

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία

**«ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΩΝ
ΣΗΡΑΓΓΩΝ»**

ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΙΝΟΣ, CW6975

Επιβλέπων: Πάυλος Αστερίου, Επισκέπτης Καθηγητής ΠΑΔΑ

ΑΘΗΝΑ 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: **ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΙΝΟΣ**

Τίτλος
Διπλωματικής Εργασίας:

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΩΝ
ΣΗΡΑΓΓΩΝ**

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή:

Πάυλος Αστερίου
Επισκέπτης Καθηγητής
Επιβλέπων

Γεώργιος Μπελόκας
Επίκουρος Καθηγητής
Μέλος

Όλγα Μαυρούλη
Επίκουρος Καθηγητής
Μέλος

ΑΙΓΑΛΕΩ, Ιούλιος 2022

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΙΝΟΣ** του **ΓΕΩΡΓΙΟΥ**, με αριθμό μητρώου **CW6975** φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο Δηλών

ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΙΝΟΣ





UNIVERSITY OF WEST ATTICA
ENGINEERING SCHOOL
CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT

Student's Name: **Efstratios Evangelinos**

*Title of
Dipoma Thesis:*

CONSTRUCTION AND TECHNOLOGY OF IMMersed TUNNELS

ABSTRACT

The purpose of the diploma thesis was to present, describe and analyze the principles governing immersed tube tunnels, both in terms of design and construction. Through extensive bibliographic research, the basic stages of analysis and design, the construction processes are presented, as well as the possibilities of development of the specific infrastructure project in relation to the dynamics of the present and future technology.

Initially, the first part provides a historical analysis of the tunnels in general and their evolution over time. The basic means of tunnel boring and support are presented, and then an introduction is made to the concept of underwater connection, as well as to some types of submarine tunnels and the construction principles that govern them.

The second part presents the basic principles of immersed tube tunnels, their benefits and the materials of which they are composed.

In the third part, the construction process is analyzed, reference is made to their construction forms and to the joints of the immersed tunnels, which are one of the main parts of the project.

In the fourth part, the seismic analysis of the project is presented, the response of the project according to the seismological conditions of the environment, as well as the ways of soil improvement, as an anti-seismic prevention measure.

In the fifth part, emphasis is placed on the value of some immersed tube tunnels around the world, but also in Greece. In this part is presented the importance of some future projects that will be carried out and upgrade both the areas in which they will be built, and the emergence of the importance of immersed tunnels as a construction practice.

In the sixth and last chapter, a reference is made to the costing of these projects, to the factors that affect the prices of the final costs. An indicative tunnel costing is carried out, including in detail both the construction processes and their costs.

Keywords: immersed tunnel, construction joints, cost of immersed tunnel



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: **Ευστράτιος Ευαγγελινός**

Τίτλος Διπλωματικής εργασίας:

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η παρουσίαση, περιγραφή και ανάλυση των αρχών που διέπουν τις επιτυθμένες σήραγγες, τόσο σε επίπεδο σχεδιασμού, όσο και σε επίπεδο κατασκευής. Μέσω εκτεταμένης βιβλιογραφικής έρευνας, παρουσιάζονται τα βασικά στάδια ανάλυσης και σχεδιασμού, οι διαδικασίες κατασκευής, καθώς και οι δυνατότητες εξέλιξης του συγκεκριμένου έργου υποδομής σε συνάρτηση με τις δυναμικές της παρούσας και μελλοντικής τεχνολογίας.

Αρχικά, στο πρώτο μέρος γίνεται μια ιστορική ανάλυση των σηράγγων γενικά και της εξέλιξής τους στην πάροδο του χρόνου. Παρουσιάζονται τα βασικά μέσα διάνοιξης και υποστήριξης και στην συνέχεια γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια των υποθαλάσσιων συνδέσεων, καθώς και σε κάποια είδη υποβρύχιων σηράγγων, όπως και στις κατασκευαστικές αρχές που τις διέπουν.

Στο δεύτερο μέρος, παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις αρχές των επιτυθμένων σηράγγων, τα οφέλη τους, καθώς και τα υλικά από τα οποία αποτελούνται.

Στο τρίτο μέρος, αναλύεται η κατασκευαστική διαδικασία, γίνεται αναφορά στις κατασκευαστικές μορφές αυτών, καθώς επίσης στους αρμούς βυθισμένων σηράγγων, οι οποίοι αποτελούν ένα από τα βασικότερα τμήματα του έργου.

Στο τέταρτο μέρος, γίνεται παρουσίαση της αντισεισμικής ανάλυσης του έργου, την απόκριση του έργου ανάλογα με τις σεισμολογικές συνθήκες του περιβάλλοντος, καθώς και η οι τρόποι βελτίωσης των εδαφών, ως αντισεισμικό μέτρο πρόληψης.

Στο πέμπτο μέρος της εργασίας, δίνεται έμφαση στην αξία κάποιων επιτυθμένων σηράγγων ανά τον κόσμο, αλλά και στον Ελλαδικό χώρο, όπως και στην σημασία κάποιων μελλοντικών έργων που θα πραγματοποιηθούν και θα αναβαθμίσουν τόσο τις περιοχές στις οποίες θα κατασκευαστούν, όσο θα συμβάλουν στην ανάδειξη της σημασίας των επιτυθμένων σηράγγων ως κατασκευαστική πρακτική.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο, γίνεται μια αναφορά στην κοστολόγηση αυτών των έργων, στους παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές των τελικών δαπανών και πραγματοποιείται μια ενδεικτική κοστολόγηση σήραγγας, περιλαμβάνοντας αναλυτικά τόσο τις διαδικασίες κατασκευής όσο και το κόστος που τους αναλογούν.

Λέξεις κλειδιά: υποπυθμένα σήραγγα, αρμοί, κόστος επιτυθμένης σήραγγας

Copyright © Ευστράτιος Ευαγγελινός, 2022

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Περιεχόμενα

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ..... | 7 |
| 1.1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 7 |
| 1.2 | ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ..... | 8 |
| 1.3 | ΜΕΣΑ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ | 19 |
| 1.4 | ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ | 22 |
| 1.4.1 | Υποπυθμένες Σήραγγες | 24 |
| 1.4.2 | Πλωτές Υποθαλάσσιες Σήραγγες..... | 26 |
| 2. | ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ..... | 28 |
| 2.1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ..... | 28 |
| 2.2 | ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ .. | 30 |
| 2.3 | ΤΥΠΟΙ ΒΥΘΙΣΜΕΝΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥΣ . | 31 |
| 3. | ΑΡΧΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ..... | 35 |
| 3.1 | ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ..... | 35 |
| 3.2 | ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ | 40 |
| 3.2.1 | Ενιαίο στοιχείο σκυροδέματος..... | 40 |
| 3.2.2 | Τμηματικό στοιχείο σκυροδέματος..... | 41 |
| 3.2.3 | Σήραγγες με μονό χαλύβδινο κέλυφος | 42 |
| 3.2.4 | Σήραγγες με διπλό χαλύβδινο κέλυφος..... | 42 |
| 3.2.5 | Σύνθετο κέλυφος χάλυβα και σκυροδέματος..... | 43 |
| 3.3 | ΑΡΜΟΙ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ | 44 |
| 3.3.1 | Αρμοί βύθισης | 45 |
| 3.3.2 | Αρμοί τμημάτων | 47 |
| 3.3.3 | Σεισμικοί αρμοί..... | 49 |
| 4. | ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ | 50 |
| 4.1 | ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ..... | 50 |
| 4.2 | ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΩΝ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ | 52 |
| 4.3 | ΑΝΥΨΩΣΗ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΛΟΓΩ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ | 54 |
| 5. | ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ | 56 |
| 5.1 | ΣΗΡΑΓΓΑ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ ØRESUND..... | 56 |

| | |
|---|----|
| 5.2 Η ΣΗΡΑΓΓΑ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ SHEN ZHONG..... | 57 |
| 5.3 Η ΣΗΡΑΓΓΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ FEHMARN BELT FIXED..... | 58 |
| 5.4 Η ΣΗΡΑΓΓΑ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΑΥ | 60 |
| 5.5 Η ΣΗΡΑΓΓΑ ΤΟΥ ΑΚΤΙΟΥ-ΠΡΕΒΕΖΑΣ..... | 61 |
| 5.6 Η ΣΗΡΑΓΓΑ ΣΑΛΑΜΙΝΑΣ-ΠΕΡΑΜΑΤΟΣ..... | 62 |
| 6. ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΠΙΠΥΘΜΕΝΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ | 65 |
| 6.1 ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΗΜΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΥΘΜΕΝΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ..... | 65 |
| 6.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΙΑΣ ΕΠΙΠΥΘΜΕΝΙΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ..... | 65 |
| 6.3 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΑΛΑΜΙΝΑΣ-ΠΕΡΑΜΑΤΟΣ | 69 |
| 6.4 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΠΥΘΜΕΝΙΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΓΕΦΥΡΑΣ 72 | |
| 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 75 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 77 |

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ολοένα και επιτακτικότερη ανάγκη για την ζεύξη δύο γεωγραφικών σημείων ,όταν δε αυτή είναι φαινομενικά ανέφικτη, επιτάσσει τον σχεδιασμό και την μελέτη συνθετότερων και πολυπλοκότερων μηχανικών έργων. Τα έργα αυτά με την σειρά τους, στηριζόμενα στην τεχνογνωσία και την τεχνολογία της εποχής που τα απαρτίζουν, αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο της επιστήμης του πολιτικού μηχανικού. Αυτή η τεχνογνωσία είναι απόρροια συνεχών επιστημονικών ανακαλύψεων στον χώρο της μηχανικής, ο οποίος εμπλουτίζεται και διανθίζεται από τα νέα επιστημονικά ευρήματα που ανασύρονται στο προσκήνιο και θέτουν τις βάσεις ενός σχετικά σύγχρονου επιστημονικού κλάδου, αυτού της σηραγγοποιίας.

Θεμελιώδης ανάγκη για τον σχεδιασμό και την κατασκευή μιας σήραγγας αποτελεί δυνατότητα πρόσβασης υπό ή εντός ενός φυσικού ορατού εμποδίου ,με σκοπό την διασύνδεση δύο τοπογραφικών σημείων ή δύο γεωγραφικών περιοχών.

Η σήραγγα¹ αποτελεί ένα υπόγειο έργο, επίμηκες, οριζόντιο ή παραοριζόντιο, με δύο εξόδους(στόμια) στην γήινη επιφάνεια(αμφίστομο) και ένα ή δύο μέτωπα στην γεωμάζα, που χρησιμοποιείται για την διέλευση ανθρώπων ,μηχανών ή νερού. Η διαφορά με την στοά είναι ότι αυτή αποτελεί διανοιγόμενο υπόγειο έργο, όχι κατά κανόνα οριζόντιο, με συνήθως μια έξοδο(μονόστομο) και πολλαπλά μέτωπα στην γεωμάζα (Κωστόπουλος, 2013).

Οι σήραγγες είναι έργα που σχεδιάζονται και κατασκευάζονται είτε πολιτικά, είτε στρατιωτικά , είτε και σε αρκετές περιπτώσεις και ως εξορυκτικά. Ως επί το πλείστον οι μέθοδοι διάνοιξης και των τριών κατηγοριών είναι παρόμοιοι, με μοναδικούς παράγοντες διαφοροποίησης την σπουδαιότητα της κατασκευής και την διάρκεια ζωής του έργου.

Η επιστήμη της σηραγγοποιίας στηρίζεται σε μια πληθώρα άλλων επιστημών , καθώς αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους γνωστικούς και διεπιστημονικούς κλάδους στο επιστημονικό πεδίο του πολιτικού μηχανικού. Τομείς όπως αυτοί της Τεχνικής Γεωλογίας, της Εδαφομηχανικής, της Βραχομηχανικής, ακόμη και της υπόγειας Υδραυλικής, είναι κάποιοι από τους οποίους βασίζεται η επιστήμη τη σηραγγοποιίας. Επίσης, η διεπιστημονικότητα του τομέα της σηραγγοποιίας εντοπίζεται και στην αλληλεπίδραση με τα υπόλοιπα πεδία του μηχανικού όπως τους μηχανολόγους μηχανικούς, του ηλεκτρολόγους μηχανικούς, τους μηχανικούς περιβάλλοντος, ακόμη και με τον τομέα της πληροφορικής.

¹ Η λέξη Σήραγγ, σύμφωνα με το Ετυμολογικό Λεξικό της Αρχαίας Ελληνικής Γλώσσας(J.B Hofmann,1974), ετυμολογείται από το ρήμα *σαίρω*(=δεικνύω τους όδοντες ως ένδειξη θυμού ή αγανάκτησης) και μάλλον σχετίζεται με την λέξη *σάρμα*(=σχισμή εδάφους, χάσμα).

Η κατασκευή μιας σήραγγας αποτελεί μια επένδυση υψηλού κόστους, σε σύγκριση με άλλες συνηθισμένες χαράξεις και για αυτό τον λόγο η μελέτη και ο σχεδιασμός της πρέπει να εκπονηθούν με ακρίβεια και αναλυτικότητα, ώστε να αποφευχθούν σφάλματα κατά την διάρκεια της κατασκευής και οικονομικές απώλειες μετά την ολοκλήρωση του έργου. Παρόλα αυτά οι σήραγγες αρκετές φορές αποτελούν πιο συμφέρουσα λύση τόσο ενεργειακά όσο και κατασκευαστικά.

Μια σημαντική παράμετρος της κατασκευής σηράγγων είναι η ασφάλεια. Κατά την μακράιωνη ιστορία της σηραγγοποιίας, ορύχοι έβρισκαν τραγική κατάληξη από την εισπνοή δηλητηριωδών αερίων, καταπτώσεις, πυρκαγιές ή ακόμη συνθλίβονταν από τον ίδιο τον εξοπλισμό. Όμως τα τελευταία 100 χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές βελτιώσεις στον τομέα αυτό, παρότι οι κίνδυνοι εξακολουθούν να υφίστανται. Ενδεικτικά, τα παλαιότερα χρόνια υπήρχε ένας θάνατος ανά 1,5 χιλιόμετρο σήραγγας (Σοφριανός, 2013).

Με το πέρασμα του χρόνου και την ολοένα αυξανόμενη επιταγή για παράκαμψη φυσικών εμποδίων, ακόμη και όταν αυτό είναι ένας μεγάλος υδάτινος όγκος (θάλασσα, λίμνη, ποτάμι) και την συνένωση δύο γεωγραφικών περιοχών, δημιουργήθηκε η ανάγκη για κατασκευή σηράγγων εντός και υπό του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Αυτού του είδους σήραγγες έχουν πλέον την πρωτοποριακή θέση στον χώρο της σηραγγοποιίας και έχουν πλέον ανοίξει έναν νέο δρόμο στον χώρο των έργων υποδομής.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

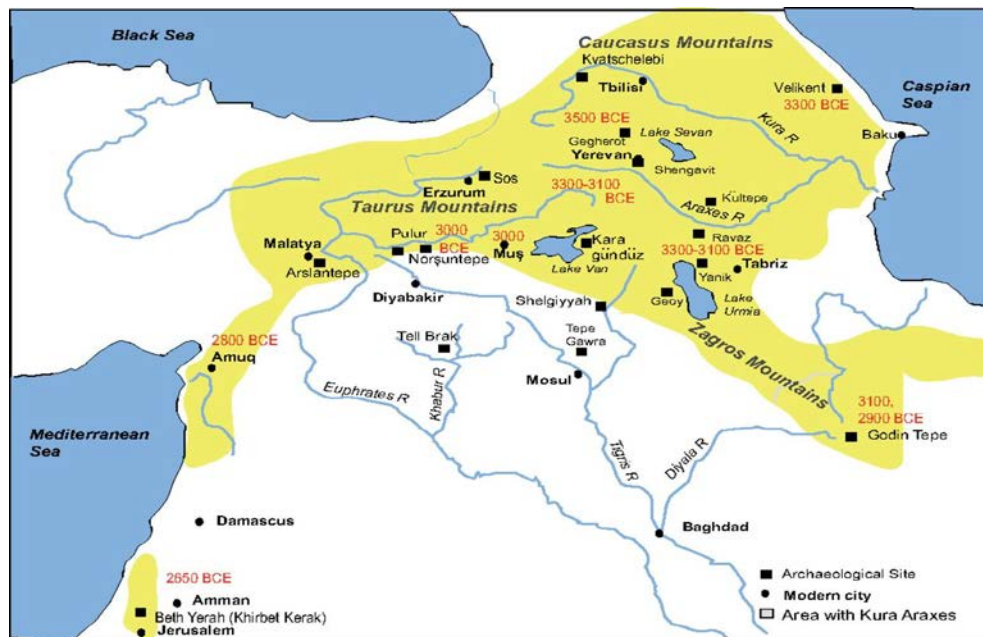
Η τέχνη της σηραγγοποιίας έχει καταγραφεί πριν ακόμη την οργάνωση των σύγχρονων πολιτισμών, δηλαδή εκείνων για τους οποίους έχουμε καταγεγραμμένη ιστορία με γραπτά μνημεία. Οι πρώτες προσπάθειες έγιναν με σκοπό την εξόρυξη πολύτιμων μεταλλευμάτων ή την παροχή νερού. Λίγο ή πολύ όλοι οι πολιτισμοί έχουν αφήσει κάποιου είδους διάνοιξη, κυρίως σε φυσικώς σχηματισμένα σπήλαια και σε πετρώματα των οποίων η διάνοιξη ήταν εφικτή με την τεχνολογία εκείνης της εποχής.

Η κατασκευή υπογείων έργων, κυρίως στοών εντοπίζεται στην περίοδο της Λίθινης Εποχής², ενώ οι πρώτες εξορυκτικές διανοίξεις συνέβησαν περίπου στην μεσοπαγετώδη ολόκαινο εποχή³ για την εξόρυξη πετρωμάτων, όπως κόνδυλοι

² Η Λίθινη Εποχή (2.58 εκατ. π.Χ-8000 π.Χ) είναι η περίοδος που περιλαμβάνει το προϊστορικό στάδιο που χαρακτηρίζεται από την δημιουργία και χρήση λίθινων εργαλείων. Ταξινομείται σε τρεις βασικές περιόδους την Παλαιολιθική, την Μεσολιθική και την Νεολιθική, με βάση τον βαθμό πολυπλοκότητας στην δημιουργία και χρήση των εργαλείων.(Stone Age,Britannica)

³ Η Ολόκαινος Εποχή ή αλλούβιος υποπερίοδος (8000 π.Χ- σήμερα), είναι η νεότερη γεωλογική εποχή και μαζί με την Πλειόκαινο Εποχή αποτελούν την Τεταρτογενή Περίοδο. Τα ιζήματα του Ολόκαινου, τόσο τα ηπειρωτικά, όσο και τα θαλάσσια καλύπτουν την μεγαλύτερη επιφάνεια του πλανήτη από οποιαδήποτε άλλη γεωλογική περίοδο.(Holocene Epoch,Britannica)

πυριτόλιθου⁴. Από τα ειδικά ευρήματα των αρχαιολογικών ανασκαφών, έχουν προκύψει στοιχεία για την εξόρυξη χαλκού στην περιοχή της Αρμενίας και της Γεωργίας, περίπου το 3.500 π.Χ και εξορύξεις για εκμετάλλευση σιδήρου περί το 1.400 π.Χ , κυρίως την περίοδο που αναπτύχθηκε ο Πολιτισμός Kura-Araxes⁵. Έχουμε επιπλέον εντοπίσει εξορυκτική δραστηριότητα στην περιοχή της Λαυρεωτικής (σημερινό Λαύριο), καθώς και στην θέση του αρχαίου οικισμού Θορικός περί το 1.500 π.Χ .Υπόγειες εξορύξεις εντοπίζονται επίσης στα αλατωρυχεία του Hallstatt⁶ περί το 1000 π.Χ . Οι ρωμαίοι περί το 500 π.Χ για πρώτη φορά , εφαρμόζεται τεχνικές όπως η στράγγιση ,καθώς και χρήση ειδικού εκσκαπτικού μηχανικού εξοπλισμού.



Σχήμα 1.1 Πολιτισμός Kura-Araxes, by M.S Rothman⁷

Αρκετές σήραγγες κατά το παρελθόν είχαν κυρίως θρησκευτικό χαρακτήρα, καθώς τελούνταν τελετουργίες και σχετιζονταν με την διέλευση των πιστών στους χώρους

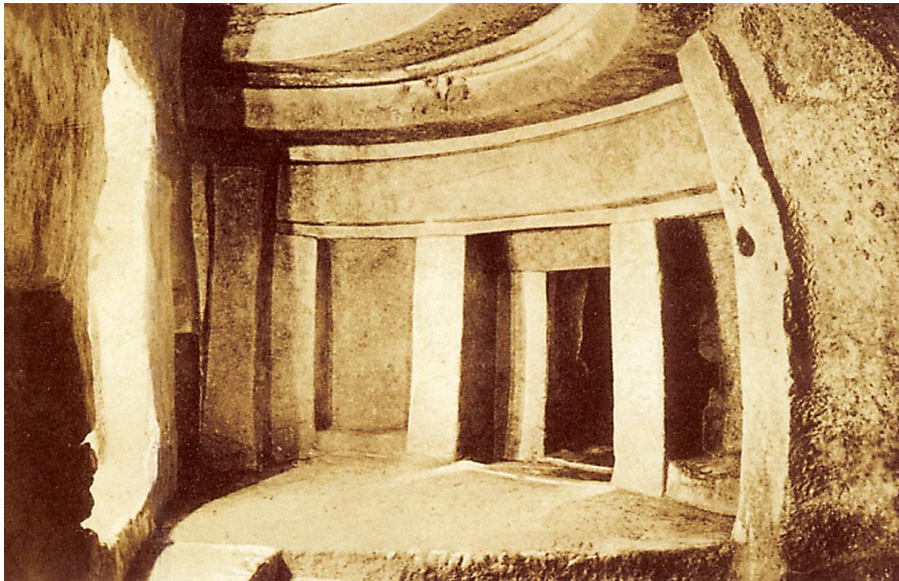
⁴ Ο πυριτόλιθος είναι λεπτόκοκκο ιζηματογενές χαλαζιακό πέτρωμα και είναι η ορυκτή μορφή του Διοξειδίου του Πυριτίου(SiO₂) . Ήταν η κύρια πηγή δημιουργίας εργαλείων κατά την Λίθινη Εποχή.(Chert,Britannica)

⁵ Ο πολιτισμός Kura-Araxes ή Kur-Araz (από τους ποταμούς Κύρος και Αράξης), ήταν πολιτισμός της πρώιμης Υπερκαυκασίας, ο οποίος εκτίνεται από το 3.500 π.Χ μέχρι το 2.500 π.Χ (Fitful Histories and Unruly Publics: Rethinking Temporality and Community in Eurasian Archaeology, Kathryn O. Weber, Emma Hite, Lori Khatchadourian, and Adam T. Smith,2016 ,κεφ.9 Mitchell S Rothman)

⁶ Το Hallstatt είναι τοποθεσία στην περιοχή Salzkammergut της Άνω Αυστρίας, όπου για πρώτη φορά εντοπίστηκαν αντικείμενα στις Ύστερης Εποχής του Χαλκού και της Πρώιμης Εποχής του Σιδήρου(από το 1100 π.Χ), καθώς εκεί αναπτύχθηκε ο Πολιτισμός του Hallstatt κατά την Πρώιμη Εποχή του Σιδήρου. (Hallstatt, Britannica)

⁷ Από studies on the Archaeology of the Ancient Near East in Honour of Antonio Sagona,2018.

των θεών. Τέτοιου είδους σήραγγες έχουμε εντοπίσει περί το 3.000 π.Χ στην Μάλτα⁸ και περί το 1000 π.Χ στην Αίγυπτο (Σοφιανός. 2018)



Σχήμα 1.2 Μάλτα, Hypogeum of Hal Saflieni , Photograph before 1911, by Richard Ellis, wikipedia



Σχήμα 1.3 Αρχαίος Αιγυπτιακός τάφος του Φαραώ Σέτι Ι, 1936, by Christofer Klein, nationalgeographic.com

Η πρώτη μορφή υποβρύχιας σήραγγας εντοπίζεται περί το 2160 π.Χ στον Ευφράτη ποταμό, στην περιοχή της Μεσοποταμίας, για την συνένωση του παλατιού της Βασίλισσας Σεμίραμις⁹ με τον ναό της θεότητας. Οι διαστάσεις της σήραγγας ήταν 920 m μήκος, διατομή 3.6m-4.5m και τοιχοποιία με θολωτή αψίδα με ασφαλτικό

⁸ Hypogeum of Hal Saflieni

⁹ Η Σεμίραμις υπήρξε βασίλισσα της Ασσυρίας και στην συνέχεια έγινε μυθική μορφή περίπου τον 9^ο αιώνα π.Χ , γνωστή και ως Shamiram στα Αραμαϊκά και Sammu-ramat στα Ακκαδικά(Sammu-ramat, Britannica)

κονίαμα για στεγάνωση.¹⁰ (Σοφιανός, Τεχνικές Διάνοιξης Σηράγγων) Αναφορές για την σήραγγα του Ευφράτη έχουν γίνει στα έργα του Διόδωρου του Σικελιώτη¹¹ και του Φιλόστρατου του Λημνίου¹². Ο ποταμός αρχικά εκτράπηκε για να κατασκευαστεί η υπόγεια σήραγγα με την μέθοδο της κοπής και επανεπίχωσης (cut and cover). (Reference Guide to Famous Engineering Landmarks of the World, 1998, Lawrence Berlow)

Κατά την Ακκαδική περίοδο της Μεσοποταμίας κατασκευάζονται υπόνομοι θολωτού σχήματος, για την αποχέτευση της πόλης από τα αστικά λύματα.¹³

Ιστορικά δείγματα σηράγγων είναι τα ταφικά μνημεία και οι ναοί, όπως οι βασιλικοί τάφοι που εντοπίζονται στην Ουρ της Μεσοποταμίας από το 2600 π.Χ.¹⁴, αλλά και μεταγενέστερα στην Αίγυπτο όπως οι βασιλικοί τάφοι της Θήβας το 1250 π.Χ.¹⁵ και τα ταφικά μνημεία του Σέτι του 1^{ου} το 1279 π.Χ.¹⁶ και του Αμπού Σιμπέλ το 1279π.Χ-1213π.Χ.¹⁷. Επιπλέον, αξιοσημείωτα είναι τα σπήλαια Ellora στην Maharashtra της Ινδίας, ένα από τα μεγαλύτερα συγκροτήματα σπηλαίων ινδουιστικών ναών, τα οποία εκσκάφτηκαν από 200 π.Χ έως το 600 μ.Χ, με συνολικό μήκος σηράγγων 2km, εντός βασαλτικού βράχου.¹⁸



Σχήμα 1.4 Βασιλικοί τάφοι στην Ούρ της Μεσοποταμίας, Sachin Kawale,

¹⁰ Υπάρχει η άποψη ότι η σήραγγα του Ευφράτη αποτελεί ένα μυθικό κατασκεύασμα, καθώς δεν έχει επιβεβαιωθεί η ύπαρξή της. (Reference Guide to Famous Engineering Landmarks of the World, 1998, Lawrence Berlow)

¹¹ Ιστορική Βιβλιοθήκη, Βιβλίο II,1 (Μετάφραση G. Booth, 1814)

¹² Βίος Απολλώνιου Τυανών, βιβλίο I,25. (Μετάφραση FC Conybeare, 1912)

¹³ Iraq, Vol. 77, pp 75, A.R. George, 2015, published by British Institute for the Study of Iraq

¹⁴ Ur, Mesopotamia, Britannica

¹⁵ A topographical catalogue of the private tombs of Thebes, 1913, Bernard Quaritch

¹⁶ Seti I, Britannica

¹⁷ Abu Simbel, Britannica

¹⁸ Ellora caves, Britannica



Σχήμα 1.5 Σπήλαια της Ellora, by Leonard Woolley, wikipedia holidayandtrips.com

Οι αποστραγγιστικές σήραγγες της Κωπαΐδας¹⁹ εντοπίζονται γύρω στον 16^ο αιώνα π.Χ από τους αρχαίους κατοίκους του Ορχομενού, τους Μινύες²⁰. (Αnon, 1970)

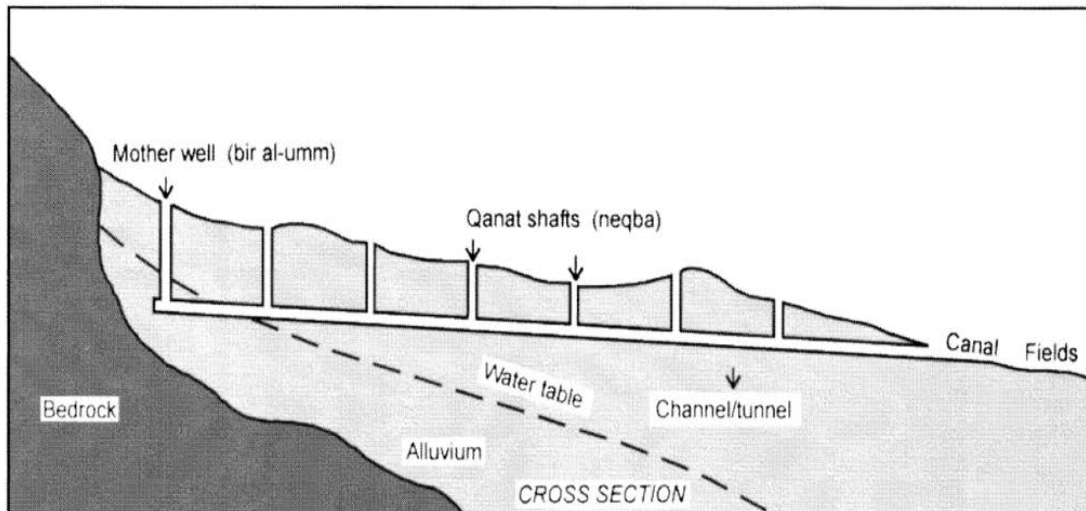
Μία ακόμη σήραγγα ύδρευσης που έχει εντοπιστεί είναι αυτή του Σιλωάμ περί τον 9^ο αιώνα π.Χ στην ανατολική Ιερουσαλήμ²¹ για λόγους παροχής νερού στην πόλη. (Israel Exploration Journal, the Siloam Tunnel Inscription: Historical and Linguistic Perspectives, Gary A. Rendsburg). Επιπλέον, αξιοσημείωτες είναι οι υδαταγωγοί σήραγγες των Κανάτ²² (Qanat), τα οποία αποτελούσαν ένα υπόγειο υδρευτικό σύστημα, όπου με την βοήθεια υπογείων σηράγγων παρείχαν νερό σε ξηρές και απομονωμένες περιοχές. Τα Κανάτ εντοπίζονται στην περιοχή της Περσίας, της Αρμενίας, του Ιράκ, της Ινδίας, ακόμη και στο Μαρόκο. Τα Κανάτ που εντοπίζονται στην Μέση Ανατολή απαιτούν στο εσωτερικό τους μια επένδυση για στήριξη και διαθέτουν ένα στεγανό ανάστροφο τόξο. Κατασκευάζονταν από κατακόρυφα φρέατα απόστασης 50m και διέθεταν ακόμη ενδιάμεση πρόσβαση για νερό με σκάλες. Αξιοπρόσεκτο είναι το Κανάτ του Χαλεπίου (Χάλαμπ) στην Συρία μήκους 11,2 km σε βάθος 90 m, περιλαμβάνοντας κατακόρυφα φρέατα για την ανέλκυση υλικών και για τον εξαερισμό των σηράγγων. Το παλαιότερο Κανάτ βρίσκεται στην πόλη Gonabad στο Ιράν. (Hemphill, 2013) Έχει μήκος 45 km και παρέχει ακόμη και στις μέρες μας πόσιμο νερό σε πάνω από 40.000 ανθρώπους. (Σοφιανός, 2013)

¹⁹ Προϊστορία και πρωτοϊστορία,, Ιστορία του Ελληνικού Έθνους, Αnon, 1970

²⁰ Οι Μινύες ήταν αρχαίο πρωτοελληνικό φύλο, το οποίο ήταν εγκατεστημένο στην περιοχή του σημερινού Ορχομενού (Μινύες, Νεώτερον Εγκυκλοπαιδικόν Λεξικόν Ηλίου, τ.13ος, σ.644)

²¹ Η σήραγγα του Σιλωάμ ή σήραγγα του Εζεκία είναι μια κατασκευή η οποία σύμφωνα με την Βίβλο (Βασιλείων Β' 20:20, 2 Χρονικών Β' 32:30) δημιουργήθηκε για σκοπούς τροφοδοσίας νερού υπό την επικείμενη επίθεση των Ασσυρίων. Η σήραγγα οδηγεί από την Πηγή Gihon στην Πισίνα του Σιλωάμ.

