



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

# «Σχεδιασμός Έργου Υπόγειας Αποθήκευσης LNG στην Ελλάδα»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**Ανδρέας Δελέντας**

Επιβλέπων: Ανδρέας Μπενάρδος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2023





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ**  
**«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»**

**«Σχεδιασμός Έργου Υπόγειας Αποθήκευσης LNG  
στην Ελλάδα»**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**του Ανδρέα Δελέντα**

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

**Εγκρίθηκε από την Τριμελή Επιτροπή στις : ..... /..... / .....**

Υπογραφές

Ιωάννης Ζευγώλης, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ανδρέας Μπενάρδος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Παύλος Νομικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

**Αθήνα, 2023**



## **Ευχαριστίες**

Ολοκληρώνοντας το μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου μέσω της παρούσης εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους με υποστήριξαν σε αυτό το ταξίδι.

Αρχικά, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τους καθηγητές και το προσωπικό των Σχολών του Ε.Μ.Π. που συνιστούν το μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών για την αμέριστη συνεισφορά τους προς την πνευματική ανάπτυξη των σπουδαστών. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ανδρέα Μπενάρδο, Καθηγητή της Σχολής Μεταλλειολόγων – Μεταλλουργών Μηχανικών και επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, για την ανάθεση και την καθοδήγησή της, αλλά και για την ιδιαίτερη συμβολή του προς την εξαιρετική ανάπτυξη του μεταπτυχιακού προγράμματος. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Παύλο Νομικό και τον Δρ. Ιωάννη Ζευγώλη, επίσης για την εξαιρετική συνεισφορά τους στην εξέλιξη του προγράμματος, αλλά και για την αποδοχή από μέρος τους να πλαισιώσουν, με τον Δρ. Ανδρέα Μπενάρδο, την τριμελή εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να αναφερθώ στην οικογένειά μου και τους φίλους μου, οι οποίοι με στηρίζουν αμέριστα σε κάθε μου βήμα και τους ευχαριστώ πολύ για αυτό.

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, η ενεργειακή κρίση κάνει ολοένα και πιο έντονη την εμφάνιση της, επιδεινώνοντας την ζωή των πολιτών σε παγκόσμιο επίπεδο. Θέματα ενεργειακής αυτονόμησης, εξασφάλισης της απρόσκοπτης ροής ενέργειας και κάλυψης των αναγκών επανήλθαν στην επιφάνεια απαιτώντας δραστικές λύσεις. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός νέων, τεχνολογικά προηγμένων και ασφαλών έργων ενεργειακής υποδομής είναι υψίστης σημασίας για την ενεργειακή θωράκιση των χωρών.

Η Ελλάδα είναι από τις λίγες χώρες της ΕΕ η οποία δεν έχει μεγάλους αποθηκευτικούς χώρους φυσικού αερίου (ΦΑ) όπως οι χώρες της κεντρικής και βόρειας Ευρώπης για την αντιμετώπιση των εποχικών διακυμάνσεων της ζήτησης και εξισορρόπησης του δικτύου. Αντίθετα, διαθέτει μία από τις λίγες μονάδες αποθήκευσης και επαναεριοποίησης φυσικού αερίου σε υγροποιημένη μορφή (LNG) στην Ευρώπη, η οποία πλέον χαρακτηρίζεται ως στρατηγικής σημασίας για όλη την ΕΕ λόγω των γνωστών ζητημάτων με το Ρωσικό ΦΑ.

Πλέον, η μονάδα LNG της Ρεβυθούσας μοιάζει περιορισμένη στο να καλύψει την μεγάλη ζήτηση που υπάρχει και ήδη εξετάζονται εναλλακτικές για την αύξηση της δυναμικότητας της. Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τον σχεδιασμό έργου υπόγειας αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου σε μικρή απόσταση από το υφιστάμενο έργο της Ρεβυθούσας. Ο σχεδιασμός του εν λόγω έργου θα γίνει με τη χρήση της μεθόδου Lined Rock Cavern - LRC και στοχεύει στον διπλασιασμό της αποθηκευτικής ικανότητας της υφιστάμενης εγκατάστασης. Με βάση προκαταρκτικά στοιχεία από γεωτεχνικές διερευνήσεις που έχουν γίνει στην ευρύτερη περιοχή, επιλέγεται η πιθανή θέση ανάπτυξης του υπόγειου συγκροτήματος, δίνονται τα βασικά έργα και επιχειρείται η περεταίρω αξιολόγηση δύο βασικών σεναρίων σχεδιασμού του έργου. Παρουσιάζονται οι βασικές παραδοχές σχεδιασμού τους, το βάθος ανάπτυξης, ο αριθμός και διάταξη των αποθηκών και γίνεται η ενδεδειγμένη αξιολόγησή τους με τη χρήση μοντέλων αριθμητικής ανάλυσης. Εκτιμώνται έτσι οι δυνατότητες που προσφέρουν στην επίτευξη των αναγκαίων συνθηκών ευστάθειας, στην ευχέρεια των κατασκευαστικών εργασιών, αλλά και τέλος, στο εκτιμώμενο κόστος κατασκευής.

## **Abstract**

In recent years, the energy crisis has become more pronounced, worsening the lives of citizens around the world. Issues of energy self-sufficiency, ensuring the uninterrupted flow of energy, and meeting demand have resurfaced and require drastic solutions. Therefore, the planning of new, technologically advanced, and secure energy infrastructure projects is of paramount importance for the energy shielding of countries.

Greece is one of the few countries in the EU that does not have large natural gas (NG) storage facilities, like those in central and northern Europe, to cope with seasonal fluctuations in demand and to balance the network. Instead, it has one of the few LNG storage and regasification facilities in Europe, which is now considered to be of strategic importance for the entire EU due to the known problems with Russian NG.

At present, the Revithusa LNG plant appears to be limited in its ability to meet the existing high demand and alternatives to increase its capacity are already being considered. This paper deals with the design of an underground LNG storage project near the existing Revithusa facility. The design of this project will be carried out using the Lined Rock Cavern - LRC method and aims to significantly increase the storage capacity of the existing facility. Based on preliminary data from geotechnical investigations carried out in the area, the potential site for the development of the underground complex is selected, the crucial parts of the project are given and further evaluation of two main project design scenarios is attempted. Their main design assumptions, depth of development, number and layout of deposits are presented, and a thorough evaluation is carried out using numerical analysis models. In this way, their potential for achieving the required stability conditions, the ease of construction and, finally, the estimated construction costs are assessed.





## Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : Εισαγωγή .....	18
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> : Βασικά στοιχεία .....	20
2.1 Φυσικό αέριο.....	20
2.2 Μέθοδοι αποθήκευσης φυσικού αερίου.....	25
2.2.1 Εισαγωγή .....	25
2.2.2 Υπόγεια αποθήκευση φυσικού αερίου .....	27
2.2.2.1 Αποθήκευση φυσικού αερίου σε εκσκαφές εντός πεδίων και δόμων άλατος .....	29
2.2.2.2 Αποθήκευση φυσικού αερίου σε υδροφόρους ορίζοντες.....	31
2.2.2.3 Αποθήκευση φυσικού αερίου σε εξαντλημένα πεδία υδρογονανθράκων ..	33
2.2.2.4 Αποθήκευση φυσικού αερίου σε εγκαταλελειμμένα μεταλλεία.....	35
2.2.2.6 Αποθήκευση φυσικού αερίου σε επενδεδυμένους υπόγειους θαλάμους (Μέθοδος Lined Rock Cavern).....	39
2.2.2.6.1 Βασικά στοιχεία .....	39
2.2.2.6.2 Θεμελιώδεις αρχές μεθόδου Lined Rock Cavern (LRC) .....	41
2.2.2.6.3 Εσωτερική επένδυση LRC.....	45
2.2.2.6.4 Βήματα κατασκευής και επένδυσης εκσκαφών.....	49
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> : Σχεδιασμός έργου υπόγειας αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου .....	50
3.1 Γενικά .....	50
3.2 Σχεδιαστικές παράμετροι LRC .....	58
3.2.1 Περίπτωση Α.....	58
3.2.2 Περίπτωση Β.....	60
3.2.3 Χαρακτηριστικά τμημάτων επένδυσης .....	61
3.3 Στάδια προσομοίωσης φάσεων κατασκευής και λειτουργίας .....	67
3.3.1 Γενικά .....	67
3.3.2 Σενάριο Α.....	67
3.3.2 Σενάριο Β.....	72
3.4 Αποτελέσματα αναλύσεων μέσω πεπερασμένων στοιχείων.....	76
3.4.1 Γενικά .....	76
3.4.2 1 <sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού .....	78
3.4.3 2 <sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού .....	90
3.4.4 Ειδικές αναλύσεις .....	101

<b>Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Κοστολόγηση βασικών κατασκευαστικών εργασιών</b> .....	105
4.1 Γενικά .....	105
4.2 Παραδοχές σχεδιασμού .....	106
4.2.1 Παραδοχές επιμέρους εργασιών .....	113
4.2.1.1 Στάδιο 1 <sup>ο</sup> : Διάτρηση .....	115
4.2.1.2 Στάδιο 2 <sup>ο</sup> : Γόμωση .....	117
4.2.1.3 Στάδιο 3 <sup>ο</sup> : Ανατίναξη .....	118
4.2.1.4 Στάδιο 4 <sup>ο</sup> : Φόρτωση – Μεταφορά εξορυγμένου υλικού .....	118
4.2.1.5 Στάδιο 5 <sup>ο</sup> : Ξεσκάρωμα .....	118
4.2.1.6 Στάδιο 6 <sup>ο</sup> : Τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης.....	118
4.2.1.7 Στάδιο 7 <sup>ο</sup> : Τοποθέτηση τμημάτων μόνιμης επένδυσης.....	119
4.2.2 Βασικοί υπολογισμοί – 1 <sup>η</sup> Περίπτωση σχεδιασμού .....	119
4.2.2.1 Προσπελαστικά έργα .....	119
4.2.2.2 Τμήμα Α.....	120
4.2.2.3 Τμήματα Β και Γ .....	121
4.2.2.4 Τμήματα Δ και Ε .....	122
4.2.2.5 Τμήματα Ζ.....	123
4.2.2.6 Τμήματα Η .....	124
4.2.3 Βασικοί υπολογισμοί – 2 <sup>η</sup> Περίπτωση σχεδιασμού .....	125
4.2.3.1 Προσπελαστικά έργα .....	125
4.2.3.2 Τμήμα Α.....	126
4.2.2.3 Τμήματα Β και Γ .....	126
4.2.2.4 Τμήματα Δ και Ε .....	127
4.3 Προκαταρκτική εκτίμηση χρονοδιαγραμμάτων εργασιών .....	129
4.3.1 Βασικές παραδοχές .....	129
4.3.2 1 <sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού του συγκροτήματος.....	130
4.3.3 2 <sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού του συγκροτήματος.....	138
4.4 Προκαταρκτική εκτίμηση κόστους έργου.....	146
4.4.1 Βασικές παραδοχές .....	146
4.4.2 1 <sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού του συγκροτήματος.....	148
4.4.3 2 <sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού του συγκροτήματος.....	156
<b>Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα και κρίσιμες επισημάνσεις</b> .....	164
5.1 Ανακεφαλαίωση.....	164
5.2 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις.....	165

<b>Βιβλιογραφία</b> .....	168
<b>Ξένη βιβλιογραφία</b> .....	168
<b>Ελληνική βιβλιογραφία</b> .....	170
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΓΓΛΙΚΗ ΓΛΩΣΣΑ</b> .....	172
<b>"Design of an Underground LNG Storage Project in Greece"</b> .....	173
<b>Introduction</b> .....	173
<b>The Lined Rock Cavern (LRC) method</b> .....	174
<b>Fundamental project design parameters</b> .....	177
<b>Illustrative results of the numerical analysis</b> .....	180
<b>Preliminary project cost estimation</b> .....	181
<b>The first (1<sup>st</sup>) examined case</b> .....	181
<b>The second (2<sup>nd</sup>) examined case</b> .....	182
<b>Conclusions</b> .....	183

## Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Ποσοστά συμμετοχής πηγών ενέργειας στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το έτος 2021 (Eurostat, 2023) .....	19
Εικόνα 2: Κατηγοριοποίηση φυσικού αερίου (Μεταφρασμένο διάγραμμα) (Faramawy, Zaki, & Sakr, 2016) .....	22
Εικόνα 3: Τυπική διαδικασία παραγωγής LNG (Μεταφρασμένο διάγραμμα ροής) (Mokhatab & Messersmith, 2018) .....	23
Εικόνα 4: Διαδρομή LNG (Μεταφρασμένο διάγραμμα ροής) (Chiyoda Corporation,n.d.) ....	24
Εικόνα 5: Κατηγορίες δεξαμενών αποθήκευσης φυσικού αερίου (Μεταφρασμένη εικόνα) (Demirel et al, 2017).....	25
Εικόνα 6: Τύποι αποθήκευσης LNG (Μεταφρασμένη εικόνα) (TOKYO GAS Co.,Ltd., n.d.) .....	26
Εικόνα 7: Τύποι αποθήκευσης LNG επάνω και εντός του εδάφους (Μεταφρασμένη εικόνα) (TOKYO GAS Co.,Ltd., n.d.) .....	26
Εικόνα 8: Ακτίνα επίδρασης έργων αποθήκευσης φυσικού αερίου (Park, Chung, Lee, & Kim, 2012).....	27
Εικόνα 9:Τύποι υπόγειας αποθήκευσης φυσικού αερίου (Μεταφρασμένη εικόνα) (U.S. Energy Information Administration, 2015) .....	29
Εικόνα 10: Γραφική απεικόνιση αποθήκευσης φυσικού αερίου εντός δόμου άλατος (Pillai, 2009).....	30
Εικόνα 11: Γραφική απεικόνιση αποθήκευσης φυσικού αερίου εντός υδροφόρου ορίζοντα (Μεταφρασμένη εικόνα) (Kruck , et al, 2013) .....	32
Εικόνα 12: Γραφική απεικόνιση αποθήκευσης φυσικού αερίου σε εξαντλημένα κοιτάσματα υδρογονανθράκων (Μεταφρασμένη εικόνα) (Kruck et al., 2013) .....	34
Εικόνα 13: Μέθοδοι θωράκισης υπόγειων θαλάμων (Μεταφρασμένη εικόνα) (Kruck et al., 2013).....	36
Εικόνα 14: Αναπαράσταση οριζόντιων (αριστερά) και κατακόρυφων (δεξιά) υπόγειων θαλάμων αποθήκευσης υδρογονανθράκων (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010).....	36
Εικόνα 15: Ανάπτυξη υδροδυναμικού φραγμού για την αποθήκευση υδρογονανθράκων (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010).....	37
Εικόνα 16: Κατασκευή τεχνητού υδροφόρου ορίζοντα (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010)	38
Εικόνα 17: Τυπική διάταξη επενδεδυμένων υπογείων θαλάμων αποθήκευσης LNG στον χώρο (Μεταφρασμένη εικόνα) (Tengborg, Johansson, & Durup, 2014).....	40
Εικόνα 18: Στάδια ανάπτυξης ιδέας LRC (Μεταφρασμένη εικόνα) (Tengborg, Johansson, & Durup, 2014).....	41
Εικόνα 19: Συνδυασμός τριών βασικών τεχνολογιών για την ανάπτυξη της μεθόδου LRC (Μεταφρασμένη εικόνα) (Park et al., 2012).....	42
Εικόνα 20: Βήματα ανάπτυξης δακτυλίου πάγου γύρω από την εκσκαφή (Μεταφρασμένη εικόνα) (Park et al., 2012) .....	43
Εικόνα 21: Τμήματα τοιχώματος Lined Rock Cavern (LRC) (Μεταφρασμένη εικόνα) (Tengborg, Johansson, & Durup , 2014) .....	45
Εικόνα 22:Διεύρυνση των συστημάτων διακλάσεων και ρωγμών κατά την φάση λειτουργίας του έργου (Sofregaz US Inc. & LRC, 1999) .....	46
Εικόνα 23:Τυπική μορφή τμηματικής εκσκαφής LRC (Glamheden & Curtis, 2005) .....	49

Εικόνα 24: Μεθοδολογία εφαρμογής ολοκληρώματος Choquet για τον προσδιορισμό της βέλτιστης θέσης κατασκευής υπόγειου χώρου αποθήκευσης φυσικού αερίου (Demirel et al, 2017).....	51
Εικόνα 25: Τερματικός σταθμός υγροποιημένου φυσικού αερίου Ρεβυθούσας (ΔΕΣΦΑ, 2013) .....	52
Εικόνα 26: Τεκτονικό διάγραμμα κύριων συστημάτων ασυνεχειών περιοχής Περάματος.....	53
Εικόνα 27: Εύρος τιμών δείκτη ποιότητας βραχώμαζας κατά GSI (Hoek & Marinos, 2001) .	55
Εικόνα 28: Προτεινόμενη διεύθυνση άξονα του έργου (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010)	56
Εικόνα 29: Προτεινόμενη τιμή συντελεστή $m_i$ του κριτηρίου αστοχίας Hoek - Brown .....	57
Εικόνα 30: Διάταξη θαλάμων υπόγειας εγκατάστασης αποθήκευσης LNG – Περίπτωση Α..	59
Εικόνα 31: Διάταξη θαλάμων υπόγειας εγκατάστασης αποθήκευσης LNG – Περίπτωση Β..	60
Εικόνα 32: Δυνητικά εμφανιζόμενες βραχοσφήνες – Περίπτωση Α .....	63
Εικόνα 33: Δυνητικά εμφανιζόμενες βραχοσφήνες – Περίπτωση Β .....	64
Εικόνα 34: Προσδιορισμός ασκούμενης εσωτερικής πίεσης εντός της δεξαμενής (Lentner et al. 2017).....	69
Εικόνα 35: Σενάριο Α – Γεωστατικό στάδιο.....	70
Εικόνα 36: Σενάριο Α - Στάδια προσομοίωσης εγκατάστασης αποθήκευσης LNG: Στάδιο #2 (Αριστερά) & Στάδιο #3 (Δεξιά).....	70
Εικόνα 37: Σενάριο Α - Στάδια προσομοίωσης εγκατάστασης αποθήκευσης LNG: Στάδιο #12 (Αριστερά) & Στάδιο #13 (Δεξιά).....	71
Εικόνα 38: Σενάριο Α – Στάδιο #20: Πλήρης εφαρμογής των τμημάτων της επένδυσης των τοιχωμάτων.....	71
Εικόνα 39: Σενάριο Α – Στάδιο #21: Φάση πλήρους λειτουργίας χώρου αποθήκευσης LNG	71
Εικόνα 40: Προσδιορισμός ασκούμενης εσωτερικής πίεσης εντός της δεξαμενής (Lentner et al. 2017).....	74
Εικόνα 41: Σενάριο Β – Γεωστατικό στάδιο .....	75
Εικόνα 42: Σενάριο Β - Στάδια προσομοίωσης εγκατάστασης αποθήκευσης LNG: Στάδιο #2 (Αριστερά) & Στάδιο #3 (Δεξιά).....	75
Εικόνα 43: Σενάριο Β – Στάδιο #20: Πλήρης εφαρμογής των τμημάτων της επένδυσης των τοιχωμάτων.....	76
Εικόνα 44: Σενάριο Β – Στάδιο #21: Φάση πλήρους λειτουργίας χώρου αποθήκευσης LNG	76
Εικόνα 45: (α)Σημεία που έχουν διαρρεύσει γύρω από τους υπόγειους θαλάμους (β) Μέγιστη απόσταση ζώνης επιρροής από το τοίχωμα του θαλάμου .....	79
Εικόνα 46: Κατανομή ολικών μετατοπίσεων .....	79
Εικόνα 47: Κατανομή ολικών μετατοπίσεων .....	80
Εικόνα 48: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης από τη στέψη του θαλάμου .....	81
Εικόνα 49: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης από το δάπεδο του θαλάμου .....	81
Εικόνα 50: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης από τον άξονα της μονάδας αποθήκευσης.....	81
Εικόνα 51: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων μεταξύ των θαλάμων.....	82
Εικόνα 52: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης στρώματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	83
Εικόνα 53: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης στρώματος έγχυτου σκυροδέματος .....	83

Εικόνα 54: (α)Θέση σημείου που εμφανίζεται να μην ικανοποιεί τις προδιαγραφές ασφαλείας (β) Θέση του σημείου στην εκσκαφή.....	84
Εικόνα 55: (α)Θέση σημείου που εμφανίζεται να μην ικανοποιεί τις προδιαγραφές ασφαλείας (β) Θέση του σημείου στην εκσκαφή.....	84
Εικόνα 56: Χωρική κατανομή συντελεστή ασφαλείας.....	85
Εικόνα 57: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει της κατακόρυφης απόστασης από τη στέψη του (δεξιού) θαλάμου.....	86
Εικόνα 58: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης από τον άξονα της εγκατάστασης.....	87
Εικόνα 59: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων γύρω από την μονάδα αποθήκευσης... 88	88
Εικόνα 60: Γεωστατικό στάδιο προσομοίωσης διάταξης υπό σύστημα συντεταγμένων Y – Z (πλάγια όψη εγκατάστασης).....	89
Εικόνα 61: Κατασκευαστική αλληλουχία θαλάμου (πλάγια όψη εγκατάστασης).....	89
Εικόνα 62: Χωρική κατανομή στοιχείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό ή/και διάτμηση γύρω από τους θαλάμους.....	90
Εικόνα 63: Χωρική κατανομή ολικών μετακινήσεων γύρω από τους θαλάμους.....	90
Εικόνα 64: (α)Σημεία που έχουν διαρρεύσει γύρω από τους υπόγειους θαλάμους (β) Μέγιστη απόσταση ζώνης επιρροής από το τοίχωμα του θαλάμου.....	91
Εικόνα 65: Χωρική κατανομή ολικών μετατοπίσεων.....	92
Εικόνα 66: Χωρική κατανομή ολικών μετατοπίσεων.....	92
Εικόνα 67: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης από τη στέψη του θαλάμου.....	93
Εικόνα 68: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης από το δάπεδο του θαλάμου.....	93
Εικόνα 69: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης από τον άξονα της μονάδας αποθήκευσης.....	94
Εικόνα 70: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων μεταξύ των θαλάμων #1 και #2.....	94
Εικόνα 71: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων μεταξύ των θαλάμων #2 και #3.....	95
Εικόνα 72: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης στρώματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	96
Εικόνα 73: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης στρώματος έγχυτου σκυροδέματος.....	96
Εικόνα 74: (α)Θέση σημείου που εμφανίζεται να μην ικανοποιεί τις προδιαγραφές ασφαλείας (β) Θέση του σημείου στην εκσκαφή.....	97
Εικόνα 75: (α) Θέση σημείου που εμφανίζεται να μην ικανοποιεί τις προδιαγραφές ασφαλείας (β) Θέση του σημείου στην εκσκαφή.....	97
Εικόνα 76: Κατανομή συντελεστή ασφαλείας.....	98
Εικόνα 77: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει της κατακόρυφης απόστασης από τη στέψη του (δεξιού) θαλάμου.....	99
Εικόνα 78: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης από τον άξονα της εγκατάστασης.....	100
Εικόνα 79: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης από τον άξονα της εγκατάστασης.....	100
Εικόνα 80: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων γύρω από την μονάδα αποθήκευσης. 101	101
Εικόνα 81: Μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος υπό φυσιολογικές συνθήκες – Σενάριο A.....	102

Εικόνα 82: Θερμοκρασιακή κατανομή γύρω από την μονάδα κατά τη φάση πλήρους λειτουργίας του έργου – Σενάριο Α .....	103
Εικόνα 83: Θερμοκρασιακή κατανομή γύρω από την μονάδα κατά τη φάση πλήρους λειτουργίας του έργου – Σενάριο Α .....	103
Εικόνα 84: Μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος υπό φυσιολογικές συνθήκες – Σενάριο Β .....	104
Εικόνα 85: Θερμοκρασιακή κατανομή γύρω από την μονάδα κατά τη φάση πλήρους λειτουργίας του έργου – Σενάριο Β.....	104
Εικόνα 86: Θερμοκρασιακή κατανομή γύρω από την μονάδα κατά τη φάση πλήρους λειτουργίας του έργου – Σενάριο Β.....	105
Εικόνα 87: Σενάριο Α – Γενική διάταξη μονάδας αποθήκευσης LNG.....	106
Εικόνα 88: Σενάριο Α – Γενική διάταξη μονάδας αποθήκευσης LNG (Πλάγια όψη) .....	107
Εικόνα 89: Σενάριο Β – Γενική διάταξη μονάδας αποθήκευσης LNG.....	108
Εικόνα 90: Σενάριο Β – Γενική διάταξη μονάδας αποθήκευσης LNG (Πλάγια όψη).....	108
Εικόνα 91: Σενάριο Α – Διαχωρισμός τμημάτων εκσκαφής.....	110
Εικόνα 92: Σενάριο Β – Διαχωρισμός τμημάτων εκσκαφής.....	112
Εικόνα 93: Ανάπτυξη κατακόρυφων διατρημάτων (Μεταφρασμένη εικόνα) (Σοφιανός, 2018) .....	113
Εικόνα 94: Τυπική αλληλουχία σταδίων μεθόδου όρυξης «Διάτρησης – Ανατίναξης» (Hatch Ltd., 2010) .....	114
Εικόνα 95: Διάγραμμα υπολογισμού απαιτούμενου αριθμού διατρημάτων (Τολιά, 2022)..	115
Εικόνα 96: Εξισώσεις υπολογισμού βασικών σχεδιαστικών παραμέτρων ανατίναξης με τη μέθοδο των ορθών βαθμίδων (Παναγιώτου, n.d.).....	116
Εικόνα 97: Τυπική γεωμετρία βαθμίδας (Αγιουτάντης, 2019) .....	117
Εικόνα 98: Ποσοστό συμμετοχής των εργασιών επί του συνολικά απαιτούμενου χρόνου ολοκλήρωσης του έργου.....	138
Εικόνα 99: Ποσοστό συμμετοχής των εργασιών επί του συνολικά απαιτούμενου χρόνου ολοκλήρωσης του έργου.....	146
Εικόνα 100: Ποσοστό συμμετοχής των εργασιών επί του συνολικού κόστους κατασκευής του έργου.....	155
Εικόνα 101: Ποσοστό συμμετοχής των εργασιών επί του συνολικού κόστους κατασκευής του έργου.....	163

## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Ποσοστό συμμετοχής μορφών ενέργειας στις κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το έτος 2021 (Eurostat, 2023) .....	18
Πίνακας 2: Συνήθης χημική σύσταση φυσικού αερίου (CROFT Production Systems, 2020) .....	21
Πίνακας 3: Τυπικές διαστάσεις κατακόρυφου LRC (Tengborg, Johansson, & Durup, 2014) .....	40
Πίνακας 4: Εύρη τιμών βασικών γεωμηχανικών χαρακτηριστικών ασβεστολίθου στην υπό εξέταση περιοχή (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010) .....	53
Πίνακας 5: Προτεινόμενες χαρακτηριστικές τιμές βασικών γεωμηχανικών χαρακτηριστικών ασβεστολίθου στην υπό εξέταση περιοχή (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010).....	54
Πίνακας 6: Τιμές παραμέτρων αντοχής βραχόμαζας κριτηρίων Mohr – Coulomb και Hoek – Brown .....	58
Πίνακας 7: Τιμές σχεδιαστικών παραμέτρων υπογείων θαλάμων .....	59
Πίνακας 8: Τιμές σχεδιαστικών παραμέτρων υπογείων θαλάμων .....	61
Πίνακας 9: Πάχη στρωμάτων επένδυσης – Τελική υπερεκσκαφή τοιχωμάτων .....	61
Πίνακας 10: Βασικά χαρακτηριστικά αγκυρίων ολόσωμης πάκτωσης.....	64
Πίνακας 11: Βασικά χαρακτηριστικά αγκυρίων ολόσωμης πάκτωσης.....	65
Πίνακας 12: Βασικά χαρακτηριστικά στρώματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος .....	65
Πίνακας 13: Βασικά χαρακτηριστικά στρώματος έγχυτου σκυροδέματος .....	66
Πίνακας 14: Βασικά χαρακτηριστικά οπλισμού ενίσχυσης έγχυτου σκυροδέματος .....	66
Πίνακας 15: Βασικά χαρακτηριστικά στρώματος μεταλλικής επένδυσης.....	66
Πίνακας 16: Αποτελέσματα τελικών μετακινήσεων .....	82
Πίνακας 17: Αποτελέσματα τελικών μετακινήσεων .....	95
Πίνακας 18: Ενδεικτικά χαρακτηριστικά συνοδών έργων – 1 <sup>η</sup> Περίπτωση .....	107
Πίνακας 19: Ενδεικτικά χαρακτηριστικά συνοδών έργων – 2 <sup>η</sup> Περίπτωση .....	109
Πίνακας 20: Διαστάσεις τμημάτων εκσκαφής – Σενάριο Α .....	111
Πίνακας 21: Διαστάσεις τμημάτων εκσκαφής – Σενάριο Β.....	112
Πίνακας 22: Βασικά αποτελέσματα υπολογισμών – Προσπελαστικές οδοί.....	119
Πίνακας 23: Βασικά αποτελέσματα υπολογισμών – Προσπελαστικές οδοί.....	125
Πίνακας 24: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Διάτρησης» .....	131
Πίνακας 25: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Γόμωσης» .....	132
Πίνακας 26: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Αερισμού» .....	133
Πίνακας 27: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Φόρτωσης - Μεταφοράς» .....	134
Πίνακας 28: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Ξεσκαρώματος»... ..	135
Πίνακας 29: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Υποστήριξης» .....	136
Πίνακας 30: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Διάτρησης» .....	139
Πίνακας 31: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Γόμωσης» .....	140
Πίνακας 32: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Αερισμού» .....	141
Πίνακας 33: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Φόρτωσης - Μεταφοράς» .....	142
Πίνακας 34: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Ξεσκαρώματος»... ..	143
Πίνακας 35: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Υποστήριξης» .....	144
Πίνακας 36: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Διάτρησης» .....	148
Πίνακας 37: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Γόμωσης» .....	149



Πίνακας 38: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Αερισμού» .....	150
Πίνακας 39: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Φόρτωσης - Μεταφοράς» .....	151
Πίνακας 40: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Ξεσκάρωματος»...	152
Πίνακας 41: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Υποστήριξης» .....	153
Πίνακας 42: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Διάτρησης» .....	156
Πίνακας 43: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Γόμωσης» .....	157
Πίνακας 44: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Αερισμού» .....	158
Πίνακας 45: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Φόρτωσης - Μεταφοράς» .....	159
Πίνακας 46: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Ξεσκάρωματος»...	160
Πίνακας 47: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Υποστήριξης» .....	161

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> : Εισαγωγή

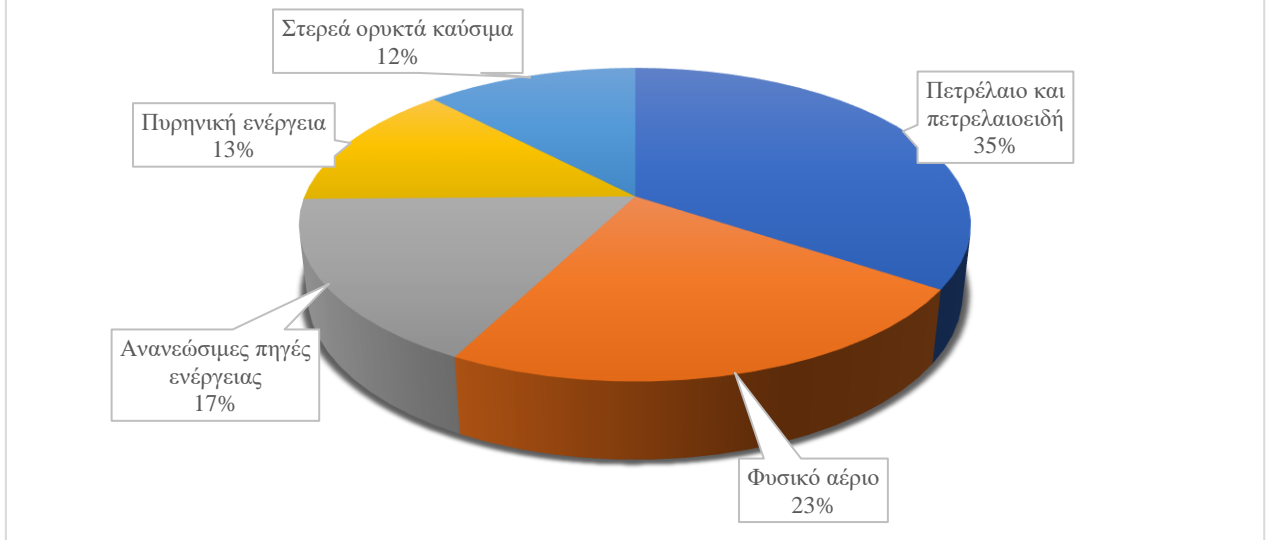
Τα τελευταία χρόνια, η ενεργειακή κρίση κάνει ολοένα και πιο έντονη την εμφάνιση της, επιδεινώνοντας την ζωή των πολιτών σε παγκόσμιο επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, θέματα ενεργειακής αυτονομίας, εξασφάλισης της απρόσκοπτης ροής ενέργειας και κάλυψης των αναγκών επανήλθαν στην επιφάνεια απαιτώντας δραστικές λύσεις. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός νέων, τεχνολογικά προηγμένων και ασφαλών έργων ενεργειακής υποδομής είναι υψίστης σημασίας για την ενεργειακή θωράκιση των χωρών.

Οι ενεργειακές ανάγκες της Ευρωπαϊκής Ένωσης καλύπτονται σε ποσοστό περί του 23% από την καύση φυσικού αερίου, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 1 και στην Εικόνα 1, αποτυπώνοντας το ποσοστό συμμετοχής των διαφορετικών πηγών ενέργειας στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της ΕΕ για το έτος 2021, σύμφωνα με έρευνα της Eurostat (2023).

**Πίνακας 1: Ποσοστό συμμετοχής μορφών ενέργειας στις κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το έτος 2021 (Eurostat, 2023)**

Πηγή ενέργειας	Ποσοστό (%)
Πετρέλαιο και πετρελαιοειδή	34
Φυσικό αέριο	23
Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	17
Πυρηνική ενέργεια	13
Στερεά ορυκτά καύσιμα	12

## ΕΕ: Ποσοστά συμμετοχής στο ενεργειακό ισοζύγιο (2021)



Εικόνα 1: Ποσοστά συμμετοχής πηγών ενέργειας στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το έτος 2021 (Eurostat, 2023)

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, και γνωρίζοντας ότι το φυσικό αέριο αποτελεί μία μορφή ενέργειας που παρουσιάζει μικρό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, καθίσταται σαφές ότι η ανάπτυξη σημαντικών έργων υποδομής για την υποστήριξη των συνεχώς αυξανόμενων αναγκών σε φυσικό αέριο είναι επιτακτική.

Πολύ σημαντικό ρόλο στην αυξανόμενη ζήτηση σε φυσικό αέριο καλείται να διαδραματίσει η Ελλάδα, όντας σε ένα εξαιρετικά στρατηγικό σημείο για την διακίνηση σημαντικών ποσοτήτων υδρογονανθράκων στην Ευρώπη. Η Ελλάδα είναι από τις λίγες χώρες της ΕΕ η οποία δεν έχει μεγάλους αποθηκευτικούς χώρους φυσικού αερίου (ΦΑ) όπως οι χώρες της κεντρικής και βόρειας Ευρώπης για την αντιμετώπιση των εποχικών διακυμάνσεων της ζήτησης και εξισορρόπησης του δικτύου. Η διεύρυνση των έργων ενεργειακής υποδομής θα παρέχει την δυνατότητα τόσο στην κάλυψη των εγχώριων αναγκών σε φυσικό αέριο, όσο και στην μετατροπή της χώρας σε έναν από τους σημαντικότερους συντελεστές διατήρησης της ενεργειακής σταθερότητας σε αρκετές χώρες της ευρωπαϊκής ηπείρου.

Επιπροσθέτως, τα πλεονεκτήματα υπόγειας αποθήκευσης υδρογονανθράκων είναι πολλαπλά έναντι της επιφανειακής και αναλύονται εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο. Η υπόγεια αποθήκευση φυσικού αερίου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην εξισορρόπηση των ημερήσιων και των εβδομαδιαίων διακυμάνσεων της ζήτησης (NATO ASI Series, 1988).

Σημειώνεται δε ότι για χώρες που χαρακτηρίζονται από υψηλή εξάρτηση σε επίπεδο εισαγωγών φυσικού αερίου προτείνεται η διατήρηση αποθεματικής ποσότητας ίσης με το 20-30% της εκάστοτε ετήσιας κατανάλωσης σε φυσικό αέριο, με στόχο την διασφάλιση των αποθεμάτων τους (Demirel et al, 2017). Επιπλέον, η υγροποιημένη μορφή του φυσικού αερίου (LNG) παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της συμβατικής αέριας μορφής του, κυρίως όσον αφορά τις δυνατότητες που παρέχει ως προς την διακίνηση μεγαλύτερων ποσοτήτων αερίου. Επομένως, το ενδιαφέρον σε παγκόσμιο επίπεδο εστιάζεται στην ανάπτυξη έργων υποδομής, τα οποία θα συντελέσουν στην ενίσχυση των αποθεμάτων του συγκεκριμένου τύπου φυσικού αερίου.

Στην παρούσα εργασία, αρχικώς πραγματοποιείται εκτενής ανάλυση των διαφορετικών μεθόδων αποθήκευσης φυσικού αερίου και ιδιαίτερα του υγροποιημένου τύπου αυτού (LNG). Βασικός στόχος της εργασίας αποτελεί ο σχεδιασμός έργου υπόγειας αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου στον ελλαδικό χώρο με τη χρήση της μεθόδου Lined Rock Cavern – LRC. Ο σχεδιασμός του έργου περιλαμβάνει την αξιολόγηση δύο (2) βασικών σεναρίων σχεδιαστικών παραμέτρων και περιλαμβάνει την παρουσίαση των βασικών παραδοχών σχεδιασμού, το βάθος ανάπτυξης, τον αριθμό και τη διάταξη των αποθηκών. Η αξιολόγηση των σεναρίων πραγματοποιείται ενδελεχώς με τη χρήση μοντέλων αριθμητικής ανάλυσης. Εκτιμώνται έτσι οι δυνατότητες που προσφέρουν στην επίτευξη των αναγκαίων συνθηκών ευστάθειας, στην ευχέρεια των κατασκευαστικών εργασιών, αλλά και τέλος, στο εκτιμώμενο κόστος κατασκευής.

## **Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> : Βασικά στοιχεία**

### **2.1 Φυσικό αέριο**

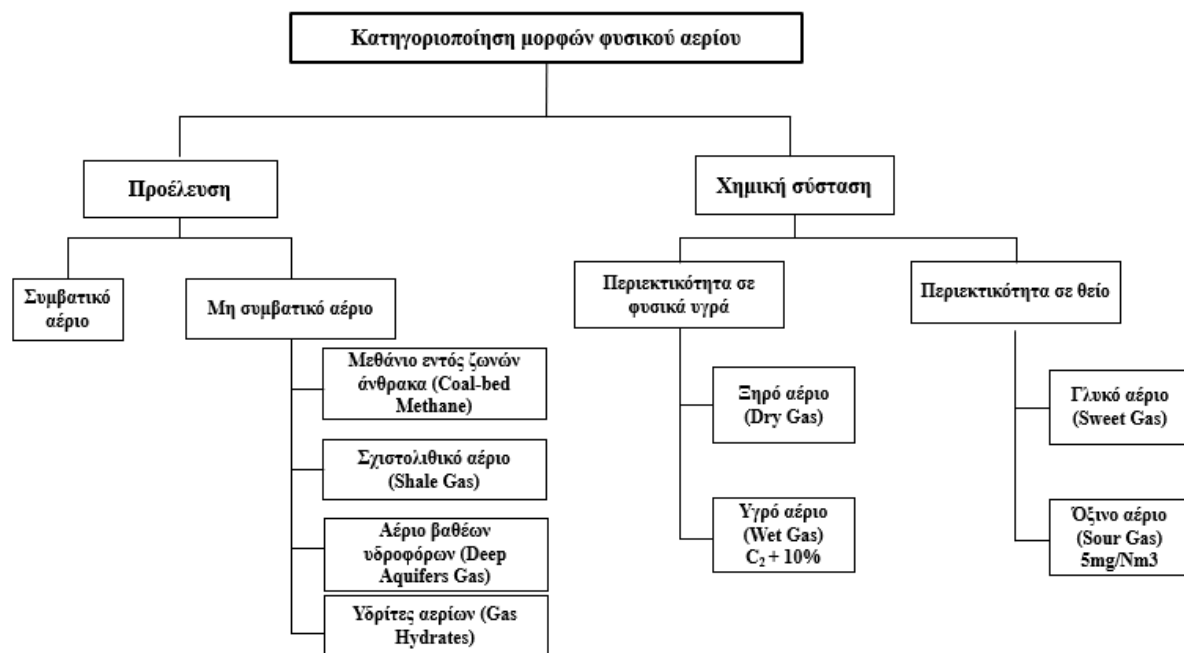
Το φυσικό αέριο είναι ένα μίγμα υδρογονανθράκων, το οποίο σχηματίζεται στο υπέδαφος και αποτελεί το περιβαλλοντικά πιο καθαρό ορυκτό καύσιμο, ενώ είναι ιδιαιτέρως ασφαλές κατά τη μεταφορά, αποθήκευση και χρήση του (Faramawy, Zaki, & Sakr, 2016). Κατά την καύση του οι εκπομπές διοξειδίου του θείου, υποξειδίου και οξειδίου του αζώτου είναι αμελητέες, γεγονός που βοηθά στην μείωση προβλημάτων που σχετίζονται με την όξινη βροχή, το στρώμα του όζοντος και τα αέρια του θερμοκηπίου. Το φυσικό αέριο αποτελείται ως επί το πλείστον από μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) με τη τυπική χημική του σύσταση να παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

**Πίνακας 2: Συνήθης χημική σύσταση φυσικού αερίου (CROFT Production Systems, 2020)**

Συστατικό	Χημικός τύπος	Ποσοστό στο Φ.Α. (%)
Μεθάνιο	CH <sub>4</sub>	60-90
Εθάνιο	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0-20
Προπάνιο	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0-20
Βουτάνιο	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0-20
Διοξείδιο του άνθρακα	CO <sub>2</sub>	0-8
Οξυγόνο	O <sub>2</sub>	0.0-0.2
Άζωτο	N <sub>2</sub>	0-5
Υδρόθειο	H <sub>2</sub> S	0-5
Σπάνια αέρια	A, He	0-2

Η επίτευξη υψηλής καθαρότητας, η οποία συνεπάγεται πολύ υψηλό ποσοστό μεθανίου εντός της μάζας του φυσικού αερίου είναι αρκετά σημαντική. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί αρκετές διαφορετικές τεχνικές “εξευγενισμού” του, οι οποίες αποσκοπούν στην απομάκρυνση των μη επιθυμητών συστατικών, ενισχύοντας την κυριαρχία του μεθανίου εντός της μάζας του (Faramawy, Zaki, & Sakr, 2016).

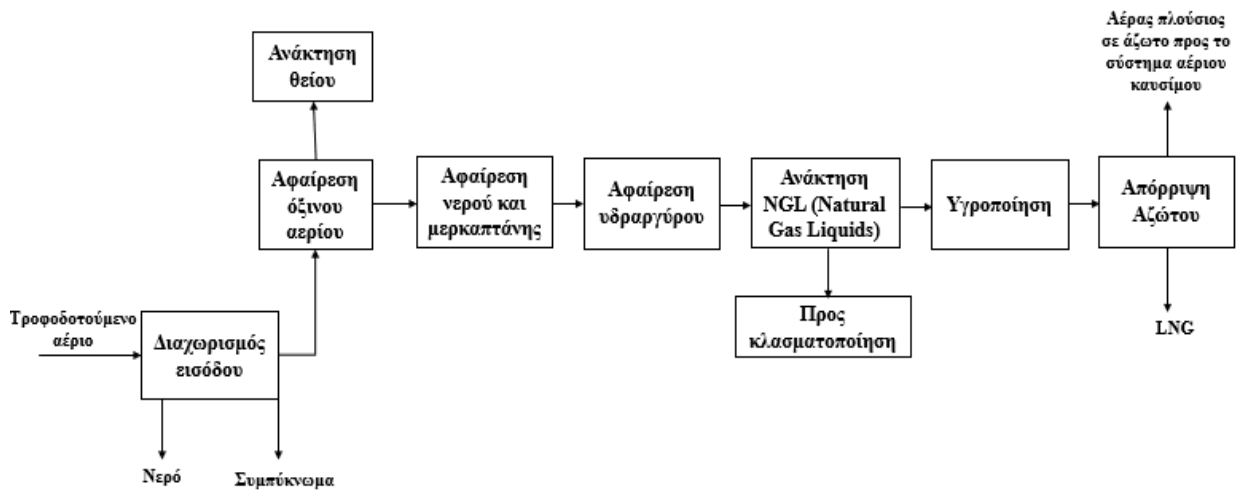
Το φυσικό αέριο υπό κανονικές συνθήκες έχει αέρια μορφή και είναι άχρωμο, άμορφο και άοσμο. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες φυσικού αερίου όπως αυτές απαντώνται στο υπέδαφος σύμφωνα με την προέλευσή τους και την χημική τους σύσταση. Η εν λόγω κατηγοριοποίηση δεν κρίνεται απαραίτητο να αναπτυχθεί σε μεγαλύτερο βαθμό, καθώς το συγκεκριμένο ζήτημα δεν άπτεται των βασικών στόχων της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 2: Κατηγοριοποίηση φυσικού αερίου (Μεταφρασμένο διάγραμμα) (Faratawy, Zaki, & Sakr, 2016)

Ιδιαίτερη ανάλυση θα πρέπει να πραγματοποιηθεί για το υγροποιημένο φυσικό αέριο ή Liquefied Natural Gas (LNG), όπως είναι ο αγγλικός όρος ο οποίος χρησιμοποιείται διεθνώς.

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) είναι μία άοσμη, άχρωμη, μη τοξική και μη διαβρωτική μορφή φυσικού αερίου, το οποίο έχει υγροποιηθεί κάτω από πιέσεις κοντά στην ατμοσφαιρική, με ταυτόχρονη ψύξη αυτού σε θερμοκρασία περί των  $-162^{\circ}\text{C}$ . Έτσι, το εν λόγω προϊόν κατατάσσεται στα κρυογενή υλικά, καθώς είναι ένα προϊόν υγρής φύσεως που υπό κανονικές συνθήκες απαντάται στην φύση ως αέριο. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα διαχείρισης της υγρής έναντι της αέριας φάσης του φυσικού αερίου είναι ότι το LNG καταλαμβάνει τον 1/600 όγκο σε σχέση με την αέρια κατάσταση για την ίδια μονάδα βάρους (Vanderbroek & Berghmans, 2012). Κατ' αυτό το τρόπο, το υγροποιημένο φυσικό αέριο ως καύσιμο παρουσιάζει μεγάλη αναλογία ενέργειας προς όγκο. Επιπροσθέτως, η καύση του χαρακτηρίζεται από χαμηλά επίπεδα παραγόμενων χημικών ενώσεων όπως  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  και σωματιδίων σε σύγκριση με άλλα συμβατικά καύσιμα. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται η παραγωγική αλυσίδα του υγροποιημένου φυσικού αερίου από την αρχικά αέρια φάση στην οποία απαντάται υπό κανονικές συνθήκες.

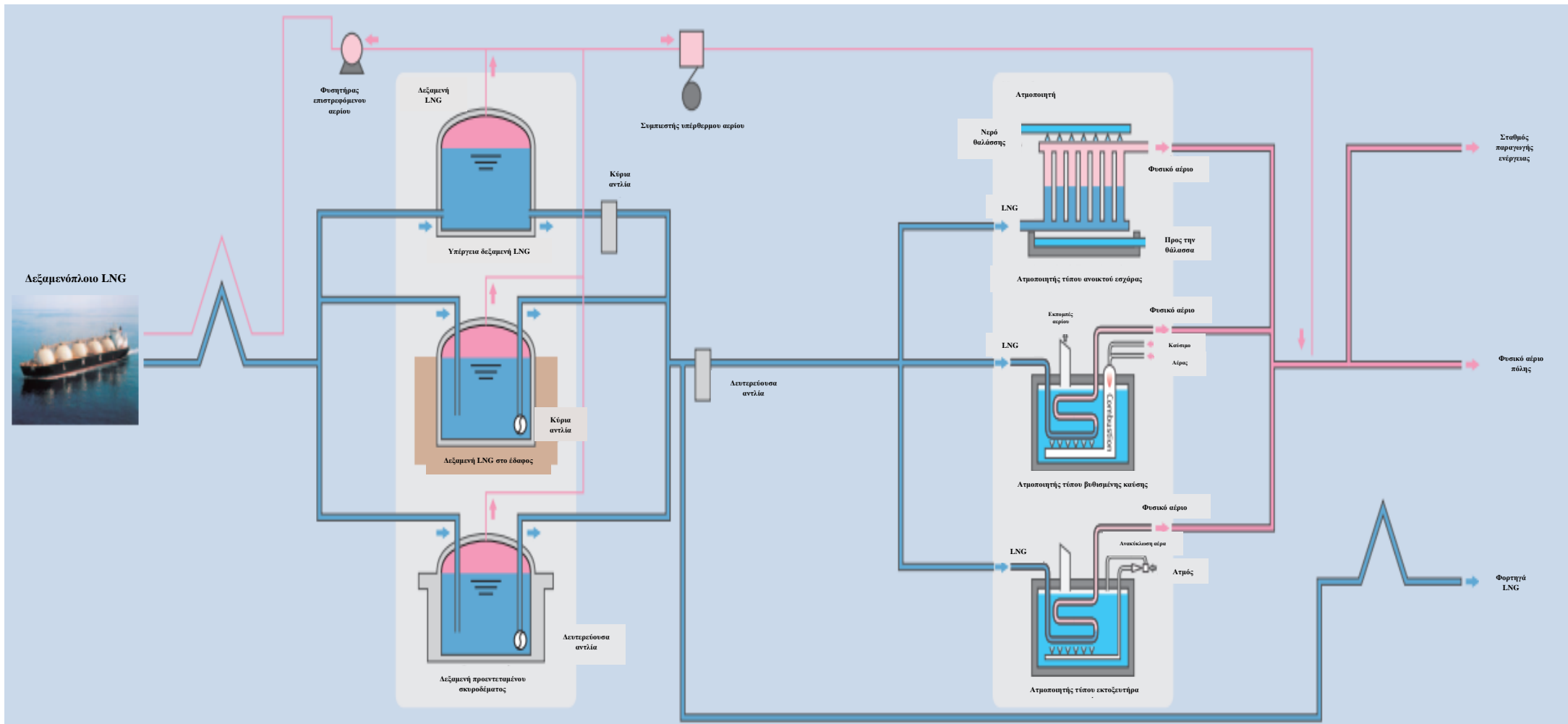


Εικόνα 3: Τυπική διαδικασία παραγωγής LNG (Μεταφρασμένο διάγραμμα ροής) (Mokhatab & Messersmith, 2018)

Αξίζει να σημειωθεί ότι η αποθήκευση και η χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου ενέχει αρκετούς κινδύνους (Vanderbroek & Berghmans, 2012). Παραδείγματος χάριν, το LNG:

- Δύναται να προκαλέσει εγκαύματα και αναπνευστικά προβλήματα στον ανθρώπινο οργανισμό.
- Δύναται να προκαλέσει ρωγμάτωση σε μεταλλικές κατασκευές που δεν φέρουν ειδική προστατευτική επένδυση.
- Έχει μεγάλη ευφλεκτότητα, καθώς ακόμη αν έρθει σε επαφή με κάποιο άλλο υγρό μέσο παρουσιάζεται το φαινόμενο της ταχύτατης μεταφοράς θερμότητας.

Στην Εικόνα 4 δίνεται διαγραμματικά η τυπική πορεία που ακολουθεί το υγροποιημένο φυσικό αέριο από την μονάδα παραλαβής της έως και την καύση της για την παραγωγή ενέργειας.



Εικόνα 4: Διαδρομή LNG (Μεταφρασμένο διάγραμμα ροής) (Chiyoda Corporation, n.d.)



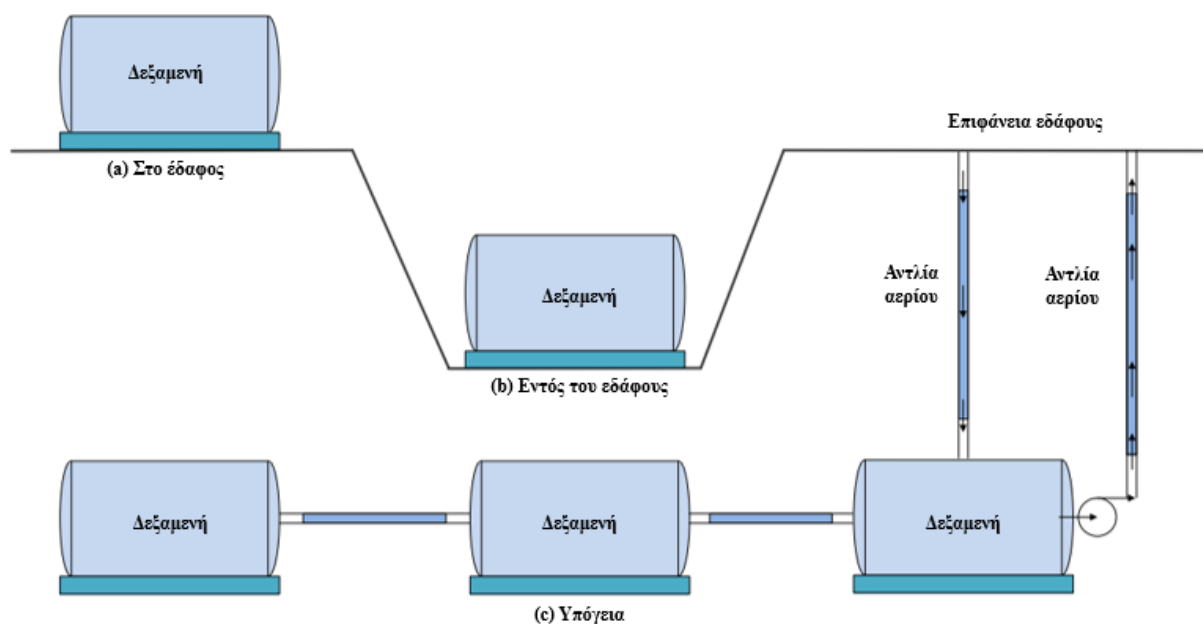
## 2.2 Μέθοδοι αποθήκευσης φυσικού αερίου

### 2.2.1 Εισαγωγή

Όπως ήδη αναφέρθηκε και σε προηγούμενο εδάφιο, η αποθήκευση υδρογονανθράκων συμβάλλει στην ικανοποίηση τόσο των σταθερών αναγκών σε ορυκτές πρώτες ύλες, όσο και στον υπερκερασμό της αιφνίδιας αύξησης της ζήτησης σε ορισμένα χρονικά διαστήματα εντός του έτους. Αξίζει δε να σημειωθεί ότι, πριν τον προγραμματισμό οποιουδήποτε έργου αποθήκευσης, επιτακτική ανάγκη αποτελεί η πλήρης κατανόηση των αναγκών της αγοράς. Ως εκ τούτου, αποφεύγονται τόσο πιθανές υποεκτιμήσεις των διαστάσεων του έργου, όσο και η κατασκευή υπερόγκων και οικονομικά ασύμφορων έργων.

Η αποθήκευση υγροποιημένου φυσικού αερίου δύναται να διακριθεί στις ακόλουθες βασικές κατηγορίες:

- Πάνω από το έδαφος
- Εντός του εδάφους
- Υπό το έδαφος



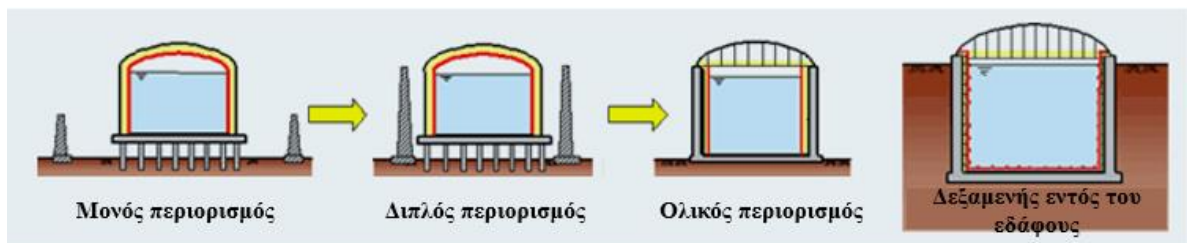
Εικόνα 5: Κατηγορίες δεξαμενών αποθήκευσης φυσικού αερίου (Μεταφρασμένη εικόνα) (Demirel et al, 2017)



Εικόνα 6: Τύποι αποθήκευσης LNG (Μεταφρασμένη εικόνα) (TOKYO GAS Co.,Ltd., n.d.)

Η κατασκευή μίας αποθήκης LNG εντός του εδάφους έναντι επί αυτού επιλέγεται συνήθως για συγκεκριμένους λόγους. Οι δεξαμενές εντός του εδάφους είναι ελάχιστα ορατές, γεγονός που αυξάνει άρδην τα επίπεδα ασφαλείας τόσο έναντι δυνητικών προσπαθειών δολιοφθοράς τους (π.χ. Τρομοκρατική επίθεση), όσο και κατά την επίδραση εξωγενών φυσικών φαινομένων (π.χ. Σεισμική δράση) στην ευστάθεια των τοιχωμάτων της κατασκευής (TOKYO GAS Co.,Ltd., n.d.).

Στην Εικόνα 7 παρουσιάζονται οι κατηγορίες των δεξαμενών επί και εντός του εδάφους.



Εικόνα 7: Τύποι αποθήκευσης LNG επάνω και εντός του εδάφους (Μεταφρασμένη εικόνα) (TOKYO GAS Co.,Ltd., n.d.)

Αξίζει να σημειωθεί ότι πολύ σημαντικό ρόλο στην επιλογή του τρόπου κατασκευής ενός έργου αποθήκευσης υδρογονανθράκων διαδραματίζει και ο διαθέσιμος χώρος στην επιφάνεια, αλλά και η ακτίνα επιρροής του έργου που πρόκειται να κατασκευαστεί. Ενδεικτικά, στην Εικόνα 8 αποτυπώνεται η έκταση που καταλαμβάνει μία αποθήκη φυσικού αερίου ανάλογα με τον τύπο της (πορτοκαλί χρωματισμός) και η ακτίνα επίδρασης αυτής στην επιφάνεια του εδάφους (μωβ χρωματισμός).



Εικόνα 8: Ακτίνα επίδρασης έργων αποθήκευσης φυσικού αερίου (Park, Chung, Lee, & Kim, 2012)

## 2.2.2 Υπόγεια αποθήκευση φυσικού αερίου

Η υπόγεια αποθήκευση φυσικού αερίου παίζει σημαντικό ρόλο στην εξισορρόπηση των ημερήσιων και των εβδομαδιαίων διακυμάνσεων της ζήτησής του (NATO ASI Series, 1988). Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσμοθετήσει ορισμένες απαιτήσεις για τα κράτη μέλη της, έτσι ώστε να διατηρούν αποθέματα πετρελαιοειδών προϊόντων, τα οποία θα καλύπτουν τις ανάγκες της κάθε χώρας για τουλάχιστον 90 ημέρες σύμφωνα με την μέση ημερήσια κατανάλωση που κατεγράφη το προηγούμενο έτος (Nanda et al, 2015).

Σύμφωνα με τα ανωτέρω και λαμβάνοντας υπόψιν την έντονη γεωπολιτική αστάθεια, η οποία επικρατεί τα τελευταία έτη σε παγκόσμιο επίπεδο, επιτακτική κρίνεται η ανάγκη εύρεσης νέων, οικονομικά εφαρμόσιμων λύσεων, οι οποίες θα ανταποκρίνονται και στις τρέχουσες τεχνολογικές εξελίξεις. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται κατά κύριο λόγο στον τομέα της υπόγειας αποθήκευσης υδρογονανθράκων, ο οποίος δύναται προσφέρει υψηλά επίπεδα ασφάλειας και οικονομικότητας. Ωστόσο, η ιδέα αξιοποίησης υπόγειων χώρων για την αποθήκευση φυσικού αερίου δεν αποτελεί καινοτομία, καθώς μέθοδοι υπόγειας αποθήκευσης έχουν δοκιμαστεί και εφαρμοστεί για αρκετές δεκαετίες, τόσο σε πετρελαιοειδή, όσο, όπως θα αναλυθεί και παρακάτω, και σε διάφορα ακόμη είδη προϊόντων, όπως τρόφιμα, νερό, συμπιεσμένος αέρας κ.α.

Η επιλογή υπόγειας αποθήκευσης φυσικού αερίου παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών δεξαμενών επί ή εντός του εδάφους, τα βασικά εκ των οποίων παρουσιάζονται ακολούθως (Pillai, 2009):

- Το προϊόν τοποθετείται σε μεγάλο βάθος και είναι πλήρως απομονωμένο.

- Εξωτερικά φαινόμενα, όπως εκτεταμένες πυρκαγιές, σεισμοί, καταιγίδες, εκρήξεις κ.α., δεν επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την σταθερότητα του ταμιευτήρα.
- Μειώνεται η αναγκαία προς δέσμευση έκταση στην επιφάνεια του εδάφους.
- Τα υπόγεια ανοίγματα εντός των βραχωδών σχηματισμών εκ φύσεως απαιτούν περιορισμένες ενέργειες συντήρησης.
- Σε γενικά πλαίσια, το κόστος κεφαλαίου ανά τόνο αποθηκευμένου προϊόντος είναι χαμηλό.
- Το παραγόμενο προϊόν της εξόρυξης δύναται να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη γειτονικών υποδομών.

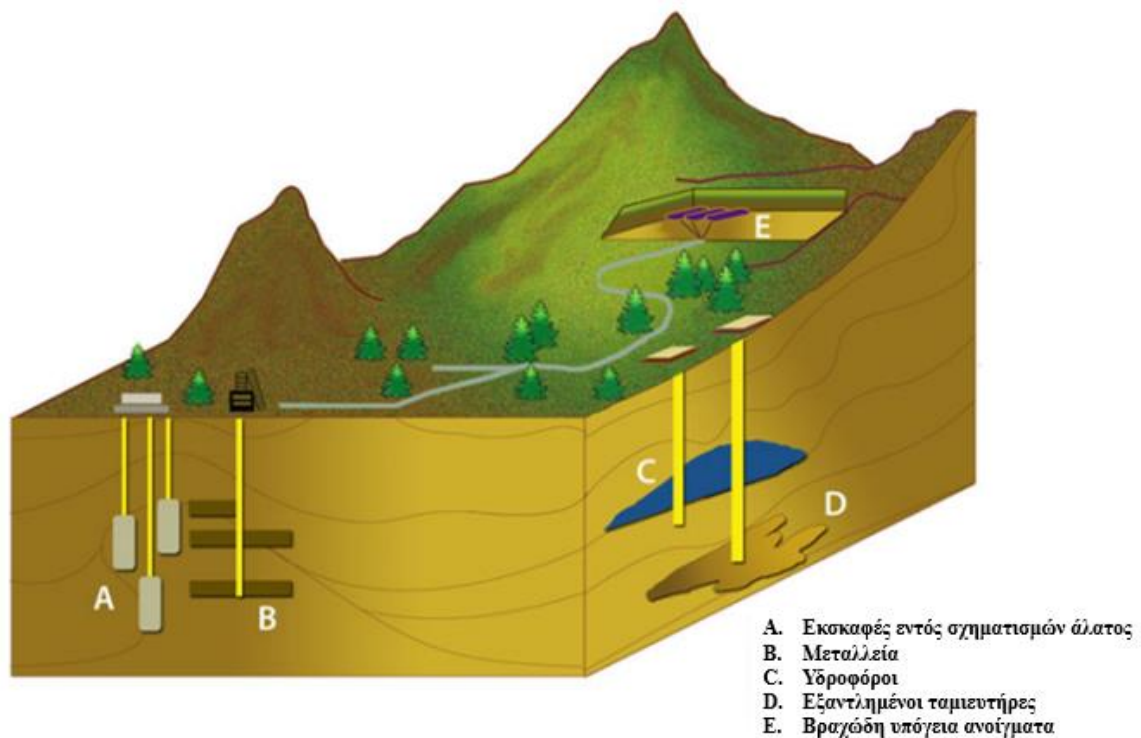
Κάθε τύπος αποθήκευσης φυσικού αερίου έχει τα δικά του φυσικά (πχ. πορώδες, διαπερατότητα, ικανότητα συγκράτησης) και οικονομικά (πχ. προετοιμασία τοποθεσίας και κόστος συντήρησης, ποσοστά διακινούμενου αερίου και κύκλοι λειτουργίας ταμιευτήρα) χαρακτηριστικά, τα οποία καθορίζουν και την καταλληλότητα ή μη αυτού για το εκάστοτε εξεταζόμενο έργο αποθήκευσης (U.S. Energy Information Administration, 2015).

Οι βασικές κατηγορίες υπόγειων ταμιευτήρων φυσικού αερίου σύμφωνα με τους Nanda et al (2015) είναι οι εξής :

- Μη επενδυμένα υπόγεια ανοίγματα (Unlined underground rock caverns).
- Μη επενδυμένα υπόγεια ανοίγματα εντός δόμων άλατος (Unlined underground salt caverns in salt beds and salt domes).
- Αποθήκευση εντός του πορώδους σχηματισμών σε πλήρως εξαντλημένους ταμιευτήρες πετρελαίου ή φυσικού αερίου ή σε βαθείς υδροφορείς (Pore space storage in depleted oil & gas reservoirs or deep aquifers).
- Υπόγειες δεξαμενές κατασκευασμένες από σκυρόδεμα (Underground Concrete Tanks).
- Επενδυμένα υπόγεια ανοίγματα (Lined Rock Caverns).

