος αποθήκευσης στο Skallen της Σουηδίας	38
3.6.2	Αποθήκευση υδρογόνου με τη μέθοδο LRC.....	41
3.6.3	Χαρακτηριστικά ατσάλινης επένδυσης.....	42
3.6.4	Πλεονεκτήματα μεθόδου LRC.....	43
4.	Σχεδιασμός υπόγειου χώρου αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου.....	44
4.1	Στοιχεία σχεδιασμού	44
4.1.1	Επιλογή θέσης κατασκευής και χαρακτηριστικών του πετρώματος.....	44
4.1.2	Δυναμικότητα και διαστάσεις θαλάμων	49
4.1.2.1	Πλοία μεταφοράς LNG	49
4.1.2.2	Τερματικός σταθμός Ρεβουθούσας.....	51
4.1.2.3	Εγκαταστάσεις αποθήκευσης στη Σουηδία	53
4.1.2.4	Καθορισμός δυναμικότητας και διαστάσεων σχεδιαζόμενου χώρου	54

4.1.3 Επιλογή μέτρων υποστήριξης	55
4.2 Προσομοίωση και δοκιμές.....	57
4.2.1 Στάδια προσομοίωσης.....	57
4.2.2 Δοκιμές σε GSI, UCS και απόσταση μεταξύ θαλάμων	58
4.2.3 Δοκιμές με δίκτυα ασυνεχειών	87
4.2.4 Συμπεράσματα	96
5. Κοστολόγηση.....	97
5.1 Στοιχεία διάνοιξης.....	97
5.2 Ανάλυση στοιχείων διάνοιξης των επιμέρους τμημάτων	98
5.2.1 Παραδοχές.....	98
5.2.1.1 Διάτρηση.....	98
5.2.1.2 Γόμωση	100
5.2.1.3 Φόρτωση – Μεταφορά.....	100
5.2.1.4 Υποστήριξη.....	101
5.2.2 Σήραγγα προσπέλασης.....	101
5.2.3 Σήραγγα προπορείας.....	101
5.2.4 Ακραία τμήματα άνω διατομής (τμήματα 2 και 3)	102
5.2.5 1 ^η Βαθμίδα (τμήμα 4).....	102
5.2.6. 2 ^η Βαθμίδα (τμήμα 5).....	102
5.3 Κατασκευή χρονοδιαγραμμάτων εργασιών των επιμέρους τμημάτων.....	103
5.3.1 Παραδοχές.....	103
5.3.2 Σήραγγα προσπέλασης.....	103
5.3.3 Σήραγγα προπορείας.....	105
5.3.4 Ακραία τμήματα άνω διατομής (τμήματα 2 και 3)	106
5.3.5 1 ^η Βαθμίδα (τμήμα 4).....	108
5.3.6 2 ^η Βαθμίδα (τμήμα 5).....	109

5.4 Ανάλυση κόστους των επιμέρους τμημάτων	111
5.4.1 Παραδοχές.....	111
5.4.2 Σήραγγα προσπέλασης.....	114
5.4.3 Σήραγγα προπορείας.....	116
5.4.4 Ακραία τμήματα άνω διατομής (τμήματα 2 και 3)	118
5.4.5 1 ^η Βαθμίδα (τμήμα 4).....	120
5.4.6 2 ^η Βαθμίδα (τμήμα 5).....	121
5.5 Συμπεράσματα	123
6. Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα – Περιορισμοί	125
Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	130

1. Εισαγωγή

Δεδομένων των συνθηκών που επικρατούν σε παγκόσμιο επίπεδο, η ενεργειακή κρίση αποτελεί φαινόμενο της σημερινής κοινωνίας και σημαντική παράμετρο για την μελλοντική εξέλιξη και ανάπτυξη της ανθρωπότητας. Ειδικότερα λόγω της ξαφνικής αύξησης των απαιτήσεων σε ενέργεια, κατά την επαναφορά της εύρυθμης λειτουργίας των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων με τη λήξη των περιορισμών που επέβαλε η πανδημία, η κρίση αυτή έγινε φανερά αισθητή. Λαμβάνοντας επίσης υπόψιν ότι μεγάλο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη προέρχεται από το φυσικό αέριο, το οποίο εισάγεται από χώρες εκτός Ευρωπαϊκής Ένωσης, το ζήτημα της ενεργειακής αυτονομίας και της ύπαρξης αποθεμάτων ενέργειας, απασχολεί όλο και περισσότερο. Στοχεύοντας παράλληλα στη μετάβαση προς πιο καθαρές μορφές ενέργειας με μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, από τις ήδη υπάρχουσες, το φυσικό αέριο κατέχει ενεργό ρόλο στη διαδικασία (Chadwick, 2022).

Η αποθήκευση ενέργειας λοιπόν αποτελεί ανάγκη στις σύγχρονες κοινωνίες προσφέροντας τόσο περιβαλλοντικά όσο και οικονομικά πλεονεκτήματα. Αγοράζοντας και αποθηκεύοντας ενέργεια σε περιόδους μειωμένης ζήτησης, με σκοπό να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά συντελεί ώστε η διαδικασία να πραγματοποιηθεί με οικονομικότερους όρους. Αντίστοιχα η αποθηκευμένη ενέργεια παρέχει τη δυνατότητα τροφοδοσίας του υπάρχοντος συστήματος ηλεκτροδότησης σε περιπτώσεις διατάραξης της λειτουργίας του, συμβάλλοντας στην άμεση αποκατάστασή του. Παράλληλα συντελεί ενεργά στην μείωση των εκπομπών των επιβλαβών για την ατμόσφαιρα αερίων. Συνεπώς στοχεύοντας στη δημιουργία χώρων ικανών να αποθηκεύσουν σημαντικά ποσά ενέργειας, η υπόγεια κατασκευή τους αποτελεί ελκυστική λύση με σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με την επιφανειακή.

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο την περιγραφή και ανάλυση μεθόδων υπόγειας αποθήκευσης ενέργειας σε διάφορες μορφές. Μεγαλύτερη έμφαση βέβαια δίνεται στην αποθήκευση υγροποιημένου φυσικού αερίου, καθώς η μεταφορά και αποθήκευσή του σε αυτή τη μορφή αποτελεί ιδιαίτερα επίκαιρη τεχνική που παρουσιάζει προκλήσεις και σημαντικές προοπτικές. Τέλος στα πλαίσια της εργασίας πραγματοποιήθηκε ολοκληρωμένος σχεδιασμός ενός υπόγειου χώρου αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) και δόθηκαν οικονομικά στοιχεία για την κατασκευή του.

2. Υπόγεια αποθήκευση ενέργειας

Η ιδέα της υπόγειας αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή υδρογονανθράκων προήλθε λόγω της ανάγκης προστασίας τους κατά την περίοδο του 1^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου. Βέβαια η ευρεία χρήση των υπόγειων θαλάμων ως αποθηκευτικοί χώροι πετρελαίου και των παραπροϊόντων του ξεκίνησε κατά κύριο λόγο το 1950, καθώς μέχρι τότε δεν είχαν αναπτυχθεί οι κατάλληλες τεχνικές για την συγκράτηση των υγρών καυσίμων μέσα στον υπόγειο θάλαμο, χωρίς την ύπαρξη προστατευτικής στρώσης υπό τη μορφή τελικής επένδυσης. Όπως είναι φυσικό από τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο και έπειτα ξεκίνησε η κατασκευή υπογείων ανοιγμάτων ως αποθηκευτικοί χώροι, κατά κύριο λόγο σε Σκανδιναβικές χώρες και στις ΗΠΑ. Γενικά οι υπόγειοι θάλαμοι αποθήκευσης υδρογονανθράκων χωρίς τελική επένδυση βασίζουν την ομαλή λειτουργία τους στην ύπαρξη υπόγειων νερών που ρέουν διαμέσου των ασυνεχειών και ρωγμών του πετρώματος ασκώντας σταθερή πίεση περιμετρικά του ανοίγματος. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ασφαλής αποθήκευση χωρίς διαρροές. Κατά την αποθήκευση φυσικού αερίου όμως απαιτείται υπόγειο άνοιγμα με αντοχές είτε σε υψηλές πιέσεις είτε σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπως στην περίπτωση του υδροποιημένου φυσικού αερίου, γεγονός που επιβάλλει διαφορετική κατασκευαστική προσέγγιση. Αντίστοιχα η μετάβαση προς καθαρότερες μορφές ενέργειας με την αποθήκευση υδρογόνου ή θερμικής ενέργειας απαιτεί και αυτή την κατάλληλη προσαρμογή των τεχνικών υπόγειας αποθήκευσής τους (Lindblom, 1994).

2.1 Πλεονεκτήματα υπόγειας αποθήκευσης ενέργειας

Η υπόγεια αποθήκευση σε θαλάμους αποτελεί μέθοδο που μπορεί να χαρακτηριστεί ως ασφαλέστερη και περιβαλλοντικά ευνοϊκότερη κατά τη σύγκρισή της με την αποθήκευση σε επιφανειακές ή υπόγειες δεξαμενές. Η παρατήρηση αυτή προκύπτει μετά την εξέταση σειράς παραγόντων, όπως αναλύονται στη συνέχεια.

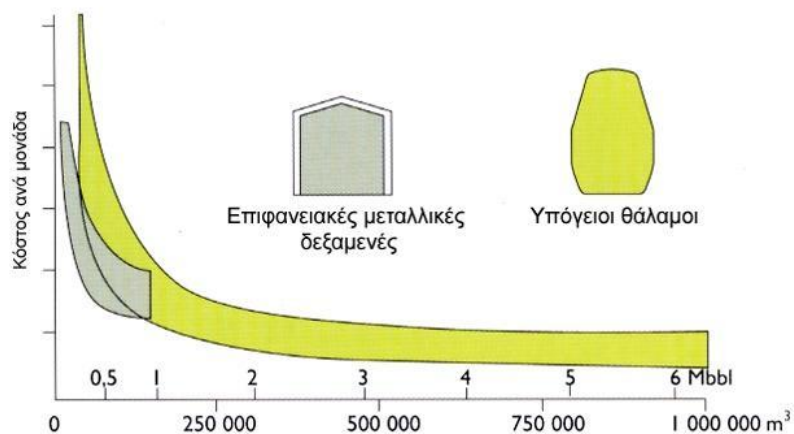
Συγκεκριμένα βασικό χαρακτηριστικό των υπόγειων χώρων αποθήκευσης ενέργειας αποτελεί το γεγονός ότι ο απαιτούμενος επιφανειακά χώρος, που αντιστοιχεί στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης, είναι σημαντικά μικρότερος και σχεδόν αμελητέος σε σχέση με τον χώρο που

αναλογεί σε επιφανειακές ή ημι-υπόγειες δομές αποθήκευσης. Μάλιστα κατά την επιφανειακή αποθήκευση παρατηρείται ότι ο χώρος που καταλαμβάνουν οι εγκαταστάσεις υπερβαίνει κατά πολύ τον αποθηκευτικό χώρο, γεγονός που πιθανόν περιορίζει την κατασκευή σε περιοχές μακριά από αστικά κέντρα, λόγω της μειωμένης ύπαρξης ελεύθερων επιφανειών σε αυτά. Τα παραπάνω μπορούν να επαληθευτούν με τη βοήθεια της εικόνας 2.1 στην οποία φαίνεται με χρωματική αντίθεση ο αποθηκευτικός χώρος και ο χώρος των επιφανειακών εγκαταστάσεων που απαιτούν οι διαφορετικοί τρόποι αποθήκευσης (Park et al., 2012).

Παράλληλα η εξέλιξη της τεχνολογίας στο κομμάτι της εξορυκτικής διαδικασίας έχει συμβάλει έτσι ώστε να μην υπάρχουν περιορισμοί στο μέγεθος και συνεπώς στη δυναμικότητα των υπόγειων ανοιγμάτων που κατασκευάζονται. Βέβαια συνήθως αποφεύγεται ο σχεδιασμός μικρών θαλάμων εφόσον αυτό είναι εφικτό, καθώς οδηγεί σε μη ευνοϊκό λόγο αποθηκευτικής ικανότητας προς συνολική επιφάνεια. Εντούτοις για εγκαταστάσεις αποθήκευσης υγρών υδρογονανθράκων δυναμικότητας κυμαινόμενης άνω των 100-150,000 m³, το κόστος κατασκευής υπόγειων θαλάμων είναι πολύ πιο οικονομικό σε σχέση με τις αντίστοιχες επιφανειακές δομές (Μπενάρδος και Καλιαμπάκος, 2010). Τα παραπάνω γίνονται περαιτέρω κατανοητά μέσω της εικόνας 2.2 στην οποία καταγράφεται το κόστος ανά μονάδα αποθηκευμένων υδρογονανθράκων ανάλογα τη δυναμικότητα για επιφανειακές και υπόγειες εγκαταστάσεις.



Εικόνα 2.1: Απαιτούμενη επιφάνεια για αποθηκευτικό χώρο 320,000m³ (πορτοκαλί χρώμα: αποθηκευτικός χώρος, μωβ χρώμα: απαιτούμενος επιφανειακός χώρος) (Park et al., 2012)



Εικόνα 2.2: Διάγραμμα κόστους επιφανειακής - υπόγειας αποθήκευσης υδρογονανθράκων (Froise, 1987)

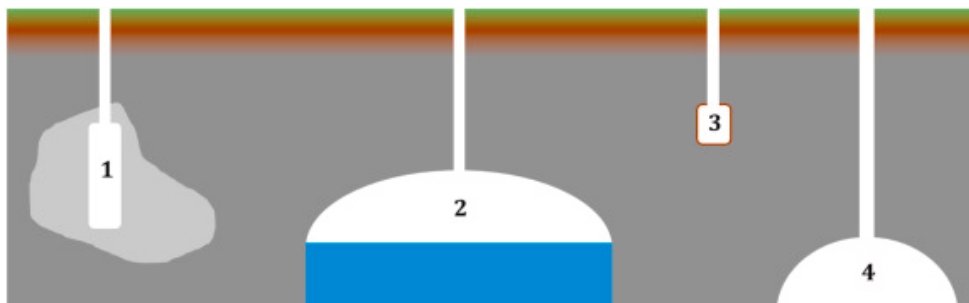
Εκτός από τους παράγοντες που προαναφέρθηκαν, η υπόγεια αποθήκευση ενέργειας υπερτερεί της επιφανειακής σε θέματα κόστους, καθώς παρουσιάζει χαμηλότερες απαιτήσεις κατά την εγκατάσταση συστημάτων ασφαλείας, όπως είναι οι τοίχοι περίφραξης και τα συστήματα αυτόματης πυρόσβεσης. Επίσης το κόστος λειτουργίας και συντήρησής τους είναι πολύ πιο χαμηλό και μάλιστα σύμφωνα με μελέτες που διεξήχθησαν στην Κορέα, το κόστος λειτουργίας υπόγειου χώρου αποθήκευσης πετρελαιοειδών είναι κατά 63% μικρότερο από αυτό των επιφανειακών μονάδων (Park et al., 2012).

Αντίστοιχα ένα ακόμα πλεονέκτημα των υπογείων χώρων αποθήκευσης αποτελεί η περιβαλλοντική προστασία που παρέχουν, καθώς χαρακτηρίζονται από μειωμένα φαινόμενα διαρροών, οσμών και εκρήξεων και προσφέρουν χαμηλή οπτική ρύπανση. Τέλος αποθηκεύοντας ενέργεια υπόγεια, οποιαδήποτε χώρα έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει αποθέματα που επιτρέπουν την τροφοδοσία της σε περιόδους οικονομικής και γεωπολιτικής κρίσης (Μπενάρδος και Καλιαμπάκος, 2010).

2.2 Τύποι υπόγειας αποθήκευσης ενέργειας

Διάφοροι υπόγειοι σχηματισμοί έχουν αξιοποιηθεί ανά τα χρόνια για την αποθήκευση ενέργειας κυρίως υπό τη μορφή του φυσικού αερίου. Κρίσιμη παράμετρο για την προτίμησή τους αποτελεί ο μεγάλος όγκος τους και κατά συνέπεια η αυξημένου μεγέθους αποθηκευτική ικανότητα που επιτυγχάνουν. Οι υπόγειες αυτές δομές δύναται μάλιστα να προσαρμοστούν, με σκοπό την αποθήκευση άλλων μορφών ενέργειας, όπως θα αναφερθούν σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας. Συνεπώς μερικές από τις υπόγειες δομές όπως φαίνονται και στις εικόνες 2.3, 2.4 είναι οι εξής:

- Κοιλότητες ορυκτού άλατος
- Υδροφορείς
- Εξαντλημένα κοιτάσματα φυσικού αερίου και πετρελαίου
- Ορυχεία
- Τεχνητοί υπόγειοι θάλαμοι



Εικόνα 2.3: Τύποι υπόγειας αποθήκευσης ενέργειας - (1) Κοιλότητα ορυκτού άλατος (2) Υδροφορέας (3) Τεχνητός υπόγειος θάλαμος (4) Εξαντλημένο κοιτάσμα φυσικού αερίου (King et al., 2021)



Εικόνα 2.4: Πιθανοί υπόγειοι αποθηκευτικοί χώροι (Matos et al., 2019)

2.2.1 Κοιλότητες ορυκτού άλατος

Οι κοιλότητες ορυκτού άλατος αποτελούν δομές το πάχος των οποίων φτάνει μέχρι και τα μερικά χιλιόμετρα, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα κατασκευής θαλάμων μεγάλου όγκου σε αρκετά μεγάλο βάθος (King et al., 2021). Οι δόμοι άλατος χαρακτηρίζονται από υψηλές αντοχές, χαμηλή διαπερατότητα και πορώδες (Liu et al., 2013), όπως επίσης και ομοιογένεια ιδιοτήτων συγκριτικά με άλλους τύπους πετρωμάτων. Παράλληλα διαθέτουν ικανότητες «αυτο-αποκατάστασης», σφραγίζοντας ρωγμές και ασυνέχειες, εμποδίζοντας την περαιτέρω εξάπλωσή τους. Κατά συνέπεια αποτελούν σχηματισμούς που δύναται να παραμείνουν σταθεροί για μεγάλα χρονικά διαστήματα και να αντισταθούν στις πιέσεις που δημιουργεί η διαδικασία της κατασκευής θαλάμων αποθήκευσης (King et al., 2021). Η εξαγωγή και εισαγωγή της αποθηκευόμενης ενέργειας από και προς τις κοιλότητες ορυκτού άλατος πραγματοποιείται γρήγορα και υπό την επίδραση ιδιαίτερα υψηλών πιέσεων, χαρακτηριστικό που καθιστά τη μέθοδο εφαρμόσιμη σε περιπτώσεις που χρήζουν άμεσης τροφοδότησης ηλεκτρικής ενέργειας. Μάλιστα η τεχνική έχει τη δυνατότητα 6 έως 12 κύκλων λειτουργίας το χρόνο. Τέλος οι εγκαταστάσεις ενός τέτοιου συστήματος μπορούν να σχεδιαστούν κοντά σε αστικά κέντρα προσφέροντας οικονομικότερη τροφοδοσία ενέργειας (Yang et al., 2015).

Για την κατασκευή των θαλάμων προηγείται έρευνα συνήθως περιορισμένης έκτασης, λόγω της ύπαρξης δεδομένων από προηγούμενες μελέτες που εκπονήθηκαν με την προοπτική της ανεύρεσης υδρογονανθράκων, γεγονός με ευνοϊκή επίδραση στο κόστος. Στη συνέχεια απαιτείται εξόρυξη του περιεχόμενου στην κοιλότητα άλατος, διαδικασία που βασίζεται στην εισπίεση νερού, πριν την εισαγωγή του υγρού ή αερίου προϊόντος στον θάλαμο (King et al., 2021).

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία τις τελευταίες δεκαετίες έχει κατασκευαστεί πλήθος θαλάμων σε κοιλότητες ορυκτού άλατος για την αποθήκευση υδρογονανθράκων. Βέβαια παρά τα πλεονεκτήματά τους, έχουν παρατηρηθεί αρκετά φαινόμενα διαρροών ή αστοχίας των θαλάμων με σημαντικές επιπτώσεις στον περιβάλλοντα χώρο (Liu et al., 2013) και η κατασκευή τους είναι σχετικά δυσχερής τόσο χρονικά όσο και οικονομικά.

2.2.2 Υδροφορείς

Η αποθήκευση φυσικού αερίου σε υδροφορείς και πορώδεις σχηματισμούς αποτελεί ευρέως διαδεδομένη τεχνική, που χρησιμοποιείται σε ποσοστό 13% παγκοσμίως. Για τη δημιουργία χώρου αποθήκευσης ενέργειας εντός υδροφορέα, πραγματοποιείται εισαγωγή αερίου υπό πίεση στο εσωτερικό του περατού πετρώματος, με συνέπεια την εκτόπιση του υπάρχοντος σε αυτό νερού και την τελική διαμόρφωση του επιθυμητού τεχνητού πεδίου. Φυσικά είναι απαραίτητη η ύπαρξη κατάλληλου γεωλογικού υποβάθρου στην περιοχή, ώστε η δημιουργούμενη δομή να μην επιτρέπει διαρροές. Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι οι ελλιπείς πληροφορίες που υπάρχουν αναφορικά με τα χαρακτηριστικά των υδροφορέων, με αποτέλεσμα το αυξημένο κόστος της, ειδικά σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές. Επίσης η εισαγωγή αέρα στο πέτρωμα ενέχει τον κίνδυνο της αλλοίωσης και διατάραξης των χαρακτηριστικών του (King et al., 2021).

2.2.3 Εξαντλημένα κοιτάσματα φυσικού αερίου και πετρελαίου

Η αποθήκευση αερίου σε εξαντλημένα κοιτάσματα φυσικού αερίου ή πετρελαίου αποτελεί ιδιαίτερα γνωστή και εφαρμόσιμη μέθοδο. Τα χαρακτηριστικά των σχηματισμών αυτών είναι συμβατά με τις απαιτήσεις, όσον αφορά στο πορώδες και στη διαπερατότητα, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η γεωλογική τους δομή να είναι ήδη γνωστή, από τις περιόδους εξαγωγής των κοιτασμάτων. Συνεπώς η χρήση τους ως αποθήκες ενέργειας αποτελεί αρκετά ελκυστική λύση στην Ευρώπη (King et al., 2021).

2.2.4 Ορυχεία

Η χρήση εγκαταλελειμμένων ορυχείων για την αποθήκευση φυσικού αερίου αποτελεί και αυτή μια πολλά υποσχόμενη τεχνική. Πιο συγκεκριμένα τα λιγνιτωρυχεία συνήθως καταλαμβάνουν τεράστιες εξορυγμένες εκτάσεις, γεγονός που μπορεί να συμβάλει στη μείωση σε σημαντικό βαθμό του αρχικού κεφαλαίου επένδυσης για τη δημιουργία του χώρου αποθήκευσης. Παράλληλα τα περισσότερα λιγνιτωρυχεία βρίσκονται κοντά σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας,

οι υποδομές των οποίων δύναται να αξιοποιηθούν κατά την εγκατάσταση του νέου χώρου αποθήκευσης (King et al., 2021). Εγκαταλελειμμένα ορυχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για αποθήκευση θερμικής ενέργειας και μάλιστα υπάρχουν ήδη, τόσο στην Ευρώπη όσο και στις Η.Π.Α. (Gombert et al., 2019).

2.2.5 Τεχνητοί υπόγειοι θάλαμοι

Οι πρώτοι τεχνητοί υπόγειοι θάλαμοι αποθήκευσης σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν στις ΗΠΑ το 1950. Λόγω των περιορισμένων γνώσεων που υπήρχαν πάνω στο αντικείμενο των υπογείων έργων η δημιουργία τους βασίστηκε σε μεταλλευτικές μεθόδους, όπως οι θάλαμοι και στύλοι και τα ανοίγματα που προέκυπταν ήταν μικρού όγκου. Με το πέρασ των χρόνων και την εξέλιξη της τεχνολογίας οι θάλαμοι αυξήθηκαν σε ύψος και πλάτος δίνοντας ικανοποιητικούς βαθμούς απόληψης. Παρά αυτή την αναβάθμιση η μέθοδος τελικά έπαψε να χρησιμοποιείται, καθώς ήταν ιδιαίτερα περιοριστική και τη θέση της πήρε η εκσκαφή μεγάλων υπόγειων ανοιγμάτων. Οι ήδη υπάρχοντες χώροι θαλάμων και στύλων επανασχεδιάστηκαν, ώστε να αποθηκεύουν υδρογονάνθρακες και υγρά ή αέρια πετρελαιοειδή υπό πίεση. Κρίσιμος συντελεστής στην προσπάθεια αυτή αποτέλεσε η χαμηλή διαπερατότητα του πετρώματος στο οποίο είχε γίνει εκσκαφή (Vaskou, 2018).

Αναλυτικότερα η αποθήκευση σε τεχνητούς υπόγειους θαλάμους συνίσταται στην δημιουργία ανοιγμάτων καθορισμένης γεωμετρίας που καταλαμβάνουν αρκετά μεγάλη επιφάνεια σε πυριγενή και μεταμορφωμένα κυρίως πετρώματα, ελάχιστα έως καθόλου διαταραγμένα. Το αποθηκευόμενο σε αυτά προϊόν μπορεί να καταλαμβάνει έως και ολόκληρο τον όγκο του θαλάμου. Η μέθοδος είναι κυρίως εφαρμόσιμη σε περιπτώσεις πετρωμάτων μικρού πορώδους και χαμηλής διαπερατότητας, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες διαρροής του αποθηκευόμενου προϊόντος. Μάλιστα η συγκράτηση και αποθήκευση σε μεγαλύτερες πιέσεις μέσα στον θάλαμο δύναται να βεβαιωθεί περαιτέρω με την τοποθέτηση τελικής επένδυσης (Matos et al., 2019).

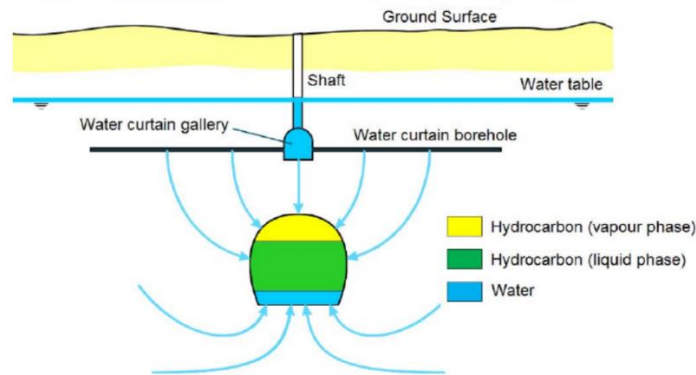


Εικόνα 2.5: Υπόγειο άνοιγμα με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων (αριστερά), Σύγχρονοι υπόγειοι θάλαμοι (δεξιά) (Vaskou, 2018)

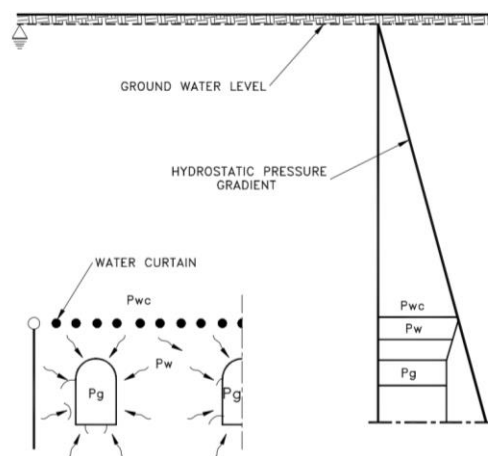
2.2.5.1 Μέθοδος υδροδυναμικού φραγμού

Η μέθοδος του υδροδυναμικού φραγμού αποτέλεσε επαναστατική εξέλιξη στο σχεδιασμό των υπόγειων τεχνητών θαλάμων αποθήκευσης, καθιστώντας τον ευκολότερα προσαρμόσιμο ακόμα και σε δυσμενείς γεωλογικές συνθήκες. Συνεπώς η τεχνική της υπόγειας αποθήκευσης σε θαλάμους απέκτησε ισχύ ακόμη και σε περιπτώσεις αδυναμίας χρήσης των κοιλοτήτων ορυκτού άλατος ή των υδροφόρων οριζόντων ως υπόγεια αποθηκευτικά μέσα. Πιο συγκεκριμένα οι υγροί και υγροποιημένοι υδρογονάνθρακες, κατά την αποθήκευσή τους μέσα σε κλειστό μέσο, διαθέτουν αέρια φάση, η οποία καταλαμβάνει το ανώτερο τμήμα του χώρου λόγω μειωμένου βάρους. Η πίεση υπό την οποία συγκρατείται η φάση αυτή, εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον τύπο του υδρογονάνθρακα και δευτερευόντως από τη θερμοκρασία και διατηρείται σταθερή ανεξάρτητα του όγκου του υγρού υδρογονάνθρακα. Το φαινόμενο λοιπόν του υδροδυναμικού φραγμού ουσιαστικά βασίζεται στην αρχή ότι η αέρια φάση του αποθηκευμένου προϊόντος διαθέτει χαμηλότερες τιμές ειδικού βάρους και πίεσης από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, με συνέπεια η αδιάκοπη ροή νερού προς τον θάλαμο να εμποδίζει τη διαφυγή του. Το νερό που τελικά εισρέει στον θάλαμο, συλλέγεται στο κατώτερο μέρος του, αντλείται και απομακρύνεται. Καθώς η φάση της κατασκευής ενέχει τον κίνδυνο πτώσης της στάθμης του φυσικού υδροφόρου ορίζοντα

έως και το βάθος του θαλάμου, λόγω των εκσκαφών που πραγματοποιούνται υπό ατμοσφαιρική πίεση, η σταθερή παροχή νερού διασφαλίζεται με εγκατάσταση τεχνητού υδροφόρου ορίζοντα. Αναλυτικότερα, δημιουργείται δίκτυο οριζόντια διατεταγμένων γεωτρήσεων πάνω από τους θαλάμους, οι οποίες τροφοδοτούν νερό υπό πίεση στο υπέδαφος. Μετά το πέρας της εκσκαφής, επιλέγεται εάν ο χώρος θα λειτουργεί με διαρκή παροχή νερού, όπου πλημμυρίζει με αυτό όταν είναι άδειος, ή χωρίς τη διαρκή παροχή νερού σε αυτόν, όπου γεμίζει με καύσιμο και απομακρύνεται το νερό (Vaskou, 2018). Η μέθοδος έχει περιορισμένης έκτασης εφαρμογές, και κατά την αποθήκευση μικρών ποσοτήτων αέριων προϊόντων. Η μεγαλύτερης κλίμακας αποθήκευση είναι οικονομικά ασύμφορη, καθώς η ύπαρξη της απαιτούμενης υψηλής πίεσης αποθήκευσης επιτυγχάνεται μόνο με την όρυξη θαλάμων σε ιδιαίτερα μεγάλο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους (Sofregaz US Inc. and LRC, 1999).



Εικόνα 2.6: Λειτουργία τεχνητού υδροφόρου ορίζοντα σε υπόγειο θάλαμο (Vaskou, 2018)



Εικόνα 2.7: Αποθήκευση σε θάλαμο χωρίς τελική επένδυση με υδροδυναμικό φραγμό (Sofregaz US Inc. and LRC, 1999)

2.2.5.2 Μέθοδος LRC

Η τεχνολογία της μεθόδου LRC (Lined Rock Caverns) αναπτύχθηκε με σκοπό να καλύψει τις ανάγκες για υπόγεια αποθήκευση ενέργειας σε περιοχές που δεν διαθέτουν το απαραίτητο γεωλογικό υπόβαθρο για την κατασκευή τεχνητών θαλάμων αποθήκευσης με τις συμβατικές μεθόδους. Η τεχνική πρακτικά στηρίζεται στην τοποθέτηση στρώσης σκυροδέματος και λεπτής μεμβράνης. Το σκυρόδεμα συμβάλει στη μεταφορά των φορτίων και πιέσεων από το αποθηκευόμενο προϊόν, στην περιβάλλουσα από το άνοιγμα βραχομάζα. Παράλληλα δρα και ως λεία βάση πάνω στην οποία δύναται μετέπειτα να τοποθετηθεί η μεμβράνη, σχεδιασμένη ώστε να παρέχει αεροστεγείς ιδιότητες στον θάλαμο.

Ο οπλισμός του τοποθετούμενου σκυροδέματος εξαρτάται από τον τύπο του και τις γεωλογικές συνθήκες. Η ανάγκη για οπλισμό προφανώς μειώνεται όσο καλύτερης ποιότητας και υψηλότερης αντοχής είναι το πέτρωμα. Βέβαια σε περίπτωση ύπαρξης λίγων σε αριθμό αλλά μεγάλου μεγέθους ασυνεχειών ο οπλισμός πρέπει να είναι ισχυρός. Παράλληλα τα χαρακτηριστικά του οπλισμού συνδέονται άμεσα και με το πάχος της μεμβράνης, καθώς όσο πιο λεπτή είναι η μεμβράνη αυτή, τόσο μικρότερο είναι το πλάτος των ρωγμών που επιτρέπεται να δημιουργηθούν, χωρίς να προκαλέσουν ιδιαίτερη «ζημιά» στην κατασκευή.

Το υλικό κατασκευής της μεμβράνης πρέπει απαραίτητα να είναι αεροστεγές και χημικά ανενεργό κατά την επαφή του με το αποθηκευόμενο προϊόν, με τις ακαθαρσίες που πιθανώς αυτό περιέχει και με το γύρω περιβάλλον. Δεν είναι σχεδιασμένο ώστε να αναλαμβάνει φορτία, όμως είναι αναγκαίο να ανθίσταται στις επιβαλλόμενες, από την ελαστική και πλαστική παραμόρφωση των τοιχωμάτων, τάσεις. Ταυτόχρονα η αύξηση των πιέσεων μέσα στον θάλαμο προκαλεί ρωγμές στη βραχομάζα, οι οποίες με τη σειρά τους ευθύνονται για τη δημιουργία μικρότερων ρωγμών στο σκυρόδεμα. Συνεπώς η μεμβράνη είναι επιτακτικής σημασίας να αντέχει τις επιβαλλόμενες από τη διεύρυνση των ρωγμών τροπές. Το υλικό κατασκευής της εν λόγω μεμβράνης συντελεί τελικά στην ανθεκτικότητα και αντίσταση στις επαναλαμβανόμενες φορτίσεις που δέχεται ο θάλαμος και για την επιλογή του έχουν δοκιμαστεί πλαστικά υλικά και ατσάλι. Συγκεκριμένα μετά από εργαστηριακές δοκιμές σε υλικά όπως πολυουρεθάνη και πολυ-βινυλοχλωρίδια, τα δείγματα χαμηλής πυκνότητας εμφάνισαν καλύτερους δείκτες παραμόρφωσης από δείγματα υψηλής πυκνότητας. Παρότι όμως τα υλικά αυτά διαθέτουν αρκετή ευελιξία ώστε να μπορούν να

χρησιμοποιηθούν σε ανομοιόμορφες επιφάνειες, παρουσιάζουν αρκετές πιθανότητες να χάσουν την σκληρότητά τους κατά την επαφή με το φυσικό αέριο, σε περίπτωση φυσικά που αυτό αποτελεί το αποθηκευόμενο προϊόν στον θάλαμο. Αντίθετα υλικά όπως ο ανθρακούχος χάλυβας και ο ανοξείδωτος χάλυβας αποτελούν πιο υποσχόμενες επιλογές, με τον ανοξείδωτο χάλυβα να υπερτερεί του ανθρακούχου στην αντοχή σε διάβρωση (Sofregaz US Inc. and LRC, 1999).

2.3 Μορφές αποθηκευόμενης ενέργειας

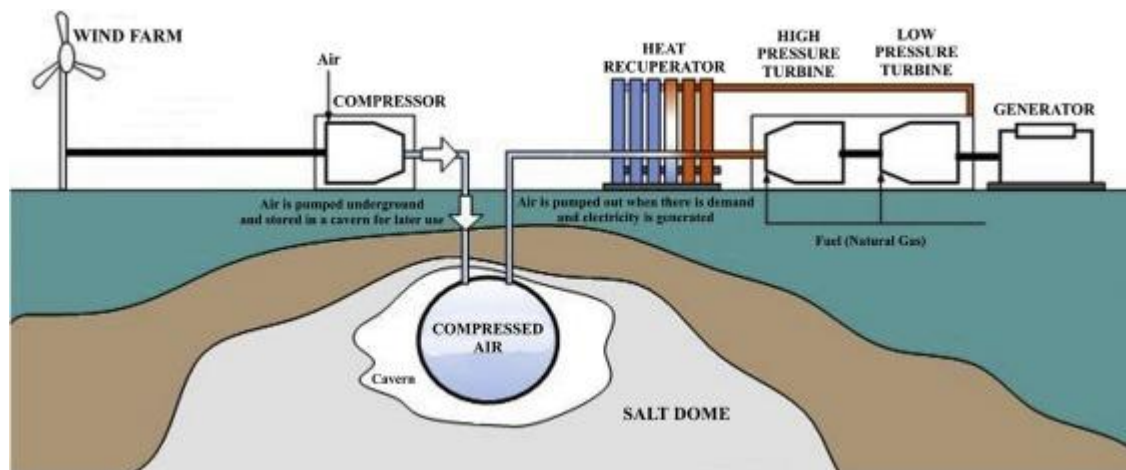
Παρότι ο όρος αποθήκευση ενέργειας είναι συνυφασμένος σε μεγάλο βαθμό με το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, μια ακόμα πτυχή του αποτελεί η μετατροπή της υπολειπόμενης, από μια πηγή, ηλεκτρικής ενέργειας στην κατάλληλη μορφή, ώστε να μπορεί να διατηρηθεί έως ότου απαιτηθεί η επανατροφοδότησή της στο σύστημα (Johnson, 2014), διαμορφώνοντας μια ισορροπία και διαχωρίζοντας τη χρονική στιγμή παραγωγής από τη χρονική στιγμή χρήσης.

Συγκεκριμένα παραδείγματα αυτής της τεχνολογίας αποτελούν η αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα και η αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Αντίστοιχα η ανάγκη προσανατολισμού προς καθαρότερες μορφές ενέργειας με μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, κατά τη χρήση τους σε σχέση με τα πετρελαιοειδή, έχει οδηγήσει στην χρήση υδρογόνου και κατά συνέπεια στην ανάγκη αποθήκευσής του. Είναι γεγονός ότι δεν έχει επικρατήσει ευρέως μια μοναδική μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας, καθώς η κάθε μια καλύπτει συγκεκριμένες ανάγκες της αγοράς και υπερτερεί σε δεδομένες συνθήκες. Συνεπώς ανάλογα την περίπτωση η τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από παράγοντες όπως το μέγεθος της αποθηκευτικής ικανότητας που απαιτείται, η αποτελεσματικότητά της, το κόστος και η σχέση αποθηκευόμενης ενέργειας με τον χώρο που αυτή καταλαμβάνει (Johnson, 2014).

2.3.1 Πεπιεσμένος αέρας

Ενέργεια προερχόμενη από ανανεώσιμες πηγές, όπως η ηλιακή και η αιολική, δεν είναι πάντα σταθερή με συνέπεια η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια να παρουσιάζει διακυμάνσεις. Με το γεγονός αυτό να επιδρά στο κόστος και στην κατασκευή μεγάλης κλίμακας έργων για την

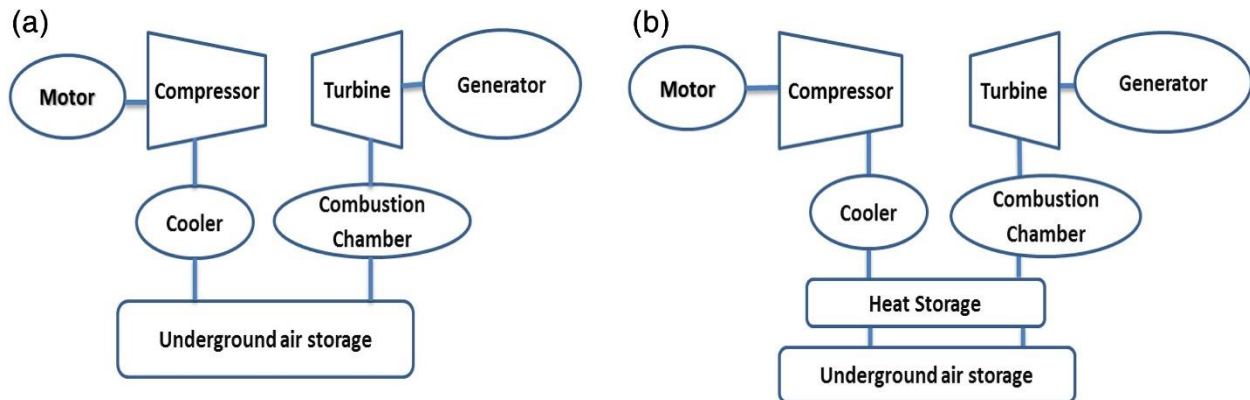
αξιοποίηση της ενέργειας αυτής, καινοτόμες λύσεις στην αποθήκευσή της στοχεύουν στην εξάλειψη αυτών των προκλήσεων. Έτσι η πλέον συνηθισμένη τεχνική αφορά στην υπόγεια αποθήκευση υπό τη μορφή πεπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage - CAES). Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα και απαιτούν μικρό χρόνο εκκίνησης.



Εικόνα 2.8: Σύστημα αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα (Matos et al., 2019)

Αναλυτικότερα μια μονάδα αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα αποτελείται από συμπιεστές, υπόγειους θαλάμους συγκράτησης του αέρα, τουρμπίνες, συστήματα καύσης και εναλλάκτες θερμότητας. Η λειτουργία του μηχανισμού βασίζεται στη συμπίεση και την εκτόνωση αέρα. Κατά τη φάση της «φόρτισης» η παραγόμενη από ανανεώσιμες πηγές ηλεκτρική ενέργεια θέτει σε λειτουργία τις τουρμπίνες οι οποίες διοχετεύουν τον αέρα διαμέσου μιας σειράς συμπιεστών μέχρι τελικά να φτάσει στον υπόγειο θάλαμο. Στη διαδικασία παρεμβάλλεται η ψύξη του αέρα μετά την συμπίεσή του, καθώς το φαινόμενο αυξάνει τη θερμοκρασία του αισθητά. Αντίθετα κατά την «αποφόρτιση» ο αέρας υπό πίεση που περιέχεται στον υπόγειο θάλαμο, ωθείται προς την επιφάνεια και θέτει σε λειτουργία τις τουρμπίνες, άρα και τις γεννήτριες που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Η τεχνολογία αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα χωρίζεται σε δύο τύπους. Ο πρώτος δεν συμπεριλαμβάνει την αποθήκευση της υπερβάλλουσας θερμικής ενέργειας κατά τη λειτουργία του, η οποία θα μπορούσε να προθερμάνει τον αέρα κατά την εκτόνωσή του. Αντί αυτού χρησιμοποιείται φυσικό αέριο με συνέπεια την μειωμένη απόδοση του μηχανισμού. Αντίθετα ο

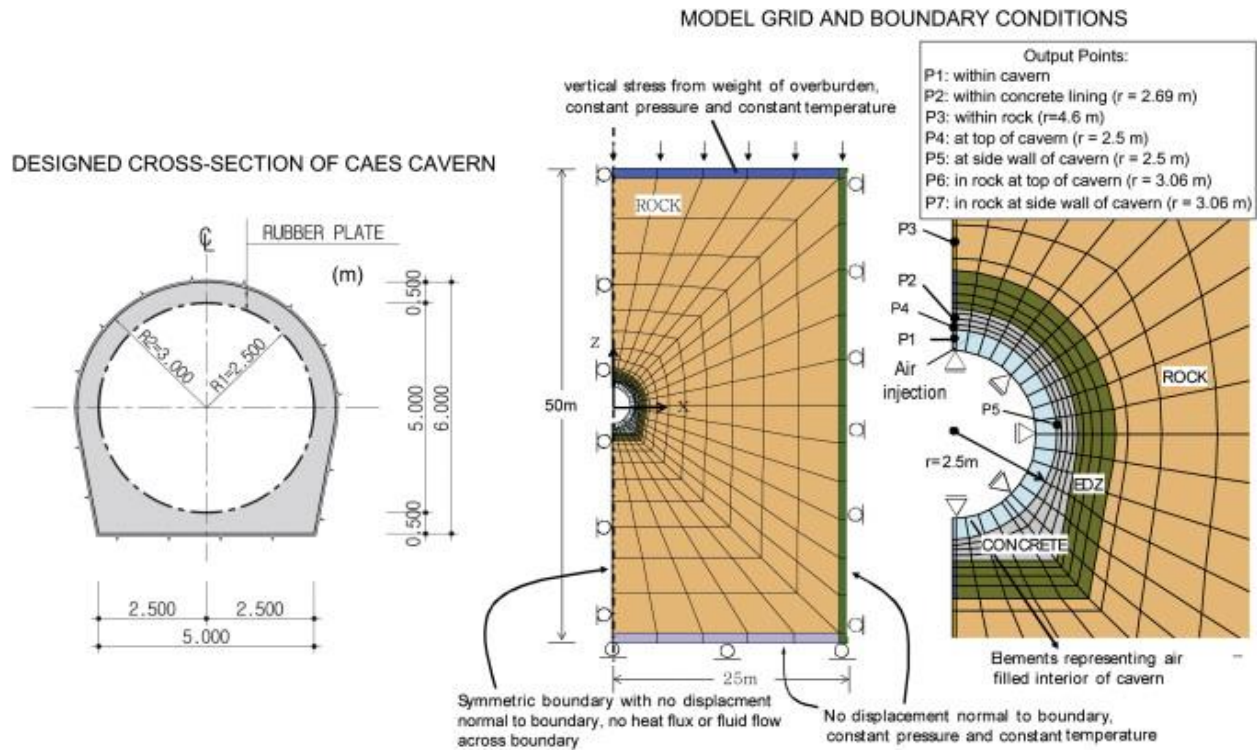
δεύτερος τύπος διαθέτει ξεχωριστό χώρο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, την οποία και χρησιμοποιεί για τη θέρμανση του αέρα κατά την «αποφόρτιση» του συστήματος, μειώνοντας έτσι την ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία του μηχανισμού (Ramadan et al., 2016).



Εικόνα 2.9: (a) Μηχανισμός χωρίς αποθήκευση θερμικής ενέργειας (b) Μηχανισμός με αποθήκευση ενέργειας (Ramadan et al., 2016)

Για την κατασκευή τέτοιου είδους συστημάτων είναι απαραίτητη η ύπαρξη αποθηκευτικών χώρων μεγάλου όγκου, οπότε οι υπόγειοι θάλαμοι αποτελούν τη βέλτιστη και πιο συνηθισμένη επιλογή. Εξαιρώντας το γεγονός ότι οι αντίστοιχοι επιφανειακοί χώροι δεν διαθέτουν την απαιτούμενη αποθηκευτική ικανότητα, οι υπόγειοι χώροι παρέχουν επίσης τη δυνατότητα αποθήκευσης σε απομονωμένο και ασφαλές περιβάλλον με χαμηλότερο κόστος.

Μια προσέγγιση στο κομμάτι της ανάπτυξης των υπόγειων αυτών χώρων αποτελεί η κατασκευή θαλάμων σε σκληρά πετρώματα με τελική επένδυση (Lined Rock Caverns – LRC), σύμφωνα με την οποία μετά την εκσκαφή μεγάλων υπόγειων ανοιγμάτων, ακολουθεί η τοποθέτηση τελικής επένδυσης από τσιμέντο, προς δημιουργία μιας μη περατής στρώσης (King et al., 2021). Μία διαφορετική μέθοδος προτείνει την τοποθέτηση μη περατής συνθετικής μεμβράνης στο εσωτερικό του θαλάμου, με σκοπό την αποφυγή οποιασδήποτε διαρροής αέρα από τον αποθηκευτικό χώρο. Παράλληλα μια μη περατή μεμβράνη προσφέρει μείωση των εφελκυστικών τάσεων και της πιθανότητας αστοχίας της τελικής επένδυσης (Rutqvist et al., 2012). Γενικά η τεχνική αποτελεί πολλά υποσχόμενη μέθοδο που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.



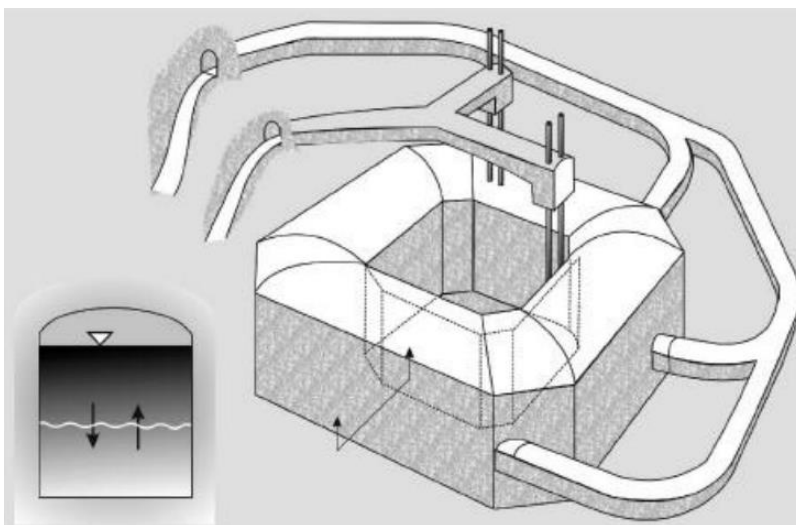
Εικόνα 2.10: Σχέδιο υπόγειου θαλάμου για αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα με επένδυση από σκυρόδεμα (Rutqvist et al., 2012)

2.3.2 Θερμική ενέργεια

Η υπόγεια αποθήκευση θερμικής ενέργειας αποτελεί εποχική μέθοδο με δυνατότητες συγκράτησης θερμότητας σε διάφορες θερμοκρασίες. Το υπέδαφος αποτελεί ιδανικό αποθηκευτικό μέσο, λόγω της θερμικής αδράνειας που παρουσιάζει από ένα βάθος και έπειτα. Τέτοια συστήματα έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης ηλιακής ή και αιολικής ενέργειας για μεγάλο χρονικό διάστημα, τροφοδοτώντας τη πίσω στο σύστημα σε περιόδους αυξημένης ζήτησης. Ένας από τους κύριους τύπους αποθήκευσης θερμικής ενέργειας αφορά στη χρήση υπόγειων τεχνητών θαλάμων ως δεξαμενές συγκράτησης νερού, με κύριο χαρακτηριστικό τους την ταχύτατη φόρτιση και αποφόρτιση που επιτυγχάνουν τροφοδοτώντας ή αντλώντας νερό αντίστοιχα (Matos et al., 2019). Παρότι η μέθοδος προσφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων τόσο περιβαλλοντικά, μειώνοντας τις εκπομπές βλαβερών αερίων στην ατμόσφαιρα και

εξοικονομώντας μεγάλα ποσοστά ενέργειας, όσο και οικονομικά, οι εφαρμογές της είναι ακόμα περιορισμένες, λόγω των ειδικών συνθηκών που απαιτεί η κατασκευή της (Lee, 2013).

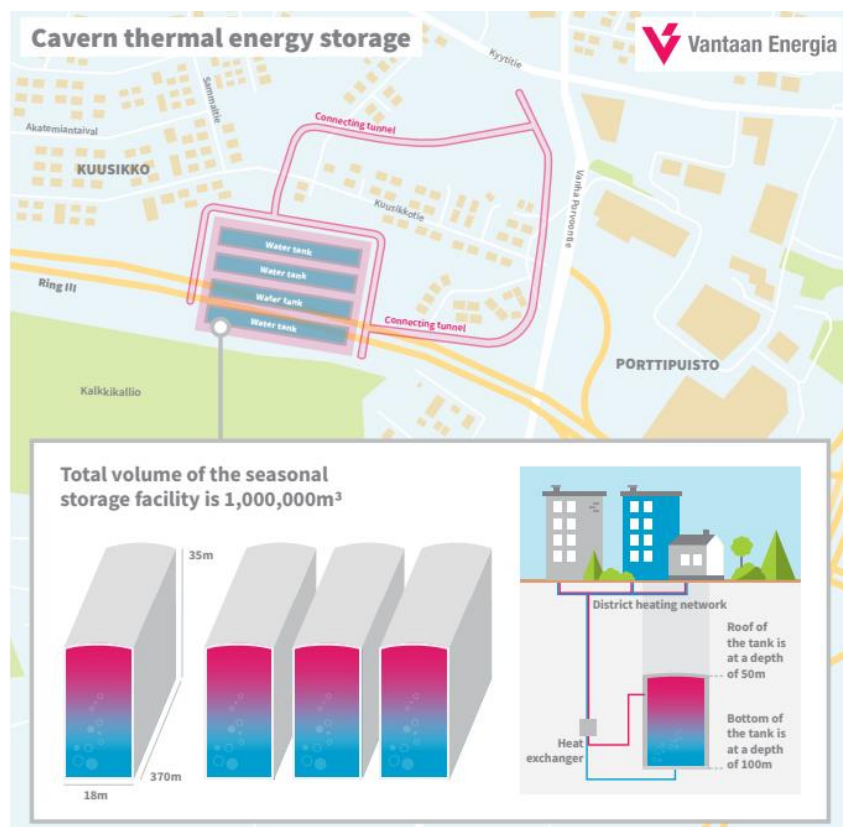
Με τη μέθοδο να παρουσιάζει μικρό αριθμό εφαρμογών στην Ευρώπη, όπως προαναφέρθηκε, χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης Lyckebo στη Σουηδία. Συγκεκριμένα πρόκειται για εκσκαφή όγκου 100,000 m³ σε σχήμα δακτυλίου, σχεδιασμένη ώστε να παρέχει θέρμανση και ζεστό νερό σε σπίτια, μέσω ηλιακών συλλεκτών επιφάνειας 4,320 m². Το νερό αποθηκεύεται σε θερμοκρασίες από 40 °C έως 90 °C και η εισαγωγή και άντλησή του πραγματοποιείται από ειδικούς σωλήνες. Παρότι στα αρχικά στάδια λειτουργίας του συστήματος παρατηρούνται υψηλές θερμικές απώλειες, με το πέρασ των χρόνων δημιουργείται μια ζώνη σταθερής θερμοκρασίας γύρω από το υπόγειο άνοιγμα, η οποία τις εμποδίζει (Nielsen, 2002).



Εικόνα 2.11: Εγκαταστάσεις αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στη Σουηδία (Nielsen, 2002)

Κρίσιμη παράμετρο για την κατασκευή υπόγειων θαλάμων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας αποτελεί η γεωλογία του υπεδάφους. Συγκεκριμένα βάσει τεχνικών απαιτήσεων η μέθοδος πρέπει να εφαρμόζεται σε σκληρό πέτρωμα με λίγες ασυνέχειες και ρωγμές, το οποίο έχει χαμηλό πορώδες και δεν είναι υδατοπερατό. Σε αντίθετη περίπτωση απαιτείται η λήψη μέτρων για την αντιμετώπιση των διαρροών και της ανάμειξης του αποθηκευμένου νερού με τον υδροφόρο ορίζοντα, όπως για παράδειγμα τοποθέτηση αδιάβροχων μεμβρανών στο εσωτερικό των θαλάμων και εισπίεση τσιμέντου γύρω από αυτούς (Park and Park, 2015).

Αντίστοιχο παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου αποτελούν και οι εγκαταστάσεις VECTES στη Σουηδία οι οποίες βρίσκονται υπό κατασκευή και αναμένεται να τεθούν σε λειτουργία τα επόμενα χρόνια. Οι υπεύθυνοι του έργου τονίζουν ότι θα αποτελέσει τον μεγαλύτερο υπόγειο χώρο αποθήκευσης ενέργειας παγκοσμίως με αυξημένες δυνατότητες ως προς τη θερμοκρασία του νερού που θα δέχεται συγκριτικά με τις υπάρχουσες δομές. Ειδικότερα οι εγκαταστάσεις θα βρίσκονται σε βάθος μεγαλύτερο των 60 μέτρων, οπότε η πίεση του υδροφόρου θα εξισορροπεί την πίεση στο εσωτερικό του θαλάμου και παράλληλα θα αποτρέπει την εξάτμιση του νερού σε υψηλές θερμοκρασίες. Συνεπώς το νερό θα αποθηκεύεται σε θερμοκρασία που θα φτάνει τους 140°C σε τέσσερις τεχνητούς θαλάμους δυναμικότητας περίπου 220,000 m³ ο κάθε ένας, αποθηκεύοντας έτσι συνολικά 90 GWh (ετήσια κατανάλωση θερμότητας 40,000 κατοίκων περίπου) (The VECTES seasonal heat storage facility, 2021).

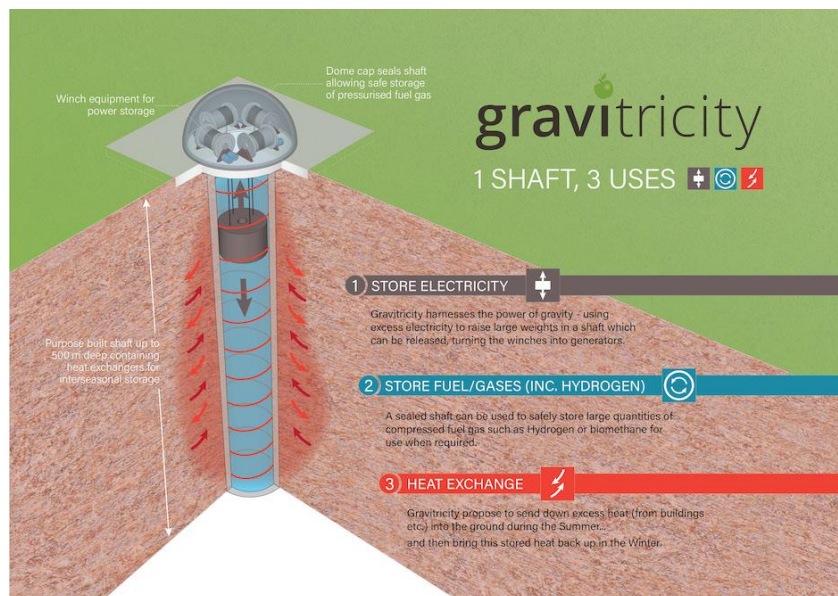


Εικόνα 2.12: Εγκαταστάσεις VECTES (The VECTES seasonal heat storage facility, 2021)

2.3.3 Υδρογόνο

Γενικά η υπόγεια αποθήκευση αερίων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε τεχνητούς θαλάμους που κατασκευάζονται σε αρκετά μεγάλο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους. Το αέριο που βρίσκεται αποθηκευμένο μέσα στον υπόγειο χώρο πρακτικά διαχωρίζεται στο αέριο που εισάγεται και εξάγεται από αυτόν και στο αέριο που παραμένει μόνιμα μέσα στον θάλαμο, καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας των εγκαταστάσεων, με σκοπό την παροχή της απαιτούμενης πίεσης προς αποφυγή πιθανής εισροής νερού στο εσωτερικό του. Με γνώμονα την μετάβαση προς καθαρότερες μορφές ενέργειας, η μέθοδος εφαρμόζεται κατά αντιστοιχία και στην αποθήκευση υδρογόνου προσφέροντας ασφάλεια, μιας και δεν υπάρχει επαφή με ατμοσφαιρικό οξυγόνο, οικονομία και εξοικονόμηση επιφανειακού χώρου (Tarkowski, 2019). Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί είτε ως αέριο υπό πίεση είτε ως υγρό σε θερμοκρασία 20K (≈ -253 °C). Βέβαια το κόστος αποθήκευσής του σε αέρια μορφή αποτελεί περίπου το 1/10 του κόστους αποθήκευσής του σε υγροποιημένη μορφή (Deveci, 2018). Έτσι η κατασκευή υπόγειων δομών βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη διεξαγωγή λεπτομερών γεωλογικών μελετών με κυριότερα κριτήρια το βάθος κατασκευής, το μέγεθος του θαλάμου, την ασκούμενη από το άνοιγμα πίεση, το πορώδες και γενικότερα τη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος. Ιδιαίτερη μέριμνα κατά το σχεδιασμό δίνεται στη στεγανότητα της γεωλογικής δομής. Καθώς το ενδιαφέρον για την υπόγεια αποθήκευση υδρογόνου αυξάνεται ραγδαία απαιτούνται αναλυτικότερες μελέτες αναφορικά με τη συμπεριφορά του σε τέτοιες συνθήκες, μιας και διαφοροποιείται από το φυσικό αέριο (Tarkowski, 2019).