²² Τα Κανάτ (Qanat η Kariz) είναι ένα υπόγειο σύστημα μεταφοράς νερού από τον υδροφόρο ορίζοντα στην επιφάνεια, μέσω υπογείων σηράγγων. Τα πρώτα Κανάτ κατασκευάστηκαν στην αρχαία Περσία περίπου το 1000 π.Χ και εξαπλώθηκαν και σε άλλες περιοχές της Μέσης Ανατολής. (qanat, Britannica)



Σχήμα 1.6 Σχεδιάγραμμα Κανάτ²³, by mdpi.com

Τόσο στην Αρχαία Ελλάδα , όσο και στην Αρχαία Ρώμη η τεχνογνωσία διάνοιξης στοών ήταν ευρέως διαδεδομένη , είτε για στρατιωτικούς λόγους(διάνοιξη σε τείχη κατά την πολιορκία, αντίμετρα), είτε για λόγους ύδρευσης. Αρκετές κατασκευές, όπως στοές στην Αρχαία Αθήνα , για σκοπούς παροχής νερού στην πόλη, έχουν χρήση ακόμη και στις ημέρες μας. Ένα δείγμα αυτής της τεχνογνωσίας ήταν το περίφημο Ευπαλίγειο όρυγμα στην Σάμο περί το 535 π.Χ , ύστερα από εντολή του τυράννου Πολυκράτη . Κατασκευάστηκε από τον μηχανικό Ευπαλίνο , ως σήραγγα ύδρευσης στο Πυθαγόρεια, με μήκος 1016 m και διατομή 1,8m πλάτος και 1,8m ύψος , μέσα σε στρώμα ασβεστόλιθου(Σοφιανός, 2013). Η μοναδική αναφορά που είχε γίνει στο παρελθόν , ήταν αυτή του Ηροδότου.²⁴



Σχήμα 1.7 Ευπαλίγειο όρυγμα, wikipedia

²³ Lightfoot, D.R. The origin and diffusion of qanats in arabia: new evidence from the northern and southern peninsula. Geogr. J. 2000, 166, 215–226.

²⁴ Ιστορία Γ': Θάλεια, 60

Στην περίοδο της ρωμαϊκής αυτοκρατορίας εντοπίζονται αρχικά αποστραγγιστικές σήραγγες, τοξωτού κυρίως ανοίγματος, με επένδυση από λίθους. Γύρω στο 395 π.Χ στην λίμνη Albanus κατασκευάζεται μια σήραγγα αποστράγγισης κατά την διάρκεια των πολέμων μεταξύ των Ρωμαίων και των Βήιων²⁵. Είχε μήκος 1200 m, 1,2 m πλάτος και 2,5 m ύψος, καθώς εξυπηρετούσε την αποστράγγιση της λίμνης κάθε φορά που υπερχειλίζει η στάθμη²⁶ (Carla Galeazzi, 2015).

Μία ακόμη αποστραγγιστική σήραγγα της ρωμαϊκής περιόδου είναι οι σήραγγες του Κλαυδίου. Αποτελεί ένα ιδιαίτερο υδραυλικό έργο, το οποίο απαρτίζεται από ένα σχετικά μακρύ υπόγειο κανάλι και έξι σήραγγες, γύρω στο 42 μ.Χ-52 μ.Χ από τον αυτοκράτορα Κλαύδιο, για τον έλεγχο της στάθμης της λίμνης Fucinus στο Αμπρούτζο (Abruzzo). Έχει μήκος 6 km, 2,5 m πλάτος και 5 m ύψος²⁷ (Afan de Rivera, 1836).

Στην επικράτεια της ρώμης κατασκευάζονται σήραγγες οδοποιίας και κατακόμβες. Οι κατακόμβες της Ρώμης υπήρξε μια πρακτική που έχει τις ρίζες της στους Ετρούσκους, για την ταφή των νεκρών σε υπογείους θαλάμους²⁸ (J. Toynbee, 1971). Αυτό το πολύπλοκο σύστημα σηράγγων, αρχικά διανοίχτηκε για εξορυκτικούς σκοπούς πάνω σε ασβεστόλιθους και ψαμμίτες. Αυτά τα λατομεία έγινε η βάση για μεταγενέστερες διανοίξεις από τους Χριστιανούς την εποχή των διωγμών και από του Εβραίους²⁹.

Την περίοδο βασιλείας του αυτοκράτορα Οκταβιανού Αυγούστου (27π.Χ-14μ.Χ) κατασκευάζονται αρκετές σημαντικές σήραγγες. Μία σημαντική είναι αυτή στην Αρχαία Νικόπολη³⁰, η οποία σχεδιάστηκε για λόγους μεταφοράς και παροχής νερού στην πόλη ως μέρος του ρωμαϊκού υδραγωγείου της πόλης που άγγιζε τα 50 km.³¹

²⁵ Οι Βήιοι (Veii ή Veii) υπήρξε αρχαία ετρουσκική πόλη και η πλουσιότερη πόλη της ετρουσκικής συμμαχίας. Βρίσκονταν σε αλληπάλληλες διαμάχες και συμφωνίες με την Ρώμη, ώσπου κατακτήθηκε από τον Ρωμαίο στρατηγό Κάμυλλο, το 396 π.Χ. (Veii, Britannica)

²⁶ Carla Galeazzi, Carlo Germani, Luigi Casciotti, "The drainage tunnel of Lake Albano (Rome, Italy) and the 3-years study program "Project Albanus": a progress report", Proceedings of the International Congress of Speleology in Artificial Cavities, Rome, March 2015

²⁷ Progetto della restaurazione dello emissario di Claudio e dello scolo del Fucino, Afan de Rivera, 1836

²⁸ Death and Burial in the Roman World. (J. Toynbee, 1971)

²⁹ Roman Catacombs". The Friend. Vol 31, pp35: 274. 8 May 1858

³⁰ Η Αρχαία Νικόπολη ήταν πόλη της ρωμαϊκής περιόδου, κοντά στην σημερινή Πρέβεζα, η οποία κτίστηκε με εντολή του ρωμαίου αυτοκράτορα Οκταβιανού Αυγούστου, μετά την νίκη στην Ναυμαχία του Ακτίου το 31 π.Χ. Αποτελεί βασικό μέρος του περιβόητου ρωμαϊκού υδραγωγείου της πόλης, που αντλούσε νερό από τον ποταμό Λούρο (Nicomopolis Britannica) Σύμφωνα με τα ευρήματα, αποτελούσε την μεγαλύτερη σε έκταση πόλη της Αρχαίας Ελλάδας. (Χ. Γκούβας, 2009)

³¹ " Το Ρωμαϊκό Υδραγωγείο της Νικόπολης", Εφορία Αρχαιοτήτων Πρέβεζας, επιμέλεια: Ανθή Αγγέλη, συγγραφή: Ελπίδα Σαλταγιάννη, Χριστίνα Μερκούρη, Ιωάννης Γιαννακάκης



Σχήμα 1.8 Οι σήραγγες του Κλαυδίου, Claudio Parente, wikipedia



Σχήμα 1.9 Η σήραγγα της Νικόπολης, Χ. Γκούβας, wikipedia

Κάποια μεγαλειώδη έργα της εποχής του αυτοκράτορα Αγρίππα το 37 π.Χ, ήταν οι οδικές σήραγγες γύρω από τα Απέννινα Όρη, στην Κύμη (Grotta di Cocceio)³² με μήκος 1000 m και στο Ποτσοούλι (Crypta Neapolitana)³³ με μήκος 700 m . Αξιοσημείωτη είναι και η οδική σήραγγα Pausilippo το 36 π.Χ, η οποία ενώνει το Ποτσοούλι με την Νάπολη μέσα σε ηφαιστειακό πέτρωμα, με μήκος 1450 m, πλάτος 7,5 m και ύψος 9m. Η ρωμαϊκή σηραγγοποιία χρησιμοποιούσε για εργάτες είτε

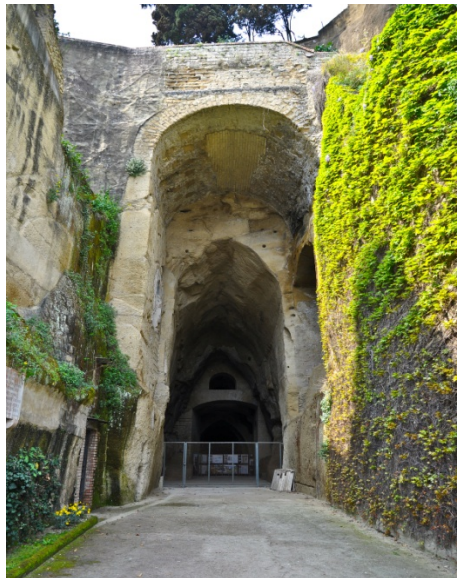
³² Η Κύμη (Cumae ή Cuma) ήταν αρχαία πόλη στην περιοχή της Καμπανίας στην Κάτω Ιταλία κατά τον 8^ο αιώνα π.Χ, η οποία ιδρύθηκε από Ευβοείς από την Κύμη και την Χαλκίδα της Εύβοιας, κατά τον Δεύτερο Ελληνικό Αποικισμό. Ήταν η πρώτη αρχαία πόλη που ιδρύθηκε στην ηπειρωτική Ιταλία. (Cumae, Britannica)

³³ Το Ποτσοούλι (Puteoli ή Pozzuoli) ήταν αρχαία πόλη της περιοχής της Καμπανίας, η οποία ιδρύθηκε το 529 π.Χ από αποίκους από την Σάμο. Ήταν σημαντικό ρωμαϊκό λιμάνι, καθώς επίσης εκεί εξορύχτηκε για πρώτη φορά η ποζολάνη (ορυκτό ηφαιστειακής προέλευσης), σημαντικό υλικό του πρώιμου σκυροδέματος. (Pozzuoli, Britannica)

σκλάβους είτε αιχμαλώτους πολέμου και η οργάνωση των έργων ήταν συγκεκριμένη και τυποποιημένη (Σοφιανός, 2013).



Σχήμα 1.10 Grotta di Cocceio, wikipedia



Σχήμα 1.11 Crypta Naepolitana, Armando Mancini, Wikipedia

Λίγο μετά κατάρρευση της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορία η ζήτηση για διανοίξεις σηράγγων μειώθηκε αισθητά στον Ευρωπαϊκό χώρο. Ο μοναδικός λόγος δημιουργίας σηράγγων για αρκετούς αιώνες ήταν η στρατιωτική χρήση τους, όπως διανοίξεις κάτω από τείχη και τοποθέτηση εκρηκτικών υλών κάτω από αυτά.

Το 1917, στα πλαίσια της μάχης της Μεσσίν (Messines)³⁴, στην Δυτική Φλάνδρα του Βελγίου, ο στρατηγός Sir Herbert Plumer, έδωσε εντολή για την όρυξη 20 στοών κάτω από τις γραμμές των Γερμανών. Δημιουργήθηκαν πάνω από 8km στοών και τοποθετήθηκαν πάνω από 600 τόνοι εκρηκτικών από τις Βασιλικές Εταιρίες Μηχανικών Σηραγγοποιίας (Royal Engineer tunnelling companies) του Βρετανικού Στρατού.

Στο Biber της Ουγγαρία, περίπου το 1400μ.Χ, εντοπίζεται αποστραγγιστική σήραγγα μήκους 5,6 km (Széchy,1967)

Από την Αναγέννηση και ύστερα δημιουργείται η ανάγκη για μεταφορά πρώτων υλών και για την επίτευξη αυτών γίνεται χρήση πλωτών μέσων σε ποταμούς. Αυτό απαιτεί την κατασκευή διωρύγων και κατά συνέπεια σηράγγων . Την περίοδο 1779-1781, στα πλαίσια κατασκευής του Καναλιού του Μιντί (Canal du Midi) στην Νότια Γαλλία, δημιουργείται η πρώτη πλωτή σήραγγα καναλιού στην Ευρώπη, ως έργο του Γάλλου μηχανικού Pierre-Paul Riquet, την εποχή στην οποία βρισκόταν στην εξουσία της Γαλλίας ο Λουδοβίκος ο XIV(René Gast,2006)³⁵. Η σήραγγα κατασκευάστηκε, αντί της παράκαμψης της ορεινής βραχομάζας, μέσα σε τόφφους, με μήκος 157 m και διαστάσεις 6.7m x 8.2m. Για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε η πυρίτιδα ως μέσον για την διάνοιξη της σήραγγας. (Σοφιανός,2013)



Σχήμα 1.12 Η σήραγγα του Malpas, by Kris Roelants, wikipedia

³⁴ Η μάχη της Μεσσίν(7-14 Ιουνίου του 1917) πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Α΄ ΠΠ, μεταξύ των Βρετανών και των Γερμανών, με νίκη υπέρ των Βρετανικών στρατευμάτων.(Battle of Messines, Britannica)

³⁵ The Canal Du Midi Waterway: The Story of a Masterpiece, René Gast,2006

Τον 17^ο αιώνα ξεκινά να γίνεται χρήση γραφικών μεθόδων στατικής από τους Γάλλους μηχανικούς σηράγγων με σκοπό την κατασκευή σταθερών αψίδων. Αυτές οι τεχνικές διάνοιξης και κατασκευής διωρύγων και σηράγγων επεκτάθηκαν στην Ευρώπη και στην Αμερική, έως και τα μέσα του 19^{ου} αιώνα . Σε ολόκληρη την Ευρώπη οι διώρυγες κατασκευάζονταν με κρατική χρηματοδότηση , εκτός από την Αγγλία στην οποία η χρηματοδοτήσεις τέτοιων έργων προέρχονταν από ιδιωτικά κεφάλαια.

Στην Αγγλία του 18^{ου} αιώνα κατασκευάζονται μια σειρά από διώρυγες και σήραγγες. Η πρώτη σήραγγα διώρυγας ήταν αυτή του Bridgewater , η οποία ένωνε το ανθρακωρυχείο του Worsley με το Manchester. Η κατασκευή της σηματοδότηση την εποχή των διωρύγων. Στην συνέχεια στις Ηνωμένες Πολιτείες κατασκευάζονται οι πρώτες σήραγγες στην διώρυγα του Union στην Pennsylvania , στις θέσεις που εντοπίζονται στο Schuylkill το 1818 και στο Lebanon το 1826.

Σε αρκετές περιπτώσεις, όπου η κατασκευή μια διώρυγας ήταν ανέφικτη , τέθηκε σε εφαρμογή ο σχεδιασμός σιδηροδρόμων και κατά συνέπεια η δημιουργία σηράγγων για αυτόν τον σκοπό. Η πρώτη σήραγγα για σιδηροδρομική χρήση κατασκευάστηκε στην Γαλλία το 1826. Παρόλα αυτά η σημαντικότερη κατασκευαστική άνθιση σηράγγων παρουσιάστηκε στην Αγγλία , την μεγαλύτερη οικονομική δύναμη της εποχής. Η σημαντικότερη σήραγγα που διανοίχθηκε ήταν αυτή του Box, το 1851, μέσα σε μάργες , ιλύες και αργίλους.

Παράλληλα, στην ηπειρωτική Ευρώπη ξεκινούν σιδηροδρομικές σήραγγες στο Βέλγιο, την Γαλλία , την Γερμανία και την Ελβετία. Στην Αυστρία έως και το 1856 έχουν διανοιχθεί πάνω από 60 σήραγγες , όπως και στην Ιταλία με μήκος 10 km συνολικά. Στις Ηνωμένες Πολιτείες η πρώτες σήραγγες κατασκευάστηκαν στην Pennsylvania και μέχρι το 1950 είχαν ωρυχθεί πάνω από 29.

Από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα τα δίκτυα σιδηροδρόμων της Γερμανίας, της Γαλλίας, της Ελβετίας και της Αυστρίας ήταν ήδη συνδεδεμένα. Στην Ιταλία του 19^{ου} αιώνα η οποία βρισκόταν εντός της δίνης των επαναστάσεων και της πολιτικής διχοτόμησης είχε ξεκινήσει η προσπάθεια για ανάπτυξη σιδηροδρομικού συστήματος. Έτσι, η ανάγκη για σύνδεση της των περιοχών Άνω και Κάτω των Άλπεων απαιτούσε διάνοιξη σηράγγων αρκετών χιλιομέτρων , προκύπτοντας αρκετές δυσκολίες , αλλά και καινοτόμες εφαρμογές στην κατασκευή.

Η διάνοιξη εντός βραχωδών όγκων απετέλεσε την αρχή της επανάστασης στην χρήση εκρηκτικών υλών , αλλά και την χρήση πεπιεσμένου αέρα για τις αεροσφύρες. Οι μέθοδοι όρυξης πριν την επαναστατική καινοτομία στην σηραγγοποιία ήταν χρονοβόρα και επίπονη και δεν διέφερε αρκετά σε σχέση με τις μεθόδους τις οποίες εφαρμόζαν οι Ρωμαίοι. (Σοφιανός, 2013)

Κάποιες σημαντικές σήραγγες της περιόδου των νέων καινοτομιών είναι οι σήραγγες του Frejus το 1871, του Gotthard το 1872, του Arlberg το 1884, του Simplon το 1921 και του Lötschberg το 1913.

1.3 ΜΕΣΑ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Την ιστορία της σηραγγοποιίας ακολουθεί η ανάπτυξη νέων μέσων και μεθόδων διάνοιξης. Από την Ρωμαϊκή Εποχή, ως μέσα εκσκαφής, χρησιμοποιούνται εργαλεία από πυριτόλιθο και ξύλινες σφήνες, τα οποία τοποθετούνταν εντός των ρωγμών του βραχόσχηματισμού. Για τις εγκοπές γινόταν χρήση με καλέμι, με ταυτόχρονη εμπότιση και τελικό αποτέλεσμα τον κατακερματισμό του βράχου.

Από τον 16^ο αιώνα εκκινά η χρήση της πυρίτιδας³⁶ αντικατέστησε τάχιστα τις παλαιότερες μεθόδους διάνοιξης. Η εφαρμογή της οδήγησε μαζί με την έλευση των σιδηροδρόμων στην “ χρυσή εποχή” της σηραγγοποιίας. Οι διανοίξεις πραγματοποιούνταν με την ανόρυξη οπών από έναν εργάτη ο οποίος σφυροκοπούσε το σημείο με ένα ασάλινο τρυπάνι και στην συνέχεια τοποθετούνταν στις οπές πυρίτιδα, η οποία πυροδοτούνταν ανά μονάδες. Κάποια από τα προβλήματα που προέκυψαν στους χώρους εργασίας ήταν οι υψηλές θερμοκρασίες και τα τοξικά αέριου από τις εκρηκτικές ύλες, για αυτό η απομάκρυνσή τους ήταν αναγκαία. Έτσι δημιουργήθηκαν μηχανισμοί αερισμού των υπόγειων εργοταξίων.

Την δεκαετία του 1860, ο Germain Sommelier, ο μηχανικός της σήραγγας του Mont Cenis³⁷ στην Γαλλία, έκανε εισαγωγή μίας νέας μεθόδου, την εφαρμογή αεροσυμπιεστών υδραυλικού φορτίου και ενός σιδηροδρομικού φορείου με εννέα διατρητικές διατάξεις. Την βελτιστοποίηση της νέας αυτής μεθόδου, πραγματοποίησε το 1865, ο Henry Charles Barkley.

Το 1847 ανακαλύπτεται η νιτρογλυκερίνη³⁸ και από το 1866 ξεκινά να εφαρμόζεται στην σηραγγοποιία. Η πυροδότηση του εκρηκτικού γινόταν με ηλεκτρισμό. Αν και

³⁶ Η πυρίτιδα (gunpowder), ή μπαρούτι είναι μείγμα άνθρακα (C₆), θείου (S₈) και νιτρικού καλίου (KNO₃) και αποτελεί την αρχαιότερη εκρηκτική ύλη. Αν και ήταν γνωστή η χρήση της από τους Κινέζους, καταγράφηκε για πρώτη φορά η σύσταση της από τον Άγγλο φιλόσοφο Ρότζερ Μπέικον ή Ρόγηρο Βάκων (Roger Bacon) (1220-1292). Η πρώτη πολεμική χρήση της πυρίτιδας έγινε από τους Άγγλους στην Μάχη του Κρεσί, το 1346, στα πλαίσια του Εκατονταετούς Πολέμου. (Νεώτερον Εγκυκλοπαιδικόν Λεξικόν Ηλίου τ. 16ος, σ. 540)

Η χημική εξίσωση της καύσης της πυρίτιδας: $2\text{KNO}_3 + \text{S} + 3\text{C} \rightarrow \text{K}_2\text{S} + \text{N}_2 + 3\text{CO}_2$

³⁷ Η σήραγγα του Mont Cenis είναι το πρώτο αλπικό πέρασμα μέσα από γνεύσιους, ασβεστόλιθους και ψαμμίτες

³⁸ Η νιτρογλυκερίνη (nitroglycerin) C₃H₅(ONO₂)₃ ή C₃H₅N₃O₉ είναι βαρύ ελαιώδες εκρηκτικό υγρό, το οποίο προέρχεται από την ανάμειξη γλυκερόλης (C₃H₈O₃) με μίγμα νιτρικού (HNO₃) και θειικού οξέως (H₂SO₄). Ανακαλύφθηκε το 1847 από τον Ασκάνιο Σομπρέρο (Ascanio Sobrero) στο Πανεπιστήμιο του Τορίνο. Η ικανότητά της να εκρήγνυται βίαια, την κατέστησε αρκετά επικίνδυνη λόγω και των ατυχημάτων που είχαν συμβεί, με αποτέλεσμα να παρασκευάζεται επιτόπια. Είναι τόσο εκρηκτική, όπου αν δεν καθαριστεί καλά εκρήγνυται και σε ηρεμία. Η έκρηξη της προκαλεί

αρκετά επικίνδυνο , ήταν πολύ πιο αποτελεσματικό εκρηκτικό , καθώς μπορούσε να εισδύσει σε μεγαλύτερες οπές και να κατακερματίσει μεγαλύτερη ποσότητα βραχομάζας. Σταδιακά, την νιτρογλυκερίνη αντικατέστησε μια εκρηκτική ύλη που ανακαλύφθηκε από τον Alfred Nobel το 1867, τον δυναμίτη³⁹. Σχεδόν τρία χρόνια από την βιομηχανική παραγωγή του δυναμίτη, ξεκίνησε η εφαρμογή του διάνοιξη της σήραγγας του Gothard στις Άλπεις με μήκος 14,5 km. Την ίδια περίοδο βελτιώθηκαν οι μηχανισμοί αερισμού και φωτισμού και αναπτύχθηκαν οι θεωρίες περί τασικής κατανομής στον δακτύλιο ενός ανοίγματος και μεθόδων υποστήριξης και επένδυσης.

Σημαντική ήταν η νέα τεχνολογία στις υπόγειες διανοίξεις , η λεγόμενη “ασπίδα” του Marc Brunel, η οποία αποτελούσε μια μέθοδο για διανοίξεις σε μαλακά εδάφη με ταυτόχρονη προφύλαξη των εργατών στο μέτωπο. Με αυτήν την μέθοδο ορύχθηκε η πρώτη υποβρύχια σήραγγα Rotherhirth κάτω από τον ποταμό Τάμεση. Μια παρεμφερής είναι και η ασπίδα του Peter Barlow, η οποία συνοδευόταν από ταυτόχρονη επένδυση στα τοιχώματα από χυτοσίδηρο. Λίγο αργότερα εισάγεται από τον James Henry Greathead η ασπίδα του πεπιεσμένου αέρα , για την άμεση αντιμετώπιση των καταρρεύσεων των τοιχωμάτων της σήραγγας και την εισροή υδάτων εντός αυτής, συχνά προβλήματα που παρουσιάστηκαν σε αρκετές κατασκευές σηράγγων όπως σε αυτές του Simplon(19km) το 1898, του Lötschberg(14km) το 1906 και στην ιαπωνική σήραγγα Tana το 1920. Έτσι, η ανάγκη των μηχανικών οδήγησε στην εκσκαφή παράλληλης σήραγγας εκροή κατά μήκος της κύριας σήραγγας, σε συνδυασμό με την μέθοδο του πεπιεσμένου αέρα με ασπίδα .

Στην συνέχεια και πιο συγκεκριμένα μετά από 1950, οι κατασκευές σηράγγων χαρακτηρίζονται από την μηχανοποιημένη διάνοιξη, κάνοντας χρήση είτε μηχανών σημειακής προσβολής⁴⁰ είτε ολομέτωπης κοπής (TBM)⁴¹, είτε ακόμη γεωτρητικών διατάξεων ανόρυξης διατρημάτων και νέων εκρηκτικών υλών (ANFO).

Μια πραγματική πρόοδος έχει πραγματοποιηθεί στα μέτρα υποστήριξης και στην τελική επένδυση της σήραγγας. Αρχικά οι υποστηρίξεις γινόντουσαν με ξύλινες επενδύσεις , στην συνέχεια ακολούθησαν οι μεταλλικές υποστηρίξεις, ώστε να

κλιμακωτή αλλαγή πίεσης, δημιουργώντας αυτοσυντηρούμενο ωστικό κύμα είκοσι φορές της ταχύτητα του ήχου. (nitroglycerin, Britannica)

$4C_3H_5(ONO_2)_3 \rightarrow 6N_2 + 12CO_2 + O_2 + 10H_2O$

³⁹ Ο δυναμίτης(dynamite) είναι μια εκρηκτική ύλη που βασίζεται στην μίξη νιτρογλυκερίνης προσροφημένης σε γη διατόμων(Kieselguhr) , πηλού και πριονιδίων. Ανακαλύφθηκε από τον Άλφρεντ Νόμπελ (Alfred Nobel) το 1867. (dynamite, Britannica)

⁴⁰ Η μηχανή σημειακής προσβολής (Roadheader) είναι εκσκαπτικό μηχανήμα , το οποίο αποτελείται από μια περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή. (Dr. Helmut Schneider (September 1988). "Criteria for Selecting a Boom-Type Roadheader". Mining Magazine. The Mining Journal, Ltd. p. 183.)