Επιπλέον, στους ανωτέρω δυνατούς τρόπους υπόγειας αποθήκευσης φυσικού αερίου θα πρέπει να συμπεριληφθούν ορισμένες μερικές ακόμη αξιοσημείωτες και ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές όπως είναι η χρήση εγκαταλελειμμένων υπόγειων μεταλλείων (NATO ASI Series, 1988).

Στην Εικόνα 9 παρουσιάζονται γραφικά οι βασικοί τύποι υπόγειας αποθήκευσης φυσικού αερίου, σύμφωνα με έκθεση της Διοίκησης Ενεργειακών Πληροφοριών των Η.Π.Α. (2015).



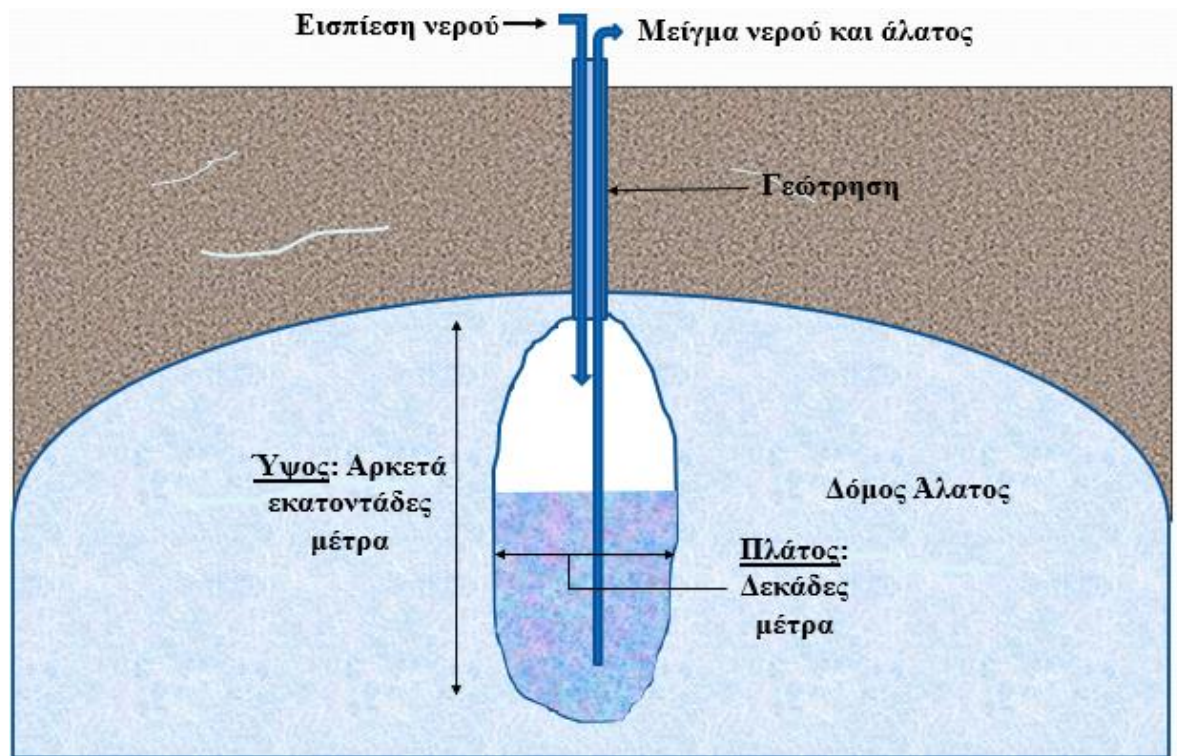
Εικόνα 9: Τύποι υπόγειας αποθήκευσης φυσικού αερίου (Μεταφρασμένη εικόνα) (U.S. Energy Information Administration, 2015)

### 2.2.2.1 Αποθήκευση φυσικού αερίου σε εκσκαφές εντός πεδίων και δόμων άλατος

Τα υπόγεια ανοίγματα εντός των δόμων άλατος διαμορφώνονται εντός σχηματισμών άλατος κάνοντας χρήση της μεθόδου της επί τόπου έκπλυσης (Nanda et al, 2015). Προς αυτό το σκοπό, αρχικά πραγματοποιείται η διάνοιξη ενός φρέατος και εν συνεχεία εισπιέζονται τεράστιες ποσότητες νερού εντός του σχηματισμού. Το παραγόμενο προϊόν (άλμη) συλλέγεται και απορρίπτεται.

Ο συγκεκριμένος τύπος αποτελεί τον οικονομικότερο τύπο αποθήκευσης πετρελαιοειδών προϊόντων, αλλά και έναν από τους περιβαλλοντικά ασφαλέστερους (Nanda et al, 2015). Τα άλατα αποτελούν έναν εξαιρετικά αδιαπέρατο φραγμό, ενώ παράλληλα είναι και χημικά αδρανή όταν έρχονται σε επαφή με υγρά καύσιμα. Η εν λόγω μέθοδος αποθήκευσης δύναται να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση υδρογονανθράκων τόσο σε αέρια όσο και σε υγρή μορφή κάτω από υψηλές πιέσεις (Kruck et al, 2013). Ανάλογα με το βάθος του υπόγειου ανοίγματος, η μέγιστη αναπτυσσόμενη εσωτερική πίεση στους ταμιευτήρες δύνανται να ακόμη και να ξεπεράσει τα 200 bar (20 MPa).

Στην Εικόνα 10 δίνεται μία οπτική αναπαράσταση ενός ταμιευτήρα φυσικού αερίου εντός υπόγειου ανοίγματος μέσα σε ένα σχηματισμό άλατος.



Εικόνα 10: Γραφική απεικόνιση αποθήκευσης φυσικού αερίου εντός δόμου άλατος (Pillai, 2009)

Η συγκεκριμένη μέθοδος αποθήκευσης υδρογονανθράκων έχει εν γένει αποδειχθεί πιο ακριβή από την αντίστοιχη αποθήκευση σε υδροφόρο ορίζοντα (NATO ASI Series, 1988). Ωστόσο, η ευρεία χρήση του συγκεκριμένου τύπου δικαιολογείται τόσο από την έλλειψη δομών υδροφόρων σε ορισμένες περιοχές, αλλά και από το μέγεθος της μέγιστης ροής που μπορεί να παρουσιάζει μία υπόγεια εκσκαφή ώστε να είναι πλήρως διασφαλισμένη η ποσότητα φυσικού αερίου εντός αυτών. Το εν λόγω χαρακτηριστικό είναι καταλυτικό στην διαμόρφωση προτίμησης των υπόγειων εκσκαφών εντός αλάτων για την κάλυψη της ζήτησης σε περιόδους πολύ υψηλής ζήτησης. Επιπροσθέτως, ένα σημαντικό πλεονέκτημα των σχηματισμών άλατος έναντι των υδροφόρων είναι η μειωμένη απαίτηση σε μονίμως αποθηκευμένη ποσότητα αερίου εντός του ταμιευτήρα για τη διασφάλιση επαρκών επιπέδων εσωτερικής πίεσης εντός αυτού (Cihlar et al, 2021).

Οι Kruck et al (2013) αναλύοντας συνολικά την σημαντικότητα των σχηματισμών ορυκτού άλατος ως ένα εξαιρετικό σχηματισμό για την διαμόρφωση μίας φυσικής αποθήκης φυσικού αερίου, επισημαίνουν κυρίως τα παρακάτω ευεργετικά χαρακτηριστικά αυτών:

- Υψηλή στεγανότητα σχηματισμού για την αντιστάθμιση υψηλών πιέσεων.
- Ικανότητα εκσκαφής ανυποστήρικτων ανοιγμάτων μεγάλων διαστάσεων.
- Χαμηλό ειδικό κόστος λόγω κατασκευής εξ' ολοκλήρου από την επιφάνεια.

- Μικρό περιβαλλοντικό αποτύπωμα των επιφανειακών εγκαταστάσεων.

Είναι αρκετά σύνηθες για εγκαταστάσεις αποθήκευσης σε αλατοσπήλαια να κατασκευάζονται πολλά υπόγεια ανοίγματα - ταμιευτήρες σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, καθώς υπάρχει περιορισμός στο μέγιστο μέγεθος που μπορεί να λάβει ένα υπόγειο άνοιγμα εντός ενός σχηματισμού άλατος πριν αυτό καταστεί ασταθές (Cihlar et al, 2021). Επιλέγοντος την ανάπτυξη πολλαπλών ταμιευτήρων, ο συνολικός αποθηκευτικός χώρος της εγκατάστασης δύναται να αυξηθεί σημαντικά.

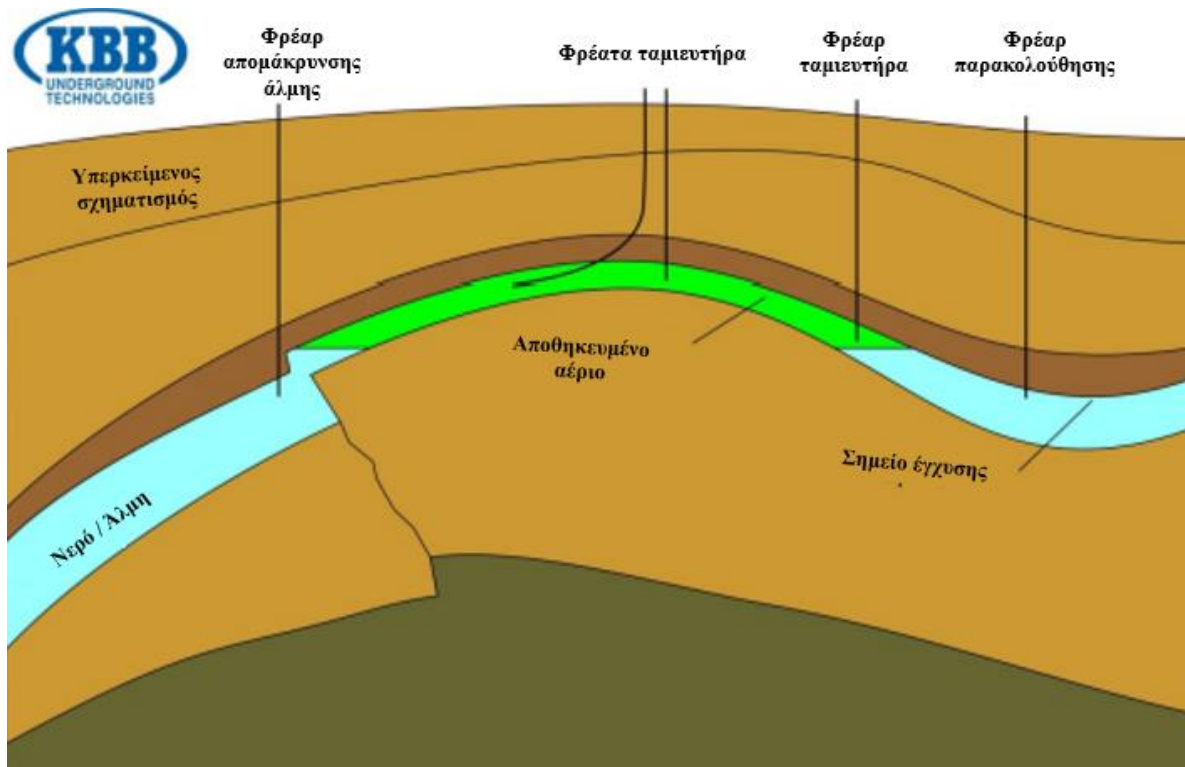
#### **2.2.2.2 Αποθήκευση φυσικού αερίου σε υδροφόρους ορίζοντες**

Οι υδροφόροι ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη ως αποθήκες φυσικού αερίου από το 1953 και η μακράιωνη εφαρμογή αυτής της μεθόδου τους καθιστά ως έναν από τους πιο διαδεδομένους τύπους αποθήκευσης φυσικού αερίου παγκοσμίως (Kruck et al, 2013).

Οι υδροφορείς είναι πορώδεις και διαπερατοί βραχώδεις σχηματισμοί που περιέχουν γλυκό νερό ή συνηθέστερα άλμη στον κενό χώρο των πόρων τους (Kruck et al, 2013). Συνηθέστερα τέτοιου τύπου διαπερατοί βραχώδεις σχηματισμοί είναι ψαμμίτες ή ανθρακικά πετρώματα. Απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου τύπου ταμιευτήρα είναι η επαφή αυτού του διαπερατού σχηματισμού με ένα αδιαπέρατο υπερκείμενο στρώμα πετρώματος, με τυπικά παραδείγματα κάποιο στεγανό στρώμα σχιστολίθου, άλατος ή ανυδρίτη.

Η μετατροπή ενός υδροφόρου σε αποθήκη φυσικού αερίου επιτυγχάνεται μέσα από την αφαίρεση ενός μέρους του νερού με την έγχυση αερίου, η οποία οδηγεί στην δημιουργία μίας τεχνητής παραγωγής ενός κοιτάσματος φυσικού αερίου (NATO ASI Series, 1988). Η αποθηκευτική ικανότητα της εν λόγω μεθόδου είναι σημαντικά μεγάλη (Kruck et al, 2013).

Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται γραφικά μία τυπική αναπαράσταση της αποθηκείωσης υδρογονανθράκων κάνοντας χρήση της εν λόγω μεθόδου.



Εικόνα 11: Γραφική απεικόνιση αποθήκευσης φυσικού αερίου εντός υδροφόρου ορίζοντα (Μεταφρασμένη εικόνα) (Kruck , et al, 2013)

Εν γένει, ο συγκεκριμένος τύπος υπόγειας αποθήκευσης φυσικού αερίου χρησιμοποιείται σε περιοχές οι οποίες δεν συναντάται κάποιος σχηματισμός ορυκτού άλατος με τα απαραίτητα ευμενή χαρακτηριστικά, ούτε κάποιο πεδίο εξαντλημένων κοιτασμάτων αερίου (Kruck et al, 2013). Οι πιέσεις λειτουργίας που αναπτύσσονται είναι 30-315 bar (3.0-31.5 MPa) και το βάθος λειτουργίας 400 – 2,300 m (Cihlar et al, 2021)

Από γεωλογικής άποψης, οι περιοχές ανάπτυξης υδροφόρων οριζόντων και εξαντλημένων πεδίων παραγωγής υδρογονανθράκων παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Ωστόσο, η περίπτωση των υδροφόρων παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα, με κυριότερο την απαίτηση μεγαλύτερης ποσότητας μονίμως αποθηκευμένου αερίου (cushion gas), ενώ παρουσιάζει και μικρότερη ευελιξία στις διαδικασίες διακίνησης του αποθηκευμένου προϊόντος (U.S. Energy Information Administration, 2015). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ποσότητες αερίου που μπορούν να διακινηθούν δύνανται να αυξηθούν, εφόσον εντός του ταμιευτήρα εντοπίζεται ενεργή κίνηση του νερού.

Σε αντίθεση με τα εξαντλημένα πεδία αερίου, τα οποία είναι γνωστό εκ των προτέρων ότι είναι πλήρως στεγανά, λόγω της αρχικής τους πλήρωσης με αέριο, οι υδροφόροι δύνανται να μην εμφανίζουν απόλυτη στεγανότητα από όλες τις πλευρές. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην



ανάγκη διενέργειας εκτεταμένου προγράμματος γεωτεχνικής έρευνας πριν την έναρξη της διαδικασίας διαμόρφωσης της αποθήκης.

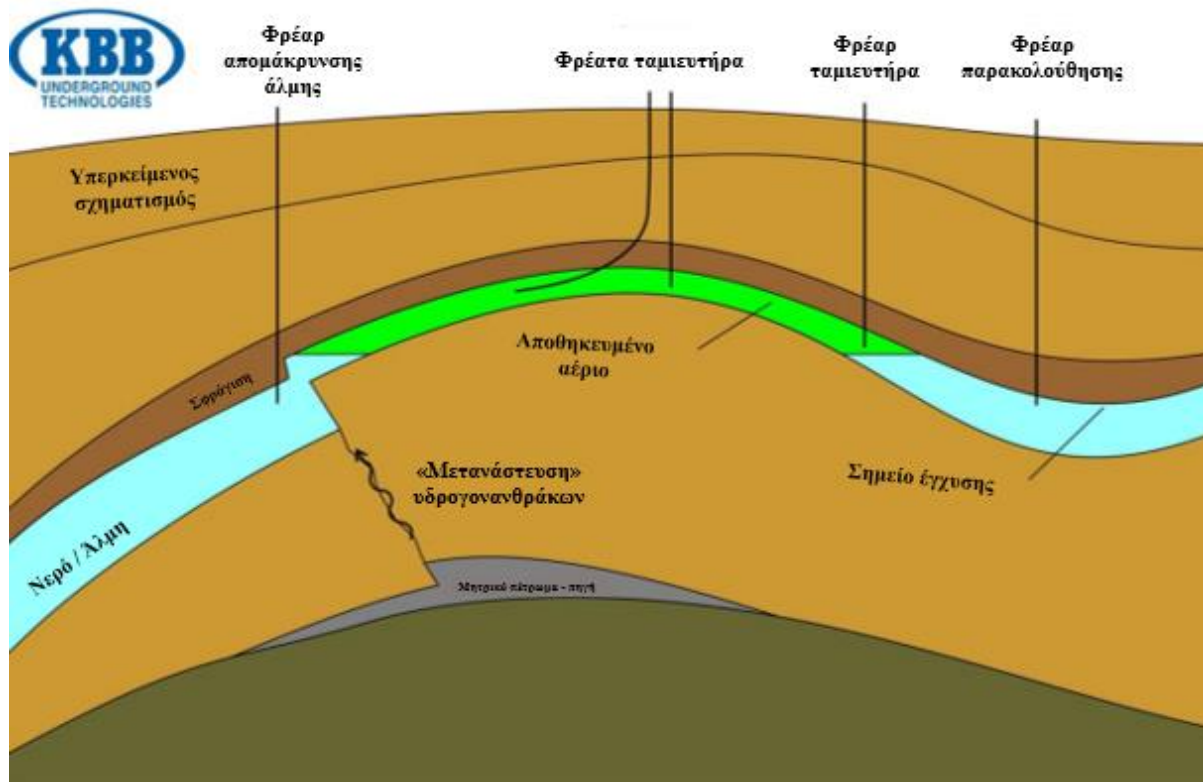
### **2.2.2.3 Αποθήκευση φυσικού αερίου σε εξαντλημένα πεδία υδρογονανθράκων**

Ο συγκεκριμένος τύπος αφορά την αποθήκευση φυσικού αερίου εντός του χώρου εξαντλημένων ταμιευτήρων υδρογονανθράκων, εισπιέζοντας εντός αυτών την επιθυμητή και ασφαλή ποσότητα φυσικού αερίου προς αποθήκευση (Nanda, Rath, & Usmani, 2015). Η εν λόγω μέθοδος αποθήκευσης παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες με την αντίστοιχη διαδικασία που εφαρμόζεται στους υδροφόρους ορίζοντες, όπως επισημάνθηκε και στο προηγούμενο εδάφιο. Σημαντικό σημείο τομής είναι η ανάγκη ύπαρξης ενός αδιαπέρατου σχηματισμού άνωθεν του σχηματισμού-ταμιευτήρα και στις δύο περιπτώσεις. Λόγω της μεγάλης διαθεσιμότητας των εν λόγω σχηματισμών σε παγκόσμιο επίπεδο, η συγκεκριμένη μέθοδος αποθήκευσης φυσικού αερίου αποτελεί και την συνηθέστερα εφαρμοζόμενη διεθνώς (Nanda, Rath, & Usmani, 2015). Η επαναχρησιμοποίηση ενός φυσικού ταμιευτήρα για την αποθήκευση φυσικού αερίου συνήθως απαιτεί περιορισμένο δίκτυο ερευνών και επενδυτικών κεφαλαίων, λόγω της ύπαρξης υφιστάμενων επιφανειακών εγκαταστάσεων.

Συνήθως, κατά την πλήρη εξάνληση ενός φυσικού ταμιευτήρα δεν αφαιρείται το σύνολο του αρχικού αερίου, με το υπολοιπό να διατηρείται εντός αυτού λαμβάνοντας υποστηρικτικό ρόλο μέσα στον αποθηκευτικό χώρο (Kruck et al., 2013).

Σε τυπικές περιπτώσεις κοιτασμάτων, οι υδρογονάνθρακες μεταναστεύουν από έναν μητρικό σχηματισμό, ο οποίος βρίσκεται κάτω από το επίπεδο του ταμιευτήρα, εκμεταλλευόμενοι την ύπαρξη ευνοϊκών χαρακτηριστικών των σχηματισμών (πχ. Διαρρήξεις) κατά την μετάβασή τους προς τον σχηματισμό του τελικού ταμιευτήρα (Kruck et al., 2013). Το δεύτερο θεμελιώδες στοιχείο είναι η σφράγιση που καλύπτει τη δεξαμενή υδρογονανθράκων. Οι συγκεκριμένες μάζες συνίστανται από αδιαπέρατους - στεγανούς σχηματισμούς, οι οποίοι συγκρατούν τους υδρογονάνθρακες εντός του ταμιευτήρα. Ως ιδανικοί σχηματισμοί για την σφράγιση των κοιτασμάτων υδρογονανθράκων μπορούν να χαρακτηριστούν πετρώματα, όπως οι σχιστόλιθοι, μη διερηγμένα ανθρακικά ή ακόμα και στεγανά στρώματα άλατος. Το τρίτο μέρος της παγίδας υδρογονανθράκων είναι ο υδροφόρος ορίζοντας κάτω από τον ταμιευτήρα, ο οποίος σε πολλές περιπτώσεις συμβάλλει στην υποστήριξη της πίεσης εντός αυτού. Η συνολική πίεση στο εσωτερικό του ταμιευτήρα καθορίζεται από την υπό συμπίεση ποσότητα υδρογονανθράκων και από τον υδροφόρο ορίζοντα και είναι μικρότερη από τις πιέσεις των πετρωμάτων στεγανοποίησης.

Στην Εικόνα 12 παρουσιάζεται γραφικά η εν λόγω μέθοδος αποθήκευσης φυσικού αερίου.



Εικόνα 12: Γραφική απεικόνιση αποθήκευσης φυσικού αερίου σε εξαντλημένα κοιτάσματα υδρογονανθράκων (Μεταφρασμένη εικόνα) (Kruck et al., 2013)

Οι συγκεκριμένοι ταμιευτήρες συνίστανται από ποικίλους συνδυασμούς διαφορετικών λιθολογιών, γεωλογικών παγίδων και γεωλογικών ηλικιών (Kruck et al., 2013). Υπάρχουν δύο (2) κύριες κατηγορίες ταμιευτήρων, οι οποίες δύνανται να συναντηθούν και συνδυαστικά στο πεδίο και είναι οι εξής:

- Κατηγορία 1<sup>η</sup>: Κλαστικοί ταμιευτήρες, οι οποίοι δομούνται από κροκαλοπαγή, ψαμμίτη, σχιστόλιθο ή συνδυασμό των προηγούμενων (Kruck et al., 2013).
- Κατηγορία 2<sup>η</sup>: Ασβεστώδεις ταμιευτήρες, οι οποίοι αποτελούνται από κιμωλία, ασβεστόλιθο, δολομίτη ή συνδυασμό αυτών (Kruck et al., 2013).

Οι πιέσεις και τα βάθη εφαρμογής διαφοροποιούνται σημαντικά, ανάλογα με τον σχηματισμό, με συνήθεις τιμές 15 έως 285 bar και 300 m-2,700 m, αντίστοιχα (Cihlar et al., 2021). Πριν την μετατροπή ενός εξαντλημένου πεδίου σε τεχνητή αποθήκη φυσικού αερίου απαιτείται συνήθως ένα χρονικό διάστημα περί των 3-10 ετών, το οποίο εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πεδίου και την έκταση της απαιτούμενης γεωτεχνικής έρευνας, ώστε να επιβεβαιωθεί η καταλληλότητα του συγκεκριμένου πεδίου (Cihlar et al., 2021).

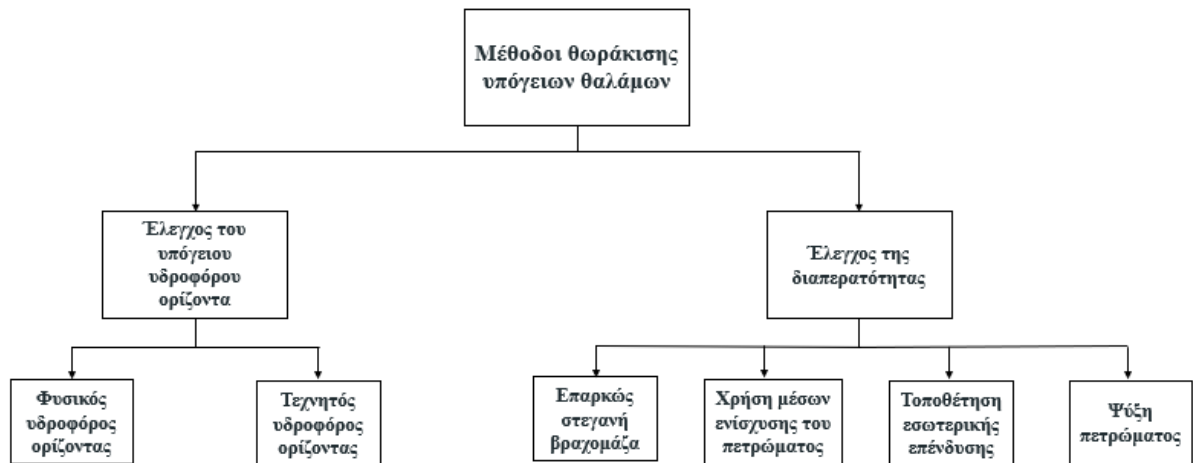
#### **2.2.2.4 Αποθήκευση φυσικού αερίου σε εγκαταλελειμμένα μεταλλεία**

Συνήθης πρακτική υπόγειας αποθήκευσης υδρογονανθράκων είναι η χρήση εξαντλημένων υπόγειων χώρων εξόρυξης. Διεθνώς υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός εγκαταλελειμμένων μεταλλείων, σε ποικίλα γεωλογικά περιβάλλοντα, τα οποία είτε δεν έχουν λιθογομωθεί, είτε έχουν επανεπιχωθεί μερικώς (Kruck et al., 2013). Το γεγονός αυτό παρέχει την δυνατότητα αξιοποίησης του υπολειπόμενου χώρου για την αποθήκευση διαφόρων προϊόντων, όπως το φυσικό αέριο. Απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η ύπαρξη κατάλληλων συνθηκών για την ανάπτυξη των απαιτούμενων πιέσεων για την αντιστάθμιση της προκαλούμενης εσωτερικής πίεσης, αλλά και την ικανοποιητική σφράγιση των προϊόντων εντός του ταμιευτήρα (Kruck et al., 2013). Εφόσον απαιτηθεί μπορούν να χρησιμοποιηθούν ενισχυτικά μέσα για την συγκράτηση των προϊόντων εντός του υπόγειου χώρου, όπως είναι η ανάπτυξη ειδικού δικτύου τροφοδοσίας και ενίσχυσης του υδροφόρου ορίζοντα, για την ανάπτυξη των απαιτούμενων υδροστατικών πιέσεων γύρω από τα τοιχώματα των στοών (Kruck et al., 2013).

Το κόστος του συγκεκριμένου εγχειρήματος είναι αρκετά χαμηλό, λόγω της ύπαρξης υφιστάμενων ανεπτυγμένων υποδομών για τη χρήση του μεταλλείου (Kruck et al., 2013). Παρόλα αυτά, η μετατροπή ενός υπόγειου χώρου εκμετάλλευσης σε χώρο αποθήκευσης υδρογονανθράκων χαρακτηρίζεται από υψηλό ρίσκο, καθώς η στεγανότητα του υπόγειου χώρου δεν μπορεί να ελεγχθεί πλήρως έως και την ολοκλήρωση της διαδικασίας της διοχέτευσης του αερίου στο χώρο (Kruck et al., 2013).

#### **2.2.2.5 Αποθήκευση φυσικού αερίου σε μη επενδεδυμένους υπόγειους θαλάμους**

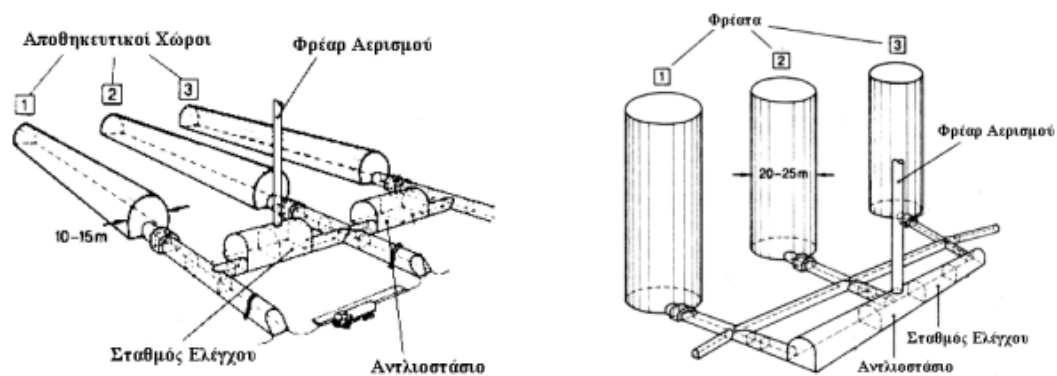
Αρκετά συνήθης τρόπος για την αποθήκευση κυρίως υγρής μορφής προϊόντα υδρογονανθράκων είναι η χρήση μη (μονίμως) επενδεδυμένων υπόγειων θαλάμων μεγάλων διαστάσεων. Αυτές οι υπόγειες εκσκαφές διανοίγονται με την χρήση συμβατικών μέσων εκσκαφής (μηχανικά μέσα ή μέθοδος διάτρησης – ανατίναξης). Αυτού του είδους υπόγεια έργα δύνανται να κατασκευαστούν σε περιοχές, οι οποίες παρουσιάζουν ένα συγκεκριμένο εύρος γεωμηχανικών χαρακτηριστικών, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μακροχρόνια ευστάθεια κατά την κατασκευή και λειτουργία του έργου αλλά και η οικονομικότητα αυτών των εγχειρημάτων (Kruck et al., 2013). Στην Εικόνα 13 παρουσιάζονται διαγραμματικά οι μέθοδοι υδραυλικής θωράκισης (αδιαπερατότητας) εκσκαφών μεγάλων διαστάσεων προς την εξυπηρέτηση των αναγκών αποθήκευσης. Σημειώνεται ότι τα έργα που αφορούν στην εν λόγω μέθοδο αποθήκευσης δεν περιλαμβάνουν τον τύπο θωράκισης μέσω της εσωτερικής επένδυσης.



Εικόνα 13: Μέθοδοι θωράκισης υπόγειων θαλάμων (Μεταφρασμένη εικόνα) (Kruck et al., 2013)

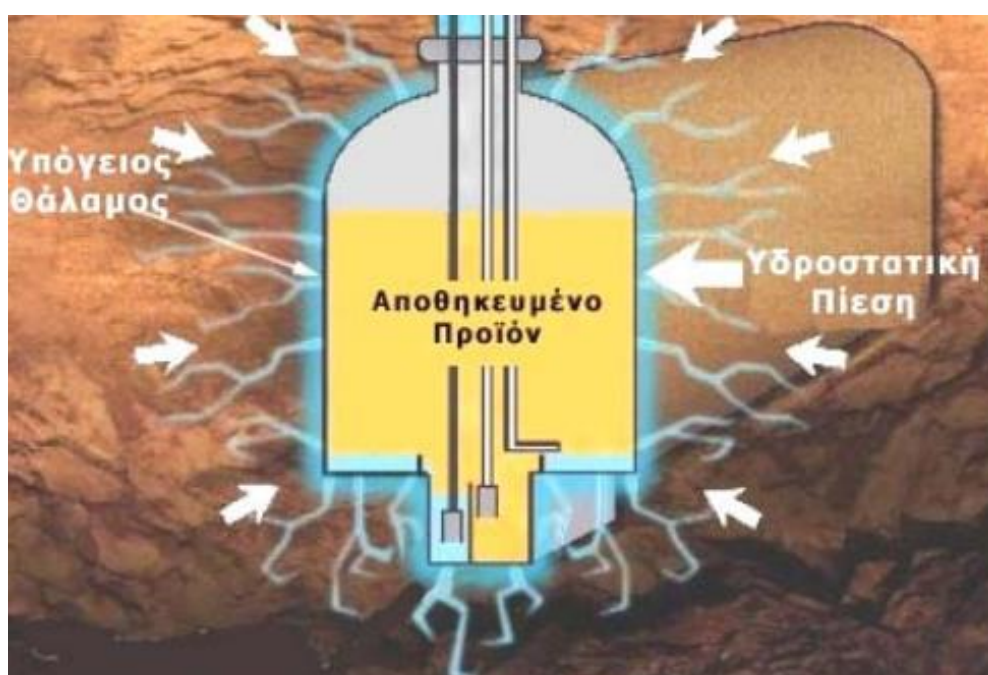
Σύμφωνα με τους Kruck et al. (2013), οι διατρυόμενοι σχηματισμοί στα εν λόγω έργα οι θα πρέπει να είναι αρκετά στεγανοί, ιδιότητα που δύναται να ενισχυθεί με την χρήση του υφιστάμενου (σε περίπτωση ύπαρξης) υδροφόρου ορίζοντα ή με την ενίσχυση αυτού με τεχνητά μέσα. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, ένα τέτοιο έργο περιλαμβάνει την εκσκαφή μίας συστάδας υπόγειων θαλάμων χώρων, ο σχεδιασμός των οποίων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, περιλαμβάνοντας επίσης και τα απαραίτητα συνοδά έργα, όπως οι στοές προσπέλασης και οι εκσκαφές που θα χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση του υδροφόρου ορίζοντα (τεχνητό φράγμα νερού) (Nanda, Rath, & Usmani, 2015).

Η γεωμετρία των θαλάμων, αλλά και η μέθοδος εξόρυξης που θα εφαρμοστεί εξαρτάται από τις γεωτεχνικές συνθήκες των σχηματισμών στην εξεταζόμενη περιοχή (Kruck et al., 2013). Η διάταξή τους δύναται να είναι είτε οριζόντια, παρουσιάζοντας τη μορφή σήραγγας είτε κατακόρυφη με την μορφή φρέατος (βλ. Εικόνα 14) (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010).



Εικόνα 14: Αναπαράσταση οριζόντιων (αριστερά) και κατακόρυφων (δεξιά) υπόγειων θαλάμων αποθήκευσης υδρογονανθράκων (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010)

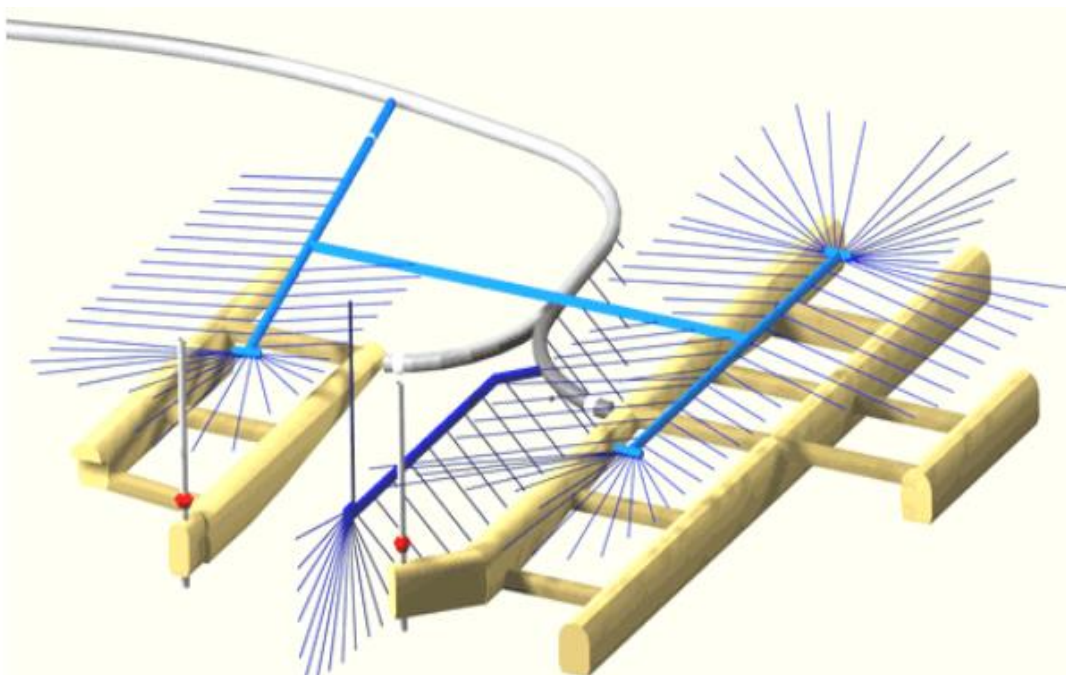
Όπως επισημάνθηκε, θεμελιώδης τεχνική για την διατήρηση των αποθηκευμένων υδρογονανθράκων εντός του ταμιευτήρα είναι ο εγκλωβισμός τους εντός του υπόγειου θαλάμου με την ανάπτυξη ενός υδροδυναμικού φραγμού. Ο υδροδυναμικός φραγμός δημιουργείται αξιοποιώντας τα υπόγεια ύδατα στην περιοχή των εγκαταστάσεων, προχωρώντας σε διαδικασίες ενίσχυσής του, εφόσον απαιτηθεί, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 15 (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010). Πολύ σημαντική παράμετρος προς την επιτυχία αυτού του εγχειρήματος είναι η ύπαρξη σημαντικού ύψους υπερκειμένων, ώστε να αναπτυχθούν υδροστατικές πιέσεις μεγέθους ικανού ώστε να υπερκεράσουν τις εσωτερικές πιέσεις που αναπτύσσονται εντός της δεξαμενής.



Εικόνα 15: Ανάπτυξη υδροδυναμικού φραγμού για την αποθήκευση υδρογονανθράκων (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010)

Κατά την αποθήκευση των υγρών – υγροποιημένων προϊόντων, ένα μέρος του χώρου καλύπτεται και από μία παραγόμενη αέρια φάση, η οποία συσσωρεύεται στο ανώτερο τμήμα του ταμιευτήρα (Τολιά, 2022). Κατά την ανάπτυξη του υδροδυναμικού φράγματος, το νερό, το οποίο έχει μεγαλύτερο ειδικό βάρος από τα προϊόντα υδρογονανθράκων, εμποδίζει την διαφυγή τους, δημιουργώντας υδροστατική πίεση στο εσωτερικό του υπόγειου θαλάμου (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010). Το νερό που ρέει προς τον υπόγειο χώρο θα πρέπει να βρίσκεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 0°C, έτσι ώστε η ροή του, αλλά και κατ' επέκταση η ανάπτυξη του υδροδυναμικού φραγμού, να είναι απρόσκοπτη. Το νερό διαπερνά τα τοιχώματα της δεξαμενής, ρέει προς το δάπεδο αυτής και τελικώς συσσωρεύεται δημιουργώντας ένα στρώμα ύδατος, το ύψος του οποίου ρυθμίζεται μέσα από ειδικό σύστημα αντλιών (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010).

Τέλος, εφόσον ο φυσικός υδροφόρος δεν μπορεί να αναπτύξει τις απαραίτητες πιέσεις για την αποθήκευση των υδρογονανθράκων εντός της μη επενδεδυμένης δεξαμενής, μπορεί να πραγματοποιηθεί ενίσχυση αυτού μέσω συστήματος τεχνητού υδροφόρου ορίζοντα. Το εν λόγω σύστημα περιλαμβάνει την όρυξη διατρήμάτων μεγάλου μήκους και την εισπίεση διαμέσου αυτών ποσότητας νερού, ικανής για την κάλυψη της ανάπτυξης των απαιτούμενων υδροστατικών πιέσεων. Τα διατρήματα αυτά εκκινούν από μικρές σήραγγες, οι οποίες ορύσσονται σε μεγαλύτερο υψομετρικά επίπεδο από τους θαλάμους, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 16 (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010).



*Εικόνα 16: Κατασκευή τεχνητού υδροφόρου ορίζοντα (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010)*

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην ποσότητα νερού που εισπιέζεται διαμέσου των γεωτρήσεων, καθώς υπέρμετρη εισροή νερού θα μπορούσε να προκαλέσει σημαντικές βλάβες στην δεξαμενή, λόγω εκτεταμένης ρωγμάτωσης του περιβάλλοντος πετρώματος (Kruck et al., 2013).

Όσον αφορά στην αποθήκευση υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) σε μη επενδεδυμένους υπόγειους θαλάμους αξίζει να σημειωθεί ότι έχουν διενεργηθεί προσπάθειες, στις οποίες εμφανίστηκε πλήθος προβλημάτων λόγω εκτεταμένης ανάπτυξης συστημάτων ρωγμών λόγω θερμικής καταπόνησης, αλλά και φαινομένων διαφυγής του αερίου στον περιβάλλοντα σχηματισμό (Amantini & Chanfreau, 2004). Η διασφάλιση της ακεραιότητας των υπογείων εκσκαφών σε μη επενδεδυμένες συνθήκες έναντι των ακραίων θερμικών καταπονήσεων που προκαλούνται από το LNG θερμοκρασίας  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$  είναι η όρυξη των

εκσκαφών σε πολύ μεγάλο βάθος, της τάξης των 500 – 1,000 μέτρων, μία λύση ιδιαιτέρως ακριβή (Amantini & Chanfreau, 2004).

#### **2.2.2.6 Αποθήκευση φυσικού αερίου σε επενδεδυμένους υπόγειους θαλάμους (Μέθοδος *Lined Rock Cavern*)**

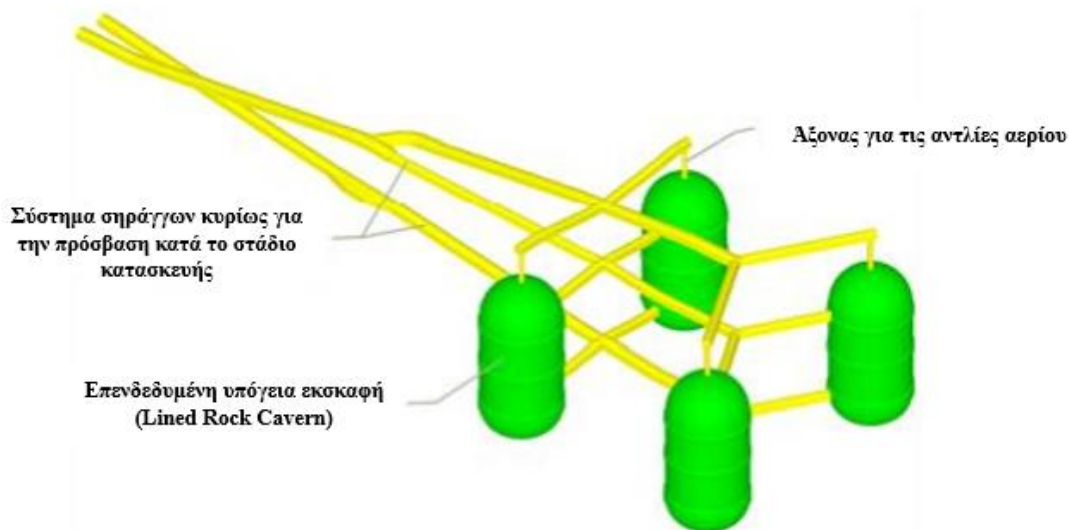
##### **2.2.2.6.1 Βασικά στοιχεία**

Ο συγκεκριμένος τύπος υπόγειου ταμειυτήρα αναπτύχθηκε με σκοπό την εκπλήρωση έργων αποθήκευσης αερίων ή υγροποιημένων αερίων υπό υψηλή πίεση εντός επενδεδυμένων υπόγειων θαλάμων μεγάλων διαστάσεων. Η βασική αρχή της εν λόγω μεθόδου βασίζεται στην πλήρη μεταβίβαση των φορτίων που επιφέρει το αποθηκευμένο προϊόν στο περιβάλλον πέτρωμα διαμέσου των διαφόρων τμημάτων της επένδυσης (Tengborg, Johansson, & Durup, 2014). Ο σχεδιασμός, η κατασκευή αλλά και η ασφαλής λειτουργία του έργου στηρίζονται σε πλείστους παράγοντες, όπως η κατασκευή και η γεωμετρία της δεξαμενής, τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά των περιβαλλόντων σχηματισμών, τα ασκούμενα φορτία κ.α. (Žlender, Jelusič, & Boumezerane, 2011). Όσον αφορά στα τμήματα της επένδυσης των τοιχωμάτων της υπόγειας εκσκαφής, η τελική εσωτερική επένδυση της δεξαμενής τοποθετείται με σκοπό την πλήρη στεγανοποίηση του ταμειυτήρα, ενώ τα σχεδιαστικά της χαρακτηριστικά προσδιορίζονται με γνώμονα την ελαχιστοποίηση της αναλαμβανόμενης εσωτερικής πίεσης του αερίου (Tengborg, Johansson, & Durup, 2014). Επιπλέον, όσο καλύτερα είναι τα μηχανικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος σχηματισμού, τόσο μεγαλύτερη είναι και η εσωτερική πίεση, η οποία δύναται να εφαρμοστεί ασφαλώς στα τοιχώματα της επένδυσης (Johansson et al., 2018).

Σύμφωνα με τους Johansson et al (2018) η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει σημαντικά οικονομικά πλεονεκτήματα, κυρίως σε περιπτώσεις όπου οι υπόγειες εκσκαφές βρίσκονται σε χαμηλό βάθος, ενώ η Geostock (nd) αναφέρει ότι αποτελεί κατάλληλη μέθοδο για την αποθήκευση κρυογενών προϊόντων όπως υγροποιημένο φυσικό αέριο αλλά και αέρια προϊόντα υπό υψηλή πίεση (πχ. Φυσικό αέριο ή υδρογόνο).

Τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του υπογείου ταμειυτήρα υδρογονανθράκων εξαρτώνται πρωτίστως από την ποσότητα προς αποθήκευση. Εν γένει, προτείνεται η κατασκευή κατακόρυφων δεξαμενών (τύπου φρέατος – σιλό) για μικρούς ή μέσους όγκους αποθήκευσης και οριζόντιες σήραγγες για μεγαλύτερες ποσότητες (Geostock, nd). Μία εγκατάσταση αποθήκευσης LNG σε επενδεδυμένους υπόγειους θαλάμους (LRCs) δύναται να αποτελείται από μία ή περισσότερες εκσκαφές, ανάλογα με τις ανάγκες αποθήκευσης, τον διαθέσιμο χώρο,

αλλά και αρκετούς ακόμη παράγοντες, όπως τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά του σχηματισμού στην περιοχή ενδιαφέροντος. Στην Εικόνα 17 δίνεται μία γραφική απεικόνιση της διάταξης μίας υπόγειας εγκατάστασης αποθήκευσης LNG, αποτελούμενη από μία συστάδα από LRCs.



Εικόνα 17: Τυπική διάταξη επενδεδυμένων υπογείων θαλάμων αποθήκευσης LNG στον χώρο (Μεταφρασμένη εικόνα) (Tengborg, Johansson, & Durup, 2014)

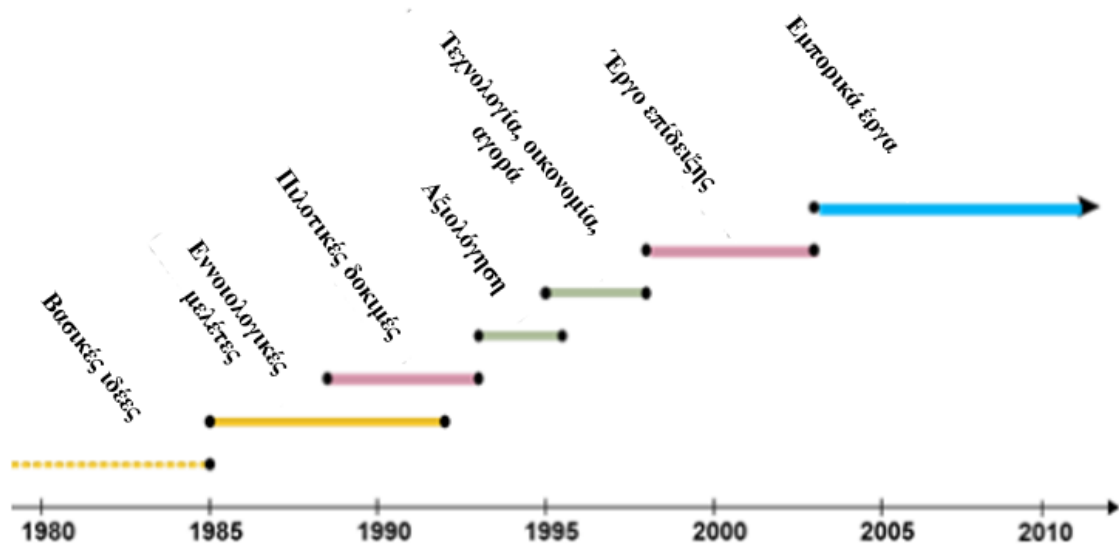
Οι τυπικές διαστάσεις ενός συμβατικού κατακόρυφου LRC είναι οι εξής (Tengborg, Johansson, & Durup, 2014):

**Πίνακας 3: Τυπικές διαστάσεις κατακόρυφου LRC (Tengborg, Johansson, & Durup, 2014)**

Διάσταση	Τιμή	Μονάδες
Διάμετρος	35 - 45	m
Ύψος	60 - 100	m

Η ιδέα για την ανάπτυξη των LRCs (Lined Rock Caverns) γεννήθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 στην Σουηδία και πέρασε από αρκετά χρονοβόρα στάδια, έτσι ώστε να ωριμάσει και να καταλήξει να αποτελεί μία ενδεδειγμένη και αποτελεσματική μέθοδο αποθήκευσης υγροποιημένων και μη αερίων. Στην ακόλουθη Εικόνα παρουσιάζεται το χρονικό πλαίσιο που ακολούθησε η ιδέα της εν λόγω μεθόδου μέχρι την εδραίωσή της στην πλέον αξιόπιστες λύσεις.



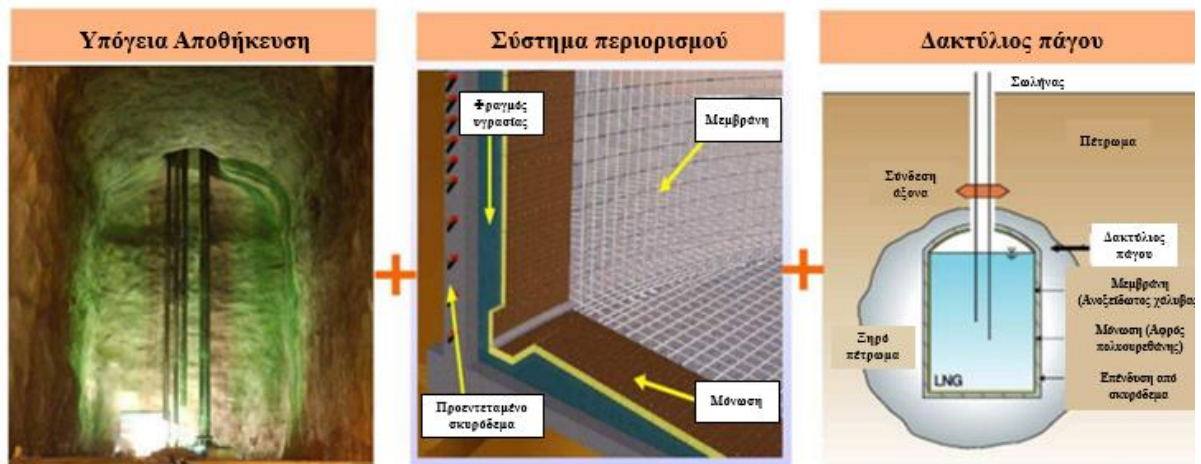


Εικόνα 18: Στάδια ανάπτυξης ιδέας LRC (Μεταφρασμένη εικόνα) (Tengborg, Johansson, & Durup, 2014)

Μία εξαιρετικά καινοτόμος πιλοτική μονάδα αποθήκευσης LNG σε επενδεδυμένα υπόγεια ανοίγματα, η οποία έθεσε τις βάσεις για την διεύρυνση των τεχνολογικών οριζόντων των LRCs, αναπτύχθηκε διαμέσου της σύμπραξης των εταιρειών Geostock, SKEC και SN Technigaz, αλλά και του Ινστιτούτου Γεωφυσικής και Ορυκτών Πόρων της Κορέας (KIGAM) το 2003 στην πόλη της Daejeon της Νότιας Κορέας (Park et al., 2012). Η συγκεκριμένη μονάδα λειτούργησε για ένα χρόνο, από τον Ιανουάριο του 2004 έως το τέλος του συγκεκριμένου χρόνου και επιλέχθηκε το υγρό άζωτο, του οποίου η θερμοκρασία βρασμού είναι στους  $-196^{\circ}\text{C}$ , ως το προϊόν που θα χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες της δοκιμής της πιλοτικής μονάδας αποθήκευσης (Park et al., 2012).

#### 2.2.2.6.2 Θεμελιώδεις αρχές μεθόδου Lined Rock Cavern (LRC)

Η τεχνολογία αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) στο συγκεκριμένο τύπο υπόγειου χώρου αποθήκευσης (LRC) αποτελεί ένα συνδυασμό τριών διαφορετικών παλαιών και νέων τεχνολογιών – συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Park et al. (2012), η βασική ιδέα στηρίζεται στην αξιοποίηση της τεχνογνωσίας που έχει αναπτυχθεί με το πέρασμα των χρόνων στην τεχνολογία εκσκαφής υπόγειων θαλάμων μεγάλων διαστάσεων, στην ύπαρξη ενός συστήματος περιορισμού του εσωτερικού χώρου, το οποίο μπορεί να απαρτίζεται από πληθώρα στρωμάτων και στην τεχνολογία του σχηματισμού του δακτυλίου πάγου γύρω από την εκσκαφή. Στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται γραφικά ο προαναφερθέν συνδυασμός των τριών τεχνικών προς την ασφαλή αποθήκευση LNG σε μεγάλες υπόγειες εκσκαφές.



Εικόνα 19: Συνδυασμός τριών βασικών τεχνολογιών για την ανάπτυξη της μεθόδου LRC (Μεταφρασμένη εικόνα) (Park et al., 2012)

Όσον αφορά στην τεχνολογία ανάπτυξης υπόγειων εκσκαφών μεγάλων διαστάσεων, τις τελευταίες δεκαετίες γνώρισε ιδιαίτερη άνθιση, κυρίως λόγω της ανάγκης εύρεσης διαθέσιμων εκτάσεων για την ανάπτυξη εγκαταστάσεων και υπηρεσιών που υπό τις συμβατικές συνθήκες δεν εντοπίζονται υπόγεια. Παραδείγματα χωρών – αρωγών αυτής της προσπάθειας αποτελούν το Χονγκ – Κονγκ (Wallace, 2013) και η Νορβηγία (Einar, 2016), με ορισμένες από τις τυπικές εφαρμογές των υπόγειων θαλάμων να είναι οι εξής:

- Αποθήκευση προϊόντων όπως υδρογονάνθρακες, τρόφιμα, πόσιμο νερό
- Εγκαταστάσεις διαχείρισης αποβλήτων
- Στέγαση
- Εγκαταστάσεις άθλησης, αναψυχής και πάρκινγκ
- Καταφύγια έκτακτης ανάγκης
- Εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας και συστημάτων τηλεπικοινωνιών
- Εργαστήρια κ.α.

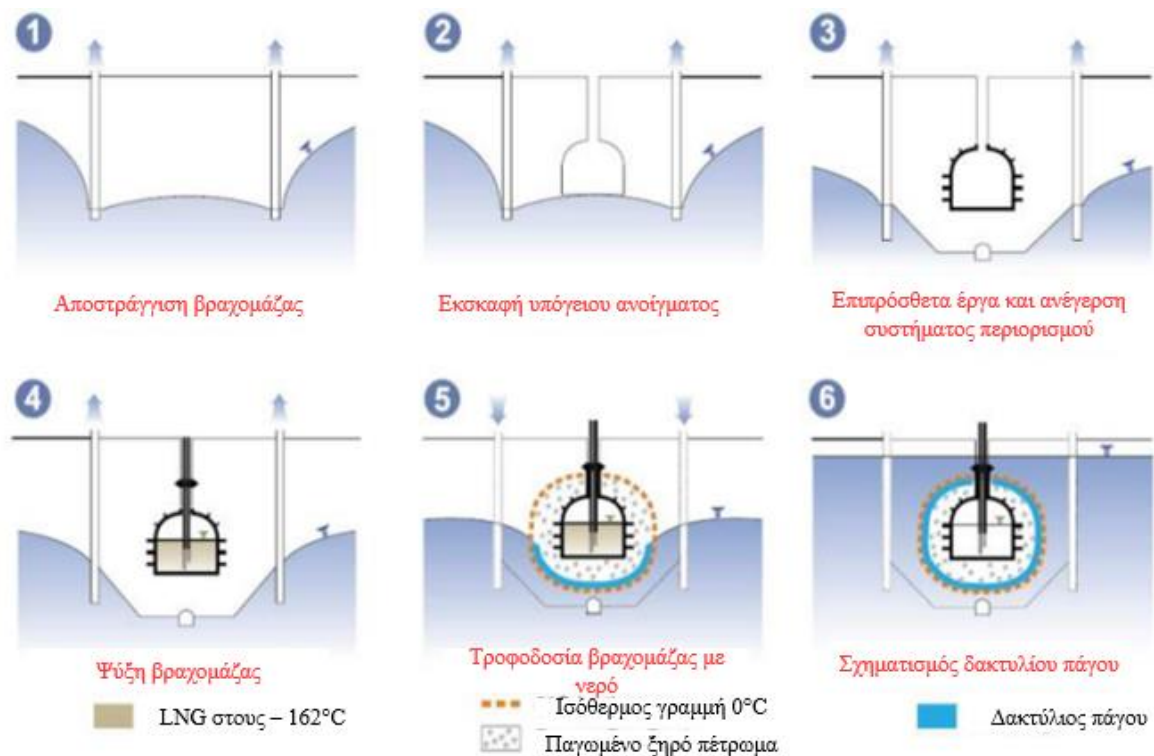
Ιδιαίτερη αναφορά θα πρέπει να γίνει στην αναγκαιότητα μετάβασης από τις υπέργειες – υπαίθριες εγκαταστάσεις προς τον υπόγειο χώρο, λόγω της συνεχούς μείωσης του διαθέσιμου χώρου στην επιφάνεια του εδάφους αλλά και λόγω σημαντικών πλεονεκτημάτων που ενέχει η επιλογή ανάπτυξης υπόγειων εγκαταστάσεων. Πιο συγκεκριμένα, τα βασικά πλεονεκτήματα συνοψίζονται παρακάτω:

- Υψηλά επίπεδα ασφαλείας
- Υψηλά επίπεδα σταθερότητας εξωγενών και γεωτεχνικών συνθηκών
- Αποφυγή σημαντικών κοινωνικών αναταράξεων

Το τελευταίο προτέρημα που αναφέρθηκε ανωτέρω κρίνεται ως ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς αντίστοιχες εγκαταστάσεις που εδράζονται στην επιφάνεια παρουσιάζουν μεγαλύτερες πιθανότητες να προκαλέσουν την κοινωνική δυσφορία.

Το σύστημα περιορισμού του προϊόντος προς αποθήκευση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία στον συγκεκριμένο τύπο ταμιευτήρα υδρογονανθράκων. Σημαντικότερη δράση του αποτελεί η ασφαλής μεταβίβαση του φορτίου των εσωτερικών πιέσεων στον περιβάλλοντα σχηματισμό αλλά και η διατήρηση όσο το δυνατόν πιο σταθερών, βέλτιστων για το εκάστοτε προϊόν συνθηκών αποθήκευσης. Όσον αφορά στην αποθήκευση LNG, θεμελιώδης λειτουργία του συστήματος περιορισμού αποτελεί η θερμική προστασία του υγροποιημένου φυσικού αερίου, λόγω του εξαιρετικά χαμηλού σημείου βρασμού του (-162°C).

Η ανάπτυξη ενός δακτυλίου πάγου γύρω από την υπόγεια επενδεδυμένη αποθήκη LNG αποτελεί ένα πολύ σημαντικό δεύτερο φραγμό έναντι διαρροών αερίου (Park et al., 2012). Στην Εικόνα 20 παρουσιάζονται τα βήματα σχηματισμού του εν λόγω δακτυλίου γύρω από την εκσκαφή.



Εικόνα 20: Βήματα ανάπτυξης δακτυλίου πάγου γύρω από την εκσκαφή (Μεταφρασμένη εικόνα) (Park et al., 2012)

Σύμφωνα με την διαγραμματική αναπαράσταση των βημάτων σχηματισμού της απαιτούμενης παγωμένης ζώνης (βλ. Εικόνα 20), τα βασικά στάδια της εν λόγω διαδικασίας είναι τα εξής:

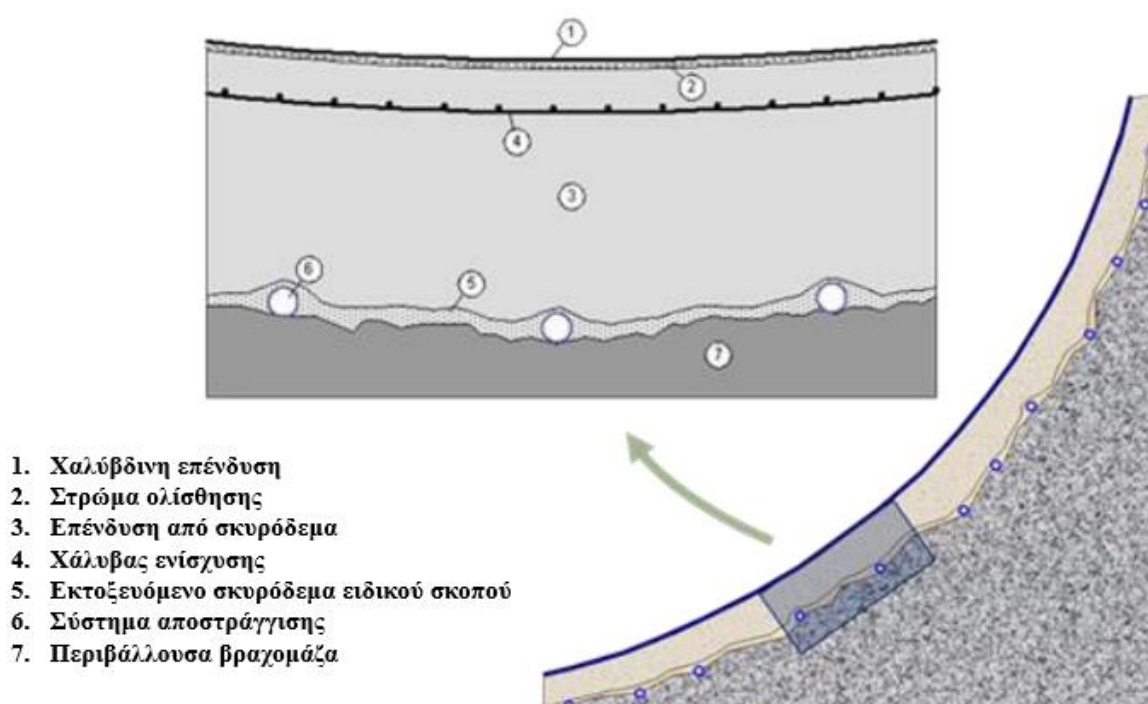
- **Στάδιο 1<sup>ο</sup>**: Σημαντική καταβίβαση της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Η εν λόγω διαδικασία επιτυγχάνεται αποστραγγίζοντας προσωρινά τον σχηματισμό στην περιοχή ανάπτυξης του έργου. Η ενέργεια αυτή αποσκοπεί τόσο στην μείωση της πίεσης πόρων που αναπτύσσεται στον περιβάλλοντα σχηματισμό, όσο και στην αποφυγή ανάπτυξης πάγου πίσω από το τμήμα της επένδυσης της εκσκαφής που θα τοποθετηθεί σε επόμενο στάδιο της διαδικασίας (Park et al., 2012).
- **Στάδιο 2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup>**: Πλήρης όρυξη της δεξαμενής και τοποθέτηση των διαφόρων τμημάτων της επένδυσης.
- **Στάδιο 4<sup>ο</sup>**: Τροφοδοσία της δεξαμενής με LNG. Η εν λόγω διαδικασία ψύχει σημαντικά τον περιβάλλοντα σχηματισμό
- **Στάδιο 5<sup>ο</sup>**: Μόλις η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου μειωθεί σημαντικά και σε επιθυμητή απόσταση από τα τοιχώματα του θαλάμου τότε σταματά η αποστράγγιση της βραχώμαζας και η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα επανέρχεται σταδιακά σε φυσιολογικά επίπεδα.
- **Στάδιο 6<sup>ο</sup>**: Η ανερχόμενη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα συμβάλλει στον σχηματισμό ενός στρώματος πάγου, σημαντικού πάχους, γύρω από την επενδεδυμένη δεξαμενή (Park et al., 2012). Το απαιτούμενο πάχος του παγωμένου δακτυλίου πετρώματος για τη διατήρηση της εξωτερικής πίεσης πόρων κυμαίνεται περί τα 1 έως 2 m, ανάλογα με τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντα σχηματισμού (Amantini & Chanfreau, 2004).