Δεδομένης λοιπόν της όλο και αυξανόμενης ανάγκης για ασφαλή και οικονομική αποθήκευση του υδρογόνου μια νέα μέθοδος, βασισμένη σε σύστημα με πολλαπλά βάρη, σχεδιάζεται αυτή τη στιγμή. Ειδικότερα μέσω ανάρτησης του βάρους από ειδικά καλώδια στο εσωτερικό φρέατος παράγεται ή αποθηκεύεται ηλεκτρική ενέργεια απελευθερώνοντας ή ανυψώνοντάς το αντίστοιχα. Το σύστημα προτείνεται να κατασκευαστεί σε κοντινή απόσταση από εργοστάσιο ηλεκτρόλυσης υδρογόνου και θα έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει, τόσο την παραπάνω ηλεκτρική ενέργεια που αυτό χρησιμοποιεί, όσο και το παραγόμενο υδρογόνο (Bradshaw, 2021).



Εικόνα 2.13: Υπόγεια αποθήκευση υδρογόνου με βάρη (Bradshaw, 2021)

2.3.4 Φυσικό αέριο

Το φυσικό αέριο αποτελεί ένα από τα κυριότερα μέσα παραγωγής ενέργειας παγκοσμίως. Η αποθήκευσή του καθίσταται απαραίτητη για την εξισορρόπηση της τροφοδοσίας του δικτύου βάσει της ζήτησης και ανάλογα τις ανάγκες της εποχής (*Underground Natural Gas Storage*, n.d.). Εφόσον η υπόγεια αποθήκευση του φυσικού αερίου σε τεχνητούς θαλάμους αποτελεί μια από τις πιο αξιόπιστες και ελκυστικές λύσεις, η κατασκευή τους προτείνεται να γίνεται σε πετρώματα σχετικά υψηλής αντοχής με μειωμένες φυσικές ρωγμές (ασυνέχειες και ρήγματα), έτσι ώστε να εμποδίζεται η εισροή νερών στην εκσκαφή, κατά τη φάση της όρυξης. Η ταυτοποίηση των χαρακτηριστικών των ασυνεχειών του πετρώματος στο οποίο πραγματοποιείται η κατασκευή είναι κρίσιμη στην επίτευξη σταθερότητας. Σε περιπτώσεις υγροποιημένου φυσικού αερίου λόγω της υψηλής πίεσης που επικρατεί, προτείνεται τοποθέτηση ασφάλινης επένδυσης στους υπόγειους θαλάμους, ή εξ αρχής κατασκευή τους σε μεγάλο βάθος (Vaskou, 2018).

3. Υπόγεια αποθήκευση υγροποιημένου φυσικού αερίου

3.1 Φυσικό αέριο – Γενικά στοιχεία σε Ελλάδα και Ε.Ε.

Το φυσικό αέριο κατέχει κυρίαρχη θέση στην παγκόσμια αγορά ενέργειας εδώ και χρόνια. Για τη μεταφορά και τροφοδοσία του από τις χώρες παραγωγής προς στις υπόλοιπες έχει κατασκευαστεί ευρύ δίκτυο αγωγών πολλών χιλιομέτρων. Συγκεκριμένα στην Ελλάδα το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου εισάγει το αέριο στη χώρα μέσω αγωγών που ξεκινούν από τα ελληνοβουλγαρικά και ελληνοτουρκικά σύνορα (*Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φ.Α.*, 2022). Εκτός αυτών έχει δημιουργηθεί Τερματικός Σταθμός Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (liquefied [sic] natural gas – LNG) στο νησί Ρεβυθούσα δυτικά της Αθήνας και ταυτόχρονα σχεδιάζεται η κατασκευή νέου Τερματικού σταθμού Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου στην Αλεξανδρούπολη.

Το φυσικό αέριο αποτελεί περίπου το ¼ της ενέργειας που καταναλώνεται από τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης και χρησιμοποιείται τόσο στη βιομηχανία όσο και για οικιακές χρήσεις. Οι απαιτήσεις σε αέριο φτάνουν έως και τα 400 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα, με στόχους για μείωση του αριθμού αυτού έως το 2030. Ένα μικρό ποσοστό των αναγκών της Ευρωπαϊκής Ένωσης καλύπτεται από εσωτερική παραγωγή, ενώ το υπόλοιπο εισάγεται από άλλες χώρες εκτός Ε.Ε., με ένα 10% αυτού να αποτελεί το υγροποιημένο φυσικό αέριο (*Liquefied Natural Gas and gas storage will boost EU's energy security*, 2016).

3.2 Πλεονεκτήματα χρήσης υγροποιημένου φυσικού αερίου

Παρότι όπως προαναφέρθηκε ένα μεγάλο ποσοστό του παραγόμενου φυσικού αερίου μεταφέρεται μέσω αγωγών σε αέρια μορφή, η αυξημένη ζήτηση σε παγκόσμιο επίπεδο έχει οδηγήσει στην ανάγκη για υγροποιημένο φυσικό αέριο. Καθώς επίσης το φυσικό αέριο αποτελεί το καύσιμο που θα μεσολαβήσει στη μεταβατική διαδικασία προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, είναι και θα παραμείνει απαραίτητο για μεγάλο χρονικό διάστημα ακόμα. Η ανταγωνιστικότητά του φυσικά εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων με κυριότερες το κόστος υγροποίησης και μεταφοράς, αλλά και το ισοζύγιο αναγκών και εισαγωγών. Παράλληλα

οι πρόσφατες γεωπολιτικές εξελίξεις έχουν ενισχύσει περαιτέρω την ενεργειακή κρίση με το ζήτημα της ενεργειακής αυτονομίας και συνεπώς της αποθήκευσης ενέργειας να αποτελεί πλέον επιτακτική ανάγκη στην Ευρώπη.

Ουσιαστικά η μετατροπή του φυσικού αερίου από αέριο σε υγρό επιτρέπει την πρόσβαση σε αυτό από χώρες καταναλωτές που δεν συνδέονται μέσω αγωγών με τις χώρες παραγωγούς. Έτσι διευκολύνεται σε μεγάλο βαθμό η μεταφορά αλλά και η αποθήκευσή του. Η διαδικασία της υγροποίησης συνίσταται στην ψύξη του αερίου σε θερμοκρασία περίπου $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ και στην απομάκρυνση ακαθαρσιών όπως σκόνη και διοξείδιο του άνθρακα. Σε υγρή πλέον μορφή το φυσικό αέριο καταλαμβάνει κατά 600 φορές μικρότερο όγκο, υπό ατμοσφαιρική πίεση, σε σχέση με την αέρια μορφή του (*Liquefied Natural Gas and gas storage will boost EU's energy security*, 2016). Παράλληλα το υγροποιημένο φυσικό αέριο ζυγίζει λιγότερο από το νερό και αποτελεί άχρωμο, άοσμο, μη τοξικό και μη διαβρωτικό καύσιμο (Lun et al., n.d.). Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν δυνατή την οικονομική μεταφορά του, είτε με ειδικά σχεδιασμένα φορτηγά πλοία, είτε χερσαία με δεξαμενές, σε μεγάλες αποστάσεις. Έτσι η διαδικασία πραγματοποιείται χωρίς διαμεσολάβηση αγωγών και χωρίς επίδραση στα χαρακτηριστικά του καυσίμου. Κατά την άφιξή του στην εκάστοτε τοποθεσία αποθηκεύεται ή αεριοποιείται και τροφοδοτείται απευθείας στο δίκτυο της περιοχής (*Liquefied Natural Gas and gas storage will boost EU's energy security*, 2016).

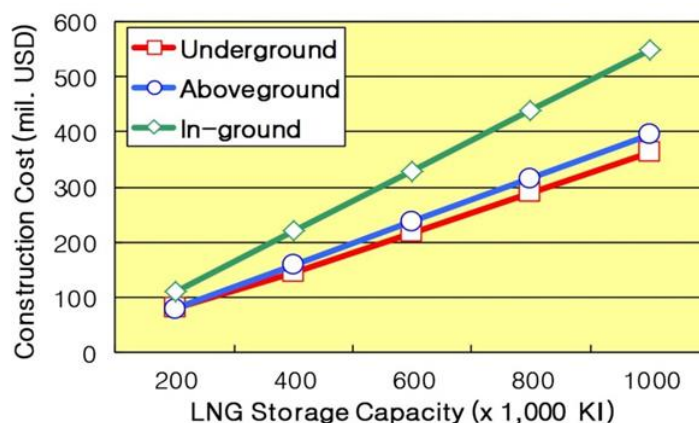
3.2.1 Πλεονεκτήματα υπόγειας αποθήκευσης

Ενεργειακή αυτονομία μπορεί να επιτευχθεί μέσω της αποθήκευσης φυσικού αερίου ανά τακτά χρονικά διαστήματα, έτσι ώστε αποθέματα ενέργειας να είναι διαθέσιμα οποιαδήποτε στιγμή παρουσιαστεί ανάγκη, μειώνοντας τον κίνδυνο «ενεργειακού αποκλεισμού» σε περίπτωση κρίσης. Ταυτόχρονα η όλο και αυξανόμενη παραγωγή και κατά συνέπεια κατανάλωση φυσικού αερίου έχει δημιουργήσει ανάγκη για κατασκευή νέων τερματικών σταθμών και σταθμών εισαγωγής. Λαμβάνοντας υπόψη τη σημασία της αποθήκευσης για την εκάστοτε χώρα είναι κρίσιμο να αναφερθούν βασικά στοιχεία που καθιστούν την υπόγεια αποθήκευση σε τεχνητούς θαλάμους προτιμώμενη μέθοδο από την αντίστοιχη επιφανειακή σε μεγάλες δεξαμενές. Ειδικότερα η υπόγεια αποθήκευση αποτελεί ελκυστική επένδυση με λογικά κόστη λειτουργίας, προσφέροντας

επίσης αυξημένη ασφάλεια και προστασία. Παράλληλα προκαλεί μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και το αποθηκευμένο φυσικό αέριο είναι λιγότερο εκτεθειμένο σε φυσικές καταστροφές όπως σεισμοί. Τέλος, λόγω των μειωμένων επιφανειακών εγκαταστάσεων που απαιτεί, προσφέρει μια πιο άρτια και αποδεκτή από την κοινή γνώμη εμφάνιση στο περιβάλλον στο οποίο έχει κατασκευαστεί (*LNG Underground storage in lined rock cavern, n.d.*).

3.2.2 Οικονομικά στοιχεία και δυναμικότητα

Σύμφωνα με έρευνα που πραγματοποιήθηκε το 2008 στην Κορέα αναφορικά με το κόστος των επιφανειακών έναντι των ημι-υπόγειων και των υπόγειων εγκαταστάσεων αποθήκευσης, υπολογίστηκε το κόστος κατασκευής για διαφορετικούς όγκους αποθηκευτικών χώρων. Συγκεκριμένα οι αναλύσεις έγιναν για δυναμικότητες κυμαινόμενες από 200,000 m³ έως 1,000,000 m³ με βήμα τα 200,000 m³ και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αντίστοιχα στοιχεία του 2006. Βάσει των αναλύσεων η κατασκευή υπόγειου χώρου αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου αποδείχτηκε η πιο οικονομική λύση για αποθηκευόμενο όγκο 300,000 m³. Ταυτόχρονα για δυναμικότητα θαλάμου 400,000 m³ η υπόγεια αποθήκευση είναι οικονομικότερη από την επιφανειακή και την ημι-υπόγεια κατά 8% και 34% και αντίστοιχα (Park et al., 2012).



Εικόνα 3.1: Συγκριτικό διάγραμμα κόστους – δυναμικότητας για επιφανειακές και υπόγειες εγκαταστάσεις (Park et al., 2012)

3.3 Προσπάθειες υπόγειας αποθήκευσης LNG στο παρελθόν

Παρότι η ιδέα της υπόγειας αποθήκευσης σε χαμηλές θερμοκρασίες δεν είναι νέα, καμία προσπάθεια ανά τα χρόνια δεν στέφθηκε με ιδιαίτερη επιτυχία. Συγκεκριμένα οι τεχνικές στόχευαν στην κατασκευή υπόγειων χώρων οι οποίοι ψύχονται πριν δεχτούν το υγροποιημένο αέριο. Τέτοιου είδους δοκιμές πραγματοποιήθηκαν τόσο στη Γαλλία και τη Σουηδία όσο και στις ΗΠΑ σε ανοίγματα με και χωρίς τελική επένδυση. Στόχος τους ήταν η ψύξη μέχρι τη θερμοκρασία υγροποίησης του αζώτου, στους $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, όμως σε καμία περίπτωση δεν επιτεύχθηκε. Πιθανοί λόγοι για αυτή την αποτυχία αποτέλεσαν η ταχεία ψύξη του πετρώματος, το μη ικανοποιητικό βάθος των θαλάμων και οι ελλειπείς γνώσεις αναφορικά με τα χαρακτηριστικά, τη συμπεριφορά και την ευστάθεια της βραχομάζας (de Laguerie, 1989). Αποτέλεσμα των παραπάνω, η διαρροή του προϊόντος από τον θάλαμο προς το περιβάλλον πέτρωμα, μέσω εφελκυστικών αστοχιών που προήλθαν από τη συρρίκνωσή του, αλλά και η μεταφορά θερμότητας από το υπέδαφος στον θάλαμο. Οι αστοχίες είναι αποτέλεσμα της ανάπτυξης τάσεων, υπεύθυνων για τη ρωγμάτωση του πετρώματος, λόγω χαμηλής θερμοκρασίας (Jung et al., 2014).

Μια πιθανή λύση στο πρόβλημα της δημιουργίας ρωγμών στο πέτρωμα σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες αποτελεί η κατασκευή του αποθηκευτικού θαλάμου σε αρκετά μεγάλο βάθος έτσι ώστε οι ασκούμενες γεωστατικές τάσεις στο σημείο να εξισορροπούνται με τις εφελκυστικές τάσεις λόγω ακραίων θερμοκρασιών. Το απαραίτητο όμως βάθος μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 500 m και 1000 m, γεγονός οικονομικά ασύμφορο (Park et al., 2012).

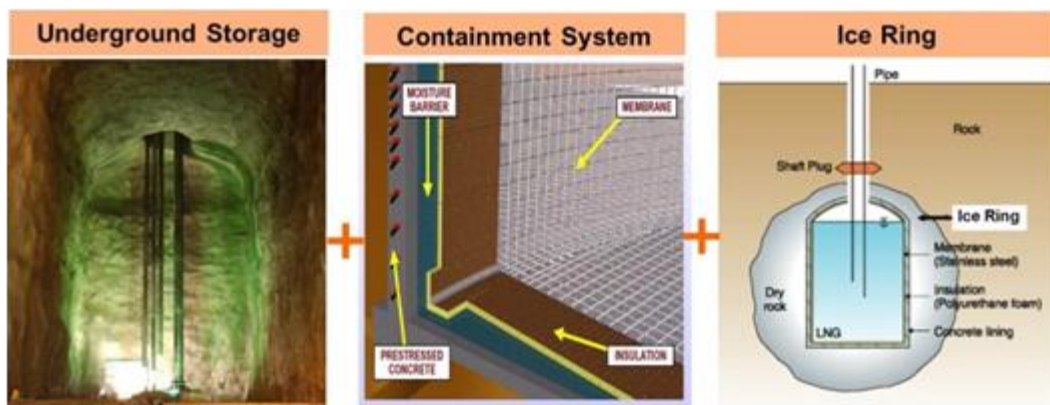
3.4 Νέα μέθοδος υπόγειας αποθήκευσης LNG – Το παράδειγμα της Κορέας

Μετά από χρόνια παρακολούθηση των αναπτυσσόμενων τεχνικών υπόγειας αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου και μελετώντας τις αδυναμίες τους, σχεδιάστηκε μια καινούργια μέθοδος αποθήκευσης σε υπόγειους τεχνητούς θαλάμους με τελική επένδυση (Lined Rock Cavern – LRC) από τις Geostock, SKEC και SN Technigaz σε συνεργασία με το KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources). Η διερεύνηση του κατά πόσο είναι εφικτό ένα τέτοιο εγχείρημα πραγματοποιήθηκε με την κατασκευή πειραματικών εγκαταστάσεων το 2004 στην

περιοχή Daejeon σε απόσταση 200 χιλιομέτρων από τη Σεούλ της Κορέας. Μάλιστα επιλέχθηκε χρήση υγρού αζώτου ως προϊόν αποθήκευσης σε θερμοκρασία $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Οι εγκαταστάσεις λειτούργησαν έναν χρόνο και μετά τέθηκαν εκτός λειτουργίας (Park et al., 2012).

3.4.1 Βασικά χαρακτηριστικά

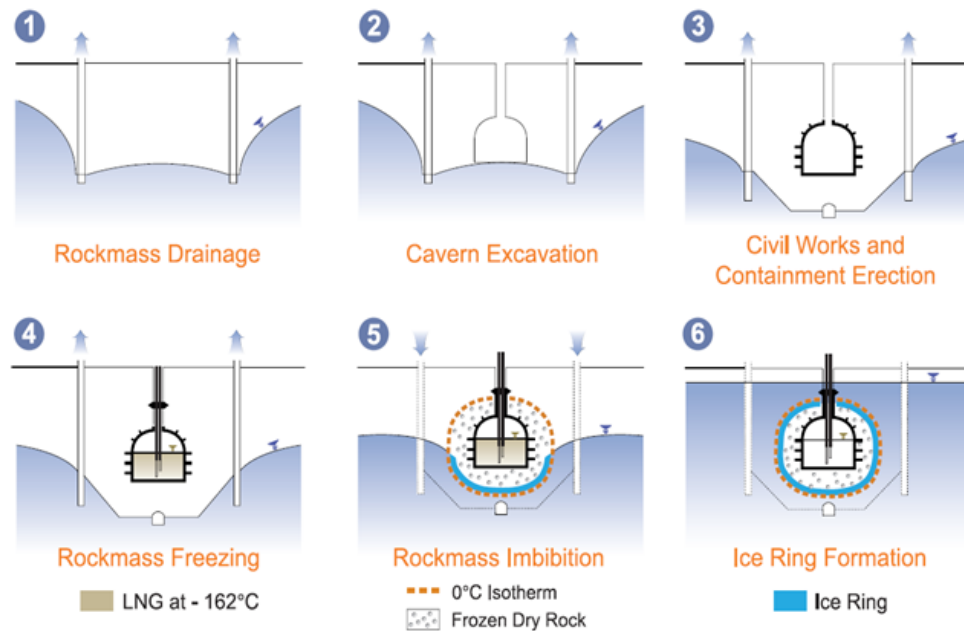
Η μέθοδος αποθήκευσης LNG που αναπτύχθηκε αποτελεί συνδυασμό παλαιών και νέων τεχνικών. Στην ουσία πρόκειται για υπόγειο θάλαμο επενδυμένο με ειδική μεμβράνη. Ως γνωστόν οι υπόγειοι θάλαμοι αποθήκευσης είναι αξιόπιστη μέθοδος που έχει εξελιχθεί σε σημαντικό βαθμό ώστε πλέον να είναι δυνατή η όρυξη ανοιγμάτων δυναμικότητας χιλιάδων κυβικών μέτρων. Παράλληλα η χρήση μεμβρανών αποτελεί επίσης παλαιά τεχνική με επιτυχημένες εφαρμογές σε επιφανειακές μονάδες αποθήκευσης LNG, με σκοπό την παροχή θερμικής προστασίας στο περιβάλλον πέτρωμα αποτρέποντας την ανάπτυξη τάσεων, τον σχηματισμό ρωγμών και μειώνοντας τα ποσοστά εξάτμισής του. Η καινοτομία της προτεινόμενης τεχνικής βρίσκεται στην δημιουργία μιας παγωμένης περιοχής σχήματος δακτυλίου γύρω από το υπόγειο άνοιγμα, με στόχο την παροχή επιπλέον προστασίας από διαρροές (Park et al., 2012).



Εικόνα 3.2: Χρησιμοποιούμενες τεχνικές (Park et al., 2012)

3.4.1.1 Δημιουργία παγωμένου δακτυλίου

Κατά το στάδιο της κατασκευής ενός τέτοιου έργου είναι απαραίτητη η απομάκρυνση των υπόγειων νερών, προς αποφυγή ανάπτυξης υψηλών πιέσεων των πόρων και δημιουργίας παγωμένων περιοχών επαπτομενικά της επένδυσης του θαλάμου. Μετά την διάνοιξη και τοποθέτηση των απαραίτητων μονωτικών συστημάτων, ο θάλαμος πληρώνεται με το υγροποιημένο αέριο, η θερμοκρασία του οποίου σταδιακά διαχέεται στο περιβάλλον πέτρωμα. Στη συνέχεια πραγματοποιείται επαναφορά των υπόγειων νερών στην αρχική τους στάθμη με αποτέλεσμα την διαμόρφωση τελικά του ζητούμενου παγωμένου δακτυλίου περιμετρικά του ανοίγματος. Η διαδικασία άντλησης των νερών είναι δυνατόν να διαρκέσει έως και μερικά χρόνια ανάλογα τις θερμικές ιδιότητες της βραχομάζας που καθορίζουν το απαιτούμενο χρονικό διάστημα για την διάχυση της χαμηλής θερμοκρασίας (Park et al., 2012).

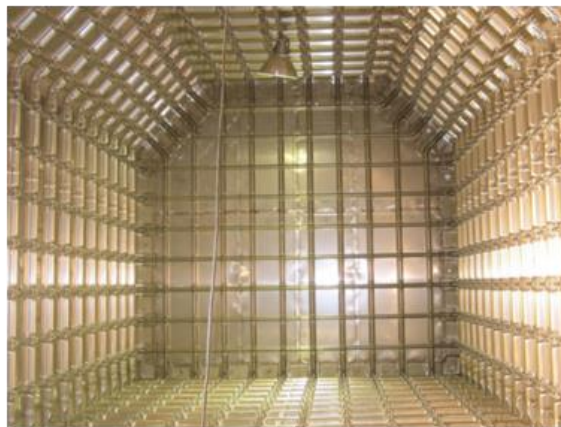


Εικόνα 3.3: Δημιουργία παγωμένου δακτυλίου (Park et al., 2012)

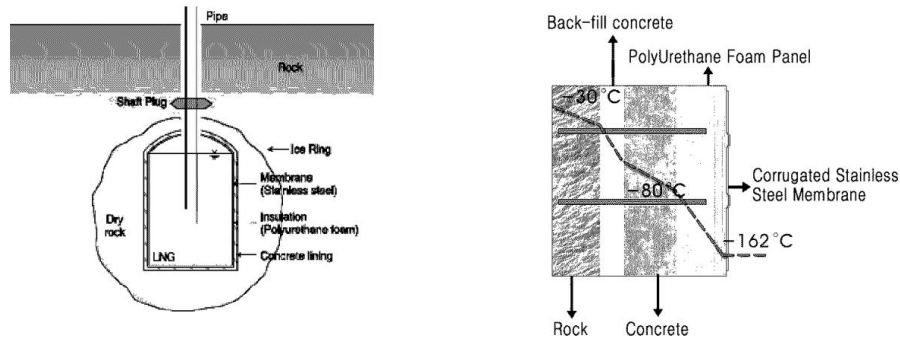
3.4.1.2 Σύστημα συγκράτησης

Το σύστημα συγκράτησης του αποθηκευόμενου φυσικού αερίου μέσα στον υπόγειο θάλαμο αποτελείται από ειδικές μονωτικές πλάκες (panels) οι οποίες κατασκευάζονται από υλικά μεγάλης ευελιξίας ώστε να προσαρμόζονται εύκολα στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανοίγματος στο οποίο εφαρμόζονται (Park et al., 2012). Το πάχος και οι θερμικές ιδιότητες των τοποθετούμενων μονωτικών πλακών επιλέγονται έτσι ώστε να επιτρέπουν μικρά ποσοστά εξάτμισης ανά ημέρα (μικρότερα από 0.1%) και να συγκρατούν την ελάχιστη δυνατή θερμοκρασία από την περιβάλλουσα βραχομάζα (Park et al., 2020).

Συγκεκριμένα στον πιλοτικό θάλαμο που κατασκευάστηκε συγκολλήθηκαν, εφαπτομενικά της επένδυσης οπλισμένου σκυροδέματος, μονωτικές πλάκες από αφρό μεταξύ φύλλων κόντρα πλακέ, με σκοπό τη διατήρηση της θερμοκρασίας χαμηλότερα από τους $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ για χρονικό διάστημα 30 ετών και την επίτευξη μικρών ποσοστών εξάτμισης. Εφαπτομενικά του μονωτικού υλικού τοποθετήθηκε ανοξείδωτος χάλυβας σε μορφή κυματοειδούς μεμβράνης ώστε να προσφέρει στεγανότητα στον θάλαμο υπό χαμηλές θερμοκρασίες. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, τα πάνελ πάχους 300 mm και η ατσάλινη μεμβράνη πάχους 1.2 mm τοποθετήθηκαν σε όλες τις επιφάνειες του θαλάμου (Park et al., 2012).



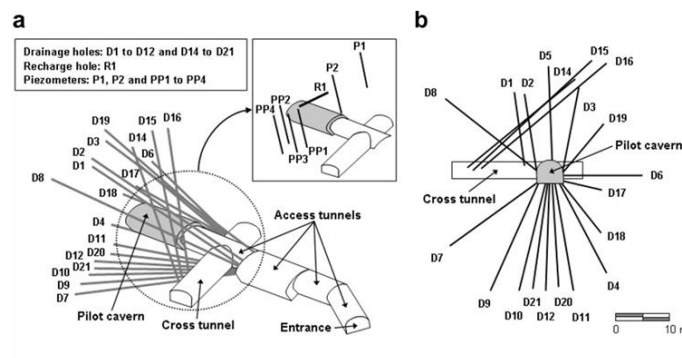
Εικόνα 3.4: Σύστημα συγκράτησης στην πιλοτική μονάδα (Park et al., 2012)



Εικόνα 3.5: Σύστημα συγκράτησης (Chung et al., 2006)

3.4.1.3 Σύστημα αποστράγγισης

Η εγκατάσταση συστήματος αποστράγγισης κατά την κατασκευή του πιλοτικού θαλάμου αποθήκευσης κρίθηκε απαραίτητη, καθώς η συμβολή του στην ομαλή εξέλιξη των εργασιών ήταν ιδιαίζουσας σημασίας. Αναλυτικότερα το σύστημα αποστράγγισης στοχεύει στη μείωση των ποσοτήτων νερού που εισχωρούν στον θάλαμο κατά την σκυροδέτησή του, αλλά και της υγρασίας που διαπερνά το σκυρόδεμα κατά την τοποθέτηση των μονωτικών πλακών. Παράλληλα αντλώντας τα υπόγεια νερά η βραχομάζα διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα κορεσμού κατά την ψύξη και ελέγχεται η διαδικασία επαναφοράς τους στην αρχική στάθμη μετά τον σχηματισμό του παγωμένου δακτυλίου. Για τους παραπάνω λόγους σχεδιάστηκε κάρναβος γεωτρήσεων περιμετρικά του ανοίγματος και ξεκίνησαν οι αντλήσεις πριν από την εκσκαφή του θαλάμου, υποβιβάζοντας τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα 8 μέτρα κάτω από την βάση του. Το σύστημα αποστράγγισης δεσμεύεται σε αδιάκοπη λειτουργία κατά την κατασκευή και λειτουργία του θαλάμου αποθήκευσης (Park et al., 2012).



Εικόνα 3.6: Σύστημα αποστράγγισης (Park et al., 2012)

3.4.2 Επιλογή δοκιμαστικού χώρου και πετρώματος

Οι πειραματικές εγκαταστάσεις του αποθηκευτικού χώρου LNG διαμορφώθηκαν διευρύνοντας και τροποποιώντας κατάλληλα έναν προϋπάρχοντα υπόγειο θάλαμο αποθήκευσης τροφίμων σε γρανιτικό πέτρωμα. Η βραχομάζα με RQD κυμαινόμενο από 80 έως 86 και με μέση τιμή Q ίση με 12.5 χαρακτηρίζεται από μηδενικές ή ελάχιστες απαιτήσεις σε μέσα υποστήριξης, όπως εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια βράχου. Πρόσβαση στον θάλαμο, κατασκευασμένο σε βάθος 20 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους, πραγματοποιήθηκε μέσω οριζόντιας σήραγγας. Κατά αντιστοιχία με τον θάλαμο, στη σήραγγα προσπέλασης τοποθετήθηκε επένδυση από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 20 cm και μονωτική πλάκα πάχους 10 cm. Οι τελικές εγκαταστάσεις με διαστάσεις 3.5 m x 3.5 m x 10 m προσφέρουν δυναμικότητα 110 m³ στον θάλαμο (Park et al., 2012).



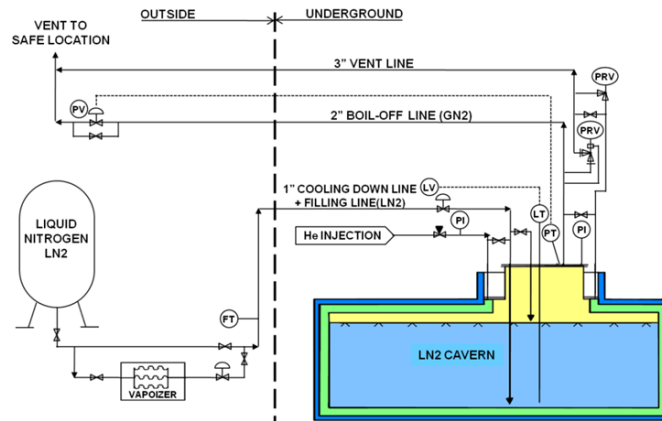
Εικόνα 3.7: Τομή του θαλάμου αποθήκευσης (Park et al., 2012)

3.4.3 Λειτουργία και έλεγχος

Όπως προαναφέρθηκε, στο δοκιμαστικό θάλαμο αποθηκεύτηκε υγροποιημένο άζωτο (LN₂) αντί για φυσικό αέριο για λόγους ασφαλείας. Οι εγκαταστάσεις ολοκληρώθηκαν με την επιφανειακή δεξαμενή αποθήκευσης LN₂ και τα απαραίτητα συστήματα αεριοποίησης, ψύξης και τροφοδότησης του προϊόντος στον θάλαμο. Οι διαδικασίες αυτές εκτελούνται μέσω μονωμένων

αγωγών που ξεκινούν επιφανειακά, διέρχονται από τη σήραγγα προσπέλασης και καταλήγουν στον υπόγειο θάλαμο. Παράλληλα ένας ξεχωριστός αγωγός είναι υπεύθυνος για την εκτόνωση των υπερπίεσεων που πιθανόν εμφανιστούν.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η ύπαρξη συστήματος ελέγχου στις εγκαταστάσεις με σκοπό την παρακολούθηση της συμπεριφοράς του πετρώματος και του σκυροδέματος βάσει των θερμοκρασιακών μεταβολών. Για τον λόγο αυτό τοποθετήθηκε ειδικός εξοπλισμός αποτελούμενος από γεωτεχνικά όργανα που παρακολουθούν πλήθος παραγόντων όπως είναι τα θερμοκρασιακά προφίλ, οι μετακινήσεις στο πέτρωμα, η κατανομή της πίεσης των πόρων και τα φορτία που αναλαμβάνουν τα αγκύρια που έχουν τοποθετηθεί.

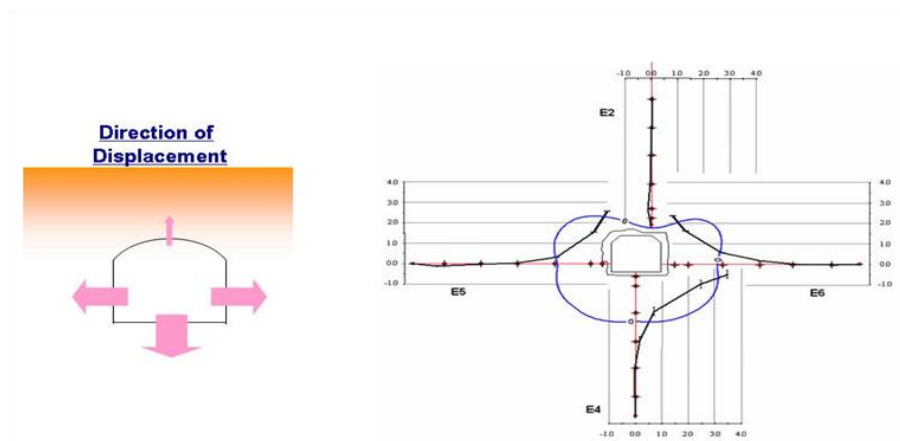


Εικόνα 3.8: Διάγραμμα ροής πιλοτικής μονάδας αποθήκευσης (Park et al., 2012)

Ταυτόχρονα έλεγχος της συμπεριφοράς του πετρώματος και του συστήματος συγκράτησης πραγματοποιήθηκε σε τρία στάδια ανά έξι μήνες λειτουργίας. Αρχικά κατά την πρώτη φάση λειτουργίας των εγκαταστάσεων κατά την οποία πραγματοποιούνταν διαρκής τροφοδοσία υγρού αζώτου, ώστε ο χώρος να διατηρείται γεμάτος. Στη συνέχεια κατά τη δεύτερη φάση λειτουργίας στην οποία ο αποθηκευτικός χώρος ξεκίνησε σταδιακά να αδειάζει και τέλος όταν ο θάλαμος είχε αδειάσει, οπότε ξεκίνησε η διαδικασία της θέρμανσής του μέχρι τελικά η πιλοτική μονάδα να διακόψει τη λειτουργία της (Park et al., 2012).

3.4.4 Παρατηρήσεις για τα συστήματα συγκράτησης και αποστράγγισης

Κατά τη διάρκεια του ενός έτους λειτουργίας της δοκιμαστικής μονάδας αποθήκευσης μελετήθηκε η συμπεριφορά του πετρώματος γύρω από το υπόγειο άνοιγμα, η αποτελεσματικότητα του συστήματος συγκράτησης και αποστράγγισης καθώς και η γενικότερη αποδοτικότητα των εγκαταστάσεων. Αρχικά όσον αφορά στο σύστημα αποστράγγισης αποδείχτηκε ότι λειτούργησε ικανοποιητικά, καθώς απομάκρυνε επιτυχώς τα υπόγεια νερά κατά την ψύξη του πετρώματος. Βάσει αυτού κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς της βραχομάζας σε θερμοκρασίες γύρω στους $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ με αριθμητικά μοντέλα όπως το FLAC_2D . Παράλληλα καταγράφηκαν μικρές μετακινήσεις της τάξης των $3 - 5\text{ mm}$, που αντιστοιχούν σε ποσοστό 0.2% της ακτίνας του θαλάμου, στο εσωτερικό του λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών που επιβλήθηκαν, γεγονός ευνοϊκό για την ευστάθεια. Αντίστοιχα μετρήσεις που λήφθηκαν τελικά μετά από την απόψυξη της περιοχής προέβλεψαν περαιτέρω μικρές μετατοπίσεις, περίπου 1 mm στη βραχομάζα. Ταυτόχρονα επιβεβαιώθηκε η λειτουργικότητα του συστήματος υποστήριξης ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 3.9: Μετατοπίσεις γύρω από το υπόγειο άνοιγμα (Park et al., 2012)

Επιπρόσθετα για την διερεύνηση της αποδοτικότητας του συστήματος συγκράτησης, των επιπτώσεων της αποθήκευσης υγρού αζώτου στο πέτρωμα και της γενικότερης ασφάλειας των εγκαταστάσεων, μετά το πέρας της δοκιμαστικής περιόδου λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας, οι μονωτικές πλάκες που είχαν τοποθετηθεί εφαπτομενικά της τελικής επένδυσης αφαιρέθηκαν από

τον υπόγειο θάλαμο. Η μετέπειτα μελέτη της κατάστασης της βραχομάζας και της επένδυσης έδωσε θετικά αποτελέσματα, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι τα τοποθετούμενα πάνελ λειτούργησαν υπέρ του συστήματος αποθήκευσης. Το κυριότερο χαρακτηριστικό που επιβεβαίωσε τα παραπάνω ήταν η απουσία ρωγμών, γεγονός που ταυτόχρονα σημαίνει ότι οι επιφάνειες του θαλάμου δεν υπέστησαν θερμικά σοκ από την απότομη ψύξη κατά την άρση της λειτουργίας του συστήματος αποστράγγισης. Τέλος τα ποσοστά εξάτμισης του φυσικού αερίου κατά τη φάση λειτουργίας της μονάδας που προέκυψαν είχαν μικρή απόκλιση από τα θεωρητικά και αριθμητικά υπολογισμένα αποτελέσματα που αναμένονταν να εμφανιστούν.

Όλα τα παραπάνω αποτελούν ενθαρρυντικές ενδείξεις ότι τόσο η κατασκευή όσο και η λειτουργία ενός αντίστοιχου συστήματος αποθήκευσης LNG είναι εφικτή (Park et al., 2012).

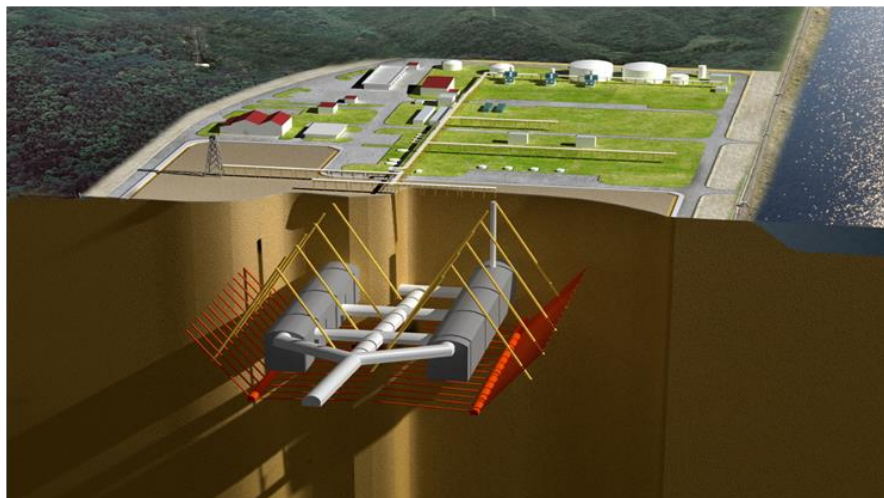
3.4.5 Παρατηρήσεις για τον σχηματισμό του παγωμένου δακτυλίου

Καθώς ο παγωμένος δακτύλιος περιμετρικά του υπόγειου ανοίγματος δημιουργείται με σκοπό να εμποδίσει τις διαρροές του αποθηκευμένου φυσικού αερίου προς το περιβάλλον πέτρωμα, τόσο η περιοχή στην οποία θα δημιουργηθεί όσο και η επιφάνεια την οποία θα καταλαμβάνει αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για την ορθή λειτουργία των εγκαταστάσεων. Ιδιαίτερο κίνδυνο στη διαδικασία ενέχει η εισροή νερού διαμέσου των μονωτικών πλακών, μιας και η αύξηση του όγκου του λόγω της ψύξης δύναται να τις καταστρέψει. Έρευνες για τον προσδιορισμό χαρακτηριστικών όπως ο χρόνος διάδοσης της χαμηλής θερμοκρασίας, η μετακίνηση του νερού και τελικά η δημιουργία του δακτυλίου πραγματοποιήθηκαν μέσω ειδικών αριθμητικών μοντέλων, τα αποτελέσματα των οποίων συνάδουν με τις πραγματικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα βάσει δοκιμών πάνω στη διαδικασία σε σχηματισμό με πορώδες 3% κατασκευάστηκαν διαγράμματα θερμοκρασιακών μεταβολών των υπόγειων νερών. Συμπερασματικά παρατηρήθηκε ότι ο απαιτούμενος δακτύλιος που σχηματίστηκε σε χρονικό διάστημα δύο μηνών, είχε μεγαλύτερο πάχος κάτω από το δάπεδο του θαλάμου, η στεγανή περιοχή στο εσωτερικό του είχε πλάτος 2 m, ενώ εφάπτονταν με τον θάλαμο στα γωνιακά σημεία μεταξύ δαπέδου και παρειών. Επιπρόσθετα μετά από δοκιμές κατά την τοποθέτηση των μονωτικών πλακών, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από την οροφή του θαλάμου μειώθηκε σημαντικά με την αύξηση του πάχους τους. Ιδιαίτερα σημαντική είναι επίσης η μέριμνα για τη σχέση των χαρακτηριστικών του πετρώματος

με τις θερμοκρασιακές μεταβολές, ιδιαίτερα σε χαμηλές θερμοκρασίες ή σε περιπτώσεις όπου το φάσμα των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων είναι ευρύ. Συνεπώς ελέγχοντας το σύστημα αποστράγγισης είναι δυνατός ο σχηματισμός του παγωμένου δακτυλίου, υπό την προϋπόθεση ότι η μέση απόσταση των περιοχών με θερμοκρασία 0 °C βρίσκεται στα 3 με 4 m από τα τοιχώματα του θαλάμου και η βραχομάζα έχει υδραυλική αγωγιμότητα μεταξύ 10^{-7} m/s και 10^{-6} m/s (Park et al., 2012).

3.4.6 Εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας και συνοδά έργα

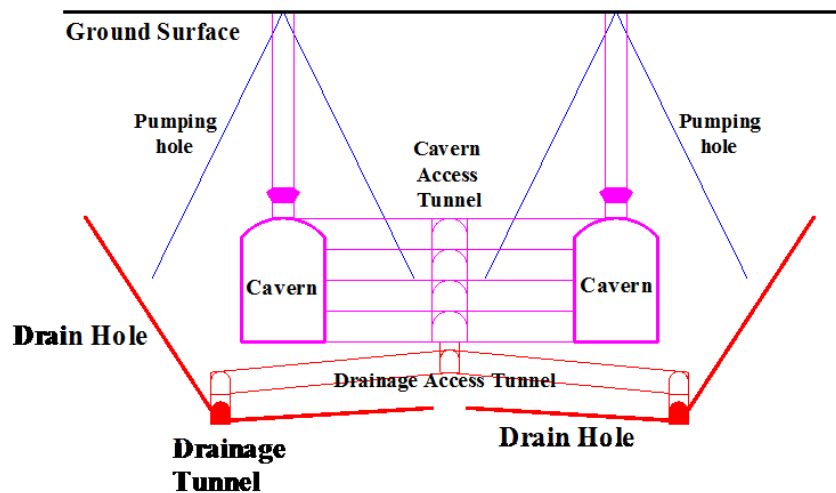
Η μέθοδος αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου σε υπόγειο θάλαμο επενδυμένο με μεμβράνη είναι δυνατόν να εφαρμοστεί σε ακόμα μεγαλύτερη κλίμακα από αυτή της πιλοτικής μονάδας που περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, προσαρμόζοντας φυσικά το μέγεθος και τον αριθμό των θαλάμων στις εκάστοτε ανάγκες. Μια πιθανή μορφή του συγκροτήματος συμπεριλαμβανομένων των επιφανειακών εγκαταστάσεων απεικονίζεται στην ακόλουθη Εικόνα 3.10:



Εικόνα 3.10: Μοντέλο συγκροτήματος υπόγειου χώρου αποθήκευσης LNG δυναμικότητας 140,000 m³ (Park et al., 2012)

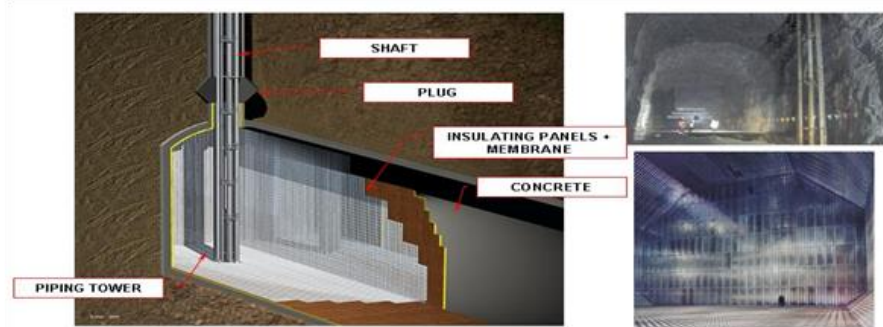
Καθώς η μέθοδος βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ύπαρξη κατάλληλα διαμορφωμένου συστήματος αποστράγγισης, είναι απαραίτητη η κατασκευή σιράγγων αποστράγγισης κάτω από

τους θαλάμους με γεωτρήσεις γύρω από αυτές. Η κατασκευή των υπόγειων θαλάμων αποθήκευσης ξεκινά με την διάνοιξη σήραγγας προσπέλασης μέχρι το επίπεδο του δαπέδου των θαλάμων. Έπειτα διανοίγεται η σήραγγα προσπέλασης των σιράγγων αποστράγγισης και στη συνέχεια αυτές κατασκευάζονται παράλληλα με τους θαλάμους σε μεγαλύτερο όμως μήκος. Ταυτόχρονα ορύσσονται διατρήματα πάνω στην επιφάνεια των σιράγγων αποστράγγισης με φορά προς την επιφάνεια του εδάφους, με απότομη ή ήπια κλίση ανάλογα αν βρίσκονται εκτός ή εντός των ορίων των θαλάμων αντίστοιχα. Η διάταξη αυτή των γεωτρήσεων έχει ως σκοπό την ελεύθερη ροή των υπόγειων νερών διαμέσου των ασυνεχειών και ρωγμών του πετρώματος με τη βοήθεια της βαρύτητας, χωρίς την ύπαρξη αντλητικού συστήματος (Park et al., 2012).



Εικόνα 3.11: Διάταξη συστήματος αποστράγγισης (Park et al., 2012)

Η γεωμετρία των σχεδιαζόμενων θαλάμων αποθήκευσης συνήθως προσαρμόζεται ανάλογα τις γεωλογικές και υδρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην εκάστοτε περιοχή. Γενικά επιλέγονται διαστάσεις εντός συγκεκριμένων ορίων έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή δυναμικότητα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι τυπικές διαστάσεις ενός θαλάμου είναι 30 m x 20 m με μήκος να κυμαίνεται από 150 m έως 270 m. Τέλος σημαντικό είναι να αναφερθεί το γεγονός ότι η διάταξη και ο εξοπλισμός που απαιτεί ένα υπόγειο σύστημα αποθήκευσης είναι πανομοιότυπα με τις αντίστοιχες επιφανειακές δεξαμενές αποθήκευσης LNG (Park et al., 2012).



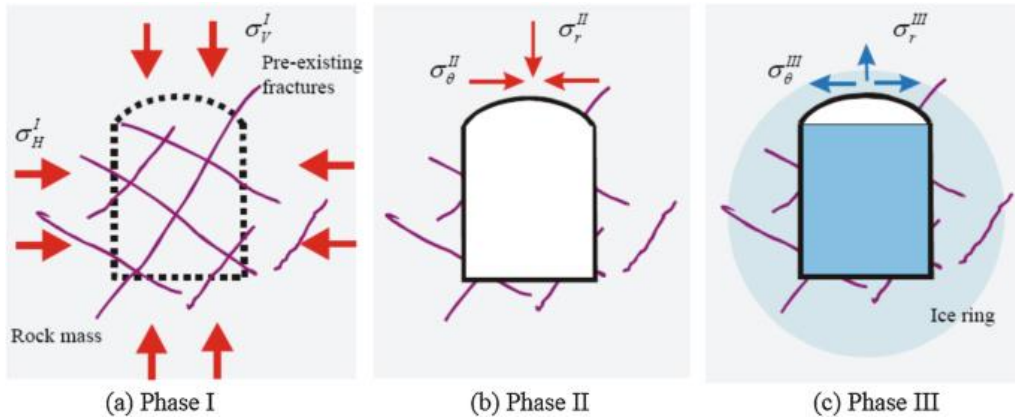
Εικόνα 3.12: Τυπική διαμόρφωση υπόγειου χώρου αποθήκευσης (αριστερά) – τυπική διαμόρφωση επιφανειακών δεξαμενών αποθήκευσης (δεξιά) (Park et al., 2012)

3.5 Μηχανική συμπεριφορά βραχομάζας υπό χαμηλές θερμοκρασίες

Καθώς η αποθήκευση του φυσικού αερίου σε ατμοσφαιρική ή χαμηλή πίεση είναι δυνατή μόνο όταν αυτό βρίσκεται σε υγρή μορφή και συνεπώς σε ιδιαίτερα χαμηλή θερμοκρασία, η θερμική μόνωση και συγκράτησή του αποτελούν ζητήματα υψίστης σημασίας. Το κυριότερο πρόβλημα το οποίο κλήθηκαν να επιλύσουν οι παλαιότερες τεχνικές αποθήκευσης αφορούσε στην διεύρυνση των φυσικών ρωγμών του πετρώματος με αποτέλεσμα τη διαρροή και εξάτμιση του προϊόντος. Με την ανάπτυξη της τεχνικής αποθήκευσης σε θάλαμο με τελική επένδυση, η παρουσία του συστήματος μόνωσης σε συνδυασμό με την επένδυση από σκυρόδεμα εμποδίζει την άμεση επαφή του LNG με το πέτρωμα, δίνοντας έτσι περιθώριο για διεύρυνση των ρωγμών χωρίς σημαντικές απώλειες ενέργειας.

Τελικά η αξιολόγηση την ευστάθειας του αναπτυσσόμενου υπόγειου ανοίγματος είναι στενά συνδεδεμένη με τη δημιουργία ή τη διεύρυνση ρωγμών βάσει των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων. Συνεπώς η θερμο-μηχανική σταθερότητα του θαλάμου που κατασκευάζεται βασίζεται στο αρχικό εντατικό πεδίο που επικρατεί, στις αναπτυσσόμενες τάσεις κατά την εκσκαφή και στις τάσεις λόγω χαμηλών θερμοκρασιών που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μονάδας. Σε θαλάμους χωρίς τελική επένδυση η χρονική στιγμή κατά την οποία πραγματοποιείται διεύρυνση των φυσικών ασυνεχειών του πετρώματος και ο θάλαμος είναι πλέον ασταθής, συμπίπτει με τη στιγμή που οι εφαπτομενικές τάσεις λόγω θερμοκρασιών μηδενίζονται και άρα οι τάσεις από θλιπτικές γίνονται εφελκυστικές. Σύμφωνα με δεδομένα από την νέα μέθοδο αποθήκευσης με τελική επένδυση, η ευστάθεια του υπόγειου χώρου είναι συνάρτηση τόσο της

διεύρυνσης ήδη υπάρχοντων ρωγμών όσο και της δημιουργίας νέων. Μάλιστα νέες ρωγμές δημιουργούνται όταν οι εφαπτομενικές τάσεις που επικρατούν κατά τη λειτουργία της μονάδας γίνουν εφελκυστικές και ξεπεράσουν την εφελκυστική αντοχή του πετρώματος, η οποία βέβαια ποικίλει ανάλογα τη θερμοκρασία (Park et al., 2020).



Εικόνα 3.13: α) Αρχικό εντατικό πεδίο β) Τάσεις κατά την εκσκαφή γ) Τάσεις κατά τη λειτουργία (Park et al., 2020)

3.5.1 Δημιουργία νέων ρωγμών λόγω ψύξης

Κατά τη σταδιακή ψύξη ενός πετρώματος, παρατηρείται μικρορωγμάτωση της μάζας του, καθώς οι δημιουργούμενες τάσεις ξεπερνούν την εφελκυστική αντοχή του. Βέβαια καθώς οι εφελκυστικές τάσεις δύναται να εξισορροπηθούν από τις θερμικές, όταν επικρατούν οι θλιπτικές τάσεις του αρχικού εντατικού πεδίου, οι ρωγμές αυτές είναι αμελητέες. Παράλληλα στη δεδομένη περίπτωση ασκείται και εσωτερική πίεση από το υπό ψύξη καύσιμο κυμαινόμενη μεταξύ 0.01 MPa και 0.03 MPa η οποία θεωρείται και αυτή αμελητέα. Υπό το ίδιο πρίσμα λειτουργεί και η υδροστατική πίεση που ασκείται από τον υδροφόρο ορίζοντα μειώνοντας τις τιμές των τάσεων. Κατά συνέπεια μια συντηρητική θεώρηση για την ευστάθεια του θαλάμου περιγράφεται με την θερμική τάση να είναι μικρότερη της ελάχιστης κύριας τάσης περιμετρικά της εκσκαφής (Park et al., 2020).

3.5.2 Διεύρυνση υπαρχόντων ρωγμών λόγω ψύξης

Στην περίπτωση που κατά την κατασκευή του υπόγειου χώρου δεν πραγματοποιηθεί επιτυχής αποστράγγιση του σχηματισμού, η διόγκωση του νερού λόγω της ψύξης και μετατροπής του σε πάγο θα δημιουργήσει πίεση που θα ασκείται αντίθετα από τις τάσεις λόγω εκσκαφής με συνέπεια τη σταδιακή διεύρυνση των ασυνεχειών και ρωγμών του πετρώματος. Η ύπαρξη πυκνού δικτύου ασυνεχειών πιθανόν να οδηγήσει στον σχηματισμό τεμαχών πετρώματος, η κίνηση των οποίων έχει την ικανότητα να απομειώσει τις θερμικές τάσεις (Park et al., 2020).

3.6 Άλλες εφαρμογές της μεθόδου LRC

3.6.1 Το παράδειγμα της Σουηδίας

Η τεχνική της υπόγειας αποθήκευσης φυσικού αερίου σε θαλάμους με τελική επένδυση (LRC) εφαρμόστηκε πειραματικά και στη Σουηδία εκτός της Κορέας, και μάλιστα πολύ νωρίτερα, το 1987. Καθώς Σκανδιναβικές χώρες όπως η Φινλανδία, η Σουηδία και η Νορβηγία δεν διαθέτουν το κατάλληλο γεωλογικό υπόβαθρο για να αποθηκεύσουν με συμβατικές μεθόδους το καύσιμο, η ανάγκη δημιουργίας μιας εναλλακτικής λύσης αποθήκευσης ήταν επιτακτική.

Οι μελέτες για τη βιωσιμότητα της μεθόδου αποθήκευσης πραγματοποιήθηκαν σταδιακά μέσα σε μία δεκαετία. Οι αρχικές έρευνες εκπονήθηκαν με σκοπό την πρώτη επαφή με το αντικείμενο, τον πειραματισμό με τη μηχανική συμπεριφορά της τελικής επένδυσης και των ιδιοτήτων της και τη διεξαγωγή δοκιμών σε κατάλληλους θαλάμους. Στη συνέχεια κατασκευάστηκε πειραματική μονάδα στο Grängesberg της Σουηδίας με σκοπό τη διερεύνηση παραγόντων όπως, η συμπεριφορά του θαλάμου υπό σταθερή και αυξανόμενη πίεση, η επίδραση της χαμηλής θερμοκρασίας και της ατσάλινης μεμβράνης, ο μηχανισμός θραύσης της βραχομάζας, καθώς και οι επιπτώσεις πιθανής διαρροής του προϊόντος στην επένδυση. Ύστερα από ενδελεχή μελέτη των παραπάνω και διεξαγωγή περαιτέρω ερευνών πάνω στον συνολικό σχεδιασμό μιας τέτοιας μονάδας, αλλά και του κόστους και του ρίσκου, ξεκίνησε η κατασκευή χώρου αποθήκευσης

μεγάλης κλίμακας στην περιοχή Skallen της Σουηδίας, με όγκο εκσκαφής τα 40000 m³ (Sofregaz and LRC, 1999).

3.6.1.1 Πειραματική μονάδα στο Grängesberg της Σουηδίας

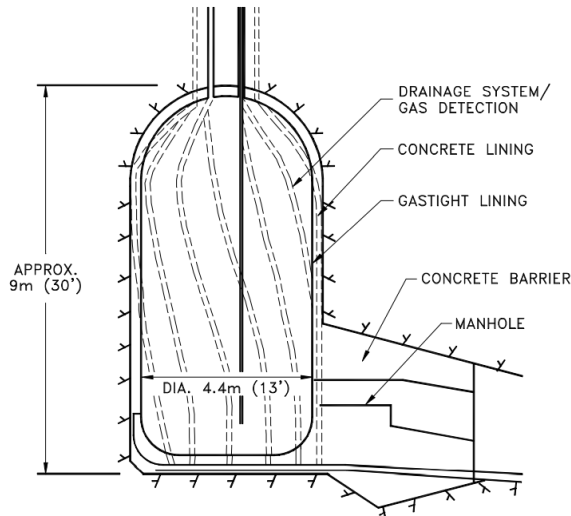
Η πειραματική μονάδα αποθήκευσης λειτούργησε από το 1988 έως και το 1993 και αποτέλεσε κρίσιμο συντελεστή στην απόφαση για την μετέπειτα δημιουργία του χώρου αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας στη χώρα.

Η κατασκευή πραγματοποιήθηκε σε γρανιτικό σχηματισμό (με $\sigma_c = 340$ MPa, $E = 56$ GPa, $RMR = 75$ και $Q = 20$) (Johansson, 2003), σε βάθος 50 m από την επιφάνεια του εδάφους, υπό τη μορφή τριών κατακόρυφων κυλινδρικών θαλάμων με διαστάσεις 4.4 m σε διάμετρο και 9 m σε ύψος ο κάθε ένας, επενδυμένοι στο εσωτερικό τους με σκυρόδεμα και ατσάλι (Sofregaz and LRC, 1999).

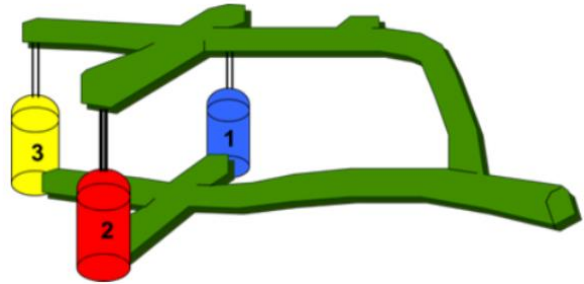
Η πειραματική διαδικασία χωρίστηκε σε φάσεις οπότε ο πρώτος θάλαμος επενδύθηκε με λεπτή στρώση ανοξειδωτού χάλυβα πάχους 0.4 mm, ο δεύτερος με ανθρακούχο χάλυβα πάχους 6 mm και ο τρίτος με πολυπροπυλένιο, το οποίο όμως λόγω της ταχείας διάρρηξης του αντικαταστάθηκε με ανοξειδωτό χάλυβα όπως στην πρώτη περίπτωση, αλλά με πάχος 0.5 mm αυτή τη φορά. Οι θάλαμοι 1 και 2 επενδύθηκαν επίσης με σκυρόδεμα πάχους 0.6 m χωρίς οπλισμό, ενώ ο θάλαμος 3 επενδύθηκε με σκυρόδεμα πάχους 0.3 m με οπλισμό. Όσον αφορά στις δοκιμές, λόγω προβλημάτων που παρουσίασε η επένδυση του θαλάμου 1, οι μέγιστες πιέσεις που εφαρμόστηκαν έλαβαν την τιμή των 14 MPa. Αντίθετα στον θάλαμο 2 εφαρμόστηκαν δοκιμές και πάνω από 200 κύκλοι φόρτισης με μέγιστη πίεση τα 52 MPa. Τέλος ο θάλαμος 3 υποβλήθηκε σε 91 κύκλους φόρτισης και σε δοκιμές με μέγιστη πίεση τα 28 MPa (Johansson, 2003).