⁴¹ Το Μηχάνημα Διάτρησης Σηράγγων (Tunnel Boring Machine) είναι ένα εκσκαπτικό μηχανήμα με κυκλική διατομή. Χρησιμοποιείται σε πολλά είδη εδαφών και έχει διάμετρο από 1m έως 16m .

οδηγηθούμε στις ηλώσεις και αγκυρώσεις σε συνδυασμό με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα(gunite), καθώς τα χαλύβδινα πλέγματα και ίνες είναι βασικό μέσον προσωρινής υποστήριξης. Η τελική πλέον επένδυση της σήραγγας πραγματοποιείται με τοποθέτηση προκατασκευασμένων δακτυλίων από σκυρόδεμα.

Οι υποστηρίξεις διακρίνονται σε ενεργητικές, όταν η γεωμάζα σταθεροποιείται εσωτερικά και παθητικές όταν η γεωμάζα σταθεροποιείται εξωτερικά. Επίσης διακρίνονται σε προσωρινές και μόνιμες, ανάλογα με το στάδιο του έργου. Από το 1960 η Νέα Αυστριακή Μέθοδος (NATM), ταυτίζει την προσωρινή με την μόνιμη υποστήριξη, κυρίως για σήραγγες μεγάλης διατομής, εντός ασταθούς γεωπεριβάλλοντος. Για την NATM η υποστήριξη είναι μια μορφή ενίσχυσης με ηλώσεις και αγκυρώσεις, καθώς και επένδυση με πλέγμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η τεχνική αυτή της υποστήριξης ξεκίνησε στις διανοίξεις σηράγγων των Αυστριακών Άλπεων, εντός ορεινών όγκων με έντονα μεταβλητά γεωλογικό υπόβαθρο και ισχυρές εισροές υδάτων.

Μια παρόμοια μέθοδο ενεργητικής υποστήριξης αποτελεί η North America Tunneling Method, η οποία έχει εφαρμογή για ομοιόμορφη γεωλογία, με σχεδόν απουσία ασταθειών και εισροών υδάτων. Αρκετά, παρόμοιες με αυτή της προηγούμενης είναι η Los Angeles Tunneling Method και η Norwegian Method Tunneling, με την τελευταία για αρκετά σκληρή γεωμάζα (Κωστόπουλος, 2013).



Σχήμα 1.13 Roadheader⁴² τύπου IBS, wikipedia

⁴² From US Government (Department of Transportation, Federal Highway Administration, Tunnel Virtual Team) web site Q&A page at: <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/tunnel/qa.htm>

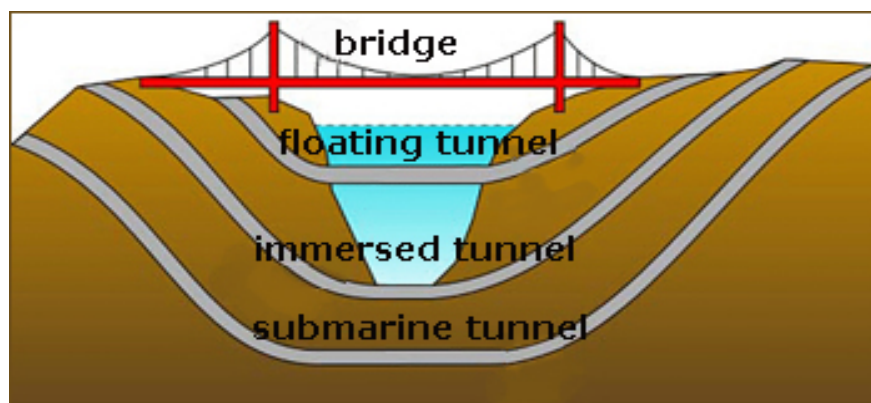


Σχήμα 1.14 TBM⁴³, wikipedia

1.4 ΥΠΟΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

Οι υποθαλάσσιες ή υποβρύχιες σήραγγες είναι το σύνολο το σηράγγων εκείνων που διανοίγονται εντός ή κάτω από την επιφάνεια μεγάλων θαλάσσιων ή γενικότερα υδάτινων όγκων. Όπως διατυπώνει και ο Eisenstein (1994), οι σημαντικές και μεγάλες σήραγγες, διαθέτουν καθοριστικό ρόλο στην εποχή μας, όπως αυτόν των μεγάλων διωρύγων, αφού κατέχουν ύψιστη θέση στην οικονομική, κοινωνική και μεταφορική δυνατότητα του σύγχρονου ανθρώπου. Οι υποβρύχιες σήραγγες διακρίνονται σε υποπυθμένες (submarine tunnel ή subsea tunnel), σε επιπυθμένες ή βυθιζόμενες (immersed tunnel) και σε πλωτές ή επιπλέουσες (submerged floating tunnel).

Παρατηρούμε ότι όσο μικρότερο βάθος έχει μια σήραγγα, τόσο μικρότερο μήκος έχει, λόγω περιορισμού μέγιστης κλίσης.



Σχήμα 1.15 Οι τρεις τύποι υποθαλάσσιων σηράγγων, by www.dutchwatersector.com

⁴³ By : A déli pajzs a keresztezőkamrában(The southern shield in the intersection chamber),2010

Κατασκευή και τεχνολογία επιπυθμένων σηράγγων

Οι υποπυθμένες σήραγγες , έχουν πανομοιότυπο τρόπο κατασκευής με τις χερσαίες σήραγγες, αφού η εκσκαφή τους γίνεται εξ ολοκλήρου στην βραχομάζα και για αυτό τον λόγο παίζει σημαντικό παράγοντα η γεωλογική δομή του πυθμένα. Οι μηχανική των πλωτών σηράγγων καθορίζεται από την θαλάσσια υδραυλική, δηλαδή από τις υδροδυναμικές δυνάμεις που ασκούνται στην σήραγγα. Οι επιπυθμένες σήραγγες καθορίζονται σε ένα μέρος από την γεωλογία του πυθμένα, όπως και οι υποπυθμένες, αλλά επιδρούν σε αυτή και οι υδροδυναμικές δυνάμεις του περιβάλλοντος γύρω από αυτήν. Μέχρι στιγμής έχουν κατασκευαστεί μόνο οι δύο πρώτες κατηγορίες σηράγγων, ενώ οι πλωτές είναι υπό μελέτη.

Σύμφωνα με τον Gursoy (1995) η επιλογή του κατάλληλου τύπου σήραγγας εξαρτάται από:

- Το απαιτούμενο βάθος και ο κυκλοφοριακός φόρτος της σήραγγας
- Οι υποδομές που διατίθενται στην ακτογραμμή
- Η τοπογραφία και η γεωλογία της περιοχής
- Τις κλίσεις και το μήκος του πυθμένα
- Τον απαιτούμενο εξαερισμό και τις ενεργειακές ανάγκες των εγκαταστάσεων της σήραγγας
- Τον οικονομοτεχνικό σχεδιασμό του έργου

Κάποιες από τις σημαντικές υποβρύχιες σήραγγες ανά τον κόσμο:

| Όνομα σήραγγας | Χώρα | Τύπος | Χρήση | Μήκος(km) | Βάθος(m) | Έτος λειτ. |
|------------------------|---------------|---------------|---------|-----------|----------|------------|
| Thames tunnel | U.K. | Subsea | Railway | 0,4 | 23 | 1843 |
| Severn Tunnel | U.K. | Subsea | Railway | 7 | 24 | 1886 |
| Maastunnel | Netherlands | Immersed tube | Roadway | 1,4 | 20 | 1942 |
| Vardø Tunnel | Norway | Subsea | Roadway | 2,9 | 88 | 1982 |
| Kanonersky Tunnel | Russia | Immersed tube | Roadway | 0,927 | 10,7 | 1982 |
| Seikan Tunnel | Japan | Subsea | Railway | 53,9 | 240 | 1988 |
| Sydney Harbour Tunnel | Australia | Immersed tube | Roadway | 2,8 | 25 | 1992 |
| Channel Tunnel | U.K.-France | Subsea | Railway | 50,5 | 75 | 1994 |
| Tokyo Bay Aqua-Line | Japan | Subsea | Roadway | 9,6 | 45 | 1997 |
| Aktio-Preveza Tunnel | Greece | Immersed tube | Roadway | 1,6 | 27 | 2002 |
| Eiksund Tunnel Norway | Norway | Subsea | Roadway | 7,7 | 287 | 2008 |
| Busan-Geoje Fixed Link | S. Korea | Immersed tube | Roadway | 3,2 | 48 | 2010 |
| Marmaray Tunnel | Turkey | Immersed tube | Railway | 13,5 | 60 | 2013 |
| Eurasian Tunnel | Turkey | Subsea | Roadway | 5,4 | 106 | 2016 |
| Eysturoyartunnilin | Faroe Islands | Subsea | Roadway | 11,24 | 187 | 2020 |
| Shun Long Road | Hong Kong | Subsea | Roadway | 5 | 60 | 2020 |

1.4.1 Υπουθμένες Σήραγγες

Οι υπουθμένες σήραγγες ,όπως αναφέρει ο Palmström (1994), είναι έργα τα οποία διέρχονται κάτω από τον πυθμένα των υδάτινων όγκων (θάλασσα, λίμνη) , όπου η γεωλογία της περιοχής είναι καλυμμένη από το νερό. Οι σήραγγες αυτού του τύπου μπορούν να διανοιχθούν με την μέθοδο διάτρησης-ανατίναξης(drill

and blast), συνήθως με Μηχανές Ολομέτωπης Διάνοιξης (TBM). Αυτού του είδους οι σήραγγες επηρεάζονται περισσότερο από τις γεωλογικές διεργασίες, λόγω της γεωμορφολογικής αβεβαιότητας , καθώς και την έλλειψη σημαντικών γεωλογικών δεδομένων. Από την στιγμή που η κατασκευή γίνεται εξ ολοκλήρου στο βραχώδες υπόβαθρο του πυθμένα , η μέθοδος κατασκευής που ακολουθείται είναι παρόμοια με αυτή των συμβατικών χερσαίων σηράγγων. Στην μελέτη των υπουθμένων σηράγγων προστίθεται και το προστιθέμενο φορτίο του νερού. (Λιώρης-Παπαχαράμπους⁴⁴,2016)

Το κύριο μέρος της μελέτης πριν την έναρξη κατασκευής , περιλαμβάνει προσδιορισμό των παραμέτρων της ποιότητας του βραχώδους υποβάθρου, μέσω του συνηθέστερου τρόπου, της μεθόδου RMR (Rock Mass Rating) και της σεισμικότητας της περιοχής μέσω των ειδικών σεισμολογικών μετρήσεων. (NORWEGIAN TUNNELLING SOCIETY ,2009)

Ο Nielsen και Palmström διατύπωσαν τις εξής ιδιαιτερότητες των υπουθμένων σηράγγων (Λ. Λιώρη ,2017):

- Το μεγαλύτερο μέρος του έργου καλύπτεται από νερό . Εφαρμόζονται ειδικές τεχνικές έρευνας , καθώς τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την περιοχή μελέτης είναι περισσότερο αβέβαια σε σχέση με άλλα έργα.
- Οι θέσεις των φιόρδ και των στενών περασμάτων βρίσκονται τις περισσότερες φορές πάνω σε ρήγματα ή ζώνες αδυναμίας του βραχώδους περιβάλλοντος της περιοχής, με αποτέλεσμα να δυσχεράνει την εκσκαφή.
- Η ποσότητα εισροής υδάτων εντός της σήραγγας είναι απροσδιόριστη. Η όποια διαρροή υπάρξει μπορεί να αντληθεί μόνο εκτός σήραγγας, λόγω της γεωμετρίας του έργου.
- Ο αλατούχος χαρακτήρας του εισρέοντος νερού προκαλεί σημαντικά προβλήματα στο εξοπλισμό της σήραγγας, καθώς και στα μέσα υποστήριξής της.

⁴⁴ Λιώρης Λ., Παπαχαράμπους Ν. (2016), «Υποθαλάσσια ζεύξη Σαλαμίνας – Περάματος», Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Αθήνα



Σχήμα 1.16 Διάνοιξη υπουθμένης σήραγγας με TBM, by hurrietdailynews.com

Ο σοβαρότερος κίνδυνος αυτού του είδους σηράγγων είναι η απότομη εισροή υδάτων εντός ή πέριξ της σήραγγας, αφού η κίνηση και η ποσότητα του νερού σε τέτοια βάθη είναι δύσκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια. Από την εμπειρία των υποθαλάσσιων σηράγγων στην Νορβηγία, έχουμε καταλήξει ότι η μείωση εισροών βελτιώνεται με την χρήση ενεμάτων (τσιμεντοενέσεων), πριν το μέτωπο της διάνοιξης της σήραγγας φτάσει εκεί. (Λιώρης-Παπαχαλαράμπους, 2015)

Ο μεγάλος αριθμός σηράγγων που έχουν κατασκευαστεί στην Νορβηγία, μας έχει δώσει ένα ευρύ εμπειρικό και κατασκευαστικό φάσμα πάνω στις υπουθμένες σήραγγες. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται στην Νορβηγία λόγω της αρκετά καλής μηχανικής συμπεριφοράς των κρυσταλλικών και μεταμορφωσιγενών πετρωμάτων της περιοχής, χρησιμοποιείται κυρίων η μέθοδος διάτρησης-ανατίναξης. Στα υπόλοιπα μέρη του κόσμου οι σήραγγες αυτού του τύπου διανοίγονται με την μέθοδο της ολομέτωπης κοπής και της χρήσης συμβατικών μέσων (Λ. Λιώρη, 2017).



Σχήμα 1.17 Υποπυθμένα σήραγγα των Νήσων Φερόες Eysturoyartunnin, by BBC.com

1.4.2 Πλωτές Υποθαλάσσιες Σήραγγες

Οι πλωτές ή επιπλέουσες σήραγγες ή και σπανιότερα γέφυρες του Αρχιμήδη, είναι υποβρύχιες προκατασκευασμένες σήραγγες, οι οποίες βρίσκονται σε μια στατική ισορροπία μεταξύ πυθμένα και επιφάνειας του νερού, οι οποίες έχουν το χαρακτηριστικό να ανθίστανται στην άνωση του νερού μέσω ενός συστήματος πρόσδεσης. (Λ. Λιώρη, 2017)

Οι πλωτές σήραγγες, όπως και οι επιπυθμένες σήραγγες αποτελούνται από προκατασκευασμένα στοιχεία(σπονδύλους, elements ή caissons), των οποίων οι κατασκευή πραγματοποιείται στην ξηρά και συνήθως πλησίον της χάραξης του έργου. Τα στοιχεία αφού σφραγίζονται με ειδικά διαφράγματα, βυθίζονται και επιπλέοντα οδηγούνται στην προκαθορισμένη θέση τους. Μετά από εκεί οι διαδικασίες και οι μηχανισμοί των δύο αυτών τύπων σηράγγων διαφοροποιούνται. Όσον αφορά για την τελική στήριξη των πλωτών σηράγγων , προτείνεται η στήριξη με αγκυρώσεις στον πυθμένα και η χρήση πλωτήρων (pontoons) στην επιφάνεια του νερού. (Ingerslev, 2010).



Σχήμα 1.18 Προσομοίωση πλωτών σηράγγων με πλωτήρες, by inhabitat.com



Σχήμα 1.19 Προσομοίωμα στο εσωτερικό μιας πλωτής σήραγγας, by nbcnews.com

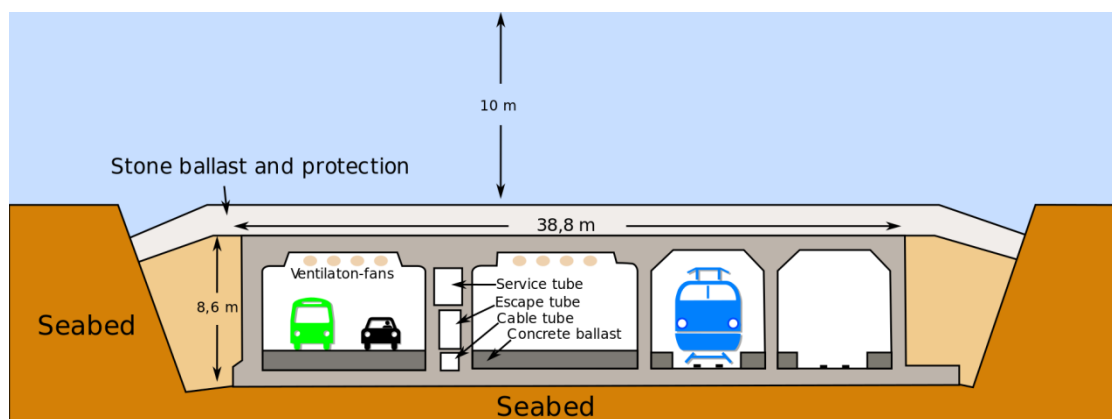
Αν και η ιδέα για κατασκευή πλωτών σηράγγων είναι γνωστή από τα μέσα του 20ου αιώνα, ακόμη δεν έχει προχωρήσει η υλοποίηση της. Η αρχική πρόταση έγινε στην Ιταλία το 1967 για την συνένωση των στενών της Μεσσίνα, η οποία δεν προχώρησε η κατασκευή της. Στην σύγχρονη εποχή την κατασκευή τέτοιων σηράγγων έχει αναλάβει η Νορβηγία, με μελέτες οι οποίες δε έχουν περάσει ακόμη στην κατασκευαστική τους διαδικασία. (Λ. Λιώρη, 2017)

Στα υπόλοιπα κεφάλαια θα αναλυθούν εκτενώς οι αρχές και η λειτουργία των επιπυθμένων σηράγγων, καθώς και η διαδικασίες κατασκευής τους.

2. ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

Οι επιπυθμένες ή επικαθήμενες ή βυθιζόμενες σήραγγες (Immersed tube tunnels) είναι προκατασκευασμένα στοιχεία(σπόνδυλοι ή caissons) από χάλυβα ή σκυρόδεμα τοποθετημένα σε τάφρους, οι οποίες έχουν διανοιχθεί στον πυθμένα μεγάλων θαλάσσιων όγκων (θάλασσα, λίμνη). Στην κάθε πλευρά της τάφρου ,γίνονται ειδικές διαδικασίες εκσκαφής για την κατασκευή της εισόδου και της εξόδου της σήραγγας. Τα τμήματα της σήραγγας(σπόνδυλοι) κατασκευάζονται σε μικρή απόσταση από την χάραξη του έργου, σε ναυπηγεία, ξηρές αποβάθρες ή λεκάνες χύτευσης και σφραγίζονται με ειδικά διαφράγματα. Στην συνέχεια επιλέγεται η κατάλληλη θέση των σπονδύλων και βυθιζόμενα οδηγούνται στην προεπιλεγμένη τοποθεσία. Τα διαφράγματα αφαιρούνται μόλις επικαλυφθεί με εδαφικό υλικό η σήραγγα. Η εφαρμογή επιπυθμένων σηράγγων πραγματοποιείται συνήθως για μικρά βάθη, στην οποίαν διαδικασία οι τάφροι μπορούν να διανοιχθούν με πλωτό εξοπλισμό. (Λιώρης, Παπαχαραλάμπους, 2015).



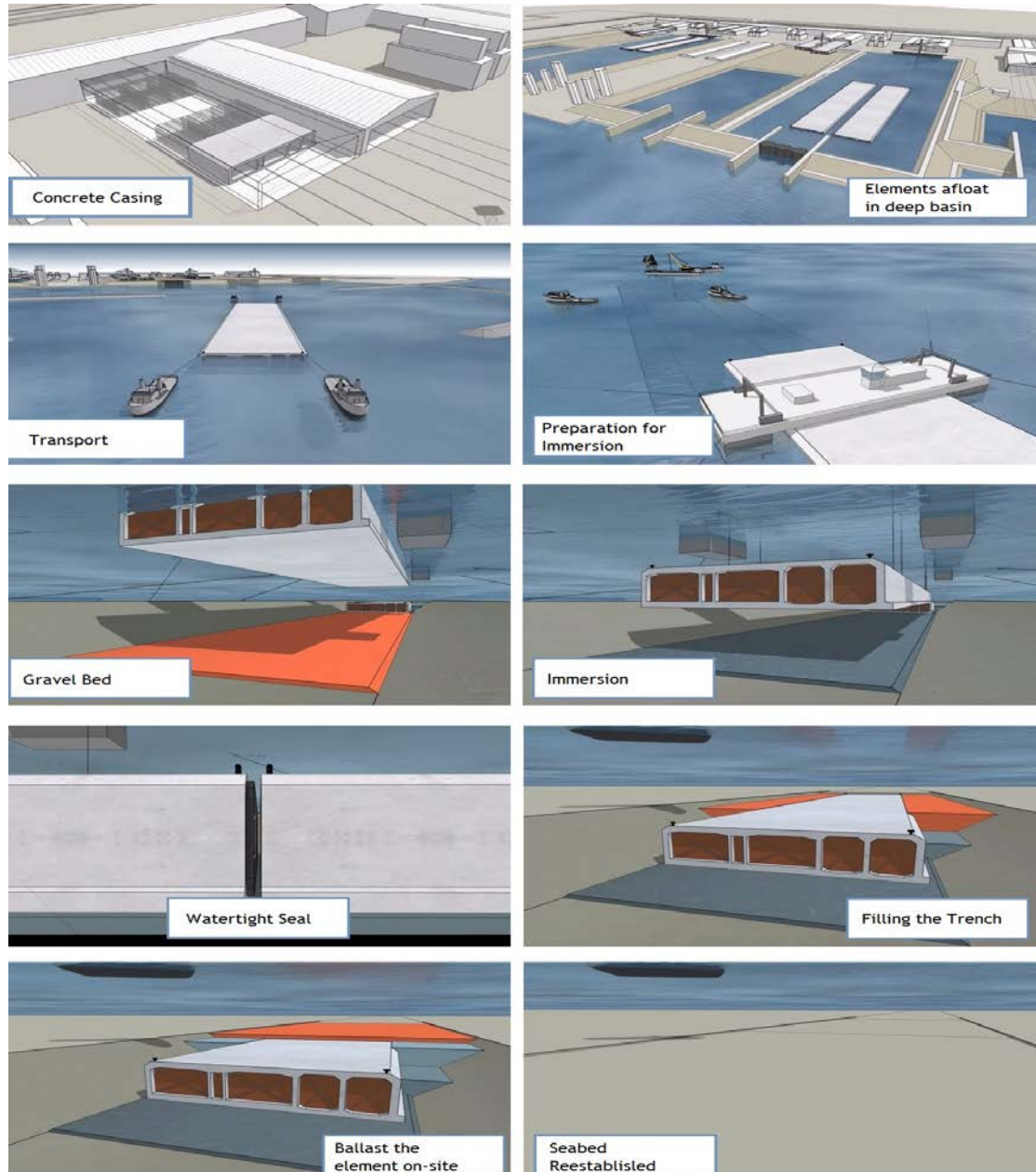
Σχήμα 2.1 Σχηματική απεικόνιση της σήραγγας του Drodgen, by Wikipedia

Οι επιπυθμένες σήραγγες κατασκευάζονται είτε από σκυρόδεμα(κυρίως στην Ευρώπη και την Ιαπωνία), είτε από χάλυβα (στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής). Έως και το έτος 1997 είχαν κατασκευαστεί περί 106 επιπυθμένες σήραγγες, είχαν κατασκευαστεί 72 από σκυρόδεμα και 36 από χάλυβα μια αναλογία, δηλαδή της τάξης του 2 προς 1 (Rasmussen, 1997).

Στην ιστορία της σηραγγοποιίας η πρώτη επιπυθμένα σήραγγα κατασκευάστηκε το 1896 στο λιμάνι της Βοστώνης των Ηνωμένων Πολιτειών, ενώ κάτω από τον ποταμό Detroit το 1910 κατασκευάστηκε η Michigan Central Railroad Tunnel, η πρώτη συγκοινωνιακή επιπυθμένα σήραγγα. Στην Ευρώπη η πρώτη επιπυθμένα σήραγγα κατασκευάστηκε στο Ρότερνταμ της Ολλανδίας το 1942, με την σήραγγα Maas

Κατασκευή και τεχνολογία επιπυθμένων σηράγγων

Tunnel. Από εκεί και ύστερα δημιουργήθηκαν πολλές τέτοιες σήραγγες , με σημαντικότερη αυτή του Drodgen Tunnel μεταξύ Δανίας και Σουηδίας.



Σχήμα 2.2 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας κατασκευής μιας επιπυθμένης σήραγγας, by railsystem.net

2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΕΠΙΠΥΘΜΕΝΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Οι συγκοινωνιακές διελύσεις μέσω βυθισμένων σηράγγων παρουσιάζουν μια πληθώρα πλεονεκτημάτων σε σχέση με άλλα είδη μεταβάσεων. Ορισμένα από αυτά είναι (Μάντη,2019):

- Ταυτόχρονη κατασκευή των σπονδύλων της σήραγγας σε παράκτιο σημείο πλησίον της χάραξης και ταυτόχρονη προετοιμασία του πυθμένα, γεγονός που επιταχύνει την ολοκλήρωση του έργου κατασκευής
- Η επιπυθμένα σήραγγα δεν επηρεάζει την ναυσιπλοΐα, παρά μόνο την περίοδο μεταφορά και βύθισης των στοιχείων της σήραγγας και προετοιμασίας του πυθμένα
- Δεν υπάρχει περιορισμός ως προς το σχήμα της σήραγγας, όπως έχει επικρατήσει για σήραγγες με βαριά διάτρηση
- Πρακτικά, οι βυθισμένες σήραγγες μπορούν να κατασκευαστούν σε οποιοδήποτε τύπο εδάφους
- Ένα έργο συνδυασμού κατασκευών , δηλαδή συνδυασμός γέφυρας-σήραγγας μπορεί να αποτελεί οικονομικότερη λύση, σε σχέση με μια εξ ολοκλήρου κατασκευή γέφυρας ή σήραγγας διάτρησης.
- Οι επιπυθμένες σήραγγες μπορούν να κατασκευαστούν σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα, με κατασκευές που άπτονται στον αντισεισμικό σχεδιασμό.
- Οι κλιματολογικές συνθήκες δεν επηρεάζουν την λειτουργία της σήραγγας. (Evgeny Kurbatcky, 2018).
- Η αρχιτεκτονικής του τοπίου στην επιφάνεια της υδάτινης περιοχής του έργου δεν επηρεάζεται.

Οι επιπυθμένες σήραγγες , οι οποίες παρουσιάζουν μια πληθώρα πλεονεκτημάτων, έχουν και κάποια μειονεκτήματα τα οποία αξίζει να αναφερθούν για την συνολική εικόνα του έργου. Κάποια από αυτά είναι (Μάντη Βασιλική Παρασκευή,2019):

- Μπορεί να έχουν κάποιον αντίκτυπο στην βιοποικιλότητα των έμβιων οργανισμών και στην οικολογία του βυθού εν γένει
- Η βυθοκόρηση μια πολύπλοκη διαδικασία , η οποία απαιτεί την έδραση των στοιχείων της σήραγγας, αποτελεί ένα ιδιαίτερο οικολογικό ζήτημα. Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία βυθοκόρησης έχει εξελιχθεί , σε βαθμό τέτοιο που να μην επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό η ποιότητα του πυθμένα.
- Ένα σημαντικό πρόβλημα είναι η απομάκρυνση των υλικών βυθοκόρησης , τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν διατάραξη στην ποιότητα του

πυθμένα. Τα μολυσμένα υλικά πρέπει να απορρίπτονται , ενώ τα μη μολυσμένα υλικά μπορούν να επαναχρησιμοποιούνται στην κατασκευή του έργου.