Τέλος, αξίζει να αναφερθούν οι βασικοί στόχοι που συνδυαστικά οδηγούν στην ενίσχυση της απόδοσης ενός έργου αποθήκευσης φυσικού αερίου σε ένα LRC και οι οποίοι συνοψίζονται παρακάτω (Žlender, Jelušič, & Boumezerane, 2011):

1. Ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους κατασκευής και λειτουργίας ανά μονάδα όγκου του αποθηκευμένου αερίου.
2. Εξασφάλιση ασφάλειας έναντι όλων των δυνητικών κινδύνων που δύνανται να ανακύψουν κατά την κατασκευή ή λειτουργία του έργου.
3. Βελτιστοποίηση σημαντικών σχεδιαστικών παραμέτρων του έργου, όπως η εσωτερική πίεση του αερίου, το βάθος έδρασης, το ύψος και η εσωτερική διάμετρος της εκσκαφής και το πάχος του σκυροδέματος της εσωτερικής επένδυσης.

### 2.2.2.6.3 Εσωτερική επένδυση LRC

Η εσωτερική επένδυση των υπογείων θαλάμων στις περιπτώσεις αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου αποτελεί πιθανότατα το σημαντικότερο τμήμα κατά το σχεδιασμό ενός LRC. Ως εκ τούτου, απαραίτητο κρίνεται να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή κατά τη διαστασιολόγηση και την επιλογή των στρωμάτων της επένδυσης των τοιχωμάτων του υπόγειου χώρου, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η πλήρης και ασφαλής μεταβίβαση των φορτίων του υπό πίεση αποθηκευμένου αερίου στο περιβάλλοντα σχηματισμό (Tengborg, Johansson, & Durup, 2014). Στην Εικόνα 21 παρουσιάζονται τα διαφορετικά τμήματα του τοιχώματος μίας επενδεδυμένης υπόγειας εκσκαφής μέσα από μία τυπική τομή του εσωτερικού της τμήματος.



Εικόνα 21: Τμήματα τοιχώματος Lined Rock Cavern (LRC) (Μεταφρασμένη εικόνα) (Tengborg, Johansson, & Durup, 2014)

Κάθε τμήμα του τοιχώματος επιτελεί τη δική του σημαντική λειτουργία, συνεισφέροντας τελικώς στην επίτευξη του εγχειρήματος της ασφαλούς αποθήκευσης του προϊόντος εντός της υπόγειας δεξαμενής. Τα επιμέρους τμήματα της εσωτερικής επένδυσης, τα χαρακτηριστικά και οι λειτουργίες τους αναλύονται εκτενώς στις ακόλουθες παραγράφους.

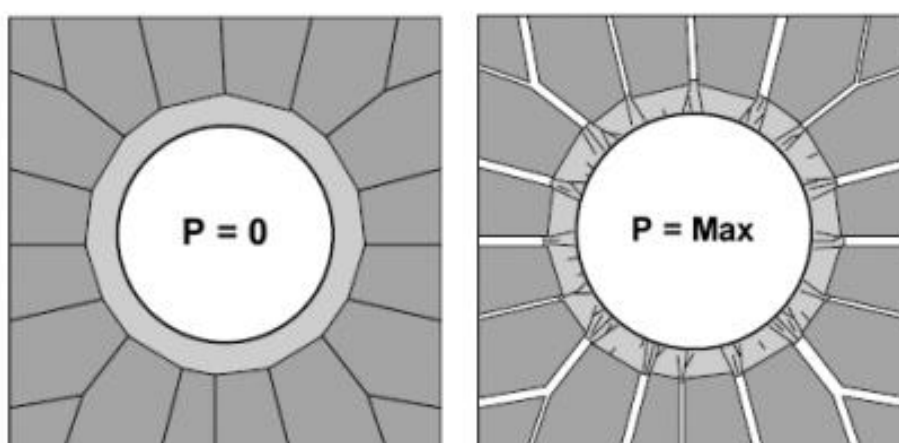
#### Χαλύβδινη επένδυση

Το πρώτο στρώμα του τοιχώματος από το εσωτερικό προς το εξωτερικό τμήμα της εκσκαφής είναι η χαλύβδινη επένδυση. Το στρώμα αυτό κατασκευάζεται από χαλύβδινες πλάκες πάχους 12-15 mm και ο σκοπός τοποθέτησής του είναι η πλήρης στεγανοποίηση του

υπογείου θαλάμου (Jelušič, Kravanja, & Žlender, 2018 ; Johansson J. , 2003). Σύμφωνα με την Geostock (n.d.), το πάχος της χαλύβδινης μεμβράνης θα πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένο ώστε να είναι εφικτό να δεχτεί την παραμόρφωση της βραχομάζας που προκύπτει από τις σχετικά μεγάλες διακυμάνσεις πίεσης εντός της εκσκαφής, αλλά και να ανθίσταται σε φαινόμενα κόπωσης που προκαλούνται από τους συνεχείς κύκλους λειτουργίας της δεξαμενής. Τέλος, η μεταλλική επένδυση και οι πιθανές προσμίξεις της θα πρέπει να είναι χημικά μη δραστικές με το αποθηκευμένο αέριο και τον περιβάλλοντα σχηματισμό (Sofregaz US Inc. & LRC, 1999).

Το εν λόγω τμήμα της επένδυσης πρέπει να σχεδιάζεται ώστε να μην αναλαμβάνει εσωτερικά φορτία, καθώς αυτά μεταβιβάζονται μέσω του σκυροδέματος στο περιβάλλοντα σχηματισμό (Mansson & Marion, n.d.). Η μέγιστη πίεση λειτουργίας της δεξαμενής καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της επένδυσης και τις γεωλογικές συνθήκες (Mansson & Marion, n.d.). Ωστόσο, η ασκούμενη από το αποθηκευμένο προϊόν εσωτερική πίεση θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την εξωτερική υδροστατική πίεση στο βάθος έδρασης του υπογείου θαλάμου (Jelušič, Kravanja, & Žlender, 2018).

Μία ακόμη σημαντική δράση του στρώματος αποτελεί η γεφύρωση μικρών ρωγμών που εντοπίζονται στην επιφάνεια του σκυροδέματος (Mansson & Marion, n.d.). Ωστόσο, με την αύξηση της εσωτερικής πίεσης παρατηρείται διεύρυνση διακλάσεων και ρωγμών που προϋπάρχουν στην βραχομάζα, οι οποίες επεκτείνονται δημιουργώντας μικρότερες ρωγμές εντός του στρώματος του σκυροδέματος (βλ. Εικόνα 22) (Sofregaz US Inc. & LRC, 1999).



Εικόνα 22: Διεύρυνση των συστημάτων διακλάσεων και ρωγμών κατά την φάση λειτουργίας του έργου (Sofregaz US Inc. & LRC, 1999)

## **Στρώμα ολίσθησης**

Το εν λόγω μικρού πάχους στρώμα τοποθετείται μεταξύ της μεταλλικής επένδυσης και του σκυροδέματος με σκοπό την μείωση των τριβών που αναπτύσσονται μεταξύ αυτών των δύο στρωμάτων (Johansson et al., 2018). Δευτερεύον στόχος του στρώματος είναι η προστασία του χάλυβα της εσωτερικής επένδυσης έναντι διάβρωσης, αλλά και η σφράγιση του σκυροδέματος, συνεισφέροντας στην παρεμπόδιση διαφυγής αερίου σε περιπτώσεις δυνητικής εμφάνισης διαρροών στην δεξαμενή (Johansson et al., 2018 ; Johansson J. , 2003).

Συνηθέστερα, το εν λόγω στρώμα κατασκευάζεται από στερεά προϊόντα υδρογονανθράκων (πίσσα), ενώ τα λειτουργικά του χαρακτηριστικά δύνανται να ενισχυθούν με την τοποθέτηση γεωυφάσματος, εφόσον απαιτείται (Johansson, 2003).

Τέλος αξίζει να σημειωθεί, ότι σε ορισμένες περιπτώσεις μεταξύ μεταλλικής επένδυσης και σκυροδέματος μπορεί να παρεμβάλλεται ένα στρώμα από αφρό συνθετικού υλικού (πχ. Πολυουρεθάνης), έτσι ώστε να ενισχύεται η αντοχή της βραχομάζας γύρω από την εκσκαφή έναντι θερμικής καταπόνησης (Geostock, n.d.).

## **Επένδυση από οπλισμένο σκυρόδεμα**

Μετά τα πρώτα δύο στρώματα της επένδυσης εντοπίζεται ένα στρώμα μεγάλου πάχους κατασκευασμένο από σκυρόδεμα. Βασική λειτουργία του εν λόγω στρώματος είναι η ομοιόμορφη μεταβίβαση των φορτίων που ασκούνται από το αποθηκευμένο προϊόν στον περιβάλλοντα σχηματισμό (Johansson et al., 2018).

Όσο ισχυρότερες είναι οι εσωτερικές πιέσεις που αναμένονται εντός του χώρου, τόσο μεγαλύτερο πάχος δίνεται στο συγκεκριμένο στρώμα (Žlender, Jelušič, & Boumezerane, 2011). Πιο συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις που αναμένονται ισχυρές εσωτερικές πιέσεις (κυρίως κατά την αποθήκευση αέριων προϊόντων), στο στρώμα σκυροδέματος δύναται να δοθεί πάχος που να ξεπερνά τα 2 m (Jelušič, Kravanja, & Žlender, 2018). Στις περιπτώσεις αποθήκευσης προϊόντων υπό χαμηλότερες πιέσεις (πχ. Υγροποιημένο φυσικό αέριο) το πάχος του σκυροδέματος είναι σημαντικά μικρότερο.

Το εν λόγω στρώμα ενισχύεται μέσω οπλισμού, ο οποίος συνήθως αποτελείται από συγκολλημένο μεταλλικό πλέγμα. Ο βασικός στόχος της τοποθέτησης ενίσχυσης είναι η αποφυγή εκτεταμένης ρωγμάτωσης του σκυροδέματος, μέσα από την κατανομή των παραμορφώσεων σε πολλές μικρότερες ρωγμές (Johansson et al., 2018).

### **Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ειδικού σκοπού**

Μεταξύ του πετρώματος και του στρώματος του έγκυτου σκυροδέματος παρεμβάλλεται ένα στρώμα εκτοξευόμενου σκυροδέματος, το οποίο έχει πάχος περί τα 40 mm (Park et al., 2012). Το στρώμα αυτό αποτελείται από ένα χαμηλής ποιότητας διαπερατό υλικό, το οποίο έχει ως βασικούς στόχους την:

1. Προστασία του συστήματος αποστράγγισης, επιτρέποντας στο νερό να οδηγηθεί προς τους σωλήνες αποστράγγισης, και
2. Απομείωση της αλληλοεμπλοκής του περιβάλλοντος πετρώματος με το έγκυτο σκυρόδεμα (Johansson et al., 2018).

### **Σύστημα αποστράγγισης**

Το σύστημα αποστράγγισης απαρτίζεται από διάτρητους σωλήνες, οι οποίοι κατανέμονται στην περιφέρεια του θαλάμου (Johansson et al., 2018). Ο ρόλος του εν λόγω συστήματος είναι διτός. Πιο συγκεκριμένα, οι διάχυτοι σωλήνες χρησιμοποιούνται τόσο για τη μείωση της υδροστρατικής πίεσης που ασκείται στην μεταλλική επένδυση, κατά τα στάδια όπου η εσωτερική πίεση του αερίου στην εγκατάσταση είναι χαμηλή, ενώ αποτελούν μέρος του συστήματος παρακολούθησης έναντι δυνητικών διαρροών αερίου από την δεξαμενή (Johansson et al., 2018 ; Žlender, Jelušič, & Boumezerane, 2011). Σύμφωνα με τους Johansson et al. (2018) στο σύστημα αποστράγγισης δεν πρέπει να κυκλοφορεί νερό υπό κανονικές συνθήκες, παρά μόνο να ενεργοποιείται υπό συνθήκες διαρροής αερίου, συμβάλλοντας στην αποφυγή φαινομένων χημικής ή βιολογικής έμφραξης.

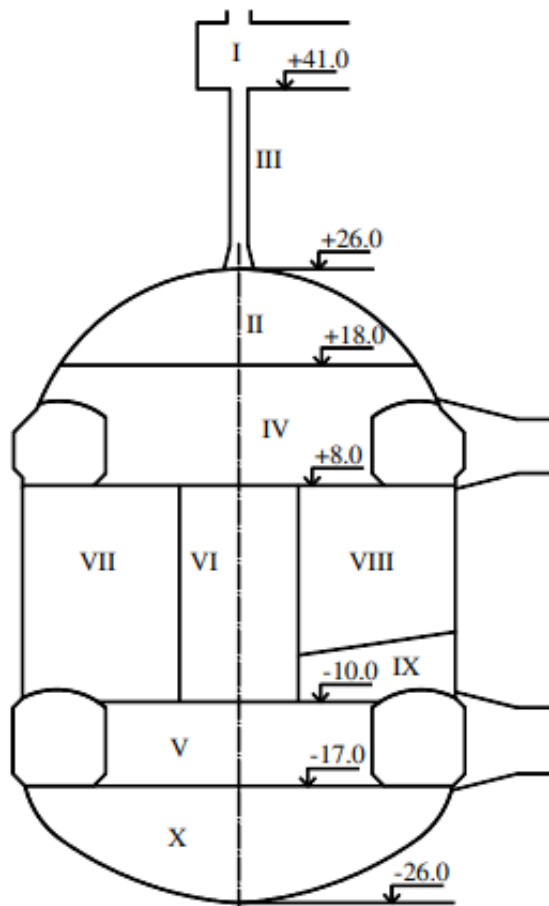
### **Περιβάλλουσα βραχομάζα**

Ο περιβάλλοντας σχηματισμός και τα γεωμηχανικά του χαρακτηριστικά αποτελούν πολύ κρίσιμες παραμέτρους για τον σχεδιασμό των LRCs. Η βραχομάζα καλείται να αναλάβει το σύνολο της πίεσης που ασκεί το αποθηκευμένο αέριο εντός της δεξαμενής, το οποίο παραλαμβάνεται διαμέσου του στρώματος του σκυροδέματος. Όπως γίνεται κατανοητό, οι παραμορφώσεις που δυνητικά αναπτυχθούν στον περιβάλλοντα σχηματισμό επηρεάζονται και από την παρουσία συστημάτων ασυνεχειών, ζώνες μειωμένης αντοχής αλλά και από τις επί τόπου ασκούμενες τάσεις πεδίου (Johansson et al., 2018).



#### 2.2.2.6.4 Βήματα κατασκευής και επένδυσης εκσκαφών

Για την αποθήκευση LNG σε υπόγειους θαλάμους μεγάλων διαστάσεων διανοίγονται, συνήθως, κατακόρυφες εκσκαφές μορφής φρέατος. Κάθε εκσκαφή αποτελείται από δύο (2) ημικυκλικά τμήματα (μορφής τρούλου) στο ανώτερο και κατώτερο τμήμα αντίστοιχα και ένα κεντρικό κυλινδρικό τμήμα. Η εκσκαφή πραγματοποιείται τμηματικά από το ανώτερο προς το κατώτερο μέρος της δεξαμενής. Τυπική διατομή αυτής της τμηματικής εκσκαφής παρουσιάζεται στην Εικόνα 23.



Εικόνα 23: Τυπική μορφή τμηματικής εκσκαφής LRC (Glamheden & Curtis, 2005)

Η κατασκευή της επένδυσης των τοιχωμάτων της εκσκαφής δύναται να κατηγοριοποιηθεί στα εξής βασικά βήματα (Tengborg, Johansson, & Durup, 2014):

- **Βήμα 1<sup>ο</sup>:** Ανέγερση, συναρμολόγηση και συγκόλληση της μεταλλικής επένδυσης στο κατώτερο τμήμα της δεξαμενής.
- **Βήμα 2<sup>ο</sup>:** Σκυροδέτηση του κατώτερου ημισφαιρικού τμήματος της δεξαμενής.

- **Βήμα 3<sup>ο</sup>:** Ανέγερση, συναρμολόγηση και συγκόλληση της μεταλλικής επένδυσης της οροφής της δεξαμενής.
- **Βήμα 4<sup>ο</sup>:** Ανέγερση, συναρμολόγηση και συγκόλληση της μεταλλικής επένδυσης του κεντρικού κυλινδρικού τμήματος της δεξαμενής.
- **Βήμα 5<sup>ο</sup>:** Σκυροδέτηση του υπόλοιπου τμήματος της δεξαμενής.

## **Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Σχεδιασμός έργου υπόγειας αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου**

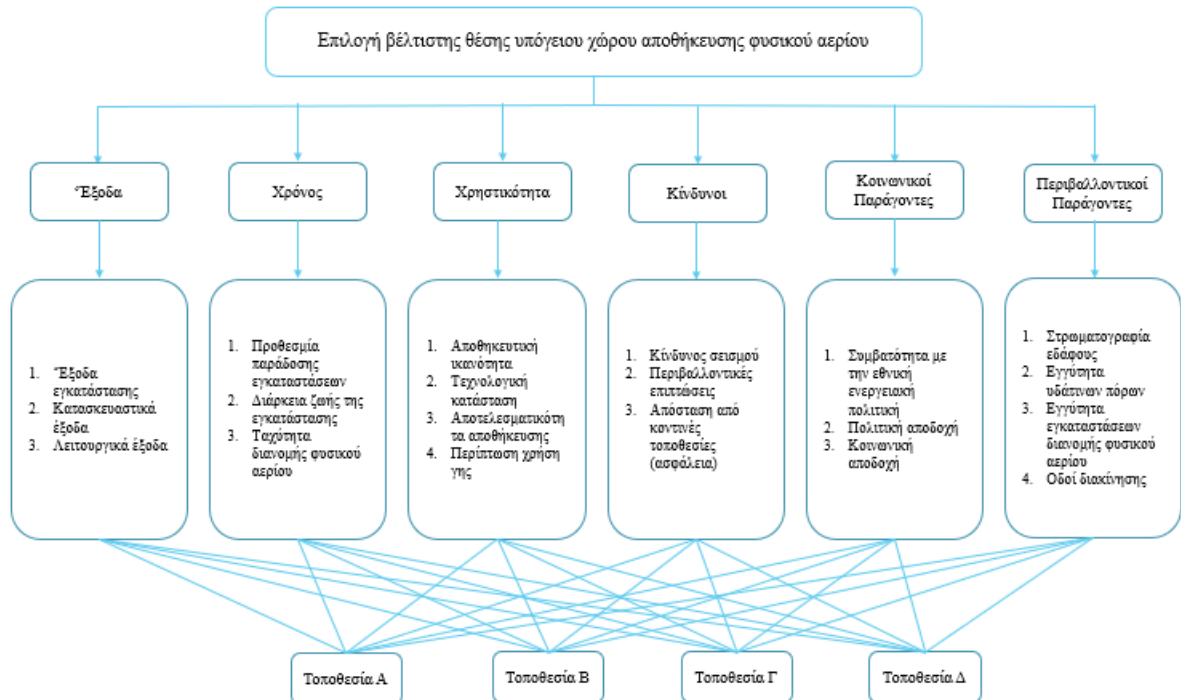
### **3.1 Γενικά**

Η επιλογή των κατάλληλων σχεδιαστικών παραμέτρων είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για την ασφαλή κατασκευή και λειτουργία ενός έργου αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου. Καθοριστικό ρόλο στην τελική επιλογή της θέσης εγκατάστασης του έργου παίζουν τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντα σχηματισμού.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα σχεδιασμού ενός υπόγειου έργου αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου στον ελλαδικό χώρο. Ο σχεδιασμός αυτός βασίζεται στην εμπειρία που έχει αποκτηθεί από την ανάπτυξη αντίστοιχων έργων τις τελευταίες δεκαετίες σε διεθνές επίπεδο και στις υφιστάμενες συνθήκες που επικρατούν σε εγχώριο επίπεδο, όπως αυτές διαμορφώνονται από τις υπάρχουσες υποδομές. Επιπλέον, η θέση κατασκευής του εν λόγω έργου επιλέγεται ώστε να είναι εφικτή η άμεση σύνδεσή του με το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου. Αξίζει δε να σημειωθεί, ότι η ανάπτυξη ενός έργου της συγκεκριμένης εμβέλειας και σημαντικότητας, το οποίο θα ενίσχυε σε πολύ μεγάλο βαθμό την υφιστάμενη αποθηκευτική ικανότητα σε LNG, θα προσέφερε ακόμη μεγαλύτερη ενεργειακή ασφάλεια στην χώρα, ενώ επίσης θα ενίσχυε και τη θέση της Ελλάδας στο διεθνές εμπόριο φυσικού αερίου.

Εν γένει, η επιλογή της θέσης ενός χώρου υπόγειας αποθήκευσης φυσικού αερίου καθορίζεται από πλήθος παραγόντων, τα οποία εμφανίζουν παραπλήσια βαρύτητα. Για την αυτοματοποίηση του προσδιορισμού της καταλληλότερης θέσης για την ανάπτυξη ενός έργου υπόγειας αποθήκευσης φυσικού αερίου έχουν αναπτυχθεί ειδικοί αλγόριθμοι ή έχουν χρησιμοποιηθεί υφιστάμενα μαθηματικά εργαλεία, όπως το ολοκλήρωμα Choquet, τα οποία βοηθούν στον καθορισμό της βέλτιστης θέσης μεταξύ συγκεκριμένων επιλογών, σε περιπτώσεις που η άμεση διάκριση είναι αρκετά ασαφής. Οι Demirel N. et al. (2009) κατάφεραν με επιτυχία να χρησιμοποιήσουν το ολοκλήρωμα Choquet για τον καθορισμό της

βέλτιστης θέσης κατασκευής ενός υπόγειου χώρου αποθήκευσης LNG στην Τουρκία, λαμβάνοντας υπόψη πλήθος σημαντικών παραμέτρων, οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 24.



Εικόνα 24: Μεθοδολογία εφαρμογής ολοκληρώματος Choquet για τον προσδιορισμό της βέλτιστης θέσης κατασκευής υπόγειου χώρου αποθήκευσης φυσικού αερίου (Demirel et al, 2017)

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τον σχεδιασμό έργου υπόγειας αποθήκευσης υδροποιημένου φυσικού αερίου σε μικρή απόσταση από το υφιστάμενο έργο της νήσου «Ρεβυθούσας». Στην συγκεκριμένη θέση φιλοξενείται ο μεγαλύτερος τερματικός σταθμός υποδοχής LNG στην Ελλάδα. Η επιλογή της εν λόγω θέσης είναι εξαιρετικά ευνοϊκή για την άμεση διακίνηση φορτίων υδροποιημένου φυσικού αερίου.

Οι υφιστάμενες εγκαταστάσεις του τερματικού σταθμού της Ρεβυθούσας (βλ. Εικόνα 25) διαθέτουν αποθηκευτική ικανότητα σε υδροποιημένο φυσικό αέριο που αγγίζει τα 225,000 m<sup>3</sup>, με τον σταθμό να τροφοδοτεί το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φ.Α. με 5.2 – 5.3 δις m<sup>3</sup> φυσικού αερίου ετησίως (ΔΕΣΦΑ, 2013).

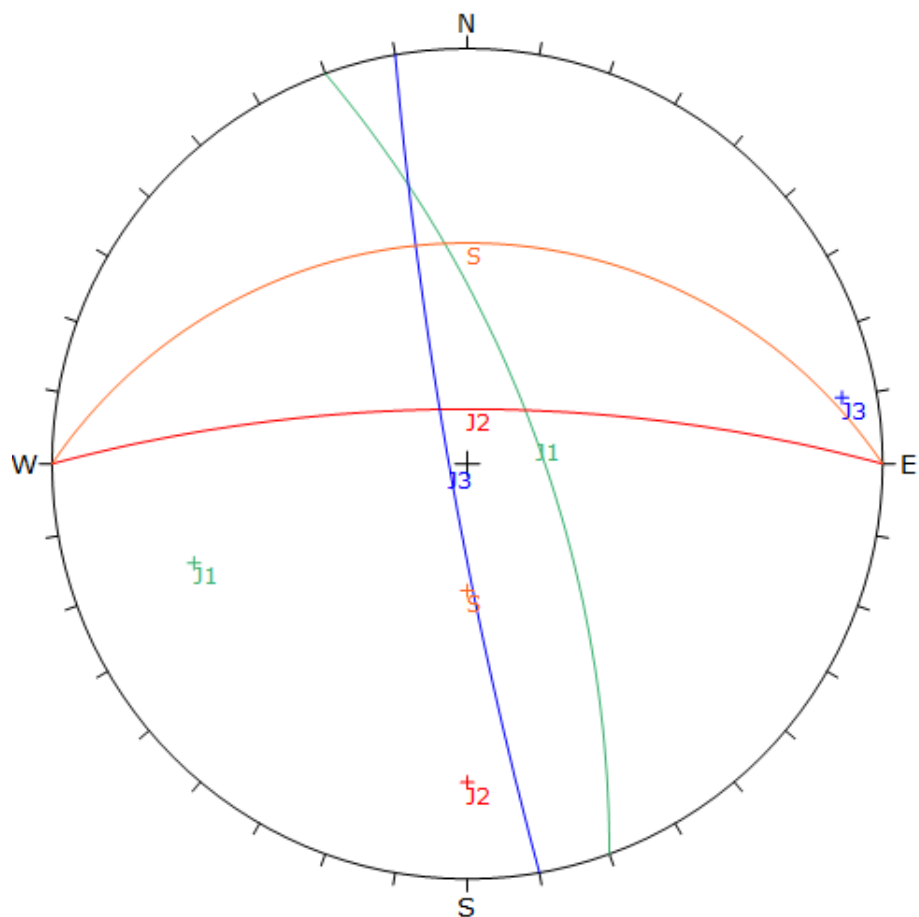


Εικόνα 25: Τερματικός σταθμός υγροποιημένου φυσικού αερίου Ρεβυθούσας (ΔΕΣΦΑ, 2013)

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας γίνεται χρήση υφιστάμενης γεωλογικής – γεωτεχνικής αξιολόγησης των συνθηκών στην ευρύτερη περιοχή του Περάματος, με την εύλογη θεώρηση του ομοιογενούς χαρακτήρα των σχηματισμών στην ευρύτερη περιοχή του προς κατασκευή έργου. Αρχικά, η γεωλογία της περιοχής του έργου, ενταγμένη στην ευρύτερη περιοχή του Περάματος, αποτελείται γεωλογικά από ασβεστόλιθο, ο οποίος τοποθετείται χρονολογικά στην Μέση – Ανώτερη Τριαδική περίοδο, με παράταξη Α-Δ και κλίση  $28^{\circ}$  –  $40^{\circ}$  Δ (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010). Ο σχηματισμός εμφανίζεται μέσο έως παχυστρωματώδης, με το πάχος του να φτάνει τα 150 – 200 m. Η περιοχή του Περάματος επηρεάζεται τεκτονικά από τρία κύρια συστήματα κανονικών ρηγμάτων με διευθύνσεις Α-Δ, ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ, αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, τα κύρια συστήματα ασυνεχειών, τα οποία διακρίνονται στο σύνολο της εξεταζόμενης περιοχής είναι τρία (3) με πυκνότητα που ποικίλει από 1 έως 3 διακλάσεις ανά m και είναι τα παρακάτω:

- J1: 70/070
- J2: 75/360
- J3: 85/260

Θεωρώντας μία μέση κλίση στρώσης για τον σχηματισμό του ασβεστολίθου ίση με  $34^{\circ}$ , στην Εικόνα 26 τοποθετούνται σε κοινό τεκτονικό διάγραμμα τα τρία κύρια συστήματα διακλάσεων, καθώς και η στρώση του σχηματισμού, θεωρώντας τα ως τα συστήματα ασυνεχειών με την μεγαλύτερη επίδραση στις γεωτεχνικές συνθήκες της περιοχής.



Εικόνα 26: Τεκτονικό διάγραμμα κύριων συστημάτων ασυνεχειών περιοχής Περάματος

Όσον αφορά στις υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή, οι σχηματισμοί εμφανίζουν υψηλή περατότητα, με εμφάνιση έντονης καρστικοποίησης (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010).

Σύμφωνα με τα δεδομένα της γεωτεχνικής αξιολόγησης που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της κατασκευής της σήραγγας Ικονίου, προέκυψαν τα παρακάτω εύρη και οι προτεινόμενες χαρακτηριστικές τιμές των βασικών γεωμηχανικών παραμέτρων του ασβεστολίθου στην εξεταζόμενη περιοχή (Πίνακες 4 και 5).

**Πίνακας 4: Εύρη τιμών βασικών γεωμηχανικών χαρακτηριστικών ασβεστολίθου στην υπό εξέταση περιοχή (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010)**

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Ειδικό βάρος πετρώματος	2.6 – 2.8	g/cm <sup>3</sup>
Μέση τιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη	29 - 87	MPa
Μέση τιμή αντοχής σε εφελκυσμό	3.8 – 6.5	MPa

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Μέση τιμή Μέτρου Ελαστικότητας πετρώματος	2.5 – 98.0	GPa
Λόγος Poisson	0.2 – 0.23	-

**Πίνακας 5: Προτεινόμενες χαρακτηριστικές τιμές βασικών γεωμηχανικών χαρακτηριστικών ασβεστολίθου στην υπό εξέταση περιοχή (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010)**







Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Ειδικό βάρος πετρώματος	2.65	g/cm <sup>3</sup>
Μέση τιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη	55	MPa
Μέση τιμή αντοχής σε εφελκυσμό	5	MPa
Μέση τιμή Μέτρου Ελαστικότητας πετρώματος	12	GPa
Λόγος Poisson	0.2	-

Επιπλέον σύμφωνα με την υφιστάμενη γεωτεχνική αξιολόγηση, η βραχομάζα χαρακτηρίζεται ως «μέτριας έως καλής ποιότητας» με εύρος τιμών δείκτη ποιότητας βραχομάζας  $RMR_{89} = 49 - 72$  κατά Bieniawski (1989). Σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης βραχομάζας Q κατά Barton et al. (1974), αποδόθηκε στον σχηματισμό ένα εύρος τιμών δείκτη ποιότητας βραχομάζας  $Q = 1.4 - 22.5$ , με προτεινόμενη τιμή  $Q = 5.7$ .

Κάνοντας χρήση της εξίσωσης συσχέτισης των δεικτών ποιότητας βραχομάζας κατά RMR (Bieniawski, 1989) και GSI (Hoek & Marinos, Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch, 2001) κατά Ceballos, Olalla, & Jiménez (2014) προκύπτει το ακόλουθο εύρος τιμών δείκτη ποιότητας βραχομάζας κατά GSI:

$$GSI = RMR_{89} - 5 \rightarrow \mathbf{GSI = 44 - 67}$$

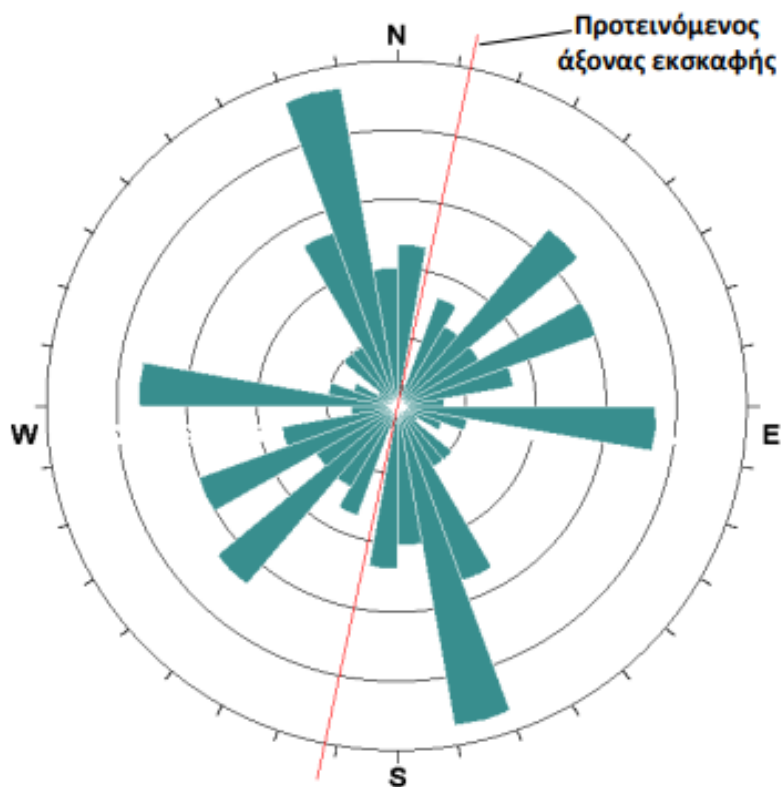
Το συγκεκριμένο εύρος τιμών, θεωρώντας βραχομάζα με τεμαχώδη έως πολύ τεμαχώδη δομή και ασυνέχειες μέτριας έως καλής ποιότητας παρουσιάζεται στην Εικόνα 27.

ΔΕΙΚΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ (GSI) (E. Hoek, Π. Marinos, 2000)		ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ					
<p>Βασίζονται στην περιγραφή της λειοκακικής σύστασης, της δομής και της ποιότητας των ασυνεχιών της βραχώμαζας εκτιμάται η μέση τιμή του GSI από τις κομπίλες. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 έως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι το GSI = 35. Ο καθορισμός της δομής καθώς και της ποιότητας των ασυνεχιών μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ δύο γειτονικών πεδίων. Τονίζεται ιδιαίτερα ότι το κριτήριο Hoek - Brown δεν εφαρμόζεται σε αστάθεις που ελέγχονται από συγκεκριμένες ασυνέχειες όταν οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες (όπως διατυμμένα επίπεδα στρώσης) έχουν δυσμενή προσανατολισμό σε σχέση με την εκσκαφή. Τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η ανταγή οριζώντων βραχώμαζων μενώνται από την παρουσία του υπόγειου νερού και αυτό μπορεί να ληφθεί υπόψη με μικρή μετακίνηση προς τα δεξιά στις στήλες της μέτρας, πτυχής και πολύ πτυχής κατάσταση ασυνεχιών. Η πίεση του νερού δεν μεταβάλλει την τιμή του GSI και λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων στους υπολογισμούς.</p>		ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ →					
		ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΠΤΩΧΗ	ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ	
ΔΟΜΗ		ΜΕΙΟΥΜΕΝΟ ΑΝΗΝΟΚΛΕΙΔΩΜΑ ΤΩΝ ΒΡΑΧΩΔΩΔΩΝ ΤΕΜΑΧΩΝ					
	<b>ΑΡΡΗΚΤΗ</b> Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή άστρωτος βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση	90				N/A	N/A
	<b>ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ / ΑΔΙΑΤΑΡΑΚΤΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ</b> Αδιάτακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχιών	80	70				
	<b>ΠΟΛΥ ΤΕΜΑΧΩΔΗΣ</b> Μερκώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχιών		60	50			
	<b>ΔΙΑΤΑΡΑΓΜΕΝΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΩΔΗΣ/ΠΤΥΧΩΜΕΝΗ</b> Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχιών. Εμμενή στρώσης ή σχιστότητας		40			30	
	<b>ΑΠΟΔΙΟΡΓΑΝΩΜΕΝΗ</b> Έσχατο κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιάδων και αποστραγγυλωμένων τεμαχίων					20	
	<b>ΦΥΛΛΩΔΗΣ / ΔΙΑΤΗΜΜΕΝΗ</b> Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατημμένη ασθενής βραχώμαζα. Η φύλλωση επικρατεί έναντι οποιαδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχιών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιάδων τεμαχίων (η κλίμακα σε αυτό το εικονίδα δεν συγκρίνεται με αυτή των άλλων εικονιδίων)	N/A	N/A				10

Εικόνα 27: Εύρος τιμών δείκτη ποιότητας βραχώμαζας κατά GSI (Hoek & Marinos, 2001)

Θεωρώντας ότι κατά την διάνοιξη του υπογείου έργου στο συγκεκριμένο βάθος θα συναντηθούν καλές συνθήκες ποιότητας ασυνεχιών και μία ευνοϊκή δομή σχηματισμού, στον ασβεστόλιθο του υπό εξέταση έργου αποδίδεται ένα μικρότερο εύρος δείκτη GSI = 55 – 65, με προτεινόμενη τιμή GSI = 60.

Η προτεινόμενη διεύθυνση του άξονα του έργου σύμφωνα με τα κύρια συστήματα ασυνεχιών παρουσιάζεται στην Εικόνα 28 και είναι B12A (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010).



Εικόνα 28: Προτεινόμενη διεύθυνση άξονα του έργου (Μπενάρδος & Καλιαμπάκος, 2010)

Τέλος, στην βραχώμαζα αποδίδεται τιμή παραμέτρου  $m_i = 12$  του κριτηρίου αστοχίας Hoek - Brown, η οποία είναι η χαρακτηριστική τιμή για τους ασβεστολίθους (βλ. Εικόνα 29) και τιμή συντελεστή διαταραχής του πετρώματος  $D = 0$ .



Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates (21±3)	Sandstones 17±4	Siltstones 7±2	Claystones 4±2
			Breccias (19±5)		Greywackes (18±3)	Shales (6±2) Marls (7±2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12±3)	Sparitic Limestones (10±2)	Micritic Limestones (9±2)	Dolomites (9±3)
		Evaporites		Gypsum 8±2	Anhydrite 12±2	
	Organic				Chalk 7±2	
METAMORPHIC	Non foliated		Marble 9±3	Hornfels (19±4) Metasandstone (19±3)	Quartzites 20±3	
	Slightly foliated		Migmatite (29±3)	Amphibolites 26±6	Gneiss 28±5	
	Foliated*			Schists 12±3	Phyllites (7±3)	Slates 7±4
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32±3	Diorite 25±5		
			Granodiorite (29±3)			
	Dark	Gabbro 27±3	Dolerite (16±5)			
		Norite 20±5				
	Hypabyssal		Porphyries (20±5)		Diabase (15±5)	Peridotite (25±5)
Volcanic	Lava		Rhyolite (25±5) Andesite 25±5	Dacite (25±3) Basalt (25±5)	Obsidian (19±3)	
	Pyroclastic	Agglomerate (19±3)	Breccia (19±5)	Tuff (13±5)		

Εικόνα 29: Προτεινόμενη τιμή συντελεστή  $m$  του κριτηρίου αστοχίας Hoek - Brown

Κάνοντας χρήση του λογισμικού RSDData της εταιρείας Rocscience και λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων, όπως αυτές προσδιορίστηκαν ανωτέρω, προέκυψαν οι ακόλουθες ισοδύναμες παράμετροι αντοχής της βραχώμαζας σύμφωνα με το κριτήριο Mohr – Coulomb και το γενικευμένο κριτήριο Hoek and Diederichs:

**Πίνακας 6: Τιμές παραμέτρων αντοχής βραχόμαζας κριτηρίων Mohr – Coulomb και Hoek – Brown**

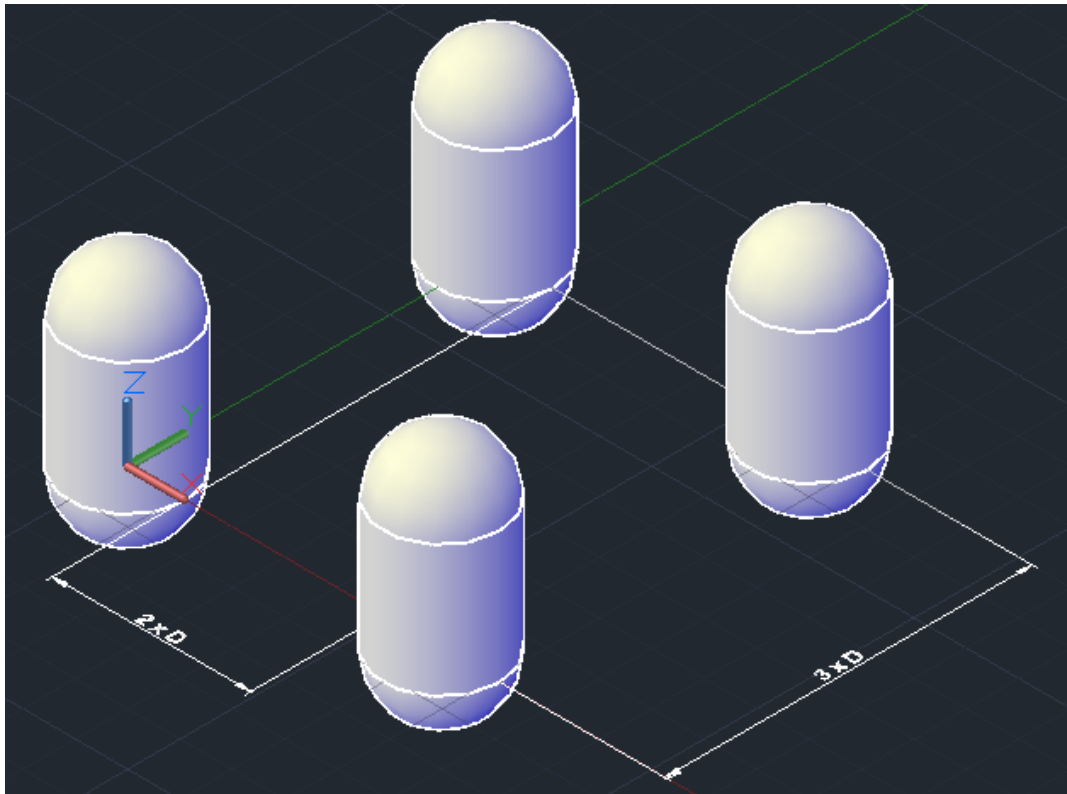
Κριτήριο Αστοχίας	Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Mohr – Coulomb	c	3,387	kPa
	$\varphi$	35.04	°
Hoek – Brown	$m_b$	2.876	-
	s	0.0117	-
	a	0.503	-

### 3.2 Σχεδιαστικές παράμετροι LRC

Στοχεύοντας στον προσδιορισμό των βέλτιστων σχεδιαστικών παραμέτρων της υπόγειας εγκατάστασης αποθήκευσης LNG, δύο (2) διαφορετικές ομάδες γεωμετρικών χαρακτηριστικών υπόγειων θαλάμων εξετάστηκαν ως προς τις δυνατότητές τους και την ευστάθεια των εκσκαφών, με την τελική επιλογή της βέλτιστης λύσης να προϋποθέτει την αντιπαραβολή των οικονομικών στοιχείων σε κάθε μία από τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις. Σημειώνεται ότι σε κάθε περίπτωση αποδόθηκαν κοινά χαρακτηριστικά στα στοιχεία της επένδυσης των τοιχωμάτων, τα οποία παρουσιάζονται στο εδάφιο 3.2.3.

#### 3.2.1 Περίπτωση Α

Στην πρώτη εξεταζόμενη περίπτωση σχεδιαστικών παραμέτρων επιλέχθηκε η εξέταση υπογείων θαλάμων κατακόρυφης διάταξης, δηλαδή μορφής σιλό. Πιο συγκεκριμένα, προβλέπεται η κατασκευή τεσσάρων (4) υπόγειων θαλάμων με αποστάσεις μεταξύ γειτονικών δεξαμενών περίπου ίσες με δύο (2) φορές την διάμετρο του θαλάμου κατά τη διεύθυνση X και τρεις φορές (3) κατά τη διεύθυνση Y, αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο σχέδιο της Εικόνας 30.



Εικόνα 30: Διάταξη θαλάμων υπόγειας εγκατάστασης αποθήκευσης LNG – Περίπτωση Α

Οι ανωτέρω αποστάσεις αναφέρονται σε συνολική διάμετρο εκσκαφής και όχι ωφέλιμη διάμετρο δεξαμενής. Επιπλέον, κατά την φάση κατασκευής του έργου θεωρείται μήκος ανυποστήρικτου τμήματος ίσο με 10m, βάσει του οποίου υπολογίζεται θεωρητικός τιμή βαθμού αποτόνωσης της βραχομάζας ίση με  $\lambda = 0.42$ . Σημειώνεται ότι ο βαθμός αποτόνωσης της βραχομάζας προσδιορίζεται μέσω εμπειρικών σχέσεων, σύμφωνα με τη μέθοδο του διαμήκους προφίλ μετακινήσεων της σήραγγας κατά Chern et al. (1998), η οποία εφαρμόζει την ακόλουθη σχέση υπολογισμού:

$$\frac{x}{R} = 1.10 \times \ln \left[ \left( \frac{u_r(x)}{u_{max}} \right)^{-0.588} - 1 \right]$$

Στον Πίνακα 7 δίνονται οι βασικές σχεδιαστικές παράμετροι των υπογείων θαλάμων.

**Πίνακας 7: Τιμές σχεδιαστικών παραμέτρων υπογείων θαλάμων**

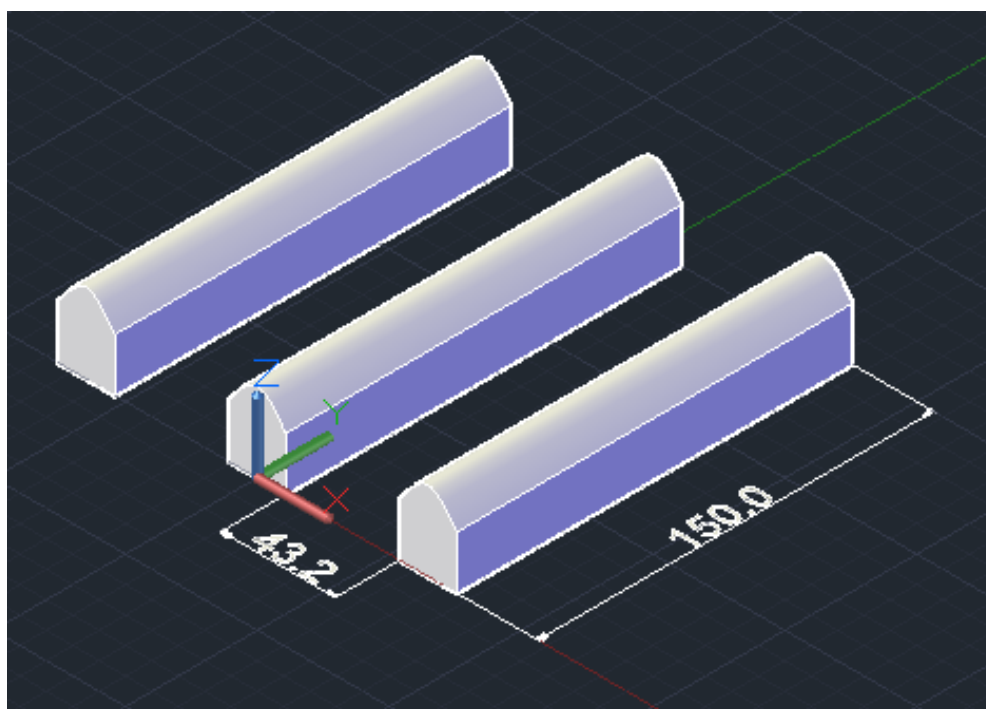
Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Συνολική διάμετρος εκσκαφής	41.6	m
Ωφέλιμη διάμετρος θαλάμου	40.0	m
Ύψος ημισφαιρικών τμημάτων	20.8	m
Ύψος κεντρικού τμήματος	25.0	m

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Συνολικό ύψος θαλάμου	66.6	m
Ύψος υπερκειμένων	120.0	m
Απόσταση κατά τον άξονα X	83.0	m
Απόσταση κατά τον άξονα Y	124.8	m

Θεωρώντας πλήρωση των επιμέρους δεξαμενών συμβατικά ίση με το σύνολο του διαθέσιμου χώρου, προκύπτει αποθηκευτική ικανότητα σε LNG ίση 394,000 m<sup>3</sup>, περίπου.

### 3.2.2 Περίπτωση Β

Στη δεύτερη εξεταζόμενη περίπτωση σχεδιαστικών παραμέτρων επιλέχθηκε η εξέταση υπογείων θαλάμων οριζόντιας διάταξης, ήτοι μορφής σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα, προβλέπεται η κατασκευή τριών (3) υπόγειων θαλάμων με απόσταση μεταξύ γειτονικών δεξαμενών ίση με δύο (2) φορές το μήκος ανοίγματος του θαλάμου (κατά τη διεύθυνση X), όπως φαίνεται στο σχέδιο της Εικόνα 31.



Εικόνα 31: Διάταξη θαλάμων υπόγειας εγκατάστασης αποθήκευσης LNG – Περίπτωση Β

Η ανωτέρω απόσταση αναφέρεται σε συνολικό άνοιγμα εκσκαφής και όχι ωφέλιμο άνοιγμα δεξαμενής. Επιπλέον, κατά την φάση κατασκευής του έργου θεωρείται μήκος ανυποστήρικτου τμήματος ίσο με 10m, βάσει του οποίου υπολογίζεται θεωρητικός τιμή βαθμού αποτόνωσης της βραχόμαζας ίση με  $\lambda = 0.54$ .

Στον Πίνακα 8 δίνονται οι βασικές σχεδιαστικές παράμετροι των υπογείων θαλάμων.

**Πίνακας 8: Τιμές σχεδιαστικών παραμέτρων υπογείων θαλάμων**

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Συνολικό άνοιγμα εκσκαφής	21.6	m
Ωφέλιμο άνοιγμα θαλάμου	20.0	m
Ύψος ημικυκλικού τμήματος	10.0	m
Ύψος ορθογώνιου τμήματος	20.0	m
Συνολικό ύψος θαλάμου	30.0	m
Μήκος θαλάμου	150.0	m
Ύψος υπερκειμένων	120.0	m
Απόσταση κατά τον άξονα X	43.2	m
Βαθμός αποτόνωσης βραχόμαζας, λ	0.54	-

Θεωρώντας πλήρωση των επιμέρους δεξαμενών συμβατικά ίση με το σύνολο του διαθέσιμου χώρου, προκύπτει αποθηκευτική ικανότητα σε LNG ίση 321,000 m<sup>3</sup>, περίπου.

### 3.2.3 Χαρακτηριστικά τμημάτων επένδυσης

Τα τμήματα της επένδυσης του υπογείου θαλάμου αποτελούν βασικό κριτήριο επιτυχίας του εγχειρήματος της αποθήκευσης LNG εντός των δεξαμενών.

Και στις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις σχεδιαστικών παραμέτρων επιλέγεται η τοποθέτηση τμημάτων επένδυσης με κοινές τιμές ιδιοτήτων. Στοχεύοντας στη βέλτιστη επιλογή των ιδιοτήτων των τμημάτων της επένδυσης, η διεθνής βιβλιογραφία και τα αποτελέσματα της των αναλύσεων μέσω πεπερασμένων στοιχείων ελήφθησαν υπόψη. Επιπλέον, προκαταρκτικές εκτιμήσεις των χαρακτηριστικών των μέτρων υποστήριξης διενεργήθηκαν, κάνοντας χρήση λογισμικών H/Y και εμπειρικών σχέσεων.

Τα πάχη των τμημάτων της επένδυσης των τοιχωμάτων του υπογείου ανοίγματος παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα.

**Πίνακας 9: Πάχη στρωμάτων επένδυσης – Τελική υπερεκσκαφή τοιχωμάτων**

Τμήμα Επένδυσης	Τιμή	Μονάδες
Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	0.2	m
Έγχυτο σκυρόδεμα	0.4	m
Στρώμα ολίσθησης	0.1	m
Μεταλλική επένδυση	12.0	mm

Κατά τη φάση κατασκευής του έργου επιλέγεται η υπερεκσκαφή των τοιχωμάτων του υπογείου ανοίγματος, σε σχέση με τις ενεργές διαστάσεις του (βλ. Πίνακα 8) κατά 0.8m διαμετρικής διάστασης.

Ακολούθως πραγματοποιείται ξεχωριστή παρουσίαση των ιδιοτήτων του εκάστοτε στρώματος της επένδυσης του θαλάμου, όπως αυτές χρησιμοποιήθηκαν κατά τον έλεγχο της ευστάθειας αυτού μέσω του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων RS2. Σημειώνεται ότι το στρώμα ολίσθησης δεν λαμβάνεται υπόψη κατά τη κατάστρωση των μοντέλων αριθμητικής ανάλυσης.

### Ηλώσεις

Όσον αφορά στα αγκύρια που επιλέχθηκαν να τοποθετηθούν για την άμεση υποστήριξη των μετώπων εκσκαφής πραγματοποιήθηκε προκαταρκτική εκτίμηση μέσω εμπειρικών τύπων και μέσω του λογισμικού Unwedge της εταιρείας Rocscience.

Αρχικά, γίνεται χρήση των ακόλουθων σχέσεων κατά Hoek, Kaiser, & Bawden (1995) για τον υπολογισμό του βέλτιστου μήκους των αγκυριών:

- Οροφή:  $L = 2 + 0.15 \times \frac{B}{ESR}$
- Παρειές:  $L = 2 + 0.15 \times \frac{H}{ESR}$

Όπου,

L: μήκος αγκυριών

B: πλάτος εκσκαφής

H: ύψος εκσκαφής

ESR: συντελεστής εξαρτώμενος από τη χρήση του υπόγειου έργου

Επομένως, για τις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις σχεδιαστικών παραμέτρων (βλ. 3.2.1) και θεωρώντας τιμή  $ESR = 1$  προκύπτουν οι ακόλουθες εκτιμήσεις:

### Περίπτωση Α

- Οροφή:  $L = 2 + 0.15 \times \frac{B}{ESR} = 2 + 0.15 \times \frac{41.6}{1.0} = 8.24 \rightarrow \mathbf{9m}$
- Παρειές:  $L = 2 + 0.15 \times \frac{H}{ESR} = 2 + 0.15 \times \frac{66.6}{1.0} = 11.99 \rightarrow \mathbf{12m}$

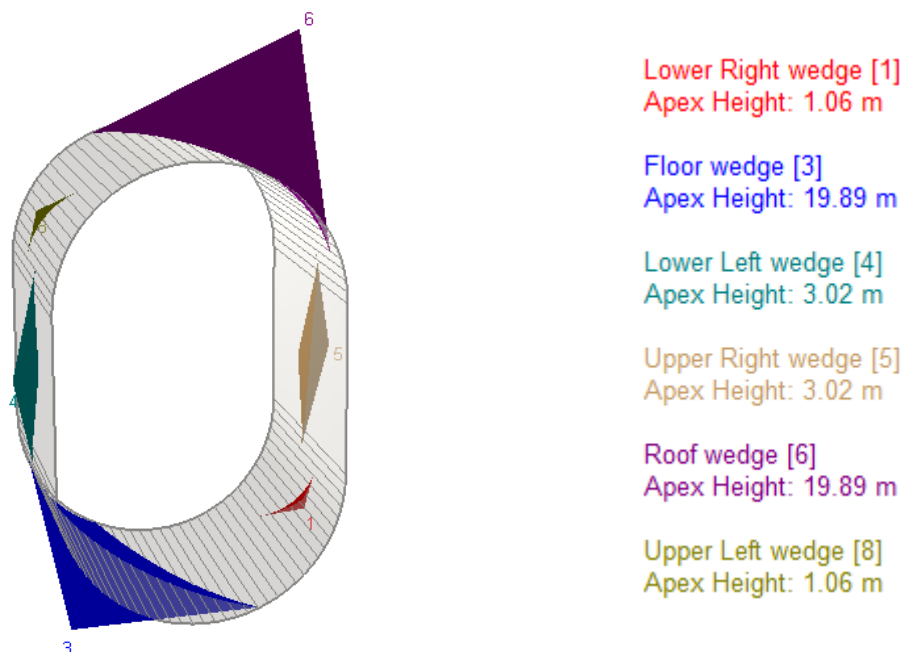
### Περίπτωση Β

- Οροφή:  $L = 2 + 0.15 \times \frac{B}{ESR} = 2 + 0.15 \times \frac{21.6}{1.0} = 5.29m \rightarrow \mathbf{6m}$
- Παρειές:  $L = 2 + 0.15 \times \frac{H}{ESR} = 2 + 0.15 \times \frac{30.8}{1.0} = 6.62 \rightarrow \mathbf{7m}$

Κάνοντας χρήση του λογισμικού Unwedge της Rocscience εκτιμήθηκαν οι δυνητικά σχηματιζόμενες βραχοσφήνες, οι οποίες δυνητικά θα μπορούσαν να ολισθήσουν προς το εσωτερικό του θαλάμου, με τις θέσεις και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους να συντελούν στην προκαταρκτική εκτίμηση των χαρακτηριστικών των μέτρων άμεσης υποστήριξης. Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων σε κάθε μία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ελέγχου.

### Περίπτωση Α

Λαμβάνοντας υπόψη τα κύρια εμφανιζόμενα συστήματα ασυνεχειών στην εξεταζόμενη περιοχή (βλ. Εικόνα 26), τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπογείου θαλάμου (βλ. Πίνακα 7), καθώς και την προτεινόμενη διάταξη αυτού στον χώρο, προέκυψαν οι ακόλουθες δυνητικά εμφανιζόμενες βραχοσφήνες γύρω από την εκσκαφή σύμφωνα με την ανάλυση του λογισμικού Unwedge της Rocscience.



Εικόνα 32: Δυνητικά εμφανιζόμενες βραχοσφήνες – Περίπτωση Α

Λαμβάνοντας υπόψη τις ανωτέρω εκτιμήσεις αλλά και τις απαιτήσεις που προκύπτουν σύμφωνα με τις δοκιμαστικές αναλύσεις ευστάθειας των υπογείων θαλάμων επιλέχθηκε η

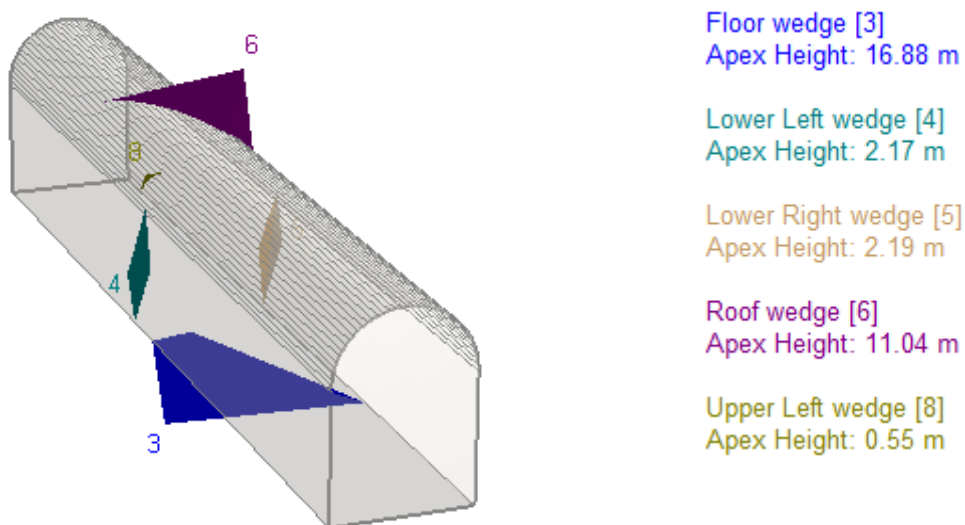
τοποθέτηση αγκυρίων ολόσωμης πάκτωσης μήκους **5m** στη στέψη και **9m** στις παρειές της εκσκαφής, αντίστοιχα. Τα βασικά χαρακτηριστικά των αγκυρίων ολόσωμης πάκτωσης παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα.

**Πίνακας 10: Βασικά χαρακτηριστικά αγκυρίων ολόσωμης πάκτωσης**

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Μήκος αγκυρίων στη στέψη	5	m
Μήκος αγκυρίων στις παρειές	9	m
Κάναβος αγκυρίων	2.5 x 2.5	m x m
Διάμετρος, d	25	mm
Αντοχή σε εφελκυσμό, $F_{tk}$	270	kN
Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα, E	200	GPa

### Περίπτωση Β

Λαμβάνοντας υπόψη τα κύρια εμφανιζόμενα συστήματα ασυνεχειών στην εξεταζόμενη περιοχή (βλ. Εικόνα 26), τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπογείου θαλάμου (βλ. Πίνακα 8), καθώς και την προτεινόμενη διάταξη αυτού στον χώρο, προέκυψαν οι ακόλουθες δυνητικά εμφανιζόμενες βραχοσφήνες γύρω από την εκσκαφή σύμφωνα με την ανάλυση του λογισμικού Unwedge της Rocscience.



*Εικόνα 33: Δυνητικά εμφανιζόμενες βραχοσφήνες – Περίπτωση Β*



Λαμβάνοντας υπόψη τις ανωτέρω εκτιμήσεις αλλά και τις απαιτήσεις που προκύπτουν σύμφωνα με τις δοκιμαστικές αναλύσεις ευστάθειας των υπογείων θαλάμων επιλέχθηκε η τοποθέτηση αγκυρίων ολόσωμης πάκτωσης μήκους **3m** στη στέψη και **5m** στις παρειές της εκσκαφής, αντίστοιχα. Τα βασικά χαρακτηριστικά των αγκυρίων ολόσωμης πάκτωσης παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα.

**Πίνακας 11: Βασικά χαρακτηριστικά αγκυρίων ολόσωμης πάκτωσης**

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Μήκος αγκυρίων στη στέψη	3	m
Μήκος αγκυρίων στις παρειές	5	m
Κάναβος αγκυρίων	2.0 x 2.0	m x m
Διάμετρος, d	25	mm
Αντοχή σε εφελκυσμό, $F_{tk}$	270	kN
Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα, E	200	GPa

#### **Στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος**

Τα χαρακτηριστικά της εν λόγω στρώσης είναι ίδια και για τα δύο εξεταζόμενες σενάρια σχεδιασμού του έργου. Το πάχος της στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι 0.2m και στόχος της είναι η προστασία του συστήματος αποστράγγισης του θαλάμου, ενώ οι βασικές ιδιότητές του δίνονται στον ακόλουθο Πίνακα.

**Πίνακας 12: Βασικά χαρακτηριστικά στρώματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος**

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Πάχος στρώματος	0.2	m
Ειδικό βάρος	25	kN/m <sup>3</sup>
Μέτρο ελαστικότητας, E	15	GPa
Λόγος Poisson, $\nu$	0.2	-
Κατηγορία	C30/37	-
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, $\sigma_{ci}$	30	MPa
Αντοχή σε εφελκυσμό, $\sigma_t$	6	MPa

#### **Στρώση έγχυτου σκυροδέματος**

Παρομοίως, και στις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις υιοθετούνται τα ίδια χαρακτηριστικά για την συγκεκριμένη στρώση της επένδυσης της εκσκαφής. Το πάχος της στρώσης έγχυτου σκυροδέματος είναι 0.4m και οι βασικές ιδιότητές του δίνονται στον ακόλουθο Πίνακα.

**Πίνακας 13: Βασικά χαρακτηριστικά στρώματος έγχυτου σκυροδέματος**

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Πάχος στρώματος	0.4	m
Ειδικό βάρος	25	kN/m <sup>3</sup>
Μέτρο ελαστικότητας, E	32837	MPa
Λόγος Poisson, ν	0.2	-
Κατηγορία	C30/37	-
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σ <sub>ci</sub>	30	MPa
Αντοχή σε εφελκυσμό, σ <sub>t</sub>	2.9	MPa

Στο εν λόγω στρώμα της επένδυσης τοποθετείται οπλισμός ενίσχυσης. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγεται να τοποθετηθεί μεταλλικό πλέγμα με τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά.

**Πίνακας 14: Βασικά χαρακτηριστικά οπλισμού ενίσχυσης έγχυτου σκυροδέματος**

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Τύπος οπλισμού	Μεταλλικό πλέγμα	-
Διάμετρος	10	mm
Αποστάσεις οπλισμών	0.2	m
Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα, E	200	GPa
Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σ <sub>ci</sub>	400	MPa
Αντοχή σε εφελκυσμό, σ <sub>t</sub>	400	MPa

### Μεταλλική επένδυση

Η μεταλλική επένδυση της εκσκαφής είναι ένα από τα κρίσιμότερα τμήματα για την απομόνωση του αποθηκευμένου προϊόντος. Σε αυτήν αποδίδονται κοινά χαρακτηριστικά και για τα δύο σενάρια σχεδιασμού του έργου και τα βασικά εξ αυτών παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα.

**Πίνακας 15: Βασικά χαρακτηριστικά στρώματος μεταλλικής επένδυσης**

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδες
Πάχος στρώματος	12	mm
Κατηγορία χάλυβα	S355	-
Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα, E	210	GPa
Λόγος Poisson, ν	0.30	-

Σημειώνεται ότι οι ανωτέρω τιμές των παραμέτρων αντοχής του χάλυβα S355 έχουν ληφθεί κατά τον EN1993-1-1 §3.2.6 για δομικό χάλυβα.

### **3.3 Στάδια προσομοίωσης φάσεων κατασκευής και λειτουργίας**

#### **3.3.1 Γενικά**

Η προσομοίωση των φάσεων της κατασκευής και λειτουργίας του υπογείου χώρου αποθήκευσης LNG για κάθε μία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις σχεδιαστικών παραμέτρων πραγματοποιείται μέσα από διαδοχικά κατασκευαστικά στάδια. Ο έλεγχος ευστάθειας των εκσκαφών πραγματοποιείται μέσω της προσομοίωσης όλων των κατασκευαστικών φάσεων με τη χρήση του λογισμικού RS2 της Rocscience.

Σημειώνεται ότι, για κάθε ένα από τα εξεταζόμενα σενάρια πραγματοποιείται μία (1) ακόμη συμπληρωματική ανάλυση μέσω του λογισμικού RS2. Πιο συγκεκριμένα, θερμική ανάλυση της μονάδας αποθήκευσης LNG πραγματοποιείται για κάθε μία περίπτωση, η οποία αποσκοπεί στην εκτίμηση των θερμοκρασιακών μεταβολών που επιφέρει η διαδικασία αποθήκευσης γύρω από το υπόγειο συγκρότημα.