Συμπερασματικά το κυριότερο αποτέλεσμα των δοκιμών ήταν η απόδειξη ότι το περιβάλλον πέτρωμα είναι ικανό να λειτουργήσει ως δεξαμενή υπό πίεση, ικανή να ανταπεξέλθει σε πραγματικές συνθήκες αποθήκευσης. Οι παραμορφώσεις που υπέστη η βραχομάζα, το σκυρόδεμα και η ατσάλινη επένδυση ήταν μικρές σε αντιστοιχία με την ασκούμενη σε αυτά πίεση. Κατά την αφαίρεση της ατσάλινης μεμβράνης, μετά το πέρας λειτουργίας της δοκιμαστικής μονάδας, παρατηρήθηκε ότι η στρώση του σκυροδέματος ήταν σχεδόν άθικτη, με την παρουσία μόνο

μερικών μικρορωγματώσεων. Τέλος παρότι η ατσάλινη μεμβράνη ξεπέρασε το όριο διαρροής της δεν έχασε τη δομή, τις ιδιότητες και άρα τη λειτουργικότητά της (Sofregaz and LRC, 1999).



Εικόνα 3.14: Τυπική διατομή δοκιμαστικού θαλάμου (Sofregaz and LRC, 1999)



Εικόνα 3.15: Όψη των εγκαταστάσεων (Tengborg et al., 2014)

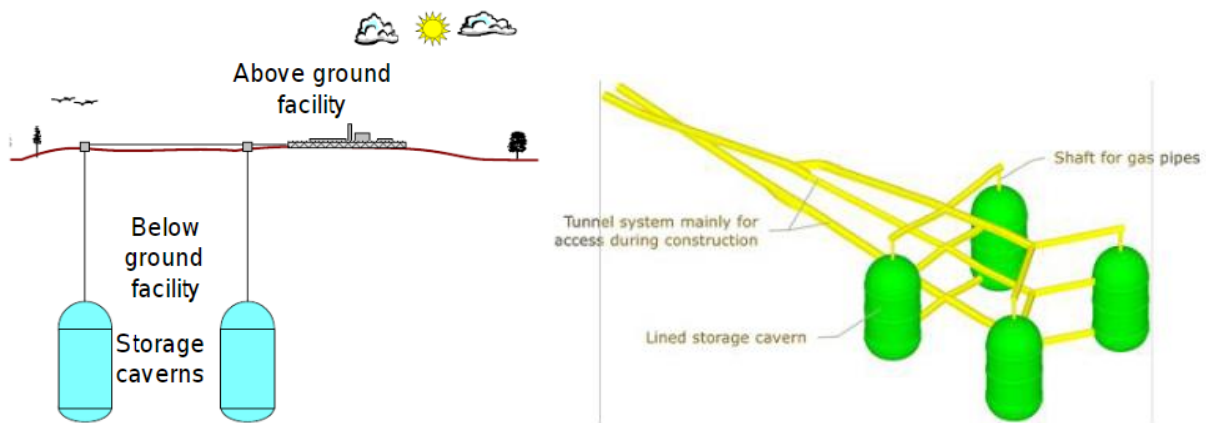
3.6.1.2 Υπόγειος χώρος αποθήκευσης στο Skallen της Σουηδίας

Οι διαδικασίες κατασκευής του υπόγειου χώρου αποθήκευσης ξεκίνησαν το 1998 και ολοκληρώθηκαν το 2002, οπότε και τέθηκε σε λειτουργία. Η μονάδα λειτουργεί μέχρι και σήμερα τροφοδοτώντας το δίκτυο φυσικού αερίου της Σουηδίας. Έρευνες για τη δημιουργία αντίστοιχων εγκαταστάσεων έχουν πλέον πραγματοποιηθεί και σε Η.Π.Α. και Ασία, κυρίως αναφορικά με την αποθήκευση φυσικού αερίου. Παρ' όλα αυτά το ενδιαφέρον στρέφεται προς τη χρήση της μεθόδου για αποθήκευση και άλλων προϊόντων παραγωγής ενέργειας υπό υψηλή πίεση (Tengborg et al., 2014).

Η βασική μορφή των εγκαταστάσεων αποθήκευσης φυσικού αερίου στην περιοχή συνίσταται στον υπόγειο και τον επιφανειακό χώρο. Μια αρχική προσέγγιση την ιδέας στο υπόγειο κομμάτι στόχευε στη δημιουργία ενός ή περισσότερων κατακόρυφων, κυλινδρικής μορφής θαλάμων με καμπύλο θόλο στην οροφή και το δάπεδο (Tengborg et al., 2014), σε βάθος 100-200 m από την επιφάνεια του εδάφους, ενός συστήματος προσπελαστικών σηράγγων και ενός κατακόρυφου φρέατος για την διοχέτευση του προϊόντος στον αποθηκευτικό χώρο. Η πίεση αποθήκευσης

εκτιμήθηκε μεταξύ 15 MPa και 30 MPa και οι διαστάσεις των θαλάμων 35-40 m σε διάμετρο και 60-100 m σε ύψος (Sofregaz and LRC, 1999). Οι επιφανειακές εγκαταστάσεις δεν διαφέρουν σε τίποτα από τις αντίστοιχες συμβατικές εγκαταστάσεις κατά την υπόγεια αποθήκευση σε κοιλότητα ορυκτού άλατος ή σε πορώδη σχηματισμό. Συνεπώς αποτελούνται από συμπιεστές, συστήματα ψύξης και θέρμανσης, αγωγούς, βαλβίδες και κέντρο ελέγχου (Tengborg et al., 2014).

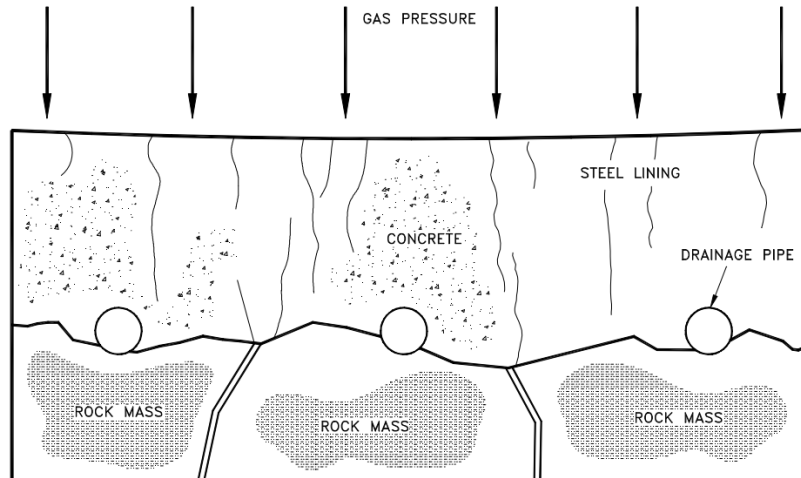
Η μέθοδος δύναται να εφαρμοστεί για διάφορους τύπους αποθηκευόμενων προϊόντων υπό πίεση, όπως το φυσικό αέριο και το υδρογόνο, και μάλιστα σε περιοχές με μέση έως υψηλή ποιότητα βραχομάζας. Για χαμηλής ποιότητας πέτρωμα η μέθοδος είναι και πάλι εφαρμόσιμη, απλά υπό μειωμένη πίεση αποθήκευσης (Tengborg et al., 2014).



Εικόνα 3.16: Απεικόνιση ενός συστήματος αποθήκευσης LRC (αριστερά), αναπαράσταση διάταξης των 4 θαλάμων (δεξιά) (Tengborg et al., 2014)

Τα βασικά χαρακτηριστικά της τεχνικής, κατά αντιστοιχία με την εφαρμογή της στο παράδειγμα της Κορέας, είναι η θεώρηση ότι η βραχομάζα απορροφά τις ασκούμενες πιέσεις, η τοποθετούμενη στρώση από σκυρόδεμα κατανέμει ομοιόμορφα τις πιέσεις από το αποθηκευόμενο φυσικό αέριο στο περιβάλλον πέτρωμα, η ύπαρξη λεπτής ατσάλινης μεμβράνης «σφραγίζει» τον θάλαμο αεροστεγώς και τέλος ότι η κατασκευή συστήματος αποστράγγισης δύναται να μειώσει τις πιέσεις των πόρων στην περιοχή. Κρίσιμο είναι επίσης να προσδιοριστούν η πίεση υπό την οποία η βραχομάζα αστοχεί, αλλά και το απαιτούμενο ύψος υπερκειμένων, ώστε να αποτραπεί το φαινόμενο ανύψωσης του εδάφους. Παράλληλα ο τύπος του τοποθετούμενου σκυροδέματος συνδέεται με τις επικρατούσες γεωλογικές συνθήκες, ενώ η ατσάλινη μεμβράνη πρέπει να

χαρακτηρίζεται από χημική αδράνεια και τη δυνατότητα να αντιστέκεται στις τάσεις και τις μετατοπίσεις του πετρώματος (Sofregaz and LRC, 1999).

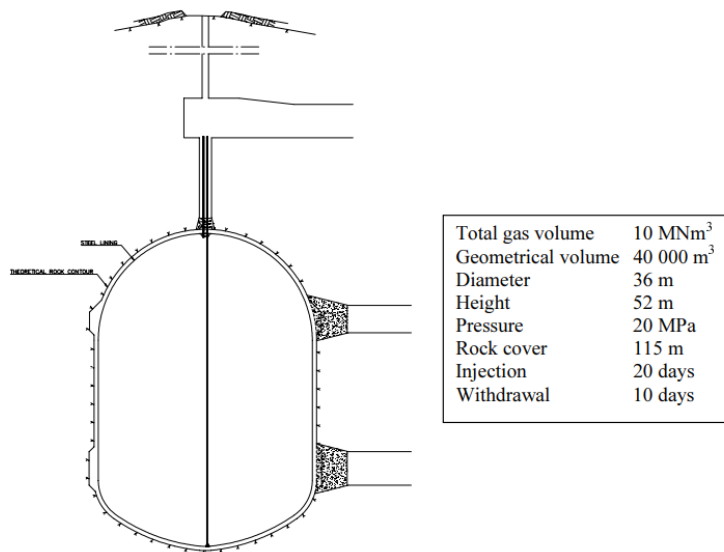


Εικόνα 3.17: Η τεχνική LRC (Lined Rock Cavern) (Sofregaz and LRC, 1999)

Τελικά επιλέχθηκε η κατασκευή κυλινδρικού κατακόρυφου θαλάμου σε βάθος 115 m από την επιφάνεια του εδάφους, με καμπύλο δάπεδο και σφαιρική οροφή, διαστάσεων 36 m σε διάμετρο και 52 m σε ύψος. Ο γεωμετρικός όγκος της εκσκαφής υπολογίστηκε σε 40,000 m³ με χωρητικότητα 10,000,000 m³ φυσικού αερίου υπό μέγιστη πίεση 200 bar (20 MPa). Η κατασκευή του υπόγειου χώρου πραγματοποιήθηκε σε καλής ποιότητας γνεύσιο. Ξεκίνησε με την διάνοιξη σήραγγας προσπέλασης και προχώρησε στη διάνοιξη του ανώτερου και κατώτερου καμπύλου τμήματος της διατομής. Το μεσαίο τμήμα του θαλάμου ήταν το τελευταίο που διανοίχτηκε. Η διαδικασία της εξόρυξης πραγματοποιήθηκε με διάτρηση – ανατίναξη με λεία τοιχώματα (smooth blasting) έτσι ώστε στη δημιουργούμενη επιφάνεια να μπορεί να τοποθετηθεί σε επόμενο στάδιο η επένδυση. Οι σωλήνες αποστράγγισης τοποθετήθηκαν στα τοιχώματα του ανοίγματος αμέσως μετά τη διάνοιξή του και καλύφθηκαν από μια στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Έπειτα ακολούθησε η κατασκευή της επένδυσης, με συγκόλληση μεγάλων προκατασκευασμένων τεμαχίων μεταλλικής μεμβράνης από ανοξείδωτο χάλυβα πάχους 12 mm, με σκοπό την παροχή αεροστεγών χαρακτηριστικών στον χώρο. Τέλος η κατασκευή ολοκληρώθηκε με την τοποθέτηση οπλισμένου σκυροδέματος μεταξύ της μεταλλικής μεμβράνης και του πετρώματος. Το σκυρόδεμα

που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτοσυμπυκνούμενο, έτσι ώστε να επιτευχθεί αποτέλεσμα υψηλής ποιότητας. Ο θάλαμος συνδέθηκε με τις επιφανειακές εγκαταστάσεις μέσω κατακόρυφου φρέατος εξοπλισμένο με αγωγούς για τη μεταφορά του φυσικού αερίου.

Το 2002 ολοκληρώθηκε η κατασκευή και η μονάδα τέθηκε σε δοκιμαστικούς ελέγχους με πολλαπλούς κύκλους λειτουργίας και πιέσεις μέχρι τα 22 MPa. Η συμπεριφορά της βραχομάζας και της επένδυσης τέθηκε υπό παρακολούθηση τα αποτελέσματα της οποίας απέδειξαν τη βιωσιμότητα του έργου. Σε γενικές γραμμές οι παραμορφώσεις ήταν χαμηλότερες από τις αναμενόμενες και συνεπώς οι τιμές σχεδιασμού ικανοποιητικές (Johansson, 2003).



Εικόνα 3.18: Η μονάδα αποθήκευσης LRC (Johansson, 2003)

3.6.2 Αποθήκευση υδρογόνου με τη μέθοδο LRC

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σε υπόγειο θάλαμο με τελική επένδυση είτε ως αέριο για απευθείας διοχέτευσή του στο δίκτυο μέσω αγωγών, είτε ως υγρό σε θερμοκρασία -253 °C για μεταφορά του μέσω φορητών πλοίων. Οι παραπάνω επιλογές παρέχουν περιβαλλοντικά και οικονομικά πλεονεκτήματα κατά την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων του καυσίμου.

Αναφορικά με την πρώτη επιλογή, λόγω της χαμηλής πυκνότητάς του, το υδρογόνο δεν είναι δυνατόν να αποθηκευτεί υπό χαμηλές πιέσεις. Συνεπώς σε θάλαμο με όγκο εκσκαφής τα 100,000 m³ και σε πίεση 10 bar μπορούν να αποθηκευτούν λιγότεροι από 90 τόνοι υδρογόνου, γεγονός μη ευνοϊκό για υπόγεια αποθήκευση. Για το λόγο αυτό οι επιθυμητές πιέσεις αποθήκευσης κυμαίνονται μεταξύ 100 bar και 200 bar. Καθώς για την επίτευξή τους απαιτείται κατασκευή θαλάμου χωρίς τελική επένδυση σε βάθος 1,000 m με 2,000 m, ώστε να λειτουργεί το φαινόμενο του υδροδυναμικού φραγμού, η ταυτόχρονη κατασκευή προσπελαστικών έργων σε τέτοια βάθη δεν είναι εύκολα εφαρμόσιμη. Εναλλακτικά μπορεί να δημιουργηθεί τεχνητός υδροφόρος ορίζοντας ώστε να μειωθεί το απαιτούμενο βάθος, χωρίς αυτή η προσθήκη να καθιστά τη μέθοδο απόλυτα ασφαλή. Έτσι η μέθοδος τεχνητού υπόγειου θαλάμου με προσθήκη τελικής επένδυσης, σε βάθος 100 m με 200 m, δύναται να ξεπεράσει τους περιορισμούς αυτούς. Κατά αντιστοιχία με την εφαρμογή της στη Σουηδία, η τεχνική εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του περιβάλλοντος πετρώματος και παρά την παρουσία της αεροστεγούς μεμβράνης, κρίνεται απαραίτητος ο έλεγχος των πιέσεων, προς αποφυγή των έντονων παραμορφώσεων πετρώματος και επένδυσης και του φαινομένου ανύψωσης του θαλάμου. Η μέθοδος χρήζει περαιτέρω εξερεύνησης και μελέτης ώστε να διευκρινισθεί η θερμοδυναμική συμπεριφορά του υδρογόνου, η μηχανική συμπεριφορά της ατσάλινης μεμβράνης και οι επιπτώσεις μιας πιθανής διαρροής.

Όσον αφορά στην αποθήκευση υγροποιημένου υδρογόνου σε χαμηλή θερμοκρασία, το σκεπτικό ακολουθεί την προσέγγιση του παραδείγματος της Κορέας σύμφωνα με το οποίο τοποθετείται στρώση σκυροδέματος, σύστημα συγκράτησης με μονωτικές πλάκες, για αποφυγή ανάπτυξης τάσεων λόγω χαμηλής θερμοκρασίας στο πέτρωμα και μείωση των ποσοστών εξάτμισης του υδρογόνου, και ατσάλινη μεμβράνη για ασφαλή περιορισμό του προϊόντος στον θάλαμο. Η αντιστοίχιση της μεθόδου αποθήκευσης LNG στην αποθήκευση LH₂ απαιτεί περισσότερη έρευνα κυρίως λόγω χαμηλότερης θερμοκρασίας στην περίπτωση του υδρογόνου (Londe, 2021).

3.6.3 Χαρακτηριστικά ατσάλινης επένδυσης

Πρωταρχικός ρόλος της ατσάλινης μεμβράνης είναι η εξασφάλιση αεροστεγούς περιβάλλοντος στο εσωτερικό του αποθηκευτικού θαλάμου. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η κατασκευή της με υλικά ανθεκτικά που δεν αντιδρούν με το αποθηκευόμενο φυσικό αέριο ή οποιαδήποτε ουσία

μπορεί αυτό να περιέχει, αλλά ούτε και με το περιβάλλον πέτρωμα με το οποίο έρχεται σε άμεση επαφή. Η ατσάλινη μεμβράνη δεν είναι σχεδιασμένη για να αναλαμβάνει φορτία, καθώς αυτά μεταβιβάζονται από το σκυρόδεμα στην βραχομάζα. Πρέπει βέβαια να αντέχει στις παραμορφώσεις των τοιχωμάτων του ανοίγματος. Παράλληλα η πίεση του φυσικού αερίου δύναται να δημιουργήσει ρωγμές στο πέτρωμα, οι οποίες εν συνεχεία δημιουργούν μικρορωγμές στο σκυρόδεμα. Καθώς η αντίσταση της μεμβράνης στις πιέσεις αυτές είναι κρίσιμη, η επιλογή της πίεσης αποθήκευσης και λειτουργίας των εγκαταστάσεων πρέπει να αποφασιστεί βάσει των αντοχών της μεμβράνης και των γεωλογικών συνθηκών. Για τη δημιουργία μεταλλικής επένδυσης υψηλής ποιότητας είναι σημαντικό να υπάρξει μέριμνα για την προσεκτική μεταφορά και τοποθέτηση των προκατασκευασμένων τεμαχίων της, την συγκόλλησή της αλλά και για τον ποιοτικό έλεγχο σχετικά με τις αντοχές της. Τέλος σημαντική είναι και η επιλογή της μεθόδου συγκόλλησης των κομματιών, μιας και με μια αυτοματοποιημένη διαδικασία η παραγωγή είναι ταχύτερη και το αποτέλεσμα είναι καλύτερης ποιότητας από την αντίστοιχη χειροκίνητη (Sofregaz and LRC, 1999).

3.6.4 Πλεονεκτήματα μεθόδου LRC

Κλείνοντας το κεφάλαιο μπορούν να αναφερθούν συμπερασματικά τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου LRC σε σχέση με μια συμβατική αποθήκευση σε υπόγειο χώρο, μετά και την διεξαγωγή του συνόλου των δοκιμών που αναλύθηκαν προηγουμένως. Συγκεκριμένα το μέγεθος του υπόγειου χώρου μπορεί να διαμορφωθεί σύμφωνα με τις εκάστοτε ανάγκες, με τη δυνατότητα να επεκταθεί αν κριθεί απαραίτητο. Ταυτόχρονα με προϋπόθεση την ύπαρξη κατάλληλου γεωλογικού υποβάθρου, μια τέτοια δομή μπορεί να κατασκευαστεί σε περιοχές με άμεση ανάγκη για κατανάλωση φυσικού αερίου. Επίσης το προϊόν δεν έρχεται ποτέ σε επαφή με τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, ενώ δεν απαιτείται αποστράγγιση του υπεδάφους κατά την άντληση. Τέλος η μέθοδος έχει αποδειχτεί ευσταθής με ελάχιστο αέριο να παραμένει μέσα στον θάλαμο (Sofregaz and LRC, 1999) ως αέριο βάσης, για την εξασφάλιση ικανοποιητικής πίεσης αποθήκευσης (Καρώνης et al., n.d.), και παρουσιάζει τα ίδια χαρακτηριστικά με τις κοιλότητες άλατος τόσο στην εξαγωγή του προϊόντος όσο και στους κύκλους λειτουργίας που μπορεί να εφαρμόσει (Sofregaz and LRC, 1999).

4. Σχεδιασμός υπόγειου χώρου αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία και τα βήματα που ακολουθήθηκαν, στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, με σκοπό το σχεδιασμό ενός υποθετικού υπόγειου χώρου αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου. Η επιλογή των χαρακτηριστικών που τελικά χρησιμοποιήθηκαν στο σχεδιασμό αποτελεί συνδυασμό των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν για την κατασκευή τέτοιου είδους χώρων, όπως αυτές αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, και δοκιμών πάνω σε μοντέλα προσομοίωσης που δημιουργήθηκαν μέσω υπολογιστικών προγραμμάτων.

4.1 Στοιχεία σχεδιασμού

4.1.1 Επιλογή θέσης κατασκευής και χαρακτηριστικών του πετρώματος

Ο υπό σχεδιασμό χώρος επιλέχθηκε να ακολουθήσει τη μέθοδο των υπόγειων τεχνητών θαλάμων με τελική επένδυση (Lined Rock Caverns). Σε αντίθεση με την επιφανειακή αποθήκευση σε κατάλληλα διαμορφωμένες δεξαμενές, οι υπόγειοι θάλαμοι παρέχουν μεγαλύτερη ασφάλεια και αξιοπιστία καταλαμβάνοντας ταυτόχρονα αρκετά μικρότερο επιφανειακό χώρο. Συνεπώς το συγκεκριμένο έργο θα ήταν χρήσιμο να κατασκευαστεί κοντά σε τερματικό σταθμό εισαγωγής φυσικού αερίου, έτσι ώστε το καύσιμο να διοχετεύεται υπόγεια απευθείας από τα φορτηγά πλοία και ο επιφανειακός χώρος να καταλαμβάνεται κυρίως από τις εγκαταστάσεις αεριοποίησης χωρίς να επιβαρύνεται περαιτέρω.

Η εφαρμογή ενός τέτοιου έργου για τα ελληνικά δεδομένα θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί είτε στο νησί Ρεβυθούσα, το οποίο ήδη φιλοξενεί τον μεγαλύτερο τερματικό σταθμό υποδοχής υγροποιημένου φυσικού αερίου στη χώρα, είτε στην ευρύτερη περιοχή μεταξύ Μεγάρων, Σαλαμίνας και Περάματος, όπως για παράδειγμα στο νησί Μακρόνησος.

Η καταλληλότητα των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής για την εκπόνηση ενός έργου αυτής της κλίμακας διερευνήθηκε μελετώντας τη διανομή του γεωλογικού χάρτη Μεγάρων του ΙΓΜΕ (Εικόνα 4.1). Σύμφωνα με τον χάρτη η περιοχή των Μεγάρων αποτελείται κατά κύριο λόγο από ασβεστόλιθους, δολομιτικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες, οι οποίοι συναντώνται ως λευκοί, λευκοκίτρινοι, τεφροί, παχυστρωματώδεις έως άστρωτοι, βιομικρίτες. Ανά διαστήματα εμφανίζονται λεπτές στρώσεις (1 – 2 cm) δολομιτωμένες (δολοσπαρίτες). Τα πετρώματα είναι έντονα κατακερματισμένα παρουσιάζοντας παράλληλα ένα ιδιαίτερα ανεπτυγμένο καρστικό σύστημα. Όσον αφορά στην περιοχή της Σαλαμίνας παρατηρούνται ασβεστόλιθοι, δολομίτες, μάρμαρα, σιπολίτες, και ηφαιστειακά πετρώματα. Πιο αναλυτικά το υπάρχον σύστημα αποτελείται από μάρμαρα και σιπολίτες, διασχίζεται από ηφαιστειακά πετρώματα και τόφφους μεγάλης εξαλλοίωσης. Στη βάση τους εμφανίζονται λατύπες από χαλαζία, μαρμαρυγιοκοί σχιστόλιθοι και χαλαζίτες, ενώ σε διάφορα σημεία παρατηρούνται φλέβες χαλαζία. Πιο πάνω αναπτύσσονται στρωματώδεις έως άστρωτοι, λευκότεφροι, λευκοκίτρινοι, ερυθρωποί, βιομικρίτες και βιοσπαρίτες. Τα υποκείμενα μεταμορφωμένα ανθρακικά πετρώματα χωρίζονται από τους τριαδικούς σχηματισμούς, μέσω ενός ορίζοντα (1 – 2.5 m) λεπτοπλακωδών ασβεστόλιθων, αντιπροσωπευτικών πιθανώς ενός μέρους του Κατώτατου Τριαδικού.

Παράλληλα λήφθηκαν υπόψιν γεωλογικά και γεωτεχνικά δεδομένα για την ευρύτερη περιοχή, από τις μελέτες σχεδιασμού υπόγειου συγκροτήματος αποθήκευσης πετρελαιοειδών στο Πέραμα. Συγκεκριμένα στην περιοχή του Περάματος επικρατούν ασβεστόλιθοι του Μέσου – Ανώτερου Τριαδικού με παράταξη Α-Δ και κλίση 28° – 40° N, μέσο έως παχυστρωματώδεις με πάχος κυμαινόμενο μεταξύ 150 m και 200 m. Η περιοχή έχει επίσης υποστεί την επίδραση τριών συστημάτων κανονικών ρηγμάτων διευθύνσεων Α-Δ, ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ. Τα κυριότερα ρήγματα έχουν διεύθυνση Α-Δ και έχουν επηρεάσει το μεγαλύτερο μέρος των σχηματισμών που επικρατούν στην περιοχή. Οι τρεις κυριότερες ασυνέχειες ορίζονται ως: J1: 70/070, J2: 75/360, J3: 85/260 με μεταβαλλόμενη πυκνότητα ανάλογα τη θέση, από 1 έως 3 διακλάσεις ανά μέτρο. Όσον αφορά στην υδρογεωλογία της περιοχής, οι σχηματισμοί παρουσιάζονται ιδιαίτερα περατοί και είναι χαρακτηριστική η ανάπτυξη έντονου καρστικού δικτύου. Ο καρστικός υδροφορέας εμφανίζει διεύθυνση απορροής ΒΔ-ΝΑ, με την εκφόρτισή του στη θάλασσα να πραγματοποιείται χωρίς την παρεμβολή ημι-περατών ή υδατοστεγανών σχηματισμών, οι οποίοι θα παρέμβαιναν στην υπόγεια απορροή. Κατά συνέπεια η διαμορφωμένη πιεζομετρία είναι αποτέλεσμα της θαλάσσιας δράσης. Οι πιεζομετρικές καμπύλες στο σημείο επαφής της θάλασσας με τον

υδροφορέα είναι ίσες με το απόλυτο μηδέν (0 m) και μάλιστα βάσει γεωτρήσεων στην ευρύτερη παραλιακή περιοχή, το απόλυτο ύψος στάθμης λαμβάνει τιμές μεταξύ 0.5 m και 1.2 m (Μπενάρδος και Καλιαμπάκος, 2010).

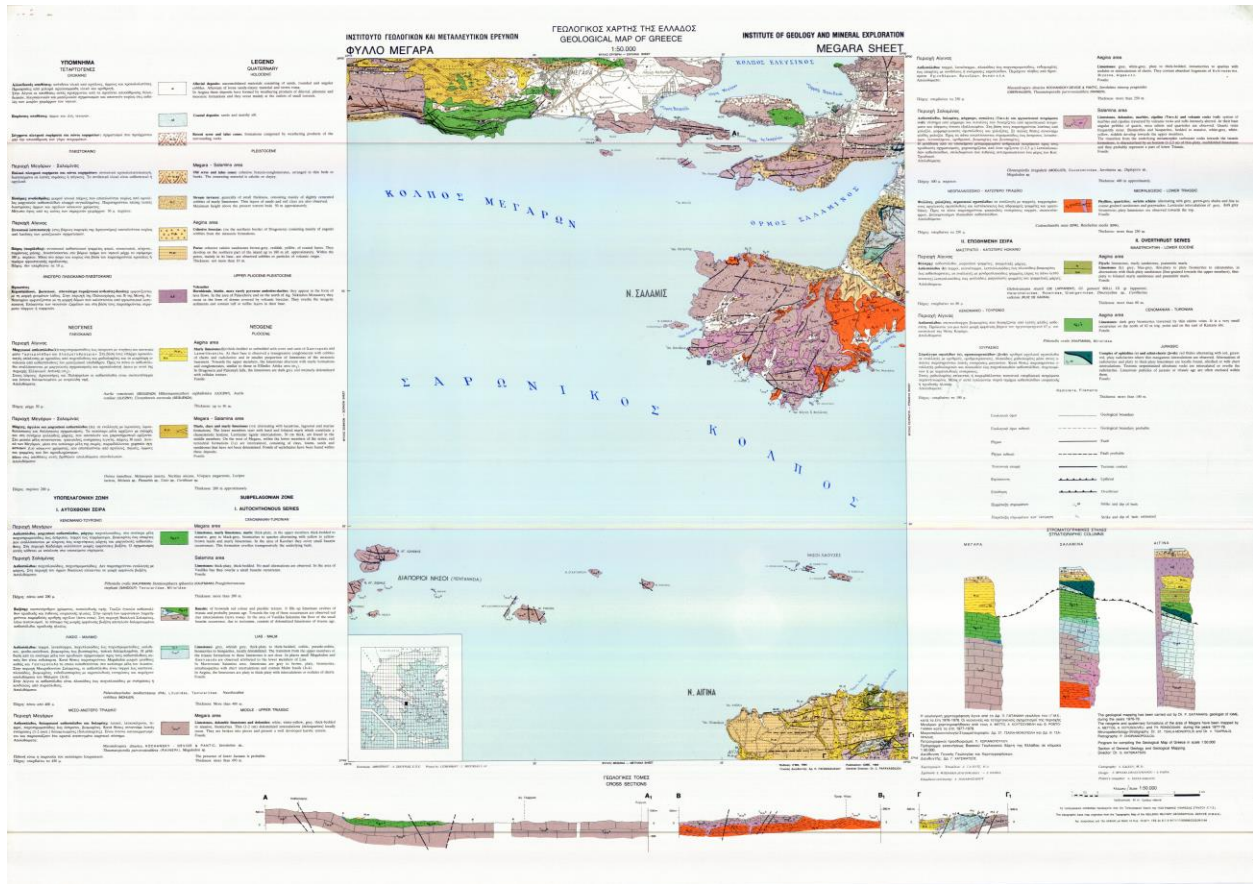
Στη συνέχεια καταγράφονται τα βασικά γεωμηχανικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση κατασκευής του έργου στο Πέραμα:

- Ειδικό βάρος: $\gamma = 0.026 \text{ MN/m}^3$ ($2.6 - 2.8 \text{ kg/cm}^3$)
- Μέση τιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη: 55 MPa ($29 - 87 \text{ MPa}$)
- Μέση τιμή αντοχής σε εφελκυσμό: 5 MPa ($3.8 - 6.5 \text{ MPa}$)
- Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας πετρώματος: $Ei = 12 \text{ GPa}$ ($2.5 - 98 \text{ GPa}$)
- Λόγος Poisson: $\nu = 0.20$ ($0.20 - 0.23$)

Επίσης αναφορικά με την ταξινόμηση της βραχομάζας στη δεδομένη περίπτωση:

- $\text{RMR}_{89} = 60$ (49 έως 72) «μέτριας έως καλής ποιότητας βραχομάζα»
- $Q = 5.8$ (1.4 έως 22.5)
- $\text{GSI} = 57$

Είναι εμφανές βάσει του χάρτη ότι στην περιοχή της Ρεβυθούσας και της Μακρονήσου επικρατούν αντίστοιχα γεωλογικά χαρακτηριστικά με τα προαναφερόμενα, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται και τρεις περιοχές πιθανών ρηγμάτων. Τελικά η κατασκευή του υπόγειου χώρου αποθήκευσης θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σε ένα εκ των δύο νησιών αποφεύγοντας φυσικά τις περιοχές των ρηγμάτων.



Εικόνα 4.1: Γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ (Φύλλο Μέγαρα)

Τελικά λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω για τον σχεδιασμό των τεχνητών υπόγειων θαλάμων στα πλαίσια της εργασίας, στην υποθετική θέση κατασκευής, επιλέχθηκε να επικρατεί ασβεστολιθικό πέτρωμα με τα εξής βασικά γεωμηχανικά χαρακτηριστικά:

- Ειδικό βάρος: $\gamma = 0.026 \text{ MN/m}^3$
- Μέτρο ελαστικότητας άρρηκτου πετρώματος: $E_i = 12 \text{ GPa}$
- Λόγος Poisson: $\nu = 0.20$

Με τη θεώρηση ότι το πέτρωμα αποτελεί συνεχές, ομοιογενές ισότροπο υλικό που διαρρέει σύμφωνα με τη θεωρία της πλαστικότητας, χρησιμοποιήθηκε το γενικευμένο κριτήριο Hoek – Brown για την περιγραφή της συμπεριφοράς της βραχομάζας κατά την αστοχία.

Ο προσδιορισμός των αδιάστατων παραμέτρων m_b , s και a του κριτηρίου, αλλά και του μέτρου παραμορφωσιμότητας E_{rm} της βραχομάζας, όπως αυτά φαίνονται στον πίνακα 4.1 παρακάτω, έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος RocData με τα ακόλουθα στοιχεία εισαγωγής:

- Παράμετρος $m_i = 12$ (τιμή για crystalline limestone)
- Συντελεστής διαταραχής $D = 0$

Αναφορικά με τις τιμές του δείκτη ποιότητας βραχομάζας GSI και της αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη UCS, πραγματοποιήθηκαν διερευνητικές δοκιμές και στη συνέχεια προσομοιώσεις για την εύρεση του ευνοϊκότερου ζεύγους τιμών. Συγκεκριμένα δοκιμάστηκαν τιμές GSI 50 και 55 και τιμές αντοχής πετρώματος UCS από 45 έως 60 με βήμα 5.

Πίνακας 4.1: Αδιάστατες παράμετροι του κριτηρίου αστοχίας βάσει του GSI

GSI	m_b	s	a	E_{rm}
50	2.012	0.0038659	0.5057	3686.2
55	2.406	0.0067379	0.5040	4899.4

Καθώς η βραχομάζα θεωρήθηκε ελαστική μέχρι την έναρξη της διαρροής και πλαστική κατά τη διαρροή, για τον υπολογισμό των τιμών παραμένουσας αντοχής της χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τύποι (Cai et al., 2007) τα αποτελέσματα των οποίων καταγράφονται στον πίνακα 4.2:

- $GSI_r = GSI * e^{-0.0134 * GSI}$
- $m_r = m_i * \exp\left(\frac{GSI_r - 100}{28}\right)$
- $s_r = \exp * \left(\frac{GSI_r - 100}{9}\right)$
- $a_r = 0.5 + \frac{1}{6} * \left(e^{\frac{GSI_r}{15}} - e^{-\frac{20}{3}}\right)$

Πίνακας 4.2: Αδιάστατες παράμετροι του κριτηρίου αστοχίας βάσει του GSI_r

GSI	GSI_r	m_r	s_r	a_r	E_{rm}
50	25.585	0.841	0.0002565	0.5301	743.3
55	26.32	0.864	0.0002783	0.5286	776.5

4.1.2 Δυναμικότητα και διαστάσεις θαλάμων

Ο καθορισμός της δυναμικότητας και συνεπώς του αριθμού των σχεδιαζόμενων θαλάμων αποθήκευσης πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια λαμβάνοντας υπόψιν στοιχεία για τη χωρητικότητα των φορητών πλοίων μεταφοράς LNG, για την αποθηκευτική ικανότητα των εγκαταστάσεων τερματικού σταθμού υγροποιημένου φυσικού αερίου στη νήσο Ρεβουθούσα, αλλά και για τον αποθηκευτικό, σε φυσικό αέριο, όγκο των εγκαταστάσεων στη Σουηδία, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3.

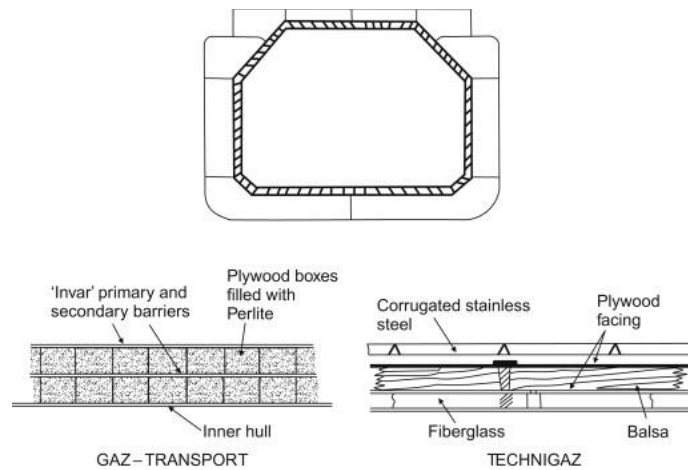
4.1.2.1 Πλοία μεταφοράς LNG

Ανά τα χρόνια έχουν κατασκευαστεί αρκετές κατηγορίες φορητών πλοίων με σκοπό την ασφαλή μεταφορά LNG από τις χώρες παραγωγούς στις χώρες καταναλωτές. Σε παγκόσμιο επίπεδο το μεγαλύτερο σε διαστάσεις και χωρητικότητα μοντέλο φορητού πλοίου έχει την ονομασία Q-Max, καθώς προέρχεται από το Κατάρ, έναν από τους μεγαλύτερους τροφοδότες υγροποιημένου φυσικού αερίου στον κόσμο. Το συγκεκριμένο πλοίο με διαστάσεις 345 m σε μήκος και 36 m σε πλάτος κατασκευάστηκε με σκοπό τη μεταφορά του μεγαλύτερου πιθανού όγκου προϊόντος, με τον περιορισμό όμως να είναι συμβατό με έναν μικρό αριθμό τερματικών σταθμών παγκοσμίως. Βέβαια παρότι το δεδομένο μοντέλο έχει ξεπεράσει σε μέγεθος τα πλέον συμβατικά πλοία που κυκλοφορούν στην αγορά, η εταιρεία Shell κατασκεύασε το 2013 μια πλωτή μονάδα (Floating Storage Unit – FSU) αποθήκευσης μήκους 490 m, η οποία όμως δεν διαθέτει δικό της σύστημα προώθησης, οπότε ρυμουλκείται στο επιθυμητό σημείο. Η μονάδα έχει δυνατότητες άντλησης του φυσικού αερίου από το κοίτασμα, υγροποίησής του και αποθήκευσης. Αντίθετα το μικρότερο σε διαστάσεις και χωρητικότητα πλοίο μεταφοράς LNG είχε μήκος 100 m και ήταν το πρώτο που χρησιμοποιήθηκε με αυτό τον σκοπό (Alaska Natural Gas Transportation Projects, 2014).

Όσον αφορά στη χωρητικότητα των φορητών πλοίων τα Q-Max διαθέτουν αποθηκευτικό χώρο ίσο με περίπου 266,000 m³, ποσότητα που μπορεί να καλύψει τις ανάγκες 75,000 νοικοκυριών στις Η.Π.Α. για ένα έτος. Στο μεγαλύτερο όμως ποσοστό τους τα πλοία είναι αρκετά μικρότερα και έχουν τη δυνατότητα μεταφοράς από 125,000 m³ έως και 175,000 m³ LNG. Είναι μάλιστα

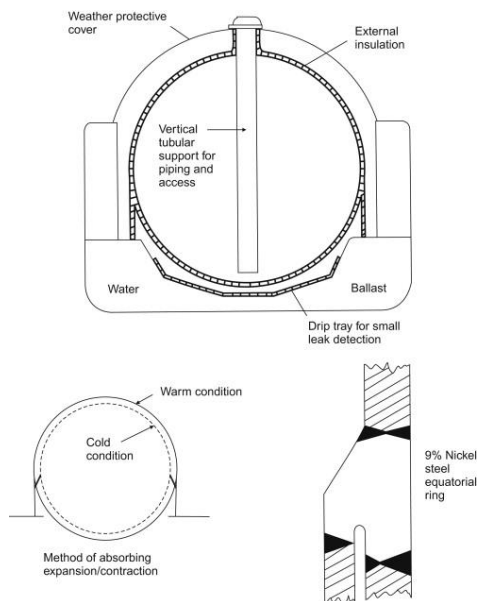
σχεδιασμένα έτσι ώστε να είναι συμβατά με τους περισσότερους τερματικούς σταθμούς παγκοσμίως (Alaska Natural Gas Transportation Projects, 2014).

Με σκοπό τη διατήρηση του φορτίου τους σε θερμοκρασία $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$, ώστε να αποφευχθεί η εξάτμιση και οι διαρροές, τα φορτηγά πλοία σχεδιάζονται κυρίως σε δύο μορφές. Η πρώτη βασίζεται στην τοποθέτηση δύο στρώσεων μεμβράνης με χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής, κατασκευασμένης από κράμα νικελίου – σιδήρου, σε πάχος $0.5 - 0.7\text{ mm}$ και μόνωσης από φύλλα κόντρα πλακέ με ενδιάμεσες στρώσεις περλίτη, πάχους περίπου 230 mm ή μεμβράνης από ανοξείδωτο χάλυβα και μόνωσης από φύλλα κόντρα πλακέ σε συνδυασμό με αφρό PVC (Eyres and Bruce, 2012).



Εικόνα 4.2: Μέθοδος με μεμβράνες (Eyres and Bruce, 2012)

Η δεύτερη μέθοδος σχεδιασμού στοχεύει στην χρήση κράματος αλουμινίου ή νικελίου με ατσάλι στα τοιχώματα μιας σφαιρικής δεξαμενής και στην τοποθέτηση αφρού από πολυουρεθάνη ως μονωτικό υλικό (Eyres and Bruce, 2012).



Εικόνα 4.3: Μέθοδος με σφαιρική δεξαμενή (Eyres and Bruce, 2012)

4.1.2.2 Τερματικός σταθμός Ρεβυθούσας

Ο τερματικός σταθμός υγροποιημένου φυσικού αερίου στη νήσο Ρεβυθούσα ανήκει στους 14 σταθμούς παραλαβής και αεριοποίησης φυσικού αερίου στην Ευρώπη σήμερα. Στις αρμοδιότητές του περιλαμβάνεται η παραλαβή του καυσίμου σε υγρή μορφή από τα φορτηγά πλοία, η αποθήκευση, η αεριοποίηση και τελικά η τροφοδοσία του στο Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου της χώρας (ΔΕΣΦΑ, n.d.).



Εικόνα 4.4: Τερματικός Σταθμός ΥΦΑ Ρεβυθούσας (ΔΕΣΦΑ, n.d.)

Οι εγκαταστάσεις αποτελούνται από δύο δεξαμενές συνολικής χωρητικότητας 130,000 m³, ενώ πρόσφατες εργασίες αναβάθμισαν τη συνολική χωρητικότητα σε 225,000 m³ με την κατασκευή μιας τρίτης δεξαμενής δυναμικότητας 95,000 m³, πλήρως μονωμένης και ημι-υπόγειας. Η κίνηση αυτή οδήγησε στην αύξηση της συνεχούς δυναμικότητας αεριοποίησης από 1,000 m³/h σε 1,400 m³/h και κατέστησε δυνατή την υποδοχή, από τις εγκαταστάσεις, πλοίων μεταφοράς χωρητικότητας μέχρι και 260,000 m³ (Asproforos engineering, 2014).

Οι δύο πρώτες δεξαμενές του σταθμού κατασκευάστηκαν μέσα σε κυλινδρικές τάφρους με διάμετρο 75 m μετά από σειρά εργασιών εκσκαφής, οι οποίες στη συνέχεια επενδύθηκαν στην περίμετρό τους με μπετόν. Οι δεξαμενές αποτελούνται από διπλό κέλυφος και κατασκευάστηκαν υπόγεια, ώστε να προσφέρουν ασφάλεια και μειωμένη οπτική ρύπανση. Η εσωτερική διάμετρος φτάνει τα 65.5 m και το ύψος τα 22.8 m. Το εσωτερικό περίβλημά τους, το οποίο έρχεται σε επαφή με το αποθηκευόμενο προϊόν, είναι κατασκευασμένο από χάλυβα με νικέλιο σε ποσοστό 9%, ενώ το εξωτερικό περίβλημα είναι κατασκευασμένο από ενισχυμένο σκυρόδεμα. Το εξωτερικό περίβλημα μάλιστα λειτουργεί και ανεξάρτητα του εσωτερικού σε περίπτωση αστοχίας του, συγκρατώντας το κρυογενικό υλικό. Η διατήρηση της χαμηλής θερμοκρασίας που απαιτεί η αποθήκευση του LNG επιτυγχάνεται μέσω τοποθέτησης μονωτικών πλακών ενδιάμεσα των δύο κελυφών. Καθώς η οροφή και η βάση χρήζουν περαιτέρω θερμικής προστασίας, η τοποθετούμενη μόνωση είναι ενισχυμένη. Ο γεωμετρικός όγκος της εκάστοτε δεξαμενής είναι 77,451 m³ με δυναμικότητα 65,000 m³ (ΔΕΣΦΑ, n.d.).

Η προσθήκη της τρίτης δεξαμενής αποθήκευσης συντελέστηκε με σκοπό την αύξηση της δυναμικότητας του τερματικού σταθμού, ώστε σε περίπτωση κρίσης να καλύπτονται οι ανάγκες της αγοράς. Κατασκευαστικά η νέα δεξαμενή ακολούθησε τη δομή των δύο προηγούμενων με διπλό κέλυφος, το εσωτερικό ως ατσάλινη μεμβράνη με 9% νικέλιο και το εξωτερικό ως σκυρόδεμα με αντοχές στις χαμηλές θερμοκρασίες, ικανό να συγκρατήσει το προϊόν σε περίπτωση ανάγκης. Σχετικά με τις διαστάσεις η εξωτερική διάμετρος της δεξαμενής είναι 81.5 m, ενώ η εσωτερική διάμετρος και το ύψος είναι 78 m και 24.4 m αντίστοιχα. Το μέγιστο πάχος της μονωτικής πλάκας φτάνει το 1 m και ο γεωμετρικός όγκος της δεξαμενής είναι 115,787 m³ για δυναμικότητα 95,000 m³. Η πίεση κατά τη λειτουργία των εγκαταστάσεων ανέρχεται σε 260 mbar (Asproforos engineering, 2014).

Για τη μεγαλύτερη ακόμα αναβάθμιση της αποθηκευτικής ικανότητας του σταθμού και για την αύξηση της ευελιξίας σε θέματα ανεφοδιασμού σε περιόδους μειωμένης ζήτησης φυσικού αερίου, αποφασίστηκε η προσθήκη πλωτής δεξαμενής στις εγκαταστάσεις (“ΔΕΣΦΑ: Η GasLog ανέλαβε την πλωτή δεξαμενή LNG”, 2022). Το πλοίο θα έχει δυναμικότητα από 150,000 m³ έως 174,000 m³ με αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής δυναμικότητας του σταθμού κατά 70% και τη δυνατότητα να ξεφορτώνουν δύο φορτηγά πλοία ταυτόχρονα. Ένα ζήτημα που απασχολεί αφορά στο κόστος που προκύπτει λόγω εξάτμισης του LNG στο ανώτερο μέρος της δεξαμενής και παρότι το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στις υφιστάμενες επιφανειακές δεξαμενές αποθήκευσης, η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στην πρώτη περίπτωση το καύσιμο χάνεται ενώ στην δεύτερη περίπτωση το αέριο συγκρατείται μέσω των υποδομών και επιστρέφει στη δεξαμενή. Η επιλογή της πλωτής δεξαμενής έγινε μέσω διαγωνισμού με τις προσφορές να ανέρχονται σε 94 εκατομμύρια, 78.4 εκατομμύρια, 92.4 εκατομμύρια και 73.5 εκατομμύρια ευρώ αντίστοιχα για ετήσια μίσθωση. Παράλληλα με το κόστος αυτό, στην τελική προσφορά προστίθεται και το κόστος λόγω εξάτμισης το οποίο κυμαίνεται από 30.4 εκατομμύρια έως 45.9 εκατομμύρια ευρώ αντίστοιχα (Τζάννε, 2022). Τελικά η σύμβαση μίσθωσης ενός νέου FSU ανατέθηκε στην εταιρεία GasLog για χρονικό διάστημα δώδεκα μηνών (“ΔΕΣΦΑ: Η GasLog ανέλαβε την πλωτή δεξαμενή LNG”, 2022).

4.1.2.3 Εγκαταστάσεις αποθήκευσης στη Σουηδία

Όπως αναλύθηκε και στο κεφάλαιο 3, στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης φυσικού αερίου στη Σουηδία επιλέχθηκε να κατασκευαστεί κατακόρυφος κυλινδρικός θάλαμος με σφαιρική οροφή και δάπεδο με διαστάσεις 36 m σε διάμετρο και 52 m σε ύψος. Με γεωμετρικό όγκο εκσκαφής τα 40,000 m³, η δυναμικότητα αποθήκευσης του θαλάμου φτάνει τα 10,000,000 m³ προϊόντος υπό μέγιστη πίεση 20 MPa. Σημαντικό είναι να σημειωθεί ότι ο συγκεκριμένος όγκος αφορά φυσικό αέριο και όχι υγροποιημένο φυσικό αέριο. Βάσει της δυναμικότητας αεριοποίησης του σταθμού Ρεβυθούσας και με την υπόθεση της χρησιμοποιούμενης σε αυτόν ισοδυναμίας: 1 m³ LNG = 590 m³ αερίου (desfa, n.d.), προφανώς η αναφερόμενη δυναμικότητα μειώνεται αισθητά.

4.1.2.4 Καθορισμός δυναμικότητας και διαστάσεων σχεδιαζόμενου χώρου

Τελικά λαμβάνοντας υπόψιν τη δυναμικότητα των φορτηγών πλοίων, των εγκαταστάσεων της Ρεβυθούσας, των εγκαταστάσεων της Σουηδίας, αλλά και του διαγράμματος που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.2.2 «Οικονομικά στοιχεία και δυναμικότητα», επιλέχθηκε να διερευνηθούν δύο σενάρια κατά το σχεδιασμό του υποθετικού χώρου.

Το πρώτο και δυσμενέστερο σενάριο πετυχαίνει συνολική δυναμικότητα της τάξης των 300,000 m³ και αποτελείται από τρεις θαλάμους, οριζόντια διατεταγμένους, χωρητικότητας 100,000 m³ ο κάθε ένας, ενώ το δεύτερο σενάριο πετυχαίνει συνολική δυναμικότητα 200,000 m³ με δύο οριζόντια διατεταγμένους θαλάμους των 100,000 m³ εκάστοτε. Τα δύο σενάρια διαφοροποιούνται και ως προς τον συντελεστή πλευρικής ώθησης K , καθώς στην πρώτη περίπτωση θεωρήθηκε ίσος με 0.3, ενώ στη δεύτερη ίσος με 0.7.

Ταυτόχρονα βάσει των εφαρμογών που αναπτύχθηκαν στον τομέα της αποθήκευσης κρυογενικών υλικών, επιλέχθηκε η τοποθέτηση μονωτικών πλακών πάχους 0.3 m και μεμβράνη κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα πάχους 12 mm. Όσον αφορά στην επένδυση από τσιμέντο, οι δοκιμές, όπως αυτές αναλύονται στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν για πάχος σκυροδέματος 110 mm και 90 mm για GSI = 50 και GSI = 55 αντίστοιχα. Τελικά αποφασίστηκε μικρή προσαύξηση του πάχους του για μεγαλύτερη ασφάλεια, έτσι ώστε να φτάσει τα 150 mm, οπότε συνολικά τα τοποθετούμενα υλικά στην εσωτερική περίμετρο της εκσκαφής έφτασαν περίπου τα 0.5 m σε πάχος.

Σχετικά με τις διαστάσεις των θαλάμων αποφασίστηκε να είναι κατακόρυφα ανοίγματα με ελλειψοειδή οροφή και διαστάσεις 20 m x 20 m. Υπολογίζοντας σε δύο διαστάσεις την επιφάνεια που καταλαμβάνει ο κάθε θάλαμος χωρίς και με την μονωτική πλάκα, τη μεμβράνη και το τσιμέντο, η επιθυμητή δυναμικότητα είναι δυνατόν να επιτευχθεί για μήκος θαλάμου σχεδόν 300 m. Με το ίδιο σκεπτικό δοκιμάστηκε η κατασκευή θαλάμων σε διαστάσεις 22 m ύψος και 16 m πλάτος, όμως ακολουθώντας την ίδια διαδικασία το απαιτούμενο μήκος των θαλάμων φτάνει τα 340 m. Η τελική επιλογή έγινε για άνοιγμα μικρότερου μήκους, οπότε και διατηρήθηκαν οι διαστάσεις 20 m x 20 m.

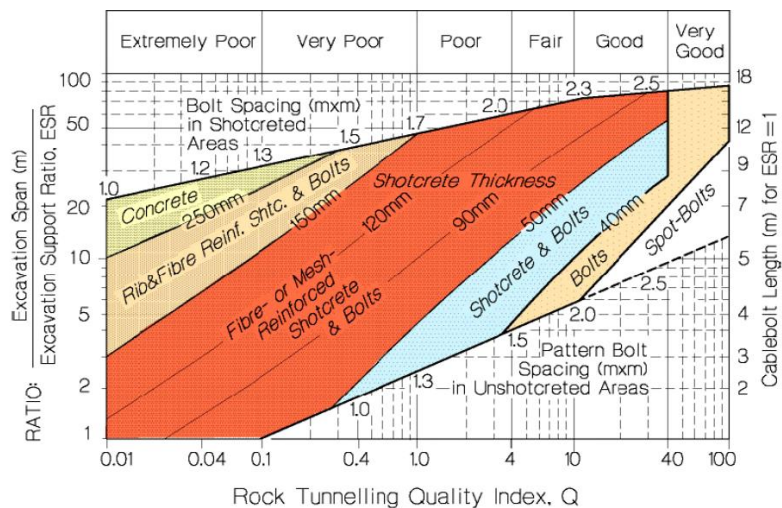
4.1.3 Επιλογή μέτρων υποστήριξης

Για τον σχεδιασμό των μέτρων υποστήριξης χρησιμοποιήθηκε το εμπειρικό διάγραμμα επιλογής μέτρων υποστήριξης βάσει της ταξινόμησης βραχομάζας κατά Q, με ESR = 1. Η συσχέτιση μεταξύ των γεωτεχνικών ταξινομήσεων GSI και Q πραγματοποιήθηκε με τη θεώρηση ότι ισχύει η σχέση $GSI \approx RMR$, ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή των εμπειρικών σχέσεων:

- $RMR = 9 * \ln Q + 44$, κατά Bieniawski (1976)
- $RMR = 15 * \log Q + 50$, κατά Barton (1995)

Τα μέτρα υποστήριξης υπολογίστηκαν για τιμές δείκτη GSI 50 και 55 και για εκσκαφή διαστάσεων 20 x 20 m και 22 x 16 m.

Τελικά για βραχομάζα με GSI = 50 επιλέχθηκε ρίψη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 110 mm και τοποθέτηση αγκυριών μήκους 7 m σε κάναβο 1.8 x 1.8 m, ενώ για βραχομάζα με GSI = 55 επιλέχθηκε ρίψη ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 90 mm και τοποθέτηση αγκυριών μήκους 7 m σε κάναβο 2 x 2 m.



Εικόνα 4.5: Επιλογή μέσων υποστήριξης (Barton et al., 1994)

Η επάρκεια του μήκους των αγκυριών που τελικά τοποθετήθηκαν στην εκσκαφή επιβεβαιώθηκε μέσω των εξής εμπειρικών τύπων κατά Hoek (1995) σε Μπενάρδος, Α. Καλιαμπάκος, Δ. (2010):

- Οροφή: $L = 2 + 0.15 * \left(\frac{B}{ESR}\right)$
- Παρειές: $L = 2 + 0.15 * \left(\frac{H}{ESR}\right)$

Όπου:

L: μήκος αγκυρίων

B: πλάτος εκσκαφής

H: ύψος εκσκαφής

ESR: συντελεστής εξαρτώμενος από τη χρήση του υπόγειου έργου

Αγκύρωση του πετρώματος επιλέχθηκε αρχικά να τοποθετηθεί σε όλη την επιφάνεια του θαλάμου και στη συνέχεια αποφασίστηκε η παράλληλη χρήση αγκυρίων διαφορετικού τύπου και μικρότερου μήκους στο θόλο του ανοίγματος. Σκοπός της κίνησης αυτής ήταν η αντιμετώπιση αστοχιών τύπου σφήνας στην οροφή από τα μικρότερα αγκύρια και η βελτίωση της ευστάθειας του ανοίγματος μέσω των αγκυρίων μεγαλύτερου μήκους, που διαπερνούν την πλαστική ζώνη και πακτώνονται σε υγιές πέτρωμα.

Έτσι κατά την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν αγκύρια τύπου Swellex / Split – Set των 7 m και αγκύρια τύπου End Anchored των 4 m, από τις επιλογές του προγράμματος RS2.

Για την εκτίμηση της πίεσης υποστήριξης και της αποτελεσματικότητας της χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RocSupport. Αρχικά έγινε εισαγωγή των χαρακτηριστικών του ανοίγματος και της βραχομάζας, προς δημιουργία της καμπύλης του πετρώματος και στη συνέχεια των χαρακτηριστικών του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ώστε να σχεδιαστεί η καμπύλη υποστήριξης. Η υποστήριξη θεωρήθηκε ότι σε κάθε περίπτωση εφαρμόστηκε στο μέτωπο εξόρυξης, οπότε υπολογίστηκε η εκάστοτε πίεση υποστήριξης, η σύγκλιση και οι μετατοπίσεις της εκσκαφής.

4.2 Προσομοίωση και δοκιμές

Μετά την επιλογή των βασικών στοιχείων σχεδιασμού του χώρου αποθήκευσης, πραγματοποιήθηκε εισαγωγή τους στο πρόγραμμα RS2 της RocScience με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς του πετρώματος, της ευστάθειας του ανοίγματος και τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων και χαρακτηριστικών βραχομάζας για την υλοποίηση ενός τέτοιου έργου.

4.2.1 Στάδια προσομοίωσης

Η ανάλυση επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί σε στάδια, ώστε να είναι εμφανής η επίδραση της κάθε κίνησης κατά την εκσκαφή στο πέτρωμα και η απόδοση των τοποθετούμενων μέτρων υποστήριξης. Για άνοιγμα ύψους 20 m αποφασίστηκε τμηματική όρυξη σε στάδια ξεκινώντας από την οροφή και καταλήγοντας στο δάπεδο. Οι βαθμίδες χωρίστηκαν στο ανώτερο, το μεσαίο και το κατώτερο τμήμα με ύψος 7 m, 7 m και 6 m αντίστοιχα.