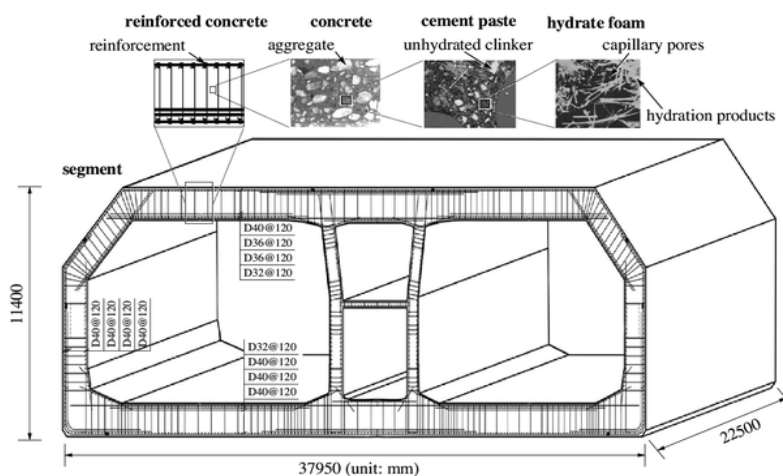
2.3 ΤΥΠΟΙ ΒΥΘΙΣΜΕΝΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥΣ

Η πρώτη κατηγορία επιτυθμένων σηράγγων είναι αυτές με **χαλύβδινο κέλυφος**. Στις Ηνωμένες Πολιτείες προτάθηκαν και αναπτύχθηκαν δύο είδη τέτοιων σηράγγων:

- Με διπλό χαλύβδινο κέλυφος
- Με μονό χαλύβδινο κέλυφος

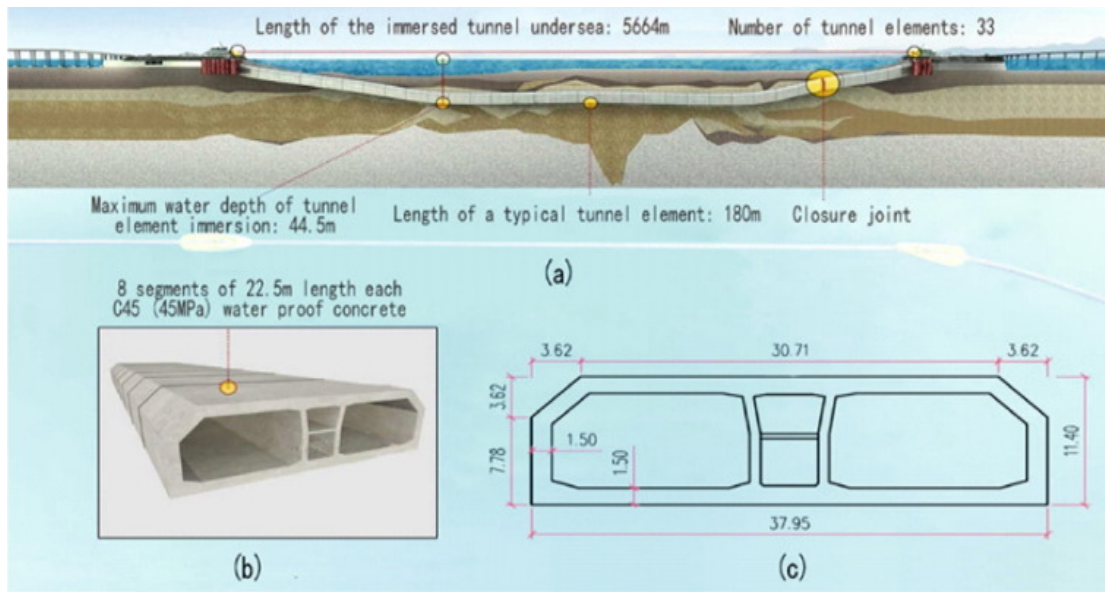
Η μέθοδος κατασκευής και στους δύο τύπους σήραγγας είναι παρόμοιος. Τα κελύφη από χάλυβα αρχικά κατασκευάζονται ως μικρότερα τμήματα ενός συνόλου και στην συνέχεια συγκολλούνται ως ένα ενιαίο κατασκευαστικό στοιχείο. Η διαδικασία κατασκευής πραγματοποιείται σε ναυπηγεία , για αυτό επιλέγεται η εφαρμογή αυτών των σηράγγων σε χώρες με ανεπτυγμένο αυτό τον τομέα., ώστε να αξιοποιούν τις εγκαταστάσεις τους για παραγωγή τεχνολογία και να αποφεύγονται οι εισαγωγές από το εξωτερικό.

Η πρώτη χαλύβδινη σήραγγα κατασκευάστηκε στον ποταμό Detroit με εφαρμογή και των δύο τύπων χαλύβδινης σήραγγας . Η δεύτερη σήραγγα που δημιουργήθηκε στο ίδιο μέρος είχε εξαγωνικό σχήμα, ένα σχήμα που χρησιμοποιείται ως αρκετά στις Ηνωμένες Πολιτείες. (Μάντη,2019)

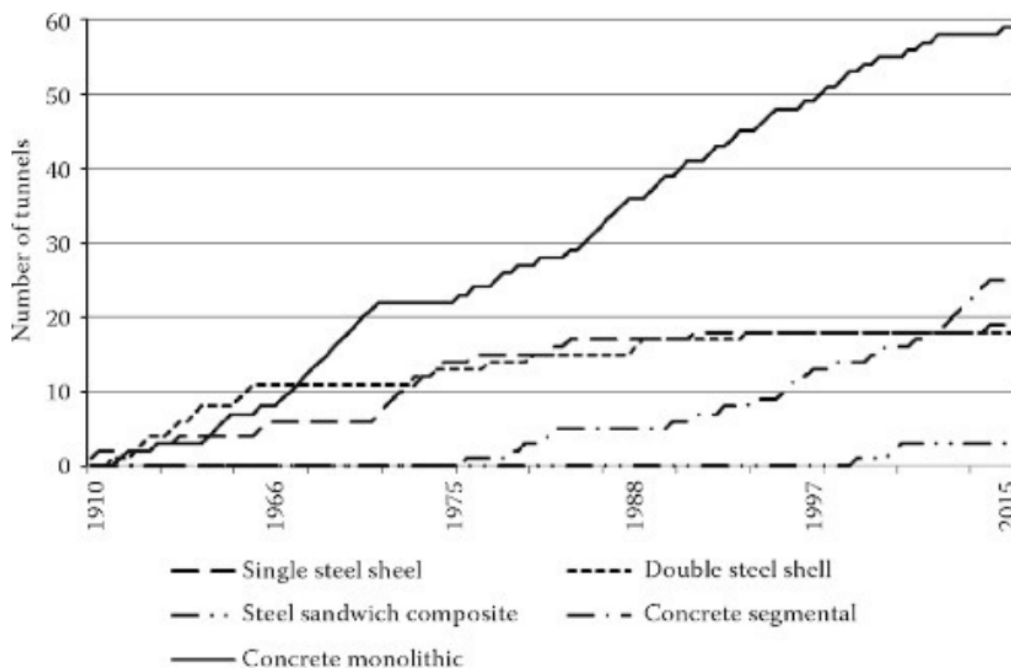


Σχήμα 2.3 Διατομή της χαλύβδινης επιτυθμένης σήραγγας Hong Kong-Zhuhai, by researchegate.net

Η δεύτερη κατηγορία επιυθμένων σηράγγων είναι αυτές από **σκυρόδεμα**. Μια τεχνική ιδιαίτερα δημοφιλής στην Ευρώπη, καθώς η εισαγωγή χάλυβα ήταν μια πολύ ακριβή διαδικασία. Αρχικά, η πρώτη επιυθμένη σήραγγα από σκυρόδεμα κατασκευάστηκε στην Γερμανία το 1927, μια τεχνική που αναπτύχθηκε από Ολλανδούς μηχανικούς, όταν θέλησαν να εφεύρουν μια εναλλακτική τεχνική σε σχέση με αυτή του χάλυβα. Αναπτύχθηκε η ορθογωνική διατομή, η οποία ήταν ικανή να αναλάβει φορτία υδροστατικής πίεσης. (Rasmussen, 1997)



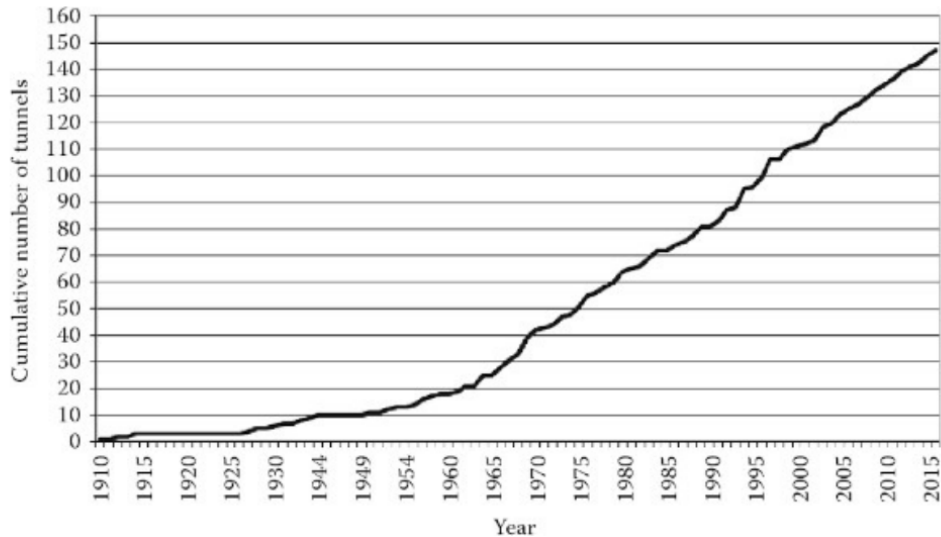
Σχήμα 2.4 Απεικόνιση μιας διατομής επιυθμένης σήραγγας από σκυρόδεμα, by sciencedirect.com



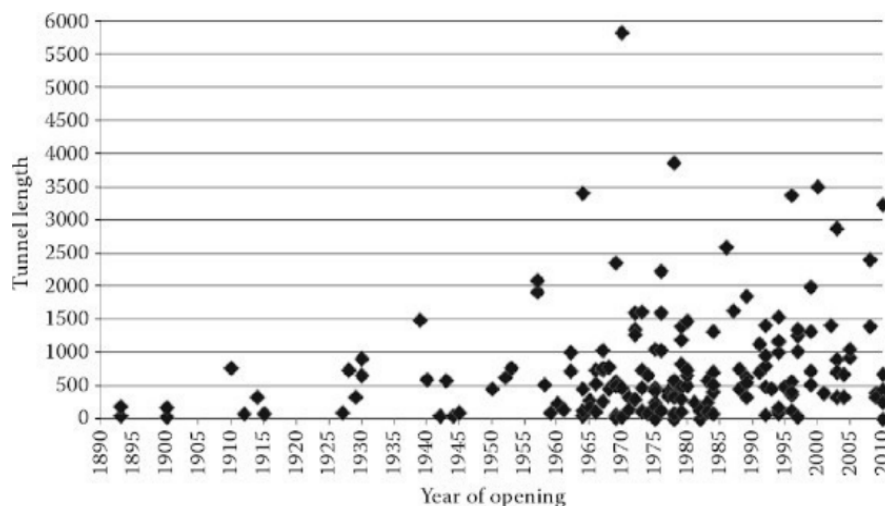
Σχήμα 2.5 Η κατασκευαστική τάση για κάθε είδος επιυθμένης σήραγγας, by Baber 2013

Κατασκευή και τεχνολογία επιυθμένων σηράγγων

Από το 1910 όπου κατασκευάστηκε η πρώτη επιυθμένα σήραγγα , χρειάστηκαν 35 έτη για να διπλασιαστεί ο ρυθμός κατασκευής τους. Η μόνη στασιμότητα υπήρξε την περίοδο 1944-1949, αφού στην συνέχεια ο ρυθμός ανάπτυξής τους ήταν ραγδαίος. Στο ακόλουθο διάγραμμα απεικονίζεται αυτή η σταδιακή κατασκευαστική ανάπτυξη (Μάντη,2019).



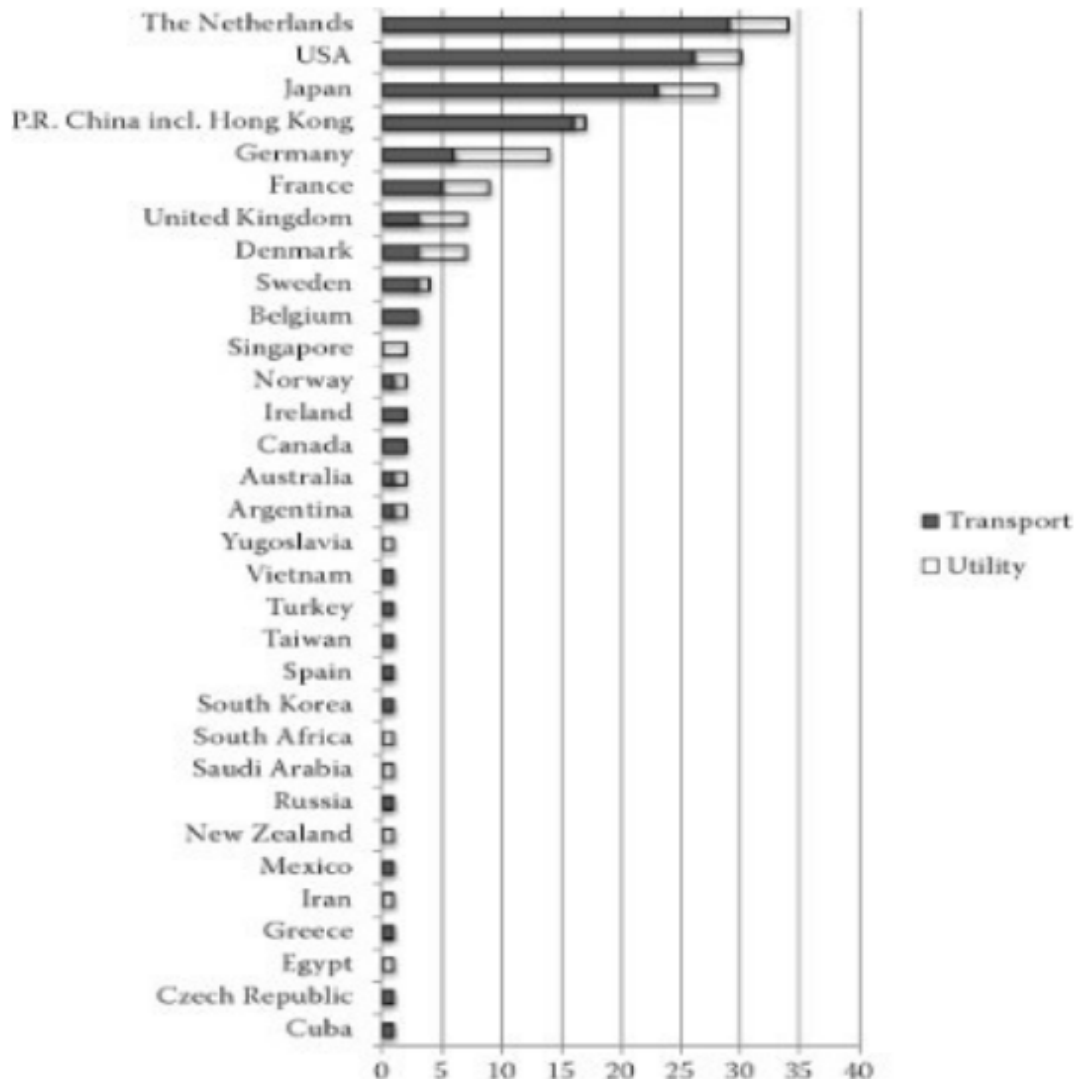
Σχήμα 2.6 Ρυθμός ανάπτυξης επιυθμένων σηράγγων ανά έτος, by Baber 2013



Σχήμα 2.7 Κατανομή του μήκους των επιυθμένων σηράγγων, by Baber 2013

Το μεγαλύτερο μέρος των επιυθμένων σηράγγων σε διεθνές επίπεδο κατέχουν οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Ολλανδία και η Ιαπωνία . Από το 2000 το κράτος της Κίνας και η αυτόνομη περιοχή του Χονγκ Κονγκ , κατασκεύασαν ένα μεγάλο πλήθος βυθισμένων σηράγγων. (Glerum, n.d.)

Κατασκευή και τεχνολογία επιτυθμένων σηράγγων



Σχήμα 2.8 Αριθμός επιτυθμένων σηράγγων ανά χώρα, by Baber 2013

3. ΑΡΧΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Παρότι οι τύποι επιπυθμένων σηράγγων είναι αρκετοί , η κύρια διαδικασία κατασκευής είναι η ίδια. Η μέθοδος κατασκευής μίας ή περισσότερων λεκανών χύτευσης (ή νηοδόχος) είναι γνωστή από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα και έχει καταστεί ως η βασική μέθοδος. Εκεί κατασκευάζονται τα στοιχεία της σήραγγας, το καθένα ξεχωριστά και πρόκειται για μία περιοχή κάτω από την στάθμη της θάλασσας, η οποία προστατεύεται με αναχώματα. Ο τρόπος που τοποθετείται η λεκάνη χύτευσης στην προεπιλεγθείσα περιοχή σχετίζεται κατά κύριο λόγο με την διαθεσιμότητα γης γύρω από το έργο και τον προγραμματισμένο χρόνο για την ολοκλήρωση αυτού. Οι βασικές προϋποθέσεις που πρέπει να έχει μια λεκάνη χύτευσης είναι (Μάντη,2019) :

- Χώρο για την κατασκευή των στοιχείων της σήραγγας και την χρήση μηχανικού εξοπλισμού κατασκευής.
- Ειδικά διαμορφωμένος χώρος πρόσβασης στα στοιχεία της σήραγγας και ειδικά περάσματα σε περίπτωση πλημμύρας της νηοδόχου.
- Ειδικά διαμορφωμένο βάθος μεταξύ του δαπέδου της λεκάνης χύτευσης και του σκελετού της σήραγγας κατά την διάρκεια επίπλευσης αυτών.
- Διαρκής ξηρή κατάσταση με αντλήσεις κατά την διάρκεια κατασκευής των στοιχείων της σήραγγας.



Σχήμα 2.9 Νηοδόχος της σήραγγας του Midtown , by roadbridges.com

Το κύριο πλεονέκτημα που διαθέτει η προκατασκευή στοιχείων σε μια νηοδόχο, σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη σηράγγων, είναι ότι τα δομικά αυτά στοιχεία κατασκευάζονται κάτω από ευνοϊκές συνθήκες . Στην περίπτωση των προκατασκευαστικών στοιχείων θα πρέπει να γίνονται διαρκείς έλεγχοι, όσον αφορά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, τον έλεγχο του βάρους των υλικών και η παροχή μιας καλά σχεδιασμένης υδατοστεγούς κατασκευής.

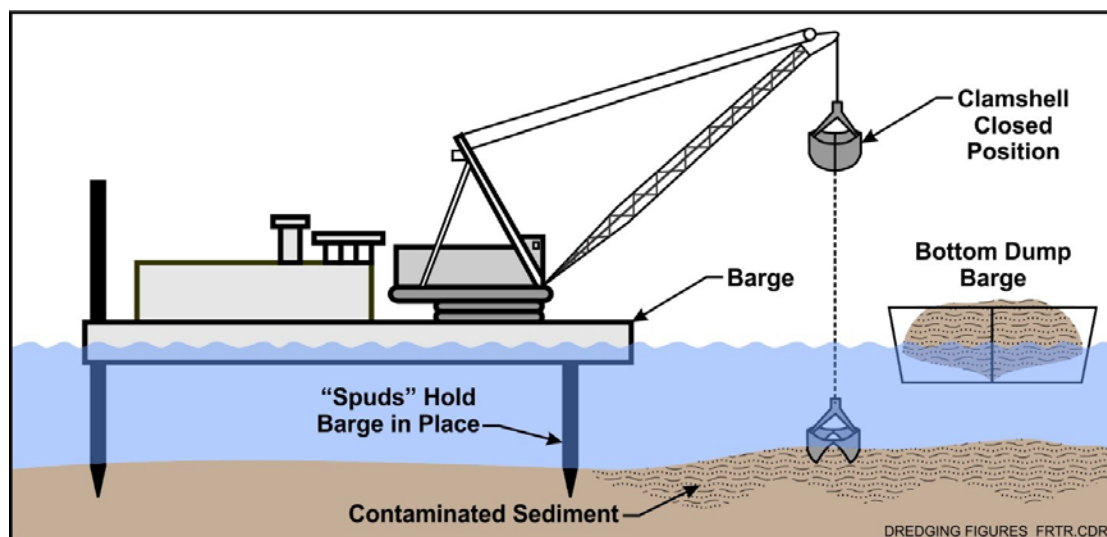
Τα δομικά στοιχεία της σήραγγας κατασκευάζονται στην ξηρά στους διαμορφωμένους ειδικούς διαμορφωμένους χώρους, τις λεκάνες χύτευσης, ενώ παράλληλα πραγματοποιείται η προετοιμασία του πυθμένα, όπου θα τοποθετηθούν τα μέρη της σήραγγας. Μια τάφρος σκάβεται μέσω μιας επίμονης διαδικασίας , η οποία ονομάζεται βυθοκόρηση, κατά την οποία το ανασκαφέν υλικό πρέπει να απομακρυνθεί με μεγάλη προσοχή ώστε να μην διαταραχθεί η ποιότητα και η οικολογία του πυθμένα. Κατά την διαδικασία της βυθοκόρησης μπορεί να περιλαμβάνεται θραύση και εκτόξευση βραχώδους μάζας. Οι βασικοί στόχοι της διαδικασίας της ανασκαφής είναι να περιλαμβάνει:

- Κατάλληλο χώρο για την τοποθέτηση της σήραγγας.
- Ένα ειδικά διαμορφωμένο υπόβαθρο άμμου και χαλικιού κάτω από το σώμα.
- Προστατευτικό κάλυμμα στις πλευρές και στην κορυφή της σήραγγας.

Σημαντικό μέρος της διαδικασίας είναι η τοποθέτηση θεμελίων για τα στοιχεία της σήραγγας στην περιοχή της βυθοκόρησης, όπως η κατασκευή χαλικοπασσάλων. Η μέθοδος θεμελίωσης συνάγεται από τις συνθήκες του υπεδάφους και τις δυναμικές φορτίσεις στις οποίες θα υπόκειται η σήραγγα. Στην περίπτωση την οποία το έδαφος είναι αρκετά μαλακό και δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί ασφαλής θεμελίωση, τότε θα πρέπει να αφαιρεθεί και να αντικατασταθεί με κατάλληλο υλικό.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό το οποίο θα πρέπει να συνυπολογιστεί στην διαδικασία βυθοκόρησης και προετοιμασίας του πυθμένα, είναι η όσον λιγότερο δυνατόν διατάραξη των ανώτερων στρωμάτων του πυθμένα, ώστε να αποφευχθεί η μεταβολή στα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους και κατά συνέπεια στην θεμελίωση της κατασκευής (Μάντη,2019).

Μπορεί η κατασκευή των δομικών στοιχείων της σήραγγας να μην είναι μια πολύ σύνθετη διαδικασία, ωστόσο η μεταφορά των στοιχείων αυτών, η βύθιση και η σύνδεσής τους αποτελεί μια αρκετά εξειδικευμένη διαδικασία. Αρχικά θα πρέπει να πληρωθεί η νηοδόχος με νερό, ώστε να μπορούν τα προκατασκευασμένα στοιχεία της σήραγγας να ρυμουλκηθούν και να μεταφερθούν στην θέση πόντισής τους. Η διαδικασία πλήρωσης της νηοδόχου μπορεί να πραγματοποιηθεί με μια διακοπή των αντλήσεων, η οποία όμως μπορεί να δημιουργήσει κατάρρευση στα πλευρικά μέρη της νηοδόχου, λόγω των αναβλυζόντων υδάτων και να γίνει αδύνατη η μεταφορά των στοιχείων. Για αυτό πλέον σχεδιάζονται ειδικές αντλίες, οι οποίες μεταφέρουν νερό από την θάλασσα στην νηοδόχο (Rasmussen, 1997).



Σχήμα 2.10 Απεικόνιση λειτουργίας μιας βυθοκόρου, by drtr.gov



Σχήμα 2.11 Διαδικασία πλήρωσης νηοδόχου της σήραγγας του Midtown, by btf-internasional.com

Τα προκατασκευασμένα στοιχεία της σήραγγας είναι σφραγισμένα με προσωρινά διαφράγματα, ώστε να μην εισρέει νερό κατά την διάρκεια της πόντισης τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επιπλέουν τα προκατασκευασμένα αυτά στοιχεία και για την βύθισή τους να χρησιμοποιείται μια ειδική διαδικασία πόντισης. Για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία πόντισης θα πρέπει να δημιουργηθεί βάρος επί των στοιχείων της σήραγγας για να υπερνικηθεί η άνωση. Η αρχική λύση στο πρόβλημα είναι η προσθήκη νερού στο εσωτερικό της σήραγγας και η αποβολή του μέσω ειδικών υδραντλιών. Έτσι επιτυγχάνεται η κατάλληλη πόντιση αλλά και η ανέλκυση των στοιχείων όταν αυτό απαιτείται. Στην συνέχεια η δεξαμενές αποβάλλουν το νερό και πληρώνονται με σκυρόδεμα, ώστε να παραμείνουν στην θέση σχεδιασμού.

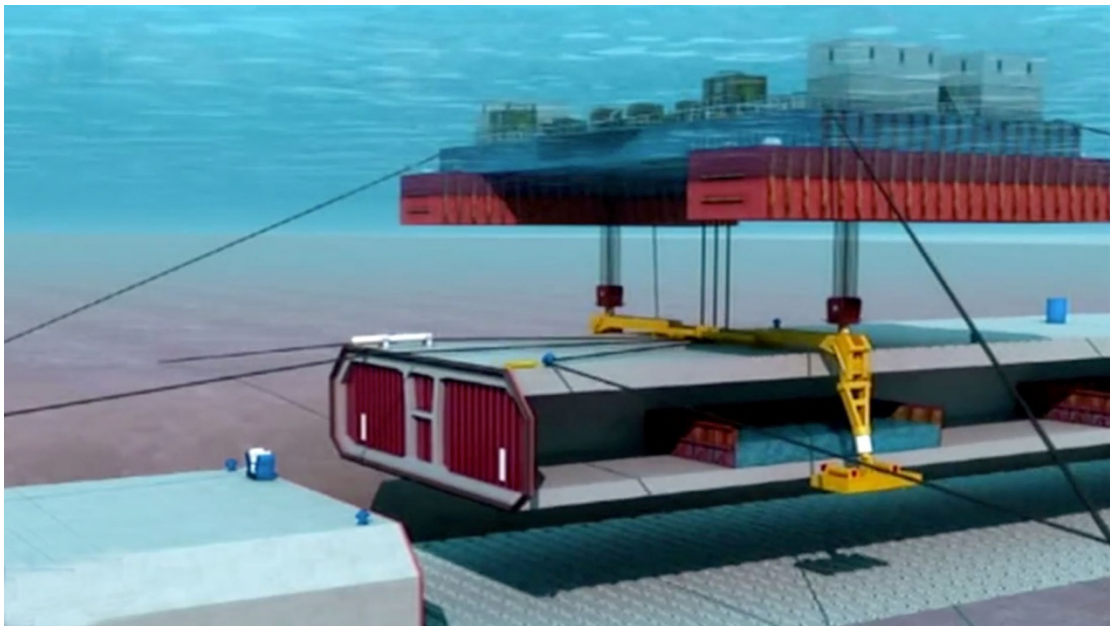
Για την μεταφορά των στοιχείων της σήραγγας από την νηοδόχο έως και το σημείο πόντισής τους, χρησιμοποιείται συνήθως ρυμούλκηση. Στην συνέχεια το ρυμουλκό θα μεταφέρει τα στοιχεία εκτός του διαύλου, όπου θα συνδεθούν με τα Catamaran, τα οποία με την σειρά τους θα τα οδηγήσουν στην θέση πόντισής τους. Στην θέση πόντισής τους τα στοιχεία οδηγούνται με την χρήση GPS και στην συνέχεια γεμίζουν η δεξαμενές πλήρωσης, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία πόντισης των στοιχείων της σήραγγας.

Το υπόστρωμα εδάφους(συνήθως χαλικιού) επί του οποίου θα τοποθετηθεί το στοιχείο της σήραγγας μετά την διαδικασία βύθισής του, έχει προετοιμαστεί εκ των προτέρων. Μόλις ένα προκατασκευασμένο στοιχείο ακουμπήσει το υπόστρωμα, τοποθετείται σε πάρα πολύ μικρή απόσταση από το προηγούμενο, ώστε να γίνει

εύκολη η διαδικασία συνένωσής τους. Αφού γίνει ο έλεγχος από εξειδικευμένους δύτες, ξεκινά η αφαίρεση αέρα από τον θάλαμο άρθρωσης, με την χρήση αντλιών. Λόγω της υψηλής υδροστατικής πίεσης που αναπτύσσεται, τα στοιχεία της σήραγγας κολλάνε με την βοήθεια ειδικών υδατοστεγών αρμών. Ως υλικό πλήρωσης χρησιμοποιείται το βυθοκορημένο υλικό ή κάποιο αμμοχάλικο καλής ποιότητας, το οποίο υλικό τοποθετείται στις πλευρές και στην κορυφή της σήραγγας, ώστε να πληρωθεί η τάφρος (Μάντη,2019)



Σχήμα 2.12 Ρυμούλκηση των στοιχείων της σήραγγας, by railsystem.net



Σχήμα 2.13 Διαδικασία πόντισης των στοιχείων της σήραγγας, by news.cgtn.com

3.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΠΙΠΥΘΜΕΝΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

3.2.1 Ενιαίο στοιχείο σκυροδέματος

Η αρχική και πιο απλή μορφή για μια επιπυθμένα σήραγγα είναι το μονολιθικό στοιχείο σκυροδέματος. Το τμήμα-στοιχείο της σήραγγας λειτουργεί ως συνεχής κατασκευή, το οποίο με την σειρά του λειτουργεί ως δεσμός. Για την καλύτερη προστασία του στοιχείου κατά την κατασκευή και την αποφυγή ρηγματώσεων, δημιουργείται με εξωτερική υδατοστεγής μεμβράνη. Το προκατασκευασμένο στοιχείο έχει συνήθως κατασκευαστεί από οπλισμένο σκυρόδεμα, αλλά αρκετές φορές για την αποφυγή των ρηγματώσεων χρησιμοποιείται και προεντεταμένο σκυρόδεμα. Ένα τυπικό στοιχεία αυτής της κατασκευαστικής μορφής έχει μήκος 100m με 200m και είναι κατασκευασμένο ως ένα συνεχές ενισχυμένο κιβώτιο. Το δάπεδο, οι εξωτερικοί τοίχοι και η οροφή έχουν συνήθως πάχος 1m. Η βάση, οι τοίχοι και η οροφή είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με ενισχύσεις σε όλο το μήκος και στις άκρες τους με αρθρώσεις.