#### **3.3.2 Σενάριο Α**

Σύμφωνα με το σχεδιασμό του πρώτου σεναρίου συγκροτήματος αποθήκευσης LNG, κάθε υπόγειος θάλαμος χωρίζεται σε τρεις (3) επιμέρους φάσεις κατασκευής. Η προχώρηση προς την διάνοιξη του επόμενου διαδοχικά θαλάμου πραγματοποιείται μετά την πλήρη ολοκλήρωση του προηγούμενου. Κατά την προσομοίωση της διάταξης των εγκαταστάσεων εφαρμόζεται η ακόλουθη αλληλουχία σταδίων:

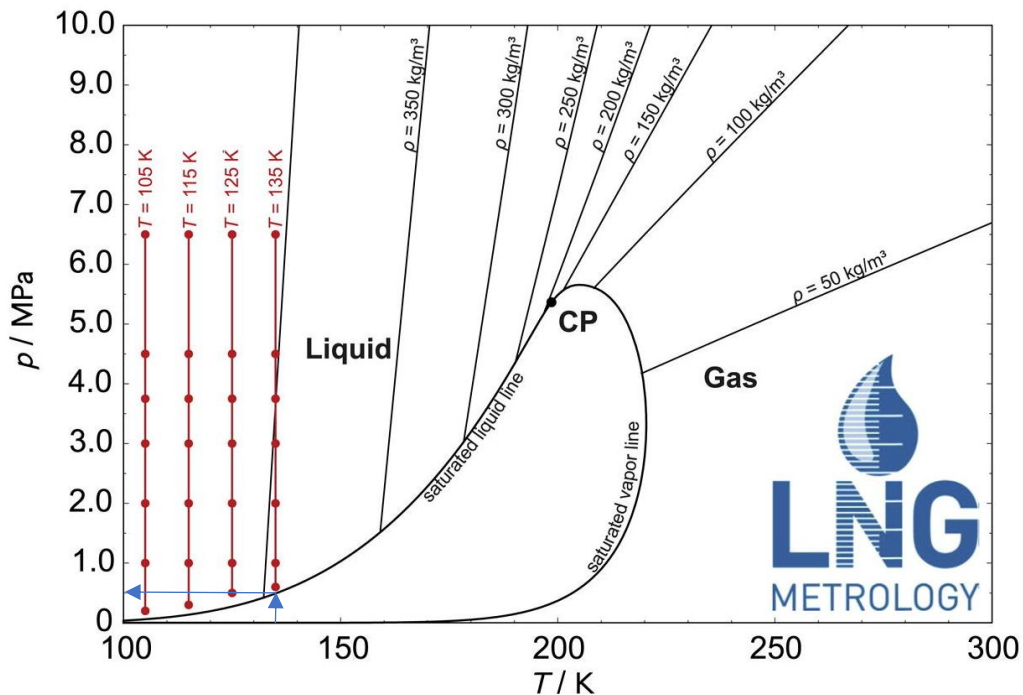
- Στάδιο 1<sup>ο</sup>: Γεωστατικό
- Στάδιο 2<sup>ο</sup>: Εκσκαφή Α' φάσης 1<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 3<sup>ο</sup>: 1<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Α' φάσης 1<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 4<sup>ο</sup>: 2<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Α' φάσης 1<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 5<sup>ο</sup>: Εκσκαφή Β' φάσης 1<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 6<sup>ο</sup>: 1<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Β' φάσης 1<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 7<sup>ο</sup>: 2<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Β' φάσης 1<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 8<sup>ο</sup>: Εκσκαφή Γ' φάσης 1<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 9<sup>ο</sup>: 1<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Γ' φάσης 1<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 10<sup>ο</sup>: 2<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Γ' φάσης 1<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 11<sup>ο</sup>: Εκσκαφή Α' φάσης 2<sup>ης</sup> εκσκαφής

- Στάδιο 12<sup>ο</sup>: 1<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Α' φάσης 2<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 13<sup>ο</sup>: 2<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Α' φάσης 2<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 14<sup>ο</sup>: Εκσκαφή Β' φάσης 2<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 15<sup>ο</sup>: 1<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Β' φάσης 2<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 16<sup>ο</sup>: 2<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Β' φάσης 2<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 17<sup>ο</sup>: Εκσκαφή Γ' φάσης 2<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 18<sup>ο</sup>: 1<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Γ' φάσης 2<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 19<sup>ο</sup>: 2<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Γ' φάσης 2<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 20<sup>ο</sup>: Εφαρμογή έγχυτου σκυροδέματος και μεταλλικής επένδυσης
- Στάδιο 21<sup>ο</sup>: Προσομοίωση φόρτισης από την αποθηκευμένη ποσότητα LNG

Ορισμένες βασικές παρατηρήσεις επί της εν λόγω διαδικασίας προσομοίωσης είναι οι εξής:

- Κατά το πρώτο στάδιο της προσομοίωσης (Γεωστατικό) προσομοιώνεται η εξεταζόμενη περιοχή πριν την πρόκληση οποιασδήποτε διατάραξης σε αυτή.
- Κατά το στάδιο της κάθε φάσης εκσκαφής και το πρώτο (1<sup>ο</sup>) στάδιο της τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης εφαρμόζεται στο εσωτερικό της εκάστοτε επιφάνειας επαγόμενο φορτίο ίσο με «1-λ», έτσι ώστε να προσομοιωθεί η αποτόνωση της βραχόμαζας στην τρίτη (μη ορατή) διάσταση. Κατά το δεύτερο (2<sup>ο</sup>) στάδιο της εφαρμογής των μέτρων άμεσης υποστήριξης το επαγόμενο φορτίο παύει να δρα στην επιφάνεια της εκσκαφής.
- Κατά το στάδιο #20 πραγματοποιείται η τοποθέτηση των δύο τελευταίων εσωτερικών τμημάτων της επένδυσης των εκσκαφών θεωρώντας ότι όλα τα φορτία από την αρχική αποτόνωση της βραχόμαζας έχουν παραλειφθεί από τα στοιχεία της άμεσης υποστήριξης.
- Κατά την φάση πλήρους λειτουργίας της μονάδας αποθήκευσης LNG, θεωρείται ολοκληρωτική πλήρωση της δεξαμενής με το προϊόν προς αποθήκευση. Ως εκ τούτου κατά το τελευταίο στάδιο της προσομοίωσης (Στάδιο 21<sup>ο</sup>) προσομοιώνεται η φόρτιση, την οποία δέχονται τα τοιχώματα της δεξαμενής κατά τη φάση λειτουργίας του έργου. Η συγκεκριμένη φόρτιση θεωρείται πως δεν θα ξεπερνά τα 0.5MPa και ως εκ τούτου επιλέγεται η εφαρμογή της συγκεκριμένης τιμής φορτίου ως η δυσμενέστερη περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη προσομοίωση θεωρείται ότι δεν θα παρατηρηθεί άνοδος της θερμοκρασίας εντός της δεξαμενής που να ξεπερνάει τους

20°C σε σχέση με τη θερμοκρασία βρασμού του φυσικού αερίου. Ως εκ τούτου, κάνοντας χρήση του ακόλουθου διαγράμματος και για θερμοκρασία αποθηκευμένου προϊόντος (LNG) ίση με -140°C ( $T \approx 135\text{K}$ ) προκύπτει μία εσωτερική τάση ασκούμενη από το αποθηκευμένο προϊόν ίση περί τα 0.5MPa.

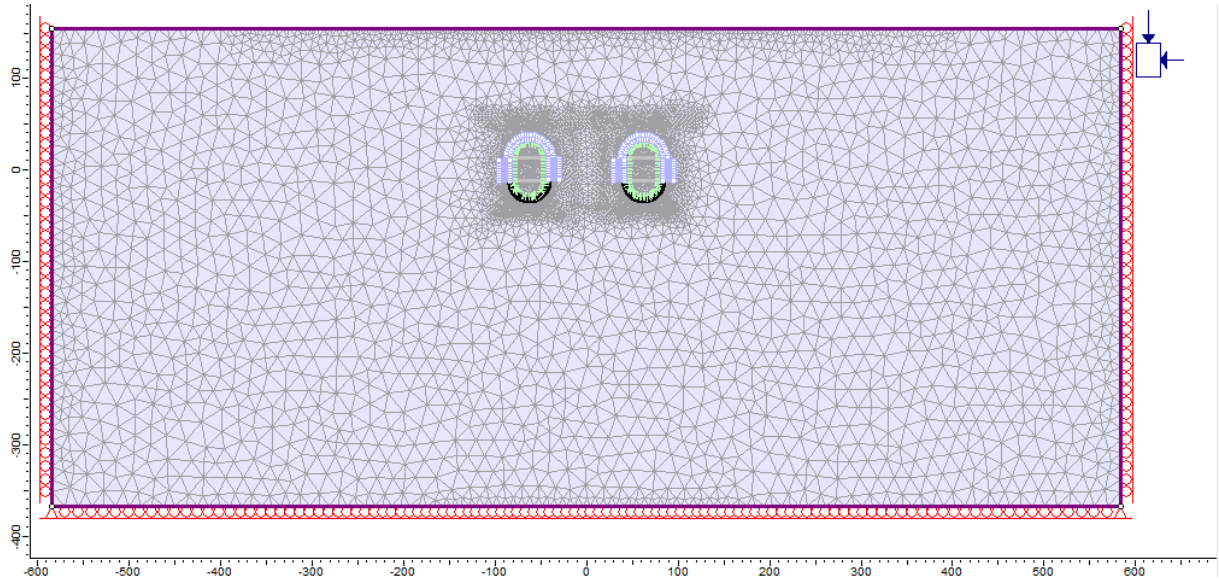


Εικόνα 34: Προσδιορισμός ασκούμενης εσωτερικής πίεσης εντός της δεξαμενής (Lentner et al. 2017)

- Τα εξωτερικά όρια του μοντέλου προσομοίωσης επιλέγονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται πλήρης απόσβεση της επιρροής του έργου στον περιβάλλοντα σχηματισμό. Επομένως:
  - Τα πλευρικά εξωτερικά όρια του μοντέλου προσομοίωσης εκτείνονται σε απόσταση τρεις (3) φορές την απόσταση μεταξύ των δύο οριζόντιων ακραίων σημείων της μονάδας.
  - Το ανώτερο εξωτερικό όριο του μοντέλου προσομοίωσης ορίζεται σύμφωνα με το εκτιμώμενο βάθος εκσκαφής, ήτοι περί τα 155m από τη στάθμη της εκσκαφής.
  - Το κατώτερο εξωτερικό όριο του μοντέλου εκτείνεται σε απόσταση δύο (2) φορές την απόσταση μεταξύ των δύο οριζόντιων ακραίων σημείων της μονάδας.
  - Ως κριτήριο αστοχίας της βραχομάζας χρησιμοποιείται το «Γενικευμένο Κριτήριο Αστοχίας Hoek & Brown» και ως τιμές παραμέτρων αντοχής εφαρμόζονται οι προτεινόμενες κατά την πρότερη γεωτεχνική αξιολόγηση στην περιοχή πλησίον της εγκατάστασης.

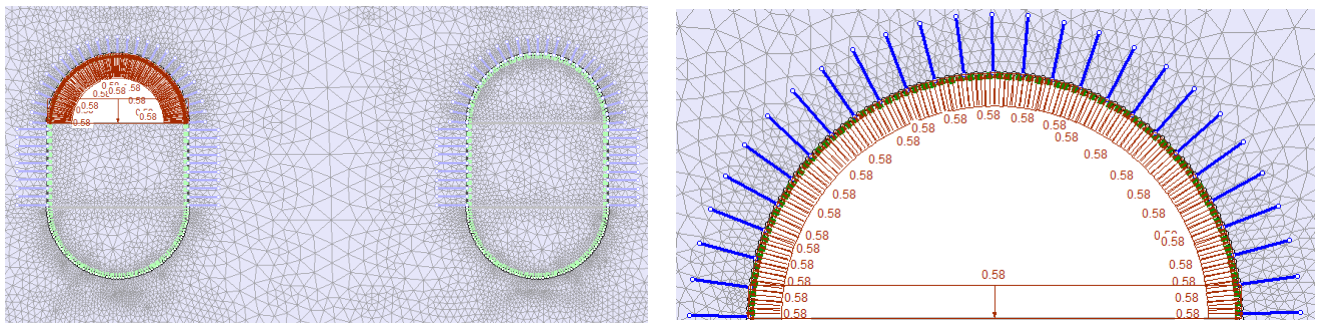
Ενδεικτικά, ακολούθως παρουσιάζονται ορισμένα κύρια στάδια της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα:

- Στην Εικόνα 35 παρουσιάζεται το στάδιο #1, δηλαδή το γεωστατικό στάδιο.



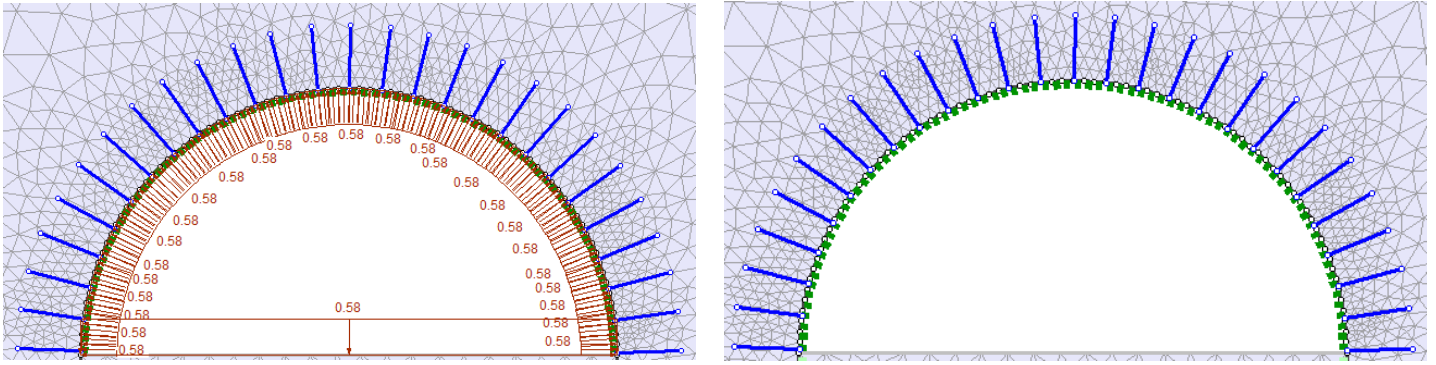
Εικόνα 35: Σενάριο A – Γεωστατικό στάδιο

- Στην Εικόνα 36 παρουσιάζονται τα στάδια #2 και #3, δηλαδή της εκσκαφής της Α' φάσης της 1<sup>ης</sup> εκσκαφής και του 1<sup>ου</sup> σταδίου της τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης στην εν λόγω φάση.



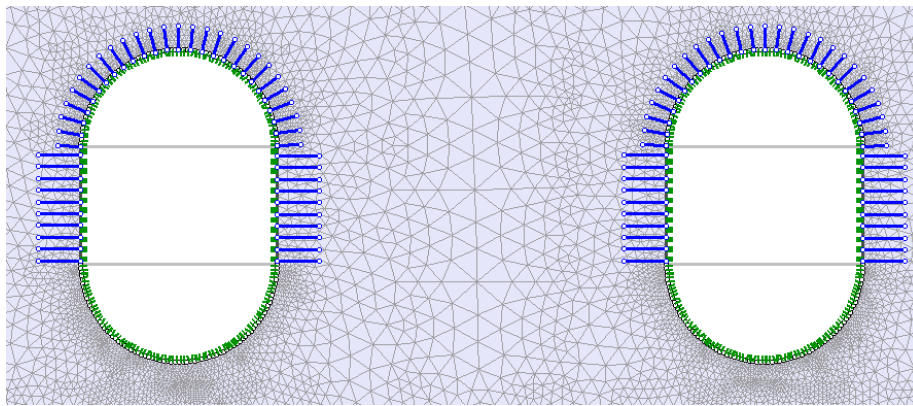
Εικόνα 36: Σενάριο A - Στάδια προσομοίωσης εγκατάστασης αποθήκευσης LNG: Στάδιο #2 (Αριστερά) & Στάδιο #3 (Δεξιά)

- Στην Εικόνα 37 παρουσιάζονται τα στάδια #12 και #13, δηλαδή τα 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> στάδιο της τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης στην εν λόγω φάση.



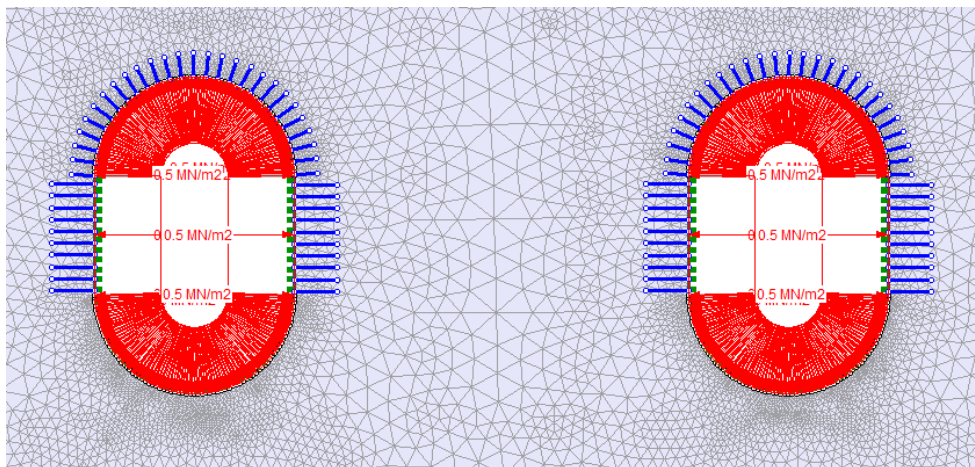
Εικόνα 37: Σενάριο A - Στάδια προσομοίωσης εγκατάστασης αποθήκευσης LNG: Στάδιο #12 (Αριστερά) & Στάδιο #13 (Δεξιά)

- Στην Εικόνα 38 παρουσιάζεται το στάδιο #20, δηλαδή της πλήρης εκσκαφής και τοποθέτησης όλων των τμημάτων της επένδυσης.



Εικόνα 38: Σενάριο A – Στάδιο #20: Πλήρης εφαρμογής των τμημάτων της επένδυσης των τοιχωμάτων

- Στην Εικόνα 39 παρουσιάζεται το στάδιο #21, δηλαδή της εφαρμογής του φορτίου που ασκεί το αποθηκευμένο προϊόν στα τοιχώματα της δεξαμενής.



Εικόνα 39: Σενάριο A – Στάδιο #21: Φάση πλήρους λειτουργίας χώρου αποθήκευσης LNG

### 3.3.2 Σενάριο Β

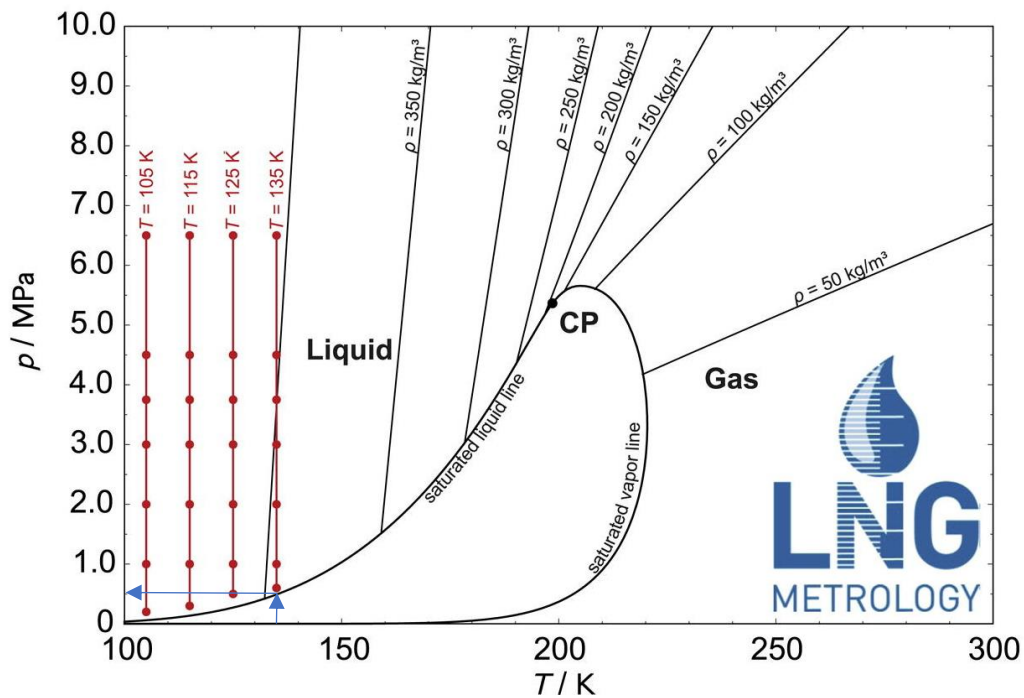
Σύμφωνα με το σχεδιασμό του δεύτερου σεναρίου συγκροτήματος αποθήκευσης LNG, κάθε υπόγειος θάλαμος χωρίζεται σε δύο (2) επιμέρους φάσεις κατασκευής. Η προχώρηση προς την διάνοιξη του επόμενου διαδοχικά θαλάμου πραγματοποιείται μετά την πλήρη ολοκλήρωση του προηγούμενου. Κατά την προσομοίωση της διάταξης των εγκαταστάσεων εφαρμόζεται η ακόλουθη αλληλουχία σταδίων:

- Στάδιο 1<sup>ο</sup>: Γεωστατικό
- Στάδιο 2<sup>ο</sup>: Εκσκαφή Α' φάσης 1<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 3<sup>ο</sup>: 1<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Α' φάσης 1<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 4<sup>ο</sup>: 2<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Α' φάσης 1<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 5<sup>ο</sup>: Εκσκαφή Β' φάσης 1<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 6<sup>ο</sup>: 1<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Β' φάσης 1<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 7<sup>ο</sup>: 2<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Β' φάσης 1<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 8<sup>ο</sup>: Εκσκαφή Α' φάσης 2<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 9<sup>ο</sup>: 1<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Α' φάσης 2<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 10<sup>ο</sup>: 2<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Α' φάσης 2<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 11<sup>ο</sup>: Εκσκαφή Β' φάσης 2<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 12<sup>ο</sup>: 1<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Β' φάσης 2<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 13<sup>ο</sup>: 2<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Β' φάσης 2<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 14<sup>ο</sup>: Εκσκαφή Α' φάσης 3<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 15<sup>ο</sup>: 1<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Α' φάσης 3<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 16<sup>ο</sup>: 2<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Α' φάσης 3<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 17<sup>ο</sup>: Εκσκαφή Β' φάσης 3<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 18<sup>ο</sup>: 1<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Β' φάσης 3<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 19<sup>ο</sup>: 2<sup>ο</sup> στάδιο τοποθέτησης μέτρων άμεσης υποστήριξης Β' φάσης 3<sup>ης</sup> εκσκαφής
- Στάδιο 20<sup>ο</sup>: Εφαρμογή έγχυτου σκυροδέματος και μεταλλικής επένδυσης
- Στάδιο 21<sup>ο</sup>: Προσομοίωση φόρτισης από την αποθηκευμένη ποσότητα LNG

Κατ' αντιστοιχία με το Σενάριο Α των εξεταζόμενων σχεδιαστικών παραμέτρων της μονάδας υπόγειας αποθήκευσης LNG, ακολούθως παρουσιάζονται ορισμένες βασικές παρατηρήσεις κατά την κατάστρωση του εν λόγω μοντέλου προσομοίωσης:



- Κατά το πρώτο στάδιο της προσομοίωσης (Γεωστατικό) προσομοιώνεται η εξεταζόμενη περιοχή πριν την πρόκληση οποιασδήποτε διατάραξης σε αυτή.
- Κατά το στάδιο της κάθε φάσης εκσκαφής και το πρώτο (1<sup>ο</sup>) στάδιο της τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης εφαρμόζεται στο εσωτερικό της εκάστοτε επιφάνειας επαγόμενο φορτίο ίσο με «1-λ», έτσι ώστε να προσομοιωθεί η αποτόνωση της βραχόμαζας στην τρίτη (μη ορατή) διάσταση. Κατά το δεύτερο (2<sup>ο</sup>) στάδιο της εφαρμογής των μέτρων άμεσης υποστήριξης το επαγόμενο φορτίο παύει να δρα στην επιφάνεια της εκσκαφής.
- Κατά το στάδιο #20 πραγματοποιείται η τοποθέτηση των δύο τελευταίων εσωτερικών τμημάτων της επένδυσης των εκσκαφών θεωρώντας ότι όλα τα φορτία από την αρχική αποτόνωση της βραχόμαζας έχουν παραλειφθεί από τα στοιχεία της άμεσης υποστήριξης.
- Κατά την φάση πλήρους λειτουργίας της μονάδας αποθήκευσης LNG, θεωρείται ολοκληρωτική πλήρωση της δεξαμενής με το προϊόν προς αποθήκευση. Ως εκ τούτου κατά το τελευταίο στάδιο της προσομοίωσης (Στάδιο 21<sup>ο</sup>) προσομοιώνεται η φόρτιση, την οποία δέχονται τα τοιχώματα της δεξαμενής κατά τη φάση λειτουργίας του έργου. Η συγκεκριμένη φόρτιση θεωρείται πως δεν θα ξεπερνά τα 0.5MPa και ως εκ τούτου επιλέγεται η εφαρμογή της συγκεκριμένης τιμής φορτίου ως η δυσμενέστερη περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη προσομοίωση θεωρείται ότι δεν θα παρατηρηθεί άνοδος της θερμοκρασίας εντός της δεξαμενής που να ξεπερνάει τους 20°C σε σχέση με τη θερμοκρασία βρασμού του φυσικού αέριου. Ως εκ τούτου, κάνοντας χρήση του ακόλουθου διαγράμματος και για θερμοκρασία αποθηκευμένου προϊόντος (LNG) ίση με -140°C ( $T \approx 135\text{K}$ ) προκύπτει μία εσωτερική τάση ασκούμενη από το αποθηκευμένο προϊόν ίση περί τα 0.5MPa.

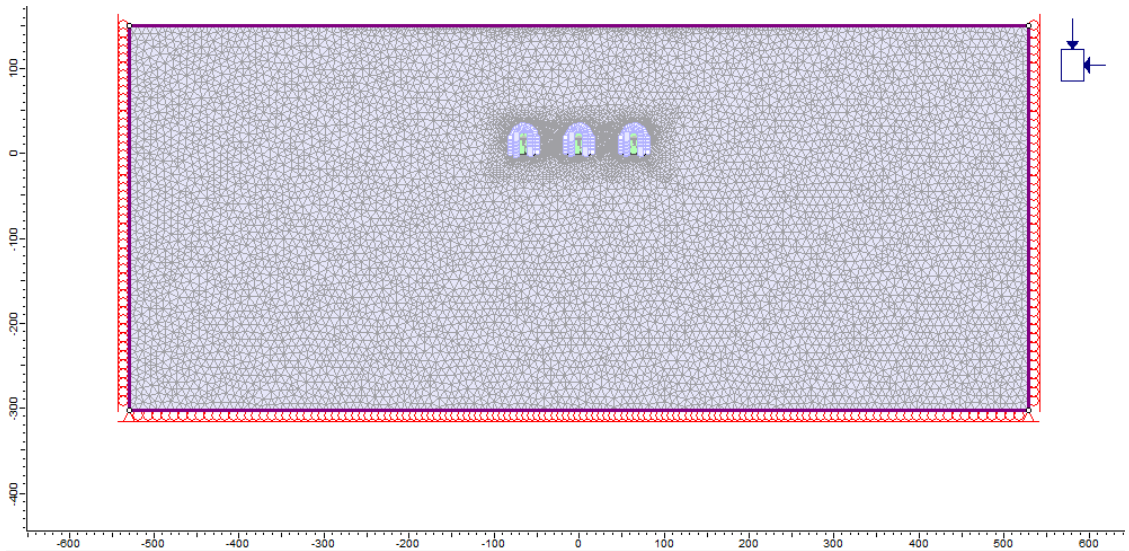


Εικόνα 40: Προσδιορισμός ασκούμενης εσωτερικής πίεσης εντός της δεξαμενής (Lentner et al. 2017)

- Τα εξωτερικά όρια του μοντέλου προσομοίωσης επιλέγονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται πλήρης απόσβεση της επιρροής του έργου στον περιβάλλοντα σχηματισμό. Επομένως:
  - Τα πλευρικά εξωτερικά όρια του μοντέλου προσομοίωσης εκτείνονται σε απόσταση τρεισήμισι (3.5) φορές την απόσταση μεταξύ των δύο οριζόντιων ακραίων σημείων της μονάδας.
  - Το ανώτερο εξωτερικό όριο του μοντέλου προσομοίωσης ορίζεται σύμφωνα με το εκτιμώμενο βάθος εκσκαφής, ήτοι περί τα 150m από τη στάθμη της εκσκαφής.
  - Το κατώτερο εξωτερικό όριο του μοντέλου εκτείνεται σε απόσταση δύο (2) φορές την απόσταση μεταξύ των δύο οριζόντιων ακραίων σημείων της μονάδας.
  - Ως κριτήριο αστοχίας της βραχομάζας χρησιμοποιείται το «Γενικευμένο Κριτήριο Αστοχίας Hoek & Brown» και ως τιμές παραμέτρων αντοχής εφαρμόζονται οι προτεινόμενες κατά την πρότερη γεωτεχνική αξιολόγηση στην περιοχή πλησίον της εγκατάστασης.

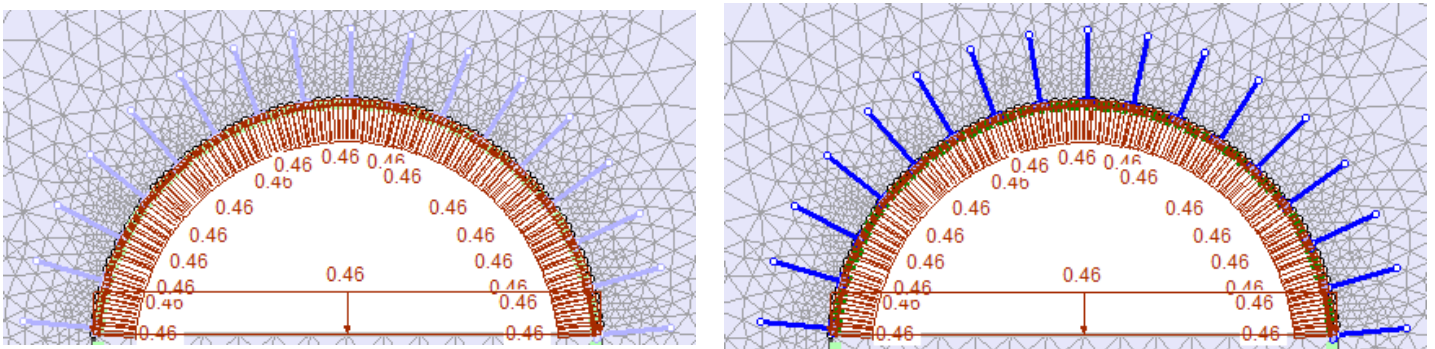
Ενδεικτικά, ακολούθως παρουσιάζονται ορισμένα κύρια στάδια της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα:

- Στην Εικόνα 41 παρουσιάζεται το στάδιο #1, δηλαδή το γεωστατικό στάδιο.



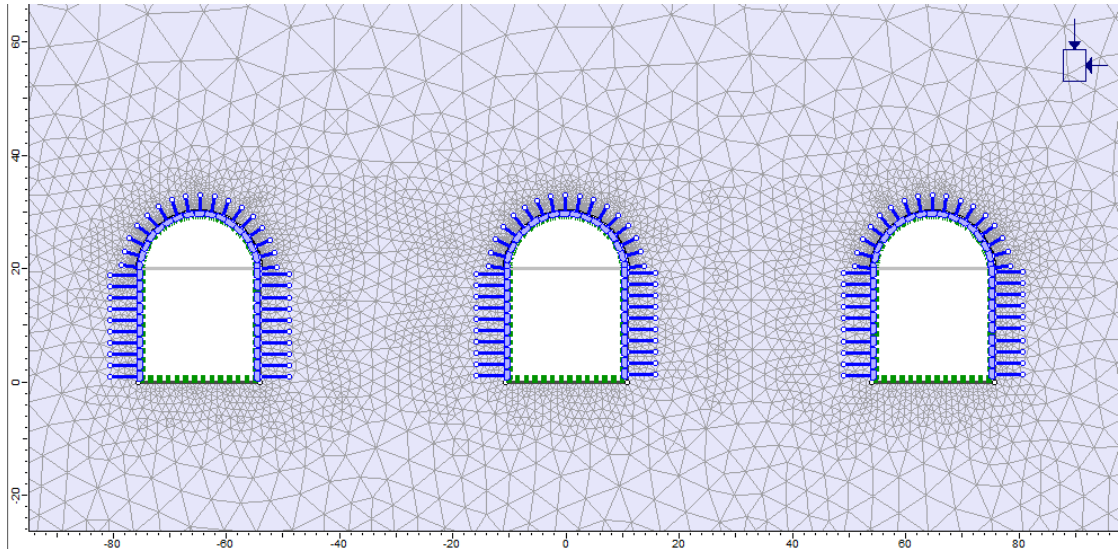
Εικόνα 41: Σενάριο Β – Γεωστατικό στάδιο

- Στην Εικόνα 42 παρουσιάζονται τα στάδια #2 και #3, δηλαδή της εκσκαφής της Α' φάσης της 1<sup>ης</sup> εκσκαφής και του 1<sup>ου</sup> σταδίου της τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης στην εν λόγω φάση.



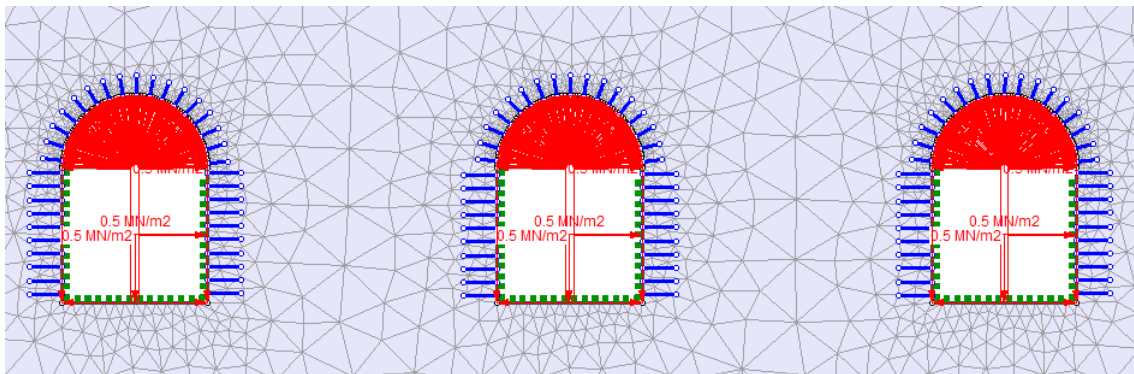
Εικόνα 42: Σενάριο Β - Στάδια προσομοίωσης εγκατάστασης αποθήκευσης LNG: Στάδιο #2 (Αριστερά) & Στάδιο #3 (Δεξιά)

- Στην Εικόνα 43 παρουσιάζεται το στάδιο #20, δηλαδή της πλήρης εκσκαφής και τοποθέτησης όλων των τμημάτων της επένδυσης.



Εικόνα 43: Σενάριο B – Στάδιο #20: Πλήρης εφαρμογής των τμημάτων της επένδυσης των τοιχωμάτων

- Στην Εικόνα 44 παρουσιάζεται το στάδιο #21, δηλαδή της εφαρμογής του φορτίου που ασκεί το αποθηκεύμενο προϊόν στα τοιχώματα της δεξαμενής.



Εικόνα 44: Σενάριο B – Στάδιο #21: Φάση πλήρους λειτουργίας χώρου αποθήκευσης LNG

### 3.4 Αποτελέσματα αναλύσεων μέσω πεπερασμένων στοιχείων

#### 3.4.1 Γενικά

Με σκοπό την επιβεβαίωση της εφικτότητας των εξεταζόμενων σεναρίων από πλευράς σχεδιαστικών παραμέτρων λαμβάνοντας υπόψιν τα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά της περιοχής ενδιαφέροντος, αναλύσεις ευστάθειας των υπογείων θαλάμων διεξήχθησαν, κάνοντας χρήση του λογισμικού H/Y RS2 της εταιρείας Rocscience. Το RS2<sup>©</sup> είναι ένα πλήρες πακέτο λογισμικού 2D γεωτεχνικών πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο δύναται να χρησιμοποιεί για αναλύσεις τόσο σε εδαφικούς όσο και σε βραχώδεις σχηματισμούς, προσφέροντας πληθώρα σχεδιαστικών επιλογών και εργαλεία για την προσομοίωση αρκετά πολύπλοκων διατάξεων.

Στοχεύοντας στην πραγματοποίηση ενός ολοκληρωμένου ελέγχου ευστάθειας της μονάδας αποθήκευσης, στο παρόν κεφάλαιο διενεργείται εκτεταμένη ανάλυση κινδύνου κατασκευής και λειτουργίας του έργου. Σύμφωνα με τους Žlender, Jelušič, & Boumezerane (2011), οι κίνδυνοι που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της κατασκευής ενός υπογείου θαλάμου αποθήκευσης LNG είναι παρόμοιοι με εκείνους που προκύπτουν κατά την κατασκευή μίας σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα, τυπικοί κίνδυνοι που δύνανται να προκύψουν κατά την κατασκευή είναι:

- μεγάλης κλίμακας αστοχία της οροφής της εκσκαφής,
- μεγάλες παραμορφώσεις των τοιχωμάτων του θαλάμου,
- εισροή υδάτων εντός του χώρου της εκσκαφής και μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής κ.α.

Οι κίνδυνοι που καλούνται να εξεταστούν κατά τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της μονάδας αποθήκευσης είναι οι εξής:

- Κίνδυνος 1: Αστοχία της περιβάλλουσας βραχομάζας (Υπέρβαση ορίου αντοχής)
- Κίνδυνος 2: Αστοχία (ανύψωση) του υπερκείμενου του θαλάμου πετρώματος
- Κίνδυνος 3: Αστοχία του πετρώματος μεταξύ γειτονικών θαλάμων
- Κίνδυνος 4: Εμφάνιση εκτεταμένων παραμορφώσεων και αστοχιών της μεταλλικής επένδυσης
- Κίνδυνος 5: Διαφορική παραμόρφωση του υπογείου θαλάμου αποθήκευσης λόγω ετερογένειας του πετρώματος
- Κίνδυνος 6: Βλάβη του συστήματος αποστράγγισης

Εκ των ανωτέρω κινδύνων, η επάρκεια έναντι του πρώτου κινδύνου επαληθεύεται σύμφωνα με τον έλεγχο ευστάθειας που διενεργείται μέσω των μοντέλων αριθμητικής προσομοίωσης της μονάδας αποθήκευσης, ενώ οι Κίνδυνοι #5 και #6 αντιμετωπίζονται μέσω της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού του έργου.

Όσον αφορά στον Κίνδυνο #2, αυτός ελέγχεται σύμφωνα με την σχέση:

$$SF_{up} \geq SF_{up,min}$$

Πιο συγκεκριμένα, αστοχία του υπερκείμενου στρώματος πετρώματος λαμβάνει χώρα όταν η πίεση που ασκεί το αποθηκευμένο αέριο μέσα στη δεξαμενή είναι μεγαλύτερη από την πίεση

που ασκεί το υπερκείμενο στρώμα πετρώματος, άνωθεν της εκσκαφής. Στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας, ως ελάχιστο όριο συντελεστή ασφαλείας ορίζεται συμβατικά η τιμή 1.

Όσον αφορά στον Κίνδυνο #3, αυτός ελέγχεται σύμφωνα με την σχέση:

$$SF_{hor} \geq SF_{hor,min}$$

Για να ικανοποιηθεί η εν λόγω συνθήκη και να αποφευχθεί ο εξεταζόμενος κίνδυνος θα πρέπει ο συντελεστής ασφαλείας του πετρώματος μεταξύ δύο γειτονικών θαλάμων αποθήκευσης να είναι μεγαλύτερος ίσος από μία ελάχιστη τιμή. Στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας, ως ελάχιστο όριο συντελεστή ασφαλείας ορίζεται συμβατικά η τιμή 1.

Όσον αφορά στον Κίνδυνο #4, αυτός ελέγχεται σύμφωνα με την σχέση:

$$\varepsilon \leq \varepsilon_{max}$$

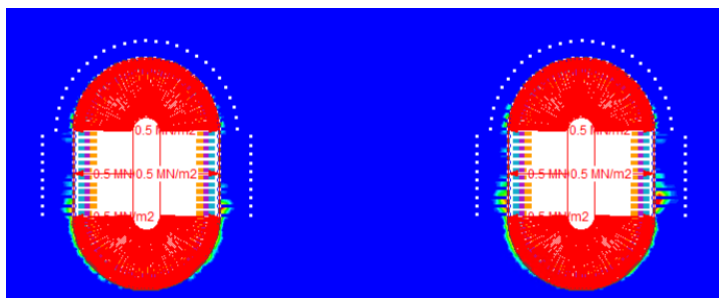
Αντίστοιχα, για τον έλεγχο της επάρκειας της μεταλλικής επένδυσης, θα πρέπει οι υπολογιζόμενες παραμορφώσεις να είναι μικρότερες από το ανώτατο όριο παραμορφώσεων, τις οποίες μπορεί να δεχθεί ασφαλώς το εν λόγω τμήμα της επένδυσης. Η μέση παραμόρφωση της μεταλλικής επένδυσης ακολουθεί την επαπτομενική παραμόρφωση που προκαλείται στα τοιχώματα του υπογείου θαλάμου λόγω της εσωτερικής πίεσης που ασκεί το αποθηκευμένου προϊόν.

Ακολούθως παρουσιάζονται τα βασικά αποτελέσματα της ανάλυσης ευστάθειας των δύο σεναρίων σχεδιαστικών παραμέτρων, μέσα από τη χρήση του προγράμματος αριθμητικής ανάλυσης RS2. Επίσης, τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν την προαναφερθείσα ανάλυση κινδύνου κατασκευής των μονάδων αποθήκευσης.

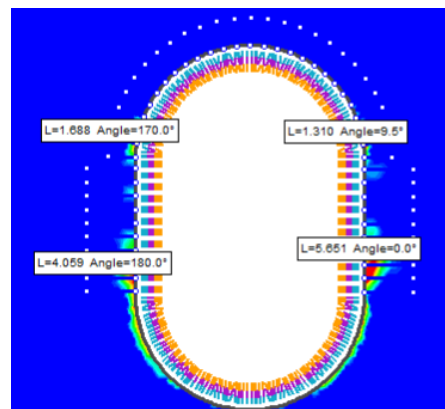
### 3.4.2 1<sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού

Το σύνολο των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται κατά το τελευταίο στάδιο της προσομοίωσης, ήτοι κατά τη φάση πλήρους λειτουργίας του έργου, όπου λαμβάνει χώρα η εφαρμογή εσωτερικής πίεσης εντός της δεξαμενής, προσομοιώνοντας την φόρτιση που ασκεί το αποθηκευμένου προϊόν στα τοιχώματα του θαλάμου.

Στην Εικόνα 45α παρουσιάζονται τα σημεία γύρω από τις εκσκαφές που έχουν διαρρεύσει, δηλαδή έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό ή/και διάτμηση, με τις κατά θέσεις μέγιστες εμφανιζόμενες αποστάσεις από τα τοιχώματα του θαλάμου να παρουσιάζονται στην Εικόνα 45β.



(α)



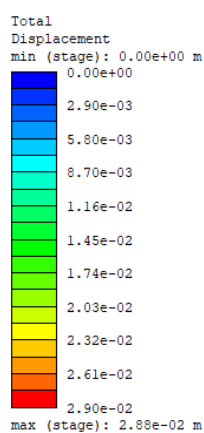
(β)

Εικόνα 45: (α) Σημεία που έχουν διαρρέυσει γύρω από τους υπόγειους θαλάμους (β) Μέγιστη απόσταση ζώνης επιρροής από το τοίχωμα του θαλάμου

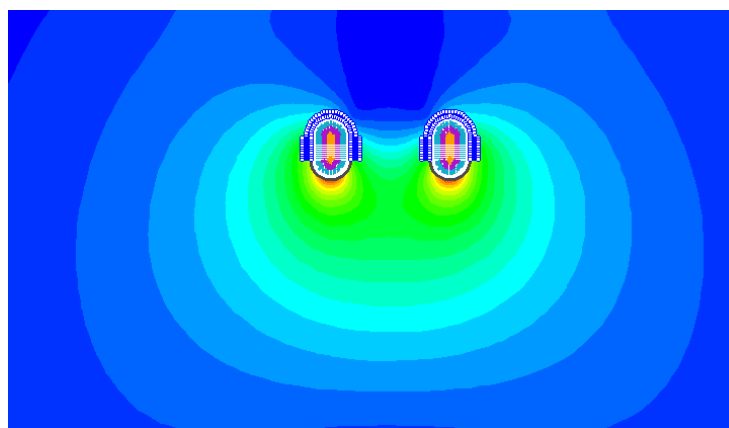
Όπως παρατηρείται από τα ανωτέρω αποτελέσματα, η ζώνη αστοχίας της περιβάλλουσας βραχώμαζας γύρω από την εκσκαφή εκτείνεται σε απόσταση έως τα 3.5m περίπου. Το επιλεγμένο μήκος των αγκυρίων κατά το συγκεκριμένο σενάριο σχεδιασμού είναι 5m στη στέψη και 9 m στις παρειές του θαλάμου, αντίστοιχα. Ως εκ τούτου προκύπτει το συμπέρασμα, ότι τα αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης που προβλέπεται να τοποθετηθούν έχουν σχεδιαστεί με επαρκές μήκος αγκύρωσης.

Βαρύνουσας σημασίας για την εξέταση της ευστάθειας της σχεδιαζόμενης μονάδας είναι ο έλεγχος της κατανομής των ολικών μετατοπίσεων γύρω από τους θαλάμους.

Στις Εικόνες 46 και 47 δίνεται η χωρική κατανομή των ολικών μετακινήσεων γύρω από τους θαλάμους.

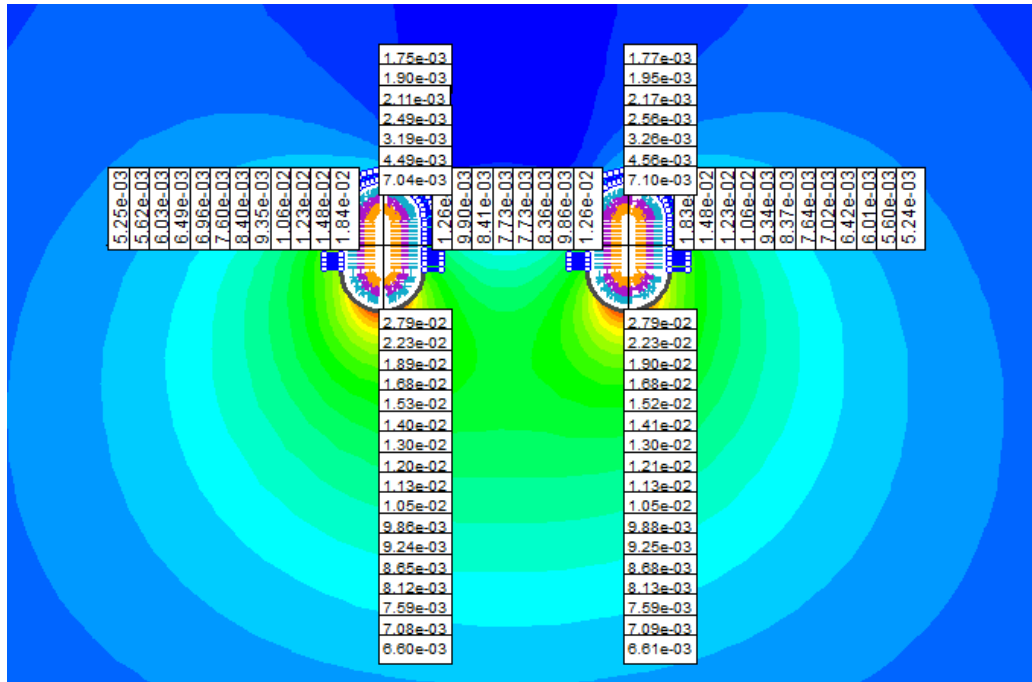


(α)



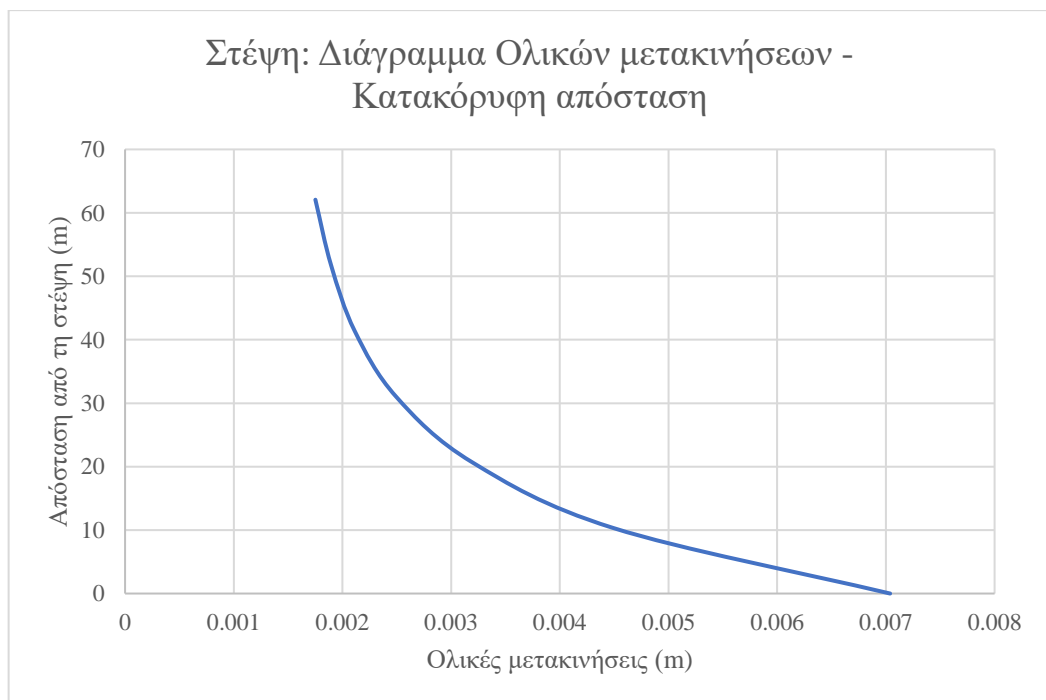
(β)

Εικόνα 46: Κατανομή ολικών μετατοπίσεων



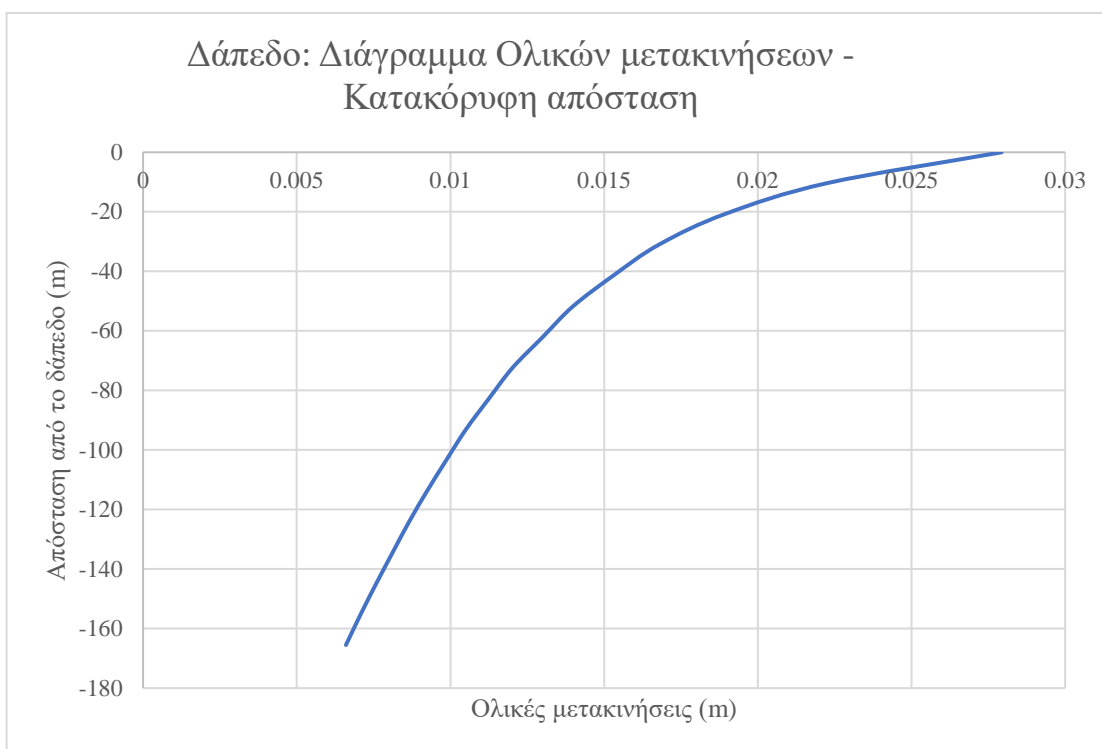
Εικόνα 47: Κατανομή ολικών μετατοπίσεων

Λόγω της παραπλήσιας κατανομής των μετατοπίσεων γύρω από τους θαλάμους στα διαγράμματα των Εικόνων Εικόνα 48 και Εικόνα 49 παρουσιάζεται η κατανομή των μετακινήσεων συναρτήσει της κατακόρυφης απόστασης από την στέψη και το δάπεδο του θαλάμου, ενώ στις Εικόνες 50 και 51 δίνεται η αντίστοιχη κατανομή κατά την οριζόντια διεύθυνση.





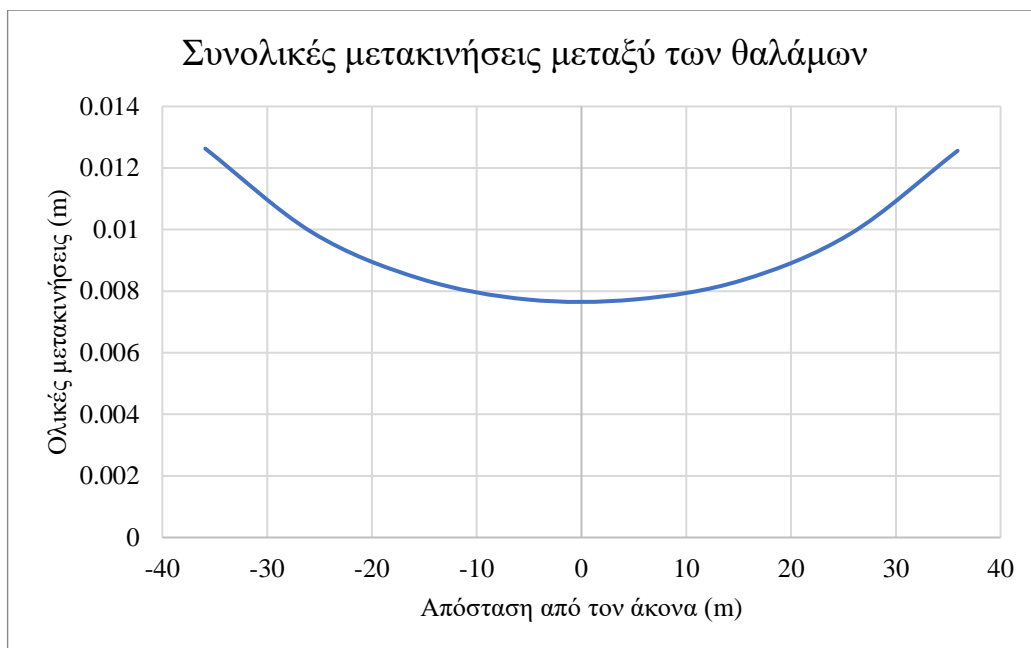
Εικόνα 48: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης από τη στέγη του θαλάμου



Εικόνα 49: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης από το δάπεδο του θαλάμου



Εικόνα 50: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης από τον άξονα της μονάδας αποθήκευσης



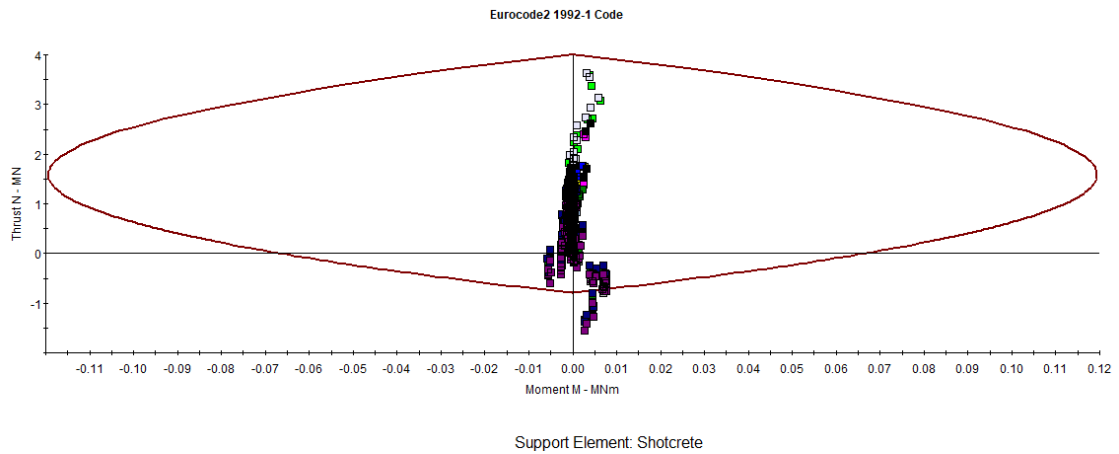
Εικόνα 51: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων μεταξύ των θαλάμων

Συνολικά, οι μέγιστες υπολογιζόμενες μετακινήσεις στη στέψη, στο δάπεδο και τις παρειές των θαλάμων είναι οι εξής:

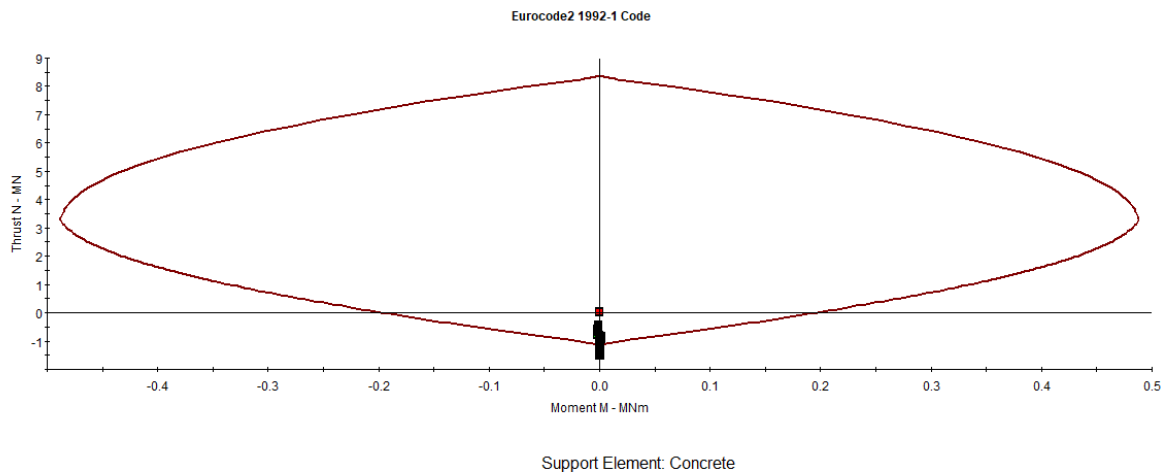
**Πίνακας 16: Αποτελέσματα τελικών μετακινήσεων**

Θάλαμος	Τιμή συνολικών μετακινήσεων (m)				Χώρος μεταξύ των θαλάμων
	Στέψη	Δάπεδο	Δεξιά παρειά	Αριστερή παρειά	
Αριστερός	0.0070	0.0279	-	0.0184	0.01263
Δεξιός	0.0271	0.0279	0.0184	-	

Όσον αφορά στην ευστάθεια των στρωμάτων της επένδυσης των τοιχωμάτων των υπογείων θαλάμων, στις Εικόνες 52 και 53 δίνονται τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των στρωμάτων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και του έγχυτου σκυροδέματος.

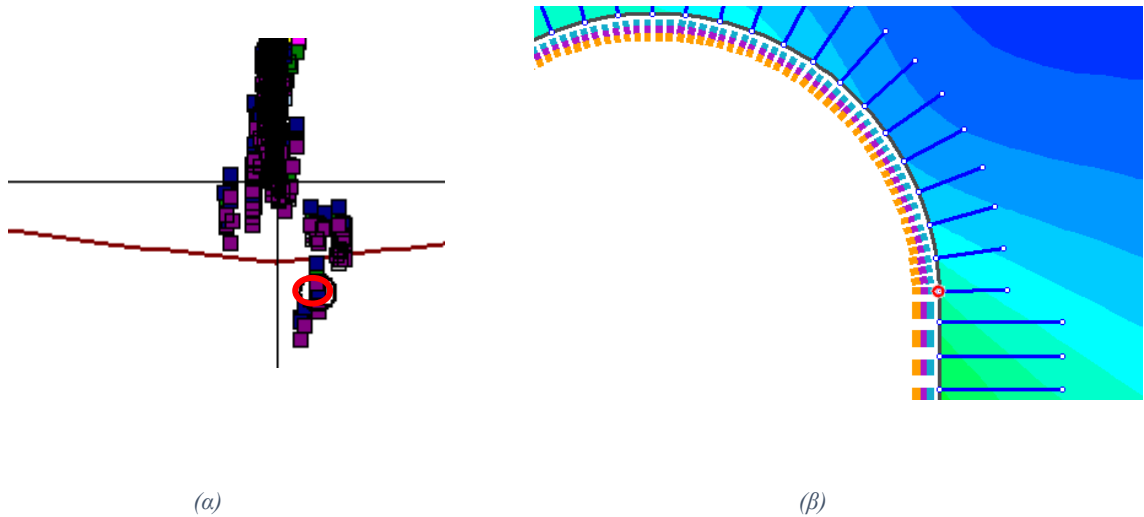


Εικόνα 52: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης στρώματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος

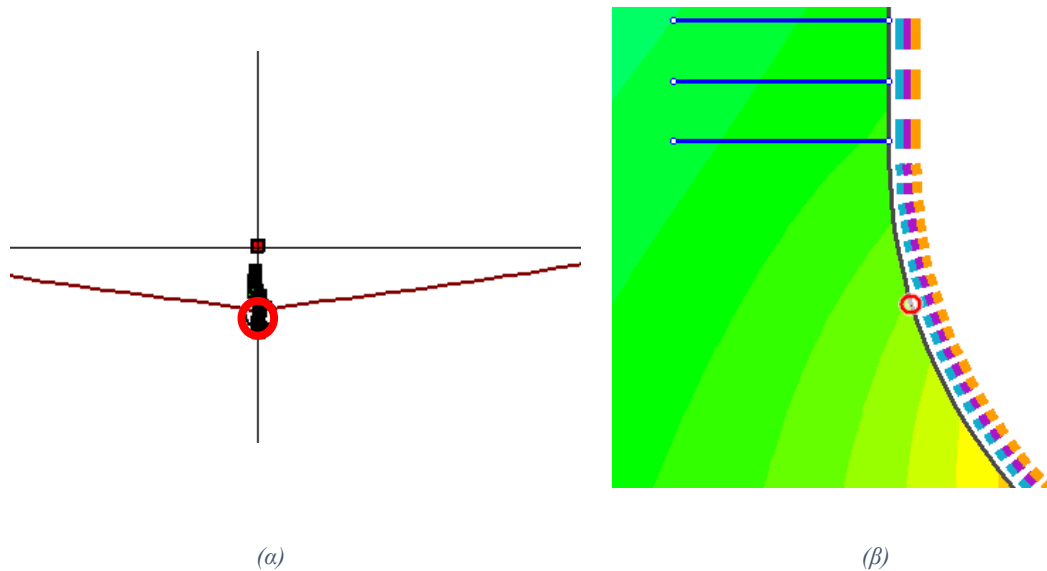


Εικόνα 53: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης στρώματος έγχυτου σκυροδέματος

Στα ανωτέρω διαγράμματα, επιβεβαιώνεται η επάρκεια των συγκεκριμένων μέτρων υποστήριξης, συγκρίνοντας τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης της προσωρινής υποστήριξης με τις προδιαγραφές που ορίζονται κατά EC2 EN 1992-1. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα σημεία του διαγράμματος που βρίσκονται εκτός των επιτρεπτών ορίων φόρτισης αφορούν σε σημεία απότομης αλλαγής της κλίσης της εκσκαφής (βλ. Εικόνες 54 και 55), ήτοι σε σημεία έντονης συσσώρευσης τάσεων και στις εν λόγω θέσεις προτείνεται η τοπική ενίσχυση των μέτρων υποστήριξης.