Συνεπώς η διαδικασία χωρίστηκε στα εξής 7 βήματα:

1. Αρχικό εντατικό πεδίο
2. Αποτόνωση ανώτερου τμήματος
3. Διάνοιξη – Υποστήριξη
4. Αποτόνωση μεσαίου τμήματος
5. Διάνοιξη – Υποστήριξη
6. Αποτόνωση κατώτερου τμήματος
7. Διάνοιξη – Υποστήριξη

Η αποτόνωση προσομοιώθηκε με την επιλογή Loading → Induced Loads → Add Induced Stress Load για $\rho_i/\rho_o = 0.7$, τιμή που υπολογίστηκε μέσω του RocSupport βάσει των καμπυλών διάδρασης πετρώματος – υποστήριξης.

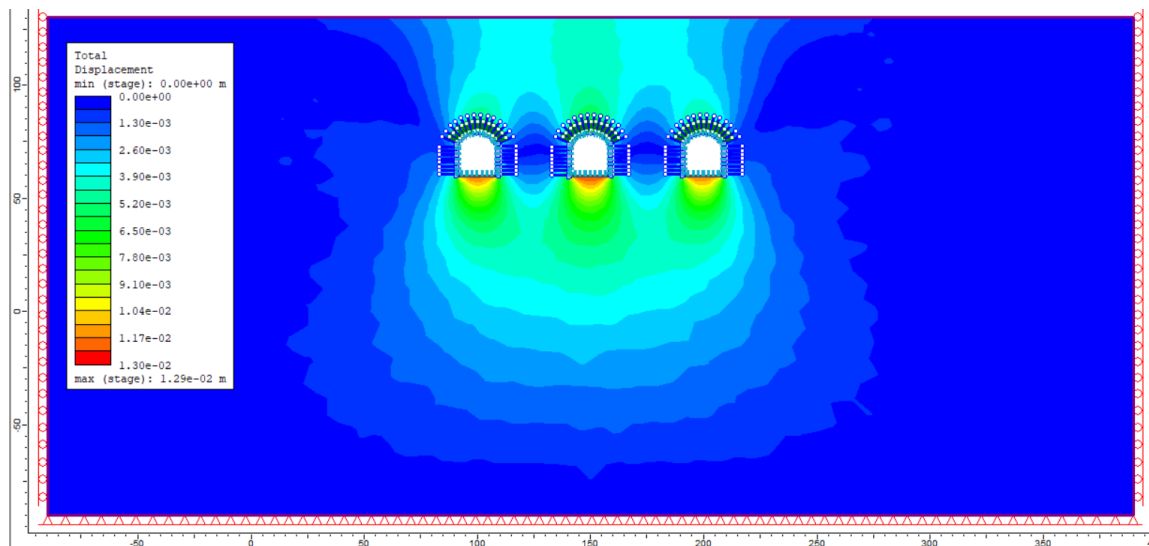
Μιας και το μητρικό πέτρωμα είναι ασβεστολιθικό η διάνοιξη είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με διάτρηση – ανατίναξη και μάλιστα με λεία τοιχώματα (smooth blasting). Για το ανώτερο τμήμα επιλέγεται χρήση οριζόντιων διατρημάτων, ενώ για το μεσαίο και κατώτερο μπορούν να

χρησιμοποιηθούν κατακόρυφα διατρήματα. Αναλυτικότερα η διαδικασία της διάνοιξης καταγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο.

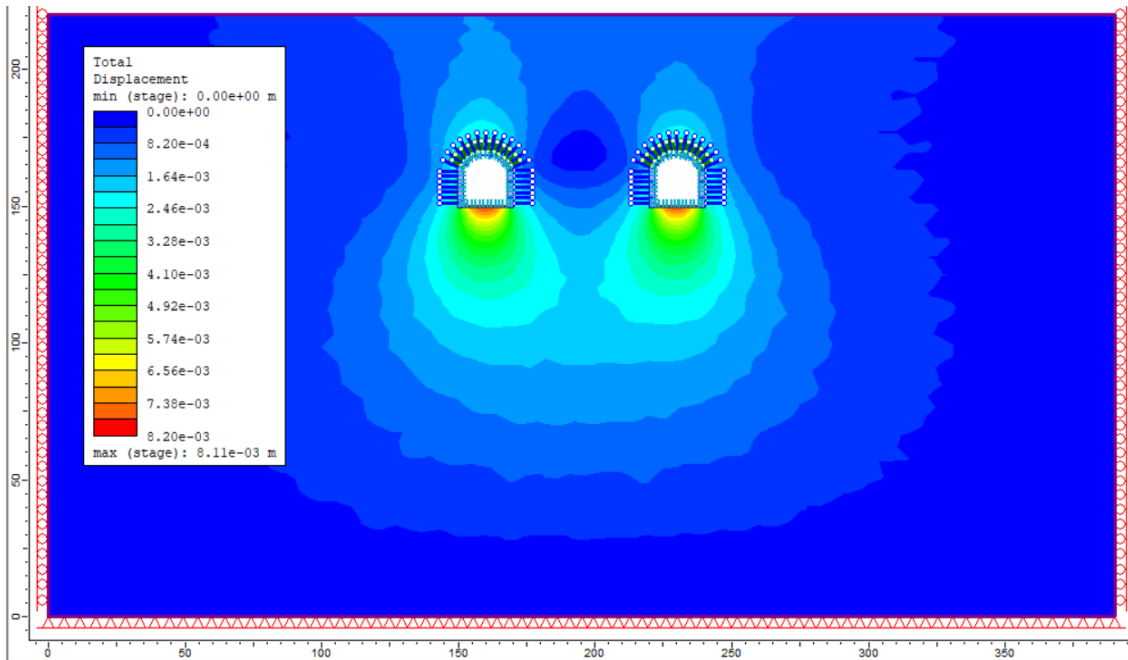
4.2.2 Δοκιμές σε GSI, UCS και απόσταση μεταξύ θαλάμων

Το σύνολο των αναλύσεων πραγματοποιήθηκε για το σενάριο των τριών και των δύο θαλάμων σε βάθος 50 m από την επιφάνεια του εδάφους. Η επιλογή του συγκεκριμένου βάθους έγινε μετά από δοκιμές για ύψος υπερκειμένων 30, 50, 60, 70 και 80 m. Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν ξεχωριστά για γεωλογικό δείκτη $GSI = 50$ και $GSI = 55$, εναλλάσσοντας τις τιμές της αντοχής του πετρώματος σε $USC = 45$, $USC = 50$, $USC = 55$ και $USC = 60$. Ταυτόχρονα για κάθε πιθανό συνδυασμό GSI και USC από τους παραπάνω, εναλλάσσονταν και η απόσταση μεταξύ των θαλάμων από 1.5 διαμέτρους (30 m), σε 2 διαμέτρους (40 m) και σε 2.5 διαμέτρους (50 m). Τελικά μέσω της επιλογής Interpret μελετήθηκαν κατά κύριο λόγο οι ολικές μετατοπίσεις, τα στοιχεία που παρουσιάζουν διαρροή σε κάθε δοκιμή και η αλληλεπίδραση μεταξύ των θαλάμων ανάλογα τη μεταξύ τους απόσταση.

Ενδεικτικά στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται οι ολικές μετατοπίσεις για ένα από τα μοντέλα που σχεδιάστηκε με τρεις θαλάμους και για ένα από τα μοντέλα που σχεδιάστηκε με δύο θαλάμους.



Εικόνα 4.6: 3 θάλαμοι – $GSI 50$, $USC 60$, απόσταση θαλάμων 1.5 διάμετροι (30 m)



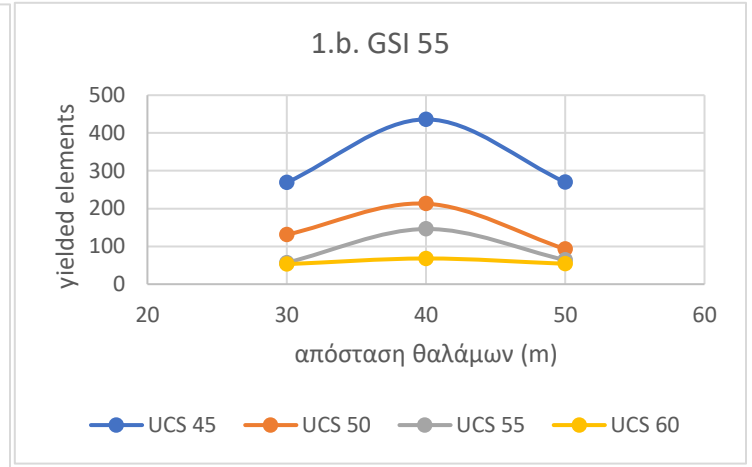
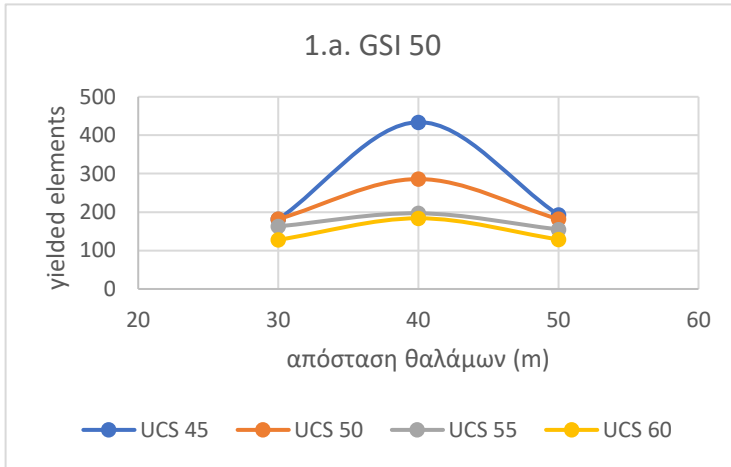
Εικόνα 4.7: 2 θάλαμοι- GSI 55, UCS 50, απόσταση θαλάμων 2.5 διάμετροι (50 m)

Για την επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού GSI, UCS και απόστασης μεταξύ των θαλάμων, λήφθηκαν τιμές ολικών μετατοπίσεων (total displacement), ογκομετρικής τροπής (volumetric strain) και μέγιστης διατμητικής τροπής (maximum shear strain), από τις παρειές και την οροφή του κάθε θαλάμου. Επίσης καταγράφηκαν και οι τιμές των στοιχείων που διαρρέουν για κάθε ζευγάρι τιμών GSI και UCS. Όλα τα παραπάνω συγκεντρώθηκαν σε υπολογιστικά φύλλα excel και σχεδιάστηκαν διαγράμματα.

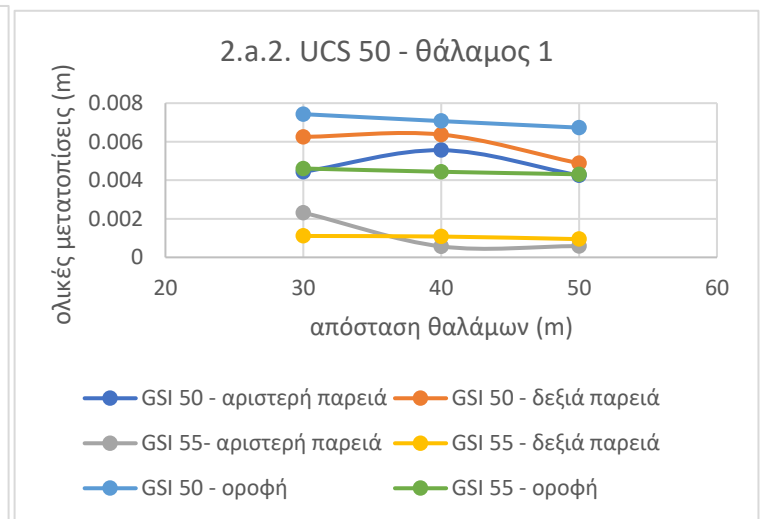
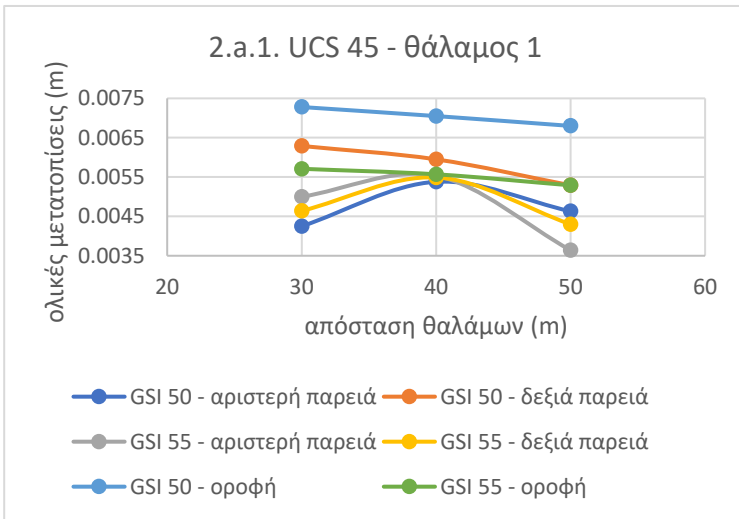
α) Σενάριο τριών θαλάμων

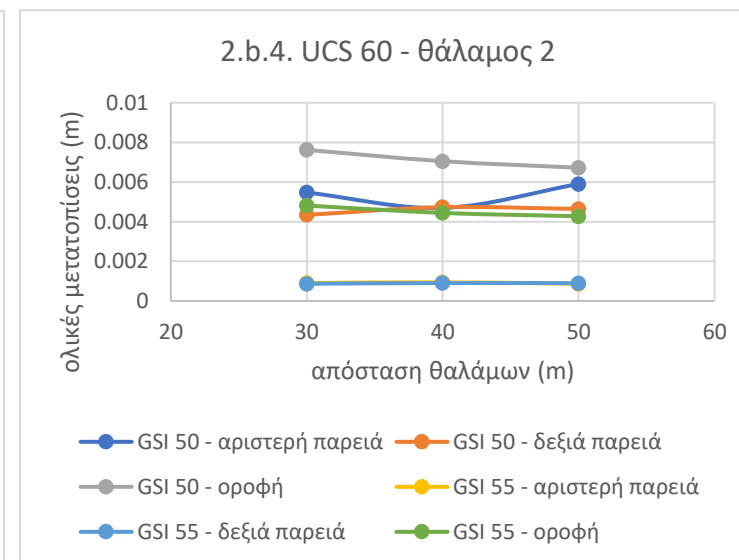
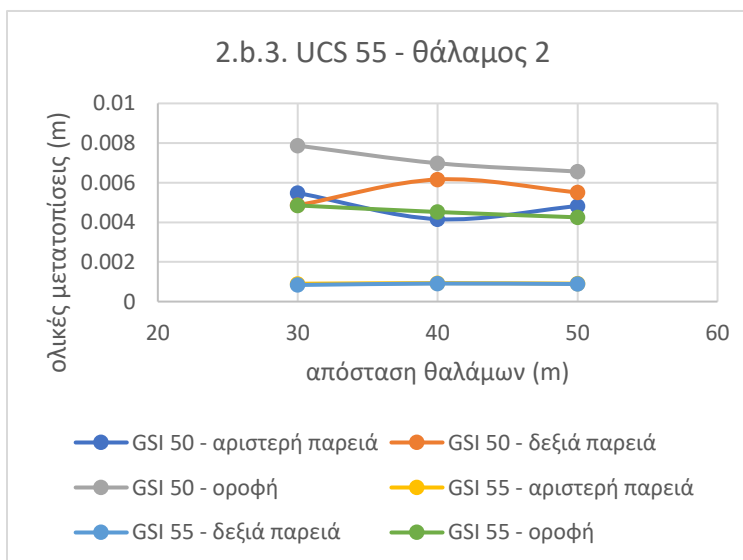
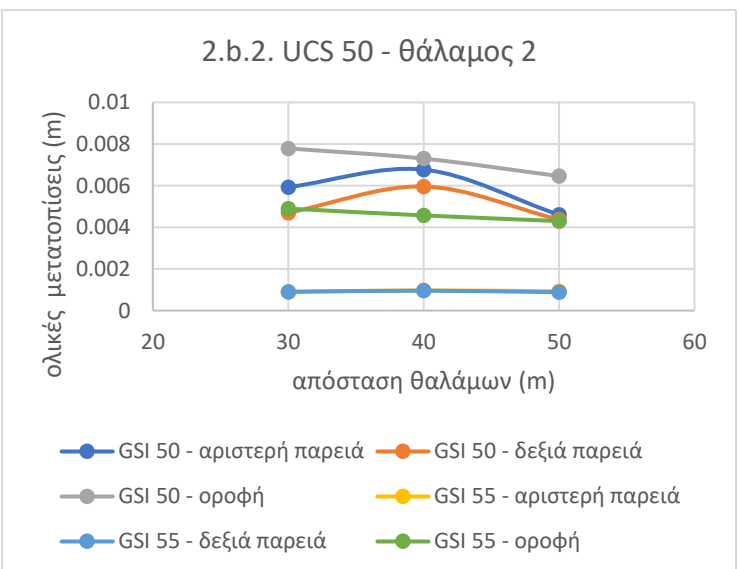
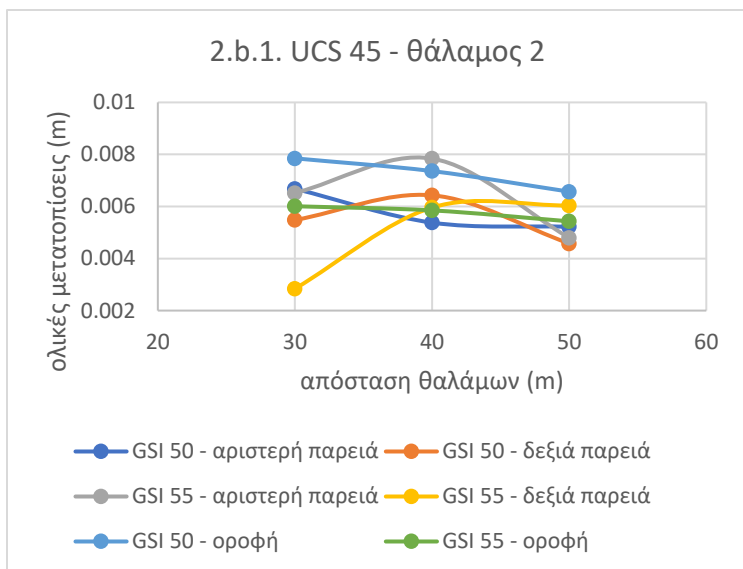
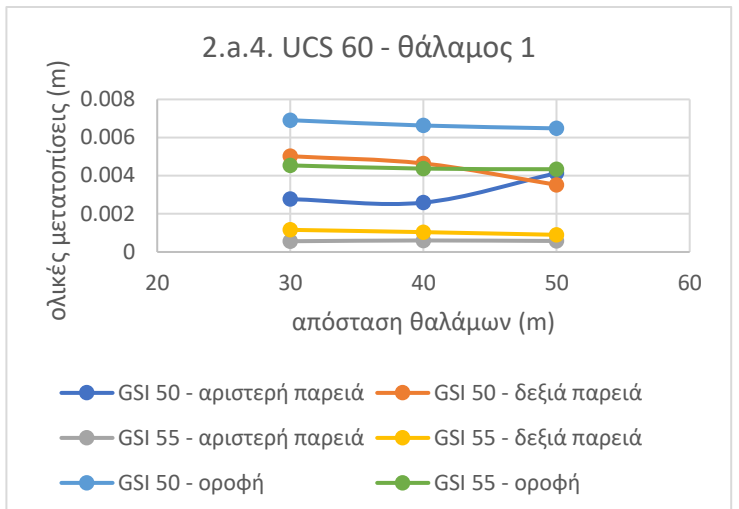
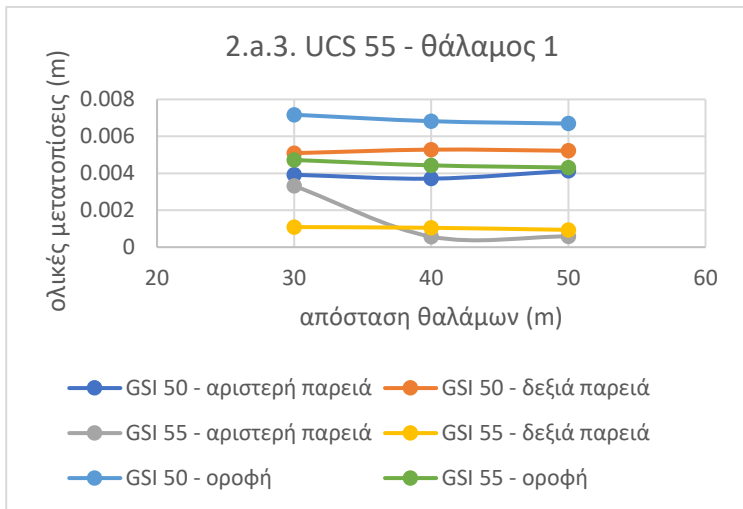
Επιλογή δείκτη ποιότητας βραχομάζας GSI

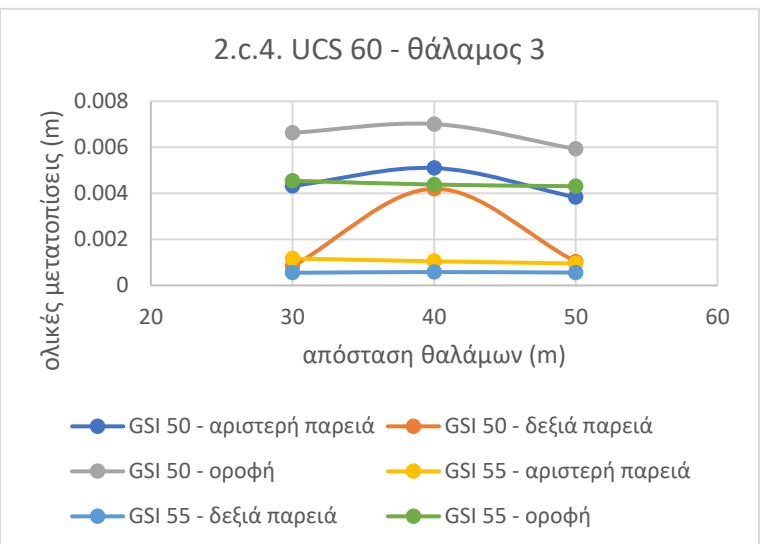
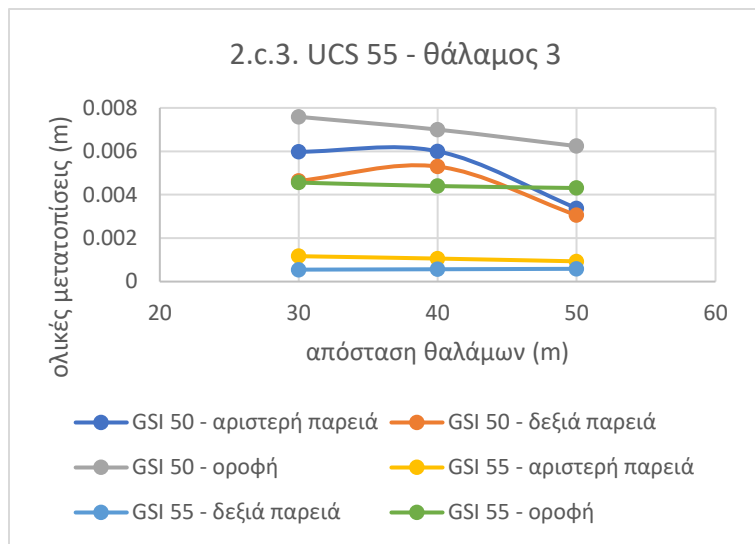
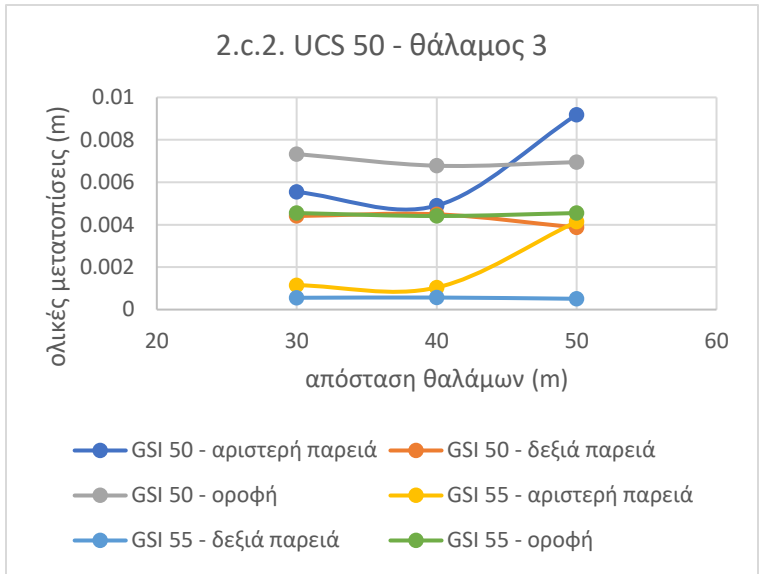
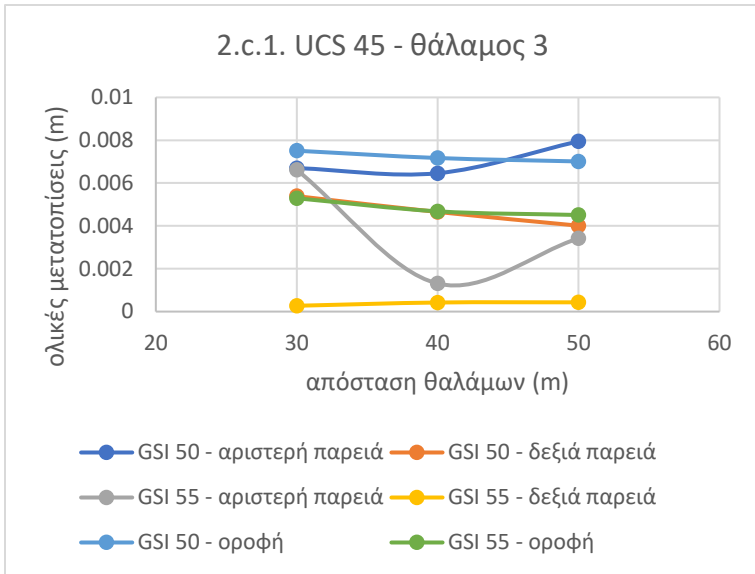
Για την επιλογή της βέλτιστης τιμής δείκτη ποιότητας βραχομάζας GSI σχεδιάστηκαν αρχικά τα διαγράμματα 1.a και 1.b στα οποία απεικονίζονται τα στοιχεία που έχουν διαρρεύσει συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των θαλάμων για τις δύο τιμές GSI και τις τέσσερις τιμές UCS. Είναι εμφανές ότι το πέτρωμα παρουσιάζει τον μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων σε διαρροή, και στις δύο περιπτώσεις GSI, για αντοχή σε μονοαξονική θλίψη UCS = 45. Παράλληλα διακρίνεται ότι για τις υπόλοιπες τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, τα στοιχεία σε διαρροή είναι λιγότερα σε αριθμό στην περίπτωση του GSI = 55.



Η επόμενη σειρά διαγραμμάτων από 2.a.1 έως 2.c.4 απεικονίζει τη μεταβολή των ολικών μετατοπίσεων σε συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των θαλάμων. Για κάθε θάλαμο και κάθε τιμή UCS σχεδιάστηκε ξεχωριστό διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζονται έξι καμπύλες. Οι τρεις καμπύλες αφορούν την οροφή και τις δύο παρειές του θαλάμου για GSI = 50 και οι άλλες τρεις καμπύλες αφορούν την οροφή και τις δύο παρειές του θαλάμου για GSI = 55.





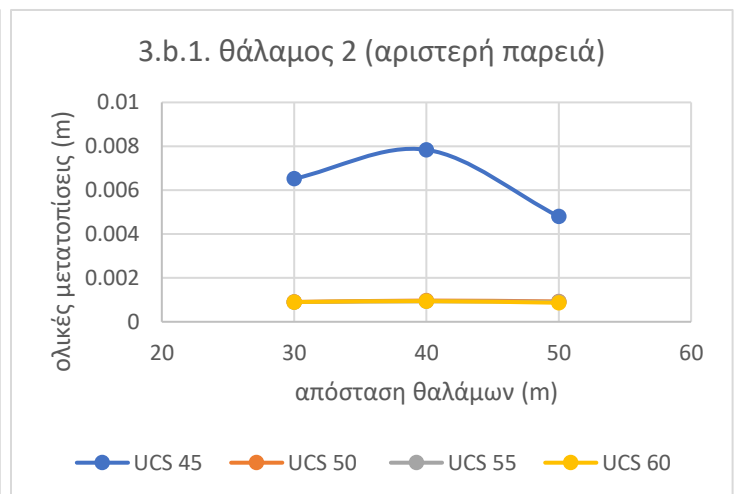
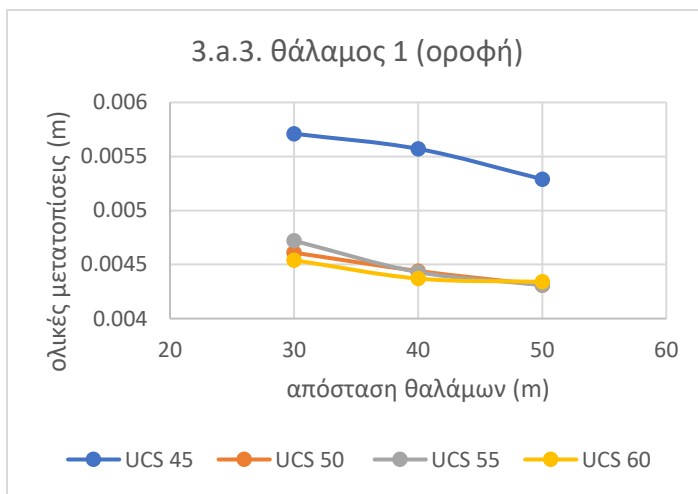
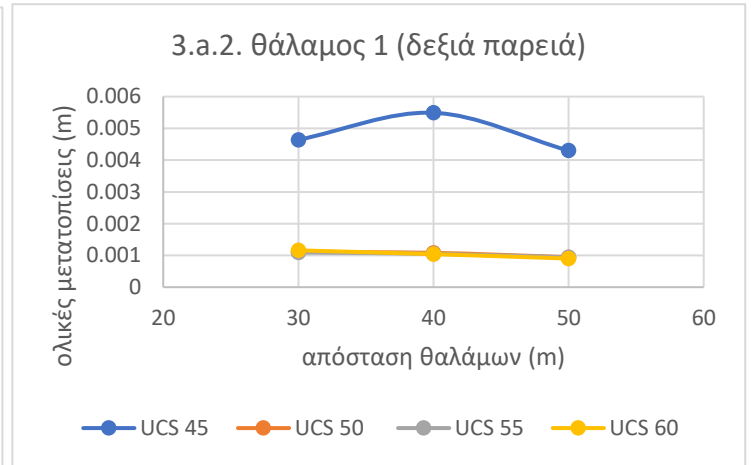
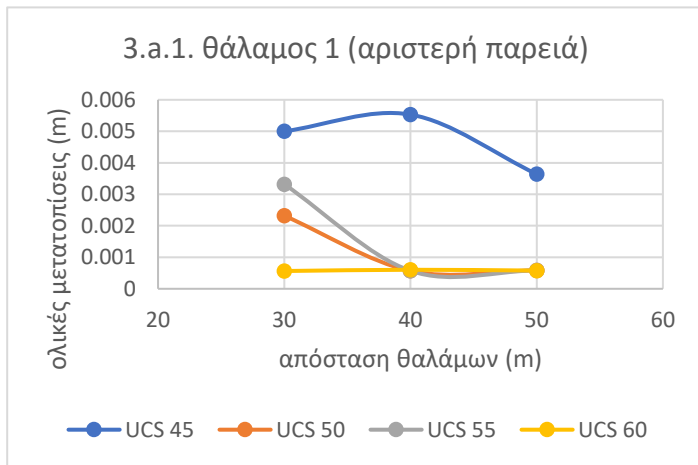


Συνολικά για τους τρεις θαλάμους παρατηρείται ότι πέτρωμα με δείκτη ποιότητας βραχομάζας GSI = 55 εμφανίζει χαμηλότερες τιμές ολικών μετατοπίσεων από πέτρωμα με δείκτη GSI = 50.

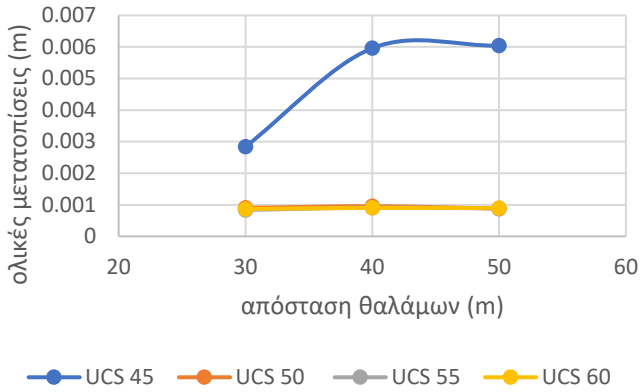
Με γνώμονα τα παραπάνω θεωρείται ότι η περίπτωση του δείκτη GSI = 50 είναι η δυσμενέστερη εκ των δύο και συνεπώς ο υποθετικός χώρος επιλέχθηκε να κατασκευαστεί σε πέτρωμα με δείκτη ποιότητας GSI = 55.

Επιλογή αντοχής πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη UCS

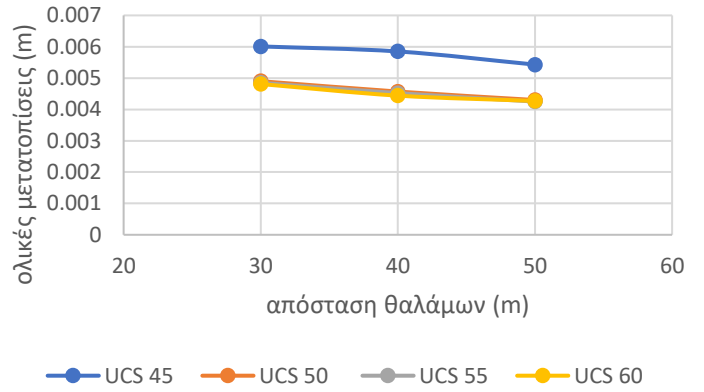
Στα διαγράμματα 3.a.1 έως 3.c.3 φαίνονται οι ολικές μετατοπίσεις σε συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των θαλάμων μόνο για την ευνοϊκότερη περίπτωση του $GSI = 55$. Τα διαγράμματα επικεντρώνονται στην οροφή και τις παρειές του κάθε θαλάμου ξεχωριστά και απεικονίζουν τέσσερις καμπύλες το κάθε ένα, για τις τέσσερις τιμές UCS. Με εξαίρεση τον τρίτο θάλαμο, τόσο στις παρειές όσο και στην οροφή, οι θάλαμοι 1 και 2 παρουσιάζουν τις μικρότερες μετατοπίσεις, για UCS κυμαινόμενο μεταξύ 50 και 60. Στον τρίτο θάλαμο παρατηρείται διαφορετική εικόνα, με τις τέσσερις καμπύλες να βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους, δυσκολεύοντας τη εξαγωγή κάποιου άμεσου συμπεράσματος. Για το λόγο αυτό λαμβάνονται υπόψιν, κατά κύριο λόγο, τα διαγράμματα που αφορούν τους άλλους δύο θαλάμους, σύμφωνα με τα οποία είναι απόλυτα εμφανές ότι για $UCS = 45$ οι εκσκαφές παρουσιάζουν συνολικά τις μεγαλύτερες τιμές μετατοπίσεων.



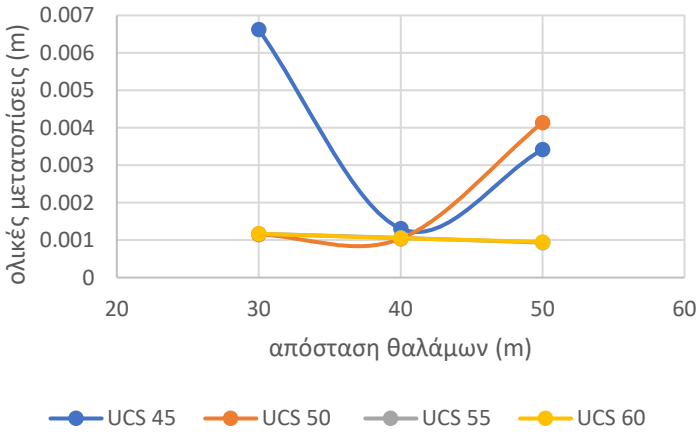
3.b.2. Θάλαμος 2 (δεξιά παρειά)



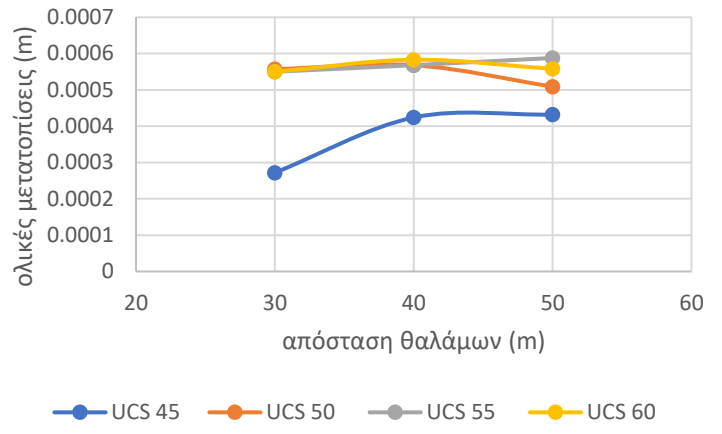
3.b.3. Θάλαμος 2 (οροφή)



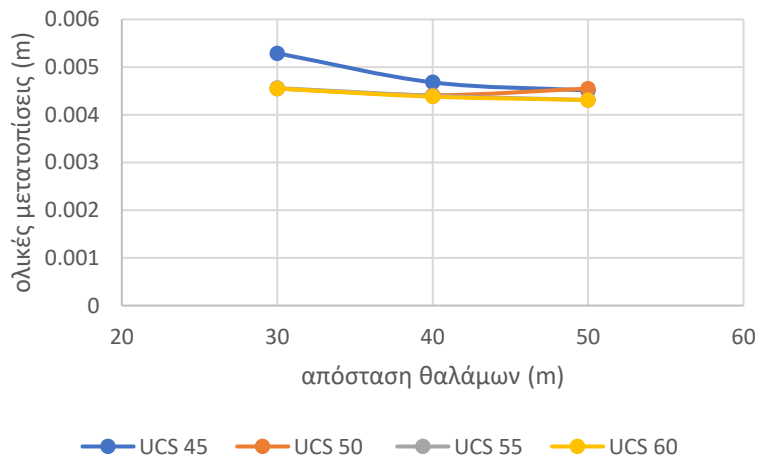
3.c.1. Θάλαμος 3 (αριστερή παρειά)



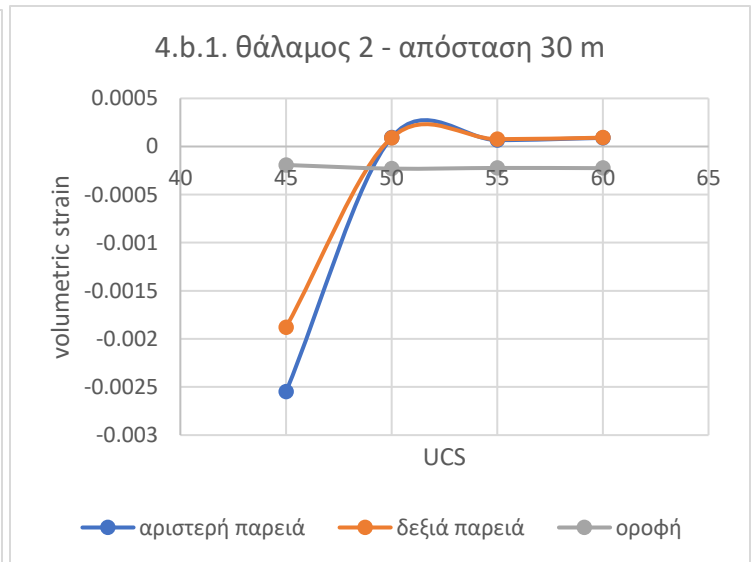
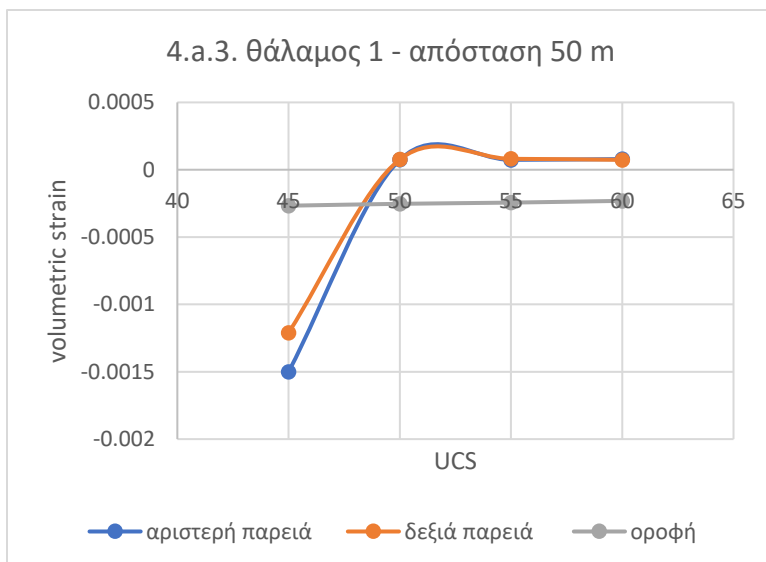
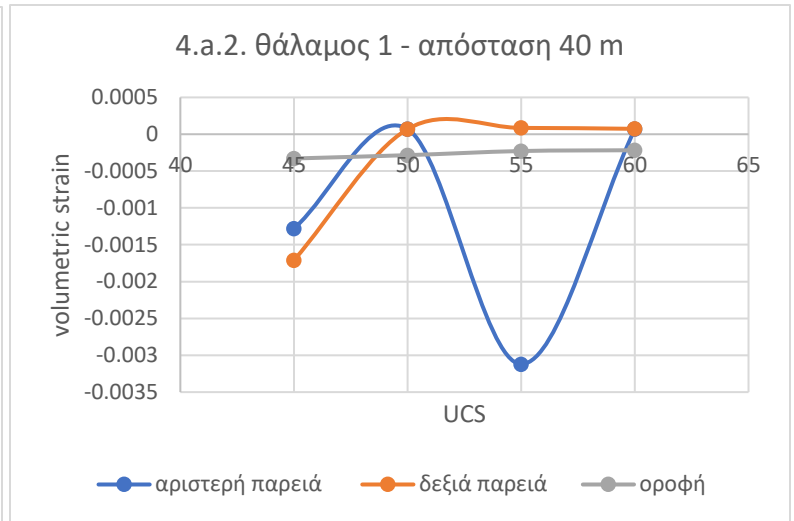
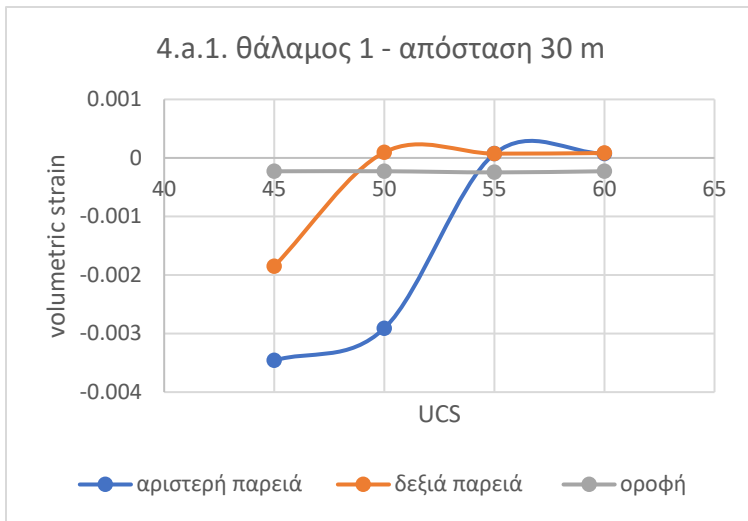
3.c.2. Θάλαμος 3 (δεξιά παρειά)



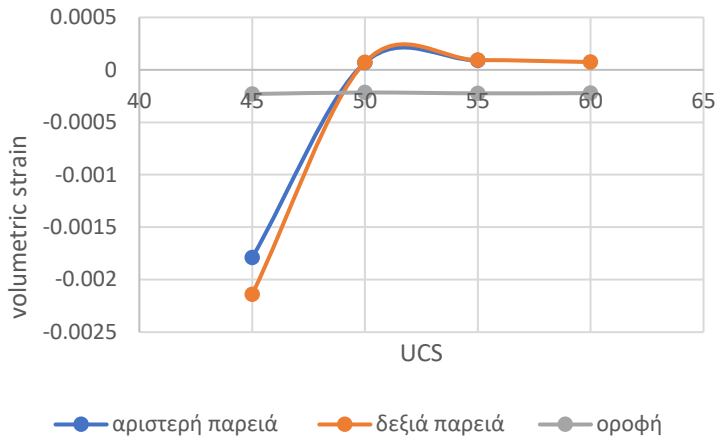
3.c.3. Θάλαμος 3 (οροφή)



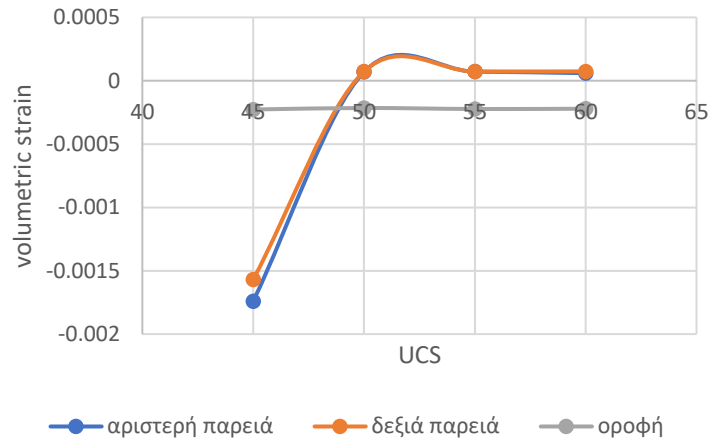
Τα διαγράμματα 4.a.1 έως 4.c.3 απεικονίζουν τη μεταβολή της ογκομετρικής τροπής σε συνάρτηση των τιμών UCS, για κάθε έναν από τους τρεις θαλάμους και για απόσταση μεταξύ τους ίση με 30 m, 40 m και 50 m αντίστοιχα. Καθώς η ογκομετρική τροπή αποτελεί ένδειξη της ανηγμένης μεταβολής όγκου ως προς τον αρχικό όγκο, παρατηρώντας τα διαγράμματα, προκύπτει ότι η οροφή των θαλάμων παρουσιάζει ελάχιστες και σχεδόν αμελητέες μεταβολές όγκου. Αντίθετα οι παρειές των θαλάμων επηρεάζονται σε μεγαλύτερο βαθμό και μάλιστα εμφανίζουν τις υψηλότερες σε απόλυτη τιμή μεταβολές, στην πλειοψηφία τους, για UCS = 45. Αντιθέτως τα ανοίγματα φαίνεται να επηρεάζονται σε μικρότερο βαθμό για UCS μεταξύ 55 και 60.



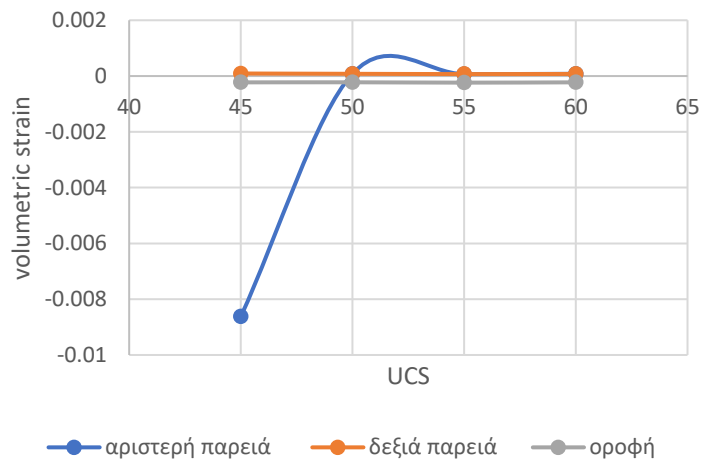
4.b.2. Θάλαμος 2 - απόσταση 40 m



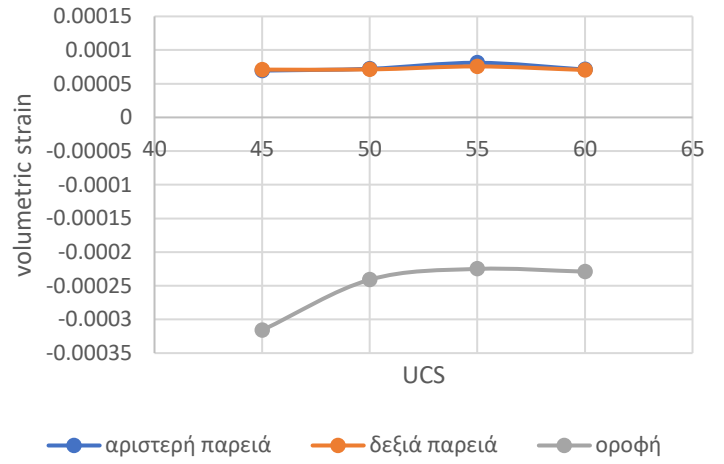
4.b.3. Θάλαμος 2 - απόσταση 50 m



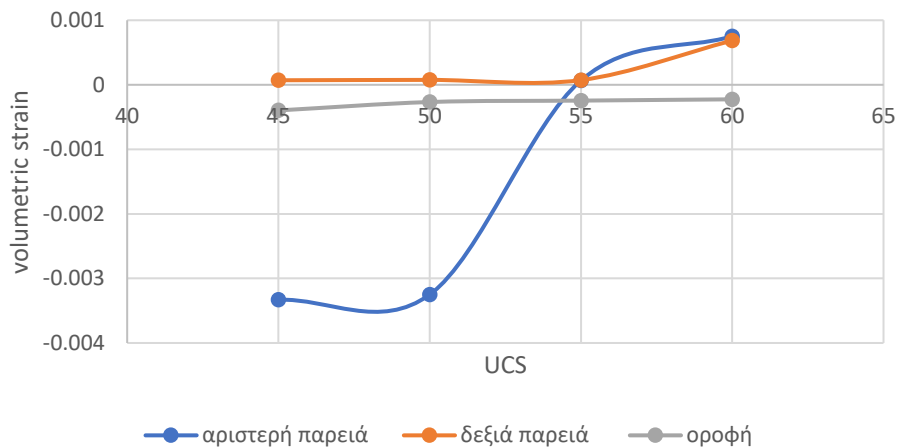
4.c.1. Θάλαμος 3 - απόσταση 30 m



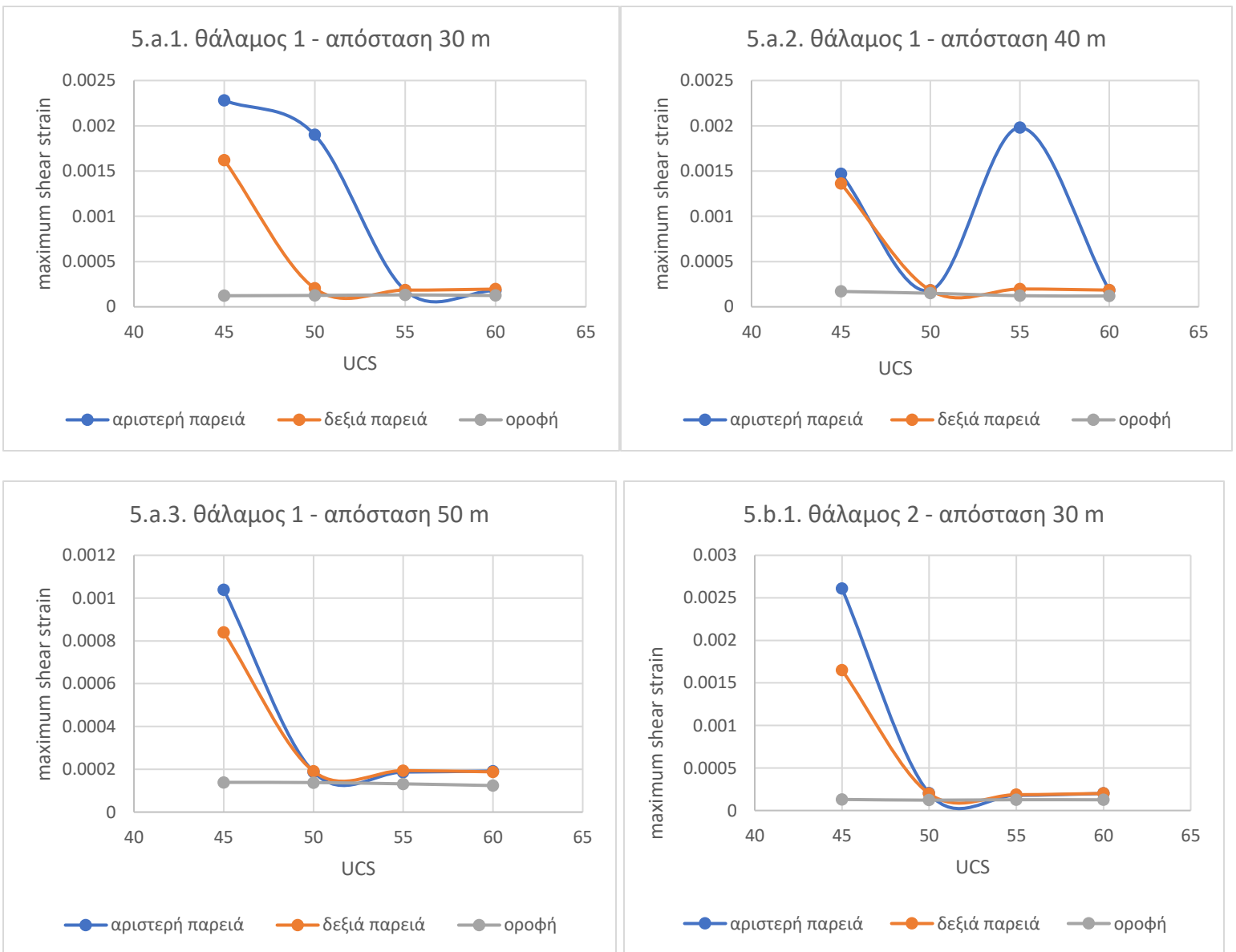
4.c.2. Θάλαμος 3 - απόσταση 40 m



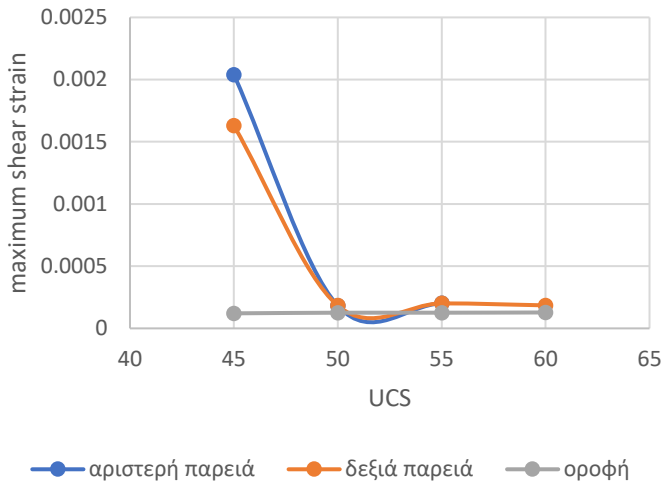
4.c.3. Θάλαμος 3 - απόσταση 50 m



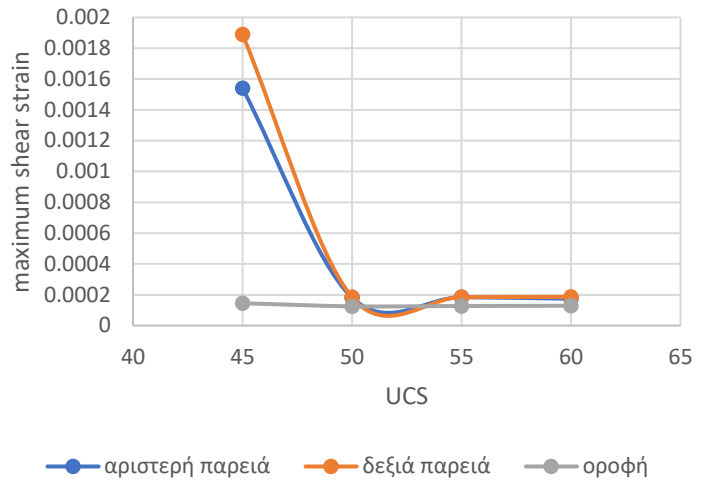
Τα διαγράμματα 5.a.1 έως 5.c.3 παρουσιάζουν τη μεταβολή της μέγιστης διατμητικής τροπής συναρτήσει των τιμών UCS. Κατά αντιστοιχία με την προηγούμενη σειρά διαγραμμάτων, τα γραφήματα αφορούν κάθε έναν από τους τρεις θαλάμους ξεχωριστά και για αποστάσεις μεταξύ τους 30 m, 40 και 50 m. Τα συμπεράσματα που εξάγονται είναι σε μεγάλο βαθμό όμοια με τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των διαγραμμάτων ογκομετρικής τροπής, μιας και η οροφή δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες μεταβολές τροπής. Υψηλές τιμές μέγιστης διατμητικής τροπής παρατηρούνται κυρίως για UCS = 45, ενώ για UCS = 55 και 60 οι τιμές ελαχιστοποιούνται.