Η μορφή της κατασκευής είναι ανελαστική, με αποτέλεσμα να δίνει την ευχέρεια στον κατασκευαστή να διαμορφώσει την γεωμετρία του στοιχείου, ανάλογα με τις ανάγκες του έργου, με αλλαγές στο πλάτος, το ύψος και αρκετές φορές και το μήκος. Η συνεχής κυβωτοειδής μορφή της κατασκευής, δίνει μια αρκετά καλή αντοχή ενάντια στις δυνάμεις που θα ασκηθούν στο σώμα κατά την διαδικασία ρυμούλκησης και τοποθέτησής του στο σημείο σχεδιασμού. Οι διατμητικές κλείδες των στοιχείων μεταφέρουν τις δυνάμεις διάτμησης στους δεσμούς, με σκοπό την μακροπρόθεσμη διατήρηση της ευθυγραμμείας του έργου. Συνήθως οι διατμητικές κλείδες είναι είτε χαλύβδινες είτε από οπλισμένο σκυρόδεμα. Για την ενίσχυση των δεσμών και υδατοπροστασία εφαρμόζονται χαλύβδινες ταινίες πλάτους 150mm γύρω από τους δεσμούς. Παρότι γίνεται χρήση συνδυασμού μεθόδων υδατοπροστασίας, είναι αρκετά πιθανόν να μην γίνει εντελώς υδατοστεγής ο δεσμός της κατασκευής.

Συνολικά η υδατοπροστασία σε ένα ανελαστικό στοιχείο της σήραγγας, γίνεται από έλεγχο ρηγμάτωσης κατά την διάρκεια κατασκευής του έργου, όπως είναι η θερμική ανάλυση και η ανάλυση τάσεων κατά την διάρκεια τοποθέτησης της υδατοστεγούς μεμβράνης στα εξωτερικά τοιχώματα της σήραγγας. Στα αρχικά στάδια τοποθετείται μια χαλύβδινη μεμβράνη πάχους 6mm. Τα χαλύβδινα φύλλα συγκολλούνται μεταξύ τους, αποτελώντας ένα ενιαίο σύνολο, το οποίο εφαρμόζεται στα εξωτερικά τοιχώματα του σκυροδέματος, με την χρήση διατμητικών καρφιών. Ο αριθμός των διατμητικών καρφιών προτείνεται να είναι μικρός. Σημαντικό επίσης είναι να μην υπάρχουν κενά μεταξύ των χαλύβδινων φύλλων, καθώς επίσης να λαμβάνονται μέτρα για την μη μακροπρόθεσμη οξείδωση της χαλύβδινης μεμβράνης από το θαλασσινό νερό (Μάντη,2019)

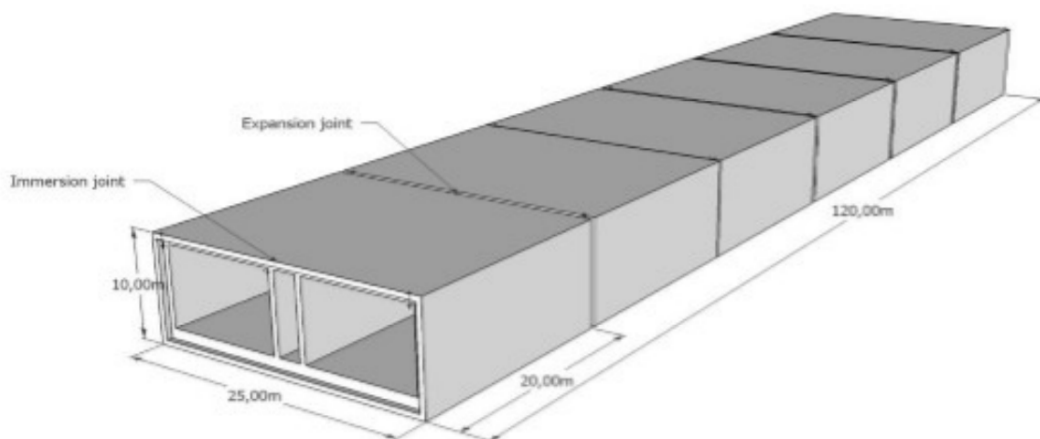
Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος της οξείδωσης , γίνεται χρήση ασφαλτώδους επικάλυψης ή εποξειδικής βαφής. Μια ακόμη λύση είναι η αύξηση του πάχους της μεταλλικής μεμβράνης , στην οποία αυτή λύση θα πρέπει να ελεγχθεί ο ρυθμός οξείδωσης της χαλύβδινης μεμβράνης. Σε αρκετές επιπυθμένες σήραγγες γίνεται χρήση πλαστικών μεμβρανών, μιας αρκετά συμφέρουσας οικονομικής λύσης, σε σχέση με αυτή των χαλύβδινων (Rasmussen, 1997).

3.2.2 Τμηματικό στοιχείο σκυροδέματος

Η κατασκευή και μέθοδος προκατασκευασμένων τμηματικών στοιχείων από σκυρόδεμα αναπτύχθηκε από την ανελαστική μέθοδο , για να αποφευχθεί η ανάγκη χρήσης υδατοστεγών μεμβρανών. Ένας από τους σημαντικότερους κινδύνους των ανελαστικών στοιχείων είναι η δημιουργία ρηγματώσεων και η πιθανή εισροή νερού στο εσωτερικό της σήραγγας. Για αυτό τον λόγο οι Ολλανδοί μηχανικοί θεώρησαν ότι εάν το ενιαίο στοιχείο αποτελείται από επιμέρους στοιχεία 22 με 25 μέτρων , αυτή η αστοχία του στοιχείου θα μπορούσε να αποφευχθεί. Ένα τυπικό στοιχείο σκυροδέματος 125m θα αποτελούταν από 5 επιμέρους τεμάχια των 25m. Η συνένωση αυτών των τεμαχίων πραγματοποιείται με κατά μήκος προένταση. Τα καλώδια προέντασης παραμένουν προσωρινά έως αυτά κοπούν μόλις γίνει η σύνδεση μεταξύ των δεσμών. Η συγκεκριμένη σύνδεση πραγματοποιήθηκε στην ζεύξη του Öresund, με κάθε στοιχείο 175 μέτρων, να αποτελείται από 8 επιμέρους ταμάχια. Αρκετοί ερευνητές μηχανική δεν επιλέγουν την συγκεκριμένη μέθοδο και προτιμούν την εφαρμογή της εξωτερικής μεμβράνης (Marshall, 2000).



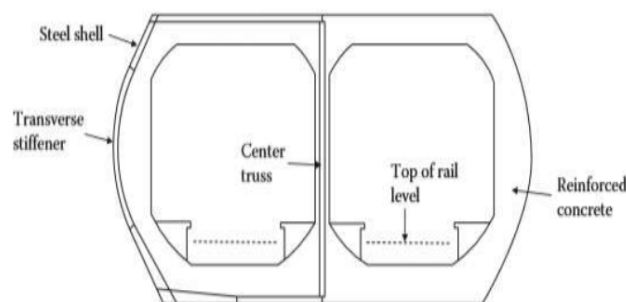
Σχήμα 3.1 Διατομή ενός ενιαίου στοιχείου και ενός τμηματικού, Oorsouw, 2010



Σχήμα 3.2 Τυπικό τμηματικό στοιχείο επιπυθμένης σήραγγας μήκους 125m, by Oorsouw, 2010

3.2.3 Σήραγγες με μονό χαλύβδινο κέλυφος

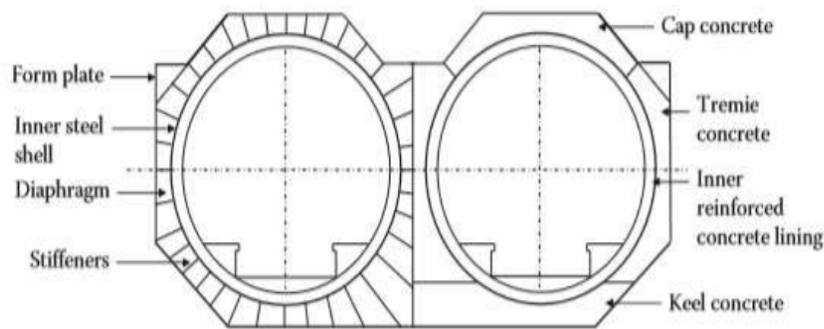
Τα στοιχεία από χάλυβα είναι πιο εύκολα στην κατασκευή σε σχέση με αυτά από σκυρόδεμα, αν και τα δύο αποτελούν δύο εφικτές κατασκευαστικές λύσεις. Τα χαλύβδινα στοιχεία είναι ανελαστικά. Συνήθως υπάρχουν αρθρώσεις μεταξύ των δεσμών των στοιχείων, οι οποίοι συγκολλούνται μεταξύ τους, ώστε να αποτελέσουν ένα ενιαίο σώμα. Ένα τυπικό στοιχείο αποτελείται από ένα χαλύβδινο κέλυφος πλάτους περίπου 10mm. Το χαλύβδινο κέλυφος που εφαρμόζεται προσφέρει αντοχή και υδατοστεγανότητα. Εντός του χαλύβδινου κελύφους τοποθετείται σκυρόδεμα πάχους 700mm. Ένα κυκλικό χαλύβδινο κέλυφος κατασκευάζεται για όλο το μήκος του προκατασκευασμένου στοιχείου. Στο εξωτερικό μέρος του στοιχείου τοποθετούνται διαφράγματα και εφαρμόζεται σκυρόδεμα μεταξύ του κυκλικού χαλύβδινου κελύφους και των διαφραγμάτων. Ο ρόλος του σκυροδέματος είναι να βοηθά την κατασκευή να αντιστέκεται στην άνωση, καθώς και να προστατεύει τα χαλύβδινα μέρη από την διάβρωση. Εσωτερικά του κελύφους εφαρμόζεται ενισχυμένο σκυρόδεμα για υψηλότερη αντοχή (Gursoy, n.d.).



Σχήμα 3.3 Διατομή μονού χαλύβδινου κελύφους της σήραγγας Cross Harbor στο Χόνγκ Κόνγκ, by Baber 2013

3.2.4 Σήραγγες με διπλό χαλύβδινο κέλυφος

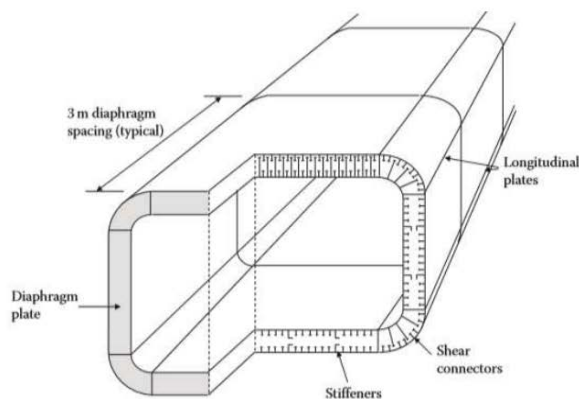
Ένα διπλό χαλύβδινο κέλυφος αποτελείται από δύο χαλύβδινα μέρη. Το εσωτερικό του κελύφους έχει πλάτος 8mm και προσφέρει αντοχή και υδατοστεγανότητα. Στην συνέχεια το χαλύβδινο κέλυφος ενισχύεται με σκυρόδεμα ώστε να λειτουργεί συνδυαστικά με αυτό. Γύρω από το εσωτερικό του κελύφους βρίσκεται ένα κιβώτιο με πάχος 6mm το οποίο πληρώνεται με σκυρόδεμα, για λόγους υδατοπροστασίας και αντοχής στην οξείδωση του χαλύβδινου μέρους. Το κιβώτιο και το εσωτερικό χαλύβδινο μέρος ενώνονται με εγκάρσιες διαφραγματικές πλάκες με σκοπό την ευστάθεια και αντοχή της κατασκευής (Μάντη,2019).



Σχήμα 3.4 Διατομή διπλού χαλύβδινου κελύφους, by Baber 2013

3.2.5 Σύνθετο κέλυφος χάλυβα και σκυροδέματος

Το κέλυφος αποτελείται από τον συνδυασμό δύο χαλύβδινων πλακών και ενός μη ενισχυμένου στρώματος σκυροδέματος. Γίνεται χρήση συνδετήρων διάτμησης, οι οποίοι συνδέονται με τις εσωτερικές επιφάνειες των χαλύβδινων πλακών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τμήμα να γίνεται αρκετά όλκιμο με υψηλή αντοχή, το οποίο μπορεί να παραλάβει ισχυρές εντάσεις, χωρίς να διαρρηχθεί. Οι σήραγγες από σύνθετα κελύφη έχουν αρκετά υψηλή εφελκυστική αντοχή, όντας ικανές να ανθίστανται σε δυναμικές φορτίσεις, όπως η σεισμικές δονήσεις. Έχουν δημιουργηθεί αρκετά υπολογιστικά μοντέλα για τον σχεδιασμό και τον έλεγχο των σύνθετων κελυφών, αφού αποτελούν μια πολύπλοκη κατασκευή.



Σχήμα 3.5 Διατομή σύνθετου κελύφους, by Baber 2013

Ο μεγαλύτερος κίνδυνος σε μια σήραγγα σύνθετου κελύφους είναι η πυρκαγιά, λόγω της εσωτερικής χαλύβδινης πλάκας. Αυτό θα οδηγούσε στην αστοχία της χαλύβδινης πλάκας και στην μείωση της αντοχής της κατασκευής, για αυτό συνήθως εφαρμόζεται ένα στρώμα πυροπροστασίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην προτιμάται η κατασκευή σύνθετου κελύφους σηράγγων. Στην μοναδική χώρα που συναντώνται σήραγγες τέτοιου τύπου είναι στην Ιαπωνία, οι σήραγγες Kobe και Naha.

Παρότι οι σήραγγες σύνθετου κελύφους έχουν εφαρμοστεί μόνο στην Ιαπωνία, έχουν μελετηθεί στα πλαίσια της σκοπιμότητας και για άλλες σήραγγες, όπως αυτή του Marmaçay στην Κωνσταντινούπολη, σε βάθος 50m, αφού οι σύνθετες σήραγγες έχουν αντοχή στις υδροστατικές πιέσεις και στις ισχυρές σεισμικές δονήσεις. Λόγω του υψηλού κόστους όμως και της δυσκολίας στην κατασκευή δεν εγκρίθηκε (Μάντη,2019) .

3.3 ΑΡΜΟΙ ΕΠΙΠΥΘΜΕΝΙΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Οι βυθισμένες σήραγγες απαρτίζονται από τα προκατασκευασμένα στοιχεία, τα οποία είναι συνδεδεμένα με αρμούς. Οι αρμοί θεωρούνται τα πιο ασταθή στοιχεία της σήραγγας, αφού δέχονται αρκετά περισσότερες παραμορφώσεις σε σχέσεις με άλλα μέρη της σήραγγας. Για αυτό είναι αναπόφευκτο ότι θα υπάρξει μια κατακόρυφη διαφορική καθίζηση μεταξύ των αρμών και των τμημάτων της σήραγγας. Αυτές οι παραμορφώσεις προκαλούνται από την αλληλεπίδραση της κατασκευής με το μαλακό έδαφος και κυρίως την διαφορική καθίζηση των θεμελίων σε σχέση με το έδαφος, τις βαριές αποθέσεις του εδάφους και το αυξανόμενο μήκος της σήραγγας. Η διαφορική καθίζηση στους αρμούς είναι αρκετά επιβλαβής για την ασφάλεια και την λειτουργία της σήραγγας. Η πλέον πιο διαδεδομένη μέθοδος που εφαρμόζεται για βυθισμένες σήραγγες είναι αυτή της ελαστικής δοκού θεμελίωσης (Elastic Foundation Beam Method), η οποία όμως δεν μπορεί να λάβει υπόψη της την διαφορική καθίζηση των αρμών (Peng Liu, 2020).

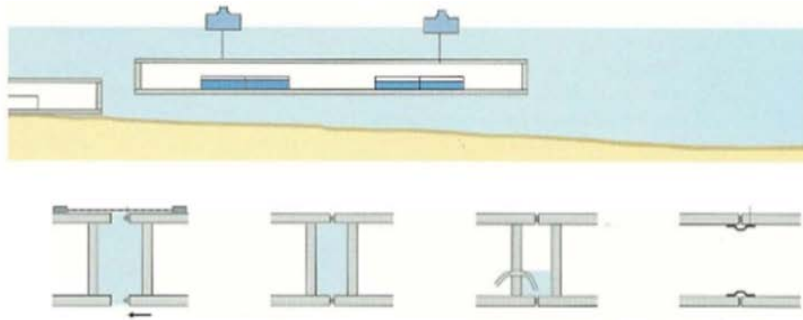
Υπάρχουν αρκετές κατηγορίες αρμών, οι οποία εφαρμόζονται στην κατασκευή μιας βυθισμένης σήραγγας, όπως:

- Αρμοί βύθισης μεταξύ των προκατασκευασμένων στοιχείων της σήραγγας.
- Αρμοί μεταξύ των τμημάτων ενός στοιχείου σκυροδέματος.
- Αρμοί που συναντώνται στα άκρα μιας επιπυθμένης σήραγγας , στην συνένωση της με της σήραγγα διάτρησης.
- Σύνδεσμοι κλεισίματος, οι οποίοι είναι οι τελευταίοι σύνδεσμοι που συναντώνται στο βυθισμένο τμήμα της σήραγγας.
- Σεισμικοί αρμοί, οι οποίοι εφαρμόζονται όταν η σήραγγα εδράζεται σε μία σεισμική περιοχή.

Η κύρια λειτουργία των αρμών είναι να αποτελούν ένα μηχανισμό σύνδεσης των στοιχείων, προστατεύοντας την σήραγγα από εισροές υδάτων. Οι αρμοί πρέπει να είναι σχεδιασμένοι, ώστε να προσδίδουν τέλεια υδατοστεγανότητα. Το κοινό στοιχείο όλων των αρμών είναι τα υψηλά πρότυπα κατασκευής, καθώς απαιτείται η αποτελεσματικότητα αυτών, σε όλη την διάρκεια ζωής του έργου. Αυτό δεν σημαίνει όμως ότι μπορεί να μην υπάρξουν διαρροές , οι οποίες όμως μπορούν να επιδιορθωθούν με ειδικά έργα (Μάντη,2019)

3.3.1 Αρμοί βύθισης

Οι αρμοί βύθισης (immersion joints) είναι βασικό τμήμα στην κατασκευή των επιπυθμένων σηράγγων. Περιέχουν στεγανοποιητικά παρεμβύσματα κατά την διάρκεια κατασκευής και μόνιμη στεγανότητα για την ολοκλήρωση της κατασκευαστικής διαδικασίας της σήραγγας. Οι αρχές λειτουργίας των αρμών είναι ίδιες για όλες τις κατηγορίες επιπυθμένων σηράγγων: χαλύβδινες, από σκυρόδεμα και σύνθετες.



Σχήμα 3.6 Αρμοί βύθισης βυθισμένων σηράγγων, Ridderkerk 2017

Στο εξωτερικό μέρος της σήραγγας εφαρμόζεται ένα συνεχές ελαστικό παρέμβυσμα, το οποίο καλείται πρωτεύον άκρο του στοιχείου. Το παρέμβυσμα είναι συνήθως ένα στοιχείο που ονομάζεται φλάντζα Gina (Gina Gasket), το οποίο αποτελείται από μίας χαμηλότερης ακαμψίας μύτη και από ένα υψηλότερης ακαμψίας σώμα. Στα αρχικά στάδια πόντισης της σήραγγας, κατά την διάρκεια σύνδεσης των στοιχείων η μαλακή μύτη έρχεται σε επαφή με την ακραία επιφάνεια του άλλου στοιχείου, πραγματοποιείται η αρχική σφράγιση του στοιχείου, καθώς και την τοπική αφυδάτωση του χώρου σύνδεσης. Τα άκρα της σήραγγας είναι εφοδιασμένα με διαφράγματα για να διατηρούν υδατοστεγή της σήραγγας, τα οποία τοποθετούνται λίγο πριν το κάθε άκρο. Κατά την διάρκεια της πρώτης έλξης των στοιχείων παγιδεύεται νερό στον χώρο μεταξύ των δύο διαφραγμάτων. Όταν τον νερό στην συγκεκριμένη περιοχή αφαιρείται, η πίεση μεταξύ των δύο διαφραγμάτων μειώνεται, αλλά η πίεση του νερού εξακολουθεί να ασκείται στο άκρο της σήραγγας. Η υδροστατική πίεση που ασκείται αναγκάζει το στοιχείο της σήραγγας να μετακινηθεί στο ακριβώς προηγούμενο και δημιουργεί μεγαλύτερη πίεση στο παρέμβυσμα Gina.

Για την κατάλληλη επιλογή του παρεμβύσματος Gina, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη:

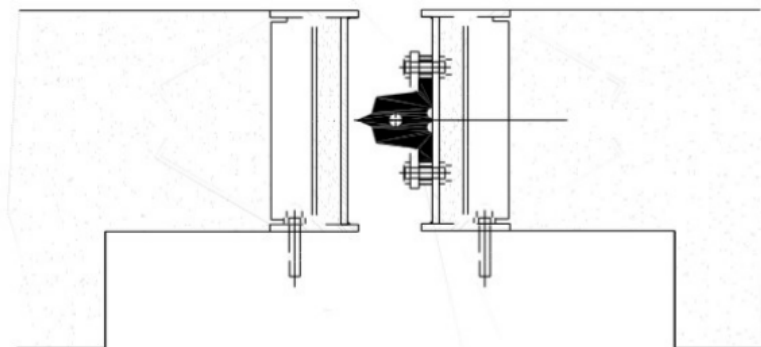
- Τα χαρακτηριστικά και οι τιμές των αρχικών και τελικών συμπίεσεων.

Κατασκευή και τεχνολογία επιπυθμένων σηράγγων

- Αλλαγές και ρυθμίσεις στην σφράγιση μέσα στον χρόνο των στοιχείων λόγω χαλάρωσης.
- Το μέγεθος της διατομής των στοιχείων.
- Το μήκος των στοιχείων της σήραγγας.
- Ακρίβεια τοποθέτησης των στοιχείων της σήραγγας.
- Επίδραση των τοπικών συνθηκών της σήραγγας.
- Σεισμική δραστηριότητα.



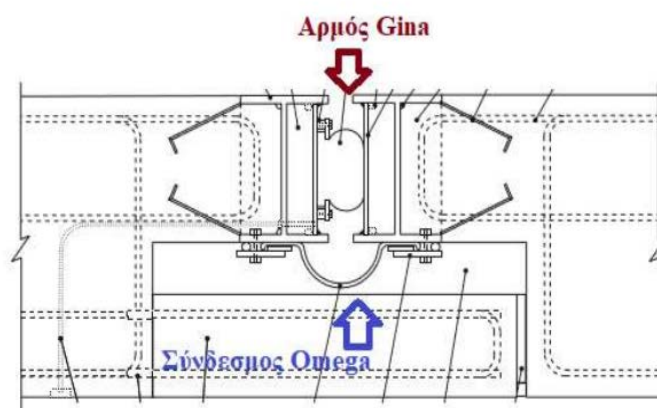
Σχήμα 3.7 Τοποθέτηση ελαστικών παρεμβυσμάτων στην άκρη ενός στοιχείου, by directindustry.com



Σχήμα 3.8 Απεικόνιση του συνδέσμου GINA, πριν την διασύνδεση δύο τμημάτων, by Riddekerk, 2007

Κατά την διαδικασία φινιρίσματος στον σύνδεσμο, εφαρμόζεται ένα δεύτερο παρέμβυσμα, του συνδέσμου Omega, στο εσωτερικό της φλάντζας Gina και της κατασκευής διατμητικών συνδετήρων, ώστε να αποφευχθεί η οριζόντια και κατακόρυφη μετατόπιση μεταξύ των στοιχείων της σήραγγας. Ο σύνδεσμος Omega, έχει την δυνατότητα να αντιστέκεται σε υψηλές υδροστατικές πιέσεις και σε μετακινήσει προς όλες τις κατευθύνσεις. Η χρήση γίνεται σε περιπτώσεις όπου αναμένονται μετακινήσεις, οι οποίες προκαλούνται συνήθως από θερμοκρασιακές μεταβολές, σεισμικά φορτία και καθιζήσεις του εδάφους. Πλέον μπορούν να προβλεφθούν τα ειδικά χαρακτηριστικά του συνδέσμου, ανάλογα με τις ανάγκες του έργου.

Οι σήραγγες σκυροδέματος περιλαμβάνουν τυπική διάταξη των δύο συνδέσμων, μιας πρακτικής που χρησιμοποιείται από το 1960, ως πιο βέλτιστη λύση για ισχυρότερη ασφάλεια. Οι χαλύβδινες σήραγγες έχουν ξεκινήσει να κατασκευάζονται με τους συγκεκριμένους τύπους παρεμβυσμάτων, σε σχέση με την παλαιότερη μέθοδο σύνδεσης, οι οποία περιελάμβανε μικρό ζεύγος ελαστικών παρεμβυσμάτων, ώστε να εξασφαλιστεί προσωρινή σφράγιση κατά την διάρκεια της διαδικασίας πόντισης και στην συνέχεια εφαρμοζόταν μια συγκολλημένη σύνδεση στους αρμούς (Μάντη, 2019).



Σχήμα 3.9 Τυπικός αρμός σύνδεσης, by Baber 2013

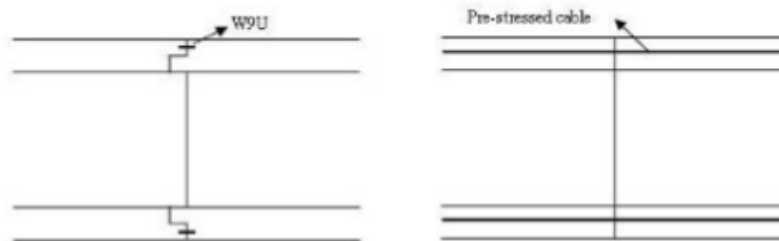
3.3.2 Αρμοί τμημάτων

Οι αρμοί τμημάτων (segment joints) είναι σύνδεσμοι που συναντώνται στα σημεία σύνδεσης μεταξύ των τμημάτων μιας σήραγγας. Αυτού του τύπου αρμός έχει τρεις βασικές λειτουργίες:

- Δίνει την δυνατότητα για διαφορετικές κινήσεις σε οριζόντιες και κατακόρυφες διευθύνσεις, καθώς και μια σχετική περιστροφή.

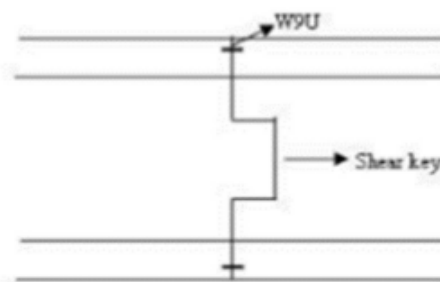
- Έχει την δυνατότητα να ανθίσταται στα στατικά και δυναμικά φορτία του περιβάλλοντος.
- Επαρκή υδατοστεγανώτητα.

Η μεταφορά των δυνάμεων συμπίεσης σε διαμήκη κατεύθυνση, πραγματοποιείται με την χύτευση των συνδέσμων με σκυρόδεμα. Η μεταφορά δυνάμεων σε διαμήκη κατεύθυνση μεταφέρεται δια μέσου προεντεταμένων καλωδίων, ενώ στην εγκάρσια κατεύθυνση μέσω του αρμού τμήματος, εφαρμόζοντας μια κλείδα διάτμησης. Η υδατοστεγανώτητα επιτυγχάνεται με την σφράγιση των τμημάτων. Στην διάρκεια μεταφορά των τμημάτων στην θέση πόντισης, ο αρμός διατηρείται άκαμπτος με την χρήση προεντεταμένων καλωδίων. Στις ολλανδικές σήραγγες τα καλώδια προέντασης, κόπτονται με την βύθιση των τμημάτων. Οι κινήσεις των τμημάτων τις σήραγγας είναι σχετικά μικρές και τα στοιχεία της σήραγγας μπορούν να παραμείνουν στεγανά. Στην ανακίνηση του εδάφους από σεισμικά φορτία, μπορεί να υπάρξει άνοιγμα στα σημεία των αρθρώσεων και να προκύψει διαρροή. Για να μην προκύψει μια τέτοια κατάσταση αστάθειας, τα καλώδια προέντασης διατηρούνται στην θέση τους και μετά την πόντιση τω στοιχείων της σήραγγας. Ο άκαμπτος αρμός τμήματος χρησιμοποιείται αρκετά στην Ιαπωνία.