Εικόνα 54: (α) Θέση σημείου που εμφανίζεται να μην ικανοποιεί τις προδιαγραφές ασφαλείας (β) Θέση του σημείου στην εκσκαφή



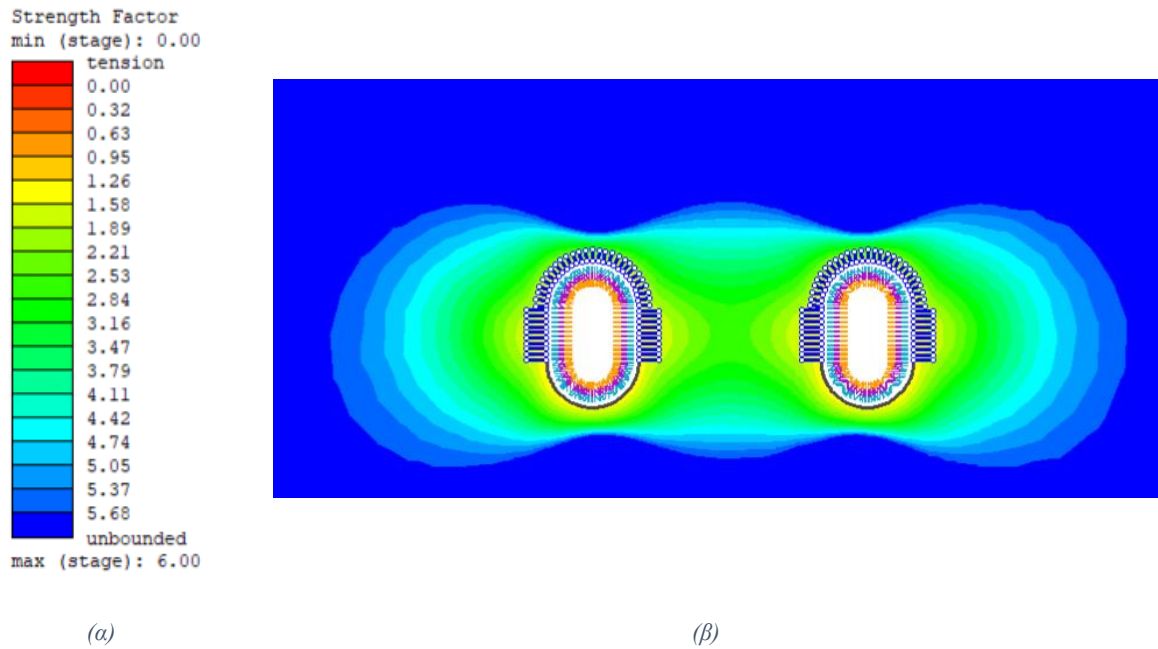
Εικόνα 55: (α) Θέση σημείου που εμφανίζεται να μην ικανοποιεί τις προδιαγραφές ασφαλείας (β) Θέση του σημείου στην εκσκαφή

Αναφορικά με την ανάλυση κινδύνου που διενεργείται για το εν λόγω σενάριο σχεδιαστικών παραμέτρων προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

### Συντελεστής ασφαλείας

Ο έλεγχος του συντελεστή ασφαλείας γύρω από την εκσκαφή καλύπτει τις ανάγκες εξέτασης των κινδύνων #2 και #3, οι οποίοι αναφέρονται σε αστοχία του πετρώματος άνωθεν του συγκροτήματος αποθήκευσης και σε αστοχία μεταξύ γειτονικών θαλάμων, αντίστοιχα.

Στην Εικόνα 56 παρουσιάζεται η κατανομή του συντελεστή ασφαλείας γύρω από την εγκατάσταση.

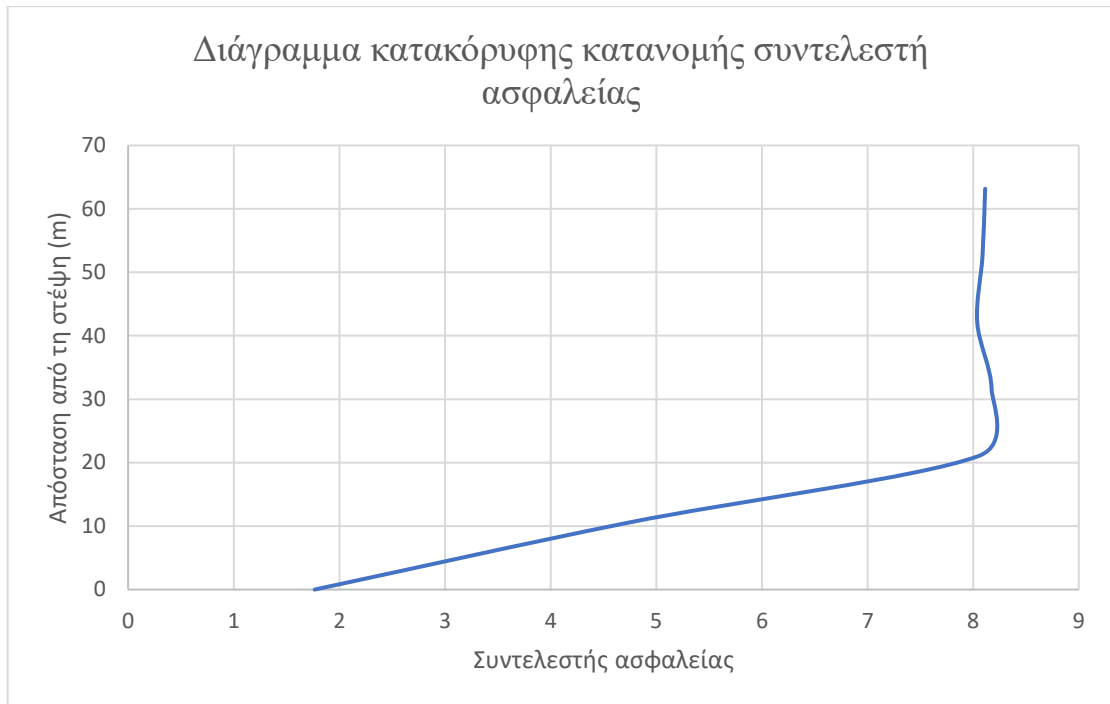


Εικόνα 56: Χωρική κατανομή συντελεστή ασφαλείας

Ακολούθως παρουσιάζονται οι επιμέρους αναλύσεις των Κινδύνων #2 και #3.

### Κίνδυνος #2

Ο έλεγχος του πετρώματος άνωθεν της στέγης των υπογείων θαλάμων αποθήκευσης πραγματοποιείται εξετάζοντας τον συντελεστή ασφαλείας άνωθεν της εγκατάστασης. Για να θεωρηθεί επισφαλής μία εξεταζόμενη περίπτωση θα πρέπει ο υπολογιζόμενος συντελεστής ασφαλείας να είναι μικρότερος από μία ελάχιστη οριζόμενη τιμή, η οποία στα πλαίσια της παρούσης ανάλυσης ορίζεται συμβατικά με μονάδα (1). Λόγω της παραπλήσιας κατανομής του συντελεστή ασφαλείας πάνω από τις δύο εκσκαφές, στο διάγραμμα της Εικόνας 57 παρουσιάζεται η κατανομή του συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει της κατακόρυφης απόστασης από τη στέγη του δεξιού θαλάμου.

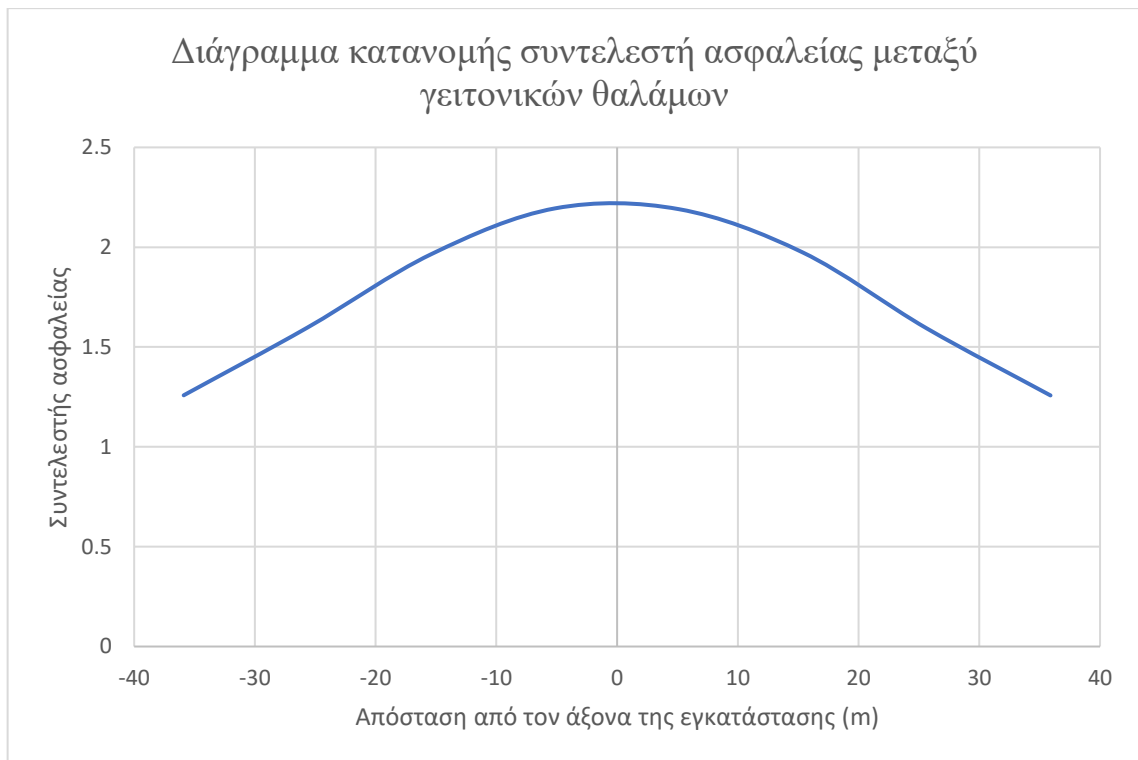


Εικόνα 57: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει της κατακόρυφης απόστασης από τη στέψη του (δεξιού) θαλάμου

Η ελάχιστη τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι 1.8, επομένως πληρούνται οι προϋποθέσεις ασφάλειας έναντι του Κινδύνου #2.

### Κίνδυνος #3

Ο Κίνδυνος 3 αναφέρεται στην αστοχία του πετρώματος μεταξύ δύο διαδοχικών θαλάμων. Ο έλεγχος που διενεργείται στη συγκεκριμένη περίπτωση βασίζεται στην αντιπαραβολή του υπολογιζόμενου συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας του πετρώματος μεταξύ των θαλάμων, σε σχέση με μία συμβατικά οριζόμενη ελάχιστη τιμή συντελεστή, η οποία στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας ορίζεται συμβατικά με μονάδα (1). Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται η κατανομή του συντελεστή ασφαλείας μεταξύ των δύο γειτονικών εκσκαφών.



Εικόνα 58: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης από τον άξονα της εγκατάστασης

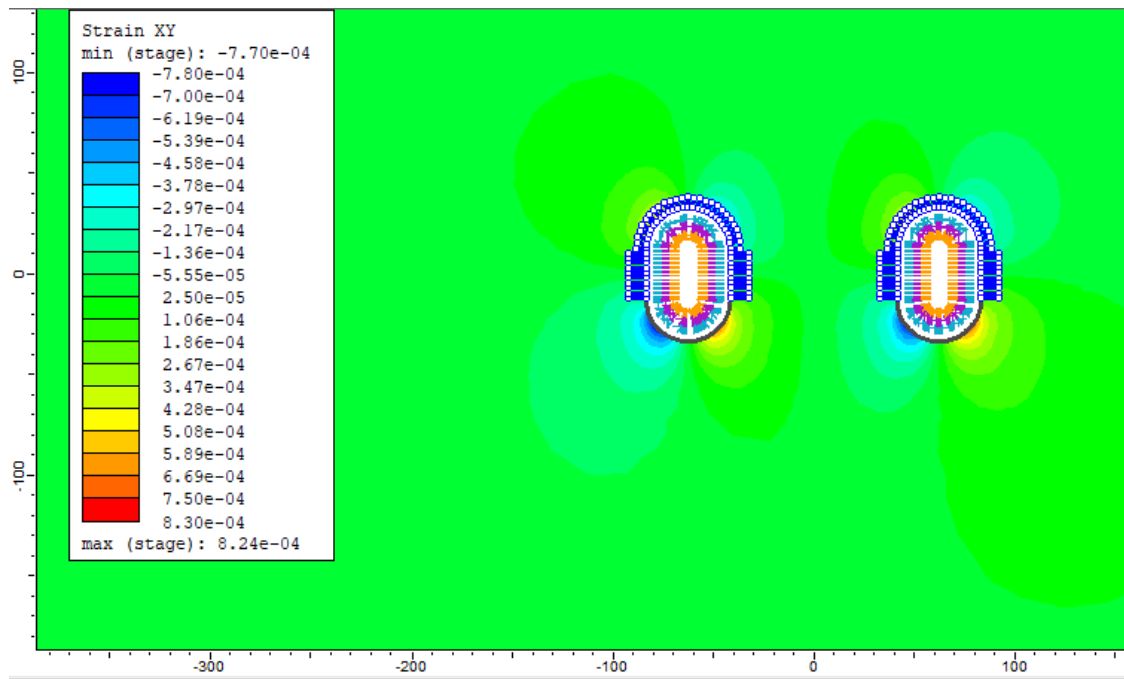
Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το ανωτέρω διάγραμμα, για την εξεταζόμενη περίπτωση πληρείται η προϋπόθεση ασφαλείας του πετρώματος μεταξύ των γειτονικών εκσκαφών.

#### Κίνδυνος #4

Ο εν λόγω τύπος κινδύνου αναφέρεται σε εκτεταμένη παραμόρφωση της μεταλλικής επένδυσης της δεξαμενής. Με σκοπό την εξασφάλιση της ασφάλειας έναντι του εν λόγω κινδύνου εξετάζονται οι διατμητικές παραμορφώσεις των τοιχωμάτων των θαλάμων, οι οποίες θα πρέπει να είναι μικρότερες από μία οριακή τιμή, η οποία ορίζεται από το όριο διαρροής του χάλυβα. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή παραμόρφωσης της χαλύβδινης κατασκευής είναι η εξής:

$$\varepsilon_{max} = \frac{f_y}{1.15 \times E} = \frac{355 \text{ MPa}}{1.15 \times 210,000 \text{ MPa}} = 0.00147$$

Στην Εικόνα 59 παρουσιάζεται γραφικά η κατανομή των διατμητικών παραμορφώσεων γύρω από τις εγκαταστάσεις.



Εικόνα 59: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων γύρω από την μονάδα αποθήκευσης

Οι μέγιστες παραμορφώσεις που παρουσιάζονται γύρω από τους θαλάμους εκσκαφής, σύμφωνα με την ανωτέρω ανάλυση είναι 0.00082 στον αριστερό και στο δεξί θάλαμο.

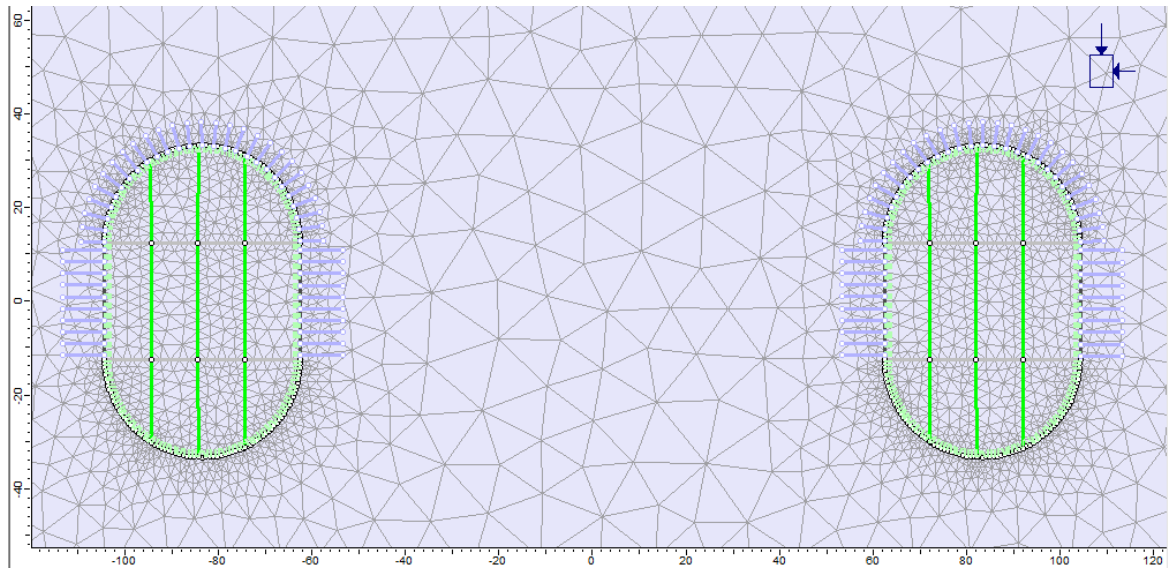
### Συμπληρωματικές αναλύσεις

Σύμφωνα με την διάταξη του Σεναρίου Α που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 30, η εγκατάσταση αποθήκευσης LNG περιλαμβάνει τέσσερις (4) κατακόρυφους θαλάμους. Για λόγους πληρότητας των αναλύσεων, για το εν λόγω σενάριο πραγματοποιήθηκε μία επιπρόσθετη ανάλυση η οποία αφορά την όψη της εγκατάστασης υπό σύστημα συντεταγμένων Y – Z. Για την οικονομία του λόγου, ακολούθως παρουσιάζονται μόνο τα βασικά στοιχεία της εν λόγω ανάλυσης.

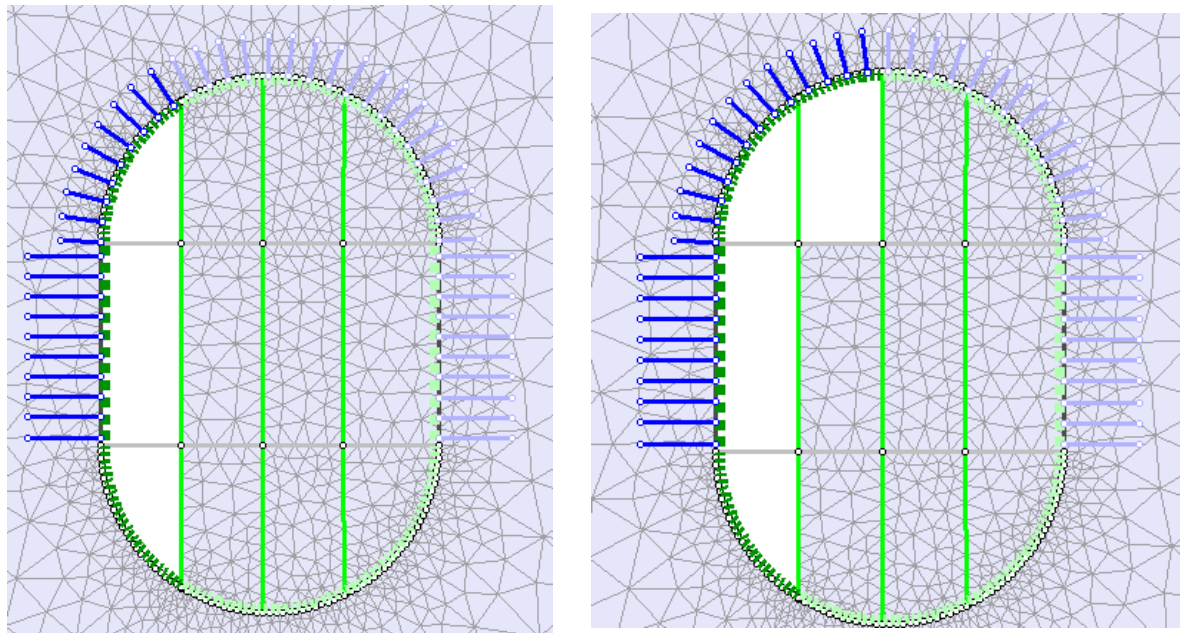
Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο προσομοίωσης κατασκευάστηκε σε συνολικά 75 στάδια, τα οποία ακολουθούν την οριζόμενη αλληλουχία κατασκευής, όπως παρουσιάστηκε και κατά το μοντέλο προσομοίωσης υπό σύστημα συντεταγμένων X – Z. Κατά τη προσομοίωση θεωρήθηκε μέση προχώρηση ανά φάση εκσκαφής περί τα 10m, η οποία αντιστοιχίζεται σε βαθμό αποτόνωσης βραχόμαζας ίσο με  $\lambda = 0.77$ .

Ενδεικτικά, στην Εικόνα 60 παρουσιάζεται η διάταξη των θαλάμων εκσκαφής, και στην Εικόνα 61 η κατασκευαστική αλληλουχία που ακολουθείται.





Εικόνα 60: Γεωστατικό στάδιο προσομοίωσης διάταξης υπό σύστημα συντεταγμένων  $Y - Z$  (πλάγια όψη εγκατάστασης)

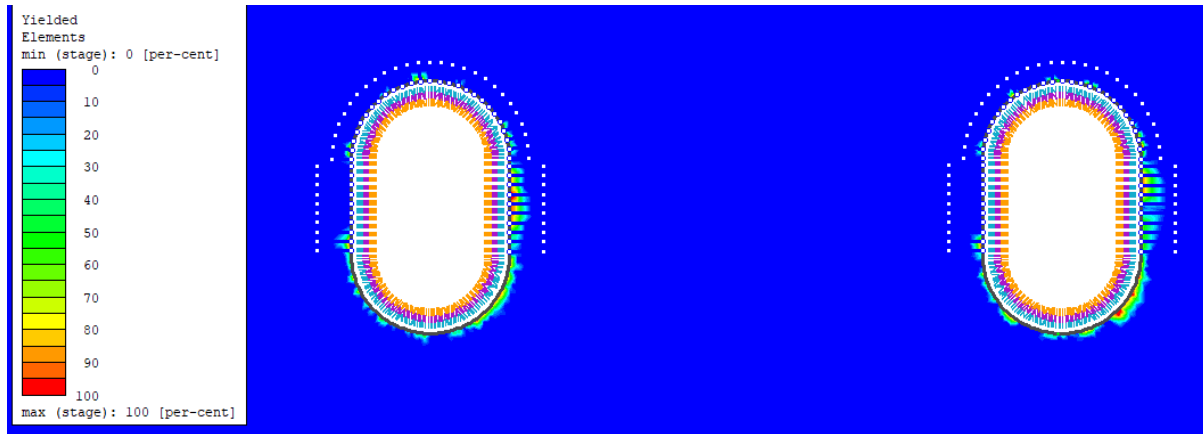


(α)

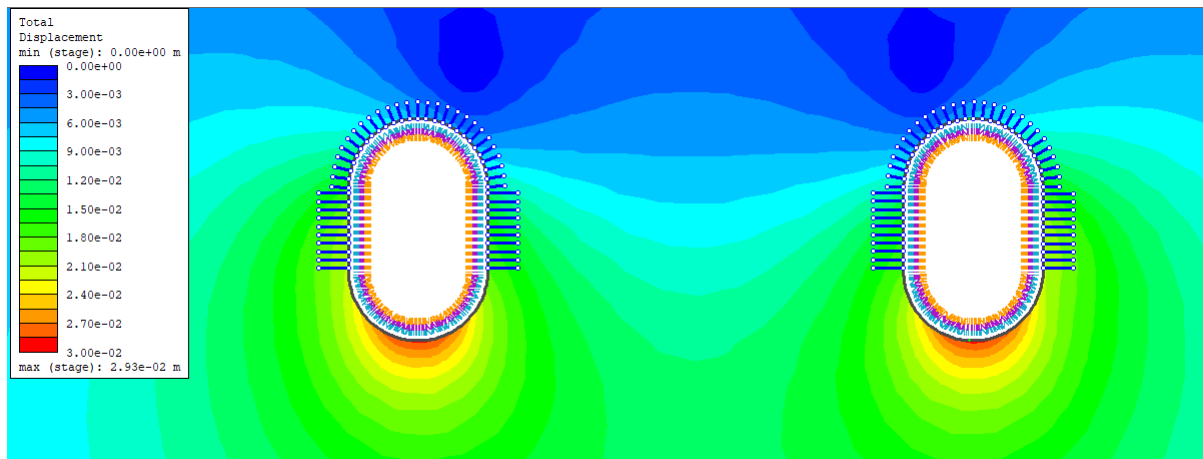
(β)

Εικόνα 61: Κατασκευαστική αλληλουχία θαλάμου (πλάγια όψη εγκατάστασης)

Στις Εικόνες 62 και 63 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι κατανομές των σημείων που έχουν διαρρέυσει και των ολικών μετακινήσεων γύρω από τις εκσκαφές κατά το τελευταίο στάδιο της προσομοίωσης. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η εν λόγω ανάλυση (υπό σύστημα συντεταγμένων  $Y - Z$ ) λειτουργεί βοηθητικά και συμπληρωματικά στην επιβεβαίωση των αρχικών θεωρήσεων της πρώτης περίπτωσης σχεδιαστικών παραμέτρων.



Εικόνα 62: Χωρική κατανομή στοιχείων που έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό ή/και διάτμηση γύρω από τους θαλάμους

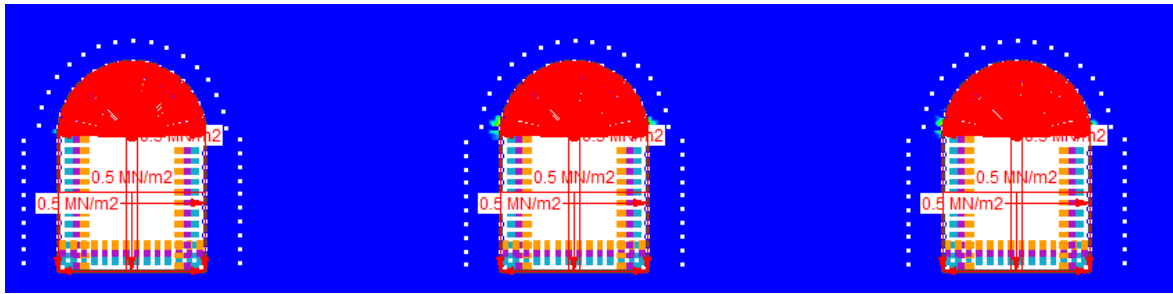


Εικόνα 63: Χωρική κατανομή ολικών μετακινήσεων γύρω από τους θαλάμους

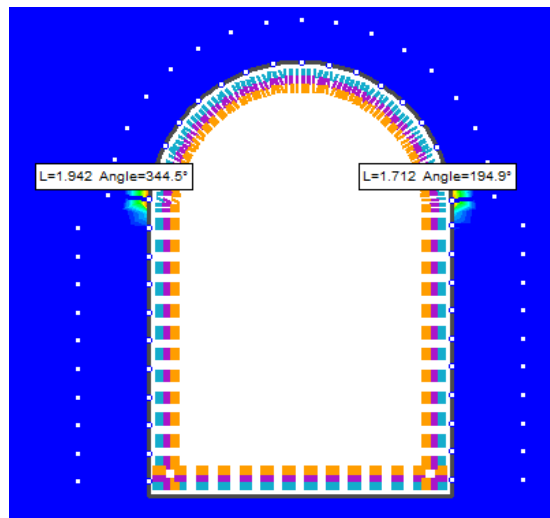
### 3.4.3 2<sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού

Το σύνολο των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται κατά το τελευταίο στάδιο της προσομοίωσης, ήτοι κατά τη φάση πλήρους λειτουργίας του έργου, όπου λαμβάνει χώρα η εφαρμογή εσωτερικής πίεσης εντός της δεξαμενής, προσομοιώνοντας την φόρτιση που ασκεί το αποθηκευμένου προϊόν στα τοιχώματα του θαλάμου.

Στην Εικόνα 64α παρουσιάζονται τα σημεία γύρω από τις εκσκαφές που έχουν διαρρεύσει, δηλαδή έχουν αστοχήσει σε εφελκυσμό ή/και διάτμηση, με τις κατά θέσεις μέγιστες εμφανιζόμενες αποστάσεις από τα τοιχώματα του θαλάμου να παρουσιάζονται στην Εικόνα 64β.



(α)



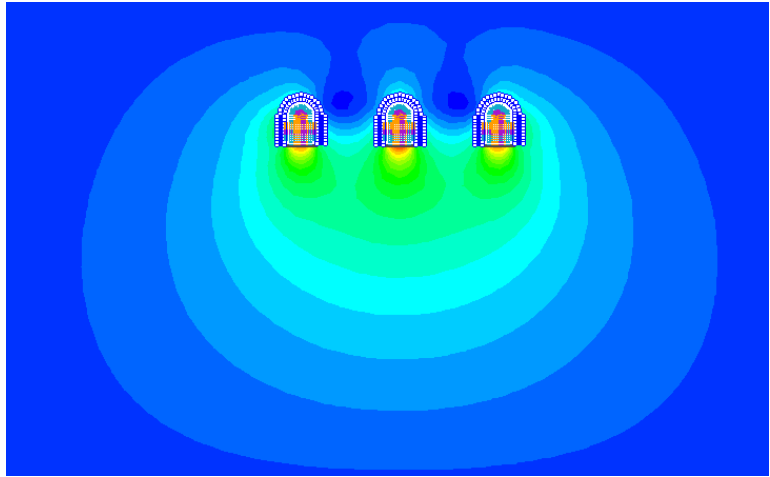
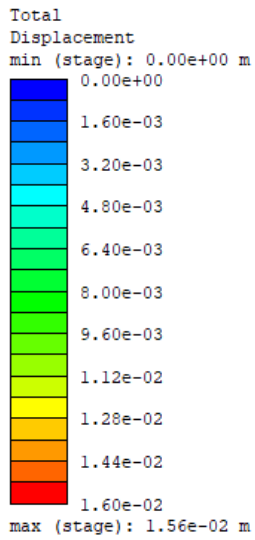
(β)

Εικόνα 64: (α) Σημεία που έχουν διαρρέσει γύρω από τους υπόγειους θαλάμους (β) Μέγιστη απόσταση ζώνης επιρροής από το τοίχωμα του θαλάμου

Όπως παρατηρείται από τα ανωτέρω αποτελέσματα, η ζώνη αστοχίας της περιβάλλουσας βραχώμαζας γύρω από την εκσκαφή εκτείνεται σε απόσταση έως τα 2m περίπου. Το επιλεγμένο μήκος των αγκυρίων κατά το συγκεκριμένο σενάριο σχεδιασμού είναι 3m στη στέψη και 5m στις παρειές του θαλάμου, αντίστοιχα. Ως εκ τούτου προκύπτει το συμπέρασμα, ότι τα αγκύρια ολόσωμης πάκτωσης που προβλέπεται να τοποθετηθούν έχουν σχεδιαστεί με επαρκές μήκος.

Βαρύνουσας σημασίας για την εξέταση της ευστάθειας της σχεδιαζόμενης μονάδας είναι ο έλεγχος της κατανομής των ολικών μετατοπίσεων γύρω από τους θαλάμους.

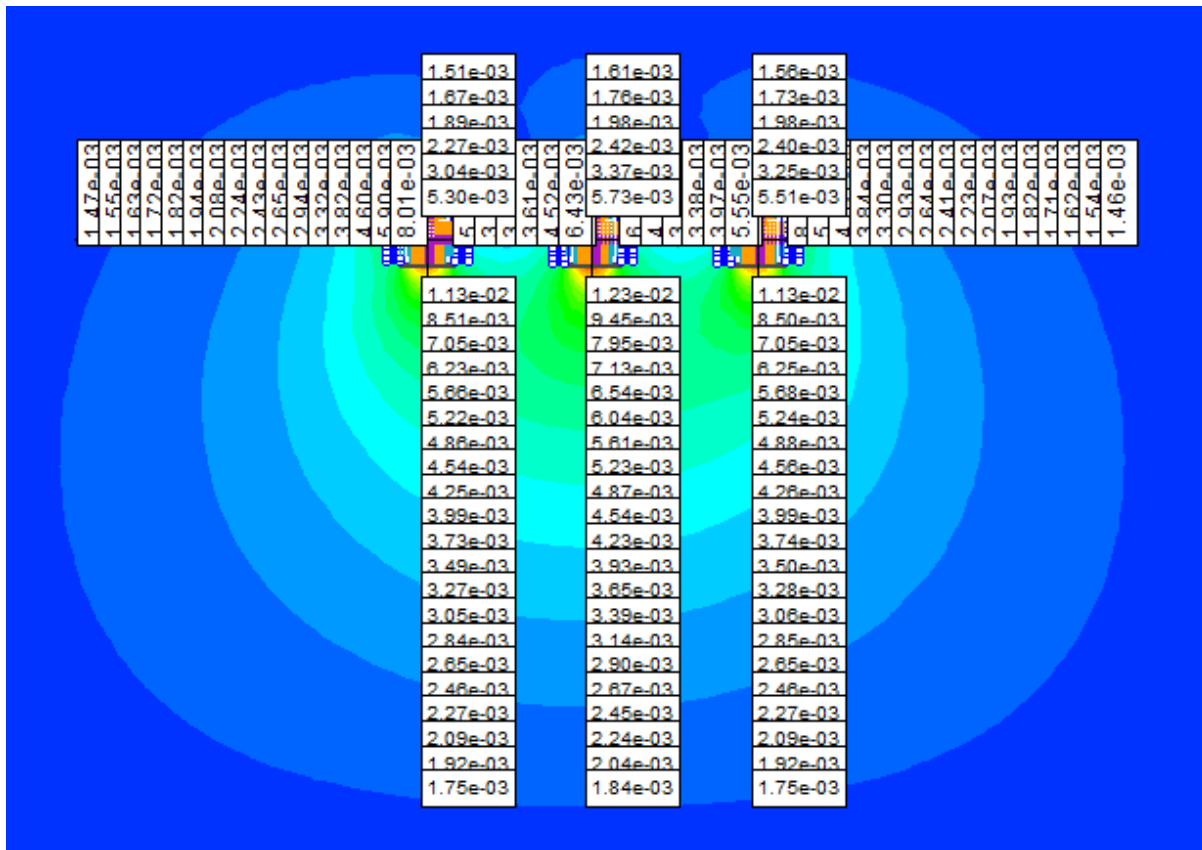
Στις Εικόνες 65 και 66 δίνεται η κατανομή των ολικών μετατοπίσεων στον χώρο γύρω από τους θαλάμους αποθήκευσης.



(α)

(β)

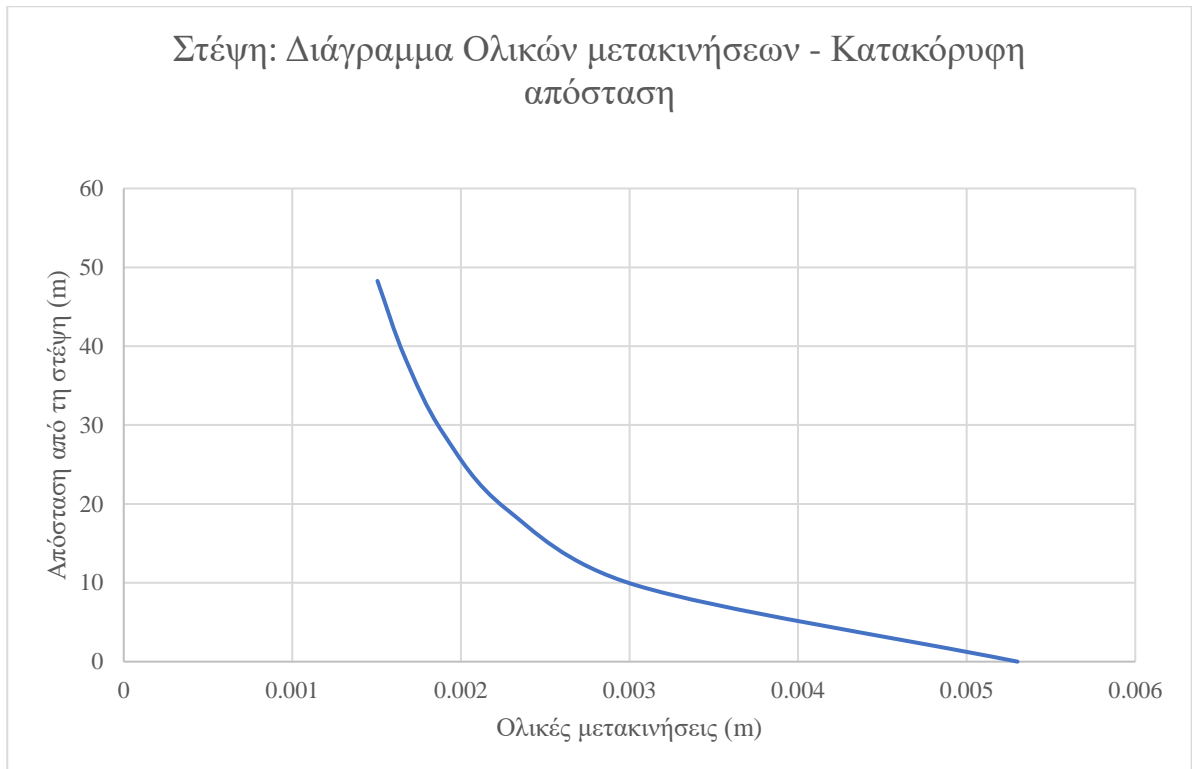
Εικόνα 65: Χωρική κατανομή ολικών μετατοπίσεων



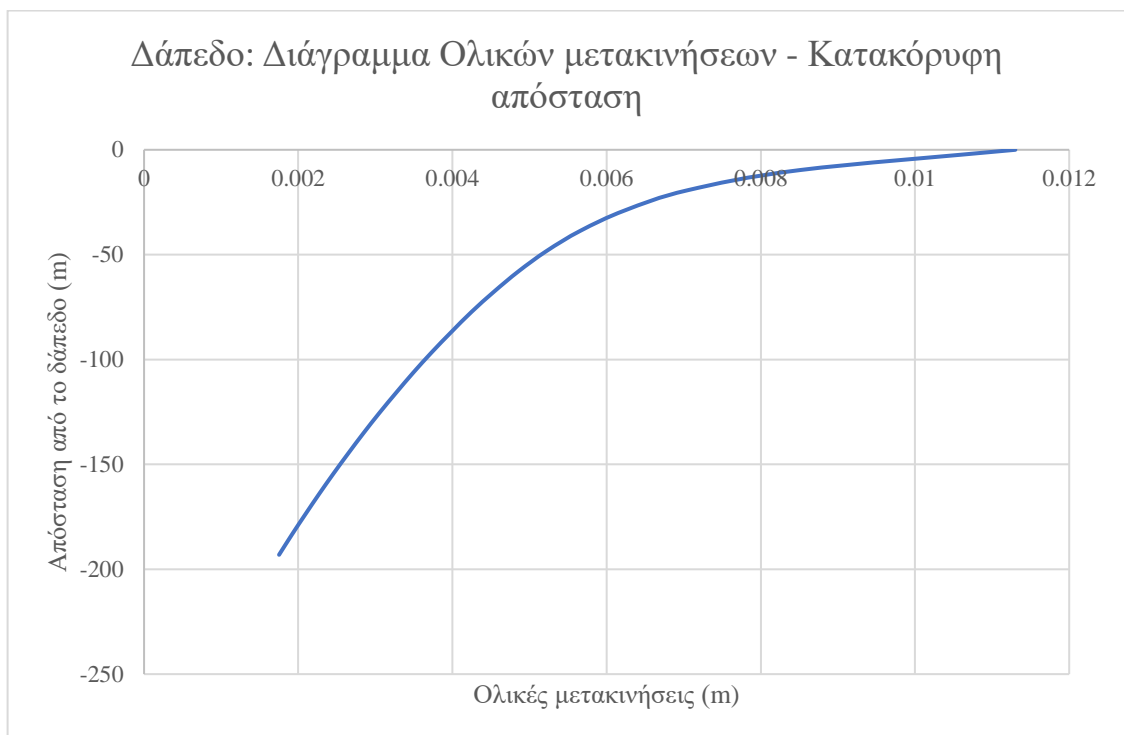
Εικόνα 66: Χωρική κατανομή ολικών μετατοπίσεων

Λόγω της παραπλήσιας κατανομής των μετατοπίσεων γύρω από τους θαλάμους στα διαγράμματα των Εικόνων 67 και 68 παρουσιάζεται η κατανομή των μετακινήσεων

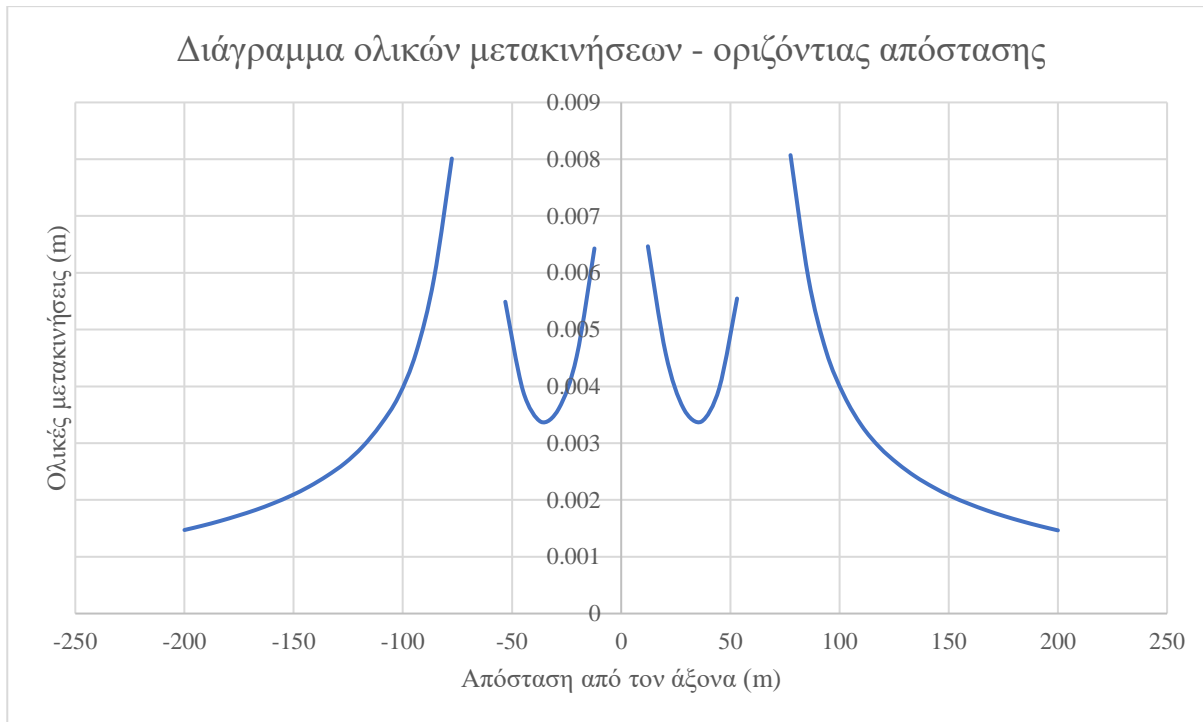
συναρτήσει της κατακόρυφης απόστασης από την στέψη και το δάπεδο του θαλάμου, ενώ στις Εικόνες 69 έως 71 δίνεται η αντίστοιχη κατανομή σε σχέση με την οριζόντιο.



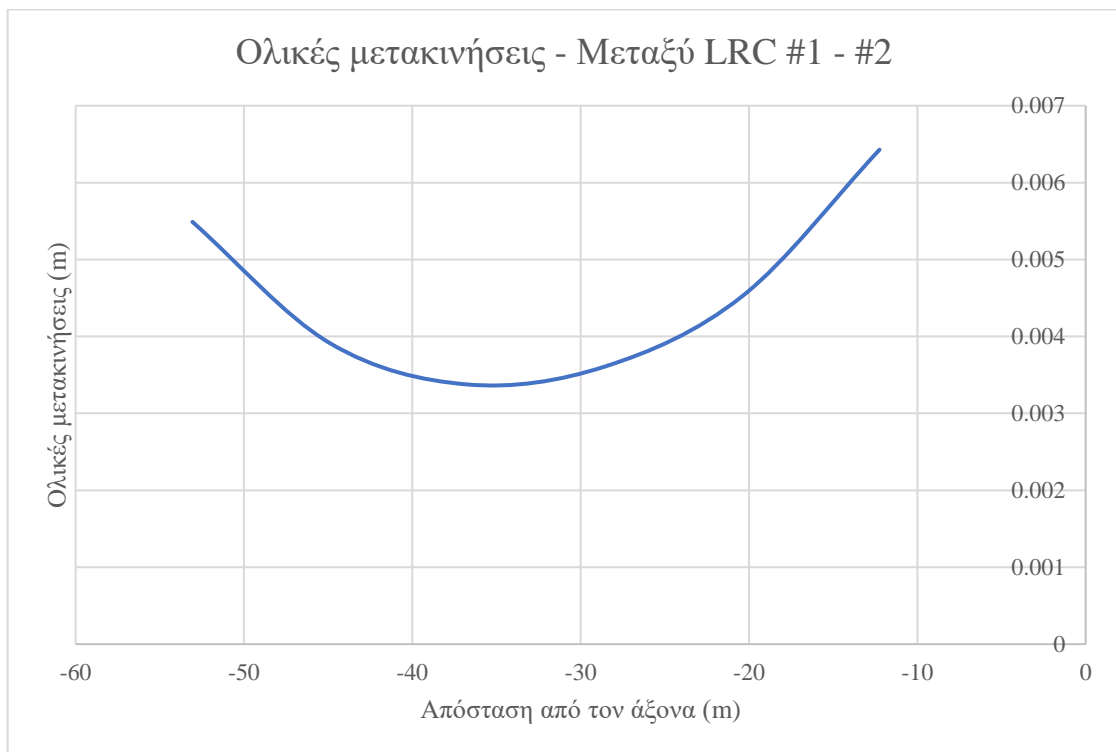
Εικόνα 67: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης από τη στέψη του θαλάμου



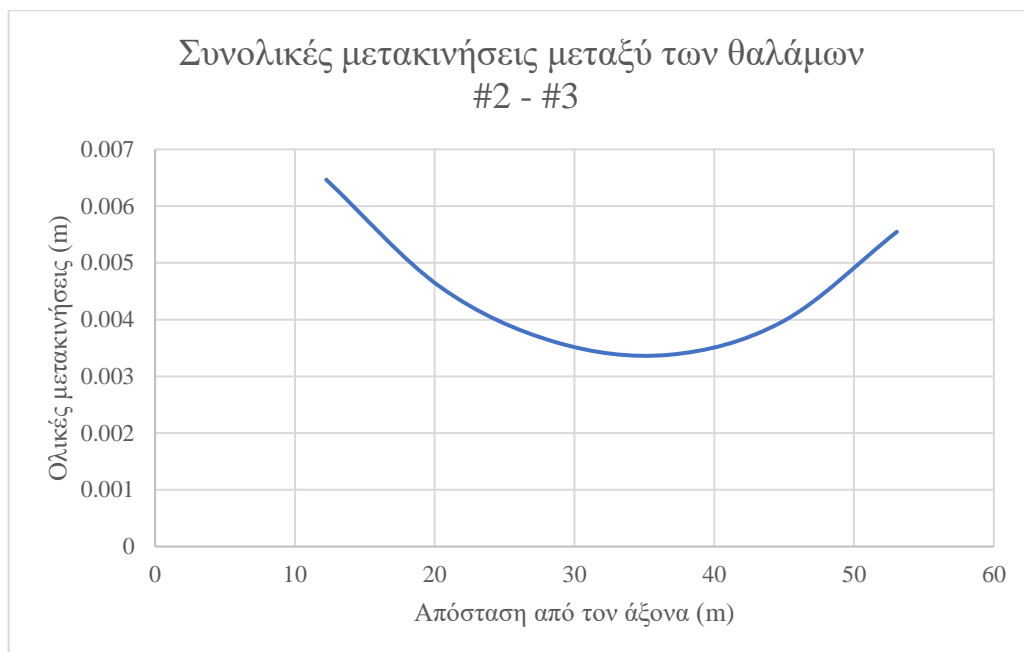
Εικόνα 68: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης από το δάπεδο του θαλάμου



Εικόνα 69: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης από τον άξονα της μονάδας αποθήκευσης



Εικόνα 70: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων μεταξύ των θαλάμων #1 και #2



Εικόνα 71: Διάγραμμα ολικών μετατοπίσεων μεταξύ των θαλάμων #2 και #3

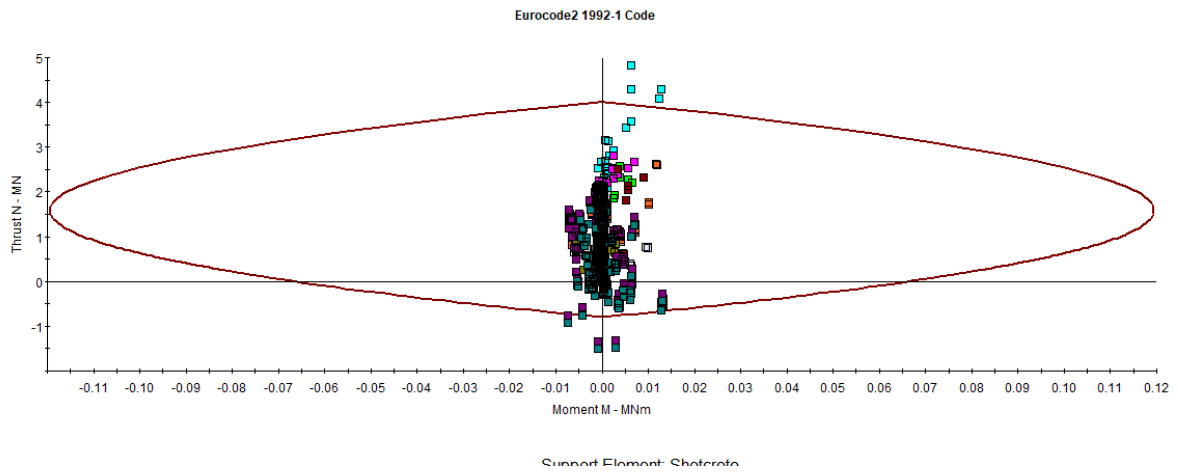
Σημειώνεται ότι η αρίθμηση των θαλάμων πραγματοποιείται από τα αριστερά προς τα δεξιά.

Συνολικά, οι μέγιστες υπολογιζόμενες μετακινήσεις στη στέψη, στο δάπεδο και τις παρειές των θαλάμων είναι οι εξής:

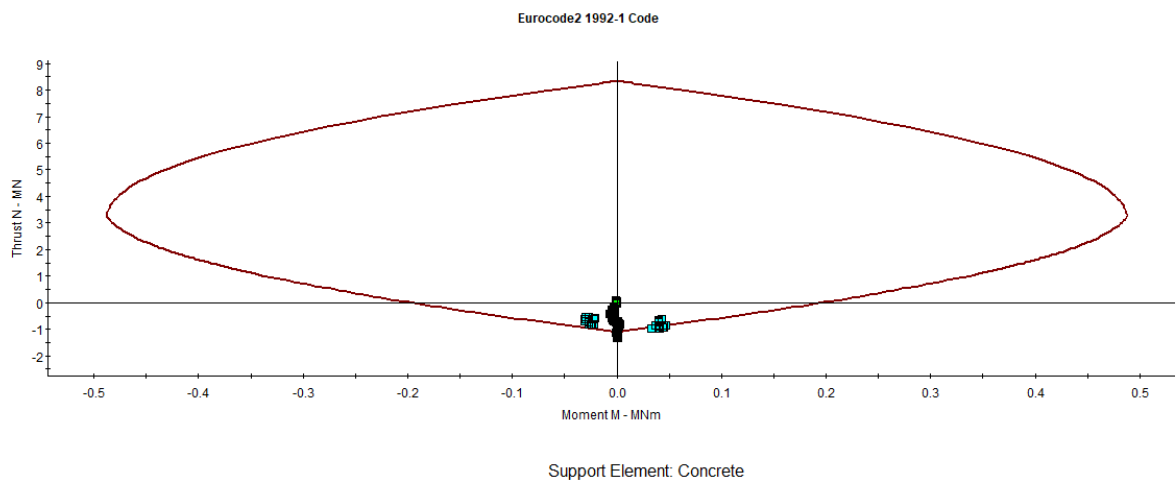
**Πίνακας 17: Αποτελέσματα τελικών μετακινήσεων**

Θάλαμος	Τιμή συνολικών μετακινήσεων (m)					
	Στέψη	Δάπεδο	Δεξιά παρειά	Αριστερή παρειά	Χώρος μεταξύ #1 και #2	Χώρος μεταξύ #2 και #3
#1	0.0053	0.0113	-	0.0080	0.0064	-
#2	0.0057	0.0123	-	-		0.0065
#3	0.0055	0.0113	0.0081	-	-	

Όσον αφορά στην ευστάθεια των στρωμάτων της επένδυσης των τοιχωμάτων των υπογείων θαλάμων, στις Εικόνες 72 και 73 δίνονται τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης των στρωμάτων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και του έγχυτου σκυροδέματος.



Εικόνα 72: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης στρώματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος

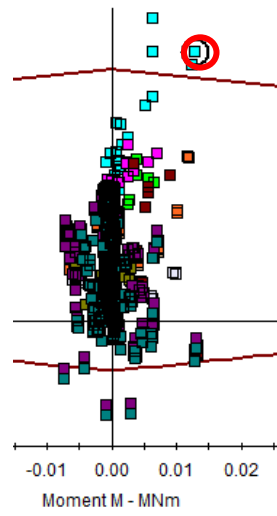


Εικόνα 73: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης στρώματος έγχυτου σκυροδέματος

Στα ανωτέρω διαγράμματα, επιβεβαιώνεται η επάρκεια των συγκεκριμένων μέτρων υποστήριξης, συγκρίνοντας τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης της προσωρινής υποστήριξης με τις προδιαγραφές που ορίζονται κατά EC2 EN 1992-1. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα σημεία του διαγράμματος που βρίσκονται εκτός των επιτρεπτών ορίων φόρτισης αφορούν σε σημεία απότομης αλλαγής της κλίσης της εκσκαφής (βλ. Εικόνες 74 και 75), ήτοι σε σημεία έντονης συσσώρευσης τάσεων και στις εν λόγω θέσεις προτείνεται η τοπική ενίσχυση των μέτρων υποστήριξης.

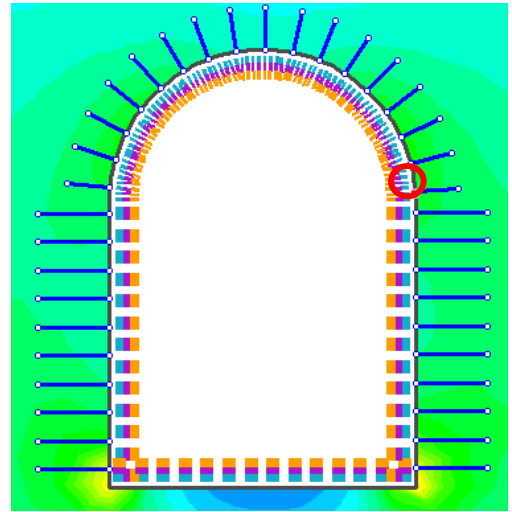


rocode2 1992-1 Code



Support Element: Shotcre

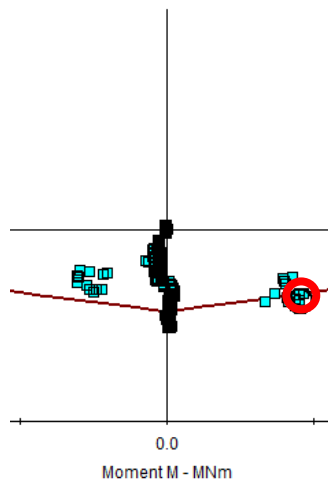
(α)



(β)

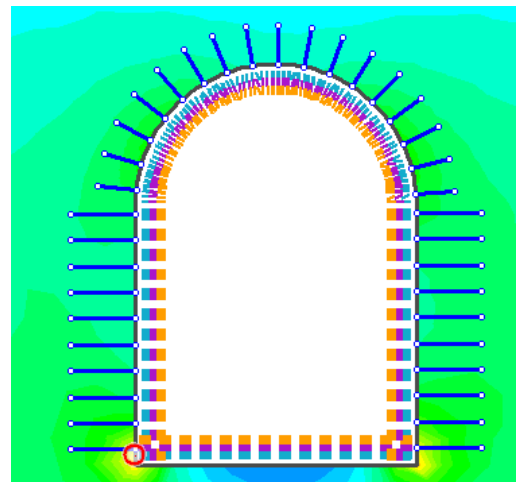
Εικόνα 74: (α) Θέση σημείου που εμφανίζεται να μην ικανοποιεί τις προδιαγραφές ασφαλείας (β) Θέση του σημείου στην εκσκαφή

Eurocode2 1992-1 Code



Support Element: Concret

(α)



(β)

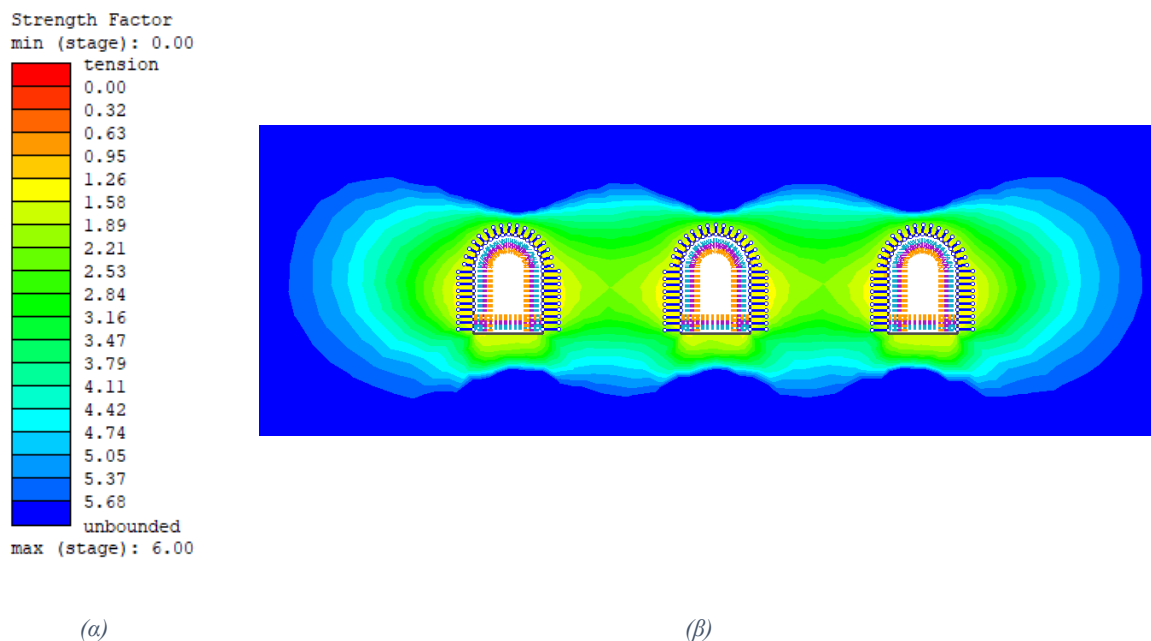
Εικόνα 75: (α) Θέση σημείου που εμφανίζεται να μην ικανοποιεί τις προδιαγραφές ασφαλείας (β) Θέση του σημείου στην εκσκαφή

Αναφορικά με την ανάλυση κινδύνου που διενεργείται για το εν λόγω σενάριο σχεδιαστικών παραμέτρων προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

## Συντελεστής ασφαλείας

Ο έλεγχος του συντελεστή ασφαλείας γύρω από την εκσκαφή καλύπτει τις ανάγκες εξέτασης των κινδύνων #2 και #3 , οι οποίοι αναφέρονται σε αστοχία του πετρώματος άνωθεν του συγκροτήματος αποθήκευσης και σε αστοχία μεταξύ γειτονικών θαλάμων, αντίστοιχα.

Στην Εικόνα 76 παρουσιάζεται η κατανομή του συντελεστή ασφαλείας γύρω από την εγκατάσταση.

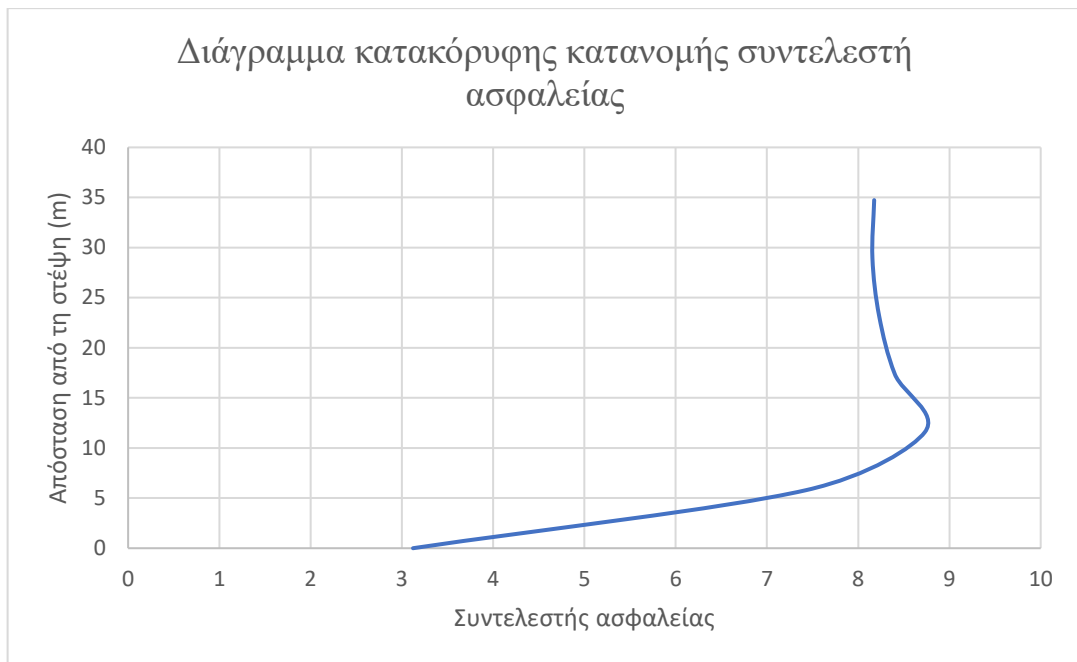


Εικόνα 76: Κατανομή συντελεστή ασφαλείας

Ακολούθως παρουσιάζονται οι επιμέρους αναλύσεις των Κινδύνων #2 και #3.

### Κίνδυνος #2

Ο έλεγχος του πετρώματος άνωθεν της στέγης των υπογείων θαλάμων αποθήκευσης πραγματοποιείται εξετάζοντας τον συντελεστή ασφαλείας άνωθεν της εγκατάστασης. Για να θεωρηθεί επισφαλής μία εξεταζόμενη περίπτωση θα πρέπει ο υπολογιζόμενος συντελεστής ασφαλείας να είναι μικρότερος από μία ελάχιστη οριζόμενη τιμή, η οποία στα πλαίσια της παρούσης ανάλυσης ορίζεται συμβατικά με μονάδα (1). Λόγω της παραπλήσιας κατανομής του συντελεστή ασφαλείας πάνω από τις δύο εκσκαφές, στο διάγραμμα της Εικόνας 77 παρουσιάζεται η κατανομή του συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει της κατακόρυφης απόστασης από τη στέγη του δεξιού θαλάμου.

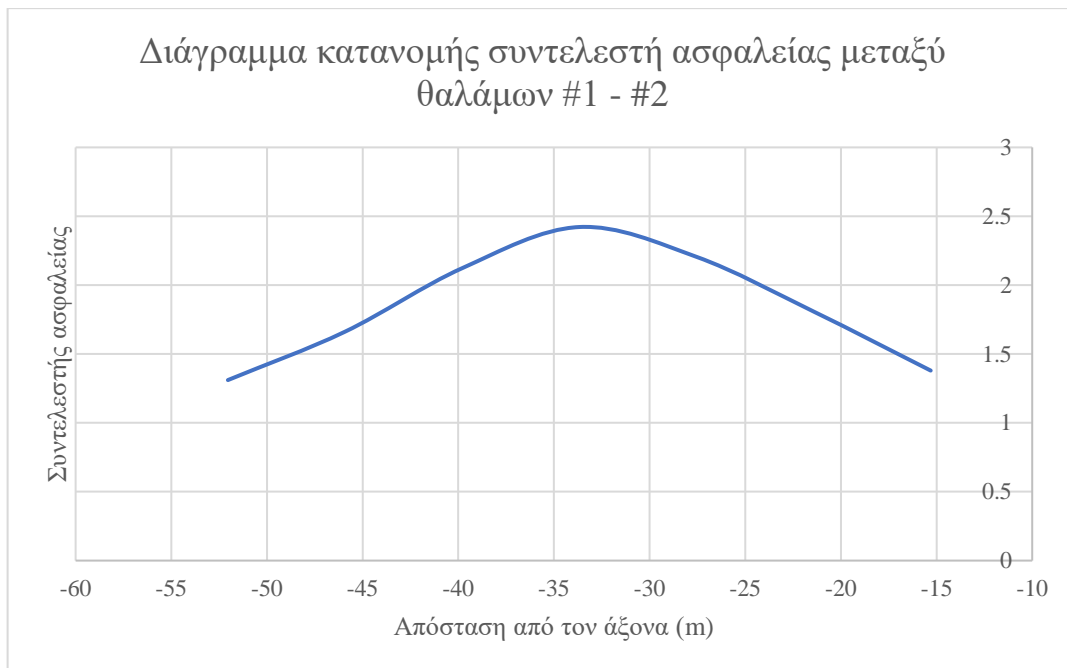


Εικόνα 77: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει της κατακόρυφης απόστασης από τη στέψη του (δεξιού) θαλάμου

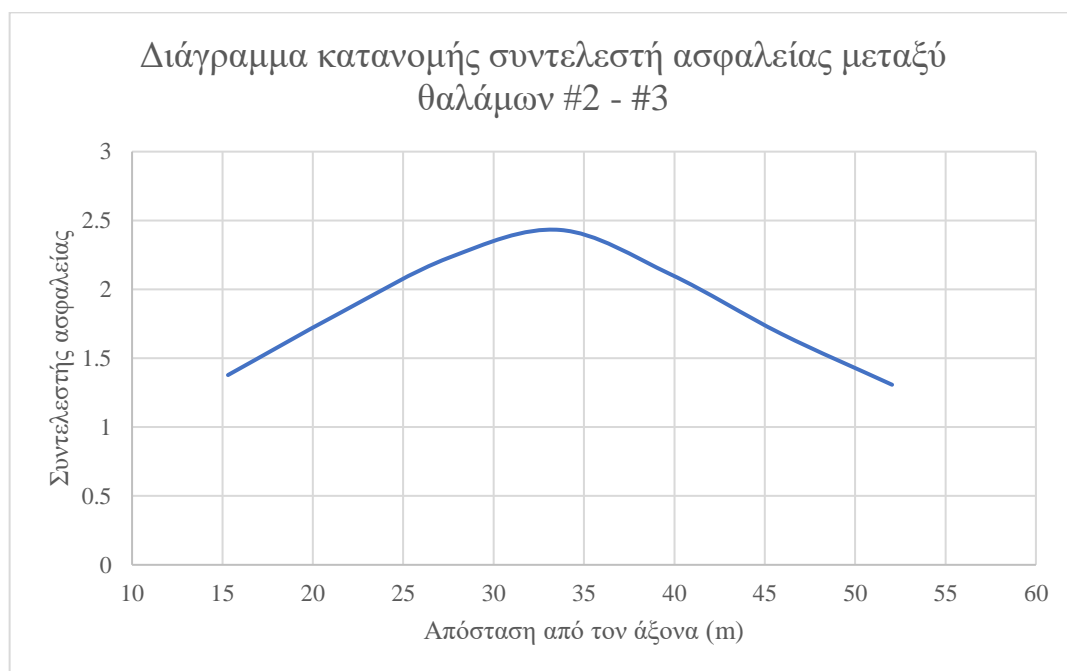
Η ελάχιστη τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι 3.1, επομένως πληρούνται οι προϋποθέσεις ασφάλειας έναντι του Κινδύνου #2.