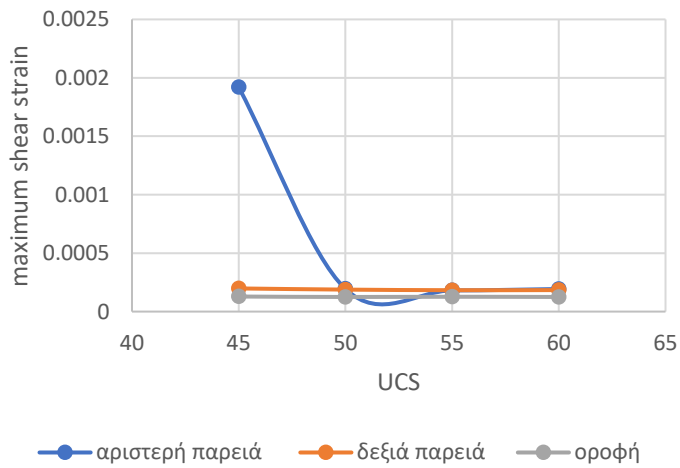
5.b.2. Θάλαμος 2 - απόσταση 40 m



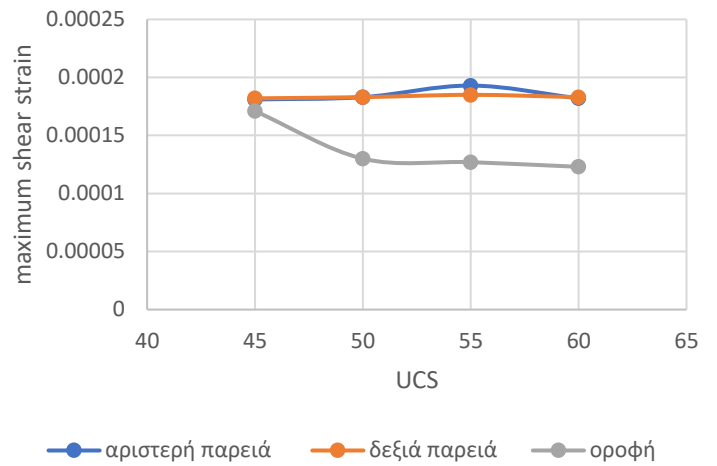
5.b.3. Θάλαμος 2 - απόσταση 50 m



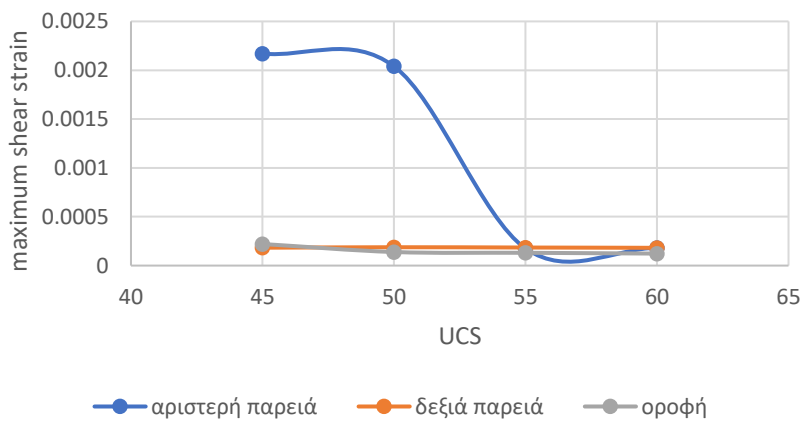
5.c.1. Θάλαμος 3 - απόσταση 30 m



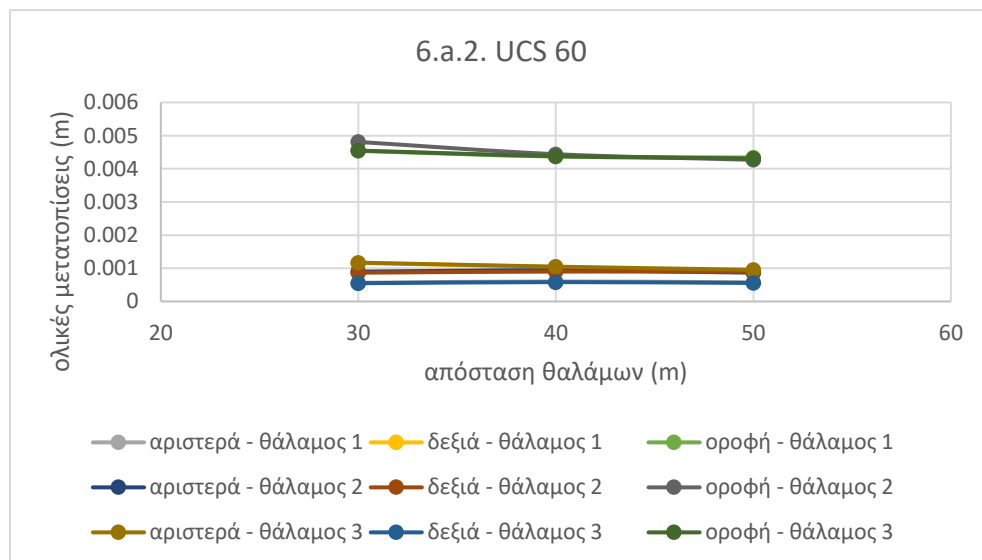
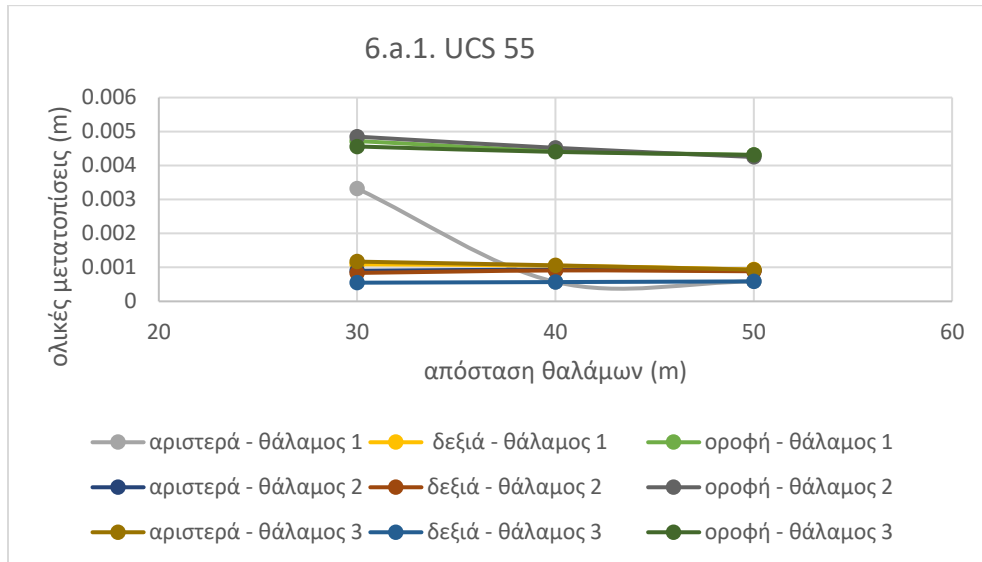
5.c.2. Θάλαμος 3 - απόσταση 40 m



5.c.3. Θάλαμος 3 - απόσταση 50 m



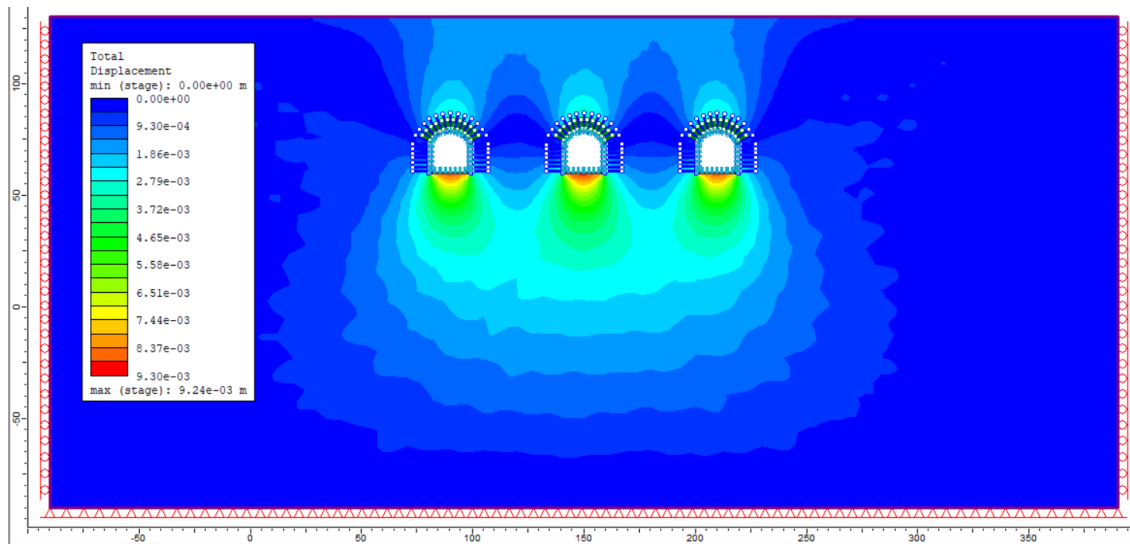
Για την τελική επιλογή της βέλτιστης τιμής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σχεδιάστηκαν δύο ακόμη διαγράμματα ολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των θαλάμων (6.a.1 και 6.a.2) για UCS = 55 και 60 αντίστοιχα, στα οποία εμφανίζεται μια συνολικότερη εικόνα των τριών θαλάμων. Συνεπώς φαίνεται ότι μεταξύ των δύο τιμών UCS δεν παρουσιάζεται αισθητή μεταβολή στις τιμές των ολικών μετατοπίσεων, γεγονός που επιτρέπει την επιλογή της τιμής UCS = 55 ως τιμή σχεδιασμού του υποθετικού χώρου αποθήκευσης.



Επιλογή απόστασης μεταξύ των θαλάμων

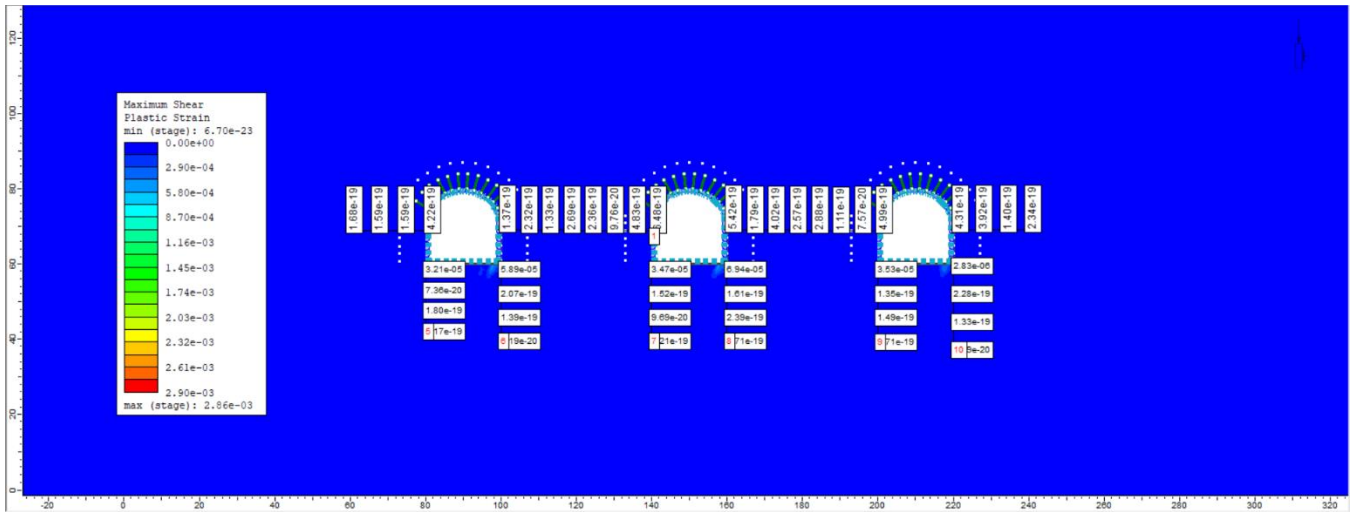
Η επιλογή της ευνοϊκότερης για την ευστάθεια απόστασης μεταξύ των σχεδιαζόμενων θαλάμων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια μερικών από τα διαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω για τη διερεύνηση της βέλτιστης επιλογής χαρακτηριστικών πετρώματος. Συγκεκριμένα μέσω των διαγραμμάτων 3.a.1 έως 3.c.3 είναι εμφανές ότι για απόσταση μεταξύ των θαλάμων ίση με 40 m και 50 m οι τιμές των μετατοπίσεων αποκλίνουν ελάχιστα μεταξύ τους και είναι στην πλειοψηφία τους χαμηλότερες από τις αντίστοιχες τιμές για απόσταση μεταξύ των θαλάμων ίση με 30 m. Το ίδιο συμπέρασμα εξάγεται και από τα διαγράμματα 6.a.1 και 6.a.2, οπότε ο τελικός σχεδιασμός των θαλάμων αποφασίστηκε να γίνει με τη θεώρηση απόστασης 40 m μεταξύ τους.

Συνοψίζοντας, το σενάριο κατασκευής των τριών θαλάμων αποθήκευσης θεωρήθηκε ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πέτρωμα με δείκτη ποιότητας $GSI = 55$ και αντοχή σε μονοαξονική θλίψη $UCS = 55$. Η απόσταση μεταξύ των θαλάμων λήφθηκε ίση με 40 m.



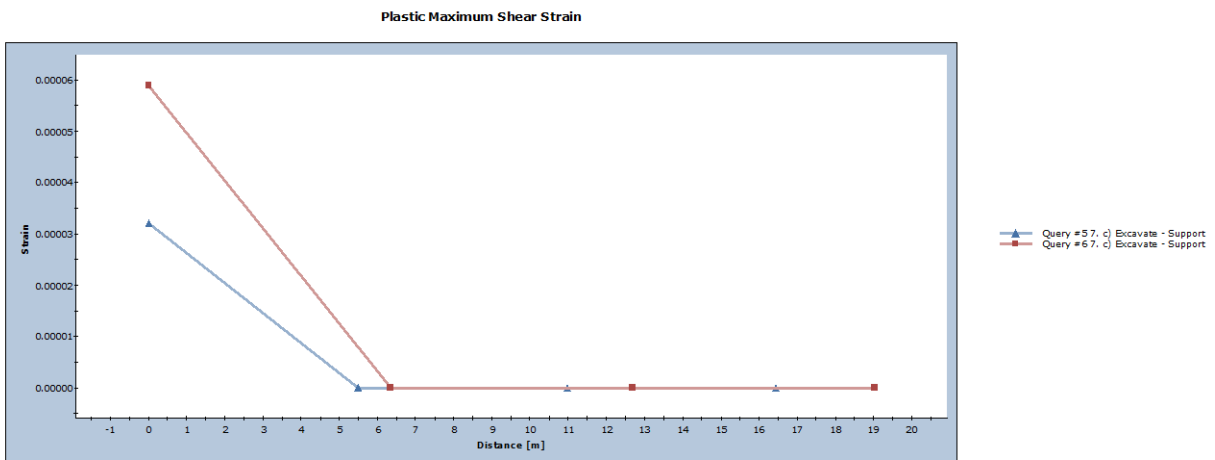
Εικόνα 4.8: Τελικό σχέδιο για 3 θαλάμους με $GSI = 55$, $UCS = 55$ και απόσταση θαλάμων 40 m

Σε συνέχεια των παραπάνω, για το μοντέλο το οποίο τελικά επιλέχθηκε ως το βέλτιστο για το συγκεκριμένο έργο, μελετήθηκαν οι τιμές της μέγιστης πλαστικής διατμητικής τροπής γύρω από τους θαλάμους, με σκοπό την προσεγγιστική εκτίμηση του εύρους της πλαστικής ζώνης.

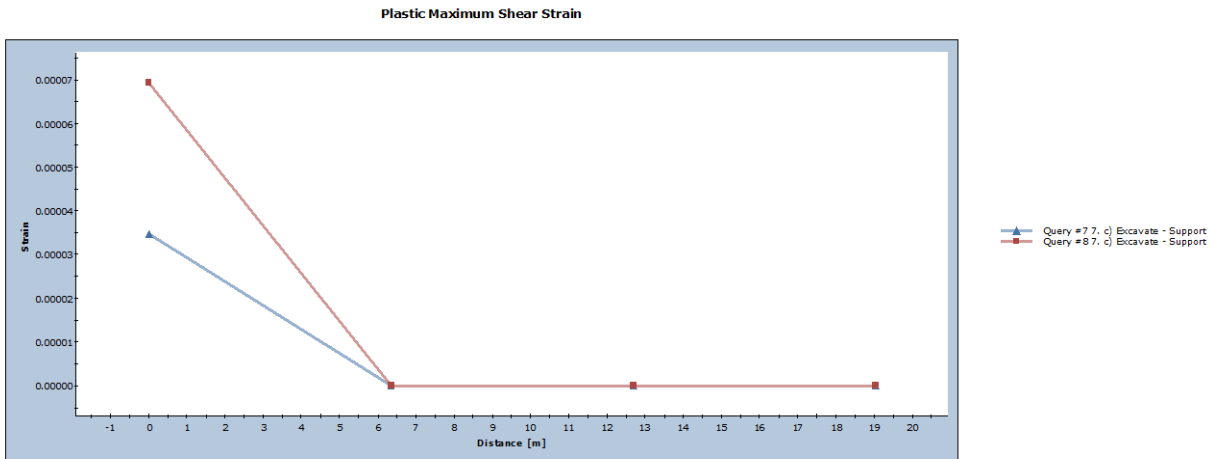


Εικόνα 4.9: Τιμές μέγιστης διατμητικής πλαστικής τροπής σε παρειές και δάπεδα των θαλάμων

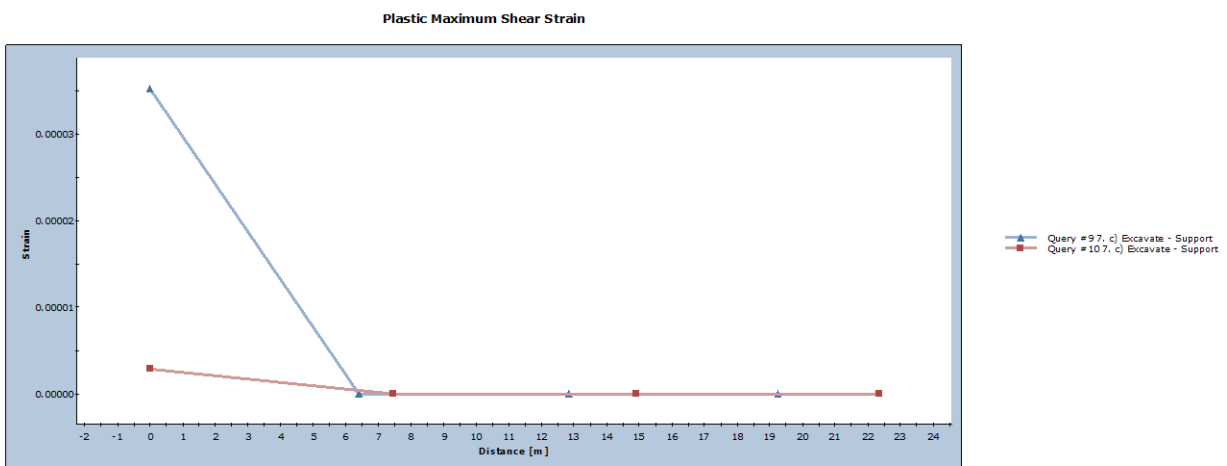
Σε γενικές γραμμές οι τιμές που εμφανίζονται στις παρειές και στην ενδιάμεση μεταξύ των θαλάμων απόσταση είναι ιδιαίτερα χαμηλές, οπότε πρακτικά δεν εμφανίζεται πλαστική ζώνη. Οι τιμές παρουσιάζονται πιο αυξημένες, αλλά και πάλι ιδιαίτερα χαμηλές, στα δάπεδα των θαλάμων. Για την περαιτέρω διερεύνηση της έκτασης της ζώνης αυτής σχεδιάστηκαν διαγράμματα διατμητικής τροπής συναρτήσεως της απόστασης από την περιφέρεια των θαλάμων, για κάθε ένα από τα τρία ανοίγματα. Οι ενδεικτικές τιμές λήφθηκαν από τα σημεία τομής του δαπέδου με τις παρειές του κάθε θαλάμου, οπότε τελικά αποδείχτηκε ότι οι τιμές της τροπής μηδενίζονται μέσα σε μια ακτίνα μεταξύ 5.5 m και 7.5 m κάτω από τα δάπεδα των εκσκαφών.



Εικόνα 4.10α: (Θάλαμος I) Διάγραμμα μέγιστης διατμητικής πλαστικής τροπής – απόστασης από θάλαμο



Εικόνα 4.10b: (Θάλαμος 2) Διάγραμμα μέγιστης διατμητικής πλαστικής τροπής – απόστασης από θάλαμο



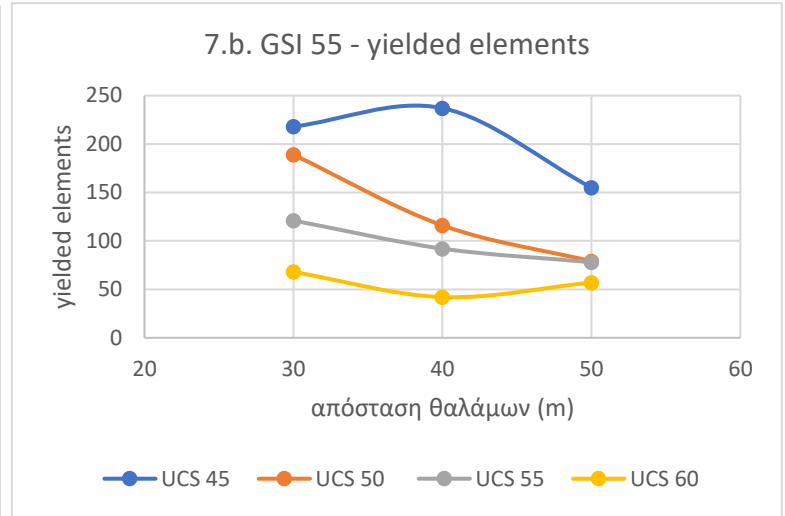
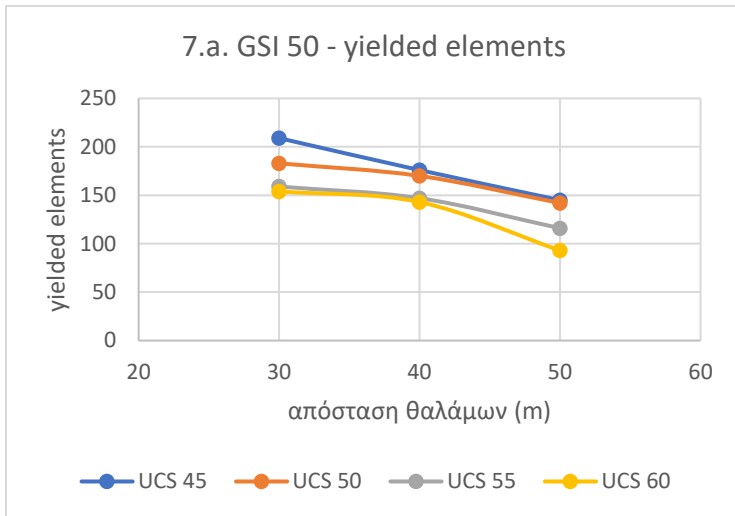
Εικόνα 4.10c: (Θάλαμος 3) Διάγραμμα μέγιστης διατμητικής πλαστικής τροπής – απόστασης από θάλαμο

β) Σενάριο δύο θαλάμων

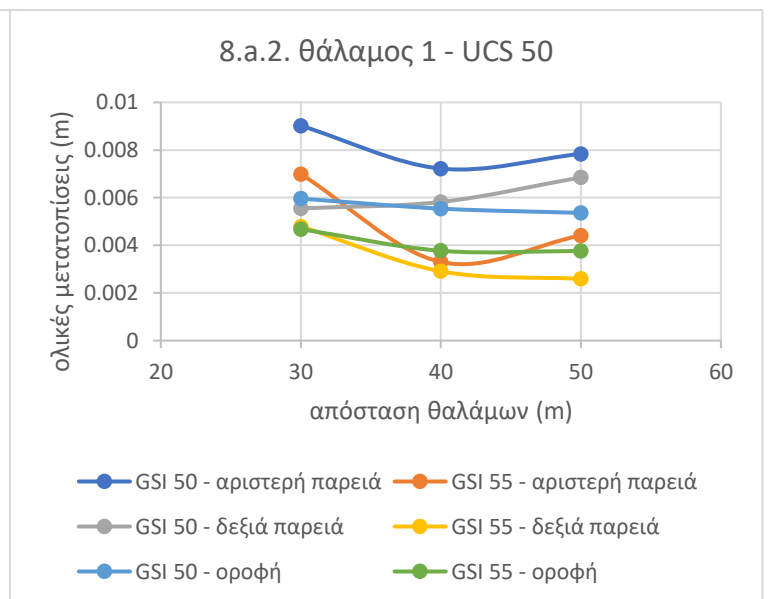
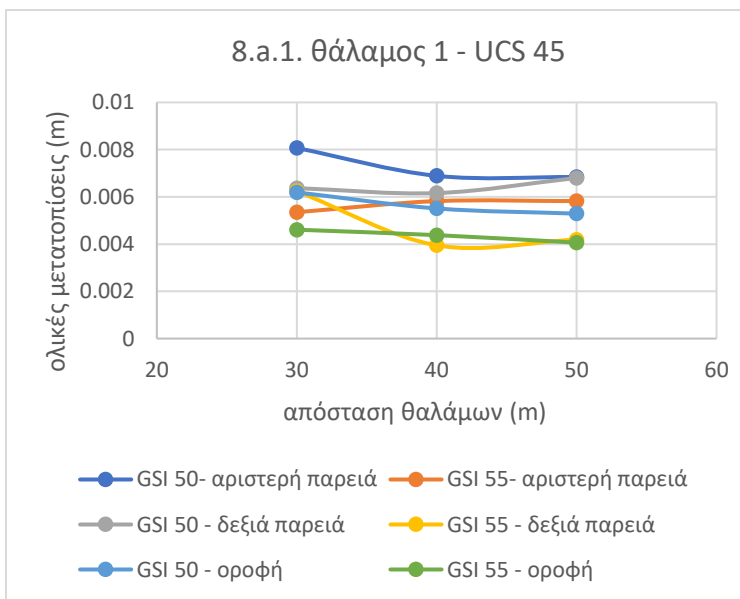
Επιλογή δείκτη ποιότητας βραχομάζας GSI

Όπως και στο σενάριο των τριών θαλάμων, για την επιλογή της βέλτιστης τιμής δείκτη ποιότητας βραχομάζας GSI σχεδιάστηκαν αρχικά τα διαγράμματα 7.a και 7.b στα οποία απεικονίζονται τα στοιχεία που έχουν διαρρεύσει, συναρτήσε της απόστασης μεταξύ των θαλάμων, για τις δύο τιμές GSI και τις τέσσερις τιμές UCS. Είναι εύκολα διακριτό ότι για πέτρωμα με $GSI = 55$ και αντοχή σε μονοαξονική θλίψη $UCS = 45$, εμφανίζεται ο μεγαλύτερος αριθμός στοιχείων σε διαρροή συγκριτικά με τις υπόλοιπες τιμές UCS. Η ίδια παρατήρηση προκύπτει και για πέτρωμα με $GSI =$

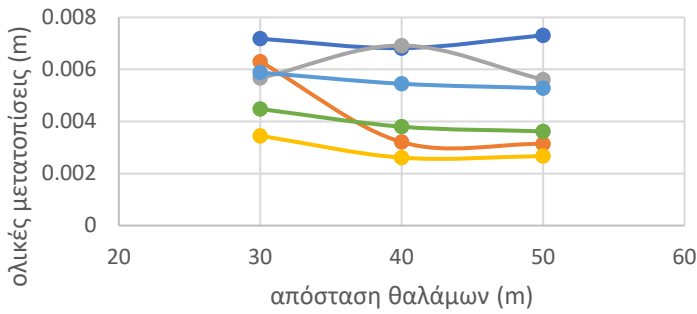
50, με τις καμπύλες των διαφορετικών UCS όμως αυτή τη φορά να μην παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους. Ταυτόχρονα φαίνεται ότι για τις υπόλοιπες τιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, στην περίπτωση του $GSI = 55$ και για απόσταση μεταξύ των θαλάμων ίση με 40 m έως 50 m, τα στοιχεία που διαρρέουν είναι αριθμητικά λιγότερα.



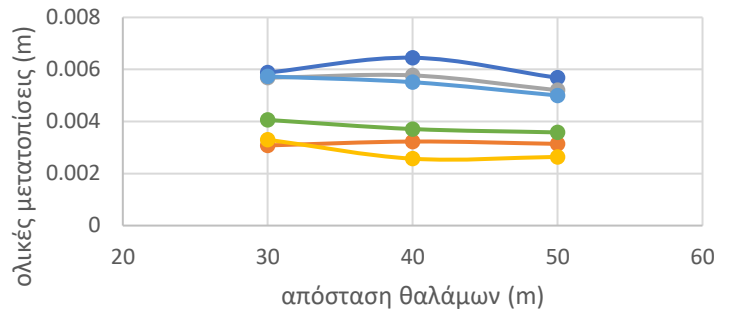
Η επόμενη σειρά διαγραμμάτων από 8.a.1 έως 8.b.4 παρουσιάζει τις ολικές μετατοπίσεις σε συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των θαλάμων. Για κάθε θάλαμο και κάθε τιμή UCS σχεδιάστηκε ξεχωριστό διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζονται έξι καμπύλες. Οι τρεις καμπύλες αφορούν στην οροφή και στις δύο παρειές για $GSI = 50$ και οι άλλες τρεις καμπύλες αντιστοιχούν στην οροφή και στις δύο παρειές για $GSI = 55$.



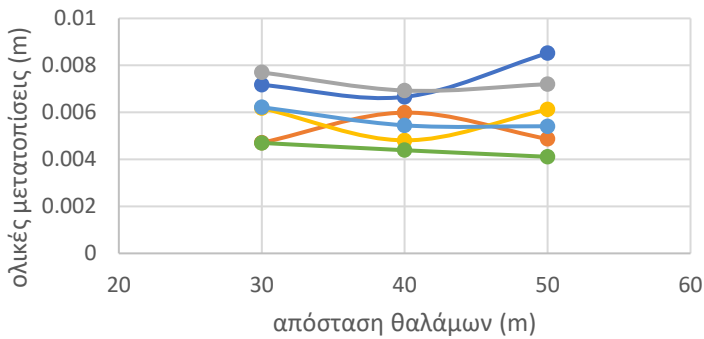
8.a.3. Θάλαμος 1 - UCS 55



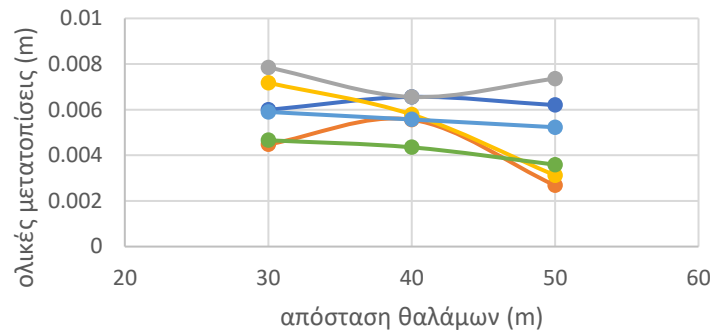
8.a.4. Θάλαμος 1 - UCS 60



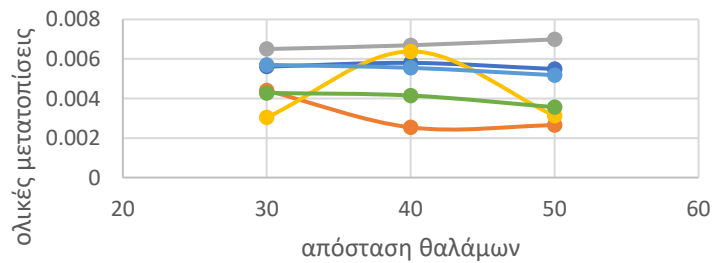
8.b.1. Θάλαμος 2 - UCS 45



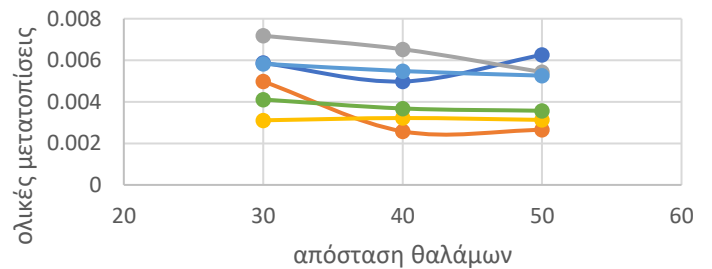
8.b.2. Θάλαμος 2 - UCS 50



8.b.3. Θάλαμος 2 - UCS 55



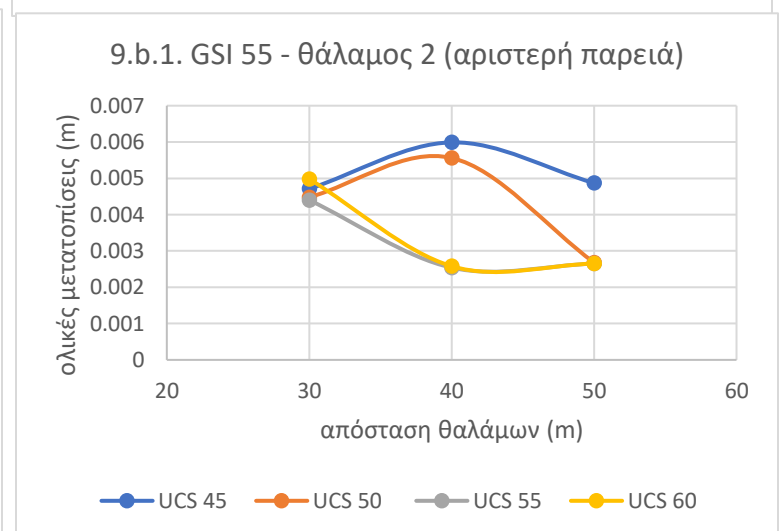
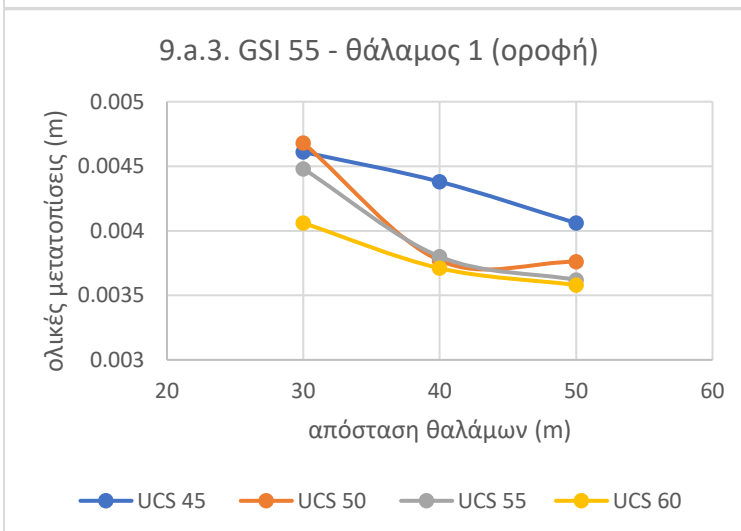
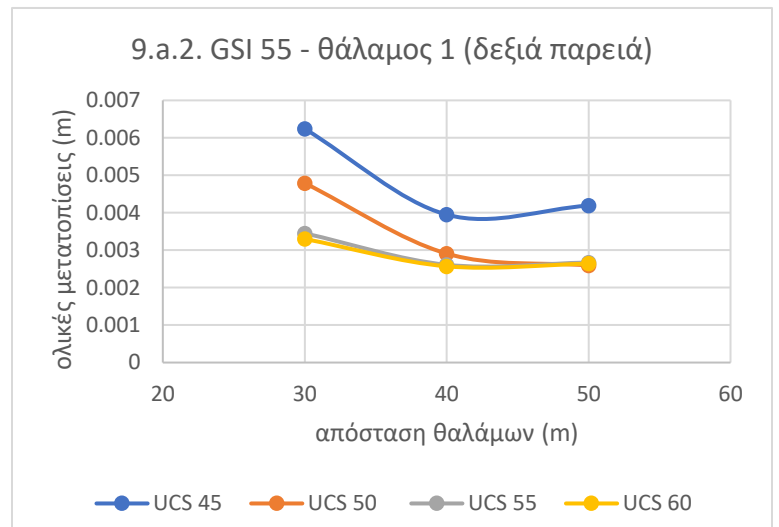
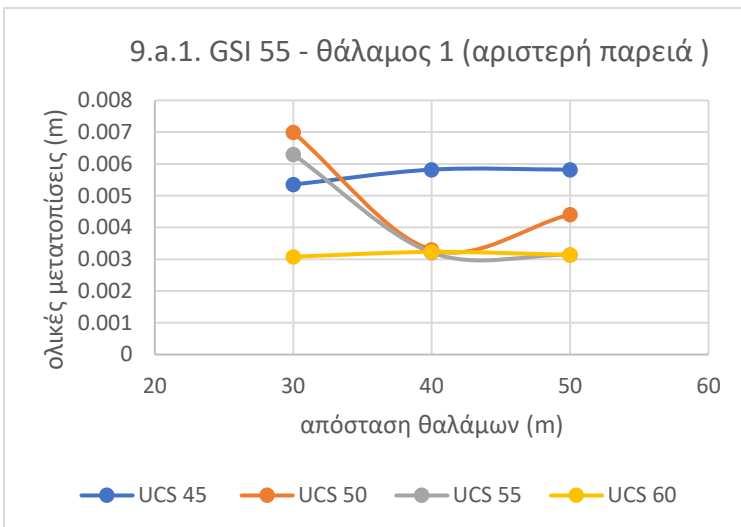
8.b.4. Θάλαμος 2 - UCS 60



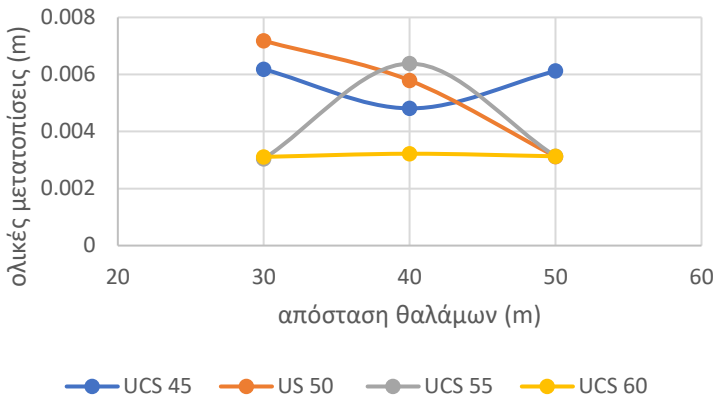
Συνολικά για τους δύο θαλάμους είναι εμφανές ότι πέτρωμα με δείκτη ποιότητας βραχομάζας GSI = 55 εμφανίζει χαμηλότερες τιμές ολικών μετατοπίσεων από πέτρωμα με δείκτη GSI = 50. Βάσει αυτής της παρατήρησης θεωρείται ότι η περίπτωση του δείκτη GSI = 50 είναι η πιο δυσμενής, οπότε ο υποθετικός χώρος επιλέχθηκε να κατασκευαστεί σε πέτρωμα με δείκτη ποιότητας GSI = 55.

Επιλογή αντοχής πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη UCS

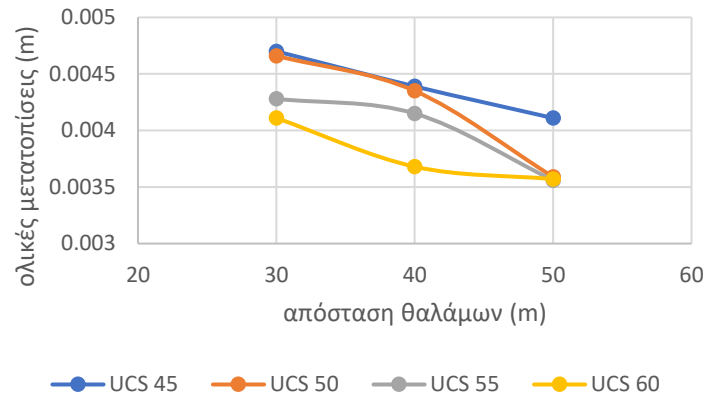
Στα διαγράμματα 9.a.1 έως 9.b.3 καταγράφονται οι ολικές μετατοπίσεις συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των θαλάμων μόνο για την ευμενή συνθήκη του GSI = 55. Τα διαγράμματα αναλύουν τον κάθε θάλαμο ξεχωριστά και απεικονίζουν τέσσερις καμπύλες το κάθε ένα, για τις τέσσερις τιμές UCS. Τόσο στις παρειές όσο και στην οροφή, οι δύο θάλαμοι παρουσιάζουν τις μικρότερες μετατοπίσεις, για UCS κυμαινόμενο κυρίως μεταξύ 55 και 60.



9.b.2. GSI 55 - θάλαμος 2 (δεξιά παρειά)

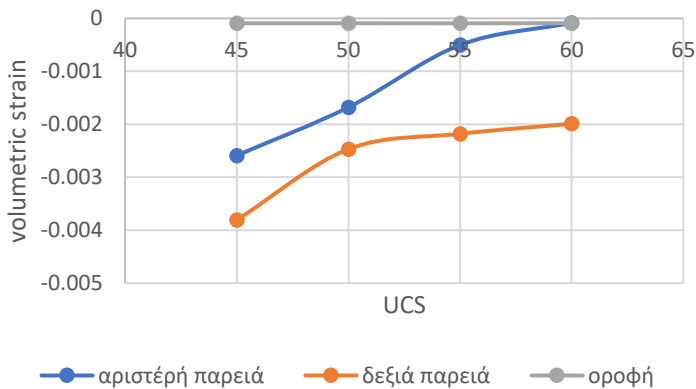


9.b.3. GSI 55 - θάλαμος 2 (οροφή)

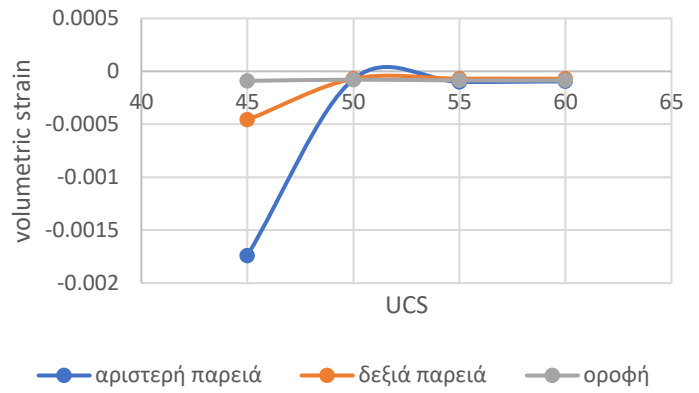


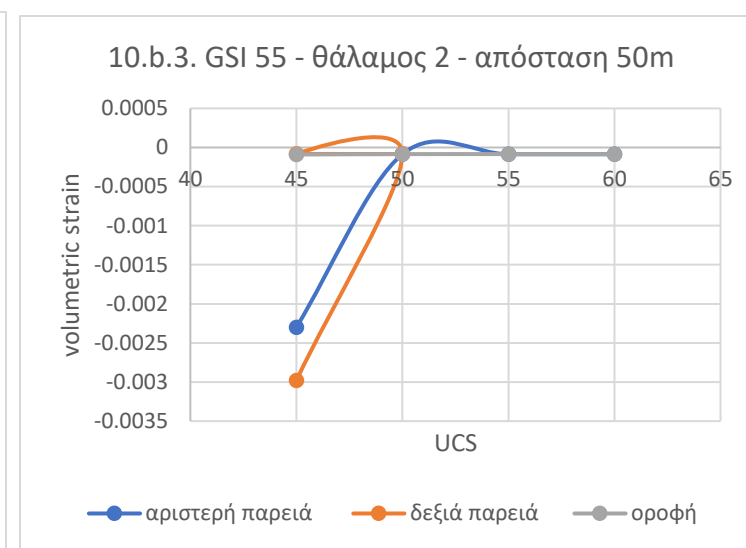
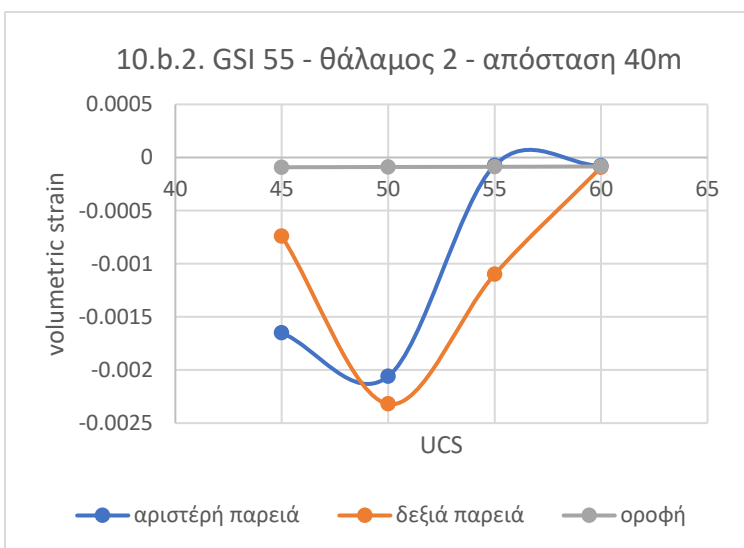
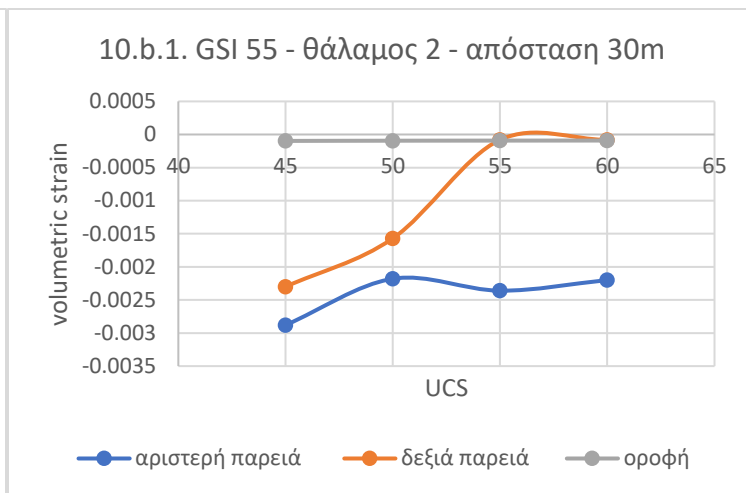
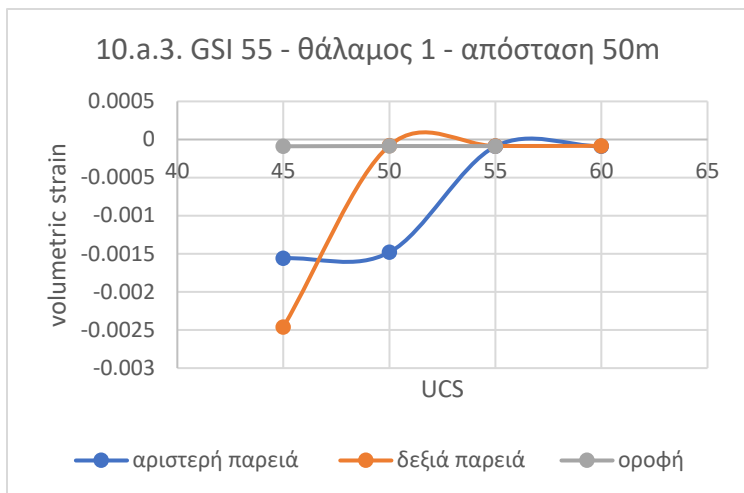
Στα διαγράμματα 10.a.1 έως 10.b.3 σχεδιάζεται η μεταβολή της ογκομετρικής τροπής σε συνάρτηση των τιμών UCS, για κάθε έναν από τους δύο θαλάμους και για απόσταση μεταξύ τους ίση με 30 m, 40 m και 50 m αντίστοιχα. Η πιο εμφανής παρατήρηση αφορά στην οροφή των θαλάμων, καθώς δεν φαίνεται να παρουσιάζει ιδιαίτερες μεταβολές όγκου. Αντίθετα οι παρειές των θαλάμων επηρεάζονται περισσότερο, με τις υψηλότερες σε απόλυτη τιμή μεταβολές να εμφανίζονται για UCS μεταξύ 45 και 50. Τα ανοίγματα φαίνεται να επηρεάζονται σε μικρότερο βαθμό για UCS κυμαινόμενο μεταξύ 55 και 60.

10.a.1. GSI 55 - θάλαμος 1 - απόσταση 30m



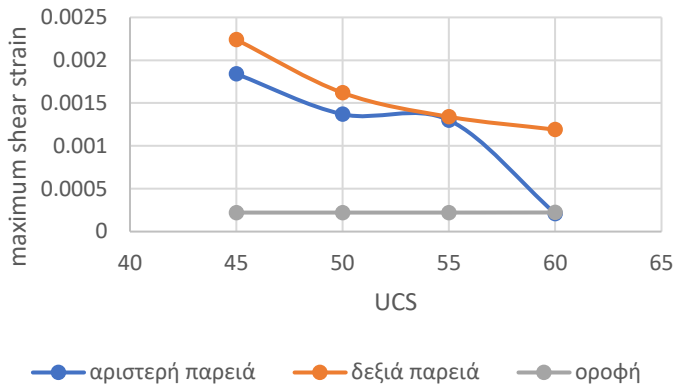
10.a.2. GSI 55 - θάλαμος 1 - απόσταση 40m



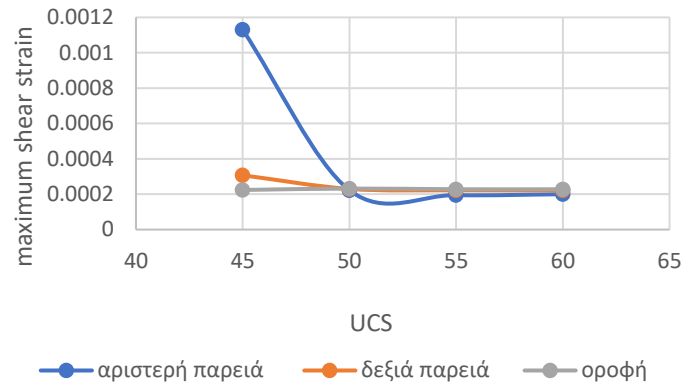


Τα διαγράμματα 10.a.1 έως 10.b.3 παρουσιάζουν τη μεταβολή της μέγιστης διαμητικής τροπής συναρτήσει των τιμών UCS. Αντίστοιχα με την προηγούμενη σειρά διαγραμμάτων, τα γραφήματα αφορούν κάθε έναν από τους δύο θαλάμους ξεχωριστά για αποστάσεις μεταξύ τους 30 m, 40 και 50 m. Η οροφή δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες μεταβολές τροπής, όπως ακριβώς φαίνεται και κατά τη μελέτη των μεταβολών της ογκομετρικής τροπής. Υψηλές τιμές μέγιστης διαμητικής τροπής παρατηρούνται κυρίως για UCS = 45, ενώ για UCS μεταξύ 55 και 60 οι τιμές κατά κύριο λόγο ελαχιστοποιούνται.

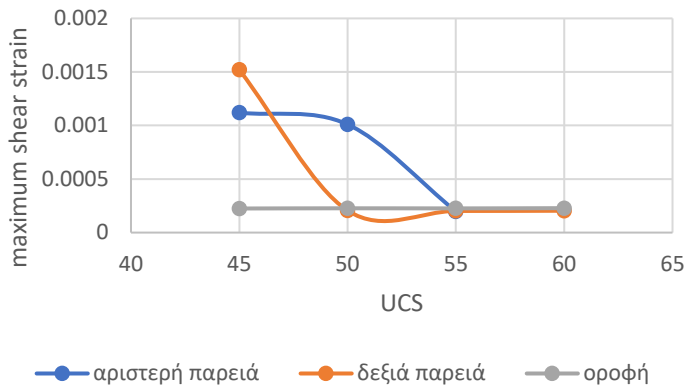
11.a.1. GSI 55 - θάλαμος 1 - απόσταση 30m



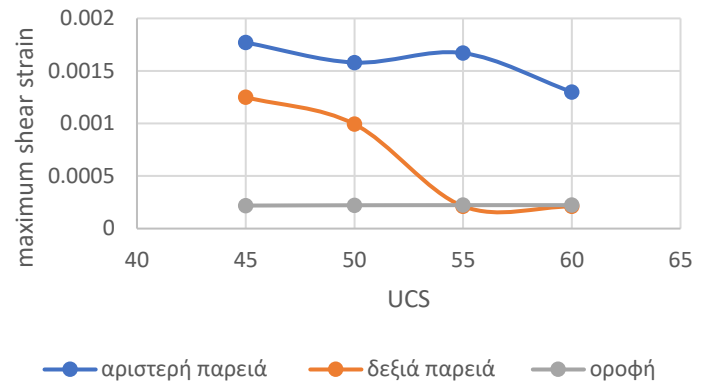
11.a.2. GSI 55 - θάλαμος 1 - απόσταση 40m



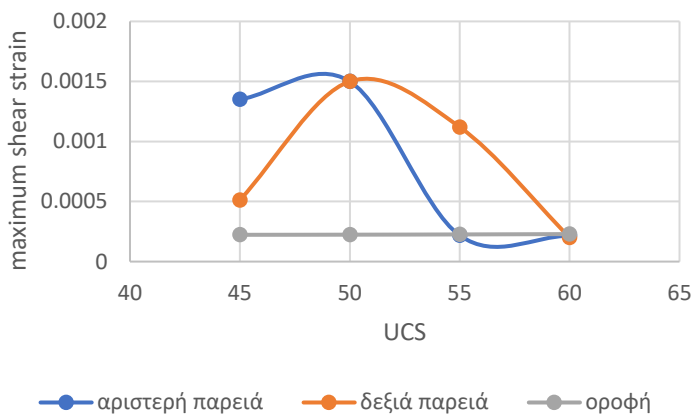
11.a.3. GSI 55 - θάλαμος 1 - απόσταση 50m



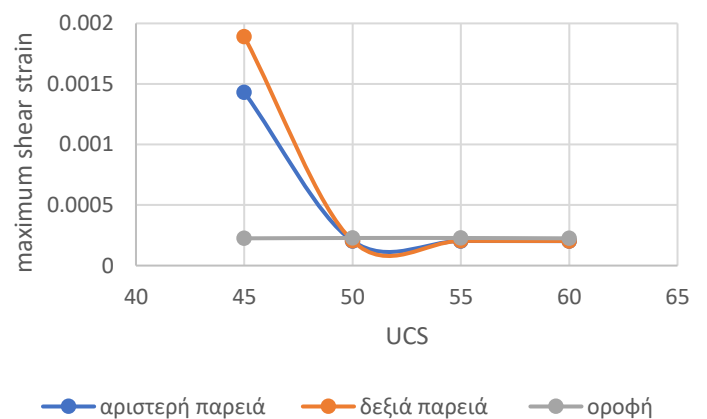
11.b.1. GSI 55 - θάλαμος 2 - απόσταση 30m



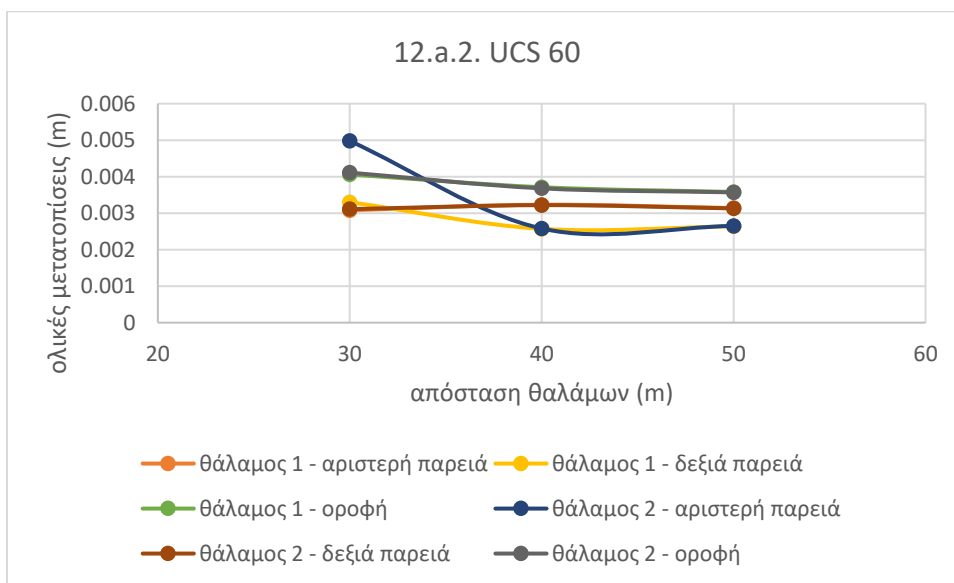
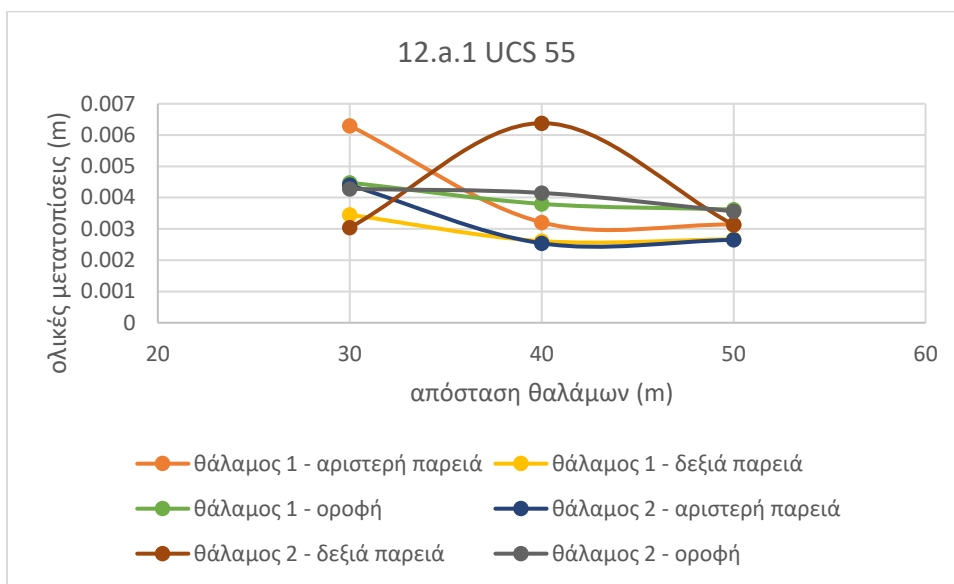
11.b.2. GSI 55 - θάλαμος 2 - απόσταση 40m



11.b.3. GSI 55 - θάλαμος 2 - απόσταση 50m



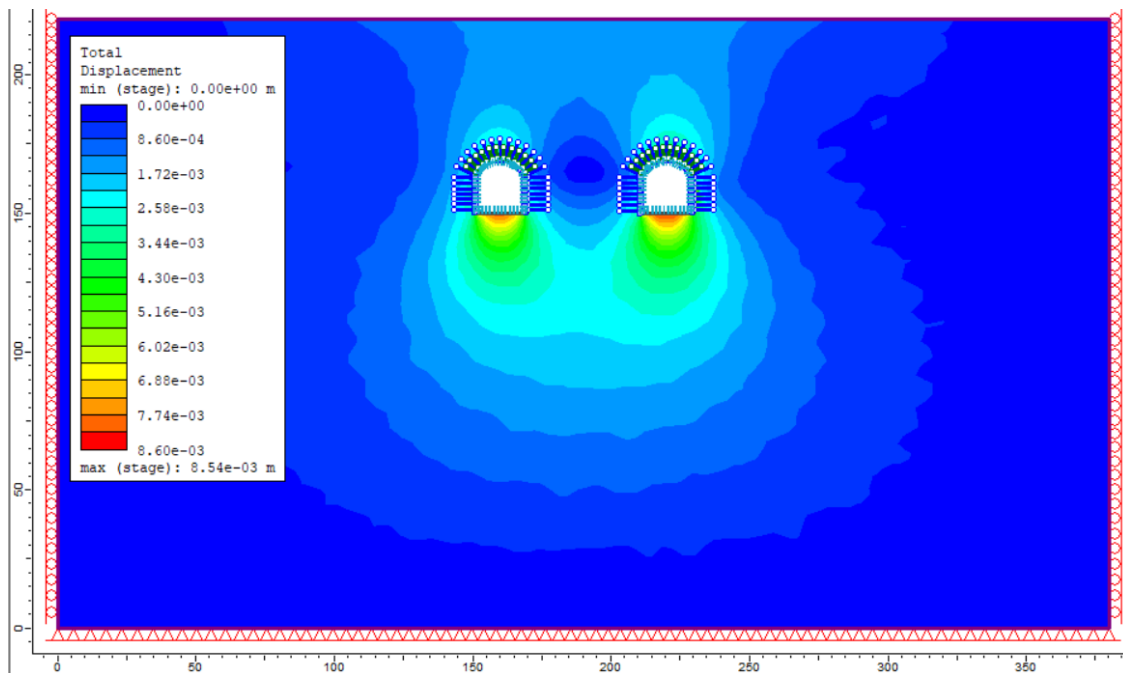
Για την τελική επιλογή της βέλτιστης τιμής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη σχεδιάστηκαν δύο ακόμη διαγράμματα ολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των θαλάμων (12.a.1 και 12.a.2) για UCS = 55 και 60 αντίστοιχα, στα οποία εμφανίζεται συνολική εικόνα των δύο θαλάμων. Από αυτά τα διαγράμματα φαίνεται να μην υπάρχει αισθητή μεταβολή των τιμών των ολικών μετατοπίσεων μεταξύ των δύο τιμών UCS, οπότε μπορεί να επιλεγθεί ως τιμή σχεδιασμού η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη UCS = 55.