Σχήμα 3.10 Ολλανδικός και Ιαπωνικός τύπος αρμού, by Oorsouw, 2010

Ακόμη ένας τύπου αρμού έχει προταθεί, όπου η δύναμη διάτμησης μεταφέρεται από το ένα μέρος στο άλλο, μέσω κλείδας διάτμησης στο ενδιάμεσο των τμημάτων. Έχει εφαρμοστεί στην επιτυθμένα σήραγγα Busan-Geoje Fixed Link στην Νότια Κορέα. (Oorsouw, 2010).

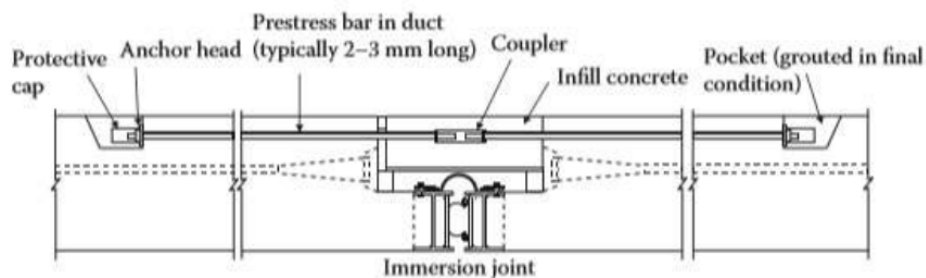


Σχήμα 3.11 Ενδιάμεσος αρμός τμήματος, by Oorsouw, 2010

3.3.3 Σεισμικοί αρμοί

Οι σεισμικοί αρμοί (Seismic joints) έχουν την ιδιότητα να διατηρούν την ακεραιότητα της σήραγγας μετά από ένα σεισμικό γεγονός. Σε μέτριες σεισμικές ζώνες οι κανονικές και τερματικές συνδέσεις συνήθως επαρκούς, αφού έχουν την δυνατότητα να επιτρέπουν την κίνηση προς όλες τις κατευθύνσεις. Σε υψηλές σεισμικές ζώνες, όπου τα σεισμικά φορτία είναι αρκετά μεγάλα, μπορεί να υπάρξει μια μετακίνηση τέτοια, όπου να μειωθεί το όριο υδατοστεγανότητας και πραγματοποιηθεί εισροή ύδατος εντός της σήραγγας. Σε αρκετές περιπτώσεις μπορούν να εφαρμοστούν σεισμικοί αρμοί σε όλες τις συνδέσεις βύθισης ή ακόμη μπορεί να χρειαστεί και μία σεισμική σύνδεση.

Σε περιπτώσεις υψηλής σεισμικής δραστηριότητας, όπου μπορεί να υπάρξει αστάθεια στο σημείο των αρμών, για την συγκράτηση της άρθρωσης γίνεται χρήση υψηλής εφελκυστικής αντοχής ράβδων ή καλωδίων. Η σύνδεση αυτή πραγματοποιείται μετά την πόντιση και τοποθέτηση των τμημάτων της σήραγγας. Στην αρχική τους θέση βρίσκονται σε μία εσοχή, ώστε να είναι υδατοστεγή και μετά την αφαίρεση των διαφραγμάτων, οι ράβδοι ή τα καλώδια τραβιούνται και συνδέονται σε κάθε πλευρά του τμήματος.



Σχήμα 3.12 Απεικόνιση διατομής σεισμικού αρμού, Baber 2013

Κατά την διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος, ο κόμβος μπορεί να συμπιεστεί, με αποτέλεσμα να υπάρξει δυναμική κρούση μεταξύ της ράβδου ή της πλάκας, για αυτό θα πρέπει τα σημεία των αρμών βύθισης στα οποία εδράζονται οι σεισμικοί αρμοί, θα πρέπει να λαμβάνονται ως ζώνες αγκύρωσης (Μάντη,2019).

4. ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

4.1 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Η σεισμική απόκριση των κατασκευών εντός της γεωμάζας, διαφέρουν αρκετά από αυτές που εδράζονται στην επιφάνεια της Γης. Οι κατασκευές στην επιφάνεια συμπεριφέρονται υπό την επίδραση των αδρανειακών δυνάμεων της ίδιας της κατασκευής. Για τα έργα εντός της γεωμάζας, οι δυνάμεις που επιδρούν είναι περισσότερο ως επιβολή μετακίνησης και λιγότερο αδρανειακής φύσης δύναμη. Η ένταση των αδρανειακών δυνάμεων είναι πολύ ισχυρότερες σε σχέση με αυτές που επιδρούν στο υπέδαφος. Η σεισμική απόκριση οποιασδήποτε κατασκευής, εξαρτάται από την απόκριση του ίδιου του περιβάλλοντος. Σημαντική παράμετρος είναι οι μετακινήσεις ελεύθερου πεδίου και η σχέση των παραμορφώσεων μεταξύ αυτών της σήραγγας και του εδάφους.

Επειδή στις σήραγγες, όπως και στις γέφυρες η χαρακτηριστική διάσταση είναι το μήκος, θα πρέπει να λαμβάνεται ως παράμετρος η χωρική μεταβλητότητα, η οποία έχει σημαντική θέση στον αντισεισμικό σχεδιασμό της κατασκευής. Οι παράγοντες που προκαλούν την χωρική μεταβλητότητα είναι:

- Η διάδοση των σεισμικών κυμάτων εντός του εδάφους.
- Η σεισμική πηγή, όταν εκείνη εκκινείται σε μεγάλη κλίμακα.
- Η ανομοιογένεια του εδάφους

Το μέγεθος της χωρικής μεταβλητότητας μειώνεται με την απόσταση από την σεισμική πηγή, καθώς και για υψίσυχνες κινήσεις (Hwang & Lysmer, 1981).

Η σεισμική επίδραση στα υπόγεια έργα, είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με αυτή στα έργα στην επιφάνεια της Γης. Κάποιες από τις ιδιότητες των υπόγειων έργων είναι :

- Η πιθανότητα εμφάνισης βλαβών σε ένα έργο από την επίδραση ενός σεισμού μειώνεται, όσο αυξάνεται το βάθος του έργου.
- Τα υπόγεια έργα εντός εδαφικών σχηματισμών έχουν μεγαλύτερη ευαλωτότητα σε σχέση με εκείνα εντός βραχωδών σχηματισμών.
- Τα υπόγεια ανοίγματα με επένδυση εντός βραχωδών σχηματισμών είναι ασφαλέστερα σε σχέση με αυτά που δεν έχουν, ακόμη και όταν αυτά έχουν διανοιχθεί σε υγιή βράχο.

- Ο βαθμός βλαβών από σεισμό μειώνεται όταν ο σχηματισμός εξυγιαίνεται στην περιοχή του ανοίγματα και βελτιώνεται η συνοχή του εδάφους (συνήθως με ενεμάτωση).
- Η ευστάθεια βελτιώνεται σε σχέση με την συμμετρική κατανομή των δυνάμεων επί του έργου, οι οποίες ενισχύουν την συνοχή μεταξύ γεωσχηματισμού και κατασκευής.
- Η ενίσχυση μόνο με επένδυση, χωρίς ενισχυτικές διεργασίες στον γεωσχηματισμό, μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερες βλάβες κατά την διάρκεια ενός σεισμικού συμβάντος.
- Η καταπόνηση του έργου και οι παρεπόμενες βλάβες σχετίζονται με την σεισμική επιτάχυνση και ταχύτητα.
- Ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει την συμπεριφορά και την παραμόρφωση των υπογείων έργων είναι η διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος και οι κύκλοι φόρτισης.
- Σε ευάλωτες ζώνες, οι υψίσυχνες σεισμικές καταπονήσεις μπορεί να οδηγήσουν σε απόσχιση βραχωδών τεμάχων και επένδυσης.
- Μπορεί να υπάρξει ενίσχυση της σεισμικής κίνησης, όταν το μήκος μια σήραγγας είναι το 25% έως το 100% του μήκους του σεισμικού κύματος.
- Συνήθως, τα στόμια των σηράγγων είναι ευάλωτα, λόγω της αστάθειας των πρανών.
- Οι σήραγγες ανοικτής εκσκαφής είναι περισσότερο ευάλωτες στις καταπονήσεις σε σχέση με τις υπόγειες (Youssef M.A.Hashasha, 2001).

Σημαντικό εργαλείο στον αντισεισμικό σχεδιασμό των υπογείων έργων είναι η σεισμοτεκτονική έρευνα της περιοχής σχεδιασμού. Ο προσδιορισμός πιθανής εμφάνισης διάρρηξης του εδάφους είναι ύψιστης σημασίας, κυρίως σε περιοχές όπως η Ελλάδα, όπου ο βαθμός σεισμικότητας είναι αρκετά μεγάλος. Ο βαθμός βλαβών στις κατασκευές, όσο και οι αστοχίες των βραχωδών γεωσχηματισμών εξαρτάται από την θέση, το μέγεθος και την κατανομή των επιφανειακών ρωγμών, οι οποίες μελετώνται μέσα από τις σεισμοτεκτονικές έρευνες και τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των ρηγμάτων (Τσιαμπάος, 2012).

Μέχρι και τα τελευταία τεχνικά δεδομένα, καμία επιτυθμένα σήραγγα δεν έχει υποστεί διάρρηξη σεισμικού ρήγματος. Παρόλα αυτά διαθέτουμε δεδομένα σεισμικής απόκρισης βυθισμένων σηράγγων ,οι οποίες έχουν υποβληθεί σε σεισμική ταλάντωση. Οι σήραγγες Bay Area Rapid Transit (BART) στην Καλιφόρνια και Osaka South Port στην Ιαπωνία είναι δύο από τις σήραγγες οι οποίες έχουν υποβληθεί σε αυτές τις σεισμικές δονήσεις , με αρκετά καλή απόκριση (Μάντη,2019) .

4.2 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΕΠΙΠΥΘΜΕΝΙΩΝ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

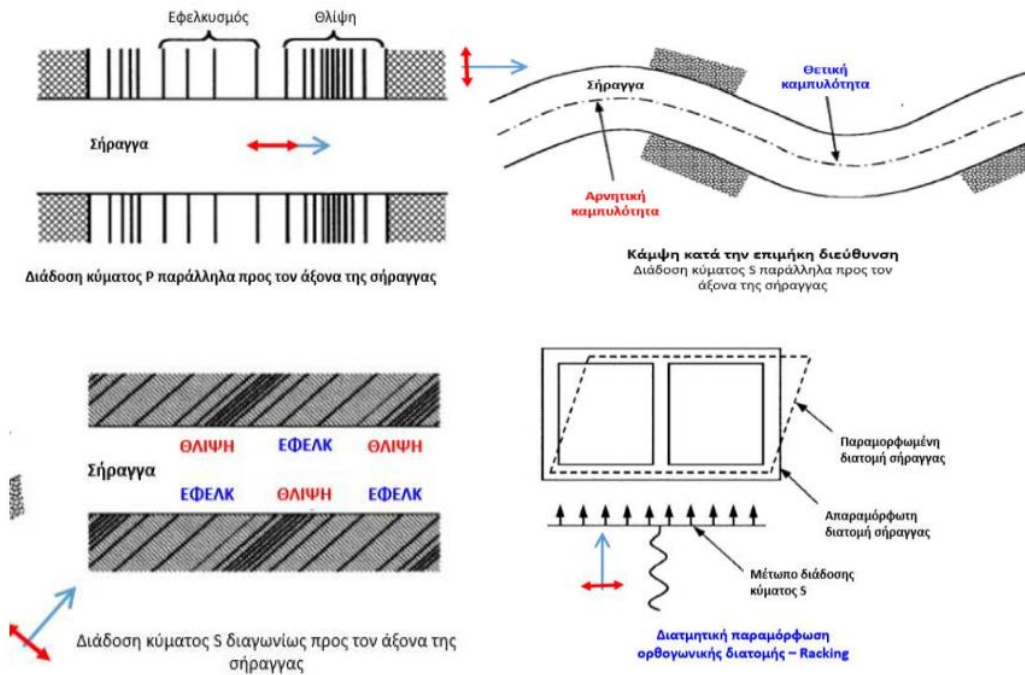
Οι σήραγγες αυτού του τύπου είναι συνήθως ρηχές και θεμελιώνεται επάνω σε μαλακά εδάφη. Επειδή έχουν σχετικό μικρό βάθος, δέχονται μεγαλύτερες καταπονήσεις σε σχέση με αυτές που έχουν κυκλική διατομή. Οι ορθογωνικές σήραγγες λειτουργούν περισσότερο σε κάμψη, ενώ οι κυκλικές μεταφέρουν φορτία μέσω αξονικών θλιπτικών δυνάμεων. Οι υποθαλάσσιες σήραγγες σε μικρά βάθη λειτουργούν ως εγκιβωτισμένα επιφανειακά θεμέλια. Ο αντισεισμικός σχεδιασμός πραγματοποιείται για τρεις τύπους παραμόρφωσης:

- Αξονικές εφελκυστικές και θλιπτικές παραμορφώσεις του άξονα της σήραγγας εξαιτίας της σεισμικής μετακίνησης κατά τη διεύθυνση του άξονα της σήραγγας.
- Καμπτικές παραμορφώσεις εξαιτίας της κάμψης του άξονα προερχόμενες από σεισμικές μετακινήσεις κάθετες προς τον άξονα της σήραγγας.
- Στρέβλωση της κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής, λόγω της κατακόρυφης διάδοσης των διατμητικών κυμάτων.

Δύο βασικοί παράμετροι που εγκύπτουν κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό και οι οποίοι καθορίζουν την μέθοδο και το κόστος κατασκευής είναι:

- Η μέγιστη εφελκυστική τάση, η οποία προκαλείται από τον σεισμό σχεδιασμού στα μέρη της σήραγγας και η οποία καθορίζει το αναγκαίο επίπεδο προέντασης με σκοπό να αποφευχθεί η αποσύνδεση των αρμών μεταξύ των επιμέρους σπονδύλων.
- Η παραμόρφωση των εύκαμπτων αρμών μεταξύ των τμημάτων της σήραγγας.

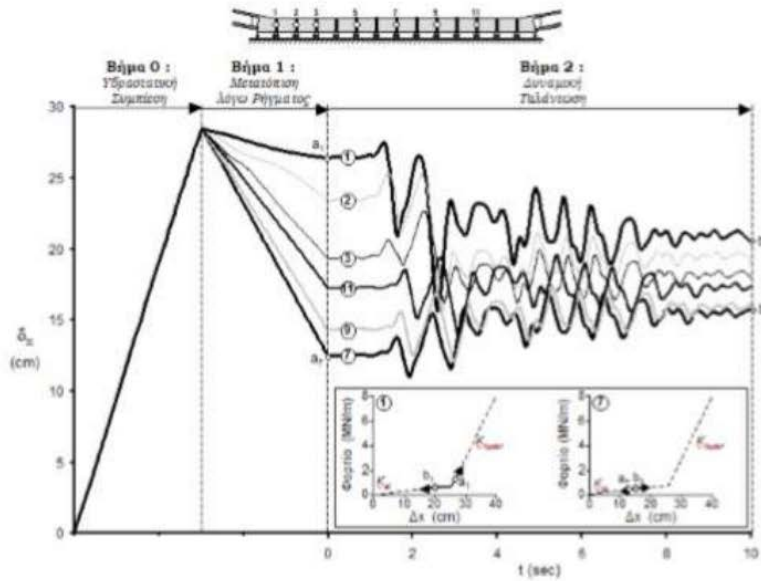
Κατασκευή και τεχνολογία επιτυθμένων σηράγγων



Σχήμα 4.1 Απεικόνιση των μετακινήσεων ελεύθερου πεδίου και η σχέση με την σεισμική απόκριση των έργων, by Χατζηγαγός, 2017

Η διαμήκης δυναμική παραμόρφωση των αρμών βυθίσεως εξαρτάται από το μήκος των επιμέρους στοιχείων και από το πάχος των παρεμβυσμάτων Gina. Λόγω των δύσκαμπτων παρεμβυσμάτων Gina, οι δυνάμεις παραμόρφωσης απορροφώνται κυρίως από τους αρμούς. Οι διάφορες μετακινήσεις και καθιζήσεις που συμβαίνουν κατά την διάρρηξη ενός ρήγματος θα δημιουργήσουν αποσυμπίεσεις σε αρκετούς αρμούς, με αποτέλεσμα να δυνάμεις εφελκυσμού στο σκυρόδεμα και να εμφανιστούν ρωγμές. Η ανάπτυξη αυτών των ρωγμές έχει επίδραση στην στεγανότητα της κατασκευής. Για αυτό τον λόγο θα πρέπει να πραγματοποιείται ιδιαίτερη μελέτη στην αποσυμπίεση των αρμών (Μάντη,2019).

Μετά από αρκετά σεισμικά γεγονότα, τα τμήματα των σηράγγων τείνουν να επαναδιευθετηθούν από την αρχική θέση, ολισθαίνοντας προς τον πυθμένα με διαμήκη προσανατολισμό. Αυτή η διαδικασία ανακατανέμει τις δυνάμεις που δέχονται οι αρμοί. Αυτή η συμπεριφορά της σήραγγας οφείλεται στην υπερελαστικότητα των παρεμβυσμάτων (Γκαζέτας, 2008).



Σχήμα 4.2 Διαμήκης παραμόρφωση των αρμών για σήραγγα με τεμάχια μήκους 70 m, ελαστικό παρέμβυσμα Τύπου Β, και 5 mm διάκενο στις διατμητικές κλειδές, υποβαλλόμενη σε διάρρηξη στην θέση 2 (μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση) και επακόλουθη σεισμική δόνηση, by Γιώργος Γκαζέτας, 2008

4.3 ΑΝΥΨΩΣΗ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΛΟΓΩ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Οι επιτυθμένες σήραγγες ελαφριάς κατασκευής παρατηρήθηκαν ότι έχουν υποστεί ανύψωση λόγω της ρευστοποίησης του εδάφους στο οποίο εδράζονται, από τις σεισμικές δονήσεις, τις οποίες έχουν υποστεί. Διαθέτουμε αρκετές καταγραφές σηράγγων που έχουν υποστεί ανύψωση σε ρευστοποιημένα εδάφη. Μια χαρακτηριστική καταγραφή είναι αυτή του Seed(1967), για ανύψωση πάνω από πέντε μέτρα σε υπόγεια δεξαμενή, μετά από σεισμό μεγέθους 7,3R στην περιοχή της Νιγκάτα της Ιαπωνίας το 1964. Γενικότερα στην Ιαπωνία έχουν καταγραφεί ανυψώσεις αγωγών και φρεατίων, μετά από διάφορα σεισμικά συμβάντα. Οι ερευνητές έχουν αποφανθεί ότι αυτή η ανύψωση έχει άμεση συσχέτιση με την ρευστοποίηση του εδάφους. Ένα πρόσφατο παράδειγμα είναι αυτό της γέφυρας George Massey στον Καναδά. Πειράματα σε συσκευή φυγοκέντρισης που πραγματοποιήθηκαν στο πανεπιστήμιο RPI, απέδειξαν την ανύψωση 20cm σε σήραγγα, με σεισμό προσομοίωσης 0,17g επιτάχυνσης. Ένα από τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν είναι ότι η χρήση χαλικοπασάλλων μπορεί να βελτιώσει αρκετά την ποιότητα εδάφους.

Στην βιβλιογραφία έχει γίνει αναφορά στο γεγονός ότι η ανύψωση υπογείων έργων, επιφέρει και μετατοπίσεις στο σύνολο της κατασκευής. Η μελέτη της τρωτότητας σε ανύψωση ήταν επίσης σημαντική για την υποθαλάσσια σιδηροδρομική σήραγγα του BART, μήκους 5.8 km, η οποία έχει κατασκευαστεί εντός υψηλής ζώνης

σεισμικότητας στο Σαν Φρανσίσκο της Καλιφόρνιας. Ο σκοπός αυτής της μελέτης ήταν ο υπολογισμός πιθάνων ανυψώσεων, μέσω της χρήσης δυναμικών αριθμητικών μοντέλων, καθώς και δύο πειραματικές δοκιμές στην συσκευή φυγοκέντρισης στο πανεπιστήμιο του Ντέιβις (Μάντη Βασιλική Παρασκευή, 2019) .

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ο μηχανισμός ανύψωσης, σε σχέση με το μικρό πάχος του ρευστοποιημένου εδάφους, εμφανίζει περιορισμό ως προς τις μετακινήσεις σε μερικά εκατοστά. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με παλαιότερες εκτιμήσεις ,ότι η ρευστοποίηση του εδάφους επιφέρει μεγάλες μετακινήσεις. Τα αποτελέσματα των ερευνών έχουν βοηθήσει στην γενικότερη κατανόηση των μηχανισμών δράσης, καθώς και να μειωθεί το κόστος βελτίωσης (Τραβασάρου, 2008).

5. ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΥΘΜΕΝΙΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

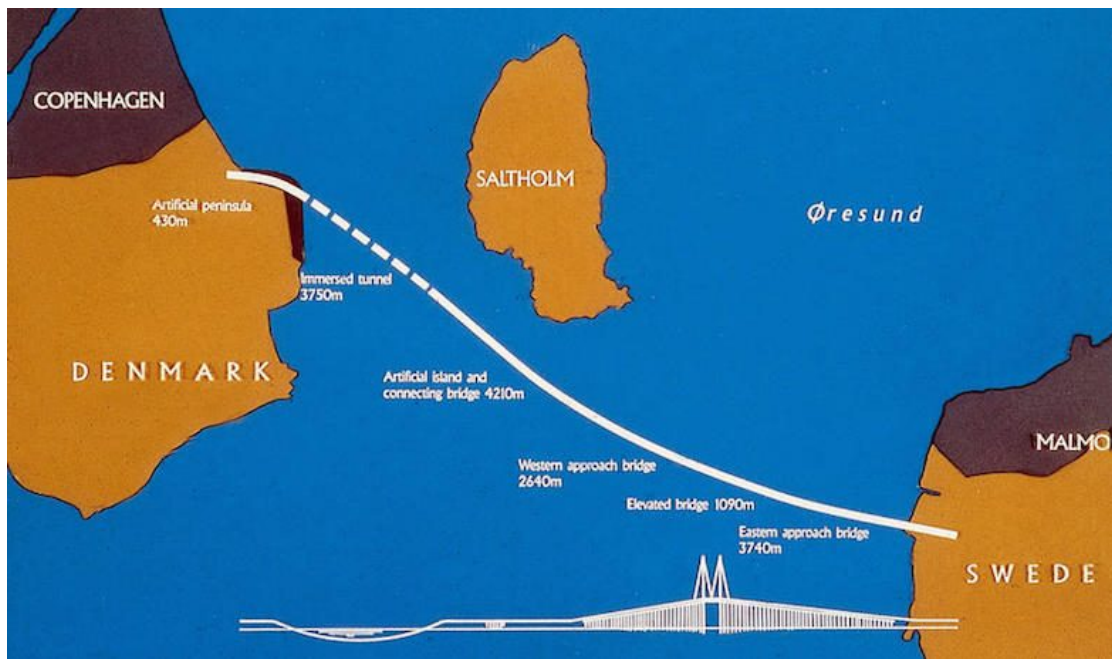
5.1 ΣΗΡΑΓΓΑ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ ØRESUND

Η υποθαλάσσια σύζευξη Δανίας-Σουηδίας αποτελεί μια ιδιαίτερη περίπτωση οδικής σύνδεσης, η οποία με μήκος 16km συνδέει την Κοπεγχάγη με την πόλη Malmö της Σουηδίας. Ο σχεδιασμός ξεκίνησε από τον George K.S. Rotne και η λειτουργία της σήραγγας ξεκίνησε την 1^η Ιουλίου του 2000. Από της αρχές του περασμένου αιώνα η μεταφορά επιβατών και εμπορευμάτων αποτελούσε ιδιαίτερο πρόβλημα για τις δύο χώρες, με αποτέλεσμα να διερευνηθούν οι τρόποι σύνδεσης των δύο αυτών περιοχών. Λόγω της έλλειψης χρηματοδότησης από τα δύο κράτη, δεν διενεργήθηκαν προσπάθειες για την υλοποίηση του έργου. Πλέον μια διαδρομή με τρένο εν μέσω της σύζευξης διαρκεί 35 λεπτά, ενώ η μετακίνηση με αυτοκίνητο διαρκεί μόλις λίγα λεπτά (Lykke, 1997).

Το έργο αποτελείται από τρία κύρια μέρη: μία γέφυρα, ένα τεχνητό νησί και μία υποθαλάσσια σήραγγα. Αυτή η επιλογή προτιμήθηκε λόγω της πολύ κοντινής απόστασης του αεροδρομίου της Κοπεγχάγης από το σημείο του έργου, καθώς μια γέφυρα μεγάλου μήκους θα εμπόδιζε την εναέρια κυκλοφορία. Η γέφυρα του Øresund αποτελεί το μισό μήκος του έργου, με χαρακτηριστικό μήκος 8km. Οι βασικές δομές τις γέφυρας έχουν κατασκευαστεί στην ξηρά και στην συνέχεια ρυμουλκήθηκαν, με εξαίρεση δύο σημεία στα οποία πραγματοποιήθηκε χύτευση στα επί τόπου αυτά σημεία σχεδιασμού. Η κατάληξη της γέφυρας φτάνει στο τεχνητό νησί Reberholm, το οποίο βρίσκεται περίπου στα μέσα της διαδρομής. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του τεχνητού νησιού, ως επί το πλείστον ήταν το βυθοκορημένο εδαφικό υλικό, το οποίο εκσκάπτηκε από την περιοχή που στην συνέχεια θα εδράζονταν τα προκατασκευασμένα στοιχεία της σήραγγας. Κατά την διαδικασία της κατασκευής του έργου υπήρξε μια ιδιαίτερη βιολογική έρευνα, λόγω του εντοπισμού περισσότερων από 500 είδη φυτών. Η σήραγγα του Drogden που ακολουθεί, εκτίνεται σε μήκος 4km, με ορθογωνική τετρακυψελική διατομή και αποτελείται από προκατασκευασμένα στοιχεία που σχεδιάστηκαν και τοποθετήθηκαν με βάση τις αρχές των επιπυθμένων σηράγγων (Marshall, 2000).



Σχήμα 5.1 Αεροφωτογραφία της γέφυρας του Øresund, by Wikipedia



Σχήμα 5.2 Οριζοντιογραφία της σύνδεσης του Øresund, by vinci-construction-projects.com

5.2 Η ΣΗΡΑΓΓΑ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ SHEN ZHONG

Η σύνδεση της σήραγγας του Shen Zhong στην νότια Κίνα θα βρίσκεται περίπου 38km από τον σύνδεσμο Χονγκ Κονγκ- Ζουχάι-Μακάο και θα συνδέει τις πόλεις Shenzhen και Zhongshan. Ο σύνδεσμος θα έχει μήκος 24km με κόστος 4,83 δις δολάρια και θα περιλαμβάνει δύο γέφυρες, δύο τεχνητά νησιά και μία επιπυθμένα σήραγγα, η οποία θα είναι και η πιο διαπλατυσμένη επιπυθμένα σήραγγα στον

κόσμο. Το έργο θα αποτελέσει ένα από τα σημαντικότερα έργα που θα έχουν πραγματοποιηθεί με τεχνητά νησιά τα οποία θα περιλαμβάνουν εγκαταστάσεις συνεδρίων, γραφείων και εστιατορίων 15.000 τετραγωνικών μέτρων καθώς και χώρους περιπάτου (Vejrum, 2015).

Η σήραγγα θα περιλαμβάνει 31 προκατασκευασμένα στοιχεία μήκους 185m με πλάτος 70m με δύο χώρος κυκλοφορίας. Το συνολικό μήκος της σήραγγας θα είναι 5,25km και τα βαθύτερα σημεία θα βρίσκονται στα 35m. Η συγκεκριμένη σήραγγα θα είναι η πρώτη εξ ολοκλήρου από χάλυβα στην Κίνα, καθώς επίσης προτάθηκε αντικατάσταση σε κάποια σημεία του εδάφους από καλά συμπυκνωμένη άμμο (TEC, 2015).