### Κίνδυνος #3

Ο Κίνδυνος 3 αναφέρεται στην αστοχία του πετρώματος μεταξύ δύο διαδοχικών θαλάμων. Ο έλεγχος που διενεργείται στη συγκεκριμένη περίπτωση βασίζεται στην αντιπαραβολή του υπολογιζόμενου συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας του πετρώματος μεταξύ των θαλάμων σε σχέση με μία συμβατικά οριζόμενη ελάχιστη τιμή συντελεστή, η οποία στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας ορίζεται συμβατικά με μονάδα (1). Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζεται η κατανομή του συντελεστή ασφαλείας μεταξύ των γειτονικών εκσκαφών.



Εικόνα 78: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης από τον άξονα της εγκατάστασης



Εικόνα 79: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης από τον άξονα της εγκατάστασης

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το ανωτέρω διάγραμμα, για την εξεταζόμενη περίπτωση πληρείται η προϋπόθεση ασφαλείας του πετρώματος μεταξύ των γειτονικών εκσκαφών.

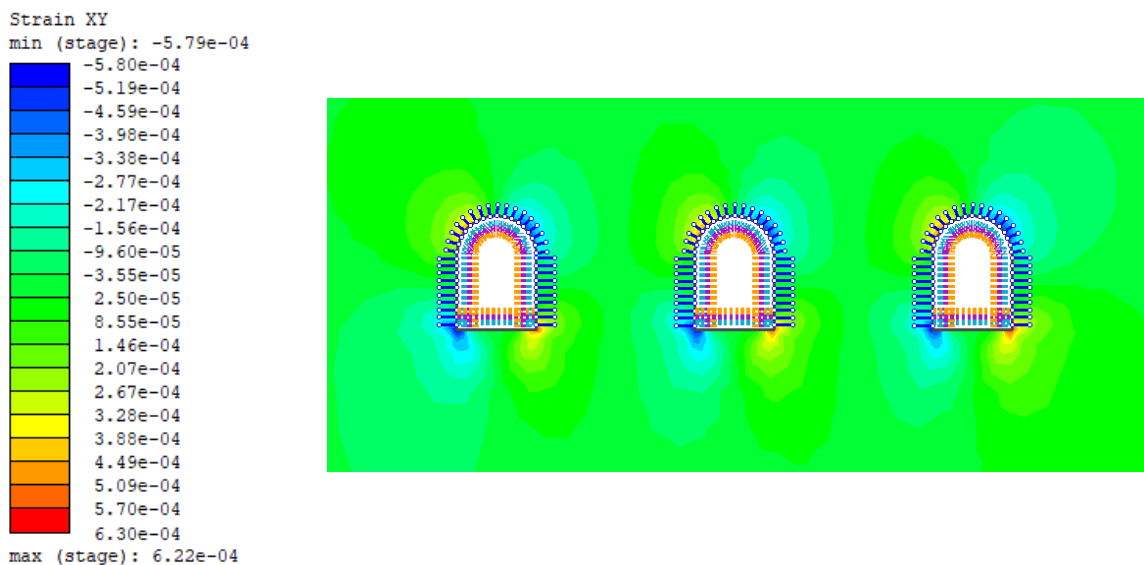
#### Κίνδυνος #4

Ο εν λόγω τύπος κινδύνου αναφέρεται σε εκτεταμένη παραμόρφωση της μεταλλικής επένδυσης της δεξαμενής. Με σκοπό την εξασφάλιση της ασφάλειας έναντι του εν λόγω

κινδύνου εξετάζονται οι διατμητικές παραμορφώσεις των τοιχωμάτων των θαλάμων, οι οποίες θα πρέπει να είναι μικρότερες από μία οριακή τιμή, η οποία ορίζεται από το όριο διαρροής του χάλυβα. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή παραμόρφωσης της χαλύβδινης κατασκευής είναι η εξής:

$$\varepsilon_{max} = \frac{f_y}{1.15 \times E} = \frac{355 MPa}{1.15 \times 210,000 MPa} = 0.00147$$

Στην Εικόνα 80 παρουσιάζεται γραφικά η κατανομή των διατμητικών παραμορφώσεων γύρω από την μονάδα εγκατάστασης.



Εικόνα 80: Κατανομή διατμητικών παραμορφώσεων γύρω από την μονάδα αποθήκευσης

Οι μέγιστες παραμορφώσεις που παρουσιάζονται γύρω από τους θαλάμους εκσκαφής, σύμφωνα με την ανωτέρω ανάλυση είναι 0.00062 στον Θάλαμο #1 (τον ακραίο εξ αριστερών), 0.00052 στον Θάλαμο #2 (τον κεντρικό θάλαμο) και 0.00054 στον Θάλαμο #3 (τον ακραίο εκ δεξιών), αντίστοιχα.

### 3.4.4 Ειδικές αναλύσεις

Για τους σκοπούς της παρούσης διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν δύο (2) ειδικές αναλύσεις, θερμικής φύσεως, οι οποίες γίνονται με στόχο τον έλεγχο της ανακατανομής της θερμοκρασίας γύρω από την μονάδα αποθήκευσης κατά το τελικό στάδιο λειτουργίας του έργου.

Κατά την προσομοίωση πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες παραδοχές:

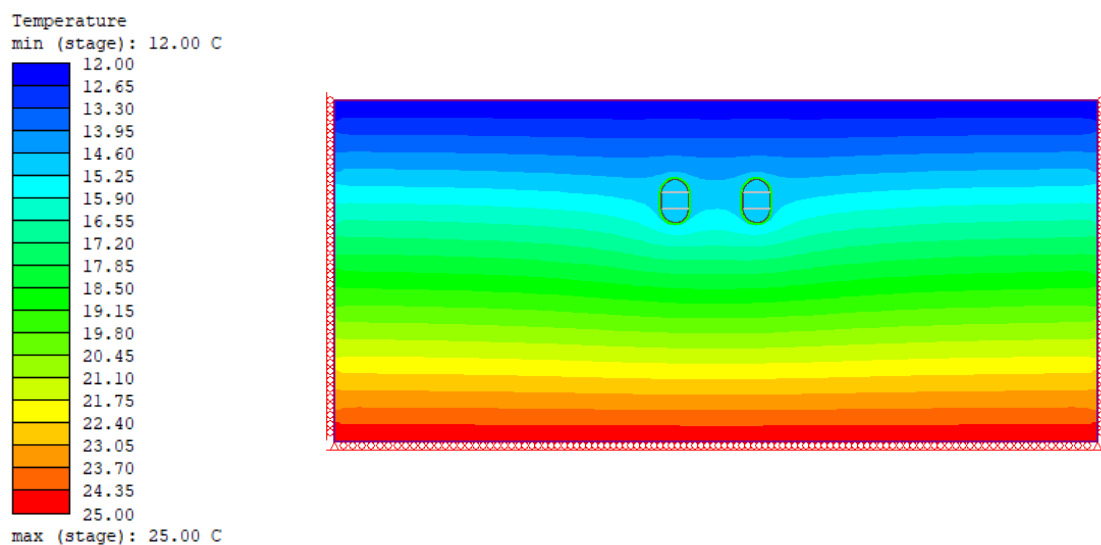
- Η αρχική θερμοκρασία στο άνω όριο του μοντέλου λαμβάνεται ίση με 12°C.

- Η γεωθερμική βαθμίδα της περιοχής λαμβάνεται ίση με  $1^{\circ}\text{C}/40\text{m}$
- Ο δακτύλιος παγωμένου πετρώματος, ήτοι το όριο της ισοθερμοκρασιακής καμπύλης των  $0^{\circ}\text{C}$  που σχηματίζεται γύρω από τους θαλάμους θεωρείται ότι έχει πάχος 2m από τα τοιχώματα της εκάστοτε εκσκαφής.
- Για τον σχηματισμό του ασβεστολίθου αλλά και για τα στοιχεία της επένδυσης λαμβάνονται οι ακόλουθες τιμές θερμικής αγωγιμότητας:
  - Για τον ασβεστόλιθο λαμβάνονται οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας  $0.5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  και  $5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$  για μη παγωμένες και παγωμένες συνθήκες αντίστοιχα.
  - Για τη μεταλλική επένδυση λαμβάνεται τιμή θερμικής αγωγιμότητας ίση με  $45 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ .
  - Για το έγχυτο και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα λαμβάνεται τιμή θερμικής αγωγιμότητας ίση με  $2.5 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ .

Ακολουθώς παρουσιάζονται για τα δύο εξεταζόμενα σενάρια σχεδιαστικών παραμέτρων τα βασικά αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε περίπτωση παρατίθεται η αρχική κατανομή της θερμοκρασίας στο χώρο γύρω από τους θαλάμους πριν την ελάχιστη διατάραξη του συστήματος και η τελική κατανομή κατά τη φάση λειτουργίας του έργου.

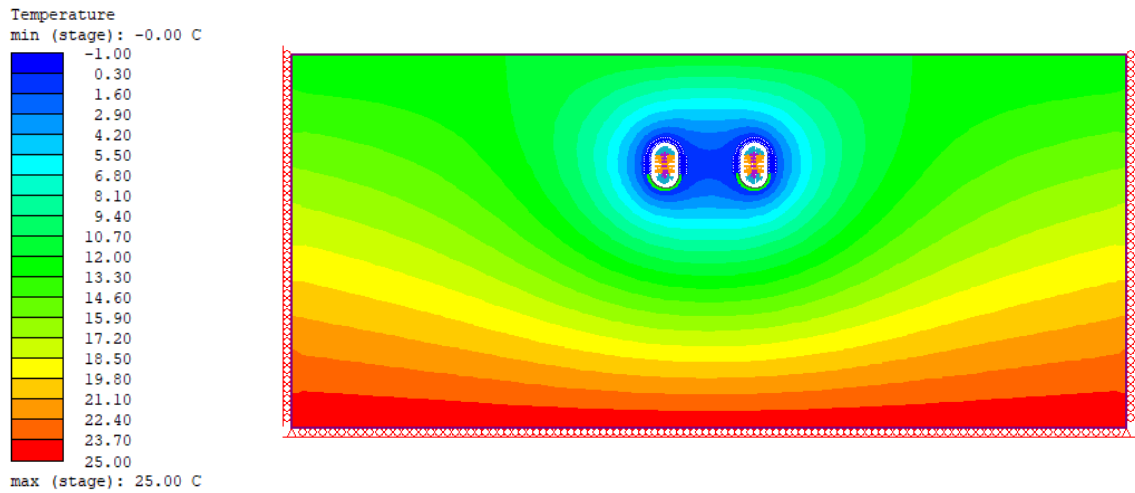
### 1<sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού

Στην ακόλουθη Εικόνα δίνεται η αρχική κατανομή της θερμοκρασίας στο χώρο υπό κανονικές συνθήκες.

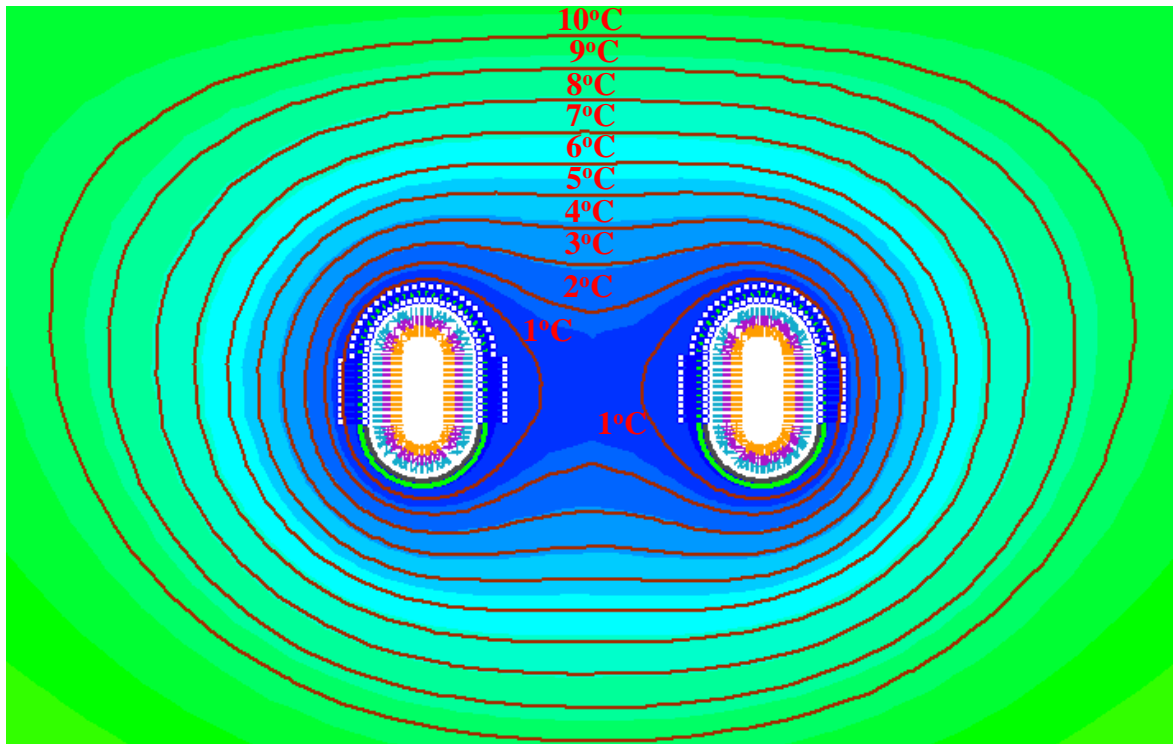


Εικόνα 81: Μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος υπό φυσιολογικές συνθήκες – Σενάριο Α

Κατά τη φάση λειτουργίας του έργου, γύρω από τους θαλάμους έως σε απόσταση περί τα 2m από τα τοιχώματά τους σχηματίζεται ένας δακτύλιος παγωμένου πετρώματος, το ακραίο όριο του οποίου αποτελεί την ισοθερμοκρασιακή καμπύλη των 0°C. Η αποθήκευση ενός προϊόντος σε τόσο χαμηλές θερμοκρασίες προκαλεί σημαντική διατάραξη στην φυσιολογική κατανομή της θερμοκρασίας στο χώρο. Στις Εικόνες 82 και 83 παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στην περιοχή ενδιαφέροντος κατά τη φάση πλήρους λειτουργίας του έργου.



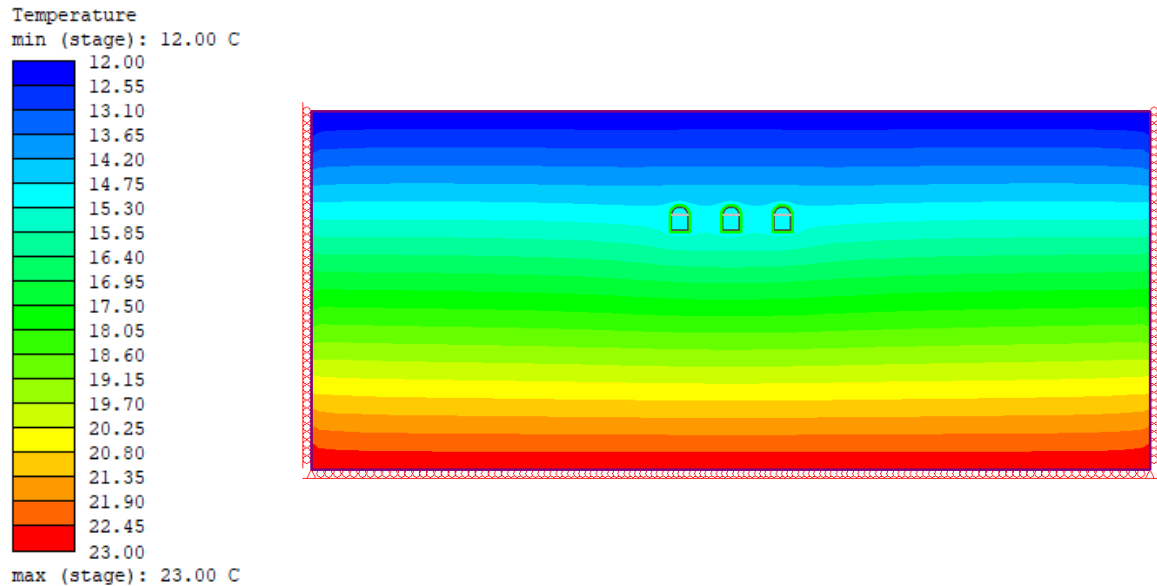
Εικόνα 82: Θερμοκρασιακή κατανομή γύρω από την μονάδα κατά τη φάση πλήρους λειτουργίας του έργου – Σενάριο A



Εικόνα 83: Θερμοκρασιακή κατανομή γύρω από την μονάδα κατά τη φάση πλήρους λειτουργίας του έργου – Σενάριο A

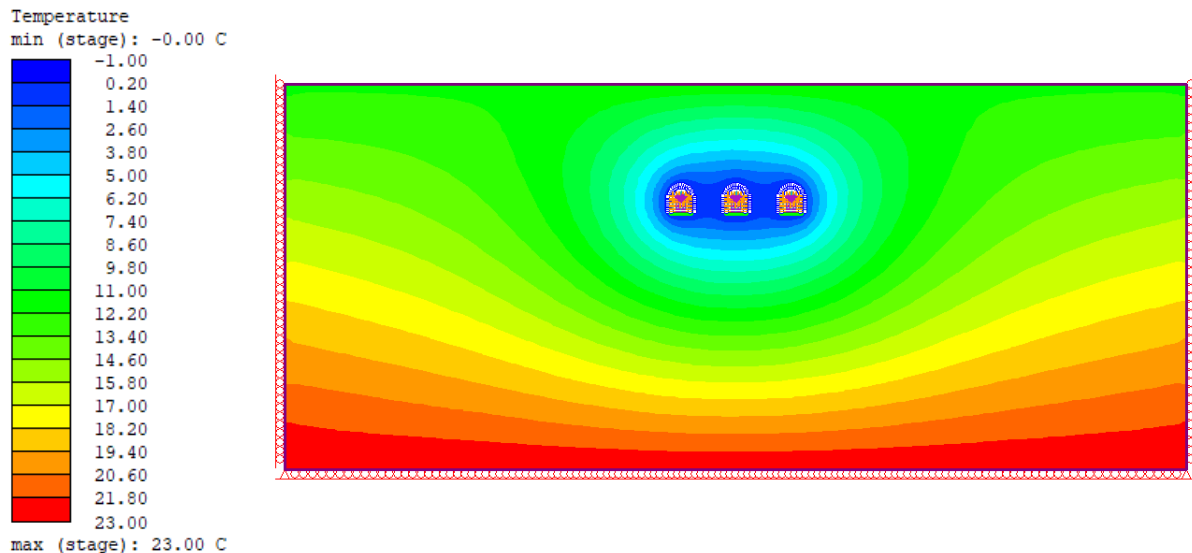
## 2<sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού

Ομοίως, στην ακόλουθη Εικόνα δίνεται η αρχική κατανομή της θερμοκρασίας στο χώρο υπό κανονικές συνθήκες.



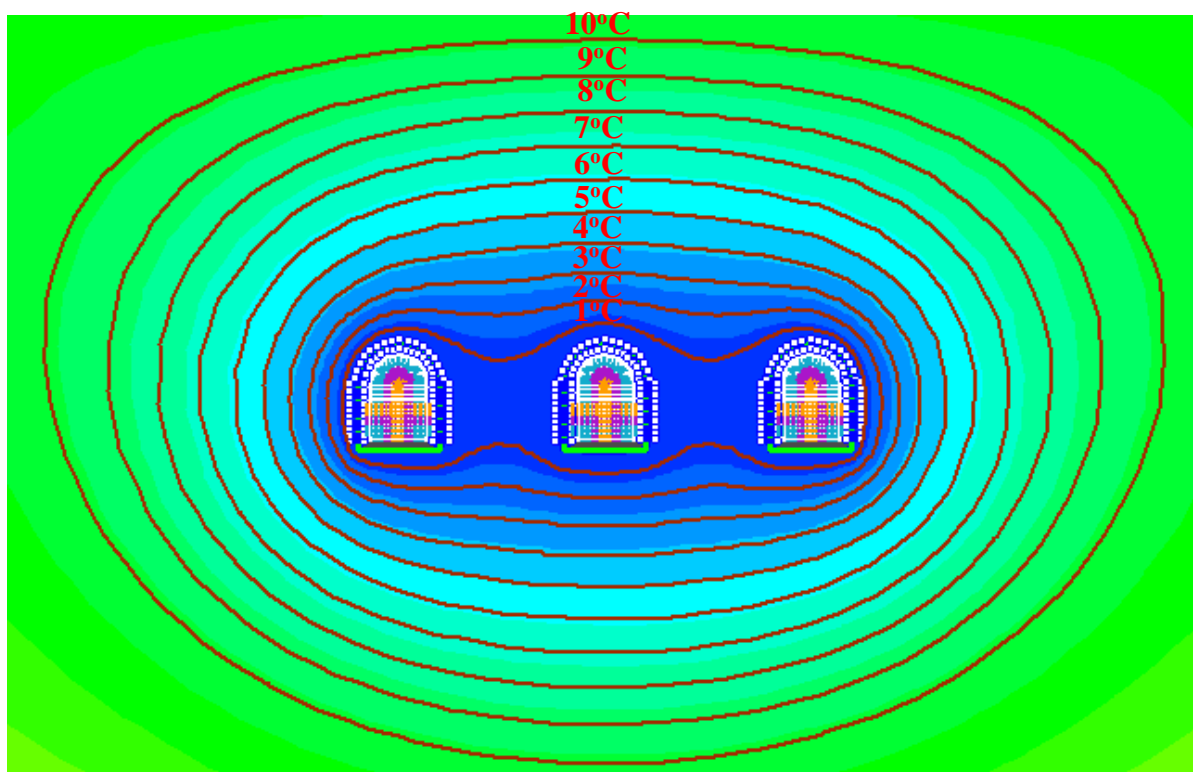
Εικόνα 84: Μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος υπό φυσιολογικές συνθήκες – Σενάριο B

Στις Εικόνες 85 και 86 παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στην περιοχή ενδιαφέροντος κατά τη φάση πλήρους λειτουργίας του έργου.



Εικόνα 85: Θερμοκρασιακή κατανομή γύρω από την μονάδα κατά τη φάση πλήρους λειτουργίας του έργου – Σενάριο B





Εικόνα 86: Θερμοκρασιακή κατανομή γύρω από την μονάδα κατά τη φάση πλήρους λειτουργίας του έργου – Σενάριο Β

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Κοστολόγηση βασικών κατασκευαστικών εργασιών

### 4.1 Γενικά

Με στόχο την πραγματοποίηση της βέλτιστης επιλογής σχεδιαστικών παραμέτρων της μονάδας αποθήκευσης, επιτακτική είναι η διερεύνηση του κόστους κατασκευής του εγχειρήματος ακολουθώντας τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε εξεταζόμενου σεναρίου.

Ως εκ τούτου, στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται μία προκαταρκτική εκτίμηση του κόστους του έργου, πραγματοποιώντας λογικές παραδοχές και αξιοποιώντας ενδεικτικά μοναδιαία κόστη επιμέρους εργασιών από βιβλιογραφικά στοιχεία. Επιπλέον, η κοστολόγηση συνοδεύεται με εκτιμώμενα χρονοδιαγράμματα των επιμέρους εργασιών.

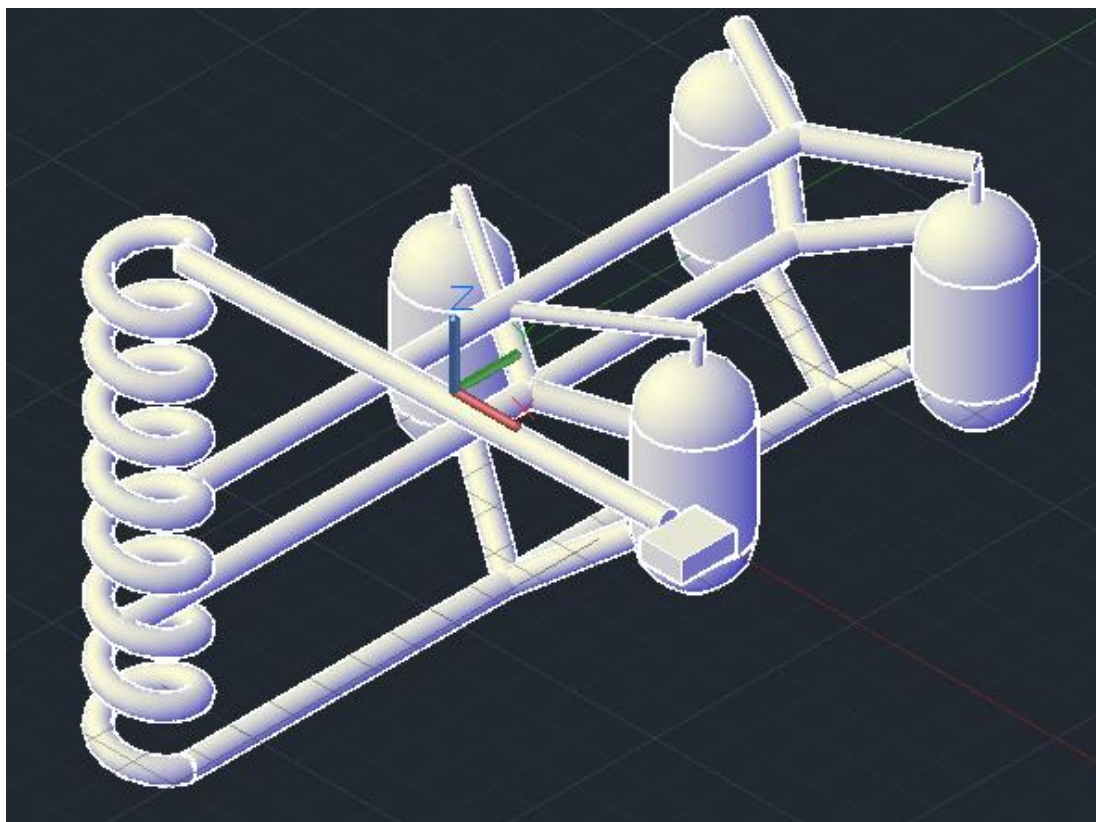
Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι απαιτούμενες παραδοχές, επιπλέον σχεδιαστικά στοιχεία του έργου και τα αποτελέσματα της διαδικασίας της προκαταρκτικής εκτίμησης του κόστους κατασκευής και των απαιτούμενων χρόνων εργασιών.

## 4.2 Παραδοχές σχεδιασμού

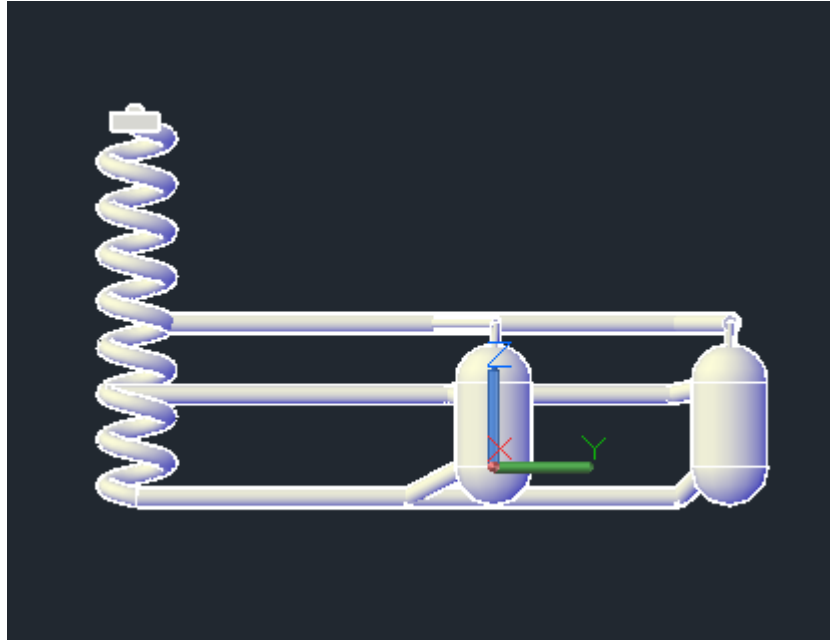
Με σκοπό τη διενέργεια μίας ορθότερης διαδικασίας κοστολόγησης των δύο εξεταζόμενων σεναρίων, συνετό κρίνεται να ληφθούν υπόψη και τα απαραίτητα συνοδά έργα, τα οποία απαιτούνται τόσο για την προσπέλαση προς την επίτευξη του επιθυμητού βάθους εκσκαφής, όσο και για την κάλυψη βασικών αναγκών και εργασιών κατά τη διάρκεια της εκσκαφής. Πιο συγκεκριμένα, ακολούθως παρουσιάζονται τα βασικά συνοδά έργα που απαιτούνται σε καθένα από δύο σενάρια σχεδιασμού. Σημειώνεται ότι τα συγκεκριμένα στοιχεία αποτελούν μία προκαταρκτική χονδροειδή εκτίμηση, η οποία πιθανότατα να διαφοροποιείται ελαφρώς από την πραγματικότητα σε περίπτωση υλοποίησης του σχεδιασμού του έργου.

### 1<sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού

Στις Εικόνες 87 και 88 παρουσιάζεται η γενική διάταξη της μονάδας αποθήκευσης LNG. Για την συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται απαραίτητη η όρυξη αρκετών συμπληρωματικών έργων.



Εικόνα 87: Σενάριο Α – Γενική διάταξη μονάδας αποθήκευσης LNG



Εικόνα 88: Σενάριο Α – Γενική διάταξη μονάδας αποθήκευσης LNG (Πλάγια όψη)

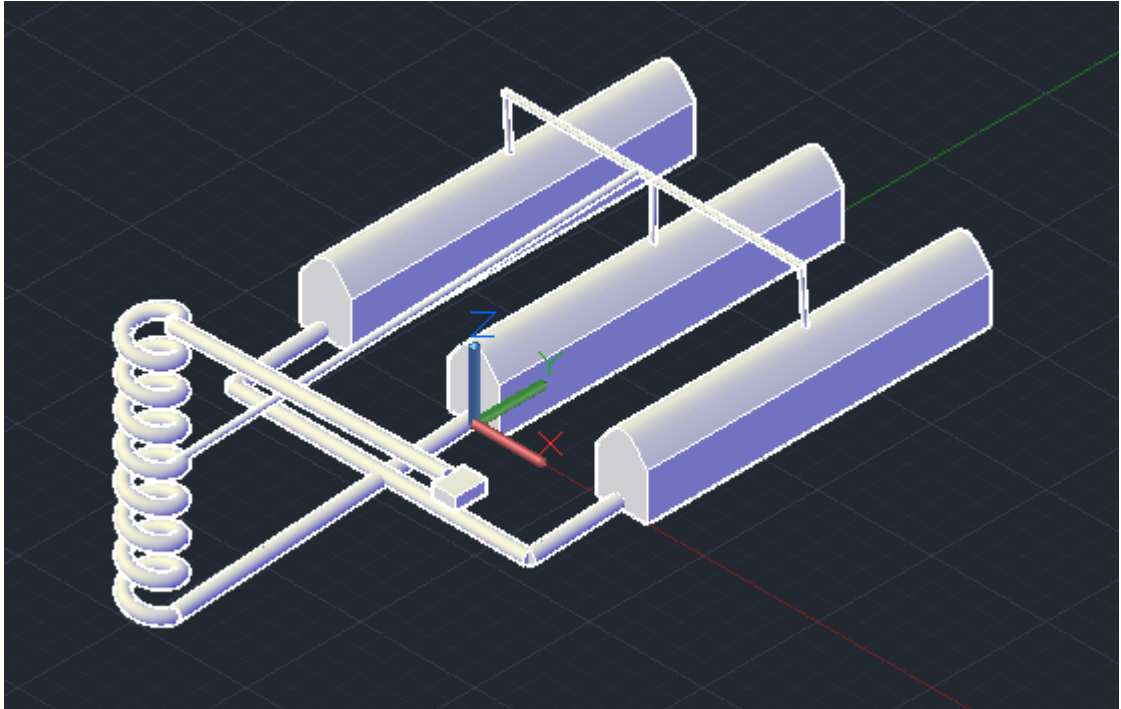
Στον ακόλουθο Πίνακα δίνονται συνοπτικά τα προβλεπόμενα συνοδά έργα με τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά τους. Σημειώνεται ότι τα εν λόγω χαρακτηριστικά είναι μία προκαταρκτική εκτίμηση, η οποία χρήζει λεπτομερέστερης ανάλυσης και σχεδιασμού.

**Πίνακας 18: Ενδεικτικά χαρακτηριστικά συνοδών έργων – 1<sup>η</sup> Περίπτωση**

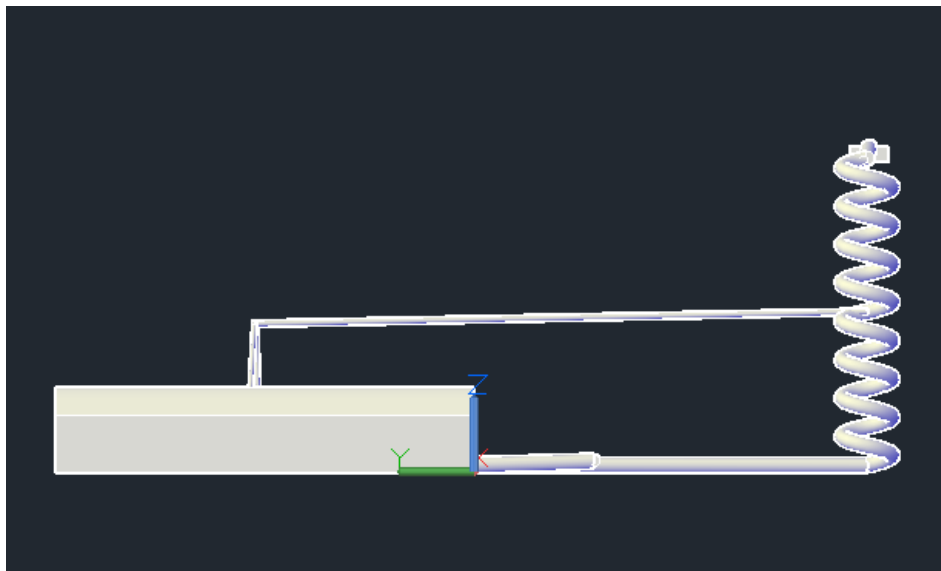
Έργο	Ενδεικτικές τιμές διαστάσεων συνοδών έργων					
	Συνολικό Μήκος Έργων(m)	Κλίση (%)	Διατομή	Ύψος στοάς (m)	Πλάτος στοάς (m)	Συνολικός αριθμός έργων
Ελικοειδής κεκλιμένη προσπελαστική στοά	520	10	Τετραγωνική	6	6	1
Οριζόντιες προσπελαστικές οδοί	675	0	Τετραγωνική	4	4	3
Οριζόντια προσπελαστική οδό προς το ελικοειδές	150	10	Τετραγωνική	6	6	1
Συνδετήριες στοές	480	0	Τετραγωνική	3	3	12
Κατακόρυφα φρέατα	80	-	Κυκλική	2 (Διάμετρος)		4

## 2<sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού

Στις Εικόνες 89 και 90 παρουσιάζεται η γενική διάταξη της μονάδας αποθήκευσης LNG. Για την συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται απαραίτητη η όρυξη αρκετών συμπληρωματικών έργων.



Εικόνα 89: Σενάριο Β – Γενική διάταξη μονάδας αποθήκευσης LNG



Εικόνα 90: Σενάριο Β – Γενική διάταξη μονάδας αποθήκευσης LNG (Πλάγια όψη)

Στον ακόλουθο Πίνακα δίνονται συνοπτικά τα προβλεπόμενα συνοδά έργα με τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά τους. Σημειώνεται ότι τα εν λόγω χαρακτηριστικά είναι μία προκαταρκτική εκτίμηση, η οποία χρήζει λεπτομερέστερης ανάλυσης και σχεδιασμού.

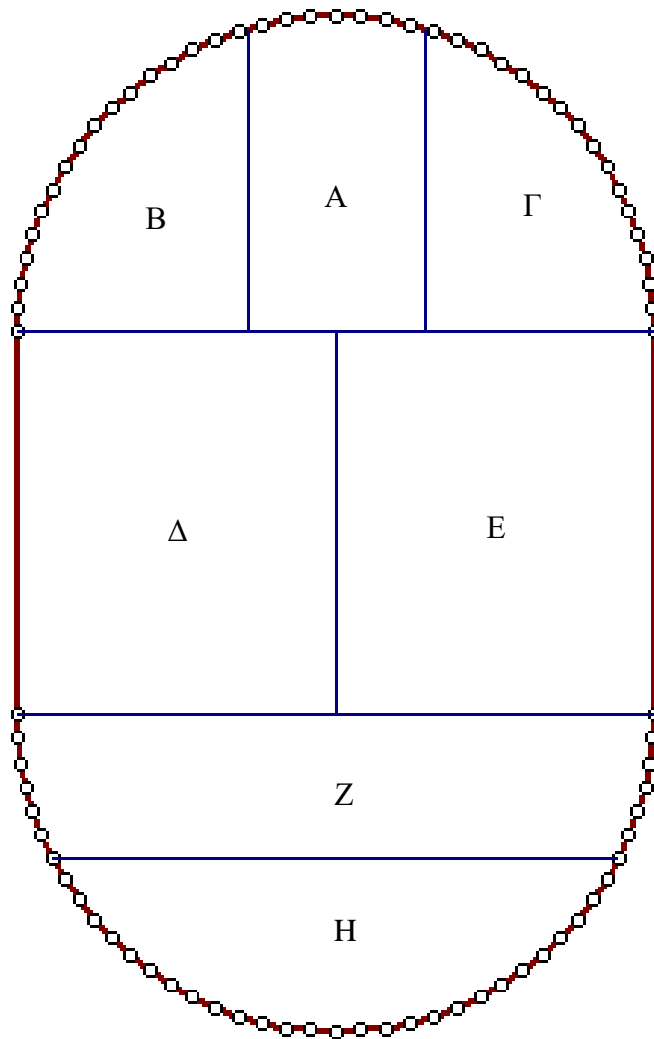
**Πίνακας 19: Ενδεικτικά χαρακτηριστικά συνοδών έργων – 2<sup>η</sup> Περίπτωση**

Έργο	Ενδεικτικές τιμές διαστάσεων συνοδών έργων					
	Συνολικό Μήκος (m)	Κλίση (%)	Διατομή	Ύψος στοάς (m)	Πλάτος στοάς (m)	Συνολικός αριθμός έργων
Ελικοειδής κεκλιμένη προσπελαστική στοά	520	10	Τετραγωνική	6	6	1
Οριζόντιες προσπελαστικές οδοί	500	0	Τετραγωνική	4	4	6
Οριζόντια προσπελαστική οδό προς το ελικοειδές	150	10	Τετραγωνική	6	6	1
Κατακόρυφα φρέατα	60	-	Κυκλική	2 (Διάμετρος)		3

Από τα ανωτέρω προσπελαστικά έργα που παρουσιάστηκαν και για τις δύο περιπτώσεις σχεδιασμού του έργου, ορισμένα θα χρησιμοποιηθούν – αξιοποιηθούν σε μεταγενέστερο χρόνο και για τη τοποθέτηση του απαιτούμενου εξοπλισμού που θα συμβάλλει στη διανομή του φυσικού αερίου. Λόγω της ανάπτυξης του έργου κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, δεν προτείνεται η όρυξη φρέατος για τη μεταφορά των χωματισμών εκτός του χώρου των εγκαταστάσεων. Αντίθετα, προτείνεται η μεταφορά του υλικού μέσω του ελικοειδούς κεκλιμένου, αξιοποιώντας τις διόδους που τέμνουν την ελικοειδώς κεκλιμένη στοά σε ανώτερα επίπεδα, πιο κοντά προς την επιφάνεια του εδάφους. Κατά παραδοχή, στο πλαίσιο των υπολογισμών της παρούσης εργασίας θεωρείται ότι τα φορτηγά μεταφοράς του εξορυγμένου πετρώματος διατρέχουν το σύνολο του μήκους του ελικοειδούς κατά την εργασία απομάκρυνσης του υλικού εκτός των εγκαταστάσεων. Όλα τα προσπελαστικά έργα, καθώς επίσης και οι θάλαμοι που θα χρησιμοποιηθούν ως δεξαμενές αποθήκευσης LNG θα εκσκαφθούν με τη χρήση εκρηκτικών υλών, λόγω των εν γένει καλών μηχανικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών στην ευρύτερη περιοχή. Ωστόσο, τα προσπελαστικά έργα θα διανοιχθούν μέσω ολομέτωπης προσβολής, ενώ οι θάλαμοι μέσω τμηματικής εκσκαφής. Επιπλέον, τα μικρών διαστάσεων φρέατα θα διανοιχθούν με τη μέθοδο όρυξης “Raise Boring”.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο διαχωρισμός των τμημάτων της εκσκαφής των θαλάμων σε κάθε μία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις σχεδιασμού.

1<sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού



*Εικόνα 91: Σενάριο A – Διαχωρισμός τμημάτων εκσκαφής*

Στον παρακάτω Πίνακα δίνονται οι βασικές διαστάσεις των τμημάτων, όπως αυτά έχουν διακριτοποιηθεί στην Εικόνα 91.

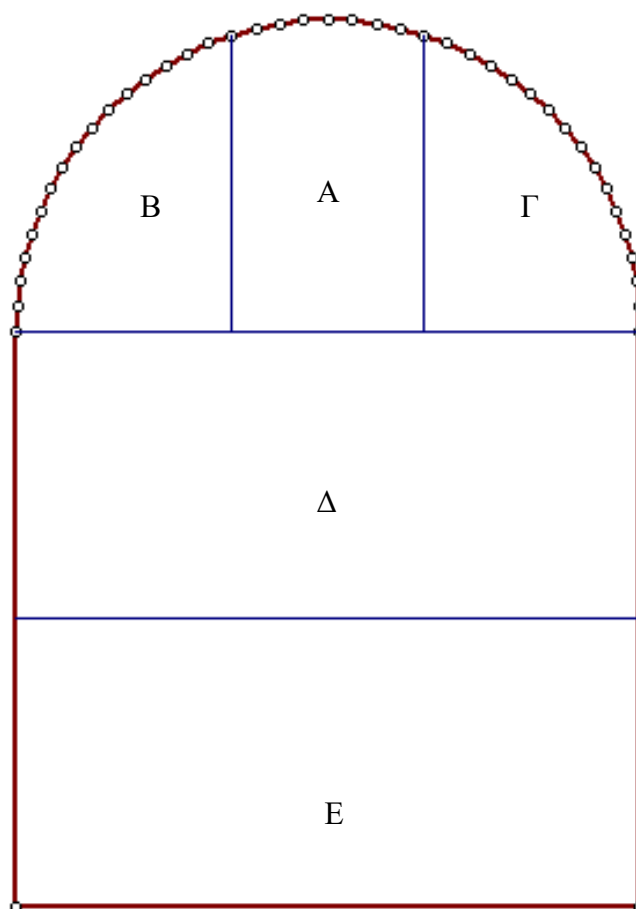
**Πίνακας 20: Διαστάσεις τμημάτων εκσκαφής – Σενάριο Α**

<b>Τμήμα</b>	<b>Ύψος (m)</b>	<b>Πλάτος (m)</b>
A	20.8	11.6
B	20.0	15.0
Γ	20.0	15.0
Δ	25.0	20.8
E	25.0	20.8
Z	9.4	37.0
H	11.4	37.0

Η όρυξη του πρώτου τμήματος θα διαδραματίσει το ρόλο διερευνητικής σήραγγας ή σήραγγας προπορείας, όπου δύνανται να διερευνηθούν οι γεωτεχνικές συνθήκες του εξορυσσόμενου σχηματισμού και να ακολουθήσει επανασχεδιασμός του έργου σε περίπτωση που διαπιστωθούν σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τη γεωτεχνική έρευνα που συνοδεύει την κατασκευή του έργου.

Η όρυξη των πρώτων τριών (3) τμημάτων, ήτοι Α, Β και Γ θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση οριζόντιων διατρημάτων, ενώ τα κατώτερα τμήματα θα διανοιχθούν ακολουθώντας τη μέθοδο των ορθών βαθμίδων, μέσω διατμημάτων κατακόρυφης διεύθυνσης.

## 2<sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού



Εικόνα 92: Σενάριο Β – Διαχωρισμός τμημάτων εκσκαφής

Στον παρακάτω Πίνακα δίνονται οι βασικές διαστάσεις των τμημάτων, όπως αυτά έχουν διακριτοποιηθεί στην Εικόνα 92.

**Πίνακας 21: Διαστάσεις τμημάτων εκσκαφής – Σενάριο Β**

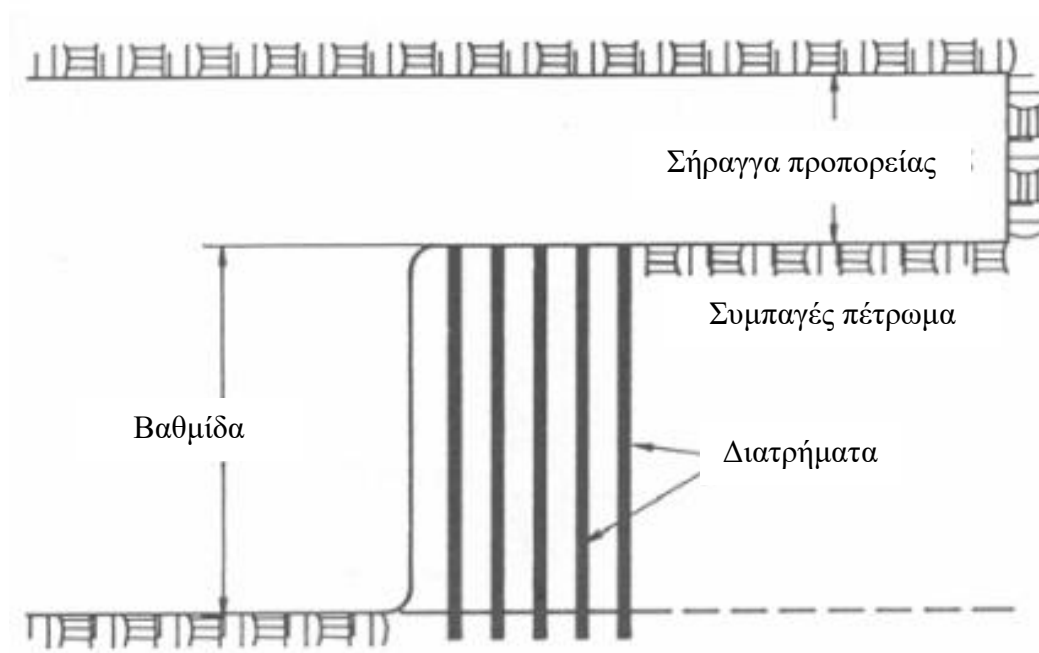
Τμήμα	Ύψος (m)	Πλάτος (m)
A	10.8	6.6
B	10.3	7.5
Γ	10.3	7.5
Δ	10.0	21.6
E	10.0	21.6

Η όρυξη του πρώτου τμήματος θα διαδραματίσει το ρόλο διερευνητικής σήραγγας ή σήραγγας προπορείας, όπου δύνανται να διερευνηθούν οι γεωτεχνικές συνθήκες του



εξορυσσόμενου σχηματισμού και να ακολουθήσει επανασχεδιασμός του έργου σε περίπτωση που διαπιστωθούν σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τη γεωτεχνική έρευνα που συνοδεύει την κατασκευή του έργου.

Η όρυξη των πρώτων τριών (3) τμημάτων, ήτοι Α, Β και Γ θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση οριζόντιων διατρημάτων, ενώ τα κατώτερα τμήματα θα διανοιχθούν ακολουθώντας τη μέθοδο των ορθών βαθμίδων, μέσω διατμημάτων κατακόρυφης διεύθυνσης (βλ. Εικόνα 93).



Εικόνα 93: Ανάπτυξη κατακόρυφων διατρημάτων (Μεταφρασμένη εικόνα) (Σοφιανός, 2018)

Στην ενότητα που ακολουθεί παρουσιάζονται εκτενώς οι παραδοχές που πραγματοποιούνται για τις επιμέρους εργασίες κατά τη διαδικασία της όρυξης.

#### 4.2.1 Παραδοχές επιμέρους εργασιών

Η μέθοδος εξόρυξης που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη των προσπελαστικών και των έργων ανάπτυξης είναι η μέθοδος «Διάτρησης – Ανατίναξης», η οποία περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια (Σοφιανός, 2018):

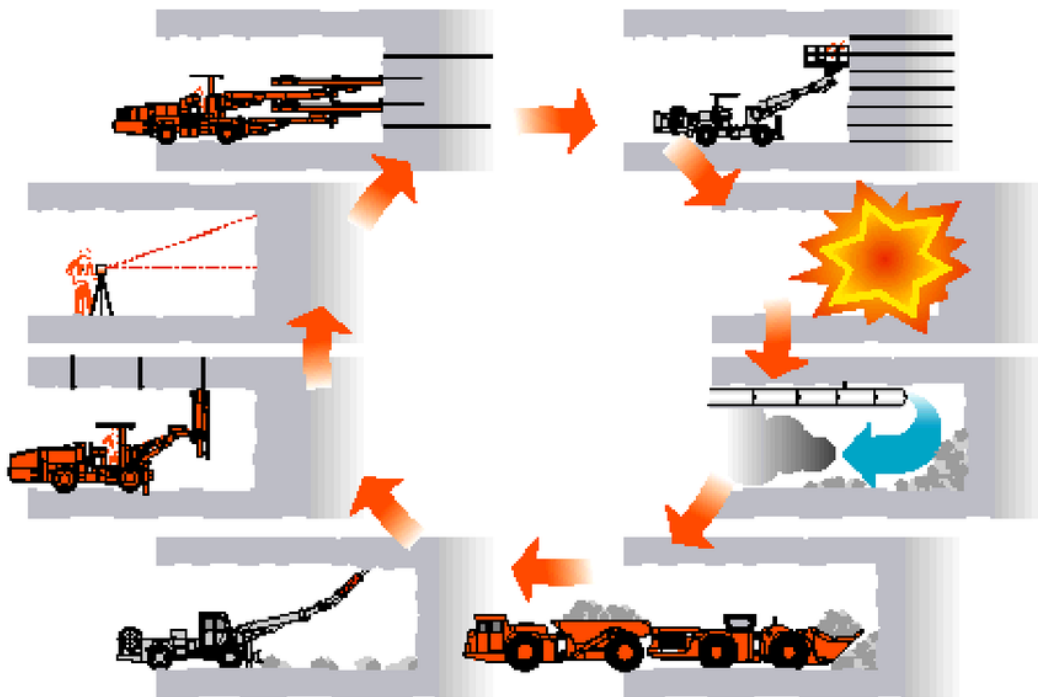
- Στάδιο 1<sup>ο</sup>: Τοπογραφική σήμανση διατρημάτων
- **Στάδιο 2<sup>ο</sup>: Όρυξη διατρημάτων (Διάτρηση)**
- **Στάδιο 3<sup>ο</sup>: Γόμωση των διατρημάτων**
- Στάδιο 4<sup>ο</sup>: Απομάκρυνση διατρητικών φορείων
- Στάδιο 5<sup>ο</sup>: Πυροδότηση - Ανατίναξη

- Στάδιο 6<sup>ο</sup>: Αερισμός για την απομάκρυνση των αερίων της ανατίναξης
- **Στάδιο 7<sup>ο</sup>: Φόρτωση – Μεταφορά εξορυγμένου υλικού**
- **Στάδιο 8<sup>ο</sup>: Αποκόλληση επισφαλών όγκων (Ξεσκάρωμα)**
- **Στάδιο 9<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης**

Ως τελικό στάδιο ανάπτυξης των επιμέρους έργων θα μπορούσε να οριστεί το ακόλουθο:

- **Στάδιο 10<sup>ο</sup>: Εφαρμογή μόνιμων μέτρων υποστήριξης**

Στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας θα θεωρηθεί ότι στοιχεία μόνιμης επένδυσης τοποθετούνται μόνο στα τμήματα των θαλάμων, δηλαδή στα έργα όπου αναφέρονται στη κατασκευή της δεξαμενής αποθήκευσης.



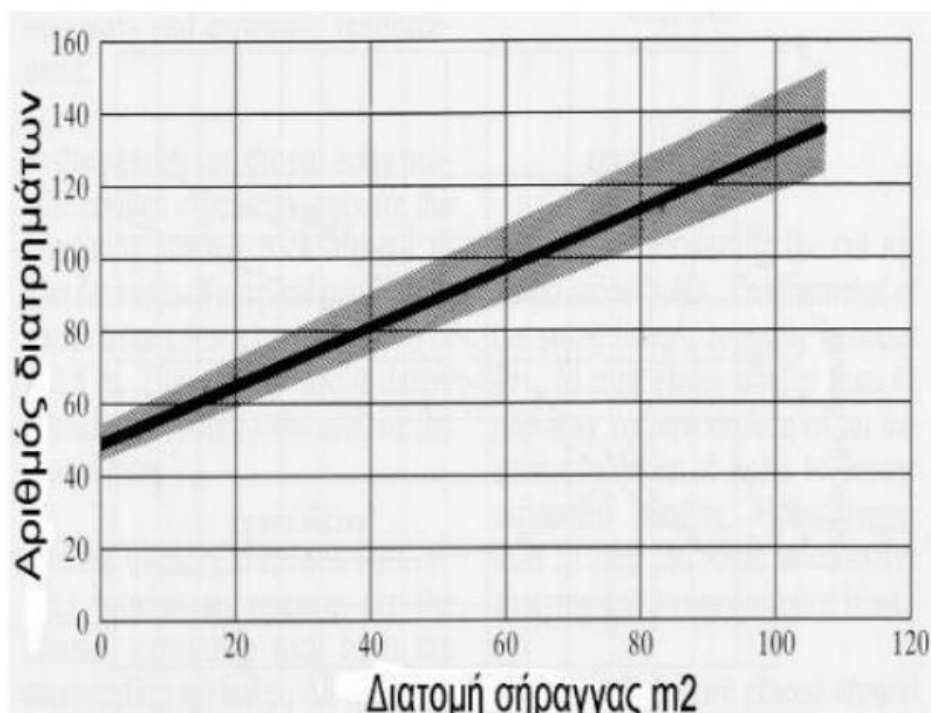
Εικόνα 94: Τυπική αλληλουχία σταδίων μεθόδου όρυξης «Διάτρησης – Ανατίναξης» (Hatch Ltd., 2010)

Ακολούθως παρουσιάζονται οι βασικές παραδοχές που πραγματοποιούνται για καθ' ένα από τα βασικότερα εκ των ανωτέρω στάδια, οι οποίες θα διαδραματίσουν πολύ σημαντικό ρόλο κατά το στάδιο των υπολογισμών.

#### 4.2.1.1 Στάδιο 1<sup>ο</sup>: Διάτρηση

Όσον αφορά στην διαδικασία της διάτρησης, αυτή θα πρέπει να διαχωριστεί σε δύο (2) ξεχωριστές περιπτώσεις, όπου η πρώτη θα αναφέρεται στην οριζόντια διάτρηση, ενώ η δεύτερη στη μέθοδο της κατακόρυφης διάτρησης, μέσω ορθών βαθμίδων.

Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου αριθμού διατρημάτων ανά τμήμα μετώπου, το οποίο διατρύεται μέσω της διαδικασίας της οριζόντιας διάτρησης, γίνεται χρήση του ακόλουθου διαγράμματος.



Εικόνα 95: Διάγραμμα υπολογισμού απαιτούμενου αριθμού διατρημάτων (Τολιά, 2022)

Σημειώνεται ότι για λόγους διενέργειας ασφαλούς διάτρησης, χωρίς την ανάπτυξη σημαντικών αποκλίσεων ως μήκος οριζόντιων διατρημάτων ορίζονται 3m. Θεωρώντας ότι ανά βήμα εκσκαφής επιτυγχάνεται προχώρηση κατά 90% του συνολικού μήκους των διατρημάτων, το συνολικό διατρύομενο μήκος των διατρημάτων ορίζεται στα 3.3m. Επιπλέον, επιλέγεται η εφαρμογή διαμέτρου διατρημάτων 45mm.

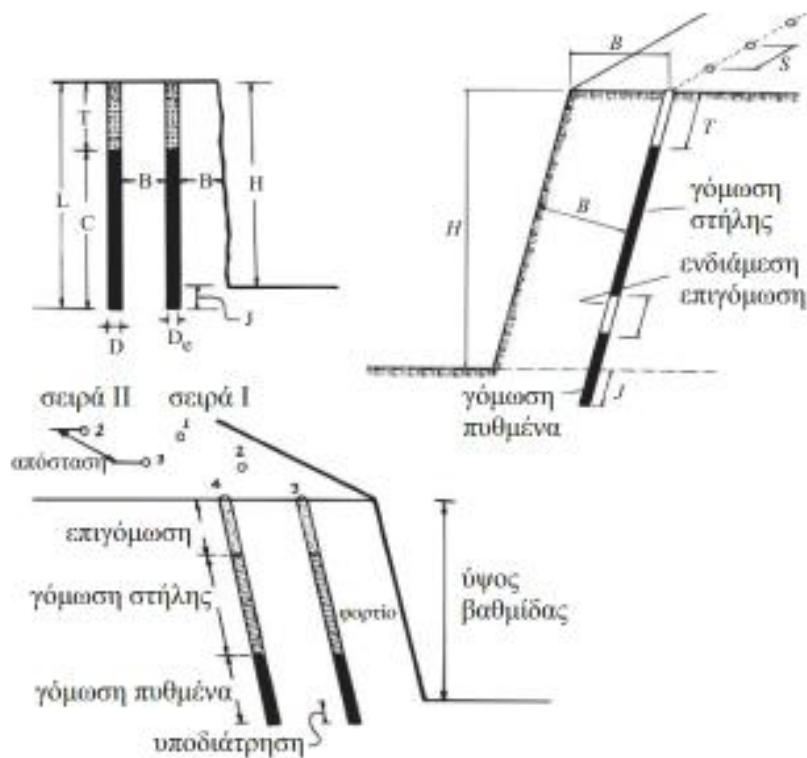
Όσον αφορά, τα τμήματα των διατομών των θαλάμων που απαιτείται η όρυξη μέσω κατακόρυφων διατρημάτων, γίνεται χρήση των σχεδιαστικών αρχών που ορίστηκαν για τις επιφανειακές εξορύξεις με ορθές βαθμίδες κατά τον Παναγιώτου (n.d.). Σύμφωνα με τις εν λόγω αρχές, ο σχεδιασμός βασίζεται στις ακόλουθες εξισώσεις:

ΦΟΡΤΙΟ:	$B = 0.045 * D$	(m)
ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΔΙΑΤΡΗΜΑΤΟΣ:	$F = (\alpha * H) + \beta$	(m)
ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ:	$B_1 = B - F$	(m)
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΔΙΑΤΡΗΜΑΤΩΝ:	$E = 1.25 * B_1$	(m)
ΥΠΟΔΙΑΤΡΗΣΗ:	$U = 0.3 * B$	(m)
ΜΗΚΟΣ ΕΠΙΓΟΜΩΣΗΣ:	$H_o = B_1$	(m)
ΜΗΚΟΣ ΓΟΜΩΣΗΣ ΠΥΘΜΕΝΑ:	$H_b = k * B$	(m)
ΜΗΚΟΣ ΓΟΜΩΣΗΣ ΣΤΗΛΗΣ:	$H_c = H - H_b - H_o$	(m)
ΓΟΜΩΣΗ ΠΥΘΜΕΝΑ:	$Q_b = (H_b * \pi * D^2 * \rho_b * f_L) / 4000$	(Kg)
ΓΟΜΩΣΗ ΣΤΗΛΗΣ:	$Q_c = (H_c * \pi * D^2 * \rho_c) / 4000$	(Kg)

Οπου:

$D$	= Διάμετρος διατρήματος, mm
$H$	= Μήκος διατρήματος, m
$\alpha$	= Γωνιακή απόκλιση διατρήματος, m/m (συνήθης τιμή 0.03 m/m)
$\beta$	= Απόκλιση στομίου διατρήματος, m (συνήθης τιμή 0.05 m)
$k$	= Δείκτης δυσκολίας ανατίναξης του πετρώματος, τιμές: 0.2 έως 1.0
$\rho_b$	= Ειδικό βάρος της εκρηκτικής ύλης στην γόμωση πυθμένα, $gr/cm^3$
$f_L$	= Συντελεστής πυκνότητας της γόμωσης πυθμένα (συνήθης τιμή για γόμωση με φυσίγγια: 0.80)
$\rho_c$	= Ειδικό βάρος της εκρηκτικής ύλης στην γόμωση στήλης, $gr/cm^3$

Εικόνα 96: Εξισώσεις υπολογισμού βασικών σχεδιαστικών παραμέτρων ανατίναξης με τη μέθοδο των ορθών βαθμίδων (Παναγιώτου, n.d.)



Εικόνα 97: Τυπική γεωμετρία βαθμίδας (Αγιουτάντης, 2019)

Η κατακόρυφη διάτρηση πραγματοποιείται ταχύτερα από την αντίστοιχη όρυξη κατά την οριζόντια διεύθυνση (Τολιά, 2022). Ως εκ τούτου, κατά την όρυξη με εφαρμογή της μεθόδου των ορθών βαθμίδων επιτυγχάνεται μεγαλύτερο μήκος προχώρησης ανά βήμα εκσκαφής. Κατά την εφαρμογή της εν λόγω μεθόδου επιλέχθηκε η όρυξη διατρημάτων διαμέτρου 115mm, με φορτίο περί τα 5.2m. και βήμα προχώρησης περί τα 6m.

Για την όρυξη των διατρημάτων επιλέγεται η χρησιμοποίηση κατά την εν λόγω διαδικασία ενός διατρητικού μηχανήματος, το οποίο φέρει δύο (2) διατρητικά στελέχη.

#### 4.2.1.2 Στάδιο 2<sup>ο</sup>: Γόμευση

Μετά τη διαδικασία της διάτρησης έπεται η βαρύνουσα σημασίας εργασία της γόμευσης και εν συνέχεια η ανατίναξη των διατρημάτων. Είναι πολύ σημαντικό να τοποθετηθεί εντός των διατρημάτων η σωστή ποσότητα εκρηκτικής ύλης, η οποία θα οδηγήσει σε επιτυχή όρυξη, χωρίς να προκαλεί προβλήματα ρωγματώσεων στην περιβάλλουσα βραχώμαζα.

Κατά τους υπολογισμούς της παρούσης εργασίας επιλέχθηκε στα οριζόντια διατρήματα η χρήση ζελατινοδυναμίτιδας ως εκρηκτική ύλη. Κάθε φυσίγγιο ζελατινοδυναμίτιδας θεωρείται πως έχει διάμετρο 38mm, μήκος 0.38m και βάρος ίσο με 0.625kg. Στα κατακόρυφα διατρήματα θα τοποθετηθούν δύο (2) είδη εκρηκτικής ύλης. Η πρώτη είναι η ζελατινοδυναμίτιδα, όπου

θεωρείται ποσότητα 2 φυσιγγίων και χρησιμοποιείται ως γόμωση πυθμένα και εναυσματική γόμωση και χύδην ποσότητα ANFO ως γόμωση στήλης.

#### **4.2.1.3 Στάδιο 3<sup>ο</sup>: Ανατίναξη**

Η έναυση και εν συνεχεία η ανατίναξη των διατρημάτων γίνεται με τη χρήση ηλεκτρικών καψυλλίων, με τον αριθμό τους να αντιστοιχεί στον συνολικό αριθμό των διατρημάτων προς ανατίναξη.

#### **4.2.1.4 Στάδιο 4<sup>ο</sup>: Φόρτωση – Μεταφορά εξορυγμένου υλικού**

Για τη φόρτωση και μεταφορά του εξορυγμένου υλικού αποφασίστηκε η χρήση δύο (2) φορτωτών υπογείων LHD και δύο (2) φορτηγών, μηχανήματα τα οποία θα χρησιμοποιούνται από έναν (1) χειριστή ανά βάρδια, έκαστος. . Πιο συγκεκριμένα, επιλέγεται η χρήση φορτωτών τύπου R3000H της εταιρείας Caterpillar με δυνατότητα μεταφοράς φορτίου ανά κύκλο ίσο με  $8\text{m}^3$  και φορτηγών χωρητικότητας κάδου  $20\text{m}^3$  εξορυγμένου πετρώματος. Θεωρώντας συντελεστή επιπλήσματος 1.3, ο συμπαγής όγκος πετρώματος που δύναται να μεταφερθεί από τον φορτωτή ανά κύκλο εργασίας, ήτοι η μεταφορική ικανότητα του φορτωτή ανά κύκλο εργασίας είναι  $6.2\text{ m}^3$ .