Επιλογή απόστασης μεταξύ των θαλάμων

Η επιλογή της ευνοϊκότερης για την ευστάθεια απόστασης μεταξύ των σχεδιαζόμενων θαλάμων πραγματοποιήθηκε και σε αυτό το σενάριο με τη βοήθεια μερικών από τα διαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω κατά τη διερεύνηση της βέλτιστης επιλογής χαρακτηριστικών πετρώματος. Συγκεκριμένα μέσω των διαγραμμάτων 9.a.1 έως 9.b.3 παρατηρείται ότι για απόσταση μεταξύ των θαλάμων κυμαινόμενη από 40 m έως και 50 m οι τιμές των μετατοπίσεων, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους, ενώ συγκριτικά οι περισσότερες τιμές για απόσταση 30 m είναι λίγο πιο αυξημένες. Το ίδιο παρατηρείται και στα διαγράμματα 12.a.1 και 12.a.2 και άρα τελικά οι θάλαμοι μπορούν να σχεδιαστούν με απόσταση 40 m μεταξύ τους.

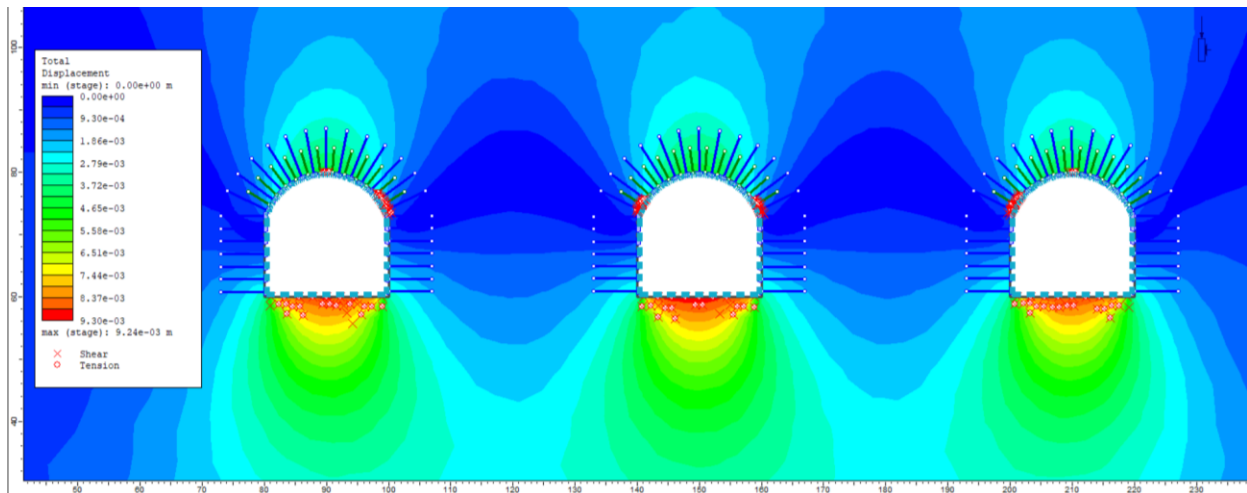
Συνοψίζοντας, όπως και στο σενάριο των τριών θαλάμων, το σενάριο κατασκευής των δύο θαλάμων αποθήκευσης μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πέτρωμα με δείκτη ποιότητας $GSI = 55$ και αντοχή σε μονοαξονική θλίψη $UCS = 55$ και απόσταση μεταξύ των θαλάμων ίση με 40 m.



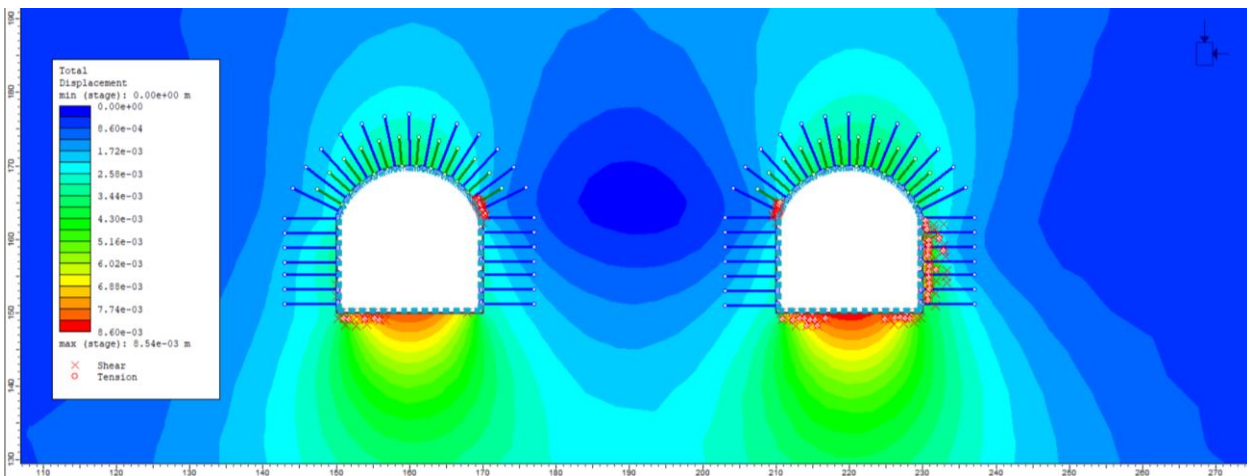
Εικόνα 4.11: Τελικό σχέδιο για 2 θαλάμους με $GSI = 55$, $UCS = 55$ και απόσταση θαλάμων 40 m

Στις εικόνες 4.8 και 4.11 φαίνονται οι ολικές μετατοπίσεις για τα δύο σενάρια με τους τρεις και δύο θαλάμους, με τα χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν. Και στις δύο περιπτώσεις μεγαλύτερες μετατοπίσεις σημειώνονται κατά κύριο λόγο στα δάπεδα των εκσκαφών και αρκετά λιγότερες στην οροφή.

Επιλέγοντας την προβολή των στοιχείων που έχουν διαρρεύσει, στην περίπτωση των τριών θαλάμων (εικόνα 4.12α) παρατηρείται συγκέντρωσή τους κυρίως στα δάπεδα. Ελάχιστα στοιχεία βρίσκονται επίσης και μεταξύ οροφής και παρειών. Αντίστοιχα στην περίπτωση των δύο θαλάμων (εικόνα 4.12β) τα στοιχεία διαρροής είναι λιγότερα πλέον στα δάπεδα, αλλά εμφανίζονται με μεγαλύτερη συγκέντρωση στην παρειά του ενός από τους δύο θαλάμους.

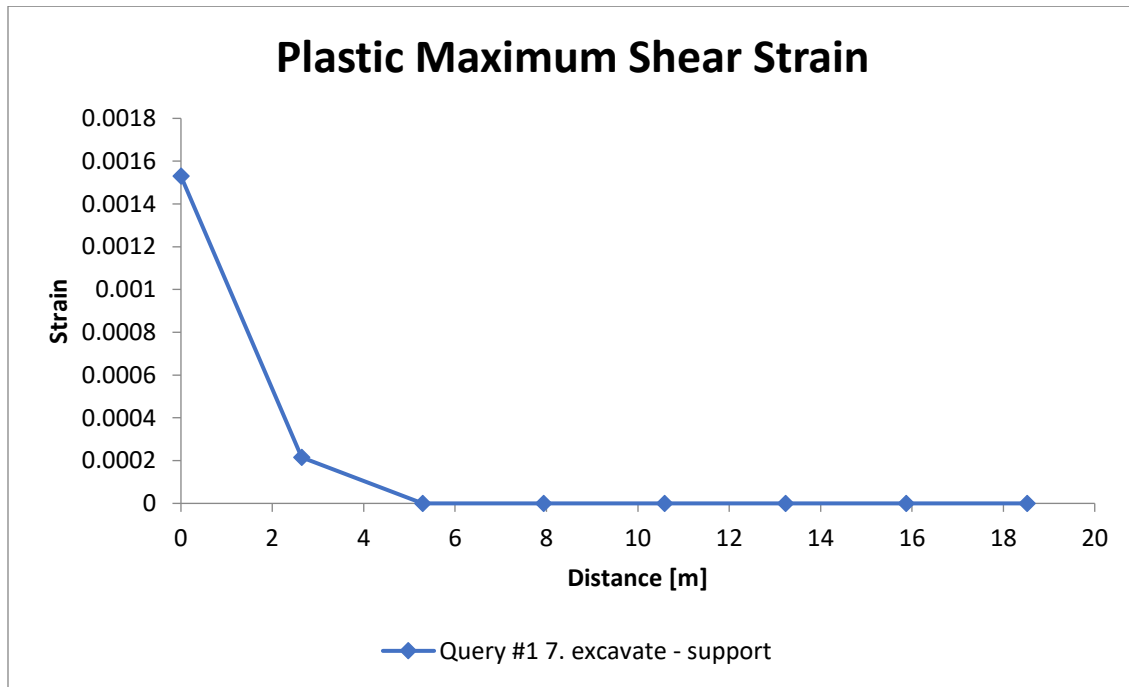


Εικόνα 4.12α: Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει

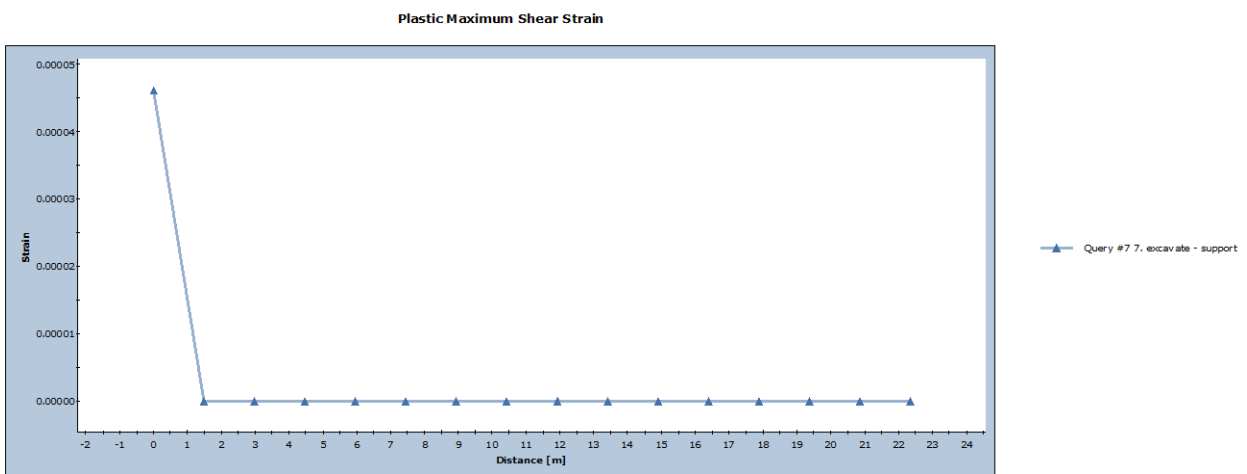


Εικόνα 4.12β: Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει

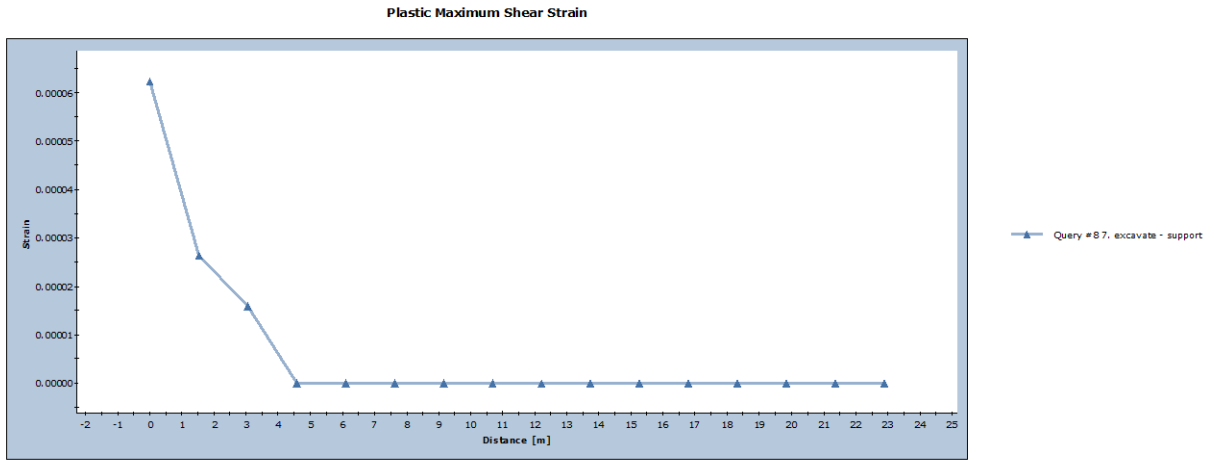
Βάσει του διαγράμματος που τελικά σχεδιάστηκε (Εικόνα 4.14) φαίνεται πως οι τιμές των μέγιστων πλαστικών διατμητικών τροπών για τη δεξιά παρειά του δεύτερου σε σειρά θαλάμου, μηδενίζονται σε μία απόσταση σχεδόν 6 m από αυτή. Αντίστοιχα για τα δάπεδα (Εικόνες 4.15, 4.16), οι τιμές των διατμητικών τροπών μηδενίζονται σε μία ακτίνα κυμαινόμενη από περίπου 1.5 m έως και 4.5 m από αυτά.



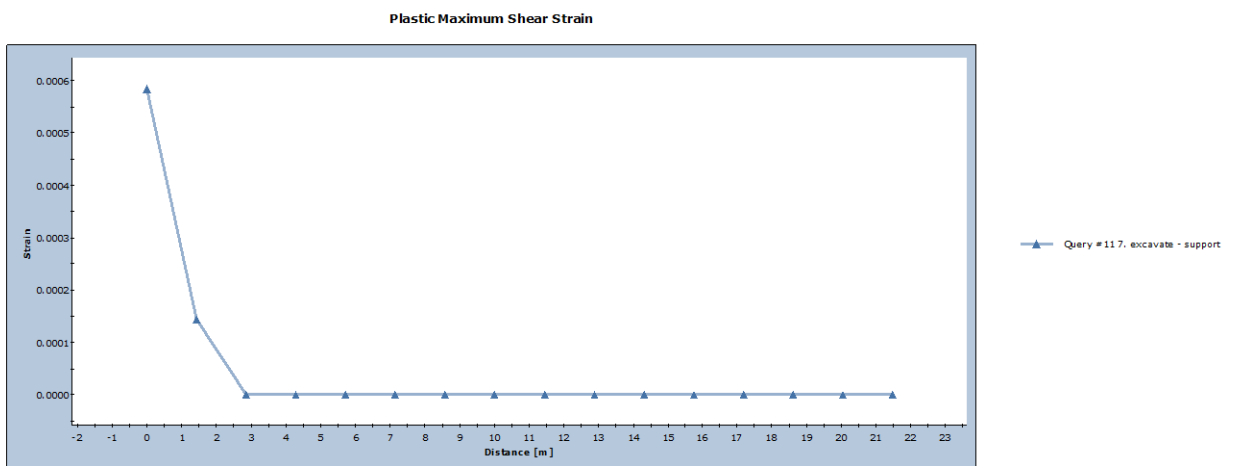
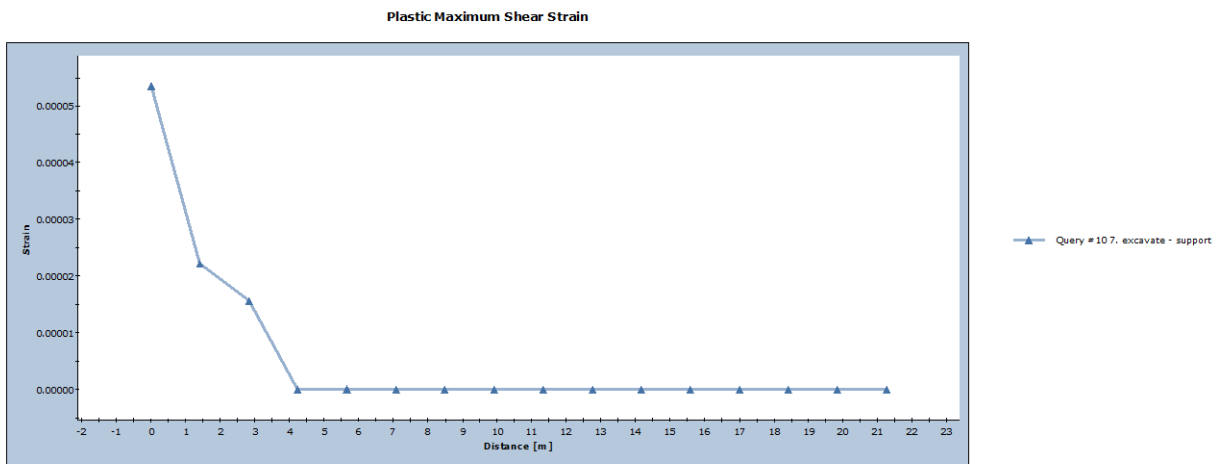
Εικόνα 4.14: Διάγραμμα μέγιστων διατμητικών πλαστικών τροπών από την δεξιά παρειά του δεύτερου θαλάμου



Εικόνα 4.15α: Διάγραμμα μέγιστων διατμητικών πλαστικών τροπών (θάλαμος 1)

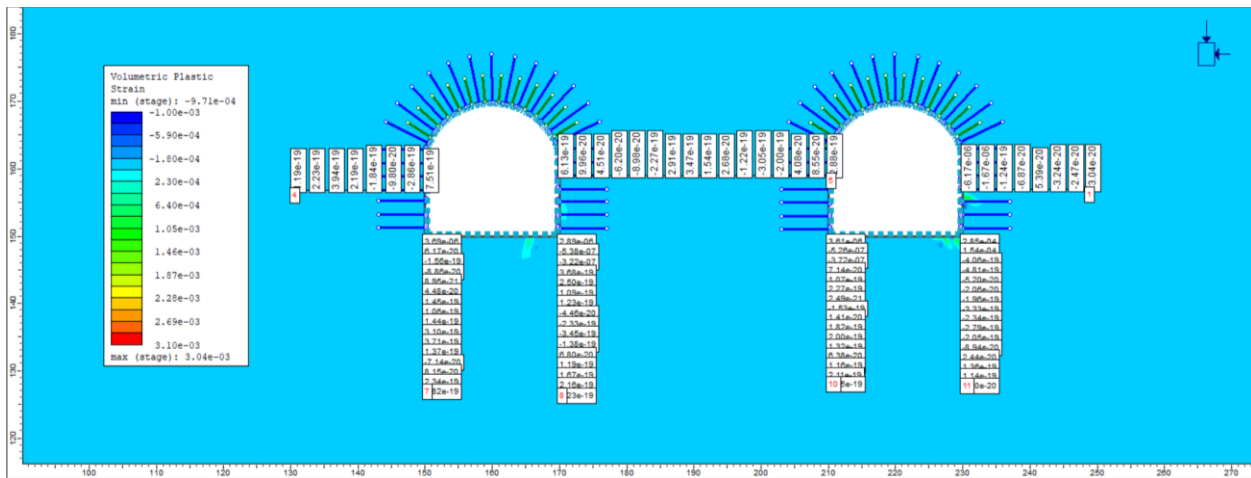


Εικόνα 4.15b: Διάγραμμα μέγιστων διατμητικών πλαστικών τροπών (θάλαμος 1)



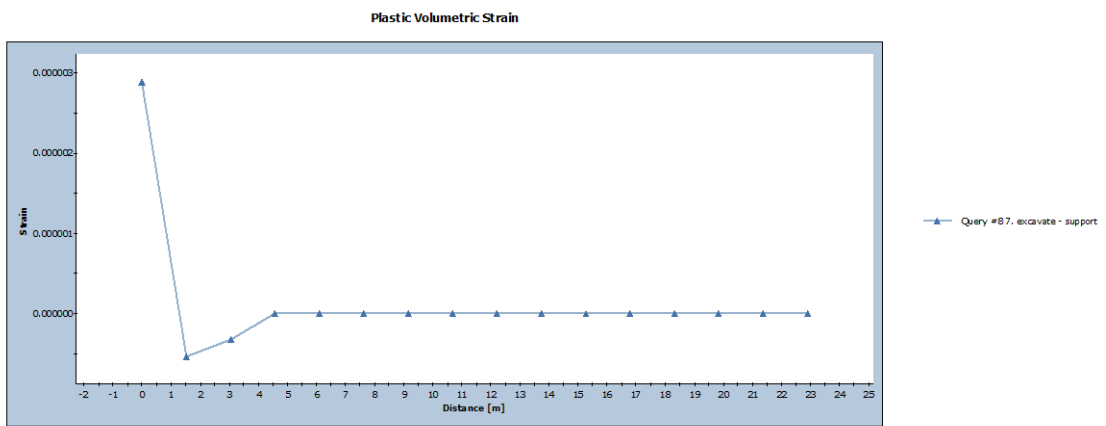
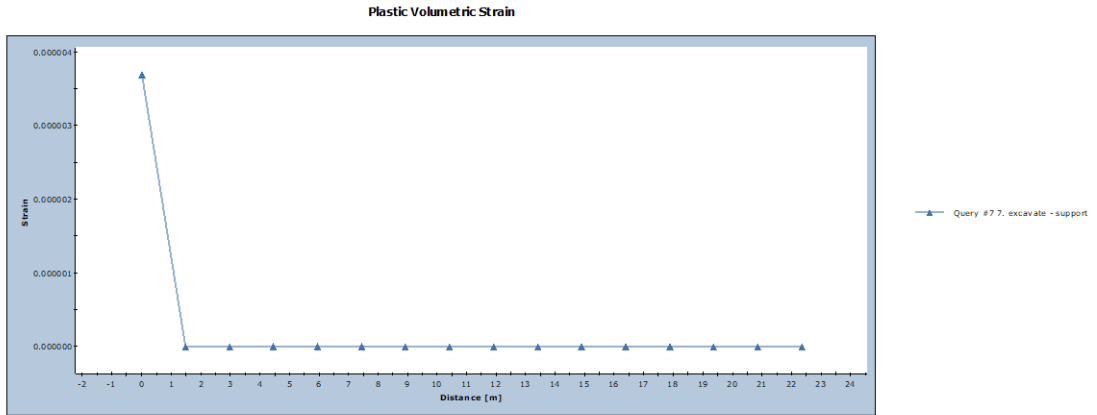
Εικόνα 4.16: Διαγράμματα μέγιστων διατμητικών πλαστικών τροπών (θάλαμος 2)

Στη συνέχεια σχετικά με την παρακολούθηση της διακύμανσης των τιμών της ογκομετρικής πλαστικής τροπής, ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με την προαναφερόμενη. Πιο συγκεκριμένα, όπως είναι αναμενόμενο, οι παρειές των θαλάμων δίνουν αμελητέες τιμές με εξαίρεση τη δεξιά παρεία του θαλάμου 2 και αντίστοιχα τα δάπεδα των εκσκαφών εμφανίζουν και αυτά μικρή έξαρση των τιμών σε σύγκριση με τις υπόλοιπες περιοχές. Η διευκρίνηση του εύρους της ζώνης επέκτασης των ογκομετρικών τροπών επιτεύχθηκε και πάλι με τον σχεδιασμό διαγραμμάτων ογκομετρικής πλαστικής τροπής σε συνάρτηση της απόστασης από τον κάθε θάλαμο.

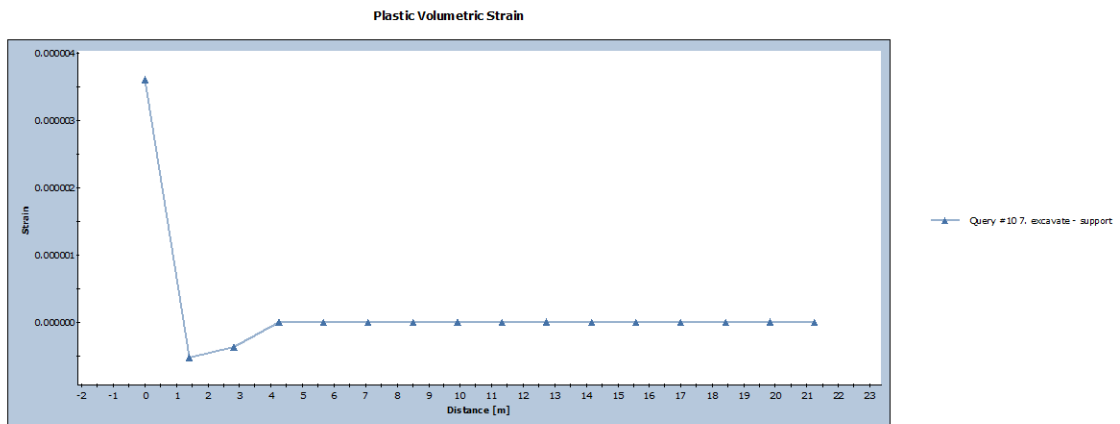


Εικόνα 4.17: Τιμές ογκομετρικής πλαστικής τροπής σε παρειές και δάπεδα των θαλάμων

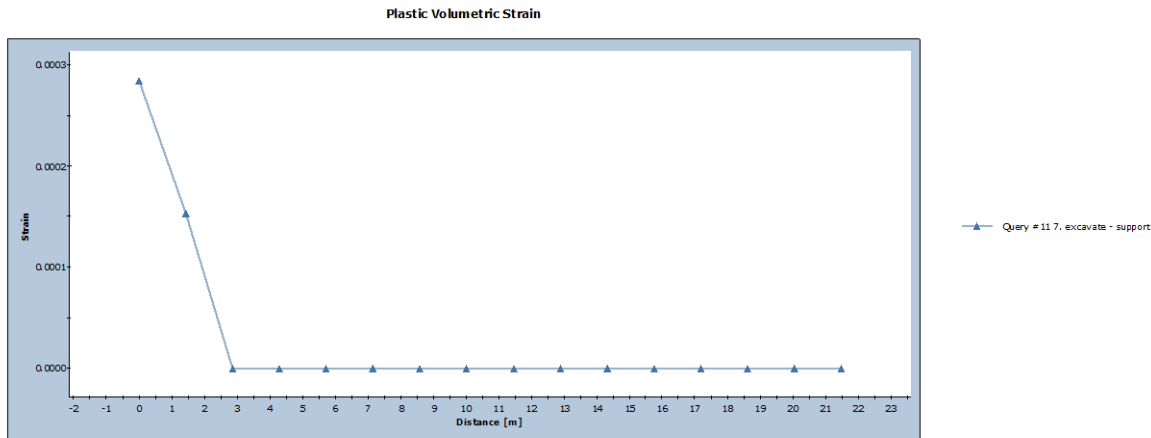
Όπως και στην περίπτωση των μέγιστων διατμητικών τροπών, οι πλαστικές ογκομετρικές τροπές στην παρεία του θαλάμου 2 φαίνεται να μηδενίζονται περίπου 4.5 m από αυτή και αντίστοιχα στα δάπεδα των θαλάμων μηδενίζονται σε απόσταση μεταξύ περίπου 1.5 m και 3 m από αυτά.



Εικόνα 4.18: Διαγράμματα ογκομετρικών πλαστικών τροπών (θάλαμος 1)



Εικόνα 4.19a: Διάγραμμα ογκομετρικών πλαστικών τροπών (θάλαμος 2)



Εικόνα 4.19b: Διάγραμμα ογκομετρικών πλαστικών τροπών (θάλαμος 2)

4.2.3 Δοκιμές με δίκτυα ασυνεχειών

Για την προσαρμογή των δύο σεναρίων σε όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικές συνθήκες αναφορικά με την κατάσταση της βραχομάζας, αποφασίστηκε η προσθήκη δικτύου ασυνεχειών στα δύο μοντέλα που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν μέσω του RS2 και τελικά μελετήθηκε η συμπεριφορά των εκσκαφών υπό τις εκάστοτε επιβαλλόμενες συνθήκες.

Για την εισαγωγή δικτύου ασυνεχειών στο πρόγραμμα επιλέχθηκε η εντολή Boundaries → Joint Network → Add joint network και στη συνέχεια το μοντέλο «Parallel Deterministic». Οι ασυνέχειες επιλέχθηκε να ξεκινούν από τυχαίο σημείο, να έχουν άπειρο μήκος και να είναι κλειστές.

Στη συνέχεια καθορίστηκαν τα χαρακτηριστικά τους ως εξής:

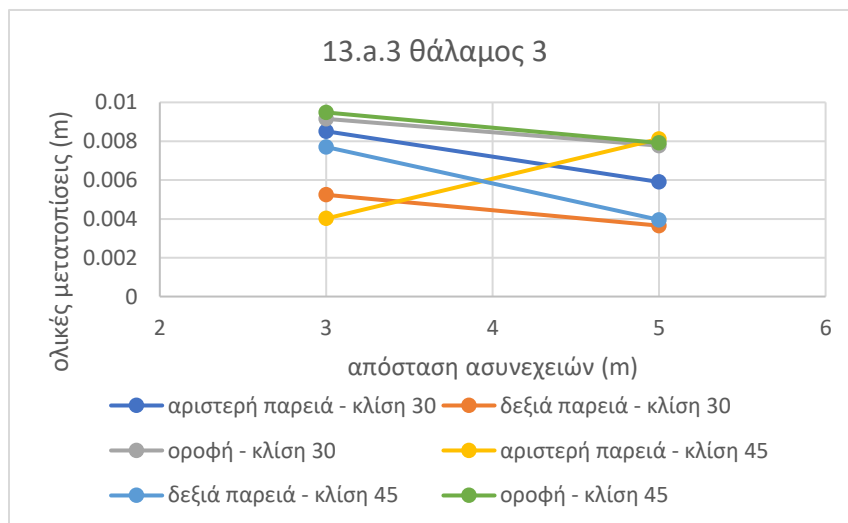
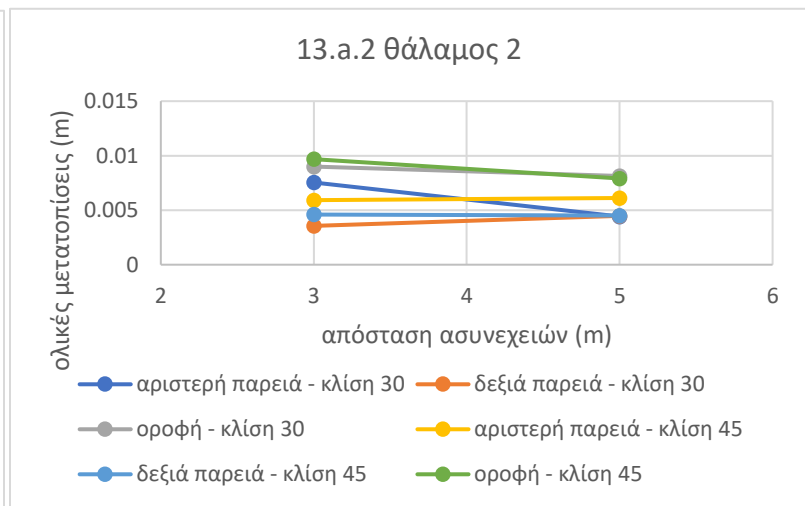
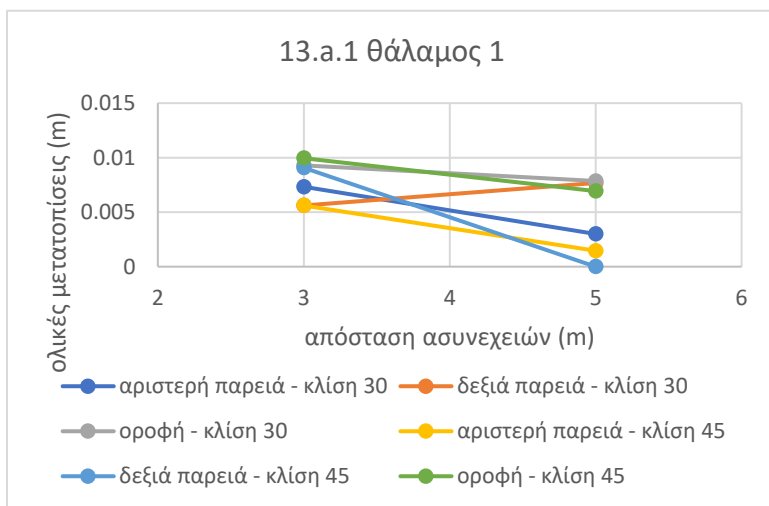
- Normal Stiffness = 100,000 MPa/m
- Shear Stiffness = 10,000 MPa/m
- Slip Criterion: Barton – Bandis, με JCS = 90, JRC = 9 και Residual friction angle = 28°

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ύστερα σχετίζονται με την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών και τη γωνία κλίσης τους. Συγκεκριμένα δοκιμάστηκαν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί για γωνίες κλίσης 30° και 45° και απόσταση μεταξύ τους 3 m και 5 m. Τελικά μέσω της εντολής Interpret

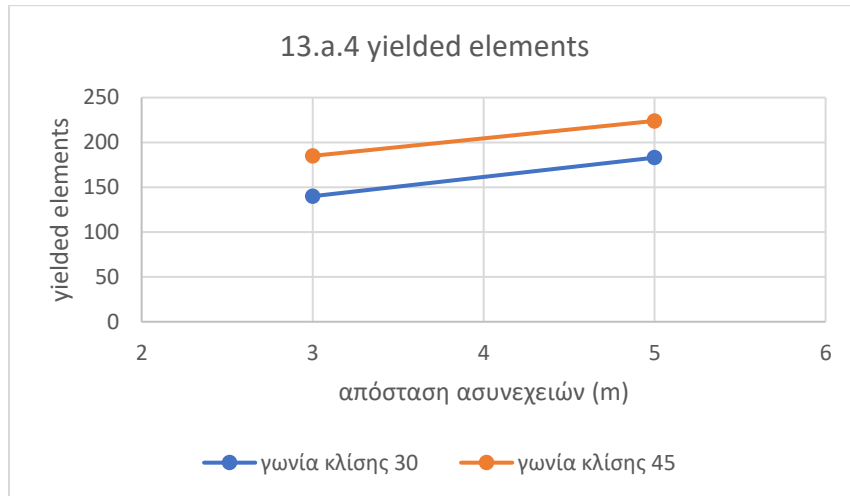
επιλέχθηκε η προβολή των ολικών μετατοπίσεων στις παρειές και την οροφή των θαλάμων και των στοιχείων υπό διαρροή και κατασκευάστηκαν διαγράμματα για την εύρεση της ευνοϊκότερης για την ευστάθεια του έργου περίπτωσης.

α) Σενάριο τριών θαλάμων

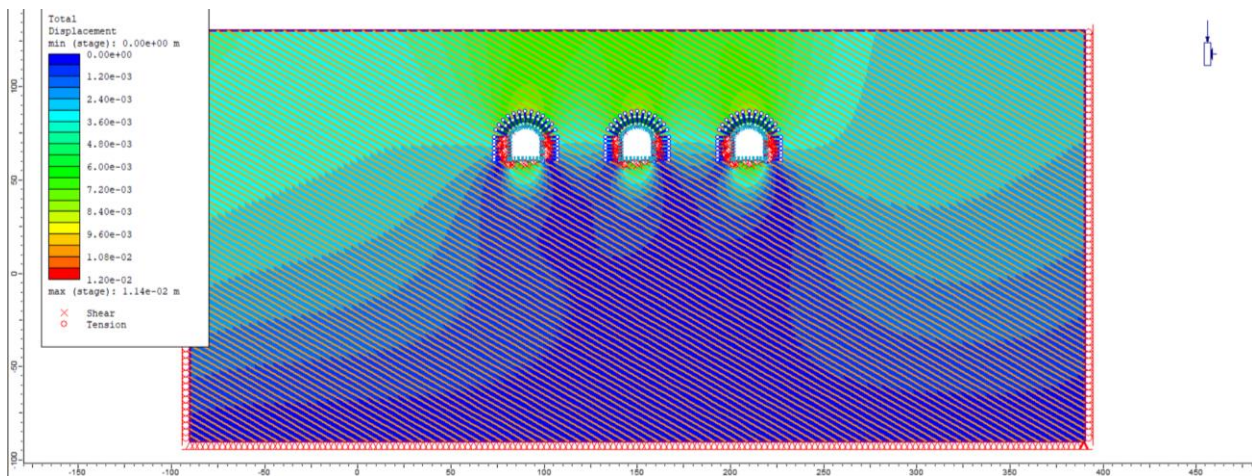
Για την σύγκριση των τεσσάρων συνδυασμών γωνίας κλίσης και απόστασης ασυνεχειών σχεδιάστηκαν τρία διαγράμματα (13.a.1 έως 13.a.3), ένα για τον κάθε θάλαμο, στα οποία απεικονίστηκαν οι τιμές των ολικών μετατοπίσεων σε σχέση με την απόσταση των ασυνεχειών για τις δύο γωνίες κλίσης. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν λήφθηκαν από τις παρειές και την οροφή των θαλάμων. Παρότι οι σχεδιαζόμενες ευθείες βρίσκονται αρκετά κοντά μεταξύ τους, δυσκολεύοντας τη εξαγωγή κάποιου άμεσου συμπεράσματος, φαίνεται πως οι ολικές μετατοπίσεις στις οροφές και των τριών θαλάμων παρουσιάζουν μικρή απόκλιση μεταξύ τους.



Για τη διευκόλυνση της σύγκρισης μεταξύ των χαρακτηριστικών των δικτύων ασυνεχειών σχεδιάστηκε επίσης το διάγραμμα 13.a.4 στο οποίο καταγράφονται τα στοιχεία που έχουν διαρρεύσει σε συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών για τις δύο γωνίες. Τελικά είναι φανερό ότι για γωνία 30° και απόσταση 3 m μεταξύ των ασυνεχειών, τα στοιχεία υπό διαρροή είναι λιγότερα από ότι για γωνία 45° και απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών ίση με 5 m. Συνεπώς η περίπτωση αυτή αποτελεί το ευνοϊκότερο σενάριο χαρακτηριστικών δικτύου ασυνεχειών.

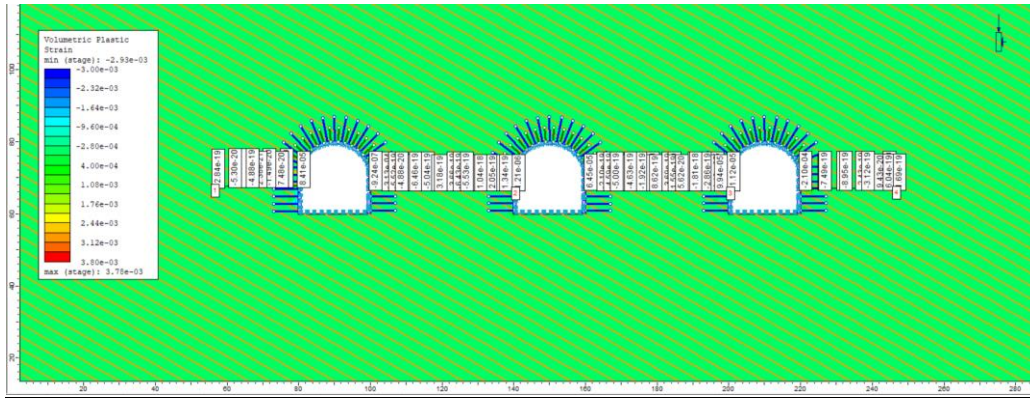


Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.20 τα στοιχεία που διαρρέουν σε αυτή την περίπτωση εμφανίζονται πυκνότερα στις παρειές και αρκετά αραιότερα στα δάπεδα των θαλάμων.



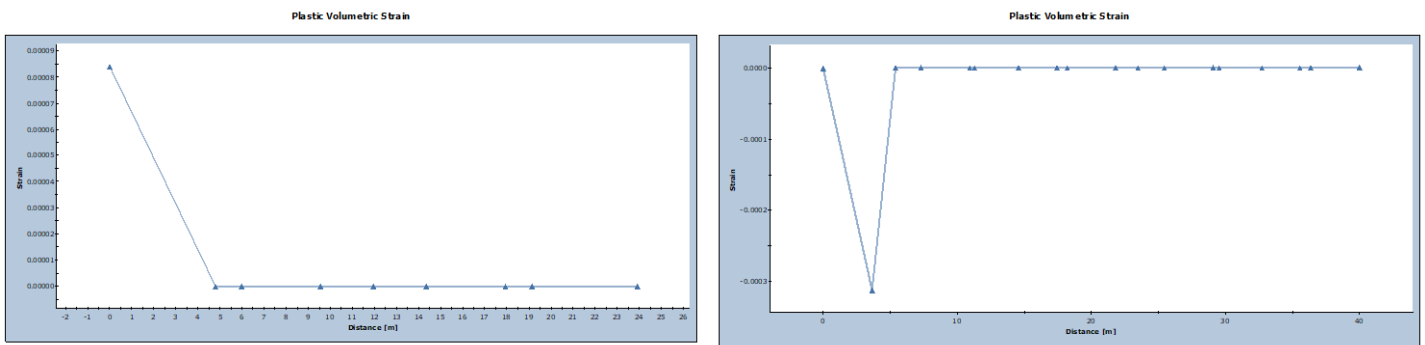
Εικόνα 4.20: Ολικές μετατοπίσεις και στοιχεία σε διαρροή για απόσταση ασυνεχειών 3 m και γωνία κλίσης 30°

Με στόχο την περαιτέρω ανάλυση της επίδρασης στο πέτρωμα του δικτύου ασυνεχειών με τα παραπάνω χαρακτηριστικά, επιλέχθηκε η προβολή των τιμών ογκομετρικής πλαστικής τροπής ενδιάμεσα των θαλάμων και σχεδιάστηκαν διαγράμματα για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων.

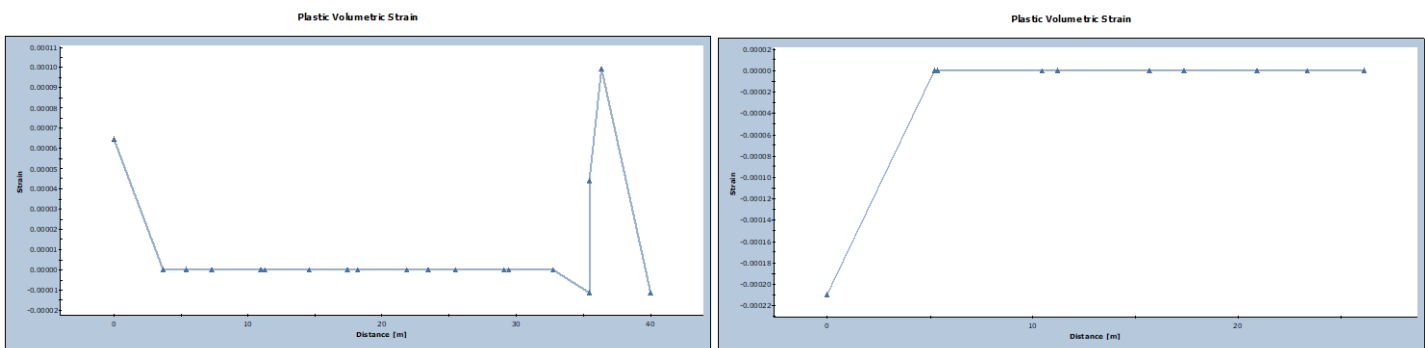


Εικόνα 4.21: Ογκομετρικές πλαστικές τροπές για δίκτυο ασυνεχιών γωνίας κλίσης 30° και απόστασης 3 m μεταξύ τους

Από τα διαγράμματα φαίνεται πως οι τιμές της ογκομετρικής πλαστικής τροπής μηδενίζονται σε απόσταση περίπου 5 m από τις παρειές των θαλάμων.

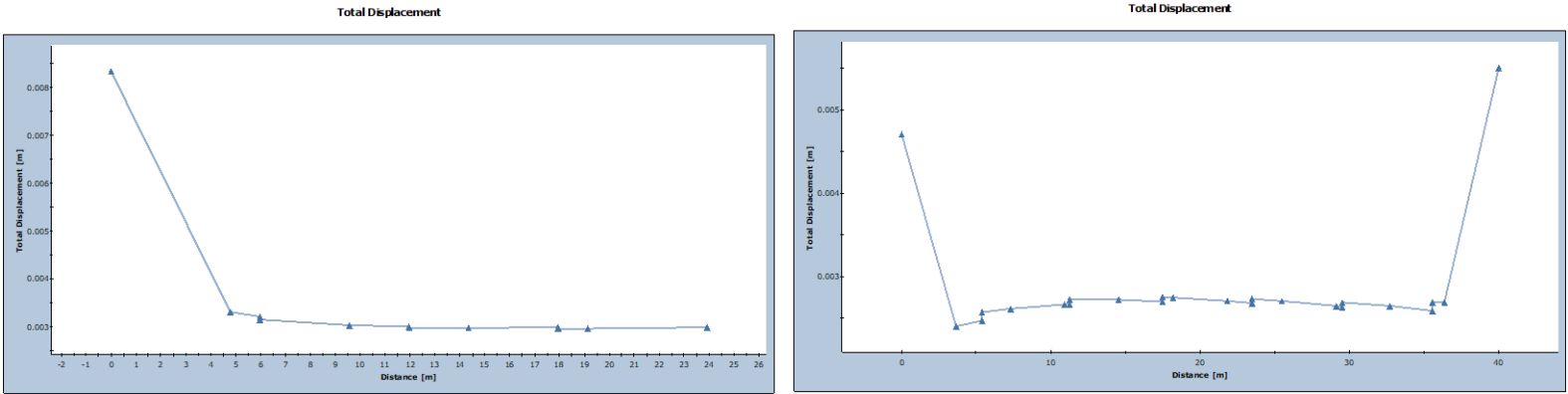


Εικόνα 4.22: Ογκομετρική πλαστική τροπή αριστερά του θαλάμου 1 (αριστερή εικόνα) και μεταξύ θαλάμων 1 και 2 (δεξιά εικόνα)

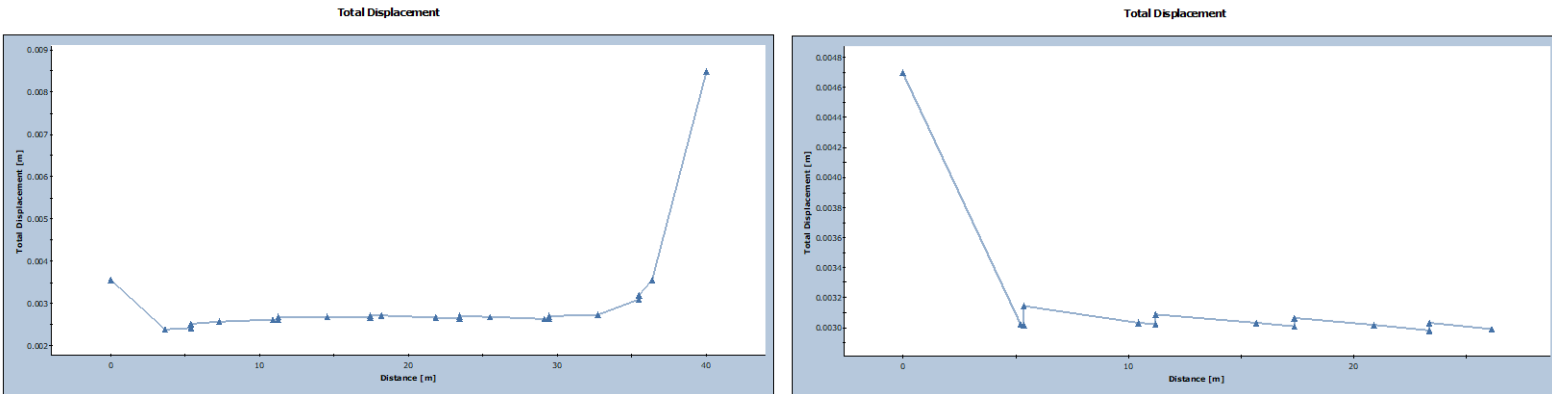


Εικόνα 4.23: Ογκομετρική πλαστική τροπή μεταξύ θαλάμων 2 και 3 (αριστερή εικόνα) και δεξιά του θαλάμου 3 (δεξιά εικόνα)

Αντίστοιχα απεικονίστηκαν σε διαγράμματα και οι τιμές των ολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης από τις παρειές των θαλάμων και παρότι δεν μηδενίζονται μέσα στα όρια των διαγραμμάτων, μειώνονται σε σημαντικό βαθμό σε μια απόσταση ίση με περίπου 5 m από την παρειά του κάθε θαλάμου.



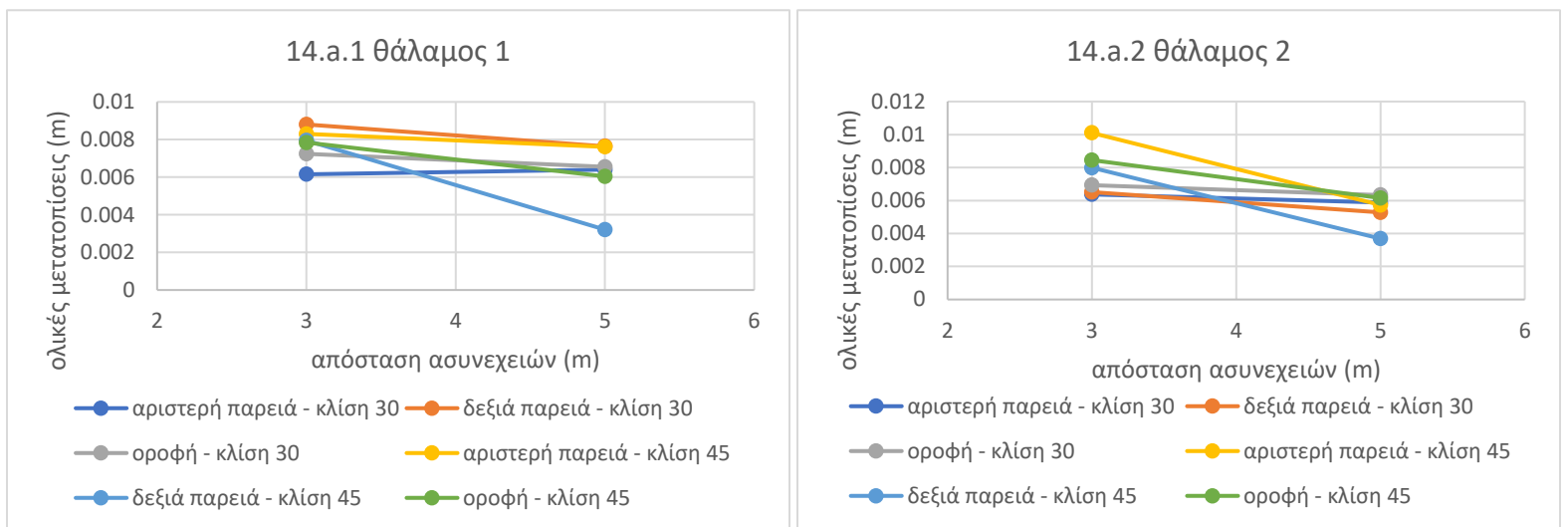
Εικόνα 4.24: Ολικές μετατοπίσεις αριστερά του θαλάμου 1 (αριστερή εικόνα) και μεταξύ θαλάμων 1 και 2 (δεξιά εικόνα)



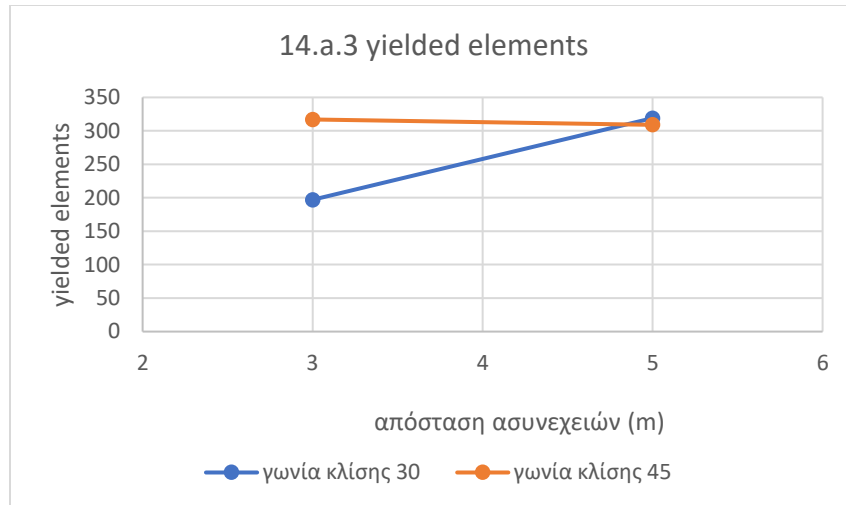
Εικόνα 4.25: Ολικές μετατοπίσεις μεταξύ θαλάμων 2 και 3 (αριστερή εικόνα) και δεξιά του θαλάμου 3 (δεξιά εικόνα)

β) Σενάριο δύο θαλάμων:

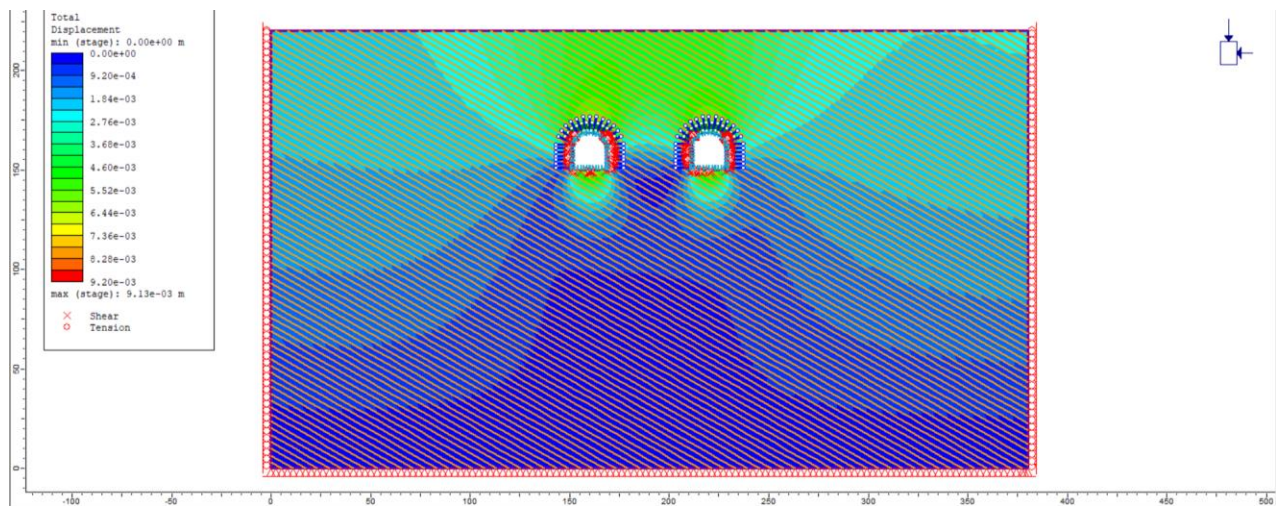
Όπως και στο προηγούμενο σενάριο, για την σύγκριση των τεσσάρων συνδυασμών γωνίας κλίσης και απόστασης ασυνεχειών σχεδιάστηκαν δύο διαγράμματα (14.a.1 και 14.a.2), ένα για τον κάθε θάλαμο, στα οποία απεικονίστηκαν οι τιμές των ολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης των ασυνεχειών για τις δύο γωνίες κλίσης. Οι τιμές των μετατοπίσεων λήφθηκαν από τις παρειές και την οροφή των θαλάμων. Οι ευθείες που σχεδιάστηκαν βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους, είναι όμως δυνατόν να παρατηρηθεί ότι η γωνία κλίσης των 30° και η απόσταση των 3 m μεταξύ των ασυνεχειών εμφανίζει τις περισσότερες φορές τις χαμηλότερες τιμές μετακινήσεων.



Ταυτόχρονα μέσω του διαγράμματος 14.a.3 στο οποίο καταγράφονται τα στοιχεία που έχουν διαρρεύσει σε συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών για τις δύο γωνίες κλίσης, φαίνεται ότι ο συνδυασμός γωνίας κλίσης 30° και απόστασης ασυνεχειών 3 m εμφανίζει τα λιγότερα στοιχεία σε διαρροή.

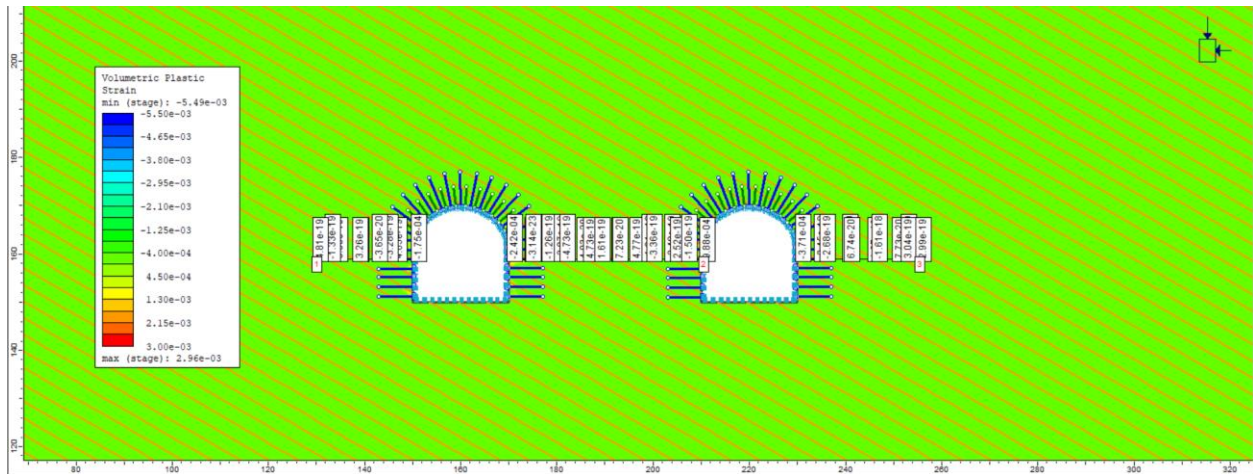


Τα στοιχεία αυτά μάλιστα παρατηρούνται σε μεγαλύτερη έκταση στις παρειές των θαλάμων και πιο αραιά στα δάπεδα (Εικόνα 4.26).