Σχήμα 5.3 Φωτορεαλιστική προσέγγιση της σύνδεσης Shen Zhong, by roadtraffic-technology.com

5.3 Η ΣΗΡΑΓΓΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ FEHMARN BELT FIXED

Είναι ένα από τα σημαντικότερα έργα που έχουν δρομολογηθεί, με σκοπό την σύνδεση των Σκανδιναβικών χωρών με την κεντρική Ευρώπη και πιο συγκεκριμένα την σύζευξη της Δανίας με την Γερμανία. Η έναρξη των εργασιών ξεκίνησαν το 2021 και θα ολοκληρωθούν το 2029. Μετά την πραγματοποίηση του έργου ο χρόνος Κοπεγχάγη-Αμβούργο με τρένο θα μειωθεί κατά δύο ώρες, το οποίο ταξίδι διαρκεί μέχρι τώρα 4,5 ώρες. Η νέα οδική σύνδεση θα επιφέρει χρονική διάρκεια μετάβασης στα 10 λεπτά με αυτοκίνητο και στα επτά λεπτά με τρένο. Οι επιβατικές αμαξοστοιχίες θα μπορούν να προσεγγίζουν την ταχύτητα των 200km/hr, ενώ οι αυτοκινητιστές θα μπορούν να διασχίζουν την απόσταση με ταχύτητα έως 110km/hr (Reynolds, 2017).

Το έργο θα περιλαμβάνει μία επιπυθμένα σήραγγα 18km, μεταξύ του Rødbyhavn στο Lolland και του γερμανικού νησιού Fehmarn, καθιστώντας την σήραγγα την

Κατασκευή και τεχνολογία επιπυθμένων σιράγγων

μεγαλύτερη σε παγκόσμια κλίμακα. Η σήραγγα θα περιλαμβάνει τέσσερις λωρίδες κυκλοφορίας και δύο σιδηροδρομικούς άξονες. Είχαν προταθεί και άλλες λύσεις μέχρι την επιλογή της βυθισμένης σήραγγας, όπως σήραγγα διάτρησης και καλωδιωτή γέφυρα (Excell, 2015).

Η τάφος κατασκευής θα έχει 60m πλάτος, 16m βάθος και 18km μήκος. Θα εκσκαπτούν περίπου 19 εκατομμύρια κυβικά μέτρα πέτρας και άμμου από τον πυθμένα της θάλασσας και τα οποία θα επαναχρησιμοποιηθούν για την δημιουργία περίπου τριών τετραγωνικών χιλιομέτρων νέων περιοχών. Το έργο θα περιλαμβάνει 79 προκατασκευασμένα στοιχεία, μήκους 217m και 10 ειδικών στοιχείων, τα οποία θα βρίσκονται ανά δύο χιλιόμετρα για την παροχή χώρων που θα ελέγχουν την λειτουργία της σήραγγας (A/S, 2018).



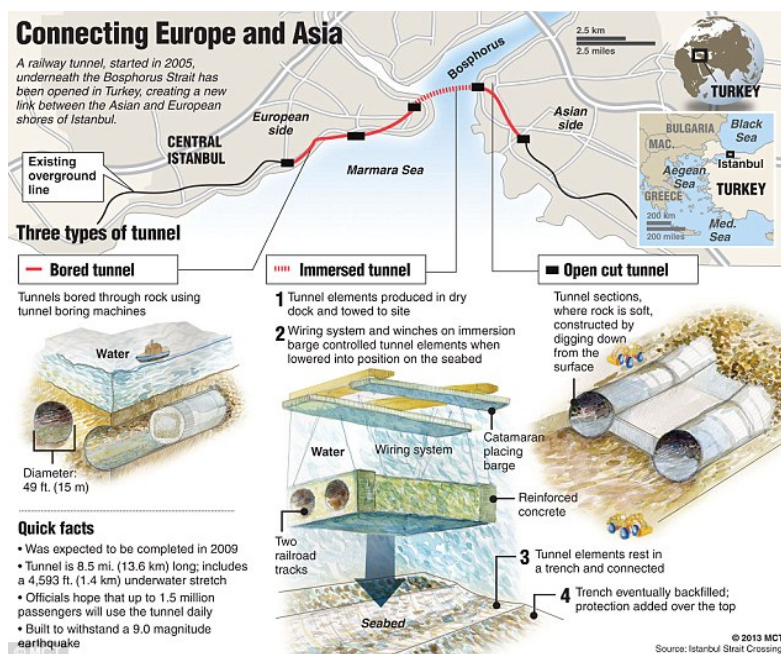
Σχήμα 5.4 Χάρτης σύνδεσης του έργου, by leica-geosystem.com



Σχήμα 5.5 Φωτορεαλιστική απεικόνιση της σήραγγας Fehmarn Belt Fixed, by worldhighways.com

5.4 Η ΣΗΡΑΓΓΑ ΤΟΥ ΜΑΡΜΑΡΑΥ

Η σήραγγα του Marmaray στην Κωνσταντινούπολη , αποτελεί μια σιδηροδρομικοί σήραγγα στην Κωνσταντινούπολη, κάτω από τα στενά του Βοσπόρου, κατά μήκος της θάλασσας του Μαρμαρά. Το έργο ξεκίνησε το 2004 και ολοκληρώθηκε το 2013, καθώς προέκυψε μια καθυστέρηση, λόγω αρχαιολογικών ευρημάτων. Η συνολική σήραγγα έχει μήκος 13,6km και το τμήμα που αποτελεί βυθισμένη σήραγγα έχει μήκος 1,3km. Αποτελεί την βαθύτερη βυθισμένη σήραγγα στον κόσμο, καθώς βρίσκεται στα 60m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η σήραγγα αποτελεί τμήμα ενός σιδηροδρομικού δικτύου 76km, το οποίο μεταφέρει καθημερινά περίπου 1,6 εκατ. επιβάτες (Η. Belkaya, 2008). Η διαδικασία κατασκευής που ακολουθήθηκε για το βυθισμένο τμήμα βασιζόταν στις γενικότερες αρχές κατασκευής επιπυθμένων σηράγγων. Το μεγαλύτερο πρόβλημα που προέκυψε ήταν η υψηλή σεισμικότητα της περιοχής σχεδιασμού, το οποίο θα είχε ως αποτέλεσμα την ρευστοποίηση του εδάφους και την εμφάνιση ρωγμών στην κατασκευή (Jonathan Stewart, professor at the University of California, Los Angeles). Το Βόρειο-Ανατολικό ρήγμα στον Βόσπορο είναι αρκετά παρόμοιο με το ρήγμα του San Andreas στην Καλιφόρνια, αλλά η μελέτη για την σήραγγα στην Τουρκία ήταν μια συνθετότερη διαδικασία , λόγω του κινδύνου υψηλής ρευστοποίησης του εδάφους. Για την αποφυγή της ρευστοποίησης εγχύθηκαν 3.000 κολώνες, με ενεμάτωση οπών σε όλη την έκταση της σήραγγας. (T.YAMAMOTO, 2014).



Σχήμα 5.6 Περιγραφική απεικόνιση της σήραγγας Marmaray, by pilir.blogs.pace.edu

5.5 Η ΣΗΡΑΓΓΑ ΤΟΥ ΑΚΤΙΟΥ-ΠΡΕΒΕΖΑΣ

Η βυθισμένη σήραγγα Ακτίου-Πρέβεζας αποτελεί την μοναδική επιπυθμένα σήραγγα στον Ελλαδικό χώρο. Το έργο συνδέει το στενό μεταξύ Στερεάς Ελλάδας και Ηπείρου στο άνοιγμα του Αμβρακικού κόλπου. Το έργο ξεκίνησε το 1995 και ολοκληρώθηκε το 2002 και αποτελεί ένα από τα ακριβότερα έργα στην Ελλάδα. Η σήραγγα έχει μήκος περίπου 1700m, εκ των οποίων τα 960m αποτελούν το θαλάσσιο τμήμα της σήραγγας. Περιλαμβάνει δύο λωρίδες κυκλοφορίας πλάτους 4m και πεζοδρόμια πλάτους 1,3m για τις ανάγκες συντήρησης της σήραγγας. Το βυθισμένο τμήμα περιλαμβάνει 6 προκατασκευασμένα στοιχεία, εκ των οποίων τέσσερα ορθογωνικής διατομής των 143,5m και δύο ορθογωνικής διατομής των 119m. Τα στοιχεία κατασκευάστηκαν σε νηοδόχο και στην συνέχεια ρυμουλκήθηκαν για να τοποθετηθούν στο σημείο πόντισής τους με την χρήση GPS στα 15m από την επιφάνεια της θάλασσας. Στα πλευρικά μέρη της σήραγγας έχουν τοποθετηθεί χαλύβδινες πλάκες για την εξασφάλιση της υδατοστεγανότητας και στην συνέχεια το έργο επανεπιχώθηκε με κοκκώδες εδαφικό υλικό.



Σχήμα 5.7 Εναέρια φωτογραφία της θέσης της σήραγγας, by carandmotor.gr

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα μελετήθηκαν είναι ότι η σήραγγα βρίσκεται στην πιο σεισμογενή περιοχή της Ελλάδας, έτσι ανατέθηκε στο Πανεπιστήμιο Αθηνών το 1995, η αντισεισμική μελέτη του έργου. Η προτεινόμενη μέγιστη σεισμική επιτάχυνση ήταν 0,32g, με περίοδο επαναφοράς 475 ετών και πιθανότητα μη υπέρβασης 90% στα 50 έτη και 80% στα 100 έτη (K.Loukakis, 2004).

Πραγματοποιήθηκαν γεωτεχνικές έρευνες με 25 γεωτρήσεις στο χώρο, 113 δοκιμές διείσδυσης κώνων και αρκετές στατικές και δυναμικές εργαστηριακές δοκιμές. Απαιτήθηκε η βελτίωση του εδάφους, λόγω ρευστοποίησης, με την χρήση χαλικοπασάλλων διαμέτρου 0,6m σε βάθος μέχρι και 15m κάτω από τον πυθμένα.



Σχήμα 5.8 Η σήραγγα την περίοδο κατασκευής της, by agriniopress.gr



Σχήμα 5.9 Στάδια κατασκευής της σήραγγας, by lefkadanews.com

5.6 Η ΣΗΡΑΓΓΑ ΣΑΛΑΜΙΝΑΣ-ΠΕΡΑΜΑΤΟΣ

Η υποθαλάσσια σύζευξη της Σαλαμίνας με το Πέραμα θα είναι μια οδική σύνδεση, με εφαρμογή βυθισμένων στοιχείων στον πυθμένα. Αρχικά η επιλογή κατασκευής γέφυρα δεν έγινε δεκτή. Λόγω του ναύσταθμου, ο οποίος αποτελεί την μεγαλύτερη ναυτική βάση του Πολεμικού Ναυτικού. Η κατασκευή επιπυθμένης σήραγγας είναι

αρκετά ευνοϊκή, λόγω του μικρού βάθους του στενού περάσματα και του μικρού μήκους που θα έχει η σήραγγα.



Σχήμα 5.10 Χάρτης απεικόνισης της διαδρομής της σήραγγας, by grodomes.com

Από τις προμελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, έχει υπολογιστεί ότι το μήκος της σήραγγας θα είναι περίπου 1,1km σε ότι αφορά το βυθισμένα τμήμα και 3,3km συνολικά για ολόκληρη την σήραγγα. Το έργο έχει υπολογιστεί ότι θα ανέρχεται στα 350 εκατ. Ευρώ και σύμφωνα με τα στοιχεία του ΟΛΠ(Οργανισμός Λιμένος Πειραιώς) τα ανερχόμενα άτομα ετησίως είναι περίπου 9,8 εκατ. , καθώς ο ετήσιος αριθμός οχημάτων ανέρχεται στα 4εκατ. , εκ των οποίων το 10% με 15% είναι φορτηγά οχήματα. Αν υπολογιστεί ότι η μέση ταχύτητα των οχημάτων θα είναι 60km/hr , ο χρόνος μετάβασης θα είναι 1,5 με 2 λεπτά, σε σχέση με τα 15 λεπτά που ισχύουν μέχρι τώρα (Λ. Λιώρη,2017)

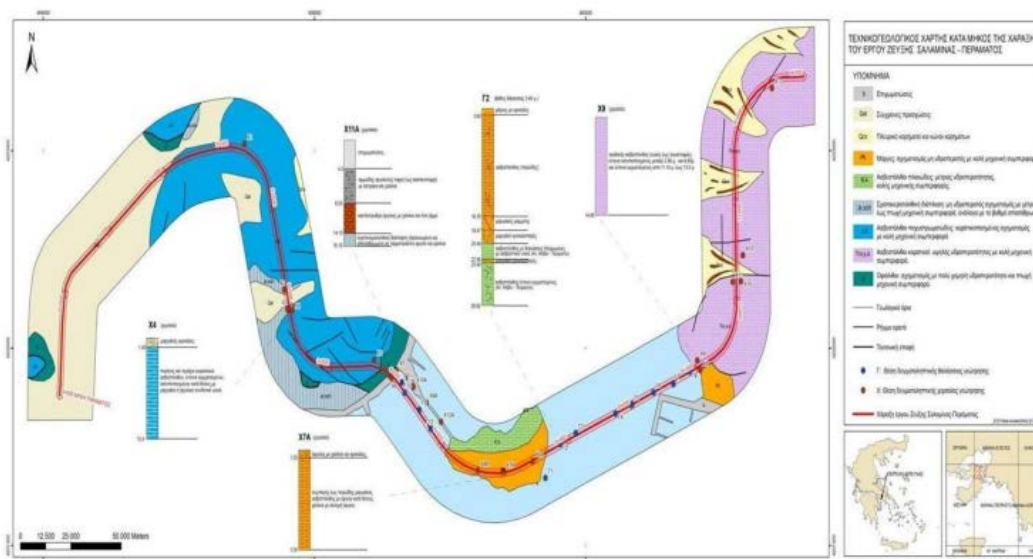
Η δημιουργία της σύνδεσης αυτής, θα επιφέρει ένα σύνολο οφελών από κοινωνικο-οικονομικής άποψης, όπως:

- Μείωση του χρόνου μετάβασης.
- Βελτίωση της χρονικής αξιοπιστίας των μετακινήσεων.
- Η διέλευση θα αποτελεί μια αξιόπιστη και άνετη επιλογή.
- Η διασφάλιση των μετακινήσεων, ανεξαρτήτως των καιρικών συνθηκών που θα επικρατούν στην περιοχή.
- Ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας των τοπικών επιχειρήσεων της Σαλαμίνας και δραστηριοποίηση νέων.
- Πολιτικο-κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη της περιοχής.
(Λιώρης, Παπαχαραλάμπους, 2015)

Κατασκευή και τεχνολογία επιπυθμένων σηράγγων

Η σεισμικότητα της περιοχής χαρακτηρίζεται μέτρια, καθώς σύμφωνα με τον νέο Αντισεισμικό Σχεδιασμό και τον Χάρτη Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας, η περιοχή ανήκει στην ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II. Η περιοχή αποτελείται περίπου από ασβεστολιθικούς σχηματισμούς σε ποσοστό 45% και με τις σύγχρονες προσχώσεις σε ποσοστό 19%. Τα ο εδαφικό περιβάλλον της κατασκευής κατατάσσεται λόγω της ποιότητας των ασβεστόλιθων που διαθέτει ως μικρής σεισμικής επικινδυνότητας, ενώ οι προσχώσεις ως μέτριας σεισμικής επικινδυνότητας.

Το έργο μελετάται αρκετά τις τελευταίες δεκαετίες, όπου εκφράζονται ανησυχίες τόσο για την διέλευση πλοίων από τον Ναύσταθμο, όσο και για τα αρχαιολογικά ευρήματα της θαλάσσιας περιοχής. Ένα μεγάλο τμήμα της τοπικής κοινωνίας της Σαλαμίνας, θεωρεί ότι η περιοχή θα χάσει τον νησιωτικό της χαρακτήρα και θα επιβαρυνθεί το περιβάλλον της περιοχής (Λ. Λιώρη, 2015).



Σχήμα 5.11 Τεχνικογεωλογικός χάρτης της οδευσης, by dspace.lib.ntua.gr

6. ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

6.1 ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΗΜΑΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ

Το κόστος κατασκευής μίας επιπυθμένης σήραγγας σχετίζεται με ένα σύνολο παραγόντων, οι οποίοι διαφέρουν ανάλογα τον τύπο της σήραγγας, την χώρα κατασκευής, τις γεωτεχνικές συνθήκες, τις διαστάσεις των στοιχείων, τα υλικά κατασκευής, κ.α. Εδώ παρουσιάζεται μία λίστα βυθισμένων σηράγγων που έχουν ολοκληρωθεί ή που θα ολοκληρωθούν στο μέλλον, σε σχέση με τον προϋπολογισμό κατασκευής τους και τα χαρακτηριστικά τους.

| Όνομα σήραγγας | Χώρα | Ημερ.Λειτ. | Μήκος(km) | Βάθος(m) | Κόστος |
|------------------------------|----------------|------------|-------------|----------|----------------|
| Σήραγγα Drogden (Øresund) | Δανία-Σουηδία | 2000 | 4 | 22 | 19,6 δυς. EUR |
| Σήραγγα Shen Zhong | Κίνα | 2025 | 5,25 | 35 | 4,83 δυς. USD |
| Σήραγγα Fehmarn Belt Fixed | Δανία-Γερμανία | 2029 | 18 | 45 | 10 δυς. EUR |
| Σήραγγα Marmaray | Τουρκία | 2013 | 13,6(1,3km) | 60 | 4.5 δυς. USD |
| Σήραγγα Ακτίου-Πρέβεζας | Ελλάδα | 2002 | 1,7(960m) | 15 | 58.9 εκατ. EUR |
| Σήραγγα Σαλαμίνας-Περάματος | Ελλάδα | 2027-28 | 3,3(1,1km) | 10 | 500 εκατ. EUR |
| Σήραγγα Hong Kong–Macau | Κίνα | 2018 | 6,75 | 30 | 7.56 δυς. USD |
| Transbay Tube | Η.Π.Α | 1974 | 5,82 | 41 | 180 εκατ. USD |
| Σήραγγα Busan-Geoje | Ν.Κορέα | 2010 | 3,24 | 38 | 300 εκατ. USD |
| Σήραγγα Hampton Roads Bridge | Η.Π.Α | 1976 | 2,2 | 37 | 95 εκατ. USD |

- Στα μήκη κάθε σήραγγας οι παρενθέσεις συμβολίζουν το υποθαλάσσιο τμήμα της σήραγγας, ενώ το εξωτερικό μήκος το αθροιστικό μήκος του υποθαλάσσιου τμήματος και της σήραγγας διάνοιξης. Στα υπόλοιπα μήκη, τα οποία δεν περιέχουν παρενθέσεις αναφέρεται μόνο το υποθαλάσσιο τμήμα.

6.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΙΑΣ ΕΠΙΠΥΘΟΜΕΝΙΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος κατασκευής των σηράγγων, οι οποίοι μπορούν να διαμορφώσουν σε μεγάλο βαθμό το συνολικό κόστος διάνοιξης αυτών. Συνολικά, η βασική παράμετρος η οποία πρέπει να ερευνηθεί είναι εάν μια μεταβλητή που καθορίζει το κόστος, θα έχει σημαντική στατιστική διακύμανση, συγκρινόμενη με την εγχώρια και διεθνή αγορά και τον τρόπο που μεταβάλλεται η κατασκευαστική ζήτηση. Παρόλα αυτά έχει διαμορφωθεί μια πληθώρα παραγόντων, οι οποίοι επηρεάζουν και εκείνοι το συνολικό κόστος του έργου:

1. Γεωτεχνικοί κίνδυνοι και προσδιορισμός γεωλογικού υποστρώματος

Ένας από τους μεγαλύτερους παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος και σχετίζονται με την κατασκευή της σήραγγας είναι ο καθορισμός των γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στο γεωπεριβάλλον που περικλείει την σήραγγα (Hoek, 1990). Οι σύγχρονοι γεωτεχνικοί μηχανικοί χρησιμοποιούν ένα σύνολο από τεχνολογίες απεικόνισης και δείγματα διάτρησης για τον προσδιορισμό του τύπου βράχου και τις πιθανές διεισδύσεις υπόγειων υδάτων. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να παρέχουν ένα αποδεκτό επίπεδο καθορισμού για το είδος της βραχομάζας που θα πρέπει να διανοιχθεί. Σε αρκετές περιπτώσεις όμως η διάνοιξη σε ανομοιογενή βραχομάζα και σε περιπτώσεις είσδυσης νερού, που τις περισσότερες φορές προκαλείται είτε από γεινιάζουσα φλέβα νερού, είτε από διάνοιξη κάτω από υδάτινους όγκους, δυσχεραίνει την διαδικασία εκσκαφής και αυξάνει το κόστος διάνοιξης. Μια παρόμοια περίπτωση ήταν εκείνη κατά την περίοδο κατασκευής της σήραγγας του Μπέρνλι, τμήμα του έργου CityLink της Μελβούρνης. Η σήραγγα του Μπέρνλι περνά σε βάθος κάτω από τον ποταμό Yarra, και κατά συνέπεια είχε ως αποτέλεσμα να υπάρχει πολύ υψηλή πίεση νερού γύρω από τη σήραγγα. Ως αποτέλεσμα απρόβλεπτης κατάστασης στο στάδιο του σχεδιασμού, ορισμένα από τα πάνελ δαπέδου, τα οποία ήταν από σκυρόδεμα πάχους 1,8 m, αποκολλήθηκαν από τη θέση τους, λόγω της πίεσης του νερού, με αποτέλεσμα ο ανάδοχος εταιρία να χάσει 154 εκατομμύρια δολάρια σε βλάβες που έγιναν στην σήραγγα (Samuel, 2007).

2. Τοποθεσία κατασκευής

Η τοποθεσία κατασκευής είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στο κόστος μιας σήραγγας. Συνήθως, οι σήραγγες εντός αστικού περιβάλλοντος, έχουν πολύ υψηλότερα κόστη κατασκευής. Η μεταφορά εξορυχθέντων υλικών, δομικών υλικών και εξοπλισμού μπορεί να είναι εξαιρετικά δύσκολη σε ένα πυκνοκατοικημένο αστικό περιβάλλον, με περιορισμό στις ώρες και όριο βάρους κατά την οδήγηση εντός της πόλης.

Επιβάρυνση κόστους υπάρχει και για μη αστικές σήραγγες, λόγω του κόστους μεταφοράς για μεγάλες αποστάσεις. Επιπλέον, εάν το έργο βρίσκεται σε σημαντικά μακρινή απόσταση, θα απαιτηθεί δημιουργία προσωρινής στέγασης για τους εργαζομένους ή αποζημίωση αυτών λόγω κόστους διέλευσης (Nathaniel Efron, Megan Read, 2012).

3. Σχεδιασμός

Ο οικονομικός προγραμματισμός και ο σχεδιασμός μιας σήραγγας σε οποιαδήποτε δεδομένη περιοχή μπορεί να ενέχει εμπόδια ρυθμιστικού περιεχομένου. Ορισμένα κράτη έχουν πολύ πιο αυστηρούς κανονισμούς σχετικά με το σχεδιασμό στις υποδομές. Αυτό είναι απαραίτητο για την διασφάλιση ότι όλοι οι κανονισμοί ασφαλείας και οι ανάγκες του γενικού πληθυσμού ικανοποιούνται από τα τελικά αποτελέσματα του έργου. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει συχνά πολλούς διαφορετικούς οργανισμούς και εποπτικά όργανα (Lieske 2008). Σε ορισμένες χώρες όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Αυστραλία και η Νέα Ζηλανδία, οι διαδικασίες σχεδιασμού διαρκούν σημαντικό χρονικό διάστημα, ενώ σε ορισμένες λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες, η διαδικασία σχεδιασμού δεν είναι τόσο ανεπτυγμένη και επίπονη (Lenferin, 2009).

Ορισμένες σήραγγες έχουν περιπλοκότερα συστήματα που χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να σχεδιαστούν και να εγκριθούν, όπως οι σιδηροδρομικές και οι οδικές σήραγγες. Άλλες σήραγγες μπορεί να χρειαστούν περισσότερο χρόνο για να σχεδιαστούν λόγω επιπλοκών στην τοποθεσία που κατασκευάζονται. Δεδομένου ότι ο μέσος μηνιαίος μισθός για μηχανικούς από το Ηνωμένο Βασίλειο, την Αυστραλία, τις Ηνωμένες Πολιτείες και τη Νέα Ζηλανδία κυμαινόταν από 4.356 \$ έως 6195 \$ σε δολάρια Αυστραλίας το 2005, είναι προφανές ότι η διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού μπορεί να έχει τεράστια επίδραση στο τελικό κόστος της κατασκευής ("Engineer Salaries," 2008).

4. Κανονισμοί υγείας και ασφάλειας

Υπάρχουν αρκετές διαφορετικές περιπτώσεις κανονισμών υγείας και ασφάλειας, οι οποίες μπορούν να αυξήσουν το κόστος της διάνοιξης σήραγγας. Το κόστος ασφάλειας μπορεί να υποδιαιρεθεί σε κόστος κατασκευής και κόστος ανθρώπινης ασφάλειας (Nathaniel Efron, Megan Read, 2012).

Οι εταιρείες είναι υποχρεωμένες να παρέχουν εξοπλισμό ασφαλείας και υψηλά επίπεδα ασφάλισης. Αυτά τα κόστη μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με την τοποθεσία, επειδή διαφορετικές κυβερνήσεις μπορεί να έχουν διαφορετικά επίπεδα κανονισμών για την ασφάλεια των εργαζομένων. Ένα παράδειγμα κόστους ασφάλειας κατασκευής που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ο σωστός εξοπλισμός, ο οποίος είναι απαραίτητος για την εξασφάλιση της υγείας των εργαζομένων κατά την διαδικασία κατασκευής. Αυτά τα κόστη μπορεί να είναι πολύ υψηλά και συχνά οδηγούν εταιρείες διαχείρισης κατασκευών να κάνουν την ελάχιστη απαιτούμενη επένδυση στην ασφάλεια με τους κανονισμούς που επιβάλλει η κυβέρνηση. Παρόλο που αυτοί οι κανονισμοί οδήγησαν σε μεγάλη βελτίωση στην ασφάλεια σε πολλές

χώρες, άλλες χώρες εξακολουθούν να υστερούν στις απαιτήσεις ασφάλειας (Hinze, 2008).

5. Περιβαλλοντικοί κανονισμοί

Οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί παίζουν επίσης ρόλο στον καθορισμό του κόστους μιας σήραγγας. Ορισμένες χώρες μπορεί να έχουν περισσότερο αυστηρούς κανονισμούς που επιμηκύνουν τη διαδικασία σχεδιασμού και μελέτης (Nathaniel Efron, Megan Read, 2012).

Πολλές χώρες χρησιμοποιούν ένα τύπο εγγράφου, το οποίο ονομάζεται Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΕΠΕ) (Environmental Impact Assessment) που αναλύει τις πιθανές επιπτώσεις στο περιβάλλον από την κατασκευή ενός έργου. Αυτό έχει συνήθως ως αποτέλεσμα την εμπλοκή πολλών φορέων στην επίβλεψη σχεδιασμού της σήραγγας (Nathaniel Efron, Megan Read, 2012).

Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να υπάρχει κόστος που σχετίζεται με την απομάκρυνση και απόρριψη απορριμμάτων όπως βιομηχανικά και οικοδομικά απόβλητα (Gurtoo, 2007), καθώς και στην περίπτωση των επιυψθμένων σηράγγων με το βυθοκορημένο υλικό κατά την διαδικασία εκσκαφής της τάφρου. Άλλα περιβαλλοντικά ζητήματα που συνδέονται με αναγκαίες δαπάνες, είναι η διαφύλαξη των υδροτόπων και των οικοτόπων και η αποκατάσταση αυτών, σε ενδεχόμενη επίδραση από την σήραγγα (Gurtoo, 2007).

6. Απρόβλεπτοι παράγοντες

Συνήθως, λόγω των απρόβλεπτων συνθηκών του εδάφους μπορεί να υπάρξει καθυστέρηση στην ολοκλήρωση της σήραγγας και άρα να επηρεαστεί το συνολικό κόστος του έργου. Ωστόσο, υπάρχει κάποια διαφορά μεταξύ του ποσού των δαπανών που επιφυλάσσεται σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης για τον προϋπολογισμό σε ότι αφορά τις αβεβαιότητες και σε σχέση με τους πιθανούς κινδύνους που ενέχει το ίδιο το έργο (Touran 2003).

7. Υλικά και Εργασία

Η εκτίμηση του κόστους υλικών και εργασίας για όλους τους τύπους σηράγγων είναι μια εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία και συνήθως αναλαμβάνεται από τις εταιρείες που υποβάλλουν προσφορές για την κατασκευή του έργου (Xiang Gu 2010). Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι οι μέθοδοι σύγκρισης για τους δείκτες τιμών μεταξύ των χωρών μπορεί να διαφέρουν και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη χρήση δεδομένων από διαφορετικές πηγές (Nathaniel Efron, Megan Read, 2012).

Η απόκλιση στο κόστος των υλικών εξαρτάται επίσης από την τοποθεσία. Αν και η διακύμανση του κόστους υλικού είναι λογική όταν συγκρίνονται διεθνή έργα

σηράγγων, μπορεί επίσης να υπάρχει σημαντική απόκλιση κόστους μεταξύ έργων που βρίσκονται στην ίδια χώρα. Το κόστος των υλικών μπορεί επίσης να ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο της σήραγγας (Crighton 1992).