Ως απόσταση απόθεσης των υλικών ορίστηκε στα 100 m από τη θέση ανάπτυξης των υπογείων θαλάμων.

#### **4.2.1.5 Στάδιο 5<sup>ο</sup>: Ξεσκάρωμα**

Για τη διαδικασία της απομάκρυνση των επισφαλών όγκων από τα τοιχώματα του υπογείου θαλάμου θα χρησιμοποιηθεί ένα (1) μηχάνημα με ειδικό άκρο ξεσκαρώματος, με έναν (1) χειριστή.

#### **4.2.1.6 Στάδιο 6<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης**

Τα μέτρα άμεσης υποστήριξης των υπογείων χώρων περιλαμβάνουν την τοποθέτηση αγκυρίων και την εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Για την τοποθέτηση των αγκυρίων θα χρησιμοποιηθεί ένα ειδικό μηχάνημα κοχλίωσης, ενώ η εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος θα πραγματοποιηθεί μέσω μηχανήματος “Robosystem”, ήτοι μηχάνημα εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα θα είναι ινοπλισμένο, ενώ σε κάθε μηχάνημα θα απασχολείται ένας εργαζόμενος.

#### 4.2.1.7 Στάδιο 7<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση τμημάτων μόνιμης επένδυσης

Τα μέτρα μόνιμης επένδυσης των υπογείων χώρων περιλαμβάνουν την τοποθέτηση έγχυτου σκυροδέματος μεγάλου πάχους και χαλύβδινων φύλλων, τα οποία μετά από συγκόλληση θα αποτελέσουν τη μεταλλική εσωτερική επένδυση της δεξαμενής.

Οι συγκεκριμένες διαδικασίες θα απαιτήσουν πιθανότατα μεγαλύτερο αριθμό εργαζομένων για την διαχείριση των επιμέρους εργασιών, ενώ θα απαιτηθούν ειδικά μηχανήματα μεταφοράς του σκυροδέματος εντός του χώρου εξόρυξης. Τέλος, θα χρησιμοποιηθεί ειδική κατασκευή ανέγερσης της σιδηράς κατασκευής.

Ακολούθως διενεργούνται οι υπολογισμοί των παραγόμενων χωματισμών ανά εξορυκτικό έργο ή τμήμα όρυξης και παράλληλα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των βασικών υπολογισμών των απαιτούμενων ποσοτήτων σε στοιχεία υποστήριξης και βοηθητικά μέσα όπως εκρηκτικές ύλες κ.α. Σε κάθε μία από τις περιπτώσεις παρουσιάζονται αρχικώς τα αποτελέσματα για τα συνοδά έργα της κύριας εγκατάστασης αποθήκευσης.

#### 4.2.2 Βασικοί υπολογισμοί – 1<sup>η</sup> Περίπτωση σχεδιασμού

##### 4.2.2.1 Προσπελαστικά έργα

Η πρώτη περίπτωση σχεδιασμού περιλαμβάνει εικοσιένα (21) στον αριθμό βασικά προσπελαστικά έργα, όπως παρουσιάστηκε στον Πίνακα 18.

Τα αποτελέσματα των βασικών υπολογισμών για τις προσπελαστικές οδούς συνοψίζονται ακολούθως.

**Πίνακας 22: Βασικά αποτελέσματα υπολογισμών – Προσπελαστικές οδοί**

Παράμετρος	Στοές Διατομής 3m x 3m	Στοές Διατομής 4m x 4m	Στοές Διατομής 6m x 6m	Συνολικά
Επιφάνεια μετώπου εκσκαφής (m <sup>2</sup> )	9	16	36	61
Συνολικό μήκος (m)	480	675	670	1,825
Συνολική ποσότητα συμπαγούς εξορυγμένου υλικού (m <sup>3</sup> )	4,320	10,800	24,120	39,240
Συντελεστής επιπλήσματος	1.3			
Συνολική ποσότητα χαλαρού εξορυγμένου υλικού (m <sup>3</sup> )	5,616	14,040	31,356	51,012

Παράμετρος	Στοές Διατομής 3m x 3m	Στοές Διατομής 4m x 4m	Στοές Διατομής 6m x 6m	Συνολικά
Διατρήματα ανά βήμα προχώρησης	55	58	70	183
Συνολικά διατρήματα	8,800	13,050	15,680	37,530
Συνολικά ηλεκτρικά καψύλλια	8,800	13,050	15,680	37,530
Συνολικά βήματα προχώρησης	160	225	224	609
Παραγόμενοι συμπαγείς χωματισμοί ανά βήμα προχώρησης (m <sup>3</sup> )	27	48	108	183
Παραγόμενοι χαλαροί χωματισμοί ανά βήμα προχώρησης (m <sup>3</sup> )	35.1	62.4	140.4	237.9
Απαίτηση σε ΕΥ ανά βήμα προχώρησης (kg)	172	181.25	218.75	572
Συνολική απαίτηση σε ΕΥ (kg)	27,520	40,781.25	49,000	117,301.25
Απαίτηση σε αγκύρια ανά βήμα προχώρησης	2.25	3	4.5	9.75
Απαίτηση σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ανά βήμα προχώρησης (m <sup>3</sup> )	5.4	9.6	10.8	25.8
Μήκος αγκυρίων (m)	5			
Συνολική απαίτηση σε αγκύρια	360	675	1,008	2,043
Συνολική απαίτηση σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (m <sup>3</sup> )	864	2,160	2,419.2	5,443.2

#### 4.2.2.2 Τμήμα Α

Το πρώτο τμήμα της συνολικής διατομής του υπογείου θαλάμου ορύσσεται ακολουθώντας την μέθοδο της οριζόντιας διάτρησης.

Ακολουθώντας την ίδια συλλογιστική με ανωτέρω παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για το τμήμα Α της διατομής του Σεναρίου Α προέκυψαν τα ακόλουθα:

- Συνολικό μήκος = 41.6m
- Εμβαδόν διατομής = 238 m<sup>2</sup>
- Συνολική ποσότητα εξορυγμένου υλικού = 9,900.8m<sup>3</sup> συμπαγούς ή 12,871m<sup>3</sup>χαλαρού πετρώματος



- Αριθμός διατρημάτων ανά βήμα προχώρησης (3m)  $\approx$  300
- Συνολικός αριθμός βημάτων προχώρησης = 14
- Χωματισμοί ανά βήμα προχώρησης =  $714\text{m}^3$  συμπαγούς ή  $928\text{m}^3$  χαλαρού πετρώματος
- Συνολικός αριθμός διατρημάτων = Αριθμός ηλεκτρικών καψυλίων = 4,200
- Συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά βήμα προχώρησης = 937.5kg
- Συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης = 13,125kg
- Αγκύρια ανά βήμα προχώρησης = 5.64
- Συνολικός αριθμός απαιτούμενων αγκυρίων = 79
- Ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος ανά βήμα προχώρησης =  $7.1\text{ m}^3$
- Συνολική ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος =  $99.4\text{ m}^3$
- Συνολική ποσότητα έγχυτου σκυροδέματος =  $195.6\text{ m}^3$
- Συνολική ποσότητα απαιτούμενης μεταλλικής επένδυσης =  $489.1\text{ m}^2$

#### 4.2.2.3 Τμήματα Β και Γ

Όσον αφορά τα δύο ακραία σημεία του πρώτου αναβαθμού της διατομής, αυτά παρουσιάζουν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Και σε αυτήν την περίπτωση ακολουθείται η ίδια διαδικασία εξόρυξης και μέθοδος διάτρησης. Ακολουθώντας υπολογίζονται τα βασικά στοιχεία για καθένα από τα δύο τμήματα. Επομένως, ισχύουν τα εξής:

- Συνολικό μήκος = 41.6m
- Εμβαδόν διατομής =  $221\text{ m}^2$
- Συνολική ποσότητα εξορυγμένου υλικού =  $9,193.6\text{m}^3$  συμπαγούς ή  $11,952\text{m}^3$  χαλαρού πετρώματος
- Αριθμός διατρημάτων ανά βήμα προχώρησης (3m)  $\approx$  280
- Συνολικός αριθμός βημάτων προχώρησης = 14
- Χωματισμοί ανά βήμα προχώρησης =  $663\text{m}^3$  συμπαγούς ή  $862\text{m}^3$  χαλαρού πετρώματος
- Συνολικός αριθμός διατρημάτων = Αριθμός ηλεκτρικών καψυλίων = 3,920
- Συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά βήμα προχώρησης = 875kg
- Συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης = 12,250kg
- Αγκύρια ανά βήμα προχώρησης = 12.86
- Συνολικός αριθμός απαιτούμενων αγκυρίων = 180
- Ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος ανά βήμα προχώρησης =  $16.1\text{ m}^3$
- Συνολική ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος =  $222.9\text{ m}^3$
- Συνολική ποσότητα έγχυτου σκυροδέματος =  $445.9\text{ m}^3$
- Συνολική ποσότητα απαιτούμενης μεταλλικής επένδυσης =  $1,114.7\text{ m}^2$

#### 4.2.2.4 Τμήματα Δ και Ε

Το τέταρτο (Δ) και το πέμπτο (Ε) κατά σειρά εκσκαφής τμήμα εκσκάπτονται με την εφαρμογή της μεθόδου των ορθών βαθμίδων και μέσα από κατακόρυφη διάτρηση. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά των εν λόγω βαθμίδων, τα οποία συνοδεύονται από τα αποτελέσματα των βασικών υπολογισμών, όπως διενεργήθηκε και για τα προγενέστερα τμήματα.

- Διάμετρος διατρήματος = 115 mm
- Ύψος μετώπου = 25 m
- Φορτίο, B = 5.18 m
- Μήκος υποδιάτρησης, U = 1.55 m
- Μήκος διατρήματος, H = 26.6 m
- Απόκλιση διατρήματος, F = 0.85 m
- Πρακτικό φορτίο, B1 = 4.38 m
- Απόσταση διατρημάτων, E = 5.41 m
- Μήκος επιγόμεωσης, Ho = 4.33 m
- Μήκος γόμωσης πυθμένα, Ho = 1.55 m
- Μήκος γόμωσης στήλης, Hc = 20.67 m
- Γόμωση πυθμένα, Qo = 12.84 kg (Ζελατινοδυναμίτιδα)
- Γόμωση στήλης, Qc = 171.78 kg (ANFO)
- Συνολικό μήκος = 41.6m
- Συνολική ποσότητα εξορυγμένου υλικού = 21,632m<sup>3</sup> συμπαγούς ή 28,122m<sup>3</sup> χαλαρού πετρώματος
- Θεωρώντας μήκος προχώρησης ίσο με 6m (όσο περίπου και το φορτίο B), ο αριθμός των διατρημάτων ανά βήμα προχώρησης είναι ίσος με 4
- Συνολικός αριθμός διατρημάτων = Αριθμός ηλεκτρικών καυλιών = 32
- Συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά βήμα προχώρησης = 738.5kg (κατά παραδοχή τα δύο είδη εκρηκτικής ύλης λαμβάνονται υπόψιν ως μία κοινή Ε.Υ.)
- Συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης = 5,908kg
- Αγκύρια ανά βήμα προχώρησης = 37.5
- Συνολικός αριθμός απαιτούμενων αγκυριών = 263
- Ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος ανά βήμα προχώρησης = 30 m<sup>3</sup>
- Συνολική ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος = 208 m<sup>3</sup>
- Συνολική ποσότητα έγχυτου σκυροδέματος = 416 m<sup>3</sup>

- Συνολική ποσότητα απαιτούμενης μεταλλικής επένδυσης = 1,040 m<sup>2</sup>

#### 4.2.2.5 Τμήματα Z

Το έκτο (Z) τμήμα της διατομής θα εκσκαφτεί με την ίδια μέθοδο, όπως αναλύθηκε ανωτέρω. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά της εκσκαφής του εν λόγω τμήματος και τα αποτελέσματα των βασικών υπολογισμών

- Διάμετρος διατρήματος = 115 mm
- Ύψος μετώπου = 9.4 m
- Φορτίο, B = 5.18 m
- Μήκος υποδιάτρησης, U = 1.55 m
- Μήκος διατρήματος, H = 11.0 m
- Απόκλιση διατρήματος, F = 0.38 m
- Πρακτικό φορτίο, B1 = 4.80 m
- Απόσταση διατρημάτων, E = 6.0 m
- Μήκος επιγόμωσης, Ho = 4.8 m
- Μήκος γόμωσης πυθμένα, Ho = 1.55 m
- Μήκος γόμωσης στήλης, Hc = 4.6 m
- Γόμωση πυθμένα, Qo = 12.84 kg (Ζελατινοδυναμίτιδα)
- Γόμωση στήλης, Qc = 38.25 kg (ANFO)
- Συνολικό μήκος = 41.6m
- Συνολική ποσότητα εξορυγμένου υλικού = 15,695.3m<sup>3</sup> συμπαγούς ή 20,404m<sup>3</sup> χαλαρού πετρώματος
- Θεωρώντας μήκος προχώρησης ίσο με 6m (όσο περίπου και το φορτίο B), ο αριθμός των διατρημάτων ανά βήμα προχώρησης είναι ίσος με 7
- Συνολικός αριθμός διατρημάτων = Αριθμός ηλεκτρικών καυσίων = 56
- Συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά βήμα προχώρησης = 357.7kg (κατά παραδοχή τα δύο είδη εκρηκτικής ύλης λαμβάνονται υπόψιν ως μία κοινή Ε.Υ.)
- Συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης = 2,917.6kg
- Ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος ανά βήμα προχώρησης = 23.4 m<sup>3</sup>
- Συνολική ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος = 162.3 m<sup>3</sup>
- Συνολική ποσότητα έγχυτου σκυροδέματος = 324.6 m<sup>3</sup>
- Συνολική ποσότητα απαιτούμενης μεταλλικής επένδυσης = 811.5 m<sup>2</sup>

#### 4.2.2.6 Τμήματα Η

Το τελευταίο βήμα (έβδομο - Ζ) εκσκαφής της διατομής θα εκσκαφτεί με την ίδια μέθοδο, όπως αναλύθηκε ανωτέρω. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά της εκσκαφής του εν λόγω τμήματος και τα αποτελέσματα των βασικών υπολογισμών.

- Διάμετρος διατρήματος = 115 mm
- Ύψος μετώπου = 11.4 m
- Φορτίο, B = 5.18 m
- Μήκος υποδιάτρησης, U = 1.55 m
- Μήκος διατρήματος, H = 13.0 m
- Απόκλιση διατρήματος, F = 0.44 m
- Πρακτικό φορτίο, B1 = 4.74 m
- Απόσταση διατρημάτων, E = 5.9 m
- Μήκος επιγόμεωσης, Ho = 4.7 m
- Μήκος γόμωσης πυθμένα, Ho = 1.55 m
- Μήκος γόμωσης στήλης, Hc = 6.7 m
- Γόμωση πυθμένα, Qo = 12.84 kg (Ζελατινοδυναμίτιδα)
- Γόμωση στήλης, Qc = 55.37 kg (ANFO)
- Συνολικό μήκος = 41.6m
- Συνολική ποσότητα εξορυγμένου υλικού = 12,575.7m<sup>3</sup> συμπαγούς ή 16,348m<sup>3</sup> χαλαρού πετρώματος
- Θεωρώντας μήκος προχώρησης ίσο με 6m (όσο περίπου και το φορτίο B), ο αριθμός των διατρημάτων ανά βήμα προχώρησης είναι ίσος με 7
- Συνολικός αριθμός διατρημάτων = Αριθμός ηλεκτρικών καυσλίων = 56
- Συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά βήμα προχώρησης = 477.4kg (κατά παραδοχή τα δύο είδη εκρηκτικής ύλης λαμβάνονται υπόψιν ως μία κοινή Ε.Υ.)
- Συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης = 3,837.7kg
- Ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος ανά βήμα προχώρησης = 55.0 m<sup>3</sup>
- Συνολική ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος = 381.4 m<sup>3</sup>
- Συνολική ποσότητα έγχυτου σκυροδέματος = 762.8 m<sup>3</sup>
- Συνολική ποσότητα απαιτούμενης μεταλλικής επένδυσης = 1,906.9 m<sup>2</sup>

## 4.2.3 Βασικοί υπολογισμοί – 2<sup>η</sup> Περίπτωση σχεδιασμού

### 4.2.3.1 Προσπελαστικά έργα

Ακολουθώντας την ίδια συλλογιστική με την 1<sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού, ακολούθως παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών των βασικών μεγεθών, για τις προσπελαστικές οδούς του δεύτερου σεναρίου σχεδιασμού.

**Πίνακας 23: Βασικά αποτελέσματα υπολογισμών – Προσπελαστικές οδοί**

Παράμετρος	Στοές Διατομής 4m x 4m	Στοές Διατομής 6m x 6m	Συνολικά
Επιφάνεια μετώπου εκσκαφής (m <sup>2</sup> )	16	36	52
Συνολικό μήκος (m)	500	670	1,170
Συνολική ποσότητα συμπαγούς εξορυγμένου υλικού (m <sup>3</sup> )	8,000	24,120	32,120
Συντελεστής επιπλήσματος	1.3		
Συνολική ποσότητα χαλαρού εξορυγμένου υλικού (m <sup>3</sup> )	10,400	31,356	41,756
Διατρήματα ανά βήμα προχώρησης	58	70	128
Συνολικά διατρήματα	9,686	15,680	25,366
Συνολικά ηλεκτρικά καψύλλια	9,686	15,680	25,366
Συνολικά βήματα προχώρησης	167	224	391
Παραγόμενοι συμπαγείς χωματισμοί ανά βήμα προχώρησης (m <sup>3</sup> )	48	108	156
Παραγόμενοι χαλαροί χωματισμοί ανά βήμα προχώρησης (m <sup>3</sup> )	62.4	140.4	202.8
Απαίτηση σε ΕΥ ανά βήμα προχώρησης (kg)	181.25	218.75	400
Συνολική απαίτηση σε ΕΥ (kg)	30,268.75	49,000	79,268.75
Απαίτηση σε αγκύρια ανά βήμα προχώρησης	3	4.5	7.5
Απαίτηση σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ανά βήμα προχώρησης (m <sup>3</sup> )	9.6	10.8	20.4
Μήκος αγκυρίων (m)	5		

Συνολική απαίτηση σε αγκύρια	501	1,008	1,509
Συνολική απαίτηση σε εκτοξευόμενο σκυροδέμα (m <sup>3</sup> )	1,603.2	2,419.2	4,022.4

#### 4.2.3.2 Τμήμα Α

Το πρώτο τμήμα της συνολικής διατομής του υπογείου θαλάμου ορύσσεται ακολουθώντας την μέθοδο της οριζόντιας διάτρησης.

Ακολουθώντας την ίδια συλλογιστική με ανωτέρω, παρακάτω παρατίθενται μόνο τα αποτελέσματα των υπολογισμών, χάριν οικονομίας του λόγου.

Επομένως, κατά τους υπολογισμούς για το τμήμα Α της διατομής του Σεναρίου Β προέκυψαν τα ακόλουθα:

- Συνολικό μήκος = 150m
- Εμβαδόν διατομής = 65 m<sup>2</sup>
- Συνολική ποσότητα εξορυγμένου υλικού = 9,750m<sup>3</sup> συμπαγούς ή 12,675m<sup>3</sup> χαλαρού πετρώματος
- Αριθμός διατρημάτων ανά βήμα προχώρησης (3m) = 100
- Συνολικός αριθμός βημάτων προχώρησης = 50
- Χωματισμοί ανά βήμα προχώρησης = 195m<sup>3</sup> συμπαγούς ή 253.5m<sup>3</sup> χαλαρού πετρώματος
- Συνολικός αριθμός διατρημάτων = Αριθμός ηλεκτρικών καυσλίων = 5,000
- Συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά βήμα προχώρησης = 312.5kg
- Συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης = 15,625kg
- Αγκύρια ανά βήμα προχώρησης = 5
- Συνολικός αριθμός απαιτούμενων αγκυρίων = 250
- Ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος ανά βήμα προχώρησης = 4.0 m<sup>3</sup>
- Συνολική ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος = 200 m<sup>3</sup>
- Συνολική ποσότητα έγχυτου σκυροδέματος = 402.4 m<sup>3</sup>
- Συνολική ποσότητα απαιτούμενης μεταλλικής επένδυσης = 1,006 m<sup>2</sup>

#### 4.2.2.3 Τμήματα Β και Γ

Όσον αφορά τα δύο ακραία σημεία του πρώτου αναβαθμού της διατομής, αυτά παρουσιάζουν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Και σε αυτήν την περίπτωση ακολουθείται

η ίδια διαδικασία εξόρυξης και μέθοδος διάτρησης. Ακολούθως υπολογίζονται τα βασικά στοιχεία για καθένα από τα δύο τμήματα. Επομένως, ισχύουν τα εξής:

- Συνολικό μήκος = 150m
- Εμβαδόν διατομής = 51 m<sup>2</sup>
- Συνολική ποσότητα εξορυγμένου υλικού = 7,650m<sup>3</sup> συμπαγούς ή 9,945m<sup>3</sup> χαλαρού πετρώματος
- Αριθμός διατρημάτων ανά βήμα προχώρησης (3m) = 90
- Συνολικός αριθμός βημάτων προχώρησης = 50
- Χωματισμοί ανά βήμα προχώρησης = 153m<sup>3</sup> ή 166,267.5kg χαλαρού πετρώματος
- Συνολικός αριθμός διατρημάτων = Αριθμός ηλεκτρικών καψυλίων = 4,500
- Συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά βήμα προχώρησης = 281.25kg
- Συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης = 14,062.5kg
- Αγκύρια ανά βήμα προχώρησης = 9.62
- Συνολικός αριθμός απαιτούμενων αγκυρίων = 481
- Ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος ανά βήμα προχώρησης = 7.7 m<sup>3</sup>
- Συνολική ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος = 385 m<sup>3</sup>
- Συνολική ποσότητα έγχυτου σκυροδέματος = 769.7 m<sup>3</sup>
- Συνολική ποσότητα απαιτούμενης μεταλλικής επένδυσης = 1,924.3 m<sup>2</sup>

#### 4.2.2.4 Τμήματα Δ και Ε

Το τέταρτο (Δ) και το πέμπτο (Ε) κατά σειρά εκσκαφής τμήμα εκσκάπτονται με την εφαρμογή της μεθόδου των ορθών βαθμίδων και μέσα από κατακόρυφη διάτρηση. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά των εν λόγω βαθμίδων, τα οποία συνοδεύονται από τα αποτελέσματα των βασικών υπολογισμών, όπως διενεργήθηκε και για τα προγενέστερα τμήματα.

- Διάμετρος διατρήματος = 115 mm
- Ύψος μετώπου = 10 m
- Φορτίο, B = 5.18 m
- Μήκος υποδιάτρησης, U = 1.6 m
- Μήκος διατρήματος, H = 11.6 m
- Απόκλιση διατρήματος, F = 0.40 m
- Πρακτικό φορτίο, B1 = 4.8 m
- Απόσταση διατρημάτων, E = 6.0 m

- Μήκος επιγόμεωσης,  $H_o = 4.8 \text{ m}$
- Μήκος γόμεωσης πυθμένα,  $H_o = 1.6 \text{ m}$
- Μήκος γόμεωσης στήλης,  $H_c = 5.2 \text{ m}$
- Γόμεωση πυθμένα,  $Q_o = 12.84 \text{ kg}$  (Ζελατινοδυναμίτιδα)
- Γόμεωση στήλης,  $Q_c = 43.39 \text{ kg}$  (ANFO)
- Συνολικό μήκος =  $150 \text{ m}$
- Συνολική ποσότητα εξορυγμένου υλικού =  $32,400 \text{ m}^3$  συμπαγούς ή  $42,120 \text{ m}^3$  χαλαρού πετρώματος
- Θεωρώντας μήκος προχώρησης ίσο με  $6 \text{ m}$  (όσο περίπου και το φορτίο B), ο αριθμός των διατρημάτων ανά βήμα προχώρησης είναι ίσος με 4
- Συνολικός αριθμός διατρημάτων = Αριθμός ηλεκτρικών καψυλίων = 116
- Συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης ανά βήμα προχώρησης =  $56.2 \text{ kg}$  (κατά παραδοχή τα δύο είδη εκρηκτικής ύλης λαμβάνονται υπόψιν ως μία κοινή E.Y.)
- Συνολική ποσότητα εκρηκτικής ύλης =  $5,046.1 \text{ kg}$
- Αγκύρια ανά βήμα προχώρησης = 30
- Συνολικός αριθμός απαιτούμενων αγκυρίων = 750

#### Τμήμα Δ

- Ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος ανά βήμα προχώρησης =  $24 \text{ m}^3$
- Συνολική ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος =  $600 \text{ m}^3$
- Συνολική ποσότητα έγχυτου σκυροδέματος =  $1,200 \text{ m}^3$
- Συνολική ποσότητα απαιτούμενης μεταλλικής επένδυσης =  $3,000 \text{ m}^2$

#### Τμήμα Ε

- Ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος ανά βήμα προχώρησης =  $49.9 \text{ m}^3$
- Συνολική ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος =  $1,248 \text{ m}^3$
- Συνολική ποσότητα έγχυτου σκυροδέματος =  $2,496 \text{ m}^3$
- Συνολική ποσότητα απαιτούμενης μεταλλικής επένδυσης =  $6,240 \text{ m}^2$



## **4.3 Προκαταρκτική εκτίμηση χρονοδιαγραμμάτων εργασιών**

### **4.3.1 Βασικές παραδοχές**

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές παραδοχές, οι οποίες θα αξιοποιηθούν με σκοπό την αρχική εκτίμηση των απαιτούμενων συνολικών χρόνων εκτέλεσης των βασικών εργασιών, και οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

#### **Αριθμός μηχανημάτων**

- Ένα (1) διατρητικό φορείο με δύο (2) διατρητικά στελέχη
- Δύο (2) φορτωτές υπογείων LHD
- Δύο (2) φορτηγά
- Ένα (1) μηχάνημα απομάκρυνσης επισφαλών όγκων - ξεσκαρωτής
- Ένα (1) μηχάνημα κοχλίωσης
- Ένα (1) μηχάνημα Robosystem

#### **Αριθμός εργαζόμενων ανά εργασία**

- Για την εργασία της διάτρησης απαιτείται ένας (1) χειριστής
- Για την εργασία της γόμωσης και της ανατίναξης απαιτούνται δύο (2) εργαζόμενοι
- Για την εργασία της φόρτωσης – μεταφοράς του εξορυγμένου υλικού απαιτούνται συνολικά δύο (2) χειριστές για τους φορτωτές και δύο (2) χειριστές για τα φορτηγά
- Για την εργασία του ξεσκαρώματος απαιτείται ένας (1) εργαζόμενος
- Για την εργασία της τοποθέτησης εκτοξευόμενου σκυροδέματος απαιτείται ένας (1) χειριστής
- Για την εργασία τοποθέτησης των αγκυρίων άμεσης υποστήριξης απαιτείται ένας (1) χειριστής
- Για την εργασία εφαρμογής του έγχυτου σκυροδέματος απαιτείται ένας (1) εργαζόμενος
- Για την εργασία της τοποθέτησης της μεταλλικής επένδυσης και της εργασίας της συγκόλλησης απαιτείται ένας (1) εργαζόμενος

#### **Βασικές παραδοχές χρόνων εργασιών**

- Ταχύτητα όρυξης διατρήματος = 1.7 m/min
- Χρόνος επανατοποθέτησης βραχίονα = 1 min/διάτρημα
- Χρόνος γόμωσης = 2 min/ διάτρημα & εργαζόμενο

- Χρόνος εξαερισμού μετώπου εξόρυξης = 10 min/βήμα προχώρησης
- Χρόνος φόρτωσης κάδου / απόρριψης υλικών = 1 min/εργασία
- Χρόνος ξεσκαρώματος = 15 min/εργασία
- Χρόνος τοποθέτησης πλέγματος όπλισης έγχυτου σκυροδέματος 1.5 min/m<sup>2</sup>
- Μέση ταχύτητα κίνησης φορτωτή = 8 km/h
- Μέση ταχύτητα κίνησης φορτηγού = 25 km/h
- Ταχύτητα εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος = 15 m<sup>3</sup>/hr
- Ταχύτητα τοποθέτησης αγκυρίου = 1.7 m/min
- Χρόνος επανατοποθέτησης βραχίονα κοχλιωτή = 0.5 min/αγκύριο
- Ταχύτητα εφαρμογής έγχυτου σκυροδέματος = 10 m<sup>3</sup>/hr
- Χρόνος συγκόλλησης μεταλλικής κατασκευής = 1.5 min/m<sup>2</sup>

Επιπλέον κατά παραδοχή θεωρείται μήκος αγκυρίων στις προσπελαστικές οδούς ίσο με 5m.

#### **4.3.2 1<sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού του συγκροτήματος**

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής εκτίμησης του απαιτούμενου χρόνου διεκπεραίωσης των επιμέρους εργασιών για την υλοποίηση της πρώτης περίπτωσης σχεδιασμού του υπόγειου συγκροτήματος αποθήκευσης LNG.

Για την εργασία της διάτρησης ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 24: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Διάτρησης»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά διατρήματα	37,530	-
Συνολικό μήκος διατρημάτων	123,849	m
Απαιτούμενος χρόνος διάτρησης	36,426	min
Απαιτούμενος χρόνος επανατοποθέτησης βραχίονα	37,530	min
Συνολικός χρόνος εργασίας	73,956	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Ανά θάλαμο)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά διατρήματα	12,216	-
Συνολικό μήκος διατρημάτων	42,778	m
Απαιτούμενος χρόνος διάτρησης	12,582	min
Απαιτούμενος χρόνος επανατοποθέτησης βραχίονα	12,216	min
Συνολικός χρόνος εργασίας	24,798	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά διατρήματα	48,864	-
Συνολικό μήκος διατρημάτων	171,112	m
Απαιτούμενος χρόνος διάτρησης	50,328	min
Απαιτούμενος χρόνος επανατοποθέτησης βραχίονα	48,864	min
Συνολικός χρόνος εργασίας	99,192	min

Για την εργασία της γόμωσης ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 25: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Γόμωσης»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά διατρήματα	37,530	-
Απαιτούμενος χρόνος γόμωσης	37,530	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Ανά θάλαμο)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά διατρήματα	12,216	-
Απαιτούμενος χρόνος διάτρησης	12,216	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά διατρήματα	48,864	-
Απαιτούμενος χρόνος διάτρησης	48,864	min

Η εργασία του αερισμού των μετώπων εξόρυξης για την απομάκρυνση των επικίνδυνων – τοξικών αερίων της ανατίναξης θεωρείται συμπληρωματική εργασία και ο υπολογισμός του συνολικού χρόνου λαμβάνεται υπόψιν ως κενός χρόνος εργασίας. Για την εν λόγω εργασία ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 26: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Αερισμού»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά βήματα προχώρησης	609	-
Απαιτούμενος «κενός» χρόνος	6,090	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Ανά θάλαμο)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά βήματα προχώρησης	74	-
Απαιτούμενος «κενός» χρόνος	740	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά βήματα προχώρησης	296	-
Απαιτούμενος «κενός» χρόνος	2,960	min

Για την εργασία της φόρτωση και μεταφοράς του εξορυγμένου υλικού ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 27: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Φόρτωσης - Μεταφοράς»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολική ποσότητα παραγόμενων χωματισμών χαλαρού πετρώματος	51,012	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενοι κύκλοι	3,188	-
Απαιτούμενος χρόνος μεταφοράς εξορυγμένου υλικού	3,188	min
Απαιτούμενος χρόνος μεταφοράς κίνησης φορτωτών	2.869	min
Συνολικός χρόνος επιτέλεσης εργασίας φόρτωσης και προκαταρκτικής μεταφοράς	6,057	min
Χρόνος απομάκρυνσης χωματισμών μέσω φορητών	1,592	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Ανά θάλαμο)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολική ποσότητα παραγόμενων χωματισμών	129,771	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενοι κύκλοι	10,465	-
Απαιτούμενος χρόνος μεταφοράς εξορυγμένου υλικού	10,465	min
Απαιτούμενος χρόνος μεταφοράς κίνησης φορτωτών	9,419	min
Συνολικός χρόνος επιτέλεσης εργασίας φόρτωσης και προκαταρκτικής μεταφοράς	19,884	min
Χρόνος απομάκρυνσης χωματισμών μέσω φορητών	4,049	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολική ποσότητα παραγόμενων χωματισμών χαλαρού πετρώματος	519,084	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενοι κύκλοι	41,860	-
Απαιτούμενος χρόνος μεταφοράς εξορυγμένου υλικού	41,860	min
Απαιτούμενος χρόνος μεταφοράς κίνησης φορτωτών	37,676	min
Συνολικός χρόνος επιτέλεσης εργασίας φόρτωσης και προκαταρκτικής μεταφοράς	79,536	min
Χρόνος απομάκρυνσης χωματισμών μέσω φορητών	16,196	min

Ο χρόνος απομάκρυνσης των χωματισμών με τη χρήση των φορητών θεωρείται συμπληρωματικός, καθώς δεν επιβαρύνει άμεσα, εφόσον γίνει ορθός προγραμματισμός, την

ομαλή διεξαγωγή του κύκλου εργασιών στο μέτωπο της εξόρυξης. Επομένως, ως απαιτούμενος χρόνος διεκπαιρέωσης της εν λόγω εργασίας καλείται ο χρόνος εργασίας των φορτωτών.

Για την εργασία του ξεσκαρώματος ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 28: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Ξεσκαρώματος»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά βήματα προχώρησης	609	-
Απαιτούμενος χρόνος ξεσκαρώματος	9,135	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Ανά θάλαμο)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά βήματα προχώρησης	74	-
Απαιτούμενος χρόνος ξεσκαρώματος	1,110	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά βήματα προχώρησης	296	-
Απαιτούμενος χρόνος ξεσκαρώματος	4,440	min

Για τις εργασίες εφαρμογής των στοιχείων της επένδυσης των τοιχωμάτων ισχύουν τα ακόλουθα:

**Πίνακας 29: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Υποστήριξης»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικός αριθμός αγκυρίων	2,043	-
Συνολικό μήκος αγκυρίων	10,215	m
Απαιτούμενος χρόνος τοποθέτησης αγκυρίων	6,008	min
Απαιτούμενος χρόνος επανατοποθέτησης βραχίονα	1,022	min
Συνολική ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος	5,443	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής εκτ. σκυροδέματος	21,772	min
Συνολική ποσότητα έγχυτου σκυροδέματος	-	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής έγχυτου σκυροδέματος	-	min
Συνολική επιφάνεια πλέγματος οπλισμού σκυροδέματος	-	m <sup>2</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής πλέγματος	-	min
Συνολική επιφάνεια μεταλλικής επένδυσης	-	m <sup>2</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής μεταλλικής επένδυσης	-	min
Συνολικός χρόνος εργασιών υποστήριξης	28,802	min

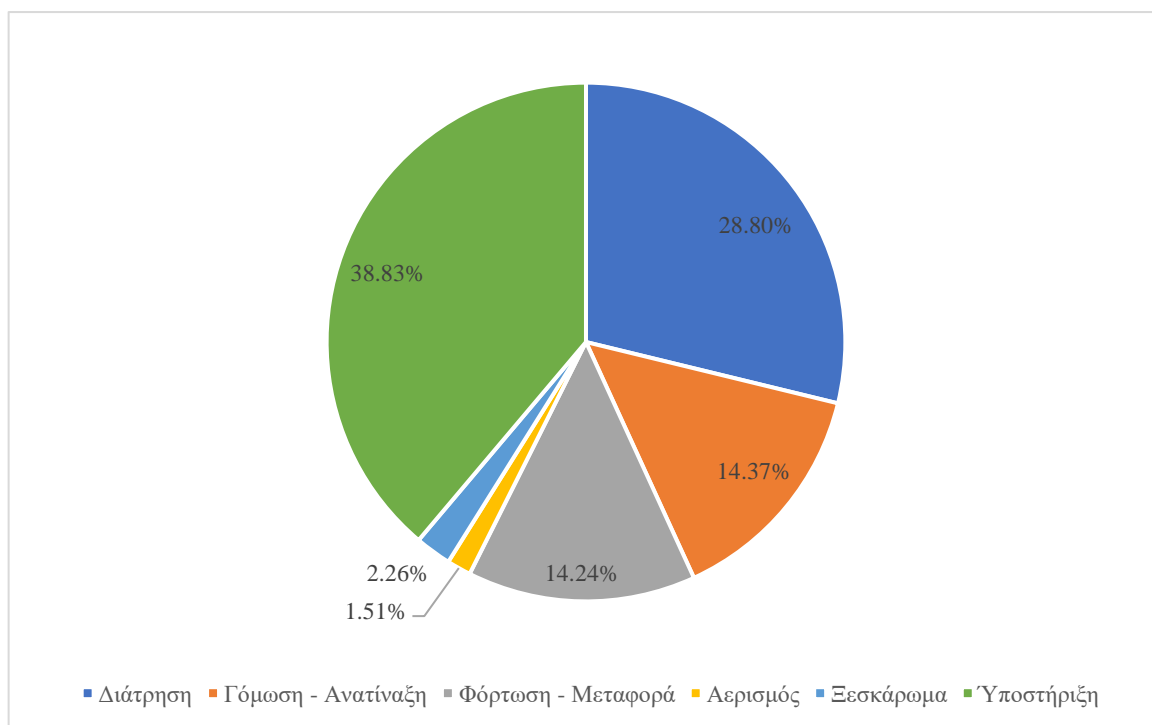


<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Ανά θάλαμο)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικός αριθμός αγκυρίων	965	-
Συνολικό μήκος αγκυρίων	6,929	m
Απαιτούμενος χρόνος τοποθέτησης αγκυρίων	4,076	min
Απαιτούμενος χρόνος επανατοποθέτησης βραχίονα	483	min
Συνολική ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος	1,505	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής εκτ. σκυροδέματος	6,020	min
Συνολική ποσότητα έγχυτου σκυροδέματος	3,007	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής έγχυτου σκυροδέματος	18,042	min
Συνολική επιφάνεια πλέγματος οπλισμού σκυροδέματος	7,517	m <sup>2</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής πλέγματος	11,275	min
Συνολική επιφάνεια μεταλλικής επένδυσης	7,517	m <sup>2</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής μεταλλικής επένδυσης	11,275	min
Συνολικός χρόνος εργασιών υποστήριξης	51,171	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικός αριθμός αγκυρίων	3,860	-
Συνολικό μήκος αγκυρίων	27,716	m
Απαιτούμενος χρόνος τοποθέτησης αγκυρίων	16,304	min
Απαιτούμενος χρόνος επανατοποθέτησης βραχίονα	1,932	min
Συνολική ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος	6,020	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής εκτ. σκυροδέματος	24,080	min
Συνολική ποσότητα έγχυτου σκυροδέματος	12,028	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής έγχυτου σκυροδέματος	72,168	min

Συνολική επιφάνεια πλέγματος οπλισμού σκυροδέματος	30,068	m <sup>2</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής πλέγματος	45,100	min
Συνολική επιφάνεια μεταλλικής επένδυσης	30,068	m <sup>2</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής μεταλλικής επένδυσης	45,100	min
Συνολικός χρόνος εργασιών υποστήριξης	204,684	min

Ο συνολικός εκτιμώμενος χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση των επιμέρους εργασιών του κύκλου της εκσκαφής είναι 601,246 mins ή 10,021 hrs ή 626 days (υπό την θεώρηση δύο βαρδιών ανά ημέρα).

Στο ακόλουθο γράφημα παρουσιάζεται το μερίδιο που καταλαμβάνει η κάθε εργασία στον συνολικό χρόνο επιτέλεσης του συνόλου του έργου.



Εικόνα 98: Ποσοστό συμμετοχής των εργασιών επί του συνολικά απαιτούμενου χρόνου ολοκλήρωσης του έργου

#### 4.3.3 2<sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού του συγκροτήματος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κατά προσέγγιση προκαταρκτικής εκτίμησης του απαιτούμενου χρόνου διεκπεραίωσης της εκάστοτε εργασίας εκσκαφής για την δεύτερη περίπτωση σχεδιασμού του υπόγειου συγκροτήματος αποθήκευσης LNG.

Για την εργασία της διάτρησης ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 30: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Διάτρησης»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά διατρήματα	25,366	-
Συνολικό μήκος διατρημάτων	126,830	m
Απαιτούμενος χρόνος διάτρησης	37,303	min
Απαιτούμενος χρόνος επανατοποθέτησης βραχίονα	25,366	min
Συνολικός χρόνος εργασίας	62,669	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Ανά θάλαμο)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά διατρήματα	14,232	-
Συνολικό μήκος διατρημάτων	48,891	m
Απαιτούμενος χρόνος διάτρησης	14,380	min
Απαιτούμενος χρόνος επανατοποθέτησης βραχίονα	14,232	min
Συνολικός χρόνος εργασίας	28612	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά διατρήματα	42,696	-
Συνολικό μήκος διατρημάτων	146,673	m
Απαιτούμενος χρόνος διάτρησης	43,140	min
Απαιτούμενος χρόνος επανατοποθέτησης βραχίονα	42,696	min
Συνολικός χρόνος εργασίας	85,836	min

Για την εργασία της γόμωσης ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 31: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Γόμωσης»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά διατρήματα	25,366	-
Απαιτούμενος χρόνος γόμωσης	25,366	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Ανά θάλαμο)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά διατρήματα	14,232	-
Απαιτούμενος χρόνος διάτρησης	14,232	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά διατρήματα	42,696	-
Απαιτούμενος χρόνος διάτρησης	42,696	min

Η εργασία του αερισμού των μετώπων εξόρυξης για την απομάκρυνση των επικίνδυνων – τοξικών αερίων της ανατίναξης θεωρείται συμπληρωματική εργασία και ο υπολογισμός του συνολικού χρόνου λαμβάνεται υπόψιν ως κενός χρόνος εργασίας. Για την εν λόγω εργασία ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 32: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Αερισμού»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά βήματα προχώρησης	391	-
Απαιτούμενος «κενός» χρόνος	3,910	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Ανά θάλαμο)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά βήματα προχώρησης	208	-
Απαιτούμενος «κενός» χρόνος	2,080	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά βήματα προχώρησης	624	-
Απαιτούμενος «κενός» χρόνος	6,240	min

Για την εργασία της φόρτωση και μεταφοράς του εξορυγμένου υλικού ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 33: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Φόρτωσης - Μεταφοράς»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολική ποσότητα παραγόμενων χωματισμών χαλαρού πετρώματος	41,756	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενοι κύκλοι	2,610	-
Απαιτούμενος χρόνος μεταφοράς εξορυγμένου υλικού	2,610	min
Απαιτούμενος χρόνος μεταφοράς κίνησης φορτωτών	2.349	min
Συνολικός χρόνος επιτέλεσης εργασίας φόρτωσης και προκαταρκτικής μεταφοράς	4,959	min
Χρόνος απομάκρυνσης χωματισμών μέσω φορητών	1,303	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Ανά θάλαμο)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολική ποσότητα παραγόμενων χωματισμών	129,771	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενοι κύκλοι	10,465	-
Απαιτούμενος χρόνος μεταφοράς εξορυγμένου υλικού	10,465	min
Απαιτούμενος χρόνος μεταφοράς κίνησης φορτωτών	9,419	min
Συνολικός χρόνος επιτέλεσης εργασίας φόρτωσης και προκαταρκτικής μεταφοράς	19,884	min
Χρόνος απομάκρυνσης χωματισμών μέσω φορητών	4,049	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολική ποσότητα παραγόμενων χωματισμών χαλαρού πετρώματος	389,313	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενοι κύκλοι	31,395	-
Απαιτούμενος χρόνος μεταφοράς εξορυγμένου υλικού	31,395	min
Απαιτούμενος χρόνος μεταφοράς κίνησης φορτωτών	28,257	min
Συνολικός χρόνος επιτέλεσης εργασίας φόρτωσης και προκαταρκτικής μεταφοράς	59,652	min
Χρόνος απομάκρυνσης χωματισμών μέσω φορητών	12,147	min

Ο χρόνος απομάκρυνσης των χωματισμών με τη χρήση των φορητών θεωρείται συμπληρωματικός, καθώς δεν επιβαρύνει άμεσα, εφόσον γίνει ορθός προγραμματισμός, την

ομαλή διεξαγωγή του κύκλου εργασιών στο μέτωπο της εξόρυξης. Επομένως, ως απαιτούμενος χρόνος διεκπαιρέωσης της εν λόγω εργασίας καλείται ο χρόνος εργασίας των φορτωτών.

Για την εργασία του ξεσκαρώματος ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 34: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Ξεσκαρώματος»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά βήματα προχώρησης	391	-
Απαιτούμενος χρόνος ξεσκαρώματος	5,865	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Ανά θάλαμο)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά βήματα προχώρησης	208	-
Απαιτούμενος χρόνος ξεσκαρώματος	3,120	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικά βήματα προχώρησης	624	-
Απαιτούμενος χρόνος ξεσκαρώματος	9,360	min

Για τις εργασίες εφαρμογής των στοιχείων της επένδυσης των τοιχωμάτων ισχύουν τα ακόλουθα:

**Πίνακας 35: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Υποστήριξης»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικός αριθμός αγκυρίων	1,509	-
Συνολικό μήκος αγκυρίων	7,545	m
Απαιτούμενος χρόνος τοποθέτησης αγκυρίων	2,219	min
Απαιτούμενος χρόνος επανατοποθέτησης βραχίονα	755	min
Συνολική ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος	4,022.4	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής εκτ. σκυροδέματος	16,090	min
Συνολική ποσότητα έγχυτου σκυροδέματος	-	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής έγχυτου σκυροδέματος	-	min
Συνολική επιφάνεια πλέγματος οπλισμού σκυροδέματος	-	m <sup>2</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής πλέγματος	-	min
Συνολική επιφάνεια μεταλλικής επένδυσης	-	m <sup>2</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής μεταλλικής επένδυσης	-	min
Συνολικός χρόνος εργασιών υποστήριξης	19,064	min

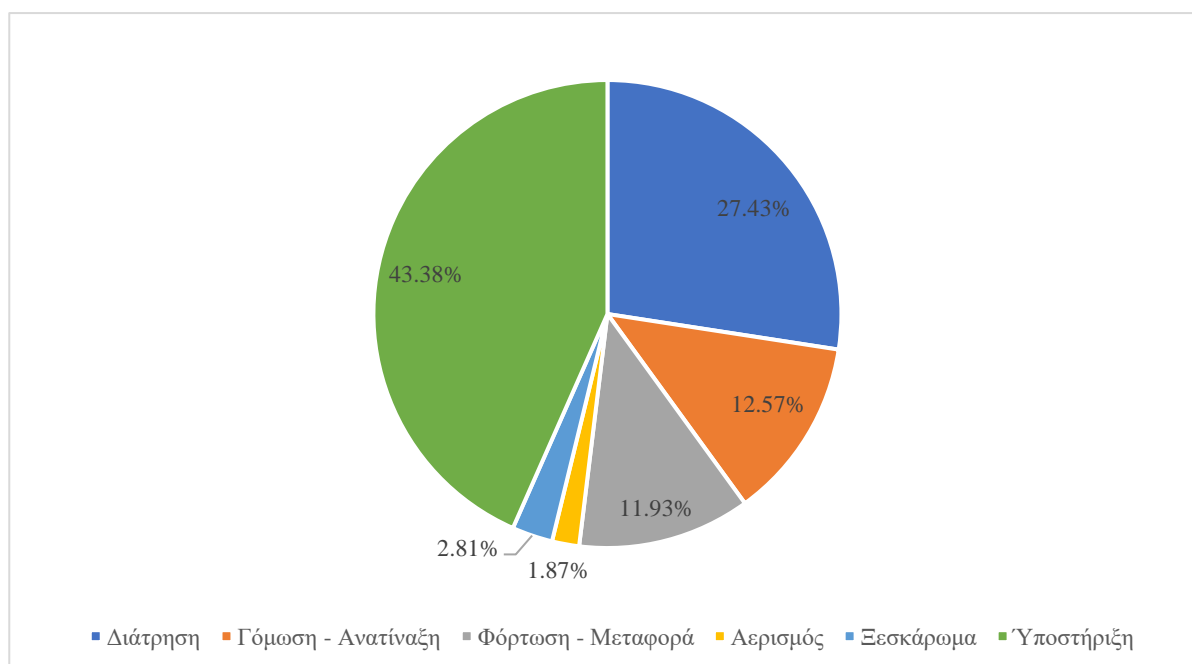


<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Ανά θάλαμο)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικός αριθμός αγκυρίων	2,712	-
Συνολικό μήκος αγκυρίων	11,136	m
Απαιτούμενος χρόνος τοποθέτησης αγκυρίων	3,275	min
Απαιτούμενος χρόνος επανατοποθέτησης βραχίονα	1,356	min
Συνολική ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος	2,170	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής εκτ. σκυροδέματος	8,680	min
Συνολική ποσότητα έγχυτου σκυροδέματος	4,341.8	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής έγχυτου σκυροδέματος	26,051	min
Συνολική επιφάνεια πλέγματος οπλισμού σκυροδέματος	10,854.6	m <sup>2</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής πλέγματος	16,282	min
Συνολική επιφάνεια μεταλλικής επένδυσης	10,854.6	m <sup>2</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής μεταλλικής επένδυσης	16,282	min
Συνολικός χρόνος εργασιών υποστήριξης	71,926	min
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Συνολικός αριθμός αγκυρίων	8,136	-
Συνολικό μήκος αγκυρίων	33,408	m
Απαιτούμενος χρόνος τοποθέτησης αγκυρίων	9,825	min
Απαιτούμενος χρόνος επανατοποθέτησης βραχίονα	4,068	min
Συνολική ποσότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος	6,510	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής εκτ. σκυροδέματος	26,040	min
Συνολική ποσότητα έγχυτου σκυροδέματος	13,025.4	m <sup>3</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής έγχυτου σκυροδέματος	78,153	min

Συνολική επιφάνεια πλέγματος οπλισμού σκυροδέματος	32,563.8	m <sup>2</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής πλέγματος	48,846	min
Συνολική επιφάνεια μεταλλικής επένδυσης	32,563.8	m <sup>2</sup>
Απαιτούμενος χρόνος εφαρμογής μεταλλικής επένδυσης	48,846	min
Συνολικός χρόνος εργασιών υποστήριξης	215,778	min

Ο συνολικός εκτιμώμενος χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση των επιμέρους εργασιών του κύκλου της εκσκαφής είναι 541,395 mins ή 9023 hrs ή 564 days (υπό την θεώρηση δύο βαρδιών ανά ημέρα).

Στο ακόλουθο γράφημα παρουσιάζεται το μερίδιο που καταλαμβάνει η κάθε εργασία στον συνολικό χρόνο επιτέλεσης του συνόλου του έργου.



Εικόνα 99: Ποσοστό συμμετοχής των εργασιών επί του συνολικά απαιτούμενου χρόνου ολοκλήρωσης του έργου

## 4.4 Προκαταρκτική εκτίμηση κόστους έργου

### 4.4.1 Βασικές παραδοχές

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές παραδοχές, οι οποίες θα αξιοποιηθούν με σκοπό την προκαταρκτική εκτίμηση του κατασκευαστικού κόστους του έργου, οι οποίες είναι οι εξής:

- Κόστος αγοράς διατρητικού φορείου = 250,000 €
- Κόστος λειτουργίας διατρητικού φορείου = 120 €/hr = 2 €/min
- Κόστος αγοράς κορώνας = 60 €/τεμάχιο
- Χρόνος ζωής κορώνας = 500m διάτρησης/κορώνα
- Κόστος αγοράς στελέχους διάτρησης = 245 €/τεμάχιο
- Χρόνος ζωής στελέχους διάτρησης = 5,000m/τεμάχιο
- Κόστος ηλεκτρικού καψυλλίου = 1 €/τεμάχιο
- Κόστος εκρηκτικών = 2 €/kg
- Κόστος αγοράς συστήματος αερισμού = 50,000€
- Κόστος λειτουργίας συστήματος αερισμού = 90€/hr = 1.5 €/min
- Κόστος αγοράς φορτωτών = 2 x 350,000 € = 700,000 €
- Κόστος αγοράς φορτηγών 2 x 100,000€ = 200,000€
- Κόστος λειτουργίας φορτωτή υπογείων = 120 €/hr = 2 €/min
- Κόστος λειτουργίας φορτηγών = 120 €/hr = 2 €/min
- Κόστος μηχανήματος ξεσκαρώματος = 150,000 €
- Κόστος λειτουργίας ξεσκαρωτή = 90 €/hr = 1.5 €/min
- Κόστος μηχανήματος κοχλίωσης = 250,000 €
- Κόστος λειτουργίας μηχανήματος κοχλίωσης = 90 €/hr = 1.5 €/min
- Κόστος κοχλία = 30 €/τεμάχιο
- Κόστος μηχανήματος Robosystem = 250,000 €
- Κόστος λειτουργίας μηχανήματος Robosystem = 90 €/hr = 1.5 €/min
- Κόστος σκυροδέματος = 65 €/m<sup>3</sup>
- Ποσότητα ιών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα = 40 kg ιών / m<sup>3</sup> σκυροδέματος
- Κόστος ιών = 1.5 €/kg
- Κόστος αγοράς μεταλλικού πλέγματος = 2.5 €/m<sup>2</sup>
- Κόστος αγοράς και τοποθέτησης μεταλλικής επένδυσης = 50 €/m<sup>2</sup>
- Ωρομίσθιο εργαζομένων = 18€/hr
- Χρόνος ζωής μηχανημάτων = 25,000hr
- Χρόνος ζωής συστήματος αερισμού = 10,000hr
- *Απόσβεση μηχανήματος =*  

$$\frac{\text{Κόστος αγοράς μηχανήματος} \times \text{Ωρες λειτουργίας μηχανήματος}}{\text{Χρόνος ζωής μηχανήματος}}$$

Σημειώνεται ότι συμβατικά το κόστος αγοράς των μηχανημάτων για την εκάστοτε εργασία λαμβάνεται υπόψη στα συνολικά κόστη των προσπελαστικών έργων.

#### 4.4.2 1<sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού του συγκροτήματος

Για την εργασία της διάτρησης ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 36: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Διάτρησης»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Απαιτούμενος αριθμός κορώνων	248	-
Συνολικό κόστος κορώνων	14,880	€
Κόστος αγοράς διατρητικού φορείου	250,000	€
Κόστος λειτουργίας διατρητικού φορείου	147,912	€
Απαιτούμενος αριθμός στελεχών διάτρησης	25	-
Συνολικό κόστος στελεχών διάτρησης	6,125	€
Απόσβεση μηχανήματος	12,326	€
Κόστος εργαζομένων	22,187	€
Συνολικό κόστος εργασίας	453,430	€
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Απαιτούμενος αριθμός κορώνων	440	-
Συνολικό κόστος κορώνων	26,400	€
Κόστος λειτουργίας διατρητικού φορείου	198,384	€
Απαιτούμενος αριθμός στελεχών διάτρησης	44	-
Συνολικό κόστος στελεχών διάτρησης	10,780	€
Απόσβεση μηχανήματος	19,233	€
Κόστος εργαζομένων	34,618	€
Συνολικό κόστος εργασίας	289,415	€

Για την εργασία της γόμωσης ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 37: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Γόμωσης»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Απαιτούμενη ποσότητα εκρηκτικής ύλης	117,281.3	kg
Κόστος εκρηκτικής ύλης	234,563	€
Απαιτούμενη ποσότητα καψυλλίων	37,530	-
Κόστος καψυλλίων	37,530	€
Κόστος εργαζομένων	11,259	€
Συνολικό κόστος εργασίας	283,352	€
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Απαιτούμενη ποσότητα εκρηκτικής ύλης	168,588.9	kg
Κόστος εκρηκτικής ύλης	337,178	€
Απαιτούμενη ποσότητα καψυλλίων	50,712	-
Κόστος καψυλλίων	50,712	€
Κόστος εργαζομένων	15,214	€
Συνολικό κόστος εργασίας	403,104	€

Για την εργασία του αερισμού των εγκαταστάσεων ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 38: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Αερισμού»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Κόστος αγοράς συστήματος αερισμού	50,000	€
Κόστος λειτουργίας συστήματος αερισμού	9,135	€
Απόσβεση συστήματος αερισμού	508	€
Συνολικό κόστος εργασίας	59,643	€
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Κόστος λειτουργίας συστήματος αερισμού	4,440	€
Απόσβεση συστήματος αερισμού	247	€
Συνολικό κόστος εργασίας	4,687	€

Για την εργασία της φόρτωση και μεταφοράς του εξορυγμένου υλικού ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 39: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Φόρτωσης - Μεταφοράς»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Κόστος αγοράς φορτωτών	700,000	€
Κόστος αγοράς φορητών	200,000	€
Κόστος λειτουργίας φορτωτών	12,114	€
Κόστος λειτουργίας φορητών	3,184	€
Απόσβεση μηχανημάτων	3,039	€
Κόστος εργαζομένων	2,295	€
Συνολικό κόστος εργασίας	920,632	€
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Κόστος λειτουργίας φορτωτών	86,709	€
Κόστος λειτουργίας φορητών	33,392	€
Απόσβεση μηχανημάτων	39,276	€
Κόστος εργαζομένων	17,342	€
Συνολικό κόστος εργασίας	176,719	€

Για την εργασία του ξεσκαρώματος ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 40: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Ξεσκαρώματος»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Κόστος αγοράς μηχανήματος	150,000	€
Κόστος λειτουργίας μηχανήματος	13,703	€
Απόσβεση μηχανήματος	914	€
Κόστος εργαζόμενων	2,741	€
Συνολικό κόστος εργασίας	167,358	€
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Κόστος λειτουργίας μηχανήματος	6,660	€
Απόσβεση μηχανήματος	444	€
Κόστος εργαζομένων	1,332	€
Συνολικό κόστος εργασίας	8,436	€



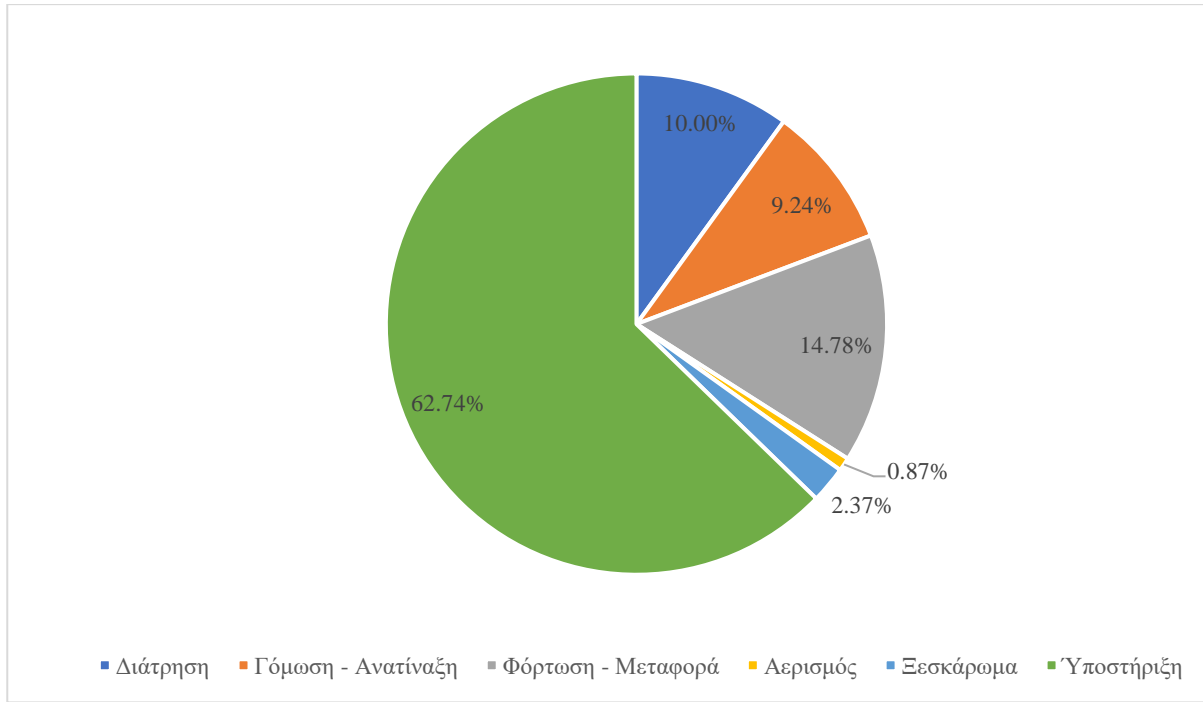
Για τις εργασίες εφαρμογής των στοιχείων της επένδυσης των τοιχωμάτων ισχύουν τα ακόλουθα:

**Πίνακας 41: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Υποστήριξης»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Κόστος αγοράς Robosystem	250,000	€
Κόστος αγοράς κοχλιωτή	250,000	€
Κόστος λειτουργίας Robosystem	32,658	€
Κόστος λειτουργίας κοχλιωτή	10,545	€
Απόσβεση Robosystem	3,629	€
Απόσβεση κοχλιωτή	1,172	€
Κόστος εργαζομένων	8,641	€
Κόστος αγκυρίων	61,290	€
Κόστος εκτοξευόμενου σκυροδέματος	353,795	€
Κόστος ινών	326,580	€
Κόστος έγχυτου σκυροδέματος	-	€
Κόστος μεταλλικού πλέγματος οπλισμού έγχυτου σκυροδέματος	-	€
Κόστος μεταλλικής επένδυσης	-	€
Συνολικό κόστος εργασίας	1,298,310	€

<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Κόστος λειτουργίας Robosystem	36,120	€
Κόστος λειτουργίας κοχλιωτή	27,354	€
Απόσβεση Robosystem	4,013	€
Απόσβεση κοχλιωτή	3,039	€
Κόστος εργαζομένων	61,405	€
Κόστος αγκυρίων	115,800	€
Κόστος εκτοξευόμενου σκυροδέματος	391,300	€
Κόστος ιών	361,200	€
Κόστος έγχυτου σκυροδέματος	781,820	€
Κόστος μεταλλικού πλέγματος οπλισμού έγχυτου σκυροδέματος	75,170	€
Κόστος μεταλλικής επένδυσης	1,503,400	€
Συνολικό κόστος εργασίας	3,360,621	€

Το συνολικό κόστος κατασκευής του έργου ανέρχεται στα 7,425,707€. Θεωρώντας μία προσαύξηση της τάξης του 15%, λόγω της αβεβαιότητας των παραδοχών και της κάλυψης απρόβλεπτων συνθηκών, προκύπτει προκαταρκτικά υπολογιζόμενο κόστος κατασκευής του έργου ίσο με 8,539,563€. Σημειώνεται ότι το συγκεκριμένο ποσό είναι ενδεικτικό, βασίζεται σε ορισμένες πρότυπες παραδοχές και αποτελεί μία προκαταρκτική εκτίμηση του κόστους των βασικών εργασιών. Στην πράξη το κόστος πιθανότατα να παρουσιάσει ορισμένες διαφοροποιήσεις, λόγω της απαίτησης σε επιπρόσθετα βοηθητικά έργα που θα καθορίσουν την τελική μονάδα αποθήκευσης, αλλά και λόγω υλικών και μηχανημάτων, τα οποία κατά παραδοχή δεν λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα εργασία (πχ. μηχανήματα τροφοδοσίας έγχυτου σκυροδέματος, βοηθητικά μέσα τοποθέτησης επενδύσεων κ.α.). Πολύ μεγαλύτερη χρησιμότητα παρέχει το ακόλουθο γράφημα, στο οποίο παρουσιάζεται ενδεικτικά το μερίδιο που καταλαμβάνει η κάθε εργασία στο σύνολο του απαιτούμενο κόστους κατασκευής του έργου.