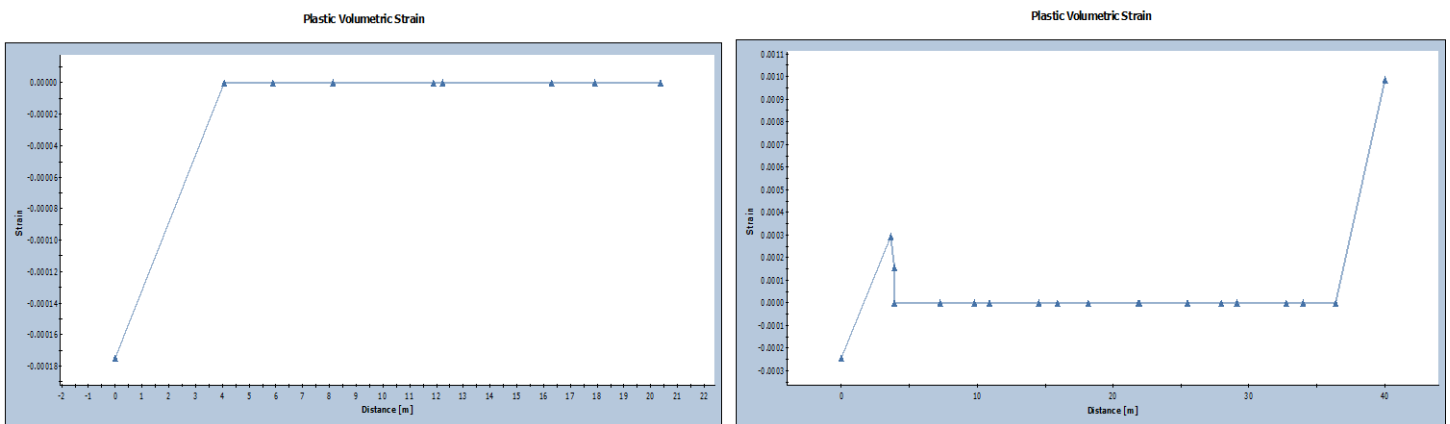
Εικόνα 4.26: Ολικές μετατοπίσεις και στοιχεία σε διαρροή για απόσταση ασυνεχειών 3 m και γωνία κλίσης 30°

Μετά την επιλογή του δικτύου ασυνεχειών με τη μικρότερη επιρροή στα χαρακτηριστικά του ανοίγματος επιλέχθηκε η προβολή των τιμών ογκομετρικής πλαστικής τροπής ενδιάμεσα των θαλάμων και σχεδιάστηκαν διαγράμματα για την εκτίμηση του εύρους της πλαστικής ζώνης.

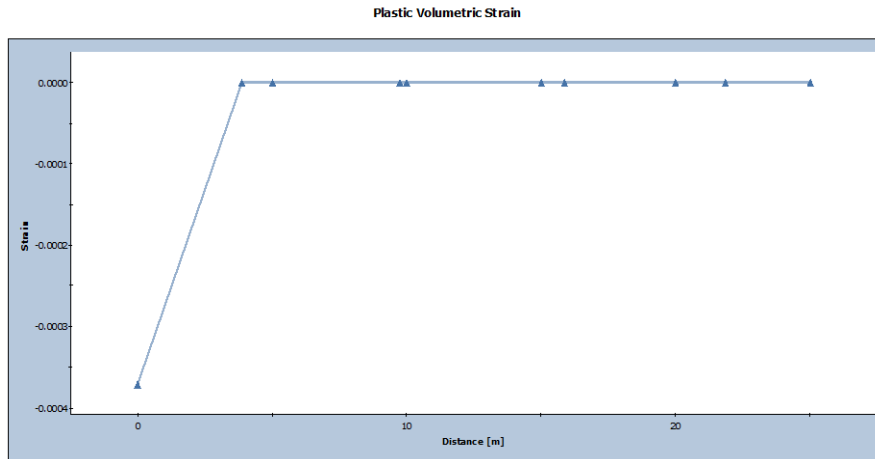


Εικόνα 4.27: Ογκομετρικές πλαστικές τροπές για δίκτυο ασυνεχειών γωνίας κλίσης 30° και απόστασης 3 m μεταξύ τους

Βάσει των διαγραμμάτων φαίνεται πως οι ογκομετρικές τροπές μηδενίζονται σε ακτίνα μεταξύ 3.5 m και 5 m από την παρειά του εκάστοτε θαλάμου.

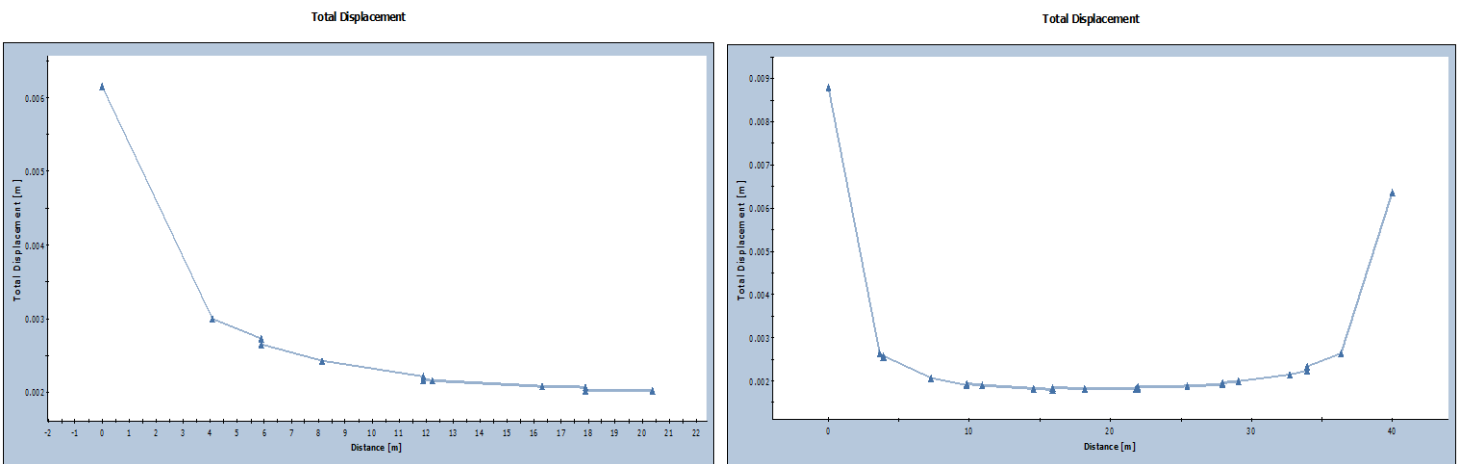


Εικόνα 4.28: Ογκομετρική πλαστική τροπή αριστερά του θαλάμου 1 (αριστερή εικόνα) και ενδιάμεσα των θαλάμων 1 και 2 (δεξιά εικόνα)

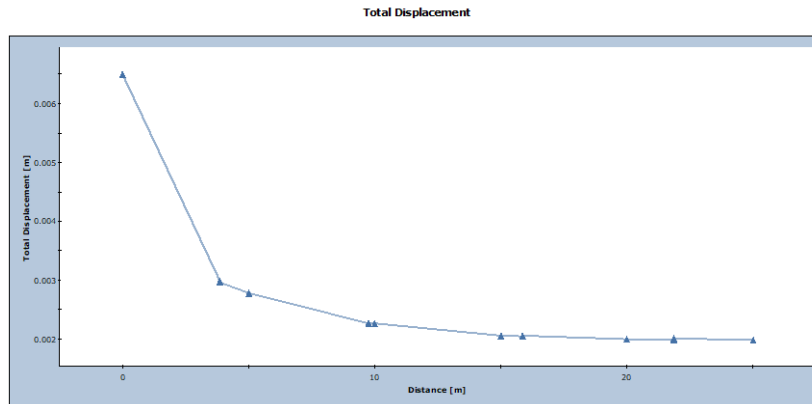


Εικόνα 4.29: Ογκομετρική πλαστική τροπή δεξιά του θαλάμου 2

Κατά αντιστοιχία με τα παραπάνω απεικονίστηκαν σε διαγράμματα και οι τιμές των ολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης από τις παρειές των θαλάμων. Τα σημεία μηδενισμού των μετατοπίσεων δεν φαίνονται στα διαγράμματα, καθώς η απαιτούμενη απόσταση είναι αρκετά μεγαλύτερη, όμως φαίνεται ότι σε απόσταση περίπου 10 m από την κάθε παρεία, οι μετατοπίσεις πλησιάζουν στον μηδενισμό.



Εικόνα 4.30: Ολικές μετατοπίσεις αριστερά του θαλάμου 1 (αριστερή εικόνα) και ενδιάμεσα των θαλάμων 1 και 2 (δεξιά εικόνα)



Εικόνα 4.31: Ολικές μετατοπίσεις δεξιά του θαλάμου 2

4.2.4 Συμπεράσματα

Στο σύνολό τους οι παραπάνω αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την εκτίμηση των ιδανικότερων χαρακτηριστικών πετρώματος που θα μπορούσε να φιλοξενήσει ένα έργο υπόγειας αποθήκευσης ενέργειας υπό τη μορφή υγροποιημένου φυσικού αερίου. Όπως προαναφέρθηκε, το σενάριο των τριών θαλάμων είναι το δυσμενέστερο εκ των δύο, λόγω των παραμέτρων που του επιβλήθηκαν κατά τις προσομοιώσεις. Ταυτόχρονα οι ήδη υπάρχουσες δεξαμενές στη νήσο Ρεβυθούσα, όπως αναλύθηκε και στο αντίστοιχο κεφάλαιο 4.1.2.2 «Τερματικός Σταθμός Ρεβυθούσας», επιτυγχάνουν δυναμικότητες $130,000 \text{ m}^3$ ($65,000 \text{ m}^3$ ανά δεξαμενή) και $95,000 \text{ m}^3$. Κατά συνέπεια το σενάριο κατασκευής δύο υπόγειων θαλάμων συνολικής δυναμικότητας $200,000 \text{ m}^3$ είναι πιο συμβατό με τα δεδομένα της ελληνικής πραγματικότητας από ότι το σενάριο κατασκευής τριών θαλάμων συνολικής δυναμικότητας $300,000 \text{ m}^3$.

Συμπερασματικά λοιπόν στα πλαίσια της εργασίας θεωρήθηκε ότι το προτιμότερο σενάριο αφορά στην κατασκευή μοντέλου δύο θαλάμων δυναμικότητας $100,000 \text{ m}^3$ ο κάθε ένας με χαρακτηριστικά πετρώματος $GSI = 55$, $UCS = 55$ και απόσταση μεταξύ θαλάμων 40 m , όπως ακριβώς παρουσιάστηκε προηγουμένως. Παράλληλα με την προσθήκη δικτύου ασυνεχειών έγινε προσπάθεια δημιουργίας ενός ακόμα μοντέλου που να προσομοιάζει σε πιο ικανοποιητικό βαθμό τις πραγματικές συνθήκες.

5. Κοστολόγηση

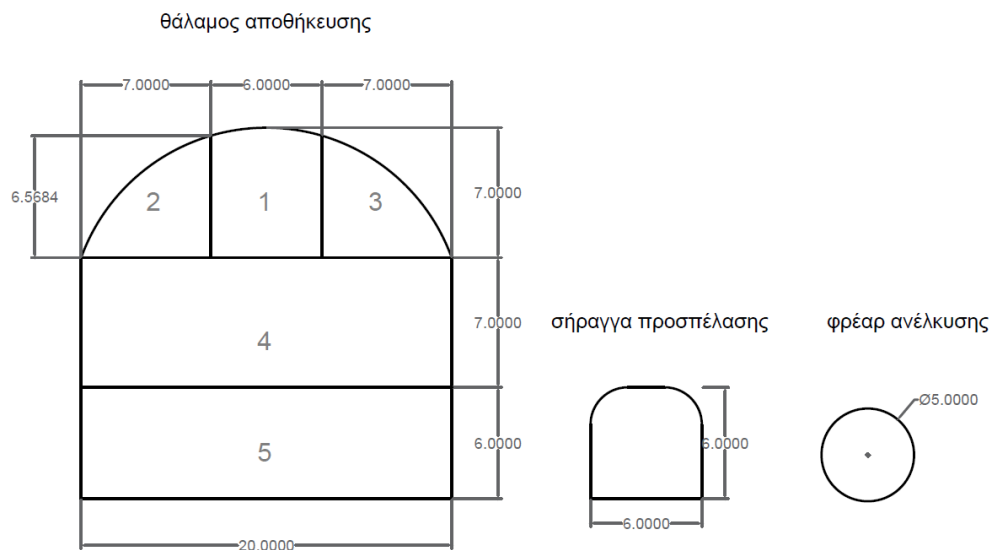
Το κεφάλαιο της κοστολόγησης αποτελεί το τελευταίο μέρος της εργασίας, κατά το οποίο έγινε προσπάθεια εκτίμησης του απαιτούμενου κεφαλαίου για την εκσκαφή και υποστήριξη του υποθετικού έργου υπόγειων θαλάμων αποθήκευσης, όπως αυτό παρουσιάστηκε προηγουμένως στην εργασία. Παράλληλα εκτός από τον προσδιορισμό των απαραίτητων πόρων, σχεδιάστηκαν και ενδεικτικά χρονοδιαγράμματα καταμερισμού των εργασιών του εργοταξίου. Για την ανάλυση του κόστους ήταν επίσης απαραίτητο να διευκρινιστούν και κάποια στοιχεία σχετικά με τη διάνοιξη των θαλάμων και των προσπελαστικών έργων, ώστε να απλοποιηθεί σε ένα βαθμό η διαδικασία.

5.1 Στοιχεία διάνοιξης

Για την κατασκευή του έργου είναι απαραίτητη η ύπαρξη σήραγγας προσπέλασης από την επιφάνεια του εδάφους έως το δάπεδο της εκάστοτε εκσκαφής, έτσι ώστε να διευκολύνεται η μετακίνηση του προσωπικού και των μηχανημάτων κατά την εργασία. Σε αυτή την περίπτωση και μιας και οι σχεδιαζόμενοι θάλαμοι είναι διαστάσεων 20 m x 20 m και θα βρίσκονται σε βάθος 50 m από την επιφάνεια του εδάφους, επιλέχθηκε η σήραγγα προσπέλασης να προχωρά με τη μορφή ελικοειδούς κεκλιμένου κλίσης 10%, με διατομή 6 m x 6 m και μήκος περίπου 700 m. Επίσης αποφασίστηκε να κατασκευαστεί φρέαρ κυκλικής διατομής, διαμέτρου 5 m, με τη μέθοδο raise boring, με σκοπό τη χρήση του ως μέσο ανέλκυσης του προσωπικού, ως εναλλακτική και ταχύτερη οδός μετακίνησης από τη μεγάλου μήκους σήραγγα προσπέλασης. Παράλληλα, μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής το φρέαρ θα λειτουργεί και ως δίοδος μεταφοράς του υγραποποιημένου φυσικού αερίου μέσα στον θάλαμο και μέσω αγωγών από τα φορτηγά πλοία.

Αναφορικά με τις μεθόδους όρυξης, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το ασβεστολιθικό πέτρωμα επιτρέπει τη διάνοιξη του συνόλου των έργων με χρήση εκρηκτικών υλών. Αναλυτικότερα η σήραγγα προσπέλασης δύναται να διανοιχθεί με ολομέτωπη προσβολή σε μία φάση χρησιμοποιώντας οριζόντια διατρήματα. Αντίθετα οι υπόγειοι θάλαμοι, λόγω των μεγάλων διαστάσεών τους είναι αδύνατο να διανοιχθούν με μονή προσβολή, οπότε η βέλτιστη επιλογή

συνίσταται στην τμηματική όρυξη. Συγκεκριμένα ο κάθε θάλαμος χωρίζεται στο ανώτερο, το μεσαίο και το κατώτερο μέρος. Το ανώτερο μέρος χωρίζεται και αυτό σε τρία επιμέρους τμήματα εκ των οποίων το πρώτο τμήμα θα λειτουργεί ως σήραγγα προπορείας, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα εξέτασης των χαρακτηριστικών του πετρώματος που συναντώνται και αντιμετώπισης τυχόν προβλημάτων ευστάθειας που εμφανίζονται, και τα άλλα δύο θα ακολουθούν. Η όρυξή τους μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση οριζόντιων διατρημάτων. Αντίθετα το μεσαίο και κατώτερο μέρος επιλέχθηκε να διανοιχθεί με τη μέθοδο των ορθών βαθμίδων και άρα με κατακόρυφη διάτρηση.



Εικόνα 5.1: Διατομές θαλάμου αποθήκευσης, σήραγγας προσπέλασης και φρέατος ανέλκυσης (μέσω AutoCAD)

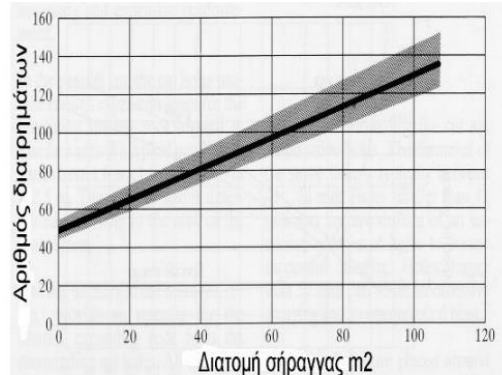
5.2 Ανάλυση στοιχείων διάνοιξης των επιμέρους τμημάτων

5.2.1 Παραδοχές

5.2.1.1 Διάτρηση

Καθώς το ασβεστολιθικό πέτρωμα επιτρέπει τη διάνοιξη του συνόλου των έργων με χρήση εκρηκτικών υλών, για το βασικό σχεδιασμό των χαρακτηριστικών της ανατίναξης με χρήση οριζόντιων διατρημάτων, χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα της εικόνας 5.2. Μέσω αυτού κατέστη δυνατή η προεκτίμηση του απαιτούμενου αριθμού διατρημάτων συναρτήσει του εμβαδού της

εκάστοτε διατομής, κατά τη διάτρηση των τμημάτων 1 έως 3 και της σήραγγας προσπέλασης. Παράλληλα θεωρήθηκε βήμα προχώρησης ίσο με 3 m, οπότε για την επίτευξή του επιλέχθηκε 90% ποσοστό προχώρησης ανά ανατίναξη και άρα μήκος διατρημάτων ίσο με 3.3 m.



Εικόνα 5.2: Προεκτίμηση του απαιτούμενου αριθμού διατρημάτων συναρτήσει του εμβαδού της διατομής (Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων, n.d.)

Όσον αφορά στις βαθμίδες (τμήμα 4 – τμήμα 5), πλάτους 20 m και ύψους 7 m και 6 m αντίστοιχα, αποφασίστηκε ο σχεδιασμός των χαρακτηριστικών της ανατίναξης να γίνει όπως σε επιφανειακές εξορύξεις με ορθές βαθμίδες, με τη βοήθεια των παρακάτω τύπων (Αγιουτάντης, 2019):

- Φορτίο: $B = 0.045 * d$, όπου d η διάμετρος των διατρημάτων (σε mm)
- Μήκος διατρήματος: $H = \frac{\text{ύψος μετώπου}}{\sin(\text{κλίση μετώπου})} * U$
- Μήκος υποδιάτρησης: $U = 0.3 * B$
- Απόκλιση διατρήματος: $F = 0.03 * H + 0.05$
- Πρακτικό φορτίο: $B1 = B - F$
- Απόσταση διατρημάτων: $E = 1.25 * B1$
- Μήκος επιγόμεσης: $H0 = B1$
- Μήκος γόμωσης πυθμένα: $Hb = 0.3 * B$
- Μήκος γόμωσης στήλης: $Hc = H - H0 - Hb$

Η διάνοιξη της πρώτης βαθμίδας επιλέχθηκε να ξεκινήσει αφότου το ανώτερο τμήμα πετύχει μια προχώρηση της τάξης των μερικών δεκάδων μέτρων, ώστε να έχει εξασφαλιστεί ο απαιτούμενος χώρος για την μετακίνηση του μηχανοκίνητου εξοπλισμού και η ασφάλεια του μετώπου. Αντίστοιχα για τη δεύτερη βαθμίδα αποφασίστηκε η έναρξη της διάνοιξής της να πραγματοποιηθεί μετά και τη συνολική διάνοιξη του ανώτερου τμήματος και της πρώτης

βαθμίδας. Καθώς η κατακόρυφη διάτρηση πραγματοποιείται ταχύτερα από την οριζόντια και υπάρχει η δυνατότητα χρήσης μεγαλύτερης διαμέτρου και μήκους διατρημάτων, επιτεύχθηκε τελικά μεγαλύτερο βήμα προχώρησης. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε τα διατρήματα να έχουν διάμετρο 75 mm, το φορτίο υπολογίστηκε ίσο με 3 m και το βήμα προχώρησης ίσο με 6 m.

Τέλος αναφορικά με τον απαραίτητο για τη διάτρηση εξοπλισμό, επιλέχθηκε χρήση διατρητικού με δύο στελέχη διάτρησης.

5.2.1.2 Γόμωση

Η γόμωση επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί με χρήση φυσιγγίων ζελατινοδυναμίτιδας βάρους 0.625 kg και μήκους 0.38 m το κάθε ένα. Τα οριζόντια διατρήματα γομώθηκαν σε ποσοστό 70% του μήκους τους, ενώ τα κατακόρυφα, των τμημάτων 4 και 5, περίπου σε ποσοστά 66% και 60% του μήκους τους αντίστοιχα. Η έναυση τελικά της εκρηκτικής ύλης πραγματοποιήθηκε με χρήση ηλεκτρικών καυυλλίων.

5.2.1.3 Φόρτωση – Μεταφορά

Για τη φόρτωση και μεταφορά του εξορυσσόμενου υλικού αποφασίστηκε η χρήση φορτωτή 992 C της εταιρείας Caterpillar με χωρητικότητα κάδου 10.3 m³ και φορτηγού TORO TH663i της εταιρείας SANDVIK με χωρητικότητα κάδου 24.23 m³, ταχύτητα κίνησης 33 km/h και χρόνο απόρριψης των μεταφερόμενων υλικών 16 sec. Η απόσταση απόθεσης των υλικών ορίστηκε στα 100 m από το στόμιο της σήραγγας.



Εικόνα 5.3: Caterpillar 992C (Lectura specs, n.d.) (αριστερά), TORO TH663i (SANDVIK, n.d.) (δεξιά)

5.2.1.4 Υποστήριξη

Τέλος για την υποστήριξη του εκάστοτε ανοίγματος επιλέχθηκε ρίψη εκτοξευόμενου σκυροδέματος και τοποθέτηση αγκυρίων, όπως αυτά προβλέπονται από το διάγραμμα του Barton της εικόνας 4.5 σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η διαδικασία τοποθέτησης των αγκυρίων πραγματοποιήθηκε μέσω κοχλιωτικού με ένα στέλεχος διάτρησης, ενώ η ρίψη εκτοξευόμενου σκυροδέματος από ρομποτικό σύστημα.

5.2.2 Σήραγγα προσπέλασης

Για τη συνολική διάνοιξη της σήραγγας προσπέλασης, διατομής 6 m x 6 m και μήκους 700 m, απαιτήθηκε εξόρυξη 25,200 m³ πετρώματος. Για εμβαδό διατομής περίπου 36 m και προχώρηση ενός βήματος (3 m) απαιτήθηκαν 75 διατρήματα και 450 φυσίγγια εκρηκτικής ύλης, ποσότητα που αναλογεί σε περίπου 282 kg ζελατινοδυναμίτιδας. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα τοποθετήθηκε σε όλες τις επιφάνειες του ανοίγματος, ενώ αγκύρια μόνο στην οροφή. Τέλος ο όγκος του εξορυσσόμενου πετρώματος ανά βήμα προχώρησης ανήλθε στα 140 m³ και η ολική εξόρυξη πραγματοποιήθηκε μέσα σε 234 βήματα.

5.2.3 Σήραγγα προπορείας

Για τη διάνοιξη της σήραγγας προπορείας διαστάσεων 6 m x 7 m x 299 m απαιτήθηκε συνολικός όγκος εκσκαφής 12,558 m³ πετρώματος. Σε αυτή την περίπτωση λόγω μεγαλύτερου εμβαδού διατομής, αυξήθηκε αντίστοιχα ο αριθμός των απαιτούμενων διατρημάτων σε 80 και ο αριθμός φυσιγγίων εκρηκτικής ύλης σε 480, δηλαδή 300 kg ζελατινοδυναμίτιδας, για προχώρηση ενός βήματος (3 m). Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και οι δύο σειρές αγκυρίων, που αποτελούν τα μέτρα υποστήριξης, τοποθετήθηκαν μόνο στην οροφή του ανοίγματος. Επίσης ο όγκος του εξορυσσόμενου πετρώματος ανά βήμα προχώρησης υπολογίστηκε ίσος με 164 m³, με την ολική εξόρυξη να ολοκληρώνεται μέσα σε 100 βήματα.

5.2.4 Ακραία τμήματα άνω διατομής (τμήματα 2 και 3)

Για την ολοκλήρωση των διαδικασιών διάνοιξης των ακραίων τμημάτων 2 και 3 της διατομής του θαλάμου, όπως αυτά φαίνονται στην εικόνα 5.1, απαιτήθηκε όγκος εκσκαφής 10798 m^3 για κάθε τμήμα. Παράλληλα λόγω της ελλειψοειδούς μορφής που παρουσιάζουν οι διατομές ο αριθμός των απαιτούμενων διατρημάτων ανήλθε στα 75 και ο αριθμός των φυσιγγίων εκρηκτικής ύλης στα 450, δηλαδή 282 kg ζελατινοδυναμίτιδας, για το εκάστοτε τμήμα και ανά βήμα προχώρησης (3m). Κατά αντιστοιχία με τη σήραγγα προπορείας, τα μέτρα υποστήριξης, δηλαδή το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και οι δύο σειρές αγκυρίων, τοποθετήθηκαν μόνο στην οροφή των ανοιγμάτων. Ο όγκος του εξορυσσόμενου πετρώματος ανά βήμα προχώρησης υπολογίστηκε ως 141 m^3 και συνεπώς η ολική διάνοιξη ολοκληρώνεται μέσα σε 100 βήματα προχώρησης.

5.2.5 1^η Βαθμίδα (τμήμα 4)

Η ολική διάνοιξη της πρώτης βαθμίδας είχε απαιτήσεις σε εκσκαφή όγκου πετρώματος $41,860 \text{ m}^3$. Για προχώρηση ενός βήματος (6 m) τα απαιτούμενα διατρήματα υπολογίστηκαν σε 15, οπότε ήταν δυνατή η όρυξή τους σε δύο σειρές. Παράλληλα ο αριθμός των φυσιγγίων εκρηκτικής ύλης υπολογίστηκε σε 206, άρα 129 kg εκρηκτικής ύλης ανά βήμα προχώρησης. Τα απαιτούμενα μέτρα υποστήριξης τοποθετήθηκαν μόνο στις παρειές της εκσκαφής και για όγκο εξορυσσόμενου πετρώματος ανά βήμα να ανέρχεται στα $1,092 \text{ m}^3$, η συνολική διάνοιξη ολοκληρώθηκε σε 50 βήματα.

5.2.6. 2^η Βαθμίδα (τμήμα 5)

Η ολική διάνοιξη της δεύτερης βαθμίδας είχε απαιτήσεις σε εκσκαφή όγκου πετρώματος $35,880 \text{ m}^3$. Για προχώρηση ενός βήματος (6 m) τα απαιτούμενα διατρήματα υπολογίστηκαν σε 15, οπότε ήταν δυνατή η όρυξή τους σε δύο σειρές. Παράλληλα ο αριθμός των φυσιγγίων εκρηκτικής ύλης υπολογίστηκε σε 160, άρα 100 kg εκρηκτικής ύλης ανά βήμα προχώρησης. Τα απαιτούμενα μέτρα υποστήριξης τοποθετήθηκαν μόνο στις παρειές της εκσκαφής και για όγκο εξορυσσόμενου

πετρώματος ανά βήμα να ανέρχεται στα 936 m³, η συνολική διάνοιξη ολοκληρώθηκε σε 50 βήματα.

5.3 Κατασκευή χρονοδιαγραμμάτων εργασιών των επιμέρους τμημάτων

Για το σχεδιασμό των χρονοδιαγραμμάτων κατανομής των απαιτούμενων για τη διάνοιξη εργασιών μέσα στις δύο βάρδιες μιας ημέρας, υπολογίστηκε ο απαιτούμενος χρόνος διάτρησης, γόμωσης, αερισμού, αποκομιδής, ξεσκαρώματος και υποστήριξης και καταγράφηκε ο απαραίτητος αριθμός εργαζομένων ανά βήμα προχώρησης.

5.3.1 Παραδοχές

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψιν μερικούς κοινούς παρονομαστές για τη διάρκεια των εργασιών, όπως αυτοί ορίζονται από τις δυνατότητες των αντίστοιχων μηχανημάτων:

- Ταχύτητα διάτρησης: 1.7 m/min (οριζόντια διάτρηση), 2 m/min (κατακόρυφη διάτρηση)
- Χρόνος γόμωσης ανά εργαζόμενο: 2 min/διάτρημα
- Χωρητικότητα φορτωτή: 10.3 m³
- Χωρητικότητα φορτηγού: 24.23 m³
- Χρόνος ξεσκαρώματος: 15 min/εργασία
- Παροχή ρομποτικού συστήματος ρίψης εκτοξευόμενου σκυροδέματος: 15 m³/h

Σημαντικό είναι επίσης να αναφερθεί ότι ο συντελεστής επιπλήσματος λήφθηκε ίσος με 1.3.

5.3.2 Σήραγγα προσπέλασης

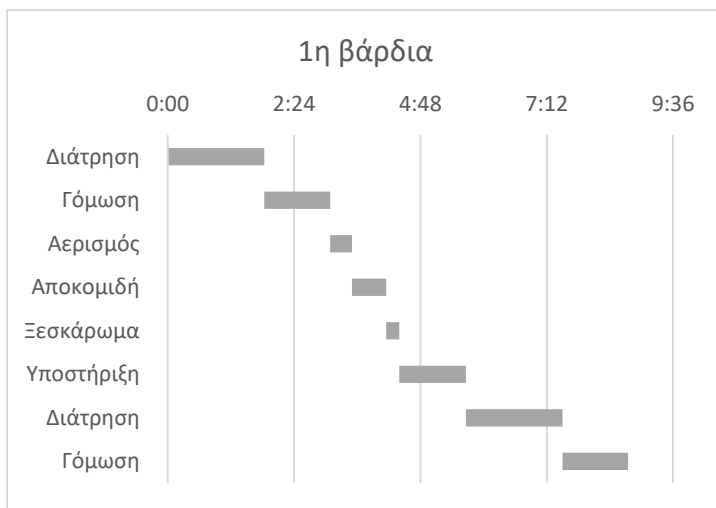
Το συνολικό μήκος διάτρησης για κάθε βήμα προχώρησης, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας προσπέλασης, υπολογίστηκε σε 247.5 m και πραγματοποιήθηκε μέσω διατρητικού δύο στελεχών. Η γόμωση επιλέχθηκε να εκτελεστεί με την ταυτόχρονη εργασία δύο εργατών. Η διαδικασία της

φόρτωσης και μεταφοράς του συνολικού εξορυσσόμενου πετρώματος ανά βήμα προχώρησης, πραγματοποιήθηκε μέσω 14 κύκλων λειτουργίας φορτωτή και 6 κύκλων λειτουργίας φορτηγού. Τέλος η διάτρηση για την τοποθέτηση αγκυριών πραγματοποιήθηκε σε συνολικό μήκος 36 m σε κάθε βήμα.

Η διάνοιξη της σήραγγας προσπέλασης απαιτεί το εξής προσωπικό ανά βάρδια (8 άτομα):

- 1 χειριστής διατρητικού/κοχλιωτικού
- 2 εργάτες για γόμωση/κοχλίωση
- 1 χειριστής φορτωτή
- 1 χειριστής φορτηγού
- 1 χειριστής ρομποτικού συστήματος ρίψης εκτοξευόμενου σκυροδέματος/ξεσκαρωτή
- 1 μηχανικός
- 1 εργοδηγός

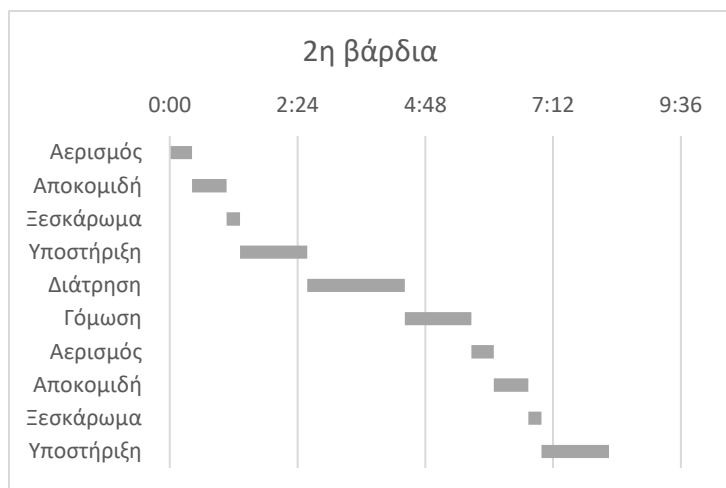
Βάσει των παραπάνω κατασκευάστηκαν τα χρονοδιαγράμματα εργασιών 1^{ης} και 2^{ης} βάρδιας, σύμφωνα με τα οποία είναι δυνατόν να επιτευχθεί συνολική προχώρηση τριών βημάτων σε μία ημέρα (9 m). Συνεπώς για τη συνολική διάνοιξη της σήραγγας προσπέλασης απαιτούνται 78 ημέρες εργασίας, υπό τις συνθήκες ωραρίων που περιγράφονται στα χρονοδιαγράμματα στη συνέχεια.



1η βάρδια	αρχή	πέρας	διάρκεια
Διάτρηση	0:00	1:50	1:50
Γόμωση	1:50	3:05	1:15
Αερισμός	3:05	3:30	0:25
Αποκομιδή	3:30	4:09	0:39
Ξεσκάρωμα	4:09	4:24	0:15
Υποστήριξη	4:24	5:40	1:16
Διάτρηση	5:40	7:30	1:50
Γόμωση	7:30	8:45	1:15

Πίνακας 5.1: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 1^{ης} βάρδιας

Διάγραμμα 5.1: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 1^{ης} βάρδιας



Διάγραμμα 5.2: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 2^{ης} βάρδιας

2η βάρδια	αρχή	πέρας	διάρκεια
Αερισμός	0:00	0:25	0:25
Αποκομιδή	0:25	1:04	0:39
Ξεσκάρωμα	1:04	1:19	0:15
Υποστήριξη	1:19	2:35	1:16
Διάτρηση	2:35	4:25	1:50
Γόμωση	4:25	5:40	1:15
Αερισμός	5:40	6:05	0:25
Αποκομιδή	6:05	6:44	0:39
Ξεσκάρωμα	6:44	6:59	0:15
Υποστήριξη	6:59	8:15	1:16

Πίνακας 5.2: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 2^{ης} βάρδιας

5.3.3 Σήραγγα προπορείας

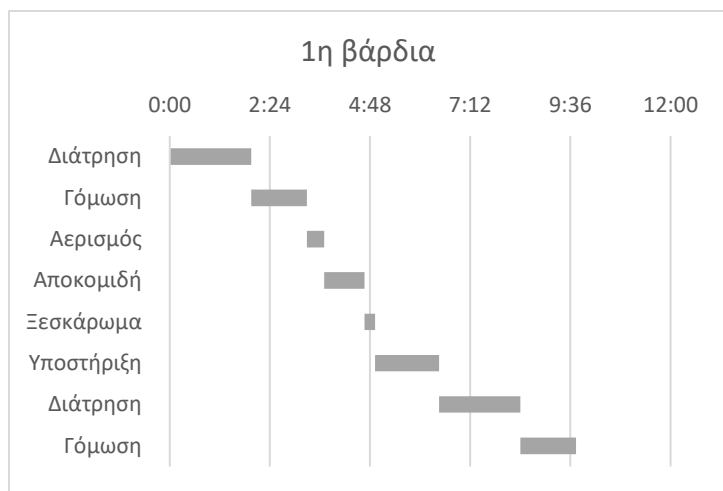
Το συνολικό μήκος διάτρησης για κάθε βήμα προχώρησης, κατά τη διάνοιξη της σήραγγας προπορείας, υπολογίστηκε σε 264 m και πραγματοποιήθηκε μέσω διατρητικού δύο στελεχών. Η γόμωση επιλέχθηκε να εκτελεστεί με την ταυτόχρονη εργασία δύο εργατών. Η διαδικασία της φόρτωσης και μεταφοράς του συνολικού εξορυσσόμενου πετρώματος ανά βήμα προχώρησης, πραγματοποιήθηκε μέσω 16 κύκλων λειτουργίας φορτωτή και 7 κύκλων λειτουργίας φορτηγού. Τέλος η διάτρηση για την τοποθέτηση αγκυριών πραγματοποιήθηκε σε συνολικό μήκος 99 m σε κάθε βήμα.

Η διάνοιξη της σήραγγας προπορείας απαιτεί το εξής προσωπικό ανά βάρδια (8 άτομα):

- 1 χειριστής διατρητικού/κοχλιωτικού
- 2 εργάτες για γόμωση/κοχλίωση
- 1 χειριστής φορτωτή
- 1 χειριστής φορτηγού
- 1 χειριστής ρομποτικού συστήματος ρίψης εκτοξευόμενου σκυροδέματος/ξεσκαρωτή
- 1 μηχανικός
- 1 εργοδηγός

Βάσει των παραπάνω κατασκευάστηκαν τα χρονοδιαγράμματα εργασιών 1^{ης} και 2^{ης} βάρδιας, σύμφωνα με τα οποία είναι δυνατόν να επιτευχθεί συνολική προχώρηση τριών βημάτων σε μία

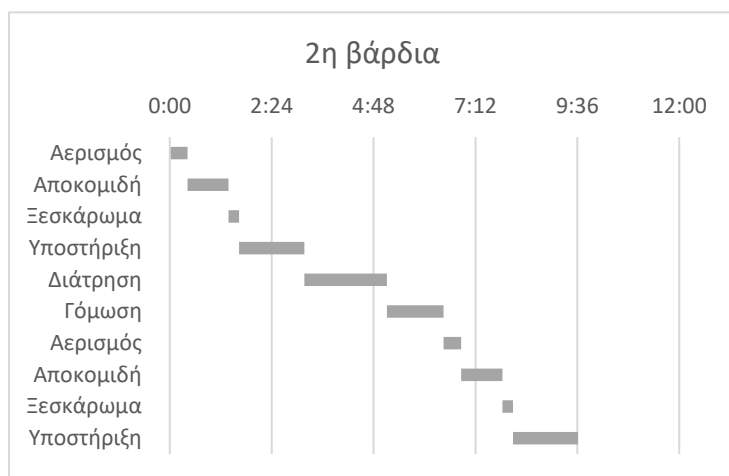
ημέρα (9 m). Συνεπώς για τη συνολική διάνοιξη της σήραγγας προπορείας απαιτούνται 34 ημέρες εργασίας, βάσει του προγράμματος που παρουσιάζεται στα χρονοδιαγράμματα στη συνέχεια.



Διάγραμμα 5.3: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 1ης βάρδιας

1η βάρδια	αρχή	πέρας	διάρκεια
Διάτρηση	0:00	1:57	1:57
Γόμωση	1:57	3:17	1:20
Αερισμός	3:17	3:42	0:25
Αποκομιδή	3:42	4:40	0:58
Ξεσκάρωμα	4:40	4:55	0:15
Υποστήριξη	4:55	6:27	1:32
Διάτρηση	6:27	8:24	1:57
Γόμωση	8:24	9:44	1:20

Πίνακας 5.3: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 1ης βάρδιας



Διάγραμμα 5.4: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 2ης βάρδιας

2η βάρδια	αρχή	πέρας	διάρκεια
Αερισμός	0:00	0:25	0:25
Αποκομιδή	0:25	1:23	0:58
Ξεσκάρωμα	1:23	1:38	0:15
Υποστήριξη	1:38	3:10	1:32
Διάτρηση	3:10	5:07	1:57
Γόμωση	5:07	6:27	1:20
Αερισμός	6:27	6:52	0:25
Αποκομιδή	6:52	7:50	0:58
Ξεσκάρωμα	7:50	8:05	0:15
Υποστήριξη	8:05	9:37	1:32

Πίνακας 5.4: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 2ης βάρδιας

5.3.4 Ακραία τμήματα άνω διατομής (τμήματα 2 και 3)

Καθώς οι διατομές των τμημάτων 2 και 3 της εικόνας 5.1 είναι πανομοιότυπες τα χαρακτηριστικά που αναλύονται στη συνέχεια αφορούν στο τμήμα 2 και θεωρείται ότι βρίσκονται σε πλήρη αντιστοιχία με το τμήμα 3.

Κατά συνέπεια το συνολικό μήκος διάτρησης για κάθε βήμα προχώρησης, κατά τη διάνοιξη του τμήματος 2, υπολογίστηκε σε 247.5 m και πραγματοποιήθηκε μέσω διατρητικού δύο στελεχών.

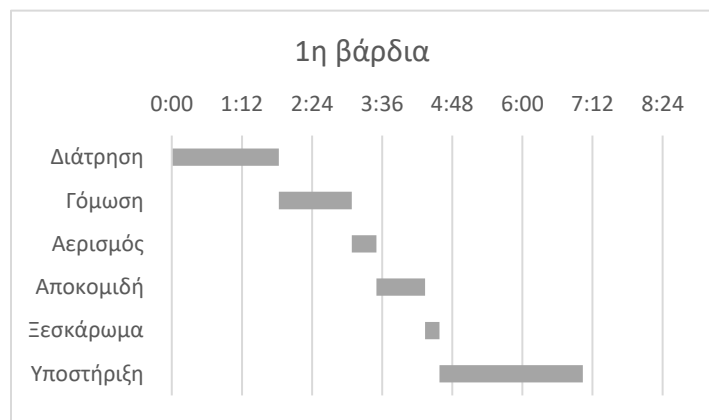
Η γόμωση επιλέχθηκε να εκτελεστεί με την ταυτόχρονη εργασία δύο εργατών. Η διαδικασία της φόρτωσης και μεταφοράς του συνολικού εξορυσσόμενου πετρώματος ανά βήμα προχώρησης, πραγματοποιήθηκε μέσω 14 κύκλων λειτουργίας φορτωτή και 6 κύκλων λειτουργίας φορτηγού. Τέλος η διάτρηση για την τοποθέτηση αγκυρίων πραγματοποιήθηκε σε συνολικό μήκος 176 m σε κάθε βήμα.

Η διάνοιξη του τμήματος 2 απαιτεί το εξής προσωπικό ανά βάρδια (8 άτομα):

- 1 χειριστής διατρητικού/κοχλιωτικού
- 2 εργάτες για γόμωση/κοχλίωση
- 1 χειριστής φορτωτή
- 1 χειριστής φορτηγού
- 1 χειριστής ρομποτικού συστήματος ρίψης εκτοξευόμενου σκυροδέματος/ξεσκαρωτή
- 1 μηχανικός
- 1 εργοδηγός

Αντίστοιχα 8 άτομα ακόμη ανά βάρδια απαιτεί και η διάνοιξη του τμήματος 3.

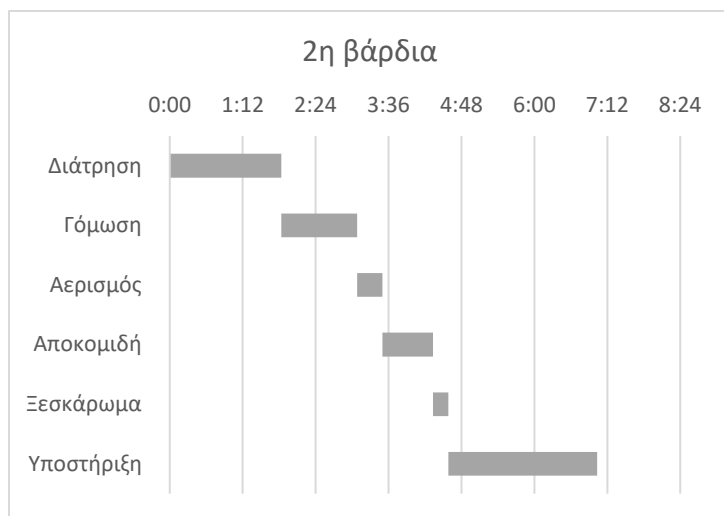
Σύμφωνα με τα παραπάνω κατασκευάστηκαν χρονοδιαγράμματα εργασιών 1^{ης} και 2^{ης} βάρδιας, βάσει των οποίων είναι δυνατόν να επιτευχθεί συνολική προχώρηση δύο βημάτων σε μία ημέρα (6 m). Τελικά για τη συνολική διάνοιξη του τμήματος 2 απαιτούνται 50 ημέρες εργασίας, βάσει του προγράμματος που καταγράφεται στα χρονοδιαγράμματα στη συνέχεια. Αντίστοιχα η συνολική διάνοιξη του τμήματος 3 πραγματοποιείται επίσης σε 50 ημέρες, σύμφωνα με τα ίδια ωράρια.



1η βάρδια	αρχή	πέρας	διάρκεια
Διάτρηση	0:00	1:50	1:50
Γόμωση	1:50	3:05	1:15
Αερισμός	3:05	3:30	0:25
Αποκομιδή	3:30	4:20	0:50
Ξεσκάρωμα	4:20	4:35	0:15
Υποστήριξη	4:35	7:02	2:27

Πίνακας 5.5: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 1^{ης} βάρδιας

Διάγραμμα 5.5: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 1^{ης} βάρδιας



Διάγραμμα 5.6: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 2^{ης} βάρδιας

2η βάρδια	αρχή	πέρας	διάρκεια
Διάτρηση	0:00	1:50	1:50
Γόμωση	1:50	3:05	1:15
Αερισμός	3:05	3:30	0:25
Αποκομιδή	3:30	4:20	0:50
Ξεσκάρωμα	4:20	4:35	0:15
Υποστήριξη	4:35	7:02	2:27

Πίνακας 5.6: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 2^{ης} βάρδιας

5.3.5 1^η Βαθμίδα (τμήμα 4)

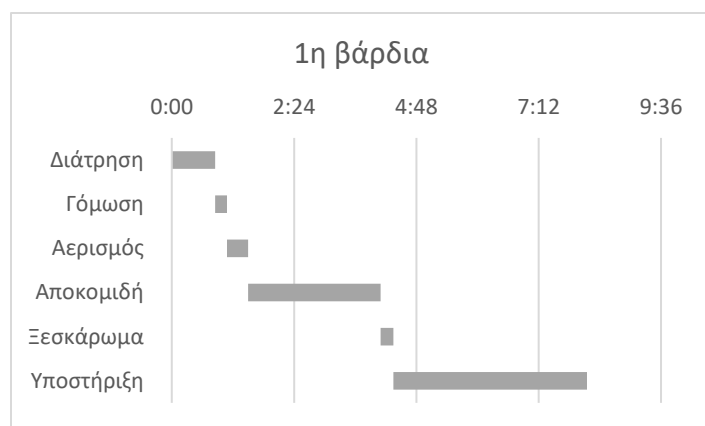
Το συνολικό μήκος διάτρησης για κάθε βήμα προχώρησης, κατά τη διάνοιξη της 1^{ης} βαθμίδας, υπολογίστηκε σε 116.5 m και πραγματοποιήθηκε μέσω διατρητικού δύο στελεχών. Η γόμωση επιλέχθηκε να εκτελεστεί με την ταυτόχρονη εργασία δύο εργατών. Η διαδικασία της φόρτωσης και μεταφοράς του συνολικού εξορυσσόμενου πετρώματος ανά βήμα προχώρησης, λόγω του αυξημένου όγκου των υλικών, πραγματοποιήθηκε μέσω ενός φορτωτή και με χρήση τριών φορτηγών, κάθε ένα από τα οποία εκτέλεσε 15 κύκλους λειτουργίας. Τέλος η διάτρηση για την τοποθέτηση αγκυριών πραγματοποιήθηκε σε συνολικό μήκος 294 m σε κάθε βήμα.

Η διάνοιξη της 1^{ης} βαθμίδας απαιτεί το εξής προσωπικό ανά βάρδια (10 άτομα):

- 1 χειριστής διατρητικού/κοχλιωτικού
- 2 εργάτες για γόμωση/κοχλίωση
- 1 χειριστής φορτωτή
- 3 χειριστές φορτηγού
- 1 χειριστή ρομποτικού συστήματος ρίψης εκτοξευόμενου σκυροδέματος/ξεσκαρωτή
- 1 μηχανικός
- 1 εργοδηγός

Σύμφωνα με τα παραπάνω κατασκευάστηκαν χρονοδιαγράμματα εργασιών 1^{ης} και 2^{ης} βάρδιας, βάσει των οποίων είναι δυνατόν να επιτευχθεί συνολική προχώρηση δύο βημάτων σε μία ημέρα

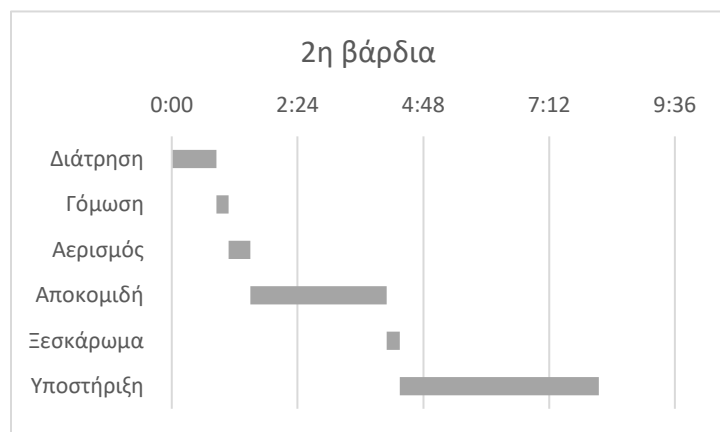
(12 m). Τελικά για τη συνολική διάνοιξη της 1^{ης} βαθμίδας απαιτούνται 25 ημέρες εργασίας, βάσει του προγράμματος που καταγράφεται στα χρονοδιαγράμματα στη συνέχεια.



Διάγραμμα 5.7: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 1^{ης} βάρδιας

1η βάρδια	αρχή	πέρασμα	διάρκεια
Διάτρηση	0:00	0:51	0:51
Γόμωση	0:51	1:05	0:14
Αερισμός	1:05	1:30	0:25
Αποκομιδή	1:30	4:06	2:36
Ξεσκάρωμα	4:06	4:21	0:15
Υποστήριξη	4:21	8:09	3:48

Πίνακας 5.7: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 1^{ης} βάρδιας



Διάγραμμα 5.8: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 2^{ης} βάρδιας

2η βάρδια	αρχή	πέρασμα	διάρκεια
Διάτρηση	0:00	0:51	0:51
Γόμωση	0:51	1:05	0:14
Αερισμός	1:05	1:30	0:25
Αποκομιδή	1:30	4:06	2:36
Ξεσκάρωμα	4:06	4:21	0:15
Υποστήριξη	4:21	8:09	3:48

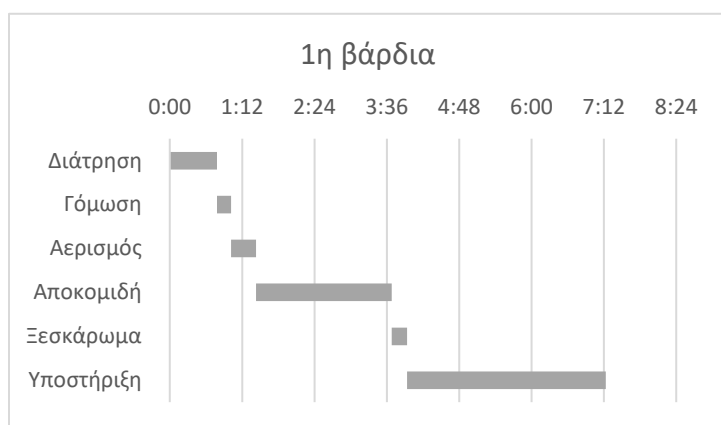
Πίνακας 5.8: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 2^{ης} βάρδιας

5.3.6 2^η Βαθμίδα (τμήμα 5)

Το συνολικό μήκος διάτρησης για κάθε βήμα προχώρησης, κατά τη διάνοιξη της 2^{ης} βαθμίδας, υπολογίστηκε σε 100.6 m και πραγματοποιήθηκε μέσω διατρητικού δύο στελεχών. Η γόμωση επιλέχθηκε να εκτελεστεί με την ταυτόχρονη εργασία δύο εργατών. Η διαδικασία της φόρτωσης και μεταφοράς του συνολικού εξορυσσόμενου πετρώματος ανά βήμα προχώρησης, λόγω του αυξημένου όγκου των υλικών, πραγματοποιήθηκε και πάλι μέσω ενός φορτωτή και με χρήση τριών φορτηγών, κάθε ένα από τα οποία εκτέλεσε 13 κύκλους λειτουργίας. Τέλος η διάτρηση για την τοποθέτηση αγκυριών πραγματοποιήθηκε σε συνολικό μήκος 252 m σε κάθε βήμα.

Καθώς η διάνοιξη της 2^{ης} βαθμίδας αποφασίστηκε να ξεκινήσει μετά την ολοκλήρωση διάνοιξης της 1^{ης} βαθμίδας, η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με τα μηχανήματα και το προσωπικό που εργάστηκαν στην 1^η βαθμίδα, οπότε συνολικά η διάνοιξη της 2^{ης} βαθμίδας απαιτεί το ίδιο προσωπικό που εργάστηκε κατά τη διάνοιξη την 1^{ης} βαθμίδας (κεφάλαιο 5.3.5), δηλαδή 10 άτομα ανά βάρδια.

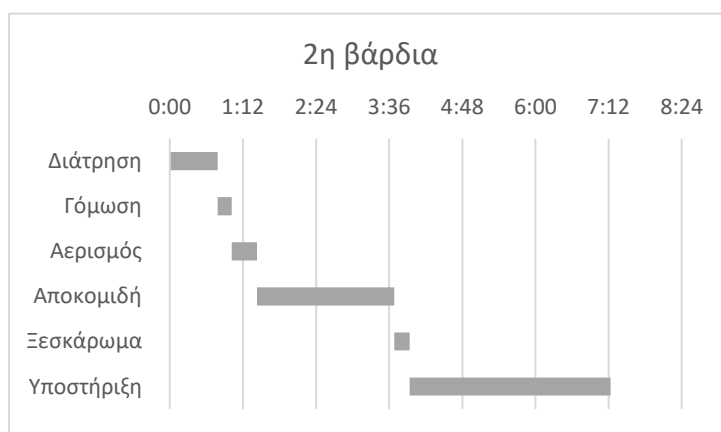
Σύμφωνα με τα παραπάνω κατασκευάστηκαν χρονοδιαγράμματα εργασιών 1^{ης} και 2^{ης} βάρδιας, βάσει των οποίων είναι δυνατόν να επιτευχθεί συνολική προχώρηση δύο βημάτων σε μία ημέρα (12 m). Τελικά για τη συνολική διάνοιξη της 2^{ης} βαθμίδας απαιτούνται 25 ημέρες εργασίας, βάσει του προγράμματος των χρονοδιαγραμμάτων στη συνέχεια.



Διάγραμμα 5.9: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 1^{ης} βάρδιας

1η βάρδια	αρχή	πέρας	διάρκεια
Διάτρηση	0:00	0:47	0:47
Γόμωση	0:47	1:01	0:14
Αερισμός	1:01	1:26	0:25
Αποκομιδή	1:26	3:41	2:15
Ξεσκάρωμα	3:41	3:56	0:15
Υποστήριξη	3:56	7:14	3:18

Πίνακας 5.9: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 1^{ης} βάρδιας



Διάγραμμα 5.10: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 2^{ης} βάρδιας

2η βάρδια	αρχή	πέρας	διάρκεια
Διάτρηση	0:00	0:47	0:47
Γόμωση	0:47	1:01	0:14
Αερισμός	1:01	1:26	0:25
Αποκομιδή	1:26	3:41	2:15
Ξεσκάρωμα	3:41	3:56	0:15
Υποστήριξη	3:56	7:14	3:18

Πίνακας 5.10: Χρονοδιάγραμμα εργασιών 2^{ης} βάρδιας

5.4 Ανάλυση κόστους των επιμέρους τμημάτων

Για τον καθορισμό του κεφαλαίου απαραίτητου για την ολοκλήρωση των εργασιών υπολογίστηκε το σύνολο των λειτουργικών δαπανών, το σύνολο εργατικού κόστους και το κόστος απόσβεσης. Από το άθροισμα των παραπάνω προκύπτει το συνολικό κόστος του έργου ανά βήμα προχώρησης και ο πολλαπλασιασμός του αποτελέσματος αυτού με τον συνολικό όγκο του έργου, προσφέρει το κόστος της ολικής διάνοιξης. Ο υπολογισμός είναι πλήρης εφόσον στο τελικό αυτό κόστος προσμετρηθεί και το κόστος αγοράς των χρησιμοποιούμενων μηχανημάτων.

5.4.1 Παραδοχές

Οι **Λειτουργικές Δαπάνες (€/m³)** αποτελούνται από το κόστος διάτρησης, γόμωσης, αποκομιδής, ξεσκαρώματος και υποστήριξης ανά βήμα προχώρησης, ο υπολογισμός των οποίων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των εξής τύπων:

→ Κόστος διάτρησης = κόστος κορώνας + κόστος στελέχους + κόστος διατρητικού φορείου

- κόστος κορώνας:

$$\frac{\text{αριθμός βραχιόνων} \times \text{μήκος διάτρησης/διάτρημα} \times \text{αριθμός διατρημάτων/βήμα} \times \text{τιμή αγοράς κορώνας}}{\text{διάρκεια ζωής κορώνας} \times \text{όγκος πετρώματος in situ/βήμα}}$$

- κόστος στελέχους:

$$\frac{\text{αριθμός βραχιόνων} \times \text{μήκος διάτρησης/διάτρημα} \times \text{αριθμός διατρημάτων/βήμα} \times \text{τιμή αγοράς στελέχους διάτρησης}}{\text{διάρκεια ζωής στελέχους διάτρησης} \times \text{όγκος πετρώματος in situ/βήμα}}$$

- κόστος διατρητικού φορείου: $\frac{\text{κόστος λειτουργίας διατρητικού} \times \text{χρόνος διάτρησης}}{\text{όγκος πετρώματος in situ/βήμα}}$

→ Κόστος εκρηκτικών / γόμωσης = κόστος εκρηκτικής ύλης + κόστος καψυλλίων

- κόστος Ε.Υ.: $\frac{\text{ποσότητα ΕΥ/βήμα} \times \text{κόστος εκρηκτικών}}{\text{όγκος πετρώματος in situ/βήμα}}$

- κόστος καψυλλίων: $\frac{\text{αριθμός διατρημάτων/βήμα} \times \text{κόστος τεμαχίου ηλ καψυλλίου}}{\text{όγκος πετρώματος in situ/βήμα}}$

→ Κόστος αποκομιδής:

$$\frac{\text{συνολικός χρόνος λειτουργίας φορτωτή} \times \text{κόστος λειτουργίας φορτωτή}}{\text{όγκος πετρώματος in situ/βήμα}} + \text{κόστος λειτουργίας φορτηγού}$$

Το κόστος λειτουργίας του φορτηγού προκύπτει βάσει δεδομένων τιμών από τη Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων σύμφωνα με την οποία για εργοταξιακές οδούς και απόσταση μεταφοράς μεγαλύτερη των 3 km, συμπεριλαμβάνοντας τυχόν καθυστερήσεις στη μετακίνηση, οι μεταφορικές δαπάνες υπολογίζονται ως 0.23 €/m³/km.