Το κόστος εργασίας και η παραγωγικότητα του εργατικού δυναμικού είναι επίσης σημαντικές παράμετροι όσον αφορά τη διακύμανση στο συνολικό κόστος μιας σήραγγας. Η κυβερνητικές ρυθμίσεις, μαζί με την κατάσταση της οικονομίας σε μια δεδομένη περιοχή, μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στο κόστος εργασίας, το οποίο με την σειρά του να επηρεάσει το συνολικό κόστος του έργου (Riegger 2008).

6.3 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΣΑΛΑΜΙΝΑΣ-ΠΕΡΑΜΑΤΟΣ

Το έργο της υποθαλάσσιας σύνδεσης της Σαλαμίνας, περιλαμβάνει μία πληθώρα διεργασιών για την ολοκλήρωση του έργου. Συγκεκριμένα θα χρειαστούν:

- 9 προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα μήκους 132m και διατομής 25.1m x 9m.
- Κατασκευή δύο σηράγγων διάνοιξης, οι οποίες θα συνδεθούν με την υποθαλάσσια σήραγγα, με την μέθοδο cut and cover, με συνολικό μήκος 530m.
- Βυθοκόρηση του πυθμένα και δημιουργία τάφρου υποδοχής των προκατασκευασμένων στοιχείων μήκους . Λόγω της ύπαρξης ψαμμιτών , μάλλον θα γίνει χρήση υδραυλικής σφύρας και χρήση βυθοκόρου για την απομάκρυνση του βυθουκορημένου υλικού, Η τάφρος θα έχει εμβαδό διατομής 816 m² και μήκος 1190 m.
- Κατασκευή νηοδόχου.
- Μεταφορά και πόντιση των στοιχείων στο σημείο της χάραξης.
- Επίχωση της τάφρου μετά την τοποθέτηση των στοιχείων της σήραγγα.
- Έργα οδοποιίας για το χερσαίο και υποθαλάσσιο τμήμα της σήραγγας.
- Τοποθέτηση και εγκατάσταση ηλεκτρολογικού και μηχανολογικού εξοπλισμού για τις ανάγκες λειτουργίας της σήραγγας (Λουκά Η. Λιώρη,2017)

Κατασκευή και τεχνολογία επιτυθμένων σηράγγων

| ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ | ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΡΓΟΥ (ΕΤΟΣ / ΜΗΝΑΣ) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | 1 | | | | | | | | | | | | 2 | | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | | | | | | | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ΕΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΡΓΟΤΑΞΙΟΥ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ΥΠΟΒΟΛΗ ΜΕΛΕΤΩΝ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΝΗΟΔΟΧΟΥ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ΧΩΜΑΤΟΥΡΓΙΚΑ ΓΙΑ CUT&COVER ΚΑΙ ΠΡΟΣΒΑΣΕΙΣ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΚΤΗΡΙΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΔΟΜΩΝ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ CUT & COVER ΤΜΗΜΑΤΩΝ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ΒΥΘΟΚΟΡΗΣΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΥΘΜΕΝΑ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ΕΠΙΚΟΝΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΗΡΑΓΓΑΣ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΙΣΤΕΡΙΚΟΥ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ΘΕΣΗ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Σχήμα 6.1 Ενδεικτικό χρονοδιάγραμμα Gantt των εργασιών της σήραγγας, Λ. Λιώρη,2017

Επίσης, θα χρειαστούν ως προς την ποσότητα των εργασιών:

- Ο συνολικός όγκος της σήραγγας υπολογίζεται στα 259.325 κ.μ. Κάθε προκατασκευασμένο στοιχείο θα έχει όγκο 84.785κ.μ (μήκος 1190m με διατομή 25.1m x 9m). Θα απαιτηθεί η τοποθέτηση χαλύβδινου οπλισμού 15.261.300 kg (περίπου 180 kg χάλυβα ανά κ.μ σκυροδέματος).
- Η τάφρος θα έχει εμβαδόν διατομής 816 τ.μ και μήκος 1190m και ο όγκος της τάφρου θα ανέρχεται στα 971.040 κ.μ.
- Ο χώρος προς επίχωση , υπολογίζεται με την αφαίρεση του όγκου της σήραγγας από τον συνολικό όγκο της τάφρου, δηλαδή θα ανέρχεται στα 711.715 κ.μ .
- Η νηοδόχος θα πρέπει να διαθέτει χώρο για 5 προκατασκευασμένα στοιχεία την φορά, καθώς και χώρο για τους εργαζομένους και τα ειδικά οχήματα. Με μία έκταση 50.000 τ.μ και βάθος νηοδόχου 10m, θα μπορούν να διενεργηθούν οι απαραίτητες διεργασίες κατασκευής. Ο όγκος εκσκαφής της νηοδόχου θα ανέρχεται στα 750.000 κ.μ.
- Για την μέθοδο cut & cover θα γίνει εκσκαφή 200.340m³ υλικού με την παραδοχή ότι το τμήμα, το οποίο θα διανοιχθεί θα έχει πλάτος 27 m και μέσο βάθος τα 12 m και το συνολικό μήκος θα ανέρχεται στα 530m.
- Για την επανεπίχωση του cut & cover θα απαιτηθούν 87.768 κ.μ εδαφικού υλικού, ώστε η επιφάνεια του εδάφους να ανέλθει στο αρχικό ύψος της.

Κατασκευή και τεχνολογία επιπυθμένων σηράγγων

- Η κατασκευή και στεγάνωση των τμημάτων του cut & cover συνολικού μήκους 530m και διατομής 25,1x9 τ.μ. Θα απαιτηθεί και ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα, η οποία θα περιλαμβάνεται στις εργασίες στεγάνωσης.
- Σε ότι αφορά τα έργα οδοποιίας θα χρειαστούν: 13.440 τ.μ σκυροδέματος για την πλήρωση του κενού, 22.610 τ.μ ασφαλτικής ισοπεδωτικής στρώσης και 22.610 τ.μ ασφαλτικής στρώσης κυκλοφορίας της οδού(Λ. Λιώρη,2017).

| ΕΡΓΑΣΙΑ | ΜΟΝΑΔΑ | ΠΟΣΟΤΗΤΑ | ΤΙΜΗ ΜΟΝΑΔΑΣ | ΚΟΣΤΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ |
|--|----------------|------------|--------------|-----------------|
| Υποθαλάσσιο τμήμα | | | | |
| Εκσκαφή πυθμένα εδάφους κατηγορίας Β-Γ | m ³ | 971.040 | 6 | 5.826.240 |
| Υφαλες επιχώσεις με προϊόντα δανειοθαλάμων | m ³ | 711.715 | 3 | 2.135.145 |
| Προκατασκευασμένα στοιχεία υφάλων κατασκευών από σπλισμένο σκυρόδεμα κατηγορίας C30/37 | m ³ | 84.785 | 180 | 15.261.300 |
| Χαλύβδινοι σπλισμοί κατηγορίας B500C (S500s) | Kg | 15.261.300 | 0,95 | 14.498.235 |
| Σκυρόδεμα πλήρωσης κατηγορίας C16/20 | m ³ | 13.440 | 90 | 1.209.600 |
| Ασφαλτική ισοπεδωτική στρώση πάχους 0,05 m | m ² | 22.610 | 5,7 | 128.877 |
| Ασφαλτική στρώση κυκλοφορίας αστικής οδού (m2) | m ² | 22.610 | 7,7 | 174.097 |
| Νηοδόχος | | | | |
| Γενικές εκσκαφές σε έδαφος γαιώδες - ημιβραχώδες | m ³ | 750.000 | 1 | 750.000 |
| Αντιμετώπιση υδάτων | μήνας | 20 | 40000 | 800.000 |

Κατασκευή και τεχνολογία επιπυθμένων σηράγγων

| | | | | |
|--|----------------|---------|-----|--------------------|
| Επιστρώσεις δαπέδων με άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα, κατηγορίας C16/20 | m ³ | 10.000 | 90 | 900.000 |
| Cut & cover τμήμα | | | | 0 |
| Γενικές εκσκαφές σε έδαφος γαιώδες - ημιβραχώδες | m ³ | 200.340 | 0,6 | 120.204 |
| Επανεπίχωση σήραγγας CUT & COVER και στομίων σηράγγων | m ³ | 87.768 | 0,7 | 61.438 |
| Κατασκευή σηράγγων με εκσκαφή και επανεπίχωση (cut & cover) με χρήση σκυροδέματος C25/30 | m ³ | 42.673 | 124 | 5.291.514 |
| Ασφαλτική ισοπεδωτική στρώση πάχους 0,05 m | m ² | 10.070 | 5,7 | 57.399 |
| Ασφαλτική στρώση κυκλοφορίας αστικής οδού | m ² | 10.070 | 7,7 | 77.539 |
| Αποκατάσταση περιβάλλοντος | | | | 3.000.000 |
| Παθητική πυροπροστασία | m ² | 62.402 | 40 | 2.496.080 |
| H/M εξοπλισμός | | | | 25.000.000 |
| Απρόβλεπτες δαπάνες | | | | 9.000.000 |
| Γενικά έξοδα και εργολαβικό όφελος | | | | 15.621.780 |
| ΣΥΝΟΛΟ | | | | 102.409.448 |

Σχήμα 6.2 Ενδεικτικός πίνακας κοστολόγησης, Λ. Λιώρη, 2017

Το ενδεικτικό τελικό ποσό ανέρχεται στα 102εκατ. EUR (το οποίο διαφέρει από το παραπάνω κόστος του έργου που ανερχόταν στα 500εκατ. EUR) και το οποίο θα αποσβεθεί ισόποσα στα 15 πρώτα έτη λειτουργίας του έργου (Λ. Λιώρη, 2017).

6.4 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΠΥΘΜΕΝΙΑΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

Η απάντηση στο ερώτημα ποια αποτελεί την βέλτιστη οικονομική λύση μεταξύ υποθαλάσσιας σήραγγας ή γέφυρας η οποία εδράζεται σε θαλάσσιο περιβάλλον, απαιτεί μια πιο σύνθετη ανάλυση. Η απάντηση σε αυτό το πρόβλημα είναι ότι εξαρτάται από τις συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του έργου. Η γεωλογία της περιοχής, το βάθος του πυθμένας, η κινητικότητα στην θαλάσσια περιοχή και σαφώς το κόστος δαπανών είναι μερικές από τις παραμέτρους, οι οποίες επηρεάζουν την επιλογή σύνδεσης δύο περιοχών. Με μία αρχική εκτίμηση, η κατασκευή μίας γέφυρας είναι φθηνότερη από αυτή της σήραγγας. Όμως αυτό αποτελεί μία μόνο οπτική στο συγκεκριμένο ζήτημα, αφού προκύπτει από τα δεδομένα ότι οι γέφυρες απαιτούν συνήθως σημαντικά έργα αποκατάστασης κάθε 20 έτη, με κόστος ίσο με το 40% της αρχικής κεφαλαιουχικής δαπάνης. Σε βάθος 70 ετών το αρχικό κόστος των δύο έργων αντιστρέφεται, με αποτέλεσμα οι σήραγγες να είναι οικονομικότερη λύση για έργα που αγγίζουν τα 100 έτη και πάνω. Η ανάλυση κόστους του έργου στηρίζεται σε μία μέθοδο που ονομάζεται ανάλυση

Κατασκευή και τεχνολογία επιπυθμένων σηράγγων

κόστος κύκλου ζωής ενός έργου(Life Cycle Cost Analysis) και δίνει μία ευρύτερη εικόνα σε ότι αφορά τις πραγματικές δαπάνες για ένα έργο (Weisskoff, 2003).

Ένας ακόμη παράγοντας, ο οποίος αυξάνει τα λειτουργικά έξοδα συντήρησης μιας γέφυρας σε σχέση με μία σήραγγα, είναι ότι οι γέφυρες είναι εκτεθειμένες στο μεγαλύτερο μέρος τους στις επιδράσεις του περιβάλλοντος, ενώ οι σήραγγες είναι προστατευμένες λόγω της φύσης της κατασκευής τους (Rasmussen,1997)

Παρατίθενται κάποιες από της σημαντικότερες γέφυρες σε παγκόσμια κλίμακα, σε ότι αναφορά το μήκος και την σπουδαιότητα του έργου:

| Όνομα γέφυρας | Χώρα | Έτος Λειτ. | Μήκος(km) | Κόστος |
|------------------------------|---------|------------|-----------|-----------------|
| Danyang–Kunshan Grand Bridge | Κίνα | 2011 | 164,8 | 8,5 δυς. USD |
| Tianjin Grand Bridge | Κίνα | 2011 | 113,7 | 20 δυς. USD |
| Hangzhou Bay Bridge | Κίνα | 2008 | 35,6 | 11,2 δυς. USD |
| Incheon Bridge | N.Κορέα | 2009 | 21,3 | 1,55 δυς. USD |
| Confederation Bridge | ΚΑΝΑΔΑΣ | 1997 | 12,9 | 971 εκατ. USD |
| Nansha Bridge | Κίνα | 2019 | 12,89 | 1,6 δυς. USD |
| Third Mainland Bridge | Νιγηρία | 1990 | 11,8 | 1 δυς. USD |
| Jiaxing-Shaoxing Sea Bridge | Κίνα | 2013 | 10,12 | 23 δυς. USD |
| Great Belt Fixed Link | Δανία | 1998 | 6,72 | 9 δυς. USD |
| Yeongjong Bridge | N.Κορέα | 2000 | 4,4 | 1,4 δυς. USD |
| Arthur Ravenel Jr. Bridge | ΗΠΑ | 2005 | 4 | 900 εκατ. USD |
| Golden Gate Bridge | ΗΠΑ | 1937 | 2,7 | 704,9 εκατ. USD |
| George Washington Bridge | ΗΠΑ | 1931 | 1,4 | 935 εκατ. USD |

Στον πίνακα παρουσιάζεται μία λίστα από γέφυρες, οι οποίες διαφέρουν σημαντικά ως προς το μήκος και το κόστος κατασκευής τους. Όπως παρατηρούμε, όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος μίας γέφυρας, τόσο μεγαλύτερο είναι και το κόστος κατασκευής της. Σε σχέση με τον πίνακα κόστους των σηράγγων, παρατηρούμε ότι για μικρά μήκη, η επιλογή γέφυρας είναι σχετικά πιο οικονομική. Συνήθως, ο λόγος που επιλέγεται η σήραγγα για μικρά μήκη σε αρκετές περιπτώσεις, έχει να κάνει με

κατασκευαστικούς και περιβαλλοντικούς λόγους, όπως βάθος πυθμένα, σεισμικότητα περιοχής, θαλάσσια κινητικότητα, κ.α.

Για μεγάλα όμως μήκη , όπως αυτά που αναφέρονται στην αρχή του πίνακα με το κόστος γεφυρών , παρατηρούμε ότι το κόστος αυξάνεται αρκετά, όπου σε κάποιες περιπτώσεις προσεγγίζει και το κόστος κάποιων μεγάλων σε μήκος επιπυθμένων σηράγγων. Ωστόσο, οι σήραγγες , ακόμη και εκείνες που πρόκειται να κατασκευαστούν , έχουν μεγάλη διαφορά ως προς το μήκος σε σχέση με τις γέφυρες που αναφέρονται στην αρχή του πίνακα. Εκεί που υπερτερούν οι σήραγγες ως προς την κοστολόγηση είναι ως προς τα έργα αποκατάστασης, αφού αν υπολογίσουμε με την μέθοδο ανάλυση κόστους της διάρκειας ζωής ενός έργου τις δαπάνες που θα πρέπει να δοθούν για κάθε αποκατάσταση και δεδομένου του μήκους των μεγάλων γεφυρών, το κόστος αυξάνεται σημαντικά.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε η παρουσίαση και ανάλυση των αρχών κατασκευής επιπυθμένων σηράγγων, ως έργο υποδομής το οποίο διαθέτει ενεργό ρόλο τόσο στην οικονομικό-κοινωνική ανάπτυξη ενός τόπου, όσο και στην διασύνδεση δύο θεωρητικά απομακρυσμένων σημείων. Παρουσιάζονται εις βάθος όλες οι κατασκευαστικές παράμετροι και οι αρχές και προϋποθέσεις σχεδιασμού αυτών των έργων, σε συνδυασμό με τους πιθανούς κινδύνους και τον οικονομικό προγραμματισμό τους. Ως έργα διαθέτουν μία πληθώρα κατασκευαστικών πλεονεκτημάτων, τα οποία καθιστούν τις επιπυθμένες σήραγγες τις περισσότερες φορές ως μία σίγουρη λύση για την σύνδεση δύο περιοχών.

Αφού, πραγματοποιείται η ιστορική εξέλιξη των σηράγγων έως την σύγχρονη εποχή των υποθαλάσσιων διασυνδέσεων, γίνεται μια εκτενής ανάλυση στις αρχές που διέπουν τις επιπυθμένες σήραγγες, στους κατασκευαστικούς τύπους σε σχέση με όλες τις παραμέτρους σχεδιασμού, τον αντισεισμικό σχεδιασμό του έργου και τέλος τις οικονομικές παραμέτρους ανάλογα με την φύση του έργου. Πιο συγκεκριμένα παρατίθενται όλες οι κατασκευαστικές διενέργειες από το στάδιο της προπαρασκευής των στοιχείων της σήραγγας και της κατασκευής και πλήρωσης της νηοδόχου, έως την διαδικασία βυθοκόρησης, καθώς και την σύνδεση και εγκατάσταση των στοιχείων στην θέση σχεδιασμού.

Η εργασία έχει ως επιπλέον σκοπό την ανάδειξη της σημαντικότητας τέτοιων έργων και πως εκείνα μπορούν να συνεισφέρουν στην συνολική ανάπτυξη όχι μόνο της περιοχής στην οποία κατασκευάζονται, αλλά και στην οικονομία μίας ολόκληρης χώρας. Τα ποσοστά εργασίας των ανθρώπων ανεβαίνουν σημαντικά, με σταδιακή ανάπτυξη τοπικών επιχειρήσεων στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας, καθώς δραστηριοποιούνται νέες επιχειρήσεις στο μέρος κατασκευής, αλλά και εγκαθίστανται ήδη υπάρχουσες επιχειρήσεις και εταιρείες της επικράτειας. Οι προοπτικές που υπάρχουν στην Ελλάδα για την κατασκευή τέτοιων υποθαλάσσιων έργων είναι σημαντικές, αφού λόγω της γεωγραφίας της χώρας και του θαλάσσιου χαρακτήρα της, παρατηρούμε τον τελευταίο καιρό ένα ενδιαφέρον για την διασύνδεση περιοχών, με τελευταίο παράδειγμα την υποθαλάσσια σήραγγα Σαλαμίνας-Περάματος, ένα έργο το οποίο θα αναβαθμίσει συνολικά την περιοχή της Αττικής, σε επίπεδο οικονομίας. Στην πορεία ενδέχεται να πραγματοποιηθούν και άλλες μελέτες για περισσότερες περιοχές, οι οποίες αντιμετώπιζαν το ίδιο πρόβλημα με την Σαλαμίνα και την Πρέβεζα και να τεθούν σε εφαρμογή κατασκευές περισσότερων επιπυθμένων σηράγγων.

Η κατασκευή τέτοιων έργων δεν συνεισφέρει μόνο στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη ενός τόπου, αλλά όπως δείχνουν τα στοιχεία έχει σημαντικές επιδράσεις σε περιβαλλοντικό επίπεδο. Αρχικά, ο σχεδιασμός υποθαλάσσιων σιδηροδρομικών σηράγγων, θα αποσυμφορήσει ένα μεγάλο μέρος οδικού φορτίου, καθώς επίσης η κατασκευή μιας υποθαλάσσιας οδικής σήραγγας διευκολύνει την προσβασιμότητα των ανθρώπων, χωρίς να προσθέτει ένα επιπλέον οδικό φορτίο στο συνολικό οδικό δίκτυο μιας περιοχής.

Τέλος, η εργασία επιχειρεί να παρουσιάσει την οικονομική διάσταση του έργου, προσπαθώντας να δείξει ότι τις περισσότερες φορές η κατασκευή μίας επιπυθμένης σήραγγας δεν αποτελεί μόνο την βέλτιστη κατασκευαστική λύση, αλλά αποτελεί και μια αρκετά συμφέρουσα οικονομική επιλογή. Πραγματοποιείται μίας οικονομική σύγκριση, με σκοπό να καταδειχθούν οι οικονομικές παράμετροι και να τεθούν οι πραγματικές οικονομικές απαιτήσεις για κάθε μορφή θαλάσσιας σύνδεσης, καθώς και το απαιτούμενο κόστος που αναλογεί σε κάθε μία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Afan de Rivera, 1836, Progetto della restaurazione dello emissario di Claudio e dello scolo del Fucino

A/S, F., 2018. femern. [Ηλεκτρονικό].

Baber, R. L. & j., 2013. Immersed Tunnels. s.l.:CRC Press.

Carla Galeazzi, March 2015, Carlo Germani, Luigi Casciotti, "The drainage tunnel of Lake Albano (Rome, Italy) and the 3-years study program "Project Albanus": a progress report", Proceedings of the International Congress of Speleology in Artificial Cavities, Rome

CRIGHTON, GS (01/01/1992). "TUNNEL DESIGN AND CONSTRUCTION". Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Civil engineering (0965-089X)

Eisenstein Z.D. (1994). "Large Undersea Tunnels and the Progress of Tunnelling Technology", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.9, No. 3, pp 283 – 292, Great Britain

Excell, J., 2015. Total immersion: the world's longest immersed tunnel. [Ηλεκτρονικό]

Glerum, 1998. Immersed Tunnels: Why, When and Where. Tunneling and underground space technology.

Glerum, A., χ.χ. Developments in immersed tunnelling in Holland. Tunneling and underground space technology.

Gursoy, A., χ.χ. Immersed steel tube tunnel: An american experience. Tunneling and underground space Technology.

Gurtoo, S.J. Antony, (2007) "Environmental regulations: Indirect and unintended consequences on economy and business", Management of Environmental Quality: An International Journal, Vol. 18 Iss: 6

Helmut Schneider (September 1988). "Criteria for Selecting a Boom-Type Roadheader". Mining Magazine. The Mining Journal, Ltd. p. 183.

Hinze, Construction safety, Safety Science, Volume 46, Issue 4, April 2008

Hoek, E., & Brown, E. T. (1990). Underground excavations in rock Spon Press.

- Ingerslev, C., 2010. Immersed and floating tunnel
- Lawrence Berlow, 1998, Reference Guide to Famous Engineering Landmarks of the World
- Lenferin, S. (2009). Government strategies for market involvement in road infrastructure planning: An international overview. Netherlands: University of Groningen.
- Lieske, SN (2008). "PLANNING DECISION SUPPORT—AUSTRALIAN EXAMPLES."
- Lykke, W. a. S., 1997. The fixed link across the Oresund. Tunneling and underground space technology.
- Marshall, J. & C., 2000. Design and construction of the Oresund Tunnel. London : s.n.
- Ming Lin, W. L. H. Y. X. L. K. L., 2018. Memory bearing: A novel solution to protect element joints from differential settlement for immersed tunnels with deep alignment. s.l.:Tunnelling and Underground Space Technology.
- Mitchell S Rothman, 2016, Fitful Histories and Unruly Publics: Rethinking Temporality and Community in Eurasian Archaeology, Kathryn O. Weber, Emma Hite, Lori Khatchadourian, and Adam T. Smith
- Nathaniel Efron, Megan Read, 2012, Analysing International Tunnel Costs
- Norwegian tunneling society, 2009
- Oorsouw, R. v., 2010. Behaviour of segment joints in immersed tunnels under seismic loading. s.l.:s.n.
- Palmstrom A (1994). "The Challenge of Subsea Tunnelling", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.9, No.2, p.145-150
- Rasmussen, N. S., 1997. Concrete Immersed Tunnels-Forty Years of Experience. Tunneling and underground space technology.
- René Gast, 2006, The Canal Du Midi Waterway: The Story of a Masterpiece
- Reynolds, P., 2017. TunnelTalk. [Ηλεκτρονικό].
- Ridderkerk, T., 2007. Gina Gasket. The Netherlands: s.n.
- Riegger, M. H. (2008, July). Calculating the annual cost of labor: setting fees correctly and fine-tuning work schedules help keep it in line. DVM Newsmagazine, 39(7), 52+. Retrieved from Touran, A. (2003). Calculation of contingency in construction projects. 50(2)
- Samuel, P. (2007, January 22). Melbourne citylink burnley tunnel cost fight. Tollroadsnews. Retrieved from <http://www.tollroadsnews.com/node/1773>

- Széchy, K., 1967, The art of tunneling, Akadimiai Kiado
- Taira Yamamoto, 2014, Seismic behavior of tunnels: From experiments to analysis
- TEC, 2015. ShenZhong Link. s.l.:s.n.
- J. Toynbee, 1971, Death and Burial in the Roman World.
- Vejrum, T., 2015. Create mobility in Southern China. s.l.:s.n.
- Youssef M.A.Hashasha, J. J. H. B. S. J. I.-C. Y., 2001. Seismic design and analysis of underground structures. s.l.:Tunnelling and Underground Space Technology .
- Weisskoff, 2003, Comparing Costs of Options for Reconstructing the 12th and 27th Avenue Bridges Over the Miami River
- Xiang Gu. (2010). Research on the cost control and estimation of engineering management. Paper presented at the Advanced Management Science (ICAMS), 2010 IEEE International Conference. 1, 497-499.
- Γιώργος Γκαζέτας, Ι. Α. Ν. Γ. Β. Δ. Κ. Γ., 2008. Υποθαλάσσια Σήραγγα Ρίου-Αντιρρίου : Σχεδιασμός έναντι Διάρρηξης Ρήγματος και Μεταγενέστερης Σεισμικής Δόνησης. Αθήνα: s.n.
- Θάλεια Τραβασάρου, J. C., 2008. Ανάλυση της Ανύψωσης Υποθαλάσσιας Σήραγγας λόγω Ρευστοποίησης του Περιβάλλοντος Εδάφους. s.l.:3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας.
- Κωστόπουλος, 2013, Σήραγγες
- Λιώρης Λ., Παπαχαλαράμπος Ν. (2016), «Υποθαλάσσια ζεύξη Σαλαμίνας – Περάματος», Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Αθήνα
- Λουκά Η. Λιώρη, Ν. Χ. Π., 2015. Υποθαλάσσια Ζεύξη Σαλαμίνας-Περάματος , Διπλωματική εργασία. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Μάντη Βασιλική Παρασκευή, 2019, Μελέτη της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής στη σεισμική απόκριση της υποθαλάσσιας σήραγγας Θεσσαλονίκης, Προπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη
- Σοφιανός, 2018, Τεχνικές Διάνοιξης Σηράγγων, ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα
- Τσιαμπάος, Κ., 2012. Η υποθαλάσσια σήραγγα Σαλαμίνας-Περάματος: Γεωλογικές, γεωτεχνικές και σεισμοτεκτονικές έρευνες , Διπλωματική εργασία. Αθήνα: s.n.
- Χατζηγώγος, Χ. Θ., 2017. Σεισμικός σχεδιασμός και ανάλυση υπογείων έργων- Σημειώσεις μαθήματος. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης - Πολυτεχνική Σχολή - Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

Επιστημονικά άρθρα και περιοδικά:

Bernard Quaritch ,2013, A topographical catalogue of the private tombs of Thebes
Carla Galeazzi, Carlo Germani, Luigi Casciotti, "The drainage tunnel of Lake Albano (Rome, Italy) and the 3-years study program "Project Albanus": a progress report", Proceedings of the International Congress of Speleology in Artificial Cavities, Rome, March 2015

Gary A. Rendsburg ,Israel Exploration Journal, the Siloam Tunnel Inscription: Historical and Linguistic Perspectives

Iraq, Vol. 77,pp 75, A.R. George,2015, published by British Institute for the Study of Iraq

Lightfoot, D.R. The origin and diffusion of qanats in arabia: new evidence from the northern and southern peninsula. Geogr. J. 2000, 166, 215–226

Roman Catacombs". The Friend. Vol 31 ,pp35: 274. 8 May 1858

Ελπίδα Σαλταγιάννη, Χριστίνα Μερκούρη, Ιωάννης Γιαννακάκης , Το Ρωμαϊκό Υδραγωγείο της Νικόπολης, Εφορία Αρχαιοτήτων Πρέβεζας, επιμέλεια: Ανθή Αγγέλη,

Χ.Γκούβας, 2009, Η ιστορία του νομού Πρέβεζας

Λεξικά και Εγκυκλοπαίδειες:

Αποη, 1970, Ιστορία και Πρωτοϊστορία, Ιστορία του Ελληνικού Έθνους, Α΄ τόμος
Britannica

Ετυμολογικό Λεξικό της Αρχαίας Ελληνικής Γλώσσας(J.B Hofmann,1974)

Νεώτερον Εγκυκλοπαιδικόν Λεξικόν Ηλίου, τ.13^{ος}

Αρχαία Ελληνικά Συγγράμματα:

Διόδωρος ο Σικελιώτης, Ιστορική Βιβλιοθήκη, Βιβλίο ΙΙ,1 (Μετάφραση G. Booth, 1814)

Φλάβιος Φιλόστρατος ο Λήμιος, Βίος Απολλώνιου Τυανών , βιβλίο Ι,25. (Μετάφραση FC Conybeare, 1912)

Ησίοδος, Ιστορία Γ΄: Θάλεια, 60