Εικόνα 100: Ποσοστό συμμετοχής των εργασιών επί του συνολικού κόστους κατασκευής του έργου

#### 4.4.3 2<sup>η</sup> περίπτωση σχεδιασμού του συγκροτήματος

Για την εργασία της διάτρησης ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 42: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Διάτρησης»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Απαιτούμενος αριθμός κορώνων	168	-
Συνολικό κόστος κορώνων	10,080	€
Κόστος αγοράς διατρητικού φορείου	250,000	€
Κόστος λειτουργίας διατρητικού φορείου	125,338	€
Απαιτούμενος αριθμός στελεχών διάτρησης	17	-
Συνολικό κόστος στελεχών διάτρησης	4,165	€
Απόσβεση μηχανήματος	10,445	€
Κόστος εργαζομένων	18,801	€
Συνολικό κόστος εργασίας	418,829	€
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Απαιτούμενος αριθμός κορώνων	294	-
Συνολικό κόστος κορώνων	17,640	€
Κόστος λειτουργίας διατρητικού φορείου	171,672	€
Απαιτούμενος αριθμός στελεχών διάτρησης	30	-
Συνολικό κόστος στελεχών διάτρησης	7,350	€
Απόσβεση μηχανήματος	14,306	€
Κόστος εργαζομένων	25,751	€
Συνολικό κόστος εργασίας	236,719	€

Για την εργασία της γόμωσης ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 43: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Γόμωσης»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Απαιτούμενη ποσότητα εκρηκτικής ύλης	79,268.75	kg
Κόστος εκρηκτικής ύλης	158,538	€
Απαιτούμενη ποσότητα καψυλλίων	25,336	-
Κόστος καψυλλίων	25,336	€
Κόστος εργαζομένων	7,610	€
Συνολικό κόστος εργασίας	191,484	€
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Απαιτούμενη ποσότητα εκρηκτικής ύλης	161,526.6	kg
Κόστος εκρηκτικής ύλης	323,053	€
Απαιτούμενη ποσότητα καψυλλίων	42,696	-
Κόστος καψυλλίων	42,696	€
Κόστος εργαζομένων	12,809	€
Συνολικό κόστος εργασίας	378,558	€

Για την εργασία του αερισμού των εγκαταστάσεων ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 44: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Αερισμού»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Κόστος αγοράς συστήματος αερισμού	50,000	€
Κόστος λειτουργίας συστήματος αερισμού	5,865	€
Απόσβεση συστήματος αερισμού	326	€
Συνολικό κόστος εργασίας	56,191	€
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Κόστος λειτουργίας συστήματος αερισμού	9,360	€
Απόσβεση συστήματος αερισμού	520	€
Συνολικό κόστος εργασίας	9,880	€

Για την εργασία της φόρτωση και μεταφοράς του εξορυγμένου υλικού ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 45: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Φόρτωσης - Μεταφοράς»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Κόστος αγοράς φορτωτών	700,000	€
Κόστος αγοράς φορητών	200,000	€
Κόστος λειτουργίας φορτωτών	9,918	€
Κόστος λειτουργίας φορητών	2,606	€
Απόσβεση μηχανημάτων	2,488	€
Κόστος εργαζομένων	1,879	€
Συνολικό κόστος εργασίας	916,891	€
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Κόστος λειτουργίας φορτωτών	119,304	€
Κόστος λειτουργίας φορητών	24,294	€
Απόσβεση μηχανημάτων	29,458	€
Κόστος εργαζομένων	21,540	€
Συνολικό κόστος εργασίας	194,596	€

Για την εργασία του ξεσκαρώματος ισχύουν συγκεντρωτικά τα ακόλουθα:

**Πίνακας 46: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Ξεσκαρώματος»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Κόστος αγοράς μηχανήματος	150,000	€
Κόστος λειτουργίας μηχανήματος	8,798	€
Απόσβεση μηχανήματος	587	€
Κόστος εργαζόμενων	1,760	€
Συνολικό κόστος εργασίας	161,145	€
<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Κόστος λειτουργίας μηχανήματος	14,040	€
Απόσβεση μηχανήματος	936	€
Κόστος εργαζομένων	2,808	€
Συνολικό κόστος εργασίας	17,784	€



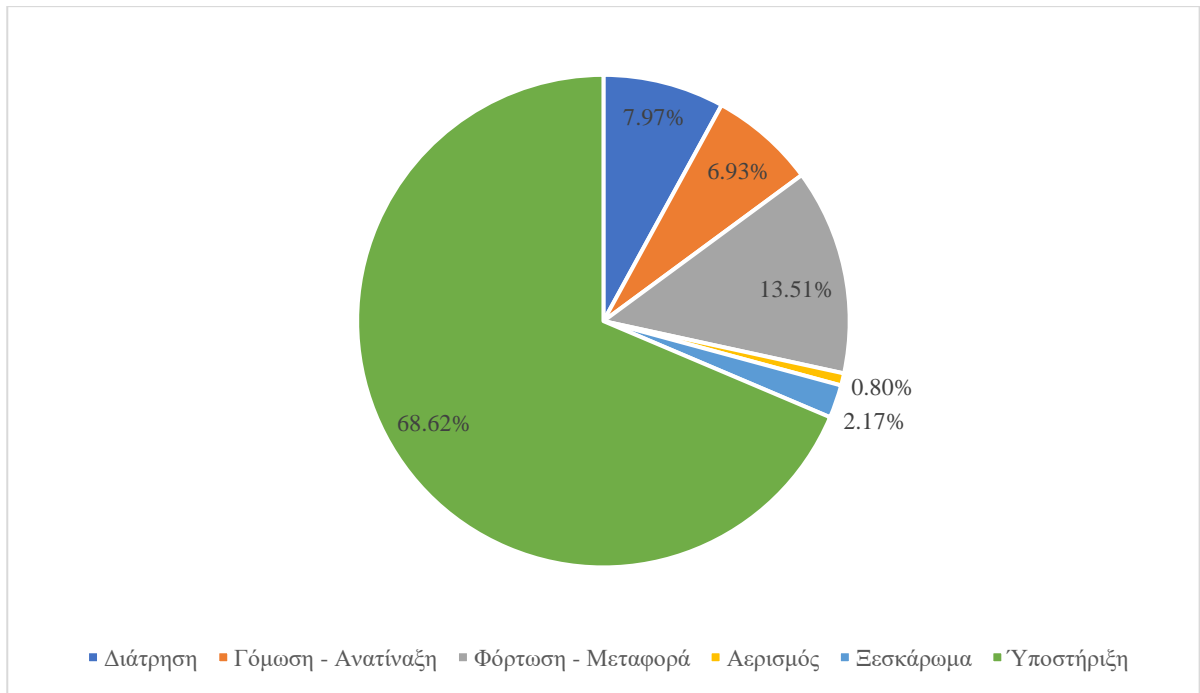
Για τις εργασίες εφαρμογής των στοιχείων της επένδυσης των τοιχωμάτων ισχύουν τα ακόλουθα:

**Πίνακας 47: Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών παραμέτρων εργασίας «Υποστήριξης»**

<b>Προσπελαστικά έργα</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Κόστος αγοράς Robosystem	250,000	€
Κόστος αγοράς κοχλιωτή	250,000	€
Κόστος λειτουργίας Robosystem	24,135	€
Κόστος λειτουργίας κοχλιωτή	4,461	€
Απόσβεση Robosystem	2,682	€
Απόσβεση κοχλιωτή	496	€
Κόστος εργαζομένων	5,719	€
Κόστος αγκυρίων	45,270	€
Κόστος εκτοξευόμενου σκυροδέματος	261,456	€
Κόστος ινών	241,344	€
Κόστος έγχυτου σκυροδέματος	-	€
Κόστος μεταλλικού πλέγματος οπλισμού έγχυτου σκυροδέματος	-	€
Κόστος μεταλλικής επένδυσης	-	€
Συνολικό κόστος εργασίας	1,085,563	€

<b>Έργα κατασκευής υπογείων θαλάμων (Συνολικά)</b>		
<b>Παράμετρος</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Κόστος λειτουργίας Robosystem	39,060	€
Κόστος λειτουργίας κοχλιωτή	20,840	€
Απόσβεση Robosystem	4,340	€
Απόσβεση κοχλιωτή	2,316	€
Κόστος εργαζομένων	64,733	€
Κόστος αγκυρίων	244,080	€
Κόστος εκτοξευόμενου σκυροδέματος	423,150	€
Κόστος ιών	390,600	€
Κόστος έγχυτου σκυροδέματος	846,651	€
Κόστος μεταλλικού πλέγματος οπλισμού έγχυτου σκυροδέματος	81,410	€
Κόστος μεταλλικής επένδυσης	2,442,300	€
Συνολικό κόστος εργασίας	4,559,480	€

Το συνολικό κόστος κατασκευής του έργου ανέρχεται στα 8,227,120€. Θεωρώντας μία προσαύξηση της τάξης του 15%, λόγω της αβεβαιότητας των παραδοχών και της κάλυψης απρόβλεπτων συνθηκών, προκύπτει προκαταρκτικά υπολογιζόμενο κόστος κατασκευής του έργου ίσο με 9,461,188€. Σημειώνεται ότι το συγκεκριμένο ποσό είναι ενδεικτικό, βασίζεται σε ορισμένες πρότυπες παραδοχές και αποτελεί μία προκαταρκτική εκτίμηση του κόστους των βασικών εργασιών. Στην πράξη το κόστος πιθανότατα να παρουσιάσει ορισμένες διαφοροποιήσεις, λόγω της απαίτησης σε επιπρόσθετα βοηθητικά έργα που θα καθορίσουν την τελική μονάδα αποθήκευσης, αλλά και λόγω υλικών και μηχανημάτων, τα οποία κατά παραδοχή δεν λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα εργασία (πχ. μηχανήματα τροφοδοσίας έγχυτου σκυροδέματος, βοηθητικά μέσα τοποθέτησης επενδύσεων κ.α.). Πολύ μεγαλύτερη χρησιμότητα παρέχει το ακόλουθο γράφημα, στο οποίο παρουσιάζεται ενδεικτικά το μερίδιο που καταλαμβάνει η κάθε εργασία στο σύνολο του απαιτούμενο κόστους κατασκευής του έργου.



Εικόνα 101: Ποσοστό συμμετοχής των εργασιών επί του συνολικού κόστους κατασκευής του έργου

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα και κρίσιμες επισημάνσεις

### 5.1 Ανακεφαλαίωση

Το ζήτημα της ενεργειακής αυτάρκειας των χωρών της ΕΕ βρίσκεται στο προσκήνιο και απαιτεί δραστικές λύσεις για την εξισορρόπηση της έκρυθμης κατάστασης που επικρατεί. Οι λύσεις αυτές θα πρέπει να είναι άμεσες, ρεαλιστικές και να συμβαδίζουν με τις επιταγές τις τεχνολογικές εξελίξεις. Το υπό εξέταση έργο αναμένεται να συνεισφέρει σε πολύ μεγάλο βαθμό στην επαύξηση της ενεργειακής αυτάρκειας της χώρας και στην ενεργειακή θωράκιση της ΕΕ.

Στο πλαίσιο της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας διενεργήθηκε προκαταρκτικός σχεδιασμός υπογείου συγκροτήματος αποθήκευσης LNG στην Ελλάδα. Πιο συγκεκριμένα, αξιολογώντας και αξιοποιώντας τα αποτελέσματα προγενέστερου προγράμματος γεωτεχνικής έρευνας στην εξεταζόμενη περιοχή, δύο (2) διαφορετικά σενάρια σχεδιαστικών παραμέτρων θαλάμων αποθήκευσης διερευνήθηκαν ως προς τις δυνατότητες που προσφέρουν προς την επίτευξη των αναγκαίων συνθηκών ευστάθειας, στην ευχέρεια των κατασκευαστικών εργασιών, αλλά και στο εκτιμώμενο κόστος κατασκευής. Κατά την εν λόγω διαδικασία, παρουσιάζονται οι βασικές παραδοχές σχεδιασμούς των εκσκαφών, το βάθος ανάπτυξης, ο αριθμός και η διάταξη των αποθηκών και η αξιολόγηση της ασφάλειας των εγχειρημάτων σε σχέση με τις προβλεπόμενες γεωτεχνικές συνθήκες της περιοχής πραγματοποιείται με τη χρήση μοντέλων αριθμητικής ανάλυσης.

Κατά την διαδικασία της αξιολόγησης της ευστάθειας των υπογείων θαλάμων πραγματοποιείται ανάλυση κινδύνου, με βάση τα κυριότερα αποτελέσματα των αναλύσεων. Επιπλέον, μία ειδικού τύπου ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνει χώρα, συμπληρωματικά των κύριων μοντέλων προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, κάνοντας χρήση των δυνατοτήτων που προσφέρει το λογισμικό RS2 της Rocscience, θερμική ανάλυση πραγματοποιείται για καθένα από τα δύο σενάρια σχεδιασμού του έργου, η οποία αποσκοπεί στην προσομοίωση της μεταβολής των θερμοκρασιακών συνθηκών γύρω από τους υπόγειους θαλάμους αποθήκευσης LNG.

Τέλος, προκαταρκτική εκτίμηση του κόστους και του απαιτούμενου χρόνου κατασκευής του έργου διενεργείται με σκοπό να ληφθούν υπόψιν αυτοί οι βαρύνουσας σημασίας παράγοντες προς τον τελικό προσδιορισμό της βέλτιστης σχεδιαστικής λύσης.

## 5.2 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Στο πλαίσιο της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας διενεργήθηκε αξιολόγηση και αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων δύο ομάδων σχεδιαστικών παραμέτρων συγκροτήματος αποθήκευσης LNG. Οι δύο περιπτώσεις ελέγχων αναπτύχθηκαν αξιοποιώντας κοινές γεωμηχανικές παραμέτρους, αξιοποιώντας δεδομένα υφιστάμενου προγράμματος γεωτεχνικής έρευνας στην ευρύτερη περιοχή του προβλεπόμενου έργου. Για κάθε μία περίπτωση πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός του έργου, μέσα από την εκτίμηση της διάταξης των υπογείων θαλάμων και των συνοδών έργων, που απαιτούνται για την επιτέλεση του εγχειρήματος, στο χώρο. Η εν λόγω διαδικασία περιελάμβανε την ανάλυση των βασικών παραδοχών και των σχεδιαστικών παραμέτρων, καθώς επίσης και προκαταρκτική κοστολόγηση του έργου και κατασκευή ενδεικτικού χρονοδιαγράμματος. Ο έλεγχος της ευστάθειας των υπογείων θαλάμων επιβεβαιώθηκε μέσα από την χρήση μοντέλων αριθμητικής ανάλυσης, μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων του λογισμικού RS2, της εταιρείας Rocscience. Τα αποτελέσματα υπέδειξαν εν γένει αρκετά ικανοποιητικές συνθήκες ευστάθειας των υπογείων χώρων, με την εκάστοτε προτεινόμενη διάταξη να περιλαμβάνει όλα τα βασικά τμήματα του έργου. Ακολούθως παρουσιάζονται συγκεντρωτικά, τα βασικά αποτελέσματα, οι παρατηρήσεις και οι κρίσιμες επισημάνσεις

### 1<sup>η</sup> περίπτωση σχεδιαστικών παραμέτρων

- Το πρώτο (1<sup>ο</sup>) σενάριο σχεδιαστικών παραμέτρων αφορά σε υπόγειο συγκρότημα αποθήκευσης LNG, το οποίο συνίσταται από τέσσερις (4) υπόγειους θαλάμους κατακόρυφης διεύθυνσης, μορφής σιλό.
- Οι υπόγειοι χώροι παρέχουν αποθηκευτική ικανότητα ίση με 394,000 m<sup>3</sup>
- Μέγιστες μετακινήσεις στη στέψη = 7 mm
- Μέγιστες μετακινήσεις στο δάπεδο = 28 mm
- Μέγιστες μετακινήσεις μεταξύ των θαλάμων = 13 mm
- Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας = 1.3
- Μέγιστη απόσταση ζώνης αστοχίας πετρώματος από το τοίχωμα = 5.7m
- Εκτιμώμενος χρόνος ολοκλήρωσης των εργασιών ≈ 630 ημέρες
- Εκτιμώμενο κόστος επιτέλεσης βασικών εργασιών ≈ 8,500,000€

## 2<sup>η</sup> περίπτωση σχεδιαστικών παραμέτρων

- Το δεύτερο (2<sup>ο</sup>) σενάριο σχεδιαστικών παραμέτρων αφορά σε υπόγειο συγκρότημα αποθήκευσης LNG, το οποίο συνίσταται από τρεις (3) υπόγειους θαλάμους οριζόντιας διεύθυνσης, μορφής σήραγγας.
- Οι υπόγειοι χώροι παρέχουν αποθηκευτική ικανότητα ίση με 321,000 m<sup>3</sup>
- Μέγιστες μετακινήσεις στη στέψη = 6 mm
- Μέγιστες μετακινήσεις στο δάπεδο = 12 mm
- Μέγιστες μετακινήσεις μεταξύ των θαλάμων = 7 mm
- Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας = 1.4
- Μέγιστη απόσταση ζώνης αστοχίας πετρώματος από το τοίχωμα = 1.9m
- Εκτιμώμενος χρόνος ολοκλήρωσης των εργασιών  $\approx$  565 ημέρες
- Εκτιμώμενο κόστος επιτέλεσης βασικών εργασιών  $\approx$  9,500,000€

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, το πρώτο σενάριο σχεδιαστικών παραμέτρων παρουσιάζεται ως οικονομικότερη λύση σε σχέση με το δεύτερο σενάριο σχεδιασμού του έργου, ενώ οι θάλαμοι του πρώτου σεναρίου παρουσιάζουν μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα έναντι του δεύτερου κατά 70,000 m<sup>3</sup>, περίπου. Ωστόσο, ο απαιτούμενος χρόνος ολοκλήρωσης της εργασίας είναι μεγαλύτερος στην πρώτη περίπτωση, λόγω και της ανάγκης ανάπτυξης περισσότερων προσπελαστικών έργων και περισσότερων σε αριθμό υπόγειων χώρων αποθήκευσης (περί τις 65 ημέρες). Επιπλέον, η περίπτωση της ανάπτυξης κατακόρυφων θαλάμων χρήζει πιο ιδιαίτερης μεταχείρισης.

Η επιλογή της βέλτιστης λύσης είναι αρκετά πολύπλοκη και θα πρέπει να βασιστεί στην ανάλυση όλων των επιμέρους καθοριστικών παραγόντων και στην βαρύτητα την οποία έχουν στην τελική επιλογή των σχεδιαστικών χαρακτηριστικών του έργου. Αναλογιζόμενοι των μεγαλύτερων πλεονεκτημάτων του πρώτου σεναρίου σχεδιασμού, τελικώς προτείνεται η υιοθέτηση του εν λόγω σεναρίου ως το προτεινόμενο, με βάση την διερεύνηση της παρούσης εργασίας.

Σημειώνεται ότι, πληθώρα προσπελαστικών και συνοδών έργων θα πρέπει να αναπτυχθούν, συμπληρωματικά με τις κύριες εγκαταστάσεις – υπόγειους θαλάμους αποθήκευσης. Το κόστος των εν λόγω έργων είναι αρκετά σημαντικό, αλλά η ανάγκη ανάπτυξης των απαιτούμενων συμπληρωματικών έργων είναι επιτακτική για την ασφαλή κατασκευή του έργου.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της διαδικασίας προκαταρκτικής εκτίμησης του χρόνου εκτέλεσης και του κόστους των επιμέρους εργασιών, παρατηρείται ότι οι εργασίες που

απαιτούν περισσότερο χρόνο επιτέλεσης είναι η «Διάτρηση» και η «Υποστήριξη» με ποσοστό 29% και 39% περίπου για την πρώτη περίπτωση σχεδιασμού και 28% και 43% περίπου για τη δεύτερη περίπτωση, αντίστοιχα. Όσον αφορά το κόστος των εργασιών, η «Υποστήριξη» των έργων κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό επί του συνολικού κόστους εκτέλεσης του έργου, με ποσοστό 62% και 68% επί του συνόλου, αντίστοιχα για την πρώτη και τη δεύτερη περίπτωση.

Τέλος, συνετό κρίνεται να επισημανθεί ότι τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας βασίζονται σε αρκετές παραδοχές, ως επί τω πλείστον βιβλιογραφικές, οι οποίες ενέχουν έναν ορισμένο βαθμό αβεβαιότητας. Ως εκ τούτου, ο ακριβέστερος σχεδιασμός του έργου απαιτεί ανάπτυξη νεότερου και αναλυτικότερου προγράμματος γεωτεχνικής έρευνας και ακριβέστερες παραδοχές για τους χρόνους και τα μοναδιαία κόστη των επιμέρους εργασιών.

## Βιβλιογραφία

### Ξένη βιβλιογραφία

- Amantini, E., & Chanfreau, E. (2004). Development and Construction of a Pilot Lined Cavern for LNG Underground Storage. *14th International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas*. Doha, Qatar: Norwegian University of Science and Technology.
- Chiyoda Corporation. (χ.χ.). Chiyoda's experience in LNG/LPG receiving terminals. Japan. Ανάκτηση από <http://www.chiyoda-corp.com/>
- CROFT Production Systems. (2020, May). *NATURAL GAS COMPOSITION*. Ανάκτηση December 19, 2022, από <https://www.croftsystems.net/oil-gas-blog/natural-gas-composition/>
- Demirel, N., Demirel, T., Deveci, M., & Vardar, G. (2017). Location selection for underground natural gas storage using Choquet integral. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*.
- Einar, B. (2016). *Norwegian Rock Caverns*. Utilization of Rock Caverns in Norway. Oslo: Norwegian Tunnelling Society.
- Eurostat. (2023). Shedding light on energy - 2023 edition. *Interactive Publications*. (E. Union, Επιμ.) Ανάκτηση 06 2023, 20, από <https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/energy-2023>
- Faramawy, S., Zaki, T., & Sakr, .-E. (2016, June 19). Natural gas origin, composition, and processing: A review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*.
- Geostock. (n.d.). Mined caverns for the storage of hydrocarbons and carbon-free products. Ανάκτηση January 22, 2023, από <https://www.geostockgroup.com/en/activities/types-of-underground-storage/mined-rock-caverns/#large-longitudinal-galleries->
- Glamheden, R., & Curtis, P. (2005). Excavation of a cavern for high-pressure storage of natural gas. *Elsevier Ltd*. doi:doi:10.1016/j.tust.2005.06.002
- Hatch Ltd. (April, 2010). OPG's Deep Geologic Repository for L&ILW - Preliminary Design Report. Στο *The Nuclear Waste Management Organization*. Ανάκτηση από [http://www.nwmo.ca/uploads\\_managed/MediaFiles/1606\\_h333000-wp700-05-124-0001.pdf](http://www.nwmo.ca/uploads_managed/MediaFiles/1606_h333000-wp700-05-124-0001.pdf)
- Hoek, E., & Marinos, P. (2001). *Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment.
- Hoek, E., Kaiser, P., & Bawden, W. (1995). *Support of Underground Excavation in Hard Rock*. Balkema, Rotterdam.



- Jelušič, P., Kravanja, S., & Žlender, B. (2018, November 12). Optimal cost and design of an underground gas storage by ANFIS. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.11.003>
- Johansson, F., Spross, J., Damasceno, D., & Johansson, J. (2018). *Investigation of research needs regarding the storage of hydrogen gas in lined rock caverns: Prestudy for Work Package 2.3 in HYBRIT Research Program 1*. KTH Royal Institute of Technology.
- Johansson, J. (2003). Cavern Wall Design Principles. Στο *High Pressure Storage of Gas in Lined Rock Caverns*. Stockholm, Sweden.
- Kruck, O., Crotogino, F., Prelicz, R., & Rudolph, T. (2013). Overview on all Known Underground Storage Technologies for Hydrogen. Στο *HyUnder, Assessment of the potential, the actors and relevant business cases for large scale and seasonal storage of renewable electricity by hydrogen underground storage in Europe*.
- Lentner, R., Richter, M., Kleinrahm, R., & Span, R. (2017). *Density measurements of liquefied natural gas (LNG) over the temperature range from (105 to 135) K at pressures up to 8.9 MPa*. Elsevier Ltd. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jct.2017.04.002>
- Littlejohn, G., & Bruce, A. (1975). *Rock Anchors - State of the Art*.
- Mansson, L., & Marion, P. (n.d.). *The LRC Concept and the Demonstration Plant in Sweden – A New Approach to Commercial Gas Storage*.
- Mokhatab, S., & Messersmith, D. (2018, July). *Hydrocarbon Processing*. Ανάκτηση December 22, 2022, από Liquefaction technology selection for baseload LNG plants: <https://www.hydrocarbonprocessing.com/magazine/2018/july-2018/bonus-report-lng-technology/liquefaction-technology-selection-for-baseload-lng-plants>
- Nanda, A., Rath, R., & Usmani, A. (2015). *Underground Storage Technologies*. New Delhi: Engineers India Ltd.
- NATO ASI Series. (1988). *Underground Storage of Natural Gas, Theory and Practice*. Στο M. Tek (Επιμ.), *Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Underground Storage of Natural Gas. 171*. Ankara, Turkey: Kluwer Academic Publishers.
- Park, E.-S., Chung, S.-K., Lee, D.-H., & Kim, T.-G. (2012). Innovative Method of LNG Storage in Underground Lined Rock Caverns. Στο *Natural Gas*. Sreenath Borra Gupta. doi:<http://dx.doi.org/10.5772/45771>
- Pillai, R. (2009, November 9). *Underground Storage in Rock Caverns*.
- Sofregaz US Inc., & LRC. (1999). *Commercial Potential of Natural Gas Storage in Lined Rock Caverns (LRC)*. U.S. Department of Energy. doi:Topical Report SZUS-0005 DE-AC26-97FT34348-01
- Tengborg, P., Johansson, J., & Durup, J. (2014). Storage of highly compressed gases in underground Lined Rock Caverns – More than 10 years of experience. *World Tunnel*

*Congress 2014 – Tunnels for a better Life*. Foz do Iguaçu, Brazil. Ανάκτηση από [https://www.researchgate.net/publication/315784541\\_Storage\\_of\\_highly\\_compressed\\_gases\\_in\\_underground\\_Lined\\_Rock\\_Caverns\\_-\\_More\\_than\\_10\\_years\\_of\\_experience](https://www.researchgate.net/publication/315784541_Storage_of_highly_compressed_gases_in_underground_Lined_Rock_Caverns_-_More_than_10_years_of_experience)

TOKYO GAS Co.,Ltd. (χ.χ.). *Tokyo Gas Engineering Solutions*. Ανάκτηση January 4, 2023, από In-Ground LNG Storage Tanks: <http://www.netdecheck.com/en/lngtech/ug-tank/index.html>

U.S. Energy Information Administration. (2015, November 16). *U.S. Energy Information Administration*. Ανάκτηση October 21, 2022, από The Basics of Underground Natural Gas Storage: <https://www.eia.gov/naturalgas/storage/basics/>

Vanderbroek, L., & Berghmans, J. (2012). Safety aspects of the use of LNG for marine propulsion. *2012 International Symposium on Safety Science and Technology*. ELSEVIER Ltd.

Žlender, B., Jelusič, P., & Boumezerane, D. (2011). Fuzzy Sets concept for optimization underground gas storage.

### **Ελληνική βιβλιογραφία**

Αγιουτάντης, Ζ. (2019). Στοιχεία Διάρθρωσης – Ανατίναξης. Εκδοτικός Όμιλος Ίων.

ΔΕΣΦΑ. (2013). Σύντομο ενημερωτικό έντυπο για τον τερματικό σταθμό υγροποιημένου φυσικού αερίου της Ρεβυθούσας.

Μπενάρδος, Α., & Καλιαμπάκος, Δ. (2010). *Υπόγεια Έργα (Σημειώσεις Μαθήματος)*. Αθήνα: Σχολή Μηχ. Μετ. Μετ. (Ε.Μ.Π.).

Παναγιώτου, Γ. Ν. (n.d.). Αρχικός σχεδιασμός ανατίναξης υπαίθριου μετώπου μορφής βαθμίδας με την βοήθεια προσωπικού υπολογιστή. Στο *Εκμετάλλευση Μεταλλείων*.

Σοφριανός, Α. (2018). Διάνοιξη Σηράγγων. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Τολιά, Α.–Β. (2022). *Σχεδιασμός Υπόγειου Χώρου Αποθήκευσης Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου*. Αθήνα: Σχολή Μηχ. Μετ. Μετ. (Ε.Μ.Π.).



## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΓΓΛΙΚΗ ΓΛΩΣΣΑ**

# "Design of an Underground LNG Storage Project in Greece"

## Introduction

In recent times, the energy crisis has assumed greater prominence, exerting a significant impact on the global populace. In particular, the issues of energy self-sufficiency, ensuring the uninterrupted energy supply and meeting escalating demand have resurfaced, necessitating the implementation of profound remedies. Therefore, the development of novel, technologically advanced, and secure energy infrastructure projects emerge as an imperative priority, crucial for safeguarding the energy requirements of nations.

As evidenced by Figure 1, the utilization of natural gas for fulfilling approximately 23% of EU's energy demands is apparent. The graphical representation, based on research conducted by the Eurostat (2023), illustrates the proportion of diverse energy sources employed in satisfying Europe's energy requirements.

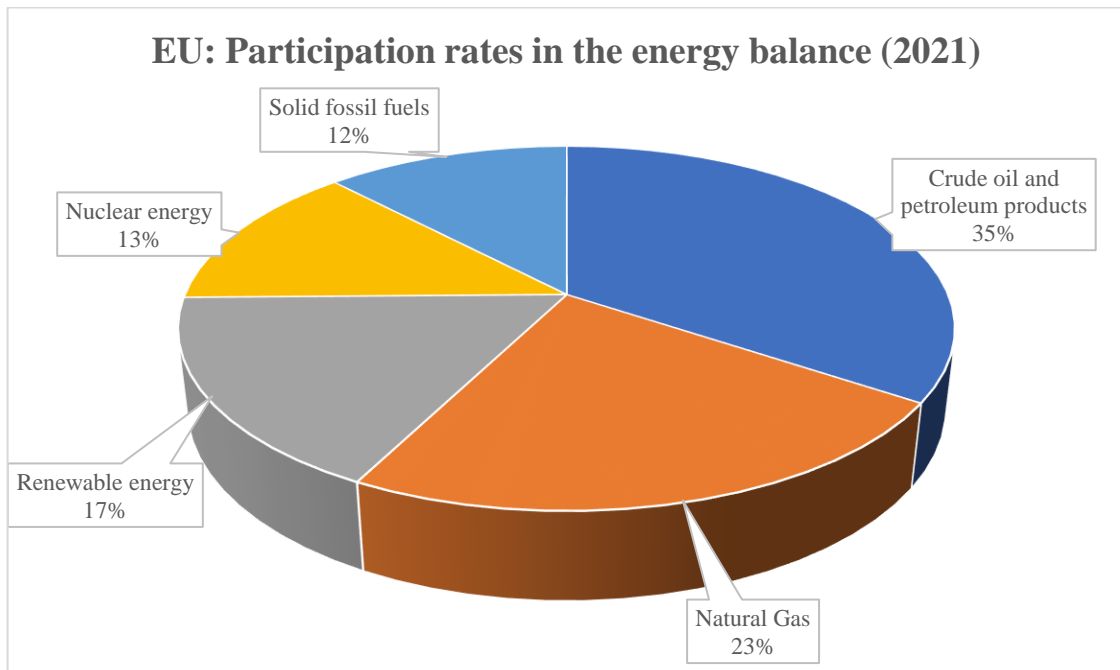


Figure 1: Share of energy sources in the satisfaction of the energy demand of Europe in 2021 (Eurostat, 2023)

Greece assumes a highly significant role in addressing the mounting demand for natural gas, owing to its strategic geographical location facilitating the transportation of substantial hydrocarbon volumes throughout Europe. Unlike several central and northern European countries, Greece lacks extensive gas storage facilities capable of accommodating seasonal fluctuations in demand and maintaining network equilibrium within the European Union (EU). The development of energy infrastructure projects in Greece not only presents an opportunity

to satisfy domestic gas requirements but also positions the country as a pivotal contributor to upholding energy stability across multiple European nations.

It is noteworthy that countries reliant on gas imports are advised to maintain reserve quantities equivalent to 20-30% of their annual gas consumption, ensuring the security of their reserves (Demirel et al., 2017). Furthermore, liquefied natural gas (LNG) offers substantial advantages over conventional gas, particularly in terms of its capacity to transport larger gas volumes. Consequently, global attention is centred on the advancement of infrastructure projects that contribute to the augmentation of LNG reserves.

The present study commences with a detailed analysis of diverse natural gas storage methods, with specific emphasis on liquefied natural gas (LNG). The primary objective of this research is to design an underground LNG storage project in Greece employing the Lined Rock Cavern (LRC) technique. The project design encompasses the evaluation of two (2) fundamental design scenarios, including key design assumptions, development depth, and the number and arrangement of storage facilities. A comprehensive assessment of the scenarios is conducted utilizing numerical analysis models, evaluating the potential to achieve requisite stability conditions, ease of construction, and estimated construction costs.

### **The Lined Rock Cavern (LRC) method**

Numerous approaches have been developed over the course of time to facilitate the construction of subterranean gas storage facilities. In recent decades, one particular storage method, namely the Lined Rock Cavern (LRC) method, has attained a commendable level of advancement, exhibiting a distinctiveness aligned with the trajectory of technological progress.

The design, construction and safe operation of the project are based on many factors, such as the construction and geometry of the reservoir, the geomechanical properties of the surrounding formations, the applied loads and various other pertinent considerations (Žlender, Jelušič, & Boumezerane, 2011).

According to Johansson et al. (2018), the LRC method offers substantial economic benefits, particularly in cases where underground excavations occur at shallow depths. Furthermore, Geostock (nd) affirms that the LRC method is highly suitable for storing cryogenic substances like liquefied natural gas and gaseous products under high pressures, such as natural gas or hydrogen.

The design characteristics of the underground hydrocarbon reservoir primarily hinge upon the desirable storage volume. For smaller or medium storage volumes, it is generally proposed to construct vertical tanks resembling well-silo structures, while larger volumes necessitate the implementation of horizontal tunnels (Geostock, nd). An underground liquefied natural gas (LNG) storage facility in Lined Rock Caverns (LRCs) may consist of one or more caverns, contingent upon storage requirements, available space, and various factors, including the geomechanical attributes of the formation in the targeted area. Figure 2 provides visual depiction of the layout of an underground LNG storage facility featuring a cluster of LRCs.

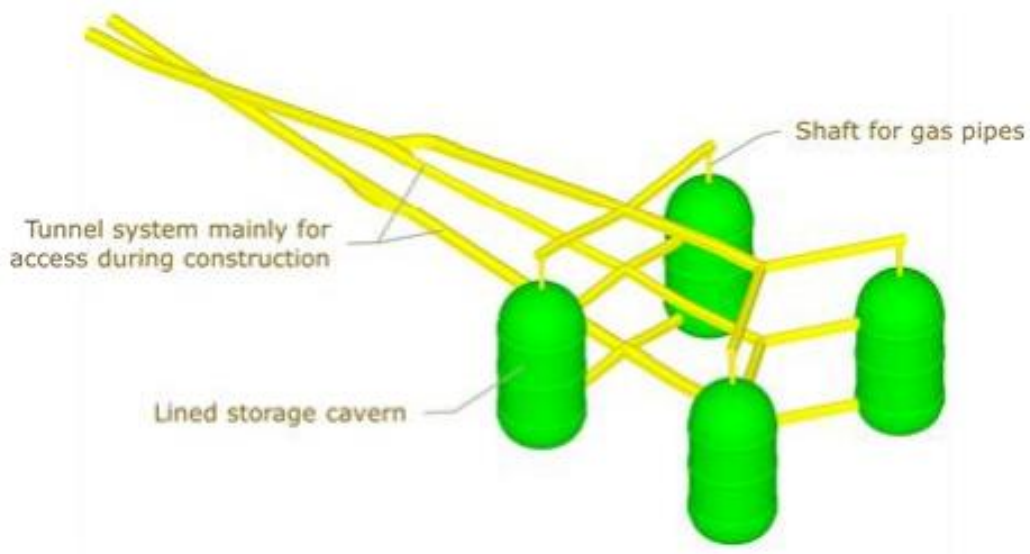


Figure 2: Typical layout of lined underground LNG storage caverns on site (Tengborg, Johansson, & Durup, 2014)

The typical dimensions of a conventional vertical LRC are presented in Table 1 (Tengborg, Johansson, & Durup, 2014):

**Table 1: Typical vertical LRC dimensions (Tengborg, Johansson, & Durup, 2014)**

Dimension	Value	Units
Diameter	35 - 45	m
Height	60 - 100	m

In this type of underground storage facility (LRC), the technology employed for LNG storage amalgamates three distinct old and new systems. Specifically, as elucidated by Park et al. (2012), the fundamental concept leverages the accumulated expertise in excavating sizable underground caverns, the utilization of an internal containment system comprising diverse materials, and the technology facilitating the formation of an ice ring surrounding the

excavation. Figure 3 visually illustrates the amalgamation of these three techniques, ensuring the safe storage of LNG within expansive underground caverns.

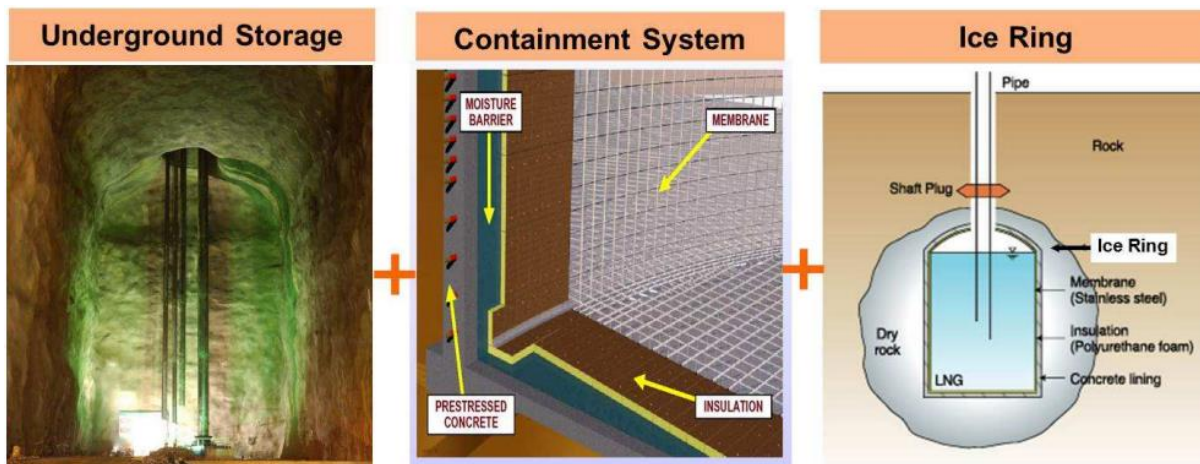


Figure 3: Combination of three key technologies to develop the LRC method (Park et al., 2012)

In the context of LNG storage, the internal lining of the caverns assumes paramount importance within the LRC design. Thus, meticulous attention must be devoted to the design of lining elements along the walls of the cavern to ensure the complete and secure transmission of pressurized gas loads to the surrounding formation (Tengborg, Johansson, & Durup, 2014). Figure 4 provides a comprehensive portrayal of the different wall sections found within a lined underground cavern, as observed in a typical cross-section of its interior.

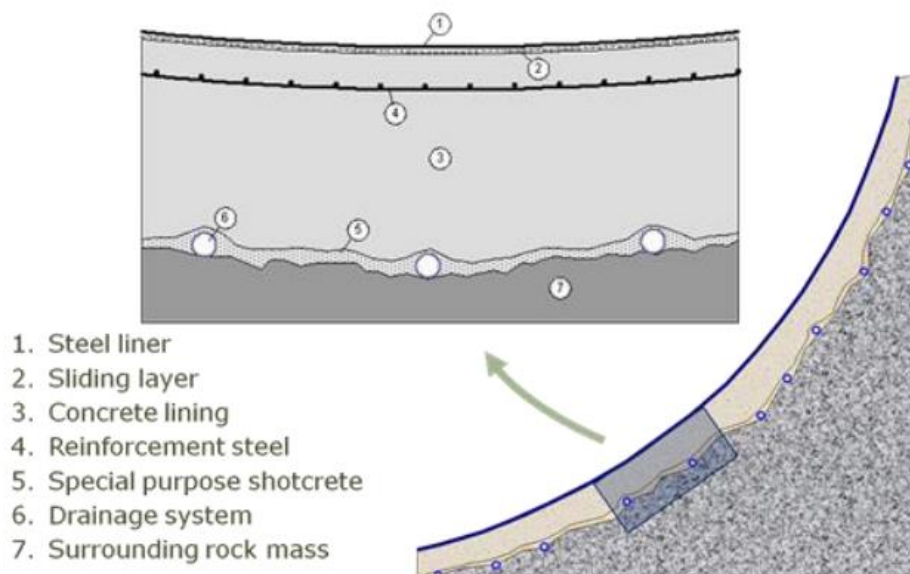


Figure 4: Lined Rock Cavern (LRC) wall sections (Tengborg, Johansson, & Durup, 2014)



## Fundamental project design parameters

The selection of appropriate design parameters holds utmost importance in ensuring the safe construction and operation of an underground liquefied natural gas (LNG) storage project. Particularly, the geomechanical characteristics of the surrounding formation play a pivotal role in determining the project's location.

This research focuses on the design aspects of an underground LNG storage facility situated in proximity to the existing Revithoussa facility, renowned as the largest LNG receiving terminal in Greece. The selection of this location proves highly advantageous for seamless LNG cargo handling. Notably, the current infrastructure at the Revithoussa terminal retain an LNG storage capacity of 225,000 m<sup>3</sup>.

Based on previous geotechnical evaluations conducted during the construction of the Iconion tunnel, comprehensive data regarding the basic geomechanical parameters of the limestone within the surveyed area has been obtained. Tables Table 2 and Table 3 present the range of values and the suggested characteristic values, respectively, for these geomechanical properties of limestone (Benardos & Kaliampakos, 2010).

**Table 2: Range of values for the basic geomechanical properties of limestone in the study area (Benardos & Kaliampakos, 2010)**

Parameter	Value	Units
Specific gravity of rock	2.6 – 2.8	g/cm <sup>3</sup>
Average uniaxial compressive strength	29 - 87	MPa
Average tensile strength value	3.8 – 6.5	MPa
Average Young's Modulus value	2.5 – 98.0	GPa
Poisson's ratio	0.2 – 0.23	-
GSI	44 – 67	-

**Table 3: Suggested values for the basic geomechanical properties of limestone in the study area (Benardos & Kaliampakos, 2010)**

Parameter	Value	Units
Specific gravity of rock	2.65	g/cm <sup>3</sup>
Average uniaxial compressive strength	55	MPa
Average tensile strength value	5	MPa
Average Young's Modulus value	12	GPa
Poisson's ratio	0.2	-

To ascertain the most favorable design parameters for the underground LNG storage facility, an examination of two distinct sets of cavern geometries was undertaken. The performance and excavation stability of these geometries were thoroughly evaluated, in order to select the optimal solution, which necessitated a comparative analysis of the economic aspects associated with each case.

The first case of design parameters relates to underground chambers with a vertical silo layout. Specifically, the plan outlined in Figure 5 illustrates the proposed construction of four caverns. Table 4 provides a comprehensive overview of the fundamental design parameters pertaining to these excavations.

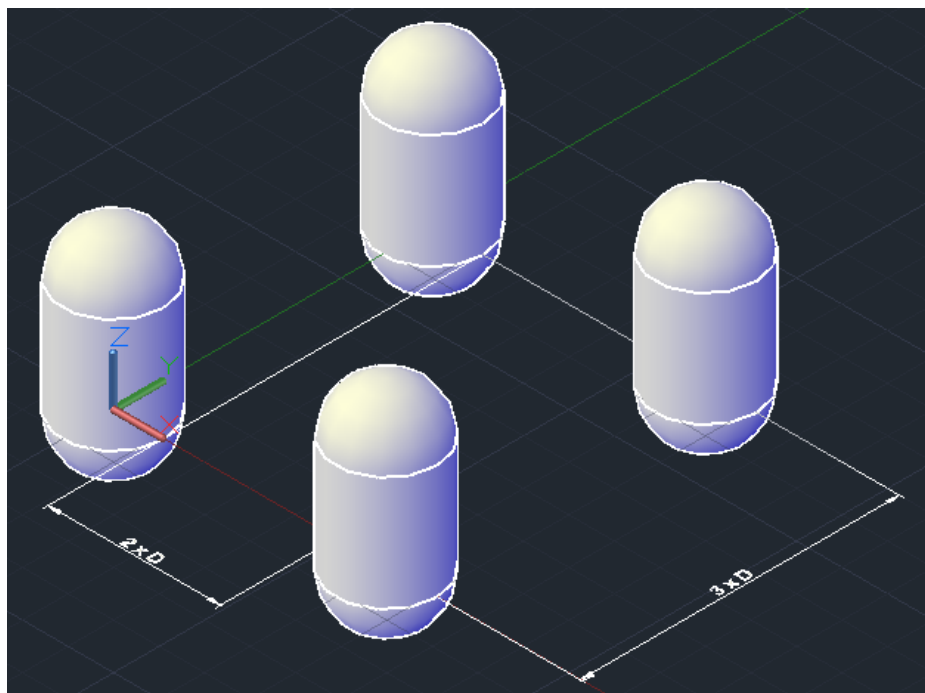


Figure 5: Layout of LNG storage caverns - Case A

Table 4: Cavern design parameter values

Parameter	Value	Units
Total excavation diameter	41.6	m
Effective cavern diameter	40.0	m
Height of hemispherical sections	20.8	m
Height of central section	25.0	m
Total cavern height	66.6	m
Overburden	120.0	m
Distance along the X-axis	83.0	m

Distance along the y-axis	124.8	m
Stress reduction factor ( $\lambda$ )	41.6	-

Under the assumption of a filling rate of 100%, the calculated LNG storage capacity amounts to approximately 394,000 m<sup>3</sup>.

In the second case of the design parameters considered, the chambers were designed as horizontal tunnels. Within this configuration, three caverns are proposed, as depicted in the plan showcased in Figure 6. The fundamental design parameters for these excavations are outlined in Table 5.

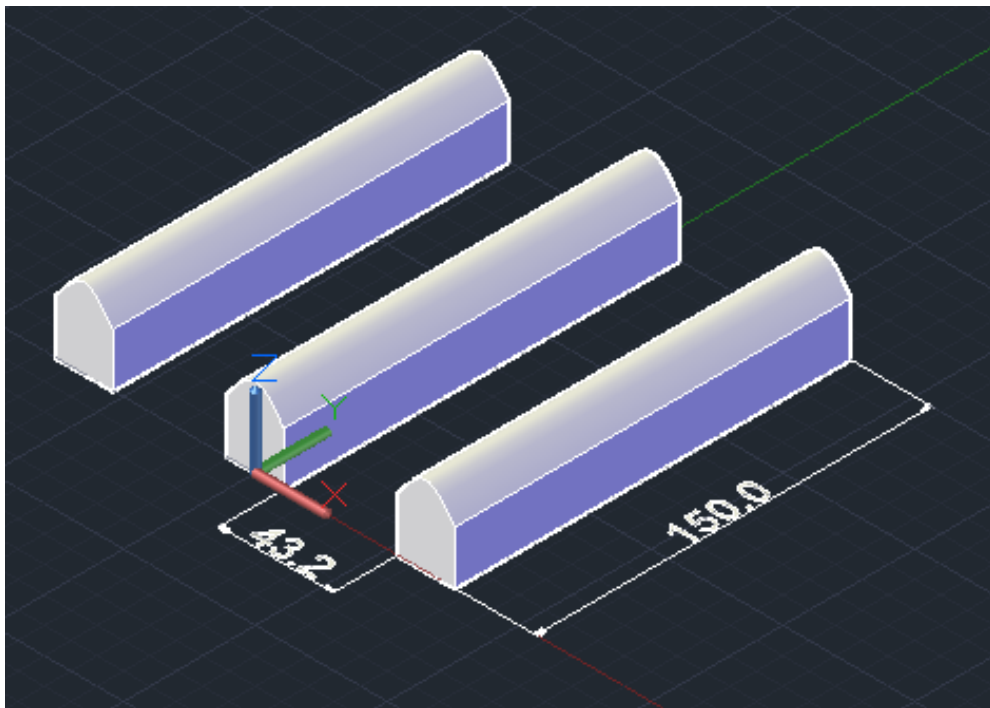


Figure 6: Layout of LNG storage caverns – Case B

Table 5: Cavern design parameter values

Parameter	Value	Units
Total excavation opening	21.6	m
Effective cavern opening	20.0	m
Height of semi-circular section	10.0	m
Height of rectangular section	20.0	m
Total cavern height	30.0	m
Cavern length	150.0	m
Overburden	120.0	m

Distance along the X-axis	43.2	m
Stress reduction factor ( $\lambda$ )	0.54	-

Under the assumption of a filling rate of 100%, the calculated LNG storage capacity amounts to approximately 321,000 m<sup>3</sup>.

### Illustrative results of the numerical analysis

Figure 7 presents the spatial distributions of the Yielded Elements surrounding the excavations for both design cases, while Figure 8 showcases the corresponding distributions of total displacements.

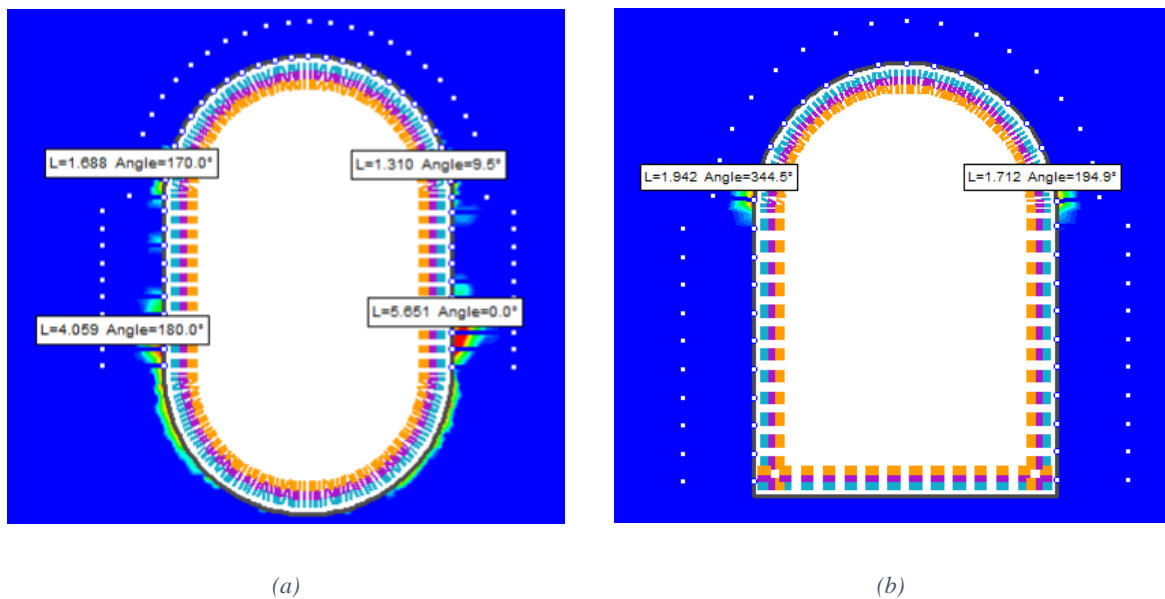


Figure 7: Yielded Elements spatial distribution: . a. Case A & b. Case B

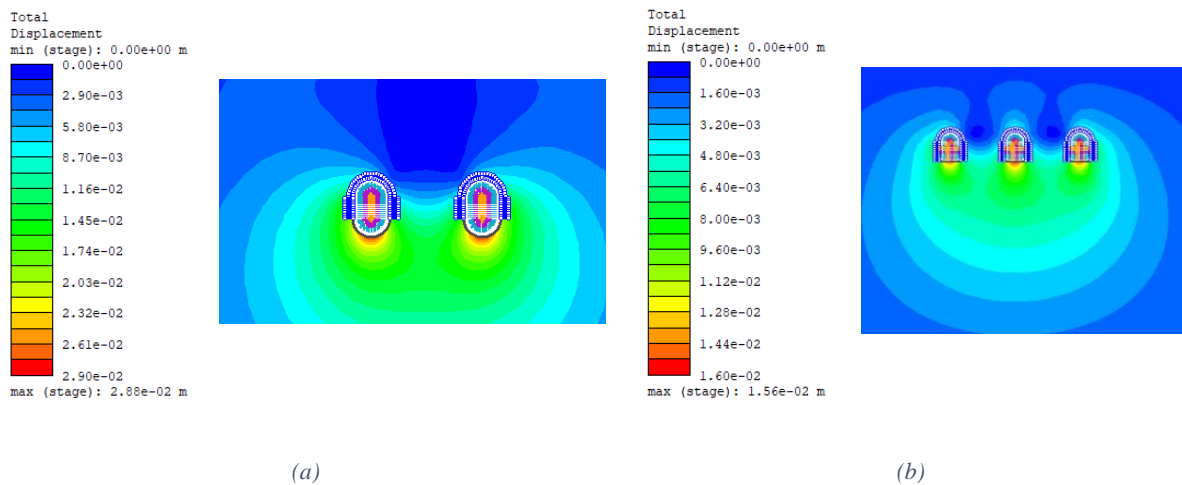


Figure 8: Total Displacements spatial distribution: . a. Case A & b. Case B

Furthermore, Figure 9 depicts the redistribution of temperature during the operational phase of the project.

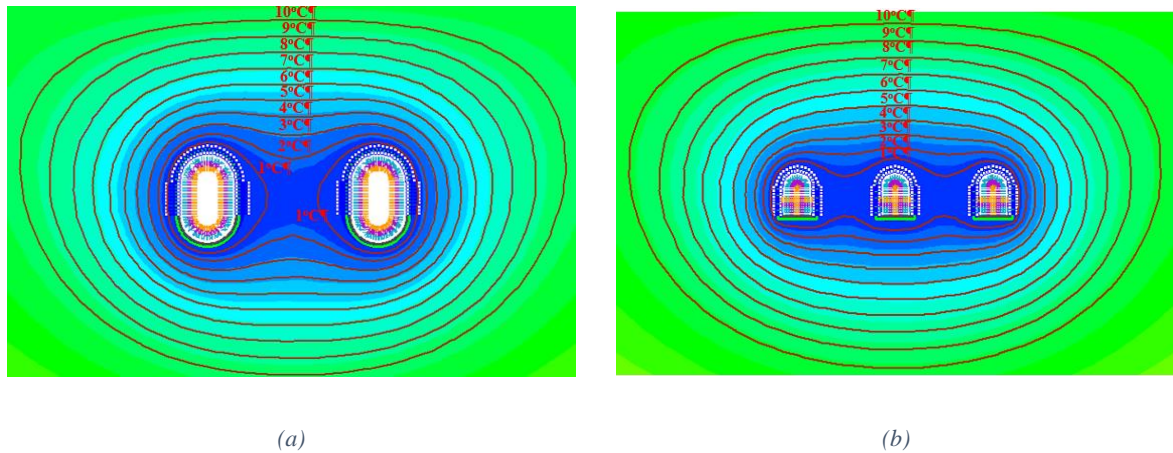


Figure 9: Temperature spatial distribution: a. Case A & b. Case B

### Preliminary project cost estimation

Based on reasonable assumptions and existing literature regarding the temporal and financial demands associated with individual tasks, the overall time and costs required to accomplish the essential tasks were calculated. The specific outcomes for each of the contemplated cases are presented below.

#### The first (1<sup>st</sup>) examined case

For the first examined case, the projected duration for the fundamental tasks was determined to be 630 days, in approximate, with the assumption of two eight-hour shifts per day. Furthermore, the estimated costs for this case amount to 8,500,000€, in approximate. The following charts illustrate the time and cost allocations for each task in accordance with the overall requirements.

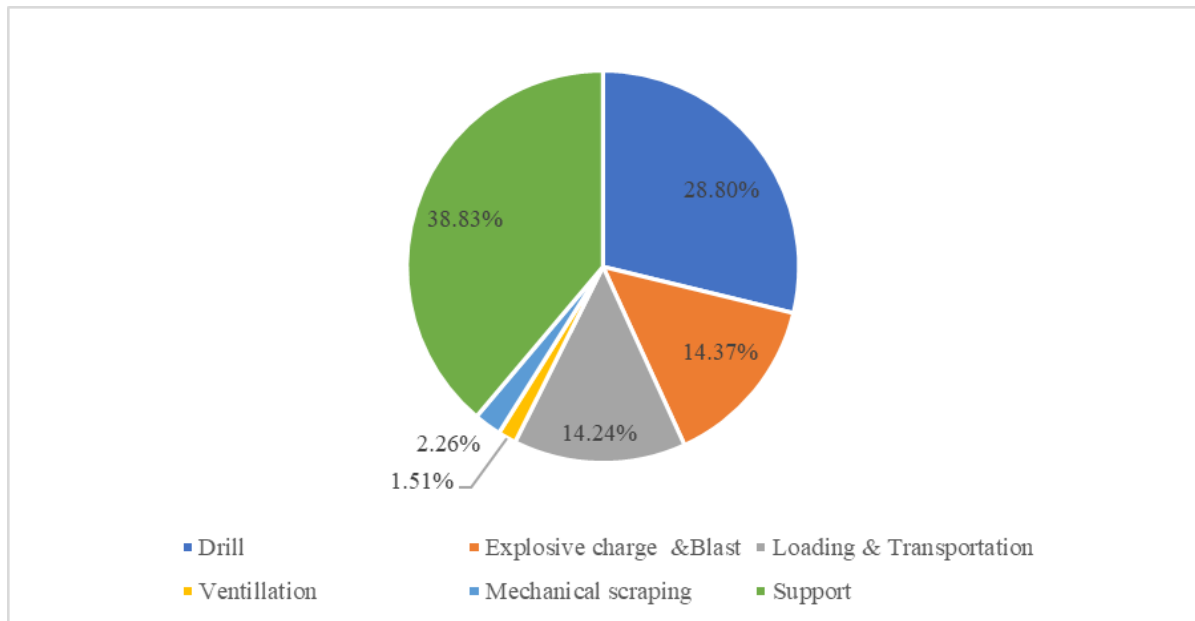


Figure 10: Temporal allocation of labor – Case A

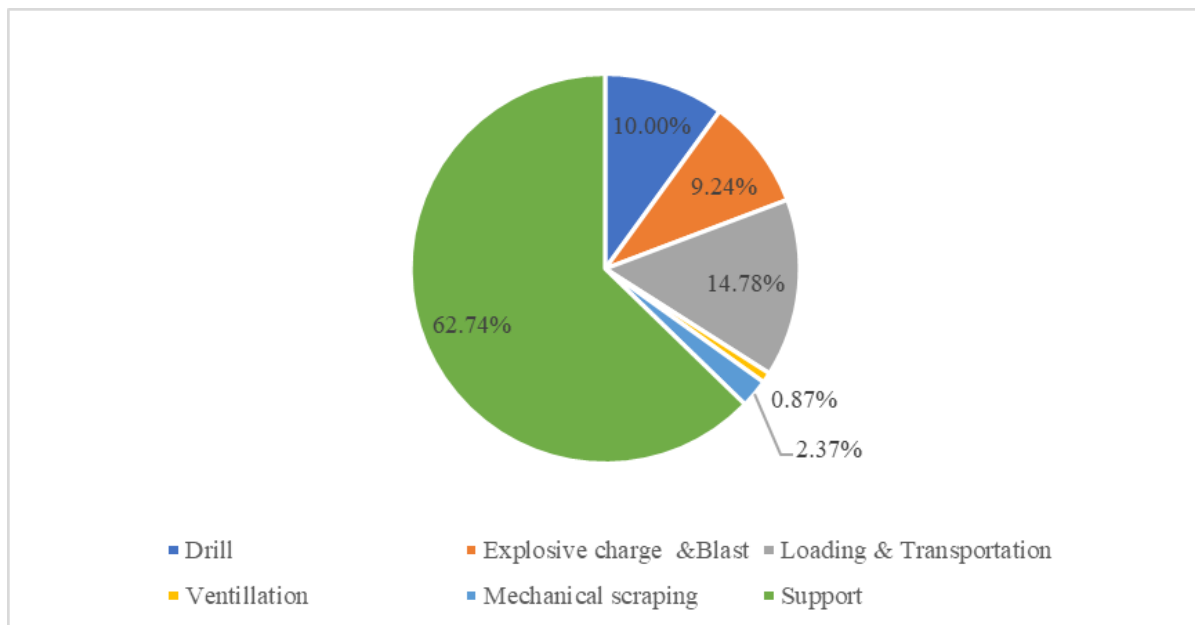


Figure 11: Allocation of labor expenditure - Case A

### The second (2<sup>nd</sup>) examined case

Regarding the second examined case, the anticipated timeframe for completing the essential work was calculated to be 565 days, in approximate, accounting for two eight-hour shifts per day. Additionally, the estimated costs for this case sum up to 9,500,000€, in approximate. Presented below are the time and cost allocation charts, delineating the distribution across various tasks in relation to the overall project requirements.

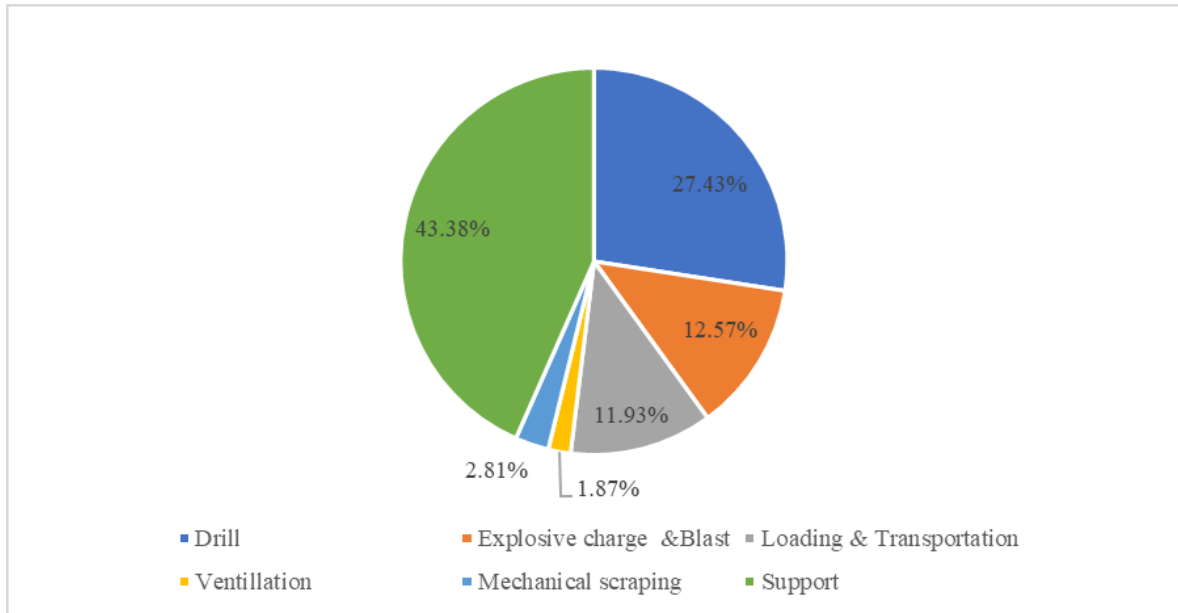


Figure 12: Temporal allocation of labor – Case B

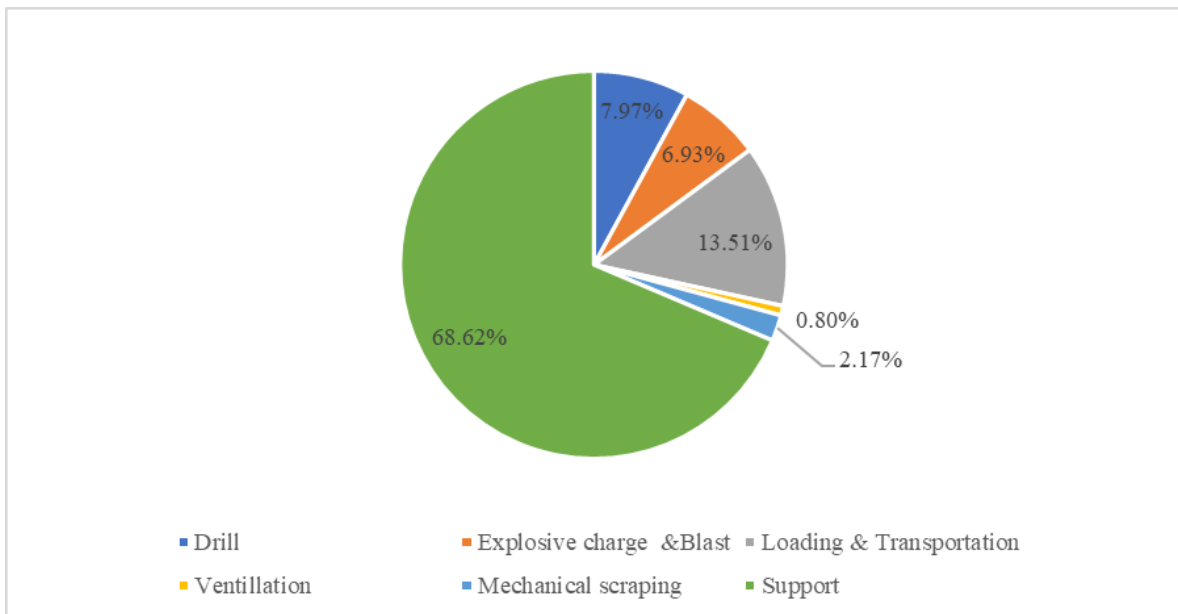


Figure 13: Allocation of labor expenditure - Case B

## Conclusions

The evaluated project is anticipated to make a significant contribution to the energy self-sufficiency of the country and the energy security of the European Union.

Within the scope of this thesis, an evaluation and comparison were conducted on the outcomes of two sets of design parameters for an LNG storage complex. The key results, observations, and critical remarks are summarized as follows:

### **First Design Parameter Case:**

- The first scenario entails an underground LNG storage complex featuring four vertically oriented caverns resembling silos.
- The storage facility offers a capacity of 394,000 m<sup>3</sup>.
- Maximum roof displacements amount to 7 mm.
- Maximum displacements on the floor reach 28 mm.
- Maximum displacements between caverns measure 13 mm.
- Minimum safety factor stands at 1.3.
- The maximum distance of the rock failure zone from the wall is 5.7 m.
- The estimated completion time for the project is approximately 630 days.
- The estimated cost of basic works is approximately 8,500,000 €.

### **Second Design Parameter Case:**

- The second scenario encompasses an underground LNG storage complex consisting of three horizontally oriented caverns in tunnel form.
- The storage facility offers a capacity of 321,000 m<sup>3</sup>.
- Maximum roof displacements amount to 6 mm.
- Maximum displacements on the floor reach 12 mm.
- Maximum displacements between caverns measure 7 mm.
- Minimum safety factor stands at 1.4.
- The maximum distance of the rock failure zone from the wall is 1.9 m.
- The estimated completion time for the project is approximately 565 days.
- The estimated cost of basic works is approximately 9,500,000€.

The selection of the optimal solution is a multifaceted decision-making process, necessitating a meticulous analysis encompassing various pertinent factors and their relative significance in determining the final design parameters of the project. After thorough exploration and evaluation within the scope of this study, the first design scenario has emerged as the favorable choice owing to its notable advantages. Consequently, it is recommended to adopt the first design scenario as the preferred option, drawing upon the comprehensive investigation and assessment conducted in this study.

It is important to note that the results of this study rely on several assumptions, primarily derived from existing literature, which entail a degree of uncertainty. Therefore, for a more



precise design of the project, it is necessary to undertake a new and detailed geotechnical investigation program and establish more accurate assumptions regarding the time and unit costs associated with individual tasks.