→ Κόστος ξεσκαρώματος: $\frac{\text{συνολικός χρόνος λειτουργίας ξεσκαρωτή} \times \text{κόστος λειτουργίας ξεσκαρωτή}}{\text{όγκος πετρώματος in situ/βήμα}}$

→ Κόστος υποστήριξης = κόστος κοχλιών + κόστος ινών + κόστος εκτ. σκυροδέματος + κόστος κορώνας + κόστος στελέχους + κόστος κοχλιωτικού + κόστος ρομποτικού συστήματος ρίψης εκτ. σκυροδέματος

- κόστος κοχλιών: $\frac{\text{κόστος κοχλία} \times \text{αριθμός κοχλιών/βήμα}}{\text{όγκος πετρώματος in situ/βήμα}}$
- κόστος ινών: $\frac{\text{κόστος ινών} \times \text{ποσότητα ινών} \times \text{όγκος εκτ σκυροδέματος/κύκλο}}{\text{όγκος πετρώματος in situ/βήμα}}$
- κόστος εκτ. σκυροδέματος: $\frac{\text{όγκος εκτ σκυροδέματος/κύκλο} \times \text{κόστος σκυροδέματος}}{\text{όγκος πετρώματος in situ/βήμα}}$
- κόστος κορώνας: $\frac{\text{αριθμός βραχιόνων} \times \text{μήκος διάτρησης/βήμα} \times \text{τιμή αγοράς κορώνας}}{\text{διάρκεια ζωής κορώνας} \times \text{όγκος πετρώματος in situ/βήμα}}$
- κόστος στελέχους: $\frac{\text{αριθμός βραχιόνων} \times \text{μήκος διάτρησης/βήμα} \times \text{τιμή αγοράς στελέχους διάτρησης}}{\text{διάρκεια ζωής στελέχους διάτρησης} \times \text{όγκος πετρώματος in situ/βήμα}}$
- κόστος κοχλιωτικού: $\frac{\text{κόστος λειτουργίας διατρητικού} \times \text{χρόνος διάτρησης}}{\text{όγκος πετρώματος in situ/βήμα}}$
- κόστος ρομποτικού συστήματος ρίψης εκτ. σκυροδέματος: $\frac{\text{κόστος λειτουργίας ρομποτικού συστήματος} \times \text{χρόνος τοποθέτησης εκτ σκυροδέματος}}{\text{όγκος πετρώματος in situ/βήμα}}$

Το **Εργατικό Κόστος (€/m³)** υπολογίστηκε δύο φορές σε κάθε περίπτωση με την παραδοχή ότι οι εργαζόμενοι δουλεύουν 8 ώρες την ημέρα και με βάση τους πραγματικούς χρόνους που απαιτεί η κάθε εργασία. Συνεπώς εφαρμόστηκαν οι εξής τύποι:

Σύνολο εργατικού κόστους (full work): $\frac{\text{συνολικός αριθμός εργαζομένων} \times \text{ωρομίσθιο} \times \text{8 ώρες εργασίας}}{\text{όγκος πετρώματος in situ/βήμα}}$

Σύνολο εργατικού κόστους (real work):

$\frac{\text{ωρομίσθιο} \times (\text{αριθμός εργαζομένων/μηχάνημα} \times \text{χρόνος εργασίας/μηχάνημα} + \dots)}{\text{όγκος πετρώματος in situ/βήμα}}$

Το **Κόστος Απόσβεσης** υπολογίστηκε σύμφωνα με τις ώρες λειτουργίας του κάθε μηχανήματος και τον χρόνο ζωής του βάσει του τύπου:

$$\frac{\text{κόστος μηχανήματος} \times \text{χρόνος λειτουργίας}}{\text{χρόνος ζωής μηχανήματος} \times \text{όγκος πετρώματος in situ/βήμα}}$$

Για την εφαρμογή τελικά των παραπάνω τύπων λήφθηκαν υπόψιν συγκεκριμένα στοιχεία για τις τιμές αγοράς, τη διάρκεια ζωής και το κόστος λειτουργίας του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε, όπως αυτά καταγράφονται στη συνέχεια:

- Τιμή αγοράς κορώνας: 50 €
- Διάρκεια ζωής κορώνας: 500 m
- Τιμή στελέχους διάτρησης: 245 €
- Διάρκειας ζωής στελέχους διάτρησης: 5000 m
- Κόστος λειτουργίας διατρητικού με ένα στέλεχος: 50 €/h
- Κόστος λειτουργίας διατρητικού με δύο στελέχη: 60 €/h
- Κόστος τεμαχίου ηλεκτρικού καψυλλίου: 0.8 €/τεμάχιο
- Κόστος εκρηκτικών: 1.4 €/kg
- Κόστος λειτουργίας φορτωτή: 90 €/h
- Κόστος σκυροδέματος: 90 €/m³
- Κόστος ιών: 1.5 €/kg
- Κόστος κοιλία: 50 €
- Κόστος λειτουργίας λοιπού εξοπλισμού: 40 €/h
- Ωρομίσθιο: 18 €/h
- Κόστος άλλων μηχανημάτων: 250,000 €/μηχάνημα
- Κόστος φορτωτή: 350,000 €/μηχάνημα
- Χρόνος ζωής μηχανημάτων 25,000 h

5.4.2 Σήραγγα προσπέλασης

Η εφαρμογή των παραπάνω τύπων στις διαδικασίες διάνοιξης της σήραγγας προσπέλασης έδωσαν τα αποτελέσματα που ακολουθούν:

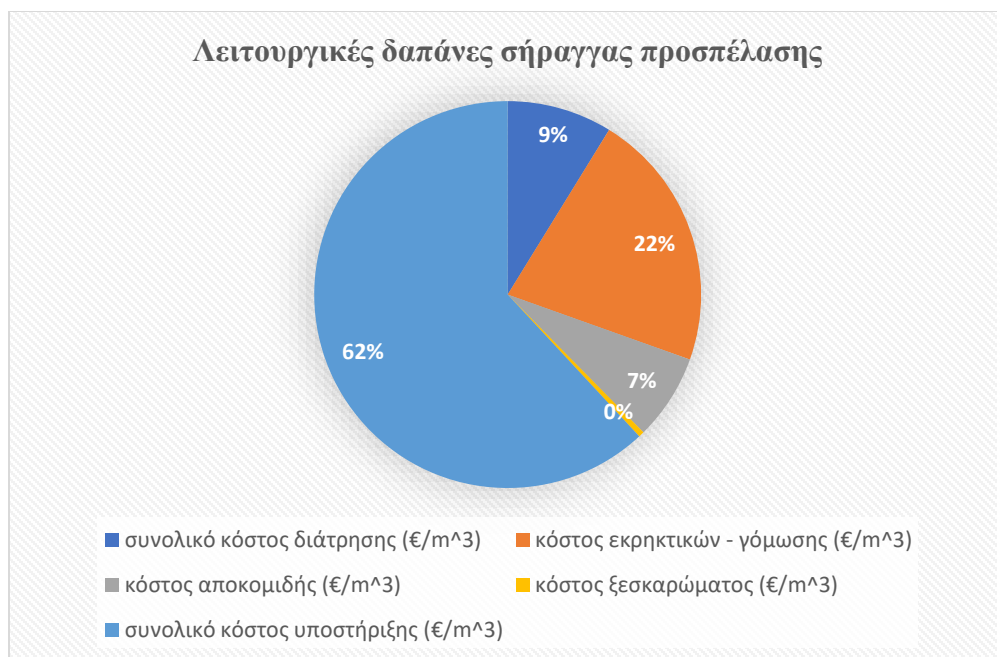
Πίνακας 5.11: Ανάλυση κόστους σήραγγας προσπέλασης

Σύνολο λειτουργικών δαπανών (€/m ³)	19.39
Σύνολο εργατικού κόστους (full work) (€/m ³)	10.67
Σύνολο εργατικού κόστους (real work) (€/m ³)	1.50
Κόστος απόσβεσης (€/m ³)	0.38
Κόστος / Βήμα Προχώρησης	
Συνολικό κόστος έργου (full work) (€/m ³)	30.44
Συνολικό κόστος έργου (real work) (€/m ³)	21.27
Κόστος Ολικής Διάνοιξης	
Συνολικό κόστος έργου (full work) (€)	767,020
Συνολικό κόστος έργου (real work) (€)	536,040
Κόστος αγοράς μηχανημάτων (€)	1,600,000

Το σύνολο των Λειτουργικών Δαπανών (€/m³) υπολογίστηκε βάσει του παρακάτω πίνακα, τα επιμέρους στοιχεία του οποίου απεικονίστηκαν στο διάγραμμα που ακολουθεί:

Πίνακας 5.12: Ανάλυση λειτουργικών δαπανών

συνολικό κόστος διάτρησης (€/m ³)	1.70
κόστος εκρηκτικών - γόμωσης (€/m ³)	4.20
κόστος αποκομιδής (€/m ³)	1.39
κόστος ξεσκαρώματος (€/m ³)	0.09
συνολικό κόστος υποστήριξης (€/m ³)	12.00



Διάγραμμα 5.11: Λειτουργικές δαπάνες σήραγγας προσπέλασης

Τα απαραίτητα για την ολοκλήρωση των διαδικασιών μηχανήματα και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, συνολικής αξίας 1,600,000 €, καταγράφονται ακολούθως:

- 1 διατρητικό
- 1 κοχλιωτικό
- 1 φορτωτής
- 1 φορτηγό
- 1 ρομποτικό σύστημα ρίψης εκτοξευόμενου σκυροδέματος
- 1 ξεσκαρωτής

Τελικά με προχώρηση τριών βημάτων μέσα σε μία ημέρα και με θεώρηση οκτάωρης εργασίας, το Συνολικό Κόστος Έργου για την ολική διάνοιξη της σήραγγας προσπέλασης, ανέρχεται στα 767,020 €.

5.4.3 Σήραγγα προπορείας

Η εφαρμογή των τύπων του κεφαλαίου 5.4.1 στις διαδικασίες διάνοιξης της σήραγγας προπορείας έδωσαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

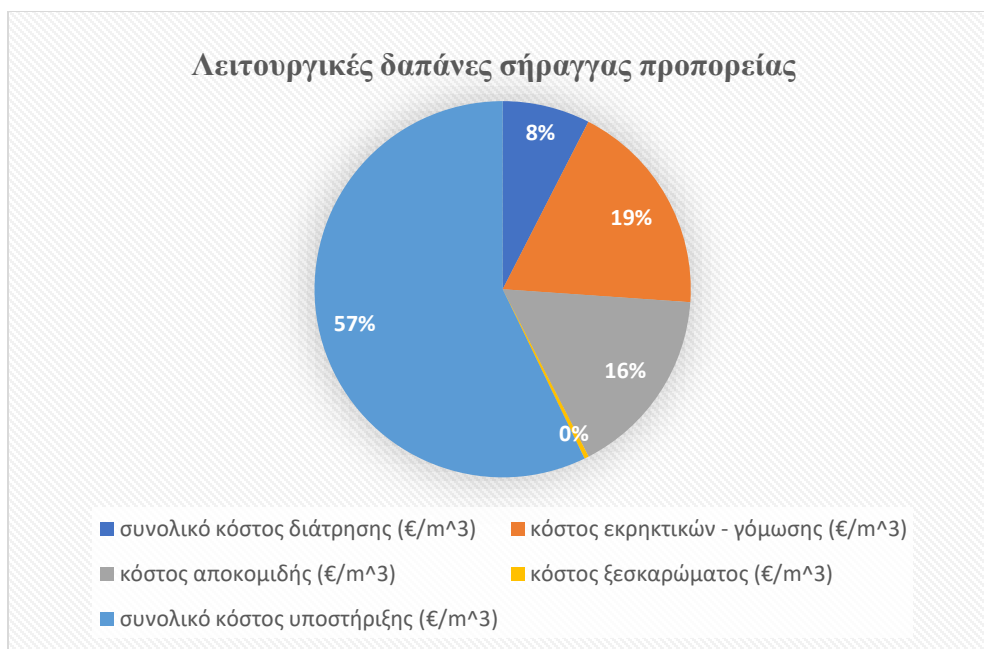
Πίνακας 5.13: Ανάλυση κόστους σήραγγας προπορείας

Σύνολο λειτουργικών δαπανών (€/m ³)	20.69
Σύνολο εργατικού κόστους (full work) (€/m ³)	9.14
Σύνολο εργατικού κόστους (real work) (€/m ³)	1.46
Κόστος απόσβεσης (€/m ³)	0.36
Κόστος / Βήμα Προχώρησης	
Συνολικό κόστος έργου (full work) (€/m ³)	30.19
Συνολικό κόστος έργου (real work) (€/m ³)	22.52
Κόστος ολικής διάνοιξης	
Συνολικό κόστος έργου (full work) (€)	379,176
Συνολικό κόστος έργου (real work) (€)	282,746
Κόστος αγοράς μηχανημάτων (€)	1,600,000

Το σύνολο των Λειτουργικών Δαπανών (€/m³) υπολογίστηκε βάσει του παρακάτω πίνακα, τα επιμέρους στοιχεία του οποίου απεικονίστηκαν στο διάγραμμα που ακολουθεί:

Πίνακας 5.14: Ανάλυση λειτουργικών δαπανών

συνολικό κόστος διάτρησης (€/m ³)	1.56
κόστος εκρηκτικών - γόμωσης (€/m ³)	3.84
κόστος αποκομιδής (€/m ³)	3.38
κόστος ξεσκαρώματος (€/m ³)	0.08
συνολικό κόστος υποστήριξης (€/m ³)	11.83



Διάγραμμα 5.12: Λειτουργικές δαπάνες σήραγγας προπορείας

Τα απαραίτητα για την ολοκλήρωση των διαδικασιών μηχανήματα και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, συνολικής αξίας 1,600,000 €, καταγράφονται ακολούθως:

- 1 διατηρητικό
- 1 κοχλιωτικό
- 1 φορτωτής
- 1 φορτηγό
- 1 ρομποτικό σύστημα ρίψης εκτοξευόμενου σκυροδέματος
- 1 ξεσκαρωτής

Τελικά με προχώρηση τριών βημάτων μέσα σε μία ημέρα και με θεώρηση οκτάωρης εργασίας, το Συνολικό Κόστος Έργου για την ολική διάνοιξη της σήραγγας προπορείας, ανέρχεται στα 379,176€.

5.4.4 Ακραία τμήματα άνω διατομής (τμήματα 2 και 3)

Η εφαρμογή των τύπων του κεφαλαίου 5.4.1 στις διαδικασίες διάνοιξης του τμήματος 2 έδωσαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

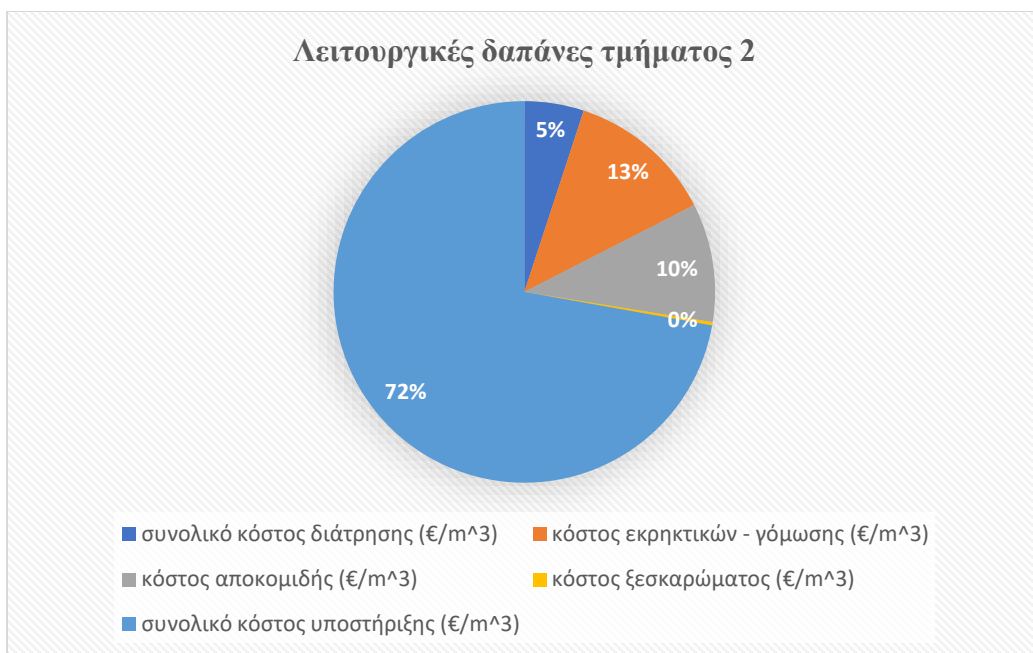
Πίνακας 5.15: Ανάλυση κόστους τμήματος 2

Σύνολο λειτουργικών δαπανών (€/m ³)	33.68
Σύνολο εργατικού κόστους (full work) (€/m ³)	10.63
Σύνολο εργατικού κόστους (real work) (€/m ³)	1.95
Κόστος απόσβεσης (€/m ³)	0.49
Κόστος / Βήμα Προχώρησης	
Συνολικό κόστος έργου (full work) (€/m ³)	44.80
Συνολικό κόστος έργου (real work) (€/m ³)	36.12
Κόστος ολικής διάνοιξης	
Συνολικό κόστος έργου (full work) (€)	483,758
Συνολικό κόστος έργου (real work) (€)	390,015
Κόστος αγοράς μηχανημάτων (€)	1,600,000

Το σύνολο των Λειτουργικών Δαπανών (€/m³) υπολογίστηκε βάσει του παρακάτω πίνακα, τα επιμέρους στοιχεία του οποίου απεικονίστηκαν στο διάγραμμα που ακολουθεί:

Πίνακας 5.16: Ανάλυση λειτουργικών δαπανών

συνολικό κόστος διάτρησης (€/m ³)	1.70
κόστος εκρηκτικών - γόμωσης (€/m ³)	4.19
κόστος αποκομιδής (€/m ³)	3.39
κόστος ξεσκαρώματος (€/m ³)	0.09
συνολικό κόστος υποστήριξης (€/m ³)	24.31



Διάγραμμα 5.13: Λειτουργικές δαπάνες τμήματος 2

Τα απαραίτητα για την ολοκλήρωση των διαδικασιών μηχανήματα και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, συνολικής αξίας 1,600,000 €, καταγράφονται ακολούθως:

- 1 διατρητικό
- 1 κοχλιωτικό
- 1 φορτωτής
- 1 φορτηγό
- 1 ρομποτικό σύστημα ρίψης εκτοξευόμενου σκυροδέματος
- 1 ξεσκαρωτής

Τελικά με προχώρηση δύο βημάτων μέσα σε μία ημέρα και με θεώρηση οκτάωρης εργασίας, το Συνολικό Κόστος Έργου για την ολική διάνοιξη του τμήματος 2, ανέρχεται στα 483,758€.

Όμοια αποτελέσματα καταγράφονται και για το τμήμα 3 της διατομής, οπότε και σε αυτή την περίπτωση με προχώρηση δύο βημάτων μέσα σε μία ημέρα και με θεώρηση οκτάωρης εργασίας, το Συνολικό Κόστος Έργου για την ολική διάνοιξη του τμήματος 3, ανέρχεται στα 483,758€.

Παράλληλα τα απαραίτητα για την ολοκλήρωση των διαδικασιών μηχανήματα και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, συνολικής αξίας 1,600,000 €, καταγράφονται ακολούθως:

- 1 διατηρητικό
- 1 κοχλιωτικό
- 1 φορτωτής
- 1 φορητό
- 1 ρομποτικό σύστημα ρίψης εκτοξευόμενου σκυροδέματος
- 1 ξεσκαρωτής

5.4.5 1^η Βαθμίδα (τμήμα 4)

Η εφαρμογή των τύπων του κεφαλαίου 5.4.1 στις διαδικασίες διάνοιξης της 1^{ης} βαθμίδας έδωσαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

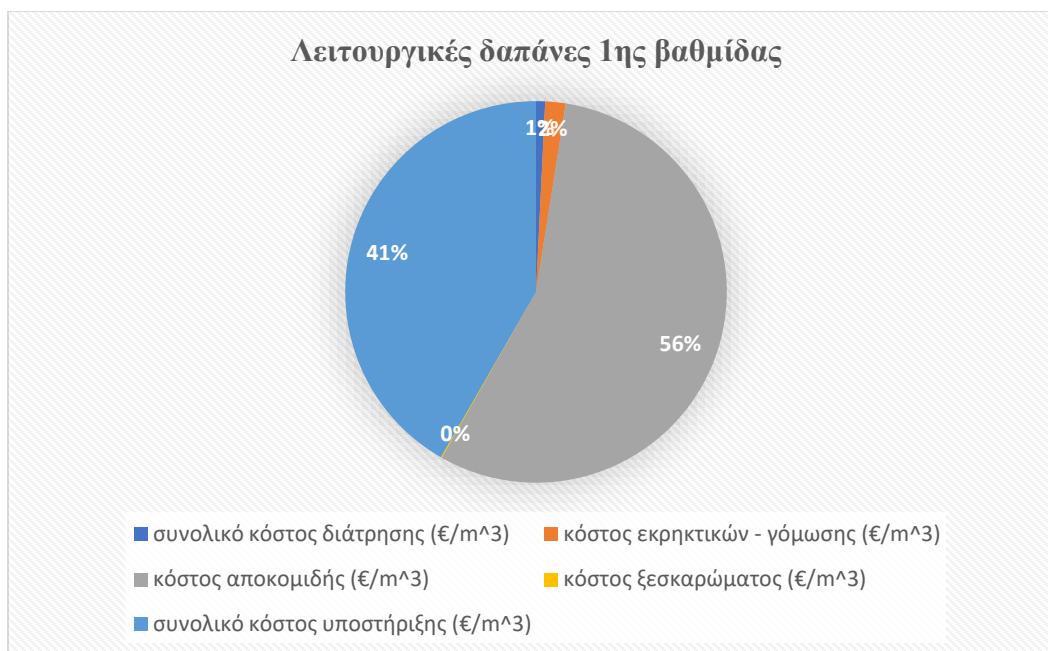
Πίνακας 5.17: Ανάλυση κόστους 1^{ης} βαθμίδας

Σύνολο λειτουργικών δαπανών (€/m ³)	13.24
Σύνολο εργατικού κόστους (full work) (€/m ³)	1.71
Σύνολο εργατικού κόστους (real work) (€/m ³)	0.30
Κόστος απόσβεσης (€/m ³)	0.12
Κόστος / Βήμα Προχώρησης	
Συνολικό κόστος έργου (full work) (€/m ³)	15.07
Συνολικό κόστος έργου (real work) (€/m ³)	13.66
Κόστος ολικής διάνοιξης	
Συνολικό κόστος έργου (full work) (€)	630,984
Συνολικό κόστος έργου (real work) (€)	571,818
Κόστος αγοράς μηχανημάτων (€)	2,100,000

Το σύνολο των Λειτουργικών Δαπανών (€/m³) υπολογίστηκε βάσει του παρακάτω πίνακα, τα επιμέρους στοιχεία του οποίου απεικονίστηκαν στο διάγραμμα που ακολουθεί:

Πίνακας 5.18: Ανάλυση λειτουργικών δαπανών

συνολικό κόστος διάτρησης (€/m ³)	0.10
κόστος εκρηκτικών - γόμωσης (€/m ³)	0.23
κόστος αποκομιδής (€/m ³)	7.38
κόστος ξεσκαρώματος (€/m ³)	0.01
συνολικό κόστος υποστήριξης (€/m ³)	5.52



Διάγραμμα 5.14: Λειτουργικές δαπάνες 1^{ης} βαθμίδας

Τα απαραίτητα για την ολοκλήρωση των διαδικασιών μηχανήματα και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, συνολικής αξίας 2,100,000 €, καταγράφονται ακολούθως:

- 1 διατηρητικό
- 1 κοχλιωτικό
- 1 φορτωτής
- 3 φορτηγά
- 1 ρομποτικό σύστημα ρίψης εκτοξευόμενου σκυροδέματος
- 1 ξεσκαρωτής

Τελικά με προχώρηση δύο βημάτων μέσα σε μία ημέρα και με θεώρηση οκτάωρης εργασίας, το Συνολικό Κόστος Έργου για την ολική διάνοιξη της 1^{ης} Βαθμίδας, ανέρχεται στα 630,984€.

5.4.6 2^η Βαθμίδα (τμήμα 5)

Η εφαρμογή των τύπων του κεφαλαίου 5.4.1 στις διαδικασίες διάνοιξης της 2^{ης} βαθμίδας έδωσαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

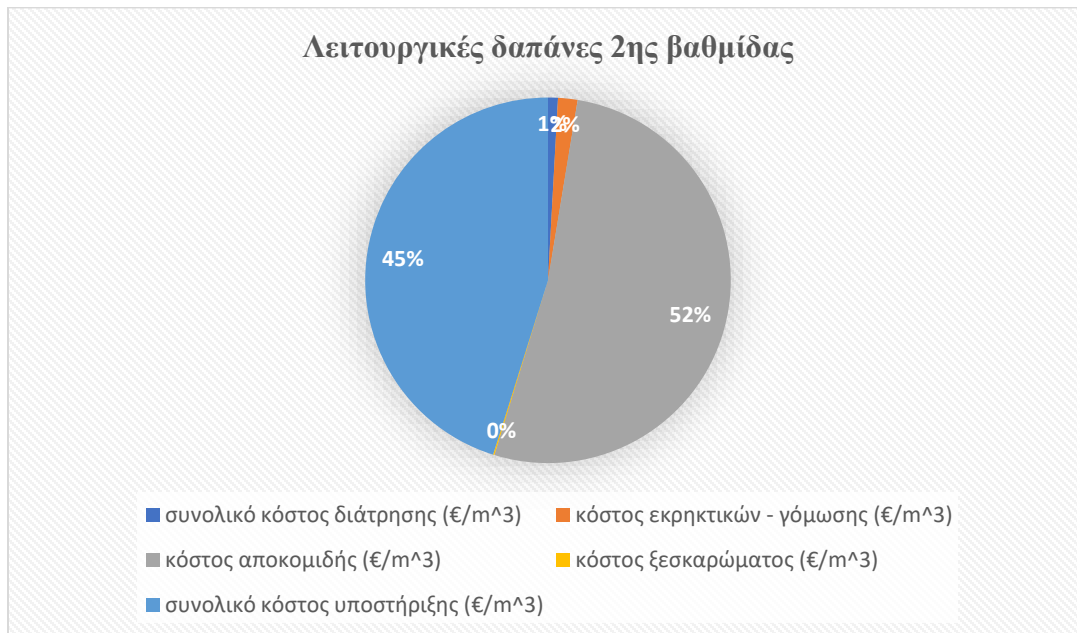
Πίνακας 5.19: Ανάλυση κόστους 2^{ης} βαθμίδας

Σύνολο λειτουργικών δαπανών (€/m ³)	12.23
Σύνολο εργατικού κόστους (full work) (€/m ³)	2
Σύνολο εργατικού κόστους (real work) (€/m ³)	0.31
Κόστος απόσβεσης (€/m ³)	0.12
Κόστος / Βήμα Προχώρησης	
Συνολικό κόστος έργου (full work) (€/m ³)	14.35
Συνολικό κόστος έργου (real work) (€/m ³)	12.67
Κόστος ολικής διάνοιξης	
Συνολικό κόστος έργου (full work) (€)	515,035
Συνολικό κόστος έργου (real work) (€)	454,551

Το σύνολο των Λειτουργικών Δαπανών (€/m³) υπολογίστηκε βάσει του παρακάτω πίνακα, τα επιμέρους στοιχεία του οποίου απεικονίστηκαν στο διάγραμμα που ακολουθεί:

Πίνακας 5.20: Ανάλυση λειτουργικών δαπανών

συνολικό κόστος διάτρησης (€/m ³)	0.11
κόστος εκρηκτικών - γόμωσης (€/m ³)	0.21
κόστος αποκομιδής (€/m ³)	6.38
κόστος ξεσκαρώματος (€/m ³)	0.01
συνολικό κόστος υποστήριξης (€/m ³)	5.52



Διάγραμμα 5.15: Λειτουργικές δαπάνες 2^{ης} βαθμίδας

Καθώς η διάνοιξη της 2^{ης} βαθμίδας αποφασίστηκε να ξεκινήσει μετά την ολοκλήρωση διάνοιξης της 1^{ης} βαθμίδας, η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με τα μηχανήματα και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκαν στην 1^η βαθμίδα και συνεπώς δεν απαιτήθηκε η αγορά νέων.

Επίσης με προχώρηση δύο βημάτων μέσα σε μία ημέρα και με θεώρηση οκτάωρης εργασίας, το Συνολικό Κόστος Έργου για την ολική διάνοιξη της 2^{ης} Βαθμίδας, ανέρχεται στα 515,035€.

5.5 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με το κεφάλαιο 5.3 η διάνοιξη της σήραγγας προσπέλασης απαιτεί τη συνολική εργασία 16 ατόμων κάθε ημέρα (8 άτομα ανά βάρδια). Για τη διάνοιξη της σήραγγας προπορείας, των τμημάτων 2, 3 και της 1^{ης} βαθμίδας, τα απαραίτητα για την ολοκλήρωση των εργασιών άτομα ανέρχονται σε 68 (34 άτομα ανά βάρδια). Τέλος με τη θεώρηση ότι η διάνοιξη της 2^{ης} βαθμίδας πραγματοποιείται μετά το πέρας των εργασιών ολικής διάνοιξης των προηγούμενων τμημάτων, οι εργαζόμενοι που δουλεύουν συνολικά σε καθημερινή βάση για την διάνοιξη του είναι 20 (10 άτομα ανά βάρδια).

Επίσης αναφορικά με το χρονικό διάστημα ολοκλήρωσης των έργων, σύμφωνα με το κεφάλαιο 5.3 η ολική διάνοιξη της σήραγγας προσπέλασης πραγματοποιείται σε 78 ημέρες. Στη συνέχεια η διάνοιξη της σήραγγας προπορείας, των τμημάτων 2, 3 και της 1^{ης} βαθμίδας απαιτεί 34, 50, 50, και 25 ημέρες εργασίας αντίστοιχα. Θεωρώντας παράλληλη διάνοιξη με προπορεία του κάθε τμήματος σε σχέση με το επόμενο, η ολοκλήρωση των εργασιών των τμημάτων αυτών απαιτούν προσεγγιστικά 60 ημέρες εργασίας. Τέλος με τη διάνοιξη της 2^{ης} βαθμίδας να ξεκινά μετά την ολοκλήρωση τις διάνοιξης των ανώτερων τμημάτων, οι εργασίες διάνοιξης της πραγματοποιούνται μέσα σε 25 ημέρες. Κατά συνέπεια το συνολικό έργο πραγματοποιείται μέσα σε χρονικό διάστημα 163 ημερών.

Ταυτόχρονα βάσει των υπολογισμών του κεφαλαίου 5.4 φαίνεται πως το Συνολικό Κόστος Έργου για την ολική διάνοιξη του συνόλου των επιμέρους τμημάτων στα οποία χωρίστηκε η διατομή του θαλάμου και της σήραγγας προσπέλασης ανέρχεται στα 11,759,731€. Λαμβάνοντας υπόψιν απρόβλεπτα έξοδα σε ποσοστό 10% του συνολικού κόστους, το Συνολικό Κόστος Έργου για την

κατασκευή ενός θαλάμου αποθήκευσης ανέρχεται στα 13,000,000€ περίπου, κόστος στο οποίο δεν συμπεριλαμβάνεται Φ.Π.Α και εργολαβικό όφελος.

Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι παρότι η ανάλυση κόστους που πραγματοποιήθηκε αφορά στον κάθε κύκλο εργασιών από την όρυξη μέχρι και την τοποθέτηση της υποστήριξης, δεν συμπεριλαμβάνει το κόστος αγοράς και τοποθέτησης της τελικής επένδυσης από ανοξείδωτο χάλυβα και των μονωτικών πλακών, απαραίτητων για τη θερμοκρασιακή μόνωση του θαλάμου. Παράλληλα στην ανάλυση του κόστους δεν λήφθηκαν υπόψιν κόστη τσιμεντενέσεων και αντλήσεων για την αντιμετώπιση των υπόγειων νερών και κόστη όρυξης φρεάτων. Επίσης όσοι υπολογισμοί διεξήχθησαν για το «τμήμα 2» της εκσκαφής προσμετρήθηκαν διπλά στο τελικό κόστος ολικής διάνοιξης, καθώς είναι όμοιοι και για το τμήμα 3 της εικόνας 5.1. Τέλος είναι προφανές ότι η ανάλυση λαμβάνει υπόψιν την κατασκευή ενός μόνο θαλάμου αποθήκευσης, οπότε στην περίπτωση διάνοιξης δύο θαλάμων οι υπολογισμοί του κόστους και του καταμερισμού των εργασιών επαναλαμβάνονται στο ίδιο μοτίβο.

6. Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα – Περιορισμοί

Κλείνοντας την εργασία είναι κρίσιμο να πραγματοποιηθεί ανακεφαλαίωση των όσων αναλύθηκαν και αποτίμηση του βαθμού επίτευξης των κύριων στόχων της.

Το πρώτο μέρος της εργασίας αφιερώθηκε κατά κύριο λόγο στην παρουσίαση βιβλιογραφικών δεδομένων για την υπόγεια αποθήκευση ενέργειας και των πλεονεκτημάτων εφαρμογής της. Με την ενεργειακή κρίση να αποτελεί πλέον μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η σύγχρονη κοινωνία, η ενεργειακή αυτονομία είναι επιτακτικής ανάγκης και ιδιαίζουσας σημασίας. Το πρόβλημα αυτό καλείται να αντιμετωπίσει η υπόγεια αποθήκευση ενέργειας με συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την αντίστοιχη επιφανειακή, καθώς καταλαμβάνει ελάχιστο επιφανειακό χώρο, προσφέρει μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα και πετυχαίνει φιλικότερους όρους τόσο οικονομικά όσο και περιβαλλοντικά.

Επίσης παρουσιάστηκαν συνοπτικά οι διάφοροι τύποι υπόγειας αποθήκευσης και αναλύθηκαν μερικές σύγχρονες και ευνοϊκές για το περιβάλλον μορφές υπό τις οποίες είναι δυνατή η αποθήκευση ενέργειας. Αναλυτικότερα ο πλέον διαδεδομένος τύπος αποθήκευσης αφορά στους τεχνητούς υπόγειους θαλάμους, οι οποίοι ξεπερνούν τεχνικά ακόμη και την αποθήκευση σε κοιλότητες ορυκτού άλατος, είτε εφαρμόζοντας τη μέθοδο του υδροδυναμικού φραγμού, είτε τη μέθοδο τοποθέτησης τελικής επένδυσης από σκυρόδεμα και ατσάλινης μεμβράνης στους θαλάμους, για τη συγκράτηση του προϊόντος εντός αυτών. Παράλληλα η «στροφή» προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελεί το μέλλον της κάθε κοινωνίας και η ανάγκη επένδυσης σε αυτές είναι ήδη υπαρκτή. Με τη χρήση του νερού για αποθήκευση θερμικής ενέργειας και του αέρα για αποθήκευση ηλιακής και αιολικής ενέργειας, η επιβάρυνση που υφίσταται το περιβάλλον είναι ιδιαίτερα μειωμένη, οπότε η διεξαγωγή περαιτέρω μελετών σε τεχνικά χαρακτηριστικά της αποθήκευσης, όπως η θερμοκρασιακή μόνωση, η αντιμετώπιση των διαρροών νερού ή αέρα και η συμπεριφορά του πετρώματος σε ακραίες θερμοκρασίες, όπως κατά την αποθήκευση υδρογόνου σε κρυογενικές συνθήκες, θα ορίσει τον δρόμο για την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών.

Στη συνέχεια μετά από μικρή εισαγωγή στην αποθήκευση φυσικού αερίου, το επόμενο μέρος της εργασίας έθιξε το ζήτημα του υγροποιημένου φυσικού αερίου, των χαρακτηριστικών του και των σύγχρονων απαιτήσεων σε αυτό. Καθώς η παγκόσμια ζήτηση σε φυσικό αέριο είναι πολύ μεγάλη,

η σύγχρονη «τάση» στην αποθήκευσή του συνίσταται στη μετατροπή του σε υγρό, μιας και σε αυτή την κατάσταση καταλαμβάνει μικρότερο χώρο και η μεταφορά του είναι απλούστερη. Τα δεδομένα που καταγράφηκαν έπειτα, επικεντρώθηκαν στις προσπάθειες, που δεν στέφθηκαν με επιτυχία, για υπόγεια αποθήκευσή του στο παρελθόν, λόγω μειωμένων γνώσεων αναφορικά με την ευστάθεια της βραχομάζας και την αντιμετώπιση των εφελκυστικών ρωγμών που δημιουργούνται, αλλά και σε καινοτόμες προσπάθειες όπως η μέθοδος δημιουργίας παγωμένου δακτυλίου και η μέθοδος LRC, σε χώρες όπως η Κορέα και η Σουηδία. Το παράδειγμα της Κορέας είναι ιδιαίτερα σημαντικό, διότι περιγράφει αναλυτικά τα στάδια σχεδιασμού και λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας που αναπτύχθηκε, από τη δημιουργία του παγωμένου δακτυλίου έως και την τοποθέτηση συστήματος θερμοκρασιακής μόνωσης και αποστράγγισης. Μάλιστα υψίστης σημασίας είναι τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν μετά το πέρας λειτουργίας της μονάδας, σύμφωνα με τα οποία το σύστημα συγκράτησης λειτούργησε αποτελεσματικά, η ψύξη του πετρώματος ήταν ικανοποιητική και ταυτόχρονα επιβεβαιώθηκε η λειτουργικότητα της υποστήριξης σε χαμηλές θερμοκρασίες. Θετικός ήταν επίσης και ο έλεγχος της κατάστασης της βραχομάζας μετά το πέρας λειτουργίας της πιλοτικής μονάδας, με την απουσία ρωγμών να αποτελεί τη σημαντικότερη ένδειξη έλλειψης θερμοκρασιακών σοκ σε αυτή. Το συγκεκριμένο παράδειγμα αποτελεί την κυριότερη ένδειξη ότι ο σχεδιασμός ενός αντίστοιχου έργου μεγάλης κλίμακας είναι εφικτός. Από την άλλη το παράδειγμα της Σουηδίας είναι χαρακτηριστικό της μεθόδου LRC και καταγράφει τα κυριότερα αποτελέσματα των δοκιμών που διεξήχθησαν για τη διερεύνηση της αντοχής του σκυροδέματος και της μεμβράνης. Παράλληλα η μονάδα που αναπτύχθηκε αποτελεί εφαρμογή της μεθόδου σε έργο που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα σε μεγάλη κλίμακα και έχει ανταπεξέλθει σε όλες τις επιβαλλόμενες δοκιμές πίεσης, δίνοντας χαμηλές τιμές παραμορφώσεων. Τελικά η μέθοδος LRC κυριαρχεί έναντι άλλων λόγω ευκολίας εφαρμογής της σε έργα κοντά σε αστικές περιοχές και απουσίας επαφής του αποθηκευόμενου προϊόντος με το περιβάλλον. Η τεχνική συμβάλλει στην ευστάθεια των υπόγειων ανοιγμάτων, δύναται να χρησιμοποιηθεί και για αποθήκευση υδρογόνου και έχει αντίστοιχες δυνατότητες λειτουργίας με την αποθήκευση σε κοιλάτητες ορυκτού άλατος.

Το επόμενο και κυριότερο κομμάτι της εργασίας αφιερώθηκε στην περιγραφή της διαδικασίας που εκτελέστηκε για τον ολοκληρωμένο σχεδιασμό ενός υποθετικού υπόγειου χώρου αποθήκευσης LNG. Η διαδικασία στόχευε στην δημιουργία ενός μοντέλου που θα μπορούσε

δυναμικά να εφαρμοστεί σε ελληνικά δεδομένα, οπότε έγιναν αρκετές προσομοιώσεις με σκοπό την πρόταση του βέλτιστου συνδυασμού χαρακτηριστικών πετρώματος.

Το πρώτο βήμα της έρευνας στόχευε στην επιλογή κατάλληλης θέσης για την κατασκευή του έργου. Δεδομένης της ύπαρξης τερματικού σταθμού υποδοχής LNG στη χώρα, στη νήσο Ρεβυθούσα, και καταγεγραμμένων στοιχείων για τα γεωλογικά και γεωτεχνικά δεδομένα της ευρύτερης περιοχής του Περάματος και των Μεγάρων, από παλαιότερες μελέτες και γεωλογικούς χάρτες αντίστοιχα, αποφασίστηκε ότι το έργο μπορεί να κατασκευαστεί είτε στη Ρεβυθούσα είτε στη γύρω περιοχή. Συνεπώς ο σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε σε ασβεστολιθικό πέτρωμα με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά. Όσον αφορά στη δυναμικότητα και στις διαστάσεις των σχεδιαζόμενων θαλάμων, επιλέχθηκε να διερευνηθούν δύο σενάρια, η κατασκευή τριών και δύο θαλάμων δυναμικότητας $100,000 \text{ m}^3$ ο κάθε ένας. Οι επιλογές αυτές προέκυψαν μετά την εξέταση στοιχείων δυναμικότητας των φορητών πλοίων, των δεξαμενών στη Ρεβυθούσα και των υπόγειων θαλάμων στη Σουηδία. Η τελική γεωμετρία των θαλάμων καθορίστηκε μετά από σύγκριση δύο επιλογών, για επίτευξη της ζητούμενης δυναμικότητας, και αποφασίστηκε η επιλογή που πετυχαίνει την απαραίτητη δυναμικότητα στο μικρότερο μήκος θαλάμου. Στη συνέχεια καθορίστηκαν τα στοιχεία υποστήριξης σύμφωνα με τα κατάλληλα διαγράμματα και δημιουργήθηκαν μοντέλα στο RS2 για κάθε συνδυασμό ποιότητας βραχομάζας $GSI = 50, 55$, αντοχής σε μονοαξονική θλίψη $UCS = 45, 50, 55, 60$ και απόστασης μεταξύ των θαλάμων $30 \text{ m}, 40 \text{ m}$ και 50 m . Για την επιλογή του βέλτιστου, για την ευστάθεια των θαλάμων, συνδυασμού κατασκευάστηκαν διαγράμματα ολικών μετατοπίσεων, ογκομετρικών τροπών και μέγιστων διατμητικών τροπών και υπολογίστηκαν τα στοιχεία που διαρρέουν σε κάθε ενδεχόμενο. Μετά τη μελέτη του συνόλου των διαγραμμάτων αποφασίστηκε ότι ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων συνίσταται σε $GSI = 55, UCS = 55$ και 40 m μεταξύ των θαλάμων.

Τελικά είναι εμφανές ότι η κρίσιμότερη παράμετρος από όσες εξετάστηκαν είναι ο δείκτης ποιότητας βραχομάζας GSI , καθώς όπως φάνηκε και από τα αντίστοιχα διαγράμματα η εναλλαγή του από 50 σε 55 επιφέρει αισθητές μεταβολές στις τιμές των ολικών μετατοπίσεων και στον αριθμό των στοιχείων που βρίσκονται υπό διαρροή. Παράλληλα τα διαγράμματα που συνέβαλαν περισσότερο στην επιλογή των κατάλληλων χαρακτηριστικών, αφορούν στις ολικές μετατοπίσεις των τοιχωμάτων των θαλάμων. Η τιμή αντοχής του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη αποτέλεσε επίσης σημαντική παράμετρο για την ευστάθεια, σε μικρότερο όμως βαθμό από τον δείκτη ποιότητας βραχομάζας, καθώς η μεταβολή μεταξύ των τιμών $50, 55$ και 60 δεν επέφερε ιδιαίτερα

μεγάλες αλλαγές στις τιμές ολικών μετατοπίσεων, ογκομετρικής τροπής και μέγιστης διατμητικής τροπής. Τέλος η απόσταση μεταξύ των θαλάμων αποτέλεσε παράμετρο που κρίθηκε μετά την επιλογή GSI και UCS κυρίως από τα διαγράμματα ολικών μετατοπίσεων, χωρίς πάλι να παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση μεταξύ των τιμών 40 m και 50 m. Η εκτίμηση του εύρους της πλαστικής ζώνης του μοντέλου που επιλέχθηκε πραγματοποιήθηκε μέσω διαγραμμάτων ογκομετρικών πλαστικών τροπών και διατμητικών πλαστικών τροπών, σύμφωνα με τα οποία η πλαστική ζώνη είναι σχεδόν ανύπαρκτη με εξαίρεση κυρίως τα δάπεδα των εκσκαφών, στα οποία φαίνεται να φτάνει έως και τα 7.5 m στο σενάριο των τριών θαλάμων και τα 6 m στο σενάριο των δύο θαλάμων. Παράλληλα αποφασίστηκε ότι το σενάριο των δύο θαλάμων αντιστοιχεί καλύτερα στα ελληνικά δεδομένα και θα μπορούσε να κατασκευαστεί στον χώρο που επιλέχθηκε.

Η εργασία ολοκληρώθηκε με την παρουσίαση οικονομικών στοιχείων για την κατασκευή του προτεινόμενου έργου από την όρυξη έως και την υποστήριξή του, σχεδιάστηκαν χρονοδιαγράμματα κατανομής των εργασιών του εργοταξίου και εκτιμήθηκε το κόστος ανά βήμα προχώρησης, το κόστος ολικής διάνοιξης του κάθε τμήματος της εκσκαφής και το κόστος αγοράς των απαιτούμενων μηχανημάτων/εξοπλισμού. Τελικά λαμβάνοντας υπόψιν απρόβλεπτα έξοδα σε ποσοστό 10% του συνολικού κόστους, το Συνολικό Κόστος Έργου για την κατασκευή ενός θαλάμου αποθήκευσης υπολογίστηκε στα 13,000,000€ περίπου, κόστος στο οποίο δεν συμπεριλαμβάνεται Φ.Π.Α και εργολαβικό όφελος. Στους υπολογισμούς επίσης δεν συμπεριλαμβάνονται τα κόστη όρυξης φρεάτων, καθώς και τα κόστη αγοράς και τοποθέτησης ατσάλινης μεμβράνης και συστήματος μόνωσης. Παράλληλα δεν λαμβάνονται υπόψιν το κόστος τσιμεντενέσεων και αντλήσεων για τυχόν αντιμετώπιση των υπόγειων υδάτων. Συγκριτικά αναφέρεται ότι ο διαγωνισμός που πραγματοποιήθηκε για την μίσθωση μιας πλωτής μονάδας αποθήκευσης LNG στη Ρεβυθούσα για έναν χρόνο, περιελάμβανε προσφορές κυμαινόμενες από 73.5 έως 94 εκατομμύρια ευρώ και το κόστος λόγω εξάτμισης υπολογίστηκε μεταξύ 30.4 και 45.9 εκατομμυρίων ευρώ.

Συμπερασματικά θα μπορούσε να αναφερθεί ότι ο βασικότερος στόχος της εργασίας επιτεύχθηκε, με τον μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων να καταλήγει σε μια βέλτιστη επιλογή χαρακτηριστικών πετρώματος, που παρουσιάζει ικανοποιητικούς βαθμούς ευστάθειας. Ταυτόχρονα η εκτίμηση του κόστους ενός τέτοιου έργου, σε συνδυασμό με τα χρονοδιαγράμματα καταμερισμού των εργασιών του εργοταξίου που σχεδιάστηκαν, δίνουν ρεαλιστικές τιμές. Σημαντικό είναι βέβαια να ληφθεί υπόψιν ότι όλα τα παραπάνω αποτελούν αποτελέσματα έρευνας περιορισμένης χρονικής

διάρκειας στα πλαίσια θεωρητικών και βιβλιογραφικών εκτιμήσεων. Η αντιστοίχιση ενός τέτοιου έργου σε πραγματικές συνθήκες, πιθανώς να προσθέσει νέα δεδομένα στη διαδικασία.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Ξένη βιβλιογραφία:

- Alaska Natural Gas Transportation Projects. (2014). LNG carriers called “floating pipelines”. Office of the Federal Coordinator.
https://www.arlis.org/docs/vol1/AlaskaGas/Paper/Paper_OFC_2014_LNG_CarriersCalledFloatingPipelines.pdf
- Asproforos engineering. (2014). Cumulative Impacts Assessment for the 2nd Upgrade of the LNG Terminal in Revithoussa Island, Greece. DESFA.
<https://www.eib.org/attachments/registers/70325460.pdf>
- Barton, N. (1995). *The influence of joint properties in modelling jointed rock masses*. 8th ISRM Congress (Tokyo). Balkema.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1994). The Q-System Following Twenty Years of Application in NMT Support Selection. *Felsbau*, 12(6), 428-436.
- Bieniawski, Z. T. (1976). *Rock mass classifications in rock engineering*. Proceedings Symposium Exploration for Rock Engineering, Johannesburg.
- Cai, M., Kaiser, P. K., Tasaka, Y., Minami, M. (2007). Determination of Residual Parameters of Jointed Rock Masses Using the GSI System. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(2), 247-265. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.07.005>
- Chung, S. K., Park, E.S., Han, K. C. (2006). Feasibility Study of Underground LNG Storage System in Rock Cavern. *Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, 16(4), 296-306. <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200608813379981.pdf>
- de Laguerie, P. V. (1989). Underground Storage of Liquefied Gases at Low Temperature. In: Tek, M. R., (Eds). *Underground Storage of Natural Gas*, NATO ASI Series, 171. Springer.
https://doi.org/10.1007/978-94-009-0993-9_15
- Deveci, M. (2018). Site selection for hydrogen underground storage using interval type-2 hesitant fuzzy sets. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(19), 9353-9368.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.127>
- Eyres, D. J., Bruce, G. J. (2012). 23 – Liquefied gas carriers. In Eyres, D. J. and Bruce, G. J. (Eds.), *Ship Construction* (7th ed., pp. 279-289). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097239-8.00023-4>
- Froise, S. (1987). Hydrocarbon Storage in Unlined Rock Caverns: Norway’s Use and Experience. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2.
- Gombert, P., Abdoulaye, G., Häikel, B. H., Hassen, B., Farid, L. (2019). Installation of a thermal energy storage site in an abandoned mine in Picardy (France). Part 1: Selection criteria and equipment of the experimental site. *Environmental Earth Sciences*, 174. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8128-0>
- Johansson, J. (2003). *High Pressure Storage of Gas in Lined Rock Caverns: CAVERN WALL DESIGN PRINCIPLES* [Licentiate Thesis, Division of Soil & Rock Mechanics Royal Institute of Technology]. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:7561/FULLTEXT01.pdf>

- Johnson, P. M. (2014). *Assessment of compressed air energy storage system (CAES)* [MSc thesis, The University of Tennessee].
<https://scholar.utc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1130&context=theses&httpsredir=1&referer=>
- Jung, Y. B., Park, E. S., Shen, B. (2014). Thermal–mechanical analysis of the fracture initiation and propagation around the underground pilot LNG storage cavern. *Geosystem Engineering*, 17(6), 331-34. <https://doi.org/10.1080/12269328.2014.995781>
- King, M., Jain, A., Bhakar, R., Mathur, J., Wang, J. (2021). Overview of current compressed air energy storage projects and analysis of the potential underground storage capacity in India and the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110705>
- Lee, K. S. (2013). Underground Thermal Energy Storage. *Underground Thermal Energy Storage. Green Energy and Technology* (pp.15-26). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4273-7_2
- Lindblom, U. E. (1994, August 29). *History and present status of hydrocarbon storage in excavated rock caverns* [Paper presentation]. Rock Mechanics in Petroleum Engineering, Delft, Netherlands. <https://doi.org/10.2118/28112-MS>
- Liu, J., Song, J., Zhang, Q., Zhang, W. (2013). Stability analysis of Jintan underground rock salt gas storage cavern. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 9(2), 268-283. <https://doi.org/10.1108/MMMS-05-2013-0037>
- Londe, L. (2021). *Four Ways to Store Large Quantities of Hydrogen* [Conference Paper]. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. <http://dx.doi.org/10.2118/208178-MS>
- Lun, H., Filippone, F., Roger, D. C., Poser, M. (n.d.). Design and construction aspects of post-tensioned LNG storage tanks in Europe and Australasia. <https://wermac.org/pdf/tanks6.pdf>
- Matos, C. R., Carneiro, J. F., Silva, P. P. (2019). Overview of Large-Scale Underground Energy Storage Technologies for Integration of Renewable Energies and Criteria for Reservoir Identification. *Journal of Energy Storage*, 21, 241-258. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.11.023>
- Nielsen, K., (2002). “Thermal Energy Storage A State-of-the-Art”,
<https://www.sintef.no/globalassets/upload/smartbygg/wp3/thermal-energy-storage.pdf>
- Park, D., Park, E. S. (2015). Effect of separation distance on the mechanical stability and thermal performance of twin hot-water storage caverns. *Solar Energy*, 114, 183-195. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.036>
- Park, E. S., Chung, S. K., Lee, D. H., Kim, T. G. (2012). Innovative Method of LNG Storage in Underground Lined Rock Caverns. In Gupta, S. B., (Ed.). *Natural Gas - Extraction to End Use*, IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/45771>
- Park, E. S., Jung, Y. B., Kim, T. K., Shen, B. (2020). Application to Underground LNG Storage. In: Shen, B., Stephansson, O., Rinne, M. (Eds). *Modelling Rock Fracturing Processes*, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35525-8_12
- Ramadan, O., Omer, S., Jradi, M., Sabir, H., Riffat, S. (2016). Analysis of compressed air energy storage for large-scale wind energy in Suez, Egypt. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 11(4), 476–488. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctv007>
- Rutqvist, J., Kim, H. M., Ryu, D. W., Synn, J. H., Song, W. K. (2012). Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 52, 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.02.010>

- Sofregaz US Inc., LRC. (1999). *Commercial Potential of Natural Gas Storage in Lined Rock Caverns (LRC)*. <https://www.osti.gov/servlets/purl/774913>
- Tarkowski, R. (2019). Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.051>
- Tengborg, P., Johansson, J., Durup, J. G. (2014). *Storage of highly compressed gases in underground Lined Rock Caverns – More than 10 years of experience*. [Paper presentation]. World Tunnel Congress, Brazil. https://www.researchgate.net/publication/315784541_Storage_of_highly_compressed_gases_in_underground_Lined_Rock_Caverns_-_More_than_10_years_of_experience
- Vaskou, P. (2018). *Unlined Rock Caverns: Historical & Technical Evolutions of a Concept for Underground Storage of Hydrocarbons* [Paper presentation]. Rock Mechanics in Infrastructure and Resource Development, Singapore. https://www.researchgate.net/publication/332464943_Unlined_Rock_Caverns_Historical_Technical_Evolutions_of_a_Concept_for_Underground_Storage_of_Hydrocarbons
- Yang, C., Wang, T., Li, Y., Yang, H., Li, J., Qu, D., Xu, B., Yang, Y., Daemen, J. J. K. (2015). Feasibility analysis of using abandoned salt caverns for large-scale underground energy storage in China. *Applied Energy*, 137, 467-481. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.048>

Ελληνική βιβλιογραφία:

- Αγιουτάντης, Ζ. (2019). Στοιχεία Διάτρησης – Ανατίναξης (2^η έκδοση). Εκδοτικός Όμιλος Ίων.
- Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων. (n.d.). *Προεκτίμηση του απαιτούμενου αριθμού διατηρημάτων συναρτήσει του εμβαδού της διατομής της σήραγγας* (Σημειώσεις μαθήματος). ΕΜΠ, Αθήνα.
- Καρώνης, Δ., Λόης, Ε., Ζαννίκος, Φ. (n.d.). *Τεχνολογία Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου*.
- Μπενάρδος, Α. Καλιαμπάκος, Δ. (2010). *Υπόγεια Έργα* (Σημειώσεις μαθήματος), ΕΜΠ, Αθήνα.

Ιστότοποι:

- Bradshaw, M. (2021, May 24). *Gravitricity reveals underground hydrogen storage plans*. The Engineer. Retrieved March 11, 2022, from <https://www.theengineer.co.uk/gravitricity-reveals-underground-hydrogen-storage-plans/>
- Chadwick, L. (2022, February 11). *Europe's energy crisis: Five charts to explain why your bills might go up this winter*. euronews. Retrieved March 20, 2022, from <https://www.euronews.com/2022/02/11/europe-s-energy-crisis-five-charts-to-explain-why-your-bills-might-go-up-this-winter>
- desfa. (n.d.). Μέθοδος προσδιορισμού τεχνικών δυναμικοτήτων. <https://www.desfa.gr/userfiles/pdflist/methodos-prosdiorismou-texnikwn-dynamikotitwn.pdf>
- Lectura specs. (n.d.). Caterpillar 992C. <https://www.lectura-specs.com/en/model/construction-machinery/wheel-loaders-caterpillar/992c-11743161>

- Liquefied Natural Gas and gas storage will boost EU's energy security.* Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2016). Retrieved April 13, 2022, from https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/el/MEMO_16_310
- LNG Underground storage in lined rock cavern.* GEOSTOCK. (n.d.). Retrieved April 2, 2022, from <https://entrepose.com/content/uploads/2016/11/LNG-CAVERN-leaflet.pdf>
- SANDVIK. (n.d.). TORO TH663i – Specification sheet. <https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/underground-loaders-and-trucks/underground-trucks/th663i-underground-truck/>
- The VECTES seasonal heat storage facility.* Vantaa Energy. (2021, May). Retrieved February 25, 2022, from https://vantaanenergia.s3.eu-west-1.amazonaws.com/uploads/20211124101426/VantaanEnergia_Whitepaper_VECTES_EN_191121.pdf
- Underground Natural Gas Storage.* Energy Infrastructure - API. (n.d.). Retrieved March 2, 2022, from <https://energyinfrastructure.org/energy-101/natural-gas-storage>
- ΔΕΣΦΑ. (n.d.). Σταθμός Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου Ρεβυθούσας. <https://www.desfa.gr/userfiles/brochurepdf/syntomo-enimerwtiko-entypo-gia-ton-termatiko-stathmo-yfa-revythousas-2013.pdf>
- Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φ.Α. Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Αερίου Α.Ε.* (2022). Retrieved April 13, 2022, from <https://www.desfa.gr/national-natural-gas-system/transmission>

Άρθρα εφημερίδων:

- ΔΕΣΦΑ: Η GasLog ανέλαβε την πλωτή δεξαμενή LNG στην Ρεβυθούσα – Έτοιμη τον Ιούλιο. (2022). *ΗΜΕΡΗΣΙΑ*. https://www.imerisia.gr/epiheiriseis/energeia/42635_desfa-i-gaslog-anelabe-tin-ploti-dexameni-lng-stin-rebythousa-etoimi
- Τζάννε, Μ. (2022, May 4). ΔΕΦΣΑ: Οι 4 προσφορές για το πλοίο που θα μετατραπεί σε πλωτή δεξαμενή LNG στη Ρεβυθούσα. *NEWMONEY*. <https://www.newmoney.gr/roh/palmos-oikonomias/energeia/desfa-i-4-prosfores-gia-to-ploti-pou-tha-metatrapi-se-ploti-dexameni-lng-sti-revithousa/>